

全部的 3 位	Q_2	Q_1	Q_0	十进制数
000	0	0	0	0
001	0	0	1	1
010	0	1	0	2
011	0	1	1	3
100	1	0	0	4
101	1	0	1	5
110	1	1	0	6
111	1	1	1	7

如果我们分开看表6-6中的 Q 列，就能看出一个模式。当我们计数时， Q 每次都会切换。当 Q 之前为1时， Q 就会切换。当 Q 和 Q 之前都为1时， Q 就会切换。换句话说，除了 Q ，当前面所有位都为1时，每位都会在下一次计数时进行切换。T触发器很适合实现这个计数器，因为它们的工作就是切换！我们来看如何构建电路来实现这个功能，如图6-15所示。

0010120

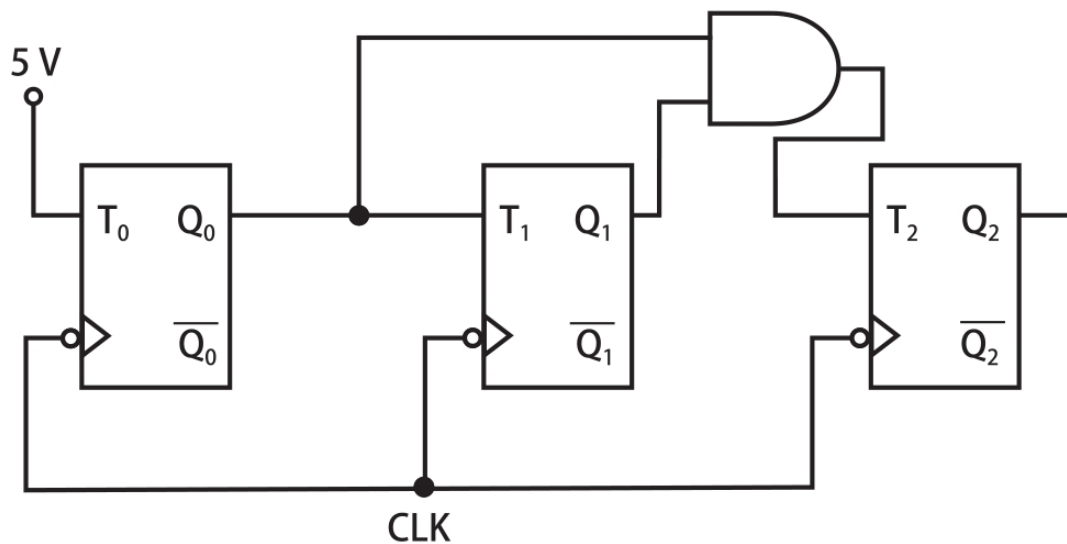


图6-15 用T触发器构建的3位计数器

在图6-15中，3个T触发器使用了同一个时钟信号，所以它们是同步的。 T 连接5V，因此， Q 每个时钟脉冲都会进行切换。 T 连接到 Q ，因此仅当

Q 为高电平时，时钟脉冲才会使 Q 进行切换。 T 连接到 Q AND Q ，因此仅当 Q 和 Q 都为高电平时，时钟脉冲才会使 Q 进行切换。

001001201012

注意

请参阅设计11搭建3位计数器。

考虑一下我们如何把这样的计数器与之前设计的自动贩卖机组合使用。除了简单地跟踪硬币是否插入，我们还可以跟踪插入的硬币数量，至少可以跟踪多达7枚硬币！要让自动贩卖机计数器发挥作用，它还需要能倒着计数，因为每卖出一件商品都应减少硬币计数。我不会在这里详细介绍如何在自动贩卖机电路中添加计数器，但你可以自行尝试。可以在线获得具有递增和递减计数功能的计数器电路设计，也可以采用诸如74191这样的递增/递减计数器IC。

我们用T触发器构建了一个计数器，T触发器是用JK触发器构建的，JK触发器又是基于晶体管的数字逻辑电路！这再次演示了封装是如何让我们构建复杂系统，并在此过程中隐藏细节的。

6.8 总结

本章介绍了时序逻辑电路和时钟信号。你了解到和组合逻辑电路不同，时序逻辑电路有存储器，可以记录过去的状态。你还了解了SR锁存器——一个简单的1位存储设备。我们讨论了如何用时钟信号同步包括存储设备在内的多个电路元件，时钟信号是一种在高电平和低电平之间交替的电信号。时钟控制的1位存储设备被称为触发器，它使状态改变只在与时钟信号同步时发生。你了解了JK触发器是如何工作的、怎样用JK触发器构造T触发器，以及如何同时使用时钟和T触发器来搭建3位计数器。

存储器和时钟是现代计算机的关键组件，第7章将介绍它们如何在现代计算机中发挥作用，你将学习计算机硬件——内存、处理器和I/O。

设计6：用NOR门搭建SR锁存器

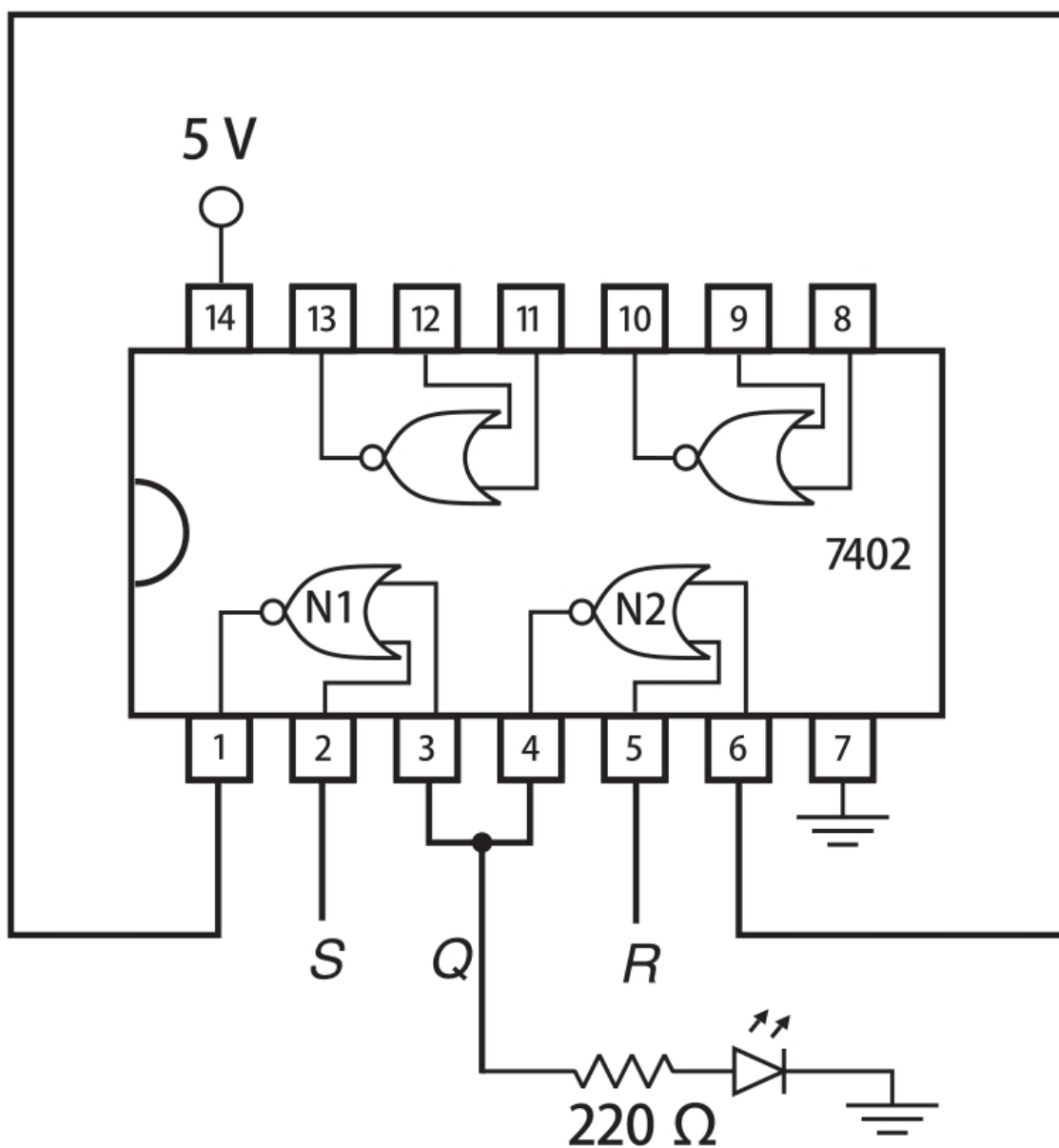
在本设计中，你将在面包板上搭建一个SR锁存器，并把输出 Q 连接到LED以方便观察状态，你还应该测试 S 和 R 的高低电平并观察输出。

本设计需要如下组件：

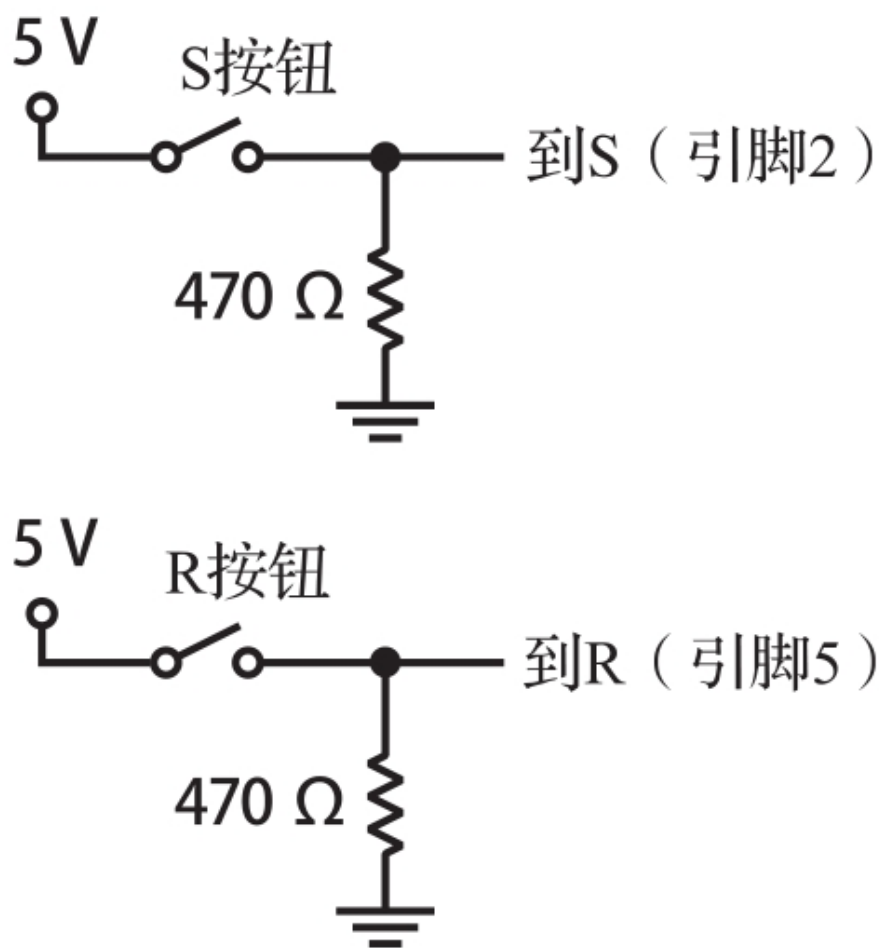
- ☐ 面包板；
- ☐ LED；
- ☐ 和LED一起使用的限流电阻（大约 220Ω ）；
- ☐ 跨接线；
- ☐ 7402 IC（含4个NOR门）；
- ☐ 5V电源；
- ☐ 两个 470Ω 电阻；
- ☐ 两个适合面包板的开关或按钮；
- ☐ 可选项：一个额外的 220Ω 电阻和一个LED。

回顾设计4可以了解如何使用带下拉电阻的按钮/开关。按图6-16所示连接组件来构建SR锁存器。注意，和诸如7408（AND门）及7432（OR门）等其他IC中的门布局相比，7402 IC中的NOR门布局是不一样的，所以要确保使用正确的输入和输出引脚。

当你按照图6-16所示构建好SR锁存器之后，把 S 和 R 连接到带下拉电阻的按钮（或开关），如图6-17所示。这可以让你只通过按下按钮就能轻松设置 S 或 R 的值。



▲图6-16 由7402 IC构建的SR锁存器连线图



▲图6-17 用按钮和下拉电阻来控制输入S与R

把按钮连接到SR锁存器后，尝试通过按下和放开按钮来把S或R设置为高电平或低电平，然后观察结果。当按下S时，代表Q的LED会点亮吗？在放开S后，LED还会保持点亮吗？当按下R时，LED会熄灭吗？在放开R后，LED还会保持熄灭吗？如果还想看 \bar{Q} 的值——这个值应该总和Q值相反，只需要将另一个220Ω电阻和另一个LED连接到IC的引脚1和引脚6。

当开始通电时，输出将是不可预测的。也就是说，电路可以在 $Q=0$ 或 $Q=1$ 时启动，也可能以Q的某个值可靠地启动。不可预测的原因是设计方案导致了竞争条件。如果通电时， $S=0$ 且 $R=0$ ，那么N1和N2都尝试输出1，其

中一个可能做得稍微快一点（所以出现了竞争）。若N1首先输出1，则N2变低电平， Q 为0。若N2首先输出1，则N1变低电平， Q 为1。这个问题可以通过在启动时按住R按钮（强制 $Q=0$ ）并在启动后松开R按钮来解决。

保留这个电路，我们在设计7中还要用到它。

设计7：搭建一个基本的自动贩卖机电路

在本设计中，你将搭建本章前面描述的自动贩卖机电路。你可以将设计6的SR锁存器作为存储单元。要确保对LED使用限流电阻，对按钮输入使用下拉电阻。测试电路以保证它按预期工作。要复位电路，请按下SR锁存器上的R按钮。

本设计需要如下组件：

- 设计6中在面包板上搭建的7402 SR锁存器；
- 一个额外的LED；
- 和LED一起使用的限流电阻（大约 220Ω ）；
- 跨接线；
- 7408 IC（含4个AND门）；
- 一个适合面包板的额外的按钮或开关；
- 一个和按钮一起使用的额外的下拉电阻（大约 470Ω ）。

在图6-18所示的电路图中，IC引脚编号用方框表示。虽然图中没有显示，但请确保把7402和7408芯片连接到5V和接地引脚（分别为引脚14和引脚7）。

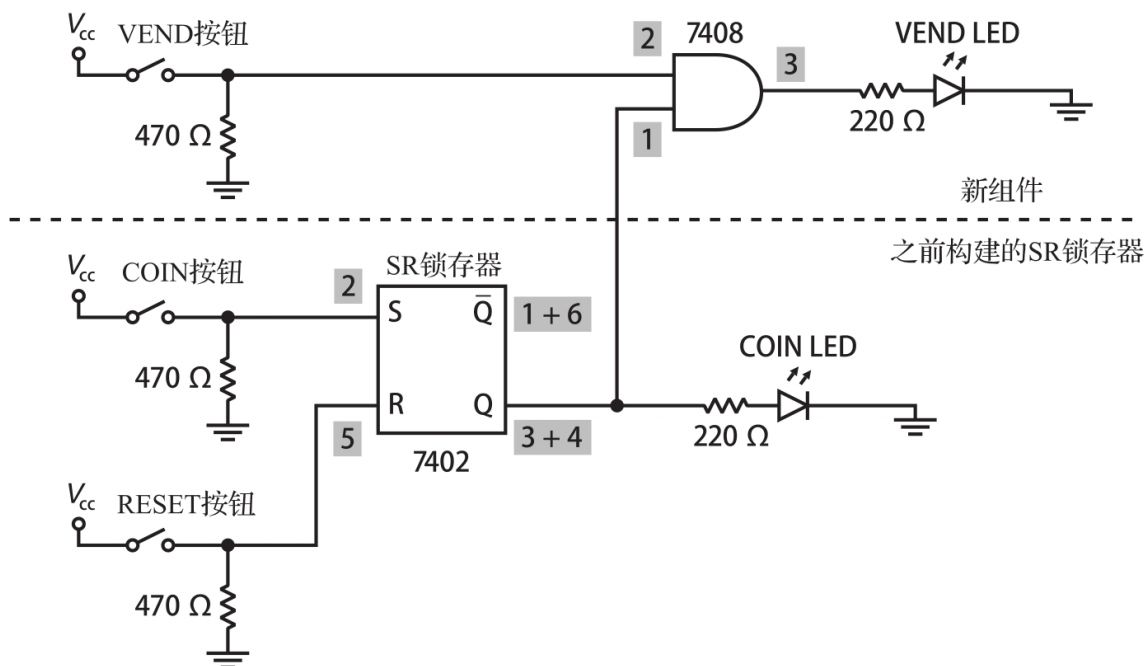


图6-18 基本的自动贩卖机电路连线图

图6-18下半部分是你在设计6中构建的电路。唯一的不同是：现在的S按钮代表的是COIN按钮，输出Q LED代表的是COIN指示灯LED。要搭建完整的电路，只需要添加电路的上半部分，然后按照图6-18把两部分连接起来。

电路搭建好后，你应当看到当按下COIN按钮时，COIN LED亮起。按下VEND按钮应该让VEND LED亮起，但前提是COIN LED已经亮了。按下RESET按钮会复位电路。

保留这个电路，我们在设计8中还要用到它。

设计8：在自动贩卖机电路中添加延迟复位功能

在本设计中，你将在设计7的自动贩卖机电路上添加延迟复位功能。本设计需要如下组件：

- 设计7中搭建的自动贩卖机电路；

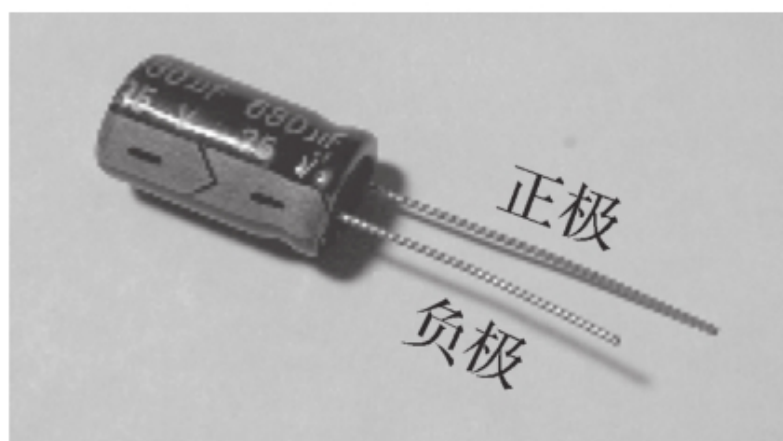
□4.7k Ω 电阻；

□220 μ F电解电容器；

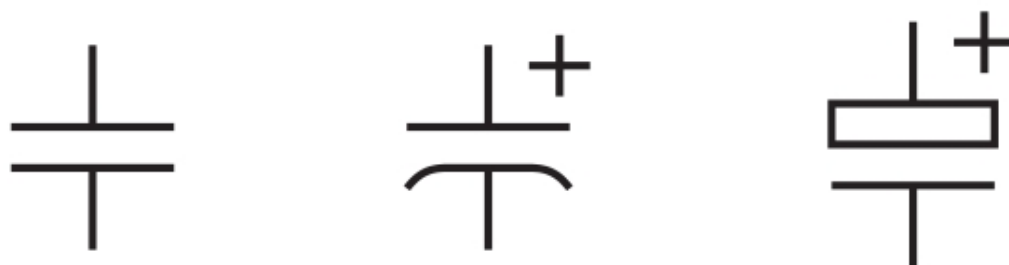
□跨接线。

电容器类型有很多，讨论各种类型不在本书的范围。对于本设计，你要使用的是电解电容器（见图6-19）。连接电容器时，请注意电解电容器是分正负极的。一般，负极引脚较短。

图6-20给出了电容器的电路图符号。左边的是非极化电容器符号，中间和右边的符号表示极化电容器。两种极化符号都提供了识别电容器正极和负极的方法。



▲图6-19 电解电容器，带条纹/箭头的较短引脚是负极引脚



▲图6-20 电容器的电路图符号

图6-21展示了如何在自动贩卖机电路上添加基于电容器的延迟复位功能，以代替手动复位。电容器负极应接地。通过该图可以获取构建本电路的更多详细信息。

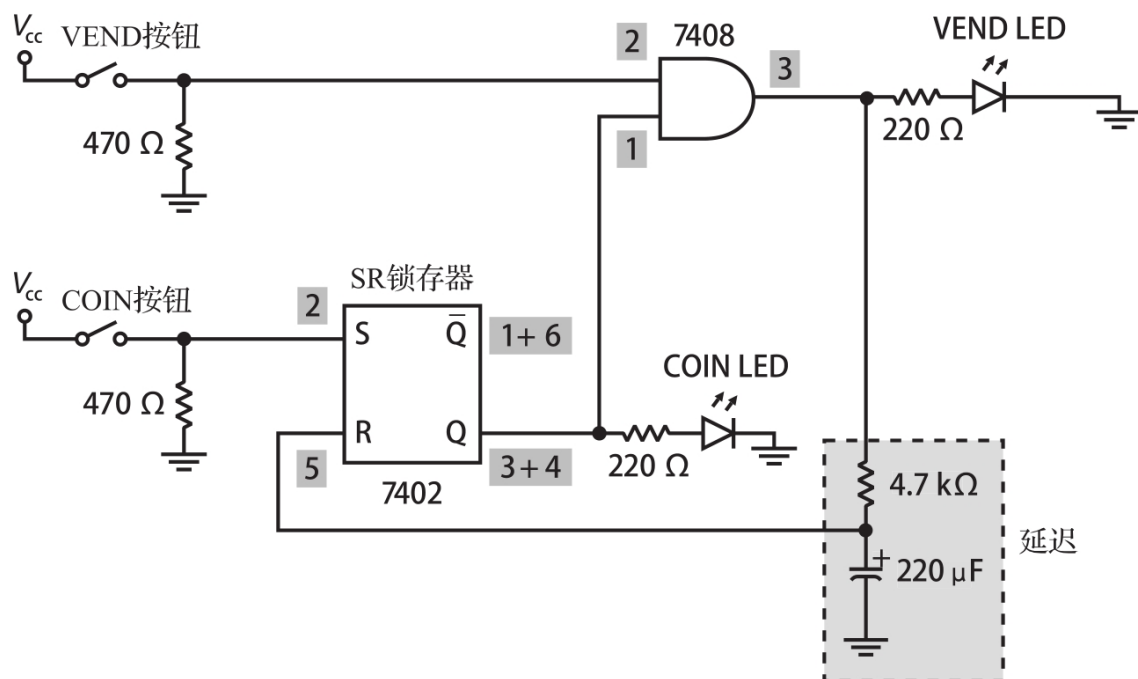


图6-21 带延迟复位功能的自动贩卖机电路连线图

如果还有手动复位开关或按钮连接到R（7402芯片的引脚5），请确保断开它，因为它的存在会干扰延迟复位操作。在图6-21中，电路的VEND输出（7408芯片的引脚3）在发生售卖操作时会变成高电平，请注意它是如何通过新的延迟组件连接到锁存器的复位引脚的。新的组件由一个电阻和一个电容器构成，它们一起为复位操作引入了1s的延迟。我们来看看这里发生了什么：

- 1) 当发生售出操作时，7408 AND门的输出会变成高电平。
- 2) 未充电的电容器初始的作用类似于短路，锁存器的复位R保持低电平，所以开始不会复位。
- 3) 由于还未复位，因此VEND LED就有机会点亮。

4) 如果按住VEND按钮, AND输出保持高电平, 电容器开始充电。

5) 大约1s后, 电容器被充分充电, 其作用类似于开路, 有效地断开与地的连接。

6) 锁存器的复位输入 R 变高电平, 复位。

关于这个设计有几点需要注意:

□必须按住VEND按钮以便让电容器有时间充电。

□电路仍有可能在COIN LED亮着的时候启动, 只需按住VEND就能复位。这可以通过上电复位电路来解决, 但是这超出了该设计的范围。

□如果添加复位组件使得整个自动贩卖机电路无任何操作, 那么 R 输入可能卡在了高电压。检查7402引脚5上的电压, 看其在应该为低电平的时候是否为高电平(电压高于0.8V)。如果遇到了这个问题, 请仔细检查4.7k Ω 电阻和220 μ F电容器的值。还要检查连线, 连接松动或者连到错误行的跨接线都可能导致故障。

□对电容和电阻值的选择主要依据是它们会产生大约1s的延迟。你可以采用其他值。

不过, 正如刚才提到的, 改变这些值有可能导致 R 输入的电压在应该低的时候过高。完成的电路应该看起来如图6-22所示, 尽管具体布局可能会有不同。

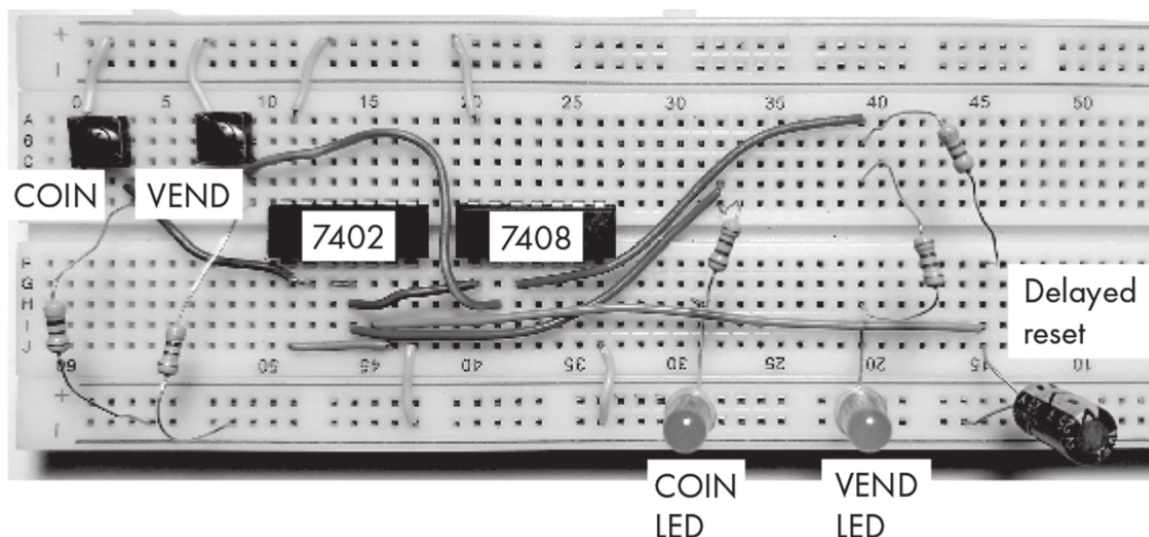


图6-22 在面包板上的带延迟复位功能的自动贩卖机电路

建议完整保留电路的SR锁存器部分，因为后面的设计中会再次用到它。你可以从面包板上移除其他组件，但请保留设计6的SR锁存器。当然，你也可以在需要的时候搭建另一个SR锁存器。

设计9：将锁存器用作手动时钟

本章后面的几个设计都需要时钟信号。在本设计中，你将把之前构建的SR锁存器配置为手动时钟。

正如你之前了解到的，时钟信号需要在高电压和低电压之间交替。你可以通过在接地和5V之间移动一根导线来实现时钟。这肯定会使电压交替变化，但这种方式不是你想要的。当你移动导线时，在某些时候导线是不连接任何东西的。在那些时刻，输入时钟引脚的电压会“浮动”，电路可能出现不可预测的行为。这不是一个好的选择。

你可以添加一个振荡器，它会自动以规律的节奏生成脉冲，比如每秒一个脉冲。这就是现实世界中时钟的工作方式。为此，人们设计了一个常用IC：555定时器。但是，在接下来的练习中，你需要仔细观察电路的状态变化，所以你真正需要的是一个手动时钟，即只有在你告诉它变高或变低的时候才会变高或变低的时钟。从某种意义上来说，这样的手动时钟甚至

不是真正的时钟，因为它不会以规律的节奏变化。也就是说，从技术上看它是否是时钟并不重要——我们需要的是一个能用来手动触发状态改变的设备。

你可能会尝试用一个常用按钮和下拉电阻作为时钟，如图6-23所示。毕竟，按下按钮会使电压变高，松开按钮会使电压变低。

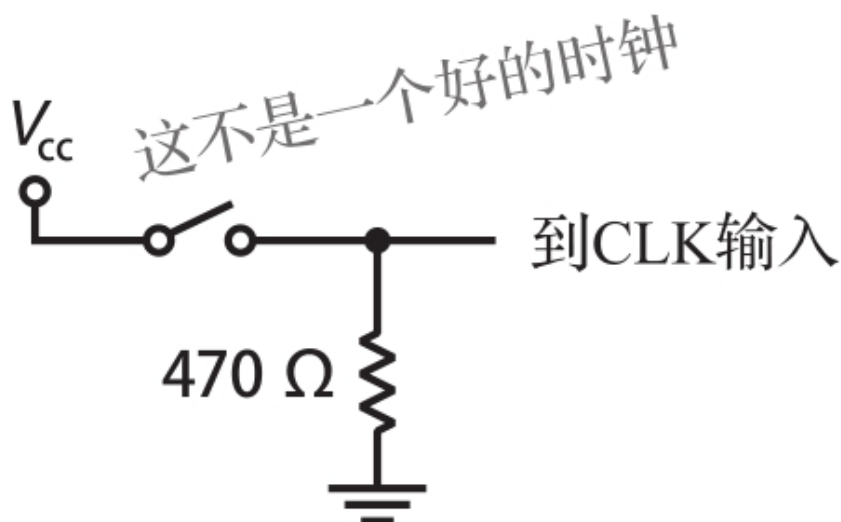


图6-23 将简单开关和下拉电阻作为CLK输入（效果并不好）

可惜的是，图6-23所示的设计实际上是一个非常糟糕的手动时钟。问题在于机械按钮和开关容易“抖动”。开关内部有金属触点，当开关闭合时触点接触。闭合开关的行为会导致触点之间接触，但随后触点分开并再次合在一起，有时会重复多次，直到开关最终停留在闭合状态。当开关断开时会发生同样的事情，只不过是反向的。简单的按钮按下或开关翻转行为会导致电压多次变高和变低。这被称为开关抖动，如图6-24所示。

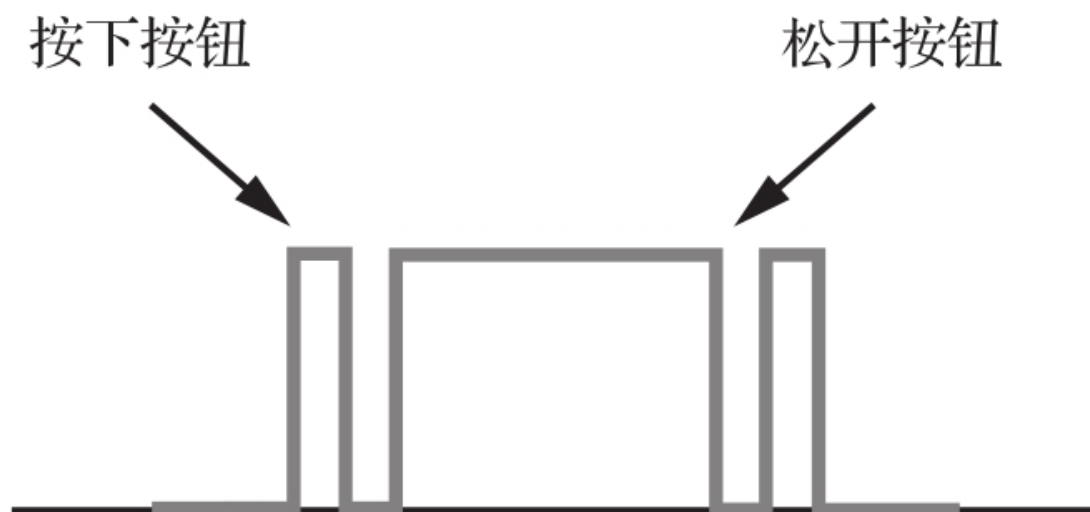


图6-24 开关抖动，这不是我们想要的时钟

去抖动电路是消除抖动的硬件。一种这样的去抖动电路是基于SR锁存器的，它很方便，你已经构建好了！如果你把S和R引脚连接到开关，锁存器的输入会抖动，但是锁存器的输出（Q）会保持干净，如图6-25所示。这是消除开关抖动的有效方法。

当把SR锁存器作为时钟时，按下S把时钟信号设置为高电平，按下R把时钟信号设置为低电平。不要同时按下这两个开关！你可以把在设计6中构建的SR锁存器作为时钟。如果在设计8中，你已经从引脚5移除了复位按钮/开关，请重新连接它。作为手动时钟的完整SR锁存器应按图6-26所示连线。

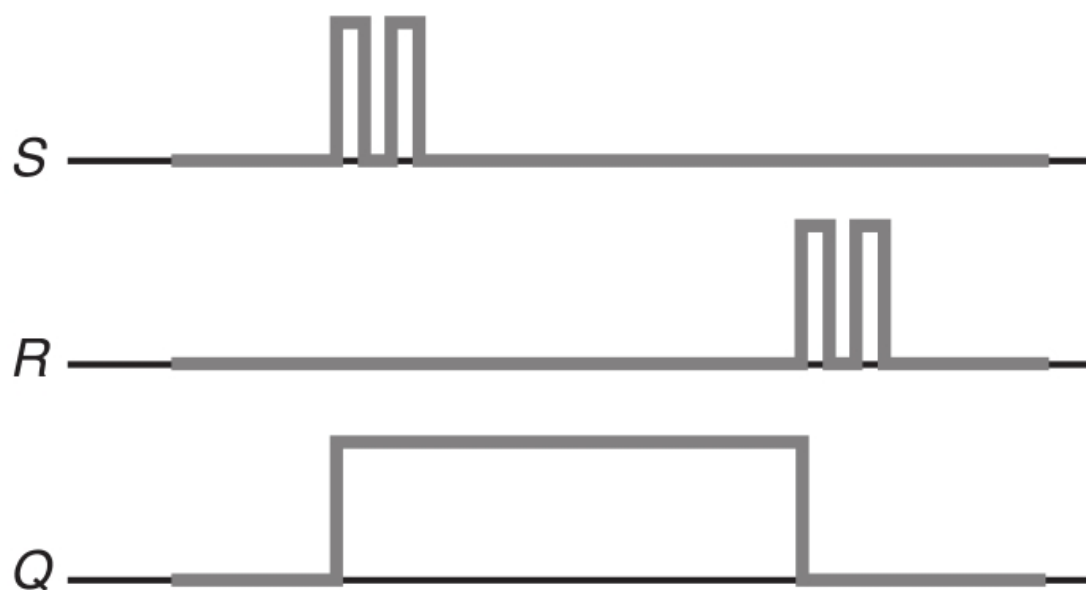


图6-25 SR锁存器可以产生干净输出，即使其输入抖动

按下S把时钟脉冲设置为高电平，按下R把时钟脉冲设置为低电平。现在你有了一个手动时钟，你可以把它用在后面的设计中。

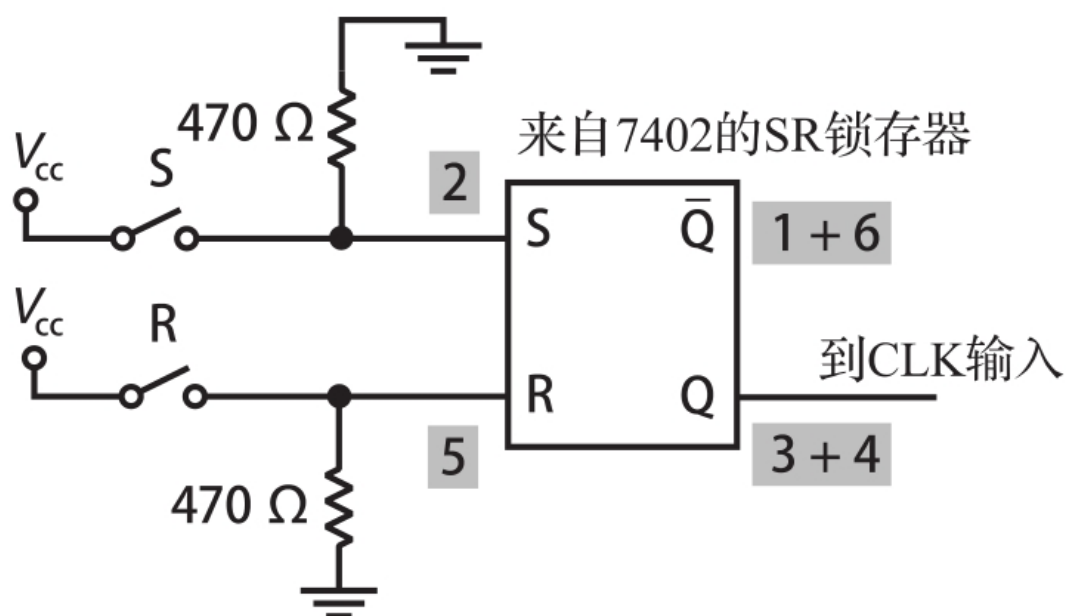


图6-26 由两个按钮/开关和一个SR锁存器构成的去抖动手动时钟

设计10：测试JK触发器

虽然你可以用其他门构建JK触发器，但它作为集成电路出售是很方便的，所以你可以省去一些麻烦。7473芯片包含两个负边沿触发JK触发器。在本设计中，你将使用这个集成电路来测试JK触发器的功能。你将尝试把J和K设置为高电平或低电平，然后通过电路发送时钟脉冲。把LED连接到输出端Q以便观察状态变化。

本设计需要如下组件：

- ☐配置为时钟的SR锁存器（设计9中已讨论）；
- ☐7473 IC（含2个JK触发器）；
- ☐跨接线；
- ☐LED；
- ☐和LED一起使用的限流电阻（约220Ω）。

图6-27展示了7473 IC的引脚图。

如图6-27所示，7473 IC含2个JK触发器。注意，电压和接地连接不在“通常”的位置，而分别在引脚4和引脚11。还要注意，CLK（时钟）输入用圆圈进行了标记，这表示这个电路是负边沿触发的，你应该在时钟脉冲下降沿期待状态改变。由于把SR锁存器作为手动时钟，这就意味着当按下SR锁存器的R按钮时，你将看到JK触发器状态的改变。

$\overline{\text{CLR}}$ $\overline{\text{CLR}}$ $\overline{\text{CLR}}$ $\overline{\text{CLR}}$ $\overline{\text{CLR}}$

本章没有提到JK触发器的另一个输入： $\overline{\text{CLR}}$ 。当这个引脚被设置为低电平时，触发器清除保存的位（ $Q=0$ ）。是异步的，这意味着它不用等待时钟脉冲。上的横线表示它是低电平有效的，这意味着当输入被设置为低电平