程序的链接

王晶

jwang@ruc.edu.cn，信息楼124

2024年12月

为什么需要链接器？

- **原因 1：模块化（Modularity）**
  - 程序可以被编写为多个较小的源文件的集合，而不是一个单一的庞大结构
  - 可以构建常用函数的库（稍后会详细讨论）
    - 例如，数学库、标准 C 库

为什么需要链接器？（续）

- 原因 2：效率
  - 时间：分离编译
    - 更改一个源文件，编译，然后重新链接
    - 无需重新编译其他源文件
    - 可以并行编译多个文件
  - 空间：库
    - 常用函数可以被聚合到单个文件中...
    - 选项 1：静态链接（Static Linking）
      - 可执行文件和运行时内存镜像只包含它们实际使用的库代码
    - 选项 2：动态链接（Dynamic linking）
      - 可执行文件不包含库代码
      - 在执行过程中，库代码的单个副本可以在所有执行进程之间共享

为什么要学习链接器？

- **帮助你构建大型程序**
  - 链接错误（如缺失模块、库或不兼容的库）可能令人困惑和沮丧
- **帮助你避免危险的错误**
  - 链接器对符号引用的解析决策可能会静默影响程序的正确性
- **帮助你理解语言作用域规则是如何实现的**
  - 全局名称与局部名称，static 的真正含义
- **使你能够利用共享库**

示例 C 程序

```c
int sum(int *a, int n);

int array[2] = {1, 2};

int main(int argc, char** argv)
{
    int val = sum(array, 2);
    return val;
}
```

main.c

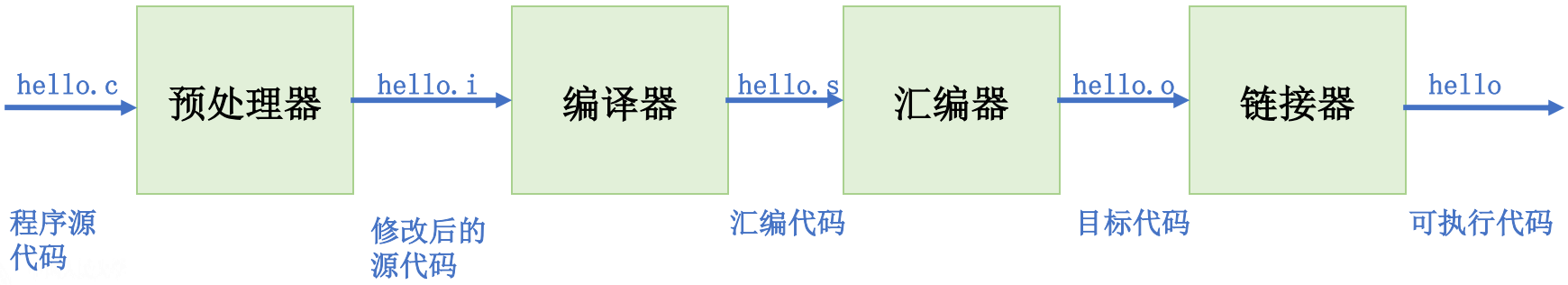
```c
int sum(int *a, int n)
{
    int i, s = 0;

    for (i = 0; i < n; i++) {
        s += a[i];
    }
    return s;
}
```

sum.c

编译器驱动程序（以 GCC 为例）

- GCC 是编译工具链中的编译器驱动程序
- GCC 调用多个其他编译阶段
  - cpp，预处理器
  - cc1，编译器
  - as/gas，汇编器
  - ld，链接器
- 每个阶段的功能和输出是什么？



预处理器

- 首先，gcc 编译器驱动程序调用 cpp 生成展开的源代码
  - 预处理器只进行文本替换 / gcc 带有 "-E" 选项
  - 将 C 源文件转换为另一个 C 源文件
  - 展开 "#" 指令

```c
#include <stdio.h>
#define FOO 4

int main() {
    printf("hello, world %d\n", FOO);
}
```

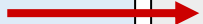
```c
...
extern int printf (const char
*__restrict __format, ...);
...

int main() {
 printf("hello, world %d\n", 4);
}
```

编译器

- 接下来，gcc 调用 cc1 生成汇编代码
  - 将高级 C 代码翻译成汇编语言

```c
// ...
extern int printf (const char
*__restrict __format, ...);
// ...
int main() {
 printf("hello, world %d\n", 4);
}
```



```
        .section        .rodata
.LC0:
        .string "hello, world %d\n"

        .text
main:
        pushq   %rbp
        movq    %rsp, %rbp
        movl    $4, %esi
        movl    $.LC0, %edi
        movl    $0, %eax
        call    printf
        popq    %rbp
        ret
```

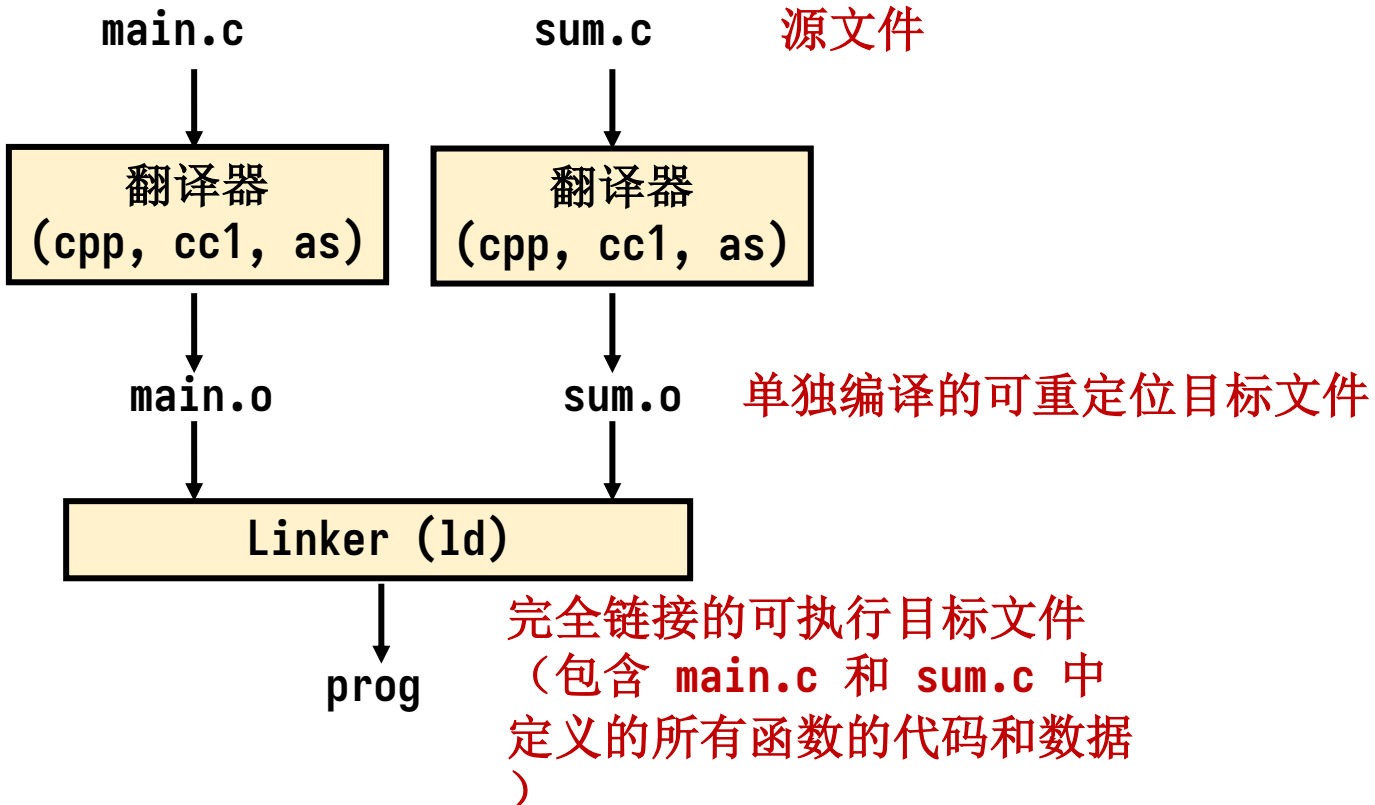
汇编器

- 此外，gcc 调用 gas 来生成目标代码
  - 将汇编代码转换为二进制目标代码

```
#  readelf -a hello | grep rodata
    [10] .rodata           PROGBITS         0000000000495d40  00095d40
#  readelf -a hello | grep -E "GLOBAL.* main“
    1591: 0000000000401190    31 FUNC    GLOBAL DEFAULT    6 main
#  readelf -x .rodata hello
    Hex dump of section '.rodata’:
    0x00495d40 01000200 68656c6c 6f2c2077 6f726c64 ....hello, world
    0x00495d50 2025640a 00464154 414c3a20 6b65726e  %d..FATAL: kern
#  objdump -d hello
    0000000000401190 <main>:
    401190:       55                      push   %rbp
    401191:       48 89 e5                mov    %rsp,%rbp
    401194:       be 04 00 00 00          mov    $0x4,%esi
    401199:       bf 44 5d 49 00          mov    $0x495d44,%edi
    40119e:       b8 00 00 00 00          mov    $0x0,%eax
    4011a3:       e8 d8 0e 00 00          callq  402080 <_IO_printf>
    4011a8:       b8 00 00 00 00          mov    $0x0,%eax
    4011ad:       5d                      pop    %rbp
    4011ae:       c3                      retq
    4011af:       90                      nop
```

链接

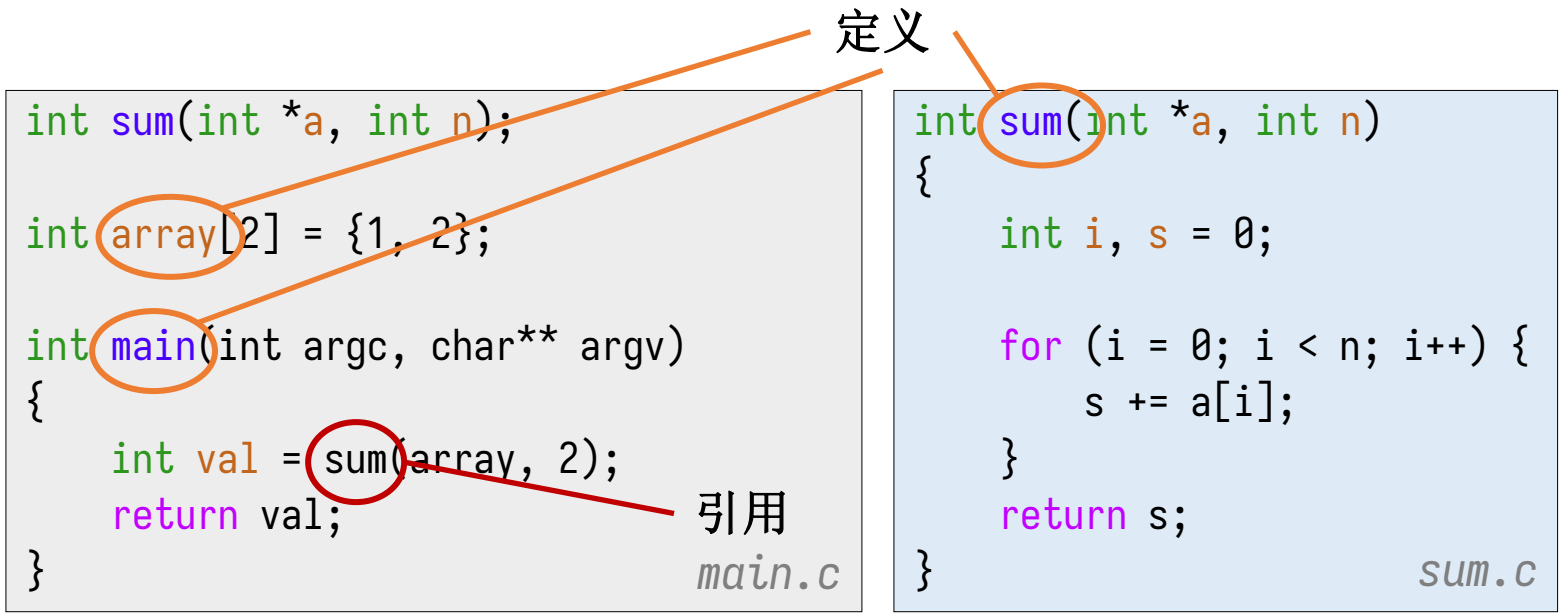
- 程序使用编译器驱动程序进行翻译和链接：
  - linux> gcc -Og -o prog main.c sum.c
  - linux> ./prog



链接器的作用是什么？

- 步骤 1：符号解析
  - 程序定义和引用符号（全局变量和函数）：
    - `void swap() {...}  /* 定义符号 swap */`
    - `swap();  /* 引用符号 swap */`
    - `int *xp = &x;  /* 定义符号 xp，引用 x */`
  - 符号定义存储在目标文件的符号表中（由汇编器生成）
    - 符号表是一个条目数组
    - 每个条目包括符号的名称、大小和位置
  - **在符号解析步骤中，链接器将每个符号引用与一个确切的符号定义关联起来**

C 程序中的符号示例




```
# gcc -c -o main.o main.c
# gcc -c -o sum.o sum.c
# nm main.o
0000000000000000 D array
0000000000000000 T main
                 U sum
# nm sum.o
0000000000000000 T sum
```

您也可以尝试：
objdump -t main.o
objdump -t sum.o

链接器的作用是什么？（续）

- **步骤 2：重定位**
  - 合并分散的代码和数据段为单一的段
  - 将符号从它们在 .o 文件中的相对位置重定位到可执行文件中的最终绝对内存位置
  - 更新所有对这些符号的引用，以反映它们的新位置
- 让我们更详细地看看这两个步骤.....

三种目标文件（模块）

- 可执行目标文件（.out 文件）
  - 包含可以直接复制到内存中并执行的代码和数据形式
- 可重定位目标文件（.o 文件）
  - 包含可以与其他可重定位目标文件组合形成可执行目标文件的代码和数据形式
  - 每个 .o 文件精确对应一个源（.c）文件
  - 每个 .c 文件对应一个，用于组成可执行文件
- 共享目标文件（.so 文件）
  - 一种特殊的可重定位目标文件，可以在加载时或运行时被动态加载到内存并链接
  - 在 Windows 系统中被称为动态链接库（DLLs）

Linux 下的三种目标文件

```
# file sum.o main.o
sum.o:  ELF 64-bit LSB relocatable, x86-64, version 1 (SYSV), not stripped
main.o: ELF 64-bit LSB relocatable, x86-64, version 1 (SYSV), not stripped

# file main
main: ELF 64-bit LSB executable, x86-64, version 1 (SYSV), dynamically linked (uses shared
libs), for GNU/Linux 2.6.24, BuildID[sha1]=0x34c39011eac6fd0ebae938e4087e788b28a4f6dd, not
stripped

# ldd main
        linux-vdso.so.1 =>  (0x00007fff9dbfe000)
        libc.so.6 => /lib/x86_64-linux-gnu/libc.so.6 (0x00007f4bef587000)
        /lib64/ld-linux-x86-64.so.2 (0x00007f4bef956000)

# file /lib/x86_64-linux-gnu/libc.so.6
/lib/x86_64-linux-gnu/libc.so.6: symbolic link to `libc-2.15.so'

# file /lib/x86_64-linux-gnu/libc-2.15.so
/lib/x86_64-linux-gnu/libc-2.15.so: ELF 64-bit LSB shared object, x86-64, version 1
(SYSV), dynamically linked (uses shared libs),
BuildID[sha1]=0x760efc6878e468a84b60e307a5bad802cbe2a480, for GNU/Linux 2.6.24, stripped
```

Relocatable object file (.o file)

Executable object file (a.out file)

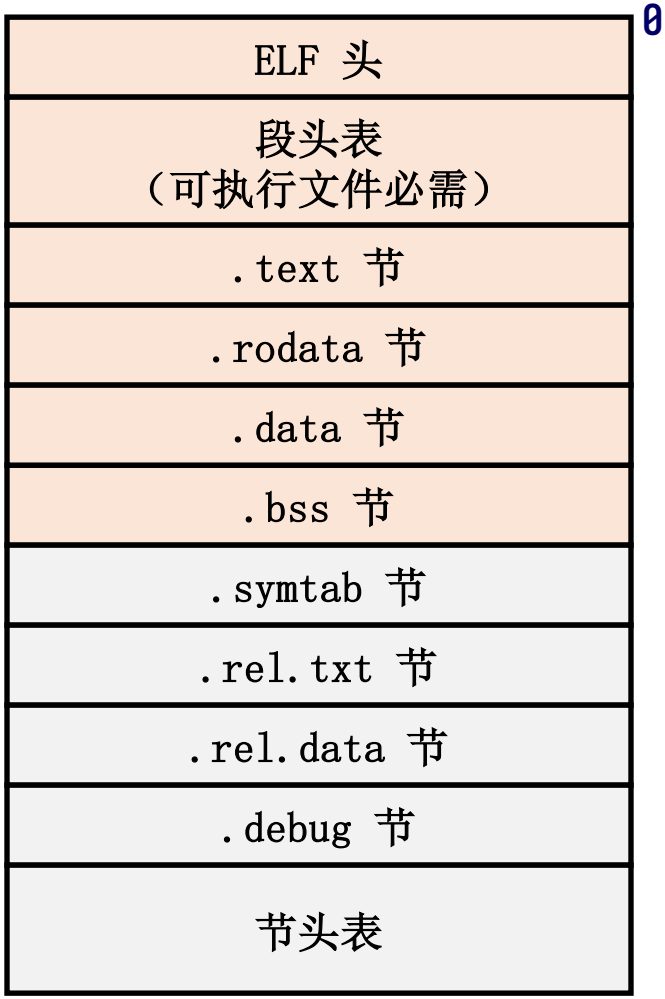
Shared object file (.so file)

可执行与可链接格式（ELF）

- 目标文件的标准二进制格式
- 一种统一格式，适用于：
  - 可重定位目标文件（.o）
  - 可执行目标文件（a.out）
  - 共享目标文件（.so）
- 通用名称：ELF 二进制文件
- 首次出现于 System V Release 4 Unix，约 1989 年
- Linux 于约 1995 年切换到 ELF，BSD 后来于约 1998-2000 年间切换

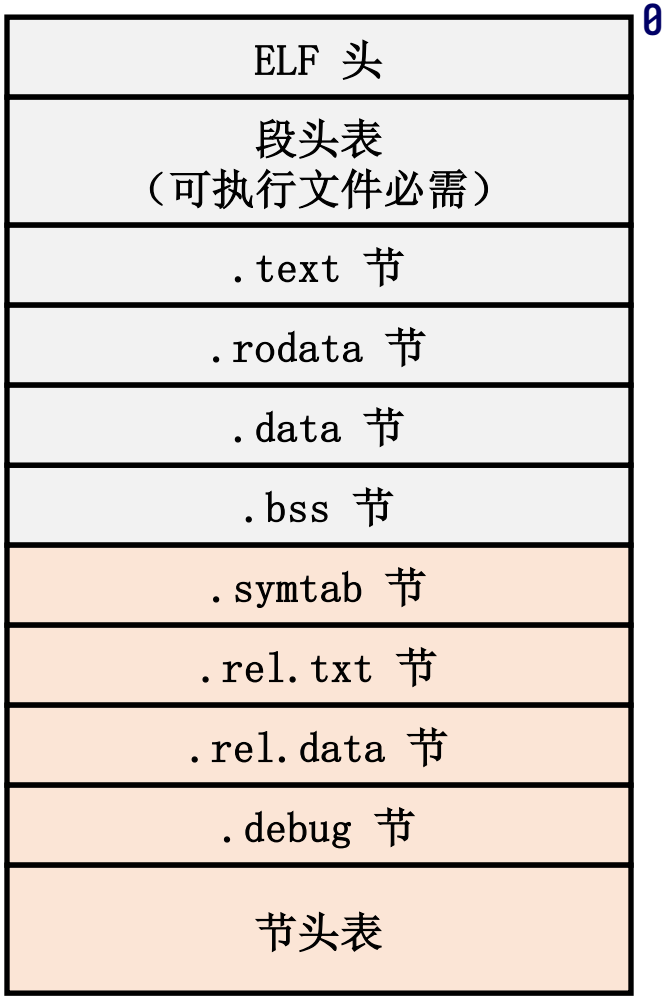
ELF 目标文件格式

- **ELF 头**
  - 字长、字节顺序、文件类型（.o, exec, .so）、机器类型等
- **段头表**
  - 页面大小、虚拟地址内存段（节）、段大小
- **.text 节**
  - 代码
- **.rodata 节**
  - 只读数据：跳转表、字符串常量等
- **.data 节**
  - 已初始化的全局变量
- **.bss 节**
  - 未初始化的全局变量
  - "Block Started by Symbol"(由符号开始的块)
  - "Better Save Space"(更好地节省空间)
  - 有节头但不占用空间



ELF 目标文件格式（续）

- **.symtab 节**
  - 符号表
  - 过程和静态变量名称
  - 节名称和位置
- **.rel.text 节**
  - .text 节的重定位信息
  - 需要在可执行文件中修改的指令地址
  - 修改指令
- **.rel.data 节**
  - .data 节的重定位信息
  - 需要在合并的可执行文件中修改的指针数据地址
- **.debug 节**
  - 用于符号调试的信息（gcc -g）
- **节头表**
  - 每个节的偏移量和大小



第一步：符号解析

```c
int sum(int *a, int n);

int array[2] = {1, 2};

int main(int argc,char **argv)
{
    int val = sum(array, 2);
    return val;
}
```

```c
int sum(int *a, int n)
{
    int i, s = 0;

    for (i = 0; i < n; i++) {
        s += a[i];
    }
    return s;
}
```

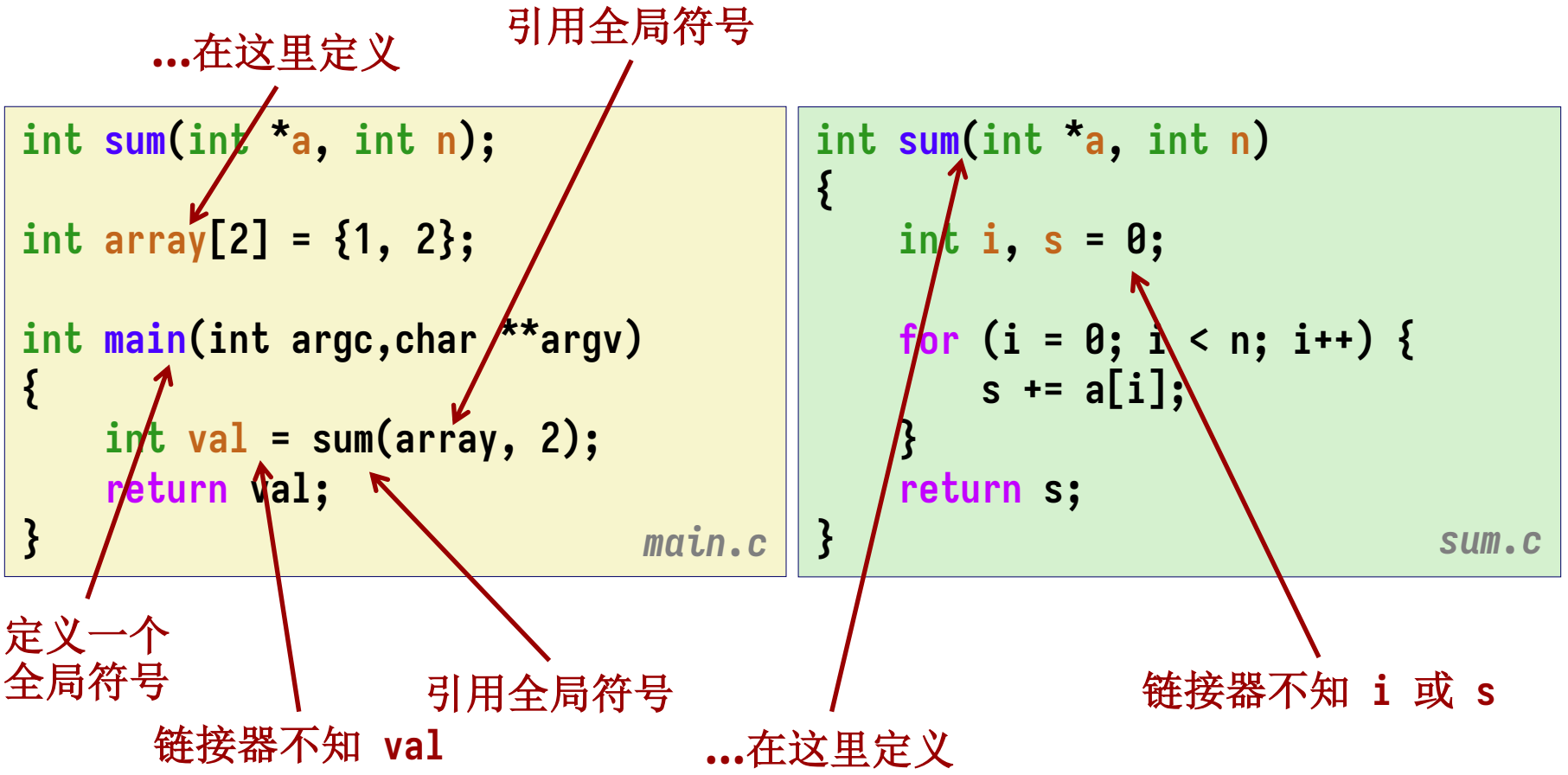
sum.c

链接器如何解析重复符号定义（例如 sum 和 array）？

链接符号

- **全局符号**
  - 由模块 *m* 定义的符号，可以被其他模块引用
  - 例如：非 *static* 的 C 函数和非 *static* 的全局变量
- **外部符号**
  - 由模块 *m* 引用，但由其他模块定义的全局符号
- **局部符号**
  - 由模块 *m* 独立定义和引用的符号
  - 例如：使用 *static* 属性定义的 C 函数和全局变量
  - 局部链接符号**不是**局部程序变量

第一步：符号解析



链接器如何解析重复符号定义（例如 sum 和 array）？

符号识别

- 下列名称中的哪些会出现在 symbols.o 的符号表中？

symbols.c:

```c
int incr = 1;
static int foo(int a) {
  int b = a + incr;
  return b;
}

int main(int argc,
         char* argv[]) {
  printf("%d\n", foo(5));
  return 0;
}
```

名称:

- incr
- foo
- a
- b
- argc
- argv
- main
- printf
- "%d\n"

可以使用 readelf 工具找到这些信息：

```
linux> readelf -s symbols.o
```

解析全局符号

- 当无法在任何输入模块中找到引用符号的定义时，链接器会打印错误信息并终止

```c
void foo(void);
int main() {
  foo();
  return 0;
}
```
linkerror.c

```
# gcc -Wall -Og -S linkerror.c
# as -o linkerror.o linkerror.s
```

编译器和汇编器运行正常

```
# gcc -Wall -Og -o linkerror linkerror.o
linkerror.o: In function `main':
linkerror.c:(.text+0x5): undefined reference to `foo'
collect2: error: ld returned 1 exit status
```

当无法解析对 foo 函数的引用时，链接器终止

局部符号

- 局部非静态 C 变量与局部静态 C 变量
  - 局部非静态 C 变量：存储在栈上
  - 局部静态 C 变量：存储在 .bss 或 .data 中

```c
static int x = 15;

int f() {
    static int x = 17;
    return x++;
}

int g() {
    static int x = 19;
    return x += 14;
}

int h() {
    return x += 27;
}
```

static-local.c

编译器为每个 x 的定义在 .data 中分配空间

在符号表中为局部符号创建唯一名称，例如 x、x.1721 和 x.1724

名称改编

- C++/Java 中的重载

名称	引用
“A”	<class A>
“print”	<overload set>

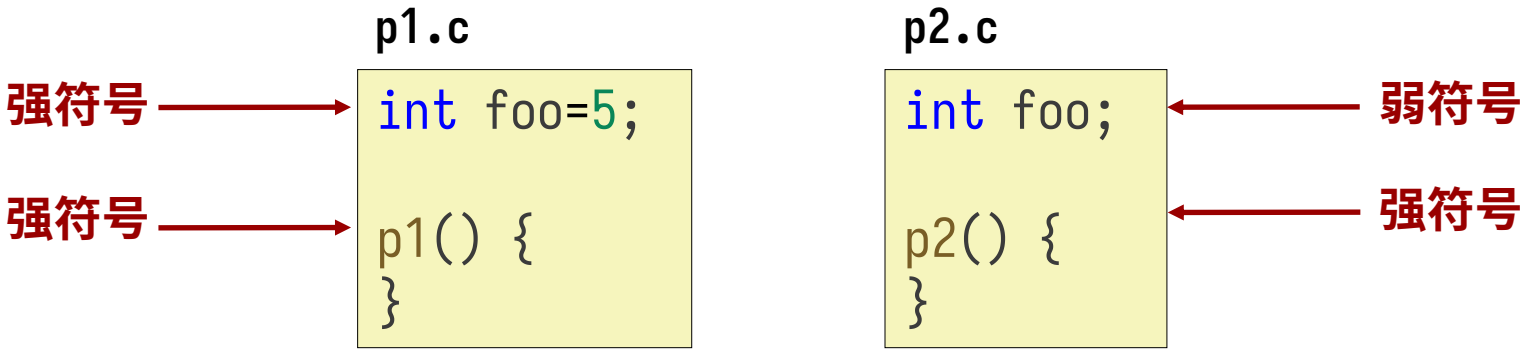
签名	引用
void(int)	<print 1>
void(char)	<print 2>
void(String)	<print 3>

- 名称改编将函数的签名（参数和返回类型）编码成文本形式。

```
void print(int i, float f)
 => "_Z5printif"       (g++)
 => "?print@@YAXHM@Z" (msvc++)
void print(float f, int i)
 => "_Z5printfi"       (g++)
 => "?print@@YAXMH@Z" (msvc++)
```

链接器如何解决重复的符号名称

- 程序符号分为强（strong）或弱（weak）两种
  - 强符号：过程和已初始化的全局变量
  - 弱符号：未初始化的全局变量
    - 或者使用 extern 说明符声明的变量
- 编译器输出此类信息，汇编器将其隐式编码在 ELF 文件的符号表中。



链接器的符号规则

- 规则 1：不允许存在多个强符号
  - 每个项目只能定义一次
  - 否则：链接器报错
- 规则 2：给定一个强符号和多个弱符号时，选择强符号
  - 对弱符号的引用会解析为强符号
- 规则 3：如果存在多个弱符号，任选其中一个
  - 可以使用 gcc -fno-common 来覆盖这一行为

如果出错了会怎样？

```
int x=7;
p1() {}
```

```
extern int x;
p2() {}
```

正确的程序。
x、p1、p2 各只有一个定义。

```
int x=7;
p1() {}
```

```
int x=0;
p1() {}
```

链接错误：x 和 p1 有两个定义。

```
int x;
p1() {}
```

```
int x;
p2() {}
```

依赖编译器。
可能被视为 x 的一个或两个定义。

```
int x=7;
int y=5;
p1() {}
```

```
extern double x;
p2() {}
```

未定义行为。不会产生链接错误。
在 p2 中对 x 的写入可能会覆盖 y！

```
char p1[]
 = 0xC3;
```

```
extern void p1();
p2() { p1(); }
```

未定义行为。不会产生链接错误。
调用 p1 可能会导致程序崩溃！

链接器检查一个符号是否有两个定义，不检查引用的类型。

链接器谜题

`int x;` `p1() {}`	`p1() {}`	链接时错误：两个强符号（p1）
`int x;` `p1() {}`	`int x;` `p2() {}`	对 x 的引用将指向同一个未初始化的 int 这真的是你想要的吗？

`int x;`
`int y;`
`p1() {}`
	`double x;`
	`p2() {}`
		在 p2 中对 x 的写入可能会覆盖 y！
		非常危险！

`int x=7;` `p1() {}`	`int x;` `p2() {}`	对 x 的引用将指向同一个已初始化的变量。

重要：链接器不进行类型检查。

练习题

Module1	Module2	
`int main()` `{}`	`int main` `int p2() {}`	REF(main.1)-> REF( ) REF(main.2)-> REF( )
`void main` `{}`	`int main=1;` `int p2() {}`	REF(main.1)-> REF( ) REF(main.2)-> REF( )

`int x;`
`void main()`
`{`
`}`
	`double x =1.0;`
	`int p2() {}`
		REF(x.1)-> REF( )
		REF(x.2)-> REF( )

类型不匹配示例

```c
extern long int x;

int main(int argc, char*
argv[])
{
    printf("%ld\n", x);
    return 0;
}
```

mismatch-main.c

```c
double x = 3.14;
```

mismatch-variable.c

- 编译时没有任何错误或警告
- 打印结果是什么？

```
bash > ./mismatch
4614253070214989087
```

检测类型不匹配示例

```c
extern long int x;
```

mismatch.h

```c
#include "mismatch.h“

int main(int argc, char* argv[])
{
    printf("%ld\n", x);
    return 0;
}
```

mismatch-main.c

```c
#include "mismatch.h"

double x = 3.14;
```

mismatch-variable.c

- 现在我们从编译器（而不是链接器）得到一个错误：

```
mismatch-variable.c:3:8: conflicting types for ‘x’
mismatch.h:1:17: previous declaration of ‘x’
```

避免类型不匹配的规则

- 尽量避免使用全局变量
- 尽量使用 static
- 将所有非 static 的声明放在头文件中
  - 确保将头文件包含在所有相关的文件中
  - 包括定义这些符号的文件
- 在头文件中的声明上始终加上 extern
  - 对于函数声明来说这可能多余但无害
  - 避免没有 extern 的全局变量出现奇怪的行为
- 当函数不接受参数时，始终写上 (void)
  - extern void no_args(void);
  - 省略 void 意味着“我不声明这个函数的参数列表。”
    - 这会关闭参数类型检查！

在 .h 文件中使用 extern（#1）

c1.c

```c
#include "global.h"

int f() { return g + 1; }
```

global.h

```c
extern int g;
int f();
```

c2.c

```c
#include <stdio.h>
#include "global.h”

int g = 0;

int main(int argc, char argv[])
{
    int t = f();
    printf("Calling f yields %d\n", t);
    return 0;
}
```

在 .h 文件中使用 extern（#2）

c1.c

```c
#include "global.h"

int f() { return g + 1; }
```

```c
extern int g;
static int init = 0;
```

global.h

```c
#else
extern int g;
static int init = 0;
```

c2.c

```c
#define INITIALIZE
#include "global.h"
#include <stdio.h>

int main(int argc, char*
{
    if (init)
        int t = f();
    printf("Calling f yields %d\n", t);
    return 0;
}
```

```c
int g = 23;
static int init = 1;
```

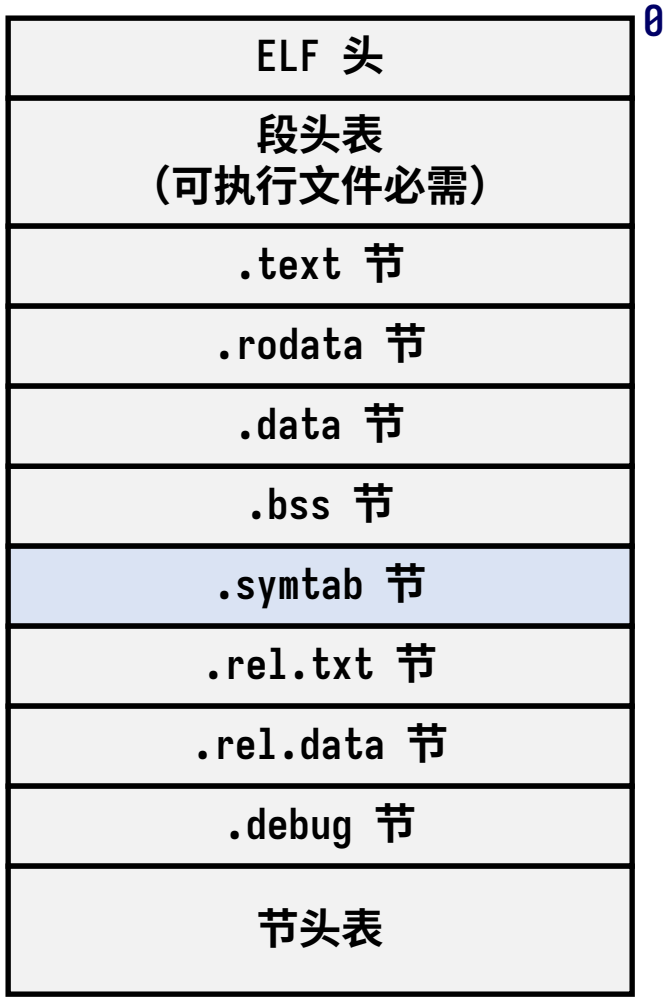
符号表（Symbol Table）

- 符号表由汇编器构建，使用由编译器导出到汇编语言 .s 文件中的符号
- ELF 符号表包含在 .symbol 节中。它包含一个条目数组

source code of glibc/elf/elf.h

```
529 typedef struct
530 {
531   Elf64_Word st_name;       /* Symbol name(string tbl index) */
532   unsigned char st_info;    /* Symbol type and binding */
533   unsigned char st_other;   /* Symbol visibility */
534   Elf64_Section st_shndx;   /* Section index */
535   Elf64_Addr st_value;      /* Symbol value */
536   Elf64_Xword st_size;      /* Symbol size */
537 } Elf64_Sym;
```

符号表


0
ELF 头
段头表
（可执行文件必需）
.text 节
.rodata 节
.data 节
.bss 节
.symtab 节
.rel.txt 节
.rel.data 节
.debug 节
节头表

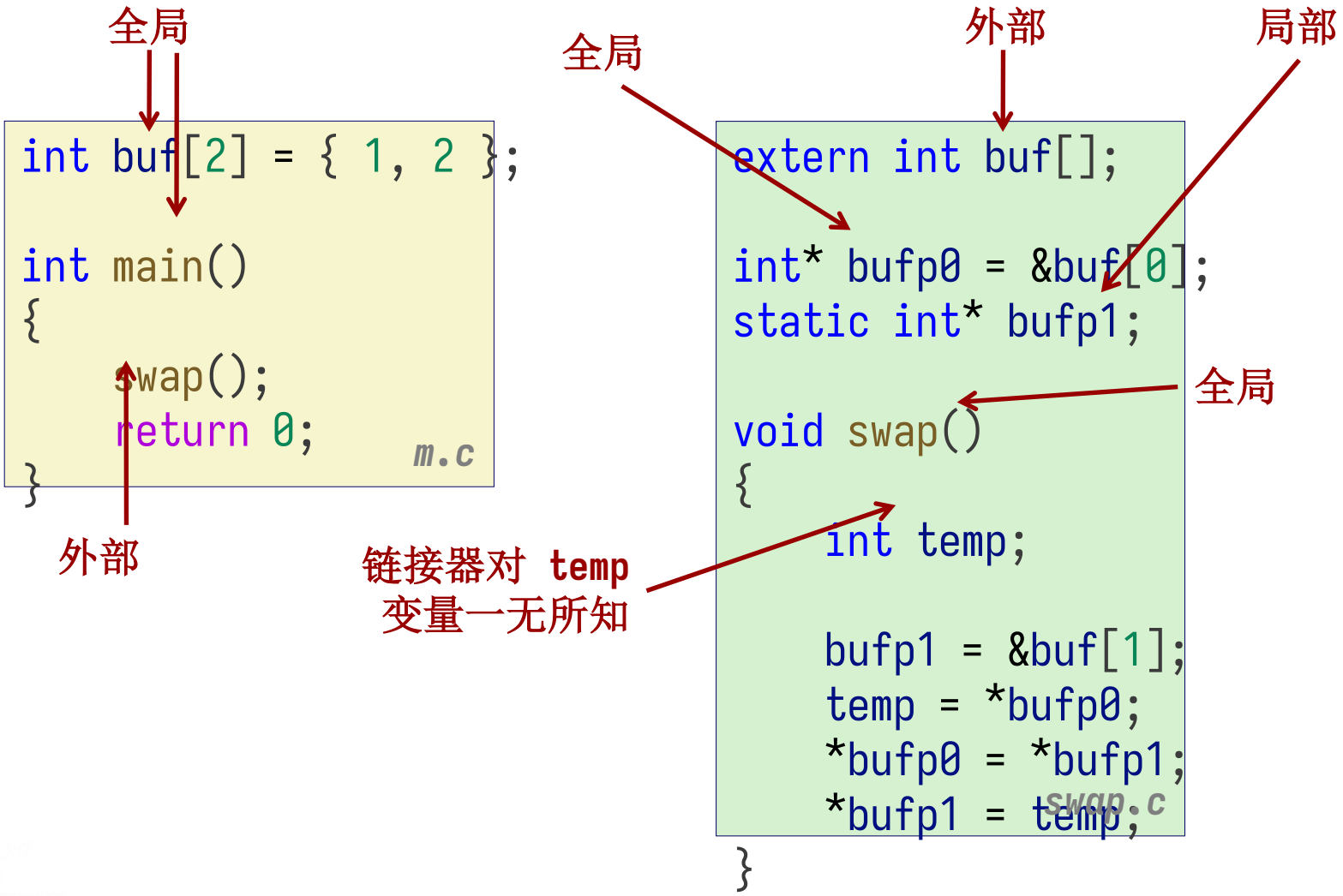
COMMON 节与 .bss 节的对比

- COMMON 和 .bss 之间的区别很微妙
- 现代版本的 GCC 使用以下约定将可重定位目标文件中的符号分配给 COMMON 和 .bss

变量类型	全局变量	静态变量
未初始化	COMMON	.bss
初始化为零	.bss	.bss
初始化为非零	.data	.data

- 在可重定位目标文件中，变量可能位于 COMMON 或 .bss 中，但在可执行文件中都位于 .bss 中

符号表条目


全局
全局
外部
局部
int buf[2] = { 1, 2 };
int main()
{
swap();
return 0;
}
m.c
外部
链接器对 temp
变量一无所知
extern int buf[];
int* bufp0 = &buf[0];
static int* bufp1;
全局
void swap()
{
int temp;
bufp1 = &buf[1];
temp = *bufp0;
*bufp0 = *bufp1;
*bufp1 = temp;
swap.c
}

练习题

swap.o

符号	.symtab条目	符号类型	定义模块	节
buf				
bufp0				
bufp1				
swap				
temp				

.symtab条目：是否在swap.o的.symtab中有符号表条目，有（是），无（否）

符号类型：局部、全局、外部

模块：swap.o和m.o

节：.text, .data, .bss, COMMON

swap.o

符号	.symtab条目	符号类型	定义模块	节
buf	是	外部	m.o	.data
bufp0	是	全局	swap.o	.data
bufp1	是	全局	swap.o	.bss
swap	是	全局	swap.o	.text
temp	否			

```c
int buf[2] = { 1, 2 };

int main()
{
    swap();
    return 0;
}
```

m.c

```c
extern int buf[];
int* bufp0 = &buf[0];
static int* bufp1;
void swap()
{
    int temp;

    bufp1 = &buf[1];
    temp = *bufp0;
    *bufp0 = *bufp1;
    *bufp1 = temp;
}
```

swap.c

符号表条目

```
# objdump -r -d -t m.o | head -n 15
m.o:     file format elf64-x86-64
SYMBOL TABLE:
0000000000000000 l    df *ABS*  0000000000000000 m.c
0000000000000000 l    d  .text  0000000000000000 .text
0000000000000000 l    d  .data  0000000000000000 .data
0000000000000000 l    d  .bss   0000000000000000 .bss
0000000000000000 l    d  .note.GNU-stack0000000000000000 .note.GNU-stack
0000000000000000 l    d  .eh_frame      0000000000000000 .eh_frame
0000000000000000 l    d  .comment       0000000000000000 .comment
0000000000000000 g     O .data  0000000000000008 buf
0000000000000000 g     F .text  0000000000000015 main
0000000000000000         *UND*  0000000000000000 swap

# readelf -s m.o
Symbol table '.symtab' contains 11 entries:
   Num:    Value          Size Type    Bind   Vis      Ndx Name
     0: 0000000000000000     0 NOTYPE  LOCAL  DEFAULT  UND
     1: 0000000000000000     0 FILE    LOCAL  DEFAULT  ABS m.c
     2: 0000000000000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    1
     3: 0000000000000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    3
     4: 0000000000000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    4
     5: 0000000000000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    6
     6: 0000000000000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    7
     7: 0000000000000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    5
     8: 0000000000000000     8 OBJECT  GLOBAL DEFAULT    3 buf
     9: 0000000000000000    21 FUNC    GLOBAL DEFAULT    1 main
    10: 0000000000000000     0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT  UND swap
```

符号表条目

```
# objdump -r -d -t swap.o | head -n 15
swap.o:     file format elf64-x86-64
SYMBOL TABLE:
0000000000000000 l    df *ABS*  0000000000000000 swap.c
0000000000000000 l    d  .text  0000000000000000 .text
0000000000000000 l    d  .data  0000000000000000 .data
0000000000000000 l    d  .bss   0000000000000000 .bss
0000000000000000 l    d  .note.GNU-stack        0000000000000000 .note.GNU-stack
0000000000000000 l    d  .eh_frame      0000000000000000 .eh_frame
0000000000000000 l    d  .comment       0000000000000000 .comment
0000000000000000 g     O .data  0000000000000008 bufp0
0000000000000000         *UND*  0000000000000000 buf
0000000000000008       O *COM*  0000000000000008 bufp1
0000000000000000 g     F .text  000000000000003c swap

# readelf -s swap.o | tail -n 11
     1: 0000000000000000     0 FILE    LOCAL  DEFAULT  ABS swap.c
     2: 0000000000000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    1
     3: 0000000000000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    3
     4: 0000000000000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    5
     5: 0000000000000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    7
     6: 0000000000000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    8
     7: 0000000000000000     0 SECTION LOCAL  DEFAULT    6
     8: 0000000000000000     8 OBJECT  GLOBAL DEFAULT    3 bufp0
     9: 0000000000000000     0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT  UND buf
    10: 0000000000000008     8 OBJECT  GLOBAL DEFAULT  COM bufp1
    11: 0000000000000000    60 FUNC    GLOBAL DEFAULT    1 swap
```

链接示例

```c
int sum(int* a, int n);

int array[2] = { 1, 2 };

int main(int argc, char** argv)
{
    int val = sum(array, 2);
    return val;
}
```

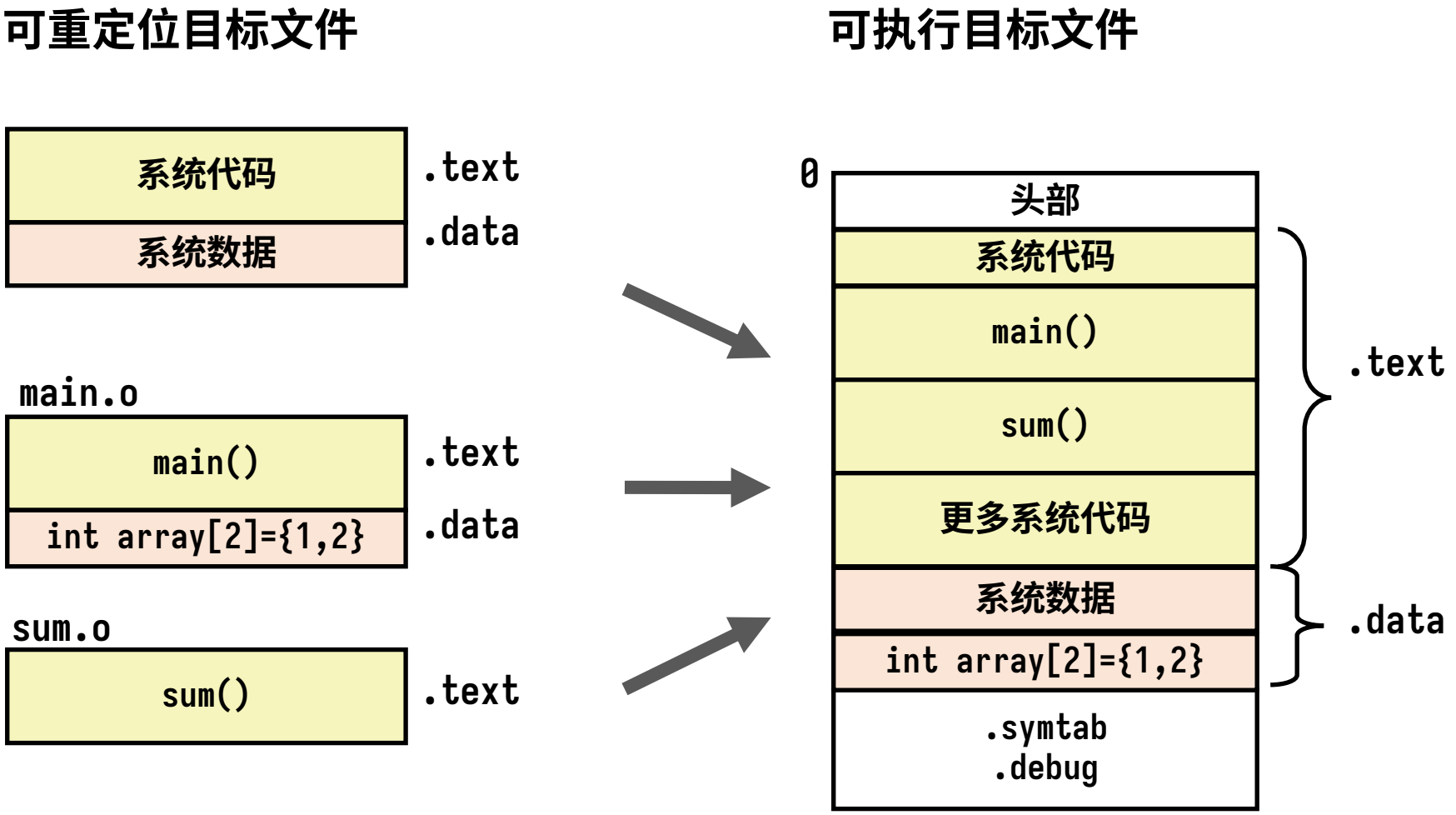
main.c

```c
int sum(int* a, int n)
{
    int i, s = 0;

    for (i = 0; i < n; i++)
    {
        s += a[i];
    }
    return s;
}
```

sum.c

步骤 2：重定位


可重定位目标文件
可执行目标文件
系统代码
.text
系统数据
.data
main.o
main()
.text
int array[2]={1,2}
.data
sum.o
sum()
.text
0
头部
系统代码
main()
sum()
更多系统代码
.text
系统数据
int array[2]={1,2}
.data
.symtab
.debug

静态链接中的两步重定位

- 重定位段和符号定义
  - 将同类型的所有段合并到一个新的聚合段中
  - 分配运行时内存地址给：
    - 新的聚合段
    - 输入模块定义的每个段
    - 输入模块定义的每个符号
- 重定位段内的符号引用
  - 修改代码和数据段中的每个符号引用，使其指向正确的运行时地址
  - 依赖于可重定位模块中称为重定位条目（relocation entries）的数据结构

重定位条目

- 重定位条目从引用位置未知的引用中生成。

```
    /* 带加数的重定位表条目（在 SHT_RELA 类型的段中）*/
660 typedef struct
661 {
662 Elf64_Addr r_offset;    /* Address */
663 Elf64_XWord r_info;     /* Relocation type and symbol index */
664 Elf64_Sxword r_addend;  /* Addend */
665 } Elf64_Rela;
673 #define ELF64_R_SYM(i) ((i) >> 32)
674 #define ELF64_R_TYPE(i) ((i) & 0xffffffff)
```

- ELF_64_R_SYM 标识引用应该指向的符号
- ELF_64_R_TYPE 告诉链接器如何修改新的引用
- r_addend 是用于某种重定位中偏移调整的常量

两种最基本的重定位类型

- R_X86_64_PC32
  - 重定位使用 32 位 PC 相对地址（PC 相对引用）的引用。
- R_X86_64_32/R_X86_64_32S
  - 重定位使用 32 位绝对地址（绝对引用）的引用。

```
for each section s {
    foreach relocation entry r {
        refptr = s + r.offset;  /* ptr to reference to be relocated */

        /* Relocate a PC-relative reference */
        if (r.type == R_X86_64_PC32){
            refaddr = ADDR(s) + r.offset; /* ref's run-time address */
            *refptr = (unsigned) (ADDR(r.symbol) + r.addend - refaddr);
        }

        /* Relocate an absolute reference */
        if (r.type ==R_X86_64_32)
            *refptr = (unsigned) (ADDR(r.symbol) + r.addend);
    }
}
```

重定位条目

```c
int array[2] = { 1, 2 };
int main(int argc, char** argv) {
    int val = sum(array, 2);
    return val;
}
```

main.c

```
# readelf -r main.o
Relocation section '.rela.text' at offset 0x560 contains 2 entries:
Offset          Info           Type            Sym.Value        Sym.Name+Addend
000000000015  00080000000a R_X86_64_32       0000000000000000 array + 0
00000000001a  000a00000002 R_X86_64_PC32     0000000000000000 sum - 4

Relocation section '.rela.eh_frame' at offset 0x590 contains 1 entries:
Offset          Info           Type            Sym.Value        Sym.Name+Addend
000000000020  000200000002 R_X86_64_PC32     0000000000000000 .text + 0
```

偏移

类型

符号名称和加数

共有 3 个符号需要重定位

重定位条目（在 main.o 中）

```c
int array[2] = { 1, 2 };
int main(int argc, char** argv) {
    int val = sum(array, 2);
    return val;
}
```

main.c

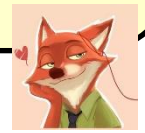
```
# readelf -r main.o
Relocation section '.rela.text' at offset 0x560 contains 2 entries:
Offset          Info           Type            Sym.Value        Sym.Name+Addend
000000000015  00080000000a R_X86_64_32       0000000000000000 array + 0
00000000001a  000a00000002 R_X86_64_PC32     0000000000000000 sum - 4
```

亲爱的链接器：

请在偏移量 0x15 处修补 .rela.text 段。按照以下步骤填入一个 32 位的值。当你确定了 .data 的地址时，计算 [array 的地址] + [加数，等于 0]，并将结果放置在指定位置。

此致，

汇编器



重定位条目（在 main.o 中）

```c
int array[2] = { 1, 2 };
int main(int argc, char** argv) {
    int val = sum(array, 2);
    return val;
}
```
main.c

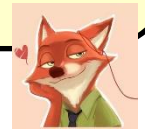
```
# readelf -r main.o
Relocation section '.rela.text' at offset 0x560 contains 2 entries:
Offset          Info           Type            Sym.Value        Sym.Name+Addend
000000000015 00080000000a R_X86_64_32     0000000000000000 array + 0
00000000001a 000a00000002 R_X86_64_PC32   0000000000000000 sum - 4
```

亲爱的链接器：

请在偏移量 0x1a 处修补 .rela.text 段。按照以下步骤填入一个 32 位的"PC 相对"值。当你确定了 sum 的地址时，计算 [sum 的地址] + [加数，等于 -4] - [段的地址 + 偏移量]，并将结果放置在指定位置。

此致，

汇编器



重定位条目（在 sum.o 中）

```c
int sum(int *a, int n)
{
    int i, s = 0;
    for (i = 0; i < n; i++) {
        s += a[i];
    }
    return s;
}
```

sum.c

```
# readelf -r sum.o
Relocation section '.rela.eh_frame' at offset 0x4f8 contains 1 entries:
Offset          Info           Type            Sym.Value        Sym.Name+Addend
000000000020    000200000002   R_X86_64_PC32   0000000000000000 .text + 0
```

偏移

类型

符号名称和加数

共有 1 个符号需要重定位 (.text)

main.o 的原始目标文件

```c
int array[2] = { 1, 2 };
int main(int argc, char** argv) {
    int val = sum(array, 2);
    return val;
}
```

main.c

Source: objdump -r -d main.o

```
0000000000000000 <main>:
   0:   55                      push   %rbp
   1:   48 89 e5                mov    %rsp,%rbp
   4:   48 83 ec 20             sub    $0x20,%rsp
   8:   89 7d ec                mov    %edi,-0x14(%rbp)
   b:   48 89 75 e0             mov    %rsi,-0x20(%rbp)
   f:   be 02 00 00 00          mov    $0x2,%esi
  14:   bf 00 00 00 00          mov    $0x0,%edi        # %edi = &array
                        15: R_X86_64_32 array          # Relocation entry
  19:   e8 00 00 00 00          callq  1e <main+0x1e>   # sum()
                        1a: R_X86_64_PC32 sum-0x4      # Relocation entry
  1e:   89 45 fc                mov    %eax,-0x4(%rbp)
  21:   8b 45 fc                mov    -0x4(%rbp),%eax
  24:   c9                      leaveq
  25:   c3                      retq
```

sum.o 的原始目标文件

```
int sum(int *a, int n){
```

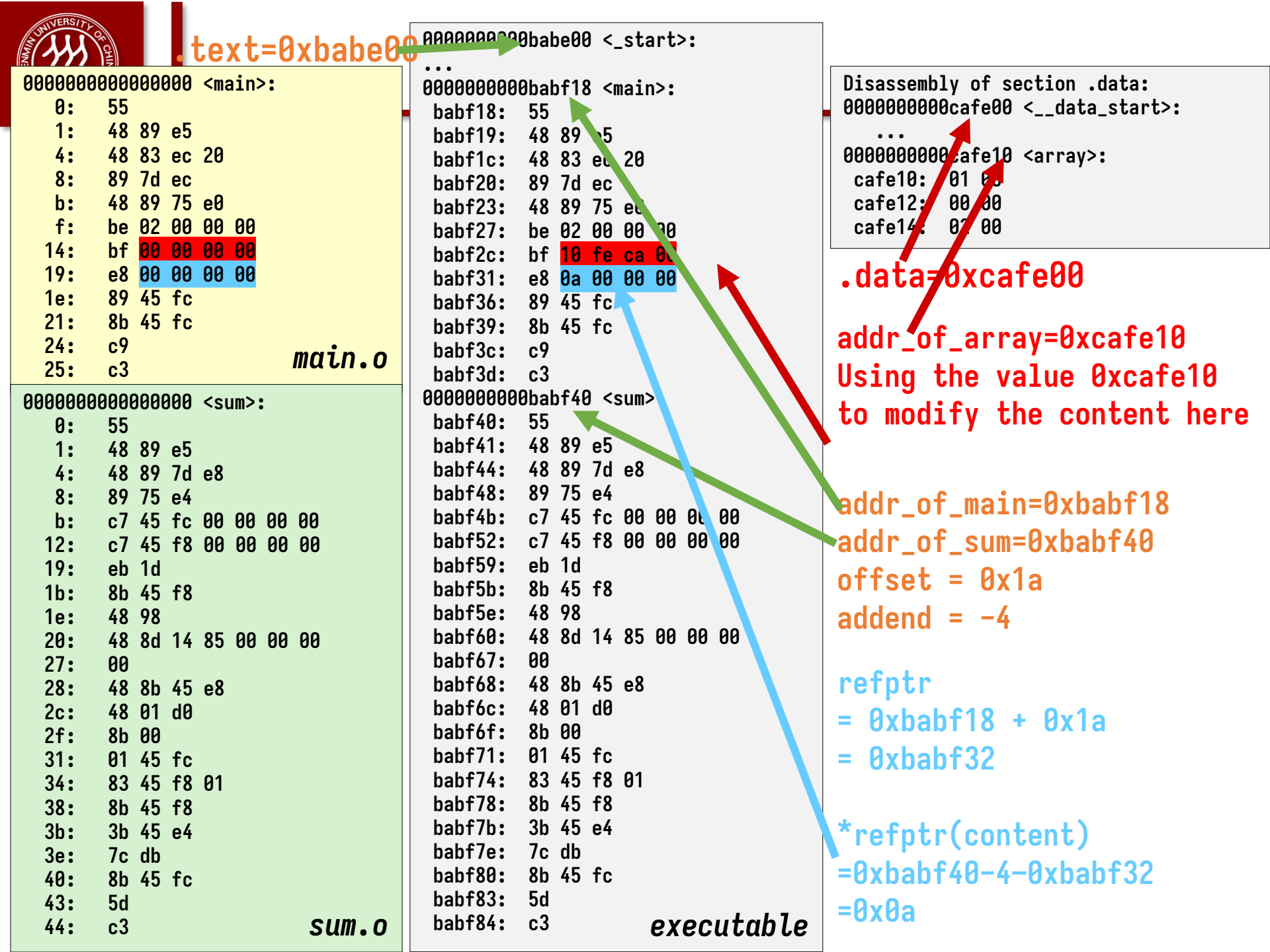
```
0000000000000000 <sum>:
   0:   55                      push   %rbp
   1:   48 89 e5                mov    %rsp,%rbp
   4:   48 89 7d e8             mov    %rdi,-0x18(%rbp)
   8:   89 75 e4                mov    %esi,-0x1c(%rbp)
   b:   c7 45 fc 00 00 00 00    movl   $0x0,-0x4(%rbp)
  12:   c7 45 f8 00 00 00 00    movl   $0x0,-0x8(%rbp)
  19:   eb 1d                   jmp    38 <sum+0x38>
  1b:   8b 45 f8                mov    -0x8(%rbp),%eax
  1e:   48 98                   cltq
  20:   48 8d 14 85 00 00 00    lea    0x0(,%rax,4),%rdx
  27:   00
  28:   48 8b 45 e8             mov    -0x18(%rbp),%rax
  2c:   48 01 d0                add    %rdx,%rax
  2f:   8b 00                   mov    (%rax),%eax
  31:   01 45 fc                add    %eax,-0x4(%rbp)
  34:   83 45 f8 01             addl   $0x1,-0x8(%rbp)
  38:   8b 45 f8                mov    -0x8(%rbp),%eax
  3b:   3b 45 e4                cmp    -0x1c(%rbp),%eax
  3e:   7c db                   jl     1b <sum+0x1b>
  40:   8b 45 fc                mov    -0x4(%rbp),%eax
  43:   5d                      pop    %rbp
  44:   c3                      retq
```

链接准备的一些要点

- 链接脚本可用于配置你的链接过程
- 可以指定各节的起始地址：
  - .text 节从 0xbabe00 开始
  - .data 节从 0xcafe00 开始
- 使用以下命令：
- gcc a.lds –o m main.o sum.o

```
SECTIONS
{
  .text 0x00BABE00:
  {
     *(.text)
  }
  . = ALIGN(0);
  .data 0x00CAFE00:
  {
     *(.data)
  }
}
```

a.lds


.text=0xbabe00
0000000000000000 <main>:
0: 55
1: 48 89 e5
4: 48 83 ec 20
8: 89 7d ec
b: 48 89 75 e0
f: be 02 00 00 00
14: bf 00 00 00 00
19: e8 00 00 00 00
1e: 89 45 fc
21: 8b 45 fc
24: c9
25: c3
main.o
0000000000000000 <sum>:
0: 55
1: 48 89 e5
4: 48 89 7d e8
8: 89 75 e4
b: c7 45 fc 00 00 00 00
12: c7 45 f8 00 00 00 00
19: eb 1d
1b: 8b 45 f8
1e: 48 98
20: 48 8d 14 85 00 00 00
27: 00
28: 48 8b 45 e8
2c: 48 01 d0
2f: 8b 00
31: 01 45 fc
34: 83 45 f8 01
38: 8b 45 f8
3b: 3b 45 e4
3e: 7c db
40: 8b 45 fc
43: 5d
44: c3
sum.o
0000000000babe00 <_start>:
...
0000000000babf18 <main>:
babf18: 55
babf19: 48 89 e5
babf1c: 48 83 ec 20
babf20: 89 7d ec
babf23: 48 89 75 e0
babf27: be 02 00 00 00
babf2c: bf 10 fe ca 00
babf31: e8 0a 00 00 00
babf36: 89 45 fc
babf39: 8b 45 fc
babf3c: c9
babf3d: c3
0000000000babf40 <sum>
babf40: 55
babf41: 48 89 e5
babf44: 48 89 7d e8
babf48: 89 75 e4
babf4b: c7 45 fc 00 00 00 00
babf52: c7 45 f8 00 00 00 00
babf59: eb 1d
babf5b: 8b 45 f8
babf5e: 48 98
babf60: 48 8d 14 85 00 00 00
babf67: 00
babf68: 48 8b 45 e8
babf6c: 48 01 d0
babf6f: 8b 00
babf71: 01 45 fc
babf74: 83 45 f8 01
babf78: 8b 45 f8
babf7b: 3b 45 e4
babf7e: 7c db
babf80: 8b 45 fc
babf83: 5d
babf84: c3
executable
Disassembly of section .data:
0000000000cafe00 <__data_start>:
...
0000000000cafe10 <array>:
cafe10: 01 00
cafe12: 00 00
cafe14: 02 00
.data=0xcafe00
addr_of_array=0xcafe10
Using the value 0xcafe10
to modify the content here
addr_of_main=0xbabf18
addr_of_sum=0xbabf40
offset = 0x1a
addend = -4
refptr
= 0xbabf18 + 0x1a
= 0xbabf32
*refptr(content)
=0xbabf40-4-0xbabf32
=0x0a

```
0000000000babe00 <_start>:
...
0000000000babf18 <main>:
 babf18:  55
 babf19:  48 89 e5
 babf1c:  48 83 ec 20
 babf20:  89 7d ec
 babf23:  48 89 75 e0
 babf27:  be 02 00 00 00
 babf2c:  bf 10 fe ca 00
 babf31:  e8 0a 00 00 00
 babf36:  89 45 fc
 babf39:  8b 45 fc
 babf3c:  c9
 babf3d:  c3
0000000000babf40 <sum>:
 babf40:  55
 babf41:  48 89 e5
 babf44:  48 89 7d e8
 babf48:  89 75 e4
 babf4b:  c7 45 fc 00 00 00 00
 babf52:  c7 45 f8 00 00 00 00
 babf59:  eb 1d
 babf5b:  8b 45 f8
 babf5e:  48 98
 babf60:  48 8d 14 85 00 00 00
 babf67:  00
 babf68:  48 8b 45 e8
 babf6c:  48 01 d0
 babf6f:  8b 00
 babf71:  01 45 fc
 babf74:  83 45 f8 01
 babf78:  8b 45 f8
 babf7b:  3b 45 e4
 babf7e:  7c db
 babf80:  8b 45 fc
 babf83:  5d
 babf84:  c3
```

它因链接顺序而不同

```
0000000000babe00 <_start>:
...
0000000000babf18 <sum>:
  babf18:       55
  babf19:       48 89 e5
  babf1c:       48 89 7d e8
  babf20:       89 75 e4
  babf23:       c7 45 fc 00 00 00 00
  babf2a:       c7 45 f8 00 00 00 00
  babf31:       eb 1d
  babf33:       8b 45 f8
  babf36:       48 98
  babf38:       48 8d 14 85 00 00 00
  babf3f:       00
  babf40:       48 8b 45 e8
  babf44:       48 01 d0
  babf47:       8b 00
  babf49:       01 45 fc
  babf4c:       83 45 f8 01
  babf50:       8b 45 f8
  babf53:       3b 45 e4
  babf56:       7c db
  babf58:       8b 45 fc
  babf5b:       5d
  babf5c:       c3
  babf5d:       00 00
0000000000babf60 <main>:
  babf60:       55
  babf61:       48 89 e5
  babf64:       48 83 ec 20
  babf68:       89 7d ec
  babf6b:       48 89 75 e0
  babf6f:       be 02 00 00 00
  babf74:       bf 10 fe ca 00
  babf79:       e8 9a ff ff ff
  babf7e:       89 45 fc
  babf81:       8b 45 fc
  babf84:       c9
  babf85:       c3
```

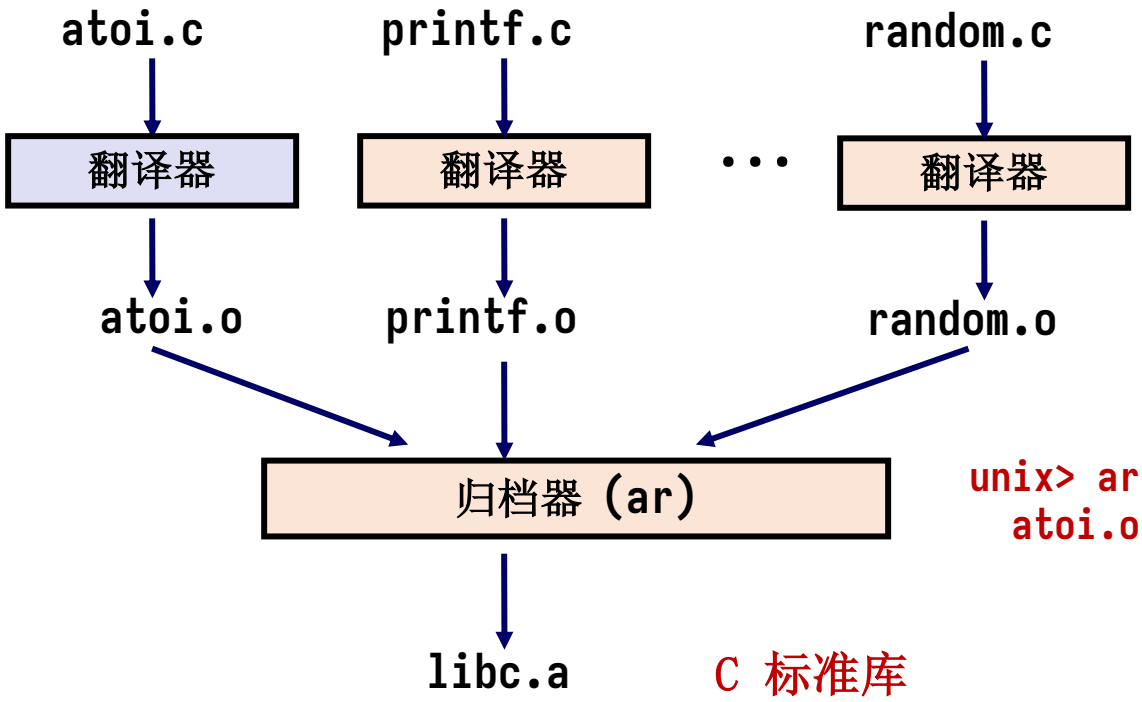
库：打包一组函数

- 如何打包程序员常用的函数？
  - 数学运算、输入/输出、内存管理、字符串操作等
- 链接器框架可选的行为：
  - 选项 1：将所有函数放入单个源文件
    - 程序员将大型目标文件链接到他们的程序中
    - 空间和时间效率低下
  - 选项 2：将每个函数放入单独的源文件
    - 程序员需要显式地将适当的二进制文件链接到他们的程序中
    - 效率更高，但对程序员来说比较繁琐

解决方案：库

- 静态库（.a 归档文件）
  - 合并：将相关的可重定位目标文件链接成一个带索引的单一文件（称为归档文件）。
  - 解析：增强链接器，使其尝试通过在一个或多个归档文件中查找符号来解析未解析的外部引用。
  - 链接：如果归档成员文件解析了引用，则将其链接到可执行文件中。

创建静态库




```
unix> ar rs libc.a \
  atoi.o printf.o … random.o
```

- 归档器允许进行增量更新。
- 重新编译发生变化的函数，并在归档中替换相应的 .o 文件。

常用库

- libc.a（C 标准库）
  - 4.6 MB 的归档文件，包含 1496 个目标文件。
  - 功能包括：输入/输出、内存分配、信号处理、字符串处理、日期和时间、随机数生成、整数数学运算
- libm.a（C 数学库）
  - 2 MB 的归档文件，包含 444 个目标文件。
  - 功能：浮点数学运算（如 sin、cos、tan、log、exp、sqrt 等）

```
% ar -t /usr/lib/libc.a | sort
...
fork.o
...
fprintf.o
fpu_control.o
fputc.o
freopen.o
fscanf.o
fseek.o
fstab.o
...
```

```
% ar -t /usr/lib/libm.a | sort
...
e_acos.o
e_acosf.o
e_acosh.o
e_acoshf.o
e_acoshl.o
e_acosl.o
e_asin.o
e_asinf.o
e_asinl.o
...
```

与静态库链接

```c
#include "vector.h"
#include <stdio.h>

int x[2] = { 1, 2 };
int y[2] = { 3, 4 };
int z[2];

int main(int argc, char** argv)
{
    addvec(x, y, z, 2);
    printf("z = [%d %d]\n",
z[0], z[1]);
    return 0;
}
```

main2.c

libvector.a

```c
void addvec(int *x, int *y,
            int *z, int n) {
    int i;

    for (i = 0; i < n; i++)
        z[i] = x[i] + y[i];
}
```

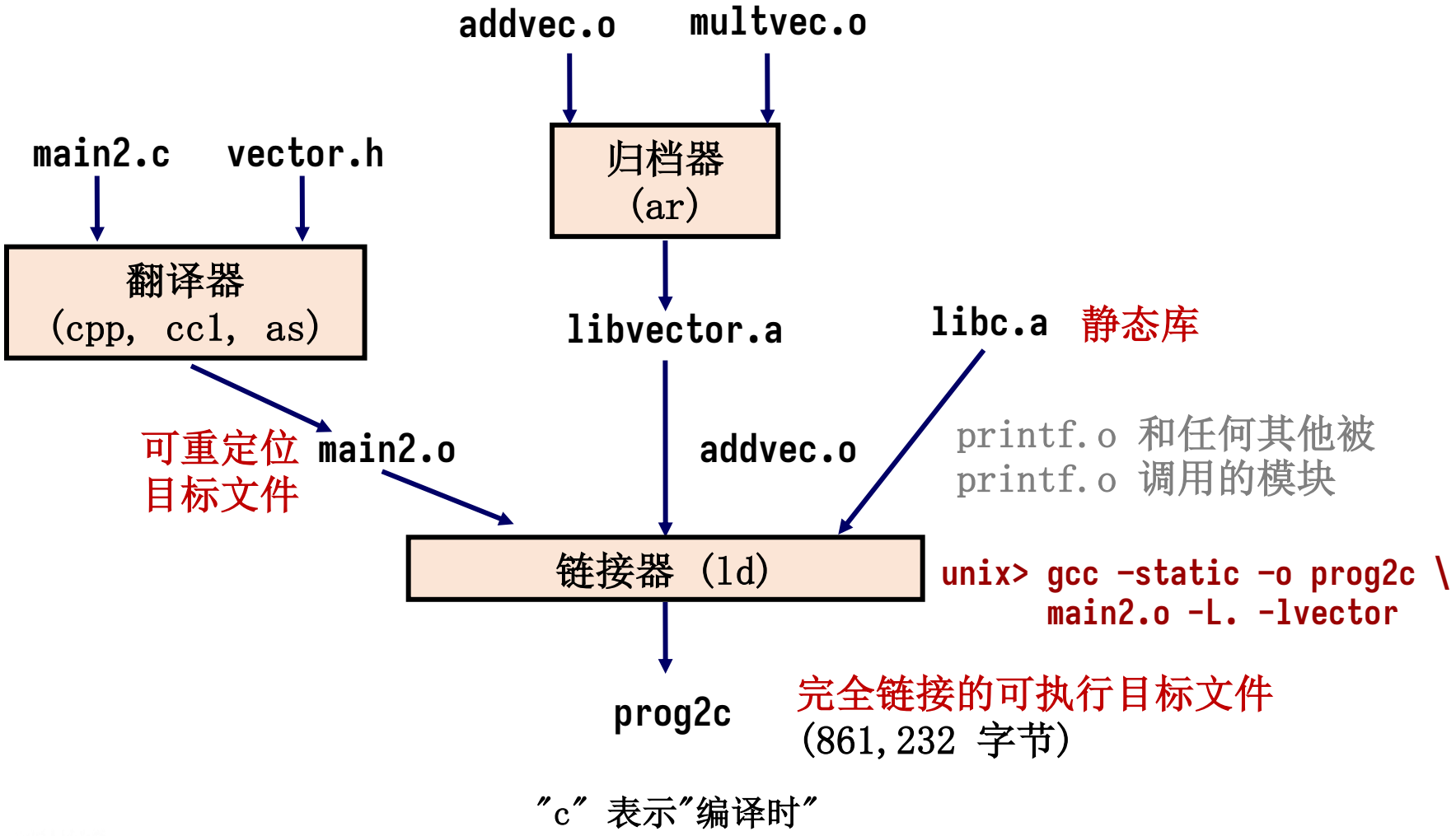
addvec.c

```c
void multvec(int *x, int *y,
             int *z, int n)
{
    int i;

    for (i = 0; i < n; i++)
        z[i] = x[i] * y[i];
}
```

multvec.c

与静态库链接


addvec.o
multvec.o
main2.c
vector.h
归档器
(ar)
翻译器
(cpp, cc1, as)
libvector.a
libc.a 静态库
可重定位
目标文件
main2.o
addvec.o
printf.o 和任何其他被
printf.o 调用的模块
链接器 (ld)
unix> gcc -static -o prog2c \
main2.o -L. -lvector
prog2c
完全链接的可执行目标文件
(861,232 字节)
"c" 表示"编译时"

使用静态库

- 链接器解析外部引用的算法：
  - 扫描：按命令行顺序扫描 .o 文件和 .a 文件。
  - 建立表：在扫描过程中，保持一个当前未解析引用的列表。
  - 尝试解析：当遇到每个新的 .o 或 .a 文件（obj）时，尝试将列表中的每个未解析引用与 obj 中定义的符号进行解析。
  - 表不空则报错：如果扫描结束时未解析列表中仍有条目，则报错。
- 问题：

```
unix> gcc -static -o prog2c -L. -lvector main2.o
main2.o: In function `main':
main2.c:(.text+0x19): undefined reference to `addvec'
collect2: error: ld returned 1 exit status
```

现代解决方案：共享库

- 静态库有以下缺点：
  - 冗余：存储的可执行文件中存在重复（每个函数都需要 libc）
  - 运行的可执行文件中存在重复
  - 修改难：系统库的小型 bug 修复需要每个应用程序显式重新链接
    - 用 glibc 重新构建所有内容？
- 现代解决方案：共享库
  - 包含代码和数据的目标文件，可以动态地加载并链接到应用程序中，可以在加载时或运行时进行
  - 也称为：动态链接库、DLL、.so 文件

不见兔子不撒鹰

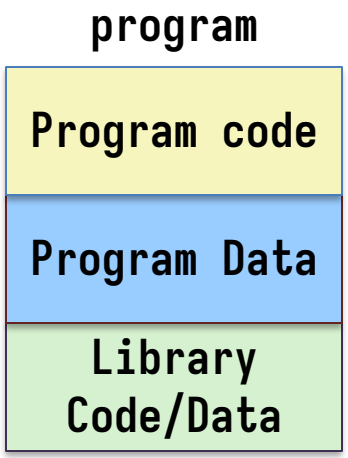
动态链接共享库

- 动态链接可以在可执行文件首次加载并运行时发生（加载时链接）。
  - Linux 常见情况，由动态链接器（ld-linux.so）自动处理。
  - 标准 C 库（libc.so）通常动态链接。
- 动态链接也可以在程序开始运行后发生（运行时链接）。
  - 在 Linux 中，这是通过调用 dlopen() 接口完成的。
    - 用于分发软件。
    - 高性能 Web 服务器。
    - 运行时库插入。
- 共享库例程可以被多个进程共享。
  - 当我们学习虚拟内存时会有更多相关内容
  - 可重入，多进程共享

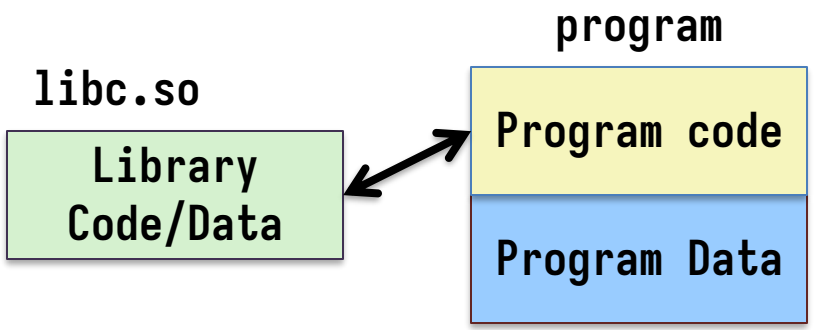
静态链接 vs 动态链接

- **静态链接**：在编译时，所需的代码和数据被复制到可执行文件中
- **动态链接**：在运行时，所需的代码和数据被链接到可执行文件中

静态链接：

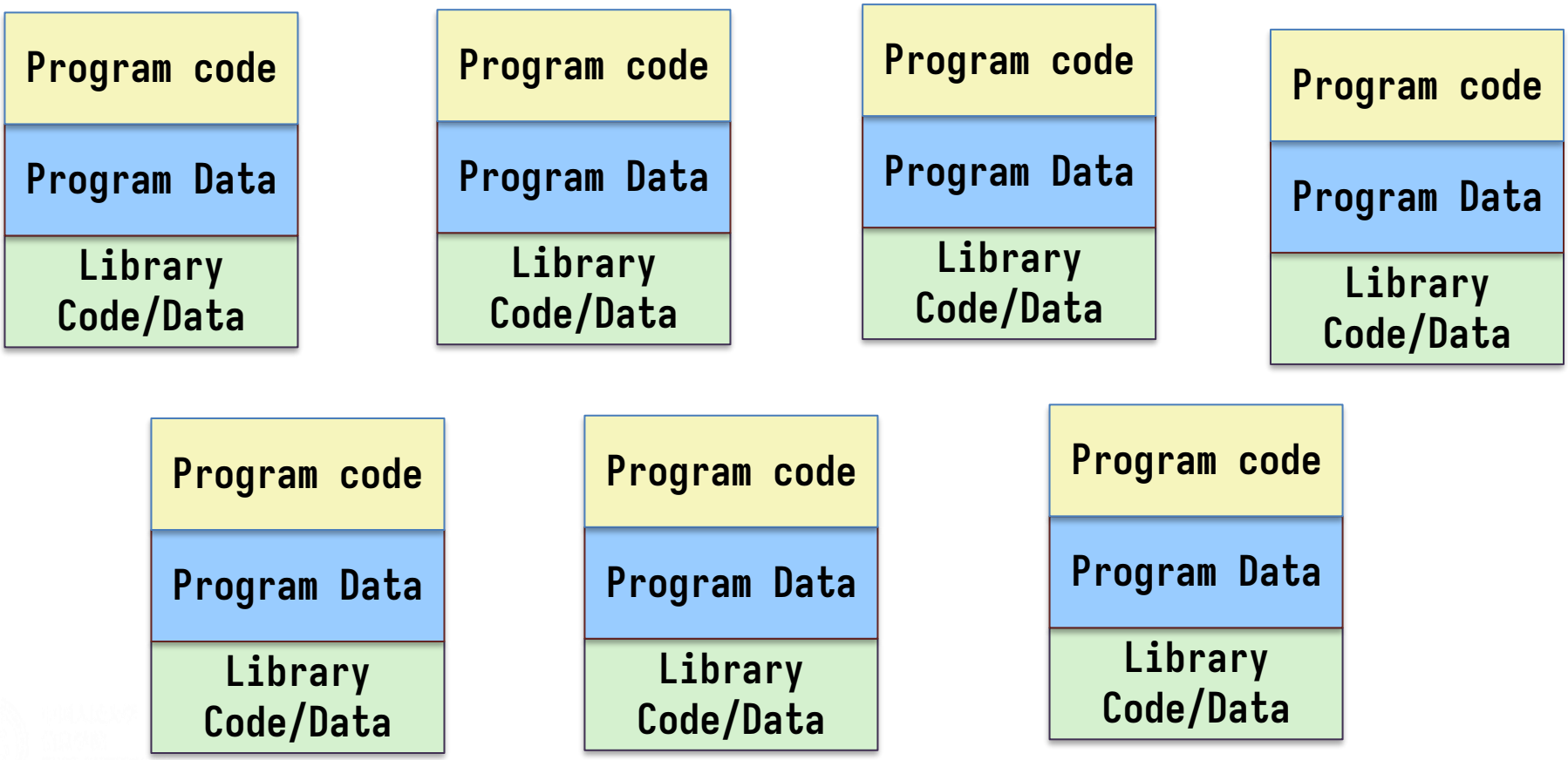


动态链接：



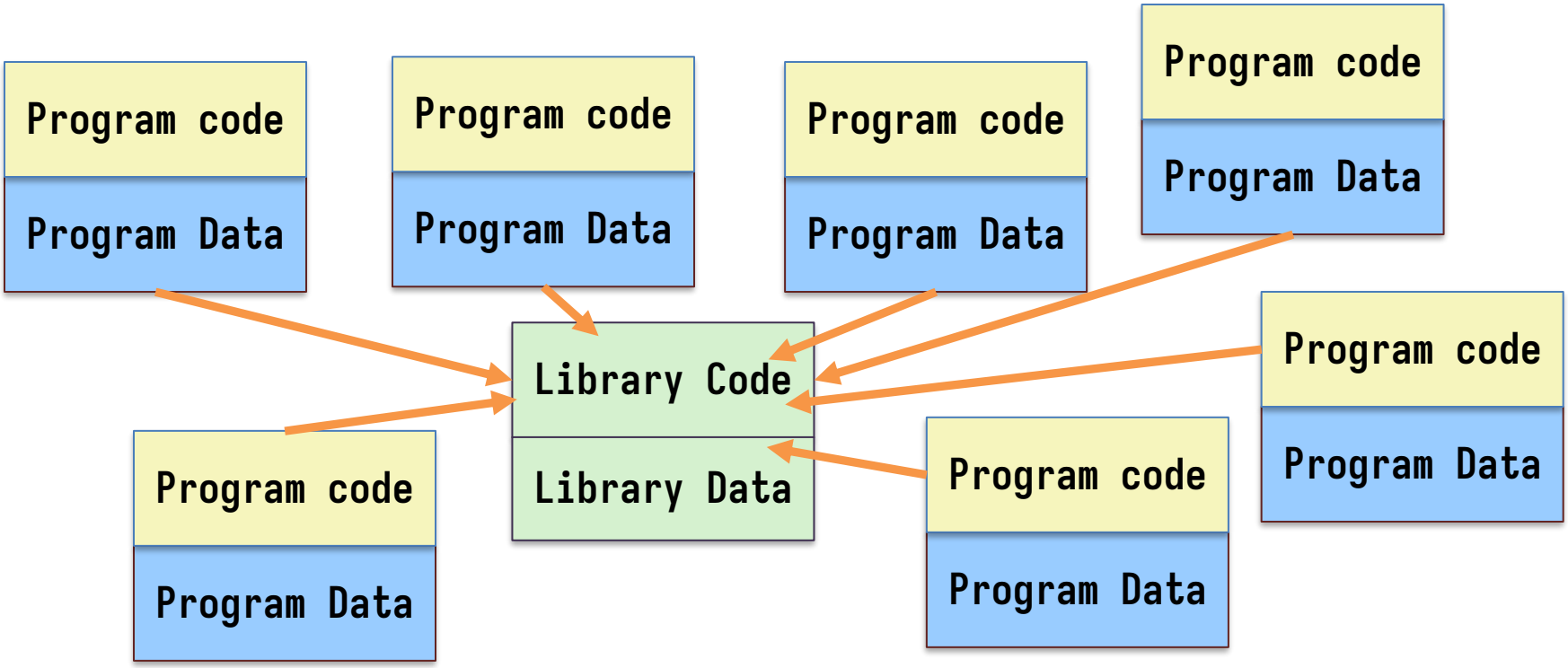
静态链接

- 对于多个程序，可执行文件的大小会发生什么变化？



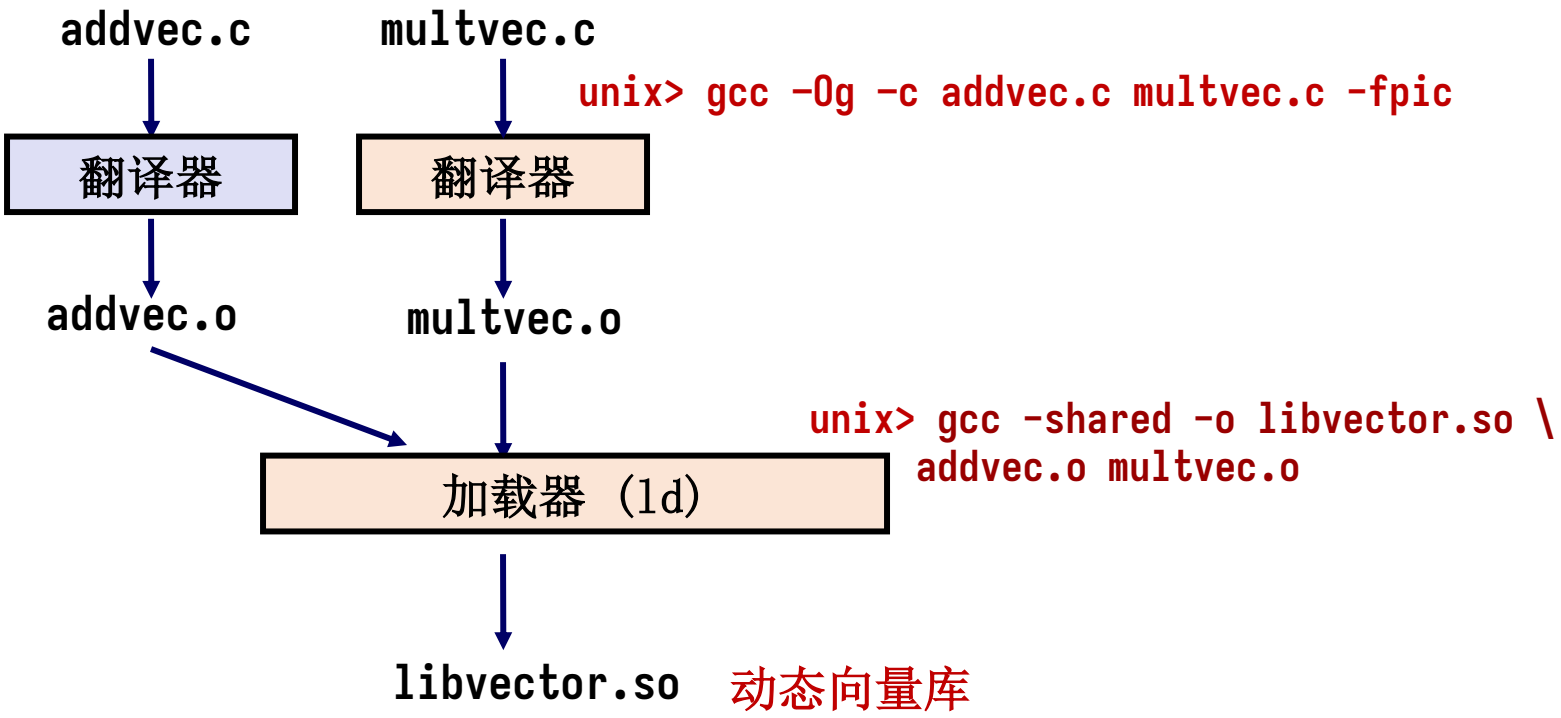
动态链接

- 对于多个程序，可执行文件的大小会发生什么变化？

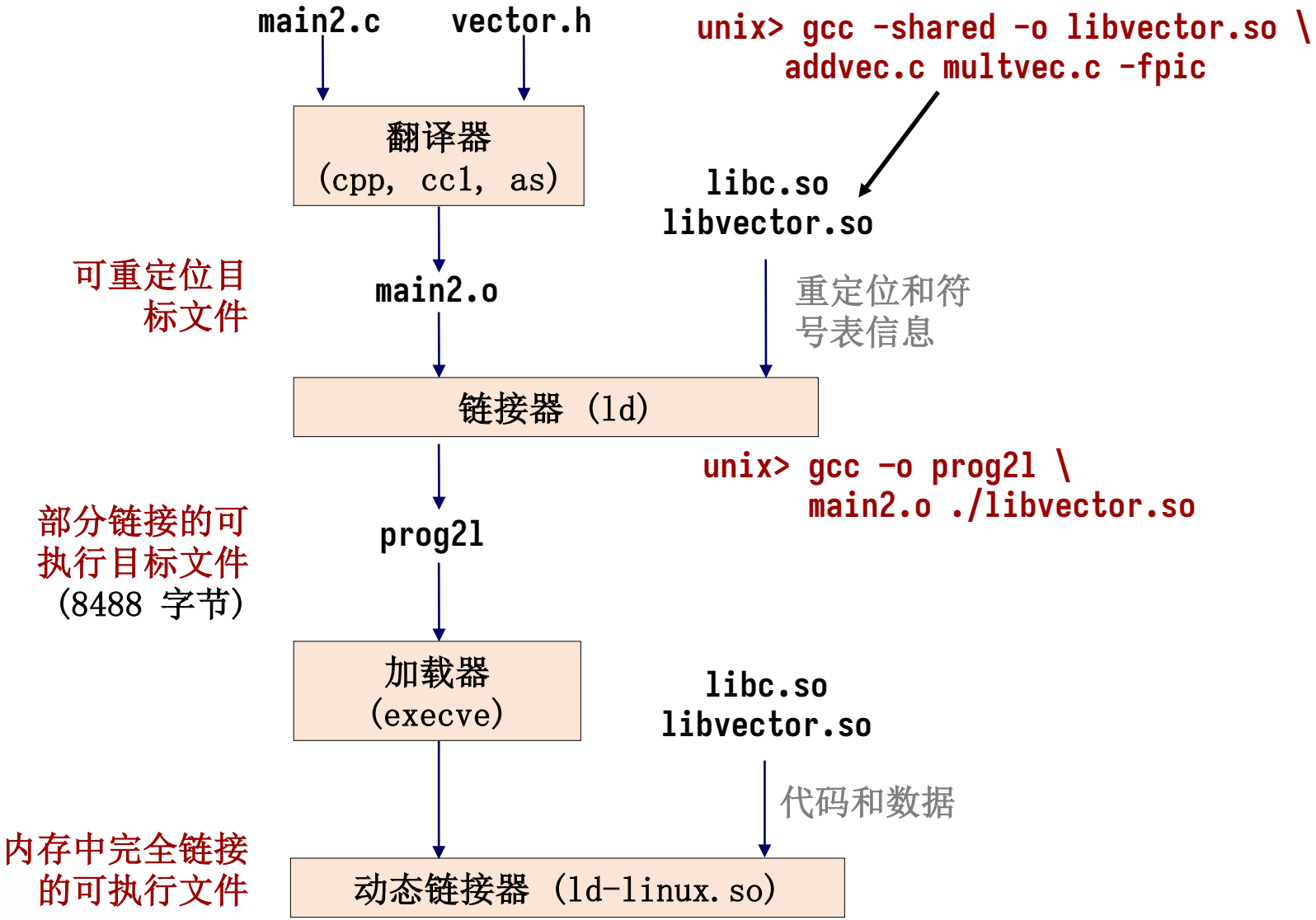


- 库的全局数据如何处理？写时复制（Copy on Write）

动态库示例

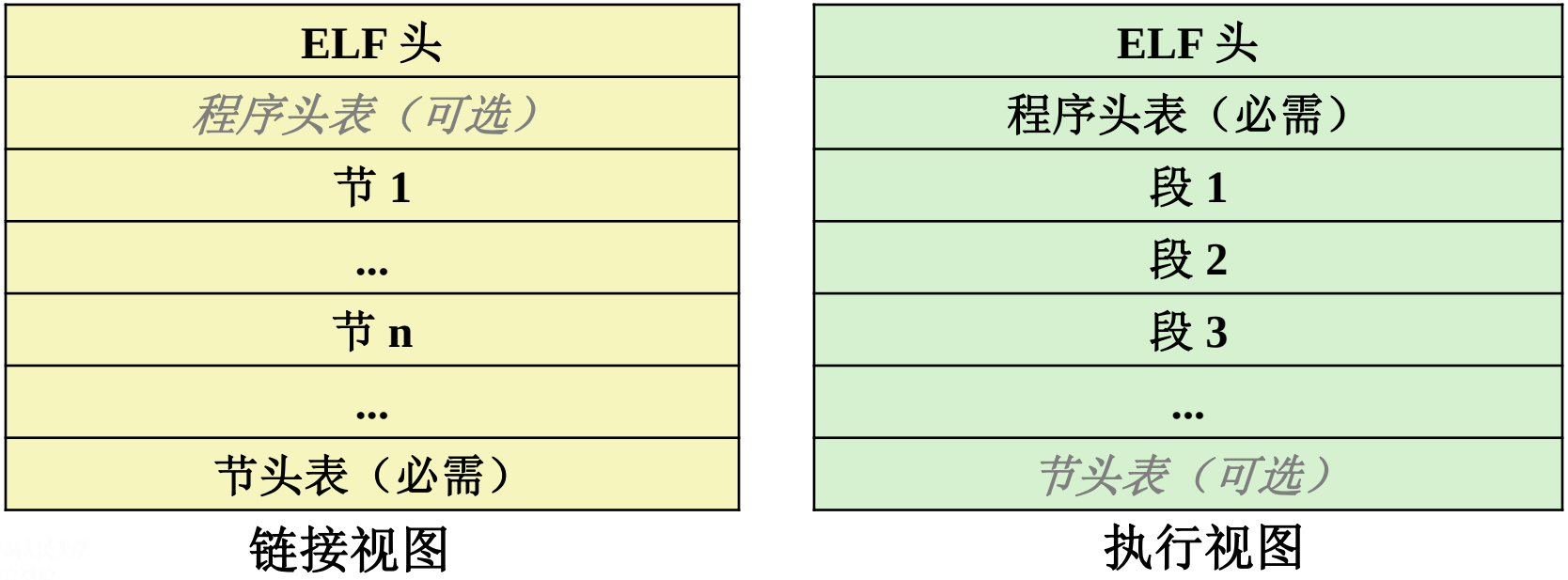

addvec.c
multvec.c
unix> gcc -Og -c addvec.c multvec.c -fpic
翻译器
翻译器
addvec.o
multvec.o
unix> gcc -shared -o libvector.so \
addvec.o multvec.o
加载器 (ld)
libvector.so
动态向量库

加载时动态链接


main2.c
vector.h
翻译器
(cpp, cc1, as)
main2.o
可重定位目
标文件
unix> gcc -shared -o libvector.so \
addvec.c multvec.c -fpic
libc.so
libvector.so
重定位和符
号表信息
链接器 (ld)
unix> gcc -o prog2l \
main2.o ./libvector.so
prog2l
部分链接的可
执行目标文件
(8488 字节)
加载器
(execve)
libc.so
libvector.so
代码和数据
动态链接器 (ld-linux.so)
内存中完全链接
的可执行文件

ELF 文件的并行视图

- 程序头表/段（Segments）用于构建进程映像（执行程序）；可重定位文件不需要它
- 链接过程中使用的文件必须有节头表（Sections）；其他目标文件可能有也可能没有。



程序头

- ELF 可执行文件易于加载到内存中，连续的块映射到连续的内存段。这由程序头表描述

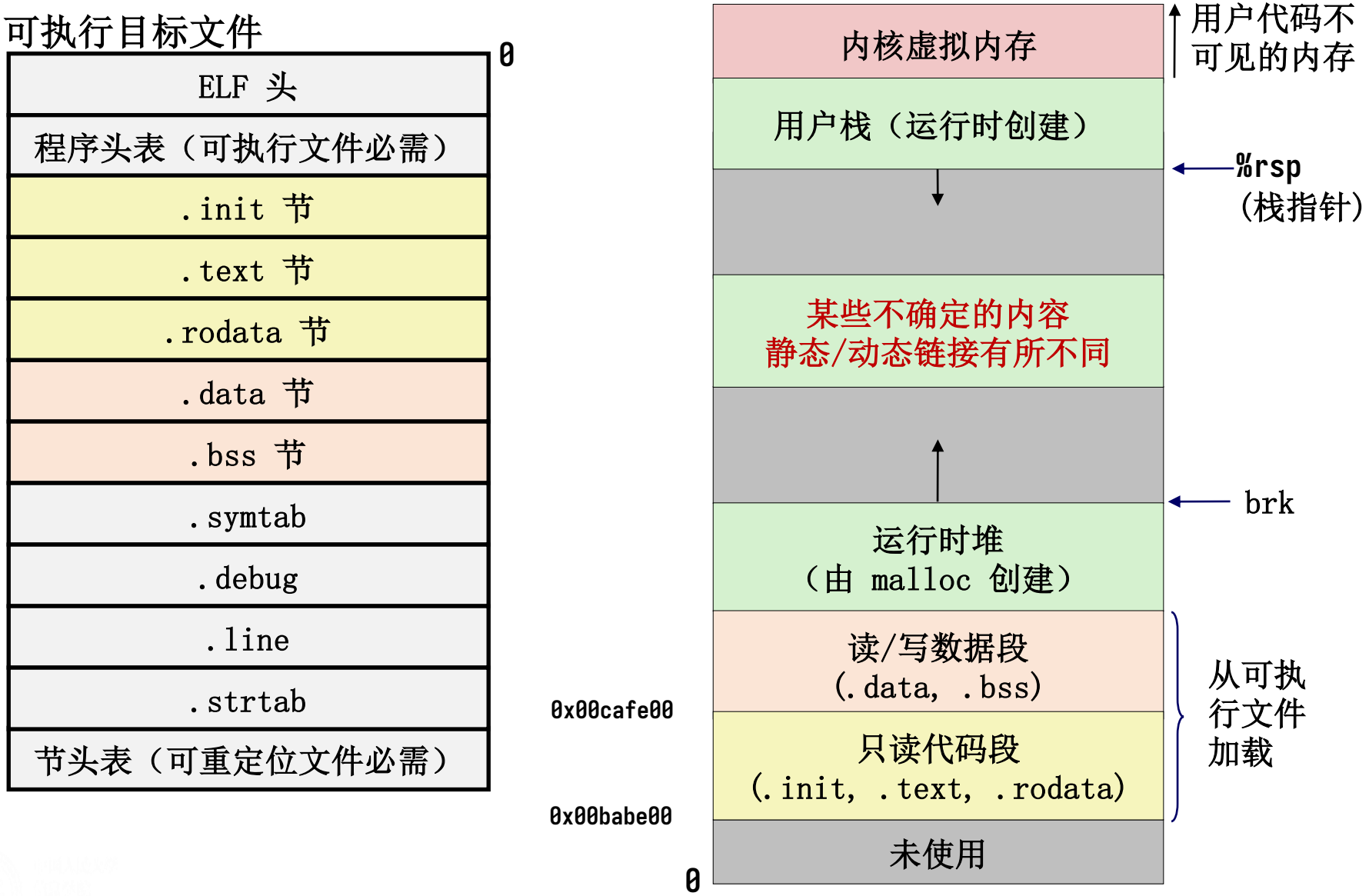
```
#  objdump -x m

.......
LOAD off 0x0000000001abe00 vaddr 0x0000000000babe00 paddr 0x0000000000babe00 align 2**12
  filesz 0x000000000000032c memsz 0x000000000000032c flags r-x
LOAD off 0x0000000002afe00 vaddr 0x0000000000cafe00 paddr 0x0000000000cafe00 align 2**12
  filesz 0x0000000000000018 memsz 0x0000000000000020 flags rw-
```

off: 目标文件中的偏移量	vaddr/paddr: 内存地址	align: 对齐要求
filesz: 目标文件中的段大小	memsz: 内存中的段大小	flags: 运行时权限

- .text 从 0x00babe00 开始，.data 从 0x00cafe00 开始，正如我们之前在链接脚本中指定的那样
- 根据标志，.text 是可执行的，而 .data 是可写的

加载可执行目标文件


可执行目标文件
0
ELF 头
程序头表（可执行文件必需）
.init 节
.text 节
.rodata 节
.data 节
.bss 节
.symtab
.debug
.line
.strtab
节头表（可重定位文件必需）
内核虚拟内存
用户代码不可见的内存
用户栈（运行时创建）
%rsp
（栈指针）
某些不确定的内容
静态/动态链接有所不同
brk
运行时堆
（由 malloc 创建）
读/写数据段
(.data, .bss)
从可执行文件加载
0x00cafe00
只读代码段
(.init, .text, .rodata)
0x00babe00
未使用
0