

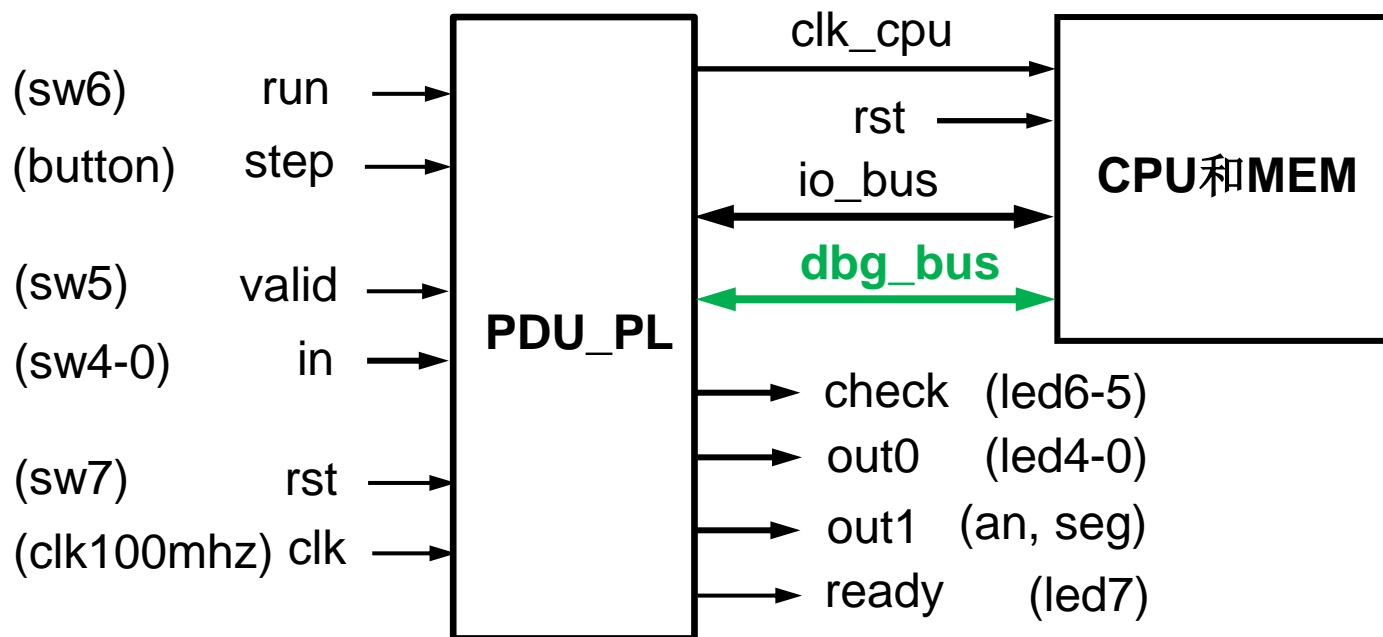
实验五 流水线CPU设计

实验目标

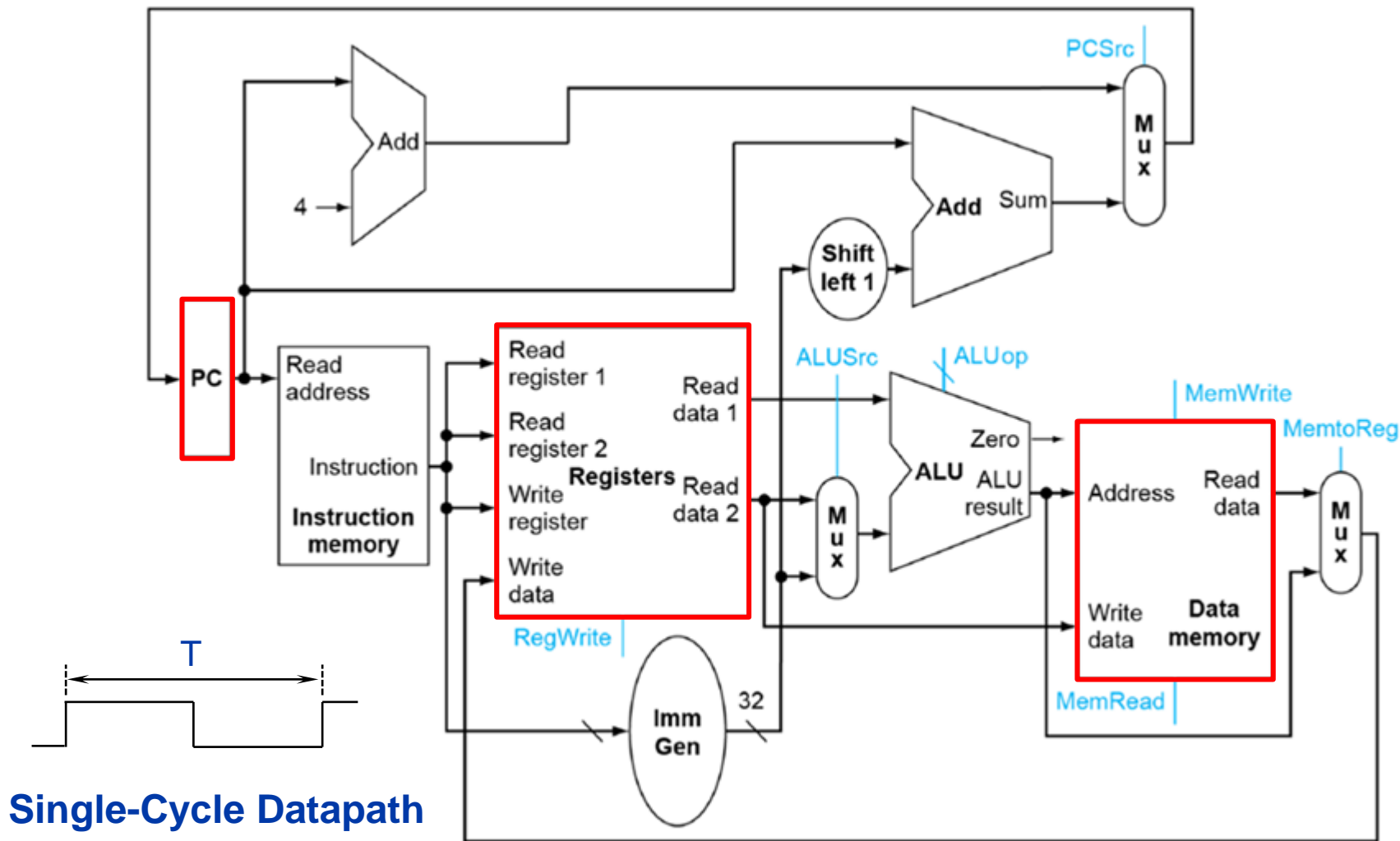
- 理解CPU的功能、结构和工作原理
- 掌握流水线CPU的设计和调试方法，特别是流水线中数据相关和控制相关的处理
- 熟练掌握数据通路和控制器的设计和描述方法

实验内容

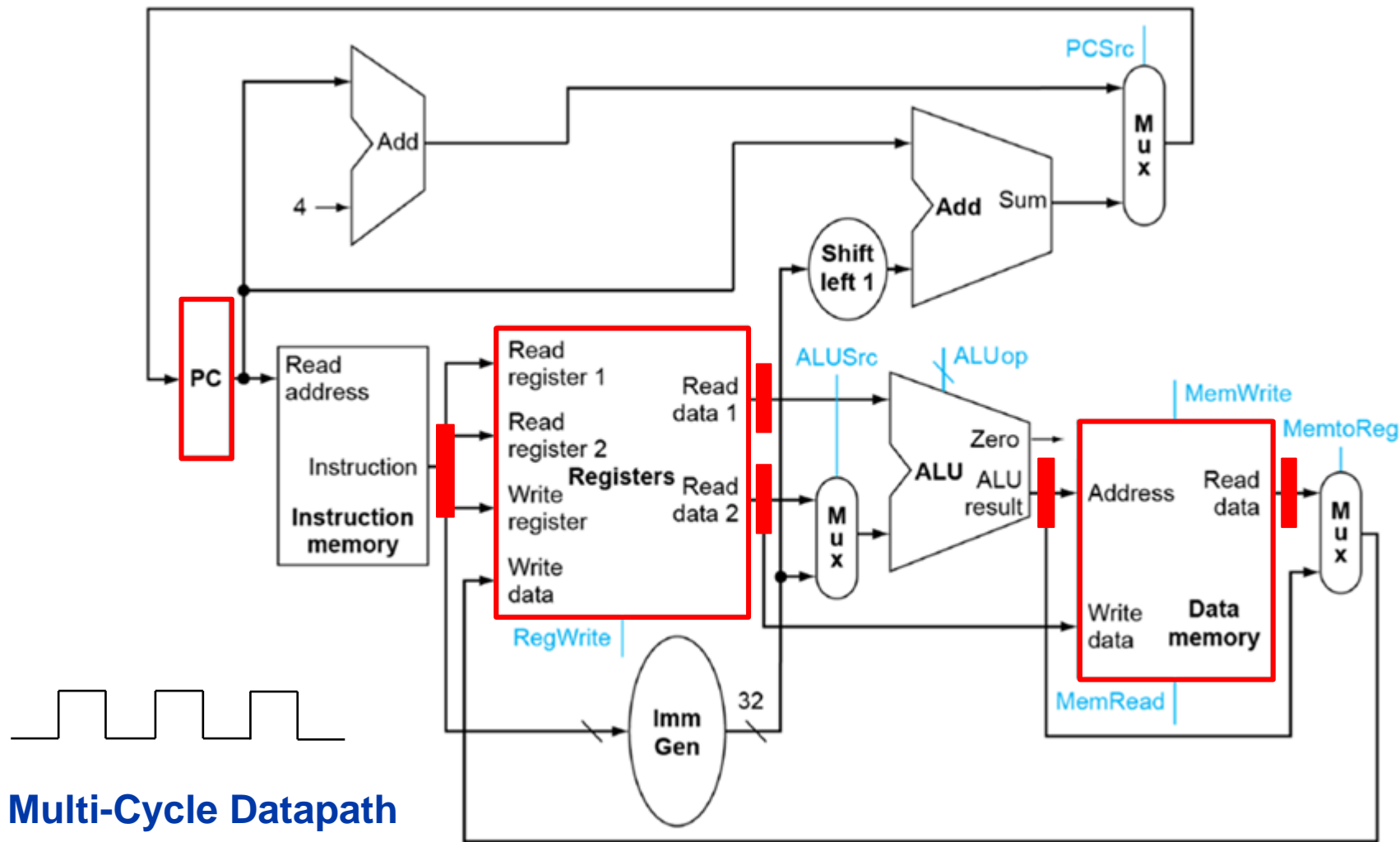
- 设计实现5级流水线的RISC-V CPU
 - 能够执行6条指令：**add, addi, lw, sw, beq, jal**
 - 指令存储器和数据存储器均使用分布式存储器，容量均为256x32位，寄存器堆和数据存储器均增加一个读端口用于调试



单周期CPU数据通路

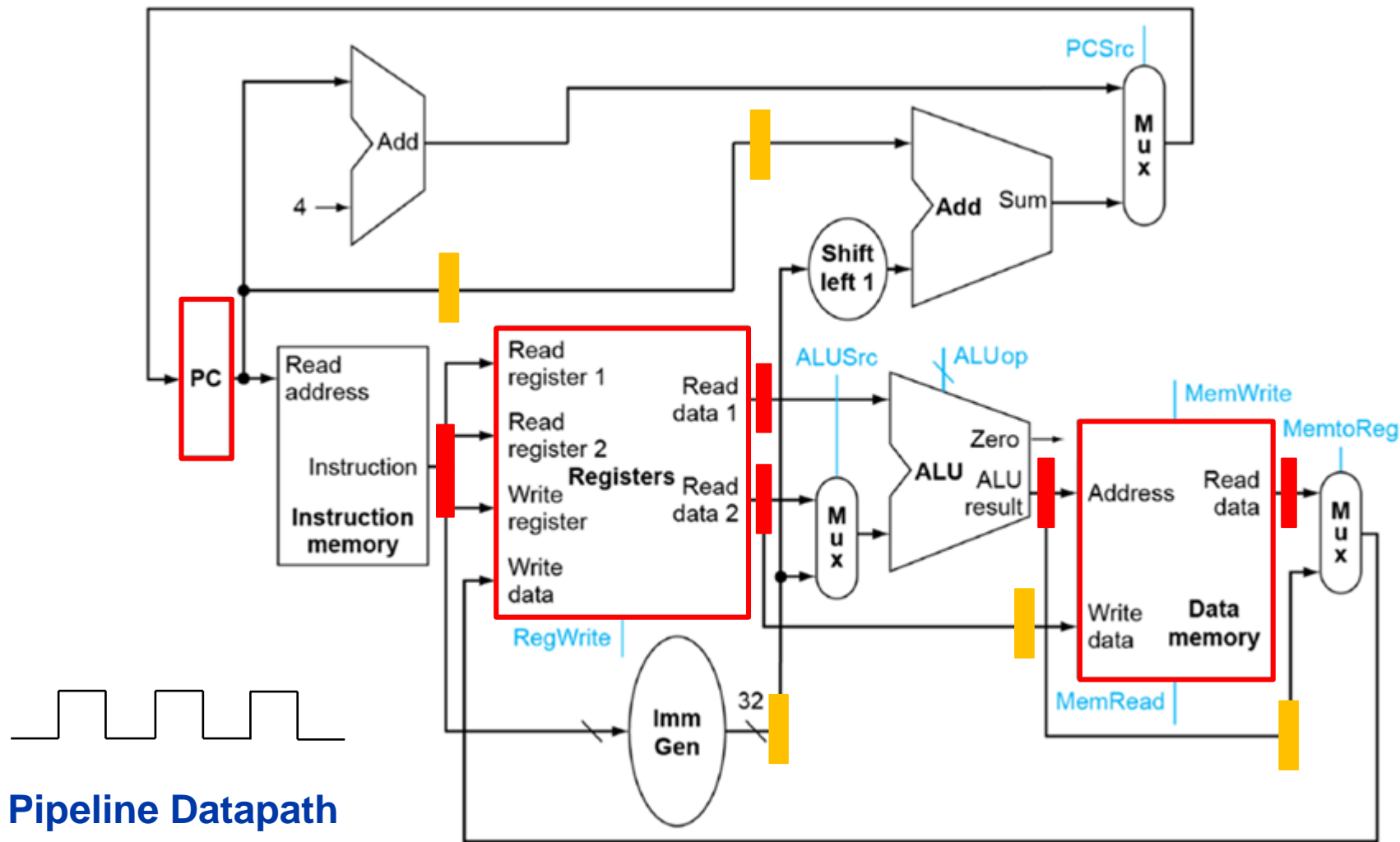


单周期CPU数据通路



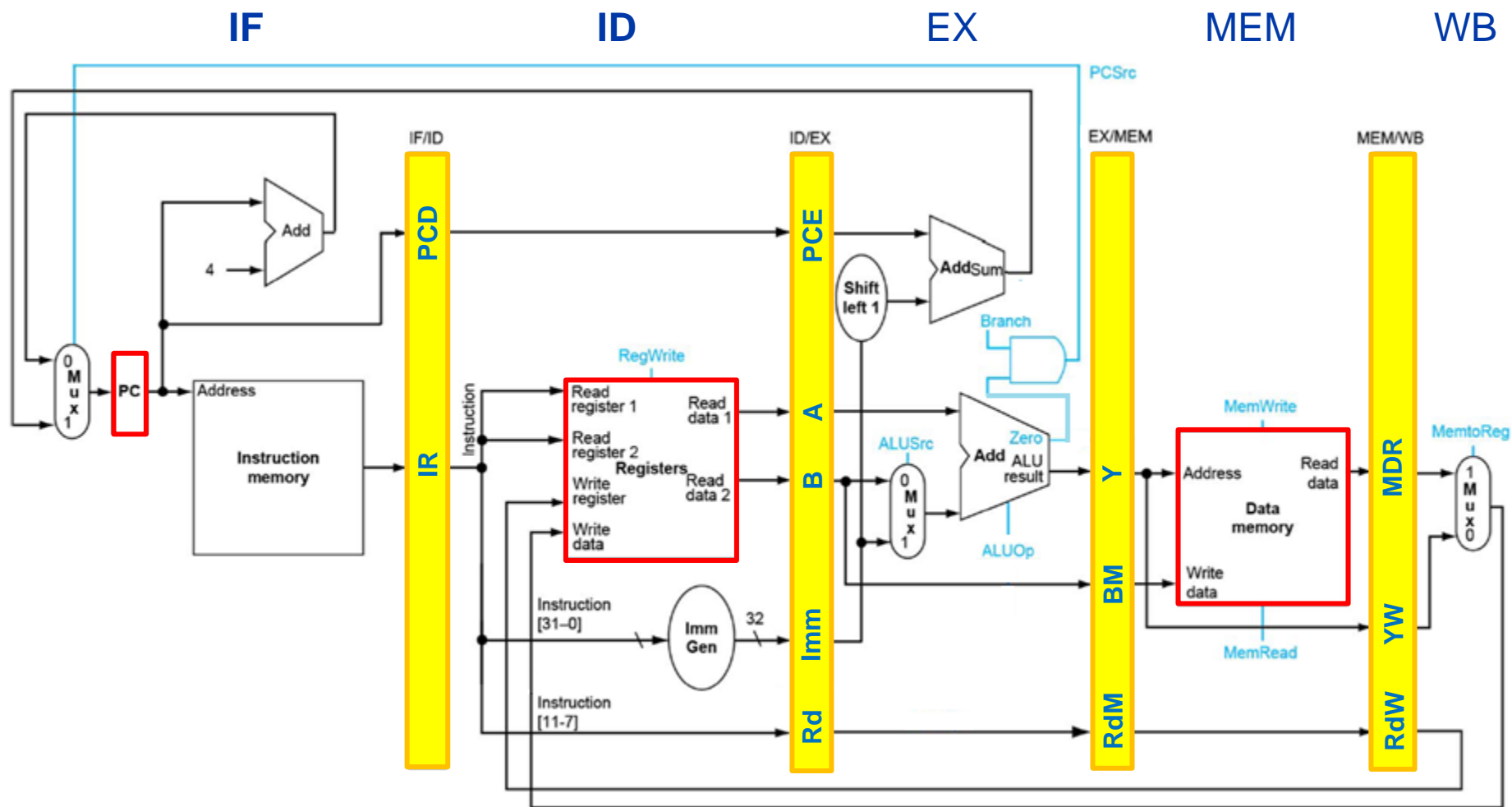
Multi-Cycle Datapath

单周期CPU数据通路

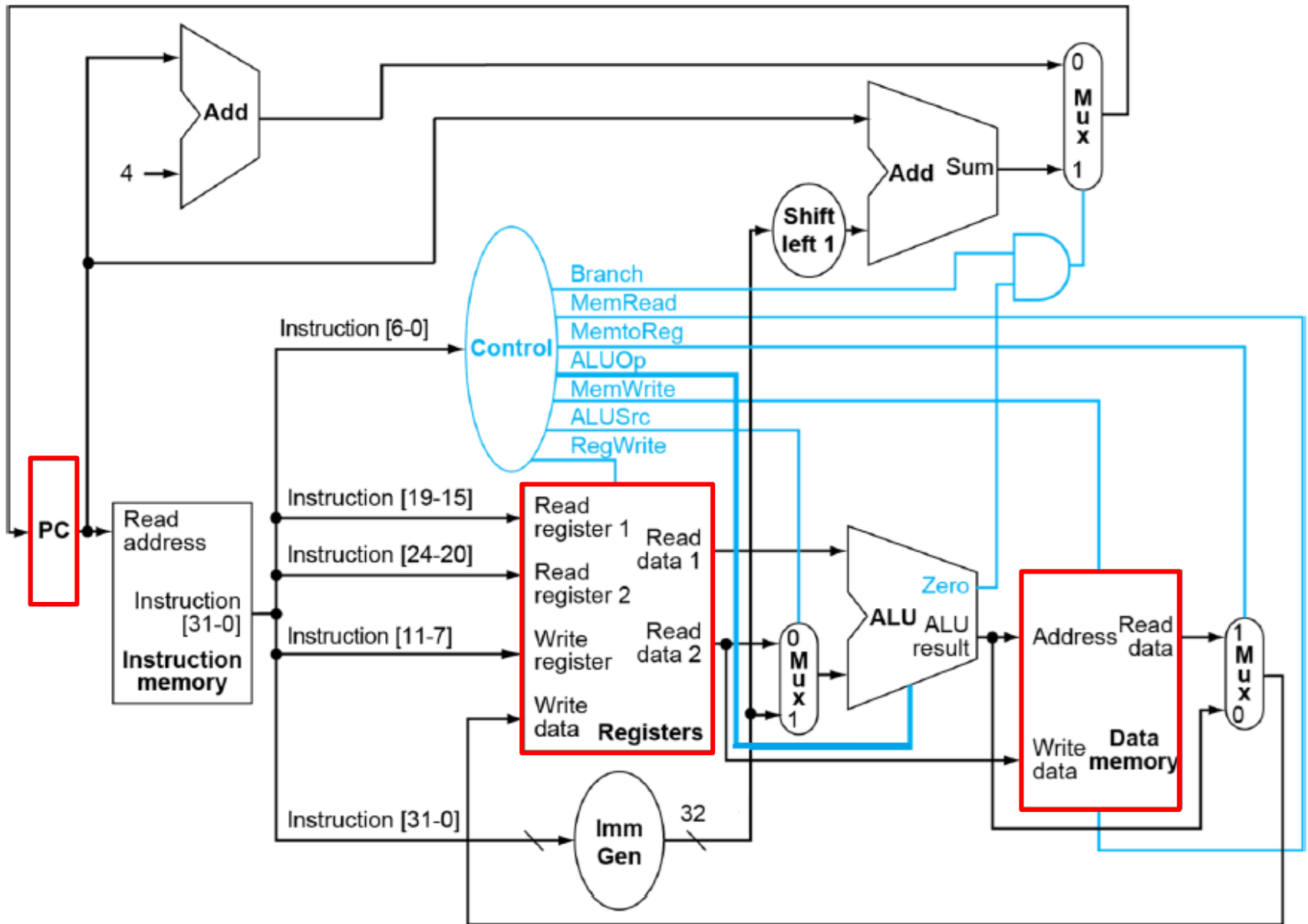


Pipeline Datapath

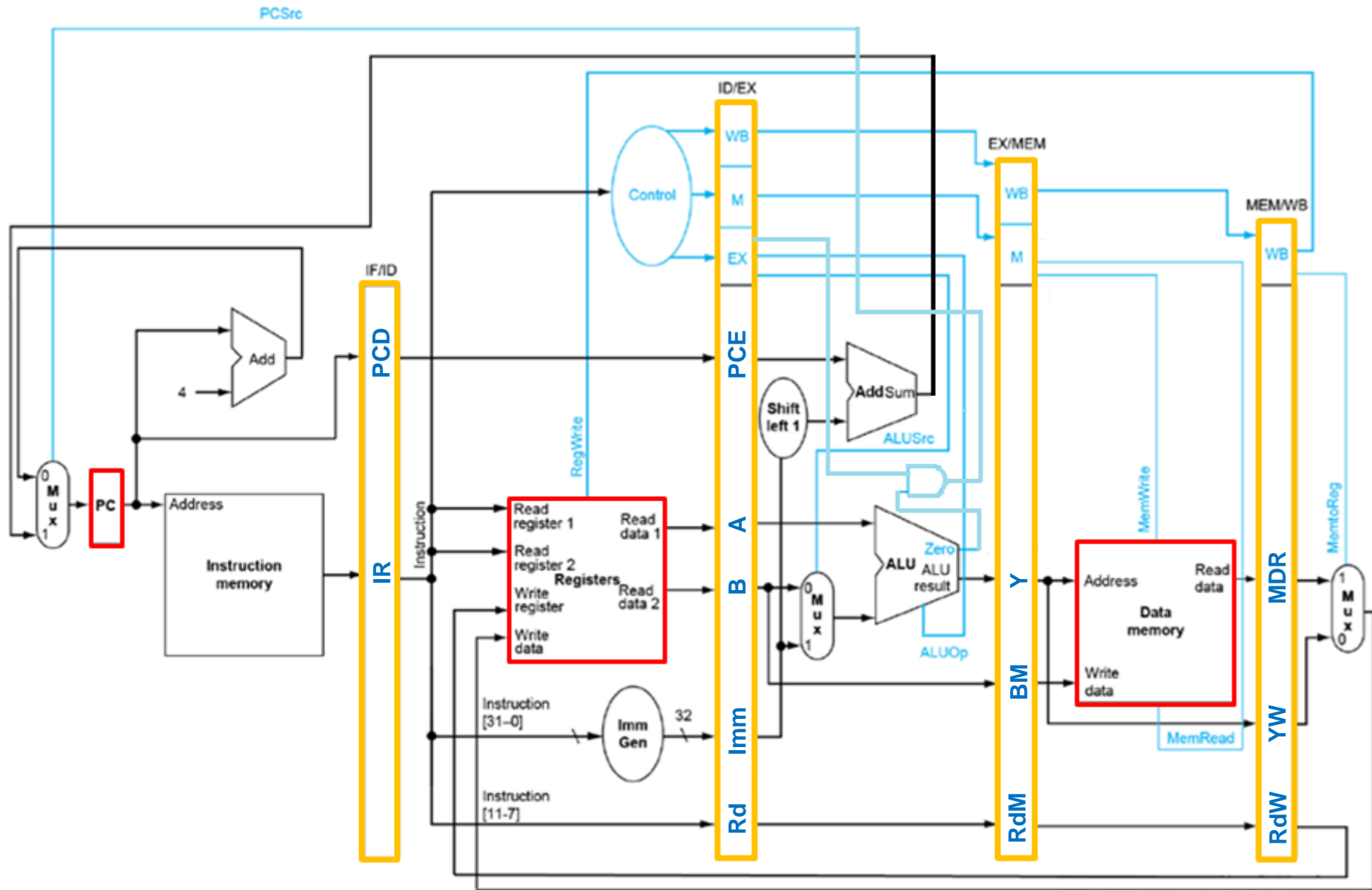
流水线CPU数据通路



单周期CPU数据通路+控制器



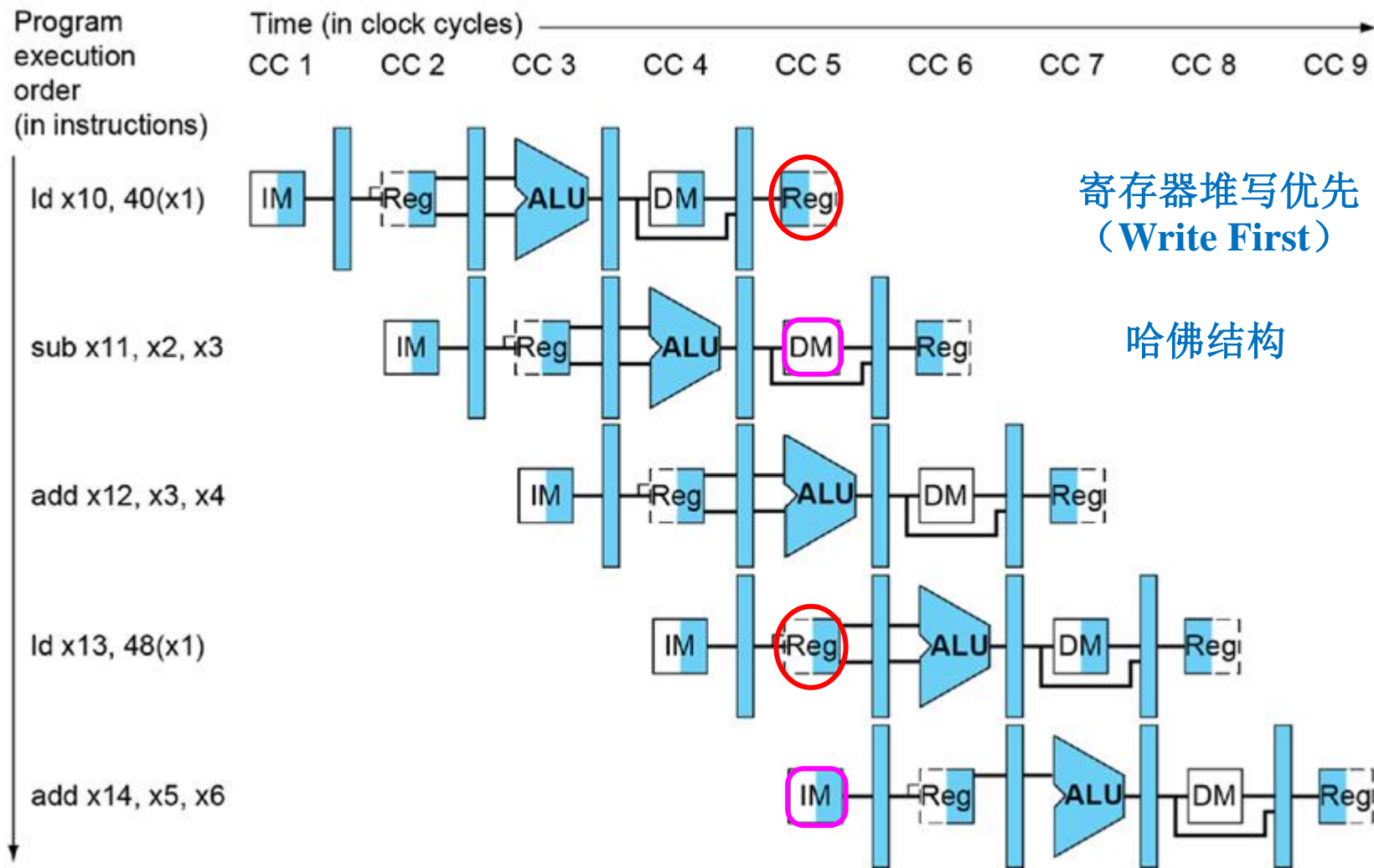
流水线CPU数据通路+控制器



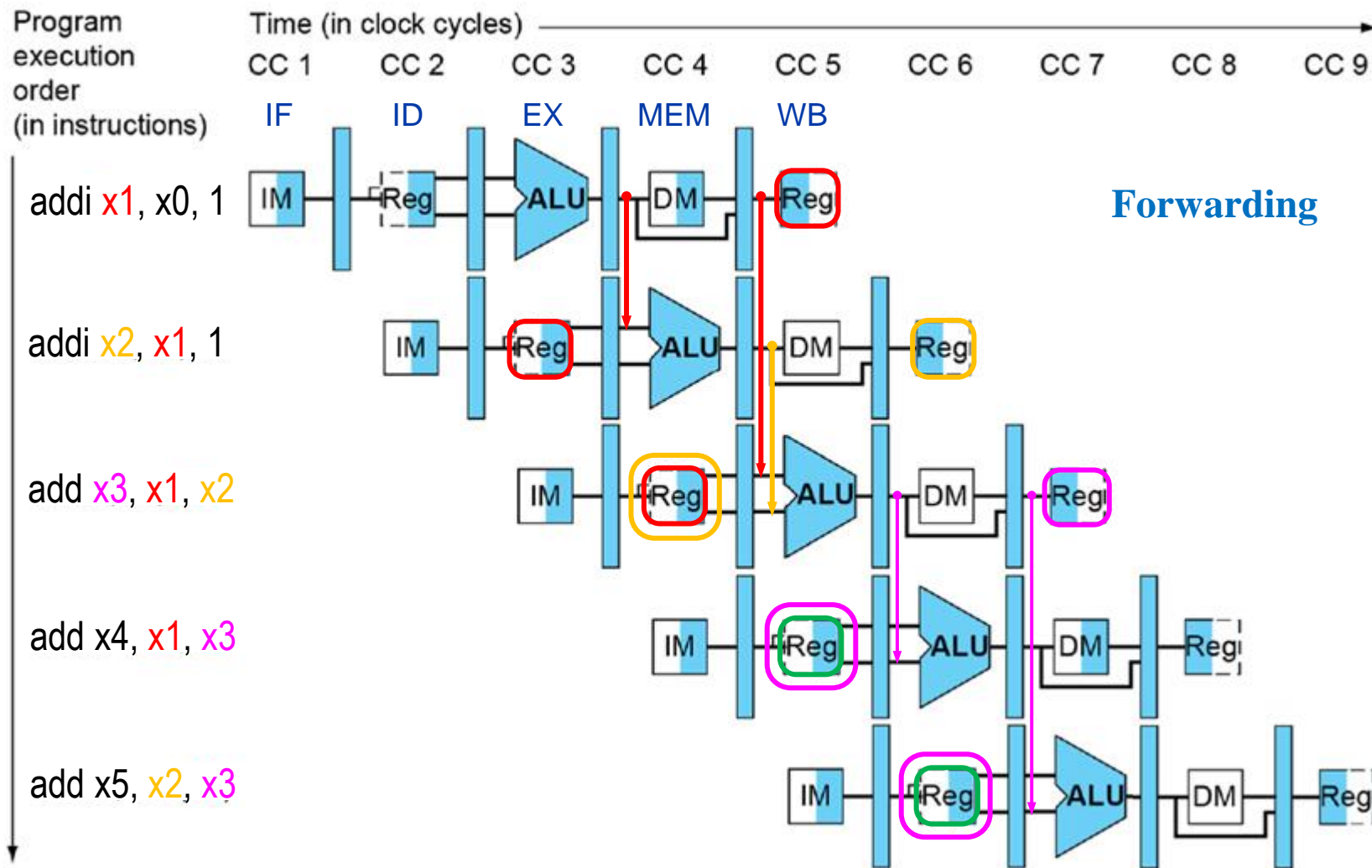
流水线相关及其处理

- **结构相关：当多条指令执行时竞争使用同一资源时**
 - 存储器相关处理：哈佛结构（指令和数据存储器分开）
 - 寄存器堆相关处理：同一寄存器读写时，写优先（Write First）
- **数据相关：当一条指令需要等待前面指令的执行结果时**
 - 数据定向（Forwarding）：将执行结果提前传递至之前流水段
 - 加载-使用相关（Load-use hazard）：阻止紧随Load已进入流水线的指令流动（Stall），向后续流水段插入空操作（Bubble）
- **控制相关：当遇到转移指令且不能继续顺序执行时**
 - 清除（Flush）紧随转移指令已进入流水线的指令
 - 从转移目标处取指令后执行

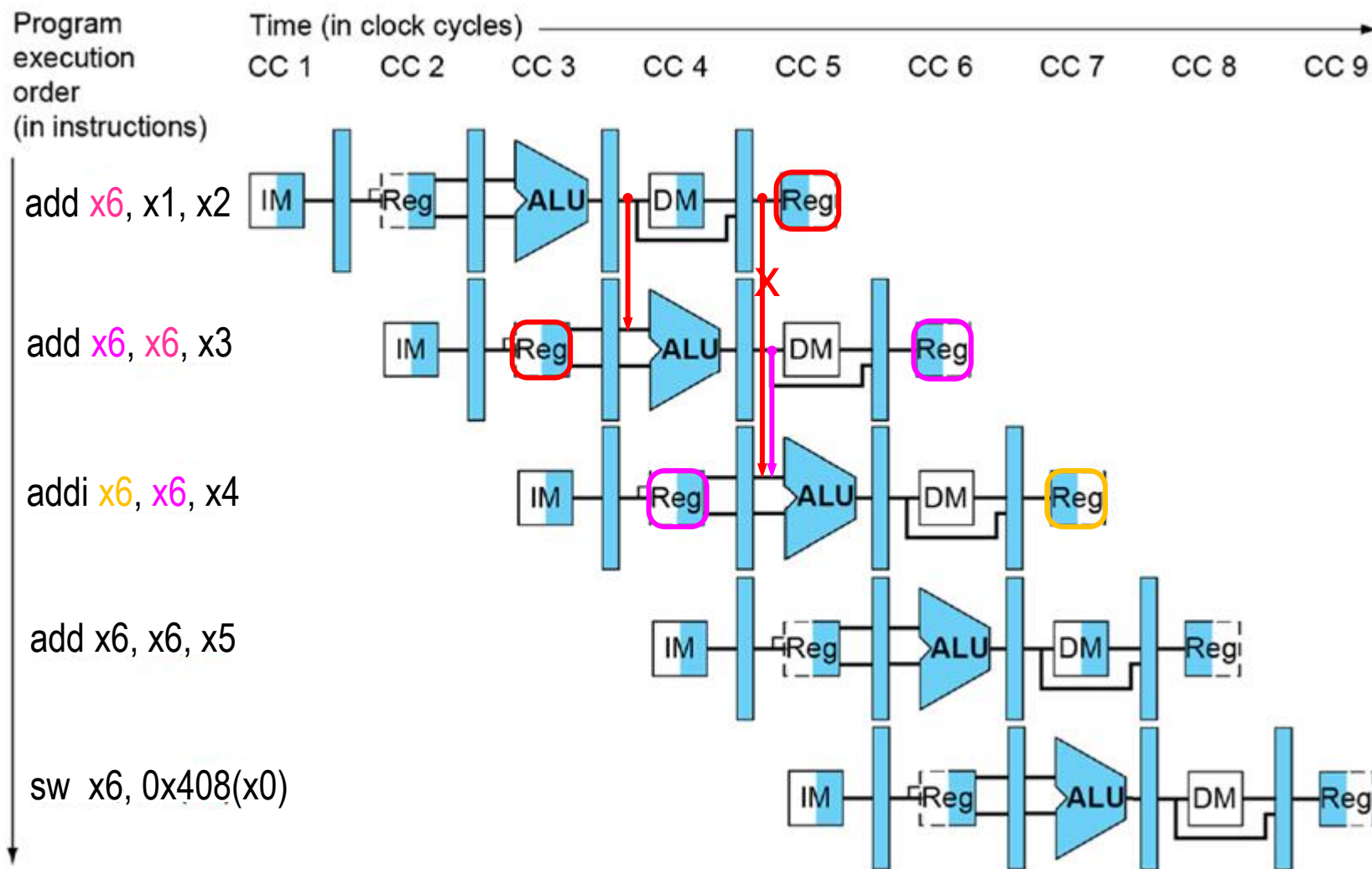
流水线相关：结构相关



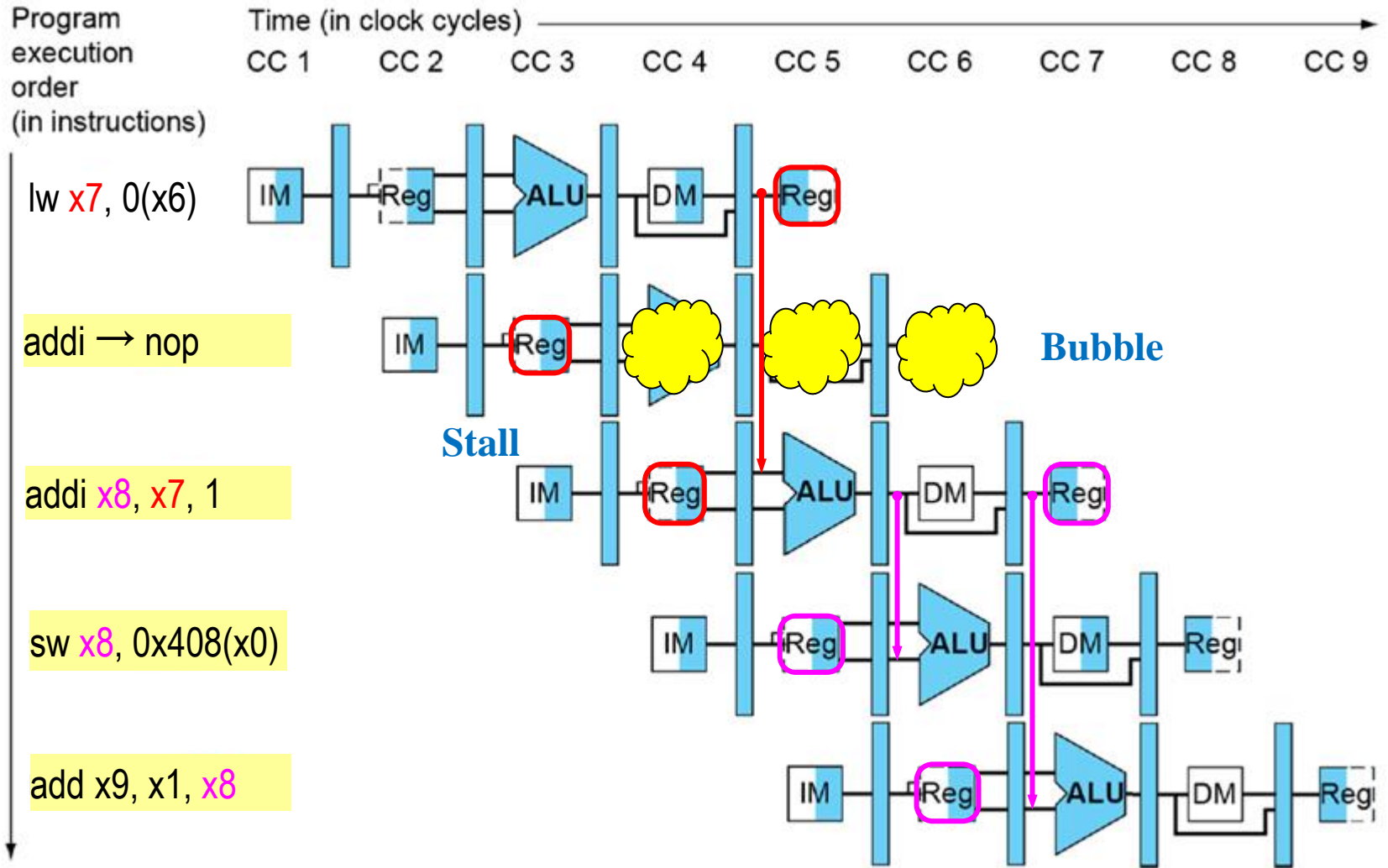
流水线相关：数据相关



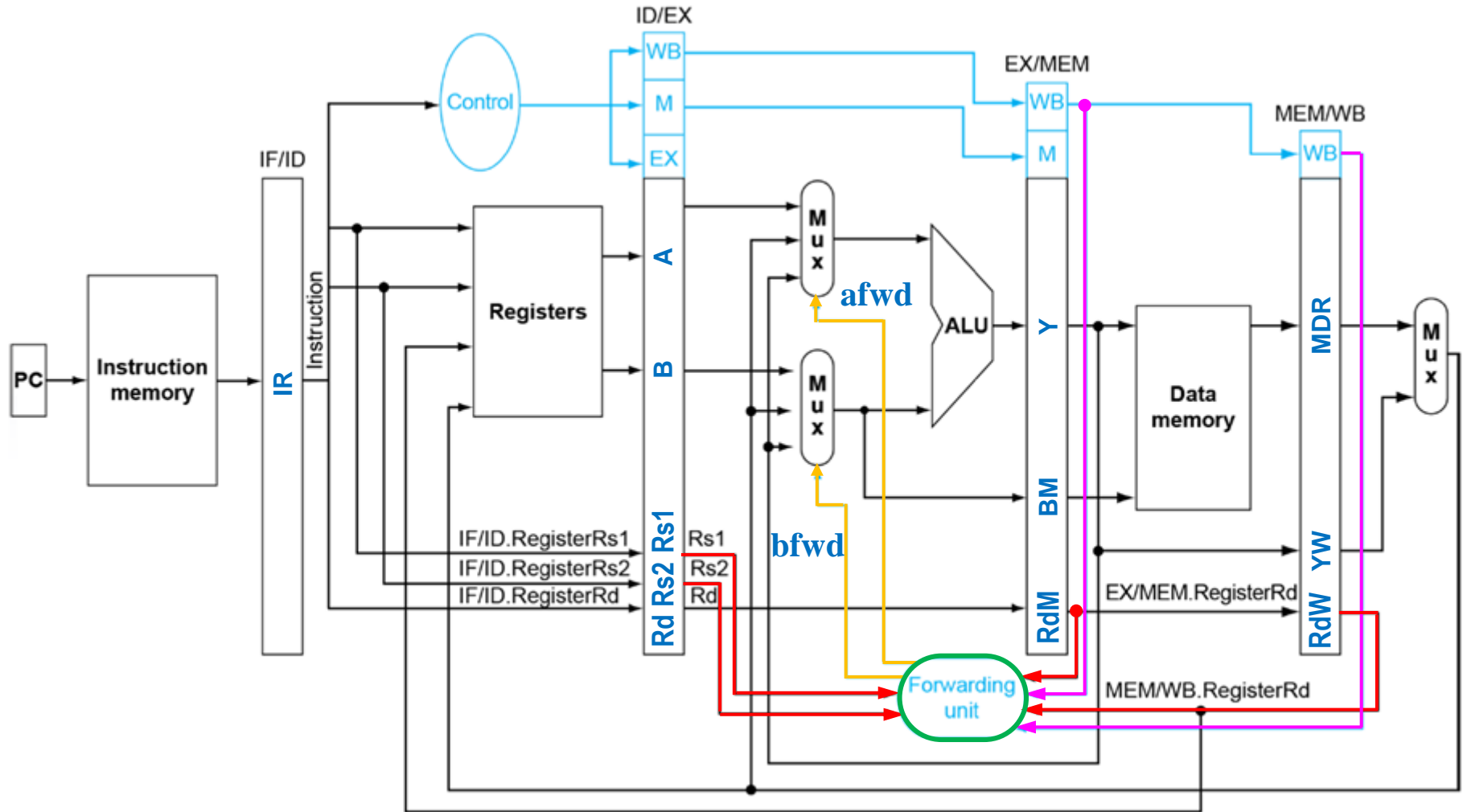
流水线相关：数据相关 (续1)



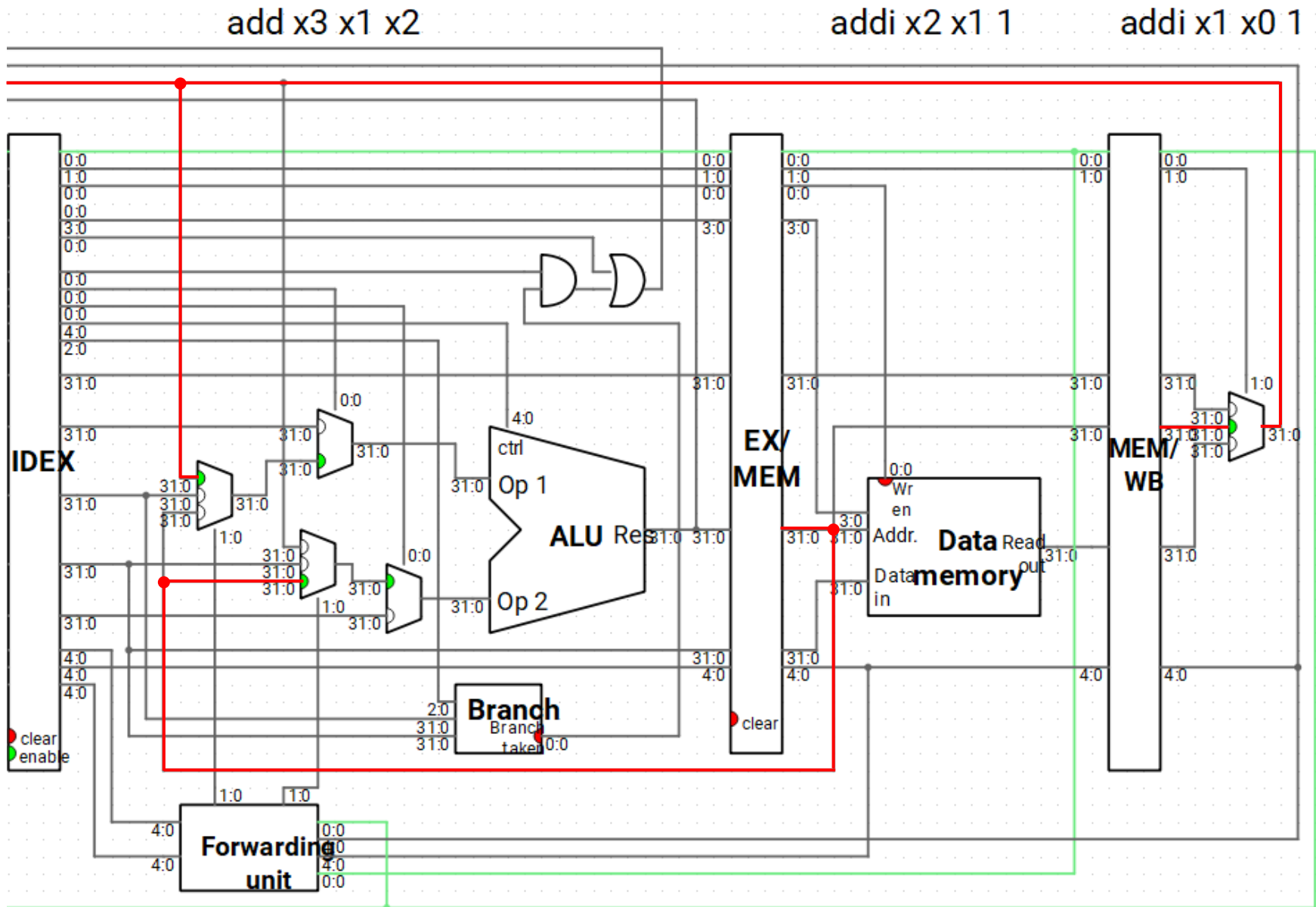
数据相关 (续2)



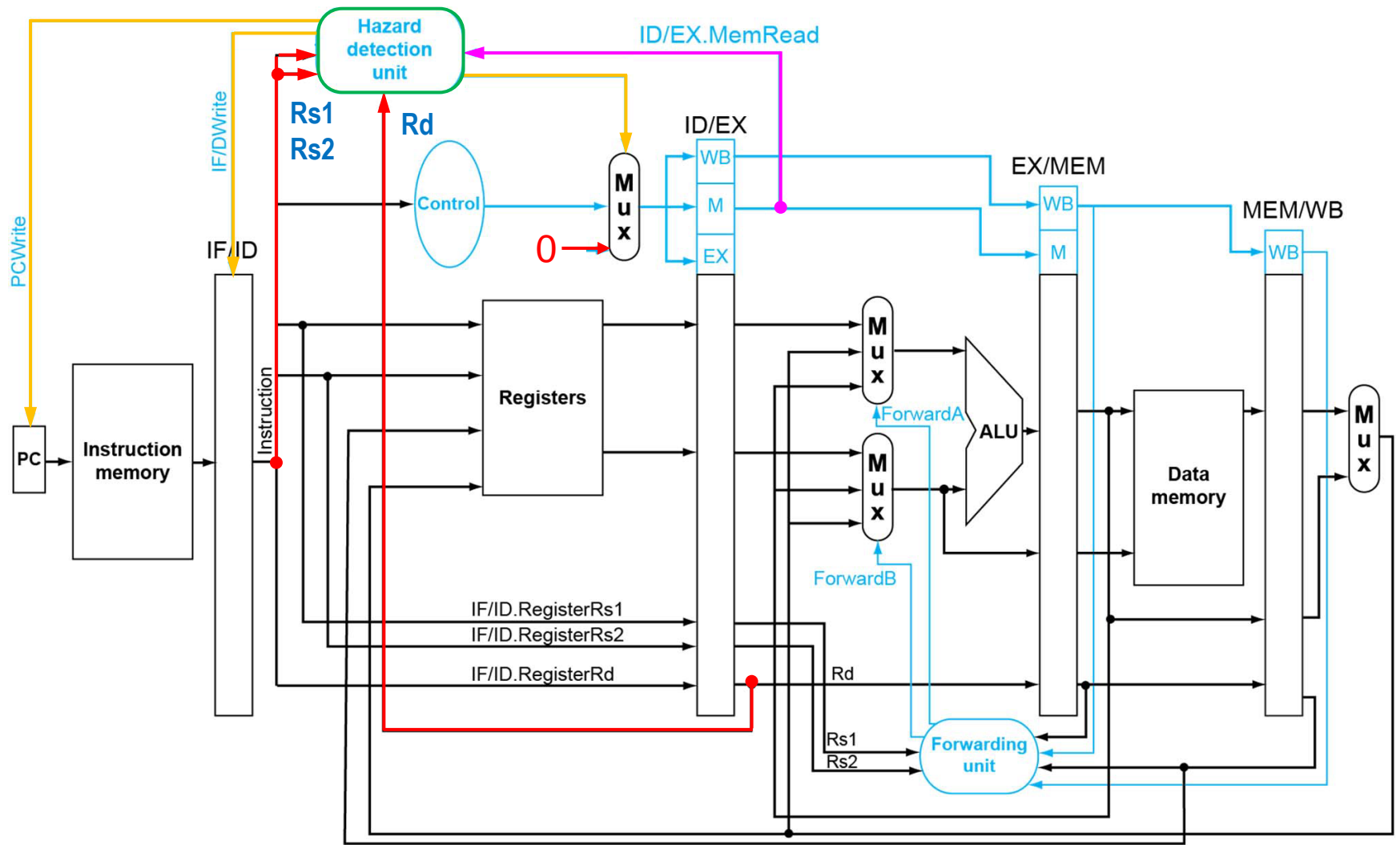
Forwarding



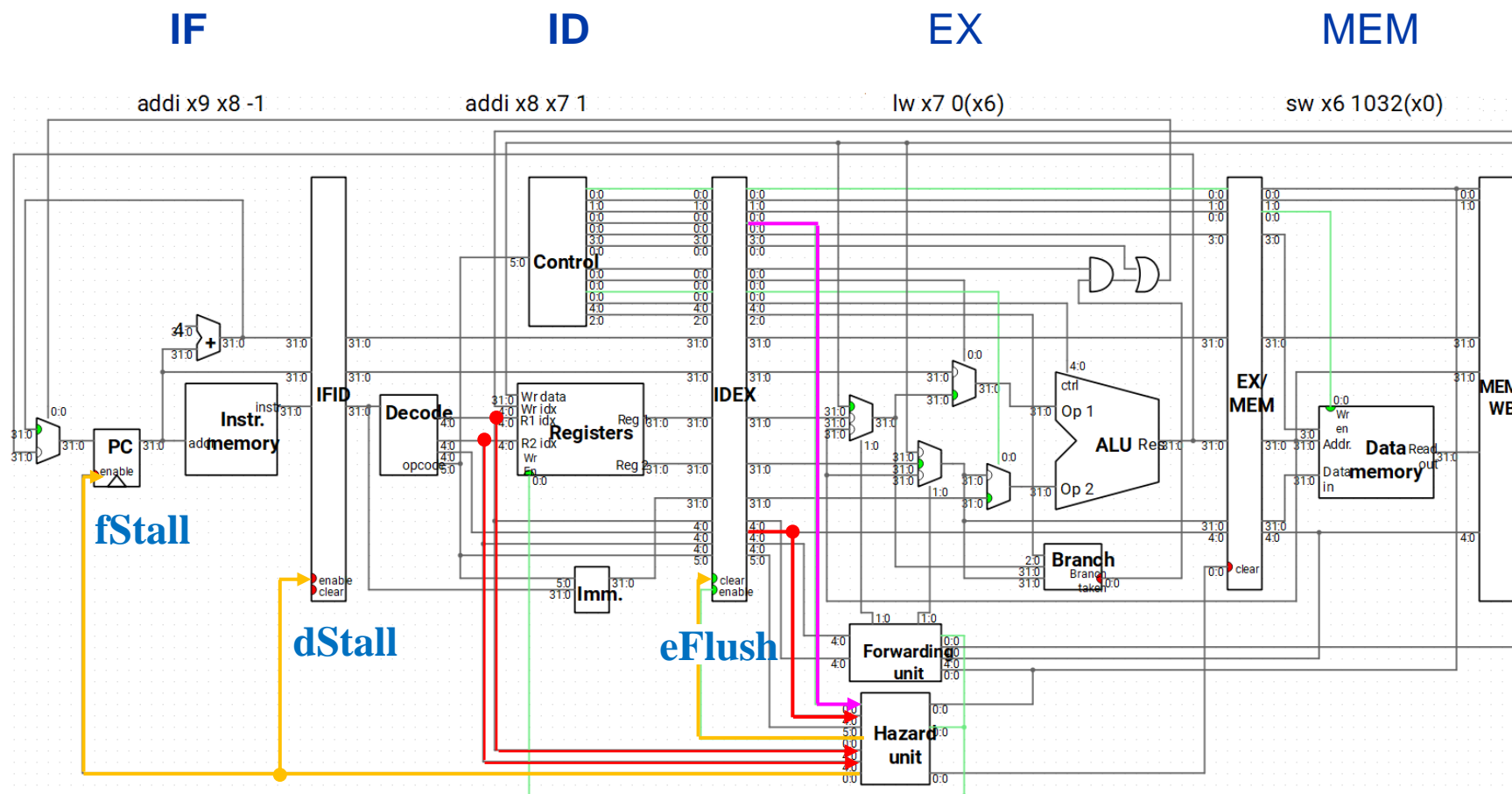
Forwarding: Ripes



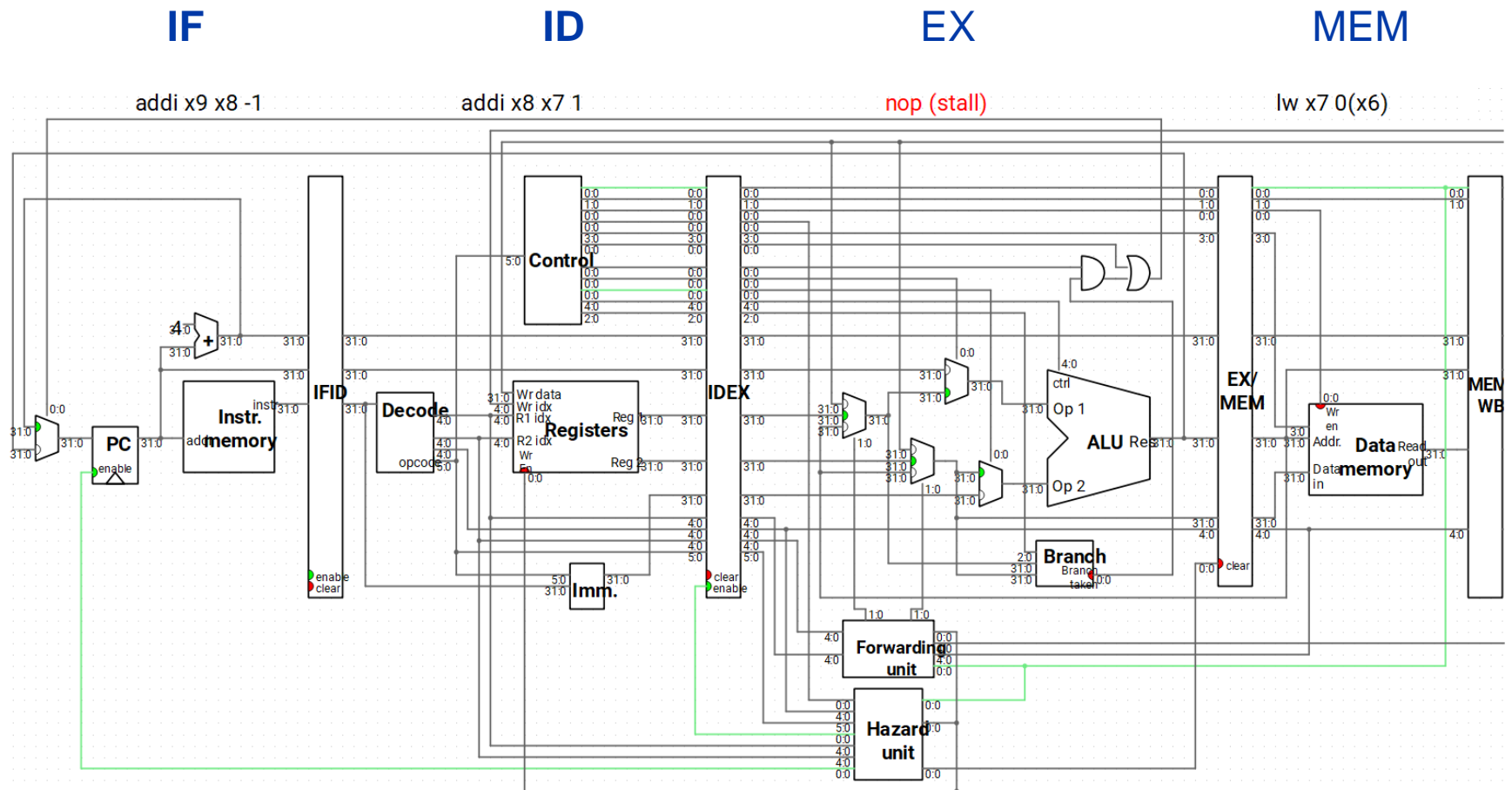
Load-Use Hazard



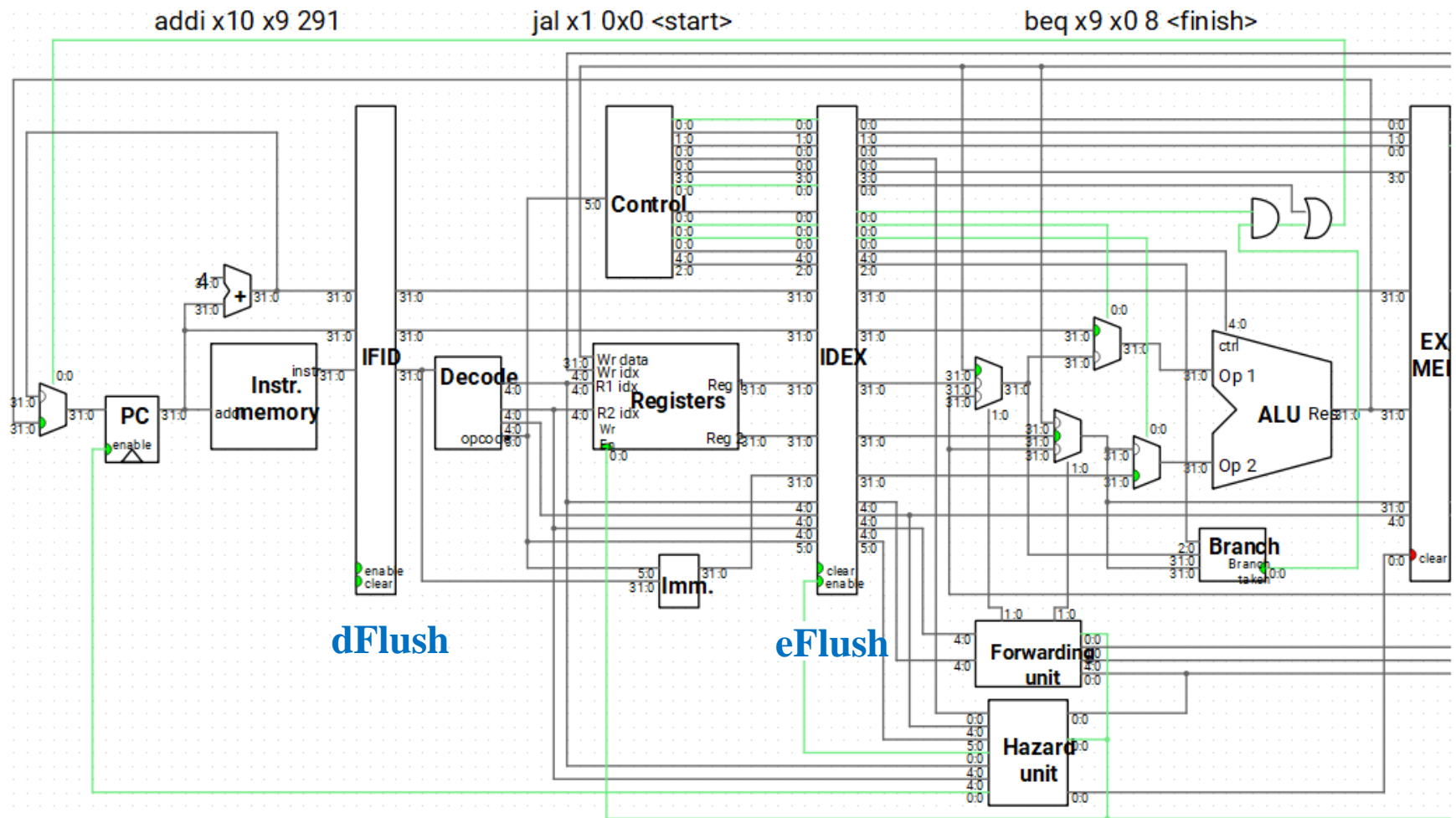
Load-Use Hazard: Ripes



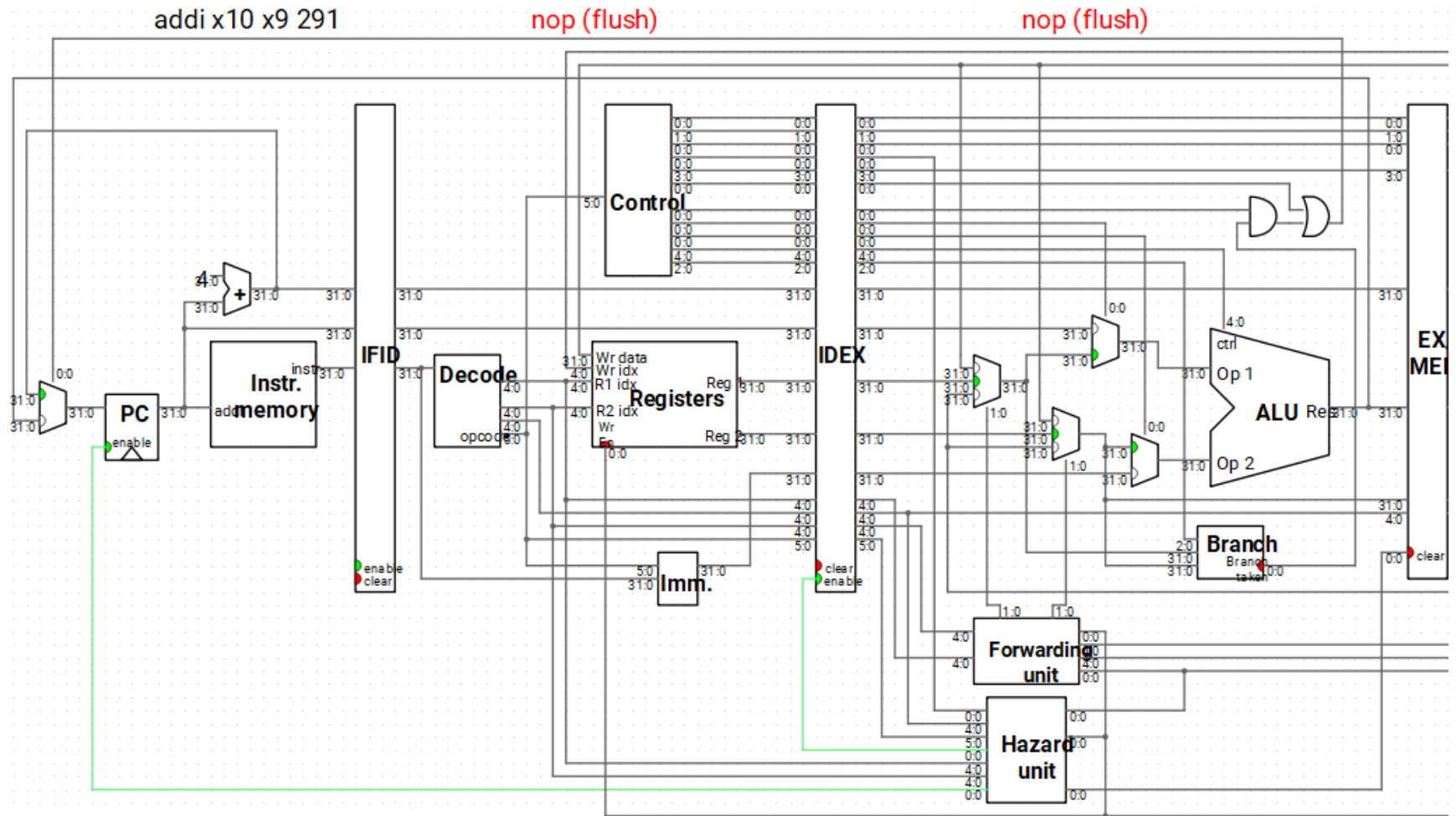
Load-Use Hazard: Ripes



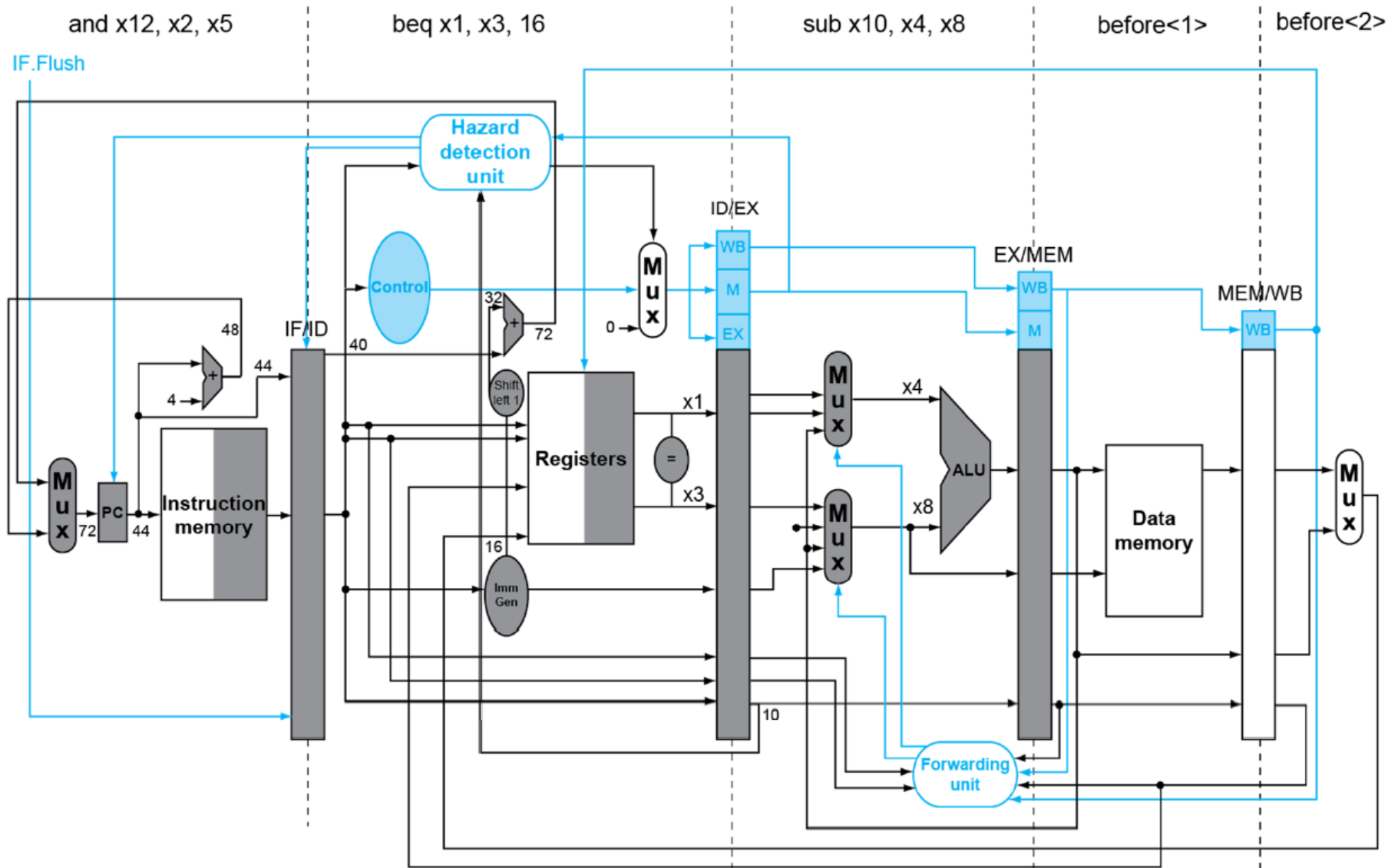
Branch Hazard: Ripes



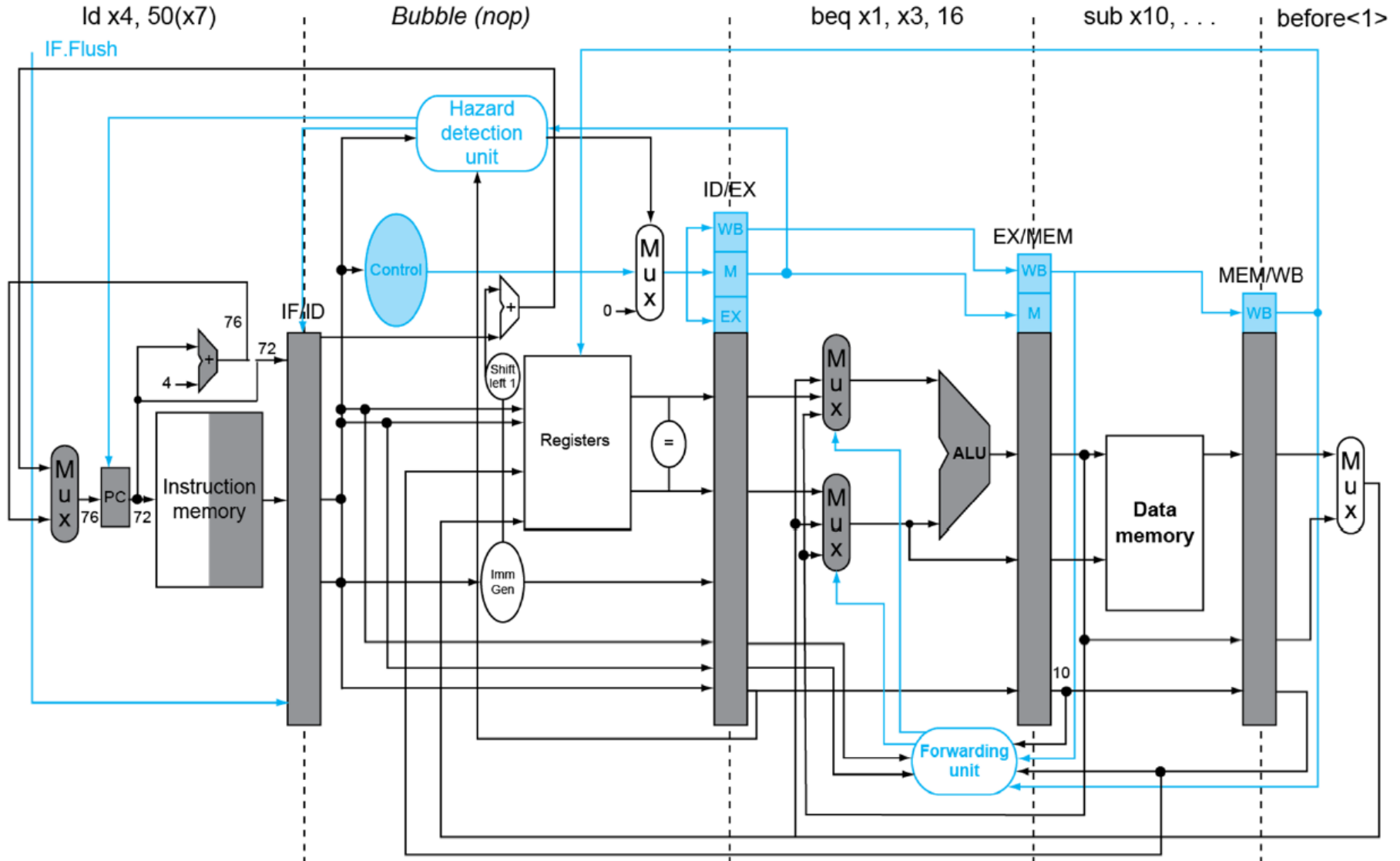
Branch Hazard: Ripes



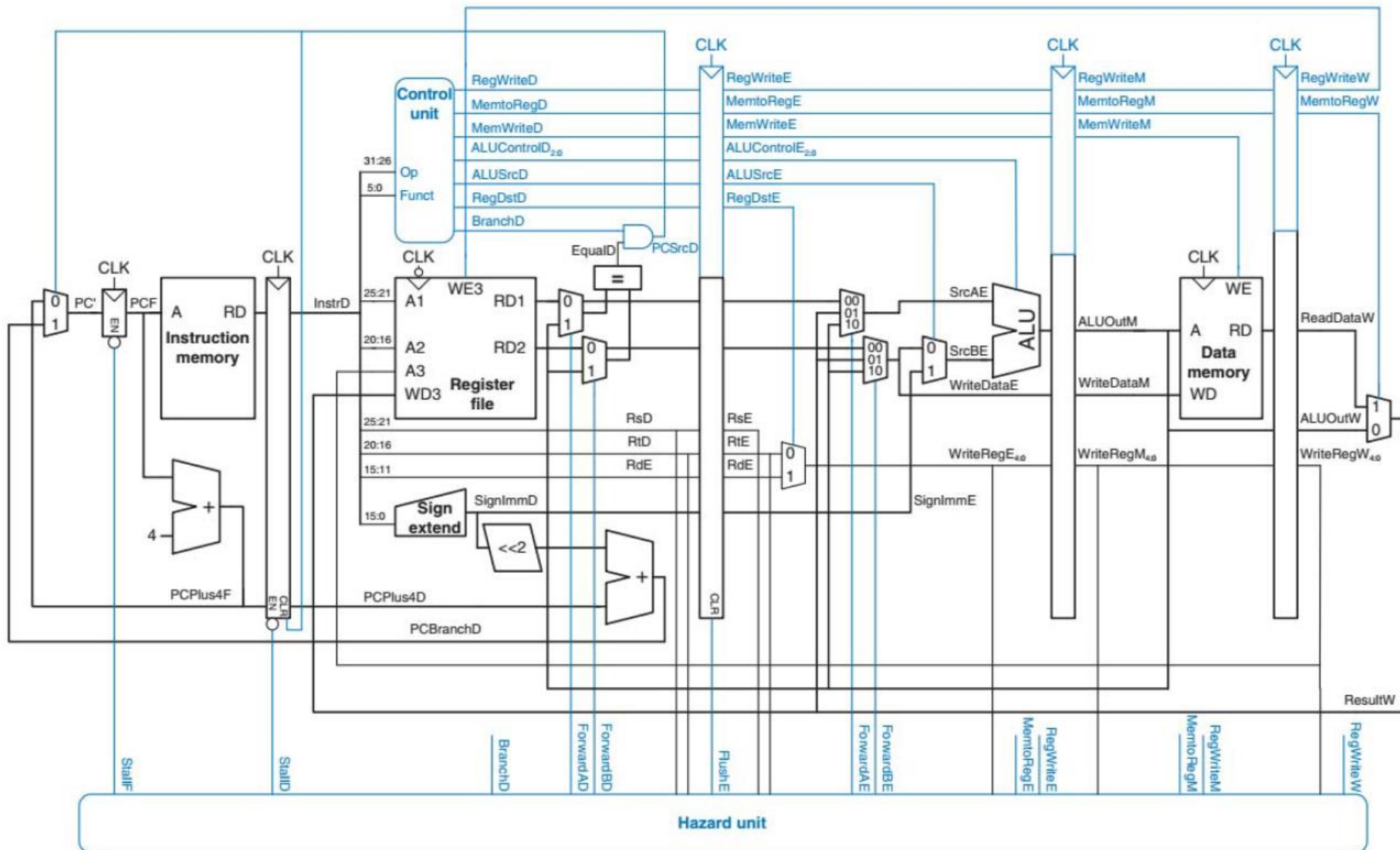
Branch Hazard



Branch Hazard

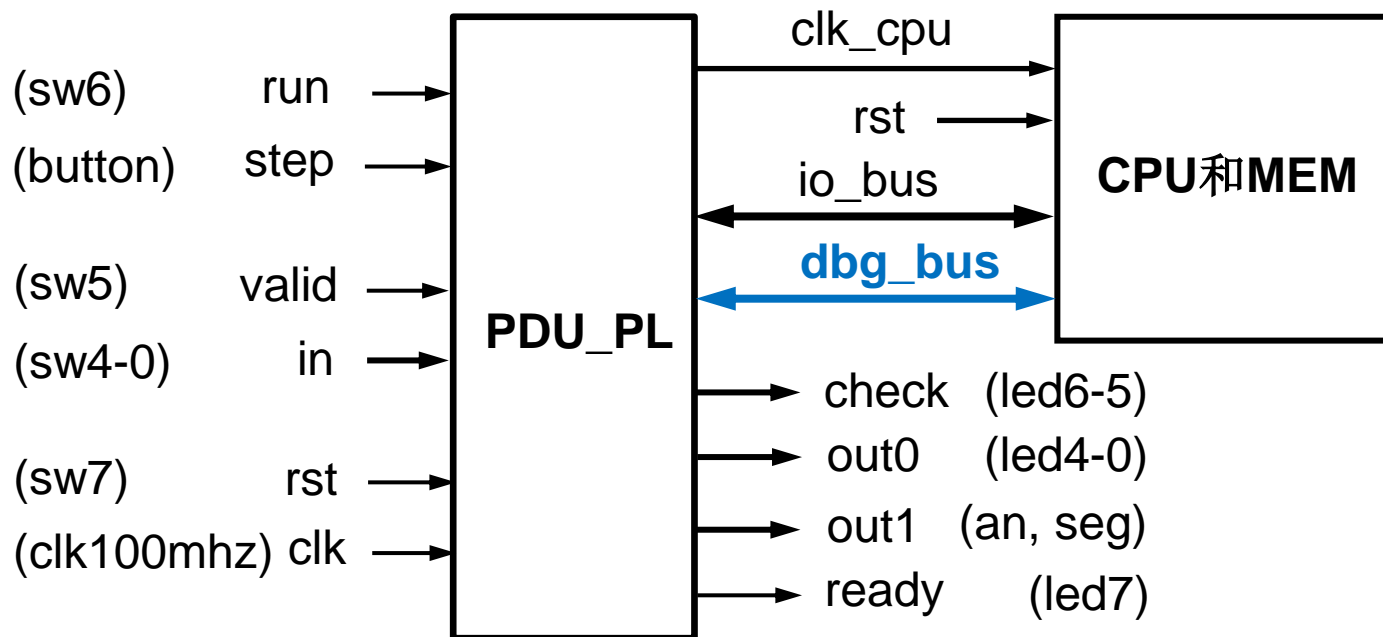


流水线CPU: MIPS



流水线处理器调试单元

- **PDU_PL (Processor Debug Unit for Pipe-Line)**
 - 控制CPU的运行方式: **run = 1** 连续运行, **0** 单步运行
 - 管理外设 (开关sw、指示灯led、数码管seg), 显示CPU运行结果和数据通路状态



IO_BUS信号

- CPU运行时访问外设的总线（地址、数据和控制）信号
 - io_addr: I/O外设的地址
 - io_din: CPU接收来自外设sw的输入数据
 - io_dout: CPU向外设led和seg输出的数据
 - io_we: CPU向外设led和seg输出时的使能信号

存储器映射外设的端口地址表

存储器地址	I/O_addr	输出端口名	输入端口名	外设
0x0000_0400	0	out0	-	led4-0
0x0000_0404	1	ready	-	led7
0x0000_0408	2	out1	-	an, seg
0x0000_040C	3	-	in	sw4-0
0x0000_0410	4	-	valid	sw5

DBG_BUS信号

- 调试时将寄存器堆和数据存储器内容，以及流水段寄存器内容导出显示
 - m_rf_addr: 存储器(MEM)或寄存器堆(RF)的调试读口地址
 - rf_data: 从RF读出的数据
 - m_data: 从MEM读出的数据
 - 流水段寄存器
 - PC/IF/ID: pcin, pc, pcd, ir
 - ID/EX: pce, a, b, imm, rd, ctrl
 - EX/MEM: y, bm, rdm, ctrlm
 - MEM/WB: yw, mdr, rdw, ctrlw

Ctrl:

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
fstall	dstall	dflush	eflush	0	0	a_fwd		0	0	b_fwd		0	rf_wr	wb_sel	

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	m_rd	m_wr	0	0	jal	br	0	0	a_sel	b_sel	alu_op			

CPU运行方式

- **run = 1: 连续运行**
 - PDU向CPU输出连续时钟信号clk_cpu
 - CPU通过I/O_BUS访问外设
 - 输入端口: in, valid
 - 输出端口: out0, out1, ready
- **run = 0: 单步运行（每次执行一条指令）**
 - 每按动step一次, PDU产生一个周期的clk_cpu
 - 执行外设输入指令前, 应先设置好valid或in后, 再按动step
 - 执行任何指令后, led和数码管(an, seg)显示当前程序运行结果
 - 随后可以通过改变valid和in查看寄存器堆、存储器和**流水段寄存器 (Pipe-Line Register, PLR)**的内容

外设使用说明表

- 利用vld和in选择需要查看的信息，chk指示out0和out1上显示信息的类型

sw						btn	led			seg	说明
7	6	5	4~2	1	0		7	6~5	4~0		
rst	run	vld	in			step	rdy	chk	out0	out1	
			ah_m	pre	next						
↑	-	-	-	-	-	-	1	00	0x1F	0x12..78	复位
x	1	vld	in			-	rdy	00	out0	out1	连续运行
	0	vld	in			↑	rdy	00	out0	out1	单步运行
		↑↓	-	↑↓	↑↓	x	rdy	01	a_rf	d_rf	查看寄存器堆
			ah_m					10	al_m	d_m	查看存储器
			-					11	a_plr	d_plr	查看流水段寄存器

查看寄存器堆和数据存储器

- 寄存器堆

- 利用vld (sw5)切换chk (led6~5) = 01
- 使用pre (sw1)和next (sw0)修改寄存器堆调试读端口地址a_rf (led4~0), out1(seg)显示读出的数据

- 数据存储器

- 利用vld (sw5)切换chk (led6~5) = 10
- 通过sw4~2设置数据存储器调试读端口高位地址ah_m (sw4~2)
- 使用pre (sw1)和next (sw0)修改数据存储器调试读端口低位地址al_m (led4~0), out1(seg)显示读出的数据

查看流水段寄存器

- 利用vld (sw5)切换chk (led6~5) = 11
- 使用pre (sw1)和next (sw0)分别修改流水段寄存器地址 ah_plr和al_plr, out1 (seg)显示对应寄存器数据(d_plr)

ah_plr (led4~3)	al_plr (led2~0)	d_plr (seg)	ah_plr (led4~3)	al_plr (led2~0)	d_plr (seg)
00 (PC/IF/ID)	x00	pc	10 (EX/MEM)	x00	y
	x01	pcd		x01	bm
	x10	ir		x10	rdm
	x11	pcin		x11	ctrlm
01 (ID/EX)	000	pce	11 (MEM/WB)	x00	yw
	001	a		x01	mdr
	010	b		x10	rdw
	011	imm		x11	ctrlw
	100	rd			
	101	ctrl			

CPU_PL模块接口

```
module cpu_pl (  
    input clk,  
    input rst,  
  
    //IO_BUS  
    output [7:0] io_addr,    //led和seg的地址  
    output [31:0] io_dout,   //输出led和seg的数据  
    output io_we,           //输出led和seg数据时的使能信号  
    input [31:0] io_din,     //来自sw的输入数据  
  
    //Debug_BUS  
    input [7:0] m_rf_addr,   //存储器(MEM)或寄存器堆(RF)的调试读口地址  
    output [31:0] rf_data,   //从RF读取的数据  
    output [31:0] m_data,    //从MEM读取的数据  
  
    //PC/IF/ID 流水段寄存器
```


CPU_PL模块接口(续)

```
output [31:0] pc,  
output [31:0] pcd,  
output [31:0] ir,  
output [31:0] pcin,
```

#ID/EX 流水段寄存器

```
output [31:0] pce,  
output [31:0] a,  
output [31:0] b,  
output [31:0] imm,  
output [4:0] rd,  
output [31:0] ctrl,
```

#EX/MEM 流水段寄存器

```
output [31:0] y,
```

```
output [31:0] bm,  
output [4:0] rdm,  
output [31:0] ctrlm,
```

#MEM/WB 流水段寄存器

```
output [31:0] yw,  
output [31:0] mdr,  
output [4:0] rdw,  
output [31:0] ctrlw  
);
```

PDU_PL模块接口

<pre>module pdu_pl (input clk, input rst, //选择CPU工作方式 input run, input step, output clk_cpu, //输入sw的端口 input valid, input [4:0] in, //输出led和seg的端口 output [1:0] check, //led6-5:查看类型 output [4:0] out0, //led4-0</pre>	<pre> output [2:0] an, //8个数码管 output [3:0] seg, output ready, //led7 //IO_BUS input [7:0] io_addr, input [31:0] io_dout, input io_we, output [31:0] io_din, //Debug_BUS output [7:0] m_rf_addr, input [31:0] rf_data, input [31:0] m_data, //PC/IF/ID 流水段寄存器</pre>
---	---

PDU_PL模块接口(续)

```
input [31:0] pc,  
input [31:0] pcd,  
input [31:0] ir,  
input [31:0] pcin,
```

#ID/EX 流水段寄存器

```
input [31:0] pce,  
input [31:0] a,  
input [31:0] b,  
input [31:0] imm,  
input [4:0] rd,  
input [31:0] ctrl,
```

#EX/MEM 流水段寄存器

```
input [31:0] y,
```

```
input [31:0] bm,  
input [4:0] rdm,  
input [31:0] ctrlm,
```

#MEM/WB 流水段寄存器

```
input [31:0] yw,  
input [31:0] mdr,  
input [4:0] rdw,  
input [31:0] ctrlw  
);
```

实验步骤

1. 修改Lab4寄存器堆模块，使其满足写优先(**Write First**), 即在对同一寄存器读写时，写数据可立即从读数据输出
2. 设计无数据和控制相关处理的流水线CPU
3. 设计仅有数据相关处理的流水线CPU
4. 设计完整的有数据和控制相关处理的流水线CPU
 - 对CPU进行功能仿真
 - 将CPU和PDU连接并下载至FPGA中测试

The End