

第八周作业

2. 考虑以下指令序列：

I1: ld a1,0(s1)

I2: mul a2,a0,a2

I3: add a1,a2,a2

I4: ld a2,0(s2)

I5: add a3,a1,a2

I6: sd a3,0(s3)

不必考虑内存地址的相关性，在下表中列出所有的数据依赖。

	I1	I2	I3	I4	I5	I6
I1	-					
I2		-				
I3	WAW	RAW	-			
I4		WAW	WAR	-		
I5	RAW	RAW	RAW	RAW	-	
I6					RAW	-

4. 流水线级数的适度加深一方面能够提高频率，但同时也会使流水线冲突的停顿代价变大，最终的性能变化是两者综合作用的结果。考虑两个处理器：处理器 A 有 1ns 时钟周期的 5 级流水线，平均每 5 条指令经历一周期停顿。处理器 B 有 0.6ns 时钟周期的 12 级流水线，平均每 8 条指令经历三周期停顿。

1) 处理器 B 相比处理器 A 的加速比是多少？

2) 若分支指令占所有指令类型的 20%，处理器 A 的错误预测代价为 2 周期，处理器 B 的错误预测代价为 5 周期。两处理器的错误预测率均为 5%。计算两处理器的 CPI。

解：(1) 每执行 40N 条指令：

$$\begin{aligned}\text{处理器 A: } T_1 &= T_{\text{stall}} + T_{\text{exe}} \\ &= 8NT_A + 40NT_A \\ &= 48NT_A\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{处理器 B: } T_2 &= T_{\text{stall}} + T_{\text{exe}} \\ &= 15NT_B + 40NT_B \\ &= 55NT_B\end{aligned}$$

$$\text{加速比 } S = \frac{T_1}{T_2} = \frac{48 \times 1}{55 \times 0.6} = 1.45$$

$$(2) \text{ 处理器 A: } CPI = 0.8 \times 1 + 0.2 \times 0.95 \times 1 \times 0.2 \times 0.05 \times 3 \\ = 1.02$$

$$\text{处理器 B: } CPI = 0.8 \times 1 + 0.2 \times 0.95 \times 1 + 0.2 \times 0.05 \times 6 \\ = 1.05$$

6. 考虑如下所示的代码片段，假设 a2 寄存器的初值为 0，a3 寄存器的初值为 100。回答以下问题：

Loop: ld a1,0(a2) ①
 addi a1,a1,1 ②
 sd a1,0(a2) ③
 addi a2,a2,4 ④
 sub a4,a3,a2 ⑤
 bnez a4,Loop ⑥

- 1) 列举代码中的数据相关，说明它们有可能导致什么类型的数据冲突（不考虑流水线级数）。
- 2) 考虑一个 5 级 RISC 流水线，该流水线不使用任何前馈硬件。假设 MEM 阶段均可在单个周期内完成，分支指令在 WB 阶段完成后取新指令。按照下表的格式补充表格，写出该代码段在一次循环中的完整执行时序，并计算执行完成所有循环共需要多少个时钟周期。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ld a1,0(a2)	IF	ID	EX	MEM	WB					
addi a1,a1,1		IF	ID	s	s	EX	MEM	WB		
...										

- (1) 指令②中 a1 与 指令①中 a1 发生写后读数据冲突。
 指令③中 a1 与 指令②中 a1 发生写后读数据冲突。
 指令⑤中 a2 与 指令④中 a2 发生写后读数据冲突。
 指令⑥中 a4 与 指令⑤中 a4 发生写后读数据冲突。

(2)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ld a1,0(a2)	IF	ID	EX	MEM	WB						
addi a1,a1,1		IF	ID	s	s	EX	MEM	WB			
sd a1,0(a2)			IF	s	s	ID	s	s	EX	MEM	WB

addi a2, a2, 4						IF	S	S	ID	EX	MEM
sub a4, a3, a2									IF	ID	S
bnez a4, loop										IF	S

	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
addi a2, a2, 4	WB										
sub a4, a3, a2	S	EX	MEM	WB							
bnez a4, loop	S	ID	S	S	EX	MEM	WB				

执行一次 loop 需 18 个周期。

该代码初始时 $a2 = 0$ ，每次循环 $a2 = a2 + 4$ ，当 $a2 == 100$ 时结束循环。

故 loop 执行 25 次。需要 $25 \times 18 = 450$ 个周期。

7. 仍考虑题 6 中的代码片段，假设 a2 寄存器的初值为 0，a3 寄存器的初值为 100。回答以下问题：

- 考虑一个 5 级 RISC 流水线，该流水线拥有完整的前馈硬件。假设 MEM 阶段均可在单个周期内完成，分支指令在 WB 阶段完成后取新指令。重新写出该代码段在一次循环中的完整执行时序，并计算执行完成所有循环共需要多少个时钟周期。
- 若在前馈硬件的基础上，该流水线存在一个工作于 IF 级的固定预测发生跳转且能记录跳转目标位置的分支预测器，此时执行完所有的循环需要的时钟周期变为多少？

(1) 由于指令① a1 的值在 MEM 阶段后才能取得，故②仍需停顿一周。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ld a1, 0(a2)	IF	ID	EX	MEM	WB						
addi a1, a1, 1		IF	ID	S	EX	MEM	WB				
sd a1, 0(a2)			IF	S	ID	EX	MEM	WB			

addi a2, a2, 4					IF	ID	EX	MEM	WB		
sub a4, a3, a2						IF	ID	EX	MEM	WB	
bnez a4, loop							IF	ID	EX	MEM	WB

执行一次 loop 需 11 个周期。

故 loop 执行 25 次. 需要 $25 \times 11 = 275$ 个周期.

2) 由于在 bnez 指令的 IF 级固定预测跳转, 则下一条指令可以在该指令的 ID 阶段进入到 IF 阶段.

故 loop 执行 25 次. 需要 $7 \times 25 + 4 = 179$ 个周期.

8. 仍考虑题 6 中的代码片段, 假设 a2 寄存器的初值为 0, a3 寄存器的初值为 100。现有一个 10 级的深流水线, 它将原来的 5 级 RISC 流水线的每一级拆分为两个阶段: IF1/IF2、ID1/ID2、EX1/EX2、MEM1/MEM2、WB1/WB2。前馈仅能将数据从两个阶段的第二阶段转发给需要它的第一阶段, 例如从 MEM2 前馈到 EX1。静态分支预测器固定预测发生跳转。回答以下问题:

- 1) 按照下表的格式补充表格, 写出该代码段在一次循环中的完整执行时序, 并计算执行完成所有循环共需要多少个时钟周期。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ld a1,0(a2)	IF1	IF2	ID1	ID2	EX1	EX2	M1	M2	WB1	WB2	
addi a1,a1,1		IF1	IF2	ID1	ID2	s	s	s	EX1	EX2	...

...											
-----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

- 2) 计算题 6-8 中各情况下处理器的 CPI。

(1)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ld a1,0(a2)	IF1	IF2	ID1	ID2	EX1	EX2	M1	M2	WB1	WB2	
addi a1,a1,1		IF1	IF2	ID1	ID2	S	S	S	EX1	EX2	M1
sd a1,0(a2)			IF1	IF2	ID1	S	S	S	ID2	S	EX1

addi a2,a2,4				IF1	IF2	S	S	S	ID1	S	ID2
sub a4,a3,a2					IF1	S	S	S	IF2	S	ID1
bnez a4,loop									IF1	S	IF2

	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
addi a1,a1,1	M2	WB1	WB2								
sd a1,0(a2)	EX2	M1	M2	WB1	WB2						

addi a2, a2, 4	EX1	EX2	M1	M2	WB1	WB2					
sub a4, a3, a2	ID2	S	EX1	EX2	M1	M2	WB1	WB2			
bnez a4, loop	ID1	S	ID2	S	EX1	EX2	M1	M2	WB1	WB2	

执行一次 loop 需 21 个周期。

由于固定预测跳转，则下一条指令可以在 bnez 指令的 IF2 阶段进入到 IF1 阶段。

故 loop 执行 25 次，需要 $12 \times 25 + 9 = 309$ 个周期。

(2) 执行 6N 条指令

$$6 \text{ 题: } CPI = \frac{18 \times N}{6N} = 3$$

$$7 \text{ 题: } ① CPI = \frac{11N}{6N} = 1.83$$

$$② CPI = \frac{7N+4}{6N} \approx 1.17 \quad (N \rightarrow \infty)$$

$$8 \text{ 题: } CPI = \frac{12N+9}{6N} \approx 2 \quad (N \rightarrow \infty)$$

19. 基础的 5 级 RISC 流水线能够单周期完成 ID 阶段的前提是寄存器堆拥有至少 2 个读端口以同时读出 2 个源操作数。假设某个系统仅能使用具有单个读端口的寄存器堆，这将导致流水线面临结构冲突。为此，拥有两个源操作数寄存器的指令的 ID 阶段需要被拆分为两周期完成，单个源操作数寄存器指令则不受影响。

1) 标记下表中的指令是否需要两周期完成 ID 阶段。

	add	addi	ld	sd	bne	jal	jalr
是否需要 2 周期?	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✗

2) 考虑以下指令序列：

```

Loop:  lw    a4, 0(a3)
        addw  a1, a4, a1
        addiw a2, a2, -1
        addiw a3, a3, 4
        bnez  a2, Loop

```

若 a1 初值为 0，a2 初值为 N，流水线无前馈，则在上述单个读端口寄存器堆系统中，循环单次迭代需要的周期数是多少？画出执行时序表。

- 3) 为流水线引入前馈，如果两个源操作数寄存器中的任意一个可以通过前馈而不是读寄存器堆得到，则即使寄存器堆只有一个读端口，ID 阶段仍然可以单周期完成。此时上述代码段单次迭代需要的周期数是多少？画出执行时序表。

(2) 循环单次迭代需要12个周期。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
lw a4, 0(a3)	IF	ID	EX	MEM	WB							
addw a1, a4, a1		IF	ID1	ID2	S	EX	MEM	WB				
addiw a2, a2, 1			IF	S	S	ID	EX	MEM	WB			
addiw a3, a3, 4						IF	ID	EX	MEM	WB		
bnez a2, loop							IF	ID	S	EX	MEM	WB

(3) 若引入前馈，循环单次迭代需要10个周期。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
lw a4, 0(a3)	IF	ID	EX	MEM	WB					
addw a1, a4, a1		IF	ID	S	EX	MEM	WB			
addiw a2, a2, 1			IF	S	ID	EX	MEM	WB		
addiw a3, a3, 4					IF	ID	EX	MEM	WB	
bnez a2, loop						IF	ID	EX	MEM	WB