南京大学计算机科学与技术系

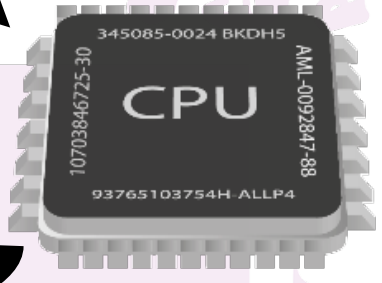
计算机系统基础
Programming Assignment

PA 2-2 – 程序的装载
PA 2-3 – 调试器符号表解析

2022年04月01日

南京大学《计算机系统基础》课程组

前情提要



2. 循环往复地取指令、取操作数、执行、写操作数（若需要写）

1. 将可执行文件中的指令、数据从外部存储器（如，硬盘）装载到内存中

Windows: .exe
Linux: ELF

PA 2-2 深入探讨 √
PA 2-1 简化实现

目录

- 认识ELF文件
- PA 2-2 - 程序的装载 -> ELF文件程序头表的解析
- PA 2-3 - 调试器符号表解析 -> ELF文件符号表的解析

目录

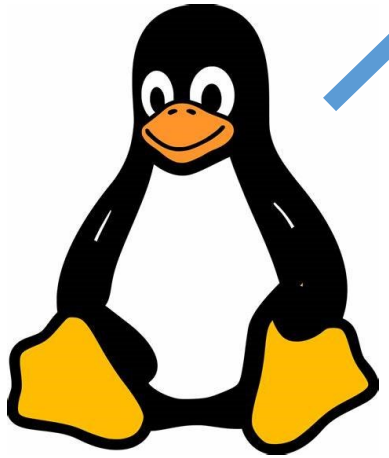
- 认识ELF文件
- PA 2-2 - 程序的装载 -> ELF文件程序头表的解析
- PA 2-3 - 调试器符号表解析 -> ELF文件符号表的解析

什么是ELF文件

ELF: Executable and Linkable Format

可执行可链接文件格式

运行



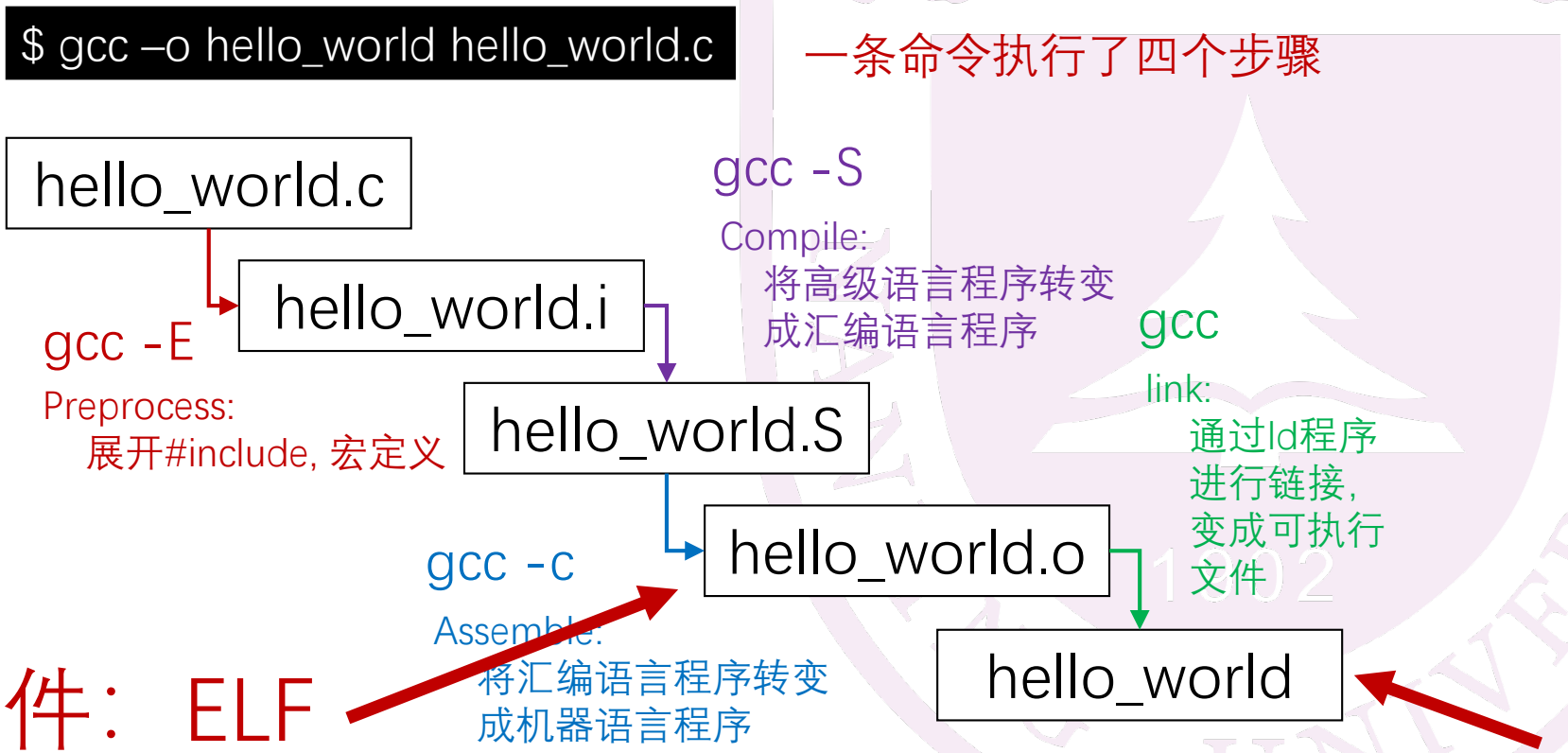
类Unix系统上
的标准格式

.exe

运行

如何得到ELF文件

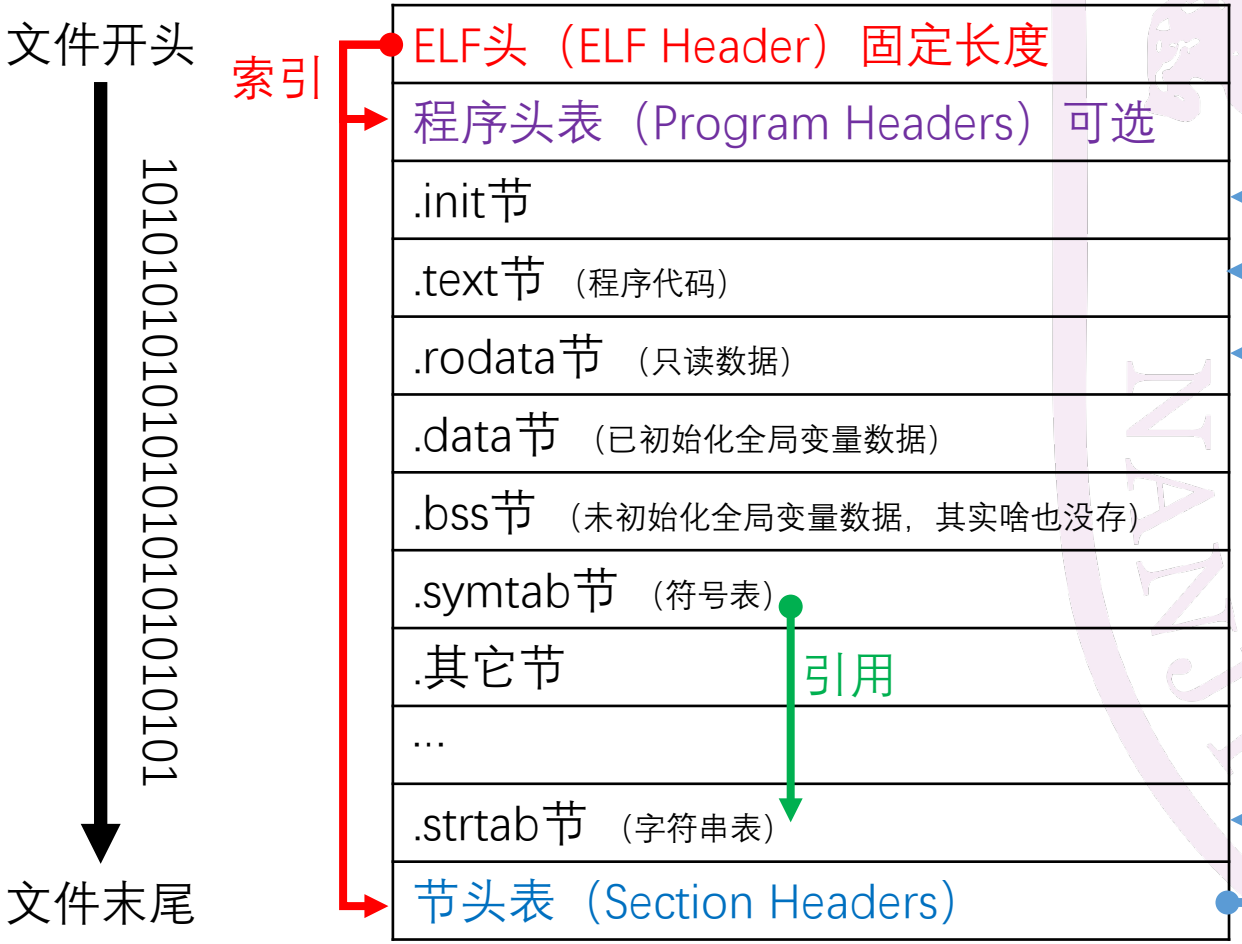
从高级语言到机器指令 – C语言程序编译的过程



可重定位文件： ELF

可执行文件： ELF

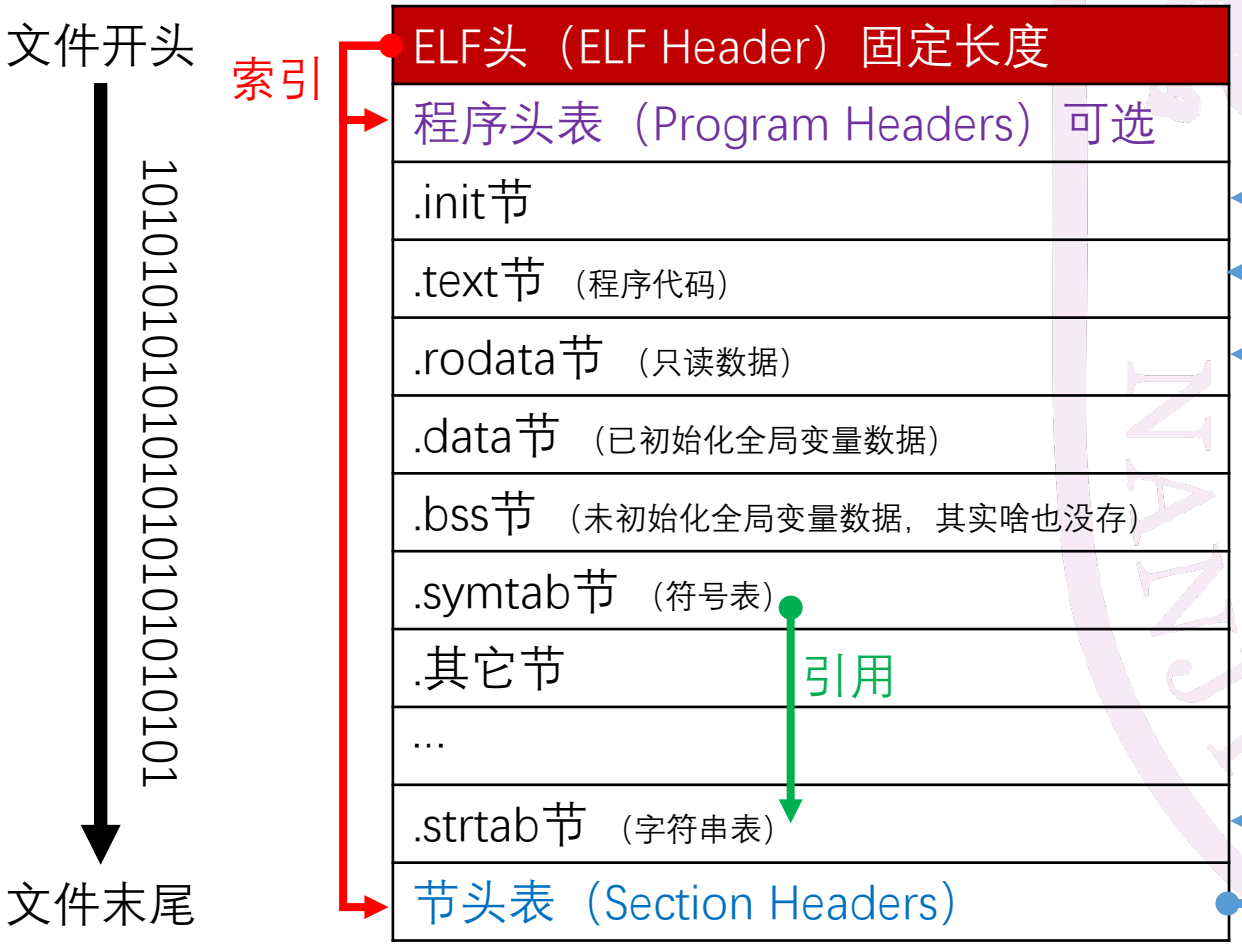
ELF文件格式



查看ELF文件

```
$ readelf
      -a 查看所有
      -h ELF头
      -l 程序头表
      -S 节头表
      -s 符号表
```

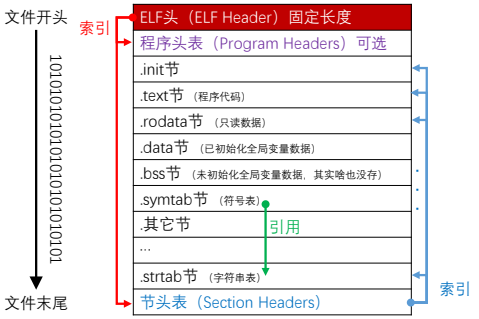
ELF文件格式



查看ELF文件

```
$ readelf
      -a 查看所有
      -h ELF头
      -l 程序头表
      -S 节头表
      -s 符号表
```

```
ELF Header:
  Magic:   7f 45 4c 46 01 01 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00
  Class:                             ELF32
  Data:                              2's complement, little endian
  Version:                           1 (current)
  OS/ABI:                            UNIX - System V
  ABI Version:                       0
  Type:                              EXEC (Executable file)
  Machine:                           Intel 80386
  Version:                           0x1
  Entry point address:               0x30000
  Start of program headers:          52 (bytes into file)
  Start of section headers:          18276 (bytes into file)
  Flags:                             0x0
  Size of this header:               52 (bytes)
  Size of program headers:           32 (bytes)
  Number of program headers:         3
  Size of section headers:           40 (bytes)
  Number of section headers:         15
  Section header string table index: 14
```

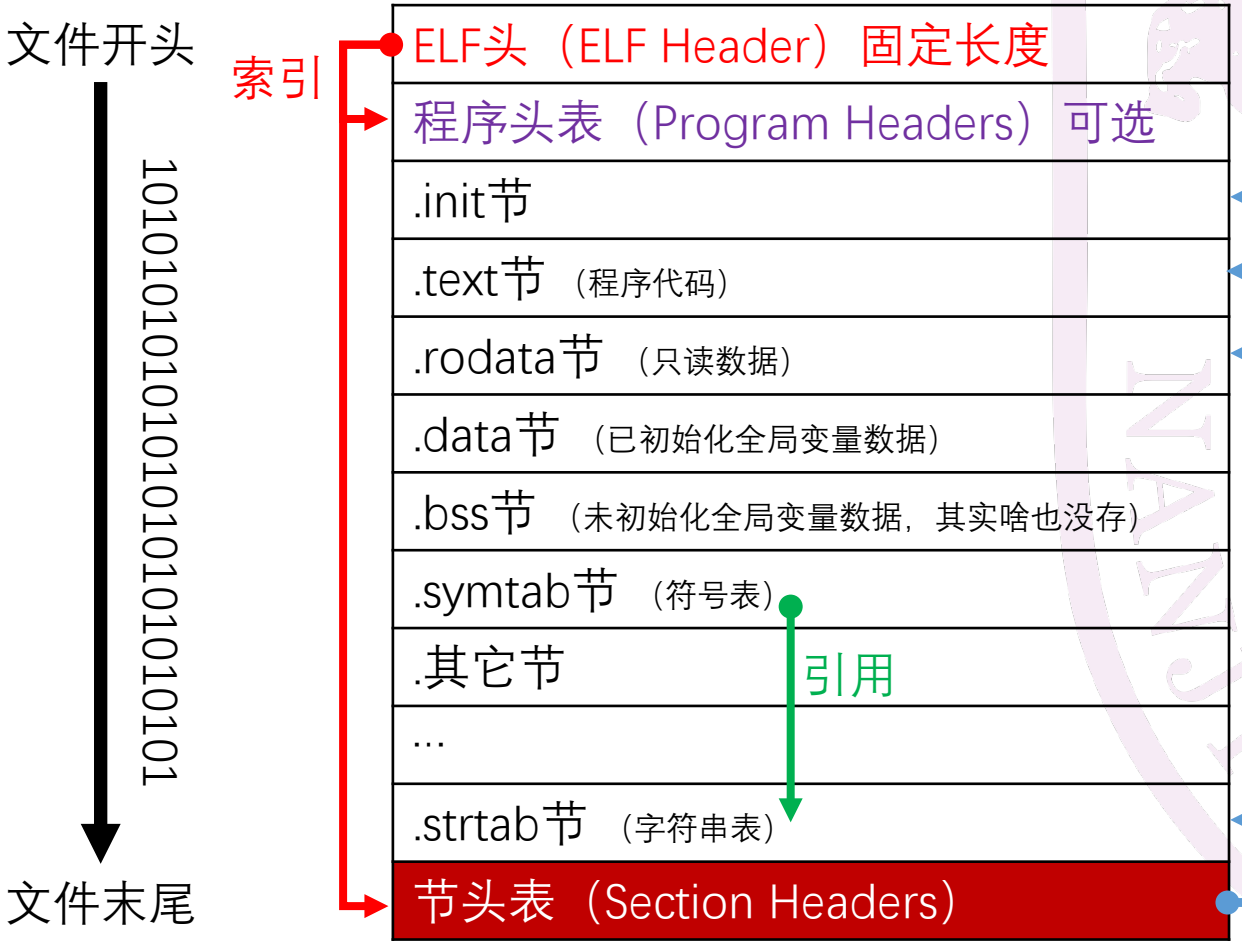


永远位于ELF文件最开始的地方，固定长度（ELF32, ELF64）

`readelf -h filename`

ELF头

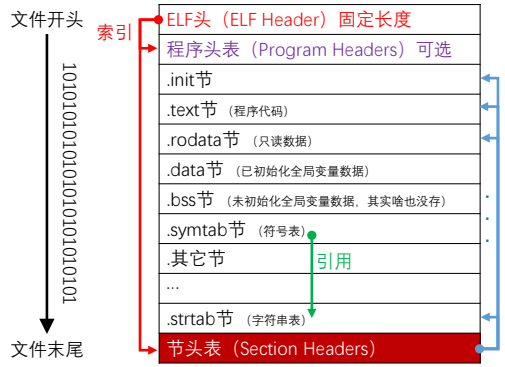
ELF文件格式



查看ELF文件

```
$ readelf
      -a 查看所有
      -h ELF头
      -l 程序头表
      -S 节头表
      -s 符号表
```

节头表

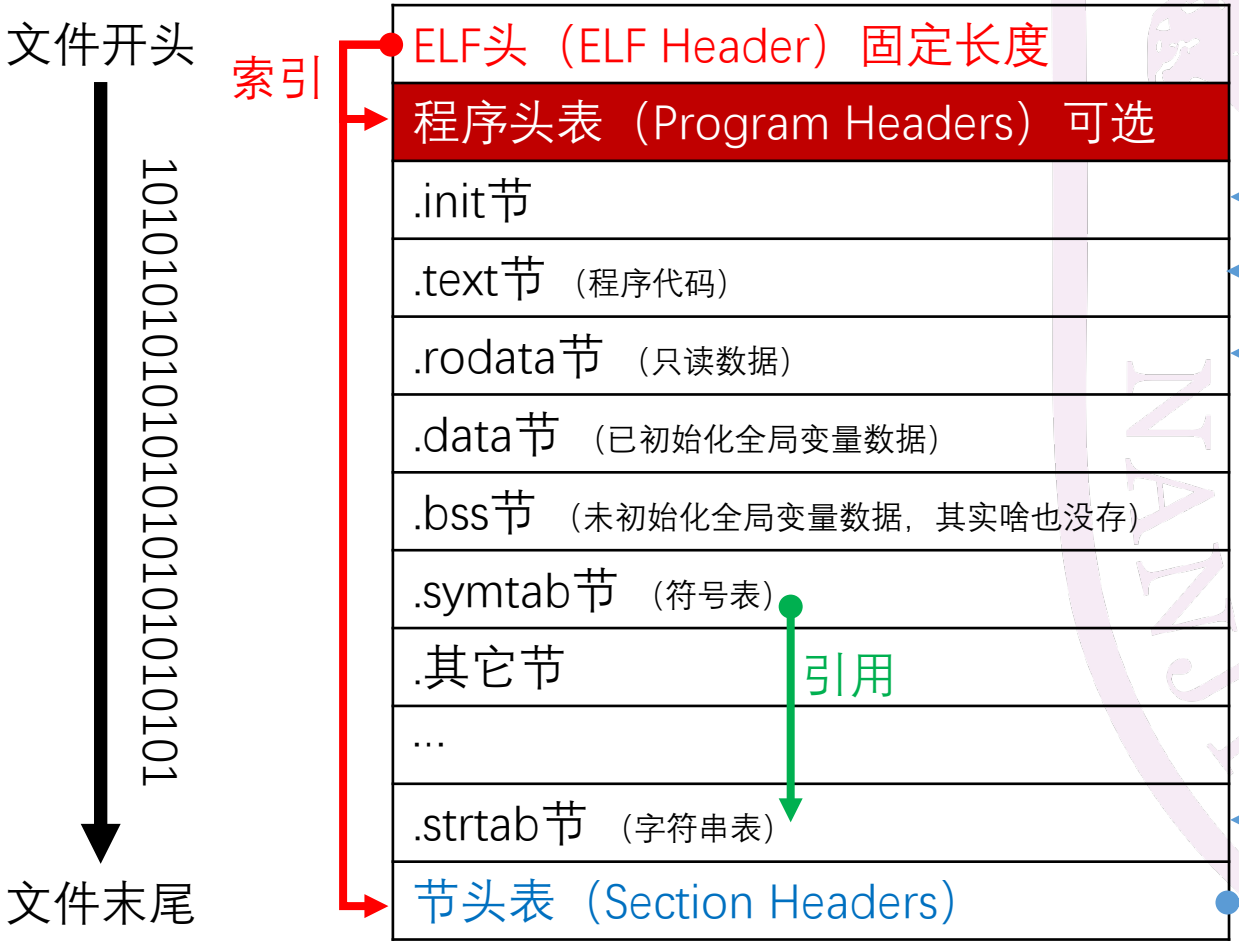



```
Section Headers:
  [Nr] Name              Type            Addr     Off    Size   ES Flg Lk Inf Al
  [ 0]                   NULL            00000000 000000 000000 00      0   0  0
  [ 1] .text             PROGBITS        00030000 001000 0000d0 00  AX  0   0  1
  [ 2] .eh_frame
  [ 3] .got.plt
  [ 4] .data
  [ 5] .comment
  [ 6] .debug_aranges
  [ 7] .debug_info
  [ 8] .debug_abbrev
  [ 9] .debug_line
  [10] .debug_str
  [11] .debug_macro
  [12] .symtab
  [13] .strtab
  [14] .shstrtab
Key to Flags:
  W (write), A (alloc), X (execute), M (merge), S (strings), I (info),
  L (link order), O (extra OS processing required), G (group), T (TLS),
  C (compressed), x (unknown), o (OS specific), E (exclude),
  p (processor specific)
```

文件分为多少个节，每个节（如.symtab节）在文件中的什么地方

```
readelf -S filename
```

ELF文件格式

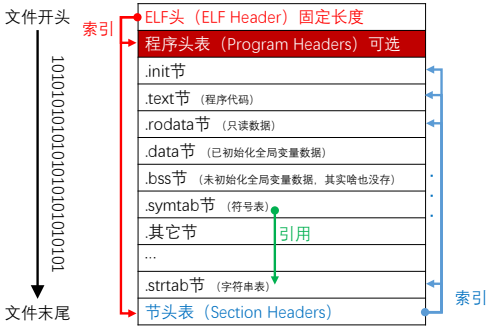


查看ELF文件

```
$ readelf
      -a 查看所有
      -h ELF头
      -l 程序头表
      -S 节头表
      -s 符号表
```

程序头表

（可选，仅可执行文件有，可重定位文件没有）



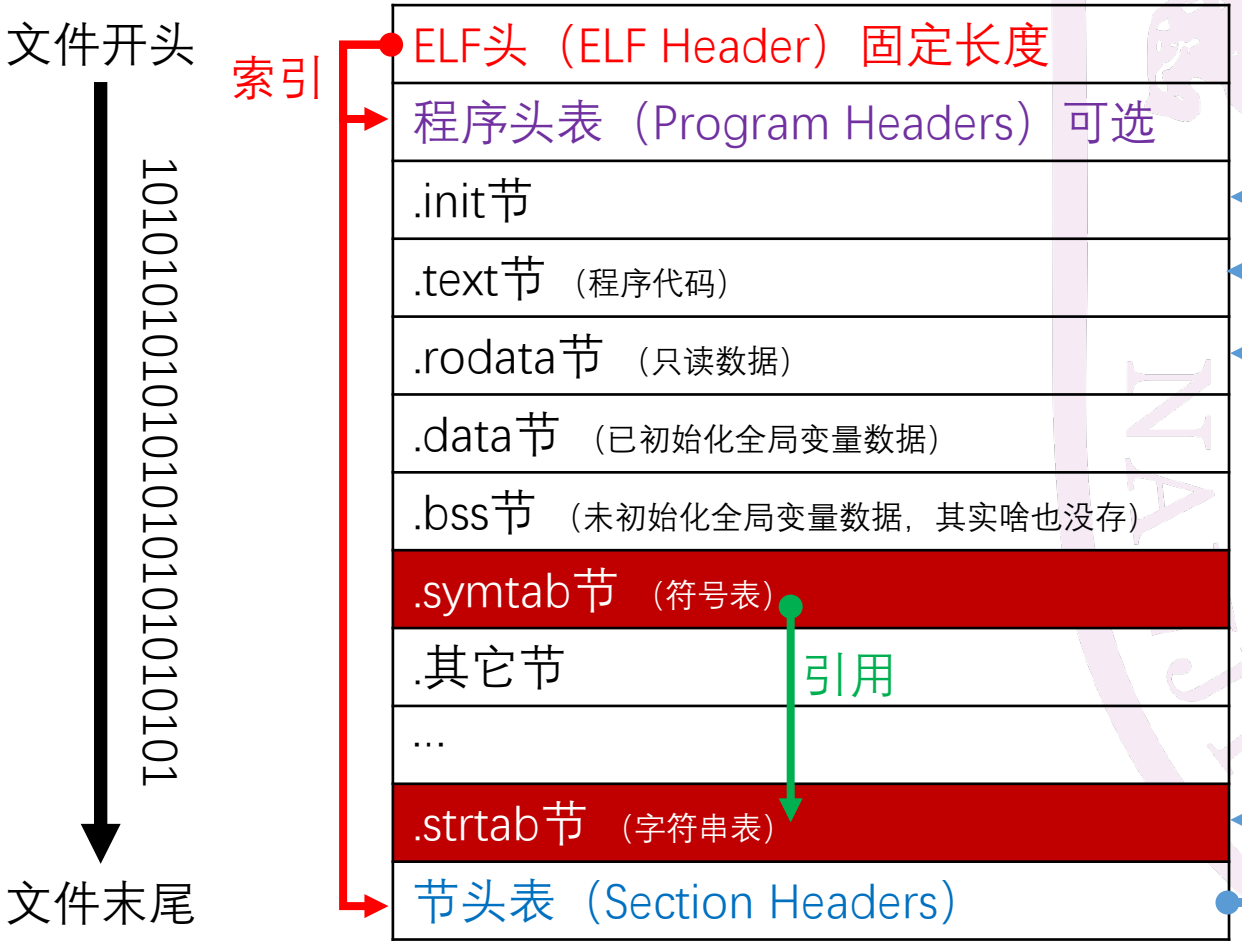

```
Program Headers:
  Type                                                    gn
  LOAD                                                    000
  LOAD                                                    000
  GNU_STACK                                               0

 Section to Segme
  Segment Section
   00      .text .eh_frame
   01      .got.plt .data
   02
```

文件中的哪一部分（节）
搬到内存中的哪个位置（段）

（PA 2-2 装载）

`readelf -l filename`

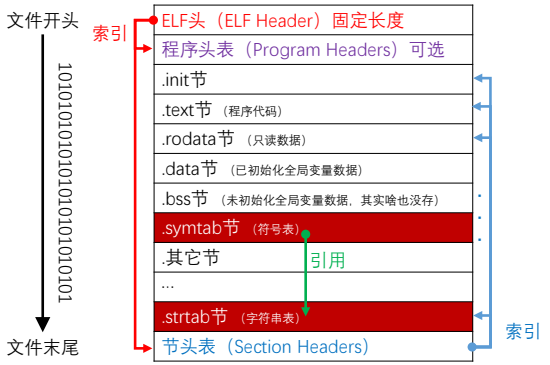
ELF文件格式



查看ELF文件

```
$ readelf
      -a 查看所有
      -h ELF头
      -l 程序头表
      -S 节头表
      -s 符号表
```

符号表+字符串表 readelf -s filename

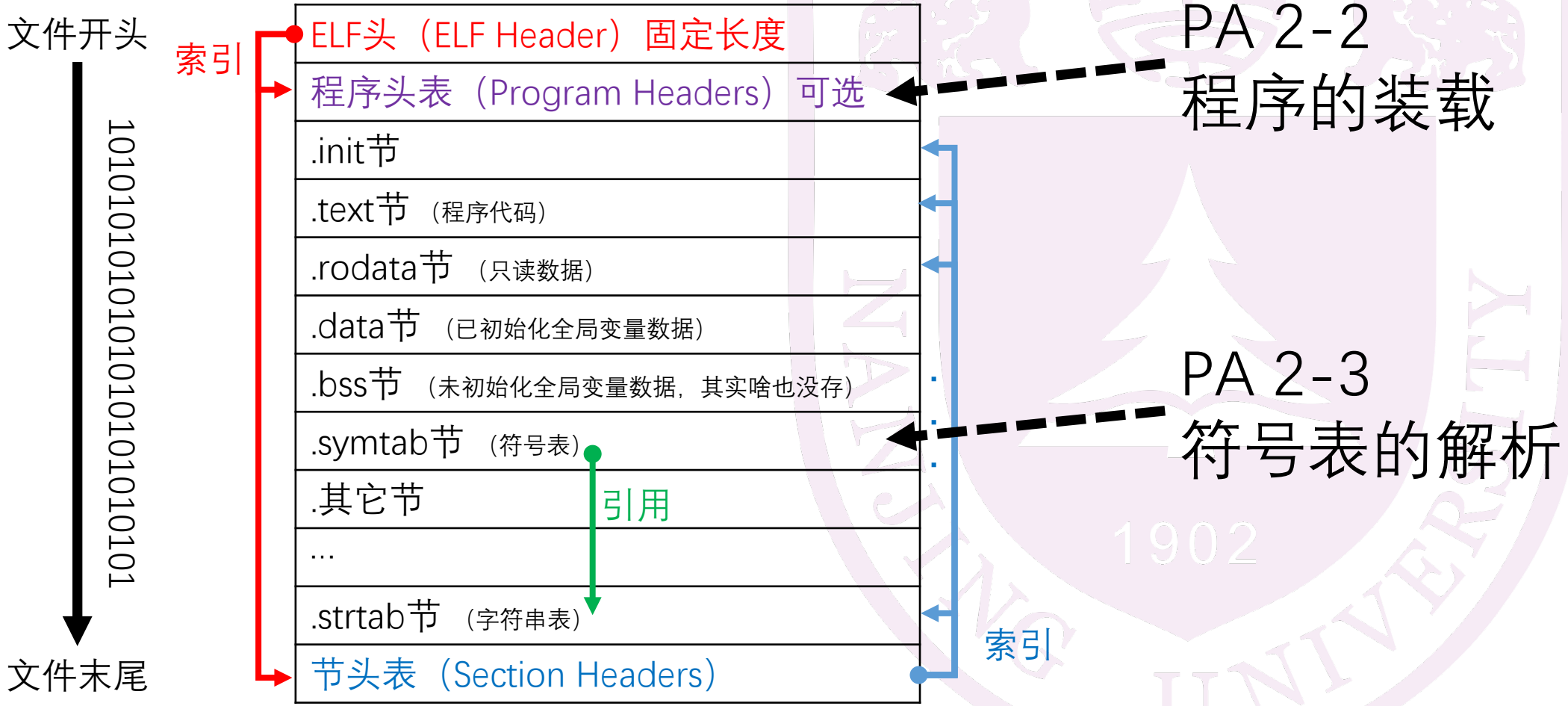



```
Symbol table '.symtab' contains 25 entries:
   Num:    Value  Size Type    Bind   Vis      Ndx Name
     0: 00000000     0 NOTYPE  LOCAL  DEFAULT  UND
     1: 00030000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    1
     2: 000300d0
    ...
    14: 00032000                                   ET_TABLE_
    15: 000300c8                                   _thunk.ax
    16: 00030005
    17: 000300cc                                   _thunk.bx
    18: 00032140
    19: 00030025
    20: 00032040
    21: 00032140     0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT    4 _edata
    22: 00032140     0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT    4 _end
    23: 00030000     0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT    1 start
    24: 00032020    32 OBJECT  GLOBAL DEFAULT    4 test_data
```

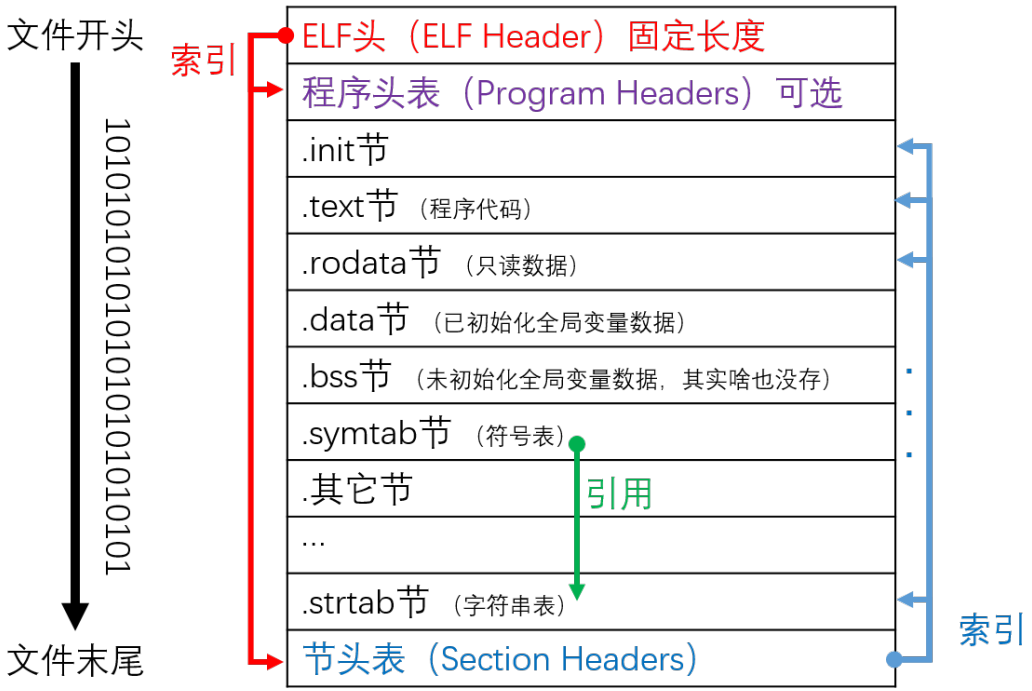
某全局变量或函数（如，’main’）
对应内存的哪个地址

（PA 2-3 符号表解析）

ELF文件格式


文件开头
索引
ELF头（ELF Header）固定长度
程序头表（Program Headers）可选
.init节
.text节 （程序代码）
.rodata节 （只读数据）
.data节 （已初始化全局变量数据）
.bss节 （未初始化全局变量数据，其实啥也没存）
.symtab节 （符号表）
.其它节
...
.strtab节 （字符串表）
节头表（Section Headers）
引用
索引
文件末尾
1010101010101010101010101
PA 2-2
程序的装载
PA 2-3
符号表的解析

要点梳理



- ELF文件结构
  - ELF头
  - 程序头表
  - 节头表
  - 各个节
    - 符号表与字符串表后续再加深理解
- 可执行/可重定位目标文件异同

目录

- 认识ELF文件
- PA 2-2 - 程序的装载 -> ELF文件程序头表的解析
- PA 2-3 - 调试器符号表解析 -> ELF文件符号表的解析

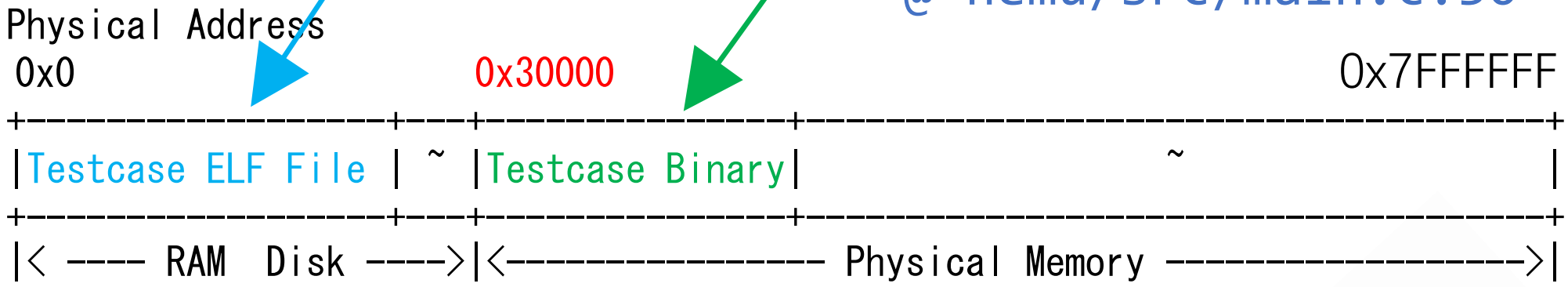
原先的NEMU是怎么装载并运行程序的?

1.1 NEMU初始化模拟内存（PA 2-1的装载）

testcase/bin/add　　testcase/bin/add.img

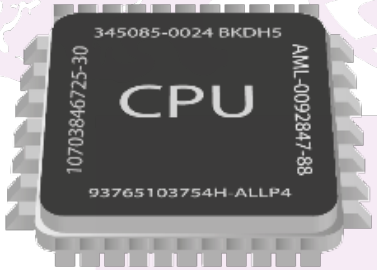
直接拷贝

load_exec()
@ nemu/src/main.c:30



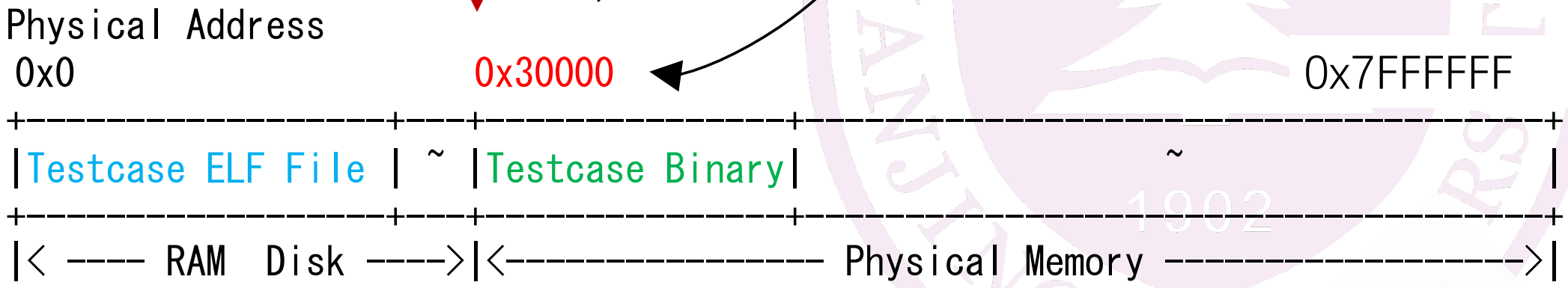
带有RAM Disk时的NEMU模拟内存划分方式

原先的NEMU是怎么装载并运行程序的?



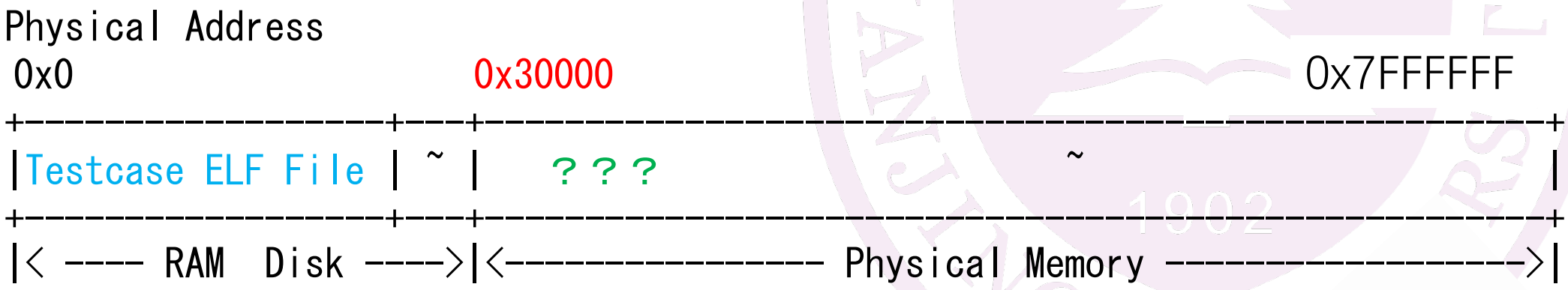
PA 2-1 赋予模拟CPU解码并执行指令的能力

EIP初始值



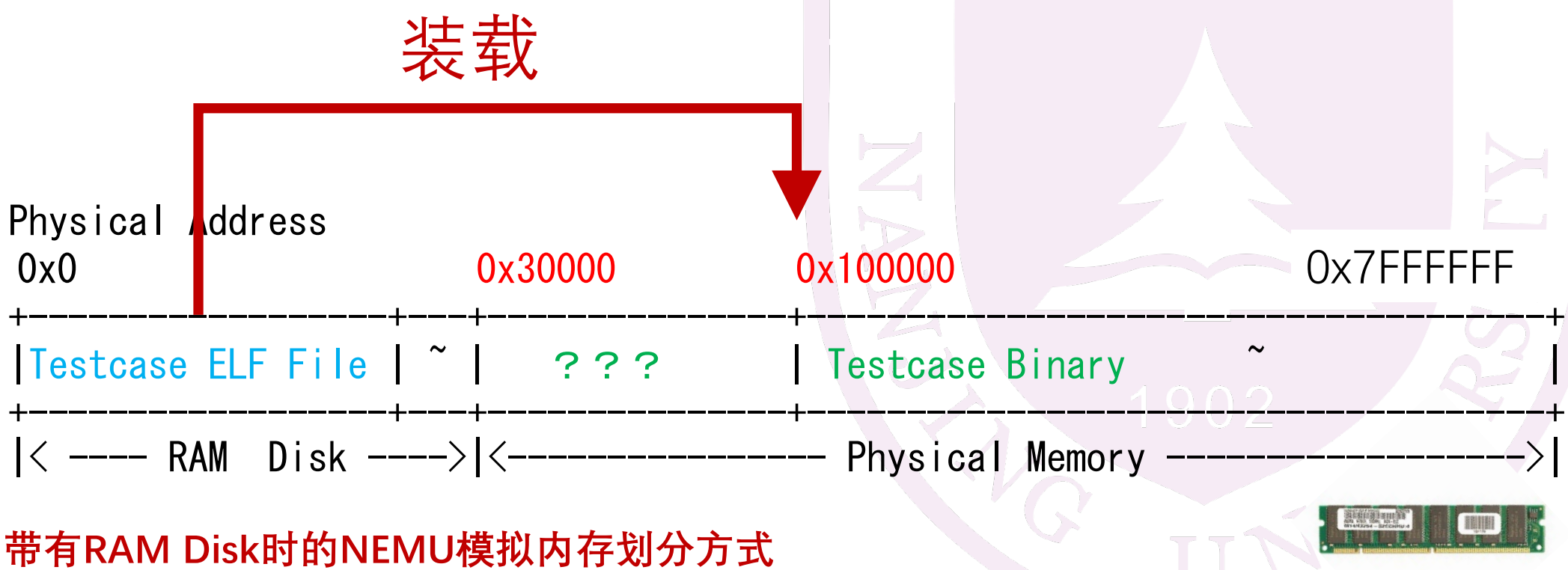
带有RAM Disk时的NEMU模拟内存划分方式

PA 2-2 以后NEMU是怎么装载并运行程序的?



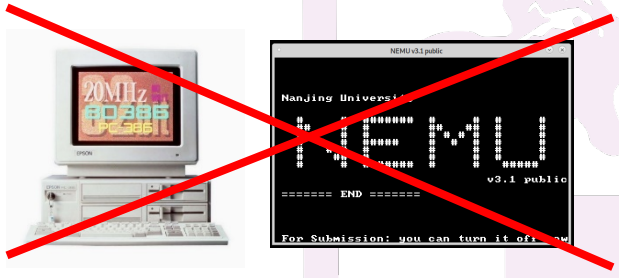
带有RAM Disk时的NEMU模拟内存划分方式

PA 2-2 以后NEMU是怎么装载并运行程序的?

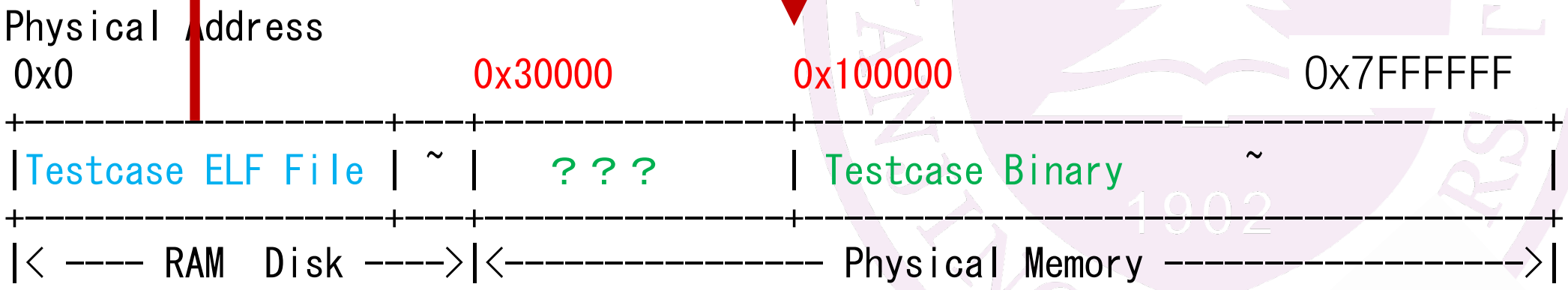


带有RAM Disk时的NEMU模拟内存划分方式

PA 2-2 以后NEMU是怎么装载并运行程序的?

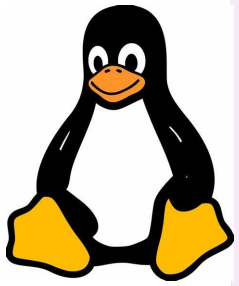


装载



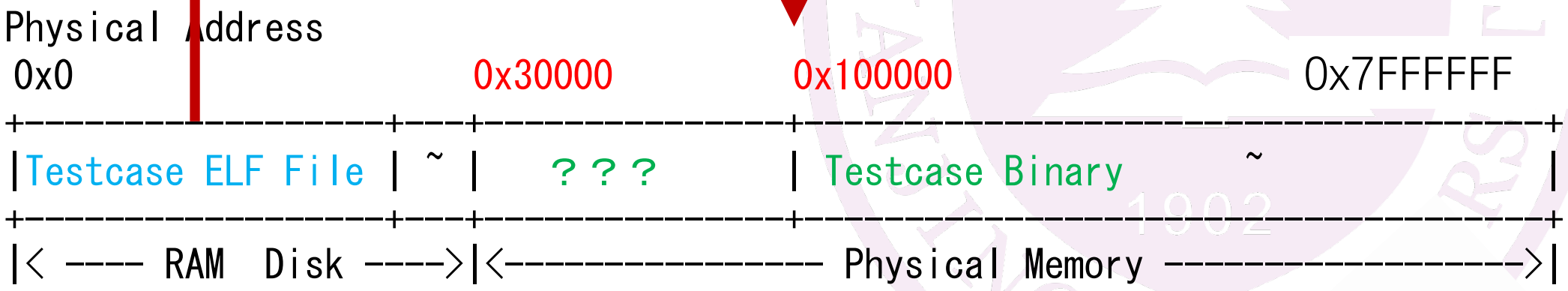
带有RAM Disk时的NEMU模拟内存划分方式

PA 2-2 以后NEMU是怎么装载并运行程序的?



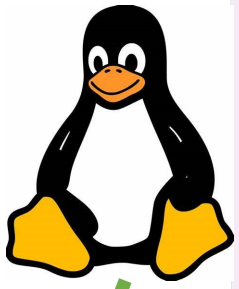
操作系统 √

装载



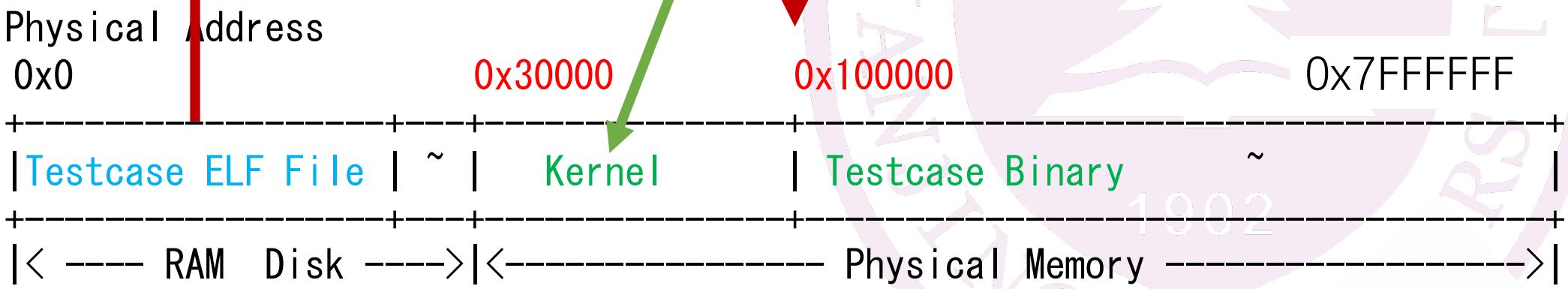
带有RAM Disk时的NEMU模拟内存划分方式

PA 2-2 以后NEMU是怎么装载并运行程序的?



操作系统 √

装载

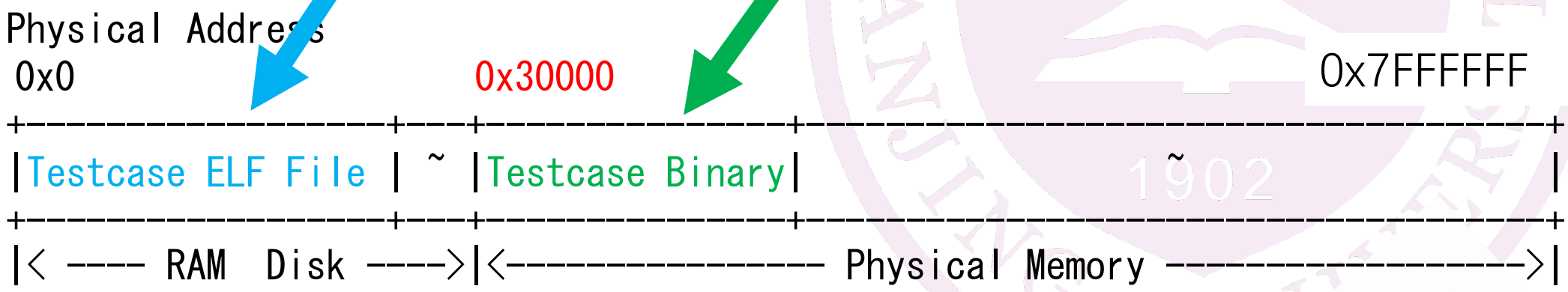


带有RAM Disk时的NEMU模拟内存划分方式

PA 2-2 以后NEMU是怎么装载并运行程序的?

testcase/bin/add　　testcase/bin/add.img

直接拷贝



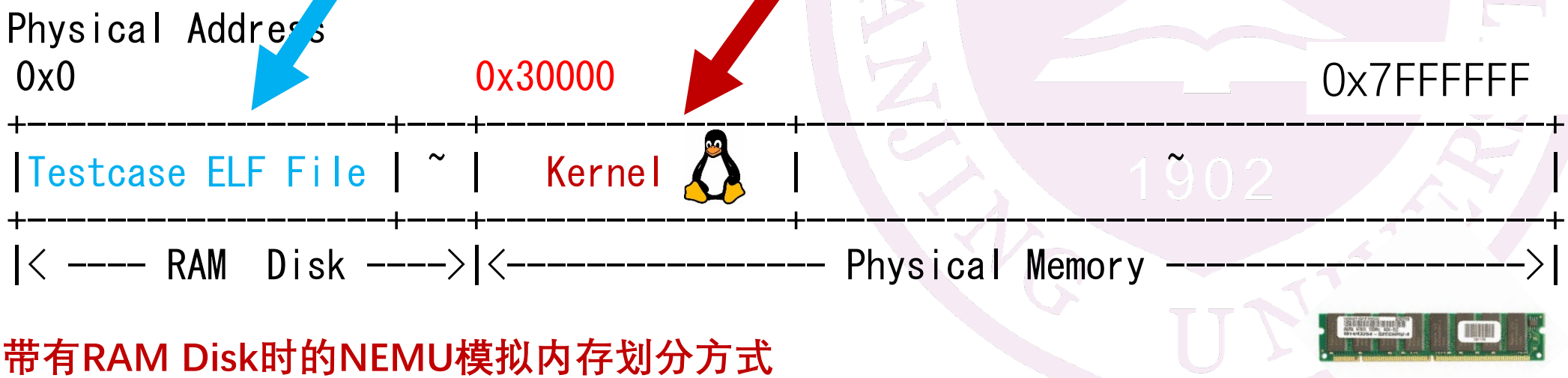
带有RAM Disk时的NEMU模拟内存划分方式

PA 2-2 以后NEMU是怎么装载并运行程序的?

testcase/bin/add

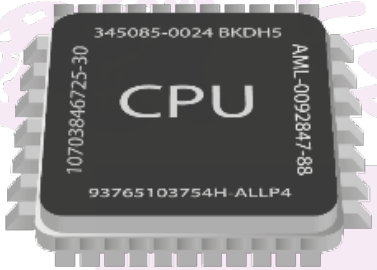
kernel/kernel.img

直接拷贝



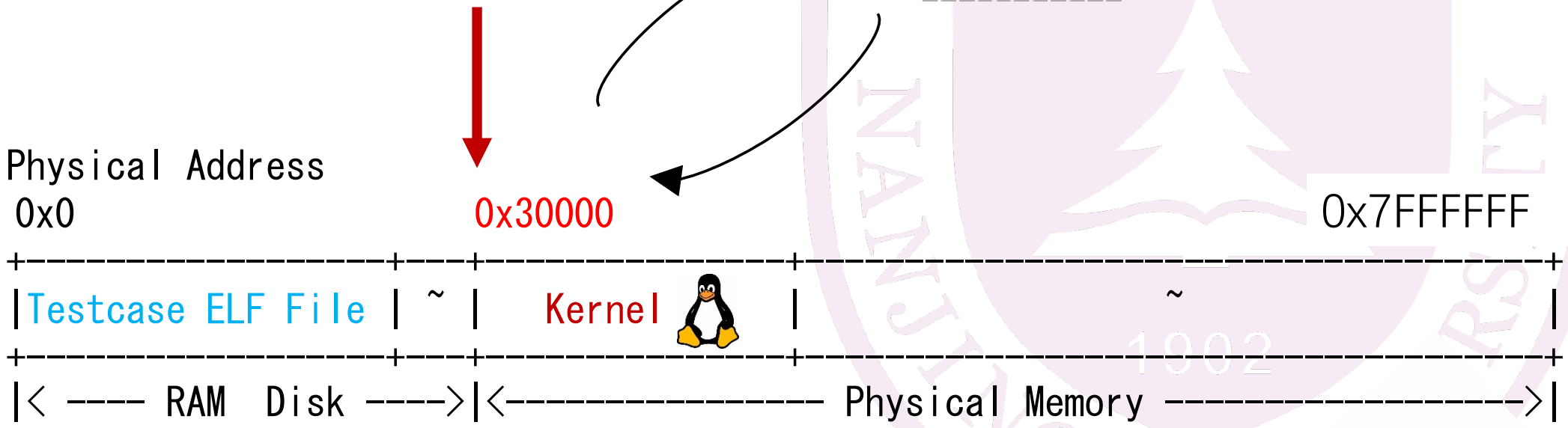
带有RAM Disk时的NEMU模拟内存划分方式

PA 2-2 以后NEMU是怎么装载并运行程序的?



模拟CPU先开始执行Kernel的指令

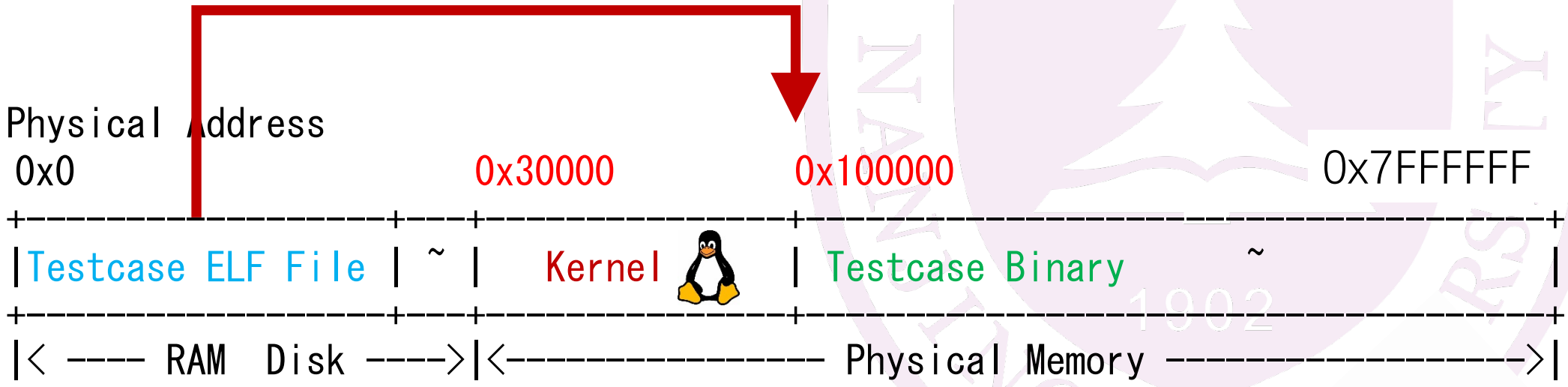
EIP初始值



带有RAM Disk时的NEMU模拟内存划分方式

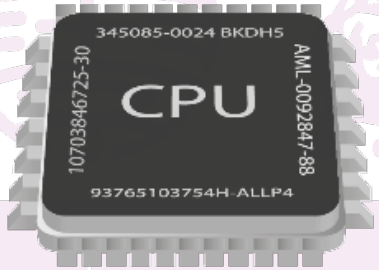
PA 2-2 以后NEMU是怎么装载并运行程序的?

由Kernel解析测试用例的ELF文件并装载



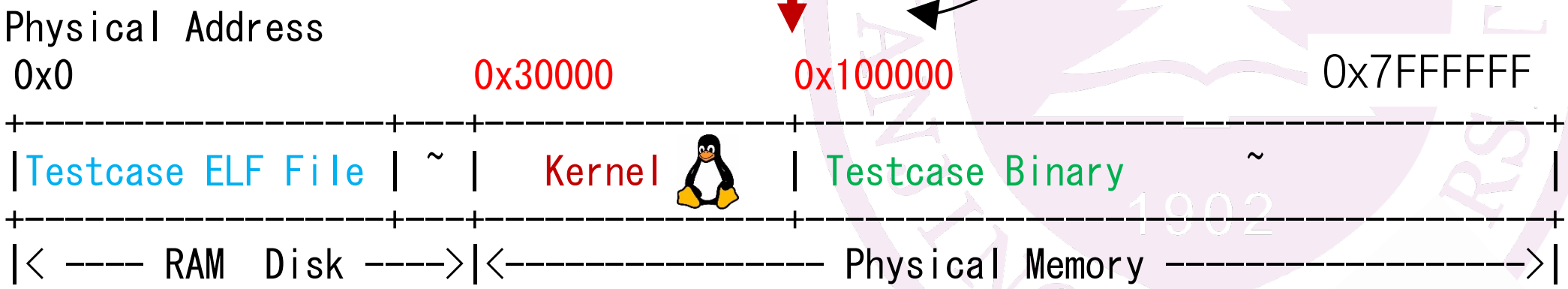
带有RAM Disk时的NEMU模拟内存划分方式

PA 2-2 以后NEMU是怎么装载并运行程序的?



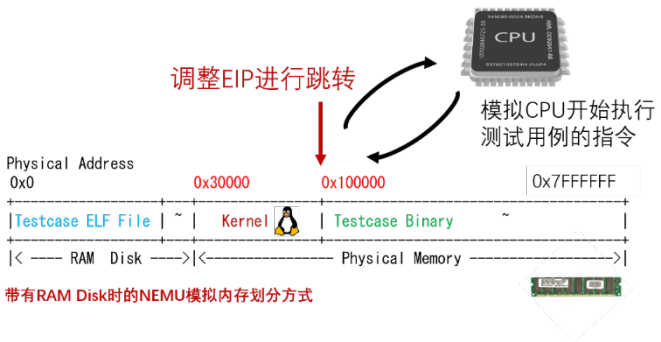
调整EIP进行跳转

模拟CPU开始执行
测试用例的指令



带有RAM Disk时的NEMU模拟内存划分方式

要点梳理



- 现阶段哪些文件是待装载的ELF文件?
- ELF文件是由谁装载的?
- 现阶段在NEMU启动后待装载的ELF文件位于何处?
- NEMU开机后执行的第一条指令是哪个地址？是哪个软件的指令?
- ELF文件被装载到哪个地址?
- 为了保证上述装载和执行地址的正确，需要修改Makefile（见后文）

Kernel装载程序

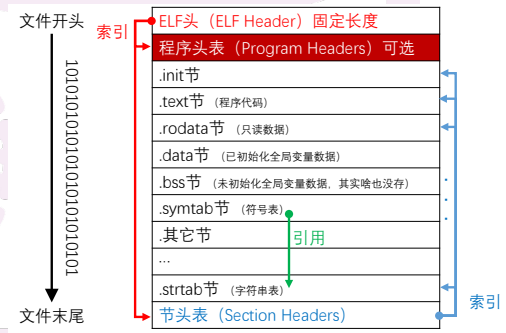
- 如何实现对ELF文件的装载
- 如何在Kernel中加入这一功能

Kernel装载程序

- 如何实现对ELF文件的装载
- 如何在Kernel中加入这一功能

装载程序的实现：解析程序头表

文件中的哪一部分（节）
搬到内存中的哪个位置（段）




```
Program Headers:
  Type           Offset   VirtAddr   PhysAddr   FileSiz MemSiz  Flg Align
  LOAD           0x001000 0x00030000 0x00030000 0x00154 0x00154 R E 0x1000
  LOAD           0x002000 0x00032000 0x00032000 0x00140 0x00140 RW  0x1000
  GNU_STACK      0x000000 0x00000000 0x00000000 0x00000 0x00000 RWE 0x10

 Section to Segment mapping:
  Segment Sections...
   00     .text .eh_frame
   01     .got.plt .data
   02
```

readelf -l filename

装载程序的实现：解析程序头表

Type指出ELF文件中节的类型，Type为LOAD表示需要装载

```
Program Headers:
  Type           Offset   VirtAddr   PhysAddr   FileSiz MemSiz  Flg Align
  LOAD           0x001000 0x00030000 0x00030000 0x00154 0x00154 R E 0x1000
  LOAD           0x002000 0x00032000 0x00032000 0x00140 0x00140 RW  0x1000
  GNU_STACK      0x000000 0x00000000 0x00000000 0x00000 0x00000 RWE 0x10

 Section to Segment mapping:
  Segment Sections...
   00     .text .eh_frame
   01     .got.plt .data
   02
```

`readelf -l filename`

装载程序的实现：解析程序头表

若Type为LOAD，则ELF文件中从文件Offset开始位置，连续FileSiz个字节的内容需要被装载

```
Program Headers:
  Type           Offset   VirtAddr   PhysAddr   FileSiz MemSiz  Flg Align
  LOAD           0x001000 0x00030000 0x00030000 0x00154 0x00154 R E 0x1000
  LOAD           0x002000 0x00032000 0x00032000 0x00140 0x00140 RW  0x1000
  GNU_STACK      0x000000 0x00000000 0x00000000 0x00000 0x00000 RWE 0x10

 Section to Segment mapping:
  Segment Sections...
   00     .text .eh_frame
   01     .got.plt .data
   02
```

`readelf -l filename`

装载程序的实现：解析程序头表

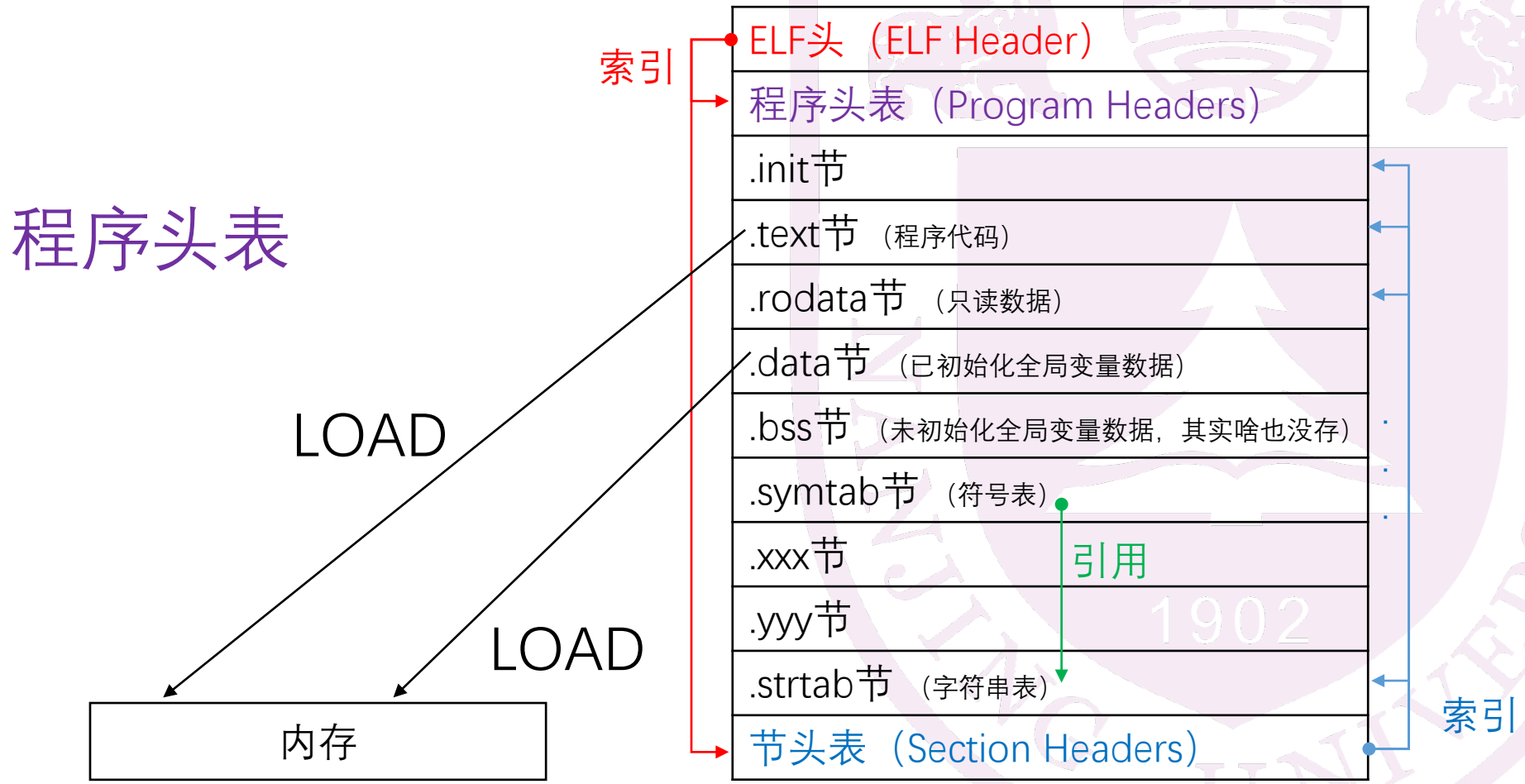
MemSiz可能大于FileSiz

装载到内存VirtAddr开始，连续MemSiz个字节的区域中

```
Program Headers:
  Type           Offset   VirtAddr   PhysAddr   FileSiz MemSiz  Flg Align
  LOAD           0x001000 0x00030000 0x00030000 0x00154 0x00154 R E 0x1000
  LOAD           0x002000 0x00032000 0x00032000 0x00140 0x00140 RW  0x1000
  GNU_STACK      0x000000 0x00000000 0x00000000 0x00000 0x00000 RWE 0x10

 Section to Segment mapping:
  Segment Sections...
   00     .text .eh_frame
   01     .got.plt .data
   02
```

`readelf -l filename`

装载程序的实现：解析程序头表



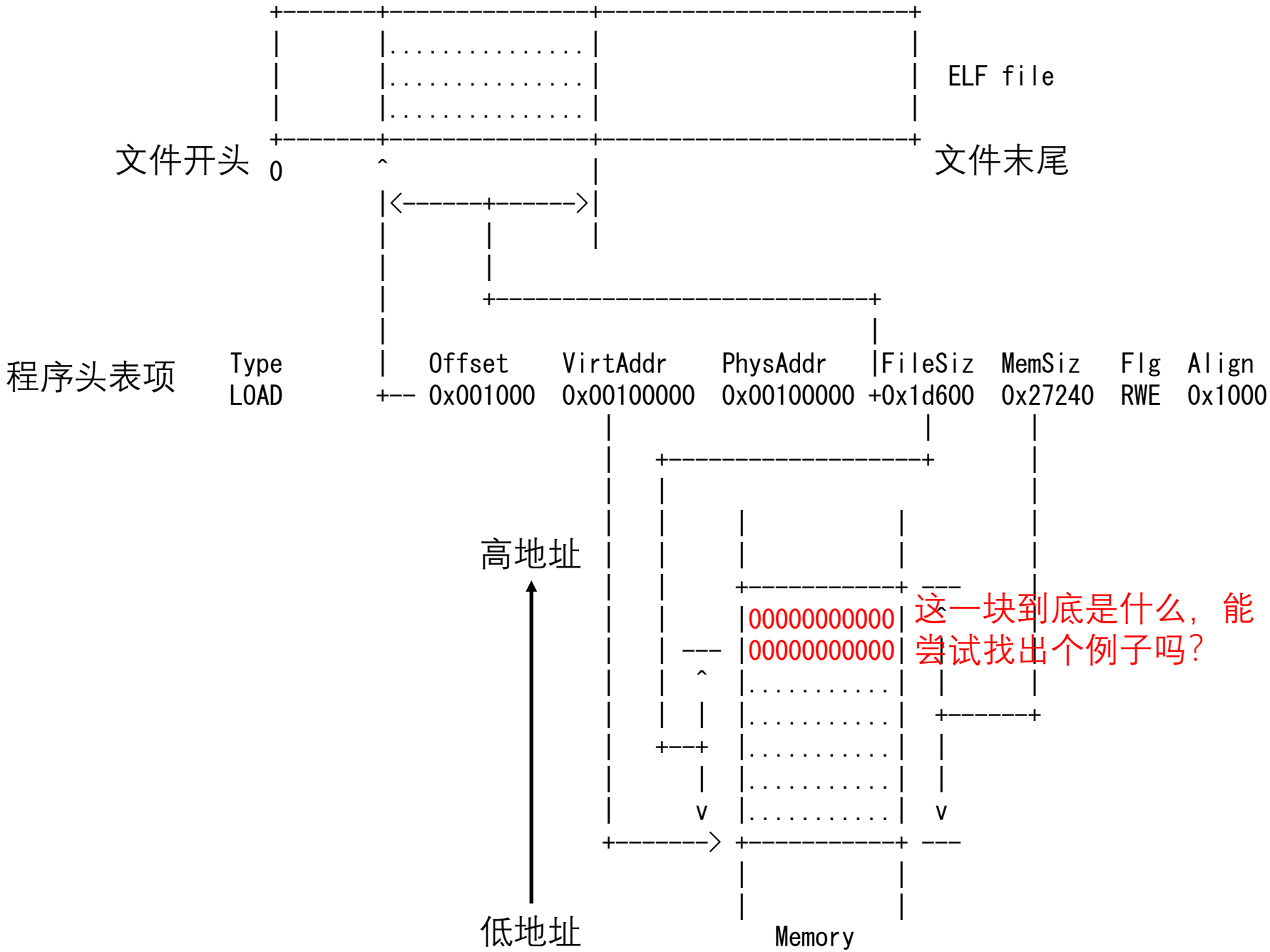
装载ELF可执行文件

- 所谓装载ELF可执行文件，就是把程序头表中，Type为LOAD类型的项目，把ELF文件中从Offset开始的FileSiz字节的内容，拷贝到内存VirtAddr开始的MemSiz大小的区域中

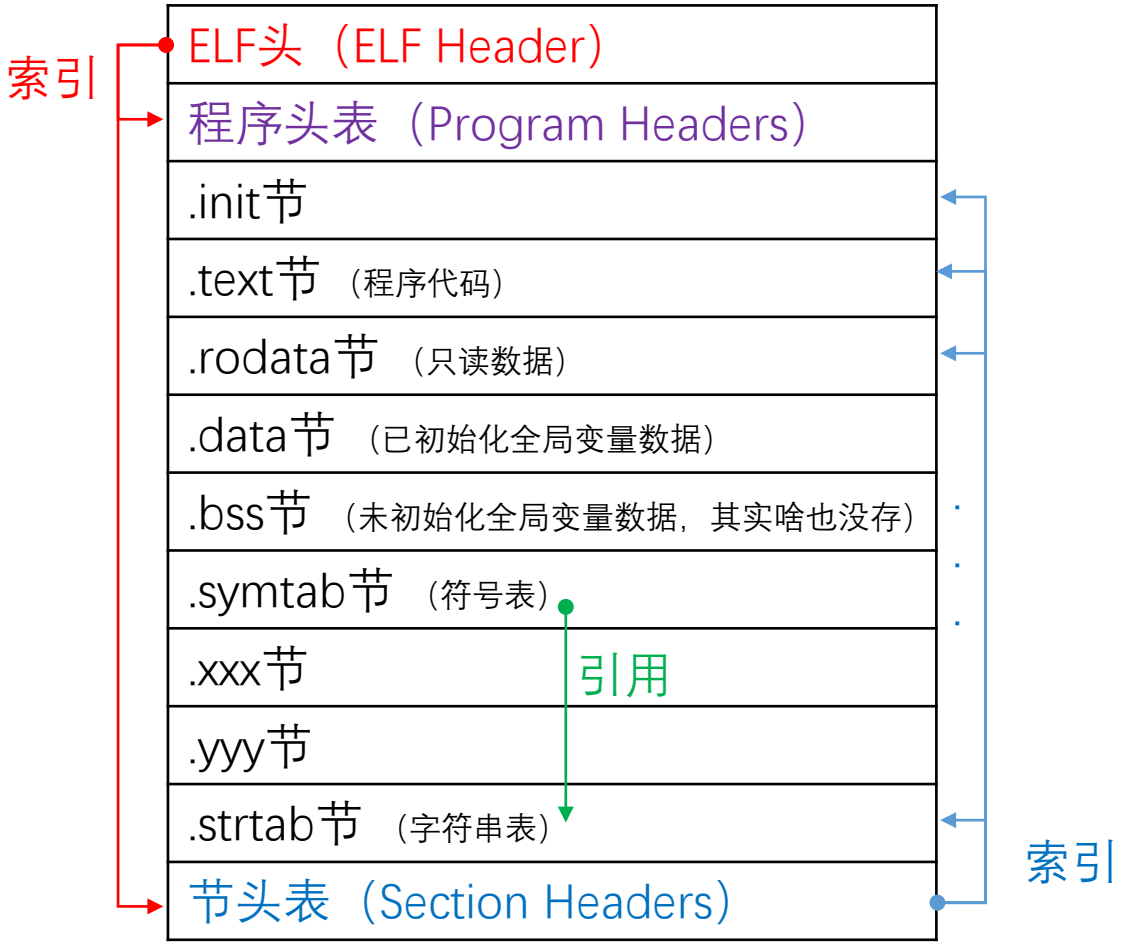
- 有时候MemSiz比FileSiz大？把内存中

  VirtAddr + [FileSiz, MemSiz]

  的区域清零


ELF file
文件开头
0
文件末尾
程序头表项
Type
LOAD
Offset
0x001000
VirtAddr
0x00100000
PhysAddr
0x00100000
FileSiz
0x1d600
MemSiz
0x27240
Flg
RWE
Align
0x1000
高地址
00000000000
00000000000
这一块到底是什么，能尝试找出个例子吗？
低地址
Memory

完整的装载逻辑

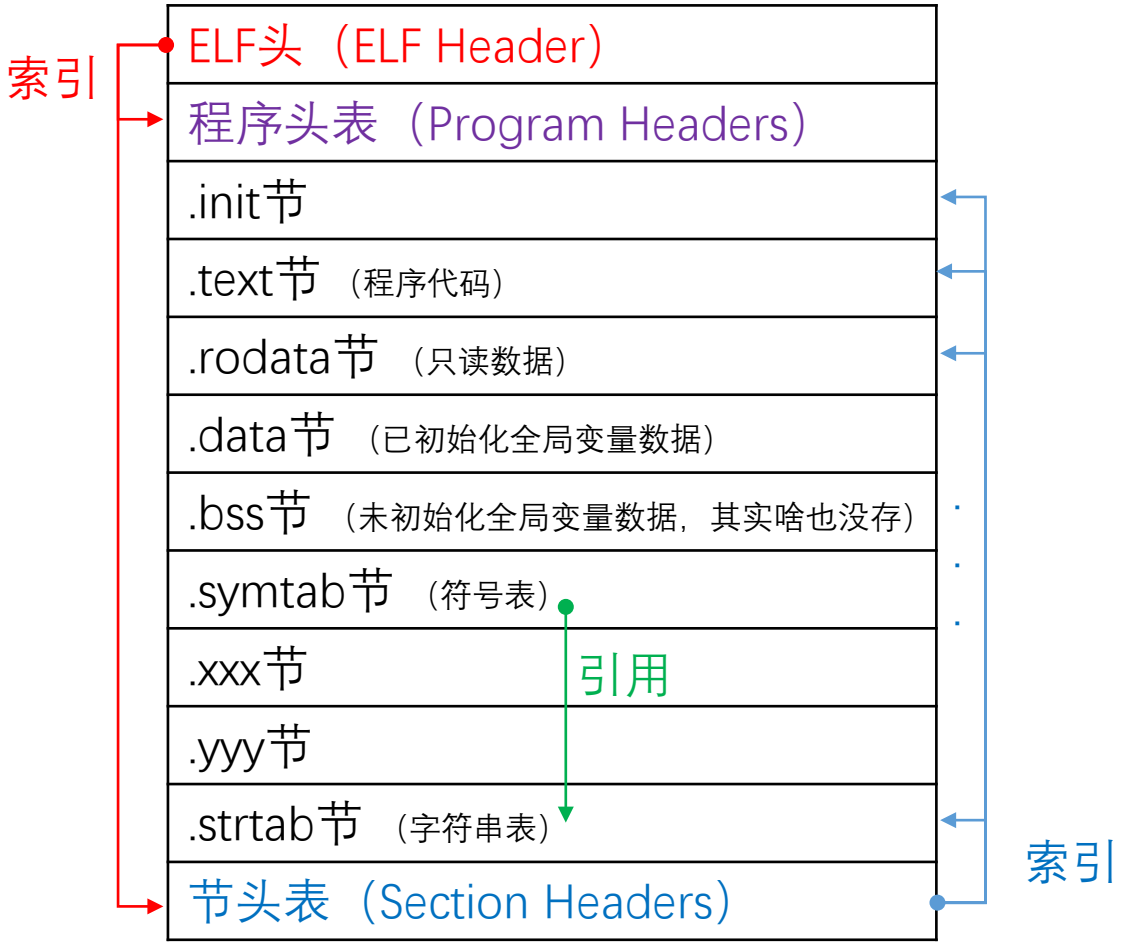


loader程序

输入： ELF文件
输出： 程序入口地址

1. 读入ELF头
2. 程序入口地址 = entry
3. 定位程序头表
4. for 程序头表中的每一项
5. if Type == Load then
6. 执行装载到内存
7. end if
8. end for
9. return 程序入口地址

完整的装载逻辑



loader程序

输入：ELF文件
输出：程序入口地址

1. **读入ELF头**
2. **程序入口地址 = entry**
3. **定位程序头表**
4. for 程序头表中的每一项
5. 　if Type == Load then
6. 　　执行装载到内存
7. 　end if
8. end for
9. **return 程序入口地址**

ELF头的编程解析

```
ELF Header:
  Magic:   7f 45 4c 46 01 01 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00
  Class:                             ELF32
  Data:                              2's complement, little endian
  Version:                           1 (current)
  OS/ABI:                            UNIX - System V
  ABI Version:                       0
  Type:                              EXEC (Executable file)
  Machine:                           Intel 80386
  Version:                           0x1
  Entry point address:               0x30000
  Start of program headers:          52 (bytes into file)
  Start of section headers:          18276 (bytes into file)
  Flags:                             0x0
  Size of this header:               52 (bytes)
  Size of program headers:           32 (bytes)
  Number of program headers:         3
  Size of section headers:           40 (bytes)
  Number of section headers:         15
  Section header string table index: 14
```

```
#define EI_NIDENT 16

typedef struct {
    unsigned char e_ident[EI_NIDENT];
    uint16_t      e_type;
    uint16_t      e_machine;
    uint32_t      e_version;
    ElfN_Addr     e_entry;
    ElfN_Off      e_phoff;
    ElfN_Off      e_shoff;
    uint32_t      e_flags;
    uint16_t      e_ehsize;
    uint16_t      e_phentsize;
    uint16_t      e_phnum;
    uint16_t      e_shentsize;
    uint16_t      e_shnum;
    uint16_t      e_shstrndx;
} ElfN_Ehdr;
```

ELF头，它位于整个ELF文件最开始的地方。在32位Linux系统中，<elf.h>头文件中的Elf32_Ehdr数据结构与之对应。

ELF头的编程解析

```
ELF Header:
  Magic:   7f 45 4c 46 01 01 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00
  Class:                             ELF32
  Data:                              2's complement, little endian
  Version:                           1 (current)
  OS/ABI:                            UNIX - System V
  ABI Version:                       0
  Type:                              EXEC (Executable f
  Machine:                           Intel 80386
  Version:                           0x1
  Entry point address:               0x30000
  Start of program headers:          52 (bytes into file)
  Start of section headers:          18276 (bytes into file)
  Flags:                             0x0
  Size of this header:               52 (bytes)
  Size of program headers:           32 (bytes)
  Number of program headers:         3
  Size of section headers:           40 (bytes)
  Number of section headers:         15
  Section header string table index: 14
```

入口地址

```
#define EI_NIDENT 16

typedef struct {
    unsigned char e_ident[EI_NIDENT];
    uint16_t      e_type;
    uint16_t      e_machine;
    uint32_t      e_version;
    ElfN_Addr     e_entry;
    ElfN_Off      e_phoff;
    ElfN_Off      e_shoff;
    uint32_t      e_flags;
    uint16_t      e_ehsize;
    uint16_t      e_phentsize;
    uint16_t      e_phnum;
    uint16_t      e_shentsize;
    uint16_t      e_shnum;
    uint16_t      e_shstrndx;
} ElfN_Ehdr;
```

ELF头，它位于整个ELF文件最开始的地方。在32位Linux系统中，<elf.h>头文件中的Elf32_Ehdr数据结构与之对应。

ELF头的编程解析

```
ELF Header:
  Magic:   7f 45 4c 46 01 01 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00
  Class:                             ELF32
  Data:                              2's complement, little endian
  Version:                           1 (current)
  OS/ABI:                            UNIX - System V
  ABI Version:                       0
  Type:                              EXEC (Executable file)
  Machine:                           Intel 80386
  Version:                           0x1
  Entry point address:               0x30000
  Start of program headers:          52 (bytes into file)
  Start of section headers:          18276 (bytes into file)
  Flags:                             0x0
  Size of this header:               52 (bytes)
  Size of program headers:           32 (bytes)
  Number of program headers:         3
  Size of section headers:           40 (bytes)
  Number of section headers:         15
  Section header string table index: 14
```

程序头表位置

```
#define EI_NIDENT 16

typedef struct {
    unsigned char e_ident[EI_NIDENT];
    uint16_t      e_type;
    uint16_t      e_machine;
    uint32_t      e_version;
    ElfN_Addr     e_entry;
    ElfN_Off      e_phoff;
    ElfN_Off      e_shoff;
    uint32_t      e_flags;
    uint16_t      e_ehsize;
    uint16_t      e_phentsize;
    uint16_t      e_phnum;
    uint16_t      e_shentsize;
    uint16_t      e_shnum;
    uint16_t      e_shstrndx;
} ElfN_Ehdr;
```

ELF头，它位于整个ELF文件最开始的地方。在32位Linux系统中，<elf.h>头文件中的Elf32_Ehdr数据结构与之对应。

ELF头的编程解析

kernel/src/elf/elf.c

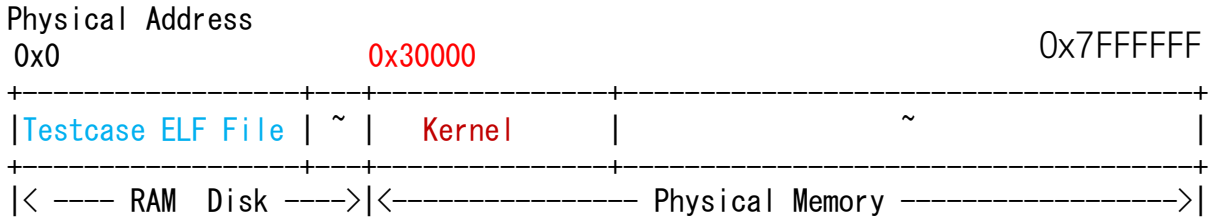
```
uint32_t loader() {
        Elf32_Ehdr *elf;
        Elf32_Phdr *ph, *eph;

#ifdef HAS_DEVICE_IDE
        … // 没有模拟硬盘
#else
        elf = (void *)0x0;
         // 模拟内存0x0处是RAM Disk，存放的就是testcase ELF file，最开始的部分是ELF头
        Log("ELF loading from ram disk.");
#endif
        ph = (void *)elf + elf->e_phoff;  // 找到ELF文件中的程序头表

        ...

        volatile uint32_t entry = elf->e_entry; // 头文件中指出的testcase起始地址，应该是0x60000
        return entry; // 返回testcase起始地址，在init_cond()后面执行((void(*)(void))eip)();
}
```

0x7FFFFFF

ELF头的编程解析

kernel/src/elf/elf.c

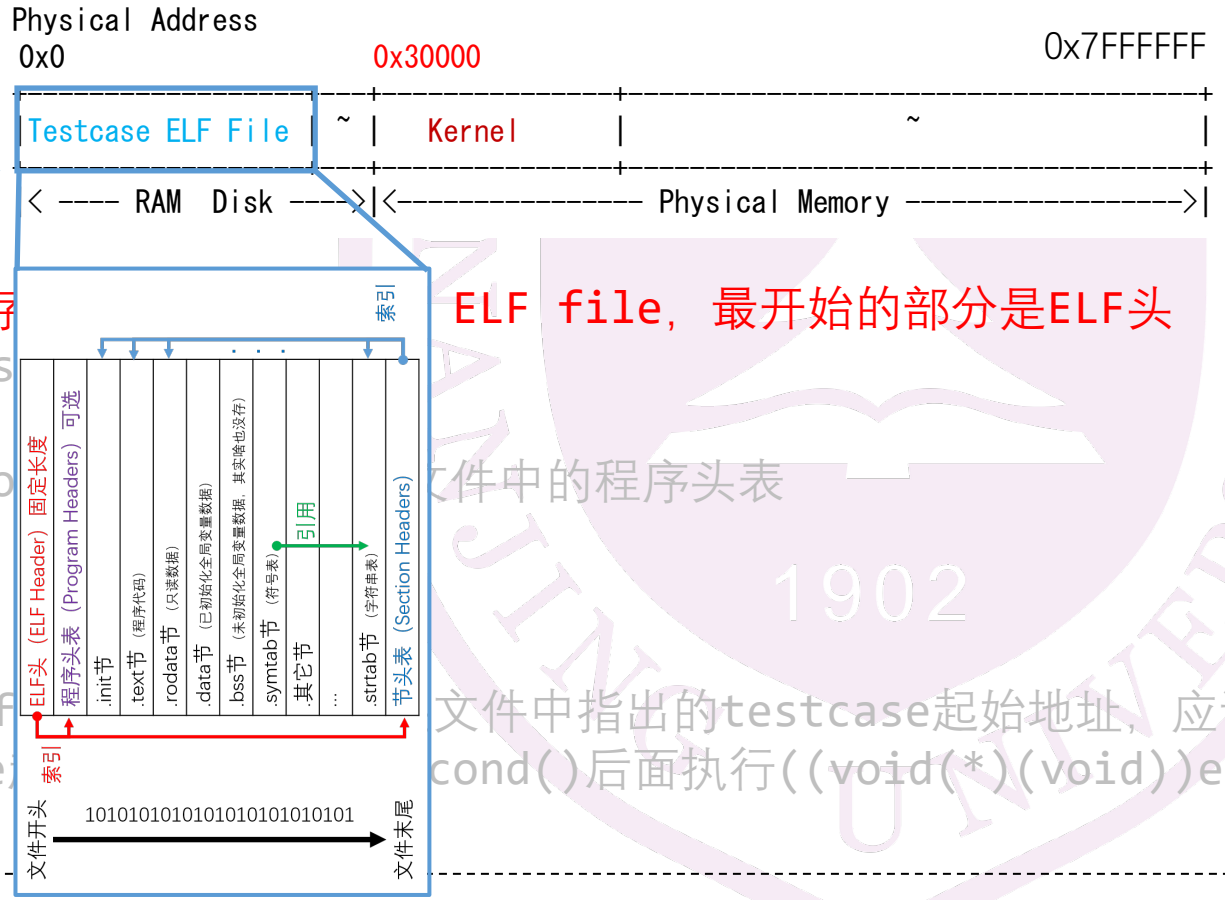
```
uint32_t loader() {
        Elf32_Ehdr *elf;
        Elf32_Phdr *ph, *eph;

#ifdef HAS_DEVICE_IDE
        … // 没有模拟硬盘
#else
        elf = (void *)0x0;
        // 模拟内存0x0处是RAM Disk，存放的就是testcase ELF file，最开始的部分是ELF头
        Log("ELF loading from ram disk.");
#endif
        ph = (void *)elf + elf->e_phoff;  // 找到ELF文件中的程序头表

        ...

        volatile uint32_t entry = elf->e_entry; // 头文件中指出的testcase起始地址，应该是0x60000
        return entry; // 返回testcase起始地址，在init_cond()后面执行((void(*)(void))eip)();
}
```



ELF头的编程解析

kernel/src/elf/elf.c

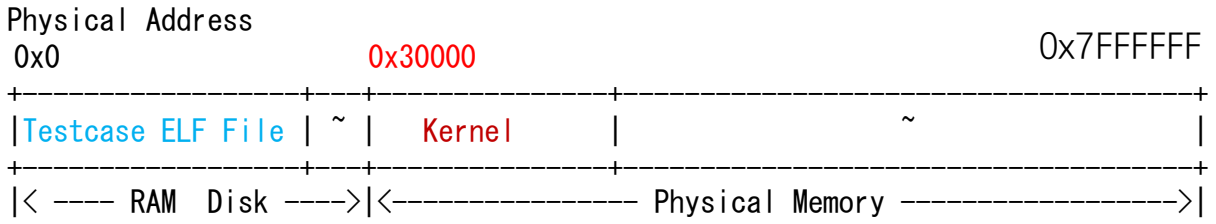
```
uint32_t loader() {
        Elf32_Ehdr *elf;
        Elf32_Phdr *ph, *eph;

#ifdef HAS_DEVICE_IDE
        … // 没有模拟硬盘
#else
        elf = (void *)0x0;
        // 模拟内存0x0处是RAM Disk，存                ELF file，最开始的部分是ELF头
        Log("ELF loading from ram dis
#endif
        ph = (void *)elf + elf->e_pho                文件中的程序头表

        ...

        volatile uint32_t entry = elf                文件中指出的testcase起始地址，应该是0x60000
        return entry; // 返回testcase                cond()后面执行((void(*)(void))eip)();
}
```



ELF头的编程解析

kernel/src/elf/elf.c

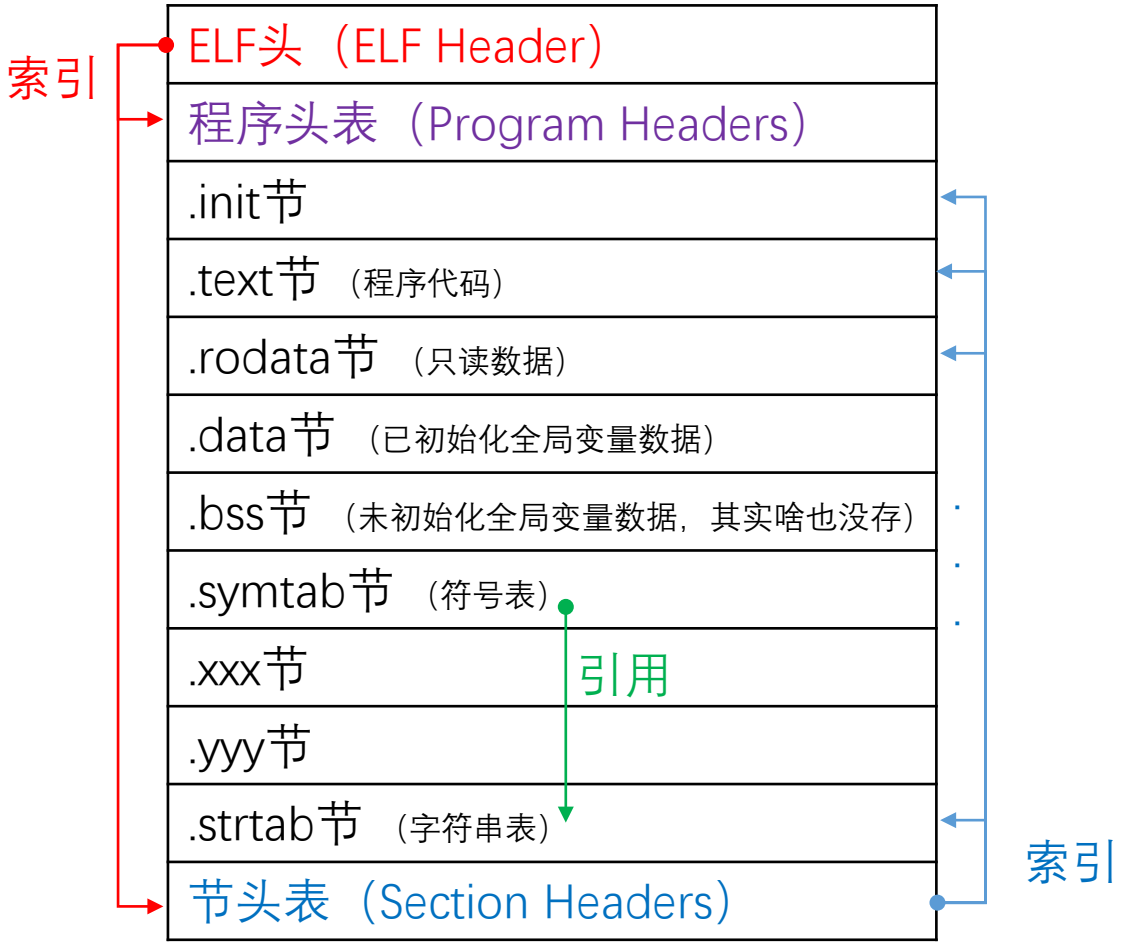
```
uint32_t loader() {
        Elf32_Ehdr *elf;
        Elf32_Phdr *ph, *eph;

#ifdef HAS_DEVICE_IDE
        … // 没有模拟硬盘
#else
        elf = (void *)0x0;
        // 模拟内存0x0处是RAM Disk，存放的就是testcase ELF file，最开始的部分是ELF头
        Lo
#endif
        ph

        ..

        vo
        re
}
```



要点：

- Kernel中访问变量语句编译后对应什么指令？
- 这条指令由谁执行？访问的地址是多少？
- 指令中的地址如何转换成对hw_mem[]的访问的？

完整的装载逻辑



loader程序

输入：ELF文件
输出：程序入口地址

1. 读入ELF头
2. 程序入口地址 = entry
3. **定位程序头表**
4. **for 程序头表中的每一项**
5. **　if Type == Load then**
6. **　　执行装载到内存**
7. **　end if**
8. **end for**
9. return 程序入口地址

程序头表的编程解析

kernel/src/elf/elf.c

```
uint32_t loader() {
        Elf32_Ehdr *elf;
        Elf32_Phdr *ph, *eph;

#ifdef HAS_DEVICE_IDE
        … // 没有模拟硬盘
#else
        elf = (void *)0x0;
        // 模拟内存0x0处是RAM Disk，存放的就是testcase ELF file，最开始的部分是ELF头
        Log("ELF loading from ram disk.");
#endif
        ph = (void *)elf + elf->e_phoff;  // 找到ELF文件中的程序头表

        ...

        volatile uint32_t entry = elf->e_entry; // 头文件中指出的testcase起始地址，应该是0x60000
        return entry; // 返回testcase起始地址，在init_cond()后面执行((void(*)(void))eip)();
}
```

程序头表的编程解析

```
Program Headers:
  Type           Offset   VirtAddr   PhysAddr   FileSiz MemSiz  Flg Align
  LOAD           0x001000 0x00030000 0x00030000 0x00154 0x00154 R E 0x1000
  LOAD           0x002000 0x00032000 0x00032000 0x00140 0x00140 RW  0x1000
  GNU_STACK      0x000000 0x00000000 0x00000000 0x00000 0x00000 RWE 0x10

 Section to Segment mapping:
  Segment Sections...
   00     .text .eh_frame
   01     .got.plt .data
   02
```

```
typedef struct {
        uint32_t   p_type;
        Elf32_Off  p_offset;
        Elf32_Addr p_vaddr;
        Elf32_Addr p_paddr;
        uint32_t   p_filesz;
        uint32_t   p_memsz;
        uint32_t   p_flags;
        uint32_t   p_align;
} Elf32_Phdr;
```

Elf32_Phdr类型的一个数组
Elf32_Phdr定义在<elf.h>

程序头表的编程解析

kernel/src/elf/elf.c

```
uint32_t loader() {
        ...

        /* Load each program segment */
        ph = (void *)elf + elf->e_phoff;  // 找到ELF文件中的程序头表
        eph = ph + elf->e_phnum;
        for(; ph < eph; ph ++) {// 扫描程序头表中的各个表项
                if(ph->p_type == PT_LOAD) {// 如果类型是LOAD，那么就去装载吧

                        panic("Please implement the loader");

                /* TODO: copy the segment from the ELF file to its proper memory area */

                /* TODO: zeror the memory area [vaddr + file_sz, vaddr + mem_sz) */
                        #ifdef IA32_PAGE
                                … // 没有开启分页
                        #endif
                }
        }

        ...
}
```

kernel/src/elf/elf.c

```
uint32_t loader() {
        Elf32_Ehdr *elf;
        Elf32_Phdr *ph, *eph;

#ifdef HAS_DEVICE_IDE
        … // 没有模拟硬盘
#else
        elf = (void *)0x0;     // 模拟内存0x0处是RAM Disk，存放的就是testcase ELF file，最开始的部分是ELF头
        Log("ELF loading from ram disk.");
#endif

        /* Load each program segment */
        ph = (void *)elf + elf->e_phoff;  // 找到ELF文件中的程序头表
        eph = ph + elf->e_phnum;
        for(; ph < eph; ph ++) {// 扫描程序头表中的各个表项
                if(ph->p_type == PT_LOAD) {// 如果类型是LOAD，那么就去装载吧
                        panic("Please implement the loader");
                        /* TODO: copy the segment from the ELF file to its proper memory area */
                        /* TODO: zeror the memory area [vaddr + file_sz, vaddr + mem_sz) */
                        #ifdef IA32_PAGE
                            … // 没有开启分页
                        #endif
                }
        }

        volatile uint32_t entry = elf->e_entry; // 头文件中指出的testcase起始地址，应该是0x60000
        … //现在不管
        return entry; // 返回testcase起始地址，在init_cond()后面执行((void(*)(void))eip)();
}
```

Kernel装载程序

- 如何实现对ELF文件的装载
- 如何在Kernel中加入这一功能

Kernel执行loader()

- Kernel的行为
  - 从kernel/start/start.S开始

```
#ifndef IA32_SEG     // 没在include/config.h中define IA32_SEG，因此编译这个分支

        .globl start
        start:
                jmp init                                # never return
```

kernel/start/start.S

Kernel执行loader()

- Kernel的行为
  - 转到了kernel/src/main.c

kernel/src/main.c

```
void init() {
#ifdef IA32_PAGE
        ...
#endif

        /* Jump to init_cond() to continue initialization. */
        // need to plus the offset 0xc0000000 if using gcc-6, strange
#ifdef IA32_PAGE
        asm volatile("jmp *%0" : : "r"(init_cond + 0xc0000000));
#else
        asm volatile(“jmp *%0” : : “r”(init_cond)); // 就执行了这一句
#endif


        /* Should never reach here. */
        nemu_assert(0);
}
```

Kernel执行loader()

kernel/src/main.c

```
void init_cond() {
        … //前面全跳过

        /* Output a welcome message.
         * Note that the output is actually performed only when
         * the serial port is available in NEMU.
         */
        Log("Hello, NEMU world!"); // 输出一下子，其工作原理直到PA 4才去弄明白

        … //中间全跳过

        /* Load the program. */
        uint32_t eip = loader(); // 装载测试用例，PA 2-2就是要实现这个

        … //中间全跳过

        /* Here we go! */
        ((void(*)(void))eip)(); // 包装成函数指针，跑去执行测试用例

}
```

kernel/src/elf/elf.c

```
uint32_t loader() {
        Elf32_Ehdr *elf;
        Elf32_Phdr *ph, *eph;

#ifdef HAS_DEVICE_IDE
        … // 没有模拟硬盘
#else
        elf = (void *)0x0;     // 模拟内存0x0处是RAM Disk，存放的就是testcase ELF file，最开始的部分是ELF头
        Log("ELF loading from ram disk.");
#endif

        /* Load each program segment */
        ph = (void *)elf + elf->e_phoff;  // 找到ELF文件中的程序头表
        eph = ph + elf->e_phnum;
        for(; ph < eph; ph ++) {// 扫描程序头表中的各个表项
                if(ph->p_type == PT_LOAD) {// 如果类型是LOAD，那么就去装载吧
                        panic("Please implement the loader");
                        /* TODO: copy the segment from the ELF file to its proper memory area */
                        /* TODO: zeror the memory area [vaddr + file_sz, vaddr + mem_sz) */
                        #ifdef IA32_PAGE
                            … // 没有开启分页
                        #endif
                }
        }

        volatile uint32_t entry = elf->e_entry; // 头文件中指出的testcase起始地址，应该是0x60000
        … //现在不管
        return entry; // 返回testcase起始地址，在init_cond()后面执行((void(*)(void))eip)();
}
```

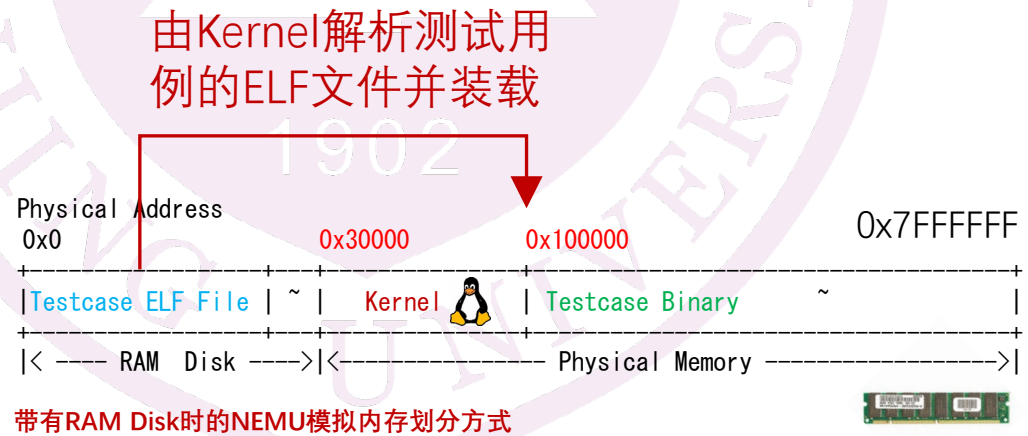
PA执行命令的改变，加入Kernel

修改testcase/Makefile中的链接选项，make clean后重新编译

```
#LDFLAGS := -m elf_i386 -e start -Ttext=0x30000
LDFLAGS := -m elf_i386 -e start -Ttext=0x100000
```

```
$ make run-kernel
$ make test_pa-2-2
```

```
run-kernel: nemu
	$(call git_commit, "run-kernel")
	./nemu/nemu --kernel --testcase add
```



带有RAM Disk时的NEMU模拟内存划分方式

PA 2-2 执行成功的标志

- 如果loader()实现正确，且指令实现都正确
  - 执行make run-kernel或make test_pa-2-2

```
icspa-public$ make clean
icspa-public$ make test_pa-2-2
...
./nemu/nemu --autorun --testcase string --kernel
NEMU load and execute img: ./kernel/kernel.img  elf: ./testcase/bin/string
nemu trap output: [src/main.c,82,init_cond] {kernel} Hello, NEMU world!
nemu trap output: [src/elf/elf.c,30,loader] {kernel} ELF loading from ram disk.
nemu: HIT GOOD TRAP at eip = 0x0010016a
NEMU2 terminated
./nemu/nemu --autorun --testcase hello-str  --kernel
NEMU load and execute img: ./kernel/kernel.img  elf: ./testcase/bin/hello-str
nemu trap output: [src/main.c,82,init_cond] {kernel} Hello, NEMU world!
nemu trap output: [src/elf/elf.c,30,loader] {kernel} ELF loading from ram disk.
nemu: HIT GOOD TRAP at eip = 0x00100105
NEMU2 terminated
./nemu/nemu --autorun --testcase test-float --kernel
NEMU load and execute img: ./kernel/kernel.img  elf: ./testcase/bin/test-float
nemu trap output: [src/main.c,82,init_cond] {kernel} Hello, NEMU world!
nemu trap output: [src/elf/elf.c,30,loader] {kernel} ELF loading from ram disk.
nemu: HIT BAD TRAP at eip = 0x001000c8
NEMU2 terminated
```

除了test-float，其它都是HIT GOOD TRAP

实用小贴士

- 如果使用make test系列命令
  - 不会进入交互界面，调试有困难
  - 可以使用BREAK_POINT宏强制进入交互模式
  - 参考群里的ui.c，实现简易的x扫描内存命令

```
#ifndef IA32_SEG

        .globl start
start:
                BREAK_POINT #每次一进Kernel就break，进入交互模式
                jmp init                                    # never return
```

PA 2-2到此结束

祝大家学习快乐，身心健康！

PA 2-2 截止时间

2022年04月21日24时

目录

- 认识ELF文件
- PA 2-2 - 程序的装载 -> ELF文件程序头表的解析
- PA 2-3 - 调试器符号表解析 -> ELF文件符号表的解析

符号表的解析

- 要解决的问题：

给定一个符号（如，全局变量）的名字，
返回其在内存中的值

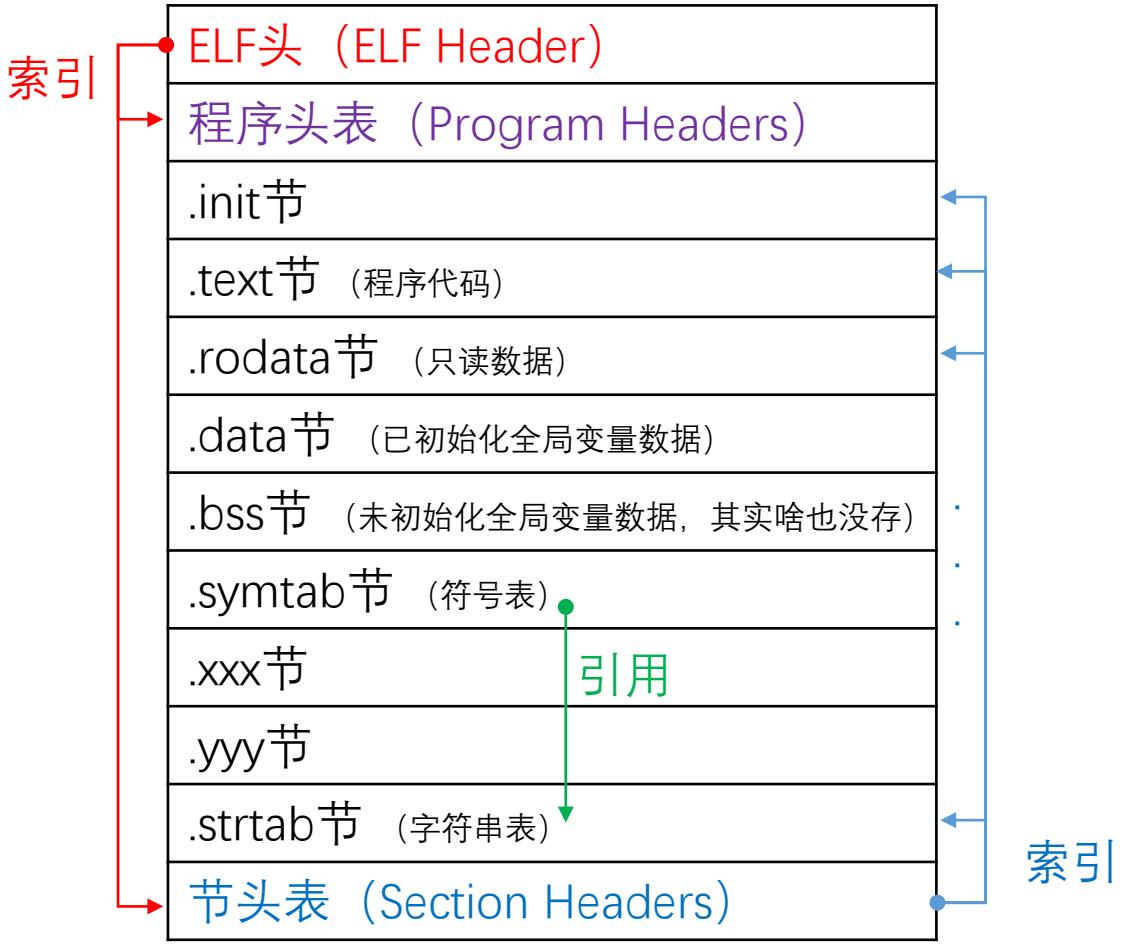
testcase/src/add.c

```
int test_data[] = {0, 1, 2, 0x7fffffff, 0x80000000, 0x80000001,
0xfffffffe, 0xffffffff};
```

NEMU中的交互式调试界面

```
(nemu) x 4 test_data
n = 4, expr = test_data
0x00032020:     0x00000000 0x00000001 0x00000002 0x7fffffff
```

符号表的解析

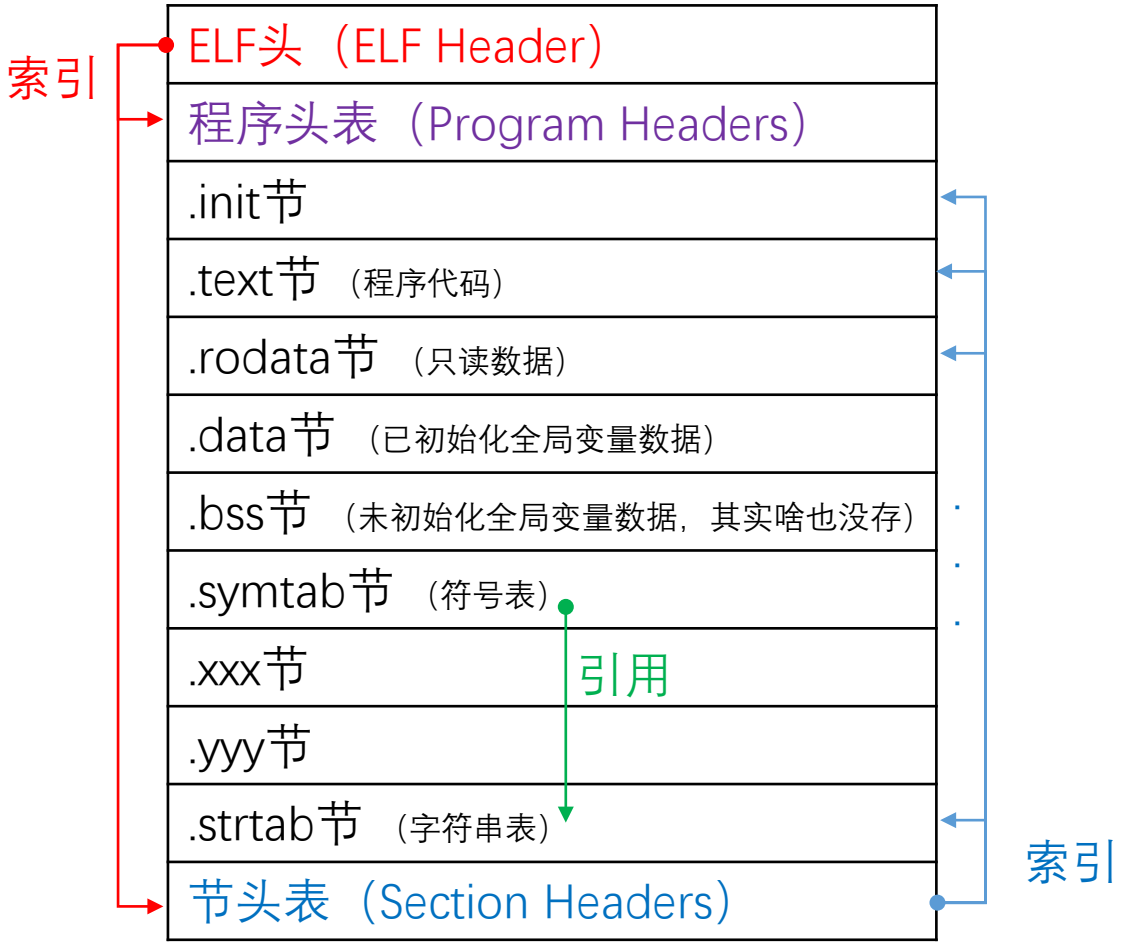


符号表解析程序

输入：ELF文件，带查询符号名
输出：符号在内存中的地址

1. 读入ELF头
2. 定位符号表
3. for 符号表中的每一项
4. 　if 该项名 == 带查询符号名
5. 　　return 查找成功，符号的内存地址
6. 　end if
7. end for
8. return 查找失败

符号表的解析



符号表解析程序

输入：ELF文件，带查询符号名
输出：符号在内存中的地址

1. **读入ELF头**
2. **定位符号表**
3. for 符号表中的每一项
4. 　　if 该项名 == 带查询符号名
5. 　　　　return 查找成功，符号的内存地址
6. 　　end if
7. end for
8. return 查找失败

ELF头的编程解析

```
ELF Header:
  Magic:   7f 45 4c 46 01 01 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00
  Class:                             ELF32
  Data:                              2's complement, little endian
  Version:                           1 (current)
  OS/ABI:                            UNIX - System V
  ABI Version:                       0
  Type:                              EXEC (Executable file)
  Machine:                           Intel 80386
  Version:                           0x1
  Entry point address:               0x30000
  Start of program headers:          52 (bytes into file)
  Start of section headers:          18276 (bytes into file)
  Flags:                             0x0
  Size of this header:               52 (bytes)
  Size of program headers:           32 (bytes)
  Number of program headers:         3
  Size of section headers:           40 (bytes)
  Number of section headers:         15
  Section header string table index: 14
```

节头表位置

节头表对应字符串表的索引

```
#define EI_NIDENT 16

typedef struct {
    unsigned char e_ident[EI_NIDENT];
    uint16_t      e_type;
    uint16_t      e_machine;
    uint32_t      e_version;
    ElfN_Addr     e_entry;
    ElfN_Off      e_phoff;
    ElfN_Off      e_shoff;
    uint32_t      e_flags;
    uint16_t      e_ehsize;
    uint16_t      e_phentsize;
    uint16_t      e_phnum;
    uint16_t      e_shentsize;
    uint16_t      e_shnum;
    uint16_t      e_shstrndx;
} ElfN_Ehdr;
```

ELF头，它位于整个ELF文件最开始的地方。在32位Linux系统中，<elf.h>头文件中的Elf32_Ehdr数据结构与之对应。

解析节头表，找到符号表和字符串表

找到名为‘.symtab’的符号表和名为‘.strtab’的（对应节头表的）字符串表

```
Section Headers:
  [Nr] Name              Type            Addr     Off    Size   ES Flg Lk Inf Al
  [ 0]                   NULL            00000000 000000 000000 00      0   0  0
  [ 1] .text             PROGBITS        00030000 001000 0000d0 00  AX  0   0  1
  [ 2] .eh_frame         PROGBITS        000300d0 0010d0 000084 00   A  0   0  4
  [ 3] .got.plt          PROGBITS        00032000 002000 00000c 04  WA  0   0  4
  [ 4] .data             PROGBITS        00032020 002020 000120 00  WA  0   0 32
  [ 5] .comment          PROGBITS        00000000 002140 000026 01  MS  0   0  1
  [ 6] .debug_aranges    PROGBITS        00000000 002168 000040 00      0   0  8
  [ 7] .debug_info       PROGBITS        00000000 0021a8 000142 00      0   0  1
  [ 8] .debug_abbrev     PROGBITS        00000000 0022ea 0000d6 00      0   0  1
  [ 9] .debug_line       PROGBITS        00000000 0023c0 0000dc 00      0   0  1
  [10] .debug_str        PROGBITS        00000000 00249c 001a37 01  MS  0   0  1
  [11] .debug_           PROGBITS        00000000 003ed3 0005f9 00      0   0  1
  [12] .symtab           SYMTAB          00000000 0044cc 000190 10     13  15  4
  [13] .strtab           STRTAB          00000000 00465c 000078 00      0   0  1
  [14] .shstrtab         STRTAB          00000000 0046d4 000090 00      0   0  1
Key to Flags:
  W (write), A (alloc), X (execute), M (merge), S (strings), I (info),
  L (link order), O (extra OS processing required), G (group), T (TLS),
  C (compressed), x (unknown), o (OS specific), E (exclude),
  p (processor specific)

There are no section groups in this file.
```

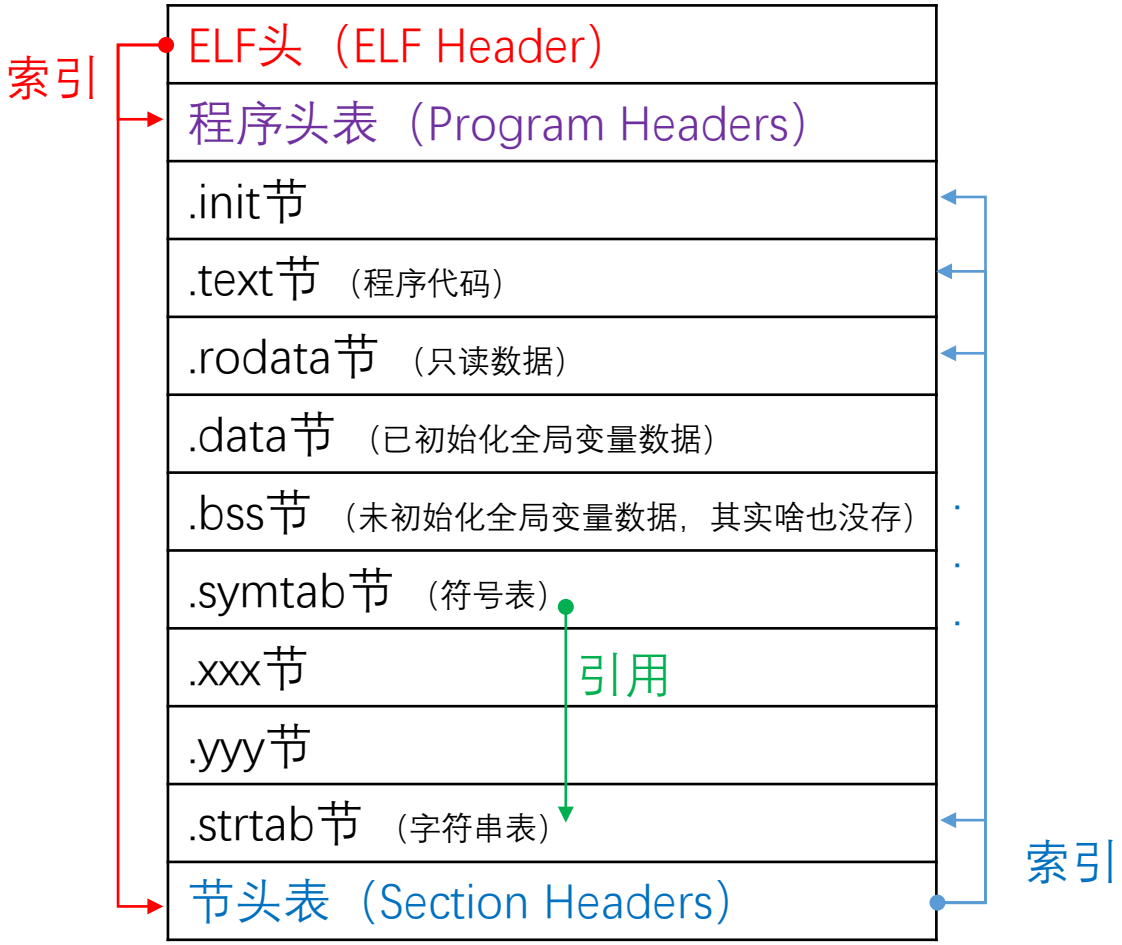
<elf.h>

```
typedef struct {
        uint32_t   sh_name;
        uint32_t   sh_type;
        uint32_t   sh_flags;
        Elf32_Addr sh_addr;
        Elf32_Off  sh_offset;
        uint32_t   sh_size;
        uint32_t   sh_link;
        uint32_t   sh_info;
        uint32_t   sh_addralign;
        uint32_t   sh_entsize;
} Elf32_Shdr;
```

这里的sh_name只是一个索引值，只有用该索引值去查了.shstrtab之后才能得到.text, .data这样的字符串，而.shstrtab在哪里呢？ELF Header中的e_shstrndx变量告诉我们，它在Section Headers数组中的第14项

具体技术和符号表+字符串表解析方式一样

符号表的解析



符号表解析程序

输入：ELF文件，带查询符号名
输出：符号在内存中的地址

1. 读入ELF头
2. 定位符号表
3. **for 符号表中的每一项**
4. **　if 该项名 == 带查询符号名**
5. **　　return 查找成功，符号的内存地址**
6. **　end if**
7. **end for**
8. **return 查找失败**

符号表的解析

- 通过节头表定位'.symtab'节在ELF文件中的位置
- 符号表也是个数组，其类型为Elf32_Sym

```
Section Headers:
  [Nr] Name              Type            Addr     Off    Size   ES Flg Lk Inf Al
  [12] .symtab           SYMTAB          00000000 0044cc 000190 10     13  15  4
```

<elf.h>

```
typedef struct {
    uint32_t      st_name;
    Elf32_Addr    st_value;
    uint32_t      st_size;
    unsigned char st_info;
    unsigned char st_other;
    uint16_t      st_shndx;
} Elf32_Sym;
```

st_name – 符号名称，对应strtab中的偏移量
st_value – 符号的地址
st_size - 符号所占用的字节数
st_info – 包含了Type信息，man elf查看说明

readelf –s add

```
Symbol table '.symtab' contains 25 entries:
   Num:    Value  Size Type    Bind   Vis      Ndx Name
     0: 00000000     0 NOTYPE  LOCAL  DEFAULT  UND
     1: 00030000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    1
     2: 000300d0     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    2
     3: 00032000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    3
     4: 00032020     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    4
     5: 00000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    5
     6: 00000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    6
     7: 00000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    7
     8: 00000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    8
     9: 00000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    9
    10: 00000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT   10
    11: 00000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT   11
    12: 00000000     0 FILE    LOCAL  DEFAULT  ABS add.c
    13: 00000000     0 FILE    LOCAL  DEFAULT  ABS
    14: 00032000     0 OBJECT  LOCAL  DEFAULT    3 _GLOBAL_OFFSET_TABLE_
    15: 000300c8     0 FUNC    GLOBAL HIDDEN     1 __x86.get_pc_thunk.ax
    16: 00030005    32 FUNC    GLOBAL DEFAULT    1 add
    17: 000300cc     0 FUNC    GLOBAL HIDDEN     1 __x86.get_pc_thunk.bx
    18: 00032140     0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT    4 __bss_start
    19: 00030025   163 FUNC    GLOBAL DEFAULT    1 main
    20: 00032040   256 OBJECT  GLOBAL DEFAULT    4 ans
    21: 00032140     0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT    4 _edata
    22: 00032140     0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT    4 _end
    23: 00030000     0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT    1 start
    24: 00032020    32 OBJECT  GLOBAL DEFAULT    4 test_data
```

testcase/src/add.c

```
int test_data[] = {0, 1, 2,
0x7fffffff, 0x80000000,
0x80000001, 0xfffffffe,
0xffffffff};
```

符号表的解析

- 符号表(.symtab)与字符串表(.strtab)结合，获取符号的字符串形式的名称

```
Section Headers:
  [Nr] Name              Type            Addr     Off    Size   ES Flg Lk Inf Al
  [13] .strtab           STRTAB          00000000 00465c 000078 00      0   0  1
```

hexdump –C add

```
00004650  20 20 03 00 20 00 00 00  11 00 04 00 00 61 64 64  |  .. ........add|
00004660  2e 63 00 5f 47 4c 4f 42  41 4c 5f 4f 46 46 53 45  |.c._GLOBAL_OFFSE|
00004670  54 5f 54 41 42 4c 45 5f  00 5f 5f 78 38 36 2e 67  |T_TABLE_.__x86.g|
00004680  65 74 5f 70 63 5f 74 68  75 6e 6b 2e 61 78 00 61  |et_pc_thunk.ax.a|
00004690  64 64 00 5f 5f 78 38 36  2e 67 65 74 5f 70 63 5f  |dd.__x86.get_pc_|
000046a0  74 68 75 6e 6b 2e 62 78  00 5f 5f 62 73 73 5f 73  |thunk.bx.__bss_s|
000046b0  74 61 72 74 00 6d 61 69  6e 00 61 6e 73 00 5f 65  |tart.main.ans._e|
000046c0  64 61 74 61 00 5f 65 6e  64 00 74 65 73 74 5f 64  |data._end.test_d|
000046d0  61 74 61 00 00 2e 73 79  6d 74 61 62 00 2e 73 74  |ata...symtab..st|
```

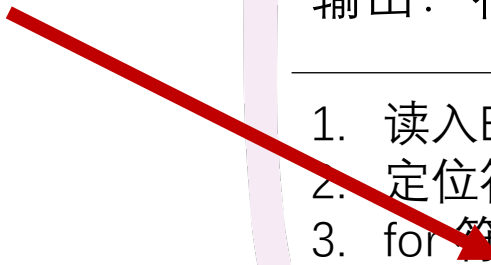
'\0'

```
Symbol table '.symtab' contains 25 entries:
   Num:    Value  Size Type    Bind   Vis      Ndx Name
    24: 00032020    32 OBJECT  GLOBAL DEFAULT    4 6d
```

```
typedef struct {
    uint32_t      st_name;
    Elf32_Addr    st_value;
    uint32_t      st_size;
    unsigned char st_info;
    unsigned char st_other;
    uint16_t      st_shndx;
} Elf32_Sym;
```

符号表的解析

.strtab在ELF文件中起始位置 + 符号表项.st_name => 字符串



符号表解析程序

输入：ELF文件，带查询符号名
输出：符号在内存中的地址

1. 读入ELF头
2. 定位符号表
3. for 符号表中的每一项
4. **if 该项名 == 带查询符号名**
5. return 查找成功，符号的内存地址
6. end if
7. end for
8. return 查找失败

NEMU相关代码

nemu/src/monitor/elf.c

```
uint32_t look_up_symtab(char *sym, bool *success) {
        int i;
        for(i = 0; i < nr_symtab_entry; i ++) {
                uint8_t type = ELF32_ST_TYPE(symtab[i].st_info);
                if((type == STT_FUNC || type == STT_OBJECT) &&
                                strcmp(strtab + symtab[i].st_name, sym) == 0) {
                        *success = true;
                        return symtab[i].st_value;
                }
        }

        *success = false;
        return 0;
}
```

NEMU相关代码

nemu/src/monitor/elf.c

找到名为.symtab的符号表和名为.strtab的字符串表

```
/* Load section header table 读取节头表 */
uint32_t sh_size = elf->e_shentsize * elf->e_shnum;
Elf32_Shdr *sh = malloc(sh_size);
fseek(fp, elf->e_shoff, SEEK_SET);
fread(sh, sh_size, 1, fp);

/* Load section header string table 读取节头表对应的字符串表 */
char *shstrtab = malloc(sh[elf->e_shstrndx].sh_size);
fseek(fp, sh[elf->e_shstrndx].sh_offset, SEEK_SET);
fread(shstrtab, sh[elf->e_shstrndx].sh_size, 1, fp);

int i;
for(i = 0; i < elf->e_shnum; i ++) { /*  扫描节头表  */
        if(sh[i].sh_type == SHT_SYMTAB &&   这一步和解析符号名称时的操作一样，等一下细讲
                        strcmp(shstrtab + sh[i].sh_name, ".symtab") == 0) {
                /* Load symbol table from exec_file 得到符号表 */
                symtab = malloc(sh[i].sh_size);
                fseek(fp, sh[i].sh_offset, SEEK_SET);
                fread(symtab, sh[i].sh_size, 1, fp);
                nr_symtab_entry = sh[i].sh_size / sizeof(symtab[0]);
        }
        else if(sh[i].sh_type == SHT_STRTAB &&
                        strcmp(shstrtab + sh[i].sh_name, ".strtab") == 0) {
                /* Load string table from exec_file 得到符号表对应的字符串表 */
                strtab = malloc(sh[i].sh_size);
                fseek(fp, sh[i].sh_offset, SEEK_SET);
                fread(strtab, sh[i].sh_size, 1, fp);
        }
}
```

符号表的解析

- 符号表解析了有啥用？
- 如果你想写一个链接器
  - 可以将处于不同.o文件中的全局变量或函数的调用和定义通过内存地址联系到一起
  - readelf -s nemu/src/cpu/decode/opcode.o
  - readelf -s nemu/src/cpu/instr/mov.o

mov.o

```
Symbol table '.symtab' contains 165 entries:
   Num:    Value  Size Type    Bind   Vis      Ndx Name
   ...
   149: 000002a0   176 FUNC    GLOBAL DEFAULT   39 mov_i2rm_b
   151: 00000350   176 FUNC    GLOBAL DEFAULT   39 mov_i2rm_v
   ...
```

opcode.o

```
Symbol table '.symtab' contains 249 entries:
   Num:    Value  Size Type    Bind   Vis      Ndx Name
   ...
   223: 00000000     0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT  UND mov_i2r_b
   224: 00000000     0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT  UND mov_i2r_v
   ...
```

如果发现符号表中有多个Type为FUNC或OBJECT，Bind类型为GLOBAL，其Ndx都显示在某一个section中被定义了的符号具有同样的名字：

multiple definition of xxx

去掉static void instr_execute_2op()前面的static就能够触发（比如尝试mov.c和sar.c，把static去掉），观察一下对应的符号表，是不是有什么变化？

符号表的解析

- 符号表解析了有啥用？
- 对于NEMU来说
  - 你可以使用 *x test_data* 来查看*test_data*的起始地址
    - 再使用*x 起始地址+offset* 来查看*test_data*的内容
    - 也可以使用 *x *(test_data + offset)*来查看*test_data*的内容
  - 你也可以使用 *b main*来在*main*函数开始处设置断点
- 在NEMU中使用上述功能涉及对表达式求值功能的实现
  - 相应教程：看教程PA 2-3部分
  - 代码：nemu/src/monitor/expr.c
  - 我们下次课再讲