

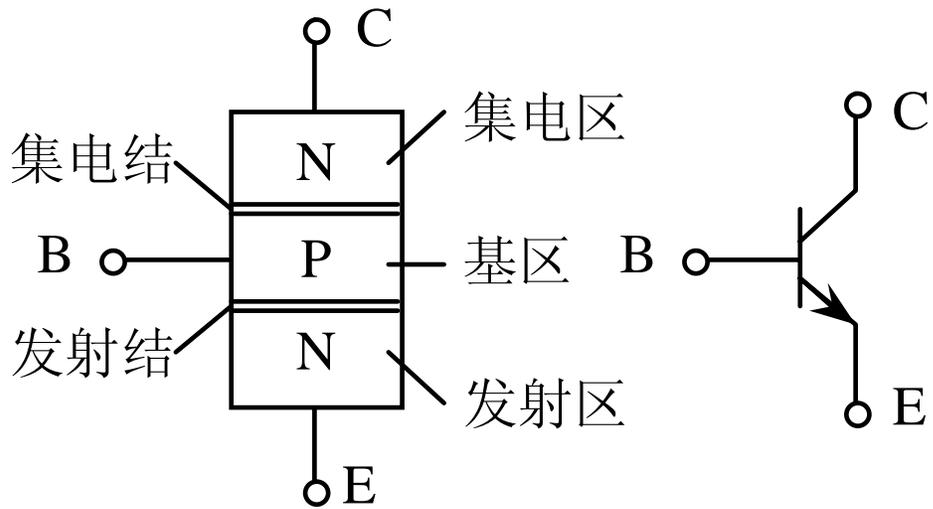
半导体三极管

三极管的结构及类型

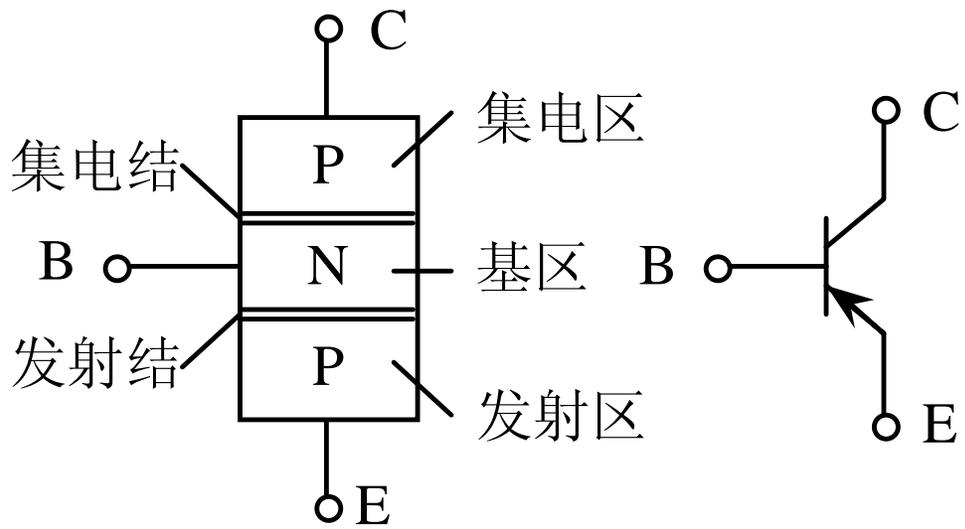
半导体三极管是由两个背靠背的PN结构成的。在工作过程中，两种载流子（电子和空穴）都参与导电，故又称为双极型晶体管，简称晶体管或三极管。

两个PN结，把半导体分成三个区域。这三个区域的排列，可以是N-P-N，也可以是P-N-P。因此，三极管有两种类型：NPN型和PNP型。

NPN型



PNP型



箭头方向表示发射结加正向电压时的电流方向

电流分配和电流放大作用

(1) 产生放大作用的条件

内部: a) 发射区杂质浓度 \gg 基区 \gg 集电区

b) 基区很薄

外部: 发射结正偏, 集电结反偏

(2) 三极管内部载流子的传输过程

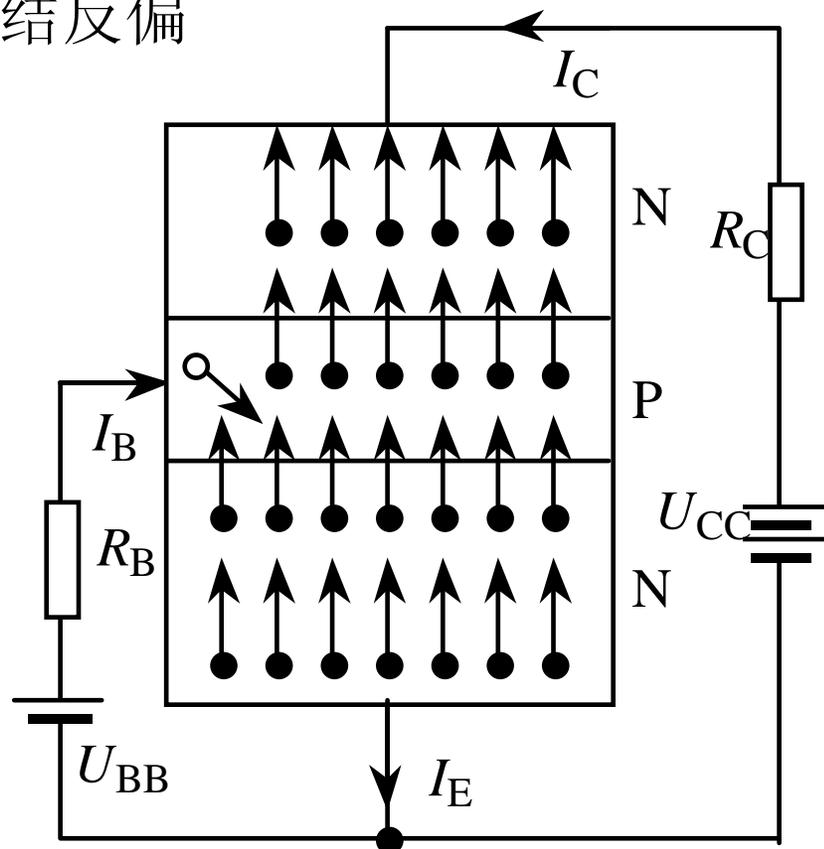
a) 发射区向基区注入电子, 形成发射极电流 i_E

b) 电子在基区中的扩散与复合, 形成基极电流 i_B

c) 集电区收集扩散过来的电子, 形成集电极电流 i_C

(3) 电流分配关系:

$$i_E = i_C + i_B$$

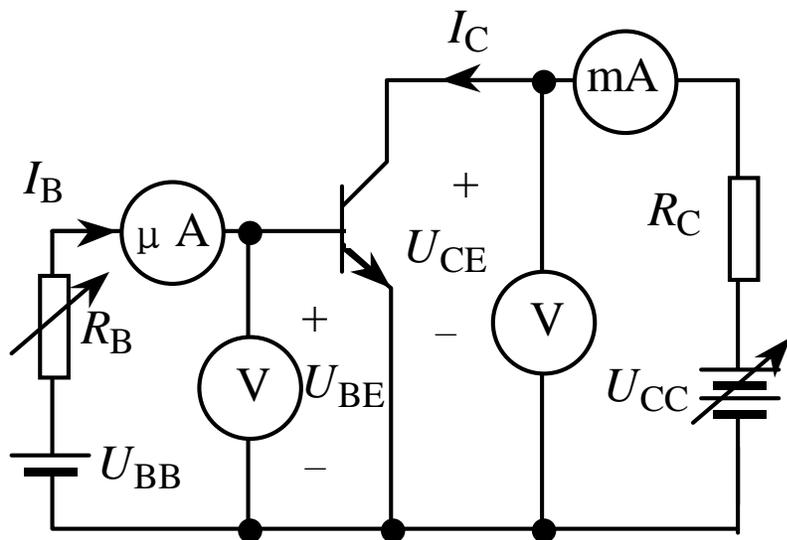


实验表明 I_C 比 I_B 大数十至数百倍，因而有。 I_B 虽然很小，但对 I_C 有控制作用， I_C 随 I_B 的改变而改变，即基极电流较小的变化可以引起集电极电流较大的变化，表明基极电流对集电极具有小量控制大量的作用，这就是三极管的电流放大作用。

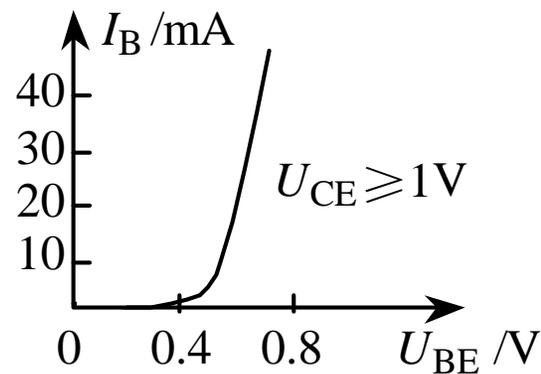
三极管的特性曲线

1. 输入特性曲线

与二极管类似



测量三极管特性的实验电路



三极管的输入特性曲线

2. 输出特性曲线

(1) 放大区：发射极正向偏置，集电结反向偏置

$$i_C = \beta i_B$$

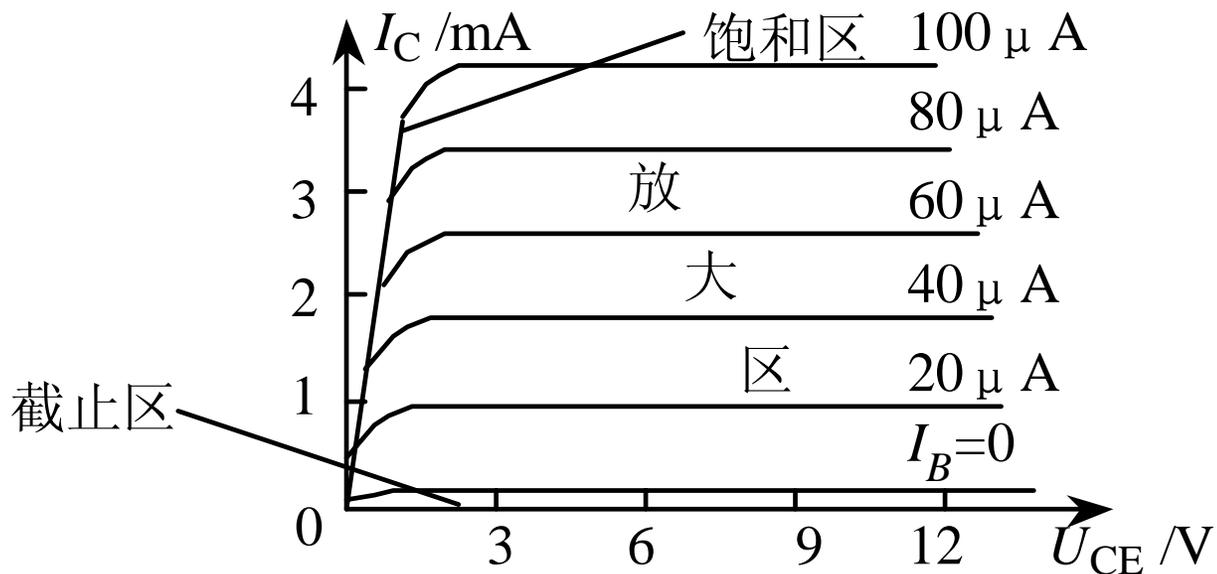
(2) 截止区：发射结反向偏置，集电结反向偏置

$$i_B \leq 0, i_C \approx 0$$

(3) 饱和区：发射结正向偏置，集电结正向偏置

$$i_B > 0, u_{BE} > 0, u_{CE} \leq u_{BE}$$

此时 $i_C \neq \beta i_B$



三极管的主要参数

1、电流放大系数 β : $i_C = \beta i_B$

2、极间反向电流 i_{CBO} 、 i_{CEO} : $i_{CEO} = (1 + \beta) i_{CBO}$

3、极限参数

(1) 集电极最大允许电流 I_{CM} : β 下降到额定值的 $2/3$ 时所允许的最大集电极电流。

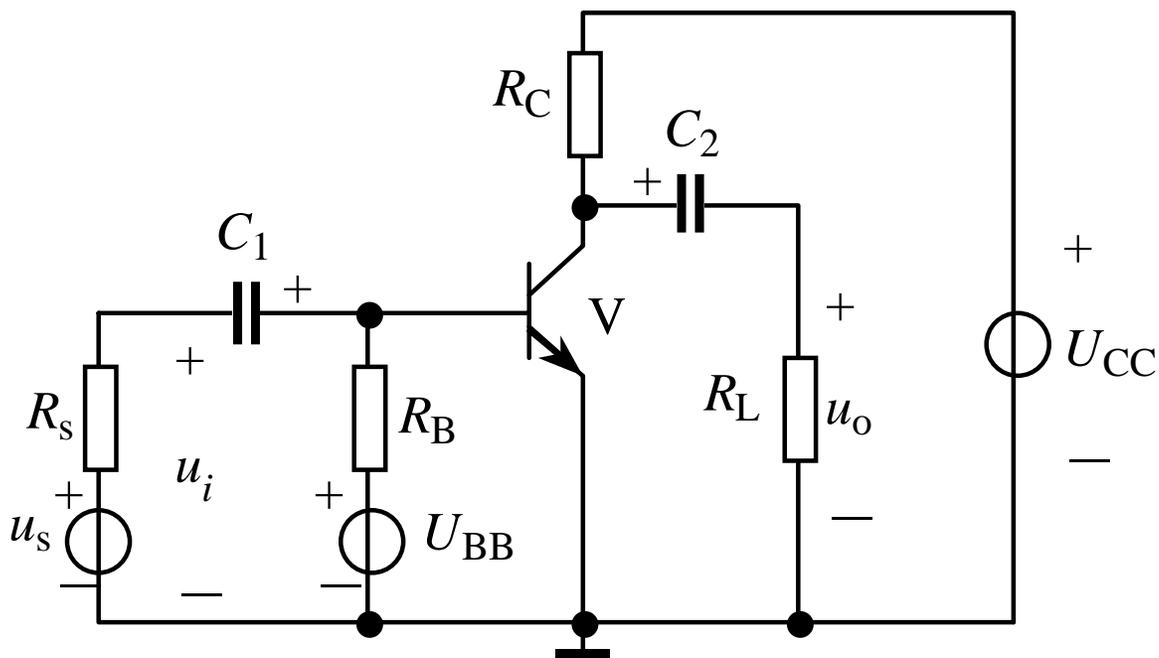
(2) 反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$: 基极开路时, 集电极、发射极间的最大允许电压。

(3) 集电极最大允许功耗 P_{CM} 。

三极管单管放大电路

放大的实质：用较小的信号去控制较大的信号。

共发射极基本放大电路的组成及工作原理



(1) 晶体管V。放大元件，用基极电流 i_B 控制集电极电流 i_C 。

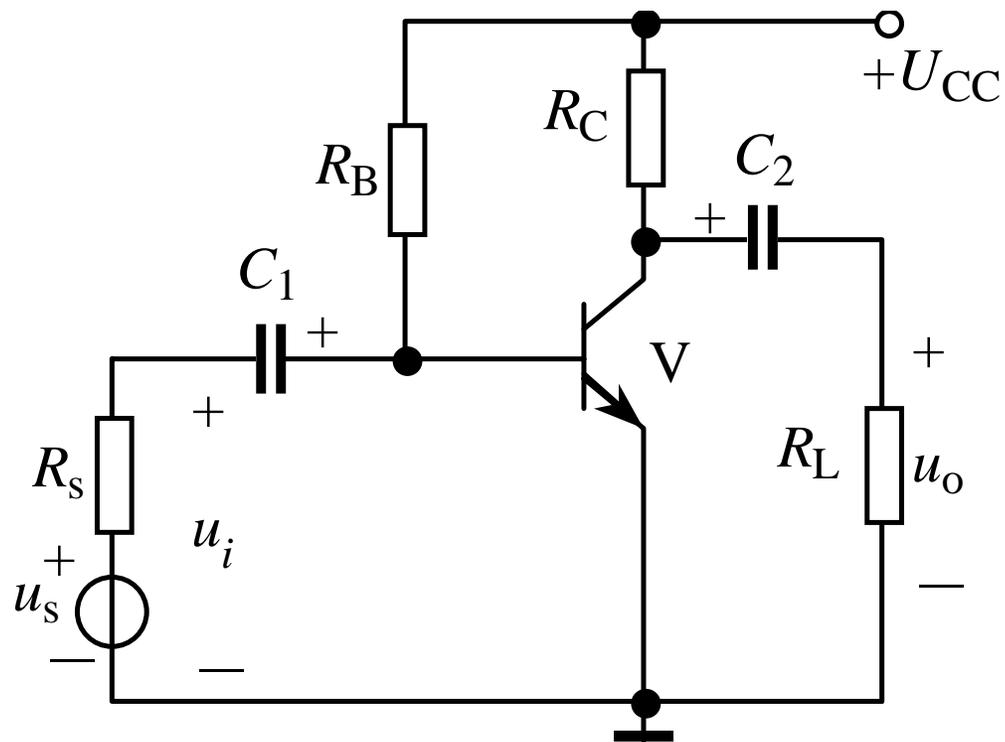
(2) 电源 U_{CC} 和 U_{BB} 。使晶体管的发射结正偏，集电结反偏，晶体管处在放大状态，同时也是放大电路的能量来源，提供电流 i_B 和 i_C 。 U_{CC} 一般在几伏到十几伏之间。

(3) 偏置电阻 R_B 。用来调节基极偏置电流 I_B ，使晶体管有一个合适的工作点，一般为几十千欧到几百千欧。

(4) 集电极负载电阻 R_C 。将集电极电流 i_C 的变化转换为电压的变化，以获得电压放大，一般为几千欧。

(5) 电容 C_1 、 C_2 。用来传递交流信号，起到耦合的作用。同时，又使放大电路和信号源及负载间直流相隔离，起隔直作用。为了减小传递信号的电压损失， C_1 、 C_2 应选得足够大，一般为几微法至几十微法，通常采用电解电容器。

共发射极放大电路的实用电路

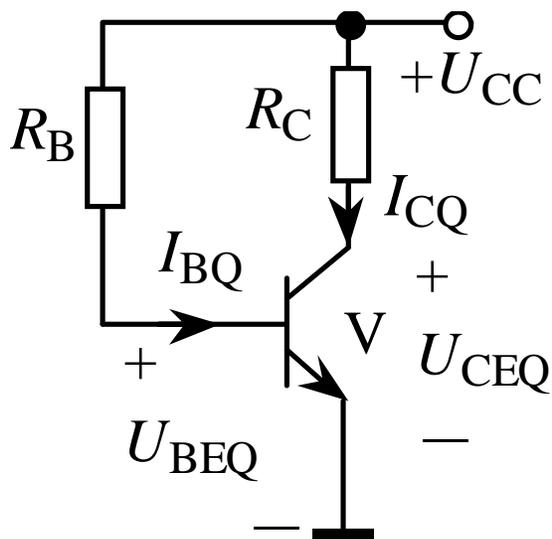


共发射极基本放大电路的静态分析

静态是指无交流信号输入时，电路中的电流、电压都不变的状态，静态时三极管各极电流和电压值称为静态工作点 Q （主要指 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和 U_{CEQ} ）。静态分析主要是确定放大电路中的静态值 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 。

1. 估算法

直流通路：耦合电容可视为开路。



$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BEQ}}{R_B}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ} R_C$$

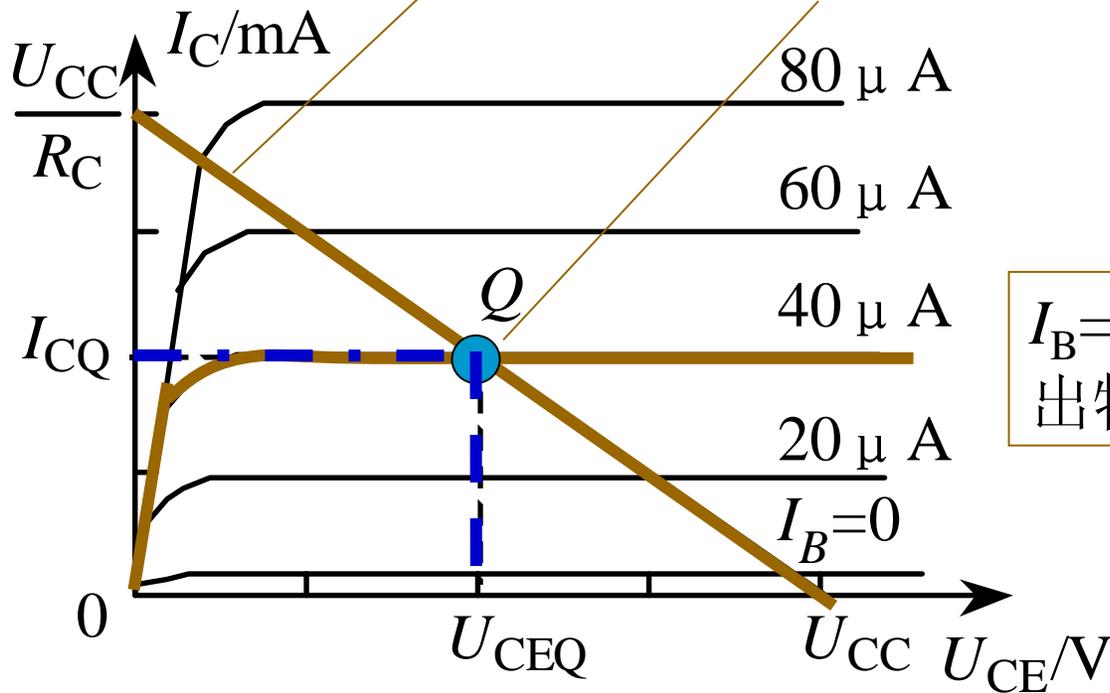
2. 图解法

图解步骤:

- (1) 用估算法求出基极电流 I_{BQ} (如 $40\ \mu\text{A}$)。
- (2) 根据 I_{BQ} 在输出特性曲线中找到对应的曲线。
- (3) 作直流负载线。根据集电极电流 I_C 与集、射间电压 U_{CE} 的关系式 $U_{CE}=U_{CC}-I_C R_C$ 可画出一条直线, 该直线在纵轴上的截距为 U_{CC}/R_C , 在横轴上的截距为 U_{CC} , 其斜率为 $-1/R_C$, 只与集电极负载电阻 R_C 有关, 称为直流负载线。
- (4) 求静态工作点 Q , 并确定 U_{CEQ} 、 I_{CQ} 的值。晶体管的 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 既要满足 $I_B=40\ \mu\text{A}$ 的输出特性曲线, 又要满足直流负载线, 因而晶体管必然工作在它们的交点 Q , 该点就是静态工作点。由静态工作点 Q 便可在坐标上查得静态值 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 。

由 $U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$ 所决定的直流负载线

两者的交点Q就是静态工作点



$I_B = 40 \mu A$ 的输出特性曲线

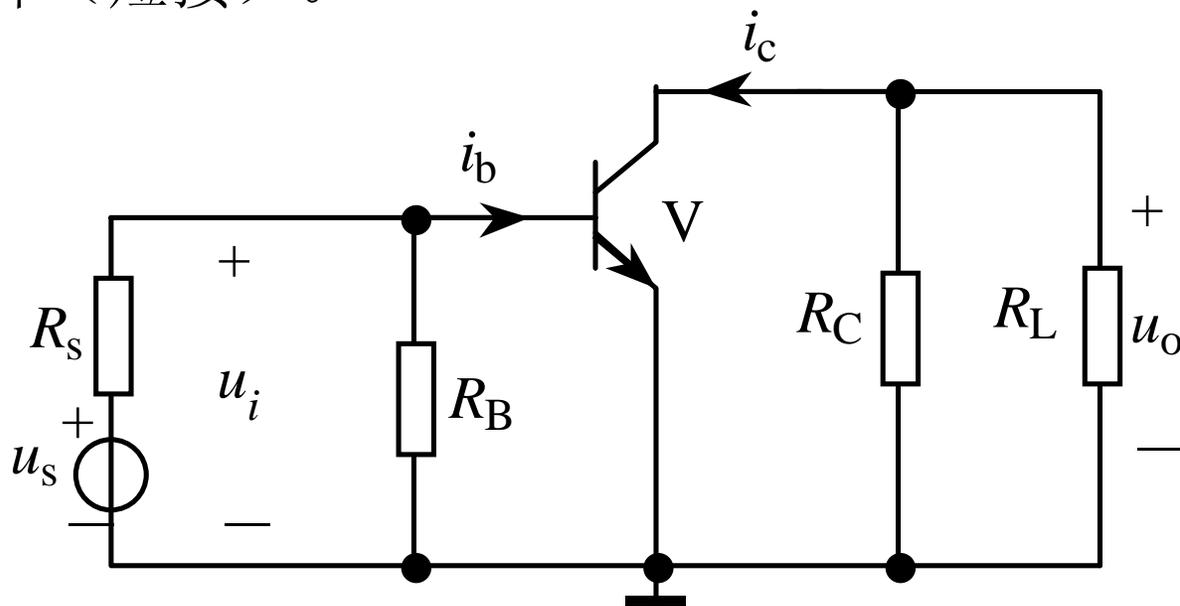
过Q点作水平线，在纵轴上的截距即为 I_{CQ}

过Q点作垂线，在横轴上的截距即为 I_{CQ}

共发射极基本放大电路的动态分析

动态是指有交流信号输入时，电路中的电流、电压随输入信号作相应变化的状态。由于动态时放大电路是在直流电源 U_{CC} 和交流输入信号 u_i 共同作用下工作，电路中的电压 u_{CE} 、电流 i_B 和 i_C 均包含两个分量。

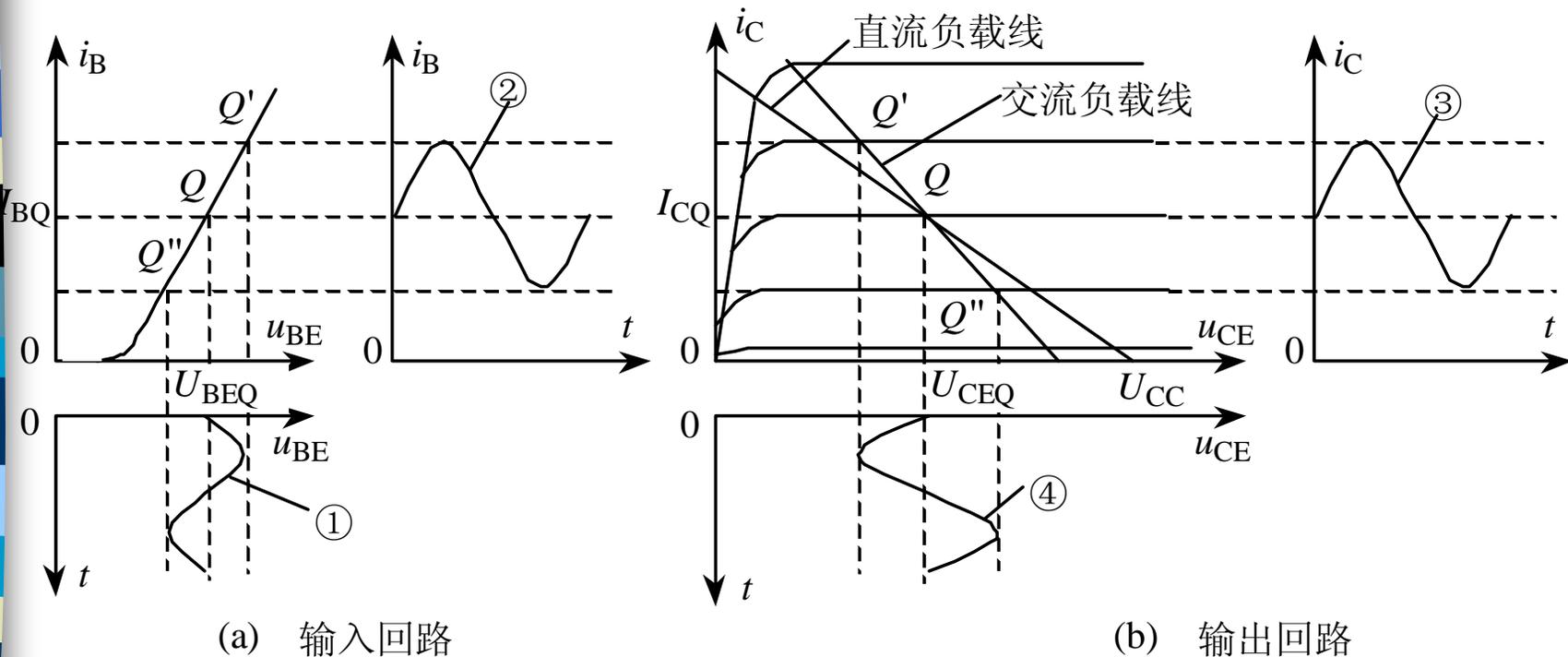
交流通路：（ u_i 单独作用下的电路）。由于电容 C_1 、 C_2 足够大，容抗近似为零（相当于短路），直流电源 U_{CC} 去掉（短接）。



1. 图解法

图解步骤:

- (1) 根据静态分析方法, 求出静态工作点 Q 。
- (2) 根据 u_i 在输入特性上求 u_{BE} 和 i_B 。
- (3) 作交流负载线。
- (4) 由输出特性曲线和交流负载线求 i_C 和 u_{CE} 。



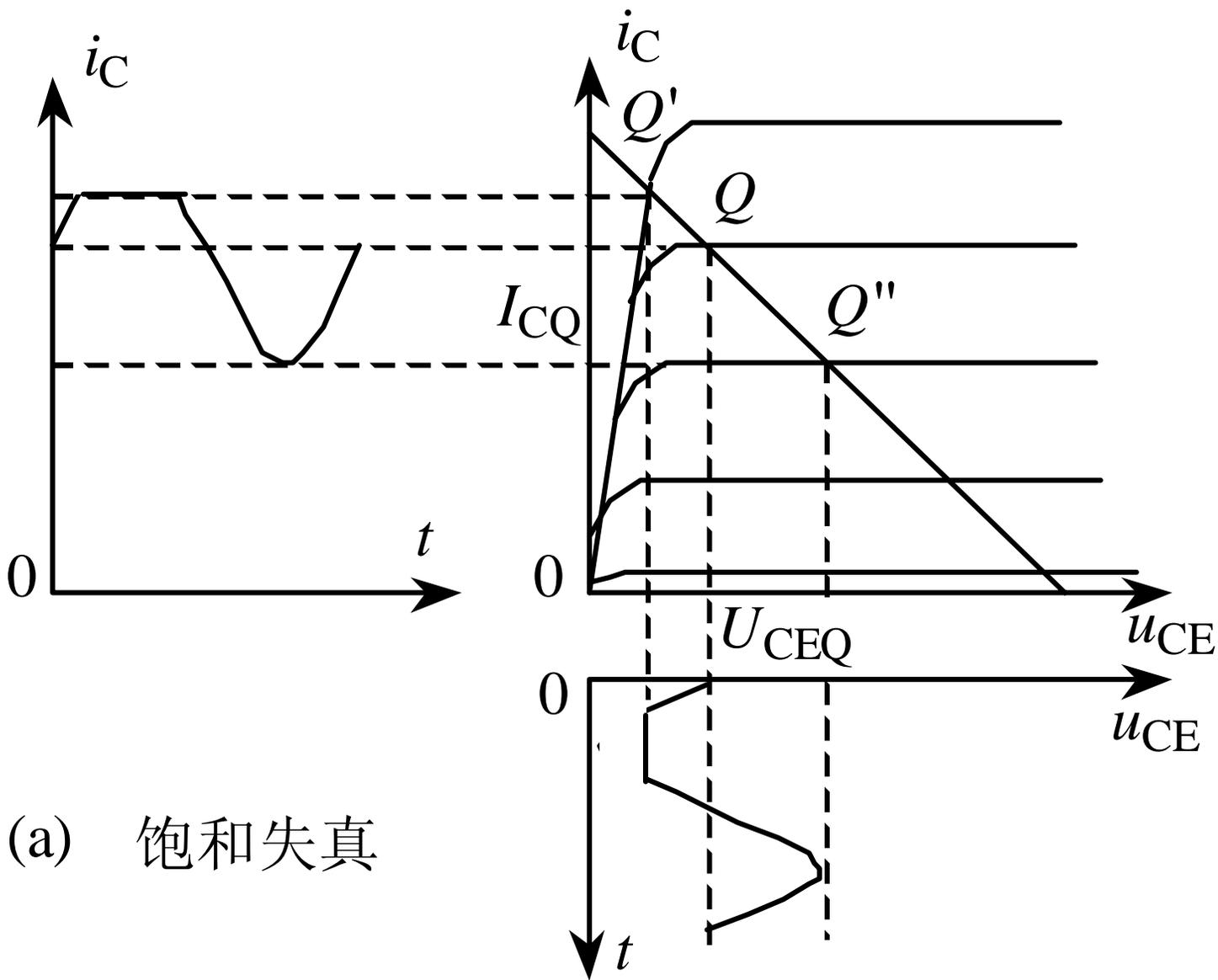
从图解分析过程，可得出如下几个重要结论：

(1) 放大器中的各个量 u_{BE} ， i_B ， i_C 和 u_{CE} 都由直流分量和交流分量两部分组成。

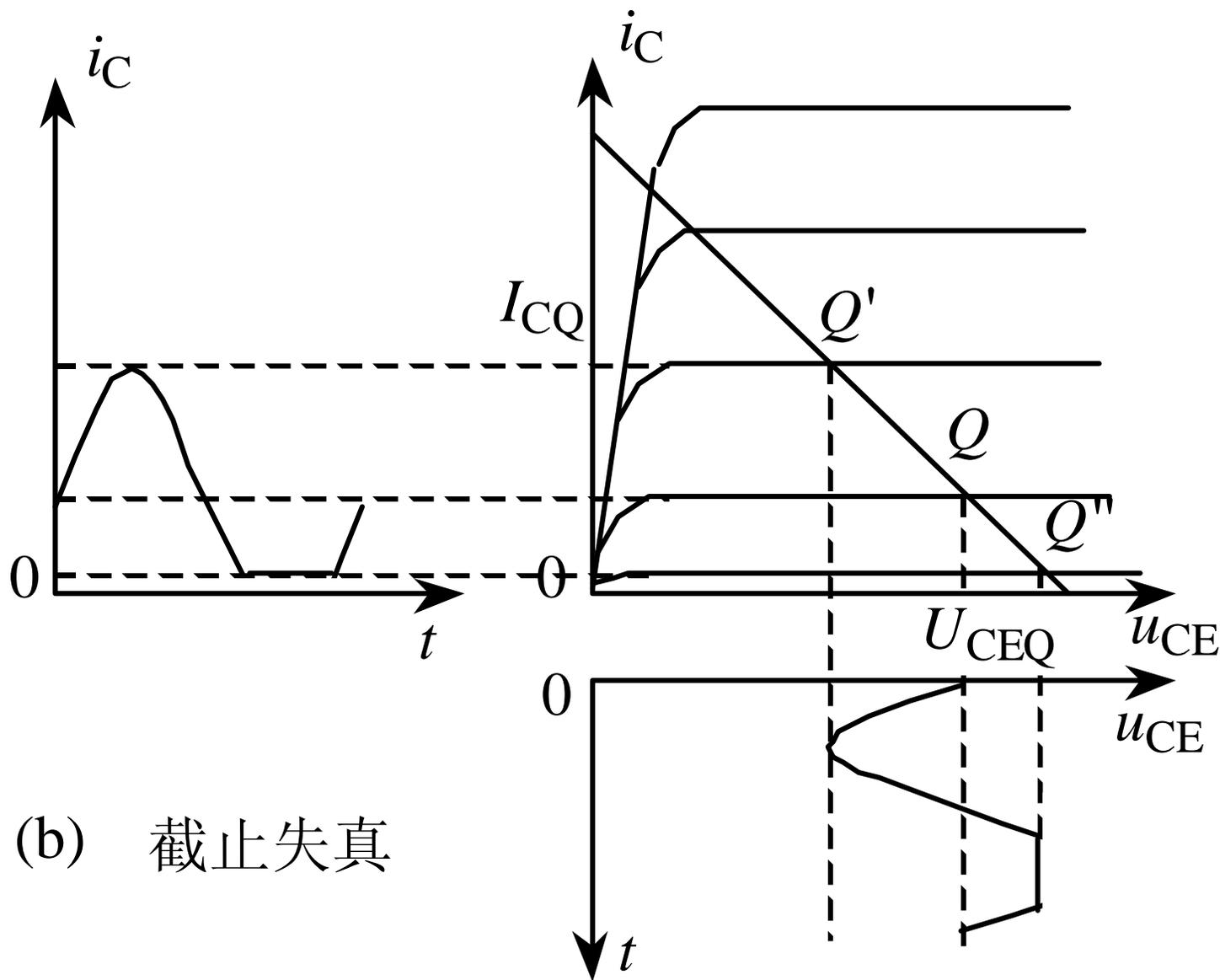
(2) 由于 C_2 的隔直作用， u_{CE} 中的直流分量 U_{CEQ} 被隔开，放大器的输出电压 u_o 等于 u_{CE} 中的交流分量 u_{ce} ，且与输入电压 u_i 反相。

(3) 放大器的电压放大倍数可由 u_o 与 u_i 的幅值之比或有效值之比求出。负载电阻 R_L 越小，交流负载电阻 R_L' 也越小，交流负载线就越陡，使 U_{om} 减小，电压放大倍数下降。

(4) 静态工作点 Q 设置得不合适，会对放大电路的性能造成影响。若 Q 点偏高，当 i_b 按正弦规律变化时， Q' 进入饱和区，造成 i_c 和 u_{ce} 的波形与 i_b （或 u_i ）的波形不一致，输出电压 u_o （即 u_{ce} ）的负半周出现平顶畸变，称为饱和失真；若 Q 点偏低，则 Q'' 进入截止区，输出电压 u_o 的正半周出现平顶畸变，称为截止失真。饱和失真和截止失真统称为非线性失真。



(a) 饱和失真



(b) 截止失真

2. 微变等效电路法

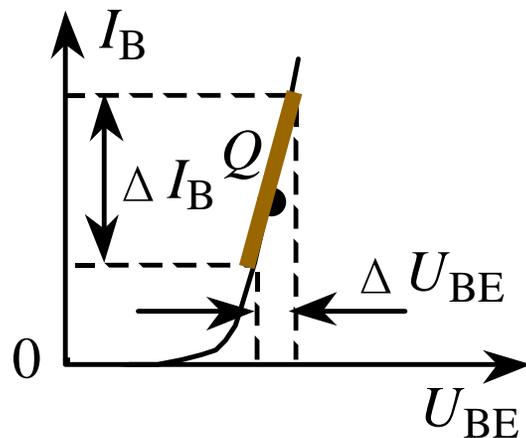
(1) 基本思路

把非线性元件晶体管所组成的放大电路等效成一个线性电路，就是放大电路的微变等效电路，然后用线性电路的分析方法来分析，这种方法称为微变等效电路分析法。**等效的条件**是晶体管在小信号（微变量）情况下工作。这样就能在静态工作点附近的小范围内，用直线段近似地代替晶体管的特性曲线。

(2) 晶体管微变等效电路

输入特性曲线在 Q 点附近的微小范围内可以认为是线性的。当 u_{BE} 有一微小变化 ΔU_{BE} 时，基极电流变化 ΔI_B ，两者的比值称为三极管的动态输入电阻，用 r_{be} 表示，即：

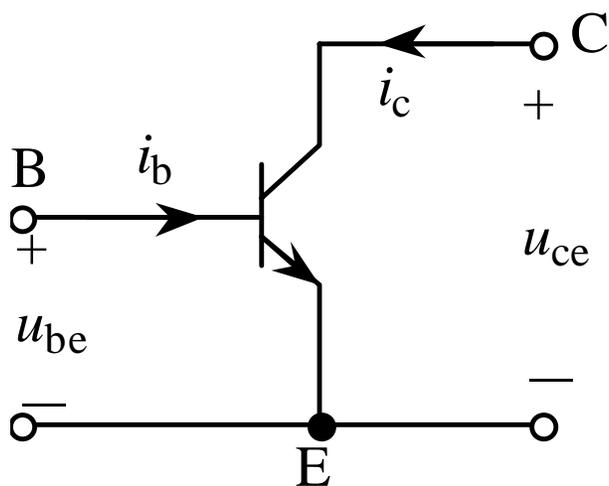
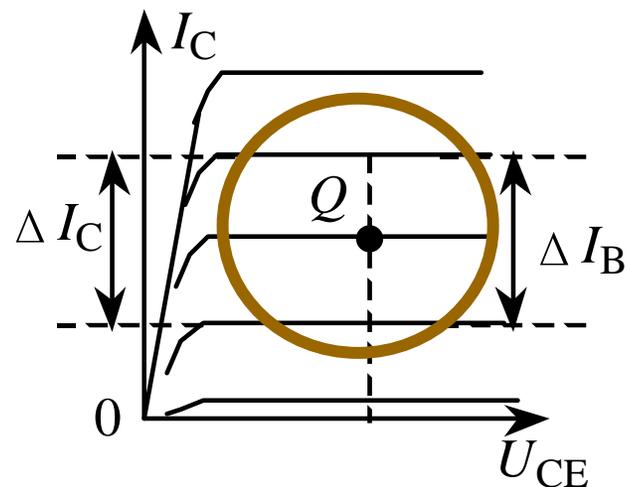
$$r_{be} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{u_{be}}{i_b}$$



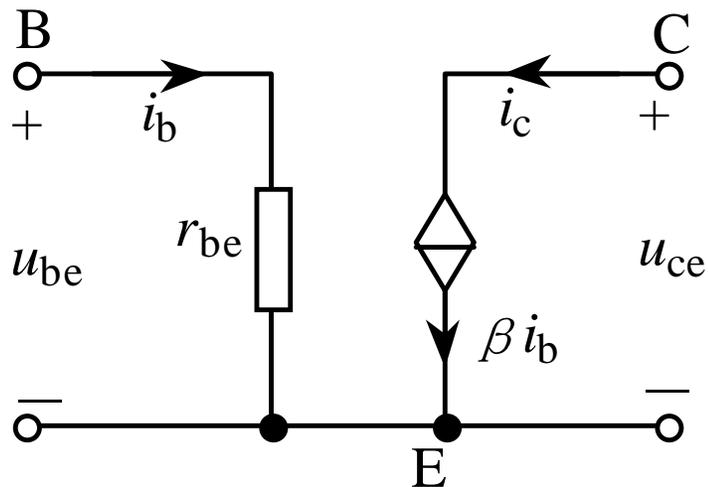
$$r_{be} = 300 + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})}$$

输出特性曲线在放大区域内可认为呈水平线，集电极电流的微小变化 ΔI_C 仅与基极电流的微小变化 ΔI_B 有关，而与电压 u_{CE} 无关，故集电极和发射极之间可等效为一个受 i_b 控制的电流源，即：

$$i_c = \beta i_b$$

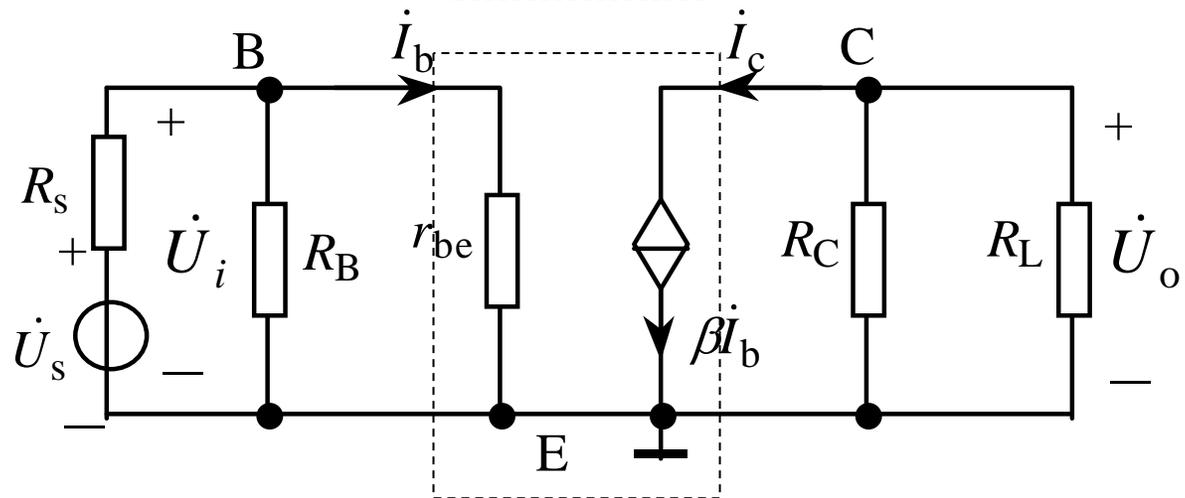
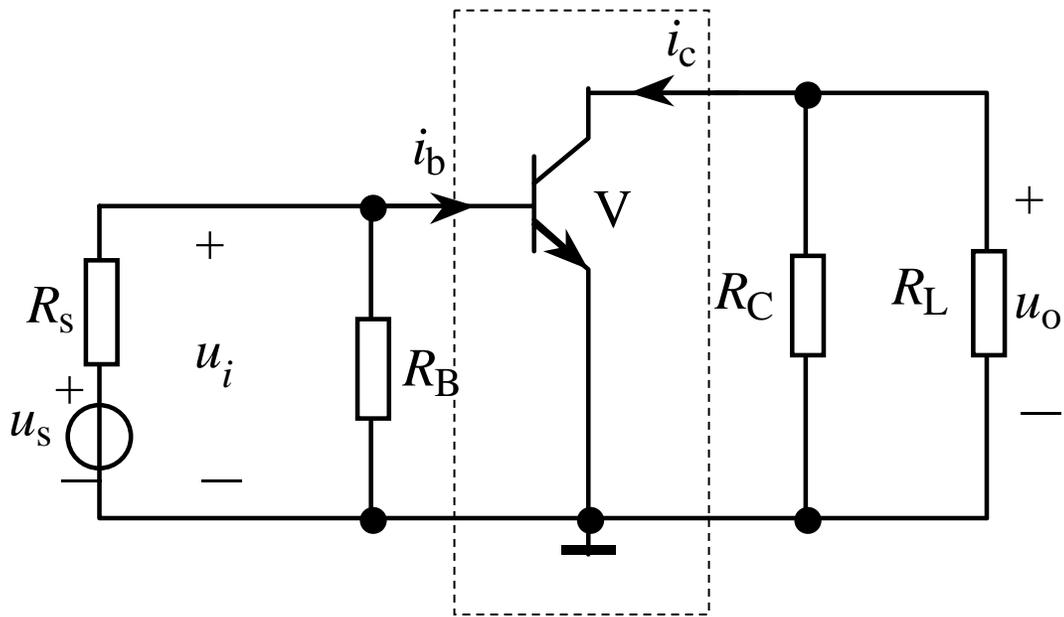


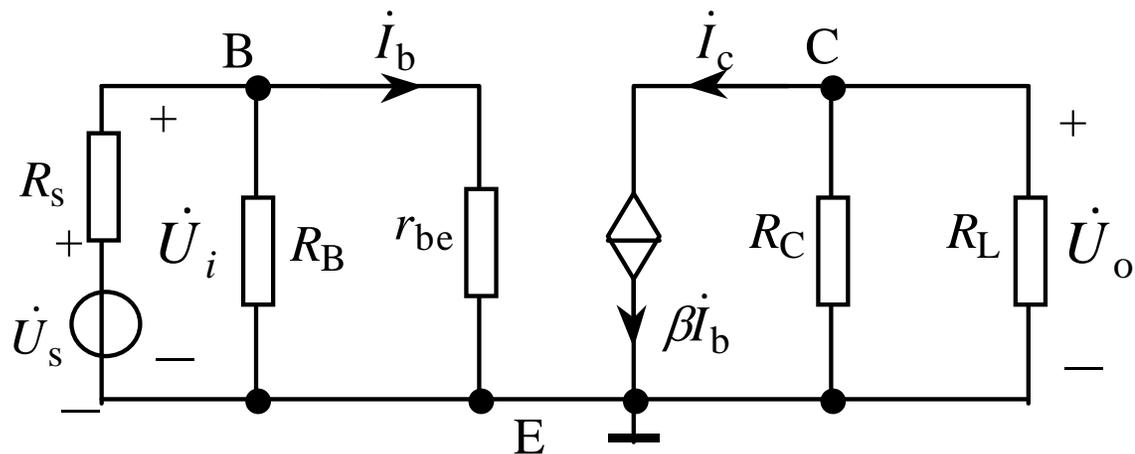
(a) 三极管



(b) 三极管的微变等效电路

(3) 放大电路微变等效电路





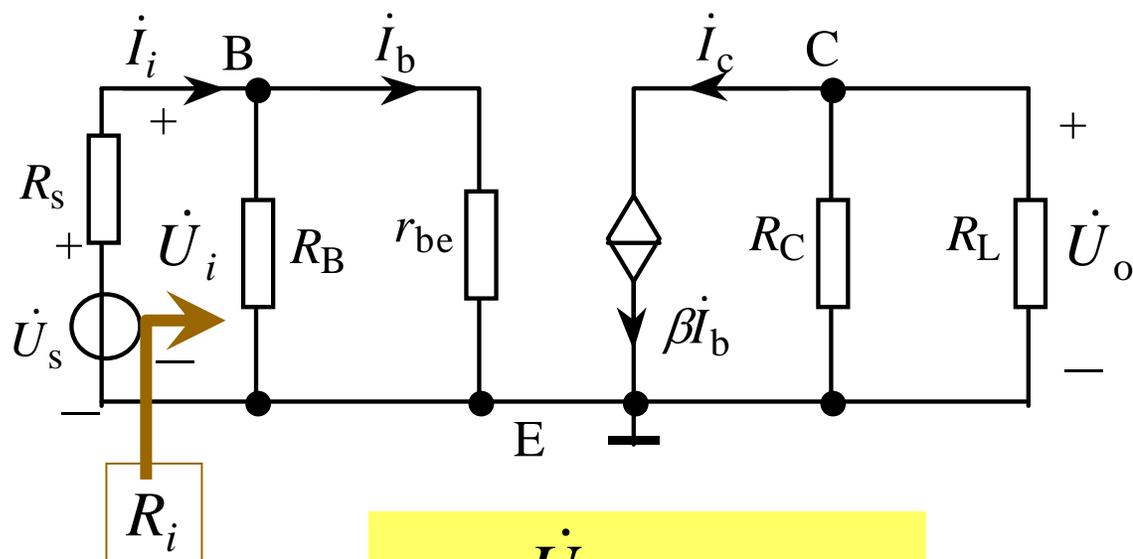
①电压放大倍数

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-R'_L \dot{I}_c}{r_{be} \dot{I}_b} = \frac{-R'_L \beta \dot{I}_b}{r_{be} \dot{I}_b} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

式中 $R'_L = R_C // R_L$ 。当 $R_L = \infty$ （开路）时

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R_C}{r_{be}}$$

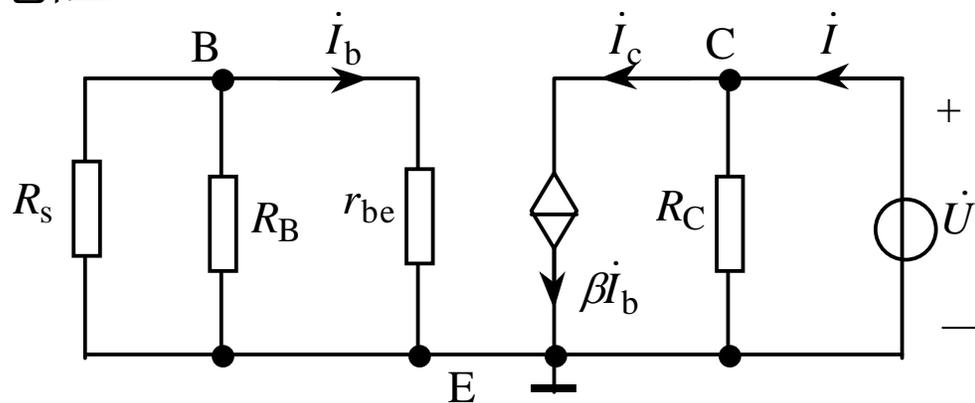
②输入电阻



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

输入电阻 R_i 的大小决定了放大电路从信号源吸取电流（输入电流）的大小。为了减轻信号源的负担，总希望 R_i 越大越好。另外，较大的输入电阻 R_i ，也可以降低信号源内阻 R_s 的影响，使放大电路获得较高的输入电压。在上式中由于 R_B 比 r_{be} 大得多， R_i 近似等于 r_{be} ，在几百欧到几千欧，一般认为是较低的，并不理想。

③输出电阻



R_o 的计算方法是：信号源 \dot{U}_s 短路，断开负载 R_L ，在输出端加电压 \dot{U} ，求出由 \dot{U} 产生的电流 \dot{I} ，则输出电阻 R_o 为：

$$R_o = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R_C$$

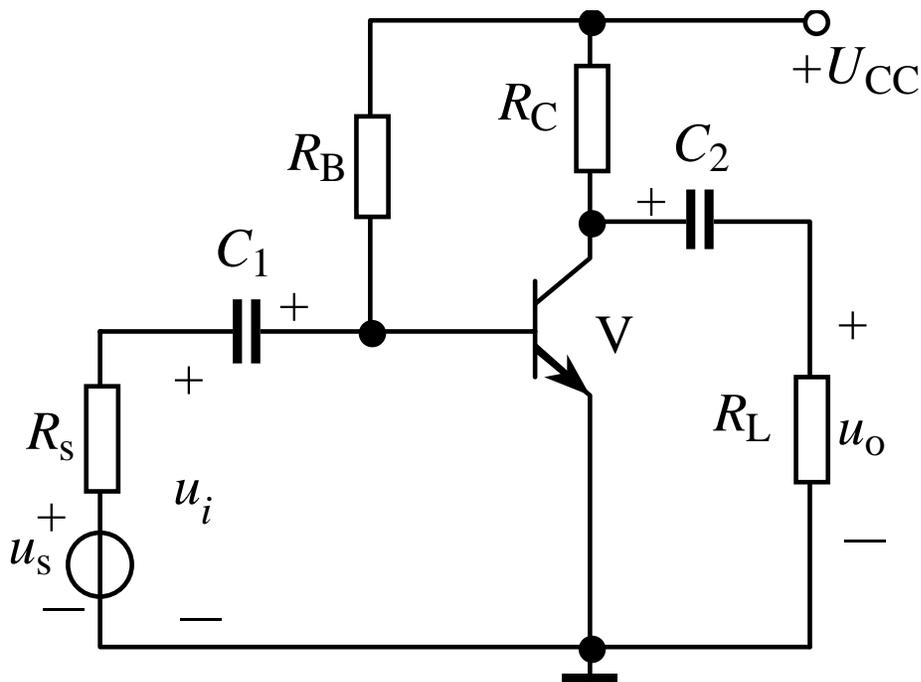
对于负载而言，放大器的输出电阻 R_o 越小，负载电阻 R_L 的变化对输出电压的影响就越小，表明放大器带负载能力越强，因此总希望 R_o 越小越好。上式中 R_o 在几千欧到几十千欧，一般认为是较大的，也不理想。

例：图示电路，已知 $U_{CC} = 12\text{V}$ ， $R_B = 300\text{k}\Omega$ ， $R_C = 3\text{k}\Omega$ ， $R_L = 3\text{k}\Omega$ ， $R_S = 3\text{k}\Omega$ ， $\beta = 50$ ，试求：

(1) R_L 接入和断开两种情况下电路的电压放大倍数 \dot{A}_u ；

(2) 输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o ；

(3) 输出端开路时的源电压放大倍数 $\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s}$ 。



解：先求静态工作点

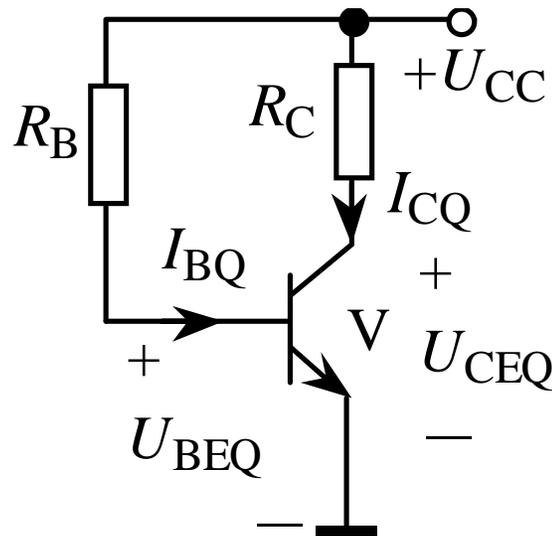
$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BEQ}}{R_B} \approx \frac{U_{CC}}{R_B} = \frac{12}{300} \text{ A} = 40 \mu \text{ A}$$

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

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

再求三极管的动态输入电阻

$$r_{be} = 300 + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} = 300 + (1 + 50) \frac{26(\text{mV})}{2(\text{mA})} = 963 \Omega \approx 0.963 \text{ k} \Omega$$



(1) R_L 接入时的电压放大倍数 \dot{A}_u 为:

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} = -\frac{50 \times \frac{3 \times 3}{3+3}}{0.963} = -78$$

R_L 断开时的电压放大倍数 \dot{A}_u 为:

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R_C}{r_{be}} = -\frac{50 \times 3}{0.963} = -156$$

(2) 输入电阻 R_i 为:

$$R_i = R_B // r_{be} = 300 // 0.963 \approx 0.96 \text{ k}\Omega$$

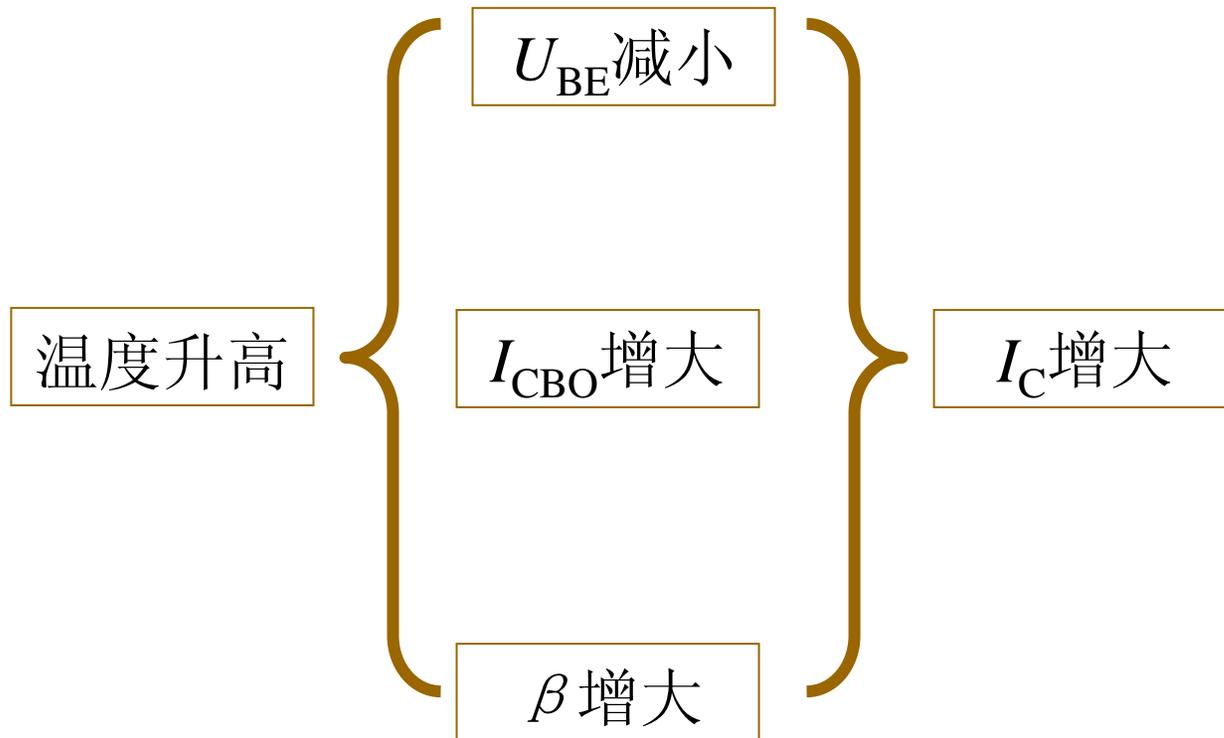
输出电阻 R_o 为:

$$R_o = R_C = 3 \text{ k}\Omega$$

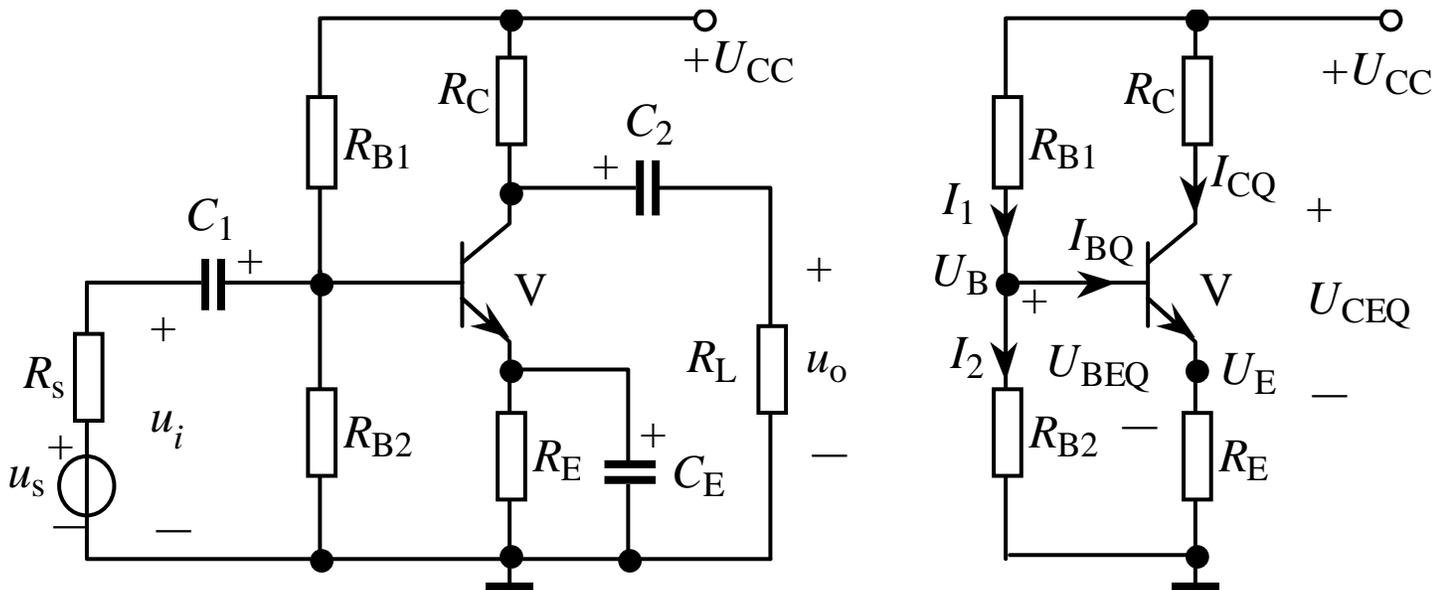
$$(3) \dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} \times \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \dot{A}_u = \frac{1}{3+1} \times (-156) = -39$$

工作点稳定的放大电路

1. 温度对工作点的影响



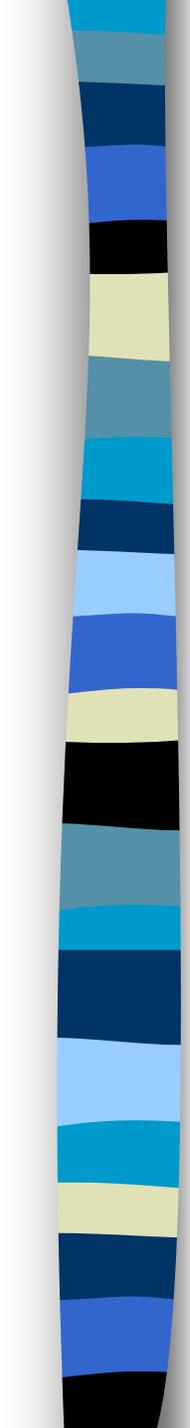
2. 工作点稳定的放大电路



条件: $I_2 \gg I_B$, 则 $U_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}$ 与温度基本无关。

调节过程:

温度 $t \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow I_E \uparrow \rightarrow U_E (= I_E R_E) \uparrow \rightarrow U_{BE} (= U_B - I_E R_E) \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$



(1) 静态分析

$$U_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_B - U_{BEQ}}{R_E}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta}$$

$$U_{CEQ} \cong U_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E)$$

(2) 动态分析

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

$$R_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be}$$

$$R_o = R_C$$

例：图示电路（接 C_E ），已知 $U_{CC}=12V$ ， $R_{B1}=20k\Omega$ ， $R_{B2}=10k\Omega$ ， $R_C=3k\Omega$ ， $R_E=2k\Omega$ ， $R_L=3k\Omega$ ， $\beta=50$ 。试估算静态工作点，并求电压放大倍数、输入电阻和输出电阻。

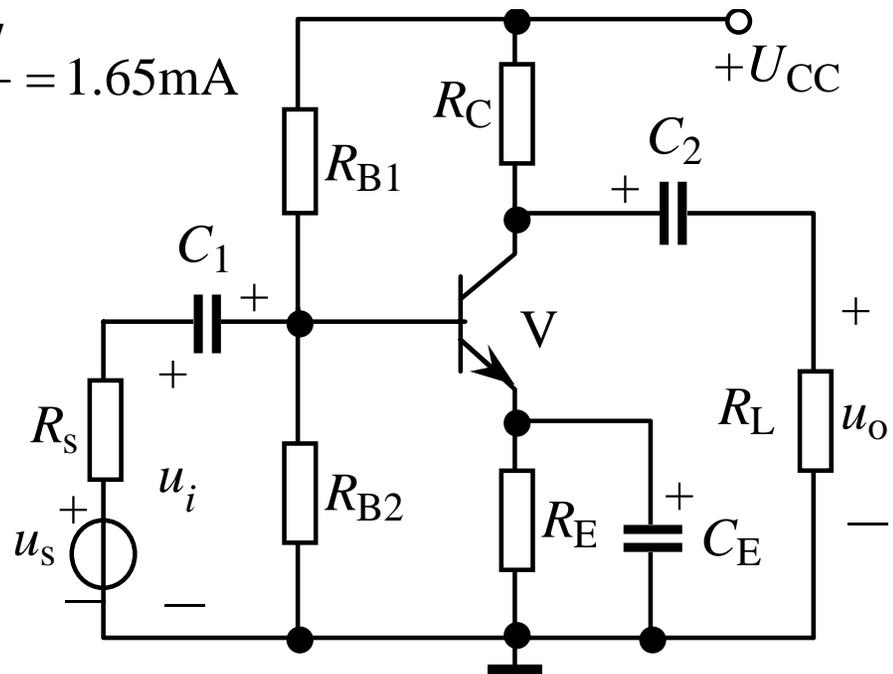
解：（1）用估算法计算静态工作点

$$U_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC} = \frac{10}{20 + 10} \times 12 = 4V$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_B - U_{BEQ}}{R_E} = \frac{4 - 0.7}{2} = 1.65mA$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = \frac{1.65}{50} mA = 33\mu A$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) \\ = 12 - 1.65 \times (3 + 2) = 3.75V$$



(2) 求电压放大倍数

$$r_{be} = 300 + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}} = 300 + (1 + 50) \frac{26}{1.65} = 1100\Omega = 1.1\text{k}\Omega$$

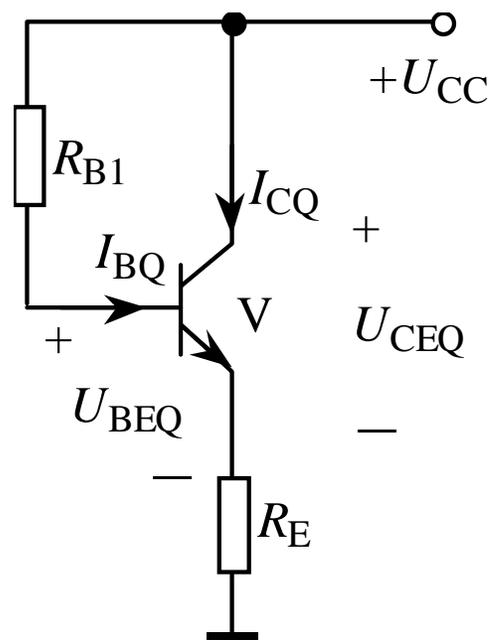
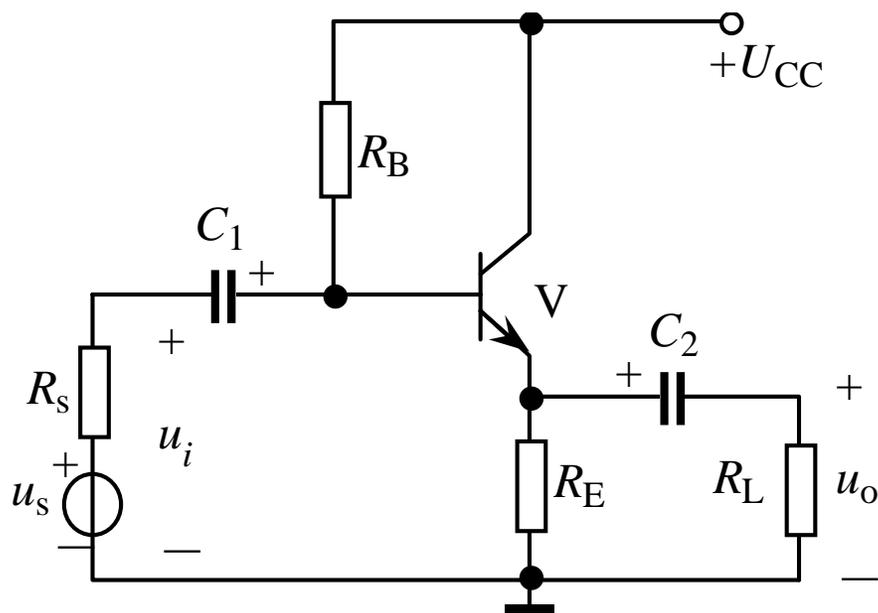
$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} = -\frac{50 \times \frac{3 \times 3}{3 + 3}}{1.1} = -68$$

(3) 求输入电阻和输出电阻

$$R_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be} = 20 // 10 // 1.1 = 0.994\text{k}\Omega$$

$$R_o = R_C = 3\text{k}\Omega$$

射极输出器



(1) 静态分析

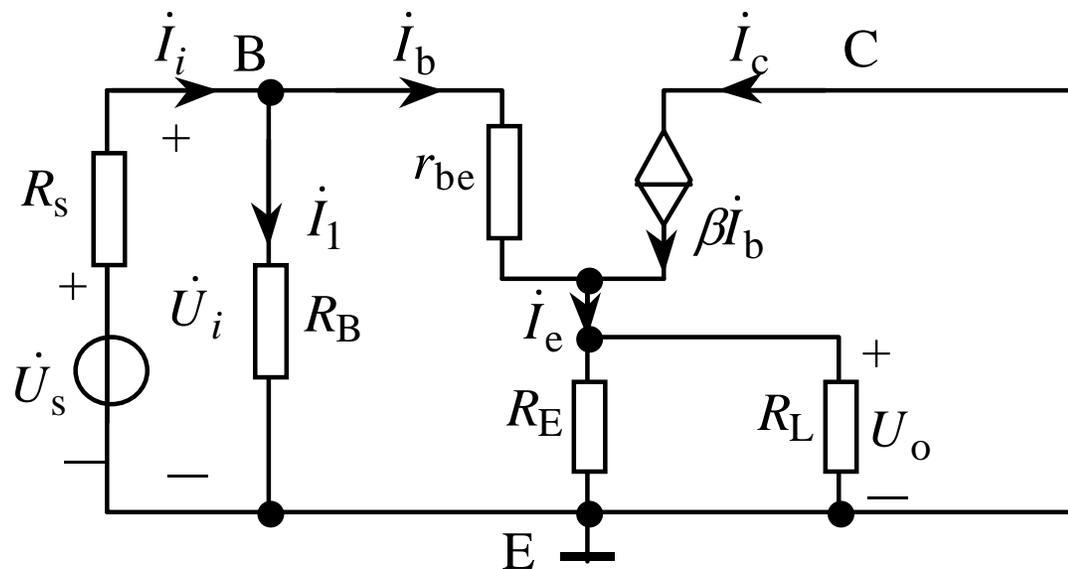
$$U_{CC} = I_{BQ}R_B + U_{BEQ} + I_{EQ}R_E = I_{BQ}R_B + U_{BEQ} + (1 + \beta)I_{BQ}R_E$$

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

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{EQ}R_E \approx U_{CC} - I_{CQ}R_E$$

(2) 动态分析



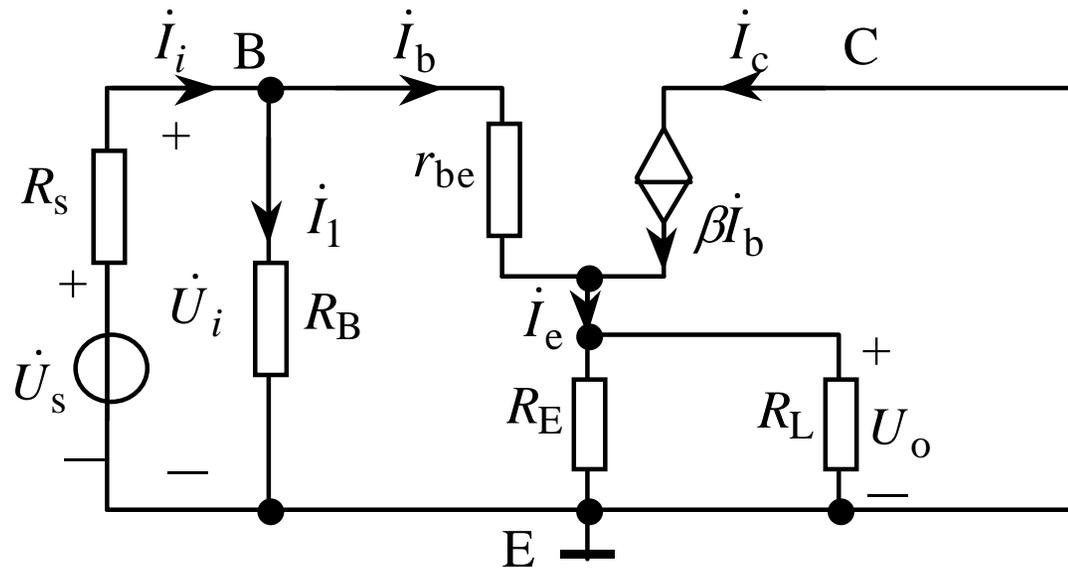
射极输出器的微变等效电路

①求电压放大倍数

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

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

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

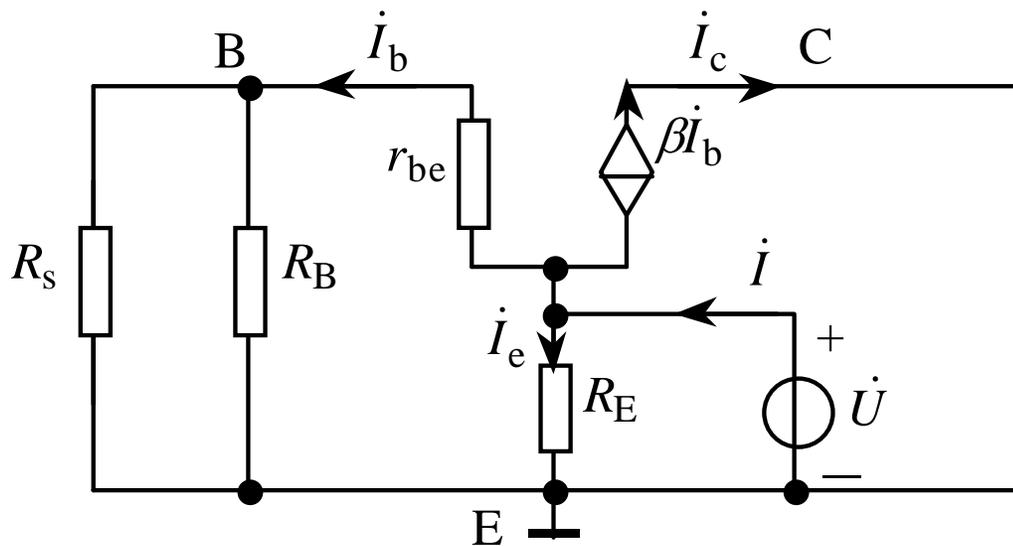


射极输出器的微变等效电路

②求输入电阻

$$\dot{I}_i = \dot{I}_1 + \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_i}{R_B} + \frac{\dot{U}_i}{r_{be} + (1 + \beta)R'_L}$$

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

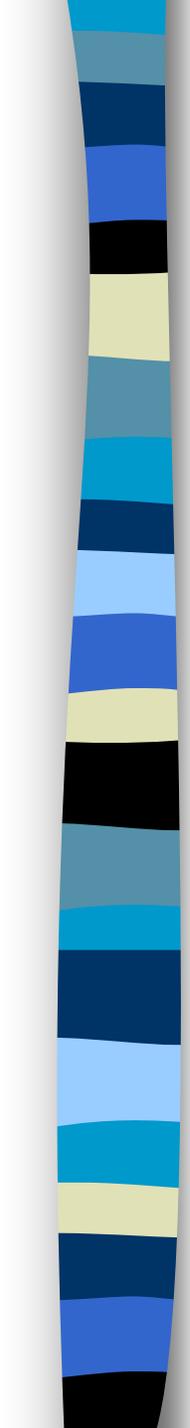


计算输出电阻的等效电路

③求输出电阻

$$\dot{I} = \dot{I}_b + \beta \dot{I}_b + \dot{I}_e = \frac{\dot{U}}{r_{be} + R'_s} + \beta \frac{\dot{U}}{r_{be} + R'_s} + \frac{\dot{U}}{R_E}$$

$$R_o = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R_E // \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta}$$



射极输出器的特点：

①电压放大倍数小于1，但约等于1，即电压跟随。

②输入电阻较高。

③输出电阻较低。

射极输出器的用途：

射极跟随器具有较高的输入电阻和较低的输出电阻，这是射极跟随器最突出的优点。射极跟随器常用作多级放大器的第一级或最末级，也可用于中间隔离级。用作输入级时，其高的输入电阻可以减轻信号源的负担，提高放大器的输入电压。用作输出级时，其低的输出电阻可以减小负载变化对输出电压的影响，并易于与低阻负载相匹配，向负载传送尽可能大的功率。

例：图示电路，已知 $U_{CC}=12V$ ， $R_B=200k\Omega$ ， $R_E=2k\Omega$ ， $R_L=3k\Omega$ ， $R_S=100\Omega$ ， $\beta=50$ 。试估算静态工作点，并求电压放大倍数、输入电阻和输出电阻。

解：（1）用估算法计算静态工作点

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

$$= \frac{12 - 0.7}{200 + (1 + 50) \times 2}$$

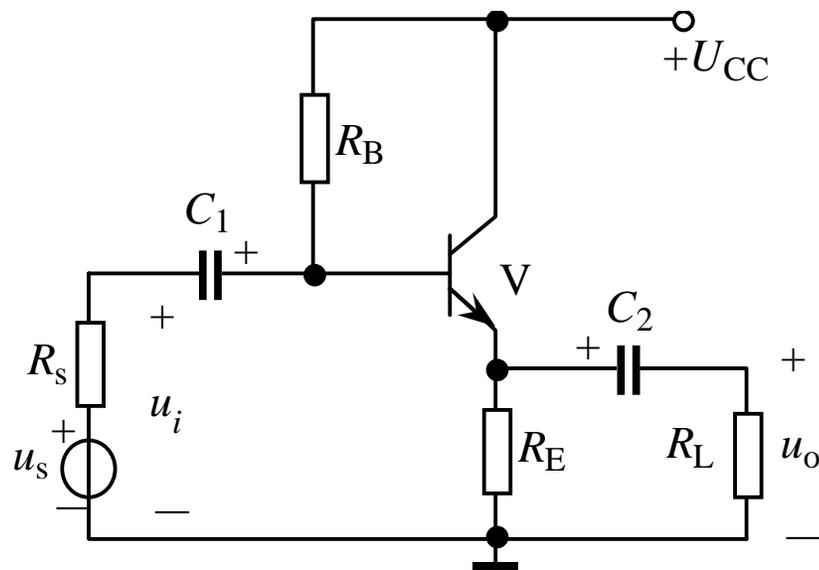
$$= 0.0374\text{mA} = 37.4\mu\text{A}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$= 50 \times 0.0374 = 1.87\text{mA}$$

$$U_{CEQ} \approx U_{CC} - I_{CQ}R_E$$

$$= 12 - 1.87 \times 2 = 8.26\text{V}$$



(2) 求电压放大倍数 \dot{A}_u 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

$$r_{be} = 300 + (1 + \beta) \frac{26}{I_{EQ}} = 300 + (1 + 50) \frac{26}{1.87} = 1009 \Omega \approx 1 \text{ k} \Omega$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1 + \beta)R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R'_L} = \frac{(1 + 50) \times 1.2}{1 + (1 + 50) \times 1.2} = 0.98$$

式中 $R'_L = R_E // R_L = 2 // 3 = 1.2 \text{ k} \Omega$

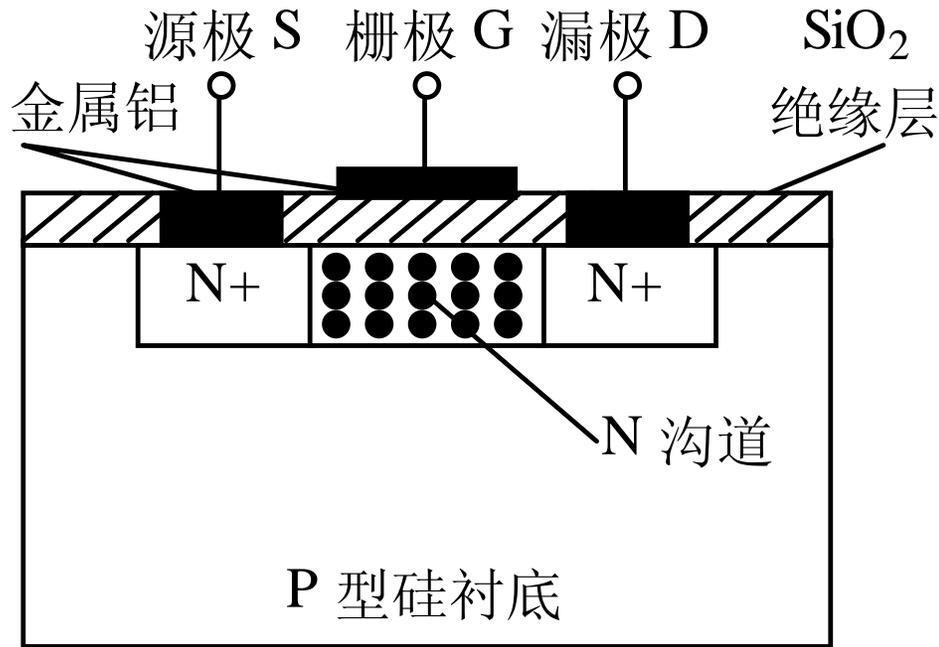
$$R_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)R'_L] = 200 // [1 + (1 + 50) \times 1.2] = 47.4 \text{ k} \Omega$$

$$R_o \approx \frac{r_{be} + R'_s}{\beta} = \frac{1000 + 100}{50} = 22 \Omega$$

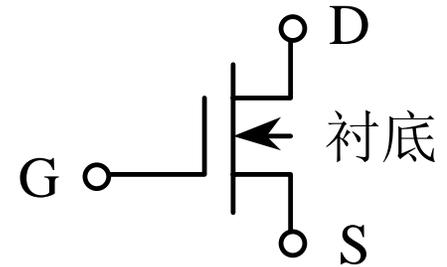
式中 $R'_s = R_B // R_s = 200 \times 10^3 // 100 \approx 100 \Omega$

场效应管及其放大电路

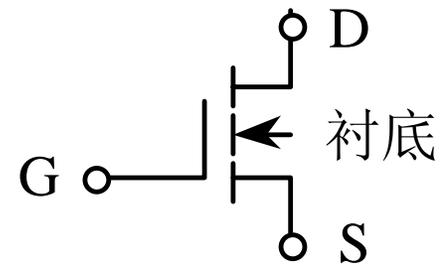
绝缘栅型场效应管



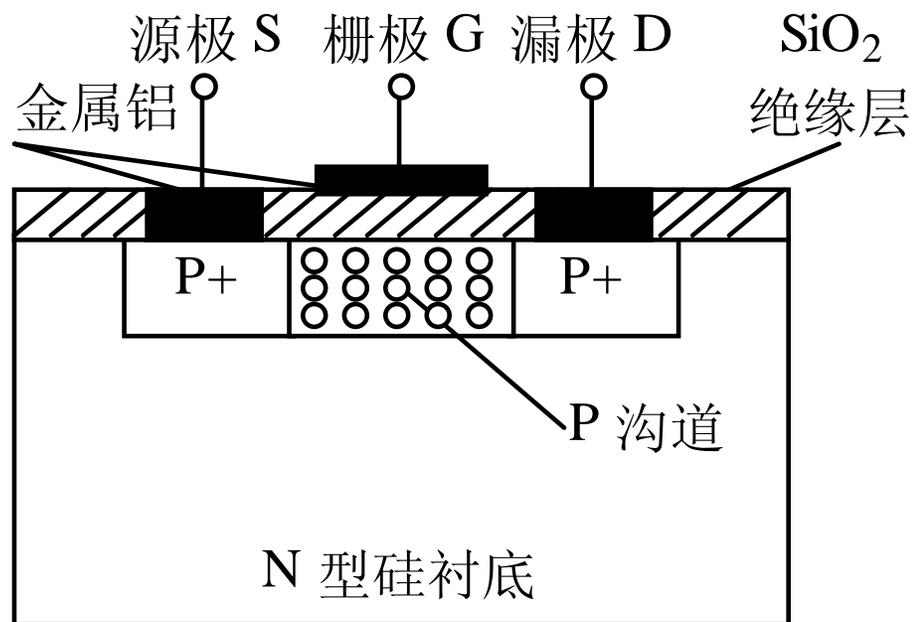
N 沟道绝缘栅型场效应管的结构



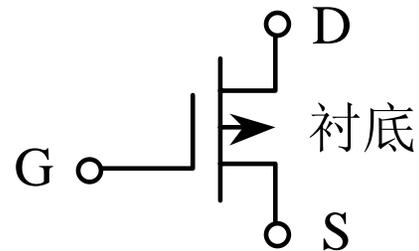
N 沟道耗尽型场效应管的符号



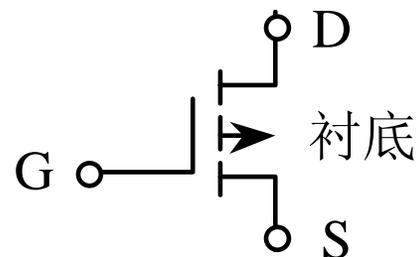
N 沟道增强型场效应管的符号



P 沟道绝缘栅型场效应管的结构



P 沟道耗尽型场效应管的符号



P 沟道增强型场效应管的符号

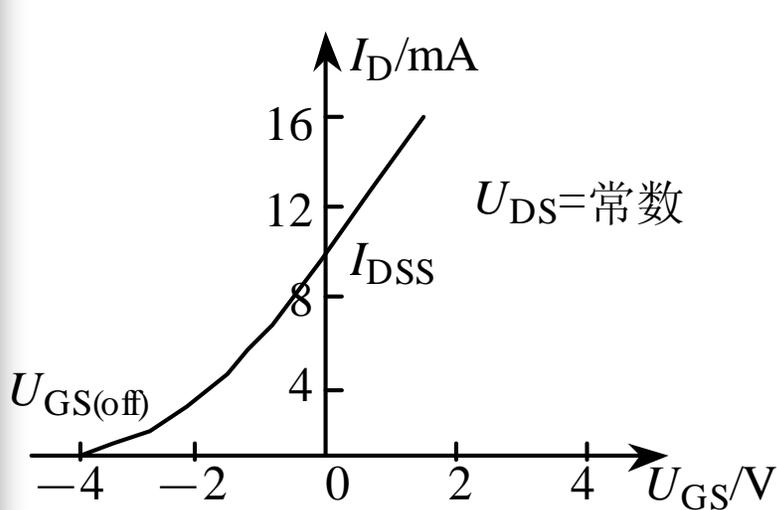
耗尽型： $U_{GS}=0$ 时漏、源极之间已经存在原始导电沟道。

增强型： $U_{GS}=0$ 时漏、源极之间才能形成导电沟道。

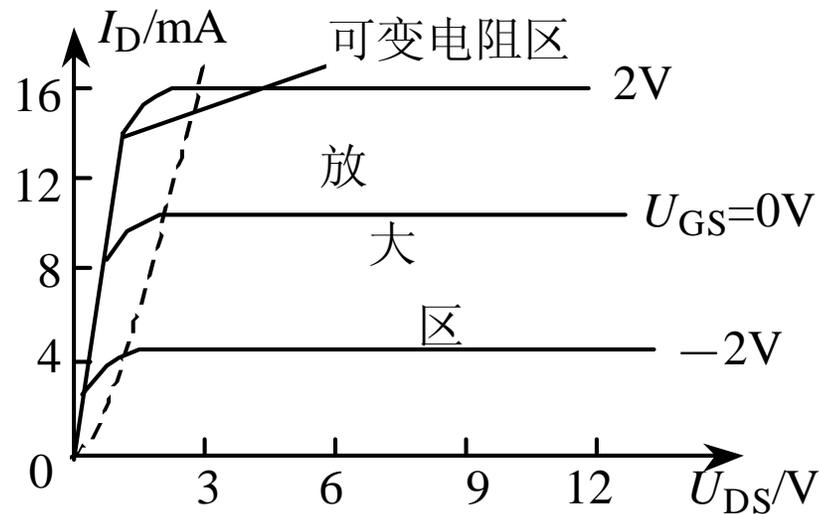
无论是N沟道MOS管还是P沟道MOS管，都只有一种载流子导电，均为单极型电压控制器件。

MOS管的栅极电流几乎为零，输入电阻 R_{GS} 很高

N沟道耗尽型场效应管的特性曲线



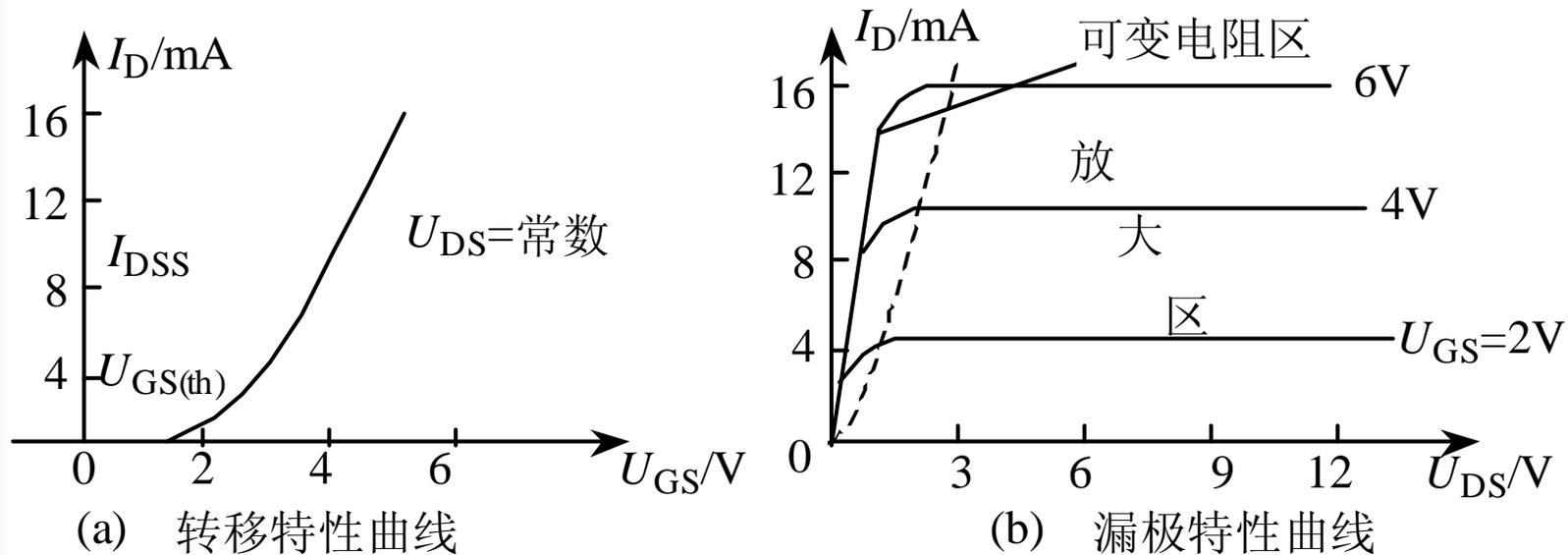
(a) 转移特性曲线



(b) 漏极特性曲线

耗尽型场效应管存在原始导电沟道， $U_{GS}=0$ 时漏、源极之间就可以导电。这时在外加电压 U_{DS} 作用下的漏极电流称为漏极饱和电流 I_{DSS} 。 $U_{GS}>0$ 时沟道内感应出的负电荷增多，沟道加宽，沟道电阻减小， I_D 增大。 $U_{GS}<0$ 时会在沟道内产生出正电荷与原始负电荷复合，沟道变窄，沟道电阻增大， I_D 减小。 U_{GS} 达到一定负值时，沟道内载流子全部复合耗尽，沟道被夹断， $I_D=0$ ，这时的 U_{GS} 称为夹断电压 $U_{GS(off)}$ 。

N沟道增强型场效应管的特性曲线



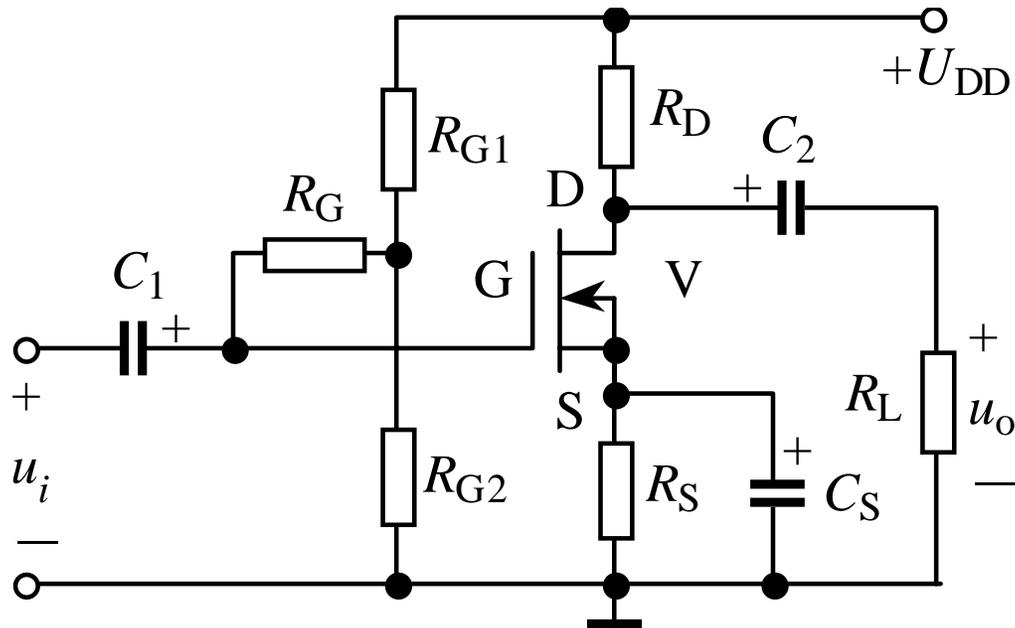
增强型场效应管不存在原始导电沟道， $U_{GS}=0$ 时场效应管不能导通， $I_D=0$ 。 $U_{GS}>0$ 时会产生垂直于衬底表面的电场。P型衬底与绝缘层的界面将感应出负电荷层， U_{GS} 增加，负电荷数量增多，积累的负电荷足够多时，两个N+区沟通，形成导电沟道，漏、源极之间有 I_D 出现。在一定的漏、源电压 U_{DS} 下，使管子由不导通转为导通的临界栅、源电压称为开启电压 $U_{GS(th)}$ 。 $U_{GS}<U_{GS(th)}$ 时， $I_D=0$ ； $U_{GS}>U_{GS(th)}$ 时，随 U_{GS} 的增加 I_D 增大。

按场效应管的工作情况可将漏极特性曲线分为两个区域。在虚线左边的区域内，漏、源电压 U_{DS} 相对较小，漏极电流 I_D 随 U_{DS} 的增加而增加，输出电阻 r_o 较小，且可以通过改变栅、源电压 U_{GS} 的大小来改变输出电阻 r_o 的阻值，这一区域称为可变电阻区。在虚线右边的区域内，当栅、源电压 U_{GS} 为常数时，漏极电流 I_D 几乎不随漏、源电压 U_{DS} 的变化而变化，特性曲线趋于与横轴平行，输出电阻 r_o 很大，在栅、源电压 U_{GS} 增大时，漏极电流 I_D 随 U_{GS} 线性增大，这一区域称为放大区。

综上所述，场效应管的漏极电流 I_D 受栅、源电压 U_{GS} 的控制，即 I_D 随 U_{GS} 的变化而变化，所以场效应管是一种电压控制器件。场效应管栅、源电压 U_{GS} 对漏极 I_D 控制作用的大小用跨导 g_m 表示：

$$g_m = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \right|_{U_{DS} = \text{常数}}$$

场效应管放大电路



场效应管共源极放大电路

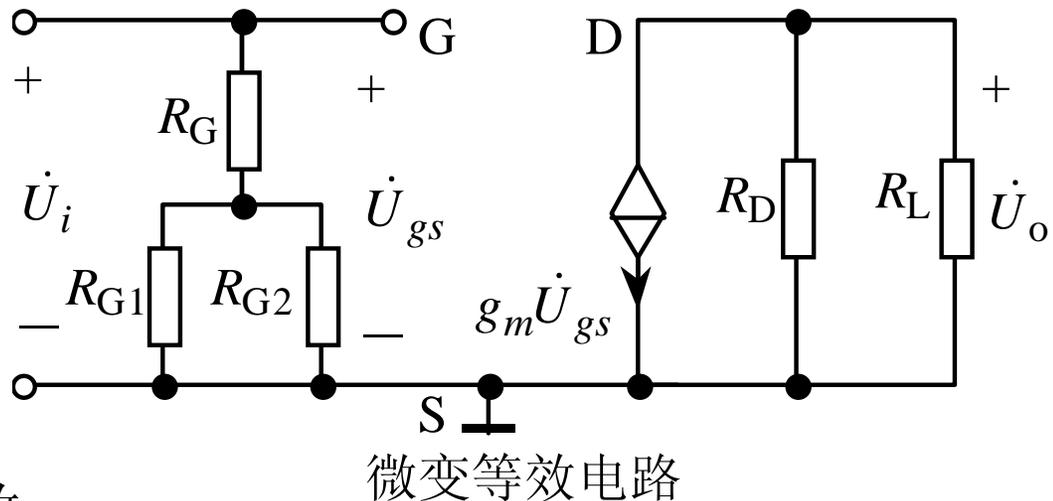
1. 静态分析

设 $U_{GS}=0$, 则:
$$U_S = U_G = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} U_{DD}$$

$$I_D = \frac{U_S}{R_S} = \frac{U_G}{R_S}$$

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

2. 动态分析



(1) 电压放大倍数。

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\dot{I}_d R'_L}{\dot{U}_{gs}} = \frac{-g_m \dot{U}_{gs} R'_L}{\dot{U}_{gs}} = -g_m R'_L$$

(2) 输入电阻。

$$R_i = R_G + R_{G1} // R_{G2}$$

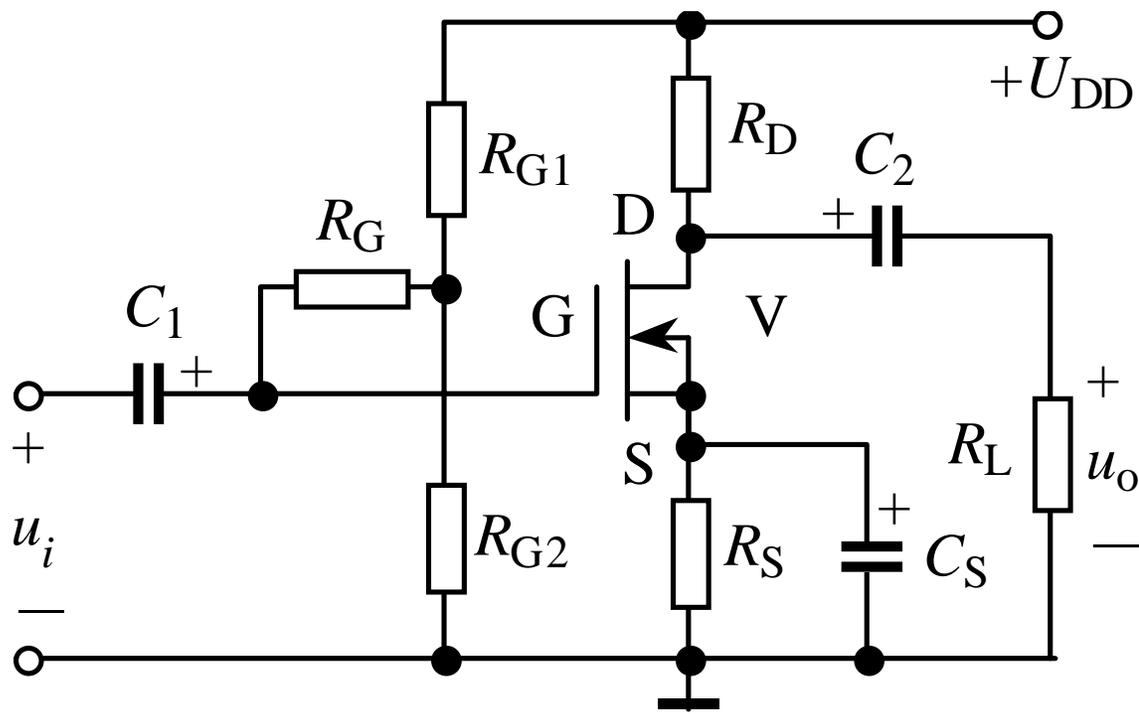
R_G 一般取几兆欧。可见 R_G 的接入可使输入电阻大大提高。

(3) 输出电阻。

$$R_o = R_D$$

R_D 一般在几千欧到几十千欧，输出电阻较高。

例：图示电路，已知 $U_{DD} = 20\text{V}$ ， $R_D = 5\text{k}\Omega$ ， $R_S = 5\text{k}\Omega$ ， $R_L = 5\text{k}\Omega$ ， $R_G = 1\text{M}\Omega$ ， $R_{G1} = 300\text{k}\Omega$ ， $R_{G2} = 100\text{k}\Omega$ ， $g_m = 5\text{mA/V}$ 。求静态工作点及电压放大倍数 \dot{A}_u 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。



解：静态工作点：

$$U_G = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} U_{DD} = \frac{100}{300 + 100} \times 20 = 5V$$

$$I_D = \frac{U_S}{R_S} = \frac{U_G}{R_S} = \frac{5}{5} = 1mA$$

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D (R_D + R_S) = 20 - 1 \times (5 + 5) = 10V$$

电压放大倍数：

$$R'_L = R_D // R_L = 5 // 5 = 2.5 k\Omega$$

$$\dot{A}_u = -g_m R'_L = -5 \times 2.5 = -12.5$$

输入电阻：

$$R_i = R_G + R_{G1} // R_{G2} = 1000 + 300 // 100 = 1075 k\Omega$$

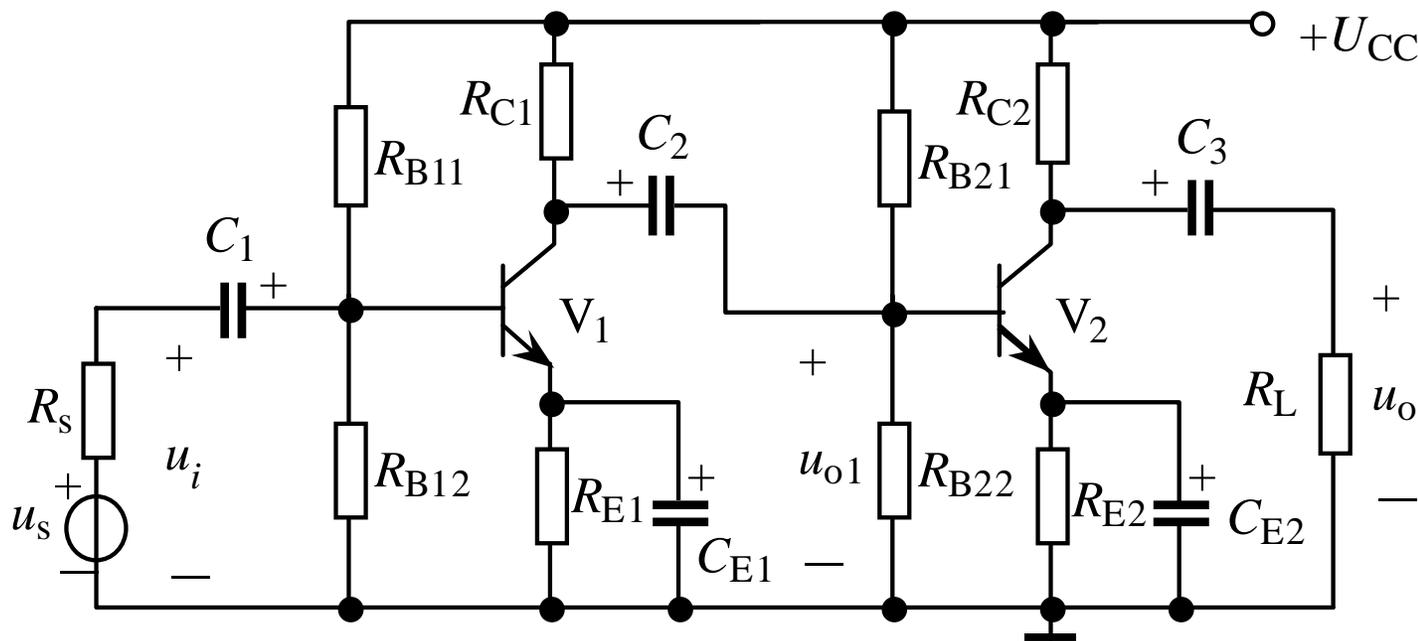
输出电阻：

$$R_o = R_D = 5 k\Omega$$

多级放大电路

阻容耦合多级放大电路

各极之间通过耦合电容及下级输入电阻连接。优点：各级静态工作点互不影响，可以单独调整到合适位置；且不存在零点漂移问题。缺点：不能放大变化缓慢的信号和直流分量变化的信号；且由于需要大容量的耦合电容，因此不能在集成电路中采用。



1. 阻容耦合多级放大电路分析

(1) 静态分析：各级单独计算。

(2) 动态分析

①电压放大倍数等于各级电压放大倍数的乘积。

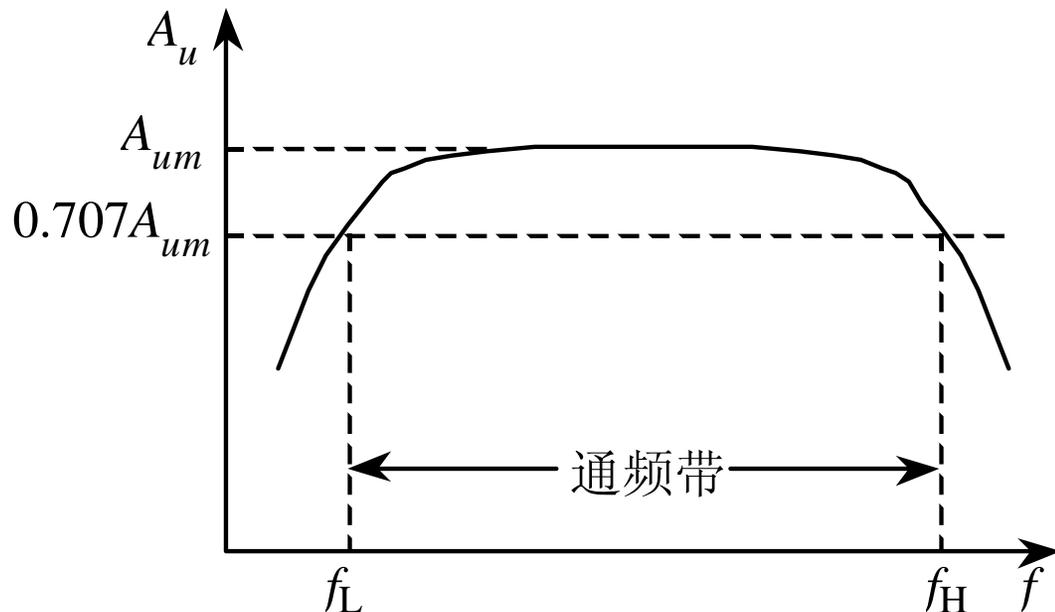
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{o1}} = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2}$$

注意：计算前级的电压放大倍数时必须把后级的输入电阻考虑到前级的负载电阻之中。如计算第一级的电压放大倍数时，其负载电阻就是第二级的输入电阻。

②输入电阻就是第一级的输入电阻。

③输出电阻就是最后一级的输出电阻。

2. 阻容耦合多级放大的频率特性和频率失真



共发射级放大电路的幅频特性

中频段：电压放大倍数近似为常数。

低频段：耦合电容和发射极旁路电容的容抗增大，以致不可视为短路，因而造成电压放大倍数减小。

高频段：晶体管的结电容以及电路中的分布电容等的容抗减小，以致不可视为开路，也会使电压放大倍数降低。

除了电压放大倍数会随频率而改变外，在低频和高频段，输出信号对输入信号的相位移也要随频率而改变。所以在整个频率范围内，电压放大倍数和相位移都将是频率的函数。电压放大倍数与频率的函数关系称为**幅频特性**，相位移与频率的函数关系称为**相频特性**，二者统称为**频率特性或频率响应**。放大电路呈现带通特性。图中 f_H 和 f_L 为电压放大倍数下降到中频段电压放大倍数的0.707倍时所对应的两个频率，分别称为**上限频率**和**下限频率**，其差值称为**通频带**。

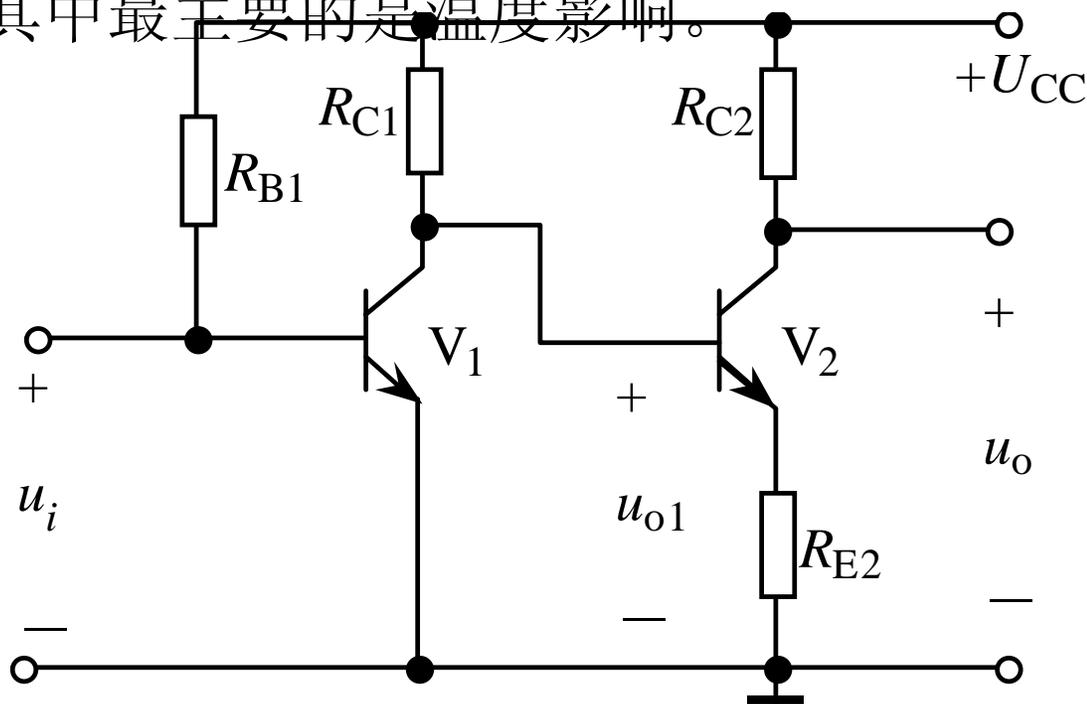
一般情况下，放大电路的输入信号都是非正弦信号，其中包含有许多不同频率的谐波成分。由于放大电路对不同频率的正弦信号放大倍数不同，相位移也不一样，所以当输入信号为包含多种谐波分量的非正弦信号时，若谐波频率超出通频带，输出信号 u_o 波形将产生失真。这种失真与放大电路的频率特性有关，故称为**频率失真**。

直接耦合多级放大电路

优点：能放大变化很缓慢的信号和直流分量变化的信号；且由于没有耦合电容，故非常适宜于大规模集成。

缺点：各级静态工作点互相影响；且存在零点漂移问题。

零点漂移：放大电路在无输入信号的情况下，输出电压 u_o 却出现缓慢、不规则波动的现象。产生零点漂移的原因很多，其中最主要的是温度影响。



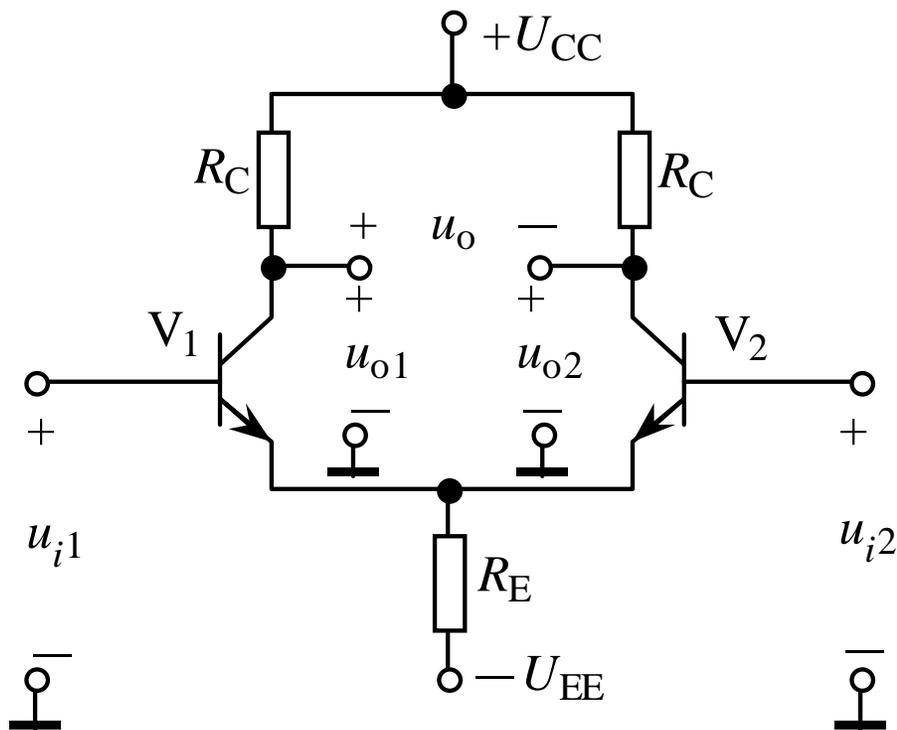
差动放大电路

抑制零漂的方法有多种，如采用温度补偿电路、稳压电源以及精选电路元件等方法。最有效且广泛采用的方法是输入级采用差动放大电路。

差动放大电路的工作原理

$$u_i = u_{i1} - u_{i2}$$

$$u_o = u_{o1} - u_{o2}$$



1. 抑制零点漂移的原理

温度变化时两个单管放大电路的工作点都要发生变动，分别产生输出漂移 Δu_{o1} 和 Δu_{o2} 。由于电路是对称的，所以 $\Delta u_{o1} = \Delta u_{o2}$ ，差动放大电路的输出漂移 $\Delta u_o = \Delta u_{o1} - \Delta u_{o2} = 0$ ，即消除了零点漂移。

2. 差模输入

差模信号：两输入端加的信号大小相等、极性相反。

$$u_{i1} = \frac{1}{2}u_i \quad u_{i2} = -\frac{1}{2}u_i$$

因两侧电路对称，放大倍数相等，电压放大倍数用 A_d 表示，则：

$$u_{o1} = A_d u_{i1} \quad u_{o2} = A_d u_{i2}$$

$$u_o = u_{o1} - u_{o2} = A_d (u_{i1} - u_{i2}) = A_d u_i$$

差模电压放大倍数： $A_d = \frac{u_o}{u_i} = A_d$

可见差模电压放大倍数等于单管放大电路的电压放大倍数。差动放大电路用多一倍的元件为代价，换来了对零漂的抑制能力。

3. 共模输入

共模信号：两输入端加的信号大小相等、极性相同。

$$u_{i1} = u_{i2} = u_i$$

$$u_{o1} = u_{o2} = A_u u_i$$

$$u_o = u_{o1} - u_{o2} = 0$$

共模电压放大倍数：

$$A_c = \frac{u_o}{u_i} = 0$$

说明电路对共模信号无放大作用，即完全抑制了共模信号。实际上，差动放大电路对零点漂移的抑制就是该电路抑制共模信号的一个特例。所以差动放大电路对共模信号抑制能力的大小，也就是反映了它对零点漂移的抑制能力。

共模抑制比：

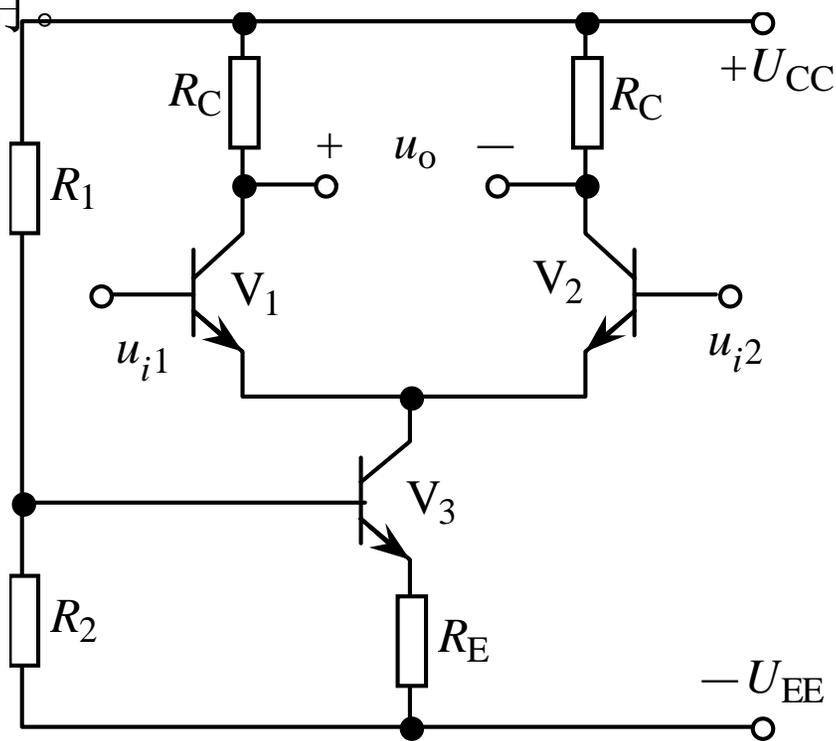
$$K_{\text{CMR}} = 20 \lg \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

共模抑制比越大，表示电路放大差模信号和抑制共模信号的能力越强。

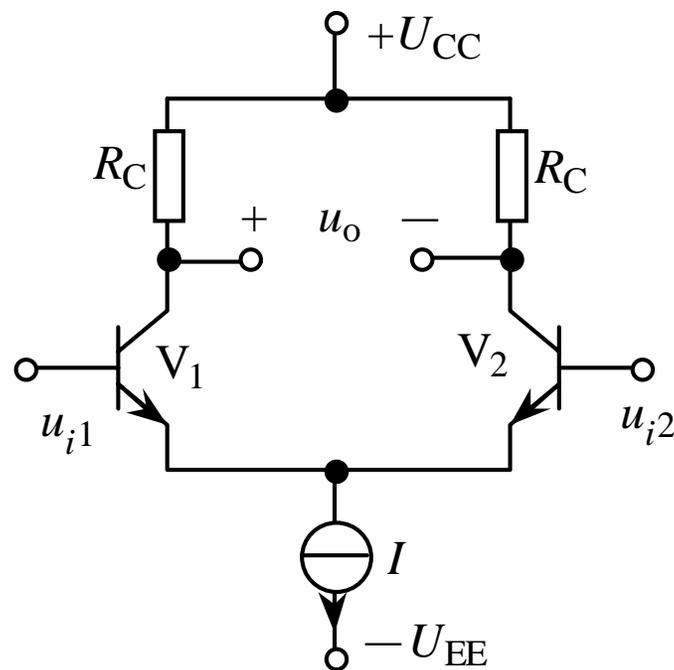
在发射极电阻 R_E 的作用：是为了提高整个电路以及单管放大电路对共模信号的抑制能力。

负电源 U_{EE} 的作用：是为了补偿 R_E 上的直流压降，使发射极基本保持零电位。

恒流源比发射极电阻 R_E 对共模信号具有更强的抑制作用。

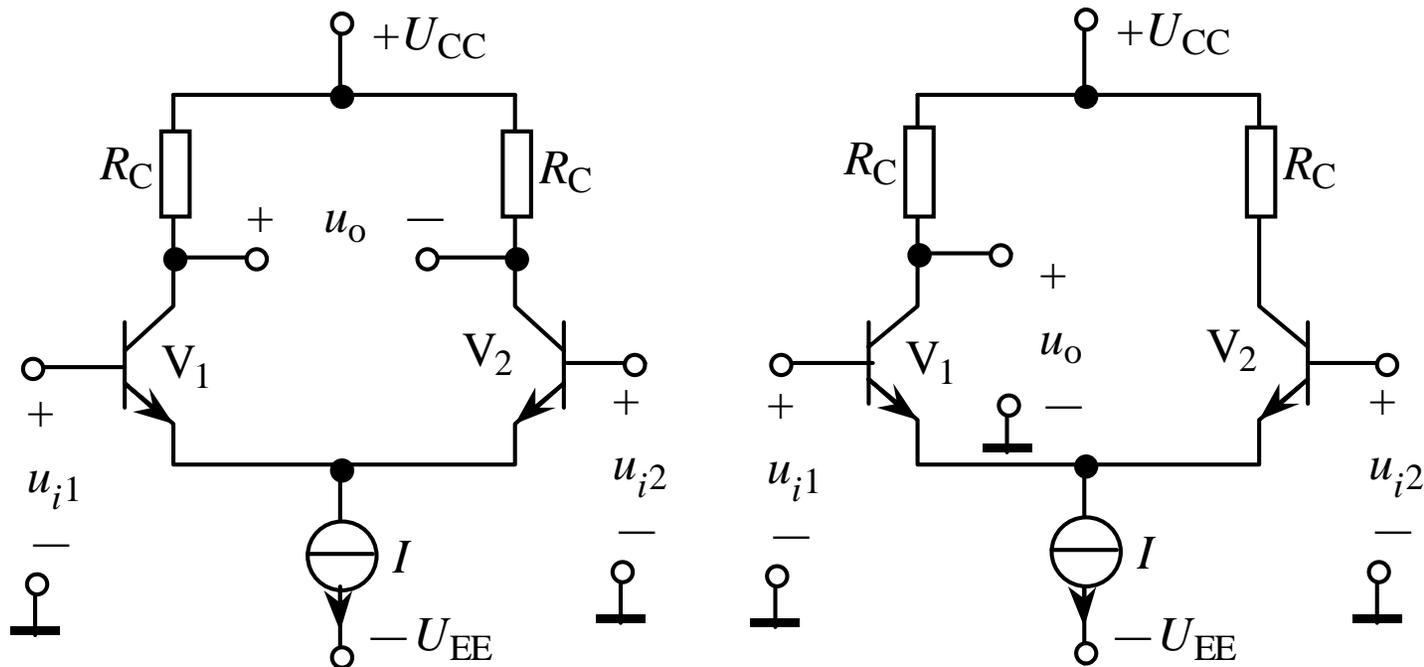


(a) 具有恒流源的差动放大电路



(b) 图(a)的简化电路

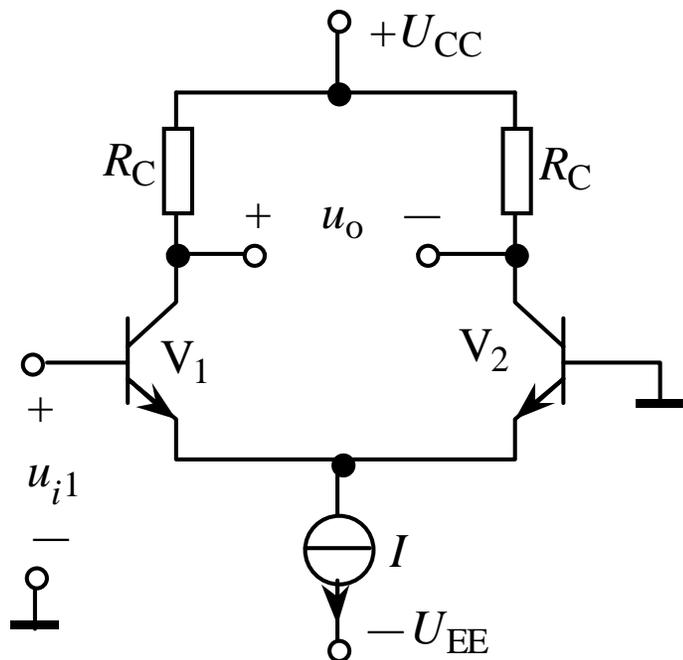
差动放大电路的输入输出方式



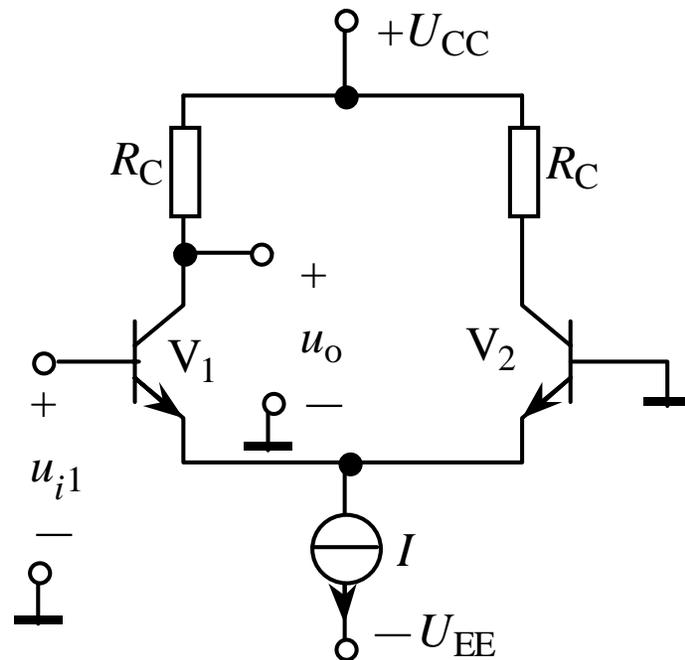
(a) 双端输入双端输出

(b) 双端输入单端输出

双端输入单端输出式电路的输出 u_o 与输入 u_{i1} 极性（或相位）相反，而与 u_{i2} 极性（或相位）相同。所以 u_{i1} 输入端称为反相输入端，而 u_{i2} 输入端称为同相输入端。双端输入单端输出方式是集成运算放大器的基本输入输出方式。

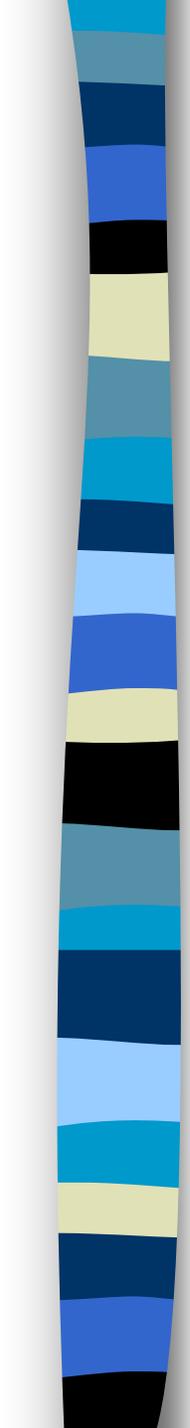


(c) 单端输入双端输出



(d) 单端输入单端输出

单端输入式差动放大电路的输入信号只加到放大器的一个输入端，另一个输入端接地。由于两个晶体管发射极电流之和恒定，所以当输入信号使一个晶体管发射极电流改变时，另一个晶体管发射极电流必然随之作相反的变化，情况和双端输入时相同。此时由于恒流源等效电阻或发射极电阻 R_E 的耦合作用，两个单管放大电路都得到了输入信号的一半，但极性相反，即为差模信号。所以，单端输入属于差模输入。



单端输出式差动电路，输出减小了一半，所以差模放大倍数亦减小为双端输出时的二分之一。此外，由于两个单管放大电路的输出漂移不能互相抵消，所以零漂比双端输出时大一些。由于恒流源或射极电阻 R_E 对零点漂移有极强烈的抑制作用，零漂仍然比单管放大电路小得多。所以单端输出时仍常采用差动放大电路，而不采用单管放大电路。

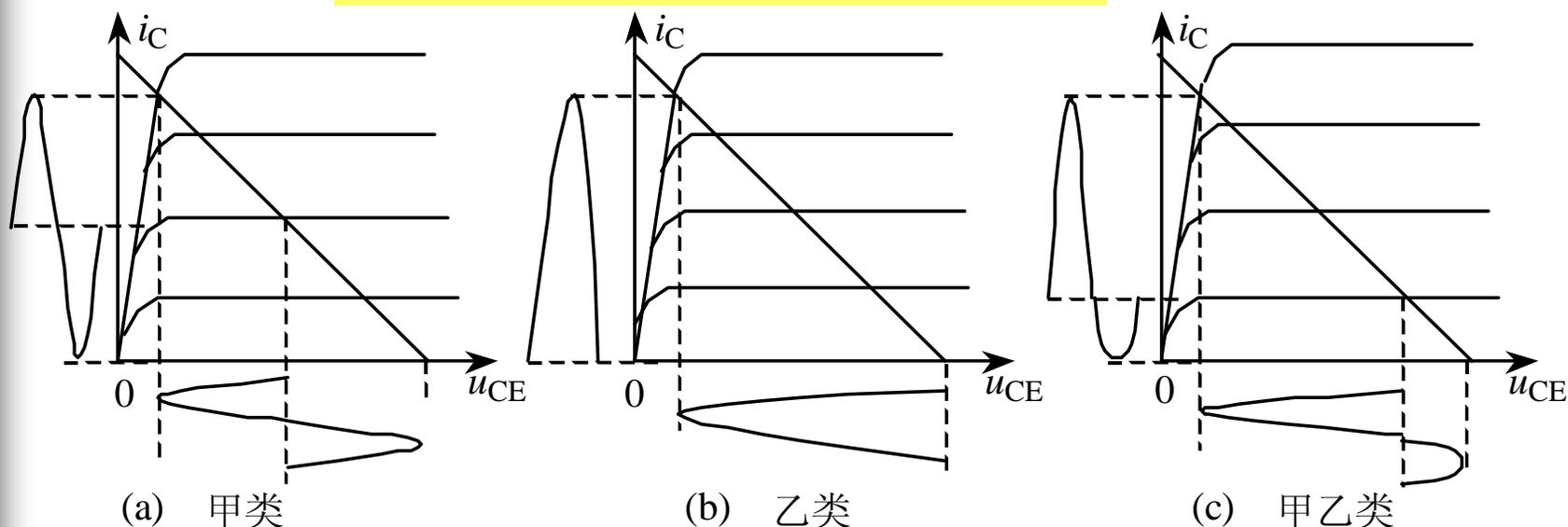
互补对称功率放大电路

功率放大电路的特点及类型

1. 功率放大电路的特点

功率放大电路的任务是向负载提供足够大的功率，这就要求①功率放大电路不仅要有较高的输出电压，还要有较大的输出电流。因此功率放大电路中的晶体管通常工作在高电压大电流状态，晶体管的功耗也比较大。对晶体管的各项指标必须认真选择，且尽可能使其得到充分利用。因为功率放大电路中的晶体管处在大信号极限运用状态，②非线性失真也要比小信号的电压放大电路严重得多。此外，功率放大电路从电源取用的功率较大，为提高电源的利用率，③必须尽可能提高功率放大电路的效率。放大电路的效率是指负载得到的交流信号功率与直流电源供出功率的比值。

2. 功率放大电路的类型



甲类功率放大电路的静态工作点设置在交流负载线的中点。在工作过程中，晶体管始终处在导通状态。这种电路功率损耗较大，效率较低，最高只能达到50%。

乙类功率放大电路的静态工作点设置在交流负载线的截止点，晶体管仅在输入信号的半个周期导通。这种电路功率损耗减到最少，使效率大大提高。

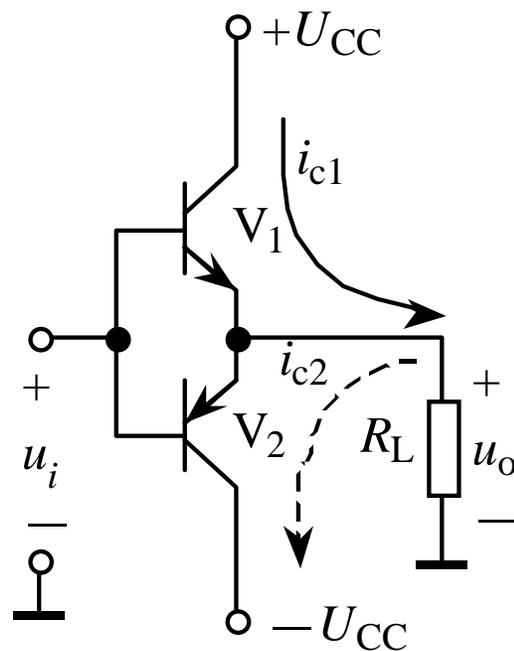
甲乙类功率放大电路的静态工作点介于甲类和乙类之间，晶体管有不小的静态偏流。其失真情况和效率介于甲类和乙类之间。

互补对称功率放大电路

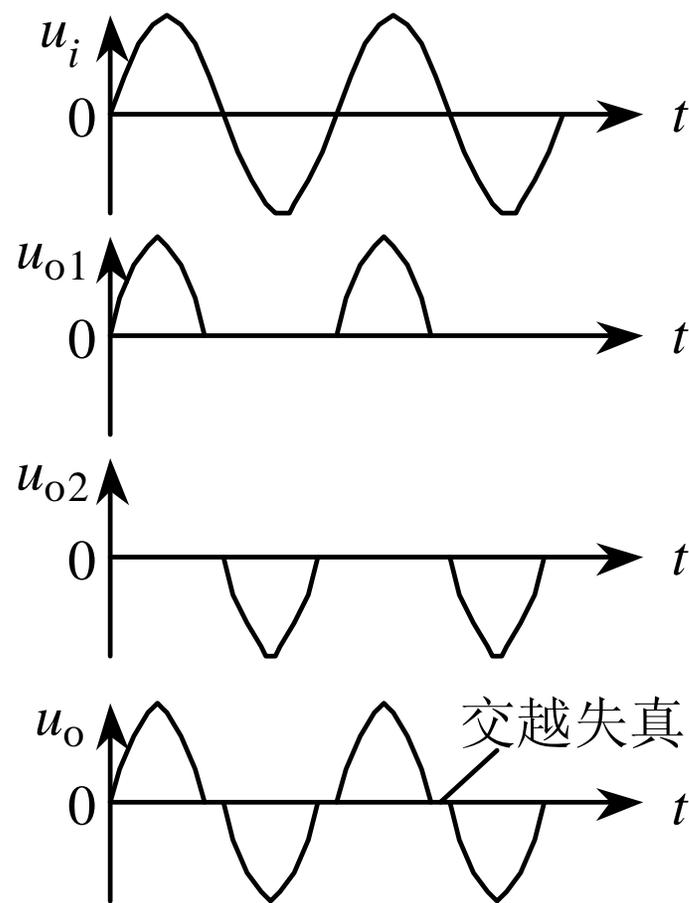
1. OCL功率放大电路

静态 ($u_i=0$) 时, $U_B=0$ 、 $U_E=0$, 偏置电压为零, V_1 、 V_2 均处于截止状态, 负载中没有电流, 电路工作在乙类状态。动态 ($u_i \neq 0$) 时, 在 u_i 的正半周 V_1 导通而 V_2 截止, V_1 以射极输出器的形式将正半周信号输出给负载; 在 u_i 的负半周 V_2 导通而 V_1 截止, V_2 以射极输出器的形式将负半周信号输出给负载。可见在输入信号 u_i 的整个周期内, V_1 、 V_2 两管轮流交替地工作, 互相补充, 使负载获得完整的信号波形, 故称互补对称电路。

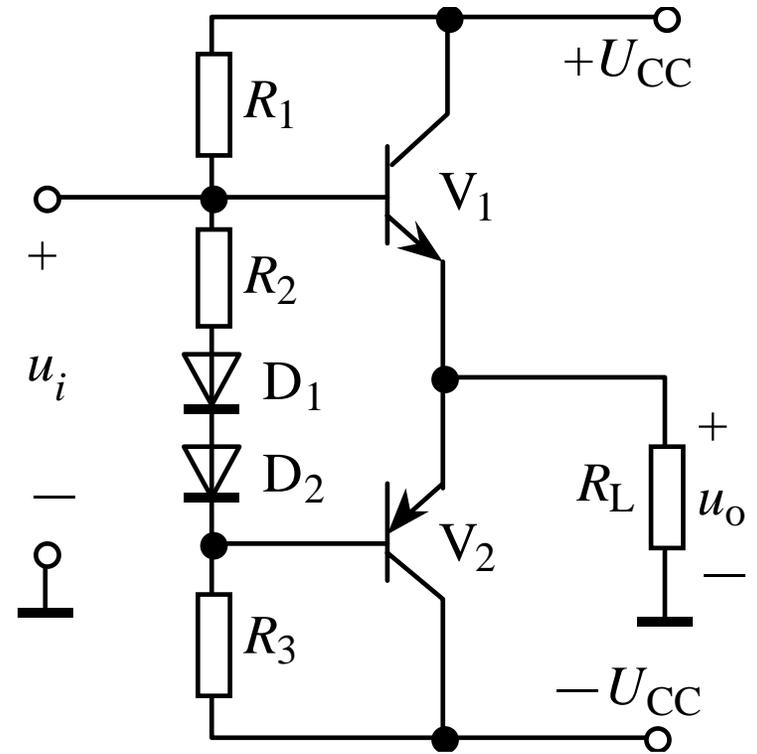
由于 V_1 、 V_2 都工作在共集电极接法, 输出电阻极小, 可与低阻负载 R_L 直接匹配。



从工作波形可以看到，在波形过零的一个小区域内输出波形产生了失真，这种失真称为交越失真。产生交越失真的原因是由于 V_1 、 V_2 发射结静态偏压为零，放大电路工作在乙类状态。当输入信号 u_i 小于晶体管的发射结死区电压时，两个晶体管都截止，在这一区域内输出电压为零，使波形失真。



为减小交越失真，可给 V_1 、 V_2 发射结加适当的正向偏压，以便产生一个不大的静态偏流，使 V_1 、 V_2 导通时间稍微超过半个周期，即工作在甲乙类状态，如图所示。图中二极管 D_1 、 D_2 用来提供偏置电压。静态时三极管 V_1 、 V_2 虽然都已基本导通，但因它们对称， U_E 仍为零，负载中仍无电流流过。



2. OTL功率放大电路

因电路对称，静态时两个晶体管发射极连接点电位为电源电压的一半，负载中没有电流。动态时，在 u_i 的正半周 V_1 导通而 V_2 截止， V_1 以射极输出器的形式将正半周信号输出给负载，同时对电容 C 充电；在 u_i 的负半周 V_2 导通而 V_1 截止，电容 C 通过 V_2 、 R_L 放电， V_2 以射极输出器的形式将负半周信号输出给负载，电容 C 在这时起到负电源的作用。为了使输出波形对称，必须保持电容 C 上的电压基本维持在 $U_{CC}/2$ 不变，因此 C 的容量必须足够大。

