

理工大学教案

第 二 (2) 次课	教学课型: 理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实验课 <input checked="" type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 实践课 <input type="checkbox"/> 技能课 <input type="checkbox"/> 其它 <input type="checkbox"/>
主要教学内容(注明: * 重点 # 难点): 2.1 双极型三极管 2.1.1 三极管的基本结构 2.1.2 三极管的电流分配和放大原理 2.1.3 三极管的伏安特性曲线 2.1.4 三极管类型和工作状态的判断 2.1.5 三极管的主要参数 2.1.6 温度对三极管参数的影响 2.1.7 三极管的类型、型号和选用原则 2.1.8 特殊三极管 重点: 1. 三极管的结构类型、原理、伏安特性和主要参数。 难点: 三极管的伏安特性	
教学目的要求: 1. 了解三极管的放大原理 2. 理解三极管的结构类型、原理、伏安特性和主要参数,	
教学方法和教学手段: 板书和多媒体教学相结合, 以教师讲授为主, 结合学生的课堂练习和讨论。	
讨论、思考题、 1. 对于双极型三极管, 是否可以将其发射极和集电极对换使用?为什么? 2. 请分别说明三极管工作在放大、截止和饱和状态时两个结的偏置情况? 对于 NPN 管和 PNP 应怎样加电源电压使其满足放大条件? 作业 2.2;2.3	
参考资料: 童诗白主编 《模拟电子技术基础》 北京高等教育出版社 康华光主编 《电子技术基础》模拟部分 北京高等教育出版社	

第二章 双极型三极管及其放大电路

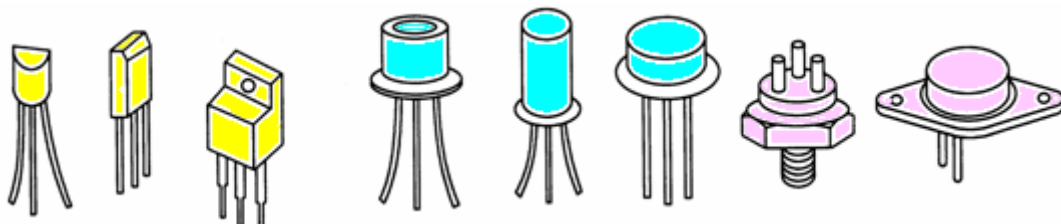
双极型三极管又常称为双极型晶体管(Bipolar Junction Transistor, 缩写BJT)、简称晶体管或三极管,常常是组成各种电子电路的核心器件。本章首先介绍三极管的结构、工作原理、特性曲线、主要参数,工作状态的判断及特殊三极管等。然后在阐明放大概念的基础上,以单管共发射极放大电路为例介绍放大电路的工作原理,通过两种基本分析方法,即图解法和微变等效电路法对电路进行静态和动态分析;然后介绍静态工作点稳定电路及共集电极和共基极放大电路;最后介绍多级放大电路四种常用的耦合方式及静态和动态的分析计算。

2.1 双极型三极管

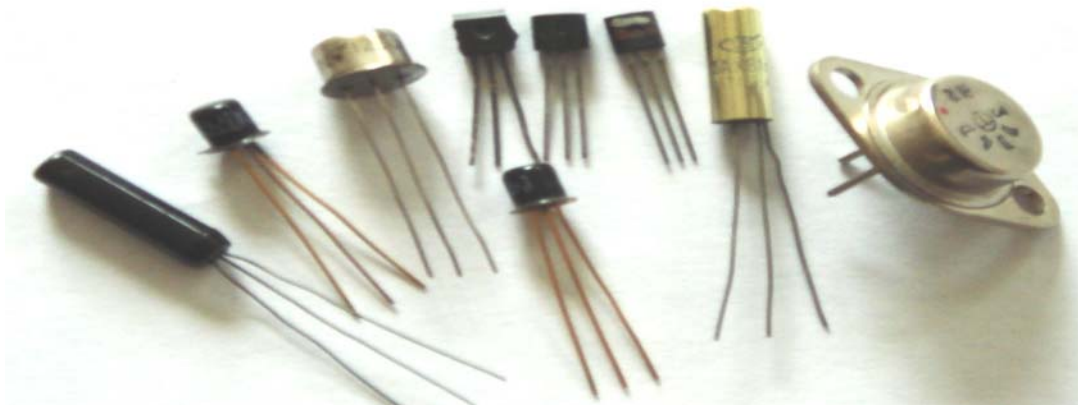
2.1.1 三极管的基本结构

从三极管的外形来看,三极管都有三个电极,根据结构的不同,三极管一般可分成两种类型:**NPN型**和**PNP型**。

半导体采用光刻、扩散等工艺在同一块半导体硅(锗)片上掺杂形成三个区、两个PN结,并引出三个电极,就构成了三极管。常见三极管的外型和封装图如图2.1.1所示。NPN型三极管的结构示意图如图2.1.2(a)所示,硅平面管的管芯结构如图2.1.2(b)所示,位于中间的P区称为基区,它很簿并且掺杂浓度很低,位于上层的N区是发射区,掺杂浓度高,位于下层的N区是集电区,集电区掺杂浓度比发射区低,且集电区面积比发射区大。因此三极管有三个区:基区、集电区和发射区;两个PN结:集电区和基区之间的PN结称为集电结,基区和发射区之间的PN结称为发射结;三个电极:基极b、集电极c和发射极e。NPN三极管符号如图2.1.2(c)所示,图中的箭头方向是表示发射结正偏时的电流方向。

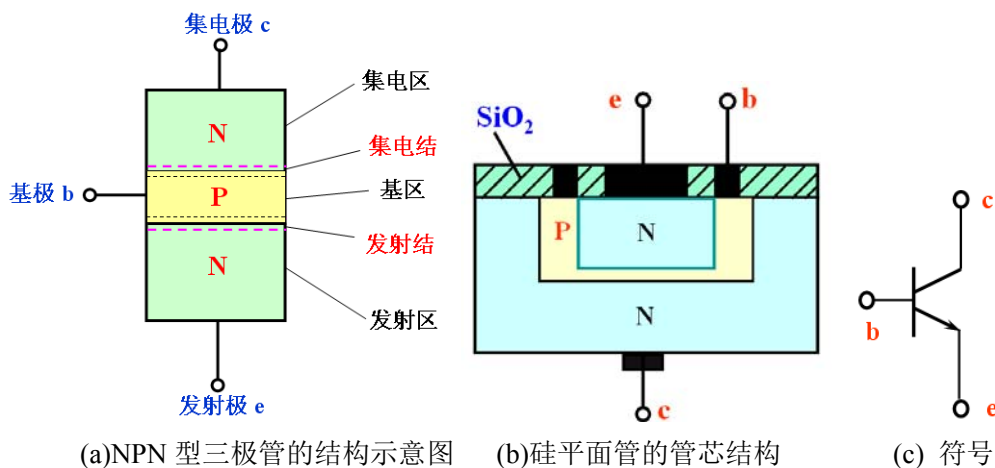


(a) 常见三极管封装图



(d) 常见三极管的外型

图 2.1.1 几种常见三极管的外型和封装



(a) NPN 型三极管的结构示意图

(b) 硅平面管的管芯结构

(c) 符号

图 2.1.2 NPN 型三极管的结构、管芯和符号

PNP 型三极管结构示意图如图 2.1.3(a)所示，图 2.1.3(b)是 PNP 型三极管的符号，注意发射极的箭头是指向里的。目前我国生产的硅管多为 NPN 型，锗管多为 PNP 型。

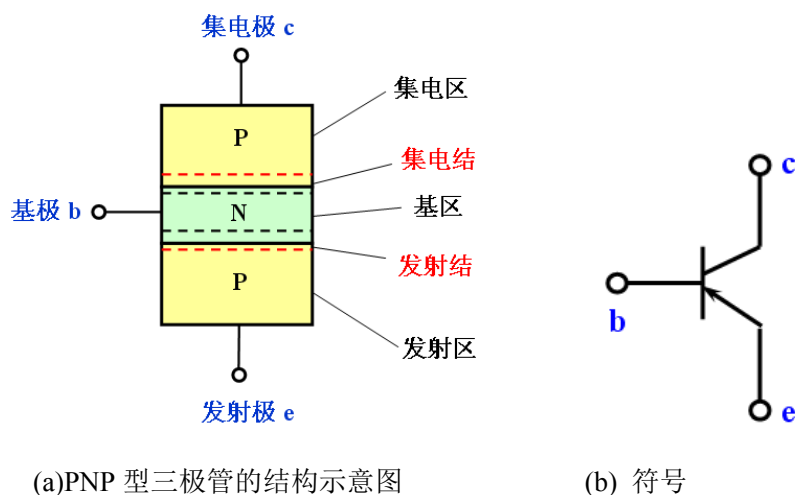


图 2.1.3 PNP 型三极管的结构、管芯和符号

NPN 型和 PNP 型三极管的工作原理类似, 仅在使用时电源极性连接不同而已。下面以 NPN 型三极管为例来分析三极管的放大原理。

2.1.2 三极管的电流分配和放大原理

1. 实验及测量

三极管电流放大的实验电路如图 2.1.4 所示, 把三极管接成两个回路: 基极回路和集电极回路。发射极是公共端, 因此这种接法称为三极管的**共发射极接法**。如果用的是 NPN 型三极管, 电源 V_{BB} 和 V_{CC} 的极性如图 2.1.4 所示, 外加电源的极性使**发射结处于正向偏置, 而集电结处于反向偏置**。

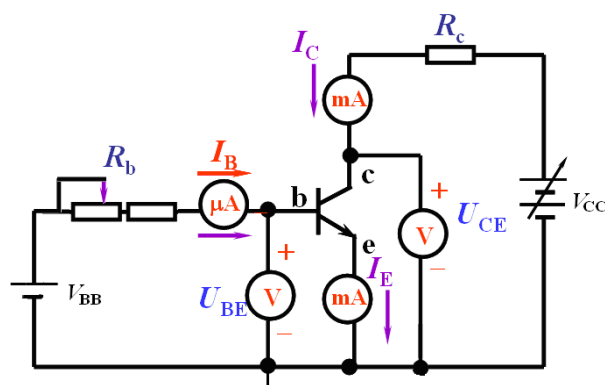


图 2.1.4 三极管电流放大的实验电路

改变可变电阻 R_b , 则基极电流 I_B 、集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 都发生变化。测量结果如表 2.1.1 所示。

表 2.1.1 三极管电流测量数据

$I_B(\text{mA})$)	0	0.02	0.04	0.06	0.08
$I_C(\text{mA})$)	<0.001	0.70	1.50	2.30	3.10
$I_E(\text{mA})$)	<0.001	0.72	1.54	2.36	3.18

由此实验及测量结果可得出如下结论:

(1)观察实验数据中的每一列, 可得

$$I_E = I_C + I_B$$

此结果符合基尔霍夫电流定律。

(2) I_C 和 I_E 都比 I_B 大得多。从第三列和第四列的数据可知, I_C 与 I_B 的比值分别为

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{1.50\text{mA}}{0.04\text{mA}} = 37.5 \quad \text{及} \quad \frac{I_C}{I_B} = \frac{2.3\text{mA}}{0.06\text{mA}} = 38.3$$

这就是三极管的电流放大作用。电流放大作用还体现在基极电流的少量变化 ΔI_B 可以引起集电极电流较大的变化 ΔI_C 。还是比较第三列和第四列的数据, 可得出

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{(2.3 - 1.5)\text{mA}}{(0.06 - 0.04)\text{mA}} = 40$$

(3)当 $I_B=0$ (将基极开路)时, $I_C=I_{\text{CEO}}$, 表中 $I_{\text{CEO}} < 0.001\text{mA} = 1\mu\text{A}$, 下面用载流子在三极管内部的运动规律来解释上述结论。

2. 载流子的运动

(1)发射区向基区扩散电子

由于发射结正向偏置, 发射区的多数载流子-自由电子不断通过发射结扩散到基区, 形成电子电流 I_{En} , 其方向与电子流动方向相反, 如图 2.1.5 所示。与此同时, 基区的多数载流子空穴也扩散到发射区, 形成空穴电流 I_{Ep} , 但由于发射区杂质浓度比基区高得多(一般高几百倍), 与电子电流相比, 这部分空穴电流可忽略不计, 因此发射极电流 $I_E \approx I_{\text{En}}$ 。

(2) 电子在基区的扩散和复合

从发射区扩散到基区的大量自由电子起初都聚集在发射结附近，靠近集电结的自由电子很少，形成了浓度上的差别，因而自由电子将向集电结方向继续扩散。在扩散过程中，自由电子不断与空穴(P型基区中的多数载流子)相遇而复合。由于基区接电源 V_{BB} 的正极，基区中受激发的价电子不断被电源拉走，这相当于不断补充基区中被复合掉的空穴，形成空穴电流 I_{Bn} ，它基本上等于基极电流 I_B 。

在中途被复合掉的电子越多，扩散到集电结的电子就越少，这不利于三极管的放大作用。为此，基区一般做得很薄，掺杂浓度也很少，以大大减少电子与基区空穴复合的机会，使绝大部分自由电子都能扩散到集电结边缘。

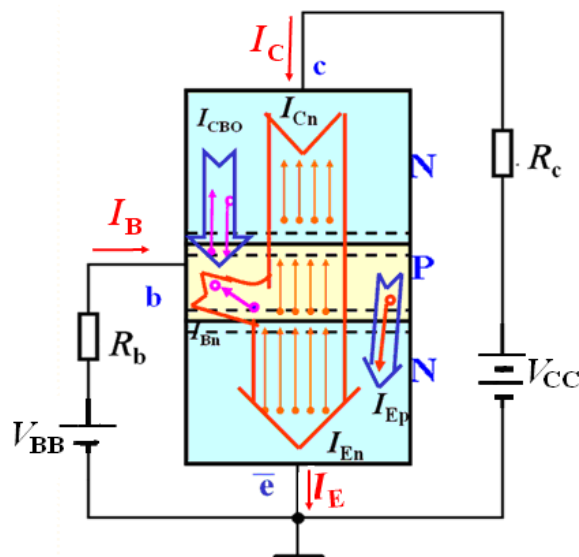


图 2.1.5 载流子运动和电流关系

(3) 集电区收集从发射区扩散过来的电子

由于集电结反向偏置，集电结内电场增强，它对多数载流子的扩散运动起阻挡作用，阻挡集电区的自由电子向基区扩散，但可将从发射区扩散到基区并达到集电区边缘的自由电子拉入集电区，从而形成电流 I_{Cn} 。 I_{Cn} 基本上等于集电极电流 I_C 。

此外，由于集电结反偏，在内电场的作用下，**集电区的少数载流子(空穴)和基区的少数载流子(电子)将发生漂移运动而形成电流，这个电流称为反向饱和电流**，用 I_{CBO} 表示。这个电流数值很小，它构成集电极电流 I_C 和基极电流 I_B 的一小部分，近似分析中可忽略不计。但受温度影响很大，与外加电压的大小关系不大。

3. 三极管的电流分配关系

由图 2.1.5 可见，集电极的电流为 I_C

$$I_C = I_{Cn} + I_{CBO}$$

(2.1.1)

基极的电流为 I_B

$$I_B = I_{Bn} - I_{CBO} + I_{EP}$$

由于 I_{EP} 很小，可以忽略不计，所以

$$I_B \approx I_{Bn} - I_{CBO}$$

(2.1.2)

发射极的电流为 I_E

$$I_E = I_{En} + I_{EP} \approx I_{En} \approx I_{Cn} + I_{Bn} \quad (2.1.3)$$

因此

$$I_E = I_C + I_B$$

(2.1.4)

如上所述，从发射区扩散到基区的电子只有很小一部分在基区复合，绝大部分到达集电区。即构成发射极电流 I_E 的两部分中， I_{Bn} 部分是很小的，而 I_{Cn} 部分所占的百分比是大的。这个比值用 $\bar{\beta}$ 表示， $\bar{\beta}$ 表征三极管的共射电流放大能力，称为电流放大系数

$$\bar{\beta} = \frac{I_{Cn}}{I_{Bn}} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} \quad (2.1.5)$$

整理可得

$$I_C = \bar{\beta} I_B + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} \quad (2.1.6)$$

上式的最后一项可用 I_{CEO} 表示，称为**集—射极之间的穿透电流**。

$$I_{CEO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} \quad (2.1.7)$$

则 I_C 可表示为

$$I_C = \bar{\beta} I_B + I_{CEO} \quad (2.1.8)$$

I_{CBO} 和 I_{CEO} 是晶体管内部噪声的主要来源，要尽量减少 I_{CBO} 和 I_{CEO} 的值，一般情况下，穿透电流 $I_{CEO} \ll I_C$ ，可将 I_{CEO} 忽略，可得

$$I_C \approx \bar{\beta} I_B \quad (2.1.9)$$

$$\bar{\beta} \approx \frac{I_C}{I_B} \quad (2.1.10)$$

即 $\bar{\beta}$ 近似等于 I_C 与 I_B 的比值。从前面的电流放大实验还知道，在三极管中，不仅 I_C 比 I_B 大得多，而且当调节可变电阻 R_B 使 I_B 有一微小的变化时，将会引起 I_C 大得多的变化。

此外，从三极管内部载流子的运动规律，也就理解了要使三极管起电流放大作用，发射结必须正向偏置，集电结必须反向偏置。

2.1.3 三极管的伏安特性曲线

三极管的特性曲线是用来表示三极管各极电压和电流之间相互关系的，它反映了三极管的性能，是分析放大电路的重要依据。本节主要介绍共发射极接法时的输入特性曲线和输出特性曲线。

1. 输入特性

输入特性是指当集电极与发射极之间的电压 u_{CE} 为某一常数时，三极管基极电流 i_B 与基极与发射极之间的电压 u_{BE} 之间的关系，即

$$i_B = f(u_{BE}) \Big|_{u_{CE}=\text{常数}} \quad (2.1.11)$$

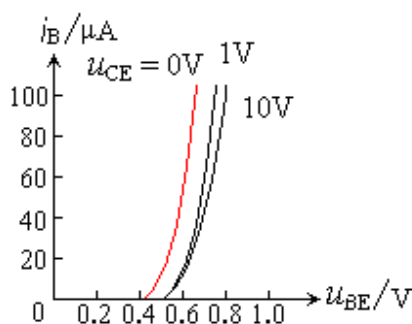


图 2.1.6 3DG6 的输入特性曲线

硅管 3DG6 的输入特性曲线如图 2.1.6 所示。比较 $u_{CE}=0V$ 和 $u_{CE}=1V$ 的两条输入特性曲线可见， $u_{CE}=1V$ 的特性曲线向右移动了一段距离，这是由于当 $u_{CE}=1V$ 时集电结加了反向电压，集电结收集电子的能力加强，使得从发射区进入基区

的电子更多地流向集电区，因此对应于相同的 u_{BE} ，流向基极的电流 i_B 比原来 $u_{CE}=0V$ 时减小了，因此特性曲线也就相应地向右移动了。 $u_{CE}>1V$ 以后的输入特性与 $u_{CE}=1V$ 的一条特性曲线非常接近，因为当 $u_{CE}>1V$ 以后，只要 u_{BE} 保持不变，则从发射区发射到基区的电子一定，而集电结所加的反向电压达到 $1V$ 以后已能把这些电子中的绝大部分拉到集电区来，以至 u_{CE} 再增加， i_C 也不再明显增大了，也就是说， i_B 已基本不变。故 $u_{CE}>1V$ 后的输入特性曲线基本重合，所以通常只要画出 $u_{CE}>1V$ 以后的任何一条曲线来近似 $u_{CE}>1V$ 的所有曲线。可见，输入特性曲线类似于 PN 结的伏安特性，发射结的死区电压硅管约为 $0.5V$ ，而锗管约为 $0.1V$ ，在正常工作情况下，硅管的发射结电压为 $0.6\sim 0.8V$ 左右，而锗管的发射结电压为 $0.1\sim 0.3V$ 左右。

2. 输出特性

输出特性是当基极电流 i_B 不变时，集电极电流 i_C 与集电极与发射极之间的电压 u_{CE} 之间的关系曲线，即

$$i_C = f(u_{CE}) \Big|_{i_B = \text{常数}} \quad (2.1.12)$$

硅管 3DG6 的输出特性曲线如图 2.1.7 所示。由图可见，对于每一个确定的 i_B ，都对应一条曲线，各条曲线的形状基本上是一样的。现取 $i_B=40\mu A$ 的一条曲线加以说明，我们看到输出特性曲线的起始部分很陡， u_{CE} 略有增加时， i_C 增加很快。这是由于在 u_{CE} 很小时 ($1V$ 以下)，集电结的反向电压很小，对到达基区的电子吸引力不够，这时 i_C 受 u_{CE} 的影响很大。 u_{CE} 稍有增加，从基区到集电区的电子也增加，故 i_C 随 u_{CE} 的增加而增加。当 u_{CE} 超过某一数值 (约 $1V$) 后，特性曲线变得平坦。这是由于 u_{CE} 大于 $1V$ 以后，集电结的电场已足够强，能使发射区扩散到基区的电子绝大部分到达集电区，故 u_{CE} 再增加，对 i_C 的影响已不大。但由于 u_{CE} 增加使集电结电场加强，因此 i_C 随着 u_{CE} 的增加略有增加，所以特性曲线稍微往上倾斜。

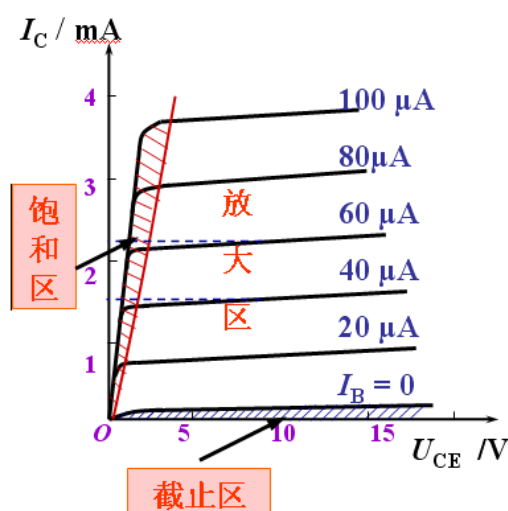


图 2.1.7 3DG6 的输出特性曲线

通常把三极管的输出特性曲线分为三个工作区，如图 2.1.7 所示。

1. 放大区

输出特性曲线近于水平部分是放大区，也称为线性区。表明当 i_B 一定时， i_C 基本不随 u_{CE} 而变，但当基极电流 i_B 有一个微小变化 Δi_B 时，相应的集电极电流 i_C 将有一个较大的变化量 Δi_C 。例如当 $u_{CE}=6V$ 时，如果 i_B 从 $40\mu A$ 变到 $60\mu A$ ，即 $\Delta i_B=20\mu A$ ，相应的 i_C 从 $1.5mA$ 变到 $2.3mA$ ，即 $\Delta i_C=0.8mA$ ，我们将集电极电流与基极电流变化量之比定义为三极管共射电流放大系数，即

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

(2.1.13)

在放大区，满足 $\Delta i_C = \beta \Delta i_B$ ， $I_C = \beta I_B$ ，表现出三极管具有电流放大作用， i_B 对 i_C 具有控制作用，可将 i_C 看成由电流 i_B 控制的电流源。三极管工作在放大状态，发射结处于正向偏置，集电结处于反向偏置，对于共射放大电路，如三极管为 NPN 型管，应使 $u_{BE}>0$ ， $u_{BC}<0$ ；如三极管为 PNP 型管，应使 $u_{BE}<0$ ， $u_{BC}>0$ 。

2. 截止区

$i_B=0$ 的曲线以下的区域称为截止区。当 $i_B=0$ 时， $i_C=I_{CEO}$ ，对于小功率硅管， I_{CEO} 在 $1\mu A$ 以下，对于小功率锗管， I_{CEO} 在几十微安以下，因此在近似计算时，可认

为 $i_C \approx 0$ 。对 NPN 型硅管而言，当 $u_{BE} < 0.5V$ 时，即已开始截止，但是为了可靠截止，常使 $u_{BE} \leq 0$ 。因此截止时发射极处于反偏，集电结也处于反偏。

3. 饱和区

曲线靠近纵坐标附近，各条输出特性曲线的上升部分属于饱和区。在饱和区， i_B 的变化对 i_C 的影响较小，两者不成正比，无电流放大作用，放大区的 β 不能用于饱和区。饱和时，三极管发射结和集电结均处于正向偏置。

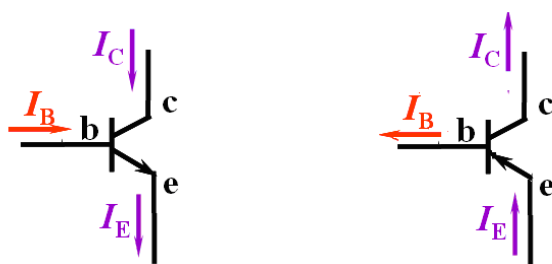
在饱和区，集射极之间电压降 u_{CE} 较小，一般认为，当 $u_{CE} < u_{BE}$ 时，三极管处于饱和状态，三极管饱和时的集射极之间电压用 u_{CES} 表示，此值较小，对于小功率硅管， $u_{CES} < 0.4V$ 。

2.1.4 三极管类型和工作状态的判断

在实际工作中，经常要对三极管类型和工作状态进行判断，下面总结了常用的三种判断方法。

1. 根据三极管的电流，判断三极管的类型

三极管就其结构分为 NPN 型和 PNP 型两种类型，两种不同类型的三极管的电流方向如图 2.1.8 所示，图 2.1.8(a) 为 NPN 三极管的电流方向，图 2.1.8(b) 为 PNP 三极管的电流方向。



(a) NPN 三极管的电流方向

(b) PNP 三极管的电流方向

图 2.1.8 三极管的电流方向

各极电流关系为

集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 远远大于基极电流 I_B ， $I_E > I_C > I_B$

同时满足

$$I_E = I_B + I_C$$

从以上的分析即可确定三极管的类型，下面举例说明。

例 2.1.1 在某放大电路中，三极管三个极的电流方向如图 2.1.9(a)所示，已知 $I_1 = -1.4\text{mA}$ ， $I_2 = -0.03\text{mA}$ ， $I_3 = 1.43\text{mA}$ ，试确定三极管是 NPN 型还是 PNP 型，并区分出各电极。

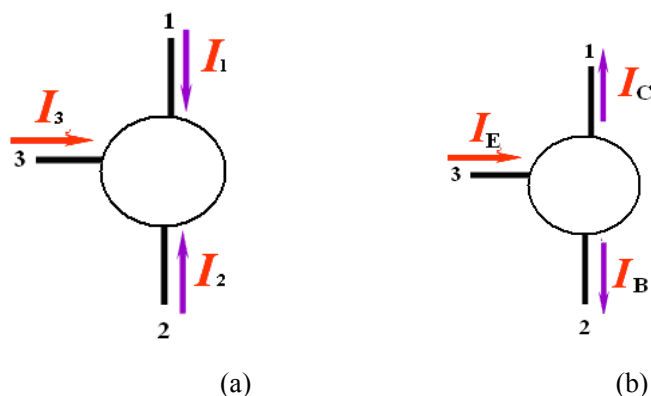


图 2.1.9 例 2.1.1 图

解：根据电流的参考方向及给定的电流， I_1 、 I_2 的实际方向朝外， I_3 向里，且 $I_3 = |I_1| + |I_2|$ ，根据 $I_E > I_C > I_B$ ，得 1 脚是集电极 C，2 脚是基极 B，3 脚是发射极 E，画出实际的电流方向如图 2.1.9(b)所示，确定出该管是 PNP 型三极管。

例 2.1.2 在某放大电路中，三极管各个极的电流方向如图 2.1.10 所示，试确定三极管是 NPN 型还是 PNP 型，并区分出各电极。

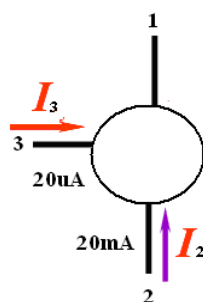


图 2.1.10 例 2.1.2 图

解：由图可知， $I_3 = 20\mu\text{A}$ ，远小于 I_2 ，从中可知，3 脚是基极 B，同时电流方向向里，可确定出该管是 NPN 型三极管，在 NPN 型三极管中，集电极电流 I_C 电流方向向里，发射极电流 I_E 电流方向向外。判断出 2 脚是集电极 C，1 脚是发射极 E。

2. 根据三极管各极电位，判断三极管的类型

三极管若是工作在放大状态，则两个 PN 结中发射结正向偏置，集电结反向偏置，三极管又有硅管和锗管之分。判断依据为：

对 NPN 管有： $U_C > U_B > U_E$

对 PNP 管有： $U_C < U_B < U_E$

对于硅管 $|U_{BE}| = 0.6 \sim 0.8V$ ，

对于锗管 $|U_{BE}| = 0.1 \sim 0.3V$

判断步骤为：先从三个电压值中找出电位差为 0.2V 或 0.7V 左右的电压，它们必为 B 极和 E 极，并可判断出是硅管还是锗管，再比较三个电压的大小，来确定是 NPN 管还是 PNP 管，下面举例说明。

例 2.1.3 若测得放大电路中的两个三极管各极电位分别如下，试判断它们是 NPN 管还是 PNP 管，是硅管还是锗管，并确定每管的 B，C，E 电极。

(1) $U_1 = 8V$ ， $U_2 = 2V$ ， $U_3 = 2.7V$ ；

(2) $U_1 = -2V$ ， $U_2 = -5V$ ， $U_3 = -2.3V$ ；

解：(1) 因为， $U_3 - U_2 = (2.7 - 2)V = 0.7V$ ，故为硅管。3 脚为 B 极，2 脚为 E 极，1 脚为 C 极。

又因为 $U_{1(C)} > U_{3(B)} > U_{2(E)}$ ，故为 NPN 管

(2) 因为 $U_3 - U_1 = -2.3V - (-2)V = -0.3V$ ，故为锗管。3 脚为 B 极，1 脚为 E 极，2 脚为 C 极。

又因为 $U_{2(C)} < U_{3(B)} < U_{1(E)}$ ，故为 PNP 管

3. 根据三极管各极的电位，判断三极管的工作状态

在电子电路中，可以通过测试三极管各极直流电位来判断三极管的工作状态，三极管工作在放大状态，发射结正向偏置，集电结反向偏置；三极管工作在截止状态时，发射极反向偏置，集电结也反向偏置；三极管工作在饱和状态时，发射结正向偏置，集电结正向偏置。

因此，对 NPN 三极管：

当 $U_{BE} < \text{死区电压}$ ，三极管截止。

当 $U_{BE} > \text{死区电压}$ ， $U_{CE} \geq U_{BE}$ ，三极管处于放大状态。

当 $U_{BE} > \text{死区电压}$ ， $U_{CE} < U_{BE}$ ，三极管处于饱和状态。

对 PNP 三极管：

当 $U_{BE} > \text{死区电压}$ ，三极管截止。

当 $U_{BE} < \text{死区电压}$ ， $U_{CE} \leq U_{BE}$ ，三极管处于放大状态。

当 $U_{BE} < \text{死区电压}$ ， $U_{CE} > U_{BE}$ ，三极管处于饱和状态。

例 2.1.3 若测得放大电路中的三极管各极电位如图 2.1.11 所示，试分别判断三极管的工作状态。

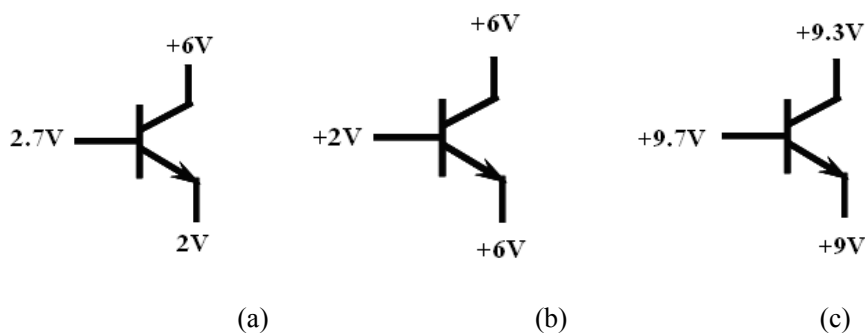


图 2.1.11 例 2.1.3 图

解：图(a) $U_{BE} = 0.7V$ ，大于死区电压，且 $U_{CE} = 4V > U_{BE}$ ，三极管处于放大状态；

图(b) $U_{BE} = -4V$ ，小于死区电压，三极管截止；

图(c) 当 $U_{BE} = 0.7V$ ，大于死区电压，且 $U_{CE} = 0.3V < U_{BE}$ ，三极管处于饱和状态。

2.1.5 三极管的主要参数

三极管的参数是设计电路时选用三极管的依据，三极管的参数主要有：

1. 电流放大系数

(1) 共射直流电流放大系数 $\bar{\beta}$

当三极管接成共发射极电路时，三极管集电极的直流电流 I_C 与基极直流电流 I_B 的比值(忽略穿透电流 I_{CEO})，称为共发射极直流电流放大系数

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

(2) 共射交流电流放大系数 β

当三极管接成共发射极电路时，集电极电流和基极电流的变化量之比称为共

射交流电流放大系数 β

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

显然 $\bar{\beta}$ 和 β 的含义是不同的, $\bar{\beta}$ 反映静态(直流工作状态)时集电极电流与基极电流之比, 而 β 反映动态(交流工作状态)时的电流放大特性。由于三极管特性曲线的非线性, 各点的 I_C 和 I_B 的比值是不同的, 只有在恒流特性比较好且曲线间距均匀的部分, $\bar{\beta}$ 才可以认为是基本不变的。交流电流放大系数 β 也是只有在特性曲线的线性部分才可以认为是基本恒定的。

在三极管的每条输出特性曲线间距基本相等并忽略 I_{CEO} 的情况下, $\bar{\beta}$ 和 β 是基本相等的。由于制造工艺的分散性, 即使同型号的管子, 它的 β 值也有差异。常用的三极管的 β 值通常在 10~200 之间。 β 值太小, 三极管的放大作用差, 但 β 太大也易使管子性能不稳定。

例 2.1.4 试从图 2.1.12 所给出的三极管的输出特性曲线上, (1)计算 Q_1 点处的 $\bar{\beta}$; (2)由 Q_1 和 Q_2 两点, 计算 β 。

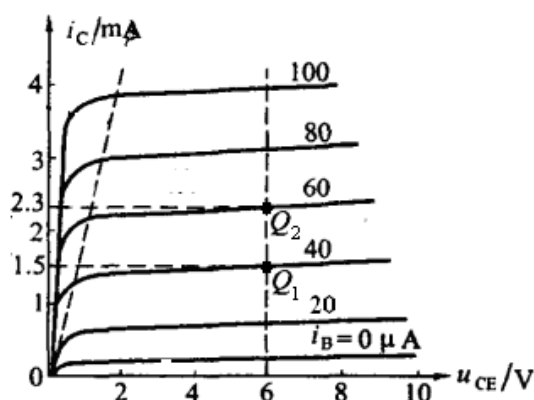


图 2.1.12 例 2.1.4 图

解: (1)在 Q_1 点处, $u_{CE}=6V$, $I_B=40\mu A=0.04mA$, $I_C=1.5mA$ 。

故

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1.5mA}{0.04mA} = 37.5$$

(2)由 Q_1 和 Q_2 两点($u_{CE}=6V$)得

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} = \frac{(2.3-1.5)mA}{(0.06-0.04)mA} = 40$$

上述可见, 在输出特性曲线近于平行等距并且 I_{CEO} 较小的情况下, $\bar{\beta}$ 和 β 的数值较为接近。今后在估算时, 常用 $\bar{\beta}=\beta$ 这个近似关系。

(3)共基极接法的直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$

共基极接法是指输入回路和输出回路的公共端为基极, 发射极作为输入, 集电极作为输出, $\bar{\alpha}$ 近似等于集电极直流电流 I_C 与发射极直流电流 I_E 之比。

$$\bar{\alpha} = \frac{I_C}{I_E} \quad (2.1.14)$$

(4)共基极接法的交流电流放大系数 α

α 定义为集电极电流的变化量 Δi_C 与发射极电流的变化量 Δi_E 的比值。

$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} \quad (2.1.15)$$

根据 α 和 β 的定义, 可以得出两者的关系

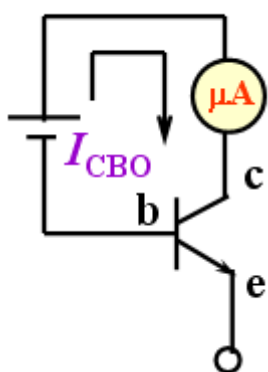
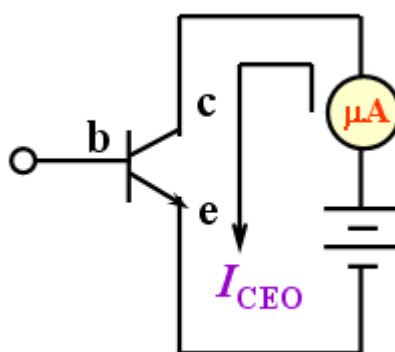
$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_C + \Delta i_B} = \frac{\Delta i_C / \Delta i_B}{(\Delta i_C + \Delta i_B) / \Delta i_B} = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (2.1.16)$$

同一个三极管的 $\bar{\alpha}$ 与 α 数字差别不大, 在估算时, 常用 $\bar{\alpha}=\alpha$ 这个近似关系。

2. 极间反向电流

(1)集电极和基极之间的反向饱和电流 I_{CBO}

I_{CBO} 表示当发射极开路时, 集电极和基极之间的反向电流值。测量电路如图 2.1.13 所示。在室温下, 小功率锗管的 I_{CBO} 约为几微安到几十微安, 小功率硅管在 1 微安以下。 I_{CBO} 越小越好, 因为 I_{CBO} 是少数载流子的运动形成的, 大约温度每升高 10°C , I_{CBO} 增大一倍, 所以 I_{CBO} 受温度的影响非常大。硅管的温度稳定性优于锗管。

图 2.1.13 测量 I_{CBO} 的电路图 2.1.14 测量 I_{CEO} 的电路

(2)集电极和发射极之间的穿透电流 I_{CEO}

I_{CEO} 表示当基极开路时，集电极和发射极之间的电流，测量电路如图 2.1.14 所示。

由式 2.1.7 可知， I_{CEO} 和 I_{CBO} 的关系为

$$I_{CEO}=(1+\beta)I_{CBO}$$

而集电极电流 I_C 则为

$$I_C=\beta I_B+I_{CEO}$$

由于 I_{CBO} 对温度非常敏感，当温度升高时， I_{CBO} 增高很快，所以 I_{CEO} 增加得也很快， I_C 也就相应增加。所以三极管的温度稳定性较差，这是它的一个主要缺点。 I_{CBO} 越大、 β 越高的管子，稳定性越差。因此，在选管时，要求 I_{CBO} 尽可能小些，而 β 以不超过 100 为宜。

3.特征频率 f_T

由于三极管中 PN 结电容的存在，三极管的交流电流放大系数是所加信号频率的函数，当信号频率高到一定程度时，集电极电流与基极电流之比数值将下降，因此，当共射放大系数数值下降到 1 时的信号频率称为特征频率。

4. 极限参数

(1)集电极最大允许电流 I_{CM}

当集电极电流 i_C 超过一定值时，三极管的 β 值会下降，当 β 值下降到正常数值的三分之二时的集电极电流，称为集电极最大允许电流 I_{CM} 。因此，在使用三极管时，集电极电流超过 I_{CM} 并不一定会使三极管损坏，但这是以降低 β 值为代价的。

(2)反向击穿电压

三极管的两个 PN 结，如果反向电压超过规定值，也会发生击穿。其击穿原理与 PN 结的击穿原理是类似的，但三极管的击穿电压不仅与管子本身特性有关，而且还取决于外部电路的接法，常用的有 $U_{(BR)CEO}$ 、 $U_{(BR)CBO}$ 、 $U_{(BR)EBO}$ 等。

$U_{(BR)CEO}$ 是基极开路时，加在集电极和发射极之间的最大允许电压。当三极管的集电极和发射极电压 U_{CE} 大于 $U_{(BR)CEO}$ 时，三极管就会被击穿而损坏。三极管在高温下， $U_{(BR)CEO}$ 的值将要降低，使用时应特别注意。

$U_{(BR)CBO}$ 是指发射极开路时，集电极和基极间的反向击穿电压。这是集电结所允许加的最高反向电压。

$U_{(BR)EBO}$ 是指集电极开路时发射极和基极间的反向击穿电压。在放大状态，发射结是正偏的，而在某些场合，例如工作在大信号或者开关状态时，发射结就有可能承受到较大的反向电压。

(3) 集电极最大允许耗散功率 P_{CM}

由于集电极电流在流经集电结时将产生热量，使结温升高，从而会引起三极管参数变化。当三极管因受热而引起三极管参数变化不超过允许值时，集电极所消耗的最大功率，称为集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 。超过此值会使管子性能变坏或烧毁。

P_{CM} 主要受结温的限制，一般来说，锗管允许的结温约为 $70\sim 90^{\circ}\text{C}$ ，硅管约为 150°C 左右，根据管子的 P_{CM} 值，有

$$P_{CM} = i_{CU_{CE}} \quad (2.1.17)$$

由上式可在三极管的输出特性曲线上做出 P_{CM} 曲线，它是一条双曲线。由 I_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 、 P_{CM} 三者共同确定三极管的安全工作区，在曲线的左下方是安全工作区，即 $i_{CU_{CE}} < P_{CM}$ 。在右上方是过损耗区(或非安全区)，即 $i_{CU_{CE}} > P_{CM}$ ，如图 2.1.15 所示。当大功率三极管按额定值使用时，应加规定的散热片，否则要降低额定值使用。

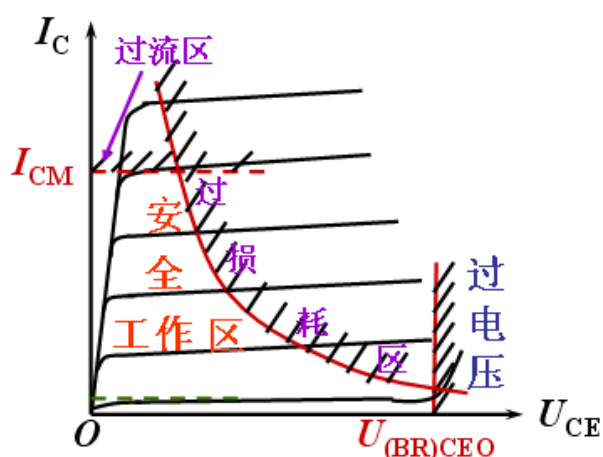


图 2.1.15 三极管的安全工作区

2.1.6 温度对三极管参数的影响

三极管是一种对温度十分敏感的元件。温度变化对管子参数的影响主要表现在：

(1) 温度对 U_{BE} 的影响

当温度升高时，输入特性曲线将向左移动，如图 2.1.16 所示，反之将向右移动。也就是说，在相同的 I_B 值下，当温度升高后，对应的发射结正向压降 U_{BE} 的数值会下降，其温度系数约为 $-(2\sim 2.5)\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。如 U_{BE} 的温度系数为 $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ ，即温度每升高 1°C ， U_{BE} 约下降 2mV 。

(2) 温度对 I_{CBO} 的影响

I_{CBO} 是集电结加反向电压时，集电区中的少数载流子漂移形成的。当温度上升时，少数载流子数增加，故 I_{CBO} 上升，其变化规律是，温度每升高 10°C ， I_{CBO} 大致将增加一倍，说明 I_{CBO} 将随温度按指数规律上升，反之，当温度降低时， I_{CBO} 减小。

硅管的 I_{CBO} 比锗管的小，因此硅管比锗管受温度的影响要小。

由式 2.1.7 和式 2.1.8 可知

$$I_{CEO} = (1 + \beta)I_{CBO}, \quad I_C = \beta I_B + I_{CEO}, \quad \text{有}$$

$$\text{温度 } T \uparrow \rightarrow I_{CBO} \uparrow \rightarrow I_{CEO} \uparrow \rightarrow I_C \uparrow$$

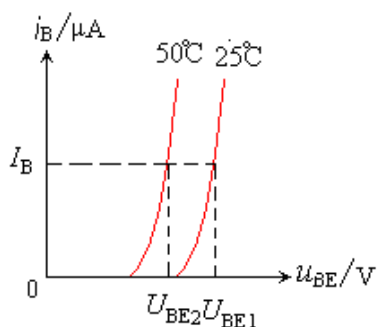


图 2.1.16 温度对输入特性曲线的影响

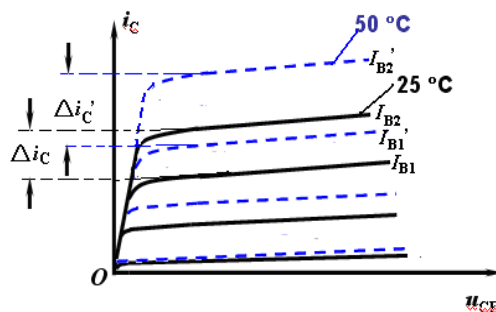


图 2.1.17 温度对输出特性曲线的影响

(3) 温度对 β 的影响

当温度升高时，输出特性曲线的距离随温度的升高而增大，如图 2.1.17 所示。图中实线为 25°C 的输出特性曲线，图中虚线为 50°C 的输出特性曲线，其中 $I_{B1}=I_{B1}'$, $I_{B2}=I_{B2}'$ ，在同样的基极电流的变化量 $\Delta i_B = I_{B1} - I_{B2} = I_{B1}' - I_{B2}'$ ，对应的 Δi_C 表示温度为 25°C 集电极电流的变化量， $\Delta i_C'$ 表示温度为 50°C 集电极电流的变化量， $\Delta i_C' > \Delta i_C$ ，因此，当温度升高时， β 将增大。

综上所述：温度对 U_{BE} 、 I_{CBO} 、 β 的影响，均将使 I_C 随温度上升而增加，这将严重地影响三极管的工作状态，其后果如何以及如何克服温度的影响，将在以后的相关章节讲述。

2.1.7 三极管的类型、型号和选用原则

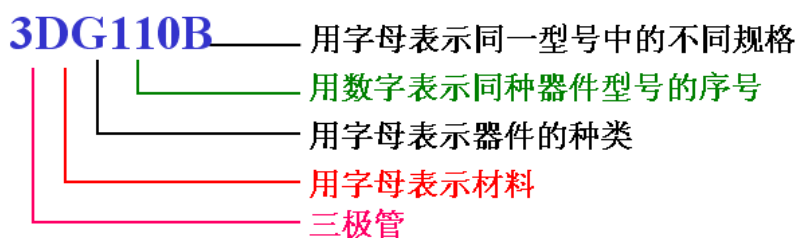
1. 类型

半导体三极管的种类很多，按半导体三极管耗散功率来分，有小功率三极管、中功率三极管和大功率三极管等；按半导体三极管的功能及用途来分，有放大管、开关管、复合管(达林顿管)和高反压管等；若按半导体三极管的工作频率来分，有低频管、高频管及超高频管等；就所用的材料而言，分为硅管和锗管；就三个区的掺杂方式而言，分为 NPN 和 PNP 管。

2. 型号

国家标准对半导体器件型号的命名方法及符号规定见教材附录表 A-1 所示。

命名举例如下：



3DG100B 高频小功率管采用硅材料 NPN 管，100 是生产序号，B 规格号
其主要参数如下：

$$I_{CBO} \leq 0.01 \mu A \quad I_{CEO} \leq 0.1 \mu A$$

$$\beta \geq 30$$

$$U_{(BR)CBO} \geq 40V \quad U_{(BR)CEO} \geq 30V$$

$$U_{(BR)EBO} \geq 4V \quad I_{CM} = 20mA$$

$$P_{CM} = 100mW \quad f_T \geq 150MHz$$

3. 三极管的选用原则

(1) 考虑三极管工作性能的稳定，在同一型号的管子中，应选反向电流小的，这样的管子温度稳定性能较好。 β 值不宜选得过高，否则管子性能不稳定。

(2) 若要求管子的反向电流小，工作温度高，则应选硅管；而当要求导通电压较低时，则应选锗管。

(3) 若要求工作频率高，则选用高频管或超高频管；若用于开关电路，则应选用开关管。

(4) 考虑三极管的安全工作条件，管子用作放大器件时必须工作在安全区，注意 P_{CM} 、 I_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 的值。

1) 若工作电压较高时，选 $U_{(BR)CEO}$ 大的高反压管。 $U_{(BR)EBO}$ 一般较小，故要注意工作时基—射极之间的反向电压不超过 $U_{(BR)EBO}$ 。

2) 需要输出大电流时，应选 I_{CM} 值较大的管子。

3) 需要输出大功率时，应选择 P_{CM} 较大的功率管。

4. 三极管的检测

当前，国内各种晶体三极管有很多种，管脚的排列也不相同，我们以半圆塑封

s9014, s9013, s9015, s9012, s9018 系列的晶体小功率三极管为例, 说明管脚的判别。

(1)把显示文字平面朝自己, 三极管的三个管脚朝下, 从左向右依次为 e 发射极、b 基极、c 集电极。如图 2.1.18 所示。

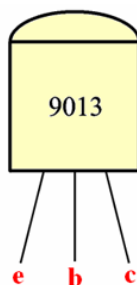


图 2.1.18 9013 管脚

(2) 在使用中不确定管脚排列的三极管, 必须进行测量确定各管脚正确的位置, 下面就介绍用万用表测量三极管的三个极的方法, 用万用表 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$ 挡测量管子三个电极中每两个极之间的正、反向电阻值。

1)判定三极管的基极

判定 NPN 管的基极: 先用黑表笔接某一引脚, 红表笔先后接另外两个引脚, 测得两个电阻值。再用黑表笔换接另一引脚, 重复以上步骤, 直至测得两个电阻值都很小, 则黑表笔所接的那个引脚即为基极 b。改用红表笔接基极 B, 黑表笔先后接另外两个引脚, 测得两个电阻值都很大, 说明被测三极管是好的。

判定 PNP 管的基极: 先用红表笔接某一引脚, 黑表笔先后接另外两个引脚, 测得两个电阻值。再用红表笔换接另一引脚, 重复以上步骤, 直至测得两个电阻值都很小, 则红表笔所接的那个引脚即为基极 b。改用黑表笔接基极 B, 红表笔先后接另外两个引脚, 测得两个电阻值都很大, 说明被测三极管是好的

2)测试三极管的 C、E 的方法

测试 NPN 三极管的 C、E 的方法: 先将三极管的基极悬空, 把万用笔的红、黑表笔分别接其余两个引脚, 此时万用表的指针应指在无穷大的位置, 接着用手同时捏住基极 B 与黑表笔所接的引脚, 然后观察指针向右偏转的幅度。然后交换红黑表笔, 再次用手同时捏住基极 B 与黑表笔所接的引脚, 然后观察指针偏转的幅度。比较两次测量中表针向右摆动的幅度, 找出摆动幅度大的一次, 此时黑表笔接的是集电极 C, 红表笔接的是发射极 E。

测试 PNP 三极管的 C、E 的方法是将红黑表笔互换。具体的操作方法与判断 NPN 三极管 C、E 的方法基本相同。

这种判别电极方法的原理是：利用万用表内部的电池，给三极管的集电极、发射极加上电压，使其具有放大能力。有手捏其基极、集电极时，就等于通过手的电阻给三极管加一正向偏流，使其导通，此时表针向右摆动幅度就反映出其放大能力的大小，因此可正确判别出发射极和集电极。

2.1.8 特殊三极管

1. 光敏三极管

光敏三极管又叫光电三极管，它是在光敏二极管的基础上发展起来的光电器件，光敏三极管最常用的材料是硅，它是靠光的照射强度来控制电流的器件。它可等效看作一个光电二极管与一个三极管的结合，所以它具有放大作用。等效电路和符号如图 2.1.19 所示，一般仅引出集电极和发射极，其外形与发光二极管一样，也有引出基极的光电三极管，它常作温度补偿用。

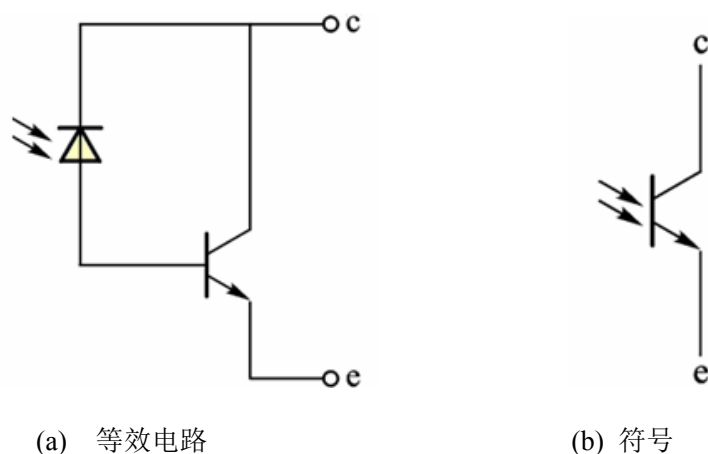


图 2.1.19 光敏三极管等效电路和符号

光敏三极管输出特性与一般晶体三极管特性相似，差别仅在于参变量不同，三极管的参变量为基极电流，而光电三极管的参变量是入射的光照度 E 。如图 2.1.20 所示。

当无光照时，流过光敏三极管的电流，就是正常情况下光敏三极管集电极与发射极之间的穿透电流 I_{CEO} ，称为光敏三极管的暗电流，它受温度的影响很大，温

度每上升 25°C , I_{CEO} 约上升 10 倍。当有光照时, 集电极电流称为光电流, 当管压降 u_{CE} 足够大时, i_{C} 仅仅决定于入射的光照度 E 。

光敏三极管的主要参数有暗电流、光电流、集电极—发射极击穿电压、最高工作电压、最大集电极功耗、峰值波长、光电灵敏度等。

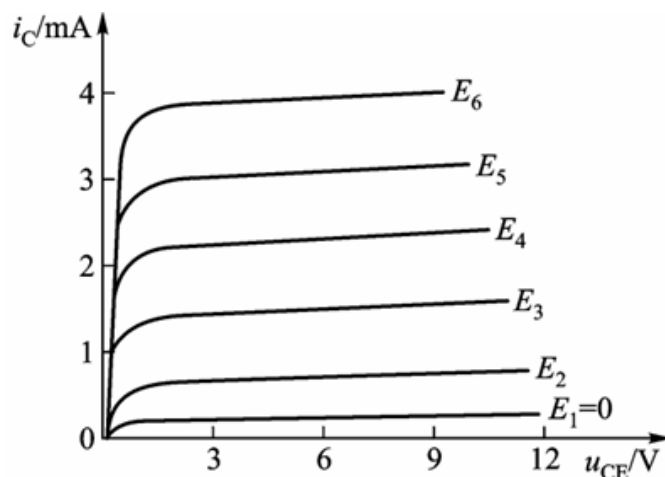


图 2.1.20 光敏三极管输出特性

2. 光耦合器

光耦合器 (optical coupler, 英文缩写为 OC) 亦称光电隔离器, 简称光耦。它是以光为媒介来传输电信号的器件, 通常把发光器 (如发光二极管) 与受光器 (如光敏三极管、光敏二极管等) 封装在同一管壳内, 常用的三极管型光电耦合器原理图如图 2.1.21 所示。

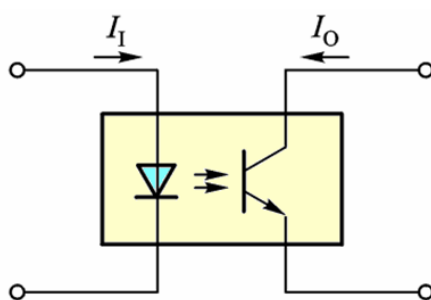


图 2.1.21 三极管型光电耦合器原理图

当输入端加电信号时发光器发出光线, 受光器接受光线之后就产生光电流, 从输出端流出, 从而实现了“电—光—电”转换。光耦合器以光为媒介传输电信号, 输入回路与输出回路之间各自独立, 没有电气联系, 也没有共地, 因而具有良好的电绝缘能力和抗干扰能力, 光电耦合器可起到很好的安全保障作用, 即使当外部

设备出现故障，甚至输入信号线短接时，也不会损坏仪表。因为光耦合器件的输入回路和输出回路之间可以承受几千伏的高压，并且工作稳定，无触点，使用寿命长，传输效率高，现已广泛用于电气绝缘、电平转换、级间耦合、驱动电路、开关电路、斩波器、多谐振荡器、信号隔离、级间隔离、脉冲放大电路、数字仪表、远距离信号传输、脉冲放大、固态继电器(SSR)、仪器仪表、通信设备及微机接口中。在单片开关电源中，利用线性光耦合器可构成光耦反馈电路，通过调节控制端电流来改变占空比，达到精密稳压目的。

光耦合器的技术参数主要有发光二极管正向压降 U_F 、正向电流 I_F 、电流传输比 CTR、输入级与输出级之间的绝缘电阻、集电极-发射极反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 、集电极-发射极饱和压降。

【练习与思考】

2.1.1 双极型三极管有两个 PN 结，如果仿照这种结构，用两个二极管反向串联，并提供必要的外部偏置条件，能获得与三极管相似的电流控制和放大作用吗？为什么？

2.1.2 对于双极型三极管，是否可以将其发射极和集电极对换使用？为什么？

2.1.3 请分别说明三极管工作在放大、截止和饱和状态时两个结的偏置情况？对于 NPN 管和 PNP 应怎样加电源电压使其满足放大条件？

2.1.4 不管三极管工作在放大、截止还是饱和状态，都满足 $I_C = \beta I_B$ ，这种说法正确吗？

2.1.5 如何用万用表判断三极管的工作状态？

2.1.6 在使用三极管时，集电极电流超过 I_{CM} ，三极管一定损坏吗？

2.2 共发射极放大电路的组成和工作原理

在模拟电子电路中，放大电路是最常用、最重要的一种单元电路。它利用放大器的控制作用把微弱的电信号进行放大，从而满足负载(如喇叭、显示仪表等)的需要。例如收音机、电视机的天线收到微弱的信号后，经过放大以后才能推动扬声器和显象管工作。而在自动控制系统中，被测物理量由温度传感器转换成微弱的电信号，必须由放大器将其电压或电流在幅度上进行放大，输出信号的能量得到加强后，再去推动执行元件以实现温度的自动调节等等。

基本放大电路一般是指由一个三极管组成的放大电路。本节以应用最广泛的共发射极电路为例，介绍放大电路的组成和工作原理。

为了理解放大电路的工作原理，那么我们首先要知道这里放大的含义是什么。

从表面看，所谓放大，是在保持信号不失真的前提下，使其由小变大、由弱变强。那么输入信号能量较小，而输出信号能量较大，这个较大的输出信号的能量来至哪里呢？输出信号的能量实际上是由直流电源提供的，只是经过放大器的控制，使之转换成信号能量，提供给负载。放大电路的结构示意图如图 2.2.1 所示。因此，在电子电路中，放大的实质是一种能量控制作用，即用能量较小的输入信号去控制直流电源，从而在输出端得到一个与输入变化相似但数值却大得多的能量。在这里需要强调的是，放大作用是针对变化量来说的。

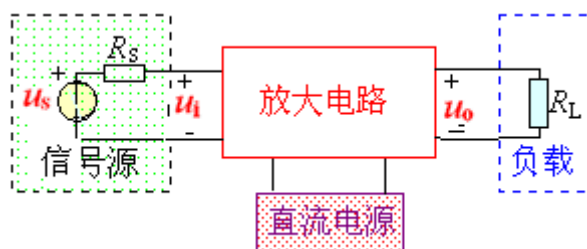


图 2.2.1 放大电路的结构示意图

具有能量控制作用的元件如三极管、场效应管等，它们都可以实现放大作用，是组成放大电路的核心元件。

2.2.1 单管共发射极放大电路的组成

单管共发射极基本放大电路如图 2.2.2 所示。因为发射极是输入回路和输出回

路的公共端，所以此电路称为共发射极基本放大电路，简称共射放大电路。

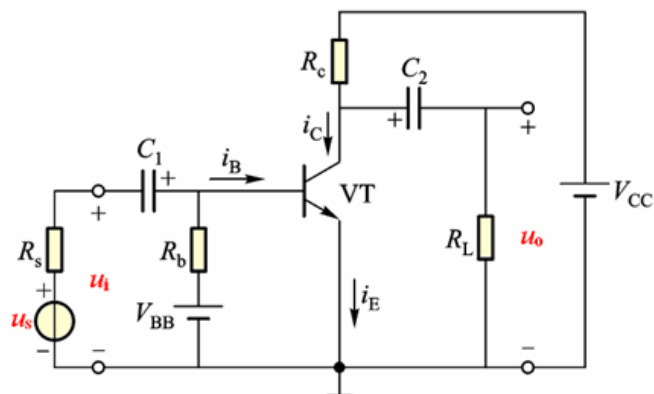


图 2.2.2 共发射极基本放大电路

共射放大电路基本组成如下：放大元件 VT 是 NPN 型三极管，它具有能量转换和控制作用，是放大电路的核心。直流电源 V_{CC} 为输出信号提供能量并保证三极管集电结反偏。 R_C 是集电极负载电阻，它把集电极电流 i_C 的变化转换为电压的变化送到输出端。直流电源 V_{BB} 使三极管的发射结正向偏置，并通过 R_b 给放大电路提供静态基极电流。合适的静态基极电流可以使三极管工作在线性放大区，对放大电路的性能有重要影响。电容 C_1 、 C_2 称为耦合电容，它们的作用是“隔离直流，传送交流”。对于直流分量来说，电容是开路的， C_1 隔断信号源与放大器的直流联系， C_2 则隔断放大器与负载的直流联系。对于交流信号， C_1 、 C_2 的容抗值较小，其交流压降忽略不计，可将 C_1 、 C_2 视为短路。电容的容量越大，则容抗值就越小，因此，需将其容量取的大些，一般为几微法至几十微法。在放大电路中，常用的是极性电容器，其正极必须接高电位，连接时一定要注意极性不要接反。

2.2.2 单管共发射极放大电路的工作原理

1. 放大作用

当输入交流信号 u_i 为 0 时，放大电路各支路的电压和电流均为直流分量。直流电源 V_{BB} 和 V_{CC} 使三极管的发射结正向偏置，集电结反向偏置，从而保证三极管工作在放大状态。

当在放大电路的输入端加上一个微小的交流信号 u_i 后，使得三极管发射结上的电压发生变化，产生变化量 Δu_{BE} ，从而引起基极电流 i_B 产生相应的变化量 Δi_B 。

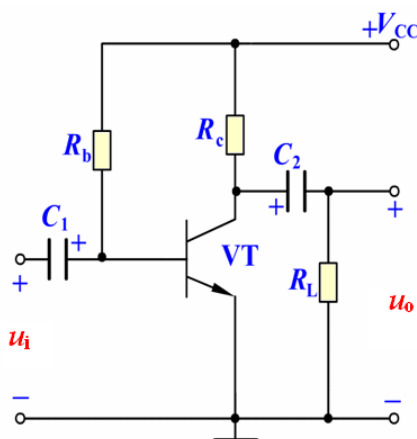


图 2.2.3 单管共射简化电路

由于电路中既有直流电源又有交流信号源，所以电路中既有直流分量也有交流分量，电压和电流的名称较多，符号不同，容易混乱，为此规定如下，以便区别。

(1) 直流分量用大写字母加大写下标表示，如 I_B 、 I_C 、 U_{CE} 等。

(2) 交流分量的瞬时值用小写字母加小写下标表示，如 i_b 、 i_c 、 u_{ce} 等；有效值用大写字母加小写下标表示，如 I_b 、 I_c 、 U_{ce} 等，而幅值是在有效值基础上加“m”下标，如 I_{bm} 、 I_{cm} 、 U_{cem} 等。

(3) 总电压（或总电流）的瞬时值则是某时刻的交流瞬时值和直流量的叠加，用小写字母加大写下标表示，如 i_B 、 u_{CE} 等，其中 $i_B = I_B + i_b$ ， $u_{CE} = U_{CE} + u_{ce}$ 。

2.2.3 放大电路的主要技术指标

为了衡量放大电路的性能，规定了各种技术指标。由于放大电路的技术指标很多，下面只介绍几个主要的性能指标。测试电路如图 2.2.4 所示。放大电路可以看成二端口网络，假设输入端加上一正弦测试信号，然后测量电路中的其他有关电量，并算出各项技术指标。

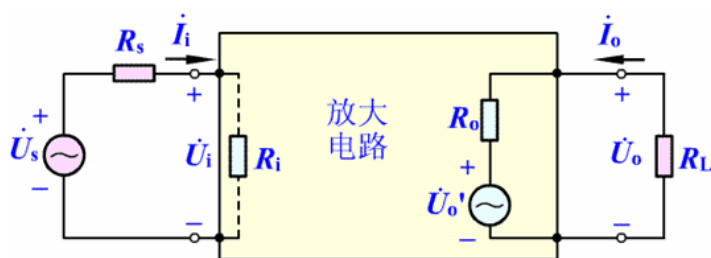


图 2.2.4 放大电路技术指标测试图

1. 放大倍数

放大倍数又叫**增益**，是衡量放大电路放大能力的重要指标。输出信号的电压和电流幅度得到了放大，所以输出功率也会有所放大。对放大电路而言有电压放大倍数、电流放大倍数和功率放大倍数，它们通常都是按正弦量定义的。放大倍数定义式中各有关量如图 2.2.4 所示。

电压放大倍数指的是**输出电压与输入电压的变化量之比**，当输入信号是正弦电压时，则

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \quad (2.2.1)$$

同理电流放大倍数定义为输出电流与输入电流的变化量之比。

$$\dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} \quad (2.2.2)$$

本章重点研究电压放大倍数。值得注意的是，只有在输出信号没有明显失真的情况下，上面的表达式才有意义。这一要求同样适用于下面各项指标。

2. 输入电阻

输入电阻是从放大电路输入端看进去的等效电阻 R_i ，**定义为输入电压有效值和输入电流有效值之比**。即

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} \quad (2.2.3)$$

输入电阻的定义见图 2.2.4。输入电阻表明了放大电路从信号源吸取电流大小的能力，当信号源内阻一定时， R_i 越大，放大电路从信号源吸取的电流则越小，反之则大。一般情况下，放大电路输入电阻越大越好。当然，有时候也要视需要而定。

3. 输出电阻

放大电路的输出可以等效成一个有内阻的电压源，**该信号源的内阻就是放大电路的输出电阻 R_o** ，即输出电阻是从放大电路输出端看进去的等效内阻。 R_o 的定义见图 2.2.4。求解时，信号源 \dot{U}_s 短路，而负载电阻 R_L 开路，外加一个正弦测试电压 \dot{U}_o ，此时，输出电流为 \dot{I}_o ，则二者之比为输出电阻 R_o ，即

$$R_o = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \quad (2.2.4)$$

这只是理论上的一种计算方法，在实际电路中，往往采用“实验测试法”。首先在输入端加一正弦信号电压 \dot{U}_i ，分别测出输出负载开路时的输出电压 \dot{U}_o' 和带上负载时的电压 \dot{U}_o ，由图 2.2.4 可得

$$R_o = \left(\frac{\dot{U}_o'}{\dot{U}_o} - 1 \right) R_L \quad (2.2.5)$$

由上式可见，输出电阻 R_o 越小，带负载时的输出电压 \dot{U}_o 越接近负载开路时的输出电压 \dot{U}_o' ，表明放大电路受负载影响越小，带负载能力越强。可知，输出电阻是衡量放大电路带负载能力的一项技术指标。 R_o 越小，表明放大电路带负载的能力越强，反之则差。

输入电阻与输出电阻描述了电子电路在相互连接时所产生的影响，它们会直接或间接地影响放大电路的放大能力。

4. 通频带

因为放大电路中有电容、电感及半导体器件结电容等电抗元件的存在，所以放大电路对不同频率信号的放大能力不同。放大倍数随频率的变化规律称为频率响应，放大倍数的大小随频率的变化规律叫幅频响应，放大倍数的相位随频率的变化规律叫相频响应。输入信号频率较低或较高时放大倍数通常都要下降，只有在中频段，放大倍数近似为常量且最大，用 A_{um} 表示。在低频段，当放大倍数下降为中频段的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 时，对应的频率 f_L 称为**下限截止频率**。在高频段，当放大倍数下降为中频段的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 时，对应的频率 f_H 称为**上限截止频率**。 f_H 和 f_L 之间的频率范围，称为放大电路的**通频带 BW**，如图 2.2.5 所示。

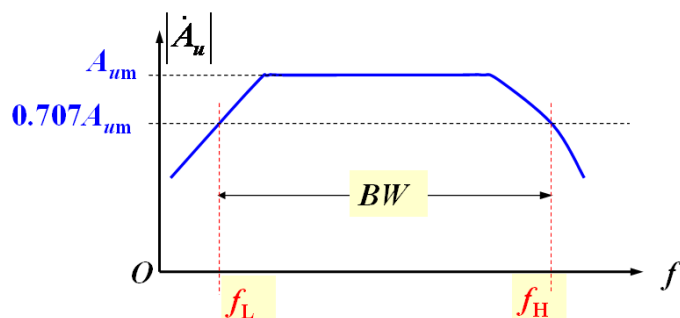


图2.2.5 放大电路的频率特性

通频带越宽，表示放大电路对不同信号频率的适应能力越强。在电子电路中常遇到的信号往往不是单一频率的信号，而是在一段频率范围内，例如广播中的音频信号，其频率范围通常在几十赫至几十千赫之间，要使放大后的信号不失真，放大电路应有足够宽的通频带。一般来说，音响设备的通频带应宽于(20Hz~20kHz)的范围，才能完全不失真地放大声音信号。

5. 最大不失真输出幅度

最大不失真输出幅度是指使输出波形没有明显失真时的最大输出电压（或最大输出电流），常用有效值 U_{om} 表示。

6. 最大输出功率与效率

最大输出功率指的是在输出信号无明显失真的情况下，电路能输出的最大功率，常用 P_{om} 表示。在放大电路中，输入的功率通常很小，但经放大电路的控制和转换后，直流电源的功率被转换成交流功率，得到较大的输出功率。直流电源能量的利用率称为效率，它的定义是最大输出功率与直流电源消耗的功率之比，即

$$\eta = \frac{P_{om}}{P_V} \quad (2.2.6)$$

公式中 P_V 是直流电源提供的功率。

【练习与思考】

2.2.1 为什么说放大的实质是一种能量控制作用？

2.2.2 为什么放大的对象是变化量？

2.2.3 组成放大电路的原则是什么？

2.2.4 放大电路主要的性能指标有那些？说明各项性能指标的物理意义。

2.3 放大电路的静态分析

由前面分析可知，在放大电路中，当外加输入信号不为零时，交流量与直流量是共存的。所以对放大电路定量分析时，其分析的内容一般包括两个方面，一是直流（静态）工作点分析，二是交流（动态）性能分析。静态是当没有输入信号时，估算三极管的各极直流电流和极间直流电压，所以静态也称为直流工作状态。各极直流电流和极间直流电压的数值可用三极管特性曲线上一个确定的点表示，通常称它为静态工作点，用 Q 表示。工作点合适，电路才能正常放大，否则，不仅失真严重，甚至无法工作。

放大电路建立合适的静态，是保证动态工作的前提。分析电路的步骤一般先静态后动态，常用的分析方法有图解法和微变等效电路法等。

分析放大电路必须要正确地区分静态和动态，正确地区分直流通路和交流通路。下面以单管共射放大电路为例，分析其直流通路。

2.3.1 直流通路

静态时，放大电路各处的电压、电流都是直流量，耦合电容 C_1 、 C_2 相当于开路。所以此时的放大电路可画成图 2.3.1 (b) 的形式，即为放大电路的直流通路。确定直流通路的方法是：将原放大电路中所有电容开路，电感短路。

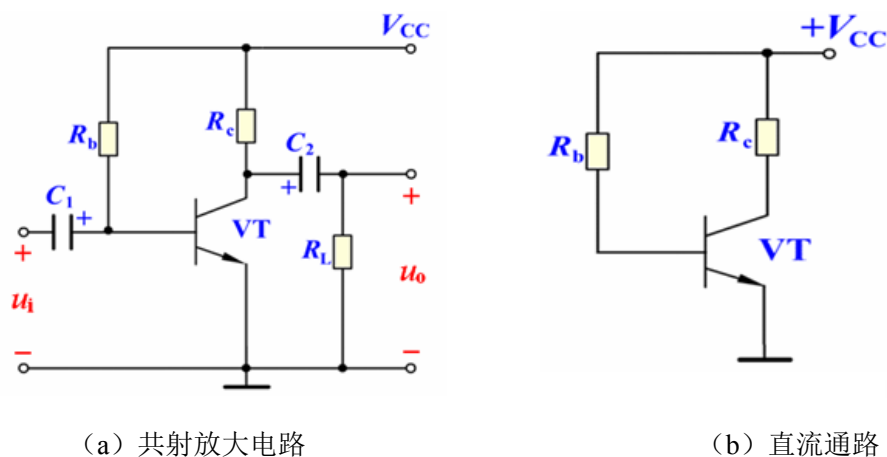


图 2.3.1 单管共射放大电路及其直流通路

2.3.2 静态工作点的近似估算

近似估算就是在一定条件下,把三极管这个非线性元件线性化,从而使非线性放大电路的分析转化为线性电路的求解。

当外加输入信号为零时,静态工作点处的基极电流、集电极电流、基极与发射极间电压、集电极与发射极间电压分别用 I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 U_{BEQ} 、 U_{CEQ} 来表示。根据图 2.3.1 (b) 中的直流通路,采用估算法求得单管共射放大电路的静态基极电流表达式为

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b} \quad (2.3.1)$$

在这里, $U_{BEQ} \approx 0.7V$ (硅管), 如果 V_{CC} 、 R_b 已知, 则可由上式估算出 I_{BQ} 的值。再由基极电流和集电极电流的关系求得静态集电极电流为

$$I_{CQ} \approx \beta I_{BQ} \quad (2.3.2)$$

然后由图 2.3.1 (b) 的直流通路可得

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c \quad (2.3.3)$$

例 2.3.1 如图 2.3.1 (a) 所示电路中, 已知 $V_{CC}=12V$, $R_b=300K\Omega$, $R_c=4K\Omega$, NPN 硅管的 $\beta=50$, 试估算该电路的静态工作点。

解: 设三极管的 $U_{BEQ} \approx 0.7V$ (硅管), 分别由式 2.3.1、2.3.2、2.3.3 可得

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b} \approx \frac{V_{CC}}{R_b} = \left(\frac{12}{300} \right) mA = 40 \mu A$$

$$I_{CQ} \approx \beta I_{BQ} = (50 \times 0.04) mA = 2 mA$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c = (12 - 2 \times 4) V = 4 V$$

2.3.3 图解法分析静态工作点

三极管各级电流和电压之间的关系可以用输入、输出特性曲线来描述。图解法是在三极管的输入、输出特性曲线上, 用作图的方法对放大电路进行分析。对

直流工作状态来说，就是在特性曲线上，用作图的方法确定出静态工作点。

从原则上来说， I_{BQ} 、 U_{BEQ} 可以在输入特性曲线上作图求出。但是输入特性不易准确测出，所以 I_{BQ} 、 U_{BEQ} 一般不用图解法确定，而是利用前面介绍的估算法求出 I_{BQ} 、 U_{BEQ} 的值。下面来讨论用图解法分析 I_{CQ} 、 U_{CEQ} 的过程。

图 2.3.2 是图 2.3.1 (b) 中直流通路的输出回路部分。用一条虚线 MN 将其分成两部分，虚线左边是三极管的集电极回路， i_c 、 u_{CE} 之间是由三极管的内部特性决定的非线性关系，可用输出特性曲线表示。右边的集电极负载电阻 R_c 和直流电源 V_{CC} 均为线性元件，它们的线性关系可用直线方程表示：

$$u_{CE} = V_{CC} - i_c R_c$$

因为该直线是由直流通路得出的，且与集电极负载电阻 R_c 有关，故称为**直流负载线**。该负载线可由两个特殊点作出，即当 $i_c=0$ 时， $u_{CE}=V_{CC}$ ；当 $u_{CE}=0$ 时， $i_c=\frac{V_{CC}}{R_c}$ 。

所以直流负载线的斜率为 $-\frac{1}{R_c}$ ，如图 2.3.3 所示。由于电路的非线性部分和线性部分是连接在一起的，所以输出特性曲线与直流负载线的交点就是放大电路的静态工作点，如图 2.3.3 所示。

综上所述，静态工作点的确定步骤如下：

综上所述，静态工作点的确定步骤如下：

- (1)用估算法算出 I_{BQ} 。
- (2)画出三极管的输出特性曲线。
- (3)作出直流负载线，直流负载线与 I_{BQ} 对应的输出特性曲线的交点，就是静态工作点 Q。

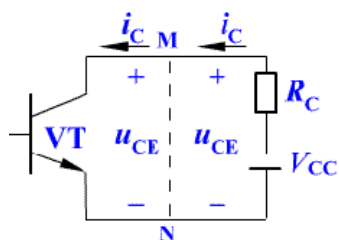


图 2.3.2 直流通路的输出回路

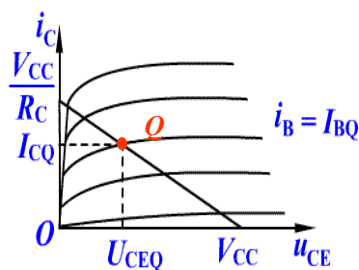


图 2.3.3 图解法确定静态工作点

以上介绍了估算法和图解法求解静态工作点的过程。静态工作点选择是否合适，对放大电路能否正常工作有很大的影响。以下将进一步分析放大电路的工作

过程、静态工作点对信号放大失真的影响、放大倍数等问题。

【练习与思考】

2.3.1 放大电路为什么要设置合适的静态工作点？如果静态工作点不合适会对电路造成什么影响？

2.3.2 计算放大电路的静态值时所用的直流通路如何画？

2.3.3 图解法求解静态工作点的步骤有哪些？

2.4 放大电路的动态分析

在静态工作点的基础上，给放大电路输入交流信号后，三极管各极的电压和各极中的电流就在静态值的基础上变化，这种状态称为**动态**。放大电路的动态分析方法主要有两种，即图解分析法和微变等效电路分析法。交流通路是输入信号作用下交流信号流经的通路，用于研究动态参数。

2.4.1 交流通路

由于在放大电路 2.2.3 中加入了输入信号 u_i ，因此电路中同时有直流量和交流量存在。如果只研究交流分量时，设 C_1 、 C_2 足够大，对信号而言，其上的交流压降近似为零，在交流通路中，可将耦合电容短路。而直流电源 V_{CC} 是个固定不变的量，对地相当于交流短路。所以，放大电路的交流通路可画成图 2.4.1 的形式。画交流通路的要点是：使所有的直流电压源和所有的大容量电容都短路。

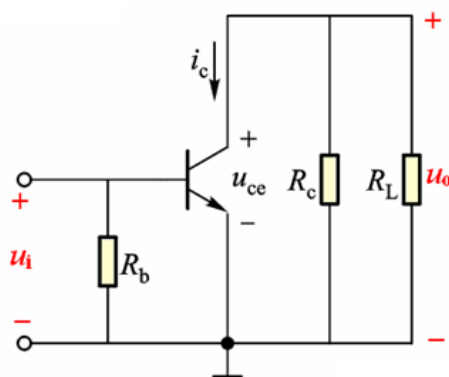


图 2.4.1 单管共射放大电路的交流通路

2.4.2 图解分析法

1. 图解分析法

图解法是在三极管的输入、输出特性曲线上，用作图的方法来确定三极管各级电流和极间电压的变化情况。下面我们讨论电路的图解分析法。

由图 2.2.3 可知，由于输入信号 u_i 和 U_{BEQ} 同时加在发射结上，因此，放大电路的工作点将围绕静态工作点沿输入特性曲线上下移动，从而使 i_B 发生变化。为了确定因 i_b 引起的 i_C 和 u_{CE} 的变化，首先应在输出特性上画出工作点移动的轨迹，即**交流负载线**。由图 2.4.1 交流通路输出部分的伏安关系，可知交流负载线的斜率为

为 $-\frac{1}{R'_L}$ (R'_L 为 R_c 和 R_L 的并联值,即集电极等效负载电阻)。通过分析可知，**交流负载线一定通过静态工作点**。因为当输入信号为零时，电路将工作在直流工作点 Q 上，此时放大电路的工作点既在交流负载线上，又在静态工作点 Q 上。所以，交

流负载线是过静态工作点 Q 且斜率为 $-\frac{1}{R'_L}$ 的直线，如图 2.4.2 所示。

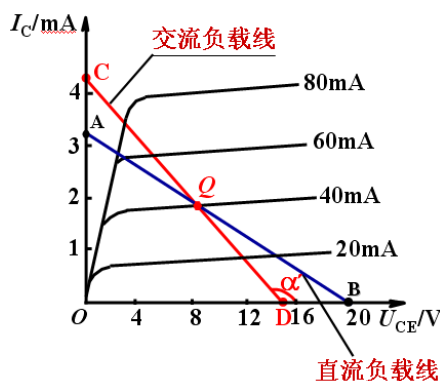


图 2.4.2 交流负载线

交流负载线的具体作法如下：

- (1) 先画出一条斜率为 $-\frac{1}{R'_L}$ 的辅助线。

在 i_C 轴上选择一个合适的值，并算出 $i_C R'_L$ ，然后在 u_{CE} 轴上找到相应点，连

接这两点即为 $-\frac{1}{R'_L}$ 的辅助线。

(2) 通过 Q 点作辅助线的平行线即为交流负载线。

在确定静态工作点、画出交流负载线的基础上，根据已知的电压输入信号 u_i 的波形，在三极管特性曲线上，可按下列作图步骤画出有关电压电流波形。

(1) 在输入特性曲线上，可由输入信号 u_i 叠加到 U_{BEQ} 上得到的 u_{BE} ，从而对应画出基极电流 i_B 的波形。

(2) 在输出特性曲线上，根据 i_B 的变化波形可对应得到集射电压 u_{CE} 及集电极电流 i_C 的变化波形，如图 2.4.3 所示。

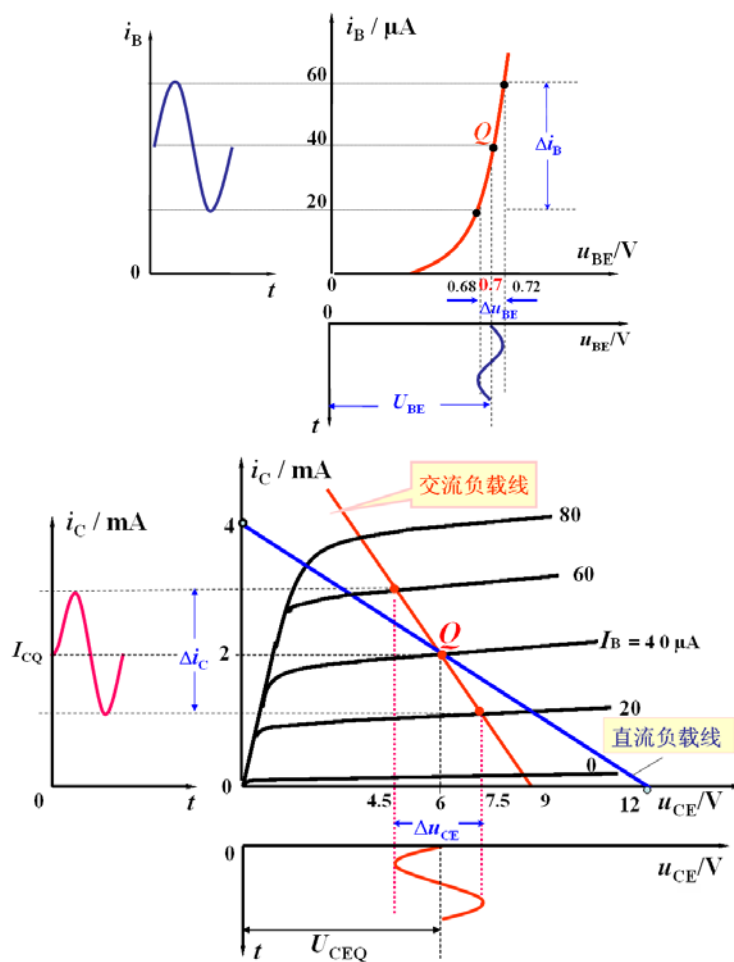


图 2.4.3 放大电路的交流图解分析

也可以利用图解法求出放大电路的电压放大倍数。设在放大电路输入端加上一个正弦电压 u_i ，然后对应画出基极电流在静态值附近的变化量 i_b 的波形。最后根据 i_b ，在输出特性曲线的交流负载线上找到与之对应的 u_{ce} ，则放大倍数为

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_{ce}}{u_{be}}$$

但是，由于作图误差等原因，这种方法得到的电压放大倍数往往不太准确。

根据图 2.4.3，可以画出在输入正弦电压时，三极管各极电流和极间电压的波形，如图 2.4.4 所示。观察这些波形，可以得出以下几点重要结论：

(1) 当输入的正弦电压 u_i 在线性范围时，放大电路中的信号是交、直流共存的，即瞬时信号是在原来直流量上叠加一个交流量形成的。而且瞬时量的方向与静态值方向相同，始终不变，只是围绕各自的静态值，按输入信号规律近似呈线性变化。

(2) 在三极管的线性工作区，当输入电压有微小变化时，输出电压有一个较大的变化量，可见单管共射放大电路有电压放大作用。

(3) 输出电压 u_o 与输入电压 u_i 的相位相反，可见单管共射放大电路具有倒相作用。

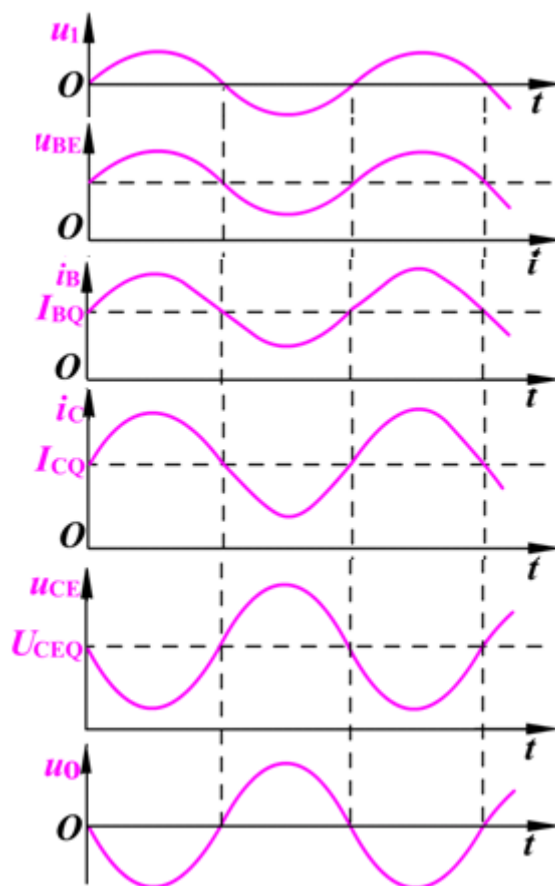


图 2.4.4 单管共射放大电路的电压、电流波形

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/337021121056006042>