

根据下面代码回答问题（假设 x3 的初始值是 x2+396）：

Loop:	lw	x1, 0(x2)	;load x1 from address 0+x2
	addi	x1, x1, 1	;x1 = x1+1
	sw	x1, 0(x2)	; store x1 at address 0+x2
	addi	x2, x2, 4	; x2=x2+4
	sub	x4, x3, x2	;x4=x3-x2
	bnez	x4, Loop	;branch to Loop if x4 != 0

1. 找出代码中所有 RAW 类型的数据依赖关系，按照下面格式列出：寄存器，源指令，目标指令；例如，寄存器 x1，ld 指令，addi 指令。

参考答案：

寄存器 x1	ld 指令	addi 指令
寄存器 x1	addi 指令	sd 指令
寄存器 x2	addi 指令	sub 指令
寄存器 x4	sub 指令	bnez 指令

2. 按照下面格式画出没有向前或旁路硬件情形下 5 段流水线中上述指令序列的时序图（假设同一个时钟周期内的寄存器读和写通过寄存器文件实现向前路径，即数据在写回寄存器阶段可以被正确读出）。假设分支指令在 x 阶段可以计算出分支地址（在 M 阶段前不能取下一条指令），如果访问内存需要 1 个周期，那么这段循环代码的执行需要多少个周期？

	1	2	3	4	5	6	...
lw x1, 0(x2)	F	D	X	M	W		
addi x1, x1, 1							
sw x1, 0(x2)							
addi x2, x2, 4							
sub x4, x3, x2							
bnez x4, Loop							
ld x1, 0(x2)							

参考答案：

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ld x1,0(x2)	IF	ID	EX	MEM	WB							
Addi x1,x1,1		IF	S	S	ID	EX	MEM	WB				
Sd x1,0(x2)					IF	S	S	ID	EX	MEM	WB	

addi x2,x2,4								IF	ID	EX	MEM	WB
Sub x4,x3,x2									IF	S	S	ID
Bnez x4,Loop												IF
Ld x1,0(x2)												

	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Ld x1,0(x2)									
Addi x1,x1,1									
Sd x1,0(x2)									
addi x2,x2,4									
Sub x4,x3,x2	EX	MEM	WB						
Bnez x4,Loop	S	S	ID	EX	MEM	WB			
Ld x1,0(x2)					IF	ID	EX	MEM	WB

循环次数=396/4=99 次，每次 bnez 指令（循环最后一条指令）在 16 个周期结束就接上了下一个循环的 ld 指令，所以 99 次循环一共 16*99 周期，但最后一次循环 bnez 指令到 18 个周期结束，因为后面没有 ld 指令了，所以一共 16*99+2=1586。

3. 按照下面格式画出在具有完整向前或旁路硬件情形下 5 段流水线中上述指令序列的时序图。如果访问内存需要 1 个周期，那么这段循环代码的执行需要多少个周期？

	1	2	3	4	5	6	...
lw x1, 0(x2)	F	D	X	M	W		
addi x1, x1, 1							
sw x1, 0(x2)							
addi x2, x2, 4							
sub x4, x3, x2							
bnez x4, Loop							
ld x1, 0(x2)							

参考答案：

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ld x1,0(x2)	IF	ID	EX	MEM	WB						
Addi x1,x1,1		IF	ID	S	EX	MEM	WB				
Sd x1,0(x2)			IF	S	ID	EX	MEM	WB			
addi x2,x2,4					IF	ID	EX	MEM	WB		
Sub x4,x3,x2						IF	ID	EX	MEM	WB	
Bnez x4,Loop							IF	ID	EX	MEM	WB
Ld x1,0(x2)										IF	ID

总执行周期=9*99+2=893，因为存在 bypass，addi x1, x1, 1 这条指令的 ID 阶段就不需要等待，

转发 (Forwarding)

- (1) LD 的结果可以直接从 MEM 阶段转发给 ADDI 的 EX 阶段
- (2) ADDI 的结果可以直接从 EX 阶段转发给 SD 的 EX 阶段

只要 EX 能够拿到正确的数据就可以了，而因为有了 W->X 的 bypass，ld 指令可以在 W 阶段将结果送给 X，因此，addi 只需要一个周期等待；因此，每次循环用 9 个周期（bnez 在第 10 个周期被下一次循环的 ld 指令接上），所以一共用了 $9 \times 99 + 2 = 893$ 周期。

4. 如果允许调整指令顺序并允许再使用 3 个寄存器 x5, x6, x7，该段代码最短可以在多少周期内完成？给出详细分析。

参考答案：

可以通过寄存器重命名和指令顺序调整，将程序变为：

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ld x5, 0(x2)	IF	ID	EX	MEM	WB						
addi x7, x2, 4		IF	ID	EX	MEM	WB					
addi x6, x5, 1			IF	ID	EX	MEM	WB				
sd x6, 0(x2)				IF	ID	EX	MEM	WB			
sub x4, x3, x7					IF	ID	EX	MEM	WB		
bnez x4, loop						IF	ID	EX	MEM	WB	
ld x5, 0(x2)									IF	ID	

总执行周期= $8 \times 99 + 5 = 797$