



基本放大电路思路梳理

1 放大原理概述

分析内容：

静态分析：直流通路求静态工作点 Q ： U_{BE}, I_B, I_C, U_{CE}

其中：硅管 $|U_{BE}| = 0.7V$ ，锗管 $|U_{BE}| = 0.3V$ ——无需求解

U_{BE} 发射极与基极电压

I_B 基极电流

I_C 集电极电流

U_{CE} 管压降

动态分析：求动态性能指标： A_u, R_i, R_o

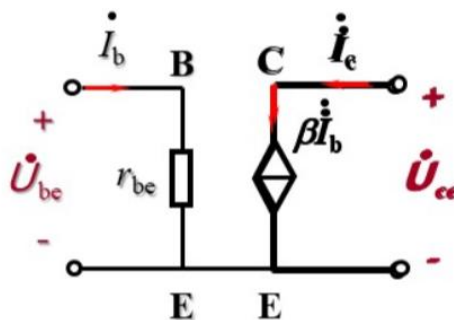
A_u 放大倍数

R_i 输入电阻

R_o 输出电阻

1.1 微变等效电路模型

低频小信号的微变等效电路模型电路图：



当三极管工作在放大区时，则有：

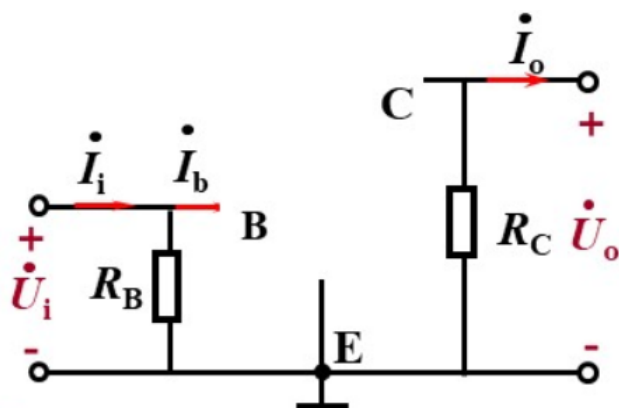
$$i_c = \beta i_b$$

$$i_e = (1 + \beta) i_b$$

$$i_e = i_b + i_c$$

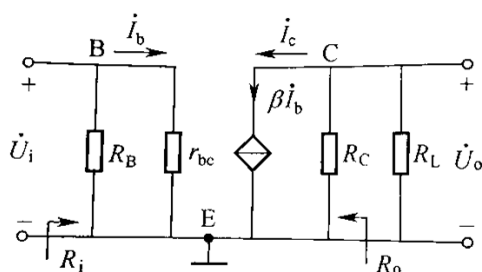
画出微变等效电路方法：

step1：画出交流通路，电容看做短路，直流电源作“去源”处理，擦去三极管；



step2: 将三极管用微变等效电路替换

B 与 E 之间为输入电阻 r_{be} ，C 与 E 之间为受控电流源，下图中的 R_L 为负载电阻。



注意 E 端口的接地符号，别忘记画

其中， r_{be} 为输入电阻，计算公式：

$$r_{be} \approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26\{mV\}}{I_E\{mA\}}$$

$r_{bb'}$ 为基区体电阻，一般来说题目会给出。

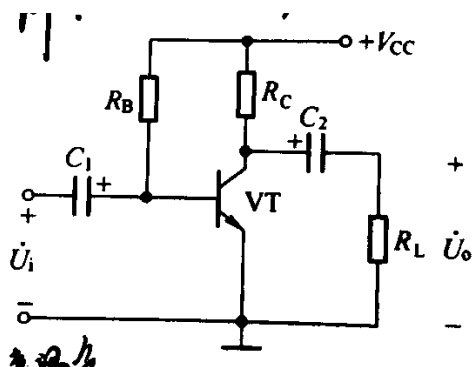
2 BJT 双极型三极管共射放大电路

共射电路：基极输入，集电极输出

2.1 固定偏置式共射放大电路

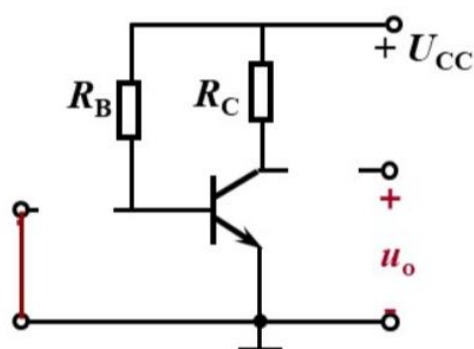
理论分析：

BJT 双极型三极管固定偏置式共射放大电路图：



2.1.1 静态工作点求解 (I_B, I_C, U_{CE})

将交流电源去源短接，电容器视作断路，作静态分析电路图。



先求解 I_B ：列写回尔霍夫方程

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B}$$

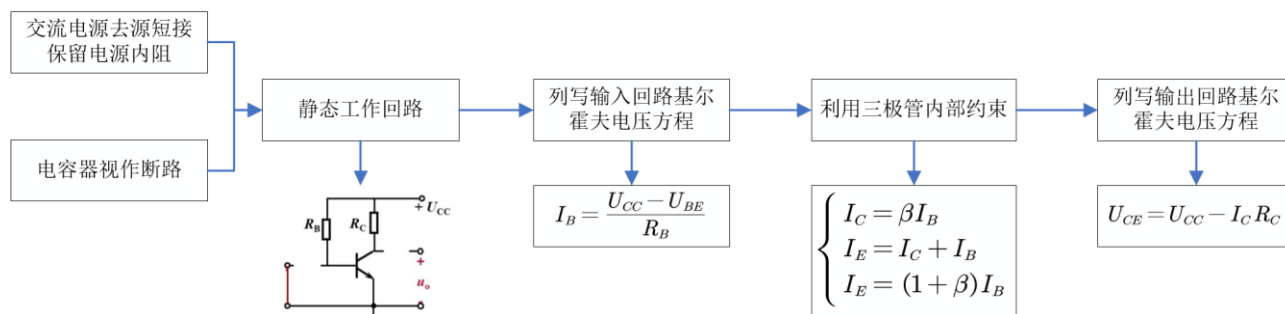
再通过三极管内部约束求解 I_C

$$I_C = \beta I_B$$

最后求解管压降 U_{CE} ，列写输出回路的基尔霍夫方程

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

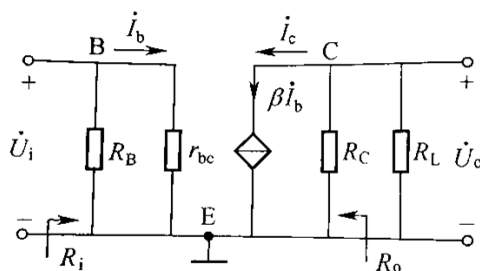
双极性三极管共射偏置式放大电路静态工作点求解方法总结：





2.1.2 动态工作点求解 (A_u, R_i, R_o)

将直流电源去源短接，电容器视作短路，利用微变等效模型作动态分析电路图。



先求解放大倍数 A_u ：

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\dot{I}_c(R_C // R_L)}{\dot{I}_b r_{be}} = \frac{-\beta \dot{I}_b(R_C // R_L)}{\dot{I}_b r_{be}} = \frac{-\beta(R_C // R_L)}{r_{be}}$$

注意，固定偏置式放大电路中的 A_u 为负数，故该电路也成为反相放大器。

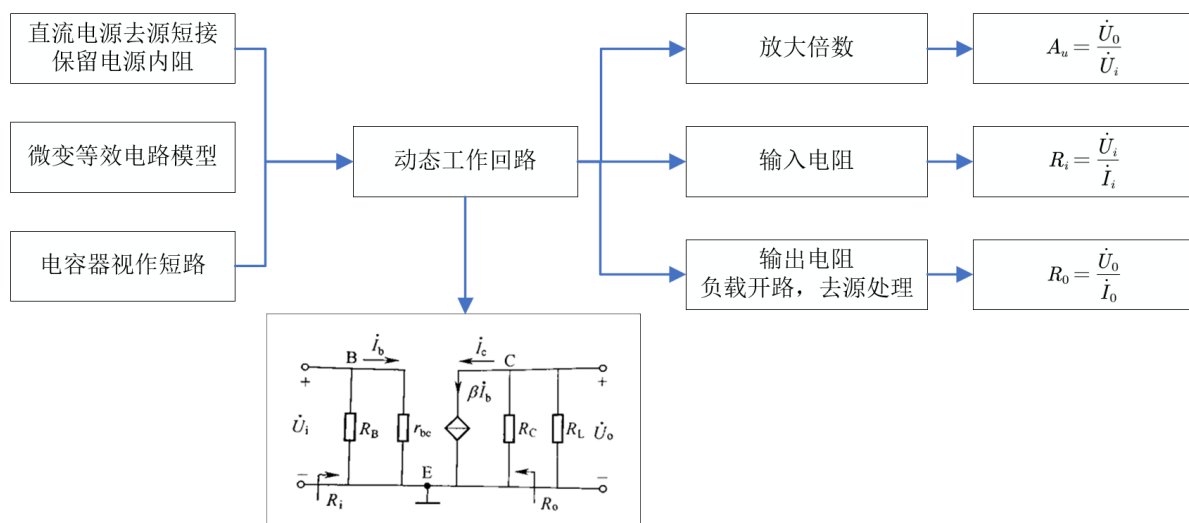
求解输入电阻 R_i

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

求解输出电阻 R_o ：将负载视作开路，若有独立电源，则作“去源”处理，有：

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

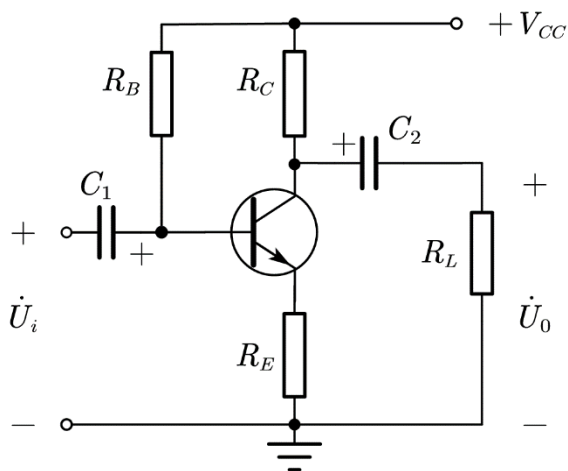
双极性三极管共射偏置式放大电路动态工作点求解方法总结：





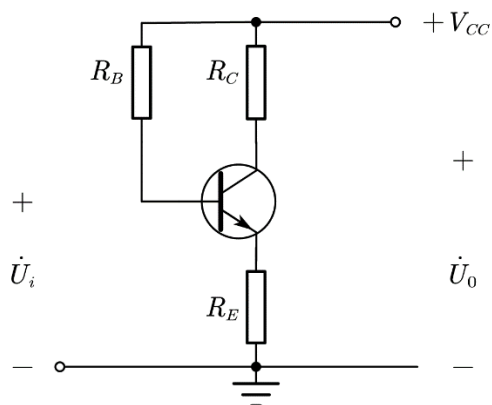
2.2 变式：带有发射极电阻的固定偏置式放大电路

放大电路图：



2.2.1 静态工作点分析：

画出静态工作电路图：



先求 I_B ，对输入回路列写基尔霍夫电压方程

$$-U_{CC} + I_B R_B + U_{BE} + I_E R_E = 0$$

而 $I_E = (1 + \beta)I_B$

故有：

$$-U_{CC} + I_B R_B + U_{BE} + (1 + \beta)I_B R_E = 0$$

求得：

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E}$$

再通过三极管约束条件求 I_C ：



$$I_C = \beta I_B = \beta \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E}$$

再求管压降 U_{CE} ，对输出回路列写基尔霍夫电压方程

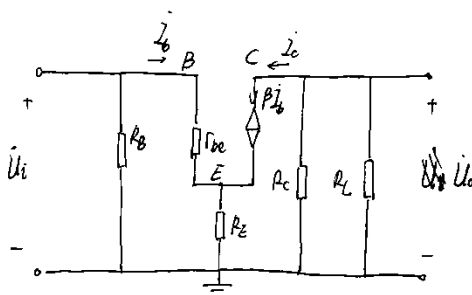
$$-U_{CC} + I_C R_C + U_{CE} + (1 + \beta)I_B R_E = 0$$

解得：

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C - (1 + \beta)I_B R_E$$

2.2.2 动态工作点分析

画出动态工作电路图：



先求 A_u

$$A_u = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b (R_C // R_L)}{\dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R_E} = \frac{-\beta (R_C // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta) R_E}$$

求输入电阻 R_i ：

$$\begin{aligned} R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} &= \frac{\dot{U}_i}{\frac{\dot{U}_i}{R_B} + \dot{I}_b} = \frac{\dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R_E}{\frac{\dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R_E}{R_B} + \dot{I}_b} = \frac{1}{\frac{1}{R_B} + \frac{1}{r_{be} + (1 + \beta) R_E}} \\ &= R_B // (r_{be} + (1 + \beta) R_E) \end{aligned}$$

求输出电阻 R_0 ：

$$R_0 = R_0 = \frac{\dot{I}_C R_C}{\dot{I}_C} = R_C$$

2.3 比较

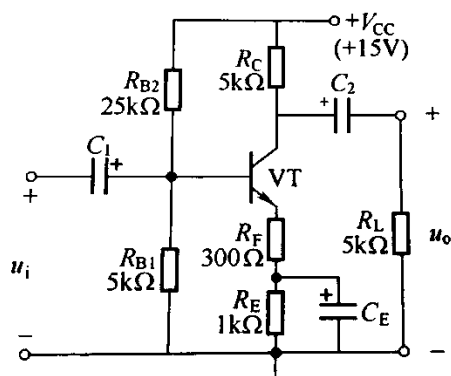
物理量	不带射极电阻的固定偏置式共射放大电路	带有射极电阻的固定偏置式共射放大电路
I_B	$\frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B}$	$\frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta) R_E}$
I_C	βI_B	
U_{CE}	$U_{CC} - I_C R_C$	$U_{CC} - I_C R_C - (1 + \beta) I_B R_E$
A_u	$\frac{-\beta (R_C // R_L)}{r_{be}}$	$\frac{-\beta (R_C // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta) R_E}$



R_i	$R_B // r_{be}$	$R_B // (r_{be} + (1 + \beta)R_E)$
R_o	R_C	

2.4 分压偏置式共射放大电路

放大电路：

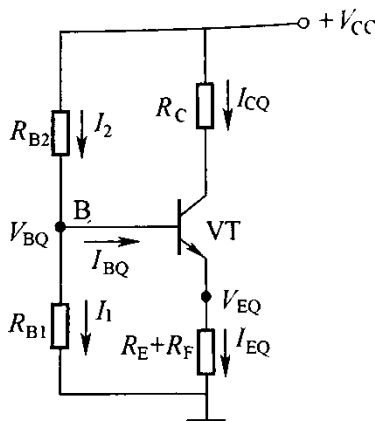


2.4.1 静态分析

静态分析基于直流通路进行，使用条件为 I_{RB1} 和 I_{RB2} 均远大于 $(5 \sim 10)I_{BQ}$ 且 $V_{BQ} \geq (3 \sim 5)U_{BEQ}$ ，即可认为此时基极电流几乎为0。

静态分析过程如下：

先画出直流通路，交流电源短路，电容视为开路，得到直流通路如下图所示：



由于我们考虑到 I_{BQ} 近似为0，故可看做 R_{B2} 与 R_{B1} 直接并联在 V_{CC} 两端，先求得 V_{BQ} ：

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

再通过输入回路求 I_C 与 I_E ：

$$-V_{BQ} + U_{BEQ} + I_{EQ}(R_E + R_F) = 0$$



求得：

$$I_{EQ} = \frac{V_{BQ} - U_{BEQ}}{R_E + R_F}$$

由于 $I_B \approx 0$,

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{V_{BQ} - U_{BEQ}}{R_E + R_F}$$

此时反回来估算 I_{BQ} ：

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = \frac{I_{EQ}}{\beta + 1}$$

此时的放大倍数很大， β 或者 $\beta + 1$ 对最终数值的影响可忽略不计

再通过输出回路求 U_{CEQ}

$$-V_{CC} + I_{CQ}R_C + U_{CEQ} + I_{EQ}(R_E + R_F) = 0$$

得到：

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C - I_{EQ}(R_E + R_F)$$

验证估算法使用条件：

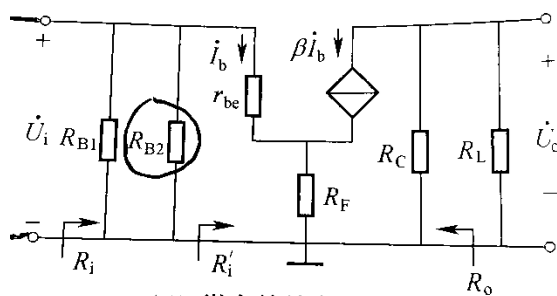
$$I_{R_2} = \frac{V_{CC} - V_{BQ}}{R_{B_2}}$$

$$I_{R_1} = \frac{V_{BQ}}{R_{B_1}}$$

均应远大于 I_{BQ}

2.4.2 动态分析

电容视作短路，直流电源短路，可画出微变等效电路：



三极管输入电阻：

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

电压放大倍数：



$$A_u = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_F}$$

与上述带射极电阻的固定偏置式放大电路相同

输入电阻:

$$R_i = R_{B1} // R_{B2} // R'_i$$

其中,

$$R'_i = r_{be} + (1 + \beta)R_F$$

输出电阻:

$$R_o = R_C$$

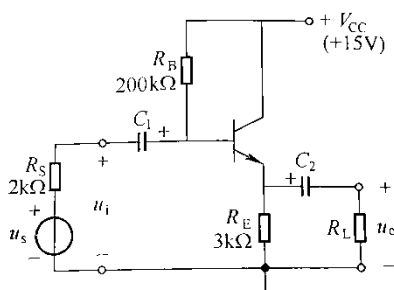
信号源内阻对性能指标的影响

若存在信号源内阻 $R_s = 1k\Omega$, 可以根据定义求源电压放大倍数 A_{us} :

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

3 BJT 双极型三极管共集放大电路

共集电路: 基极输入、发射极输出



(a) 共集放大电路

3.1.1 静态分析

由输入回路:

$$-V_{CC} + I_B R_B + U_{BE} + (1 + \beta)R_E I_B = 0$$

得到:

$$I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E}$$

$$I_C = \beta I_B$$

由输出回路:

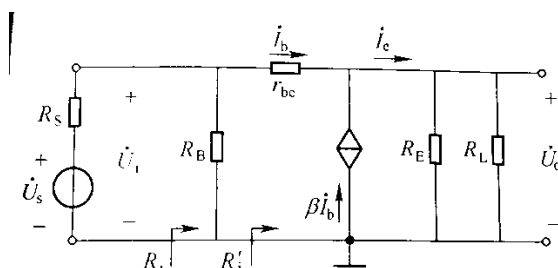
$$-V_{CC} + U_{CE} + (1 + \beta)I_B R_E = 0$$



得到：

$$U_{CE} = V_{CC} - (1 + \beta)I_B R_E$$

3.1.2 动态分析



电压放大倍数：

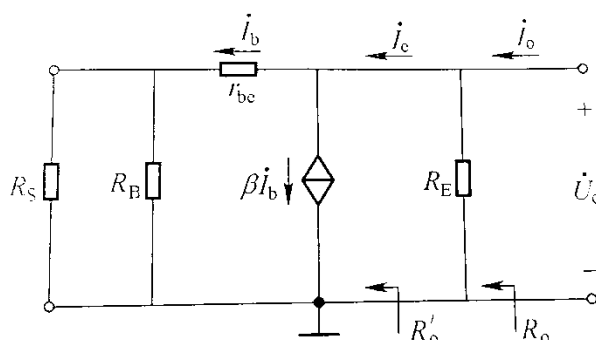
$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{(1 + \beta)I_b(R_E // R_L)}{I_b r_{be} + (1 + \beta)I_b(R_E // R_L)} = \frac{(1 + \beta)(R_E // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)} \approx 1$$

输入电阻：

$$R_i = R_B // R'_1 = R_B // \left(r_{be} + \frac{U_o}{I_b} \right) = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)]$$

输出电阻：

求输出电阻的电路如下：



$$R'_0 = \frac{U_o}{I_E} = \frac{I_b r_{be} + I_b(R_s // R_B)}{(1 + \beta)I_b} = \frac{r_{be} + R_s // R_B}{(1 + \beta)}$$

$$R_o = R'_0 // R_E = R_E // \frac{r_{be} + R_s // R_B}{(1 + \beta)}$$

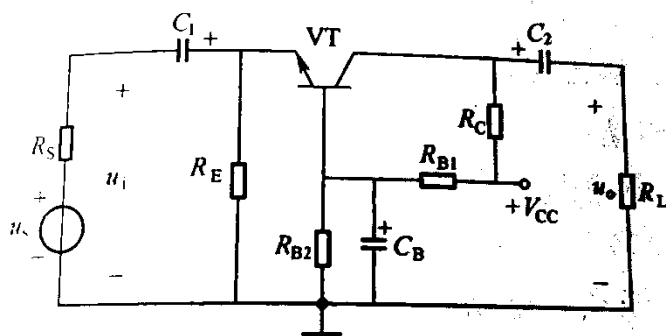
共集电路的特性：

1. 电压放大倍数接近于 1，电路放大能力差，因此也被称作射极跟随器
2. 但该电路输入电阻大，输出电阻小，带负载能力强

4 BJT 双极型三极管共基放大电路

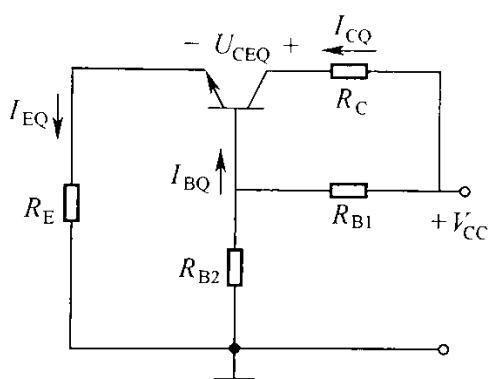
共基电路：射极输入、集电极输出

放大电路如下图所示：



4.1.1 静态分析

直流电路：等同于分压式偏置电路 $\rightarrow I_{BQ} \approx 0$



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

得到：

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

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$$

由输出回路的基尔霍夫电压方程：

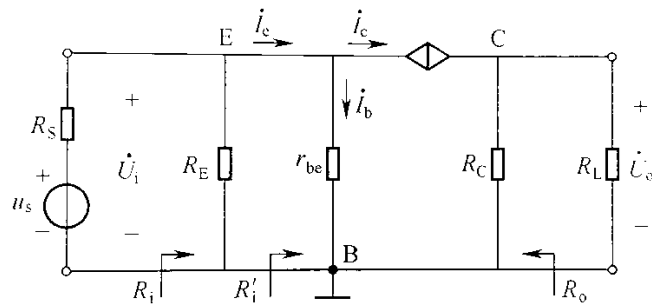
$$-V_{CC} + I_{CQ}R_C + U_{CEQ} + I_{EQ}R_E = 0$$

得到：

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C - I_{EQ}R_E$$

4.1.2 动态分析

交流通路：



电压放大倍数:

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\beta I_b (R_C // R_L)}{I_b r_{be}} = \frac{\beta (R_C // R_L)}{r_{be}}$$

输入电阻:

$$R_i = R_E // \frac{U_i}{I_e} = R_E // \frac{I_b r_{be}}{(1 + \beta) I_b} = R_E // \frac{r_{be}}{(1 + \beta)}$$

输出电阻:

此时将电压源短路, $I_b = 0$, 受控源开路, 则:

$$R_o = R_C$$