

# 智能仪器原理与设计

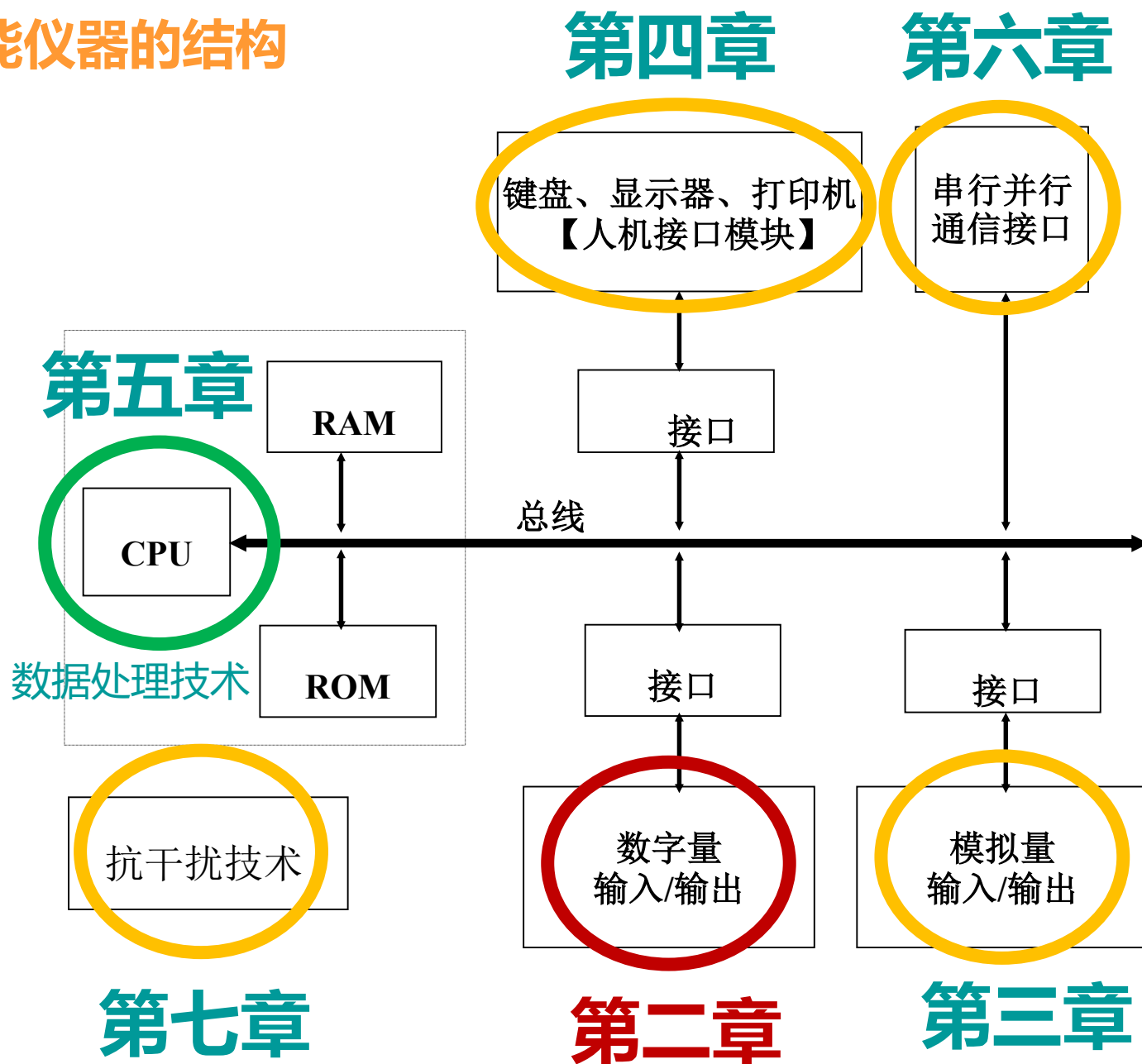


仪器科学与工程学院

姚逸卿

yiqing-yao@seu.edu.cn

# 智能仪器的结构



## 第二章 智能仪器中数字量的输入/输出

---

### 概述

无论是微处理器内嵌式智能仪器还是标准化模块仪器，**输入/输出通道**是其重要的组成部分。仪器测控对象的各类参数、状态等信息通过**输入通道**进入仪器，这些信息经微处理器分析、处理后，根据需要 will 将测量结果送显示或打印机接口等，或将控制命令等通过**输出通道**送至执行机构。显然，**智能仪器的测量和控制精度与输入/输出通道的性能密切相关。**

智能仪器的输入/输出通道包括**数字量输入/输出通道**和**模拟量输入/输出通道**两部分。

本章主要内容——数字量输入/输出通道

数字量分为开关量和脉冲量。

2.1 开关量输入/输出

2.2 脉冲量输入/输出

## 2.1 开关量输入/输出

开关量信号是智能仪器常需处理的一类基本的输入输出信号。这类信号包括：开关的闭合和断开，指示灯的点亮和熄灭，继电器或接触器的吸合和释放等，这些信号的最大特点是：只有开和关或者高低电平两种状态（0或1）。

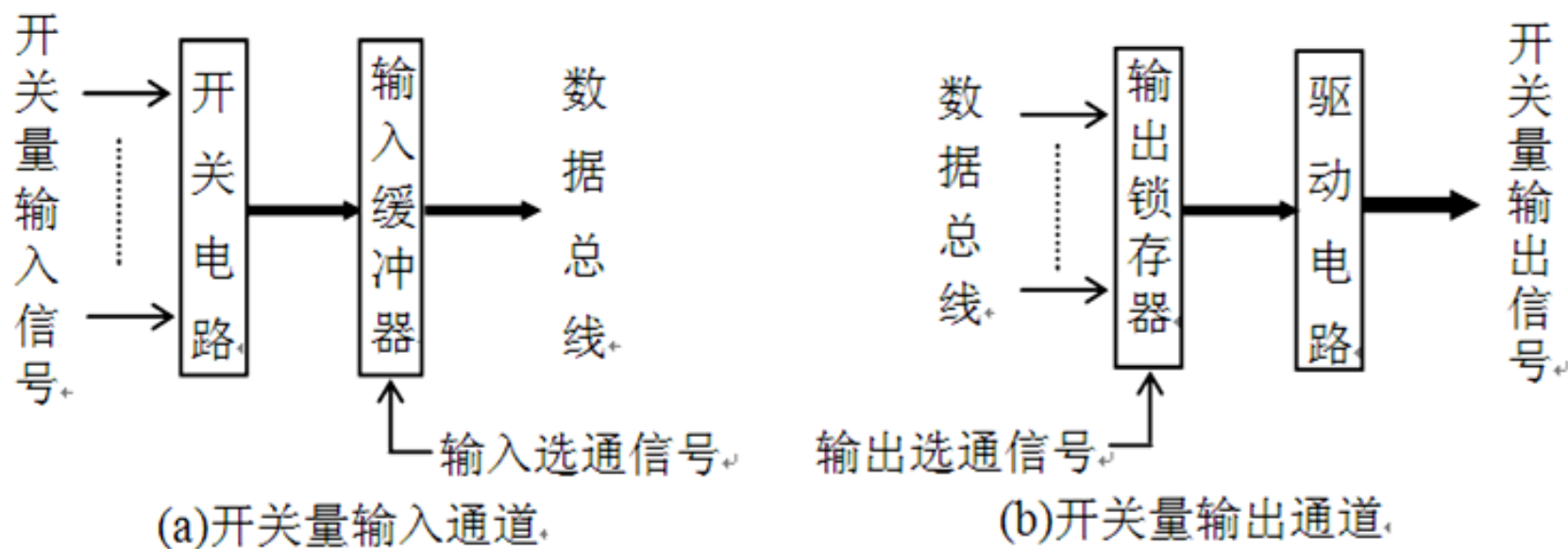
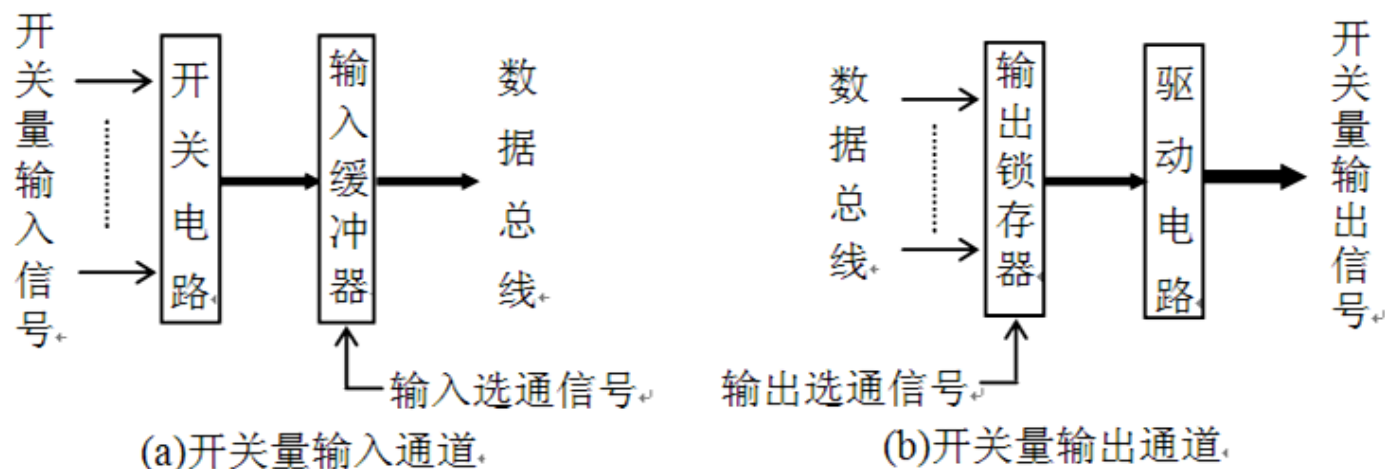


图 2.1 开关量输入/输出通道的结构



**开关电路：** 信号转换（转换成能被微处理器识别的数字信号）

+ 保护隔离（反极性，瞬态尖峰，过压保护）。

**缓冲器：** 不同工作速度设备间进行协调、缓冲作用，实现数据传送的同步。

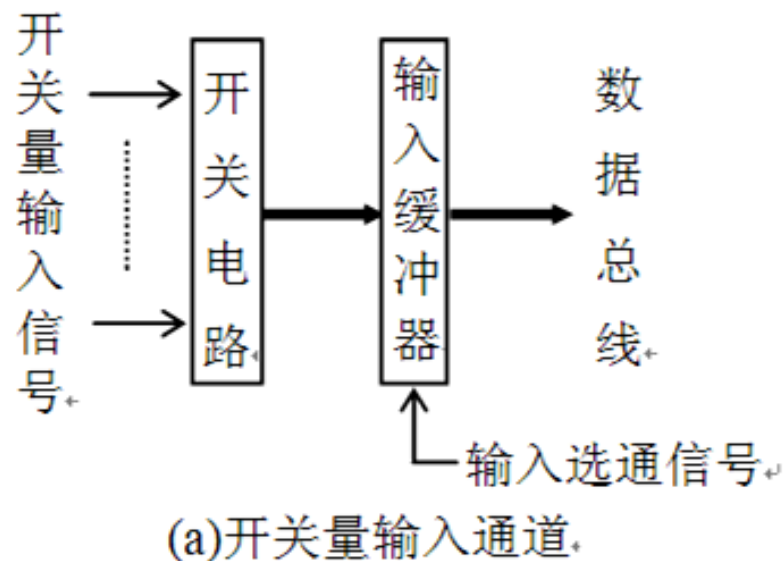
**锁存器：** 高速的控制器与慢速的外设的不同步问题，输出端的状态不会随输入端的状态变化而变化

**驱动电路：** 驱动负载，位于主电路和控制电路之间，用来对控制电路的信号进行放大的中间电路。

**一般输入用缓冲器，输出用锁存器。**

## 2.1.1 开关量输入

所谓开关量，就是只有两种状态的数字量。开关量输入通道输入的是外部设备、装置或过程的状态信号，信号的形式可能是电压、电流或开关的触点等。

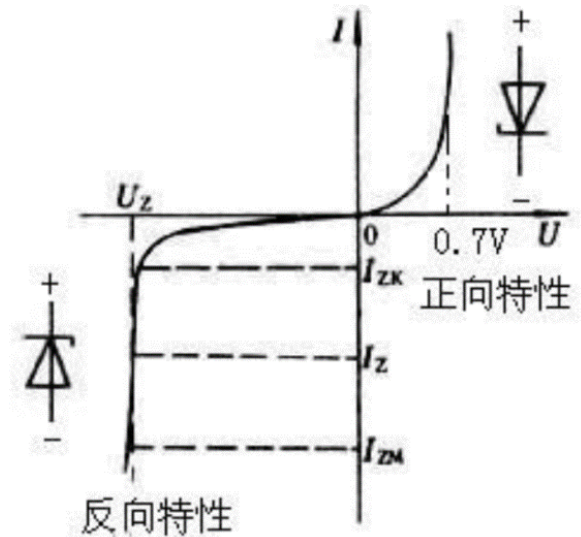
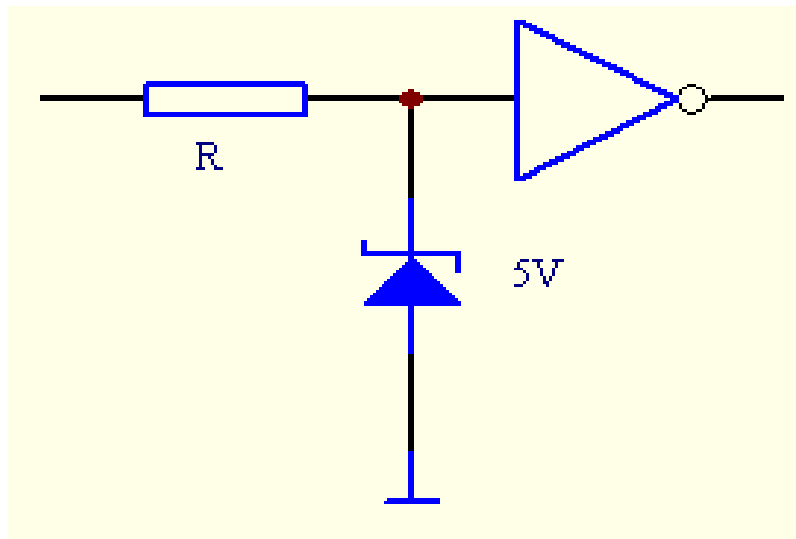


### 2.1.1.1 信号转换电路

根据不同的输入信号形式，应采用不同的信号转换电路。

- 电压输入电路
- 电流输入电路
- 开关触点输入电路

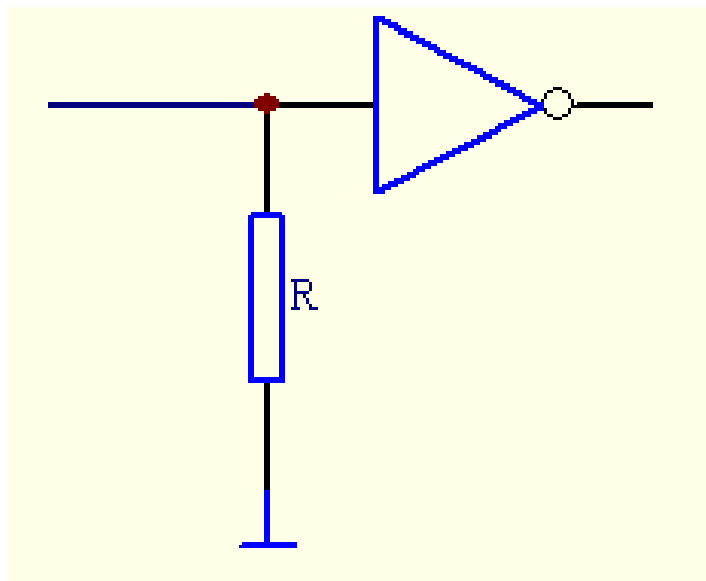
## (1) 电压输入电路



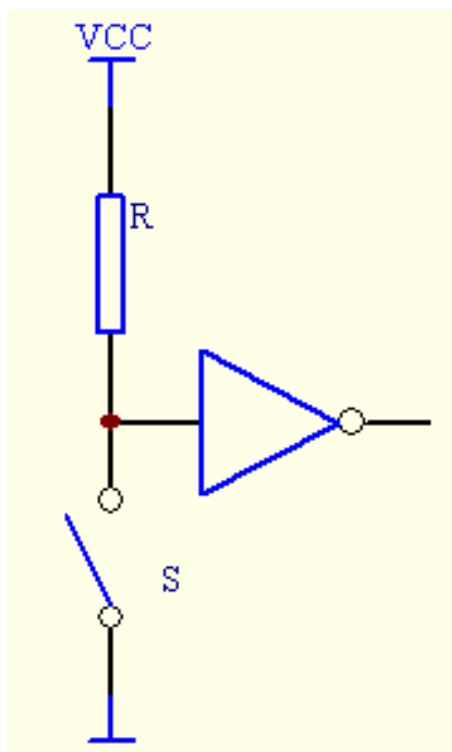
稳压二极管(齐纳二极管): 工作在反向击穿区的二极管



## (2) 电流输入电路



### (3) 开关触点输入电路



开关闭合，输出高电平；  
开关断开，输出低电平。

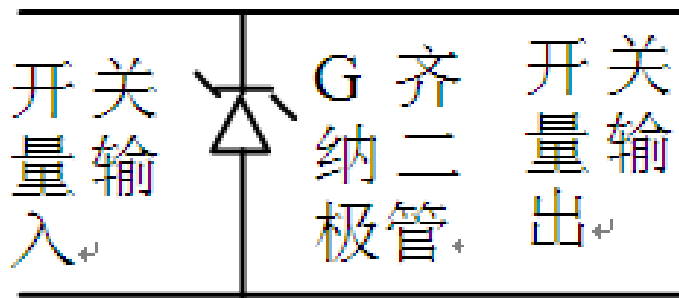
## 2.1.1.2 保护和隔离电路

智能仪器用于工业现场时，应采用适当的保护措施，防止过电压、瞬态尖峰或反极性信号损坏智能仪器的接口电路。

### (1) 瞬态尖峰保护电路

**瞬态尖峰：**在电子系统的应用中，电压及电流的瞬态干扰会经常造成电子设备的损坏，瞬态干扰的显著特点是作用时间短，但电压幅度高，瞬态能量大，所以破坏性很大。

#### (a) 齐纳二极管保护



(a) 齐纳二极管保护

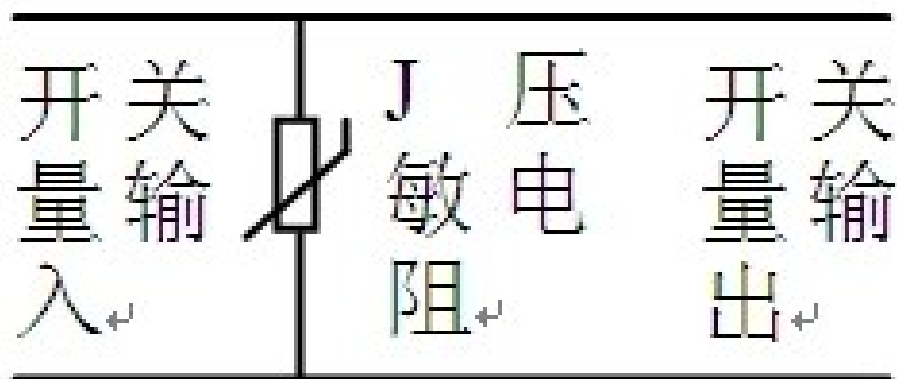
齐纳二极管一般用于稳压。瞬态尖峰保护多用TVS管。

## TVS管(Transient Voltage Suppressor, 瞬态抑制二极管/瞬态电压抑制器)

TVS是普遍使用的一种新型高效电路保护器件,其电路符号和普通稳压二极管相同,外形也与普通二极管无异。它具有极快的响应时间(亚纳秒级,最高可达 $10^{-12}$  s)和相当高的浪涌吸收能力。当它的两端经受瞬间的高能量冲击时, **TVS能以极高的速度把两端间的阻抗值由高阻抗变为低阻抗,以吸收一个瞬间大电流,从而把它的两端电压箝制在一个预定的数值上,从而保护后面的电路元件不受瞬态高压尖峰脉冲的冲击。**正因为如此,TVS可用于保护设备或电路免受静电、电感性负载切换时产生的瞬变电压,以及感应雷所产生的过电压。

和齐纳二极管比较: **TVS管的反应速度远比齐纳二极管快,吸收瞬变电流的能力强;但齐纳二极管稳压精度一般比较高,TVS管强调的是瞬态响应,时间参数很重要。**

## (b)压敏电阻保护



(b)压敏电阻保护

**压敏电阻**（在一定电流电压范围内电阻值随电压而变化）是一种限压型保护器件。利用压敏电阻的**非线性特性**，当过电压出现在压敏电阻的两极间，压敏电阻可以将电压钳位到一个相对固定的电压值，从而实现对后级电路的保护。

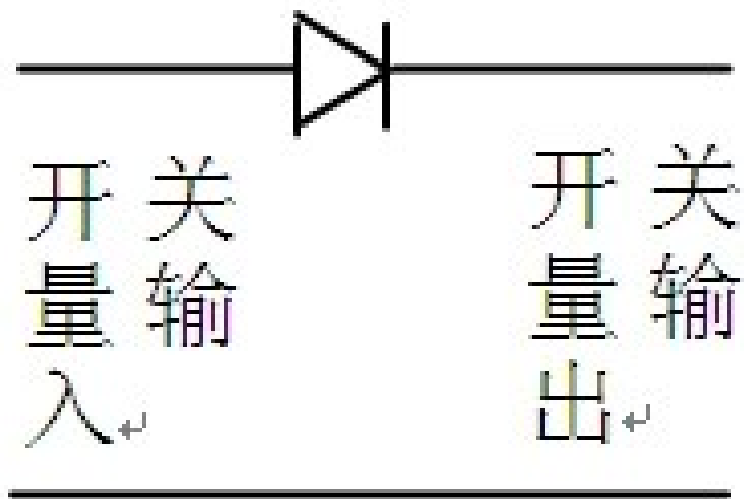
## TVS管 VS 压敏电阻

**响应时间：**压敏电阻的响应时间为ns级，比TVS管稍慢一些；

**通流能力：**但TVS通流能力不如压敏电阻。

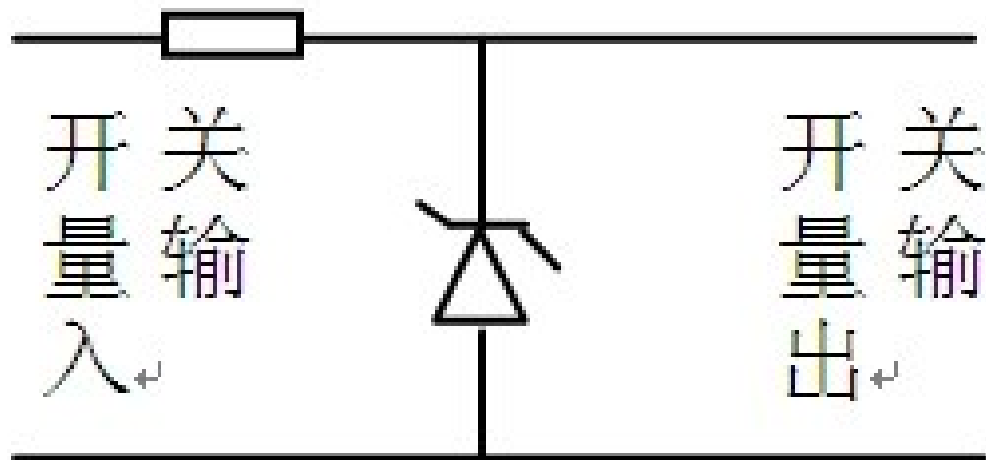
所以TVS适合做末级防护，在做直流电源防护时常与压敏电阻等高通流能力的器件配合使用。

## (2) 反极性保护电路



采用二极管防反极性信号的保护电路。  
利用二极管正向导通反向截止的特性。

### (3) 过压保护电路



采用一个稳压二极管并在输入回路串接限流电阻防止过电压输入的保护电路。

限流电阻：分压作用

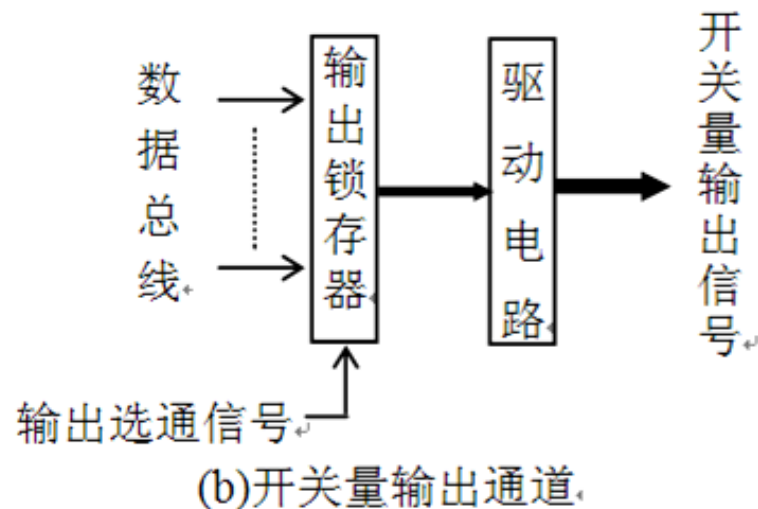


## 2.1.2 开关量输出

智能仪器的有些开关量输出设备可以**直接用输出锁存器输出的二进制信号进行控制**，例如LED；

有些开关量输出设备可以用**集电极开路门驱动**，例如灵敏继电器；

有些开关量输出设备需用驱动功率更大的器件驱动。



### 2.1.2.1 微机并行输出接口的驱动能力

**驱动能力**：后级电路带负载能力的大小，电压、电流要求等。

表2.1数字逻辑电路的额定负载能力

| 逻辑电路类型          | 输出高电平/V | 拉电流值/mA | 输出低电平/V | 灌电流值/mA |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|
| 标准TTL逻辑         | 2.4     | -0.4    | 0.4     | 16      |
| LSTTL逻辑         | 2.4     | -0.4    | 0.4     | 1~8     |
| 带大电流缓冲器的LSTTL逻辑 | 2.4     | -12.0   | 0.4     | 24      |
| 标准CMOS逻辑        | 4.99    | -1.6    | 0.01    | 0.5     |
| 高速CMOS逻辑        | 4.99    | -5.0    | 0.01    | 0.5     |

注意：输出低电平时，流进芯片的电流称为灌电流；  
输出高电平时，流出芯片的电流称为拉电流。

允许最大值

由表可知，大部分由表中构成的输出接口的功率驱动能力都较低。

其他重要性能指标：

1、功耗：

CMOS: 50nW~1mW

TTL: 2~22mW。

2、开关速度（平均时延）：

CMOS: 10~20ns

TTL: 3~10ns

**评价门电路性能好坏：**

**品质因素 $M = \text{功耗} \times \text{开关速度}$ （门电路平均延迟时间）**

**$M$ 越小，品质越好。**

## 2.1.2.2 低中功率开关量输出驱动接口

### (1) 低功率开关量输出驱动接口

灵敏继电器、LED数码显示器、液晶显示器、报警器及指示灯等属于低功率负载。

单个LED构成的报警器或指示灯这样的低功率负载而言，可采用TTL接口电路直接驱动。

LED正向工作电流为 $2\text{mA} \sim 20\text{mA}$ ，在此范围内LED的发光强度基本上与正向电流成正比。

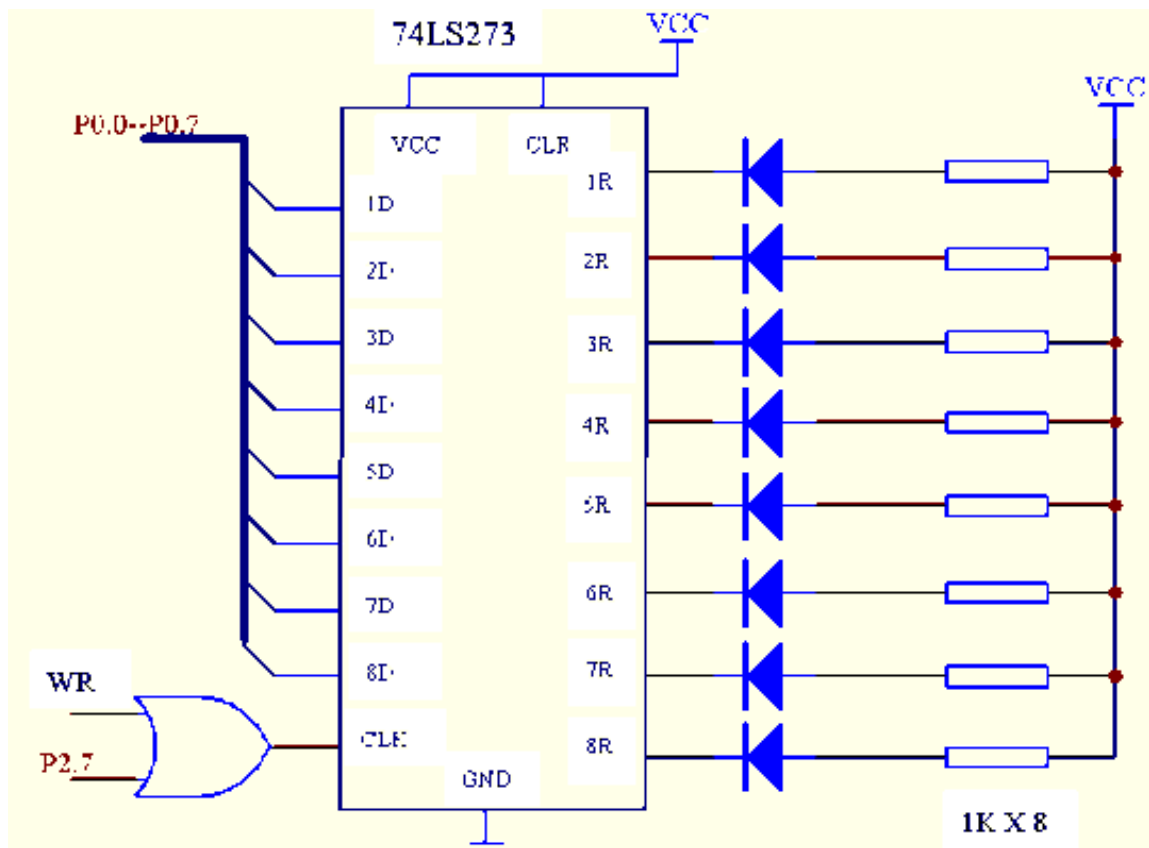
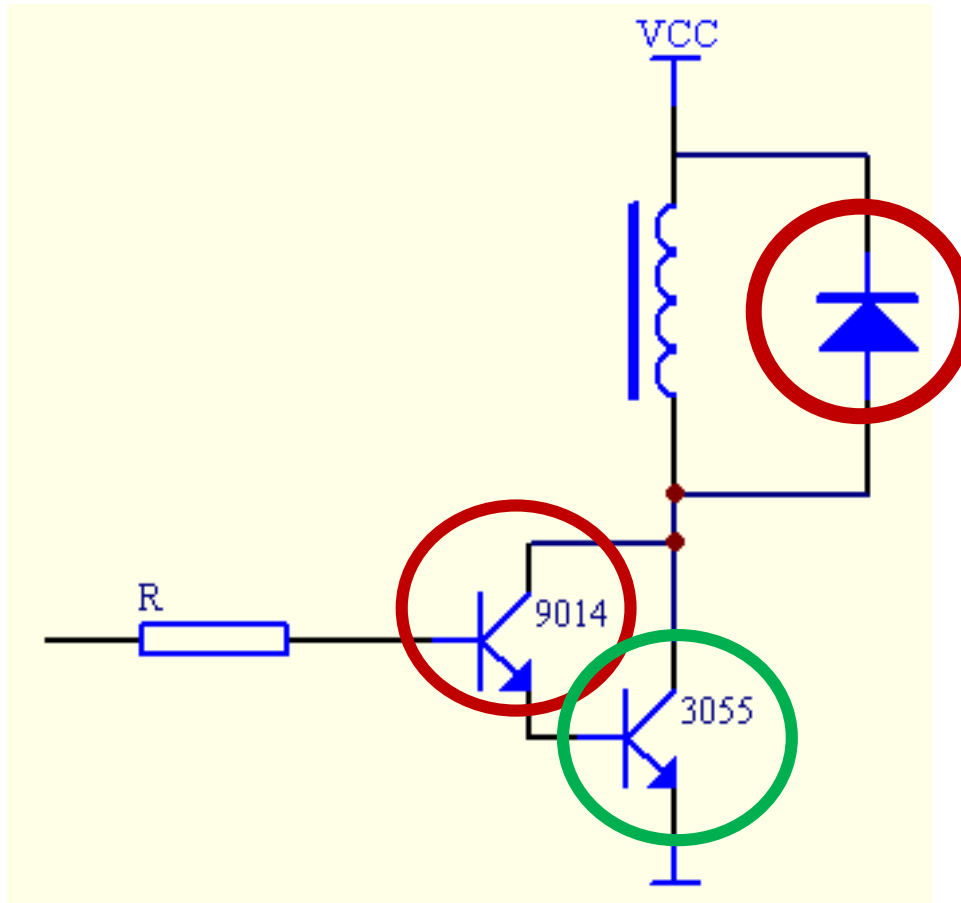


图2.7 通过74LS273驱动8个LED

## 续流二极管：保护电路



- 达林顿管又称复合管。用两个三极管，以组成一只等效的新的三极管。这等效三极管的放大倍数是二者之积。

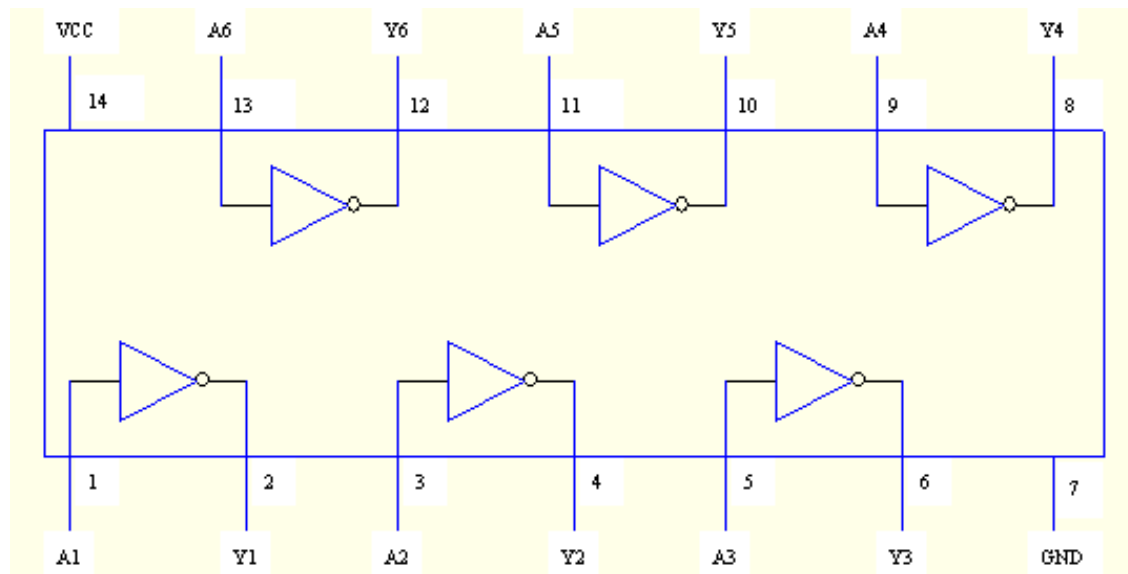
图2.8 用达林顿结构晶体管驱动继电器

有时可以用驱动能力高的反相器和缓冲器作为驱动器使用。

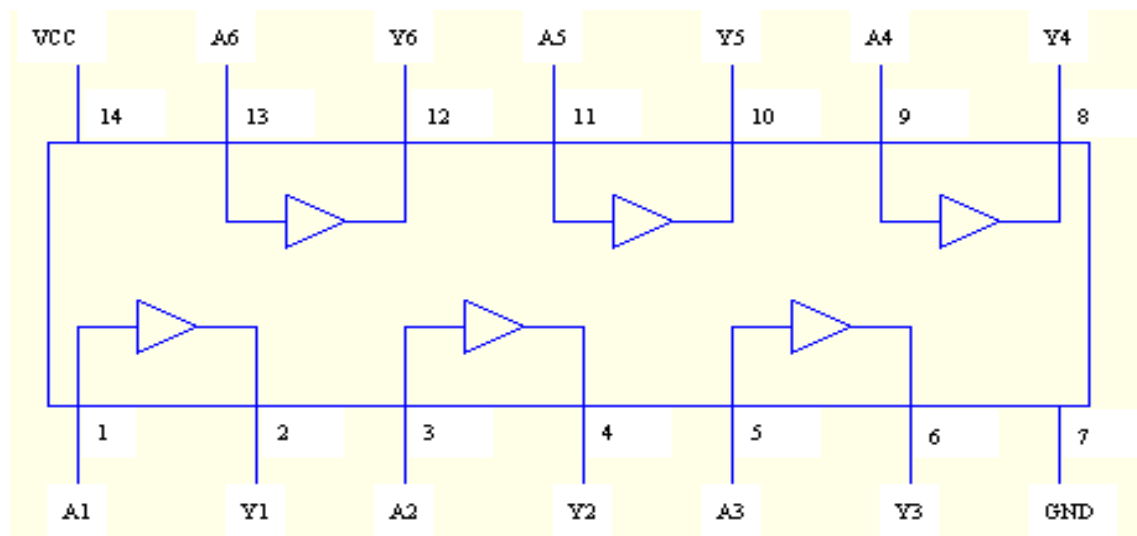
7406和7407为集电极开路（OC）的六反相器和缓冲器。

7406和7407每个逻辑门的负载能力为**40mA(灌电流)**。

在智能仪器中，它们常作为驱动器使用。

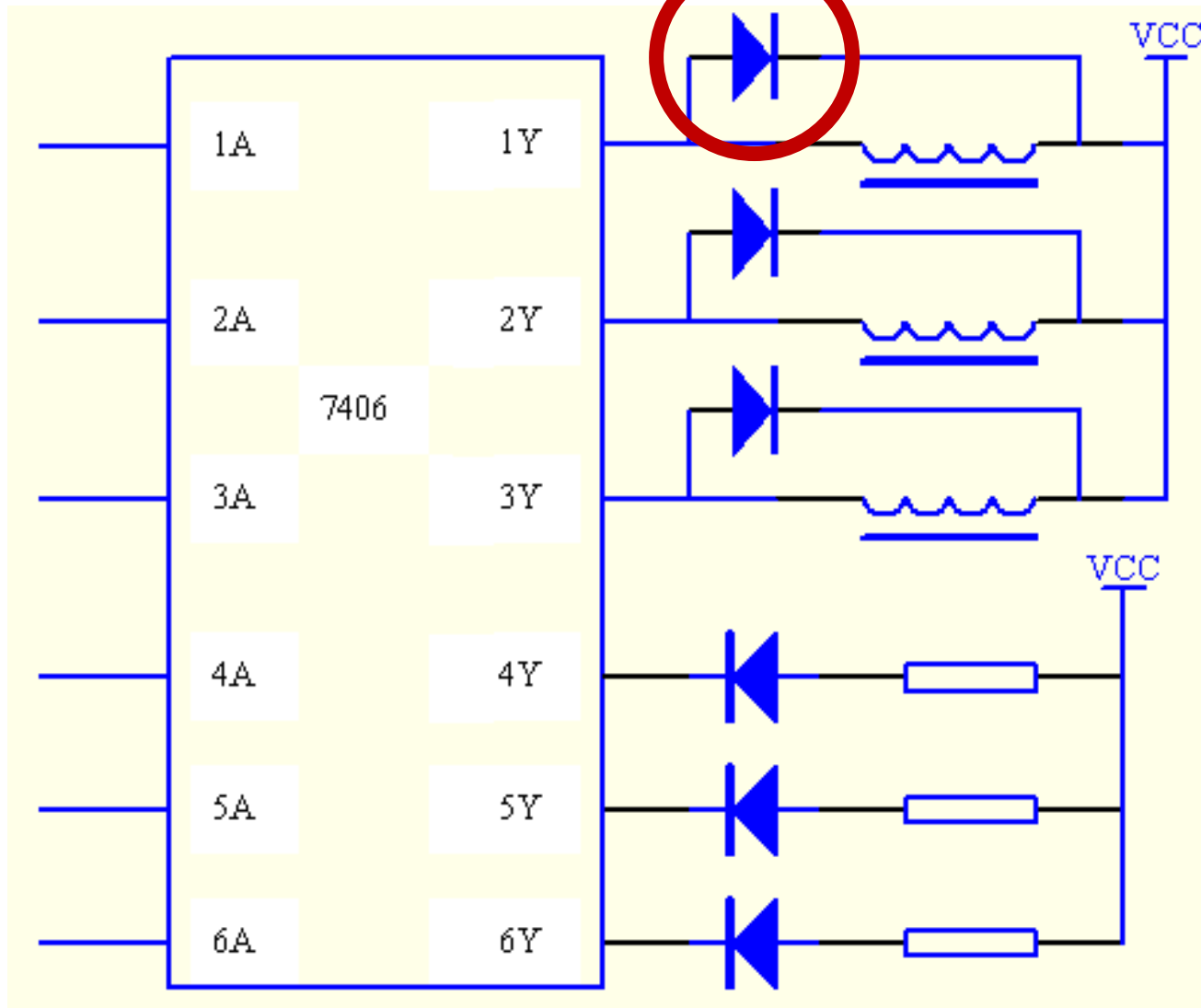


(a)7406内部结构



(b)7407内部结构

## 续流二极管：保护电路



(c) 应用举例——7406驱动3只低电压小功率继电器、3只LED发光管



学会看芯片手册，查看芯片的灌电流（输出低电平电流） $I_{OL}$ 和拉电流（输出高电平电流） $I_{OH}$ 。

## (2) 中功率开关量输出驱动接口

功率场效应是一种常用的中等功率的开关控制驱动器件。与双极型晶体管相比，有下述几个优点：

- ①由于功率场效应晶体管是多数载流子导电，不存在少数载流子的储存效应，从而使MOSFET有较高的开关速度；
- ②具有较宽的安全工作区而不会产生热点，同时，由于它是一种具有正电阻温度系数的器件，所以，容易进行并联使用；

- ③具有较高的可靠性;
- ④具有较强的过载能力，短时过载能力通常为额定值的4倍;
- ⑤具有较高的开启电压，即阈值电压（该电压达2~6V），因此有较高的噪声容限和抗干扰能力;
- ⑥由于是电压控制器件，即具有很高的输入阻抗，因而驱动功率很小，对驱动电路要求较低。

**场效应管需要驱动**

## 一、采用TTL 集成电路的驱动方式

由于功率场效应晶体管绝大多数是由VMOS或TMOS工艺制成，因此它们是由电位控制而不是由电流控制的。这样，小功率的TTL集成电路也就足以驱动大功率的场效应晶体管。但是，由于TTL集成电路通常的输出高电平大约是3.5 V，而功率场效应晶体管的导通门槛电压一般为2~4V，因此，在驱动电路中不采用一般的TTL集成电路，而采用集电极开路的TTL集成电路。

在**集电极开路**的TTL集成电路驱动电路中，为提高输出驱动电平的幅值，可以通过一个上拉电阻接到+5V电源；不过，为了保证能有足够高的电平驱动功率场效应晶体管导通，也为了保证它能迅速截止，在实际中是把上拉电阻接到+10~+15V电源。

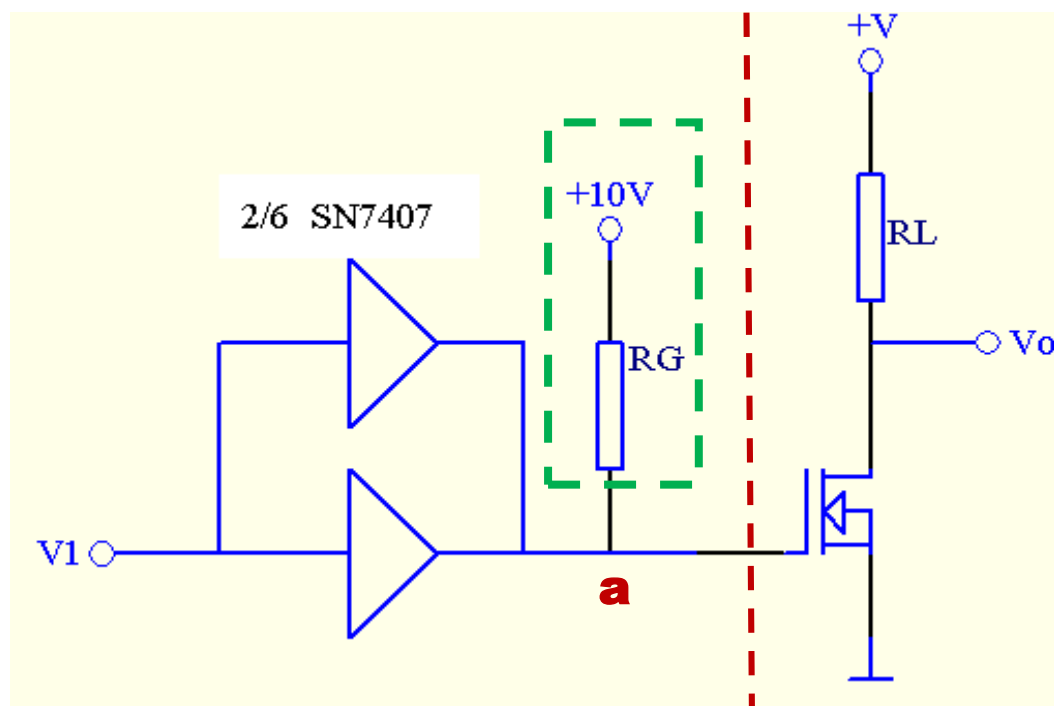


图2.11 TTL集成电路驱动功率场效应管

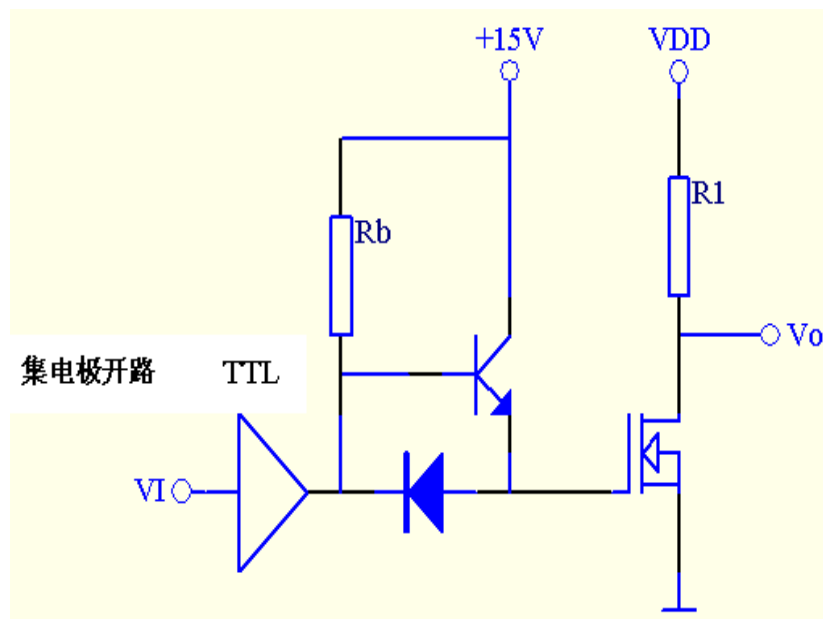
TTL集成电路的灌电流和拉电流越大越利于提高功率场效应管的开关速度。

表2.2给出了几个系列TTL集成电路的吸入电流（灌电流）和拉出电流（拉电流）。

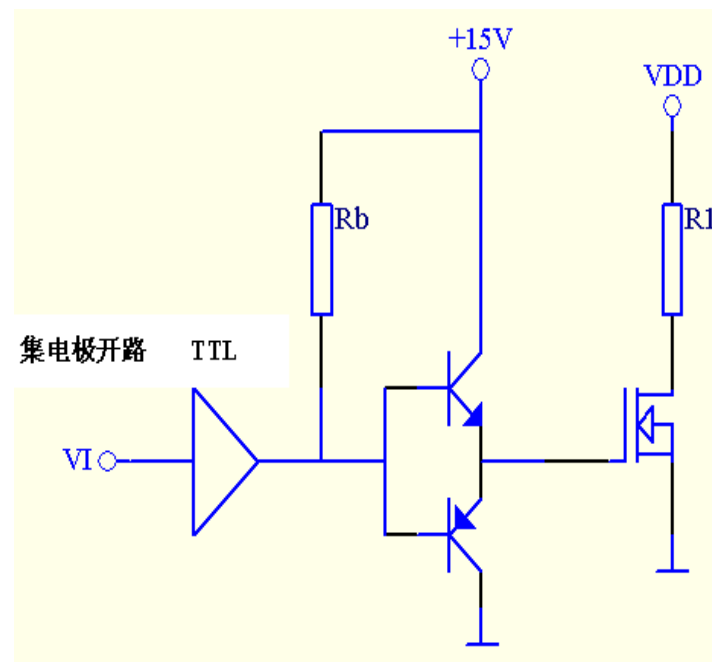
|        | 输出高电平时<br>拉出电流/mA | 输出低电平时<br>吸入电流/mA |
|--------|-------------------|-------------------|
| 74LS系列 | 0.4               | 8.0               |
| 74系列   | 0.8               | 16                |
| 9000系列 | 0.8               | 16                |
| 74H系列  | 1.0               | 20                |
| 74S系列  | 1.0               | 20                |

为了保证功率场效应晶体管有更快的开关速度，在TTL集成电路和功率场效应晶体管之间加上一级晶体管。

在图2.12(a)中，晶体管可加速功率场效应管的导通速度并减小功耗；在图2.12(b)中，晶体管接成互补式，它们即可以提高功率场效应晶体管的导通速度，也可以提高它的截止速度。



(a)



(b)

图2.12 TTL集成电路加晶体管驱动功率场效应管

## 二、采用CMOS的集成电路的驱动方式

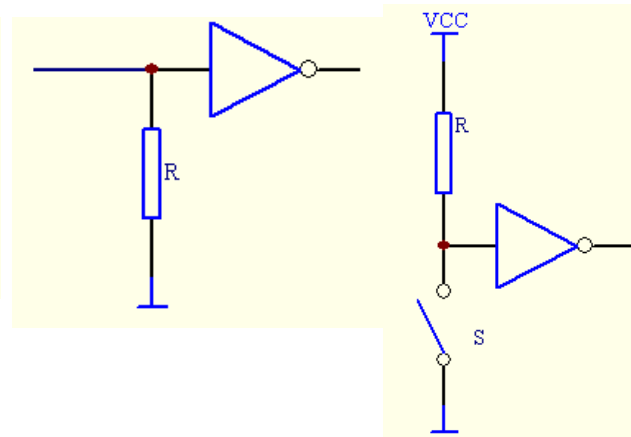
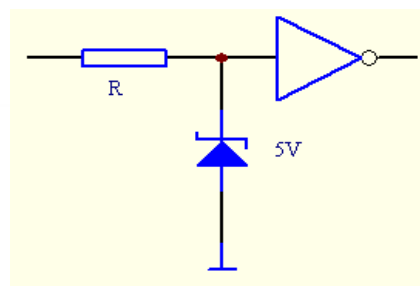
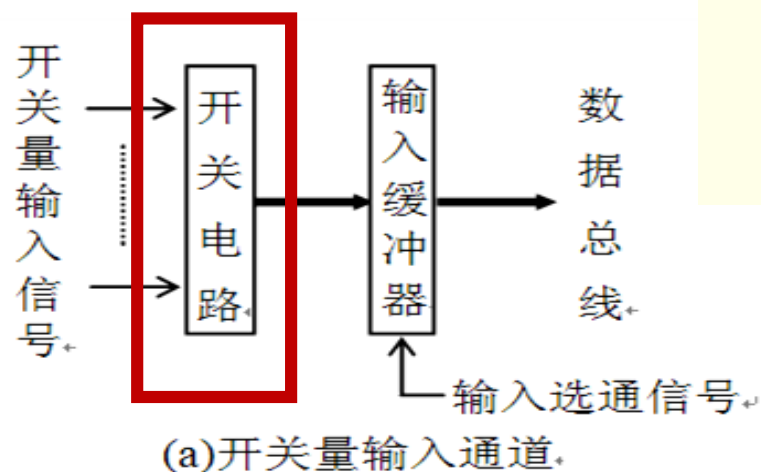
采用CMOS集成电路直接驱动功率场效应晶体管的一个最明显的优点是，可采用10~15V的电源电压。这就使得CMOS集成电路至少有10V的输出高电平，远高于功率场效应晶体管的最高门槛电压（4V左右），从而使功率场效应管在导通时处于充分导通状态。

用CMOS集成电路直接驱动功率场效应晶体管时无需附加任何电路，因此，驱动电路比较简单。

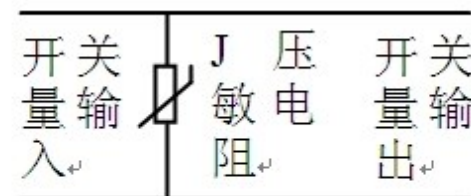
但是，由于CMOS集成电路的负载能力较低，即拉出电流及吸入电流都较小，故对开关速度的提高不利。

# 本章主要内容——数字量输入/输出通道

## 2.1 开关量输入/输出



(a) 齐纳二极管保护



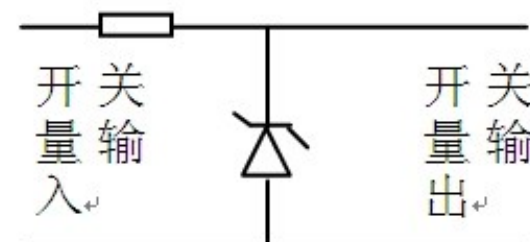
(b) 压敏电阻保护

### ➤ 信号转换电路

电压 电流 开关触点

### ➤ 保护隔离电路

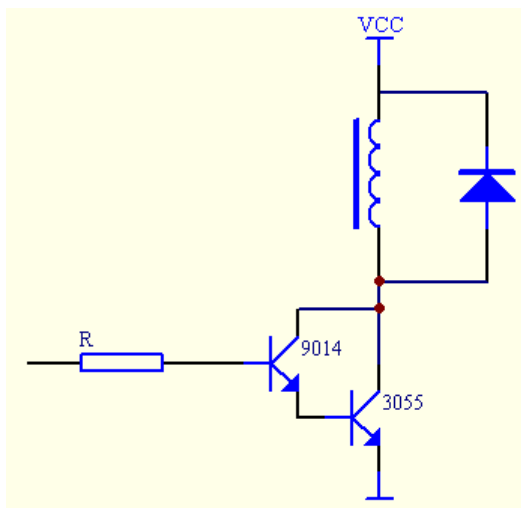
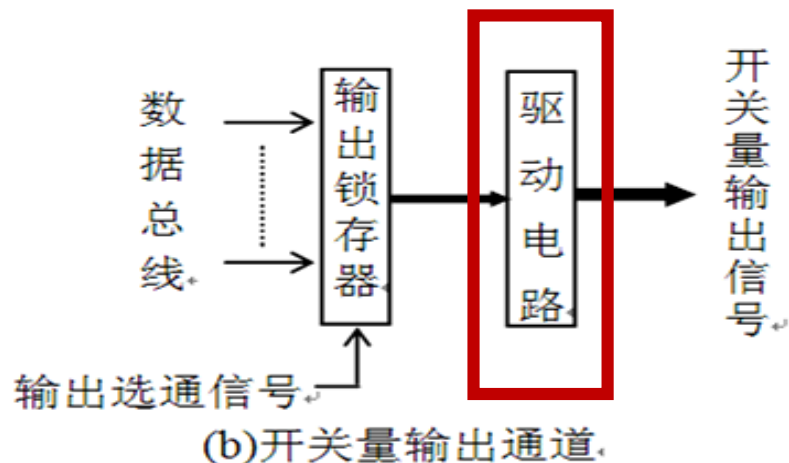
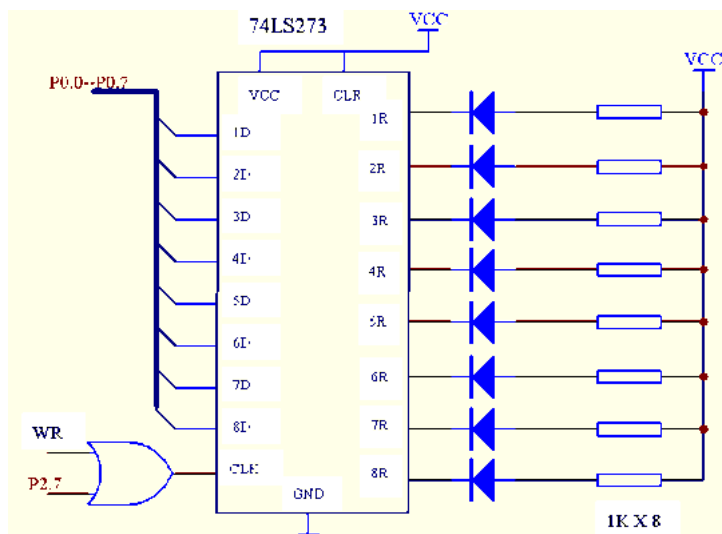
瞬态尖峰 反极性 过电压





# 本章主要内容——数字量输入/输出通道

## 2.1 开关量输入/输出



- 低功率开关量输出驱动接口  
TTL接口电路 (74LS273, 达林顿结构晶体管, 7406, 7407)
- 中功率开关量输出驱动接口  
场效应管 (自身需要被驱动(TTL集成电路, CMOS集成电路))

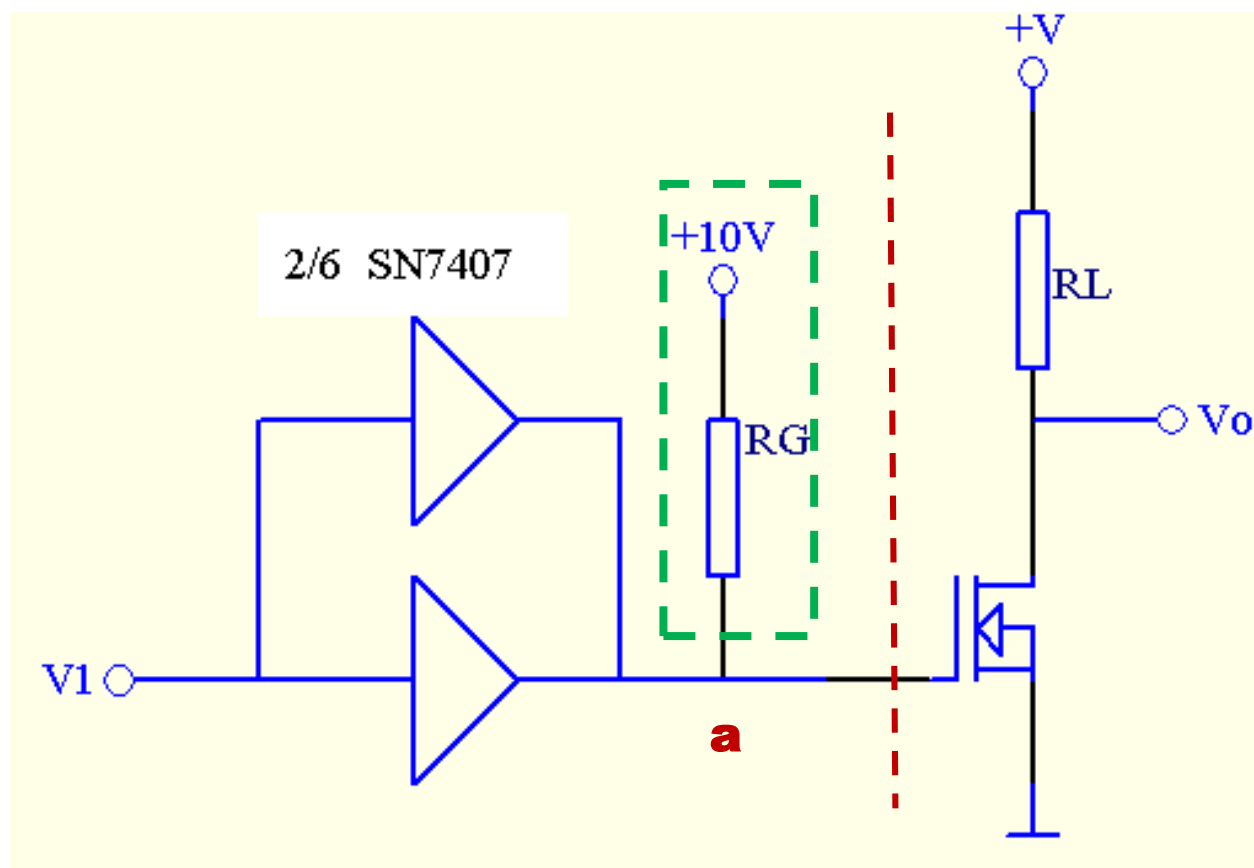


图2.11 TTL集成电路驱动功率场效应管

## 2.2 脉冲量输入/输出

---

脉冲量输入/输出是智能仪器中数字量输入、输出的另一个主要方面。

**脉冲量输入**是指频率变化的脉冲信号的输入，如光电转换器、霍尔传感器等输出的信号，数字式传感器直接输出的频率信号，积累式仪表如电量计、流量计的变送器输出的频率信号等是常见的脉冲量输入信号。这些信号通常经过开关电路后，以**标准TTL**电平送到智能仪器中的数字量输入接口。该输入接口一般包含计数电路。

**脉冲量输出**是指输出通道输出频率可变或占空比可变的脉冲信号。采用**脉冲宽度调制PWM** (Pulse – Width Modulation) 技术输出的脉冲信号是智能仪器中常见的脉冲量输出信号。

## 2.2.1 常用的数字化测频方法

智能仪器中常用的数字化测频方法主要有测频法和测周法两种。

### 2.2.1.1 测频法

#### (1) 原理

测频法是按照频率的定义（即  $f = N/t$ ）对信号的频率进行测量的一种方法，其原理如图2.13所示。

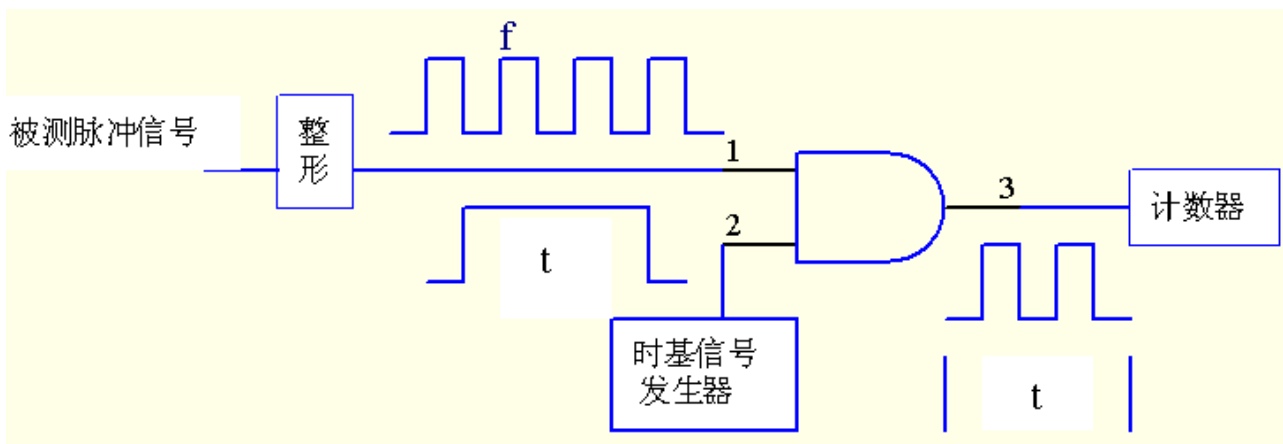


图2.13 测频法测量信号频率的原理图

$$f = N / t$$

## (2) 误差分析

由  $f = N/t$  可得

$$\Delta f / f = [(\partial f / \partial N) \Delta N + (\partial f / \partial t) \Delta t] / f$$

由于  $1/f = t/N, \partial f / \partial N = 1/t, \partial f / \partial t = -N/t^2$

所以  $\Delta f / f = \Delta N / N - \Delta t / t$

考虑到极限情况，最终得到：  $(\Delta f / f)_{\max} = \pm(|\Delta N / N| + |\Delta t / t|)$

式中：

- $\Delta f / f$  为测量频率时的相对误差；
- $\Delta N / N$  为计数值的相对误差；
- $\Delta t / t$  为与门开启时间的相对误差。

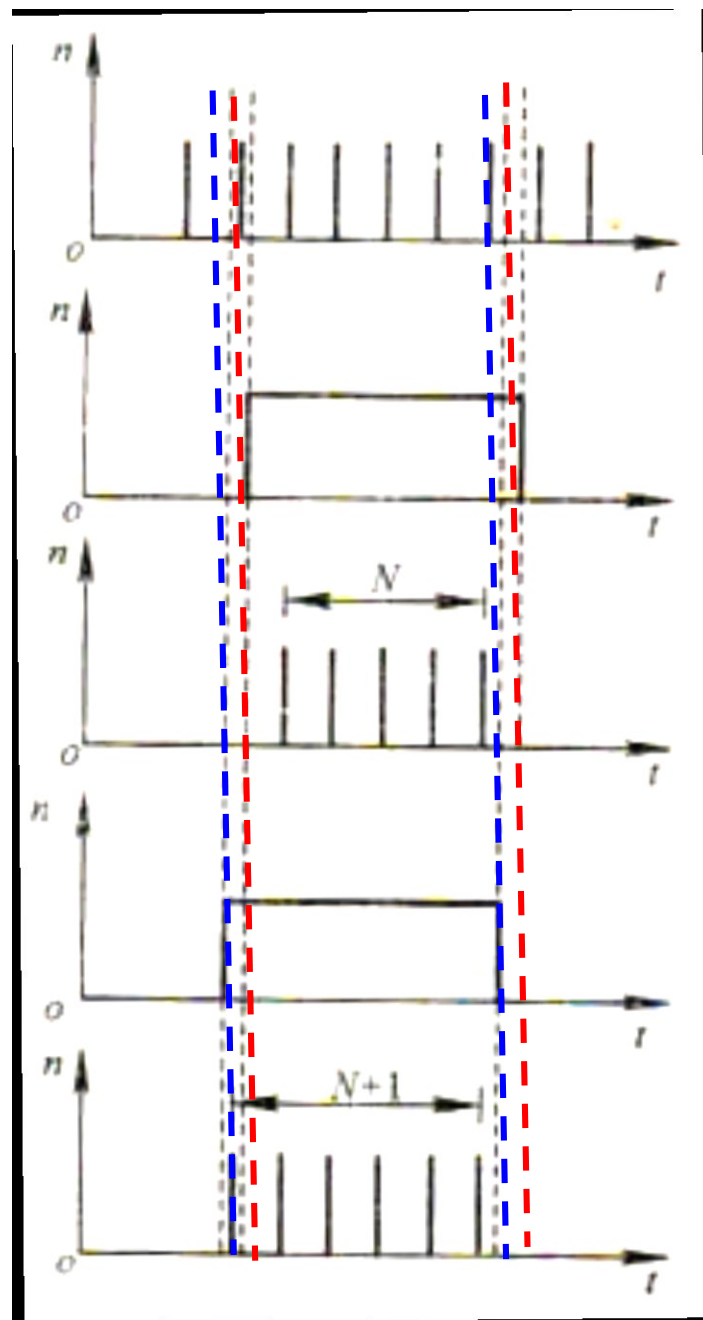
$$(\Delta f / f)_{\max} = \pm(|\Delta N / N| + |\Delta t / t|)$$

## ①分析 $\Delta N / N$

### 先分析 $\Delta N$

在测量过程中，与门开启时刻与计数脉冲之间的时间关系是不相关的，即它们在时间轴上的相对位置是随机的。

$$\Delta N = \pm 1$$



## ①分析 $\Delta N / N$

当与门开闭时间 $t$ 与被测脉冲周期的整数倍相接近或相等时，测频法测量频率的最大可能误差为 $\pm 1$ ，如图2.14所示。

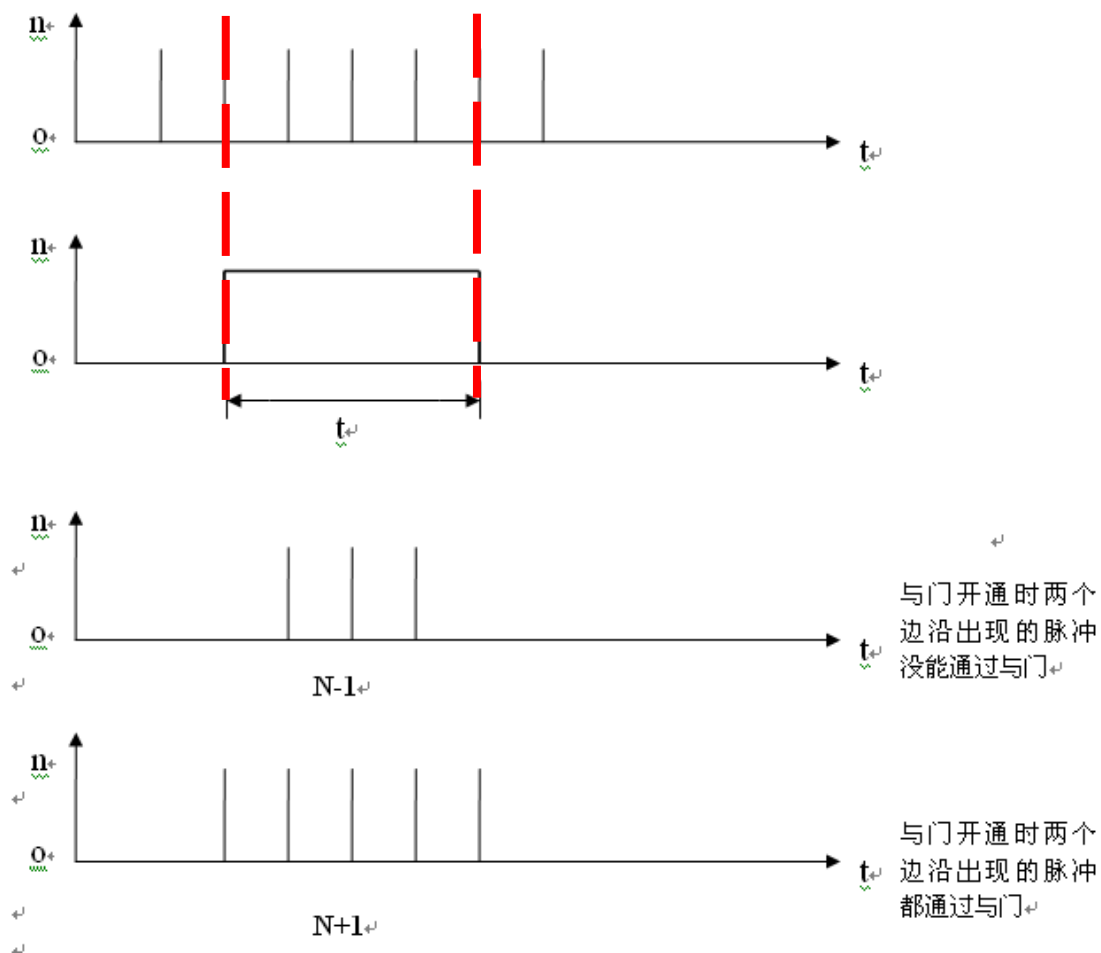
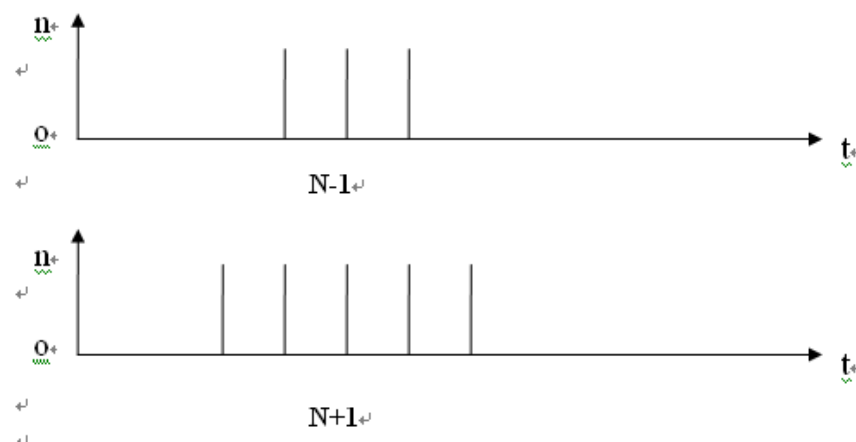
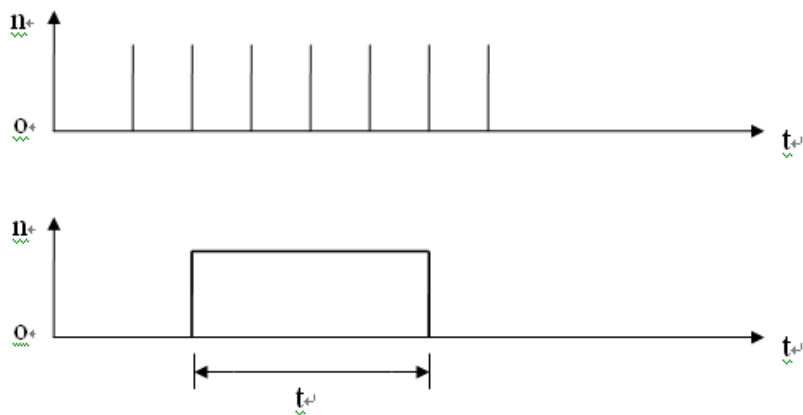


图2.14测频法测量频率时的 $\pm 1$ 误差



上述误差 $\pm 1$ 称之为“ $\pm 1$ 个字误差”或“ $\pm 1$ 误差”。

$$\Delta N = \pm 1 \quad \longrightarrow \quad \frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{1}{ft}$$

$$f = N / t \quad \longrightarrow \quad N = ft$$

$\pm 1$ 误差对测量的影响为，如果被测信号的频率 $f$ 一定，则增大测量时间 $t$ ，可使减小。

$$(\Delta f / f)_{\max} = \pm (|\Delta N / N| + |\Delta t / t|)$$



## ②分析 $\Delta t / t$

测频法的时间基准 $t$ 一般是由石英振荡器提供的标准频率经整形电路、分频电路后产生的。 $\Delta t / t$  主要取决于晶体振荡器的稳定度，即

$$\Delta t / t \approx -\Delta f_0 / f_0 = -G$$

$f_0$  是晶振频率， $G$ 为晶振稳定度。

在合理的使用下，石英晶体稳定度较好，所以  $\Delta f / f$  主要取决于 $\pm 1$ 误差，即

$$(\Delta f / f)_{\max} = \pm |\Delta N / N| = \pm 1 / (ft)$$

结论：测频法适用于高频信号的测量

## 2.2.1.1 测周法

### (1) 原理

测周法是先对信号的周期  $T$  进行测量，然后根据  $f = 1/T$  而得到信号的频率。

其中  $f_\phi$  由标准频率源产生的高频脉冲信号。

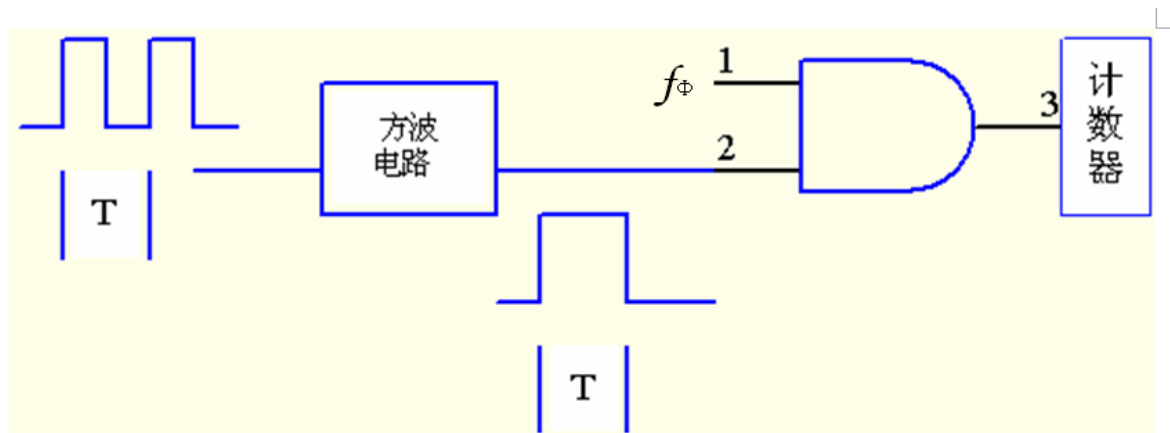


图2.15 测量信号周期  $T$  的原理图

通过对与门输出端的脉冲计数，就可得到被测信号的周期

$$T = N \cdot \frac{1}{f_\phi}, \text{ 换算成频率 } f = f_\phi / N。$$

## (2) 误差分析

由 
$$f = f_{\phi} / N$$

可得 
$$\Delta f / f = [(\partial f / \partial f_{\phi}) \Delta f_{\phi} + (\partial f / \partial N) \Delta N] / f$$

由于 
$$\partial f / \partial f_{\phi} = 1 / N, \partial f / \partial N = -f_{\phi} / N^2, 1 / f = N / f_{\phi}$$

所以 
$$\Delta f / f = \Delta f_{\phi} / f_{\phi} - \Delta N / N$$

考虑到极限情况，最终得到： 
$$(\Delta f / f)_{\max} = \pm(|\Delta N / N| + |\Delta f_{\phi} / f_{\phi}|)$$

式中：  
 $\Delta f / f$  为测量频率时的相对误差；  
 $\Delta N / N$  为计数值的相对误差；  
 $\Delta f_{\phi} / f_{\phi}$  为标准频率源的稳定度。

$$(\Delta f / f)_{\max} = \pm(|\Delta N / N| + |\Delta f_{\phi} / f_{\phi}|)$$

### ①分析 $\Delta N / N$

上述表达式与测频法的误差表达式类似。式中， $\Delta N_{MAX} = \pm 1$  即“ $\pm 1$ 误差”。

“ $\pm 1$ 误差”对测量精度的影响可用下式表示。

$$f = f_{\phi} / N \quad \longrightarrow \quad N = f_{\phi} / f$$

$$\longrightarrow \quad \Delta N / N = \pm 1 / N = \pm f / f_{\phi}$$

由上式知， $f_{\phi}$  越高， $\Delta N / N$  越小。

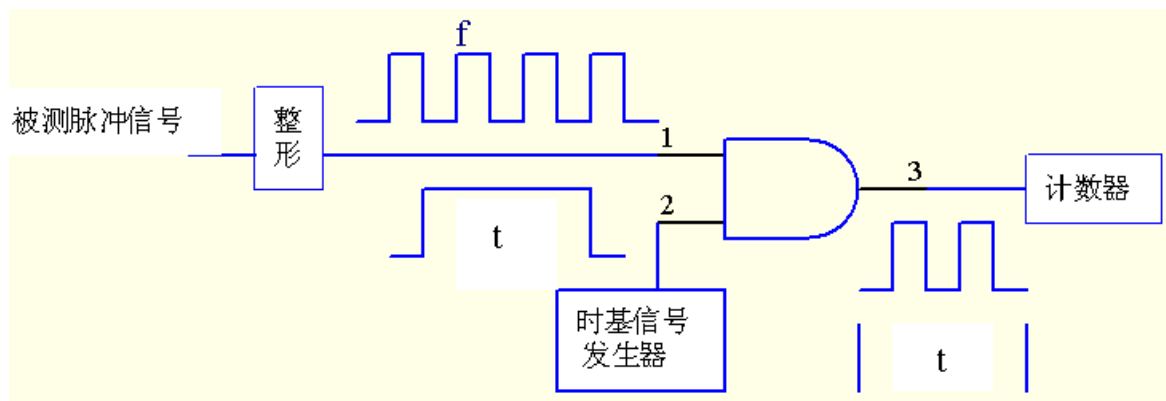
$$(\Delta f / f)_{\max} = \pm(|\Delta N / N| + |\Delta f_{\phi} / f_{\phi}|)$$

## ②分析 $\Delta f_{\phi} / f_{\phi}$

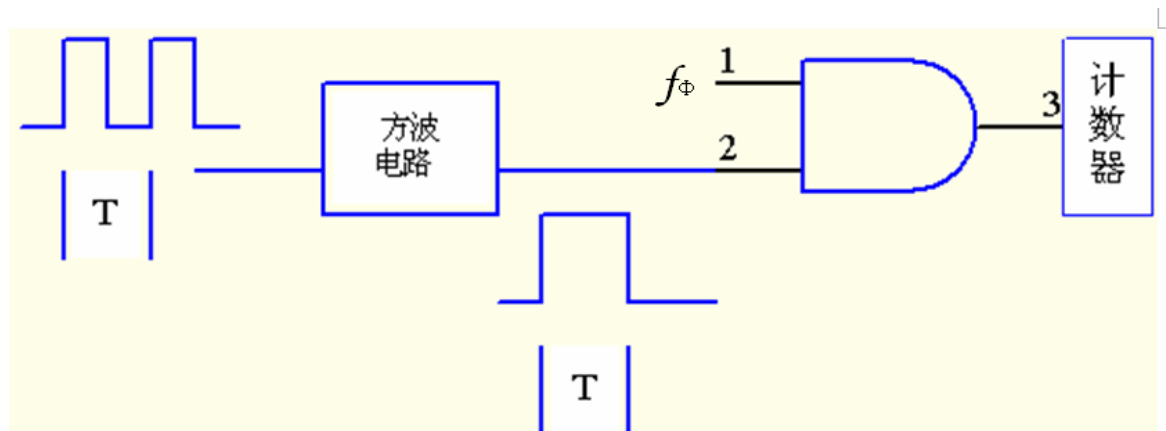
由于标准频率源产生的脉冲信号一般也是从石英晶体振荡器获得的。因此，如果在采取了适当措施之后，同样也可以使  $\Delta f_{\phi} / f_{\phi}$  很小。所以，可以认为。 $\Delta f / f$  也仍然取决于 $\pm 1$ 误差。

$$(\Delta f / f)_{\max} = \pm|\Delta N / N| = \pm f / f_{\phi}$$

一旦  $f_{\phi}$  确定了，被测信号的频率越低（即  $T$  越大）， $\Delta N / N$  就越小，测量精度就越高。



$$\pm 1 / (tf)$$



$$\pm f / f_{\phi}$$

结论：测周法适用于低频信号的测量

结论：测频法适用于高频信号的测量

那么多低的频率算低频呢？多高的算高频呢？

### 2.2.1.3 测频法和测周法之间中界频率的确定

如果能够确定一个中界频率  $f_0$ ,

当被测信号频率大于  $f_0$  时, 认定为高频信号, 采用测频法测量;

当被测信号频率小于  $f_0$  时, 认定为低频信号, 采用测周法测量。

中界频率  $f_0$  的确定方法如下:

无论是测频法还是测周法, 都存在  $\pm 1$  误差

测频法:  $\pm 1$  误差对测量产生的影响为  $\pm 1 / (tf)$

测周法:  $\pm 1$  误差对测量产生的影响为  $\pm f / f_\phi$

当使用测频法和测周法的  $\pm 1$  误差的影响相等时的频率点就是中界频率  $f_0$

$$\frac{1}{tf} = \frac{f}{f_\phi} \quad \longrightarrow \quad f_0 = (f_\phi / t)^{1/2}$$

式中:  $f_\phi$  为测周法时的标准频率 (一般与计数器的最高输入频率有关)

$t$  为测频法时的测量时间 (一般与允许的最大测量时间有关)。

当被测频率的变化范围较宽、测频时采用的计数器的最高输入频率和最大测量时间又有一定的限制时，常采用测频法和测周法相结合的测量方法：

当被测频率低于  $f_0$  时，采用测周法得到的测量结果；

当被测频率高于  $f_0$  时，采用测频法得到的测量结果。

测量的误差在中界频率时最大，为

$$\pm 1 / (tf_0) = \pm f_0 / f_\phi = \pm 1 / (f_\phi t)^2$$

为什么？

假设  $f_\phi, t$  一定，

当被测频率高于  $f_0$  时，采用测频法，误差为：  $\pm 1 / (tf)$

$$f > f_0, \quad \text{最大误差是} \quad \pm 1 / (tf_0)$$

当被测频率低于  $f_0$  时，采用测周法，误差为：  $\pm f / f_\phi$

$$f < f_0, \quad \text{最大误差是} \quad \pm f_0 / f_\phi$$



例：对一数字化测频装置进行原理设计，要求被测信号频率范围为1Hz~10M Hz，最慢1秒钟能得到一个测量结果，同时希望测量精度尽可能高，设测频装置所用计数器的最高计数频率为10M Hz。最后分析所设计装置的测量精度。

$$\pm 1 / (tf)$$

$$\pm f / f_{\phi}$$

解：被测信号频率范围较宽，因此选用测频法与测周法相结合的方法。

由题意选取  $t = 1, f_{\phi} = 10M$

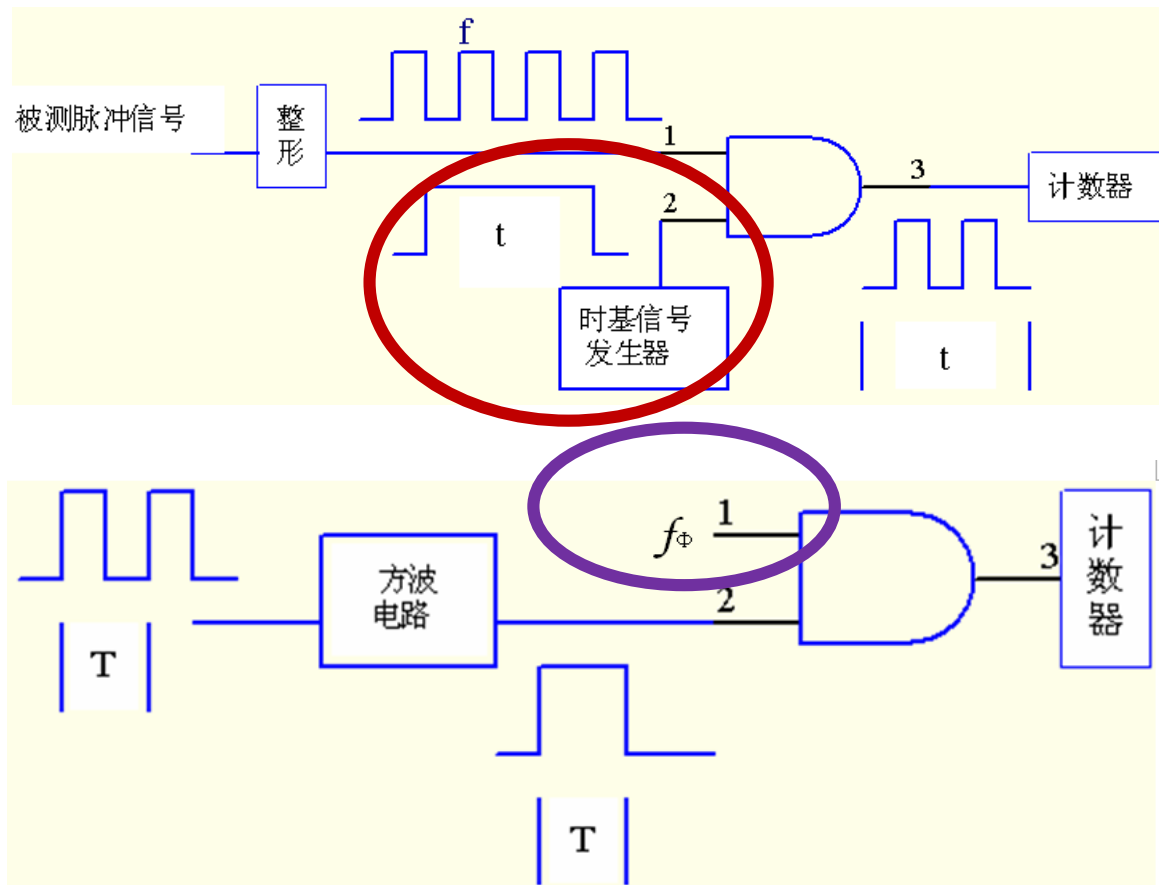
中界频率：  $f_0 = (f_{\phi} / t)^{1/2} \approx 3162Hz$

$f < 3162Hz$  采用测周法；  $f > 3162Hz$  采用测频法。

最大测量误差为出现在中界频率处，为：

$$\left( \frac{\Delta f}{f} \right)_{\max} = \pm 1 / (f_{\phi} t)^{1/2} \approx \pm 3.16 \times 10^{-4}$$

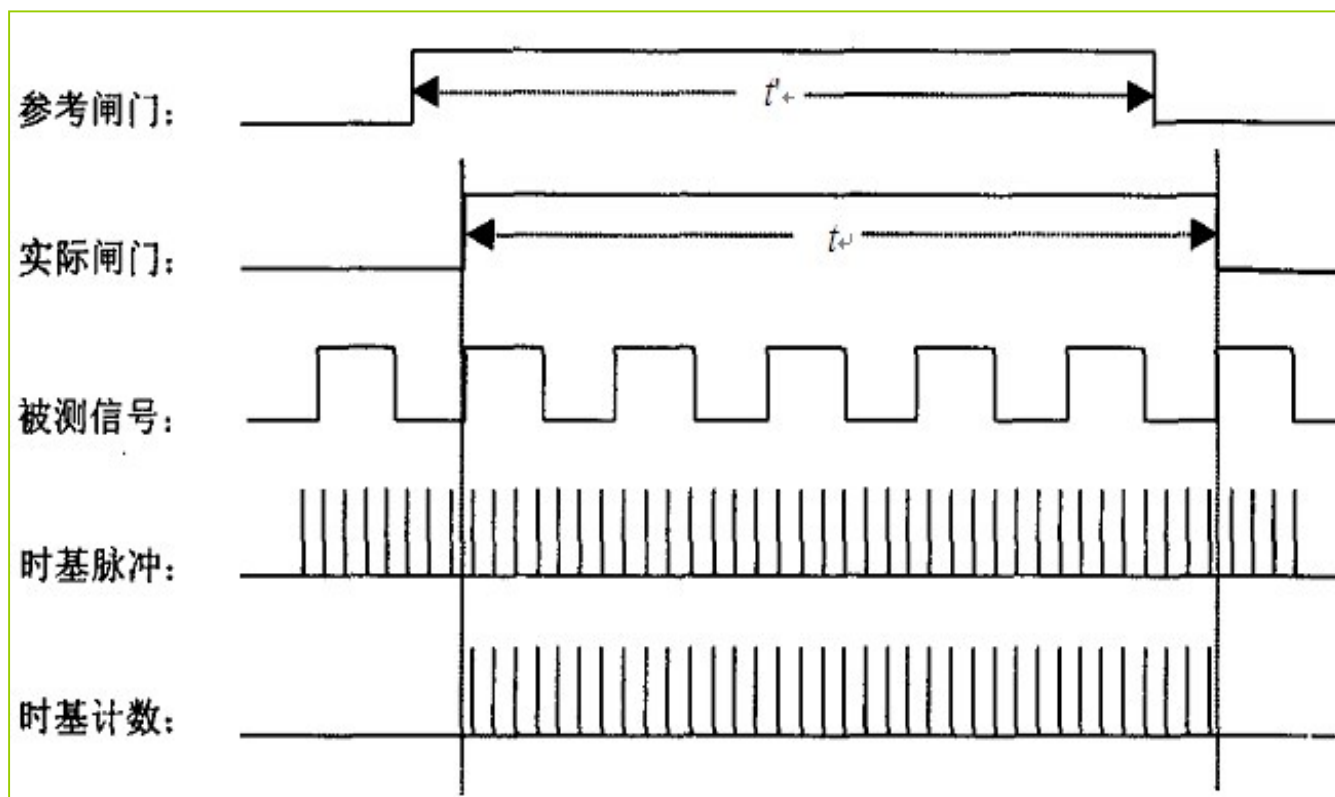
对于这种频率变化范围较宽的被测信号，还有别的方法吗？



## 2.2.1.4 多周期同步法

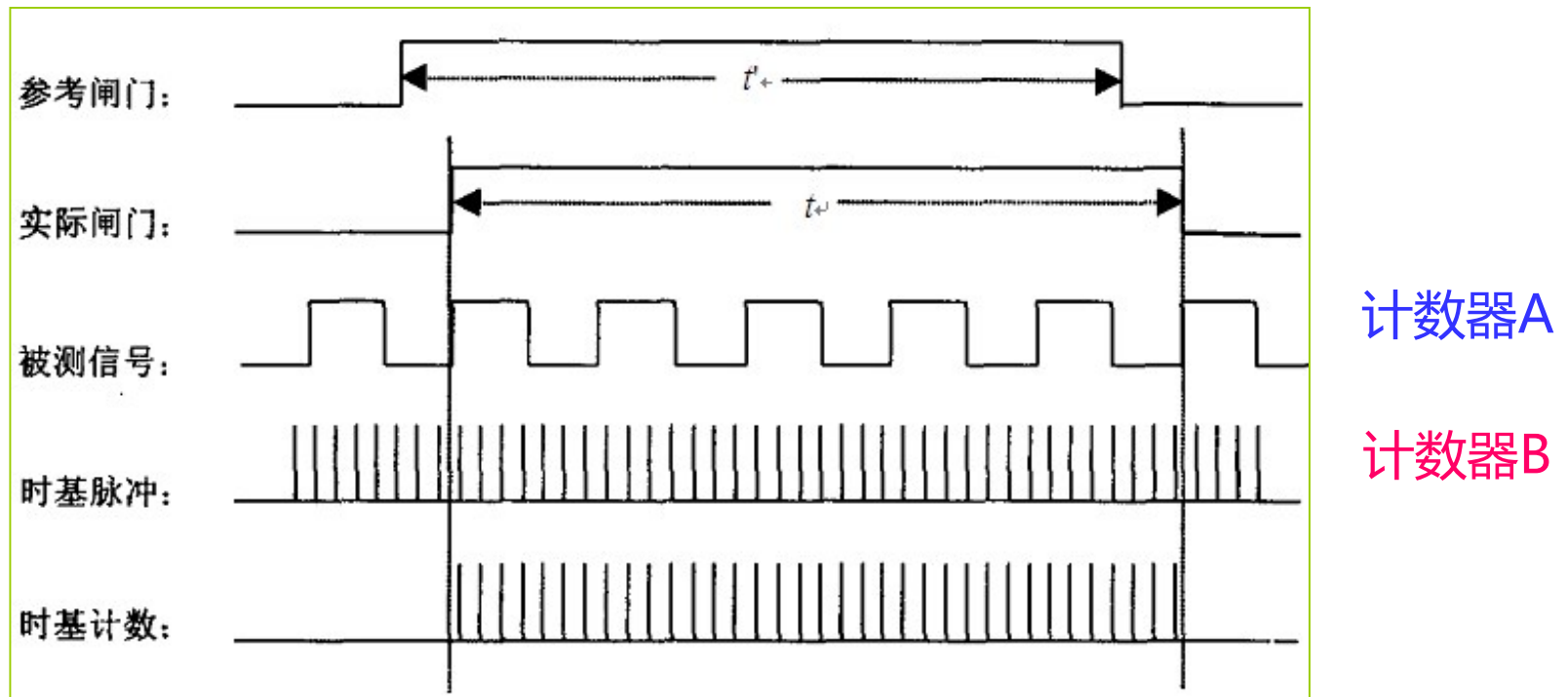
除前面介绍的测频法和测周法两种测量方法外，还有另外一种测量方法：**多周期同步法**。

多周期同步测量的原理波形如图所示。



**多周期同步法的测量过程：**

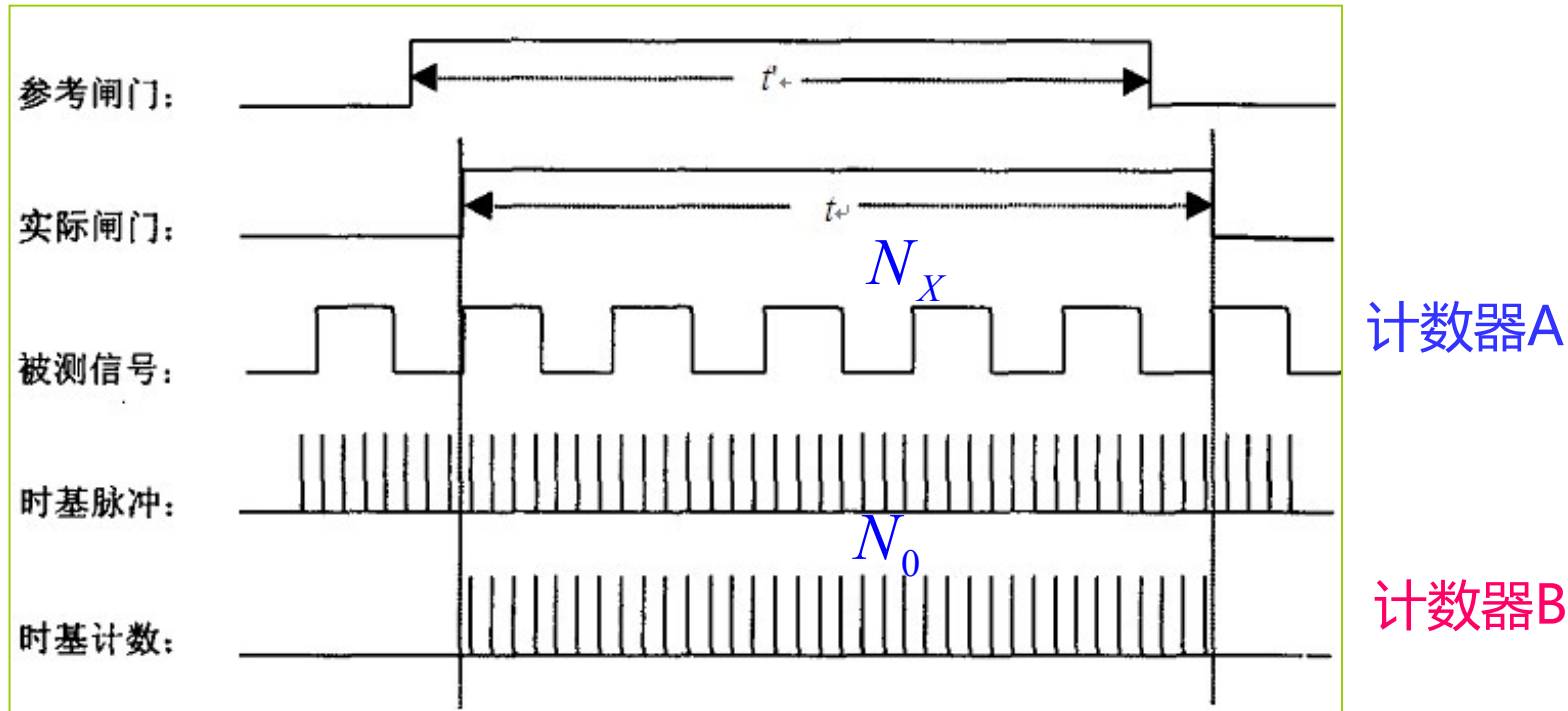
①首先由控制信号打开参考闸门，此时计数器并不开始计数，等到被测信号的上升沿到来时才开始计数。



②被测信号由计数器A计数，时基脉冲由计数器B计数。

③当参考闸门关闭时，计数器并不立即停止计数，而是等到被测信号上升沿到来时才结束计数，完成一次测量过程。闸门实际打开的时间为 $t$ 。由于计数器的开闭与被测信号是完全同步的，因而不存在对被测信号计数的 $\pm 1$ 个字误差。

## 多周期同步法的测量结果与误差分析：



### (1) 测量结果

实际闸门时间为  $t$ ，在此时间内，若计数器A测得的被测信号的计数值为  $N_X$ ，计数器B测得的时基信号的计数值为  $N_0$ ，已知时基信号的频率为  $f_{\phi}$ ，则被测信号的频率为：

$$f_X = (N_X / N_0) f_{\phi}$$

## (2) 误差分析

被测信号频率:  $f_X = (N_X / N_0) f_\phi$

分析  $f_X$  的测量误差时只需考虑  $N_0$  的测量误差。上式对  $N_0$  微分可得:

$$df_X = -\left(N_X f_\phi / N_0^2\right) dN_0$$

由前面分析可知,  $dN_0 = \pm 1$ , 则测量的相对误差为:

$$\Delta f_X / f_X = \pm 1 / N_0 = \pm 1 / (t f_\phi)$$

对比测频法与测周法相结合的方法的最大测量误差:  多周期法  
精度更高

$$\pm 1 / \left(f_\phi t\right)^{\frac{1}{2}}$$

多周期同步法误差： $\pm 1 / (tf_\phi)$

测频+测周法误差： $\pm 1 / (f_\phi t)^{\frac{1}{2}}$

例如当  $f_\phi = 100\text{MHz}$ 、 $t = 10\text{ms}$  时，采用多周期同步法时的最大测量误差为  $\pm 10^{-6}$ ，而采用测频法和测周法相结合的测量方法时的最大测量误差为  $\pm 10^{-3}$ ，二者相差1000倍。

结论： 在相同的闸门时间  $t$ （最大测量时间）及时基频率  $f_\phi$ （最高输入频率）的条件下，测量误差减小  $(tf_\phi)^{\frac{1}{2}}$  倍。  
实现了被测频带内的等精度测量。

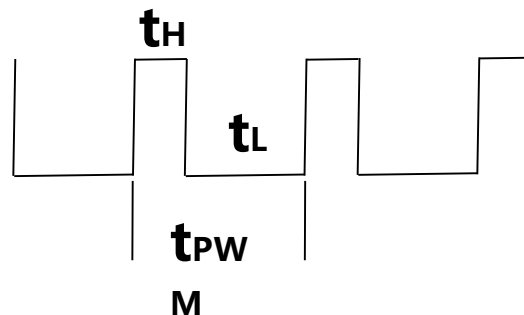
## 2.2.2 脉冲宽度调制 (PWM, Pulse-Width Modulation)

脉冲宽度调制技术就是通过改变脉冲占空比大小来实现改变输出信号的大小的一门技术。

- 什么是占空比?

如右图所示, 设高电平宽度为 $t_H$ , 低电平宽度为 $t_L$ , 脉冲周期为  $t_{PWM} = t_H + t_L$  , 则占空比表示为如下:

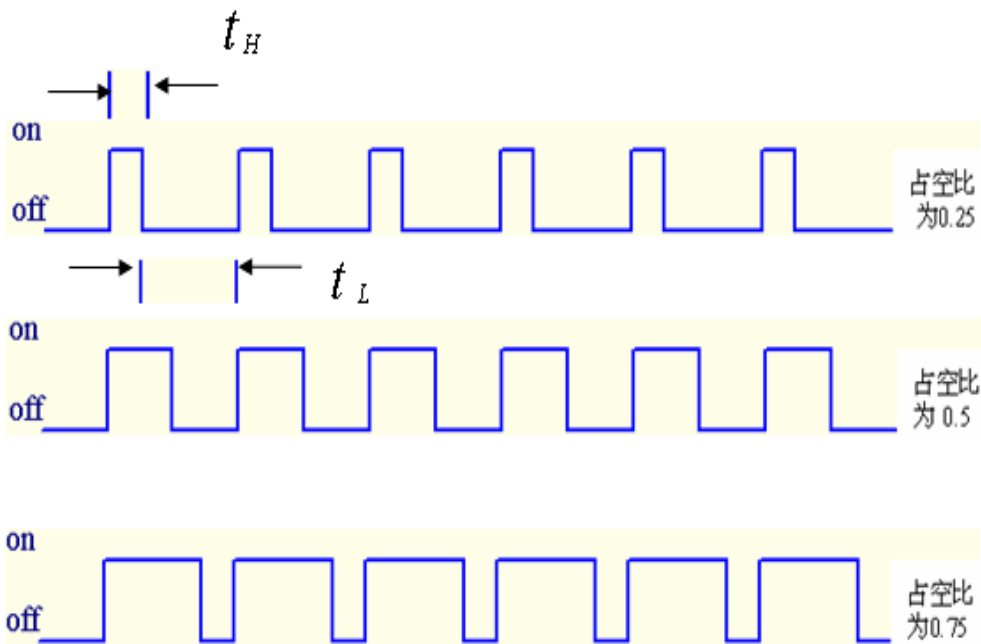
$$\text{占空比} = \frac{t_H}{t_H + t_L} \times 100\% = \frac{t_H}{t_{PWM}} \times 100\%$$



占空比可从0% ~ 100%连续可调。

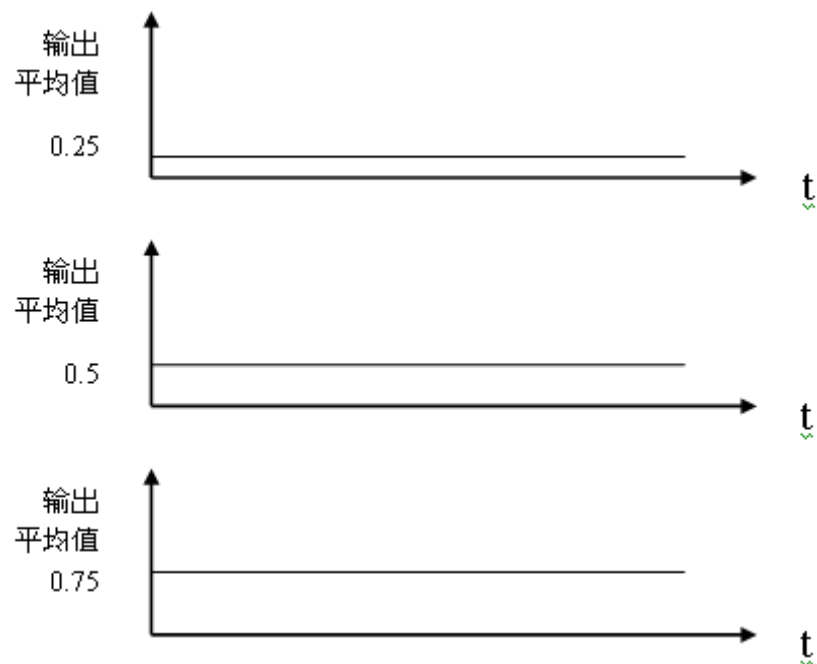


## ● 脉冲宽度调制的工作原理



(a) 为脉冲信号频率（周期）固定,但占空比可调的PWM信号

脉冲宽度调制的工作原理如图2.17所示：



(b) 图 (a) 中PWM信号的平均值

可以通过控制  $\frac{t_L}{t_H}$ （即占空比）来调节输出信号平均值的大小。

这也就是说，图 (a) 所示的数字信号经滤波后转换成了如图 (b) 所示的模拟信号，即通过PWM及相关的辅助电路可实现数字量 (D) 到模拟量 (A) 的转换 (D/A转换)。

## ● 脉冲宽度调制技术的实现

对于内含嵌入式微处理器的智能仪器而言，产生PWM信号的方法主要有两种。

(1) 不带PWM的微处理器，如AT89C51等，可以通过内部定时器通过软件模拟的方法来完成。

(2) 自带PWM的微处理器，如C8051F\*\*\*系列，因为自带PWM功能，使用起来极为方便。

## ● 举例：PWM技术可用于直流伺服电机的控制

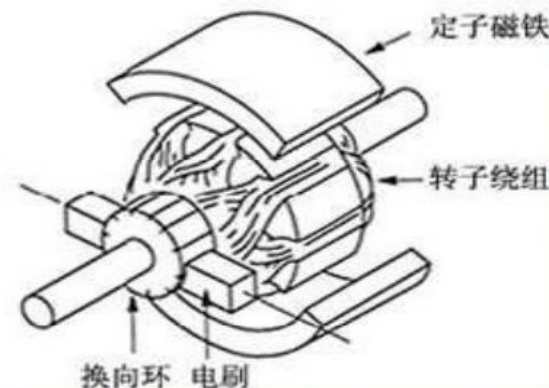
直流伺服电机有电磁式、永磁式、杯形电枢式、无槽电枢式、圆盘电枢式、无刷式等多种类型，还有一种特殊的直流力矩电机。

不管哪种类型的直流伺服电机，电机的转速由电枢电压决定，在励磁电压和负载转矩恒定时：

电枢电压越高，电机转速就越高；

当电枢电压为零时，电机停转；

当电枢电压极性改变时，电机就反转。

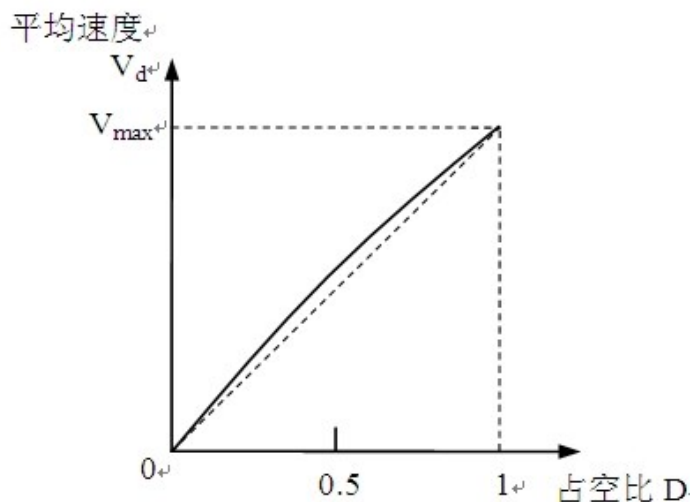


直流伺服电机的转速和转向可以通过控制电枢电压的大小和方向来实现。

## 如何通过PWM技术来实现对直流伺服电机的控制呢？

转速  $\leftarrow$  电枢电压大小  $\leftarrow$  占空比

直流伺服电机的平均转速 $V_d$ 与占空比 $D$ 之间的关系如图2.19所示。



图中， $V_{max}$ 为电机最高转速， $D$ 为占空比。由图可见， $V_d$ 与 $D$ 的关系近似为 $V_d = V_{max}D$

图 2.19 电机平均转速与占空比的关系

用PWM技术实现直流伺服电机开环调速的结构原理如图2.18所示。

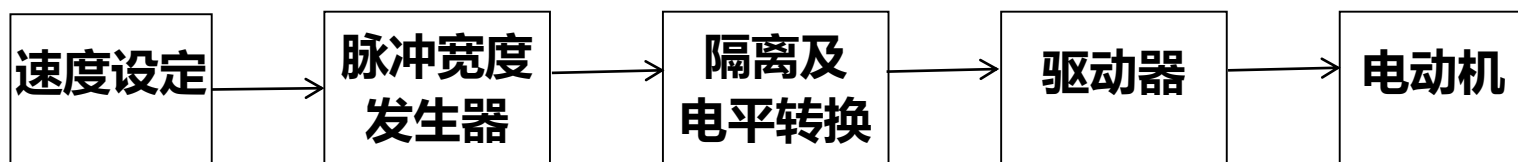
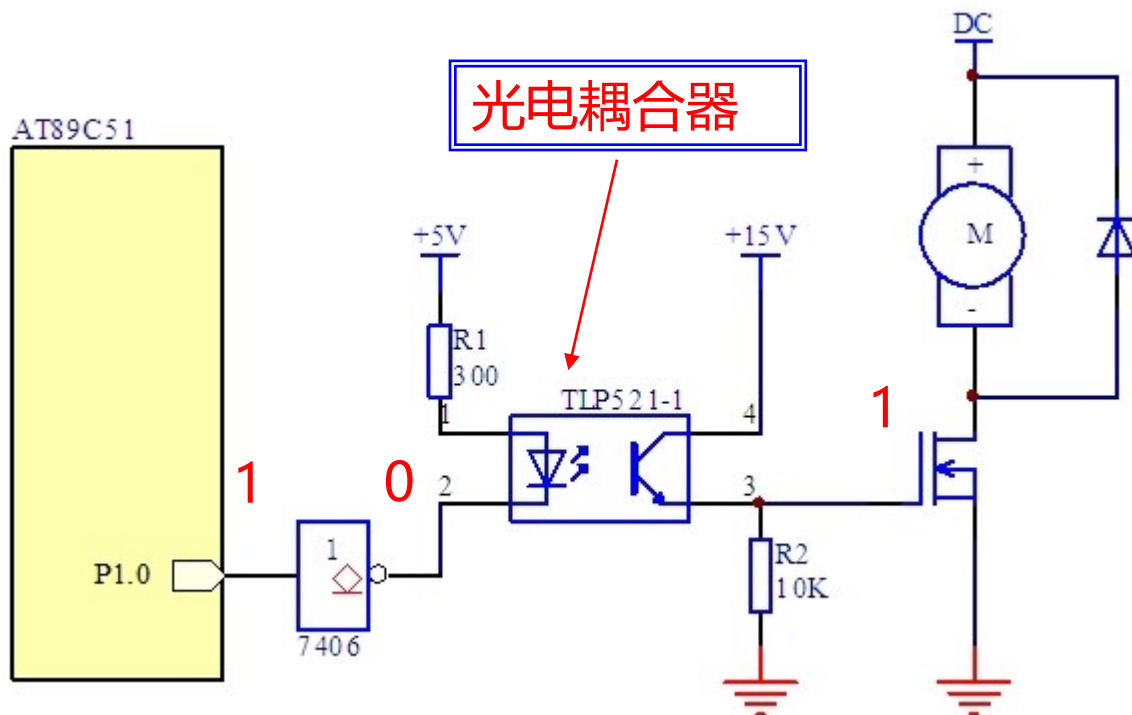


图2.18 开环脉冲宽度调速系统原理图

采用场效应管作为驱动器的开环PWM直流伺服电机调速系统的原理如图2.20 所示（只能正转）。图中，51系列单片机的P1.0输出的PWM信号通过光电耦合器隔离后由场效应管驱动电机。

**光电耦合器**的作用是切断以单片机为主的控制系统与以电机等为主的控制现场之间的电气联系而提高单片机系统的可靠性。

- PWM的频率为500Hz（即T为2ms）时能使直流电机平衡运转，当占空比从0%~100%时，转速以1%的变化率连续可调。



**编程：**  
51单片机晶振12MHz(机器周期1us)，定时器0工作在方式1，输出PWM占空比70%的输出信号。

编程:

51单片机晶振12MHz(机器周期1us), 定时器0工作在方式1, 输出PWM占空比70%的输出信号。

- PWM的频率为500Hz (即T为2ms) 时能使直流电机平衡运转, 当占空比从0%~100%时, 转速以1%的变化率连续可调。

定时/计数器的工作初始化

- 1、 确定工作方式: 对TMOD赋值
- 2、 预置定时或计数的初值: 可直接将初值写入TH0、TL0或TH1、TL1
- 3、 根据需要开放定时/计数器的中断: 直接对IE位赋值
- 4、 启动定时/计数器工作:

软件启动, 则可把TR0或TR1置“1”。

因为定时/计数器是做“加1”计数, 并在计满溢出时产生中断, 因此计数初值 $X = \text{最大计数值} M - \text{计数值} N$ ;

确定定时/计数初值: 定时初值 =  $2^n - (\text{定时时间} / \text{机器周期})$   
计数初值 =  $2^n - \text{计数次数}$

## 初始化程序

|        |      |            |                          |
|--------|------|------------|--------------------------|
| CONTL: | MOV  | TMOD, #01H | ;定义T0方式1                 |
|        | MOV  | IE,#82H    | ;允许T0中断                  |
|        | MOV  | IP,#02H    | ;定义T0为高优先级               |
|        | MOV  | TH0,#0FAH  | ;T0预置64136 (=65536-1400) |
|        | MOV  | TL0,#88H   | ;实际计数1400                |
|        | SETB | 00H        | ;置输出“1”标志                |
|        | SETB | P1.0       | ;电机转动P1.0输出“1”           |
|        | SETB | TR0        | ;启动定时器                   |

## ·;T0中断服务程序

|         |      |            |                                       |
|---------|------|------------|---------------------------------------|
| T0INT:  | CPL  | 00H        | ;状态标志求反                               |
|         | CPL  | P1.0       |                                       |
|         | JNB  | 00H,T0INT1 |                                       |
|         | MOV  | TH0,#0FAH  | ;预置64136                              |
|         | MOV  | TL0,#88H   | ;计数1400(=2000×70%),<br>1400×1μs=1.4ms |
|         | SJMP | T0INT2     |                                       |
| T0INT1: | MOV  | TH0,#0FDH  | ;预置64936 (=65536-600) ,<br>实际计数600    |
|         | MOV  | TL0,#0A8H  | ;计数600(=2000×30%),<br>600×1μs=0.6ms   |
| T0INT2: | RETI |            |                                       |

**练习题：**根据下列条件，采用软件方法产生PWM信号：设MCS-51系列单片机的晶振频率 $f_{OSC}=6\text{MHz}$ ，若 $t_{PWM}=2\text{ms}$ ，PWM信号的占空比为50%，试确定相应的计数值x和y(x,y分别为和 $t_H$ 和 $t_L$ 对应的计数初值)为？

为获得最小的**非零**占空比，x和y的值分别为多少？（假设采用定时/计数器0工作在方式1）

$$\text{定时时间} = (2^{16} - \text{计数初值}) \times \text{机器周期}$$

**解：情况1：占空比50%**

机器频率=晶振频率/12=6M/12Hz=0.5MHz

机器周期=1/机器频率=2 $\mu\text{s}$

由 $t_{PWM}=t_H+t_L=2\text{ms}$ 和占空比50%（ $t_H=t_L$ ）得，

$$t_H=t_L=1\text{ms}$$

$$t_H=(2^{16}-x) \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 1 \cdot 10^{-3}$$

$$x=2^{16}-500=65036$$

同理得：y=65036



**练习题：**根据下列条件，采用软件方法产生PWM信号：设MCS-51系列单片机的晶振频率 $f_{OSC}=6\text{MHz}$ ，若 $t_{PWM}=2\text{ms}$ ，PWM信号的占空比为50%，试确定相应的计数值x和y(x,y分别为和 $t_H$ 和 $t_L$ 对应的计数初值)为？

为获得最小的**非零**占空比，x和y的值分别为多少？（假设采用定时/计数器0工作在方式1）

$$\text{定时时间} = (2^{16} - \text{计数初值}) \times \text{机器周期}$$

**解：情况2：最小的非零占空比**

为获得最小的非零占空比， $t_H = \min > 0$ ，即获得最短定时时间。

$$\text{则 } x = 2^{16} - 1 = 65535, \quad t_H = (2^{16} - 65535) \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 10^{-6}$$

$$t_L = t_{PWM} - t_H = 2 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-6} = (2^{16} - y) \cdot 2 \cdot 10^{-6}$$

$$y = 2^{16} - 999 = 64537$$

## 2.2.3 步进电机的驱动及控制

步进电机是一种用电脉冲信号进行控制，并将电脉冲信号转化成相应的角位移或线位移的特种电机。

改变脉冲频率就能改变电机转速；

改变脉冲触发相序，就能改变电机的转向。



电脉冲信号→相应的角位移；  
转速取决于脉冲信号的频率；

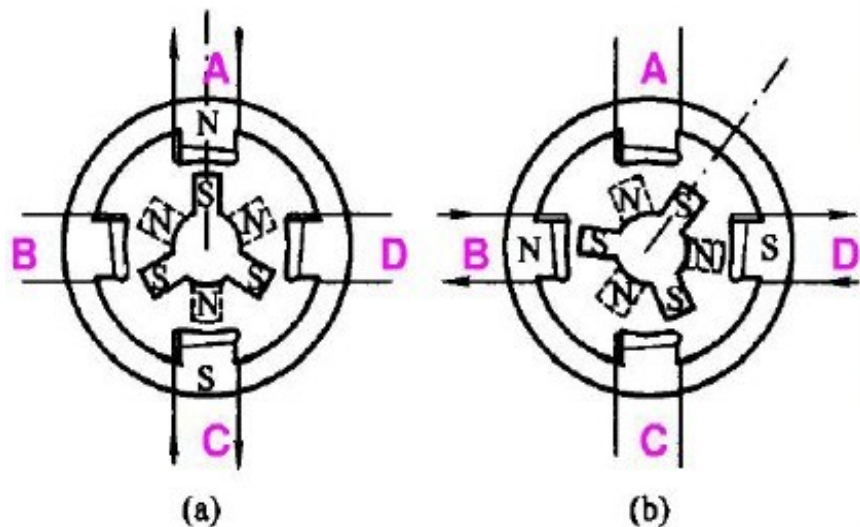


容易实现正反转和启停控制；  
输出转角精度高；



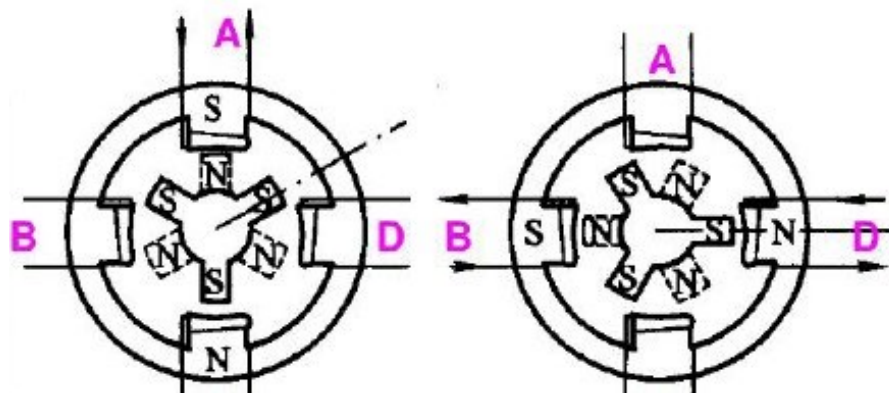
直接用数字信号控制与计算机接口方便。





当绕组不通电时，转子中的永磁体试图减少磁路中的磁阻，转子将趋向使磁阻最小的位置，即转子中有一个齿和定子对齐。

当绕组中各相通电时，转子将被吸引一步步转动。转子每走一步所转过的角度称步距角



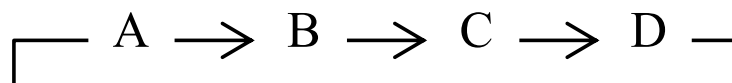
常用的步进电机有二相、三相、四相、五相、六相等，其旋转方向与内部绕组的通电顺序有关。

目前，使用最广泛的是二相、四相步进电机，它特别适合于小型的微机控制系统。

四相步进电机常用的工作方式有两种：

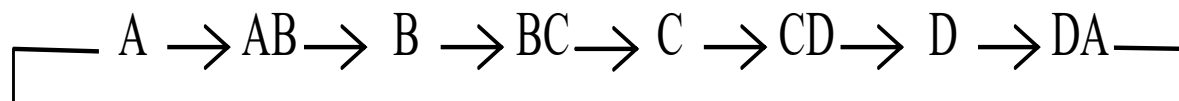
### (1) 单四拍

通电顺序为：



### (2) 四相八拍

通电顺序为：



**如果按上述通电顺序通电，步进电机正转。反之，则反转。**

### 2.2.3.2 步进电机控制系统设计

由微控制器实现对步进电机控制的原理如图2.24所示。它由微控制器、接口电路、驱动电路等组成。

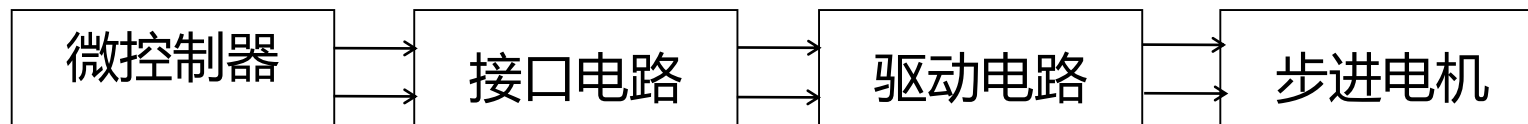


图2.24 微机控制步进电机原理框图

## 2.2.3.1 步进电机的驱动方式

### (1) 基本型

基本型驱动方式如图2.22所示，适用于步进电机绕组的阻抗较大，输入功率较小，低速运转的场合。这种驱动电路结构简单，运转稳定性好，但启动频率较低。图2.22 步进电机基本型驱动方式

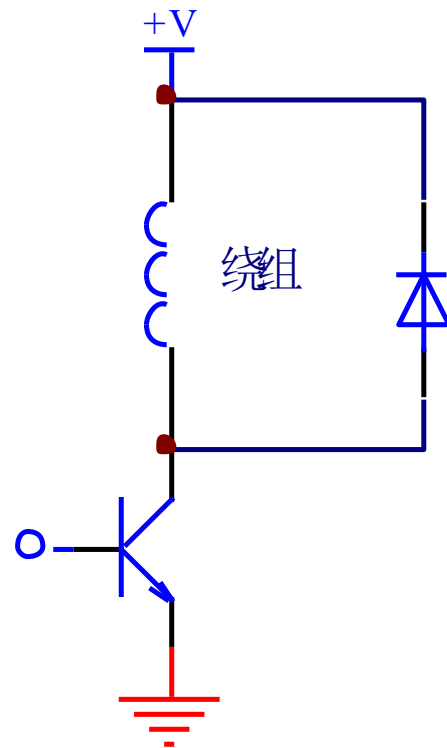


图2.22 步进电机基本型驱动方式

## (2) 串阻型

串阻型驱动电路如图2.23所示，适用于绕组阻抗小，输入功率较大，转速较高的场合。该电路的特点是启动频率较高。

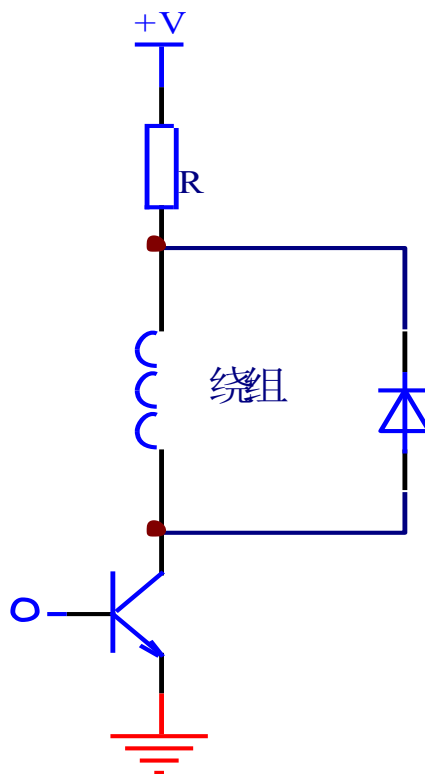


图2.23 步进电机串阻型驱动方式

图2.25为四相步进电机与89C52的硬件接口电路。由于51系列单片机复位后其输出口均为“1”，这样可以确保单片机在接通电源时，四相绕组均不通电，以防止步进电机的负载发生位移。

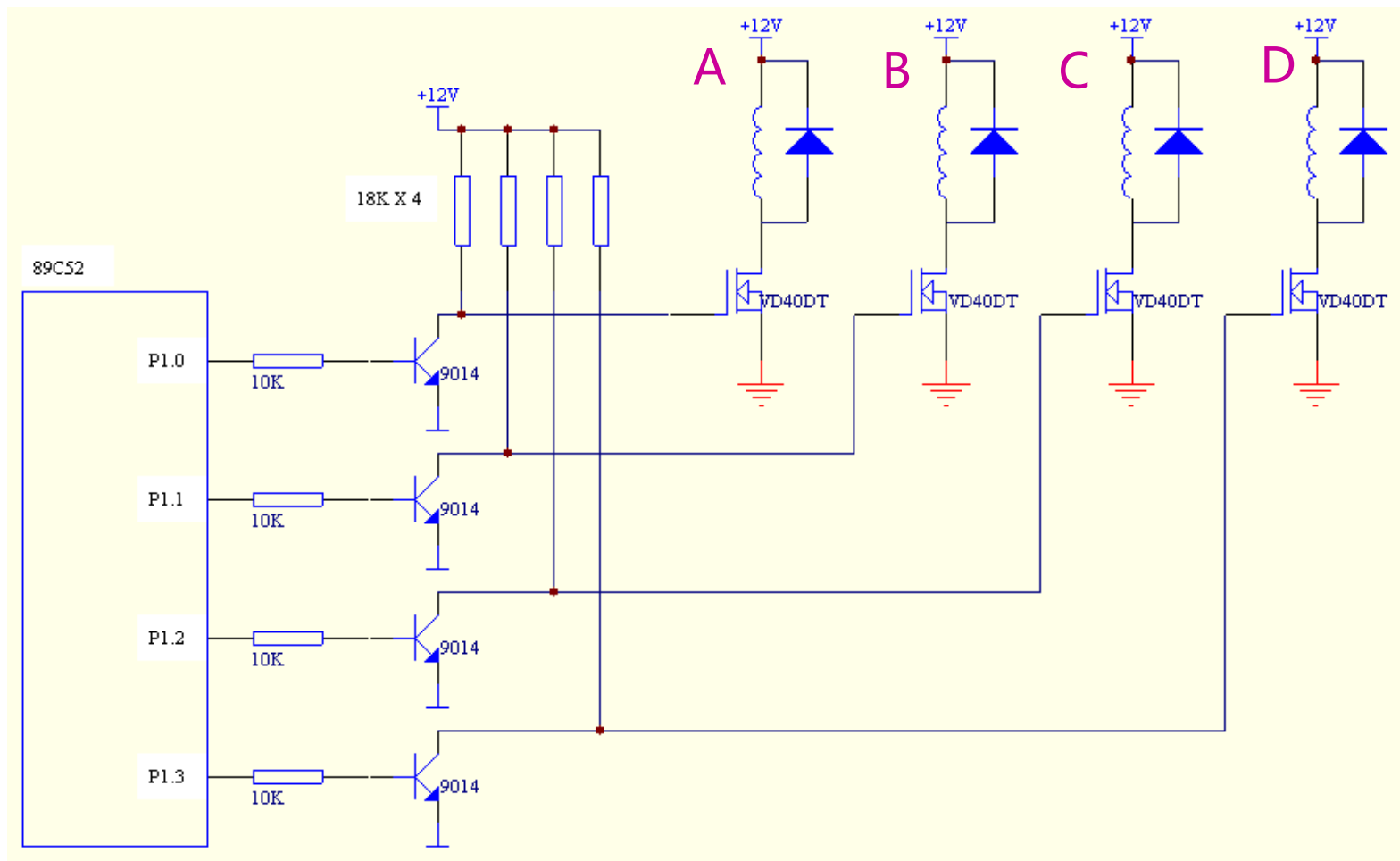


图2.25 四相步进电机与89C52的硬件接口电路



下面是步进电机采用单四拍运行时的控制程序：

```
STEPRUN:    MOV    R7, #data    ;运行步数送R7
             MOV    A,  #0EEH    ;驱动字送A

RE:          MOV    B,  P1        ;保护P1口高四位

             MOV    R5, A

             ANL    A,  #0FH

             ANL    B,  #0F0H

             ORL    A,  B        ;拼装驱动字

             MOV    P1, A        ;运行一步
             MOV    A,  R5
             RL     A            ;驱动字移位
             LCALL  DELAY        ;延时
             DJNZ   R7, RE        ;没运行完继续
             RET                ;返回
```

步进电机运行速度可以通过改变DELAY时间来改变，但必须注意步进电机空载起动频率和带载运行频率这两个参数。如果程序送出的移位脉冲频率超过了这两个参数，则会引起步进电机运行**失步**，无法实现精确控制。

以上介绍的步进电机驱动方法是**开环控制模式**。在某些精密控制系统中，由于开环控制可能存在的失步等问题，使控制指标达不到要求，此时可考虑采用**闭环控制**。常用的方法是，在步进电机的输出轴上安装光电式编码器。**微控制器**接收光电式编码器输出的表示转过角度的脉冲数后，判断步进电机是否已运行了程序规定的步数（角度），若出现差错，则可以进行修正。