

G 714
48

※※※※※※※※※※※※※※※※

电 子 学 基 础

※※※※※※※※※※※※※※※※

马全根 编

北京市农业管理干部学院

一九八九年十月

第一章 半导体二极管和三极管

概述 自从1948年第一个晶体管问世以来，半导体技术有了飞跃的发展。由于半导体器件具有体积小、重量轻、耗电省以及寿命长，工作可靠等突出优点，所以在现代农业、现代工业、现代科学技术和现代国防中获得广泛地应用。由于我们是管理专业的干部，因此，我们只对其在使用方面的一些特点作一些扼要地介绍，以开拓知识面。

§ 1-1 半导体的导电特性

(一) 什么是半导体，顾名思义，就其导电能力在导体和绝缘体之间，如硅、锗、硒以及大多数金属氧化物和硫化物都是半导体。

(二) 半导体的导电特性 半导体的导电能力在不同的条件下有很大的差别，例如有些半导体对温度的反应很灵敏，在环境温度升高时，它的导电能力增强很多。利用这种特性就可以做成各种热敏元件。再如有些半导体（如硫化镉）受光照时，它的导电能力变得很强；当无光照时又变得象绝缘体那样不导电。利用这种特性，就可以做成各种光电元件。更重要的是，如果在纯净的半导体中掺入微量的杂质后，它的导电能力就可增加几十万乃至几百万倍。例如：在纯硅中掺入百分之一的硼以后，硅的电阻率就从大约 20×10^8 欧·毫米²/米减小到4000欧·毫米²/米左右，利用这种特性就能做成各种不同用途器件，如半导体二极管、三极管、场效应管以及可控硅半导体器件。

§ 1-2 半导体二极管

一、基本结构

将PN结加上相应的电极引线、管壳就成为半导体二极管。按结构分，二极管有点接触型和面接触型等。

点接触型：PN结面积很小，因此不能通过较大电流，但其高频特性好，一般适用于高频小功率场合，也可以作数字开关电路中的开关元件。

面接触型：PN结面积大，结电容大，它能通过较大的电流，但其高频特性差，工作频率较低，一般用作整流。

二极管的电路表示符号为： $\longrightarrow \text{D} \longleftarrow$

二、二极管的伏安特性：具有单向导电性。当二极管两端加正向电压（左“正”右负）时，则二极管呈现较低的阻抗；在二极管两端加反向电压时，二极管则呈现较高的阻抗。如图1-1所示，由

图可以看出：当外加正向电压很低时，正向电流很小几乎为零，当正向压超过一定的数值后，电流增长很快这一数值的正向电压值称为死区电压。其值大小与材料及环境温度有关。通常硅管死区电压约0.5伏，而锗管的死区电压约为0.2伏。

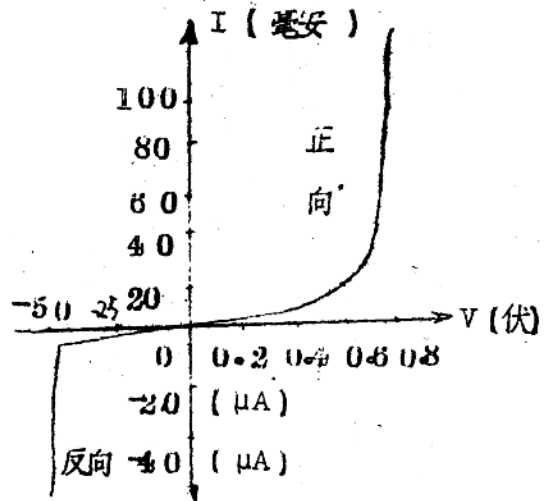


图1-1 二极管的伏安特性

当二极管加反向电压时，反向电流很小，反向电流有两个特点。其一是反向电流随温的上升增长速度很快，二是反向电压不超过某一范围时，反向电流基本不变。它与反向电压的高低无关。故通常称它为反向饱和电流。而当外加反向电压过高时，反向电流突然增大，二极管失去单向导电性，这种现象称为击穿。二极管一旦被击穿后，便不能恢复原来的性能，就是说二极管失效了。产生击穿的原因是二极管的外加反向电压达到反向击穿电压 V_{BR} 值。

三 主要参数：

二极管的特性除了用伏安特性曲线表示外，还可以用一些数据来表示，这些数据就是二极管的参数。

二极管的主要参数有以下几个：

1、最大整流电流 I_{OM} 指长时期使用时，二极管允许流过的正向平均电流。

点接触二极管最大整流电流约为五十毫安以下，面接触的 I_{OM} 值较大，如2CP10硅二极管的 I_{OM} 约为100毫安。当正向电流超过允许值 I_{OM} 时，将由于PN结的过热而使管子损坏。

2、最高反向工作电压 V_{RM} 它是保证二极管不被反击穿而给出的最高反向电压值。一般是反向击穿电压值的一半或 $\frac{2}{3}$ ，如2CP10的最高反向工作电压为25伏，而其击穿电压为50伏。点接触二极管的最高反向工作电压一般是数十伏，而面接触二极管的最高反向工作电压可达数百伏。

3、最大反向电流 I_{RM} 它是指二极管上加最高反向工作电压

时的反向电流值。

反向电流大说明二极管单向导电性差，并且受温度影响大。

硅二极管的反向电流较小，一般在几个微安以下；锗二极管的反向电流大，为硅二极管数十到数百倍。

四、二极管的命名：以“2”打头代表是二极管；A—表锗管；C—硅管；排在第二位；第三位是表明该二极管性能的为P—普通型，K—开关，Z—整流型；W—稳压型等等。例如：2AP5锗普通二极管，末位表示产品序列。2CP10硅普通二极管。2CK12硅开关二极管。

二极管的应用范围是十分宽广，主要是利用二极管的单向异性，它可以用于整流、检波、元件保护以及脉冲数字电路中作为开关元件。

例一：已知如图1-2，求输出端F的电位 V_F

解：因为A端的电位比B端电位高。所以二极管 D_A 优先导通。如果二极管的正向电压降是0.3伏，则 $V_F = 3 - 0.3 = 2.7$ V

当 D_A 导通后， D_B 加的反向电压，因此 D_B 截止。 D_A 起箝制电位的作用，它把F端的电位箝制在2.7伏， D_B 起隔离作用，把B端与输出端F隔开。

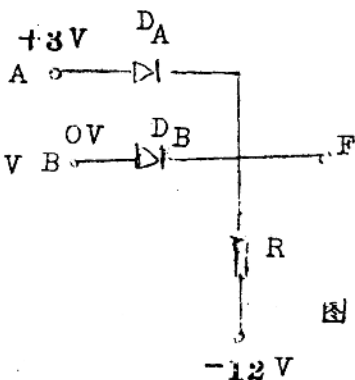


图 1-2

§ 1-3 稳压管

稳压管是一种特殊的二极管型半导体二极管。由于它在电路中适当数值的电阻配合后能起稳定电压的作用，故称为稳压管。

表示符号为：



稳压管的伏安特性与普通的二极管极其相似。其差别是稳压管反向特性曲线比较陡。如图 1-3 所示。

稳压管工作在反向击穿区。从正向特性曲线上看出，反向电压在允许范围内变化时，它的反向电流很小，当反向电压增高到击穿电压 V_z 时，反向电流突然急剧增加，稳压管反向击穿，此后电压的反向电流虽然在很大的范围内变化，但稳压管两端的电压变化却很小。利用这一特性，

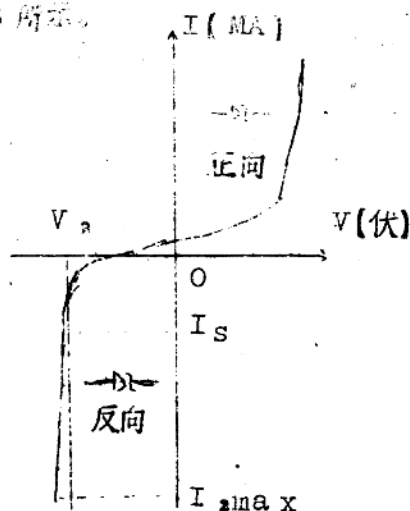


图 1-3 稳压管的伏安特性

稳压管与一般二极管不一样，它

的击穿是可逆的，当去掉反电压之后，稳压管又恢复正常。

但如果反向电流超过允许范围，稳压管将会发生热击穿而损坏。

稳压管的主要参数：

稳定电压 V_z ：稳压管在正常工作时的两端电压值。如 2C18 稳压管的稳压值为 10 至 12 伏。

电压温度系数 α_V ：这是说明稳压管受温度影响的系数。如 2C18 电压温度系数为：0.095%/°C。就是说温度每

每增加1°C，稳压管的稳压值升高0.093%。

假如在20°C时的稳压值是1.1伏，那么在50°C时的稳压值将是： $1.1 + \frac{0.935}{100} \times (50 - 20) \times 1.1 \approx 1.3$ 伏。

一般来说，低于6V的稳压管它的电压温度系数是“负”的，而高于6V的稳压管它的电压温度系数是“正”的，而在6V左右的稳压管的稳压值受温度的影响就比较小。

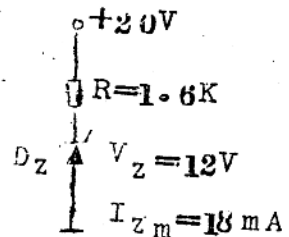
3、动态电阻 r_z 是指稳压管端电压变化量 ΔV_z 与相应的电流变化量 ΔI_z 的比值，即： $r_z = \frac{\Delta V_z}{\Delta I_z}$ 。稳压管的反向特性曲线越陡，则动态电阻 r_z 就越小。稳压管的性能就越越好。

4、稳定电流 I_z 稳压管的稳定电流只是一个作参考的数值，设计选用时要根据具体情况来考虑。（例如工作电流的范围）。

例二，在图1-4中流过稳压管的电流 $I_z = ?$ 限流电阻R的数值是否合适？

$$\text{解： } I_z = \frac{20 - 12}{1.6} = 5 \text{ 毫安。}$$

$I_z < I_{z \max}$ 所选限流电阻合适。



§ 1-4 半导体二极管

图1-4

半导体三极管又称晶体管，是一种重要的半导体器件。

一、晶体管的基本结构：目前最常见的结构有两种：一是平面型。硅管主要是平面型（NPN），另一种是合金型。（PNP）

晶体管的表示符号为：

B—基极；C—集电极；E—发射极。

NPN型和PNP型晶体管的工作原理类似，仅仅是使用时电源的极性连接不同而已。下面就以NPN型晶体管为例来分析讨论：

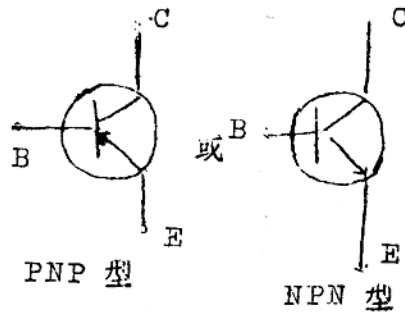


图 1-5

二、三极管的电流分配和放大原理

为了了解晶体管的放大原理和其中的电流分配，我们先作一个实验，实验电路如图(1-6)所示，图中是把晶体管接成两个电路，即基极电路和集电极电路，发射极是公共端。因此这种接法称为共发射极接法，如果采用N-P-N型硅管(3DG6)，电源 E_B 和 E_C 的极性必须按图中那样接法，晶体管才能起到放大的作用。

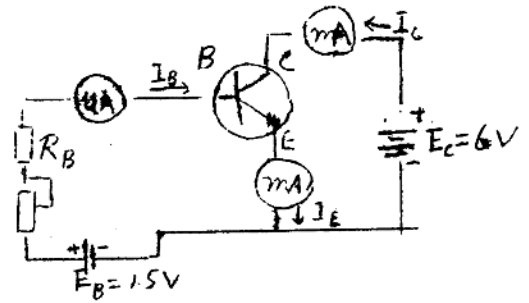


图 1-6 三极管的放大原理图

改变可变电阻 R_B ，则基极电流 I_B 、集电极电流 I_C 以及发射电流 I_E 都发生变化。电流的方向如图1-6中所示。把测量的结果列于下面表中：

I_B (mA)	-0.001	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
I_C (mA)	0.001	0.01	0.70	1.50	2.30	3.10	3.95
I_E (mA)	0	0.01	0.72	1.54	2.36	3.18	4.05

由此实验结果可以得出如下的结论：

(1) 观察数据中的每一列可得： $I_E = I_C + I_B$ 其结果符合基尔霍夫电流定律。

(2) I_C 和 I_E 比 I_B 大得多。从第四列和第五列的数据可知， I_C 与 I_B 的比值分别为：

$$\text{第四列: } \frac{I_C}{I_B} = \frac{1.50}{0.04} = 37.5 \quad \text{第五列: } \frac{I_C}{I_B} = \frac{2.30}{0.06} = 38.3$$

这个比值就是晶体管的电流放大作用，电流放大作用还体现在微小的基极电流变化 ΔI_B ，可以引起集电极电流较大的变化 ΔI_C 。

仍以第四列和第五列的数据为例，可得出：

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{2.30 - 1.50}{0.06 - 0.04} = \frac{0.80}{0.02} = 40$$

这就是说集电极电流的变化比基极电流的变化大 40 倍。

(3) 当 $I_B = 0$ (将基极与发射极短接) 时， $I_C = I_{CEO}$ 称为穿透电流，表中 $I_{CEO} = 0.01 \text{ mA} = 10 \mu\text{A}$

(4) 当 $I_E = 0$ (将发射极断开时)， $I_C = I_{CBO}$ 称为反向饱和电流，表中 $I_{CBO} = 0.001 \text{ mA} = 1 \mu\text{A}$

(5) 要想使 NPN 型晶体管具有放大作用，电源极性必须按图 1-6 中所画的极性接入。

三、三极管的特性曲线

三极管的特性曲线是内部载流子运动的外部表现。它能反映出晶体管的性能，是分析放大电路的重要依据。

最常用的是共发射极接法时的输入特性和输出特性曲线。这些曲线可以用晶体管特性图示仪直观地在荧光屏上显示出来。也可以通过如图 1-7 所示的实验电路进行实地测绘。在实验电路中用的是 N-P-N 型硅管。其型号为：3DG6

1、输入特性曲线是指当集电极电压 V_{CE} 为常数时，输入电路中（基极电路）的基极电流 I_B 与基-射极电压 V_{BE} 之间的关系曲线。即 $I_B = f(V_{BE})$ ，其曲线形状如图 1-8 所示。

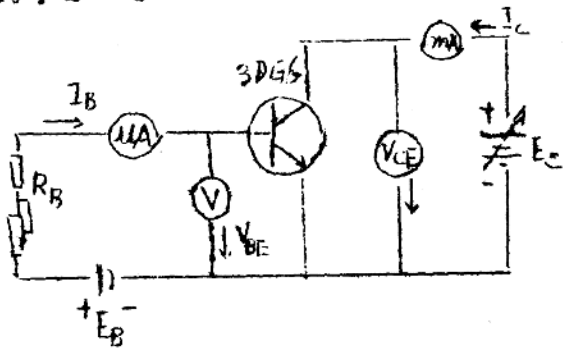
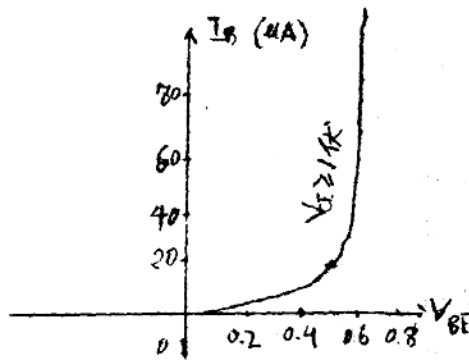


图 1-7 晶体管特性实验电路

对硅管而言 $V_{CE} \geq 1$ 伏时，此电压已足够大了。如果此时再增大 V_{CE} ，只要 V_{BE} 保持不变 I_B 也基本上保持不变，这就是说 $V_{CE} > 1$ 伏以后的输入特性曲线基本上与图 1-8 所示的输入特性曲线重合。所以通常



只画出 $V_{CE} \geq 1$ 伏的一条输入特性曲线，如图 1-8。由图可知晶体管的输入特性曲线和二极管的伏安特性是一样的。晶体管的输入特性也有一段死区。只要基-

射极电压 V_{BE} 不大于死区电压时，晶体管就不会出现 I_B 。一般讲硅管的死区电压约为 0.5 伏；锗管的死区电压不超过 0.2 伏。在正常情况下 N-P-N 硅管的 $V_{BE} = 0.6 \sim 0.7$ 伏，而 P-N-P 型锗管的 $V_{BE} = 0.2 \sim 0.3$ 伏。

2、输出特性曲线

输出特性曲线是指基极电流 I_B 为常数时，输出电路（集电极电路）中集电极电流 I_C 与集-射极电压 V_{CE} 之间的关系曲线，即 $I_C = f(V_{CE})$ ，在不同的 I_B 下，可得出不同的曲线，所以晶体管的输出特性曲线是一组曲线，如图 1-9 所示。

当 I_B 一定时， I_C 随 V_{CE} 的增大而增加， V_{CE} 上升到一定数值以后， I_C 就不再明显的增加，呈现出饱和的状态，这时晶体管具有恒流源的特性。

当 I_B 增大时，相应的 I_C 也增大，曲线上移而且 I_C 比 I_B 增加得多，这就是晶体管的电流放大作用。

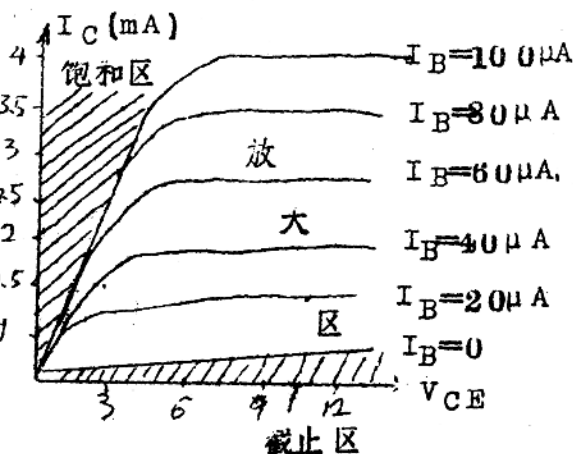


图 1-9 晶体管的输出特性

通常把晶体管的输出特性曲线分为三个工作区，即放大区，截止区和饱和区。

1、放大区：输出特性曲线接近水平的部分是放大区，在放大区内有 $I_C = \beta I_B$ 关系式存在，所以放大区也称为线性区，因为 I_C 和 I_B 成正比例关系。

2、截止区： $I_B = 0$ 的曲线以下的区域称为截止区， $I_B = 0$ 时， $I_C = I_{CE0}$ （在前述表中 $I_{CE0} = 0.01$ 毫安）。对 P-N 型硅管而言当 $V_{BE} < 0.5$ 伏时，晶体管已开始截止，但是，有时为了更可靠地截止，常常使 $V_{BE} \leq 0$ 伏。

3、饱和区：当 $V_{CE} < V_{BE}$ 时，晶体管处于饱和工作状态。在饱和工作区域内， I_B 变化时， I_C 变小很小，两者不成正比。放大区的 $\bar{\beta}$ 不能适用于饱和区。

四、晶体管的主要参数：

晶体管的特性除了用特性曲线表示外，还可以用一些数据来说明。这些数据就是晶体管的参数。晶体管的参数也是设计电路和选择晶体管的主要依据。主要参数有下面几个。

1、电流放大系数 $\bar{\beta}$ 、 β

当晶体管接成共射极电路时，在静态（无输入信号）时，集电极电流 I_C （输出电流）与基极电流 I_B （输入电流）的比值称为发射极静态电流（直流）放大系数，用 $\bar{\beta}$ 表示。

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$$

当晶体管接成共射极电路时，在动态（有输入信号）时，基极电流的变化量为 ΔI_B ，它引起集电极电流的变化量为 ΔI_C 与 ΔI_B 的比值，称为动态电流（交流）放大系数，用 β 表示，

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

习题三：从图 1-10 所给的 3DG6 晶体管输出特性曲线上；

(1) 计算 Q_1 点处的 β ;

(2) 由 Q_1 和 Q_2 两点计算 β

解: (1) 在 Q_1 点处, $V_{CE} = 6 \text{ V}$, $I_B = 40 \mu\text{A} = 0.04$ 毫安, $I_C = 1.5$ 毫安, 故:

$$\bar{\beta} = \frac{1.5}{0.04} = 37.5$$

(2) 由 Q_1 、 Q_2 两点 ($V_{CE} = 6 \text{ 伏}$) 得:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{2.3 - 1.5}{0.06 - 0.04} \\ &= \frac{0.8}{0.02} = 40 \end{aligned}$$

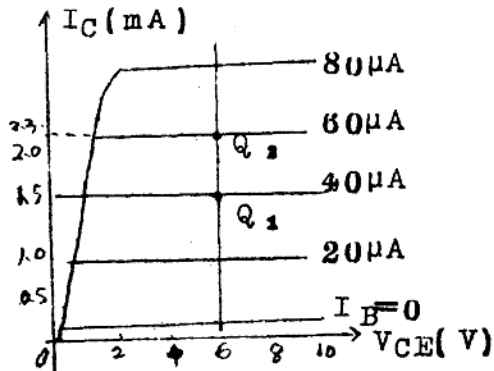


图 1-10 3DG6 输出特性曲线

由此可见: $\bar{\beta}$ 与 β 的含义是不同的, 但在输出特性近于平行等距的情况下, 两者较为接近。今后在估算时常常使用 $\bar{\beta} \approx \beta$ 这个近似关系。

由于晶体管的输出特性曲线是非线性的, 只有在特性曲线接近水平的部分 I_C 才随 I_B 成正比地变化。 β 值才可认为是基本恒定的。

由于晶体管在制作过程中, 工艺的分散性, 即便是同一型号的晶体管, β 值也有很大的差别, 常用的晶体管的 β 值在 20—100 之间。

2. 集电极反向饱和电流 I_{CBO}

测量方法如图 1-11 所示。 I_{CBO} 是在发射极开路、基极

输入讯号为零时的反向电
流。

3、集-射极穿透电
流 I_{CBO}

I_{CBO} 测量方法如图
1-11所示： I_{CBO} 是
在基极开路，流经集-射
的电流，该电流越小越好。

4、集电极最大允许电
流 I_{CM}

5、集-射极击穿电压
 BV_{CED}

6、集电极最大允许耗散功
率 P_{CM} 。

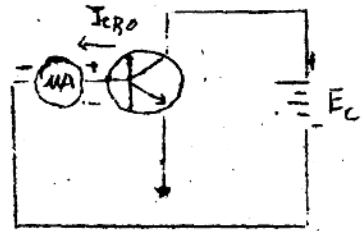


图 1-11 集-基反向饱和电流

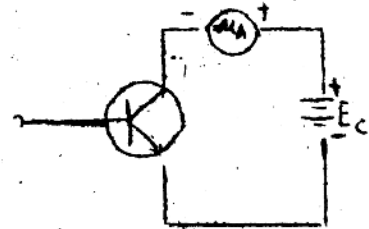


图 1-12 I_{CEO} 测量电路。

第二章 交流放大器

在生产和科学实验中，往往要求用微弱的信号去控制较大功率的负载。例如在自动控制机床上，需将反映加工要求的控制信号加以放大，得到一定输出功率的信号，借以推动执行元件。又例如在DDZ-Ⅱ型电动单元组合仪表中，首先将温度、压力、流量等非电量的物理量，通过传感器变为微弱的电信号，经过放大以后，从显示仪表上读出被测的非电量，温度、压力、流量的大小，或者用来推动执行元件，以实现温度、压力和流量的自动控制与调节。

放大器一般是由电压放大和功率放大两部分组成。先是由电压放大电路将微弱的信号加以放大，然后去推动功率放大电路，并由功率放大电路输出足够的功率去推动执行元件。

电压放大电路通常是工作在较小的信号情况下，而功率放大电路却往往是工作在大信号的情况下。

在工业电子技术中，最常用的是低频放大电路，其频率范围在20~10000赫兹，本章主要介绍低频放大电路结构、工作原理、分析方法和常用电路。

§2-1 基本交流放大电路的组成

图2-1是共发射极接法的基本交流放大电路。输入端接交流信号源，输入电压为 U_1 ，输出端开路，不接负载。输出电压为 U_0 ，电路中各元件分别起的作用如下：

晶体管T 晶体管是放大电路中的放大元件，利用它的电流放大作用，可在集电极电路获得放大的电流，这电流受输入信号的

控制。

如果从能量观点来看，输入信号的能童是比较小的，而输出的能童却比较大。但这不是说放大电路把输入能童放大了。能童是守恒的，不能放大。其输出的较大能童是来自直流电源 E_c 。也就是输入信号通过晶体管的控制作用，去控制电源 E_c 所供给的能童，以便在输出端获得一个能童较大的信号。从这个意义上讲，晶体管也可以说是一个控制元件。

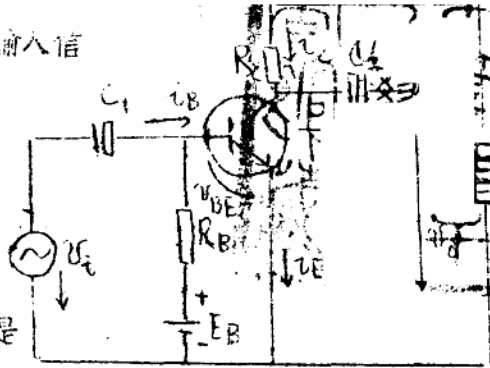


图 2-1 基本交流放大电路

集电极电源 E_c 它使晶体管处于起放大作用，另外它又是放大电路的能量源， E_c 的值一般为几伏到十几伏。

集电极负载电阻简称集电极电阻，它的主要作用是将集电极的电流变化转换为电压的变化，以实现其电压放大的作用， R_c 的阻值一般为几千欧到几十千欧。

基极电源 E_B 和基极电阻 R_B 它们的作用是使晶体管处于正常的放大作用，另外还提供大小适当的基极电流 I_B ，以便使放大电路获得合适的工作点， R_B 的值为几十千欧到几百千欧。

耦合电容 C_1 和 C_2 它们一方面起到隔离作用： C_1 用来隔离放大电路与信号源之间的直流通路， C_2 用来隔离放大电路与负载之间的直流通路，使两者之间无直流的联系，~~互不影响，互不干扰~~，~~又起到交流耦合作用，保证交流信号顺利地通过放大电路。~~ 起到交流耦合作用，保证交流信号顺利地通过放大电路。

信号源、放大电路和负载三者之间的交流通路。

这里要求在耦合电容上的交流电压降小到可以忽略不计，即对交流信号可视为短路。因此电容的数值就要取得较大些。这样才能对某一频率的容抗 $\frac{1}{\omega C} = X_C$ 近似为零。 C_1 、 C_2 的电容值一般为几微法到几十微法。用的是电解电容，使用时要注意它的极性。

在图 2-1 的电路中，采用了两个直流电源 E_C 和 E_B 。实际电路中，常常可以把 E_B 省略去，再把 R_B 改一下。只用 E_C 一个电源供电，如图 2-2 所示。

在放大电路中通常把公共端接“地”，设其电位为零，作为电路中其它各点电位的参考点。同时为了简化电路的画法，习惯上常不画出 E_C 电源符号，而只在联接其正极的一端标出它对“地”的电压值 V_{CC} 和极性“+”或“-”。如图 2-3 所示。如果忽略电源 E_C 的内阻，则 $V_{CC} = E_C$ 。

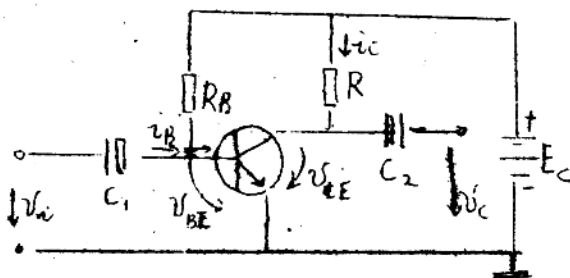


图 2-2 只用 E_C 一个电源的基本交流放大电路

§ 2-2 放大电路的图解法

放大电路的图解法是利用晶体管的特性曲线，用作

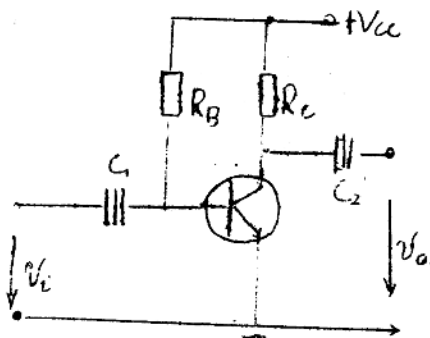


图 2-3 基本交流放大电路

图的方法来分析放大电路的各个电压和电流之间的相互关系和变化