

本章在介绍放大的概念和放大电路主要技术指标的基础上,以单管共发射极基本放大电路为例,介绍放大电路的组成原则及实现放大的基本原理,然后介绍用微变等效电路法求解放大电路主要技术指标和用图解法分析放大电路的非线性失真情况及最大输出幅度。

温度变化将使半导体器件的参数发生变化,从而引起放大电路的静态工作点的不稳定,进而导致放大电路的动态性能受到影响。因此,本章将介绍一种常用的分压式工作点稳定的放大电路,还着重介绍了共集电极组态放大电路。

接着,在晶体管放大电路的基础上,简要地介绍了场效应管放大电路的特点和分析方法。最后扼要地介绍多级放大电路的耦合方式、电压放大倍数、输入电阻和输出电阻。

5.1 放大的基本概念和放大电路的主要技术指标

5.1.1 放大的基本概念

人们在生产和技术工作中,需要通过放大电路放大微弱的信号,以便进行有效的观察、测量和利用。例如,自动控制设备把通过传感器获取的反映压力、温度、湿度、机械位移或转速等的微弱的电信号放大后,才能驱动继电器、控制电动机、显示仪表或其他执行机构动作。

放大电路的作用,就是将微弱的电信号不失真地放大成较大的信号。放大的本质是能量的控制过程,即在输入信号的作用下,将直流电源的能量转换成负载获得的能量,因此放大电路中必须有能够控制能量的器件,如晶体管和场效应管等。不失真是放大的基本要求。正弦信号是放大电路的分析、测试信号。

5.1.2 放大电路的主要技术指标

放大电路的技术指标用于定量地描述电路的有关技术性能。测试时,通常在放大电路的输入端加上一个正弦测试电压,然后测量电路中其他有关电量。图 5.1 是测试技术指标的示意图。

1. 放大倍数

放大倍数是衡量放大电路放大能力的技术指标。

1) 电压放大倍数 $\dot{A}_u$

电压放大倍数 $\dot{A}_u$ 定义为输出电压 $\dot{U}_o$ 与输入电压 $\dot{U}_i$ 之比,即



视频讲解

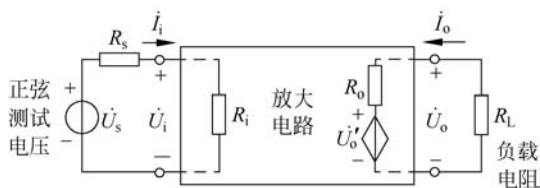


图 5.1 放大电路技术指标测试的示意图

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \quad (5.1)$$

2) 电流放大倍数 $\dot{A}_i$

电流放大倍数 $\dot{A}_i$ 定义为输出电流 $\dot{I}_o$ 与输入电流 $\dot{I}_i$ 之比,即

$$\dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} \quad (5.2)$$

2. 输入电阻 R_i

从放大电路输入端看进去的等效电阻称为放大电路的输入电阻 R_i 。输入电阻 R_i 等于输入电压 $\dot{U}_i$ 与输入电流 $\dot{I}_i$ 之比,即

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} \quad (5.3)$$

式(5.3)表明,输入电阻 R_i 越大,放大电路对信号源索取的电流就越小。输入电阻是衡量放大电路对信号源影响程度的技术指标。

3. 输出电阻 R_o

从放大电路输出端看进去的等效电阻称为放大电路的输出电阻 R_o 。输出电阻 R_o 的定义是当输入端信号短路(即 $\dot{U}_s = 0$, 但保留 R_s)、输出端负载开路(即 $R_L = \infty$)时,外加一个正弦输出电压 $\dot{U}_o$, 得到相应的输出电流 $\dot{I}_o$, 二者之比为输出电阻 R_o , 即

$$R_o = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \bigg|_{\substack{\dot{U}_s = 0 \\ R_L = \infty}} \quad (5.4)$$

式(5.4)通常用作分析放大电路时,推导输出电阻。根据图 5.1 的输出回路可得

$$R_o = \frac{\dot{U}_o' - \dot{U}_o}{\frac{\dot{U}_o}{R_L}} = \left(\frac{\dot{U}_o'}{\dot{U}_o} - 1 \right) R_L \quad (5.5)$$

实际工作中测试输出电阻时,通常按式(5.5)间接完成,在输入端加上一个正弦信号 $\dot{U}_i$, 分别测得负载 R_L 开路时的输出电压 $\dot{U}_o'$ 及接上负载 R_L 时的输出电压 $\dot{U}_o$, 再按式(5.5)计算出 R_o 。

将式(5.5)变形为

$$\dot{U}_o = \frac{R_L}{R_o + R_L} \dot{U}'_o \quad (5.6)$$

可以看出,输出电阻 R_o 越小,负载电阻 R_L 变化时输出电压 $\dot{U}_o$ 的变化量越小。

输出电阻是衡量放大电路带负载能力的技术指标。

4. 通频带 BW

由于电容、电感及半导体器件 PN 结的电容效应,放大电路的电压放大倍数随着信号频率的变化而变化。一般情况下,在信号频率较低的低频段和信号频率较高的高频段,电压放大倍数的数值都将减小,而在中间频率范围内的中频段(通频带),因各种电抗性作用可以忽略,故电压放大倍数基本不变。放大电路的频率特性曲线如图 5.2 所示。

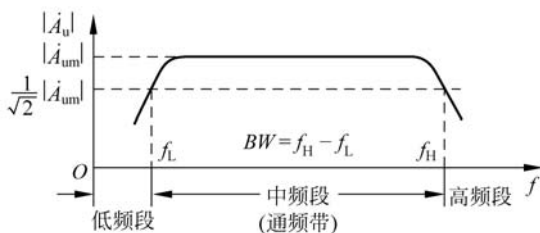


图 5.2 放大电路的频率特性曲线

当信号频率上升或下降,使放大倍数等于 $1/\sqrt{2}$ 倍中频放大倍数 $|A_{um}|$ 时所对应的频率分别称为上限截止频率 f_H 和下限截止频率 f_L 。上、下限截止频率之间的频率范围定义为放大电路的通频带 BW ,即

$$BW = f_H - f_L \quad (5.7)$$

通频带是衡量放大电路对不同频率信号放大能力的技术指标。

5. 最大输出幅度 U_{om}

最大输出幅度表示输出信号波形在没有明显失真的情况下,放大电路能够提供给负载的最大输出电压。一般用最大值 U_{om} 表示,也可用有效值和峰-峰值表示。

放大电路的技术指标还有最大输出功率与效率和非线性失真系数等。

5.2 基本放大电路的组成及工作原理

电流放大作用是晶体管的重要特性,利用这一特性,可以组成各种放大电路。其中,最基本的单管共发射极放大电路和共集电极放大电路是构成多级放大电路的基础。

5.2.1 基本放大电路的组成

晶体管是电流放大元件,发射结具有单向导电性且存在死区,对交流输入电压信号进行放大时,放大电路在组成上需要考虑以下两个进行电压放大的条件转化问题及实现方法。

(1) 信号形式的转换。在输入端,将输入的交流电压信号加到晶体管的发射结上,转换成(产生)基极电流;晶体管进行电流放大得到集电极电流,在输出端通过电阻将集电极电

流转换成交流输出电压信号。

(2) 交、直流量叠加。外加直流量,直流电源的接法使晶体管的发射结正偏、集电结反偏,满足放大的偏置条件,将交流信号叠加在直流量上转换成脉动直流量。

以上所述也是放大电路组成的基本原则。图 5.3 就是按照以上原则组成的共发射极基本放大电路。

图 5.3 中, u_i 为输入交流信号电压, u_o 为输出交流信号电压。 u_i 、 C_1 、晶体管的基极 b 和发射极 e 组成输入回路, u_o 、 C_2 、晶体管的集电极 c 和发射极 E 组成输出回路。因发射极是输入回路和输出回路的公共端,所以称这种电路为共发射极电路。晶体管 VT 作为电流放大器件,是放大电路的核心。基极电源 V_{BB} 使晶体管的发射结正偏。基极电阻 R_B 决定着当输入信号为 0 时的基极电流,该电流称为静态基极电流,在以后的分析中将会看到静态基极电流的大小对晶体管能否工作在放大区以及电路的其他性能具有重要影响。集电极电源 V_{CC} 使晶体管的集电结反偏,产生集电极电流。集电极电阻 R_C 将放大后的集电极电流转换成放大的电压输出。电容 C_1 、 C_2 具有通交流的作用。交流信号在输入端与放大电路、放大电路与输出端之间的传输称为耦合,电容 C_1 、 C_2 正是起到这种作用,所以称为耦合电容。电容 C_1 位于输入端,称为输入耦合电容;电容 C_2 位于输出端,称为输出耦合电容。电容的另一个作用是隔直流,从而使放大电路的直流电量不会受到信号源和输出负载的影响,因此也称为隔直电容。图 5.3 的电路使用了两个直流电源,实际应用中可以将 V_{BB} 省去,改接 R_B 至 V_{CC} 的正极,调整 R_B 的阻值,同样可以产生合适的静态基极电流。采用只标出 V_{CC} 正端的简化方式表示,电路如图 5.4 所示。

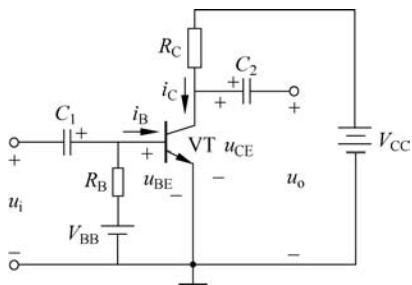


图 5.3 共发射极基本放大电路

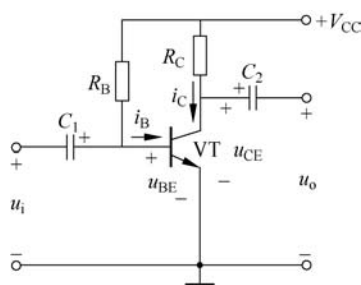


图 5.4 单电源的共发射极基本放大电路

5.2.2 基本放大电路的工作原理

放大电路中,交、直流量并存。交流量是放大的目的,直流量是实现放大的基础。交、直流量既有联系又有区别。

当输入信号 $u_i = 0$ 时,仅直流电源作用,电路中的电压和电流只有直流成分,此时放大电路的工作状态称为静态,也称作直流工作状态。当输入信号 $u_i \neq 0$ 时,电路中的电压和电流既有直流成分又有交流成分。在只考虑纯交流电量情况时,放大电路的工作状态称为动态,也称作交流工作状态。

直流量、交流量(变化量)及交、直流叠加的总电量的约定表示符号如表 5.1 所示。



视频讲解

表 5.1 电量的表示符号

电量名称	直流量	交流量(变化量)	总电量
发射结电压	U_{BEQ}	$u_{be}、\Delta u_{BE}$	$u_{BE}=U_{BEQ}+u_{be}$
集电极-发射极电压	U_{CEQ}	$u_{ce}、\Delta u_{CE}$	$u_{CE}=U_{CEQ}+u_{ce}$
基极电流	I_{BQ}	$i_b、\Delta i_B$	$i_B=I_{BQ}+i_b$
集电极电流	I_{CQ}	$i_c、\Delta i_C$	$i_C=I_{CQ}+i_c$

静态时,发射结电压 U_{BEQ} 与基极电流 I_{BQ} 、集电极-发射极电压 U_{CEQ} 与集电极电流 I_{CQ} ,可分别在晶体管的输入特性曲线和输出特性曲线上确定下一个固定的点,该点称为放大电路的静态工作点 Q 。

图 5.3 和图 5.4 所示的基本放大电路的工作原理表述如下:

$u_i \xrightarrow{\text{加至发射结}} \Delta u_{BE} \xrightarrow{\text{产生基极电流}} \Delta i_B \xrightarrow{\text{晶体管电流放大}} \Delta i_C \xrightarrow{\text{经 } R_C \text{ 转换成电压}} \Delta u_{CE}(u_o) = -\Delta i_C R_C$

共发射极基本放大电路的工作波形如图 5.5 所示。共发射极放大电路的输出信号 u_o 与输入信号 u_i 相位相反。只要电路器件参数选取合适, u_o 的数值就会比 u_i 的数值大得多,从而达到电压放大的目的。

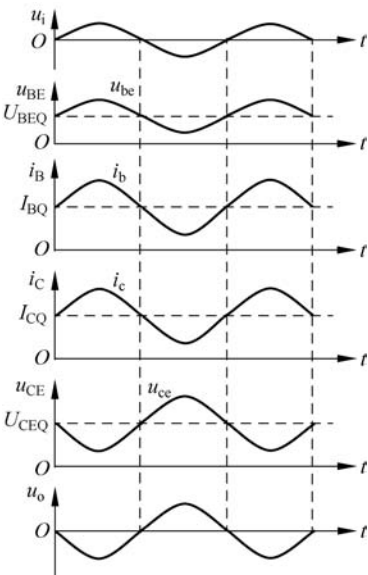


图 5.5 共发射极基本放大电路的工作波形

5.3 放大电路的基本分析方法

为了深入、具体地评价一个放大电路的质量,需要对放大电路进行定量分析,得出放大电路的各项主要技术指标。定量分析放大电路的工作,一般包括两方面的内容:静态分析,即确定不加输入信号时放大电路的工作状态,求解静态工作点;动态分析,即求解出加上输入信号后放大电路的各项主要技术指标,如电压放大倍数 $\dot{A}_u$ 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 等。分析的一般步骤是先分析静态,后分析动态。



视频讲解

5.3.1 直流通路与交流通路

由于放大电路中存在电抗性元件,因此并存的交、直流两种成分的电量在放大电路中的流电路径不同,分析时需分别处理。

1. 直流通路

静态时,直流电流流通的路径称为直流通路。直流通路用于对放大电路进行静态分析,即求解静态工作点处的电量。

直流通路的画法为:

将放大电路中的信号源 $u_s=0$ 、保留内阻 R_s 、电容开路后,剩下的与晶体管连接的部分电路即为直流通路。

2. 交流通路

动态时,交流电流流通的路径称为交流通路。交流通路用于对放大电路进行动态分析,即求解各项主要技术指标。

交流通路的画法为:

将放大电路中的大容量电容短路和直流电压源短路(内阻为0)后,剩下的与晶体管连接的部分电路即为交流通路。

图 5.6(a)所示为接有负载电阻 R_L 的共发射极基本放大电路,其直流通路和交流通路分别如图 5.6(b)和图 5.6(c)所示。

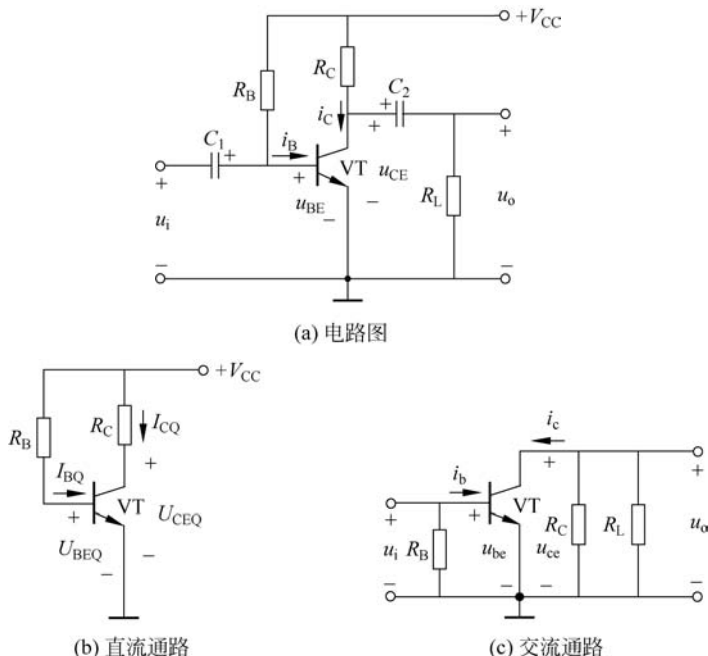


图 5.6 共发射极基本放大电路

5.3.2 放大电路的静态分析

静态工作点的 4 个直流电量为 U_{BEQ} 、 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 。其中,发射结正偏时, U_{BEQ}



视频讲解

为已知常数。

$$|U_{BEQ}| \approx \begin{cases} 0.7\text{V}(\text{硅管}) \\ 0.2\text{V}(\text{锗管}) \end{cases} \quad (5.8)$$

静态分析通常有近似估算法(公式法)和图解法两种。此处重点介绍近似估算法(公式法)。

1. 近似估算法(公式法)求静态工作点

在放大电路的直流通路中,用电路分析的方法求解 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 。

图 5.6(b)所示的共发射极基本放大电路的直流通路中,各直流量及参考方向已标示,由图可得到 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 的计算公式为

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B} \quad (5.9)$$

$$I_{CQ} \approx \beta I_{BQ} \quad (5.10)$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C \quad (5.11)$$

例 5.1 在图 5.6(a)所示的共发射极基本放大电路中,已知晶体管为硅管, $\beta = 50$, $R_B = 280\text{k}\Omega$, $R_C = 3\text{k}\Omega$, $R_L = 3\text{k}\Omega$, $V_{CC} = 12\text{V}$, 试估算放大电路的静态工作点。

解: 根据式(5.9)、式(5.10)和式(5.11)可得

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B} = \left(\frac{12 - 0.7}{280} \right) \text{mA} = 0.04\text{mA} = 40\mu\text{A}$$

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

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C = (12 - 2 \times 3)\text{V} = 6\text{V}$$

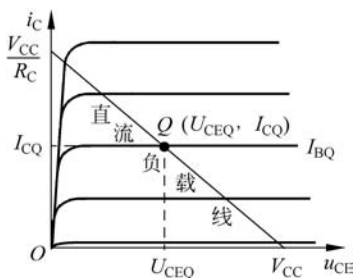


图 5.7 输出特性曲线上求静态工作点

2. 图解法求静态工作点

在晶体管输出特性曲线上,用作图的方法求解 I_{CQ} 和 U_{CEQ} ,方法如下。

用公式法,由放大电路的直流通路计算静态基极电流 I_{BQ} ,由直流通路的输出回路列写直流负载线方程 $u_{CE} = V_{CC} - i_C R_C$,并由此方程在输出特性曲线上确定点 $(V_{CC}, 0)$ 和 $(0, V_{CC}/R_C)$,画出直流负载线,再确定 $i_B = I_{BQ}$ 的输出特性曲线与直流负载线的交点 $Q(U_{CEQ}, I_{CQ})$ 。

图 5.7 所示为晶体管输出特性曲线上求解静态工作点的图解法。

5.3.3 放大电路的动态分析

动态分析的目的是求解放大电路的各项主要技术指标。动态分析有微变等效电路分析法和图解法。此处介绍用微变等效电路分析法求解放大电路的各项主要技术指标和用图解法分析非线性失真情况、确定最大输出幅度。

1. 微变等效电路分析法

微变等效电路分析法是解决放大元件晶体管非线性特性问题的一种常用方法。这种方法的实质是:在信号变化范围很小(微变)的前提下,可认为晶体管电压、电流之间的关系基



视频讲解

本是线性的,即在一个很小的变化范围内,可以将晶体管的输入、输出特性曲线近似地看作直线。这样,就可以用一个线性等效电路代替非线性的晶体管,将非线性问题转换为线性问题,从而使复杂的电路分析计算得以简化。

1) 晶体管简化的 h 参数微变等效电路

晶体管特性曲线的局部线性化如图 5.8 所示。

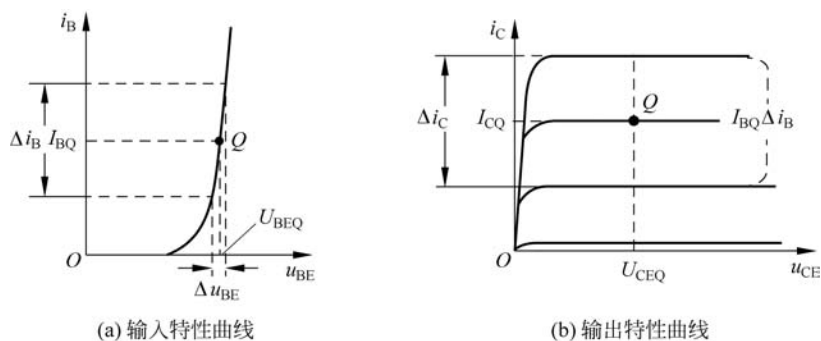


图 5.8 晶体管特性曲线的局部线性化

图 5.8(a)所示的输入特性曲线表明,在小信号输入的情况下,静态工作点 Q 附近的一段曲线近似为一条直线,可以认为基极电流的变化量 Δi_B 与发射结电压的变化量 Δu_{BE} 成正比,因此晶体管的基极 b 与发射极 e 之间可用一个线性等效电阻 r_{be} 表示 Δu_{BE} 与 Δi_B 之间的关系,即

$$r_{be} = \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B} \quad (5.12)$$

r_{be} 为晶体管的输入电阻。对于低频小功率晶体管, r_{be} 为

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}} \quad (5.13)$$

式中, $r_{bb'}$ 是晶体管的基区体电阻,对于低频小功率管, $r_{bb'} \approx 300\Omega$ 。 I_{EQ} 是发射极静态电流,可用 I_{CQ} 近似代替。

图 5.8(b)所示的输出特性曲线表明,在静态工作点 Q 附近的小范围内,各条输出特性曲线基本上是水平的,而且互相之间平行等距,集电极电流的变化量 Δi_C 与集电极电压的变化量 Δu_{CE} 无关,仅决定于基极电流的变化量 Δi_B ,即满足 $\Delta i_C = \beta \Delta i_B$ 。因此晶体管的集电极 c 与发射极 e 之间可以等效成一个受基极电流 Δi_B 控制的线性受控电流源,其电流大小为 $\beta \Delta i_B$ 。

根据以上分析,可以得到晶体管的简化 h 参数微变等效电路如图 5.9 所示。

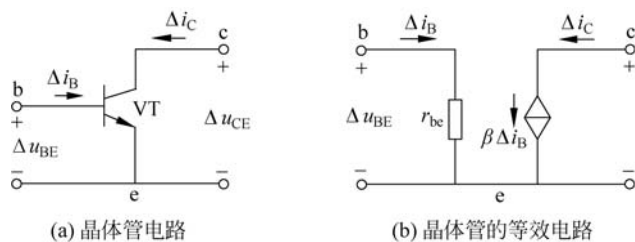


图 5.9 晶体管的简化 h 参数微变等效电路

说明如下。

(1) 微变等效电路中的受控电流源 $\beta \Delta i_B$ 的大小和方向受基极电流 Δi_B 控制。

(2) 微变等效电路是对交流量而言的,所以 NPN 型、PNP 型晶体管的微变等效电路是相同的。

2) 用微变等效电路法分析放大电路

用微变等效电路法分析放大电路时,首先需要画出放大电路的微变等效电路,然后再依据技术指标的定义,用电路分析的方法求解主要技术指标。

画出放大电路的微变等效电路的步骤和方法如下。

(1) 画出晶体管的微变等效电路。

(2) 在交流状态下再连接其他元器件。

(3) 用正弦量的相量形式表示电压量和电流量。

图 5.6 的共发射极基本放大电路的微变等效电路如图 5.10 所示。

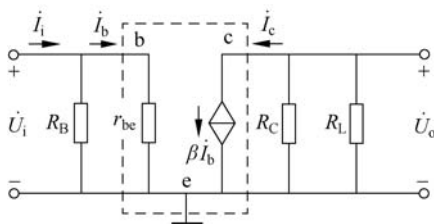


图 5.10 共发射极基本放大电路的微变等效电路

(1) 电压放大倍数 $\dot{A}_u$ 。

由输入回路,有

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be}$$

由输出回路,有

$$\dot{U}_o = -\dot{I}_c (R_C // R_L) = -\beta \dot{I}_b R'_L$$

由此得电压放大倍数为

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \quad (5.14)$$

其中

$$R'_L = R_C // R_L$$

式(5.14)中的“-”号表示输出电压与输入电压反相。

下面对共发射极基本放大电路的电压放大倍数做两点讨论。

• 直流静态工作点变化,使 $|\dot{A}_u|$ 变化。

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B} \uparrow \rightarrow I_{EQ} [(1 + \beta) I_{BQ}] \uparrow \rightarrow r_{be} \left[= r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}} \right] \downarrow \rightarrow |\dot{A}_u| \uparrow$$

因此,调整静态工作点的位置,适当地增大 I_{CQ} ,可使 $|\dot{A}_u|$ 增大。但 I_{CQ} 过大将使 U_{CEQ} 过小,使静态工作点靠近饱和区,可能产生饱和失真。

- 电流放大系数 β 变化, 使 $|\dot{A}_u|$ 变化。

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}} = r_{bb'} + \frac{26(\text{mV})}{I_{BQ}}, \text{不随 } \beta \text{ 变化, } \beta \uparrow \rightarrow |\dot{A}_u| \uparrow$$

因此, 选用 β 值较大的晶体管, 可使 $|\dot{A}_u|$ 增大。但需注意, β 值变化也会引起静态工作点 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 发生变化。

(2) 输入电阻 R_i 。

由输入回路, 有

$$\dot{U}_i = \dot{I}_i (R_B // r_{be})$$

由此得输入电阻为

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_B // r_{be} \quad (5.15)$$

分析式(5.15)可知, 由于 R_i 的表达式中含有 r_{be} , 因此输入电阻 R_i 受直流静态工作点影响。

(3) 输出电阻 R_o 。

输出电阻 R_o , 是当输入信号电压为 0、输出端开路 (R_L 为无穷大) 时, 从放大电路输出端看进去的等效电阻。因此, 由图 5.10 可见

$$R_o = R_C \quad (5.16)$$

例 5.2 在图 5.11 所示的共发射极基本放大电路中, 已知晶体管为硅管, $\beta = 50$, $r_{bb'} = 300\Omega$ 。

(1) 试估算放大电路的静态工作点 Q 。

(2) 试估算晶体管的 r_{be} 以及放大电路的电压放大倍数 $\dot{A}_u$ 、输入电阻 R_i 及输出电阻 R_o 。

(3) 如果换上 $\beta = 80$ 的晶体管, 电路的其他参数不变, 分析静态工作点 Q 将如何变化, 并求电压放大倍数 $\dot{A}_u$ 。

(4) 如果仍用 $\beta = 50$ 的晶体管, 但调整基极电阻 R_B , 使 I_{CQ} 为原来的 1.5 倍, 求 $\dot{A}_u$ 。

解: 估算放大电路的静态工作点 Q 。

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B} = \left(\frac{12 - 0.7}{560} \right) \text{mA} \approx 0.02 \text{mA}$$

$$I_{CQ} \approx \beta I_{BQ} = (50 \times 0.02) \text{mA} = 1 \text{mA}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C = (12 - 1 \times 5) \text{V} = 7 \text{V}$$

估算 r_{be} 、 $\dot{A}_u$ 、 R_i 及 R_o 。

$$\begin{aligned} r_{be} &= r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}} \\ &\approx \left[300 + (1 + 50) \times \frac{26}{1} \right] \Omega \\ &= 1626 \Omega = 1.626 \text{k}\Omega \end{aligned}$$

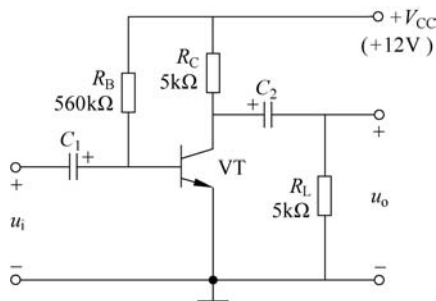


图 5.11 例 5.9 的电路

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} = -\frac{50 \times (5 // 5)}{1.626} \approx -76.9$$

$$R_i = R_B // r_{be} \approx 1.626 \text{ k}\Omega$$

$$R_o = R_C = 5 \text{ k}\Omega$$

当 $\beta=80$ 时, 如果电路的其他参数不变, 则 I_{BQ} 不变, 即

$$I_{BQ} \approx 0.02 \text{ mA}$$

但 I_{CQ} 、 U_{CEQ} 将发生变化, 此时

$$I_{CQ} \approx \beta I_{BQ} = (80 \times 0.02) \text{ mA} = 1.6 \text{ mA}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C = (12 - 1.6 \times 5) \text{ V} = 4 \text{ V}$$

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} = -\frac{80 \times (5 // 5)}{1.626} \approx -123$$

当 $\beta=50$, $I_{CQ}=1.5 \text{ mA}$ 时

$$r_{be} = \left[300 + (1 + 50) \frac{26}{1.5} \right] \Omega = 1184 \Omega = 1.184 \text{ k}\Omega$$

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} = -\frac{50 \times (5 // 5)}{1.184} \approx -105.6$$

2. 非线性失真及最大输出幅度的图解分析法

通过在晶体管的特性曲线上作图, 可以直观地看到晶体管的工作情况。因此, 常用图解法分析放大电路输出波形的非线性失真、最大输出幅度以及电路参数变化对静态工作点的影响等。

1) 交流负载线及最大输出幅度的确定

由图 5.6(a) 和图 5.6(c) 所示的共发射极基本放大电路及交流通路, 有如下关系式:

$$u_{ce} = -i_c (R_C // R_L) = -i_c R'_L \quad (5.17)$$

$$i_C = I_{CQ} + i_c \quad (5.18)$$

$$u_{CE} = U_{CEQ} + u_{ce} \quad (5.19)$$

由式(5.17)、式(5.18)和式(5.19), 有

$$u_{CE} = U_{CEQ} - (i_C - I_{CQ}) R'_L \quad (5.20)$$

式(5.20)反映了交、直流并存状态下, 共发射极基本放大电路输出端电压、电流之间的关系

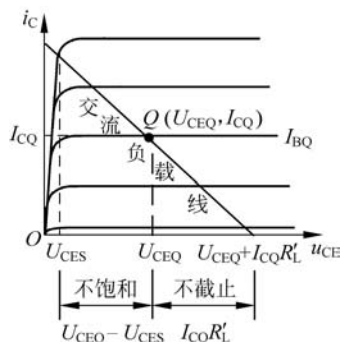


图 5.12 交流负载线

称为交流负载线方程。依据式(5.20), 在晶体管输出特性曲线上画出的直线称为交流负载线。当 $i_C = I_{CQ}$ 时, $u_{CE} = U_{CEQ}$, 交流负载线经过静态工作点 Q 。当 $i_C = 0$ 时, 确定出交流负载线在输出特性曲线上横轴上的交点为 $u_{CE} = U_{CEQ} + I_{CQ} R'_L$ 。交流负载线的斜率为 $-1/R'_L$ 。图 5.12 所示为共发射极基本放大电路的交流负载线。

当电路参数确定后, 由图 5.12 可确定不饱和失真的最大输出幅度为 $U_{CEQ} - U_{CES}$, 不截止失真的最大输出幅度为 $I_{CQ} R'_L$, 取二者中数值小者作为放大电路的最大不失真输出幅度 U_{om} 。显然, 最大不失真输出幅度的值最大时, 应将 Q 点设置在交流负载线的中点, 即应满足如下条件:

$$U_{CEQ} - U_{CES} = I_{CQ} R'_L \quad (5.21)$$

将式(5.21)与直流通路中输出回路的 I_{CQ} 、 U_{CEQ} 关系式联立,可求出不失真输出幅度的值最大时 Q 点处的数值。

2) 非线性失真

当放大电路的静态工作点 Q 设置不合理,不能适应输出幅度要求时,就会产生饱和失真或截止失真。

(1) 饱和失真。

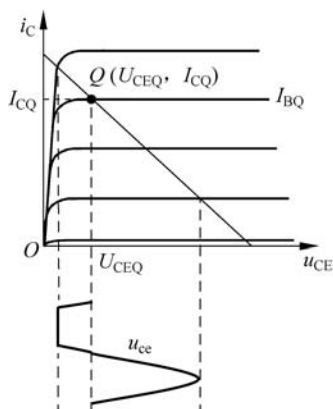
对于 NPN 管构成的共射基本放大电路, I_{BQ} 、 R_C 的数值选取使 I_{CQ} 偏大、 U_{CEQ} 偏小时,即静态工作点 Q 设置偏高,靠近饱和区,分析式(5.20)所示的交流负载线方程,在输入正弦波信号的正半周,有如下过程

$$u_i \text{ 正向 } \uparrow \rightarrow i_B \text{ 正向 } \uparrow \rightarrow i_C \text{ 正向 } \uparrow \rightarrow u_{ce} \text{ 负向 } \uparrow \rightarrow u_{CE} \downarrow$$

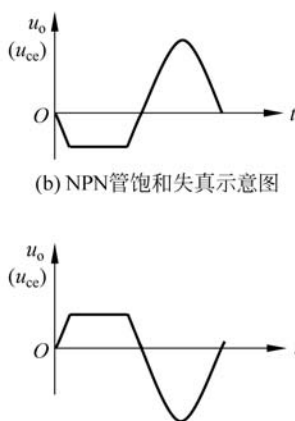
致使 u_{ce} 的波形负半周的一部分落入饱和区,产生饱和失真。

对于 PNP 管构成的共发射极基本放大电路,电压极性、电流方向与 NPN 管相反, u_{ce} 的波形正半周产生饱和失真。

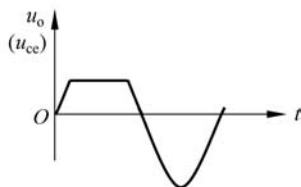
饱和失真的图解分析如图 5.13 所示。



(a) 输出特性曲线上饱和失真示意图



(b) NPN管饱和失真示意图



(c) PNP管饱和失真示意图

图 5.13 饱和失真的图解分析

其中,图 5.13(a)为输出特性曲线上饱和失真的示意图。以 U_{CEQ} 为交流分量的零点, NPN 管的 u_{ce} 波形中在 U_{CEQ} 右侧部分为高电位的半周,即正半周,PNP 管的 u_{ce} 波形中在 U_{CEQ} 左侧部分为高电位的半周,即正半周。将 u_{ce} 按时间变化方式画出,图 5.13(b)为 NPN 管饱和失真示意图,图 5.13(c)为 PNP 管饱和失真示意图。

(2) 截止失真。

对于 NPN 管构成的共射基本放大电路, I_{BQ} 、 R_C 的数值选取使 I_{CQ} 偏小、 U_{CEQ} 偏大时,即静态工作点 Q 设置偏低,靠近截止区,分析式(5.20)所示的交流负载线方程,在输入正弦波信号的负半周,有如下过程

$$u_i \text{ 负向 } \uparrow \rightarrow i_B \text{ 负向 } \uparrow \rightarrow i_C \text{ 负向 } \uparrow \rightarrow u_{ce} \text{ 正向 } \uparrow \rightarrow u_{CE} \uparrow$$

致使 u_{ce} 的波形正半周的一部分落入截止区,产生截止失真。

对于 PNP 管构成的共发射极基本放大电路,电压极性、电流方向与 NPN 管相反, u_{ce} 的波形负半周产生截止失真。

截止失真的图解分析如图 5.14 所示。

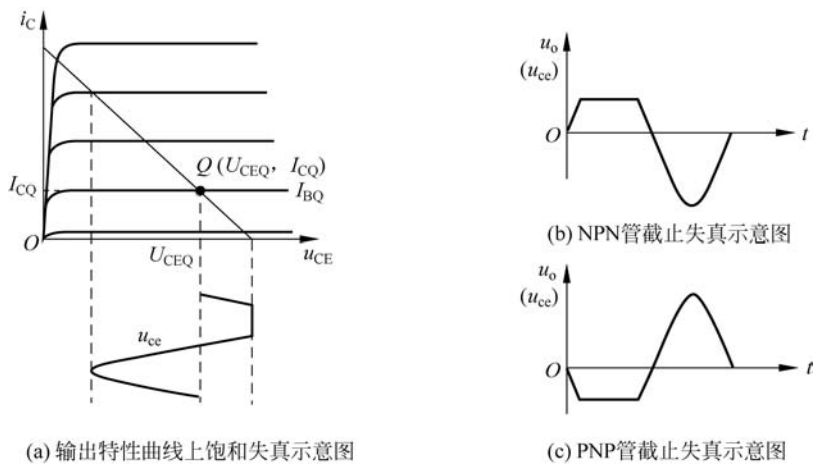


图 5.14 截止失真的图解分析

其中,图 5.14(a)为输出特性曲线上截止失真的示意图。以 U_{CEQ} 为交流分量的零点, NPN 管的 u_{ce} 波形中在 U_{CEQ} 右侧部分为高电位的半周,即正半周,PNP 管的 u_{ce} 波形中在 U_{CEQ} 左侧部分为高电位的半周,即正半周。将 u_{ce} 按时间变化方式画出,图 5.14(b)为 NPN 管截止失真示意图,图 5.14(c)为 PNP 管截止失真示意图。

消除饱和和失真应降低静态工作点 Q ,即减小 I_{CQ} 、增大 U_{CQ} ;消除截止失真应提高静态工作点 Q ,即增大 I_{CQ} 、减小 U_{CQ} 。所以,放大电路不出现失真现象,必须要设置合适的静态工作点 Q ,以使其动态范围尽可能大。

例 5.3 基本放大电路如图 5.6(a)所示, $R_B = 280\text{k}\Omega$, $R_C = 3\text{k}\Omega$, $R_L = 3\text{k}\Omega$, $V_{CC} = 12\text{V}$,晶体管为硅管, $\beta = 50$, $U_{CES} = 0.3\text{V}$ 。试估算放大电路的最大不失真输出幅度 U_{om} ,并分析逐渐增大输入信号 u_i 的幅度时,先出现截止失真还是饱和失真。

解: 估算最大不失真输出幅度 U_{om} 。

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B} = \left(\frac{12 - 0.7}{280} \right) \text{mA} \approx 0.04 \text{mA}$$

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

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C = (12 - 2 \times 3) \text{V} = 6 \text{V}$$

不饱和失真的最大输出幅度为

$$U_{CEQ} - U_{CES} = (6 - 0.3) \text{V} = 5.7 \text{V}$$

不截止失真的最大输出幅度为

$$I_{CQ} R'_L = [2 \times (3 // 3)] \text{V} = 3 \text{V}$$

取 $U_{CEQ} - U_{CES}$ 和 $I_{CQ} R'_L$ 中数值小者作为最大不失真输出幅度,即

$$U_{om} = 3 \text{V}$$

由于不截止失真的最大输出幅度小于不饱和失真的最大输出幅度,故逐渐增大输入信

号 u_i 的幅度时,先出现截止失真。

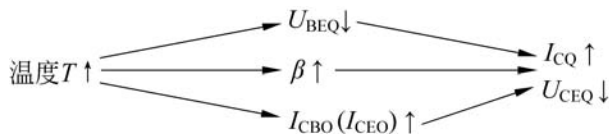
5.4 放大电路静态工作点的稳定

放大电路的多项重要技术指标与静态工作点的位置密切相关。如果静态工作点不稳定,放大电路的某些性能也将发生变化。因此,如何使放大电路的静态工作点保持稳定是一个十分重要的问题。

在实际工作中,电路元件的老化、电源的波动及温度的变化都会引起静态工作点的不稳定,尤其是温度的影响。

5.4.1 温度对静态工作点的影响

晶体管是一种对温度十分敏感的元件。温度变化影响晶体管参数,从而导致静态工作点发生变化主要表现在以下三方面。



稳定静态工作点 Q 的方法主要有利用对直流电量的负反馈抑制 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 变化的反馈法以及利用晶体管进行补偿的补偿法。此处主要介绍反馈法。

5.4.2 分压式静态工作点稳定电路

1. 电路组成和工作点稳定原理

分压式静态工作点稳定电路如图 5.15(a)所示。直流电源 V_{CC} 经基极电阻 R_{B1} 、 R_{B2} 分压后接到晶体管的基极。 R_E 为发射极电阻, C_E 为发射极旁路电容。

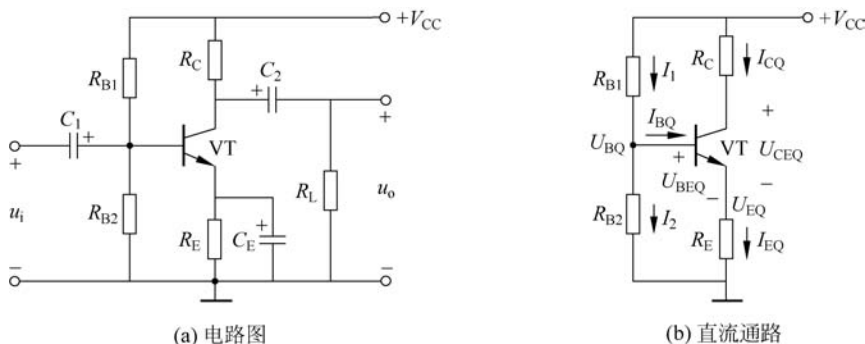


图 5.15 分压式静态工作点稳定电路

分压式静态工作点稳定电路的直流通路如图 5.15(b)所示。

稳定静态工作点的条件是,流过基极电阻 R_{B1} 的电流 I_1 、流过基极电阻 R_{B2} 的电流 I_2 和基极电流 I_{BQ} 满足 $I_1 \gg I_{BQ}$ 和 $I_2 \gg I_{BQ}$ 的关系,从而使基极电位 $U_{BQ} \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC}$ 基



视频讲解



视频讲解

本不随温度变化,即对温度是稳定的。稳定静态工作点的原理是,利用发射极电流 I_{EQ} 在电阻 R_E 上的电压,即发射极电位 U_{EQ} 影响基极电流 I_{BQ} 和集电极电流 I_{CQ} ,即通过发射极电流的负反馈稳定静态工作点 Q 。

静态工作点稳定的过程可表述如下。

$$\begin{array}{c} \text{温度 } T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_{CQ} \uparrow (I_{EQ} \uparrow) \rightarrow U_{EQ} \uparrow (=I_{EQ}R_E) \rightarrow U_{BEQ} \downarrow (=U_{BQ} - U_{EQ}) \rightarrow I_{BQ} \downarrow \\ \text{不变} \\ I_{CQ} \downarrow \leftarrow \end{array}$$

显然, R_E 的阻值越大,发射极电位 U_{EQ} 越高,对集电极电流 I_{CQ} 变化的抑制作用越强,静态工作点的稳定性就越好。但 R_E 增大后, U_{CEQ} 随之减小,为了不减小输出电压的幅度,必须增大电源电压 V_{CC} ,需要兼顾考虑。

2. 静态分析

由如图 5.15 (b) 所示的直流通路进行静态工作点的估算步骤如下。

$$U_{BQ} \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} \quad (5.22)$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_E} \quad (5.23)$$

$$U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) \quad (5.24)$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} \quad (5.25)$$

3. 动态分析

图 5.15(a) 所示电路的微变等效电路如图 5.16 所示。

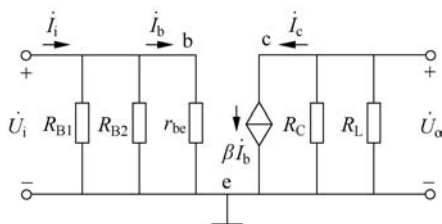


图 5.16 分压式静态工作点稳定电路的微变等效电路

由此,可求出动态技术指标估算公式。

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \quad (5.26)$$

其中

$$R'_L = R_C \parallel R_L$$

$$R_i = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel r_{be} \quad (5.27)$$

$$R_o = R_C \quad (5.28)$$

对于图 5.15(a)所示的分压式静态工作点稳定电路,当去掉发射极旁路电容 C_E 时,直流通路及静态工作点的估算公式不变。此时,其微变等效电路如图 5.17 所示。

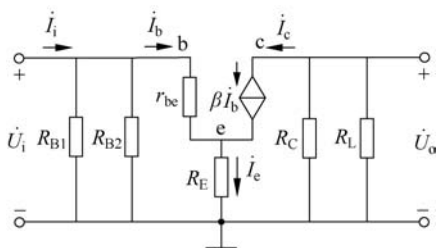


图 5.17 无发射极旁路电容的工作点稳定电路的微变等效电路

因为

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_E = \dot{I}_b [r_{be} + (1 + \beta) R_E]$$

$$\dot{U}_o = -\dot{I}_c (R_C \parallel R_L) = -\beta \dot{I}_b R'_L$$

其中

$$R'_L = R_C \parallel R_L$$

所以

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_E} \quad (5.29)$$

因为

$$\dot{I}_i = \frac{\dot{U}_i}{R_{B1}} + \frac{\dot{U}_i}{R_{B2}} + \frac{\dot{U}_i}{r_{be} + (1 + \beta) R_E}$$

所以

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = \frac{1}{\frac{1}{R_{B1}} + \frac{1}{R_{B2}} + \frac{1}{r_{be} + (1 + \beta) R_E}}$$

即

$$R_i = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel [r_{be} + (1 + \beta) R_E] \quad (5.30)$$

$$R_o = R_C \quad (5.31)$$

下面对没有发射极旁路电容 C_E 的分压式静态工作点稳定电路的电压放大倍数做两点讨论。

(1) 直流静态工作点变化,使 $|\dot{A}_u|$ 变化。

由于

$$I_{EQ} [= (1 + \beta) I_{BQ}] \uparrow \rightarrow r_{be} \left[= r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}} \right] \downarrow \rightarrow |\dot{A}_u| \uparrow$$

因此,调整静态工作点的位置,适当地增大 $I_{CQ} (I_{EQ})$,可使 $|\dot{A}_u|$ 增大。

(2) 电流放大系数 β 变化, $|\dot{A}_u|$ 基本不变。

一般电路参数满足 $(1+\beta)R_E \gg r_{be}$ 和 $\beta \gg 1$ 的条件, 则式(5.29)可简化成

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1+\beta)R_E} \approx -\frac{R'_L}{R_E}$$

因此, 电流放大系数 β 变化, $|\dot{A}_u|$ 基本不变。

5.5 基本共集电极放大电路

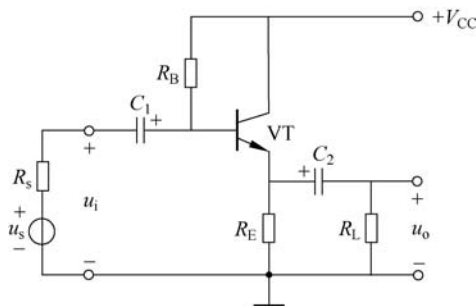
组成放大电路时, 晶体管的三个电极均可作为输入回路和输出回路的公共端。前面介绍的共发射极放大电路是以发射极作为公共端, 如果以基极或集电极作为公共端, 则称共基极放大电路或共集电极放大电路。这三种接法的放大电路也称作放大电路的三种组态, 它们在电路结构和性能上有各自的特点, 但基本的分析方法一样。本节仅介绍基本共集电极放大电路。



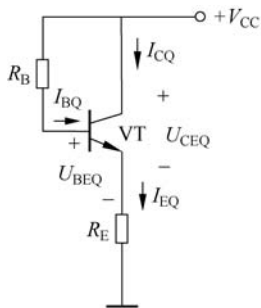
视频讲解

5.5.1 电路的组成

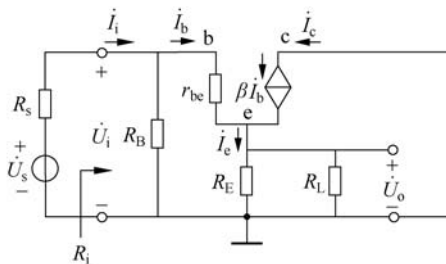
基本共集电极放大电路如图 5.18(a) 所示。图 5.18(b) 是直流通路。图 5.18(c) 是微变等效电路。由图 5.18(c) 可以看出, 输入信号与输出信号的公共端是集电极, 所以属于共集电极组态。由图 5.18(a) 可以看出, 输出信号从发射极引出, 因此这种电路也称为射极输出器。



(a) 电路图



(b) 直流通路



(c) 微变等效电路

图 5.18 基本共集电极放大电路

5.5.2 静态分析

由图 5.18(b)所示的直流通路,可求得

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B + (1 + \beta)R_E} \quad (5.32)$$

$$I_{CQ} \approx \beta I_{BQ} \quad (5.33)$$

$$U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}R_E \quad (5.34)$$

5.5.3 动态分析

1. 电压放大倍数 $\dot{A}_u$

由图 5.18(c)所示的微变等效电路,可求得

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

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

因此

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1 + \beta)R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R'_L} \quad (5.35)$$

其中

$$R'_L = R_E // R_L$$

分析式(5.35),电路参数一般满足 $(1 + \beta)R'_L \gg r_{be}$ 条件,使 $\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx 1$,即 $\dot{U}_o \approx \dot{U}_i$ 。这

表明输出电压与输入电压的大小近似相等且相位相同,输出电压随输入电压变化,所以共集电极放大电路又称为射极跟随器。

2. 输入电阻 R_i

由图 5.18(c)所示的微变等效电路,可求得

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

所以

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = \frac{1}{\frac{1}{R_B} + \frac{1}{r_{be} + (1 + \beta)R'_L}} = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)R'_L] \quad (5.36)$$

由式(5.36)可见,共集电极放大电路的输入电阻远大于共发射极放大电路的输入电阻。

3. 输出电阻 R_o

在图 5.18(c)中,按 $R_o = \left. \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \right|_{\substack{\dot{U}_s=0 \\ R_L=\infty}}$ 求输出电阻的定义,所得的等效电路如图 5.19

所示。



视频讲解

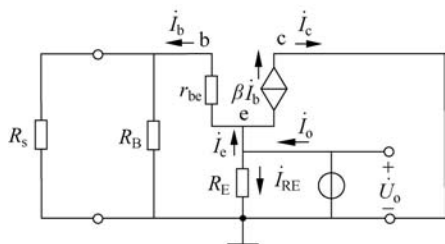


图 5.19 共集电极放大电路求输出电阻的等效电路

由图 5.19, 有

$$\dot{I}_o = \dot{I}_{R_E} + \dot{I}_e = \dot{I}_{R_E} + (1 + \beta)\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_o}{R_E} + (1 + \beta) \frac{\dot{U}_o}{r_{be} + R_s \parallel R_B}$$

所以

$$R_o = \left. \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \right|_{\substack{\dot{U}_s = 0 \\ R_L = \infty}} = \frac{\dot{U}_o}{\frac{\dot{U}_o}{R_E} + (1 + \beta) \frac{\dot{U}_o}{r_{be} + R_s \parallel R_B}}$$

即

$$R_o = R_E \parallel \frac{r_{be} + R_s \parallel R_B}{1 + \beta} = R_E \parallel \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta} \quad (5.37)$$

其中

$$R'_s = R_s \parallel R_B$$

共集电极放大电路具有输入电阻大、输出电阻小的特点,常用于多级放大电路的输入级和输出级,以减小从信号源索取的电流,即减小对信号源的影响,提高带负载的能力。也常用于中间级,以减小电路之间的相互影响,起缓冲作用。

下面对共集电极放大电路的电路构成形式进行分析。由于电路参数一般满足 $(1 + \beta)R'_L \gg r_{be}$ 条件,从而有

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1 + \beta)R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R'_L} \approx 1$$

$$R_i = R_B \parallel [r_{be} + (1 + \beta)R'_L] \approx R_B \parallel (1 + \beta)R'_L$$

可以看出,电压放大倍数和输入电阻与静态工作点的直流电量和稳定性近似无关。

虽然式(5.37)表示的输出电阻 R_o 与静态工作点的电量有关,但由于 R_o 很小,共集电极放大电路的带负载的能力受静态工作点变化的影响很小,可以忽略。

以上分析表明,共集电极放大电路的动态性能对静态工作点的稳定性要求很低。因此,为简化电路,在电路构成上,晶体管的基极只用一个电阻 R_B ,用于引入发射结的正偏压;晶体管的发射极接有电阻 R_E ,用于将发射极交流电流 i_e 经电阻转换成交流电压从发射极输出,同时 R_E 又对直流有负反馈作用,有一定稳定静态工作点的作用,但由于基极直流电位不恒定,因此使静态工作点的稳定性变差。

5.6 场效应管放大电路

场效应管放大电路与晶体管放大电路类似,也有三种组态,即共源极、共栅极和共漏极的放大电路。场效应管放大电路的分析也包括静态分析和动态分析两方面,只是放大元件的特性和电路模型不同。本节以增强型 NMOS 管为例,分析场效应管放大电路。

5.6.1 电路的组成

增强型 NMOS 管共源极放大电路的组成如图 5.20(a)所示。栅极电阻 R_{G1} 、 R_{G2} 为分压偏置电阻,对电源 V_{DD} 分压后给栅极加固定正电压。 R_S 为源极电阻,作用是稳定静态工作点。电阻 R_G 与静态工作点无关,作用是提高放大电路的输入电阻。 C_1 为输入耦合电容, C_2 为输出耦合电容, C_S 为源极旁路电容。

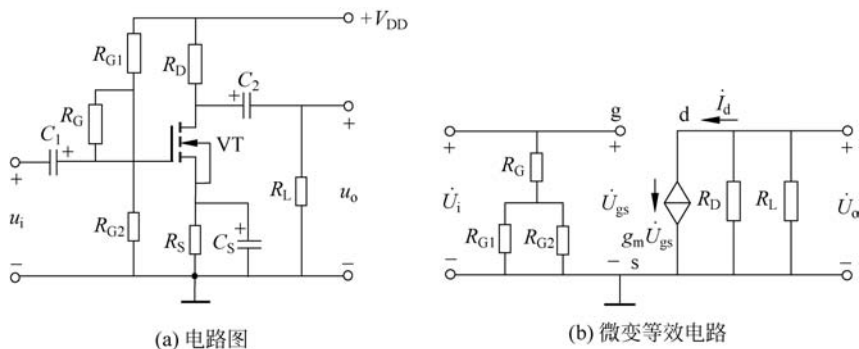


图 5.20 场效应管共源极放大电路

5.6.2 静态分析

场效应管是压控器件,静态工作点 Q 的电量为 U_{GSQ} 、 I_{DQ} 和 U_{DSQ} 。

静态时,由于场效应管的栅极电流 $I_G = 0$,所以电阻 R_G 上无压降,因此,栅极电位为

$$U_{GQ} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD}, \text{ 栅源电压为 } U_{GSQ} = U_{GQ} - U_{SQ} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} - I_{DQ} R_S。$$

所以静态工作点的求解关系式为

$$\begin{cases} U_{GSQ} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} - I_{DQ} R_S \\ I_{DQ} = I_{D0} \left(\frac{U_{GSQ}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2 \end{cases} \quad (5.38)$$

联立可解出 U_{GSQ} 、 I_{DQ} 。

而

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} (R_D + R_S) \quad (5.39)$$

5.6.3 动态分析

用微变等效电路法进行动态分析。场效应管共源极放大电路的微变等效电路如图 5.20(b)所示。

1. 电压放大倍数 $\dot{A}_u$

由图 5.20(b)所示的微变等效电路,可求得

$$\begin{aligned}\dot{U}_i &= \dot{U}_{gs} \\ \dot{U}_o &= -\dot{I}_d(R_D // R_L) = -g_m \dot{U}_{gs}(R_D // R_L)\end{aligned}$$

所以

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-g_m \dot{U}_{gs}(R_D // R_L)}{\dot{U}_{gs}} = -g_m(R_D // R_L) = -g_m R'_L \quad (5.40)$$

其中

$$R'_L = R_D // R_L$$

2. 输入电阻 R_i

由图 5.20(b)所示的微变等效电路,可求得

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_G + R_{G1} // R_{G2} \quad (5.41)$$

3. 输出电阻 R_o

根据输出电阻的定义 $R_o = \left. \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \right|_{\substack{\dot{U}_s=0 \\ R_L=\infty}}$, 有

$$R_o = R_D \quad (5.42)$$

5.7 多级放大电路

对于一个基本放大电路,电路参数、静态工作点、输出幅度和非线性失真等因素制约和影响着电压放大倍数,使放大倍数有限。当需要很大放大倍数的放大电路时,需将多个基本放大电路合理连接组成多级放大电路。组成多级放大电路的每一个基本放大电路称为一级。

5.7.1 多级放大电路耦合方式

多级放大电路的级间连接方式称为级间耦合方式。常用的级间耦合方式有阻容耦合、直接耦合和变压器耦合。耦合电路的任务是有效地传输信号,减小衰减,避免失真,尽量不影响各级静态工作点的设置。

1. 阻容耦合

将放大电路的前级的输出端通过电容接到后级的输入端,称为阻容耦合方式。阻容耦



视频讲解

合方式充分地利用了电容“隔直流、通交流”的作用。主要优点是,各级的静态工作点相互独立,分析或设计、调试方便。主要缺点是,低频特性差,只能放大交流信号,不能放大变化缓慢的直流信号,不适用于集成电路。

图 5.21 所示为一个两级阻容耦合放大电路,第一级为共发射极放大电路,第二级为共集电极放大电路, C_2 为级间耦合电容。

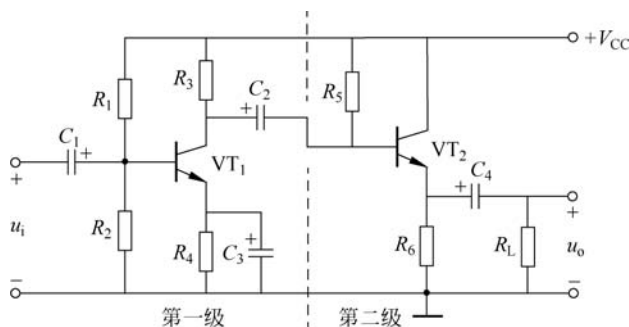


图 5.21 两级阻容耦合放大电路

2. 直接耦合

将放大电路前一级的输出端直接或经非电抗性元件连接到后一级的输入端,称为直接耦合方式。

图 5.22(a)和图 5.22(b)为两个两级直接耦合放大电路示例。图 5.22(a)电路中,通过在第二级加发射极电阻的方式提高第一级的集电极电位,使两级均有合适的静态工作点,但发射极电阻对第二级的电压放大倍数影响大。图 5.22(b)电路中,NPN 型管和 PNP 型管混合使用,使各级的集电极电位升或降,而不会逐级提高,从而使各级都有合适的静态工作点。这种组合方式被广泛应用于分立器件以及集成的直接耦合放大电路。

直接耦合方式的主要优点是,低频特性好,既能放大交流信号,又能放大直流信号,所用元件少,适用于集成电路。主要缺点是,各级静态工作点相互影响,分析或设计、调试不方便;有零点漂移现象(当输入信号 $u_i=0$ 时,在输出端仍有无规则缓慢变化的信号输出的现象称为零点漂移)。

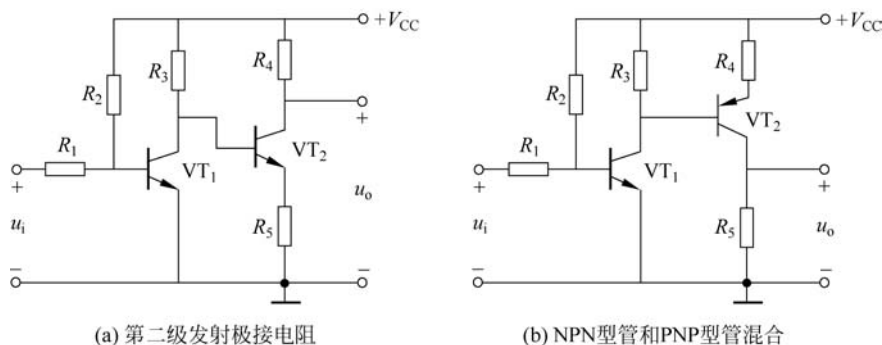


图 5.22 两级直接耦合放大电路

3. 变压器耦合

将放大电路前一级的输出端通过变压器连接到后一级的输入端,称为变压器耦合方式。由于变压器体积大、成本较高、频率特性较差,因此很少使用。在这里不做更多介绍。

5.7.2 多级放大电路的动态分析

一个有 n 级的多级放大电路的方框图如图 5.23 所示。

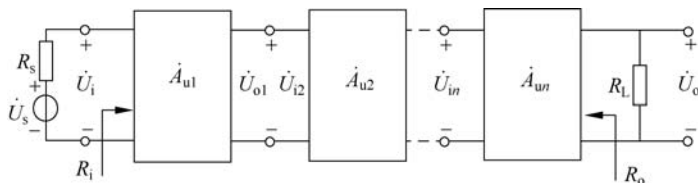


图 5.23 多级放大电路框图

多级放大电路的主要动态技术指标仍为电压放大倍数、输入电阻和输出电阻。分析交流性能时,要考虑各级之间的相互联系和相互影响,即前级的输出电压是后级的输入电压,前级的输出电阻视为后级的信号源内阻,后级的输入电阻为前级的负载电阻。

$$\text{电压放大倍数 } \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_{i1}} \cdot \frac{\dot{U}_{o2}}{\dot{U}_{i2}} \cdot \dots \cdot \frac{\dot{U}_{on}}{\dot{U}_{in}} = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \cdot \dots \cdot \dot{A}_{un} \quad (5.43)$$

式(5.43)表明,多级放大电路的电压放大倍数等于各单级放大电路电压放大倍数的乘积。计算多级放大电路电压放大倍数方法是将多级的计算转换为单级的计算,且可直接引用单级放大电路的计算公式,计算单级电压放大倍数时要将后级的输入电阻作为前级的负载电阻。

输入电阻

$$R_i = R_{i1} \quad (5.44)$$

式(5.44)表明,多级放大电路的输入电阻等于第一级(即输入级)放大电路的输入电阻。

输出电阻

$$R_o = R_{on} \quad (5.45)$$

式(5.45)表明,多级放大电路的输出电阻等于最后一级(即输出级)放大电路的输出电阻。

应当指出,当用共集电极放大电路作为输入级时, R_i 与第二级的输入电阻(为输入级的负载电阻)有关;当用共集电极放大电路作为输出级时, R_o 与相邻前一级的输出电阻(为输出级的信号源内阻)有关;当多级放大电路的输出波形产生失真时,应首先确定是在哪一级出现的失真,然后再判断是饱和失真还是截止失真。

5.8 基本放大电路 Multisim 仿真示例

1. 共发射极基本放大电路的 Multisim 仿真

在 Multisim 14 中构建共发射极基本放大电路仿真测试电路如图 5.24 所示。其中,晶体管的参数设置为 $\beta=50$, $r_{bb'}=300\Omega$, 电路及参数与例 5.2 相同。此处,电阻 R 用来测量放大电路的输入电阻 R_i 。



视频讲解

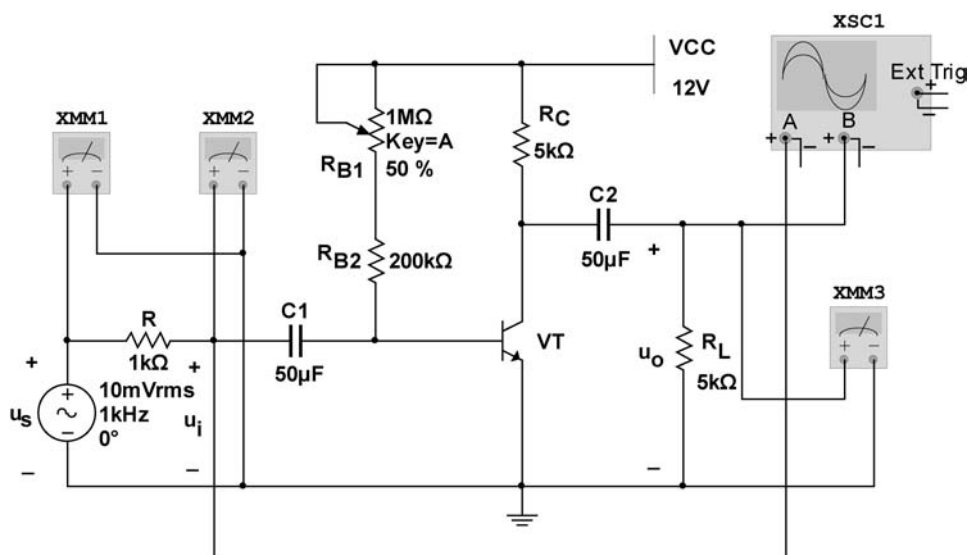
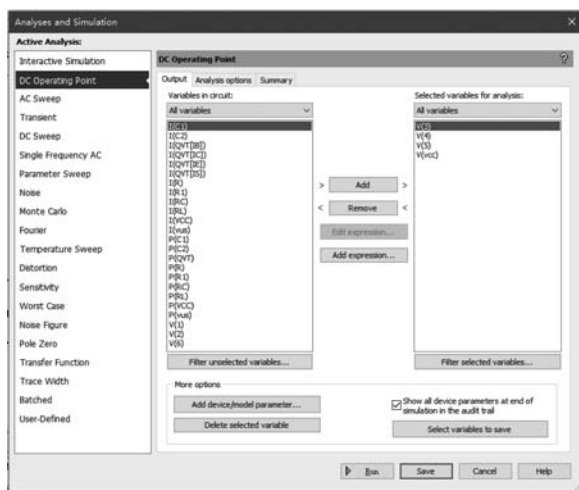


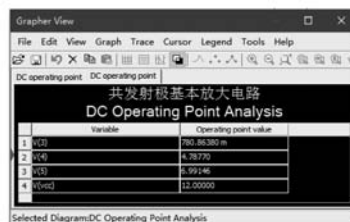
图 5.24 共发射极基本放大电路仿真测试电路

1) 静态仿真分析

图 5.25 所示为直流分析选项对话框和直流电位分析结果图。



(a) 直流分析选项对话框



(b) 直流电位分析结果图

图 5.25 静态直流电位仿真分析

根据分析结果,有

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_3}{R_{B1} + R_{B2}} = \left(\frac{12 - 0.78}{360 + 200} \right) \text{mA} \approx 0.02 \text{mA}$$

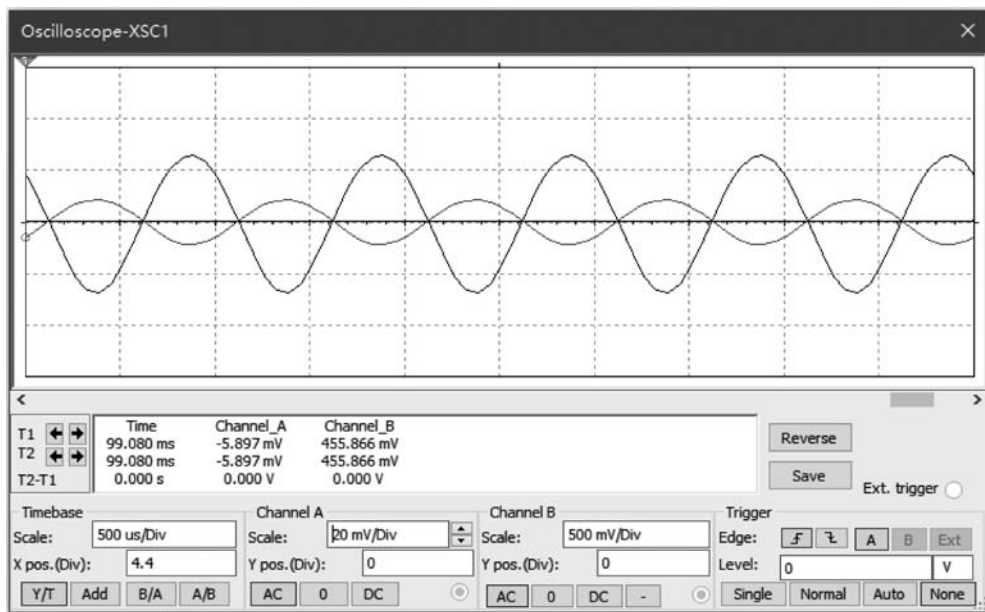
$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_5}{R_C} = \left(\frac{12 - 6.99}{5} \right) \text{mA} \approx 1 \text{mA}$$

$$U_{CEQ} = V_5 = 6.99 \text{V}$$

与例 5.2 的结果基本相同。

2) 动态仿真分析

图 5.24 的电路仿真后,可从示波器观察到 u_i 、 u_o 的波形如图 5.26(a)所示。由图可见, u_o 的波形没有明显的非线性失真,而且 u_i 、 u_o 的相位相反。



(a) 示波器显示的 u_i 、 u_o 波形



(b) 使用数字万用表测试的 U_s 、 U_i 、 U_o 数值

图 5.26 动态仿真分析

图 5.26(b)所示为三个数字万用表测试的 U_s 、 U_i 、 U_o 数值。依测试结果,有

$$\dot{A}_u = -\frac{U_o}{U_i} = -\frac{473.485}{6.204} \approx -76.32$$

$$R_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} \cdot R = \left(\frac{6.204}{10 - 6.204} \times 1 \right) \text{k}\Omega \approx 1.634 \text{k}\Omega$$

为了测量输出电阻 R_o ,可将图 5.24 电路中的负载电阻 R_L 开路,此时从数字万用表测得 $U'_o = 946.986 \text{mV}$,则

$$R_o = \left(\frac{U'_o}{U_o} - 1 \right) \cdot R_L = \left[\left(\frac{946.986}{473.485} - 1 \right) \times 5 \right] \text{k}\Omega \approx 5.00 \text{k}\Omega$$

电压放大倍数 $\dot{A}_u$ 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 与例 5.9 的结果基本相同。

电路其他参数不变,将晶体管的电流放大系数 β 设置成为 80 时,示波器观察 u_o 的波形没有明显的非线性失真,用数字万用表测试出此时 $U_i = 6.202\text{mV}$, $U_o = 758.025\text{mV}$,则

$$\dot{A}_u = -\frac{U_o}{U_i} = -\frac{758.025}{6.202} \approx -122.2$$

与例 5.2 的结果基本相同。

调节图 5.24 电路中的可调电阻 R_{B1} ,使 $U_{CEQ} = 4.5\text{V}$,从而使 $I_{CQ} = 1.5\text{mA}$ 。示波器观察 u_o 的波形没有明显的非线性失真,用数字万用表测试出此时 $U_i = 5.456\text{mV}$, $U_o = 566.409\text{mV}$,则

$$\dot{A}_u = -\frac{U_o}{U_i} = -\frac{566.409}{5.456} \approx -100.15$$

与例 5.2 的结果基本相同。

3) 非线性失真仿真分析

调节图 5.24 电路中的基极可调电阻 R_{B1} ,使 $U_{CEQ} = 2\text{V}$, $I_{CQ} = 2\text{mA}$,让静态工作点 Q 设置偏高,靠近饱和区。逐渐增大输入信号幅度,输出信号 u_o 的底部出现如图 5.27 所示的饱和失真。

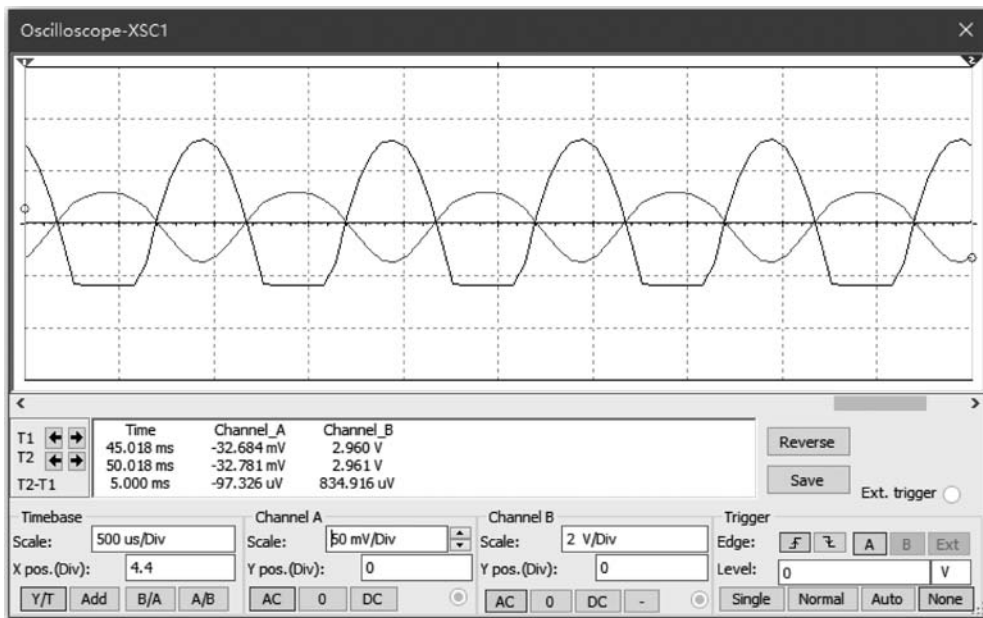


图 5.27 饱和失真仿真分析

调节图 5.24 电路中的基极可调电阻 R_{B1} ,使 $U_{CEQ} = 10\text{V}$, $I_{CQ} = 0.4\text{mA}$,让静态工作点 Q 设置偏低,靠近截止区。逐渐增大输入信号幅度,输出信号 u_o 的顶部出现如图 5.28 所示的截止失真。

2. 分压式静态工作点稳定电路的 Multisim 仿真

在 Multisim 14 中构建分压式静态工作点稳定电路仿真测试电路如图 5.29 所示。其中,晶体管的参数设置为 $\beta = 100$, $r_{bb'} = 300\Omega$,电路及参数与本章习题 7 相同。此处,电阻 R

用来测量放大电路的输入电阻 R_i 。

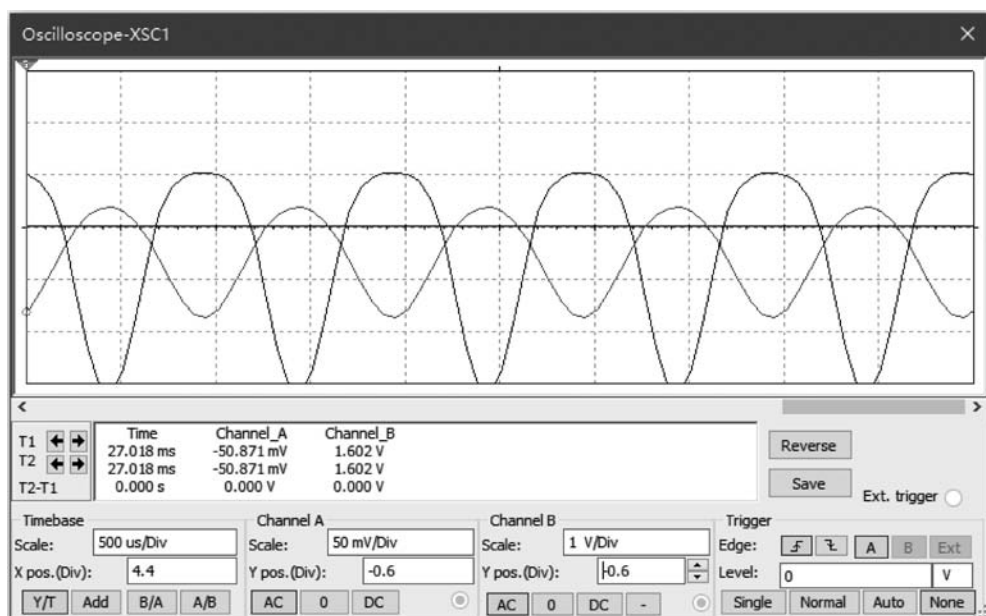


图 5.28 截止失真仿真分析

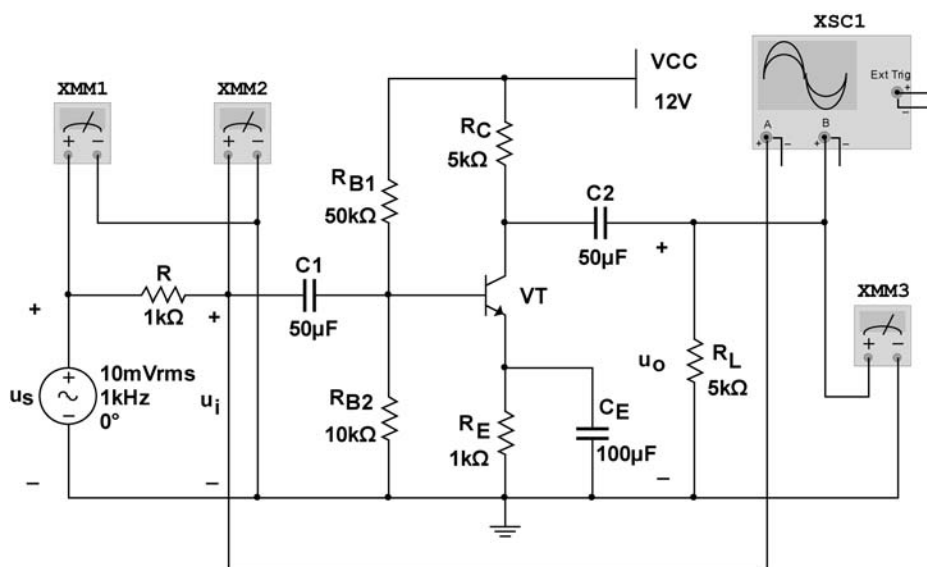


图 5.29 分压式静态工作点稳定电路仿真测试电路

1) 静态仿真分析

在 Multisim 14 中进行直流仿真分析, 静态直流电位分别为 $V_1 = 1.90687\text{V}$, $V_2 = 6.4125\text{V}$, $V_3 = 1.12868\text{V}$ 。

根据分析结果, 有

$$U_{BQ} \approx 1.9068\text{V}$$

$$I_{CQ} = \frac{V_3}{R_E} = \left(\frac{1.12868}{1} \right) \text{mA} \approx 1.12868 \text{mA}$$

$$U_{CEQ} = V_2 - V_3 = (6.4125 - 1.12868) \text{V} = 5.28382 \text{V}$$

$$I_{BQ} \approx \frac{I_{CQ}}{\beta} = \left(\frac{1.12868}{100} \right) \text{mA} = 0.0112868 \text{mA} = 11.2868 \mu\text{A}$$

2) 动态仿真分析

仿真后,可从示波器观察到 u_o 的波形没有明显的非线性失真, u_i 、 u_o 的相位相反。

根据三个数字万用表测试的 U_s 、 U_i 、 U_o 数值,有

$$\dot{A}_u = -\frac{U_o}{U_i} = -\frac{666.744}{6.557} \approx -101.68$$

$$R_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} \cdot R = \left(\frac{6.557}{10 - 6.557} \times 1 \right) \text{k}\Omega \approx 1.9 \text{k}\Omega$$

将图 5.29 电路中的负载电阻 R_L 开路,此时从数字万用表测得 $U'_o = 1.333 \text{V}$,则

$$R_o = \left(\frac{U'_o}{U_o} - 1 \right) \cdot R_L = \left[\left(\frac{1.333}{666.744} - 1 \right) \times 5 \right] \text{k}\Omega \approx 5 \text{k}\Omega$$

将电容 C_E 开路,仿真后,可从示波器观察到 u_o 的波形没有明显的非线性失真, u_i 、 u_o 的相位相反。

根据三个数字万用表测试的 U_s 、 U_i 、 U_o 数值,有

$$\dot{A}_u = -\frac{U_o}{U_i} = -\frac{20.868}{8.779} \approx -2.377$$

$$R_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} \cdot R = \left(\frac{8.779}{10 - 8.779} \times 1 \right) \text{k}\Omega \approx 7.19 \text{k}\Omega$$

将负载电阻 R_L 开路,此时从数字万用表测得 $U'_o = 41.736 \text{V}$,则

$$R_o = \left(\frac{U'_o}{U_o} - 1 \right) \cdot R_L = \left[\left(\frac{41.736}{20.868} - 1 \right) \times 5 \right] \text{k}\Omega \approx 5 \text{k}\Omega$$

可将仿真结果与本章习题 7 解题结果进行比较。

本章小结

本章介绍了放大电路的基本原理和基本分析方法,属于电子技术中最基本的内容,也是其后各章的基础。

(1) 基本共发射极放大电路、分压式静态工作点稳定放大电路和基本共集电极放大电路是常用的单管放大电路。组成放大电路的基本原则是:外加直流电源的极性必须使晶体管的发射结正偏、集电结反偏,保证晶体管工作在放大状态;输入回路的接法应使输入信号 u_i 能够作用于晶体管的发射结上产生基极电流 i_b ,输出回路的接法应使集电极电流 i_c 或发射极电流 i_e 经电阻转换成电压量并传送到输出端。

(2) 放大电路中交、直流量并存。对放大电路进行定量分析的任务是:进行静态分析,确定静态工作点;进行动态分析,计算电压放大倍数、输入电阻和输出电阻等动态技术指标。一般分析放大电路的方法是先静态、后动态。

(3) 静态分析根据直流通路进行。动态分析时,用微变等效电路法求解电压放大倍数、输入电阻和输出电阻,用图解法分析非线性失真情况及最大输出幅度。

(4) 微变等效电路法实际上是在信号变化比较小的条件下,近似地用一个线性的等效电路代替非线性的放大元件,将非线性转化为线性,使放大电路的分析过程得以简化。该方法只能分析动态,不能分析静态,也不能分析非线性失真及动态范围。场效应管放大电路的分析方法与晶体管放大电路类似。

(5) 多级放大电路有阻容耦合、直接耦合和变压器耦合三种耦合方式。多级放大电路的电压放大倍数等于各单级放大电路电压放大倍数的乘积,但在计算单级电压放大倍数时,要注意:后级的输入电阻将作为前级的负载电阻;输入电阻等于第一级放大电路的输入电阻;输出电阻等于最后一级放大电路的输出电阻。

自测题

一、单项选择题

在各小题备选答案中选择出一个正确的答案,将正确答案前的字母填在题干后的括号内。

- 对放大电路中静态工作点 Q 的下列说法中,正确的是()。
 - 静态工作点是实现对交流放大的基础
 - 静态工作点的数值要合适
 - 静态工作点要稳定
 - 以上均对
- 在放大电路中,表示对信号源影响程度的指标是()。
 - 输入电阻 R_i
 - 输入电压 u_i
 - 电压放大倍数 $\dot{A}_u$
 - 输出电阻 R_o
- 对于某放大电路,当输出端开路时,输出电压为 5V ,接上 $2\text{k}\Omega$ 负载电阻后的输出电压为 2.5V ,则输出电阻 R_o 为()。
 - $0.5\text{k}\Omega$
 - $2\text{k}\Omega$
 - $10\text{k}\Omega$
 - $2.5\text{k}\Omega$
- 阻容耦合放大电路中,电压放大倍数在低频段下降的原因是()。
 - 晶体管特性的非线性
 - 晶体管极间电容的影响
 - 耦合电容的影响
 - 分布电容的影响
- 为消除如图 5.30 所示放大电路输出信号 u_o 波形的非线性失真,应采取的措施为()。
 - 减小 R_B ,增大 R_C
 - 增大 R_B ,减小 R_C
 - 减小 R_B ,减小 V_{CC}
 - 增大 R_C ,减小 V_{CC}

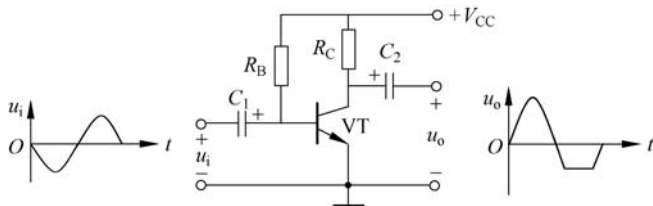
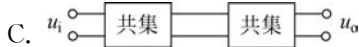


图 5.30

C. 电压放大倍数小于 1, 输入电阻大, 输出电阻小

D. 电压放大倍数小于 1, 输入电阻小, 输出电阻大

11. 设计一个输入电阻高、输出电阻低且有大于 1 的电压放大倍数的多级放大电路, 符合要求的电路框图为()。



12. 在论及对信号的放大能力时, 直接耦合放大电路()。

A. 只能放大交流信号

B. 只能放大直流信号

C. 交、直流两种信号都能放大

D. 交、直流两种信号都不能放大

二、填空题

1. 交流放大电路的放大倍数是一个复数, 它反映了输出电压与输入电压之间的 _____ 和 _____ 关系。

2. 放大电路的输入电阻 R_i 越大, 则向信号源索取的电流 _____; 输出电阻 R_o 越小, 则带负载能力 _____。

3. 放大电路的 _____ 越宽, 表示对信号频率变化的适应能力越强。

4. 一个放大电路的上限截止频率 $f_H = 5\text{MHz}$, 中频段的电压放大倍数 $|\dot{A}_{um}| = 100$, 当输入信号的频率 $f = 5\text{MHz}$ 时的电压放大倍数为 $|\dot{A}_u|$ _____。

5. 在阻容耦合基本共发射极放大电路中, 电压放大倍数在低频段下降主要与 _____ 有关, 在高频段下降主要与 _____ 有关。

6. 共集电极放大电路的输出电压与输入电压的相位 _____, 输入电阻较共射极放大电路 _____, 而输出电阻则 _____。

7. 在基本共发射极放大电路中, 如果静态工作点设置过高, 则容易出现 _____ 失真, 对于 NPN 型晶体管, 此时输出波形的 _____ 将出现失真, 对于 PNP 型晶体管, 此时输出波形的 _____ 将出现失真。

8. 已知图 5.34 电路中, $V_{CC} = 12\text{V}$, $R_C = 3\text{k}\Omega$, $R_L = 3\text{k}\Omega$, 静态管压降 $U_{CEQ} = 6\text{V}$, 该电路的最大不失真输出电压 $U_{om} =$ _____ V。

9. 已知图 5.34 电路中, 当 R_B 减小时, 输入电阻 R_i 将 _____; R_C 增大时, 输出电阻 R_o 将 _____; 去掉负载电阻 R_L 后, 电压放大倍数 $|\dot{A}_u|$ 将 _____。

10. 放大交流信号应采用 _____ 耦合或 _____ 耦合方式, 放大直流或变化缓慢的信号应采用 _____ 耦合方式。

11. 直接耦合放大电路, 当输入信号 $u_i = 0$ 时, 在输出端仍有无关则缓慢变化的信号输出, 这种现象称为 _____。

12. 一个两级放大电路, 第一级的电压放大倍数 $\dot{A}_{u1} = -50$, 第二级的电压放大倍数 $|\dot{A}_{u2}| = -60$, 则总的电压放大倍数 $\dot{A}_u =$ _____。

习题

1. 改正图 5.35 所示各电路中的错误, 使它们对正弦波信号能够正常放大。要求保留

电路原来的共发射极接法和耦合方式。

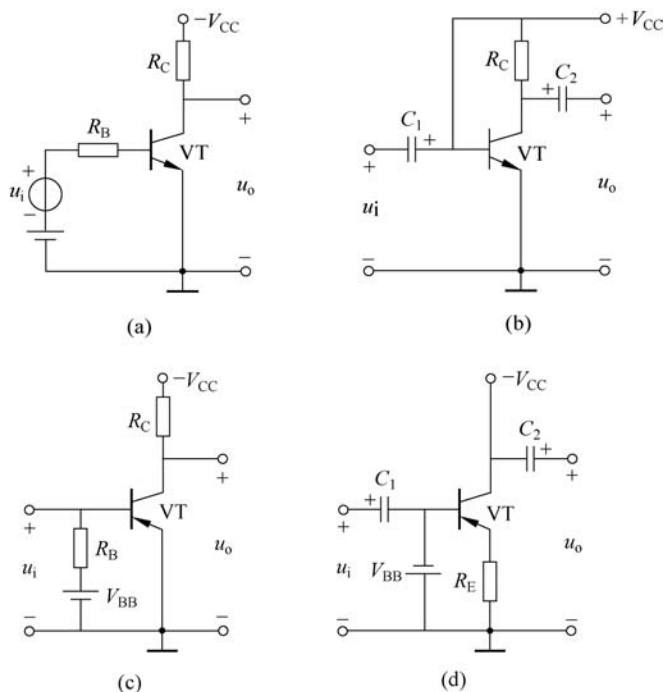


图 5.35

2. 放大电路如图 5.36 所示, 已知 $V_{CC}=12\text{V}$, 晶体管的 $\beta=50$, $U_{BEQ}=0.7\text{V}$, 饱和压降 $U_{CES}=0.3\text{V}$, 在下列情况下, 用直流电压表测晶体管的集电极电位, 应分别为多少?

(1) 正常情况 (2) R_{B1} 短路 (3) R_{B1} 开路 (4) R_{B2} 开路 (5) R_C 短路

3. 已知图 5.37 所示放大电路中, 晶体管的 $\beta=100$, $U_{BEQ}=0.7\text{V}$, $r_{be}=1\text{k}\Omega$, $R_C=3\text{k}\Omega$ 。

(1) 现已测得静态管压降 $U_{CEQ}=6\text{V}$, 试估算基极电阻 R_B 。

(2) 若测得 $\dot{U}_i$ 和 $\dot{U}_o$ 的有效值分别为 1mV 和 100mV , 则试求负载电阻 R_L 。

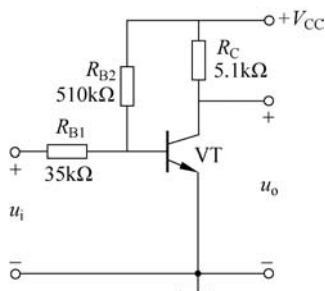


图 5.36

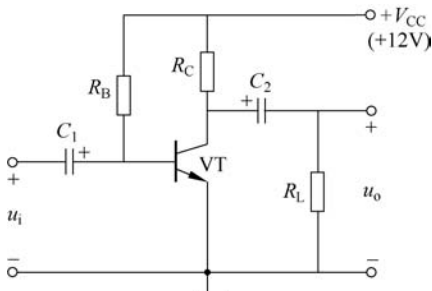


图 5.37

4. 已知图 5.37 所示放大电路中, 晶体管的 $\beta=50$, $U_{BEQ}=0.7\text{V}$, $U_{CES}=0.3\text{V}$, $R_C=3\text{k}\Omega$, $R_L=3\text{k}\Omega$ 。求输出电压幅度最大时的静态工作点 I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 U_{CEQ} 及基极电阻 R_B 。

5. 已知图 5.38 所示放大电路中, 晶体管的 $\beta=50$, $U_{BEQ}=0.7\text{V}$ 。

(1) 试估算 r_{be} 以及放大电路的电压放大倍数 $\dot{A}_u$ 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

(2) 如欲提高 $|\dot{A}_u|$, 分析可采取什么措施, 应调整放大电路中的哪些参数。

6. 已知图 5.38 所示放大电路中, 晶体管的 $\beta=50$, $U_{BEQ}=0.7\text{V}$, 饱和管压降 $U_{CES}=0.3\text{V}$ 。试求当负载电阻 $R_L=\infty$ 和 $R_L=3\text{k}\Omega$ 时电路的最大不失真输出电压 U_{om} 。

7. 已知图 5.39 所示分压式工作点稳定电路中, 晶体管的 $\beta=100$, $U_{BEQ}=0.7\text{V}$, $r_{bb'}=300\Omega$ 。

(1) 试估算放大电路的静态工作点 Q 。

(2) 估算放大电路的电压放大倍数 $\dot{A}_u$ 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

(3) 若电容 C_E 开路, 分析 $\dot{A}_u$ 、 R_i 和 R_o 将如何变化。

(4) 若使 $U_{CEQ}=6\text{V}$, 求基极电阻 R_{B1} 。

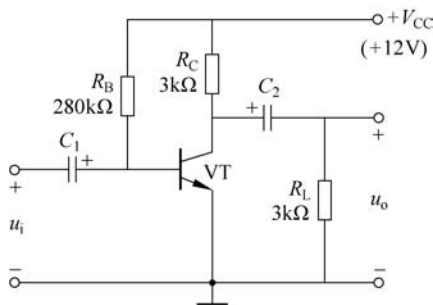


图 5.38

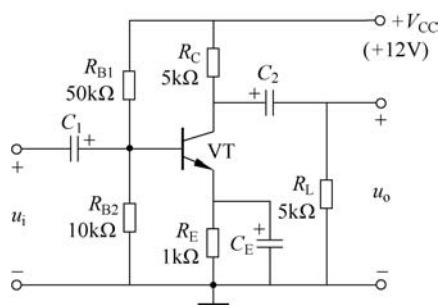


图 5.39

8. 放大电路如图 5.40 所示, 晶体管的 $\beta=100$, $r_{bb'}=300\Omega$ 。

(1) 求放大电路的静态工作点 Q 、电压放大倍数 $\dot{A}_u$ 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

(2) 若电容 C_E 开路, 分析将引起电路的哪些动态参数发生变化以及如何变化。

9. 放大电路如图 5.41 所示, 晶体管的 $\beta=60$, $U_{BEQ}=0.7\text{V}$, $r_{bb'}=300\Omega$ 。

(1) 求解静态工作点 Q 、电压放大倍数 $\dot{A}_u$ 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

(2) 设 $U_s=10\text{mV}$ (有效值), 求 U_i 和 U_o 。若 C_E 开路, 求 U_i 和 U_o 。

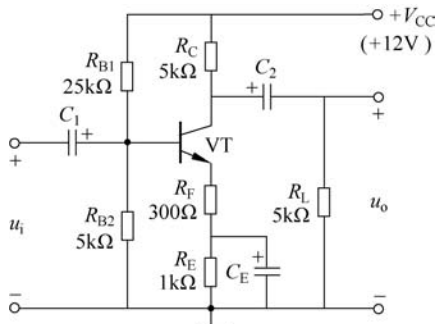


图 5.40

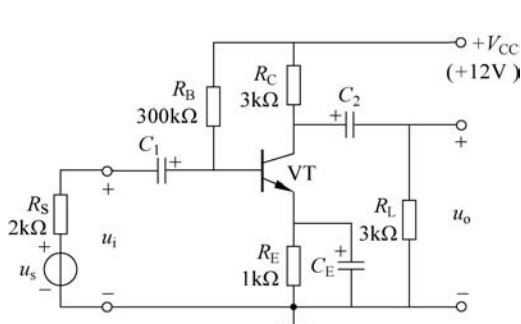


图 5.41

10. 放大电路如图 5.42 所示, 晶体管的 $\beta=80, r_{be}=1\text{k}\Omega$ 。

(1) 求静态工作点 Q 。

(2) 分别求 $R_L=\infty$ 和 $R_L=3\text{k}\Omega$ 时电路的电压放大倍数 $\dot{A}_u$ 和输入电阻 R_i 。

(3) 求 $R_L=3\text{k}\Omega$ 时电路的源电压放大倍数 $\dot{A}_{us}=\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s}$ 。

(4) 求 R_o 。

11. 放大电路如图 5.43 所示, 设 $R_C=R_E$, 晶体管的 $\beta\gg 1$, 静态工作点合适。

(1) 分析从晶体管的集电极输出与从发射极输出有何不同。试求 $\dot{A}_{u1}=\frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i}$ 和 $\dot{A}_{u2}$

$$=\frac{\dot{U}_{o2}}{\dot{U}_i}。$$

(2) 若输入 u_i 为正弦电压, 试画出输入电压和输出电压 u_i, u_{o1}, u_{o2} 的波形。

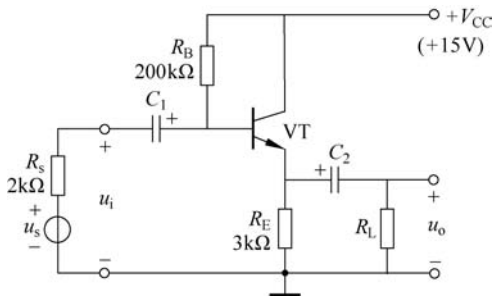


图 5.42

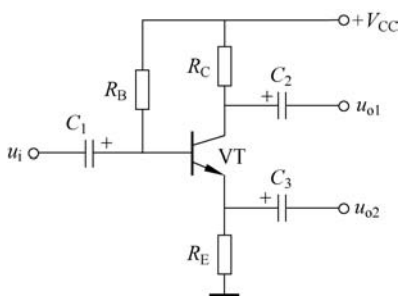


图 5.43

12. 两级放大电路如图 5.44 所示。

(1) 写出估算总电压放大倍数 $\dot{A}_u$ 的表达式。

(2) 写出估算输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 的表达式。

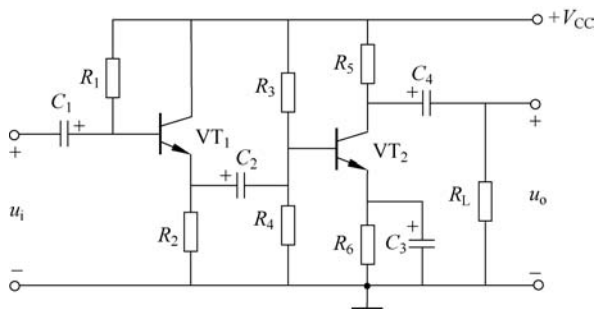


图 5.44