

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

2019年12月11日

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

- 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）

如果出现了n号异常，你
就去执行内存地址x开始，
我准备好的处理程序啊~



TeenClips.com #8185 service@teenclips.com

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

哦



异常和中断的响应

- 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

- 响应过程

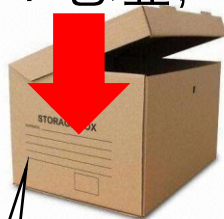
- CPU检测到异常或中断后，根据异常和中断号去查表得到处理程序的入口地址，处理完后返回原程序继续

1. 检测到异常或中断！

2. 出大事了！赶紧保护一下当前程序执行状态！



EFLAGS
断点



异常和中断的响应

- 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

- 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！



2. 出大事了！赶紧保护一下当前程序执行状态！

EFLAGS
断点



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 

4. 转到OS提供的异常/中断处理程序继续执行



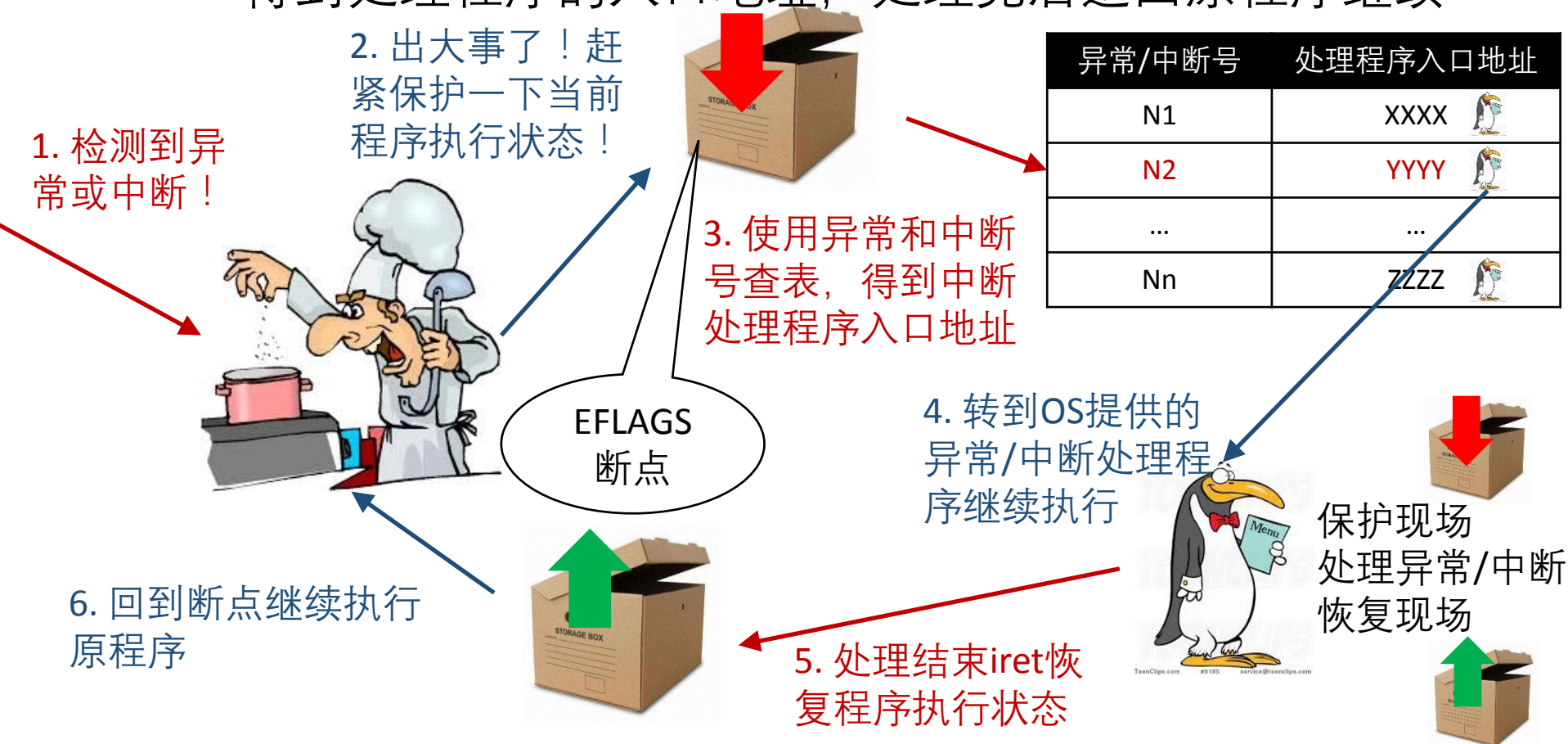
保护现场
处理异常/中断
恢复现场



异常和中断的响应

- 响应过程

- 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

- 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

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！



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 – 获得异常或中断号

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 



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

OFFSET 31..16	P	DPL	0	1	1	1	1	0	0	0	(NOT USED)	4
SELECTOR	OFFSET 15..0											0

OFFSET 31..16	P	DPL	0	1	1	1	1	0	0	0	(NOT USED)	4
SELECTOR	OFFSET 15..0											0

OFFSET 31..16	P	DPL	0	1	1	1	1	0	0	0	(NOT USED)	4
SELECTOR	OFFSET 15..0											0

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 

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

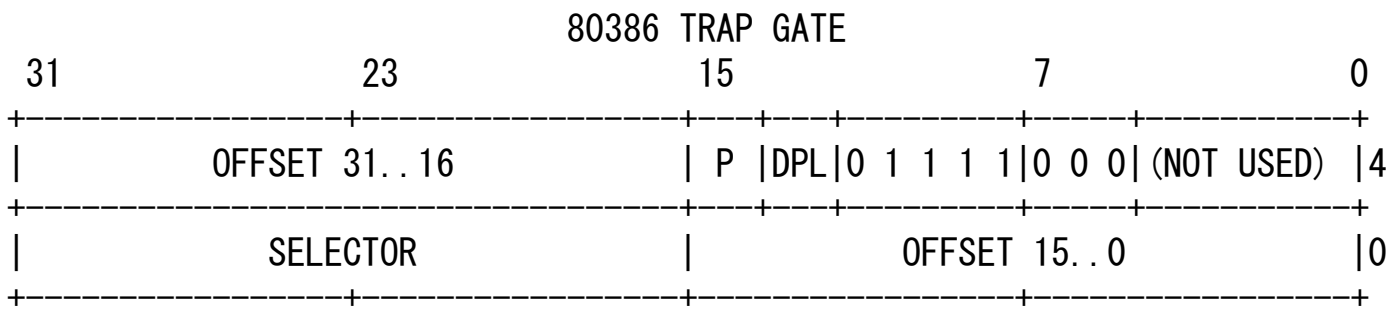
中断描述符表 (IDT)

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



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)

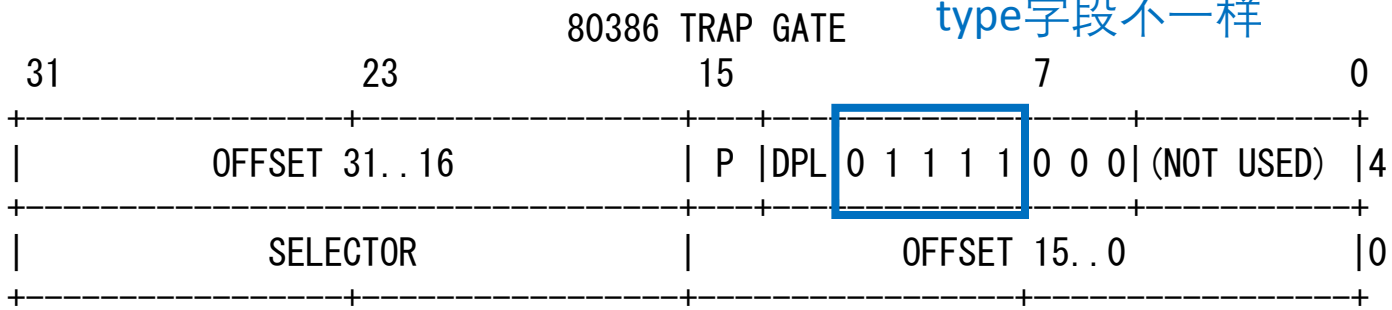
异常/中断号	处理程序入口地址
N1	XXXX 
N2	YYYY 
...	...
Nn	ZZZZ 

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



异常和中断的响应

- 响应过程各个步骤

64位门描述符(Gate Descriptor)

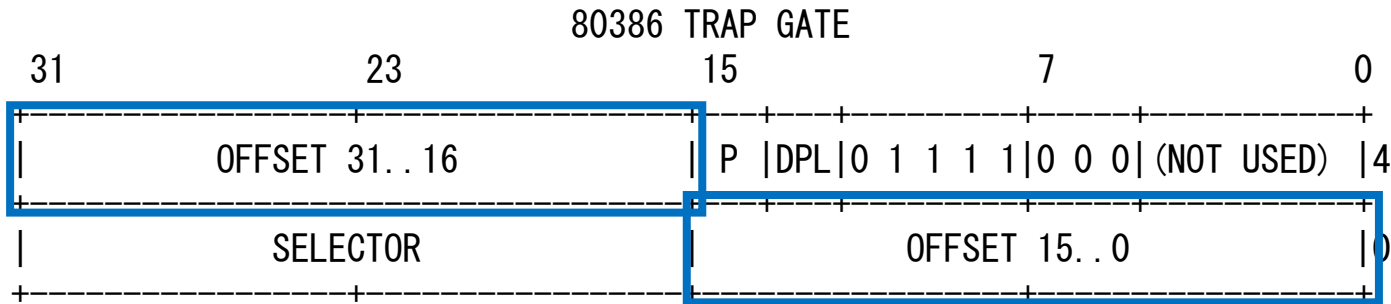
- 中断门(Interrupt Gate)
- 陷阱门(Trap Gate)
- ~~任务门(Task Gate)~~

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 

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



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



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 

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

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 

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

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

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 

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

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 – 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

- 检测异常并得到对应的编号
 - 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
 - 实现包括lidt、cli、sti、int、pusha、popa、iret等指令

NEMU中实现异常（系统调用）响应

- Kernel初始化中断描述符表
 - 在init_cond()中调用了init_idt()
 - init_idt()位于kernel/src/irq/idt.c

```
/* 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)vecsyz, 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中实现异常（系统调用）响应

- 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 EIP to the entry of the interrupt handler  
#endif  
}
```

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



int 指令调用, why ?

NEMU中实现异常（系统调用）响应

- 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);  
    ...  
}
```

```
.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

- 理解Kernel对于0x80号系统调用的响应方式

```
void irq_handle(TrapFrame *tf) {  
    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

- 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);  
    ...  
}
```

```
.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

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

- 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 testkernel ;
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 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