计算机系统基础
Programming Assignment

PA 4 异常、中断与I/O

——PA 4-2 外设与I/O

2020年12月31日 / 2021年1月1日

南京大学《计算机系统基础》课程组

前情提要

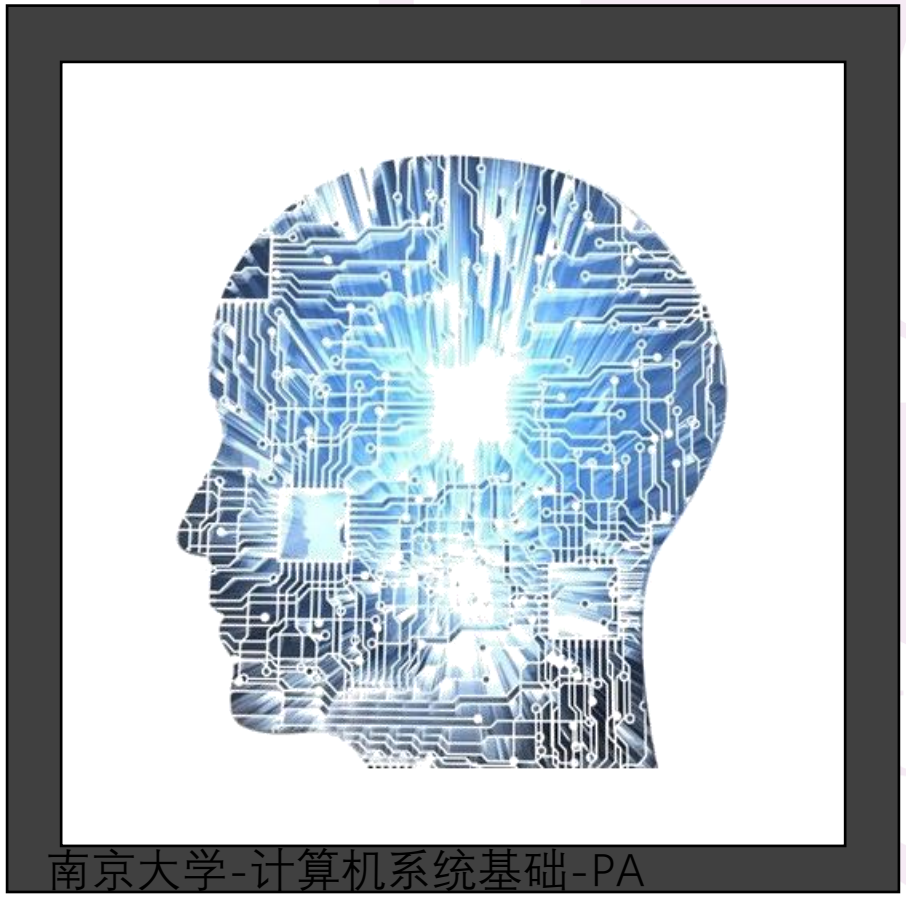
PA 1 ~ PA 3构建的由CPU和内存构成的计算机，配合Kernel的支持，已经拥有了很强的运算能力

中断

使用PA 4-1模拟的中断机制能够让机器对外部中断产生响应

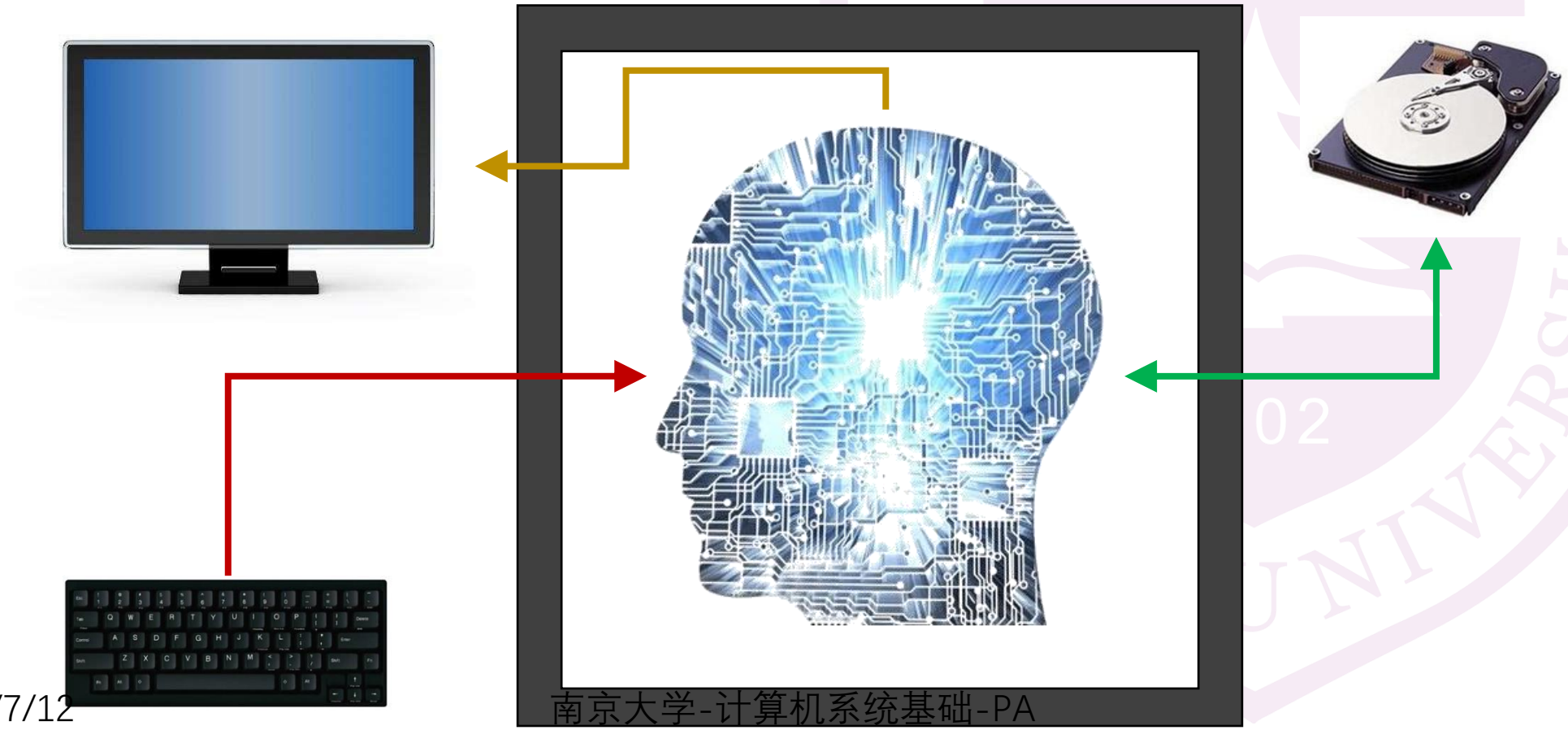
前情提要

但是！缺少输入和输出的能力，
基本上还是封闭在机箱的内部。



PA 4-2的任务

为它接上眼睛和嘴巴，完成实现一台现代计算机的“最后的拼图”。



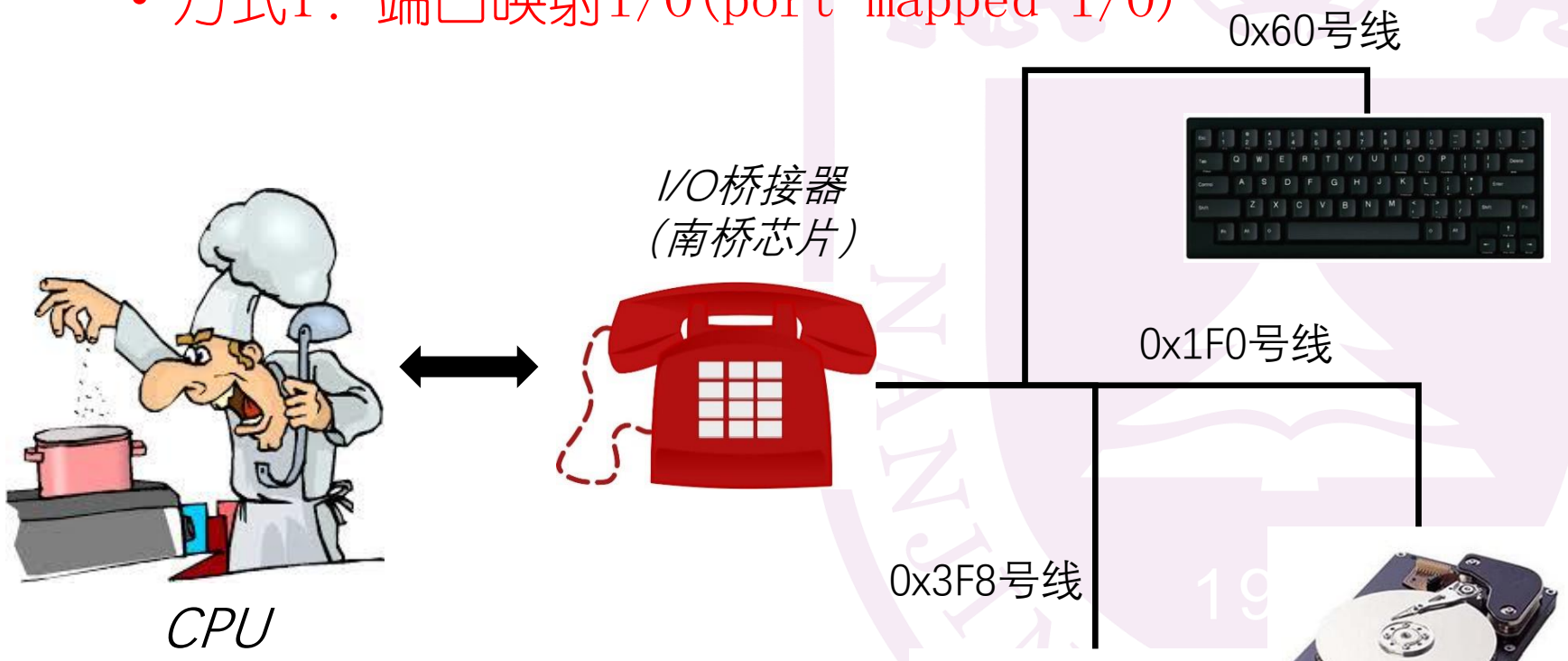
外设与I/O

- CPU完成与外设通信的几种方式
  - 方式1：端口映射I/O(port-mapped I/O)
  - 方式2：内存映射I/O (Memory Mapped I/O, mmio)

- NEMU中CPU完成与外设通信的几种方式
  - 方式1：端口映射I/O(port-mapped I/O)
    - 串口（Serial）、键盘（Keyboard）、硬盘（IDE）
  - 方式2：内存映射I/O（Memory Mapped I/O, mmio）
    - 显卡（VGA）
  - 其它只需要理解：
    - 声卡（Audio）实验性质
    - 时钟（Timer）只产生时钟中断PA 4-1

外设与I/O

- CPU如何向外设进行输入输出？
  - 方式1：端口映射I/O(port-mapped I/O)



将外设的数据、状态、控制寄存器称为I/O端口；对端口进行编号；CPU使用in与out指令同端口间通过按编号“打电话”的方式通信

in 端口号

out 端口号

65536个I/O端口，可以由16位无符号整型编码

I/O端口地址（编号）

I/O端口
（设备控制器中的数据、状态、控制寄存器）

0	字节
1	字节
2	字节
3	字节
4	字节
5	字节
…	…
65534	字节
65535	字节

0x60 → 键盘

0x1F0 ~ 0x1F7 → 硬盘

0x3F8 ~ 0x3FF → 串口

```
movb $’A’, %al
movw $0x3F8, %dx
outb %al, %dx
```

NEMU中I/O端口和设备间的对应关系

外设与I/O

- CPU如何向外设进行输入输出？
  - 方式1：端口映射I/O(port-mapped I/O)

nemu/src/device/io/port_io.c

```
#define IO_PORT_SPACE 65536
static uint8_t io_port[IO_PORT_SPACE]; // 65535个8位的I/O端口

static struct pio_handler_map {
        uint16_t port;
        pio_handler handler;
} pio_handler_table [] = {  // 端口映射表
     // 格式 {port, handler}
};

// called by the out instruction, 写端口
void pio_write(uint16_t port, size_t len, uint32_t data) {…}

// called by the in instruction, 读端口
uint32_t pio_read(uint16_t port, size_t len) {…}
```

外设与I/O

- CPU如何向外设进行输入输出？
  - 方式1：端口映射I/O(port-mapped I/O)

nemu/src/device/io/port_io.c

```
#define IO_PORT_SPACE 65536
static uint8_t io_port[IO_PORT_SPACE]; // 65535个8位的I/O端口

static struct pio_handler_map {
        uint16_t port;
        pio_handler handler;
} pio_handler_table [] = {  // 端口映射表
     // 格式 {port, handler}
};

// called by the out instruction, 写端口
void pio_write(uint16_t port, size_t len, uint32_t data) {…}

// called by the in instruction, 读端口
uint32_t pio_read(uint16_t port, size_t len) {…}
```

nemu/src/device/dev/xxx.c

```
make_pio_handler(handler_xxx) {
        …
}
```

访问（读/写）这个端口，
引起对handler的调用

外设与I/O

- CPU如何向外设进行输入输出？
  - 方式1：端口映射I/O(port-mapped I/O)

设备制造商和OS可以约定，如：我占用哪几个端口，控制端口写0我就读，端口写1我就写……

nemu/src/device/io/port_io.c

```
#define IO_PORT_SPACE 65536
static uint8_t io_port[IO_PORT_SPACE]; // 65535个8位的I/O端口

static struct pio_handler_map {
        uint16_t port;
        pio_handler handler;
} pio_handler_table [] = {  // 端口映射表
     // 格式 {port, handler}
};

// called by the out instruction, 写端口
void pio_write(uint16_t port, size_t len, uint32_t data) {…}

// called by the in instruction, 读端口
uint32_t pio_read(uint16_t port, size_t len) {…}
```

访问（读/写）这个端口，引起对handler的调用

nemu/src/device/dev/xxx.c

```
make_pio_handler(handler_xxx) {
        …
}
```

外设与I/O

- CPU如何向外设进行输入输出？
  - 方式1：端口映射I/O(port-mapped I/O)

设备制造商和OS可以约定，如：我占用哪几个端口，控制端口写0我就读，端口写1我就写……

nemu/src/device/io/port_io.c

```
#define IO_PORT_SPACE 65536
static uint8_t io_port[IO_PORT_SPACE]; // 65535个8位的I/O端口

static struct pio_handler_map {
        uint16_t port;
        pio_handler handler;
} pio_handler_table [] = {  // 端口映射表
     // 格式 {port, handler}
};

// called by the out instruction, 写端口
void pio_write(uint16_t port, size_t len, uint32_t data) {…}

// called by the in instruction, 读端口
uint32_t pio_read(uint16_t port, size_t len) {…}
```

访问（读/写）这个端口，引起对handler的调用

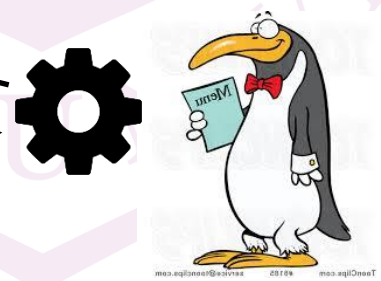
nemu/src/device/dev/xxx.c

```
make_pio_handler(handler_xxx) {
        …
}
```

OS中包含的驱动程序熟知这些约定，便可通过in和out指令完成对设备的控制和数据读写（直接控制法）

out

in



看代码

外设与I/O

- CPU如何向外设进行输入输出？
  - 方式1：端口映射I/O(port-mapped I/O)
  - NEMU中典型的端口映射I/O设备
    - 串口 (Serial)
      - 端口映射：nemu/src/device/io/port_io.c

```
{SERIAL_PORT + [0-7], handler_serial}
```

      - 设备模拟：nemu/src/device/dev/serial.c

```
make_pio_handler(handler_serial) {…} // 响应端口读写
```

      - 驱动程序：kernel/src/lib/serial.c

```
void serial_printc(char ch) { // 请你实现
        while (!serial_idle()); // wait until serial is idle
}
```

看代码

外设与I/O

- CPU如何向外设进行输入输出？
  - 方式1：端口映射I/O(port-mapped I/O)
  - NEMU中典型的端口映射I/O设备
    - 串口（Serial）
      - 端口映射：nemu/src/device/io/port_io.c

```
{SERIAL_PORT + [0-7], handler_serial}
```

      - 设备模拟：nemu/src/device/dev/serial.c

```
make_pio_handler(handler_serial) {…} // 响应端口读写
```

      - 驱动程序：kernel/src/lib/serial.c

```
void serial_printc(char ch) { // 请你实现
        while (!serial_idle()); // wait until serial is idle
}
```

任务

§4-2.3.1 完成串口的模拟

1. 在include/config.h中定义宏HAS_DEVICE_SERIAL并make clean;
2. 实现in和out指令;
3. 实现serial_printc()函数;
4. 运行hello-inline测试用例，对比实现串口前后的输出内容的区别。

外设与I/O

- CPU如何向外设进行输入输出？
  - 方式1：端口映射I/O(port-mapped I/O)
  - NEMU中典型的端口映射I/O设备
    - 硬盘（IDE）
      - 端口映射：nemu/src/device/io/port_io.c

```
{IDE_PORT_BASE + [0-7], handler_ide}
```

      - 设备模拟：nemu/src/device/dev/ide.c

```
make_pio_handler(handler_ide) {…} // 响应端口读写
```

      - 驱动程序：kernel/src/driver/disk.c // 底层驱动
        kernel/src/driver/ide.c // 上层磁盘读写接口

```
void ide_read(uint8_t *buf, uint32_t offset, uint32_t len);
void ide_write(uint8_t *buf, uint32_t offset, uint32_t len);
```

看代码

外设与I/O

- CPU如何向外设进行输入输出？
  - 方式1：端口映射I/O(port-mapped I/O)
  - NEMU中典型的端口映射I/O设备
    - 硬盘（IDE）
      - 端口映射：nemu/src/device/io/port_io.c

```
{IDE_PORT_BASE + [0-7], handler_ide}
```

      - 设备模拟：nemu/src/device/dev/ide.c

```
make_pio_handler(handler_ide) {…} // 响应端口读写
```

      - 驱动程序：kernel/src/driver/disk.c // 底层驱动
        kernel/src/driver/ide.c // 上层磁盘读写接口

```
void ide_read(uint8_t *buf, uint32_t offset, uint32_t len);
void ide_write(uint8_t *buf, uint32_t offset, uint32_t len);
```

任务

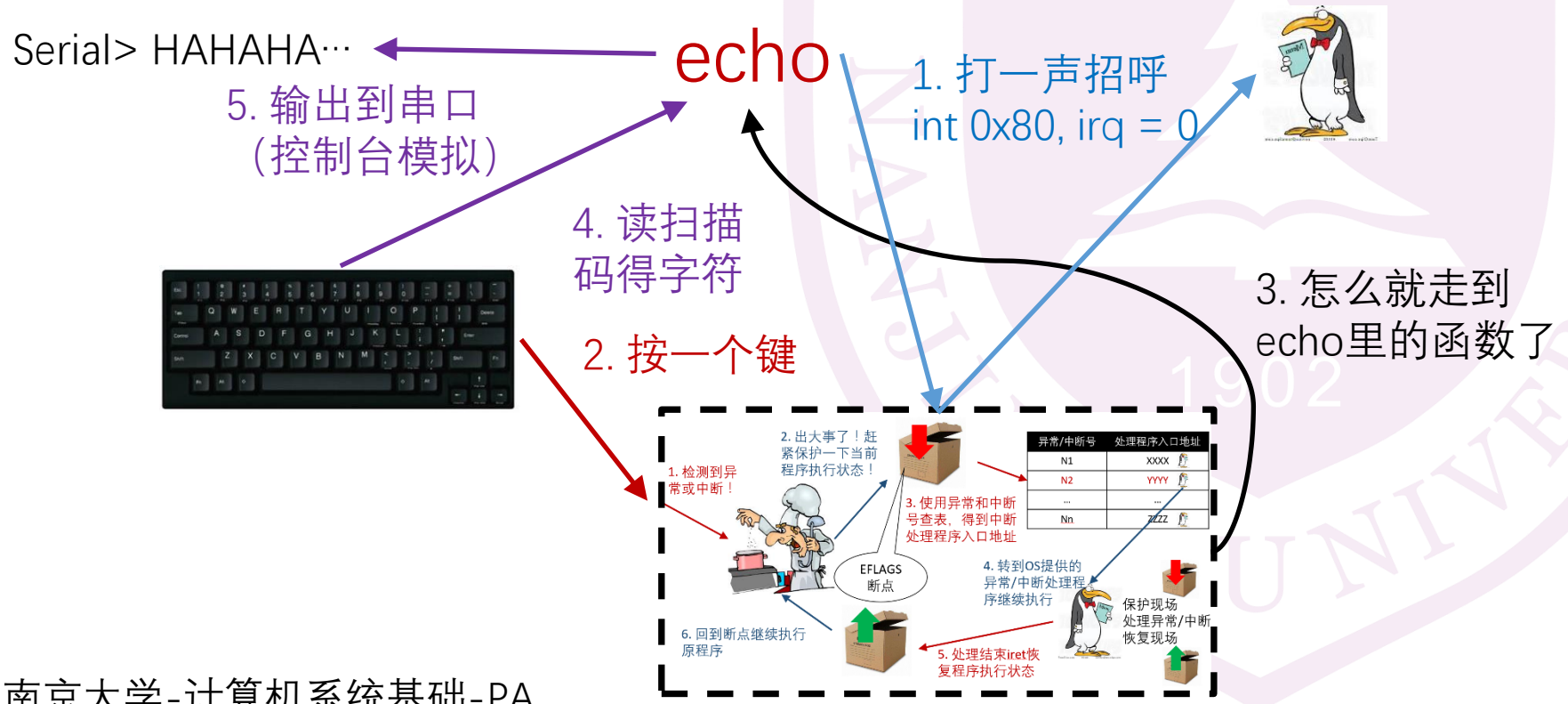
§4-2.3.2 通过硬盘加载程序

1. 在include/config.h中定义宏HAS_DEVICE_IDE并make clean；
2. 修改Kernel中的loader()，使其通过ide_read()和ide_write()接口实现从模拟硬盘加载用户程序；
3. 通过make test_pa-4-2执行测试用例，验证加载过程是否正确。

提示：有些接口这里用不到咱就不用

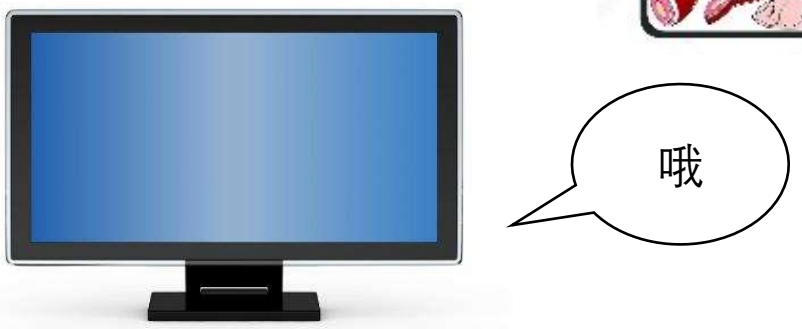
外设与I/O

- CPU如何向外设进行输入输出？
  - 方式1：端口映射I/O(port-mapped I/O)
  - NEMU中典型的端口映射I/O设备
    - 键盘（Keyboard）：结合echo程序彻底理解流程，这里给点提示



外设与I/O

- CPU如何向外设进行输入输出？
  - 方式2：内存映射I/O（Memory Mapped I/O，mmio）
  - NEMU中典型的内存映射I/O设备
    - VGA



我们约定内存从物理地址0xa0000开始，长度为 320 * 200字节的区间为显存区间

外设与I/O

- CPU如何向外设进行输入输出？
  - 方式2：内存映射I/O（Memory Mapped I/O，mmio）
  - NEMU中典型的内存映射I/O设备
    - VGA

```
paddr_read/write() {
        if(is_mmio(paddr) == -1) {
                ...
        } else {
                mmio_read/write()
        }
}
```

§4-2.3.4 实现VGA的MMIO

1. 在include/config.h中定义宏HAS_DEVICE_VGA；
2. 在nemu/src/memory/memory.c中添加mm_io判断和对应的读写操作；
3. 在kernel/src/memory/vmem.c中完成显存的恒等映射；
4. 通过make test_pa-4-2执行测试用例，观察输出测试颜色信息，并通过video_mapping_read_test()。

外设与I/O

- CPU如何向外设进行输入输出？
  - 方式2：内存映射I/O（Memory Mapped I/O，mmio）
  - NEMU中典型的内存映射I/O设备
    - VGA

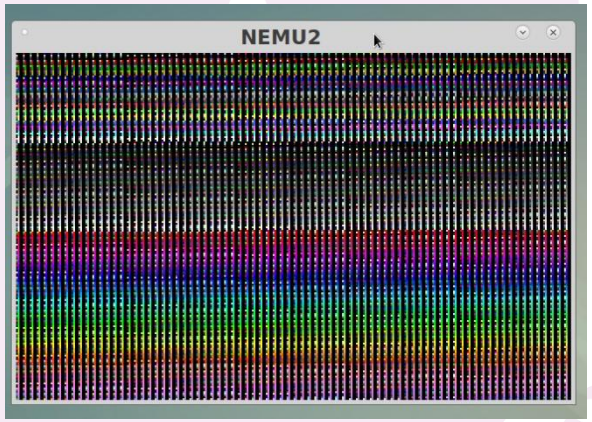
```
create_video_mapping() {
        // 0xa0000          ->     0xa0000
        //    + SCR_SIZE    ->        + SCR_SIZE
        // 虚拟地址              物理地址
}
```

§4-2.3.4 实现VGA的MMIO

1. 在include/config.h中定义宏HAS_DEVICE_VGA;
2. 在nemu/src/memory/memory.c中添加mm_io判断和对应的读写操作;
3. 在kernel/src/memory/vmem.c中完成显存的恒等映射;
4. 通过make test_pa-4-2执行测试用例，观察输出测试颜色信息，并通过video_mapping_read_test()。

外设与I/O

- CPU如何向外设进行输入输出？
  - 方式2：内存映射I/O（Memory Mapped I/O，mmio）
  - NEMU中典型的内存映射I/O设备
    - VGA



§4-2.3.4 实现VGA的MMIO

1. 在include/config.h中定义宏HAS_DEVICE_VGA；
2. 在nemu/src/memory/memory.c中添加mm_io判断和对应的读写操作；
3. 在kernel/src/memory/vmem.c中完成显存的恒等映射；
4. 通过make test_pa-4-2执行测试用例，观察输出测试颜色信息，并通过video_mapping_read_test()。

I/O的控制方式

- 基本方式
  - 直接控制法
  - 中断控制法
  - DMA控制法

- 在PA的实现中，大多数设备采用直接控制法，Audio的实现采用了DMA控制法，有兴趣的同学可以去阅读相应代码

打字小游戏与仙剑（选做任务）

这一部分的代码和教程都相对比较老了，属于对老版本致敬的部分，会有一些不一致，希望有志之士参与重构，成为核心开发者。

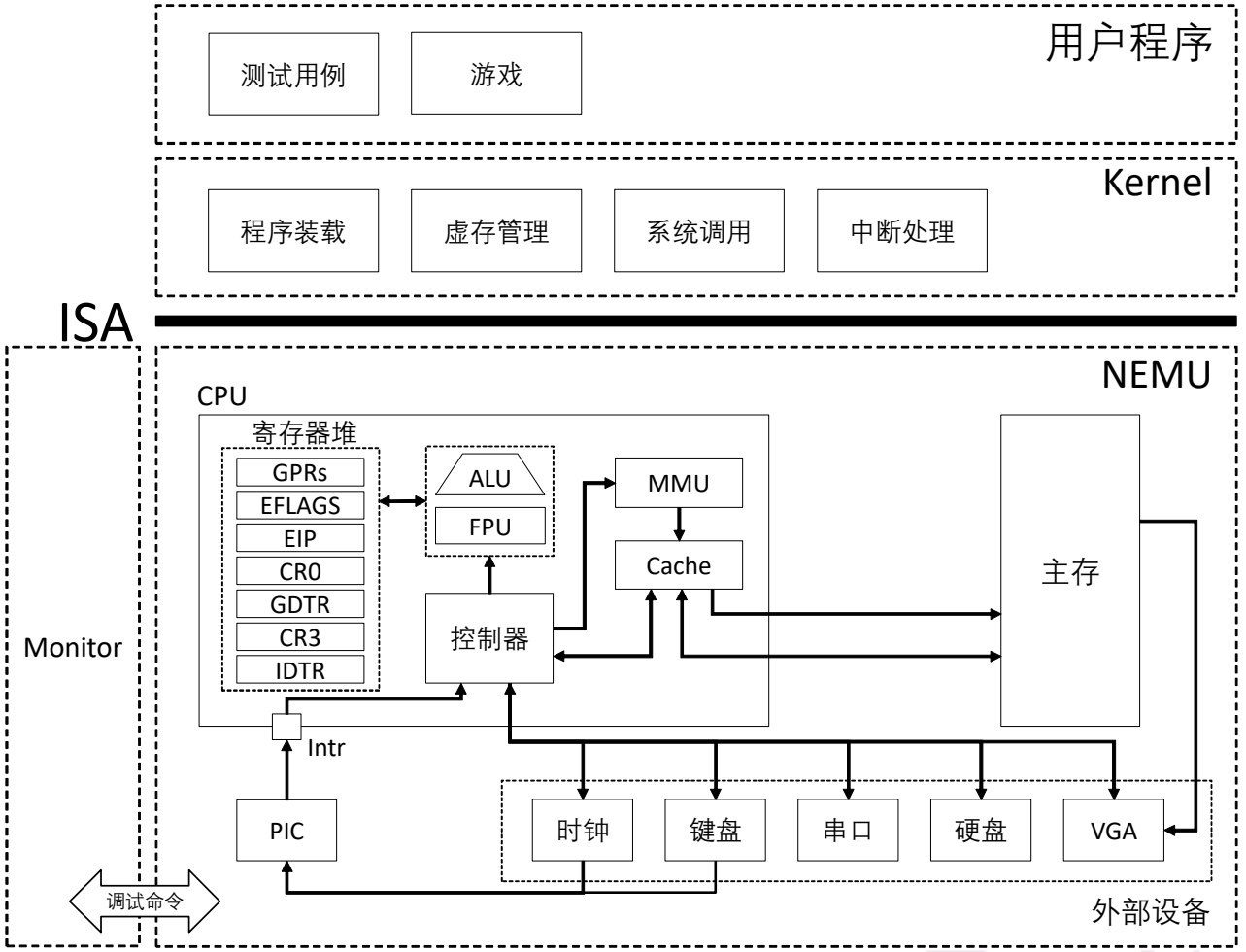
作为最后的挑战任务，以理解框架代码和debug为主。加油了

建议关调cache

执行命令：make test_pa-4-3 // 最后submit执行的是credits小游戏

最终的截止时间会另行公布

PA的构成 – 路线图 回顾


用户程序
测试用例
游戏
Kernel
程序装载
虚存管理
系统调用
中断处理
ISA
NEMU
CPU
寄存器堆
GPRs
EFLAGS
EIP
CR0
GDTR
CR3
IDTR
ALU
FPU
MMU
Cache
控制器
主存
Monitor
Intr
PIC
时钟
键盘
串口
硬盘
VGA
调试命令
外部设备

PA 到此结束

祝大家学习快乐，身心健康！

感谢同学们一个学期的努力 :-)