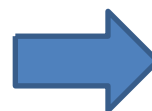
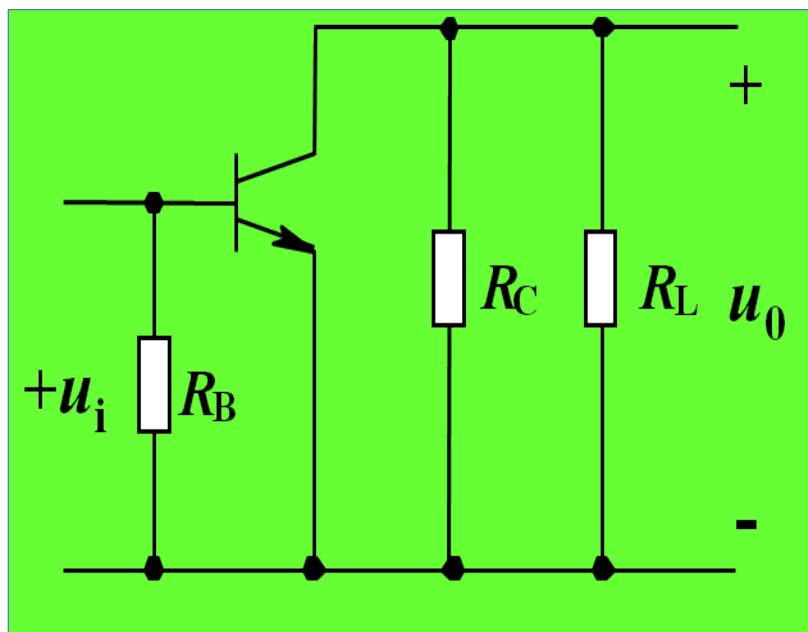


三、晶体管的低频交流小信号模型



交流通路

低频交流小信号模型

处理思路：当输入**交流小信号 (微变量)**时，因为工作点只在Q点附近的小范围内移动，所以Q处的**伏安特性可用线性关系来近似，把晶体管看作线性有源器件**，并用相应的线性元件来等效，便可得到Q点处的交流小信号模型。

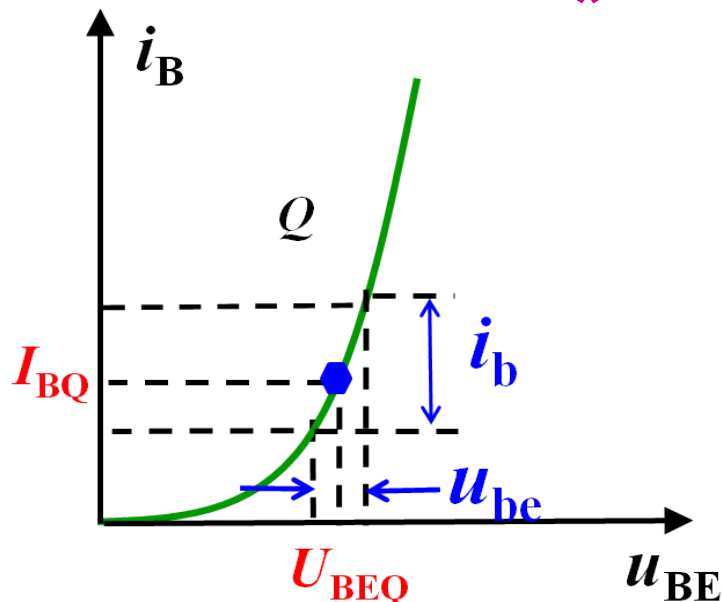
根据导出的方法不同，可分为两类：

1. 物理型电路模型（如：混合 π 型电路模型）
2. 网络参数模型（如：H参数电路模型）

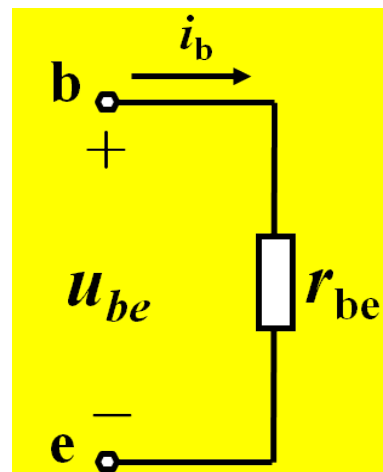
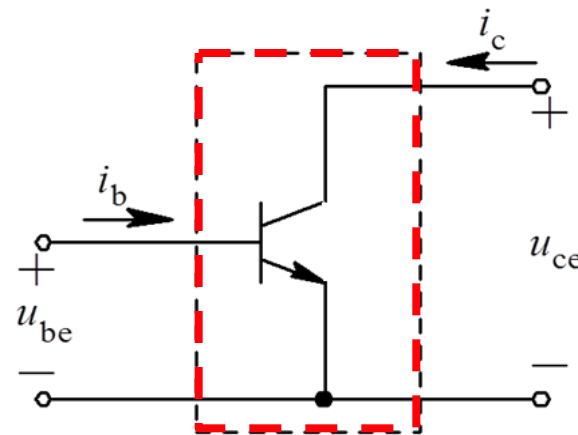
它们是等价的，相互之间可以进行转换。

一、共射混合 π 型电路模型

输入端:



u_{be} 对 i_b 的控制作用可用 b,e 极间相应的交流结电阻 r_{be} 来等效



$$r_{be} = \frac{u_{be}}{i_b} = \frac{u_{be}}{i_e / (1 + \beta)} = (1 + \beta) r_e \quad r_e = \frac{u_{be}}{i_e} \bigg|_Q = \frac{U_T}{I_{EQ}}$$

输出端:

1. u_{be} 通过 i_b 对 i_c 的控制作用，可以用接在c, e极间的一个电压控制电流源来等效，即 $i_c = g_m u_{be}$

式中控制参量 g_m 反映 u_{be} 对 i_c 的控制能力，简称跨

$$g_m = \frac{i_c}{u_{be}} = \frac{\beta i_b}{u_{be}} = \frac{\beta}{r_{be}} = \frac{\beta}{(1 + \beta) r_e} = \frac{\alpha}{r_e} \approx \frac{1}{r_e} = \frac{I_{EQ}}{U_T}$$

2. r_{ce} :反映 u_{ce} 对 i_c 的控制作用

$$r_{ce} = \frac{u_{ce}}{i_c} = \frac{U_A}{I_{CQ}}$$

3. r_{bc} :反映 u_{ce} 对 i_b 的控制作用

$$r_{bc} = \frac{u_{ce}}{i_b} = \frac{u_{ce}}{i_c / \beta} = \beta r_{ce}$$

厄尔利电压 U_A ：反映了厄尔利效应的大小

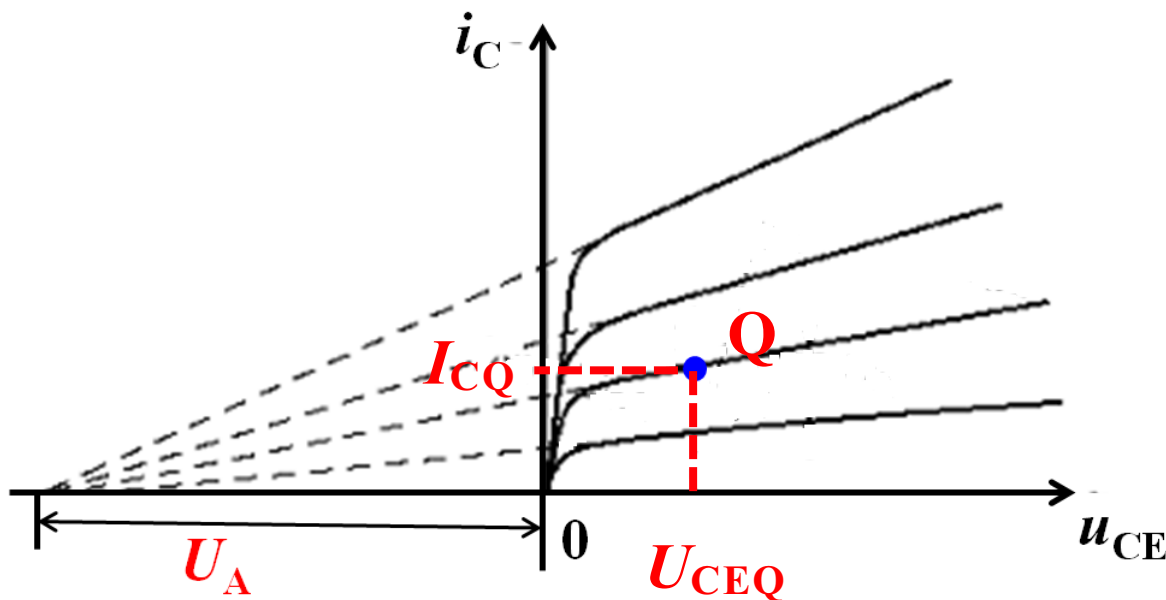
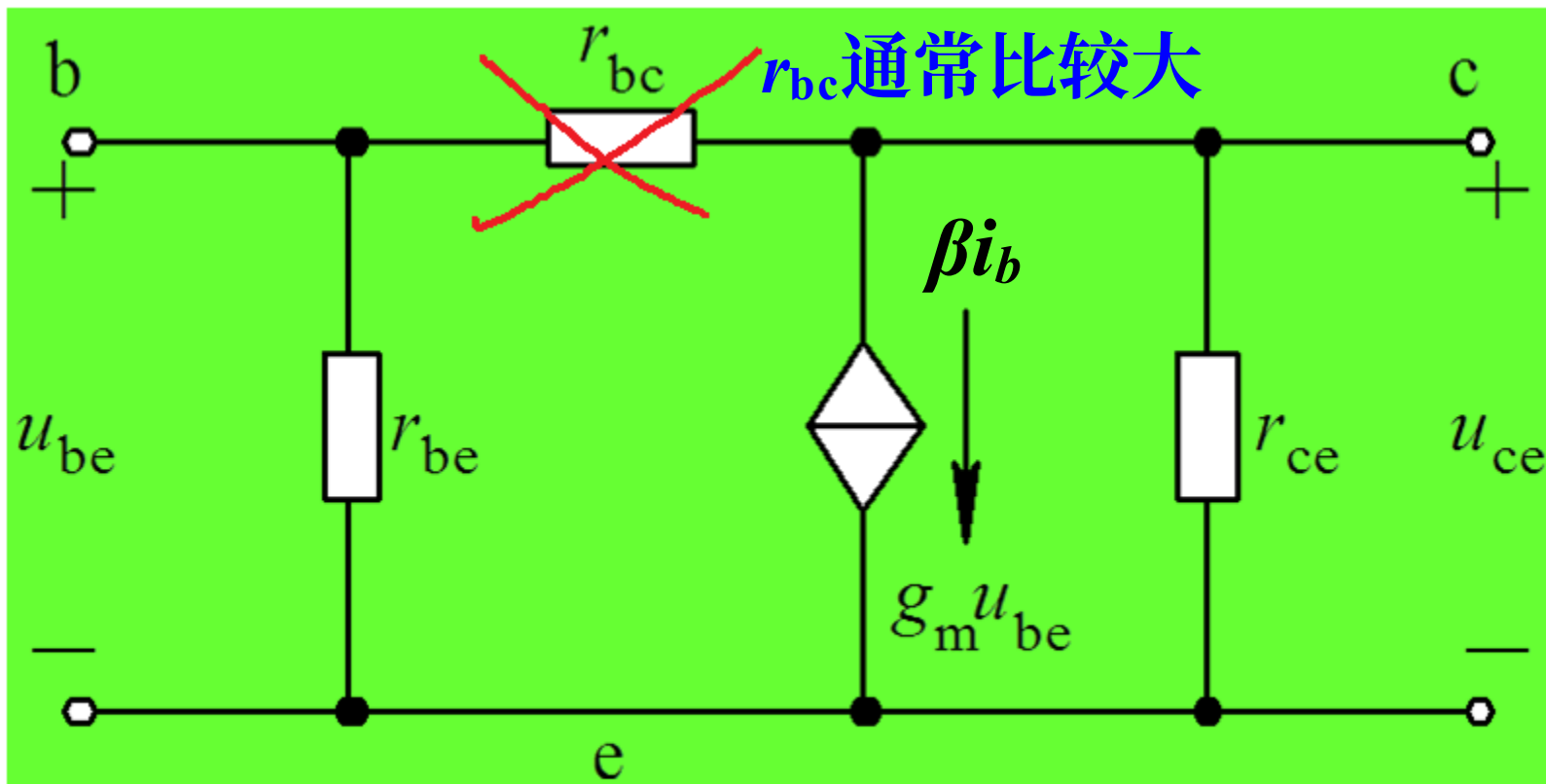


图 7. 厄尔利电压的输出特性

此效应意味着晶体管在放大区的交流输出电阻是个有限值

$$r_{ce} = \frac{|U_A| + U_{CEQ}}{I_{CQ}} \approx \frac{|U_A|}{I_{CQ}}$$



忽略体电阻的交流小信号等效模型

$$g_m = \frac{\beta i_b}{u_{be}} \approx \frac{\beta}{r_{be}} = \frac{\beta}{(1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}}} = \frac{\alpha}{U_T} \frac{I_{EQ}}{e}$$

掌握以下关系式：

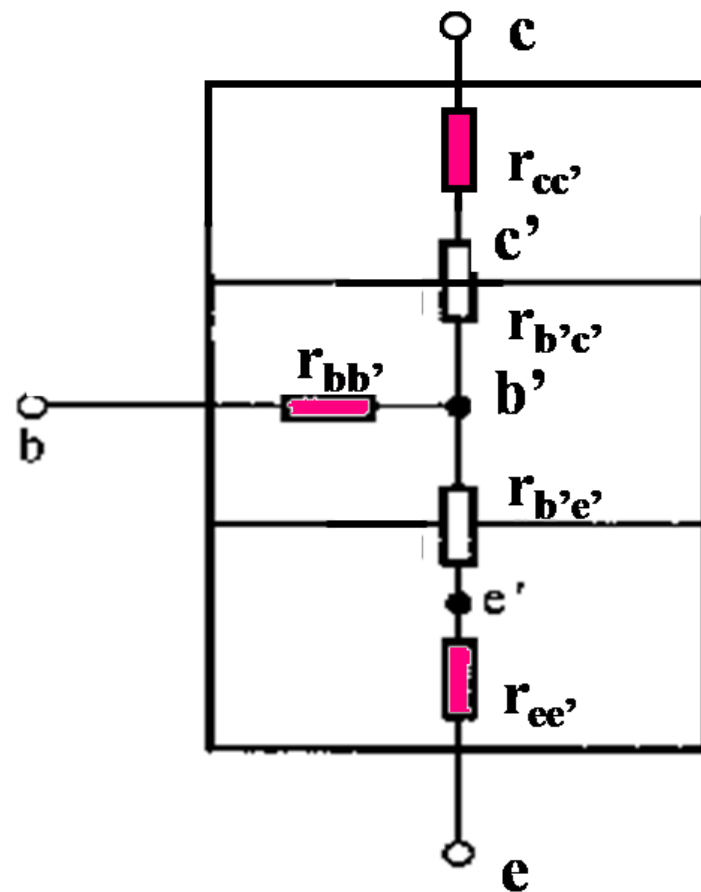
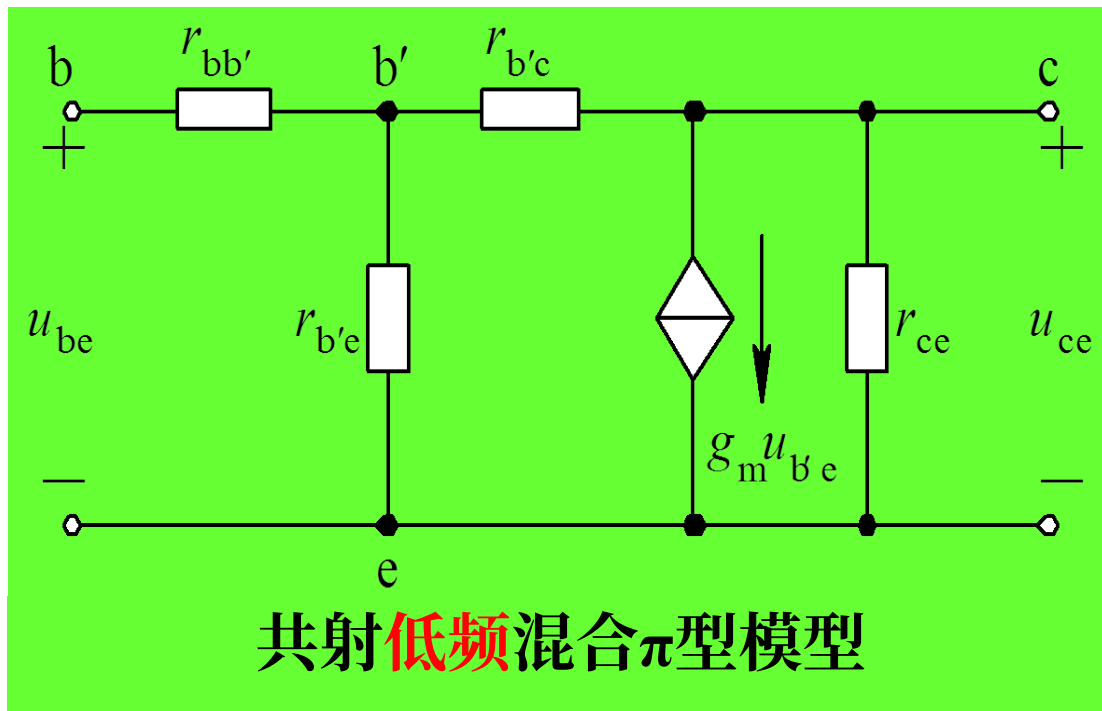
1. r_{be} : 反映 u_{be} 对 i_b 的控制作用 $r_{be} = (1 + \beta)r_e$ $r_e = \frac{U_T}{I_{EQ}}$

2. g_m : 反映 u_{be} 对 i_c 的控制作用 $g_m = \frac{\beta}{r_{be}} = \frac{\alpha}{r_e} \approx \frac{1}{r_e} = \frac{I_{EQ}}{U_T}$

3. r_{bc} : 反映 u_{ce} 对 i_b 的控制作用 $r_{bc} = \beta r_{ce}$

4. r_{ce} : 反映 u_{ce} 对 i_c 的控制作用 $r_{ce} = \frac{U_A}{I_{CQ}}$

考虑寄生效应（体电阻）的模型

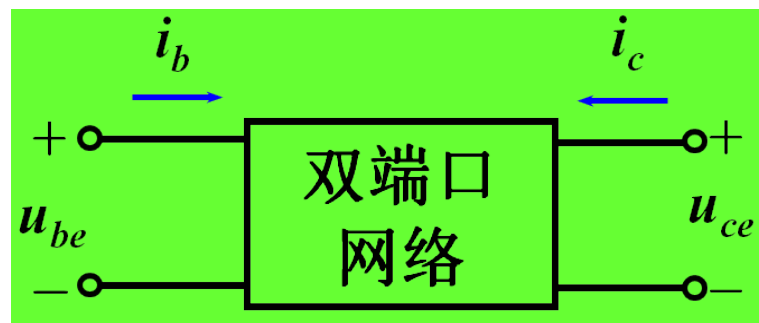
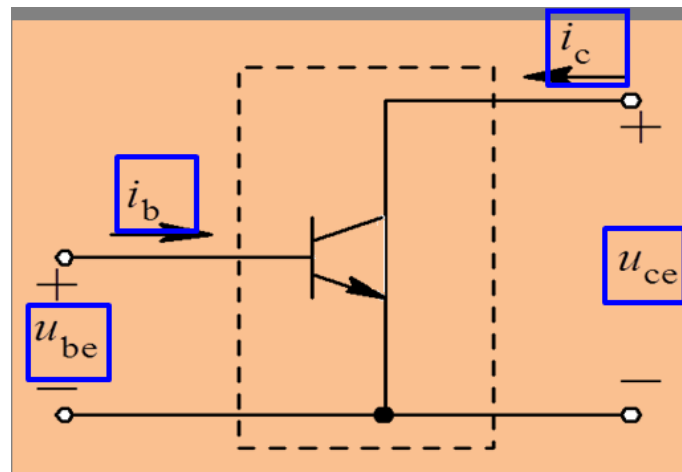


其中 $r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e} = r_{bb'} + (1 + \beta)r_e$ 、 $r_{b'c} = \beta r_{ce}$

二、H参数电路模型：

在静态工作点设置合理和输入为交流低频小信号（振幅2.6mV左右）的前提下，晶体管可等效为一个线性双端口电路：

2个作自变量，2个作因变量



若取 i_b 和 u_{ce} 为自变量， $u_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} u_{ce}$

i_c 和 u_{be} 为因变量，则有： $i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} u_{ce}$

$$u_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} u_{ce}, i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} u_{ce}$$

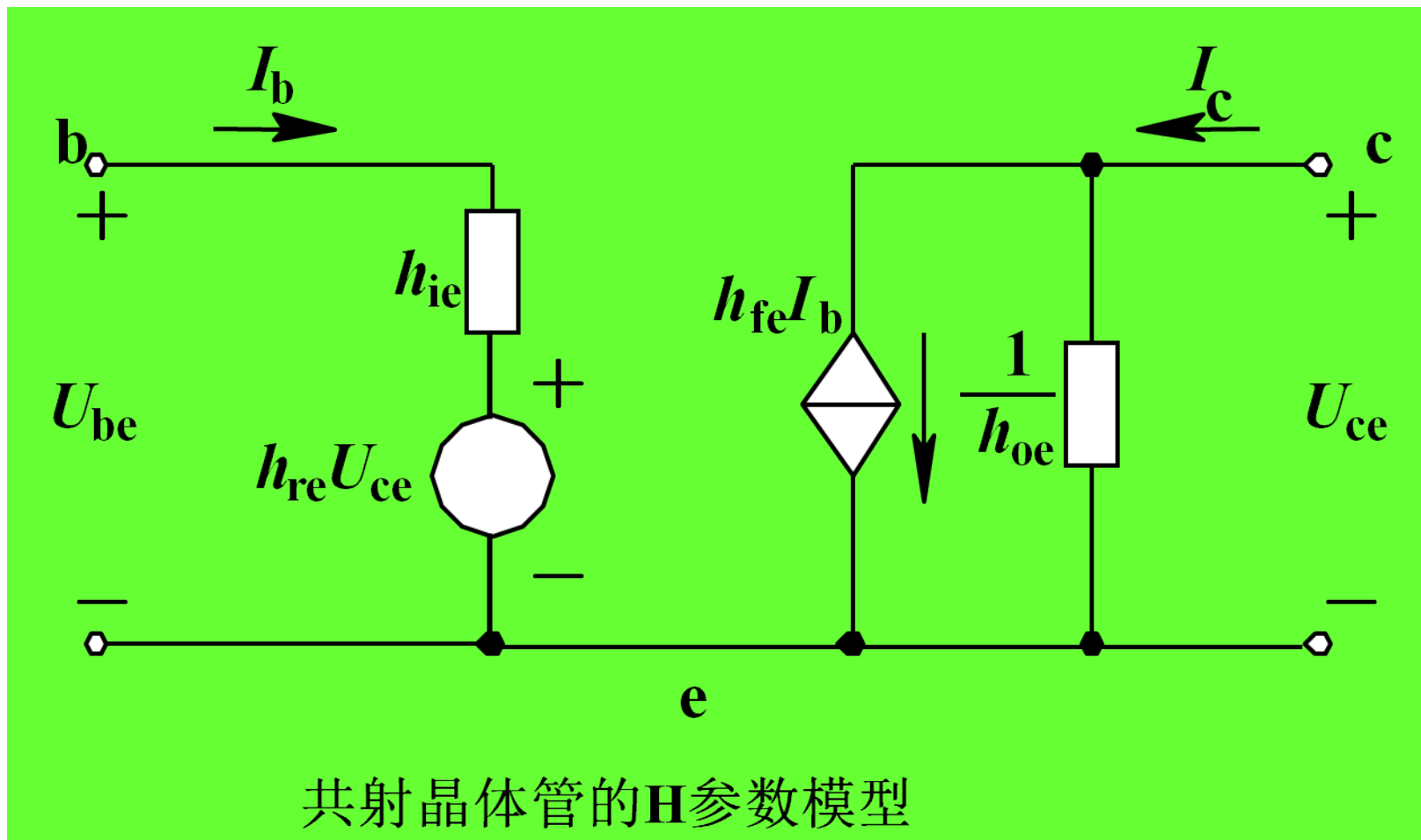
$$h_{ie} = \left. \frac{U_{be}}{I_b} \right|_{U_{ce}=0} \text{ ----- 输出交流短路时的输入电阻}$$

$$h_{re} = \left. \frac{U_{be}}{U_{ce}} \right|_{I_b=0} \text{ ----- 输入交流开路时的电压传输系数}$$

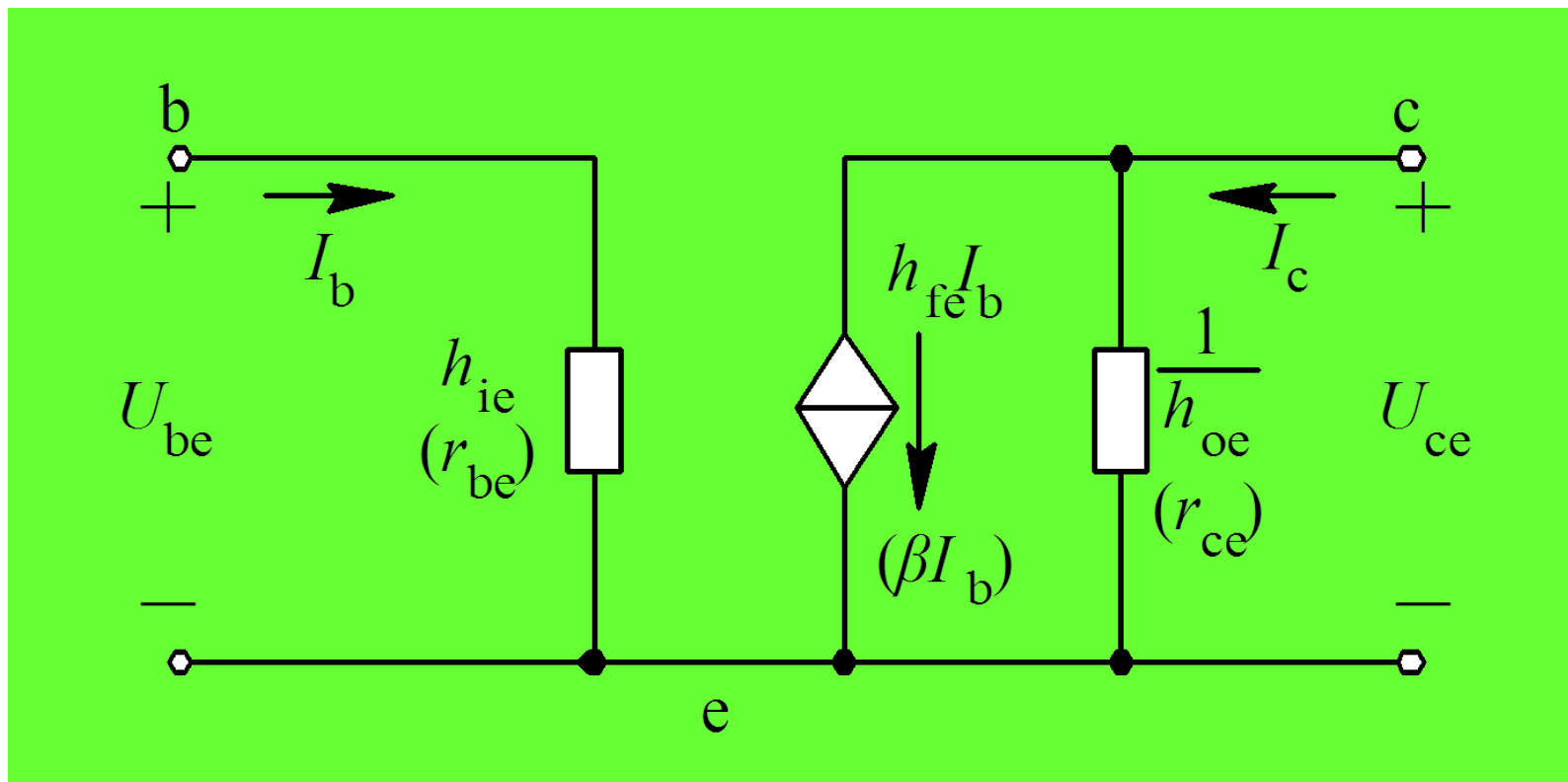
$$h_{fe} = \left. \frac{I_c}{I_b} \right|_{U_{ce}=0} \text{ ----- 输出交流短路时的电流放大系数}$$

$$h_{oe} = \left. \frac{i_c}{u_{ce}} \right|_{i_b=0} \text{ ----- 输入交流开路时的输出电导}$$

四个参数量纲各不相同，故称为混合(Hybrid)参数

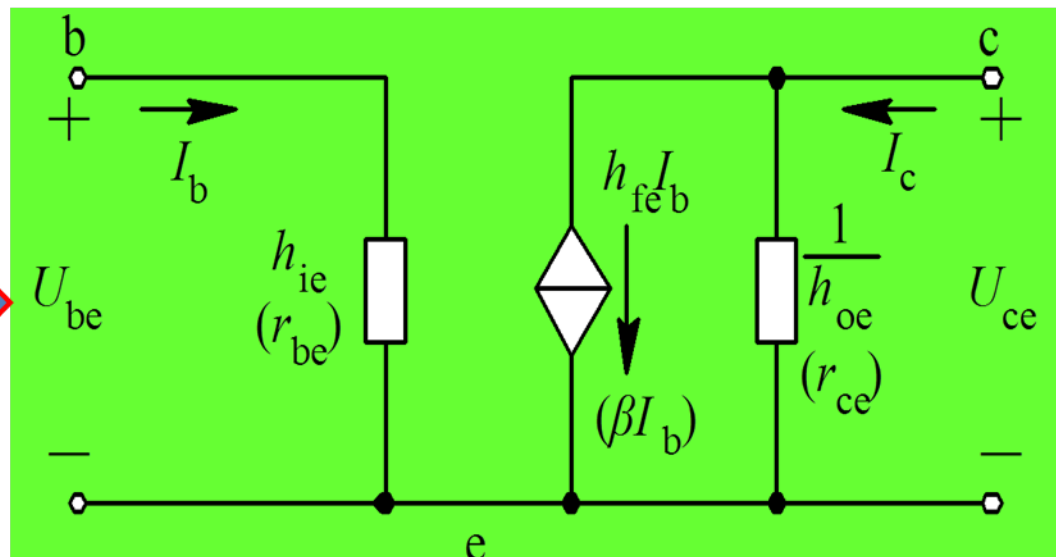
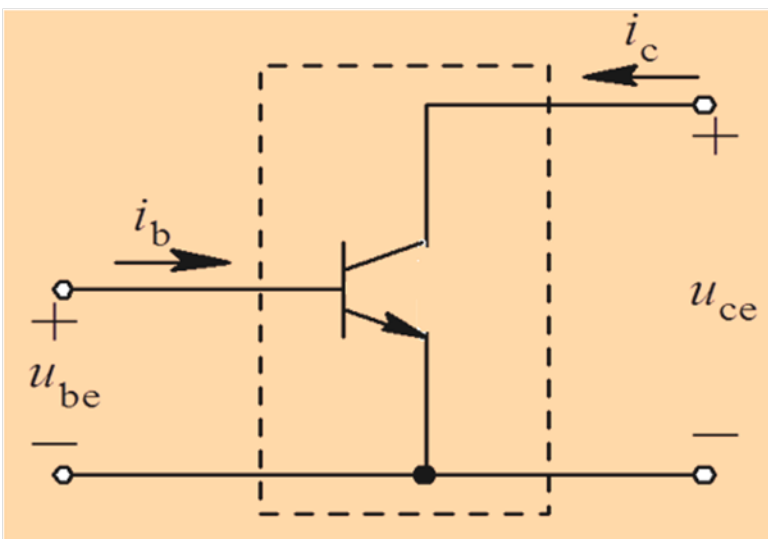


h_{re} 很小，可忽略，即 $h_{re}=0$ ，则可得到
简化的H参数模型



两种模型参数之间的关系 $h_{ie} \approx r_{be}, h_{fe} \approx \beta, h_{oe} \approx \frac{1}{r_{ce}}$

★ 简化的低频交流小信号模型：H参数或混合 π 模型



$$r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e} = r_{bb'} + (1 + \beta)r_e$$

$$= r_{bb'} + (1 + \beta)U_T/I_{EQ} = r_{bb'} + \alpha(1 + \beta)U_T/I_{CQ}$$

$$= r_{bb'} + \beta U_T/I_{CQ}$$

$$g_m = \frac{i_c}{u_{be}} = \frac{\beta i_b}{u_{be}} = \frac{\beta}{r_{be}} = \frac{\beta}{(1 + \beta)r_e} = \frac{\alpha}{r_e} \approx \frac{1}{r_e} = \frac{I_{EQ}}{U_T}$$

例题:

某双极性晶体管的静态工作点 $U_{CEQ}=5V$

$I_{CQ}=0.2mA$, $\beta=100$, 厄尔利电压 $U_A=100V$, $r_{bb'}=100\Omega$ 。试

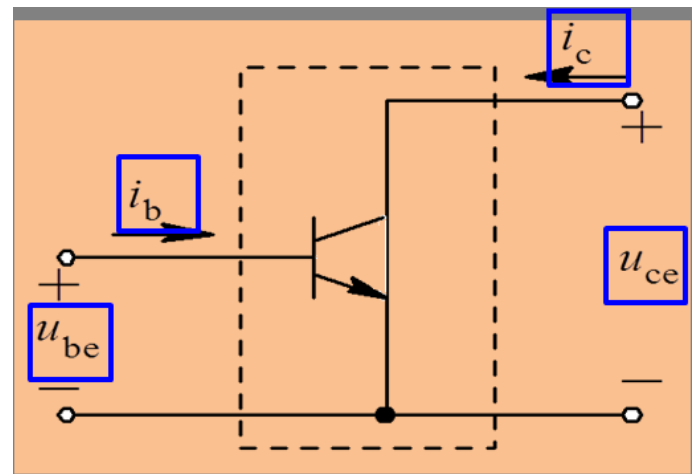
求混合 π 型电

路和H参数模型的参数:

$$r_{b'e} = (1 + \beta) r_e = (1 + 100) \frac{U_T}{I_{EQ}} = 100 \frac{U_T}{I_{CQ}} = 100 \times \frac{26mV}{0.2mA} = 13k\Omega$$

$$g_m = \frac{1}{r_e} = \frac{I_{EQ}}{U_T} \approx \frac{0.2}{26} = 77ms$$

$$r_{ce} = \frac{U_A}{I_{CQ}} = \frac{100}{0.2mA} = 500k\Omega$$



再求H电路参数：

$$h_{ie} = r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e} = 100\Omega + 13k\Omega = 13.1k\Omega$$

$$h_{fe} = \beta = 100$$

$$h_{oe} = \frac{1}{r_{ce}} = 2 \times 10^{-6} S$$

四、等效电路法分析共射放大电路的动态参数

画出直流通路，用近似
估算法求解直流工作点



确定交流通路，用模型等效晶体管得到交流等效电路

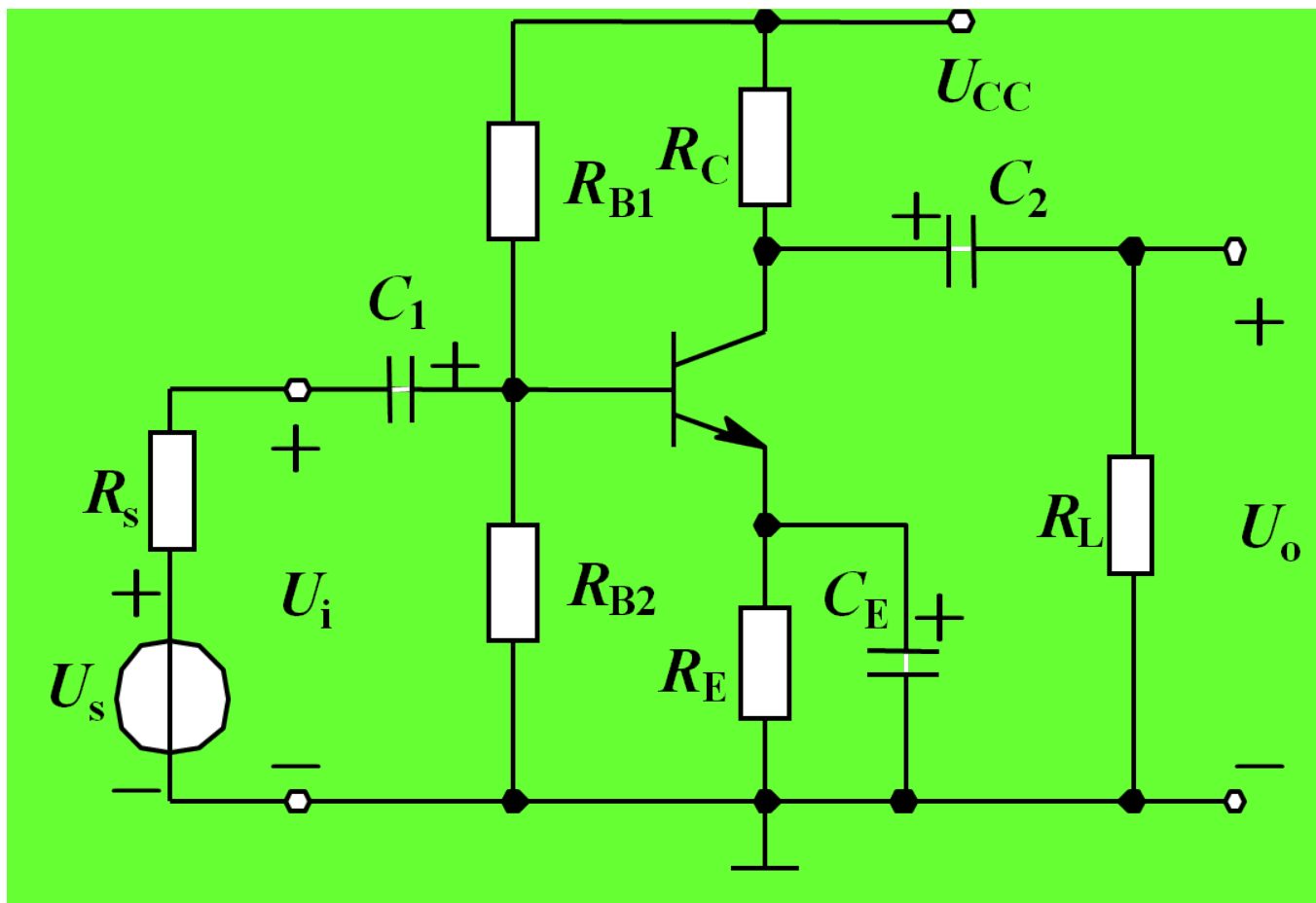
(微变等效电路只适用于
低频小信号放大电路)



根据交流等效电路计算
放大器的各项交流指标

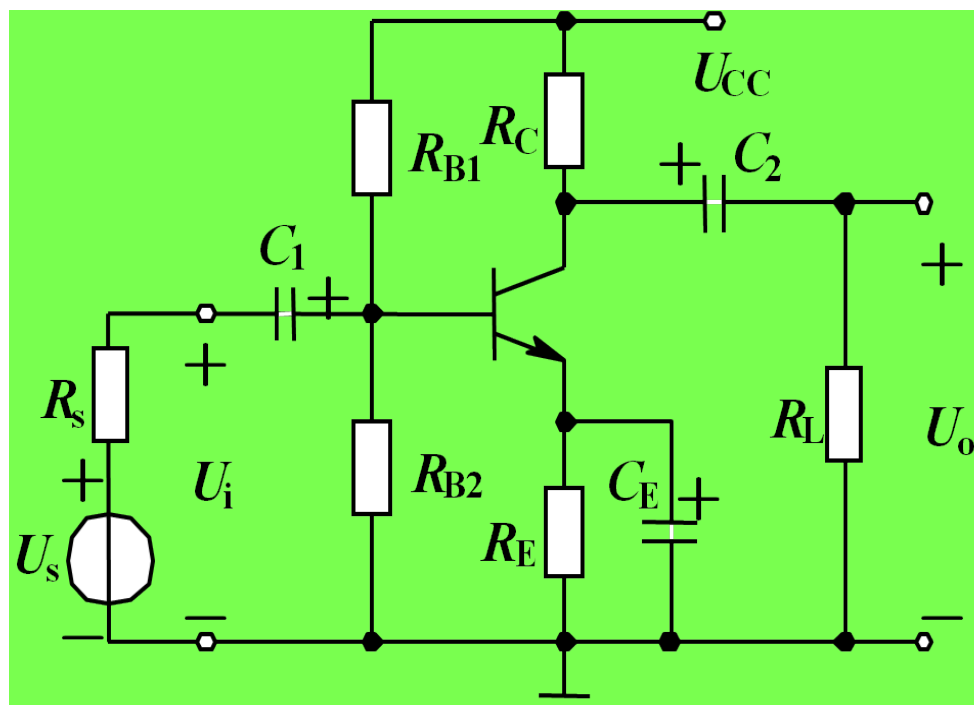
(只能用来计算交流分量，
不能计算总的瞬时值和静态
工作点)

以**共射**放大电路为例, 讨论放大电路交流性能的分析方法。

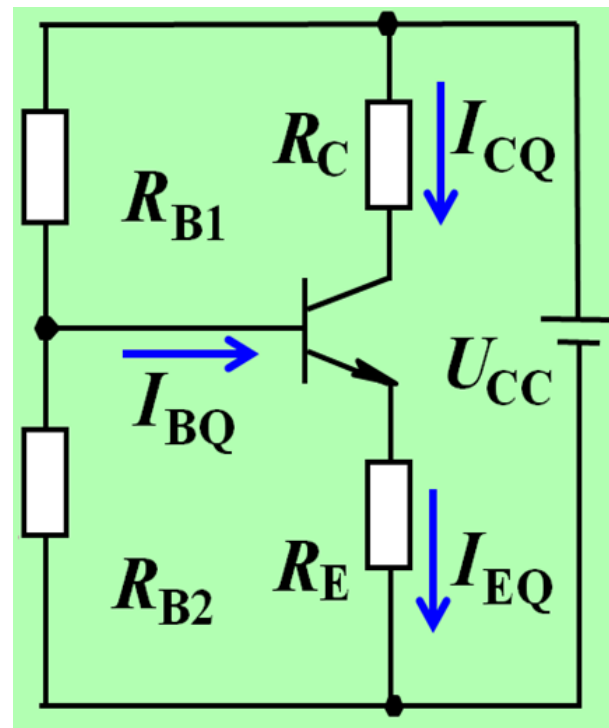


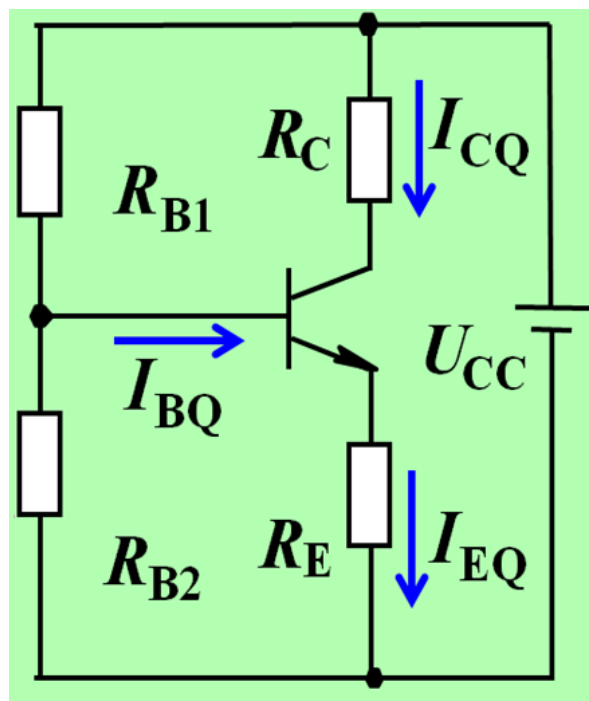
分压式电流负反馈偏置电路

画出直流通路，用近似
估算法求解直流工作点



直流通路



静态工作点 (I_{BQ} , I_{CQ} , U_{CEQ})

由直流通路知，基极电位为

$$U_{BQ} \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}$$

集电极与发射极电流为

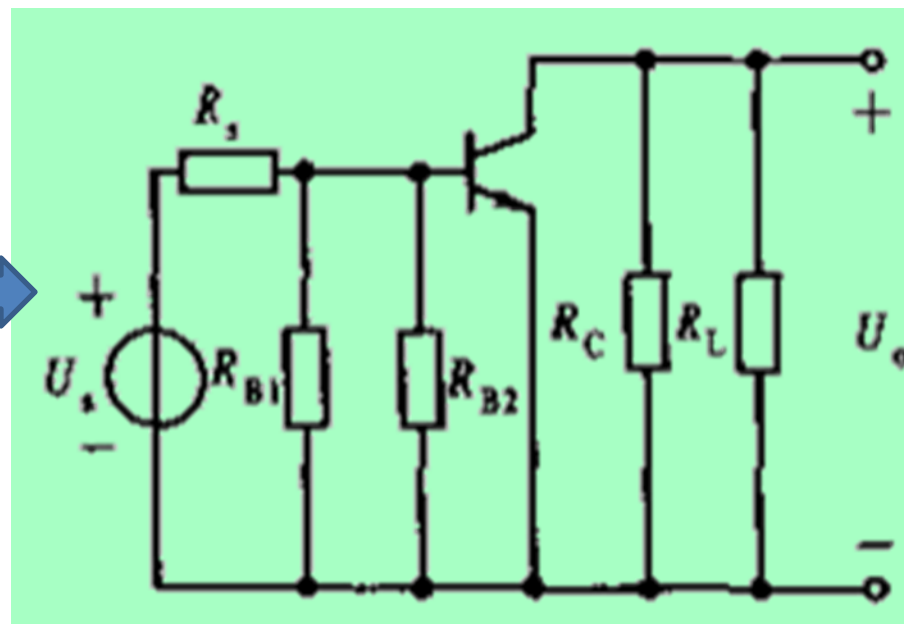
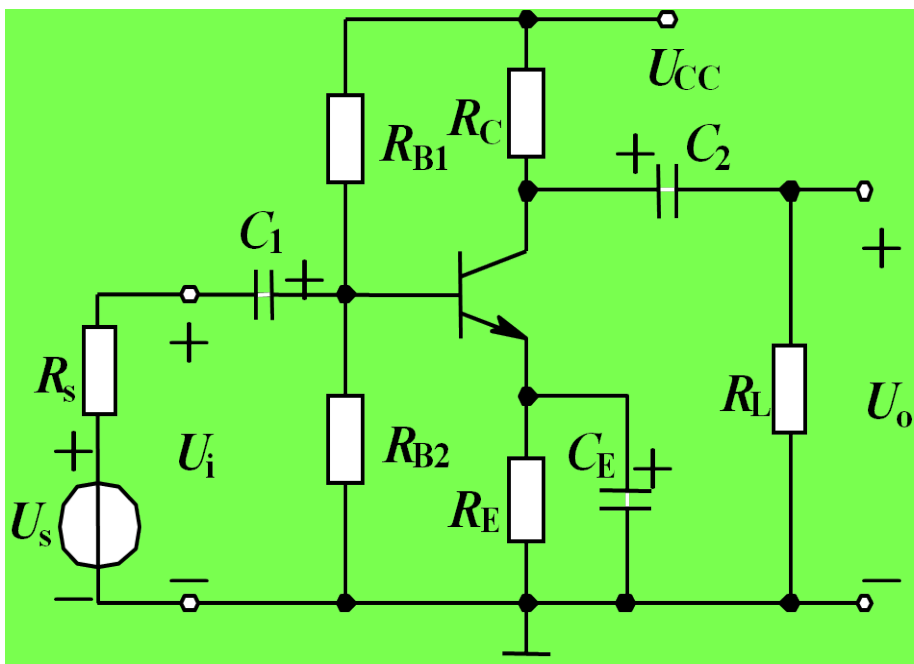
$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BE(on)}}{R_E}$$

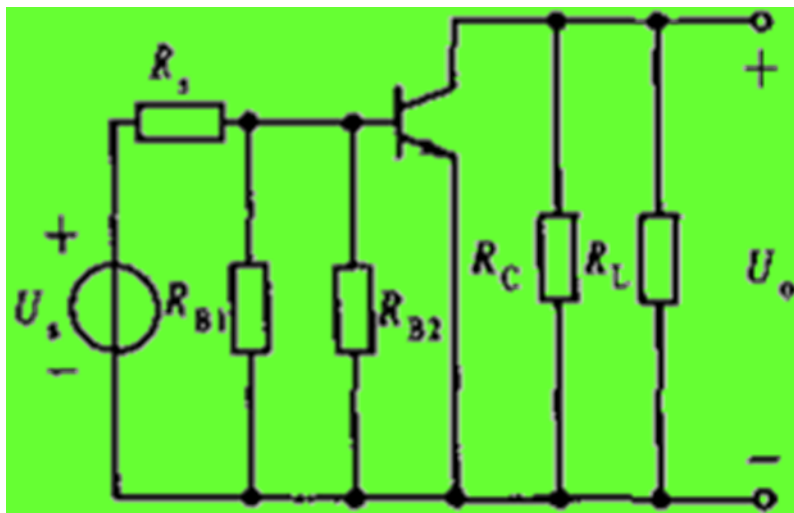
管压降为 $U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E)$

$$\text{基极电流管为 } I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$$

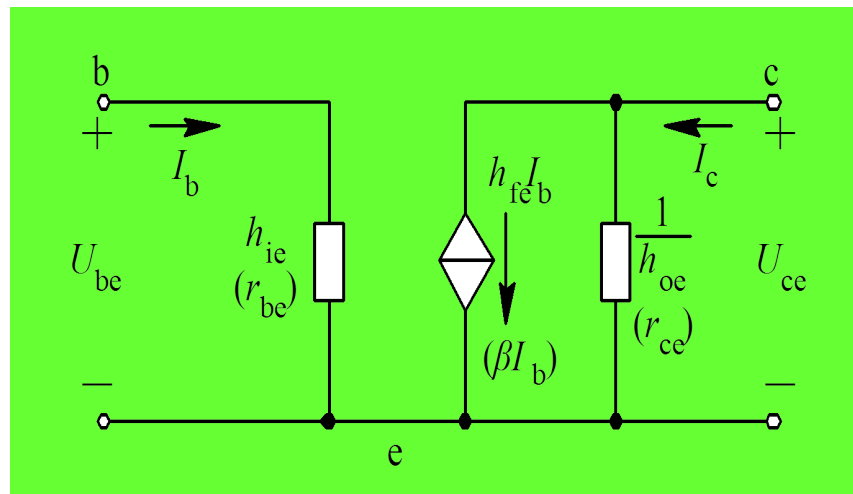
确定交流通路，用模型等效晶体管得到交流等效电路

交流通路





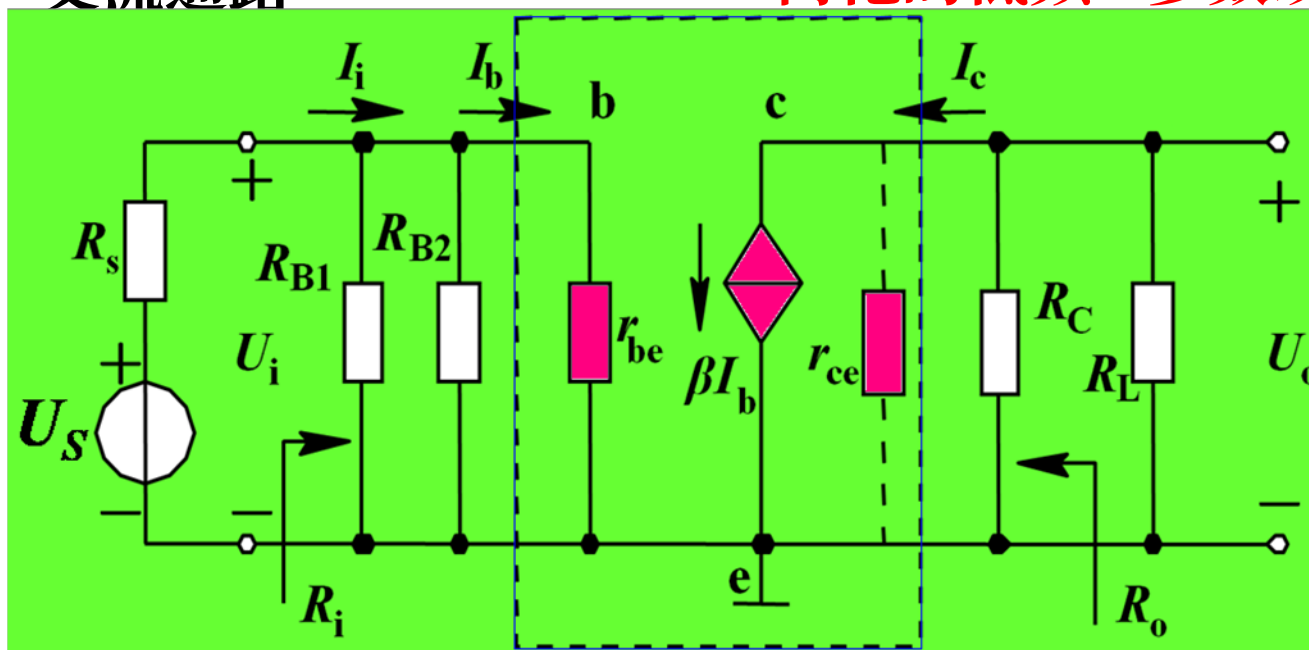
+



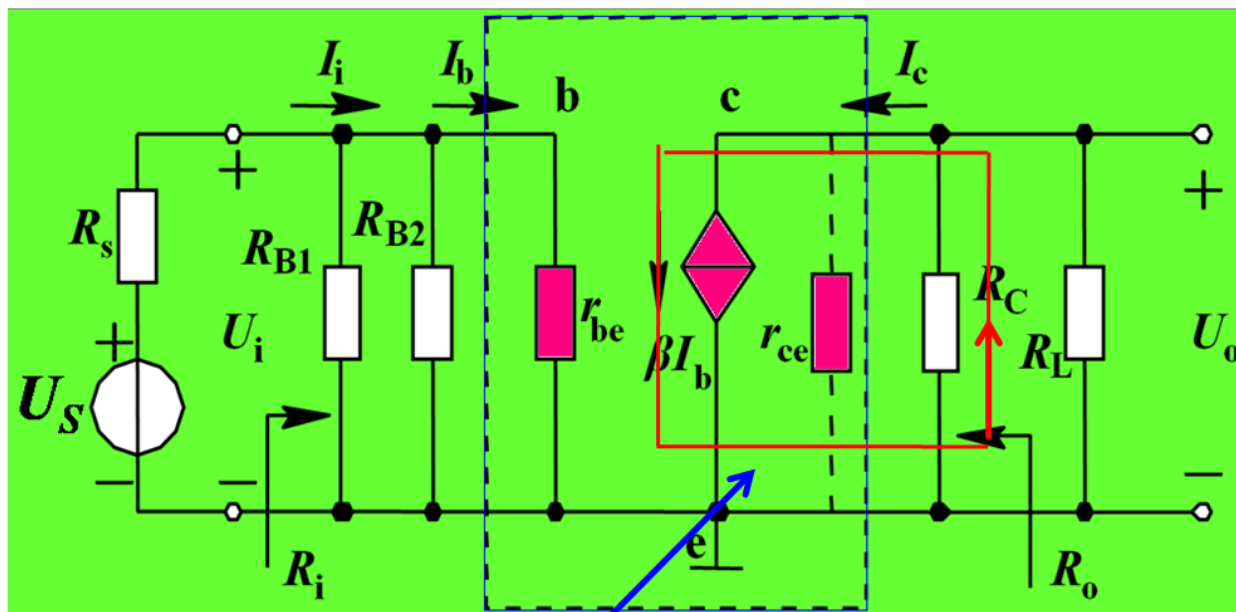
交流通路



简化的低频H参数或混合π模型



交流等效电路



$$I_i = I_{RB1} + I_{RB2} + I_b$$

$$I_c = \beta I_b = I_{rce} + I_{RC} + I_{RL}$$

1. 电压放大倍数(电压增益) $A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\text{输出交流电压有效值}}{\text{输入交流电压有效值}}$

$$U_i = U_{be} = I_b r_{be}$$

$$U_o = -I_c (r_{ce} \parallel R_C \parallel R_L) \approx -I_c (R_C \parallel R_L) = -\beta I_b (R_C \parallel R_L)$$

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{\beta (R_C \parallel R_L)}{r_{be}} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

输出、输入电压反相

其中

$$\begin{aligned}r_{be} &= r_{bb'} + r_{b'e} = r_{bb'} + (1 + \beta)r_e \\&= r_{bb'} + (1 + \beta)U_T / I_{EQ} = r_{bb'} + \alpha(1 + \beta)U_T / I_{CQ} \\&= r_{bb'} + \beta U_T / I_{CQ} \quad (I_{CQ} = \alpha I_{EQ})\end{aligned}$$

∴ 当忽略 $r_{bb'}$ 时, $r_{be} = (1 + \beta)r_e$

$$\begin{aligned}\therefore A_u &= -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} = -\frac{\beta R'_L}{(1 + \beta)r_e} = -\frac{\alpha R'_L}{r_e} \\&= -g_m R'_L = -\frac{R'_L}{26(mV)} I_{CQ}\end{aligned}$$

2. 电流放大倍数 $A_i = \frac{I_{RL}}{I_i}$ ----无量纲参数

$$\text{流过 } R_L \text{ 的电流 } I_{RL} = \frac{I_c R_C}{R_C + R_L} = \frac{\beta I_b R_C}{R_C + R_L}$$

$$\text{而 } I_i = I_b \frac{R_B + r_{be}}{R_B}$$

式中 $R_B = R_{B1} \parallel R_{B2}$ 。由此可得

$$A_i = \frac{I_{RL}}{I_i} = \beta \frac{R_B}{R_B + r_{be}} \cdot \frac{R_C}{R_C + R_L}$$

若满足 $R_B \gg r_{be}$, $R_C \gg R_L$, 则

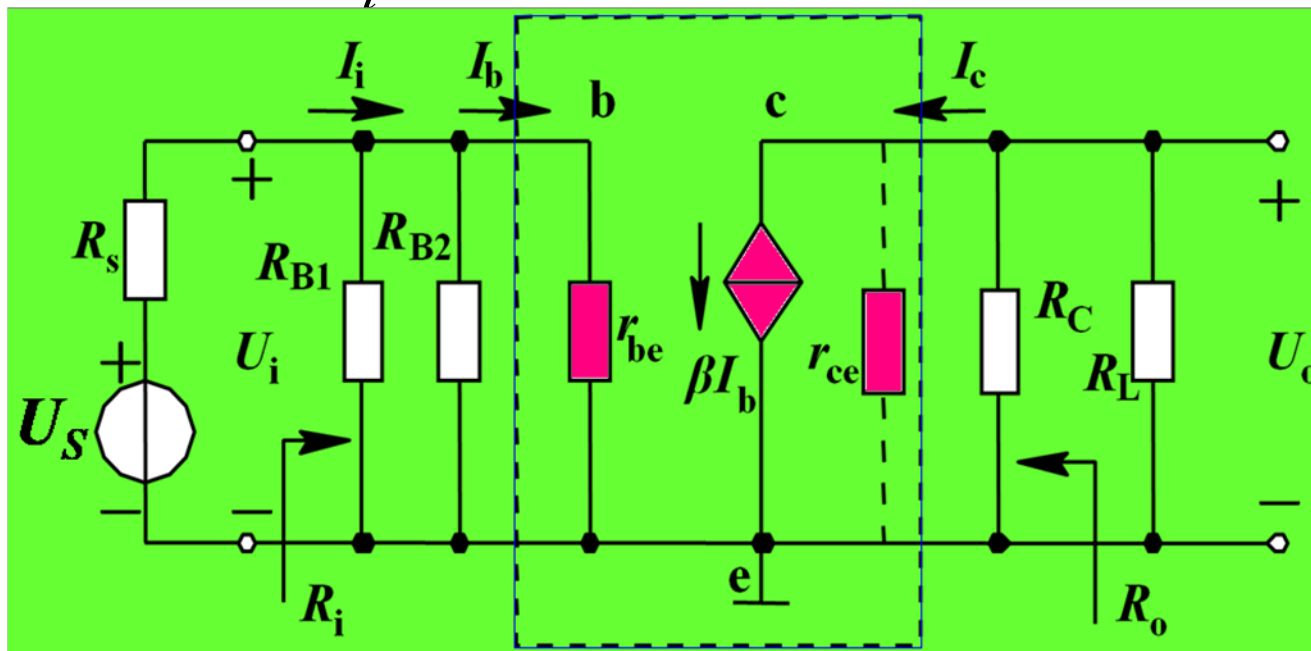
$$A_i \approx \beta$$

可见，共射极放大器既有电压放大，又有电流放大，因而具有极大的功率增益。

3. 输入电阻 R_i

定义：从放大器输入端看进去的交流等效电阻，即：

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel r_{be}$$

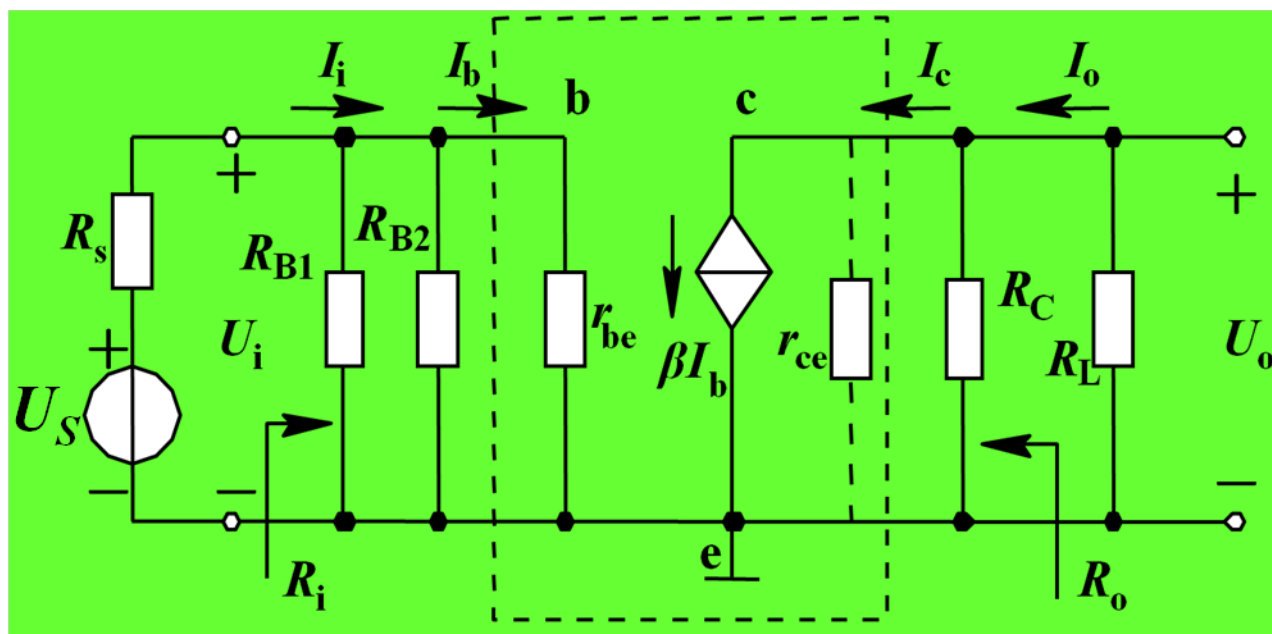


对信号源来说，放大器相当于它的负载，
 R_i 则表征该负载能从信号源获取多大信号。

4. 输出电阻 R_o

定义：从放大器输出端看进去的交流等效电阻，即：

$$R_o = \left. \frac{U_o}{I_o} \right|_{U_s=0, R_L=\infty}$$



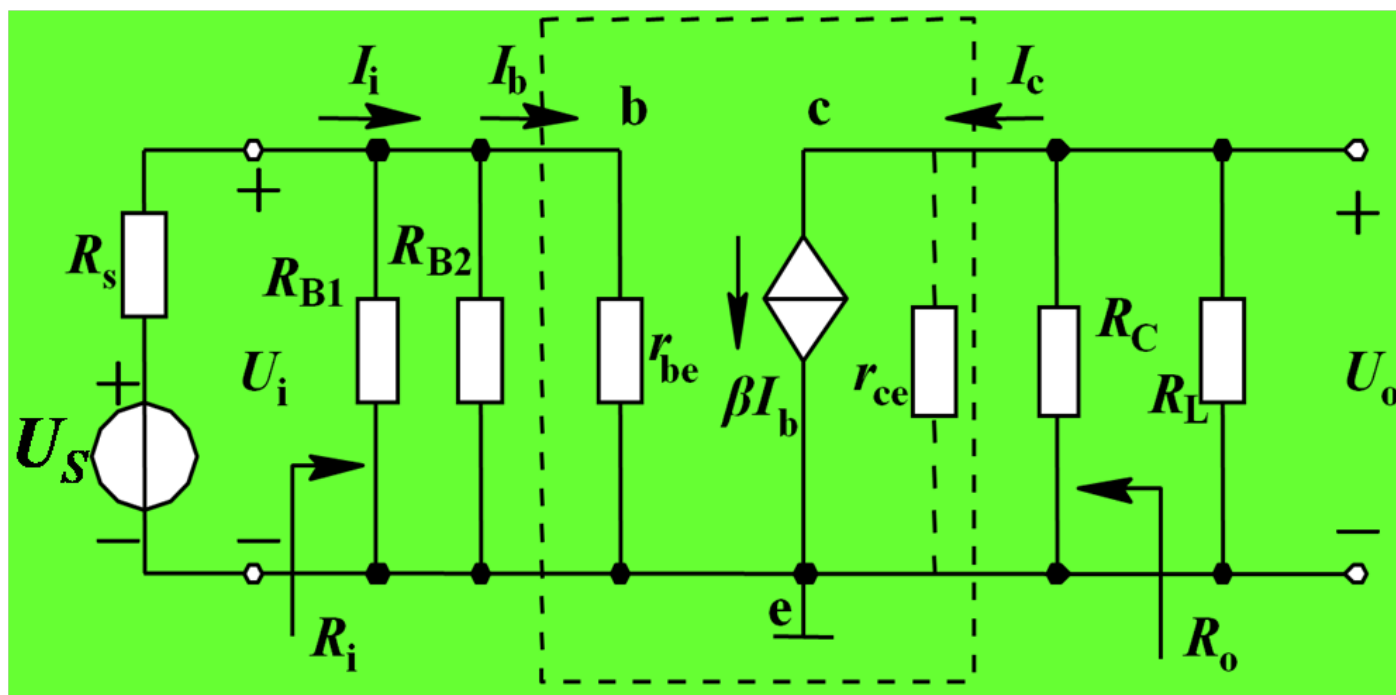
在电路的输出端将负载断开，并加一电压 U_o ，并将 U_s 短路时，因 $I_b=0$ ，则受控源 $\beta I_b=0$ 。这时，从输出端看进去的电阻为 R_C 。

对负载来说，放大器相当于它的信号源，而 R_o 正是该信号源的内阻，是一个表征放大器带负载能力的参数。

5. 源电压放大倍数 A_{us}

定义：输出电压与信号源电压的比值，即：

$$A_{us} = \frac{U_o}{U_s} = \frac{U_i}{U_s} \cdot \frac{U_o}{U_i} = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_u \quad |A_{us}| \leq |A_u|$$



6. 发射极接有电阻 R_E 时的情况

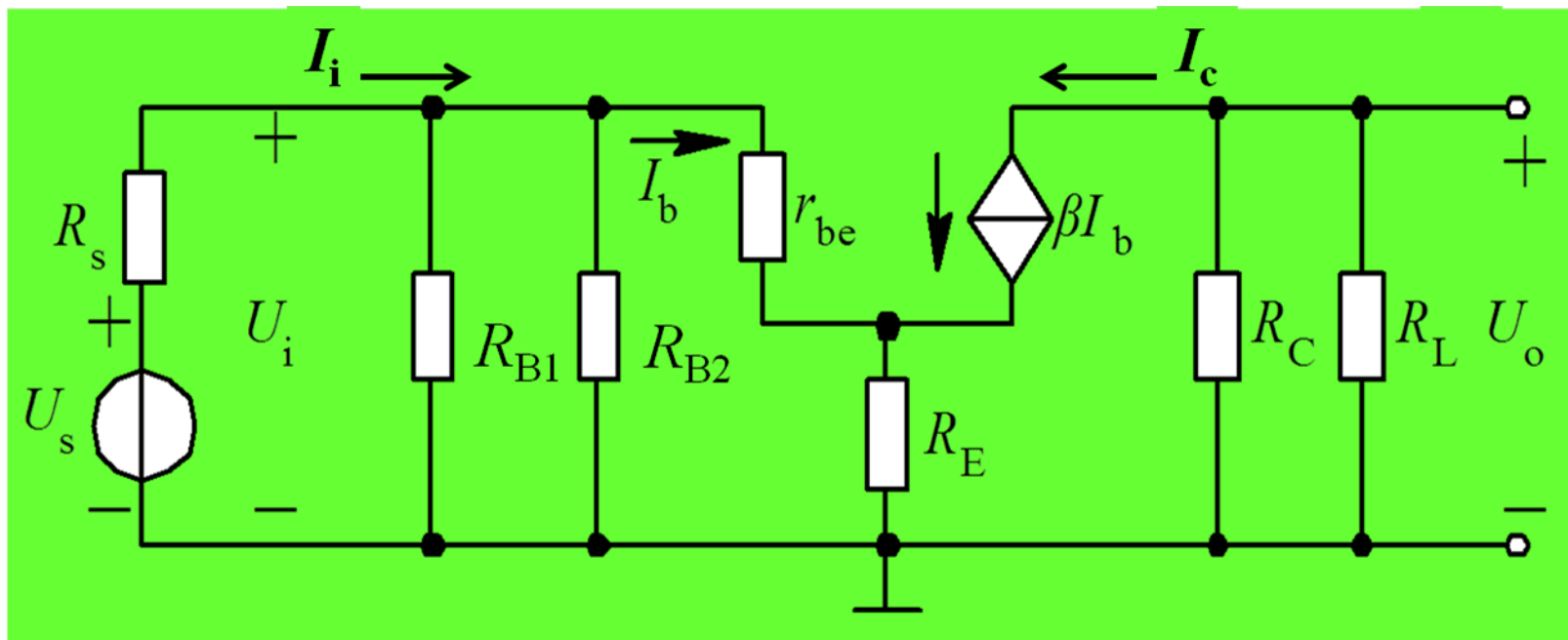
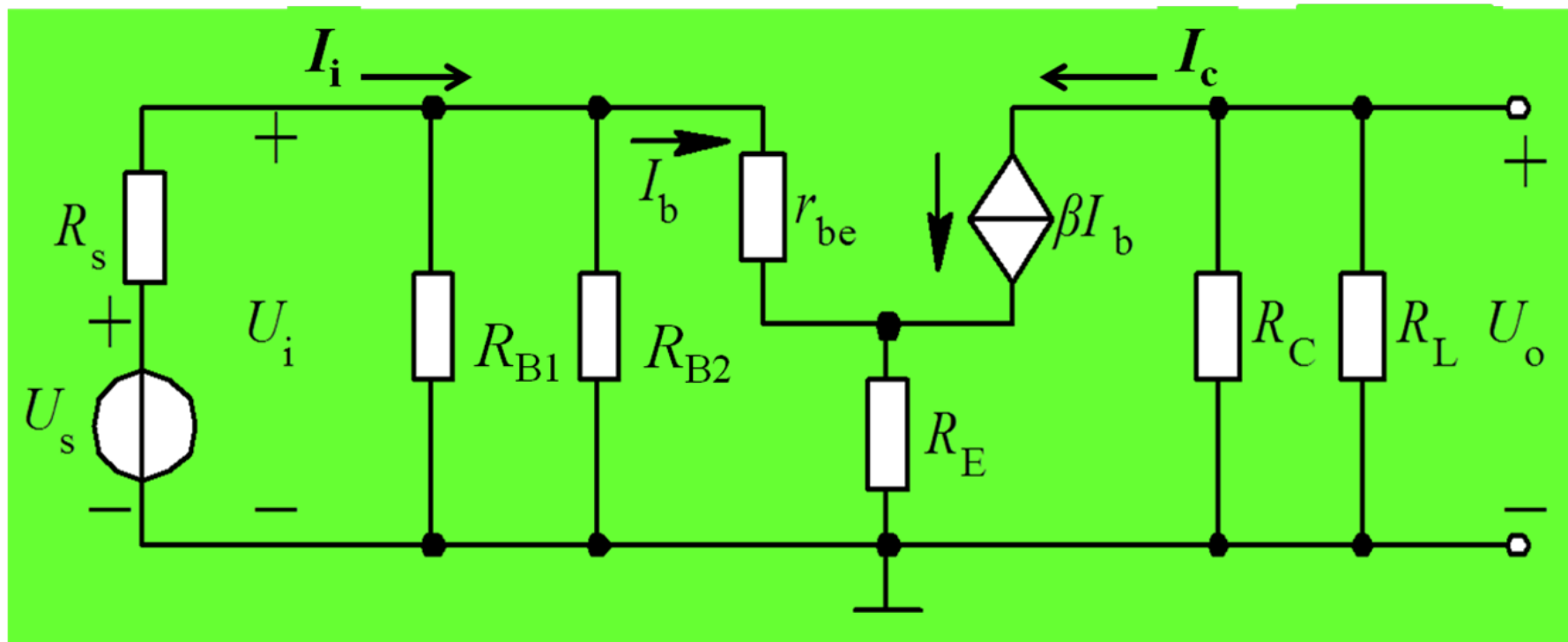


图2.5.12 发射极接电阻时的交流等效电路

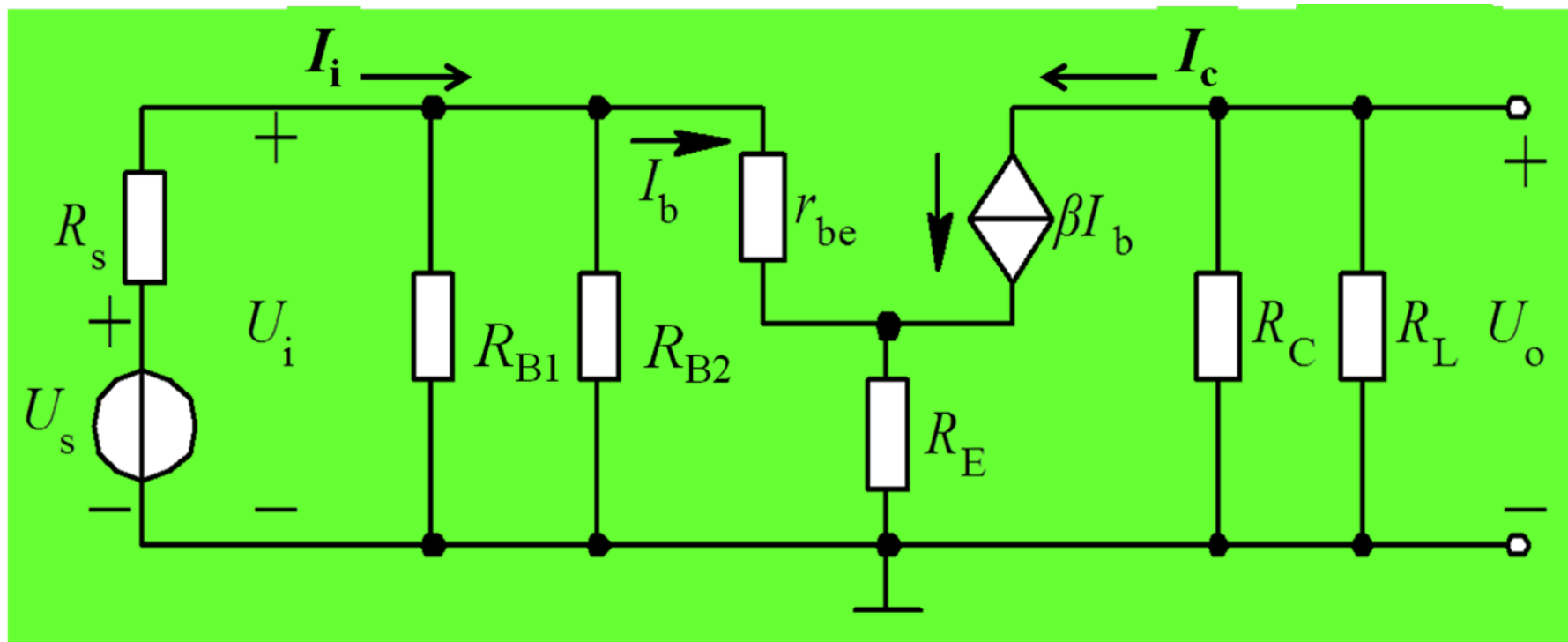
$$I_i = I_{RB1} + I_{RB2} + I_b$$

$$I_c = \beta I_b = I_{RC} + I_{RL}$$

$$U_i = I_b r_{be} + (1 + \beta) I_b R_E$$



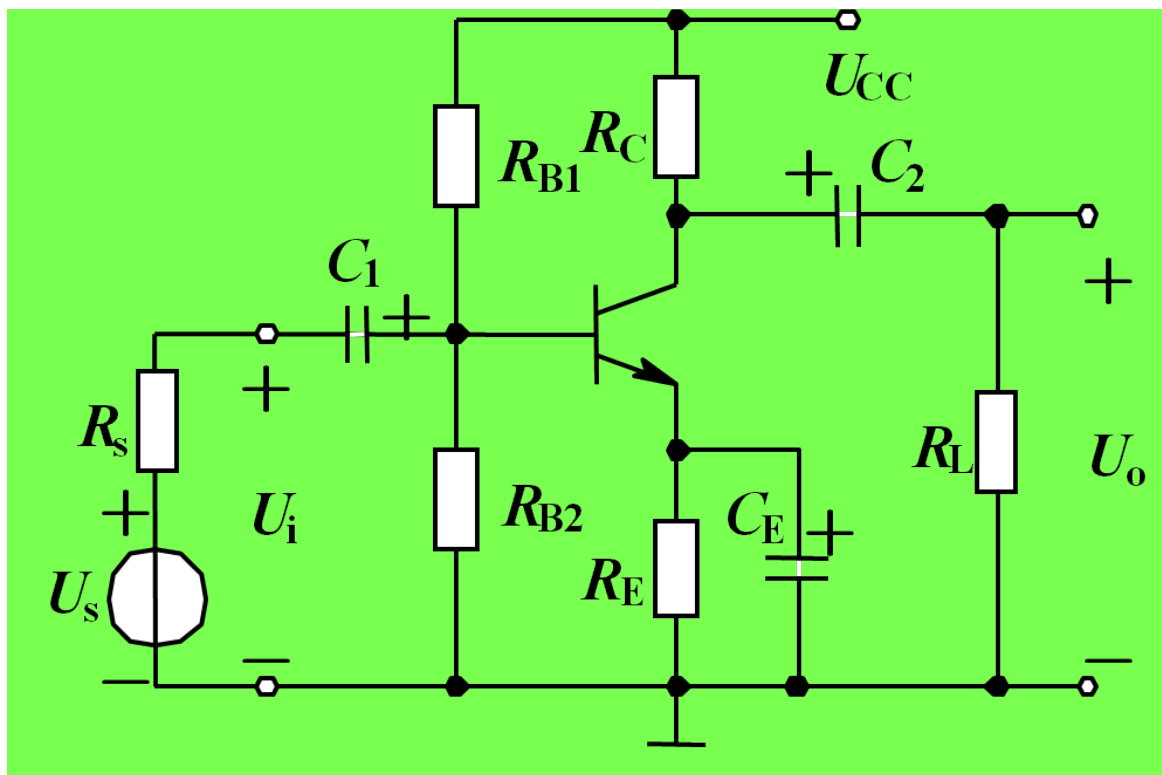
$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = - \frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_E} = - \frac{\frac{\beta}{r_{be}} R'_L}{1 + \frac{1 + \beta}{r_{be}} R_E} \approx - \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R_E}$$

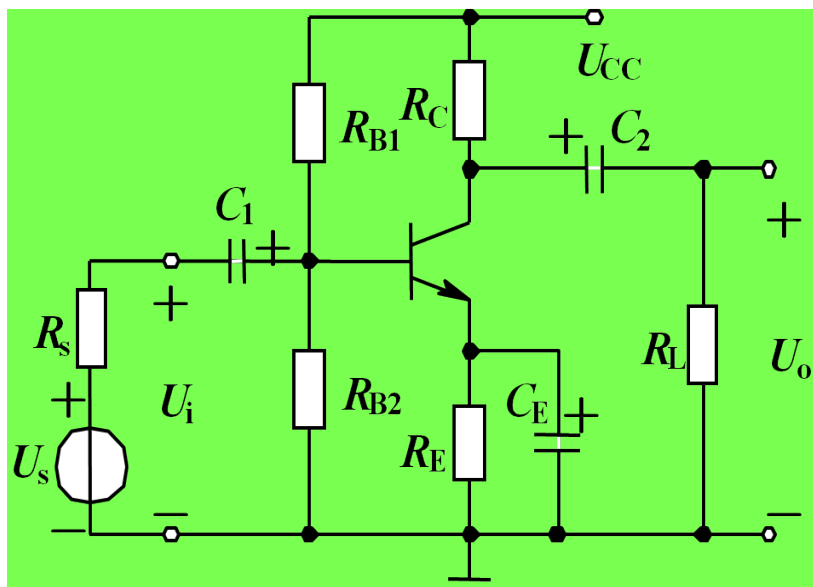


输出电阻 $R_o = \frac{U_o}{I_o} \bigg|_{\substack{U_s=0 \\ R_L=\infty}} = R_c$ 与发射极没有电阻 R_E 时的情况一样

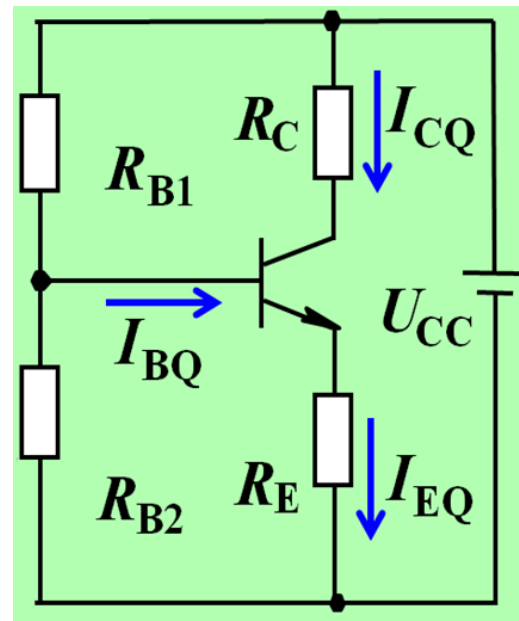
输入电阻 $R_i = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel R'$, 其中 $R'_i = r_{be} + (1 + \beta)R_E$

例3.5.3 电路如下图，其中 $R_{B1}=75k\Omega$, $R_{B2}=25k\Omega$, $R_C=R_L=2k\Omega$, $R_E=1k\Omega$, $U_{CC}=12V$, $\beta=80$, $r_{bb'}=100\Omega$, $R_s=0.6k\Omega$, 试求直流工作点 I_{CQ} , U_{CEQ} 及 A_u , R_i , R_o 和 A_{us} 等项指标。





直流通路

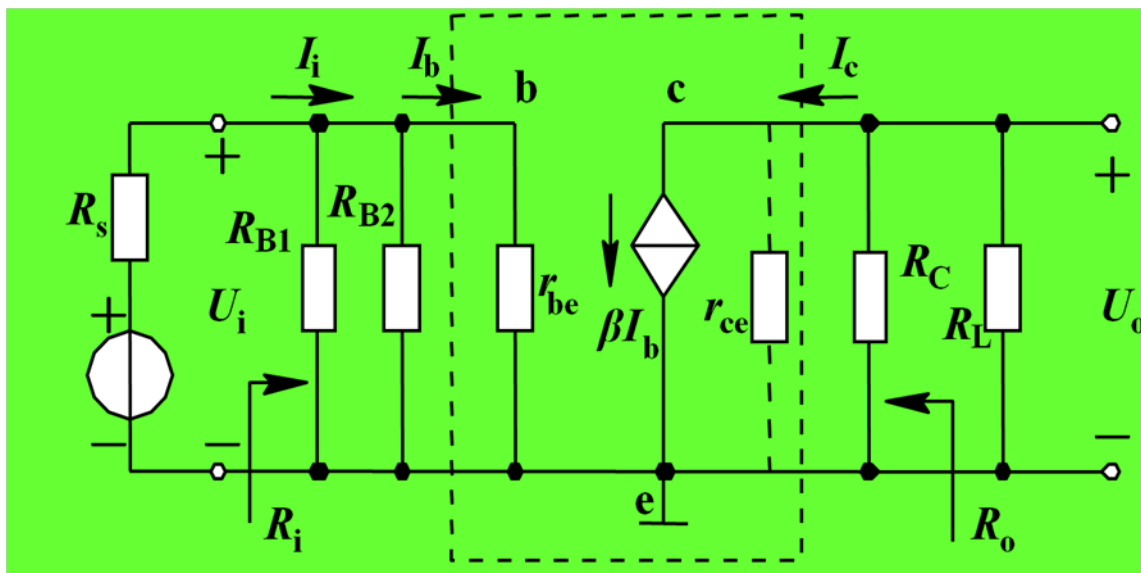


解: 画出直流通路，用估算法计算静态工作点 Q ：

$$U_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC} = \frac{25}{75 + 25} \times 12 = 3V$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_B - U_{BEQ}}{R_E} = \frac{3 - 0.7}{1} = 2.3mA$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) = 12 - 2.3 \times (2 + 1) = 5.1V$$

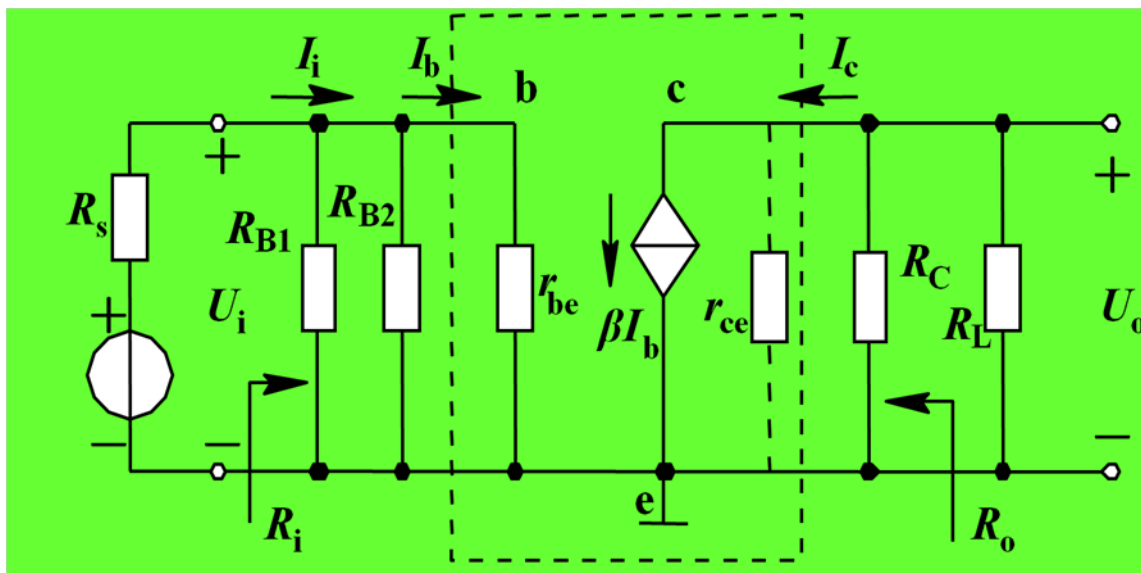


下面求交流指标，交流等效电路如上图，

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

$$\text{式中: } r_{be} = r_{bb'} + \beta \frac{26}{I_{CQ}} = 100 + 80 \frac{26}{2.3} = 1k\Omega$$

$$R'_L = R_C \parallel R_L = 2 \parallel 2 = 1k\Omega$$



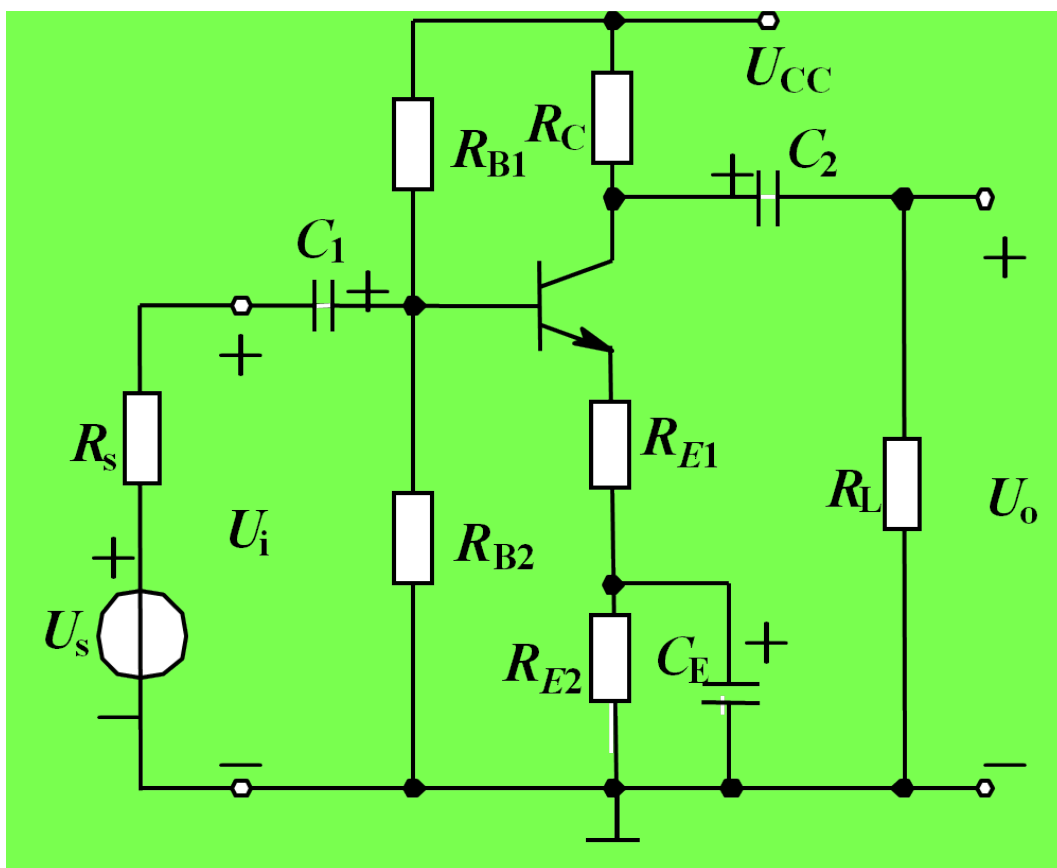
将数值代入上式，得

$$A_u = -\frac{80 \times 1}{1} = -80$$

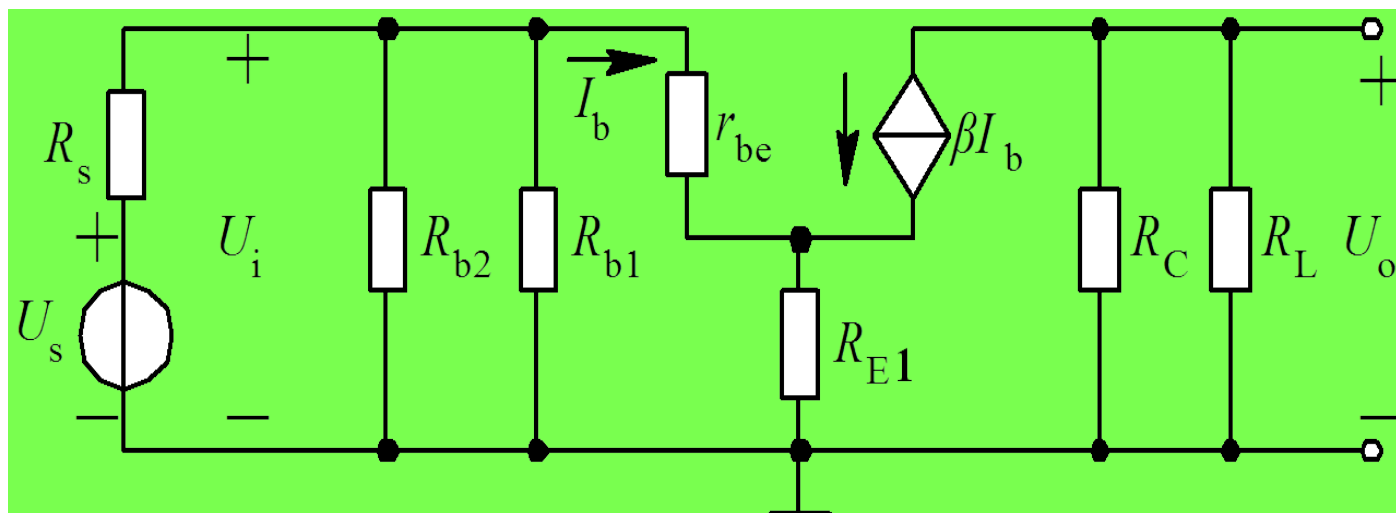
$$R_i = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel r_{be} = 75 \parallel 15 \parallel 1 \approx 1k\Omega \quad R_o = R_C = 2k\Omega$$

$$A_{us} = \frac{U_o}{U_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_u = \frac{1}{0.6 + 1} \times (-80) = -50$$

例3.5.4 电路在上例中，将 R_E 变为两个电阻 R_{E1} 和 R_{E2} 串联，且 $R_{E1}=100\Omega$ ， $R_{E2}=900\Omega$ ，而旁通电容 C_E 接在 R_{E2} 两端，其它条件不变，试求此时的交流指标。



解: 由于直流通路中 $R_E = R_{E1} + R_{E2} = 1k\Omega$, 所以Q点不变。
对于交流通路, 现在射极通过 R_{E1} 接地。交流等效电路为:



$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = - \frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_{E1}} = - \frac{80 \times 1}{1 + 81 \times 0.1} = -8.8$$

$$R_i = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel [r_{be} + (1 + \beta) R_{E1}] = 75 \parallel 25 \parallel [1 + 81 \times 0.1] = 6k\Omega$$

$$R_o = R_C = 2k\Omega$$

$$A_{us} = \frac{U_o}{U_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_u = \frac{6}{0.6 + 6} \times (-8.8) = -8$$

可见, R_{E1} 的接入, 使得 A_u 减小了约10倍。但是, 由于输入电阻增大, 因而 A_{us} 与 A_u 的差异明显减小。

作 业:

- 3.23