

本科生毕业设计(论文)

基于二次汇编的ROP攻击防御技术研究与实现

Research and implementation of ROP attack defense based reassemble

|  |  |
| --- | --- |
| 学 院： | 计算机学院 |
| 专 业： | 软件工程 |
| 学生姓名： | 李博 |
| 学 号： | 1120162015 |
| 指导教师： | 孙建伟 |

2020 年 月 日

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在指导老师的指导下独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

特此申明。

本人签名： 日 期： 年 月 日

关于使用授权的声明

本人完全了解北京理工大学有关保管、使用毕业设计（论文）的规定，其中包括：①学校有权保管、并向有关部门送交本毕业设计（论文）的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存本毕业设计（论文）；③学校可允许本毕业设计（论文）被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的,复制赠送和交换本毕业设计（论文）；⑤学校可以公布本毕业设计（论文）的全部或部分内容。

本人签名： 日 期： 年 月 日

指导老师签名： 日 期： 年 月 日

基于二次汇编的ROP攻击防御技术研究与实现

摘　要

随着计算机和软件技术的不断发展，使用软件已经是人们日常生活中必不可少的一部分。与此同时，也有越来越多的软件漏洞被挖掘出来，这些漏洞一旦被黑客利用，将极大地威胁系统的安全。面向返回编程(Return-oriented programming)是一种功能强大且用途广泛的代码重用攻击，攻击者可以基于现有的指令片段(gadget)引导程序控制流执行非预期功能，由此引发一系列的安全事件。于是使用有效的ROP攻击防御措施对于系统安全的保护有重要意义和价值。

本文对现有的ROP攻击防御技术进行讨论和分析，提出了一种基于二进制重写技术的ROP攻击防御方法，对Linux的32位和64位可执行文件进行保护。当前的ROP攻击防御方法一部分需要程序的源码，在编译器层面进行修改，然而如今的很多商用软件并不开源；另一部分使用动态监控的方法，会造成很大的性能开销。本文通过使用二次汇编框架Ramblr，可以有效的避免二进制文件没有源码的问题，在此基础上提出了指令替换，无效指令填充和自由跳转保护三种方案。通过对含有0xc2这样可能被解析为retn指令的指令进行等效指令替换或无效指令分隔，减少gadget数量，达到缓解ROP攻击的效果；以及在直接跳转和间接跳转前进行数据校验，保护控制流的完整性，防止攻击者直接调用跳转指令进行控制流转移。

实验部分，通过ROP攻击防御测试，上述方案可以有效地减少gadget数量，并且能够防御基于栈溢出的ROP攻击。结果表明，balabala。

**关键词：**软件安全、面向返回编程、二次汇编、Ramblr

The Subject of Undergraduate Graduation Project (Thesis) of Beijing Institute of Technology

Abstract

Key Words: ROP attack defense, reassemble, Ramblr

目录

[摘　要 I](#_Toc37238291)

[Abstract II](#_Toc37238292)

[第1章 绪论 1](#_Toc37238293)

[1.1 研究背景和意义 1](#_Toc37238294)

[1.2 国内外研究现状 2](#_Toc37238295)

[1.2.1 ROP攻击防御技术 2](#_Toc37238296)

[1.2.2 二次汇编技术 4](#_Toc37238297)

[1.3 论文主要研究内容 4](#_Toc37238298)

[1.4 论文结构 5](#_Toc37238299)

[第2章 相关理论知识 6](#_Toc37238300)

[2.1 ROP攻击及防御技术 6](#_Toc37238301)

[2.1.1 ROP攻击的背景知识 6](#_Toc37238302)

[2.1.2 ROP攻击的原理 10](#_Toc37238303)

[2.1.3. ROP攻击防御技术及其原理 10](#_Toc37238304)

[2.2 二次汇编技术 10](#_Toc37238305)

[第3章 基于二次汇编的ROP攻击防御方法设计 11](#_Toc37238306)

[第4章 基于二次汇编的ROP攻击防御实现 12](#_Toc37238307)

[第5章 测试及结果分析 13](#_Toc37238308)

[结　论 14](#_Toc37238309)

[总结 14](#_Toc37238310)

[展望 14](#_Toc37238311)

[致谢 15](#_Toc37238312)

[参考文献 16](#_Toc37238313)

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

随着网络技术的快速发展，计算机正不断受到越来越复杂的攻击者的威胁。在网络中，攻击者发送恶意制作的数据包，这些数据包利用软件错误来获得未经授权的控制。防止此类错误存在的研究一直在进行中，但是到目前为止，仍未能为可利用的安全漏洞问题提供一个周全的方法。但是，针对攻击本身的不同方面的解决方案已经取得了一些成功，这导致了恶意攻击者和安全研究人员之间的“军备竞赛”。

最早的攻击技术之一是代码注入攻击，攻击者将精心编写的代码写入有漏洞的程序的内存中，然后利用一个漏洞将控制流重定向至代码所在的内存，从而执行代码。攻击者注入的代码能够损害数据库的完整性和安全性，还能够窃取数据来绕过访问和身份验证控制。针对这一问题，早在1961年，Burroughs 5000推出时就为可执行空间保护提供了硬件支持，在实现带标记的体系架构时，内存中的每个字节都带有一个关联的隐藏标记位，用于指定其是代码或数据，确保了内存可写或可执行。Microsoft公司在2004年将这种技术首次应用在Windows XP Service Pack 2，可执行的空间保护在Windows中也称为数据执行保护（Data Execution Prevention，DEP），开启此功能后，计算机将拒绝执行位于用户可写内存区域中的任何代码，从而防止攻击者将代码写入堆栈并通过返回地址覆盖跳转到堆栈。但是，早期的数据执行保护依旧不是完美的，攻击者可以使用代码重用攻击，例如return-into-libc技术，通过栈溢出覆盖返回地址将控制流转移到libc库中现有的代码片段，调用system函数或mprotect函数创建可写的可执行内存区域来绕过DEP。于是Windows系统又添加了地址空间布局随机化（Address Space Layout Randomization, ASLR）技术，用于将虚拟地址随机分配给正在运行的程序中的代码和数据，防止攻击者利用事先从程序中获取的静态地址来执行代码。

面向返回编程（Return-Oriented Programming, ROP）是一种基于代码重用的攻击，它也是栈溢出的高级形式，最初由Shacham在2007年提出[1]。通过这种方法攻击者可以劫持程序的控制流，并执行计算机内存中已经存在的指令片段（gadget），从而绕过DEP。像栈溢出一样，面向返回编程可以滥用缓冲区溢出漏洞来执行恶意指令，而不受安全措施DEP的阻碍。



图 1-1 国家信息安全漏洞库-漏洞新增数量统计图

图1-1是国家信息安全漏洞库[2]从2019年9月至2020年2月关于漏洞新增数量的统计图，近六个月来平均每月漏洞达到1432个，2020年2月份采集安全漏洞共1246个，其中缓冲区错误类型的漏洞最多，数量为150个，占比12.04%，并且在超危漏洞中缓冲区错误类型的漏洞也有20个，数量最多。这些漏洞可以为ROP攻击提供很好的利用条件。于是，及时的检测并防御ROP攻击就显得极为重要。基于此，本文提出基于二次汇编的ROP攻击防御技术，通过二次汇编技术可以对可执行文件进行反汇编生成汇编文件，并对汇编指令进行混淆和插桩，然后将汇编文件重编译成新的可执行文件。此过程不需要程序的源代码，并且可以在指令级别进行处理，在不对程序进行外部监控的情况下自动化的完成ROP攻击防御，减少了性能开销。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 ROP攻击防御技术

ROP攻击通过将目标程序中现有的指令序列链接在一起，可以使远程攻击者执行具有图灵完备的计算，而无需注入任何恶意代码。正是由于其巨大的威胁，近年来产生了许多针对ROP攻击的防御方法。

一些安全研究人员在程序源代码的基础上进行ROP攻击的防御。

Kaan Onarlioglu等人[3]提出了基于减少gadget和保护自由跳转分支的防御方法，通过修改编译器使源代码进行编译生成中间代码时对中间代码进行处理，包括指令替换、无效指令（nop指令）以及自由跳转保护，以达到减少gadget数量和保护跳转指令不被攻击者滥用的目的。

Tyler Bletsch等人[4]提出了基于控制流锁定的防御方法，通过一个大小为1比特的变量k来标记此时状态是解锁、间接调用、来自间接调用函数的返回以及来自直接调用的函数返回，从而防止跳转指令被攻击者滥用。

以上方法的实现需要重新编译程序，意味着每个使用者不得不使用新的程序来增加安全性。然而重新构建一个新的程序往往是一个巨大的工程，并且如果源代码丢失，那么程序的安全性就更无法得到保障。于是一些安全研究人员在不修改程序的基础上通过外部监控的方式进行ROP攻击的防御。

Lucas Davi等人[5]使用二进制指令框架Pin来监控栈内容达到防御ROP攻击的目的。通过复制一个程序栈，在程序动态运行时，在处理器执行指令之前拦截指令并检查指令类型。若为call指令，则将返回地址复制一份压进栈，若为ret指令，则比较复制的栈与程序栈的栈顶内容是否相同，从而判断该跳转指令是否被攻击者使用。

Vasilis Pappas等人[6]提出了一种基于异常控制流转移的动态检测方法。利用处理器提供的上次分支记录技术（Last Branch Recording，LBR），可以获取上一次执行分支的记录，从而在系统调用返回时，判断之前是由call指令还是ret指令跳转到系统调用的，若是call指令则是善意的系统调用，否则是恶意的系统调用。

Ivan Fratrić等人[7]提出了六种不同的检测方法来判断一个函数调用是否是恶意的。包括检验栈指针是否在正确的边界内、检查栈上是否有特定函数的入口地址、验证返回地址是否有效（可执行并且前面有call指令）、验证调用栈是否有效、模拟程序执行流程以及特定函数检验（VirtaulProtect和LoadLibrary函数）。

Yueqiang Cheng等人[8]使用LBR技术和预运行的方法。在预运行阶段导出所有指令的偏移、类型和对齐方式，并收集程序和共享库中可能的gadget，以此构建一个数据库;在运行阶段通过滑动窗口机制限制可利用的指令数量，并通过LBR技术识别先前执行的指令和传入的指令是否是ROP攻击的gadget。

以上的方法大部分依赖于ret-call指令之间的联系，并通过CPU的LBR技术在程序动态运行时获取控制流的转移信息，从而判断是否受到ROP攻击。然而外部监控的方法会带来很大的性能开销，并且Nicholas Carlini等人[9]已经对kBouncer和ROPecker两种防御方法提出了破解的思路及实现方法。

1.2.2 二次汇编技术

二次汇编是指将可执行文件反汇编得到汇编文件后，再将汇编文件重汇编成可执行文件。Shuai Wang等人[10]于2015年率先提出了静态二次汇编的方法，并实现了名为Uroboros的开源工具。但是，作为第一个实现二次汇编的项目，Uroboros存在许多的局限使得它无法处理许多可执行文件。Ruoyu Wang等人[11]在Uroboros工具提供的二次汇编方法的基础上进行完善，实现了一个完成度更高的工具Ramblr。Ramblr使用二进制分析框架angr[12]来进行控制流图（Control Flow Graph，CFG）恢复，并封装为了angr的子模块。相较Uroboros，Ramblr具有更高的成功率和很好的可拓展性，所以本文的ROP攻击防御方法基于Ramblr进行实现。

1.3 论文主要研究内容

本文主要研究基于二次汇编的ROP攻击防御技术，将二次汇编框架与一些ROP攻击的防御方法相结合。利用二次汇编的可直接对指令进行处理的特点，使用指令替换和无效指令填充的方法减少gadget的数量，缓解ROP攻击；使用跳转指令保护的方法保证控制流的完整性，防止攻击者任意调用跳转指令。本文的主要工作如下：

第一：本文提出了一种新的ROP攻击防御的思路，可以避免程序源码难以获取的问题。与现有的ROP攻击防御方法不同的是，本文的方法基于二次汇编实现，可以自动化地对程序进行反汇编和重汇编操作，不需要外部监控，生成的程序在功能上与原始程序完全相同。

第二：本文使用了一种适合二次汇编框架的ROP攻击防御方法。借助二次汇编技术可获取程序的汇编指令并对其直接进行操作的特点，提出了指令替换、无效指令填充和自由跳转指令保护三种方法，最大限度的减少gadget数量以及保护控制流的完整性。

第三：本文使用linux的coreutils工具包作为测试样本，结果表明经二次汇编处理之后的程序较原始程序在大小上小近xx%，在性能开销上xxxxx

1.4 论文结构

本文的主要研究内容是设计并实现了一种基于二次汇编的ROP攻击防御方法，总体分为五大章节，组织结构为：

第一章：绪论。本章介绍了论文的研究背景和研究意义、国内外的研究现状、论文的主要研究内容和论文的组织结构。

第二章：相关理论知识。本章

第三章：基于二次汇编的ROP攻击防御方法设计。

第四章：基于二次汇编的ROP攻击防御方法实现。

第五章：测试及结果分析。

结论：总结和展望。

第2章 相关理论知识

2.1 ROP攻击及防御技术

2.1.1 ROP攻击的背景知识

在正式介绍ROP攻击的原理之前，这里先对ROP攻击的背景知识进行大致的介绍，包括堆栈的定义、堆栈缓冲区溢出、堆栈溢出的利用方法以及基础的保护技术。有了背景知识的掌握后，理解ROP攻击的原理将会更加容易。

2.1.1.1 堆栈的定义

在现代计算机的操作系统中，每个进程都有它专属的内存区域，称为堆栈（stack）。进程可分为三大区域，分别是代码段、数据段和堆栈。代码段是一个只读的数据段，它包含了程序的指令；数据段包含了程序中初始化和未初始化的数据，比如静态变量；堆栈则存储函数中动态分配的变量，用来传递函数的参数以及在函数执行结束后返回数据。堆栈是一个充当元素集合的抽象数据类型，它的功能就像一堆盘子，最后放在最上面的盘子也是要取出的第一个盘子。这种从堆栈取元素的排序方式称为后进先出。

每次函数调用时，操作系统会分配堆栈的一小部分来存储它的数据，这一小部分称为栈帧，由函数参数、函数的局部变量以及用于恢复前一个栈帧的数据。尽管从理论上来说堆栈的功能很简单，但仍然很可能出现错误。与堆栈交互时遇到的最常见的错误之一就是堆栈缓冲区溢出。这个错误与变量在堆栈的存储方式有关，它也是引起漏洞的关键。在下一节栈溢出原理中，本文将研究导致此错误的原因及其工作原理。

2.1.1.2 堆栈缓冲区溢出的原理

缓冲区溢出是一种程序运行时的错误，发生在程序尝试对超出其预期数据结构的内存地址进行写操作的时候。通常是写入数据的大小超出缓冲区大小，这可能会破坏相邻的内存数据，并导致程序崩溃或错误的结果。缓冲区溢出错误的一个常见例子就是数组索引超出范围，该错误使攻击者可以通过代码注入劫持程序控制流，导致程序受到攻击。

为了更直观地说明缓冲区溢出的原理，接下来将使用一个例子来介绍。程序源码如图2-1，其功能非常简单，使用gets函数接收字符串并输出该字符串。字符串名为buffer，大小为8字节。



图 2-1 缓冲区溢出例子源码

程序正常执行时，栈的内容如图2-2，可以看到使用字符串“Hello”作为输入时，栈内容没有异常。但是，如果使用的字符串过长而无法放入预期的缓冲区，那么字符串的剩余部分溢出到堆栈上，并从而覆盖其它的内容。程序发送缓冲区溢出时，栈的内容如图2-3，可以看到输入的字符串为16个字符A，由于大小超出预期，并且C语言中的gets函数没有边界检查，导致栈上的上一个函数的栈帧以及返回地址被字符A所覆盖。这里由于返回地址被覆盖为无效地址，程序将异常终止，但攻击者可以精心构造输入，利用此漏洞接管程序的控制流，实现任意代码执行。



图 2-2 程序期待的输入 图 2-3 程序发生缓冲区溢出

2.1.1.3 堆栈缓冲区溢出的利用方法

本小节将介绍两种不同的技术，这些技术为面向返回编程奠定了基础。第一项也是最基本的技术称为堆栈粉碎（Stack Smashing）。它是第一项利用堆栈缓冲区溢出的技术，并且在Aleph One发表他著名的文章[13]之后该项技术得到了广泛的认可。第二项将介绍的技术是返回到共享库（Return-to-libc），它被视为面向返回编程的前身，与其有很多相似之处，并且也是基于代码重用的技术，但它的通用性要差一点。

**堆栈粉碎技术**是我们可以通过堆栈缓冲区溢出进行的最基本的利用方法。使用这项技术，可以通过调用堆栈来重定向程序的控制流。当一个函数被调用时，调用者会将返回地址压入堆栈，而当函数执行结束时，被调用者会将返回地址弹出堆栈，并将控制权转移给该地址。如果攻击者可以控制该地址，那么就可以任意地重定向控制流，使得攻击者能够执行任意代码。

如图2-3所示，如果我们输入足够长的字符串，栈上存储的返回地址将被部分输入覆盖，这导致当函数结束时，控制权就会移交给地址0x49494949，即字符串“AAAA”的十六进制。在大多数情况下，0x49494949会超出程序的内存范围，并且程序将会异常终止。但如果这个地址包含有效指令，程序将从该地址继续执行。这意味着攻击者可以用包含有效指令的地址覆盖返回地址，从而执行任意指令。

要使用堆栈粉碎技术对程序进行利用，攻击者必须构造一个字符串，该字符串由三部分组成：填充偏移的无效字符串、新的返回地址和配合新的返回地址的有效负载（payload）。攻击者首先应当计算到达返回地址所在栈上的位置所需的偏移。偏移取决于许多因素，比如缓冲区的长度和堆栈的实现原理。这里提出两种方法来计算偏移，一是单步执行代码，二是通过报错暴力破解。从图2-2可以看出，从缓冲区的开始到返回地址的开始的偏移是12个字节。攻击者得到偏移之后，需要用一条指令的地址覆盖栈上存储的返回地址，该指令的功能可以是控制寄存器的值，也可以是转移控制流，但相同点是它们都需要以跳转指令结尾。这里的示例如图2-4所示，我们将堆栈上的返回地址覆盖为jmp esp指令所在的地址，在程序执行到函数返回时，使用栈上新的返回地址，执行jmp esp指令，跳转到栈顶元素所处地址，即shellcode。



图 2-4 构造堆栈粉碎的字符串

然而在现代操作系统中，由于采用了堆栈不可执行和其它内存空间的保护措施，使得直接在堆栈上执行代码几乎不可能。因此，需要改用基于程序已有指令的新技术，最早实现这一思想的技术之一就是返回到共享库技术。

**返回到共享库技术**是面向返回编程的前身，并且是最早发现的代码重用攻击之一，它由Alexander Peslyak于1997年首次发表[14]。返回到共享库攻击通过调用共享库中已经存在的函数来绕过堆栈不可执行的安全措施，它和将攻击者编写的代码压入堆栈并执行的堆栈粉碎技术不同。C的标准共享库是一个寻找现有函数十分方便的地方，其中包含许多不同功能的函数，并且被不同的应用程序广泛使用。这也是为什么返回到共享库技术被命名为Return-to-libc的原因，其中的字母c代表的就是c语言。利用这项技术的一个很大的限制就是我们只能在漏洞利用中调用已经存在的函数，在下一节ROP攻击的原理中，将研究一种更高级的技术称为面向返回编程，这项技术为我们提供了更多选择，并为在现代操作系统中绕过堆栈不可执行措施提供了更大的灵活性。

2.1.1.4 针对堆栈缓冲区溢出的保护措施

第一种保护措施是可执行的空间保护（Executable Space Protection）。它利用了硬件功能的不可执行位，是一种CPU用于在处理器指令和存储之间隔离内存区域的技术。如果硬件不支持的情况下，可以使用软件仿真来实现此功能，但需要一些性能开销。此外存在其它可执行空间保护方案，例如通过一个比特位将内存页标记为可写或可执行。在Windows操作系统中，该措施是数据执行保护方案的一部分。从Windows XP Service Pack2开始，这种方法已经在Windows操作系统的每个版本中实现。由于该措施将内存区域标记为不可执行，因此无法对受该措施保护的应用程序执行堆栈粉碎攻击。因此，攻击者必须利用返回共享库或面向返回编程技术来绕过内存页的不可执行保护。

第二种保护措施是堆栈金丝雀（Stack Canary）。它是放置在堆栈上缓冲区与控制数据之间的值，以监控堆栈缓冲区溢出。当缓冲区溢出破坏了堆栈内容时，canary值也将被覆盖。在函数执行结束时，会进行canary的验证，由于缓冲区溢出导致canary被破坏，因此将出现不匹配的情况。

第三种保护措施是地址空间布局随机化（ASLR）。它可以使程序的地址空间随机化，是一种计算机安全技术。这使得攻击者在执行漏洞利用时很难准确地跳转到正确的地址。ASLR技术会随机化进程的关键数据区域，如堆栈、共享库以及可执行文件的基址。并且基于使用概率来防止攻击，它依赖于攻击者猜测随机放置的数据的正确位置的几率非常低。由于攻击者必须知道要执行的指令的位置，这使得利用返回到共享库和面向返回编程的攻击变得更加困难。由于攻击者很难知道他们注入代码的准确位置，因此堆栈粉碎技术也很难付诸实践。

2.1.2 ROP攻击的原理

面向返回编程是一种基于代码重用的攻击，所以要实现面向返回编程，程序中必须存在我们要执行的指令，并且指令片段（gadgets）以返回指令结束。这意味着我们需要足够丰富的指令集来执行面向返回编程攻击。如果有足够大的指令集，意味着面向返回编程就是图灵完备的。接下来将从gadgets的结构和寻找gadgets的方法两部分阐述ROP攻击的原理。

gadgets是一条或多条指令组成的指令片段，并且以返回指令（retn）结束。通过将gadgets组合放到堆栈上，可以实现不同的功能，其中不同的gadgets组合成为ROP链（ROP-chain）。图2-5是一个简单ROP链的示例，它的功能是将寄存器eax和edx清零，然后将eax加3，edx加2，并把edx的值加在eax上。



图 2-5 gadgets示例-控制寄存器值

通过返回指令可以将每个gadgets链接在一起。当返回指令执行时，会将栈顶的元素弹出并跳转到元素值所在位置，在ROP链中，则会跳转到下一条指令的地址。建立ROP链时，有一些非常有用的gadgets。例如异或指令xor，当我们需要将寄存器清零但又要避免空字节时就可以用异或指令将寄存器自身异或，达到清零的目的；还有就是pop指令，它可以将栈顶的值弹出并放入寄存器中。

查找gadgets是构造ROP链必不可少的一部分。gadgets决定了攻击的类型和如何构造ROP链，通过对二进制文件及其导入的共享库进行静态分析，可以找到gadgets。在寻找gadgets时，应避免一些特殊值，如空字节（0x0）、换行符（0xA）和回车符（0xD）。因为这些值代表了C语言中字符串的结束，这导致当我们在利用像strcpy之类的函数时，导入的ROP链会被提前解析结束。在通过静态分析查找gadgets时，我们应寻找返回指令（0xC3），并从返回指令处向前构建gadgets，直到达到了不希望出现的指令或gadgets预定的最大长度为止。在寻找gadgets时，最好先将其构建的尽可能长，然后将其拆分为多个小的gadget。例如如果需要构造“a; b; c; retn”这样的gadgets，那么从逻辑上讲，也可以将其分隔成“a; b; retn”和“c; retn”两个小的gadgets。Shacham提出了一种算法[1]用于寻找gadgets。由于Intel x86的指令是不定长的，这使得我们可以从任意位置开始解析汇编代码，导致出现非预期的指令。如图2-6的前两行是经编译器产生的原有指令。然而当我们向后偏移两个字节，并以此为起点开始解析时，就会产生如图2-6的第4行和第5行的结果。



图 2-6 intel不定长指令示例

通过这种方法我们可以查找出更多可利用的gadgets，从而使面向返回编程的功能更加强大。

2.1.3. ROP攻击防御技术及其原理

2.2 二次汇编技术

# 第3章 基于二次汇编的ROP攻击防御方法设计

# 第4章 基于二次汇编的ROP攻击防御实现

# 第5章 测试及结果分析

# 

结　论

## 总结

## 展望

# 致谢

参考文献

1. H. Shacham, “The Geometry of Innocent Flesh on the Bone: Returninto-libc Without Function Calls (on the x86),” in Proceedings of the 14th ACM Conference on Computer and Communications Security, 2007.
2. 国家信息安全漏洞库：<http://www.cnnvd.org.cn/>
3. Onarlioglu K, Bilge L, Lanzi A, et al. G-Free: defeating return-oriented programming through gadget-less binaries[C]//Proceedings of the 26th Annual Computer Security Applications Conference. 2010: 49-58.
4. Bletsch T, Jiang X, Freeh V. Mitigating code-reuse attacks with control-flow locking[C]//Proceedings of the 27th Annual Computer Security Applications Conference. 2011: 353-362.
5. Davi L, Sadeghi A R, Winandy M. ROPdefender: A detection tool to defend against return-oriented programming attacks[C]//Proceedings of the 6th ACM Symposium on Information, Computer and Communications Security. 2011: 40-51.
6. Pappas V. kBouncer: Efficient and transparent ROP mitigation[J]. Apr, 2012, 1: 1-2.
7. Fratrić I. ROPGuard: Runtime prevention of return-oriented programming attacks[R]. Technical report, 2012.
8. Cheng, Yueqiang, et al. "ROPecker: A generic and practical approach for defending against ROP attack." (2014): 1.
9. Carlini, Nicholas, and David Wagner. "{ROP} is Still Dangerous: Breaking Modern Defenses." *23rd {USENIX} Security Symposium ({USENIX} Security 14)*. 2014.
10. Wang, Shuai, Pei Wang, and Dinghao Wu. "Uroboros: Instrumenting stripped binaries with static reassembling." *2016 IEEE 23rd International Conference on Software Analysis, Evolution, and Reengineering (SANER)*. Vol. 1. IEEE, 2016.
11. Wang, Ruoyu, et al. "Ramblr: Making Reassembly Great Again." *NDSS*. 2017.
12. angr: <https://github.com/angr/angr>
13. One, Aleph. "Smashing the stack for fun and profit (1996)." *See http://www.phrack.org/show.php* (2007).
14. Designer, Solar. "Getting around non-executable stack (and fix)." *http://ouah.bsdjeunz.org/solarretlibc.html* (1997).