

第3章

单管放大器

单管放大器是指由一只晶体管构成的放大器。由于放大器的输入端和输出端共有 4 个端点,而三极管和场效应管只有 3 个电极,因此,放大器中三极管和场效应管必然有一个电极处在输入端和输出端的公共端。根据公共端的不同,晶体管可以组成 6 种形式的单管放大器,其中 5 种放大器是最常见的,分别是:共发射极放大器、共集电极放大器、共基极放大器、共源极放大器及共漏极放大器。

3.1 单管共射放大器

3.1.1 一个典型的共射放大器

1. 放大器基本结构

图 3-1 所示为典型阻容耦合共射放大器。输入信号为 u_i , 输出信号为 u_o ; 三极管基极、发射极和信号源组成输入回路; 集电极、发射极、负载电阻 R_c 及 R_L 组成输出回路; 该放大器发射极为输入和输出的公共端, 故为共射放大器。

2. 各元件的作用

1) 三极管 T

采用 NPN 型硅管, 具有电流放大作用, 是放大器的核心元件。

2) 基极偏置电阻 R_b

V_{CC} 正端通过基极电阻 R_b 供给基极一个合适的基极电流 I_B , 这种电路又称固定基极偏置共发射极放大器。

3) R_c 的作用

R_c 使集电极电位因 I_C 的变化而改变, 从而引起输出端电压变化。

4) 电容 C_1 和 C_2

电容 C_1 的作用是隔离 V_{CC} 对信号源的影响, 并有效地将信号源提供的信号传送到基极 b; 电容 C_2 的作用是隔离 V_{CC} 对负载的影响, 并能把放大的交流信号 u_{ce} 传送到负载。

3. 静态工作点的定义

由以上分析可知, 在图 3-1 中, 当有交流输入信号时, 电路中直流量与交流量共存。

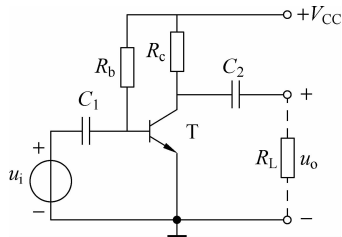


图 3-1 阻容耦合共射放大器

当放大器输入信号为零时,晶体管各极电流和电压都是不变的直流量,称为**直流工作点**或**静态工作点**,在管子的输入、输出特性曲线上确定的一点称为 **Q 点**,常记作 $I_{BQ}, I_{CQ}, U_{BEQ}, U_{CEQ}$ 。

3.1.2 放大器的组成原则

通过对基本共射放大器的简单分析可以总结出,在组成放大器时必须遵循以下原则:

(1) 必须根据所用放大管的类型提供直流电源,以便设置合适的静态工作点,并作为输出的能源。对于三极管放大器,电源的极性和大小应使三极管发射结正偏,集电结反偏,保证管子工作在放大区。对于场效应管放大器,电源的极性和大小应为场效应管的栅极与源极之间、漏极与源极之间提供合适的电压,使管子工作在恒流区。

(2) 电阻取值适当,与电源配合,使放大管有合适的静态工作电流。

(3) 输入信号必须能够作用于放大管的输入回路。

(4) 负载接入时,必须保证放大管输出回路的动态电流能够作用于负载。

【例 3.1】 试分析图 3-2 所示的电路是否具有放大作用。如果不能放大,如何改正?

在图 3-2(a)中所示,由于 C_1 的隔直作用而使发射结零偏,放大管不能放大,因此该电路不具有放大作用。改正的方法是将电容 C_1 移至如图 3-1 所示的位置。

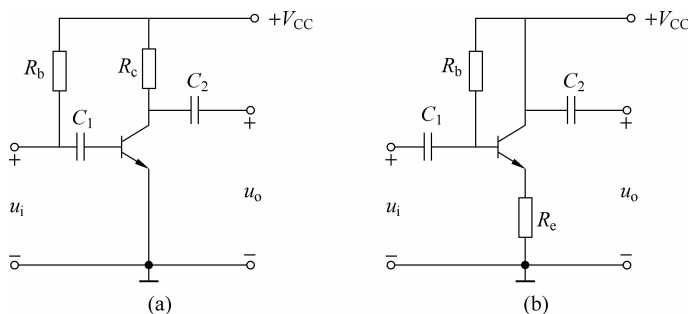


图 3-2 例 3.1 的电路图

在图 3-2(b)中,信号放大后虽然 i_c 有变化,但却被直流电源 V_{CC} 短接,交流信号无法输出。改正的方法是在集电极与直流电源 V_{CC} 之间加一集电极电阻 R_c ,以便把放大的集电极电流转化为输出电压。

3.2 放大器的分析

放大器的分析包括两方面的内容:一是**静态分析**(又称**直流分析**或**工作点分析**),二是**动态分析**(又称**交流分析**或**小信号分析**)。

3.2.1 直流通路和交流通路

一般情况下,在放大器中,直流量和交流量总是共存的。但由于电容、电感及电源等的存在,直流量和交流量流经的通路是不完全相同的。为了分析方便,通常先作静态分析后再

作动态分析。

直流通路是在直流电源作用下直流电流流经的通路,画直流通路的原则是:

- (1) 电容视为开路;
- (2) 电感视为短路;
- (3) 电压信号源视为短路但保留其内阻;
- (4) 电流信号源视为开路并保留其内阻。

例如,图 3-1 所示的直流通路如图 3-3(a)所示。

交流通路是输入交流信号作用下,信号流经的通路。画交流通路的原则是:

- (1) 耦合电容或旁路电容视为短路;
- (2) 电感照搬;
- (3) 凡是不变的信号就视为 0,直流电压源视为接地,直流电流源视为开路;
- (4) 在不考虑内阻时,二极管和稳压管都可视为短路。

例如,图 3-1 所示的交流通路如图 3-3(b)所示。

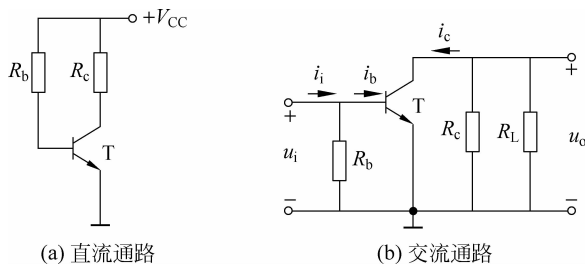


图 3-3 图 3-1 放大器的直流通路和交流通路

由于晶体管属于非线性器件,不能用普通线性电路的方法来分析。有了等效电路,就可以对晶体管放大器进行电路分析了。

3.2.2 等效电路法

现在来分析如图 3-1 所示的阻容耦合共射放大器。

1. 静态分析

直流分析只要求出放大管本身的直流参数即可。如图 3-1 所示的放大电路,首先画出其直流通路,如图 3-3(a)所示,此时

$$I_{BQ} = (V_{CC} - U_{BEQ})/R_b \approx V_{CC}/R_b \quad (3-1)$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} \approx \beta V_{CC}/R_b \quad (3-2)$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c \quad (3-3)$$

2. 动态分析

图 3-3(b)给出了图 3-1 的交流通路,一般情况下有了交流通路就可以进行动态分析了,但画出 h 参数微变等效电路更加便于分析。如图 3-4(a)所示为图 3-1 电路的 h 参数微变等效电路。

1) 放大倍数

在图 3-4(a) 中, 输出回路 $u_o = -i_c(R_c // R_L) = -\beta i_b R'_L$, 输入回路 $u_i = i_b r_{be}$, 其中, $r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{\text{EQ}}(\text{mA})}$, 故:

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \quad (3-4)$$

式(3-4)表明共射放大器为反相放大器。若 R_L 开路, 则电压放大倍数为

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{\beta R_c}{r_{be}} \quad (3-5)$$

A_u 通常在几十倍到一百倍。

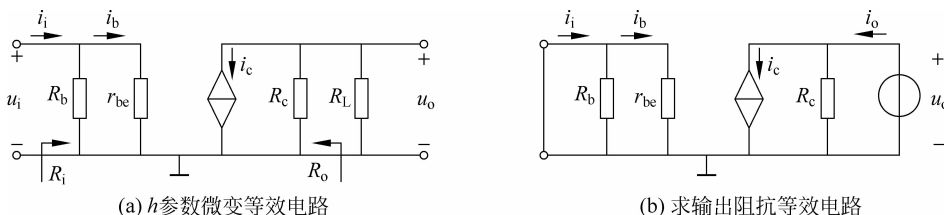


图 3-4 图 3-1 放大器的微变等效电路

2) 输入阻抗

根据 R_i 的定义, 当外加一个 u_i 必然产生 i_i , 则:

$$R_i = \frac{u_i}{i_i} = \frac{u_i}{u_i/R_b + u_i/r_{be}} = R_b // r_{be} \quad (3-6)$$

实际中 R_b 是 r_{be} 的几十倍到几百倍, 所以有

$$R_i \approx r_{be} \quad (3-7)$$

3) 输出阻抗

放大器的输出阻抗 R_o 是相对外接负载 R_L 而言的一个内部参数, 因此, 求 R_o 时, 不能将外接负载 R_L 考虑在内。求 R_o 的电路如图 3-4(b) 所示, 令 $u_i = 0$, 对图 3-4(b) 分析可知 $i_b = 0$, 受控电流源 $i_c = \beta i_b = 0$, 即受控电流源相当于开路, 当外加一个 u_o 必然产生 i_o , 则:

$$R_o = \frac{u_o}{i_o} = \frac{i_o R_c}{i_o} = R_c \quad (3-8)$$

以后求 R_i 和 R_o 时, 对于不复杂的电路我们可能会直接写出, 而省去外加信号源的推导过程。

【例 3.2】 在如图 3-1 所示电路中, 已知 $V_{CC} = 12\text{V}$, $R_b = 510\text{k}\Omega$, $R_c = 3\text{k}\Omega$; 三极管的 $r_{bb'} = 150\Omega$, $\beta = 80$, 导通时 $U_{\text{BEQ}} = 0.7\text{V}$; $R_L = 3\text{k}\Omega$ 。

(1) 求出电路的 A_u , R_i , R_o ;

(2) 若所加信号源的内阻 $R_s = 2\text{k}\Omega$, 求 A_{us} ($A_{us} = u_o/u_s$)。

解: (1) 首先求出 Q 点和 r_{be} , 再求出 A_u , R_i , R_o 。

根据式(3-1), 式(3-2), 式(3-3), $I_{\text{BQ}} = (V_{CC} - U_{\text{BEQ}})/R_b = \frac{12-0.7}{510}\text{mA} \approx 0.0222\text{mA} = 22.2\mu\text{A}$ 。

$$I_{\text{CQ}} = \beta I_{\text{BQ}} \approx (80 \times 0.0222)\text{mA} \approx 1.77\text{mA}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c \approx (12 - 1.77 \times 3)V = 6.69V$$

$U_{CEQ} > U_{BEQ}$, 说明 Q 点在三极管的放大区。

$$r_{be} \approx r_{bb'} + \beta \frac{U_T}{I_{CQ}} \approx \left(150 + 80 \times \frac{26}{1.77} \right) \Omega \approx 1325 \Omega \approx 1.33k\Omega$$

画出交流等效电路, 如图 3-5 所示。

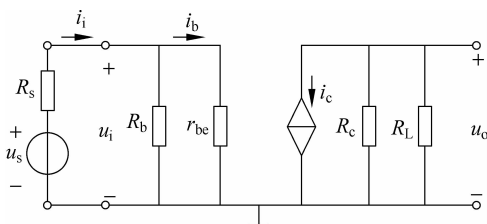


图 3-5 例 3.2 电路图

由式(3-4)可以得出

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \approx -80 \times \frac{3 \times 3}{3 + 3} \approx -90$$

通过观察可直接写出 R_i 和 R_o :

$$R_i = \frac{u_i}{i_i} = R_b // r_{be} \approx 1.33k\Omega$$

$$R_o = R_c = 3k\Omega$$

$$(2) A_{us} = \frac{u_o}{u_s} = \frac{u_i}{u_s} \cdot \frac{u_o}{u_i} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_u, \text{ 代入数据后得 } A_{us} \approx -36。$$

3.2.3 图解分析法

已知放大管的输入特性图、输出特性图以及放大器中各元件参数的情况下, 利用作图的方法对放大器进行分析即为图解法。下面的分析还以图 3-1 所示电路为例。

1. 静态分析

1) 图解法求静态工作点

为便于分析, 将图 3-3(a) 的直流通路改画成如图 3-6(a) 所示的形式。在图 3-6(a) 中, 用虚线将三极管与外围电路分开, 两条虚线之间为三极管, 虚线之外是电路的其他元件。

在三极管的输入回路中, 静态工作点在三极管的输入特性曲线上, 又满足外电路的回路方程:

$$V_{CC} = I_B R_b + U_{BE} \quad (3-9)$$

在输入特性坐标系中, 分别令 I_B 和 U_{BE} 为 0, 可求得式(3-9)代表的直线与横轴的交点 $(V_{CC}, 0)$ 以及与纵轴的交点 $(0, V_{CC}/R_b)$ 。直线与输入特性曲线的交点就是静态工作点 Q , 如图 3-6(b) 所示。式(3-9)所确定的直线称为输入回路负载线, 直线的斜率为 $-1/R_b$ 。

与输入回路类似, 在三极管的输出回路中, 静态工作点在 $I_B = I_{BQ}$ 的那条输出特性曲线上, 又满足外电路的回路方程:

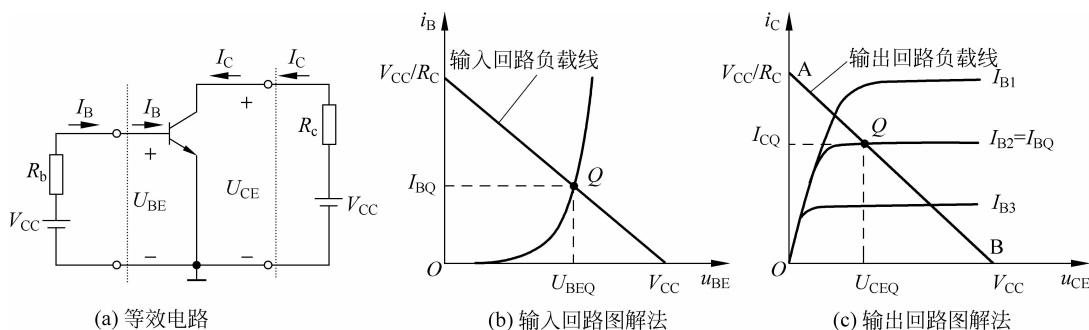


图 3-6 放大器的静态分析

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_c \quad (3-10)$$

在输出坐标系中,分别令 I_C 和 U_{CE} 为 0,可求得式(3-10)代表的直线与横轴的交点 $(V_{CC}, 0)$ 以及与纵轴的交点为 $(0, V_{CC}/R_c)$ 。找到 $I_B = I_{BQ}$ 的那条输出特性曲线,该曲线与上述直线的交点就是静态工作点 Q ,如图 3-6(c) 所示。由式(3-10)确定的直线称为输出回路负载线,又称为直流负载线,直线斜率为 $-1/R_c$,它描述的是在 V_{CC} 和 R_c 确定后直流工作点坐标 (U_{CE}, I_c) 的轨迹。

应当指出,如果输出特性曲线上没有 $I_B = I_{BQ}$ 的那条输出特性曲线,则应当根据曲线规律补充画出该曲线。

2) 电路参数对静态工作点的影响

通过上述静态工作点的图解过程可以看出,影响静态工作点的参数有 V_{CC}, R_b, R_c 。

改变 R_b : 输出回路负载线不变, Q 点将沿该负载线上下移动,如图 3-7(a) 所示。

改变 R_c : 输出回路负载线斜率变化, Q 点在 I_{BQ} 所在的那条输出特性曲线上移动,如图 3-7(b) 所示。

改变 V_{CC} : 输出回路负载线平移, Q 点发生移动,如图 3-7(c) 所示。可见, V_{CC} 的变化致使输出回路负载线和 I_{BQ} 所在的那条输出特性曲线均发生变化,故一般对 V_{CC} 的改变要慎重。

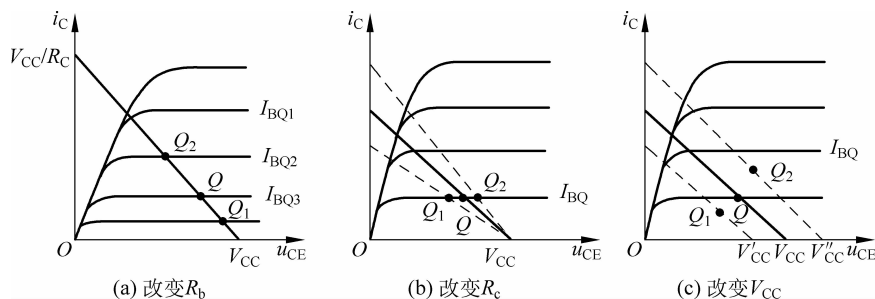


图 3-7 电路参数对静态工作点的影响

2. 动态分析

图解动态分析就是在放大器输入端加一动态信号如正弦波,描绘从输入到输出各点的电量变化情况,进而分析放大器的有关性能。其优点是可直接地看到放大器输入和输出电

压、电流的变化范围,由此大致确定电压、电流放大倍数,正确地选择静态工作点和研究信号的失真情况。下面仍以图 3-1 所示阻容耦合共射放大器为例讨论。图解动态分析可按以下两步进行:

(1) 由放大管输入特性曲线及 u_i 描绘输入回路中电压 u_{BE} 和电流 i_B 的波形。

输入正弦动态信号后,电压 u_{BE} 是静态时的直流电压 U_{BE} 与输入交流电压 u_i 的叠加,即

$$u_{BE} = U_{BE} + u_i \quad (3-11)$$

随着 u_{BE} 瞬时值的改变,工作点将在静态工作点 Q 的上、下沿三极管输入特性曲线移动,使 i_B 在静态 I_B 基础上叠加一个交流分量 i_b ,如图 3-8 所示。

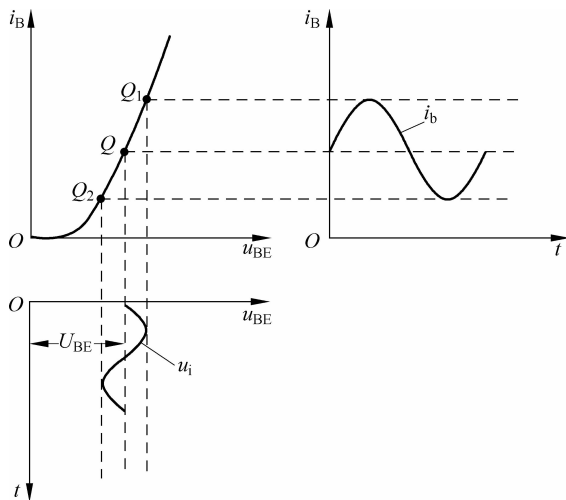


图 3-8 输入回路图解法

(2) 由 i_B 的变化曲线、输出特性曲线及输出端负载线画出 u_{CE} 和 i_C 的波形。

① 负载 R_L 开路时的情形。把因输入信号引起的坐标 (u_{CE}, i_C) 变化轨迹称为**交流负载线**,显然,在 R_L 开路时交流负载线和直流负载线重合。当 i_b 变化时,坐标 (u_{CE}, i_C) 将沿直流负载线在 Q_1 和 Q_2 之间移动,描绘 i_B 、 i_C 及 u_{CE} 对应值,得 i_C 和 u_{CE} 的波形如图 3-9 所示。由图可见, i_C 及 u_{CE} 均在静态工作点值 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 叠加有交流分量,其中 u_{CE} 的交流分量 u_{ce} 就是输出电压 u_o 。通过作图,可得电压放大倍数 A_u 。同时发现,当 u_i 为正半周时, u_o 为负半周,这说明了共射放大器为反相放大器。

② 接上负载 R_L 时的情形。由于耦合电容对交流视为短路,放大器输出回路交流电流与直流电流经过的通路就不一样了。集电极直流电流 I_C 只流经 R_c ,而交流电流 i_c 流经 R_c 和 R_L 。但在静态时,由于电容 C_2 的隔直作用,负载电阻 R_L 不会有电流,交流负载线和直流负载线必在 Q 点重合。此外,从图 3-3(b)所示交流通路看出,放大器的等效负载是 $R'_L = R_c // R_L$,且 $u_o = -i_c R'_L$,所以,交流负载线的斜率为 $-1/R'_L$,交流负载线在图 3-9 中用 $A'B'$ 标出。

当 i_b 变化时,坐标 (u_{CE}, i_C) 将沿交流负载线在 A' 和 B' 之间移动,同样,描绘 i_B 、 i_C 及 u_{CE} 对应值,可得 i_C 和 u_{CE} 的波形,我们将会发现所得到 u_o 的幅值要比断开 R_L 时小一些,这说明放大器带载会降低增益。

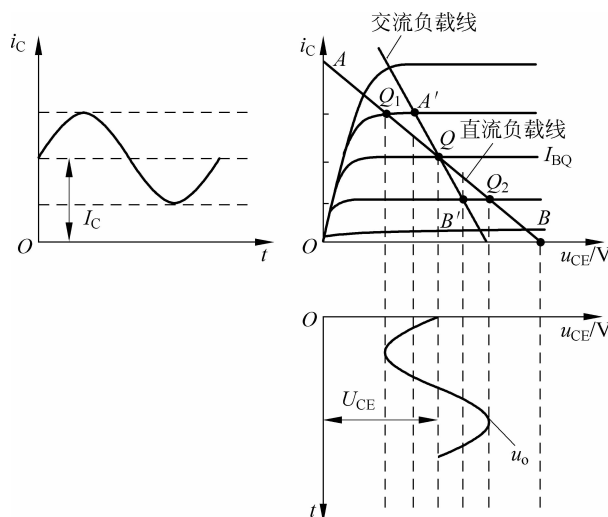
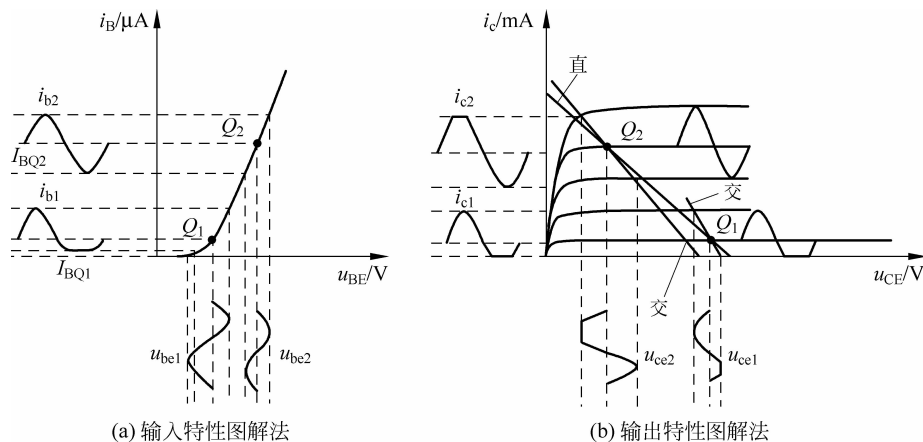


图 3-9 输出回路图解法

3. 静态工作点的设置与非线性失真的分析

如图 3-10 所示,假如放大器的工作点为 Q_1 ,当输入信号超过一定值时,所作出的波形的 i_b 和 i_c 会出现削底特征, u_o 会出现削顶特征,这是因为 U_{BE} 过小,负半周的输入信号使三极管进入截止区而造成的,由此引起的失真称为截止失真。

图 3-10 Q 点选择不当引起的失真

假如放大器的工作点为 Q_2 ,当输入信号超过一定值时,所作出的波形的 i_c 会出现削顶特征, u_o 会出现削底特征,这是因为 I_B 过大,正半周的输入信号使三极管进入饱和区而造成的,由此引起的失真称为饱和失真。

4. 静态工作点选取的一般原则

通过以上分析可知,静态工作点的选择要根据输出电压 u_o 的幅值和交流负载综合考

考虑。若输入信号 u_i 幅值较大,则输出电压 u_o 的幅值也较大,为了减小波形失真,静态工作点最好选择在交流负载线的中点,这样可保证 u_o 的正、负半周对称。

若输入信号 u_i 的幅值较小,其输出电压的幅值也较小,此时,为降低直流电源 V_{CC} 的功率损耗,在不产生失真的前提下,常把静态工作点选得低一些,静态工作点可选择在交流负载线中点偏下的地方。

5. 图解法的局限性和适用范围

(1) 图解法必须具备所用管子的特性曲线,一般情况下,测试三极管特性曲线费用较高,因此,图解法不经济。

(2) 图解法只能分析简单无反馈电路,对较复杂的放大器显得无能为力。

(3) 图解法未考虑三极管的结电容影响,只适合于中低频放大器。

(4) 图解法有一个优点,它对理解放大器原理很有帮助,尤其是在设计大功率放大器输出端电路时,往往要用到图解法的概念。

3.3 稳定静态工作点电路

3.3.1 静态工作点稳定的必要性

从以上讨论中可知,放大器的静态工作点对放大性能有着很重要的影响。因此,选择合适的工作点并使之保持稳定,就成为保证放大器正常工作的关键。引起静态工作点不稳定的因素很多。例如,电源电压的变化、电路元件由于老化而引起参数值的改变,以及温度对器件参数的影响等,其中最主要的因素是三极管的参数随温度而变化。

例如,上面讨论过的如图 3-1 所示的共射放大器,当环境温度升高时,三极管的电流放大系数 β 将增大,穿透电流 I_{CEO} 将增大,即使 b-e 间电压保持不变基极电流也将增大,这一切集中地表现为温度升高时集电极电流增大。在共射放大器中三极管的管压降 U_{CE} 会减小, Q 点将沿负载线上移,向饱和区变化;反之,当温度降低时, Q 点将沿负载线下移,向截止区变化。如图 3-11 中所示,实线为三极管 20°C 时的输出特性曲线,虚线为 40°C 时的输出特性曲线。由于温度升高,静态工作点从 Q 移到 Q' 。

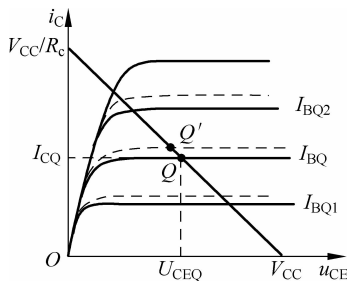


图 3-11 晶体管在不同环境温度下的输出特性曲线

稳定静态工作点的方法有:(1)在电路中加入二极管、热敏电阻等温度敏感元件,设法抵消因温度引起的相关工作点参数的变化,这种方法往往适用范围小、调试麻烦且成本高。(2)通过引入负反馈电路来稳定工作点,这是最有效的方法,此内容将在第 5 章详细讨论。

下面先以增加感性知识为出发点介绍一种带 R_e 的共射放大器,这种电路具有自动稳定工作点的功能。

3.3.2 带 R_e 的共射放大器

前面主要分析了如图 3-1 所示的放大器,该放大器的偏置电路提供的是固定偏置电流 ($I_{BQ} \approx V_{CC}/R_b$),通常称为固定偏置式共射电路。当更换器件或环境温度变化时,都将引起静态工作点的变动,严重时会使放大器不能正常工作。采用带 R_e 的共射放大器能在外界因素变化时,自动调整静态工作点的位置使之保持基本稳定。该放大器如图 3-12(a) 所示, R_{b1} 和 R_{b2} 构成分压电路,在三极管的发射极增加了电阻 R_e 。图 3-12(b) 为其直流等效电路。如果 R_{b1}, R_{b2}, R_e 的值选得合适就可满足 $I_1 \gg I_B$, 此时有:

$$U_B \approx \frac{R_{b2} V_{CC}}{R_{b1} + R_{b2}} \quad (3-12)$$

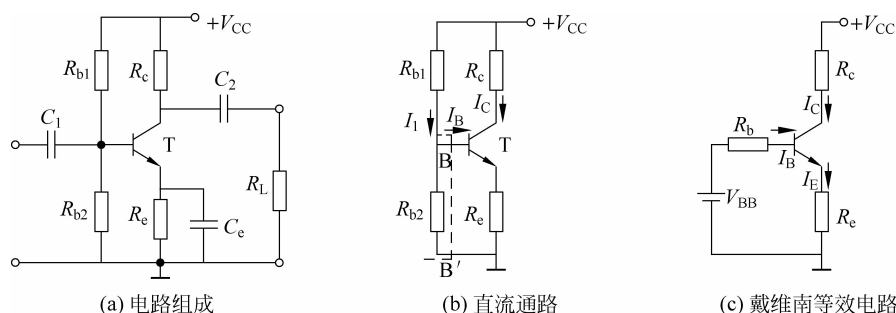


图 3-12 分压式偏置稳定放大器

式(3-12)表明, U_B 由电源电压 V_{CC} 和分压电阻 R_{b1} 和 R_{b2} 决定,与三极管的参数基本无关,由于有电阻 R_e 的存在,当环境参数变化,如温度 T 升高时将会发生以下一系列连锁反应:

$$\text{温度 } T \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow I_E \uparrow \rightarrow U_E \uparrow \rightarrow U_{BE} \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$$

其结果最终使 I_C 或 I_E 维持基本不变。当温度降低时道理也是一样的。发射极电阻 R_e 越大,电路的静态工作点就越稳定。但 R_e 不能过大,因为 R_e 过大必然使得 U_{CE} 变小,使放大器输出动态范围变小,下面对该放大器做定量分析。

1. 静态分析

$$U_{BQ} \approx \frac{R_{b2} V_{CC}}{R_{b1} + R_{b2}} \quad (3-13)$$

$$I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e} \quad (3-14)$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$$

$$U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e)$$

这里顺便讨论一下如何选择 R_e 的值。利用戴维南定理,可将图 3-12(b) 所示的电路变换成如图 3-12(c) 所示的电路,其中:

$$V_{BB} = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC}$$

$$R_b = R_{b1} // R_{b2}$$

$$V_{BB} = I_{BQ} R_b + U_{BEQ} + I_{EQ} R_e$$

$$I_{EQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{\frac{R_b}{1 + \beta} + R_e}$$

当选 $R_e \gg \frac{R_b}{1 + \beta}$ 时, I_{EQ} 的表达式与式(3-14)相同, 此时 $I_E \gg I_B$ 的假定条件就成立了。

2. 动态分析

1) 电压放大倍数

图 3-12(a) 所示电路的微变等效电路如图 3-13 所示。 C_e 为交流旁路电容可视为短路。由此可算得放大器的增益为

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \quad (\text{其中 } R'_L = R_c // R_L) \quad (3-15)$$

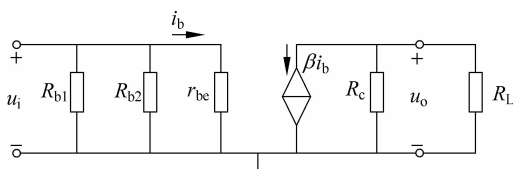


图 3-13 射极偏置电路的微变等效电路

2) 输入阻抗

$$R_i = \frac{u_i}{i_i} = r_{be} // R_{b1} // R_{b2} \quad (3-16)$$

通常 $(R_{b1} // R_{b2}) \gg r_{be}$, 故 $R_i \approx r_{be}$ 。

3) 输出阻抗

$$R_o = R_c \quad (3-17)$$

【例 3.3】 电路如图 3-12(a) 所示, 分析 C_e 开路时, 将引起电路哪些动态参数发生变化? 如何变化?

旁路电容开路时的交流等效电路如图 3-14 所示。

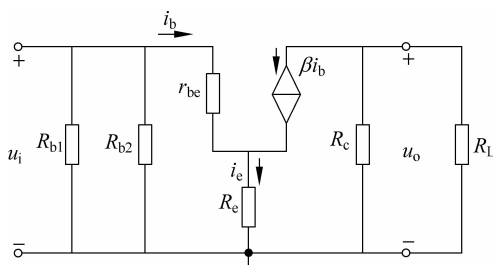


图 3-14 无旁路电容时的微变等效电路