
计算机系统基础
Programming Assignment

# PA 4 异常、中断与I/O

## ——PA 4-1 异常和中断的响应

2020年12月24日 / 12月25日

南京大学《计算机系统基础》课程组

# 前情提要

- PA 1 – 实现了基本的运算单元
- PA 2 – 实现了各种指令和程序的装载，NEMU（几乎）等价于图灵机（除了没有无限长的纸带）
- PA 3 – 引入了保护机制，引入分页机制打破物理内存限制，多个进程互不干扰

能力上讲：能够同时执行多项复杂的科学计算任务，但是不能处理任何异常情况，也无法和外面的世界产生任何互动

# PA 4-1要解决的问题

- 异常和中断的响应（以做一道蛋炒饭为类比）
  - 正常的控制流
    - 热锅、添油、炒蛋、炒饭、加佐料……
    - 按照菜谱规定步骤顺序执行或跳转
  - 异常的控制流
    - 内部异常
      - 正要炒饭，发现饭没有煮熟！这饭没法炒了！
      - 和正在执行的指令有关的同步事件（执行到那一步才会出错）
    - 外部中断
      - 突然厨房外面一声大吼：“不要辣的！”
      - 和正在执行的指令无关的异步事件（不知何时到来）
  - 问题：CPU和操作系统如何配合响应内部和外部的异常?


# PA 4-1 异常和中断的响应

# 异常和中断

- 内部异常：在执行一条指令时，由处理器在其内部检测到的，与正在执行的指令相关的同步事件
  - **故障**：缺页、非法操作码、除数为零……
  - **陷阱**：用户程序主动调用操作系统处理例程
  - **终止**：执行指令时发生严重错误，如内存校验错误

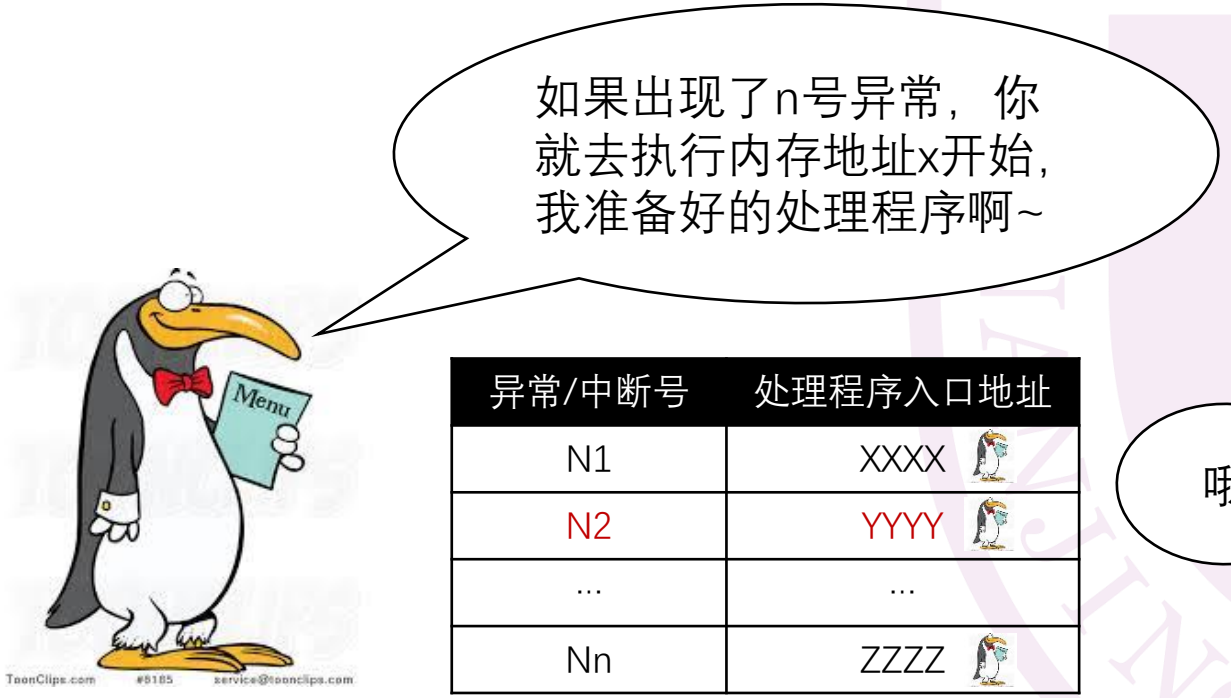
- 外部中断：典型地由I/O设备触发，与当前正在执行的指令无关的异步事件

# 异常和中断的响应

宏观步骤 1/2

在能够响应中断之前，操作系统先准备好IDT

- 操作系统先和机器打好招呼
  - 初始化中断描述符表（我们不模拟实模式的向量中断）




| 异常/中断号 | 处理程序入口地址 |
| --- | --- |
| N1 | XXXX |
| N2 | YYYY |
| … | … |
| Nn | ZZZZ |

# 异常和中断的响应

宏观步骤 2/2

在操作系统准备好IDT之后，机器就能够响应中断了

- 响应过程
  - CPU检测到异常或中断后，根据异常和中断号去查表得到处理程序的入口地址，处理完后返回原程序继续

1. 检测到异常或中断!

# 异常和中断的响应

宏观步骤 2/2

在操作系统准备好IDT之后，机器就能够响应中断了

- 响应过程
  - CPU检测到异常或中断后，根据异常和中断号去查表得到处理程序的入口地址，处理完后返回原程序继续

# 异常和中断的响应

宏观步骤 2/2

在操作系统准备好IDT之后，机器就能够响应中断了

- 响应过程
  - CPU检测到异常或中断后，根据异常和中断号去查表得到处理程序的入口地址，处理完后返回原程序继续

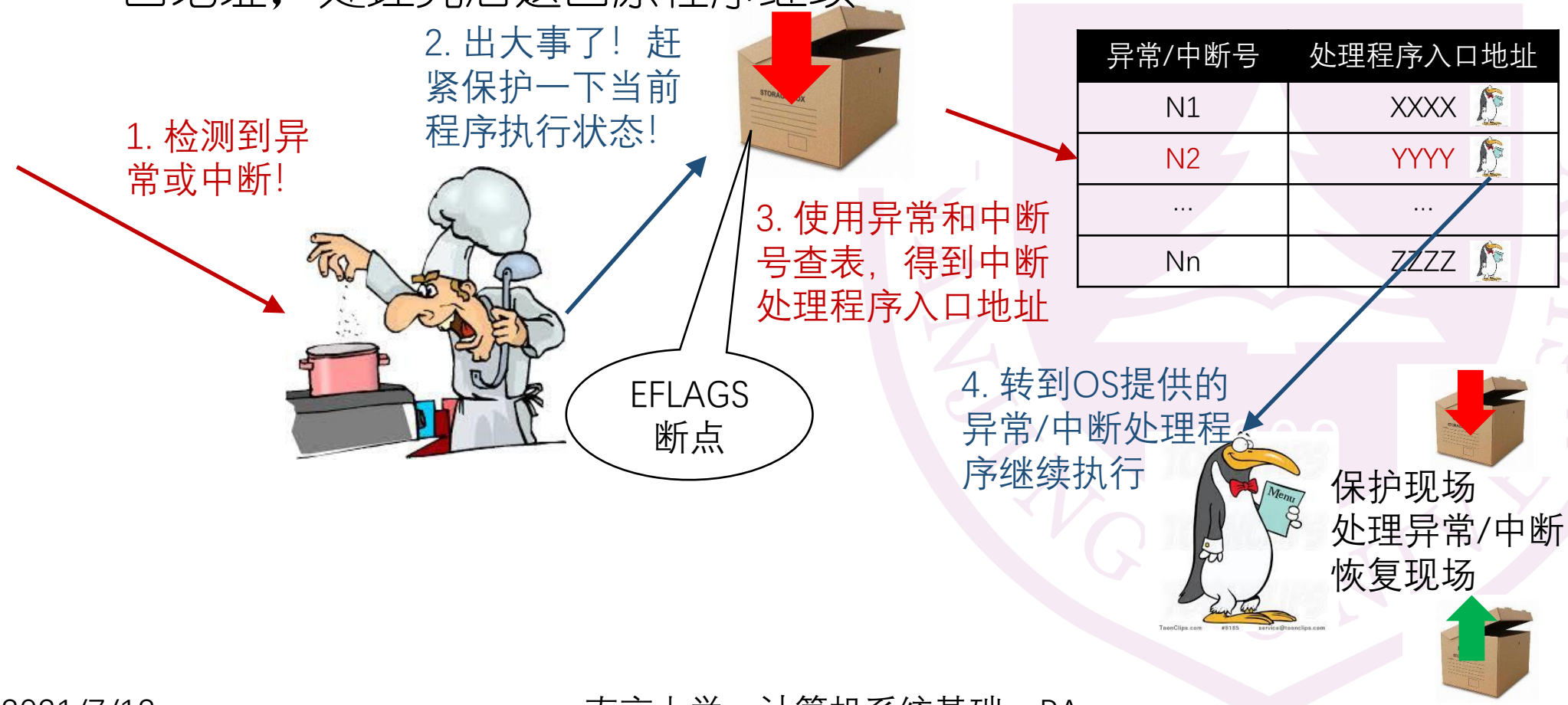

| 异常/中断号 | 处理程序入口地址 |
|---|---|
| N1 | XXXX |
| N2 | YYYY |
| … | … |
| Nn | ZZZZ |

# 异常和中断的响应

宏观步骤 2/2

在操作系统准备好IDT之后，机器就能够响应中断了

- 响应过程
  - CPU检测到异常或中断后，根据异常和中断号去查表得到处理程序的入口地址，处理完后返回原程序继续

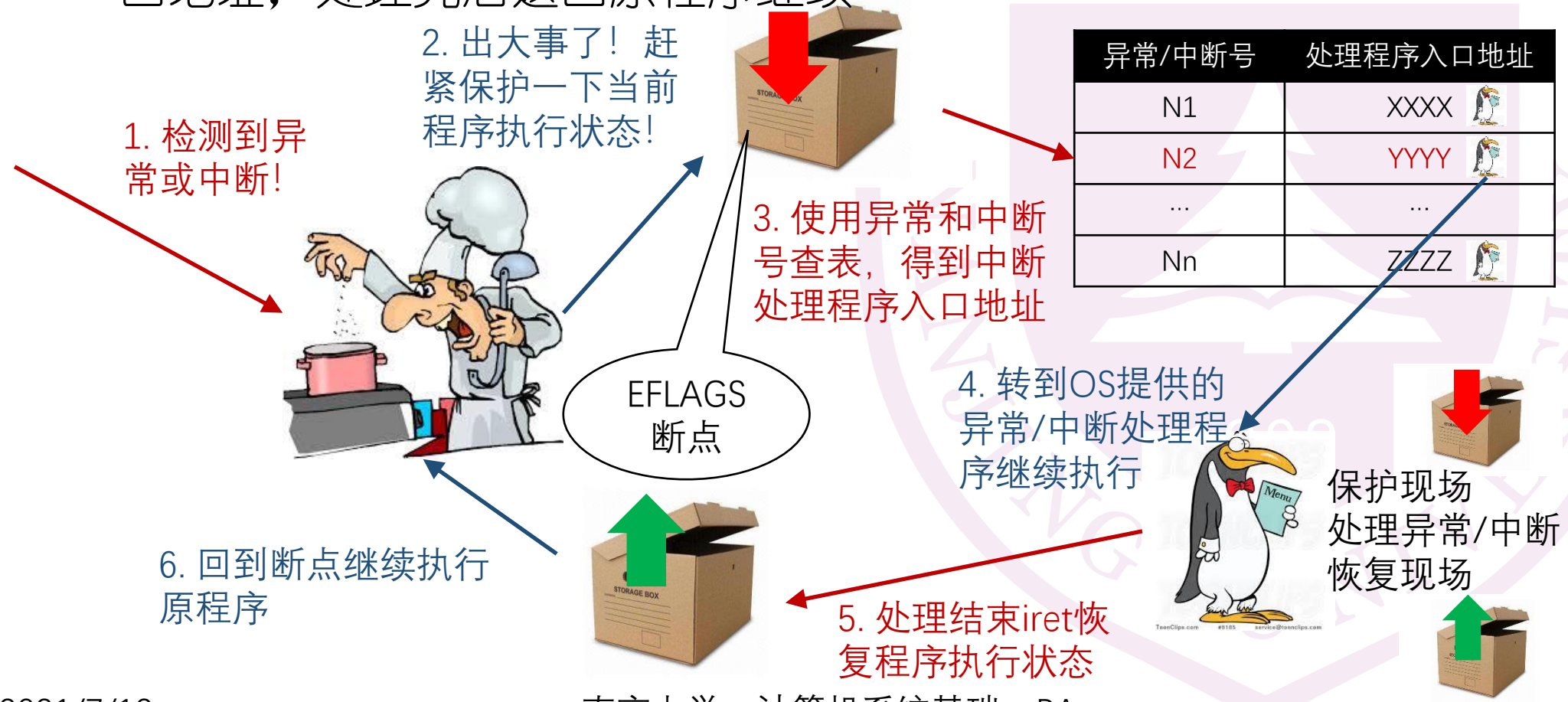


# 异常和中断的响应

宏观步骤 2/2

在操作系统准备好IDT之后，机器就能够响应中断了

- 响应过程
  - CPU检测到异常或中断后，根据异常和中断号去查表得到处理程序的入口地址，处理完后返回原程序继续




| 异常/中断号 | 处理程序入口地址 |
|---|---|
| N1 | XXXX |
| N2 | YYYY |
| … | … |
| Nn | ZZZZ |

# 异常和中断的响应

- 响应过程各个步骤 – 检测异常或中断的到来

1. 检测到异常或中断!

- 内部异常（陷阱 - 系统调用，其它情况不模拟）

int指令触发

- 外部中断（典型由I/O设备触发）

CPU中断引脚

每执行完一条指令查看一次

# NEMU中实现中断响应

- 在NEMU中实现对中断的响应
  - 在nemu/src/cpu/cpu.c中do_intr()函数

```
void exec(uint32_t n)
{
        while (n > 0 && nemu_state == NEMU_RUN)
        {
                if(!is_nemu_hlt)
                {
                        instr_len = exec_inst();
                        cpu.eip += instr_len;
                        n--;
                }
#if defined(HAS_DEVICE_TIMER) || defined(HAS_DEVICE_VGA) || defined(HAS_DEVICE_KEYBOARD) || defined(HAS_DEVICE_AUDIO)
                do_devices();
#endif
#ifdef IA32_INTR
                do_intr();  // check for interrupt
#endif
        }
}
```

# 异常和中断的响应

- 响应过程各个步骤 – 检测异常或中断的到来 并获得

异常和中断号

1. 检测到异常或中断!

- 内部异常（陷阱 - 系统调用，其它情况不模拟）

  int 0x80

- 外部中断（典型由I/O设备触发）

中断控制器（i8259）提供

# NEMU中实现中断响应

- 在NEMU中实现对中断的响应
  - 在nemu/src/cpu/cpu.c中do_intr()函数

```
void exec(uint32_t n)
{
        while (n > 0 && nemu_state == NEMU_RUN)
        {
                if(!is_nemu_hlt)
                {
                        instr_len = exec_inst();
                        cpu.eip += instr_len;
                        n--;
                }
#if defined(HAS_DEVICE_TIMER) …
                do_devices();
#endif
#ifdef IA32_INTR
                do_intr();
#endif
        }
}
```

```
#ifdef IA32_INTR
void do_intr()
{
        if (cpu.intr && cpu.eflags.IF)
        {
                // get interrupt number
                uint8_t intr_no = i8259_query_intr_no();
                assert(intr_no != I8259_NO_INTR);
                // tell the PIC interrupt info received
                i8259_ack_intr();
                // raise interrupt
                raise_intr(intr_no);
        }
}
#endif
```

# 异常和中断的响应

- 响应过程各个步骤 – 第一阶段保护程序状态

2. 出大事了！赶紧保护一下当前程序执行状态!

EFLAGS
断点

第一阶段保护（硬件完成）：
依次将EFLAGS, CS, EIP寄存器的值压栈

# 异常和中断的响应

- 响应过程各个步骤 – 根据异常或中断号查询IDT

异常和中断号

- 内部异常（陷阱 - 系统调用，其它情况不模拟）

  int 0x80

- 外部中断（典型由I/O设备触发）

中断控制器（i8259）提供

3. 使用异常和中断号查表，得到中断处理程序入口地址

| 异常/中断号 | 处理程序入口地址 |
| --- | --- |
| N1 | XXXX |
| N2 | YYYY |
| … | … |
| Nn | ZZZZ |

# NEMU中实现中断响应

- 在NEMU中实现对中断的响应
  - 在nemu/src/cpu/cpu.c中do_intr()函数

```
void exec(uint32_t n)
{
        while (n > 0 && nemu_state == NEMU_RUN)
        {
                if(!is_nemu_hlt)
                {
                        instr_len = exec_inst();
                        cpu.eip += instr_len;
                        n--;
                }
#if defined(HAS_DEVICE_TIMER) …
                do_devices();
#endif
#ifdef IA32_INTR
                do_intr();
#endif
        }
}
```

```
#ifdef IA32_INTR
void do_intr()
{
        if (cpu.intr && cpu.eflags.IF)
        {
                // get interrupt number
                uint8_t intr_no = i8259_query_intr_no();
                assert(intr_no != I8259_NO_INTR);
                // tell the PIC interrupt info received
                i8259_ack_intr();
                // raise interrupt
                raise_intr(intr_no);
        }
}
#endif
```

nemu/src/cpu/intr.c

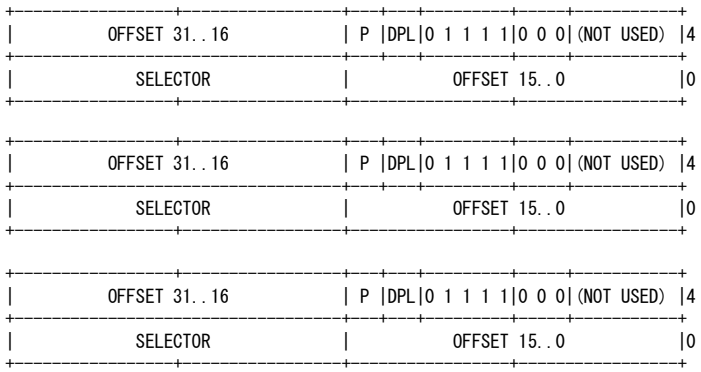
```
void raise_intr(uint8_t intr_no) {
#ifdef IA32_INTR
    - printf("Please implement raise_intr()");
    - assert(0);
    + // Trigger an exception/interrupt with 'intr_no'
    + // 'intr_no' is the index to the IDT

    + // Push EFLAGS, CS, and EIP
    + // Find the IDT entry using 'intr_no'
    + // Clear IF if it is an interrupt
    + // Set CS:EIP to the entry of the interrupt handler, need to reload CS with load_sreg()
#endif
}
```

# 异常和中断的响应

- 响应过程各个步骤 – 使用异常或中断号查中断描述符表

中断描述符表（IDT）

门描述符的数组




| 异常/中断号 | 处理程序入口地址 |
|---|---|
| N1 | XXXX |
| N2 | YYYY |
| … | … |
| Nn | ZZZZ |

3. 使用异常和中断号查表，得到中断处理程序入口地址

首地址存储在idtr寄存器中，由lidt指令负责装入

# 异常和中断的响应

- 响应过程各个步骤 – 中断描述符表

中断描述符表（IDT）

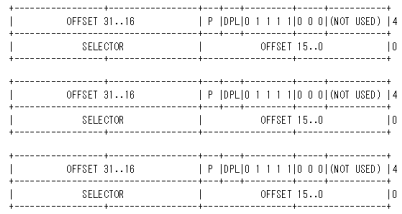
| 异常/中断号 | 处理程序入口地址 |
|---|---|
| N1 | XXXX |
| N2 | YYYY |
| … | … |
| Nn | ZZZZ |

64位门描述符(Gate Descriptor)

- 中断门(Interrupt Gate)
- 陷阱门(Trap Gate)
- ~~任务门(Task Gate)~~

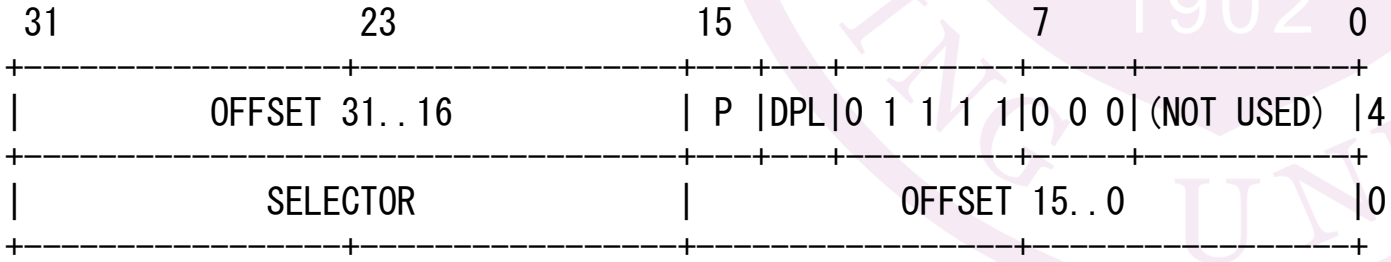
3. 使用异常和中断号查表，得到中断处理程序入口地址

门描述符的数组




首地址存储在idtr寄存器中，由lidt指令负责装入

80386 TRAP GATE



# 异常和中断的响应

- 响应过程各个步骤 – 中断描述符表

中断描述符表（IDT）

| 异常/中断号 | 处理程序入口地址 |
|---|---|
| N1 | XXXX |
| N2 | YYYY |
| … | … |
| Nn | ZZZZ |

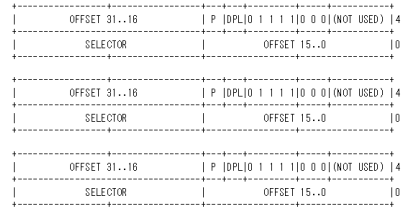
64位门描述符(Gate Descriptor)

- 中断门(Interrupt Gate)
- 陷阱门(Trap Gate)
- ~~任务门(Task Gate)~~

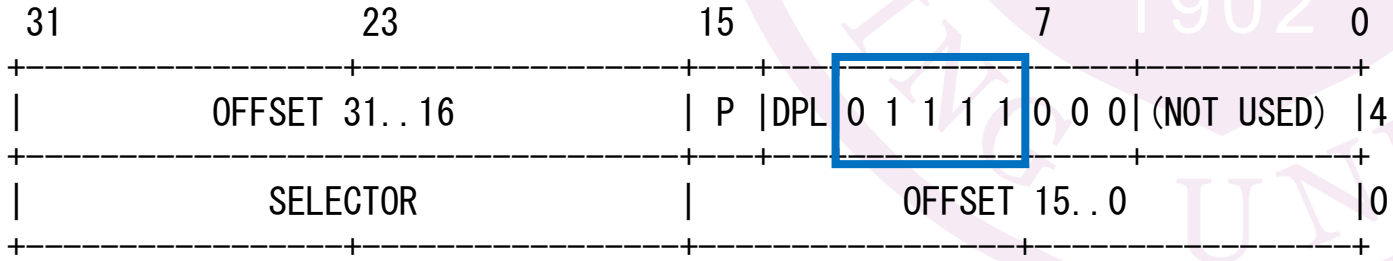
3. 使用异常和中断号查表，得到中断处理程序入口地址

中断门和陷阱门就是type字段不一样

门描述符的数组



80386 TRAP GATE




首地址存储在idtr寄存器中，由lidt指令负责装入

# 异常和中断的响应

- 响应过程各个步骤

中断描述符表（IDT）

| 异常/中断号 | 处理程序入口地址 |
| --- | --- |
| N1 | XXXX |
| N2 | YYYY |
| … | … |
| Nn | ZZZZ |

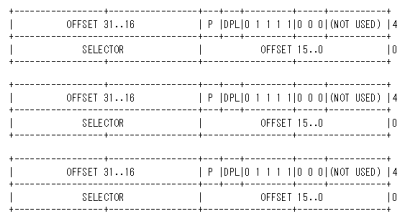
64位门描述符(Gate Descriptor)

- 中断门(Interrupt Gate)
- 陷阱门(Trap Gate)
- ~~任务门(Task Gate)~~

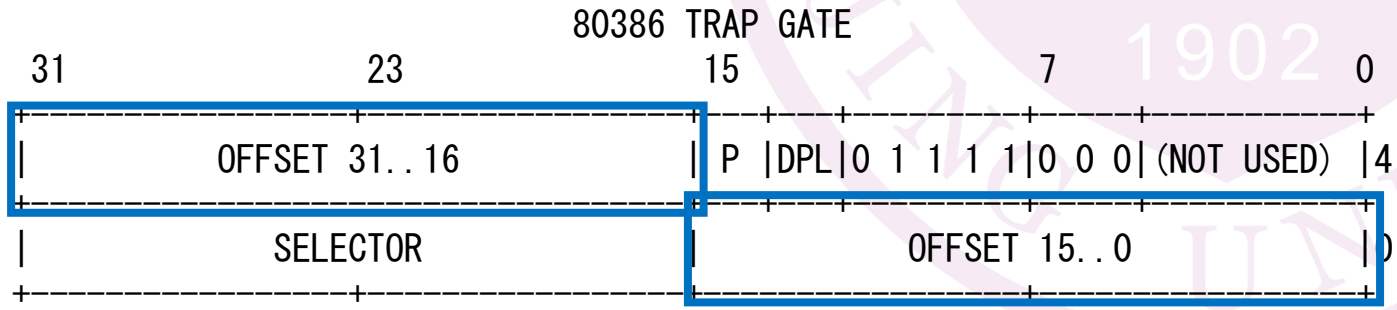
3. 使用异常和中断号查表，得到中断处理程序入口地址

跳转逻辑地址=段选择符+段内偏移量

门描述符的数组




首地址存储在idtr寄存器中，由lidt指令负责装入




处理程序入口地址对应的段内偏移量

# 异常和中断的响应

- 响应过程各个步骤 – 跳转到处理程序执行

## 跳转前决定是否允许中断嵌套?

- 当处理外部中断时，清除EFLAGS寄存器中的IF位，实现关中断，不允许嵌套
- 当处理内部异常时，不清除EFLAGS寄存器中的IF位，不关闭中断，允许嵌套

中断描述符表（IDT）

| 异常/中断号 | 处理程序入口地址 |
| --- | --- |
| N1 | XXXX |
| N2 | YYYY |
| … | … |
| Nn | ZZZZ |

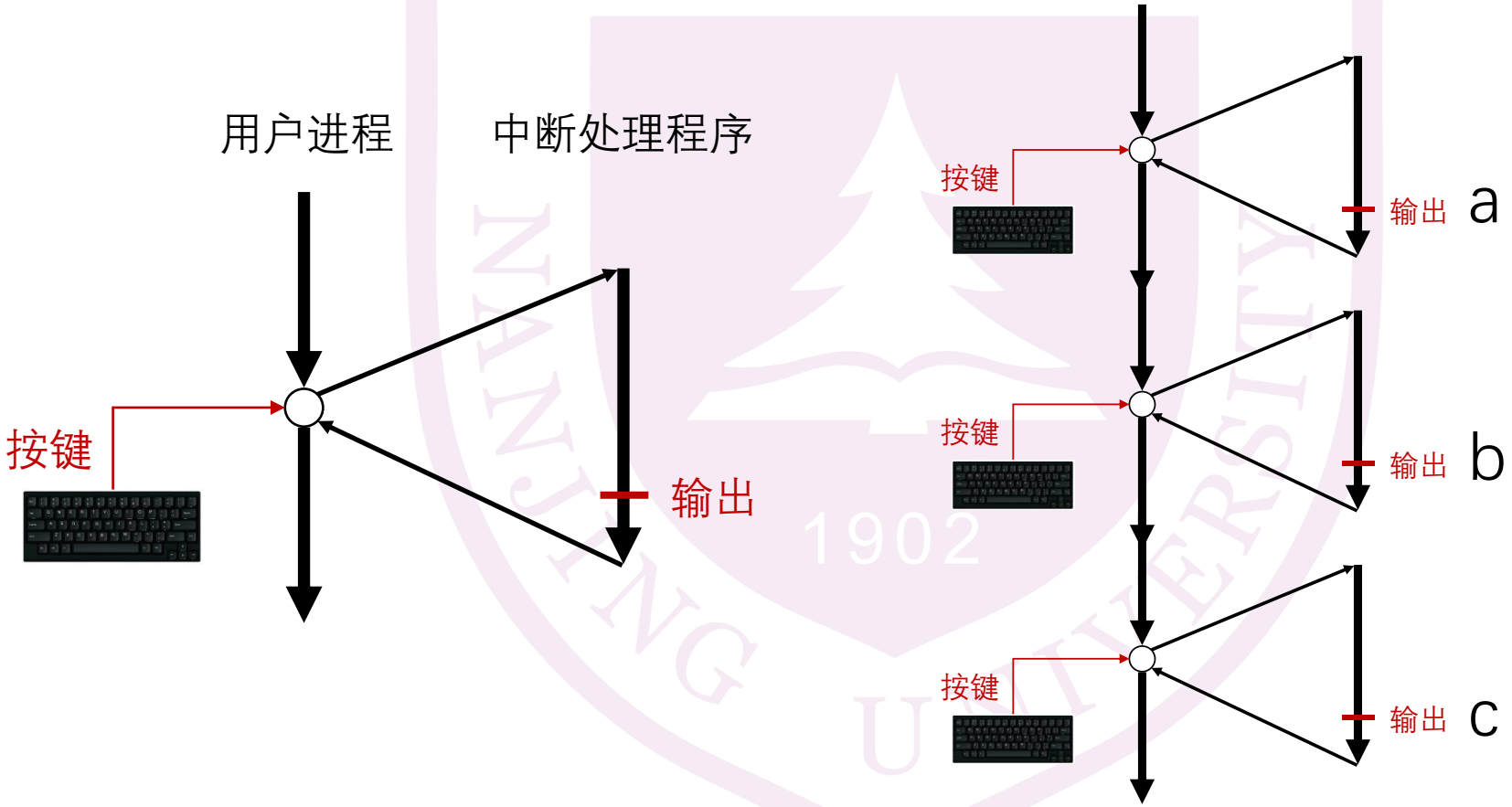
4. 转到OS提供的异常/中断处理程序继续执行


保护现场
处理异常/中断
恢复现场

# 小例子

- NEMU约定：当处理外部中断时，清除EFLAGS寄存器中的IF位，实现关中断，不允许嵌套（也不考虑中断的优先级）

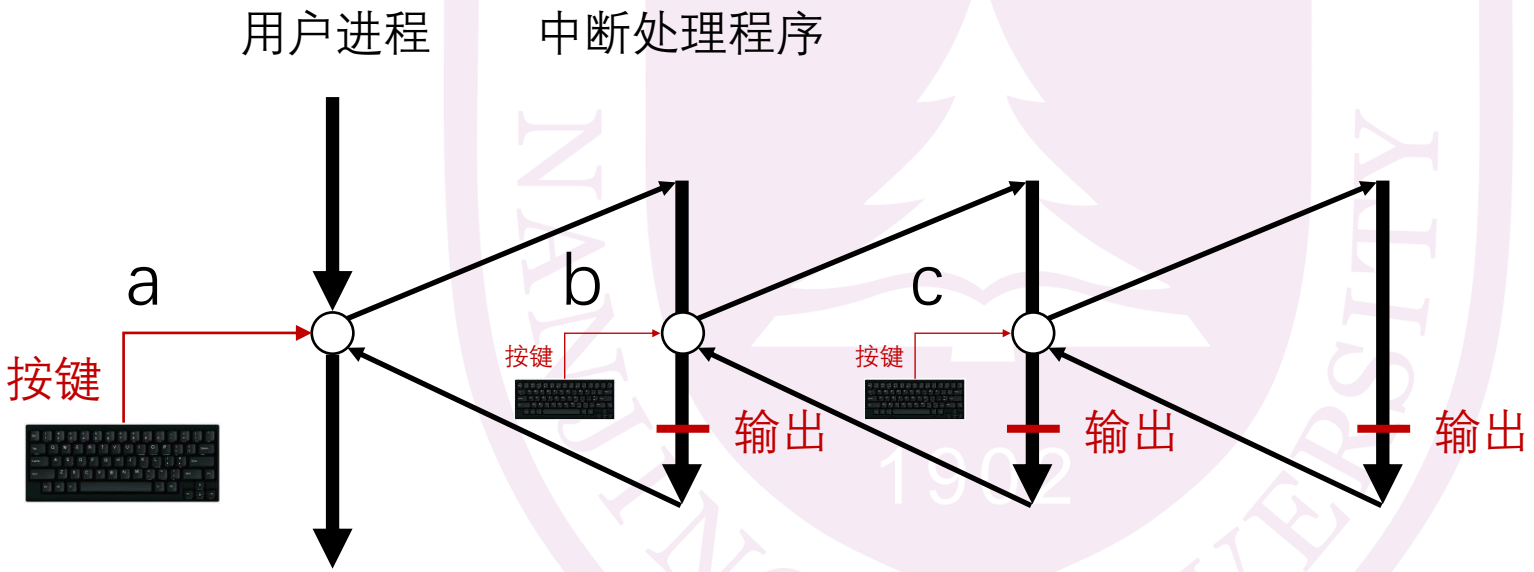
键盘按键：a -> b -> c
期待输出：a -> b -> c



# 小例子

- NEMU约定：当处理外部中断时，清除EFLAGS寄存器中的IF位，实现关中断，不允许嵌套（也不考虑中断的优先级）

键盘按键：a -> b -> c
期待输出：a -> b -> c



# 异常和中断的响应

- 响应过程各个步骤 – 跳转到处理程序执行

第二阶段保护程序状态（处理程序软件完成）：

pusha - 将各通用寄存器的值压栈

中断描述符表（IDT）

| 异常/中断号 | 处理程序入口地址 |
| --- | --- |
| N1 | XXXX |
| N2 | YYYY |
| … | … |
| Nn | ZZZZ |

# 异常和中断的响应

- 响应过程各个步骤 – 跳转到处理程序执行

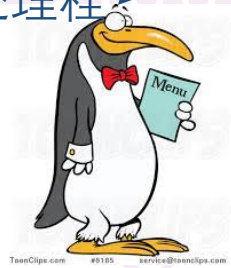
处理异常/中断:

- 使用TrapFrame传递参数（若有）
  - 先把参数按约定放在各通用寄存器中
  - pusha保护现场
  - push %esp ??? 对应代码理解
- 完成对异常/中断的处理

中断描述符表（IDT）

| 异常/中断号 | 处理程序入口地址 |
| --- | --- |
| N1 | XXXX |
| N2 | YYYY |
| … | … |
| Nn | ZZZZ |

4. 转到OS提供的异常/中断处理程序继续执行




保护现场
处理异常/中断
恢复现场

# 异常和中断的响应

- 响应过程各个步骤 – 跳转到处理程序执行

恢复现场：

popa - 将各通用寄存器的值弹栈

- 修改TrapFrame中的内容
  - popa的时候将TrapFrame中内容弹栈到各通用寄存器，可以实现返回值功能

中断描述符表（IDT）

| 异常/中断号 | 处理程序入口地址 |
| --- | --- |
| N1 | XXXX |
| N2 | YYYY |
| … | … |
| Nn | ZZZZ |

# 异常和中断的响应

- 响应过程各个步骤 - iret恢复原程序断点

iret

- 按照第一阶段保护程序状态对应的次序正确弹栈
- 将eip设置为原程序需要恢复执行的位置（断点）


6. 回到断点继续执行原程序

5. 处理结束iret恢复程序执行状态


# NEMU中的任务

# NEMU中实现异常（系统调用）响应

- 第一步：更改配置和在nemu中添加必要的硬件/指令
  - include/config.h
    - 定义宏　#define IA32_INTR
    - make clean
  - 在nemu/include/cpu/reg.h中定义 IDTR 结构体
    - 参照手册
  - 并在 CPU_STATE中添加idtr寄存器和中断引脚（框架代码已经提供）
  - 实现包括lidt、cli、sti、int、pusha、popa、iret等指令
    - 部分指令要先写完第三步才能做

# NEMU中实现异常（系统调用）响应

- 第二步：理解Kernel初始化中断描述符表的内容
  - 在init_cond()中调用了init_idt()
  - init_idt()位于kernel/src/irq/idt.c

```
void init_cond()
{
#ifdef IA32_INTR
            /* Reset the GDT, since the old GDT in start.S cannot be used in the future. */
            init_segment();

            /* Set the IDT by setting up interrupt and exception handlers.
             * Note that system call is the only exception implemented in NEMU.
             */
            init_idt();

            /* Enable interrupts. */
            sti();
#endif
```

# NEMU中实现异常（系统调用）响应

- 第二步：理解Kernel初始化中断描述符表的内容
  - 在init_cond()中调用了init_idt()
  - init_idt()位于kernel/src/irq/idt.c

```
void init_cond()
{
#ifdef IA32_INTR
            /* Reset the GDT, since the old GDT in s
            init_segment();

            /* Set the IDT by setting up interrupt a
             * Note that system call is the only exc
             */
            init_idt();

            /* Enable interrupts. */
            sti();
#endif
```

```
/* Each entry of the IDT is either an interrupt gate, or a trap gate */
static GateDesc idt[NR_IRQ];

/* Setup a interrupt gate for interrupt handler. */
static void set_intr(GateDesc *ptr, uint32_t selector, uint32_t offset, uint32_t dpl) {…}

void init_idt() {
            …
            set_trap(idt + 0, SEG_KERNEL_CODE << 3, (uint32_t)vec0, DPL_KERNEL);
            …
            /* the system call 0x80 */
            set_trap(idt + 0x80, SEG_KERNEL_CODE << 3, (uint32_t)vecsys, DPL_USER);

            set_intr(idt+32 + 0, SEG_KERNEL_CODE << 3, (uint32_t)irq0, DPL_KERNEL);
            set_intr(idt+32 + 1, SEG_KERNEL_CODE << 3, (uint32_t)irq1, DPL_KERNEL);
            set_intr(idt+32 + 14, SEG_KERNEL_CODE << 3, (uint32_t)irq14, DPL_KERNEL);

            /* the ``idt'' is its virtual address */
            write_idtr(idt, sizeof(idt));
            sti();
}
```

# NEMU中实现中断响应

- 第三步：在NEMU中实现对中断的响应
  - 在nemu/src/cpu/cpu.c中do_intr()函数

```
void exec(uint32_t n)
{
        while (n > 0 && nemu_state == NEMU_RUN)
        {
                instr_len = exec_inst();
                cpu.eip += instr_len;
                n--;

#ifdef IA32_INTR
                // check for interrupt
                do_intr();
#endif
        }
}
```

```
#ifdef IA32_INTR
void do_intr()
{
        if (cpu.intr && cpu.eflags.IF)
        {
                // get interrupt number
                uint8_t intr_no = i8259_query_intr_no();
                assert(intr_no != I8259_NO_INTR);
                // tell the PIC interrupt info received
                i8259_ack_intr();
                // raise interrupt
                raise_intr(intr_no);
        }
}
#endif
```

# NEMU中实现异常（系统调用）响应

- 第三步：在NEMU中实现对异常的响应
  - 在nemu/src/cpu/intr.c中实现raise_intr()函数

```
void raise_intr(uint8_t intr_no) {
#ifdef IA32_INTR
    - printf("Please implement raise_intr()");
    - assert(0);
    + // Trigger an exception/interrupt with 'intr_no'
    + // 'intr_no' is the index to the IDT

    + // Push EFLAGS, CS, and EIP
    + // Find the IDT entry using 'intr_no'
    + // Clear IF if it is an interrupt
    + // Set CS:EIP to the entry of the interrupt handler
    + // need to reload CS with load_sreg()
#endif
}
```

int 指令调用这个接口，why?

```
void raise_sw_intr(uint8_t intr_no) {
        // return address is the
        // next instruction
        cpu.eip += 2;
        raise_intr(intr_no);
}
```

**NEMU的重要简化：**
**都是ring0不考虑权限**

# NEMU中实现异常（系统调用）响应

- 第四步：理解Kernel对于0x80号系统调用的响应方式

```
#include "trap.h"

const char str[] = "Hello, world!\n";

int main()
{
        asm volatile( "movl $4, %eax;"   // system call ID, 4 = SYS_write
                      "movl $1, %ebx;"   // file descriptor, 1 = stdout
                      "movl $str, %ecx;" // buffer address
                      "movl $14, %edx;"  // length
                      "int $0x80");
        HIT_GOOD_TRAP;
        return 0;
}
```

testcase/src/hello-inline.c

# NEMU中实现异常（系统调用）响应

- 第四步：理解Kernel对于0x80号系统调用的响应方式

```
#include "trap.h"

const char str[] = "Hello, world!\n";

int main()
{
        asm volatile( "movl $4, %eax;"    //
                      "movl $1, %ebx;"    //
                      "movl $str, %ecx;"  // buffer address
                      "movl $14, %edx;"   // length
                      "int $0x80");
        HIT_GOOD_TRAP;
        return 0;
}
```

```
void raise_sw_intr(uint8_t intr_no) {
    // return address is the
    // next instruction
    cpu.eip += 2;
    raise_intr(intr_no);
}
```

testcase/src/hello-inline.c

# NEMU中实现异常（系统调用）响应

- 第四步：理解Kernel对于0x80号系统调用的响应方式

```
void init_idt() {
        ...
        /* the system call 0x80 */
        set_trap(idt + 0x80, SEG_KERNEL_CODE << 3, (uint32_t)vecsys, DPL_USER);
        ...
}
```

kernel/src/irq/idt.c

```
.globl vecsys; vecsys:  pushl $0;  pushl $0x80; jmp asm_do_irq

.globl asm_do_irq
.extern irq_handle

asm_do_irq:
        pushal

        pushl %esp              # ???
        call irq_handle

        addl $4, %esp
        popal
        addl $8, %esp
        iret
```

kernel/src/irq/do_irq.S

# NEMU中实现异常（系统调用）响应

- 第四步：理解Kernel对于0x80号系统调用的响应方式

```
void irq_handle(TrapFrame *tf) { pushl %esp # ???
        int irq = tf->irq; //结合kernel/src/irq/do_irq.S，理解tf怎么传进来的

        ...
        else if (irq == 0x80) {
                do_syscall(tf); //tf又当作参数传给了do_syscall，tf里面有什么?
        }
        ...
}
```

kernel/src/irq/irq_handle.c

```
static void sys_write(TrapFrame *tf) {
        // 设置 tf -> eax 是想干吗？
        tf->eax = fs_write(tf->ebx, (void*)tf->ecx, tf->edx);
}

void do_syscall(TrapFrame *tf) {
        switch(tf->eax) { //tf -> eax哪儿来的，最早是谁设置的?
                ...
                case SYS_write: sys_write(tf); break; // SYS_write等都是预定义好的常量
                ...
        }
}
```

kernel/src/syscall/do_syscall.c

# NEMU中实现异常（系统调用）响应

- 第四步：理解Kernel对于0x80号系统调用的响应方式

```
void init_idt() {
        ...
        /* the system call 0x80 */
        set_trap(idt + 0x80, SEG_KERNEL_CODE << 3, (uint32_t)vecsys, DPL_USER);
        ...
}
```

kernel/src/irq/idt.c

```
.globl vecsys; vecsys:  pushl $0;  pushl $0x80; jmp asm_do_irq

.globl asm_do_irq
.extern irq_handle

asm_do_irq:
        pushal

        pushl %esp              # ???
        call irq_handle

        addl $4, %esp
        popal
        addl $8, %esp
        iret
```

响应完后恢复现场，iret，
对于0x80系统调用，当初
保存的返回地址是多少？

kernel/src/irq/do_irq.S

# NEMU中实现异常（系统调用）响应

PA 4-1 小任务一：完成上述编码和理解工作，并且：

执行hello-inline测试用例并看到屏幕输出

```
nemu trap output: Hello, world!
```

# NEMU中实现中断响应

## PA 4-1 小任务二：开启时钟中断并理解响应过程

- 以时钟中断为例
  1. 在include/config.h中定义宏HAS_DEVICE_TIMER并make clean;
  2. 在nemu/include/cpu/reg.h的CPU_STATE中添加uint8_t intr成员，模拟中断引脚;
  3. 在nemu/src/cpu/cpu.c的init_cpu()中初始化cpu.intr = 0;
  4. 在nemu/src/cpu/cpu.c的exec()函数while循环体，每次执行完一条指令后调用do_intr()函数查看并处理中断事件;
  5. 执行make test_pa-4-1;
  6. 触发Kernel中的panic，找到该panic并移除

完整跟踪一下从nemu/src/device/dev/timer.c中发出timer interrupt到触发panic的整个过程，就可以全懂

timer interrupt是由sdl.c中的线程定时调用发出的



PA 3-3截止：2020年1月10日24时

PA 4-1到此结束

# 祝大家学习快乐，身心健康！

欢迎大家踊跃参加问卷调查