23-冒险和预测（二）：流水线里的接力赛

上一讲，我为你讲解了结构冒险和数据冒险，以及应对这两种冒险的两个解决方案。一种方案是增加资源，通过添加指令缓存和数据缓存，让我们对于指令和数据的访问可以同时进行。这个办法帮助CPU解决了取指令和访问数据之间的资源冲突。另一种方案是直接进行等待。通过插入NOP这样的无效指令，等待之前的指令完成。这样我们就能解决不同指令之间的数据依赖问题。

着急的人，看完上一讲的这两种方案，可能已经要跳起来问了：“这也能算解决方案么？”的确，这两种方案都有点儿笨。

第一种解决方案，好比是在软件开发的过程中，发现效率不够，于是研发负责人说：“我们需要双倍的人手和研发资源。”而第二种解决方案，好比你在提需求的时候，研发负责人告诉你说：“来不及做，你只能等我们需求排期。” 你应该很清楚地知道，“堆资源”和“等排期”这样的解决方案，并不会真的提高我们的效率，只是避免冲突的无奈之举。

那针对流水线冒险的问题，我们有没有更高级或者更高效的解决方案呢？既不用简单花钱加硬件电路这样“堆资源”，也不是纯粹等待之前的任务完成这样“等排期”。

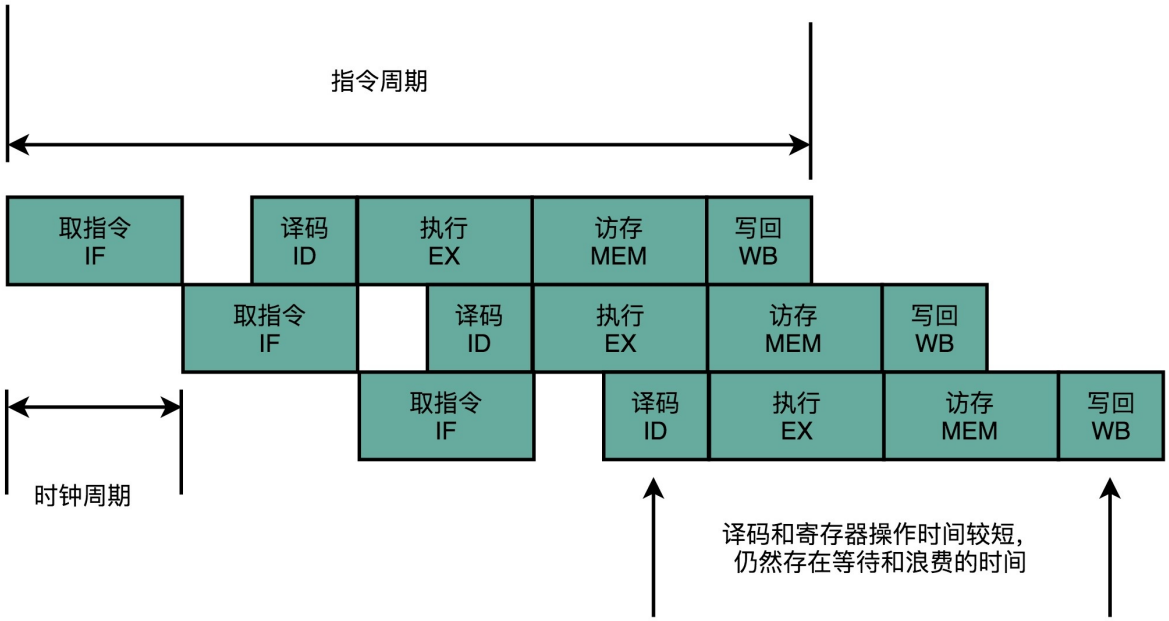
答案当然是有的。这一讲，我们就来看看计算机组成原理中，一个更加精巧的解决方案，**操作数前推**。

NOP操作和指令对齐

要想理解操作数前推技术，我们先来回顾一下，第5讲讲过的，MIPS体系结构下的R、I、J三类指令，以及第20讲里的五级流水线“取指令（IF）-指令译码（ID）-指令执行（EX）-内存访问（MEM）-数据写回（WB）”。

我把对应的图片放进来了，你可以看一下。如果印象不深，建议你先回到这两节去复习一下，再来看今天的内容。

指令类型	6位	5位	5位	5位	5位	6位	解释
R	opcode	rs	rt	rd	shamt 位移量	funct 功能码	算术操作、逻辑操作
I	opcode	rs	rt	address/immediate 地址/立即数			数据传输、条件分支、立即数操作
J	opcode	target address 目标地址					无条件跳转

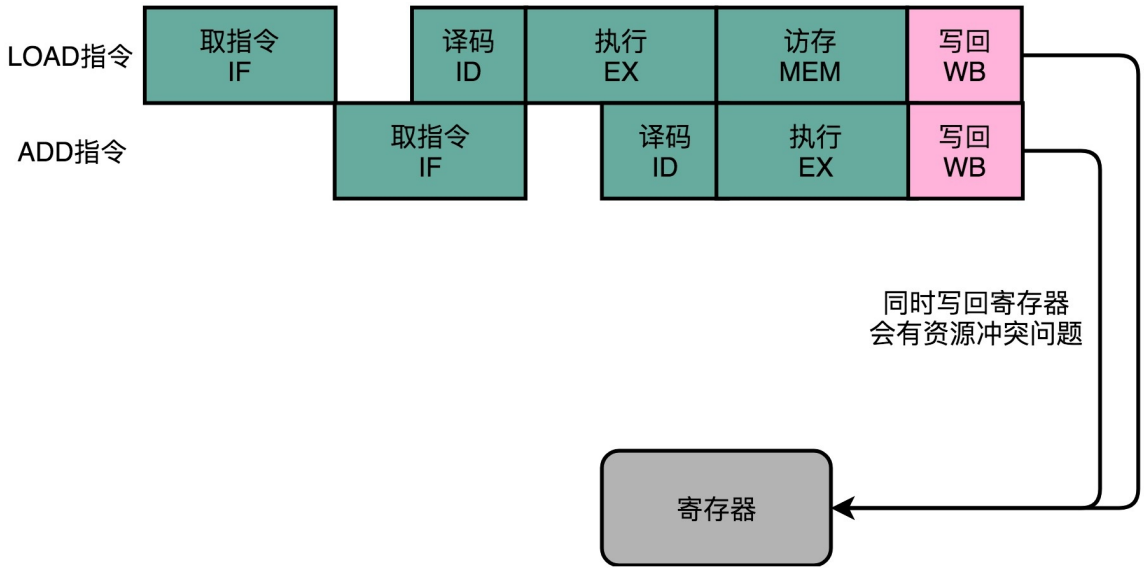


在MIPS的体系结构下，不同类型的指令，会在流水线的不同阶段进行不同的操作。

我们以MIPS的LOAD，这样从内存里读取数据到寄存器的指令为例，来仔细看看，它需要经历的5个完整的流水线。STORE这样从寄存器往内存里写数据的指令，不需要有写回寄存器的操作，也就是没有数据写回的流水线阶段。至于像ADD和SUB这样的加减法指令，所有操作都在寄存器完成，所以没有实际的内存访问（MEM）操作。

指令类型	流水线阶段（Pipeline Stage）				
LOAD	IF	ID	EX	MEM	WB
STORE	IF	ID	EX	MEM	
R型指令（ADD/SUB等）	IF	ID	EX		WB

有些指令没有对应的流水线阶段，但是我们并不能跳过对应的阶段直接执行下一阶段。不然，如果我们先后执行一条LOAD指令和一条ADD指令，就会发生LOAD指令的WB阶段和ADD指令的WB阶段，在同一个时钟周期发生。这样，相当于触发了一个结构冒险事件，产生了资源竞争。



所以，在实践当中，各个指令不需要的阶段，并不会直接跳过，而是会运行一次NOP操作。通过插入一个NOP操作，我们可以使后一条指令的每一个Stage，一定不和前一条指令的同Stage在一个时钟周期执行。这样，就不会发生先后两个指令，在同一时钟周期竞争相同的资源，产生结构冒险了。

指令类型	流水线阶段（Pipeline Stage）				
LOAD	IF	ID	EX	MEM	WB
STORE	IF	ID	EX	MEM	NOP
R型指令（ADD/SUB等）	IF	ID	EX	NOP	WB

流水线里的接力赛：操作数前推

通过NOP操作进行对齐，我们在流水线里，就不会遇到资源竞争产生的结构冒险问题了。除了可以解决结构冒险之外，这个NOP操作，也是我们之前讲的流水线停顿插入的对应操作。

但是，插入过多的NOP操作，意味着我们的CPU总是在空转，干吃饭不干活。那么，我们有没有什么办法，尽量少插入一些NOP操作呢？不要着急，下面我们就以两条先后发生的ADD指令作为例子，看看能不能找到一些好的解决方案。

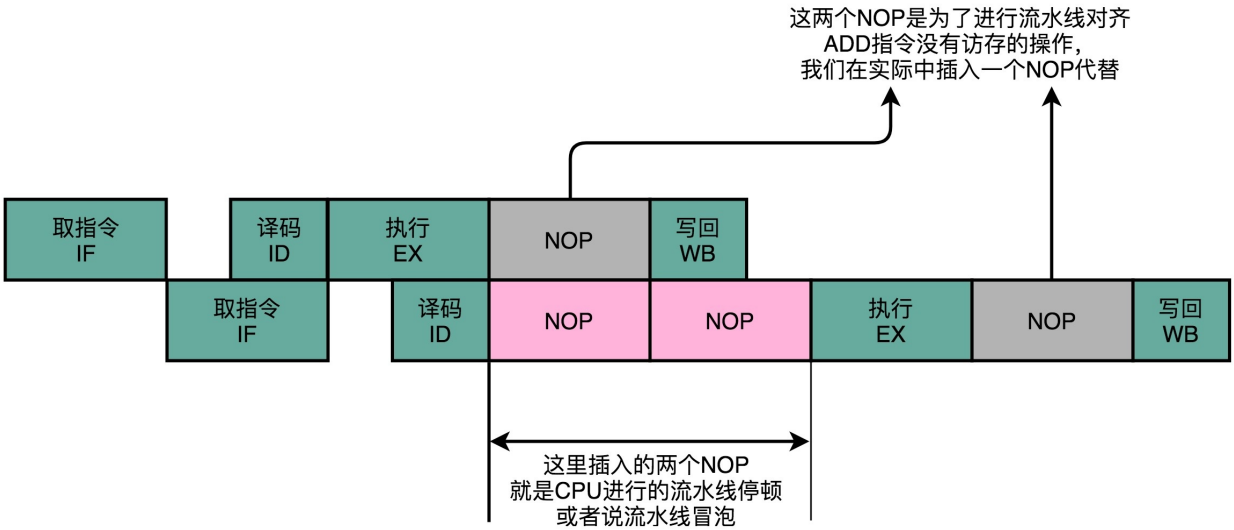
```
add $t0, $s2,$s1
add $s2, $s1,$t0
```

这两条指令很简单。

1. 第一条指令，把 s1 和 s2 寄存器里面的数据相加，存入到 t0 这个寄存器里面。
2. 第二条指令，把 s1 和 t0 寄存器里面的数据相加，存入到 s2 这个寄存器里面。

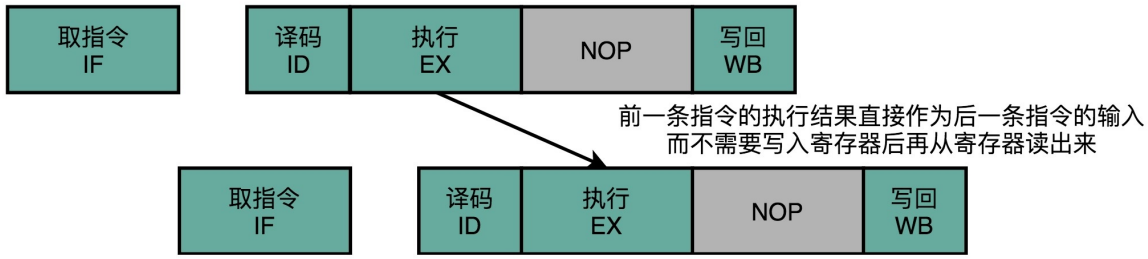
因为后一条的 add 指令，依赖寄存器 t0 里的值。而 t0 里面的值，又来自于前一条指令的计算结果。所以后一条指令，需要等待前一条指令的数据写回阶段完成之后，才能执行。就像上一讲里讲的那样，我们遇到了一个数据依赖类型的冒险。于是，我们就不得不通过流水线停顿来解决这个冒险问题。我们要在第二条指令的译码阶段之后，插入对应的NOP指令，直到前一天指令的数据写回完成之后，才能继续执行。

这样的方案，虽然解决了数据冒险的问题，但是也浪费了两个时钟周期。我们的第2条指令，其实就是多花了2个时钟周期，运行了两次空转的NOP操作。



不过，其实我们第二条指令的执行，未必要等待第一条指令写回完成，才能进行。如果我们第一条指令的执行结果，能够直接传输给第二条指令的执行阶段，作为输入，那我们的第二条指令，就不用再从寄存器里面，把数据再单独读出来一次，才来执行代码。

我们完全可以在第一条指令的执行阶段完成之后，直接将结果数据传输给到下一条指令的ALU。然后，下一条指令不需要再插入两个NOP阶段，就可以继续正常走到执行阶段。



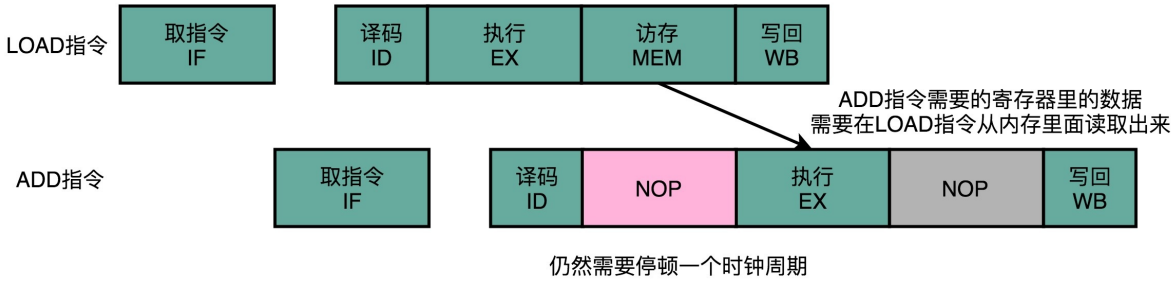
这样的解决方案，我们就叫作**操作数前推**（Operand Forwarding），或者操作数旁路（Operand Bypassing）。其实我觉得，更合适的名字应该叫**操作数转发**。这里的Forward，其实就是我们写Email时的“转发”（Forward）的意思。不过现有的经典教材的中文翻译一般都叫“前推”，我们也就不去纠正这个说法了，你明白这个意思就好。

转发，其实是这个技术的**逻辑含义**，也就是在第1条指令的执行结果，直接“转发”给了第2条指令的ALU作为输入。另外一个名字，旁路（Bypassing），则是这个技术的**硬件含义**。为了能够实现这里的“转发”，我们在CPU的硬件里面，需要再单独拉一根信号传输的线路出来，使得ALU的计算结果，能够重新回到ALU的输入里来。这样的一条线路，就是我们的“旁路”。它越过（Bypass）了写入寄存器，再从寄存器读出

的过程，也为我们节省了2个时钟周期。

操作数前推的解决方案不但可以单独使用，还可以和流水线冒泡一起使用。有的时候，虽然我们可以把操作数转发到下一条指令，但是下一条指令仍然需要停顿一个时钟周期。

比如说，我们先去执行一条LOAD指令，再去执行ADD指令。LOAD指令在访存阶段才能把数据读取出来，所以下一条指令的执行阶段，需要在访存阶段完成之后，才能进行。



总的来说，操作数前推的解决方案，比流水线停顿更进了一步。流水线停顿的方案，有点儿像游泳比赛的接力方式。下一名运动员，需要在前一个运动员游玩了全程之后，触碰到了游泳池壁才能出发。而操作数前推，就好像短跑接力赛。后一个运动员可以提前抢跑，而前一个运动员会多跑一段主动把交接棒传递给他。

总结延伸

这一讲，我给你介绍了一个更加高级，也更加复杂的解决数据冒险问题方案，就是操作数前推，或者叫操作数旁路。

操作数前推，就是通过在硬件层面制造一条旁路，让一条指令的计算结果，可以直接传输给下一条指令，而不再需要“指令1写回寄存器，指令2再读取寄存器“这样多此一举的操作。这样直接传输带来的好处就是，后面的指令可以减少，甚至消除原本需要通过流水线停顿，才能解决的数据冒险问题。

这个前推的解决方案，不仅可以单独使用，还可以和前面讲解过的流水线冒泡结合在一起使用。因为有些时候，我们的操作数前推并不能减少所有“冒泡”，只能去掉其中的一部分。我们仍然需要通过插入一些“气泡”来解决冒险问题。

通过操作数前推，我们进一步提升了CPU的运行效率。那么，我们是不是还能找到别的办法，进一步地减少浪费呢？毕竟，看到现在，我们仍然少不了要插入很多NOP的“气泡”。那就请你继续坚持学习下去。下一讲，我们来看看，CPU是怎么通过乱序执行，进一步减少“气泡”的。

推荐阅读

想要深入了解操作数前推相关的内容，推荐你读一下《计算机组成与设计：硬件/软件接口》的4.5 ~ 4.7章节。

课后思考

前面讲5级流水线指令的时候，我们说，STORE指令是没有数据写回阶段的，而ADD指令是没有访存阶段的。那像CMP或者JMP这样的比较和跳转指令，5个阶段都是全的么？还是说不需要哪些阶段呢？

欢迎留言和我分享你的疑惑和见解。你也可以把今天的内容，分享给你的朋友，和他一起学习和进步。

精选留言：

- 陈华应 2019-06-17 12:53:50
  从指令作用理解，cmp是全的，jmp不需要回写~ [2赞]

- Zain Lau 2019-06-18 00:30:16
  今天考研冲北邮！

- haer 2019-06-17 21:19:16
  我觉得：cmp没有“访存”，jmp没有“执行”和“访存”

- Geek 2019-06-17 12:16:45
  后面这些就有点难了，对于非计算机专业的我来说，不过就当看小说了，会一直看下去。。。

- Linuxer 2019-06-17 08:31:31
  请问老师操作数前推中，前一条指令的输出存哪呢？如果还是寄存器那不还是没解决问题，如果不是那指令add不有两种形式，那又如何区分呢?