

作业 4 参考答案

邵艾然 <sar13@mails.tsinghua.edu.cn>

2016-06-13

作业中提到的“教材”均指：《计算机系统结构教程》，张晨曦等编著，清华大学出版社。

第 1 题（教材-习题-3.8）

有一条动态多功能流水线由 5 段组成（示意图参考教材），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。若在该流水线上计算 $\sum_{i=1}^4 (A_i \times B_i)$ ，试计算其吞吐率、加速比和效率。

参考解答

先计算 $M_1 = A_1 \times B_1$ 、 $M_2 = A_2 \times B_2$ 、 $M_3 = A_3 \times B_3$ 、 $M_4 = A_4 \times B_4$ ；再计算 $S_1 = M_1 + M_2$ 、 $S_2 = M_3 + M_4$ ；最后计算 $S_1 + S_2$ 。

画出时空图可以方便问题的求解，正确的时空图需要 7 条指令（4 条乘法指令，3 条加法指令），共 $18\Delta t$ 的执行时间。因此吞吐率为

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

单独执行一条乘法和加法的时间都是 $4\Delta t$ ，因此串行执行全部 7 条指令的时间为 $28\Delta t$ 。所以加速比为

$$S = \frac{28\Delta t}{18\Delta t} = 1.556$$

流水线效率为

$$E = \frac{28\Delta t}{5 \times 18\Delta t} = 31.11\%$$

常见问题

- 1) 乘法指令第 2 段用时 $2\Delta t$ ，因此当乘法指令连续执行时，后一条指令与前一条指令间必须间隔 Δt 的时间。这样才能保证流水线第 2 段不发生冲突。
- 2) 因为计算 S_1 要使用 M_1 、 M_2 的结果，因此 S_1 的计算必须要等 M_1 和 M_2 计算结束后才能开始。同理， S_2 的计算也必须要等 M_3 和 M_4 计算结束后才能开始。
- 3) 有些同学在计算串行总执行时间时出错。计算前请同学们认真读题，看清要求计算什么，不同的指令使用哪些流水段，每个流水段的执行需要多长时间？

第 2 题（教材-习题-3.9）

在一个 5 段流水线处理机上，各段执行时间均为 Δt ，需经 $9\Delta t$ 才能完成一个任务，其预约表参考教材。

- (1) 画出流水线任务调度的状态转移图。
- (2) 求流水线的最优调度策略和流水线的最大吞吐率。
- (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是多少？

参考解答

仅列表示意任务调度的状态转移图。

- 10001101（初始冲突向量）
 - 2: 10101111
 - 6: 10001111
 - 5,7,9+: 10001101
- 10101111

- 5,7,9+: 10001101
- 10001111
- 6: 10001111
- 5,7,9+: 10001101

最优调度策略为 (2,5)，平均延迟为 $3.5\Delta t$ 。因此最大吞吐率为

$$TP_{max} = \frac{1}{3.5\Delta t}$$

连续输入 6 个任务，流水线的实际吞吐率为

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

常见问题

- 1) 非初始冲突向量的转移条件是根据其允许间隔决定的。允许间隔就是冲突向量中，值为零的位（从右往左数）。
- 2) 不要把最大吞吐率和实际吞吐率弄混，二者并不相同。
- 3) 请大家确认总执行时间的计算方法。有些同学总是在计算出总执行时间后，再加上一，这是错误的。
- 4) 计算总执行时间时的一种常见错误： $9 + 5 \times 3.5\Delta t$ 。注意本题的最优调度策略，时间间隔是不相等的。
- 5) 转移条件“9+”最好画出来，虽然并不是强制要求。

第 3 题（教材-习题-3.10）

有一个 5 段流水线，各段执行时间均为 Δt ，其预约表参考教材。

- (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，计算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，分别求采用这两种调度策略的流水线的实际吞吐率和加速比？

参考解答

仅列表示意任务调度的状态转移图。

- 100101 (初始冲突向量)
 - 2: 101101
 - 4: 100111
 - 5,7+: 100101
- 101101
 - 2: 101111
 - 5,7+: 100101
- 100111
 - 4: 100111
 - 5,7+: 100101
- 101111
 - 5,7+: 100101

不等时间间隔最优调度策略为 (2,2,5)，平均延迟为 $3\Delta t$ 。因此最大吞吐率为

$$TP_{max} = \frac{1}{3\Delta t}$$

连续输入 10 个任务，流水线的实际吞吐率为

$$TP = \frac{10}{(7 + 9 \times 3)\Delta t} = \frac{10}{34\Delta t}$$

加速比为

$$S = \frac{10 \times 7\Delta t}{34\Delta t} = 2.059$$

等时间间隔最优调度策略为 (4)，平均延迟为 $4\Delta t$ 。因此最大吞吐率为

$$TP_{max} = \frac{1}{4\Delta t}$$

连续输入 10 个任务，流水线的实际吞吐率为

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

加速比为

$$S = \frac{10 \times 7\Delta t}{43\Delta t} = 1.628$$

常见问题

- 1) 状态转移图中任意一个闭环都能构成调度策略，不是必须从初始冲突向量出发。如本题的等时间间隔最优调度策略 (4)，就是一个不包含初始冲突向量的闭环。
- 2) 注意求新冲突向量时的计算错误。
- 3) 不要把最大吞吐率和实际吞吐率弄混，二者并不相同。
- 4) 与前一题不同，本题要求连续输入 10 个任务。因此计算实际吞吐率时，分子应为 10。
- 5) 有些同学算出的吞吐率在分子中包含 Δt ，这显然是不对的。
- 6) 请大家确认总执行时间的计算方法，有很多同学在这个问题上出错。比如，总是在计算出总执行时间后，再加上一，这是错误的。
- 7) 有些同学把完成一个任务所需的时间设成了未知数。这个数值是已知的，可以从预约表中看出。
- 8) 转移条件“7+”最好画出来，虽然并不是强制要求。

第 4 题（教材-习题-3.11）

在 MIPS 流水线上运行以下代码序列。

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

其中，R3 的初值是 R2+396。假设：在整个代码序列的执行过程中，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写操作和读操作可以通过分别把它们安排在前半个时钟周期和后半个时钟周期来实现。请问：

- (1) 在没有任何其它定向（或旁路）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和一个单周期延迟分支，请对该循环中的指令进行调度，你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。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所需要的时钟周期数。

参考解答

没有任何定向（或旁路）硬件支持的情况。

```

|      LW: IF ID EX MEM WB
| DADDIU:      IF ID S  S  EX MEM WB
|      SW:      IF S  S  ID S  S  EX MEM WB
| DADDIU:      IF S  S  ID EX  MEM WB
|  DSUB:      IF ID S  S  EX ...
|  BNEZ:      IF S  S  ID ...

```

$$18 + 17 \times 98 = 1684$$

有定向路径、采用预测分支失败策略的情况。

```

|      LW: IF ID EX MEM WB
| DADDIU:      IF ID S  EX MEM WB
|      SW:      IF S  ID EX  MEM WB
| DADDIU:      IF ID  EX  MEM WB
|  DSUB:      IF ID  EX  MEM WB

```

	BNEZ:		IF	ID	EX	MEM	WB
	(LW):					IF	ID EX ...

$$11 + 10 \times 98 = 991$$

指令调度的情况。

	LOOP: LW	R1,0(R2)					
		DADDIU R2,R2,#4					
		DADDIU R1,R1,#1					
		DSUB R4,R3,R2					
		BNEZ R4,LOOP					
		SW R1,-4(R2)					
	LW:	IF	ID	EX	MEM	WB	
	DADDIU:		IF	ID	EX	MEM	WB
	DADDIU:			IF	ID	EX	MEM WB
	DSUB:				IF	ID	EX MEM WB
	BNEZ:					IF	ID EX MEM WB
	SW:						IF ID EX MEM WB
	(LW):						IF ID EX MEM WB

$$10 + 6 \times 98 = 598$$

常见问题

- 1) 对于分支指令是在 ID 段完成的还是在 MEM 段完成的，可以有不同的理解。参考答案对前两问，按照“在 MEM 段完成”处理，对第 3 问，按照“在 ID 段完成”处理，因为第 3 问明确提到了“单周期延迟分支”。
- 2) 后一条指令的 ID 段可以与前一条指令的 WB 段在同一周期执行，因为 WB 用前半个时钟周期，而 ID 用后半个时钟周期。但当没有定向时，后一条指令的 EX 段是不可以与前一条指令的 WB 段在同一周期执行的，WB 只能把结果写回寄存器，不能直接送到 EX。

- 3) 使用了定向后，除了 load 指令引起的先写后读冲突，其它的先写后读冲突都可以避免。
- 4) 明确延迟转移槽的使用方法。有些同学新增了一条 SLOTT 指令填充延迟转移槽，这是错误的。
- 5) 很多同学为了表示分支指令的处理方法，在画时空图时也画了下一个循环中的第一条 LW 指令（如参考答案）。这样做很好。但在计算每次循环的周期数时，就忘记把属于下一个循环的 LW 指令排除在外了，导致执行时间计算错误。
- 6) 请大家确认每次循环占用周期数的计算方法，有很多同学在这个问题上出错。比如，总是在计算出周期数后，再加上一。这是错误的。
- 7) 总执行时间还可以按别的思路计算。以第一问为例，总执行时间还可以按如下方法计算

$$17 \times 99 + 1 = 1684$$

一种常见错误是把式子列成 $17 \times 98 + 1$ 。

- 8) 有些同学把指令序列记错了，导致得到错误结果。

第 5 题

学习教材 3.5 节：流水线的实现，回答以下问题（相关插图参考课件“SEC10 Pipeline (Cont)”最后几页）：

- Q1** Write down the bypass condition for the path between M (Memory) -> D (Decode) stages into register B. The path is shown with a dotted line in the figure.
- Q2** Write down the stall condition in which stalls are only caused by data hazards.
- Q3** Please write down an instruction sequence (with fewer than 5 instructions) which activates the bypass logic in Q1.

参考解答

```
| Q1: ID/EX.IR[rt] == MEM/WB.IR[rt]

| Q2: ID/EX.IR[op] == "LW" &&
|      (ID/EX.IR[rt] == IF/ID.IR[rs] ||
|      ID/EX.IR[rt] == IF/ID.IR[rt])

| Q3: LW      R1,0(R2)
|      ADDIU  R2,R2,#4
|      ADDU   R3,R1,R1
```

常见问题

- 1) 不同指令中 rs、rt、rd 的含义不同。有时 rs 和 rt 分别代表第 1 和第 2 源操作数，有时 rs 代表源操作数而 rt 代表目的操作数。请同学们参考原题中对各种指令格式说明的部分。
- 2) Q1 和 Q2 中出现的寄存器需标明是属于哪一流水段的。
- 3) Q1 和 Q2 的解答还是尽可能用符号表示（参考教材），这样比较清楚明确。
- 4) 很多同学限制 Q1 中 MEM 段的指令必须为 LW、EX 段的指令必须为 ALU，这是没必要的。其它指令，如 MEM 段为 ALU 指令、EX 段为 SW 指令，也是可以使用的。
- 5) Q1 要求的是从 MEM 段到 EX 段的、第 2 个源操作数的定向，其它定向通路就不必写了。
- 6) 从 EX 段到 EX 段也可以有定向。有些同学在回答 Q1 时特意检查，当从 EX 到 EX 的定向不满足要求时，才启用从 MEM 到 EX 的定向。这是没有必要的，选择从 EX 来的定向还是从 MEM 来的定向是由寄存器输入端的多路选择器实现的。
- 7) Q2 要注意比对 EX 段指令的目的寄存器是否与 ID 段指令的源寄存器相同。源寄存器可能有两个，要分别比对。

- 8) Q3 中，必须是 LW 指令的先写后读相关才能触发定向，且有数据依赖关系的两条指令间必须间隔 1 周期，否则即使通过定向也无法解决。注意要求触发的是 Q1 中的逻辑，所以有依赖关系的数据应作为第 2 个源操作数出现。
- 9) 对指令助记符中源和目的操作数的摆放位置可能存在不同理解，下面说明参考答案的理解方式。以指令 ADD R2,R1,R0 为例，R2 为目的操作数，R1 为第 1 个源操作数，R0 为第 2 个源操作数。