

基本放大电路

在电子技术的许多应用领域中,都需要把微弱信号放大到足够的幅度,以便进行显示、测量、变换、控制等处理。信号的放大是由放大电路实现的。随着电子技术的飞速发展,各种高性能的集成放大电路不断出现,但分立元件放大器是各种放大电路的基础。学习和掌握放大器的工作原理、分析方法、实验技术是电子技术课程的基本内容。本章主要介绍晶体管放大器的电路组成和工作原理,静态工作点的设置方式,分析放大器性能的微变等效电路,放大器的主要性能指标等。

5.1 晶体管基本放大电路

晶体管的主要用途之一是利用其放大作用组成各种放大电路,实现对微弱信号的放大。本节介绍晶体管共发射极基本放大电路(简称为放大器),包括它的电路组成、放大原理、分析方法以及主要性能指标等。

5.1.1 电路组成

图 5-1 是共发射极的基本放大电路。输入端接交流信号源(通常可用一个电动势 e_s 与电阻 R_s 串联的电压源等效表示),输入电压为 u_i ,输出端接负载电阻 R_L ,输出电压为 u_o 。电路中各个元件所起作用如下。

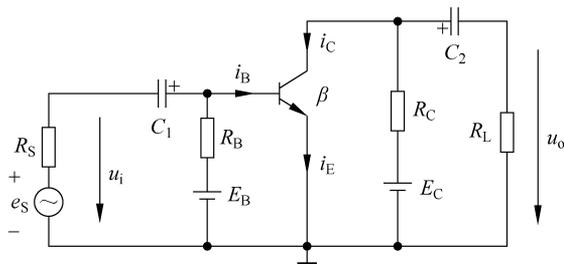


图 5-1 共发射极基本放大电路

晶体管 T: 晶体管是放大电路中的放大元件,利用它的电流放大作用,在集电极电路获得放大的电流受输入信号的控制。如果从能量观点来看,输入信号的能量比较小,而输出信号的能量比较大,但这不是放大电路把输入的能量放

大了。能量是守恒的,不能放大,输出的较大能量来自直流电源 E_C 。也就是能量较小的输入信号通过晶体管的控制作用,去控制电源 E_C 所供给的能量,以在输出端获得一个能量较大的信号。这就是放大作用的实质,而晶体管也可以说是一个控制元件。晶体管是放大电路的核心。

集电极电源 E_C : 电源 E_C 除为输出信号提供能量外,它还保证集电结处于反向偏置,以便晶体管起到放大作用。 E_C 一般为几伏到几十伏。

集电极负载电阻 R_C : 集电极负载电阻简称为集电极电阻,它主要是将集电极电流的变化变换为电压的变化,以实现电压放大。 R_C 的阻值一般为几千欧。

基极电源 E_B 和基极电阻 R_B 它们的作用是使发射结处于正向偏置,并提供大小适当的基极电流 I_B ,以使放大电路获得合适的静态工作点,使晶体管在输入信号的正半周和负半周都能良好的导通,在输出端得到与输入信号成正比的交流输出(无失真)。 R_B 的阻值一般为几十千欧到几百千欧。

耦合电容 C_1 和 C_2 : 它们一方面起到隔直作用, C_1 用来隔断放大电路与信号源之间的直流通路,而 C_2 则用来隔断放大电路与负载之间的直流通路,使三者之间无直流联系,互不影响;另一方面又起到交流耦合作用,保证交流信号畅通无阻地经过放大电路,沟通信号源、放大电路和负载三者之间的交流通路。通常要求耦合电容上的交流压降小到可以忽略不计,即对交流信号可视作短路,因此电容的容量要取得比较大,使电容对交流信号的容抗近似为 0。 C_1 和 C_2 的电容值一般为几微法到几十微法,通常用的是电解电容器,连接时要注意其极性。

在图 5-1 的电路中,用了两个直流电源 E_C 和 E_B 。实际上把 R_B 改接一下,可以只由 E_C 供电,省去 E_B ,如图 5-2 所示。这样,发射结仍是正向偏置,仍然能够产生合适的基极电流 I_B (R_B 的阻值要做相应调整)。

在电子电路中,通常把公共端接地,设其电位为零,作为电路中其他各点电位的参考点。同时为了简化电路的画法,习惯上不画出电路中的直流电源,而只在连接电源的节点上标出其对地的电压值 V_{CC} 和极性(“+”或“-”),如图 5-2 所示。

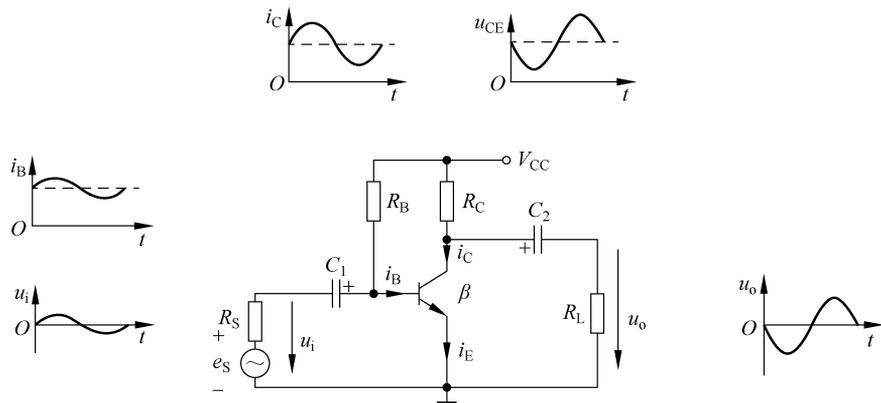


图 5-2 放大电路的习惯画法和工作波形

5.1.2 放大原理

首先结合基本放大电路的工作波形,如图 5-2 所示,简单介绍电路是如何对交流信号实现放大的。

根据叠加原理,电路在直流电源和交流信号源的共同作用下,电路中的电压或电流将含有直流分量和交流分量。为明确起见,用大写字母加大写下标表示电压或电流的直流分量,如 U_{CE} 、 I_B 等;用小写字母加小写下标表示电压或电流的交流分量,如 u_{ce} 、 i_b 等;用小写字母加大写下标表示电压或电流的总量,即直流分量和交流分量的和,如 u_{CE} 、 i_B 等。

设电路中的晶体管处于放大状态,即有 $i_C = \beta i_B$ 。在没有交流信号输入时(常称为静态),电路中的电压和电流只有直流分量,即

$$i_B = I_B$$

$$i_C = I_C = \beta I_B$$

$$u_{CE} = U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

式中, I_B 、 I_C 和 U_{CE} 为晶体管的静态工作点。在有交流信号输入时, $i_B = I_B + i_b$, 其中 i_b 是信号源在基极回路产生的交流电流。根据晶体管的电流关系,有

$$i_C = \beta i_B = \beta(I_B + i_b) = \beta I_B + \beta i_b = I_C + \beta i_b$$

而

$$\begin{aligned} u_{CE} &= V_{CC} - i_C R_C = V_{CC} - (I_C + i_c) R_C = V_{CC} - I_C R_C - i_c R_C \\ &= U_{CE} - \beta i_b R_C \text{ (此处忽略了负载效应)} \end{aligned}$$

由于电容的隔直作用,在负载电阻上得到的是电压的交流分量 $-\beta i_b R_C$ 。这里的负号表明输出电压与输入电流反相,其波形关系如图 5-2 所示。一般来说输出电压的幅度要比输入电压大,即电路实现了信号放大。

以上讨论中,假定晶体管处于放大状态,忽略了负载电阻对交流输出的影响(负载效应),输入交流信号设为正弦量。关于基极电流的交流分量 i_b 和输入电压 u_i 的关系在 5.1.4 节的动态分析部分介绍。另外,需要特别注意符号字母及下标字母大小写的不同含义。

5.1.3 静态分析

对放大电路可分静态和动态两种情况来分析。动态是指有输入信号时电路的工作状态,动态分析主要是确定放大电路的电压放大倍数 A_u 、输入电阻 r_i 和输出电阻 r_o 等动态参数。静态则是指没有输入信号时电路的工作状态,静态分析是确定放大电路的静态工作点(直流值) I_B 、 I_C 和 U_{CE} 。放大电路的质量与其静态工作点的关系很大,良好的静态工作点可使晶体管在输入信号的变化范围内都能工作在线性放大状态,使输出无失真。

1. 近似计算法

静态分析实际上就是在没有交流信号时对放大电路进行直流计算。根据电容对直流

相当于开路、电感对直流相当于短路的特点,将放大电路中的电容开路,电感短路,交流电压源短路,就可得到放大电路的直流通路。例如,将图 5-2 所示放大电路中的电容 C_1 和 C_2 开路,就可得到其直流通路如图 5-3 所示。

有了放大电路的直流通路,就可以按第 4 章所介绍的晶体管电路的计算方法计算静态工作点,晶体管的发射结一般都按恒压模型处理。图 5-3 的所示的直流通路,若发射结导通,则有

$$I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_B} \approx \frac{V_{CC} - V_{BES}}{R_B} \quad (5-1)$$

若晶体管工作在放大状态($I_B < I_{BS}$),则有

$$I_C = \beta I_B \quad (5-2)$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \quad (5-3)$$

例 5-1 图 5-2 所示放大电路中,已知 $V_{BES} = 0.7\text{V}$, $\beta = 60$, $R_B = 200\text{k}\Omega$, $R_C = 2\text{k}\Omega$, $V_{CC} = 5\text{V}$ 。计算晶体管的静态工作点。

解: 做出电路的直流通路如图 5-3 所示,显然晶体管应该导通,所以

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BES}}{R_B} = \frac{5 - 0.7}{200} \text{mA} = 0.022 \text{mA}$$

因为 $I_{BS} = V_{CC} / (\beta R_C) = 5 / (60 \times 2) \text{mA} = 0.041 \text{mA}$, $I_B < I_{BS}$ 所以晶体管处于放大状态,有

$$I_C = \beta I_B = 60 \times 0.022 \text{mA} = 1.32 \text{mA}$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 5 - 1.32 \times 2 \text{V} = 2.36 \text{V}$$

2. 图解法

晶体管是一种非线性元件,其基极电流 I_B 与基-射极电压 U_{BE} 之间,以及集电极电流 I_C 与集-射极电压 U_{CE} 之间都不是线性关系,可以用输入特性曲线和输出特性曲线描述。在直流通路中除晶体管之外都是线性元件,其电压和电流的关系可以用欧姆定律描述。这样,可以在晶体管的特性曲线上通过作图,找出同时满足晶体管特性和线性元件特性的电压值、电流值,即静态工作点。这就是静态分析的图解法。图解法可以确定晶体管的静态工作点,并能直观地分析和了解静态工作点的变化对放大器工作的影响。

下面以图 5-3 所示的直流通路为例,说明静态分析的图解法。

对于输入回路(基极回路),按 KVL,有 $U_{BE} = V_{CC} - R_B I_B$ 。这是一个线性方程,给出了 U_{BE} 和 I_B 应该满足的线性约束。同时, U_{BE} 和 I_B 还应该满足晶体管输入特性曲线所给出的非线性约束。即晶体管的输入特性曲线和直线的 $U_{BE} = V_{CC} - R_B I_B$ 的交点就是电路的输入工作点,该点给出了 U_{BE} 和 I_B 的实际值,如图 5-4(a)所示。

对于输出回路(集电极回路),按 KVL,有 $U_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$ 。这是一个直线方程。在晶体管的输出特性曲线上,此直线与 I_B 等于实际值的曲线的交点 Q 就是晶体管的静态工作点,如图 5-4(b)所示。 Q 点给出了 U_{CE} 和 I_C 的实际值。

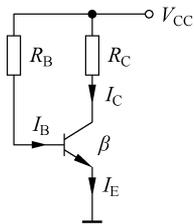


图 5-3 直流通路

由直线方程画出直线的方法很简单,如由方程 $U_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$ 所确定的直线,在横轴上(电压)的截距为 V_{CC} ,在纵轴上(电流)的截距为 V_{CC}/R_C ,连接这两点就得到所求直线。这条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。

由图 5-4 可见,基极电流 I_B 的大小不同,静态工作点在负载线上的位置也就不同。若 I_B 过大或过小,静态工作点可能落在 Q' 或 Q'' 附近,当有交流信号输入时,晶体管就容易出现饱和和失真或截止失真。可以通过改变 I_B 的大小来获得合适的工作点。因此, I_B 很重要,它确定晶体管的工作状态,通常称它为偏置电流,简称为偏流。产生偏流的电路称为偏置电路,在图 5-3 中,其路径为 $V_{CC} \rightarrow R_B \rightarrow$ 发射结 \rightarrow 地。 R_B 称为偏置电阻。通常可通过改变 R_B 的阻值来调整偏流 I_B 的大小。

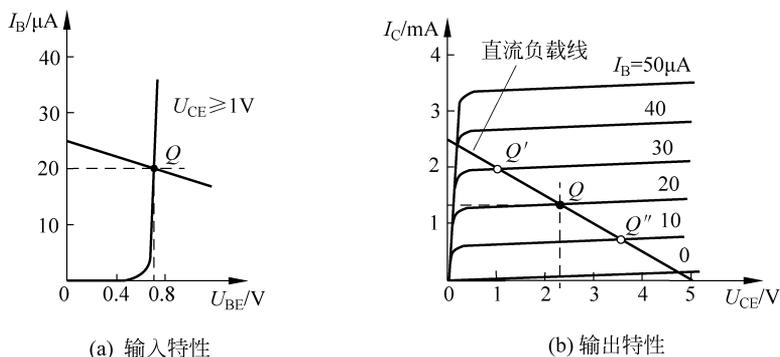


图 5-4 静态分析的图解法

5.1.4 动态分析

当放大电路有输入信号时,晶体管的各个电流和电压都含有直流分量和交流分量。直流分量一般为静态值,可由前述的静态分析来确定。动态分析是在静态值确定后分析信号的传输情况,考虑的只是电流和电压的交流分量(信号分量)。微变等效电路法是放大电路动态分析的基本方法。

微变等效电路是把非线性元件晶体管所组成的放大电路等效为一个线性电路,也就是把晶体管线性化,用线性元件来等效其输入、输出特性。这样,就可以像分析线性电路那样来分析晶体管放大电路。线性化的条件是晶体管工作在小信号(微变量)状态,这时才能在静态工作点附近的小范围内用直线近似地代替晶体管的特性曲线。

1. 晶体管的微变等效电路

如何把晶体管线性化,用一个等效电路(也称为线性化模型)来代替,这是首先要讨论的。下面从共发射极接法晶体管的输入特性和输出特性两方面来分析介绍。

晶体管的输入特性曲线是非线性的。但在静态工作点 Q 的附近可以用直线代替曲线,如图 5-5(a)所示。这就是说,当输入信号幅度较小时,可以认为晶体管的动态输入特性是线性的,可以用一个动态电阻 r_{be} 来表示动态输入电压和输入电流的关系,即

$$r_{be} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{u_{be}}{i_b} \Big|_{V_{CE} \geq 1V} \quad (5-4)$$

式中, r_{be} 为晶体管的动态输入电阻, 它表示晶体管在交流小信号时的输入特性。晶体管的输入电路可以用动态电阻 r_{be} 等效代替, 如图 5-6(b)、(c) 所示。

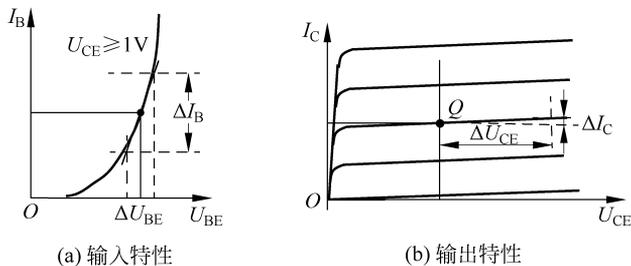


图 5-5 小信号动态分析示意

图 5-5(b) 是晶体管的输出特性曲线族, 在线性工作区是一组近似等距离的平行直线。当 U_{CE} 为常数时, ΔI_C 与 ΔI_B 之比就是晶体管的电流放大系数 β , 即

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{i_c}{i_b} \Big|_{U_{CE} \text{ 为常数}} \quad (5-5)$$

在小信号条件下, β 是一个常数, 它确定了 i_c 受 i_b 控制的关系。在晶体管的等效电路中可用一个源电流为 βi_b 的受控恒流源表示此关系(图 5-6(b) 和 (c) 中的菱形块)。小功率晶体管的 β 值一般为 20~100, 在手册中常用 h_{fe} 代表。

此外, 在图 5-5(b) 中还可看到, 晶体管的输出特性曲线不完全与横轴平行, 当 I_B 为常数时, ΔU_{CE} 与 ΔI_C 的比值用 r_{ce} 表示, 即

$$r_{ce} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C} = \frac{u_{ce}}{i_c} \Big|_{I_B \text{ 为常数}} \quad (5-6)$$

式中, r_{ce} 为晶体管的输出电阻。在小信号条件下, r_{ce} 也是一个常数。如果把晶体管的输出电路看作电流源, r_{ce} 就是电源的内阻, 所以在等效电路中与恒流源 βi_b 并联, 如图 5-6(b) 所示。由于 r_{ce} 的阻值很高, 一般为几十万欧, 所以在微变等效电路中常把它忽略掉, 这样就得到了图 5-6(c) 所示的简化等效电路。上述等效模型只适用于中、低频。

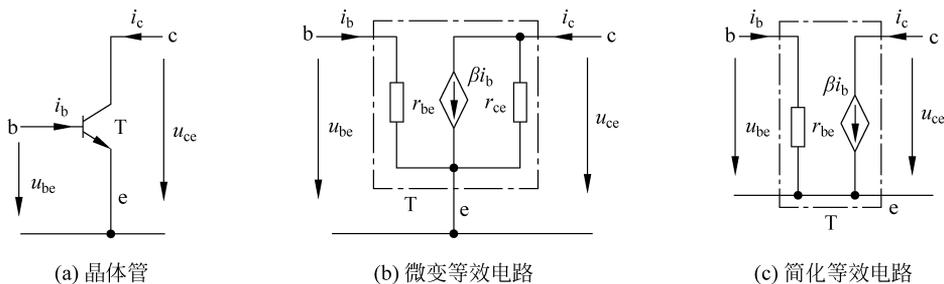


图 5-6 晶体管的微变等效电路

低频小功率晶体管的输入电阻 r_{be} 常用下式估算：

$$r_{be} = r_b + (1 + \beta)r_e \approx 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_E \text{mA}} \quad (5-7)$$

式中, I_E 为发射极的静态电流,以毫安为单位; r_b 是晶体管的基区体电阻,对于小功率晶体管, r_b 在 200Ω 左右; $(1 + \beta)r_e$ 是晶体管的发射结电阻 r_e 折算到基极回路的等效电阻; 26mV 是 25°C 时的温度电压当量值。 r_{be} 与晶体管的静态工作点有关,一般为几百欧到几千欧,是对交流而言的一个动态电阻,在手册中常用 h_{ie} 代表。

2. 放大电路的微变等效电路

由晶体管的微变等效电路和放大电路的交流通路可得出放大电路的微变等效电路。对于交流分量,耦合电容的阻抗很小,可视为短路;按照叠加原理,在计算交流信号源的响应时应使其他电源不作用,即应将直流电压源短路。这样,将电路中的耦合电容和直流电压源短路,就可得出放大电路的交流通路。一般来说,放大器电路中容量为几微法以上的电容,对交流信号都可视为短路。图 5-7(a)是图 5-2 所示交流放大电路的交流通路。电路中原标为 V_{CC} 的节点由于直流电压源短路也变成了地。再把交流通路中的晶体管用它的微变等效电路代替,就可得到放大电路的微变等效电路。图 5-7(b)就是图 5-2 所示交流放大电路的微变等效电路。其中晶体管用的是简化等效电路。交流通路和微变等效电路中的电压和电流都是交流量,不能用来计算电路的静态工作点。

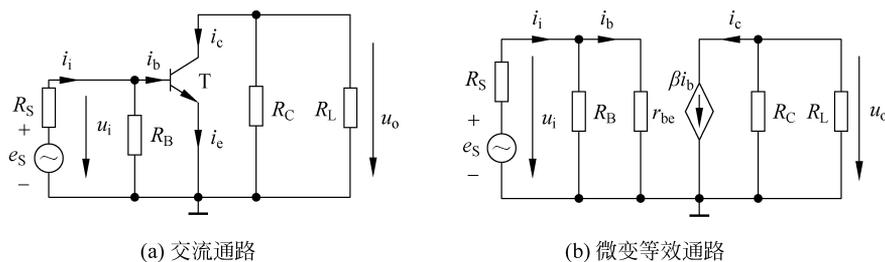


图 5-7 基本放大器的动态电路模型

3. 计算电压放大倍数

设放大器的输入是正弦交流信号,则电路中的交流量都是正弦量,可以用相量表示。放大器的电压放大倍数(也称为电压增益)定义为输出电压和输入电压的相量之比,常用 A_u 表示,即

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \quad (5-8)$$

按图 5-7(b)所示的微变等效电路,有

$$\begin{aligned} \dot{U}_i &= \dot{I}_b r_{be} \\ \dot{U}_o &= -\dot{I}_c R'_L = -\beta \dot{I}_b R'_L \end{aligned}$$

式中, $R'_L = R_C // R_L$, 所以

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b R'_L}{\dot{I}_b r_{be}} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} \quad (5-9)$$

式中, 负号表示输出电压 \dot{U}_o 与输入电压 \dot{U}_i 的相位相反。

当放大器的输出端开路时(不接负载电阻 R_L), 放大器的电压放大倍数称为空载电压放大倍数, 记作 A_{u0} , 即

$$A_{u0} = \frac{\dot{U}_{o0}}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b R_C}{\dot{I}_b r_{be}} = -\beta \frac{R_C}{r_{be}} \quad (5-10)$$

显然, 放大器接有负载电阻时的放大倍数比空载时的放大倍数小。负载电阻越小, 放大倍数降低得越多, 这就是放大器的负载效应。

4. 计算输入电阻

一个放大器的输入端总是与信号源(或前级放大电路)相连, 其输出端总是与负载(或后级放大电路)相连, 如图 5-8 所示。因此放大器与信号源和负载之间(或前级放大电路和后级放大电路之间)都是互相联系、互相影响的。

放大器对信号源(或对前级放大电路)来说, 是一个负载, 可用一个电阻来等效代替。这个电阻就是放大器的输入电阻 r_i , 是信号源的负载电阻, 即

$$r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} \quad (5-11)$$

对交流信号而言, 输入电阻 r_i 是一个动态电阻, 是反映放大器对信号源的负载效应的指标。如果放大器的输入电阻较小, 第一, 将从信号源取用较大的电流, 从而增加信号源的负担; 第二, 经过信号源内阻 R_S 和 r_i 的分压, 使实际加到放大器的输入电压 U_i 减小, 从而减小了输出电压; 第三, 后级放大电路的输入电阻, 就是前级放大电路的负载电阻, 从而将会降低前级放大电路的电压放大倍数。因此, 通常希望放大器的输入电阻能高一些。

按图 5-7(b) 所示的微变等效电路, 有 $r_i = r_{be} // R_B$ 。实际上 R_B 的阻值比 r_{be} 大得多, 因此, 晶体管放大器的输入电阻基本上就等于晶体管的输入电阻, 其阻值并不大。

注意: r_i 和 r_{be} 意义不同, 不能混淆。在计算电压放大倍数 A_u 的式(5-9)中, 用的是 r_{be} 而不是 r_i 。

5. 计算输出电阻

放大器对负载(或后级放大电路)来说是一个信号源, 其内阻就是放大器的输出电阻 r_o 。放大器的输出电阻 r_o 也是一个动态电阻。

如果放大器的输出电阻比较大(相当于信号源的内阻较大), 当接负载时, 输出电压在内阻上的压降就大, 负载所获得的电压就小(见图 5-8), 即放大器带负载的能力比较差。因此, 通常希望放大器输出级的输出电阻低一些。

放大器的输出电阻是在信号源短路($U_S=0$)和输出端开路的条件下,从放大器的输出端看进去的等效电阻,如图 5-9 所示。通常计算 r_o 时是将信号源短路(使 $U_S=0$,但要保留信号源内阻),将 R_L 去掉,在输入端加交流电压 \dot{U}_0 ,计算出产生的电流 \dot{I}_0 ,则放大器的输出电阻为

$$r_o = \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} \quad (5-12)$$

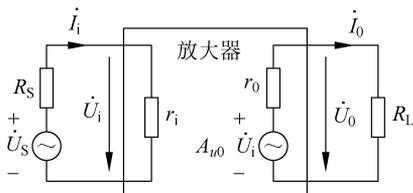


图 5-8 放大器的连接示意

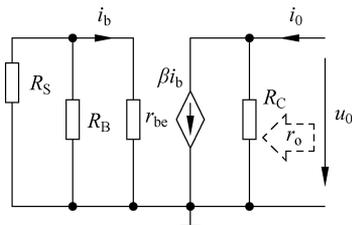


图 5-9 计算放大器输出电阻示意

注意: 此处的 \dot{U}_0 是一个外加的电压,不是放大器工作时所产生的输出电压。

对于图 5-2 所示放大器,从它的微变等效电路(见图 5-7(b))看,当 $U_S=0$ 时, $I_b=0$, $\beta I_b=0$,即电路中的受控电流源为开路。显然,放大器的输出电阻为 $r_o=R_C//r_{ce}$ 。由于晶体管的输出电阻 r_{ce} (和恒流源 βi_b 并联)很大,与 R_C 相比可以忽略不计,所以有 $r_o \approx R_C$ 。

R_C 一般为几千欧,所以共发射极放大电路的输出电阻比较高。

利用微变等效电路对放大电路进行动态分析和计算非常方便,对较为复杂的电路也能适用,但不能用它来确定静态工作点。

例 5-2 在图 5-2 所示放大电路中, $V_{BES}=0.7\text{V}$, $\beta=60$, $R_B=200\text{k}\Omega$, $R_C=2\text{k}\Omega$, $V_{CC}=5\text{V}$, $R_S=500\Omega$, $R_L=2\text{k}\Omega$ 。计算电路的输入电阻 r_i 和输出电阻 r_o ,空载电压放大倍数 A_{u0} ,带载电压放大倍数 A_u ,源载电压放大倍数 A_{us} 。

解: 晶体管的静态工作点已在例 5-1 中求出,为 $I_B=0.022\text{mA}$, $I_C=1.32\text{mA}$, $U_{CE}=2.36\text{V}$, $I_E=I_B+I_C=1.342\text{mA}$ 。做出电路的微变等效电路如图 5-7(b)所示,其中

$$r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_E} = 200 + (1 + 60) \frac{26}{1.342} \Omega = 1382 \Omega$$

所以

$$r_i = r_{be} // R_B \approx r_{be} = 1.38\text{k}\Omega$$

$$r_o \approx R_C = 2\text{k}\Omega$$

$$A_{u0} = \frac{\dot{U}_{o0}}{\dot{U}_i} = -\beta \frac{R_C}{r_{be}} = -60 \times \frac{2}{1.38} = -87$$

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} = -60 \times \frac{2 // 2}{1.38} = -43 \left(\text{或由 } A_u = \frac{R_L}{r_o + R_L} A_{u0} \text{ 计算} \right)$$

$$A_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_o}{\frac{R_s + r_i}{r_i} \dot{U}_i} = \frac{r_i}{R_s + r_i} \cdot \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{r_i}{R_s + r_i} A_u = \frac{1.38}{0.5 + 1.38} \times (-43) = -32$$

以上计算表明,由于负载以及信号源内阻的影响,放大器的放大倍数要比空载时低。

5.2 分压偏置的晶体管放大器

5.2.1 工作点的稳定问题

通过前面的介绍可知,晶体管的静态工作点(Q点)对放大器非常重要,它不仅对放大倍数有重要影响,还关系到放大器的动态输出范围、波形失真等问题。为使放大器具有良好的性能,必须为放大器设置合适的静态工作点。前面介绍的基本放大电路,由 R_B 提供偏流 I_B 。可以通过改变 R_B 的阻值来调整 I_B 的大小,从而获得合适的工作点。这种偏置电路称为固定偏置电路(由于 $I_B \approx V_{CC}/R_B$)。

晶体管的电气参数受温度影响较大,主要表现在两方面。①发射结的导通压降 U_{BE} 随温度的升高而减小(大多数小功率管的温度系数约为 $-2.2\text{mV}/^\circ\text{C}$),这会使 I_B 变大从而使 I_C 变大(在固定偏置电路中 $I_B = (V_{CC} - U_{BE})/R_B$)。②晶体管的 β 值随温度的升高而变大(β 的温度系数约为 $+0.5\%/^\circ\text{C}$),这也会使 I_C 变大。这两方面的影响都使晶体管的集电极电流 I_C 随温度的升高而变大,这就会使静态工作点偏离原来设置的位置,影响放大器的性能,这种现象称为温漂。固定偏置电路不能克服温漂以及其他原因(如元件老化,换用晶体管带来的 β 值变化等)引起的静态工作点偏移问题。分压偏置电路具有稳定静态工作点的能力,是晶体管放大器的主要偏置形式。

5.2.2 分压偏置的放大电路

图5-10所示电路称为分压偏置放大电路,也叫作射极偏置放大电路,具有稳定静态工作点的能力,是交流放大器中最常用的一种基本电路。下面分别介绍其静态分析方法、动态性能指标的计算以及工作点的稳定原理。

1. 静态分析

首先将电路中的电容开路,做出电路的直流通路如图5-11所示。由于基极电流 I_B 很小,与电阻 R_{B1} 及 R_{B2} 中的电流相比可以忽略不计,所以基极电位基本由电阻 R_{B1} 和 R_{B2} 对电源 V_{CC} 分压决定,即

$$V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} \quad (5-13)$$

从而可得

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E} \quad (5-14)$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E \approx V_{CC} - I_C (R_C + R_E) \quad (5-15)$$

C_E 为交流分量另外提供一条低阻通路,常叫作旁路电容。

将电路中的耦合电容和旁路电容短路,直流电压源短路,晶体管用简化等效电路替代,就可得到放大器的微变等效电路,如图 5-12(b)所示。电阻 R_E 不出现在交流通路中,对交流分量没有影响。分压偏置放大器的微变等效电路(见图 5-12(b))与固定偏置放大器的微变等效电路(见图 5-7(b))相比,除了 R_B 变成 R_{B1} 和 R_{B2} 并联之外,其余完全相同,所以有关动态指标的计算式也完全相同。

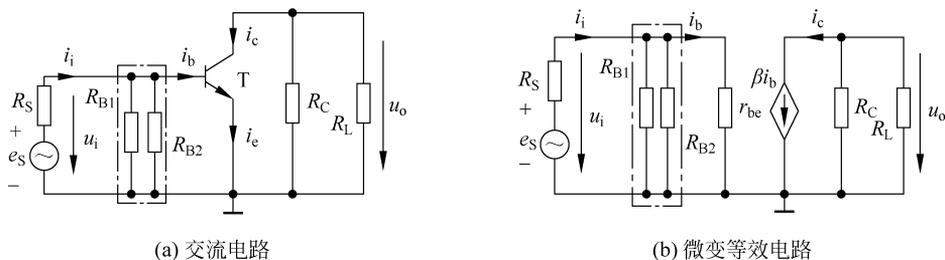


图 5-12 射极偏置放大器的动态电路模型

经常在发射极上串联一个不被电容旁路的小电阻(一般为几百欧姆)为放大器提供交流负反馈(见习题 5 计算题 10)。交流负反馈会降低放大倍数,但能显著地改善放大器的性能,稳定放大倍数,改变输入、输出电阻,展宽通频带等。

5.3 射极输出放大器

射极输出放大器简称为射极输出器,其电路如图 5-13 所示。从电路图中可以看到,射极输出器的输出电压取自晶体管的发射极。下面我们分别介绍其静态分析方法和动态性能指标的计算方法。

5.3.1 静态分析

首先将电路中的电容开路,做出电路的直流通路如图 5-14 所示。可以看出,射极输出放大器的偏置电路(直流通路)与分压偏置放大器的偏置电路(见图 5-11)相同,只是没有了集电极电阻,有关静态工作点的计算方法是相同的,即

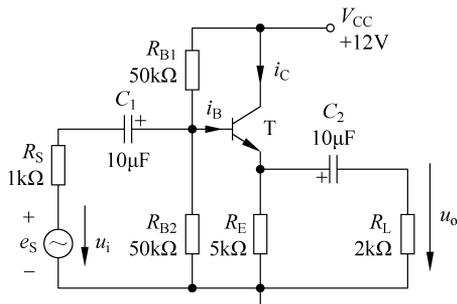


图 5-13 射极输出放大电路

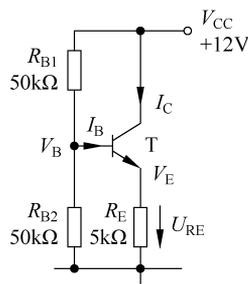


图 5-14 射极输出放大电路的直流通路

$$V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC}$$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E}$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_E R_E$$

$$I_B = I_C / \beta$$

按以上各式就可以求出电路的 Q 点 (I_B, I_C, U_{CE})。

5.3.2 动态分析

将电路中的耦合电容和旁路电容短路,直流电压源短路,晶体管用简化等效电路替代,就可得到放大器的微变等效电路,如图 5-15(b)所示。在射极输出器的交流通路中,晶体管的集电极是接地的,是输入回路和输出回路的公共端,所以射极输出器也称为共集电极放大电路。射极输出放大器的微变等效电路(见图 5-15(b))与固定偏置放大器的微变等效电路(见图 5-7(b))有较大不同,有关动态性能指标的计算方法也有较大差别。

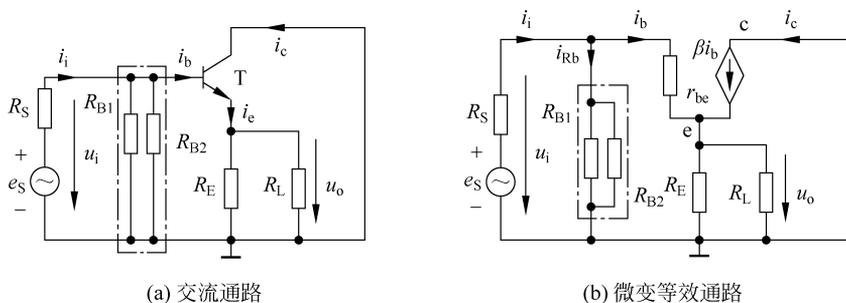


图 5-15 射极输出放大器的动态电路模型

1. 计算电压放大倍数 A_u

由图 5-15(b)所示的微变等效电路,可以写出

$$\dot{I}_e = \dot{I}_b + \dot{I}_c = (1 + \beta) \dot{I}_b$$

$$\dot{U}_o = \dot{I}_e R'_L = (1 + \beta) \dot{I}_b R'_L$$

式中, $R'_L = R_E // R_L$ 。

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{U}_o = \dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R'_L = \dot{I}_b [r_{be} + (1 + \beta) R'_L] \quad (5-16)$$

所以

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1 + \beta) \dot{I}_b R'_L}{\dot{I}_b [r_{be} + (1 + \beta) R'_L]} = \frac{(1 + \beta) R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R'_L} \quad (5-17)$$

通常情况下总有 $r_{be} \ll (1 + \beta) R'_L$, 所以有

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{(1+\beta)R'_L}{(1+\beta)R'_L} = 1 \quad (5-18)$$

即射极输出器的电压放大倍数为 1。式(5-18)说明射极输出器的输出电压 \dot{U}_o 与输入电压 \dot{U}_i 的幅度及相位都相同,输出电压完全是“跟随”输入电压,所以射极输出器也叫作射极跟随器。

2. 计算输入电阻 r_i

由图 5-15(b)所示的微变等效电路,可以看出 $\dot{I}_i = \dot{I}_{R_B} + \dot{I}_b$ 。而 $\dot{I}_{R_B} = \dot{U}_i / R_B$, 其中 $R_B = R_{B1} // R_{B2}$, 由式(5-16)可得

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_i}{r_{be} + (1+\beta)R'_L}$$

所以

$$\dot{I}_i = \dot{I}_{R_B} + \dot{I}_b = \dot{U}_i \left[\frac{1}{R_B} + \frac{1}{r_{be} + (1+\beta)R'_L} \right] \quad (5-19)$$

即射极输出器的输入电阻为

$$r_i = R_B // [r_{be} + (1+\beta)R'_L] \quad (5-20)$$

考虑到 $\beta \gg 1$ 和 $\beta R'_L \gg r_{be}$, 所以有

$$r_i \approx R_B // (\beta R'_L) \quad (5-21)$$

3. 计算输出电阻 r_o

按照放大器输出电阻的定义(在信号源短路但保留信号源内阻和输出端开路的条件下,从放大器的输出端看进去的等效电阻),画出计算射极输出放大器输出电阻的等效电路,如图 5-16 所示,有

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{R_E} - \dot{I}_b - \dot{I}_c = \dot{I}_{R_E} - (1+\beta)\dot{I}_b$$

而

$$\dot{I}_{R_E} = \frac{\dot{U}_0}{R_E}$$

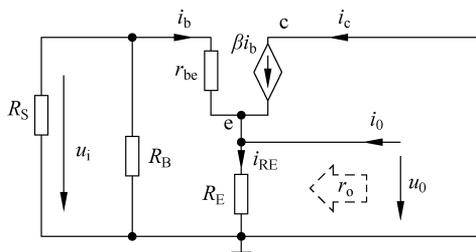


图 5-16 计算射极输出放大器输出电阻的等效电路

$$\dot{I}_b = -\frac{\dot{U}_0}{r_{be} + R'_B}$$

式中, $R'_B = R_B // R_S$ 。所以

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_0}{R_E} + (1 + \beta) \frac{\dot{U}_0}{r_{be} + R'_B} = \dot{U}_0 \left[\frac{1}{R_E} + \frac{1 + \beta}{r_{be} + R'_B} \right]$$

即

$$\frac{1}{r_o} = \frac{\dot{I}_0}{\dot{U}_0} = \frac{1}{R_E} + \frac{1 + \beta}{r_{be} + R'_B} \quad (5-22)$$

$$r_o = R_E // \frac{r_{be} + R'_B}{1 + \beta} \quad (5-23)$$

综合上述分析可知,射极输入器的特点:电压放大倍数接近于1,输入电阻越高,输出电阻越低。

例 5-4 分析图 5-13 所示射极输出放大器。设晶体管的参数为 $\beta = 50$, $V_{BE} = 0.7\text{V}$ 。

解: (1) 静态分析。做出放大器的直流通路如图 5-14 所示,由前述分析可知

$$V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} = \frac{50}{50 + 50} \times 12\text{V} = 6\text{V}$$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E} = \frac{6 - 0.7}{5} \text{mA} = 1.06\text{mA}$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_E R_E = 12 - 1.06 \times 5\text{V} = 6.7\text{V}$$

$$I_B = I_C / \beta = 1.06 / 50 \text{mA} = 0.021\text{mA}$$

(2) 动态分析。做出放大器的微变等效电路如图 5-15(b) 所示,可得

$$r_{be} = 200 + (1 + 50) \times 26 / 1.08 \Omega = 1.43\text{k}\Omega$$

$$R'_L = R_E // R_L = 5\text{k}\Omega // 2\text{k}\Omega = 1.43\text{k}\Omega$$

$$R_B = R_{B1} // R_{B2} = 50\text{k}\Omega // 50\text{k}\Omega = 25\text{k}\Omega$$

$$R'_B = R_B // R_S = 25\text{k}\Omega // 1\text{k}\Omega = 0.96\text{k}\Omega$$

由前述分析可知

$$A_u = \frac{(1 + \beta)R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R'_L} = \frac{51 \times 1.43}{1.43 + 51 \times 1.43} = 0.98 \quad (\text{可直接取 } A_u = 1)$$

$$r_i \approx R_B // (\beta R'_L) = 25\text{k}\Omega // (50 \times 1.43)\text{k}\Omega = 18.5\text{k}\Omega \quad (\text{按 } r_i \approx R_B = 25\text{k}\Omega)$$

$$r_o = R_E // \frac{r_{be} + R'_B}{1 + \beta} = 5\Omega // \frac{1.43 + 0.96}{51} \Omega = 46\Omega \quad (\text{按 } r_o \approx (r_{be} + R'_B) / \beta = 47\Omega)$$

本例题的计算结果表明,对于射极输出放大器,电压放大倍数可直接取为1,输入电阻和输出电阻可分别按 $r_i \approx R_B$ 和 $r_o \approx (r_{be} + R'_B) / \beta$ 近似计算,其误差一般不超过 10%。

5.4 场效应管放大器

场效应管是一种电压控制的单极型半导体器件,具有输入阻抗高、热稳定性好、抗辐射能力强等优点。与双极型晶体管相比,场效应管的缺点是输出功率小、饱和压降大、工作频率低。随着半导体技术的发展,场效应管的这些不足之处已得到显著改善。场效应管也已广泛应用在放大电路中,特别是在一些高灵敏度的多级放大器中用作前置级(输入级)以提高放大器的输入电阻。

场效应管放大器的典型电路如图 5-17 所示。电路中所用的场效应管为 N 沟道耗尽型 MOS 管。在模拟电路中所用的场效应管主要是耗尽型的。场效应管放大器的分析也分为静态分析和动态分析。静态分析是确定放大器的静态工作点,动态分析是分析计算放大器的动态性能指标。下面分别简单介绍其静态分析方法和动态性能指标的计算方法。

5.4.1 静态分析

场效应管放大器也需要有直流偏置电路,为放大器提供合适的静态工作点。图 5-17 所示场效应管放大器与晶体管分压偏置放大器类似,是由电阻分压为 MOS 管的栅极提供一个合适的电位,从而确定放大器的静态工作点。场效应管放大器的这种直流偏置电路称为分压式自偏置电路,这是场效应管放大器的主要偏置形式。

将电路中的电容开路就可作出放大器的直流通路,如图 5-18 所示。工作在线性状态的场效应管,没有静态等效电路模型,其栅源电压和漏极电流的关系要用“电流方程”式(4-1)(耗尽型)或式(4-2)(增强型)描述。按图 5-18,放大器的静态工作点计算如下:由于 MOS 管的栅极是绝缘的,所以栅极电位由电阻 R_1 和 R_2 分压确定,即

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} \quad (5-24)$$

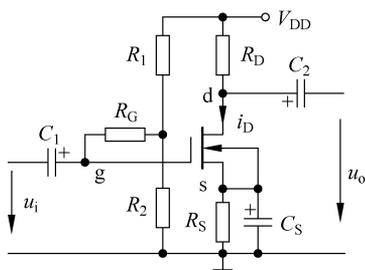


图 5-17 MOS 管放大器

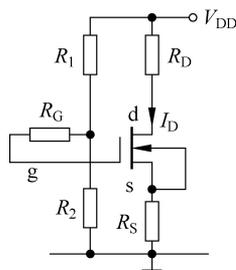


图 5-18 MOS 管放大器的直流通路

栅源电压为

$$U_{GS} = V_G - V_S = V_G - I_D R_S \quad (5-25)$$

而

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{V_P} \right)^2 \quad (5-26)$$

求解以上三式(其中式(5-25)和式(5-26)需联立求解)即可得出电路的 U_{GS} 和 I_D , 再由

$$U_{DS} = V_{DD} - I_D R_D - I_D R_S = V_{DD} - I_D (R_D + R_S) \quad (5-27)$$

求出 U_{DS} , 就得到了放大器的静态工作点 (U_{GS}, I_D, U_{DS}) 。

5.4.2 动态分析

场效应管放大器的动态分析与晶体管放大器的动态分析基本相同,也是先做出放大器的交流通路,再将场效应管用其微变等效模型替代,得到放大器的微变等效电路,然后按微变等效电路计算放大器的电压增益、输入电阻、输出电阻等动态指标。

场效应管适用于中频范围的简化微变等效模型如图 5-19 所示。与晶体管的微变等效模型(见图 5-6(c))相比,差别仅在于管子的输入电阻为无穷大(相当于 r_{be} 变为无穷大)和受控电流源的控制量是电压 u_{gs} 。

做出 MOS 管放大器的微变等效电路如图 5-20 所示。由此计算放大器的动态指标为

$$\begin{cases} A_{u0} = \frac{\dot{U}_{o0}}{\dot{U}_i} = \frac{-g_m \dot{U}_i R_D}{\dot{U}_i} = -g_m R_D \\ r_i = R'_G \quad (\text{其中 } R'_G = R_G + R_1 // R_2) \\ r_o = R_D \end{cases} \quad (5-28)$$

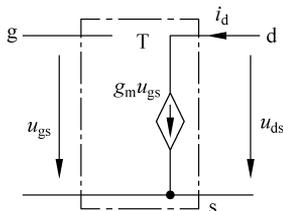


图 5-19 MOS管的微变等效模型

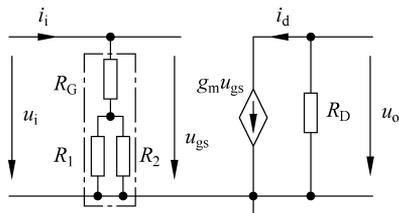


图 5-20 MOS管放大器的微变等效电路

例 5-5 已知图 5-17 所示 MOS 管放大器中, MOS 管的参数为 $I_{DSS} = 0.93\text{mA}$, $V_P = -4\text{V}$, $g_m = 0.3\text{mA/V}$; 电路参数为 $R_1 = 200\text{k}\Omega$, $R_2 = 50\text{k}\Omega$, $R_G = 1\text{M}\Omega$, $R_D = 12\text{k}\Omega$, $R_S = 10\text{k}\Omega$, $V_{DD} = 20\text{V}$ 。计算放大器的静态工作点和交流指标。

解: (1) 静态分析。做出放大器的直流通路如图 5-18 所示, 由前述分析可知

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} = \frac{50}{200 + 50} \times 20\text{V} = 4\text{V}$$

栅源之间的偏置电压为

$$U_{GS} = V_G - V_S = 4 - I_D R_S$$

N 沟道耗尽型 MOS 管的电流方程为

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{V_P} \right)^2$$

联立求解以上两式,可得 $I_D = 0.56\text{mA}$, $U_{GS} = -1.6\text{V}$, 所以

$$U_{DS} = V_{DD} - I_D R_D - I_D R_S = 20 - 0.56 \times 12 - 0.56 \times 10\text{V} = 7.68\text{V}$$

(2) 动态分析。做放大器的微变等效电路如图 5-20 所示, 可得

$$A_{u0} = -g_m R_D = -0.3 \times 12 = -3.6$$

$$r_i = R_G + R_1 // R_2 = 1000\text{k}\Omega + 200\text{k}\Omega // 50\text{k}\Omega = 1040\text{k}\Omega$$

$$r_o = R_D = 12\text{k}\Omega$$

一般来说, MOS 管的跨导与静态工作点 U_{GS} 有关, 可以通过将式(4-1)(耗尽型)或式(4-2)(增强型)对 U_{GS} 求导得出。

5.5 多级放大器

由一个晶体管或场效应管构成的基本放大器称为单级放大器。单级放大器的电压增益一般为几十倍, 这在很多场合是远远不够的。例如, 无线电收音机接收到的电台广播信号幅度一般在毫伏级, 要使扬声器正常工作需要将信号放大到几伏; 在工业控制中用于检测炉温的热电偶的输出信号通常在微伏级, 为满足模-数转换的要求需要将信号放大到十几伏; 在生物医学领域, 测量信号常常低于微伏。这些应用中所需要的电压增益成千上万, 单级放大器无法实现。实际使用中常将多个单级放大器串联起来构成多级放大器, 对信号进行多级放大, 以获得所需要的输出幅度。多级放大器的构成如图 5-21 所示。本节简单介绍多级放大器的电压增益、级间耦合方式和放大器的频率特性。

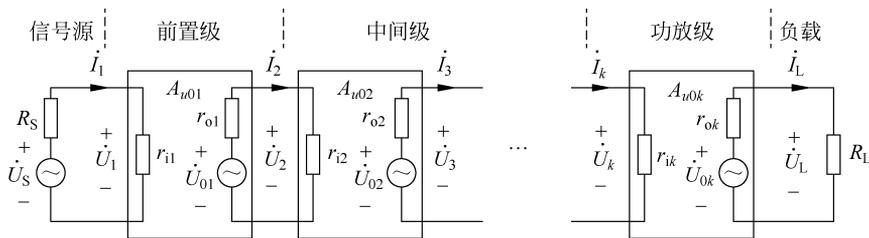


图 5-21 多级放大器的构成示意图

5.5.1 多级放大器的电压增益

图 5-21 是多级放大器的构成示意图, 各单级放大器的输入电压、空载输出电压、空载电压放大倍数、输入电阻和输出电阻分别用 \dot{U}_j 、 \dot{U}_{0j} 、 A_{u0j} 、 r_{ij} 和 r_{oj} 表示, 其中 $j = 1, 2, \dots, k$; 信号源的电动势为 \dot{U}_S , 内阻为 R_S ; 负载电阻为 R_L 。

由电阻分压关系和空载电压放大倍数的定义, 不难写出

$$\dot{U}_1 = \frac{r_{i1}}{R_S + r_{i1}} \dot{U}_S, \dot{U}_2 = \frac{r_{i2}}{r_{o1} + r_{i2}} \dot{U}_{01}, \dots, \dot{U}_k = \frac{r_{ik}}{r_{ok-1} + r_{ik}} \dot{U}_{0k-1}, \dot{U}_L = \frac{R_L}{r_{ok} + R_L} \dot{U}_{0k}$$

$$\dot{U}_{01} = A_{u01} \dot{U}_1, \dot{U}_{02} = A_{u02} \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_{0k} = A_{u0k} \dot{U}_k$$

所以

$$\begin{aligned}\dot{U}_{0k} &= A_{u0k} \dot{U}_k = A_{u0k} \frac{r_{ik}}{r_{ok-1} + r_{ik}} \dot{U}_{0k-1} = A_{u0k} \frac{r_{ik}}{r_{ok-1} + r_{ik}} A_{u0k-1} \frac{r_{ik-1}}{r_{ok-2} + r_{ik-1}} \dot{U}_{k-2} \\ &= \cdots = A_{u0k} \frac{r_{ik}}{r_{ok-1} + r_{ik}} A_{u0k-1} \frac{r_{ik-1}}{r_{ok-2} + r_{ik-1}} \cdots \frac{r_{i2}}{r_{o1} + r_{i2}} A_{u01} \dot{U}_1\end{aligned}$$

由此可以写出多级放大器的空载放大倍数

$$A_{u0} = \frac{\dot{U}_{0k}}{\dot{U}_1} = \frac{r_{ik}}{r_{ok-1} + r_{ik}} \frac{r_{ik-1}}{r_{ok-2} + r_{ik-1}} \cdots \frac{r_{i2}}{r_{o1} + r_{i2}} A_{u0k} A_{u0k-1} \cdots A_{u01} \quad (5-29)$$

多级放大器的第一级称为前置级,最末级称为功放级。前置级的输入电阻就是放大器的输入电阻,功放级的输出电阻就是放大器的输出电阻,即 $r_i = r_{i1}$, $r_o = r_{ok}$ 。

由放大器的空载放大倍数,放大器的输入电阻和信号源内阻的分压关系,放大器的输出电阻和负载电阻的分压关系,不难写出放大器的带载电压放大倍数 $A_u = \dot{U}_L / \dot{U}_1$ 和源载放大倍数 $A_{us} = \dot{U}_L / \dot{U}_S$ 的计算式。读者可以自行推导。

5.5.2 放大器的级间耦合方式

放大器的级间耦合方式是指信号在放大器前后级间的传递方式,就是放大器前级的输出信号如何传送到后级,实现逐级放大。放大器的级间耦合方式主要有直接耦合、阻容耦合和变压器耦合 3 种。

1. 直接耦合

直接耦合是直接用导线把前级放大器的输出连接到后级的输入端,如图 5-22 所示。直接耦合最为简便。这种耦合方式既能传递交流信号,也能传递缓慢变化的直流信号。但是,由于直接耦合使级间存在直流通路,造成放大器前后级的静态工作点相互影响,难以同时达到最佳状态。另外,温漂对直接耦合放大器的影响较为严重,因为前级的温漂被后级当作缓慢变化的信号放大了。集成放大器多采用直接耦合方式。

2. 阻容耦合

阻容耦合是通过电容把前级放大器的输出信号传送到后级的输入端,如图 5-23 所示。用于在级间传送信号的电容称为耦合电容,如图 5-23 中的 C_1 、 C_2 和 C_3 。耦合电容能够在级间传递交流信号的同时隔断直流通路。这样,阻容耦合放大器各级的静态工作点相互独立,互不影响,便于设置到合适的工作状态。因为各级的温漂不会被下一级放大,所以温漂对阻容耦合放大器的影响不太严重。分立元件的交流放大器大部分都采用阻容耦合方式。为使中频段(一般为几千赫兹到近兆赫兹)的信号能近于无损耗的通过,要求耦合电容的容量要足够大。通常交流放大器中所用的耦合电容都是电解电容,容量一般为几十微法。

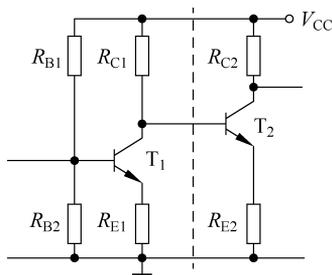


图 5-22 放大器的直接耦合

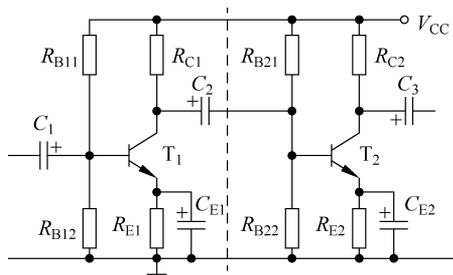


图 5-23 放大器的阻容耦合

3. 变压器耦合

变压器耦合是使用音频或中频变压器把前级放大器的输出信号传送到后级的输入端,如图 5-24 所示。无线电收音机中所用的“中周”就是一种中频变压器。变压器也能在级间传递交流信号的同时隔断直流,使得放大器各级的静态工作点相互独立。变压器耦合的主要好处是可以实现级间阻抗匹配,使放大器的输出功率接近最大。另外,中频变压器在传递信号的同时,常常还兼有选频的功能。变压器耦合的不足之处是变压器,特别是音频变压器的体积比较大,高频特性比较差。

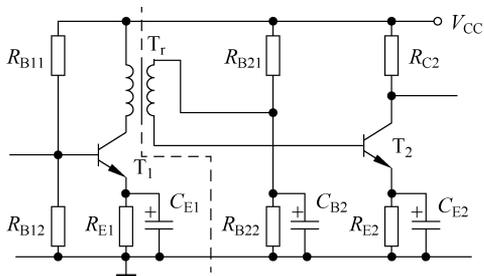


图 5-24 放大器的变压器耦合

5.5.3 放大器的频率特性

由于受到电路中的电抗元件(如耦合电容、旁路电容等)和半导体器件的极间电容、等效结电容,以及电路的分布电容、导线电感等因素的影响,放大器对不同频率的信号呈现不同的放大倍数。一般来说,耦合电容和旁路电容的阻抗变大是造成放大器低频段放大倍数下降的主要原因;半导体器件的等效结电容以及电路的分布参数等是造成放大器高频段放大倍数下降的主要原因。前面所介绍的微变等效电路仅适用于中频段。

放大器的电压放大倍数 A_u 定义为输出电压和输入电压的相量之比,在一般情况下 A_u 是个复数,即放大倍数包括幅度和相位两部分。放大器的放大倍数和频率的关系就是放大器的频率特性。频率特性又可分为幅频特性和相频特性。幅频特性是指放大倍数的幅值和频率的关系,相频特性是指放大倍数的相位(即辐角)和频率的关系。典型的放大器幅频特性如图 5-25 所示。横坐标代表频率,为使低频和高频部分都能清楚地显示出来,频率坐标常采用对数标度(在按对数标度的横坐标上,每个等间隔所代表的频率相差十倍,常称为十倍频程);纵坐标代表放大倍数的幅值。在图 5-25 中可以看出:放大器的放大倍数仅在中间一段频率范围内保持不变,在频率较低或较高时,放大倍数都会下

降。中频段的放大倍数称为中频放大倍数,在图 5-25 中用 A_{uM} 表示(在前面所计算的放大倍数就是此处的 A_{uM})。放大倍数下降到中频放大倍数的 $1/\sqrt{2}$ (0.707) 时的频率称为截止频率,其中,低频段的截止频率称为下限截止频率(下限频率),用 f_L 表示;高频段的截止频率称为上限截止频率(上限频率),用 f_H 表示,放大倍数大于中频放大倍数的 $1/\sqrt{2}$ (0.707) 的频率区段称为放大器的通频带,用 ΔF 表示,即 $\Delta F = f_H - f_L$,如图 5-25 所示。当频率坐标采用对数标度时,大部分放大器的增益在通频带之外的衰减可近似表示为线性的,常称为每十倍频程衰减若干分贝。

工程上常用分贝增益表示放大倍数的幅值,其单位为分贝(dB)。分贝增益定义为

$$K_{dB} = 20 \lg |A_u| \quad (5-30)$$

其中, K_{dB} 为放大器的分贝增益; \lg 是以 10 为底的对数。

用分贝表示的放大器的频率特性如图 5-26 所示。由于在截止频率处,放大器的放大倍数为 $\frac{1}{\sqrt{2}}A_{uM} = 0.707A_{uM}$ 。而

$$20 \lg \left(\frac{1}{\sqrt{2}} A_{uM} \right) = 20 \lg A_{uM} - 20 \lg \sqrt{2} = 20 \lg A_{uM} - 3$$

即截止频率处的分贝增益比中频分贝增益下降了 3dB。

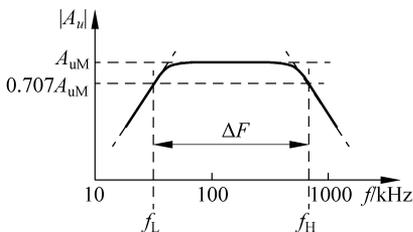


图 5-25 放大器的幅频特性曲线

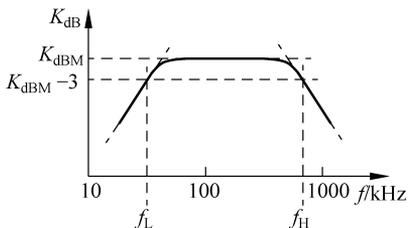


图 5-26 用分贝表示的幅频特性

习题 5

一、思考题

1. 简述共射极晶体管基本放大电路(见图 5-2)中各元件的作用。若电路中的 R_B 断开了,定性画出此时有交流信号输入的电路各点的波形。

2. 在图 5-1 所示的晶体管基本放大电路中,信号源 e_s 中有没有直流电流? 电源 E_C 中有没有交流电流?

3. 简述分压偏置晶体管放大电路(见图 5-10)中各元件的作用。若电路中的 R_{B2} 断开了,定性画出此时在输入交流信号作用下电路各点的波形。

4. 比较图 5-10、图 5-11 和图 5-12 所示的同一放大器的不同通路中标注晶体管各电极电流所用符号的不同,说明其含义上的区别。

5. 在晶体管放大电路中,为什么要设置静态工作点?若不设置静态工作点会怎样?
6. 若图 5-2 所示放大电路的静态工作点在图 5-4(b)所示的 Q' 点,应如何调整电路才能使工作点转到 Q 点?
7. 若图 5-2 所示放大电路的静态工作点在图 5-4(b)所示的 Q'' 点,定性画出电路出现一定程度的失真时电路各点的相应波形。这时的失真主要是何种失真?
8. 在图 5-10 所示分压偏置放大电路中,简述由于温度下降引起的静态工作点的稳定过程。在温度下降后,表示静态工作点的 3 个量 I_B, I_C, U_{CE} 中哪些量近似不变?哪些量会有变化?
9. 若图 5-10 所示分压偏置放大电路中的晶体管因为老化 β 值下降了,简述这时静态工作点的稳定过程。
10. 做出晶体管的微变等效电路,简要说明等效电路中各元件的意义。
11. 为什么不能用放大电路的微变等效电路来计算放大器的静态工作点?说明微变等效电路的适用范围。
12. 计算交流放大倍数的微变等效电路中并没有直流电源,所以放大器可以不用直流电源,这种说法是否正确?为什么?
13. 说明 A_u 和 A_{u0} 有何区别?若已知放大器的空载电压放大倍数 A_{u0} 、输出电阻 r_o 、负载电阻 R_L 和信号源内阻 R_S ,推导放大器的电压放大倍数 A_u 和源载电压放大倍数 A_{us} 。
14. 说明晶体管的输入电阻 r_{be} 和放大器的输入电阻 r_i 、晶体管的输出电阻 r_{ce} 和放大器输出电阻 r_o 的区别,在什么条件下两者可以等效互换?
15. 为什么晶体管的发射结电阻 r_e 折算到基极回路要变大 $1+\beta$ 倍?
16. 叠加原理只适用于线性电路,而晶体管是非线性元件。为什么在由微变等效电路计算交流分量时,可以按叠加原理将直流电压源短路?
17. 简述放大器的负载效应及产生负载效应的原因。
18. 写出图 5-10 所示分压偏置放大电路的动态指标的计算式。
19. 既然射极输出器的电压放大倍数为 1,也就是说,射极输出器的输出电压和输入电压是一样的,那么为什么还要使用射极输出器?
20. 从电路构成、工作原理、分析方法、计算公式等方面简述场效应管放大器和晶体管放大器的相同点和不同点。
21. 说明温度变化时,图 5-17 所示场效应管放大器的工作点稳定过程。(稳定升高使漏极电流 I_D 变大)
22. 由 MOS 管的电流方程推导其跨导表达式,并结合 MOS 管结构原理,找出增大跨导的措施。
23. 参照图 5-21 所示多级放大器的构成示意图,推导放大器的有载电压放大倍数 $A_u = \dot{U}_L / \dot{U}_1$ 和源载电压放大倍数 $A_{us} = \dot{U}_L / \dot{U}_S$ 的计算式。
24. 简述放大器的几种级间耦合方式的主要优缺点。若要设计一个电子体温计,其中的放大器应采用哪种耦合方式?

25. 在截止频率处,放大器的负载电阻所获得的功率比中频时下降了多少? 直接耦合放大器的下限截止频率应该是多少?

二、计算题

1. 判断图 5-27 所示各电路能否对信号进行线性放大,并说明理由。

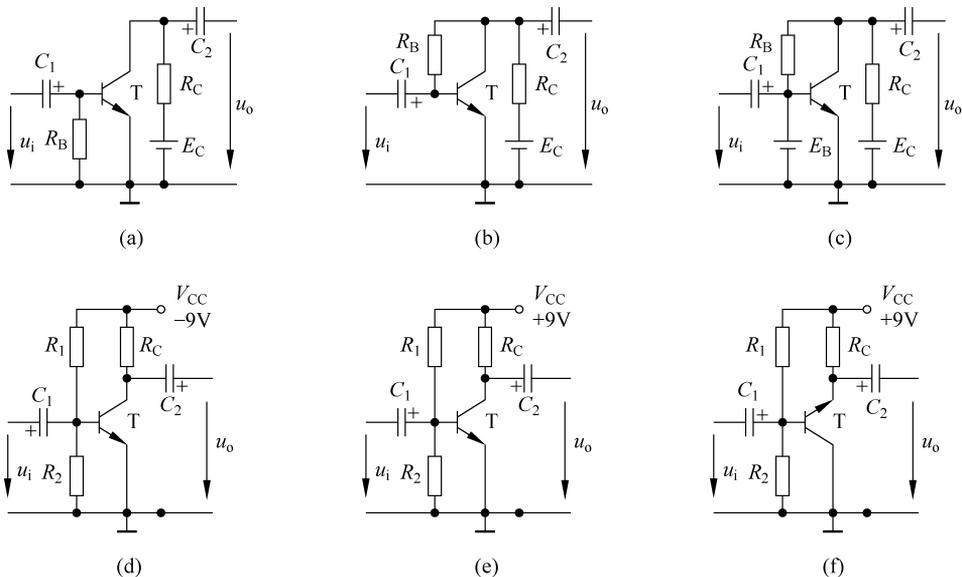


图 5-27 计算题 1 的电路图

2. 图 5-28(a)所示放大电路的输入、输出波形如图 5-28(b)所示。说明此时的失真是什么失真? 应如何调整电路才能消除此失真?

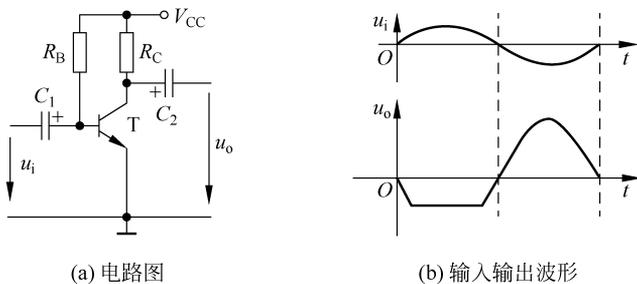


图 5-28 计算题 2 图

3. 设图 5-29 所示各放大电路中晶体管的参数均为 $\beta = 50$, $V_{\text{BES}} = 0.7\text{V}$ 。确定电路中各未知电阻的阻值,使电路具有合适的静态工作点,输出动态范围最大。

4. 放大器电路如图 5-30 所示,已知 $V_{\text{CC}} = +12\text{V}$, $R_{\text{C}} = 3\text{k}\Omega$, $R_{\text{B}} = 240\text{k}\Omega$, $\beta = 50$, $V_{\text{BES}} = 0.7\text{V}$, $R_{\text{L}} = 2\text{k}\Omega$ 。求放大器的静态工作点,电压放大倍数 A_u , 输入电阻 r_i , 输出电阻 r_o 。

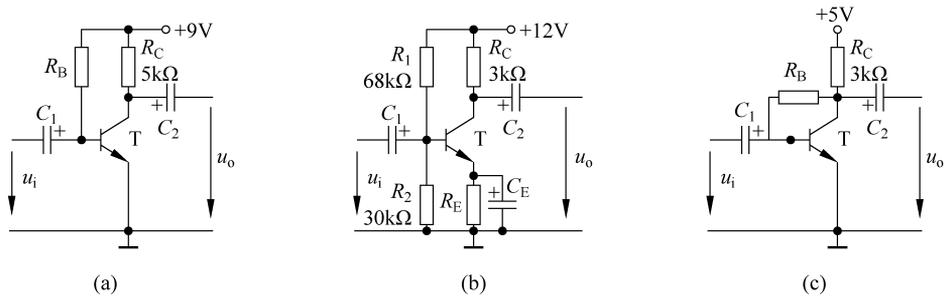


图 5-29 计算题 3 的电路图

5. 图 5-31 所示放大器中, $V_{CC} = +12\text{V}$, $R_C = 4\text{k}\Omega$, $R_1 = 140\text{k}\Omega$, $R_2 = 40\text{k}\Omega$, $R_E = 2\text{k}\Omega$, $\beta = 100$, $V_{\text{BES}} = 0.7\text{V}$ 。求放大器的静态工作点, 电压放大倍数 A_{u_0} , 输入电阻 r_i , 输出电阻 r_o 。

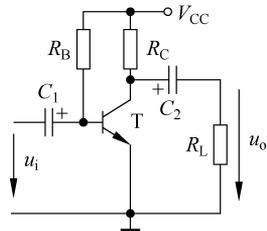


图 5-30 计算题 4 的电路图

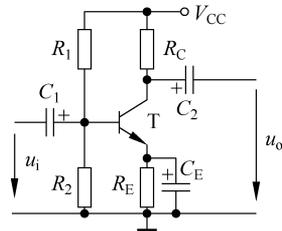


图 5-31 计算题 5 的电路图

6. 放大器电路如图 5-32 所示, 其中晶体管的 $\beta = 40$, $V_{\text{BES}} = 0.7\text{V}$ 。

- (1) 计算放大器的静态工作点。
- (2) 做出放大器的微变等效电路。
- (3) 计算放大器的 A_u , r_i , r_o 。
- (4) 若 $R_S = 500\Omega$, 求 A_{us} 。

7. 放大器电路如图 5-33 所示, 其中晶体管的 $\beta = 80$, $V_{\text{BES}} = 0.7\text{V}$ 。

- (1) 计算放大器的静态工作点。
- (2) 做出放大器的微变等效电路。

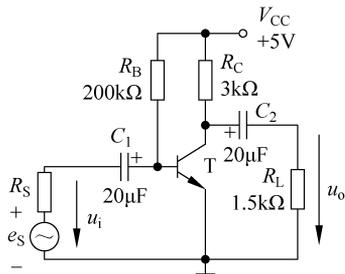


图 5-32 计算题 6 的电路图

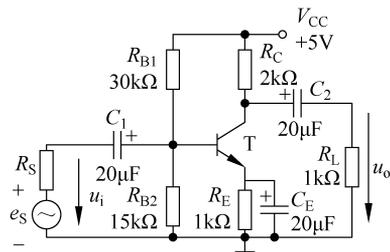


图 5-33 计算题 7 的电路图

(3) 计算放大器的 A_u, r_i, r_o 。

(4) 若 $R_S = 500\Omega$, 求 A_{us} 。

8. 射极输出器电路如图 5-34 所示, 其中晶体管的 $\beta = 60, V_{BES} = 0.7V$ 。

(1) 做出放大器的微变等效电路。

(2) 计算放大器的 A_u, r_i, r_o 。

9. PNP 晶体管构成的放大电路如图 5-35 所示, 其中晶体管的 $\beta = 80, V_{BES} = -0.5V$ 。

(1) 做出放大器的微变等效电路。

(2) 计算放大器的 A_{u0}, r_i, r_o 。

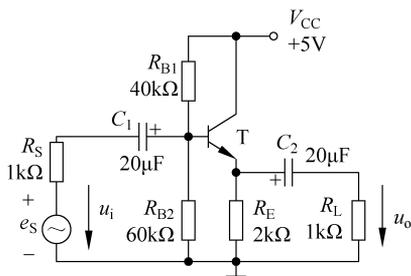


图 5-34 计算题 8 的电路图

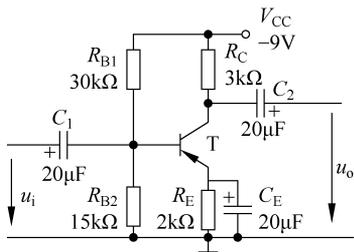


图 5-35 计算题 9 的电路图

10. 图 5-36 所示电路是一种具有交流负反馈的放大器, 设其中的晶体管 $\beta = 60, V_{BES} = 0.7V, r_{be} = 1.3k\Omega$ 。

(1) 做出放大器的微变等效电路。

(2) 计算放大器的 A_{u0}, r_i, r_o 。

11. 图 5-37 所示电路也是一种具有交流负反馈的放大器, 设其中的晶体管 $\beta = 40, V_{BES} = 0.7V$ 。

(1) 确定电路的静态工作点。

(2) 做出放大器的微变等效电路。

(3) 计算放大器的交流参数 A_{u0}, r_i, r_o 。

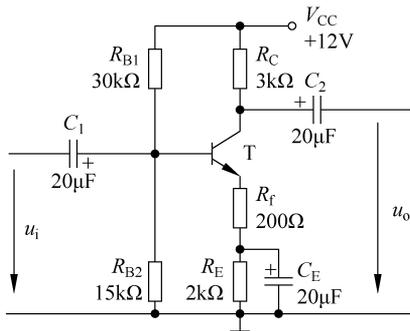


图 5-36 计算题 10 的电路图

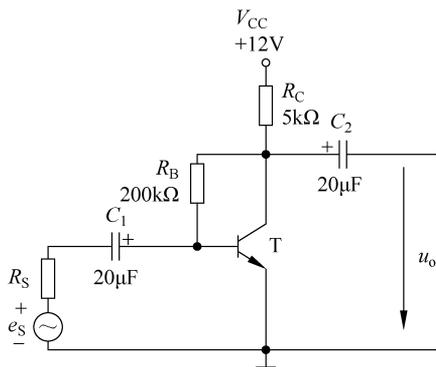


图 5-37 计算题 11 的电路图

12. 某交流放大器在输入信号为 $U_i = 10\text{mV}$ 时, 当输出端空载时测得输出为 $U_{o0} = 5\text{V}$, 当输出端空载接有负载电阻 $R_L = 2\text{k}\Omega$ 时测得输出为 $U_o = 3\text{V}$ 。求放大器的 A_{u0} 和 r_o 。

13. 某放大器连接如图 5-38, 已知放大器的动态指标为 $A_{u0} = 10^3$, $r_i = 1\text{k}\Omega$, $r_o = 4\text{k}\Omega$; $U_S = 5\text{mV}$, $R_S = 1\text{k}\Omega$, $R_L = 2\text{k}\Omega$ 。计算放大器的输出电压 U_o 。

14. MOS 管放大电路如图 5-39 所示, 其中 MOS 管的参数为 $I_{DSS} = 2\text{mA}$, $V_P = -2\text{V}$, $g_m = 1.2\text{mA/V}$ 。

- (1) 确定电路的静态工作点。
- (2) 做出放大器的微变等效电路。
- (3) 计算放大器的交流参数 A_{u0} 、 r_i 、 r_o 。

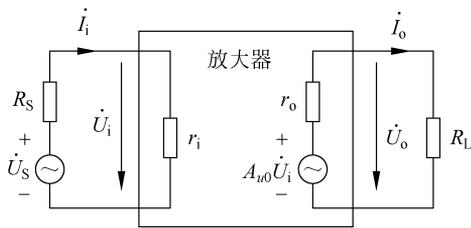


图 5-38 放大器的连接示意图

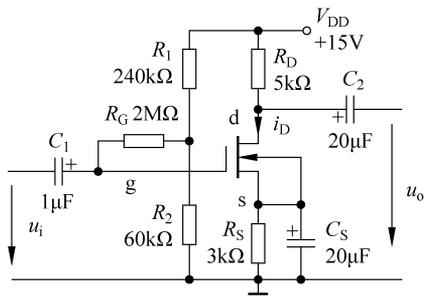


图 5-39 MOS 管放大器

15. 有两个单级放大器分别为 A: $A_{u0} = -50$, $r_i = 2\text{k}\Omega$, $r_o = 1\text{k}\Omega$; B: $A_{u0} = -20$, $r_i = 20\text{k}\Omega$, $r_o = 4\text{k}\Omega$ 。已知信号源为 $U_S = 10\text{mV}$, $R_S = 5\text{k}\Omega$; 负载电阻为 $R_L = 1\text{k}\Omega$ 。两个单级放大器应如何连接才能使负载得到最大电压? 这个最大电压为何值?

16. 将两个参数均为空载分贝增益 $K_{dB0} = 40\text{dB}$, 输入电阻 $r_i = 2\text{k}\Omega$, 输出电阻 $r_o = 4\text{k}\Omega$ 的放大器串联起来, 其总的分贝增益为何值? 若所接信号源为 $U_S = 4\text{mV}$, $R_S = 2\text{k}\Omega$; 负载电阻为 $R_L = 1\text{k}\Omega$, 则输出电压为何值?