南京大学

南京大学计算机科学与技术系

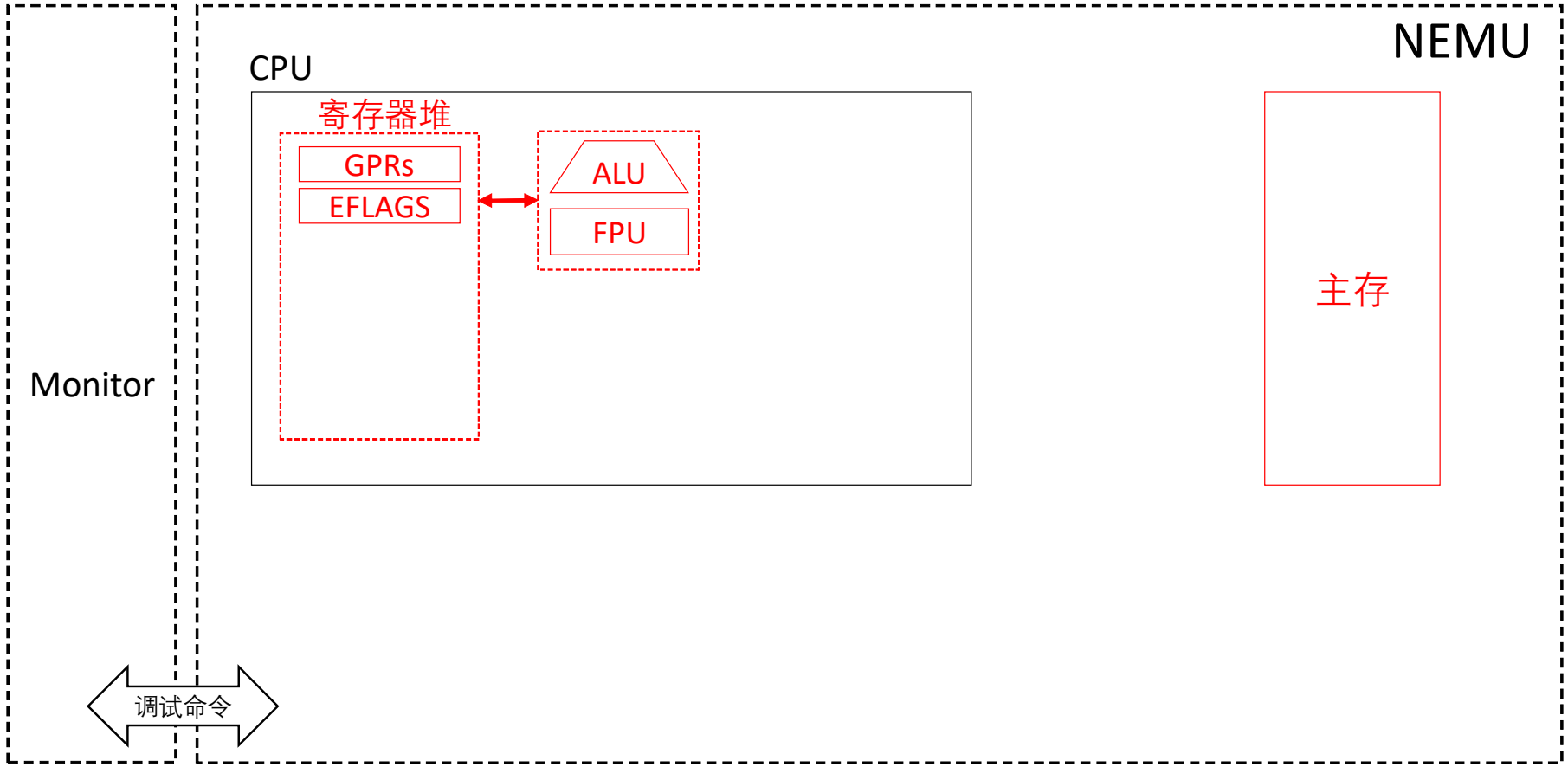
计算机系统基础
Programming Assignment

PA 2-0 – 汇编基础知识先导课

2022年3月11日

南京大学《计算机系统基础》课程组

前情提要



目录

- 从高级语言到机器指令
- 汇编语句与机器指令
- 尝试用gdb调试程序

目录

- 从高级语言到机器指令
  - C语言程序编译的过程（了解相应的Linux命令）
  - 查看目标文件中的机器指令（了解相应的Linux命令）
  - NEMU模拟实现计算机执行指令
- 汇编语句与机器指令
- 尝试用gdb调试程序

从高级语言到机器指令 – C语言程序编译的过程

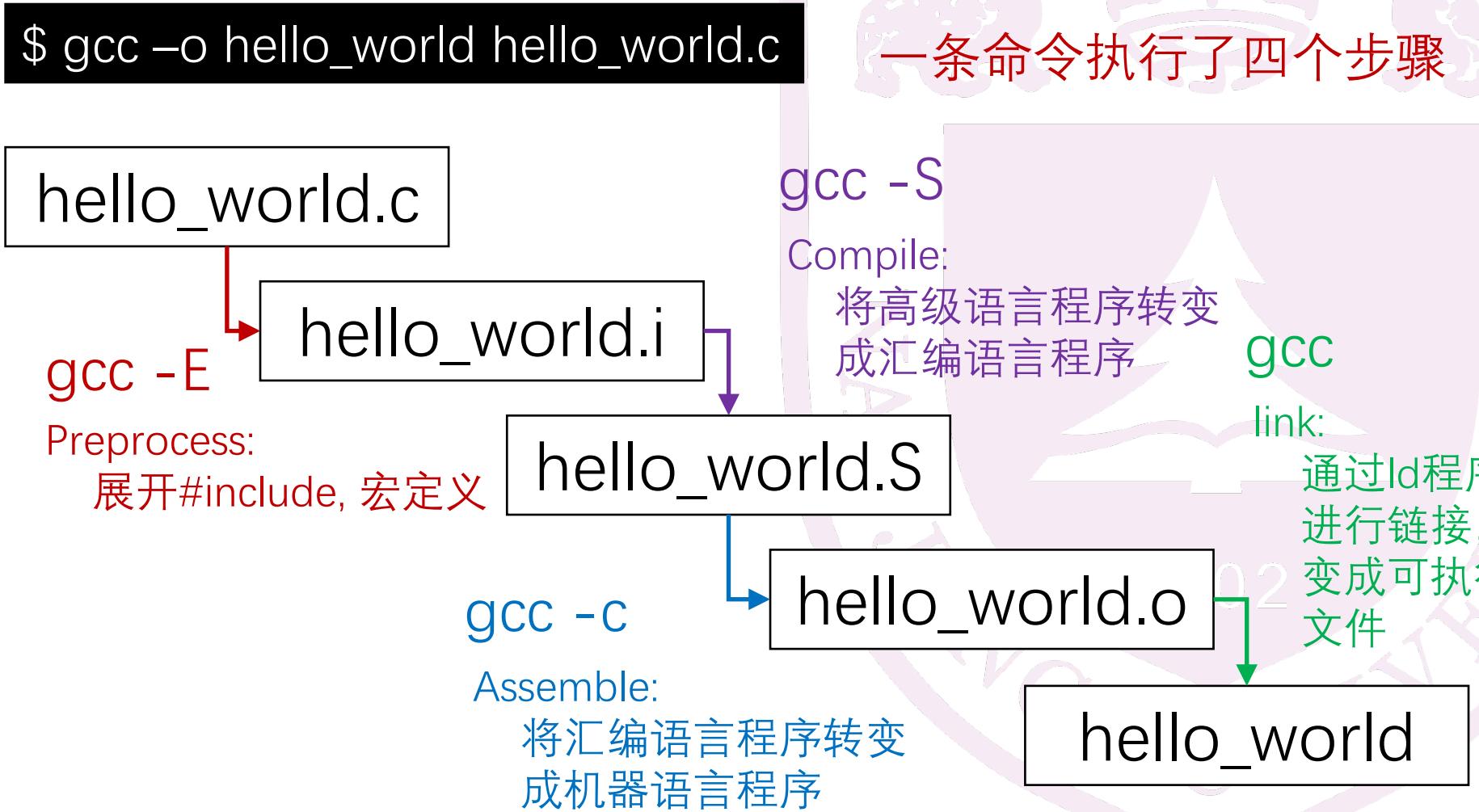
hello_world.c

```
#include<stdio.h>

int main() {
    printf("Hello World!\n");
    return 0;
}
```

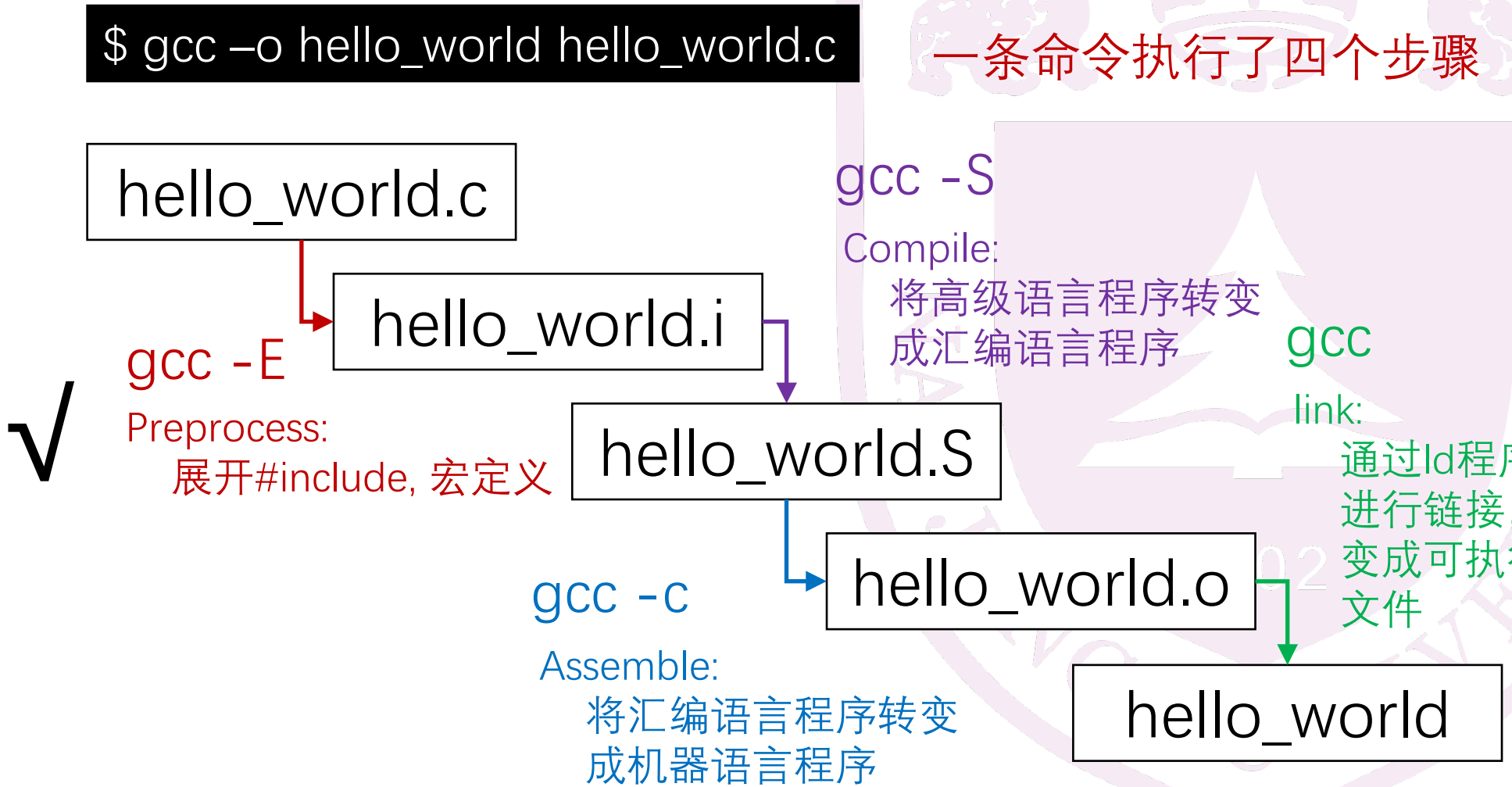
```
$ gcc –o hello_world hello_world.c
$ ./hello_world
Hello World!
```

编译
运行

从高级语言到机器指令 – C语言程序编译的过程



从高级语言到机器指令 – C语言程序编译的过程



从高级语言到机器指令 – C语言程序编译的过程

```
$ gcc –E –o hello_world.i hello_world.c
$ cat hello_world.i | less
```

hello_world.i 预处理的结果

```
…       // 一大堆c语言的代码，是stdio.h展开的结果
extern int fprintf (FILE *__restrict __stream,
      const char *__restrict __format, ...);

extern int printf (const char *__restrict __format, ...); // printf的声明

extern int sprintf (char *__restrict __s,
      const char *__restrict __format, ...) __attribute__ ((__nothrow__));
…
# 3 "hello_world.c”  // 最后，是我们的程序代码

int main() {
 printf("Hello World!\n");
 return 0;
}
```

从高级语言到机器指令 – C语言程序编译的过程

```
$ gcc –E –o hello_world.i hello_world.c
$ cat hello_world.i | less
```

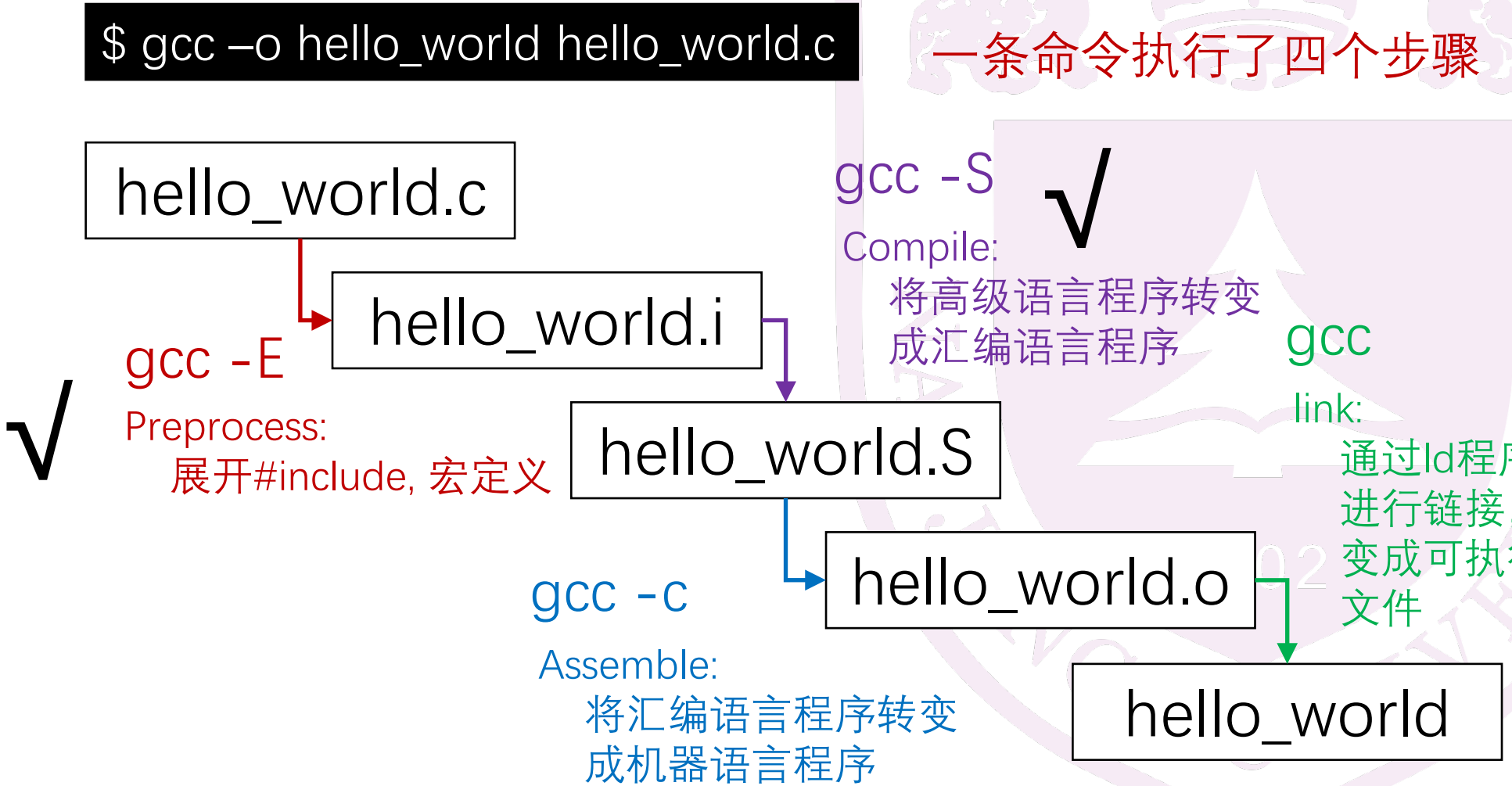
hello_world.i 预处理的结果

```
…       // 一大堆c语言的代码，是stdio.h展开的结果
extern int fprintf (F
      const char *__r

extern int printf (co

extern int sprintf (c
      const char *__r
…
# 3 "hello_world.c”

int main() {
 printf("Hello World!
 return 0;
}
```

宏的预处理

```
// nemu/include/memory/memory.h
#define MEM_SIZE_B 128 * 1024 * 1024

// nemu/src/memory/memory.c
uint8_t hw_mem[MEM_SIZE_B];

// nemu/src/memory/memory.i
uint8_t hw_mem[128 * 1024 * 1024];
```

从高级语言到机器指令 – C语言程序编译的过程



从高级语言到机器指令 – C语言程序编译的过程

```
$ gcc –S –o hello_world.S hello_world.i
$ cat hello_world.S | less
```

hello_world.S 编译的结果

```
.file   "hello_world.c"
        .section        .rodata     // 只读数据
.LC0:
        .string "Hello World!"
        .text                       // 代码
        .globl  main                // 全局符号main
        .type   main, @function
main:                               // main函数的汇编代码从这里开始
.LFB0:
        .cfi_startproc
        leal    4(%esp), %ecx
        .cfi_def_cfa 1, 0
        andl    $-16, %esp
        pushl   -4(%ecx)
```

汇编指令

从高级语言到机器指令 – C语言程序编译的过程

```
$ gcc –S –o hello_world.S hello_world.i
$ cat hello_world.S | less
```

hello_world.S 编译的结果

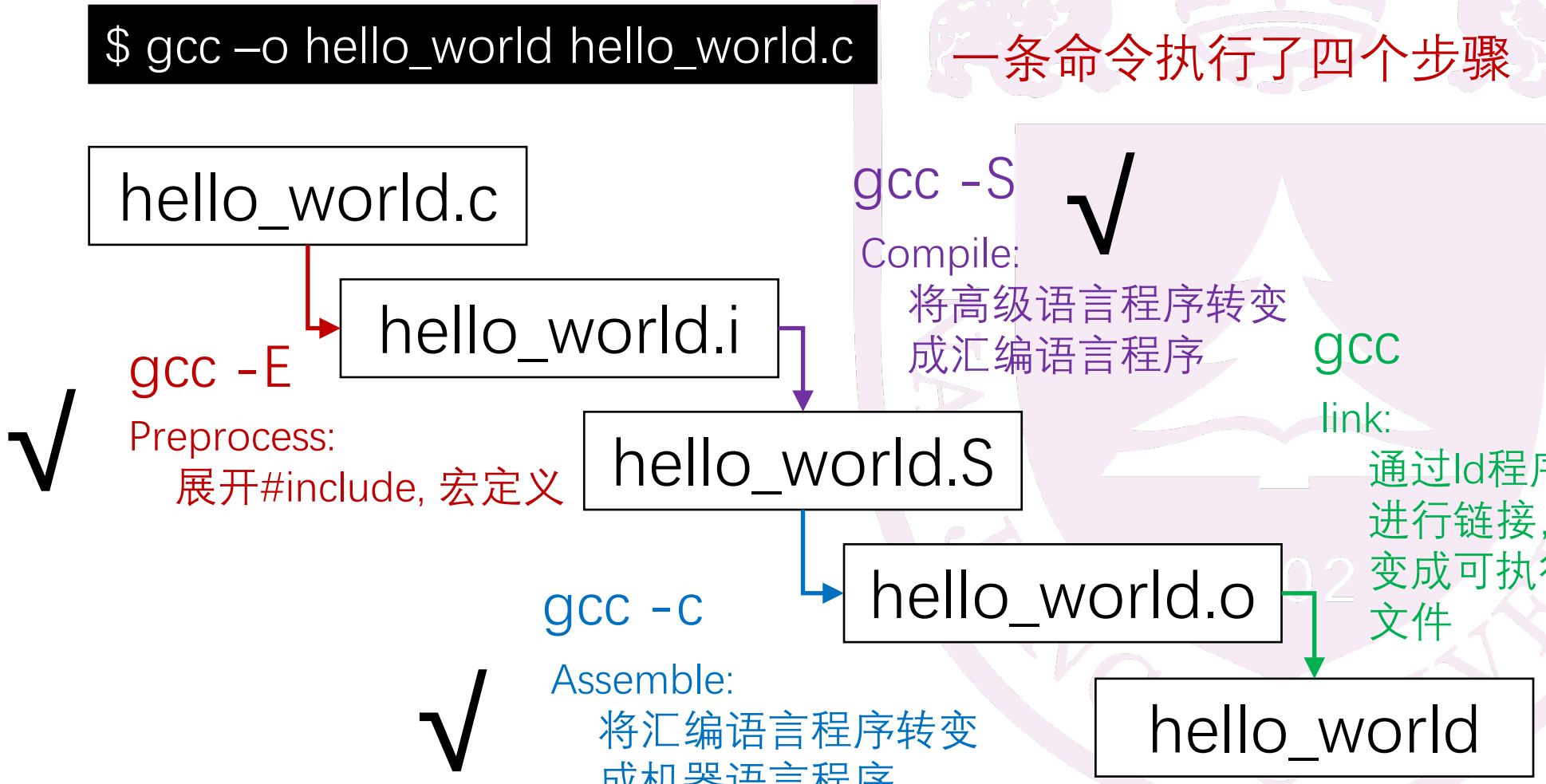
```
.file   "hello_world.c"
        .section        .rodata     // 只读数据
.LC0:
        .string "Hello World!"
        .text                       // 代码
        .globl  main                // 全局符号main
        .type   main, @function
main:                               // main函数的汇
.LFB0:
        .cfi_startproc
        leal    4(%esp), %ecx
        .cfi_def_cfa 1, 0
        andl    $-16, %esp
        pushl   -4(%ecx)
```

汇编指令

如何从C语言程序转化为汇编语言程序?

进一步学习：编译原理

从高级语言到机器指令 – C语言程序编译的过程



从高级语言到机器指令 – C语言程序编译的过程

```
$ gcc –c –o hello_world.o hello_world.S
$ hexdump hello_world.o | less
```

hello_world.o 查看其内容

```
0000000 457f 464c 0101 0001 0000 0000 0000 0000
0000010 0001 0003 0001 0000 0000 0000 0000 0000
0000020 02fc 0000 0000 0000 0034 0000 0000 0028
0000030 000f 000e 0001 0000 0007 0000 4c8d 0424
0000040 e483 fff0 fc71 8955 53e5 e851 fffc ffff
0000050 0105 0000 8300 0cec 908d 0000 0000 8952
0000060 e8c3 fffc ffff c483 b810 0000 0000 658d
0000070 59f8 5d5b 618d c3fc 6548 6c6c 206f 6f57
0000080 6c72 2164 8b00 2404 00c3 4347 3a43 2820
0000090 6544 6962 6e61 3620 332e 302e 312d 2938
```

机器语言程序!

偏移量

数据，两字节一组，小端

从高级语言到机器指令 – C语言程序编译的过程

```
$ gcc –c –o hello_world.o hello_world.S
$ objdump -d hello_world.o | less
```

hello_world.o 反汇编其内容

```
hello_world.o:     file format elf32-i386


Disassembly of section .text:

00000000 <main>:
   0:   8d 4c 24 04             lea    0x4(%esp),%ecx
   4:   83 e4 f0                and    $0xfffffff0,%esp
   7:   ff 71 fc                pushl  -0x4(%ecx)
   a:   55                      push   %ebp
   b:   89 e5                   mov    %esp,%ebp
   d:   53                      push   %ebx
   e:   51                      push   %ecx
   f:   e8 fc ff ff ff          call   10 <main+0x10>
```

机器读取并执行的机器指令

对应的汇编助记符

从高级语言到机器指令 – C语言程序编译的过程

```
$ gcc –c –o hello_world.o hello_world.S
$ objdump -d hello_world.o | less
```

hello_world.o 反汇编其内容

```
hello_world.o:     file format elf32-i386


Disassembly of section .text:

00000000 <main>:
   0:   8d 4c 24 04             lea    0x4(%esp),%ecx
   4:   83 e4 f0                and    $0xfffffff0,%esp
   7:   ff 71 fc                pushl  -0x4(%ecx)
   a:   55                      push   %ebp
   b:   89 e5                   mov    %esp,%ebp
   d:   53                      push   %ebx
   e:   51                      push   %ecx
   f:   e8 fc ff ff ff          call   10 <main+0x10>
```

编码

——对应

真值（误

机器读取并执行的机器指令

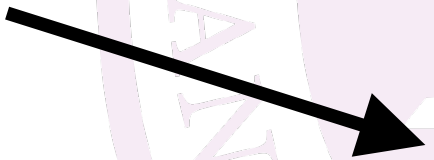
对应的汇编助记符

重要提示!

用objdump命令反汇编目标文件

```
$ objdump -d hello_world.o | less
```

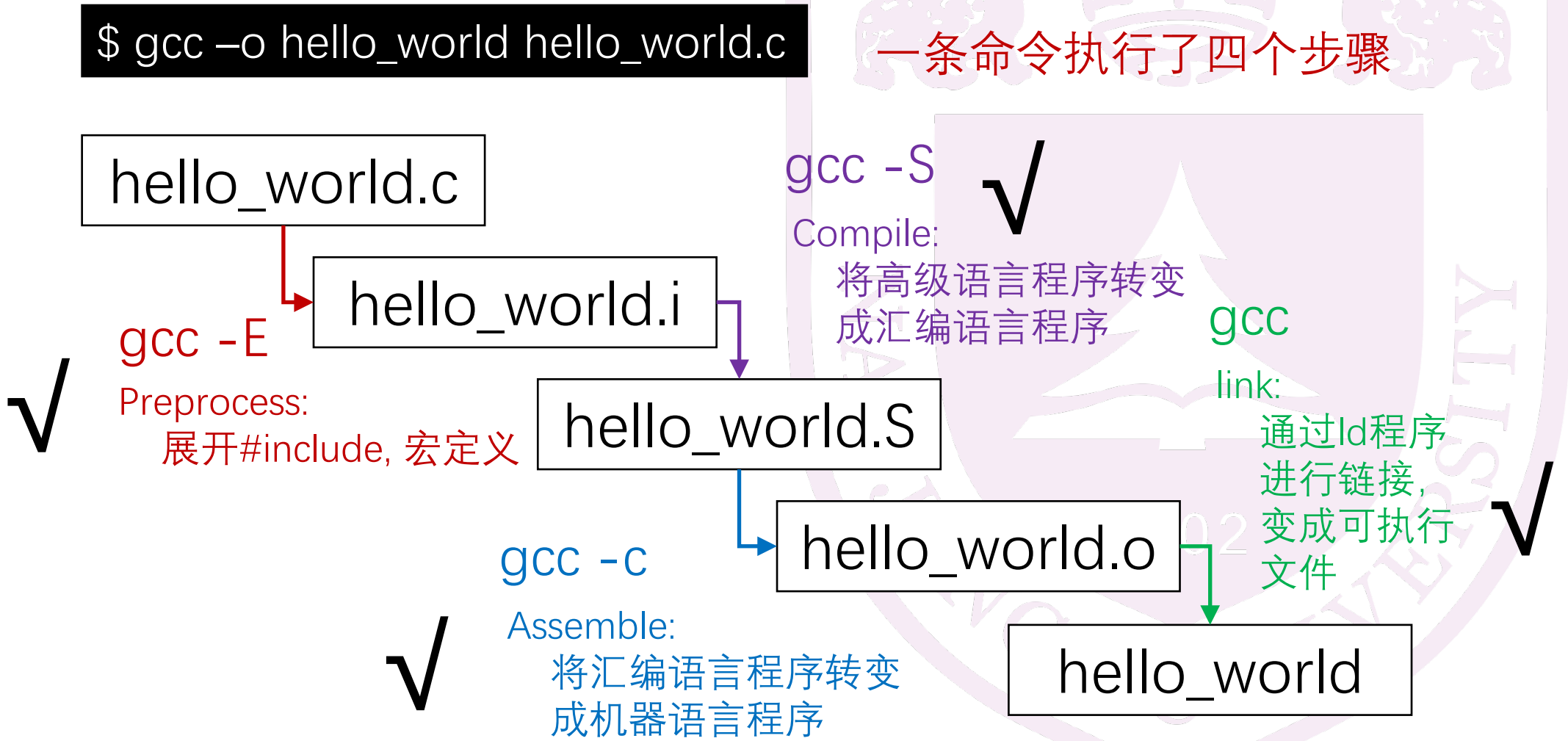
标准的objdump无法识别我们为PA定制的0x82指令，因此我们提供了自己的改造版本，用于反汇编PA的测试用例



objdump4nemu-i386

源码：https://gitee.com/wlicsnju/binutils4nemu

从高级语言到机器指令 – C语言程序编译的过程



从高级语言到机器指令 – C语言程序编译的过程

```
$ gcc –o hello_world hello_world.o

$ ./hello_world

Hello World!
```

- 最后将hello_world.o通过ld程序链接其它模块和库文件，得到最终的可执行文件hello_world
- 此系后话（PA 2-2，2-3简要认识），此时先略去不表

和PA的关系

testcase/src/add.c

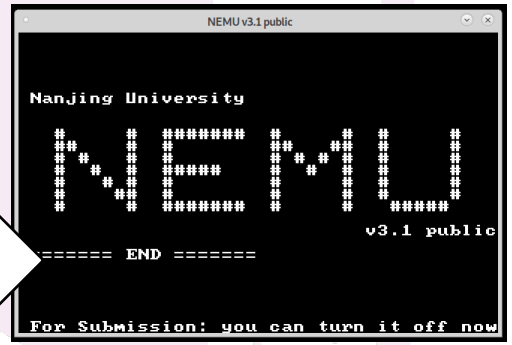
```
int main()
{
        …

        return 0;
}
```

gcc

testcase/bin/add

```
bin/add:     file format elf32-i386


Disassembly of section .text:

00030000 <start>:
   30000:       e9 00 00 00 00
00030005 <main>:
   30005:       55
   30006:       89 e5
   30008:       53
   30009:       83 ec 10
   3000c:       e8 8f 00 00 00
```

装载



nemu本身也被编译成二进制的可执行文件

和PA的关系

模拟CPU
解释执行

testcase/bin/add

执行

虚拟机 + Linux

都是x86指令的序列

小结

- 不管什么语言写的程序，最后交给CPU执行的，都是机器指令的序列
- 这些指令与对应的汇编助记符一一对应


```
e9 00 00 00 00 55 89 e5 53 83 ec 10 e
```

```
jmp 30005; push %ebp; mov %esp,%ebp; push %ebx; sub $0x
```

目录

- 从高级语言到机器指令
- 汇编语句与机器指令
  - 认识Intel和AT&T汇编助记符
  - 学会查阅i386手册指令描述
  - 尝试使用汇编写程序
- 尝试用gdb调试程序

汇编语言编程（指令的格式）

(gcc接受的格式，也是我们写程序采用的格式)

AT&T格式：指令长度后缀 源操作数，目的操作数

```
movl $0x7, %eax
```

```
MOV EAX, 0x7
```

INTEL格式：指令目的操作数，源操作数

(i386手册上采用的格式)

汇编语言编程（指令的格式）

(gcc接受的格式，也是我们写程序采用的格式)

AT&T格式：指令长度后缀 源操作数，目的操作数

```
movl $0x7, %eax
```

```
MOV EAX, 0x7
```

INTEL格式：指令目的操作数，源操作数

(i386手册上采用的格式)

汇编语言编程

- i386指令集：有哪些指令我们可以用？

类型	举例 (长度后缀省略)
传送指令	mov, xchg, push, lea, …, in, out, …
定点算术运算指令	add, sub, mul, div, inc, dec, cmp, …
按位运算指令	and, not, or, xor, test, shr, shl, …
控制转移指令	call, ret, jmp, jne, jb, …, int, iret, …

详见i386手册，以及《实验指导 (Guide)》第一页上列举的参考资料和网站，注意Intel和At&t格式的区别

汇编语言编程（指令的格式）

(gcc接受的格式，也是我们写程序采用的格式)

AT&T格式：指令长度后缀 源操作数, 目的操作数

```
movl $0x7, %eax
```

```
MOV EAX, 0x7
```

INTEL格式：指令目的操作数, 源操作数

(i386手册上采用的格式)

汇编语言编程（长度后缀）

名称	长度（比特）	长度后缀
字节 Byte	8	b
字 Word	16	w
双字 Double Word	32	l

```
movb $0x7, %al
movw $0x7, %ax
movl $0x7, %eax
```

和alu实现中的data_size相关

汇编语言编程（指令的格式）

(gcc接受的格式，也是我们写程序采用的格式)

AT&T格式：指令长度后缀 源操作数, 目的操作数

```
movl $0x7, %eax
```

```
MOV EAX, 0x7
```

INTEL格式：指令目的操作数, 源操作数

(i386手册上采用的格式)

汇编语言编程（操作数寻址）课本pg. 93，图3.4

操作数硬编码在指令

立即数寻址

寄存器寻址

操作数在寄存器

```
movl $0x7, %eax
```

汇编语言编程（操作数寻址）课本pg. 93，图3.4

操作数硬编码在指令

立即数寻址

寄存器寻址

操作数在寄存器

```
movl $0x7, %eax
```

可概括除了立即数和寄存器寻址以外的各种寻址方式：

```
movl 0x1100(%ebx, %eax, 4), %edx
```

操作数在内存

基址加比例变址加位移

内存地址 = 基址+变址*比例+位移

读懂i386手册对指令的描述

ADD — Add

Opcode	Instruction	Clocks	
04 ib	ADD AL,imm8	2	
05 iw	ADD AX,imm16	2	
05 id	ADD EAX,imm32	2	
80 /0 ib	ADD r/m8,imm8	2/7	
81 /0 iw	ADD r/m16,imm16	2/7	
81 /0 id	ADD r/m32,imm32	2/7	
83 /0 ib	ADD r/m16,imm8	2/7	
83 /0 ib	ADD r/m32,imm8	2/7	
00 /r	ADD r/m8,r8	2/7	
01 /r	ADD r/m16,r16	2/7	
01 /r	ADD r/m32,r32	2/7	Add dword register to r/m dword
02 /r	ADD r8,r/m8	2/6	Add r/m byte to byte register
03 /r	ADD r16,r/m16	2/6	Add r/m word to word register
03 /r	ADD r32,r/m32	2/6	Add r/m dword to dword register

Operation

DEST ← DEST + SRC;

Description

ADD performs an integer addition of the two operands (DEST and SRC). The result of the addition is assigned to the first operand (DEST), and the flags are set accordingly.

When an immediate byte is added to a word or doubleword operand, the immediate value is sign-extended to the size of the word or doubleword operand.

Flags Affected

OF, SF, ZF, AF, CF, and PF as described in Appendix C

指令编码（PA 2-1关注）

对应汇编 INTEL格式

指令描述

汇编语言编程

- 如何用汇编语言写一个Hello World程序？
  - 第一步：创建一个文本文件，hello.S
  - 第二步：写入汇编代码
  - 第三步：编译运行

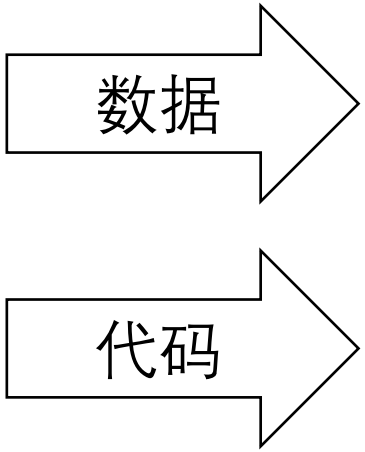
```
$ gcc –o hello hello.S
$ ./hello
$ Hello World!
```

```
.data
hello_str: .ascii “Hello World!\n”

.text
.globl main
main:
        movl $4, %eax
        movl $1, %ebx
        movl $hello_str, %ecx
        movl $13, %edx
        int $0x80
```

汇编语言编程

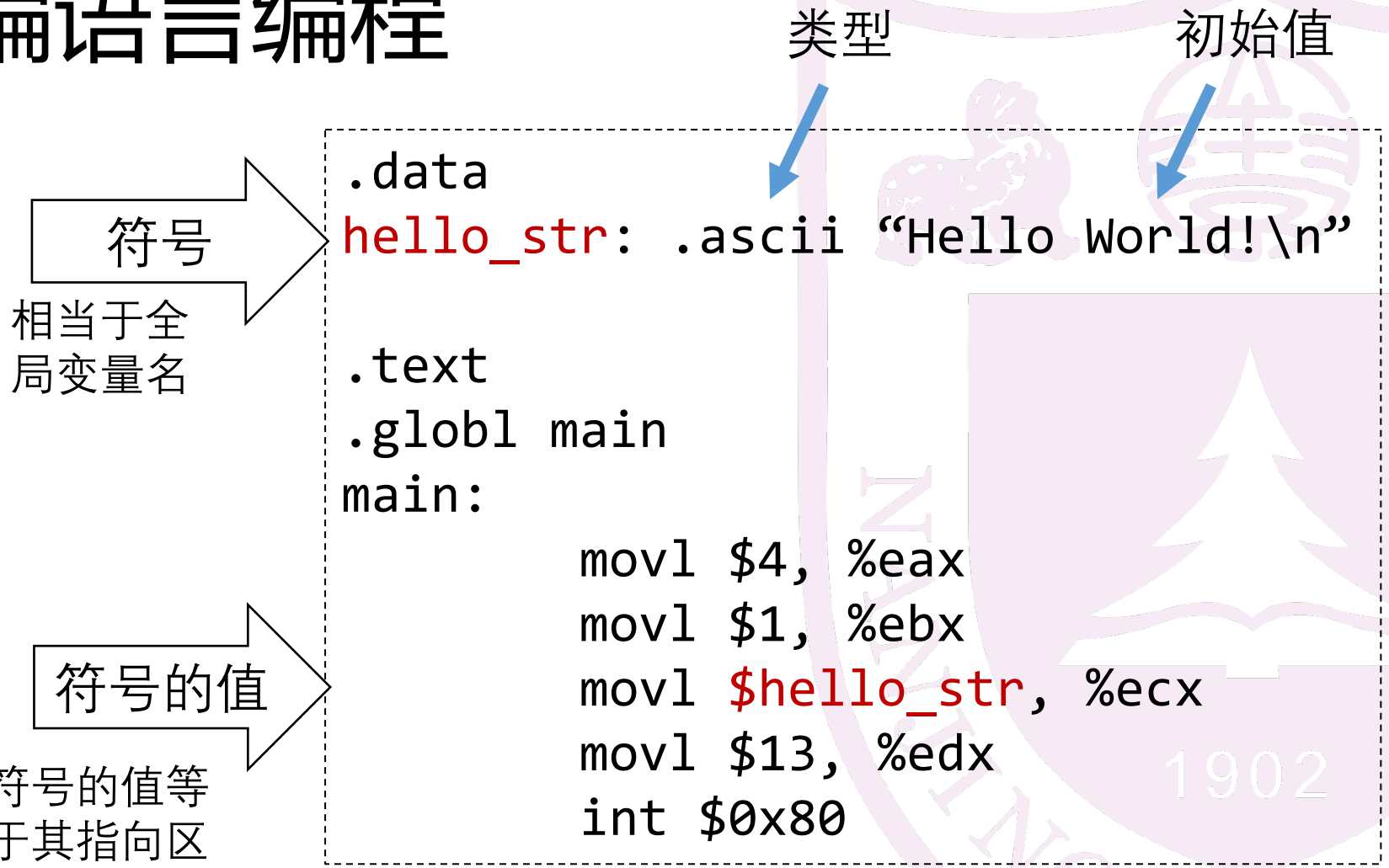
```
.data
hello_str: .ascii “Hello World!\n”

.text
.globl main
main:
        movl $4, %eax
        movl $1, %ebx
        movl $hello_str, %ecx
        movl $13, %edx
        int $0x80
```

汇编语言编程




```
.data
hello_str: .ascii “Hello World!\n”

.text
.globl main
main:
        movl $4, %eax
        movl $1, %ebx
        movl $hello_str, %ecx
        movl $13, %edx
        int $0x80
```

汇编语言编程


类型
初始值
符号
相当于全局变量名
符号的值
符号的值等于其指向区域的地址
.data
hello_str: .ascii “Hello World!\n”
.text
.globl main
main:
movl $4, %eax
movl $1, %ebx
movl $hello_str, %ecx
movl $13, %edx
int $0x80
其它一些类型
.byte
.short
.long
.string
.zero #字节数

汇编语言编程

全局符号
main

程序的入口，
链接器需要它

```
.data
hello_str: .ascii “Hello World!\n”

.text
.globl main
main:
        movl $4, %eax
        movl $1, %ebx
        movl $hello_str, %ecx
        movl $13, %edx
        int $0x80
```

汇编语言编程

```
.data
hello_str: .ascii “Hello World!\n”

.text
.globl main
main:
        movl $4, %eax
        movl $1, %ebx
        movl $hello_str, %ecx
        movl $13, %edx
        int $0x80
```

从第一条指令开始顺序往下执行，遇到jmp、call等指令则跳转

```
$ gcc –o hello hello.S
$ ./hello
$ Hello World!
```

熟练掌握汇编语言的重要性

- 能够看懂并修改底层代码
  - Linux kernel
  - BIOS
- 逆向工程，掌握程序行为的细节信息
- 对程序的高度优化
- 显得特别专业特别厉害 ✧(ㅍ ◡ ㅍ)

小练习1

```
.globl main
main:
    movl $1, %eax
    movl $1, %ebx
loop:
    movl %ebx, %ecx
    addl %eax, %ecx
    movl %ebx, %eax
    movl %ecx, %ebx
    jmp loop
```

每一步中，eax, ecx, ebx中保存的是几?
这是一个求解什么的程序?

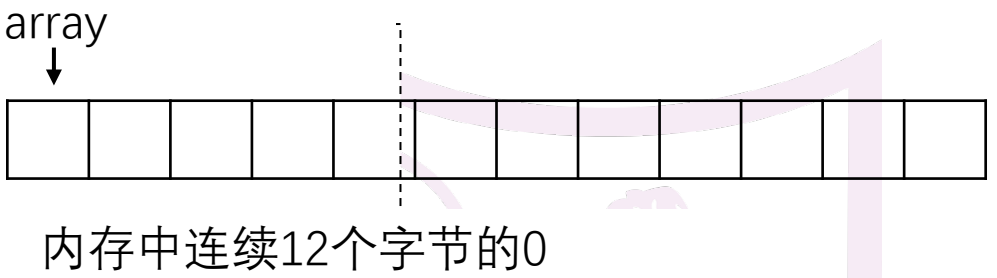
小练习2

.fill的含义：

.fill repeat , size , value

含义是反复拷贝size个字节，重复repeat次，其中size和value是可选的，默认值分别为1和0

```
.data
array: .fill 12
.text
.globl main
main:
    movl $0, %ebx
    movl $1, %eax
    movl $1, array(%ebx, %eax, 4)
    incl %eax
    movl $1, array(%ebx, %eax, 4)
    movl $array, %ebx
loop:
    movl $1, %eax
    movl (%ebx, %eax, 4), %ecx
    movl %ecx, array
    incl %eax
    movl (%ebx, %eax, 4), %edx
    movl %edx, 0x4(%ebx)
    addl %ecx, %edx
    movl %edx, (%ebx, %eax, 4)
    jmp loop
```



内存中连续12个字节的0

movl array, %ebx

把这句换成 会在这句出段错误，为什么？

array是什么数据结构？
array中的数据如何变化？

目录

- 从高级语言到机器指令 – C语言程序编译的过程
- 汇编语句与机器指令
- 尝试用gdb调试程序

使用gdb调试程序

- 安装gdb调试器：`sudo apt-get install gdb`
- 调试某程序：`gdb <程序名>`
- 常用命令：见后页

gdb常用命令

https://darkdust.net/files/GDB%20Cheat%20Sheet.pdf

命令	说明
r	运行程序
c	（触发断点后）继续运行
si [N]	单步执行N条指令，默认为1
x /nfu <地址>	查看<地址>处内存，打印n个单位，每个单位长度为u，打印值的类型为f，如，x /12ub <地址> f的取值：c d f o s u x… u的取值：b: Byte h: Half-word (two bytes) w: Word (four bytes) g: Giant word (eight bytes))
info	打印信息，如，info r打印寄存器信息
b <地址>	设置断点 breakpoint
w <地址>	设置监视点 watchpoint
bt	打印栈帧链

用gdb来调试小练习2

保存为fib.S

```
.data
array: .fill 12
.text
.globl main
main:
    movl $0, %ebx
    movl $1, %eax
    movl $1, array(%ebx, %eax, 4)
    incl %eax
    movl $1, array(%ebx, %eax, 4)
    movl $array, %ebx
loop:
    movl $1, %eax
    movl (%ebx, %eax, 4), %ecx
    movl %ecx, array
    incl %eax
    movl (%ebx, %eax, 4), %edx
    movl %edx, 0x4(%ebx)
    addl %ecx, %edx
    movl %edx, (%ebx, %eax, 4)
    jmp loop
```

```
$ gcc -o fib fib.S  或  gcc -g -o fib fib.S
$ gdb fib
(gdb) b main # 在main处设置断点
(gdb) b loop # 在loop处设置断点
(gdb) r      # run 并触发断点
(gdb) x /3uw &array # 打印内存首地址&array
                    # 3个无符号整型（u）
                    #  每个单元长度为32位（w）
(gdb) c # continue 并触发下一个断点
(gdb) x /3uw &array
```

需要加取地址符是因为汇编代码中没有声明array的类型，C语言数组类型无需&

熟练掌握gdb对做PA的好处

- 用gdb调试nemu
  - 当遇到assertion fail或者segmentation fault的时候

```
$ cd pa2020_spring/
$ gdb ./nemu/nemu
(gdb) run --test-alu adc
执行和出错信息
(gdb) bt
打印栈帧链帮助定位bug和相应的函数调用参数
(gdb) q
```

nemu执行参数，参见Makefile

在run前使用命令可以在执行前打断点：

(gdb) b main

熟练掌握gdb对做PA的好处

- 用gdb调试nemu
  - 当遇到assertion fail或者segmentation fault的时候

```
$ cd pa2020_spring/
$ gdb ./nemu/nemu
(gdb) run --test-alu adc
执行和出错信息
(gdb) bt
打印栈帧链帮助定位bug和相应的函数调用参数
(gdb) q
```

等同，参见Makefile中的debug目标

```
$ gdb -ex=run --args ./nemu/nemu --test-alu adc
```

修改参数后，使用make debug进入gdb调试

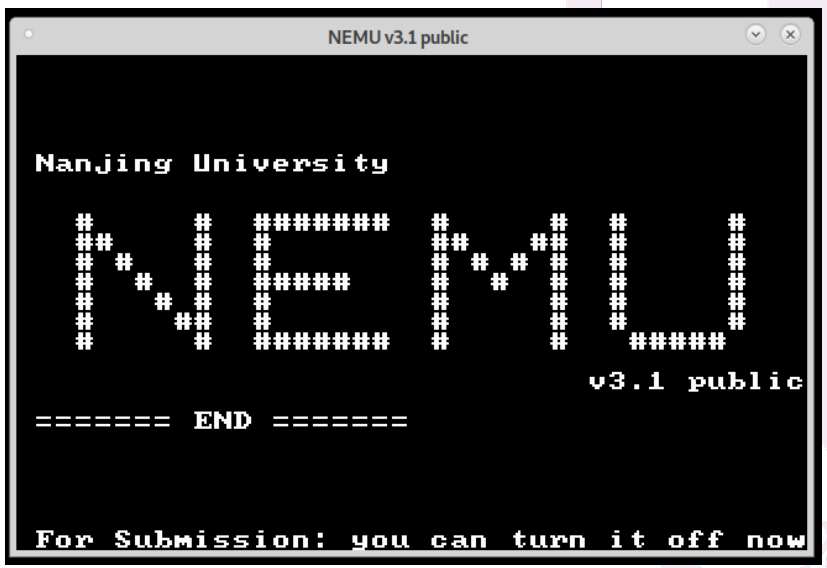
nemu内建的调试器（PA 2-3完善）

- 命令和gdb类似，由nemu内部的monitor实现，可以实现对测试用例（testcase）的单步执行、打印机器状态等功能
- 到了PA 2-1阶段
  - 修改根目录Makefile中run目标的对应规则后使用 make run 命令
  - 或根目录执行 ./nemu/nemu --testcase <测试用例名> 来进入调试界面

gdb与nemu内建调试器monitor区别和联系

模拟CPU
解释执行

testcase/bin/add

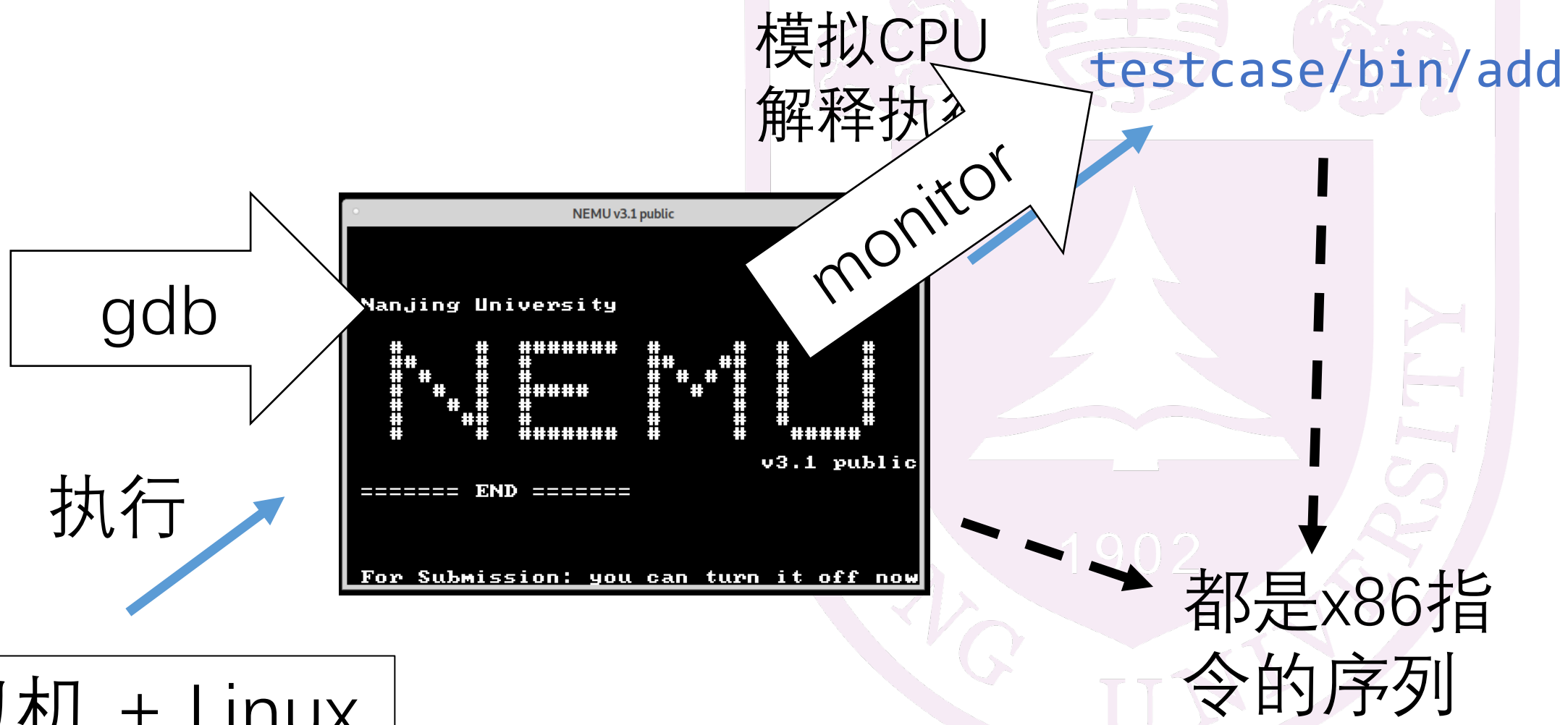


执行

都是x86指令的序列

虚拟机 + Linux

gdb与nemu内建调试器monitor区别和联系



虚拟机 + Linux

PA 2-0 结束