

# 模拟电子技术基础

# 第5章 放大电路基础

5.1 放大电路的组成及工作原理 → 定性

5.2 图解分析法  
5.3 计算分析法 } 定量

5.4 放大电路的三种接法

5.5 稳定工作点的放大电路 (怎么消除温度影响) (实验课中的电路)

5.6 场效应管放大电路

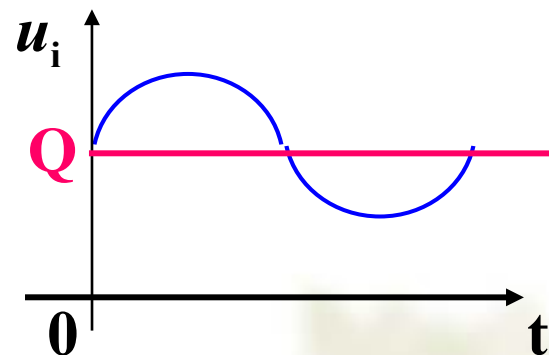
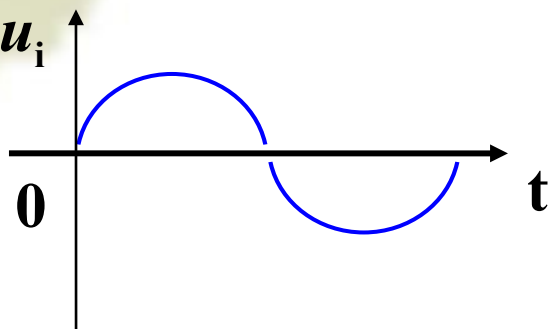
5.7 多级放大电路

5.8 放大器的通频带

## 5.5 稳定工作点的放大电路

### 一、工作点的设置

1、静态工作点  $Q$  不设不行



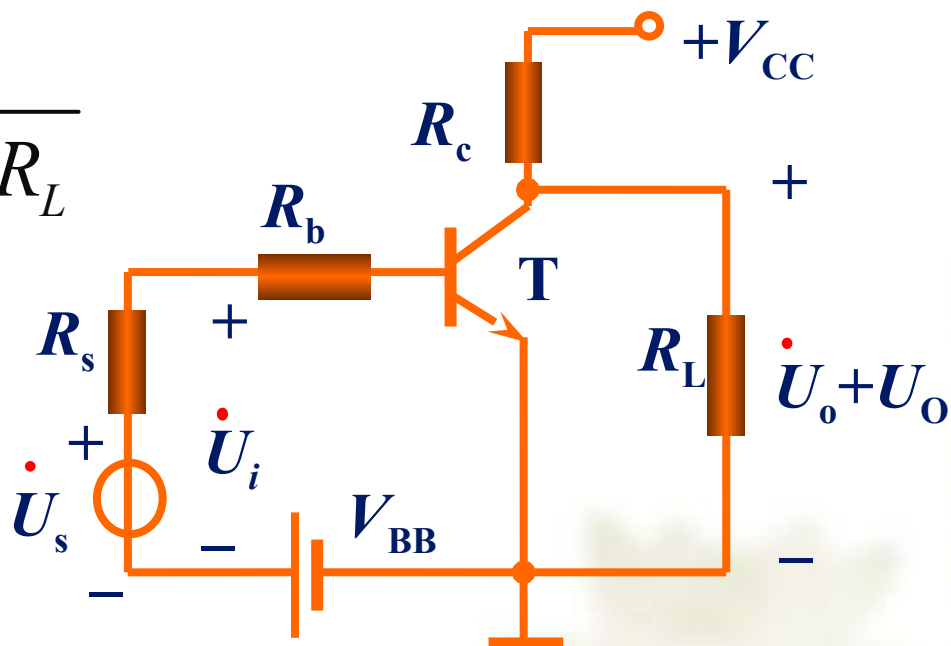
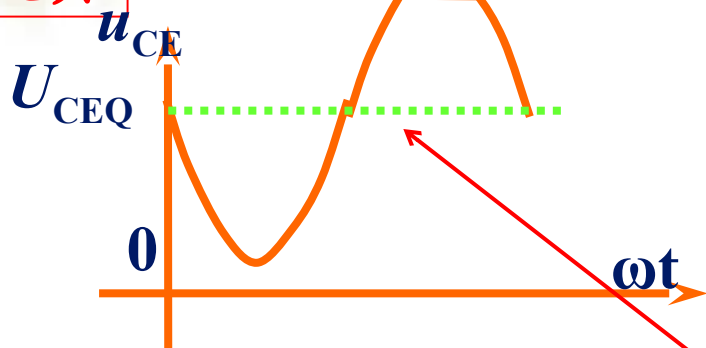
交流输入  $\xrightarrow{\text{设 } Q \text{ 点}}$  交、直流叠加  $\xrightarrow{\text{放大、隔直}}$  交流输出

2、 $Q$  点设得不合理不行

# 一、工作点的设置

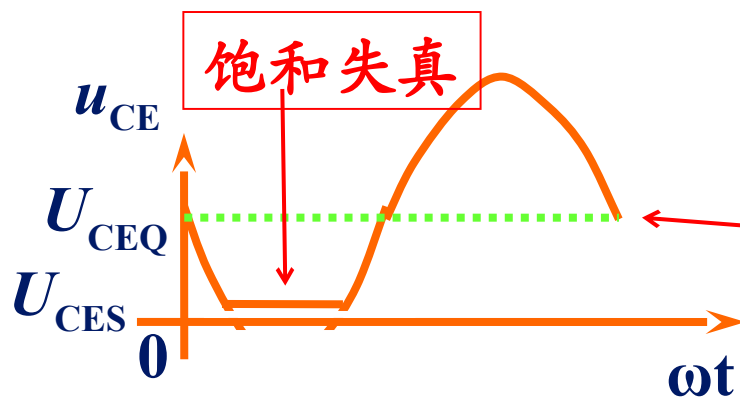
$$u_{CE\max} = V_{CC} \frac{R_L}{R_c + R_L}$$

截止失真



(a) 放大电路

饱和失真



$U_{CEQ}$  太高

$U_{CEQ}$  太低

Q 点设置很重要

# 温度变化对 Q 点的影响

## ① 温度变化对 $\checkmark$ 的影响

响

温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$ ,  $\checkmark$  要增加  $0.5\%\sim 1.0\%$

$$T \uparrow \longrightarrow \checkmark \star \longrightarrow I_C \uparrow$$

## ② 温度变化对 $I_{CBO}$ 的影响

$$I_{CBO} = I_{CBO(T_0=25^{\circ}\text{C})} \cdot e^{k(T-T_0)}$$

$$I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$$

温度  $T \uparrow \rightarrow$  输出特性曲线上移

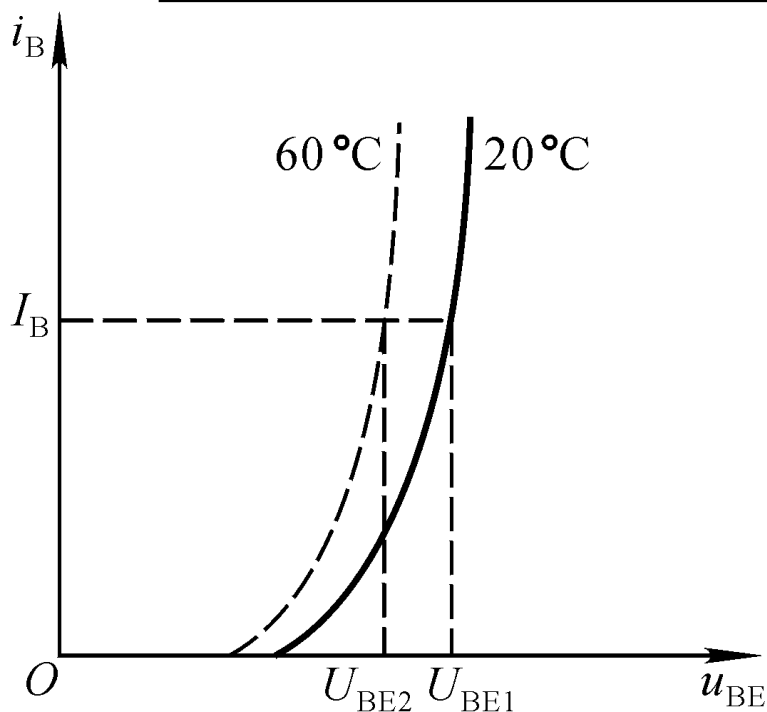
$$T \uparrow \longrightarrow I_{CBO} \uparrow \longrightarrow I_{CEO} \uparrow \longrightarrow I_C \uparrow$$

# 温度变化对 Q 点的影响

## 3 温度变化对 $U_{BE}$ 的影响

$$U_{BE} = U_{BE(T_0=25^\circ\text{C})} - (T - T_0) \times 2.2 \times 10^{-3} \text{ V}$$

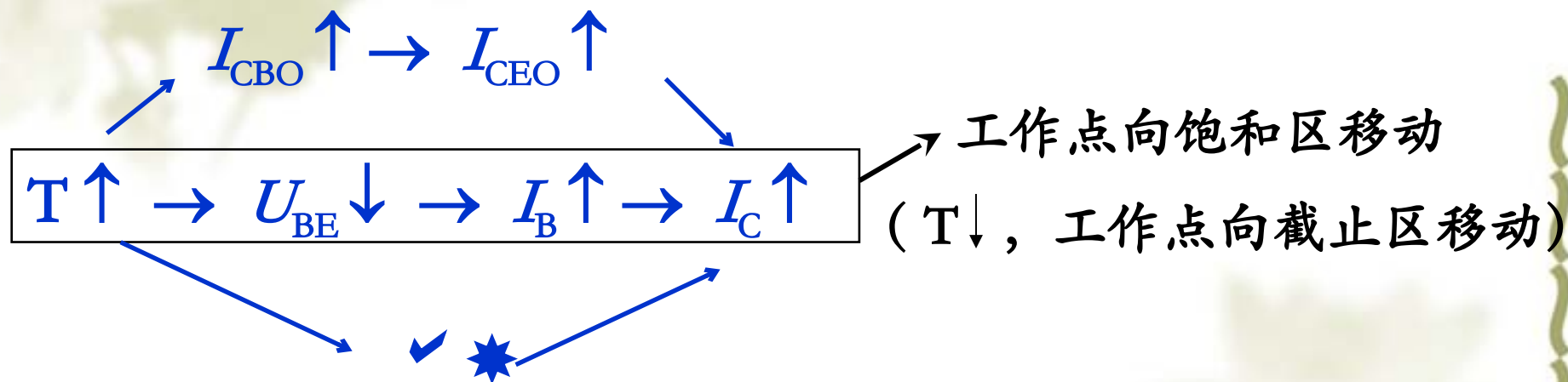
$$T \uparrow \rightarrow U_{BE} \downarrow \rightarrow I_B \uparrow \rightarrow I_C \uparrow$$



## 5.5 放大电路静态工作点的稳定

### 一、工作点稳定的必要性

#### 1、引起工作点变化的原因。（主要是温度）



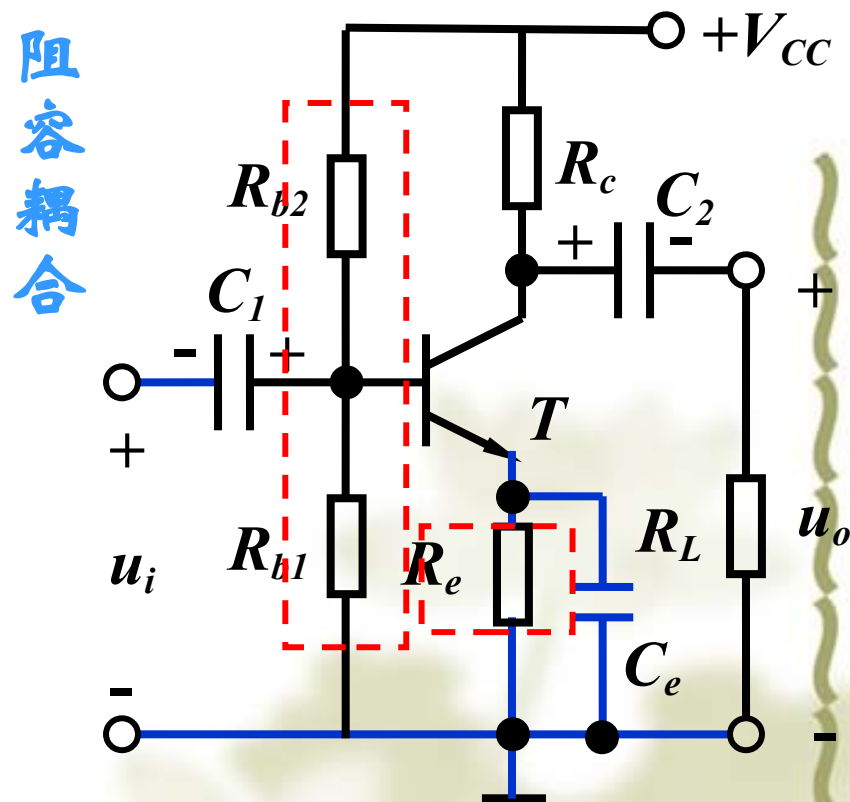
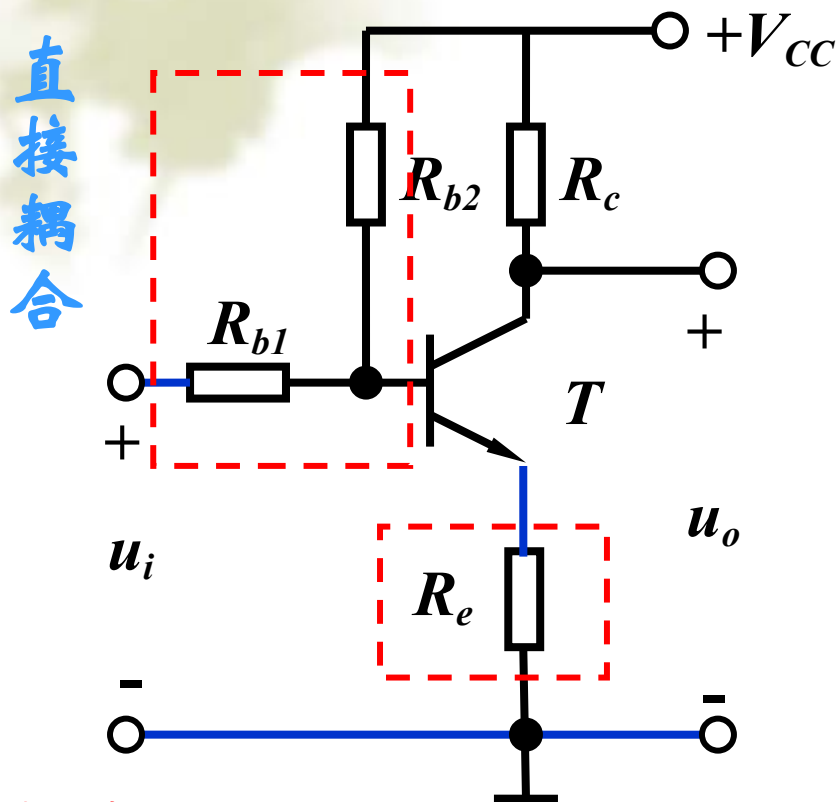
#### 2、解决思路：设法在 $I_C \uparrow$ 时，使外加的

$$U_{BE} \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$$

#### 3、解决办法：(1) 发射极串电阻；

(2) 利用偏置电阻  $R_{b1}$  和  $R_{b2}$  的分压  
得到一个比较稳定的基极静态电位

## 二、典型的静态工作点稳定电路



本节目的：

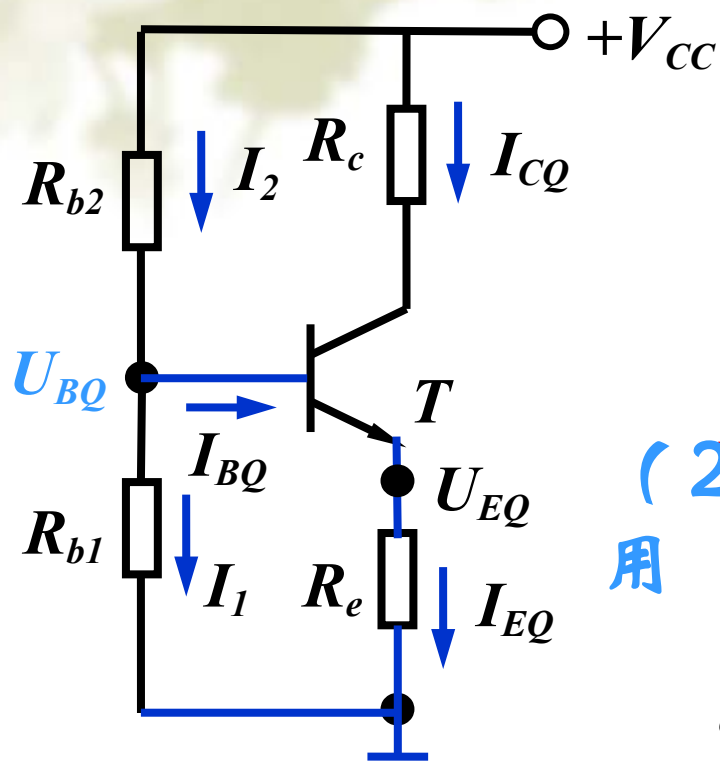
温度变化时该电路为什么能稳定静态工作点？

该电路的交流通路分析。



# 1、电路分析(两个电路的直流通路是一样的)

## (1) 基极电位 $U_{BQ}$



设  $I_1 \gg I_{BQ}$  , 则

$$\therefore I_2 = I_1 + I_{BQ} \approx I_1$$

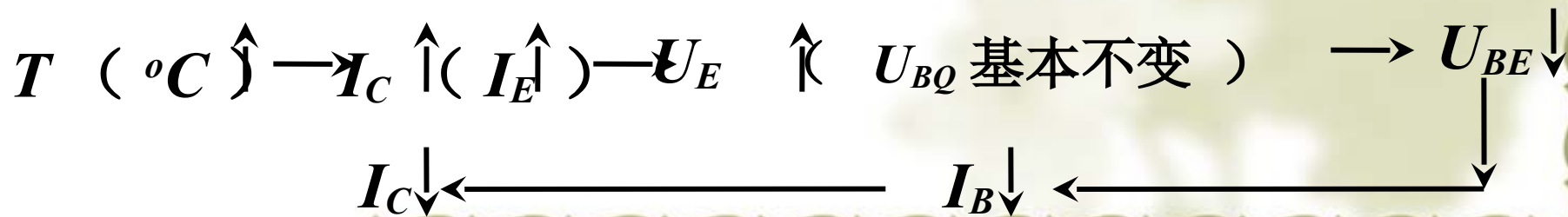
$$\therefore U_{BQ} \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

基极电位几乎仅取决于  $R_{b1}$  与

$R_{b2}$  对  $V_{CC}$  的分压, 而与环境温度

无关。: 引入直流负反馈来稳定静态工作点,  $R_e$  为负反馈电阻。

$$U_E = I_E \cdot R_e \quad U_{BE} = U_{BQ} - U_E$$



## 2、分析举例 (2)

①画直流通路，标注电量参考方向。

②计算静态电流和电压。

解法1：一般电路分析法

假设电路处于放大状态

$$\begin{cases} I_1 R_{b1} + I_2 R_{b2} = E_C \\ I_1 = I_2 + I_{BQ} \\ I_2 R_{b2} = U_{BEQ} + (1 + \beta) I_{BQ} R_e \end{cases}$$

0.7 / 0.2V

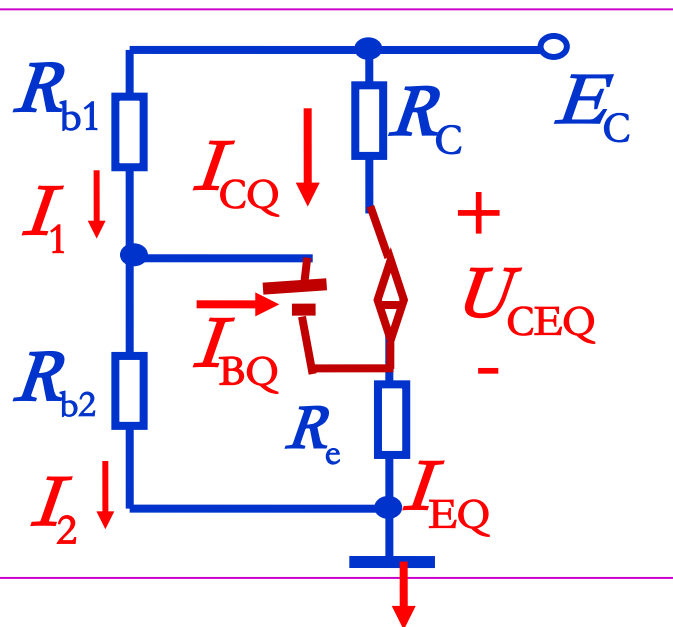
求解方程组，可解出  $I_{BQ}$

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

$$\begin{aligned} E_C &= I_{CQ} R_C + U_{CEQ} + I_{EQ} R_e \\ &\approx I_C (R_C + R_e) + U_{CEQ} \end{aligned}$$

解出  $U_{CEQ}$ 。 根据结果判断三极管处在哪

需要解方程组，较繁琐。



## 解法2：等效电路法（戴维南等效）

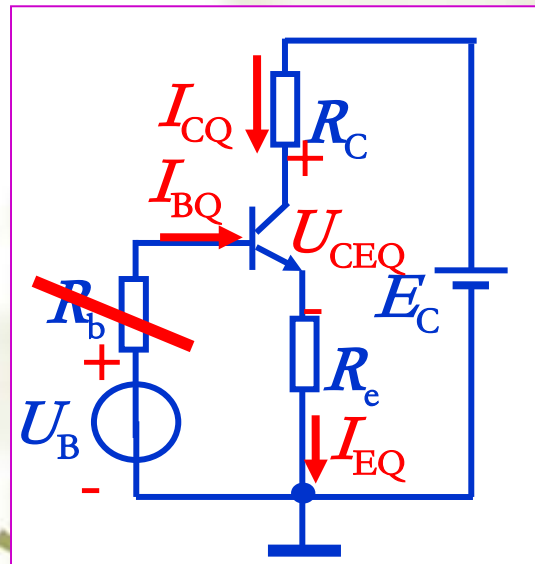
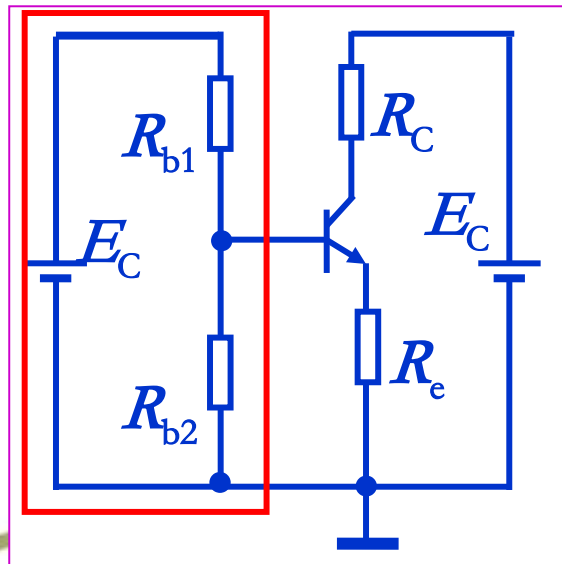
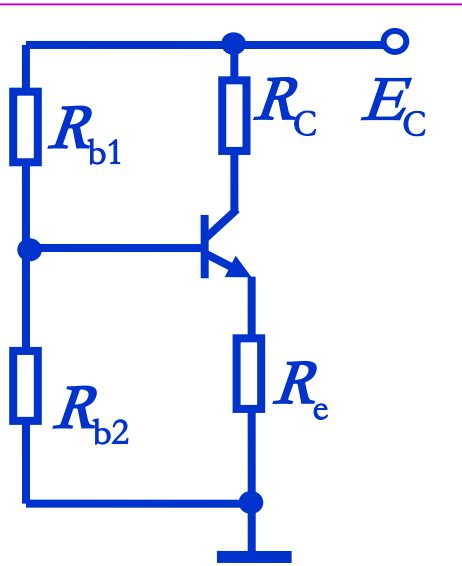
$$U_B = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} E_C; \quad R_b = R_{b1} // R_{b2};$$

$$U_B = I_{BQ} R_b + U_{BEQ} + (1 + \beta) I_{BQ} R_e;$$

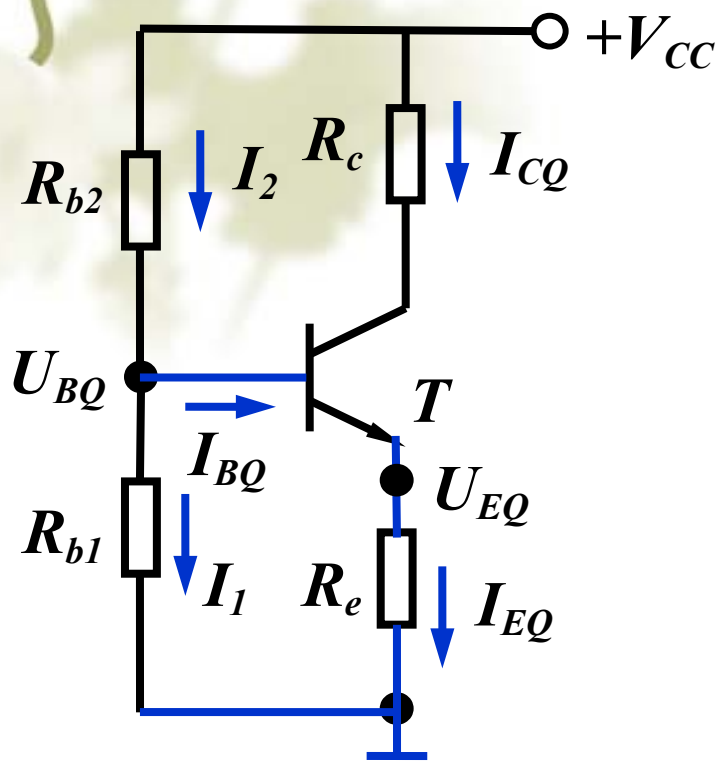
$$I_{BQ} = \frac{U_B - U_{BEQ}}{\cancel{R_b} + (1 + \beta) R_e}; \quad \text{即 } (1 + \beta) R_e \gg R_b \text{ 时}$$

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

$$U_{CEQ} \approx E_C - I_{CQ} (R_C + R_e)$$



## 2、静态工作点的估算



$$U_{BQ} \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

$$I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e} \approx I_{CQ}$$

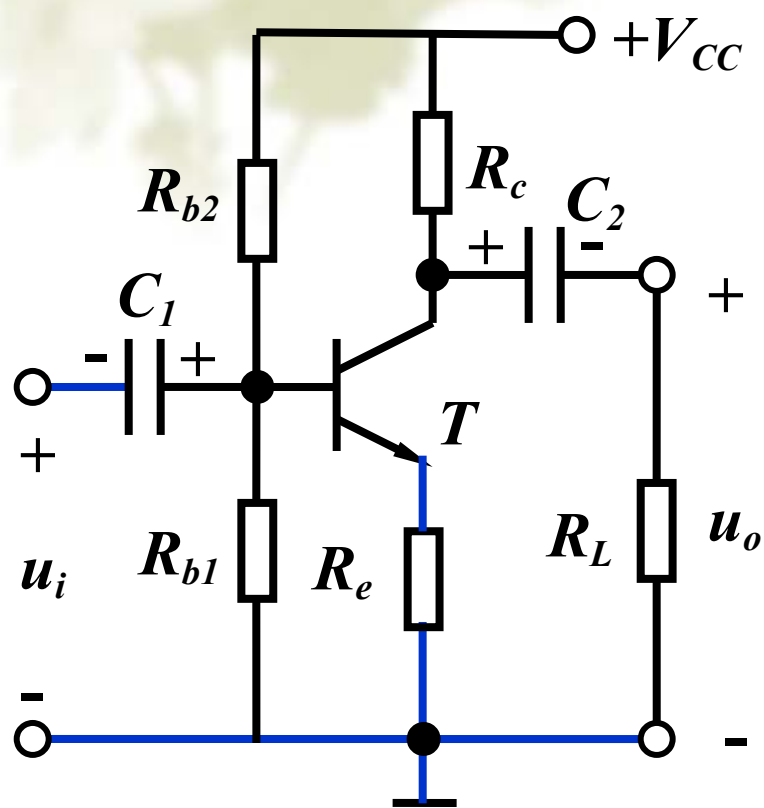
$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta}$$

$$U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e)$$

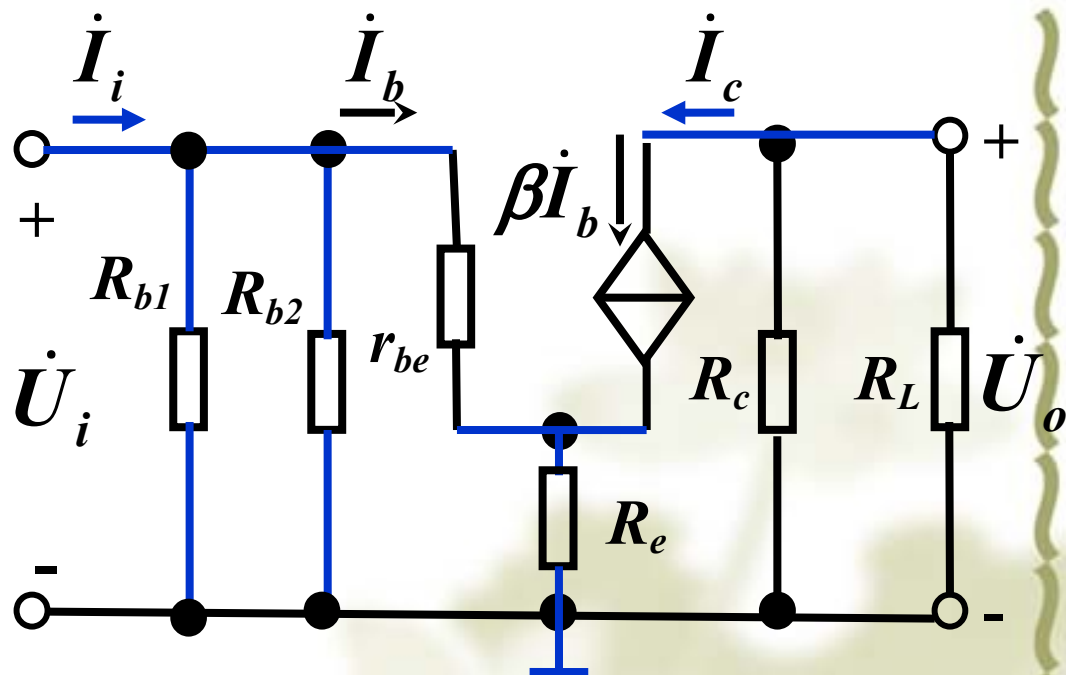
（ 当  $R_e \gg \frac{R_b}{1 + \beta}$ , 即  $(1 + \beta)R_e \gg R_b$  时,  $I_1 \gg I_{BQ}$  ）  
其中:  $R_b = R_{b1} // R_{b2}$

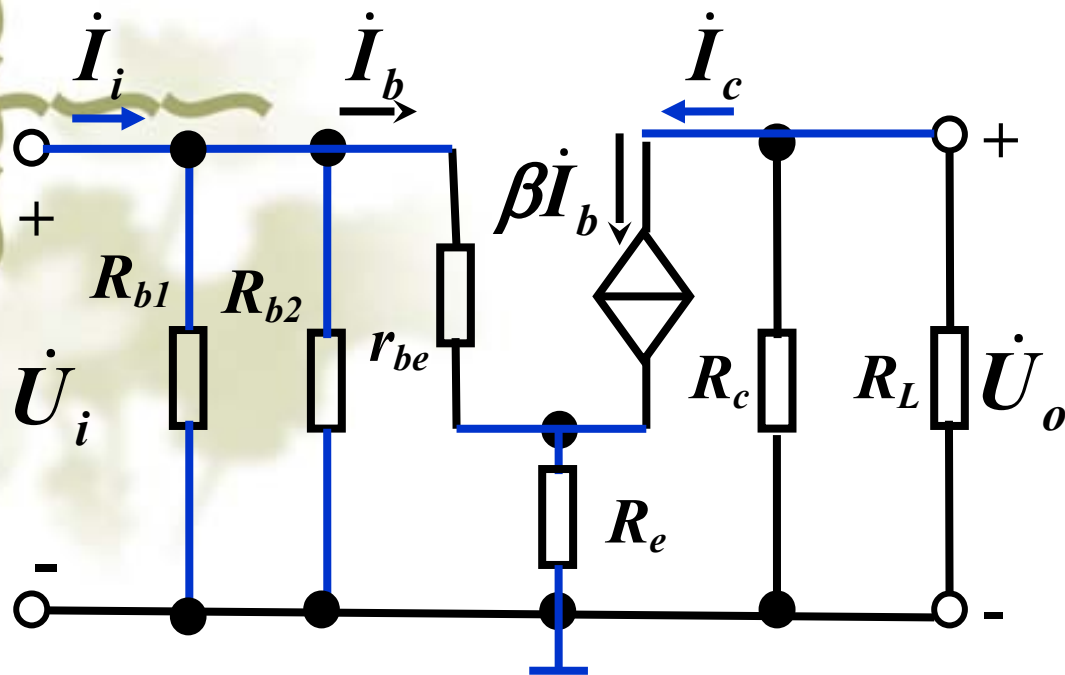
## (2) 稳定工作点的交流通路分析

### a、无旁路电容的阻容耦合电路



微变等效电路:





求输入等效电阻

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_e}$$

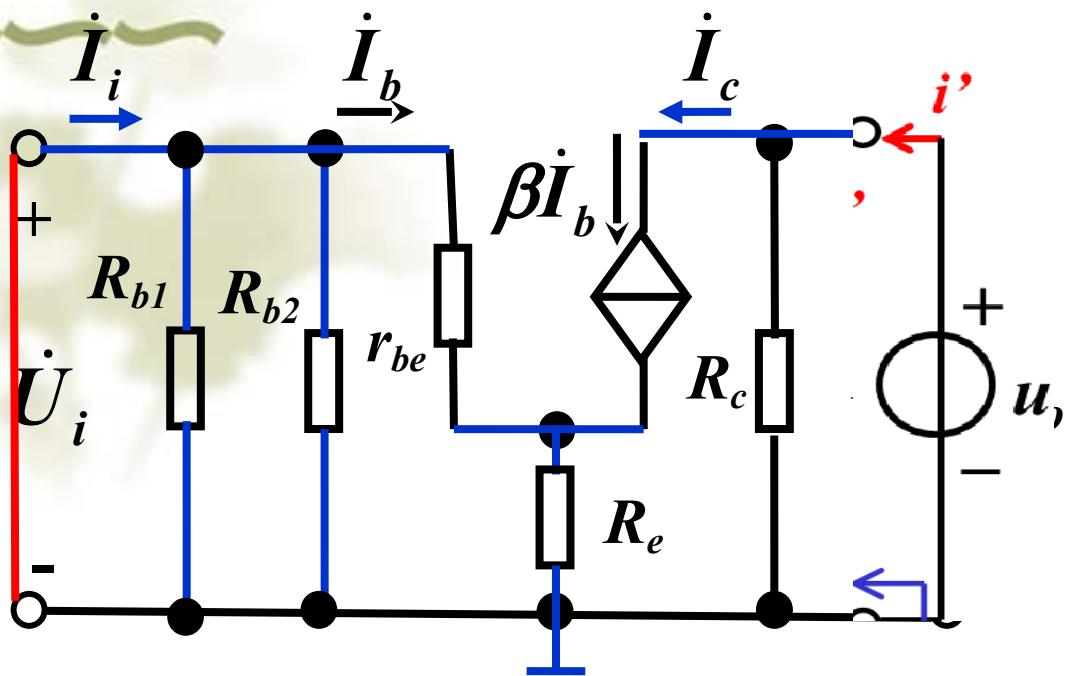
$$u_i = i_b r_{be} + i_e R_E = i_b [r_{be} + (1 + \beta)R_E]$$

须把发射极电阻  
折算到基极上串  
联电阻

$$r_i = \frac{u_i}{i} = \frac{u_i}{\frac{u_i}{R_{B1}} + \frac{u_i}{R_{B2}} + i_b}$$

$$= \frac{\cancel{u_i}}{\frac{\cancel{u_i}}{R_{B1}} + \frac{\cancel{u_i}}{R_{B2}} + \frac{\cancel{u_i}}{r_{be} + (1 + \beta)R_E}}$$

$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_e]$$



求输出等效电阻

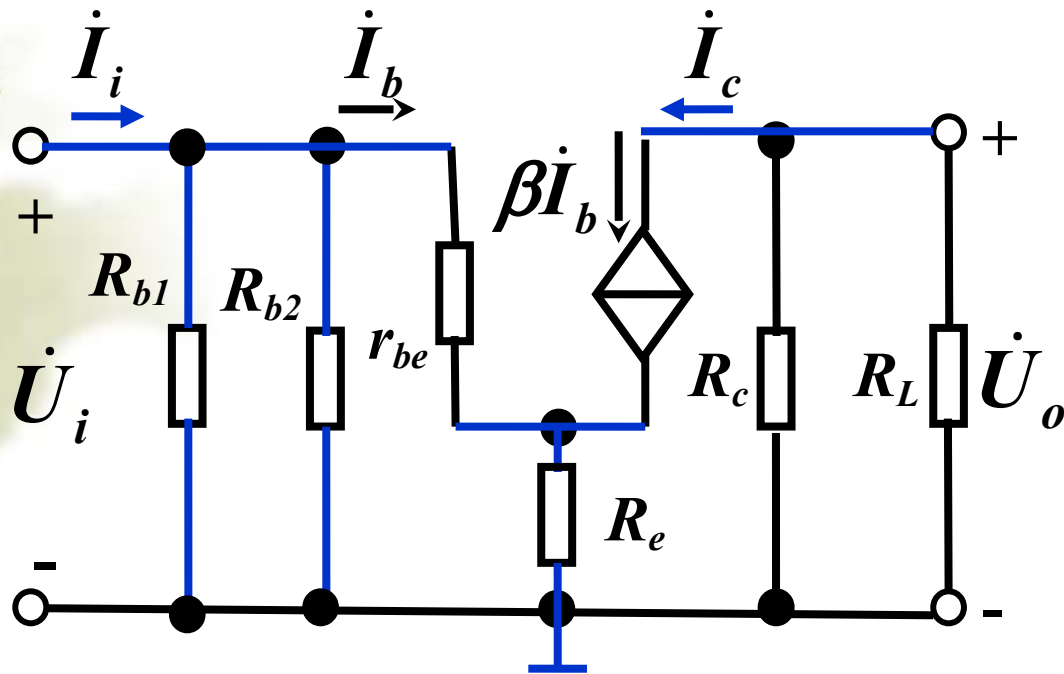
输入回路:

$$r_{be} \dot{I}_b + (1 + \beta) \dot{I}_b R_e = 0 \text{ 则 } \dot{I}_b = 0$$

$$\text{则 } \dot{I}_e = 0, \dot{I}_c = 0$$

$$R_o = R_c$$





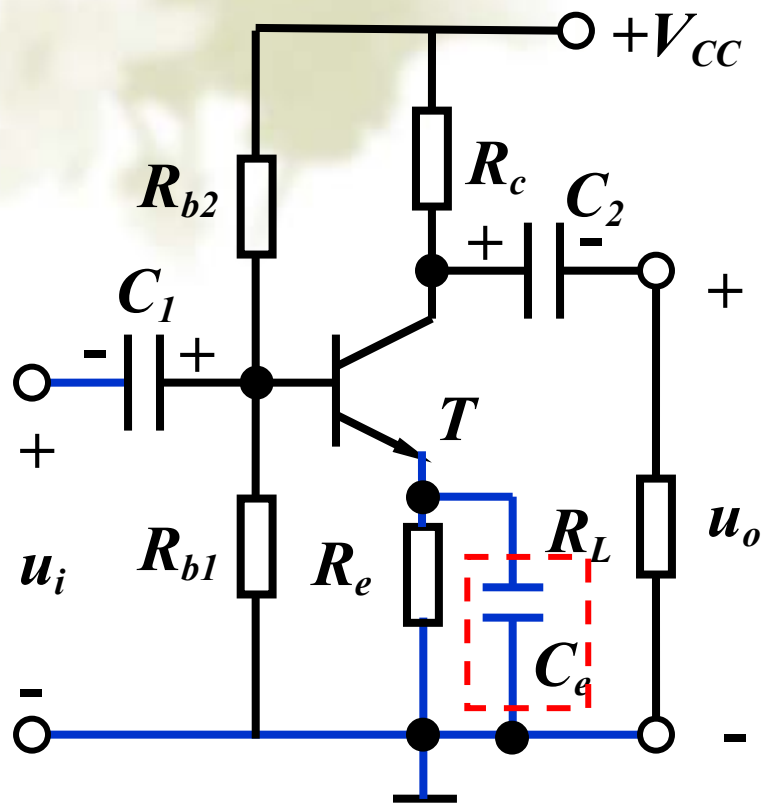
$$\begin{cases} \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} \\ R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_e] \\ R_o = R_c \end{cases}$$

与前面共射极大电路相比， $R_e$  降低了电压放大倍数。电阻越大，稳定工作点能力越好，但放大倍数下降越多。

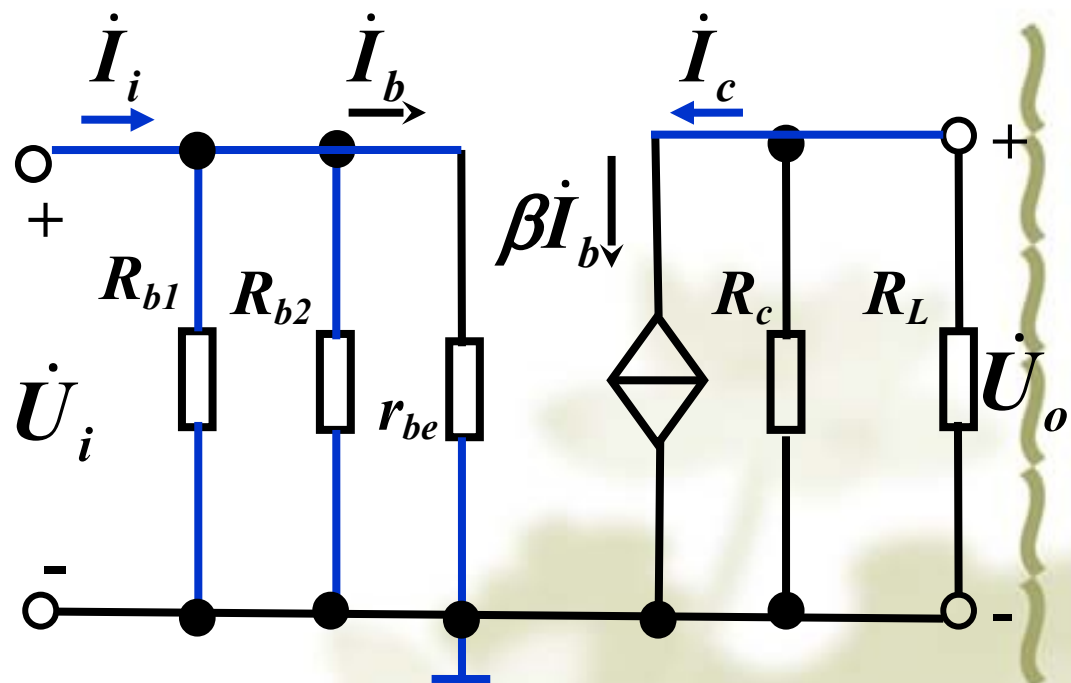
思考：矛盾如何解决？



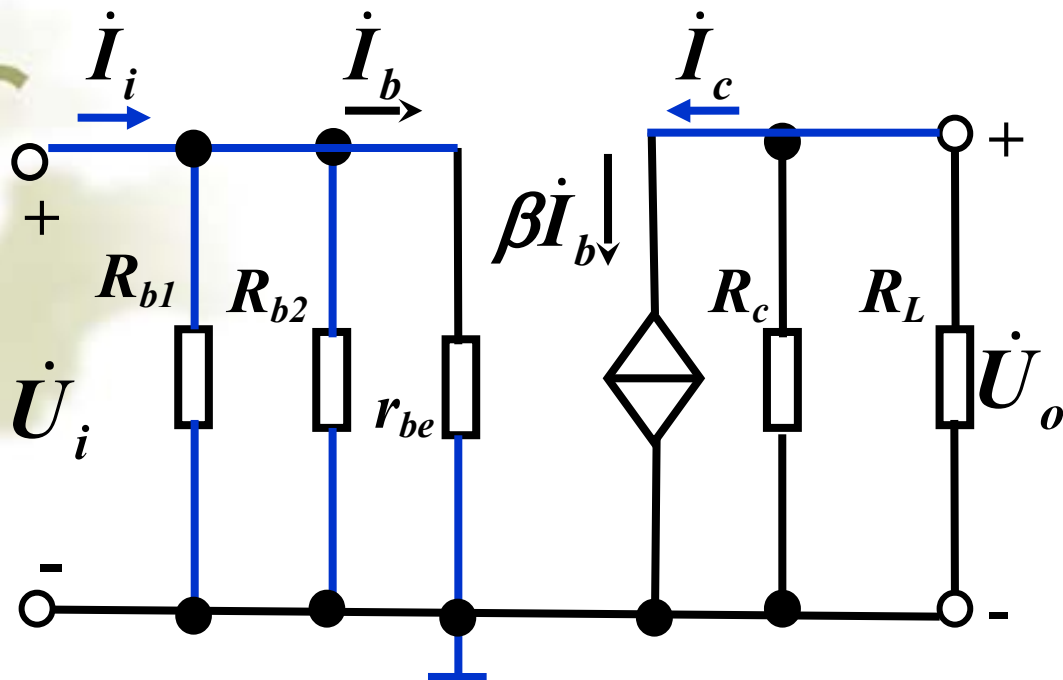
## (b) 具有旁路电容的阻容耦合电路



微变等效电路:



旁路电容  $C_e$  电容量很大，对交流来说可视为短路。



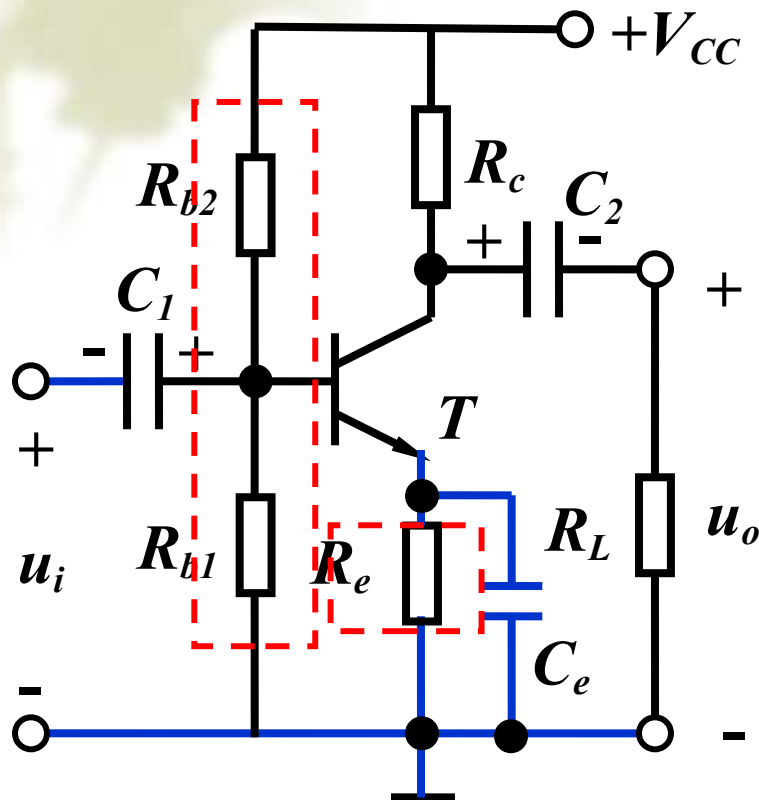
$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = - \frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}} \\ R_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be} \\ R_o = R_c \end{array} \right.$$

与前面共射极放大电路电压放大倍数一样。

电容 \$C\_e\$ 使 \$R\_e\$ 只在直流时起作用，交流时消失。

## 总结、典型的静态工作点稳定电路

阻容耦合



引入负反馈电阻  $R_e$ ，通过直流负反馈来稳定静态工作点。

电阻  $R_e$  越大，稳定工作点能力越好，但放大倍数下降越多。

引入旁路电容  $C_e$ ，交流通路中  $R_e$  视为短路。

电容  $C_e$  使  $R_e$  只在直流时起作用，交流时消失。

# 第5章 放大电路基础

5.1 放大电路的组成及工作原理 → 定性

5.2 图解分析法  
5.3 计算分析法 } 定量

5.4 放大电路的三种接法

5.5 稳定工作点的放大电路 (怎么消除温度影响) (实验课中的电路)

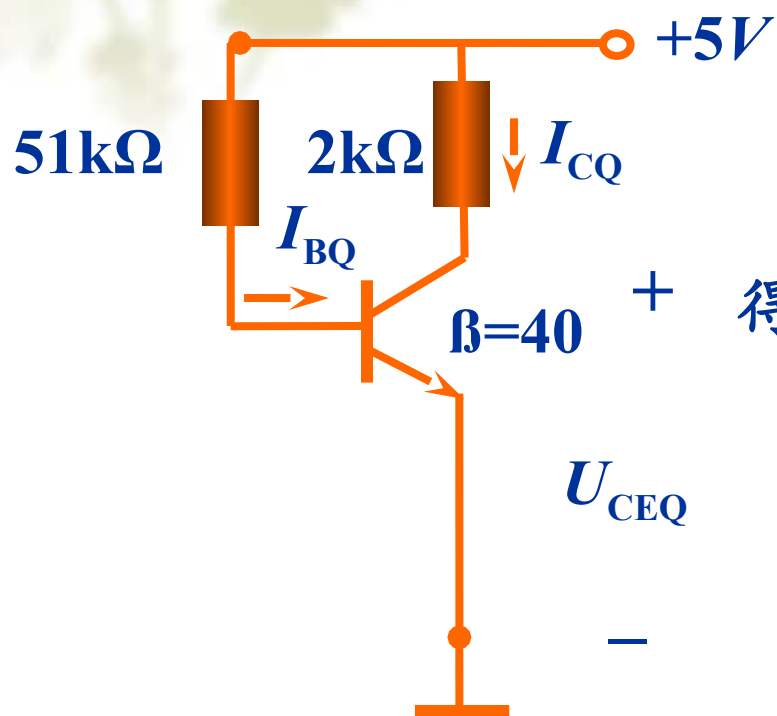
5.6 场效应管放大电路

5.7 多级放大电路

5.8 放大器的通频带

## 例题 5-4a

- 画直流通路如图 (b) 所示



$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BE}}{R_b} = \frac{5 - 0.7}{51 \times 10^3} \approx 84 \mu A$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 40 \times 84 \mu A = 3.36 mA$$

得:

$$\begin{aligned} U_{CEQ} &= V_{CC} - I_{R_c} \cdot R_c \\ &= 5 - 3.36 \times 2 = -1.72V < 0 \end{aligned}$$

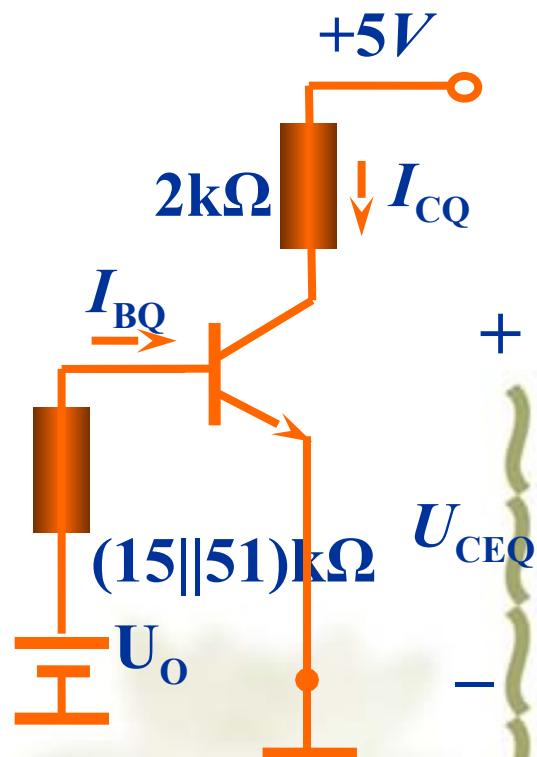
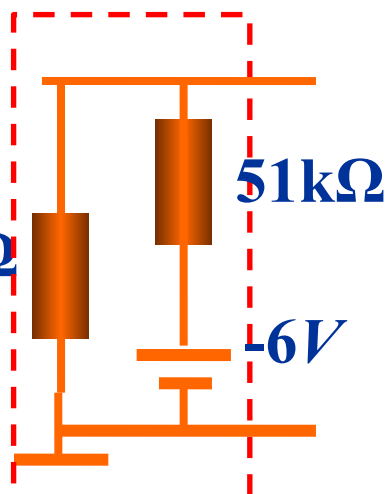
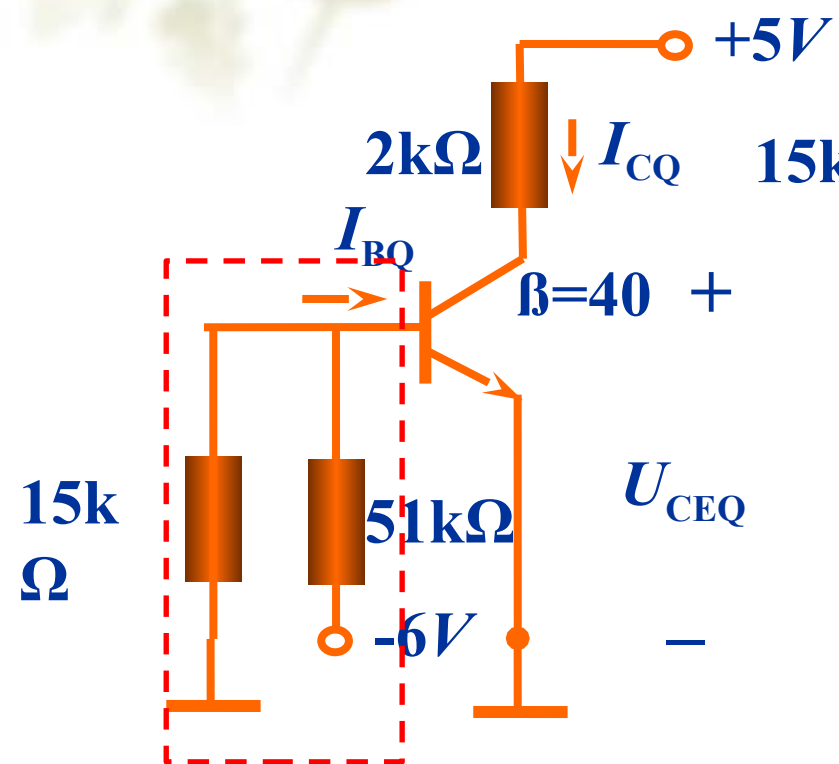
$$\begin{aligned} U_{BC} &= U_{BE} - U_{CE} \\ &= 0.7 - (-1.72) = 2.42V > 0 \end{aligned}$$

BE 正偏, BC 也正偏, 所以静态工作点处于饱和区

## 例题 5-4b

- 画直流通路如图 (b) 所示

戴维南等效:



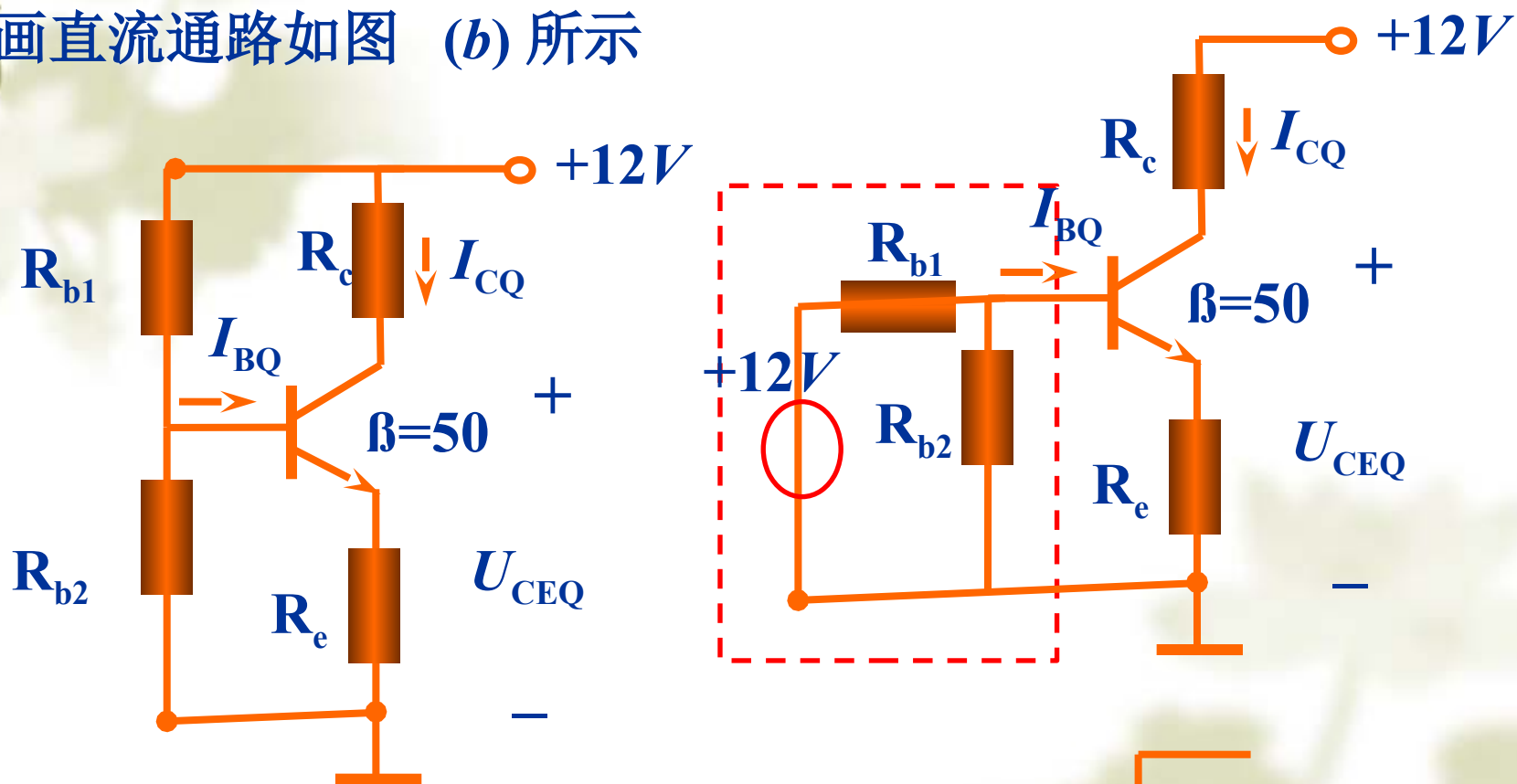
$$\begin{aligned} \text{开路电压 } U_o &= -6 \times \frac{15}{15 + 51} \\ &= \frac{5 - 0.7}{51 \times 10^3} \approx -1.36V \end{aligned}$$

$$U_{BE} < 0$$

BE 反偏，所以静态工作点处于截止区

## 例题 5-4c

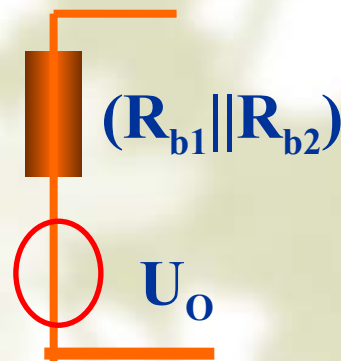
- 画直流通路如图 (b) 所示



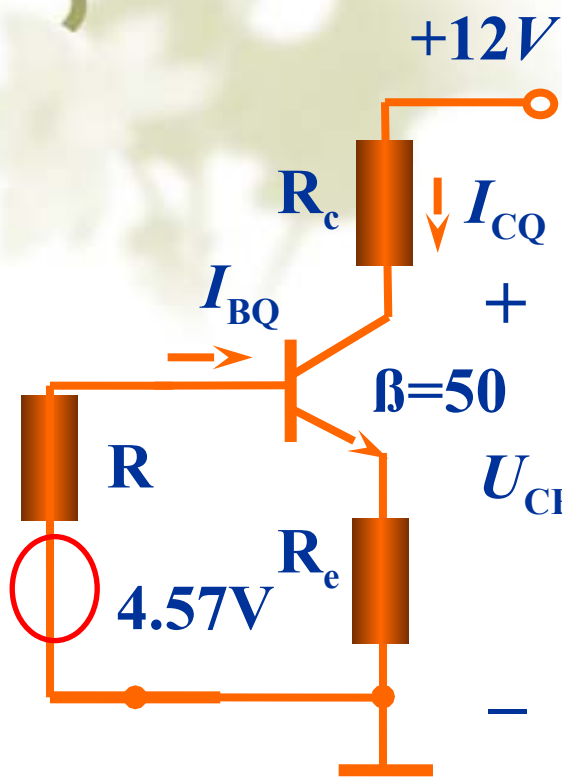
戴维南等效:

$$\text{开路电压 } U_o = 12 \times \frac{5.6}{9.1 + 5.6} \approx 4.57V$$

$$\text{等效电阻 } R = R_{b1} \parallel R_{b2} \approx 3.47k\Omega$$



## 例题 5-4c



$$4.57 = I_{BQ}R + 0.7 + I_{EQ}R_e$$

$$= I_{BQ}R + 0.7 + (1 + \beta)I_{BQ}R_e$$

$$I_{BQ} = \frac{4.57 - 0.7}{3.47 + 51 \times 0.62} \text{ mA} = 110 \mu\text{A}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 50 \times 110 \mu\text{A} = 5.5 \text{ mA}$$

$$I_{EQ} = (1 + \beta)I_{BQ} = 51 \times 110 \mu\text{A} = 5.61 \text{ mA}$$

$$U_{BQ} = 4.57 - I_{BQ}R = 4.57 - 0.11 \times 3.47 \approx 4.19 \text{ V}$$

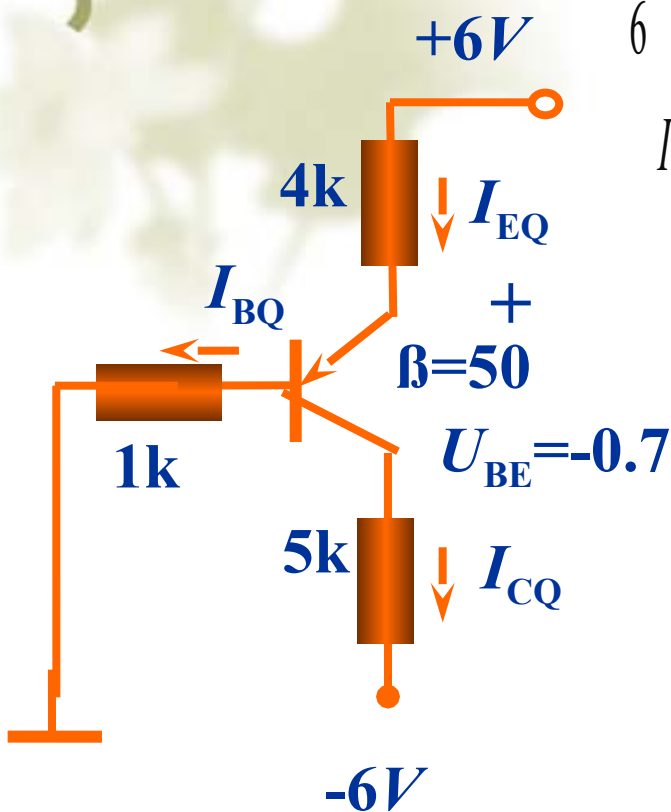
$$U_{CQ} = 12 - I_{CQ} \cdot R_c = 12 - 5.5 \times 1 = 6.5 \text{ V}$$

$$U_{BC} = U_B - U_C = 4.19 - 6.5 = -2.41 \text{ V}$$

BE 正偏，BC 反偏，所以静态工作点处于放大区



## 例题 5-4d



电流为 E 向 B，所以三极管是 PNP 型

$$6 = 4k * I_{EQ} + U_{EB} + 1k * I_{BQ} \quad \text{其中 } U_{EB} = -U_{BE} = 0.7$$

$$I_{EQ} = (1 + \beta) * I_{BQ}$$

联立求解得  $I_{BQ} = 25.8 \mu A$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 1.3 \text{ mA}$$

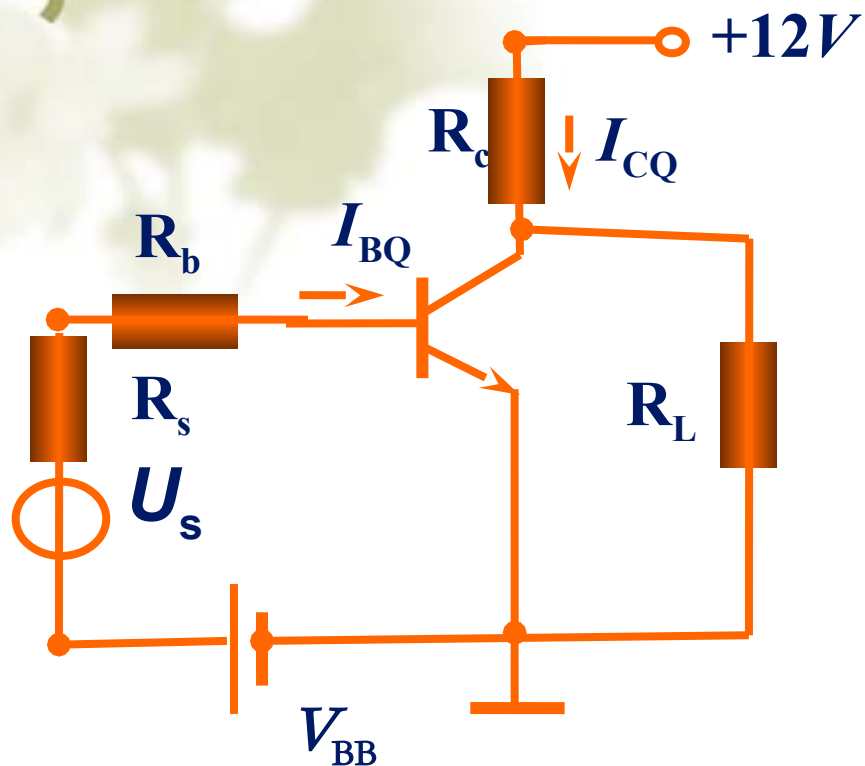
由  $U_{BC} + 5k * I_{CQ} + (-6) - 1k * I_{BQ} = 0$

联立求解得  $U_{BC} = -0.47 < 0$

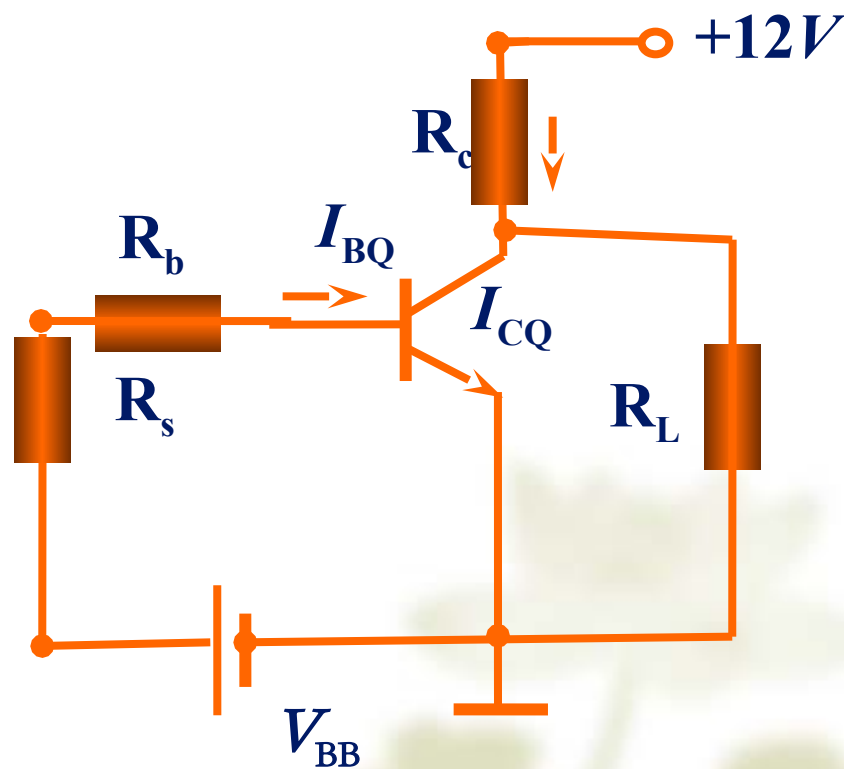
由于三极管是 PNP，所以 BC 结正偏

BE 正偏，BC 正偏，所以静态工作点处于饱和区

## 例题 5-5



●画直流通路如图 (b) 所示

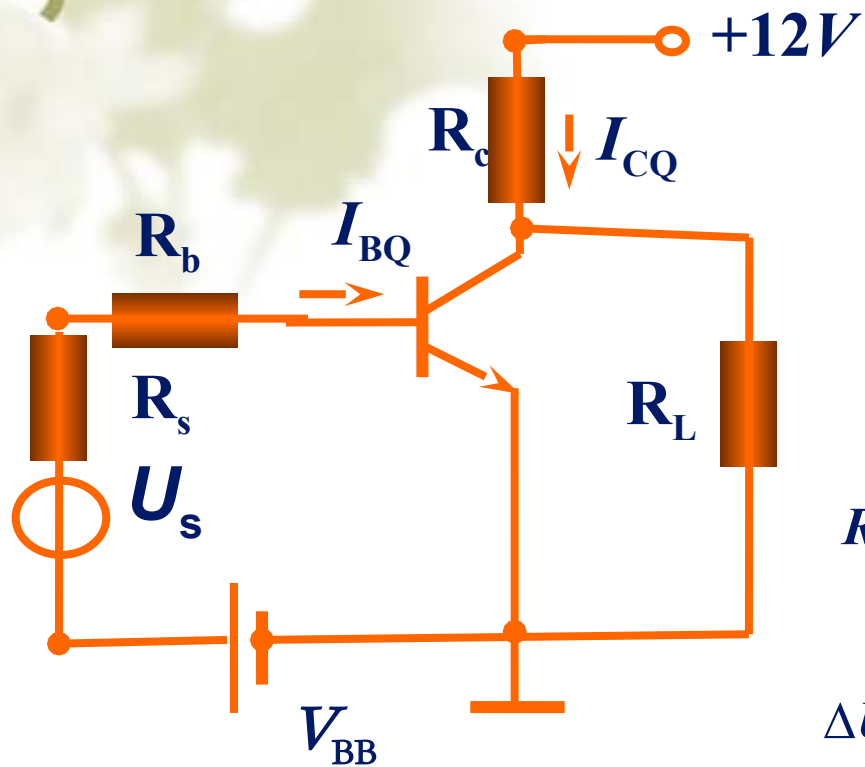


$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BE}}{R_s + R_b} = \frac{1 - 0.7}{7 + 0.5} \text{mA} = 40 \mu\text{A}$$

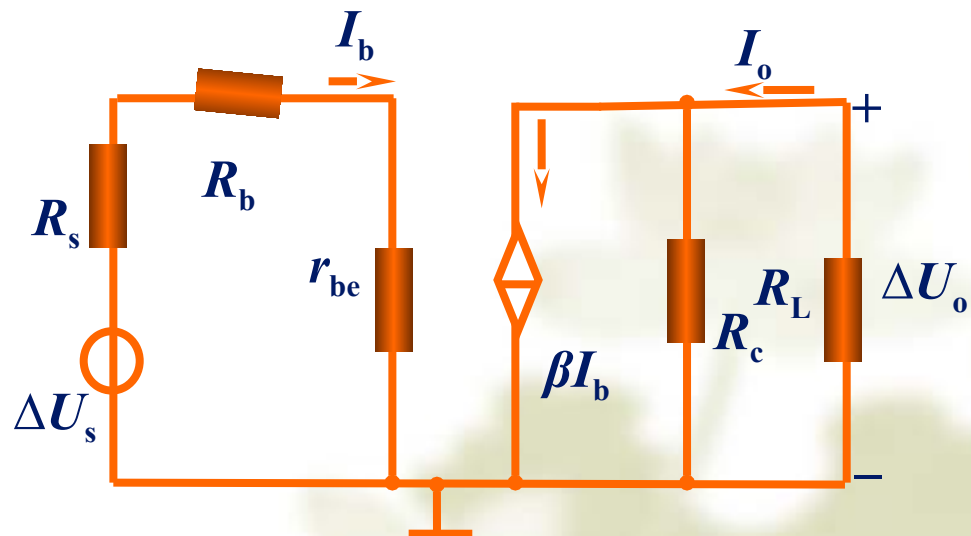
●查输出特性图对应  $I_{CQ} = 2\text{mA}$

$$\text{由 } I_{CQ} = \frac{V_{CC} - U_{CEQ}}{R_c} - \frac{U_{CEQ}}{R_L} = \frac{12 - U_{CEQ}}{3} - \frac{U_{CEQ}}{3} \quad \text{得 } U_{CEQ} = 3\text{V}$$

## 例题 5-5



●画交流通路如图 (b) 所示



(b) 微变等效电路

## 例题 5-5

$$r_{be} = 300 + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} (\Omega) \approx 0.95k\Omega$$

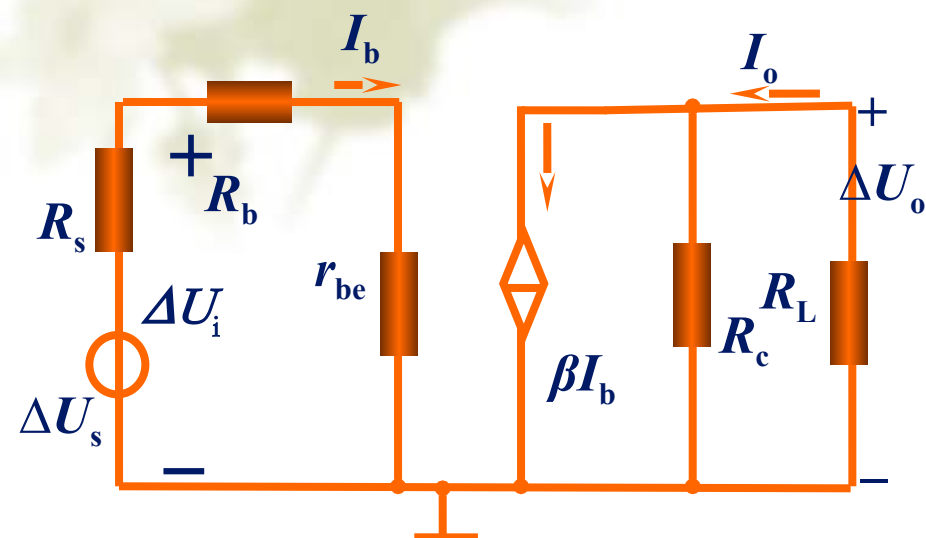
$$\Delta U_o = -\beta I_b (R_c // R_L)$$

$$\Delta U_s = I_b (R_s + R_b + r_{be})$$

$$A_{us} = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_s} = \frac{-\beta I_b (R_c // R_L)}{I_b (R_s + R_b + r_{be})} \approx -8.88$$

$$R_i = (R_b + r_{be}) = 7.95k\Omega$$

$$R_o = R_c = 3k\Omega$$



(b) 微变等效电路

第20次课小测：已知  $V_{CC}=12.7V$ ,  $U_{BE}=U_{CES}=0.7V$ ,  $R_B=120K\Omega$ ,  $R_C=3K\Omega$ ,  $\beta=50$ ,

1、最大集电极放大电流  $I_{CS}=?$

2、最大基极放大电流  $I_{BS}=?$

3、静态时，基极电流  $I_{BQ}=?$

4、静态时三极管处于什么状态？

5、电路若要正常工作  $R_B$  应如何？

注意：  $I_B \uparrow$ ,  $I_C$  不会无限增大

$I_C = \beta I_B \rightarrow$  发射结正偏，集电结反偏

$V_C > V_B > V_E \quad \because U_{BE}=0.7V \quad \therefore U_{CE} > 0.7V$

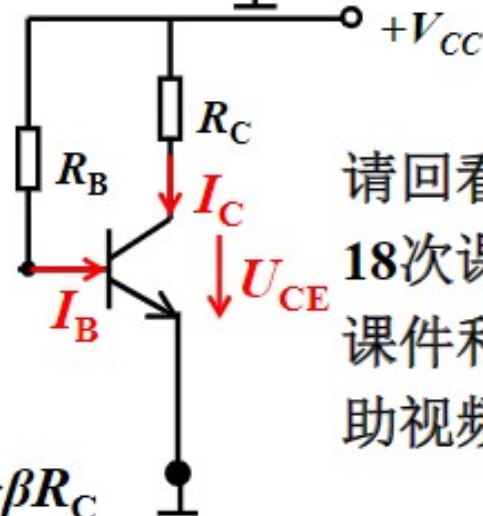
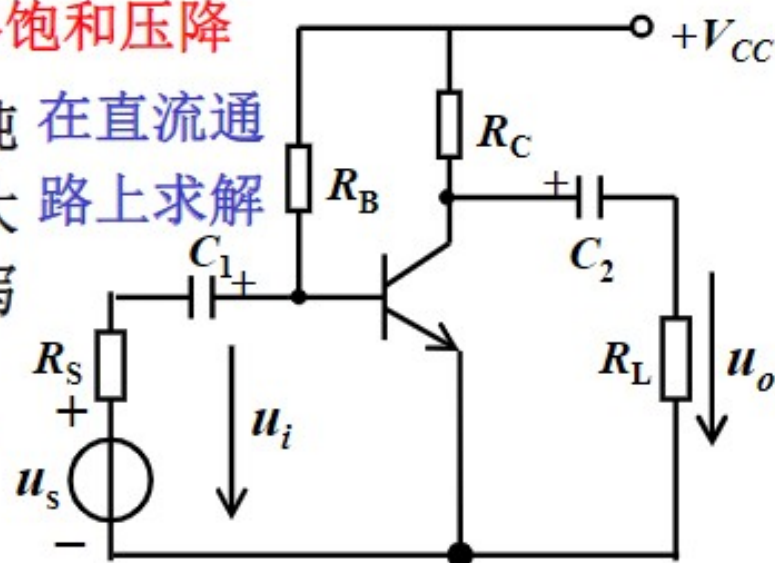
$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \quad I_{CS} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_C} = 4mA$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_B} = 100\mu A > I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} = 80\mu A$$

$\therefore$  三极管处于饱和状态  $\rightarrow$  调大  $R_B \rightarrow R_B > \beta R_C$

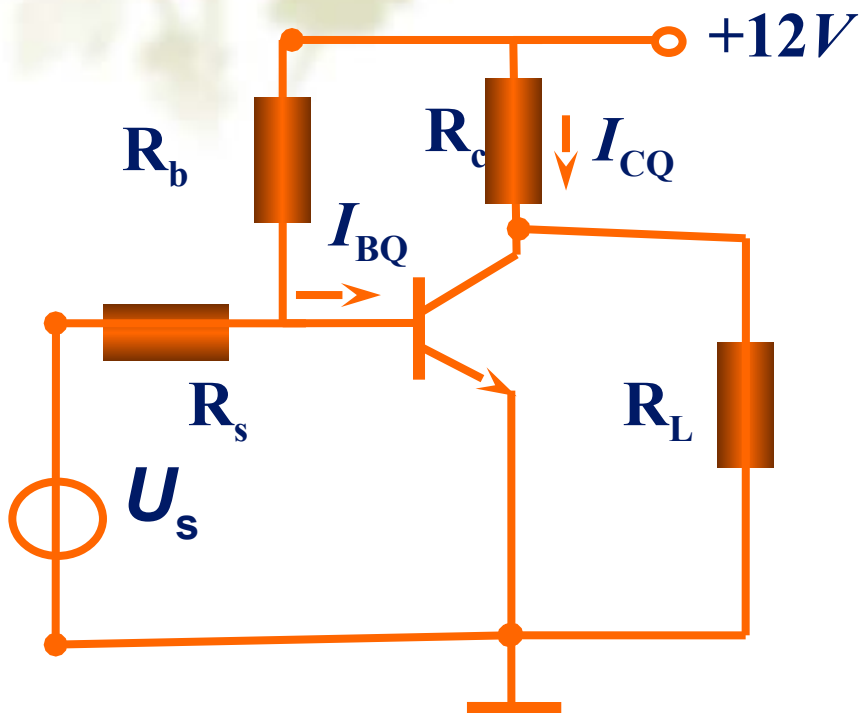
临界饱和压降

纯在直流通路上求解

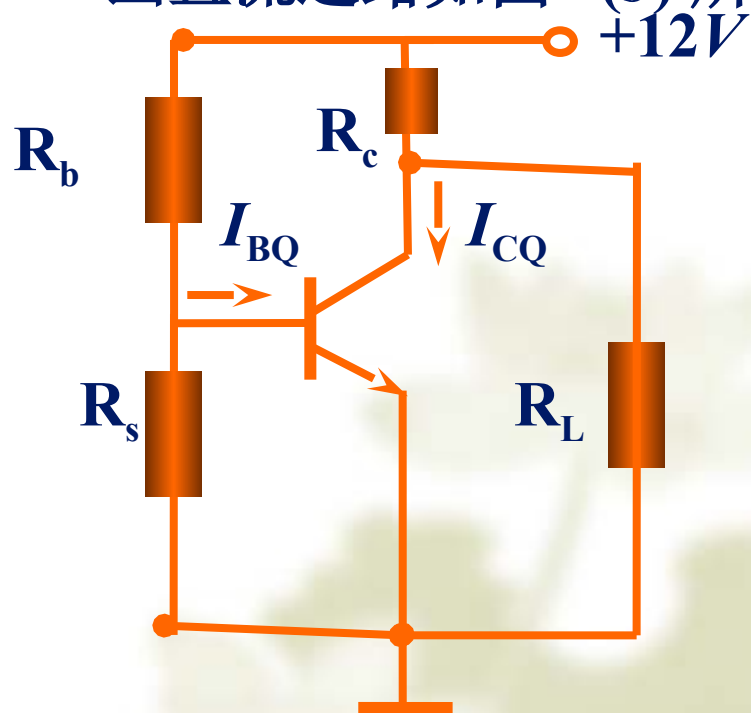


请回看第18次课的课件和辅助视频

## 例题 5-7



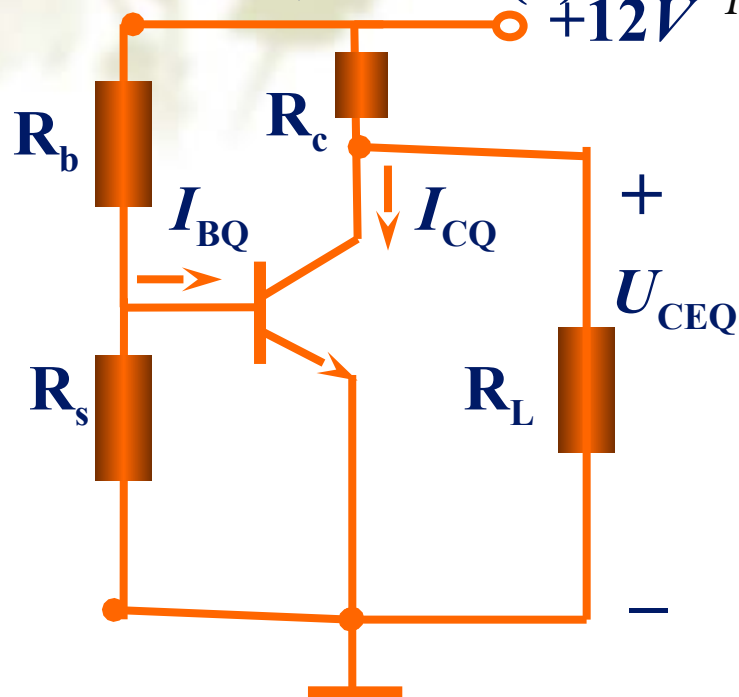
●画直流通路如图 (b) 所示





## 例题 5-7

●画直流通路如图 (b) 所示



$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_b} - \frac{U_{BE}}{R_s} = \frac{12 - 0.7}{125} - \frac{0.7}{10} = 20.4 \mu A$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 1.63 mA$$

由  $V_{CC} = I_{R_c} \cdot R_c + (I_{R_c} - I_{CQ}) \cdot R_L$

得: 
$$I_{R_c} = \frac{V_{CC} + I_{CQ} R_L}{R_c + R_L}$$

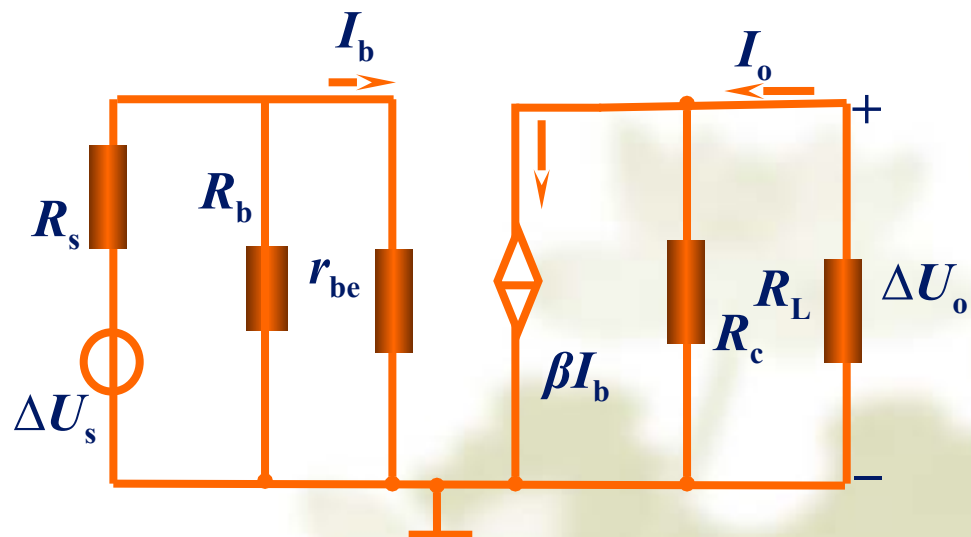
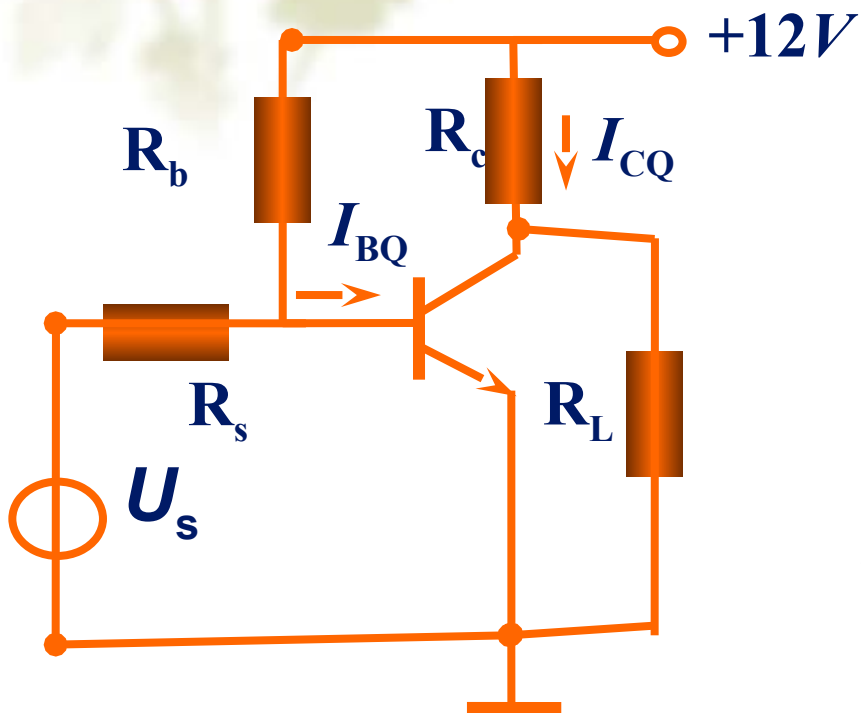
$$= \frac{12 + 1.63 \times 5.1}{3.3 + 5.1} mA = 2.42$$

得:  $U_{CEQ} = V_{CC} - I_{R_c} \cdot R_c = 12 - 2.42 \times 3.3 \approx 4.01 V$

$U_{CEQ} > 0$ , BC 反偏, 静态工作点位于放大区。

## 例题 5-7

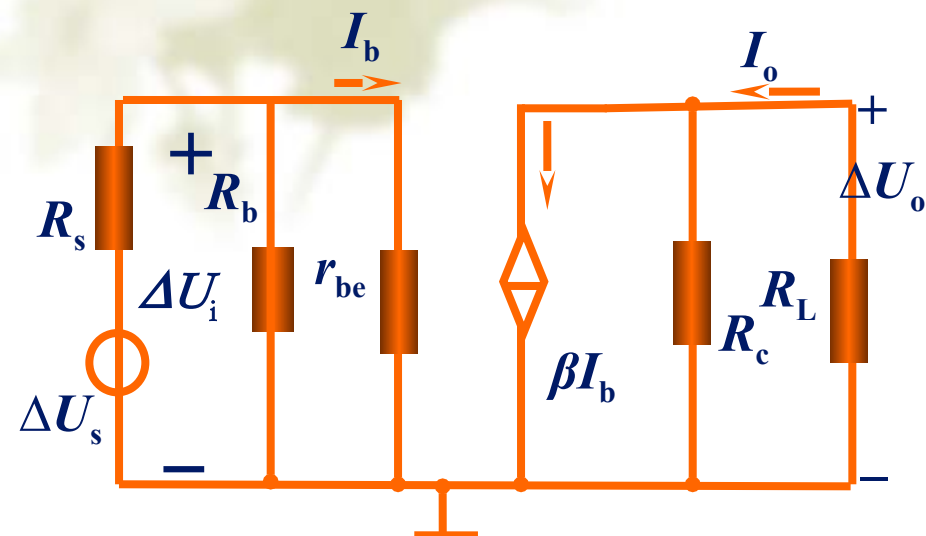
●画交流通路如图 (b) 所示



(b) 微变等效电路



## 例题 5-7



(b) 微变等效电路

$$r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})}(\Omega)$$

$$= 200 + (1 + 80) \frac{26(\text{mV})}{1.65(\text{mA})}(\Omega) \approx 1.5\text{k}\Omega$$

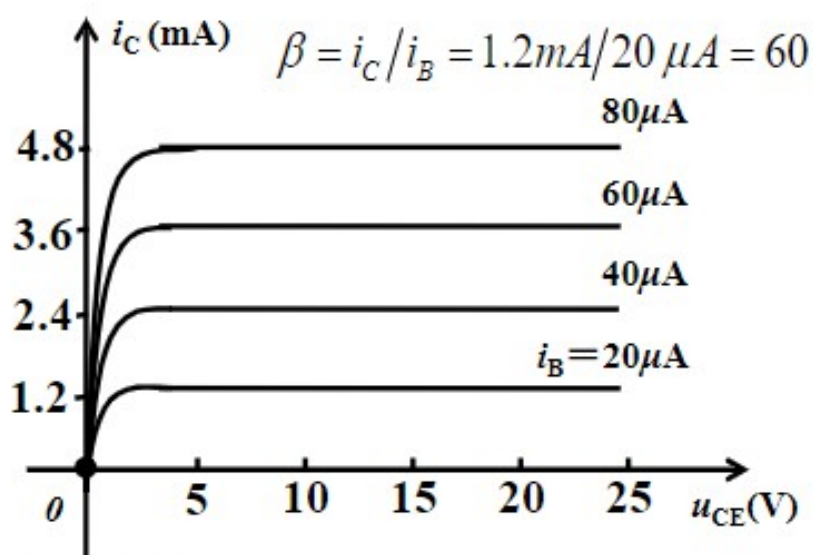
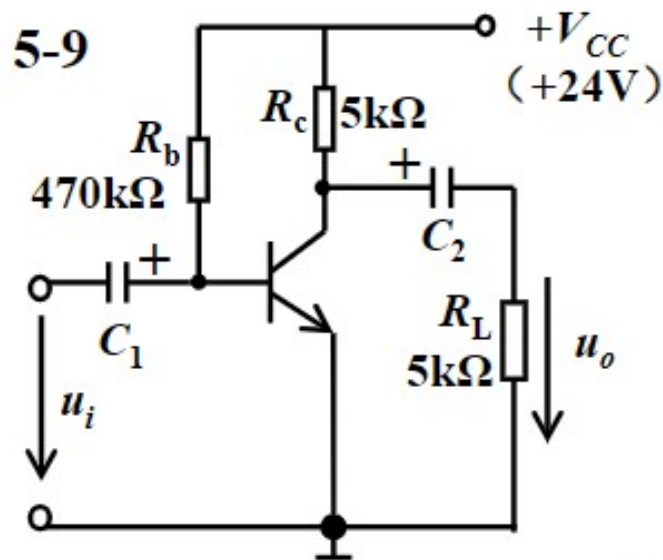
$$\Delta U_s = I_b r_{be} + \left( \frac{I_b r_{be}}{R_b} + I_b \right) R_s$$

$$\Delta U_o = -\beta I_b (R_c // R_L)$$

$$A_{us} = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_s} = \frac{-\beta I_b (R_c // R_L)}{I_b r_{be} + \left( \frac{I_b r_{be}}{R_b} + I_b \right) R_s} \approx -13.9$$

$$R_i = (R_b // r_{be}) \approx r_{be} = 1.5\text{k}\Omega$$

$$R_o = R_c = 3.3\text{k}\Omega$$



已知  $U_{BE} = U_{CES} = 0.7\text{V}$   $\beta = \frac{\Delta i_c}{\Delta i_B} = \frac{(3.6 - 2.4)\text{mA}}{(60 - 40)\mu\text{A}} = 60$

(1) 确定静态工作点  $\rightarrow$  求  $I_B$ 、 $I_C$ 、 $U_{CE}$

步骤1: 画出直流通路  $\rightarrow$  断开所有C

步骤2: 标出方向进行求解

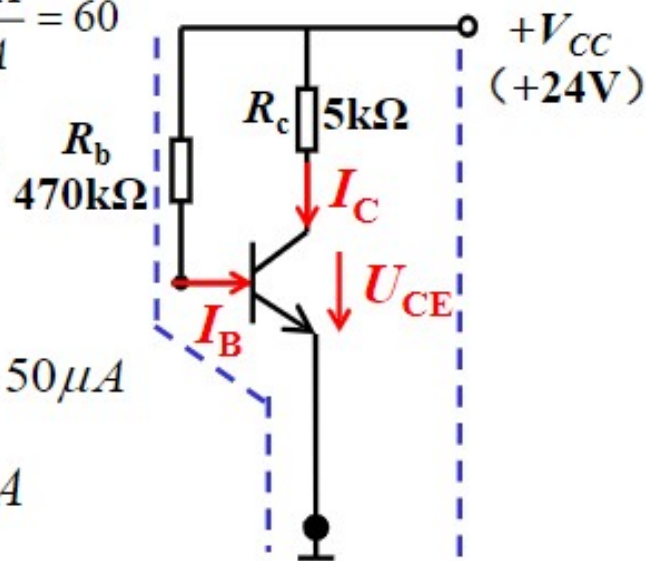
支路1  $\rightarrow V_{CC} = I_B R_b + U_{BE}$

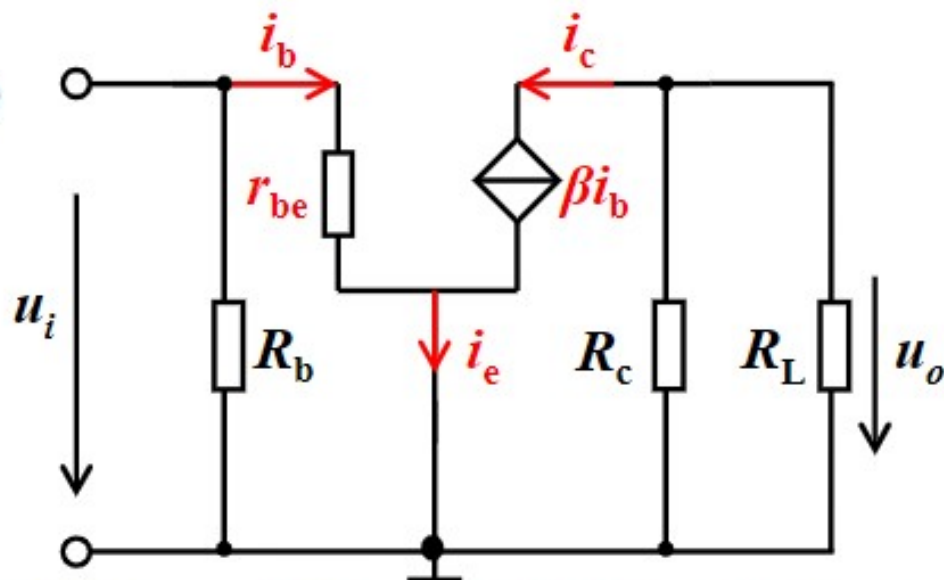
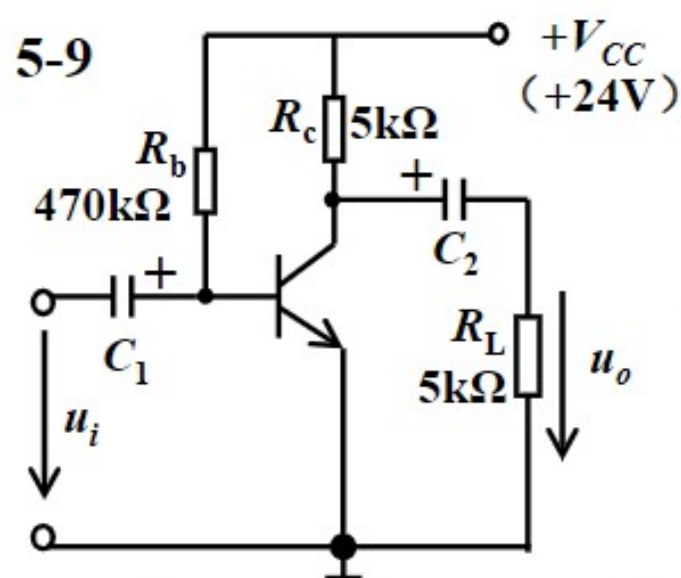
$$I_B = \frac{V_{CC} - 0.7}{R_b} \approx 50\mu\text{A}$$

$\beta$ 从图b中读取

$$I_C = \beta I_B = 3\text{mA}$$

支路2  $\rightarrow V_{CC} = I_C R_c + U_{CE}$   $U_{CE} = V_{CC} - I_C R_c = 9\text{V}$





(2) 计算  $A_u$ ,  $r_i$  和  $r_o$ 。 ← 动态分析 → 只有交流电源作用的电路

步骤1: 画出微变等效电路

注意点:

1、采用小写符号和下标

2、遇到  $+V_{CC}$  做接地处理

3、遇到电容做短路处理

① 画三极管的微变等效模型

② 根据原图画发射极电路

③ 根据原图画基极电路

④ 根据原图画集电极电路

$$r_{be} = r_{bb}' + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_{EQ}(mA)} = 300 + \frac{26(mV)}{I_{BQ}(mA)} = 820\Omega$$



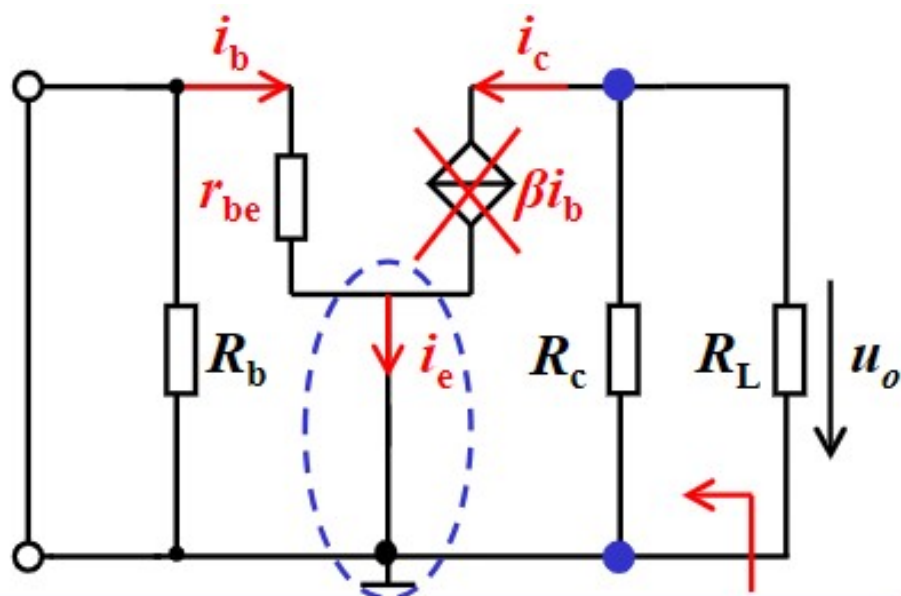
$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-i_c(R_c // R_L)}{i_b r_{be}} \quad \text{反相放大}$$

$$= \frac{-\beta i_b (R_c // R_L)}{i_b r_{be}} = -183 < -1$$

$r_{be} \leftarrow 0.82k\Omega$

$$r_i = R_b // r_{be} \rightarrow R_b \gg r_{be}$$

$$r_i \approx r_{be} \approx 0.82k\Omega \quad r_o = R_c = 5k\Omega$$



(2) 计算 $A_u$ ,  $r_i$ 和 $r_o$ 。 注意：读输出电阻时决不能把 $R_L$ 计算在内

步骤1：画出微变等效电路

注意点：

1、采用小写符号和下标

2、遇到 $+V_{CC}$ 做接地处理

3、遇到电容做短路处理

① 画三极管的微变等效模型

② 根据原图画发射极电路

③ 根据原图画基极电路

④ 根据原图画集电极电路

$$r_{be} = r_{bb}' + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_{EQ}(mA)} = 300 + \frac{26(mV)}{I_{BQ}(mA)} = 820\Omega$$

- (1) 确定静态工作点。  $\rightarrow I_B = 50\mu A \quad I_C = 3mA \quad U_{CE} = 9V$
- (2) 计算  $A_u$ ,  $r_i$  和  $r_o$ 。  $\rightarrow A_u = -183 \quad r_i \approx 0.82k\Omega \quad r_o = 5k\Omega$
- (3) 当有效值  $U_i = ?$ , 输出电压将出现失真? 首先出现什么失真?

步骤1: 求解最大不失真输出电压幅值  $U_{omax}$   $U_{CES}$  通常取  $0.7V$

① 不出现饱和失真的最大输出电压幅值  $U_{Rm} = U_{CE} - U_{CES} = 8.3V$

② 不出现截止失真的最大输出电压幅值  $U_{Fm} \rightarrow$  需判断电路是否接有负载  $R_L$

空载:  $U_{Fm} = I_C R_C$  或 有载:  $U_{Fm} = I_C (R_C // R_L)$

$\because$  电路图中接有  $5k\Omega$  的  $R_L \quad \therefore U_{Fm} = 3mA * 2.5k\Omega = 7.5V$

$\because$  交流信号要求对称  $\therefore U_{omax} = \min\{U_{Rm}, U_{Fm}\} = 7.5V$

步骤2:  $U_{imax} = \frac{U_{omax}}{|A_u|} = \frac{7.5}{183} = 41mV \quad U_i = \frac{U_{imax}}{\sqrt{2}} = 29mV$

$\because U_{Fm} < U_{Rm} \quad \therefore$  当  $U_i > 29mV$  时首先出现截止失真