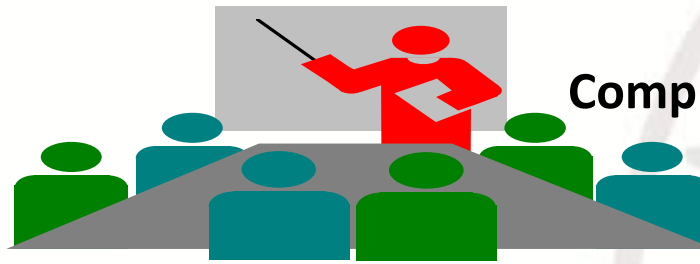




浙江大学  
ZHEJIANG UNIVERSITY



Computer Organization & Design

# Computer Organization & Design 实验与课程设计

## 实验十

### 多周期CPU设计-数据通路设计

施青松

Asso. Prof. Shi Qingsong

College of Computer Science and Technology, Zhejiang University

[zjsqs@zju.edu.cn](mailto:zjsqs@zju.edu.cn)

---



# Course Outline





# 实验目的

1. 深入运用寄存器传输控制技术
2. 深入掌握CPU的核心：数据通路组成与原理
3. 设计多周期数据通路
4. 测试方案的设计
5. 测试程序的设计



# 实验环境

## □ 实验设备

1. 计算机（Intel Core i5以上，4GB内存以上）系统
2. Spartan-3 Starter Kit Board/Sword开发板
3. Xilinx ISE14.4及以上开发工具

## □ 材料

无

# Course Outline





# 实验任务

## 1. 设计9+条指令的多周期数据通路

- 设计多周期数据通路逻辑原理图
  - R-Type: add, sub, and, or, slt, nor\*;
  - I-Type: lw, sw, beq;
  - J-Type: J
- 用硬件描述语言设计实现数据通路
  - ▣ ALU和Regs调用Exp04设计的模块
- 替换Exp09数据通路核

## 2. 数据通路测试

- 设计测试方案与测试程序
- 通路测试: I-格式通路、R-格式通路

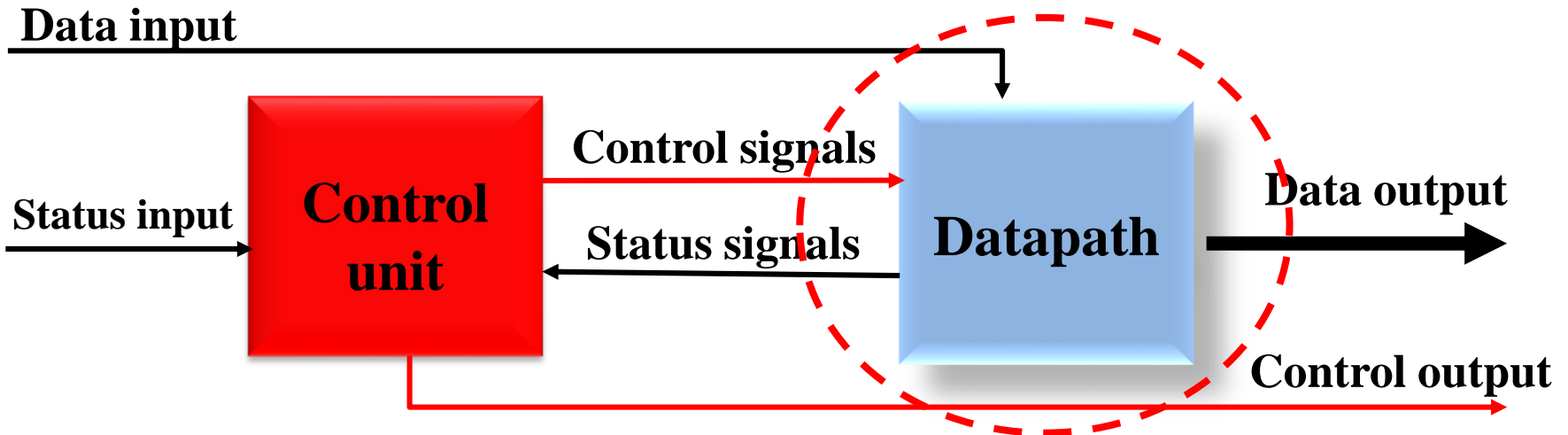
# Course Outline



# CPU organization

## □ Digital circuit

- General circuits that controls logical event with logical gates -  
**-Hardware**



## □ Computer organization

- Special circuits that processes logical action with instructions  
**-Software**



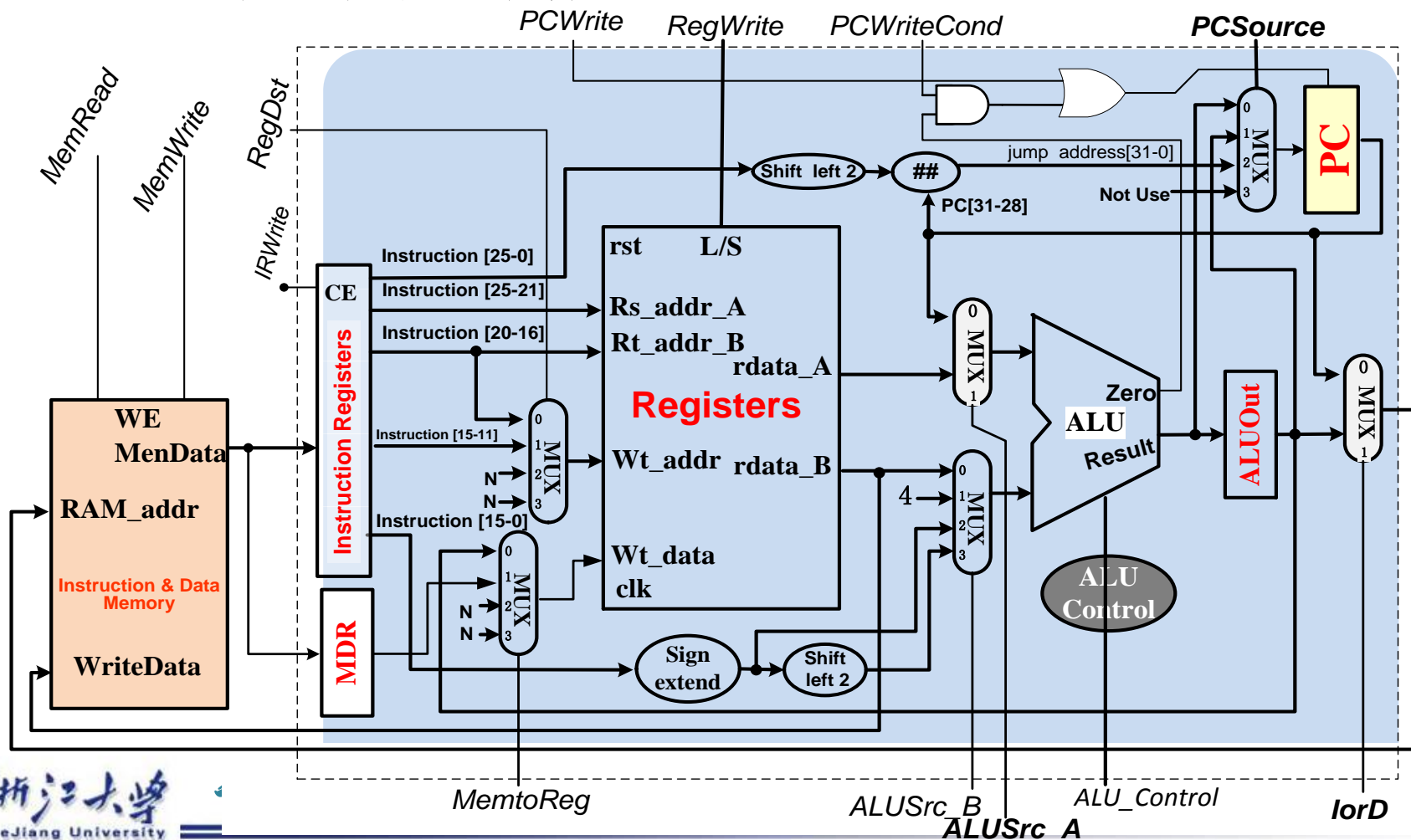
# 多周期数据通路结构：兼容9-23+指令



MUX选择更多输入以兼容扩展

❑ 找出指令的通路：5+1个MUX

■ 比单周期增加了什么通道？





# 多周期控制信号定义: Defined 10+6+? control

## □ 修改单周期通路与操作控制

信号	源数目	功能定义	赋值0时动作	赋值1时动作
ALUScrA ALUSrc_B	?	ALU端口A、B输入选择		
RegDst	?	寄存器写地址选择(考虑扩展)		
MemtoReg	?	寄存器写数据选择(考虑扩展)		
IorD	?	新增	请填写信号赋值时 对应操作	
PCSource	?	新增		
PCWriteCond	?	新增		
.....	?	新增		
Branch	?	Beq指示(考虑Bne扩展)		
RegWrite	-	寄存器写控制		
MemWrite	-	存储器写控制		
MemRead	-	存储器读控制		
ALU_Control	000- 111	3位ALU操作控制	参考表 Exp04	Exp04



# 多周期数据通路模块：M\_datapath

## □ 数据通路

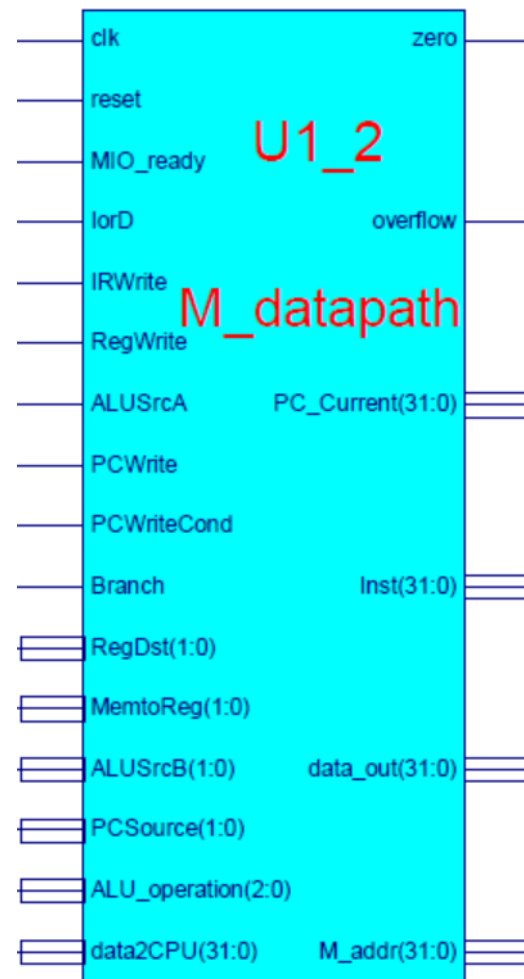
- CPU主要部件之一
- 寄存器传输控制对象：通用数据通路

## □ 基本功能

- 具有通用计算功能的算术逻辑部件
- 具有通用目的寄存器
- 具有通用计数所需的尽可能的路径

## □ 重要信号

- Inst\_R: 指令寄存器输出
- PC\_Current: 当前PC(PC+4)
- M\_addr: 存储器地址
- Branch: =1→beq; =0→bne
- PCWriteCond: Branch指令



# 数据通路接口参考- M\_datapath.v



```
module M_datapath(input clk,
                  input reset,
                  input MIO_ready,
                  input IorD,
                  input IRWrite,
                  input[1:0] RegDst,
                  input RegWrite,
                  input[1:0] MemtoReg,
                  input ALUSrcA,
                  input[1:0] ALUSrcB,
                  input[1:0] PCSrc,
                  input PCWrite,
                  input PCWriteCond,
                  input Branch,
                  input[2:0] ALU_operation,

                  output[31:0] PC_Current,
                  input[31:0] data2CPU,
                  output[31:0] Inst,
                  output[31:0] data_out,
                  output[31:0] M_addr,
                  output zero,
                  output overflow
                );
```

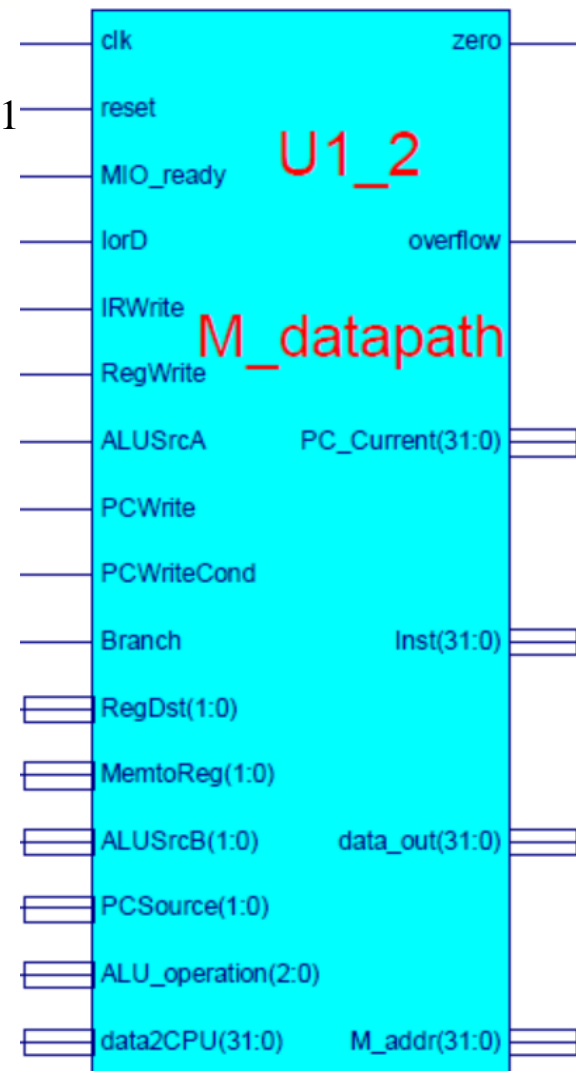
endmodule

//外部输入=1

//预留到2位

//预留到2位

//4选1控制





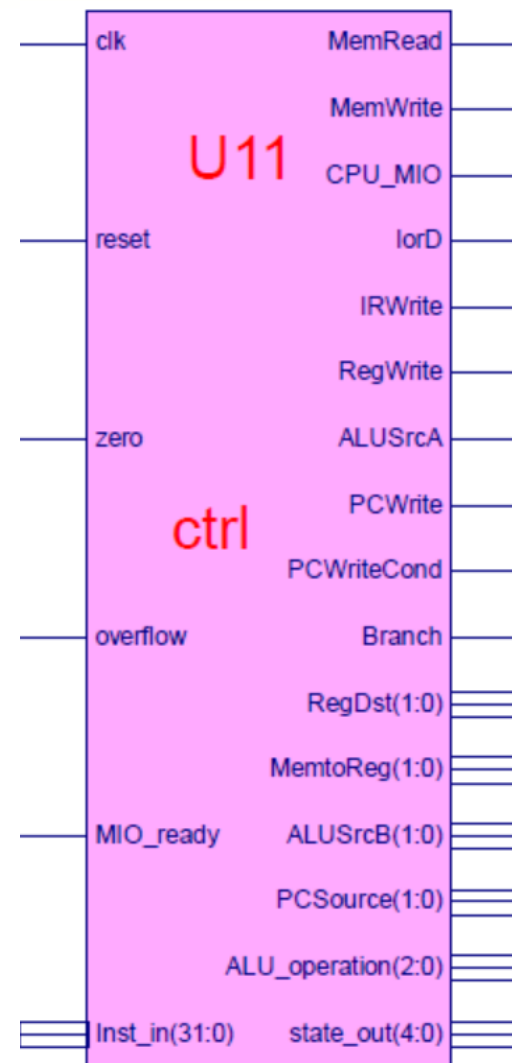
# CPU部件之二-控制器: ctrl

## □ 本实验用IP 软核- ctrl

- 核调用模块ctrl.ngc
- 核接口信号模块(空文档): ctrl.v
- 核模块符号文档: ctrl.sym

## □ 重要信号

- MIO\_ready: 外设就绪
  - =0 CPU等待
  - =1 CPU正常运行
  - 本实验恒等于1
- Inst\_in: 指令输入, 来自IR输出
- State\_out: 状态编码, 用于测试





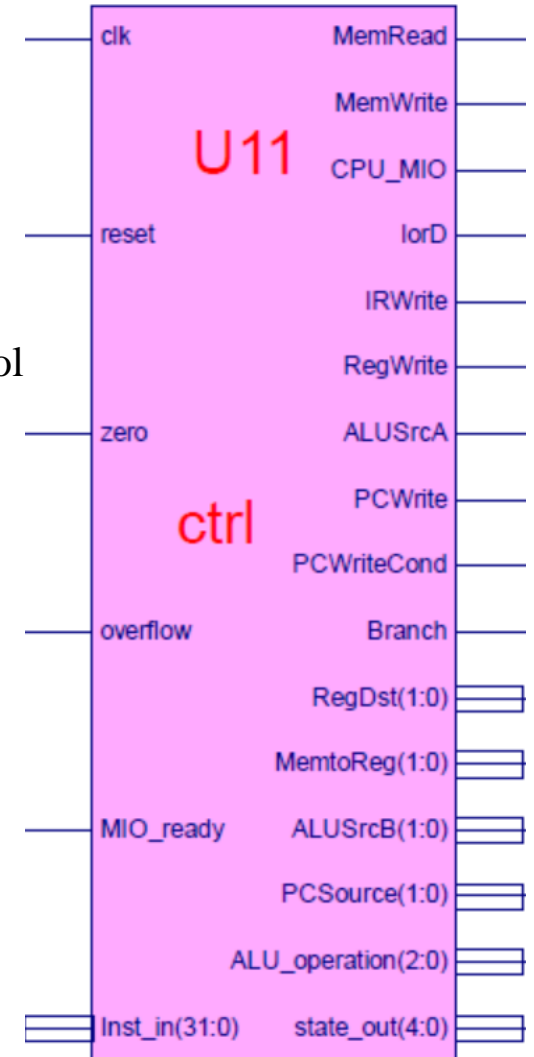
# 控制器接口文档- ctrl.v

```
module ctrl(input clk,
            input reset,
            input [31:0] Inst_in,
            input zero,
            input overflow,
            input MIO_ready,
            output reg MemRead,
            output reg MemWrite,
            output reg[2:0] ALU_operation,
            output [4:0] state_out,

            output reg CPU_MIO,
            output reg IorD,
            output reg IRWrite,
            output reg [1:0] RegDst,
            output reg RegWrite,
            output reg [1:0] MemtoReg,
            output reg ALUSrcA,
            output reg [1:0] ALUSrcB,
            output reg [1:0] PCSource,
            output reg PCWrite,
            output reg PCWriteCond,
            output reg Branch
            );

            //外部输入=1
            //ALU_Control
            //预留到2位
            //预留到2位

endmodule
```



# U3-存储器初始化数据参考文档:

## mem.coe 代码与数据共存



memory\_initialization\_radix=16; 9条指令设计的, 根据实验三修改

memory\_initialization\_vector=

```
00A52820, AC650000, 8C650000, 00A85824, 01A26820, 11A00017, 8C650000, 01CE9020, 0252B020, 02569020,  
00B25824, 11600005, 1172000A, 01CE9020, 1172000B, AC890000, 08000036, 11410001, 0800004D, 00005027,  
014A5020, AC8A0000, 08000036, 8E290860, AC890000, 08000036, 8E290820, AC890000, 08000036, 8C0D0014,  
014A5020, 01425025, 022E8820, 02348824, 01224820, 11210001, 0800005F, 000E4820, 01224820, 8C650000,  
00A55820, 016B5820, AC6B0000, AC660004, 0800003E, 00000000, 00000000, 00000000, 00000000, 00000000,  
00000000, 00000000, 00000000, 00000000, 00000000, 00000000, 00000000, 00000000, 00000000, 00000000,  
00000000, 00000000, 00000000, 00000000, 00000000, 00000000, 00000000, 00000000, 00000000, 00000000,  
00000000, 00000000, .....
```

代码区: 地址从00000000开始

```
F0000000, 000002AB, 80000000, 0000003F, 00000001, FFFF0000, 0000FFFF, 80000000, 00000000, 11111111,  
22222222, 33333333, 44444444, 55555555, 66666666, 77777777, 88888888, 99999999, AAAAAAAA, BBBB BBBB,  
CCCCCCCC, DDDDDDDD, EEEEEEEE, FFFFFFFF, 557EF7E0, D7BDFBD9, D7DBFDB9, DFCFFCFB, DFCFBFFF, F7F3DFFF,  
FFFFDF3D, FFFF9DB9, FFFFBCFB, DFCFFCFB, DFCFBFFF, D7DB9FFF, D7DBFDB9, D7BDFBD9, FFFF07E0, 007E0FFF,  
03BDF020, 03DEF820, 08002300, 00000000, 00000000, 00000000, 00000000, 00000000;
```

数据区: 地址起始需要约定: 此代码为00000200



# Course Outline







# CPU之数据通路设计

- 用HDL描述实现
- 调用实验一设计的多路器
- 调用实验一的基本运算模块
- 调用实验四设计的ALU和Regs



# 设计工程：OExp10-MDP

## ◎ 设计CPU之数据通路

- ⌚ 根据理论课分析讨论设计9+条指令的数据通路
- ⌚ 仿真测试M\_Datapath.v模块

## ◎ 集成替换验证通过的数据通路模块

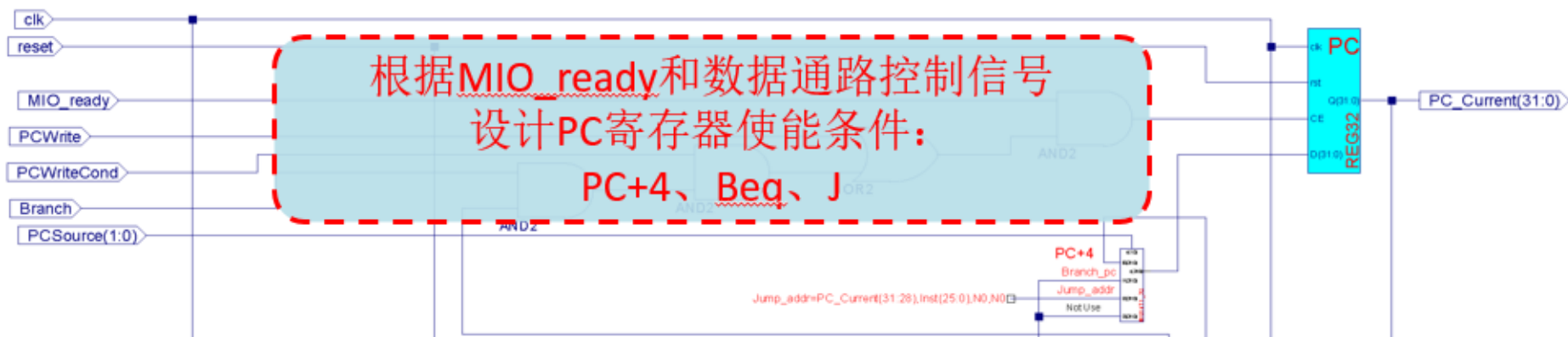
- ⌚ 替换实验四(Exp09)中的M\_Datapath.ngc核
- ⌚ 顶层模块沿用Exp09
  - ⊙ 模块名：Top\_OExp09\_MDP.v

## ◎ 测试数据通路模块

- ⌚ 设计测试程序(MIPS汇编)测试：
- ⌚ ALU功能
- ⌚ I-指令通路
- ⌚ R-指令通路

# 设计要点

- 建立DataPath HDL输入模板
- 设计PC通路
  - 调用REG32和MUX4T1\_32模块



## ■ 参考描述

**assign**       $CE = MIO\_ready \ \&\& \ (PCWrite \ || \ (PCWriteCond \ \&\& \ zero \ \&\& \ Branch));$

**MUX4T1\_32**     $MUX6(.IO(PC+4?), .I1(Beq?), .I2(Jump?), .I3(No \ Use), .o(PC\_next));$

**REG32**       $PC(.clk(???), .rst(???), .CE(CE), .D(PC\_next), .Q(PC\_Current));$

.....



# 变量传输与调用Exp04的Regs模块

```
wire[4:0] reg_Rs_addr_A = Inst_R[25:21]; //REG Source 1 rs
wire[4:0] reg_Rt_addr_B = Inst_R[20:16]; //REG Source 2 or Destination rt
wire[4:0] reg_rd_addr = Inst_R[15:11]; //REG Destination rd
wire[15:0] imm = Inst_R[15:0]; //Immediate
wire[25:0] direct_addr = Inst_R[25:0]; //Jump addre
```

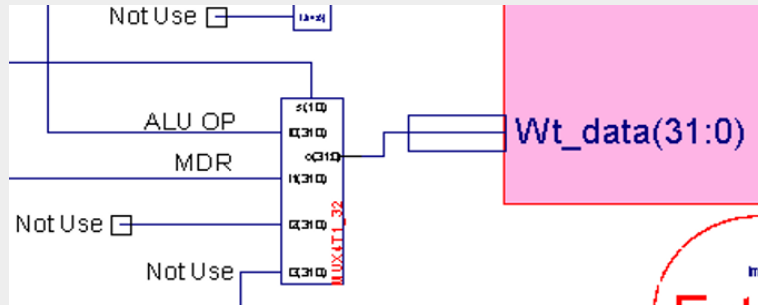
```
Regs regs(.clk(clk),
          .rst(rst),
          .R_addr_A(reg_Rs_addr_A),
          .R_addr_B(reg_Rt_addr_B),
          .Wt_addr(????????), //来自MUX1输出
          .Wt_data(????????), //来自MUX2输出
          .L_S(RegWrite), //来自控制器
          .rdata_A(rdata_A), //送MUX4
          .rdata_B(rdata_B) //送MUX3
        );
assign data_out=rdata_B;
```



# 寄存器Regs传输通路

// reg write data port

**MUX4T1\_32**



MUX2(.I0(ALU\_Out),

.I1(MDR),

.I2({32'h00000000}),

.I3(32'h00000000), // not use

.s(MemtoReg),

.o(w\_reg\_data)

);

//ALU OP

//LW

// not use

// reg write addr port

**MUX4T1\_5**

MUX1(.I0(reg\_Rt\_addr\_B),

.I1(reg\_rd\_addr),

.I2(5'b11111),

.I3(5'b00000),

.s(RegDst),

.o(reg\_Wt\_addr)

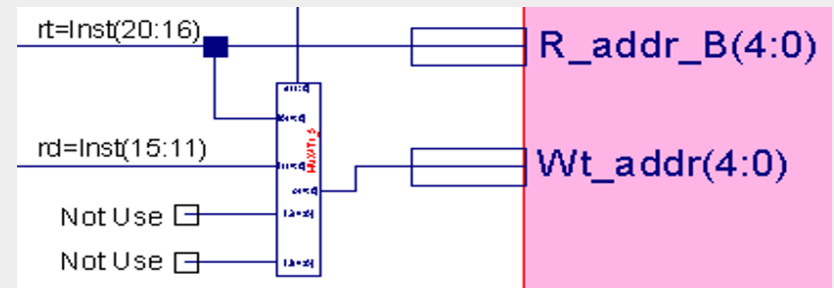
);

//reg addr=IR[21:16]

//reg addr=IR[15:11], LW or lui

// not use

// not use

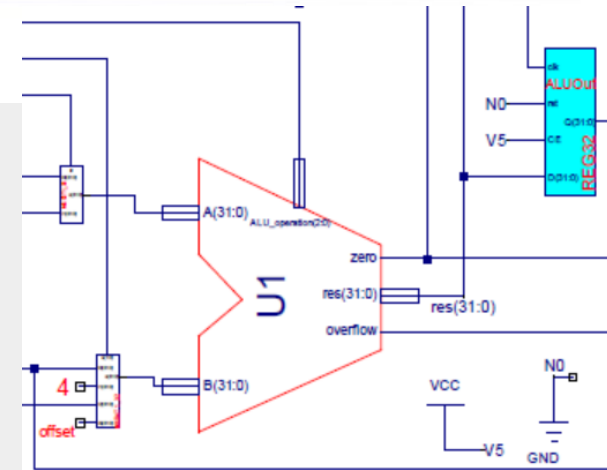


# 调用Exp04的ALU模块

## □ ALU通路及ALU模块调用描述

```

alu  x_ALU(.A(Alu_A),
           .B(Alu_B),
           .ALU_operation(ALU_operation),
           .res(res),
           .zero(zero),
           .overflow(overflow)
           );
MUX2T1_32  MUX4 (.I0(rdata_A),                // reg out A
                .I1(PC_Current),                // PC
                .s(ALUSrcA),
                .o(Alu_A)
                );
MUX4T1_32  MUX3(.I0(rdata_B),                //reg out B
                .I1(PC+4),                    //4 for PC+4
                .I2(???????),                 //可扩展imm
                .I3(???????),                 //可扩展offset
                .s(ALUSrcB),
                .o(Alu_B)
                );
REG32      ALUOut(.clk(???), .rst(???), .CE(???), .D(res), .Q(ALU_Out) );
  
```

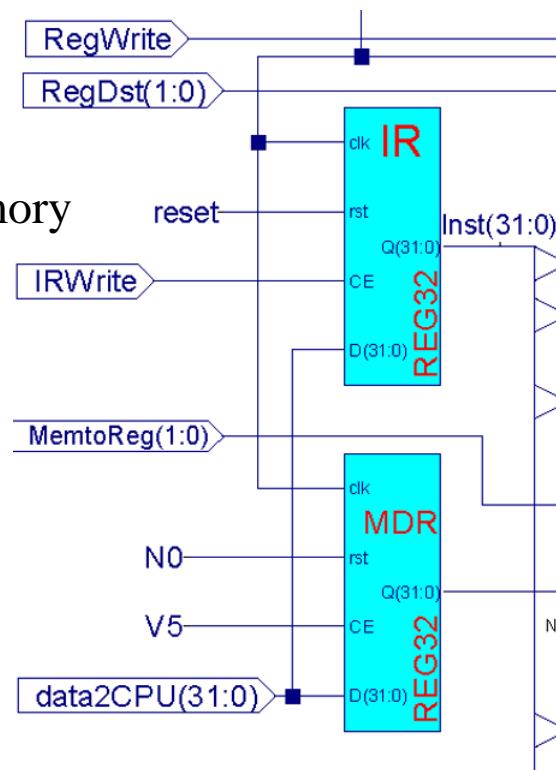
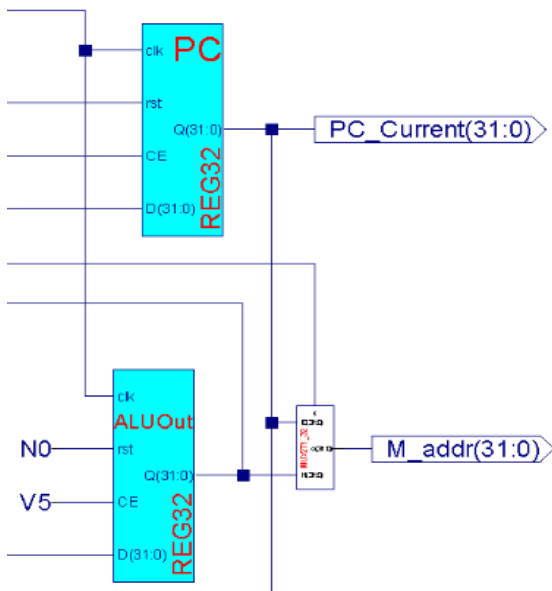


# 指令寄存器和存储器缓冲器通路

**REG32** IR(.clk(???), .rst(???), .CE(???), .D(???), .Q(**Inst**) );

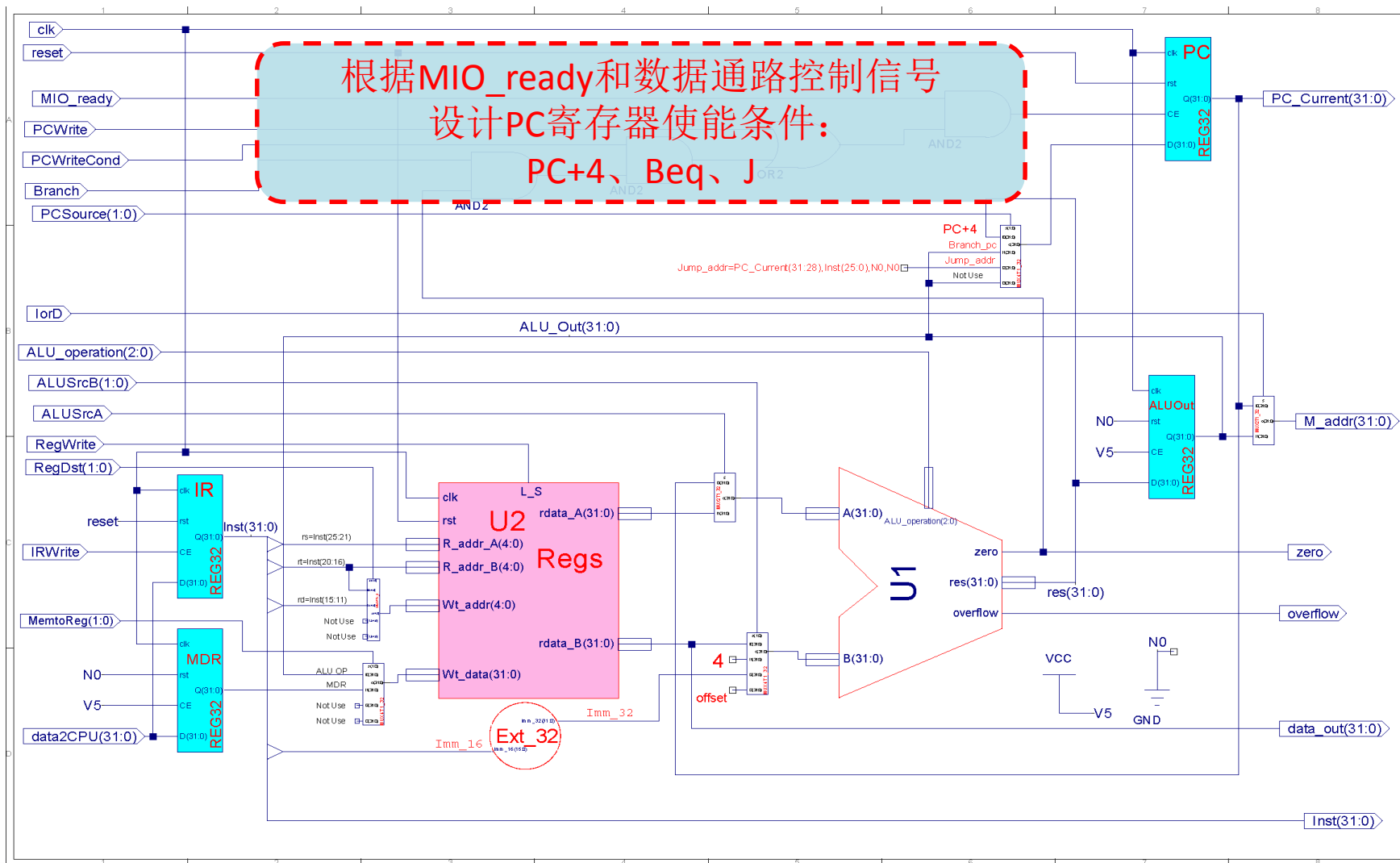
**REG32** MDR(.clk(???), .rst(???), .CE(???), .D(???), .Q(**MDR**) );

**MUX2T1\_32** MUX5 (.I0(ALU\_Out), //access memory  
.I1(PC\_Current), //IF  
.s(IorD),  
.o(M\_addr)  
);





# 完整支持9+条指令的数据通路参考描述







## □ 数据通路仿真调试

- 参考实验五，注意多周期时序
- M\_Datapath模块仿真
  - 语法检查没有Errors和warnings后仿真测试
  - 仿真激励代码设计要点
    - 只做功能性测试，不做性能和完备性测试
    - 通路功能测试
      - » 选择9条指令所有可能通路的代表指令
      - » 激励输入：
        - 计算出不同指令控制信号、代表数据和时序
        - clk、rst
    - ALU功能测试
      - » 选择add、and、sub、or、nor、slt指令
        - 计算出对应指令的输入控制信号和代表数据
      - » 选择Beq比较、Load和Store测试地址计算
    - Regs功能测试
      - » add指令代表作寄存器遍历测试

# M\_Datapath替换集成

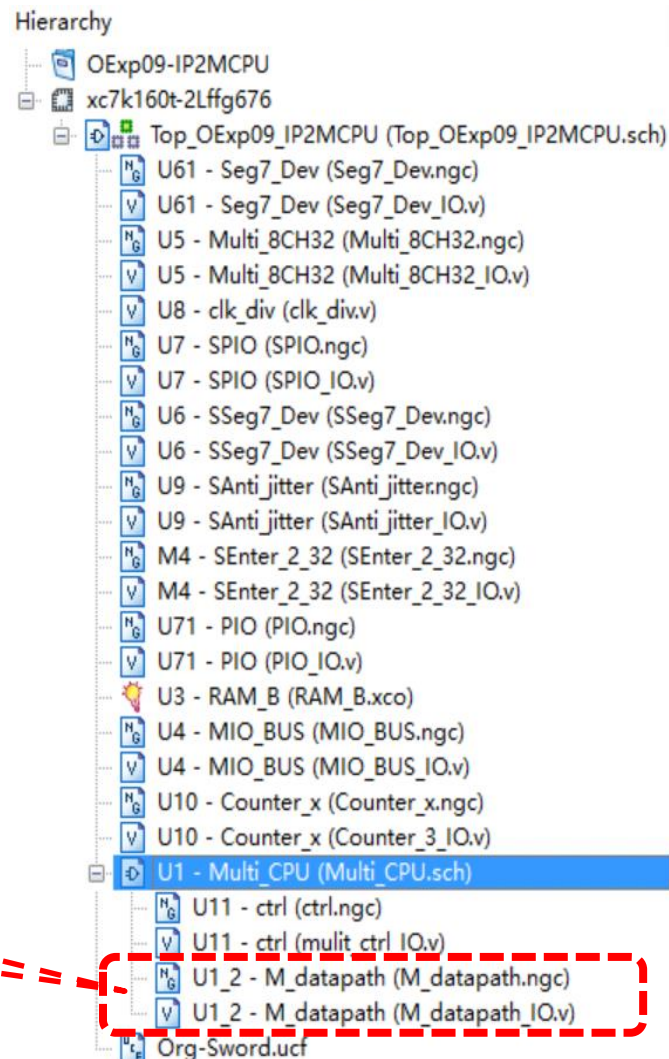
## 集成替换

- 仿真正确后替换Exp09的数据通路IP核

## 清理Exp09工程

- 移除工程中的数据通路核
  - Exp09工程中移除数据通路核关联
- 删除工程中的数据通路核文件
  - M\_Datapath.ngc并替换 M\_Datapath.v 文件
  - 在Project菜单中运行:  
**Cleanup Project Files ...**
- 建议用Exp09资源重建工程
  - 除M\_Datapath.ngc核

Exp09需要清理的核



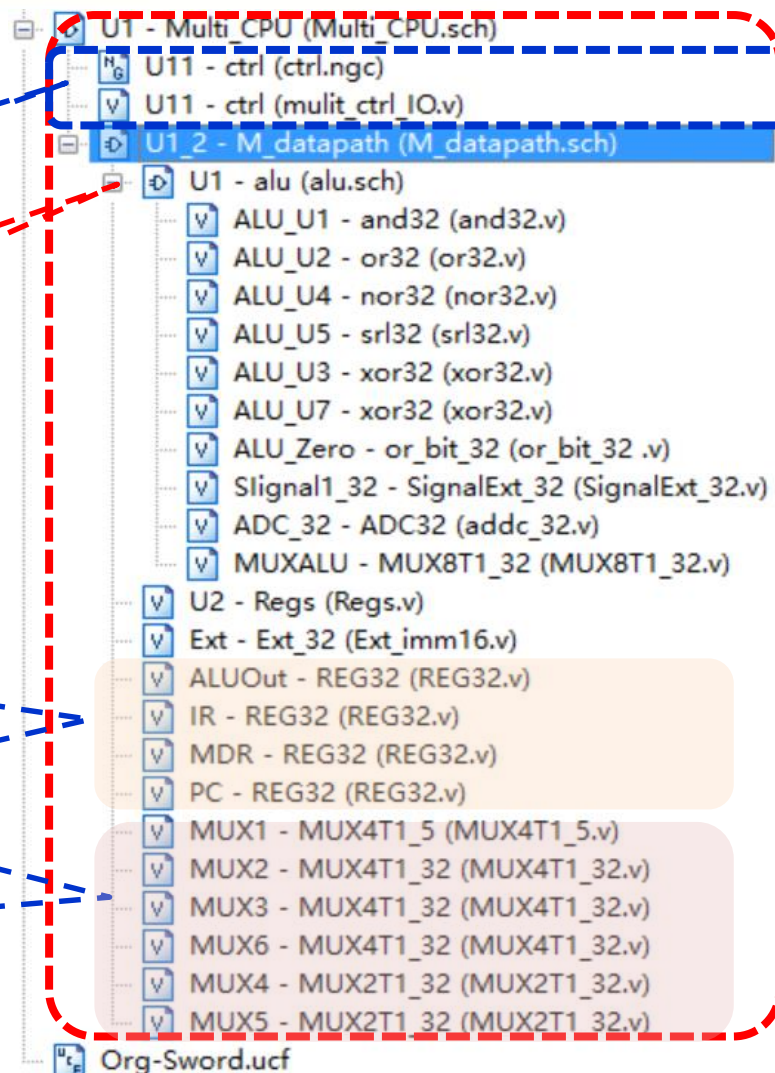
## 集成替换DapaPath核后的模块层次结构

控制器不变  
仍然使用IP核

Exp10完成数据通路替换  
后的模块调用关系

需要寄存器锁在：  
指令、PC计数器、存储器地址和ALU输出

六个多路选择器：  
MUX1,2: Regs输入；MUX6: PC计数器；  
MUX5: 存储器地址和MUX3,4: ALU输入





# 物理验证

## □ 使用**DEMO**程序目测数据通路功能

### ■ DEMO接口功能

#### □ SW[7:5]=000, SW[2]=0(全速运行)

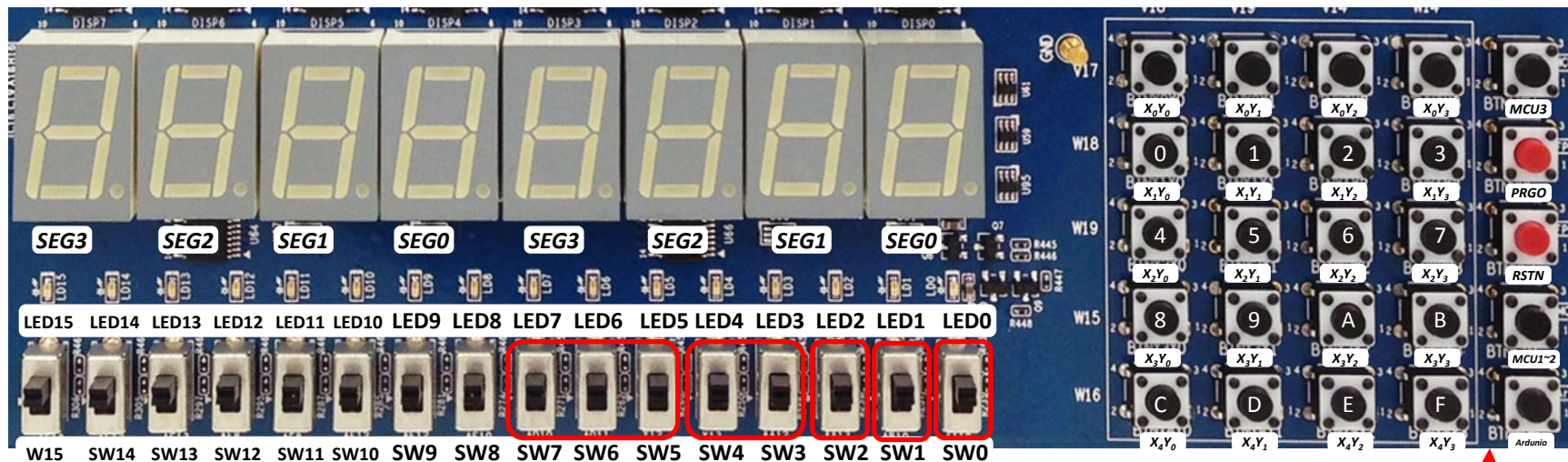
- SW[4:3]=00, SW[0]=0, 点阵显示程序: 跑马灯
- SW[4:3]=00, SW[0]=0, 点阵显示程序: 矩形变幻
- SW[4:3]=01, SW[0]=1, 内存数据显示程序: 0~F
- SW[4:3]=10, SW[0]=1, 当前寄存器R9+1显示

## □ 用汇编语言设计测试程序

- 测试ALU功能
- 测试Regs访问
- 测试I-格式指令通路
- 测试R-格式指令通路



# 物理验证-DEMO接口功能



SW[7:5]=显示通道选择

SW[7:5]=000: CPU程序运行输出

SW[7:5]=001: 测试PC字地址

SW[7:5]=010: 测试指令字

SW[7:5]=011: 测试计数器

SW[7:5]=100: 测试RAM地址

SW[7:5]=101: 测试CPU数据输出

SW[7:5]=110: 测试CPU数据输入

SW[0]=文本图形选择

SW[1]=高低16位选择

SW[2]=CPU单步时钟选择

没有使用

DEMO功能, 测试程序可以替换成自己的功能

SW[4:3]=00, 点阵显示程序: 跑马灯

SW[4:3]=00, 点阵显示程序: 矩形变幻

SW[4:3]=01, 内存数据显示程序: 0~F

SW[4:3]=10, 当前寄存器+1显示



# 测试程序参考：ALU和Regs

## □ 设计ALU和Regs测试程序替换DEMO程序

- ALU、Regs测试参考设计，测试结果通过CPU输出信号单步观察
- SW[7:5]=100, Addr\_out=ALU输出
- SW[7:5]=101, Data\_out=寄存器B输出

```
#baseAddr 0000
loop:  nor r1,r0,r0;      //r1=FFFFFFFF
      slt r2,r0,r1;      //r2=00000001
      add r3,r2,r2;      //r3=00000002
      add r4,r3,r2;      //r4=00000003
      add r5,r4,r3;      //r5=00000005
      add r6,r5,r4;      //r6=00000008
      add r7,r6,r5;      //r7=0000000d
      add r8,r7,r6;      //r8=00000015
      add r9,r8,r7;      //r9=00000022
      add r10,r9,r8;     //r10=00000037
      add r11,r10,r9;    //r11=00000059
      add r12,r11,r10;   //r12=00000090
      add r13,r12,r11;   //r13=000000E9
      add r14,r13,r12;   //r14=00000179
      add r15,r14,r13;   //r15=00000262
```

```
add r16,r15,r14; //r16=000003DB
add r17,r16,r15; //r17=000006D3
add r18,r17,r16; //r18=00000A18
add r19,r18,r17; //r19=000010EB
add r20,r19,r18; //r20=00001B03
add r21,r20,r19; //r21=00003bEE
add r22,r21,r20; //r22=000046F1
add r23,r22,r21; //r23=000080DF
add r24,r23,r22; //r24=0000C9D0
add r25,r24,r23; //r25=00014AAF
add r26,r25,r24; //r26=0001947F
add r27,r26,r25; //r27=0012DF2E
add r28,r27,r26; //r28=001473AD
add r29,r28,r27; //r29=002752DB
add r30,r29,r28; //r30=003BC688
add r31,r30,r29; //r31=00621963
```

j loop;



# 测试程序参考

## □ 设计通道测试程序替换DEMO程序

- 通道测试参考设计。测试结果通过CPU输出信号单步观察
- 通道功能由传输数据结果来指示，如立即数通道观察：14+\$zero

#baseAddr 0000

```
start:                                     //通道结果由后一条指令读操作数观察
      lw  r5, 14($zero);                  //取测试常数55555555。存储器读通道
start_A:
      add r1, r5, $zero;                  //r1: 寄存器写通道。R5:寄存器读通道A输出
      nor r2, $zero, r1;                  //r1: 寄存器读通道B输出。R2:ALU输出通道
      lw  r5, 48($zero); //取测试常数AAAAAAAA。立即数通道:00000048
      beq r2, r5 start_A;                  //循环测试
      j   start;                          //循环测试。立即数通道: 00000014
```

## □ 测试的完备性

- 上述测试正确仅表明通道切换功能和总线传输部分正确
- 要测试其完全正确，必须遍历所有可能的情况



# 存储器模块测试

## □ 设计存储器模块测试程序

- 7段码显示器的地址是E0000000/FFFFFFE0
- LED显示地址是F0000000/FFFFFFF0
- 请设计存储器模块测试程序
  - 测试结果显示在7段显示器上指示

## □ RAM初始化数据：参考单周期DEMO设计

memory\_initialization\_radix=16;

memory\_initialization\_vector=

00A52820, AC650000, 8C650000, 00A85824, 01A26820, 11A00017, 8C650000, 01CE9020, 0252B020,  
02569020, 00B25824, 11600005, 1172000A, 01CE9020, 1172000B, AC890000, 08000036, 11410001,  
0800004D, 00005027, 014A5020, AC8A0000, 08000036, 8E290860, AC890000, 08000036, 8E290820,  
AC890000, 08000036, 8C0D0014, 014A5020, 01425025, 022E8820, 02348824, 01224820, 11210001,  
0800005F, 000E4820, 01224820, 8C650000, 00A55820, 016B5820, AC6B0000, AC660004, 0800003E,  
.....

代码区

F0000000, 000002AB, 80000000, 0000003F, 00000001, FFF70000, 0000FFFF, 80000000, 00000000,  
11111111, 22222222, 33333333, 44444444, 55555555, 66666666, 77777777, 88888888, 99999999,  
aaaaaaaa, bbbbbbbb, cccccccc, dddddddd, eeeeeeee, FFFFFFFF, 557EF7E0, D7BDFBD9, D7BDFBD9,  
DFCFFCFB, DFCFBFFF, F7F3DFFF, FFFFDF3D, FFFF9DB9, FFFFBCFB, DFCFFCFB, DFCFBFFF, D7DB9FFF,  
D7BDFBD9, D7BDFBD9, FFFF07E0, 007E0FFF, 03bdf020, 03def820, 08002300;

数据区





# 设计测试记录表格

- 学会实验数据的统计
  - 参考大学物理实验
    - 本实验没有有效数精确计算，但有大量数据表格
- ALU和Regs测试结果记录
  - 自行设计记录表格
- 通道测试结果记录
  - 自行设计记录表格
- 数据存储模块测试记录
  - 自行设计记录表格



# 思考题

- ALU输出为什么要锁存？
- ALU计算有效地址会与ALU正常操作冲突吗？
- 仅增加I-Type算术运算指令是否需要修改本设计的数据通路？
- 扩展下列指令，数据通路将作如何修改：

R-Type: srl\*, jr, jalr, eret\*;

I-Type: addi, andi, ori, xori, lui, bne, slti

J-Type: Jal;



● END