

## 19-建立数据通路（下）：指令more运算=CPU

上一讲，我们讲解了时钟信号是怎么实现的，以及怎么利用这个时钟信号，来控制数据的读写，可以使得我们能需要的数据“存储”下来。那么，这一讲，我们要让计算机“自动”跑起来。

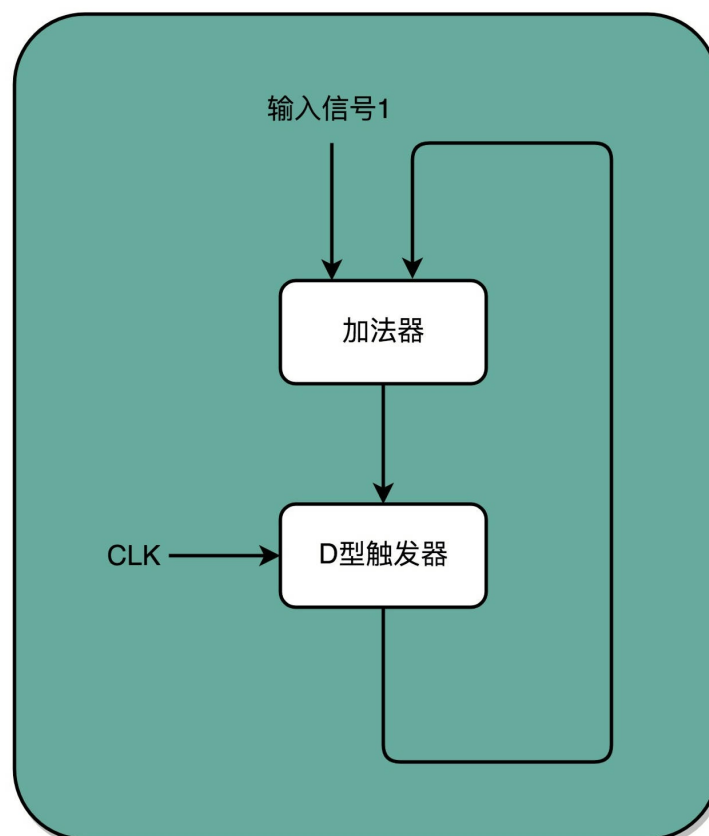
通过一个时钟信号，我们可以实现计数器，这个会成为我们的PC寄存器。然后，我们还需要一个能够帮我们在内存里面寻找指定数据地址的译码器，以及解析读取到的机器指令的译码器。这样，我们就能把所有学习到的硬件组件串联起来，变成一个CPU，实现我们在计算机指令的执行部分的运行步骤。

### PC寄存器所需要的计数器

我们常说的PC寄存器，还有个名字叫程序计数器。下面我们就来看看，它为什么叫作程序计数器。

有了时钟信号，我们可以提供定时的输入；有了D型触发器，我们可以在时钟信号控制的时间点写入数据。我们把这两个功能组合起来，就可以实现一个自动的计数器了。

加法器的两个输入，一个始终设置成1，另外一个来自于一个D型触发器A。我们把加法器的输出结果，写到这个D型触发器A里面。于是，D型触发器里面的数据就会在固定的时钟信号为1的时候更新一次。



这样，我们就有了一个每过一个时钟周期，就能固定自增1的自动计数器了。这个自动计数器，可以拿来当我们的PC寄存器。事实上，PC寄存器的这个PC，英文就是Program Counter，也就是**程序计数器**的意思。

每次自增之后，我们可以去对应的D型触发器里面取值，这也是我们下一条需要运行指令的地址。前面第5讲我们讲过，同一个程序的指令应该要顺序地存放在内存里面。这里就和前面对应上了，顺序地存放指令，就是为了让通过程序计数器就能定时地不断执行新指令。

加法计数、内存取值，乃至后面的命令执行，最终其实都是由我们一开始讲的时钟信号，来控制执行时间点

和先后顺序的，这也是我们需要时序电路最核心的原因。

在最简单的情况下，我们需要让每一条指令，从程序计数，到获取指令、执行指令，都在一个时钟周期内完成。如果PC寄存器自增地太快，程序就会出错。因为前一次的运算结果还没有写回到对应的寄存器里面的时候，后面一条指令已经开始读取里面的数据来做下一次计算了。这个时候，如果我们的指令使用同样的寄存器，前一条指令的计算就会没有效果，计算结果就错了。

在这种设计下，我们需要在一个时钟周期里，确保执行完一条最复杂的CPU指令，也就是耗时最长的一条CPU指令。这样的CPU设计，我们称之为**单指令周期处理器**（Single Cycle Processor）。

很显然，这样的设计有点儿浪费。因为即便只调用一条非常简单的指令，我们也需要等待整个时钟周期的时间走完，才能执行下一条指令。在后面章节里我们会讲到，通过流水线技术进行性能优化，可以减少需要等待的时间，这里我们暂且说到这里。

## 读写数据所需要的译码器

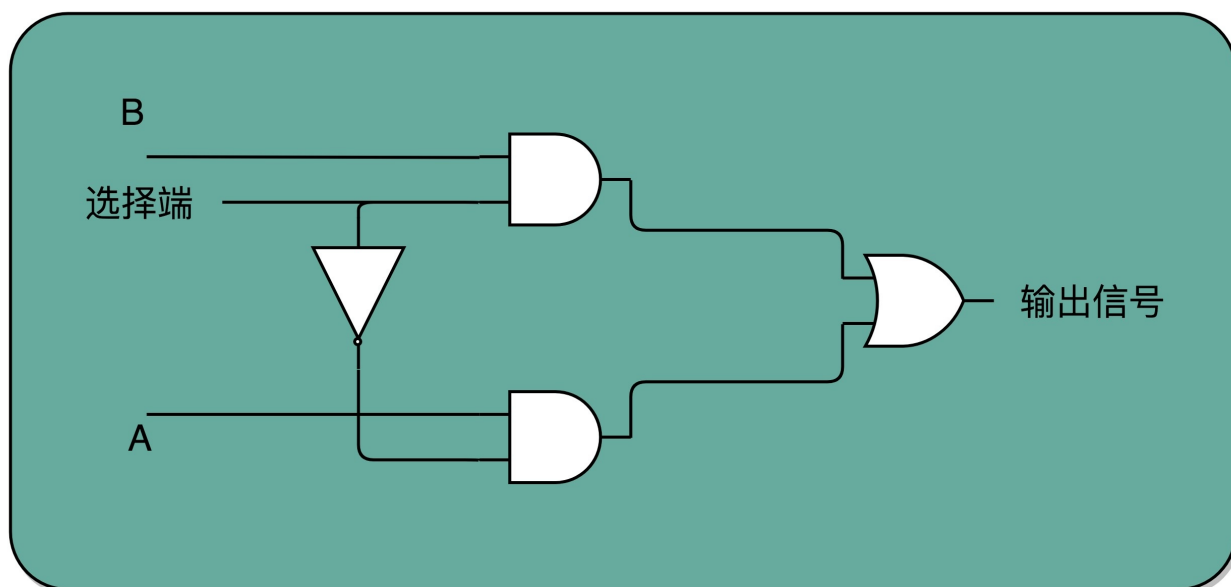
现在，我们的数据能够存储在D型触发器里了。如果我们把很多个D型触发器放在一起，就可以形成一块很大的存储空间，甚至可以当成一块内存来用。像我现在手头这台电脑，有16G内存。那我们怎么才能知道，写入和读取的数据，是在这么大的内存的哪几个比特呢？

于是，我们就需要有一个电路，来完成“寻址”的工作。这个“寻址”电路，就是我们接下来要讲的译码器。

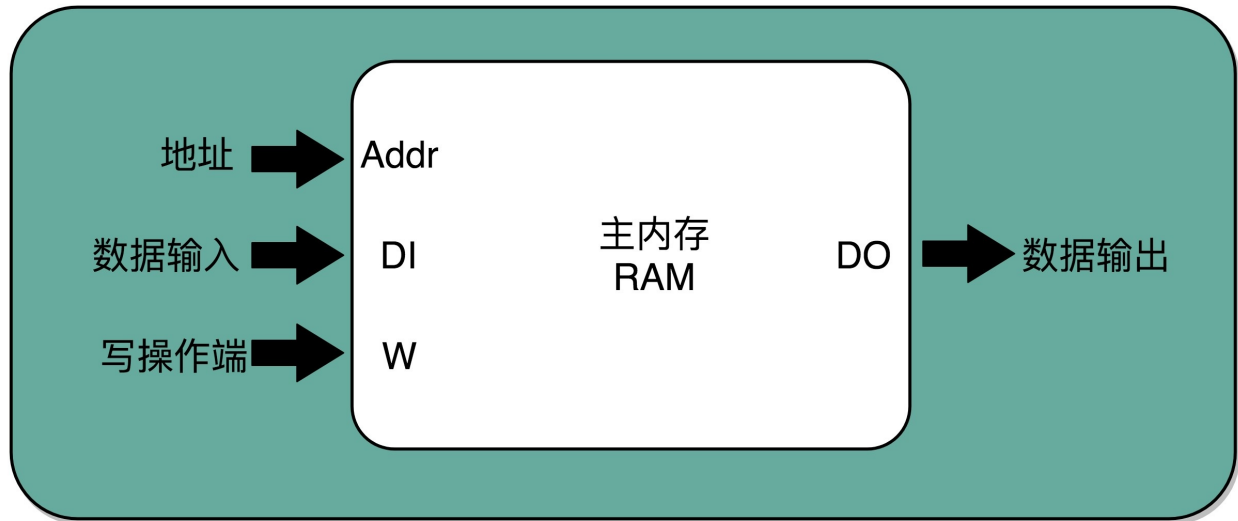
在现在实际使用的计算机里面，内存所使用的DRAM，并不是通过上面的D型触发器来实现的，而是使用了一种CMOS芯片来实现的。不过，这并不影响我们从基础原理方面来理解译码器。在这里，我们还是可以把内存芯片，当成是很多个连在一起的D型触发器来实现的。

如果把“寻址”这件事情退化到最简单的情况，就是在两个地址中，去选择一个地址。这样的电路，我们叫作**2-1选择器**。我把它的电路实现画在了这里。

我们通过一个反相器、两个与门和一个或门，就可以实现一个2-1选择器。通过控制反相器的输入是0还是1，能够决定对应的输出信号，是和地址A，还是地址B的输入信号一致。



一个反向器只能有0和1这样两个状态，所以我们只能从两个地址中选择一个。如果输入的信号有三个不同的开关，我们就能从 $2^3$ ，也就是8个地址中选择一个了。这样的电路，我们就叫**3-8译码器**。现代的计算机，如果CPU是64位的，就意味着我们的寻址空间也是 $2^{64}$ ，那么我们就需要一个有64个开关的译码器。

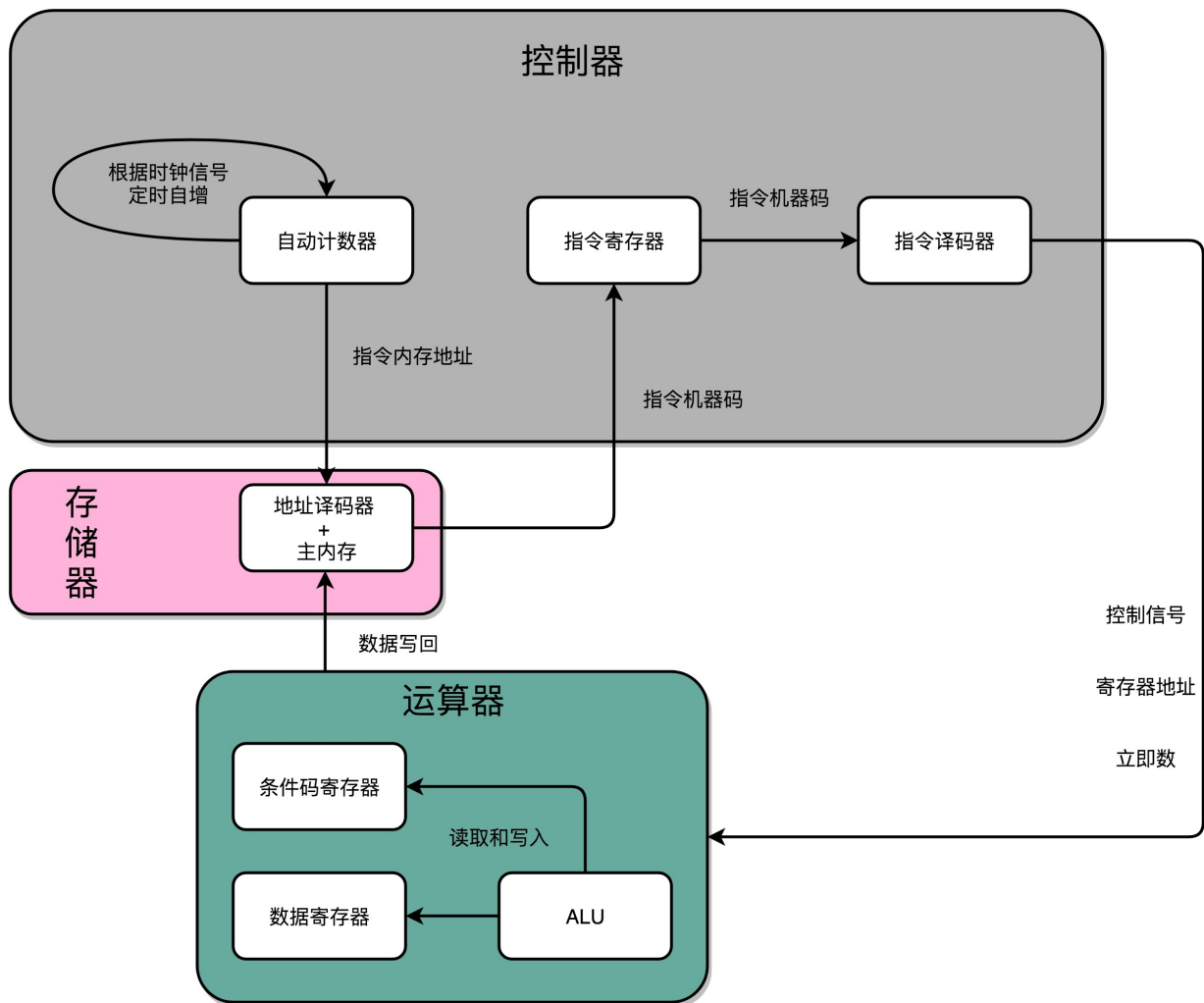


当我们把译码器和内存连到一起时，通常会组成这样一个电路

所以说，其实译码器的本质，就是从输入的多个位的信号中，根据一定的开关和电路组合，选择出自己想要的信号。除了能够进行“寻址”之外，我们还可以把对应的需要运行的指令码，同样通过译码器，找出我们期望执行的指令，也就是在之前我们讲到过的opcode，以及后面对应的操作数或者寄存器地址。只是，这样的“译码器”，比起2-1选择器和3-8译码器，要复杂的多。

### 建立数据通路，构造一个最简单的CPU

D触发器、自动计数以及译码器，再加上一个我们之前说过的ALU，我们就凑齐了一个拼装一个CPU必须零件了。下面，我们就来看一看，怎么把这些零件组合起来，才能实现指令执行和算术逻辑计算的CPU。



CPU实现的抽象逻辑图

1. 首先，我们有一个自动计数器。这个自动计数器会随着时钟主频不断地自增，来作为我们的PC寄存器。
2. 在这个自动计数器的后面，我们连上一个译码器。译码器还要同时连着我们通过大量的D触发器组成的内存。
3. 自动计数器会随着时钟主频不断自增，从译码器当中，找到对应的计数器所表示的内存地址，然后读取里面的CPU指令。
4. 读取出来的CPU指令会通过我们的CPU时钟的控制，写入到一个由D触发器组成的寄存器，也就是指令寄存器当中。
5. 在指令寄存器后面，我们可以再跟一个译码器。这个译码器不再是用来寻址的了，而是把我们拿到的指令，解析成opcode和对应的操作数。
6. 当我们拿到对应的opcode和操作数，对应的输出线路就要连接ALU，开始进行各种算术和逻辑运算。对应的计算结果，则会再写回到D触发器组成的寄存器或者内存当中。

这样的一个完整的通路，也就完成了我们的CPU的一条指令的执行过程。在这个过程中，你会发现这样几个有意思的问题。

第一个，是我们之前在[第6讲](#)讲过的程序跳转所使用的条件码寄存器。那时，讲计算机的指令执行的时候，我们说高级语言中的if...else，其实是变成了一条cmp指令和一条jmp指令。cmp指令是在进行对应的比较，比较的结果会更新到条件码寄存器当中。jmp指令则是根据条件码寄存器当中的标志位，来决定是否进行跳转以及跳转到什么地址。

不知道你当时看到这个知识点的时候，有没有一些疑惑，为什么我们的if...else会变成这样两条指令，而不是设计成一个复杂的电路，变成一条指令？到这里，我们就可以解释了。这样分成两个指令实现，完全匹配好了我们在电路层面，“译码-执行-更新寄存器”这样的步骤。

cmp指令的执行结果放到了条件码寄存器里面，我们的条件跳转指令也是在ALU层面执行的，而不是在控制器里面执行的。这样的实现方式在电路层面非常直观，我们不需要一个非常复杂的电路，就能实现if...else的功能。

第二个，是关于我们在[第17讲](#)里讲到的指令周期、CPU周期和时钟周期的差异。在上面的抽象的逻辑模型中，你很容易发现，我们执行一条指令，其实可以不放在一个时钟周期里面，可以直接拆分到多个时钟周期。

我们可以在一个时钟周期里面，去自增PC寄存器的值，也就是指令对应的内存地址。然后，我们要根据这个地址从D触发器里面读取指令，这个还是可以在刚才那个时钟周期内。但是对应的指令写入到指令寄存器，我们可以放在一个新的时钟周期里面。指令译码给到ALU之后的计算结果，要写回到寄存器，又可以放到另一个新的时钟周期。所以，执行一条计算机指令，其实可以拆分到很多个时钟周期，而不是必须使用单指令周期处理器的设计。

因为从内存里面读取指令时间很长，所以如果使用单指令周期处理器，就意味着我们的指令都要去等待一些慢速的操作。这些不同指令执行速度的差异，也正是计算机指令有指令周期、CPU周期和时钟周期之分的原因。因此，现代我们优化CPU的性能时，用的CPU都不是单指令周期处理器，而是通过流水线、分支预测等技术，来实现在一个周期里同时执行多个指令。

## 总结延伸

好了，今天我们讲完了，怎么通过连接不同功能的电路，实现出一个完整的CPU。

我们可以通过自动计数器的电路，来实现一个PC寄存器，不断生成下一条要执行的计算机指令的内存地址。然后通过译码器，从内存里面读出对应的指令，写入到D触发器实现的指令寄存器中。再通过另外一个译码器，把它解析成我们需要执行的指令和操作数的地址。这些电路，组成了我们计算机五大组成部分里面的控制器。

我们把opcode和对应的操作数，发送给ALU进行计算，得到计算结果，再写回到寄存器以及内存里面来，这个就是我们计算机五大组成部分里面的运算器。

我们的时钟信号，则提供了协调这样一条条指令的执行时间和先后顺序的机制。同样的，这也带来了一个挑战，那就是单指令周期处理器去执行一条指令的时间太长了。而这个挑战，也是我们接下来的几讲里要解答的问题。

## 推荐阅读

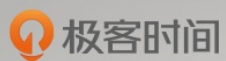
《编码：隐匿在计算机软硬件背后的语言》的第17章，用更多细节的流程来讲解了CPU的数据通路。《计算机组成与设计 硬件/软件接口》的4.1到4.4小节，从另外一个层面和角度讲解了CPU的数据通路的建立，推荐你阅读一下。

## 课后思考

CPU在执行无条件跳转的时候，不需要通过运算器以及ALU，可以直接在控制器里面完成，你能说说这是为

什么吗？

欢迎在留言区写下你的思考和疑惑，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。




# 深入浅出计算机组成原理

带你掌握计算机体系全貌

徐文浩 bothub 创始人



新版升级：点击「 请朋友读」，20位好友免费读，邀请订阅更有**现金**奖励。