

电子技术讲座(四)

晶体管开关电路

上海市业余工业大学



科学出版社

《电子技术基础》系列教材

晶体管开关电路

王中奇 王中良 王中伟

• • • • •

电子技术讲座(四)

晶体管开关电路

上海市业余工业大学编

科学出版社

1978

内 容 简 介

本书介绍了工业生产自动化中常用的一些基本开关电路。比较详细地讨论了各种开关电路的工作原理、各元件参数的选择和设计方法,介绍了它们的电路。最后一章介绍了隧道二极管、单结晶体管、小功率可控硅和可关断可控硅等负阻器件组成的开关电路。书中列举的一些应用实例,是群众性技术革新运动的产物。

本书内容通俗易懂,深入浅出,可供从事电子工业的有关工人和技术人员阅读,也可供高等院校、中专的有关专业的教师和学生参考。

电子技术讲座共四本,分别是:《晶体管整流电路》、《晶体管放大与振荡电路》、《晶体管收音机》、《晶体管开关电路》。

晶 体 管 开 关 电 路

上海市业余工业大学

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

北京印刷二厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1972年8月第一版 开本:787×1092 1/32

1978年5月第四次印刷 印张:12 3/4 插页2

印数:1,157,910—1,659,010 字数:289,000

统一书号:15031·16

本社书号:56·15-7

定价: 0.85 元

前 言

伟大领袖和导师毛主席早在一九六五年就指出,电子水准是现代化的一个重量标志。我国要高速度地实现四个现代化,必须发展电子工业和广泛采用电子技术。近年来,电子技术的应用,已经渗透到国民经济、国防建设和人民生活中的各个领域,并开始收到了良好的效果。为适应这一形势,我们组织了有工人、革命干部、革命知识分子参加的三结合小组,陆续编写了电子技术讲座《晶体管整流电路》、《晶体管放大与振荡电路》、《晶体管收音机》、《晶体管开关电路》四本普及读物。

本讲座出版以来,得到广大读者的热情鼓励,特别是许多单位和读者来信来访,提出了不少宝贵的意见。据此,我们对《晶体管整流电路》、《晶体管放大与振荡电路》进行修改和增补。在修订过程中,又得到很多单位和广大读者的关怀和帮助,我们表示衷心的感谢。

由于我们马列主义、毛泽东思想水平不高,业务知识有限,加上缺乏编写科技普及读物的经验,一定会有缺点和错误,希望工农兵群众和读者给予批评指正。

编 者

一九七八年一月

目 录

第一章 晶体管开关特性及反相器..... (1)

第一节 为什么晶体管能作为开关应用..... (1)

第二节 晶体管反相器..... (12)

第三节 晶体管的开关速度..... (15)

第四节 RC 电路的充放电特性及加速电容 (20)

第五节 晶体管延时开关电路..... (25)

第六节 射极跟随器..... (31)

第七节 参考电路..... (34)

第八节 应用举例..... (39)

结 语 (46)

第二章 双稳态电路..... (49)

第一节 双稳态电路工作原理..... (50)

第二节 稳定条件..... (52)

第三节 触发方式..... (55)

第四节 双稳态电路的设计与调试..... (59)

第五节 直流负载对双稳态电路的影响..... (64)

第六节 参考电路..... (70)

第七节 应用举例..... (72)

结 语 (81)

第三章 无稳态电路..... (83)

第一节 无稳态电路的工作原理..... (83)

第二节 电路设计..... (88)

第三节 参考电路..... (92)

第四节 应用举例..... (98)

结 语 (103)

第四章 单稳态电路	(105)
第一节 集基偶合单稳态电路	(106)
第二节 射极偶合单稳态电路	(111)
第三节 参考电路	(115)
第四节 应用举例	(117)
第五节 压片机程序控制电路——介绍一种延时 较长的单稳电路	(126)
结 语	(138)
第五章 射极偶合双稳态电路	(139)
第一节 工作原理	(140)
第二节 射偶双稳电路的回差现象	(141)
第三节 射偶双稳电路设计	(150)
第四节 参考电路	(154)
第五节 应用举例	(156)
结 语	(162)
第六章 锯齿波发生器	(164)
第一节 锯齿电压波的产生	(166)
第二节 简单的锯齿波电路所产生的锯齿波线性 不好的原因	(170)
第三节 以晶体管作恒流源的锯齿波电路	(172)
第四节 采用补偿电势的锯齿波电路	(177)
第五节 电容负反馈锯齿波电路	(182)
第六节 参考电路	(188)
第七节 应用举例	(193)
结 语	(203)
第七章 门电路	(204)
第一节 什么是与门和或门电路	(204)
第二节 二极管门电路	(207)
第三节 三极管门电路	(212)

第四节	电阻-三极管门电路	(218)
第五节	应用举例	(221)
结 语		(242)

第八章 晶体管计数电路..... (244)

第一节	二进制计数电路	(244)
第二节	十进制计数电路	(252)
第三节	十进计数电路状态的显示	(258)
第四节	计数电路置零的方法	(263)
第五节	环形计数器	(267)
第六节	参考电路	(273)
第七节	应用举例	(280)
结 语		(291)

第九章 开关电路综合应用例举..... (293)

一、	DZ-62 型电针治疗机	(293)
二、	超声波钢轨探伤仪	(299)
三、	QA-50-1 型可控硅脉冲缝焊机	(307)
四、	晶体管电度表脉冲校验台	(313)
五、	电子量革机	(325)
结 语		(333)

第十章 负阻器件在开关电路中的应用..... (334)

第一节	隧道二极管	(335)
第二节	单结晶体管	(350)
第三节	小功率可控硅	(369)
第四节	可关断可控硅	(384)

第一章 晶体管开关特性及反相器

在自动化设备中,无论它是一个简单的控制电路,或者是一台用大量数字电路组成的复杂的电子设备,例如电子计算机,就其各单元电路来说都是各种各样的开关电路,其中包括一些门电路和触发器,以及由触发器组成的计数部件和寄存部件。由于开关电路的波形都是脉冲形式的,因此,开关电路实际上也是脉冲电路。

晶体管脉冲技术历史并不长,但是,随着半导体器件的发展和大规模集成电路的出现,其发展的速度是惊人的。现在一台由大规模集成电路组成的微型电子计算机,重量只有几十克,而运算速度可达每秒十万次,一台巨型的高速电子计算机,运算速度可达每秒一亿五千万次。至于晶体管脉冲数字技术,除了在电子计算机、电视、雷达、数字通信、遥控遥测等各个领域外,在许多工业部门,象轻纺、冶金、机械、电子等行业中应用也日益广泛,成为技术改造与实现机械化、自动化的重要措施。因此,学习和掌握晶体管开关电路的技术,有着十分重大的意义。

第一节 为什么晶体管能作为开关应用

在早期,继电器被认为是良好的电路开关,通过外界对继电器的控制,继电器按照人们的需要接通或断开电路,以达到自动控制的目的。

但是,随着开关速度的加快,譬如每分钟要求接通和断开

电路数千次、上万次时,则机械继电器的接触点就来不及接通和断开,便失去继电器的开关作用。另外,这种有触点的开关接触时往往有颤动,产生火花,因此就容易损坏,使开关动作不可靠。

“在生产斗争和科学实验范围内,人类总是不断发展的,自然界也总是不断发展的,永远不会停止在一个水平上。”随着晶体管的出现,人们在实践中,采用晶体管做成无触点开关,可以克服有触点开关的一系列缺点。晶体管为什么可以作为一个开关来应用呢?为了使大家对“开关”的特性有一个概念,我们先从理想开关说起。

1. 理想开关

人们在日常生活和生产中,经常用开关来接通和切断电源,如拉线开关、闸刀开关、按钮开关等,这些开关是有接触点的,叫有触点开关。这类开关的开关状态比较理想,如图 1-1 所示,当开关接通时,其接触电阻很小,可当作零,因此,开关两端电压降 $U_K = 0$, 回路电流 $I = \frac{E}{R} = \frac{12 \text{ 伏}}{2 \text{ 千欧}} = 6 \text{ 毫安}$, 此状态相当于图 1-1(2) 特性的 A 点;而开关断开时,开关电阻极大,可看作无穷大,此时开关两端电压 $U_K = E$, 回路电流为零,相当工作在图 1-1(2) 特性中 B 点。图 1-1(3) 为开关两端的电压波形。

电压和电位 让我们以图 1-1 所示的电路为例,来说明电压和电位的概念。图中的开关跟电源正极相连的一端是接地的。通常我们把电路中接地的这点电位当作零,作为公共的参考点,而其余各点电位都与它比较,比它高的为正,比它低的为负。如图 1-1 中 $E = 12 \text{ 伏}$ 的电源,由于正极接地,所以正极电位就为零伏,负极的电位比正极低 12 伏,所以负极电位为 -12 伏 。由此可见,电子电路中的所谓接地,通常不同

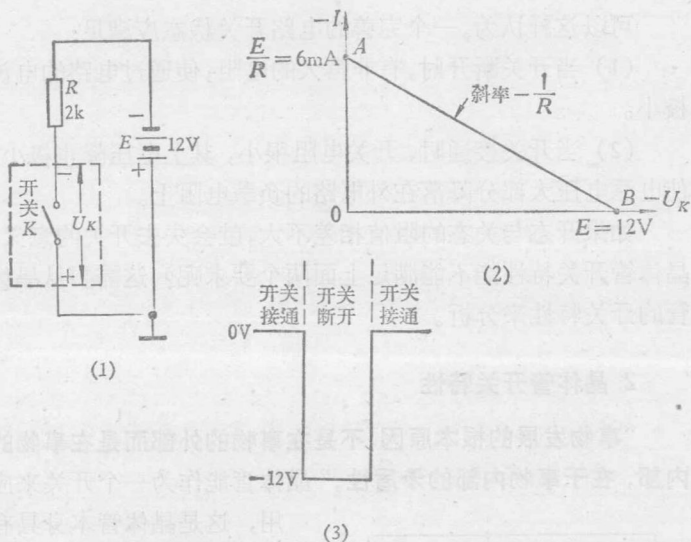


图 1-1

于电工中的接“大地”，只是为了便于比较电路中各点的电位而采用的一个符号。一般地说，电路中 P 点到 Q 点之间的电压 U_{PQ} 就是 P 点的电位 U_P 与 Q 点的电位 U_Q 之差，即 $U_{PQ} = U_P - U_Q$ ，若 Q 点是接地的，则 $U_{PQ} = U_P - 0 = U_P$ ，即电路中任一点对接地点的电压等于这一点的电位。应用到图 1-1 的电路里，我们说开关两端的电压 U_K 就是开关上端这一点的电位，因为开关的下端是接地的，因此当开关接通时，上端与下端都是零电位，开关两端电压为零。当开关断开时，电路中不通过电流，电阻 R 两端间的电压为零，开关上面这一点的电位与电源负极的电位相同，即 -12 伏。所以开关断开时，它的端电压 U_{PQ} 等于 -12 伏。由此得出开关电压波形如图 1-1(3) 所示。

与电流座标轴及电压座标轴相交 A 点和 B 点的直线叫负载线，此负载线的斜率为 $-\frac{1}{R}$ ，它的作法在第二讲《晶体管放大与振荡电路》中已讨论，不过对于开关状态来说，工作点只有两点：即 A 点及 B 点。

可以这样认为,一个完善的电路开关状态应满足:

(1) 当开关断开时,有非常大的电阻,使通过电路的电流极小。

(2) 当开关接通时,开关电阻很小,其上电压降也极小,使电源电压大部分降落在外电路的负载电阻上。

如果开态与关态的阻值相差不大,就会失去开关的意义。晶体管开关特性不能满足上面两个要求呢? 这需要从晶体管的开关特性来分析。

2. 晶体管开关特性

“事物发展的根本原因,不是在事物的外部而是在事物的内部,在于事物内部的矛盾性。”晶体管能作为一个开关来应用,

这是晶体管本身具有开关特性的缘故。

为了便于了解晶体管的开关特性,让我们先从实验着手。搭一个如图 1-2 所示的电路。调节偏置电阻 R_B , 从最大值开始, 逐渐减小, 每调一次

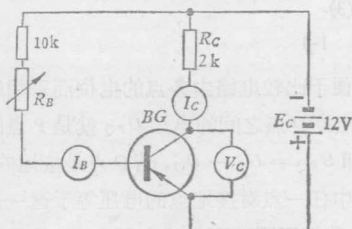


图 1-2

就把三个电表上的读数记录下来,如表 1-1 所列。

表中所列的实验结果,也可在晶体管的输出特性曲线上用作图法得出,如图 1-3 所示。图中的直线,就是在 E_C 为 -12 伏、 R_C 为 2 千欧情况下的负载线。它同特性曲线的各个交点,决定了晶体管的相应的工作点。同表 1-1 中的数据相比较是一致的。从表 1-1 或图 1-3 中可以清楚地看出:

(1) 在基极电流 I_B 从 0 变化到 80 微安范围内, I_B 的较小变化都将引起 I_C 的较大的变化,输入端的基极电流 I_B 与输

表 1-1

I_B (微安)	0	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120
I_C (毫安)	0.1	1	1.4	2.3	3.2	4	4.7	5.3	5.8	6	6	6
U_C (伏)	11.8	10	9.2	7.4	5.6	4	2.6	1.4	0.4	0.1	0.1	0.1

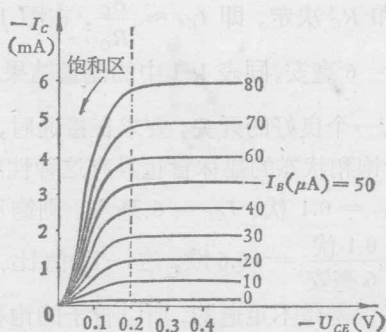
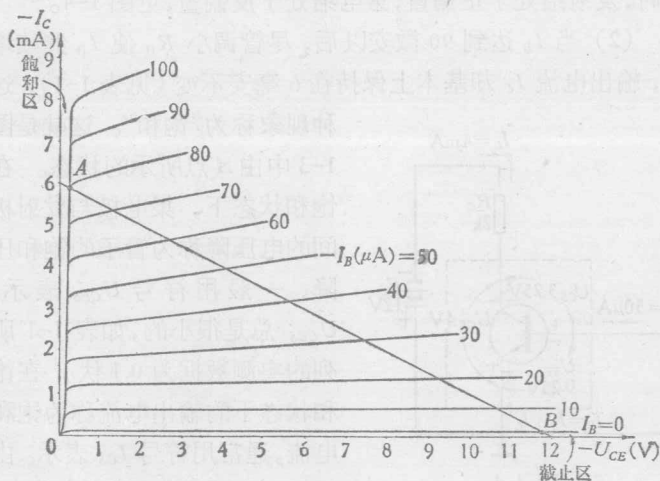


图 1-3

出端的集电极电流 I_C 之间近似地成线性比例关系即: $I_C \approx \beta I_B$, 例如 $I_B = 50$ 微安时, $I_C = 4$ 毫安, 输出电流 I_C 为输入电流 I_B 的 $\beta = \frac{4 \text{ 毫安}}{50 \text{ 微安}} = 80$ 倍, 所以特性曲线的这一范围称为放大区。这是我们已比较熟悉的。晶体管工作在放大区时, 发射结处于正偏置, 集电结处于反偏置, 见图 1-4。

(2) 当 I_B 达到 90 微安以后, 尽管调小 R_B 使 I_B 继续增大, 输出电流 I_C 却基本上保持在 6 毫安不变 (见表 1-1), 这

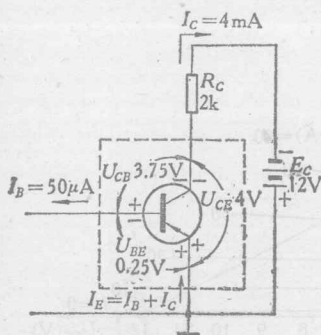


图 1-4

种现象称为“饱和”。这就是图 1-3 中由 A 点所示的状态。在饱和状态下, 集电极与发射极间的电压降称为管子的饱和电压降, 一般用符号 U_{CES} 表示。 U_{CES} 总是很小的, 如表 1-1 所列的实测数据为 0.1 伏。在饱和状态下的输出电流称为饱和电流, 通常用符号 I_{CS} 表示。由于 U_{CES} 很小, 所以饱和电流 I_{CS}

基本上由 E_C 和 R_C 决定, 即 $I_{CS} \approx \frac{E_C}{R_C}$, 在图 1-2 的电路中 $I_{CS} = \frac{12 \text{ 伏}}{2 \text{ 千欧}} = 6 \text{ 毫安}$, 同表 1-1 中的测量结果相符。

前面说过, 一个好的开关, 要求在接通时, 它本身的电阻很小。处于饱和状态的晶体管也具有这种性质, 由表 1-1 测量结果 $U_{CES} = 0.1$ 伏、 $I_{CS} = 6$ 毫安, 则饱和管的内阻 $R_{\text{导}} = \frac{U_{CES}}{I_{CS}} = \frac{0.1 \text{ 伏}}{6 \text{ 毫安}} = 16.6 \text{ 欧}$, 这一阻值比之负载电阻 $R_C = 2$ 千欧来说是微不足道的, 所以管子的饱和状态, 相当于开关的接通状态。在饱和状态下的晶体管可以画成图 1-5 所示的等值电路, 图中还标出了在饱和的情况下, 基极对发射

极间的电压约为 -0.3 伏(锗管)。晶体管工作在饱和区时,发射结处于正偏置,集电结也处于正偏置。

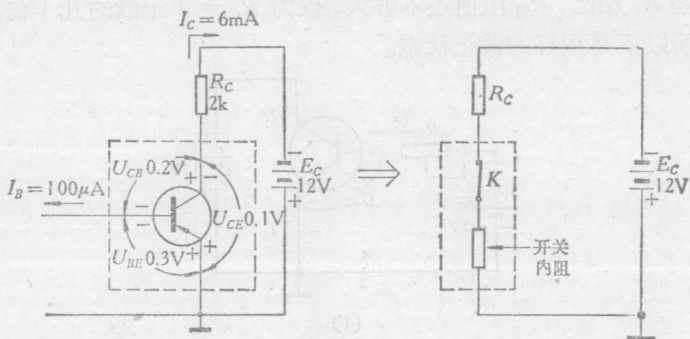


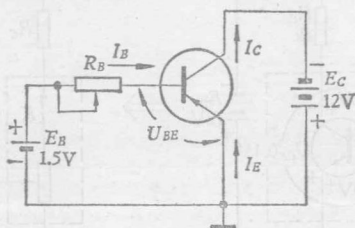
图 1-5

如表 1-1 所示,对于图 1-2 这个具体电路,使管子饱和所需的 I_B ,应大于 80 微安。 I_B 越大,管子的饱和就越深,抗干扰能力也越强,就是说由于干扰使 I_B 有所变动时,也不致使管子脱离饱和状态。在一般情况下,使管子刚好饱和所需的基极电流可由下式决定: $I_B = \frac{I_{CS}}{\beta}$,所以一般设计电路时,晶体管的饱和条件总是取 $I_B > \frac{I_{CS}}{\beta}$ 。

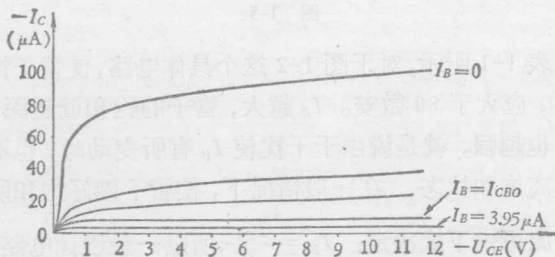
(3) 当图 1-2 电路中的偏流电阻 R_B 阻值调至很大时,基极可认为开路,这时表 1-1 所列测量数据是 $I_B = 0$,集电极电流 I_C 减小到 100 微安(此电流称为穿透电流,一般用 I_{CEO} 表示),集电极和发射极间的电压增至 11.8 伏。这一工作状态对应于图 1-3 中的 B 点。与普通开关特性(见图 1-1)相比较,晶体管的这种工作状态相当于开关的断开状态,所以称为晶体管的截止状态,不过这个截止状态是不太理想的,因为管子内还有 100 微安这样大的穿透电流通过。作为开关来说,相当于断开时具有漏电阻,其数值为

$$R_{\text{偏}} = \frac{U_{CE}}{I_{CEO}} = \frac{11.8 \text{ 伏}}{100 \text{ 微安}} = 118 \text{ 千欧}$$

与 R_C 相比, $R_{\text{偏}}$ 阻值还不够大, 仅为 $R_C = 2 \text{ 千欧}$ 的几十倍, 所以不是很好的截止状态。



(1)



(2)

图 1-6

能否使晶体管截止得更好些呢? 实践表明, 是能够做到的。为了说明这一点, 我们先做一个实验, 把晶体管接成图 1-6, 改变 R_B , 测得 I_B 、 I_C 、 I_E 和 U_{BE} 的各个数值如下:

表 1-2

I_B (微安)	3.2	3.3	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	3.9	3.95	3.95	3.95	3.95
I_C (微安)	14	11	8	6.5	5.1	4.5	3.9	3.5	3.4	3.4	3.4	3.4
I_E (微安)	10.8	7.7	4.5	2.9	1.4	0.7	0	-0.4	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55
U_{BE} (伏)	0.06	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.36	0.4	0.5	0.5	0.6	1

上列数据表明：只要在基极上加上相对于发射极为正的电压，这样集电极电流就会减小，且比 I_{CEO} 的数值还要小许多，例如当 $U_{BE} = 1$ 伏时， $I_C = 3.4$ 微安，这个集电极电流已是很小的了，这时相当于断开时的漏阻等于

$$R_{漏} = \frac{U_{CE}}{I_{C漏}} = \frac{12 \text{ 伏}}{3.4 \text{ 微安}} = 3530 \text{ 千欧},$$

所以，这样的截止状态可以说是相当好了。在这种情况下晶体管的发射结和集电结都处于反偏置，基极注入的电流 $I_B = 3.95$ 微安，在数值上它近似等于晶体管特性手册中所列的 I_{CBO} 。以后，我们为了得到可靠的截止状态，只要在锗管的基极注入一个 I_{CBO} 的电流*，见图 1-6(2)。工作在反偏置情况下的晶体管及其等效电路如图 1-7 所示。

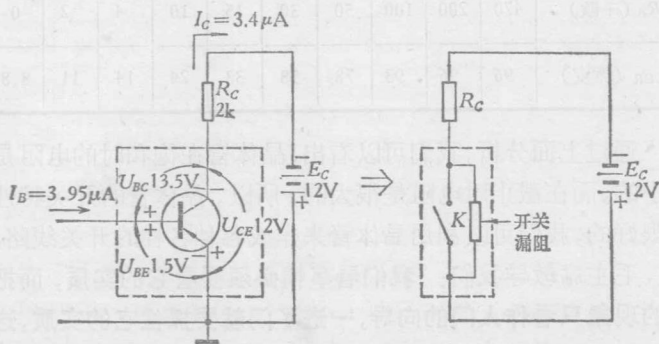


图 1-7

* 如果我们仔细分析一下表 1-2 的数据可以看出，对于我们这个特定的管子来说，当 $U_{BE} = 0.36$ 伏时，管子内部的发射结才真正处于零偏置，因为只有此时发射结上没有电流流过，即 $I_E = 0$ 。而当 $U_{BE} > 0.36$ 伏时，发射结才处于反偏置，发射极电流 I_E 从发射极往外流，当管子发射结、集电结均反偏时，集电极电流记为 I_{CX} ，发射极电流记为 I_{EX} ，此时三个电流的关系是 $I_B = I_{CX} + I_{EX}$ 。从表中还可看出， U_{BE} 从 0.5 伏继续增加，三个电流的数值基本上保持不变了，所以 $I_{CX} = 3.4$ 微安，这时集电极电流已减小到最小值了。