

# 《计算机组成原理》

## （第七讲习题答案）

厦门大学信息学院软件工程系 曾文华

2023年5月31日

# 第7章 指令流水线

- 7.1 流水线概述
- 7.2 流水线数据通路
- 7.3 流水线冲突与处理
- 7.4 流水线的异常与中断
- 7.5 指令级并行技术

# 习题 (P283–286)

- 7.1
- 7.2
- 7.4
- 7.5
- 7.6
- 7.8
- 7.9

# 习题答案（P283-286）

## 习题 7.1 解释下列名称

- **流水线技术**：流水线技术是将一个复杂的任务分解为若干个阶段，每个阶段与其它阶段并行处理，其运行方式与工业流水线十分相似。
- **指令流水线**：将流水线技术应用于指令的解释执行过程，就形成了指令流水线。
- **运算流水线**：将流水线技术应用于数据运算的执行过程，如第3章的乘法流水线（图3.15）、浮点加减法流水线（图3.26）。
- **流水寄存器**：指令流水线在每个执行阶段的后面都需要增加一个流水寄存器，用于锁存本段处理完成的所有数据或结果，以保证本段的执行结果能在下一个时钟周期给下一个阶段使用。
- **流水时空图**：可以用时空图的方式描述指令在流水线不同功能段中的执行情况，时空图的横坐标表示时间、纵坐标表示空间（流水线的功能段）。
- **数据冲突**：当前指令要用到先前指令的操作结果，而这个结果尚未产生，或尚未送达指定的位置，会导致当前指令无法继续执行，称为数据冲突；数据冲突包括：先写后读冲突、先读后写冲突、写后写冲突。

## 习题 7.1 解释下列名称（续）

- **结构冲突**：多条指令在同一时钟周期都需使用同一操作部件引起的冲突，称为结构冲突（也称为资源冲突）。
- **控制相关**：当流水线遇到分支指令时（或子程序调用指令、子程序返回指令），在分支指令之后载入流水线的相邻指令，可能因为分支跳转而不能进入执行阶段，这种冲突称为控制相关（控制冲突、分支冲突）。
- **先写后读冲突**：
  - `and $s1,$s2,$s3`
  - `sub $s2,$s1,$s2`
  - 第1条指令还没有执行完毕（还没有完成对\$s1寄存器的写），第2条指令就已读取\$s1寄存器的值，会导致第2条指令读取的是第1条指令之前的\$s1寄存器的值，从而发生先写后读冲突（必须是：第1条指令先完成对\$s1的写，然后是第2条指令读\$s1）。
- **先读后写冲突**：
  - `sw $s3,0($zero)`
  - `sub $s3,$s1,$s2`
  - 第1条指令还没有执行完毕（还没有完成对\$s3寄存器的读），第2条指令就已完成对\$s3寄存器的写，会导致第1条指令读取的是第2条指令改写后的\$s3寄存器的值，从而发生先读后写冲突（必须是：第1条指令先完成对\$s3的读，然后是第2条指令写\$s3）。
- **写后写冲突**：
  - `lw $s3,0($zero)`
  - `sub $s3,$s1,$s2`
  - 第1条指令还没有执行完毕（还没有完成将存储器中的内容写到\$s3寄存器），第2条指令就已完成对\$s3寄存器的写，会导致第2条指令后的\$s3的值，为第1条指令从存储器中读出的值（必须是：第1条指令先完成对\$s3的写，然后是第2条指令写\$s3）。
- **气泡**：当流水线检测到数据冲突或控制冲突后，可以采用插入“气泡”的方法（即清空IF/ID流水寄存器和ID/EX流水寄存器）解决冲突。
- **重定向**：假设EX段的指令与MEM、WB段的指令存在数据相关，EX段的寄存器操作数（RS、RT）就不能由ID/EX流水寄存器提供，而是要由MEM段或WB段提供；此时可以通过重定向（Forwarding，也称为旁路：Bypass）的方式，将MEM段的AluResult或WB段的WriteBackData，送到EX段。
- **延迟槽**：流水线中的延迟分支技术由编译器将一条或多条有用的指令或空指令放在分支指令后，作为分支指令延迟槽，不论分支指令是否跳转，都要按顺序执行延迟槽中的指令。
- **动态分支预测**：依据分支指令的分支跳转历史，不断地对预测策略进行动态调整，具有较高的预测准确率；动态分支预测正是利用了分支指令的分支局部性进行预测。

## 习题 7.1 解释下列名称（续）

- **超标量技术**：动态多发射由硬件动态处理多发射流水线运行过程中出现的各种冲突，动态多发射也称为超标量（**Suoverscalar**）技术。
- **超流水线技术**：超流水线（**Superpipelined**）技术主要通过增加流水线功能段数目，尽量减少各段关键延迟时间，提高流水线主频，来提升流水线性能。
- **动态多发技术**：动态多发射由硬件动态处理多发射流水线运行过程中出现的各种冲突，动态多发射也称为超标量（**Suoverscalar**）技术。
- **静态多发技术**：多发射会引起更多的相关性（冲突），如果将冲突全部交给编译器静态解决，就是静态多发射，超长指令字（**Very Long Instruction Word, VLIW**）技术就属于静态多发射。
- **同步中断**：指令异常也称为同步中断（因为异常指令执行而同步产生的），同步中断必须立即处理，处理完毕后，异常指令可能需要重新执行。
- **异步中断**：外部I/O中断请求和硬件故障异常与指令无关，也称为异步中断，不一定要立即响应，可以在处理器方便的时候进行处理。

## 习题 7.2 选择题

- (1) **C**
  - 4级流水线CPU执行n条指令需要  $n+(4-1)$  时钟周期。执行100条指令需要103个时钟周期  $=103*(1/1.03\text{GHz})=100*10^{-9}\text{s}$ 。
  - 吞吐率=每秒执行的指令条数  $=100\text{条}/100*10^{-9}\text{s}=10^9\text{条指令/秒}$ 。
- (2) **A**
  - 流水线的时钟周期应以各功能段中最长（90ns）的为准。
- (3) **D**
  - 流水线的时钟周期应以各功能段中最长（80ps）的为准，另加上流水段寄存器的延迟（20ps），共100ps。
- (4) **B**
  - A: I1和I2: 不存在数据相关
  - B: I2和I3: 存在“先写后读”数据相关
  - C: I2和I4: 不存在数据相关
  - D: I3和I4: 不存在数据相关
- (5) **C**
  - A: I1和I3: 存在“先写后读”数据相关
  - B: I2和I3: 存在“先写后读”数据相关
  - C: I2和I4: 不存在数据相关
  - D: I3和I4: 存在“先写后读”数据相关

## 习题 7.2 选择题（续）

- (6) **A**
  - 数据旁路（转发）技术是为了解决数据相关，直接将执行结果送到其他指令所需的地方，使流水线不发生停顿，因此不会引起流水线阻塞。
  - 数据相关、条件转移、资源冲突，都会引起流水线阻塞。
- (7) **D**
  - I、II、III三个特点都有利于实现指令流水线。
- (8) **A**
  - 指令流水线数据通路不包括控制部件。
- (9) **C**
  - I: 错误（超标量流水线是指在CPU中有多条流水线，每个时钟周期内可以完成多条指令，并不能缩短流水线功能段的处理时间）
  - II: 正确
  - III: 正确
- (10) **B**
  - I: 单周期CPU的CPI=1
  - II: 多周期CPU的CPI>1
  - III: 基本流水线CPU的CPI=1
  - IV: 超标量流水线CPU的CPI<1



- **7.3 简述指令流水线的特点。**
- 答：指令流水线将一条指令的执行划分为若干个阶段，每个阶段由一个独立的功能部件来完成，依靠个功能部件的并行工作来提高系统的吞吐率和处理速度。指令流水线并不能改变单条指令的执行时间，但当指令流水线充满时可大幅提高程序的执行效率。

## 习题

### 7.4 简述采用插入气泡方法解决数据冲突的主要过程。

- 答：ID段检测到数据相关，需在EX段插入气泡，同时IF/ID段暂停，等待数据写回到寄存器堆流水线才能恢复正常，具体只需给出ID/EX流水寄存器同步清零信号，同时将PC、IF/ID流水寄存器使能信号关闭即可。

## 习题

### 7.5 简述采用重定向方法解决数据冲突的主要过程。

- 答：气泡流水线通过延缓ID段取操作数的方式来解决数据冲突问题，但气泡插入会影响流水线性能。重定向方法的基本原理是等到指令实际使用寄存器操作数时再将正确的数据从后续功能段的流水寄存器中直接旁路到正确的位置，这种方法有效避免了气泡引起的性能损失，但部分Load-Use数据相关仍然需要插入气泡。

## 习题 7.6 流水线方式缩短的是指令的执行时间还是程序的执行时间？

- 答：缩短了程序的执行时间，指令的执行时间并没有缩短，相反由于流水寄存器的存取等额外开销还会增加。

- 7.7 简述流水线中断和非流水线中断处理的差异。
- 答：流水线中可能会有多条指令同时加入结束阶段，到底应中断流水线哪一段中的指令需要考虑。假设分支指令在EX段执行，则中断处理可以选择在IF、ID、EX、MEM段进行，但考虑IF段、ID段中可能存在误取指令，所以选择EX、MEM段更加容易实现。

## 习题

7.8 如果采用气泡流水线执行下述程序，请给出类似图7.18所示的流水线时空图。注意时空图中最后一个时钟周期第5条指令进入ID段。

- `addi $s0,$s0,4`
- `lw $s1,($s0)`
- `add $s2,$s2,$s1`
- `and $s3,$s1,$s2`
- `sub $s4,$s2,$s2`

理想流水线

CLKs	IF	ID	EX	MEM	WB
1	lw				
2	add	lw			
3	sub	add	lw		
4	or	sub	add	lw	
5	and	or	sub	add	lw
6	Next Instr	and	or	sub	add

• 答：

气泡流水线

CLKs	IF	ID	EX	MEM	WB
1	addi				
2	lw	addi			
3	add	lw	addi		
4	add	lw		addi	
5	add	lw			addi
6	and	add	lw		
7	and	add		lw	
8	and	add			lw
9	sub	and	add		
10	sub	and		add	
11	sub	and			add
12	next	sub	and		

检测到lw指令与addi指令存在相关（\$s0寄存器），则插入2个气泡

检测到add指令与lw指令存在相关（\$s1寄存器），则插入2个气泡

检测到and指令与add指令存在相关（\$s2寄存器），则插入2个气泡

## 习题

7.9 如果采用重定向流水线执行7.8的程序，请给出类似图7.18所示的流水线时空图。注意时空图中最后一个时钟周期第5条指令进入ID段。

- `addi $s0,$s0,4`
- `lw $s1,($s0)`
- `add $s2,$s2,$s1`
- `and $s3,$s1,$s2`
- `sub $s4,$s2,$s2`

• 答：

重定向流水线

CLKs	IF	ID	EX	MEM	WB
1	addi				
2	lw	addi			
3	add	lw	addi		
4	and	add	lw	addi	
5	and	add		lw	addi
6	sub	and	add		lw
7	next	sub	and	add	

检测到add指令与lw指令存在相关（\$s1寄存器），则插入1个气泡



理想流水线

CLKs	IF	ID	EX	MEM	WB
1	lw				
2	add	lw			
3	sub	add	lw		
4	or	sub	add	lw	
5	and	or	sub	add	lw
6	Next Instr	and	or	sub	add

气泡流水线

CLKs	IF	ID	EX	MEM	WB
1	addi				
2	lw	addi			
3	add	lw	addi		
4	add	lw		addi	
5	add	lw			addi
6	and	add	lw		
7	and	add		lw	
8	and	add			lw
9	sub	and	add		
10	sub	and		add	
11	sub	and			add
12	next	sub	and		

**Thanks**