

### 3. 流水线

#### 课后作业答案

##### C. 1

Loop:  
LD R1,0(R2) ;load R1 from address 0+R2  
DADDI R1,R1,#1 ;R1=R1+1  
SD R1,0(R2) ;store R1 at address 0+R2  
DADDI R2,R2,#4 ;R2=R2+4  
DSUB R4,R3,R2 ;R4=R3-R2  
BNEZ R4,Loop ;branch to Loop if R4!=0

题目中代码的含义是将一个长度为 99 的整型数组（每个整型长度为 4B）每个元素增加 1。

(a) 代码中存在的数据依赖有：

寄存器	源指令	目的指令	数据依赖类型
R1	LD	DADDI	RAW
R1	DADDI	SD	RAW
R2	LD	DADDI	WAR
R2	SD	DADDI	WAR
R2	DADDI	DSUB	RAW
R4	DSUB	BNEZ	RAW

(b) 五段流水，没有定向技术（注：分支目标计算并没有提前到 ID 阶段，下同），没有分支预测技术的时序图：

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	...
										0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
LD R1, 0(R2)	F	D	X	M	W															
DADDI R1, R1, #1		F	s	s	D	X	M	W												
SD 0(R2), R1					F	s	s	D	X	M	W									
DADDI R2, R2, #4								F	D	X	M	W								
DSUB R4, R3, R2									F	s	s	D	X	M	W					

[illegible]

迭代了 99 次，总的执行周期为： $98 \times 16 + 18 = 1586$

(c) 五段流水, 采用定向技术, 分之预测失败的时序图:

[illegible]

总共迭代 98 次，前 98 次分支成功，最后一次分支失败，总的执行的时钟周期数为： $98 \times 9 + 12 = 894$

(d) 五段流水, 采用定向技术, 分之预测成功时序图:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	...
										0	1	2	3	

LD R1, 0(R2)	F	D	X	M	W									
DADDI R1, R1, #1		F	D	s	X	M	W							
SD 0(R2) , R1			F	s	D	X	M	W						
DADDI R2, R2, #4					F	D	X	M	W					
DSUB R4, R3, R2						F	D	X	M	W				
BNEZ R4, Loop							F	D	s	X	M	W		
LD R1, 0(R2)								F	s	D	X	M	W	
...														

总共迭代 98 次，前 98 次分支成功，最后一次分支失败，总的执行的时钟周期数为： $98 \times 8 + 12 = 796$

(e) 10 段流水（将 5 段流水细分），采用定向技术，分支预测成功时序图：

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	..
LD R1 , 0(R2 )	F1	F2	D1	D2	X1	X2	M1	M2	W1	W2												
DA DD I R1 , R1 , #1		F1	F2	D1	D2	s	s	s	X1	X2	M1	M2	W1	W2								
SD 0(R2 ) , R1			F1	F2	D1	s	s	s	D2	X1	X2	M1	M2	W1	W2							
DA DD I R2 , R2 , #4				F1	F2	s	s	s	D1	D2	X1	X2	M1	M2	W1	W2						

DS UB R4 , R3 , R2					F1	s	s	s	F2	D1	D2	s	X1	X2	M1	M2	W1	W2				
BN EZ R4 , Lo op									F1	F2	D1	s	D2	s	X1	X2	M1	M2	W1	W2		
LD R1 , O( R2 )										F1	F2	s	D1	s	D2	X1	X2	M1	M2	W1	W2	
.. .																						

总共迭代 98 次，前 98 次分支成功，最后一次分支失败，总的执行的时钟周期数为：98\*11 + 20 = 1098

(f) 五段流水时钟周期为：0.8 ns + 0.1 ns = 0.9 ns

十段流水时钟周期为：0.4 ns + 0.1 ns = 0.5 ns

(g) 五段流水 CPI = 796 / (99\*6) = 1.34；十段流水 CPI = 1098 / (99\*6) = 1.85

五段流水平均指令执行时间：1.34\*0.9 = 1.21；十段流水平均指令执行时间：1.85\*0.5 = 0.92

## C.2

(a) 对于四段流水线，假设四段分别标记为 S1、S2、S3、S4，那么如果无分支冲突则平均 CPI 为 1。

若有分支冲突，分三种情况：

- 无条件分支：

Instruction	Clock Cycle						
	1	2	3	4	5	6	7
Branch Inst.	S1	S2	S3	S4			
i+1		S1	S1	S2	S3	S4	
i+2				S1	S2	S3	S4
i+3					S1	S2	S3

每次无条件分支会带来 1 个 stall（红色标记）

- 分支成功：

Instruction	Clock Cycle						
	1	2	3	4	5	6	7
Branch Inst.	S1	S2	S3	S4			
i+1		S1	stall	S1	S2	S3	S4
i+2					S1	S2	S3
i+3						S1	S2

每次分支成功会带来 2 个 stall（红色标记）

- 分支失败：

Instruction	Clock Cycle						
	1	2	3	4	5	6	7
Branch Inst.	S1	S2	S3	S4			
i+1		S1	stall	S2	S3	S4	
i+2				S1	S2	S3	S4
i+3					S1	S2	S3

每次分支失败会带来 1 个 stall (红色标记)

那么若有分支冲突则平均 CPI 为:  $1 + (1*1\%) + (2*15\%*60\%) + (1*15\%*40\%) = 1.24$

那么, 若无任何分支冲突, 则加速比为 1.24。

(b) 同 (a) 的分析, 对于 15 段流水线, 无条件分支会带来 4 个stall, 条件分支成功带来 9 个 stall, 条件分支失败带来 8 个stall, 那么加速比为:  $1 + (4*1\%) + (9*9\%) + (8*6\%) = 2.33$

### C.3

(a) 时钟周期选择最长的流水线段的时间为准, 所以时钟周期时间为:  $2ns+0.1ns = 2.1ns$

(b) 每 4 条指令就有一个 stall, 那么  $CPI = 1 + 1/4 = 1.25$

(c) 根据公式:  $CPU\ Time = Inst. * CPI * CT$ , 设程序的指令条数为 I, 可得:

pipelined machine CPU Time:  $I * 1.25 * 2.1$

single-cycle machine CPU Time:  $I * 1 * 7$

加速比为:  $I * 1 * 7 / (I * 1.25 * 2.1) = 2.67$

(d) 流水线分为无穷段, 那么对于 CPI 为 1, 时钟周期为 0.1, 加速比为:  $(I*1*7) / (I*1*0.1) = 70$

### C.4

将分支指令的分支目标 PC 值计算提前由 EX 段提前到 ID 阶段, 仍然有可能导致数据冲突。

### C.7

5 段流水: 时钟周期 1 ns, 每 5 条指令有 1 个 stall, 分支错误的惩罚是 2 个时钟周期

12段流水: 时钟周期 0.6 ns, 每 8 条指令有 3 个 stall, 分支错误的惩罚是 5 个时钟周期

(a) 仅考虑数据冲突: 加速比为  $(I*6/5*1) / (I*11/8*0.6) = 1.45$

(b) 同时考虑到控制相关:

- $CPI_{5-stage} = 6/5 + 20\%*5*2 = 1.22$
- $CPI_{12-stage} = 11/8 + 20\%*5*5 = 1.425$
- $Speedup = (I*1.22*1) / (I*1.425*0.6) = 1.17$