

第四次作业

2020 - 12 - 12

3.11 有一条静态多功能流水线由5段组成(如图3.45所示), 加法用1、3、4、5段, 乘法用1、2、5段, 第3段的时间为 $2\Delta t$, 其余各段的时间均为 Δt , 而且流水线的输出可以直接返回输入端或暂存于相应的流水线寄存器中。现在要在该流水线上计算 $\prod_{i=1}^4 (A_i + B_i)$, 画出其时空图, 并计算其吞吐率、加速比和效率。

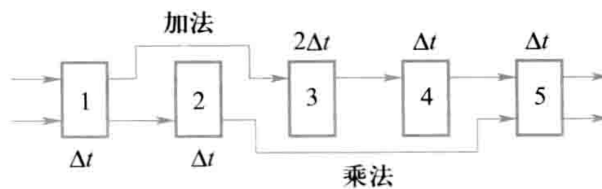
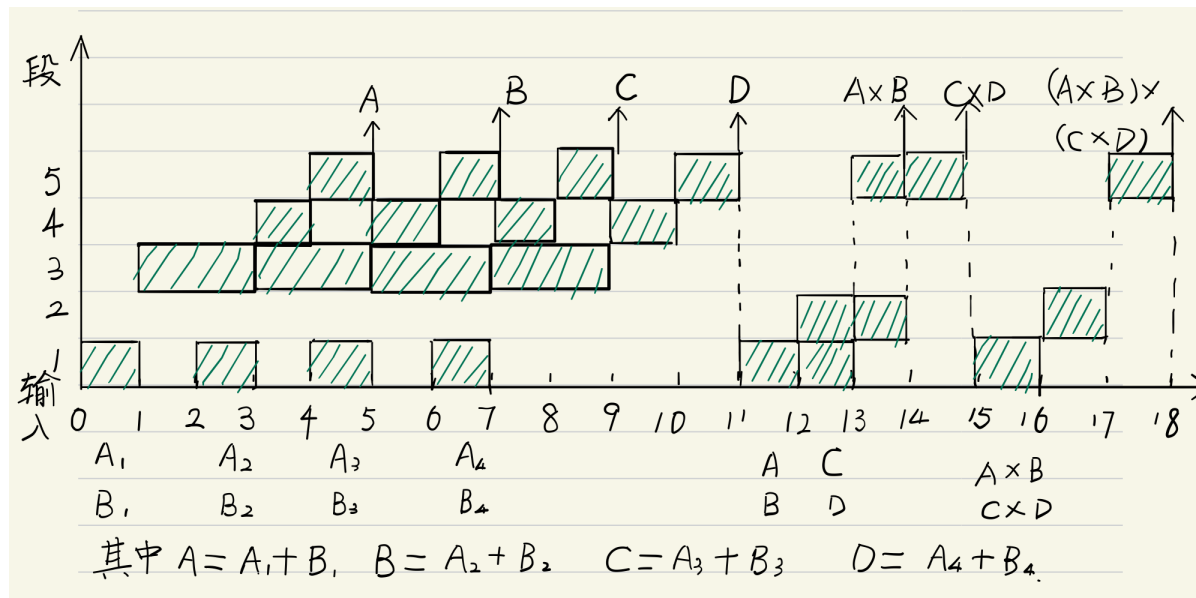


图 3.45 5 段静态多功能流水线

答: 首先计算 $A_1 + B_1$ 、 $A_2 + B_2$ 、 $A_3 + B_3$ 、 $A_4 + B_4$, 然后计算 $(A_1 + B_1) \times (A_2 + B_2)$ 和 $(A_3 + B_3) \times (A_4 + B_4)$, 最后计算总结果。

完成该计算的时空图如下, 阴影部分表示该段在工作。



在18个 Δt 时间中, 给出了7个结果, 所以吞吐率为

$$TP = \frac{7}{18\Delta t}$$

如果不用流水线，产生上述7个结果需要 $4 \times 5\Delta t + 3 \times 3\Delta t = 29\Delta t$ 时间，所以加速比为

$$S = \frac{29\Delta t}{18\Delta t} = 1.61$$

流水线的效率可由阴影区的面积和5段总时空区的面积比求得

$$E = \frac{4 \times 5 + 3 \times 3}{5 \times 18} = 0.322$$

3.13 在MIPS流水线上运行如下代码序列。

```

1  LOOP:
2      LW      R1, 0(R2)    // 从存储器中读取一个字的数据到寄存器中
3      DADDIU  R1, R1, #1   // 把一个寄存器的内容加上一个无符号的立即数
4      SW      R1, 0(R2)    // 把一个字的数据从寄存器存储到存储器中
5      DADDIU  R2, R2, #4   // 把一个寄存器的内容加上一个无符号的立即数
6      DSUB    R4, R3, R2   //
7      BNEZ    R4, LOOP     // 两个寄存器的内容相减

```

其中，R3的初值是R2 + 396。假设：在整个代码序列的运行过程中，所有的存储器访问都是命中的，并且在一个时钟周期中对同一个寄存器的读操作和写操作可以通过寄存器组“定向”。

(1)在 没有任何其他定向(或旁路)硬件 的支持下，画出该指令序列执行的流水线时空图。假设采用 排空流水线 的策略处理分支指令，且所有的存储器访问都命中Cache，那么执行上述循环需要多少个时钟周期？

答：寄存器读写可以定向、无其他旁路硬件支持、排空流水线。时空图如下图所示

[illegible]

	18	19	20	21	22												
LW																	
DADDIU																	
SW																	
DADDIU																	
DSUB																	
BNEZ	WB																
LW	IF	ID	EX	M	WB												

第*i*次迭代开始周期： $1 + (i + 17)$ ，总迭代次数为 $396 \div 4 = 99$ 次，因此*i* = 0~98，

总时钟周期数为 $(98 \times 17) + 18 = 1684$ 。

(2)假设该流水线由 **正常的定向路径**，画出该指令序列执行的流水线时空图。假设采用 **预测分支失败** 的策略处理分支指令，且所有的存储器访问都命中Cache，那么执行上述循环需要多少个时钟周期？

答：有正常定向路径，预测分支失败。时空图如下图所示

指令	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
LW	IF	ID	EX	M	WB										
DADDIU		IF	ID	S	EX	M	WB								
SW			IF	S	ID	EX	M	WB							
DADDIU					IF	ID	EX	M	WB						
DSUB						IF	ID	EX	M	WB					
BNEZ							IF	ID	EX	M	WB				
LW								IF	miss	miss	IF	ID	EX	M	WB

第*i*次迭代开始周期： $1 + (i + 10)$ ，总迭代次数为 $396 \div 4 = 99$ 次，因此*i* = 0~98，

总时钟周期数为 $(98 \times 10) + 11 = 991$ 。

(3)假设该流水线有 **正常的定向路径** 和一个 **单周期延迟分支**，请对该循环中的指令进行调度。可以重新组织指令的顺序，也可以修改指令的操作数，但是注意不能增加指令的条数。画出该指令序列执行的流水线时空图，并计算执行上述循环所需要的时钟周期数。

答：有正常定向路径，单周期延迟分支。指令修改、时空图如下所示

```
1  LOOP:
2      LW      R1, 0(R2)    // 从存储器中读取一个字的数据到寄存器中
3      DADDIU   R2, R2, #4   // 把一个寄存器的内容加上一个无符号的立即数
4      DADDIU   R1, R1, #1   // 把一个寄存器的内容加上一个无符号的立即数
5      DSUB     R4, R3, R2   //
6      BNEZ     R4, LOOP     // 两个寄存器的内容相减
7      SW      R1, -4(R2)    // 把一个字的数据从寄存器存储到存储器中
```

指令	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
LW	IF	ID	EX	M	WB							
DADDIU		IF	ID	EX	M	WB						
DADDIU			IF	ID	EX	M	WB					
DSUB				IF	ID	EX	M	WB				
BNEZ					IF	ID	EX	M	WB			
SW						IF	ID	EX	M	WB		
LW							IF	ID	EX	M	WB	

第*i*次迭代开始周期： $1 + (i + 6)$ ，总迭代次数为 $396 \div 4 = 99$ 次，因此*i* = 0~98，

总时钟周期数为 $(98 \times 6) + 10 = 598$ 。

4.6 下面的一段MIPS汇编程序是计算高斯消去法中的关键一步，用于完成下面公式的计算：其浮点指令延迟如表4.3所示，整数指令均为1个时钟周期完成，浮点和整数部件均采用流水。整数操作之间以及与其他所有浮点操作之间的延迟为0，转移指令的延迟为0。X中的最后一个元素存放在存储器中的地址为DONE。

表 4.3 本节使用的浮点流水线的延迟

产生结果的指令	使用结果的指令	延迟(时钟周期数)
浮点计算	另一个浮点计算	3
浮点计算	浮点 store(S. D)	2
浮点 load(L. D)	浮点计算	1
浮点 load(L. D)	浮点 store(S. D)	0

```

1  F00:
2      L.D    F2, 0(R1)
3      MUL.D  F4, F2, F0
4      L.D    F6, 0(R2)
5      ADD.D  F6, F4, F6
6      S.D    F6, 0[R2]
7      DADDIU R1, R1, #8
8      DADDIU R2, R2, #8
9      DSUBIU R3, R1, #DONE
10     BNEZ   R3, F00

```

(1)对于标准的单流水线，上述循环计算一个Y值需要多长时间？其中有多少空转周期？

答：如下所示，共需14个时钟周期，空转周期有5个。

1	L.D	F2, 0(R1)	1
2	Stall		
3	MUL.D	F4, F2, F0	2
4	L.D	F6, 0(R2)	3
5	Stall		
6	Stall		
7	ADD.D	F6, F4, F6	4
8	Stall		
9	Stall		
10	S.D	F6, 0[R2]	5
11	DADDIU	R1, R1, #8	6
12	DADDIU	R2, R2, #8	7
13	DSUBIU	R3, R1, #DONE	8
14	BNEZ	R3, F00	9

(2)对于标准的MIPS单流水线，将上述循环顺序展开4次，不进行任何指令调度，计算一个Y值平均需要多长时间？加速比是多少？其加速是如何获得的？

答：循环顺序展开4次，不进行任何指令调度，则指令1-5及中间的Stall指令都是必要的，只是指令6-9只需执行一次，因此，共有 $10 \times 4 + 4 = 44$ 个时钟周期，计算出4个Y值，所以计算一个Y值需要11个时钟周期，加速比为 $14 \div 11 = 1.27$ 。加速主要是来自减少控制开销，即减少对R1、R2的整数操作以及比较、分支指令而来。

(3)对于标准的MIPS单流水线，将上述循环顺序展开4次，优化和调度指令，使循环处理时间达到最优，计算一个Y值平均需要多长时间？加速比是多少？

答：循环展开4次，优化和调度指令，如下所示：

```

1      L.D      F2, 0(R1)
2      L.D      F8, 8(R1)
3      L.D      F14, 16(R1)
4      L.D      F20, 24(R1)
5      MUL.D    F4, F2, F0
6      MUL.D    F10, F8, F0
7      MUL.D    F16, F14, F0
8      MUL.D    F22, F20, F0
9      L.D      F6, 0(R2)
10     L.D      F12, 8(R2)
11     L.D      F18, 16(R2)
12     L.D      F24, 24(R2)
13     ADD.D    F6, F4, F6
14     ADD.D    F12, F10, F12
15     ADD.D    F18, F16, F18
16     ADD.D    F24, F22, F24
17     S.D      F6, 0[R2]
18     S.D      F12, 8[R2]
19     S.D      F18, 16[R2]
20     S.D      F24, 24[R2]
21     DADDIU   R1, R1, #32
22     DADDIU   R2, R2, #32
23     DSUBIU   R3, R1, #DONE
24     BNEZ     R3, F00

```

一共用了24个时钟周期，计算一个Y值平均要花6个时钟周期，加速比为
 $14 \div 6 = 2.33$ 。

(4)对于采用图4.9的前瞻执行机制的MIPS处理器(只有一个整数部件)，当第二次循环执行到

```

1      BNEZ     R3, F00

```

时，写出前面所有指令的状态，包括指令使用的保留站、指令起始节拍、执行节拍和写结果节拍，并写出处理器当前的状态。

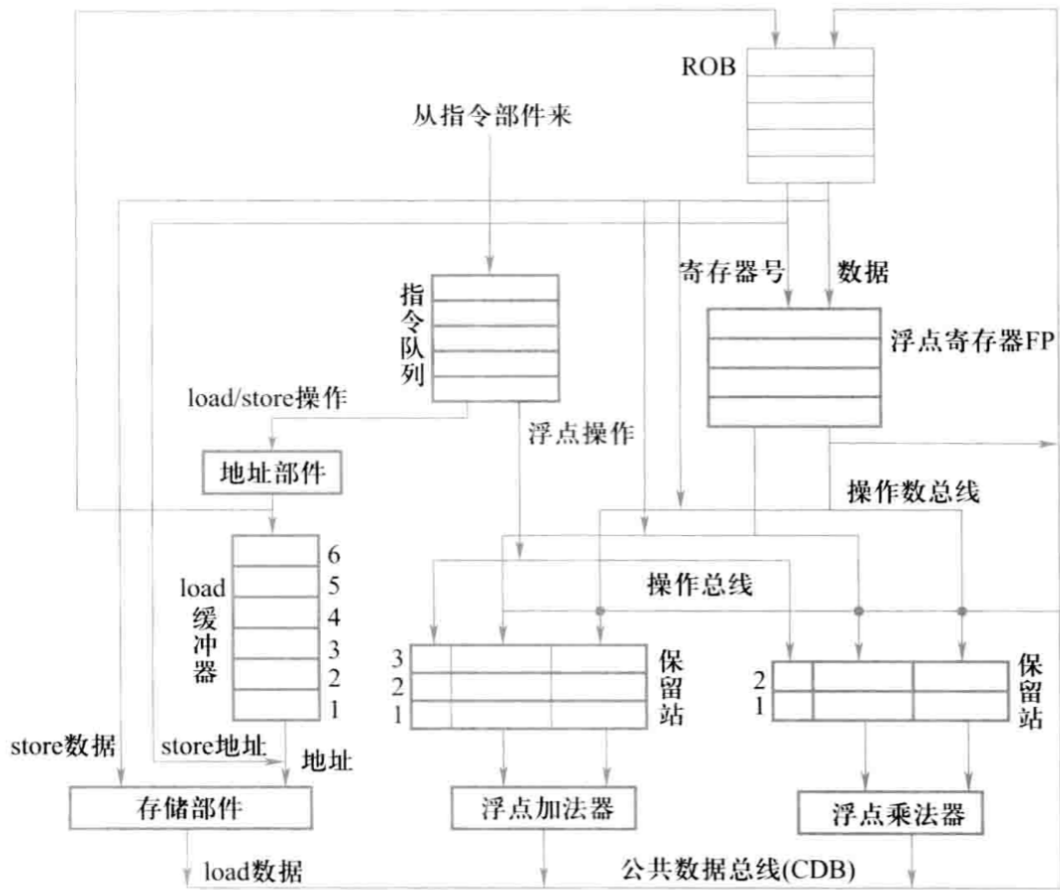


图 4.9 基于 Tomasulo 算法的支持前瞻执行的浮点部件的结构

答：各状态表如下所示：

指令		指令执行时钟		
	流出	执行	写结果	确认
L.D F2, 0(R1)	1	2	3	4
MUL.D F4, F2, F0	2	4	5	6
L.D F6, 0(R2)	3	4	6	7
ADD.D F6, F4, F6	4	8	9	10
S.D F6, 0[R2]	5	11	12	13
DADDIU R1, R1, #8	6	7	8	
DADDIU R2, R2, #8	7	8	9	
DSUBIU R3, R1, #DONE	8	9	10	
BNEZ R3, FOO	9	10		
L.D F2, 0(R1)	10	11	13	14
MUL.D F4, F2, F0	11	13	14	15
L.D F6, 0(R2)	12	13	14	15
ADD.D F6, F4, F6	13	17	18	19
S.D F6, 0[R2]	14	20	21	22
DADDIU R1, R1, #8	15	16	17	
DADDIU R2, R2, #8	16	17	18	
DSUBIU R3, R1, #DONE	17	18	19	
BNEZ R3, FOO	18			

名称				保留站				
	Busy	Op	Vj	Vk	Qj	Qk	Dest	A
Add1	yes	ADD.D	Regs[F4]	Regs[F6]				
Add2	no							
Add3	no							
Mul1	yes							
Mul2	no							

项 号			ROB		
	Busy	指令	状态	目的	Value
1	yes	ADD.D F6, F4, F6	执行	F6	Regs[F4]+Regs[F6]
2	yes	S.D F6, 0[R2]	流出	Mem[0+Regs[R2]]	#2

字段				浮点寄存器状态			
	F0	F2	F4	F6	F8	...	F30
ROB项号				1		...	
Busy				yes		...	

(5)对于两路超标量的MIPS流水线，设有两个指令流出部件，可以流出任意组合的指令，系统中的功能部件数量不受限制。将上述循环展开4次，优化和调度指令，使循环处理事件达到最优。计算一个Y值平均需要多少时间？加速比是多少？

整数及访存指令	浮点指令	时钟周期数
L.D F2, 0(R1)		1
L.D F8, 8(R1)		2
L.D F14, 16(R1)	MUL.D F4, F2, F0	3
L.D F20, 24(R1)	MUL.D F10, F8, F0	4
L.D F6, 0(R2)	MUL.D F16, F14, F0	5
L.D F12, 8(R2)	MUL.D F22, F20, F0	6
L.D F18, 16(R2)	ADD.D F6, F4, F6	7
L.D F24, 24(R2)	ADD.D F12, F10, F12	8
DADDIU R1, R1, #32	ADD.D F18, F16, F18	9
S.D F6, 0[R2]	ADD.D F24, F22, F24	10
S.D F12, 8[R2]		11
S.D F18, 16[R2]		12
S.D F24, 24[R2]		13
DADDIU R2, R2, #32		14
DSUBIU R3, R1, #DONE		15
BNEZ R3, FOO		16

答：在两路超标量MIPS流水线上，循环展开4次，并经优化和调度后，指令序列如上所示。

计算一个Y值需要 $16 \div 4 = 4$ 个时钟周期，加速比为 $14 \div 4 = 3.5$ 。

(6)对于超长指令字MIPS处理器，将上述循环展开4次，优化和调度指令，使循环处理时间达到最优。计算一个Y值平均需要多少时间？加速比是多少？

答：对于超长指令字MIPS处理器，将循环展开4次，并经优化和调度后的指令序列如下所示。

计算一个Y值需要 $11 \div 4 = 2.75$ 个时钟周期，加速比为 $14 \div 2.75 = 5.09$ 。

访存1	访存2	浮点指令1	浮点指令2	整数指令	时钟周期
L.D F2, 0(R1)	L.D F8, 8(R1)				1
L.D F14, 16(R1)	L.D F20, 24(R1)				2
L.D F6, 0(R2)	L.D F12, 8(R2)	MUL.D F4, F2, F0	MUL.D F10, F8, F0		3
L.D F18, 16(R2)	L.D F24, 24(R2)	MUL.D F16, F14, F0	MUL.D F22, F20, F0		4
		ADD.D F6, F4, F6	ADD.D F12, F10, F12		5
		ADD.D F18, F16, F18	ADD.D F24, F22, F24	DADDIU R1, R1, #32	6
				DADDIU R2, R2, #32	7
				DSUBIU R3, R1, #DONE	8
				BNEZ R3, FOO	9
S.D F6, -32[R2]	S.D F12, -24[R2]				10
S.D F18, -16[R2]	S.D F24, -8[R2]				11