

Lab04-3

CPU设计—指令集扩展

Ma De (马德)

made@zju.edu.cn

2025

College of Computer Science, Zhejiang University

Course Outline

- 一、实验目的
- 二、实验环境
- 三、实验目标及任务

实验目的

1. 运用寄存器传输控制技术
2. 掌握CPU的核心：指令执行过程与控制流关系
3. 设计数据通路和控制器
4. 设计测试程序

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. NEXYS A7开发板
3. Xilinx Vivado14.7及以上开发工具

□ 材料

无

实验目标及任务

- **目标：** 熟悉RISC-V RV32I的指令特点，了解控制器和数据通路的原理，扩展实验lab4-2 CPU指令集，设计并测试CPU

- **任务一：** 重新设计数据通路和控制器，在lab4-2的基础上完成
 - 兼容lab4-1、 lab4-2的数据通路和控制器
 - 替换lab4-1、 lab4-2的数据通路控制器核
 - 扩展不少于下列指令

R-Type: add, sub, and, or, xor, slt, **sltu**, srl, **sra**, **sll**;

I-Type: addi, andi, ori, xori, slti, **sltiu**, srli, **srai**, **slli**, lw, **jalr**;

S-Type: sw;

B-Type: beq, **bne**;

J-Type: Jal;

U-Type: **lui**;

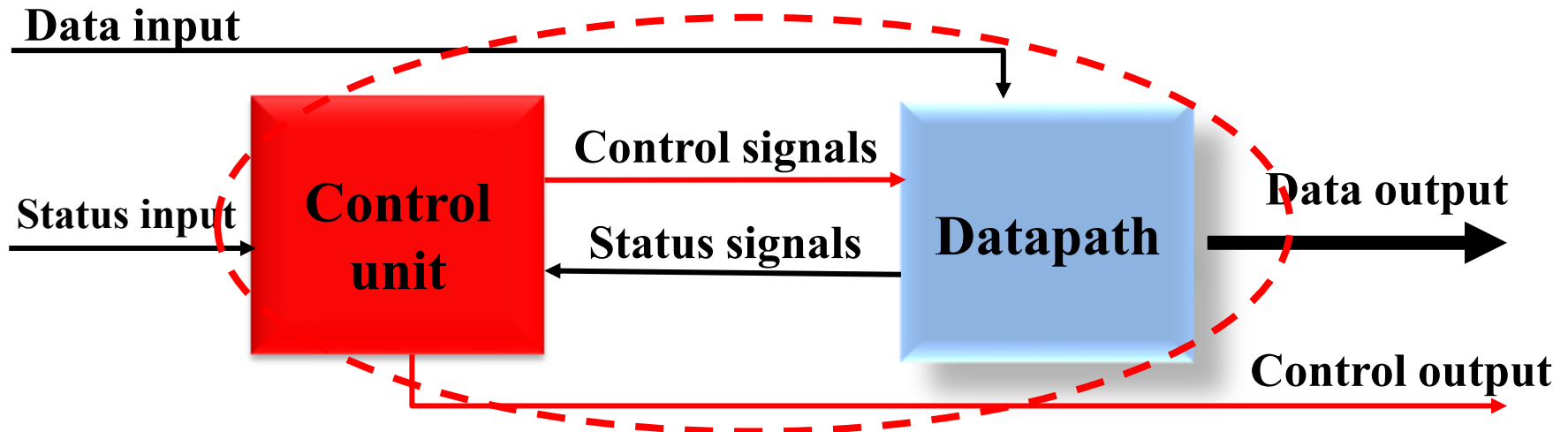
- **任务二：** 设计指令集测试方案并完成测试

RISC-V RV32I指令集扩展的原理介绍

CPU organization

□ Digital circuit

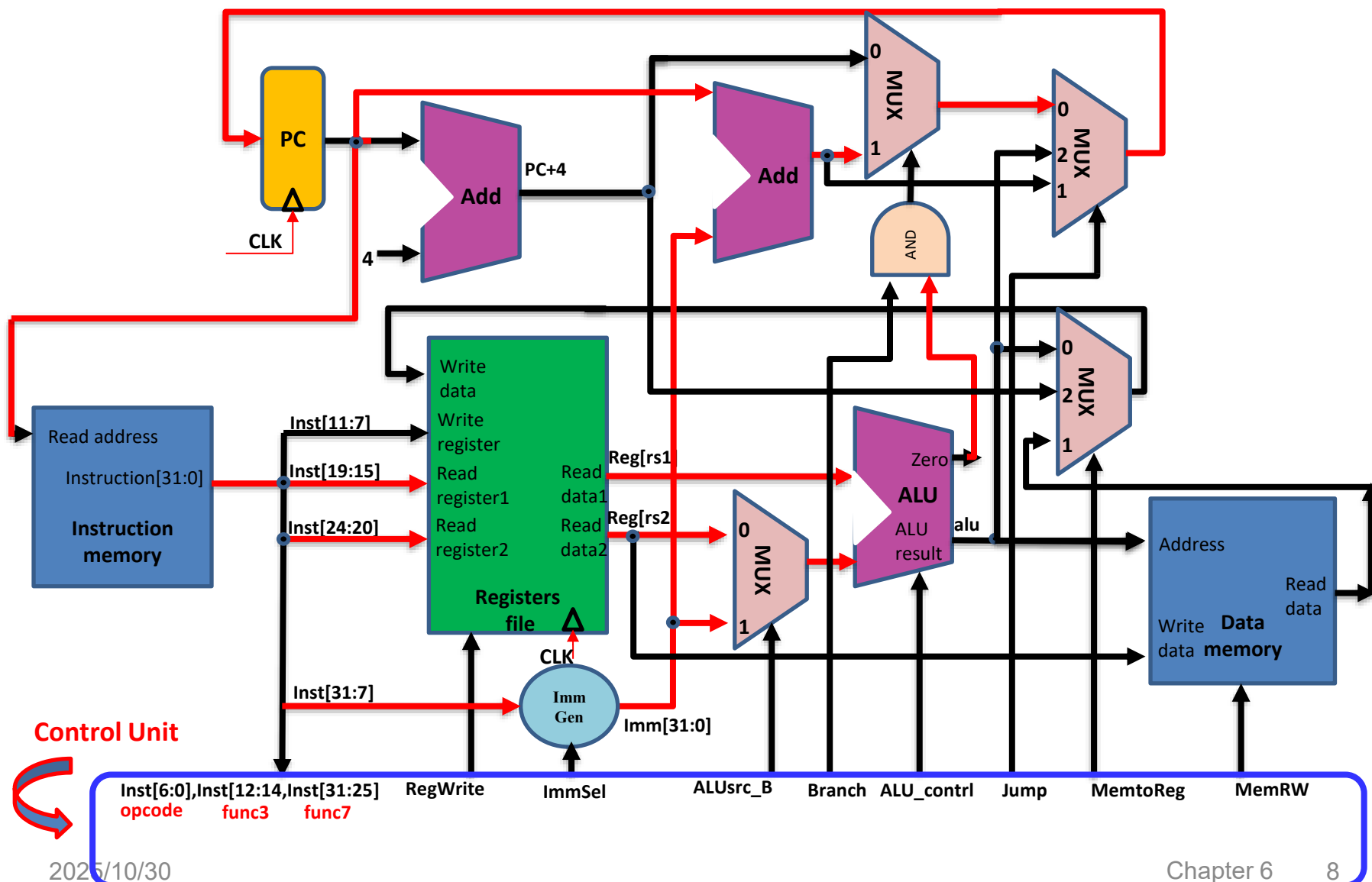
- General circuits that controls logical event with logical gates -
-Hardware



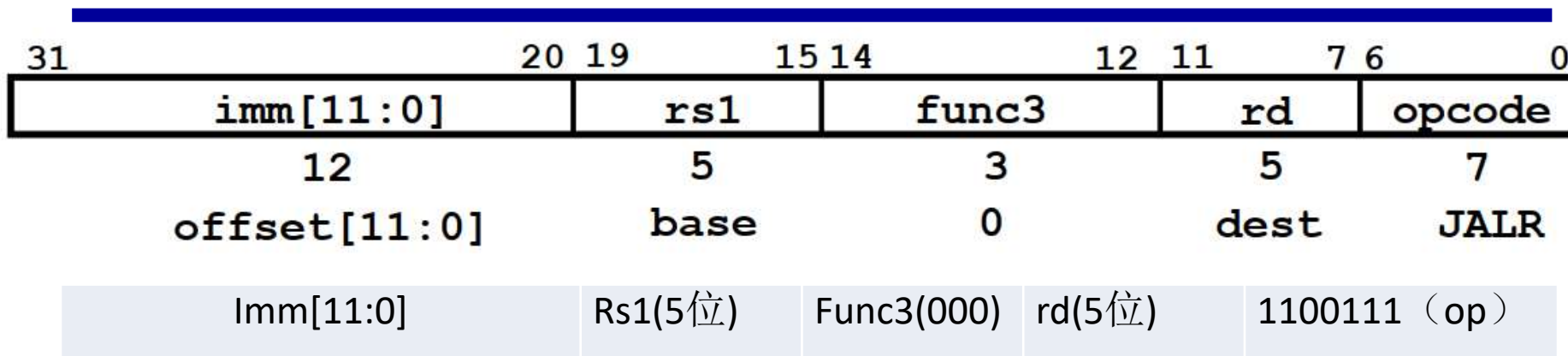
□ Computer organization

- Special circuits that processes logical action with instructions
-Software

数据通路 □ 兼容lab4-2需要增加哪些通路 with 操作控制



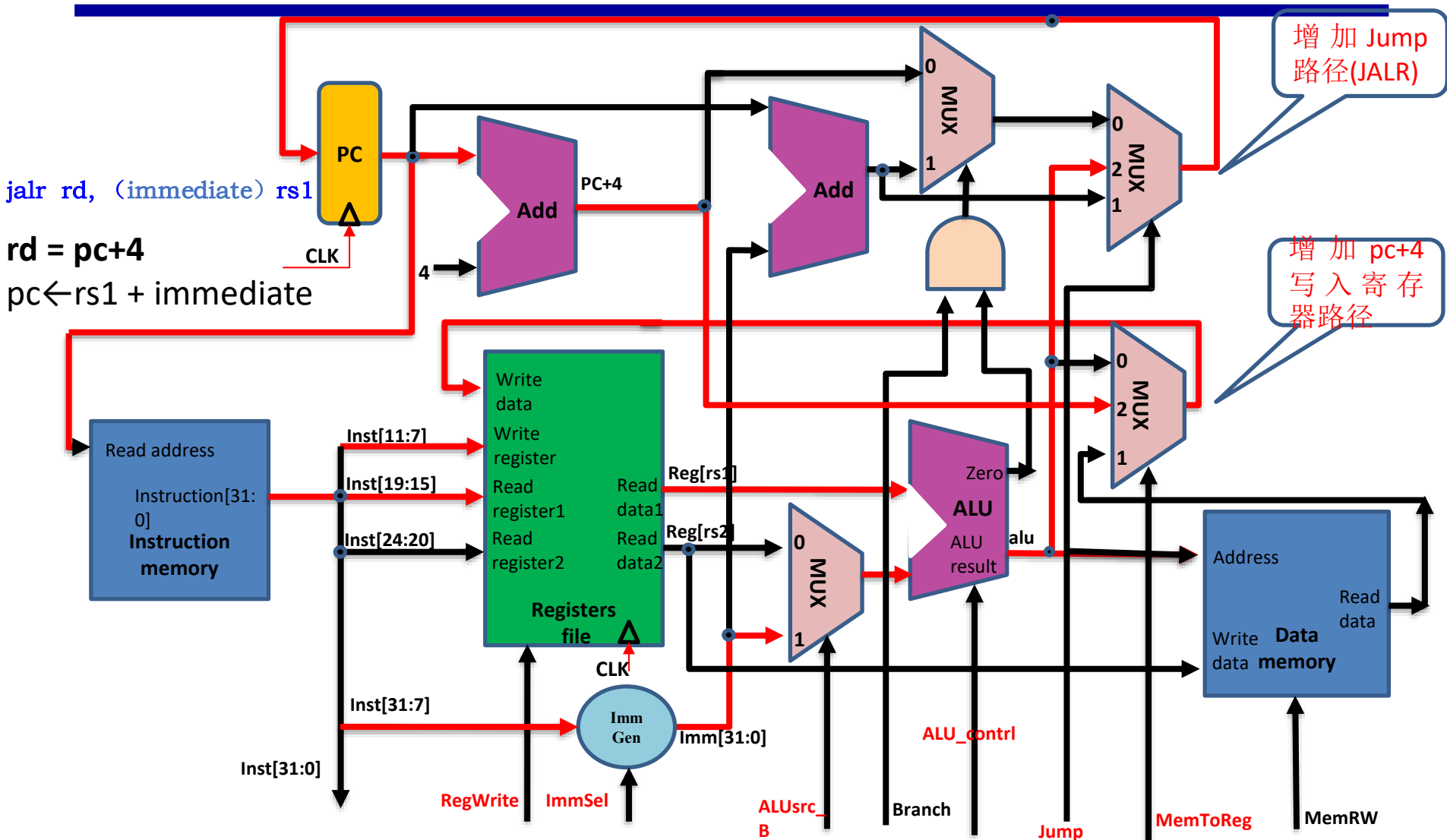
Adding JALR (I-Format)



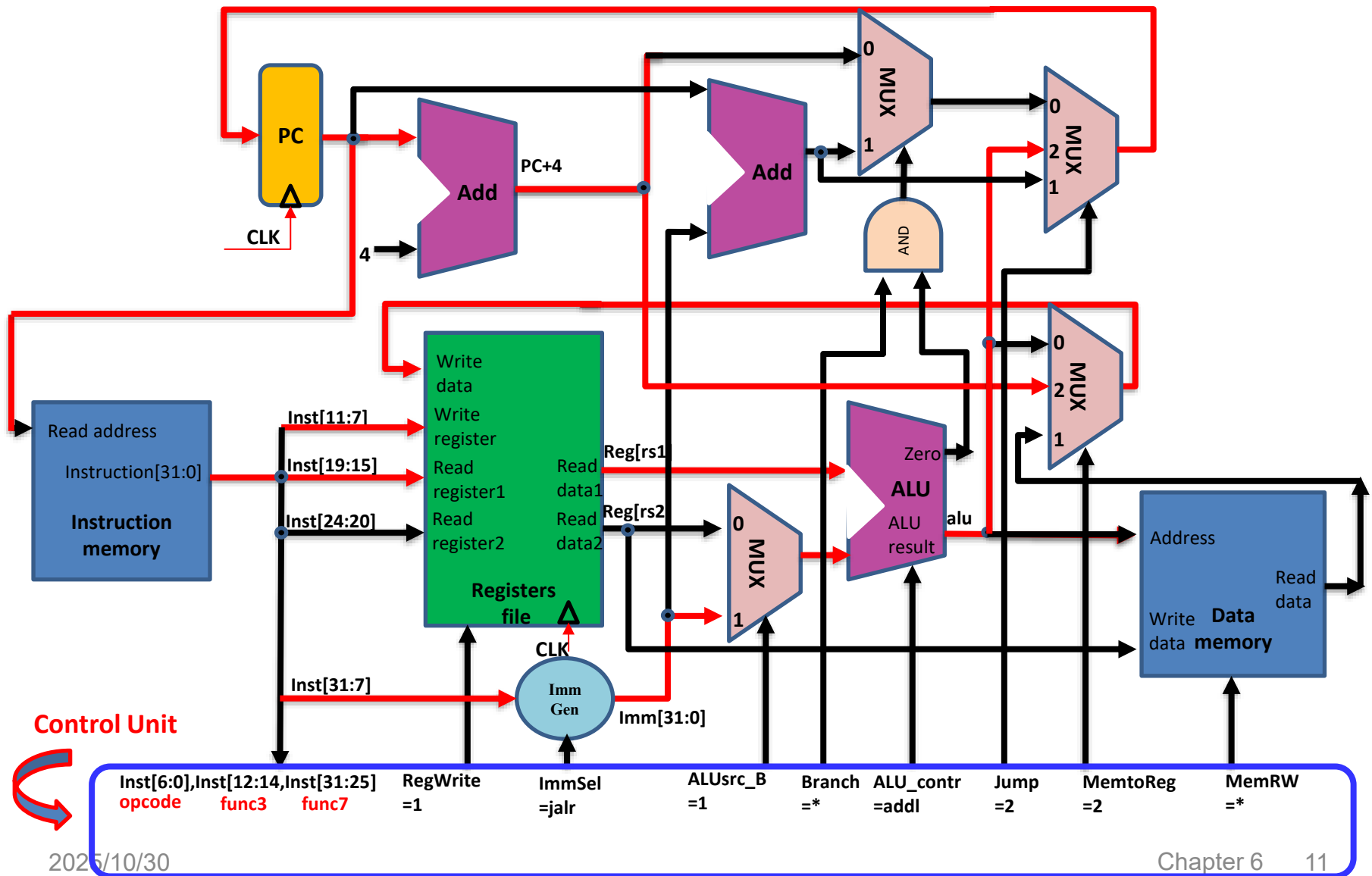
jalr rd, (immediate) rs1 无条件跳转-链接（寄存器地址）

功能： $rd = pc+4$, $pc \leftarrow rs1 + \text{immediate}$

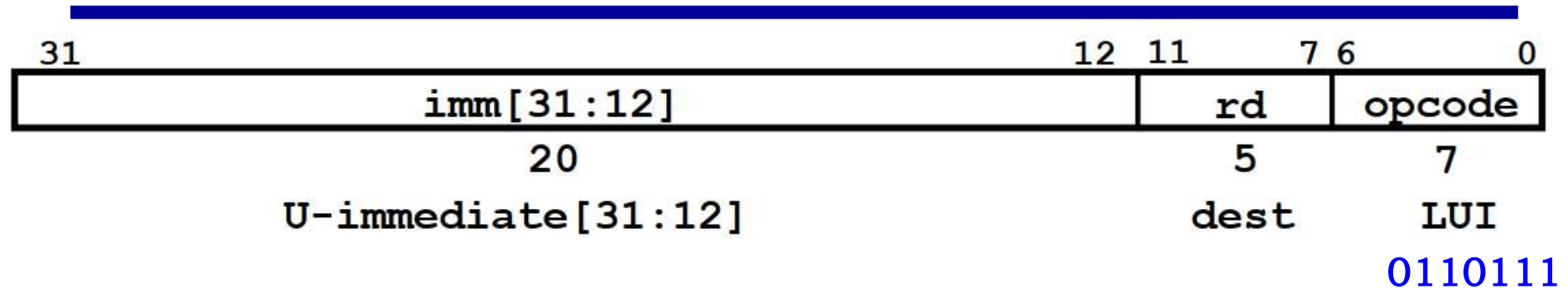
Adding JALR to Datapath



Control unit--jalr



Adding U-Format



`lui rd, immediate`

功能: $rd = \text{immediate} \ll 12$

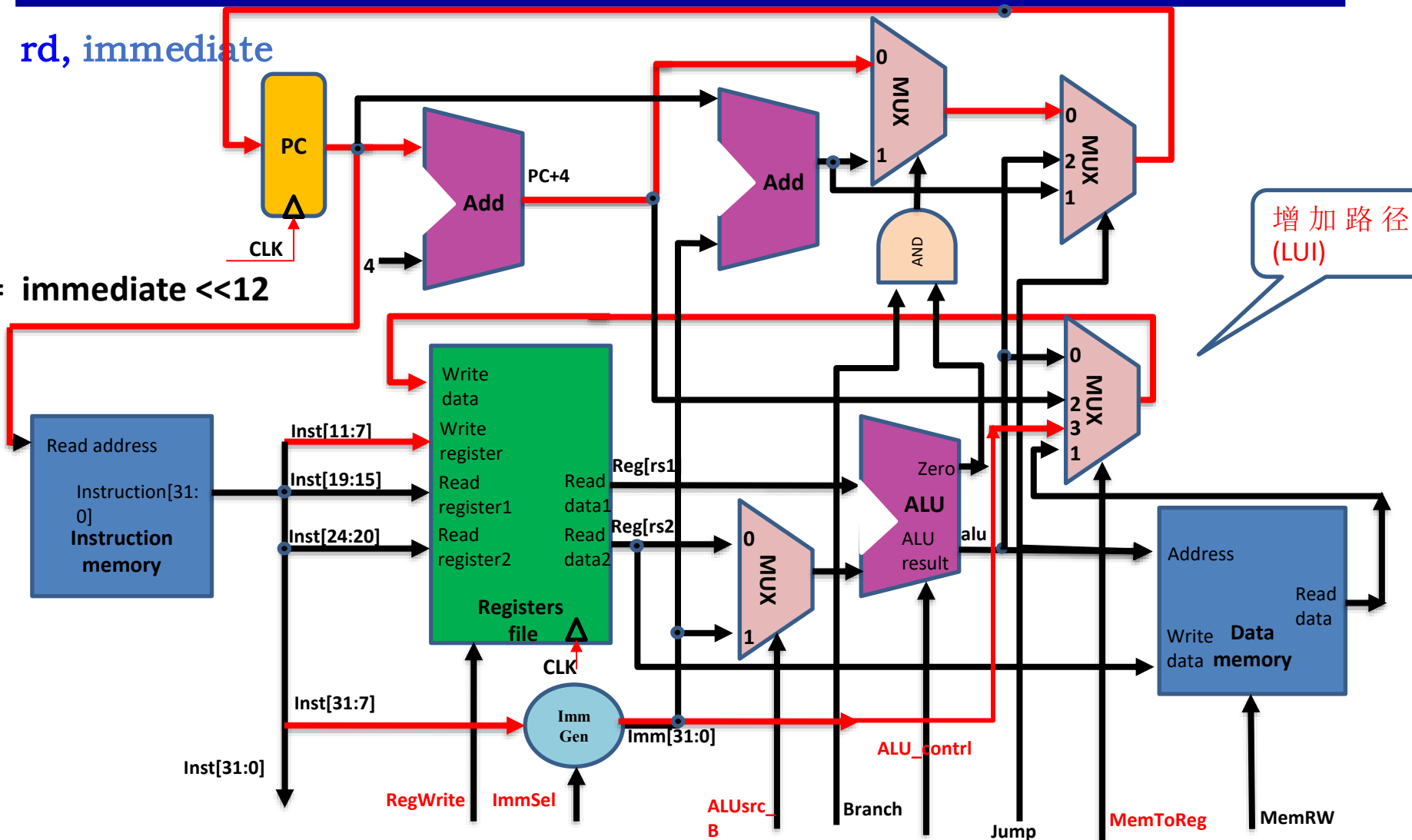
Eg: `lui x5, 0x12345`

$X5 = 0x12345000$ 取左移12位的20位立即数

Adding LUI to Datapath

`lui rd, immediate`

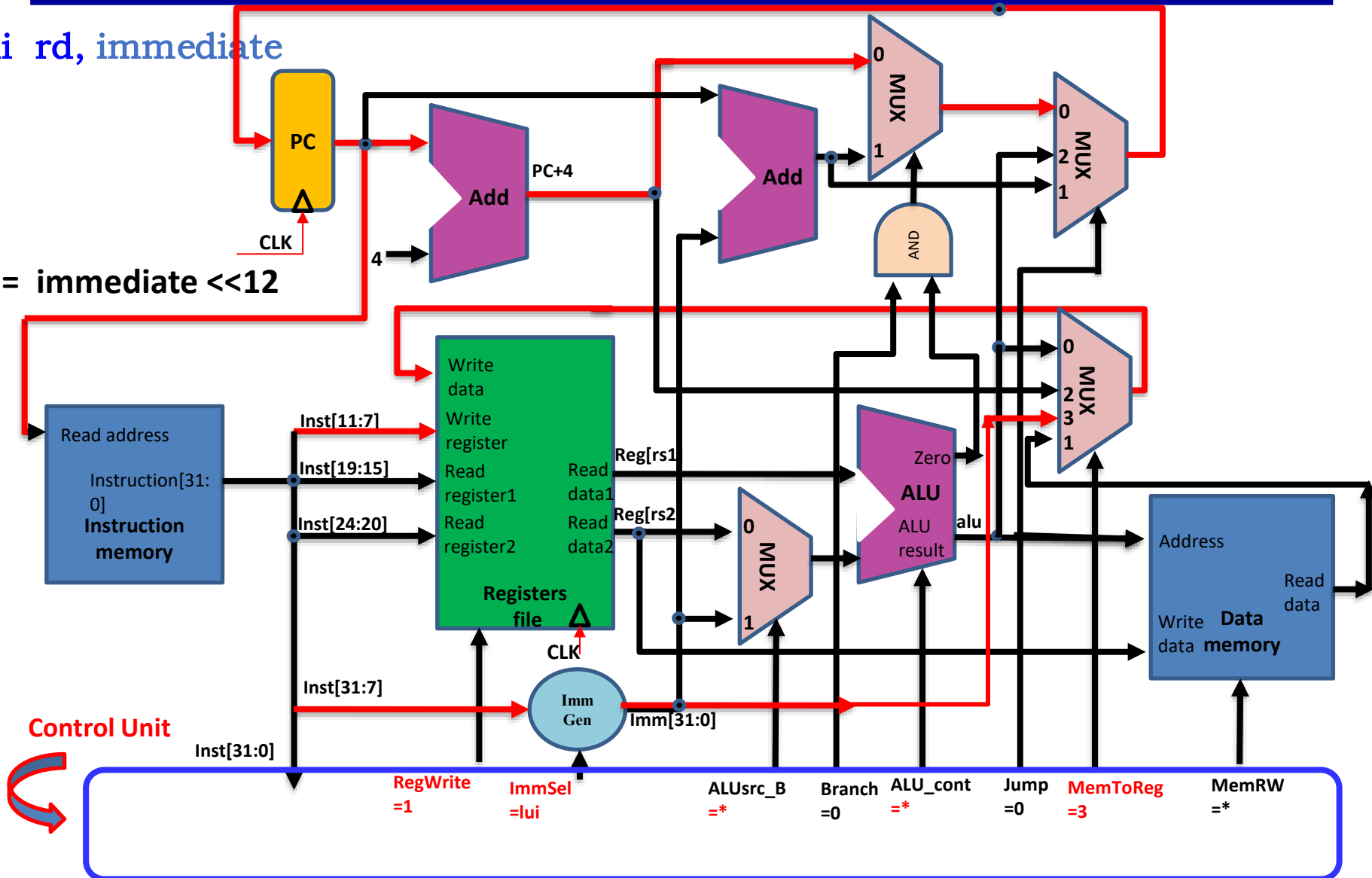
`rd = immediate << 12`



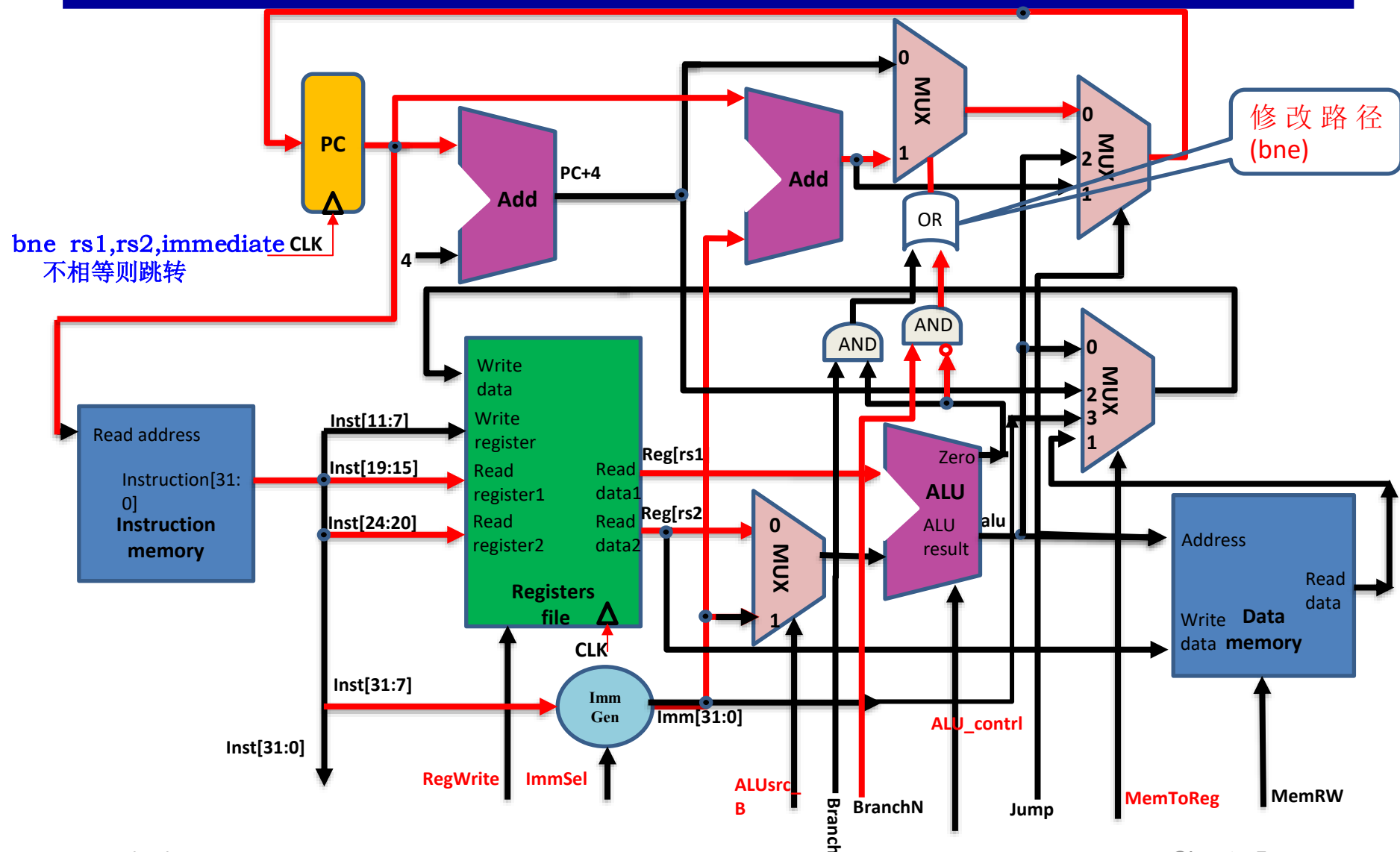
Control unit-- LUI

lui rd, immediate

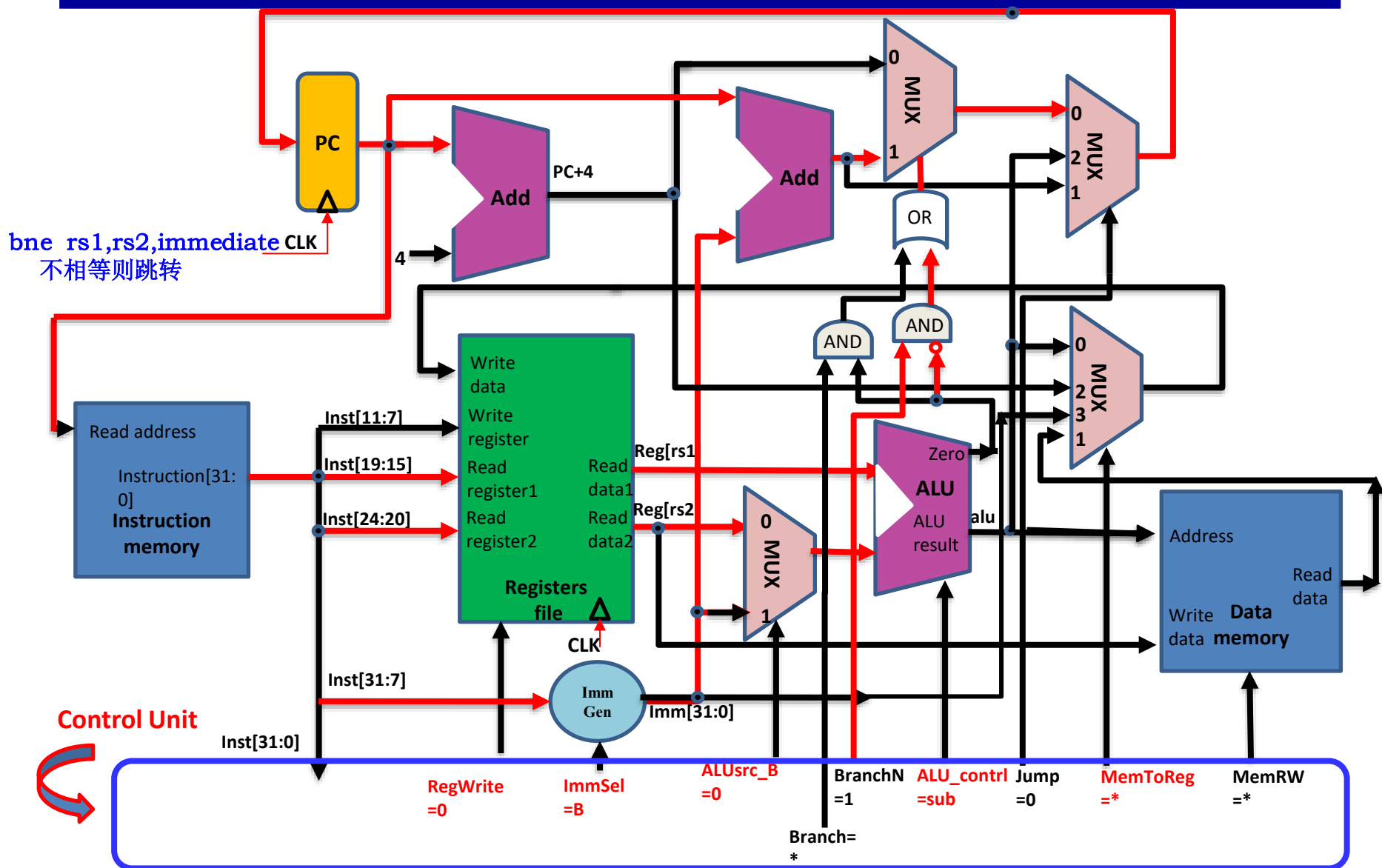
rd = immediate <<12



Adding bne to Datapath



Control unit-- bne



控制信号定义

兼容lab4-2需要增加哪些操作控制

信号	源数目	功能定义	赋值0时动作	赋值1时动作	赋值2时动作	赋值3时动作
ALUSrc_B	2	ALU端口B输入选择	选择源操作数寄存器2数据	选择32位立即数（符号扩展后）	-	-
MemToReg	4	寄存器写入数据选择	选择ALU输出	选择存储器数据	选择PC+4	选择imm
Branch	2	Beq指令目标地址选择	选择PC+4地址	选择转移目的地址PC+imm（zero=1）	-	-
BranchN	2	Bne指令目标地址选择	选择PC+4地址	选择转移目的地址PC+imm（zero=0）	-	-
Jump	3	J指令目标地址选择	由Branch决定输出	选择跳转目标地址PC+imm（JAL）	选择跳转目标地址ALU输出（JALR:rs1+imm）	-
RegWrite	-	寄存器写控制	禁止寄存器写	使能寄存器写	-	-
MemRW	-	存储器读写控制	存储器读使能，存储器写禁止	存储器写使能，存储器读禁止	-	-
ALU_Control	0000 - 1111	4位ALU操作控制	参考表ALU_Control			
ImmSel	000-111	3位立即数组合控制	参考表ImmSel			

控制信号真值表

□ 根据数据通路重新设计控制器输出信号真值表

	ALU Src_B	Mem toReg	Reg Write	Mem RW	ImmSel	Branch	BranchN	Jump	ALUCon trol
R-格式									
I-格式									
S-格式									
B-格式									
J-格式									
U-格式									

重新设计真值表
需要增加控制信号吗?

控制信号真值表

Inst[31:0]	Banch	Branch N	Jump	ImmSel	ALUSrc_B	ALU_Control	MemRW	RegWrite	MemtoReg
add	0	0	0	*	Reg (0)	Add	Read	1	ALU(0)
sub	0	0	0	*	Reg (0)	Sub	Read	1	ALU(0)
(R-R Op)	0	0	0	*	Reg (0)	(Op)	Read	1	ALU(0)
addi	0	0	0	I	Imm (1)	Add	Read	1	ALU(0)
lw	0	0	0	I	Imm (1)	Add	Read	1	Mem(1)
sw	0	0	0	S	Imm (1)	Add	Write	0	*
beq	0	0	0	B	Reg (0)	sub	*	0	*
beq	1	*	0	B	Reg (0)	sub	*	0	*
bne	0	0	0	B	Reg (0)	sub	*	0	*
bne	*	1	0	B	Reg (0)	sub	*	0	*
jalr	*	*	2	I	Imm (1)	Add	*	1	PC+4(2)
jal	*	*	1	J	Imm (1)	*	*	1	PC+4(2)
lui	0	0	0	U	*	*	*	1	Imm(3)

ImmSel

Instruction type	Instruction opcode[6:0]	Instruction operation	(sign-extend)immediate	Imm Sel
I-type	0000011	Lw; lb ;lh; lb ;lhu	(sign-extend) instr[31:20]	001
	0010011	Addi;slti;slti u;xori;ori;a ndi;slli;srai		
	1100111	jalr		
S-type	0100011	Sw; sb ;sh	(sign-extend) instr[31:25],[11:7]	010
B-type	1100011	Beq;bne; blt bge ;bltu; bgeu	(sign-extend) instr[31],[7],[30:25],[11:8], 1'b0	011
J-type	1101111	jal	(sign-extend) instr[31],[19:12],[20],[30:21],1 'b0	100
U-type	0010111	auipc	instr[31:12],12'h000	000
	0110111	lui		

RV32I---decode

Instruction opcode	op	Instruction operation	Funct 3	Funct7	ALUop	Desired ALU action	ALUControl
R-type	0110011	add	000	0000000	10	add	0010
		sub	000	0100000		sub	0110
		sll	001	0000000		sll	1110
		slt	010	0000000		slt	0111
		sltu	011	0000000		sltu	1001
		xor	100	0000000		xor	1100
		srl	101	0000000		srl	1101
		sra	101	0100000		sra	1111
		or	110	0000000		or	0001
		and	111	0000000		and	0000

RV32I---decode

Instruction opcode	op	Instruction operation	Funct 3	Funct7	ALUop	Desired ALU action	ALUControl
S-Type	0100011	sb	000	-	00	add	0010
		sh	001	-		add	0010
		sw	010	-		add	0010
Instruction opcode	op	Instruction operation	Funct 3	Funct7	ALUop	Desired ALU action	ALUControl
B-Type	1100011	Beq	000	-	01	sub	0110
		Bne	001	-		sub	0110
		Blt	100	-		slt	0111
		Bge	101	-		slt	0111
		Bltu	110	-		sltu	1001
		bgeu	111	-		sltu	1001

RV32I---decode

Instruction opcode	op	Instruction operation	Funct 3	Funct7	ALUop	Desired ALU action	ALUControl
U-Type	0110111	lui	-	-	-	-	-
	0010111	auipc	-	-		-	-
Instruction opcode	op	Instruction operation	Funct 3	Funct7	ALUop	Desired ALU action	ALUControl
J-Type	1101111	jal	-	-	-	-	-

RV32I---decode

Instruction opcode	op	Instruction operation	Funct 3	Funct7	ALUop	Desired ALU action	ALUControl
I-Type	0000011	Lb	-	-	00	add	0010
		Lh	-	-		add	0010
		Lw	-	-		add	0010
		Lbu	-	-		add	0010
		lhu	-	-		add	0010
	1100111	jalr			00	add	0010

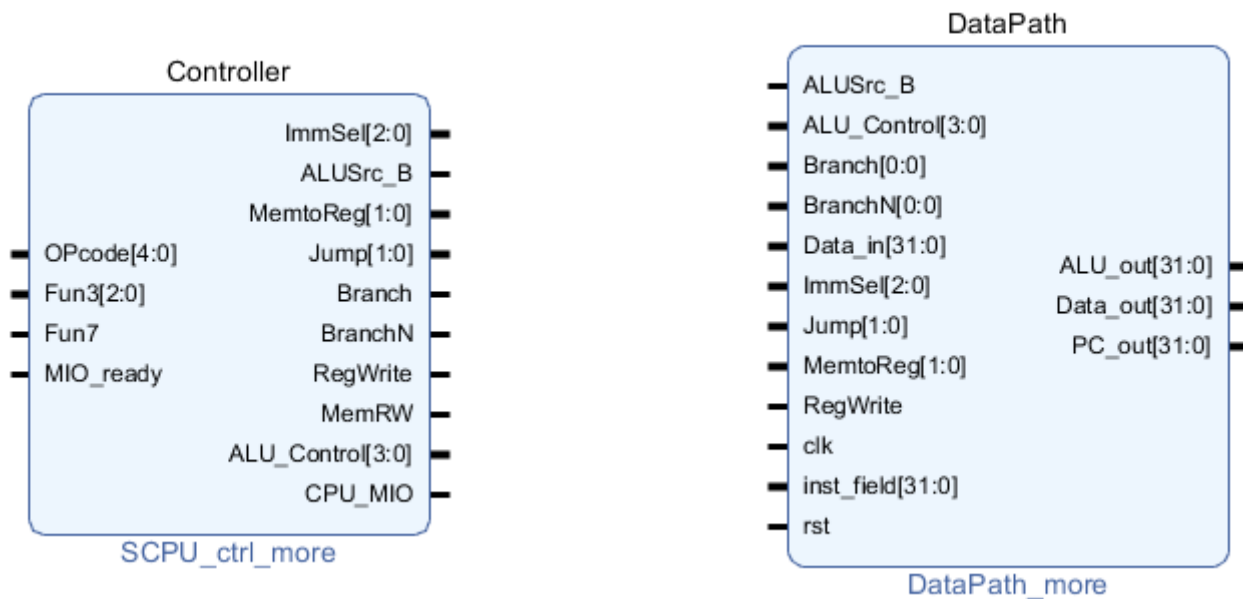
RV32I---decode

Instruction opcode	op	Instruction operation	Funct 3	Funct7	ALUop	Desired ALU action	ALUControl
I-Type	0010011	addi	000	-	11	add	0010
		slti	010	-		slt	0111
		sltiu	011	-		sltu	1001
		xori	100	-		xor	1100
		ori	110	-		or	0001
		andi	111	-		and	0000
		slli	001	0000000		sll	1110
		srli	101	0000000		srl	1101
		srai	101	0100000		sra	1111

重新设计数据通路与控制接口：

□ 重新设计接口

- 扩展后增加了控制信号
- 数据通路参考接口如右图
- 控制器参考接口信号如下图



数据通路功能控制器接口信号标准

```
module  SCPU_ctrl_more( input[6:0]OPcode,    //OPcode
                        input[2:0]Fun3,        //Function
                        input  Fun7,          //Function
                        input MIO_ready,       //CPU Wait
                        output reg [2:0]ImmSel,
                        output reg ALUSrc_B,
                        output reg [1:0]MemtoReg,
                        output reg [1:0]Jump,
                        output reg Branch,
                        output reg BranchN,
                        output reg RegWrite,
                        output reg MemRW,
                        output reg [3:0]ALU_Control,
                        output reg CPU_MIO
                        );

endmodule
```

数据通路功能控制器接口信号标准

```
module      Data_path_more( input clk,           //寄存器时钟
                             input rst,           //寄存器复位
                             input[31:0]inst_field, //指令数据域[31:7]
                             input ALUSrc_B,      //ALU端口B输入选择
                             input [1:0]MemtoReg,  //Regs写入数据源控制
                             input [1:0]Jump,      //J指令
                             input Branch,         //Beq指令
                             input BranchN,        //Bne指令
                             input RegWrite,       //寄存器写信号
                             input[31:0]Data_in,   //存储器输入
                             input[3:0]ALU_Control, //ALU操作控制
                             input[2:0]ImmSel,     //ImmGen操作控制

                             output[31:0]ALU_out,   //ALU运算输出
                             output[31:0]Data_out,  //CPU数据输出
                             output[31:0]PC_out    //PC指针输出
                             );

endmodule
```

-
- **任务一：** 重新设计数据通路和控制器，在Exp4-2的基础上完成
 - 兼容Exp4-1、 Exp4-2的数据通路和控制器
 - 替换Exp4-1、 Exp4-2的数据通路控制器核

设计工程：OExp04-ExtSCPU

◎扩展不少于下列指令

R-Type: add, sub, and, or, xor, slt, **sltu**, srl, **sra**, **sll**;

I-Type: addi, andi, ori, xori, slti, **sltiu**, srli, **srai**, **slli**, lw, **jalr**;

S-Type: sw;

B-Type: beq, **bne**;

J-Type: Jal;

U-Type: **lui**;

◎集成替换验证通过的新CPU

- ☞ 替换 (Exp4-2)中的SCPU模块

- ☞ 替换 (Exp4-2)中的SCPU_ctrl模块

- ☞ 替换 (Exp4-2)中的Data_Path模块

- ☞ 顶层模块沿用Exp04

 - 模块名: ExtSCPU.v

◎测试扩展后的CPU功能

- ☞ 设计测试程序(RISCV汇编)测试

设计要点

◎ 设计指令扩展后DataPath结构

☞ 在实验4-1的基础上扩展

◎ 根据新DataPath结构设计控制器

☞ 建议用HDL结构化描述

◎ 设计CPU调用模块

☞ 根据新的控制器和数据通路接口信号设计CPU模块

◎ 仿真新设计的模块

☞ 独立仿真DataPath和控制器

◎ 集成替换CPU及子模块

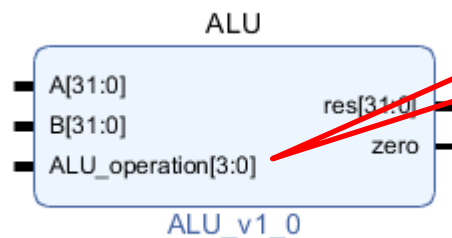
☞ 仿真正确后

○ 集成替换CPU、数据通路和控制器模块

设计要点

◎ 设计指令扩展后的ALU

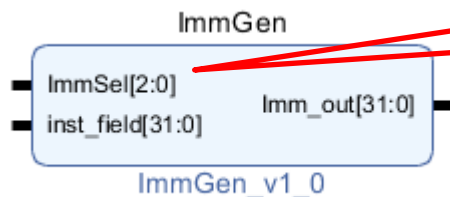
在实验四的原理图上扩展



控制信号增加，
内部实现了
sra,sll等R型扩
展指令的算数
单元

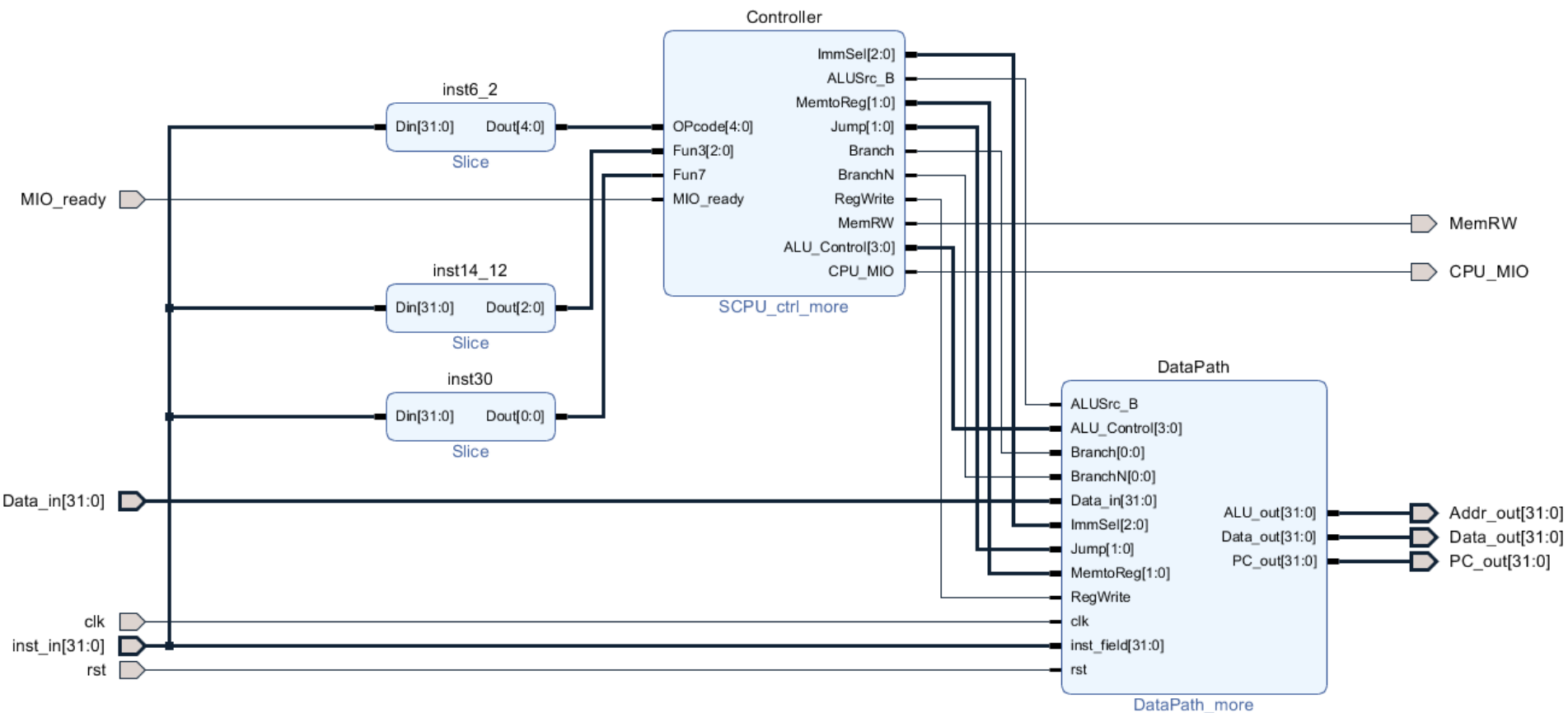
◎ 设计指令扩展后的ImmGen

在实验五的结构描述上扩展

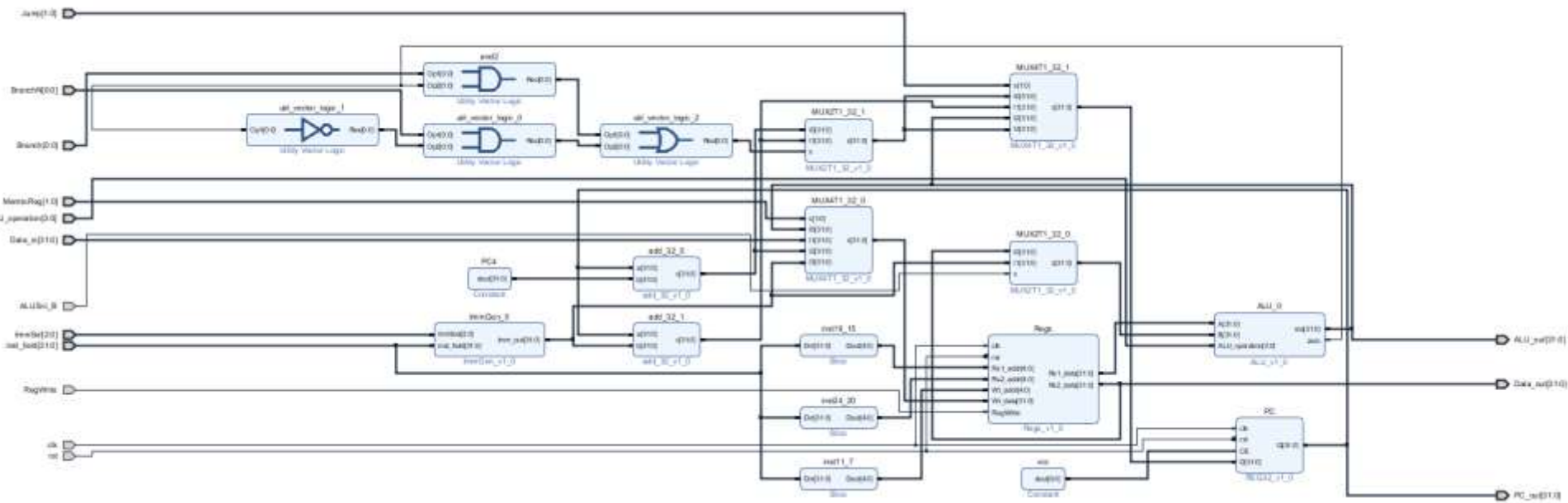


控制信号增加，
内部实现了U型
扩展指令的立
即数生成

扩展指令后的CPU参考模块



Datapath参考设计



控制器描述参考结构

```
`define CPU_ctrl_signals {ALUSrc_B,MemtoReg,RegWrite,MemRW,Branch,Jump, ALU_Control
, .....}

    always @* begin
        case(OPcode)
            5'b01100:                                     //ALU
                case(Fun)
                    4'b0000: begin CPU_ctrl_signals = ?; end    //add
                    4'b0001: begin CPU_ctrl_signals = ?; end    //sub
                    .....
                    default:    begin CPU_ctrl_signals = ?; end;
                endcase
            5'b000000: begin CPU_ctrl_signals = ?; end          //load
            5'b01000: begin CPU_ctrl_signals = ?; end          //store
            .....
            default:    begin CPU_ctrl_signals = ?; end
        endcase
    end
```

CPU调试与测试

□ 调试

- SCPU_ctrl_more模块仿真
 - 设计测试激励代码仿真测试*
- Data_path_more模块仿真
 - 设计测试激励代码仿真测试*
- CPU功能仿真（仿真测试平台参见lab04-2）

若含有提供的
EDF格式IP则无
法仿真

直接调用.v形
式的子模块

□ 集成替换

- 仿真正确后逐个替换Exp04-2的相应模块
- 使用DEMO程序（或另外编写）目测控制器正常运行

```
memory_initialization_radix=16;  
memory_initialization_vector=  
00007293, 00007313, 88888137, 00832183, 0032A223, 00402083, 01C02383, 00338863, 555550B7, 0070A0B3,  
FE0098E3, 007282B3, 00230333, 00531463, 40000033, 40530433, 405304B3, 0080006F, 00007033, 0072F533,  
00157593, 00B51463, 00006033, 00A5E5B3, 0015E513, 00558463, 00004033, 00A5C633, 00164613, 00B61463,  
00000013, 0012D293, 00060463, 40000033, 00129293, 00B28463, 00000013, 001026B3, 00503733, F65FF06F;
```

设计测试记录表格

- CPU指令测试结果记录
 - 自行设计记录表格

思考题

- 指令扩展时控制器用二级译码设计存在什么问题？
- 设计bne指令需要增加控制信号吗？
- 设计srai时需要增加新的数据通道吗？

◎ **END**