

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

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。附录中结合本讲座内容,介绍了简易晶体管电视机的原理、装配和调试方法。

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

沈阳市第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1972 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1977 年 2 月第三次印刷 印张:13 1/4 插页:3

印数:657,451—1,157,910 字数:302,000

统一书号:15031·16

本社书号:56·15—7

定 价: 0.85 元

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	十进制计数电路状态的显示	(
第四节	计数电路置零的方法	(2
第五节	环形计数器	(2
第六节	参考电路	(2
第七节	应用举例	(28
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)
附 录	简易晶体管电视机	(398)

第一章 晶体管开关特性及反相器

晶体管开关电路又称“晶体管脉冲电路”。晶体管脉冲技术是近十几年发展起来的,历史并不长,但在刘少奇修正主义路线的影响下,被一些资产阶级技术“权威”所垄断。他们极力散布脉冲技术“神秘论”,把这项电子技术吹得高深莫测,玄而又玄,叫嚷:“文化低的不能搞脉冲”,妄图阻止工人攀登科学技术高峰。

“卑贱者最聪明!高贵者最愚蠢”。经过无产阶级文化大革命战斗洗礼的广大工人群众,遵照毛主席“**不破不立**”的教导,高举革命大批判的旗帜,粉碎了资产阶级束缚工人的种种精神枷锁,从战争中学习战争,边干边学,边学边创,不仅把脉冲技术用于加强国防建设的重要设备上,而且将它应用于各个生产领域中,大大提高了工业自动化的程度,为电子技术应用闯出一条新路。

第一节 为什么晶体管能作为开关应用

在自动化设备中,无论它是一个简单的控制电路,或者是一台复杂的电子控制设备,如程序控制线切割机床、电子计算机等,其中最主要的结构部件都是各种各样的开关电路。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,我们先从普通开关说起。

1. 普通开关

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

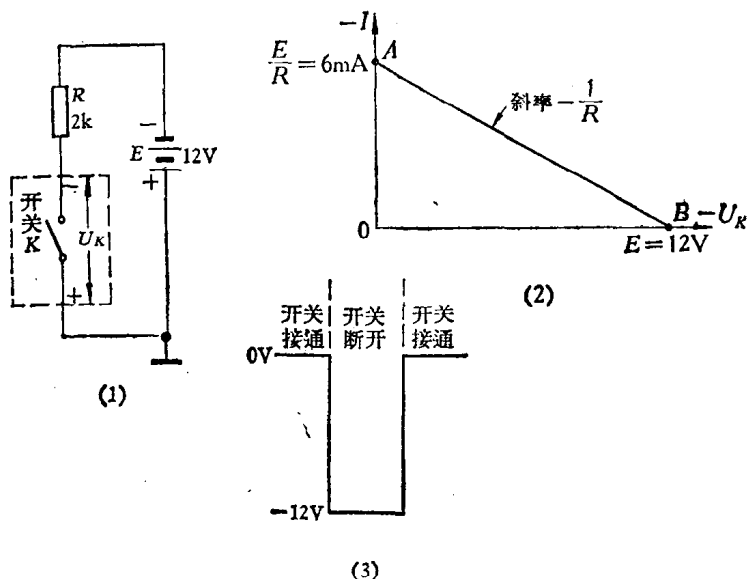


图 1-1

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。

与电流坐标轴及电压坐标轴相交 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

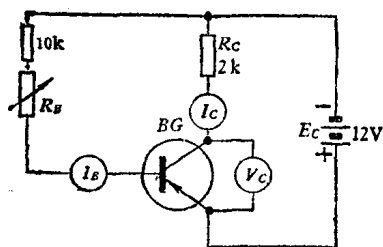


图 1-2

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

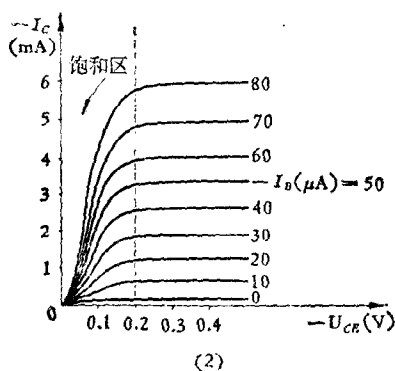
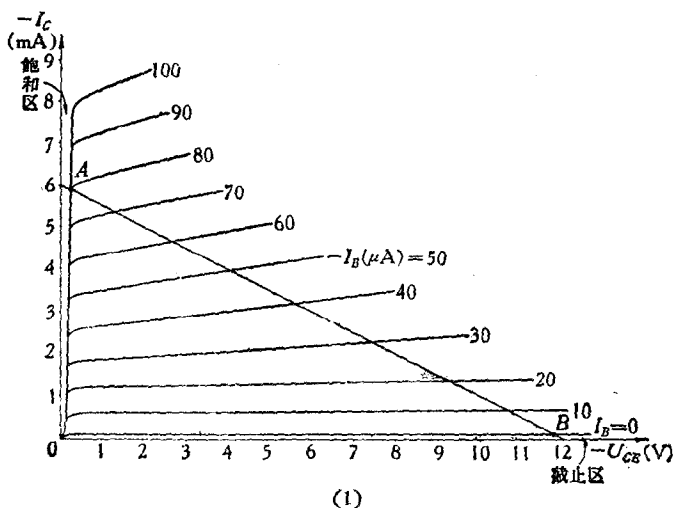


图 1-2

1100330

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), 这种

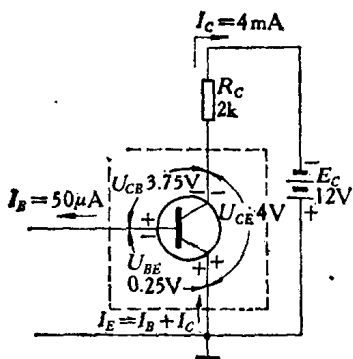


图 1-4

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 $R_{\#} = \frac{U_{CES}}{I_{CS}} = \frac{0.1 \text{ 伏}}{6 \text{ 毫安}} = 16.6 \text{ 欧}$, 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。

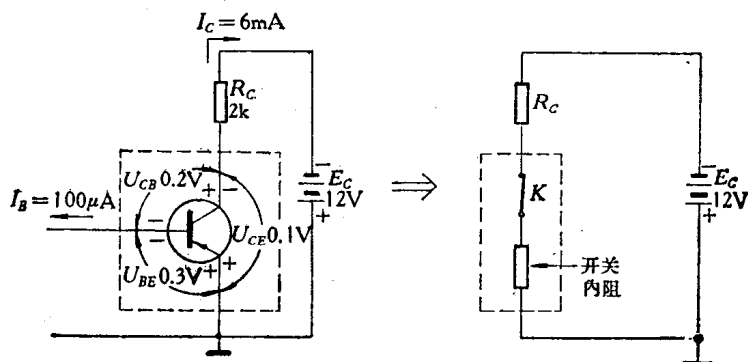


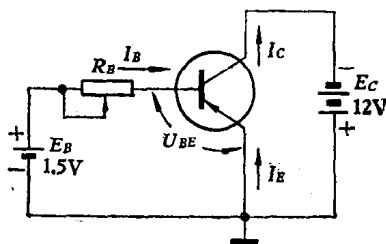
图 1-5

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 $I_B > \frac{I_{CS}}{\beta}$ 。

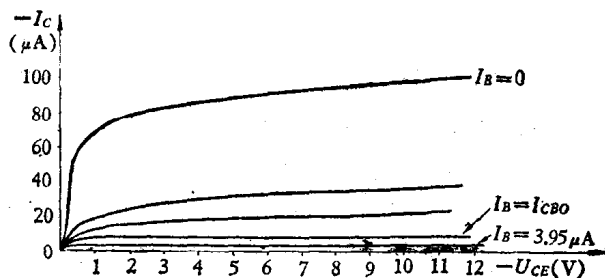
(3) 当图 1-2 电路中的偏流电阻 R_B 阻值调至很大时, 基极可认为开路, 这时表 1-1 所列测量数据是 $I_B = 0$, 集电极电流 I_C 减小到 100 微安 (此电流称为穿透电流, 一般用 I_{CEO} 表示), 集电极和发射极间的电压增至 11.8 伏。这一工作状态对应于图 1-3 中的 B 点。与普通开关特性 (见图 1-1) 相比较, 晶体管的这种工作状态相当于开关的断开状态, 所以称为晶体管的截止状态, 不过这个截止状态是不太理想的, 因为管子内还有 100 微安这样大的穿透电流通过。作为开关来说, 相当于断开时具有漏电阻, 其数值为

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

与 R_C 相比, R_B 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。

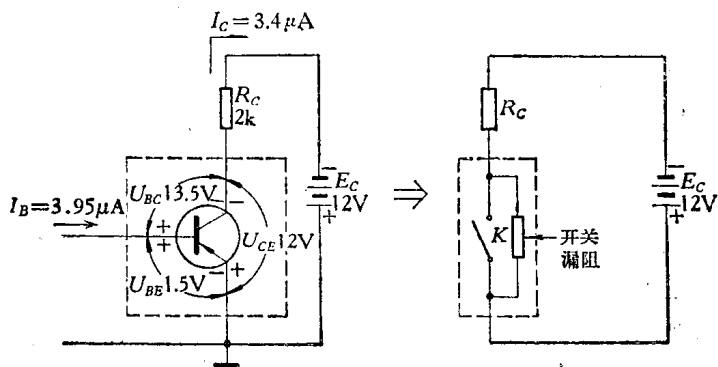


图 1-7

* 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。

有时我们也可用下述的方法来减小截止时的集电极漏电

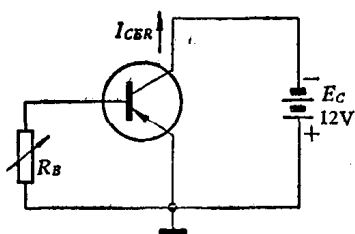


图 1-8

流，即在晶体管的基极与发射极之间接上一个电阻 R_B ，如图 1-8 所示。此时的集电极电流用 I_{CER} 表示。

表 1-3 列出了某晶体管的 I_{CER} 与 R_B 的关系，该晶体管的参数 $I_{CEO} = 100$ 微

安， $I_{CBO} = 3.9$ 微安，由表中可以看出，集电极电流 I_{CER} 随着 R_B 的减小而减小，并在 I_{CEO} 到 I_{CBO} 这个范围内变化。

表 1-3

R_B (千欧)	470	200	100	50	30	15	10	4	2	0
I_{CER} (微安)	96	96	93	78	58	33	24	14	11	8.8

通过上面分析，我们可以看出，晶体管在饱和时的电阻是很小的，而在截止时电阻是很大的，所以，晶体管的开关特性是很好的，我们可以利用晶体管来作成各种各样的开关线路。

毛主席教导我们：“我们看事情必须要看它的实质，而把它的现象只看作入门的向导，一进了门就要抓住它的实质，这才是可靠的科学的分析方法。”我们在讨论晶体管开关电路时，就应该紧紧抓住它的实质。尽管晶体管开关电路五花八门，变化多端，但其实质还是以晶体管开关特性为基础的。为了抓住主要因素，因此今后在分析这些线路工作原理及估算线路参数时，常常将处于饱和状态下的三极管 E 、 C 二个极近似看成短路（ B 点的电位接近 E 、 C 电位），在截止情况下，我们将三极管 E 、 C 二个极近似看成开路，即把它们之间很大的漏电阻看作开路。这样我们对晶体管开关电

路，无论在理解其工作原理方面还是在估算其工作状态或电路参数方面都要比放大电路容易得多。

晶体管的 I_{CBO} 和 I_{CEO} 三极管内部有两个 P-N 结，如果把发射极断开，集电结加反向偏压，这时就有漏电流 I_{CBO} 流过，如图 I 所示。在

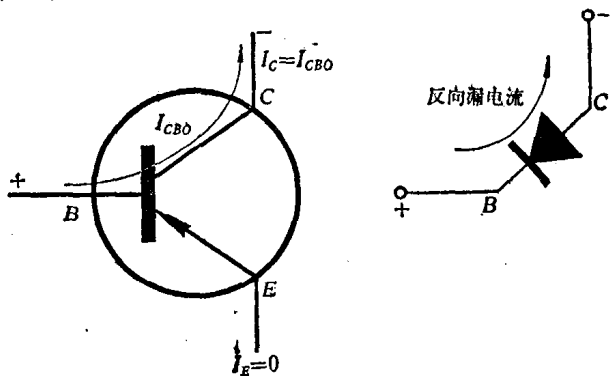


图 I

这种情况下，晶体管相当于一只二极管， I_{CBO} 称为发射极开路，集电极-基极反向截止电流或集电极反向饱和电流。这个漏电流的大小与所加集电结反向偏置的电压大小基本无关，但受温度影响很大，一般说来，温度每升高 10°C ， I_{CBO} 将增加一倍左右。

如果把基极断开，发射极接电源正极，集电极接负极，在晶体管内部两个结上分压后，发射结

将受正向偏压，集电结将受反向偏压，于是集电结产生漏电流 I_{CBO} ，这时由于基极断开， $I_B = 0$ ，故这部分电流由发射极供给，这样发射极就有电流 $I'_E = I_{CBO}$ 流向基极，由晶体管的电流放大作用知，这部分电流将引起发射极有电流 $I''_E = \beta I'_E = \beta I_{CBO}$ 流至

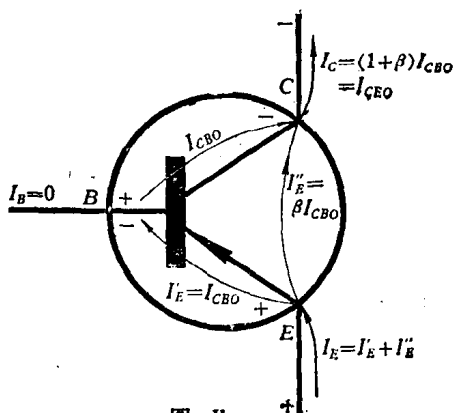
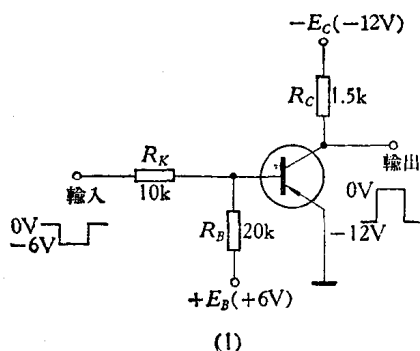


图 II

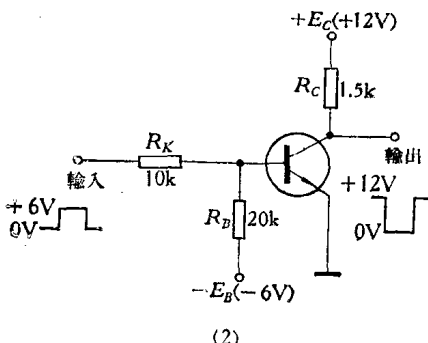
集电极,最后在集电极总共得到 $I_C = I_{CBO} + \beta I_{CBO} = (1 + \beta) I_{CBO}$, 这个漏电流就是 I_{CEO} , 见图 II。所以这两个漏电流有以下关系: $I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$ 。 I_{CEO} 称为基极开路,集电极-发射极反向截止电流或穿透电流。表 1-1 中测得的 100 微安就是这个穿透电流。有时实际测得的 I_{CEO} 比 $(1 + \beta) I_{CBO}$ 来得小,这是因为晶体管的 β 值跟发射极电流有关,当发射极电流很小时, β 值也降低了。

第二节 晶体管反相器

最常用最基本的晶体管开关电路如图 1-9 所示。工作原理是这样的: 当无输入信号时(即输入端为零电位), $+E_B$ 通过 R_B 加到晶体管基极上,使晶体管截止,管子内几乎没有电



(1)



(2)

图 1-9

流通过, R_C 上的压降接近于零, 因此输出端电位近似为 $-E_C$ 。当输入端加一负的信号电压, 例如 -6 伏时, 管子由截止过渡到饱和, 此时, 输出端电位近似为零, 这个状态一直保持到输入信号消失为止。常见的电铃按钮开关, 平时是断开的, 手掀按钮时, 开关接通, 停止掀按钮, 开关又断开。上述晶体管开关与这种按钮开关很相似, 平时总是断开的, 来负信号时线路接通, 来正信号则不起作