

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			WAR		WAW	-

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？	是	是	否	否	是	是	是

2) 考虑以下指令序列：

Loop: 1. lw a4,0(a3) $a_4 = a_3[0]$
 2. addw a1,a3,a1 $a_1 = a_3 + a_1$
 3. addiw a2,a2,-1 $a_2 = a_2 - 1$
 4. addiw a3,a3,4 $a_3 = a_3 + 4$
 5. bnez a2,Loop $a_2 \neq 0$, 10

若 a_1 初值为 0, a_2 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。

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14

2)

lw a4,0(a3)	IF	ID	EX	Mem	WB									IF
addw a1,a3,a1		IF	ID ₁	ID ₂	S	EX	MEM	WB						
addiw a2,a2,-1			IF	ID ₁	S	ID ₂	EX	MEM	WB					
addiw a3,a3,4				IF	S	ID ₁	ID ₂	EX	MEM	WB				
bnez a2,Loop					S	IF	ID	S	S	EX	MEM	WB		

周期数 $11N+1$

3)

lw a4,0(a3)	IF	ID	EX	Mem	WB									
addw a1,a3,a1		IF	ID	S	EX	MEM	WB							
addiw a2,a2,-1			IF	S	ID ₁	ID ₂	EX	MEM	WB					
addiw a3,a3,4				S	IF	ID ₁	ID ₂	EX	MEM	WB				
bnez a2,Loop					S	IF	S	ID	EX	M	N			

周期数 $10N+1$

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	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
ld a1,0(a2)	IF1	IF2	ID1	ID2	EX1	EX2	M1	M2	WB1	WB2											IF1 IF2
addi a1,a1,1		IF1	IF2	ID1	ID2	s	s	s	EX1	EX2	M1	M2	W1	W2							
sd a1,0(a2)			IF1	IF2	ID1	S	S	S	ID2	S	EX1	EX2	M1	M2	W1	W2					
addi a2,a2,4				IF1	IF2	S	S	S	ID1	S	ID2	E1	E2	M1	M2	W1	W2				
sub a3,a1,a2					IF1	S	S	S	IF2	S	S	ID1	ID2	E1	E2	M1	M2	W1	W2		
loop						S	S	S	IF1	S	S	IF2	ID1	ID2	S	E1	E2	M1	M2	W1	W2

时钟周期数为 $24 \times 15 + 21 = 381$

...

- 2) 计算题 6-8 中各情况下处理器的 CPI。

$$\text{CPI}_6 = \frac{426}{6 \times 25} = 2.84$$

$$\text{CPI}_7 = \frac{179}{6 \times 25} = 1.193$$

$$\text{CPI}_8 = \frac{381}{6 \times 25} = 2.54$$

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)
        addi a1,a1,1
        sd a1,0(a2)
        addi a2,a2,4
        sub a4,a3,a2
        bneq a4,Loop
```

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	EX	MEM	WB			
sd a1,0(a2)			IF	S	ID	EX	MEM	WB		

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：

- 1) 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。
- 2) 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 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

ld a1,0(a2)	IF	ID	EX	MEM	WB					IF
addi a1,a1,1		IF	ID	S	EX	MEM	WB			
sd a1,0(a2)			IF	S	ID	EX	MEM	WB		
addi a2,a2,4				S	IF	ID	EX	MEM	WB	
sub a4,a3,a2					S	IF	ID	EX	MEM	WB
bneq a4,Loop						S	IF	ID	EX	MEM

时钟周期： $25 \times 10 + 1 = 251$

IF ID EX MEM WB

2) 当 a4 + 5 时，预测器保留在第 8 个周期即可进行下次取指
最后一次循环内失败需要 11 个周期

周期数： $24 \times 7 + 11 = 179$

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。

$$1) CPI_{la} = \frac{5+5-1+1}{5} = 2, CPI_{lb} = \frac{8+8-1+3}{8} = \frac{9}{4} = 2.25$$

$$\therefore S = \frac{CPI_{la} \cdot T_a}{CPI_{lb} \cdot T_b} = \frac{2 \times 1}{\frac{9}{4} \times \frac{3}{5}} = \frac{40}{27} = \frac{23}{18}$$

2) 设共有 N 条指令,

$$\text{对 A 处理器: } CPI_{la}' = CPI_{la} \times 0.8 + 0.2(0.95 CPI_{la} + 0.05 \times 1.2 CPI_{la}) \\ = (0.8 + 0.19 + 0.012) CPI_{la} = 2.004$$

$$B: CPI_{lb}' = CPI_{lb} \times 0.8 + 0.2(0.95 CPI_{lb} + 0.05 \times \frac{23}{18} CPI_{lb}) \\ = (0.8 + 0.19 + 0.01278) CPI_{lb} = 2.256$$

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: ⑨ ld a1,0(a2)
      ⑩ addi a1,a1,1
      ⑪ sd a1,0(a2)
      ⑫ addi a2,a2,4
      ⑬ sub a4,a3,a2
      ⑭ bne a4,Loop
  
```

1) ab RAW
 ac RAW, WAR
 bc RAW
 de RAW
 ef RAW

- 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	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ld a1,0(a2)	IF	ID	EX	MEM	WB													IF
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			S	S	ID	S	S	ID	EX	MEM	WB							
sub a4,a3,a2			S	S	S	S	S	ID	S	S	EX	MEM	WB					
bne a4,Loop			S	S	S	S	S	ID	S	S	ID	S	S	EX	MEM	WB		

时钟周期为 $25 \times 17 + 1 = 426$ 个时钟周期