Slide 1/134

计算机系统结构
www.GotoSchool.net

Tomasulo Example

load：2个时钟周期，加法：2个时钟周期，乘法：10个时钟周期，除法：40个时钟周期

Instruction status:

Instruction	j	k	Issue	Exec Comp	Write Result		Busy	Address
LD	F6	34+	R2			Load1	No	
LD	F2	45+	R3			Load2	No	
MULTD	F0	F2	F4			Load3	No	
SUBD	F8	F6	F2					
DIVD	F10	F0	F6					
ADDD	F6	F8	F2					

Reservation Stations:

Time	Name	Busy	Op	S1 Vj	S2 Vk	RS Qj	RS Qk
	Add1	No					
	Add2	No					
	Add3	No					
	Mult1	No					
	Mult2	No					

Register result status:

Clock		F0	F2	F4	F6	F8	F10	F12	...	F30
0	FU									

▲ 1/134

Slide 2/134

计算机系统结构
www.GotoSchool.net

Instruction status:

Instruction	j	k	Issue	Exec Comp	Write Result		Busy	Address
LD	F6	34+	R2	1	3 3	4	Load1	No
LD	F2	45+	R3	2	3,4	5	Load2	No
MULTD	F0	F2	F4	3	6,7,8,9,10		Load3	
SUBD	F8	F6	F2	4	6,7	8		
DIVD	F10	F0	F6	5				
ADDD	F6	F8	F2	6	9 10	11		

Reservation Stations:

Time	Name	Busy	Op	S1	S2	RS Qj	RS Qk
	Add1	No					
	Add2	Yes	ADDD	M-M	M(A2)		
	Add3	No					
	Mult1	Yes	MULTD	M(A2)R(F4)			
	Mult2	Yes	DIVD	M(A1)	Mult		

Register result status:

Clock		F0	F2	F4	F6	F8	F10	F12	...	F30
1	FU	Mult1	M(A2)		Ant1A	M-M	Mult2			

周期1：取出第一条指令L.D F6, 34(R2)，地址偏移量34,写入LOAD1，LOAD1名存入寄存器F6。

▲ 2/134

Slide 3/134

计算机系统结构
www.GotoSchool.net

Tomasulo Example Cycle 2

Instruction status:

Instruction	j	k	Issue	Exec Comp	Write Result		Busy	Address
LD	F6	34+	R2			Load1		
LD	F2	45+	R3			Load2		
MULTD	F0	F2	F4			Load3		
SUBD	F8	F6	F2					
DIVD	F10	F0	F6					
ADDD	F6	F8	F2					

Reservation Stations:

Time	Name	Busy	Op	S1 Vj	S2 Vk	RS Qj	RS Qk
	Add1	No					
	Add2	No					
	Add3	No					
	Mult1	No					
	Mult2	No					

Register result status:

Clock		F0	F2	F4	F6	F8	F10	F12	...	F30
2	FU									

周期2：取出第二条指令L.D F2, 45(R3)，地址偏移量45写入LOAD2，LOAD2名存入寄存器F2，同时第一条指令开始执行，LOAD1上写入绝对地址▲ 3/134

Slide 4/134

计算机系统结构
www.GotoSchool.net

Tomasulo Example Cycle 3

Instruction status:

Instruction	j	k	Issue	Exec Comp	Write Result		Busy	Address
LD	F6	34+	R2			Load1		
LD	F2	45+	R3			Load2		
MULTD	F0	F2	F4			Load3		
SUBD	F8	F6	F2					
DIVD	F10	F0	F6					
ADDD	F6	F8	F2					

Reservation Stations:

Time	Name	Busy	Op	S1 Vj	S2 Vk	RS Qj	RS Qk
	Add1						
	Add2						
	Add3						
	Mult1						
	Mult2						

Register result status:

Clock		F0	F2	F4	F6	F8	F10	F12	...	F30
3	FU									

· **周期3：取出第三条指令MUL.D F0, F2,F4，第一条指令完成，第二条指令开始执行,LOAD3上写入绝对地址。保留站中存入待运算的操作数和操作。寄存器F0上写入保留站中待运算命令的名称。**
· ▲ 4/134

Slide 5/134

计算机系统结构
www.GotoSchool.net

Tomasulo Example Cycle 4

Instruction status:

Instruction	j	k	Issue	Exec Comp	Write Result		Busy	Address
LD	F6	34+	R2			Load1		
LD	F2	45+	R3			Load2		
MULTD	F0	F2	F4			Load3		
SUBD	F8	F6	F2					
DIVD	F10	F0	F6					
ADDD	F6	F8	F2					

Reservation Stations:

Time	Name	Busy	Op	S1 Vj	S2 Vk	RS Qj	RS Qk
	Add1						
	Add2						
	Add3						
	Mult1						
	Mult2						

Register result status:

Clock		F0	F2	F4	F6	F8	F10	F12	...	F30
4	FU									

周期4：取出第四条指令SUB.D F8,F6,F2，第二条指令执行完成，第一条指令写入结果M(A1)到寄存器F6，保留站中存入第四条指令的待运算操作数和操作。LOAD1清空。 5/134

Slide 6/134

计算机系统结构
www.GotoSchool.net

Instruction status:

Instruction	j	k	Issue	Exec Comp	Write Result		Busy	Address
LD	F6	34+	R2			Load1		
LD	F2	45+	R3			Load2		
MULTD	F0	F2	F4			Load3		
SUBD	F8	F6	F2					
DIVD	F10	F0	F6					
ADDD	F6	F8	F2					

Reservation Stations:

Time	Name	Busy	Op	S1 Vj	S2 Vk	RS Qj	RS Qk
2	Add1						
	Add2						
	Add3						
10	Mult1						
	Mult2						

Register result status:

Clock		F0	F2	F4	F6	F8	F10	F12	...	F30
5	FU									

周期5：取出第五条指令DIV.D F10,F0,F6，第二条指令写结果M(A2)到寄存器F2，LOAD2清空。保留站中存入第五条指令的待运算操作数和操作

▲ 6/134

计算机系统结构 — Tomasulo Example Cycle 6
www.GotoSchool.net

Instruction status:

Instruction	j	k	Issue	Exec Comp	Write Result		Busy	Address
LD	F6	34+	R2	1	4	5	Load1	No
LD	F2	45+	R3	2	4	5	Load2	No
MULTD	F0	F2	F4	3			Load3	
SUBD	F8	F6	F2	3				
DIVD	F10	F0	F6	4	5			
ADDD	F6	F8	F2	6				

Reservation Stations:

Time	Name	Busy	Op	S1 Vj	S2 Vk	RS Qj	RS Qk
1	Add1	Yes	SUBD	M(A1)	M(A2)		
	Add2	Yes	ADDD		M(A1)	Add1	
	Add3						
9	Mult1	Yes	MULTD	M(A1)	F4		
	Mult2	Yes	DIVD		M(A1)	Mult1	

Register result status:

Clock		F0	F2	F4	F6	F8	F10	F12	...	F30
6	FU	Mult1	M(A1)		ADDD	Add1	Mult2			

周期6：取出第六条指令ADD.D F6,F8,F2，第三条和第四条指令开始执行，相关的操作数和操作符被存入保留站

7/134

计算机系统结构 — Tomasulo Example Cycle 7
www.GotoSchool.net

Instruction status:

Instruction	j	k	Issue	Exec Comp	Write Result		Busy	Address
LD	F6	34+	R2	1	4	5	Load1	No
LD	F2	45+	R3	2	4	5	Load2	No
MULTD	F0	F2	F4	3			Load3	
SUBD	F8	F6	F2	3	7			
DIVD	F10	F0	F6	4				
ADDD	F6	F8	F2	6				

Reservation Stations:

Time	Name	Busy	Op	S1 Vj	S2 Vk	RS Qj	RS Qk
0	Add1	Yes	SUBD	M(A1)	M(A2)		
	Add2	Yes	ADDD		M(A1)	Add1	
	Add3						
8	Mult1	Yes	MULTD	M(A1)	F4		
	Mult2	Yes	DIVD		M(A1)	Mult1	

Register result status:

Clock		F0	F2	F4	F6	F8	F10	F12	...	F30
7	FU	Mult1	M(A1)		ADDD	Add1	Mult2			

周期7：第四条指令执行完成，保留站中的第三条指令继续执行

8/134

计算机系统结构
www.GotoSchool.net

Instruction status:

Instruction	j	k	Issue	Exec Comp	Write Result		Busy	Address
LD	F6	34+	R2	1	4	5	Load1	No
LD	F2	45+	R3	2	4	5	Load2	No
MULTD	F0	F2	F4	3			Load3	
SUBD	F8	F6	F2	3	7	8		
DIVD	F10	F0	F6	4				
ADDD	F6	F8	F2	6				

Reservation Stations:

Time	Name	Busy	Op	S1 Vj	S2 Vk	RS Qj	RS Qk
	Add1	No					
2	Add2	Yes	ADDD	M(B1)	M(A1)		
	Add3						
7	Mult1	Yes	MULTD	M(A1)	F4		
	Mult2	Yes	DIVD		M(A1)	Mult1	

Register result status:

Clock		F0	F2	F4	F6	F8	F10	F12	...	F30
8	FU	Mult1	M(A1)		ADDD	M(A1)	Mult2			

周期8：第四条指令写结果M-M到寄存器F8，保留站中存放第四条指令的位置清空，第三条指令继续执行。

9/134

计算机系统结构
www.GotoSchool.net

Instruction status:

Instruction	j	k	Issue	Exec Comp	Write Result	Busy	Address
LD	F6	34+	R2			Load1	
LD	F2	45+	R3			Load2	
MULTD	F0	F2	F4			Load3	
SUBD	F8	F6	F2				
DIVD	F10	F0	F6				
ADDD	F6	F8	F2				

Reservation Stations:

Time	Name	Busy	Op	S1 Vj	S2 Vk	RS Qj	RS Qk
	Add1						
1	Add2						
	Add3						
6	Mult1						

Register result status:

Clock		F0	F2	F4	F6	F8	F10	F12	...	F30
9	FU									

周期9：第六条指令开始执行。第三条指令继续执行。

10/134

计算机系统结构 — Tomasulo Example Cycle 10
www.GotoSchool.net

Instruction status:

Instruction	j	k	Issue	Exec Comp	Write Result	Busy	Address
LD	F6	34+	R2			Load1	
LD	F2	45+	R3			Load2	
MULTD	F0	F2	F4			Load3	
SUBD	F8	F6	F2				
DIVD	F10	F0	F6				
ADDD	F6	F8	F2				

Reservation Stations:

Time	Name	Busy	Op	S1 Vj	S2 Vk	RS Qj	RS Qk
	Add1						
0	Add2						
	Add3						
5	Mult1						
	Mult2						

Register result status:

Clock		F0	F2	F4	F6	F8	F10	F12	...	F30
10	FU									

周期10：第六条指令执行完成，第三条指令继续执行。

11/134

计算机系统结构 — Tomasulo Example Cycle 11
www.GotoSchool.net

Instruction status:

Instruction	j	k	Issue	Exec Comp	Write Result	Busy	Address
LD	F6	34+	R2			Load1	
LD	F2	45+	R3			Load2	
MULTD	F0	F2	F4			Load3	
SUBD	F8	F6	F2				
DIVD	F10	F0	F6				
ADDD	F6	F8	F2				

Reservation Stations:

Time	Name	Busy	Op	S1 Vj	S2 Vk	RS Qj	RS Qk
	Add1						
	Add2						
	Add3						
4	Mult1						
	Mult2						

Register result status:

Clock		F0	F2	F4	F6	F8	F10	F12	...	F30
11	FU									

周期11：第六条指令写结果M-M+M(A2)到寄存器F6中，清空保留站中原来存放第六条指令的位置。第三条指令继续执行。 12/134

Slide 13

计算机系统结构
www.GotoSchool.net

Instruction status:

Instruction	j	k	Issue	Exec Comp	Write Result		Busy	Address
LD	F6	34+	R2				Load1	
LD	F2	45+	R3				Load2	
MULTD	F0	F2	F4				Load3	
SUBD	F8	F6	F2					
DIVD	F10	F0	F6					
ADDD	F6	F8	F2					

Reservation Stations:

Time	Name	Busy	Op	S1 Vj	S2 Vk	RS Qj	RS Qk
	Add1						
	Add2						
	Add3						
3	Mult1						
	Mult2						

Register result status:

Clock		F0	F2	F4	F6	F8	F10	F12	...	F30
12	FU									

周期12~15：第三条指令继续执行，直到完成。

13/134

Slide 14

计算机系统结构
www.GotoSchool.net
Tomasulo Example Cycle 13

Instruction status:

Instruction	j	k	Issue	Exec Comp	Write Result		Busy	Address
LD	F6	34+	R2				Load1	
LD	F2	45+	R3				Load2	
MULTD	F0	F2	F4				Load3	
SUBD	F8	F6	F2					
DIVD	F10	F0	F6					
ADDD	F6	F8	F2					

Reservation Stations:

Time	Name	Busy	Op	S1 Vj	S2 Vk	RS Qj	RS Qk
	Add1						
	Add2						
	Add3						
2	Mult1						
	Mult2						

Register result status:

Clock		F0	F2	F4	F6	F8	F10	F12	...	F30
13	FU									

14/134

Slide 15

计算机系统结构
www.GotoSchool.net
Tomasulo Example Cycle 14

Instruction status:

Instruction	j	k	Issue	Exec Comp	Write Result		Busy	Address
LD	F6	34+	R2				Load1	
LD	F2	45+	R3				Load2	
MULTD	F0	F2	F4				Load3	
SUBD	F8	F6	F2					
DIVD	F10	F0	F6					
ADDD	F6	F8	F2					

Reservation Stations:

Time	Name	Busy	Op	S1 Vj	S2 Vk	RS Qj	RS Qk
	Add1						
	Add2						
	Add3						
1	Mult1						
	Mult2						

Register result status:

Clock		F0	F2	F4	F6	F8	F10	F12	...	F30
14	FU									

15/134

Slide 16

计算机系统结构
www.GotoSchool.net
Tomasulo Example Cycle 15

Instruction status:

Instruction	j	k	Issue	Exec Comp	Write Result		Busy	Address
LD	F6	34+	R2				Load1	
LD	F2	45+	R3				Load2	
MULTD	F0	F2	F4				Load3	
SUBD	F8	F6	F2					
DIVD	F10	F0	F6					
ADDD	F6	F8	F2					

Reservation Stations:

Time	Name	Busy	Op	S1 Vj	S2 Vk	RS Qj	RS Qk
	Add1						
	Add2						
	Add3						
0	Mult1						
	Mult2						

Register result status:

Clock		F0	F2	F4	F6	F8	F10	F12	...	F30
15	FU									

16/134

Slide 17

计算机系统结构
www.GotoSchool.net

in-order issue, out-of-order execution, completion

Instruction status:

Instruction	j	k	Issue	Exec Comp	Write Result		Busy	Address
LD	F6	34+	R2				Load1	
LD	F2	45+	R3				Load2	
MULTD	F0	F2	F4				Load3	
SUBD	F8	F6	F2					
DIVD	F10	F0	F6					
ADDD	F6	F8	F2					

Reservation Stations:

Time	Name	Busy	Op	S1 Vj	S2 Vk	RS Qj	RS Qk
	Add1						
	Add2						
	Add3						
	Mult1						
40	Mult2						

Register result status:

Clock		F0	F2	F4	F6	F8	F10	F12	...	F30
16	FU									

周期16：第三条指令写结果M*F4到寄存器F0，保留站中原来存放第三条指令的位置清空。

17/134

Slide 18

计算机系统结构
www.GotoSchool.net

周期17~56：第五条指令开始执行，直到结束

周期57：第五条指令执行结束后写结果M6到F10,保留站中原来存放第五条指令的位置清空。

为什么Tomasulo算法消除了WAR和WAW冒险。Tomasulo的FU称做保留站，保留站可以完成寄存器重命名，避免WAR、WAW。它采用寄存器重命名的方法来消除寄存器数据流之间的假相关，即用虚拟寄存器集代替真实的FPR，虚拟寄存器集在tomasulo算法中由每一功能单元所带的保留站、取数缓冲区和存数缓冲区组成。保留站可以多于寄存器，实现更多编译器无法完成的优化。

18/134