

TH-39

M54

457678

图解 机电一体化入门系列

# 电子机械控制入门

[日] 雨宫好文 主编 妹尾允史 著  
白玉林 商福昆 译



科学出版社 OHM社  
2000. 北京

**图字：01-1999-2505号**

Original Japanese edition

Zukai Mekatoronikusa Nyuumon Shirizu; Denshi Kikaiseigyo Nyuumon

Supervised by Yoshifumi Amemiya

Written by Masafumi Senoo

Copyright © 1983 by Masafumi Senoo

published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press.

Copyright © 1999

All rights reserved.

本书中文版版权为科学出版社和 OHM 社所共有

**圖解メカトロニクス入門シリーズ**

**電子機械制御入門**

妹尾允史 オーム社 1991 第1版第7刷

**图书在版编目(CIP)数据**

电子机械控制入门/(日)雨宫好文主编;妹尾允史著.

北京:科学出版社,2000

ISBN 7-03-008001-7

I. 电… II. ①雨… ②妹… III. 机电设备-控制电路-基本知识 IV. TP27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 65155 号

**科学出版社 OHM 社 出版**

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

中国科学院印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

2000 年 1 月第 一 版 开本: 889 × 1194 1/32

2000 年 1 月第一次印刷 印张: 4 3/4

印数: 1-5 000 字数: 121 000

**定 价: 14.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

## 主编的话

本书是图解机电一体化入门系列中的一个分册。随着制造行业的电子化，机械技术工作者如果还不懂得电子学，那他必将落后于时代。所谓机电一体化，当然不单指机器人和数控机床一类新产品，实际上指的是，在原有机产品中加入电子技术，来提高它们性能的一大类新技术。例如，钟表和缝纫机等一些日常用品，在加入电子技术以后，不仅性能提高，而且可以实现小型化和多样化，同时还能够降低成本。

为了帮助初学者学习机电一体化技术，本丛书特意安排了如下6本书：

- (1) 传感器入门
- (2) 控制用电机入门
- (3) 接口电路入门
- (4) 控制用微机入门
- (5) 电子机械控制入门
- (6) 机器人控制入门

名古屋大学早在1982年便在日本首先设置“电子机械工程学科”，接受主编工作之后，自然想到最好从我周围的同事中挑选各分册的作者。

希望本书能对广大读者有所助益，为发展机电一体化技术作出贡献。

雨宫好文

## 前 言

自第一次听到机电一体化这个术语以来,电子控制技术被应用于各种机械产品,从家用产品、工作机械到航天机器等一切领域,都得到迅猛的发展。正如主编的话中所说,在今天,电子学已经成为机械技术工作者必须掌握的一门知识。

本书的目的正如序言中所叙述的那样,与传统的控制类教科书的形式和内容有很大的不同。在我与机械系学生的接触中感觉到,学生最好不是将实验装置或者测量装置的电路只作为“黑匣子”来处理,而应对其工作原理也有兴趣,才是非常可贵的。电子机械控制基本是将有接点或无接点开关加以组合,以顺序逻辑电路为中心的一种数字控制。一旦掌握逻辑电路的关键所在,便可以将它们应用在许多机械中,那是很有用的。

在进行本书的最后修改时,听到了来自名古屋机场关于“新一代战斗机”在日本初次试飞的报道。它是采用电子控制,力求达到临界飞行性能的飞机 CCV。遗憾的是用计算机控制的试验飞行好像失败了,但是 CCV 的基本设计思想,无论对民用飞机,还是身旁的汽车都有影响,表明了向整体自动化机械的发展方向。

对于自动化机械的电子电路的构造及工作原理是些什么内容,或者什么地方要注意、如何操作等,以及电路及其设备的运作情况,本书着重作了论述。

在本书写作过程中,从构思到内容审阅、校正,始终得到名古屋大学工学部教授雨宫好文先生,以及多年来辅导我电气电路知识的县立冈山工业高等学校坪井真象先生的指导和帮助,谨向他们表示衷心谢意。同时对为本书各章开头加插图的竹内佳子、在出版中给予大力协助的欧姆社(OHMSHA)的各位深致谢意。

妹尾允史

# 目 录

第 0 章 序言	11
第 1 章 开关与控制	
1.1 手动开关	17
1.1.1 车灯的亮灭	17
1.1.2 接通与断开	18
1.1.3 切换开关	20
1.1.4 流体泵与流路切换器	21
1.2 电磁继电器	23
1.2.1 电磁铁の利用	23
1.2.2 保持电路	24
1.2.3 温度继电器	25
1.2.4 电磁泵与电磁离合器	26
1.3 无触点继电器	26
1.3.1 二极管开关	26
1.3.2 晶体管开关	30
1.3.3 可控硅开关	36
1.3.4 无触点手动开关	37
1.4 微动开关和限动开关	39
1.5 电路顺序图	40
1.5.1 实体配线图	40
1.5.2 电路顺序图的画法	41

## 第 2 章 开关的组合与逻辑电路

2.1 与电路(AND)和或电路(OR) .....	45
2.1.1 电热吹风机的控制 .....	45
2.1.2 通过继电器控制 .....	47
2.1.3 利用电气信号控制 .....	48
2.1.4 信号的逻辑控制 .....	49
2.1.5 二极管阵列 .....	53
2.2 反相器与正负逻辑 .....	54
2.2.1 阈值电平 .....	54
2.2.2 晶体管反相器 .....	55
2.2.3 正逻辑与负逻辑 .....	56
2.3 数字集成电路(NAND 电路) .....	60
2.3.1 DTL .....	60
2.3.2 TTL .....	62
2.3.3 C-MOS .....	64
2.4 优先电路 .....	67
2.4.1 互锁电路(interlock) .....	67
2.4.2 并列优先电路 .....	68
2.4.3 新输入优先电路 .....	69
2.4.4 串行优先电路 .....	70

## 第 3 章 门电路的组合与逻辑电路的表示法

3.1 逻辑代数(布尔代数)与真值 .....	73
3.2 门电路和逻辑式 .....	76
3.2.1 非门(NOT)和缓冲器 .....	76
3.2.2 与门(AND)和与非门(NAND, INV-NOR 与 INV-OR) .....	77
3.2.3 或门(OR)和或非门(NOR, INV-NAND 与 INV-AND) .....	78
3.2.4 异或门(EX-OR)和 EX-NOR .....	79

3.3 卡诺图 .....	80
3.3.1 4变量的真值表 .....	80
3.3.2 卡诺图的作法 .....	81
3.3.3 卡诺图和逻辑式 .....	83
<b>第4章 计数器和数字电路</b>	
4.1 RS 闭锁电路(记忆电路) .....	87
4.2 触发器 .....	92
4.2.1 RST 触发器 .....	92
4.2.2 D型触发器 .....	93
4.2.3 T型触发器 .....	93
4.2.4 JK 触发器 .....	97
4.3 计数器 .....	98
4.3.1 2进制计数器 .....	98
4.3.2 16进制数与BCD码 .....	100
4.3.3 10进制数与BCD码的变换 .....	103
4.4 寄存器 .....	104
4.4.1 并行数据与串行数据 .....	104
4.4.2 并行寄存器 .....	105
4.4.3 移位寄存器 .....	106
4.5 用LED表示数值 .....	107
4.5.1 发光二极管(LED) .....	107
4.5.2 数字LED .....	108
<b>第5章 无触点检测电路</b>	
5.1 施密特触发器 .....	111
5.1.1 比较电路 .....	111
5.1.2 施密特触发器 .....	113
5.2 非接触式开关 .....	115
5.2.1 接近式开关 .....	115

5.2.2	光电式开关	116
5.3	光耦合器件	116
5.3.1	噪音抑制	117
5.3.2	信号电平的调节	118
<b>第6章 电力的开关控制</b>		
6.1	消耗电力的控制	121
6.1.1	串联连接与并联连接	121
6.1.2	串联控制	123
6.1.3	ON - OFF 控制	124
6.2	直流电压的控制	126
6.3	交流电的相位控制	128
6.3.1	用可控硅及三端双向可控硅的开关 电路	128
6.3.2	利用 UJT 及 DIAC 的触发电路	129
6.3.3	灯光调节电路	132
<b>第7章 电机的控制</b>		
7.1	电容式电机	135
7.1.1	正转、反转、停止的有接点电路	135
7.1.2	正转、反转的无接点电路	136
7.1.3	速度控制	138
7.2	三相感应电机	138
7.2.1	正转、反转及反相制动控制	138
7.2.2	星形 - 三角形起动电路	140
7.3	直流电机	141
7.3.1	利用可控硅(晶闸管)的速度控制 电路	142
7.3.2	开关型控制	143
7.3.3	起动发电机的控制	144



7.4 步进电机 .....	146
参考文献 .....	149

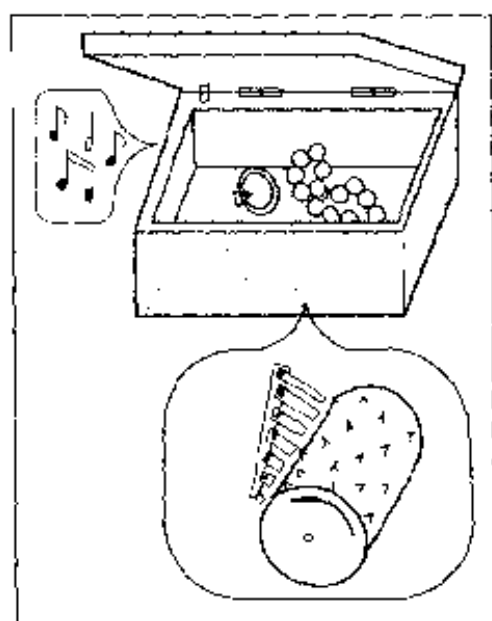


# 第 0 章

## 序 言



请打开这个宝石盒看看。里面装的什么不用管它，只要一掀开上盖，你便能听到一首让你怀旧的动人乐曲。这是一个八音盒，谁都不难想像它的结构(图 0.1)。其中有一个由发条驱动的转鼓，上面分布有许多突起，转鼓转动时它们会依次拨动已经按一定音阶调整好的振动片。如果根据曲谱的音符适当安排突起的分布位置，使它们在转鼓转动时按一定的时间去拨动能发出一定音调的



八音盒也是自动机呢!



图 0.1 宝石盒的八音盒

振动片，那么，随着转鼓转动，八音盒便会自动奏出美妙的音乐来。从防止宝石被盗的角度看，这个八音盒也能起到自动报警的作用。

最近，计算器上也安装上了如八音盒一类的玩意。不过，在这种场合，宝石盒里的发条、转鼓、突起、振动片等等，全都换成了电子部件，再要想像它的结构，也许就不那么容易了(图 0.2)。尽管如此，原理都是一样的，它必须根据预先选定的曲谱按一定的顺序和在适当的时间改变振动频率，以此方式来使某种振动片产生振动。这种电子装置即使已经制造出来，也很容易改变它奏出来的乐曲和音色。在这一方面，电子八音盒要比机械八音盒灵活得多。

“按照预先确定的顺序，逐阶段实施控制”(JIS 的定义)，这是顺序控制。它是自动化机器的基本控制形式。每一阶段的控制动作都是上一阶段控制动作的结果，或者按照环境或条件的变化来选择下一步的动作，在有的场合，甚至选择的动作根本与上一阶段动作的结果或环境条件无关。像这样，无论控制动作的顺序还是做什么动作都预先确定好了，这是顺序控制的特点。它的基础，就是基于逻辑电路的数字控制。还有一种将控制对象的参数如何随时间而变化预先就加以规定下来的程序控制，也是自动化机器

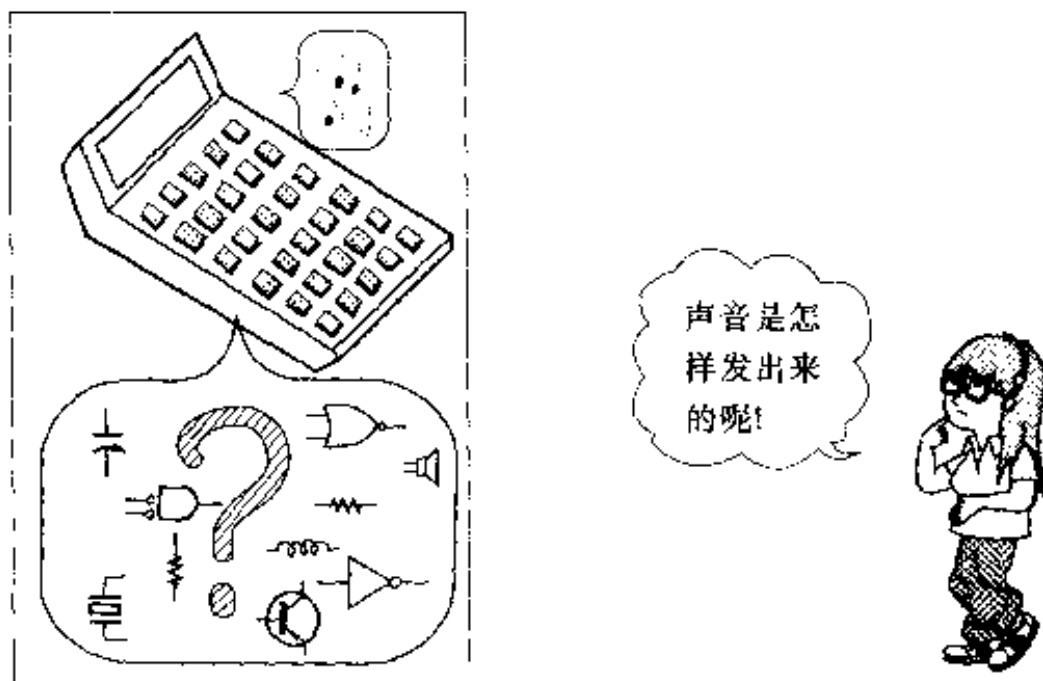


图 0.2 电子八音盒

中经常使用到的一种控制方法。

汽车是我们身边的一种高度自动化的机器。例如，我们来看它的发动机。在气缸盖上有一系列阀门，它们与各个活塞处在吸气、压缩、爆发和排气等不同行程的运动保持同步，严格按照一定的次序或开或闭。火花塞的点火装置也是如此，不过，它还需要根据发动机的转速和吸气部分的真空程度来控制点火时间，使之能在压缩行程上死点之前几度到几十度之间的范围作相应改变。为保持发动机总能得到最佳的混合气而有理想的功率输出，化油器也配有一个能自动进行调节的巧妙装置。

从八音盒的例子我们已经看到，用电子控制代替机械控制，能够极大地提高控制的灵活性。例如，在汽车上就可以用晶体管来代替原来的点火装置，而用电子喷油装置（EFI）来代替原来的化油器。

另外，发动机以外的组装机件更多地采用电气控制电路。有发电机的电压控制、车窗刮水器、信号灯、空气调节器的温度控制、制动的反联锁，或者油压、油温、冷却水量，水温、灯类的断线等警报系统。

在本书中，像这样常见的电子机器的具体数字控制电路，以机械工程专业的学生或技术工作者感到头痛的关键作为重点，对其基本的思路及作用原理作了简单说明。机械技术工作者把日常碰到的电子机械控制电路完全当作黑匣子考虑，只是利用就可以了，但是若能了解从按一下按钮到传动器动作的内部电路的结构和作用，是不是会有些安全感。并且，在开发采用电子控制的机械装置时，虽然达不到能设计电子电路本身，但对其电路的作用及特点如不能充分掌握，要真正灵活运用电子控制将是困难的，

## MEMO

这些控制是按预先设定的次序进行动作，当然，希望尽可能设计得到最佳状态，但要注意不是最佳化控制。

最近，将检测出的排气中的  $O_2$  和  $CO$  等输入给 EFI（电子式燃料喷射装置），利用微机进行燃料喷射量最佳化控制的汽车已试制出来。

这些是笔者多年经验得到的实际感受。本书如能使读者多少可以想像内部结构,对电路产生兴趣,作者将深感荣幸。

原来,自动机器的控制中最重要的-一点为利用计算机的顺序控制,但为进一步统一认识,在本书最后给出另外-一些好的参考书。

通常的机械中根据油空压回路、连杆结构或转矩等组成的顺序控制较多,这只是控制的能量形态不同,逻辑本身与电气顺序控制相同。如果考虑机械的简化、可靠性、制造成本等,一台自动机器则可根据各种能量形态,巧妙地利用控制也很重要。另外,如能活用传感器或者传动器的转换器,根据电气顺序控制可将较复杂的控制以快速响应速度进行控制。

从油空压回路或连杆机构的控制发展到电气控制,机械本身也在不断发生质的变化,其典型的例子可从飞机的发展来看。

自从1903年末,莱特兄弟在克提浩克丘陵上试飞飞行者1号机以来,飞机的操纵系统使用了传统的机械连杆结构、钢索或者油空压回路。进入20世纪60年代,随着自动着陆技术的开发,也对利用电气系统的操纵方式,即开发了由电气信号控制飞行(FBW)。与此同时,利用计算机使操纵的简易性得到飞速地提高。为避免静电、雷电等噪声引起的误动作,电气系统采用四重系统结构,并且利用光纤代替电线进行信号传送,就是说由光信号控制飞行(FBL)的技术也开发出来了。

只要能提高操纵的控制性能,即使牺牲点飞机形态本身的稳定性也可以,这样就能够选择飞机的最好飞行效率的结构、形态。采用这样的电路控制,开发具有被称为CCV的控制性能优先的结构、形态的飞机。控制技术的进步不仅只是机器的自动化,而且对其基本设计也产生影响。

这种发展若没有以电子计算机为中心的电路技术的进步是无希望的,但要实现CCV,必须从最基本的部件发动机开始,依靠

飞机的历史就是电子机械发展的绝好写照。



具有结构力学、流体力学等专业知识的技术工作者的力量，只有成为能自由地控制电路的机械技术人员才有可能发展。

从连杆运动经过 FBI 到 CCV 的技术革新开始渗透到整个机械工业，不仅是输送机器的无人化工场即以机器人等为代表的工作机械，而且包括能量机械等，对于这个领域的技术工作者或学生们而言，希望本书能成为对电子控制产生兴趣的契机。

### 名词解释

警报装置 annunciator; 利用蜂鸣器、铃等引起听觉注意的自动警报装置

顺序控制 sequential control; 源于 sequence 顺序

程序控制 program control; 源于 program 预定表

最佳化控制 optimizing control; 无论环境、条件怎样变化能经常得到最佳输出的控制; 源于 optimum 最佳条件

黑匣子 black box; 只注意机器的输入输出特性,不接触里面的细节,源于暗箱

传感器 sensor; 检测温度、压力、位置等的环境、条件并变换成电信号的元件; 源于 sense 感觉

传动器 actuator; 将信号能源变换为具体动作的装置

转换器 transducer; 信号能源的变换器

FBW fly by wire; 由电气信号操纵飞行

FBL fly by light; 由光信号操纵飞行

CCV control configured vehicle; 具有控制性能优先的结构、形态的飞机,运动性能优秀的飞机

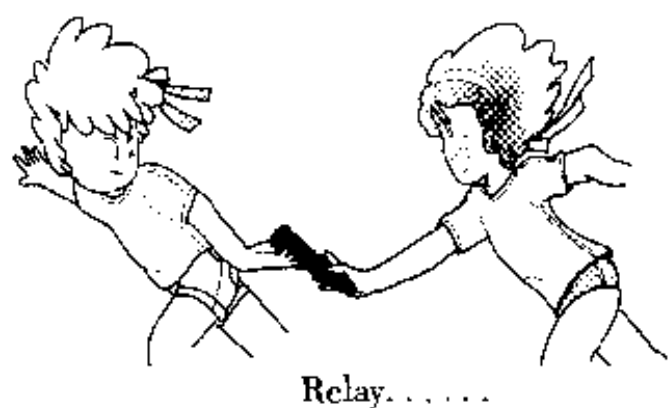
光纤、光缆 optical fiber; 传输光信号的线路





# 第 1 章

## 开关与控制



### 1.1 手动开关

#### 1.1.1 车灯的亮灭

讨论一下汽车上用蓄电池供电并控制车灯亮灭的电路（图 1.1）。如果用手指按压可动接点，使其与安装在绝缘板上的固定接点相触，则电路变为闭合状态，有电流流过电路，车灯被点亮。可动接点是由弹簧片支撑着，当手指放开时，接点恢复原位，电路又变为断开状态，车灯熄灭。

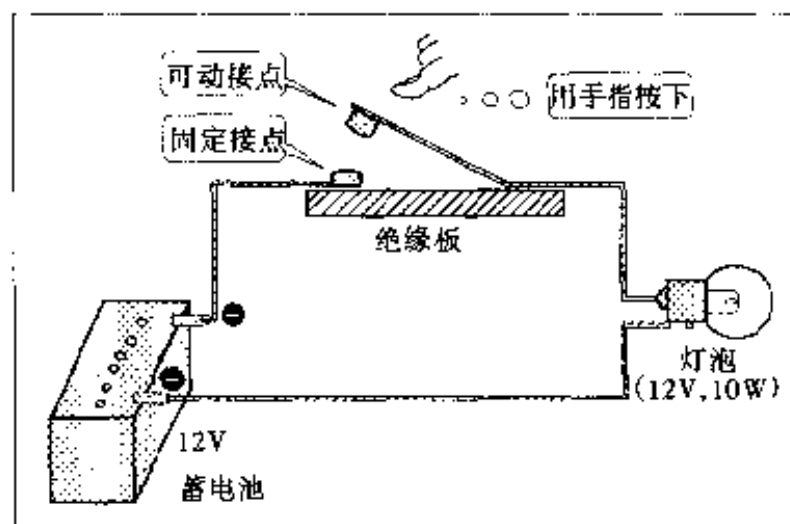


图 1.1 灯泡的亮灭控制

如上所述,与手指动作相对应(自动实行?),对车灯的亮灭进行控制,这是个典型的顺序控制实例。即使是非常复杂由计算机进行控制的自动化机械,也是通过如常见的键盘类手动开关,执行相关动作,将人类的意思传达给机械。这就是人-机接口(将人与机械互相连接的装置)所起的作用。

在图 1.1 中,若电池的电压 ( $E$ ) 为 12V,灯泡消耗电力为 10W,则利用公式

$$\text{电流}(I) \times \text{阻抗}(R) = \text{电压}(E) \quad (1.1)$$

$$\text{电流}(I) \times \text{电压}(E) = \text{功耗}(P) \quad (1.2)$$

可计算出,在正常状态下流过电路的电流为 0.83A,灯泡的阻抗为  $14.4\Omega$ 。这时,该电路中使用的开关的接点电流容量(可安全流过的最大电流)为 1A 也就足够了,绝缘板的耐受电压(不会引起绝缘破坏的最大电压)为 12V 也可以。但是,由于构成电路的开关开闭之时,瞬间会有大电流(突发电流)流过,或者会产生非常高的电压(浪涌电压),所以必须注意。

对于各种负载产生的突发电流的大小示例于图 1.2。

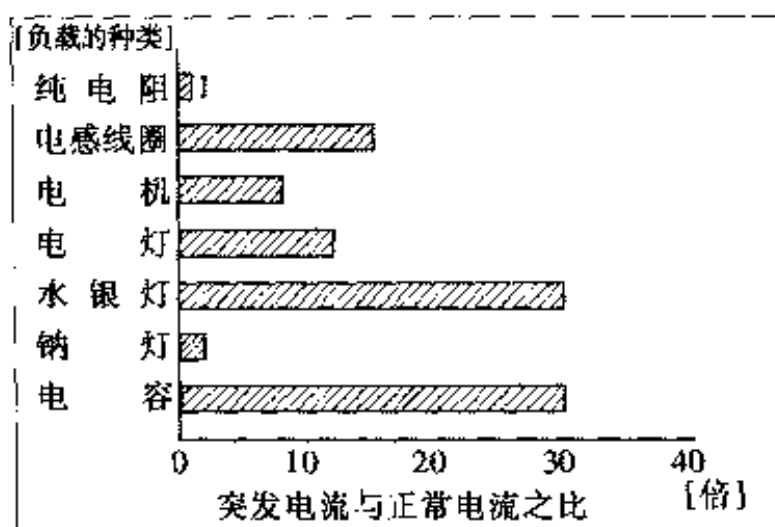


图 1.2 根据负载的种类列出突发电流大小的例子

### 1.1.2 接通与断开

对普通开关的接点不能用手指直接操作,如图 1.3 所示,要使用带有弹簧的绝缘操作手柄,将此手柄沿轴向押下的操作称为按下按钮开关。将按钮按下时电路导通的情况称为导通式接点(a

## 举例

即使在如图 1.1 所示的那样非常普通的电路中,当开关闭合瞬间,流过的电流也比上述的 0.83A 大得多,这一点应引起注意。为什么会这样呢?这是由于灯丝处于冷却状态时,比其在亮灯状态时的阻抗要小的缘故。

在亮灯状态下,钨丝的温度可高达 2000℃ 以上,灯丝的阻抗如所示那样为 14.4Ω,为求出其突发电流,必须知道常温下灯丝的阻抗。金属的电气阻抗  $R$  一般随温度的上升而增加,记为

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T) \quad (1.3)$$

其中  $R_0$  是 0℃ 时的阻抗,  $\alpha$  为温度系数,  $T$  为温度 [℃]。由于钨丝的  $\alpha$  为  $45 \times 10^{-4}$ ,利用式 (1.3),可求出 20℃ 时的阻抗  $R(20)$  与 2000℃ 时的阻抗  $R(2000)$  之比,约为 1/10。因此,该电路中,当开关关闭时的突发电流取决于电池内阻与线路阻抗等因素,为正常状态的 10 倍,可达 8A 左右。



接点或 NO 接点), 而将平常处于闭合状态, 按下按钮后变为开路状态的接点称为断开式接点 (b 接点或 NC 接点)。

这种开关, 按下后一松手就会恢复到原来的位置, 因此称为瞬时型开关。若按下后, 按钮即被固定在按下的位置并不返回原位则被称为锁定型开关。此外还有交替式开关, 即当按钮与可动

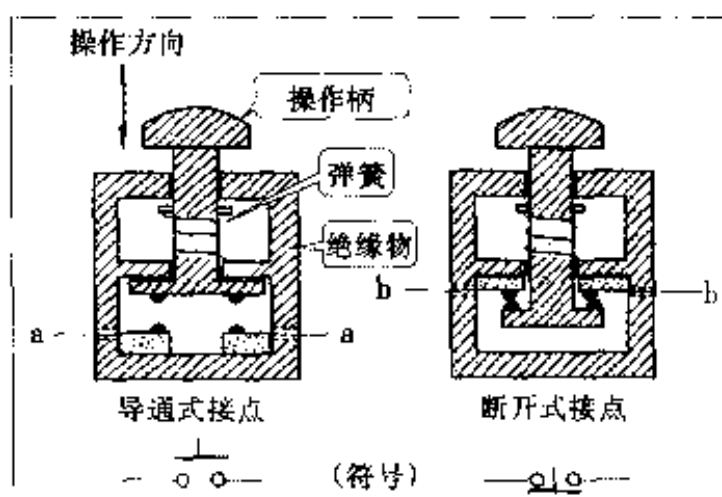


图 1.3 按钮式开关

接点分开时,按一下,变为导通(或断开)状态并保持住,再按一下,就变为相反的断开(或导通)状态并保持住。

为使这三种类型开关的动作状态简明易懂,可如图 1.4 所示,横轴为时间轴,这种图又称为时序图,为了把握顺序控制用电路的动作状态,时序图是经常使用的重要图形。

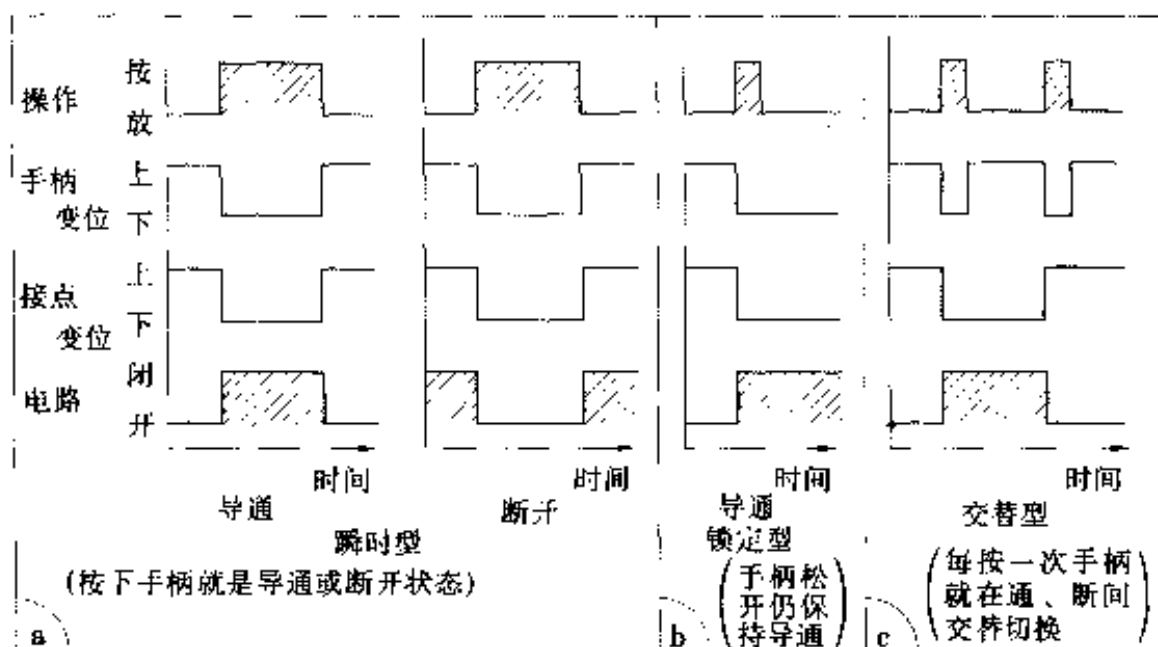


图 1.4 手柄的操作与电路的开闭状态

### 1.1.3 切换开关

上述开关只能控制一个电路的通断,还有在一个操作手柄上有几个 a 或 b 接点组合连动的开关形式。

如图 1.5 所示,使用 a 接点与 b 接点连动开关,可以让 2 个灯泡交替点亮,其时序图如图 1.6 所示。

像这样在两种电路间来回切换的场合,使用具有共同接点(c 接点或 COM 接点)的跳动式开关更方便些,通常在与手柄轴成直角方向进行瞬动操作。另外,若在众多接点间进行切换时,可使用旋转手柄操作的旋柄开关。

若将切换开关当成 2 个来使用,就可以从 2 个不同的地方对同一盏灯泡独立进行亮灭控制(如图 1.7)。若开关  $S_1$  与  $S_2$  同时倒向 A 或 B,则点亮灯泡,而当它们倒向不同的方向,灯泡就灭了。看一下时序图或动作表就很清楚了。这种电路称为 3 路开关电路,它常实用于控制楼道灯的楼上、楼下的开关,或作为房屋电灯

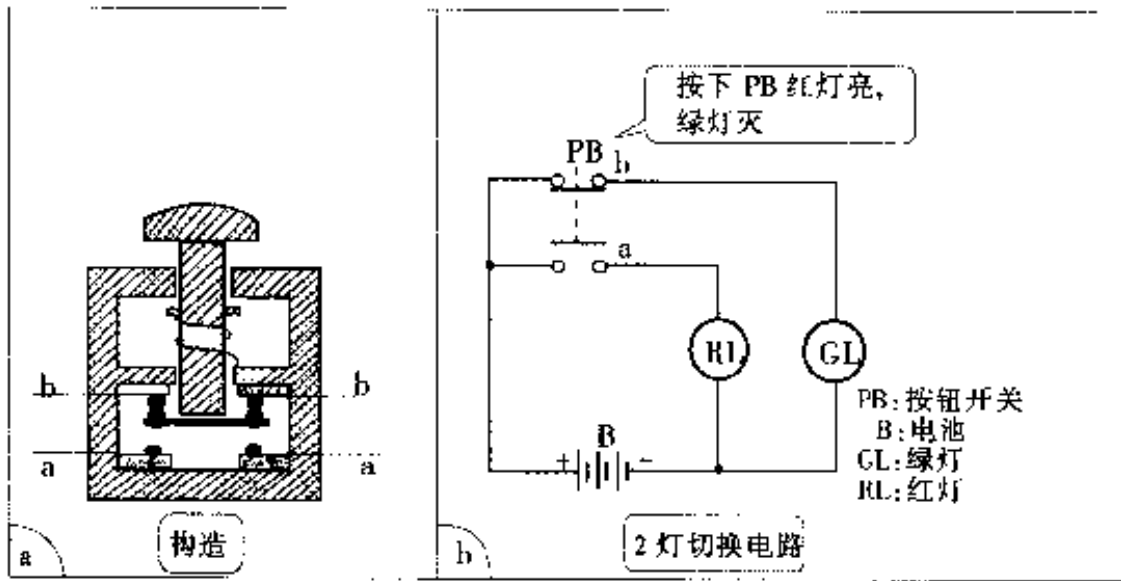


图 1.5 连动开关(a 为导通式接点, b 为断开式接点)

的室内外开关使用。

### 1.1.4 流体系与流路切换器

与电气电路类似，为控制流体回路的开闭或者流路的切换，可使用如图 1.8 所示的装置。为了不让流体(液、气)逸出，必须使管线保持严丝合缝，于是不得不采用比电路中所用更复杂的设备。在电路中之所以能使用

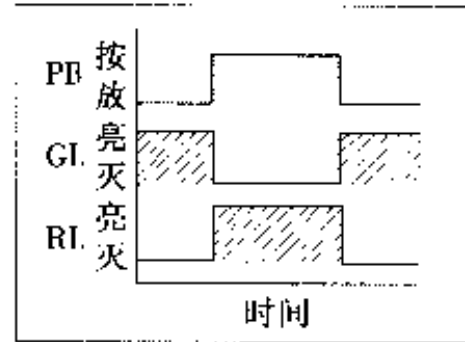


图 1.6 2 灯切换电路的时序图

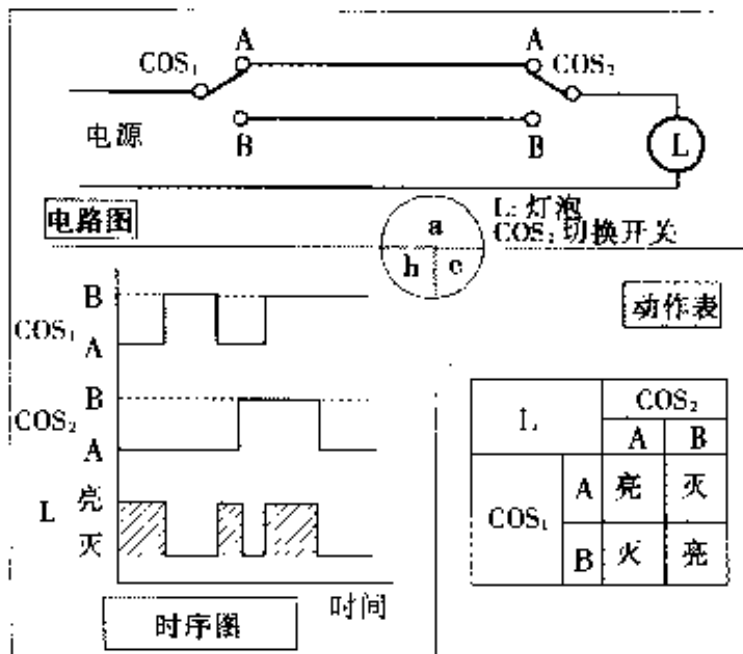


图 1.7 从 2 处亮灭楼道灯的控制电路

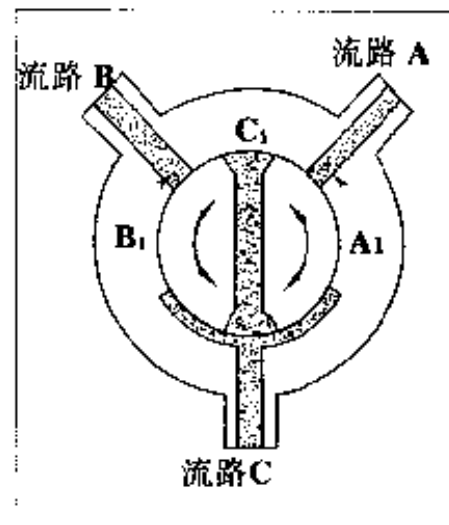


图 1.8 旋钮型流路切换器  
(将 C<sub>1</sub> 转向 A<sub>1</sub> 或 B<sub>1</sub>, 则流路 A 或 B 的流体流向共同流路 C)

开关方便地控制电路的通断,有赖于其与空气有非常良好的绝缘。类似地,若考虑在海水中组成电路,就应当注意与海水的绝缘性。

另外,为控制旋转机械飞轮传送系统的开闭,常用离合器,这时就利用了空气的良好润滑性以及离合器片的摩擦性能。

### REMEMBER

按照能量形态的不同,比较一下传送量的大小。取直径相同(4mm)的铜线、不锈钢管以及钢丝绳,设其输送的能量分别为电气(200V, 50A),流体压力(20MPa × 10m/s)以及旋转扭矩(100Nm × 6000rpm),转换为相同单位能量的计算结果皆为 $10^4\text{J/s}$ 左右(大约可使1杯水在10秒钟内沸腾所用的能量),彼此间无太大差别。

信息传输  
是这么回事呀!



### 名词解释

- 键盘 key board; 开关的操作盘,源于钢琴的键盘  
 人机接口 man-machine interface; 将人的意志传送给机械的设备  
 突发电流 rushing current; 开关接入瞬间流过的电流  
 浪涌电压 surging voltage; 异常电压  
 阻抗 impedance; 电路中电压与电流之比  
 导通式接点 make contact; 执行由断开变为导通动作的接点  
 关断式接点 break contact; 执行由导通变为断开动作的接点  
 瞬间、短暂 momentary  
 锁定 lock  
 交替 alternate  
 时序图 time chart  
 跳动式开关 toggle switch  
 瞬动开关 snap action  
 NO 接点 常开接点 normally open point  
 NC 接点 常联接点 normally contact point  
 COM 接点 共同接点 common point

## 1.2 电磁继电器

### 1.2.1 电磁铁の利用

上节所述的开关是用手指操作的,而利用电磁铁可代替手指进行电气操作,这就是电磁继电器(如图 1.9)

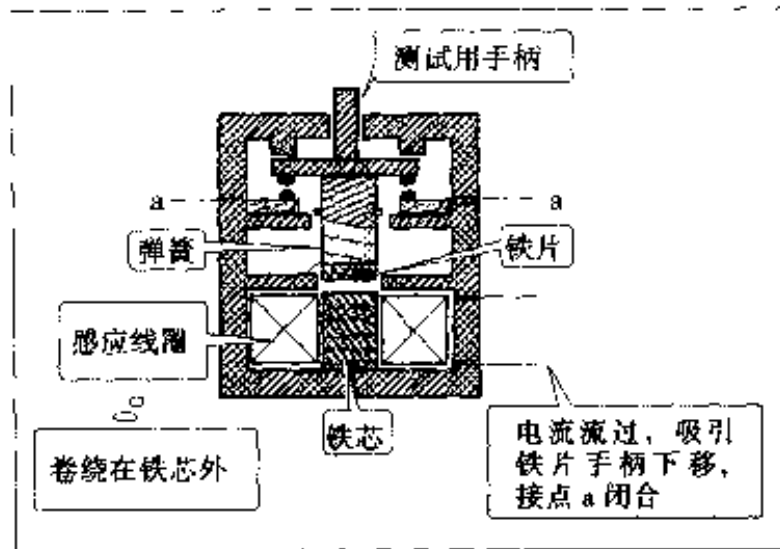


图 1.9 电磁继电器

由于是通过电信号对电路的开闭进行控制的,所以具有如下特长:

- ① 可以用一个手动开关对几个电路以及机器实行控制
- ② 能从远距离的场所进行操作
- ③ 用小电流对大电流进行控制(放大作用)

因此无触点继电器是顺序控制电路中非常重要的元件之一,有数量众多各种各样类型的继电器在起着重要作用。

总之,只要电磁铁上有电流通过,就可以使电气接点动作。其时序图如图 1.10 所示。从电磁铁线圈上有电流开始流过,到接点完全闭合需要若干时间(通常有几毫秒),称其为延迟时间(lagtime)。在高速控制的情况下需格外注意,而采用下节所述的无触点继电器,该延迟时间就非常小。

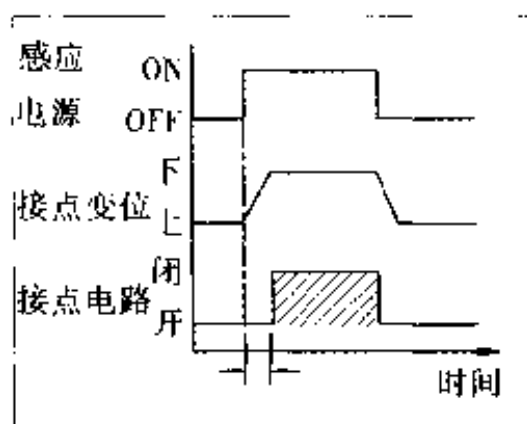


图 1.10 继电器的时序图

电气动作  
也需要时  
间啊!



### 1.2.2 保持电路

即使是继电器，也设有机械锁定机构，以使电路持续闭合状态。与上节类似，考察一下灯泡亮灭电路。如图 1.11 所示，按下主开关，继电器 RL 上有电流通过（励磁），接点 A 闭合，点亮灯泡。与此同时，由于接点 B 也闭合了，这时即使放开按钮  $PB_1$ ，其处于断

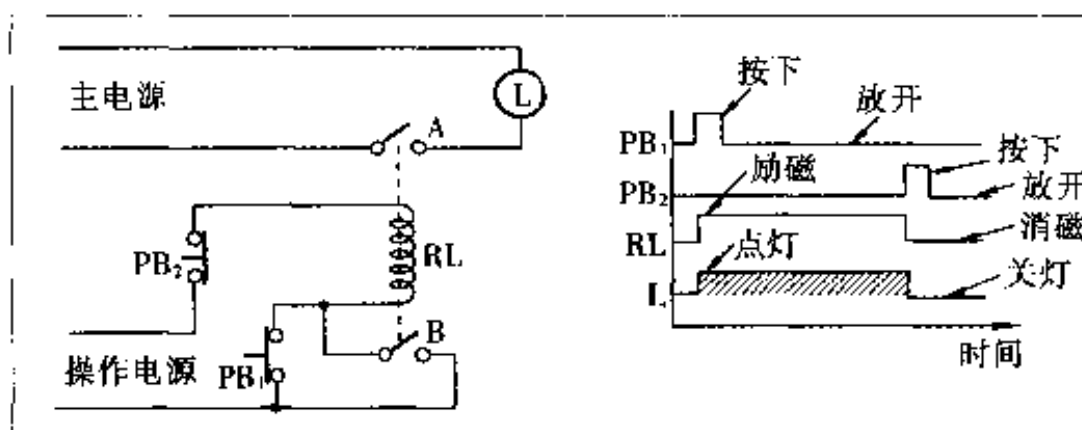


图 1.11 继电器的保持电路

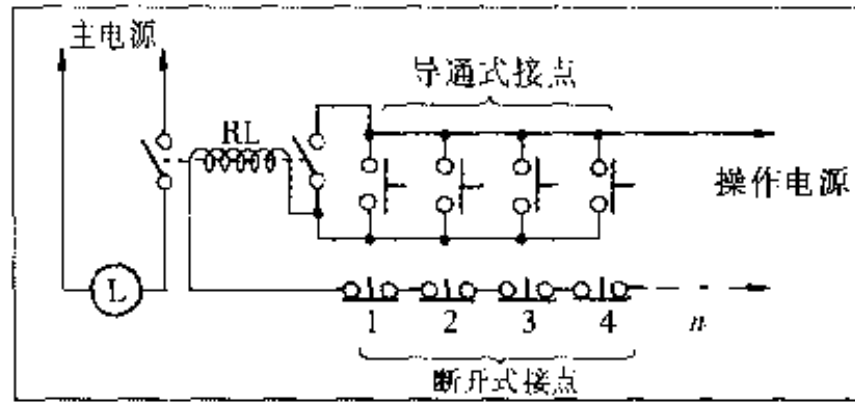
开状态，在继电器上还会有电流持续流过，灯泡依然亮着。关灯过程是按下关断式开关  $PB_2$ ，切断继电器的电流（消磁）。我们将驱动继电器的电路称为操作电路或控制电路，将点亮灯泡的电路称为主电路，它们各自的电源称为操作电源和主电源。当然，操作电源与主电源相同或不同均可。

即使手放开，  
开关仍闭合，  
是因为有记  
忆电路。





由于操作电路与主电路可以分离，就像上节楼道灯一例那样，从几个地方进行亮灭是非常容易的(如图 1.12)。由于在 3 处以上的场合不使用继电器，所以利用切换开关电路也很实用(参照第 3 章)。



(按下任何一个导通式接点灯泡都亮)  
(按下任何一个断开式接点灯泡都灭)

图 1.12 从多个场所的亮灭控制

### 1.2.3 温度继电器

温度继电器是一种在主电路一旦超过负荷(电流过大)时，能够自动断开电磁继电器，从而保护载荷机器的装置。通常，人们是将它与用来开关公共电源(100V 或 200V，单相或三相)的电磁继电器组合起来一起使用。

温度继电器的结构和工作原理如图 1.13 所示。主电路中的电流流过缠绕在双金属片上的一个线圈，双金属片受到加热而产生

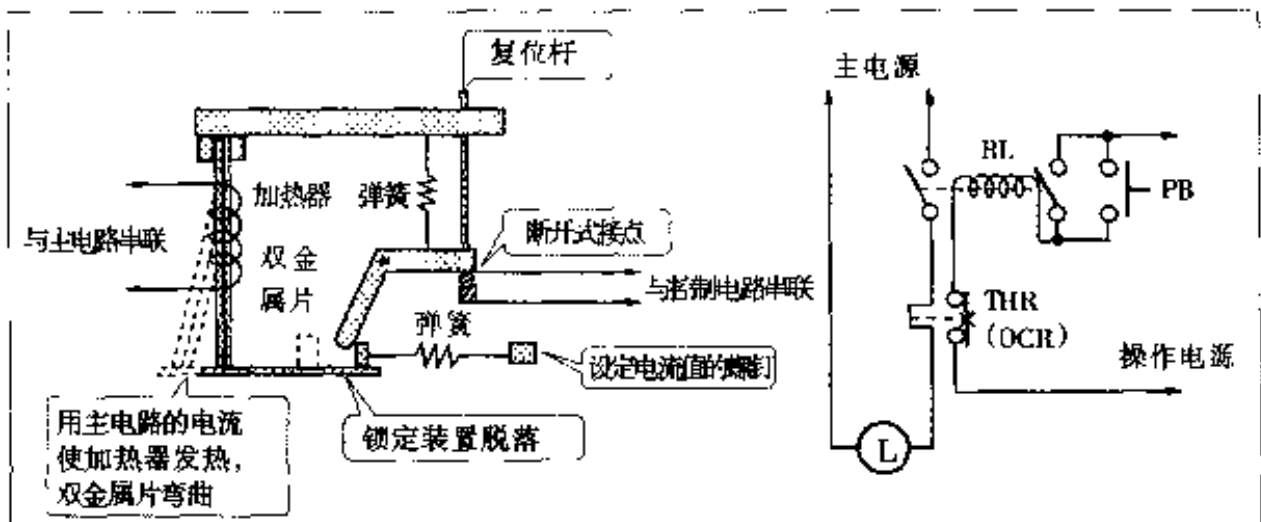


图 1.13 温度继电器

生应力。当这个应力超过某个预定值时,有一个锁扣会脱开,切断控制电路的电流,从而使主电路断开。若要再次使用电磁继电器,需要按下复位杆,挂上锁扣。在电路图中,温度继电器用符号 THR 或 OCR 来表示。

温度继电器由于是对产生的热量作出响应,因此不会在有浪涌电流流过时产生动作,其动作只取决于流过负载的恒定电流,所以是一种非常好的保护机器的设备。

#### 1.2.4 电磁泵与电磁离合器

同电路中的开关一样,我们将前节介绍的手动泵或手动离合器改为利用线圈通过电磁方式来驱动,就得到电磁泵或电磁离合器。它们在传动装置的控制元件或电路同其他动力电路的连接中,起着非常重要的作用。此外,在根据油压来进行顺序控制的动力电路中,还制成了通过监测油压来控制开合的油压泵。

#### 名词解释

线圈 solenoid

延迟时间 lag time

温度继电器 thermal relay; (THR)

双金属片 bimetal; 将热膨胀系数大小不同的 2 种金属片,做成一条合金片,温度变化时,会产生形变应力

过电流保护继电器 OCR over current relay

### 1.3 无触点继电器

#### 1.3.1 二极管开关

**NOTE** 金属,绝缘体,半导体

如果从固体物理角度来看,固体就是由那些价电子的能量都较低的原子结合而成的物质。在固体中是否有电流流动,取决于是否有价电子处于来回自由移动状态(是否有自由电子)。在图 1.14 中表示出了价电子的能量状态模式图。

(a) 金属中,价电子带与传导带互相重合,价电子能在固体中自由

地来回移动。

(b) 绝缘体中,价电子带被不能动弹的电子完全充满,在其上层的传导带中没有电子,禁止带的间隔  $E_g$  值也相当大。

(c) 半导体中,间隔(gap)  $E_g$  值不是太大,价电子带的电子由于被热振动所激励而进入传导带,从而引起一定程度的电气传导性。此外,这时在价电子带残留出一些正电荷的孔洞,即空穴,这也有助于电气传导。这些电子与空穴称为载流子(carrier),这样的半导体叫做真正半导体。

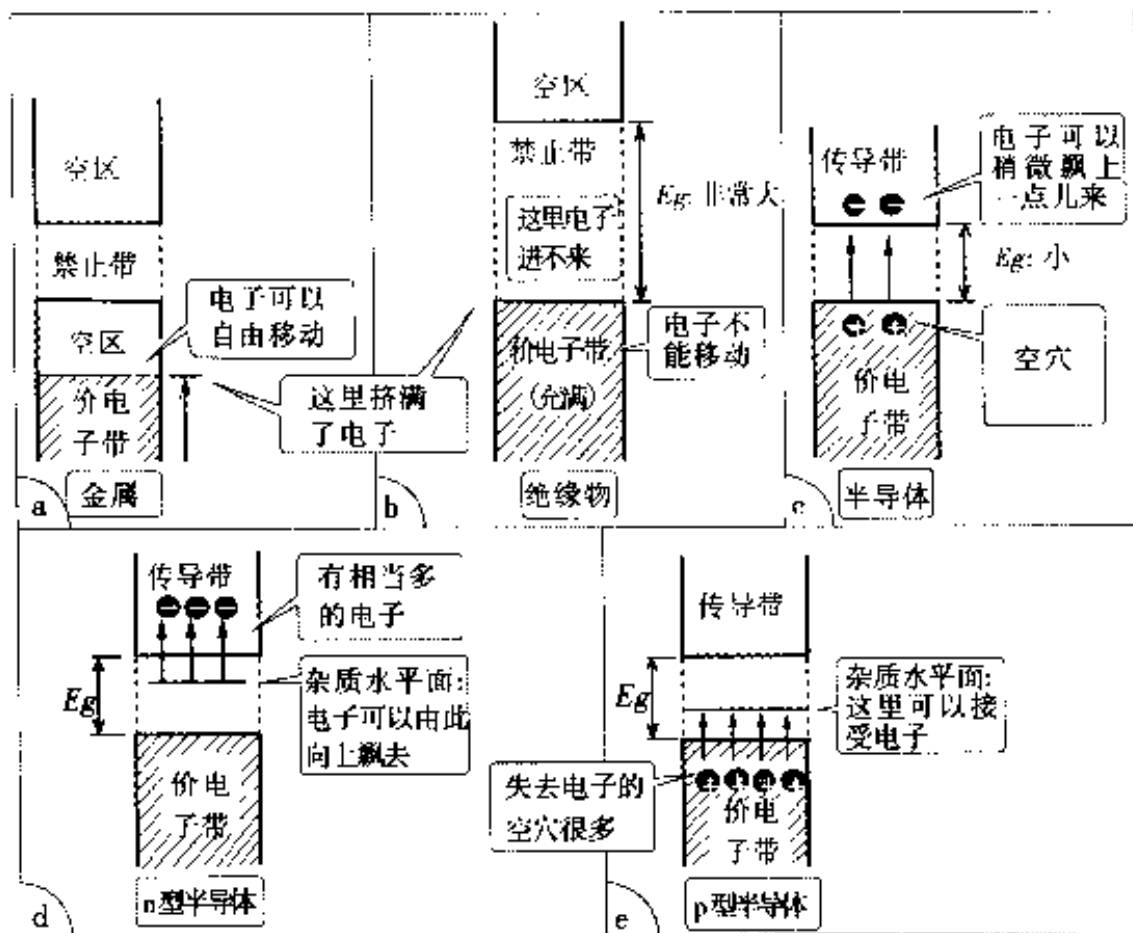


图 1.14 固体的能量带模式图

(d) 在真正半导体中掺入价电子较多的杂质(施主),把许多电子注入传导带称为 n 型半导体。这些电子有助于电气传导。

(e) 把价电子少的杂质(受主)掺入而造成更多的空穴称为 p 型半导体。这些空穴也有利于电气传导。

半导体中的载流子数量随温度、压力或其他环境条件等不同会有很大变化。因此,如后面几章所述那样,对各种各样物理量的检测或用作传感器等,半导体有着广泛的用途。

有 2 种运送电气的东西



迄今为止所讨论的电路开闭方式均为,金属接点接触时电流流过,离开时电流就被切断。将这些开关称为有触点开关或有触点继电器,将使用这些开关的电路称为有触点时序电路。

利用半导体技术,可以代替完成接点的接触、分离动作,这主要是由于半导体元件自身的电气阻抗会随着电流流过方向的不同而发生极其明显的变化。

如图 1.15 所示,将 p 型半导体(含有许多正性空穴)与 n 型半导体(含有许多负性电子)相结合可以组成称为 p-n 结二极管的半导体元件。在这种二极管中,如果有电流流过(如图 1.16),根据电流的方向会有两种情况,(a)正方向,电流顺畅地流过;(b)反方向,几乎没有电流流过。也就是说,根据电路加在二极管两端电压极性的正反不同,二极管可在导通与关断两种状态中切换,即二极管有开关作用。

例如,一般常用的二极管 SD-34,其正向阻抗为  $100\Omega$ (正向电压 1V 时),而反向阻抗为  $1M\Omega$ ,即导通状态与关断状态阻抗相差  $10^4$ 。其正向及反向的电压-电流特性如图 1.17 所示。特别需要注意的是,在低电压区域(锗二极管 0.2V 以下,硅二极管 0.7V

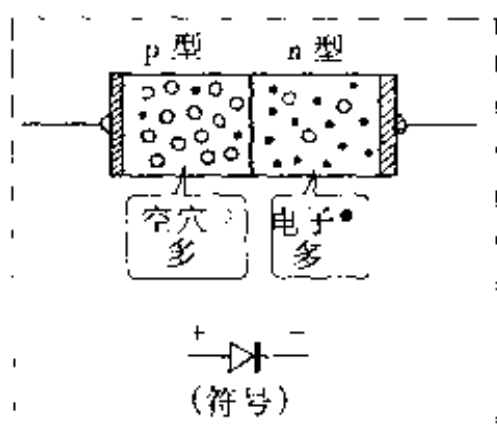


图 1.15 p-n 结二极管

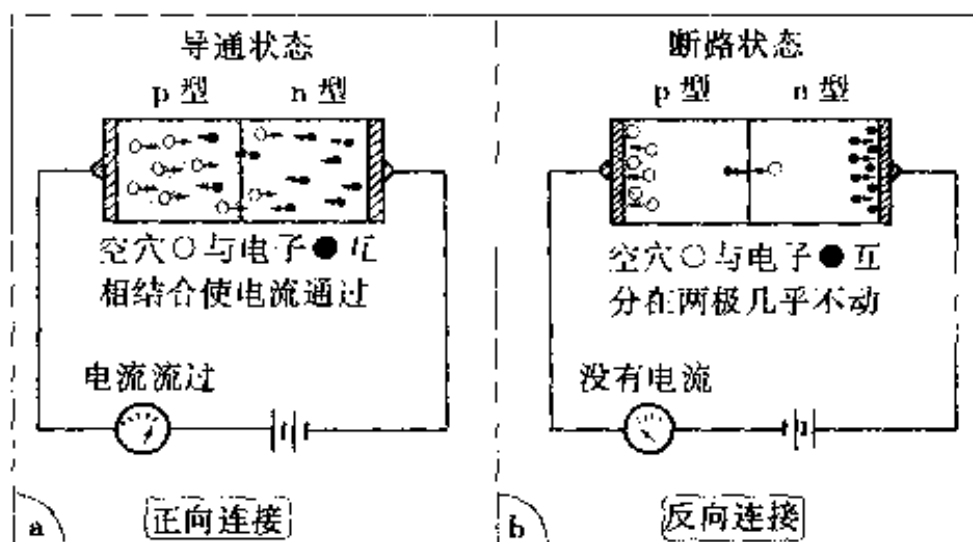


图 1.16 二极管的通、断状态

以下) 正反向阻抗之比并非很大。另外, 半导体元件都具有共通性, 对其正向允许电流(能安全流过的最大电流)以及反向耐受电压(绝缘不被破坏的最大耐受电压)也应十分注意。

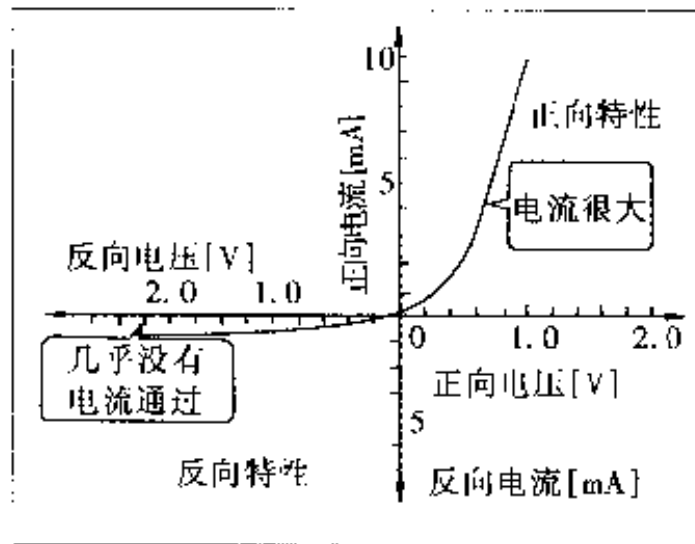


图 1.17 二极管的电压 - 电流特性示例

开关二极管可直接用于控制电流方向, 即用于整流电路中。如图 1.18。图 1.18(a)为半波整流电路, 仅交流输入电压的正半

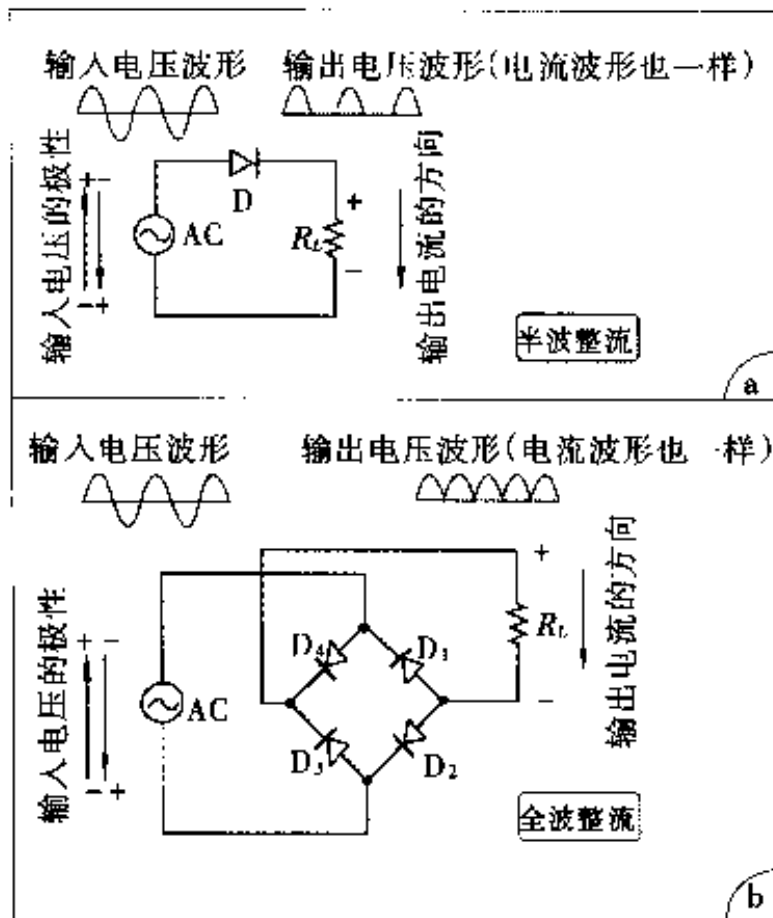


图 1.18 二极管整流电路

周使电路处于闭合状态,在输出端的负载  $R_L$  上只有正向电流通过。图 1.18(b) 为全波整流电路,交流电压的正负半周均可向负载输出电流,提高了整流效率。

使用二极管还可以对音频或高频信号进行处理(信号由电压变化来传送),如图 1.19 所示。控制端子  $Y_1$ 、 $Y_2$  间的电压为 0V 时,输入信号的正半周部分被二极管  $D_1$  切除,只有负半周部分通过,接着负半周部分又被二极管  $D_2$  切除,在输出端没有任何信号。在  $Y_1$ 、 $Y_2$  间若加上控制电压, $D_1$  及  $D_2$  均为正向偏压电流可以流过,电路处于闭合导通状态,信号可以在输出端取出。

在顺序控制中,开关二极管不仅直接用于电路的开闭,更多地还是用在吸收浪涌电压或是用于构成逻辑电路的基本单元。与继电器相比其响应速度要快得多,并且具有小型、轻量、低功耗等特点,通过集成化(将几十个二极管组合为一个部件)可以很方便地构成复杂电路。另一方面,对其弱点也必须注意,即易因噪音信号而误动作,或因过热、电击等造成损伤。

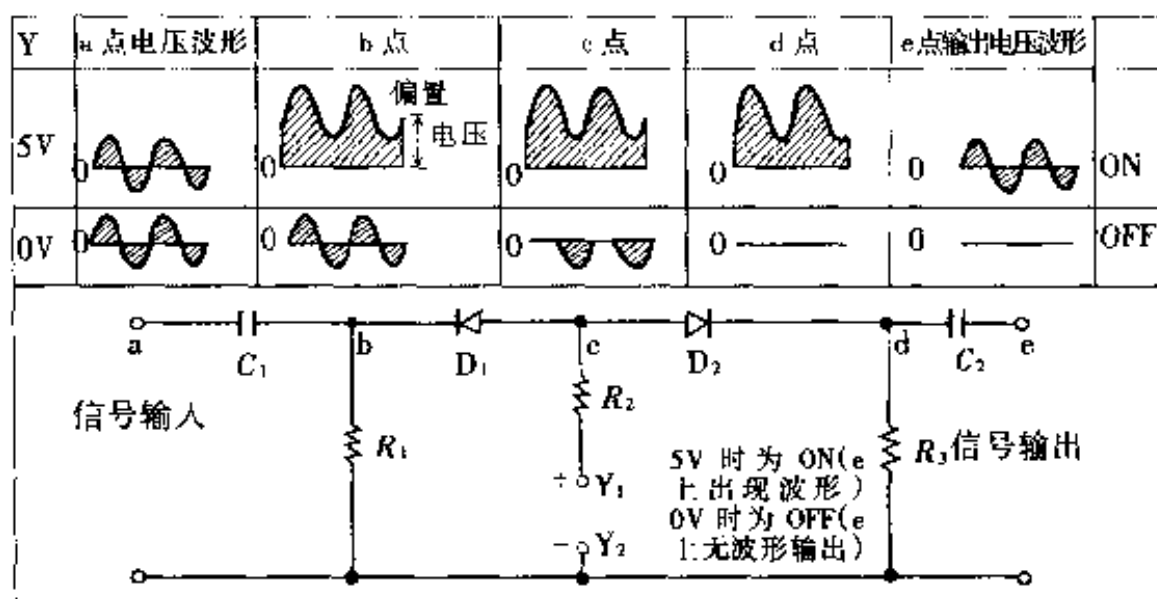


图 1.19 二极管开关电路

### 1.3.2 晶体管开关

将 n 型与 p 型半导体如图 1.20 所示,按 npn 的顺序相接合,就组成了 npn 型双极晶体管。由于发射极与集电极间正向与反向串联,所以在负载  $R_L$  上没有电流流过(关断状态)。若将开关  $S_1$

关闭，则在基极与发射极间有正向直流电流（偏置基极电流）流过，电子注入基极部分，由于电子可由集电极补给，发射极与集电极间变为导通状态，所以  $R_L$  上有负载电流（集电极电流）流过。这些动作的时序图如图 1.21 所示。基极的输入电压与集电极的输出电压相位相反，即输入电压  $E_B$  为高 (①的状态) 时，输出电压  $E_C$  为低 (②的状态)，这点也须注意。

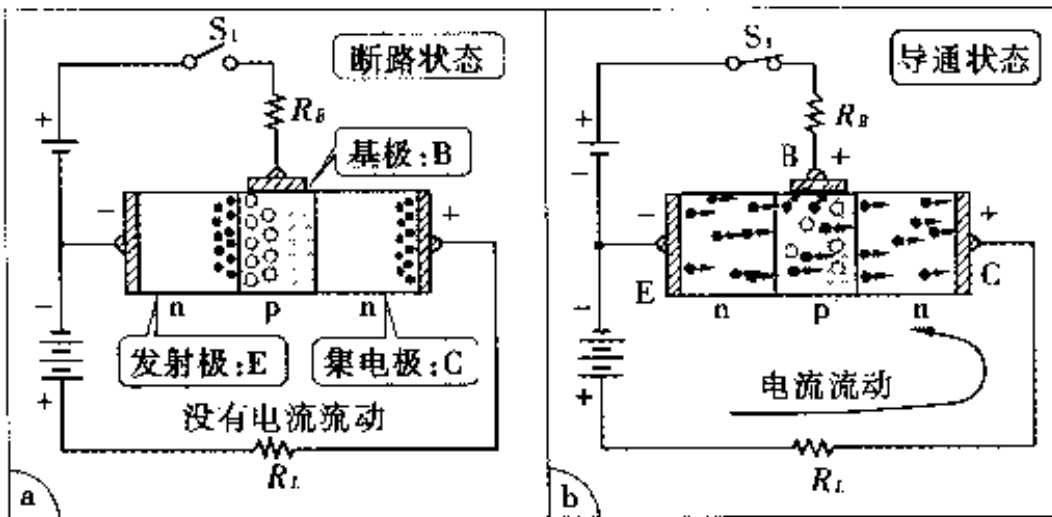


图 1.20 晶体管的开关动作

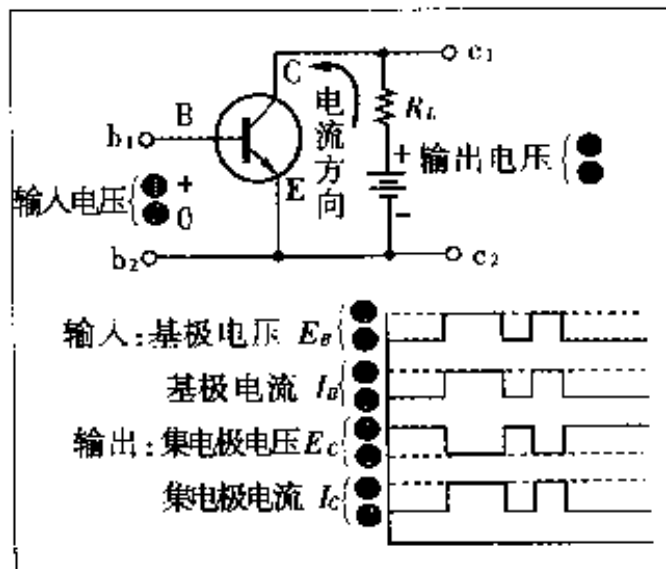


图 1.21 npn 晶体管开关电路

pnp 晶体管的情况，如图 1.22 所示，除电流方向完全相反以外，其它动作与 npn 型完全一样。

考虑一下下述情况，即发射极与集电极间为主电路导通式接点，发射极与基极间为操作电路的电磁线圈，可动接点为永久磁

铁时，该电路就与上节的电磁继电器具有类似性，能够完成同样的动作(如图 1.23)，通常的晶体管能够做到集电极电流比基极电流放大 100 倍，可以既当继电器用又具有很好的放大作用。

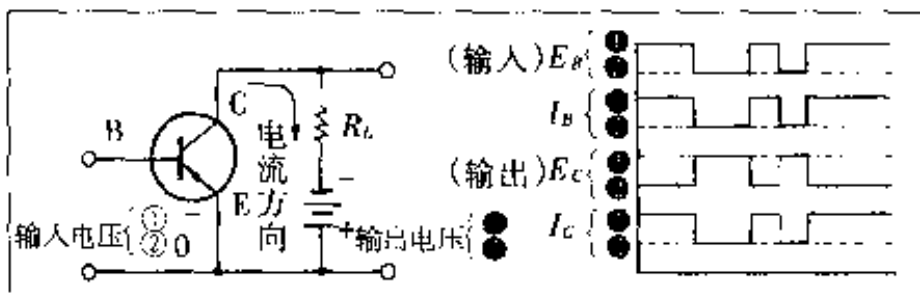


图 1.22 pnp 晶体管的开关电路

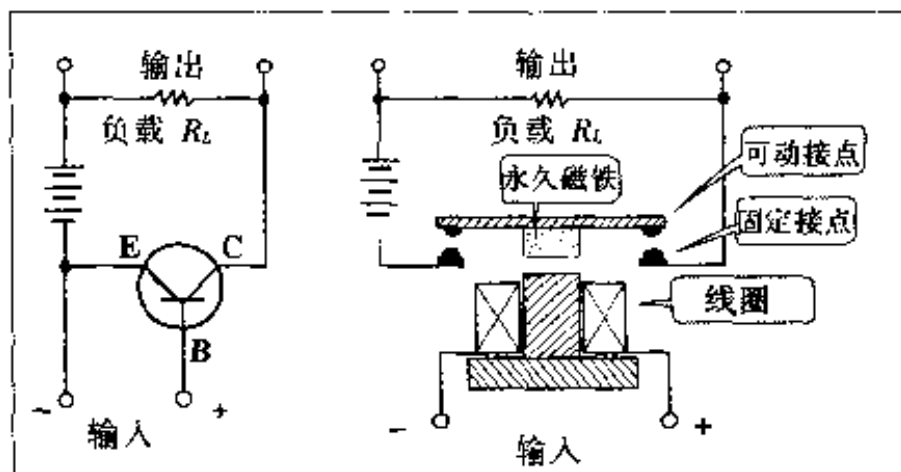


图 1.23 晶体管与继电器的相似性

(输入端有小电流流过, 负载  $R_L$  上就有大电流流过)

### MEMO

显然,与晶体管作为开关元件相比,更多的还是用于电气信号的线性放大器件。为了说明晶体管的放大原理,将图 1.23 中的继电器触点用振动片和炭精粒作成的炭精式话筒代替来讨论(如图 1.24)。与输入信号强弱相对应,通过话筒的振动片压缩炭精粒,引起接触阻抗发生变化,使输出电路的电流产生相应变化。从而,在负载阻抗

中间加入的机械动作是放大电路呀!





$R_L$  的两端出现与输入信号波形一致但被放大的输出信号。这种情况与晶体管不一样的是,可以自由选择永久磁铁磁极的朝向,没有正反相位的不同。在电子管也很少的过去的年代中,依据这种原理,作成机械放大器来使用。

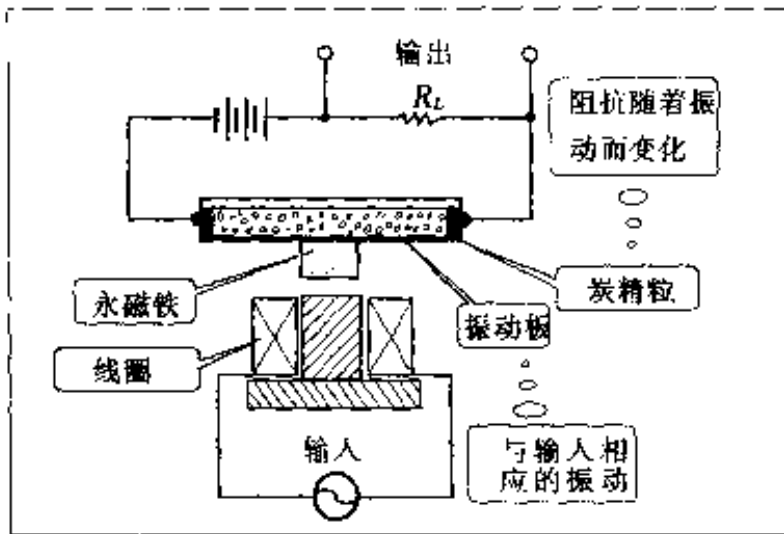


图 1.24 机械式放大器

利用晶体管继电器的放大作用,可在汽油发动机的点火线路中,断路器与点火线圈间插入晶体管,如图 1.25 所示,这样做,流过断路器上的电流很小,可以显著提高可靠性并延长断路器的使用寿命。

晶体管振子时钟是开关晶体管另一个巧妙应用实例。如图 1.26 所示,振子上加有永久磁铁,其两侧分别设有电磁线圈,并与晶体管的基极与集电极相接。振子向左方移动,磁铁接近基极侧的搜索线圈时,在基极加上线圈产生的负电压,这时基极为负偏压,集电极没有电流流过。振子向右振动远离基极侧的线圈时,产生反向电动势而使基极电压为正向偏压,集电极有电流流过,此时集电极的吸引线圈产生磁场并吸引磁铁接通集电极电路。这样,在与振子周期同步的一定的外力作用下,振

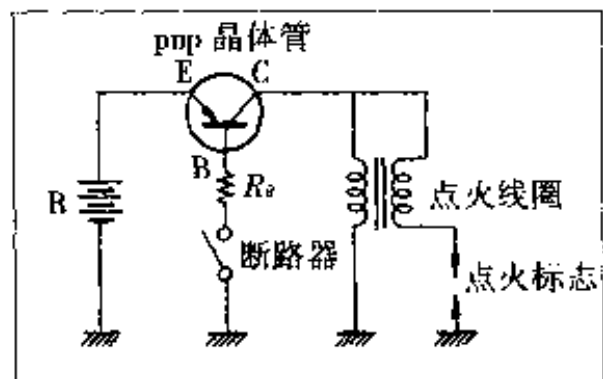


图 1.25 晶体管点火装置

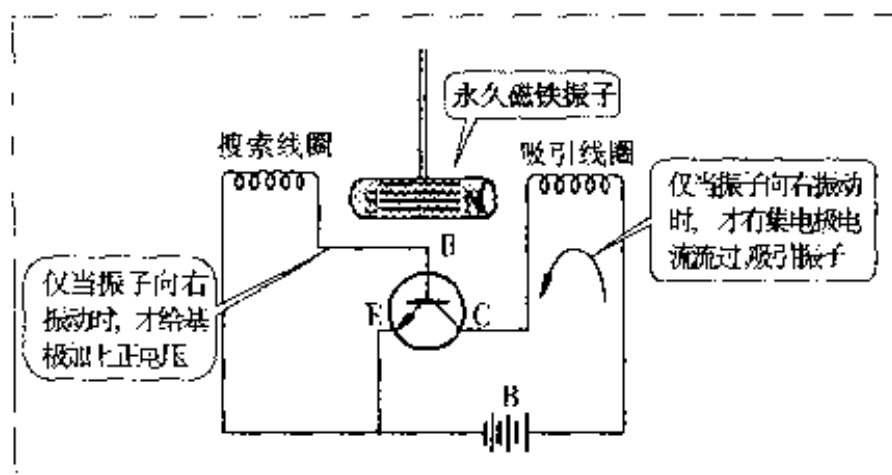


图 1.26 晶体管式振子时钟

子能够按一定频率持续振动。其原理与水晶振动或者叉振动等是相同的,也是一种用本身的机械共振频率控制的振荡电路。

与上述双极晶体管动作原理不一样的放大电路单元,是场效应晶体管(FET)。它是用电场对电流进行控制(开关),电气特性与电子管的动作相近。由于其种类非常多,所以每种元件的特征、用法,在后面章节中通过具体电路举例说明,本节仅对其典型动作原理给以介绍。

在 p 型半导体的基片上面扩散上施主(含多数电子)杂质,形成 n 型的源极(S)与漏极(D),如图 1.27 所示,在绝缘的氧化层上扩散上金属薄层引出栅极(G)(也可称为门极)。如果在栅极与源极之间加上正向电压,则紧靠栅极下面的基片部分产生负的诱导电荷,形成 n 型沟道有漏极电流流过,元件变为导通状态(称为增

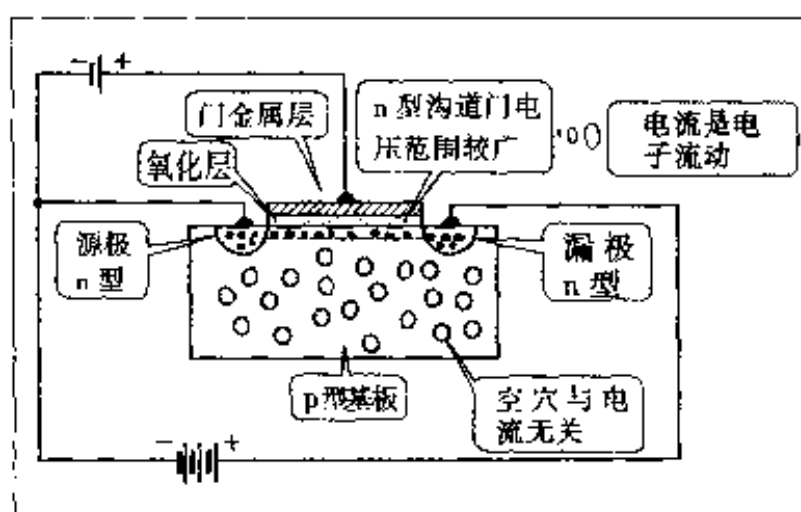


图 1.27 n 沟道 MOS-FET

强型,与 a 接点等价)。将这种元件叫做 MOS 型 FET(金属-氧化物-半导体场效应管),与双极型晶体管相比,其输入阻抗非常高(在栅极加上输入电压时,流过的输入电流非常微弱),是适用于低功耗的集成电路。

若对栅极选用适当的金属层,利用其表面电位差,即使输入电压为 0 时,也能形成 n 型沟道。这时在栅极加上负偏压,则源-漏极间就会处于关断状态(称为耗尽层,与 b 接点等价)。

在 n 型基片上面扩散上受主(含空穴多)杂质,作成 p 型源极与漏极,形成 p 沟道,除电流方向相反外,其余完全相同。最近,又有一种 C-MOS 型 FET 被制造出来,它是将 n 沟道与 p 沟道做一个器件里,是一种性能很好的开关元件,称为互补-MOS FET,正被广泛使用着。但是,与双极晶体管相比较,在开关速度方面,FET 稍处劣势。

### NOTE 开关时间

即使是无触点开关,对于输入信号的响应也不能马上在输出端得到,有响应快慢的不同和有触点继电器同样会产生若干时间上的延迟。图 1.28 表示出在晶体管开关电路中,与输入信号波形相应的输出波形。其中延迟时间  $T_d$  与上升时间  $T_r$  之和为导通所需要的时间  $T_{on}$ ,存储时间  $T_s$  与下降时间  $T_f$  之和为关断所需时间  $T_{off}$ 。全部开关时间为二者之

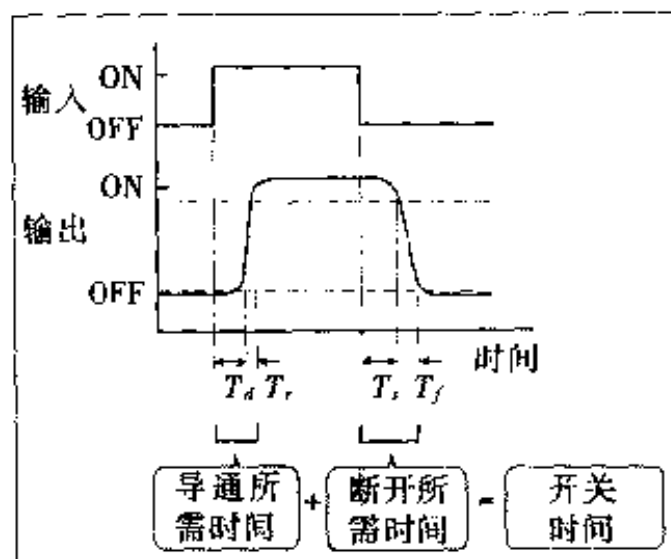


图 1.28 开关晶体管的输出波形

和,用  $T_{on} + T_{off}$  来表示。

在图 1.29 中,给出了顺序电路中经常使用的各种元器件的开关时间。一般来说,即使是相同的元件,耗电大的开关时间短,省能源的,响应时间慢。

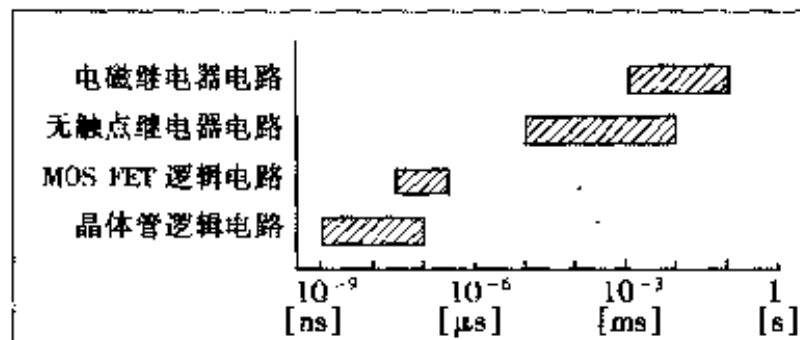


图 1.29 各种开关的响应时间

### 1.3.3 可控硅开关

作为电力控制用的无触点继电器,经常使用可控硅元件,它是将 p 型及 n 型半导体,按 pnpn 的顺序组成 4 层结构的半导体元件(如图 1.30)。在阳极(A)上即使加上正电压,由于其 4 层构造的中间含有反向接合的 np 结,故也没有电流流过。这时若有电流供给控制触发极(G),则与之相连的 np 结变为导通状态(将其当作 npn 接合的晶体管来看),可控硅也变成导通状态。这就意味着,可以用控制极电流对从阳极到阴极(K)的主电流进行开关控制。但是,与晶体管不同的是,一旦主电路变为导通状态,控制电流即使变为 0,主电流仍可继续流过。

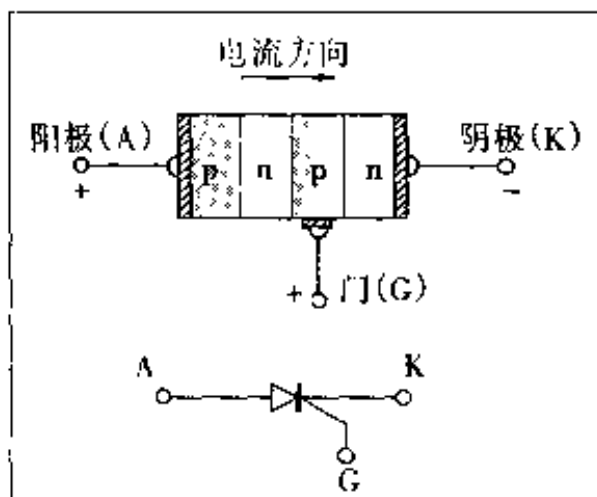


图 1.30 可控硅(SCR)

因此,可控硅是一种具有保持功能的继电器。

可以将可控硅看作为分别处于阳极侧与阴极侧等价的 pnp 晶体管  $T_1$  与 npn 晶体管  $T_2$  的组合,这就变为如图 1.31 所示的等价电路。控制电路中的  $S_1$  打开时,  $T_1$  与  $T_2$  均为关断状态,没

有主电流流过。若  $S_1$  闭合,  $T_2$  的基极有电流流过,  $T_2$  变为导通状态。  $T_1$  的基极 ( $T_2$  的集电极) 有电流流过,  $T_1$  也处于导通状态。这时,  $T_1$  的集电极电流与  $T_2$  的基极电流合流, 构成了正反馈的循环, 即使  $S_1$  此时断开, 主电流仍会继续流过, 从而保持主电路的导通状态。

要想让处于导通状态的可控硅变为关断状态, 就必须切断这个正反馈循环, 在控制极 (G) 加上负电压可以强制切断主电流, 或者主电流下降为 0。对交流电路的控制是, 通常每半周主电流的方向反转一次, 在那时刚好切断正反馈循环。如图 1.31 中的时序图所示。

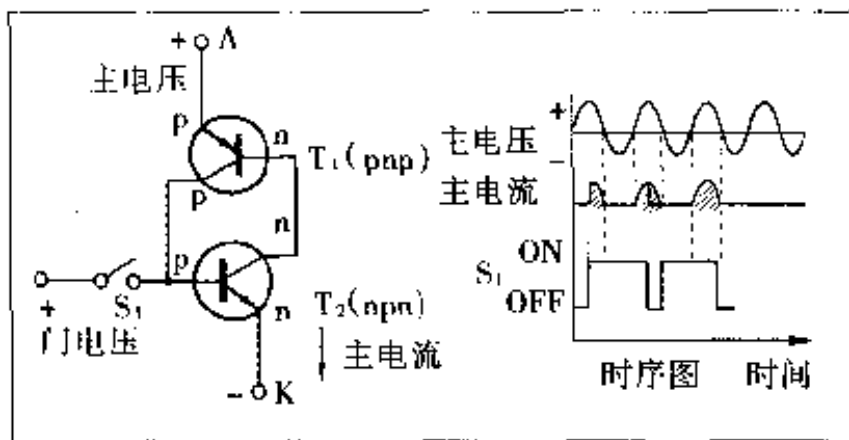


图 1.31 可控硅的等价模型

#### 1.3.4 无触点手动开关

若将有电流  $I$  流过的半导体放在磁场中, 如图 1.32 所示, 则在半导体中移动着的载流子会受到洛仑兹力的作用 (电流与磁场

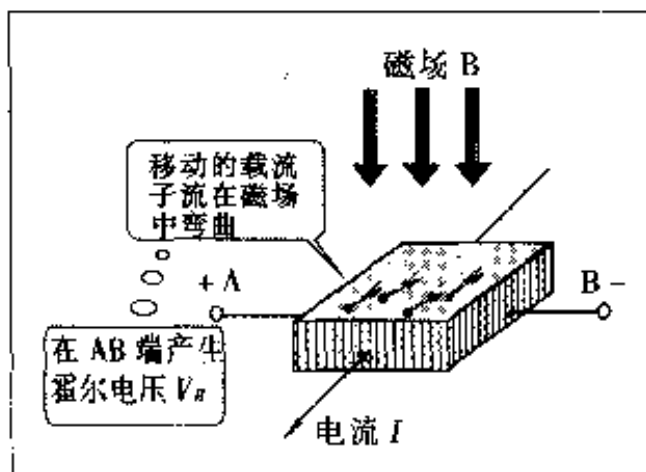


图 1.32 霍尔元件的动作原理

磁铁一接近  
电子流就弯  
曲啦!



的相互作用力), 电流及磁场在垂直方向上出现电动势  $V_H$ , 这种现象叫做霍尔效应,  $V_H$  称为霍尔电压, 以此目的制造的半导体称为霍尔元件。

在 1.1 节所述的有接点手动开关中, 将替代接触接点的永久磁铁换为霍尔元件相近的结构, 就可以通过手指的操作使霍尔电压产生或消失, 用这个  $V_H$  就能让二极管或晶体管动作, 可以当作无触点手动开关使用。使用这种方法具有提高耐久性和防止离合抖动(开关切入的杂音)等许多优点, 经常作为键盘上的微动开关使用。

### 名词解释

- 二极管 diode 2 极管元件; pn 结源于 di-electrode
- 半导体 semi-conductor; 运载电荷的载流子中等程度存在着的固体
- 价电子 valence electron; 源于原子价 valence, 位于原子的最外层的电子, 有助于固体的结合
- 自由电子 free electron; 固体中可自由活动的电子
- 载流子 carrier 半导体中运送电荷的东西
- p 型半导体 p-type semi-conductor; 源于 positive, 多数载流子为空穴(正电荷)的半导体
- n 型半导体 n-type semi-conductor; 源于 negative, 多数载流子为电子(负电荷)的半导体
- pn 结 pn-junction; p 型半导体与 n 型半导体的结合单元
- 正方向(顺方向) forward; pn 结中, 在 p 侧加上正电压, n 侧加上负电压的方向
- 反方向(逆方向) backward, reverse; 与正(顺)方向相反
- 偏压 bias; 把直流重合动作点从中立状态挪动的电压
- 逻辑电路 logic circuit; 使用 ON 与 OFF 信号进行逻辑演算, 存储传送, 变换等操作的电路
- 晶体管 transistor; pnp 或 npn 型结合的半导体放大元件。源于 transfer signal through a varistor
- 双极型 bipolar; 与电子和空穴两方面动作有关的元件
- 发射极 emitter; 晶体管中送出载流子的电极
- 基极 base; 晶体管中控制载流子的电极

- 集电极 collector; 通过基极收集载流子的电极
- MOS metal oxide semi-conductor 金属 - 氧化物 - 半导体场效应管
- FET field effect transistor; 场效应管
- 源极 source; FET 中供给载流子的电极
- 漏极 drain; FET 中接受载流子的电极
- 栅极 gate; FET 或 SCR 等的控制电极(也称为门极)
- 集成电路 integrated circuit; IC, 在一小块基片上集成制造了许多电子元件(晶体管、二极管、电阻)而形成的小型电子元件
- 施主 donor; 将 5 价元素(砷、锑、磷)作为杂质掺入 4 价元素中(硅等),使电子成为多数载流子的 n 型半导体
- 受主 acceptor; 掺入 3 价元素(镉、镓、硼),与施主相反空穴正电荷为多数载流子的 p 型半导体
- 沟道 channel; FET 中漏极 - 源极间电流的通路
- 互补式 - MOS C - MOS complementary metal oxide semi - conductor; 互补式金属 - 氧化物 - 半导体, n 沟道与 p 沟道二者互补(推挽式)组成的 MOS FET
- 基片 substrate; 用于半导体气相生长的原始衬底平台, FET 中用于制作沟道时的半导体薄片
- 可控硅 thyristor; 硅可控整流元件; SCR (silicon controlled rectifier)
- 阳极 anode
- 阴极 cathode
- 正反馈 positive feedback; 将一部分输出信号返回输入端,从而使输出端信号越来越增强的方法
- 洛仑兹力 Lorentz force; 有电流流过的物体或带电粒子运动时,从磁场受到的作用力
- 霍尔效应 Hall effect; 在洛仑兹力的作用下,在固体中产生电位差的现象
- 抖动 chattering; 开关接点闭合时的振动现象

## 1.4 微动开关和限动开关

是指附着在速动机构上的微小触点,为了进行操作,由小型插柱组成微动开关(如图 1.33)。此外,为了检测出相应位置而与传动装置组合,以检测出在机器的运动行程中预定的位置进行控

制为目的的开关,称为限动开关,其构造如图 1.34 所示。

作为各种物理量的有触点检出开关,微动开关可以和各种各样的传感器组合使用。例如,装有双金属片的温度开关,利用振动膜动作的压力开关和流量开关,利用浮子检测液面的液面开关,控制自动门的脚踏开关,以及与电压表、电流表等组成的测量用继电器等。

有关传感器及利用触发电路的无触点检出开关在后面章节中叙述。

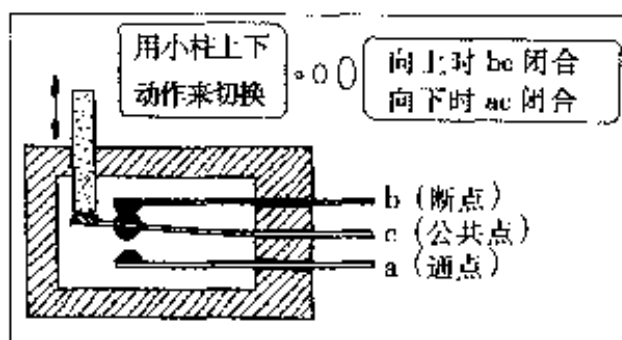


图 1.33 微动开关

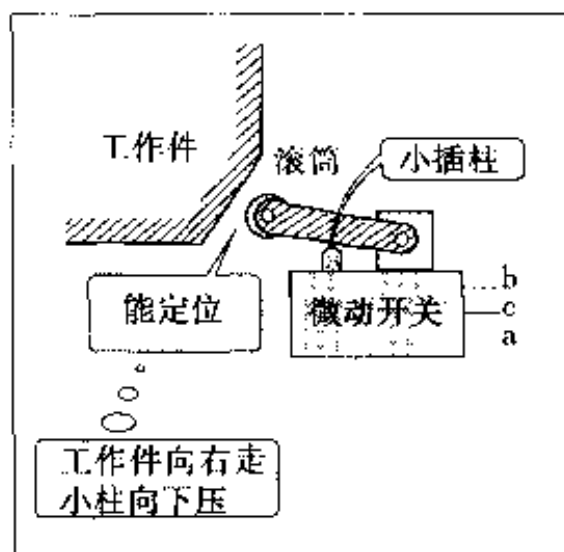


图 1.34 限动开关

### 名词解释

微动开关 microswitch; 小型按钮式开关

限动开关 limit switch; 位置检出开关

压力膜 diaphragm; 将压力变换成位移的元件

浮子 float; 可检测出液面变化的元件

触发电路 trigger circuit; 例如,将模拟电路向数字化变换时的起始信号的输出电路

## 1.5 电路顺序图

### 1.5.1 实体配线图

用电气设备、装置等的动作表示出的电路结构,即表示部件、机器间的电气连接关系的电路图,称为电气连接图。而实体配线



图,如前述灯泡控制电路(如图 1.1)那样,用与实物相近的图画形式画出电路结构图并作为电气连接图。但是,由于将零部件、机器等,全部照实物画出来过于繁琐,因此,从图 1.5 开始到上节为止所见的图,都是用电气符号来表示元器件的电路图,并称其为实体配线图。

很难看懂  
动作啊!



再举一个稍微复杂的例子,如图 1.35 所示,利用继电器控制三相感应电机的启动、停止的实体配线图。将继电器、按钮、闸刀、电动机及灯泡等各种零部件,按其相互连接关系一一画出,很容易理解。相反,在连接着电动机的主电路中,也加入了用于控制电机操作的电路,对电路的具体动作状况就不易弄明白。

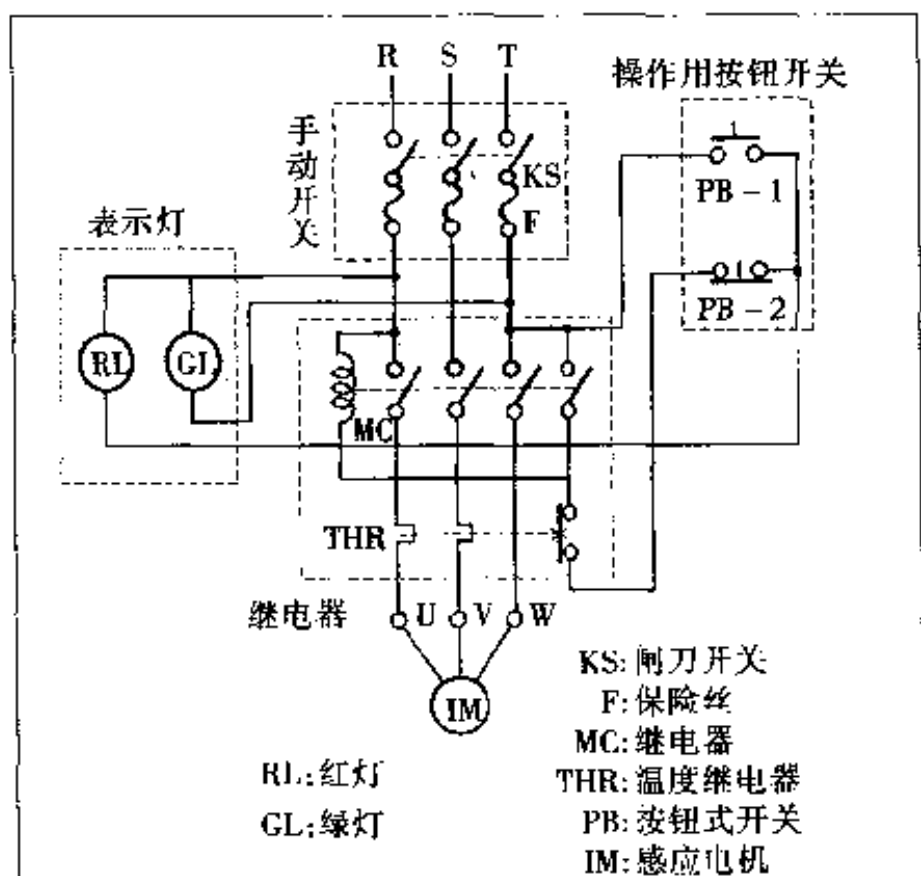


图 1.35 三相感应电机开关电路的实体配线图

### 1.5.2 电路顺序图的画法

完全忽略构成电路的各个零部件之间的实际机械连接,仅将各自的控制电路分离取出,按照电路的操作顺序对应画出,称为

顺序图。

将前述灯泡控制电路,用顺序图表示如图 1.36。将开关、灯泡等各种零件用电气符号表示,与表示所有电源供应处于切断状态的实体配线图相同。电源电路不必一个个详细列出,仅在上下用横线表示控制电源的母线。各零部件的连接线,用上下电源横线间的纵线直接相连。

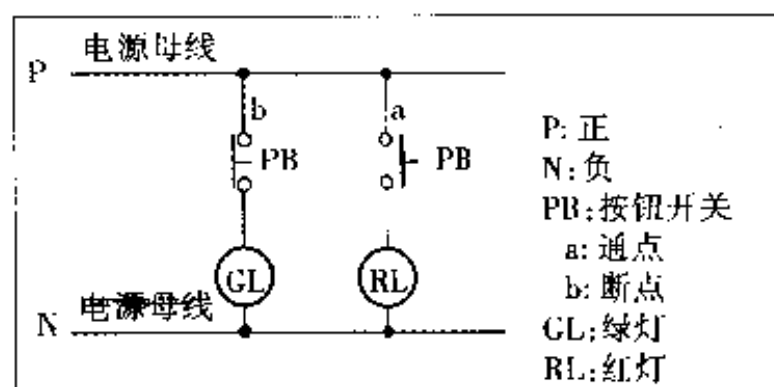


图 1.36 2 灯切换电路的顺序图

将上述复杂例子（如图 1.35）用顺序图表示成如图 1.37 那样。主电路与控制电路分别集中表示,完全忽略了继电器 MC 的线圈、接点等机械部分的实际位置,而将有关接点在各处分离画出。因此同一个继电器都用符号 MC 来表示并记下全部接点。控制用的各个零件不管实际配置关系,而是依照动作顺序从左到右列出。

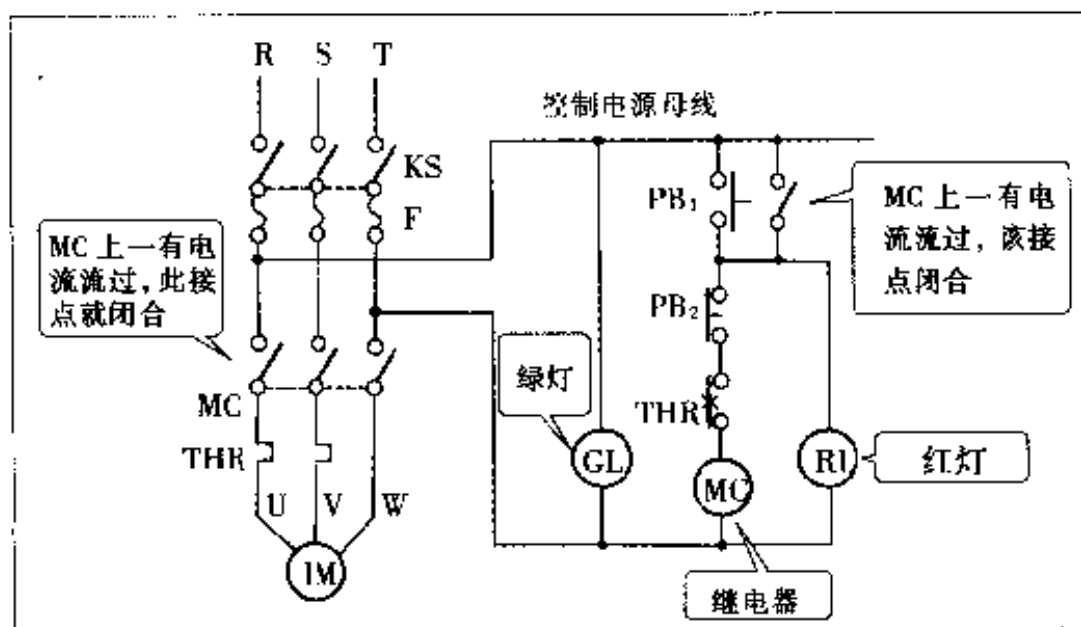


图 1.37 三相感应电机开关电路的顺序图

该电路的动作如下所述。

(a) 开关 KS 闭合, 灯泡 GL 立即被点亮。

(b) 按下按钮开关 PB<sub>1</sub>, 继电器 MC 被励磁, 接点 MC 闭合。点亮灯泡 RL, 电机 IM 旋转。

(c) 按下按钮 PB<sub>2</sub>, 继电器 MC 消磁, 接点 MC 断开, 电机 IM 停止, 灯泡 RL 关灭。

该电路的时序图如图 1.38 所示, 对照该图, 顺序图所表示的动作状况就很容易明白了。

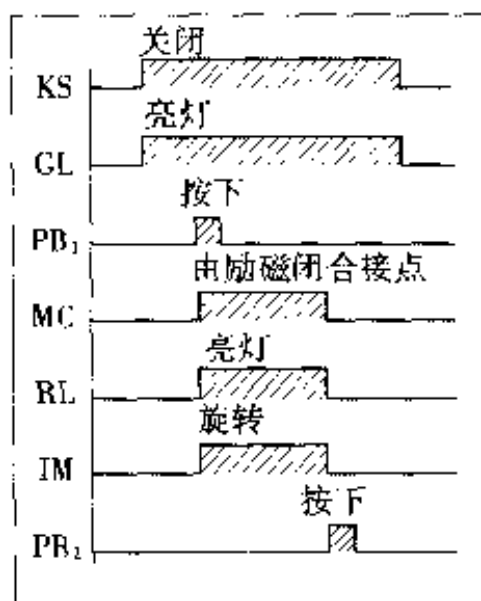


图 1.38 三相感应电机开关电路的时序图

### 名词解释

操作电路 operating circuit; 控制部分的电路

主电路 main circuit; 应当被控制的动力电路等

三相感应电机 three-phase induction motor; 用三相交流电运转的普通电动机

母线, 总线 bus bar; 连接着各种零部件设备的公共电源线



# 第 2 章

## 开关的组合与逻辑电路



### 2.1 与电路(AND)和或电路(OR)

#### 2.1.1 电热吹风机的控制

电热吹风机是由送风电机与加热器组成的，它们分别由独立的开关控制。但是当送风电机的开关被切断而加热器仍在工作时，就存在过热的危险，为避免这种情况的发生，通常使用如图 2.1(a)所示电路。也即如图 2.1(b)动作表所示那样控制其通断动作。限定只要送风电机的开关  $S_1$  不处于 ON(开通)状态，即使加

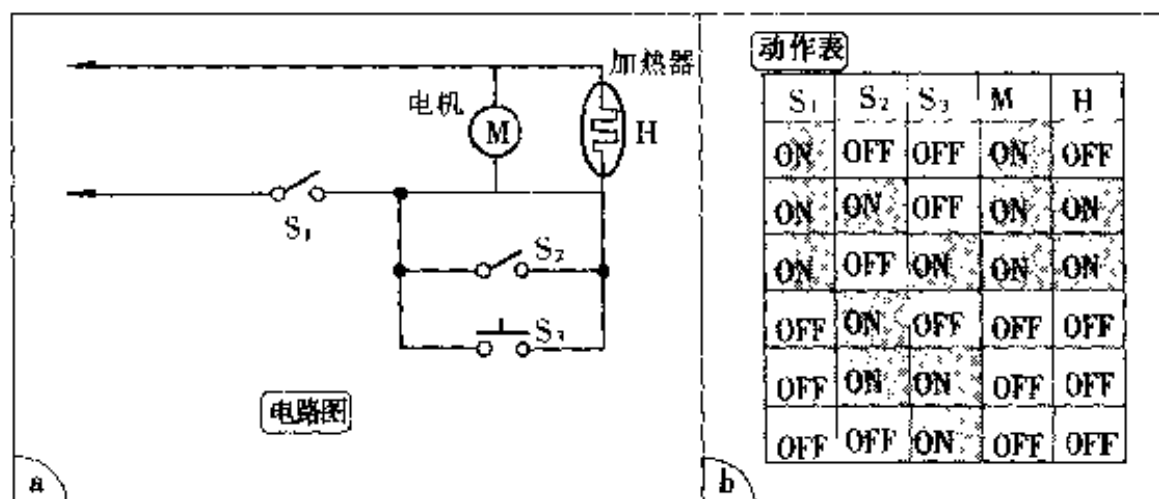


图 2.1 电热吹风机的控制

热器的开关  $S_2$  或  $S_3$  处于 ON 状态, 加热器上也不能有电流流过。其中  $S_3$  为自动复位型按钮式开关, 它是为了短时 (只在按钮按下时) 送暖风所设。

送风电机完全依照  $S_1$  的通、断来控制, 对加热器而言, 由于  $S_1$  与  $S_2$  是串行连接, 只有当  $S_1$  与  $S_2$  两个开关同时开通时, 它才能工作。这种控制加热器动作的电路称为“与”(AND) 电路, 这时加热器电路的状态  $H_p$  称为  $S_1$  状态与  $S_2$  状态的逻辑乘, 可表示为  $H_p = S_1 \cdot S_2$  (这与普通代数乘积形式相同而意义不同)。而开关  $S_1$  与  $S_3$  同样也是串行连接, 可以用  $H_p' = S_1 \cdot S_3$  来表示。若 ON (通) 状态用白 (圆) 圈, OFF (断) 状态用黑 (实) 圆表示, 和开关  $S_1$  与  $S_2$  或者  $S_1$  与  $S_3$  的输入动作相对应的加热器的输出状态  $H_s$  或者  $H's$  分别如图 2.2(a) 所示。仅当  $S_1$  与  $S_2$  或者  $S_1$  与  $S_3$  是白圈时,  $H_s$  或者  $H's$  才是白圈, 这就是 AND 动作 (逻辑乘, 即按照 AND 逻辑动作)。

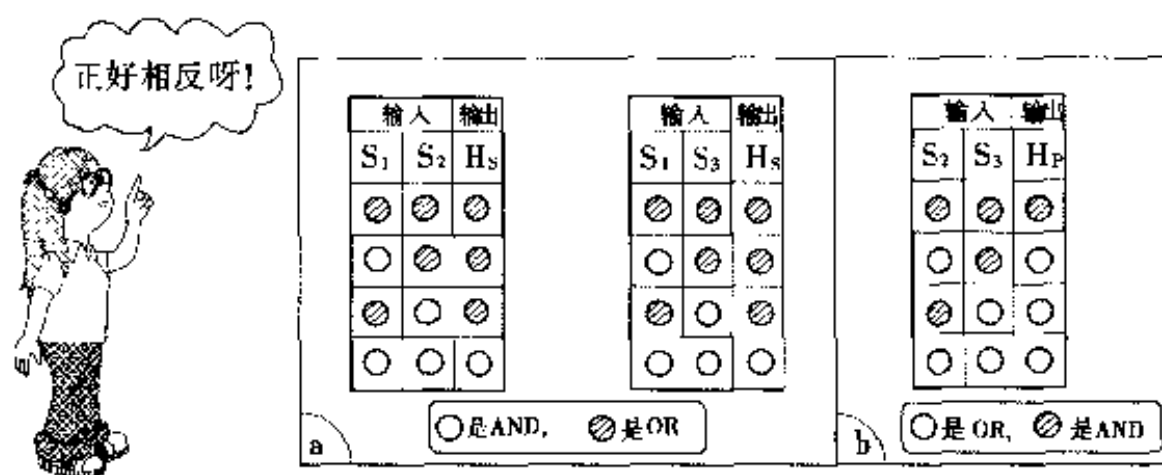


图 2.2 AND 电路与 OR 电路的动作表 (○表示 ON, ●表示 OFF)

另一方面, 由于  $S_2$  与  $S_3$  是并行连接着的, 因此, 当  $S_1$  变为 ON 导通时, 只要  $S_2$  或  $S_3$  有一个处于 ON 导通状态, 加热器就会启动。对于加热器动作而言, 这就称为“或”(OR) 电路, 这时加热器电路的状态  $H_p$  称为  $S_2$  状态与  $S_3$  状态的逻辑和, 表示为  $H_p = S_2 + S_3$  的形式 (这也与普通代数和式的意义不一样)。如图 2.2(b) 所示那样, 输入端  $S_2$  与  $S_3$  只要有一方是白圈, 则输出端  $H_p$  就是白圈, 这就是 OR 动作 (逻辑和, 即按照 OR 逻辑动作)。

但是,若稍微变换一个角度,以停止加热器加热为目的,再看一下这个电路。那么只要  $S_1$  与  $S_2$  或者  $S_1$  与  $S_3$  有一方为 OFF(断开)就可达到目的,这也可称为 OR 电路。同样由于  $S_2$  与  $S_3$  二者只要不同时处于 OFF 状态,加热器就不会停止,这些情况是当作逆向 AND 电路来考虑的。也就是说,在图 2.2 所示动作表中,以白圈为目的和以黑圈为目的,图 2.2(a)与图 2.2(b)是完全相反的。这样即使是完全相同的电路,由于考察的目的不同,其逻辑关系也会逆转,这点请多留意。关于这样的逻辑逆转,在下节中会详述。

### 2.1.2 通过继电器控制

与普通美发用电吹风机中使用的控制技术不同,在工业用的大功率暖风送风机等情况下,大多使用如图 2.3 所示控制电路。

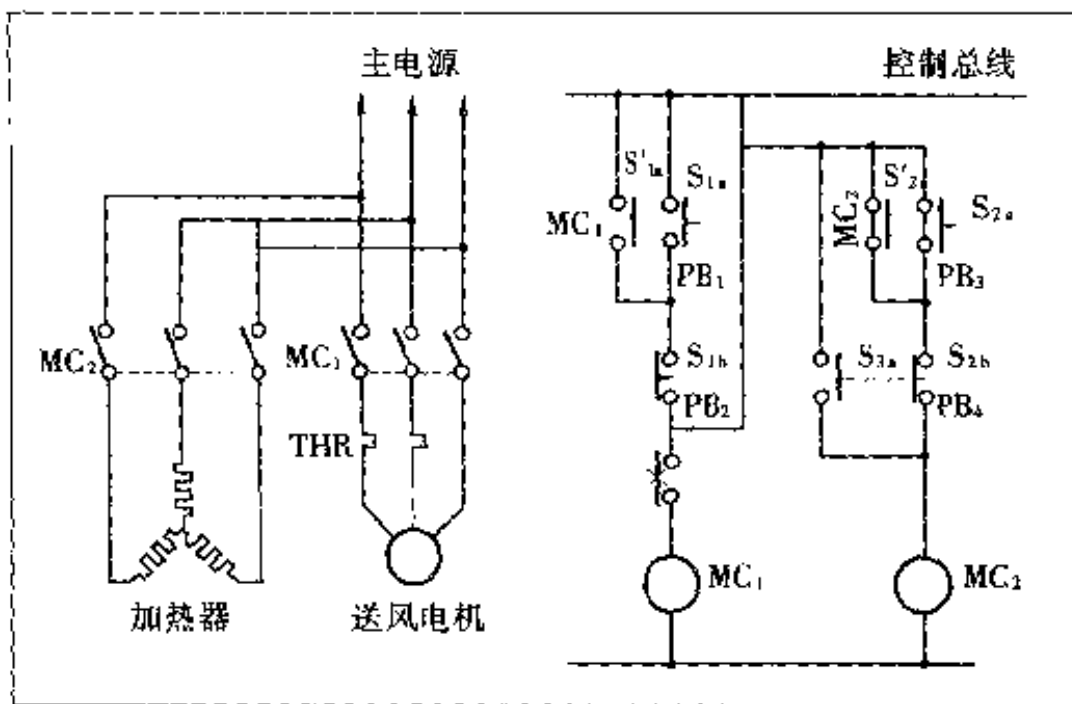


图 2.3 大容量暖风送风机的电路图

送风电机及驱动加热器的主电源与控制用电源分开,使用继电器控制。送风电机的启动按钮  $PB_1$  为 ON 时,电磁继电器  $MC_1$  动作,开始送风。即使放开  $PB_1$  按钮,具有自我保持功能的  $S'_{1a}$  仍保持 ON 状态,仍可持续送风。接着,如果接通加热器的启动按钮  $PB_3$ ,则  $MC_2$  的继电器动作,进行加热。如果这时  $MC_1$  没处于接通状态,则  $MC_2$  上也不会有控制电流流过,对于加热器加热这一目

的,  $MC_1$  与  $MC_2$  构成 AND 电路, 以防止加热器过热。

另外, 按钮  $PB_4$  用于断开连续运转中的加热器的继电器,  $S_{2b}$  与  $S_{3a}$  处于连动状态, 断开状态下进行此项操作时,  $S_{3a}$  接通,  $MC_2$  动作。但是, 此时具有自我保持功能的  $S_{2b}$  为断开状态而没有动作, 放开手的同时  $MC_2$  复归为断开状态。即它是作为临时加热用的开关而动作的。这时  $S_{3a}$  与  $S_{2a}$  不管哪个变为接通状态, 加热器的继电器均会动作, 也就是说它们构成 OR 电路。 $PB_4$  为连动开关, 相互伴随操作,  $S_{2b}$  的断开状态比  $S_{3a}$  的接通状态稍前, 有必要使用 BBM (break before make) 型接点开关。

这里描述的通过按钮开关  $PB_4$  进行临时加热的控制电路就是电机微动控制电路, 常用于卷扬机或起重机等的电机控制。

### 2.1.3 利用电气信号控制

送风电机和加热器的继电器  $MC_1$  与  $MC_2$ , 如果不用按钮式开关, 可以考虑利用电气信号来控制。

由于主电源的动力开关用电磁继电器  $MC_1$ ,  $MC_2$  不可能直接用晶体管驱动, 可以在中间使用微型继电器, 原理上可使用图 2.4 所示电路。

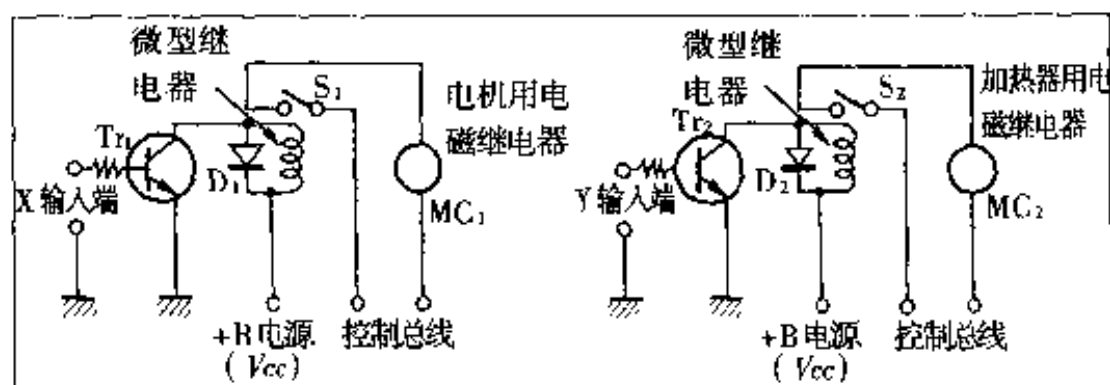


图 2.4 用信号控制继电器

在输入端 X 加上正数伏的电压, 晶体管  $T_{r1}$  变为导通状态, 电流从集电极流出, 微型继电器  $S_1$  闭合,  $MC_1$  动作。如果输入端没有加上信号, 即 X 点的电压为 0V,  $T_{r1}$  则为断开状态,  $MC_1$  不动作。因此根据在 X 端所加信号是正电压 (称为高电平, 记为 H), 还是 0V (称为低电平, 记为 L), 就可以决定连接于  $MC_1$  上的送风电机的



动作状态。

对于控制加热器的继电器  $MC_2$  也是完全一样的过程, 根据在输入端  $Y$  上所加信号电平的高低来决定  $MC_2$  的通断。这样, 送风机与加热器的控制均可由  $X$  点与  $Y$  点的输入电气信号来完成。但是, 像这样由于送风机与加热器的逻辑动作控制并非相互独立, 就存在只有加热器处于导通状态的危险性。为避免这种情况, 可以采用后述以控制  $X$  点和  $Y$  点输入信号为目的的逻辑电路更好一些。

用于驱动  $MC_1$  和  $MC_2$  的电磁继电器的电源连接在控制总线上, 为使晶体管  $T_1$ 、 $T_2$  和微型继电器动作, 必须采用  $5 \sim 15V$  的直流电源(+B 电源)。像这样通过晶体管或二极管驱动信号电路使用正向直流电源  $V_{CC}$ , 也有采用负向直流电源  $V_{EE}$  的。此外, 在微型继电器上与线圈并联着二极管  $D_1$ 、 $D_2$ , 当晶体管关断时, 在线圈中会产生反向电力, 它们的作用是吸收冲击电压。

### 注意

用于驱动风机或加热器等终端机械的继电器并不具有逻辑功能, 只有用信号电路才能进行必要的逻辑控制, 将逻辑与动作的功能分离开来, 具有扩大控制自由度的好处。但是, 必须十分注意误动作等的危险性, 为了提高控制的安全性, 一般尽可能将逻辑功能放在靠近电路的终端处。本文的例子也是如此, 如图 2.4 所示, 将具有多个接点的  $MC_1$  继电器中的一个闭合接点, 插入  $MC_2$  的控制线圈与控制总线之间, 如果风机用的继电器  $MC_1$  不动作, 则加热器用的继电器  $MC_2$  也不会动作, 就达到了安全控制的目的。

#### 2.1.4 信号的逻辑控制

将两个二极管如图 2.5(a) 所示那样连接, 研究一下输入端  $A$ 、 $B$  与输出端  $X$  的关系。如果输入端  $A$  或  $B$  只要有一个为低电平, 也就是  $0V$ , 则在  $V_{CC}$  电压  $5V$  的作用下, 有正向电流通过负载电阻  $R_L$ , 流过二极管  $D_1$  或  $D_2$ 。从而经过  $R_L$  电压下降, 输出端变为低电平。若输入端  $A$  与  $B$  均为高电平的情况,  $D_1$  与  $D_2$  均无电流流

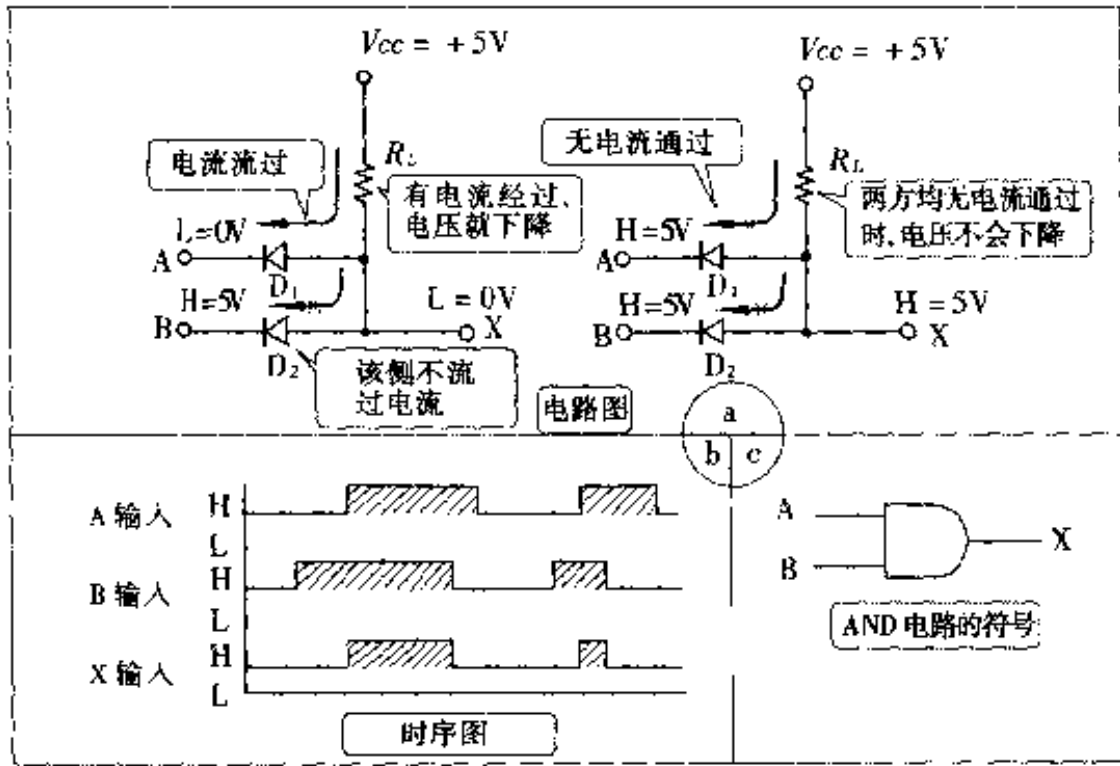


图 2.5 用 2 个二极管构成的高电平 AND 电路

过,而  $R_L$  也不会使电压下降。从而如图 2.5(b) 所示的流程图,只有当 A、B 均为高电平时,输出端 X 才变成高电平。也就是说,它们

表 2.1 H 电平的 AND 电路的真值表

A	B	X
L	L	L
H	L	L
L	H	L
H	H	H

表 2.2 H 电平的 OR 电路的真值表

A	B	X
L	L	L
H	L	H
L	H	H
H	H	H

构成了高电平 AND 电路,用逻辑式可写为  $X = A \cdot B$ ,也可以用图 2.5(c) 所示的符号表示。A 和 B 为 L(低)或 H(高)的几种组合及 X 端所表现的状态如下:

A = L, B = L 时 X = L

A = H, B = L 时 X = L

A = L, B = H 时 X = L

A = H, B = H 时 X = H

将它们整理成表 2.1 那样的表格,称其为真值表。

将二极管像图 2.6(a) 那样连接,只有当 A 和 B 均为低电平时,  $R_L$  上没有电流,输出端 X 与接地端子(也可以称其为  $V_{EE}$ ) 0V 是同电位,为低电平。仅当 A 与 B 中有一方为高电平时,与其相对应的二极管  $D_1$

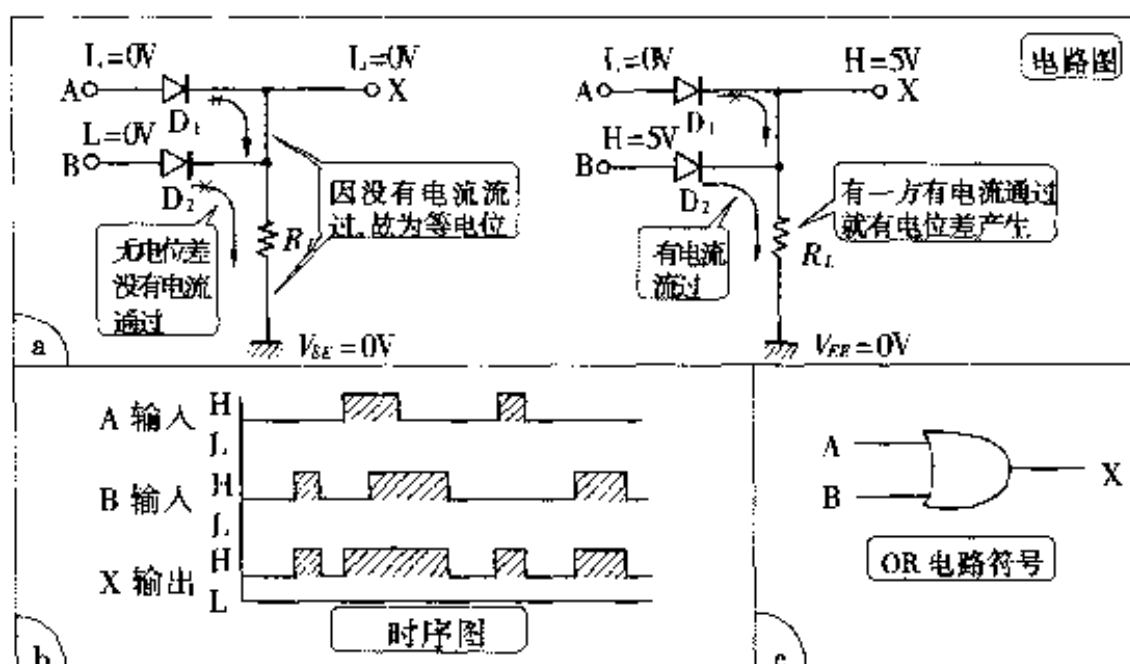


图 2.6 用 2 个二极管构成的高电平 OR 电路

或  $D_2$  有正向电流经过,  $X$  端变为高电平。如图 2.6(b) 流程图所表明的那样, 称为高电平 OR 电路, 用逻辑式表示为  $X = A + B$ 。OR 电路的符号如图 2.6(c) 所示, 其真值表如表 2.2 所示。

使用这样的 AND 电路和 OR 电路, 可以看到图 2.4 所示的送风机与加热器的驱动电路, 与前面叙述过的吹风机电路有相同的控制逻辑。在图 2.1 中  $S_1$  作为输入端  $A$ ,  $S_2$  为  $B$ ,  $S_3$  为  $C$  考虑, 输出端  $Y$  为推动加热器时, 可记为  $Y = A \cdot (B + C)$ 。风机的驱动逻辑直接记为  $X = A$ , 将这些用逻辑符号表示如图 2.7(a) 所示。A 输入端为高电平时, 因  $X$  与  $A$  是直接, 故图 2.4 的  $X$  端亦为高电平, 送风电机为 ON。B 与 C 输入端经 OR 电路接入, 其输出与 A 经 AND 电路输出至  $Y$ , B 或 C 有一个为高电平时, 只要 A 也为高电平, 则  $Y$  端为高电平, 可使加热器工作。若 A 为低电平, 即使 B 与 C 为高电平,  $Y$  也为低电平, 加热器不会工作。这点已表明于图 2.7(b) 的流程中。

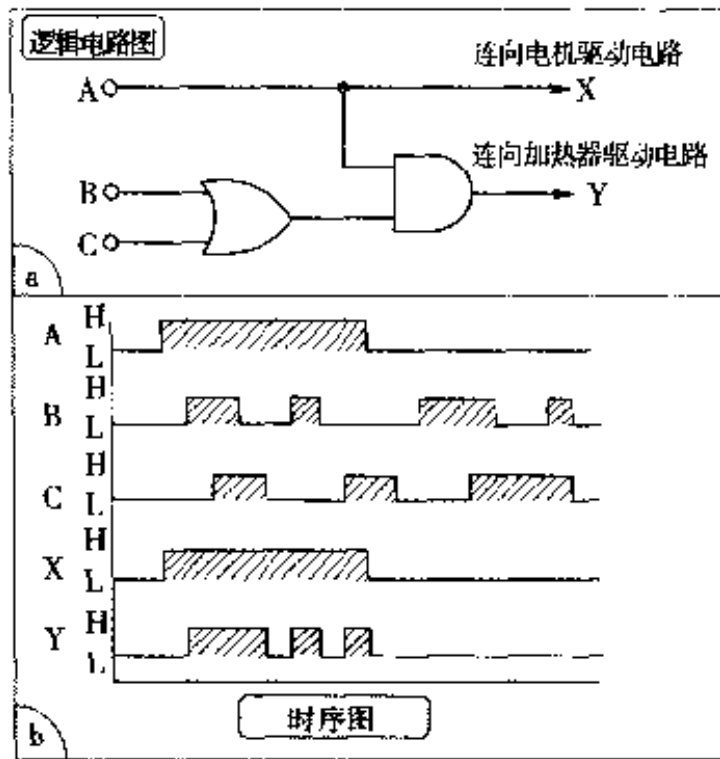


图 2.7 暖风送风机的控制电路

MEMO

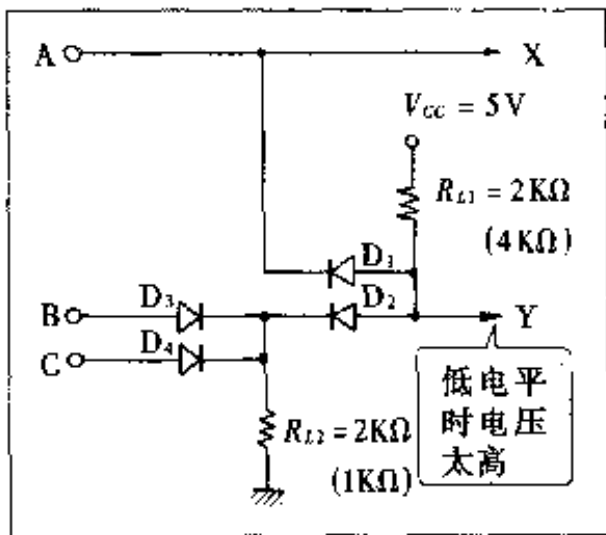


图 2.8 将二极管 AND 电路和 OR 电路直接相连的例子(实际上很少使用)

本节所讨论的 AND 电路或 OR 电路，是由输入信号按条件组合而成的控制电路，称为门电路。一般讲，由这类门电路搭配组合构成逻辑电路的情况下，必须十分注意其信号电平的变化。如本文所述由二极管构成 AND 电路与 OR 电路，如果依照图 2.7 连接构成逻辑电路，如图 2.8 所示电路中，若输出端 Y 的低电平过高，很多都不能很好地工作。若 A 端高电平为 5V，B 与 C 端输入 L 电平 0V，Y 端输出的

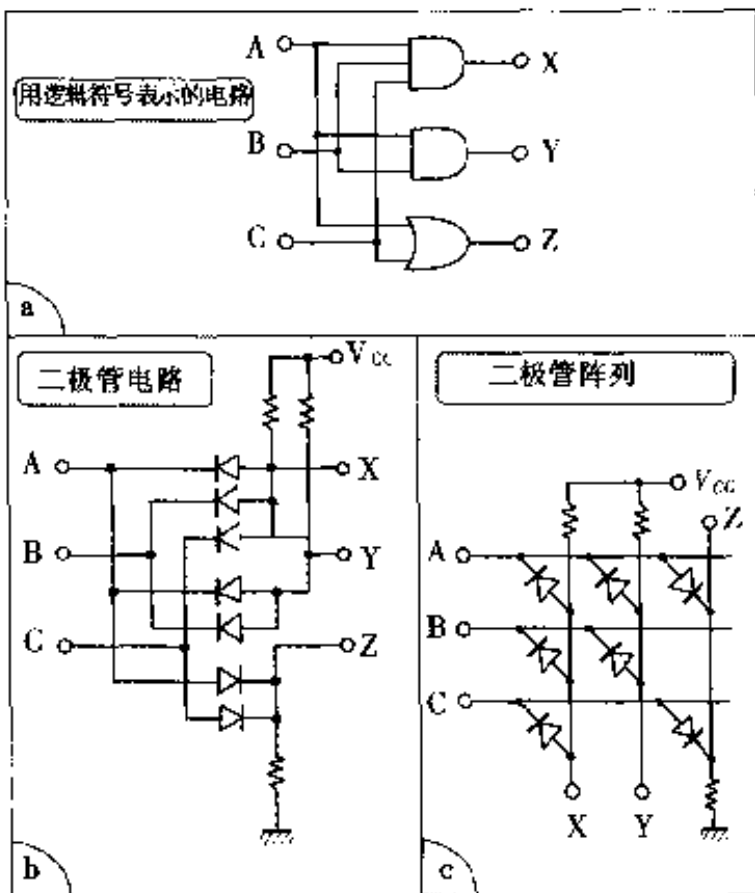
低电平有时可达 2.5V 以上(由于  $D_2$  的正向阻抗也增加)，与高电平相差过小。因此，后面的晶体管有可能变为 ON 状态。为避免发生这种情况，增设了电阻  $R_{L1} = 4K\Omega$ ， $R_{L2} = 1K\Omega$ ，即使这样，低电平还是可能增高 1V 以上，而使 Y 的输出阻抗上升，B、C 端的输入阻抗下降，因此不太实用。

这是由于二极管没有信号放大功能所致。一般,如下节所述,在门电路中采用一段晶体管电路用以调节电平。

### 2.1.5 二极管阵列

前面的例子是两个输入端的 AND 电路和 OR 电路,而一个门电路的输入个数可达 3,4,5……,并无特别限制。还有若干电路上连接着多个输入输出端子的。

如图 2.9(a) 所示逻辑电路,二极管的连线非常复杂,很难看清楚,如图 2.9(b),若改画成图 2.9(c)那样,就容易看明白了,它被叫做二极管阵列,用这样的画法,可以直接用于制作印刷电路板。



怎么样,  
容易看  
懂了吧!



图 2.9 具有多个输入/输出端口的门电路

#### 名词解释

‘与’电路 AND 电路,AND circuit 具有逻辑乘功能的电路,也称为‘与门’(AND gate)

‘或’电路 OR 电路 OR circuit 具有逻辑和功能的电路,也称为‘或门’(OR gate)

微动控制 inching control 通过电机等的反复启停,使机械每次前进少许距离

关断 turn off 从 ON 状态变化为 OFF 状态;从 OFF 变为 ON 则称为开通(turn on)

阵列 matrix

## 2.2 反相器与正负逻辑

### 2.2.1 阈值电平

迄今为止所见的在逻辑电路中使用的电气信号,是高电平(H)或低电平(L),这样的信号叫作2值数字信号。一般的模拟波形是如图2.10所示那样连续变化的。对应这种波形,超过某一电压 $V_s$ 时,当作高电平,在 $V_s$ 以下时,对应为低电平,可以变为如图2.10(b)所示形状的不连续变化的数字化波形。这个用于区分高低电平的电压值 $V_s$ 叫作阈值电平。该值不是某个选定的固定电压,而是要根据逻辑电路所使用的基本单元电路的特性有个最佳值。

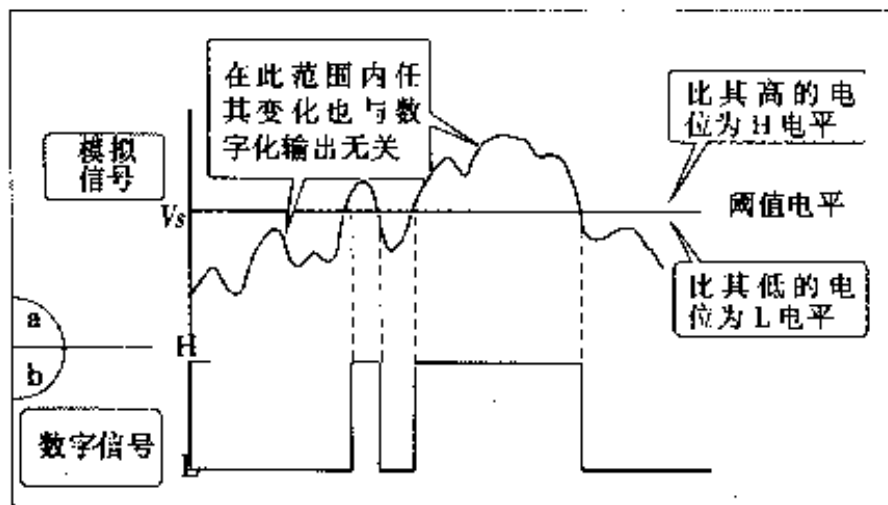


图 2.10 按照设定的阈值电平所获得的数字信号

例如,在图 1.17 中,若采用 SD-34 型二极管,阈值选在电压-电流特性曲线中非线性最大点,大约取在正向电压 0.5V 处较为

合适。但是,从图中可见,明确的非线性出现在  $0.2V$  左右,故阈值至少为  $0.2V$  的幅度。此外,阈值电平因各个单元电路的特性不同,输入信号的高低电平必须保持相应的差别。通常取  $V_S$  为  $1.4V$ ,  $L$  为  $0V$ ,  $H$  为  $3.5V$  左右为宜。

从阈值电平到高低电平的差,称为允许噪声电平(noise margin),在该值以下强度的噪声,即使混入信号,输入信号的高低电平也完全能被识别,不会引起误动作。

### 2.2.2 晶体管反相器

如上节所述,用二极管组成的 AND 电路或 OR 电路,可以若干段连接起来组成逻辑电路,但由于这类电路没有放大作用,  $H$  电平与  $L$  电平逐渐接近阈值电平,最终不能识别。为了使输入端原来的信号电平再生,可以使用如图 2.11(a)所示的晶体管电路。

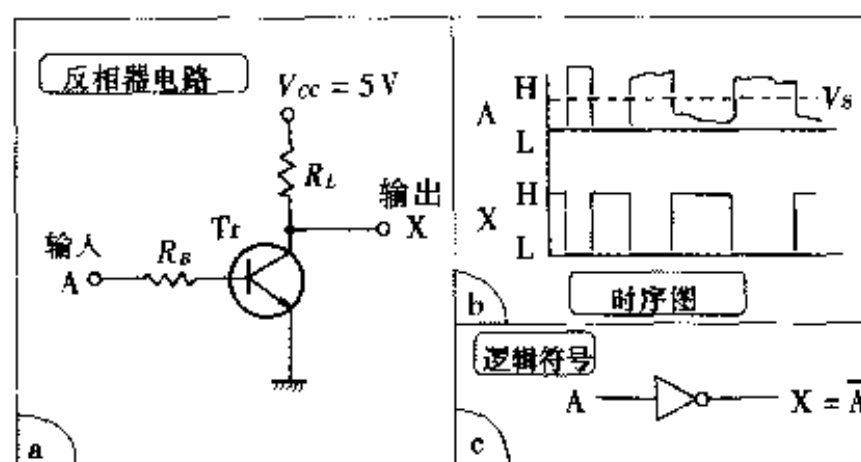


图 2.11 晶体管反相器

输入信号  $A$  如果比阈值电压  $V_S$  (该电路中  $V_S \approx 0.7V$ ) 还低,晶体管  $T_r$  就处于 OFF 状态,集电极没有电流流过。因此,负载电阻不会引起电压下降,在输出端  $X$  重现  $V_{cc}$  电压  $5V$ 。另外,若  $A$  端电平比阈值还要大,通过  $R_B$  有基极电流流过,  $T_r$  变为 ON 状态,利用晶体管的电流放大作用,集电极电流基本可以达到由  $V_{cc}$  与  $R_L$  所决定的值。

这时的输出端 X 实际变为 0V 了。即如图 2.11(b) 所示, 即使比  $V_s$  稍大的高电平输入信号变为 0V, 比  $V_s$  还小的低电平信号变成  $V_{cc}$  电压 5V, 也能在输出端得到漂亮的整形方波。

但是若输入高电平, 输出为低电平。而输入低电平, 却输出高电平, 刚好相反, 故此种电路称作反相器或 NOT“非”电路, 用如图 2.11(c) 所示符号表示。“○”称为状态表示记号, 表示输入的逻辑电平(高或低电平)在输出时被反转(低或高电平)。与输入 A 相应的输出记为  $\bar{A}$ 。正负逻辑电平反转, 即高电平输出代表是低电平输入, 难于理解, 若采用图 2.12 所示的 2 个缓冲器(缓冲放大器)

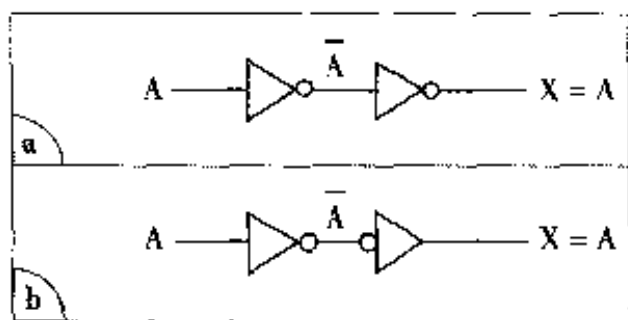


图 2.12 用 2 级反相器构成的缓冲器

就好一些。

2 个反相器中的“○”记号可以像图 2.12(a) 那样画在输出侧, 也可以像图 2.12(b) 那样画在输入侧。在图 2.12(b) 中, 没画“○”记号的地方(输入线与输出线)

是相同的逻辑电平, 一望便知, 很方便, 这种表记法称为 MIL(军用标准)记法。

反相器使用晶体管, 能获得比输入电流放大 10 倍以上的输出电流。也就是说它还能驱动 10 几个反相器, 因而可以很方便地组成复杂的逻辑电路。

### 2.2.3 正逻辑与负逻辑

前节所举的吹风机控制电路例子中, 即使是相同的开关电路, 根据操作目的的不同也可用 AND 电路或者 OR 电路, 这里再稍作详述。

如图 2.13(a) 所示, 开关  $S_1$  与  $S_2$  串联后接入电灯 L 的亮灭电路。平常电灯关闭, 开关接通后灯亮, 这些已表明在图 2.13(b) 的动作表中, 只有当  $S_1$  与  $S_2$  同时接通才能达到亮灯的目的, 这就是 AND 电路。动作结果 L 以  $S_1$  与  $S_2$  的逻辑乘来表示。但是像某种报警电路那样, 若平常时为灯亮状态, 操作开关后灯灭,  $S_1$  与  $S_2$  只要有一个变为断开状态即可达到灯灭的目的, 这时就是 OR 电路, 动



作结果可用逻辑和表示。

也就是说，只就开关串联插入电路而言，并不能决定它是 AND 电路还是 OR 电路。电吹风机的例子中，实行接通开关的输入操作，达到导通加热器电路的目的，作为串联 AND 电路，并联 OR 电路，即默认输入操作与输出动作的方向。将这种输入操作及作为其结果的输出称为“能动”，一般用逻辑电平“1”来表示，“非能动”状态为逻辑电平“0”。即两个以上的输入都是能动“1”时，输出也为能动“1”的电路称为 AND 电路，而即使只有一个输入为能动时，输出为能动的电路定义为 OR 电路。将这些

定义写为如图 2.13(b) 所示的动作表，当作 AND 电路示于左下方，而当作 OR 电路示于右下方。因此可见，完全相同的开关电路对应着两个不同的逻辑关系。像这样用逻辑电平“1”与“0”表示的真值表常用到。

此外，2 个开关并联接在电路中，也同样可以作为 OR 电路或 AND 电路去考虑。

作为信号控制的例子，可见图 2.5 中的 H 电平 AND 电路及图 2.6 中的 H 电平 OR 电路，输入及输出状态是 H 电平或 L 电平。现在如果将 H 电平状态作为逻辑 1，L 电平作为逻辑 0，则输入的 A、B 端与输出的 X 端的逻辑关系可以表示成图 2.14(a) 和图 2.15(a)。从表中可见对应于 H 电平 AND 电路的是逻辑乘，即  $X = A \cdot B$ ，对应于 H 电平 OR 电路的是逻辑和，即  $X = A + B$ ，从表中

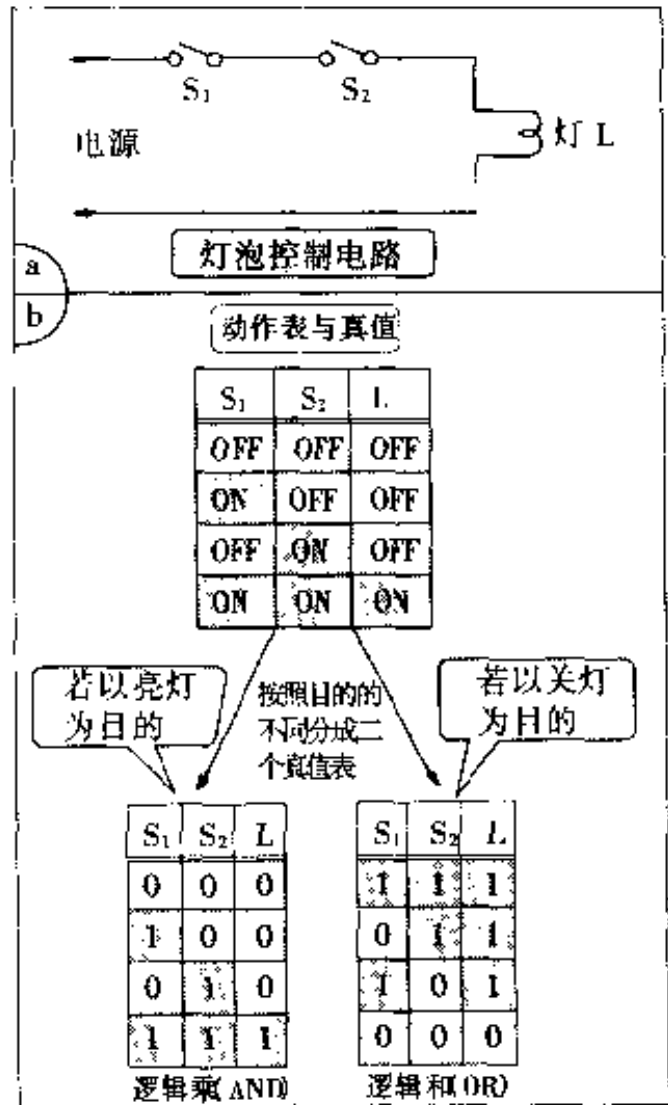


图 2.13 在灯泡控制电路中的正逻辑与负逻辑

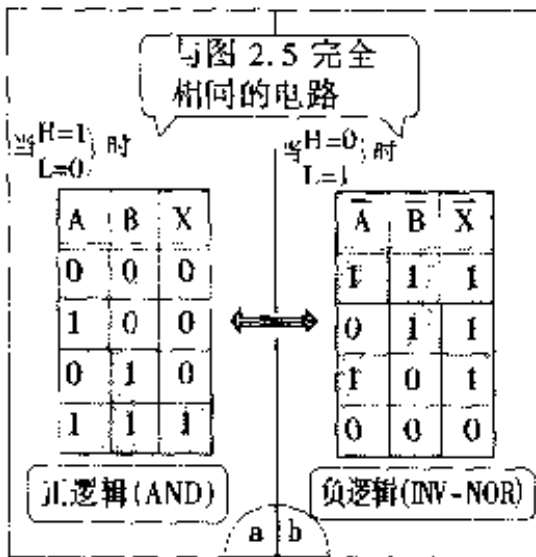


图 2.14 H 电平 AND 电路的正逻辑与负逻辑

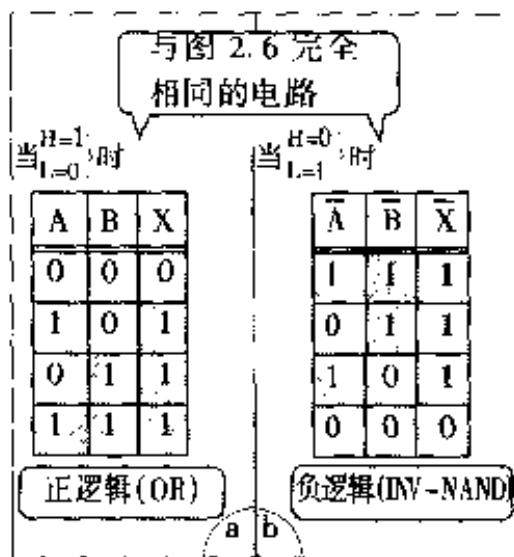


图 2.15 H 电平 OR 电路的正逻辑与负逻辑

易见它们分别成立,称其为正逻辑。

反之,按 H 电平为 0, L 电平为 1 作成真值表,就变成图 2.14 (b) 与图 2.15 (b), 逻辑和  $\bar{X} = \bar{A} + \bar{B}$  与正逻辑的 AND 电路 (如图 2.5) 相当, 逻辑乘  $\bar{X} = \bar{A} \cdot \bar{B}$  与 OR 电路 (如图 2.6) 相当。也就是说, 与正逻辑相比较, AND 与 OR 的逻辑刚好相反, 故将其称为负逻辑。结论是, 图 2.5 所示的正逻辑 AND 电路与负逻辑 OR 电路完全等价。而图 2.6 所示的正逻辑 OR 电路与负逻辑 AND 电路等价。在这样的逻辑电路中, 由于条件不同或阻止信号或让信号通过, 故也称为门电路。这时为避免混乱, 相对于正逻辑与门 (AND gate), 负逻辑时电路完全相同, 称为反 - 非或门 (INV-NOR gate), 另外相对于正逻辑或门 (OR gate), 负逻辑时称为反 - 非与门 (INV-NAND gate)。

反相器就是将任何输入电平都进行反转而输出其逆电平。也就是说具有将 H 变为 L, L 变为 H 的逆向变换功能, 使用它也能将正逻辑门变换为负逻辑门。可以在图 2.5 所示的正逻辑 AND 电路的输入输出端都接上反相器看一下 (如图 2.16)。正如在其真值表中所表明的, AND

因较为难懂, 开始仅考虑正逻辑吧!



电路是按照负逻辑(L电平)或门动作的,对于整体的输入端A及B而言的输出端X,可用逻辑和 $X = A + B$ 来表示,也就是说,整体上看是正逻辑(H电平)OR电路。可以将一个电路单元当作与门和或门2个电路那样自由选择使用。一般讲,数字IC含有普通单元电路的功能,只是常用正逻辑表示,使用中,可随设计者的意愿自由选用正逻辑或负逻辑。

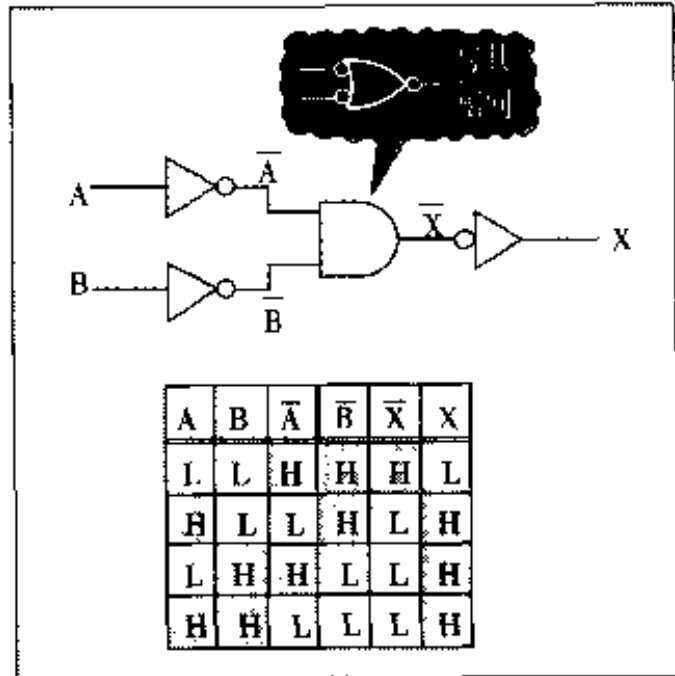


图 2.16 反相器与门的组合

### 名词解释

- 反相器 inverter; 反相放大器, NOT 电路, 非门
- 阈值电平 threshold level; 门槛值, 用以区分高电平与低电平的电平
- 噪声容限 noise margin; 允许噪音电平, 即在可以正确判别 H 电平与 L 电平的前提下允许的噪声电平
- 缓冲器 buffer; 缓冲放大器, 波形整形放大器
- MIL 记法 MIL notation; 源于 Military Standard 即美国军用标准表示法
- 正逻辑 positive logic; 采用高电平(H电平)为 1, 低电平(L电平)为 0 的逻辑
- 负逻辑 negative logic; 与正逻辑相反, 用 H 为 0, L 为 1 的逻辑
- 能动 active; 主动, 使逻辑电平必须为 1 的状态
- 真值表 truth table; 用逻辑电平值表示的动作表
- 非 NOT 和反相(inverssr)相同 使逻辑反转的门电路
- 非或 与非 NOR NAND 输入正逻辑(H电平), 输出负逻辑(L电平)的 OR 及 AND 电路
- INV-OR, INV-AND; 反转输入负逻辑(L电平), 输出正逻辑(H电平)的 OR 及 AND 电路
- INV-NOR, INV-NAND; 输入、输出都是负逻辑(L电平)的 OR 电路及 AND 电路

## 2.3 数字集成电路(NAND 电路)

## 2.3.1 DTL

前面所讲的用二极管组成的 AND 电路或 OR 电路,由于没有放大作用,每经过一段电路,高低电平差就缩小一些,很难实用化。故将其改进为如图 2.17(a)所示电路,通过二极管  $D_1$  和  $D_2$  组成的 AND 电路,加上用晶体管  $Tr_2$  组成的反相放大器,组合成为一个单元电路使用,称为二-三极管逻辑电路(DTL)。

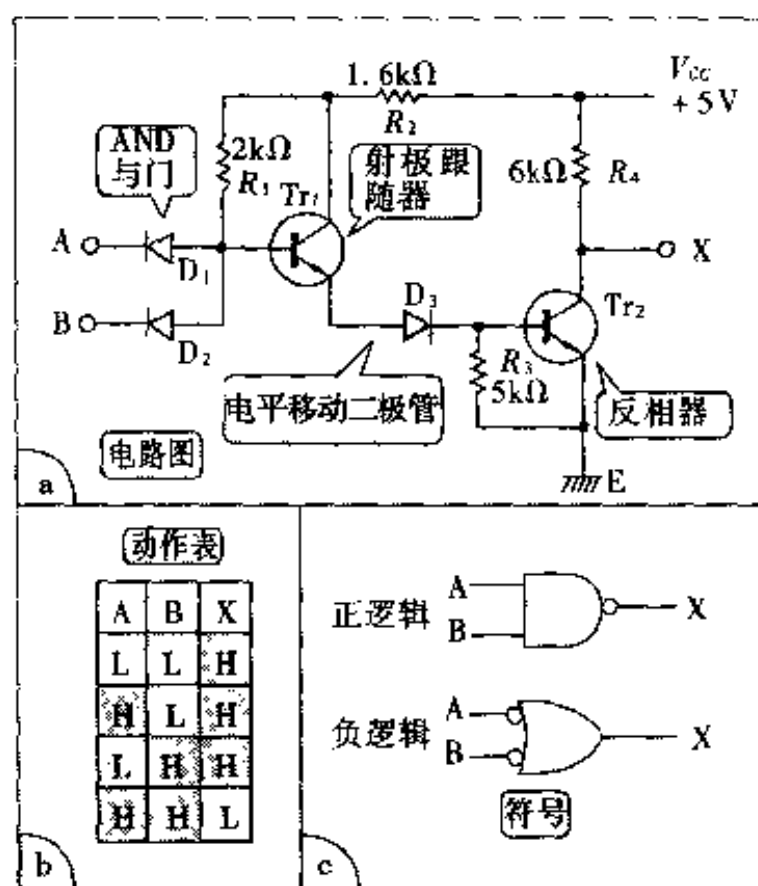


图 2.17 DTL 标准 NAND 电路

从图 2.17(b) 的动作表中可见,对于正逻辑,执行 AND 动作后,反转为负逻辑输出。这就是 AND-NOT 即与非(NAND)电路,当然,对于负逻辑输入,执行 OR 动作后,反转为正逻辑,是 INV-OR 电路。电路的逻辑符号如图 2.17(c)所示。将这 4 种单元电路集成

在门电路后面增加了放大电路啦!



在一起作为一个电路单元,就是TI公司(得克萨斯州仪器公司)的846型IC芯片,具有2个输入端的DTL正逻辑NAND IC。

在图2.17电路中的 $Tr_1$ 和 $D_3$ ,分别是起放大电流与调节阈值电压作用的晶体管射极跟随器和电平移动二极管。从原理上讲,即使省略了 $Tr_1$ 与 $D_3$ ,该电路也可动作,如前所述,输入端A、B加上L电平0V,二极管 $D_1$ 与 $D_2$ 的输出端电平也会达到0.5~0.7V的程度。这样,与 $Tr_1$ 的阈值电平差不多相同,从而完全没有噪声容限的余地了。因此,为了提升该电平(向上移动),就插入 $D_3$ ,加上这个电路后阈值电压可达到约1.4V。 $R_1$ 的作用是当高电平输入时, $Tr_1$ 的基极有电流流过的提升阻抗。另外 $R_3$ 是当 $Tr_2$ 关断时,将蓄积在基极的电荷快速放电用的放电推降电阻。

将这样的DTL电路2级连接如图2.18后,讨论一下它的输入、输出电流。

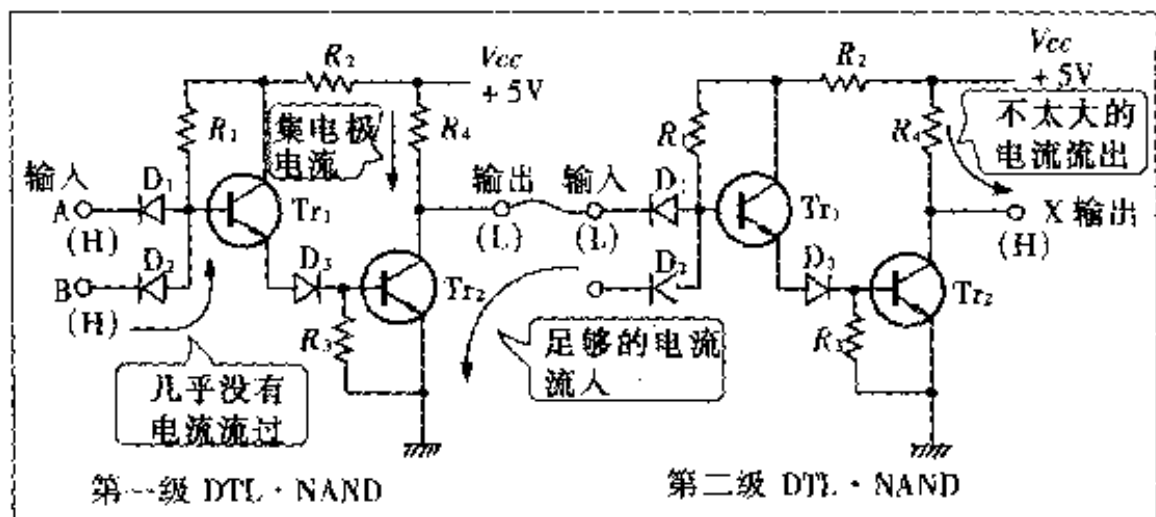


图 2.18 DTL·NAND 电路的 2 级连接

第一级的输入端 A、B 皆为高电平时, $D_1$ 、 $D_2$  为反向偏置,处于关断状态,没有输入电流(为高输入阻抗), $Tr_2$  为导通状态,第一级的输出端信号反转为 L 电平。此时,第二级的  $D_1$  为正向偏置,处于导通状态,有  $V_{cc}/(R_1 + R_2) \approx 1.3\text{mA}$  的电流流过。这是由于与  $Tr_2$  的集电极电流一起迭加流入的结果。第二级输出高电平, $Tr_2$  为关断状态,取不出太大的电流(最大为  $V_{cc}/R_3 \approx 0.83\text{mA}$ )。但是,从第一级的输入端看,DTL 的高电平,几乎没有电流流过,第二级后的第三级……,  $n$  级 DTL 均能很好地续接。

如果在第一级的输出端,连接  $n$  个并联的第二级电路,则在  $Tr_2$  的集电极上,从次级的 DTL 流入的电流变为  $n$  倍,为了不烧坏晶体管,必须限制所连接的门电路的个数。输出端能允许可靠连接的最大门电路的个数称为扇出数(fan out),DTL 电路大约为 8 ~ 10 个,输入、输出信号的传送速度为 30ns。

图 2.17 中,电平移动二极管  $D_3$  所用齐纳二极管的阈值电压高达 3V,电源电压  $V_{cc}$  也达 15V,称为 HTL,为 IC 片,信号传送速度较慢(约 90ns),是强噪声门电路。

### 2.3.2 TTL

如图 2.19 所示,在一个晶体管基极上连着  $n$  个发射极,称为多发射极晶体管,其等价电路为有若干输入端并联的二极管 AND 电路,其功能是相同的。将它与图 2.20 那样的普通晶体管相组合,可以像 DTL 那样作为与非门使用。称其为 TTL 电路,以与非

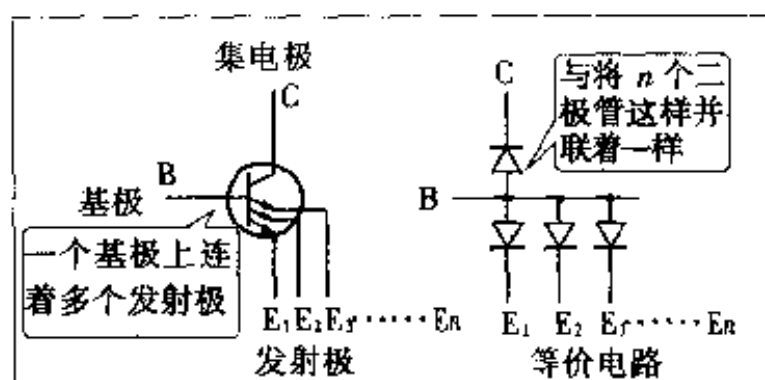


图 2.19 多发射极晶体管

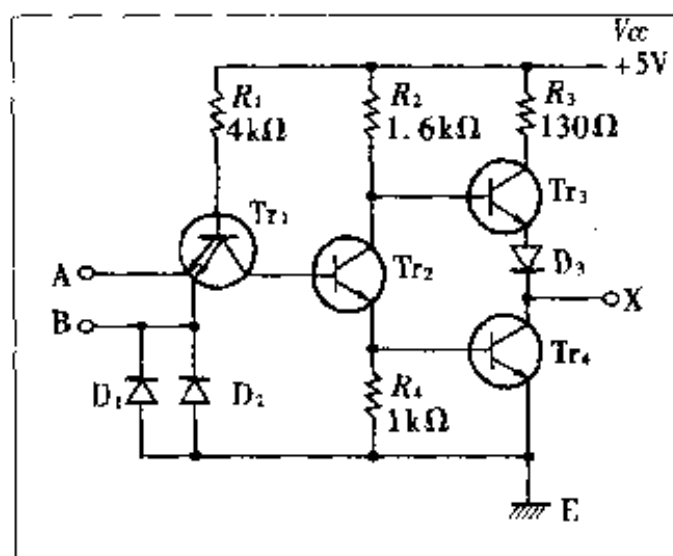


图 2.20 TTL 标准 NAND 电路

门为基础的数字集成电路现在十分流行,从 TI 公司的 SN7400 开始,各公司已有多种产品面市。

在图 2.20 中,输入 A、B 两端均为 H 电平时,  $Tr_1$  的基-射极间无电流流过,故其处于关断状态。但是与平常的晶体管使用法不同,集电极的电压比基极低,基-集间

为正向电压, 此时经由  $R_i$  流入基极的电流, 几乎全部流向集电极, 作为  $Tr_2$  的基极电流, 使它成为 ON 状态。DTL 电路中 (如图 2.17), 此处的晶体管只是作为射极跟随器使用, 而在 TTL 电路中还从集电极取出反相信号。 $Tr_3$  为 ON 时,  $Tr_4$  为 OFF,  $Tr_3$  为 OFF 时,  $Tr_4$  变成 ON。当其输出高电平时,  $Tr_3$  仍可作为射极跟随器使用, 与 DTL 不同的是, 能够获得低输出阻抗 (输出电流较为充裕)。并且信号传送速度比 DTL 快约 8 倍, 达 10ns, 可带动负载的扇出数也多些, 可达 10 个。

**MEMO**

2 个输入端的 (NAND) 与非门使用率非常高, TTL-IC 片四门封装为一片的 SN7400 是典型芯片, 其引脚布局如图 2.21 所示。如前所述, 与非门与反相器结合, 再与各种与门、非门、或非门等自由组合, 这时, 若使用图 2.11 所示的晶体管反相器, 可能产生误动作。从图 2.22 可知, 反相

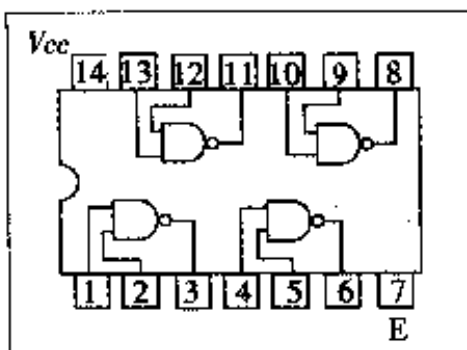


图 2.21 2 输入 NAND IC (SN 7400) 引脚图

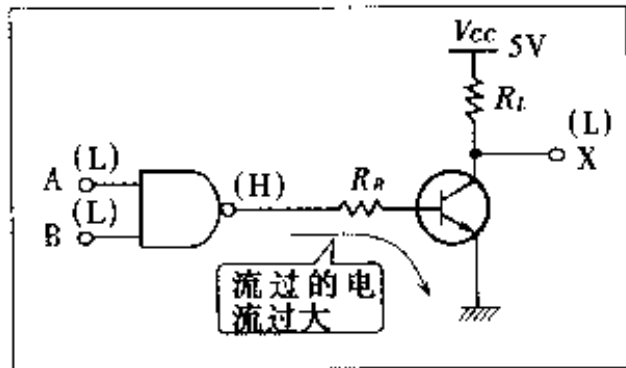


图 2.22 TTL NAND 与晶体管反相器的组合

器的输入为 H 电平时, 有基极电流流过, 无论 DTL 还是 TTL, 由于 H 电平的输出电流非常小, 从而不能十分有效地驱动下级晶体管。

在那里, 作为反相器, 最好使用图 2.23 所示电路, 用一个与非门, 将 2 个输入端信号整理成一个使用。此外, 也有只有一个输入端的专用与非门 (即反相器) TTL 芯片, 如六门电路的 IC-SN7404。

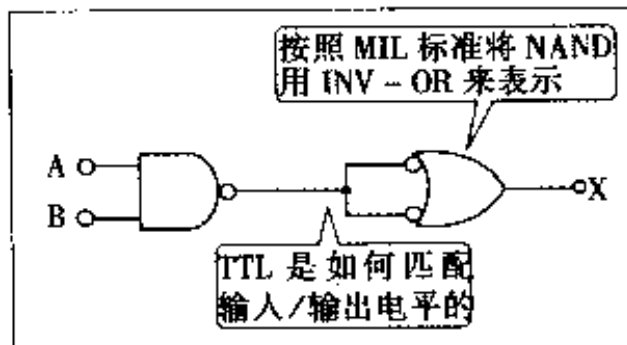


图 2.23 TTL NAND 与 TTL 反相器的组合

## 2.3.3 C-MOS

MOS FET 是最近迅速普及使用的一种场效应晶体管。它是由在一块基片上互补的 p 型沟道及 n 型沟道组成的，如图 2.24(a) 所示电路为 C-MOS 与非门(NAND gate)。输入端 A、B 皆为高电平

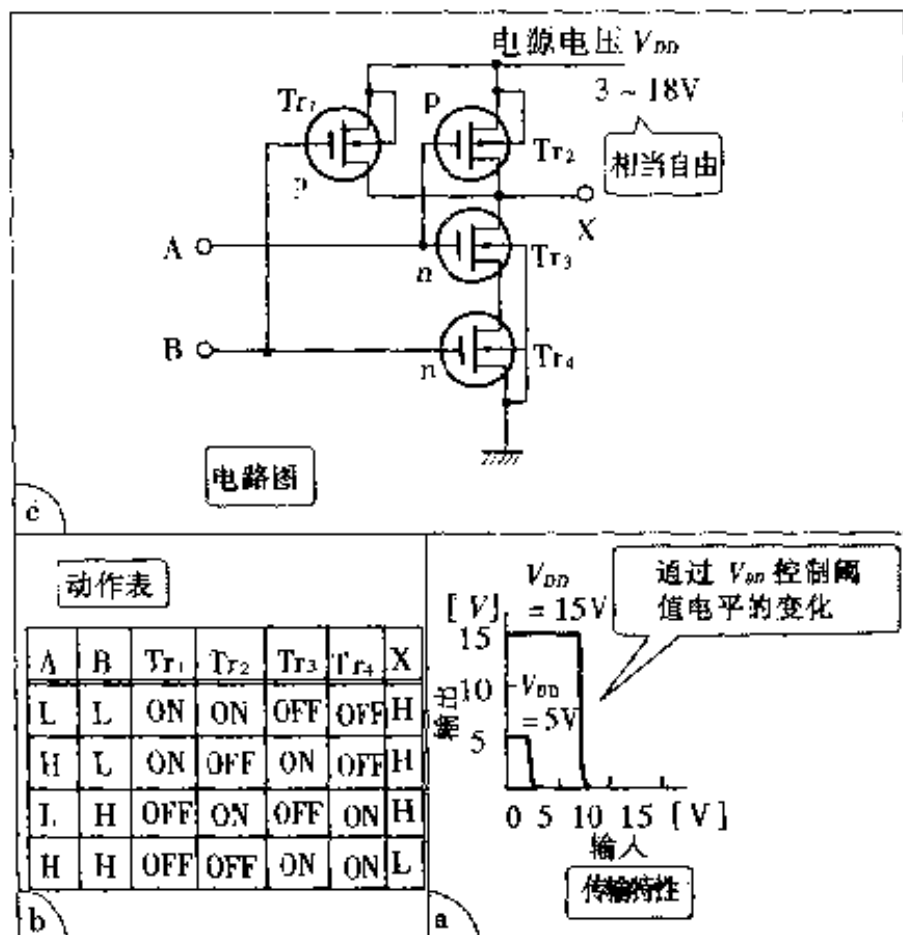


图 2.24 C-MOS NAND 门电路

时，因 FET 的门电压为 H 电平，p-MOS 的  $Tr_1$  与  $Tr_2$  为 OFF 状态，n-MOS 的  $Tr_3$  与  $Tr_4$  为 ON 状态。因此输出端 X 为 L 电平。而若 A、B 输入端中有一个，例如 A 变为 L 电平时， $Tr_2$  为 ON， $Tr_3$  变为 OFF，则输出端 X 变为 H 电平（参见图 2.24(b) 的动作表），当然，A、B 输入皆为 L 电平，输出为 H 电平。这个动作与 DTL 或 TTL 相比，更为单纯明快，用图 2.25 所示有触点电磁继电器电路来模拟它，就十分容易理解。

这种门电路，忠实地继承了第 1 章所述的 MOS FET 的特征，由于门的输入阻抗非常高，所消耗的功率极小，这种门电路大约仅  $10\mu W$ ，为 DTL 或 TTL 的  $1/1000$  以下。正如其电路图（如图 2.24）所表明的那样，完全不使用电阻来分配电压、电流，故十分



容易用来制作成集成电路的 IC 片, 电源电压  $V_{DD}$  允许范围也较大,  $3 \sim 18V$  均可正常工作。输入、输出信号的 L 电平为  $(0 \sim 0.3) \times V_{DD}$ , H 电平为  $(0.7 \sim 1) \times V_{DD}$ , 阈值电平, 如图 2.24(c) 所示达  $0.5 \times V_{DD}$  的程度。自然而然,  $V_{DD}$  较高其允许噪声电平也较大。相对于前述 DTL 或 TTL 对电源电压  $V_{CC}$  的高稳定性 ( $5V \pm 5\%$ ) 要求而言, MOS FET 是相当自由的。扇出数也可达到驱动 50 个电路的程度。但其信号传送速度稍慢些, 为  $70ns$ 。

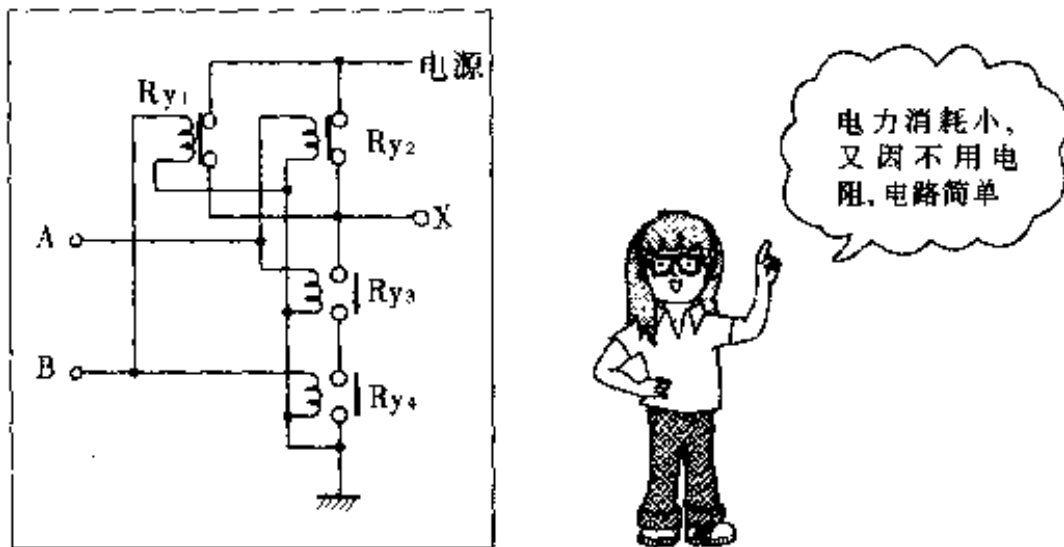


图 2.25 用继电器来模拟 C - MOS NAND 电路

电力消耗小,  
又因不用电  
阻, 电路简单

## NOTE

为将不同方式的电子电路从电气上很好地结合起来, 需要有相应的变换单元电路, 一般叫做接口电路 (interface), 当混合使用 DTL、TTL 或 C-MOS 等的 IC 电路时, 对输入、输出的电流容量应十分注意, 信号电压电平也必须互相吻合。根据具体情况对信号脉冲的前沿或脉冲幅度等, 以及时钟脉冲的匹配必须多加关注。例如, TTL 输出与 C-MOS 连接的情况, 由于 C-MOS 的输入阻抗非常大, 就不必首先考虑其输入电流大小的问题。但是由于两者间的阈值电平差别很大, 所以应当对其信号电压电平的匹配格外注意。

一般而言, 作为调节电压的单元, 在输出部分可以加上称为集电极开路器 (open collector) 的 IC 芯片, 如图 2.26(a) 所示 SN7405 即为集电极开路反相转换器。

通常从 TTL 反相器的最后一级中将  $R_3$ 、 $T_2$  以及 D 去掉。如图 2.26

(b) 所示,下级的电源电压  $V_{DD}$  可从外接电阻  $R_L$  上适当选择,信号电平可自由调节。

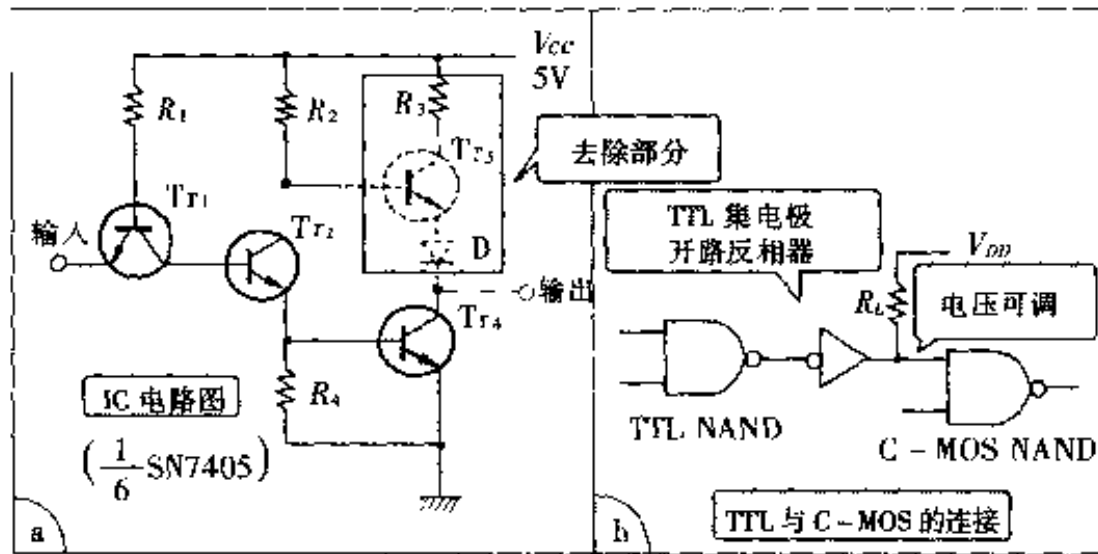


图 2.26 TTL 集电极开路反相器

### 名词解释

- DTL diode - transistor - logic; 由二极管门与晶体管反相器组成的逻辑电路
- TTL transistor - transistor - logic; 由晶体管门电路与反相转换器组成的逻辑电路
- C-MOS complimentary metal oxide semiconductor; p 沟道与 n 沟道互补型金属 - 氧化物 - 半导体场效应 IC
- 射极跟随器 emitter follower 集电极接地的电路, 输入阻抗高, 输出阻抗低, 电流增幅大, 电压不变
- 提升 pull up 将 H 电平的信号电压向  $V_{cc}$  方向提升
- 推降 pull down 将 L 电平的信号电压向 0V 附近推降
- 关断 turn off; (反义词为导通 turn on) 将 ON 状态的电路单元变为 OFF 状态的动作
- 级联 cascade; 将放大电路数级相连接
- 扇出数 fan out (反义词为扇入 fan in) 逻辑电路的输出电流容量 (输出可带负载数)
- 齐纳二极管 Zener diode; 源于齐纳是人名, 固定电压二极管
- 多发射极晶体管 multi-emitter-transistor; 逻辑门电路采用的有多个发射极的晶体管

集电极开路器 open collector 接于集电极处于开放状态的最末级晶体管输出端的逻辑单元

## 2.4 优先电路

### 2.4.1 互锁电路(interlock)

为了用一个装置去控制各种各样的动作,而设计了若干个电路,其中优先级高的电路处于动作状态时,其它电路应处于闭锁状态,无论在输入端加以什么电平都不能驱动,这称作锁定。电机的运转操作、电视、空调、洗衣机等家用电器的电子控制,自动售货机、电梯的操作等,在这些经常使用和见到的设备中,顺序控制是最基本的电路。

在图 2.27(a) 所示电路中,为使电机 X 运作,需先操作  $PB_1$ , 电磁继电器  $R_{y1}$  开始励磁,保持接点  $R_{y1a}$ 。关闭,  $PB_1$  即使松开,励磁状态仍可保持。与此同时,  $R_{y1}$  的常闭接点  $R_{y1b}$  断开,从而切断电磁继电器  $R_{y2}$  的操作电源。因此,其后不管  $PB_2$  如何操作,  $R_{y2}$  不会动作,电机 Y 也不会工作。这是由于实行了锁定,于是就将继电器  $R_{y1}$  的常断接点  $R_{y1b}$  称为锁定接点,是将优先权给予电机 X 的电路。当然,在电机 Y 转动中,  $PB_1$  变为 ON 时,电磁继电器  $R_{y1}$  被励磁,锁定接点  $R_{y1b}$  断开,正如图 2.27(b) 时序图所示的,电机 Y 停止。  $PB_3$  为清除(reset)开关,停止电机时可按下。

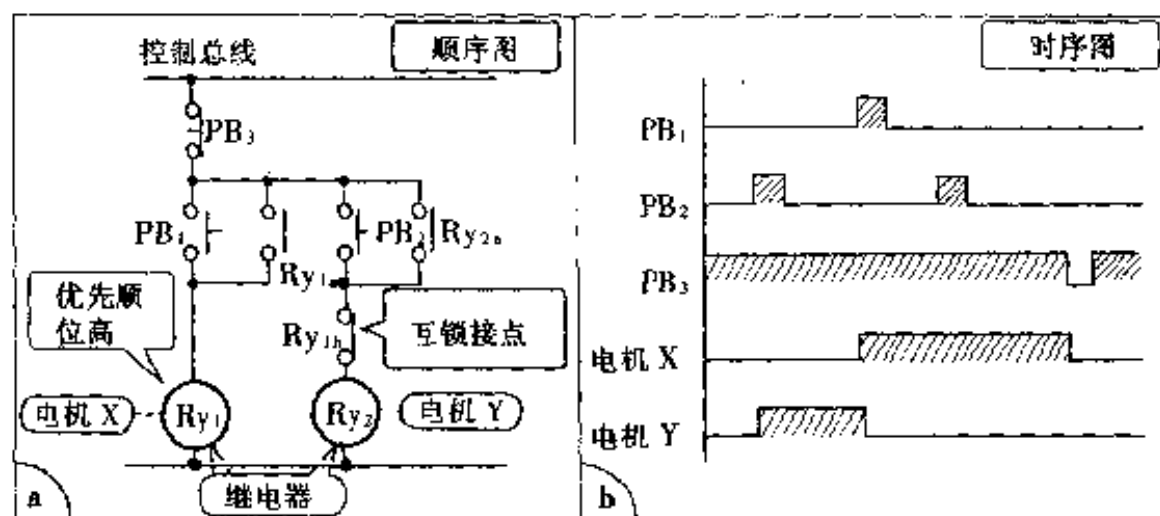


图 2.27 互锁电路

在无接点顺序控制电路中,上述那样的状态保持功能或具有优先级功能,一般都通过使用触发器电路来实现(详见第4章)。若用与非门表示则如图2.28(a)所示。A端有输入信号可直接控制X,同时经反相器将 $\bar{A}$ 输入与门,禁止将B信号输出到Y。称与门的 $\bar{A}$ 信号为禁止输入信号。正如图2.28(b)的真值表所表示的,成为X优先的锁定逻辑。

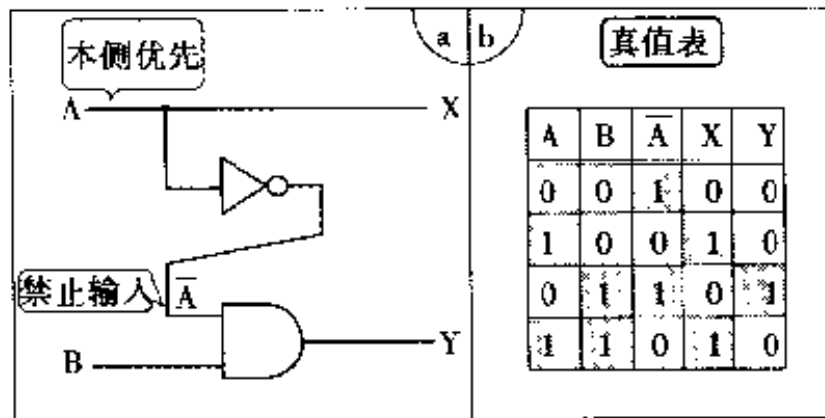


图 2.28 互锁的门电路

### 2.4.2 并列优先电路

如图2.29所示,继电器 $R_{y1}$ 与 $R_{y2}$ 相互配合锁定,将优先权给予先操作为ON的一方。在这种情况下,电机X与Y的优先级没有差异,谁先开始动作谁就获得优先权,其后即使有另一方输入启动信号,另一方的电机也不会旋转(即禁止其它的输入)。

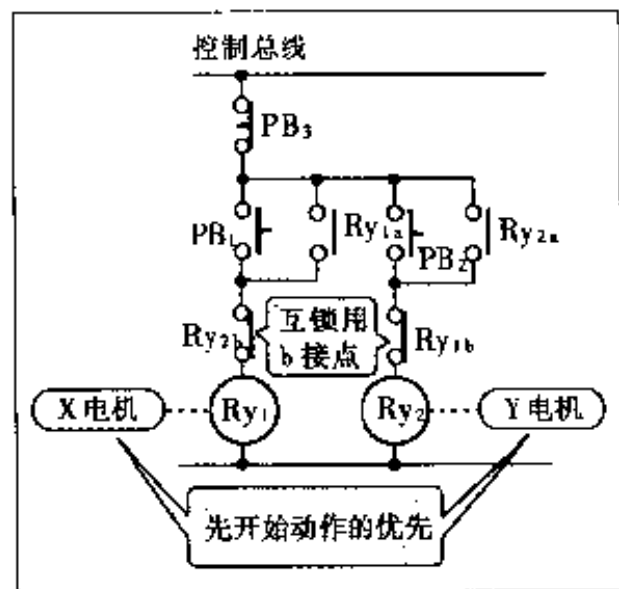


图 2.29 并列优先电路

例如,当电机Y处于停止状态中,也就是说继电器 $R_{y2}$ 处于被消磁的状态( $R_{y2}$ 互锁用的b接点 $R_{y2b}$ 为闭锁状态),这时如果按下 $PB_1$ ,继电器 $R_{y1}$ 被励磁,电机X旋转。其后即使按下 $PB_2$ ,由于 $R_{y1}$ 互锁用的b接点 $R_{y1b}$ 正处于开路状态,故 $R_{y2}$ 不能被励磁,电机Y启动不了。反之,若电机Y正在动作中,由于 $R_{y2}$ 的互锁接点 $R_{y2b}$ 处于开路状态,即使按下

PB<sub>1</sub>, 电机 X 也不能被启动。

有 3 个以上的输入端也是一样, 只有最早输入信号的电路可以动作。一个电路正在工作时, 禁止其它输入。

用这样的逻辑, 将控制灯泡 A、B、C、D 亮灭的时序电路示于图 2.30, 它常见于电视的抢答比赛节目中, 在 A、B、C、D 四个抢答者中, 只有最早用手按下抢答按钮的人, 面前的灯才会亮。

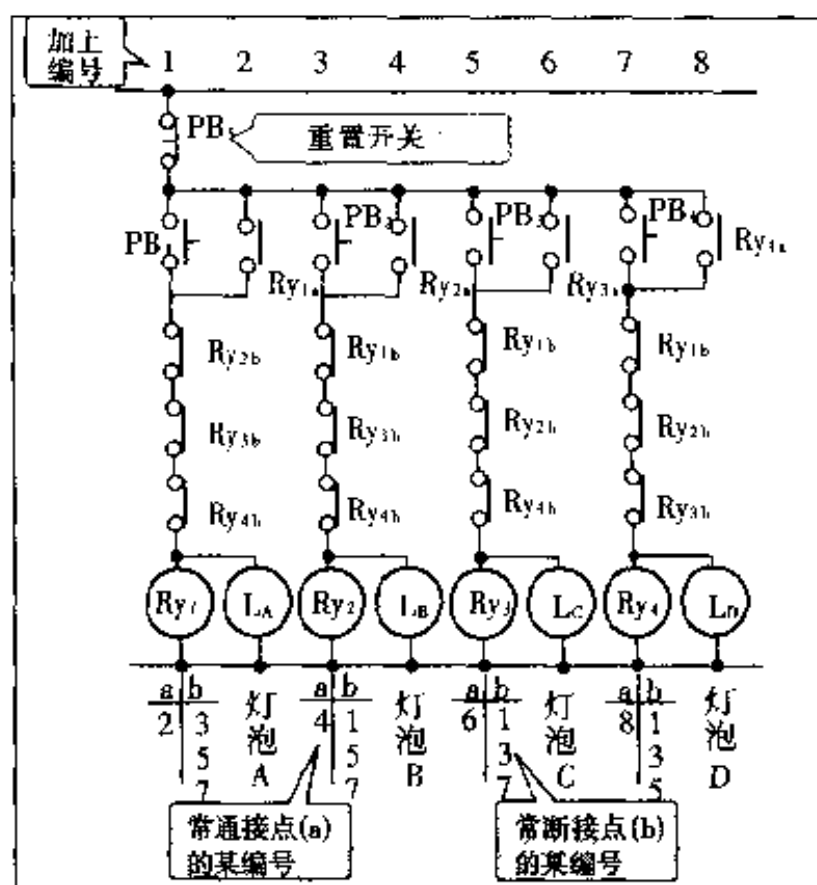


图 2.30 只点亮最快抢答者灯泡的电路

### 2.4.3 新输入优先电路

一般情况下, 后操作的开关其电路优先, 如图 2.31(a) 所示, 锁定接点与自我保持接点串联接入电路, 按下 PB<sub>1</sub>, 灯 A 亮且继电器 Ry<sub>1</sub> 励磁, 第 2 列的 a 接点闭合, 灯 A 亮灯状态持续。这时若按下 PB<sub>2</sub>, 灯 B 亮, 同时继电器 Ry<sub>2</sub> 励磁, 第 2 列的 b 接点断开, 灯 A 熄灭, 第 4 列的 b 接点也复原为关闭状态。

### 顺序图的编号表示法

由于继电器电路日趋复杂,每个继电器的接点都在哪里使用着,很难弄明白,所以在顺序图的控制总线上方写上编号,用以表示其下方的每个继电器的编号,是个方便的方法。如图 2.30 所示,有 4 列并联输入优先电路的例子,a 为常通接点,b 为常断接点。

例如,按下  $PB_1$ ,点亮 A 灯,继电器  $R_{y1}$  被励磁,3 个锁定用的常断接点  $R_{y2b}$ 、 $R_{y3b}$ 、 $R_{y4b}$  打开,1 个自我保持用常通接点关闭,将这时有动作的常断接点的插入位置,记在  $R_{y1}$  下面 b 栏中,写上 3、5、7,与控制总线上方 3、5、7 列相对应,清楚地表示禁止输入于灯 B、C、D 所连电机。此外在接点 a 栏中写上 2,与总线上的第 2 列相对应,表明它是具有自保功能的接点。

一般说,接点的插入处,设计者很清楚,但第三者检查电路动作,或维修、检修电路时就不太容易弄明白,用上述编号表示法是十分有效的方法。

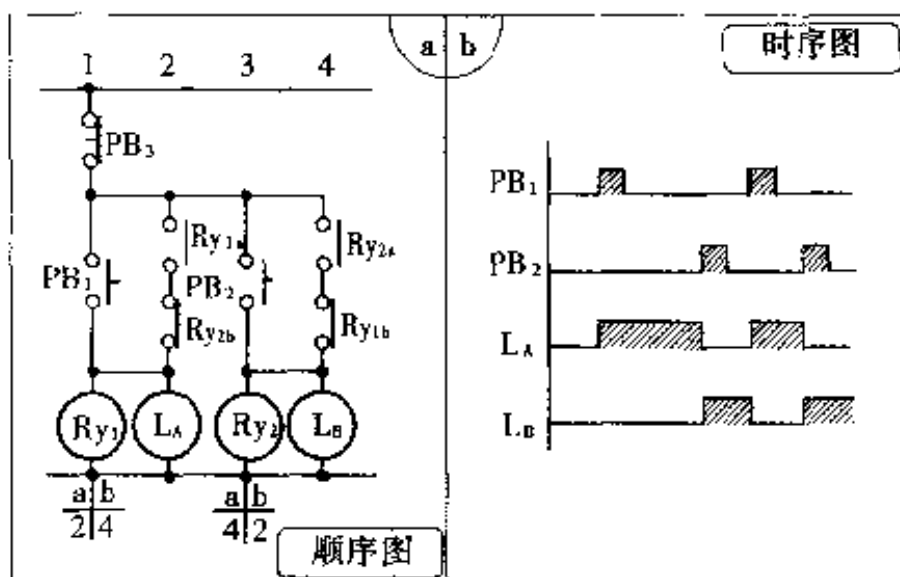


图 2.31 新输入优先电路

因此,从图 2.31(b)的时序图中可看出,利用自我保持功能,可以形成记忆下输入端 A、B 中,谁是最新输入的那一方的电路,也就是说,用有接点的继电器也可以组成与第 4 章所述无接点时序触发器电路有相同功能的电路。

#### 2.4.4 串行优先电路

如图 2.32 所示,从最靠近电源一侧开始,继电器按 A、B、C 的

优先顺序排列,也可称为顺序控制电路。在决定机械启动顺序时,这是很有效的电路。

$PB_1$  按下,灯 A 亮,接点  $Ry_{1a}$  闭合,在按下  $PB_1$  以前,即使先按  $PB_2$  或  $PB_3$ ,继电器  $Ry_2$  或  $Ry_3$  也不会被励磁,灯 B、灯 C 也不亮。 $PB_1$ 、 $PB_2$  被顺序按下,灯 A 与灯 B 均被点亮,如果  $Ry_{1a}$  与  $Ry_{2a}$  2 个接点没有闭合,则 C 灯不会被点亮。

在前述吹风机的例子中,必须按送风机、加热器的顺序启动开关,就是这种电路应用的例子。

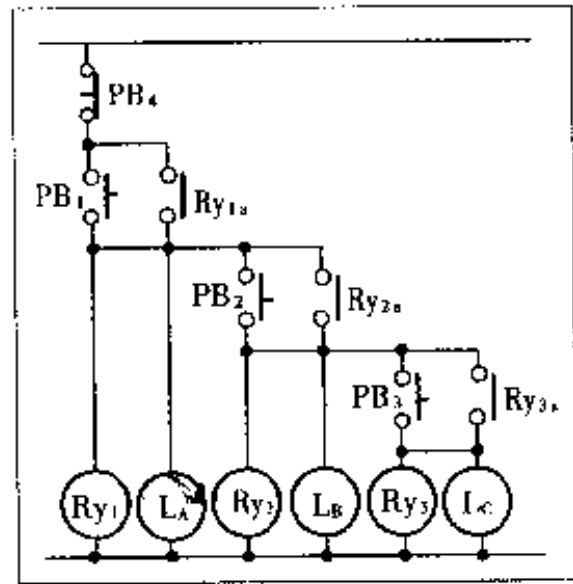


图 2.32 串行优先电路(顺序控制)

### 名词解释

锁定 interlock; 禁止有关对方的相关动作

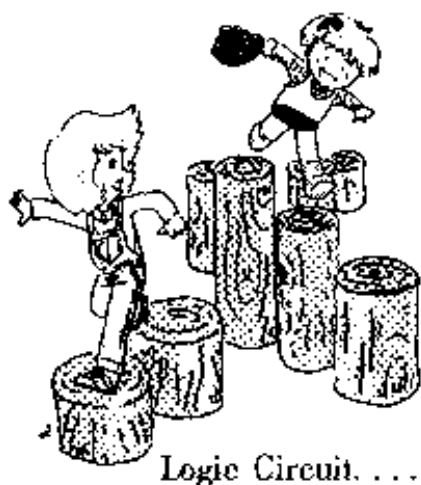
触发器 flip-flop; 将与输入信号相应的 0 或 1 状态反复表示的电路





# 第 3 章

## 门电路的组合与逻辑电路的表示法



前一章,对 AND(INV-NOR)、OR(INV-NAND)、NOT(NOT) 及 NAND(INV-OR) 等门电路,其具体的电路是怎样工作的进行了说明,本章对其它常用的门电路及其对应的逻辑式进行归纳讨论。

在设计逻辑电路时,将要求的逻辑动作直接用逻辑式表示出来,并加以合理的整理演算,首先,将必要的动作用时序图、动作表或真值表表示出来。其次,对逻辑式进行适当地演算,对门电路组合进行简化,并以手边有的 IC 芯片进行代用等。

### 3.1 逻辑代数(布尔代数)与真值

迄今为止,在顺序控制中使用的信号是 ON、OFF,或者 H 电平、L 电平 2 种信号。但是,从集合论角度讲,只有全部“有集合”(全体集合)与全部“无集合”(空集合)2 种状态。要处理这样非常单纯的集合,将“有集”用“1”来表示,将“空集”用“0”表示比较方便,称其为逻辑电平 1 与逻辑电平 0,即将数字信号当作逻辑变量(0 或 1)来考虑,其真值为 1 或 0,在集合论中成立的法则、公式等,全部适用于这些逻辑变量的关系,将对这些逻辑变量的演算称为逻辑代数或布尔代数。

将 A、B、C 作为逻辑变量,适用于它们的代数公式如下所示:

交换律

$$A \cdot B = B \cdot A \text{ (逻辑乘)} \quad (3.1)$$

$$A + B = B + A \text{ (逻辑加)} \quad (3.2)$$

吸收律

$$A \cdot 1 = A \quad (3.3)$$

$$A \cdot 0 = 0 \quad (3.4)$$

$$A + 1 = 1 \quad (3.5)$$

$$A + 0 = A \quad (3.6)$$

结合律

$$A \cdot (B \cdot C) = A \cdot B \cdot C \quad (3.7)$$

$$A + (B + C) = A + B + C \quad (3.8)$$

分配律

$$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C \quad (3.9)$$

$$A + (B \cdot C) = (A + B) \cdot (A + C) \quad (3.10)$$

德·摩根定理

$$\overline{(A \cdot B)} = \bar{A} + \bar{B} \quad (3.11)$$

$$\overline{(A + B)} = \bar{A} \cdot \bar{B} \quad (3.12)$$

其中,交换律、吸收律、结合律及分配律 4 个法则与普通代数完全相同、易懂,但由于此处处理的是逻辑变量的真值,只有 1 和 0,  $1 + 1 = 1$  希望引起注意。即  $A = 0$  时没有问题,  $A = 1$  时式(3.5)与式(3.10)与普通代数运算不一样。式(3.10)中,无论 B、C 为何值,只要  $A = 1$  则两端皆为 1 成立。

根据上一章说明的正负逻辑,德·摩根定理与 AND 电路、OR 电路具有相同的互换性。如图 3.1(a)所示,  $\bar{A}$ 、 $\bar{B}$  符号代表 A、B 的补集,圆 A 外侧的横线部分代表  $\bar{A}$ ,圆 B 外侧的竖线部分代表  $\bar{B}$ 。如图 3.1(b)所示, A 与 B 的逻辑积 ( $A \cdot B$ ) 就是圆 A 与圆 B 重合的部分(即空白处), A 与 B 的补集  $\overline{A \cdot B}$  就是  $A \cdot B$  的外侧,即横线部分  $\bar{A}$  与竖线部分  $\bar{B}$  的逻辑和 ( $\bar{A} + \bar{B}$ )。以上就是对式(3.11)的说明。而 A 与 B 的逻辑和 ( $A + B$ ) 的补集  $\overline{(A + B)}$  是图 3.1(c)中实线包围部分的外侧,即竖线和横线重叠的部分,也就是  $\bar{A}$  与

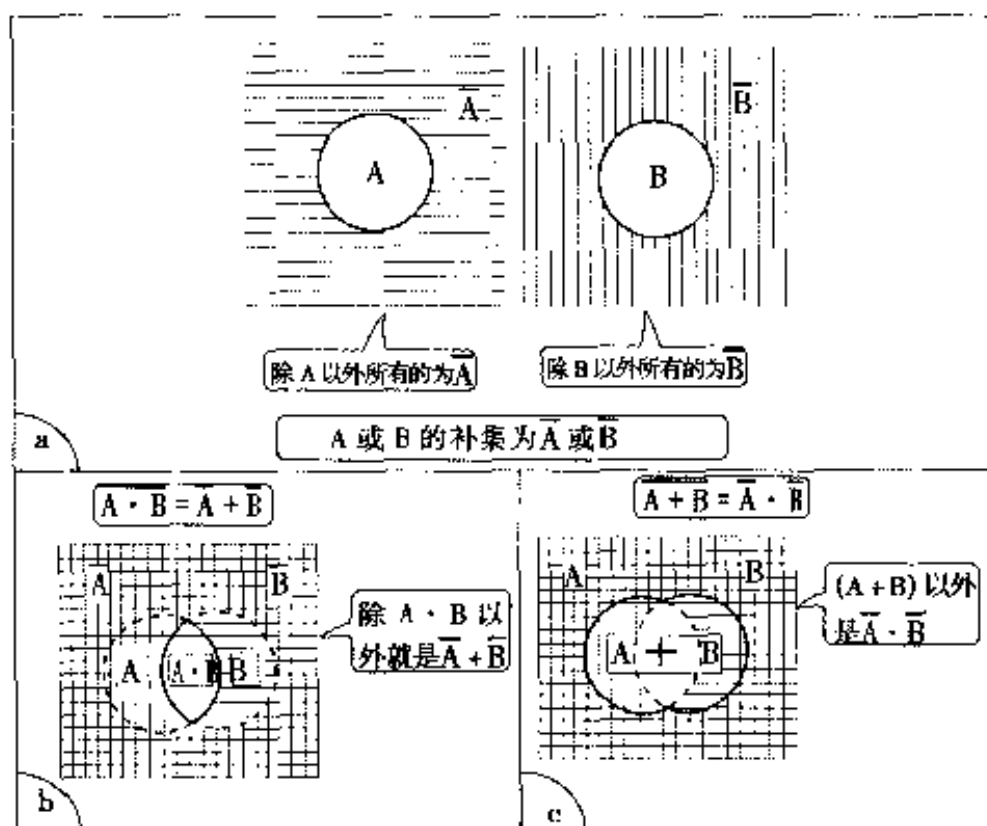


图 3.1 德·摩根定理的说明

$\bar{B}$  的逻辑积  $\bar{A} \cdot \bar{B}$ , 这就是对式 (3.12) 的说明。

在上一章中讲过, 正逻辑将 ON 或 H 电平设为“1”, 将 OFF 或 L 电平设为“0”。负逻辑则相反。这并不是说何者正确, 实际上正逻辑和负逻辑完全等价, 希望根据情况恰当使用。正如前一章所述, 即使门电路的硬件本身完全相同, 但使用正逻辑和使用负逻辑的功能是不同的。值得注意的是, 通常门电路的硬件名称只采用正逻辑中的功能名称。

AND 和 OR 反过来是相同的



### 名词解释

布尔代数 Boolean algebra; 逻辑代数

补集 complementary set; 从全集中抽出元素后余下元素的集合

德·摩根定理 d' Morgan's law; 关于全集与空集的逻辑公式之

硬件 hardware; 与程序软件 software 相对, 指构成电路的元、器件

## 3.2 门电路和逻辑式

### 3.2.1 非门(NOT)和缓冲器

2.2节中的反相器也被称为非门(NOT),非门(NOT)的功能就是将逻辑变量反转(若输入H电平,则输出L电平;若输入L电平,则输出H电平),如图3.2所示,输出X总是表现为输入信号A的反转电平。

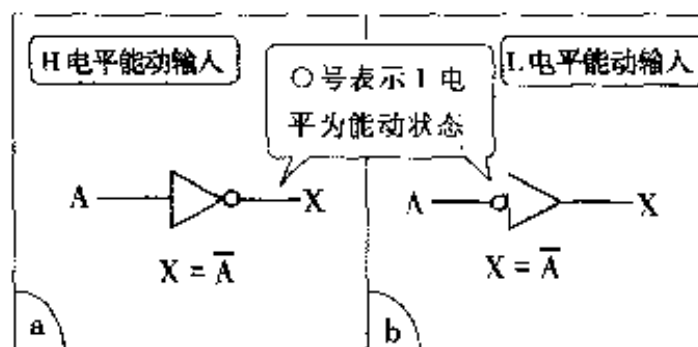


图 3.2 非门的表示法

其逻辑式记为

$$X = \bar{A} \quad (3.13)$$

图中○号表示L电平为能动状态。

能动状态就是设计者欲使电路发挥作用的状态。例如,若设计目的是点亮灯泡,那么图3.2(a)中输出为L电平时灯亮,而图3.2(b)中输入为L电平时灯亮。不论是输入侧取H电平为能动状态(图3.2(a))还是与之相反,输入侧取L电平为能动状态,门电路反转电平的功能都不变。

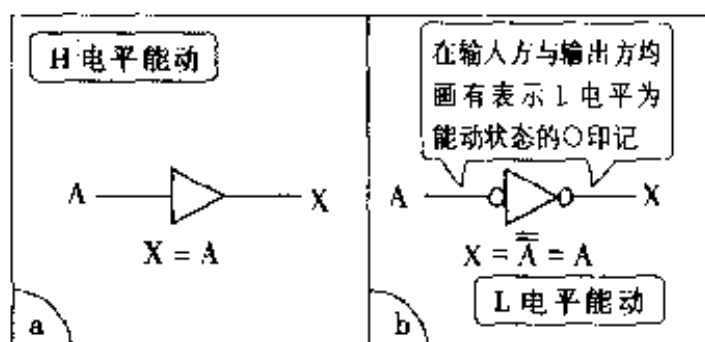


图 3.3 缓冲器的表示法

缓冲器如图3.3所示,因为输出信号总是和输入信号相同,所以逻辑门不起任何作用。它主要用于增加输出端子数。当H电平能动输入时,逻辑式为

$$X = A \quad (3.14)$$

当 L 电平能动输入时,由图 3.3(b)可知,逻辑式为

$$X = \overline{\overline{A}} = A \quad (3.15)$$

### 3.2.2 与门(AND)和与非门(NAND, INV-NOR 与 INV-OR)

如图 3.4 所示, AND 门是取 H 电平能动输入的 A、B 的逻辑积作为输出 X。

$$X = A \cdot B \quad (3.16)$$

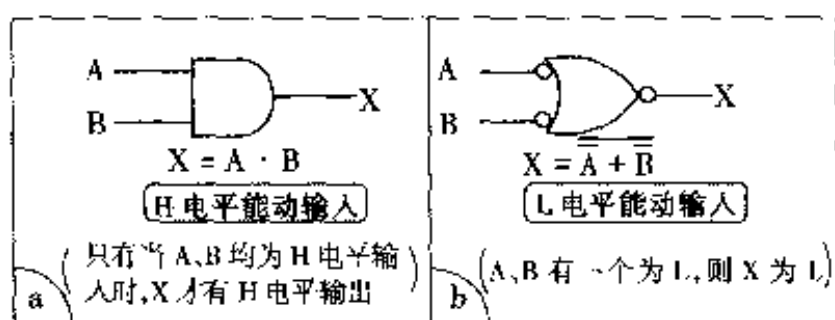


图 3.4 与门(INV-NOR 门)的表示法

当 A、B 为 L 电平能动输入时,它作为 NOR 门(INV-NOR)起作用,即求出  $\overline{A}$ 、 $\overline{B}$  的逻辑和后再反转、输出,如图 3.4(b)所示,其逻辑式为

$$X = \overline{\overline{A} + \overline{B}} \quad (3.17)$$

使用德·摩根定理可改写为

$$X = \overline{\overline{A} + \overline{B}} = \overline{\overline{A \cdot B}} = A \cdot B \quad (3.18)$$

这与 H 电平能动输入时的逻辑积表达式(3.16)相同。总之,正如



在上一章所说明的硬件电路功能一样,正逻辑积(H电平能动)与负逻辑和(L电平能动)是同样的操作。

如图 3.5 所示,NAND 门是对 H 电平能动输入的 A、B 求逻辑积后,再反转输出。其逻辑式为

$$X = \overline{A \cdot B} \quad (3.19)$$

对于 L 电平能动输入的 A、B,它作为 OR 门(INV-OR)起作用,H 电平能动输出逻辑式为

$$X = \overline{A} + \overline{B} \quad (3.20)$$

根据德·摩根定理式(3.11),可将其改写为

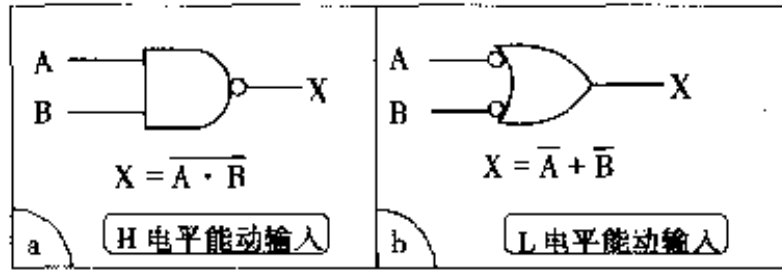


图 3.5 与非门(INV - OR)的表示法

$$X = \bar{A} + \bar{B} = \overline{A \cdot B} \quad (3.21)$$

这与式(3.19)相同,可见 NAND 与 INV-OR 是相同的。

### 3.2.3 或门(OR)和或非门(NOR, INV-NAND 与 INV-AND)

OR 门是取 H 电平能动输入的 A、B 的逻辑和作为输出 X。

$$X = A + B \quad (3.22)$$

如图 3.6(a)所示,由图 3.6(b)可知,对于 L 电平能动输入的 A、B, NAND 门(INV-NAND)是求得  $\bar{A}$ 、 $\bar{B}$  的逻辑积后反转输出。逻辑表达式为

$$X = \overline{\bar{A} \cdot \bar{B}} = \overline{\overline{A + B}} = A + B \quad (3.23)$$

可见 OR 与 INV-NAND 是相同的。

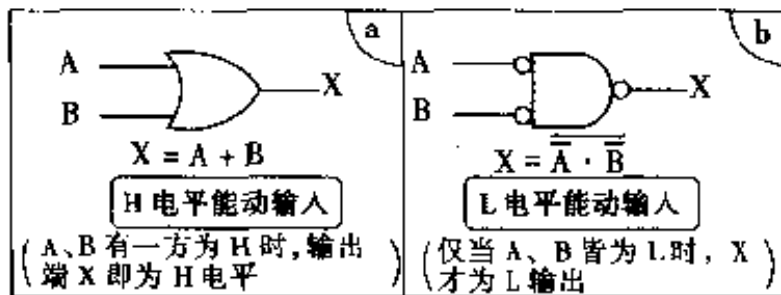


图 3.6 或门(INV - NAND)表示法

NOR 门如图 3.7 所示,是对 H 电平能动输入的 A、B 求逻辑和后再反转输出。逻辑式为

$$X = \overline{A + B} \quad (3.24)$$

当 L 电平为能动输入时,它作为 AND 门起作用。因为输出为 H 电平能动,所以逻辑式为

$$X = \bar{A} \cdot \bar{B} = \overline{A + B} \quad (3.25)$$

可见 NOR 与 INV-AND 是相同的。

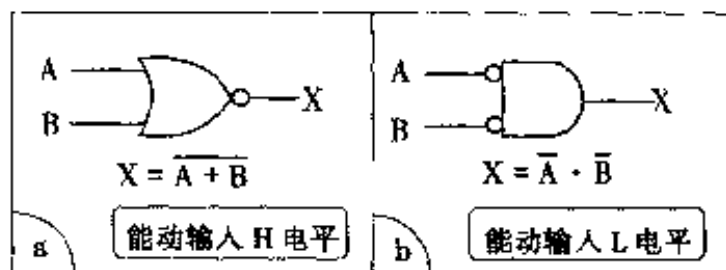


图 3.7 或非门(INV - AND 门)表示法

## 3.2.4 异或门(EX-OR)和 EX-NOR

若两个输入 A、B 中一个为 1, 另一个为 0, 则输出 X 为 1; 若两者同为 1 或 0 (一致), 则输出为 0。将这种门电路称为异或门 (EX-OR) 或者反一致电路。

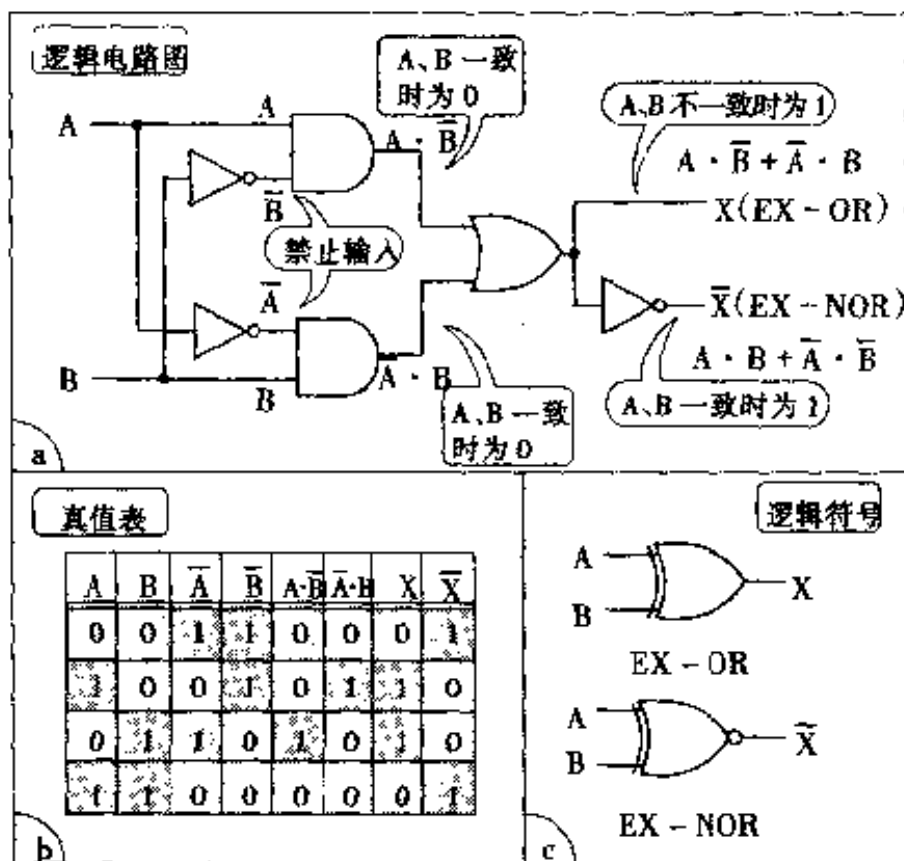


图 3.8 异或门和异 - 非或门

该电路为前面介绍过的互锁电路的变形, 如图 3.8(a) 所示, 它可由具有相互禁止输入功能的 AND 门与 OR 门构成。由图 3.8 可知, 其逻辑式为

$$X = (A \cdot \bar{B}) + (\bar{A} \cdot B) \quad (3.26)$$

另外, 如果给输出 X 加个 NOT 门, 得到  $\bar{X}$ 。

$$\bar{X} = \overline{(A \cdot \bar{B}) + (\bar{A} \cdot B)} \quad (3.27)$$

由图 3.8(b)所示的真值表可知,仅当输入 A、B 一致时输出  $\bar{X}$  才为 1,将这种电路称为 EX-NOR 门或者一致电路,其逻辑式为 EX-OR 的逆逻辑,即使用德·摩根定理式(3.11)及式(3.12)可得

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \overline{(A \cdot B)} \cdot \overline{(\bar{A} \cdot \bar{B})} = (\bar{A} + \bar{B}) \cdot (\bar{\bar{A}} + \bar{\bar{B}}) \\ &= (\bar{A} \cdot \bar{\bar{A}}) + (\bar{A} \cdot \bar{B}) + (\bar{\bar{A}} \cdot \bar{B}) + (\bar{B} \cdot \bar{\bar{B}})\end{aligned}\quad (3.28)$$

其中

$$\bar{A} \cdot \bar{\bar{A}} = \bar{A} \cdot A = 0 \quad (3.29)$$

$$\bar{B} \cdot \bar{\bar{B}} = \bar{B} \cdot B = 0 \quad (3.30)$$

所以最终得到

$$\bar{X} = (A \cdot B) + (\bar{A} \cdot \bar{B}) \quad (3.31)$$

图 3.8(c)为逻辑符号。

EX-OR 或 EX-NOR 门电路有多个输入,输入信号全为“0”或全为“1”的时候,其输出状态完全不同于其它情况。因此在数字电路中,它经常用于检测各个输入端的逻辑电平是否全为“1”或全为“0”。

### 名词解释

异或、异非或,EX-OR、EX-NOR;排他的逻辑和;源于 exclusively  
一致电路 coincidence gate;检出输入信号的逻辑电平一致还是不一致的门电路。(逆)anti coincidence gate 反一致电路

## 3.3 卡诺图

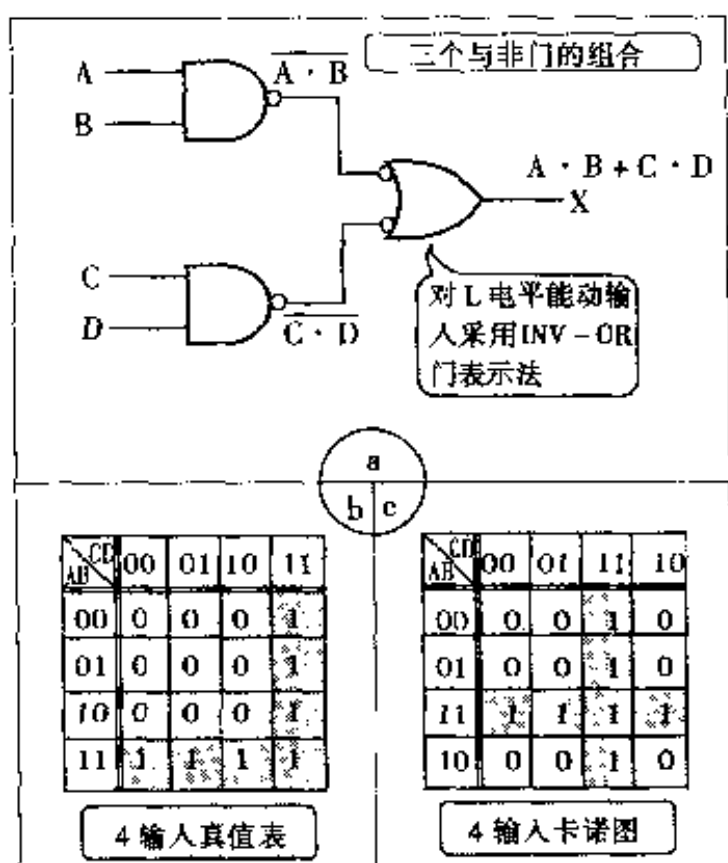
### 3.3.1 4 变量的真值表

以前为了表现 2 个输入的逻辑动作使用真值表,真值表清晰地表现了逻辑电路的作用,十分方便。但对有多个输入的电路该怎么办呢?例如,将 3 个 NAND 门如图 3.9(a)所示连接起来,研究一下输入为 A、B、C、D 时的输出 X。3 个门电路都是完全相同的元件(例如 SN7400 的 3/4),根据 MIL 记号法,第 2 列的门电路是低电平能动输入,表现为 INV-OR 门的形式。

如果用前面所述的方法列真值表, A、B、C、D 值组合起来有



$2^4 = 16$  种,包括输出 X,需要 16 行  $\times$  5 列的存贮空间。如图 3.9(b) 所示,将 AB 和 CD 分别组合建一个 2 维表,只须 5 行 5 列即可。输出 X 记在 16 个小格内。这样可得到全部真值,而且易写易看。如果有 5 个变量或 6 个变量,则需 4 行 8 列或 8 行 8 列的表格。这是无法避免的。



卡诺图中 2 邻居间只有 1 位不同呀!



图 3.9 4 输入门电路的表示

由这一真值表可知,只有 AB 为 11 这一行和 CD 为 11 这一列真值为 1。因此,输出 X 应该是 A、B 的逻辑积和 C、D 的逻辑积的逻辑和。即图 3.9(a)的门电路表示为

$$X = (A \cdot B) + (C \cdot D) \quad (3.32)$$

这是因为

A、B 和 C、D 输入到 NAND 门( $\overline{A \cdot B}$  及  $\overline{C \cdot D}$ ),然后再输入到 INV-OR,所以有

$$X = \overline{\overline{A \cdot B}} + \overline{\overline{C \cdot D}} = (A \cdot B) + (C \cdot D) \quad (3.33)$$

### 3.3.2 卡诺图的作法

在 2 维真值表中(如图 3.9(b)),输入 A、B 及 C、D 按二进制数顺序,即 00、01、10、11 的顺序排列,可是这样一来,第 2 个和第

3个由01变成10时,需要同时改变两个变量的值。如果将第2个和第3个交换一下,按00,01,11,10的顺序排列,则向相邻者变化时只须改变一个变量的值。我们将2进制数的顺序称为二进制代码,而称该顺序为格雷码(gray code)。因为最后面的10和最前面的00也仅有一位发生变化,所以用格雷码表示可保持周期的连续性,可用于机械转角的编码器等。

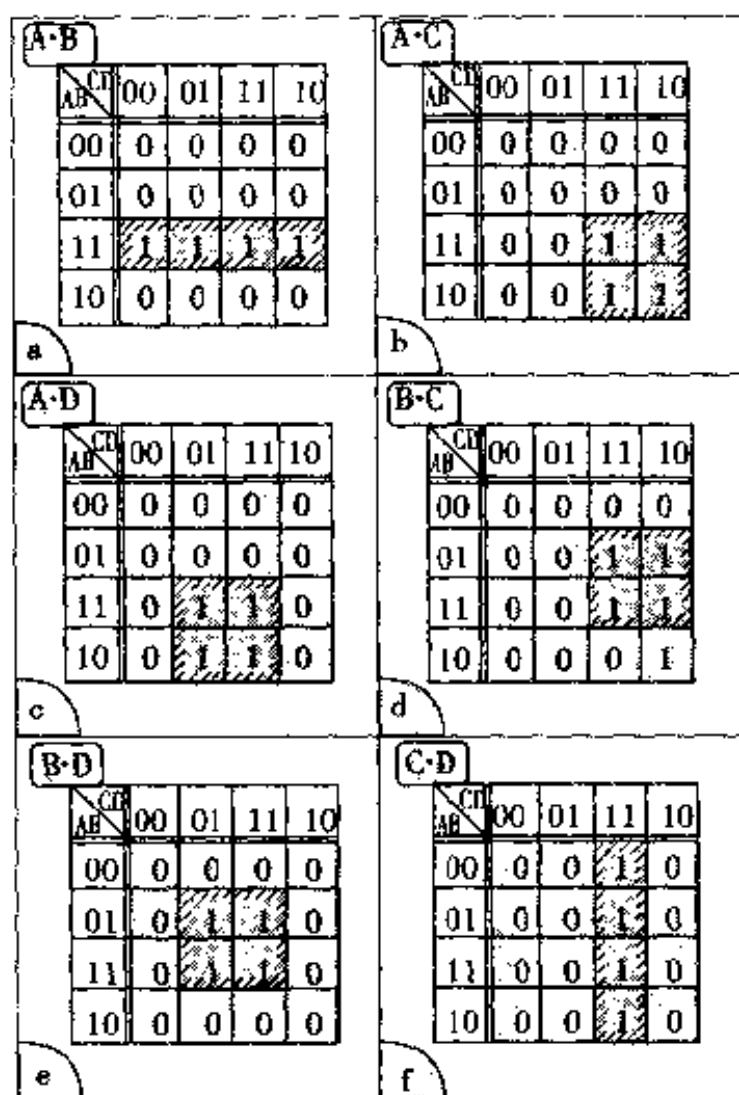


图 3.10 4 变量逻辑积卡诺图

在前面介绍的2维真值表中,将输入值按格雷码顺序重新排列,则称为卡诺图(如图3.9(c))。也就是交换图3.9(b)中第3行与第4行及第3列与第4列。由此可知,由于卡诺图的小格沿上下或左右只移动一个,所以输入A、B、C、D中,只需改变一个即可。其逻辑距离为1。若沿斜向移动到相邻小格,则需改变两个输入,其逻辑距离为2,如图3.10所示,可在一个区域内表示变量

逻辑积为 1 的部分。另外,若需求逻辑和,可通过将每个卡诺图迭加起来得到。

在 4 个变量的卡诺图中,2 变量的积有  $A \cdot B$ 、 $A \cdot C$ 、 $A \cdot D$ 、 $B \cdot C$ 、 $B \cdot D$  及  $C \cdot D$  六种。该值为 1 的区域如图 3.10(a) 到图 3.10(d) 中阴影线所示。从中可以看出通过两个输入的 AND 电路以后输出为 1 的区域。图 3.9(c) 所示的卡诺图中为 1 的部分等于图 3.10(a) 中的  $A \cdot B$  与图 3.10(d) 中的  $C \cdot D$  的迭加。不难看出,图 3.9(a) 的门电路的逻辑表达式为

$$X = (A \cdot B) + (C \cdot D) \quad (3.34)$$

### 3.3.3 卡诺图和逻辑式

请大家回顾一下第 1 章中讲述的控制楼道灯的 3 路开关电路,其目的是从两处独立控制同一盏灯,用输入  $A$ 、 $B$  为 0 或 1 来表示两个开关的切换方向,若设开灯状态为 1、关灯状态为 0,则可得到图 3.11(a) 所示的卡诺图。在该图中,方格为 1 的情况是  $A \cdot B$  和  $\bar{A} \cdot \bar{B}$ ,可得到逻辑表达式如下

$$L = (A \cdot B) + (\bar{A} \cdot \bar{B}) \quad (3.35)$$

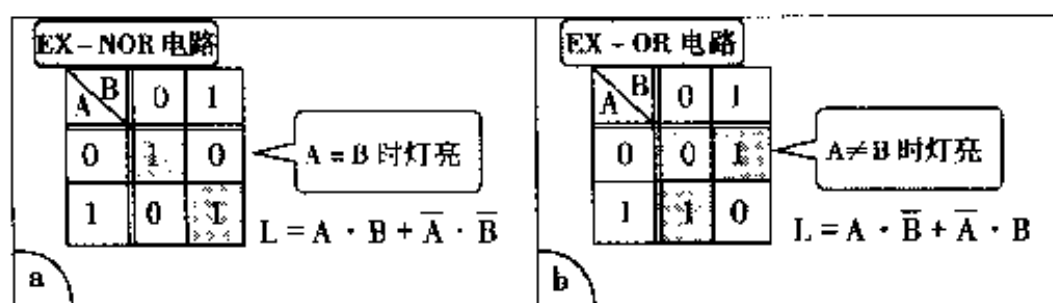


图 3.11

这与 EX-NOR 的逻辑表达式相同。

另一方面,采用负逻辑,设关灯状态为 1,开灯状态为 0,则可得到图 3.11(b) 所示的卡诺图。其逻辑表达式为

$$L = (A \cdot \bar{B}) + (\bar{A} \cdot B) \quad (3.36)$$

这与 EX-OR 的逻辑表达式相同。采用这些逻辑表达式组成的电路可以有图 3.12(a) 及图 3.12(b) 所示的两种形式,它们都能实现设计目的,第 1 章中介绍的楼道灯的电路例子就是 EX-NOR 电路。

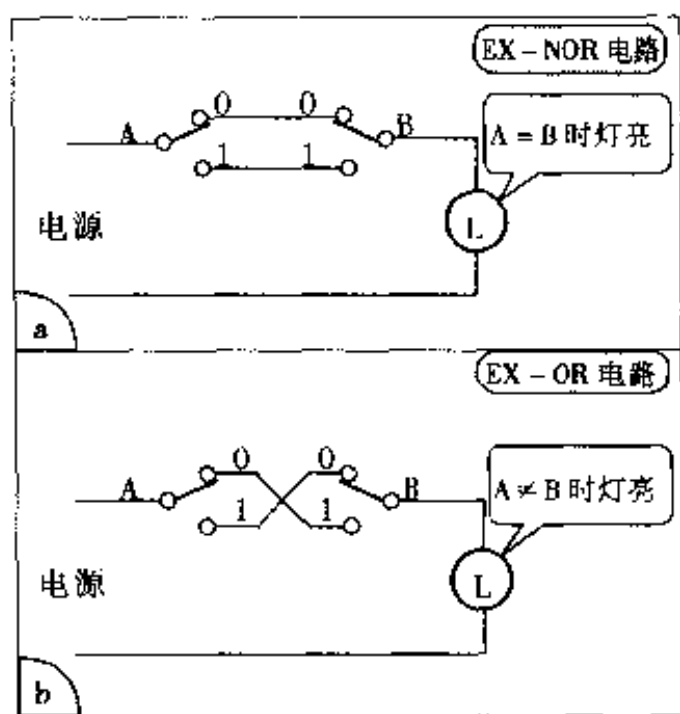


图 3.12 楼道灯的 3 路开关电路

状排列 0 和 1。由此可知,不论改变 A、B、C、D 中的哪一个输入,都能将 L 值从 0(关灯)变到 1(开灯),或从 1(开灯)变到 0(关灯)。

为推导其逻辑表达式,可求得卡诺图中真值为 1 处的逻辑积的全部逻辑和。首先,与第 1 行、第 2 列的  $A=0、B=0、C=0、D=1$  对应的逻辑积为  $\bar{A}\bar{B}\bar{C}D$ 。其次,第 1 行第 4 列 0010 对应的逻辑积为  $\bar{A}\bar{B}C\bar{D}$ ,与第 2 行第 1 列 0100 对应的为  $\bar{A}B\bar{C}\bar{D}$  等。最后,所有项

如要控制 4 层公寓的楼道灯该怎么办呢? 假设各层输入为 A、B、C、D,只要改变 A、B、C、D 这 4 个输入中的一个,就可以改变灯的逻辑状态 L 的真值为 0 或 1,只改变一个变量,意味着卡诺图中逻辑距离为 1(纵向或横向相差一格),所以上下左右相邻的真值通常可取相反符号,即如图 3.13 所示,与此相应的卡诺图呈现出汽车竞赛中的信号旗

楼关大厦的楼道灯是怎么控制的?

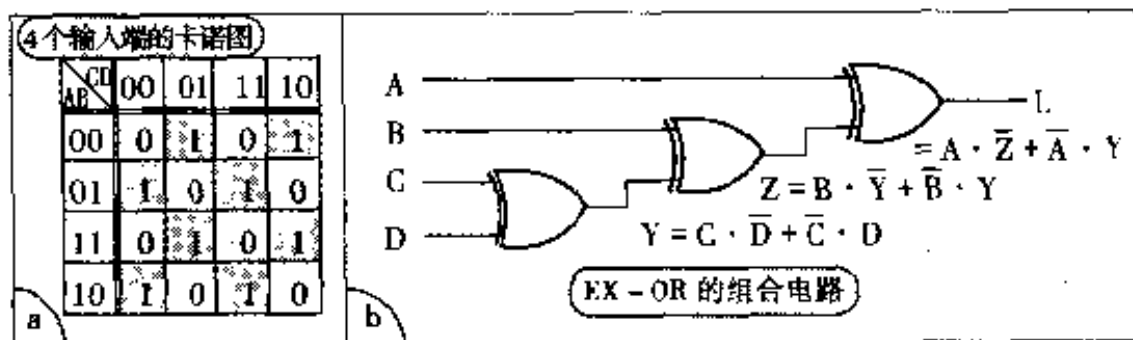


图 3.13 4 个控制场所的逻辑电路

的逻辑和为

$$L = \overline{A}\overline{B}\overline{C}D + \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}BCD \\ + A\overline{B}\overline{C}D + A\overline{B}C\overline{D} + A\overline{B}C\overline{D} + A\overline{B}CD \quad (3.37)$$

这样就可表达出灯的逻辑状态。归纳一下可得到

$$L = A(\overline{B}\overline{C}D + B\overline{C}\overline{D} + \overline{B}C\overline{D} + \overline{B}CD) \\ + \overline{A}(BCD + \overline{B}C\overline{D} + \overline{B}C\overline{D} + \overline{B}C\overline{D}) \\ = A\{B(\overline{C}D + C\overline{D}) + \overline{B}(CD + \overline{C}\overline{D})\} \\ + \overline{A}\{B(CD + \overline{C}\overline{D}) + \overline{B}(\overline{C}D + C\overline{D})\} \quad (3.38)$$

令

$$Y = \overline{C}D + C\overline{D} \quad (3.39)$$

即 Y 取 C、D 的 EX-OR, 使用德·摩根定理式(3.11)及式(3.12), 并参考式(3.27)~式(3.31), 有

$$\overline{Y} = CD + \overline{C}\overline{D} \quad (3.40)$$

因而式(3.38)可化为

$$L = A(BY + \overline{B}\overline{Y}) + \overline{A}(B\overline{Y} + \overline{B}Y) \quad (3.41)$$

其中又出现了  $B\overline{Y} + \overline{B}Y$  形式的 EX-OR 门, 令  $Z = B\overline{Y} + \overline{B}Y$ , 与式(3.41)推导同理, 有

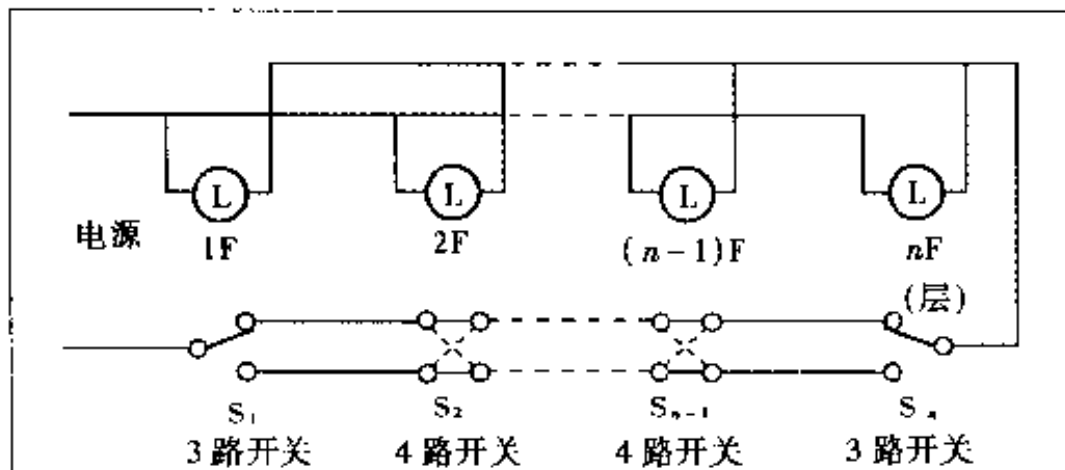
$$L = A \cdot \overline{Z} + \overline{A} \cdot Z \quad (3.42)$$

这又是一个 EX-OR 的逻辑式。总之, 如图 3.13(b)所示, L 可由 3 个连接的 EX-OR 门电路得到。

如果使继电器电路这样作用, 那么在 4 层楼的任一层楼道都可自由地开灯、关灯, 当输入 A、B、C、D 中, 逻辑电平为 1 的输入有偶数个时, 该电路输出为 0, 为奇数个时输出为 1, 所以也称之为判断输入个数的奇偶校验电路。当然, 它不仅适用于 4 个输入, 对于有  $n$  个输入的  $n$  层建筑也同样适用。

根据此原理也可实现无触点顺序控制。

和前面讲过的 2 处控制的情况相同, 将它用开关电路来实现比较复杂。如图 3.14 所示, 在两端配置 2 个 3 路开关组成 EX-NOR 电路, 中间插入 4 路开关用于反转。4 路开关如图 3.15 所示, 采用 3 极双掷开关, 在  $AA'$ 、 $BB'$  和  $AB'$ 、 $BA'$  的状态间切换。这样即使在数十层的建筑, 也可实现利用每层的开关随意地开关

图 3.14  $n$  层楼道灯的控制

楼道灯。实际上，虽然利用 2~3 层的楼道却要一齐打开数十处灯，这是一种浪费。因此，多采用每几层分为一组，分别予以控制。

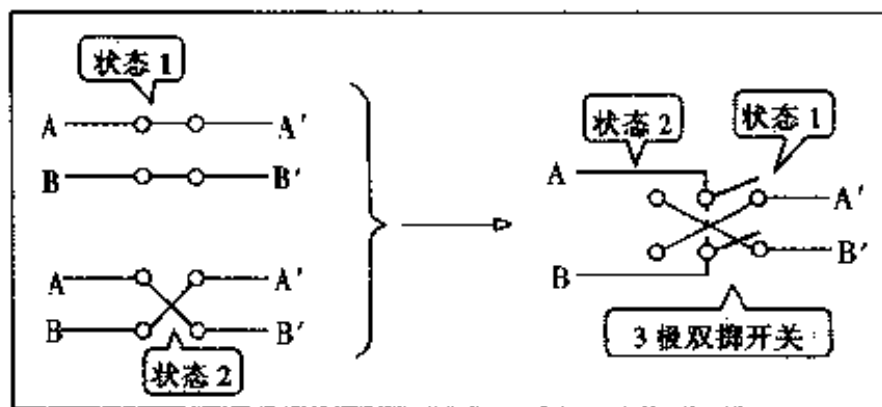


图 3.15 4 路开关的动作

## 名词解释

二进制数 binary code

格雷码 Gray code; 按逻辑距离 1 的顺序排列的二进制数

编码 encoder; 将信号按规则组合起来, (逆), 解码 decoder

卡诺图 Karnaugh's map; 将输入信号按格雷码表示列出的真值表,

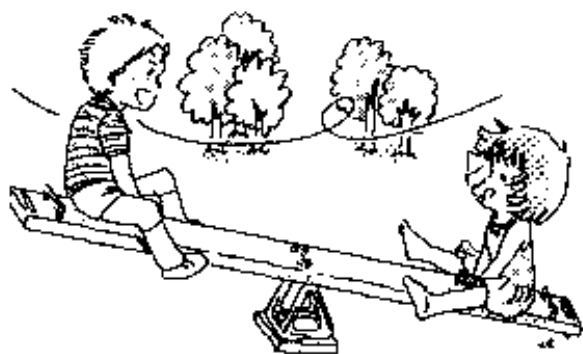
Karnaugh 是人名

信号旗(检查标志) checker flag

· 奇偶校验 parity check; 按奇偶性检查

# 第 4 章

## 计数器和数字电路



Flip - Flop ···

### 4.1 RS 闭锁电路(记忆电路)

乘电梯时,按下目的地楼层的按钮,相应楼层的指示灯亮。即使放开手指,在到达目的地楼层前指示灯也一直亮着,也就是说到达目的地命令一直被记忆着。

在第 1 章说明过的继电器保持电路也是典型的记忆电路。用图 4.1 将其再表示出来。

按下按钮  $PB_1$ , 与其并联的继电器保持接点  $a$  也接通。因此,  $PB_1$  与  $a$  为或门关系, 继电器因  $a$  激活而动作, 如图 4.2(a) 所示等价电路,  $S$  与  $a$  的 2 个输入端经 OR 电路输出  $Q$ , 并返回  $a$  端。在  $S$  瞬间有 H 电平输入,  $Q$  及  $a$  变为 H 电平, 其  $S$  输入端即使变为 L 电平,  $Q$  端仍保持 H 电平输出。也就是说  $S$  的信号被记忆下来了。

但是, 这样曾经输入的信号记忆不能消去。为此在继电器电路中, 又设置了断开式开关  $PB_2$  (如图 4.1)。此  $PB_2$  与  $PB_1$  及  $a$  接点串联着, 一旦切断继电器的电源, 保持

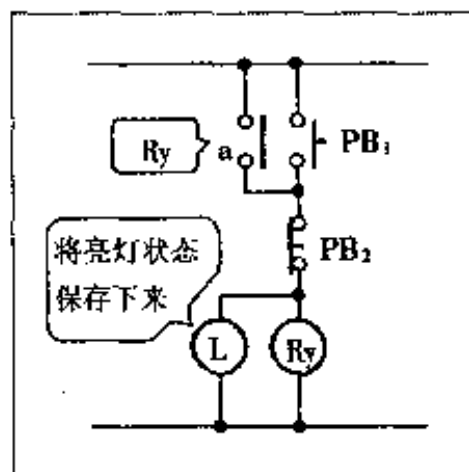


图 4.1 使用继电器的保持电路

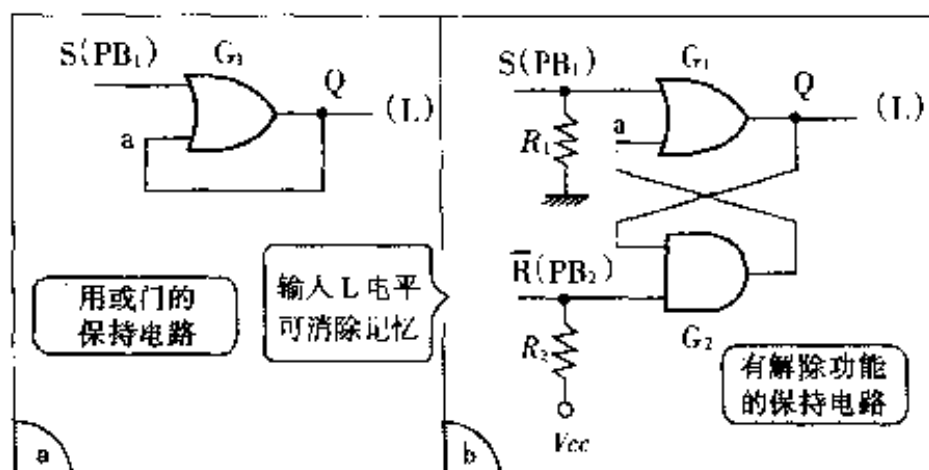


图 4.2 用门组合的保持电路

状态就被解除,记忆也就消失了。

于是,如图 4.2(b)所示,增加一个与门,通过在 $\bar{R}$ 输入另外的 L 电平,用于切断从 Q 到 a 的还原循环信号。Q 为 H 电平, $\bar{R}$ 也为 H 电平时,与门  $G_2$  输出 H 电平, $\bar{R}$ 变为 L 电平, $G_2$  输出 L 电平,Q 变为 L 电平。S 是被记忆信号的输入端,称为 set(设置)输入, $\bar{R}$  是消去记忆,返回原来状态的信号,称为 reset(重置)输入。这就是 RS 闭锁电路的基本点,也是各种触发器电路的原形。这种电路不仅称为闭锁,叫做 RS 触发器的也很多。

实际上,利用 SN7400 等与非门,可搭成如图 4.3 所示电路。在 set 及 reset 的输入端利用负载电阻  $R_1$  以及  $R_2$ , 平常保持 H 电平,瞬间有 L 电平信号输入 $\bar{S}$  或 $\bar{R}$  则产生动作。输出信号从 Q 及  $\bar{Q}$  处取出。Q、 $\bar{Q}$  的写法是说明一方为 H 电平时,另一方就为 L 电

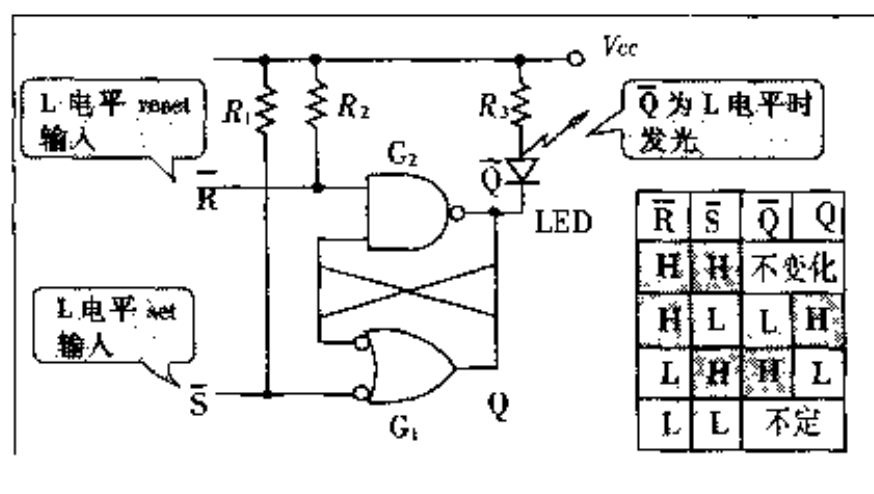


图 4.3 由与非组合而成的 RS 闭锁电路



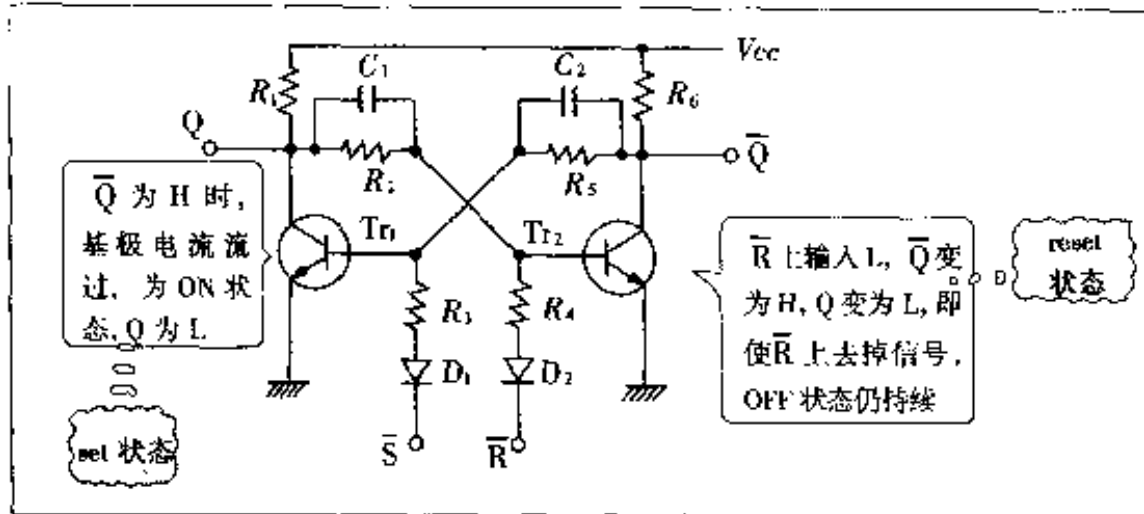


图 4.4 晶体管 RS 闭锁电路

平。在 $\bar{Q}$ 输出端接有发光二极管 LED,一有电流流过就会发光, $\bar{Q}$ 为 L 时灯亮,即表明闭锁电路处于设置(set)状态。

讨论一下用晶体管构成 RS 闭锁电路的基本动作过程(如图 4.4)。在 $\bar{R}$ 上输入 L 电平。因 $T_{r2}$ 的基极为低(L)电平,故 $T_{r2}$ 为 OFF 状态, $\bar{Q}$ 为 H 电平,从而在 $T_{r1}$ 的基极上经电阻 $R_5$ 有基极电流流入, $T_{r1}$ 变为饱和状态 ON, $Q$ 为 L 电平。其结果是,即使 $\bar{R}$ 返回 H, $T_{r2}$ 的基极仍维持 L 电平, $Q$ 为 L 电平, $\bar{Q}$ 为 H 电平称为 reset 状态被记忆下来。其后,若在 $\bar{S}$ 输入 L 电平, $T_{r1}$ 与 $T_{r2}$ 全都发生相反动作, $Q$ 为 H 电平, $\bar{Q}$ 为 L 电平,变为 set 状态被记忆下来。

与基极电阻 $R_2$ 及 $R_3$ 并联着的电容 $C_1$ 及 $C_2$ ,是为了加速晶体管导通所用的加速电容。二极管 $D_1$ 及 $D_2$ 为当输入端 $\bar{S}$ 及 $\bar{R}$ 为 H 电平时,防止从输入侧向晶体管基极流入电流。

另外, $\bar{S}$ 及 $\bar{R}$ 皆为 L 电平输入状态时,因 $T_{r1}$ 与 $T_{r2}$ 也皆为 OFF 状态, $Q$ 与 $\bar{Q}$ 同时变为 H 电平。但其后当 $\bar{S}$ 与 $\bar{R}$ 同时返回 H(高)电平时, $Q$ 或 $\bar{Q}$ 哪一个变为 H 电平却不能确定。也就是说,RS 闭锁电路的输入同时是 L 电平后,不允许全部同时返回 H 电平的使用方法。这恰恰是 RS 闭锁电路的最大缺点。正如下节所述,已设计了各种触发器输入信号的控



制电路来改进上述缺陷。

### analogy

将 RS 闭锁电路当作水管模型来看,如图 4.5 所示,不稳定的倒立模型,水由左右水龙头流出。左右水龙头都关闭时,倒立的平台向右或向左倒向支持棒后,状态不会起变化。若向右倒, $\bar{Q}$  为 H 电平状态,左边的水龙头一开流出水来,倒立平台就向左倾,一直倾倒在左侧的支持棒上,变为稳定状态为止,即  $\bar{Q}$  变为 L 电平,此时,即使左龙头关闭,水流停止,也应保持原有(向左倾倒)状态。接着,若右边的水龙头流出水来,倒立平台会向反方向倾倒直至右倒安定在右侧支持棒上。上述 RS 闭锁电路就是依照这种原理动作的。

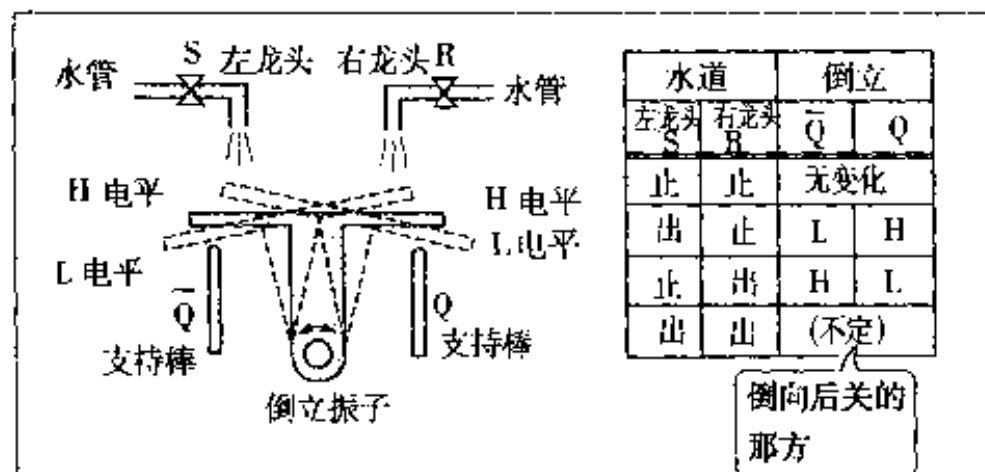


图 4.5 RS 闭锁的水管模型

若左右两方的水龙头都打开流出水来,会怎么样呢?倒立的平台在中间不稳定的位置停止一会儿,其后,若使左右水龙头同时关闭,倒立平台又不会稳定直立,但向哪一侧倾倒却不清楚,若毫不迟疑地打开水龙头,则肯定是哪方先开,倒立平台就倒向哪方。即 RS 闭锁电路既是记忆电路又可以是新输入优先电路。

两边都流水就难办了



在数字电路中,通常应该为 H 电平的地方,突然间闯入错误的 L 信号,于是会引发致命的误动作。在如图 4.6 所示那样简单的与非门电路中,若输入信号 A 与 B 同时分别从 L 向 H,从 H 向

L 变化, 对于这样的逻辑组合, 就可能有误动作。按设计者的意图应当如时序图中 X 所示, X 的输出像平常那样还是保持 H 电平, 但在实际上, 因 A、B 输入信号的翻转(从 H 到 L, 或从 L 到 H 的电平变化)引起时序的偏移, 如时序图 X' 所示, 在输出瞬间会变为 L 电平。这就是称为尖峰信号 (spike) 的错误信号, 在将动作时间快慢不一的元件组合在一起时, 这种现象会屡屡出现。

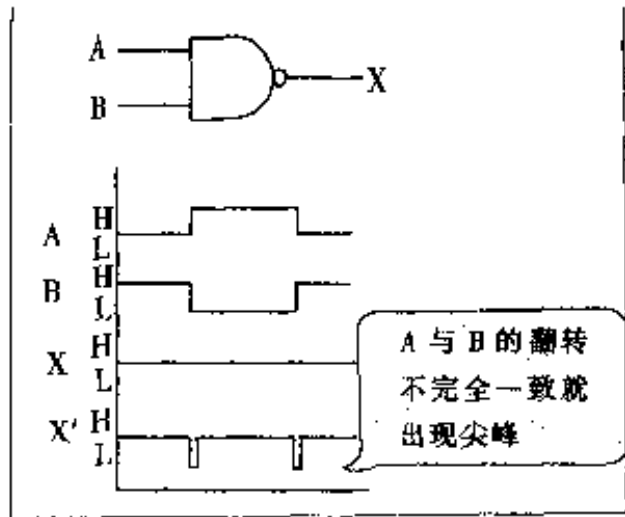


图 4.6 数字电路的尖峰信号

当然, 这种尖峰信号用一般的测试仪器是检测不出来的, 因为它们通常是非常短时的信号, 在随机产生时, 即使用同步示波器也多不易发现。这时, 图 4.3 的 RS 闭锁电路的 S 输入即使为 reset(重置、清除)状态, 因为会产生尖峰信号, 所以瞬间的 L 电平也可使 LED 亮, 将这种状态记忆下来, 就能检测出尖峰干扰信号的有无。此外, 不仅能检测出尖峰干扰信号, 为了除掉第 1 章所述由于手动开关的抖动(chattering)而导致的误动作, 也经常采用这样的电路。总之, 在  $\bar{R}$ 、 $\bar{S}$  端接入手动开关接点, 从 Q 或  $\bar{Q}$  取出信号, 能够得到稳定的开关动作。

### 名词解释

闭锁电路 latch circuit; 数字信号的临时记忆电路

设置 set; 将闭锁电路设置为记忆状态。(反)reset 重置, 清除

发光二极管 luminescent diode; LED, 有电流流过就会发光的二极管

操纵电路 steering gate; 触发器的输入控制电路

加速电容 speed up capacitor; 为提高一般晶体管的开关速度而连接的电容

尖峰信号 spike; 因脉冲电路而引起的窄细误信号

## 4.2 触发器

### 4.2.1 RST 触发器

上节的闭锁电路中,  $\bar{R}$  或者  $\bar{S}$  端一有信号输入,  $Q$  及  $\bar{Q}$  立刻就反转为新状态。这时若想用某个同步信号使触发器产生同步触发动作时, 可采用如图 4.7(a) 那样, 用与非门组成的操纵控制电路去驱动 RS 闭锁电路的方法。尤其是用微机控制的情况下, 在使用时钟脉冲的系统中, 利用该脉冲来同步  $Q$ 、 $\bar{Q}$  的输出, 常使用这种方法。此外, 对于去除前述的尖峰干扰也是个有效的方法。

从图 4.7(b) 的时序图可看出, 只要  $T$  为 L 电平, 不论加在与非门  $R$ 、 $S$  端的信号如何变化, 闭锁电路的  $\bar{R}$ 、 $\bar{S}$  输入端保持 H 电平,  $Q$  不发生变化, 只有当在  $T$  端输入 H(高) 电平的时钟脉冲时, 与  $R$ 、 $S$  的状态相对应, 将与其相反的电平加在闭锁电路的  $\bar{R}$ 、 $\bar{S}$  端。这样,  $Q$  输出端的变化就与时钟脉冲  $T$  完全同步了。

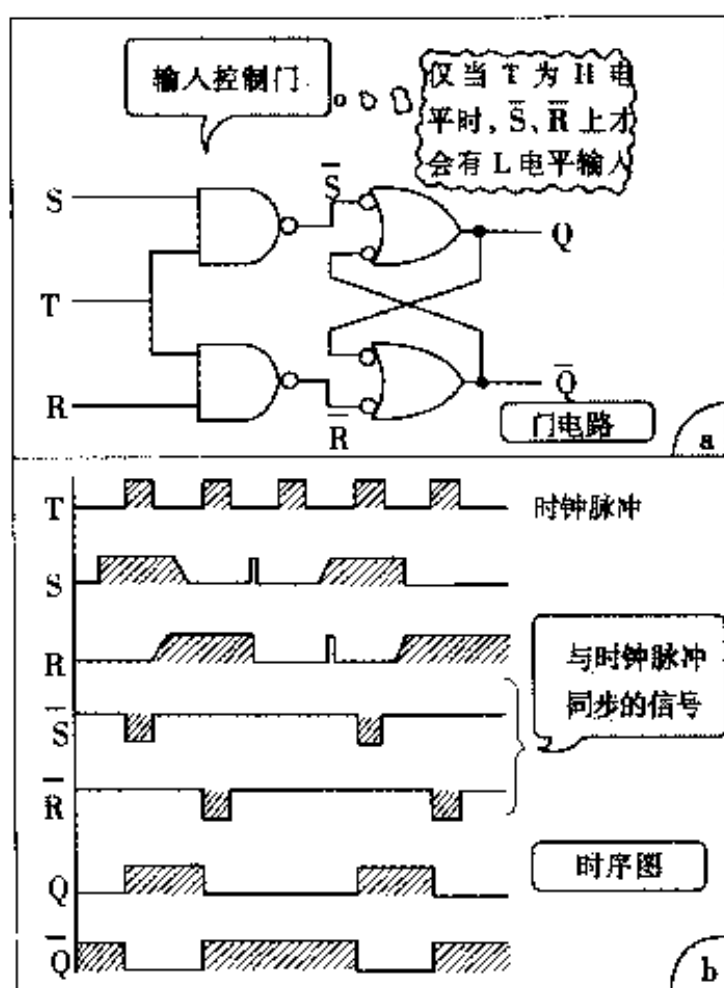


图 4.7 RST 触发器

上节“analogy(模拟)”中所述的水管模型中(如图 4.5),可将一根水管经定时管后,再分开成为左右有龙头的 R 与 S 管。

#### 4.2.2 D 型触发器

作为 RST 触发器,当 S 与 R 同为 H 电平时,若加上时钟脉冲 T, 输出状态不定的缺点还是不能去除。为克服该缺陷,采用如图 4.8 所示的 D 型触发器电路。将时钟脉冲加入时的一个信号 D, 记住是 H 电平还是 L 电平。在这个电路中,在 S 上加上一个信号源 D, 它们经过与非门后,成为  $\bar{S}$  信号又加到 R 上,就使 R 与 S 不可能同时为 H 电平。

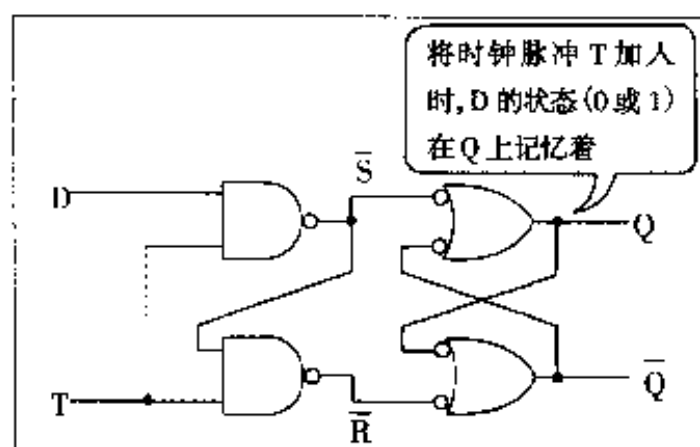


图 4.8 D 型触发器电路

因此,当输入信号 D 为 H 电平时,再加上时钟脉冲 T,  $\bar{R}$  还是 H 电平,  $\bar{S}$  端为 set(设置)信号,触发器工作, Q 输出 H(高)电平,  $\bar{Q}$  保持 L(低)电平。另一方面, D 变为 L(低)电平时,  $\bar{S}$  还是 H 电平,用  $\bar{R}$  上的 reset(重置)信号,清除触发器,使 Q 为 L 电平,  $\bar{Q}$  保持 H 电平。结果是,时钟脉冲输入瞬间, D 的状态被忠实原样地保存在 Q 上,一直保持到下一个脉冲在 T 上输入为止。将 D 的电平状态移到 Q 上,由于最长只需最大的时钟脉冲间隔时间,故又将其称为延迟电路。

就图 4.5 的水管模型而言,可更换一根将 2 个带龙头管 R 和 S 向左右切换的水管 D。当然,定时管 T 还是要原样连接的。

#### 4.2.3 T 型触发器

D 型触发器是将一个信号源的电平利用时钟脉冲忠实地保存下来的电路。而 RST 触发器只是将输出信号 Q 反转,其输入端

R 和 S 需要有别的信号输入。T 型触发器中只要在一个触发端子 T(trigger) 上加入输入信号, 输出端 Q 的状态每次随之翻转一次。

这种电路中, 输入 2 次触发信号会产生一个方波输出, Q 端恢复到原来的状态, 所以也叫做 2 进制计数电路或者 2 进制计数器。

如图 4.9 所示, 在 RS 闭锁电路中, 利用电阻  $R_1$  将输出 Q 反馈到  $\bar{S}$  上, 将  $\bar{Q}$  反馈到  $\bar{R}$  上, 在输入端  $\bar{S}$  以及  $\bar{R}$  上, 通过引导电容  $C_1$  加以输入触发信号  $\bar{T}$ 。触发脉冲经过小引导电容  $C_1$  加到两个输入端, 如时序图所示, 变为脉冲下降沿时为负向, 脉冲上升沿时为正向, 具有锐利尖峰状的波形加在  $\bar{R}$  及  $\bar{S}$  上。

这里, 不会有两边的水同时流下的事, 我就放心了

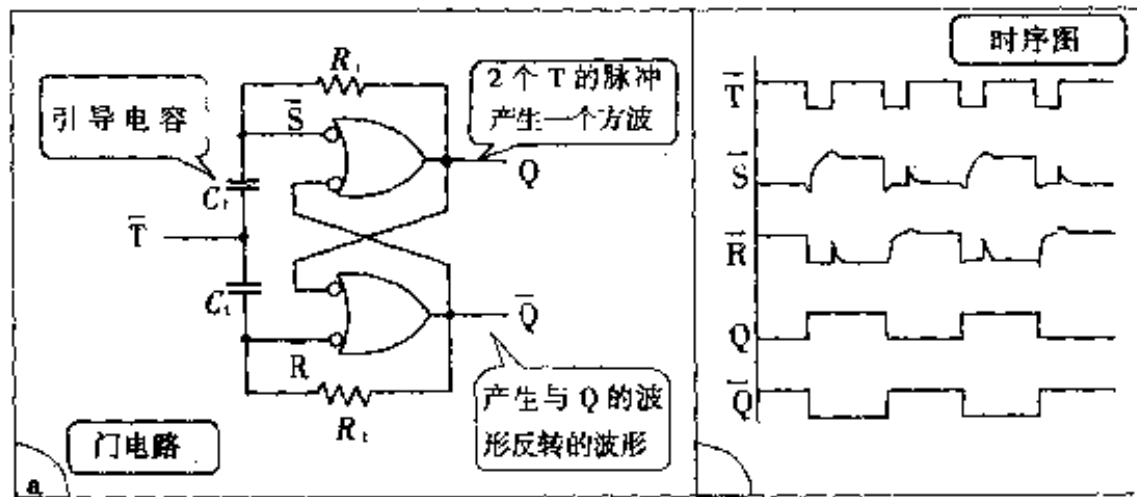


图 4.9 T 型触发器

在这种 T 型触发器电路中, 当 Q 为 L 电平,  $\bar{Q}$  为 H 电平时,  $\bar{S}$  应为 L(低) 电平,  $\bar{R}$  应为 H(高) 电平, 触发脉冲下降时刻,  $\bar{R}$  为 L 电平, Q 为 H 电平,  $\bar{Q}$  为 L 电平, 刚好反转(见图 4.9(b)时序图)。

另一方面, 触发脉冲的上升沿做正向触发时, 在 Q、 $\bar{Q}$  并未引起任何变化, 第 2 个触发脉冲输入时, 触发器才翻转, 输出 Q 才完成了 1 个周期。也就是说, 在触发脉冲  $\bar{T}$  的 1 个周期中, 只在下降沿时输出翻转进入半周期(将其称为下降沿触发), 也将这种电路作为 1/2 分频器使用。

## analogy

将 T 型触发器电路再用前面的水管模型模拟讨论一下。如图 4.10 所示, 相当于引导电容的左右龙头的切换管 C 与倒立振子连动着。振子向左倒是 Q 为 H 电平,  $\bar{Q}$  为 L 电平状态, 此时按下按钮管 T, 触发水流动, 切换管 C 打开右龙头 R, 水由右侧龙头流出。因此振子向右倒, 则 Q 为 L 电平,  $\bar{Q}$  为 H 电平。若再次操作 T 触发水流出, 这次就向左倒, Q 为 H 电平,  $\bar{Q}$

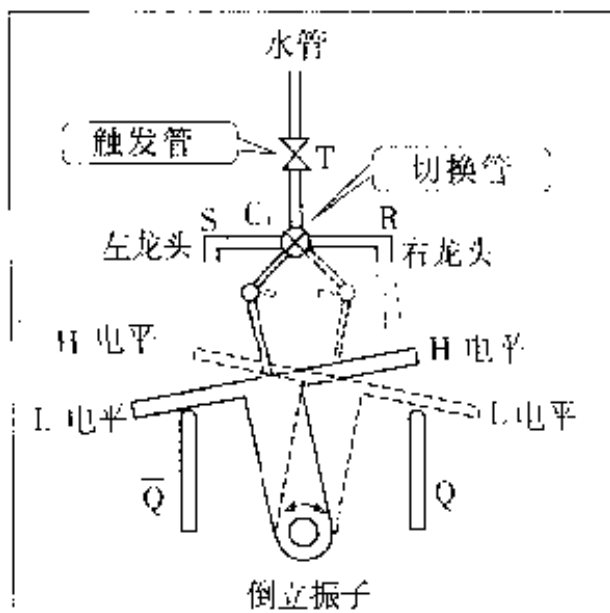


图 4.10 T 型触发器的水管模型

为 L 电平, 振子的位置复原。也即通过触发管的 2 次操作, 倒立振子完成了 1 个周期, 故可以当作 1/2 分频器的计数器去操作。

操作按钮式触发管 T 时, 应确保处于使振子能正常动作的必要流量范围内, 时间必须尽可能短。振子反转后, 水还在流着, 因方向切换管 C 的动作, 水就从另一侧的龙头开始流出, 振子就又反转过去了。另外, T 连续开着, 水就不断流出, 会引起按振子时间常数的振荡现象。这与不稳定触发器, 即方波振荡器的原理相同。

### MEMO 微分电路与积分电路

如图 4.11(a) 所示, 在由电容 C 与电阻 R 组成的电路中, 输入电压  $V_i$  为周期 T 的方波, 输出电压  $V_o$  则如图 4.11(b) 的时序图所表明的那样, 是锐利尖峰状的上、下沿, 指数式的充放电特性。因此常将方波作为触发脉冲使用。脉冲为上升沿时, C 上有充电电流流过, R 的两端出现正电压。充电进行中, C 两端的电压上升, 充电电流减少, 输出电压  $V_o$  下降, 一直到 0。当用脉冲下降沿时, 输入电压  $V_i$  急速变为 0, C 的放电电流与前述相反的方向流过 R, 输出电压  $V_o$  急速变负并慢慢返回到 0。

这种充、放电特性是由 C 与 R 的大小所决定的, 输出电压  $V_o$  作为 t 的函数, 可表示如下式

$$V_o = V_i e^{-t/CR}$$

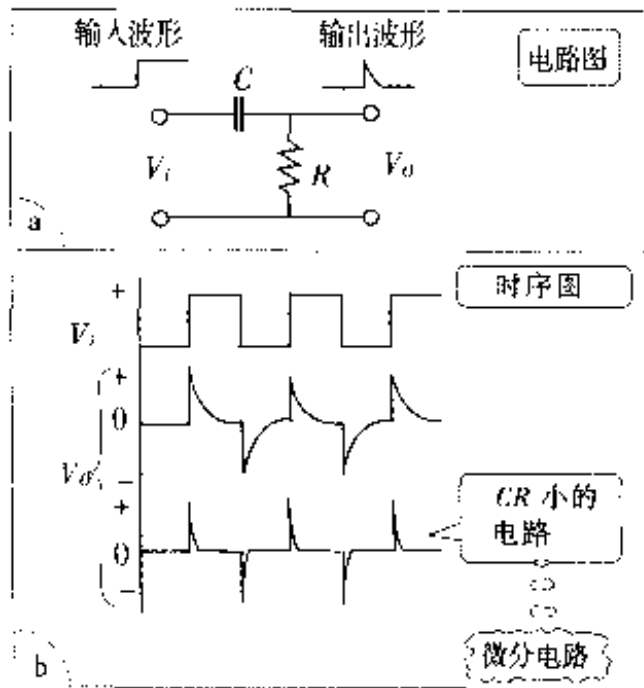


图 4.11 微分电路

$CR$  称为时间常数,用  $\tau$  来表示。当  $t = CR$  时上式为

$$V_o = V_i e^{-1} = \frac{V_i}{e}$$

$CR = \tau$  (秒)后,  $V_o$  约为  $1/2.7 V_i$ 。

例如,  $C = 1\mu F$ ,  $R = 1K\Omega$  时,时间常数  $\tau$  为  $1ms$ 。时间常数  $CR$  的值小的电路,输出电压波形较尖锐,这样的电路称为微分电路。

另一方面,在如图 4.12 所示电路中,是将  $C$  的充放电电压作为输出电压,输出波形为缓缓上升和下降的形状。与前述相反,可用于除去电路

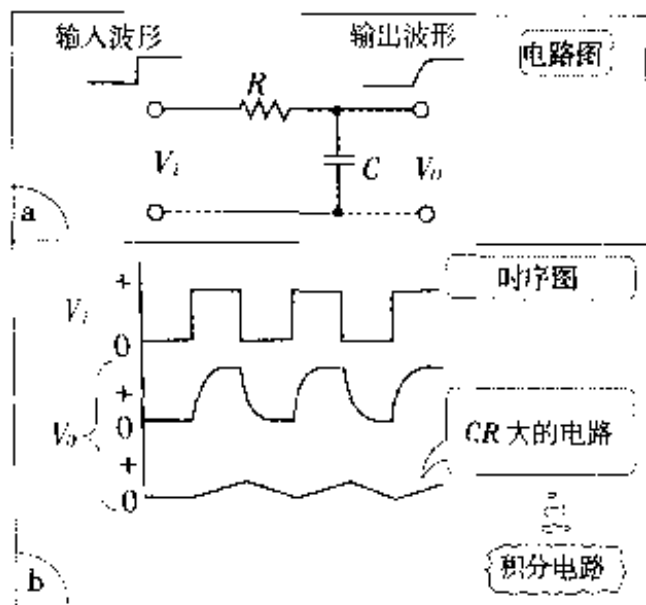


图 4.12 积分电路

中的锐利尖峰。另外,为保持脉冲电路的延迟时间也常用到。同样,充放电特性也是由时间常数  $CR$  确定的,可用指数函数来表示。时间常数  $CR$  的值越大的电路,输出波形越钝化。这样的电路称为积分电路。



## 4.2.4 JK 触发器

在 RS 及 RST 触发器中, R、S 两个输入端不允许同时给与 H 电平,可以在两个输入端同时给与信号的触发器是 JK 触发器。它是作为主 - 从触发器的基础被制造的。

图 4.13 为全部用与非门构成的电路示例。这里是带有输入控制门电路的 2 级触发器,相当复杂。其基本原理是利用输入时钟脉冲 T 的定时作用,控制向触发器传送信号。 $G_3$ 、 $G_4$  的主触发器用  $G_1$ 、 $G_2$  输入门电路 A 来控制,  $G_7$ 、 $G_8$  的从触发器用  $G_5$ 、 $G_6$  输入门电路 B 来控制。

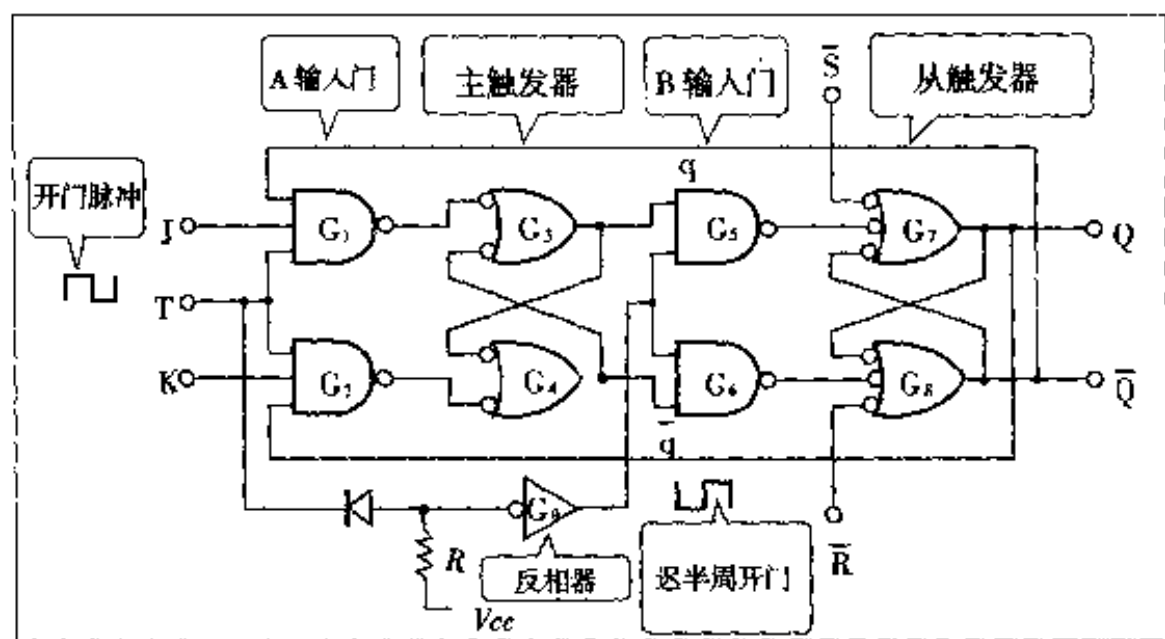


图 4.13 主从型 JK 触发器

输入时钟脉冲 T 为 H 电平时,门 A 打开, J、K 输入主触发器,  $q$ 、 $\bar{q}$  的状态发生变化。但是,这时 B 门为关闭状态,信号并未到达从触发器,  $Q$ 、 $\bar{Q}$  没有变化。随后,时钟脉冲 T 变为 L 电平时, A 门关闭, J、K 输入中断,同时通过反相器  $G_9$ , B 门打开,  $q$ 、 $\bar{q}$  输入从触发器。这样输出端  $Q$ 、 $\bar{Q}$  变化,使得 A 门输入的条件变化,直到时钟脉冲 T 变为 H 电平为止, A 门都不打开。

这样主 - 从型触发器依据时钟脉冲的高低,向前段(主)或后段(从)往返传送。这里,将输出端  $Q$ 、 $\bar{Q}$  反馈给输入侧的  $G_2$ 、 $G_1$  门,不会引起误动作,而是稳定的动作。为了这种正反馈,即使 J、K 输入皆为 H 电平时,与非门  $G_1$ 、 $G_2$  也必须一个开,另一个关闭。

此外,根据 JK 及 RS 的条件,可以按照功能自由选择 RS 型, D 型或 T 型等触发器(如,只使用  $\bar{S}$ 、 $\bar{R}$ 、Q、 $\bar{Q}$  的端子,就选用 RS 触发器),现在 JK 触发器正在作为万能触发器被使用着。

触动与翻转分开进行了



### 名词解释

RST 触发器 RS timing flip-flop; 与时钟脉冲(T)同步动作的 RS 闭锁电路

D 型触发器 delay flip-flop; 将时钟脉冲输入时的 D 端输入电平一直保存到下个脉冲输入为止

T 型触发器 trigger flip-flop 每当有触发脉冲输入,输出 Q 的电平就翻转。可作为 2 进制计数电路(binary counter)

不稳定触发器 non-stable flip-flop; (astable multi-vibrator)方波发生器(类似词)单稳(mono-stable)双稳(bi-stable)

主-从触发器 master-slave flip-flop; 将输入与输出电路互相分离,各自设置触发器的 2 级触发器电路

下沿触发 down-edge trigger; 脉冲下降沿时动作,(反义词)上(升)沿触发 up-edge trigger

微分电路 differentiator; 得到微分波形,使脉冲的上、下沿变尖锐的阻容电路

积分电路 integrator; 得到积分波形,使脉冲上、下沿钝化的阻容电路

时间常数 time constant; 微分电路、积分电路的常数,用电容的容量 C 与电阻值 R 之积 CR 表示

## 4.3 计数器

### 4.3.1 2 进制计数器

用于控制电子设备的数字信号是 H(高)电平或 L(低)电平,或者是 ON 或 OFF,它们可以相应地用 1 或 0(正逻辑),0 或 1(负逻辑)来表示。因此,从电路功能方面看,用 2 进制计数法表示是最方便的。上述 T 触发器就是 2 进制触发器。reset 状态为 0, set

状态为 1, 从  $Q$  输出端的状态看, 每当有一个输入信号, 它就在 0 与 1 之间来回翻转, 即可以当作 1 位 2 进制计数器来动作。将用 2 进制表示的数的 1 位 (0 或 1) 称为 1 bit, 一个触发器就是 1 位计数器, 是记忆单元。

因此, 将 4 个 T 触发器串联就能组成 4 位 2 进制计数器, 将  $n$  个串联就能组成  $n$  位 2 进制计数器 (如图 4.14)。图 4.14 中 T 触发器用标有  $Q$ 、 $\bar{Q}$  和  $\bar{T}$  记号的长方框来表示。目前的电路图中, 信号流程都是从左向右表示的, 在图 4.14 中输入信号从右方开始向左前进。这样做是为了将各位触发器的动作与 2 进制数的表示相对应, 比较容易习惯。

如图 4.14 所示, 最初时全部触发器  $TFF_1 \sim TFF_4$  的输出端  $Q$  皆为 0 (2 进数  $N=0000$ ) 处于 reset 状态。当在  $\bar{T}$  输入端有计数脉

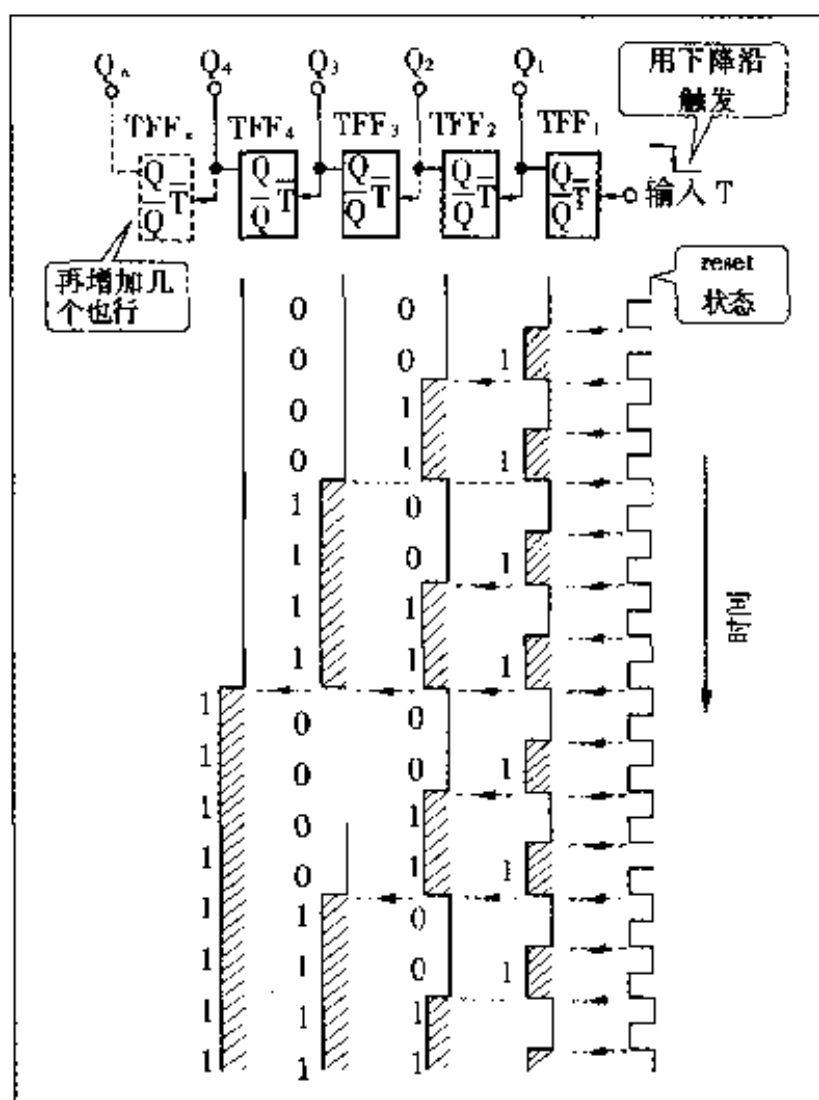


图 4.14 4 位 2 进制计数器的动作

冲输入时,脉冲的下降沿触发  $TFF_1$ ,使  $Q_1$  变为 1 ( $N=0001$ )。第 2 个脉冲输入时,  $TFF_1$  返回原来状态,  $Q_1$  变成 0,这时用  $Q_1$  的下降沿触发  $TFF_2$  动作,  $Q_2$  从 0 变为 1 ( $N=0010$ )。这就是进位动作。以后根据脉冲输入的数量  $N$  重复同样的动作,到 4 位 2 进制最大数  $N=1111$  为止,即 10 进制数的 15 (0~15 共 16 个数) 为止,这就是该递增计数器 (up-counter, 每次信号输入都使数值渐渐变大的计数器) 所能表示的数字。必要时可增加到  $n$  位,通常微机上以 8 位为一个单位容量,称为 1 个字节 (1byte)。

另外,若从触发器的  $\bar{Q}$  端子将各位取出, reset 状态时为  $N=1111$ ,每当在  $\bar{T}$  输入一个脉冲,所表示的数值就从  $N$  减少 1,将其称为递减计数器 (down-counter 每次信号输入后,数值渐渐减小的计数器)。

#### 4.3.2 16 进制数与 BCD 码

如上所述,用 4 位触发器能表示从 0000 到 1111 的 16 个数,用 8 位时,可到 1111 1111 即 10 进制数

$$2^7 + 2^6 + 2^5 + 2^4 + 2^3 + 2^2 + 2^1 + 2^0 = 255$$

为止,共可表示 256 个数。当然,只要增加位数,多大的数都能表示。将这样的 4 位 2 进制数原样表示出来需要并排 4 列数字,8 位时需要 8 列并排。

将这样的 2 进制数,每 4 位为一组表示起来比较方便。在表 4.1 中,与其它代码归纳在一起表示,4 位可以表示 16 个数 (0~15),写为 1 列,称为 16 进制数表示法。但可惜的是只有 0~9 这 10 个阿拉伯数字,只好将 9 以后的数用附加的 A、B、C、D、E、F 分别表示,才能用 1 个字符表示 (0~15) 16 个数字。这样,要表现 10 进制数的 200,需要 2 进制数 8 位记为 11001000,而用 16 进制数 2 位即可,记为 C8。但是说到底这仅仅是数字表示方法的规则,要保存 10 进制数的 200,必须用 8 位记忆单元,用 2 进制数表示,以 11001000 的形式保存下来。

16 进制数可以将很大的数非常简单地表示出来,的确很方便,但通常的数值处理,或数据交换是用 10 进制计数法。将 10 进制数的 200 与 16 进制数的 C8 对应起来就很不直观易懂了,用 2

进制表示为 11001000，不是相当熟练的人，很难马上明白。于是创造了 BCD 编码法，即用以 2 进制动作的记忆单元或运算单元形式去处理 10 进制数。

从表 4.1 的 BCD 码一栏中可见，将 10 进制的 0 到 9 的数值用 4 位 2 进制数表示，直到 1001 为止，下一个不写成 1010 而是进位成 00010000。即将 10 进制数的各位分别用 4 位 2 进制数表示，原样并排放在那儿，称为 10 进制数的 2 进制表示法，叫做 BCD 码。

其对应电路如图 4.15 所示。

将 4 位触发器的形态置为 1010(10 进制数的 10) 时，需要通过  $G_4$  的与非门进行重置。在 reset 的同时， $Q_4$  从 1 变为 0，通过下降沿触发也可以进位，这样就可以将 0~9 的 10 进制数用相应的 4 位 2 进制数表示，任何位数的 10 进制数，都有其每位相应的 4 位 2 进制数真值表，简单明确。

例如，与 10 进制数 231 相应的各

表 4.1 数值的各种表示法

10 进制数	2 进制数	16 进制数	BCD 码
0	00000000	0	0000000000
1	00000001	1	0000000001
2	00000010	2	0000000010
3	00000011	3	0000000011
4	00000100	4	0000000100
5	00000101	5	0000000101
6	00000110	6	0000000110
7	00000111	7	0000000111
8	00001000	8	0000001000
9	00001001	9	0000001001
10	00001010	A	0000010000
11	00001011	B	0000010001
12	00001100	C	0000010010
13	00001101	D	0000010011
14	00001110	E	0000010100
15	00001111	F	0000010101
16	00010000	10	0000010110
17	00010001	11	0000010111
20	00010100	14	0000100000
30	00011110	1E	0000110000
50	00110010	32	0001010000
64	01000000	40	0001100100
99	01100011	63	0010011001
100	01100100	64	0100000000
101	01100101	65	0100000001
128	10000000	80	0100101000
200	11001000	C8	1000000000
231	11100111	E7	1000110001
255	11111111	FF	1001010101

BCD 码虽有些浪费，但还是很方便呀！



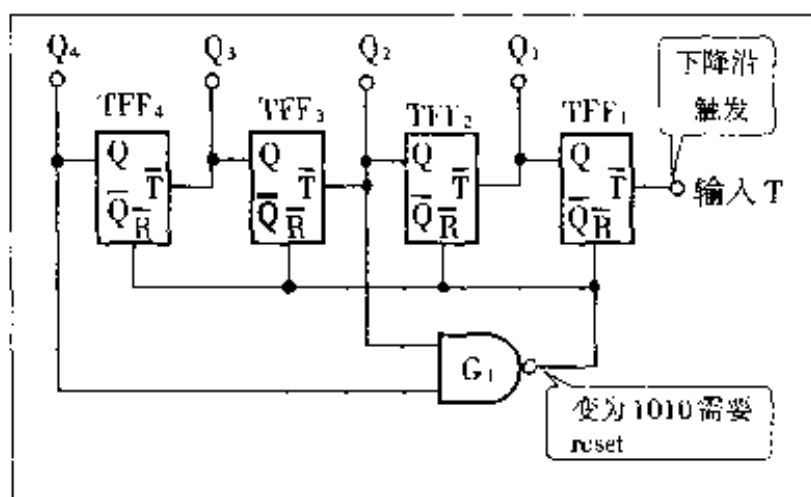


图 4.15 4位10进制计数器

位真值为

0010 0011 0001

纯2进制数表示也可以用8位,BCD码用10位,这时每4位

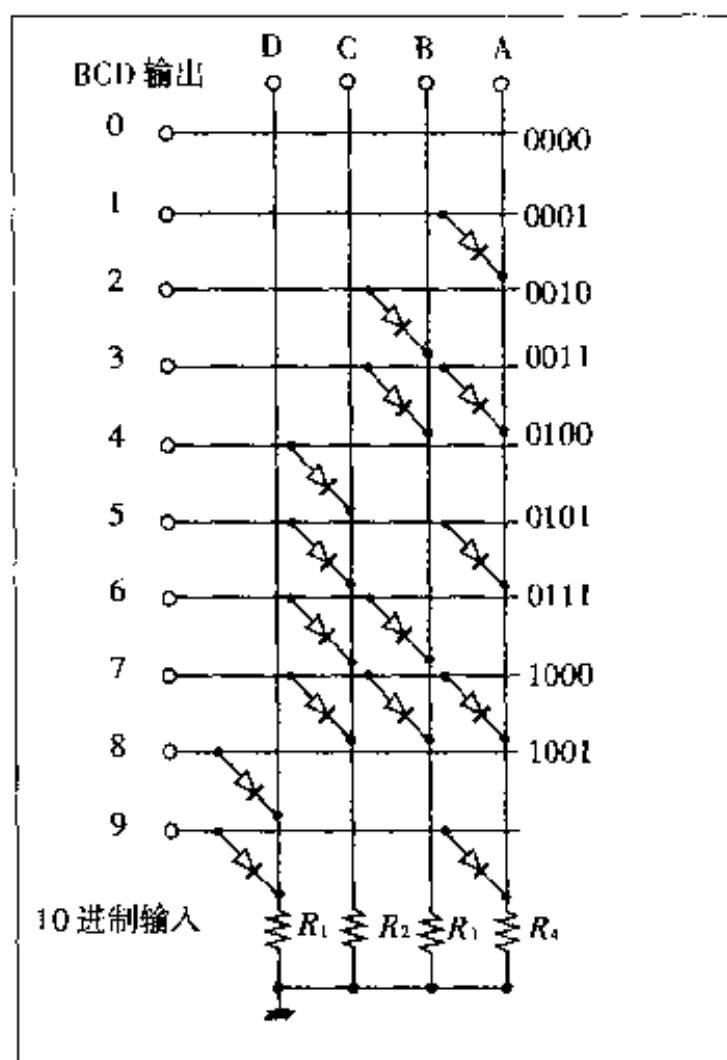


图 4.16 BCD 码的编码器

中不得不舍弃掉 6 种状态，与 10 进制数容易对应是其最大特征，因浪费太大，不适用于控制设备的内部数据交换，但在数字化设备的输入输出处理中，BCD 码却是经常使用的代码。

### 4.3.3 10 进制数与 BCD 码的变换

将 10 进制数的输入信号变为 BCD 码的电路称为 10 进制 BCD 编码器，由二极管阵列组成的例子示于图 4.16。0~9 的 10 进制数输入信号必须为正脉冲，还要注意抖动等干扰，当然也可以使用按钮或旋钮开关作为输入。这个电路是 DCBA 形的 4 位 BCD 码输出电路。

相反，将 BCD 码变回 10 进制数须使用译码器，如图 4.17 所示。实际的译码器是将不能在 2 处以上的数字同时为 ON 的电路，与防止因杂音等引起误动的方法结合起来。

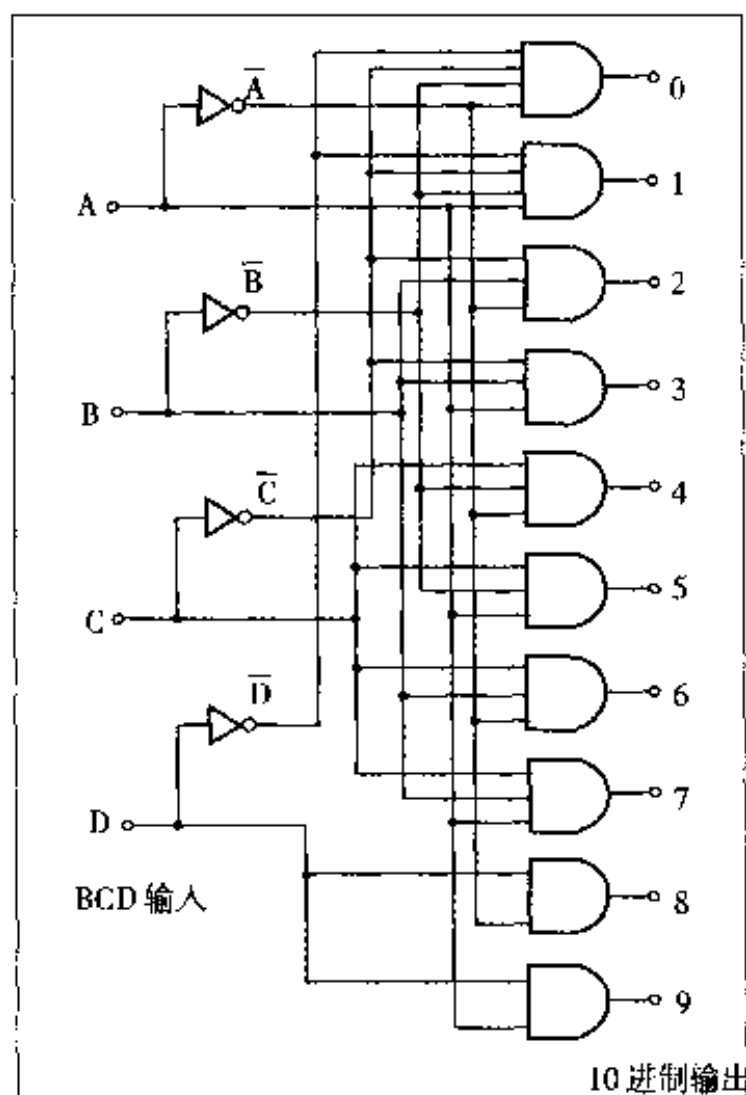


图 4.17 BCD 码译码器

### 名词解释

位 bit: 2 进制表示法的 0 或 1 的 1 位

字节 byte: 8 位为一个字节

递增计数器 up-counter: 每输入 1 个计数脉冲, 输出就增加 1 的计数器; 加 1 计数器

递减计数器 down-counter: 每输入 1 个计数脉冲, 输出就减少 1 的计数器; 减 1 计数器

BCD 码 binary coded decimal code; 2 进制化的十进制数

## 4.4 寄存器

### 4.4.1 并行数据与串行数据

在控制设备或数字电路中, 经常要将各种数据进行临时保存。这样的数据包括电压、电流或温度、压力等物理量数值, 也有用于决定各个电路动作条件的命令形式。在顺序控制中, 经常将设定动作条件的一连串 ON、OFF 信号的组合记忆下来。同时将为了设定  $n$  个场所的动作条件的数据变成一组 ON、OFF 的信息, 组合成一串 bit 状态保存下来或者调出使用, 这些数据都有处理的必要。将各位一齐取出的数据称为并行数据(如图 4.18)。

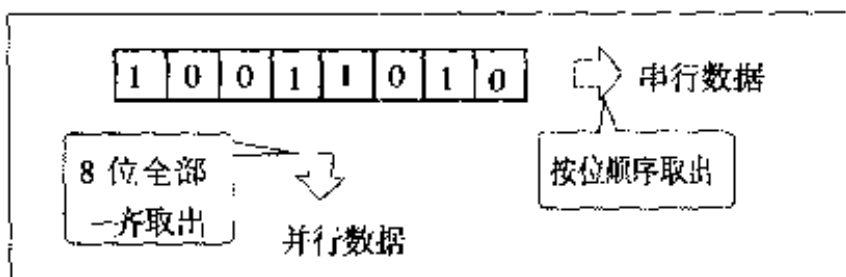


图 4.18 并行数据与串行数据

另外, 为了执行按时间顺序排列的动作命令, 必须依照时钟脉冲的顺序输入、输出连串的数据, 这样的数据称为串行数据。甚至连表示物理量大小的数值也经常有串行处理的必要。例如, 想保存要输出到电动打字机上, 用 BCD 码记录数位的数值时, 将每 4 位作为一组并行数据进行整理, 只将必要的字符位, 串行顺序取出驱动打字臂。



## 4.4.2 并行寄存器

为了保存 1 位数据可以使用如前所述的 RS 闭锁电路或触发器。将这样的触发器按必要的位数并联连接起来就变成了寄存器，能将多位数据并行处理的寄存器，称为并行寄存器。图 4.19 所示是由 RST 触发器及 D 闭锁电路构成的 4 位寄存器。

依从时钟脉冲 T 的信号 4 个 D 触发器  $DEF_1 \sim DEF_4$  并行动作，将输入信号  $A_1, A_2, A_3, A_4$  保存为  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  的输出信号，它们可以随时由  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  端子“直接”取出。

这种“直接”输出实际上是 D 触发器的缺陷，因而 A、B 两个寄存器保存的任何内容都不能进行直接交换。为了能进行这种交换，如图 4.20

(a) 所示那样，使用缓冲寄存器 C 进行 3 级动作。为解决这种缺陷，作为保存电路，可以将主-从式的 JK 触发器当作 D 闭锁电路使用。如上节说明的那样，JK 触发器是由主触发器与从触发器的 2 级动作进行保存记忆的，如图 4.20(b) 所示，可以将寄存器 A、B 的内容，互相同同时向对方传送进行数据交换。

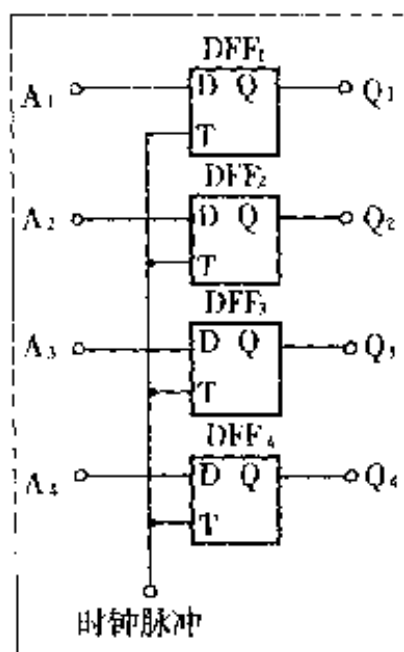


图 4.19 由 D 触发器构成的 4 位并行寄存器

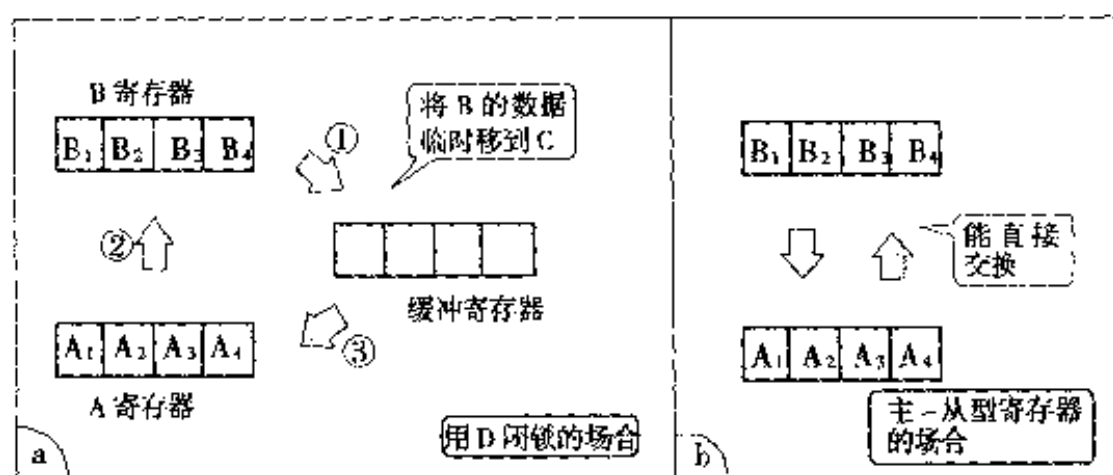


图 4.20 交换 A、B 寄存器的内容

## 4.4.3 移位寄存器



每1位挪一挪，  
可用于步进电  
机的控制呀！

为了保存串行数据，只将 D 触发器并列是不行的，为了在时钟脉冲的控制下进行数据输入，必须有将每一位的内容向相邻位里移动的机构。一般讲，将具有这种功能的寄存器叫做移位寄存器 (shift-register)，图 4.21 所示是由主-从型 JK 触发器构成的 4 位移位寄存器。在输入端上接入一个反相器将 J 和 K 信号分开，当作 D 触发器动作。

由动作图可知，每送入 1 个时钟脉冲，寄存器内容就向右移动 1 位，移动 4 次 4 位的内容就全部输出，新的 4 位信号被替换进来。

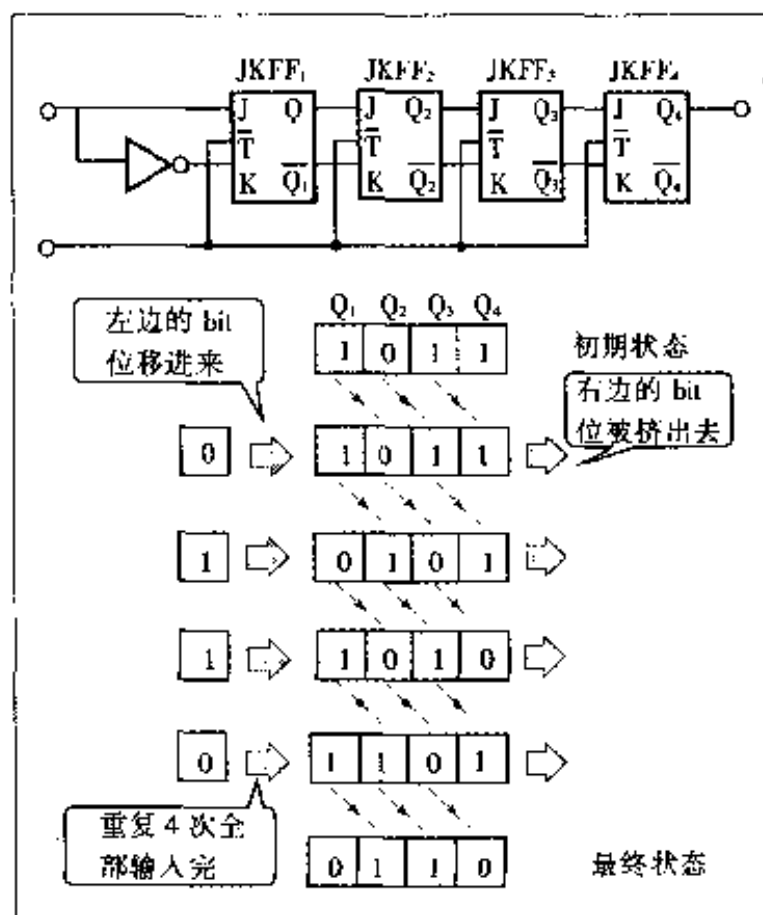


图 4.21 4 位移位寄存器的动作

这种移位寄存器还具有并行输入及并行输出的功能，将并行数据变换为串行，或将串行数据变为并行，可以用这样的电路。

## 名词解释

并行数据 parallel data

串行数据 serial data

并行寄存器 parallel - register; 能将  $n$  位数据一齐处理的保存电路

移位寄存器 shift register; 按每 1 位的顺序进行处理的保存记忆电路

## 4.5 用 LED 表示数值

### 4.5.1 发光二极管(LED)

最简单的数值表示法是像在 RS 闭锁电路中所说的那样, 将寄存器的 bit 状态按 1 或 0 原样表示出来。如图 4.22(a)所示, 将发光二极管通过反相放大器, 连接在寄存器所有 bit 位的并行输出端 Q 上, 只在 bit 位变为 1 时发光。用 BCD 码输入寄存器的数值, 读出时也比较简单。此外, 不仅用于数值的表示, 在控制电路的关键之处插入若干发光二极管, 对于掌握动作状态也是十分便利的。

若不使用发光二极管, 如图 4.22(b)所示, 也可以利用小灯泡。但是, 在使用驱动晶体管的同时, 为了防止过大的峰值电流, 在关灯时必须通过分流电阻  $R_2$  将  $1/5$  左右的

电流泄放掉。另外, 在用继电器操作时, 如图 4.22(c)所示, 为了利用反向脉冲吸收浪涌电流, 也必须附加一个二极管电路。

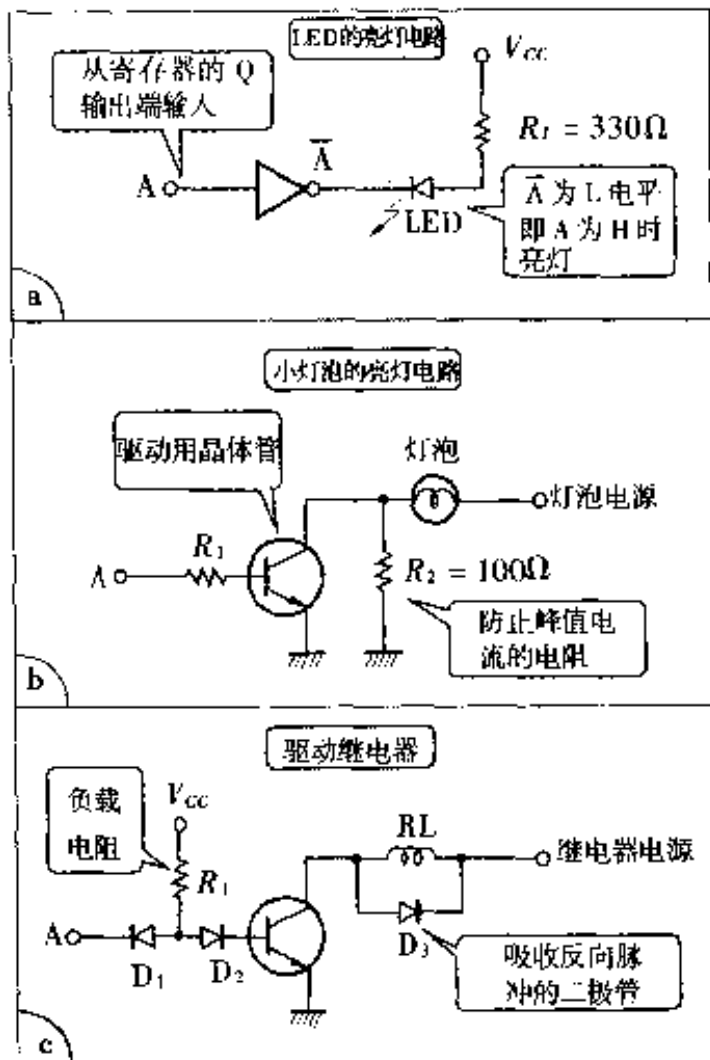


图 4.22 数据显示电路

### MEMO

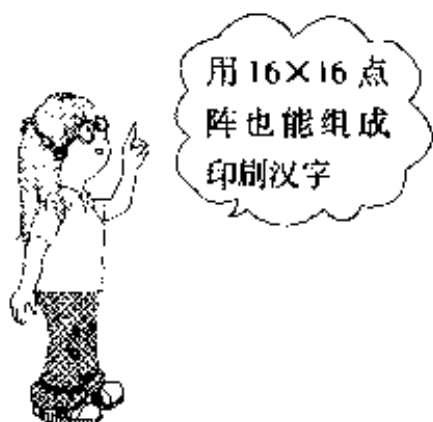
p型半导体与n型半导体相结合,使二极管具有整流特性。正方向电流流过,从n领域向p领域注入电子(少数载流子)时,与原来p领域存在的空穴(多数载流子)进行再结合的动作,会有光产生。这时光的波长若在可视光线范围内,称这样的半导体元件为可视发光二极管,可以作为显示元件去使用。发光光的波长 $\lambda$ 依赖于禁止带(如图1.14)的能量间隙 $E_g$ ,普朗克常数 $h(4.1 \times 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s})$ ,光速 $C(3 \times 10^8 \text{m/s})$ ,有 $\lambda = hc/E_g$ 的关系。与可见光线的波长 $\sim 600 \text{nm}$ 相应的 $E_g$ 约为 $2 \text{eV}$ ,Si( $E_g = 0.56 \text{eV}$ )或Ge( $1.09 \text{eV}$ )不能产生可见光。通常,因再结合的效率,取出光的难易性等因素,而使用在GaP或GaAs<sub>0.4</sub>P<sub>0.4</sub>中掺进Zn、N、O等杂质。

#### 4.5.2 数字LED

由于bit位的1或0为2进制数作为数字较难读懂,采用7个细长的发光二极管,配置成图4.23所示的数字形状,通过各段(segment)的发光组合成0~9的数字表示出来。将这种组合用动作表写出来,数字的形状虽有些呆板,但比用4位BCD码表示还是更直观一些。

为了驱动7段LED,必须将图4.23所示a、b、c、d、e、f、g各段进行适当组合以与数字相匹配,这就要使用编码器(encoder)。用二极管阵列组成的编码器见图4.24。从图4.23的动作表可以看出,

用于灭灯的段数比亮灯用的段数要少,故若关注于灭灯字段的控制,所使用的二极管数目要少些,电路也简单些,需采用负逻辑。



用16×16点阵也能组成印刷汉字

在表示多位数数值时,可采用静态驱动方式(static drive),即重叠使用与表示的位数相同数量的编码器,同时驱动所有数位的方式,从原理上讲是较为简单的方法。但是,如果位数不太多,与重复使用多个编码驱动器相比,采用多路分配器(将多数数据分配处理)将有关各位的数值

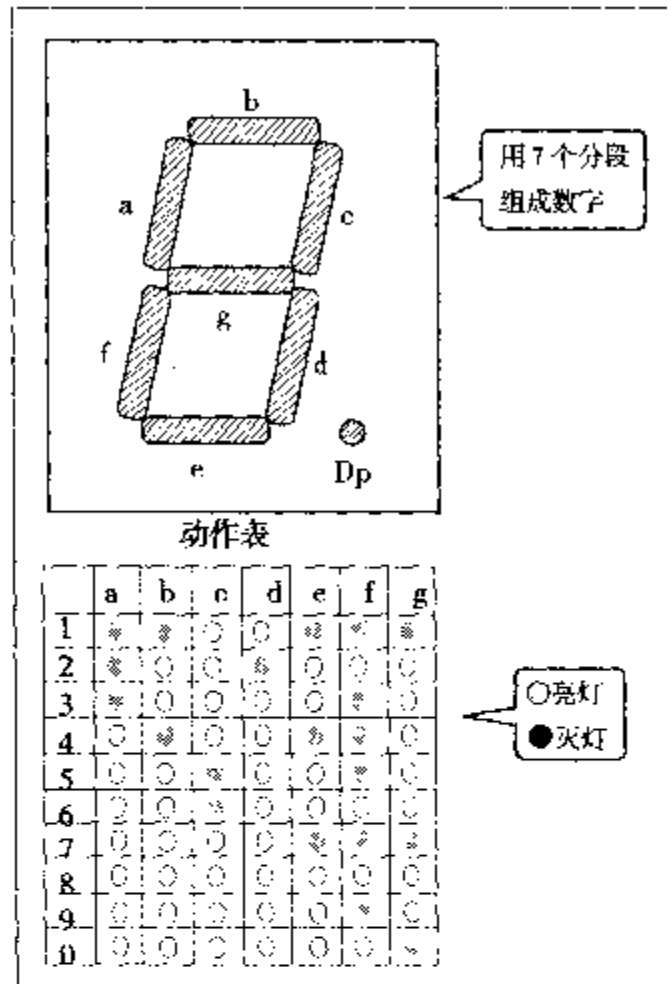


图 4.23 用7段LED表示数字

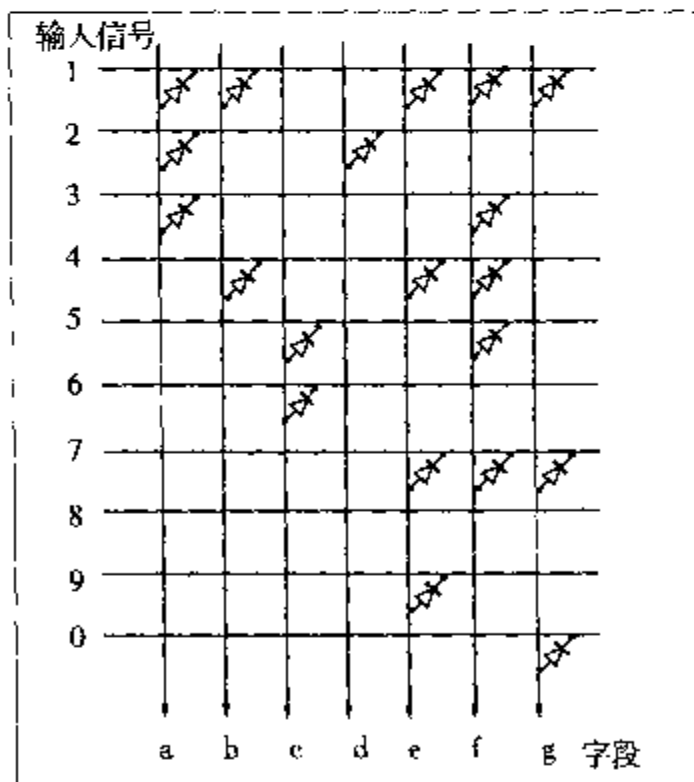


图 4.24 7段LED的编码矩阵

交给一个编码器处理后,各自对应的 LED 按一定时间间隔同步分配的方式效率更高。将这种方式称为动态驱动方式 (dynamic drive)。如果切换速度足够快,所有数位就会同时发光显示出来。这种时分制 (time sharing) 的处理方法在数字电路中经常采用,可起到简化电路,提高效率的作用。

另外,若不采用 7 段显示表现字形的方式,还可以采用按 7 行 5 列矩阵配置光点 (LED, 显示灯等) 表示字形的方法,称为点阵 (dot matrix) 法,通过各个点阵的巧妙组合,不仅能显示数字还可以表示简单文字。微机上的显示文字、CRT 或点阵打印机上利用  $16 \times 16$  或  $24 \times 24$  等更多点阵能表示所有汉字,正像文字处理机上所用的那样。

### 名词解释

发光二极管 LED light emitting diode

分段 segment

静态驱动 static drive 在文字、数字的显示方式中,将一个单元进行正常点亮

动态驱动 dynamic drive; 显示单元的点亮与脉冲同步交互进行

多路分配器 multiplexer; 控制输入并行数据,并有控制地串行取出的电路。在动态驱动时使用

时分制 time sharing 分时使用

显示装置 display

阴极射线管 CRT cathode ray tube

文字处理装置 word processor

# 第 5 章

## 无触点检测电路



### 5.1 施密特触发器

用顺序电路进行 ON-OFF 控制,就必须将 0 或 1 信号赋予控制对象,以表示温度、压力等的环境变化或控制目标的设定值。一般而言,各种形态物理量的变化都能用叫做传感器 (sensor) 的元件,以合乎某种目的量的变化形式被取出。将变换为控制杆位置变化量的传感器与微动开关组合构成的有触点检测器,已在第 1 章所述。而无触点检测电路是,将变换为电气量的传感器与电子电路相组合,以便取出必要的 ON-OFF 信号。

对于传感器,在本系列其它分册中有详细说明,这里首先介绍有关将连续变化的模拟信号变换为 ON-OFF 形信号的方法并给出若干具体应用实例。

#### 5.1.1 比较电路

有关晶体管的开关原理,迄今已做过多解释,现在讨论图 5.1 的电路,  $V_i$  从 0 的状态 (晶体管为 OFF 状态) 顺序增加升高的情况。

在晶体管阈值电压  $V_s = 0.7V$  附近,基极电流  $I_B$  开始流入,同时有比  $I_B$  大近似 100 倍的集电极电流  $I_C$  流过。输入电压进一步增加,  $I_B$  也增大,  $I_C$  的值增加到大约电源电压与负载电阻之比  $V_{CC}/R_L$  时就保持一定的值 (饱和值),晶体管变为 ON 状态。从原

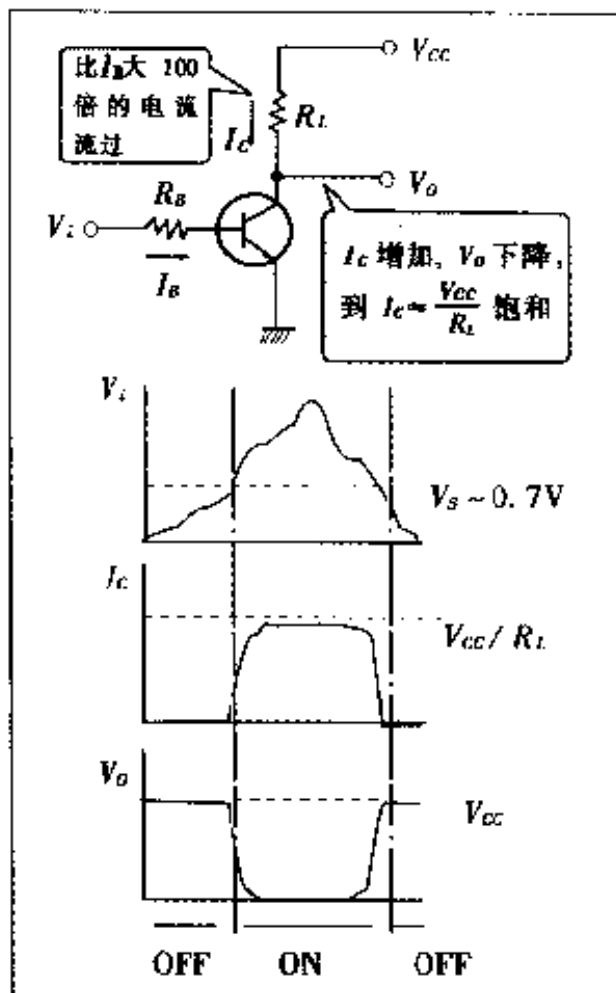


图 5.1 晶体管的 ON-OFF 动作

理上讲, 这样就将输入电压  $V_i$  的连续变化变换为 ON-OFF 状态并检测出来了。需注意的是, 这时输入电压  $V_i$  与输出电压  $V_o$  的相位相反, 即输入电压低时输出为 H(高) 电平, 输入电压高时输出 L(低) 电平。

但是, 这样的电路中, ON-OFF 的开关电平被晶体管的阈值电平所决定, 不能自由选择。于是改进为如图 5.2 所示电路, 用  $R_1$  与  $R_2$  使  $T_{r1}$  的射极电压可变化, 从而能够变更 ON-OFF 的开关电平, 该电平  $V_T$  可表示为

$$V_T = V_s + V_E \approx 0.7 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \quad (5.1)$$

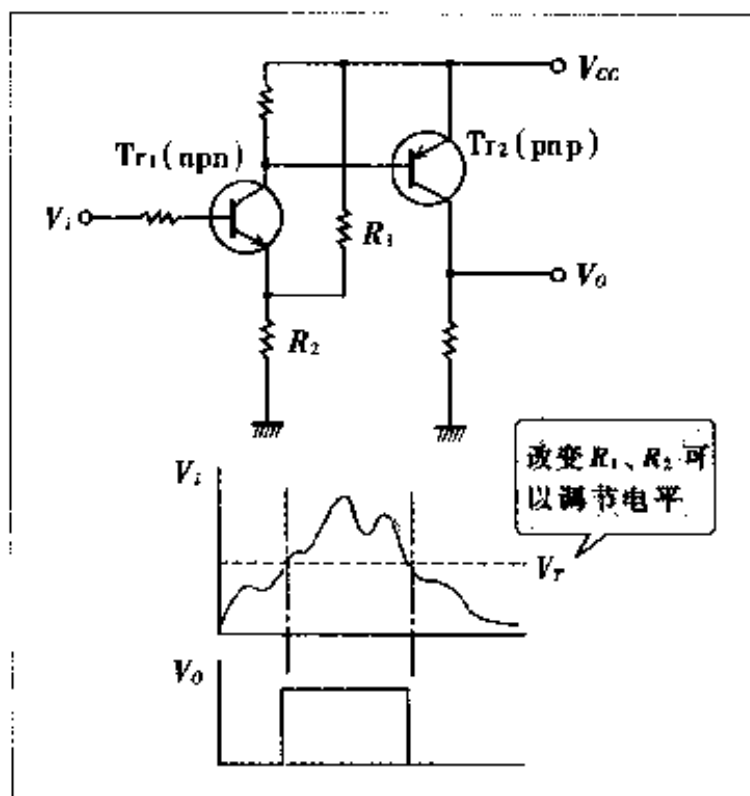


图 5.2 比较电路



选择适当的  $R_1$  与  $R_2$ , 就能自由设定  $V_T$ 。此外为了使 ON-OFF 的变化尽可能明显且输入/输出相位一致, 可以增加一个 pnp 型第 2 级晶体管将电流放大。

在这个电路中, 将输入电平的大小与某个设定的电平  $V_T$  相比较, 故叫做比较电路, 可用于灯泡亮灭、电机驱动、加热器加热等顺序动作电路中。

### 5.1.2 施密特触发器

将上述比较电路用于实际的路灯 ON-OFF 控制, 为使路灯能随着周围环境的明亮程度而自动地白天关灯, 夜间开灯, 使用光敏传感器件 CdS(硫化镉), 用如图 5.3 所示电路驱动开关路灯的继电器。由于 CdS 器件的特性即有光照时阻抗下降, 光线断掉阻抗变大, 因此白天天亮时, 输入电压  $V_i$  非常小, 随着天色逐渐变暗  $V_i$  也渐渐变大。如果设定了适当的开关电平, 就可以于夜间和白天之间自动亮灭路灯。

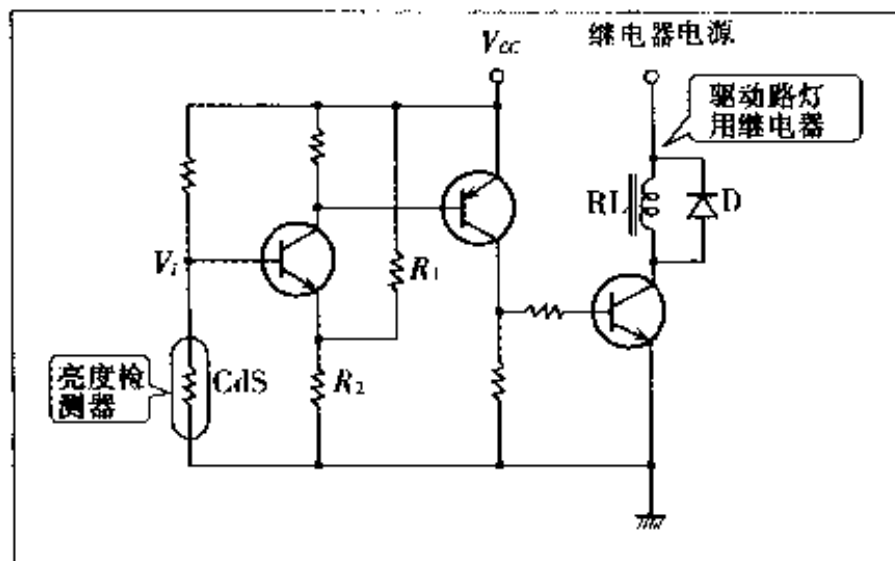


图 5.3 路灯亮灭电路(这会引入抖动现象)

但是, 用这种电路, 在早晚之间切换开关时, 会因亮度的小幅变动或噪声信号的干扰, 使比较电路在 ON-OFF 之间来回转换, 路灯也随之忽明忽暗。这与有触点开关中的抖动干扰现象类似, 同样, 通过增加 RS 闭锁电路可防止这种现象。即使用 2 个阈值电平不同的比较电路, 在光敏器件的输出电压渐渐变大时的电平  $V_U$  与其渐渐变小时的电平  $V_D$  之间, 保持有  $V_U - V_D > 0$  的差值。

将这二个比较电路的输出接在闭锁电路上,由于街灯的亮灯与灭灯之间有一定的滞后,故不会出现抖动现象。

另一方面,若只用一个比较电路,能将滞后的数据进行正反馈,即使不增加特定的闭锁电路也能防止抖动现象。正反馈越大,脉冲上升沿越锐利。

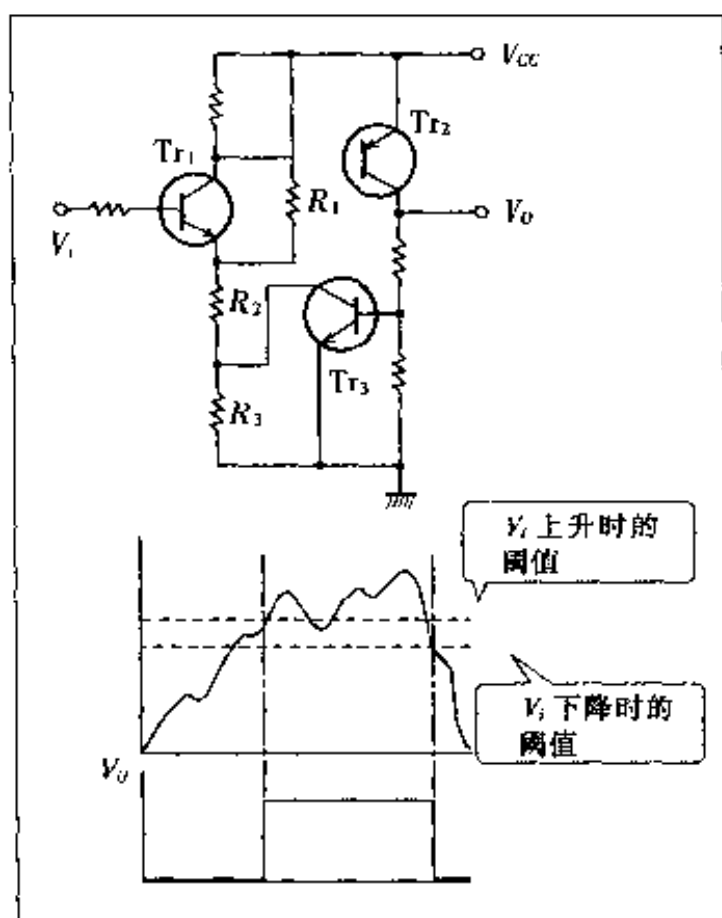


图 5.4 施密特触发电路

在如图 5.4 所示的比较电路中,增加了第 3 个晶体管,使输入端的阈值电平可变。在输入电压  $V_i$  增加过程中,  $Tr_1$ 、 $Tr_2$ 、 $Tr_3$  所有晶体管皆为 OFF 状态,输入上升时的阈值电平  $V_U$  为

$$V_U = \frac{R_2 + R_3}{R_1 + (R_2 + R_3)} V_{CC} + V_S \quad (5.2)$$

反之,在输入电压下降的过程中,因所有晶体管均为 ON 状态,电平移动电阻  $R_3$  处于被短路状态,输入电压下降时的阈值电平  $V_D$  变为

$$V_D = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} + V_S \quad (5.3)$$

故仍能保持  $V_U - V_D > 0$  的滞后，称其为施密特触发器电路 (Schmidt trigger)。

施密特触发电路，在想将脉冲上升沿加速时，或用于改善波形对付噪音电平等的数字电路中是很好的可利用电路。

### 名词解释

比较电路 comparator; 将 2 个输入电压进行比较的电路

施密特触发器 Schmidt trigger; 利用正反馈放大的比较电路

硫化镉 CdS cadmium sulfide; 遇到光线, 阻抗变小的半导体

滞后现象 hysteresis; 上升路径与下降路径有差异的现象

## 5.2 非接触式开关

### 5.2.1 接近式开关

公寓或银行的大门，即使手没有接触门拉手，只要有人接近就自动开门，这是很常见的接近式开关的应用。其构成有如图 5.5 所示的两种类型。原理上都是利用振荡电路，有物体接近检出板时，振荡频率发生变化，如图 5.5(a)，检测这种信号的称为电容型。还有利用接近金属等的导体时，电磁感应的振荡频率发生变化或停止振荡的现象，如图 5.5(b)，检测出这种信号的称为高频振荡型。

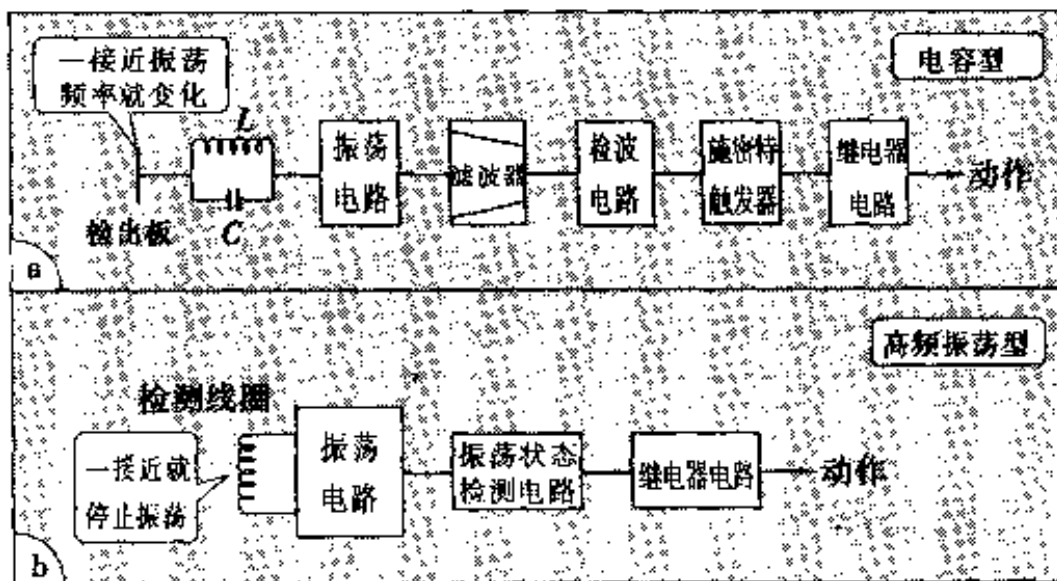


图 5.5 接近式开关电路的基本构成

图 5.5(a)的 LC 振荡电路中,其振荡频率  $f$  由下式决定

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (5.4)$$

一有物体接近检测板,就相当于静电容量  $C$  增加,而使振荡频率下降,通过滤波器(filter)后,再经检波,可获得与频率变化相应的电压输出,利用施密特触发器变为 ON-OFF 信号。在图 5.5(b)中检测线圈自身作为共振电路的场合,会引发导电体接近时,振荡频率的变化或振荡停止的现象。

### 5.2.2 光电式开关

是由投光器与接受该光线控制信号的受光器所组成的。受光器的原理与前述路灯控制电路基本相同,为避开周围的光,而只接受投光器的光,使用了福德、楞茨(Lenz)等的光学系统。检测物是能将光线截断的物体即可,动作距离一般 10m 左右。常作为防盗系统使用。

为了检测出不透明的液面、粉末、粘性体等的表面水平,常常使用光电开关。与上述投光器与 CdS 光敏检测器结构相近的是 LED、光敏二极管、光敏晶体管。

#### 名词解释

电磁感应 electro - magnetic induction; 电场磁场的相互作用

LC 共振电路 LC resonance circuit; 使用  $L$  与  $C$  的电气振荡电路

检波器 rectifier; 将信号由高频载波中取出来

滤波器 filter; 只允许某种频率的信号通过

光电开关 photo - switch; 用光线进行电气的 ON-OFF 控制

光敏二极管 photo - diode; 利用 pn 结进行光电变换的元件

光敏晶体管 photo - transistor; pnp 或 npn 结合的光 - 电转换元件

### 5.3 光耦合器件

将无触点检测元件用在特殊条件下,如高电压、高噪音电平、

或商用电源重叠、高泄漏的场合,为保证在恶劣条件中也能安全使用,必须采取将检测单元与控制电路从电气上完全分离绝缘的措施。为此经常使用称为光耦合或光分离的元件。

如图 5.6 所示,发光元件与受光元件相向而设,封装在一起。输入与输出之间只通过光学结合,电气方面处于可耐受 1000V 以上电压的完全绝缘状态。(也有采用如下所述在发光元件与受光元件间用光纤连接的情况)。发光元件除 LED 外还可以使用氩管或白炽灯,受光元件有如图 5.6(a)所示 CdS,光敏晶体管或者光敏达林顿元件等也是常常采用的。

### 5.3.1 噪音抑制

在工厂内等使用时,检测元件与控制电路或者计算机与终端设备间距离很长,由于外界噪音、商用电源的感应、泄漏等原因而不能确保噪音安全系数时,常使用如图 5.7 所示的光耦合

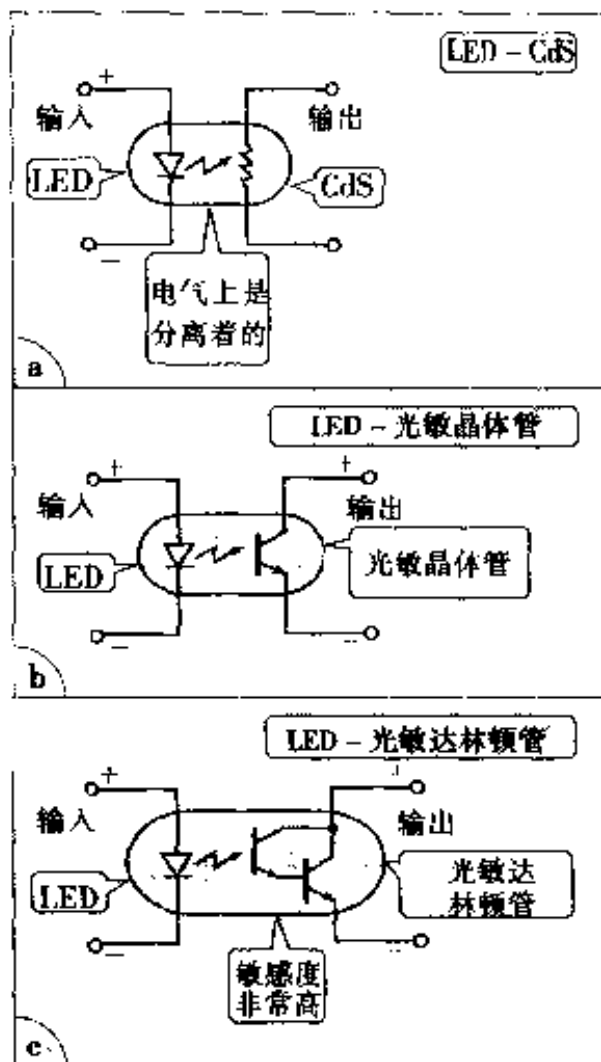


图 5.6 光耦合

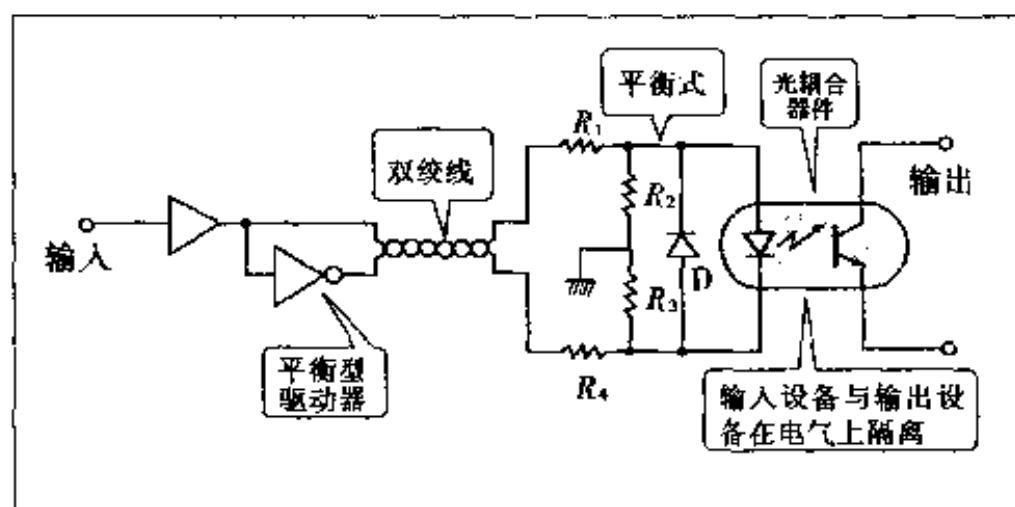


图 5.7 长距离控制线的连接

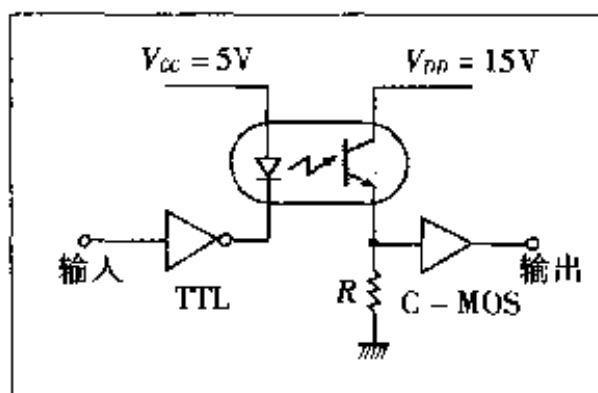


图 5.8 TTL - C - MOS 接口

器件作为信号传输线的方法。长线驱动器为加有反相器的平衡型（正负信号线以地线为对称），输出尽可能不发生信号偏离（破坏平衡），可使用双绞线。接收部分也是终端阻抗与二极管对称配置以尽可能

避免外来噪音的干扰。

在噪音电平更为严重的场所使用时，可以将光耦合器件的输入部分与输出部分分离，中间用长光纤线缆连接的配线方法。

### 5.3.2 信号电平的调节

使用光耦合器件，对信号电平不同的逻辑电路的连接也非常简单。如图 5.8 所示为  $V_{CC} = 5V$  的 TTL 电路与  $V_{DD} = 15V$  的 C-MOS 电路的连接例子。

另外，作为进行电力控制的例子，如图 5.9 所示，将光耦合器件的输出信号作为 SCR 或者双向 SCR 的触发输入信号使用，可以控制大电力负荷。这就是所说的固态继电器 (SSR)，再加上零电压交叉电路 (zero cross) 就成为集成化产品了。

光纤长度延长  
也没关系呀!

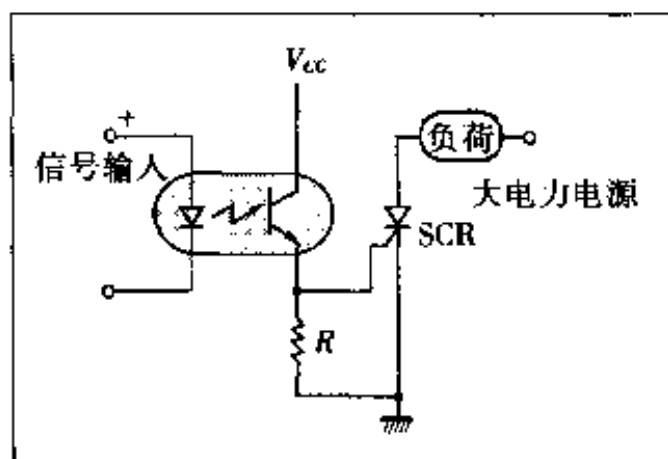


图 5.9 固态继电器 (SSR)

**名词解释**

光耦合器件 photo-coupler; 利用与电气绝缘的光进行信号结合的器件

光隔离器件 photo-isolater; 与光耦合器件相同

氖管 neon tube; 封入氖气的放电管

白炽灯 tungsten lamp; 钨丝灯泡

达林顿连接 Darlington connection; 将晶体管发射极的输出直接连在下一级晶体管的基极上的电路, 放大程度加大

噪音抑制 noise suppress

双绞线 twisted pair

光纤 optical fiber; 光纤维电缆

固态继电器 SSR; solid state relay

零交叉 zero cross; 交流波形为 0 电位时切换开关的动作





# 第 6 章

## 电力的开关控制



### 6.1 消耗电力的控制

#### 6.1.1 串联连接与并联连接

用二个电阻发热元件，利用串联或者并联连接转换控制其发热量。

如图 6.1 所示，使用电源电压  $E = 100\text{V}$ 、 $R_1 = 300\Omega$  及  $R_2 = 200\Omega$  的发热元件。如第 1 章中叙述过的，一般来讲，电阻值是温度的函数。所以  $R_1$  及  $R_2$  的电阻值随着加热而变化，但这里为了简单起见假设不变。

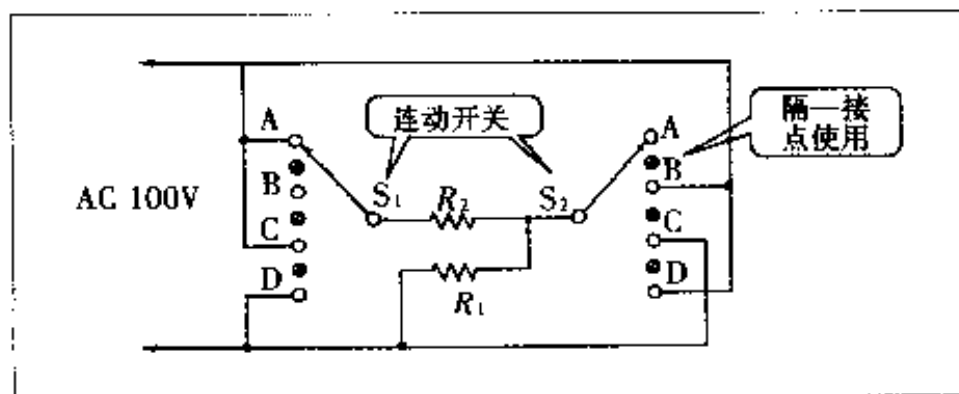


图 6.1 串、并联转换电路

$S_1$  及  $S_2$  为二电路的连动开关,但相邻的固定接点为了防止由于转动接触而短路,将接点隔一个使用,在 A 点位置  $R_1$  与  $R_2$  是串联连接,此时的消耗电功率  $P_A$  为

$$P_A = \frac{E^2}{R_1 + R_2} = 20\text{W}$$

在 B 点位置仅  $R_1$ , C 点位置仅  $R_2$ , D 点位置是  $R_1$  与  $R_2$  并联连接,各个的消耗电功率  $P_B$ 、 $P_C$  及  $P_D$  分别为

$$P_B = \frac{E^2}{R_1} = 33\text{W}$$

$$P_C = \frac{E^2}{R_2} = 50\text{W}$$

$$P_D = \frac{E^2}{R_1} + \frac{E^2}{R_2} = 88\text{W}$$

20 ~ 88W 可分 4 级控制。

### NOTE

如在 B、C 的位置单独用电阻元件,或在 D 的位置并联连接使用时,电阻值低的  $R_2$  的消耗电功率变大。串联连接(A 的位置)的情况如何呢?流经电路电流  $I_A$  是

$$I_A = \frac{E}{R_1 + R_2} = 0.2\text{A}$$

在  $R_1$  上消耗电功率  $P_{A1}$  为

$$P_{A1} = I_A^2 R_1 = 12\text{W}$$

在  $R_2$  上消耗电功率  $P_{A2}$  为

$$P_{A2} = I_A^2 R_2 = 8\text{W}$$

电阻值大的  $R_1$  上消耗电功率大。

像灯泡等的电阻值,根据温度有很大变化是非线性电阻元件时,这种不同更以极端的形式表现出来。额定 40W 和 60W 的灯泡,一般来讲当然 60W 的灯泡亮些,但是如果串联连接,两者均比以前暗些,但若一起比较,相反 40W 的灯泡亮些。可试试看。



试一下看吧!

## 6.1.2 串联控制

仅用 1 个负载电阻控制其发热量时，可以改变电源电压，或者加入串联控制电阻。如图 6.2 所示，直流电源电压  $E = 10\text{V}$ ，在  $R_L = 10\Omega$  的电阻负载上要有  $P_L = 5\text{W}$

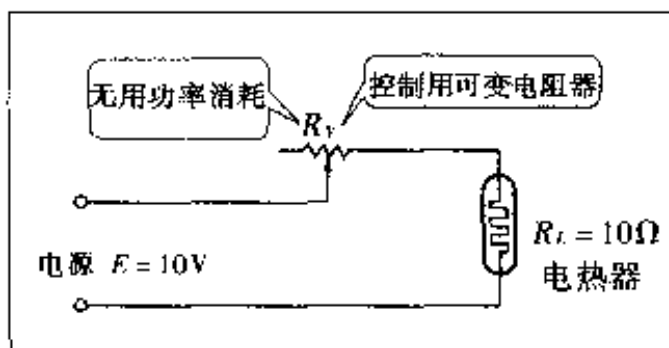


图 6.2 利用可变电阻的串联控制电路

的发热电功率时，则流经电路电流  $I$  可用下式决定

$$P_L = I^2 R_L$$

由于  $I = \sqrt{5/10} = 0.7\text{A}$ ，所以可变电阻器  $R_V$  的数值可用下式求得

$$E = I(R_L + R_V)$$

即  $R_V = 4.3\Omega$ 。因此，在  $R_V$  上消耗的电功率  $P_C$  为

$$P_C = I^2 R_V = 2.2\text{W}$$

此功率为无用消耗功率。

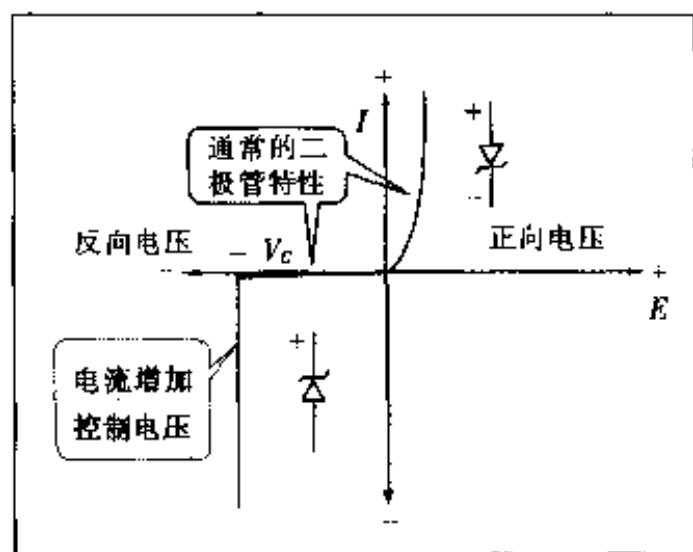


图 6.3 齐纳二极管的特性

串联控制获得恒电压输出的最简单方法，如图 6.3 所示，常常利用齐纳二极管具有的输入输出特性。在正方向及低电压区的反方向特性与通常的二极管相同，但是反向电压一达到某临界电压  $V_C$ ，则开始有保持恒压的反向电流流动。图 6.4 的电路为输入是可变的  $10 \sim 15\text{V}$  电压，可得到  $6\text{V}$  的恒定电压，从图可知，即便  $R_L$  变动到  $I_L$  为  $0 \sim 4\text{mA}$ ，但电压几乎不变。

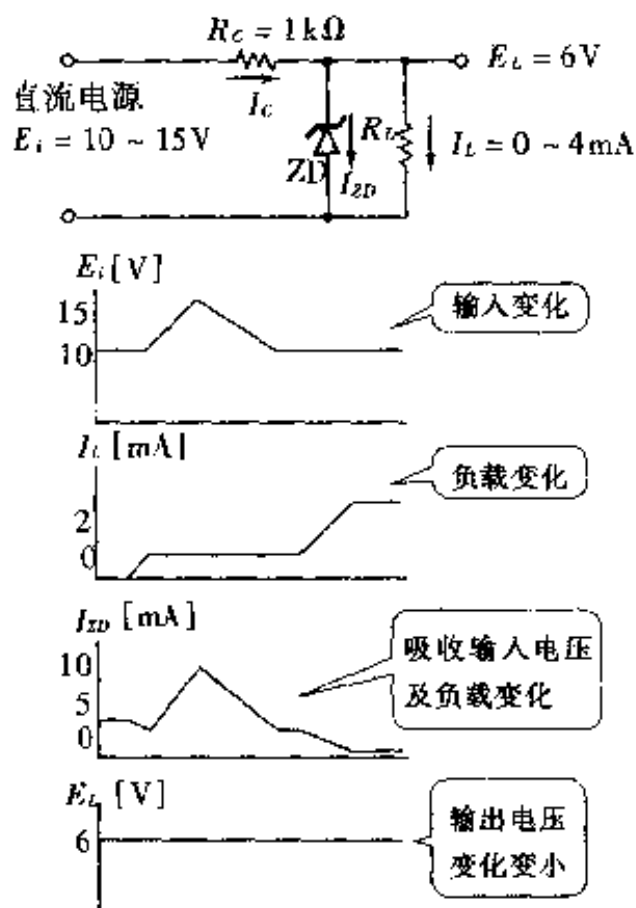


图 6.4 利用齐纳二极管的恒压电路

在此图上将控制电阻  $R_c$  用晶体管  $Tr$  代替, 用整流电流的大小控制的电路是串联控制电路的原形(如图 6.5)。给晶体管的基极输入信号, 因为从电压开始, 电流、电功率等均可控制, 如果此基极电压保持恒定, 对于负载变化则可进一步得到稳定, 但在这种情况下也是利用控制晶体管的压降, 晶体管内部同样有无用的功率消耗, 所以在控制大电功率时, 对于晶体管的发热需要充分注意。

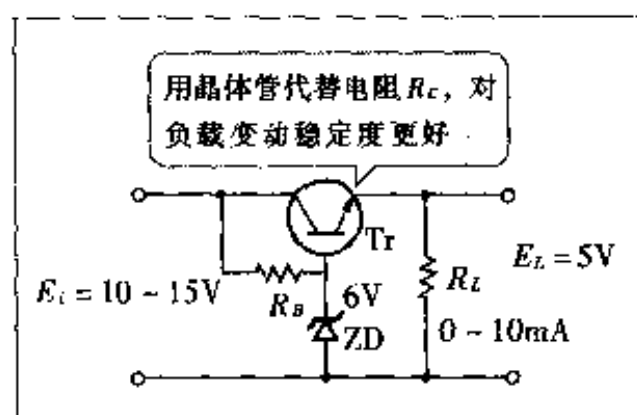


图 6.5 恒压电路的基本形

### 6.1.3 ON-OFF 控制

我们来看看电炉如何以恒温器控制温度。

从图 6.6 的电路图及作用表可知, 合上电源开关  $PB$  则满负荷电流流经加热器  $H$ , 开始加热。当达到适当的设定温度时, 恒温器  $TH$  动作, 加热器成为 OFF(断开)状态, 电流完全不流通。温度下降到某一程度后再为 ON(接通)状态进行加热。这种控制称为

ON-OFF 控制, 加热电流从时间流程图上可知, 是断断续续地流动。但是, 如果加热部分的热容量大, 温度即便有某种程度的变动(脉动), 也能保持大约一定数值。

电功率的负荷状态只有 ON 或 OFF 二种状态, 而将恒温器的设定温度升高, 则与其相应的 ON(通电)状态的时间加长, 平均投入电功率增加。此平均电功率与最大电功率之比称为能率。ON 时间、OFF 时间相等的矩形波的能率为 50%。

这种方法与串联控制不同, 没有控制用的无用能耗, 投入的电功率都用在负载加热器的加热上, 效率非常好。

这样的 ON-OFF 开关动作非常快(20 ~ 50KHz), ON 时间的平均长度, 即像控制能率一样, 脉动也少, 能够高效率控制。此方法是以温度开始的电压、电功率等的开关控制原理。从这种意义讲, 它也称为斩波形调节器。

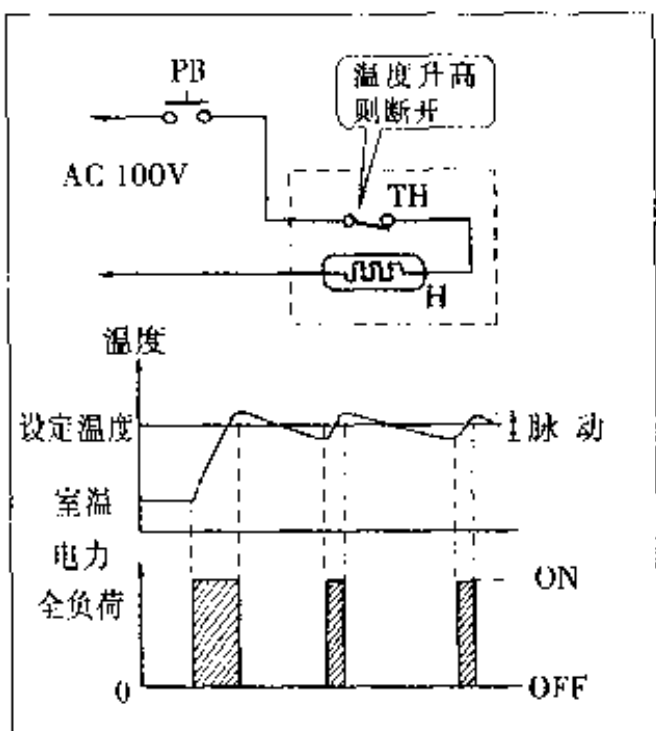


图 6.6 电炉的 ON - OFF 控制



### 名词解释

非线性电阻元件 non-linear resistor; 电阻值随着电流变化, 而电压和电流不成比例关系的电阻元件

齐纳二极管 Zener diode; 恒压二极管

恒温器 thermostat; 根据温度的高低, 开闭接点的温度传感器, 多用双金属制造

脉动 ripple; 脉动, 变动

能率 duty; 脉冲的波峰值与平均值之比  
 斩波 chopper; 将连续波形变成脉冲状波形  
 调节器 regulator; 调节装置

## 6.2 直流电压的控制

将直流电压进行开关控制如图 6.5 所示, 利用晶体管串联控制电路, 将 ON-OFF 的脉冲信号输入晶体管的基极即可。此时, 晶体管进行 ON-OFF 开关作用, 在 ON 状态的晶体管内部压降几乎为零, 没有无用电功率消耗。改变控制脉冲的宽度, 就是改变 ON 状态的平均时间和能率。

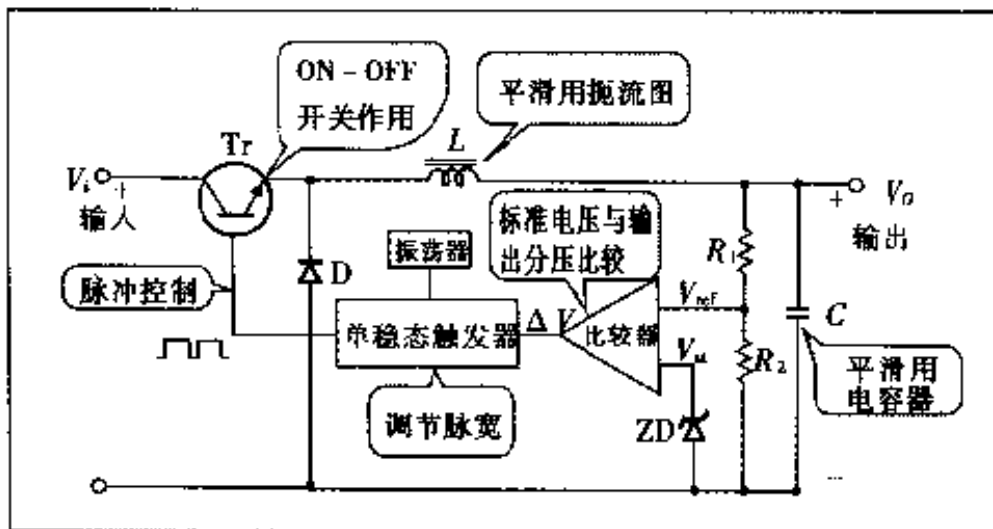


图 6.7 直流电压开关调节器的原理图

图 6.7 所示为恒压电路原理的方框图。将输出电压  $V_o$  用分压电阻  $R_1$ 、 $R_2$  降到适当的电压, 形成控制电压  $V_{ref}$ , 此控制电压与基准电压  $V_a$  比较, 利用电压差值  $\Delta V$  控制单稳态触发电路的脉冲宽度。将此脉冲信号输入控制用晶体管  $T_r$  的基极, 通过电流的 ON-OFF 作用, 即将输出电压与基准电压相互比较来控制其能率的大小。在输出电路中装有很大容量的平滑用电容器。

不使用独立的振荡器和触发器, 利用自激振荡也可使用开关调节器。其原理图如图 6.8 所示, 利用恒压的齐纳二极管作为基准电压  $V_a$ , 将输出电压利用  $R_2$ 、 $R_3$  分压并与控制电压  $V_{ref}$  之差用

运算放大器比较放大,输入到控制用晶体管  $T_r$  的基极。

输出电压  $V_o$  低时,则  $V_{st} - V_{ref} > 0$ , npn 晶体管  $T_r$  的基极加有正电压,  $T_r$  成 ON 状态。因此,输入电压  $V_i$  通过平滑用扼流圈  $L$  供给输出电路的电容器  $C$ 。  $V_o$  升高当  $V_{ref} - V_{st} > 0$  时,则  $T_r$  变为 OFF 状态,但由于  $L$  与  $C$  导致延时,  $V_o$  开始降低。到  $V_{ref} - V_{st} < 0$  时,则  $T_r$  变为 ON 状态。这种反复的振荡状态继续地进行。

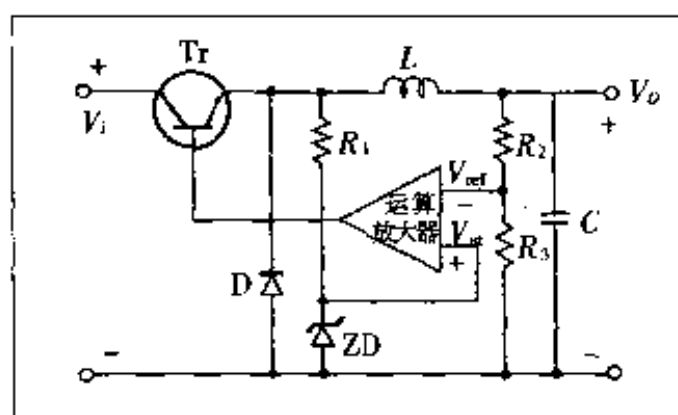


图 6.8 自激式开关恒压电路

头在振荡



另外,负载电流如果增加,由于流入电容器  $C$  的电流减少,则给电容器  $C$  充电的时间需要加长,ON 状态加长。即能率增加要保持恒压。电压之外的电流、电功率或者加热器的温度、电机的转数等作为保持一定的控制电路使用时,则将这些量转变为电压  $V_{ref}$  即可。

开关调节器与串联控制调节器比较有脉动大、容易产生干扰、瞬态响应差等缺点,但是功率损耗少、效率高,因为小型、轻量,所以,在逻辑电路的电源等处开始广泛利用。

### 名词解释

自激振荡 self-oscillation; 将电路输出的一部分向输入侧正反馈的振荡形态

运算放大器 operational amplifier; 运算放大器

扼流圈 choke coil; 为消除变动成分的闭塞线圈

瞬态响应 transient response; 跟随瞬间的变化

## 6.3 交流电的相位控制

### 6.3.1 用可控硅及三端双向可控硅的开关电路

用与直流电源开关调节器相同原理来控制交流电的方法。



如图 6.9 所示, 与输入的交流电压同步将可控硅导通 (ON), 加在负载电阻  $R_L$  上的功率平均值是按可控硅的触发时间, 即相位角的大小可以进行控制。交流输入每半周因通过零电位, 此时可控硅自动关断 (OFF)。因此, 只要与交流输入同步就可导通, 不需独立的振荡器, 只要有能控制相位角  $\phi$  的触发

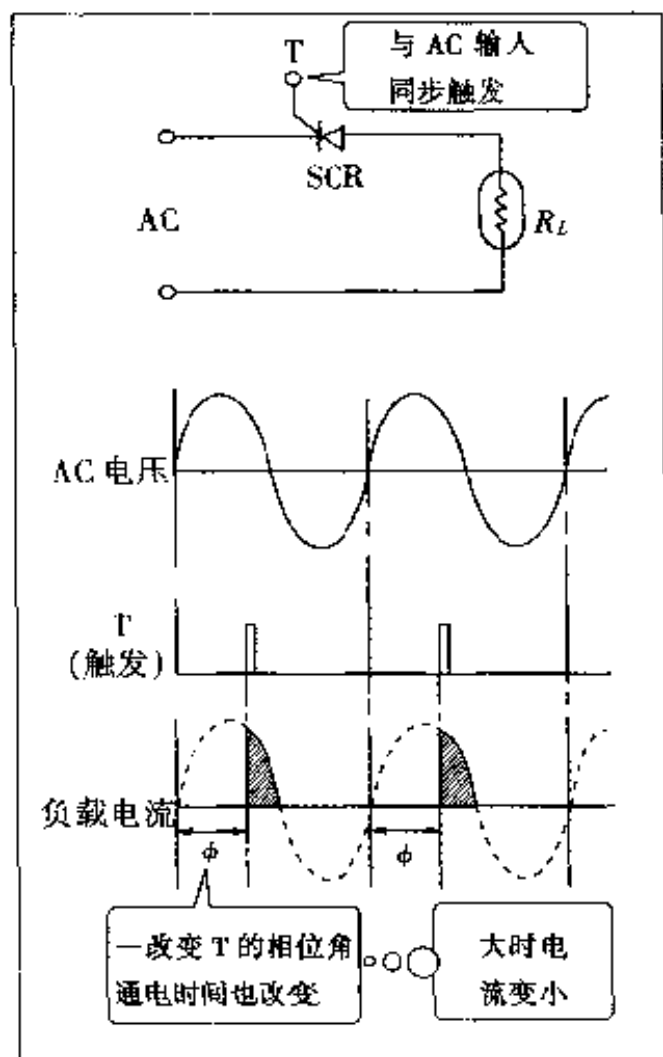


图 6.9 用可控硅的交流相位控制



电路就可以。

用前述的单稳态触发器和施密特触发电路就足够了,但与直流情况不同,控制能率的是相位角  $\phi$ ,与脉冲宽度无关。所以用下一节要讲的简单的触发电路。

可控硅只在交流正半周触发,而用三端双向可控硅如图 6.10 所示,因在交流正负两侧均能触发,所以电源利用率提高 1 倍。

### 6.3.2 利用 UJT 及 DIAC 的触发电路

UJT 的结构是在 n 型硅两端有  $B_1$ 、 $B_2$  基极,在中间 pn 结有发射极 E,如图 6.11。因为只有 1 个 pn 结,故称单结晶体管。图 6.12

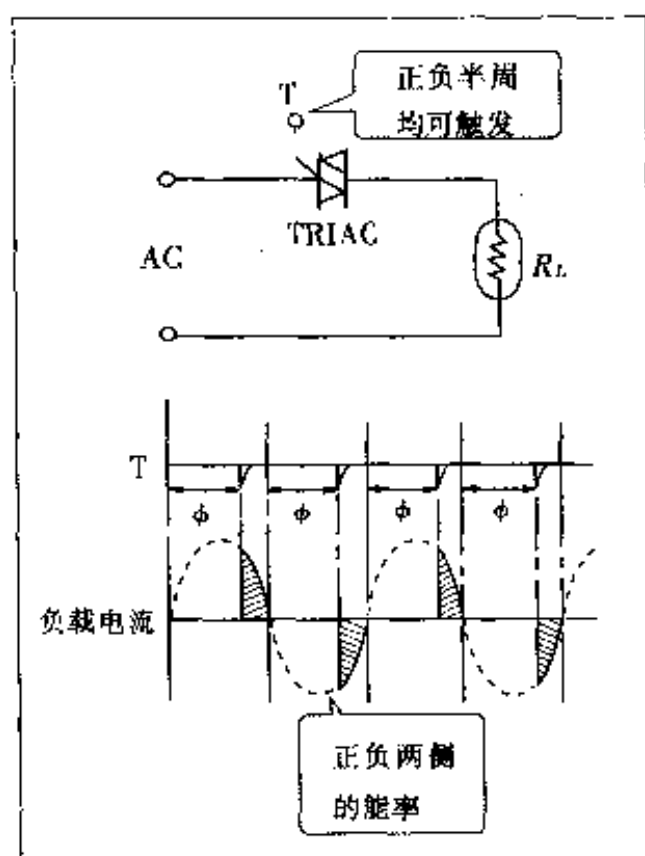


图 6.10 利用三端双向可控硅的交流相位

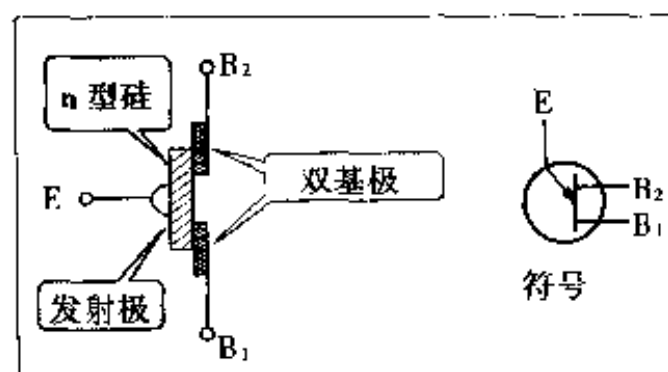


图 6.11 UJT 的结构

电路中,在  $B_2$  和  $B_1$  之间加电压时,由于  $B_2$  的正电压作用,发射极电压  $V_E$  在低于  $V_S$  某值期间,则无发射极电流,但经过电阻  $R$  对电容器  $C$  充电超过  $V_S$ ,则成负性电阻区(电压下降而电流增加),迅速有发射极电流  $I_{E-B_1}$  流通。此时由于  $C$  的放电在  $B_1$  上出现触

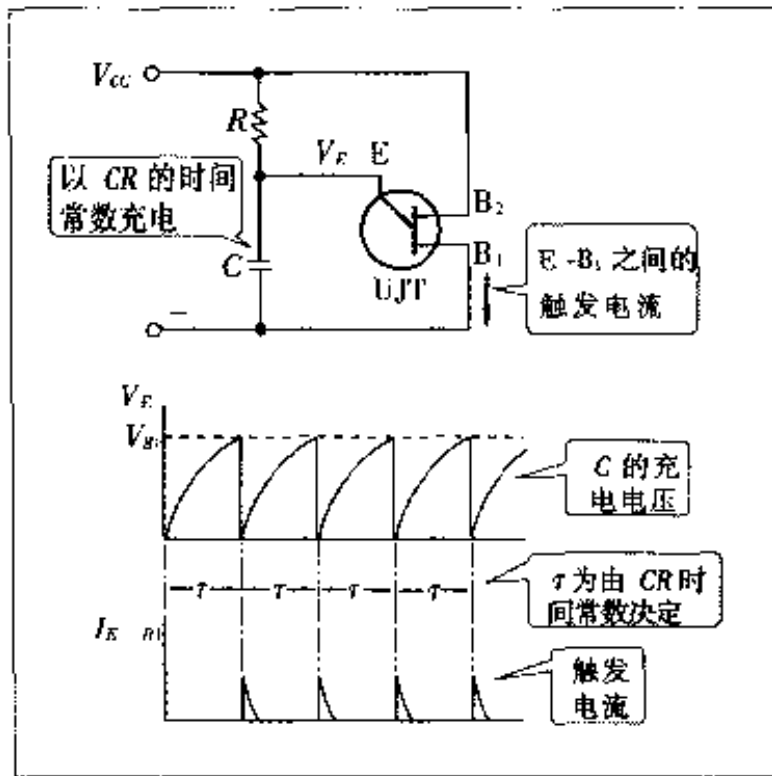


图 6.12 UJT 的作用

analogy

用在古寺庙庭院里常见的竹翻筒接水器可以很好地模拟 UJT 触发电路。

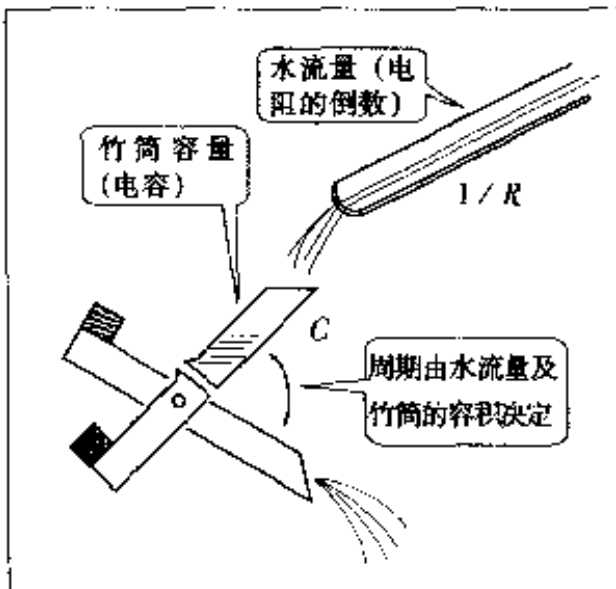


图 6.13 UJT 触发电路的模拟

如图 6.13, 流水充满竹筒时, 则倒转, 从竹筒一下流出。只要从水管中有水继续流出, 就一边间歇地发出尖锐声音, 一边继续流动。此时的周期根据水的流量 ( $1/R$ ) 及竹筒的容量  $C$  决定。流量增加 (电阻  $R$  减少) 周期则快, 竹筒的容量 (电容器  $C$ ) 增大则周期变长。

发电流。然后, 间歇地反复进行充、放电成为振荡状态, 振荡周期由时间常数  $CR$  而定。

图 6.14 中表示采用 UJT 的可控硅开关控制电路的例子。从时间流程图可知, 交流输入电压  $V_{in}$  是用二极管  $D$  进行半波整流后由齐纳二极管的恒压加到 UJT 上。 $V_{B1}$  是经过由可变电阻  $R_2$  与  $C$  的积分电路后, 加到 UJT 的发射极上。因此, 从加上电压  $V_{B1}$  到发生触发脉冲的时间  $\tau$  由  $CR$  的时间常数决定, 让 SCR 导通的相位用可变电阻  $R_2$  可以任意调节。即可控制负载的平均电力。

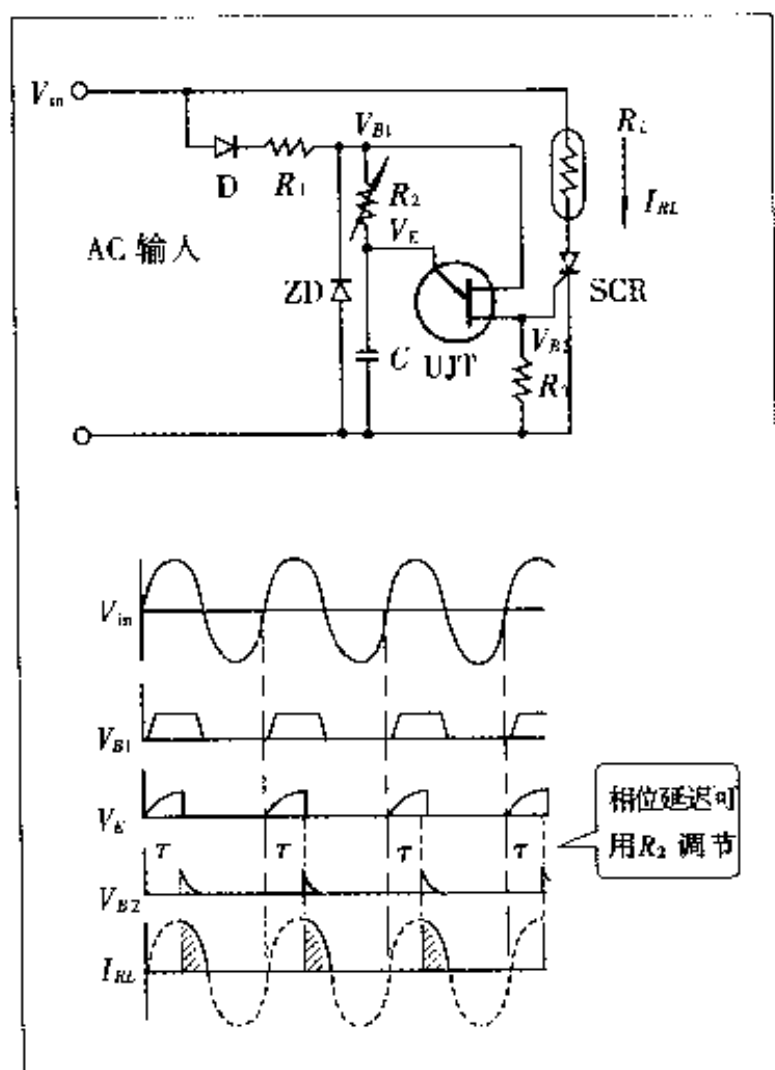


图 6.14 由 UJT 相位控制

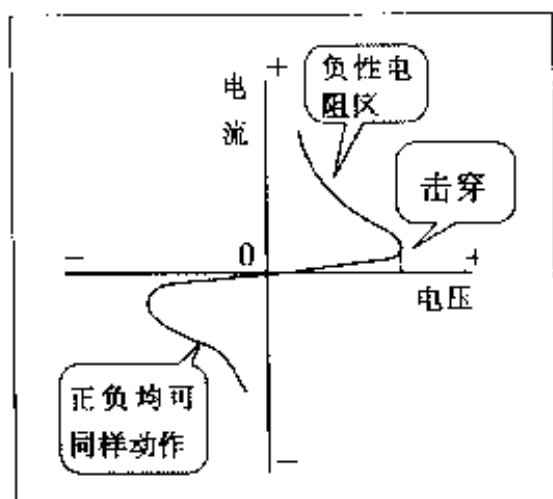


图 6.15 DIAC 的电压 - 电流特性

在此电路的负载接以白炽灯泡或者电热器,它们各自的亮度或者温度可以自由控制,但是只能在正半周导通,所以电功率利用效率不高。此电路适用于只要求电流单方向流动的直流电机等的控制。

另一方面,与 UJT 一样作为负性电阻特性的二极管称为 DIAC 触发二极管。它具有如图 6.15 所示的电压 - 电流特性,如果超过正负对称的一定电压(称为转折电压,通常为  $\pm 20 \sim 40\text{V}$ ) 则为负性电阻区。因此,将它与控制元件三端双向可控硅 (TRIAC) 组合起来,则能在交流的正负两侧进行触发。

### 6.3.3 灯光调节电路

用触发二极管 DIAC 与三端双向可控硅 (TRIAC) 作为全波电功率控制的例子,可用图 6.16 上的电灯调光电路表示。加交流半

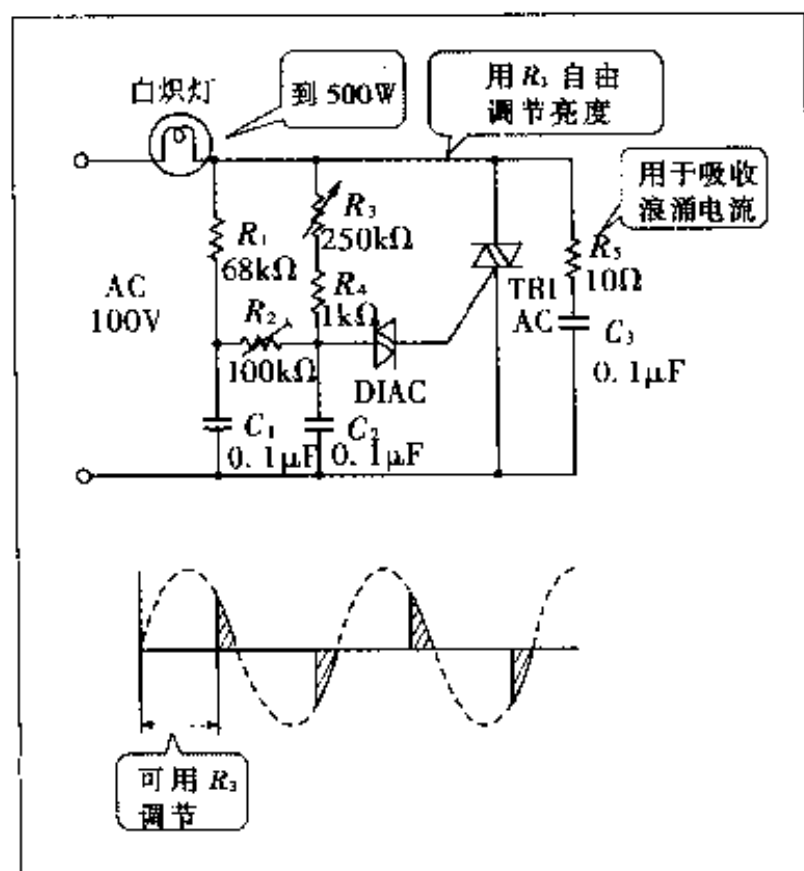


图 6.16 电灯的开关调光电路



用此可以避免  
冲击电流啊!

周电源,通过调光可变电阻  $R_3$ 、 $R_4$  给电容器  $C_2$  充电,此时的充电电压若超过 DIAC 的转折电压时,则 DIAC 成导通状态, $C$  则放电。用此放电电流将 TRIAC 触发,灯泡有电流流通。

半周结束 TRIAC 自动为 OFF 状态,下一反半周发生同样作用,灯泡有电力供给。因此,从时间图上可知,正负两侧均为导通状态,此开关的相位是由  $C_2(R_3 + R_4)$  的时间常数而定,即用可变电阻  $R_3$  可以自由控制。为在低电力区域能平滑控制,而加入  $R_1$ 、 $R_2$  及  $C_1$ 。另外  $R_5$  及  $C_3$  是为 TRIAC 发生转折时,吸收浪涌电流。

第 1 章中已叙述过,在白炽灯开灯时,对冲击电流需充分注意。即在刚开灯瞬间因有 10 倍多的大电流流通,为了防止大电流将初期触发相位大大滞后,在减小冲击电流的电路上,用软起动电路。这不仅只限于白炽灯,对电机等在希望限制冲击电流的地方,也可以广泛利用。

图 6.17 是使用 UJT 及 TRIAC 的具有软起动功能的开关控制电路。在控制用触发电路电源中,采用  $D_1 \sim D_4$  桥式全波整流,可以在正负两周波进行整流。 $R_4$ 、 $R_5$ 、 $C_2$  是前述的调光用积分电路,在此之前设有时间常数非常大的  $R_3$  及  $C_1$  的积分电路,电源

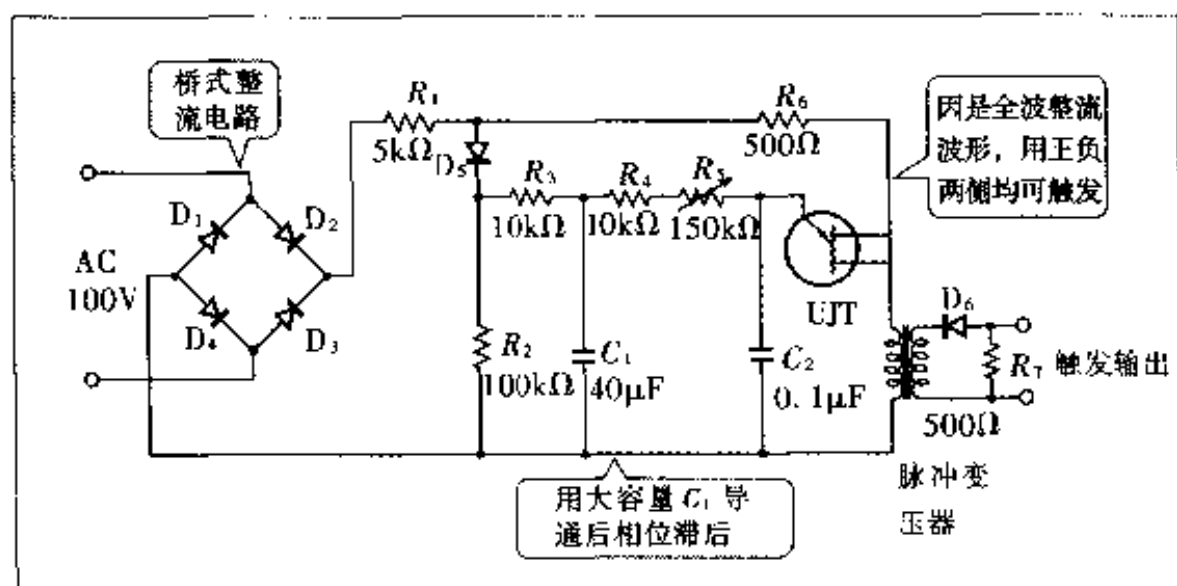


图 6.17 能软起动的触发电路

接入后触发相位角将有很大的滞后。若  $C_1$  得到充分充电时, 则作为通常的开关控制电路使用。

### 名词解释

过零 zero cross; 每交流半周波的 0 电位

UJT uni-junction transistor; 单结晶体管

负性电阻 negative resistance; 电压下降则电流增加的性质

转折 break over; 迅速开始电流流通

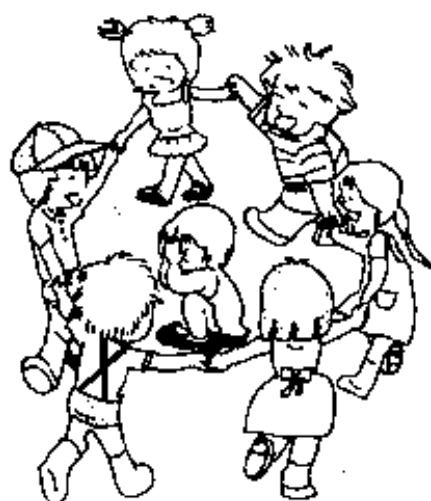
软起动 soft start; 限制冲击电流的电源投入法

DIAC 触发二极管

三端双向可控硅 双向可控硅(TRIAC)

# 第 7 章

## 电机的控制



Servo - motor ...

### 7.1 电容式电机

#### 7.1.1 正转、反转、停止的有接点电路

相位超前电容器型的单相感应电机，从作为洗衣机电机开始，家用或工业用是广泛采用的通用电机。其工作原理如图 7.1 所示。旋转方向根据用电容器相位超前的辅助线圈及主线圈的相位差决定，改变电源连接电机不反向转动。只改变主线圈或者辅助线圈任何一方，则可使电机反向转动。

图 7.2 是利用电磁继电器将辅助线圈反接，来控制电机正转、反转的电路。PB<sub>1</sub> 为正转的启动开关，接通则 MC<sub>1</sub> 工作。PB<sub>2</sub> 接通则 MC<sub>2</sub> 工作，电机反转。此时，因为两个电磁继电器同时动作，电源电路则短路，为了使双方不能同时动作，采用在第 2 章中说明的联锁接点，分别串接在对方

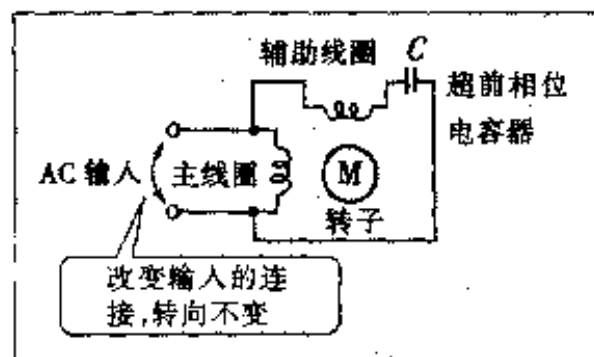


图 7.1 电容式电机

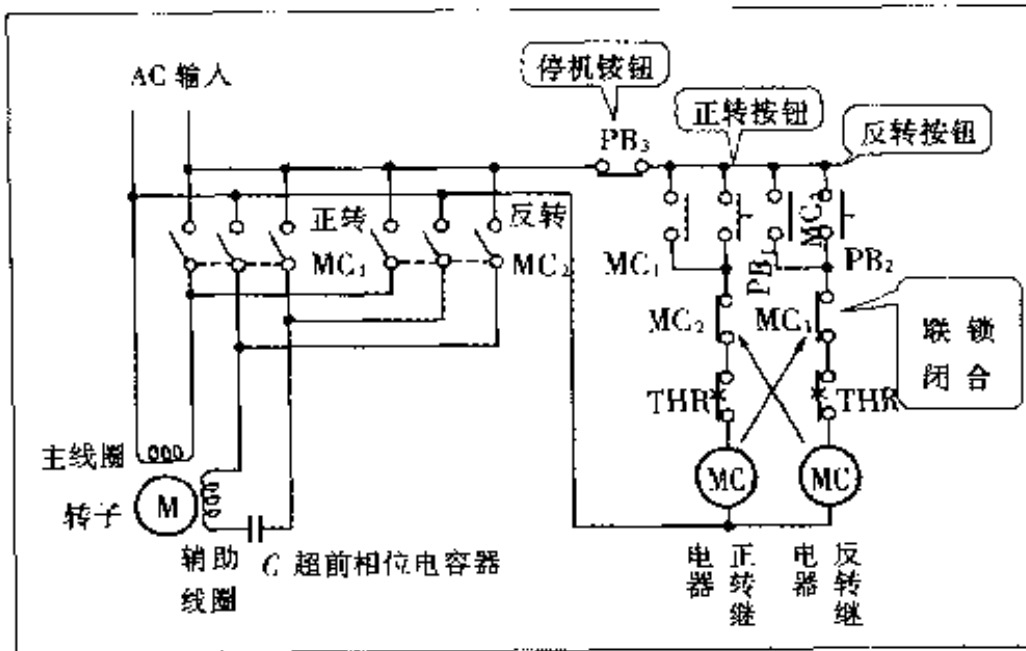


图 7.2 电容式电机的正、反转顺序

的线圈电路上。PB<sub>3</sub> 是为将电磁继电器断开的停机开关。

### 7.1.2 正转、反转的无接点电路

像自动门的驱动电机那样，在正转、反转经常重复的电路中，可以利用主线圈和辅助线圈不加区别作为二相电机来设计。图 7.3 是用三端双向可控硅用逻辑信号控制正、反转的原理电路例子。G<sub>1</sub> 加上输入信号，TRIAC<sub>1</sub> 被触发导通，在电机 M 的磁场线圈 FC<sub>1</sub> 有负载电流流通，同时经过超前相位电容 C<sub>3</sub>，FC<sub>2</sub> 起着辅助线圈的作用。G<sub>1</sub> 断开，TRIAC<sub>1</sub> 断开后，G<sub>2</sub> 加上触发输入信号 TRIAC<sub>2</sub> 成为导通状态。因此，相反 FC<sub>2</sub> 成为主线圈，FC<sub>1</sub> 为辅助线圈，电机则反转。

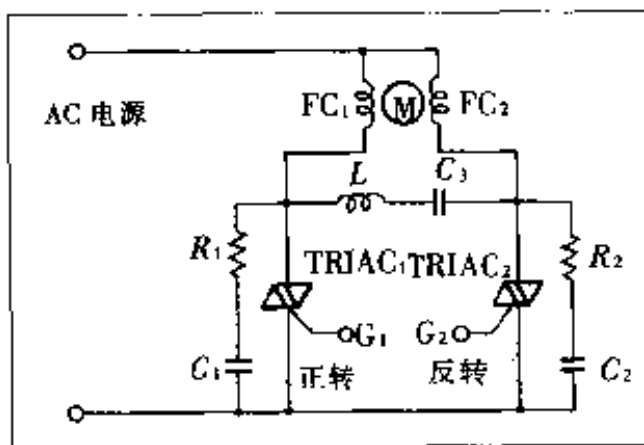


图 7.3 以逻辑信号控制正、反转的原理图

此时，正、反转的信号输入 G<sub>1</sub> 及 G<sub>2</sub>，需有相互联锁的逻辑控制。而且，控制用的触发电路与主电路采用的脉冲变压器等必须进行绝缘。在电路中的 R<sub>1</sub>、C<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>、C<sub>2</sub> 以及 L 等是为控制换流时产生的浪涌电流，如在第 5 章中叙述的也可用无触点固态继电器



器 SSR 代替三端双向可控硅。

在自动门开闭等情况下，不仅是将电机断开，在停机时也需要加以制动。当然，也可用电磁线圈等机械的滑动制动，但在感应电机时，磁场线圈因有直流电流流过产生制动作用，利用这点比较方便。图 7.4 表示带制动电路的用无接点继电器 SSR 控制的正转、反转、停机电路的例子。

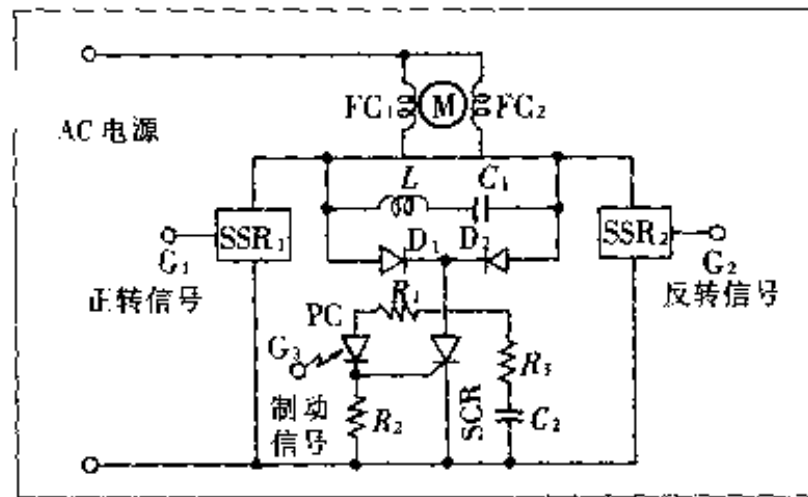


图 7.4 带有制动的正、反转控制

SSR<sub>1</sub> 或 SSR<sub>2</sub> 上分别加以正转或反转的控制信号、驱动电机 M 的情况，这与前述的用三端双向可控硅的情况相同。在断开控制信号的同时向光电耦合器 PC 的门极 G<sub>3</sub> 输入制动信号时，可控硅 SCR 则为导通状态，经过二极管 D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>，磁场线圈 FC<sub>1</sub> 及 FC<sub>2</sub> 因有直流电流流通，电机则产生制动力。

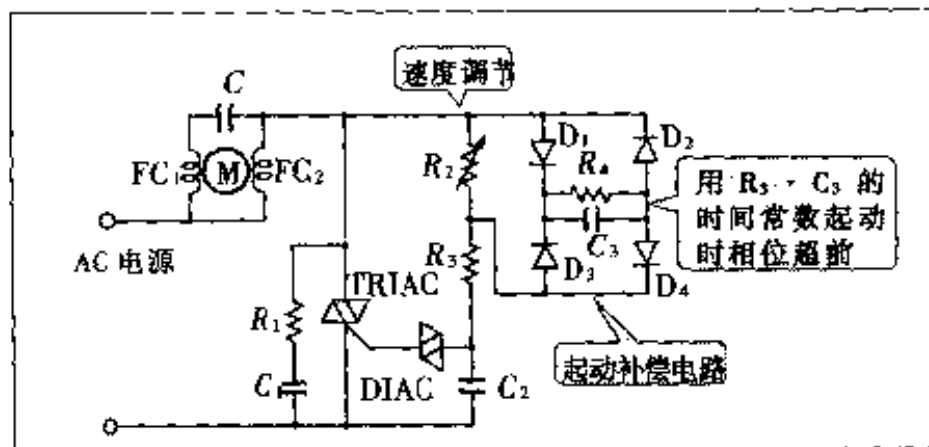


图 7.5 有起动补偿的调速电路

### 7.1.3 速度控制

感应电机基本上是一种改变电源电压调速困难的电机,仅单纯地降低电压则转矩迅速减小。变更转速采用改变电源频率最好,但因需要直流电源及逆变器等,部件数量多,电路非常复杂。另外,像电扇、冷却器的风扇等调速范围比较小的也可用,负载变动少的情况下,仅仅起动力矩可用相位补偿控制的开关调节器。

这是电扇  
的调速啊!



图 7.5 是用触发二极管 DIAC 及开关用 TRIAC 的简单相位控制电路,并带有起动力矩补偿。刚一起动大容量电容器  $C_3$  被充电,由  $R_3$  及  $C_2$  决定的相位通电充电。随着  $C_3$  充电结束,由于在  $D_1 \sim D_4$  的桥式电路的电流不流通,其后的速度调节是由可变电阻  $R_2$ 、 $R_3$  及  $C_2$  决定的相位通电。

因此,电机只在起动力矩时以近似于 100% 的电力投入,其后在平常时用  $R_2$  来调整所需的电力通电以调节转速。即这种起动力矩补偿电路与前一章叙述的为了控制冲击电流的软起动力矩电路,恰好是作用相反。

#### 名词解释

磁场线圈 field coil 为产生磁场的线圈

逆变器 inverter; 将直流变为交流的设备

## 7.2 三相感应电机

### 7.2.1 正转、反转及反相制动控制

三相感应电机将电源中的任一 2 相电线调换,电机则反转。正转、反转的顺序电路如图 7.6 所示。操作正转用的按钮开关  $PB_3$ ,则电磁继电器  $MC_1$  动作,电机正转。与此同时  $MC_1$  的接点闭合,由于带有保持功能,即使  $PB_3$  打开, $MC_1$  仍在工作,电机继续正转。

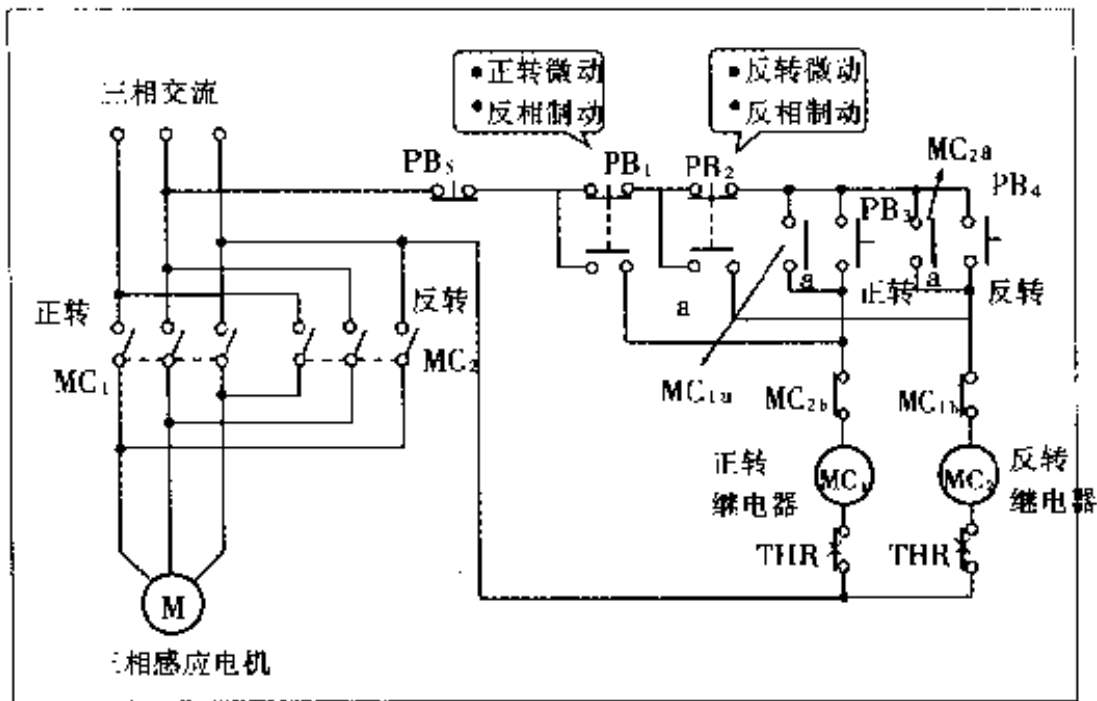


图 7.6 正转、反转、反相制动顺序图

操作反转用按钮开关  $PB_4$ ，这次因为反转用的电磁继电器  $MC_2$  工作，电机则反转。但电机在通电运行中，有反向的操作信号输入时，因为电源电路短路，所以装有相互联锁用的接点  $MC_{1b}$  及  $MC_{2b}$ 。用按钮开关  $PB_5$  将继电器的电源断开，电机无论正转、反转均停止。

通常即使切断电源，电机并不马上停止，暂时用惯性继续转动。想让电机马上停止时，加以反相电压产生反向力矩，可以进行紧急制动。称为电机的反相制动或者反向力矩制动。


图 7.6 上的按钮开关  $PB_2$  是串接于正转用电磁继电器  $MC_1$  的制动开关，在电机的正转运行中，操作此按钮时， $MC_1$  则断开，切断电机的电源。与此同时，与  $PB_2$  连动的闭合接点闭合，反转用电磁继电器  $MC_2$  导通，以惯性正转中的电机因加上反相电压，产生紧急制动。如果电机在反转运行中，操作按钮开关  $PB_1$  时，完全一样可以紧急制动。

反相制动用开关  $PB_1$  及  $PB_2$ ，因为没有装保持电路，此按钮开关一松手则制动切断，必须继续接到需要的地方，但是按的时间过长，超过停止则开始反转。此点与前节所述的加直流的制动不同。相反在停止中，按此按钮电机会暂时运行，将此称为电机的微动控制或者蠕动。绞车等常用这种运行方法。

## 7.2.2 星形-三角形起动电路

三相感应电机接入电源起动时,为直接起动运行状态,但在大容量(5kW以上)的电机中,这样直接投入起动则起动电流过大,将给电源电路加以过大负担,于是只在电机起动时,采用降低加到磁场线圈上电压的起动方法。如前一章软起动那样,利用可控硅相位控制是一种简便方法,但在三相感应电机情况下,改变磁场结线也是常用的简单控制方法。

三相感应电机的磁场线圈如图 7.7 所示由 3 个线圈构成,有图 7.7(a) 星形结线和图 7.7(b) 三角形结线 2 种形式。星形结线的一个磁场线圈上所加电压为三角形结线时的  $1/\sqrt{3}$ , 消耗电流也小。于是在起动时采用星形结线通电,当电机转动起来到某种程度,起动电流降低之后转换到三角形结线,采用这样稳定运行的方法较好。这样的电机起动方法称为星形-三角形起动方法。



星形用于  
起动电路

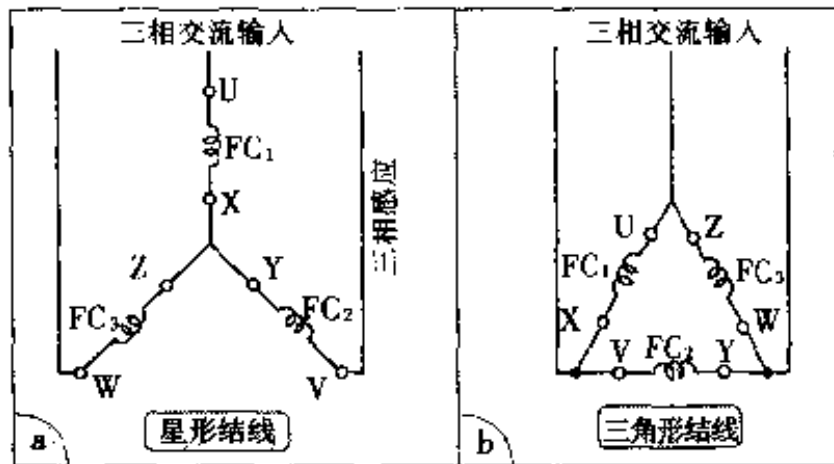


图 7.7 三相感应电机的结线法

图 7.8 的电路用时间继电器 TLR(time lag relay) 起动,经过适当时间后,自动由星形结线转换为三角形的顺序电路。按下起动开关  $PB_1$  则星形结线继电器  $MC_1$  接通,电机起动同时,时间继电器 TLR 开始动作,起动后,经过适当时间 TLR 接通,则辅助继电器  $R_y$  动作,  $MC_1$  及 TLR 断开。但此时  $R_y$  的自保持接点仍闭合,

三角形结线继电器仍在作用,电机成为稳定运行。 $MC_1$  及  $MC_2$  同时接通,则电源电路会短路,为防止短路,所以相互加有联锁。

另外,绕线形感应电机时,经过滑环的转子二次绕线,其端子由于向外伸出,当接以电阻器时,则可减少起动时的电流。到稳定运行后,则不经过滑环利用转子的离心开关,在内部采取各线圈短路的方法。

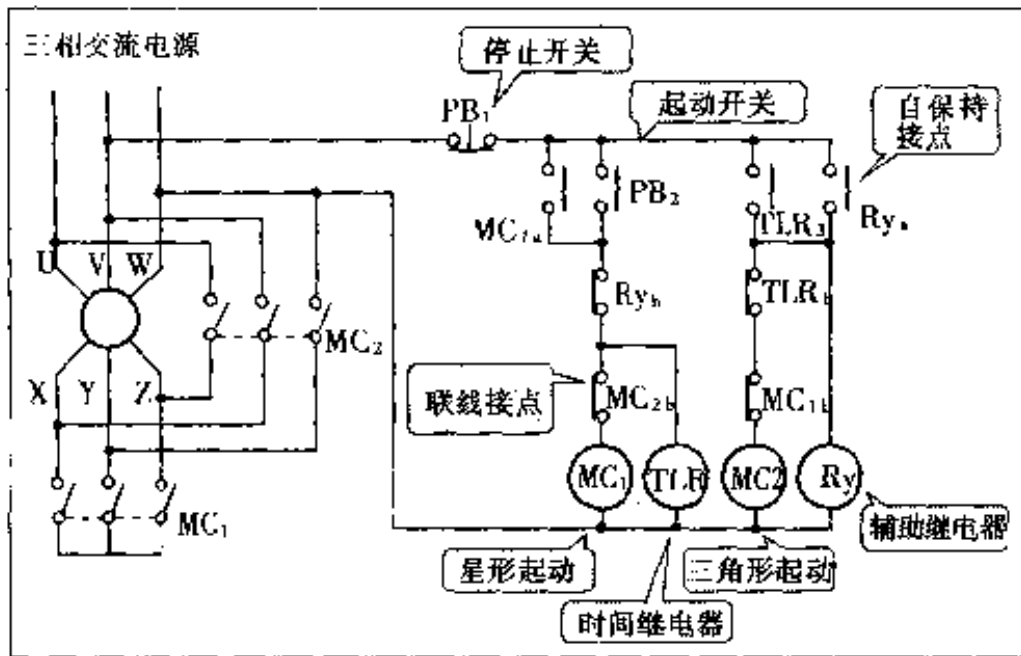


图 7.8 星形-三角形电机起动顺序电路

### 名词解释

- 反相制动 plugging; 以惯性运行中的电机通以反转电流进行制动  
 微动控制 inching; 让电机微小转动  
 星形-三角形起动 star-delta starting; 星形-三角形起动, 限制电机起动电流的起动方法  
 滑环 slip ring; 转子和外部端子用电刷进行电连接  
 转子 rotator; (反)定子 stator

## 7.3 直流电机

直流电机是以永久磁铁或磁场线圈作为定子,几乎所有的消耗电功率是经过整流子(换流子)进入转子。磁场电流一定(或用永久磁铁)时,则旋转力矩、转速及转动方向是由流过转子的电

流大小及其方向决定。而且,流经磁场线圈及转子的电流,即使均反向,由于力矩方向不变,也有作为交流用的交流整流子电机(通用电机)。

与感应电机比较,其特点是调速容易、便于高速运行,而在低速时的力矩大。所以工业用的小型电机等,从高速运行电机或者需要调速范围广的机器,到一般家用的除尘器、修剪机、电动缝纫机等(交流整流子电机),多被采用。

### 7.3.1 利用可控硅(晶闸管)的速度控制电路

如图7.9所示,将交流输入利用 $D_1 \sim D_4$ 二极管的桥式全波整流后加到电机上。磁场线圈FC与直流输出串联,利用可控硅SCR

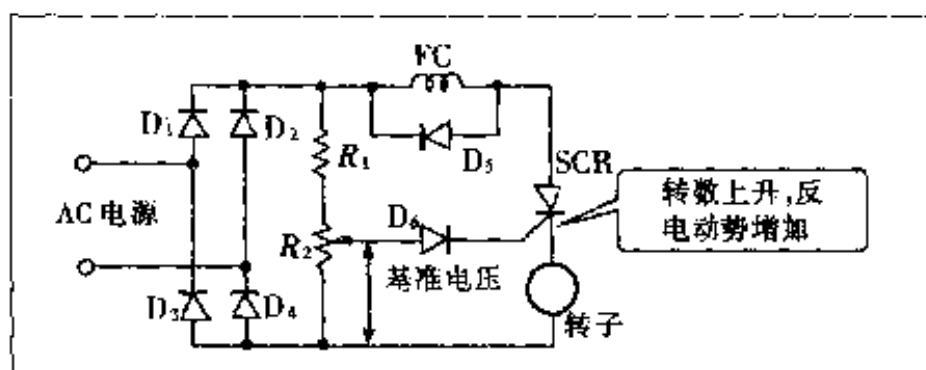


图7.9 直流电机的速度控制

的触发相位变化,控制加到转子M的电压。相位控制的原理与前章讲述的一样,但是此时转子的端子电压(反电动势)也作为反馈信号来用。确定 $R_2$ 的数值即便基准电压一定的状态,由于负载变动等电机的速度增加,则端子电压变大,SCR的门极-阴极间的电压相对变小,触发相位角滞后,所以投入电力则自动的下降。



另外,此电路是用桥式全波整流的直流,当磁场线圈FC的L负载用可控硅换流控制时,由于L的电感部分可控硅每半周期有不起换流的情况。为避免这种情况,如图7.10所示,在交流输入侧串联TRIAC及触发二极管DIAC,在每半周期的前沿达到DIAC的转折电压(约30V)之前,不导通即可。

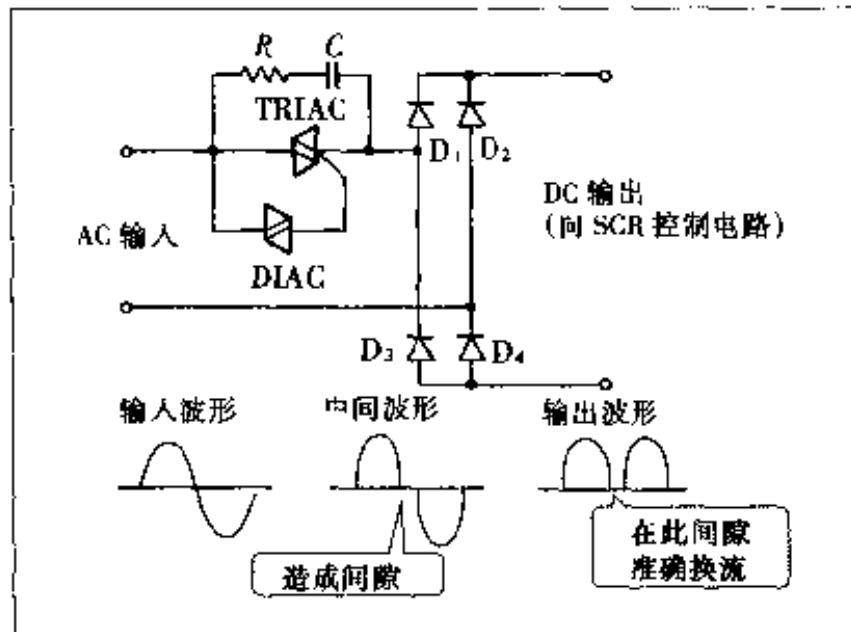


图 7.10 SCR 控制中防止换流误动作电路

### 7.3.2 开关型控制

在前章中叙述了利用串联晶体管的 ON-OFF 作用的开关控制电路，如图 6.7、图 6.8 所示，负载直接串接电机可以恒速运行。此时，不需要平滑用的斩波线圈及大容量电容器，以转子的惯性能充分地平滑。在图 7.11 所示电路中，即使接电源，由于开关晶体管  $T_r$  为 OFF 状态，没有初始输出。因而，进入比较用运算放大器的控制电压  $V_{ref}$  为零。

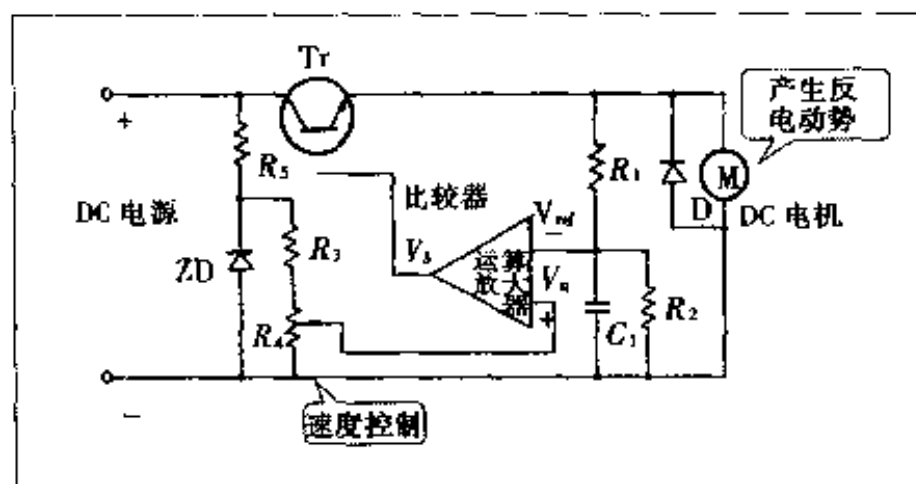


图 7.11 DC 电机的开关控制原理图

另外，基准电压  $V_n$  中，因加有用齐纳二极管 ZD 形成的一定电压，经过设定速度用的电阻  $R_4$ ，比较器的输出  $V_b$  成为 H 电平。所以  $T_r$  开始成为 ON 状态，电机 M 开始转动。 $T_r$  导通，比较器的

输入电压  $V_{ref}$  也只有时间常数的相位滞后, 相加电压, 当  $V_{ref} > V_{st}$  时, 开关晶体管  $Tr$  又成为 OFF 状态。但是, 电机并不马上停止, 以惯性继续运行, 因在输入端产生反电动势,  $V_{ref} > V_{st}$  的状态暂时继续,  $Tr$  仍然为 OFF 状态。

电机加上负载, 转数则下降, 因反电动势也下降, 成为  $V_{ref} < V_{st}$ , 因此比较器输出 H 电平,  $Tr$  再次成为导通状态, 电机加速。以后这种作用重复下去, 不论电机负载大小, 或者电源电压变动, 可以维持一定的转数控制, 这是以电机的反电动势作为检测信号所用的反馈控制, 可望有相当稳定的转数。并且如果使用与电机串接的测速发电机 (转速计) 作为检测信号, 可以得到更精

确、稳定的转数。

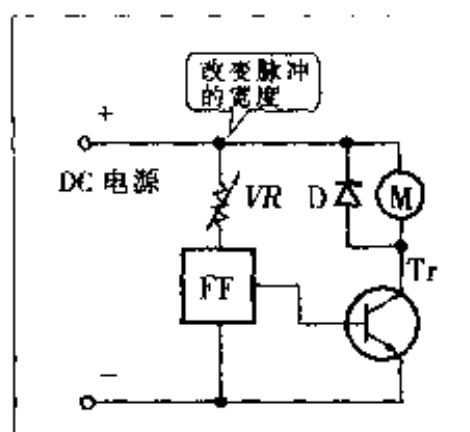


图 7.12 用触发器控制的直流电机

正如车用冷却器的风扇等, 仅仅调节输入电力采用开环的速度控制, 则可采取简单不稳定的触发器办法 (如图 7.12)。调节可变电阻器  $VR$  改变脉冲宽度, 控制开关晶体管  $Tr$  的 ON-OFF 时间比 (即能率)。但因完全不跟踪负载力矩的变动, 会仍然出现转数的变化。

### 7.3.3 起动发电机的控制

在摩托车或小型汽车中, 发动机起动用的起动电机和蓄电池充电用的发电机作成一体, 经常用起动发电机, 图 7.13 表示电压调节器及阻断继电器的组合电路。键开关接入将起动器开关接通, 电磁继电器  $S_1$  闭合, 起动发电机有电流流通。二个磁场线圈  $FC_1$  及  $FC_2$  分别为串联和并联连接, 作为复励式电机工作, 转动发电机的曲轴。

发动机起动后, 起动器开关一打开, 则  $S_1$  断开作为电机的功能停止, 但因转子继续转动, 由于并联的磁场线圈  $FC_2$  作为分激发电机工作, 采用电压调节器来控制产生的反电动势。根据产生电压作用的电磁继电器  $MC_1$  的接点,  $S_2$  不仅用于 a 点及 b 点的转



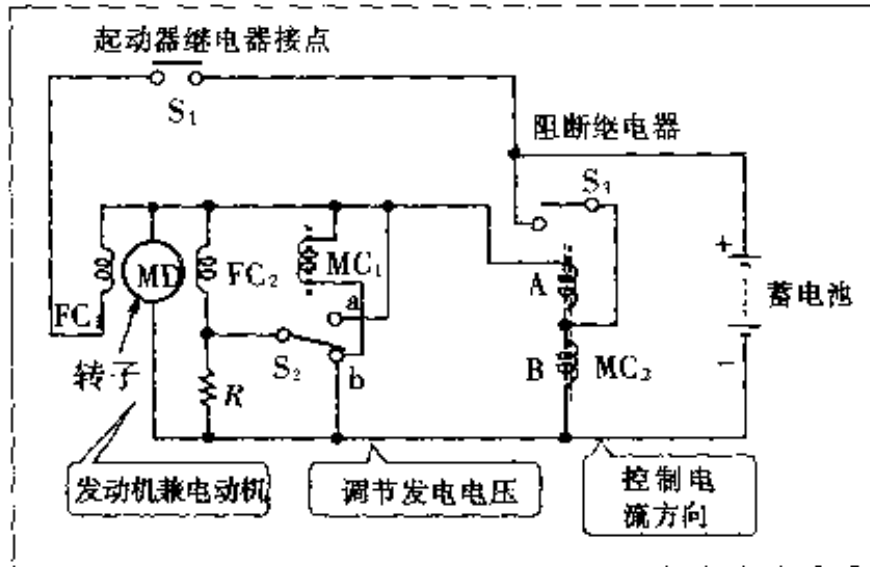


图 7.13 起动发电机的电路

换,并可处在中间不连接状态。即在低转数发电量少的期间,则将串联电阻  $R$  短路,将  $FC_2$  直接接地,得到最大磁场。随着转数慢慢升高发电电压上升,  $S_2$  的接点被圆筒形线圈  $MC_1$  吸引离开  $b$  点。因此,磁场线圈  $FC_2$  串联接入电阻  $R$ , 磁场变小,发电量减少。发动机转数再上升时,  $S_2$  的接点与  $a$  点相接,  $FC_2$  被短路,则无磁场电流。但因有剩余磁场,发电量并不完全为零。

自古就用啊!



发动机在空载等状态运行时,发电量则显著下降,当比蓄电池电压还低时,为了防止蓄电池电流逆流向发电机,采用阻断继电器。这是圆筒形线圈  $MC_2$  从中间向二端  $A$ 、 $B$  伸出分为二部分的特点。当发生电流超过规定值时,接点  $S_3$  闭合,输出电流流向蓄电池进行充电。发电电压低于蓄电池电压,电流将要逆流,但此时  $MC_2$  的  $A$  部分电流成为反方向流动,与  $B$  部分磁力相互抵消,接点离开,因此可防止自蓄电池的逆流。

仅阻断继电器的功能用 1 只二极管就够了,但与电压调节器组合一起,到目前仍在用此电路。但在使用交流发电机的同时,正在大量利用可控硅、晶体管以及二极管的控制。

### 名词解释

- 速度发电机 tacho-generator; 产生电压与转数成比例的发电机  
 电压调节器 voltage regulator; 电压调节器  
 阻断继电器 cut out relay; 防止逆流继电器  
 空载 idling; 空转

## 7.4 步进电机

这种电机的原理是被旋转磁场吸引的转子的磁极在移动。感应电机是利用磁场线圈加以交流电流而定子的磁场转动。直流电机是根据换流子使转子磁场变化。

因此,若磁场按步进式移动,转子也随之步进式转动。并且,不一定要旋转运动,让它平行移动则为线性电机。利用脉冲电流将定子磁场作步进式转动的方法,就是步进电机的原理。

由定子的6个磁极(各极绕以磁场线圈)及转子的4个极(由硅钢片等强磁性体的凸极),构成的步进电机的原理图如图7.14所示。定子的相对磁极的二个磁场线圈 $FC_1$ 及 $FC_1'$ 为串联连接,利用直流电流同时磁化成为N和S。用开关晶体管对 $FC_1$ 及 $FC_1'$

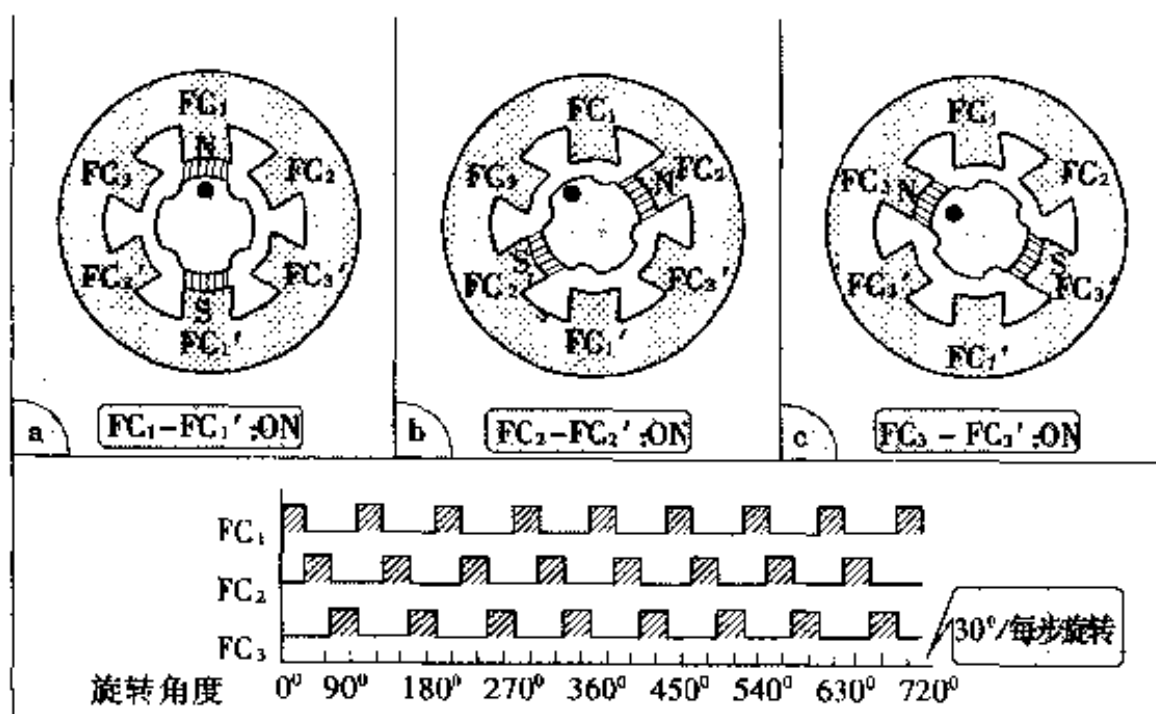


图 7.14 步进电机的工作原理

通以磁化电流,另外的磁极如果是断开,转子为图 7.14(a)所示静止状态。为了表示转子转动的状态,在一个极上加一符号。

然后,  $FC_2$  及  $FC'_2$  为接通状态,其它是断开时,转子移动到图 7.14(b)位置停止,即转子向左转动  $30^\circ$ 。同样下一脉冲输入,  $FC_3$  及  $FC'_3$  为导通状态,其它为断开,转子则转到图 7.14(c)所示状态,依次这样反复进行,转子转动 2 周为止的动作状态如图 7.14 中所示,由此可以理解,每一个脉冲使  $FC_1$ 、 $FC_2$ 、 $FC_3$  成

为依次导通状态的逻辑电路结构即可实现。每一脉冲则转子转动  $30^\circ$ , 3 个脉冲就可完成 1 周期, 合计 12 个脉冲则旋转 1 圈, 称为三相步进电机。对于磁场线圈  $FC_n$  和  $FC'_n$  能依次进行励磁的逻辑电路来说, 在第 4 章讲述的移位寄存器的应用中, 可以利用环形计数器。



停止时,好像需要关断呀!



这样的步进电机利用数字信号进行顺序控制,是非常好的电机,广泛用于控制转动角或者控制位置等。

用一个脉冲使阶梯角度变小,可以将定子及转子的极数增加。而且,仅将磁极的稳定点(最强的吸引点)分开即可,只将定子及转子的凸极数增多,与实际上被增加极数有同样的效果。因此,即使用 1 个阶梯,其转动角为  $1 \sim 2^\circ$  也比较容易制造。

### 名词解释

步进电机 stepping motor; 脉冲电机

线性电机 linear motor; 直线移动电机

环形计数器 ring counter; 2 进位计数器多个连成环状,每一个脉冲,使 H 电平的比特位向邻侧移动一次

## 参考文献

作者参考了以下书籍谨致谢意。

- (1) 山崎洋一：実践シーケンス制御（啓学出版）
- (2) 種田導博：シーケンス制御の基礎（東京電機大学出版局）
- (3) 岡村迪夫：解析デジタル回路（CQ出版）
- (4) 猪飼国夫：デジタル・システムの設計（CQ出版）
- (5) 実用電子回路ハンドブック，第1巻～第5巻（CQ出版）
- (6) 制御機器活用ガイドブック（日刊工業新聞社）
- (7) 白土義男：デジタルICの基礎（東京電機大学出版局）
- (8) 松下電器製造・技術研修所：制御基礎講座第1巻～第3巻（広済堂出版）

[ G e n e r a l I n f o r m a t i o n ]

书名 = 图解机电一体化入门系列 电子机械控制入门

作者 = 妹尾允史

页数 = 1 4 8

S S 号 = 0