A.5 实验五 Tomasulo 算法

A.5.1 实验目的

- 1. 加深对指令级并行性及其开发的理解。
- 2. 加深对 Tomasulo 算法的理解。
- 3. 掌握 Tomasulo 算法在指令流出、执行、写结果各阶段对浮点操作指令以及 load 和 store 指令进行什么处理。
- 4. 掌握采用了 Tomasulo 算法的浮点处理部件的结构。
- 5. 掌握保留站的结构。
- 6. 给定被执行代码片段,对于具体某个时钟周期,能够写出保留站、指令状态表以及浮点寄存器状态表内容的变化情况。

A.5.2 实验平台

实验平台采用 Tomasulo 算法模拟器。环境的建立:见 A.0。

A.5.3 实验内容及步骤

首先要掌握 Tomasulo 模拟器的使用方法。(见 A.5.4 节)

1. 假设浮点功能部件的延迟时间为加减法 2个时钟周期,乘法 10个时钟周期,除法 40个时钟周期,Load部件 2个时钟周期。

(1) 对于下面的代码段,给出当指令 MUL.D 即将确认时,保留站、load 缓冲器以及寄存器状态表中的内容。

L.D F6, 24 (R2) L.D F2, 12 (R3) MUL.D F0, F2, F4 SUB.D F8, F6, F2 DIV.D F10, F0, F6 ADD.D F6, F8, F2

	ΛL	ט.ט.	10, 10,	1.7						
保留站									1	
名称	Busy	Ор	Vj	Vk		Qj	Qk	А		
Load1	No	~	-	-		-	-	4		
Load2	No	-		-		=	-	-		
Add1	No	-	-	-		-	=			
Add2	No	-		-		-		π		
Add3	No	-	-	-		-	_	4		
Mult1	Yes	MUL. D	D2	R[F4]		0	0	at the		
Mult2	Yes	DIV. D	-	D1		Mult1	0	-		
寄存器										1
名称	FO	F2	F4	F6	F8	F10)	F12	F14	
值	170	D2	(5)	D6	D4	77.			5	
Qi	Mult1	0	-	0	0	Mu	lt2	-	_	
名称	F16	F18	F20	F22	F24	F2	5	F28	F30	
值	-	-	-	-	-	-		-	100	
Qi	1751	7.0	-	(70)	77.0			-		

数据列表

D1 = M[R[R2] + 24] D5 = D3 / D1 D2 = M[R[R3] + 12] D6 = D4 + D2

D3 = D2 * R[F4]
D4 = D1 - D2

指令	列表					1
序号	指令		状态	流出周期	执行周期	写结果周期
1	L. D	F6,24(R2)	完成	CP1	CP 2 - 3	CP 4
2	L. D	F2,12(R3)	完成	CP 2	CP 3 - 4	CP 5
3	MUL. D	F0,F2,F4	执行	CP3	执行完成	-
4	SUB. D	F8,F6,F2	完成	CP 4	CP 6 - 7	CP8
5	DIV. D	F10,F0,F6	流出	CP 5	-	-
6	ADD. D	F6,F8,F2	完成	CP 6	CP 9 - 10	CP 11
7	-		7,	. = 0	70	17
8	-		-	-	-	-
9	-		-	-	7	
10	(=)		=	*	*	-

(2) 按步进方式执行上述代码,利用模拟器的"小三角按钮"的对比显示功能,观察每一个时钟周期前后各信息表中内容的变化情况。

周期1:



周期2:



周期3:



周期4:



周期5:



周期6:



周期7:



周期8:



周期9:



周期10:



周期11:



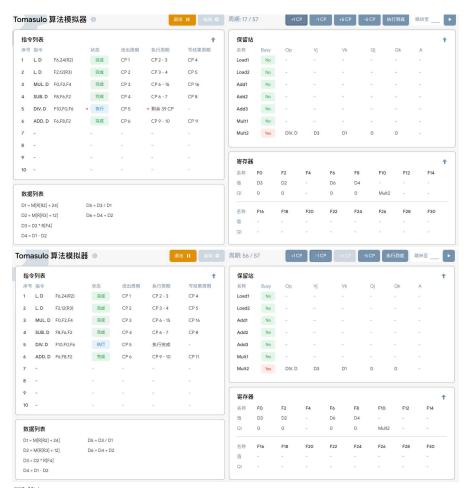
周期12-15:



周期16:



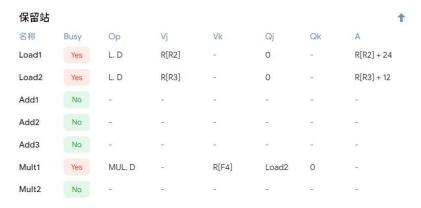
周期17-56:



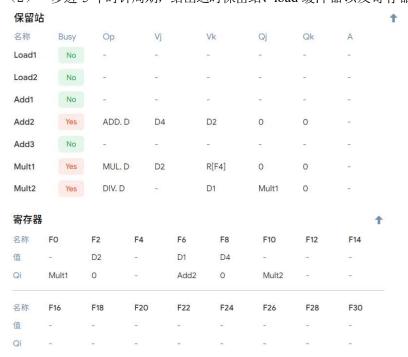
周期57:



- 2. 对于与上面相同的延迟时间和代码段。
- (1) 给出在第3个时钟周期时,保留站的内容.



(2) 步进 5个时钟周期,给出这时保留站、load 缓冲器以及寄存器状态表中的内容。



数据列表

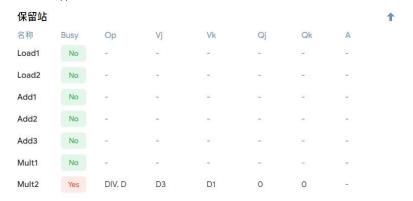
D1 = M[R[R2] + 24] D5 = D3 / D1D2 = M[R[R3] + 12] D6 = D4 + D2

D3 = D2 * R[F4]D4 = D1 - D2

指令列表

序号	指令		状态	流出周期	执行周期	写结果周期
1	L. D	F6,24(R2)	完成	CP1	CP 2 - 3	CP 4
2	L. D	F2,12(R3)	完成	CP 2	CP 3 - 4	CP 5
3	MUL. D	F0,F2,F4	执行	CP 3	剩余 7 CP	-
4	SUB. D	F8,F6,F2	完成	CP 4	CP 6 - 7	CP8
5	DIV. D	F10,F0,F6	流出	CP 5	-	-
6	ADD. D	F6,F8,F2	流出	CP 6	-	æ.
7	(*)		-	-	(#)	-
8	-		-,	8	-	8
9				*	*	~
10	-		-	ē.	-	ž

(3) 再步进 10个时钟周期,给出这时保留站、load 缓冲器以及寄存器状态表中的内容。

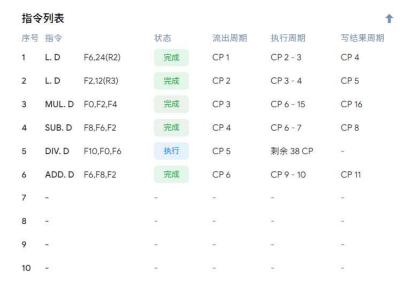


寄存器	몸								1
名称	FO	F2	F4	F6	F8	F10	F12	F14	
值	D3	D2	<u></u>	D6	D4	-	_	-	
Qi	0	0	-	0	0	Mult2	-	-	
名称	F16	F18	F20	F22	F24	F26	F28	F30	
值	er .	-	77	=	=	77	7	=	
Qi	_	2	_	2	2	5	2	-	

数据列表

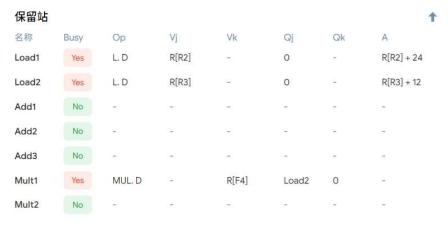
D1 = M[R[R2] + 24] D5 = D3 / D1D2 = M[R[R3] + 12] D6 = D4 + D2

D3 = D2 * R[F4]D4 = D1 - D2

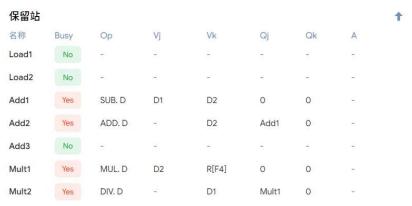


3. 假设浮点功能部件的延迟时间为加减法 3 个时钟周期,乘法 8 个时钟周期,除法 40个时钟周期。自己编写一段程序(要在实验报告中给出),重复上述步骤 2 的工作。程序:

(1) 给出在第3个时钟周期时,保留站的内容.



(2) 步进 5 个时钟周期,给出这时保留站、load 缓冲器以及寄存器状态表中的内容。



数据列表

 $\begin{aligned} & D1 = M[R[R2] + 24] & D5 = D3 \ / \ D1 \\ & D2 = M[R[R3] + 12] & D6 = D4 + D2 \\ & D3 = D2 * R[F4] \end{aligned}$

00	DZ 11(1-1	1						
D4 =	D1 - D2							
寄存	器							1
名称	FO	F2	F4	F6	F8	F10	F12	F14
值	120	D2	-	D1	2	<u></u>	c	12
Qi	Mult1	0	-	Add2	Add1	Mult2	-	**
名称	F16	F18	F20	F22	F24	F26	F28	F30
值	1.77	-	-	170	=	-	-	
Qi		-	-	-	2.7	e.	8	12
指令	列表							1
序号	指令		状态	流出	出周期	执行周期	写结果	果周期
1	L. D	F6,24(R2)	完	成 CP	1	CP 2 - 3	CP 4	
2	L. D	F2,12(R3)	完	或 CP	2	CP 3 - 4	CP 5	
3	MUL. D	F0,F2,F4	执行	厅 CP	3	剩余 5 CP	-	
4	SUB. D	F8,F6,F2	执行	T CP	4	执行完成	-	
5	DIV. D	F10,F0,F6	流	<u></u>	5	-	-	
6	ADD. D	F6,F8,F2	流	<u></u> СР	6	-	-	
7	-		-	-		-	-	
8	170		=	. 70		7.0	1070	
9	-		=	-		-	-	
10	-		-	-		7.0		

(3) 再步进 10 个时钟周期,给出这时保留站、load 缓冲器以及寄存器状态表中的内容。

保留站	i								3
名称	Busy	Ор	Vj		Vk	Qj	Qk	Α	
Load1	No	1.50	(7)		1.5	7	П	7	
Load2	No	-	-		-	-	=	<u>.</u>	
Add1	No	-	170		175	ī	77	=	
Add2	No	14				5	-	-	
Add3	No	17	177			r	en en	~	
Mult1	No	-	-		₩	-	34	-	
Mult2	Yes	DIV. D	D3		D1	0	0	ä	
寄存器								1	
名称	FO	F2	F4	F6	F8	F10	F12	F14	
值	D3	D2	-	D6	D4	-	-		
Qi	0	0	-	0	0	Mult2	-	-	
名称	F16	F18	F20	F22	F24	F26	F28	F30	
值	×	-	-	-	-	~	-	1-1	

数据列表

 $D1 = M[R[R2] + 24] \\ D5 = D3 / D1$ $D2 = M[R[R3] + 12] \\ D3 = D2 * R[F4]$

D4 = D1 - D2

指令	列表					1
序号	指令		状态	流出周期	执行周期	写结果周期
1	L. D	F6,24(R2)	完成	CP1	CP 2 - 3	CP 4
2	L. D	F2,12(R3)	完成	CP 2	CP 3 - 4	CP 5
3	MUL. D	F0,F2,F4	完成	CP3	CP 6 - 13	CP 14
4	SUB. D	F8,F6,F2	完成	CP 4	CP 6 - 8	CP 9
5	DIV. D	F10,F0,F6	执行	CP 5	剩余 36 CP	-
6	ADD. D	F6,F8,F2	完成	CP 6	CP 10 - 12	CP 13
7	8)		-	-	8	-
8	-		-	-	-	-
9	91		-	-	ë	-
10	-		-	-	*	-



A.5.4 Tomasulo 算法模拟器使用方法

1. 设置指令和参数

本模拟器最多可以模拟 10条指令。可以在"指令"区选择和设置所要的指令。"指令"区如图 A.5.1 所示。



图 A.5.1 "指令"区

你可以从下拉框中选择指令,供选择的指令有以下 5种:

- (1) L.D 指令: 从主存读取一个双精度浮点数;
- (2) ADD.D: 双精度浮点加法指令;
- (3) SUB.D: 双精度浮点减法指令;
- (4) MULT.D: 双精度浮点乘法指令;
- (5) DIV.D: 双精度浮点除法指令。

指令的各参数也可以从各自的下拉框中选择。

你还可以在窗口的右上区域设置各部件的执行时间(时钟周期数),如图 A.5.2 所示。



图 A.5.2 设置功能部件时间

其中"复位"的作用是使所有设置恢复为默认值。

2. 执行

点击"执行"按钮,就进入执行状态。你可以用中间的按钮来控制指令的执行,包括"步进"、"退1步"、"前进5个周期"、"后退5个周期"、"执行到底"、"退出"等。还可以用"go"按钮直接跳转到你所指定的时钟周期。如果想修改被执行的代码,按"退出"按钮,即可回到设置指令和参数页面。

向前执行后,状态表中抹色的字段表示其内容发生了变化。

3. 对比状态表

每一个状态表的右上角外侧都有一个小三角,用鼠标左键点击它,会弹出该表在上一个时钟周期的内容。这是为了让你通过对比来了解哪些内容发生了变化。在弹出表以外的区域再次点击鼠标,就可以将其收回。

4. 各个表的内容

(1) 指令状态表

指令状态表如图 A.5.3 所示。它列出了各指令什么时候执行到了哪一步。其中的数字表示时钟周期, "~"表示时钟周期期间。例如,图 A.5.3 中的 2~3 表示在第 2 到第 3 个时钟周期(含第 3 个),第一条 L.D 指令是在"执行"这一步。

L. D F4, 16 (R4) 2 3° MULT. D F2, F4, F6 SUB. D F10, F8, F4 DIV. D F12, F2, F8	指令	流出	执行	写结果
MULT. D F2, F4, F6 SUB. D F10, F8, F4 DIV. D F12, F2, F8	L.D F8, 21 (R3)	1	2~3	
SUB.D F10, F8, F4 DIV.D F12, F2, F8	L.D F4, 16 (R4)	2	3~	
DIV. D F12, F2, F8	MULT.D F2, F4, F6	3		
	SVB.D F10, F8, F4			
ADD. D F8, F10, F4	DIV.D F12,F2,F8			
	ADD. D F8, F10, F4			

图 A.5.3 指令状态表

其中抹色的区域表示最近一个时钟周期其内容发生了变化。下同。

(2) 保留站

保留站的内容如图 A.5.4 所示。

Time	名称	Busy	0p	ز۷	Vk	Qj	Qk
	Add1	No					
	Add2	No					
	Add3	No					
	Mult1	No			1		
	Mult2	No					

图 A.5.4 保留站

其中各字段的名称和含义如下:

Time: 表示相应的保留站还有要执行多少个时钟周期; 名称: 保留站的名称。用于唯一地标识相应的保留站;

Op: 要对源操作数进行的操作;

Qj, Qk: 将产生源操作数的保留站名称。其值等于 0 表示操作数已经就绪且在 Vj 或 Vk 中,或者不需要操作数。

Vj, Vk: 源操作数的值。对于每一个操作数来说, V和Q字段只有一个有效。Busy: 为"Yes"表示该保留站 "忙"。

(3) Load 部件

Load 部件的内容如图 A.5.5 所示。它按队列方式工作,每次处理新的访存都是从队列 头部取走一条。

名称	Busy	地址	值
Load1	Yes	21	
Load2	No		
Load3	No		

图 A.5.5 Load 部件

其中各字段的含义如下:

名称:相应单元的名称(标识); Busy:

"忙"标志,为"Yes"表示已被占用;地址:

访存的有效地址;

值: 存放从存储器读来的数据。

(4) 寄存器

寄存器的内容如图 A.5.6 所示。

字段	FO	F2	F4	F6	F8	F10	F12	F14	F16	F18
Qi					Loadl					

图 A.5.6 寄存器的内容

各字段的含义如下:

Qi: 寄存器状态,用于存放将把结果写入该寄存器的保留站的站号。为 0 表示当前没有正在执行的指令要写入该寄存器,也即该寄存器中的内容就绪。

值:寄存器的值。

当上述表中的内容写不下时,模拟器会采用缩写的方法。这时,在上面中间的区域中会显示缩写及其值。

A.6 实验六 再定序缓冲(ROB)工作原理

A.6.1 实验目的

- 1. 加深对指令级并行性及其开发的理解。
- 2. 加深对基于硬件的前瞻执行的理解。
- 3. 掌握 ROB 在流出、执行、写结果、确认 4个阶段所进行的操作。
- 4. 掌握 ROB 缓冲器的结构。
- 5. 给定被执行代码片段,对于具体某个时钟周期,能写出保留站、ROB以及浮点寄存器状态表内容的变化情况。

A.6.2 实验平台

实验平台采用再定序缓冲 ROB 模拟器。环境的建立:见 A.0。

A.6.3 实验内容及步骤

首先要掌握 ROB 模拟器的使用方法(见 A.6.4 节)。

- 1. 假设浮点功能部件的延迟时间为加法 2 个时钟周期,乘法 10 个时钟周期,除法 40 个时钟周期,Load 部件 2 个时钟周期。
- (1) 对于下面的代码段,给出当指令 MUL.D 即将确认时保留站、ROB 以及浮点寄存器状态表的内容。

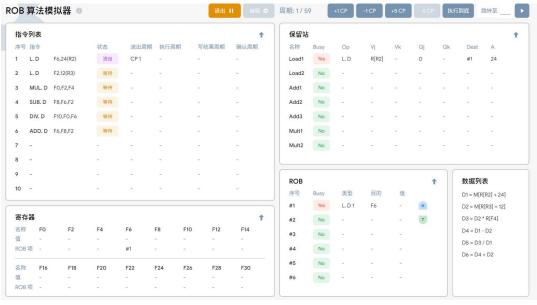
L.D F6, 24 (R2) L.D F2, 12 (R3) MUL.D F0, F2, F4 SUB.D F8, F6, F2 DIV.D F10, F0, F6 ADD.D F6, F8, F2

保留站

名称	Busy	Op	Vj	Vk	Qj	Qk	Dest	A
Load1	No	12	21	4	2	12	2	23
Load2	No		(7)	7	70	1.7	(3)	
Add1	No	0.00	-	-	¥	~	-	-
Add2	No	-	-	=	-	-		
Add3	No	-	-	-	-	-	•	*
Mult1	No	1.0		-			-	(#)
Mult2	Yes	DIV. D	D3	D1	0	0	#5	-



(2) 按步进方式执行上述代码,利用模拟器的"小三角按钮"的对比显示功能,观察每一个时钟周期前后保留站、ROB 以及浮点寄存器状态表的内容的变化情况。周期1:



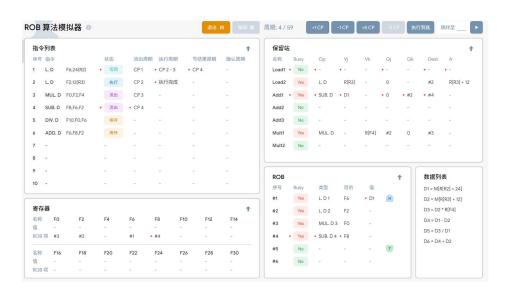
周期2:



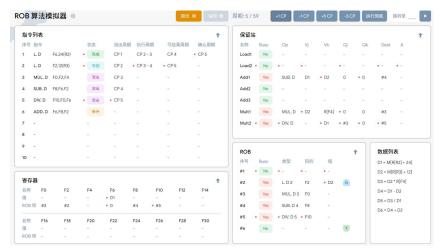
周期3:



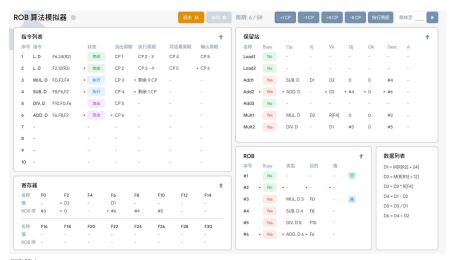
周期4:



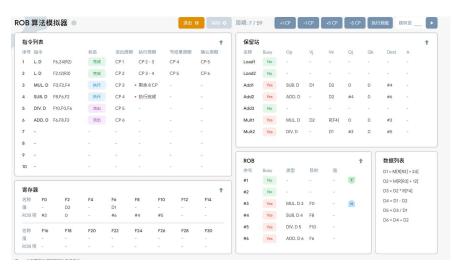
周期5:



周期6:



周期7:



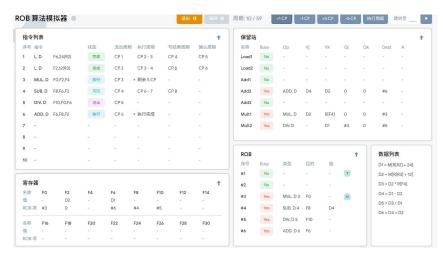
周期8:



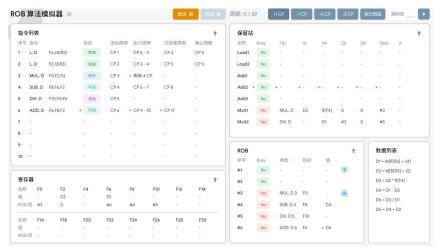
周期9:



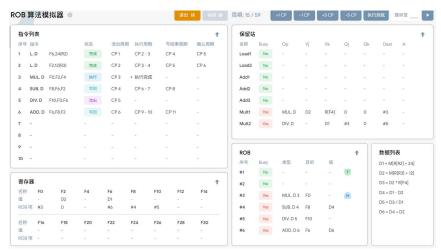
周期10:



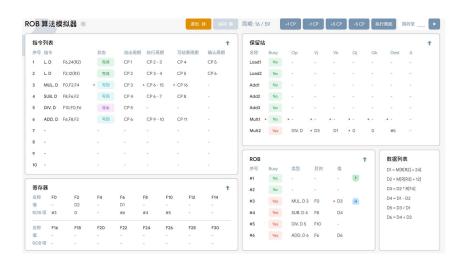
周期11:



周期12-15:



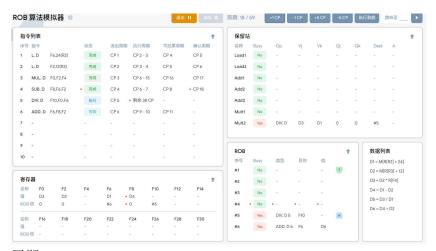
周期16:



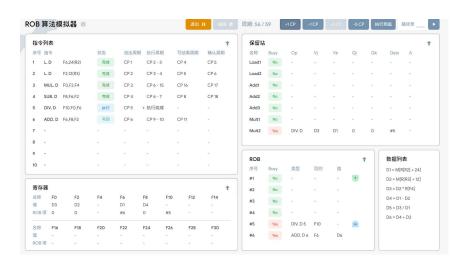
周期17:



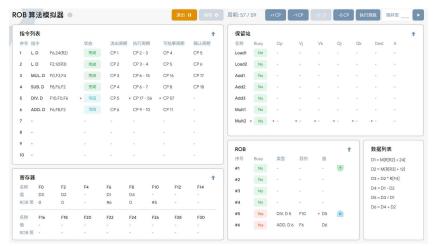
周期18:



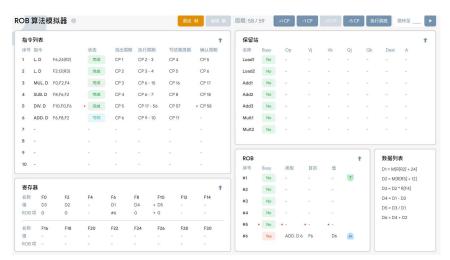
周期19-56:



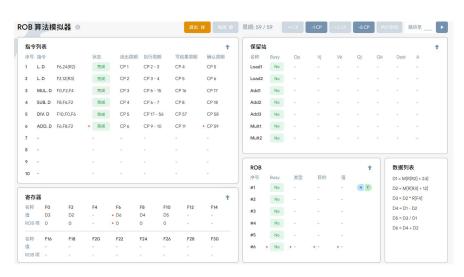
周期57:



周期58:



周期59:



- 2. 对于与上面相同的延迟时间和代码段:
- (1) 给出在第5个时钟周期时,保留站的内容。

保留站

名称	Busy	Ор	Vj	Vk	Qj	Qk	Dest	A	
Load1	No	-	-	-	-	-	_	22	
Load2	No	-	-	-	-	-	-	=	
Add1	Yes	SUB. D	D1	D2	0	0	#4	-	
Add2	No	-	-	14	-	-	-	-	
Add3	No	-	-	-	_	2	2	2	
Mult1	Yes	MUL. D	D2	R[F4]	0	0	#3	77	
Mult2	Yes	DIV. D		D1	#3	0	#5	-	

(2) 步进 5个时钟周期, ROB的内容有哪些变化?

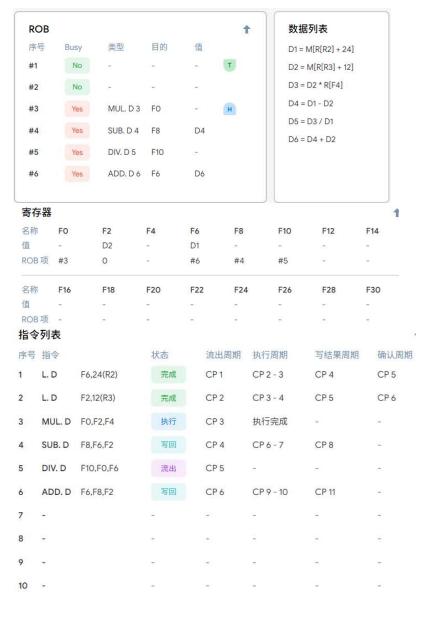


步进 5个时钟周期后:



(3) 再步进 5 个时钟周期,给出这时保留站、ROB 以及浮点寄存器状态表的内容。 保留站

名称	Busy	Ор	Vj	Vk	Qj	Qk	Dest	Α
Load1	No	-	-	-	-	-	-	-
Load2	No	XE.	-	<u>u</u>	2	02	2	127
Add1	No		-	-	m		*	(*)
Add2	No) -	-	÷	-	-	-	-
Add3	No	-	-	<u>u</u>	2	-	-	-
Mult1	Yes	MUL. D	D2	R[F4]	0	0	#3	-
Mult2	Yes	DIV. D	-	D1	#3	0	#5	(-)



3. 假设浮点功能部件的延迟时间为加减法 3个时钟周期,乘法 8个时钟周期,除法 40个时钟周期。自己编写一段程序(要在实验报告中给出),重复上述步骤 2的工作。程序:

(1) 给出在第5个时钟周期时,保留站的内容。

保留站

名称	Busy	Op	Vj	Vk	Qj	Qk	Dest	A
Load1	No	*	-	-	-	-	-	-
Load2	No	2.0	-	-	2	-	2	-
Add1	Yes	SUB. D	D1	D2	0	0	#4	
Add2	No	-	-	-	E	-	=1	-
Add3	No	ž.	-		-	u .	-	-
Mult1	Yes	MUL. D	D2	R[F4]	0	0	#3	-
Mult2	Yes	DIV. D	-	D1	#3	0	#5	

(2) 步进 5 个时钟周期, ROB 的内容有哪些变化?



步进5个周期后:

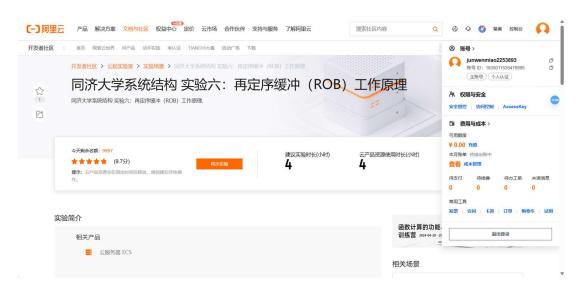


(3) 再步进 5 个时钟周期,给出这时保留站、ROB 以及浮点寄存器状态表的内容。

保留站

名称	Busy	Ор	Vj	Vk	Qj	Qk	Dest	Α
Load1	No	=:	-	-	-	-		-
Load2	No	÷	-	-	-	-		-
Add1	No	-	-	-	-	-	-	-
Add2	No	=		2	er.	7.5	-	-
Add3	No	-	140	(m)	~	-	-	-
Mult1	No	12	2	2	<u>_</u>	20	112	12
Mult2	Yes	DIV. D	D3	D1	0	0	#5	-





A.6.4 ROB 模拟器的使用方法

1. 设置指令和参数

本模拟器最多可以模拟 10 条指令。可以在"指令"区选择和设置所要的指令。"指令"区如图 A.6.1 所示。



图 A.6.1 "指令"区

你可以从下拉框中选择指令,供选择的指令有以下 5 种:

- (1) L.D 指令: 从主存读取一个双精度浮点数;
- (2) ADD.D: 双精度浮点加法指令;
- (3) SUB.D: 双精度浮点减法指令;
- (4) MULT.D: 双精度浮点乘法指令;
- (5) DIV.D: 双精度浮点除法指令。

指令的各参数也可以从各自的下拉框中选择。

你还可以在窗口的右上区域设置各部件的执行时间(时钟周期数),如图 A.6.2 所示。



图 A.6.2 设置功能部件时间

其中"复位"的作用是使所有设置恢复为默认值。

2. 执行

点击"执行"按钮,就进入执行状态。你可以用中间的按钮来控制指令的执行,包括"步进"、"退1步"、"前进5个周期"、"后退5个周期"、"执行到底"、"退出"等。还可以用"go"按钮

直接跳转到你所指定的时钟周期。如果想修改被执行的代码,按"退出"按钮,即可回到设置指令和参数页面。

向前执行后,状态表中抹色的字段表示其内容发生了变化。

3. 对比状态表

每一个状态表的右上角外侧都有一个小三角,用鼠标左键点击它,会弹出该表在上一个时钟周期的内容。这是为了让你通过对比来了解哪些内容发生了变化。在弹出表以外的区域再次点击鼠标,就可以将其收回。

4. 各个表的内容

(1) 指令状态表

指令状态表如图 A.6.3 所示。它列出了各指令什么时候执行到了哪一步。其中的数字表示时钟周期,"~"表示时钟周期期间。例如,图 A.6.3 中的 2~3 表示在第 2 到第 3 个时钟周期,第一条 L.D 指令是在"执行"这一步。

指令	流出	执行	写结果	确认
L.D F8, 21 (R3)	1	2~3		1000000
L. D F4, 16 (R4)	2	3~		
MULT.D F2, F4, F6	3			
SVB.D F10, F8, F4				
DIV.D F12,F2,F8				
ADD. D F8, F10, F4				

图 A.6.3 指令状态表

其中抹色的区域表示最近一个时钟周期其内容发生了变化。下同。

(2) 再定序缓冲器 ROB

ROB 如图 A.6.4 所示。它按队列方式工作,其中各字段的意义如下:

- ◆ 标记:用于给出队列的头和尾;
- ◆ 项号:给出各项的编号;
- ◆ Busy: "忙"标志,指出相应的行是否已占用;
- ◆ 指令:给出是什么指令占用该行;
- ◆ 目的地: 指出结果写到哪里去;
- ◆ 值: 暂时存放相应指令的计算结果,在该指令被确认时,将被写到目的地。

标记	项号	Busy	指令	目的地	值
HEAD	#1	Yes	L.D F8, 21 (R3)	F8	
***************************************	#2	Yes	L. D F4 , 16 (R4)	F4	
	#3	Yes	MULT. D F2 , F4 , F6	F2	
TAIL	#4	No			
	#5	No			
	#6	No			
	#7	No			
	#8	No			
	#9	No			
	#10	No			

图 A.6.4 再定序缓冲器 ROB

(3) 保留站

保留站的内容如图 A.6.5 所示。

Time	名称	Busy	Op	Vj	Vk	Qj	Qk	目的地
	Add1	No						
	Add2	No						
	Add3	No						
	Mult1	Yes	MULT. D		R[F6]	#2		#3
	Mult2	No	1			1	1000	

图 A.6.5 保留站

其中各字段的名称和意义与图 A.5.4 中的相同。不过,这里增加了一个字段:目的地。它指出相应部件的运算结果要暂时存放到 ROB 的第几号单元。

(4) Load 缓冲器

Load 缓冲器的内容如图 A.6.6 所示。它按队列方式工作,每次处理新的访存都是从队列头部取走一条。



图 A.6.6 Load 缓冲器

该缓冲器各字段的意义如下:

- ◆ 名称:相应单元的名称;
- ◆ Busy: "忙"标志,为"Yes"表示已被占用;
- ◆ 地址: 访存的有效地址;
- ◆ 目的地: 指出从存储器读来的数据要暂时存放到 ROB 的第几号单元;
- ◆ 值:存放从存储器读来的数据。

(5) 寄存器

寄存器的内容如图 A.6.7 所示。

寄存器											
字段	FO	F2	F4	F6	F8	F10	F12	F14	F16	F18	F20
ROB项号		#3	#2		#1						L
Busy	No	Yes	Yes	No	Yes	No	No	No	No	No	No
值			1					1			

图 A.6.7 寄存器的内容

该缓冲器各字段的意义如下:

- ◆ Busy: "忙"标志,为"Yes"表示将有指令要对该寄存器写入数据;
- ◆ ROB 项号:指出它在等哪个 ROB 项的数据。当那个 ROB 项中的指令被确认 且其值已经就绪时,那个数据将被写入该寄存器;
- ◆ 值:寄存器的值。

当上述表中的内容写不下时,模拟器会采用缩写的方法。这时,在屏幕上面中间的区域中会显示缩写及其值。