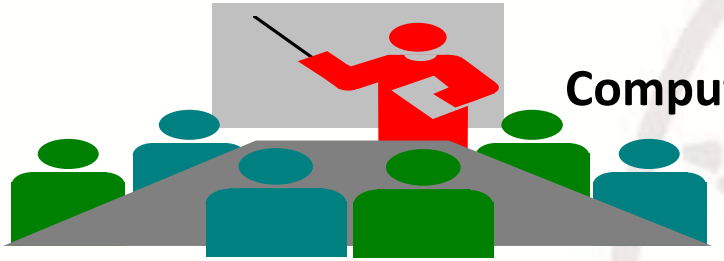


Computer Organization & Design
实验与课程设计

实验十一
多周期CPU设计-控制器设计

施青松
Asso. Prof. Shi Qingsong
College of Computer Science and Technology, Zhejiang University
zjsqs@zju.edu.cn

Course Outline

- 实验目的与实验环境
- 实验任务
- 实验原理
- 实验操作与实现

实验目的

1. 深入运用寄存器传输控制技术
2. 掌握CPU核心：指令执行过程与控制流关系
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

- 实验目的与实验环境
- 实验任务
- 实验原理
- 实验操作与实现

实验任务

1. 设计9+条指令的控制器
   - 用硬件描述语言设计实现控制器
     - 此实验在Exp10的基础上完成
2. 设计控制器测试方案：
   - OP译码测试：R-格式、访存指令、分支指令，转移指令
   - 运算控制测试：Function译码测试
3. 设计控制器测试程序

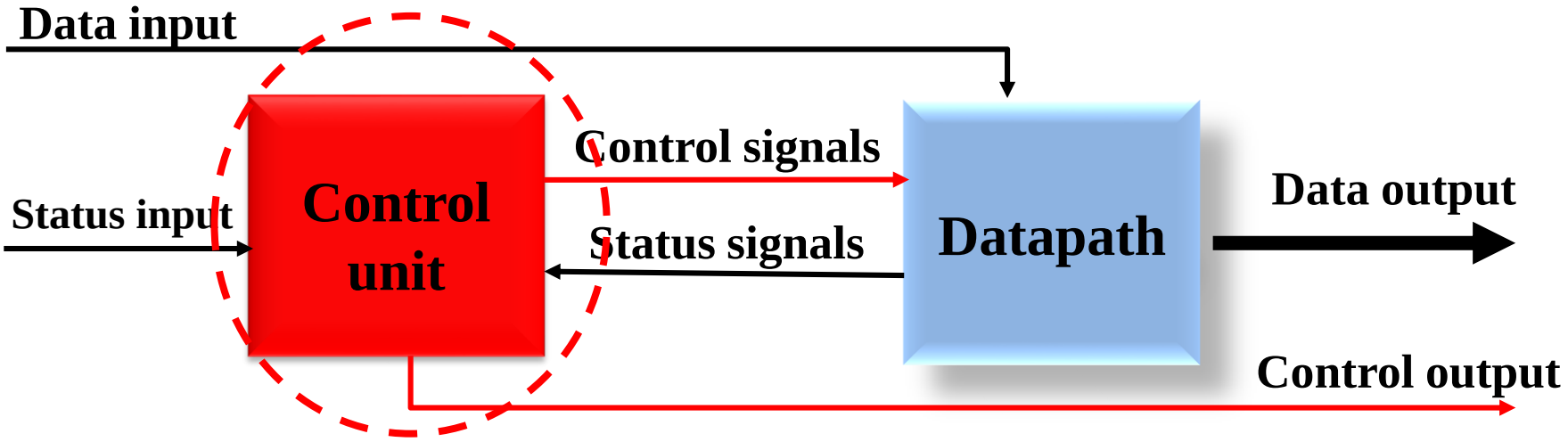
Course Outline

- 实验目的与实验环境
- 实验任务
- 实验原理
- 实验操作与实现

CPU organization

Digital circuit

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

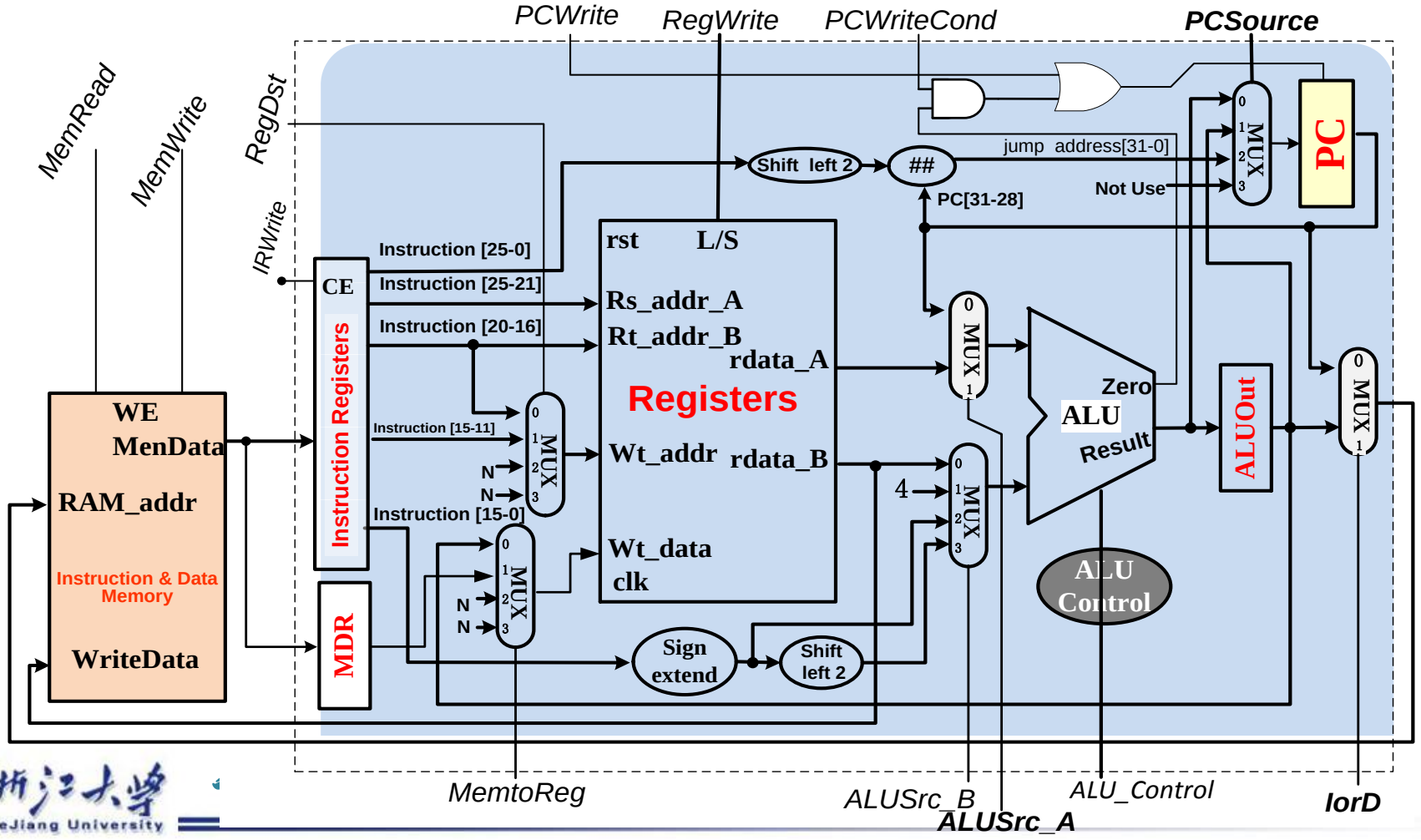


Computer organization

- Special circuits that processes logical action with instructions -Software

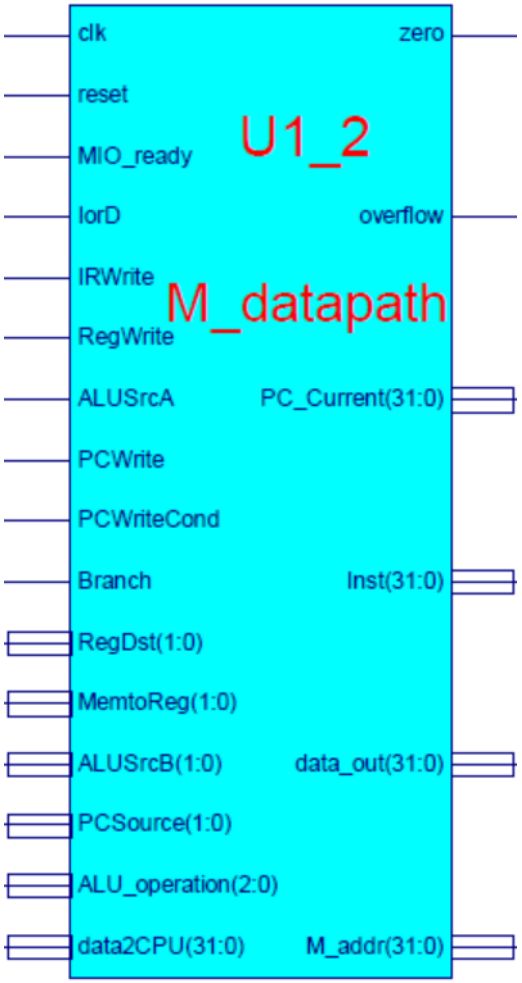
多周期数据通路结构：兼容9-23+指令

- 找出指令的通路：5+1个MUX
  - 比单周期增加了什么通道？



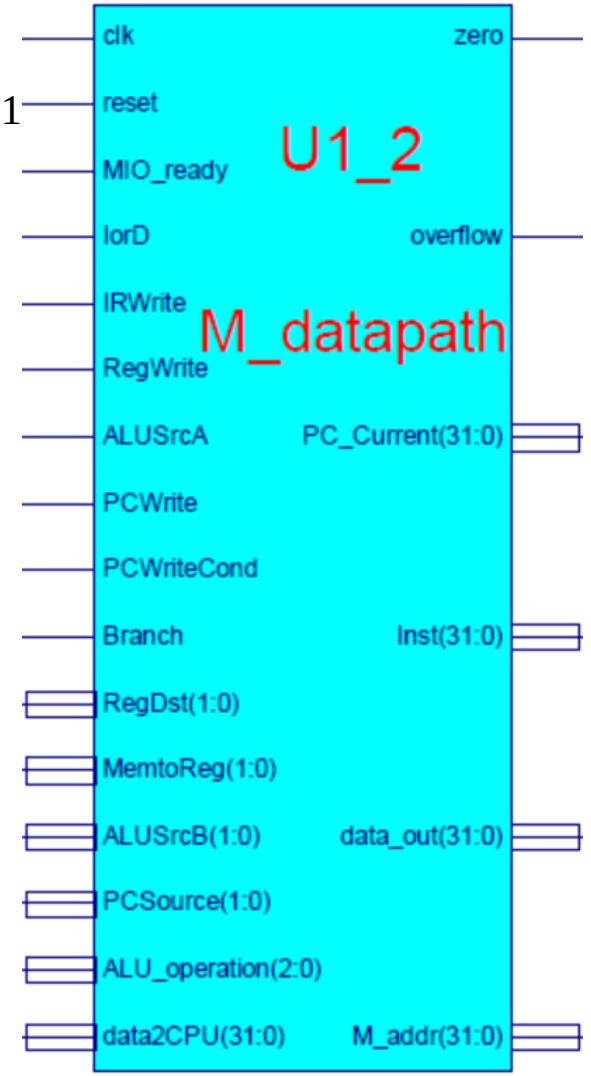
多周期数据通路模块： M_datapath

- 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

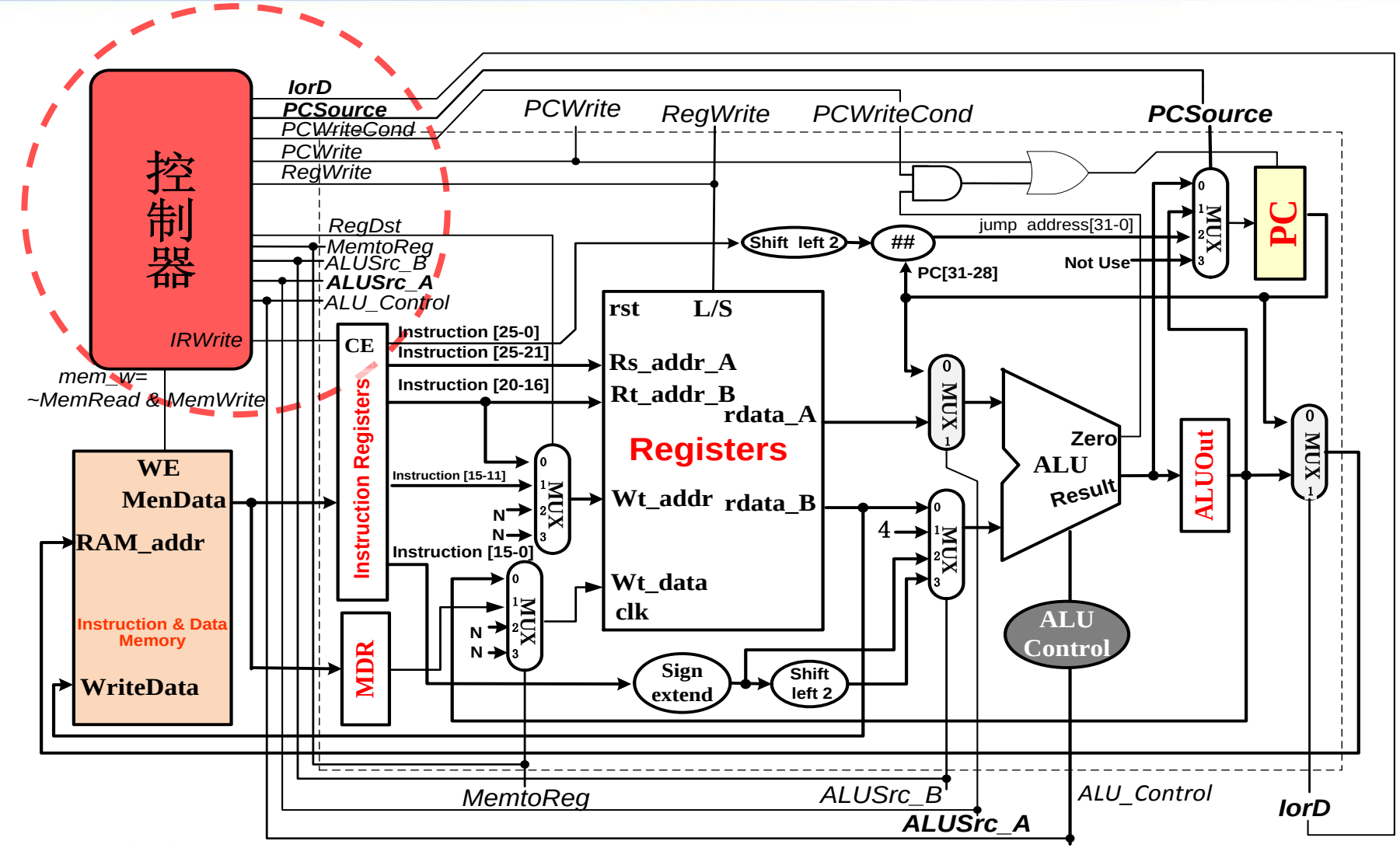
```
module      M_datapath(input clk,
                       input reset,
                       input MIO_ready,          //外部输入=1
                       input IorD,
                       input IRWrite,
                       input[1:0] RegDst,        //预留到2位
                       input RegWrite,
                       input[1:0]MemtoReg,       //预留到2位
                       input ALUSrcA,
                       input[1:0]ALUSrcB,
                       input[1:0]PCSource,       //4选1控制
                       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
```



控制器设计方案

- 控制器实现有多种方法
  - 状态转换实现：
    - 状态表→状态方程→激励方程→HDL描述
    - 或状态表→ HDL行为描述
  - 激励方程和输出信号：
    - HDL直接描述
    - ROM/ PLA (教材光盘)
    - MUX
    - 门电路
- 这里根据时序电路的一般设计流程分析
  - 实现时可以选用任意一种方法。建议：
    - 9+条指令不是非常复杂，用激励方程HDL描述实现
    - 指令较多时用HDL直接描述状态表实现

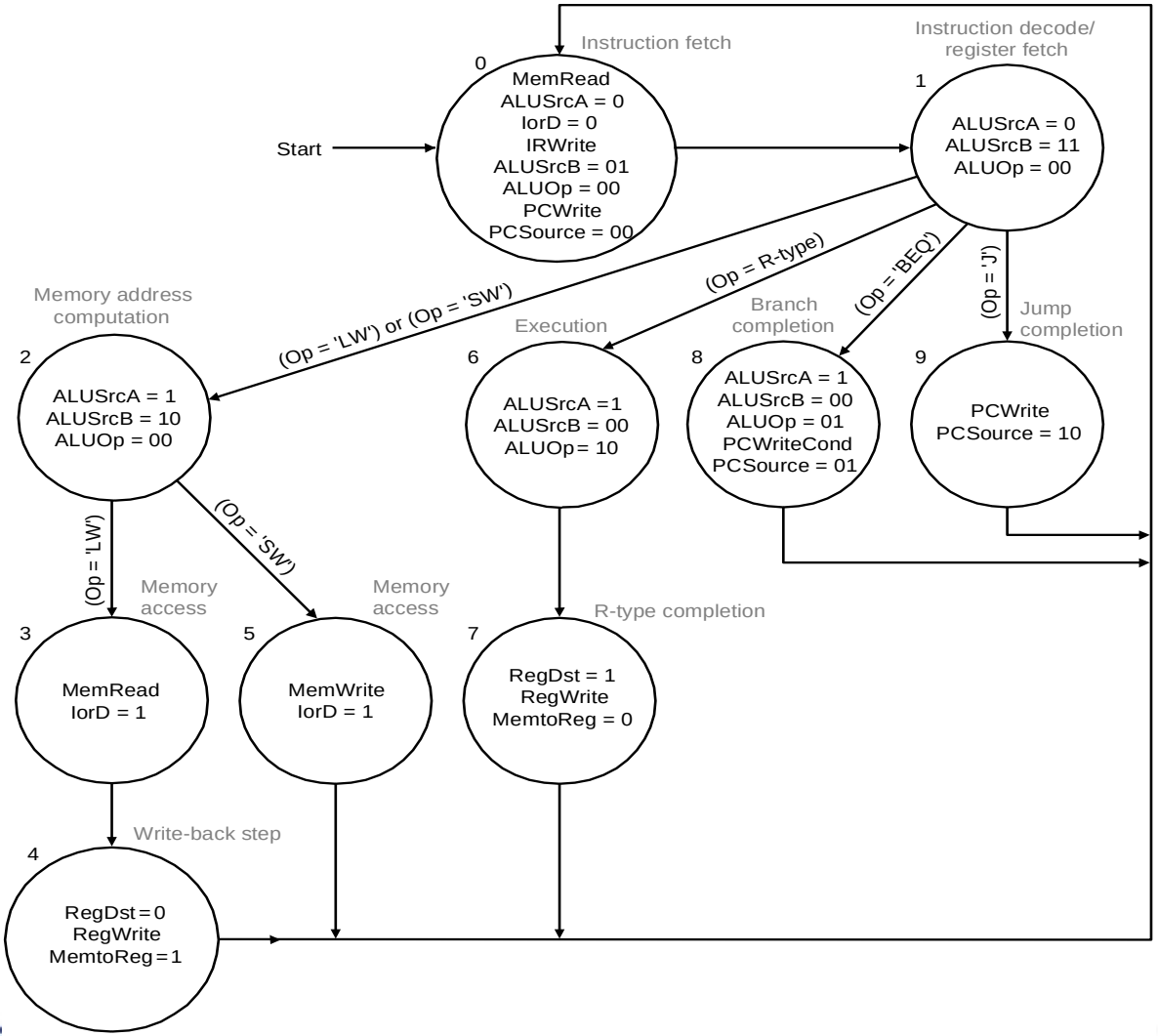
控制器与控制对象


控制器
IorD
PCSource
PCWriteCond
PCWrite
RegWrite
RegDst
MemtoReg
ALUSrc_B
ALUSrc_A
ALU_Control
IRWrite
mem_w=
~MemRead & MemWrite
PCWrite
RegWrite
PCWriteCond
PCSource
Shift left 2
##
jump address[31-0]
Not Use
PC[31-28]
PC
MUX
CE
Instruction [25-0]
Instruction [25-21]
Instruction [20-16]
Instruction [15-11]
Instruction [15-0]
Instruction Registers
rst
L/S
Rs_addr_A
Rt_addr_B
rdata_A
Registers
Wt_addr
rdata_B
Wt_data
clk
4
Zero
ALU
Result
ALUOut
WE
MenData
RAM_addr
Instruction & Data Memory
WriteData
MDR
Sign extend
Shift left 2
ALU Control
MemtoReg
ALUSrc_B
ALUSrc_A
ALU_Control
IorD

9+指令的状态机：根据设计指令画出

asking the students to complete the corresponding state truth table

- 根据数据通路设计所有指令状态机



状态编码与分配

- 根据状态图可知10个状态需要4位状态变量表示
- 实验选用4个D触发器存储状态变量
- 状态编码有多种编码方法，不唯一。这里采用与教材一致的顺序状态编码，不是最佳方案：

状态	触发器状态分配 Q_{3n} Q_{2n} Q_{1n} Q_{0n}	备注
0	0 0 0 0	
1	0 0 0 1	
2	0 0 1 0	
3	0 0 1 1	
4	0 1 0 0	
5	0 1 0 1	
6	0 1 1 0	
7	0 1 1 1	
8	1 0 0 0	
9	1 0 0 1	

状态转换表/次态表

- 根据状态图和输入变量OP_0~OP_5写出状态转换表
  - 4个状态变量共有16个状态，其中1010~1111六个状态为非工作状态
  - 操作码有6个变量，共2^6=64个最小项组合，只有5种组合为有效输入，其余为无效输入，可作任意项考虑。

序号	现 态	输 入(指令操作码)	次 态		备注
	Q_{3n} Q_{2n} Q_{1n} Q_{0n}	Op5 Op4 Op3 Op2 Op1 Op0	Q_{3n+1} Q_{2n+1} Q_{1n+1} Q_{0n+1}		
0	0 0 0 0	x x x x x x	0 0 0 1	1	Op无关
1	0 0 0 1	0 0 0 0 0 0	0 1 1 0	6	R-type
		1 0 x 0 1 1	0 0 1 0	2	L/S
		0 0 0 1 0 0	1 0 0 0	8	Beq
		0 0 0 0 1 0	1 0 0 1	9	Jump
2	0 0 1 0	1 0 0 0 1 1	0 0 1 1	3	Load
		1 0 1 0 1 1	0 1 0 1	5	Store
3	0 0 1 1	1 0 0 0 1 1	0 1 0 0	4	Load
4	0 1 0 0	1 0 0 0 1 1	0 0 0 0	0	Load
5	0 1 0 1	1 0 1 0 1 1	0 0 0 0	0	Store
6	0 1 1 0	0 0 0 0 0 0	0 1 1 1	7	R-type
7	0 1 1 1	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0	0	R-type
8	1 0 0 0	0 0 0 1 0 0	0 0 0 0	0	Beq
9	1 0 0 1	0 0 0 0 1 0	0 0 0 0	0	Jump

状态方程

- 根据状态转换表可以写出状态方程如下：

$Q_{3n+1} = State1\ (Beq + Jump)$

$Q_{2n+1} = State1\ Rtype + State2\ Store + State3\ Load + State6\ Rtype$

$Q_{1n+1} = State1\ (Rtype + LS) + State2\ Load + State6\ Rtype$

$Q_{0n+1} = State0 + State1\ Jump + State2\ Load + State2\ Store + State6\ Rtype$

$$Q_{3n+1} = \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}\overline{Q}_{1n}Q_{0n}(\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3Op_2\overline{O}p_1\overline{O}p_0 + \overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2Op_1\overline{O}p_0)$$

$$Q_{2n+1} = \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}\overline{Q}_{1n}Q_{0n}\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2\overline{O}p_1\overline{O}p_0 + \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}Op_5\overline{O}p_4Op_3\overline{O}p_2Op_1Op_0 + \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}Q_{1n}Q_{0n}Op_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2Op_1Op_0 + \overline{Q}_{3n}Q_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2\overline{O}p_1\overline{O}p_0$$

$$Q_{1n+1} = \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}\overline{Q}_{1n}Q_{0n}(\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2\overline{O}p_1\overline{O}p_0 + Op_5\overline{O}p_4X\overline{O}p_2Op_1Op_0) + \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}Op_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2Op_1Op_0 + \overline{Q}_{3n}Q_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2\overline{O}p_1\overline{O}p_0$$

$$Q_{0n+1} = \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}\overline{Q}_{1n}\overline{Q}_{0n} + \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}\overline{Q}_{1n}Q_{0n}\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2Op_1\overline{O}p_0 + \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}Op_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2Op_1Op_0 + \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}Op_5\overline{O}p_4Op_3\overline{O}p_2Op_1Op_0 + \overline{Q}_{3n}Q_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2\overline{O}p_1\overline{O}p_0$$

- Op_4全是“0”可以简化，但意义不大

激励方程

- 根据D触发器特征方程和状态方程可得D触发器激励函数：

$$D_3 = \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}\overline{Q}_{1n}Q_{0n}(\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3Op_2\overline{O}p_1\overline{O}p_0 + \overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2Op_1\overline{O}p_0)$$

$$D_2 = \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}\overline{Q}_{1n}Q_{0n}\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2\overline{O}p_1\overline{O}p_0 + \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}Op_5\overline{O}p_4Op_3\overline{O}p_2Op_1Op_0 + \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}Q_{1n}Q_{0n}Op_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2Op_1Op_0 + \overline{Q}_{3n}Q_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2\overline{O}p_1\overline{O}p_0$$

$$D_1 = \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}\overline{Q}_{1n}Q_{0n}(\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2\overline{O}p_1\overline{O}p_0 + Op_5\overline{O}p_4X\overline{O}p_2Op_1Op_0) + \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}Op_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2Op_1Op_0 + \overline{Q}_{3n}Q_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2\overline{O}p_1\overline{O}p_0$$

$$D_0 = \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}\overline{Q}_{1n}\overline{Q}_{0n} + \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}\overline{Q}_{1n}Q_{0n}\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2Op_1\overline{O}p_0 + \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}Op_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2Op_1Op_0 + \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}Op_5\overline{O}p_4Op_3\overline{O}p_2Op_1Op_0 + \overline{Q}_{3n}Q_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2\overline{O}p_1\overline{O}p_0$$

$D_3 = State1\ (Beq + Jump)$

$D_2 = State1\ Rtype + State2\ Store + State3\ Load + State6\ Rtype$

$D_1 = State1\ (Rtype + LS) + State2\ Load + State6\ Rtype$

$D_0 = State0 + State1\ Jump + State2\ Load + State2\ Store + State6\ Rtype$

- 这一步完成了状态转换的设计
  - 根据D触发器激励方程可以画出状态转换逻辑
  - 现代工程设计已经不需要自己求解
    - EDA综合器会自动综合

状态激励表

- 也可以根据D触发器特征和状态表得到状态激励表
  - 和状态表类同，仅输出是触发器输入D，一般用状态方程配方
  - 输出真值信号太多，需要另列
    - 采用Moore状态机，输出仅与状态有关

序号	现 态	输 入(指令操作码)	D触发器输入	输出	备注
	Q_{3n} Q_{2n} Q_{1n} Q_{0n}	Op5 Op4 Op3 Op2 Op1 Op0	D_3 D_2 D_1 D_0	另列	
0	0 0 0 0	x x x x x x	0 0 0 1		Op无关
1	0 0 0 1	0 0 0 0 0 0	0 1 1 0		R-type
		1 0 x 0 1 1	0 0 1 0		L/S
		0 0 0 1 0 0	1 0 0 0		Beq
		0 0 0 0 1 0	1 0 0 1		Jump
2	0 0 1 0	1 0 0 0 1 1	0 0 1 1		Load
		1 0 1 0 1 1	0 1 0 1		Store
3	0 0 1 1	1 0 0 0 1 1	0 1 0 0		Load
4	0 1 0 0	1 0 0 0 1 1	0 0 0 0		Load
5	0 1 0 1	1 0 1 0 1 1	0 0 0 0		Store
6	0 1 1 0	0 0 0 0 0 0	0 1 1 1		R-type
7	0 1 1 1	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0		R-type
8	1 0 0 0	0 0 0 1 0 0	0 0 0 0		Beq
9	1 0 0 1	0 0 0 0 1 0	0 0 0 0		Jump

输出信号真值表(状态激励表另列部分)

- 根据状态图和多周期数据通路控制要求信号真值表如下：

输入Q_{3n} Q_{2n} Q_{1n} Q_{0n}（当前状态—现态）										输出控制信号
0000 IF	0001 ID	0010 MEN-Ex	0011 MEN-RD	0100 LW_WB	0101 MEM_W	0110 R_Exc	0111 R_WB	1000 Beq_Exc	1001 J	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	PCWrite
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	PCWriteCond
0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	IorD
1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	MemRead
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	MemWrite
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	IRWrite
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	MemtoReg
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	PCSource1
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	PCSource0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	ALUOp1
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	ALUOp0
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	ALUSrcB1
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	ALUSrcB0
0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	ALUSrcA
0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	RegWrite
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	RegDst

多周期控制信号定义： Defined 10+6+？ control

- 实验十定义的数据通路控制信号

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		
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

请填写信号赋值时对应操作

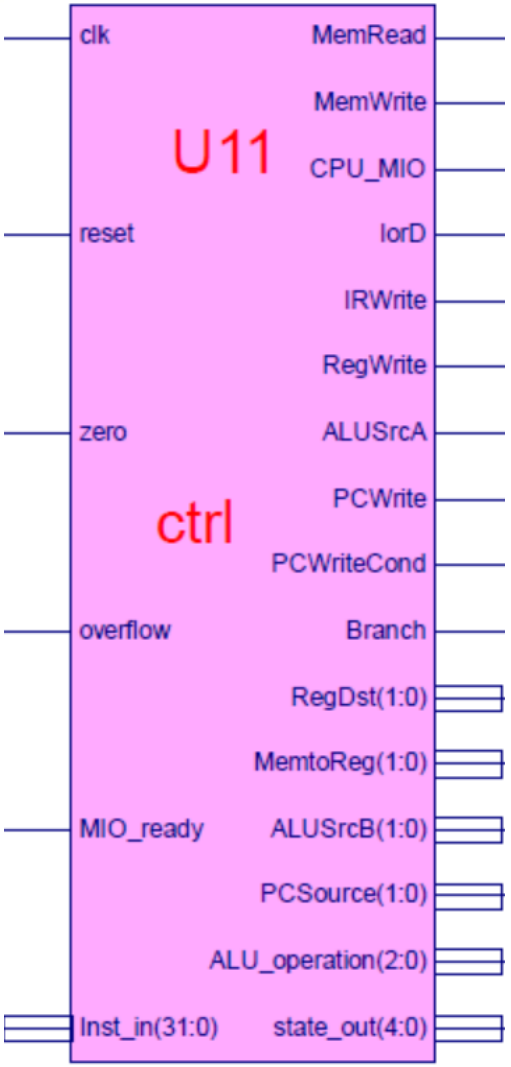
兼容Exp10的数据通路完善输出信号真值表

状态 / 输出信号	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001
	IF	ID	MEM-Ex	MEM-RD	LW_WB	MEM_W	R_Exc	R_WB	Beq_Exc	J
PCWrite	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
PCWriteCond	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
IorD	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
MemRead	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
MemWrite	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
IRWrite	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MemtoReg	00	00	00	00	01	00	00	00	00	00
PCSource1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
PCSource0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
ALUSrcA	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0
ALUSrcB1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
ALUSrcB0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
RegWrite	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
RegDst	00	00	00	00	00	00	00	01	00	00
Branch	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
ALUOp1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
ALUOp0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
MEM_IO	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0

请分析填入

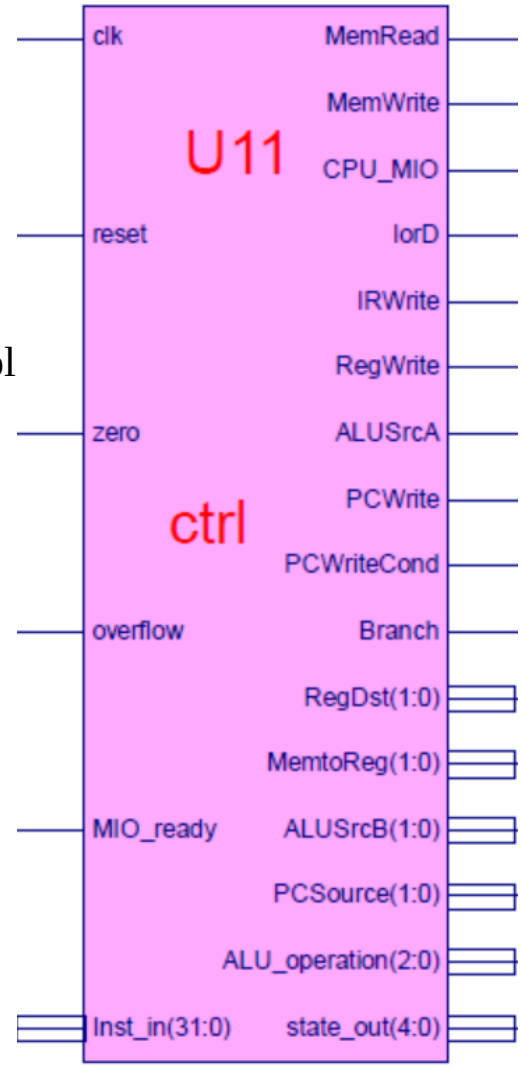
CPU部件之二-控制器：ctrl

- 多周期控制器
  - CPU主要部件之一
  - 寄存器传输控制者：
    - 根据状态图将编码转换成命令
- 基本功能
  - 微操作控制
  - 数据传输通道控制
- 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,                    //外部输入=1
               output reg MemRead,
               output reg MemWrite,
               output reg[2:0]ALU_operation,        //ALU_Control
               output [4:0]state_out,

               output reg CPU_MIO,
               output reg IorD,
               output reg IRWrite,
               output reg [1:0]RegDst,              //预留到2位
               output reg RegWrite,
               output reg [1:0]MemtoReg,            //预留到2位
               output reg ALUSrcA,
               output reg [1:0]ALUSrcB,
               output reg [1:0]PCSource,
               output reg PCWrite,
               output reg PCWriteCond,
               output reg Branch
              );
endmodule
```



控制器实现

- 控制器实现方案
  - 9+条指令实现与单周期方案相同采用二级译码方案
    - 主控制器输出ALUop
    - ALU译码电路调用单周期设计模块
- 状态机实现方法
  - 状态机实现请参考数字逻辑状态机描述的三种方式
  - 状态转换实现选择：
    - 根据状态方程/激励方程：有利于学习理解状态实现原理
    - 根据状态表HDL直接描述：工程设计方便
  - 激励方程和输出信号：
    - HDL直接描述：工程设计方便
    - SOP门电路
    - ROM
    - MUX

    } 有利于学习理解组合电路原理与结构
  - 本实验可任取一种状态机方式实现

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, BBBBBBBB,
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

- 实验目的与实验环境
- 实验任务
- 实验原理
- 实验操作与实现

多周期CPU控制器设计

–控制实验十设计的数据通路

设计工程：OExp11-OwnMCPU

- **设计多周期CPU之控制器**
  - 根据Exp10数据通路及指令设计状态图和状态真值表
  - 根据状态表完成控制器电路，HDL描述实现
    - 必须根据状态表结构描述或激励方程描述实现
  - 仿真测试控制器模块
- **集成替换验证后的控制器模块**
  - 替换实验十(Exp10)中的ctrl.ngc核
  - 顶层模块延用Exp10： 模块名：Top_OExp10_OwnMCPU.v
- **测试控制器模块**
  - 设计测试程序(MIPS汇编)测试：
  - OP译码测试：
    - R-格式、访存指令、分支指令，转移指令
  - 运算控制测试：Function译码测试

设计要点

- **设计主控制器模块**
  - 完成输出信号真值表
    - 用HDL直接描述实现状态转换并输出控制信号
    - 或用激励方程实现状态转换并输出控制信号
- **设计ALU操作译码**
  - 分离出单周期的ALU译码模块并修改调用
  - 使用DEMO作功能初步调试
    - ALU必须运算包含“nor”操作
    - 否则需要修改或重新设计调试程序
- **仿真主控制器电路模块**
  - 可以单独或合并仿真，但最后要合并为一个控制模块

多周期控制器设计

激励方程描述实现

激励方程状态机HDL描述结构

主控制器状态机描述结构

```
parameter IF =   4'b0000,     ……
parameter AND=3'b000, OR=3'b001, ADD=3'b010, SUB=3'b110, ……

`define Datapath_signals  {PCWrite, PCWriteCond, ……                    }
```

```
always @ (posedge clk or posedge reset)
    if (reset==1) Q <= IF;
    else          Q <= D;
```

状态转换

$$
\begin{aligned}
D_3 &= \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}\overline{Q}_{1n}Q_{0n}(\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3Op_2\overline{O}p_1\overline{O}p_0 + \overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2Op_1\overline{O}p_0)\\
D_2 &= \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}\overline{Q}_{1n}Q_{0n}\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2\overline{O}p_1\overline{O}p_0 + \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}Op_5\overline{O}p_4Op_3\overline{O}p_2Op_1Op_0 +\\
&\quad \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}Q_{1n}Q_{0n}Op_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2Op_1Op_0 + \overline{Q}_{3n}Q_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2\overline{O}p_1\overline{O}p_0\\
D_1 &= \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}\overline{Q}_{1n}Q_{0n}(\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2\overline{O}p_1\overline{O}p_0 + Op_5\overline{O}p_4X\overline{O}p_2Op_1Op_0) +\\
&\quad \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}Op_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2Op_1Op_0 + \overline{Q}_{3n}Q_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2\overline{O}p_1\overline{O}p_0\\
D_0 &= \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}\overline{Q}_{1n}\overline{Q}_{0n} + \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}\overline{Q}_{1n}Q_{0n}\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2Op_1\overline{O}p_0 +\\
&\quad \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}Op_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2Op_1Op_0 + \overline{Q}_{3n}\overline{Q}_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}Op_5\overline{O}p_4Op_3\overline{O}p_2Op_1Op_0 +\\
&\quad \overline{Q}_{3n}Q_{2n}Q_{1n}\overline{Q}_{0n}\overline{O}p_5\overline{O}p_4\overline{O}p_3\overline{O}p_2\overline{O}p_1\overline{O}p_0
\end{aligned}
$$

激励方程描述

输出变量(信号)描述

数据通路控制

ALU操作译码描述

ALU操作控制

激励方程实现状态机参考

- 参数定义
  - 状态变量

```
parameter IF = 4'b0000,  ID = 4'b0001, Mem_Ex = 4'b0010, Mem_RD = 4'b0011,
          LW_WB = 4'b0100,  Mem_W = 4'b0101,  R_Exc = 4'b0110, R_WB   = 4'b0111,
          Beq_Exc= 4'b1000, J= 4'b1001, Error = 4'b1111;
```

  - 输出变量宏定义

```
`define Datapath_signals  {PCWrite, PCWriteCond,IorD, MemRead, MemWrite,IRWrite,
MemtoReg, PCSource, ALUSrcA, ALUSrcB, RegWrite, RegDst, Branch, ALUop, CPU_MIO}
```

  - 输出变量值：根据输出信号真值表

```
parameter  value0 = 20'b10010100000010000000,  value1 = 20'b00000000000110000000,
           value2 = 20'b00000000001100000000,  value3 = 20'b00110000000000000001,
           value4 = 20'b00000001000001000000,  value5 = 20'b00101000000000000001,
           value6 = 20'b00000000001000000100,  value7 = 20'b00000000000001010000,
           value8 = 20'b01000000011000001010,  value9 = 20'b10000000100000000000;
parameter AND=3'b000, OR=3'b001, ADD=3'b010, SUB=3'b110, NOR=3'b100, SLT=3'b111,
XOR=3'b011, SRL=3'b101;
```

$D_3 = State1\ (Beq + Jump)$

$D_2 = State1\ Rtype + State2\ Store + State3\ Load + State6\ Rtype$

$D_1 = State1\ (Rtype + LS) + State2\ Load + State6\ Rtype$

$D_0 = State0 + State1\ Jump + State2\ Load + State2\ Store + State6\ Rtype$

激励方程描述

- 根据D触发器输入方程用assign描述
- 也可用逻辑图描述
- 本参考采用状态变量和操作码分别描述然后组合
  - 状态译码描述

```
assign s0 = ~|Q;                                  //if Q=0000 then s0 = 1
assign s1 = ~Q[3] && ~Q[2] && ~Q[1] &&  Q[0] ;    //if Q=0001 then s1 = 1
assign s2 = ~Q[3] && ~Q[2] &&  Q[1] && ~Q[0] ;    //if Q=0010 then s2 = 1
assign s3 = ~Q[3] && ~Q[2] &&  Q[1] &&  Q[0] ;    //if Q=0011 then s3 = 1
assign s4 =                                       //if Q=0100 then s4 = 1
assign s5 =                                       //if Q=0101 then s5 = 1
assign s6 =                                       //if Q=0110 then s6 = 1
assign s7 =                                       //if Q=0111 then s7 = 1
assign s8 =                                       //if Q=1000 then s8 = 1
assign s9 =                                       //if Q=1001 then s9 = 1
```

请完成后继部分

- 操作码译码描述

```
assign Rtype  =  ~|OP;                          //if OP=000000 then Rtype = 1
assign LS     = (OP == 6'b10x011) ? 1 : 0;      //if OP=10x011 then     LS = 1
assign Ibeq   = (OP == 6'b000100) ? 1 : 0;      //if OP=000100 then   Ibeq = 1
assign Jump   = (OP == 6'b000010) ? 1 : 0;      //if OP=000010 then  Jump = 1
assign Load   = (OP == 6'b100011) ? 1 : 0;      //if OP=100011 then  Load = 1
assign Store  = (OP == 6'b101011) ? 1 : 0;      //if OP=101011 then  Store = 1
```

请完成后继部分

- 激励方程合成描述

```
assign D[3] =
assign D[2] =
assign D[1] =
assign D[0] =
```

$D_3 = State1\ (Beq + Jump)$

$D_2 = State1\ Rtype + State2\ Store + State3\ Load + State6\ Rtype$

$D_1 = State1\ (Rtype + LS) + State2\ Load + State6\ Rtype$

$D_0 = State0 + State1\ Jump + State2\ Load + State2\ Store + State6\ Rtype$

状态转换描述

```
always @ (posedge clk or posedge reset)
        if (reset==1) Q <= IF;
        else Q <= D;
```

输出变量(信号)描述

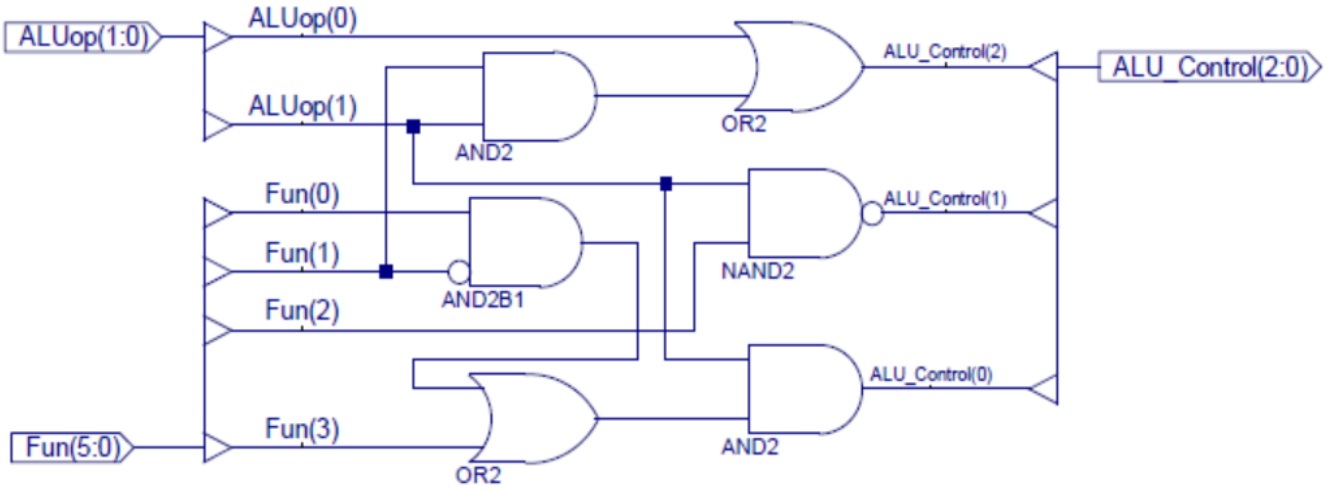
```
always @ * begin
    case(Q)                                          //state
        IF:         `Datapath_signals = value0;
        ID:         `Datapath_signals = value1;
        Mem_Ex:     `Datapath_signals = value2;
        Mem_RD:     `Datapath_signals = value3;
        LW_WB:      `Datapath_signals = value4;
        Mem_W:      `Datapath_signals = value5;
        R_Exc:      `Datapath_signals = value6;
        R_WB:       `Datapath_signals = value7;
        Beq_Exc:    `Datapath_signals = value8;
        J:          `Datapath_signals = value9;
        default:    `Datapath_signals = value0;
    endcase
```

请完成后继部分

ALU操作译码

- 本实验采用二级译码
  - 调用单周期ALU译码电路
  - 修改单周期控制器模块
    - 分离出ALU译码部分(原理图2部分)

ALU_Decoder **ALU_D(.ALUop(ALUop),**
.Fun(Inst_in[5:0]),
.ALU_Control(ALU_operation));



多周期控制器设计

HDL直接描述实现

控制器HDL直接描述结构

主控制器状态机描述结构

```
parameter IF =   4'b0000,     ……
parameter AND=3'b000, OR=3'b001, ADD=3'b010, SUB=3'b110, ……

`define Datapath_signals  {PCWrite, PCWriteCond, ……                    }
```

状态机

```
always @ (posedge clk or posedge reset)begin
                ……
end
```

数据通路控制

```
always @* begin
                ……输出变量(信号)描述
end
```

ALU操作译码描述

ALU操作控制

状态机转换描述

```
always @ (posedge clk or posedge reset)
    if (reset==1) state <= IF;
     else
        case (state)
        IF: if(MIO_ready) state <= ID;
            else state <= IF;
        ID: case (Inst_in[31:26])
                6'b000000: state <= R_Exc;          //R-type OP
                6'b100011: state <= Mem_Ex;         //Lw

                      ..................

                6'b000100: state <= Beq_Exc;        //Beq
                default:      state <= Error;
                endcase
        Mem_Ex:begin

                                ............

        Error:     state <= Error;
        default:  state <= Error;
        endcase
```

- 输出变量(信号)描述：与激励方程时相同

```
always @ * begin
    case(Q)                                          //state
        IF:         `Datapath_signals = value0;
        ID:         `Datapath_signals = value1;
        Mem_Ex:     `Datapath_signals = value2;
        Mem_RD:     `Datapath_signals = value3;
        LW_WB:      `Datapath_signals = value4;
        Mem_W:      `Datapath_signals = value5;
        R_Exc:      `Datapath_signals = value6;
        R_WB:       `Datapath_signals = value7;
        Beq_Exc:    `Datapath_signals = value8;
        J:          `Datapath_signals = value9;
        default:    `Datapath_signals = value0;
    endcase
```

请完成后继部分

ALU操作译码

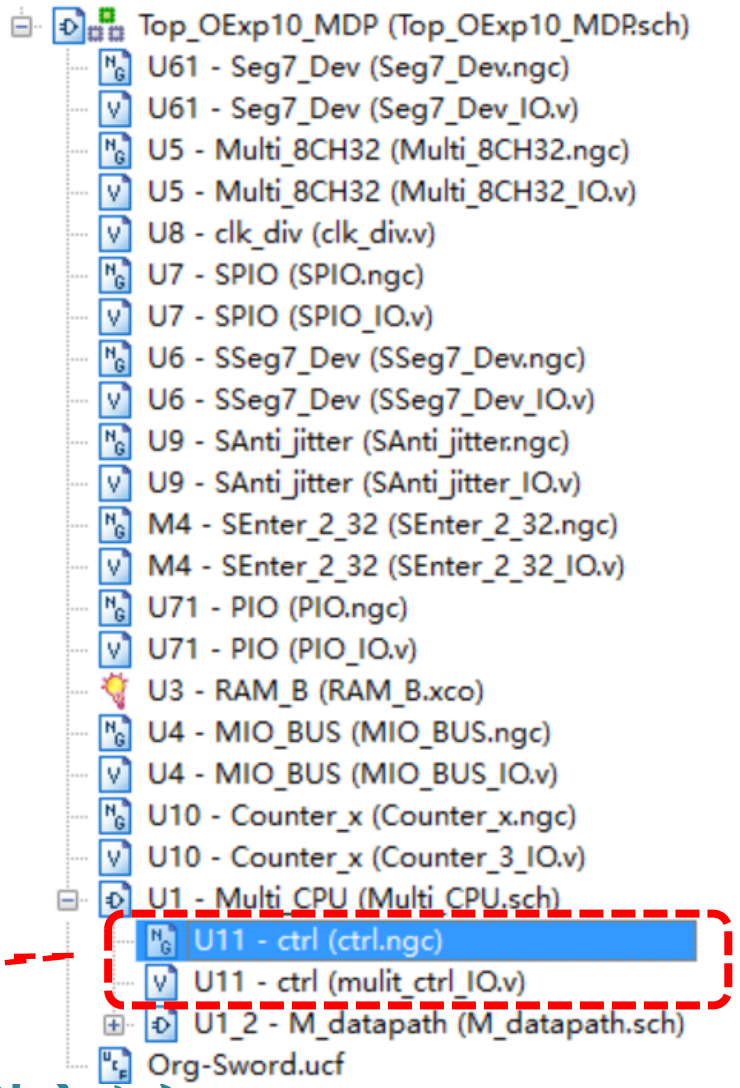
```
always @ * begin
        case(ALUop)
        2'b00: ALU_operation = 3'b010;          //add计算地址
        2'b01: ALU_operation = 3'b110;          //sub比较条件
        2'b10:
            case (Inst_in[5:0])
              6'b100000: ALU_operation = ADD;
              6'b100010: ALU_operation = SUB;
              6'b100100: ALU_operation = AND;
              6'b100101: ALU_operation = OR;
              6'b100111: ALU_operation = NOR;
              6'b101010: ALU_operation = SLT;
             6'b000010: ALU_operation = SRL;      //shfit 1bit right
             6'b000000: ALU_operation = XOR;
             default:   ALU_operation = ADD;
             endcase
        2'b11: ALU_operation = 3'b111;                  //slti
        endcase
end
```

多周期控制器实现

集成替换

控制器集成替换

- 集成替换
  - 仿真正确后替换Exp10的控制器IP核
- **移除工程中的控制器核**
  - Exp10工程中移控制器核关联
  - 删除工程中控制器核文件
    - ctrl.ngc文件
    - 在Project菜单中运行：
      Cleanup Project Files …
  - 建议用Exp10资源重建工程
    - 除ctrl.ngc核

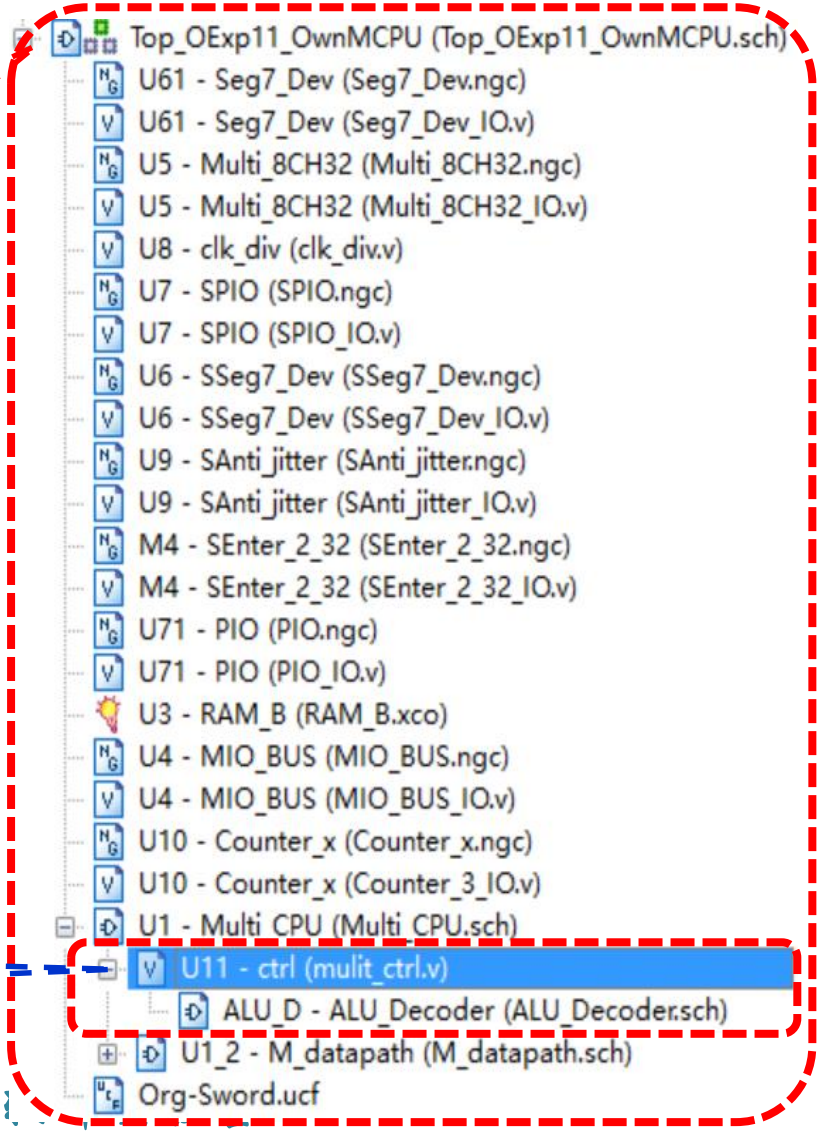


Exp10需要清理的核

集成替换ctrl核后的模块层次结构

Exp11完成数据通路替换后的模块调用关系

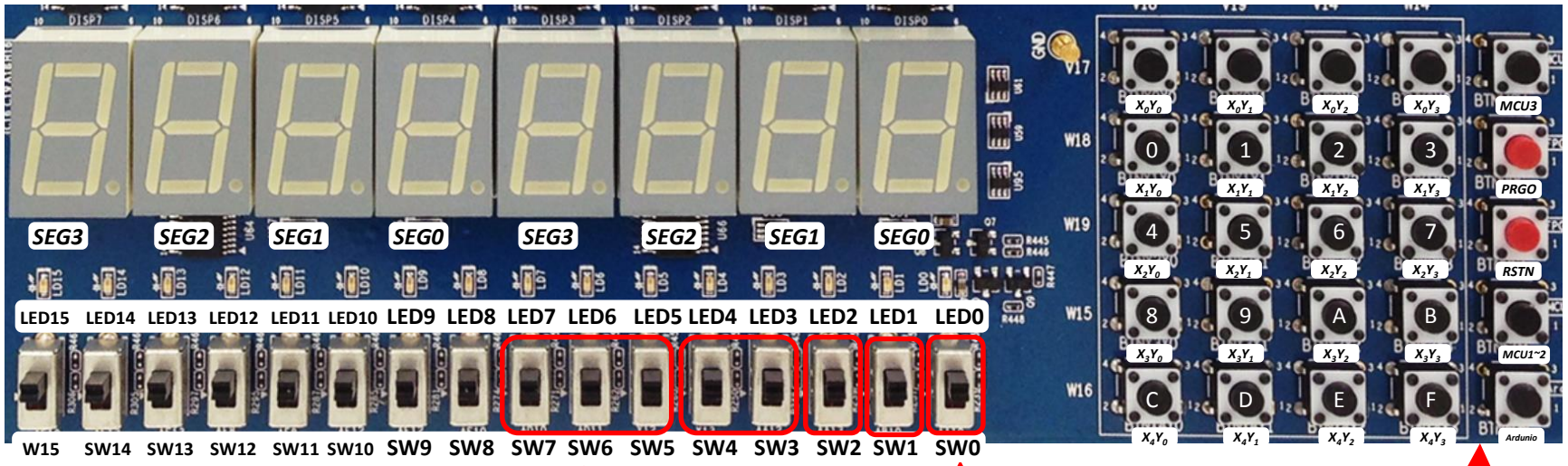
替换后的控制器模块



物理验证

- 使用DEMO程序目测控制器功能(同实验十)
  - 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指令(R-格式译码、 Function译码)
  - 测试LW/SW指令(I-格式译码)
  - 测试分支指令(I-格式译码)
  - 测试转移指令(J-格式译码)

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

没有使用

SW[2]=CPU单步时钟选择

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指令

- 设计ALU指令测试程序替换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,r3;          //r4=00000004
            add r5,r4,r2;          //r5=00000005
            add r6,r5,r5;          //r6=0000000A
            nor r7,r5,r5;          //r7=FFFFFFFA
            sub r8,r7,r5;          //r8=FFFFFFF5
            and r9,r8,r5;          //r9=00000005
            and r10,r8,r6;         //r10=00000000
            or   r11,r5,r6;        //r11=0000000F
            or   r12,r11,r7;       //r12=0000000A
            slt   r13,r5,r7;       //r13=00000000
            ……
j loop;
```

测试程序参考： LW/SW

- 设计LW/SW程序替换DEMO程序
  - 参考Lab5通道测试设计。测试结果通过CPU输出信号单步观察
  - 存储器地址通过Addr_out通道4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 test_sw;             //循环测试
        j    start;                     //循环测试。立即数通道：00000014
test_sw: ……                             //增加写SW测试，如14和48单元交换
        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地址计算、存储单元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

动态LW/SW测试

- 利用七段显示设备可以设计动态测试程序
  - 7段码显示器的地址是E0000000/FFFFFFE0
  - LED显示地址是F0000000/FFFFFF00
  - SW指令输出测试结果：sw
  - 请设计存储器模块测试程序
    - 测试结果在7段显示器上指示
- **RAM初始化数据同Exp10**

```
00A52820, AC650000, 8C650000, 00A85824, 01A26820, 11A00017, 8C650000, 01CE9020,
0252B020, 02569020, ……
```

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, D7DBFDB9, DFCFFCFB, DFCFBFFF, F7F3DFFF, FFFFDF3D, FFFF9DB9,
FFFFBCFB, DFCFFCFB, DFCFBFFF, D7DB9FFF, D7DBFDB9, D7BDFBD9, FFFF07E0, 007E0FFF,
03bdf020, 03def820, 08002300;
```

数据区

设计测试记录表格

- **ALU指令**测试结果记录
  - 自行设计记录表格
- **LW/SW指令测试结果记录**
  - 自行设计记录表格
- **动态存储模块测试记录**
  - 自行设计记录表格

思考题

- 用HDL直接描述状态机时同时输出控制信号需要如何修改？
- 设计bne指令需要增加控制信号吗？
- 扩展下列指令，控制器将作如何修改：

  R-Type：　srl*, jr, jalr, eret*；

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

  J-Type：　Jal；
  - 此时用二级译码有优势吗？
- 状态机调试你有什么建议？


END