# 第 3 章

CHAPTER 3

# 晶体三极管及其基本放大电路

晶体三极管是一种重要的三端电子器件。在它问世后的近 30 年时间里，一直是电子电路设计中一种重要的器件，并在某些应用领域（如汽车电子仪器、无线系统的射频电路）具有一定的优势。在高速数字系统中，晶体三极管射极耦合逻辑器件也仍然被使用。

**本章重难点**：晶体三极管的工作原理和特性曲线；晶体管放大电路的静态分析；晶体管放大电路的动态分析（即图解法和等效电路法）；共射组态、共集组态和共基组态三种基本放大电路的性能及特点。

## 3.1 晶体三极管

晶体三极管又称双极结型晶体管（Bipolar Junction Transistor，BJT），是电子技术中重要的半导体器件，因其有自由电子和空穴两种极性的载流子同时参与导电而得名。

### 3.1.1 晶体管的结构及类型

视频 8 晶体三极管的结构及符号

晶体管的结构示意图如图 3.1.1 所示。在一个硅（或锗）片上生成 3 个杂质半导体区域：一个 P 区夹在两个 N 区中间，或者一个 N 区夹在两个 P 区中间。晶体管有两种类型：NPN 型和 PNP 型。晶体管由 3 个掺杂半导体区组成，分别称为发射区（emitter）、基区（base）和集电区（collector），3 个区引出的电极分别称为发射极、基极和集电极。3 个区构成了两个 PN 结：发射区和基区构成发射结，基区和集电区构成集电结。

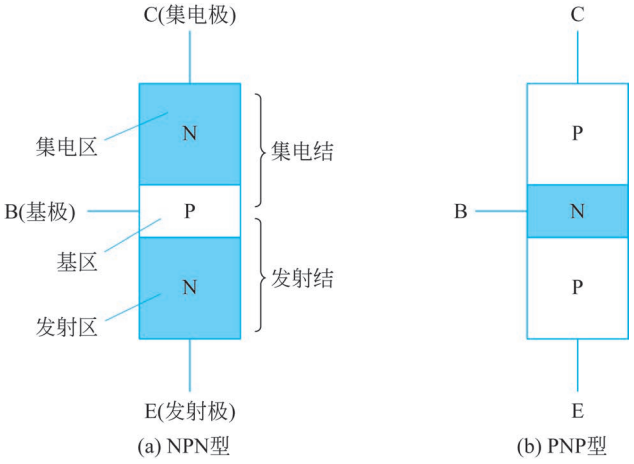



图 3.1.1 晶体管的结构示意图

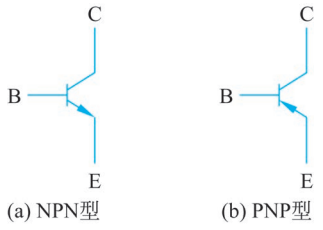



图 3.1.2 NPN 型和 PNP 型晶体管的电路符号

NPN 型和 PNP 型晶体管的电路符号如图 3.1.2 所示。不论是 NPN 型晶体管还 NPN 型晶体管，晶体管的符号中发射结箭头的方向都是发射结加正偏电压时电流的实际方向。

晶体管的 3 个区域具有以下特点：

(1) 基区宽度很薄(微米数量级)，且掺杂密度低；

(2) 发射区比集电区掺杂浓度高很多，且集电结面积大于发射结面积，因此它们结构不是对称的。

晶体管在实际使用中发射极和集电极是不可以颠倒使用的，否则不能正常工作；晶体管的外特性与 3 个区的上述特点紧密相关。

本章主要讨论 NPN 型晶体管及其电路，但结论对 PNP 型晶体管同样适用，只不过两者所需的直流电源电压的极性相反，产生的电流方向也相反。

视频 9
晶体三极管的工作原理

## 3.1.2 晶体管的工作原理

### 1. 晶体管工作在放大区时的外部条件

晶体管是有源器件，需要加合适的外部偏置电压才能对输入信号进行放大。晶体管工作在放大区时的外部条件是发射结正偏，集电结反偏。满足上述条件的电路示意图如 3.1.3 所示，其中直流电源 $E_B$ 使 NPN 管发射结正偏；直流电源使 $E_C$ 使集电结反偏。

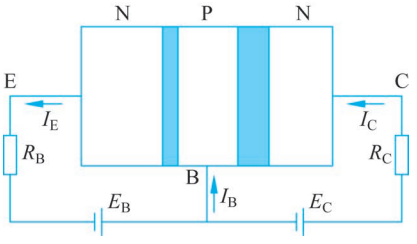



图 3.1.3 满足 NPN 管工作在放大区时外部条件的电路示意图

### 2. 晶体管内部载流子的传输运动

如图 3.1.4 所示是一个处于放大状态的 NPN 型晶体管的内部载流子的传输运动。图中粗箭头方向表示电流的实际方向，粗箭头中的实心圆圈“•”表示自由电子，空心圆圈“◦”表示空穴。空穴的运动方向与电流实际方向一致，自由电子的运动方向与电流实际方向相反。

当发射结正偏时，发射区向基区扩散多子电子，形成发射结电子扩散电流 $I_{En}$；基区向发射区扩散多子空穴，形成空穴扩散电流 $I_{Ep}$，由于发射区的掺杂密度远远高于基区的掺杂密度，所以电子扩散电流 $I_{En}$ 远远大于空穴扩散电流 $I_{Ep}$。

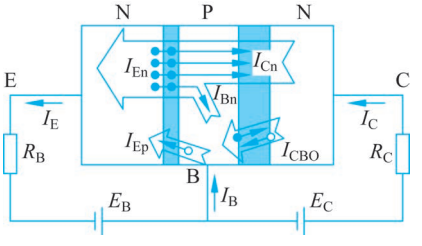



图 3.1.4 晶体管内部载流子的传输运动

由于基区很薄，因此发射区向基区扩散的大量的电子只有少数在基区与空穴复合，形成基区复合电流 $I_{Bn}$，其余的电子到达集电区边缘，在集电结加反偏电压的情况下漂移到集电区被收集，集电区形成电流 $I_{Cn}$，同时由于集电结反偏，集电区少子空穴、基区少子电子在电场的作用下产生漂移运动，形成集电结反向饱和电流 $I_{CBO}$，集电结漂移电流 $I_{CBO}$ 也很小。

需要说明的是，由于发射结正偏，此时 PN 结以扩散运动为主，扩散电流远远大于漂移电

流，所以图 3.1.4 中发射结正偏时的漂移电流忽略不计。由于集电结反偏，此时 PN 结以漂移运动为主，漂移电流远大于扩散电流，所以图 3.1.4 中集电结的扩散电流忽略不计。

**3. 晶体管电流分配关系**

根据图 3.1.4，结合电路的基本理论，整理晶体管发射极、基极和集电极的电流及其分配关系如下：

$$I_E = I_{En} + I_{Ep} \approx I_{En} (I_{En} \gg I_{Ep}) \tag{3.1.1}$$

$$I_C = I_{Cn} + I_{CBO} \tag{3.1.2}$$

$$I_B = I_{Bn} + I_{Ep} - I_{CBO} \approx I_{Bn} - I_{CBO} \tag{3.1.3}$$

根据图 3.1.4，发射区发射出去多子形成的电流 $I_{En}$ 共分为两部分：一部分是与基区空穴复合的电流 $I_{Bn}$，另一部分是被集电区收集的电流 $I_{Cn}$，有

$$I_{En} = I_{Bn} + I_{Cn} (I_{En} \gg I_{Bn}, I_{Cn} \gg I_{Bn}) \tag{3.1.4}$$

由式(3.1.1)～式(3.1.4)，可得

$$\begin{aligned} I_E \approx I_{En} &= I_{Bn} + I_{Cn} = (I_B - I_{CBO}) + (I_C + I_{CBO}) \\ &= I_B + I_C \end{aligned} \tag{3.1.5}$$

从宏观的角度，把晶体管看作一个节点，流入节点的电流和流出节点的电流相等，所以有

$$I_E = I_B + I_C \tag{3.1.6}$$

通过上述分析，晶体管工作在放大区时各区域的作用如下：

(1) 发射区发射载流子；

(2) 集电区收集载流子；

(3) 基区传送和控制载流子。

## 3.1.3 晶体管基本放大电路的电流增益

**1. 晶体管放大电路的 3 种组态**

双极型三极管有 3 个电极，其中两个可以作为输入，两个可以作为输出，这样必然有一个电极是公共电极。3 种接法也称 3 种组态，分别是共射(Common-Emitter，CE)组态、共基(Common-Base，CB)组态和共集(Common-Collector，CC)组态，如图 3.1.5 所示。

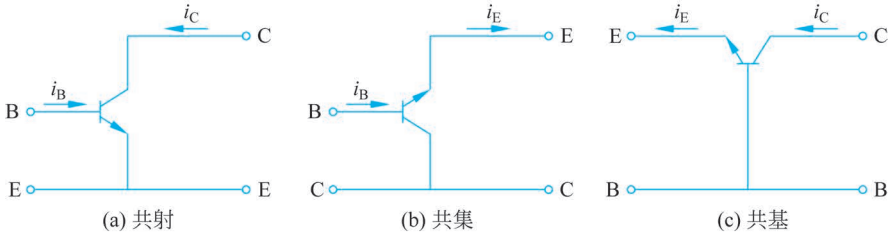



图 3.1.5 晶体管的 3 种组态

**2. 基本放大电路的直流电流放大系数**

**共基组态的直流放大系数**$\bar{\alpha}$ 定义为

$$\bar{\alpha} = \frac{I_{Cn}}{I_E} \tag{3.1.7}$$

它表达了 $I_E$ 转化为 $I_{Cn}$ 的能力。对于一个具体型号的晶体管，$\bar{\alpha}$ 一般为 0.9～0.99。

根据式(3.1.2)和式(3.1.7)，有

$$I_C = I_{Cn} + I_{CBO} = \bar{\alpha} I_E + I_{CBO} \tag{3.1.8}$$

当 $I_C \gg I_{CBO}$ 时,有

$$I_C \approx I_{Cn} = \bar{\alpha} I_E \tag{3.1.9}$$

所以工程上在对共基组态直流放大系数 $\bar{\alpha}$ 近似分析时,$\bar{\alpha}$ 近似计算公式为

$$\bar{\alpha} \approx \frac{I_C}{I_E} \tag{3.1.10}$$

$\bar{\alpha}$ 描述了晶体管在共基组态输出电流 $I_C$ 受输入电流 $I_E$ 控制的电流分配关系。

由于 $I_E = I_B + I_C$,将它代入式(3.1.8),整理后得到共射组态时输出电流 $I_C$ 受输入电流 $I_B$ 控制的电流分配关系,即

$$\begin{aligned} I_C &= \frac{\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}} I_B + \frac{I_{CBO}}{1-\bar{\alpha}} \\ &= \bar{\beta} I_B + (1+\bar{\beta}) I_{CBO} \end{aligned} \tag{3.1.11}$$

其中,

$$\bar{\beta} = \frac{\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}} \tag{3.1.12}$$

$$I_{CEO} = (1+\bar{\beta}) I_{CBO} \tag{3.1.13}$$

$\bar{\beta}$ 为**共射组态的直流放大系数**,对于一个具体型号的晶体管,其 $\bar{\beta}$ 一般在几十到几百之间。

$I_{CEO}$ 为集电极到发射极之间的反向饱和电流,简称穿透电流。$I_{CEO}$ 的数值一般很小,可忽略不计。式(3.2.11)可简化为

$$I_C = \bar{\beta} I_B \tag{3.1.14}$$

利用 $I_E = I_B + I_C$ 和式(3.1.14),可得到共集电极组态输出电流 $I_E$ 受输入电流 $I_B$ 控制的电流分配关系,即

$$\begin{aligned} I_E &= I_C + I_B \\ &= \bar{\beta} I_B + I_B \\ &= (1+\bar{\beta}) I_B \end{aligned} \tag{3.1.15}$$

$1+\bar{\beta}$ 为**共集组态的直流放大系数**。显然,共集组态的电流增益略大于共射组态的电流增益。

上述电流分配关系说明,无论采用哪种连接方式,晶体管在发射结正偏、集电结反偏,而且 $\bar{\alpha}$ 或 $\bar{\beta}$ 保持不变时,输出电流 $I_C$(或 $I_E$)正比于输入电流 $I_E$(或 $I_B$)。如果能控制输入电流,就能控制输出电流,所以常将晶体管称为电流控制器件。实质上由

$$I_E = I_{ES}(e^{U_{BE}/U_T} - 1) \approx I_{ES} e^{U_{BE}/U_T}$$

(其中 $I_{ES}$ 是发射结的反向饱和电流)可知,$I_E$ 是受正向发射结电压 $U_{BE}$ 控制的,因此 $I_C$ 和 $I_B$ 也是受正向发射结电压 $U_{BE}$ 控制的。这体现了晶体管的正向受控特性。利用这一特性,可以把微弱的电信号加以放大。

### 3. 基本放大电路的交流电流放大系数

对于共射组态,在动态基极电流较小的情况下,共射交流电流放大系数与其直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ 近似相等,有

$$\beta = \left.\frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}\right|_{U_{CE}=\text{常数}} \approx \bar{\beta} \tag{3.1.16}$$

对于共基组态，在基极电流动态范围较小的情况下，共基交流电流放大系数 $\alpha$ 与其直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$ 近似相等，有

$$\alpha = \left.\frac{\Delta i_C}{\Delta i_E}\right|_{U_{CB}=常数} \approx \bar{\alpha} \tag{3.1.17}$$

## 3.1.4　晶体管的特性曲线

视频 10 晶体三极管的伏安特性曲线

晶体管的特性曲线能直观地描述各极电流与各极间电压之间的关系。晶体管输入特性曲线描述晶体管输入两端电压、电流之间的关系，输出特性曲线描述晶体管输出两端电压、电流之间的关系。不论是用哪种组态晶体管的特性曲线，描述的都是同一器件的特性。本节仅分析共射组态 NPN 型晶体管的特性曲线。

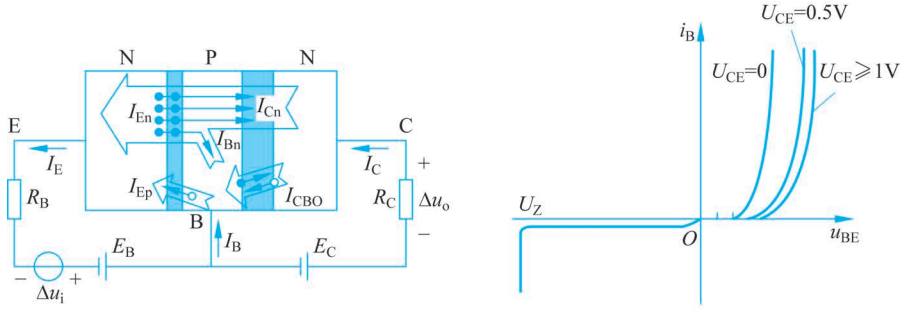
### 1. 输入特性曲线

晶体管的输入特性曲线是指在集电极与发射极之间电压 $U_{CE}$ 为常数的情况下，基极电流 $i_B$ 与发射结压降 $u_{BE}$ 之间的函数关系曲线，即

$$i_B = \left.\int(u_{BE})\right|_{U_{CE}=常数} \tag{3.1.18}$$

共射组态基本放大电路如图 3.1.6(a)所示，晶体管输入特性曲线如图 3.1.6(b)所示。输入特性曲线与半导体二极管的正向伏安特性曲线相似。但随着 $U_{CE}$ 的增加，特性曲线向右移动。

在发射结正偏导通的情况下，当 $U_{CE}$ 略大于 0V 但比较小的时候，发射区向基区发射的电子有少部分在基区复合形成电流 $I_{Bn}$，其余的扩散到集电区被集电区收集形成电流 $I_{Cn}$。随着 $U_{CE}$ 逐渐增大，集电区收集电子的能力逐渐增强，发射区向基区发射的电子在基区复合的数量略有减少，基极电流 $i_B$ 略有下降，如图 3.1.6(b)所示的输入特性曲线向右略有偏移。




(a) 共射组态基本放大电路　　(b) 晶体管输入特性曲线

图 3.1.6　共射组态放大电路及晶体管输入特性曲线

$U_{CE}$ 继续增大，当达到一定值时，被集电区收集的电子数量的增加不再明显，趋于饱和，再继续增大 $U_{CE}$，基极电流 $i_B$ 不再明显减小，因此可近似认为在 $U_{CE}>1$ 后的所有输入特性曲线基本上是重合的。对于小功率管，可以近似用 $U_{CE}$ 大于 1V 的任何一条输入特性曲线来代表所有的输入特性曲线。

### 2. 输出特性曲线

晶体管输出特性曲线是指在基极电流 $I_B$ 为常数的情况下，集电极电流电 $i_C$ 与 $u_{CE}$ 之间的函数关系曲线，即

$$i_C = \left.\int(u_{CE})\right|_{I_B=常数} \tag{3.1.19}$$

晶体管的输出特性曲线如图 3.1.7 所示。它是以 $I_B$ 为参变量的一族特性曲线。现以其中任何一条加以说明，当 $u_{CE}=0$V 时，因集电极无收集作用，$i_C=0$。当 $u_{CE}$ 稍增大时，发射结虽处于正向电压之下，但集电结反偏电压 $u_{CB}$ 很小，集电区收集电子的能力很弱，$i_C$ 主要由 $u_{CE}$ 决定。当 $u_{CE}$ 增加到使集电结反偏电压 $u_{CB}$ 较大时，运动到集电结的电子基本都可以被集电区收集，此后 $u_{CE}$ 再增加，集电极电流不再有明显增加，输出特性曲线出现拐点，如图 3.1.7 所示，此后继续增大 $u_{CE}$，集电极电流 $i_C$ 仅有微小的增加，出现在拐点之后的 $i_C$ 曲线几乎平行于坐标横轴，此时 $i_C$ 的大小仅由 $i_B$ 的大小来决定。

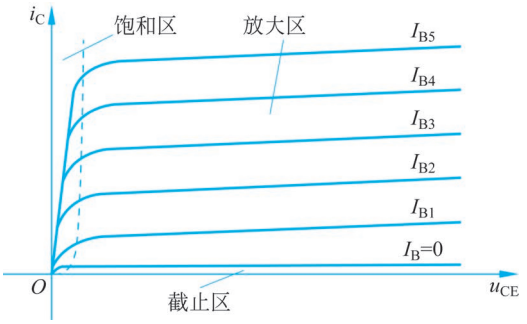



图 3.1.7　晶体管输出特性曲线

图 3.1.7 输出特性曲线可以分为 3 个工作区：饱和区、截止区和放大区。

1）放大区

晶体管工作在放大区的条件是发射结正偏且发射结压降大于开启电压、集电结反偏。每一条曲线 $i_C$ 几乎都与 $u_{CE}$ 轴平行，曲线基本平行等距。在放大区，$i_C$ 的大小受控于 $i_B$，与 $u_{CE}$ 大小几乎无关，工程分析时认为 $i_C=\beta i_B$。

实际测量的输出特性曲线在 $i_B$ 不变时，$i_C$ 并不是常数，$i_C$ 随着 $u_{CE}$ 增大略有增大，曲线略有上翘。

2）饱和区

晶体管工作在饱和区的条件是发射结正偏且发射结压降大于开启电压、集电结正偏。$i_C$ 受 $u_{CE}$ 显著控制的区域，该区域内 $u_{CE}$ 的数值较小，一般 $u_{CE}<0.7$V(硅管)。晶体管输出特性曲线中的虚线是饱和区与放大区的临界线，小功率管在 $u_{CE}=u_{BE}$(即 $u_{CB}=0$V)时，可认为是饱和区与放大区的分界点。饱和区 C、E 之间的压降 $u_{CE}$ 称为饱和压降 $u_{CES}$，小功率管的饱和压降 $u_{CES}\approx 0.3$V。

3）截止区

晶体管工作在截止区的条件是发射结反偏、集电结反偏。工程上常把 $i_B=0$ 的那条输出特性曲线以下的区域称为截止区。$i_C=I_{CEO}$，但小功率管的穿透电流 $I_{CEO}$ 很小，可以忽略它的影响。

## 3.1.5　晶体管的主要参数

晶体管的参数可用来表征其性能的优劣和适应范围，是合理选择和正确使用晶体管的依据。这里只介绍在近似分析中最常用的主要参数，它们均可在半导体器件手册查到。

### 1. 电流放大系数 $\beta$ 和 $\alpha$

电流放大系数有共射电流放大系数 $\beta$ 和共基电流放大系数 $\alpha$，其定义前面已经详细介绍，在此不再赘述。

### 2. 集电结反向饱和电流 $I_{CBO}$ 和穿透电流 $I_{CEO}$

集电结反向饱和电流 $I_{CBO}$ 和集电极与发射极之间的穿透电流 $I_{CEO}$ 统称为极间反向电流。穿透电流和集电结反向饱和电流之间关系为 $I_{CEO}=(1+\beta)I_{CBO}$。一般 $I_{CBO}$ 的值很小，小功率硅管 $I_{CBO}$ 小于 1μA，锗管的 $I_{CBO}$ 约为 10μA。因 $I_{CBO}$ 是随温度增加而增加的，因此在温度变化范围大的工作环境应选用硅管。

### 3. 特征频率

由于晶体管发射结和集电结均有 PN 结电容效应，$\beta$ 是所加信号频率的函数。当晶体管工作频率高到一定程度时，电流放大系数 $\beta$ 不仅数值下降，而且产生相移。当 $\beta$ 幅值下降到 1 时的工作频率称为晶体管的特征频率，常用符号 $f_T$ 表示。

### 4. 极限参数

1）最大允许集电极电流 $I_{CM}$

当集电极电流增加时，$\beta$ 将会减小。$\beta$ 值下降到一定值时的 $I_C$ 即为 $I_{CM}$。当 $I_C>I_{CM}$ 时，并不表示三极管会损坏，但 $\beta$ 值将过小，放大能力太差。

2）最大允许集电极功耗 $P_{CM}$

$P_{CM}$ 表示集电极上允许功率损耗的最大值，超过这个值时，管子因集电结发热、升温而性能变差，甚至烧毁。$P_{CM}$ 的表达式为

$$P_{CM}=i_C u_{CE} \tag{3.1.20}$$

根据 $P_{CM}$ 的表达式，可以在晶体管输出特性曲线上画出晶体管的允许功率损耗线，超过此线区域称为过损耗区，如图 3.1.8 所示。

$P_{CM}$ 值与环境温度有关，温度越高，则 $P_{CM}$ 值越小。使用大功率晶体管时必须注意使用条件，如对散热片的要求等。

3）极间反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$

晶体管的某一电极开路时，另外两个电极所允许加的最高反向电压即为极间反向击穿电压，超过规定值的管子发生击穿现象。当发射极开路时，集电极与基极之间即集电结的反向击穿电压用 $U_{(BR)CBO}$ 表示。当基极开路时，集电极与发射极之间的击穿电压用 $U_{(BR)CEO}$ 表示。当集电极开路时，基极与发射极分之间的反向击穿电压用 $U_{(BR)EBO}$ 表示。

为了使晶体管能安全工作，在应用中必须使它的集电极工作电流小于 $I_{CM}$，集电极-发射极间的电压小于 $U_{(BR)CEO}$，集电极耗散功率小于 $P_{CM}$，即上述 3 个极限参数决定了晶体管的安全工作区，如图 3.1.8 所示。

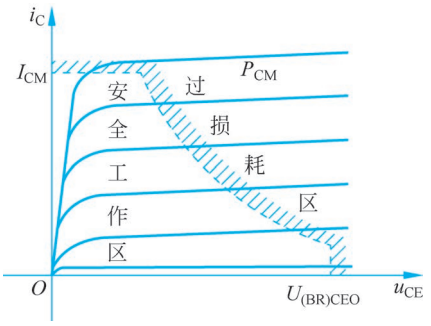



图 3.1.8 晶体管的极限参数

## 3.1.6 温度对晶体管特性及参数的影响

### 1. 温度对晶体管参数的影响

由于半导体具有温度特性，晶体管的参数几乎都与温度有关。

$$I_{CBO}(T℃)=I_{CBO}(T_1℃)2^{\frac{T-T_1}{10}}\quad(T>T_1) \tag{3.1.21}$$

表明温度升高 10℃ 时，$I_{CBO}$ 将增大约 1 倍。

$$\frac{\Delta U_{BE}}{\Delta T}=-\frac{2.5\text{mV}}{1℃} \tag{3.1.22}$$

表明温度升高 1℃，$U_{BE}$ 减小 2.5mV，并具有负温度系数。

共射电流放大系数 $\bar{\beta}$ 的相对变化 $\Delta\bar{\beta}$ 与温度变化 $\Delta T$ 之间的关系为

$$\frac{\Delta\bar{\beta}}{\bar{\beta}}\cdot\frac{1}{\Delta T}=\frac{0.5\%\sim 1\%}{1℃} \tag{3.1.23}$$

这表明，温度每升高 1℃，$\beta$ 值增大 0.5%～1%。

**2. 温度对晶体管特性的影响**

当温度升高时，发射结导通电压减小，输入特性曲线向左移动，如图 3.1.9 所示。也就是说，当发射结电压不变时，温度增高，基极电流增大。

当温度升高时，$I_{CBO}$、$I_{CEO}$、$\beta$ 都将增大，结果将导致晶体管输出特性曲线向上移动，而且各条曲线间的距离增大，如图 3.1.10 中的虚线所示。

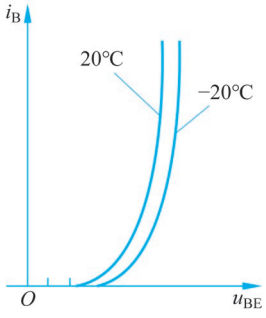



图 3.1.9 温度对晶体管输入特性的影响

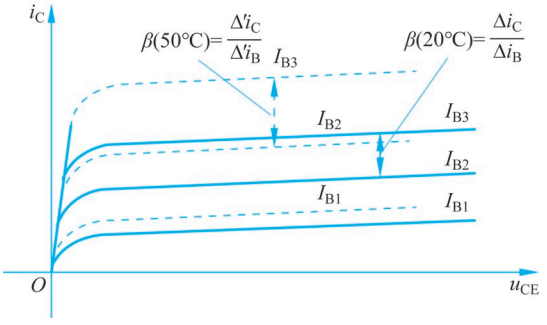



图 3.1.10 温度对晶体管输出特性的影响

## 3.1.7 晶体管的命名方法

国产晶体管型号的命名方法与二极管器件型号一样，也是由五部分组成，如图 3.1.11 所示。

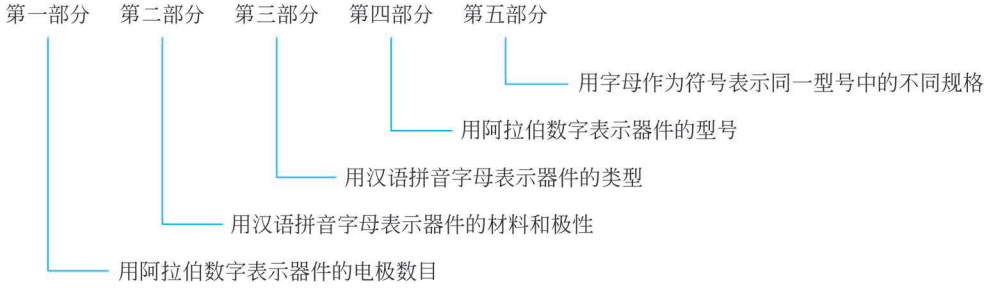



图 3.1.11 国产晶体管的命名方法

第一部分：用阿拉伯数字表示器件的电极数目，数字 3 表示晶体管，因为晶体管有三个电极。

第二部分：用汉语拼音字母表示器件的材料，A 表示 PNP 型锗材料，B 表示 NPN 型锗材料，C 表示 PNP 型硅材料，D 表示 NPN 型硅材料。

第三部分：用汉语拼音字母表示器件的种类，如 X 表示低频小功率管，A 表示高频大功率管，G 表示高频小功率管，D 表示低频大功率管。

第四部分：用阿拉伯数字表示器件的型号，依据型号可以根据半导体手册查出对应型号晶体管的特性参数。

第五部分：用字母作为符号表示同一型号中的不同规格。

美国产晶体管命名方法与二极管一样，器件型号也是由 3 部分组成，第一部分用数字 2 表示半导体器件内部有两个 PN 结，其他两部分与二极管的相同，如晶体管 2N5551 等。

晶体管 3DG100 的主要特性如表 3.1.1 所示。晶体管 2N5551 的主要特性如表 3.1.2 所示。

**表 3.1.1 晶体管 3DG100 主要特性**

| 型号 | 极限参数 | | | | 直流参数 | | | | 交流参数 | β 色标分档 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P_{CM}$/mW | $I_{CM}$/mA | $U_{(BR)CEO}$/V | $U_{(BR)CBO}$/V | $I_{CBO}$/A | $I_{CEO}$/μA | $I_{EBO}$/μA | β | $f_T$/MHz | |
| 3DG100A | 100 | 0 | ≥20 | ≥30 | ≤0.01 | ≤0.01 | ≤0.01 | ≥30 | ≥150 | 红：30～60<br>绿：50～110；<br>蓝：90～160；<br>白：>150 |
| 3DG100B | 100 | 0 | ≥30 | ≥40 | ≤0.01 | ≤0.01 | ≤0.01 | ≥30 | ≥150 | |
| 3DG100C | 100 | 0 | ≥20 | ≥30 | ≤0.01 | ≤0.01 | ≤0.01 | ≥30 | ≥300 | |
| 3DG100D | 100 | 0 | ≥30 | ≥40 | ≤0.01 | ≤0.01 | ≤0.01 | ≥30 | ≥300 | |
| 3DG201 | 100 | 0 | ≥30 | ≥30 | ≤0.01 | ≤0.01 | ≤0.01 | ≥55 | ≥100 | |
| 测试条件 | | | $I_C$=100mA | $I_C$=100mA | $U_{CB}$=10V | $U_{CE}$=10V | $U_{EB}$=1.5V | $U_{CE}$=10V<br>$I_C$=3mA | $U_{CB}$=10V<br>$I_C$=3mA<br>$f$=100MHz<br>$R_L$=5Ω | |

**表 3.1.2 晶体管 2N5551 主要特性**

| 符号 | 参数 | 测试条件 | 最小值 | 最大值 | 单位 |
|---|---|---|---|---|---|
| 反向电压和电流特性 | | | | | |
| $U_{(BR)CEO}$ | 集电极-发射极反向击穿电压 | $I_C$=100mA，$I_B$=0 | 160 | | V |
| $U_{(BR)CBO}$ | 集电极-基极反向击穿电压 | $I_C$=100μA，$I_E$=0 | 180 | | V |
| $U_{(BR)EBO}$ | 发射极-基极反向击穿电压 | $I_E$=10μA，$I_C$=0 | 6.0 | | V |
| $I_{CBO}$ | 集电结反向饱和电流 | $U_{CB}$=120V，$I_E$=0 | | 50 | nV |
| | | $U_{CB}$=120V，$I_E$=0<br>$T_A$=100℃ | | 50 | μA |
| $I_{EBO}$ | 发射结反向饱和电流 | $U_{CB}$=120V，$I_E$=0 | | 50 | nA |
| 正常放大特征 | | | | | |
| β | 直流电流增益 | $I_C$=1mA，$U_{CE}$=5.0V | 80 | | |
| | | $I_C$=10mA，$U_{CE}$=5.0V | 80 | 250 | |
| | | $I_C$=50mA，$U_{CE}$=5.0V | 30 | | |

注：除非其他说明，测试温度 $T_A$=25℃。

**例 3.1.1** 测得某放大电路中处于放大状态的晶体管的 3 个电极对地电位分别为 3.5V、2.8V、5V，试判别此管的 3 个电极，并说明此晶体管是 NPN 型管还是 PNP 型管。

**解：** 当晶体管处于放大状态时，必定满足发射结正偏导通，集电结反偏截止，因此 3 个电极的电位大小对 NPN 型管为 $U_C>U_B>U_E$，对 PNP 型管为 $U_C<U_B<U_E$，中间电位者必为基极 B，故 3.5V 对应基极 B。由 3.5V−2.8V=0.7V 可知，2.8V 对应发射极 E，则 5V 对应集电极 C，为 NPN 管。

**例 3.1.2** 在一个单管放大电路中，电源电压为 30V，已知 3 只管子的参数如表 3.1.3 所示，请选用一只管子，并简述理由。

**解：** 虽然 $T_1$ 管 $I_{CBO}$ 最小，即温度稳定性好，但 $\beta$ 很小，放大能力差，所以不宜选用。虽然 $T_3$ 管 $I_{CBO}$ 较小且 $\beta$ 较大，但因晶体管的工作电源电压为 30V，而 $T_3$ 的 $U_{CEO}$ 仅为 20V，工作

过程中有可能使 $T_3$ 击穿,所以不能选用。虽然 $T_2$ 管 $I_{CBO}$ 最大,但 $\beta$ 较大,且 $U_{CEO}$ 大于电源电压,所以 $T_2$ 最合适。

表 3.1.3 例 3.1.2 的晶体管参数表

| 晶 体 管 | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ |
|---|---|---|---|
| $I_{CBO}/\mu A$ | 0.01 | 0.1 | 0.05 |
| $U_{CEO}/V$ | 50 | 50 | 20 |
| $\beta$ | 15 | 100 | 100 |

**讨论:**

(1) 为使晶体管工作在放大状态,两个 PN 结各应处于何种偏置?

(2) 试列表比较晶体管放大、饱和、截止工作时的偏置方式和工作特点。

(3) 与 NPN 管相比,PNP 管在结构、符号、电路接法和特性等方面有何异同?

(4) 能否将晶体管的发射极 E、集电极 C 交换使用?为什么?

(5) 如何用一台电阻表(模拟型)判断晶体管的 3 个电极 E、B、C?

(6) 现已测得某电路中 4 只硅材料 NPN 型晶体管 3 个极的对地电位如表 3.1.4 所示,各晶体管 b-e 间开启电压 $U_T$ 均为 0.5V。试分别说明各管子的工作状态。

表 3.1.4 4 只晶体管电极对地电位

| 晶 体 管 | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$ |
|---|---|---|---|---|
| 基极对地电位 $U_B/V$ | −0.7 | −1 | 1 | 0 |
| 发射极对地电位 $U_E/V$ | 0 | −0.3 | 1.7 | 0 |
| 集电极对地电位 $U_C/V$ | −5 | −0.7 | 0 | 15 |
| 工作状态 | | | | |

(7) 用几个参数可以确定晶体管的安全工作区?

(8) 温度变化时,会影响晶体管的哪些参数?

## 3.2 晶体管放大电路的工作原理及基本分析方法

基本放大电路一般是指由一个晶体三极管与相应元件组成的放大电路。该电路将直流电源提供的能量经过三极管的控制得到输出信号,将能量提供给负载,在输出端得到无失真的输出信号。本节先以共射极放大电路为例介绍晶体管放大电路的组成、工作原理及基本的静态及动态分析方法。

视频 11
基本共射极放大电路

### 3.2.1 放大电路的工作原理

#### 1. 放大电路的基本组成

本节将以 NPN 管组成的共射组态放大电路为例,说明放大电路的基本组成。图 3.2.1 是典型的共射组态放大电路,电路中各器件的作用如下。

晶体管 $T_1$ 是核心元件,起电流放大作用。直流电压源 $V_{CC}$、通过基极电阻 $R_B$、晶体管发射结到参考地构成输入直流回路,给晶体管发射结提供合适正向

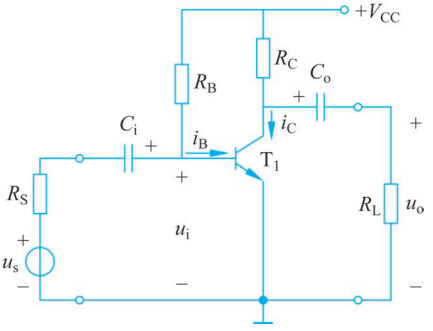



图 3.2.1 典型的共射组态放大电路

偏置电压，并使晶体管工作在线性区。直流电压源 $V_{CC}$ 经过晶体管的集电结、发射结分后到达参考地，构成输出直流输出回路，给集电结提供反向偏压同时为负载提供能量；另外负载电阻 $R_L$ 和集电极电阻 $R_C$ 将变化的集电极电流转换为变化的电压输出。输入耦合电容 $C_i$ 保证信号加到发射结，不影响发射结偏置。输出耦合电容 $C_o$ 保证信号输送负载，不影响集电结偏置。

### 2. 静态和动态

图 3.2.1 中的输入信号 $u_s$ 为正弦信号。在晶体管放大电路中是交流、直流电量共存，交流信号叠加在直流电量上。分析或设计晶体管的放大电路时，先确定直流电量，后分析交流性能。

静态是输入信号 $u_s=0$ 时，放大电路的工作状态，也称直流工作状态。放大电路中的电压、电流都是直流量。晶体管各电极的直流电流及各电极间的直流电压分别用 $I_B$、$I_C$、$U_{BE}$、$U_{CE}$ 表示，这些电流、电压的数值可用晶体管输入、输出特性曲线上的一个确定的点（静态工作点 $Q$）表示，因此常将上述 4 个直流电量写成 $I_{BQ}$、$I_{CQ}$、$U_{BEQ}$、$U_{CEQ}$。

动态是输入信号 $u_s\neq0$ 时，放大电路的工作状态，也称交流工作状态。

放大电路建立正确的静态，是保证动态工作的前提。由 $Q$ 点位置可以很直观地看出静态点是否位于放大区，并能看出不失真放大信号时的动态范围大不大，因此确定合适的 $Q$ 点很重要，应该将 $Q$ 点设置于放大区，并有足够大的动态范围。

分析放大电路必须要正确地区分静态和动态，正确地区分直流通道和交流通道。

直流通路是指放大电路中能通过直流信号的通路。直流通路的画法如下：

（1）将放大电路中的耦合电容和旁路电容开路；

（2）令所有的交流信号源为 0。

图 3.2.2 为如图 3.2.1 所示电路的直流通路。

交流通路是指放大电路中能通过交流信号的通路。交流通路的画法如下：

（1）因 $C_i$、$C_o$ 足够大，其上的交流压降近似为零，故将放大电路中电容视作短路。

（2）对交流信号，电路中内阻很小的直流电压源可视为短路；内阻很大的电流源可视为开路。

图 3.2.3 为如图 3.2.1 所示电路的交流通路。

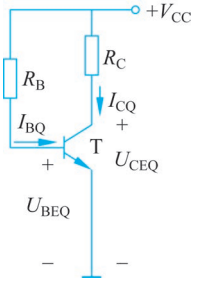



图 3.2.2　图 3.2.1 所示电路的直流通路

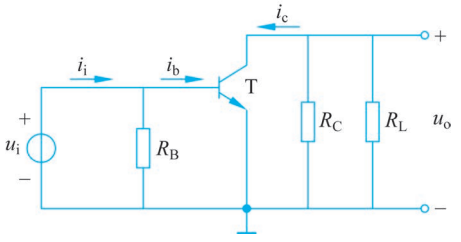



图 3.2.3　图 3.2.1 所示电路的交流通路（令 $R_s=0$）

### 3. 放大原理

图 3.2.1 中输入正弦信号 $u_i$（$u_i=u_s$，令 $R_s=0$）后，电路处于动态工作状态。晶体管各极的电流及电压都将在直流分量基础上叠加交流分量，放大电路中的信号既有直流又有交流。

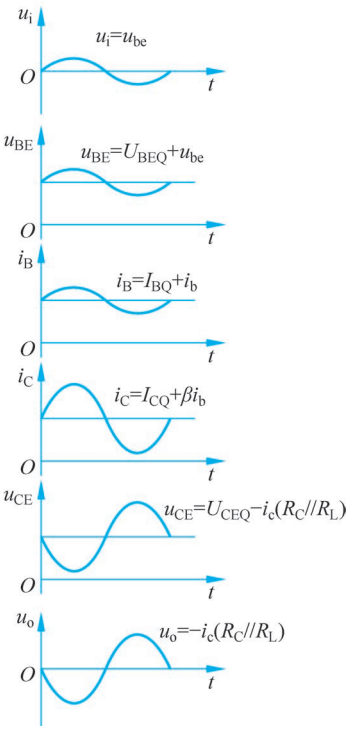



图 3.2.4 共射组态基本放大电路工作波形

放大电路中各信号波形及其相互关系如图 3.2.4 所示。显然图中只有输入 $u_i$ 和输出 $u_o$ 是交流信号，其他信号都是交直流混合信号。

在图 3.2.4 中，各直流分量含义如下：

$U_{BEQ}$ 表示发射结的直流电压；

$I_{BQ}$ 表示基极的直流电流；

$I_{CQ}$ 表示集电极的直流电流。

交流分量含义如下：

$u_i$ 表示输入端加在发射结的交流电压；

$i_b$ 表示基极的交流电流；

$i_c$ 表示集电极的交流电流。

交直流分量含义如下：

$u_{BE}$ 表示发射结交直流电压；

$i_B$ 表示基极交直流电流；

$i_C$ 表示集电极交直流电流。

在本书中，大写字母、大写下标表示直流分量，如 $I_B$ 表示直流电流；小写字母、小写下标表示交流分量，如 $i_b$ 表示交流电流；小写字母、大写下标表示交直流混合分量，如 $i_B$ 表示交直流电流。

**讨论：**

（1）为什么要设置静态工作点？

（2）何谓直流通路和交流通路？直流通路和交流通路有何用途？画直流通路、交流通路的要点是什么？

（3）在如图 3.2.1 所示的电路中，若分别出现下列故障，则电路还能正常放大吗？简述理由。

A. $R_B$ 短路　　B. $R_B$ 开路　　C. $R_C$ 短路

D. $R_C$ 开路　　E. $C_i$ 短路　　F. $V_{CC}$ 接反

## 3.2.2 放大电路的静态分析方法

下面介绍工程分析过程中常用的解析法和图解法。

### 1. 解析法

分析过程中，已知发射结导通压降 $U_{BEQ}$ 和共射组态的电流增益 $\beta$，其中小功率硅管一般取 $U_{BEQ}\approx 0.7\text{V}$，锗管一般取 $U_{BEQ}\approx 0.3\text{V}$。

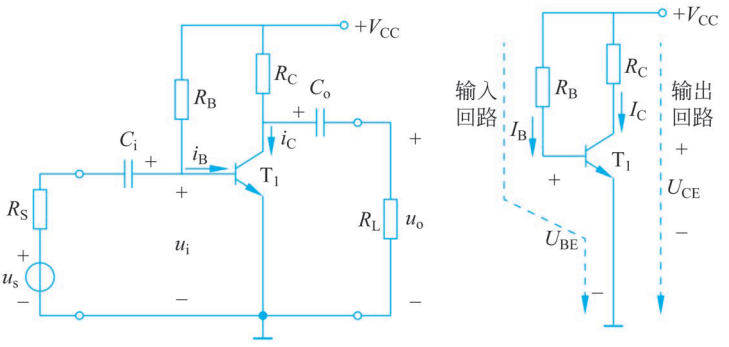
计算放大电路静态工作点 $Q$ 的步骤如下：

（1）画放大电路的直流通路，在直流通路图中标出各电流的参考方向和电压参考方向。通常发射极、基极、集电极的电流的参考方向与其直流电流实际的方向一致。

（2）根据输入回路和输出回路列写输入回路和输出回路电压方程，同时利用晶体管的电流增益关系，解方程得到静态工作点 $Q(I_{BQ}、I_{CQ}、U_{CEQ})$。

放大电路的直流通路如图 3.2.5(b)所示。根据输入回路列写输入回路电压方程为

$$I_{BQ}R_B+U_{BEQ}=V_{CC} \tag{3.2.1}$$




(a) 共射组态基本放大电路　　(b) 直流通道

图 3.2.5　共射组态放大电路及直流通道

解方程得基极静态电流为

$$I_{BQ}=\frac{V_{CC}-U_{BEQ}}{R_B} \tag{3.2.2}$$

其中，硅管取 $U_{BEQ}\approx 0.7\text{V}$，锗管 $U_{BEQ}\approx 0.3\text{V}$。

$$I_{CQ}=\beta I_{BQ} \tag{3.2.3}$$

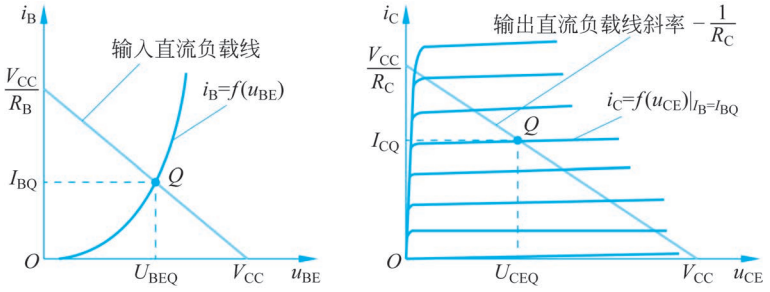
根据输出回路，计算 $U_{CEQ}$ 为

$$U_{CEQ}=V_{CC}-I_{CQ}R_C \tag{3.2.4}$$

**2. 图解法**

图解法就是在晶体管的特性曲线坐标系中通过作图的方法，求解静态工作点 $Q$（$I_{BQ}$、$I_{CQ}$、$U_{BEQ}$、$U_{CEQ}$）图解法分析计算静态工作点的步骤如下：

（1）画放大电路的直流通路，根据输入回路写出输入回路电压方程 $U_{BE}=V_{CC}-I_BR_B$，由此方程可作出一条斜率为 $-\dfrac{1}{R_B}$ 的直线，称其为输入直流负载线。在输入特性曲线坐标系中，绘制输入直流负载线与输入特性曲线 $i_B=f(u_{BE})$ 的交点就是所求的静态工作点 $Q$，其坐标值 $I_{BQ}$ 和 $U_{BEQ}$，如图 3.2.6(a)所示。




(a) 输入回路的图解分析　　(b) 输出回路的图解分析

图 3.2.6　图 3.2.5 共射组态放大电路静态图解分析

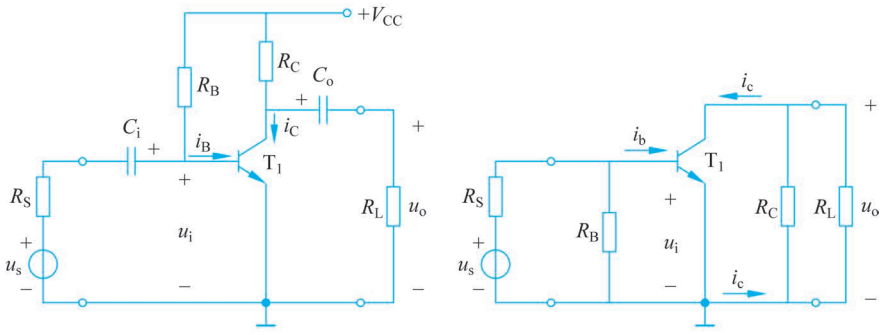
（2）根据输出回路列写输出回路电压方程 $U_{CE}=V_{CC}-I_CR_C$，由此方程可作出一条斜率为 $-1/R_C$ 的直线，称其为输出直流负载线。在输出特性曲线坐标系中，绘制输出直流负载线与输出特性曲线 $i_C=f(u_{CE})$ 的交点，其坐标值 $I_{CQ}$ 和 $U_{CEQ}$，如图 3.2.6(b)所示。

视频 12
BJT 的图解分析法

## 3.2.3　放大电路的动态分析方法一：图解法

**1. 交流负载线**

在图 3.2.7(a)中，晶体管的 C、E 间电压 $u_{CE}$ 为




(a) 共射组态基本放大电路　　(b) 交流通路

图 3.2.7　共射组态放大电路及交流通路

$$u_{CE}=U_{CEQ}+u_{ce} \tag{3.2.5}$$

其中，$U_{CEQ}$ 是 $u_{CE}$ 中的直流分量，$u_{ce}$ 是 $u_{CE}$ 中的交流分量。由图 3.2.7(b)可知，$u_{ce}=-i_c(R_C/\!/R_L)=-i_cR'_L$，其中，$R'_L=R_C/\!/R_L$。

将 $U_{CEQ}=V_{CC}-I_{CQ}R_C$、$u_{ce}=-i_cR'_L$ 表达式代入式(3.2.5)，得

$$u_{CE}=(V_{CC}-I_{CQ}R_C)-i_cR'_L \tag{3.2.6}$$

集电极电流 $i_c$ 为

$$i_c=i_C-I_{CQ} \tag{3.2.7}$$

将 $i_c=i_C-I_{CQ}$ 代入式(3.2.6)，得

$$u_{CE}=(V_{CC}-I_{CQ}R_C)-(i_C-I_{CQ})R'_L \tag{3.2.8}$$

式(3.2.8)经过变换，得

$$i_C=I_{CQ}-\frac{1}{R'_L}(V_{CC}-I_{CQ}R_C)-\frac{1}{R'_L}u_{CE} \tag{3.2.9}$$

在输出特性曲线坐标系中，根据式(3.2.9)绘制的 $i_c$ 与 $u_{CE}$ 关系曲线就是输出交流负载线，如图 3.2.8 所示，其斜率为 $-1/R'_L$。

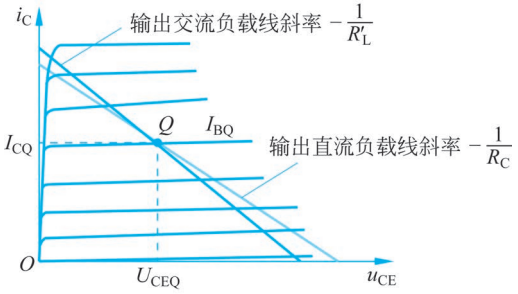



图 3.2.8　图 3.2.5 电路的交流负载线

因为 $R'_L<R_L$，直流负载线的斜率是 $-1/R_C$，交流负载线的斜率是 $-1/R'_L$，所以交流负载线要比直流负载线陡一些。另外，根据式(3.2.8)，当 $i_C=I_{CQ}$ 时，$u_{CE}=(V_{CC}-I_{CQ}R_C)-(i_C-I_{CQ})R'_L=U_{CEQ}$，这说明交流负载线与直流负载线有交点，交点就是静态工作点 $Q(I_{CQ}、U_{CEQ})$。

**2. 图解法分析步骤**

下面通过例题详细说明放大电路图解法的分析过程。

**例 3.2.1**　共射组态基本放大电路如图 3.2.9(a)所示，电路中晶体管输入特性曲线和输出特性曲线如图 3.2.9(b)、(c)所示。请用图解法分析最大输出电压、电压增益。

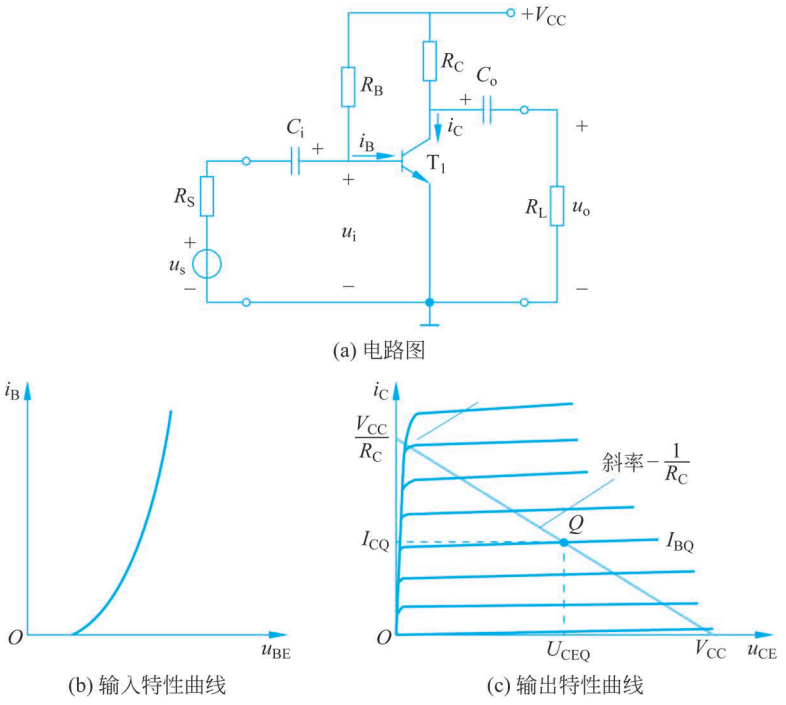



图 3.2.9　例 3.2.1 电路图及图中晶体管输入/输出特性曲线

**解：**

(1) 根据图 3.2.9(a)所示放大电路画其直流通路，如图 3.2.10(a)所示，根据输入回路和输出回路分别列写输入回路电压方程和输出回路电压方程，根据方程绘制输入直流负载线和输出直流负载线，求出静态工作点 $Q$ 的 $I_{BQ}$、$I_{CQ}$、$U_{BEQ}$、$U_{CEQ}$。如图 3.2.10(b)和(c)所示，其过程同 3.2.4 节，此处不再赘述。

(2) 根据如图 3.2.9(a)所示放大电路画其交流通路，如图 3.2.11(a)所示，求交流负载电阻 $R'_L=R_C/\!/R_L$，经过 $Q$ 点画斜率 $-1/R'_L$ 的交流负载线，如图 3.2.11(b)所示。

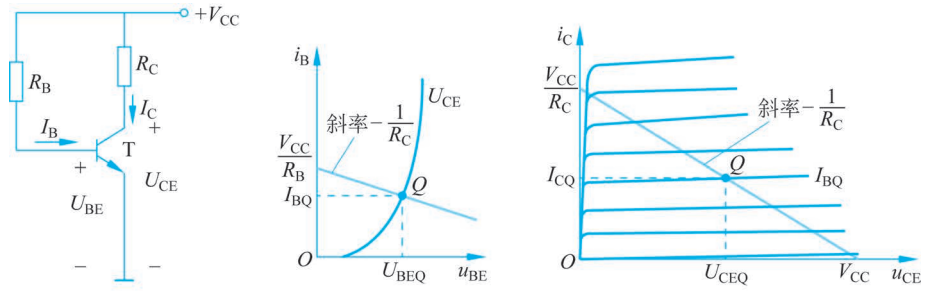
(3) 在输入特性曲线坐标系中，如图 3.2.12(a)所示，以静态工作点 $Q$ 为参考点，根据输入 $u_i$ 随时间变化的波形画出相应的基极电流 $i_b$ 随时间变化的波形，根据 $u_i$ 的峰值 $U_{im}$ 画出相应的基极电流峰值 $I_{bm}$；根据 $i_b$ 的动态范围确定 $i_B$ 的最大值由 $I_{B1}$ 和最小值 $I_{B2}$。

(4) 在输出特性曲线坐标系中，如图 3.2.12(b)所示，参数值 $I_{B1}$ 和 $I_{B2}$ 对应的两条输出特性曲线与交流负载线均有交点，这两个交点的纵轴坐标范围就是集电极电流 $i_C$ 的动态范围，两个交点的横轴坐标范围就是 $u_{CE}$ 的动态范围。根据 $i_C$ 和 $u_{CE}$ 的动态范围画出 $i_c$ 的波形和 $u_{ce}$ 的波形，确定 $i_c$ 的 $I_{cm}$ 幅度峰值和 $u_o$ 的幅度峰值 $U_{om}$。在确保交流信号在放大区范围内(即未进入截止区和饱和区)的情况下，确定允许输出电压的正向峰值 $U_{om1}$ 和负向峰值 $U_{om2}$。无明显饱和及截止失真电压峰值 $U_{om}=\min(U_{om1},U_{om2})$。

(5) 根据图 3.2.12(b)确定的输出电压最大值 $U_{om}$ 和如图 3.2.12(a)所示的输入电压最大值 $U_{im}$，计算电压增益为 $A_u=\dfrac{U_{om}}{U_{im}}$。

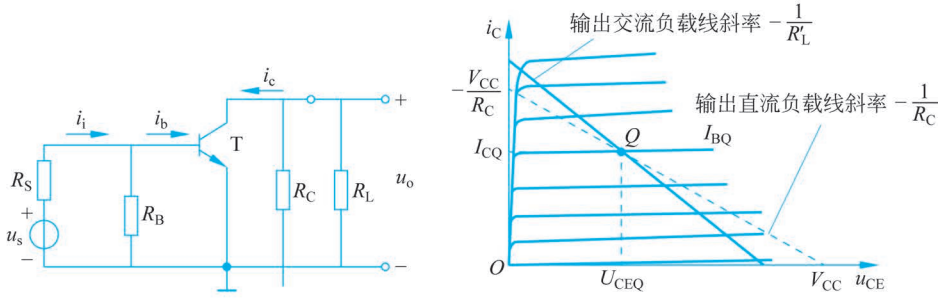
### 3. 放大电路的失真

由对图 3.2.12 的分析可知，要使放大电路能够不失真地放大输入信号，则必须设置合适的静态工作点 $Q$。为保证在交流信号的整个周期内，晶体管都处于放大区域内，不进入饱和区和截止区，静态工作点 $Q$ 的选择应满足下列条件：



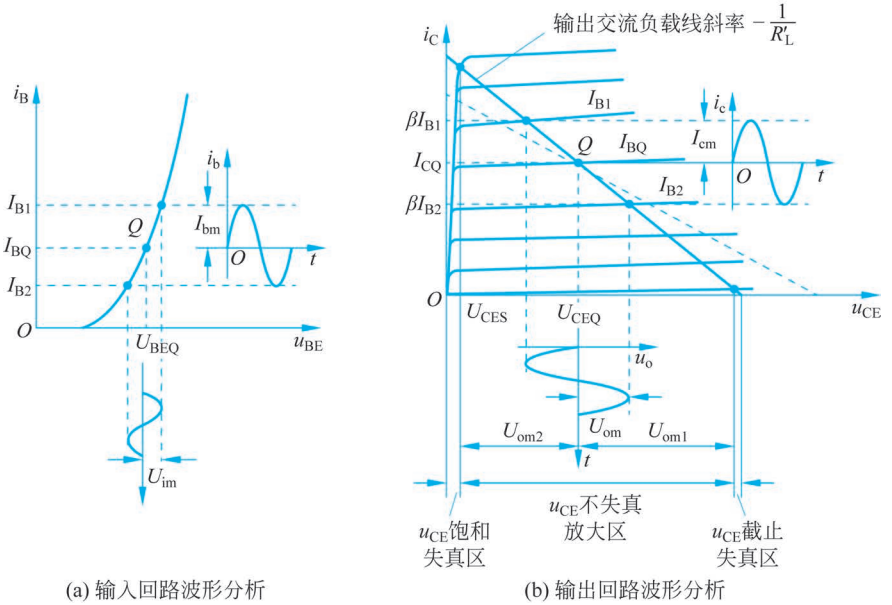

(a) 直流通道　(b) 输入特性曲线　(c) 输出特性曲线

图 3.2.10　例 3.2.1 静态图解分析




(a) 交流通道　(b) 交流负载线

图 3.2.11　例 3.2.1 交流通道及交流负载线



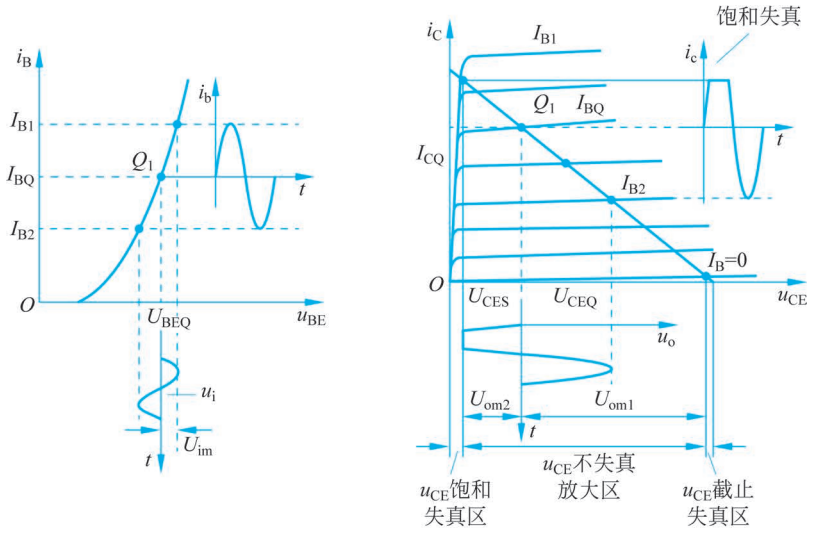

(a) 输入回路波形分析　(b) 输出回路波形分析

图 3.2.12　动态工作情况图解分析

$$U_{CEQ} > U_{om} + U_{CES}$$

及$I_{CQ} > I_{cm} + I_{CEO}$。其中，$I_{CEO}$ 是晶体管的穿透电流，$U_{CES}$ 是晶体管的饱和压降，对于小功率管，$U_{CES} \approx 0.3\text{V}$。

如图 3.2.13(b)所示，当静态工作点 $Q$ 设置过高时，用 $Q_1$ 表示，此时放大电路的工作点达到了晶体管的饱和区而引起的饱和失真，$u_o$ 底部产生失真，称为削底；$i_c$ 的顶部产生失真，称为顶部失真，称为削顶。

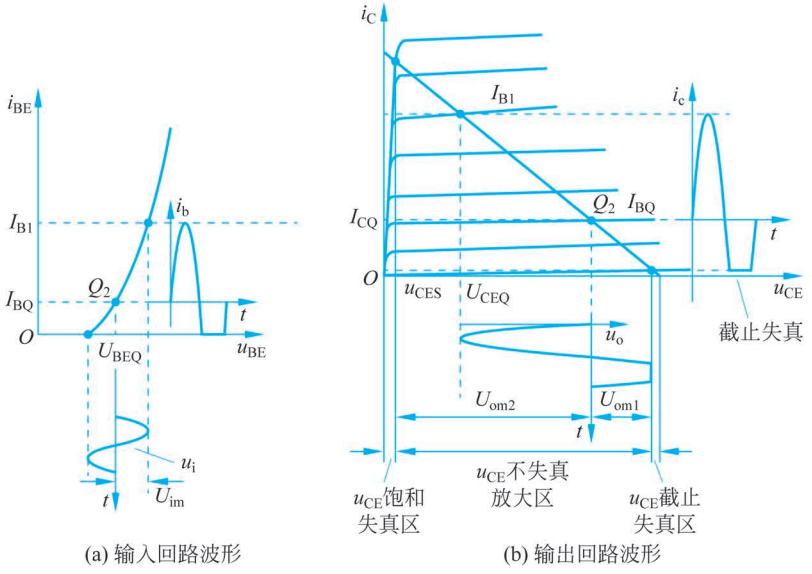



(a) 输入回路波形　　(b) 输出回路波形

**图 3.2.13　饱和失真的波形**

如图 3.2.14(b)所示，当静态工作点 $Q$ 设置过低时，用 $Q_2$ 表示，此时放大电路的工作点达到了晶体管截止区而引起的截止失真，输出电压 $u_o$ 顶部产生失真，称为削顶；输出电流 $i_c$ 的底部产生失真，称为削底。

饱和失真和截止失真称为非线性失真，都是因为放大电路的工作点设置不合适，进入了晶体管的非线性区而引起的失真。对于 PNP 管，由于是负电源供电，失真的表现形式与 NPN 管正好相反。




(a) 输入回路波形　　(b) 输出回路波形

**图 3.2.14　截止失真的波形**

为了减小或避免晶体管放大电路的非线性失真，必须合理地设置其静态工作点 $Q$。当输入信号 $u_i$ 较大时，应把 $Q$ 点设置在输出交流负载线的中点，这时可得到输出电压的最大动态范围。当 $u_i$ 较小时，为了降低电路的功率损耗，在不产生截止失真和保证一定的电压增益的前提下，可把 $Q$ 点选得低一些。

图解法比较直观，但由于作图很难准确，所以不易定量求解电压增益为 $A_u$，也不便于计算输入电阻 $R_i$ 和输出电阻 $R_o$。此外，图解法还适用大信号放大电路的动态分析，如功率放大电路最大不失真输出电压的分析。

**讨论：**

(1) 什么是截止失真？什么是饱和失真？简述这两种失真的原因与对策。

(2) 如何确定放大电路的最大动态范围？

(3) 在图 3.2.9(a)中，若晶体管替换为 PNP，直流电压换成负电电源，则饱和失真和截止失真时时输出电压波形的特点是什么？

视频 13 BJT 的小信号模型分析法

## 3.2.4 放大电路的动态分析方法二：等效电路法

### 1. 晶体管的 $h$ 参数小信号模型

晶体管具有非线性的输入特性和输出特性，是一个非线性器件，不能直接采用线性电路的分析方法来分析计算晶体管放大电路。工程上为了简化分析过程，认为晶体管工作在放大区，且信号为低频小信号时具有近似线性特征，此时晶体管的特性可用线性模型来替代，低频表示可以不考虑晶体管结电容对放大电路性能的影响。这时可以用一个线性化的小信号模型代替晶体管，从而将晶体管放大电路当作线性电路来分析。低频小信号模型也称为微变信号模型、混合(hybrid)参数模型，或直接称为 $h$ 参数模型。晶体管中参数模型是分析低频小信号放大电路性能的重要工具。

1) 晶体管的 $h$ 参数小信号模型

晶体管的 3 个电极在电路中可连接成一个二端口网络。共射基本放大电路可看成一个双端口网络。

对于晶体管双口网络，分别用 $i_B$ 与 $u_{BE}$ 和 $i_C$ 和 $u_{CE}$ 表示输入端口和输出端口的电压及电流。若以 $i_B$、$u_{CE}$ 作自变量，$u_{BE}$、$i_C$ 作因变量，由晶体管的输入、输出特性曲线可写出以下两个方程式：

$$u_{BE}=f_1(i_B,u_{CE}) \tag{3.2.10}$$

$$i_C=f_2(i_B,u_{CE}) \tag{3.2.11}$$

下面通过数学方法分析推导晶体管的低频小信号等效模型。

在输入为低频小信号的情况下，对于式(3.2.10)和式(3.2.11)表达的双端口特性函数，认为其在($i_B$，$u_{CE}$)各点可微分，分别进行全微分，有

$$\mathrm{d}u_{BE}=\left.\frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B}\right|_{U_{CE}}\mathrm{d}i_B+\left.\frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}}\right|_{I_B}\mathrm{d}u_{CE} \tag{3.2.12}$$

$$\mathrm{d}i_C=\left.\frac{\partial i_C}{\partial i_B}\right|_{U_{CE}}\mathrm{d}i_B+\left.\frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}}\right|_{I_B}\mathrm{d}u_{CE} \tag{3.2.13}$$

上式中 $\mathrm{d}u_{BE}$ 表示 $u_{BE}$ 的变化部分，工程分析时近似用 $\Delta u_{BE}$ 表示 $\mathrm{d}u_{BE}$，其他的微分变量同理，这样将式(3.2.12)和式(3.2.13)整理为

$$\Delta u_{BE}=\left.\frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B}\right|_{U_{CE}}\Delta i_B+\left.\frac{\Delta u_{BE}}{\Delta u_{CE}}\right|_{I_B}\Delta u_{CE} \tag{3.2.14}$$

$$\Delta i_C=\left.\frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}\right|_{U_{CE}}\Delta i_B+\left|\frac{\Delta i_C}{\Delta u_{CE}}\right|_{I_B}\Delta u_{CE} \tag{3.2.15}$$

定义式(3.2.14)和式(3.2.15)中 4 个 $h$ 参数的物理含义如下：

$h_{ie}=\left.\dfrac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B}\right|_{U_{CE}}$，$h_{ie}$ 表示晶体管在共射组态时的输入电阻或动态(交流)电阻，也常表示为 $r_{be}$；

$h_{re}=\left.\dfrac{\Delta u_{BE}}{\Delta u_{CE}}\right|_{I_B}$，$h_{re}$ 表示晶体管在共射组态时的反向电压传输系数，也称电压反馈系数，也常表示为 $\mu_T$；

$h_{fe}=\left.\dfrac{\Delta i_C}{\Delta i_B}\right|_{U_{CE}}$，$h_{fe}$ 表示晶体管共射组态电流增益，即 $\beta$；

$h_{oe}=\left.\dfrac{\Delta i_C}{\Delta u_{CE}}\right|_{I_B}$，$h_{oe}$ 表示晶体管 CE 组态时的输出电导，也常表示为 $\dfrac{1}{r_{ce}}$，$r_{ce}$ 称为输出电阻。

$h_{ie}$、$h_{re}$、$h_{fe}$ 和 $h_{oe}$ 统称为共射组态晶体管的 $h$ 参数，由于 4 个 $h$ 参数具有不同的量纲，所以称为混合(hybrid)参数。参数中下方的“e”表示共射组态晶体管的 $h$ 参数。

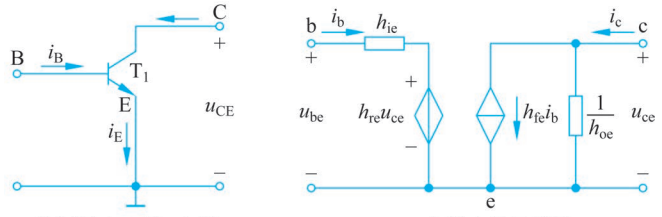
需要特别说明，由于共射组态 $h$ 参数是根据晶体管特性曲线分析整理的结果，无论什么组态，其特性曲线是晶体管固有的、不会改变的，所以由此得到的共射组态 $h$ 参数可以用来分析所有组态的晶体管的放大电路。

对于低频小信号放大电路，若输入为低频小幅值的正弦波信号，式(3.2.14)和式(3.2.15)中各变量的微变量可以用其交流瞬时变量替代，如用 $u_{be}$ 表示 $\Delta u_{BE}$，则式(3.2.14)和式(3.2.15)可整理为

$$u_{be}=h_{ie}i_b+h_{re}u_{ce} \tag{3.2.16}$$

$$i_c=h_{fe}i_b+h_{oe}u_{ce} \tag{3.2.17}$$

上式中输入电压 $u_{be}$ 和输出电流 $i_c$ 与 $i_b$、$u_{ce}$ 的函数关系用电路符号描述时如图 3.2.15(b)所示，称其为共射组态晶体管的 $h$ 参数等效电路，或称其为 $h$ 参数小信号模型。




(a) 共射组态双端口网络　　(b) $h$参数小信号模型

图 3.2.15　晶体管共射组态双口网络及 $h$ 参数小信号模型

2) $h$ 参数小信号模型的简化

通常情况下，反向传输系数 $h_{re}$ 非常小，一般小于 $10^{-4}$，工程分析时可忽略，近似认为是 0；图 3.2.15 中 $h_{oe}=\dfrac{1}{r_{ce}}$，若输出电阻 $r_{ce}$ 为无穷大，则可视为开路，实际的电阻 $r_{ce}$ 一般在几百千欧以上，工程分析时也常忽略不计，视其为开路。这样图 3.2.15(b)中的参数简化模型如图 3.2.16 所示。在晶体管放大电路分析过程中经常要用到这个模型。

3) $h$ 参数值的确定

$h$ 参数小信号简化模型中只有两个参数，一个是输入电阻 $h_{ie}$(即 $r_{be}$)；另一个参数是共射电流 $h_{fe}$(即 $\beta$)，对于确定型号的晶体管，其电流增益是常数 $\beta$。

下面对输入电阻 $r_{be}$ 进行分析。

晶体管内部结构模型如图 3.2.17 所示，在低频小信号情况下，忽略晶体管发射结 $C_{b'e'}$ 和

集电结的结电容 $C_{b'c'}$。

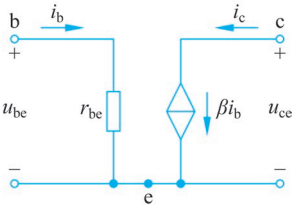



图 3.2.16 晶体管 $h$ 小信号参数简化模型

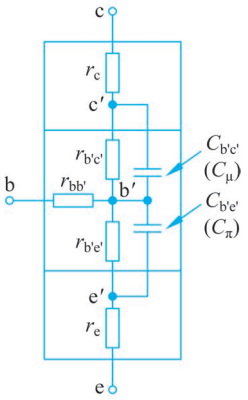



图 3.2.17 晶体管内部结构模型

图 3.2.17 中各参数的含义如下：

- $r_{bb'}$是基区体电阻，对于小功率的晶体管，约为几十欧至几百欧；
- $r_e$ 是发射区体电阻，仅为几欧甚至更小，通常忽略不计；
- $r_{b'e'}$是发射结正向电阻。

当用晶体管的 $h$ 参数小信号模型替代放大电路中的晶体管，对电路进行交流分析时，必须首先求出晶体管在静态工作点 $Q$ 处的 $h$ 参数值。$h$ 参数值可以从晶体管的特性曲线上求得，也可用 $h$ 参数测试仪或晶体管特性图示仪测得。此外，$r_{be}$ 可由下面的表达式求得

$$r_{be}=r_{bb'}+(1+\beta)r_{b'e'} \tag{3.2.18}$$

根据 PN 结电流方程，可以推导出 $r_{b'e'}=U_T/I_{EQ}$，在常温 $T=300\text{K}$ 时，$U_T\approx 26\text{mV}$，所以常温下，式(3.2.18)可写成

$$r_{be}=r_{bb'}+(1+\beta)\frac{U_T}{I_{EQ}} \tag{3.2.19}$$

$r_{be}$ 一般比较小，通常情况下为几百欧至几千欧。显然输入电阻与静态工作点 $I_{EQ}$ 有关。

PNP 型晶体管与 NPN 型晶体管的 $h$ 小信号参数模型是相同的。

利用晶体管 $h$ 小信号参数模型可以计算放大电路的电压增益 $A_u$、输入电阻 $R_i$ 和输出电阻 $R_o$。

由于在计算 $r_{be}$ 时需要知道静态工作点 $I_{EQ}$，所以在分析放大电路增益、输入和输出电阻等参数时，首先需要计算放大电路的静态工作点 $I_{EQ}$，之后的分析步骤如下：

(1) 画放大电路的交流通路；

(2) 将交流通路中的晶体管用 $h$ 小信号参数模型取代，得到放大电路的低频小信号等效电路图；

(3) 标出等效电路图中电压、电流关联参考方向，进行交流分析。

需要特别说明的是，晶体管是电流控制元件，集电极电流 $i_c=\beta i_b$，受控电流源和控制电流的方向是有关联的，在放大电路的低频小信号等效电路图中标识集电极电流 $i_c$ 和基极电流 $i_b$ 的参考方向时，一定要注意二者的关联关系。在如图 3.2.16 所示的晶体管 $h$ 参数模型中，图中标出的 $i_c$ 和 $i_b$ 的参考方向是二者的瞬时关联参考方向，适用于任何晶体管放大电路组态和任何晶体管类型的放大电路的性能分析。

**2. 微变等效电路的分析步骤**

(1) 分析静态工作点，确定其是否合适，如不合适应进行调整；

(2) 画出放大电路的低频小信号等效电路，并根据式(3.2.19)求出 $r_{be}$；

(3) 根据要求求解动态参数 $A_u$、$R_i$ 和 $R_o$。

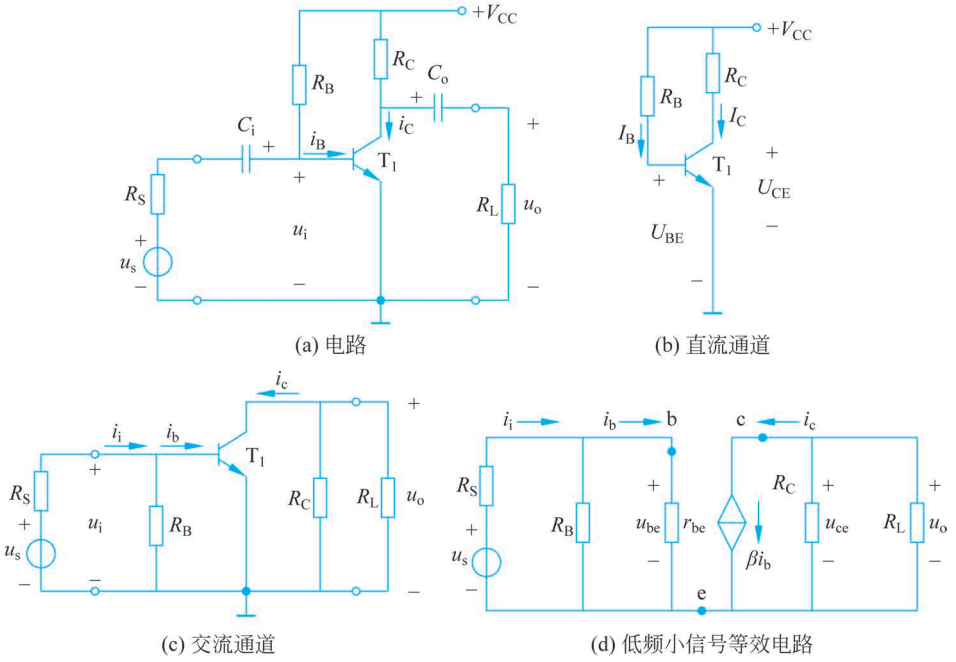
综上所述，对于放大电路的分析应遵循“先静态，后动态”的原则，静态分析时应利用直流通路，动态分析时应利用交流通路或交流等效电路。只有在静态工作点合适的情况下，动态分析才有意义。图解法形象直观，适于对 $Q$ 点的分析和失真的判断；等效电路法简单，适于动态参数的估算。

**例 3.2.2**　在图 3.2.18(a)所示电路中，$V_{CC}=15\text{V}$，$R_B=750\text{k}\Omega$，$R_C=3\text{k}\Omega$，$R_L=3\text{k}\Omega$，$R_S=1\text{k}\Omega$，晶体管的 $\beta=150$，$r_{bb'}=200\Omega$，设电容 $C_1$、$C_2$ 足够大。试求：

(1) 静态工作点 $Q$；

(2) $R_i$、$R_o$ 和 $A_u$。

**解：**如图 3.2.18(a)所示电路的直流通路、交流通路和低频小信号等效电路如图 3.2.18(b)～(d)所示。




(a) 电路　(b) 直流通道

(c) 交流通道　(d) 低频小信号等效电路

图 3.2.18　例 3.2.2 的电路图

(1) 计算静态工作点 $Q$。

根据图 3.2.18(b)，由基极输入回路可得

$$I_{BQ}R_B+U_{BEQ}=V_{CC}$$

基极静态电流为

$$I_{BQ}=\frac{V_{CC}-U_{BEQ}}{R_B}\approx\frac{V_{CC}}{R_B}=\frac{15\text{V}}{750\text{k}\Omega}=0.02\text{mA}$$

根据集电极电流和基极电流的控制关系，可得

$$I_{CQ}=\beta I_{BQ}=150\times0.02\text{mA}=3\text{mA}$$

由集电极输出回路，可得

$$U_{CEQ}=V_{CC}-I_{CQ}R_C=(15-3\times3)\text{V}=6\text{V}$$

(2) 求 $R_i$、$R_o$ 和 $A_u$。

根据式(3.2.19)先求出 $r_{be}$ 为

$$I_{EQ} \approx I_{CQ} = 3\text{mA}$$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1+\beta)\frac{U_T}{I_{EQ}} \approx 200 + (1+150) \times \frac{26}{3} = 1.5\text{k}\Omega$$

根据图 3.2.18(d),可知输入电压为

$$u_i = i_b r_{be}$$

输出电压为

$$u_o = -i_c(R_C \,/\!/\, R_L) = -\beta i_b(R_C \,/\!/\, R_L)$$

根据放大电路电压增益的定义,

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-i_c(R_C \,/\!/\, R_L)}{i_b r_{be}} = \frac{-\beta R'_L}{r_{be}} = -150 \times \frac{3 \,/\!/\, 3}{1.5} \approx -150$$

式中,$R'_L = R_C /\!/ R_L$

根据输入电阻和输出电阻的定义

$$R_i = R_B \,/\!/\, r_{be} \approx 1.5\text{k}\Omega$$

$$R_o = R_C = 3\text{k}\Omega$$

**讨论:**

(1) 如何求得晶体管小信号模型中 $r_{be}$ 和 $\beta$? 若用万用表的"Ω"挡测量 b、e 两极的电阻,是否为 $r_{be}$?

(2) 什么情况下可采用晶体管的小信号模型分析电路? 这种模型适用于 PNP 管吗? 画出晶体管的简化小信号模型。

(3) 简述采用小信号模型法分析晶体管放大电路的基本步骤。

## 3.3 晶体管放大电路的 3 种接法

由晶体管可构成共射、共集、共基 3 种基本组态放大电路。下面分别对这几种组态放大电路的性能进行分析。

视频 14 共射极放大电路

### 3.3.1 共射组态放大电路

#### 1. 电路的组成

由 NPN 型晶体管构成的共射组态放大电路如图 3.3.1 所示。待放大的输入信号源接到电路的输入端 1-1′,通过电容 $C_1$ 与放大电路相耦合,放大后的输出信号通过电容 $C_2$ 的耦合,输送到负载 $R_L$,$C_1$、$C_2$ 起到耦合交流、隔断直流的作用,为了使交流信号顺利通过,要求它们在输入信号频率下的容抗很小,常采用有极性的电解电容器,这样,对于交流信号,$C_1$、$C_2$ 可视为短路。

直流电源 $V_{CC}$ 通过 $R_{B1}$、$R_{B2}$、$R_C$、$R_E$ 使晶体管获得合适的偏置,为晶体管的放大作用提供必要的条件。$R_{B1}$、$R_{B2}$ 称为基极偏置电阻,$R_E$ 称为发射极电阻,$R_C$ 称为集电极负载电阻。$R_C$ 将晶体管集电极电流的变化转换成集电极电压的变化,从而实现信号的电压放大。与 $R_E$ 并联的电容 $C_E$,称为发射极旁路电容,用以短路交流,使 $R_E$ 对放大电路电压放大倍数不产生影响,故要求它对信号频率的容抗越小越好。因此,在低频放大电路中通常采用容量较大的电解电容器。

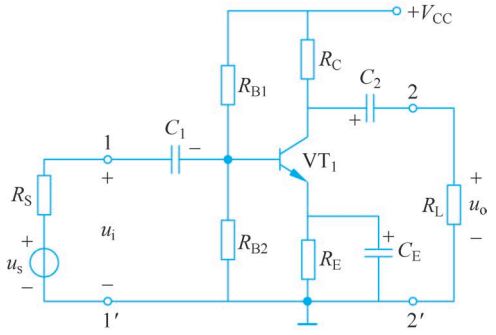



图 3.3.1　共射组态放大电路

## 2. 静态分析

将图 3.3.1 电路中所有电容均断开即可得到该放大电路的直流通路，如图 3.3.2 所示。由图 3.3.2 可见，晶体管的基极偏置电压是由直流电源 $V_{CC}$ 经过 $R_{B1}$、$R_{B2}$ 的分压而获得，所以图 3.3.2 电路又叫基极分压式射极偏置放大电路。当流过 $R_{B1}$、$R_{B2}$ 的直流电流 $I_1$ 远大于基极电流 $I_{BQ}$ 时，可得到晶体管基极直流电压 $U_{BQ}$ 为

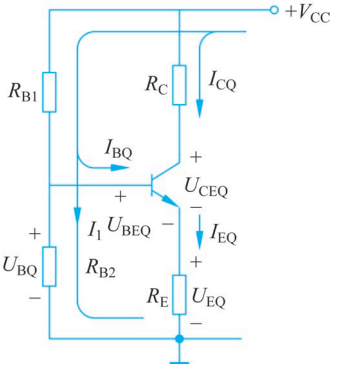



图 3.3.2　图 3.3.1 的直流通道

$$U_{BQ}=\frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}V_{CC} \tag{3.3.1}$$

由于 $U_E=U_{BQ}-U_{BEQ}$，所以晶体管发射极直流电流为

$$I_{EQ}=\frac{U_B-U_{BEQ}}{R_E} \tag{3.3.2}$$

晶体管基极直流电流和集电极直流电流分别为

$$I_{CQ}\approx I_{EQ},\quad I_{BQ}\approx\frac{I_{EQ}}{\beta} \tag{3.3.3}$$

晶体管 C、E 之间的直流电压为

$$U_{CEQ}=V_{CC}-I_{CQ}R_C-I_{EQ}R_E\approx V_{CC}-I_{CQ}(R_C+R_E) \tag{3.3.4}$$

式(3.3.1)～式(3.3.4)为放大电路静态工作点 $Q$ 电流、电压的近似计算公式。

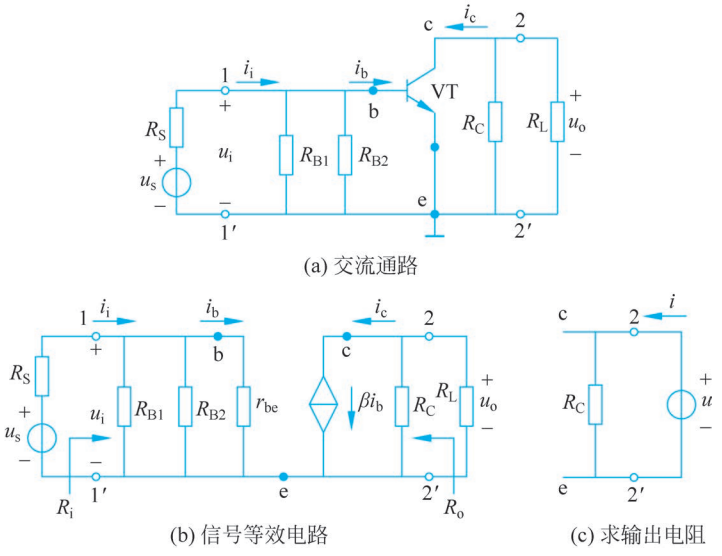
在实际应用中，环境温度的变化、直流电源电压的波动、元件参数的分散性及元件的老化等，都会造成晶体管的静态工作点 $Q$ 的不稳定，影响放大电路的正常工作。在引起 $Q$ 点不稳定的诸因素中，尤以环境温度变化的影响最大。温度上升时，晶体管的反向饱和电流 $I_{CBO}$、穿透电流 $I_{CEO}$ 及电流放大系数 $\beta$ 或 $\alpha$ 都会增大，而发射结正向压降 $U_{BEQ}$ 会减小。这些参数随温度的升高，都会使放大电路中的集电极静态电流 $I_{CQ}$ 增大，从而使 $Q$ 点沿着交流负载线向上移动，这不但影响放大倍数等性能，严重时还会造成输出波形的失真，甚至使放大电路无法正常工作。基极分压式射极偏置放大电路可以较好地解决这一问题。

所以，当温度升高时，$I_{CQ}$($I_{EQ}$)增大，使 $U_{EQ}$(即 $R_E$ 上的电压)升高，导致 $U_{BEQ}$(因 $U_{BQ}$ 基本不变)减小，$I_{BQ}$ 随之减小，故 $I_{CQ}$ 减小，达到自动稳定静态工作点 $Q$ 的目的。当温度降低时，各电量向相反方向变化，$Q$ 点也能稳定。这种利用 $I_{CQ}$($I_{EQ}$)的变化，通过电阻 $R_E$ 而实现负反馈控制作用的，称之为直流电流负反馈。

## 3. 动态分析

在如图 3.3.1 所示的电路中，由于 $C_1$、$C_2$、$C_E$ 的容量均很大，对于交流信号可视为短路，

直流电源 $V_{CC}$ 的内阻很小，对于交流信号可视为短路，这样即可得到如图 3.3.3(a)所示的交流通路。然后再用晶体管的 $h$ 小信号参数模型替代图 3.3.3(a)中的晶体管，便得到放大电路的小信号等效电路，如图 3.3.3(b)所示。利用小信号等效电路求出其动态参数。




(a) 交流通路

(b) 信号等效电路　　(c) 求输出电阻

图 3.3.3　图 3.3.1 的低频小信号等效电路

1) 电压增益 $A_u$

先求晶体管的输入电阻。由式(3.2.19)，得

$$r_{be}=r_{bb'}+(1+\beta)\frac{U_T}{I_{EQ}}$$

由图 3.3.3(b)可知，

$$u_i=i_b r_{be}$$

$$u_o=-i_c(R_L\ /\!/\ R_C)=-\beta i_b R'_L$$

式中，$R'_L=R_L/\!/R_C$。

根据电压增益的定义，

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=\frac{-\beta i_b R'_L}{i_b r_{be}}=\frac{-\beta R'_L}{r_{be}} \tag{3.3.5}$$

式中，负号表示共射组态放大电路的输出电压与输入电压相位相反，即输出电压滞后输入电压 180°。

2) 输入电阻 $R_i$

由图 3.3.3(b)可知，

$$R_i=\frac{u_i}{i_i}=\frac{u_i}{\dfrac{u_i}{R_{B1}}+\dfrac{u_i}{R_{B2}}+\dfrac{u_i}{r_{be}}}=\frac{1}{\dfrac{1}{R_{B1}}+\dfrac{1}{R_{B2}}+\dfrac{1}{r_{be}}}=R_{B1}\ /\!/\ R_{B2}\ /\!/\ r_{be} \tag{3.3.6}$$

3) 输出电阻 $R_o$

根据 1.3.2 节介绍的求输出电阻的方法，当 $u_s=0$，$i_b=0$，则 $\beta i_b=0$，负载开路 $R_L\to\infty$；然后输出接入信号源电压 $u$，如图 3.3.3(c)所示，可得 $i=u/R_C$，因此放大电路的输出电阻 $R_o$ 为

$$R_o=\frac{u}{i}=R_C \tag{3.3.7}$$

**例 3.3.1** 已知如图 3.3.1 所示电路中的 $V_{CC}=15\text{V}$，$R_{B1}=62\text{k}\Omega$，$R_{B2}=20\text{k}\Omega$，$R_C=3\text{k}\Omega$，$R_E=1.5\text{k}\Omega$，$R_L=5.6\text{k}\Omega$，$R_S=1\text{k}\Omega$，晶体管的 $\beta=100$，$r_{bb'}=200\Omega$，$U_{BEQ}=0.7\text{V}$，设电容 $C_1$、$C_2$、$C_E$ 足够大。试求：

(1) 静态工作点 $Q$；

(2) $A_u$、$R_i$、$R_o$ 和源电压增益 $A_{us}$；

(3) 如果 $C_E$ 开路，画出此时放大电路的交流通路和小信号等效电路，并求此时放大电路的 $A_u$、$R_i$、$R_o$。

**解**：(1) 计算静态工作点 $Q$。

利用式(3.3.1)～式(3.3.4) 计算静态工作点 $Q$，得

$$U_{BQ}=\frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}V_{CC}=\frac{20}{62+20}\times 15\text{V}\approx 3.7\text{V}$$

$$I_{CQ}\approx I_{EQ}=\frac{U_B-U_{BEQ}}{R_E}=\frac{(3.7-0.7)\text{V}}{1.5\text{k}\Omega}=2\text{mA}$$

$$I_{BQ}=\frac{I_{CQ}}{\beta}=\frac{2\text{mA}}{100}\approx 20\mu\text{A}$$

$$U_{CEQ}=V_{CC}-I_{CQ}(R_C+R_E)=15\text{V}-2\text{mA}(3\text{k}\Omega+1.5\text{k}\Omega)=6\text{V}$$

(2) 求 $A_u$、$R_i$、$R_o$ 和 $A_{us}$。

先求晶体管的输入电阻。由式(3.2.19)，得

$$r_{be}=r_{bb'}+(1+\beta)\frac{U_T}{I_{EQ}}=200\Omega+(1+100)\times\frac{26\text{mV}}{2\text{mA}}\approx 1.5\text{k}\Omega$$

利用式(3.3.5)～式(3.3.7)，得

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=-\beta\frac{R_L\,/\!/\,R_C}{r_{be}}\approx -130$$

$$R_i=\frac{u_i}{i_i}=R_{B1}\,/\!/\,R_{B2}\,/\!/\,r_{be}\approx 1.36\text{k}\Omega$$

$$R_o=R_C=3\text{k}\Omega$$

源电压增益 $A_{us}$ 定义为 $A_{us}=u_o/u_s$

$$A_{us}=\frac{u_i}{u_s}=\frac{u_o}{u_i}\cdot\frac{u_i}{u_s}=A_u\cdot\frac{R_i}{R_s+R_i}=-130\times\frac{1.36\text{k}\Omega}{1\text{k}\Omega+1.36\text{k}\Omega}\approx -75$$

(3) $C_E$ 开路后，求 $A_u$、$R_i$、$R_o$。

$C_E$ 开路后，图 3.3.1 的交流通路和低频小信号等效电路如图 3.3.4(a)、(b)所示。

由图 3.3.4(b)，得

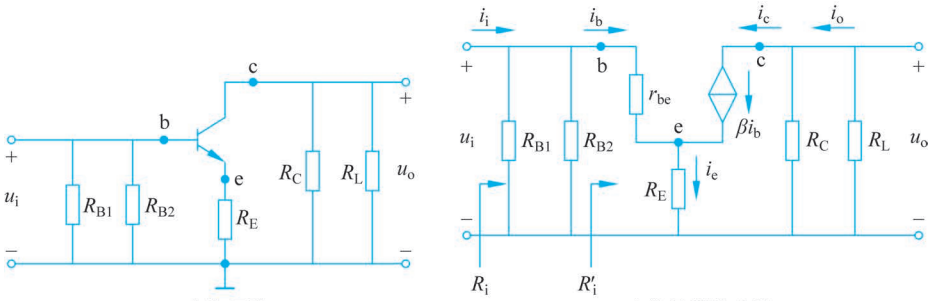
$$u_i=i_b r_{be}+i_e R_E=i_b[r_{be}+(1+\beta)R_E]$$

$$u_o=-i_c(R_L\,/\!/\,R_C)=-\beta i_b(R_L\,/\!/\,R_C)$$

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=-\beta\frac{R_L\,/\!/\,R_C}{r_{be}+(1+\beta)R_E}\approx -1.3$$

显然去掉 $C_E$，使电压增益 $A_u$ 大幅度降低，这是由于 $R_E$ 对交流信号产生了很强的负反馈。在实际电路中，射极电阻 $R_E$ 旁边通常要并联一个大电容 $C_E$，称为旁路电容，这样其交流通路中的射极电阻 $R_E$ 被短路，不影响放大电路的电压增益。

由图 3.3.4(b)，得




(a) 交流通路　　(b) 小信号等效电路

图 3.3.4　图 3.3.1 开路后低频小信号等效电路

$$R'_i=\frac{u_i}{i_b}=\frac{i_b r_{be}+(1+\beta)i_b R_E}{i_b}=r_{be}+(1+\beta)R_E$$

$$R_i=R_{B1}\ /\!/\ R_{B2}\ /\!/\ R'_i\approx 13.8\text{k}\Omega$$

$$R_o=R_C=3\text{k}\Omega$$

**讨论：**

(1) 引起放大电路静态工作点不稳定的主要因素是什么？

(2) 在如图 3.3.1 所示的静态工作点稳定电路中，发射极电阻 $R_E$ 为直流负反馈，其值越大 $Q$ 点越稳定，$R_E$ 有上限值吗？为什么？

(3) 为使如图 3.3.1 所示的放大电路的静态工作点进一步稳定，可选热敏电阻取代 $R_{B1}$ 或 $R_{B2}$。试分别选择正温度系数或负温度系数的热敏电阻取代 $R_{B1}$ 和 $R_{B2}$，并简述温度变化 $Q$ 点是如何稳定的。

(4) 如图 3.3.1 所示的放大电路能否不加 $C_E$？

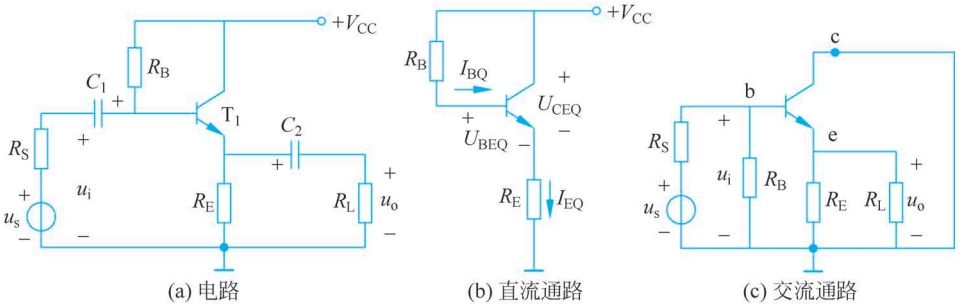
视频 15 单管共射极放大电路仿真实验

视频 16 共集电极放大电路

## 3.3.2　共集组态放大电路

### 1. 电路的组成

共集组态放大电路如图 3.3.5(a)所示，图 3.3.5(b)、(c)分别是它的直流通路和交流通路。由交流通路可见，负载电阻 $R_L$ 接在晶体管的发射极上，输入电压 $u_i$ 加在基极和地(即集电极)之间，而输出电压 $u_o$ 从发射极和集电极之间取出，所以集电极是输入、输出回路的共同端。因为从发射极输出，所以共集电极电路又称为射极输出器。




(a) 电路　　(b) 直流通路　　(c) 交流通路

图 3.3.5　共集组态放大电路

### 2. 静态分析

如图 3.3.5(b)所示，由直流电压源 $+V_{CC}$ 经基极电阻 $R_B$、晶体管的发射结、射极电阻 $R_E$

到达地构成的输入回路，列写输入回路电压方程为

$$V_{CC}=I_{BQ}R_B+U_{BEQ}+I_{EQ}R_E$$
$$=I_{BQ}R_B+U_{BEQ}+(1+\beta)I_{BQ}R_E$$

晶体管基极直流电流为

$$I_{BQ}=\frac{V_{CC}-U_{BEQ}}{R_B+(1+\beta)R_E} \tag{3.3.8}$$

晶体管集电极直流电流为

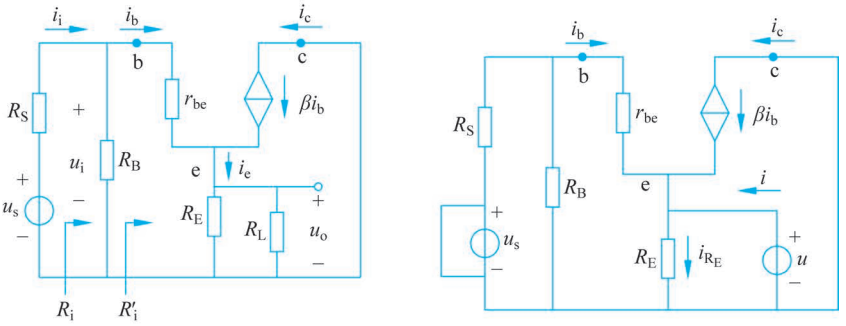
$$I_{CQ}=\beta I_{BQ} \tag{3.3.9}$$

晶体管 C、E 之间的直流电压为

$$U_{CEQ}=V_{CC}-(1+\beta)I_{BQ}R_E \tag{3.3.10}$$

### 3. 动态分析

根据如图 3.3.5(c)所示的交流通路画出放大电路的低频小信号等效电路图如图 3.3.6(a)所示。利用小信号等效电路求出其动态参数。




(a) 小信号等效电路　　(b) 输出电阻的等效电路

图 3.3.6　图 3.3.5 的低频小信号等效电路

1) 电压增益为 $A_u$

首先计算晶体管的输入电阻

$$r_{be}=r_{bb'}+(1+\beta)\frac{26\text{mV}}{I_{EQ}}$$

根据图 3.3.6(a)，电压增益 $A_u$ 为

$$u_i=i_b r_{be}+i_e(R_L/\!/R_E)=i_b r_{be}+(1+\beta)i_b R'_L$$
$$u_o=i_e(R_L/\!/R_E)=(1+\beta)i_b R'_L$$

其中，$R'_L=R_L/\!/R_E$

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=\frac{(1+\beta)i_b R'_L}{i_b r_{be}+(1+\beta)i_b R'_L}=\frac{(1+\beta)R'_L}{r_{be}+(1+\beta)R'_L} \tag{3.3.11}$$

显然共集组态放大电路的电压增益小于 1，通常情况下 $(1+\beta)R'_L \gg r_{be}$，所以电压增益近似等于 1，$u_o \approx u_i$，且相位相同，所以共集放大电路又称电压跟随器。

2) 输入电阻

如图 3.3.6(a)所示，放大电路输入电阻的分析较为复杂，所以可分两步进行分析计算，首先计算输入电阻 $R'_i$，然后再计算总的输入电阻 $R_i$，$R_i$ 是 $R'_i$ 和 $R_B$ 的并联。

对于输入电阻 $R'_i$，其输入电流是 $i_b$，依据输入电阻定义有

$$R'_i=\frac{u_i}{i_b}=\frac{i_b r_{be}+(1+\beta)i_b R'_L}{i_b}=r_{be}+(1+\beta)R'_L$$

共集组态放大电路总的输入电阻 $R_i$ 为

$$R_i = R_B \,//\, R'_i = R_B \,//\, [r_{be} + (1+\beta)R'_L] \tag{3.3.12}$$

显然 $(1+\beta)R'_L \gg r_{be}$，晶体管共集组态的输入电阻 $R_i$ 比共射组态的输入电阻高。

3) 输出电阻

计算放大电路的输出电阻的等效电路如图 3.3.6(b)所示。

首先令输入信号源 $u_s=0$；之后令负载 $R_L$ 开路，即 $R_L=\infty$，令输出端电压为 $u$，在 $u$ 激励下产生电流 $i$ 为

$$i = i_{R_E} - i_b - \beta i_b = \frac{u}{R_E} + (1+\beta)\frac{u}{r_{be}+R'_S}$$

其中，$R'_S = R_S \,//\, R_B$。由此得到放大电路的输出电阻为

$$R_o = \frac{u}{i} = \frac{1}{\dfrac{1}{R_E} + (1+\beta)\dfrac{1}{r_{be}+R'_S}} = R_E \,//\, \frac{r_{be}+R'_S}{1+\beta} \tag{3.3.13}$$

$R_S$ 是电压源内阻，其值非常小，$r_{be}$ 一般是几百欧或者几千欧，电流增益 $\beta$ 至少为几十甚至更大，所以 $R_o$ 比共射组态的输出电阻小得多。

与共射组态放大电路的性能进行对比，总结共集组态放大电路的特点如下：

(1) 输入电阻大；

(2) 输出电阻小；

(3) 电压增益小于 1，近似为 1，同相放大。

由于共集组态输入电阻大，所以如果共集组态放大电路作为电压源的负载，电压源的内阻比较小，这样电压源内阻的变化对于放大电路电压增益的影响很小，电压增益较稳定。

由于共集组态输出电阻小，故通常远小于负载电阻 $R_L$。

通过以上分析可知，共集组态放大电路的应用主要有两方面：一是作为电子系统中放大电路的输入级和输出级；二是作为两个电路的中间级，起到阻抗变换、隔离缓冲的作用。

**例 3.3.2** 已知如图 3.3.5(a)所示电路中的 $U_{CC}=12\text{V}$，$R_B=300\text{k}\Omega$，$R_E=1\text{k}\Omega$，$R_L=1\text{k}\Omega$，$R_S=1\text{k}\Omega$，晶体管的 $\beta=120$，$r_{bb'}=200\Omega$，$U_{BEQ}=0.7\text{V}$，设电容 $C_1$、$C_2$ 足够大。试求：静态工作点 $Q$ 及 $A_u$、$R_i$、$R_o$。

**解：** 利用式(3.3.8)～式(3.3.10)计算静态工作点 $Q$，得

$$I_{BQ} = \frac{U_{CC}-U_{BEQ}}{R_B+(1+\beta)R_E} = \frac{12-0.7}{300+(1+120)\times 1} \approx 0.027(\text{mA})$$

$$I_{EQ} \approx I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 120\times 0.027 = 3.2(\text{mA})$$

先求晶体管的输入电阻。由式(3.2.19)，得

$$r_{be} = r_{bb'} + (1+\beta)\frac{U_T}{I_{EQ}} = 200\Omega + (1+120)\times\frac{26\text{mV}}{3.2\text{mA}} \approx 1.18\text{k}\Omega$$

利用式(3.3.11)～式(3.3.13)，得

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{(1+\beta)i_b R'_L}{i_b r_{be}+(1+\beta)i_b R'_L} = \frac{(1+\beta)R'_L}{r_{be}+(1+\beta)R'_L} = \frac{(1+120)\times 0.5}{1.18+(1+120)\times 0.5} \approx 0.98$$

$$R_i = R_B \,//\, [r_{be}+(1+\beta)R'_L] \approx 51.2\text{k}\Omega$$

$$R_o = R_E \,//\, \frac{r_{be}+R'_S}{1+\beta} \approx 18\Omega$$

式中，$R'_L = R_L \,//\, R_E$，$R'_S = R_S \,//\, R_B$。

**讨论：**

（1）共集电组态放大电路为什么可以称为电压跟随器？其输出电阻为什么小？

（2）说明共集电组态放大电路的功率放大作用。

### 3.3.3　共基组态放大电路

共基组态放大电路如图 3.3.7 所示。由交流通路可见，输入电压 $u_i$ 加在发射极和地（即基极）之间，而输出电压 $u_o$ 从集电极和地（即基极）之间取出，所以基极是输入、输出回路的共同端。

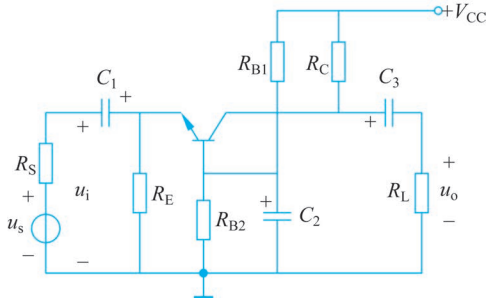



图 3.3.7　共基组态基本放大电路

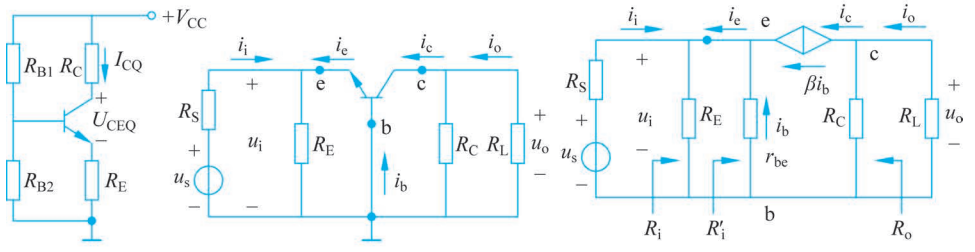
**1. 静态分析**

将电路中的耦合电容和旁路电容开路，得到的电路就是直流通路，如图 3.3.8(a)所示。显然与例 3.3.1 中共射组态基本放大电路的直流通路完全相同，静态工作点分析计算方法自然也完全一样，故不再赘述。

视频 17
共基极放大电路

**2. 动态分析**

图 3.3.7 的交流通路如图 3.3.8(b)所示，利用晶体管 $h$ 参数简化模型，得到放大电路的低频小信号等效电路图如图 3.3.8(c)所示。利用小信号等效电路求出其动态参数。




(a) 直流通路　　(b) 交流通路　　(c) 小信号等效电路

图 3.3.8　共基组态的等效电路

1）电压增益 $A_u$

首先计算晶体管的输入电阻

$$r_{be}=r_{bb'}+(1+\beta)\frac{26\text{mV}}{I_{EQ}}$$

根据图 3.3.8(c)，电压增益 $A_u$ 为

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=\frac{-\beta i_b R'_L}{-i_b r_{be}}=\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \tag{3.3.14}$$

其中，$R'_L=R_C/\!/R_L$。

显然共基组态放大电路的电压增益幅值与共射的组态放大电路的电压增益相当,但是极性不同,共基组态放大电路是同相放大。

2) 输入电阻

如图 3.3.8(c)所示,放大电路输入电阻可分两步进行分析计算,首先计算输入电阻 $R_i'$,然后再计算总的输入电阻 $R_i$,$R_i$ 是 $R_i'$和 $R_E$ 的并联。

对于输入电阻 $R_i'$,其输入电流是 $i_e$,依据输入电阻定义有

$$R_i'=\frac{u_i}{-i_e}=\frac{-i_b r_{be}}{-i_e}=\frac{r_{be}}{1+\beta}$$

共集组态放大电路总的输入电阻 $R_i$ 为

$$R_i=\frac{u_i}{i_1}=R_E /\!/ R_i'=R_E /\!/ \frac{r_{be}}{1+\beta} \tag{3.3.15}$$

显然,与共射组态相比,共基组态输入电阻非常小。

3) 输出电阻

根据定义,放大电路的输出电阻为

$$R_o=R_C \tag{3.3.16}$$

与共射、共集组态放大电路相比,共基组态放大电路具有如下特点:

(1) 输入电阻较小,输出电阻较大,电流增益小于 1,近似为 1,相当于电流跟随器;电压增益与共射组态的增益幅值数量级相当,但是共射分组态放大电路是反相放大,共基组态放大电路是同相放大。

(2) 共基电路的通频带宽。

**例 3.3.3** 已知图 3.3.7 所示电路中的 $V_{CC}=15\text{V}$,$R_{B1}=62\text{k}\Omega$,$R_{B2}=20\text{k}\Omega$,$R_C=3\text{k}\Omega$,$R_E=1.5\text{k}\Omega$,$R_L=5.6\text{k}\Omega$,$R_S=1\text{k}\Omega$ ,晶体管的 $\beta=100$,$r_{bb'}=200\Omega$,$U_{BEQ}=0.7\text{V}$,设电容 $C_1$、$C_2$、$C_3$ 足够大。试求:静态工作点 $Q$ 及 $A_u$、$R_i$、$R_o$。

**解:** 根据例 3.3.1 的计算结果可得

$$I_{BQ}\approx 20\mu\text{A},\quad I_{CQ}=2\text{mA},\quad U_{CEQ}=6\text{V}$$

先求晶体管的输入电阻

$$r_{be}=r_{bb'}+(1+\beta)\frac{U_T}{I_{EQ}}=200\Omega+(1+100)\times\frac{26\text{mV}}{2\text{mA}}\approx 1.5\text{k}\Omega$$

利用式(3.3.14)~式(3.3.16),得

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=\frac{\beta(R_C /\!/ R_L)}{r_{be}}=130$$

$$R_i=\frac{u_i}{i_1}=R_E /\!/ \frac{r_{be}}{1+\beta}\approx 15\Omega$$

$$R_o=R_C=3\text{k}\Omega$$

视频 18
3 种 BJT 放大电路的比较

## 3.3.4 3 种组态放大电路的比较

### 1. 3 种组态的判别

一般看输入信号加在晶体管的哪一个电极,输出信号从哪一个电极取出。在共射组态放大电路中,信号由基极输入,集电极输出;在共集组态放大电路中,信号由基极输入,发射极输出;在共基组态放大电路中,信号由发射极输入,集电极输出。

### 2. 3种组态的性能及用途

3种组态放大电路主要性能比较及其主要用途如表3.3.1所示。

表3.3.1　晶体管3种组态放大电路主要性能比较及其主要用途

| 性能指标 | 共射组态放大电路 | 共集组态放大电路 | 共基组态放大电路 |
|---|---|---|---|
| 电压增益 $A_u$ | 大(一般几十至几百) | 小(<1) | 大(一般几十以上) |
| 输出和输入电压相位关系 | 反相 | 同相 | 同相 |
| 电流增益 $A_i$ | 大($\beta$) | 大($1+\beta$) | 小($\alpha<1$) |
| 输入电阻 $R_i$ | 中(几百至几千欧)$r_{be}$ | 大(几十千欧)$r_{be}+(1+\beta)R'_L$ | 小(几欧至几十欧)$\dfrac{r_{be}}{1+\beta}$ |
| 输出电阻 $R_o$ | 大(几百至几千欧)$R_C$ | 小(可小于一百欧)$\dfrac{r_{be}+R'_S}{1+\beta}$ | 大(几百至几千欧)$R_C$ |
| 通频带 | 窄 | 较宽 | 宽 |
| 用途 | 单级放大；多级放大电路的中间级，主要用于小信号电压放大 | 多级放大电路的输入级、输出级或中间缓冲级 | 宽带放大；高频放大电路 |

表3.3.1中电流增益 $A_i=i_o/i_i$，$i_i$ 是晶体管放大电路的输入电流，$i_o$ 是晶体管放大电路的输出电流。

**讨论：**

(1) 共射、共集、共基3种基本组态电路各有什么特点？

(2) 为什么共集组态放大电路又称为电压跟随器？

## 3.4　多级放大电路

### 3.4.1　多级放大电路耦合方式与动态分析

#### 1. 多级放大电路的组成

当单级放大电路不能满足电路对增益、输入电阻和输出电阻等性能指标的综合要求时，在实际应用中，应将放大电路3种组态中的两种或两种以上进行适当的组合，组成多级放大电路，如图3.4.1所示。与信号源相连的第一级放大电路称为输入级，与负载相连的末级放大电路称为输出级，输入级与输出级之间的放大电路称为中间级。输入级与中间级的位置处于多级放大电路的前几极，故称为前置极。前置极一般都属于小信号工作状态，主要用于电压放大，输出级是大信号放大，以提供负载足够大的信号，常采用功率放大电路。

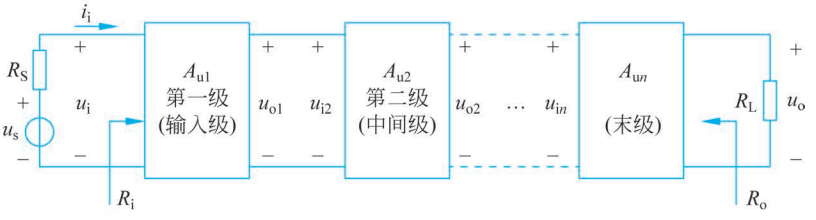



图3.4.1　多级放大电路组成框图

### 2. 耦合方式

级间耦合电路应保证有效地传输信号，使之损失最小，同时使各放大电路的直流工作状态不受影响。常用的级间耦合方式有阻容耦合、直接耦合、变压器耦合等。

1）阻容耦合

级与级之间采用电容连接，称为阻容耦合，如图 3.4.2 所示。由于耦合电容对直流量相当于开路，使各级间的静态工作点相互独立，因而设置各级电路静态工作点的方法与前面所述单管放大电路的完全一样。由于耦合电容对低频信号呈现出很大电抗，低频信号在耦合电容上的压降很大，致使电压放大倍数大大下降，甚至根本不能放大，所以阻容耦合放大电路的低频特性差，不能放大变化缓慢的信号。又因集成芯片中不能制作大容量电容，所以阻容耦合放大电路不能集成化，而只能用于分立元件电路级联。

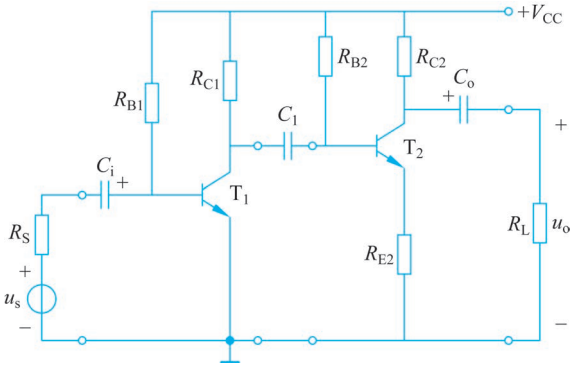



图 3.4.2　阻容耦合

2）直接耦合

级与级间采用直接连接，称为直接耦合，如图 3.4.3 所示。直接耦合方式可省去级间耦合元件，信号传输的损耗很小，它不仅能放大交流信号，而且还能放大变化十分缓慢的信号，集成电路中多采用直接耦合方式。

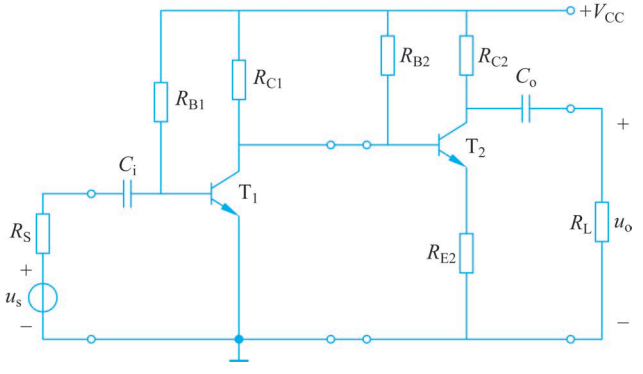



图 3.4.3　直接耦合

3）变压器耦合

如图 3.4.4 所示为变压器耦合放大电路，电阻 $R_L$ 可能是实际的负载，也可能是下一级放大电路。由于电路之间靠磁路耦合，因而与阻容耦合放大电路一样，各级电路的静态工作点相互独立因低频特性差，不能放大变化缓慢的信号，且笨重，不能集成化。

### 3. 多级放大电路的动态分析

在如图 3.4.1 所示多级放大电路的框图中，每级电压放大倍数分别为 $A_{u1}=u_{o1}/u_i$、

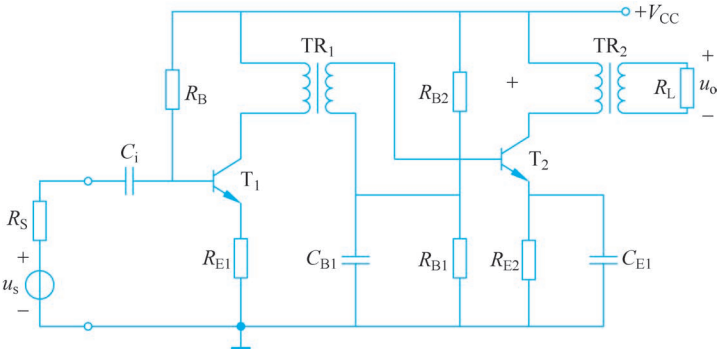



图 3.4.4　变压器耦合

$A_{u2}=u_{o2}/u_{i2}$、……、$A_{un}=u_o/u_{in}$。由于信号是逐级传送的，前级的输出电压便是后级的输入电压，所以整个放大电路的电压放大倍数为

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=\frac{u_{o1}}{u_i}\cdot\frac{u_{o2}}{u_{i2}}\cdot\cdots\cdot\frac{u_o}{u_{in}}=A_{u1}\cdot A_{u2}\cdot\cdots\cdot A_{un} \tag{3.4.1}$$

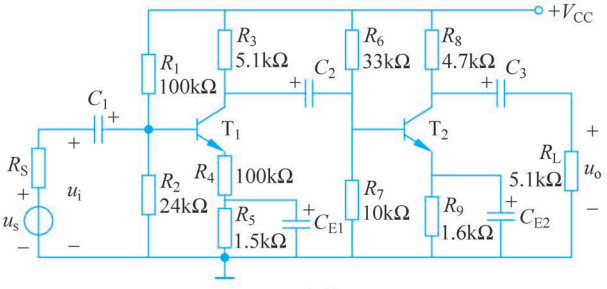
式(3.4.1)表明，多级放大电路的电压放大倍数等于各级电压放大倍数的乘积。若用分贝表示，则多级放大电路的电压总增益等于各级电压增益的和，即

$$A_u(\mathrm{dB})=A_{u1}(\mathrm{dB})+A_{u2}(\mathrm{dB})+\cdots+A_{un}(\mathrm{dB}) \tag{3.4.2}$$

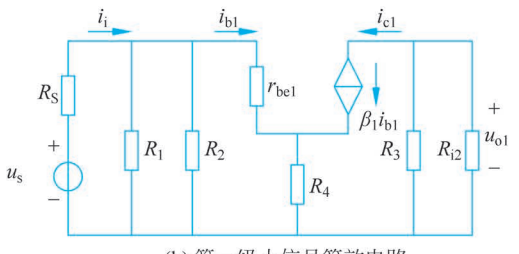
应当指出，在计算各级电压放大倍数时，要注意级与级之间的相互影响，即计算每级的放大倍数时，下一级输入电阻应作为上一级的负载来考虑。

由图 3.4.1 可知，多级放大电路的输入电阻就是由第一级求得的输入电阻，即 $R_i=R_{i1}$。多级放大电路的输出电阻即为末级求得的输出电阻，即 $R_o=R_{on}$。

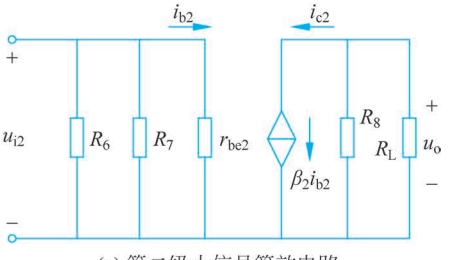
**例 3.4.1**　在如图 3.4.5 所示的两级共发射极电容耦合放大电路中，已知晶体管 T$_1$ 的 $\beta_1=60$，$r_{be1}=1.8\mathrm{k\Omega}$，T$_2$ 的 $\beta_2=100$，$r_{be2}=2.2\mathrm{k\Omega}$，其他参数如图 3.4.5 所示，设电容 $C_1$、$C_2$、$C_3$ 足够大。试求：$A_u$、$R_i$、$R_o$。




(a) 电路




(b) 第一级小信号等效电路




(c) 第二级小信号等效电路

图 3.4.5　两级共发射极电容耦合放大电路的等效电路

**解：**在小信号工作情况下，两级共发射极放大电路的小信号等效电路如图 3.4.5(b)、(c)所示，其中图 3.4.5(b)中的负载电阻 $R_{i2}$ 为后级放大电路的输入电阻，即

$$R_{i2}=R_6 /\!/ R_7 /\!/ r_{be2}\approx 1.7\text{k}\Omega$$

因此第一级的总负载为

$$R'_{L1}=R_3 /\!/ R_{i2}\approx 1.3\text{k}\Omega$$

所以，第一级电压增益为

$$A_{u1}=\frac{u_{o1}}{u_i}=\frac{-\beta_1 R'_{L1}}{r_{be1}+(1+\beta_1)R_4}=\frac{-60\times 1.3\text{k}\Omega}{1.8\text{k}\Omega+(1+60)\times 0.1\text{k}\Omega}\approx -9.9$$

第二级电压增益为

$$A_{u2}=\frac{u_o}{u_{i2}}=\frac{-\beta_2 R'_L}{r_{be2}}=-100\times\frac{\frac{4.7\times 5.1}{4.7+5.1}}{2.2}\approx -111$$

两级放大电路的总电压增益为

$$A_u=A_{u1}\cdot A_{u2}=(-9.9)\times(-111)=1099$$

$$A_u(\text{dB})=A_{u1}(\text{dB})+A_{u2}(\text{dB})=60.9\text{dB}$$

式中没有负号，说明两级共射组态放大电路的输出电压与输入电压同相。

两级放大电路的输入电阻就是等于第一级放大电路的输入电阻，即

$$R_i=R_{i1}=R_1 /\!/ R_2 /\!/ [r_{be1}+(1+\beta_1)R_4]\approx 5.6\text{k}\Omega$$

输出电阻等于第二级的输出电阻，即

$$R_o=R_8=4.7\text{k}\Omega$$

**讨论：**

(1) 级间耦合电路应解决哪些问题？常采用的耦合方式有哪些？各有何特点？

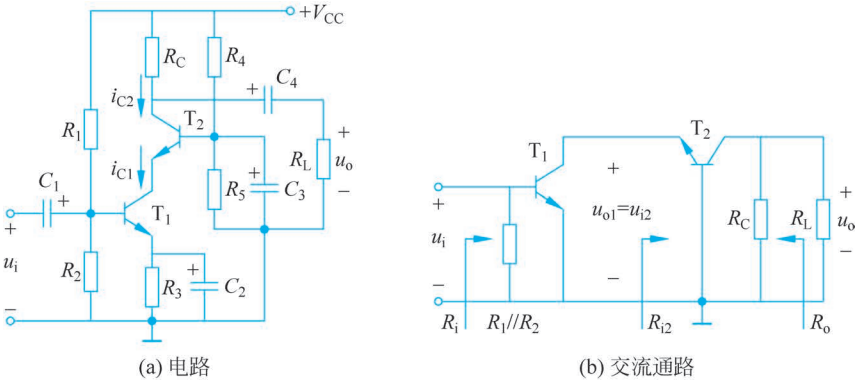
(2) 多级放大电路增益与各级增益有何关系在计算各级增益时应注意什么问题？

## 3.4.2 组合放大电路

在实际应用中，常把 3 种组态放大电路中的两种或两种以上进行适当的组合，以便发挥各自的优点获得更好的性能，这种电路常称为组合放大电路。

### 1. 共射-共基极放大电路

图 3.4.6(a)是共射-共基极放大电路图，其中 $T_1$ 管构成共射组态，$T_2$ 管构成共基组态。由于 $T_1$ 与 $T_2$ 管是串联的，故又称为串接或级联放大电路。图 3.4.6(b)是图 3.4.6(a)的交流通路。




(a) 电路　　(b) 交流通路

图 3.4.6　共射-共集极放大电路

由其交流通路可见，第一级的输出电压就是第二级的输入电压，即 $u_{o1}=u_{i2}$，由此可推导出电压增益的表达式为

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=\frac{u_{o1}}{u_i}\cdot\frac{u_o}{u_{o1}}=A_{u1}\cdot A_{u2}$$

其中，

$$A_{u1}=-\frac{\beta_1 R'_{L1}}{r_{be1}}=-\frac{\beta_1 r_{be2}}{r_{be1}(1+\beta_2)}$$

$$A_{u2}=\frac{\beta_2 R'_{L2}}{r_{be2}}=\frac{\beta_2(R_C\ /\!/\ R_L)}{r_{be2}}$$

所以

$$A_u=-\frac{\beta_1 r_{be2}}{r_{be1}(1+\beta_2)}\cdot\frac{\beta_2(R_C\ /\!/\ R_L)}{r_{be2}}$$

因为 $\beta_2\gg1$，所以

$$A_u=-\frac{\beta_1(R_C\ /\!/\ R_L)}{r_{be1}} \tag{3.4.3}$$

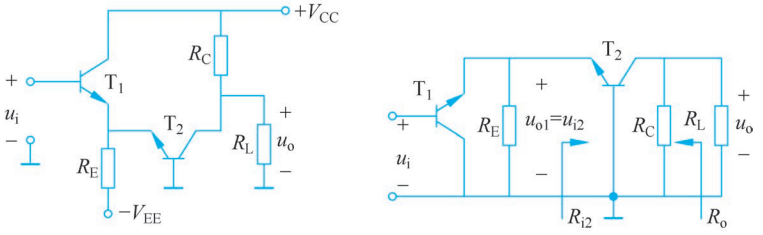
$$R_i=R_1\ /\!/\ R_2\ /\!/\ r_{be1} \tag{3.4.4}$$

$$R_o\approx R_C \tag{3.4.5}$$

式(3.4.3)～式(3.4.5)说明，共射-共基极放大电路电压放大倍数、输入电阻和输出电阻都与单级共发射极放大电路基本相同。共射-共基极组合放大电路的重要优点是高频特性好，具有较宽的带宽。

### 2. 共集-共基极放大电路

共集-共基极放大电路如图 3.4.7(a)所示，电路采用双电源供电，$T_1$ 管构成共集组态，$T_2$ 管构成共基组态。图 3.4.7(a)所示电路的交流通路如图 3.4.7(b)所示。




(a) 电路　　(b) 交流通路

图 3.4.7　共集-共基极放大电路

共集-共基极放大电路的电压放大倍数为

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=\frac{u_{o1}}{u_i}\cdot\frac{u_o}{u_{o1}}=A_{u1}\cdot A_{u2}$$

其中，

$$A_{u1}=-\frac{(1+\beta_1)R'_{L1}}{r_{be1}+(1+\beta_1)R'_{L1}}$$

$$A_{u2}=\frac{\beta_2 R'_{L2}}{r_{be2}}=\frac{\beta_2(R_C\ /\!/\ R_L)}{r_{be2}}$$

所以

$$A_u=-\frac{(1+\beta_1)R'_{L1}}{r_{be1}+(1+\beta_1)R'_{L1}}\cdot\frac{\beta_2(R_C\ /\!/\ R_L)}{r_{be2}} \tag{3.4.6}$$

由于共基组态放大电路的输入电阻 $\frac{r_{be2}}{(1+\beta_2)}$ 很小，所以共集电路集电极交流负载

$$R'_{L1}=R_E \,//\, \frac{r_{be2}}{(1+\beta_2)} \approx \frac{r_{be2}}{(1+\beta_2)}$$

设 $T_1$、$T_2$ 两管特性相同，即 $\beta_1=\beta_2=\beta$，$r_{be1}=r_{be2}=r_{be}$，则可将式(3.5.10)简化为

$$A_u=-\frac{\beta(R_C \,//\, R_L)}{2r_{be}}$$

由上式可见，由于第二级共基电路输入电阻很小，使第一级共集电路电压放大倍数由近似为 1 而下降为 0.5。

共集-共基极放大电路的输入电阻 $R_i$ 和输出电阻 $R_o$ 分别为

$$R_i=r_{be1}+(1+\beta_1)\left(R_E \,//\, \frac{r_{be2}}{(1+\beta_2)}\right) \approx 2r_{be} \tag{3.4.7}$$

$$R_o \approx R_C \tag{3.4.8}$$

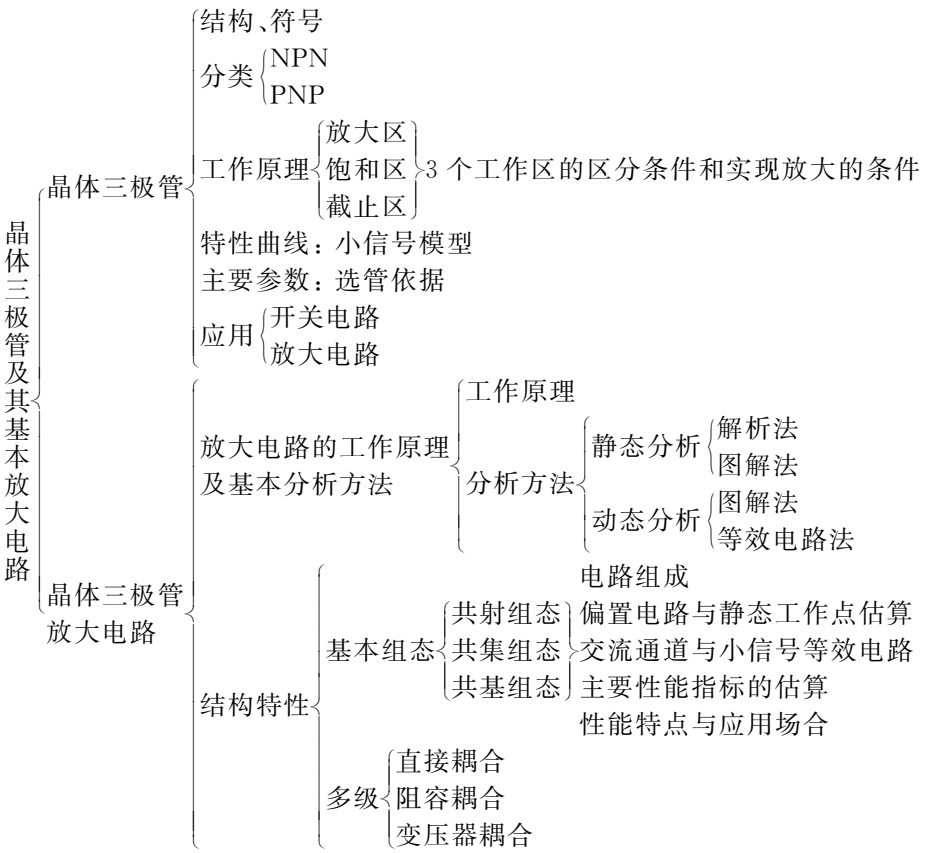
由于共集-共基极电路都具有较宽的频带，而且分别具有较大的电流和电压增益，所以共集-共基极放大电路可获得相当宽的频带，同时又能提供足够大的增益且高频工作稳定性好，因而广泛用于高频集成电路中。

**讨论：**

(1) 何谓组合放大电路？采用组合放大电路的目的是什么？

(2) 共集-共基极放大电路有何特点？有何应用？

## 本章知识结构图



## 自测题

### 1. 填空题

(1) 晶体管从结构上可分成_____和_____两种类型，它工作时有_____种载流子参与导电。

(2) 晶体管具有电流放大作用的外部条件是发射结_____、集电结_____。

(3) 晶体管的输出特性曲线通常分为3个区域，分别为_____、_____、_____。

(4) 某晶体管工作在放大区，如果基极电流从10μA变化到20μA时，集电极电流从1mA变为1.99mA，则交流电流放大系数$\beta$约为_____，$\alpha$约为_____。

(5) 放大电路的输入电压$U_i$=10mV，输出电压$U_o$=1V，该放大电路的电压放大倍数为_____，电压增益为_____ dB。

(6) _____电阻反映了放大电路对信号源或前级电路的影响；_____电阻反映了放大电路带负载的能力。

(7) 放大电路的输入电阻越大，则放大电路向信号源索取的电流_____，输入电压越_____，输出电阻越小，负载对输出电压的影响就越_____，放大电路带负载能力越_____。

(8) 放大电路中的隔直耦合电容在直流分析时视为_____，交流分析时视为_____。

(9) 在放大电路中，当静态工作点Q过低时，会产生_____失真；当静态工作点Q过高时，产生_____失真；_____过大时，既可能有饱和失真，又有截止失真。

(10) 放大电路的静态工作点根据_____通路进行估算，而_____通路用于放大电路的动态分析。

(11) 单级晶体管放大电路中，输出电压与输入电压反相的有共_____极电路，输出电压与输入电压同相的有共_____极和共_____极电路。

(12) 多级放大电路中常用的耦合方式有_____耦合、_____耦合和变压器耦合等。

(13) 两级放大电路中，第一级电路输入电阻为$R_{i1}$、输出电阻为$R_{o1}$、电压放大倍数为$A_{u1}$，第二级电路输入电阻为$R_{i2}$、输出电阻为$R_{o2}$、电压放大倍数为$A_{u2}$，则该电路总输入电阻$R_i$=_____，输出电阻为$R_o$=_____，电压放大倍数$A_u$=_____。

(14) 多级放大电路中，后级输入电阻可视为前级的_____，而前级输出电阻可视为后级的_____。

### 2. 判断题

(1) PNP管工作于放大区的偏置条件是发射结正偏导通、集电结反偏。(　　)

(2) 晶体管工作于放大区时，流过发射结的电流主要是扩散电流，流过集电结的电流主要是漂移电流。(　　)

(3) 温度升高时，NPN管的输入特性曲线左移，输出特性曲线上移。(　　)

(4) 信号源内阻对放大电路的输出电阻无影响。(　　)

(5) 负载电阻$R_L$对放大电路的输入电阻无影响。(　　)

(6) 只有电路既放大电流又放大电压，才称其有放大作用。(　　)

(7) 放大电路中输出的电流和电压都是由有源元件提供的。(　　)

(8) 共射放大电路输出信号出现顶部失真都是截止失真。(　　)

(9) 直接耦合电路只能放大直流信号。(　　)

(10) 阻容耦合电路只能放大交流信号。(　　)

(11) 在典型的静态工作点稳定电路中,若发射极电阻 $R_e$ 未加旁路电容,则它在稳定电路静态工作点的同时,也会影响到电路的动态特性。

(12) 共集放大电路电压放大倍数小于 1,所以不能实现功率放大。(　　)

(13) 共基放大电路的电流放大倍数小于 1,所以不能实现功率放大。(　　)

(14) 共射放大电路由于输出电压与输入电压反相,输入电阻和输出电阻大小适中,故很少应用。(　　)

(15) 画放大电路交流通路时,直流电压源视为短路,直流电流源视为开路。(　　)

**3. 选择题**

(1) 晶体管工作在放大区时,具有_____的特点。

A. 发射结正偏,集电结反偏　　B. 发射结反偏,集电结正偏

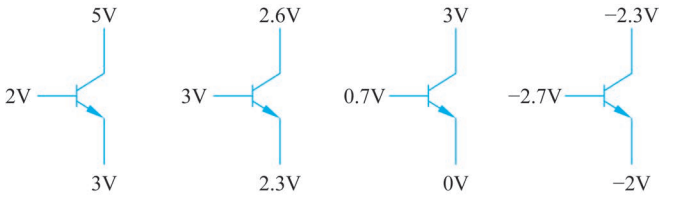
C. 发射结正偏,集电结正偏　　D. 发射结反偏,集电结反偏

(2) 共射、共集、共基三组态基本放大电路中电压放大倍数小于 1 的是_____组态。

A. 共集　　B. 共基

C. 共射　　D. 不确定,取决于外围电路

(3) 图 3.5.1 中的晶体管为硅管,可判断工作于放大状态的图为_____。




A.　　B.　　C.　　D.

图 3.5.1

(4) 对于如图 3.5.2 所示的放大电路,当用直流电压表测得 $U_{CE}\approx U_{CC}$ 时,有可能是因为_____。

A. $R_B$ 开路　　B. $R_B$ 短路

C. $R_C$ 开路　　D. $R_B$ 过小

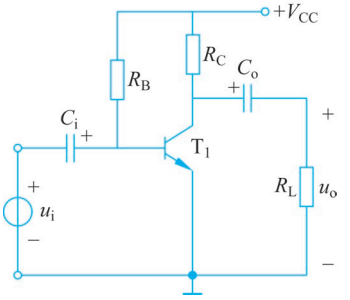



图 3.5.2

(5) 对于如图 3.5.2 所示的放大电路,若其他电路参数不变,仅当 $R_B$ 增大时,$U_{CEQ}$ 将_____。

A. 增大　　B. 减小

C. 不变　　D. 不确定

(6) 对于如图 3.5.2 所示的放大电路,若其他电路参数不变,仅当 $R_C$ 减小时,$U_{CEQ}$ 将_____。

A. 减小　　B. 增大　　C. 不变　　D. 不确定

(7) 对于如图 3.5.2 所示的放大电路,若其他电路参数不变,仅当 $R_L$ 增大时,$U_{CEQ}$ 将_____。

A. 不变　　B. 减小　　C. 增大　　D. 不确定

(8) 对于如图 3.5.2 所示的放大电路,若其他电路参数不变,仅更换一个 $\beta$ 较小的晶体管时,$U_{CEQ}$ 将_____。

A. 增大　　B. 减小　　C. 不变　　D. 不确定

(9) 对于 NPN 管组成的基本共射放大电路,若产生饱和失真,则输出电压_____失真。

A. 底部　　B. 顶部　　C. 顶部和底部　　D. 不确定

(10) 为了使高阻输出的放大电路(或高阻信号源)与低阻负载(或低输入电阻的放大电路)很好地配合,可以在高阻输出的放大电路与负载之间插入_____。

A. 共集电路　　B. 共基电路

C. 共射电路　　D. 任何一种组态的电路

(11) 在单级共射组态放大电路中,若输入电压为余弦波形,用示波器同时观察输入 $u_i$ 和输出 $u_o$ 的波形,$u_i$ 和 $u_o$ 的相位_____。

A. 同相　　B. 反相　　C. 相差 90°　　D. 不确定

(12) 在单级共基组态放大电路中,若输入电压为余弦波形,用示波器同时观察输入 $u_i$ 和输出 $u_o$ 的波形,$u_i$ 和 $u_o$ 的相位_____。

A. 同相　　B. 反相　　C. 相差 90°　　D. 不确定

(13) 在共射、共集、共基三组态基本放大电路中,输出电阻最小的是_____组态。

A. 共集　　B. 共基　　C. 共射　　D. 任意

(14) 在共射、共集、共基三组态基本放大电路中,输入电阻最大的是_____组态。

A. 共射　　B. 共基　　C. 共集　　D. 任意

(15) 放大电路在输入低频信号时电压放大倍数下降的原因是存在_____电容。

A. 耦合和旁路　　B. 耦合　　C. 旁路　　D. 晶体管极间

(16) 测得放大电路中处于放大状态的晶体管的直流电位如图 3.5.3 所示,判断晶体管的发射极、基极、集电极分别是_____。

A. $P_2$、$P_3$、$P_1$　　B. $P_3$、$P_2$、$P_1$　　C. $P_1$、$P_3$、$P_2$　　D. $P_3$、$P_1$、$P_2$

(17) 测得放大电路中处于放大状态的晶体管的直流电位如图 3.5.4 所示,判断晶体管的发射极、基极、集电极分别是_____。

A. $P_2$、$P_3$、$P_1$　　B. $P_3$、$P_2$、$P_1$　　C. $P_1$、$P_3$、$P_2$　　D. $P_3$、$P_1$、$P_2$

(18) 测得放大电路中处于放大状态的晶体管的直流电位如图 3.5.5 所示。判断晶体管类型为_____。

A. NPN 型,锗管　　B. NPN 型,硅管　　C. PNP 型,硅管　　D. PNP 型,锗管

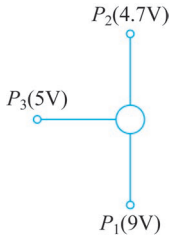



图 3.5.3

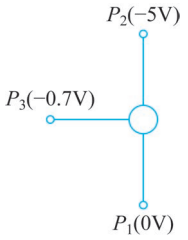



图 3.5.4

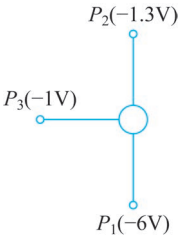



图 3.5.5

第 3 章　自测题答案　　第 3 章　习题