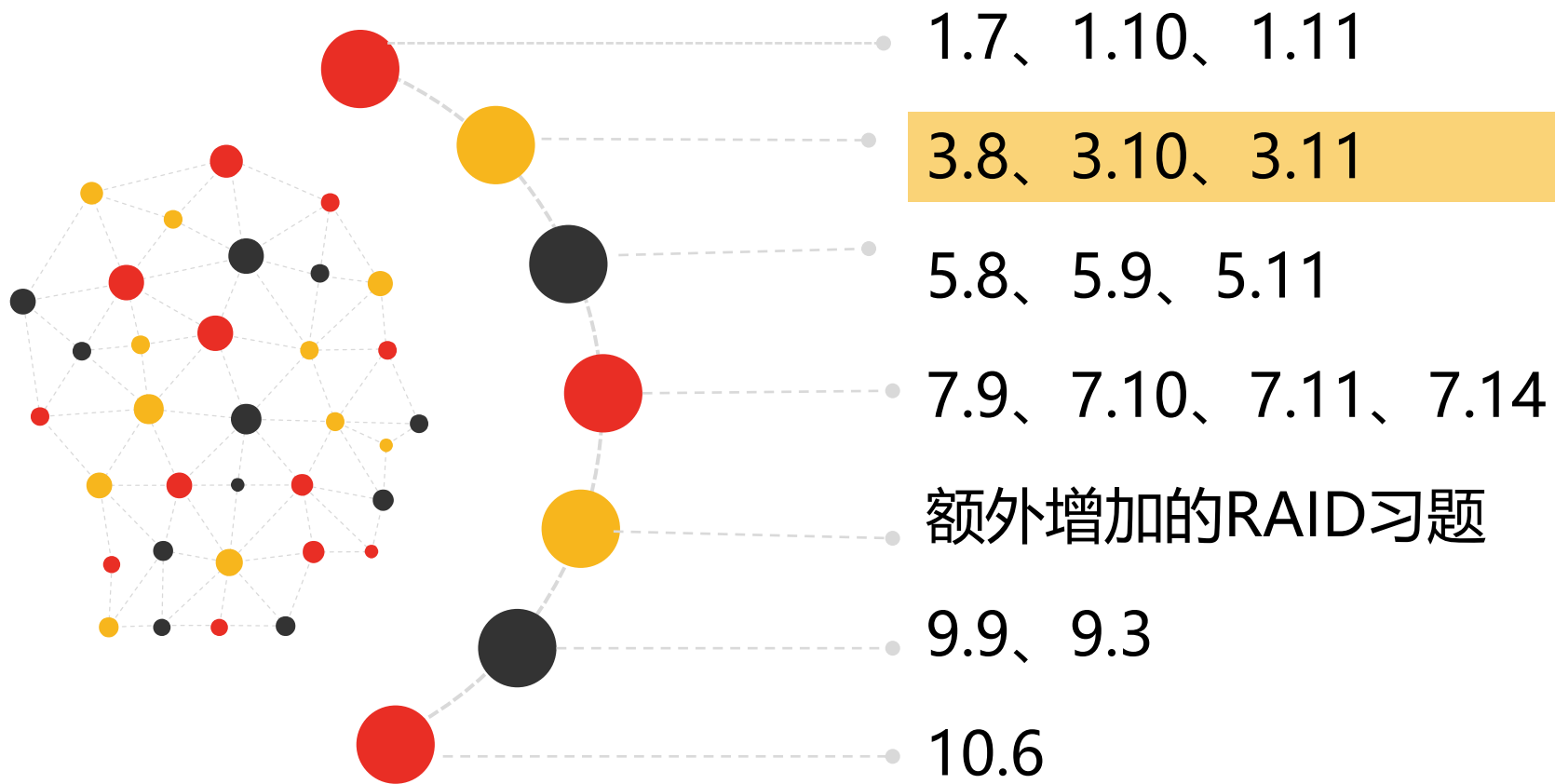




计算机系统结构习题内容





第一章

Amdahl定律:

$$S_n = \frac{T_0}{T_n} = \frac{1}{(1 - Fe) + \frac{Fe}{Se}}$$

$$\text{CPU时间} = IC * CPI * \text{时钟周期时间} = \sum_{i=1}^n (CPI_i + IC_i) * \text{时钟周期时间}$$

$$CPI = \frac{\text{时钟周期数}}{IC} = \frac{\sum_{i=1}^n (CPI_i * IC_i)}{IC} = \sum_{i=1}^n (CPI_i * \frac{IC_i}{IC})$$

$$MIPS\text{速率} = \frac{f}{CPI \times 10^6}$$

习题1.7

对于一台400MHz计算机执行标准测试程序，程序中指令类型，执行数量和平均时钟周期数如下：

指令类型	指令执行数量	平均时钟周期数
整数	45000	1
数据传送	75000	2
浮点	8000	4
分支	1500	2

求该计算机的有效CPI、MIPS和程序执行时间。

解：

$$CPI = \sum_{i=1}^4 (CPI_i \times \frac{IC_i}{IC}) = 1 \times \frac{45000}{129500} + 2 \times \frac{75000}{129500} + 4 \times \frac{8000}{129500} + 2 \times \frac{1500}{129500} = \frac{230000}{129500} \approx 1.776$$

$$MIPS = \frac{f}{CPI \times 10^6} \approx \frac{400 \times 10^6}{1.776 \times 10^6} \approx \frac{400}{1.776} \approx 225.225 MIPS$$

$$T = \frac{IC}{MIPS \times 10^6} \approx \frac{129500 \times 1.776}{400 \times 10^6} \approx 0.000575 (\text{秒}) = 0.575 (\text{毫秒})$$



习题1.10

计算机系统有三个部件可以改进，这三个部件的加速比如下：部件加速比1 = 30；部件加速比2 = 20；部件加速比3 = 10；

(1) 如果部件1和部件2的可改进比例为30%，那么当部件3的可改进比例为多少时，系统的加速比才可以达到10？

(2) 如果三个部件的可改进比例为30%、30%和20%，三个部件同时改进，那么系统中不可加速部分的执行时间在总执行时间中占的比例是多少？

$$T_e = T_o \left[(1 - f_e) + \frac{f_e}{S_e} \right]$$

$$S = \frac{1}{(1 - f_e) + \frac{f_e}{S_e}}$$

$$S = \frac{1}{(1 - \sum_i f_i) + \sum_i \frac{f_i}{S_i}}$$



习题1.10

$$S = \left\{ [1 - (f_1 + f_2 + f_3)] + \frac{f_1}{S_1} + \frac{f_2}{S_2} + \frac{f_3}{S_3} \right\}^{-1}$$

$$10 = \left\{ [1 - (0.3 + 0.3 + f_3)] + \frac{0.3}{30} + \frac{0.3}{20} + \frac{f_3}{10} \right\}^{-1} \quad f_3 = \frac{65}{180} = 0.36$$

$$\begin{aligned} P &= \frac{[1 - (0.3 + 0.3 + 0.2)]T}{\frac{0.3T}{30} + \frac{0.3T}{20} + \frac{0.2T}{10} + 0.2T} \\ &= \frac{0.2}{\frac{0.3}{30} + \frac{0.3}{20} + \frac{0.2}{10} + 0.2} \\ &= \frac{0.2}{\frac{0.6}{60} + \frac{0.9}{60} + \frac{1.2}{60} + \frac{12}{60}} \\ &= \frac{12}{14.7} = 0.82 \end{aligned}$$



习题1.11

假设浮点数指令FP指令的比例为30%，其中浮点数平方根FPSQR占全部指令的比例为4%，FP操作的CPI为5，FPSQR操作的CPI为20，其他指令的平均CPI为1.25。

现有两种改进方案：（1）把FPSQR操作的CPI减至3；（2）把所有的FP操作的CPI减至3
试比较两种方案对系统性能的提高程度。

解法1：

利用原始CPI的唯一性，先使用已知条件求出原始CPI，再求出除去FPSQR指令外其他指令的平均CPI，最后比较改进后的CPI大小。

$$\text{原始CPI} = 5 \times 30\% + 1.25 \times (1 - 30\%) = 2.375$$

设除FPSQR外其余指令的平均CPI为X

$$\text{则 } 2.375 = 20 \times 4\% + (1 - 4\%)X, \text{ 解出 } X = 1.640625$$

$$\text{方案1: } \text{CPI}_1 = 3 \times 4\% + 1.640625 \times (1 - 4\%) = 1.695$$

$$\text{方案2: } \text{CPI}_2 = 3 \times 30\% + 1.25 \times (1 - 30\%) = 1.775$$

结论：方案1导致的新CPI更小，性能更好



习题1.11

解法2:

用Amdahl公式求。记指令总条数=M, 时钟周期长度=CYCLE。

$$\begin{aligned}\text{原始总时间} T_{\text{old}} &= 0.3M \times 5 \times \text{CYCLE} + 0.7M \times 1.25 \times \text{CYCLE} \\ &= M \times 2.375 \times \text{CYCLE}\end{aligned}$$

$$T_{\text{FP}} = 0.3M \times 5 \times \text{CYCLE} = M \times 1.5 \times \text{CYCLE},$$

所占比例为 $1.5/2.375 \approx 63\%$

$$T_{\text{FPSQR}} = 0.04M \times 20 \times \text{CYCLE} = M \times 0.8 \times \text{CYCLE},$$

所占比例为 $0.8/2.375 \approx 34\%$

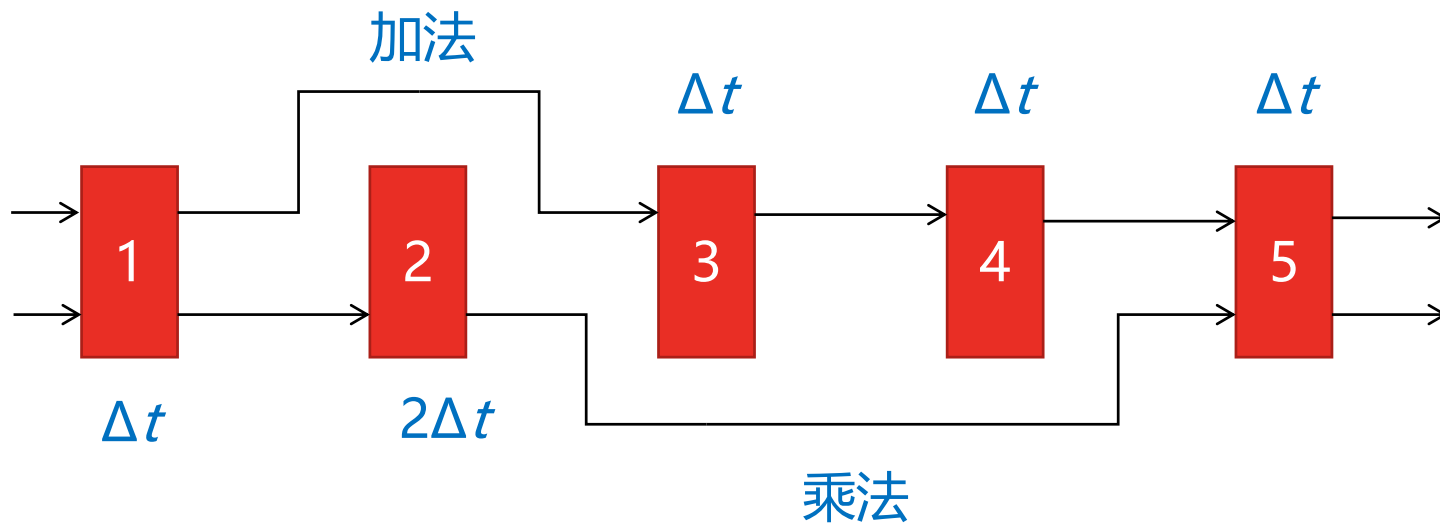
$$\text{方案1: } Se = 20/3, Fe \approx 34\%, Sn_1 = 1 / [(1 - Fe) + Fe / Se] \approx 1.4$$

$$\text{方案2: } Se = 5/3, Fe \approx 63\%, Sn_2 = 1 / [(1 - Fe) + Fe / Se] \approx 1.3$$

结论: 方案1导致加速比更大, 性能更好

习题3.8 (时空图、性能指标)

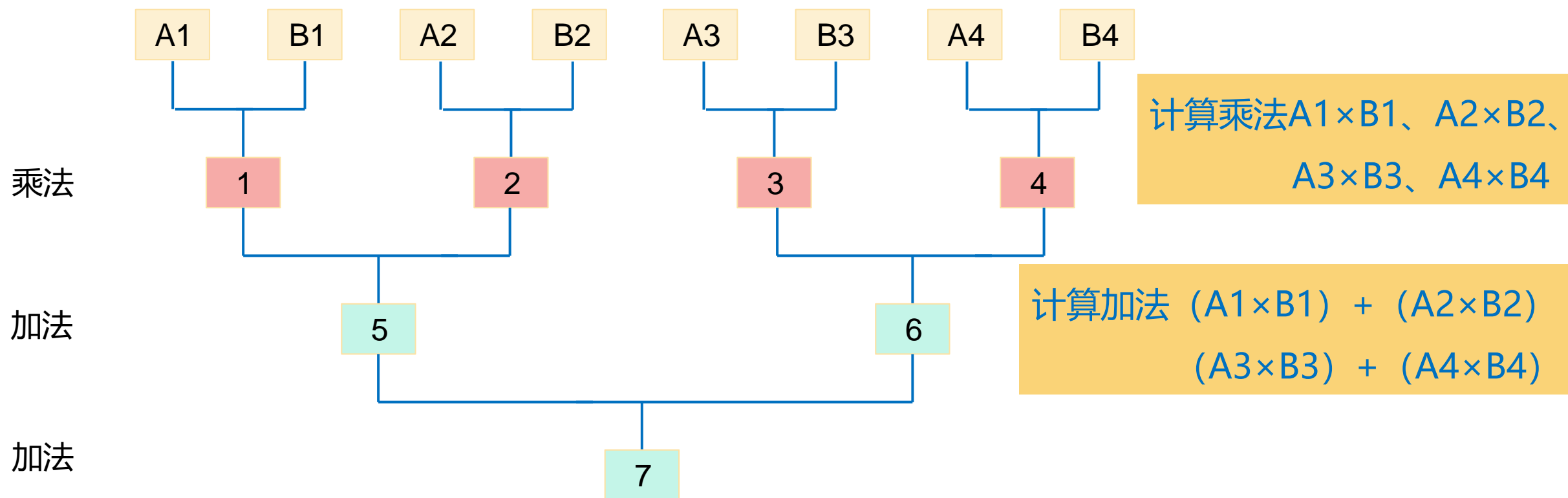
3.8 有一条**动态**多功能流水线由5段组成，加法用1、3、4、5段，乘法用1、2、5段，第2段的时间为 $2\Delta t$ ，其余各段的时间均为 Δt ，而且流水线的输出可以直接返回输入端或暂存于相应的流水寄存器中。现要在该流水线上计算 $\sum_{i=1}^4 (A_i \times B_i)$ ，画出其时空图，并计算其吞吐率、加速比和效率。





习题3.8 (时空图、性能指标)

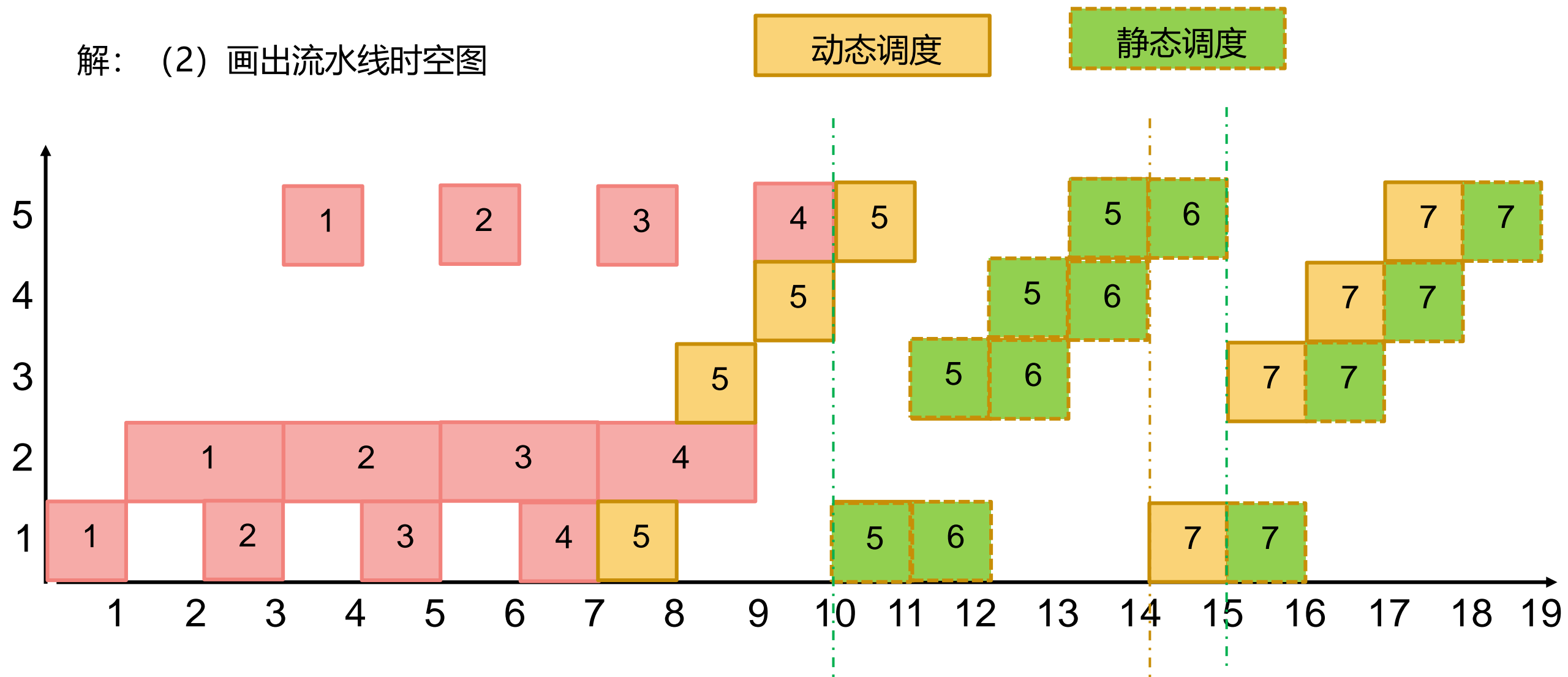
解： (1) 提高流水线效率， 减少切换次数， 根据最小二叉树， 选择适合于流水线调度的计算策略；





习题3.8 (时空图、性能指标)

解： (2) 画出流水线时空图



习题3.8 (时空图、性能指标)

解： (3) 计算性能指标

由图可见，7个任务， 花费了18个 Δt 时间， 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 $4\Delta t$ ， 则执行上述7个任务共需 $(4 \times 4 + 3 \times 4) \Delta t = 28\Delta t$ 。 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的面积和5 个段总时空区的面积的比值求得：

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

如果是静态流水线调度， 执行任务花费的时间是19个 Δt 。

思考： 为什么现在的机器很少用动态流水线调度策略？



习题3.10 (单功能非线性流水线调度)

3.10 有一个5段流水线，各段执行时间均为 Δt ，其预约表如下：

时间 功能段	1	2	3	4	5	6	7
S1	√						√
S2		√			√		
S3			√	√			
S4				√			√
S5					√	√	

1. 画出流水线任务调度的状态转移图。
2. 分别求出允许不等时间间隔调度和等时间间隔调度的两种最优调度策略，以及这两种调度策略的流水线最大吞吐率。
3. 若连续输入10个任务，求这两种调度策略的流水线实际吞吐率和加速比。



习题3.10 (单功能非线性流水线调度)

解:

(1) 由预约表可得

功能段S1, 禁止启动距离 $7-1=6$;

功能段S2, 禁止启动距离 $5-2=3$;

功能段S3, 禁止启动距离 $4-3=1$;

功能段S4, 禁止启动距离 $7-4=3$;

功能段S5, 禁止启动距离 $6-5=1$;

去掉重复的, 所以禁止表为 $F=\{6,3,1\}$

时间 功能段	1	2	3	4	5	6	7
S1	√						√
S2		√			√		
S3			√	√			
S4				√			√
S5					√	√	

(2) 根据初始冲突向量定义, 初始冲突向量 $C_0 = (100101)$

$$C_i = \begin{cases} 1, & i \in F \\ 0, & i \notin F \end{cases}$$

6 3 1

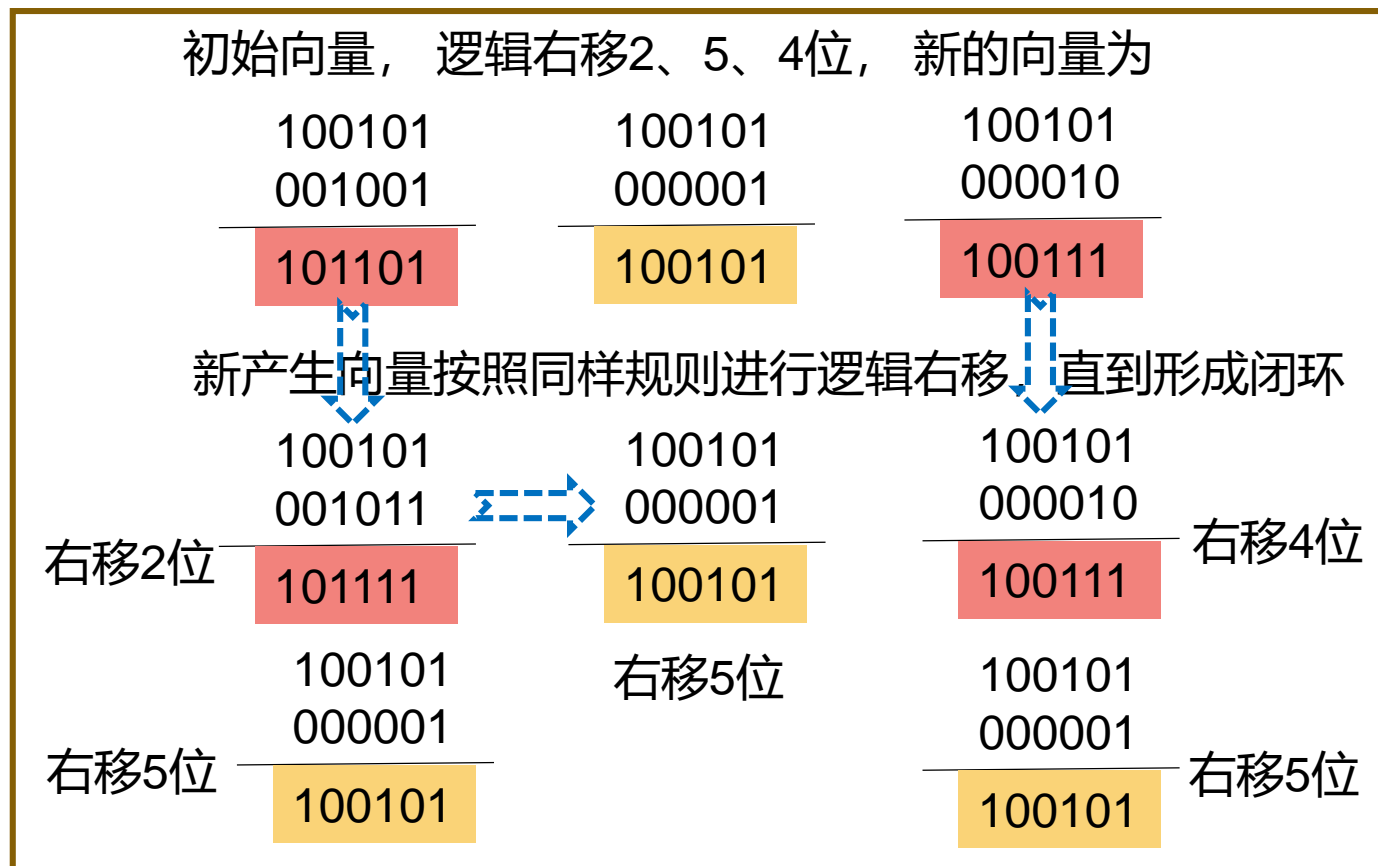
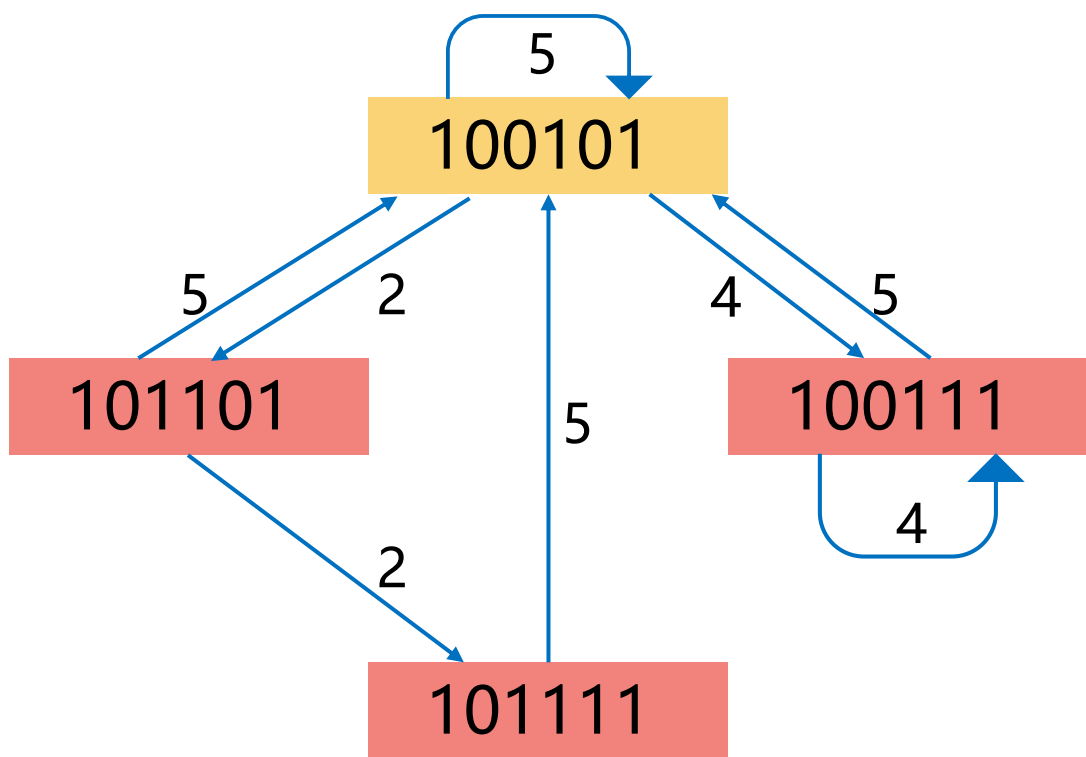


习题3.10 (单功能非线性流水线调度)

解:

(3) 根据初始冲突向量 $C_0 = (100101)$, 画状态转移图

每次都是和初始冲突向量执行按位或运算!!!





习题3.10 (单功能非线性流水线调度)

解：

(4) 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

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

由上可知，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： $1/3\Delta t$ 。

等时间间隔的调度的最优调度策略是(4)，流水线最大吞吐率为： $1/4\Delta t$ 。



习题3.10 (单功能非线性流水线调度)

解:

(5) 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:

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

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

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:

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

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



习题3.11 (相关, 定向, 指令调度)

3.11 在MIPS流水线(按照图3.33)上运行右边代码序列:

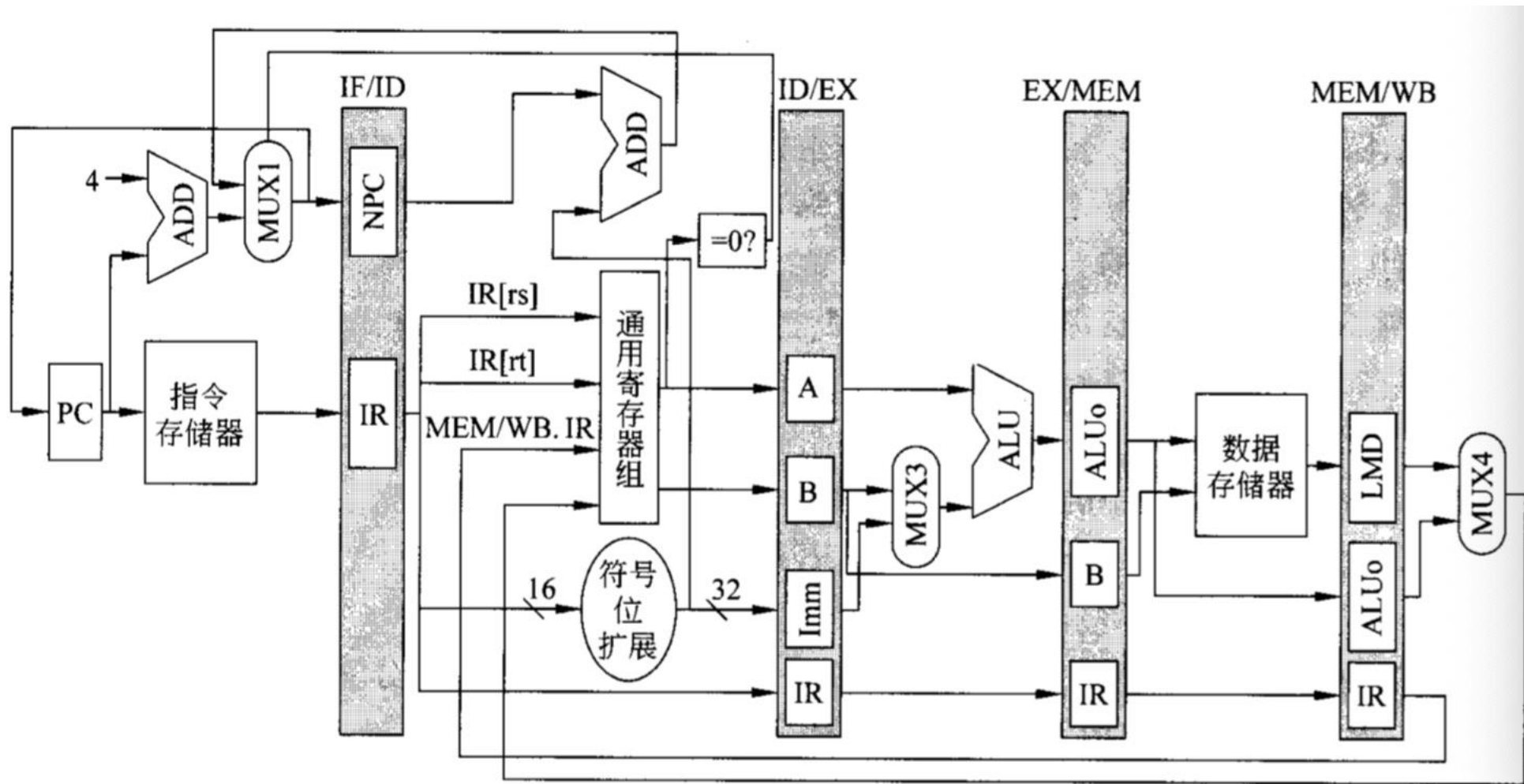
其中, R3的初始值是 $R2 + 396$ 。假设: 在整个代码序列的运行过程中, 所有的存储器访问都是命中的, 并且在一个时钟周期中对同一个寄存器的读操作和写操作可以通过寄存器“定向”。问:

1. 在没有任何其它定向硬件的支持下, 请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可以命中Cache, 那么执行上述循环需要多少个时钟周期?
2. 假设该流水线有正常的定向路径, 请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可以命中Cache, 那么执行上述循环需要多少个时钟周期?
3. 假设该流水线有正常的定向路径, 请对该循环中的指令进行调度。注意可以重新组织指令的顺序, 也可以修改指令的操作数, 但是不能增加指令的条数。请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需要的时钟周期数?

```
LOOP:    LW R1, 0(R2)
          ADDI R1, R1, #1
          SW 0(R2), R1
          ADDI R2, R2, #4
          SUB R4, R3, R2
          BNZ R4, LOOP
```



习题3.11 (相关, 定向, 指令调度)



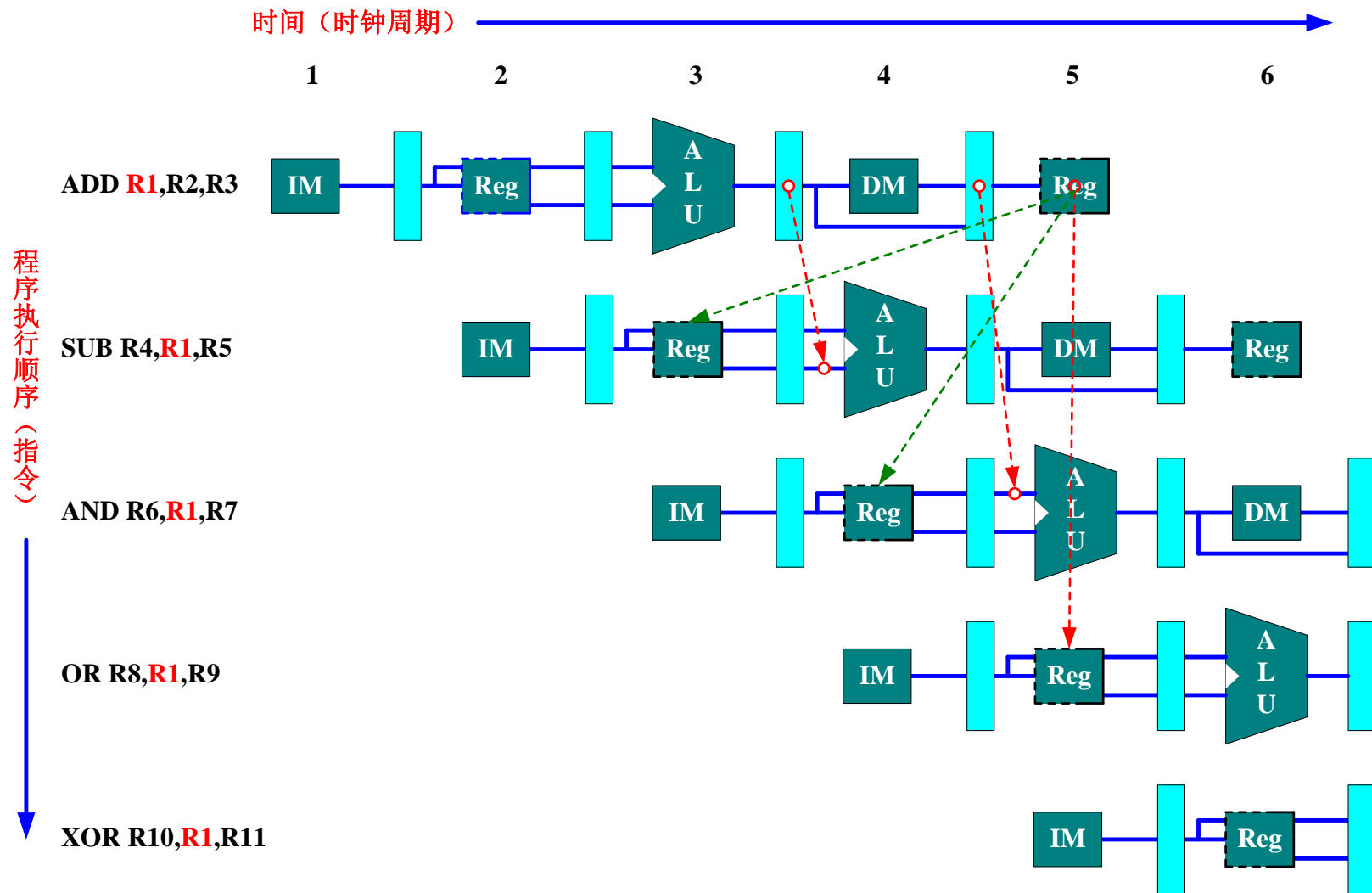
分支延迟仅需要1个是周期

图 3.33 为减少分支延迟,对图 3.32 进行改进后的流水线数据通路



习题3.11 (相关, 定向, 指令调度)

采用定向技术消除数据相关



数据重定向, 解决数据相关问题



习题3.11 (相关, 定向, 指令调度)

解:

1. 无定向: 每轮循环从第1条指令开始到下轮循环第1条指令开始 (此时最后一条指令bnez r4,Loop才执行完ID 周期) 为15拍。

末轮循环的最后一条指令 (bnez r4,Loop) 在ID周期后还执行3 拍才结束.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
lw r1,0(r2)	IF	ID	EX	MEM	WB														
daddi r1,r1,1		IF	S	S	ID	EX	MEM	WB											
sw r1,0(r2)					IF	S	S	ID	EX	MEM	WB								
daddi r2,r2,4								IF	ID	EX	MEM	WB							
dsub r4,r3,r2									IF	S	S	ID	EX	MEM	WB				
bnez r4,Loop												IF	S	S	ID	EX	MEM	WB	★
halt															IF				
lw r1,0(r2)																IF	ID	EX	
15×99 + 3 = 1488																			

需要进行 $396/4=99$ 次循环, 由于每次分支都清空流水线。从上图可以看出每次循环需要15个时钟周期, 因此总共需要的时钟周期数= $15 \times 99 + 3 = 1488$

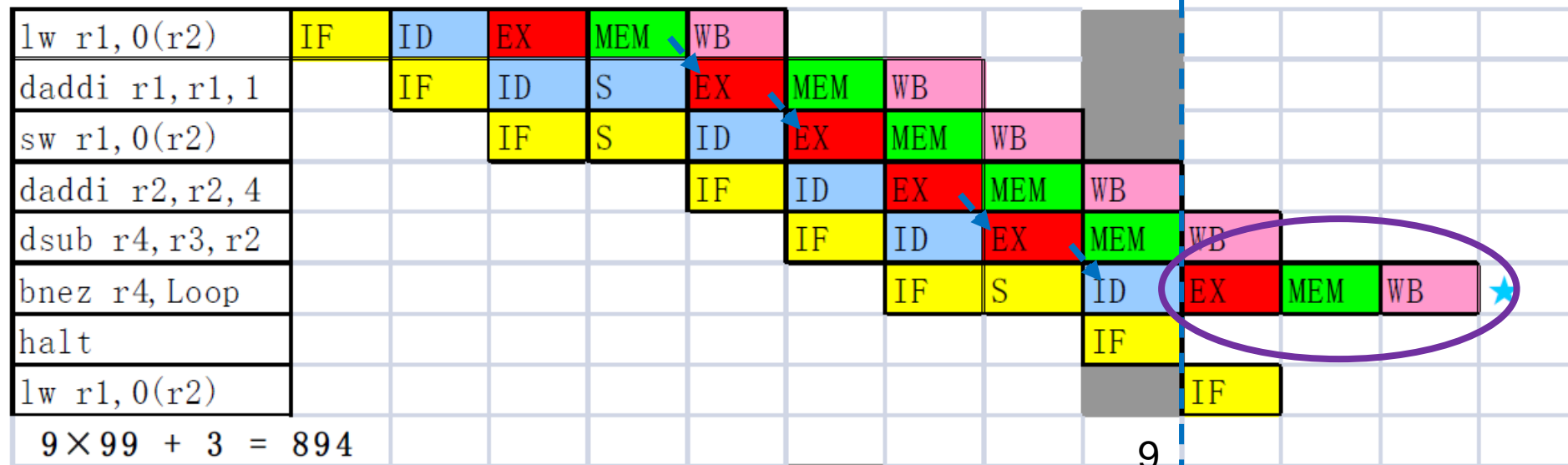


习题3.11 (相关, 定向, 指令调度)

2. 采用定向技术, 按“预测分支失败”的策略处理分支指令的

每轮循环第1 条指令开始到下轮循环第1 条指令开始为9拍

末轮循环的最后一条指令 (bnez r4,Loop) 在ID周期后还执行3拍才结束。

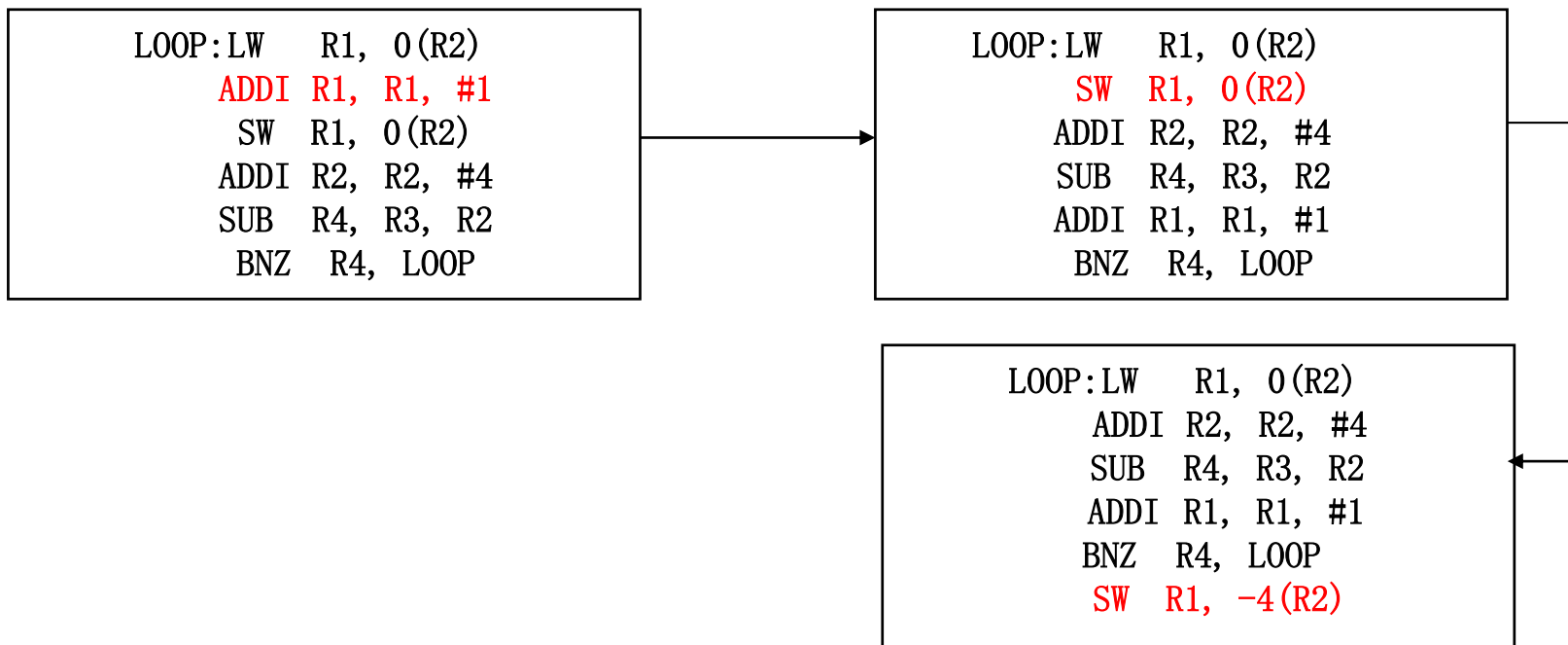


需要进行 $396/4=99$ 次循环, 由于每次分支都清空流水线。从上图可以看出每次循环需要9个时钟周期, 因此总共需要的时钟周期数为 $9 \times 99 + 3 = 894$



习题3.11 (相关, 定向, 指令调度)

3. 指令执行重新排序如下:
- | | | |
|------|------------|---------------------|
| lw | r1,0(r2) | ;加法寄存器R1←取数(R2) |
| addi | r2,r2,#4 | ;指针R2←指针R2+4 |
| sub | r4,r3,r2 | ;R4←R3-R2 |
| addi | r1,r1,#1 | ;R1←R1+1 |
| bnez | r4,Loop | ;若R4≠0, 循环 |
| sw | r1, -4(r2) | ;分支延迟槽, 存数(R2-4)←R1 |





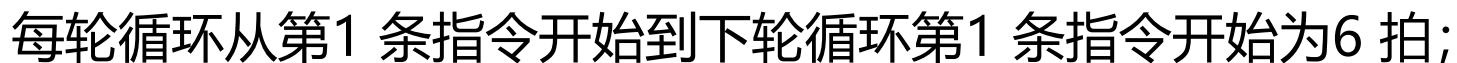
```
loop: lw  r1, 0(r2)
```

```
sub r4,r3,r2
```

```
addi r1,r1,#1
```

bnz r4,loop

sw r1,-4(r2)



末轮循环的最后一条指令 (sw r1,-4(r2)) 在ID周期后还执行4 拍才结束:

总拍数 = $6 \times 99 + 4 = 598$



习题5.8 (分支预测技术)

假设有一条长流水线，仅仅对条件转移指令使用分支目标缓冲。假设分支预测错误的开销为4个时钟周期，缓冲不命中的开销为3个时钟周期。假设命中率为90%，预测精度为90%，分支频率为15%，没有分支的基本CPI为1。

(1) 求程序执行的CPI。

(2) 相对固定的2个时钟周期延迟的分支处理，哪种更快？

解：

(1) 程序执行的CPI=没有分支的基本CPI+分支带来的额外开销

额外开销=15%*(90%命中*10%预测错误*4+10%没命中*3)=0.099

所以程序执行的CPI=1+0.099=1.099。

(2) 采用固定的2个时钟周期延迟的分支处理

$$\text{CPI} = 1 + 15\% * 2 = 1.3$$

由 (1) (2) 知分支目标缓冲方法执行速度快。



习题5.9 (分支预测技术)

假定分支目标缓冲的命中率为90%，程序中无条件转移指令为5%，其它指令的CPI为1。假设分支目标缓冲包含分支目标指令,允许无条件转移指令进入分支目标缓冲,则CPI是多少。假定原来的CPI为1.1。

(1) 原来不采用分支目标缓冲器BTB情况下

$$\text{实际CPI} = \text{理想CPI} + \text{各种停顿拍数} = 1 + 5\% \times L = 1.1$$

$$\text{解出 } L = 2$$

(2) 现在采用分支目标缓冲器BTB情况下

$$\text{实际CPI} = \text{理想CPI} + \text{各种停顿拍数} = 1 + 5\% \times 10\% \times 2 = 1.01$$



习题5.11 (超标量/超长指令字/超流水)

设指令流水线由取指令,分析指令和执行指令3个部件构成,每个部件 Δt ,连续12条指令,分别画出ILP为4的超标量,超长指令字处理机和超流水线的时空图,并分别计算相对标量流水处理机的加速比.

1. 标量流水处理机

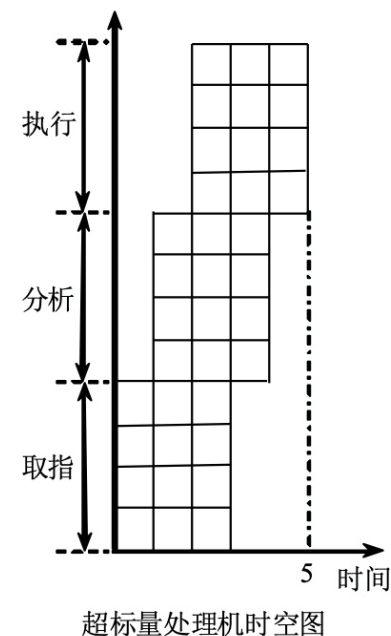


$$T_k = (k+n-1) \Delta t = (3+12-1) \Delta t = 14 \Delta t$$

2. 超标量处理机

$$\begin{aligned} \text{ILP}=4, \text{ 执行12条指令 } T_k &= (k+n-1) \Delta t \\ &= (3+3-1) \Delta t = 5 \Delta t \end{aligned}$$

$$\text{加速比 } S = 14 \Delta t / 5 \Delta t = 2.8$$





习题5.11 (超标量/超长指令字/超流水)

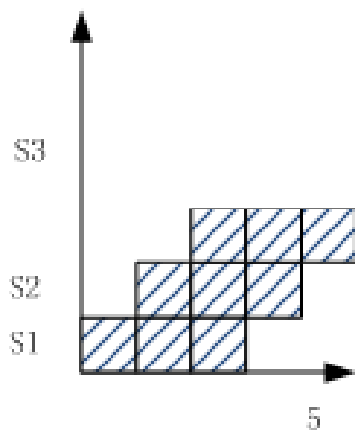
3. 超长指令字处理机

采用指令级并行技术, ILP=4,

12个任务组装成3条长指令, 每条含4条小指令, $n=3$ 。

$$T_k = (k+n-1) \Delta t = (3+3-1) \Delta t = 5 \Delta t,$$

$$\text{加速比 } S = 14 \Delta t / 5 \Delta t = 2.8$$



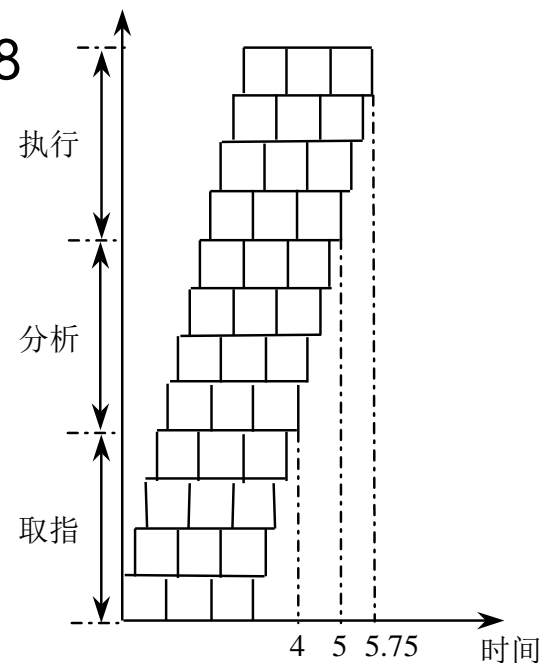
4. 超流水线处理机

每1/4个时钟周期启动一条指令。

执行完12条指令需 $T_4 = 5.75 \Delta t$

$$T_k = (k+n-1) \Delta t = (3+3-1) \Delta t = 5 \Delta t,$$

$$\text{加速比 } S = 14 \Delta t / 5 \Delta t = 2.8$$



谢谢!

