

程序链接与 ELF 目标文件实验

(苏丰, 南京大学)

一、实验介绍

本实验的目的在于加深对程序生成与运行过程中链接的基本概念、作用和 ELF 文件的基本格式组成的理解。实验的主要内容是在二进制层面上逐步修改一个由多个 C 模块组成的程序（称为“linkbomb”），使其在运行时满足实验指定的行为要求。

本实验包含以下阶段，各阶段考察程序链接与 ELF 文件的不同方面知识：

阶段 1：静态数据对象与 ELF 数据节

阶段 2：指令与 ELF 代码节

阶段 3：符号解析

阶段 4：switch 语句与重定位

阶段 5：可重定位目标文件

阶段 6：位置无关代码（Position-Independent Code, PIC）

实验中需要完成对二进制可重定位目标文件（.o 文件）特定内容的修改，包括数据内容、机器指令、重定位记录等。在完成每个阶段的修改后，应该能够链接相关模块得到一个二进制可执行程序“linkbomb”，该程序应能正常运行并输出期望的正确结果。

■ 实验环境：Linux i386

■ 实验语言：汇编/C

二、实验数据

在本实验中，每位学生可从 Lab 实验服务器下载包含本实验相关文件的一个 tar 文件。可在 Linux 实验环境中使用命令“`tar xvf <tar 文件名>`”将其中包含的文件提取到当前目录中。该 tar 文件中包含如下实验所需文件：

- main.o：主程序的二进制可重定位目标模块，实验中无需且不应该修改
- phase1.o, phase2.o, …：各阶段实验所针对的二进制可重定位目标模块
- strings.txt：各阶段实验中链接生成的程序在运行时的预期输出字符串

三、实验结果提交

将修改完成的各阶段模块（phase1.o, phase2.o, phase3_patch.o, phase4.o, phase5.o, phase6.o）和未改动的 main.o、phase3.o 模块用 tar 工具打包（注意其中不能包含任何目录结构），并命名为“学号.tar”的单一文件提交。

注意：可只提交已完成阶段的对应模块文件，如验证正确可获得相应阶段的实验分数。

四、实验内容

实验的每一阶段 n 中，按照阶段的目标要求修改二进制可重定位目标模块 phase[n].o 后，可使用如下命令生成可执行程序 linkbomb：

```
linux> gcc -no-pie -o linkbomb main.o phase[n].o
```

并且，如下运行链接生成的可执行程序 linkbomb，应输出符合该阶段目标的字符串。

```
linux> ./linkbomb
```

提示：

- ✓ main.o 中会调用相应模块 phase[n].o 中如下定义的一个全局函数指针变量 phase:
`void (*phase)() = do_phase;`
- ✓ 其中，作为其初始值的"do_phase"是各阶段模块中实现的一个全局函数，用来完成该阶段的具体功能。
- ✓ 各阶段之间没有相互依赖关系，可按任意阶段顺序进行实验。

下面针对具体每个实验阶段，分别说明实验需要达到的目标。

Phase 1

修改二进制可重定位目标文件"phase1.o"的.data 节的内容（注意不允许修改其它节的内容），使其如下与 main.o 模块链接后运行时输出（且仅输出）学号：

```
linux> gcc -no-pie -o linkbomb main.o phase1.o
```

```
linux> ./linkbomb
```

```
linux> 学号
```

提示：

- ✓ 可查看反汇编代码，获得输出函数的调用参数的地址，按照目标输出内容，修改该参数在 phase1.o 文件的数据节中的相应内容
- ✓ 可使用 hexedit 等工具或自己编写程序实现对二进制 ELF 文件的编辑和修改

Phase 2

修改二进制可重定位目标文件"phase2.o"的.text 节的内容（注意不允许修改其它节的内容），使其如下与 main.o 模块链接后运行时输出（且仅输出）学号：

```
linux> gcc -no-pie -o linkbomb main.o phase2.o
```

```
linux> ./linkbomb
```

```
linux> 学号
```

提示：

- ✓ 可查看反汇编代码，定位模块中的各组成函数并推断其功能作用，进一步修改入口函数 do_phase()中的机器指令（可用自己指令替换函数体中的 nop 指令）以实现所需输出功能
- ✓ 注意：模块中的函数并不都是完成该阶段目标所必需的——有些函数是不相关的、不必修改

Phase 3

针对给定的可重定位目标文件"phase3.o"，创建生成一个名为"phase3_patch.o"的二进制可重定位目标文件（注意不允许修改 phase3.o 模块），使其如下与 main.o、phase3.o 模块链接后运行时输出（且仅输出）学号：

```
linux> gcc -no-pie -o linkbomb main.o phase3.o phase3_patch.o
```

```
linux> ./linkbomb
```

```
linux> 学号
```

提示：

- ✓ phase3.o 模块的入口函数 do_phase()依次遍历一个 COOKIE 字符串（由一组互不相

同的英文字母组成，且总长度与学号字符串相同）中的每一字符，并将其不同 ASCII 编码取值映射为特定输出字符。

- ✓ 需熟悉并利用链接的符号解析规则。

Phase 4

修改二进制可重定位目标文件“phase4.o”中相关节的内容（**注意不允许修改.text节和重定位节的内容**），使其如下与 main.o 链接后运行时输出（且仅输出）学号：

```
linux> gcc -no-pie -o linkbomb main.o phase4.o
linux> ./linkbomb
linux> 学号
```

提示：

- ✓ 该模块针对一个 COOKIE 字符串（由大写英文字母组成，每个字符互不相同，且总长度与学号字符串相同）中每一字符逐一进行变换处理
- ✓ 要完成本阶段，需熟悉 switch 语句的机器表示和特定重定位类型的处理算法

Phase 5

修改二进制可重定位目标文件“phase5.o”，恢复其中被**人为清零**的一些**重定位记录**（分别对应于本模块中需要重定位的符号引用，**注意不允许修改除重定位节以外的内容**），使其如下与 main.o 链接后，运行所生成程序时输出对学号进行编码处理后得到的一个特定字符串，例如下例中的“L*`Upt6HZ”（不同学号对应的字符串不同，具体见 strings.txt 文件中对应本阶段的预期输出字符串）：

```
linux> gcc -no-pie -o linkbomb main.o phase5.o
linux> ./linkbomb
linux> L*`Upt6HZ
```

注意：如果对重定位信息的修改不正确或不完整的话，如上链接（往往不会报错）后运行生成的 linkbomb 程序可能会得到以下结果之一：

- "Segmentation fault" 出错信息 — 请对照机器代码思考和查找错误的可能原因（如果未对相关引用进行必要的重定位会发生什么）。
- 类似 "Welcome to this small lab of linking. To begin lab, please link the relevant object module(s) with the main module." 的输出信息 — 原因：某些重要的重定位记录未正确恢复。
- 输出字符串不同于预期字符串 — 原因同上

提示：

- ✓ 实验中共需要对模块中的 **7** 个被置为全零的重定位记录进行恢复，注意这些重定位记录可能位于目标文件的不同重定位节中
- ✓ 查看课程内容中相关介绍，了解重定位记录的组成结构，构造符合规范的二进制重定位记录数据，并用其替代 ELF 模块 phase5.o 中合适位置上的被清零的重定位记录
- ✓ 为获得生成重定位记录所必须的信息，可对照模块的反汇编结果和如下本模块的主要代码框架（略去部分具体实现，注意函数和变量的实际名称和出现顺序可能不同），推断并找到每个重定位记录对应的符号引用：

```
/* NOTE: Those capitalized variable names in following code will
```

```

be substituted by different actual names in the module. */

char BUFFER[] = .....;
const int CODE_TRAN_ARRAY[] = .....;
int CODE = .....;
const char DICT[] = .....;
..... // Definitions of other variables

int transform_code( int code, int mode ) {
    switch ( CODE_TRAN_ARRAY[mode] ... )
    {
        case 0: .....
        case 1: .....
        .....
        default: .....
    }
    return code;
}

void generate_code( int cookie ) {
    ... = cookie;
    for( i=0; i<...; i++ ) {
        ... = transform_code( ..., i );
    }
}

int encode_1( char* str ) {
    .....
    for(i=0; i<n; i++) {
        str[i] = DICT[str[i]] ...;
        if(str[i]<0x20 || str[i]>0x7E) str[i] = ...;
    }
    .....
}

int encode_2( char* str ) {
    .....
    // Similar to encode_1
    .....
}

typedef int (*CODER)(char*);
CODER encoder[] = { ..... };

```

```
void do_phase() {
    generate_code(...);
    .....; // Call one encoder here
    printf("%s\n", ...);
}

.....
```

Phase 6

修改二进制可重定位目标文件“phase6.o”，恢复其中被**人为清零**的一些**重定位记录**（分别对应于本模块中需要重定位的符号引用）和部分**机器指令**（注意不允许修改除这些以外的文件其它部分内容），使其如下与 main.o 链接后，运行所生成程序时输出对学号进行编码处理后得到的一个特定字符串，例如下例中的“**I*JRmq3EW**”（不同学号对应的字符串不同，具体见 strings.txt 文件中对应本阶段的预期输出字符串）：

```
linux> gcc -no-pie -o linkbomb main.o phase6.o
linux> ./linkbomb
linux> I*JRmq3EW
```

phase6 采用了与 phase5 基本相同的源代码（仅个别数据初始值有所变化）。**phase6 不同于 phase5** 的主要之处是：phase6.o 采用了 **Position Independent Code (PIC)** 的编译方式（即编译生成可重定位目标模块时使用了 GCC 的“-fPIC”选项），因此生成的指令代码和对数据、函数符号的引用形式发生了变化。

提示：

- ✓ 实验中共需要对 phase6.o 模块中的 **8** 个随机被置为零的重定位记录和 **1** 或 **2** 个被置为 nop 指令序列的与 PIC 机制相关的函数的机器指令进行恢复。
- ✓ 可以自己编写小的样例程序并通过编译再反汇编，了解同样 C 源代码的 PIC 与 Non-PIC 机器代码之间的差异，进一步对照本模块的机器代码，推断其中所缺失的信息。
- ✓ 如果对本模块中缺失的重定位信息和函数指令代码的补充不正确或不完整的话，运行链接所得的 linkbomb 程序可能会输出类似于前一阶段的错误信息。