

学习情境三 放大电路基础

第一单元 共发射极放大电路

情境导入

在某音频产品中，要求实现单级低频小信号放大，静态工作点稳定，需要把单个放大电路串接起来，将信号经过多级放大，才能达到所需要的输出要求。元件清单：驻极体话筒、晶体管（三个）、偏置电阻若干、可调电阻（ $500\text{ k}\Omega$ ）、电解电容（ $4.7\text{ }\mu\text{F}$ 若干、 $47\text{ }\mu\text{F}$ 若干）、102瓷片电容、耳机插座。该电路以晶体管为主组成共发射极放大电路，电解电容为耦合电容，102瓷片电容为消振电容，用于消除电路可能产生的自激。晶体管（三个）组成三级音频放大电路，级与级之间采用电容耦合方式连接，前两级组成具有电压负反馈的偏置电路，起到稳定静态工作点的作用。驻极体话筒将微弱的声音信号转换成电信号，经过音频放大电路的多级放大，最后由耳机插座输出，输出的信号由外接的耳机或扬声器发出声音。电路组装好后，外接 3 V 直流电源（两节 1.5 V 电池），对着驻极体话筒说话，耳机里能听到声音，可以当助听器使用，效果很好。

学习导航

- 1.掌握放大电路的概念，以及放大电路的主要技术指标。
- 2.掌握共发射极放大电路的组成、工作原理和分析方法。
- 3.掌握共基极和共集电极放大电路的工作原理。
- 4.掌握多级放大电路的耦合方式和分析方法；了解复合管的应用。
- 5.掌握共源极和共漏极场效应管放大电路的静态和动态分析。

育人目标

了解我国电力发展史，学习榜样人物无私奉献的精神，树立为祖国强盛发奋学习的坚定信念。

知识目标

- 1.了解放大电路的概念。
- 2.掌握放大电路的主要技术指标。
- 3.了解共发射极放大电路的组成及工作原理。
- 4.掌握共发射极放大电路的分析方法。

技能目标

通过本单元的学习，掌握共发射极放大电路的性能指标及其测试方法，掌握声控开关的制作方法。

基础知识

一、放大电路的概念

放大电路又称放大器，是对模拟信号最基本的处理电路，也是应用最广泛的电子电路之一。模拟信号是在时间和数值上均连续的信号。例如，正弦信号是典型的模拟信号。大多数物理量所转换成的信号均为模拟信号。对模拟信号进行处理的电路称为模拟电路。放大电路是构成各种功能的模拟电路的基本电路。所谓“放大”，就是将输入的微弱信号(简称信号，指变化的电压、电流等)放大到所需要的幅值且与原输入信号的变化规律一致，即进行不失真的放大。放大电路的本质是能量的控制和转换。

二、放大电路的主要技术指标

(一) 输入和输出电阻

输入电阻 r_i 是从放大电路输入端口视入的等效电阻，它定义为放大电路输入电压 U_i 和输入电流 I_i 的比值，即

$$r_i = \frac{U_i}{I_i} \quad (3-1)$$

r_i 与网络参数、负载电阻 R_L 有关，表征了放大电路对信号源的负载特性。

输出电阻 r_o 是表征放大电路带负载能力的一个重要参数。它定义为输入信号电压源 U_s 短路或电流源 I_s 开路并断开负载时，从放大电路输出端

$$r_o = \frac{U_o}{I_o} \Big|_{\substack{R_L = \infty \\ U_s = 0}} \quad (3-2)$$

r_o 不仅与网络参数有关，还与源内阻 R_s 有关。若要求放大电路具有恒定的电压输出， r_o 应越小越好；若要求放大电路具有恒定的电流输出， r_o 应越大越好。

(二) 放大倍数

放大倍数（或增益）表示输出信号的变化量与输入信号的变化量之比，用来衡量放大电路的放大能力。根据需要处理的输入量和输出量的不同，有电压放大倍数、电流放大倍数、互阻放大倍数和互导放大倍数四种。

电压放大倍数为

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} \quad (3-3)$$

电流放大倍数为

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} \quad (3-4)$$

互阻放大倍数为

$$A_r = \frac{U_o}{I_i} \quad (3-5)$$

互导放大倍数为

$$A_g = \frac{I_o}{U_i} \quad (3-6)$$

为了表征输入信号源对放大电路激励的大小，常引入源放大倍数的概念。其中，源电压放大倍数为

$$A_{uS} = \frac{U_o}{U_S} = A_u \frac{r_i}{R_S + r_i} \quad (3-7)$$

源电流放大倍数为

$$A_{iS} = \frac{I_o}{I_S} \quad (3-8)$$

(三) 失真

失真是评价放大电路放大信号质量的重要指标，常分为线性失真和非线性失真两大类。

线性失真又分为频率失真和瞬变失真。前者是由于对不同频率的输入信号产生不同的放大倍数和相移所引起的信号失真；后者是由于电抗元件对电压或电流不能突变而引起的输出波形的失真。线性失真不会在输出信号中产生新的频率分量。

非线性失真则是由半导体器件的非线性特性所引起的。它会导致输出信号中产生新的频率分量。

三、基本放大电路的组成

(一) 放大电路的组成原理

无论何种类型的放大电路，均由三大部分组成，如图3-1所示。第一部分是具有放大作用的半导体器件，如晶体管、场效应管，这是整个电路的核心。第二部分是直流偏置电路，其作用是保证半导体器件工作在放大状态。第三部分是耦合电路，其作用是将输入信号源和输出负载分别连接到放大管的输入端和输出端。

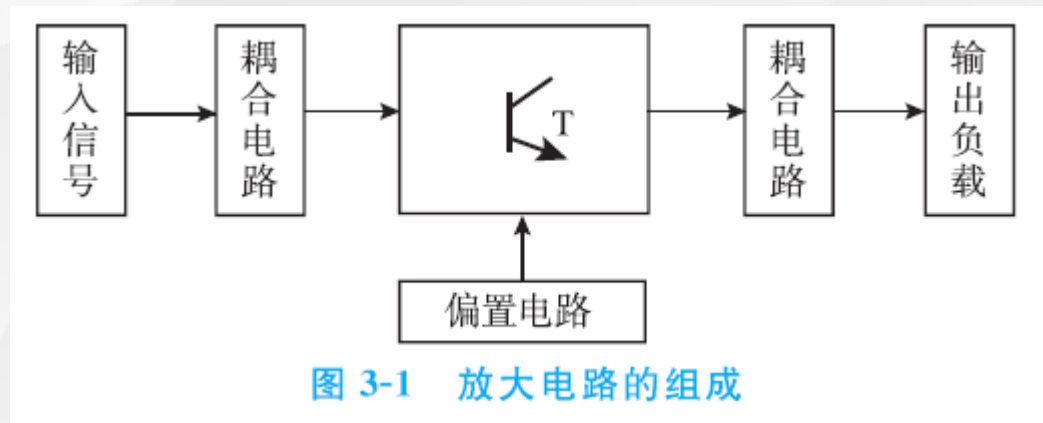


图 3-1 放大电路的组成

第一单元 共发射极放大电路

1. 偏置电路

在分立元件电路中，常用的偏置方式有分压偏置电路、自偏置电路等。其中，分压偏置电路适用于任何类型的放大器件，而自偏置电路只适用于耗尽型场效应管（如JFET管、DMOS管）。偏置电路除了为放大管提供合适的静态工作点之外，还应具有稳定静态工作点的作用。

2. 耦合方式

为了保证信号不失真地放大，放大电路与信号源、放大电路与负载，以及放大电路中级与级之间的耦合方式必须保证交流信号正常传输，且尽量减小有用信号在传输过程中的损失。实际放大电路有如下两种耦合方式。

第一单元 共发射极放大电路

(1) **电容耦合和变压器耦合**。这种耦合方式具有隔直流的作用，故各级静态工作点相互独立，互不影响，但不易集成，常用于分立元件放大电路中。

(2) **直接耦合**。这是集成电路中广泛采用的一种耦合方式。这种耦合方式存在的两个主要问题是电平配置问题和零点漂移问题。解决电平配置问题的主要方法是加电平位移电路；解决零点漂移问题的主要措施是采用低温漂的差分放大电路。

课堂讨论：

信号经过放大电路放大后，放大的能量从哪里来？

(二) 共发射极放大电路

共发射极放大电路如图3-2所示。集电极电源 V_{CC} 是放大电路的能源，为输出信号提供能量，并保证发射结处于正偏、集电结处于反偏，使晶体管工作在放大区。 V_{CC} 取值一般为几伏到几十伏。晶体管是放大电路的核心器件。利用晶体管在放大区的电流控制作用，可将微弱的电信号进行放大。集电极电阻 R_C 是晶体管的集电极负载电阻，它将集电极电流的变化转换为电压的变化，实现电路的电压放大作用。 R_C 一般为几千欧到几万欧。基极电阻 R_B 用于保证晶体管工作在放大状态。改变 R_B 可使晶体管有合适的静态工作点。 R_B 一般为几万欧到几十万欧。耦合电容 C_1 、 C_2 起隔直流通交流的作用；在信号频率范围内，可认为其容抗近似为零。所以分析电路时，在直流通路中电容视为开路，在交流通路中电容视为短路。 C_1 、 C_2 一般为十几微法到几十微法的有极性的电解电容。

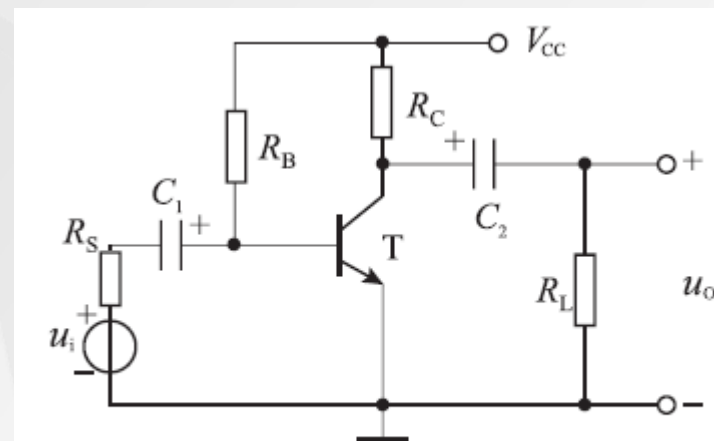


图 3-2 共发射极放大电路

四、共发射极放大电路的分析方法

当无输入信号，即 $u_i=0$ 时，放大电路的工作状态称为静态，也称直流工作状态。

当有输入信号，即 $u_i \neq 0$ 时，放大电路的工作状态称为动态，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。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。

(一) 静态分析

静态分析就是分析放大电路的直流工作情况，以确定晶体管各电极之间的静态值 U_{BE} 、 i_B 、 i_C 、 U_{CE} 。静态分析主要在直流通路中进行。所谓直流通路，就是静态电流流经的通路。对于直流通路，电容视为开路，电感线圈视为短路(即忽略线圈电阻)，信号源视为短路，但应保留内阻。静态分析的主要方法有以下两种。

第一单元 共发射极放大电路

1. 由放大电路的直流通路确定静态工作点

将耦合电容 C_1 、 C_2 视为开路，画出如图3-3所示的共发射极放大电路的直流通路。

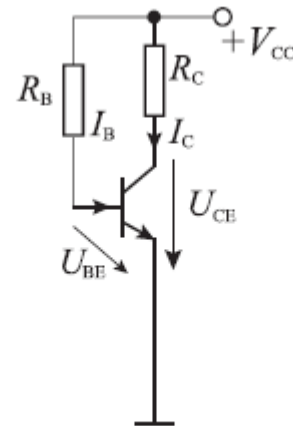


图 3-3 共发射极放大电路的直流通路

由电路得

$$\begin{cases} I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_B} \approx \frac{V_{CC}}{R_B} \\ I_C = \beta I_B \\ U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \end{cases} \quad (3-9)$$

用式(3-9)可以近似估算此放大电路的静态工作点。晶体管导通后，硅管 U_{BE} 的大小为 $0.6 \sim 0.7 \text{ V}$ ，锗管 U_{BE} 的大小为 $0.2 \sim 0.3 \text{ V}$ 。而当 V_{CC} 较大时， U_{BE} 可以忽略不计。

2. 由图解法求静态工作点

(1) 用输入特性曲线确定 I_{BQ} 和 U_{BEQ} 。根据图3-3中的输入回路，可列出输入回路电压方程：

$$V_{CC} = I_B R_B + U_{BE} \quad (3-10)$$

同时 U_{BE} 和 I_B 还符合晶体管输入特性曲线所描述的关系，输入特性曲线用函数式可表示为

$$I_B = f(U_{BE}) \Big|_{U_{CE} = \text{常数}} \quad (3-11)$$

用作图的方法在输入特性曲线所在的 $U_{BE}-I_B$ 平面上画出式(3-10)对应的直线，两线的交点就是静态工作点Q，如图3-4a所示。Q点的坐标就是静态时的基极电流 I_{BQ} 和基-射极间电压 U_{BEQ} 。

(2) 用输出特性曲线确定 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 。根据图3-3中的输出回路及晶体管的输出特性曲线，可以写出下面两式：

$$V_{CC} = I_C R_C + U_{CE} \quad (3-12)$$

$$I_C = f(U_{CE}) \Big|_{I_B = \text{常数}} \quad (3-13)$$

第一单元 共发射极放大电路

晶体管的输出特性可由已选定管子型号在手册上查找，或从图示仪上描绘，而式(3-12)为直线方程，其斜率为 $\tan\alpha=-1/R_c$ ，在横轴的截距为 V_{CC} ，在纵轴的截距为 V_{CC}/R_c 。该直线很容易在图3-4b上画出。因为它是直流通路得出的，且与集电极负载电阻有关，故称为直流负载线。由于已确定了 I_{BQ} 的值，因此直流负载线与 $I_B=I_{BQ}$ 所对应的那条输出特性曲线的交点就是静态工作点Q，如图3-4b所示。Q点的坐标就是静态时晶体管的集电极电流 I_{CQ} 和集电极-发射极间电压 U_{CEQ} 。由图3-4可见，基极电流的大小影响静态工作点的位置。若 I_{BQ} 偏低，则静态工作点Q靠近截止区；若 I_{BQ} 偏高，则静态工作点Q靠近饱和区。因此，在已确定直流电源 V_{CC} 和集电极电阻 R_c 的情况下，静态工作点设置的合适与否取决于 I_B 的大小，调节基极电阻 R_B ，改变电流 I_B ，可以调整静态工作点。

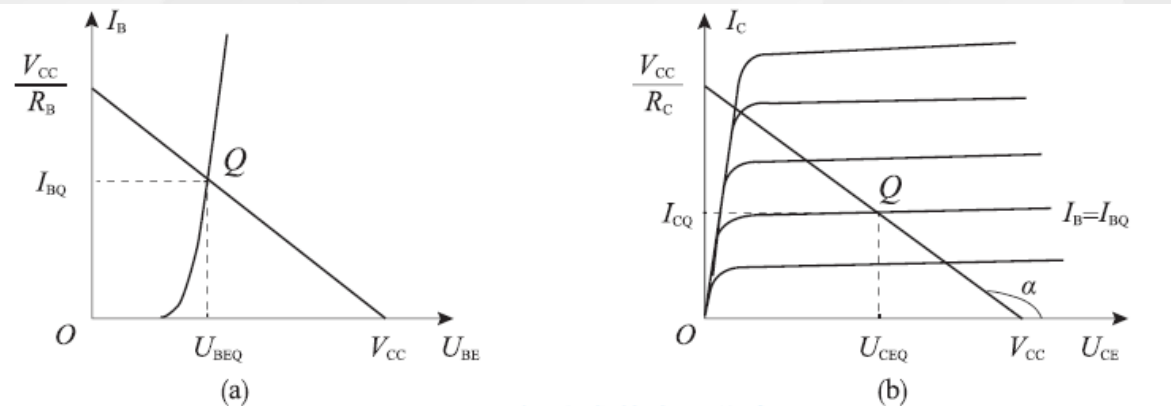


图 3-4 图解法求静态工作点

课堂讨论：

为什么放大电路要设置静态工作点？设置静态工作点的意义是什么？

(二) 动态分析

静态工作点确定以后，放大电路在输入电压信号 u_i 的作用下，若晶体管能始终工作在特性曲线的放大区，则放大电路输出端就能获得基本不失真的放大的输出电压信号 u_o 。放大电路的动态分析，就是要对放大电路中信号的传输过程、放大电路的性能指标等问题进行分析，这也是模拟电子电路所要讨论的主要问题。微变等效电路法和图解法是动态分析的基本方法。

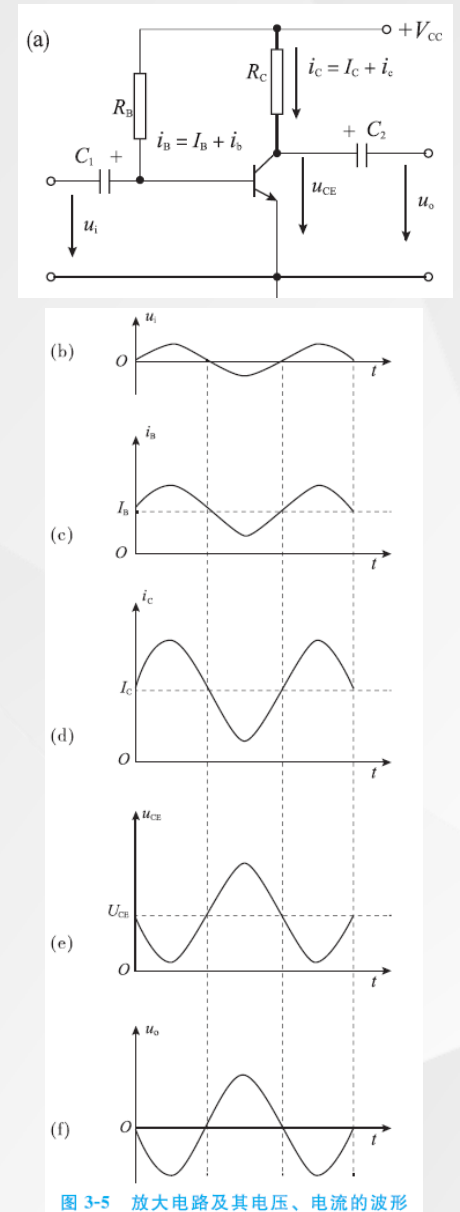
第一单元 共发射极放大电路

1. 信号在放大电路中的传输与放大

以图3-5a为例来讨论，图中 I_B 、 I_C 、 U_{CE} 表示直流分量（静态值）， i_b 、 i_c 、 u_{ce} 表示输入信号作用下的交流分量（有效值用 I_b 、 I_c 、 U_{ce} 来表示）， i_B 、 i_c 、 u_{CE} 表示总电流或总电压。

设输入信号 u_i 为正弦信号，通过耦合电容 C_1 加到晶体管的基极射极，产生电流 i_b ，因而基极电流 $i_B = I_B + i_b$ 。集电极电流受基极电流的控制， $i_c = I_C + i_c = \beta (I_B + i_b)$ 。电阻 R_C 上的压降为 $i_c R_C$ 。而集-射极的管压降 $u_{CE} = V_{CC} - i_c R_C = V_{CC} - (I_C + i_c) R_C = U_{CE} - i_c R_C$ ，随 $i_c R_C$ 的增大而减小。耦合电容 C_2 阻隔直流分量 U_{CE} ，将交流分量 $u_{ce} = -i_c R_C$ 送至输出端，这就是放大后的信号电压 $u_o = u_{ce} = -i_c R_C$ 。 u_o 为负，说明 u_i 、 i_b 、 i_c 为正半周时， u_o 为负半周；它与输入信号电压 u_i 反相。

图3-5b ~ f所示为放大电路中各有关电压和电流的信号波形。



第一单元 共发射极放大电路

综上所述，可归纳以下几点。

(1) 无输入信号时，晶体管的电压、电流都是直流分量。有输入信号后， i_B 、 i_C 、 u_{CE} 都在原来静态值的基础上叠加了一个交流分量。虽然 i_B 、 i_C 、 u_{CE} 的瞬时值是变化的，但它们的方向始终不变，即均是脉动直流量。

(2) 输出电压 u_o 与输入电压 u_i 频率相同，且 u_o 的幅度比 u_i 的幅度大得多。

(3) 电流 i_b 、 i_c 与输入电压 u_i 同相，输出电压 u_o 与输入电压 u_i 反相，即共发射极放大电路具有“倒相”作用

2.微变等效电路法

(1) **晶体管的微变等效电路**。所谓晶体管的微变等效电路，就是晶体管在小信号（微变量）的情况下工作在特性曲线直线段时，将晶体管（非线性器件）用一个线性电路代替。

由如图3-6a所示的晶体管的输入特性曲线可知，小信号作用下的静态工作点Q邻近的Q₁ ~ Q₂工作范围内的曲线可视为直线，其斜率不变。两变量的比值称为晶体管的输入电阻，即

$$r_{be} = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE} = \text{常数}} = \frac{u_{be}}{i_b} \quad (3-14)$$

式(3-14)表示晶体管的输入回路可用管子的输入电阻 r_{be} 来等效代替，其等效电路如图3-7b所示。根据半导体理论及文献资料，工程中低频小信号下的 r_{be} 可用式(3-15)估算。

$$r_{be} = 300 \Omega + (1 + \beta) \frac{26 \text{ mV}}{I_{EQ} (\text{mA})} \quad (3-15)$$

第一单元 共发射极放大电路

工作在低频小信号下的晶体管的 r_{be} 一般为几百欧到几千欧。

由如图3-6b所示的晶体管的输出特性曲线可知，小信号作用下的静态工作点Q邻近的 $Q_1 \sim Q_2$ 工作范围内，放大区的曲线是一组近似等距的水平线，它反映了集电极电流 I_C 只受基极电流 I_B 的控制，而与管子两端的电压 U_{CE} 基本无关，因而晶体管的输出回路可等效为一个受控的恒流源，即

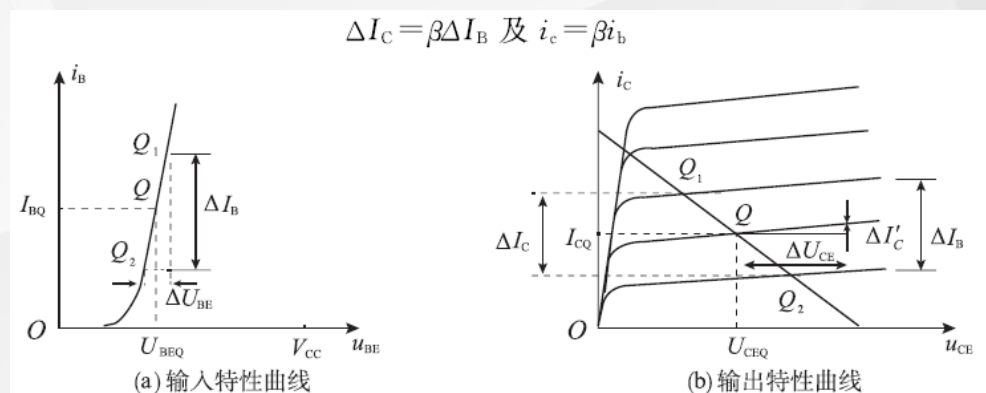


图 3-6 利用晶体管的特性曲线求 r_{be} 、 β 和 r_{ce}

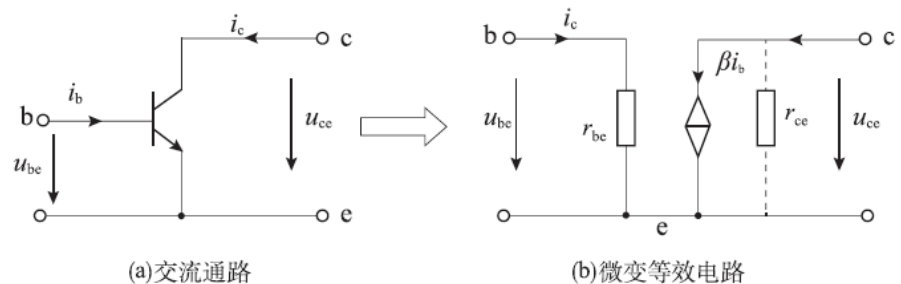


图 3-7 晶体管的交流回路及微变等效电路

第一单元 共发射极放大电路

实际晶体管的输出特性并非与横轴绝对平行。当 I_B 为常数时， ΔU_{CE} 变化会引起 $\Delta I'_C$ 变化，这个线性关系就是晶体管的输出电阻 r_{ce} ，即

$$r_{ce} = \left. \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I'_C} \right|_{I_B = \text{常数}} = \frac{u_{ce}}{i_c} \quad (3-16)$$

r_{ce} 和受控恒流源 βi_b 并联。由于输出特性近似为水平线， r_{ce} 又高达几万欧到几十万欧，在微变等效电路中可视为开路而不予考虑。

(2) 共发射极放大电路的微变等效电路。放大电路的直流通路可确定静态工作点，交流通路则反映了信号的传输过程，通过它可以分析计算放大电路的性能指标。图3-8a所示是共发射极放大电路的交流通路。将交流通路中的晶体管用微变等效电路来取代，可得如图3-8b所示的共发射极放大电路的微变等效电路。

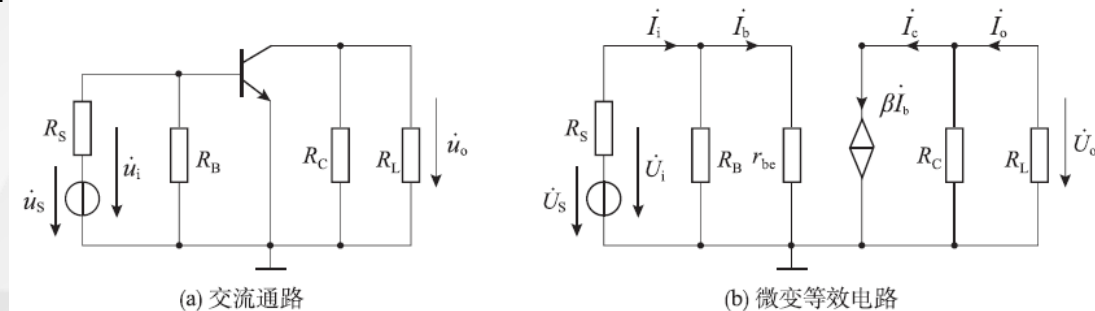


图 3-8 共发射极放大电路的交流通路及微变等效电路

3. 动态性能指标的计算

(1) **电压放大倍数 A_u** 。电压放大倍数是小信号电压放大电路的主要技术指标。设输入为正弦信号，图3-8b中的电压和电流都可用相量表示。

$$\begin{aligned}\dot{U}_o &= -\beta \dot{I}_b \cdot (R_C // R_L) \\ \dot{U}_i &= \dot{I}_b r_{be} \\ A_u &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b (R_C // R_L)}{\dot{I}_b r_{be}} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}}\end{aligned}\quad (3-17)$$

式中， $R'_L = R_C // R_L$ ； A_u 为复数，它反映了输出电压与输入电压之间的大小和相位关系；负号表示共发射极放大电路的输出电压与输入电压的相位反相。

当放大电路输出端开路（未接负载电阻 R_L ）时，可得空载时的电压放大倍数为

$$A_{uo} = -\beta \frac{R_C}{r_{be}}\quad (3-18)$$

第一单元 共发射极放大电路

由式 (3-17) 和式 (3-18) 可得出，放大电路接有负载电阻 R_L 时的电压放大倍数比空载时降低了。 R_L 愈小，电压放大倍数愈低。一般共发射极放大电路为提高电压放大倍数，总希望负载电阻 R_L 大一些。

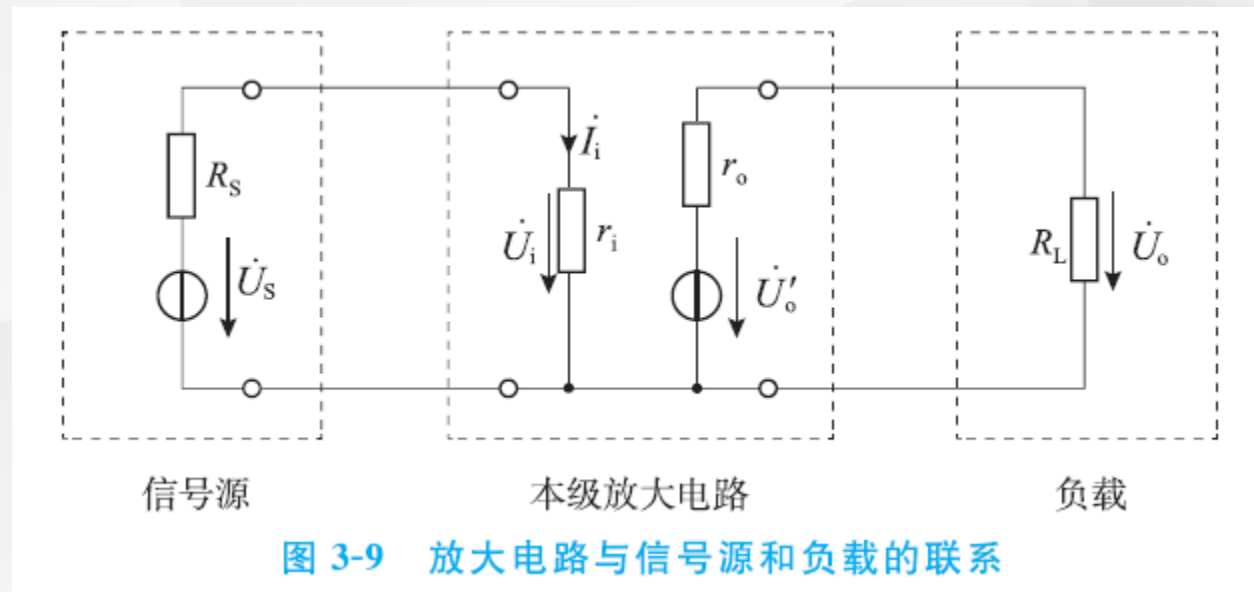
输出电压 U_o 与输入信号源电压 U_s 之比，称为源电压放大倍数 (A_{uS}) ，即

$$A_{uS} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} = A_u \cdot \frac{r_i}{R_s + r_i} \approx \frac{-\beta R'_L}{R_s + r_{be}} \quad (3-19)$$

式 (3-19) 中， $r_i = R_B // r_{be} \approx r_{be}$ (通常 $R_B \gg r_{be}$) 。可见 R_s 愈大，电压放大倍数愈低。一般共发射极放大电路为提高电压放大倍数，总希望信号源内阻 R_s 小一些。

第一单元 共发射极放大电路

(2) 放大电路的输入电阻 r_i 。一个放大电路的输入端总是与信号源（或前级放大电路）相连的，其输出端总是与负载（或后级放大电路）相接的。因此，放大电路与信号源（或前级放大电路）和负载（或后级放大电路）之间都是互相联系、互相影响的。图3-9所示为它们之间的联系。



第一单元 共发射极放大电路

输入电阻 r_i 也是放大电路的一个主要性能指标。放大电路是信号源（或前级放大电路）的负载，其输入端的等效电阻就是信号源（或前级放大电路）的负载电阻，也就是放大电路的输入电阻 r_i 。输入电阻 r_i 为输入电压与输入电流之比，即

$$r_i = \frac{U_i}{I_i} \quad (3-20)$$

共发射极放大电路的输入电阻可由如图 3-10 所示的等效电路计算得出。由图可知

$$\dot{I}_i = \frac{\dot{U}_i}{R_B} + \frac{\dot{U}_i}{r_{be}}$$

得

$$r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_B // r_{be} \approx r_{be} \quad (3-21)$$

一般输入电阻越高越好。原因是：第一，较小的 r_i 从信号源取用较大的电流会增加信号源的负担。第二，电压信号源内阻 R_s 和放大电路的输入电阻 r_i 分压后， r_i 上得到的电压才是放大电路的输入电压 U_i ， r_i 越小，相同的 U_s 使放大电路的输入电压 U_i 越小，那么放大后的输出电压也就越小。第三，若与前级放大电路相连，则本级的 r_i 就是前级的负载电阻 R_L ，如果 r_i 较小，则前级放大电路的电压放大倍数也就越小。总之，放大电路要有较高的输入电阻。

第一单元 共发射极放大电路

(3) 输出电阻 r_o 。放大电路是负载（或后级放大电路）的等效信号源，其等效内阻就是放大电路的输出电阻 r_o ，它是放大电路的性能参数。它的大小影响本级和后级的工作情况。放大电路的输出电阻 r_o ，即从放大电路输出端视入的戴维南等效电路的等效内阻，实际中采用如下方法计算。

将输入信号源短路，但保留信号源内阻，在输出端加一个信号 U_o' ，以产生一个电流 I_o' ，则放大电路的输出电阻为

$$r_o = \frac{U_o'}{I_o'} \Big|_{U_s=0} \quad (3-22)$$

共发射极放大电路的输出电阻可由如图3-11所示的等效电路计算得出。由图可知，当 $U_s=0$ 时， $I_b=0$ ， $\beta I_b=0$ ，而在输出端加一个信号 U_o' ，产生的电流 I_o' 就是电阻 R_C 中的电流，电压与电流之比即为输出电阻，即

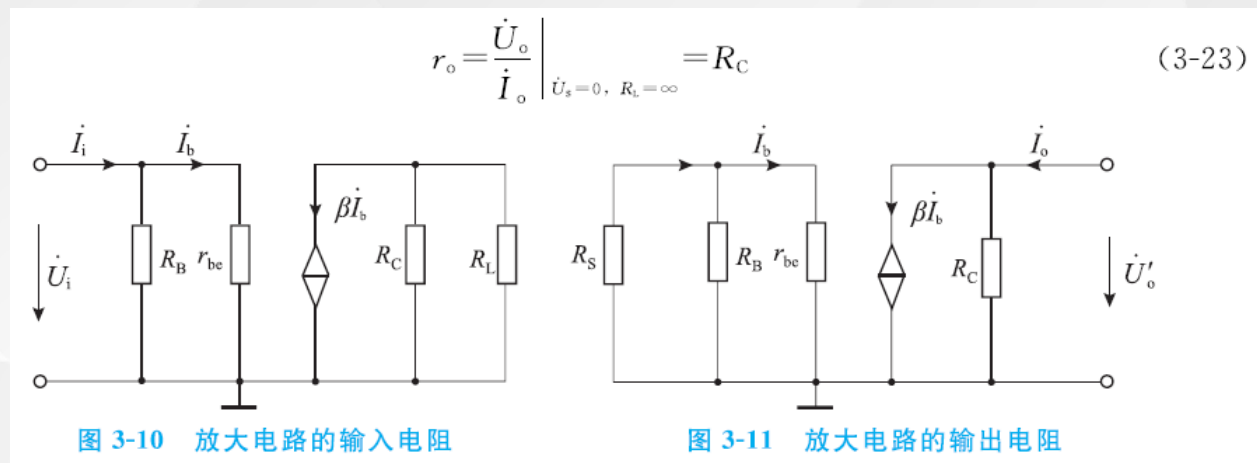


图 3-10 放大电路的输入电阻

图 3-11 放大电路的输出电阻

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/156020101242011013>