

第3章 放大电路基础

3.1 本章教学要求

1. 掌握基本单管放大电路的组成及工作原理，能正确判断放大电路的组成是否合理；掌握放大电路性能参数的含义及对放大电路的影响。
2. 掌握放大电路的分析方法，能够对放大电路进行静态分析和动态分析；熟练掌握共射组态放大电路的电压增益、输入电阻及输出电阻的分析计算。
3. 了解共集电极电路和共基极电路的分析及计算方法；熟悉三种组态放大电路的特点。
4. 了解放大电路频率响应的基本概念。
5. 掌握共源组态场效应管放大电路的分析计算方法。
6. 掌握多级放大电路的构成及分析计算方法。

3.2 本章学习重点及难点解析

本章是模拟电路部分的核心内容之一，包含了模拟电路部分的各种基本电路及分析方法，必须正确理解并熟练掌握。具体教学内容包括：

3.2.1 正确理解放大电路的构成、工作原理及特点

三极管的一个基本应用是组成放大电路。放大电路是在不失真的前提下将微弱的电信号放大到一定的量级，即放大电路既要能放大输入信号，又不能产生失真。

1. 放大电路的构成

放大电路的构成如图 3.1 所示。

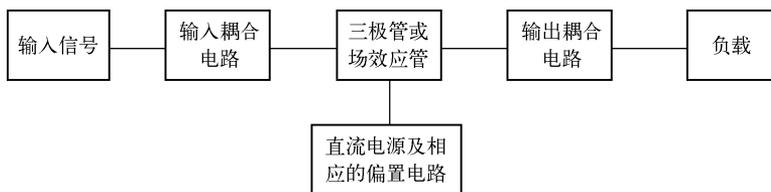


图 3.1 放大电路构成

无论哪种类型的放大电路，都是由下列三部分构成的：①具有放大作用的半导体器件，即晶体三极管或场效应管，它是整个电路的核心器件；②直流偏置电路，它的作用是为半导体器件提供合适的静态工作点以保证半导体器件能工作在放大状态，即晶体三极管工作在放大区或场效应管工作在恒流区；③耦合电路，它的作用是将要放大的信号加入放大电路的输入端，即要放大的信号能作用于晶体三极管的基极-发射极回路或场效应管的栅极-源极回路，放大后的信号能有效地加到负载上。

我们以共射放大电路为例来说明放大电路的构成情况。基本共射放大电路如图 3.2 所示。

此电路的核心器件是晶体三极管 V ，它具有电流放大作用； R_b 是基极偏置电阻， R_c 是集电极电阻， V_{CC} 是直流电源，它们构成直流偏置电路，为此放大电路提供合适的静态工作点，保证晶体三极管工作在放大区； C_1 、 C_2 是耦合电容， C_1 将输入信号 v_i 耦合到三极管的基极， C_2 将集电极的信号耦合到负载电阻 R_L 上。

2. 放大电路的工作原理

放大电路之所以能将微弱的电信号进行放大，其根本原因就在于它利用了晶体三极管的电流控制作用或场效应管的电压控制作用将直流电源提供的能量转换为信号能量提供给负载，所以放大的实质是能量的控制和转换。在图 3.2 的基本共射放大电路中，要放大的信号通过耦合电容 C_1 加到晶体三极管 V 的发射结，引起晶体三极管的基极电流的变化，当晶体三极管工作在放大区时，其基极电流的变化会引起集电极电流的变化，而且其变化是基极电流变化的 β 倍（这体现了晶体三极管的电流放大作用），变化了的集电极电流再通过集电极电阻 R_c 将电流的变化转化为电压的变化，从而实现电压的放大，最后放大的信号经过 C_2 传送到输出端的负载上。

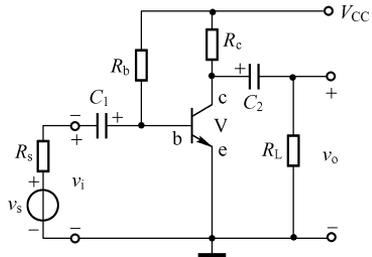


图 3.2 基本共射放大电路

从上述信号的传输可见放大电路要能够不失真地放大交流信号的基本条件有两个：一是放大电路必须要设置合适的静态工作点 Q ，通过设置静态工作点 Q 将要放大的交流量叠加到电路的直流量上，这样就把原来大小和方向都变化的信号转化为只有大小变化但方向不再变化的电量，使得在整个信号周期内三极管都能工作在放大区，从而实现不失真的放大；二是要放大的交流信号必须能够加到放大电路的输入回路，这样才能有效地引起发射结电压的变化，同样，放大后的信号必须能够从负载取出。

3. 放大电路的特点

由图 3.2 的基本共射放大电路可见，此电路中既有线性器件，也有非线性器件（三极管），所以放大电路是由三极管构成的非线性电路。

当输入信号为零时，由于电路中存在直流电源 V_{CC} ，那么电路中就有一组直流量；当加入输入信号后，输入的交流量叠加到直流量上，这时各点的电压和电流都是既有直流又有交流，即交直流共存，所以放大电路的特点有两个：一是非线性；二是交直流共存。

4. 放大电路的主要性能指标

放大电路的主要性能指标有增益、输入电阻、输出电阻、带宽、非线性失真及最大输出功率等，这些性能指标是衡量放大电路性能优劣的标准。主要参数简介如下：

(1) 增益

增益又称为放大倍数，是衡量放大电路放大能力的指标。通常有电压增益、电流增益、互阻增益及互导增益。我们主要讨论的是电压增益。

电压增益表示的是放大电路的电压放大能力，其定义为：

$$\dot{A}_v = \dot{V}_o / \dot{V}_i \quad (3.1)$$

(2) 输入电阻

输入电阻是放大电路输入端看进去的等效电阻，是表征放大电路获取信号能力的指标，其定义为：

$$R_i = \dot{V}_i / \dot{I}_i \quad (3.2)$$

若放大电路的信号源为电压源，输入电阻 R_i 越大，则放大电路输入端获得的输入电压 v_i

值就越大,即放大电路获取信号的能力就越强;若放大电路的信号源为电流源,输入电阻 R_i 越小,放大电路输入端获得的输入电流 i_i 值就越大。

(3) 输出电阻

输出电阻是从放大电路输出端看进去的等效电阻,是表征放大电路带负载能力的指标,其定义为:

$$R_o = \dot{V}_o / \dot{I}_o |_{V_s=0, R_L=\infty} \quad (3.3)$$

若放大电路的输出量为电压信号,输出电阻 R_o 越小,负载电阻 R_L 的变化对输出电压 v_o 的影响就越小,那么放大电路带负载的能力就越强;若放大电路的输出量为电流信号,则 R_o 越大, R_L 的变化对输出电流 i_o 的影响就越小,那么电路带负载的能力就越强。

3.2.2 熟练掌握放大电路的分析方法

由放大电路的特点可知放大电路工作时,各点的电压和电流都是既有直流又有交流,因此放大电路的分析分为静态分析和动态分析两部分。由于放大电路的交流参数是建立在静态工作点的基础上的,如果静态工作点发生变化,那么交流参数也将随之而变,所以放大电路的分析首先进行的是静态分析,然后才是动态分析。

1. 静态分析

放大电路静态分析的对象是直流信号,其目的是求解放大电路的静态工作点 Q ,即确定输入信号为零时,三极管各电极的直流电流和极间直流电压。

对由晶体三极管构成的放大电路来说就是求解输入回路的电压 V_{BE} 、电流 I_B ;输出回路的电压 V_{CE} 、电流 I_C 。由于 V_{BE} 为常数,因此求解时可不分析,故求解静态工作点 Q 就是求解 I_B , V_{CE} 及 I_C 。

对由场效应管构成的放大电路,同样是求解输入回路的电压 V_{GS} 、电流 I_G ;输出回路的电压 V_{DS} 、电流 I_D 。由于场效应管的输入电阻非常大,所以 I_G 近似为零,因此求解时可不分析,故求解静态工作点 Q 就是求解 V_{GS} , V_{DS} 及 I_D 。

(1) 直流通路

要进行静态分析首先要画出放大电路的直流通路,直流通路是直流信号的流通过程。画直流通路的原则如下:

- ① 交流信号源置零(交流电压源短路,交流电流源开路),但信号源内阻保留;
- ② 电容开路,电感短路。

(2) 静态分析的分析方法

因为放大电路是非线性的,所以静态分析可采用两种方法:一是图解法,二是估算法。

图解法是根据三极管的输入和输出特性曲线以及管外电路所确定的负载线采用直接作图的方法求解电路的静态工作点的。图像法是解决非线性问题的常用方法,但它比较烦杂,只适用于比较简单的电路。因此静态分析的重点是估算法。

用估算法进行静态分析的步骤如下:

- ① 根据放大电路画出直流通路;
- ② 由电路分析的方法分别列出输入回路和输出回路的方程,进而求解静态工作点 Q 参数。

下面以图 3.3 所示的分压式偏置共射放大电路为例说明静态工作点 Q 的计算。

首先画出电路的直流通路,如图 3.4 所示。画直流通路时电容 C_1 、 C_2 及 C_e 都开路。

对图 3.4 进行分析时要抓住电路的特点, 采用工程估算的方法可简便地分析静态工作点 Q 。

当基极电流 I_B 远小于 R_{b1} 、 R_{b2} 上的电流时 (此条件工程上可用 $\beta R_c \geq 10(R_{b1} // R_{b2})$ 来判断), R_{b1} 与 R_{b2} 近似为串联, 这样基极电位 V_B 是固定的, 其大小由 R_{b1} 、 R_{b2} 的分压比确定, 因此这种基极分压式偏置电路也称为稳压电路。

首先计算基极电位:

$$V_B = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} \quad (3.4)$$

然后计算集电极电流:

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_c} \quad (3.5)$$

由三极管的电流放大特性可得:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{V_B - V_{BE}}{\beta R_c} \quad (3.6)$$

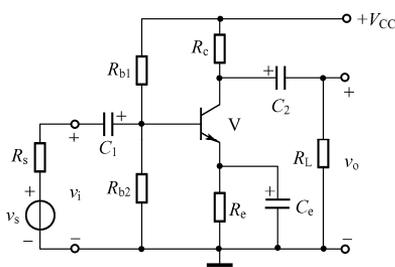


图 3.3 分压式偏置共射放大电路

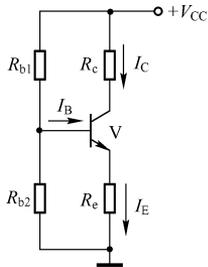


图 3.4 图 3.3 的直流通路

最后由输出回路列回路方程, 求得

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c - I_E R_e \approx V_{CC} - I_C (R_c + R_e) \quad (3.7)$$

若条件 $\beta R_c \geq 10(R_{b1} // R_{b2})$ 不满足, 则需用戴维南定理计算 Q 参数, 详细分析参见教材第 56 页, 可解得:

$$I_B = \frac{\frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} - V_{BE}}{R_{b1} // R_{b2} + (1 + \beta) R_c} \quad (3.8)$$

$$I_C = \beta I_B \quad (3.9)$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c - I_E R_e \approx V_{CC} - I_C (R_c + R_e) \quad (3.10)$$

比较式 (3.6)、式 (3.8), 可见若 $(1 + \beta) R_c \gg R_{b1} // R_{b2}$ (此条件工程上可用 $\beta R_c \geq 10(R_{b1} // R_{b2})$ 来判断), 则式 (3.8) 分母中的 $R_{b1} // R_{b2}$ 可忽略, 那么两种方法的求解是相同的。注意: 因为一般 $R_{b1} \gg R_{b2}$, 所以 $R_{b1} // R_{b2} \approx R_{b2}$, 此处的工程近似条件与教材上 $\beta R_c \geq 10R_{b2}$ 是一致的。

2. 动态分析

动态分析是分析当电路加入输入信号后叠加在静态工作点 Q 上的各电极电流和极间电压的变化量, 所以放大电路动态分析的对象是交流信号, 其目的是分析放大电路的动态特性及计算放大电路的动态性能指标。

(1) 交流通路

要进行动态分析首先要能正确画出放大电路的交流通路, 画交流通路的原则如下:

- ① 对交流信号, 电路中内阻很小的直流电压源可视为短路;
- ② 对一定频率范围内的交流信号, 容量较大的电容可视为短路。

(2) 动态分析的分析方法

由于放大电路是非线性的, 同样其动态分析可采用两种方法: 一是图解法, 二是小信号模型法。

① 图解法

放大电路动态特性的分析采用图解法, 主要是通过分析放大电路输入波形和输出波形的情

况来确定放大电路输出信号的动态范围及放大电路的非线性失真问题。

当静态工作点 Q 设置不当且输入信号幅度较大时，三极管会工作在特性曲线的放大区外，这样放大电路就会产生失真。若 Q 设置得过低而输入信号幅度又较大时，会产生截止失真，对 NPN 管来说表现为“削顶”输出；若 Q 设置得过高而输入信号幅度又较大时，会产生饱和失真，对 NPN 管来说表现为“削底”输出。截止失真是在输入回路首先产生失真，而饱和失真是输出回路产生失真。为了获得最大的不失真输出电压， Q 应选在交流负载线的中央，但这也需要输入信号幅度较大，以使基极电流 i_B 达到一定的幅度。

例如某固定偏流放大电路的 BJT 的输出特性曲线及直流负载线和交流负载线如图 3.5 所示，由图 3.5 可判断出要使此电路既不产生饱和失真又不产生截止失真的最大不失真输出电压幅度为 1.5V，而要使输出电压幅度达到 1.5V，基极电流 i_B 的幅度要达到 $20\mu\text{A}$ 。如图 3.6 所示。

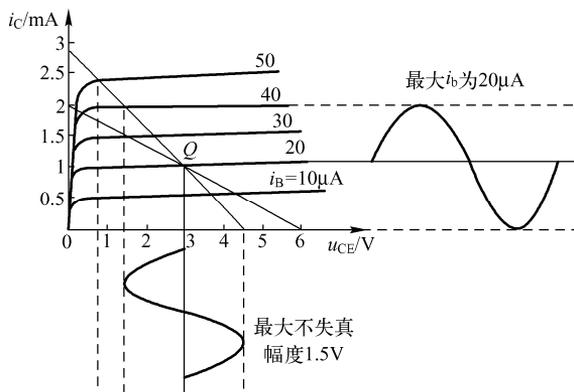
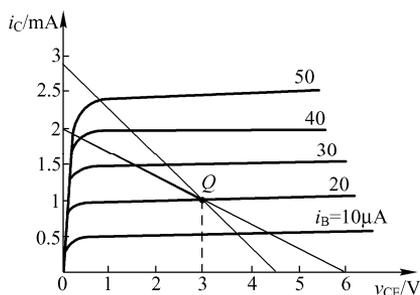


图 3.5 BJT 的输出特性曲线及直流负载线和交流负载线 图 3.6 图 3.5 的最大不失真输出电压及基极电流的确定

在实际应用中，当输入信号的幅度较小时，为降低直流电源的功率损耗，在不产生失真和保证一定的电压增益的前提下，常可将 Q 点选得低一些。

② 小信号模型法

放大电路动态分析的重点是动态性能指标的计算。动态性能指标的计算采用解析法，即小信号模型法分析。

由于三极管是非线性器件，这样就使放大电路的分析比较困难。若在一定条件下非线性器件三极管能做线性化处理，就可简化放大电路的分析与设计。当放大电路的输入信号很小时，三极管小范围内的特性曲线可以近似地用直线来代替，这样就可将三极管这种非线性器件用线性模型来替代。晶体三极管及场效应管的低频小信号模型及参数如表 3.1 所示。

当三极管用其低频小信号模型替代后，就得到放大电路的小信号等效电路，这样就将非线性的问题转化为线性问题了，而后就可用线性电路分析的方法根据定义求解放大电路的 \dot{A}_v 、 R_i 及 R_o 等动态性能指标。

由于小信号模型法在交流、小信号、低频时才适用，所以应用小信号模型法分析时要注意以下两点：

a. 交流小信号模型中的参数是针对变化量的，因此只能在动态分析时使用；

b. 不论是晶体三极管的 H 参数等效模型中的 H 参数还是场效应管的小信号模型中的参数都是在静态工作点附近的微小变化范围内定义的，所以小信号模型法的计算结果反映了静态工作点 Q 附近的工作情况。若 Q 点发生变化，则交流参数也将随之发生变化。

表 3.1 放大器件的低频小信号模型及参数

放大器件名称	低频小信号模型	模型参数
晶体三极管		① β ② $r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_E}$
场效应管		g_m

3. 放大电路各分析方法的比较

放大电路的静态、动态分析有估算法、图解法和小信号模型法，三种方法的比较如表 3.2 所示。

表 3.2 三种分析方法的比较

方 法	用 途	优 点	缺 点
估算法	求解静态工作点 Q	简洁、方便	不是十分准确
图解法	① 确定静态工作点 ② 画出输入、输出波形，分析失真情况 ③ 确定输出信号的动态范围	① 直观、形象 ② 便于大信号的分析，特别是电压幅值、失真及功率的分析	① 作图麻烦，有误差 ② 只适用于简单电路的分析
小信号模型法	分析电路的小信号动态性能指标 A_v 、 R_i 及 R_o 。	使用方便，适用于各种电路	① 不能用于静态分析 ② 只能用于小信号动态分析

3.2.3 熟练掌握小信号模型分析法分析放大电路的动态性能指标

1. 小信号等效电路的画法

运用小信号模型法分析放大电路的动态性能指标首先要正确画出电路的小信号等效电路。

画小信号等效电路的步骤如下：

- ① 根据放大电路画出交流通路；
- ② 在交流通路中，将晶体三极管用其简化的 H 参数等效模型替代（或场效应管用其简化的小信号模型替代），得到放大电路的小信号等效电路；
- ③ 最后将各电流、电压标上即可。

实际上小信号等效电路也可以以模型为中心，采用如下简便的方法画出：

- ① 首先画出晶体三极管的简化的 H 参数等效模型或场效应管的简化小信号模型；
- ② 从三极管的三个电极出发，将各电极与地之间各支路上的元件按照画交流通路的画法一一加入；
- ③ 最后将各电流、电压标上即可。

例如如图 3.3 所示的分压式偏置共射放大电路的小信号等效电路就可这样简便画出：首先画出三极管的简化的 H 参数等效模型，基极与发射极之间为输入电阻 r_{be} ，集电极与发射极之间

为受控电流源，其大小为基极电流 i_b 的 β 倍，方向由基极与发射极间的电压 v_{be} 控制；然后分别从发射极、基极及集电极出发，将各电极与地之间各支路上的元件按照画交流通路的画法一一加入。由图 3.3 可见由于存在旁路电容 C_e ，所以发射极直接到地；基极到地之间有 R_{b1} 、 R_{b2} ，这两个电阻是并联关系，还有就是信号源；集电极到地之间有 R_c 、 R_L ，同样这两个电阻也是并联关系，输出信号在负载 R_L 上取得；最后将各电流、电压标出，如图 3.7 所示。

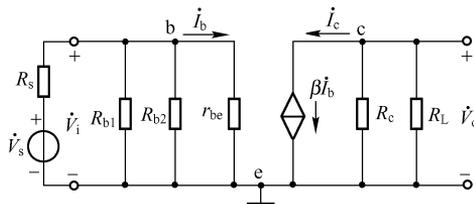


图 3.7 图 3.3 的小信号等效电路

2. 动态性能指标的计算

放大电路的小信号等效电路画出后便可应用线性电路分析的方法根据定义求解放大电路的电压放大倍数、输入电阻、输出电阻等动态性能指标。

下面以共集电极放大电路为例说明放大电路上述三个动态性能指标的计算。

共集电极放大电路如图 3.8 所示。

首先画出其小信号等效电路，如图 3.9 所示。

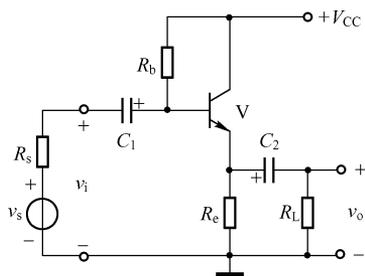


图 3.8 共集电极放大电路

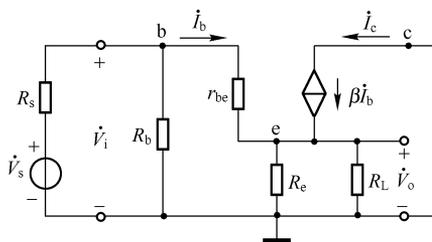


图 3.9 图 3.8 的小信号等效电路

由图 3.9 根据 \dot{A}_v 、 R_i 及 R_o 的定义按照线性电路的分析方法可得：

$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{\dot{I}_e(R_e // R_L)}{\dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e(R_e // R_L)} = \frac{(1 + \beta)\dot{I}_b(R_e // R_L)}{\dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta)\dot{I}_b(R_e // R_L)} = \frac{(1 + \beta)(R_e // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)} \quad (3.11)$$

$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_{R_b} + \dot{I}_b} = \frac{\dot{V}_i}{\frac{\dot{V}_i}{R_b} + \frac{\dot{V}_i}{r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)}} = R_b // [r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)] \quad (3.12)$$

$$R_o = \left. \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_o} \right|_{v_s=0, R_L=\infty} = R_e // \frac{r_{be} + R_b // R_s}{1 + \beta} \quad (3.13)$$

在用小信号模型法分析放大电路的动态性能指标时有两点需要特别说明：

① 研究的对象是交流信号，因此计算时其中的电流、电压量不能用静态分析时求解出的值代入计算，尽管表面上用静态值代入最后求出的放大倍数的数值是相同的。

② 输入电阻是放大电路输入端看进去的等效电阻，不包括信号源内阻。同样，输出电阻是放大电路输出端看进去的等效电阻，不包括负载电阻。

3. 折合的方法在分析放大电路中的应用

在熟练掌握电路的分析后，应用折合的方法可大大简化电路的分析。折合的方法是：如果电路中含有电阻的两条支路的电流成倍数，则可将一条支路上的电阻折合到另一条支路上，折

合后的电阻等于折合前的电阻乘以电流放大或缩小的倍数。例如，将大电流支路的电阻折合到小电流支路上时，折合后的电阻将扩大；而将小电流支路上的电阻折合到大电流支路时，折合后的电阻将缩小。电阻扩大或缩小的倍数就是两支路电流间的倍数。如图 3.10 所示。

在放大电路中利用折合的方法从基极回路看射极回路电阻时，由于发射极的电流是基极电流的 $(1 + \beta)$ 倍，则射极回路电阻值应增大为原值的 $(1 + \beta)$ 倍；同样，从射极回路看基极回路电阻则基极电阻值应减小到原值的 $\frac{1}{1 + \beta}$ 。

应用上述折合的方法由图 3.9 可直接写出输入电阻与输出电阻的表达式。由于输入电阻是放大电路输入端看进去的等效电阻，由图 3.9 可见输入电阻就应是 R_b 与从基极看进去的电阻的并联，由于 r_{be} 与 R_e 在两条不同的支路上，这样就需要将发射极回路的电阻折合到基极，即其射极回路电阻值应增大为原值的 $(1 + \beta)$ 倍，所以输入电阻为 $R_b // [r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)]$ 。同样，输出电阻是放大电路输出端看进去的等效电阻，由图 3.9 可见输出电阻就应是 R_e 与从发射极看进去的电阻的并联，这样要将基极回路电阻折合到发射极，则电阻就应为原来的 $\frac{1}{1 + \beta}$ ，因此输出电阻为

$$R_e // \frac{r_{be} + R_b // R_s}{1 + \beta}。$$

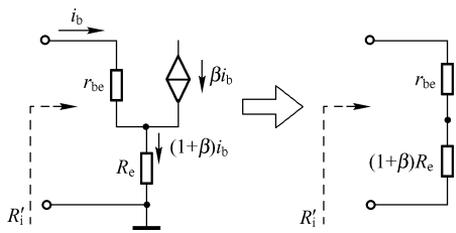


图 3.10 电阻的折合

3.2.4 熟练掌握由晶体三极管构成的三种组态放大电路及特点

1. 三种组态放大电路及特点

由晶体三极管构成的放大电路有共发射极、共集电极及共基极三种组态。观察输入信号从哪个电极加入（即哪个电极接信号源），输出信号从哪个电极取出（即哪个电极接负载），剩下的另一个电极即为组态形式。晶体三极管三种组态放大电路的接法可由表 3.3 表示。

表 3.3 三种组态放大电路的接法

接法	共射组态	共集组态	共基组态
输入电极	基极 b	基极 b	发射极 e
输出电极	集电极 c	发射极 e	集电极 c

由表 3.3 可见由晶体三极管构成的各种组态的放大电路中，能加输入信号的电极只能是基极 b 或发射极 e，集电极 c 是不能加输入信号的；同样输出信号只能从集电极 c 或发射极 e 取出，基极 b 是不能取得输出信号的。

这三种组态放大电路的电路结构及主要动态性能指标比较如表 3.4 所示。

由表 3.4 可见共发射极组态放大电路既能实现电压放大又能实现电流放大，因此它的功率增益最大。另外，它是一个反相放大电路，输出信号与输入信号相位相反。它的输入电阻适中，输出电阻较大。它常用于多级放大电路的中间级，实现电压放大。

共集电极组态放大电路只能实现电流放大不能实现电压放大，其电压放大倍数小于 1 但接近于 1，输出信号与输入信号相位相同，因此它也称为电压跟随器。它的输入电阻大，输出电阻较小。由于它的输入电阻大，所以常用于多级放大电路的输入级，以提高放大电路获取信号的能力；由于它的输出电阻小，所以常用于多级放大电路的输出级，以提高放大电路带负载的能力；另外它也常用于多级放大电路的中间级，实现阻抗转换，起到阻抗匹配的作用。

共基极组态放大电路只能实现电压放大不能实现电流放大，其输出信号与输入信号相位相同。它的输入电阻小，输出电阻较大。

表 3.4 放大电路三种基本组态的比较

组态	共发射极组态		共集电极组态	共基极组态
	固定偏流电路	分压式偏置电路		
电路				
直流通路				
静态工作点	$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b}$ $I_C = \beta I_B$ $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c$	<p>方法一： 若 $\beta R_c \geq 10(R_{b1} // R_{b2})$</p> $V_B = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC}$ $I_C \approx I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_c}$ $I_B = I_C / \beta$ <p>方法二：</p> $I_B = \frac{\frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} - V_{BE}}{R_{b1} // R_{b2} + (1 + \beta) R_c}$ $I_C = \beta I_B$ $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c - I_E R_e$ $\approx V_{CC} - I_C (R_c + R_e)$	$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b + (1 + \beta) R_c}$ $I_C = \beta I_B$ $V_{CE} = V_{CC} - I_E R_e$	<p>方法一： 若 $\beta R_c \geq 10(R_{b1} // R_{b2})$</p> $V_B = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC}$ $I_C \approx I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_c}$ $I_B = I_C / \beta$ <p>方法二：</p> $I_B = \frac{\frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} - V_{BE}}{R_{b1} // R_{b2} + (1 + \beta) R_c}$ $I_C = \beta I_B$ $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c - I_E R_e$ $\approx V_{CC} - I_C (R_c + R_e)$
小信号等效电路				
A_v	$-\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}}$ (高)	$-\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}}$ (高)	$\frac{(1 + \beta)(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_c // R_L)}$ ≈ 1 (低)	$\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}}$ (高)
A_i	β (高)	$\frac{\beta(R_{b1} // R_{b2})}{r_{be} + (R_{b1} // R_{b2})}$ (高)	$-(1 + \beta)$ (高)	$-\alpha \approx -1$ (低)
R_i	$R_b // r_{be}$ (中等)	$R_{b1} // R_{b2} // r_{be}$ (中等)	$R_b // [r_{be} + (1 + \beta)R'_L]$ $R'_L = R_c // R_L$ (高)	$R_c // \frac{r_{be}}{1 + \beta}$ (低)
R_o	R_c (中等)	R_c (中等)	$R_c // \frac{r_{be} + R_b // R_s}{1 + \beta}$ $\approx \frac{r_{be} + R_b // R_s}{1 + \beta}$ (低)	R_c (中等)

2. 固定偏流共射放大电路与分压式偏置稳定共射放大电路的再讨论

放大电路要实现不失真的放大，必须设置合适的静态工作点。静态工作点的设置是放大电

路正常放大的前提，另一方面静态工作点也影响到放大电路的动态性能指标。因此实用的放大电路静态工作点必须稳定。

晶体三极管放大电路的偏置电路有两种：一种是固定基极偏置电路，另一种是基极分压式偏置电路。固定基极偏置电路其基极电流 I_B 是一个几乎不随温度变化的恒值，这也就是固定偏流放大电路名称的由来。固定偏流共射放大电路结构简单，但温度对 I_C 、 V_{CE} 的影响较大，因而静态工作点 Q 不稳定。

基极分压式偏置电路使基极电位 V_B 稳定，这种偏置电路构成的分压式偏置共射放大电路与固定偏流共射放大电路最主要的区别在于发射极加入了电阻 R_e ，加入此电阻的目的在于它会将集电极电流由于温度的影响而产生的变化引回到输入回路，使输入端的电压 V_{BE} 产生相反的变化从而使静态工作点趋于稳定。所以在实际的应用中共射组态放大电路采用的是分压式偏置共射放大电路。

比较表 3.4 中分压式偏置共射放大电路与固定偏流共射放大电路的电压增益的表达式，两个表达式形式上完全相同，表面上它们的电压增益都会随着三极管的电流放大系数 β 的变化而变化。但实际上当 β 改变时，固定偏流共射放大电路的电压增益会随着 β 的变化而变化，而分压式偏置共射放大电路的电压增益却几乎不变。产生这一现象的根本原因在于固定偏流共射放大电路的 I_B 是固定的，其值为 $I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b} \approx \frac{V_{CC}}{R_b}$ 。而分压式偏置共射放大电路的 I_E 是稳定的，其值为 $I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_e}$ ，其中 $V_B = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC}$ 是固定的，由于 $r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_E} = r_{bb'} + \frac{26}{I_B}$ ，所以固定偏流共射放大电路的 r_{be} 不随 β 的变化而变化，但分压式偏置共射放大电路的 r_{be} 却随着 β 的变化而变化。

3.2.5 熟练掌握场效应管放大电路的工作原理及分析

场效应管是利用输入电压所产生的电场效应来控制其输出电流的半导体器件，它是一种电压控制器件。场效应管的输出特性曲线与晶体三极管的输出特性曲线非常相似，同样可用场效应管组成放大电路。与晶体三极管相比，二者的区别在于晶体三极管是电流控制器件，是由输入端的电流 i_B 控制输出电流 i_C ；而场效应管是电压控制器件，是由输入端的电压 v_{GS} 控制输出电流 i_D 。在分析场效应管放大电路时，将晶体三极管的三个电极 b、e、c 与场效应管的三个电极 g、s、d 对应可达到事半功倍的效果。由晶体三极管组成的放大电路有共射组态、共集组态和共基组态，相应地由场效应管组成的放大电路就有共源组态、共漏组态和共栅组态。

场效应管放大电路组态的判别与晶体三极管放大电路组态的判别相同，只需观察输入信号从哪个电极加入（即哪个电极接信号源），输出信号从哪个电极取出（即哪个电极接负载），剩下的另一个电极即为组态形式。场效应管三种组态放大电路的接法可由表 3.5 表示。

表 3.5 场效应管三种组态放大电路接法

接法	共源	共漏	共栅
输入电极	栅极 g	栅极 g	漏极 d
输出电极	漏极 d	源极 s	源极 s

从表 3.5 可见由场效应管构成的各种组态的放大电路中，加输入信号的电极只能是栅极 g 或漏极 d，源极 s 是不能加输入信号的；同样输出信号只能从漏极 d 或源极 s 取出，栅极 g 是不能取得输出信号的。

1. 两种偏置电路

在场效应管放大电路中提供静态工作点 Q 的常用的偏置方式有自给偏置和分压式偏置两种，如图 3.11 所示。

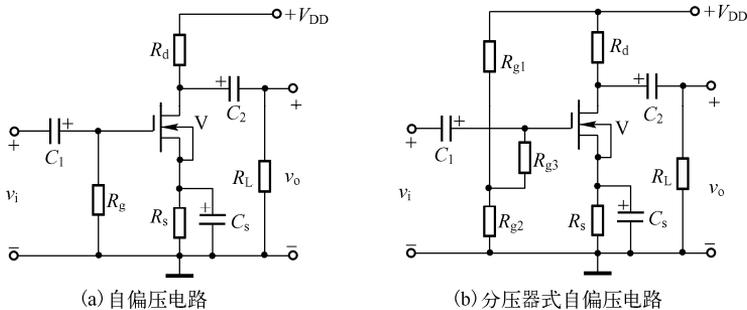


图 3.11 自给偏置和分压式偏置电路

自给偏置的偏置电压 V_{GS} 由漏极电流 I_D 提供，这种偏置方式只适用于需要负偏压或零偏压的场效应管。

分压式偏置的偏置电压 V_{GS} 通过分压电阻分压直流电源提供偏置， V_{GS} 可正也可负，因此适用于所有类型的场效应管。

2. 场效应管放大电路的分析

场效应管放大电路的分析与晶体三极管放大电路的分析相同，同样分为静态分析和动态分析。

(1) 静态分析

静态分析的对象是直流信号，目的同样是求解场效应管放大电路的静态工作点 Q ，即求解输入回路的电压 V_{GS} 、电流 I_G ；输出回路的电压 V_{DS} 、电流 I_D 。由于场效应管的输入电阻非常大，所以输入回路的电流 I_G 近似为零，因此求解场效应管放大电路的静态工作点 Q 就是求解输入回路的电压 V_{GS} ；输出回路的电压 V_{DS} 、电流 I_D 。

静态分析步骤如下：

- ① 根据放大电路画出其直流通路；
- ② 由电路分析的方法列出输入回路方程，即 I_D 与 V_{GS} 的关系式；
- ③ 根据场效应管的类型，选择相应的数学模型，写出处于放大状态的 I_D 与 V_{GS} 间的关系式；

④ 联立求解上述方程，得到 I_D 与 V_{GS} ；

⑤ 由输出回路求解出 V_{DS} 。

同样，画直流通路时注意电容开路。

下面以共源组态放大电路为例，说明场效应管放大电路静态工作点 Q 的求解。

共源组态放大电路如图 3.12 所示。

首先画出电路的直流通路，如图 3.13 所示。

由图 3.13 列输入回路方程为：

$$V_{GS} = -I_D R_s \quad (3.14)$$

由耗尽型 MOSFET 的转移特性表达式，有

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 \quad (3.15)$$

联立式 (3.14) 和式 (3.15) 两方程可求得 V_{GS} 及 I_D 。最后列输出回路方程：

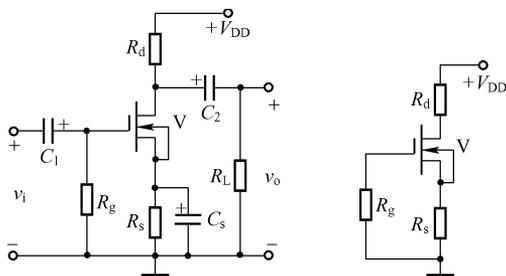


图 3.12 共源组态的放大电路

图 3.13 图 3.12 的直流通路

$$V_{DD} = V_{DS} + I_D R_s + I_D R_d \quad (3.16)$$

可得:

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_s + R_d) \quad (3.17)$$

(2) 动态分析

动态分析的对象是交流信号，其目的是分析放大电路的动态性能指标，采用的方法还是小信号模型法。用小信号模型法求解场效应管放大电路的动态性能指标的整个求解过程与晶体三极管放大电路的求解完全相同。分析步骤仍然是：首先正确画出电路的小信号等效电路，然后应用线性电路分析的方法根据定义求解放大电路的电压放大倍数、输入电阻、输出电阻等动态性能指标。

比较表 3.1 中场效应管的小信号模型与晶体三极管的小信号模型，可见场效应管的小信号模型比晶体三极管的小信号模型简单，因为栅极 G 和源极 S 间可看作开路，漏极 D 与源极 S 间可看作一个压控源，全部参数只有一个 g_m 。所以实际上场效应管放大电路的动态性能指标的分析比晶体三极管放大电路动态性能指标的分析更简单。下面以共漏组态放大电路为例来说明场效应管放大电路动态性能指标的分析。

共漏组态放大电路如图 3.14 所示。

首先画出其小信号等效电路，如图 3.15 所示。

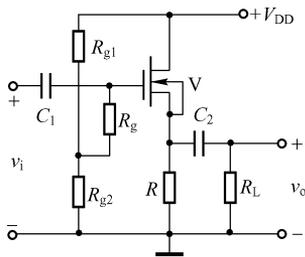


图 3.14 共漏组态放大电路

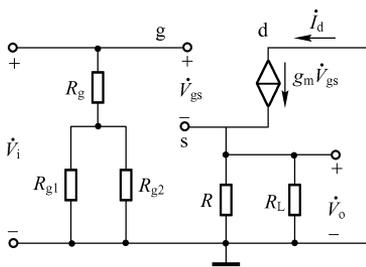


图 3.15 图 3.14 的小信号等效电路

由图 3.15 根据定义可得：

$$A_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{\dot{I}_d (R // R_L)}{\dot{V}_{gs} + \dot{I}_d (R // R_L)} = \frac{g_m \dot{V}_{gs} (R // R_L)}{\dot{V}_{gs} + g_m \dot{V}_{gs} (R // R_L)} = \frac{g_m (R // R_L)}{1 + g_m (R // R_L)} \quad (3.18)$$

$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = R_g + (R_{g1} // R_{g2}) \quad (3.19)$$

$$R_o = \left. \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_o} \right|_{v_s=0, R_L=\infty} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_o/R + g_m \dot{V}_o} = R // \frac{1}{g_m} \quad (3.20)$$

在场效应管放大电路动态分析时同样需要注意的是：场效应管小信号模型中的压控源 $g_m v_{gs}$ 是受 v_{gs} 控制的，表示的是场效应管的栅源电压 v_{gs} 对漏极电流 i_d 的控制作用，同样控制不仅有大小，还有方向，受控源的流向是由栅源电压 v_{gs} 的正向决定的。

3. 场效应管三种组态放大电路的比较

场效应管三种组态放大电路的结构及主要动态性能指标比较如表 3.6 所示。

表 3.6 场效应管三种组态放大电路的比较

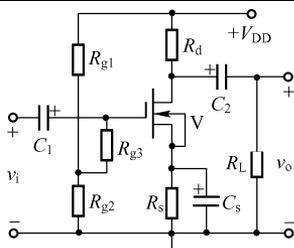
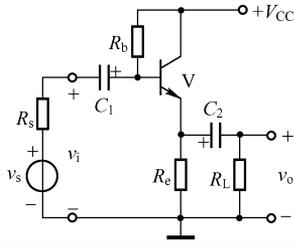
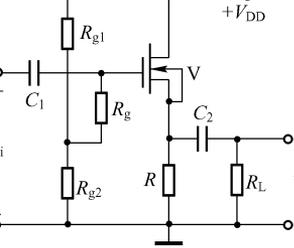
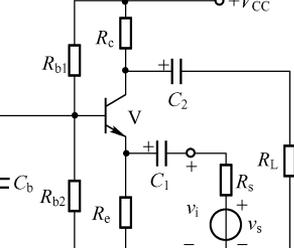
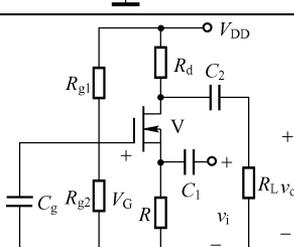
组态		电压增益 A_v	输入电阻 R_i	输出电阻 R_o
共源组态	自给偏压电路	$-g_m(R_d // R_L)$ (中等)	R_g (高)	R_d (中等)
	分压式偏置电路	$-g_m(R_d // R_L)$ (中等)	$R_{g3} + (R_{g1} // R_{g2})$ (高)	R_d (中等)
共漏组态		$\frac{g_m(R // R_L)}{1 + g_m(R // R_L)}$ (低)	$R_g + (R_{g1} // R_{g2})$ (高)	$R // \frac{1}{g_m}$ (低)
共栅组态		$g_m(R_d // R_L)$ (中等)	$R // \frac{1}{g_m}$ (低)	R_d (中等)

4. 场效应管三种组态放大电路与晶体三极管三种组态放大电路的比较

比较由场效应管与由晶体三极管构成的各种组态放大电路，可见它们只是在偏置电路和受控源的类型上有所不同。由场效应管组成共源组态、共漏组态和共栅组态放大电路的电压增益、输入电阻及输出电阻特性与由晶体三极管组成共射组态、共集组态和共基组态放大电路的电压增益、输入电阻及输出电阻特性类似，如表 3.7 所示。

表 3.7 场效应管三种组态放大电路与晶体三极管三种组态放大电路的比较

组态		电压增益 A_v	输入电阻 R_i	输出电阻 R_o
共射组态		$-\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}}$	$R_{b1} // R_{b2} // r_{be}$	R_c

组态	电压增益 A_v	输入电阻 R_i	输出电阻 R_o	
共源组态		$-g_m(R_d // R_L)$	$R_{g3} + (R_{g1} // R_{g2})$	R_d
共集组态		$\frac{(1 + \beta)(R_e // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)}$	$R_b // [r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)]$	$R_e // \frac{r_{be} + R_b // R_s}{1 + \beta}$
共漏组态		$\frac{g_m(R // R_L)}{1 + g_m(R // R_L)}$	$R_g + (R_{g1} // R_{g2})$	$R // \frac{1}{g_m}$
共基组态		$\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}}$	$R_c // \frac{r_{be}}{1 + \beta}$	R_c
共栅组态		$g_m(R_d // R_L)$	$R // \frac{1}{g_m}$	R_d

3.2.6 熟练掌握多级放大电路耦合方式及其分析

多级放大电路是将由晶体三极管或场效应管构成的单管放大电路作为一级单元电路，通过一定的方式将其一级一级连接起来构成的放大电路，使微弱的输入信号达到足够的幅度以推动负载工作。

1. 耦合方式

多级放大电路的连接方式称为多级放大电路的耦合方式，常用的耦合方式有以下三种。

(1) 直接耦合

直接耦合是将前后级直接连接或电阻连接,不采用电抗性元件。其主要优点是:

- ① 直接耦合不采用电抗性元件,便于集成;
- ② 直接耦合电路可传输低频甚至直流信号。

直接耦合的主要缺点是:

- ① 由于直接耦合是将前后级直接连接或电阻连接,因此前后级的静态工作点相互影响;
- ② 直接耦合电路可传输低频甚至直流信号,因此缓慢变化的漂移信号可以通过直接耦合

放大电路,存在着零点漂移的问题。

直接耦合适用于直流放大电路及模拟集成放大电路。

(2) 阻容耦合

阻容耦合是级间采用电容连接。其主要优点是静态工作点互不影响。

它存在的主要问题有:①阻容耦合只能传输交流信号,不能放大直流信号;②不便于集成。

(3) 变压器耦合

变压器耦合是通过变压器将前后级连接起来。其主要优点有:

- ① 变压器耦合同样具有各级静态工作点互不影响的优点;
- ② 变压器耦合可以实现输出级与负载的阻抗匹配,以获得有效的功率传输。它存在的主要问题是

不便于集成。

阻容耦合和变压器耦合常用于分立元件放大电路中。

2. 多级放大电路的分析

多级放大电路的分析是在单级放大电路分析的基础上进行的,同样分为静态分析和动态分析。

(1) 静态分析

多级放大电路静态分析时要注意多级放大电路的耦合方式是否会使静态工作点相互影响。

阻容耦合的多级放大电路,其静态工作点互不影响,其分析与单级放大电路的静态分析相同;直接耦合多级放大电路,前后级的静态工作点相互影响,分析时须找到前后级的关联点列方程求解。

(2) 动态分析

多级放大电路的动态分析是求解多级放大电路的电压增益、输入电阻及输出电阻等动态性能指标。求解这些动态性能指标时仍采用小信号模型分析法,由于阻容耦合放大电路中的耦合电容对交流短路,而直接耦合放大电路是前后级直接相连,所以阻容耦合放大电路与直接耦合放大电路的交流通路相同,动态分析时并无区别。

① 多级放大电路的电压增益

多级放大电路的电压增益等于各级放大电路的电压增益之积,即

$$\dot{A}_v = \dot{A}_{v1} \cdot \dot{A}_{v2} \cdot \dot{A}_{v3} \cdots \dot{A}_{vn} \quad (3.21)$$

要注意的是计算各级放大电路的电压增益时,必须考虑前后级的相互影响,要将第 $i+1$ 级放大电路的输入电阻作为第 i 级放大电路的负载。

② 多级放大电路的输入电阻

多级放大电路的输入电阻是第一级放大电路的输入电阻,即

$$R_i = R_{i1} \quad (3.22)$$

③ 多级放大电路的输出电阻

多级放大电路的输出电阻是最后一级放大电路的输出电阻，即

$$R_o = R_{on} \quad (3.23)$$

要正确进行多级放大电路的动态分析必须考虑前后级放大电路的相互关系。即后级放大电路等效为前级放大电路的负载，负载电阻就是后级放大电路的输入电阻；而前级放大电路可等效为后级放大电路的信号源，信号源的内阻是前级放大电路的输出电阻。多级放大电路的前后级关系如图 3.16 所示。

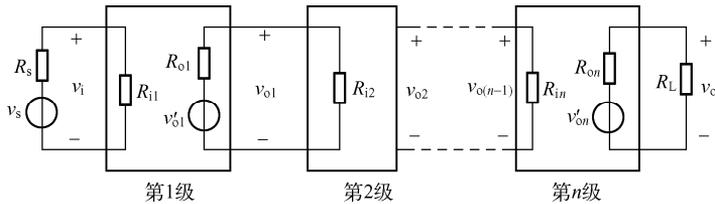


图 3.16 多级放大电路的前后级关系

3.3 解题指导

例 3.1 判断图 3.17 所示电路对交流信号有无放大作用？

解题思路：要使由晶体三极管构成的放大电路能正常放大，首先三极管必须工作在放大区，即发射结正偏，集电结反偏；要放大电路的交流信号必须能加到三极管的发射结上，使发射结电压发生变化；放大后的信号还必须能输出，即负载上有交流输出。

解：由于选用了 PNP 管因此电压 V_{CC} 的极性反了；由于直流电源 V_{BB} 对交流信号短路，因此输入信号加不到发射结上，所以在这条支路上应串入一只电阻；同样由于直流电源 V_{CC} 对交流短路，信号也输出不到负载上。

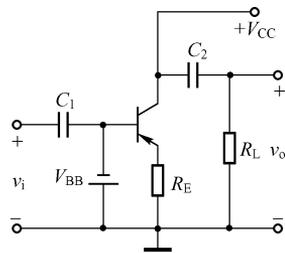


图 3.17 例 3.1 电路图

例 3.2 判断图 3.18 所示电路对交流信号有无放大作用？

解题思路：要使由场效应管构成的放大电路能正常放大，首先场效应管必须工作在恒流区（饱和区），场效应管的类型比较多，对每种类型场效应管工作在恒流区（饱和区）的外部条件必须清楚；其次还要判断要放大的交流信号是否能加到场效应管的栅极和源极上，即要放大的交流信号能使栅源电压发生变化；放大后的信号还必须能输出，即负载上有交流输出。

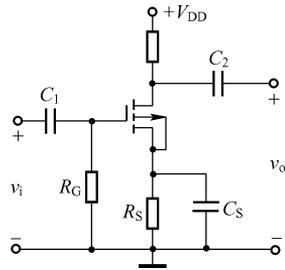


图 3.18 例 3.2 电路图

解：此电路中的场效应管是 P 沟道增强型 MOS 管，要使它工作在恒流区（饱和区），栅源间必须加负电压，漏源间加负电压。但此电路中漏源间加的是正电压，因此它不能放大信号。

例 3.3 在图 3.19 所示共射放大电路中， $\beta = 50$ ， $V_{BE} = -0.2V$ 。问当开关分别与 A 处、B 处和 C 处相接时，三极管的工作状态。

解题思路：要判断晶体三极管处于何种状态就是要分别判断发射结和集电结加的是何种极性的电压。当发射结和集电结都加正向电压时，三极管为饱和状态；当发射结和集电结都加反向电压时，三极管为截止状态；当发射结加正向电压而集电结加反向电压时，三极管

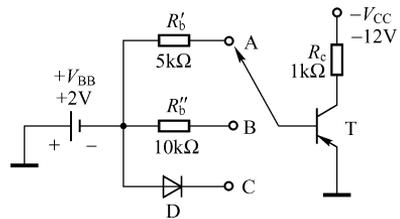


图 3.19 例 3.3 的图

为放大状态。观察图 3.19, 若发射结加的是正向电压, 那么还需通过进一步的计算来判断集电结所加电压的极性。步骤为: 首先计算出基极电流 I_B , 若三极管为放大状态, 则 $I_C = \beta I_B$, 那么由输出回路可计算出 V_{CE} 的极性, 从而可判断三极管的工作状态。

解: 当开关与 A 处相接时, 此 PNP 管发射结加的是正向电压, 首先计算出 $I_B = \frac{-2 - (-0.2)}{5} = -0.36\text{mA}$, 假设三极管处于放大状态, 则 $I_C = \beta I_B = -18\text{mA}$, $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 6\text{V}$ 。由于 PNP 管工作在放大区时 $V_{CE} < 0$, 与计算出的 $V_{CE} > 0$ 矛盾, 因此假设三极管处于放大状态不成立, 所以三极管工作在饱和状态。

同样当开关与 B 处相接时, 首先计算出 $I_B = \frac{-2 - (-0.2)}{10} = -0.18\text{mA}$, 假设三极管处于放大状态, 则 $I_C = \beta I_B = -9\text{mA}$, $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = -3\text{V} < 0$ 。因此假设三极管处于放大状态成立, 所以三极管工作在放大状态。

当开关与 C 处相接时, 发射结加的是反向电压, 所以三极管工作在截止状态。

例 3.4 基本共射放大电路如图 3.20 所示。已知: $V_{CC} = 12\text{V}$, $R_b = 510\text{k}\Omega$, $R_c = 10\text{k}\Omega$, 三极管的 $V_{BE} = 0.7\text{V}$, $\beta = 50$ 。

(1) 计算静态工作点 Q , 并分析 Q 点的设置是否合适? 如果增加输入信号的幅度, 首先出现什么失真?

(2) 当三极管和 V_{CC} 都不变时, 要使 $V_{CE} = 6\text{V}$, 可以改变哪些参数?

解题思路: 放大电路要实现不失真的放大必须要设置合适的静态工作点, 若工作点过高, 当输入信号较大时容易产生饱和失真; 若工作点过低, 当输入信号较大时容易产生截止失真。

解: (1) 在图 3.20 所示基本共射放大电路中, 将电容 C_1 、 C_2 开路, 即得到该放大电路的直流通路, 如图 3.21 所示。

由图 3.21 列输入回路的回路方程:

$$V_{CC} = I_{BQ} R_b + V_{BE}$$

可得
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b} = \frac{12 - 0.7}{510} = 0.022\text{mA}$$

再由三极管的放大特性可得:

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 1.1\text{mA}$$

最后由输出回路列回路方程:

$$V_{CC} = I_{CQ} R_c + V_{CEQ}$$

求得:

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c = 1\text{V}$$

由于 $V_{CEQ} = 1\text{V}$, 而 $V_{CC} = 12\text{V}$, 所以静态工作点 Q 靠近饱和区, 因此 Q 点设置不合适。

如果增加输入信号的幅度, 首先出现饱和失真。

(2) 由上面的分析可知, 在此放大电路中影响 Q 点的参数取决于直流电源 V_{CC} 、三极管的 V_{BE} 及基极电阻 R_b 和集电极电阻 R_c 。

因为 $V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c$, 所以当三极管和 V_{CC} 都不变时, 可改变 I_{CQ} 或 R_c 使 V_{CEQ} 发生改变。

由于 I_{CQ} 由 I_{BQ} 控制, 而 $I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b}$, 所以改变 R_b 或 R_c 可使 $V_{CEQ} = 6\text{V}$ 。

若 R_c 保持不变, 仅改变 R_b , 则

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{CEQ}}{R_c} = 0.6\text{mA} \quad I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = 0.012\text{mA} \quad R_b = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_{BQ}} = 941.67\text{k}\Omega$$

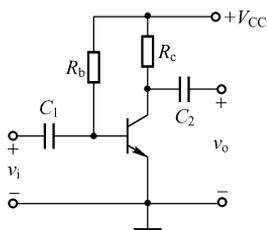


图 3.20 例 3.4 的图

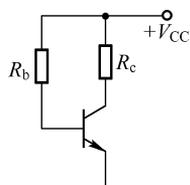


图 3.21 图 3.20 的直流通路

若 R_b 保持不变, 仅改变 R_c , 则 I_{BQ} 和 I_{CQ} 保持不变

$$R_c = \frac{V_{CC} - V_{CEQ}}{I_{CQ}} = 5.45k\Omega$$

例 3.5 图 3.22 所示为分压式偏置共射放大电路。

(1) 若电阻 R_{b1} 短路, 则此电路中的三极管处于_____。

- a. 放大工作状态 b. 饱和工作状态
c. 截止工作状态 d. 工作状态不确定

(2) 若负载开路, 则此电路静态工作点 I_{CQ} _____, 输出

电压 v_o _____。

- a. 增大 b. 减小 c. 不变或基本不变 d. 不能确定

(3) 若 R_c 增大, 则此电路的输入电阻 R_i _____, 输出电阻 R_o _____; 若 R_L 减小, 则此电路的输入电阻 R_i _____, 输出电阻 R_o _____。

- a. 增大 b. 减小 c. 不变或基本不变 d. 不能确定

解题思路: (1) 若电阻 R_{b1} 短路, 则三极管的发射结和集电结加的都是正向电压, 那么三极管处于饱和工作状态。

(2) 静态工作点由直流通路确定, 在此电路中与负载无关。

因为 $v_o = A_v \cdot v_i$, 所以要判断负载与 v_o 的关系实质上就是判断负载与 A_v 的关系, 由于此放大电路的 $A_v = \frac{-\beta(R_c // R_L)}{r_{be}}$, 可见负载开路时 A_v 增大。

(3) 由于此放大电路的输入电阻 $R_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be}$, 若 R_c 增大, 会改变电路的静态工作点 Q , r_{be} 增大, 因此 R_i 增大; 负载 R_L 变化时, 静态工作点不受影响, 则 r_{be} 不变, 因此 R_i 也不变; 此放大电路的输出电阻只取决于 R_c 。

解: (1) b; (2) c, a; (3) a, c, c, c

例 3.6 某放大电路在负载开路时测得电路的输出电压为 4V; 接上 $3k\Omega$ 的负载后, 测得输出电压为 2V。据此可计算出该放大电路的输出电阻是多少?

解题思路: 放大电路的输出电阻是放大电路输出端看进去的等效电阻, 其定义为: $R_o = \dot{V}_o / \dot{I}_o |_{V_s=0, R_L=\infty}$ 。由于放大电路对负载来说可等效为信号源, 信号源的内阻就是放大电路的输出电阻, 如图 3.23 所示。所以输出电阻也可用实验的方法测得:

首先在输入端加正弦信号, 测量 R_L 开路时的输出电压 V'_o , 再接入

$$R_L, \text{ 测量输出电压 } V_o, \text{ 则有 } R_o = \left(\frac{V'_o}{V_o} - 1 \right) \cdot R_L$$

解: $R_o = \left(\frac{V'_o}{V_o} - 1 \right) \cdot R_L = 3k\Omega$

例 3.7 如图 3.24 所示电路中, 已知 $V_{BE} = 0.7V$, $\beta = 100$, $r_{bb'} = 200\Omega$, $R_{b2} = 300k\Omega$, $R_c = 1k\Omega$, $R_L = 4.9k\Omega$, $V_{CC} = 12V$, $I_{CQ} = 1mA$, $V_{CEQ} = 6V$ 。

试求: (1) R_c 、 R_{b1} 的值; (2) 电压放大倍数 A_v 、输入电阻 R_i 及输出电阻 R_o 。

解题思路: 该题已知静态工作点 Q 参数, 要求 R_c 、 R_{b1} 的值只需进行静态分析即可; 动态性能指标用小信号模型法解得。

解: (1) 首先画出直流通路如图 3.25 所示。

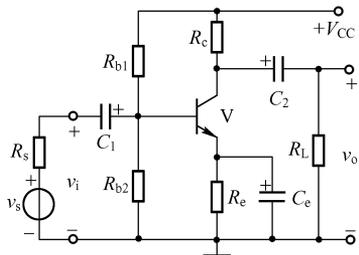


图 3.22 例 3.5 的图

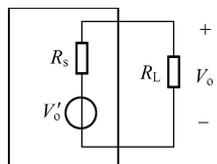


图 3.23 放大电路输出电压与负载的关系

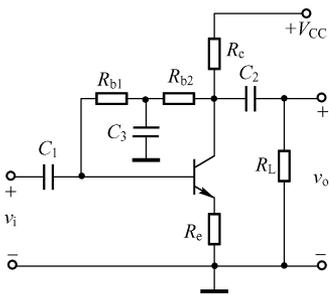


图 3.24 例 3.7 电路图

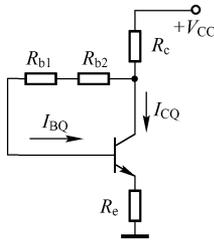


图 3.25 图 3.24 的直流通路

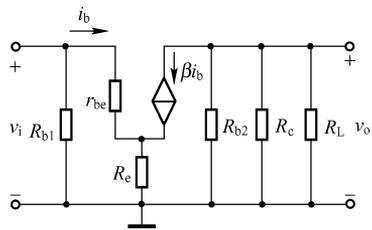


图 3.26 图 3.24 的小信号等效电路

因为 $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$, 所以 $I_{BQ} = I_{CQ} / \beta = 1/100 = 0.01\text{mA}$ 。

由图 3.25 列输出回路方程:

$$V_{CC} = (I_{CQ} + I_{BQ})R_c + V_{CEQ} + I_{EQ}R_e$$

$$R_c = \frac{V_{CC} - V_{CEQ} - I_{EQ}R_e}{I_{CQ} + I_{BQ}} = \frac{12 - 6 - 101 \times 0.01 \times 1}{1 + 0.01} \approx 4.9\text{k}\Omega$$

可得

由图 3.25 列输入回路方程:

$$V_{CC} = (I_{CQ} + I_{BQ})R_c + I_{BQ}(R_{b1} + R_{b2}) + V_{BE} + I_{EQ}R_e$$

可得

$$R_{b1} = \frac{V_{CC} - (I_{BQ} + I_{CQ})R_c - V_{BE} - I_{EQ}R_e}{I_{BQ}} - R_{b2}$$

$$= \frac{12 - 1.01 \times 4.9 - 0.7 - 1.01 \times 1}{0.01} - 300 \approx 234\text{k}\Omega$$

(2) 首先画出图 3.24 的小信号等效电路, 如图 3.26 所示。

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_E} = 2.8\text{k}\Omega$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{\beta(R_{b2} // R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} \approx -2.36$$

$$R_i = R_{b1} // [r_{be} + (1 + \beta)R_e] \approx 71.9\text{k}\Omega$$

$$R_o = R_{b2} // R_c \approx R_c \approx 4.9\text{k}\Omega$$

例 3.8 如图 3.27 所示电路中, 已知 $R_B = 260\text{k}\Omega$, $R_E = R_L = 5.1\text{k}\Omega$, $R_S = 500\Omega$, $V_{CC} = 12\text{V}$, $|V_{BE}| = 0.6\text{V}$, $\beta = 50$, $r_{bb'} = 200\Omega$ 。

试求: (1) 静态工作点 Q ; (2) 电压放大倍数 A_v , 输入电阻 R_i 及输出电阻 R_o 。

解题思路: 首先观察电路可知信号由基极加入, 由发射极输出, 所以这是一个共集电极组态的放大电路。要保证此三极管工作在放大区, 需 $V_E > V_B > V_C$, 由于这里用的是正电源, 因此发射极接到电源。由 PNP 管组成的放大电路的分析与由 NPN 管组成的放大电路的分析完全相同。

$$\text{解: (1) } I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E} \approx 22\mu\text{A}, \quad I_C = \beta I_B = 1.1\text{mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_E R_E = 6.27\text{V}, \quad r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_E} \approx 1.38\text{k}\Omega$$

$$(2) A_v = \frac{(1 + \beta)(R_E // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)} \approx 0.99$$

$$R_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)] \approx 87.3\text{k}\Omega$$

$$R_o = R_E // \frac{r_{be} + R_B // R_S}{1 + \beta} \approx 37\Omega$$

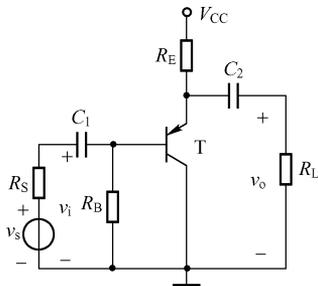


图 3.27 例 3.8 电路图

例 3.9 分析如图 3.28 所示的放大电路，试求：

(1) 静态工作点 Q ；(2) 电压放大倍数 A_v ，输入电阻 R_i 及输出电阻 R_o 。

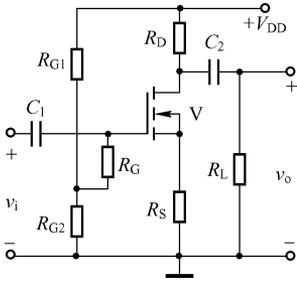


图 3.28 例 3.9 电路图

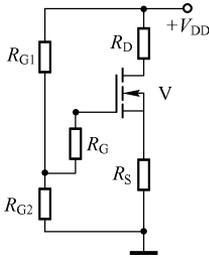


图 3.29 图 3.28 的直流通路

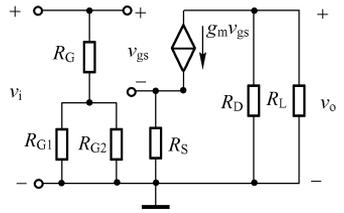


图 3.30 图 3.28 的小信号等效电路

解题思路：由场效应管组成的放大电路的分析与由晶体三极管组成的放大电路的分析完全一致，首先进行静态分析，然后再进行动态分析。

解：(1) 静态分析：首先画出电路的直流通路，如图 3.29 所示。

由于 $I_G = 0$ ，所以栅极电压为

$$V_G = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD}$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} - I_D R_S \quad (1)$$

由增强型 MOSFET 的转移特性表达式，有

$$I_D = I_{D0} \left(\frac{V_{GS}}{V_T} - 1 \right)^2 \quad (2)$$

联立 (1)、(2) 两式，可求得 V_{GS} 及 I_D 。

最后由输出回路列回路方程，可得：

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S)$$

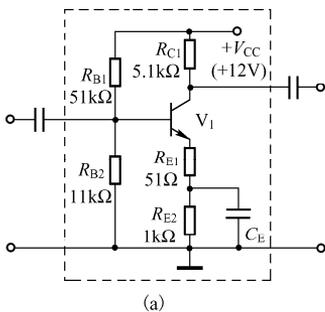
(2) 动态分析：首先画出电路的小信号等效电路，如图 3.30 所示。

由图 3.30 根据定义可得：

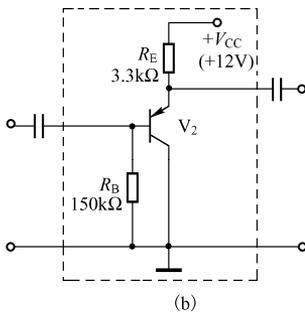
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-g_m v_{gs} (R_D // R_L)}{v_{gs} + g_m v_{gs} R_S} = \frac{-g_m (R_D // R_L)}{1 + g_m R_S}$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_G + (R_{G1} // R_{G2}), \quad R_o = \frac{v_o}{i_o} \Big|_{v_s=0, R_L=\infty} = R_D$$

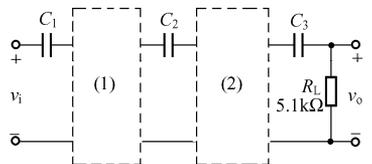
例 3.10 基本放大电路如图 3.31 (a)、(b) 所示，其中晶体管 V_1 的 β_1 为 150、 V_2 的 β_2 为 50， $r_{bb'}$ 均为 200Ω ， $|V_{BE}|$ 均为 $0.7V$ 。请选择合适的组态，接成一个带负载能力尽可能强的两级放大电路（画出图 3.31 (c) 虚线框中的部分），并计算 A_v ， R_i ， R_o 。



(a)



(b)



(c)

图 3.31 例 3.10 图

解题思路：图 (a) 是共发射极组态的放大电路，图 (b) 是共集电极组态的放大电路。要由这两个基本放大电路接成一个带负载能力尽可能强的两级放大电路就必须考虑这两种组态放大电路的特点，由于共集电极组态放大电路的输出电阻小，带负载能力强，所以图 (b) 要作为输出级。电路连接如图 3.32 所示。

为了计算 A_v 、 R_i 、 R_o ，需计算 V_1 、 V_2 的 r_{be} ，因此对每级放大电路要先进行静态分析，求 I_E 。

解：由于两级电路采用的是阻容耦合，因此静态工作点互不影响。

第一级：由于 $(1 + \beta_1)[R_{E1} + R_{E2}] > 10(R_{B1} // R_{B2})$ ，可采用近似估算法：

$$V_{B1} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} = \frac{11}{51 + 11} \times 12 = 2.13 \text{ V}, \quad I_{E1} = \frac{V_{B1} - V_{BE}}{R_{E1} + R_{E2}} = \frac{2.13 - 0.7}{0.051 + 1} = 1.36 \text{ mA}$$

$$r_{be1} = r_{bb'} + (1 + \beta_1) \frac{26}{I_{E1}} = 3.09 \text{ k}\Omega$$

第二级：由输入回路列回路方程

$$V_{CC} = I_{E2} R_E + |V_{BE}| + I_{B2} R_B$$

$$I_{E2} = \frac{V_{CC} - |V_{BE}|}{R_E + \frac{R_B}{1 + \beta_2}} = 1.81 \text{ mA}, \quad r_{be2} = r_{bb'} + (1 + \beta_2) \frac{26}{I_{E2}} = 0.93 \text{ k}\Omega$$

$$\dot{A}_v = \dot{A}_{v1} \cdot \dot{A}_{v2}$$

$$\dot{A}_{v1} = -\beta_1 \frac{R_{C1} // R_{L1}}{r_{be1} + (1 + \beta_1) R_{E1}}$$

其中

而 R_{L1} 就是第二级放大电路的输入电阻

$$R_{L1} = R_B // [r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_E // R_L)]$$

$$\dot{A}_{v2} = \frac{(1 + \beta_2)(R_E // R_L)}{r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_E // R_L)}$$

带入参数可计算出

$$\dot{A}_v = \dot{A}_{v1} \cdot \dot{A}_{v2} = -64.68$$

$$R_i = R_{i1} = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be1} + (1 + \beta_1) R_{E1}] = 4.9 \text{ k}\Omega$$

$$R_o = R_E // \frac{r_{be2} + R_B // R_{o1}}{1 + \beta_2}$$

而 R_{o1} 就是第一级放大电路的输出电阻， $R_{o1} = R_{C1}$ ，带入参数可计算出 $R_o = 0.11 \text{ k}\Omega$ 。

例 3.11 图 3.33 所示为两级放大电路，已知两三极管的电流放大系数均为 β ，输入电阻为 r_{be} ，试写出放大电路的输入电阻和输出电阻的表达式。

解题思路：多级放大电路的输入电阻是第一级放大电路的输入电阻，即 $R_i = R_{i1}$ ，当第一级放大电路为共集电极组态的放大电路时，由于共集电极组态放大电路的输入电阻和它的负载有关，而它的负载是下一级放大电路的输入电阻，所以它的输入电阻与下一级放大电路的输入电阻有关。多级放

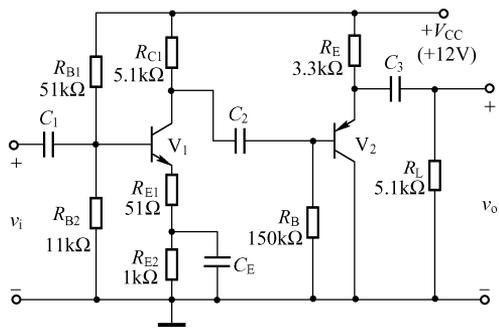


图 3.32 例 3.10 电路连接图

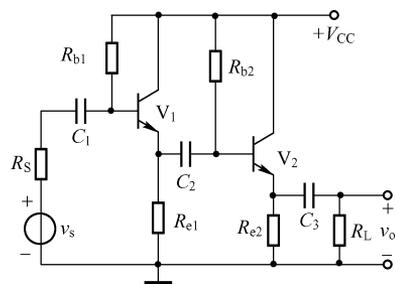


图 3.33 例 3.11 电路图

大电路的输出电阻是最后一级放大电路的输出电阻，即 $R_o = R_{on}$ 。当最后一级放大电路是共集电极组态的放大电路时，由于共集电极组态放大电路的输出电阻和它的信号源内阻有关，而它的信号源内阻是前一级放大电路的输出电阻，所以它的输出电阻与前一级放大电路的输出电阻有关。

解： $R_i = R_{i1} = R_{b1} // [r_{be} + (1 + \beta)(R_{e1} // R_{L1})]$ ， $R_{L1} = R_{i2} = R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta)(R_{e2} // R_L)]$
 $R_o = R_{o2} = R_{e2} // \frac{r_{be} + R_{b2} // R_{o1}}{1 + \beta}$ ， $R_{o1} = R_{e1} // \frac{r_{be} + R_s // R_{b1}}{1 + \beta}$

由以上分析可知，由共集-共集构成的多级放大电路，可使其输入电阻更大，输出电阻更小。

例 3.12 如图 3.34 所示的两级放大电路，静态工作点合适，且场效应管 V_1 的 g_m ，三极管 V_2 的 β 、 r_{be} 也均为已知，试写出 A_v 、 R_i 和 R_o 的表达式。

解题思路： 无论是何种三极管构成的多级放大电路，求解的关键是注意前后级的相互关系。

解： $A_{v1} = -\frac{g_m(R_D // r_{be})}{1 + g_m R_{S1}}$ ， $A_{v2} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be}}$
 $A_v = A_{v1} \cdot A_{v2}$
 $R_i = R_G + (R_{G1} // R_{G2})$ ， $R_o = R_C$

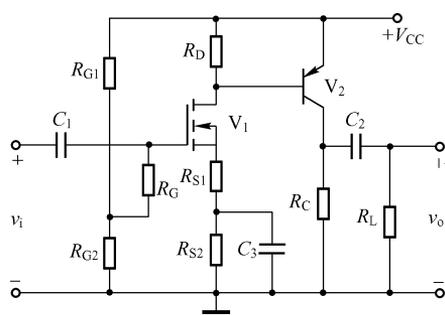


图 3.34 例 3.12 电路图