

## 5. 应用题

## 【题 3.31】

解: (1) 每条指令的执行时间为:  $\Delta t + \Delta t + 2\Delta t = 4\Delta t$

连续执行  $N$  条指令所需的时间为:  $4N\Delta t$

(2) 连续执行  $N$  条指令所需的时间为:  $4\Delta t + 3(N-1)\Delta t = (3N+1)\Delta t$

(3) 连续执行  $N$  条指令所需的时间为:  $4\Delta t + 2(N-1)\Delta t = (2N+2)\Delta t$

## 【题 3.32】 3.5.

解:

指令/时钟	1	2	3	4	5	6	7	8	9
K	IF	ID	EX	EX					
K+1		IF	ID	stall	EX	EX	EX	EX	
K+2			IF	stall	ID	EX	EX	stall	EX

计算执行完三条指令共使用了 9 个时钟周期。

## 【题 3.33】 3.6

解: (1)

$$T_{\text{pipeline}} = \sum_{i=1}^m \Delta t_i + (n-1)\Delta t_{\text{max}} = (50 + 50 + 100 + 200) + 9 \times 200 = 2200(\text{ns})$$

$$TP = \frac{n}{T_{\text{pipeline}}} = \frac{1}{220} (\text{ns}^{-1})$$

$$E = TP \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \Delta t_i}{m} = TP \cdot \frac{400}{4} = \frac{5}{11} \approx 45.45\%$$

(2) 3、4 段是瓶颈。

① 变成 8 级流水线(细分), 如图 3.7 所示。

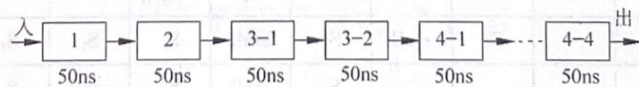


图 3.7 8 级流水线

$$T_{\text{pipeline}} = \sum_{i=1}^m \Delta t_i + (n-1)\Delta t_{\text{max}} = 50 \times 8 + 9 \times 50 = 850(\text{ns})$$

$$TP = \frac{n}{T_{\text{pipeline}}} = \frac{1}{85} (\text{ns}^{-1})$$

$$E = TP \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \Delta t_i}{m} = TP \cdot \frac{400}{8} = \frac{10}{17} \approx 58.82\%$$

② 重复设置部件(如图 3.8 所示)

$$TP = \frac{n}{T_{\text{pipeline}}} = \frac{1}{85} (\text{ns}^{-1})$$

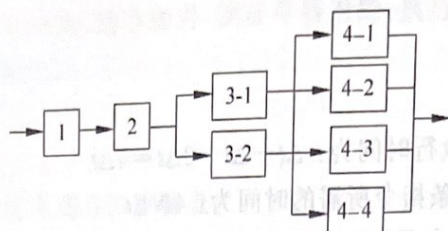


图 3.8 重复设置部件

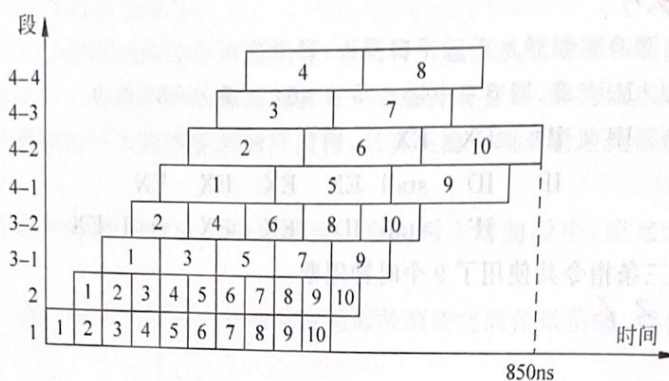


图 3.9 时空图

$$E = \frac{400 \times 10}{850 \times 8} = \frac{10}{17} \approx 58.82\%$$

【题 3.34】 3.7.

解：(1) 会发生流水线阻塞情况，如表 3.7 所示。

表 3.7 流水线阻塞情况

第 1 个任务	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$
第 2 个任务		$S_1$	$S_2$	stall	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$
第 3 个任务			$S_1$	stall	$S_2$	stall	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
第 4 个任务				$S_1$	stall	$S_2$	stall	$S_3$	$S_4$	$S_5$

(2) 不阻塞情况。

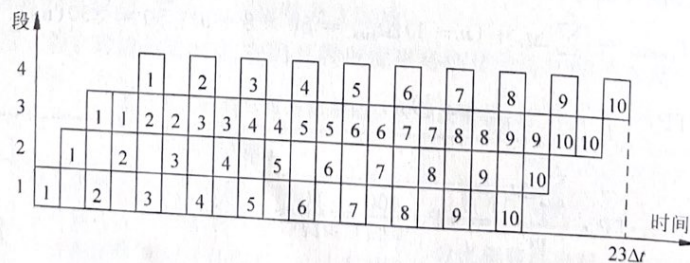


图 3.10 时空图



$$TP_{\max} = \frac{1}{2\Delta t}$$

$$T_{\text{pipeline}} = 23\Delta t$$

$$TP = \frac{n}{T_{\text{pipeline}}} = \frac{10}{23\Delta t}$$

$$E = TP \cdot \frac{5\Delta t}{4} = \frac{50}{92} \approx 54.35\%$$

(3) 重复设置部件。

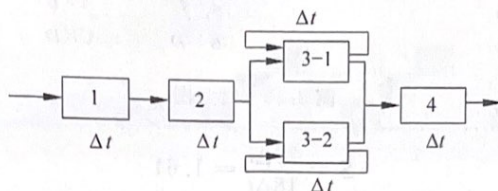


图 3.11 重复设置部件

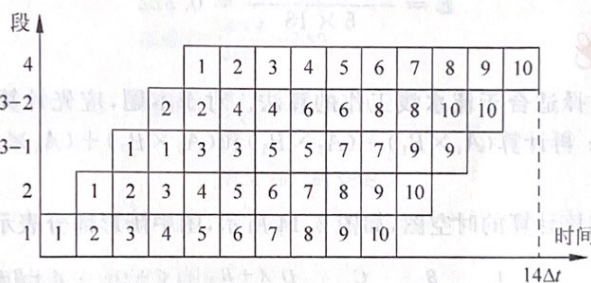


图 3.12 重复设置部件后的时空图

$$TP = \frac{n}{T_{\text{pipeline}}} = \frac{10}{14 \cdot \Delta t} = \frac{5}{7 \cdot \Delta t}$$

$$\text{吞吐率提高倍数} = \frac{\frac{5}{7\Delta t}}{\frac{10}{23\Delta t}} = 1.64$$

### 【题 3.35】

解：首先，应选择适合于流水线工作的算法。对于本题，应先计算  $A_1 + B_1$ 、 $A_2 + B_2$ 、 $A_3 + B_3$  和  $A_4 + B_4$ ；再计算  $(A_1 + B_1) \times (A_2 + B_2)$  和  $(A_3 + B_3) \times (A_4 + B_4)$ ；然后求总的结果。

其次，画出完成该计算的时空图，如图 3.13 所示，图中阴影部分表示该段在工作。

由图 3.13 可见，它在 18 个  $\Delta t$  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，由于一次求积需  $3\Delta t$ ，一次求和需  $5\Delta t$ ，则产生上述 7 个结果共需  $(4 \times 5 + 3 \times 3)\Delta t = 29\Delta t$ 。所以加速比为：



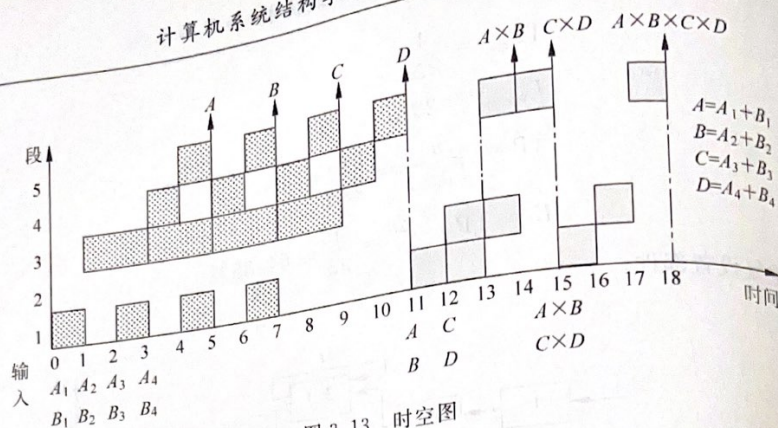


图 3.13 时空图

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

该流水线的效率可由阴影区的面积和 5 个段总时空区的面积的比值求得：

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

【题 3.36】 3.8

解：首先，应选择适合于流水线工作的算法。对于本题，应先计算  $A_1 \times B_1$ 、 $A_2 \times B_1$ 、 $A_3 \times B_3$  和  $A_4 \times B_4$ ；再计算  $(A_1 \times B_1) + (A_2 \times B_2)$  和  $(A_3 \times B_3) + (A_4 \times B_4)$ ；然后求总的加结果。

其次，画出完成该计算的时空图，如图 3.14 所示，图中阴影部分表示该段在工作。

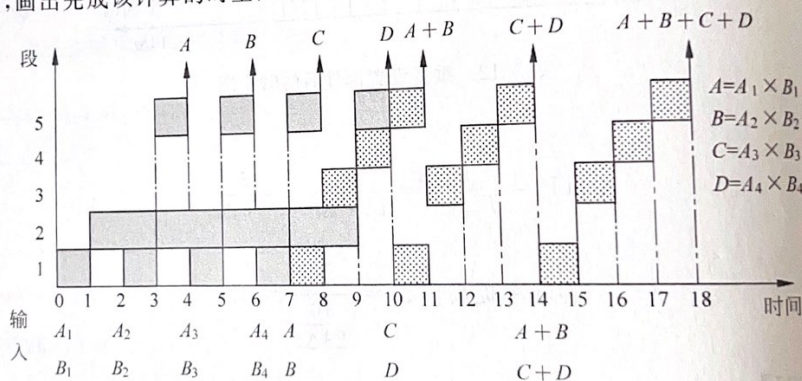


图 3.14 时空图

由图 3.14 可见，它在 18 个  $\Delta t$  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，由于一次求积需  $4\Delta t$ ，一次求和需  $4\Delta t$ ，则产生上述 7 个结果共需  $(4 + 3 \times 4)\Delta t = 16\Delta t$ 。所以加速比为：

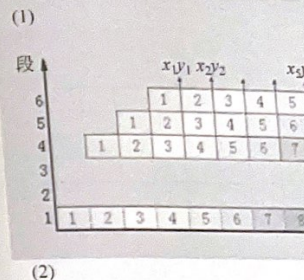
$$S = \frac{28\Delta t}{18\Delta t} \approx 1.56$$

该流水线的效率可由阴影区和 5 个段总时空区的比值求得：

E =

【题 3.37】

解：机器一共要做 10 次乘法，4



(2)

【题 3.38】

解：流水线的预约表如表

时间	1
功能段	
$S_1$	✓
$S_2$	
$S_3$	
$S_4$	

【题 3.39】 3.9

解：(1) 由预约表得出  
为避免争用  $S_1$  段，禁用  $S_3$  段，禁用启动距离：3, 4  
启动距离：1。

由禁止表得到初始冲

$C_0 = (10001101)$  有 4

$C_1 = \text{SHR}^{(2)}(C_0) \vee ($



$$E = \frac{4 \times 4 + 3 \times 4}{5 \times 18} \approx 0.31$$

## 【题 3.37】

解：机器一共要做 10 次乘法，4 次加法。时空图如图 3.15 所示。

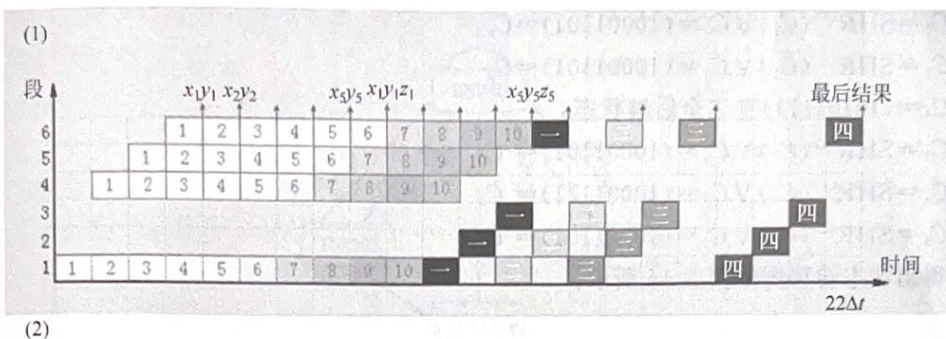


图 3.15 时空图

## 【题 3.38】

解：流水线的预约表如表 3.8 所示。

表 3.8 流水线的预约表

时间 功能段	1	2	3	4	5	6
$S_1$	✓				✓	
$S_2$		✓				✓
$S_3$			✓			
$S_4$				✓		

## 【题 3.39】

3.9

解：(1) 由预约表得出禁止表： $F = \{8, 4, 3, 1\}$

为避免争用  $S_1$  段，禁用启动距离：8；为避免争用  $S_2$  段，禁用启动距离：1；为避免争用  $S_3$  段，禁用启动距离：3, 4, 1；为避免争用  $S_4$  段，禁用启动距离：1；为避免争用  $S_5$  段，禁用启动距离：1。

由禁止表得到初始冲突向量： $C_0 = (10001101)$

$C_0 = (10001101)$  有 4 个后继状态：

$C_1 = \text{SHR}^{(2)}(C_0) \vee C_0 = (00100011) \vee (10001101) = (10101111)$

$$C_2 = \text{SHR}^{(5)}(C_0) \vee C_0 = (00000100) \vee (10001101) = (10001101) = C_0$$

$$C_3 = \text{SHR}^{(6)}(C_0) \vee C_0 = (00000010) \vee (10001101) = (10001111)$$

$$C_4 = \text{SHR}^{(7)}(C_0) \vee C_0 = (00000001) \vee (10001101) = (10001101) = C_0$$

$C_1 = (10101111)$  有两个后继状态:

$$C_5 = \text{SHR}^{(5)}(C_1) \vee C_0 = (10001101) = C_0$$

$$C_6 = \text{SHR}^{(7)}(C_1) \vee C_0 = (10001101) = C_0$$

$C_3 = (10101111)$  有三个后继状态:

$$C_7 = \text{SHR}^{(5)}(C_3) \vee C_0 = (10001101) = C_0$$

$$C_8 = \text{SHR}^{(6)}(C_3) \vee C_0 = (10001111) = C_3$$

$$C_9 = \text{SHR}^{(7)}(C_3) \vee C_0 = (10001101) = C_0$$

得出状态转移图如图 3.16 所示。

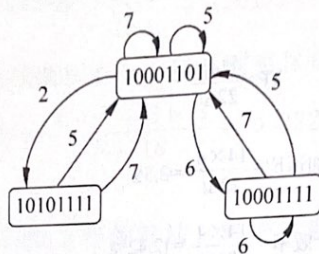


图 3.16 状态转移图

各种调度策略及平均延迟时间如表 3.9 所示。

表 3.9 调度策略及平均延迟时间

调度策略	平均延迟时间
(2,5)	$3.5\Delta t$
(2,7)	$4.5\Delta t$
(5)	$5\Delta t$
(6,5)	$5.5\Delta t$
(6)	$6\Delta t$
(6,7)	$6.5\Delta t$
(7)	$7\Delta t$

(2) 在表 3.9 中, 平均延迟时间最小的调度策略是最优调度策略: (2,5); 流水线的最大吞吐率就是最优调度策略的最大吞吐率:  $1/(3.5\Delta t)$ 。

(3) 按最优调度策略连续输入 6 个任务, 流水线的实际吞吐率为:

$$TP = \frac{6}{(2+5+2+5+2+9)\Delta t} = \frac{6}{25\Delta t}$$

【题 3.40】3.10

解: (1) 由预约表得出禁止表:  $F = \{6, 3, 1\}$

为避免争用  $S_1$  段, 禁用启动距离: 6; 为避免争用  $S_2$  段, 禁用启动距离: 3; 为避免争用



$S_3$  段,禁用启动距离:1;为避免争用  $S_4$  段,禁用启动距离:3;为避免争用  $S_5$  段,禁用启动距离:1。

由禁止表得到初始冲突向量:  $C_0 = (100101)$ ,由初始冲突向量和后继冲突向量的计算公式  $C_j = \text{SHR}^{(k)}(C_i) \vee C_0$ ,可得流水线任务调度的状态转移图如图 3.17 所示。

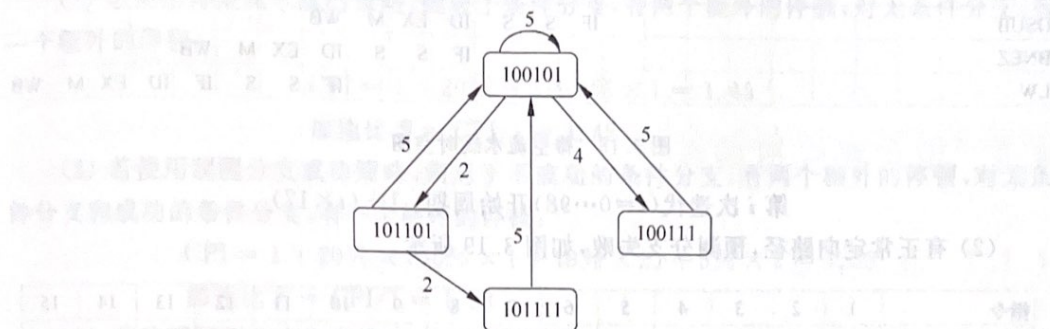


图 3.17 流水线任务调度的状态转移图

(2) 由状态转移图可得不发生段争用冲突的调度策略以及平均延迟时间,如表 3.10 所示。

表 3.10 调度策略和平均延迟时间

调度策略	平均延迟时间
(2,2,5)	$3\Delta t$
(2,5)	$3.5\Delta t$
(4)	$4\Delta t$
(4,5)	$4.5\Delta t$
(5)	$5\Delta t$

由表 3.10 可知,允许不等时间间隔调度的最优调度策略是(2,2,5),流水线最大吞吐率为:  $1/(3\Delta t)$ 。等时间间隔调度的最优调度策略是(4),流水线最大吞吐率为:  $1/(4\Delta t)$ 。

(3) 按调度策略(2,2,5),连续输入 10 个任务的流水线实际吞吐率与加速比分别为:

$$TP_1 = \frac{10}{(2+2+5+2+2+5+2+2+5+7)\Delta t} = \frac{10}{34\Delta t}$$

$$S_1 = \frac{10 \times 7\Delta t}{34\Delta t} = 2.06$$

按调度策略(4),连续输入 10 个任务的流水线实际吞吐率与加速比分别为:

$$TP_2 = \frac{10}{(4 \times 9 + 7)\Delta t} = \frac{10}{43\Delta t}$$

$$S_2 = \frac{10 \times 7\Delta t}{43\Delta t} = 1.63$$

【题 3.41】 3.11

解:

(1) 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图 3.18 所示。

指令	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
LW	IF	ID	EX	M	WB																
DADDIU		IF	S	S	ID	EX	M	WB													
SW					IF	S	S	ID	EX	M	WB										
DADDIU								IF	ID	EX	M	WB									
DSUB									IF	S	S	ID	EX	M	WB						
BNEZ												IF	S	S	ID	EX	M	WB			
LW															IF	S	S	IF	ID	EX	M

图 3.18 排空流水线时空图

第  $i$  次迭代( $i=0\cdots 98$ )开始周期:  $1+(i\times 17)$

(2) 有正常定向路径, 预测分支失败, 如图 3.19 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	ID	EX	M	WB			
									IF	miss	miss	IF	ID	EX	M

图 3.19 采用预测分支失败的时空图

第  $i$  次迭代( $i=0\cdots 98$ )开始周期:  $1+(i\times 10)$

总的时钟周期数:  $(98\times 10)+11=991$

(3) 有正常定向路径。单周期延迟分支的时空图如图 3.20 所示。

```

LOOP: LW      R1, 0(R2)
      DADDIU   R2, R2, #4
      DADDIU   R1, R1, #1
      DSUB     R4, R3, R2
      BNEZ     R4, LOOP
      SW       R1, -4(R2)
  
```

第  $i$  次迭代( $i=0\cdots 98$ )开始周期:  $1+(i\times 6)$

总的时钟周期数:  $(98\times 6)+10=598$

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

图 3.20 采用单周期延迟分支的时空图



## 【题 3.42】 3.12

解：没有控制相关时流水线的平均  $CPI=1$ 。

存在控制相关时，由于无条件分支在第二个时钟周期结束时就被解析出来，而条件分支要到第3个时钟周期结束时才能被解析出来。所以：

(1) 若使用排空流水线的策略，则对于条件分支，有两个额外的停顿，对无条件分支，有一个额外的停顿：

$$CPI = 1 + 20\% \times 2 + 5\% \times 1 = 1.45$$

$$\text{加速比 } S = CPI/1 = 1.45$$

(2) 若使用预测分支成功策略，则对于不成功的条件分支，有两个额外的停顿，对无条件分支和成功的条件分支，有一个额外的停顿：

$$CPI = 1 + 20\% \times (60\% \times 1 + 40\% \times 2) + 5\% \times 1 = 1.33$$

$$\text{加速比 } S = CPI/1 = 1.33$$

(3) 若使用预测分支失败策略，则对于成功的条件分支，有两个额外的停顿；对无条件分支，有一个额外的停顿；对不成功的条件分支，其目标地址已经由 PC 值给出，不必等待，所以无延迟：

$$CPI = 1 + 20\% \times (60\% \times 2 + 40\% \times 0) + 5\% \times 1 = 1.29$$

$$\text{加速比 } S = CPI/1 = 1.29$$