

一. PPT 中习题.

【例1】某处理器中，浮点加法器采用4级流水线实现，流水线示意图如下图所示，每级处理时间 $\Delta t_0 = 250\text{ps}$ 。

请计算：

- (1) 该浮点加法器计算100组数据采用非流水和流水处理所用时间各是多少？
- (2) 采用流水处理的加速比是多少？
- (3) 采用流水处理的最大吞吐率是多少？



解：1. 由流水线示意图可得

计算100组数据采用非流水时间为：

$$T_{\text{非流水}} = n m \Delta t_0 = 100 \times 4 \times 250\text{ps} = 10^5\text{ps} = 100\text{ns}$$

计算100组数据流水时间为：

$$T_{\text{流水}} = m \Delta t_0 + (n-1) \Delta t_0 = (4 + 100 - 1) \times 250\text{ps} = 2.575 \times 10^4\text{ps} = 25.75\text{ns}$$

$$\text{ps: } 1\text{s} = 10^{12}\text{ps} = 10^9\text{ns} = 10^6\text{ms} = 10^3\text{ms}$$

2. 由流水线加速比定义得

采用流水处理的加速比为：

$$S = \frac{T_{\text{非流水}}}{T_{\text{流水}}} = \frac{100\text{ns}}{25.75\text{ns}} = 3.88$$

3. 采用流水处理最大吞吐率为：

$$TP_{\text{max}} = \frac{1}{\Delta t_0} = \frac{1}{250\text{ps}} = 4 \times 10^9\text{次/s} = 4\text{GFLOPs}$$

$$\text{ps: } 10^6\text{次/s} = 1\text{MFLOPs}$$

$$10^9\text{次/s} = 1\text{GFLOPs}$$

$$10^{12}\text{次/s} = 1\text{TFLOPs}$$

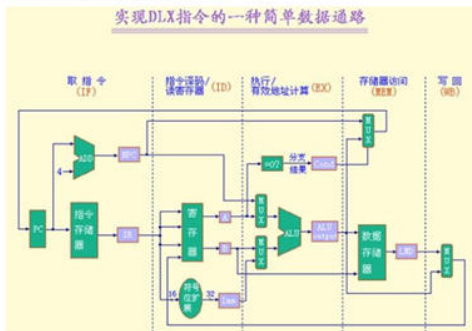
$$10^{15}\text{次/s} = 1\text{PFLOPs}$$

【例2】假设在DLX的非流水实现和基本流水线中，5个功能单元的时间为：10，8，10，10，7（ns），流水额外开销为：1ns，求加速比S。

对于DLX指令集，设计其拥有将指令执行划分为5个阶段：

1. 取指令周期（IF）
2. 指令译码/读寄存器周期（ID）
3. 执行/有效地址计算周期（EX）
4. 存储器访问/分支完成周期（MEM）
5. 写回周期（WB）

实现DLX指令的一种简单数据通路



解：由题意 计算非流水实现DLX所需时间：

$$T_{\text{非流水}} = 10 + 8 + 10 + 10 + 7 = 45 \text{ ns}$$

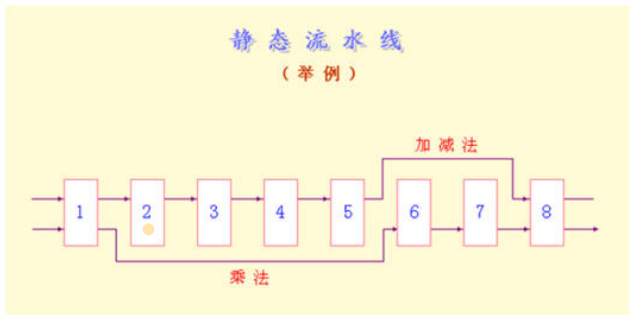
计算流水实现DLX所需时间：

$$T_{\text{流水}} = \max(t_i) + 1 = 10 + 1 = 11 \text{ ns}$$

流水线加速比 为：

$$S = \frac{T_{\text{非流水}}}{T_{\text{流水}}} = \frac{45}{11} = 4.1$$

【例3】在静态流水线上计算 $\sum_{i=1}^4 A_i B_i$ ，求：吞吐率，加速比，效率。



解: 由题意, 确定流水处理计算过程.

$$\sum_{i=1}^4 A_i B_i = A_1 B_1 + A_2 B_2 + A_3 B_3 + A_4 B_4$$

$$\begin{array}{ccccc} A_1 B_1 & & A_2 B_2 & & A_3 B_3 \\ & \swarrow \quad \searrow & & \swarrow \quad \searrow & \\ & + & & + & \\ & \swarrow \quad \searrow & & \swarrow \quad \searrow & \\ & & + & & \end{array}$$

$$\text{吞吐率} = TP = \frac{7}{200t}$$

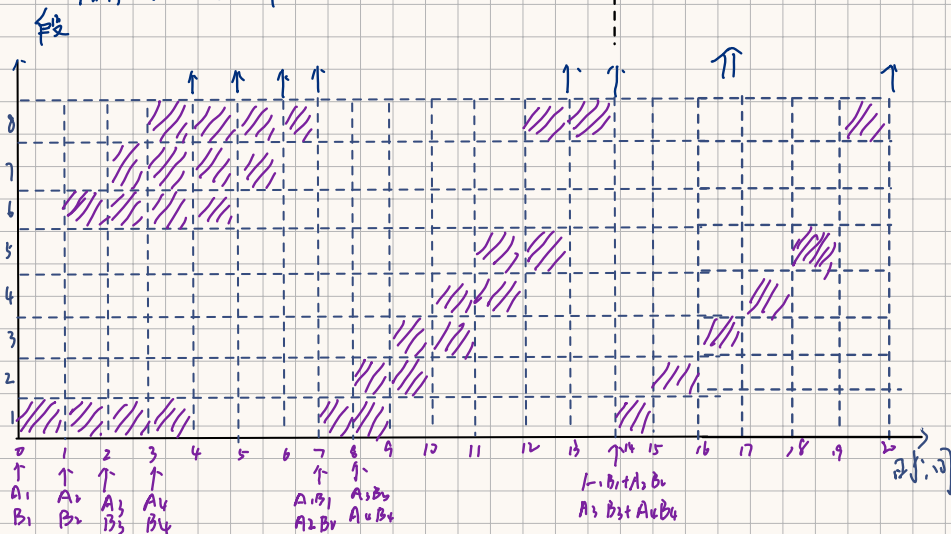
加速比:

$$S = \frac{T_{\text{非液体}}}{T_{\text{液体}}} = \frac{340\text{e}}{200\text{e}} = 1.7$$

敘辛:

$$\bar{L} = \frac{34}{8 \times 20} = 0.21$$

绘制时空图如下:



二. 课后题 (5, 9, 10) ~~18~~

6.1 列举用 k 级流水线设计浮点处理器的优缺点。

解: 6.1.

优点: ① 提高浮点处理器吞吐率。

吞吐率指流水线在单位时间里输出的结果, 流水线技术减少了组合逻辑的级数, 提高了处理器吞吐能力。

缺点: ① 产生了输入输出延迟。由于输入了流水线寄存器, 导致第一个输出在第 k 个时钟周期得到, 之后每个时钟周期均会有一个输出。

② 用空间换复杂度换取时间 (性能复杂度)。

③ 存在相关问题: 控制相关, 数据相关, 结构相关。

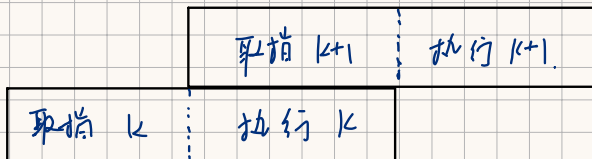
6.2 一个浮点流水线有 5 级, 其延迟分别为 110ns、90 ns、120 ns、80 ns、100 ns
该流水线的最大吞吐量是多少 MFLOPS?

解: 6.2. 由最大吞吐率公式得:

$$TP_{\max} = \frac{1}{\max(t_{oi})} = \frac{1}{120 \text{ ns}} = 8.33 \times 10^6 / \text{s} = 8.33 \text{ MFLOPS}$$

6.3 何谓指令的重叠执行方式? 请举一例, 以示意图描述之。

解: 指令的重叠执行: 指在相邻的指令之间, 第 k 条指令与取第 k+1 条指令同时进行。



5. 指令的执行可采用顺序执行、重叠执行和流水线三种方式，它们的主要区别是什么？各有何优缺点。

答：(1) 指令的顺序执行是指指令与指令之间顺序串行。即上一条指令全部执行完后，才能开始执行下一条指令。

优点：控制简单，节省设备。缺点：执行指令的速度慢，功能部件的利用率低。

(2) 指令的重叠指令是在相邻的指令之间，让第 k 条指令与取第 $k+1$ 条指令同时进行。重叠执行不能加快单条指令的执行速度，但在硬件增加不多的情况下，可以加快相邻两条指令以及整段程序的执行速度。与顺序方式相比，功能部件的利用率提高了，控制变复杂了。

(3) 指令的流水执行是把一个指令的执行过程分解为若干个子过程，每个子过程由专门的功能部件来实现。把多个处理过程在时间上错开，依次通过各功能段，每个子过程与其它子过程并行进行。依靠提高吞吐率来提高系统性能。流水线中各段的时间应尽可能相等

6.4 在指令流水线中，影响流水线性能的主要障碍是条件分支指令。请简要介绍至少 3 种处理条件分支指令的方法。

解：① 冻结流水线：在指令译码阶段检测出分支指令后，则在同目标地址确定前删除所有紧跟分支指令之后的所有指令；当分支指令从执行阶段退出，确定新 PC 值后，流水线依据新 PC 值填充流水线。

② 预取分支目标：当分支指令被识别后，除了顺序指令，分支目标也被预取，并保存到分支缓冲器。

③ 循环缓冲器：循环缓冲器是一种容量小，速度高的存储器，保存最近 n 条顺序预取的指令。若分支发生，硬件首先检查缓冲器，若循环缓冲器中存在分支目标，以下一条指令从缓冲器获取。

④ 分支预测：

1) 静态分支预测：在编译阶段完成。预测方法包括：

1) 预测分支不会发生 { 预测成功：分支失败，流水线正常执行
预测失败：分支成功，空操作代替已取指令，
2) 预测分支总是发生 { 预测成功：立刻从目标地址处取指令

3) 由编译器预测：由编译器认为转移发生时，将指令中某些量

4) 前面法。

2) 动态分支预测：在执行阶段完成。通过记录分支指令近期运行历史信息，作为预测依据，提高分支预测准确度。

⑤ 延迟分支：把分支指令延迟为长度为 n 的分支指令，后跟 $n-1$ 延迟槽。流水线遇到分支指令时，按正常方式处理，同时执行延迟槽中指令。

循环缓冲器优点

(1) 由于采用了预取方式，循环缓冲器将顺序地保存现行指令及其后的一些指令。当分支未发生时，顺序获取的指令将会有效，这时只要在缓冲器中取指令即可，而不必进行常规的存储器访问。

(2) 通常，循环缓冲器的容量有限。但是，对于目标地址仅仅是在分支指令之后的几个单元处，则当分支发生时，目标将已在缓冲器中。这种情况，对于常见的 if-then 和 if-then-else 语句非常有利。

(3) 这个策略特别适合处理循环或重复操作，所以称为循环缓冲器。如果循环缓冲器大到足以容纳一个循环中的全部指令，那么，循环中的指令仅需从内存中读出一一次，可以大大加快取指令的速度。

剖面法步骤:

如果能正确预测分支，就可以跳转到目的地址继续执行。如果预测错误，就要找到正确的目的地址并转移到该目的地址继续执行。

这种方法的特点在于对预测错误的处理上，在预测错误时，如何取消已经执行的和将要执行的指令，通常有两种处理方法：

① 第一种是允许预测的条件分支指令之后的指令继续执行，直到它们将要修改计算机的状态(例如向寄存器中保存数据)。这时，并不把计算结果存入寄存器，而是存入一个临时寄存器，当得知预测结果正确时，再把该值复制到实际的寄存器中。

② 第二种是记录将要被覆盖的寄存器的原值(可以保存在临时寄存器中)，这样当计算机发现自己发生预测错误时，可以恢复到正确的状态。

6.5 某 CPU 内有 5 级指令流水线，每级的处理时间(包括级间缓冲延迟)为 10ns、5ns、5ns、10ns、5ns。

(1) 当执行 1000 条指令时，该流水线的吞吐率和加速比是多少？

(2) 若要改进该流水线的性能，可对流水线做何改造？改造后的流水线吞吐率可达到多少？

解：流水线执行 1000 条指令所用时间为：

$$T_{\text{流水}} = (10 + 5 + 5 + 10 + 5) + 999 \times 10 = 10025 \text{ ns}$$

由吞吐量定义得

$$TP = \frac{n}{T_{\text{流水}}} = \frac{1000}{10025 \text{ ns}} = 99.75 \text{ MIPS}$$

百万次/秒

非流水线执行时间为：

$$T_{\text{非流水}} = n \cdot \sum_{i=1}^5 t_i = 1000 \times (10 + 5 + 5 + 10 + 5) = 35000 \text{ ns}$$

由加速比定义得

$$S = \frac{T_{\text{非流水}}}{T_{\text{流水}}} = \frac{35000 \text{ ns}}{10025 \text{ ns}} = 3.5$$

21. 可将两段瓶颈变为两段, 每段 5 ns, 此时 7 段流水线的工作时间相同。

$$T_{\text{流水}} = 35 + 999 \times 5 = 5030 \text{ ns}$$

$$T_{\text{非流水}} = 1000 \times 35 = 35000 \text{ ns}$$

$$TP = \frac{1000}{5030} = 198.8 \text{ n.sps}$$

$$S = \frac{35000}{5030} = 6.958$$

6.6 某流水线为 m 段, 各段的处理时间为 $t_i (i=1, 2, 3, \dots, m)$ 。现有 n 个任务需经此流水线完线, 试计算:

(1) 流水线完成此 n 个任务所需要的时间。

(2) 与非流水线顺序执行该 n 个任务相比, 流水线的加速比是多少?

解: (1) $T_{\text{流水}} = \sum_{i=1}^m t_i + (n-1) \cdot t_{\max}$ $t_{\max} = \max\{t_1, t_2, \dots, t_m\}$

$$\therefore S = \frac{T_{\text{非流水}}}{T_{\text{流水}}} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m t_i + (n-1) t_{\max}}$$

6.7 流水 CPU 中的主要问题是 结构 相关, 数据 相关和 控制 相关; 为此需要采用相应的技术对策, 才能保证流水畅通而不断流。

定义:

(1) 结构相关。当硬件资源满足不了流水线同时重叠执行指令的要求, 而发生资源冲突时, 出现结构相关。

(2) 数据相关。当一条指令需要用到前面某条指令的结果, 而前面的指令尚在流水还未产生结果, 因而不能重叠执行时, 发生数据相关。 3种

(3) 控制相关。当流水线遇到分支等转移类指令或其他能够改变 PC 值的指令时, 产生控制相关。

解决方法:

① 结构相关:

1、增加资源副本

可以设计数据存储器和指令存储器, 流水线的取指段与数据访存段就可以通过两个独立的通路同时访问两个独立的存储器。

2、延迟 (或暂停) 流水线

通过延迟 (或暂停) 流水线的冲突段或在冲突段插入流水线气泡 (气泡在流水线中只占资源不做实际操作), 使各段“轮流”使用资源。

3、改变资源以便它们能并发的使用

在相邻近的指令间尽可能不使用相同的资源。例如, 在相邻的 m (流水线的段数) 条指令中, 不相关的数据尽量使用不同的寄存器; 或通过程序再设计或寄存器重命名技术来改变寄存器资源。

② 数据相关

1. 采用定向技术

定向通道是指在某些流水线段之间设置的直接连接通路。当定向硬件检测到前面某条指令的结果操作数就是当前指令的源操作数时，控制逻辑会将前面那条指令的结果从其产生的地方直接连接到当前指令所处的位置。

2. 增加专用硬件

加流水线互锁硬件。互锁硬件先要检测流水线中指令的数据相关性，当互锁硬件发现数据相关时，使流水线工作停顿下来，直到相关消失为止。

3. 利用编译器

某些系统的编译器可以对指令重新排序或插入空操作指令，使得加载任何冲突数据的操作被延迟，但对程序逻辑或输出不受影响，这种技术称为流水线调度或指令调度。

③ 控制相关：见 6.4

6.8 假设一条具有 4 个功能段的流水线，各段执行时间是 1ns、2ns、2ns、3ns，计算完成 100 条连续指令的时间、吞吐率、加速比、效率。

解：1. 100 条连续指令完成时间：

$$T_{\text{总}} = (1 + 2 + 2 + 3) + 99 \times 3 = 305 \text{ ns}$$

2. 吞吐率：

$$TP = \frac{100}{305 \text{ ns}} = \frac{100}{305 \times 10^{-9} \text{ s}} = \frac{100}{3.05 \times 10^{-7} \times 10^6} \text{ MIPS} = 28571 \text{ MIPS}$$

3. 加速比：

$$S = \frac{100 \times 8}{305} = 2.62$$

4. 效率：

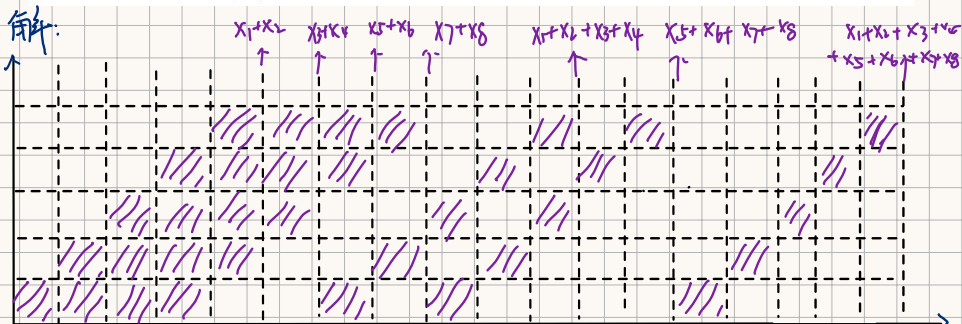
$$E = \frac{T_{\text{非流水}}}{T_{\text{流水}} \cdot 4} = \frac{800}{305 \times 4} = 65.57\%$$

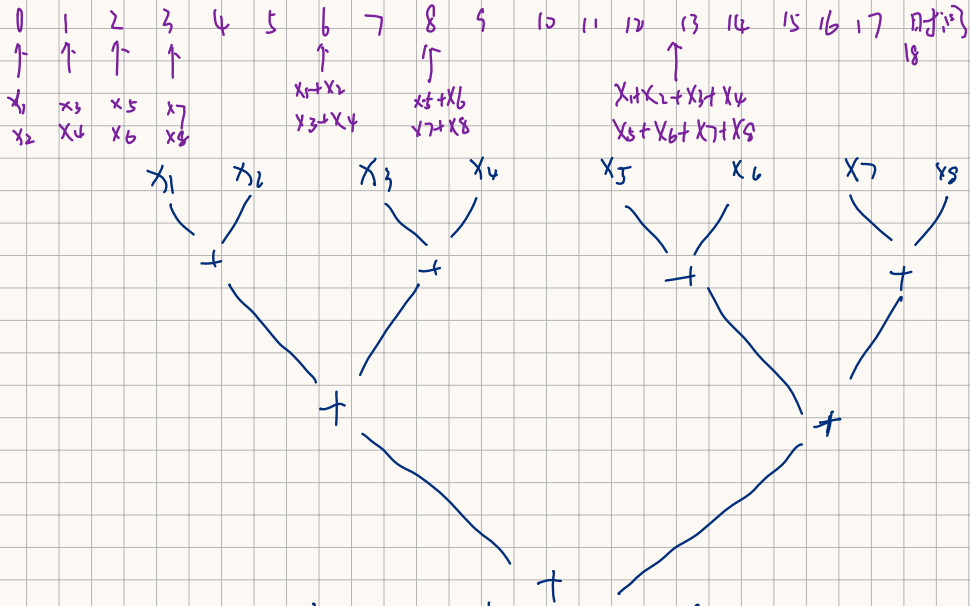
6.9 在一台具有 5 个功能段的线性流水线处理机上计算：

$$\sum_{k=1}^8 X_k$$

每个功能段均为 1 个时钟周期，设时钟频率为 100MHz。计算实际吞吐率、实际加速比、实际效率。

解：





时钟周期: $T = \frac{1}{100 \times 10^6} = \frac{1}{10^8} \text{ s} = 10^{-8} \text{ s}$

实际吞吐率: $TP = \frac{7}{18 \times 10^{-8}} = 38.89 \text{ MIPS}$

实际加速比: $S = \frac{5 \times 7 \times 10^{-8}}{18 \times 10^{-8}} = 1.94$

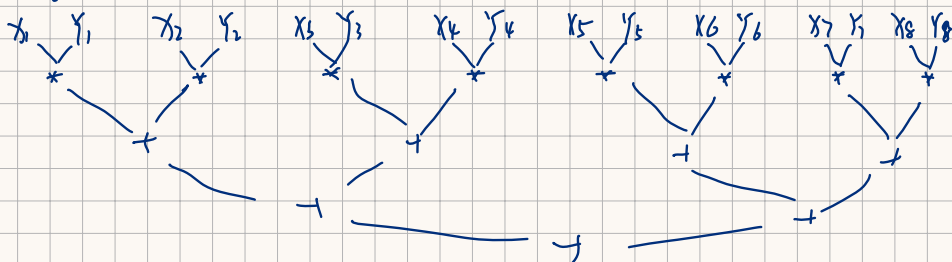
实际效率: $E = \frac{35}{18 \times 5} = 38.9\%$

6.10 在一条具有 6 个功能段静态多功能的流水线上，计算：

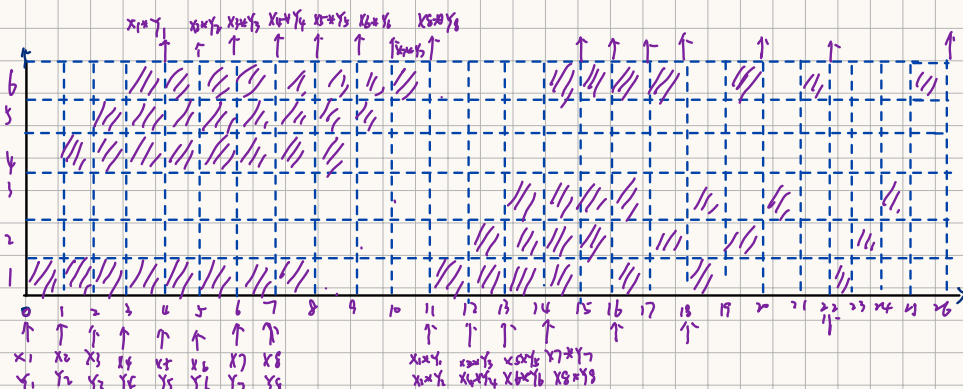
$$\sum_{k=1}^8 (X_k * Y_k)$$

其中，加法用 1、2、3、6 功能段，乘法用 1、4、5、6 功能段。计算吞吐率、加速比和效率。

解：流水线过程。



时空图如图7.



吞吐率: $TP = \frac{15}{26 \Delta t}$

加速比: $S = \frac{15 \times 4 \Delta t}{26 \Delta t} = 2.31$

效率: $E = \frac{15 \times 4 \Delta t}{26 \times 6 \Delta t} = 38.5\%$

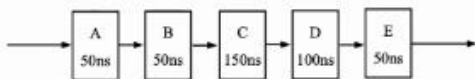
6.11 说明超标量处理机和超流水线处理机的差别。

解: 超标量处理机: 采用多指令流水线, 每个时钟周期可以流出多条指令。

超流水线处理机: 将功能部件进一步流水线化, 使得一个功能部件一向可以处理多条指令。

三. 期末考题.

四. (本题 15 分) 某流水线有 5 级, 其延迟分别为 50ns、50ns、150ns、100ns 和 50ns。



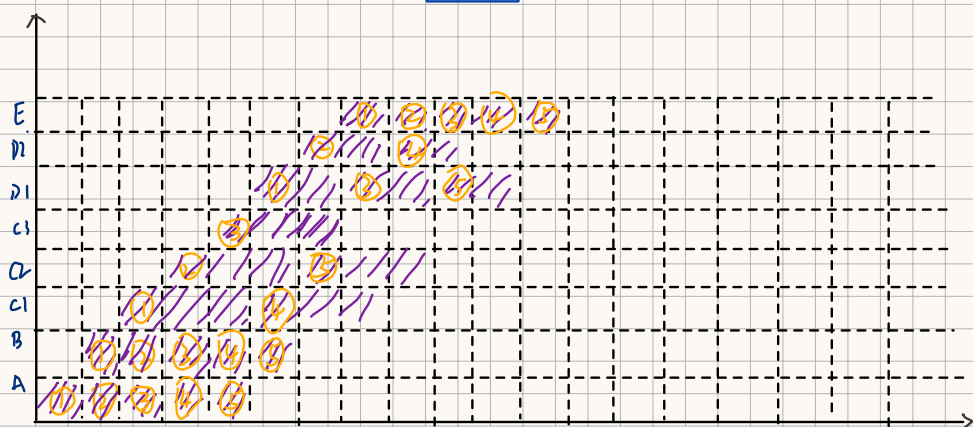
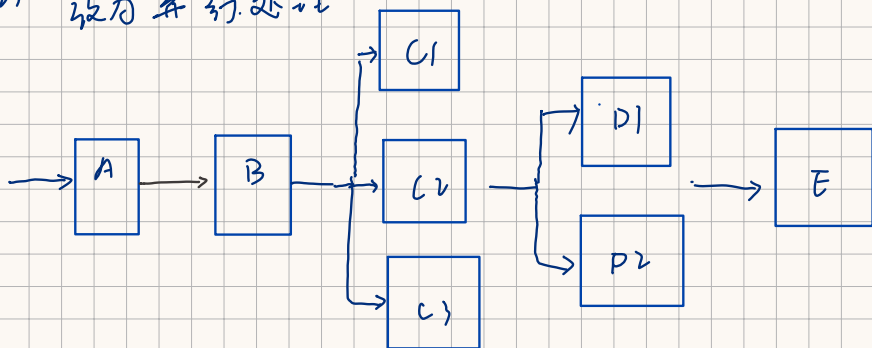
要求:

(1) 该流水线的最大吞吐率是多少 MIPS?

(2) 在维持流水线级数不变的情况下, 如何将平均吞吐时延降至 50ns, 给出改造方案:
并且, 在改造后的流水线上完成任务 1 到 5, 画出改造后的时空图。

1) 解 $TP_{max} = \frac{1}{\max(t_{oi})} = \frac{1}{150ns} = 6.667 \text{ MIPS}$

2) 改为并行处理



在 CPU 总晶体管规模基本一致的前提下，试分析超标量流水线 (Super-Pipelined)、超流水流水线 (Super-Scalar)、超标量超流水流水线 (Super-Pipelined Super-Scalar) 三种构架中，哪种构架的性能最优？试简述原因。

表 基于指令流水线技术的4种不同类型处理机的性能比较

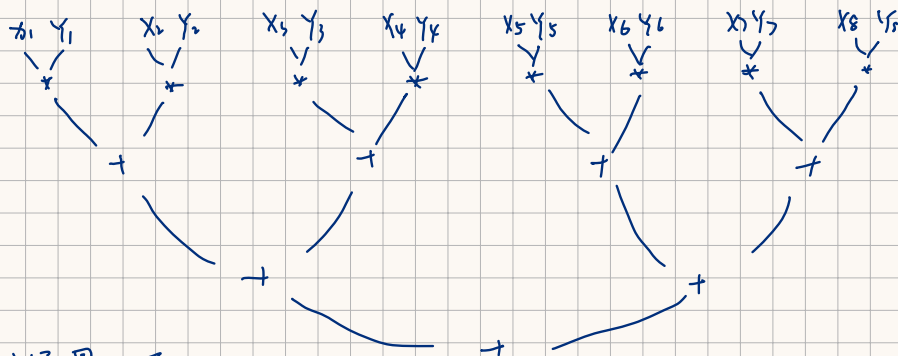
机器类型	k段流水线基准标量处理机	m度超标量处理机	n度超流水线处理机	(m, n)度超标量超流水线处理机
机器流水线周期	1个时钟周期	1	1/n	1/n
同时发射指令条数	1条	m	1	m
指令发射等待时间	1个时钟周期	1	1/n	1/n
指令及并行度ILP	1	m	n	$m \times n$

四. JZP 测试题:

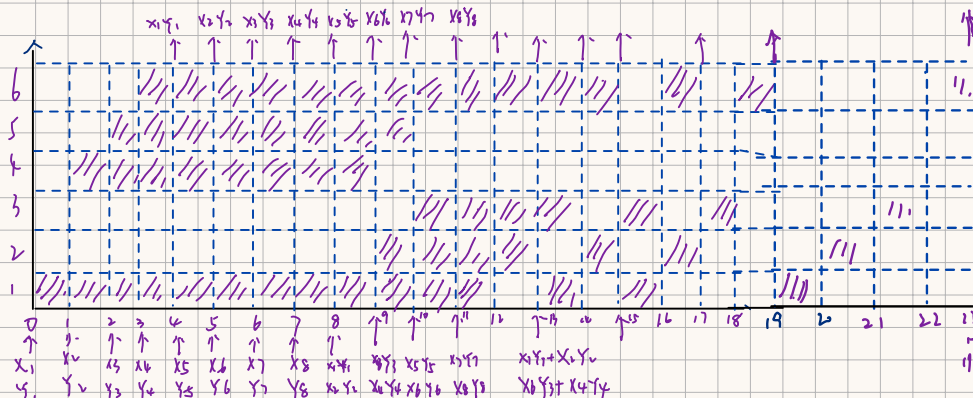
二. 在一条6功能段的动态流水线上计算 $\sum_{k=1}^8 (X_k \times Y_k)$, 其中加法使用1、2、3和6段, 乘法使用1、

4、5和6段。计算吞吐量、加速比和效率。假设每个单位时间是10ns。

解. 流水过程如下:



时空图如下:



吞吐量: $TP = \frac{14}{23 \times 10 \text{ ns}} = \frac{14}{23 \times 10^{-9}} \text{ s}$

加速比: $S = \frac{14 \times 4 \times 10 \text{ ns}}{23 \times 10 \text{ ns}}$

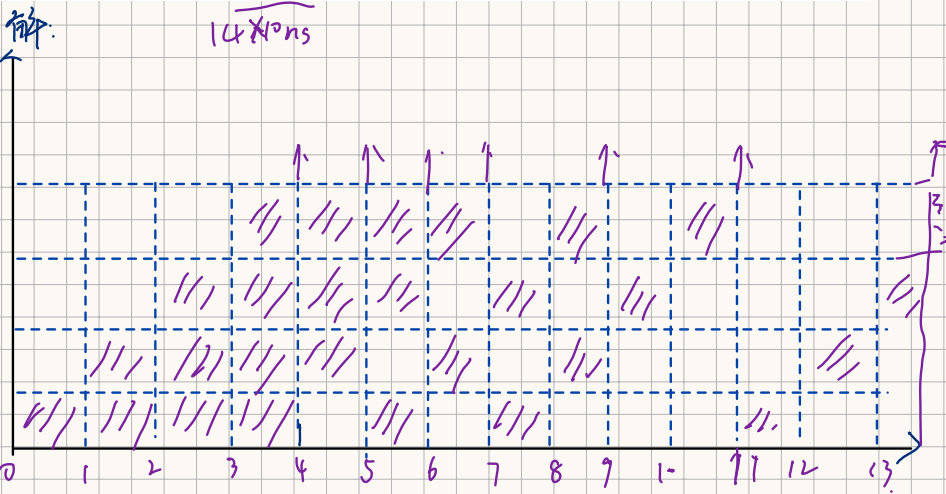
效率: $E = \frac{14 \times 4}{23 \times 6} <$

四. 一个应用了直通技术(Forwarding)的加法四段流水线，其输出可直接返回到输入端或寄存器，每

段经过时间均为10ns，试计算： $\sum_{i=1}^8 A_i$

1. 画出时空图。

2. 说明完成计算最少需要多少时间，加速比、吞吐率和效率各为多少？



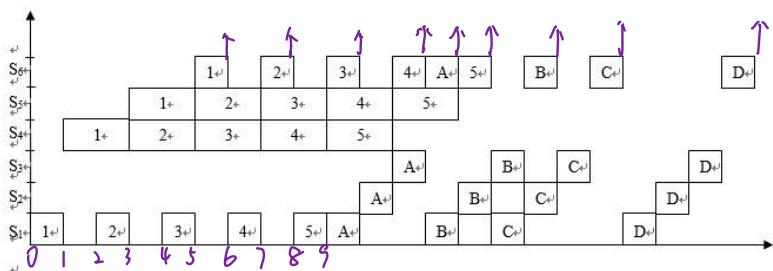
$$S = \frac{7 \times 4 \times 10 \text{ ns}}{14 \times 10 \text{ ns}}$$

$$E = \frac{7 \times 4}{14 \times 4} = 50\%$$

$$TP = \frac{7}{14 \times 10 \text{ ns}} = \frac{1}{20 \text{ ns}}$$

有一条动态流水线由6段组成，加法用1、2、3、6段，乘法用其中的1、4、5、6段，除第4、5段的延迟时间为 $2\Delta t$ 外，其余段的延迟时间都为 Δt 。流水线的输出端与输入端有直接数据通路，且设有缓冲寄存器。若用流水线按最快的处理方式计算： $\sum_{i=1}^n A_i B_i$ 求时间

2. (1) 时空图 6分



其中 1~5 代表 $A_1B_1 \sim A_5B_5$, A 代表 $1+2$, B 代表 $3+4$, C 代表 $A+5$, D 代表 $B+C$

$$T=22\Delta t$$