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 1-2 – 整数的表示和运算

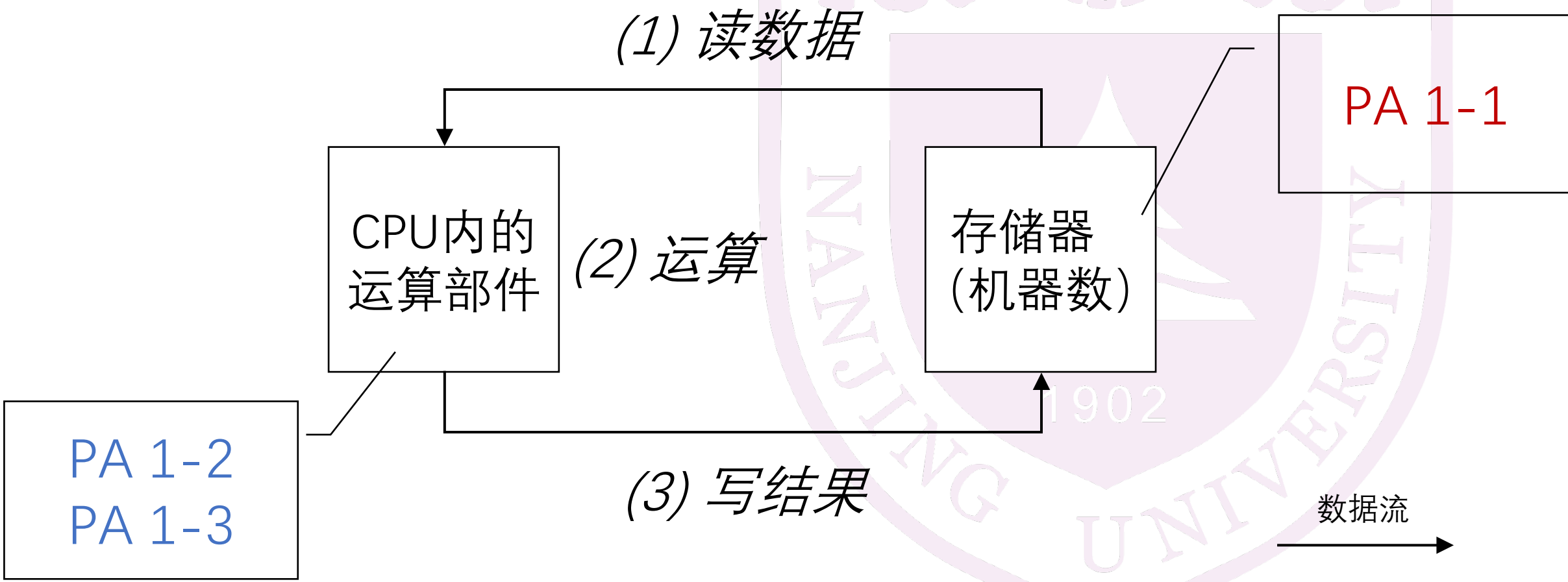
2022年2月25日

南京大学《计算机系统基础》课程组

目录

机器数的存取

- CPU对数据的处理



通过尝试测试，发现我们需要实现ALU中的相应功能

```
pa_nju$ make clean
pa_nju$ make test_pa-1

./nemu/nemu --test-reg
NEMU execute built-in tests
reg_test()       pass

./nemu/nemu --test-alu add
NEMU execute built-in tests
Please implement me at alu.c
```

需要实现alu的功能

数据的类型及其机器级表示

数据（真值）的类型 —编码→ 机器数

无符号整数 → 直接编码
123, 0x8048000

带符号整数 → 原码、补码、反码、移码
-123, 123

→ 1010010010…
二进制位串

整数的表示和运算

- 无符号整数
  - 32位整数：0x0 ~ 0xFFFFFFFF（32个1）
- 二进制编码：熟练掌握不同进制之间的转换方法

1010B
= 12O
= 10D
= AH

整数的表示和运算

- 带符号整数
  - 原码表示法：最高位为符号位
  - 补码表示法（普遍采用）：各位取反末位加一
    - 用加法来实现减法
    - 可以试试X+(-X)等于多少，其中X为某一32位正整数，-X为其补码表示，运算结果截取低32位
  - 移码表示法：增加偏置常数，将在浮点数的IEEE 754标准中得到应用

数据的类型及其机器级表示

数据（真值）的类型 → 编码 → 机器数

无符号整数 → 直接编码
123, 0x8048000

带符号整数 → 原码、补码、反码、移码
-123, 123

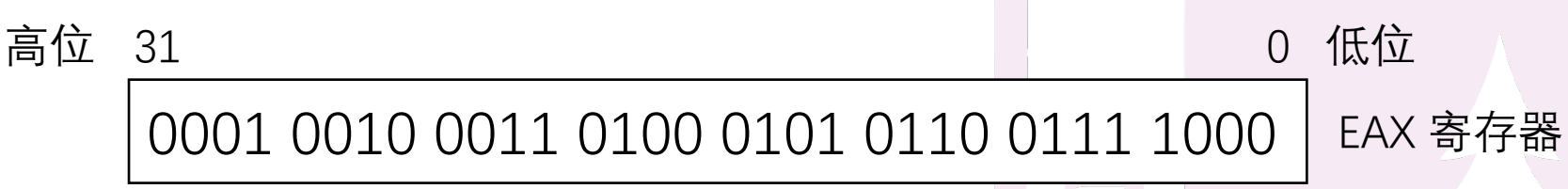
直接编码、原码、补码、反码、移码 → 1010010010…
二进制位串

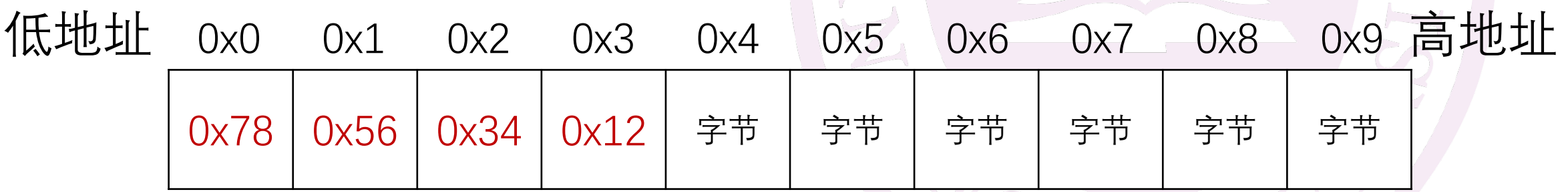
小端方式

存储器：寄存器 | 主存 | 等

机器数存储到存储器

机器数：0x 12 34 56 78





小端：低有效字节在低地址

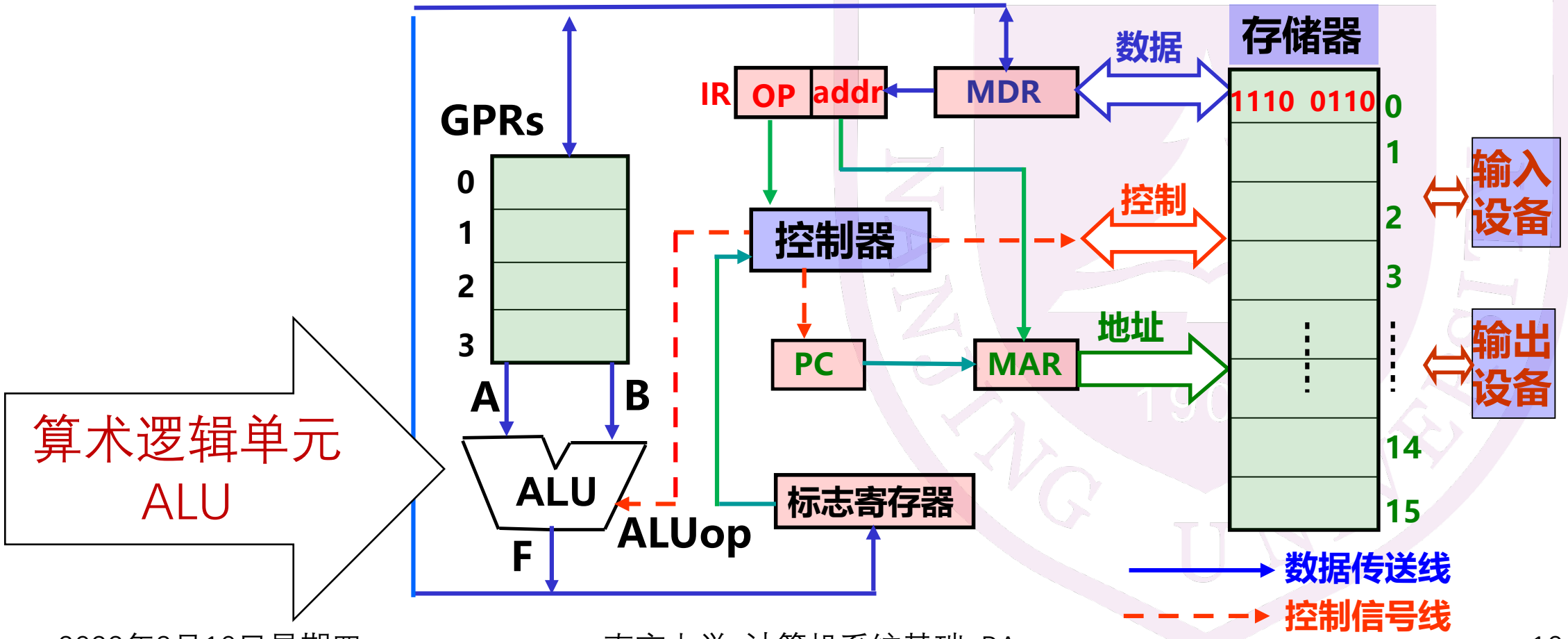
主存（RAM）按字节编址

整数的运算部件

CPU：中央处理器；PC：程序计数器；MAR：存储器地址寄存器

ALU：算术逻辑部件；IR：指令寄存器；MDR：存储器数据寄存器

GPRs：通用寄存器组（由若干通用寄存器组成）



算术逻辑单元

- 我们对ALU的功能进行了抽象和包装
  - 能进行各类算术运算：加减乘除、移位
  - 能进行各种逻辑运算：与或非

- 对应代码：
  - `nemu/include/cpu/alu.h`
  - `nemu/src/cpu/alu.c`

实现对一种运算的模拟

第一步：找到需要实现的函数

执行make test_pa-1遇到错误提示

```
pa_nju$ make clean
pa_nju$ make test_pa-1

./nemu/nemu --test-reg
NEMU execute built-in tests
reg_test()       pass

./nemu/nemu --test-alu add
NEMU execute built-in tests
Please implement me at alu.c
```

需要实现add

算术逻辑单元的模拟

- 取add为例

函数名称，对应指令名称　　参与运算的两个操作数　　操作数长度：8, 16, 32

```
uint32_t alu_add(uint32_t src, uint32_t dest, size_t data_size)
{
        printf("\e[0;31mPlease implement me at alu.c\e[0m\n");
        assert(0);
        return 0;
}
```

要替换成教程中说明的正确实现：
1. 返回dest + src的结果，data_size不足32时，高位清0
2. 设置EFLAGS标志位

实现对一种运算的模拟

第二步：掏出i386手册

1. 找到i386手册Sec. 17.2.2.11
2. 有关ADD指令的描述 p.g. 261 of 421
3. 看Flags Affected: OF, SF, ZF, AF, CF, and PF as described in Appendix C
4. 找到Appendix C并仔细体会（AF不模拟）

实现对一种运算的模拟

第三步：按照手册规定的操作进行实现

nemu/src/cpu/alu.c
add的参考实现方案

```
uint32_t alu_add(uint32_t src, uint32_t dest, size_t data_size) {
        uint32_t res = 0;
        res = dest + src;                       // 获取计算结果

        set_CF_add(res, src, data_size);        // 设置标志位
        set_PF(res);
        // set_AF();                            // 我们不模拟AF
        set_ZF(res, data_size);
        set_SF(res, data_size);
        set_OF_add(res, src, dest, data_size);

        return res & (0xFFFFFFFF >> (32 - data_size)); // 高位清零并返回
}
```

ADD运算CF的判断逻辑

- 参考表盘这一模运算系统

```
// CF contains information relevant to unsigned integers
void set_CF_add(uint32_t result, uint32_t src, size_t data_size) {
	result = sign_ext(result & (0xFFFFFFFF >> (32 - data_size)), data_size);
	src = sign_ext(src & (0xFFFFFFFF >> (32 - data_size)), data_size);
	cpu.eflags.CF = result < src; //
}


void set_ZF(uint32_t result, size_t data_size) {
	result = result & (0xFFFFFFFF >> (32 - data_size));
	cpu.eflags.ZF = (result == 0);
}

// SF and OF contain information relevant to signed integers
void set_SF(uint32_t result, size_t data_size) {
	result = sign_ext(result & (0xFFFFFFFF >> (32 - data_size)), data_size);
	cpu.eflags.SF = sign(result);
}

void set_PF(uint32_t result) { … } // 简单暴力穷举也行
```

对cpu中eflags寄存器的访问
i386手册 sec 2.3.4.1

nemu/src/cpu/alu.c
add的参考实现方案

```
// CF contains information relevant to unsigned integers
void set_CF_add(uint32_t result, uint32_t src, size_t data_size) {
        result = sign_ext(result & (0xFFFFFFFF >> (32 - data_size)), data_size);
        src = sign_ext(src & (0xFFFFFFFF >> (32 - data_size)), data_size);
        cpu.eflags.CF =
}


void set_ZF(uint32_t r
        result = result
        cpu.eflags.ZF =
}

// SF and OF contain i
void set_SF(uint32_t r
        result = sign_e
        cpu.eflags.SF =
}

void set_PF(uint32_t r
```

nemu/include/cpu/alu.h

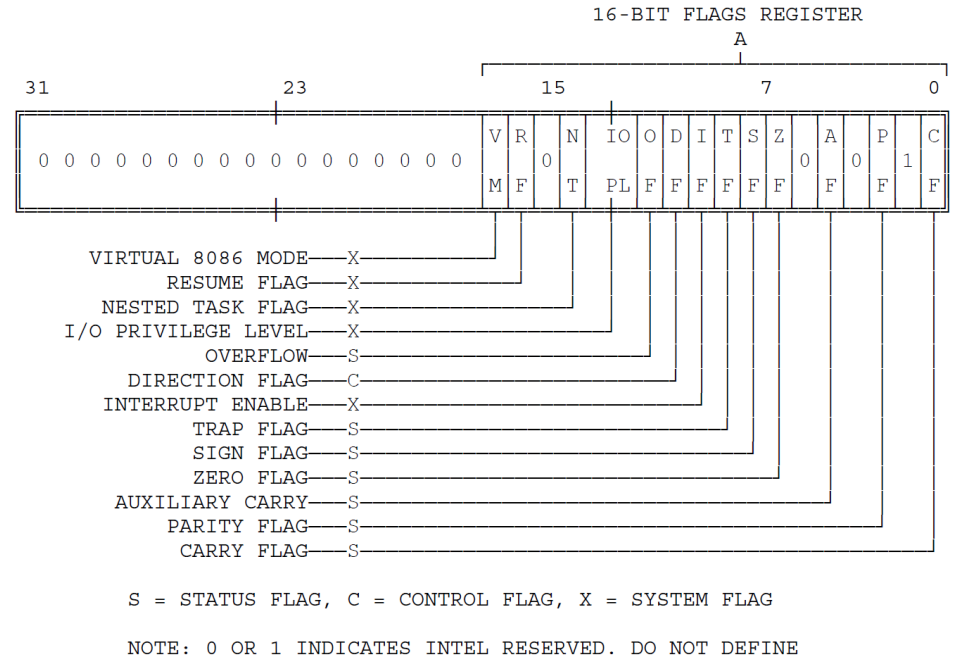
```
// sign extend
#define sign(x) ((uint32_t)(x) >> 31)
//#define sign_ext(x) ((int32_t)((int8_t)(x)))

inline uint32_t sign_ext(uint32_t x, size_t data_size)
{
        assert(data_size == 16 || data_size == 8 || data_size == 32);
        switch (data_size)
        {
        case 8:
                return (int32_t)((int8_t)(x & 0xff));
        case 16:
                return (int32_t)((int16_t)(x & 0xffff));
        default:
                return (int32_t)x;
        }
}
```

```c
// CF contains infor
void set_CF_add(uint
        result = sign_
        src = sign_ext
        cpu.eflags.CF
}


void set_ZF(uint32_t
        result = resul
        cpu.eflags.ZF
}

// SF and OF contain
void set_SF(uint32_t
        result = sign_
        cpu.eflags.SF
}

void set_PF(uint32_t
```

```c
// define the structure of registers
typedef struct
{
    // general purpose registers

    // EIP
    uint32_t eip;

    // EFLAGS
    union {
        struct
        {
            uint32_t CF : 1;
            uint32_t dummy0 : 1;
            uint32_t PF : 1;
            uint32_t dummy1 : 1;
            uint32_t AF : 1;
            uint32_t dummy2 : 1;
            uint32_t ZF : 1;
            uint32_t SF : 1;
            uint32_t TF : 1;
            uint32_t IF : 1;
            uint32_t DF : 1;
            uint32_t OF : 1;
            uint32_t OLIP : 2;
            uint32_t NT : 1;
            uint32_t dummy3 : 1;
            uint32_t RF : 1;
            uint32_t VM : 1;
            uint32_t dummy4 : 14;
        };
        uint32_t val;
    } eflags;


} CPU_STATE;
```

nemu/include/cpu/reg.h

Figure 2-8. EFLAGS Register



nemu/src/cpu/cpu.c

```c
CPU_STATE cpu;
FPU fpu;
int nemu_state;
uint8_t data_size = 32;
bool verbose = false;
bool is_nemu_hlt = false;
bool has_prefix = false;

#define sign(x) ((uint32_t)(x) >> 31)

void do_devices();
void init_cpu(const uint32_t init_eip)
{
    cpu.eflags.val = 0x0;
    fpu.status.val = 0x0;
    int i = 0;
```

```
void set_OF_add(uint32_t result, uint32_t src, uint32_t dest, size_t data_size) {
	switch(data_size) {
		case 8:
			result = sign_ext(result & 0xFF, 8);
			src = sign_ext(src & 0xFF, 8);
			dest = sign_ext(dest & 0xFF, 8);
			break;
		case 16:
			result = sign_ext(result & 0xFFFF, 16);
			src = sign_ext(src & 0xFFFF, 16);
			dest = sign_ext(dest & 0xFFFF, 16);
			break;
		default: break;// do nothing
	}
	if(sign(src) == sign(dest)) {
		if(sign(src) != sign(result))
			cpu.eflags.OF = 1;
		else
			cpu.eflags.OF = 0;
	} else {
		cpu.eflags.OF = 0;
	}
}
```

nemu/src/cpu/alu.c
add的参考实现方案

对于ADC和SUB的特殊说明

- ADC需要结合CF的取值判断
  - 考虑CF == 1时，src == res的情况是否产生进位？
- SUB为什么不能对减数取补码后，简单复用add的CF判断标准？

实现对一种运算的模拟

重复第一步：找到需要实现的函数
执行make test_pa-1遇到错误提示

```
./nemu/nemu --test-alu add
NEMU execute built-in tests
alu_test_add()  pass
./nemu/nemu --test-alu adc
NEMU execute built-in tests
Please implement me at alu.c
```

需要实现adc

实现对ALU的模拟

完成对ALU的模拟

```
alu_test_add()  pass
alu_test_adc()  pass
alu_test_sub()  pass
alu_test_sbb()  pass
alu_test_and()  pass
alu_test_or()   pass
alu_test_xor()  pass
alu_test_shl()  pass
alu_test_shr()  pass
alu_test_sal()  pass
alu_test_sar()  pass
alu_test_mul()  pass
alu_test_div()  pass
alu_test_imul() pass
alu_test_idiv() pass
```

测试用例代码：

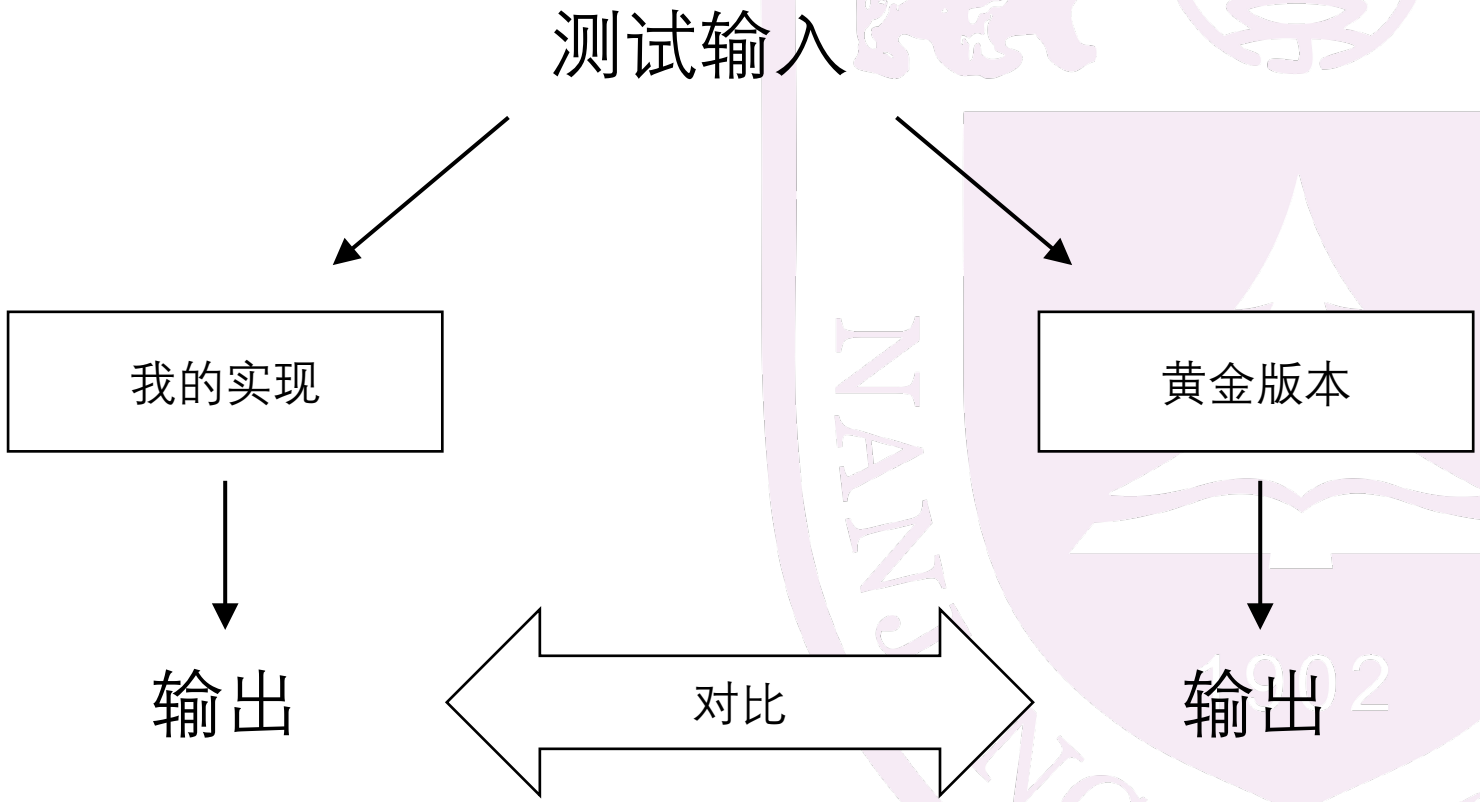
nemu/src/cpu/test/alu_test.c

注意：　移位操作不测试OF位
所有操作都不测试AF位
imul操作所有标志位都不测试

注意：禁止采用测试用例里面使用内联汇编进行实现的方法，但是可以学习这种交叉验证的方法

说明：其中mod和imod运算是我们单独抽象出来的，需参照div和idiv的说明进行实现并测试

框架代码对于ALU运算的测试方法



框架代码对于ALU运算的测试方法

nemu/src/cpu/test/alu_test.c

```
#define internel_alu_test_CPSZO(alu_func, dataSize, asm_instr) \
    uint32_t res, res_asm, res_eflags;\
    TEST_EFLAGS test_eflags;\
    res = alu_func(b, a, dataSize);\
    asm (   asm_instr \
    assert_res_CPSZO(dataSize)
```

```
#define assert_res_CPSZO(dataSize) \
        "pushf;" \
        "popl %%edx;" \
        : "=a" (res_asm), "=d" (res_eflags) \
        : "a" (a), "c" (b)); \
    test_eflags.val = res_eflags; \
    res_asm = res_asm & (0xFFFFFFFF >> (32 - dataSize)); \
    fflush(stdout); \
    assert(res == res_asm); \
    assert(cpu.eflags.CF == test_eflags.CF); \
    assert(cpu.eflags.PF == test_eflags.PF); \
    assert(cpu.eflags.SF == test_eflags.SF); \
    assert(cpu.eflags.ZF == test_eflags.ZF); \
    assert(cpu.eflags.OF == test_eflags.OF); \
```

```
void alu_test_add() {
    uint32_t a, b;
    int input[] = {0x10000000, -3, -2, -1, 0, 1, 2};
    int n = sizeof(input) / sizeof(int);
    int i, j;
    for(i = 0 ; i < n ; i++) {
        for(j = 0 ; j < n ; j++) {
            a = input[i];
            b = input[j];
            {internel_alu_test_CPSZO(alu_add, 32, "addl %%ecx, %%eax;")}
            {internel_alu_test_CPSZO(alu_add, 16, "addw %%cx, %%ax;")}
            {internel_alu_test_CPSZO(alu_add, 8 , "addb %%cl, %%al;")}
        }
    }

    srand(time(0));
    for(i = 0 ; i < 1000000 ; i++) {
        a = rand();
        b = rand();
        {internel_alu_test_CPSZO(alu_add, 32, "addl %%ecx, %%eax;")}
        {internel_alu_test_CPSZO(alu_add, 16, "addw %%cx, %%ax;")}
        {internel_alu_test_CPSZO(alu_add, 8 , "addb %%cl, %%al;")}
    }
    printf("alu_test_add()  \e[0;32mpass\e[0m\n");
    if( get_ref() ) printf("\e[0;31mYou have used reference implementatio
}
```

后续阶段对ALU模拟的依赖

- 在PA 2-1阶段的算术运算指令中，调用本阶段所实现的alu函数

```
#include "cpu/instr.h"

static void instr_execute_2op() {
    operand_read(&opr_src);
    operand_read(&opr_dest);
    opr_dest.val = alu_add(sign_ext(opr_src.val, opr_src.data_size),
                           sign_ext(opr_dest.val, opr_dest.data_size),
                           data_size);
    operand_write(&opr_dest);
}

make_instr_impl_2op(add, r, rm, b)
```

重要说明

特别说明：针对上面四个移位操作，约定只影响 `dest` *操作数的低* `data_size` *位，而不影响其高* `32 - data_size` *位。标志位的设置根据结果的低* `data_size` *位来设置。*

——感谢16级何峰彬、张明超同学的建议

该特别说明不再生效，移位操作也需要将高位清零（此时就不存在是否影响高32-data_size位的问题了）

提醒注意SLR和SAR的区别

实现对ALU的模拟

- 实现ALU的目的
  - 复习课本第二章内容
  - 在alu.c中实现的这些函数，到了PA 2实现对应指令的时候，就可以直接调用了
- PA 1不设置小的阶段截止，PA 1-3完成后统一提交
  - 建议PA 1-1和PA 1-2在一周内完成

PA 1-2 结束