

# 基础电路与电子学

主讲：陈开志

办公室：学院 2 号楼 304

Email: [ckz@fzu.edu.cn](mailto:ckz@fzu.edu.cn)

# 第5章 放大电路基础

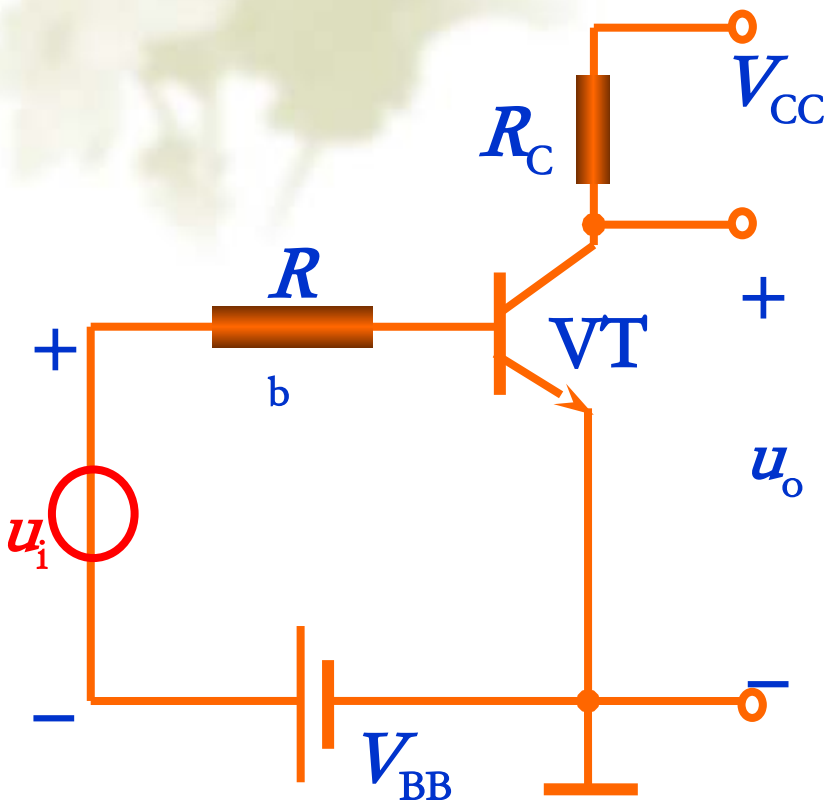
## 5.3 计算分析法

### ◆ 静态工作点计算

### ◆ 交流通路的分析

- 晶体管的  $h$  参数微变等效电路
  - 三极管如何等效成以前的普通电路
  - 在普通电路上进行计算
- 用计算分析法计算主要性能指标
  1. 电压放大倍数
  2. 电流放大倍数
  3. 输入电阻和输出电阻
  4. 最大输出电压幅值  $U_{\text{omax}}$

## 2. 用图解法分析动态工作情况



输入交流信号  $u_i \neq 0$ ，此时电路中各处为直流与交流的叠加。

(1) 利用输入特性画出  $i_B$  和  $u_{BE}$  波形

- 设输入信号  $u_i = U_{im} \sin \omega t (\text{mV})$
- 从输入回路可列出方程：

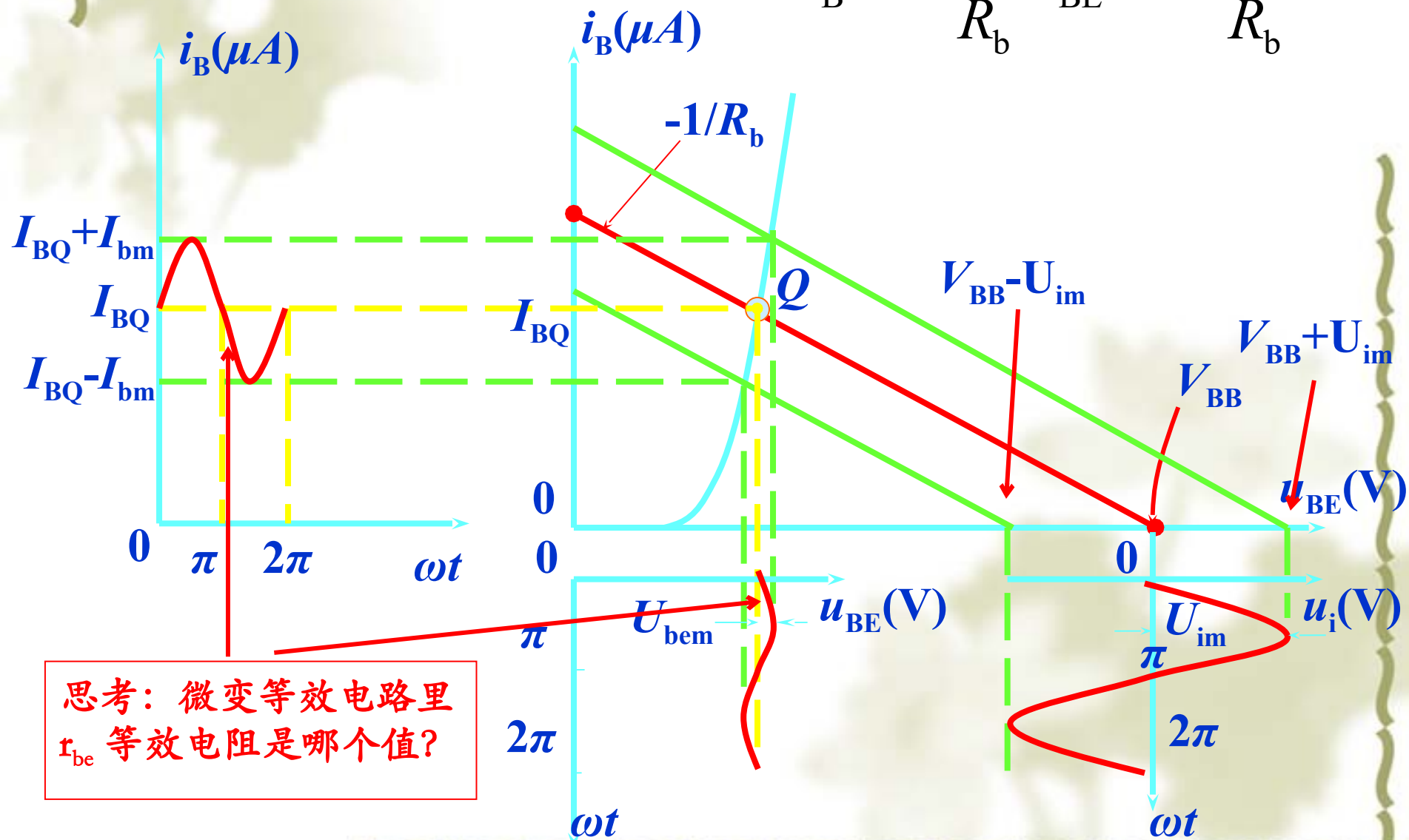
$$V_{BB} + u_i = i_B R_b + u_{BE}$$

$$i_B = -\frac{1}{R_b} u_{BE} + \frac{V_{BB} + u_i}{R_b}$$

取两点 (  $V_{BB} + u_i$  , 0 )  
和 ( 0 ,  
(  $V_{BB} + u_i$  ) /  $R_b$  )

# 图解法求 $u_{BE}$ 及 $i_B$ 波形

$$i_B = -\frac{1}{R_b} u_{BE} + \frac{V_{BB} + u_i}{R_b}$$



思考：微变等效电路里  $r_{be}$  等效电阻是哪个值？

## (2) 利用输出特性画出 $i_C$ 和 $u_{CE}$ 波形

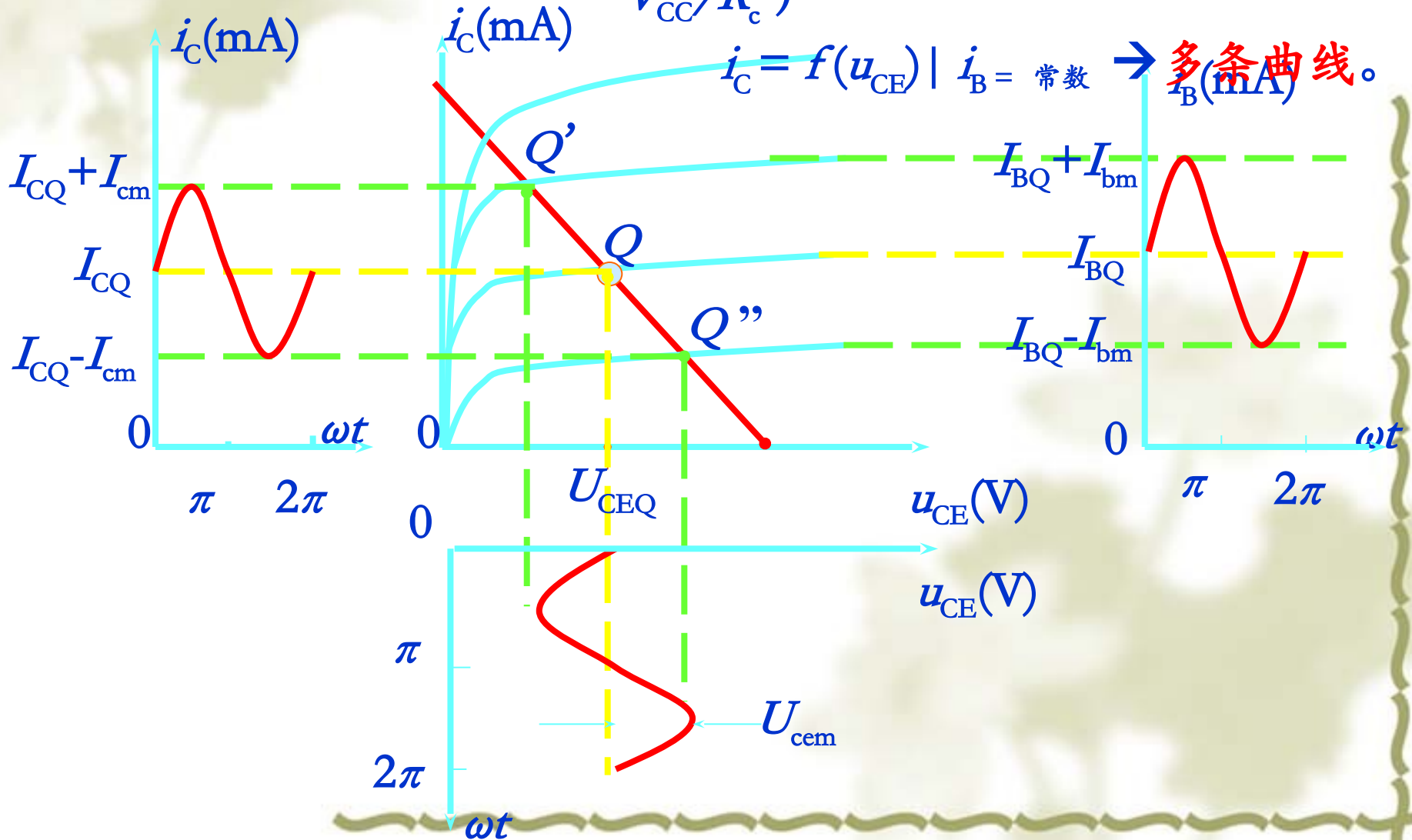
- 当  $u_i \neq 0$  时，有  $V_{CC} = i_C R_c + u_{CE}$ ，其中  $i_C$  与  $u_{CE}$  既有直流分量又有交流分量。
- 它反映了瞬时电量之间的关系，故称为动态负载线或交流负载线 (Dynamic Load Lines)。
- 由输入特性曲线已得到  $i_B$  的波形，且有

$$V_{CC} = i_C R_c + u_{CE} \quad \text{取两点 } (V_{CC}, 0) \text{ 和 } (0, V_{CC}/R_c)$$

$i_C = f(u_{CE}) | i_B = \text{常数} \rightarrow \text{多条曲线。}$

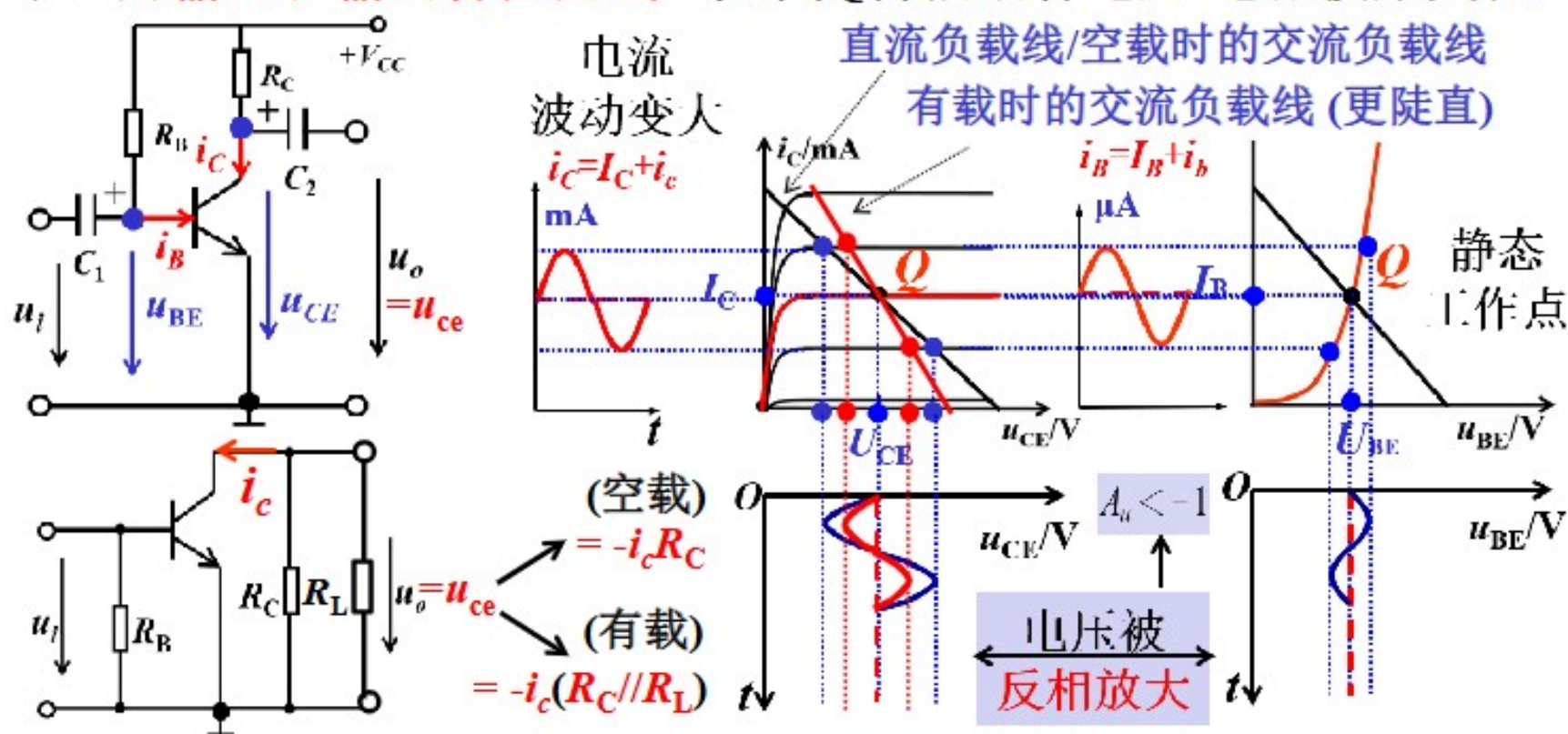
$$i_C = \frac{1}{R_C} u_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C}$$

图解法求  $u_{CE}$  和  $i_C$  取两点  $(V_{CC}, 0)$  和  $(0, V_{CC}/R_C)$





在T的输入和输出特性曲线上先找Q再描绘各电压/电流波形变化



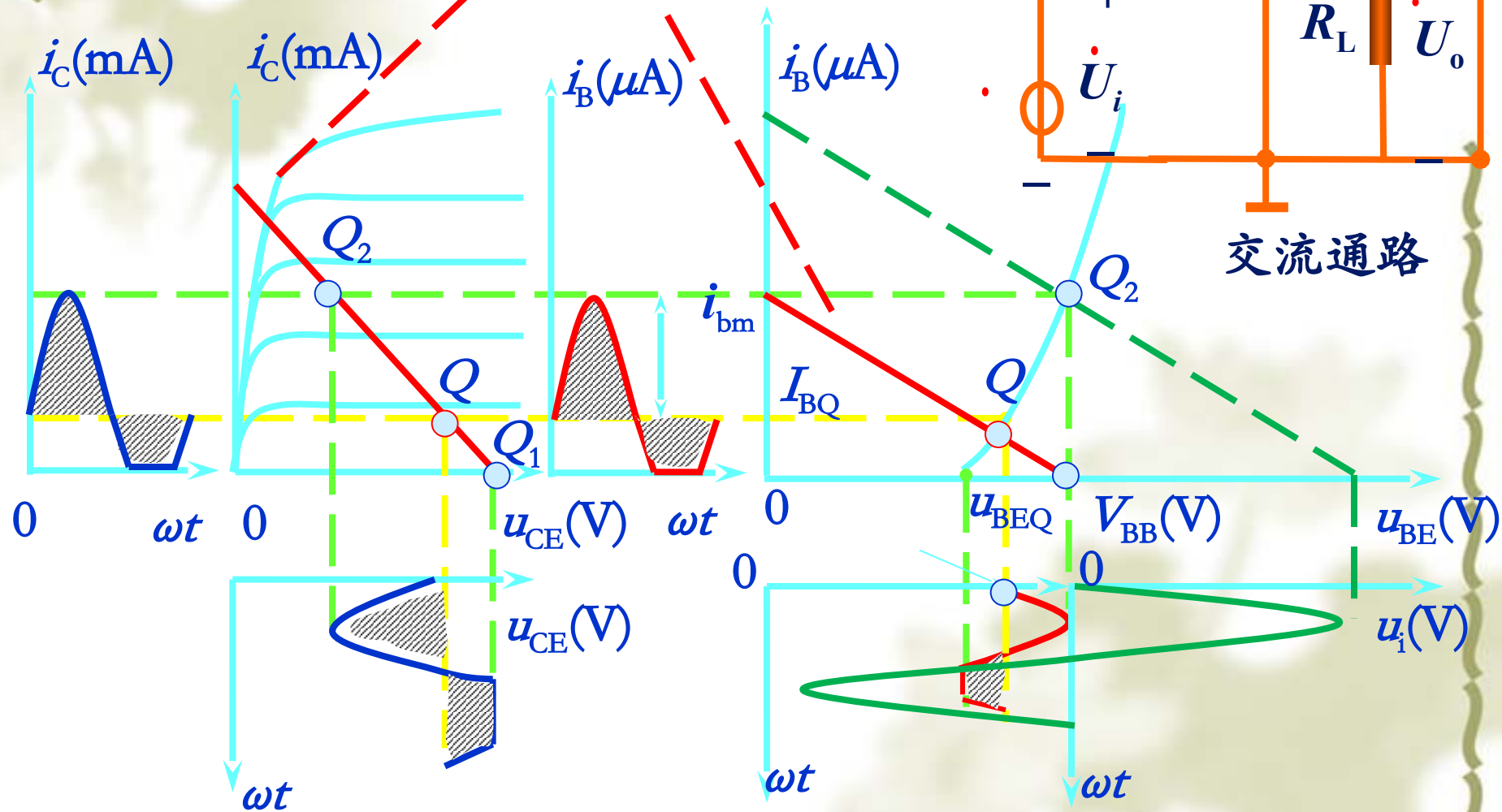
结论1: 放大电路是在直流静态工作点的基础上产生交流波动

结论2: 空载和有载时  $u_{ce}$  (即  $u_o$ ) 与  $i_c$  的关系不同(看交流通路)

结论3: 只要是共射接法, 都会实现对  $u_i$  的反相放大  $A_u = u_o/u_i < -1$

# 交流动态直线

## 截止失真



(a) 从输出特性分析截止失真

(b) 从输入特性分析截止失真

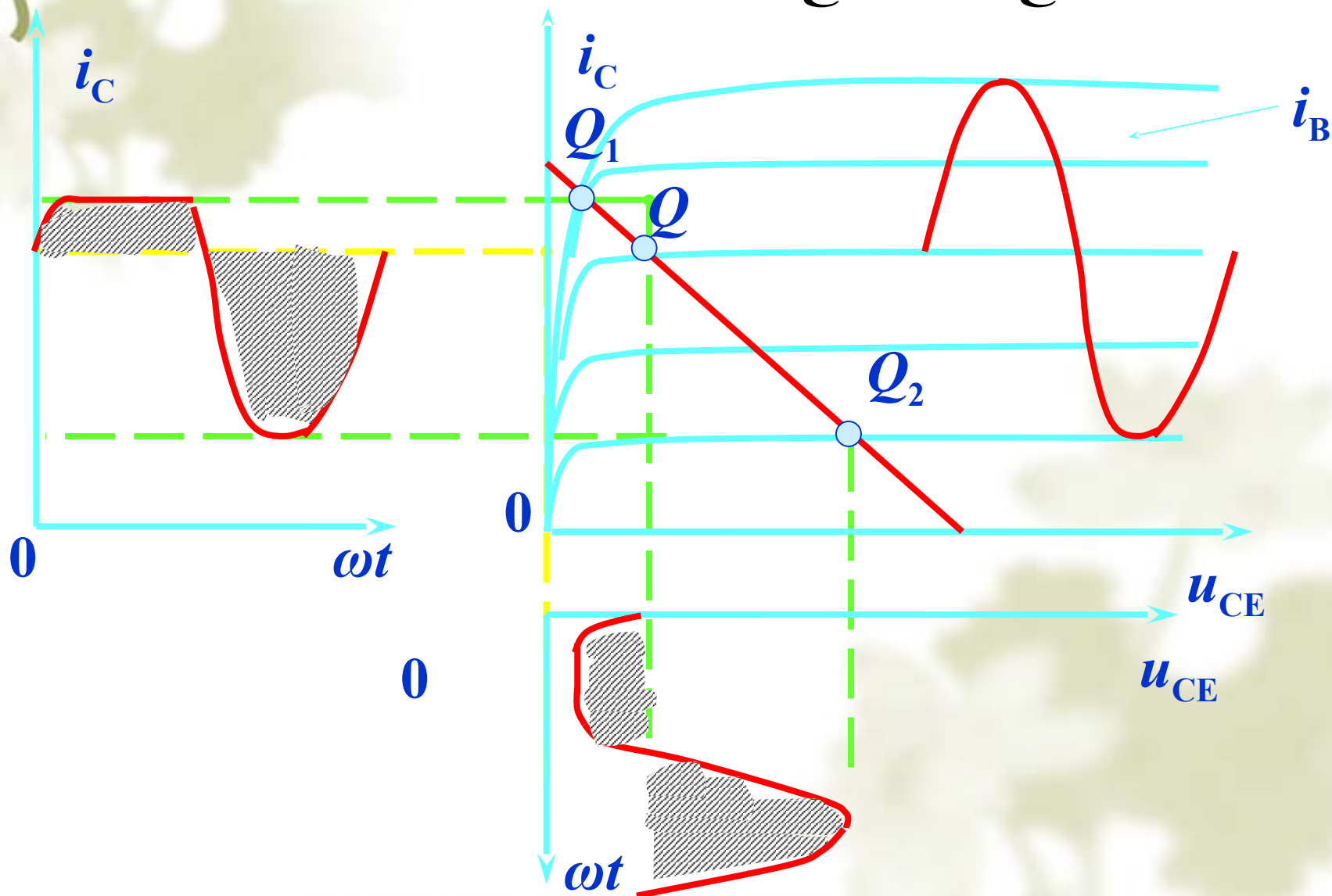


## ➤ (1) 截止失真

- 条件：静态工作点设置**偏低**，输入信号  $u_i$  的幅值相对比较大。
- 结果： $i_B$ 、 $i_C$ 、“削底”， $u_{CE}$  的波形出现“削顶”失真，见图。这种失真称为截止失真 (Cutoff Distortion)。
- 消除截止失真的方法：**提高  $Q$  点位置**（如减小  $R_b$  的阻值）；减小  $u_i$  的幅值。

# 饱和失真

$$i_C = \frac{1}{R_C} u_E + \frac{V_C}{R_C}$$



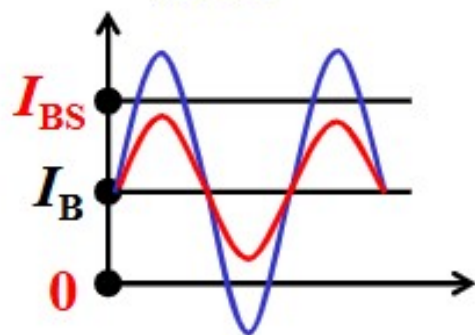
## (2) 饱和失真

- 条件：静态工作点设置**偏高**，输入信号  $u_i$  的幅值相对比较大。
- 结果： $i_c$  的波形出现“削顶”， $u_{CE}$  “削底”失真这种失真称为**饱和失真**（Saturation Distortion）。
- 消除饱和失真的方法：**降低  $Q$  点位置**（如  $R_b \uparrow$  或  $R_c \downarrow$ ）；减小  $u_i$  的幅值。

问题2：如何用图解法画出输出电压 $u_o$ 的非线性失真波形？

注意：①  $I_B$  不合适不一定会出现失真 ②  $I_B$  合适也可能出现失真

情况三



失真原因及解决：

① Q 不合适

截止失真  $\rightarrow$  调大  $I_B$

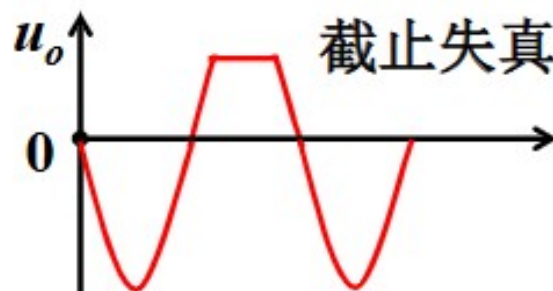
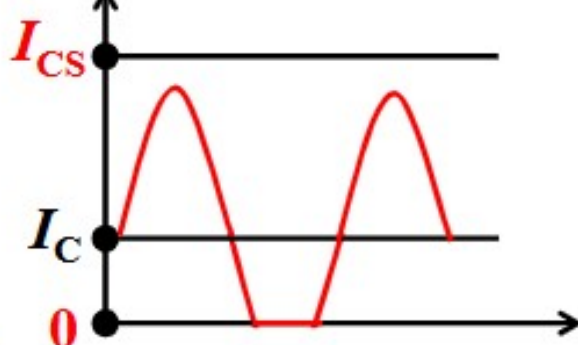
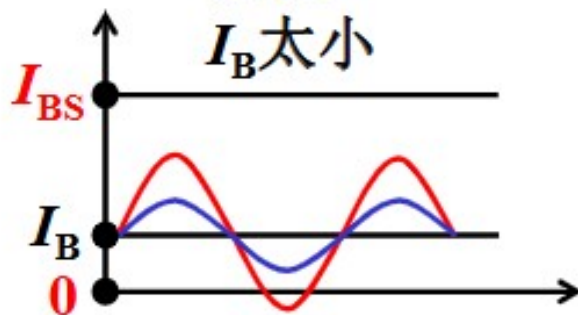
饱和失真  $\rightarrow$  调小  $I_B$

②  $u_i$  不合适

解决方法：调小  $u_i$

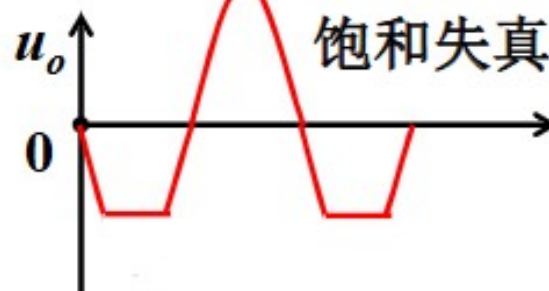
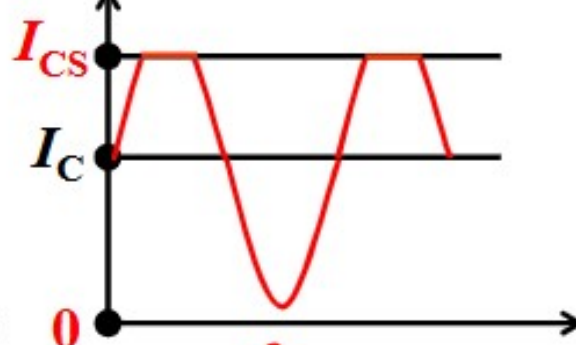
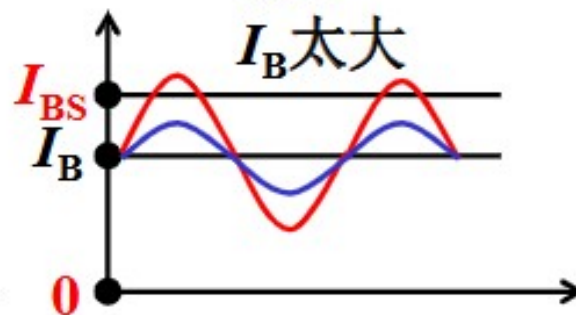
情况一

$I_B$  太小



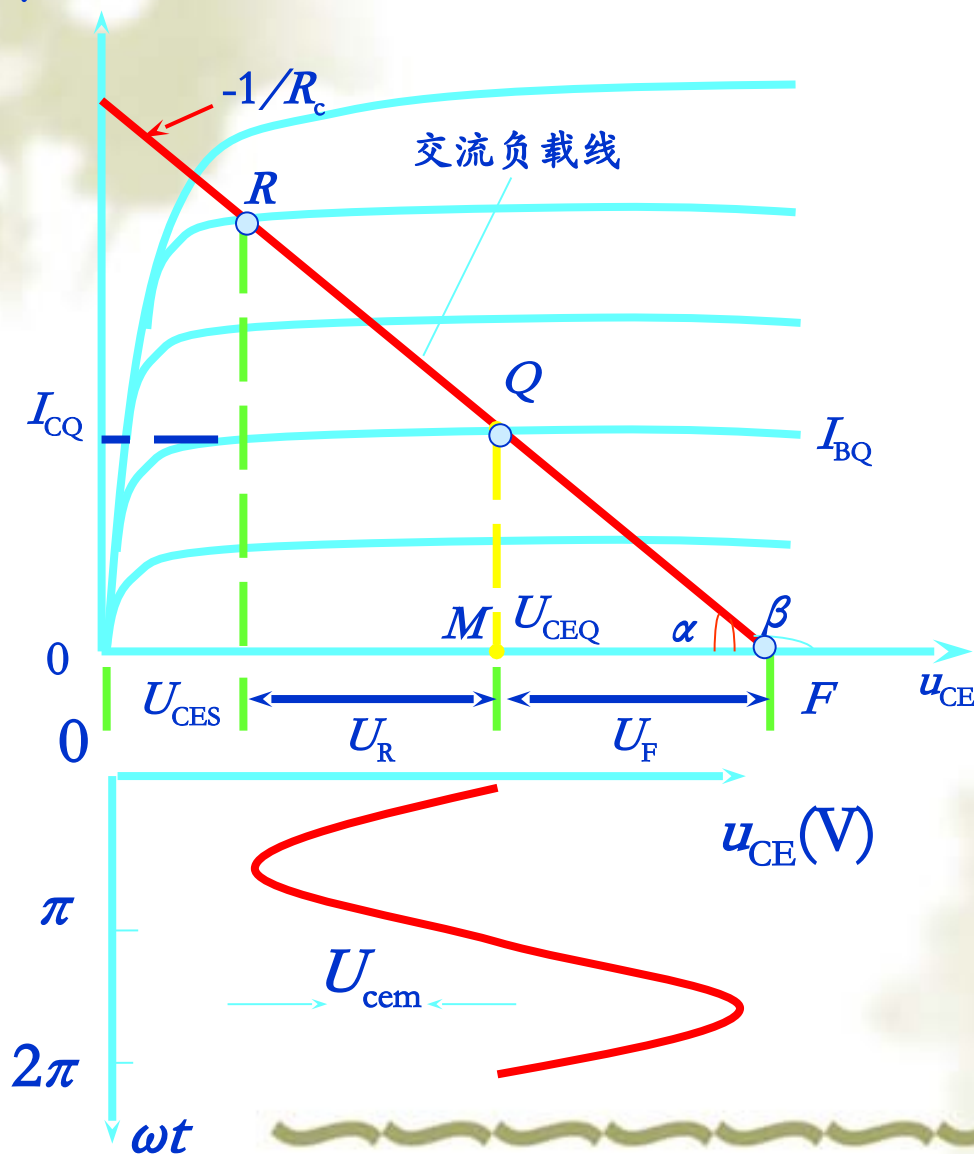
情况二

$I_B$  太大



## 5. 最大输出电压幅值

$$i_C = \frac{1}{R_C} u_E + \frac{V_C}{R_C}$$



- 工作点下移至  $F$  点时便进入截止区，将发生截止失真。
- 工作点上移至  $R$  点时便进入饱和区，将发生饱和失真。



## 5. 最大输出电压幅值

- 所以既不发生饱和失真，又不发生截止失真的条件下， $u_{CE}$  的交流分量的最大幅值应当是  $U_R$  与  $U_F$  之中的最小值。即

$$U_{cemax} = \min\{U_R, U_F\}$$

- 对于图 5-6(a) 的共射极放大电路，输出电压  $u_o$  就等于  $u_{CE}$ ，其中输出信号电压  $u_o$  就等于  $u_{ce}$ ，那么该电路的最大输出电压幅值为

$$U_{omax} = \min\{U_{CEQ} - U_{CES}, I_{CQ}R_C\}$$

# 计算分析法

## ➤ 主要矛盾——如何处理三极管的非线性问题

### ➤ 线性近似

所谓放大电路的分析方法是指怎样求解静态工作点，怎样求解电路的动态指标。

	静态分析	动态分析
待求问题	静态工作点 $Q$ ( $I_{BQ}$ 、 $I_{CQ}$ 、 $U_{CEQ}$ )	求动态指标： $R_i$ 、 $R_o$ $A_u$ 、 $A_i$ 等
电路	直流通路	交流通路
分析方法	直流电路分析方法，近似估算法	微变等效电路法

交直流分开计算，分析过程是“先静后动”。

## 微变等效电路分析法小结

1、分析步骤（应遵循先静态后动态的原则）：

①根据直流通路确定放大电路的静态工作点，确定处在放大状态。

③求出静态工作点处的微变等效电路参数： $r_{be}$ 。

②根据交流通路，用三极管的小信号模型代替电路中的三极管，画出放大电路的微变等效电路。

④利用线性电路理论计算电路的动态技术指标：

$A_u$ 、 $A_i$ 、 $R_i$ 、 $R_o$ 等。

2、微变等效电路法只能进行动态分析。

## 直流通路和交流通路画法：

➤ 直流通路和交流通路的划分依据：**叠加定理**。

### ➤ **直流通路画法原则：**

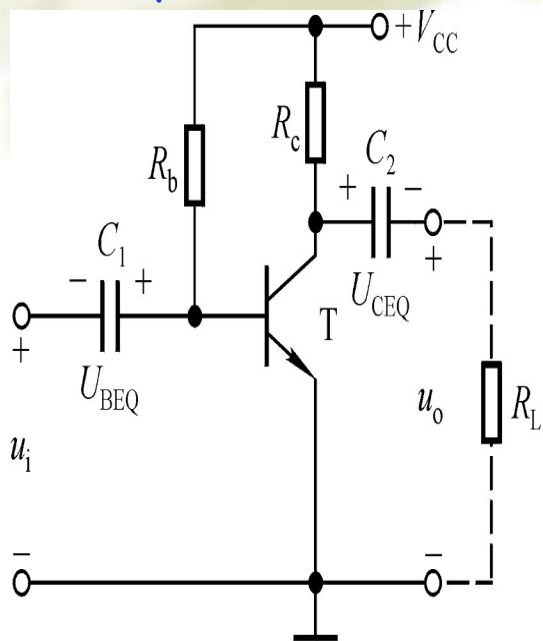
- ① 令  $U_i=0$  （输入信号为 0）
- ② 耦合电容  $C_1$ 、 $C_2$  等开路，电感等短路
- ③ 保留直流电压源  $V_{cc}$  或  $E_c$

### ➤ **交流通路画法原则：**

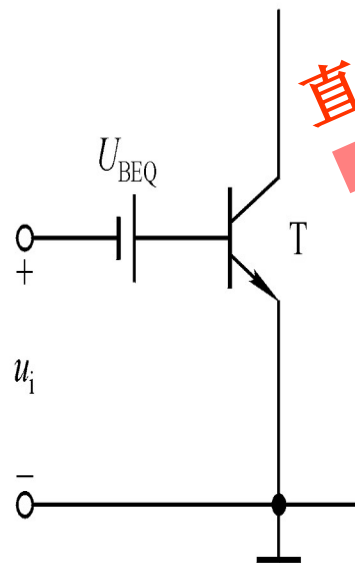
- ① 令  $U_i \neq 0$  （加入输入信号）
- ② 电容  $C_1$ 、 $C_2$  对交流信号短路
- ③ 直流电压源自身除源（**短路**）

耦合电容  $C_1$ 、 $C_2$  等开路，电感等短路

# 例 5-1：阻容耦合共射放大电路

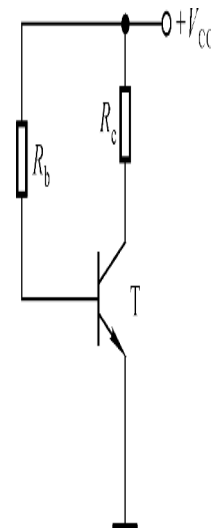


(a)

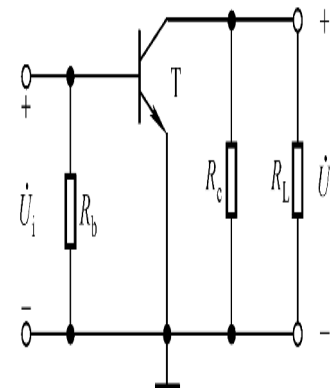


(b)

直流通路



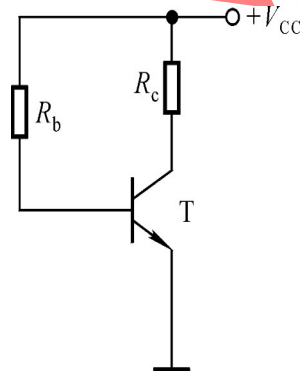
(a)



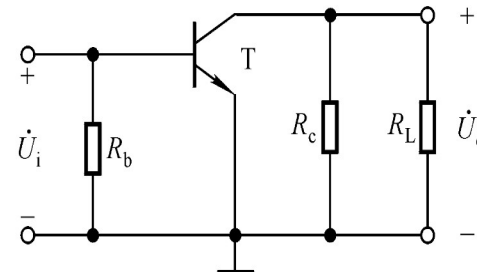
(b)

交流通路

电容  $C_1$ 、 $C_2$  对交流信号短路



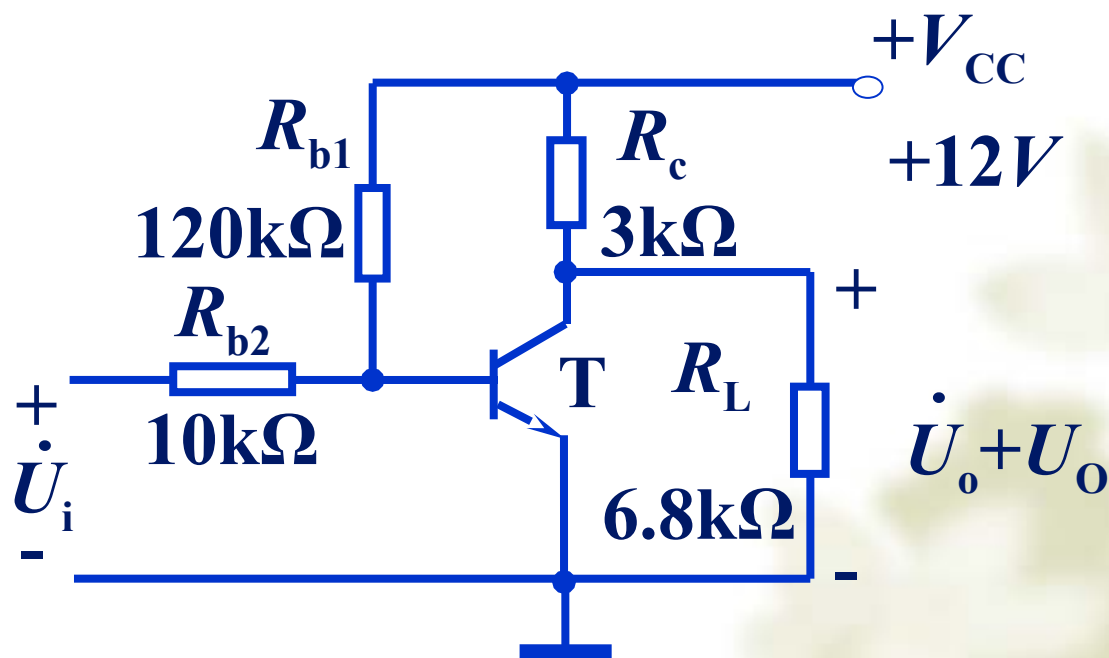
(a)



(b)



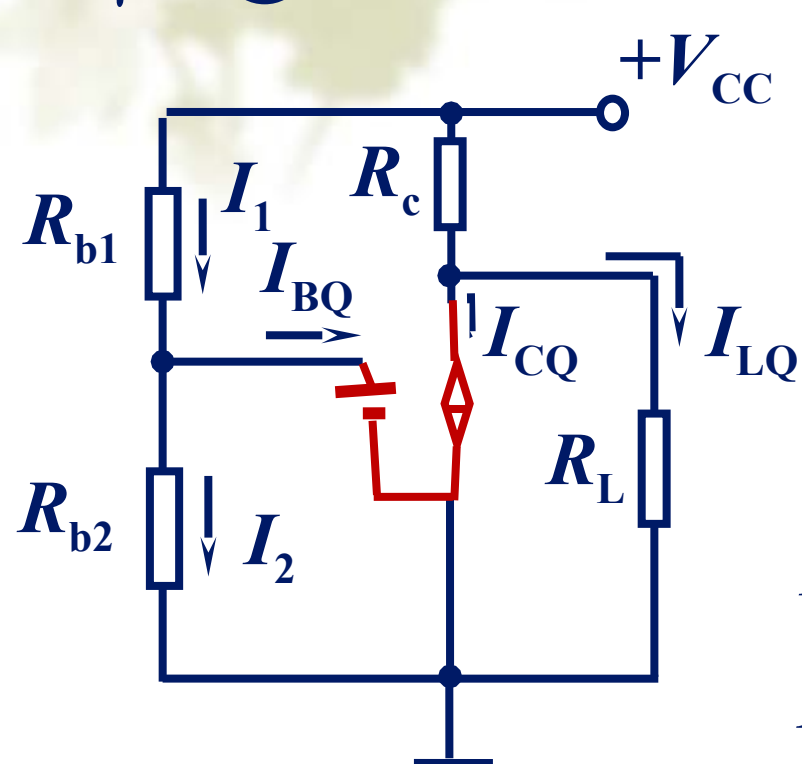
**[例]** 在图示的共射极放大电路中，T 是 NPN 硅管， $\beta=50$ 。求：① 计算  $I_{CQ}$ ， $U_{CEQ}$ 。② 计算  $\dot{U}_o / \dot{U}_i$ 。  
③ 计算输入电阻  $R_i$  及输出电阻  $R_o$ 。



(a) 共射极放大电路

[ 例 ]

解：①画出该电路的直流通路



(b) 直流通路

$$I_{BQ} = I_1 - I_2 = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_{b1}} - \frac{U_{BE}}{R_{b2}}$$

$$= \frac{12 - 0.7}{120} - \frac{0.7}{10} = 0.094 - 0.07$$

$$= 0.024(\text{mA})$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 50 \times 0.024 = 1.2(\text{mA})$$

$$I_{EQ} = I_{CQ} + I_{BQ}$$

$$= 1.2 + 0.024 = 1.224(\text{mA})$$

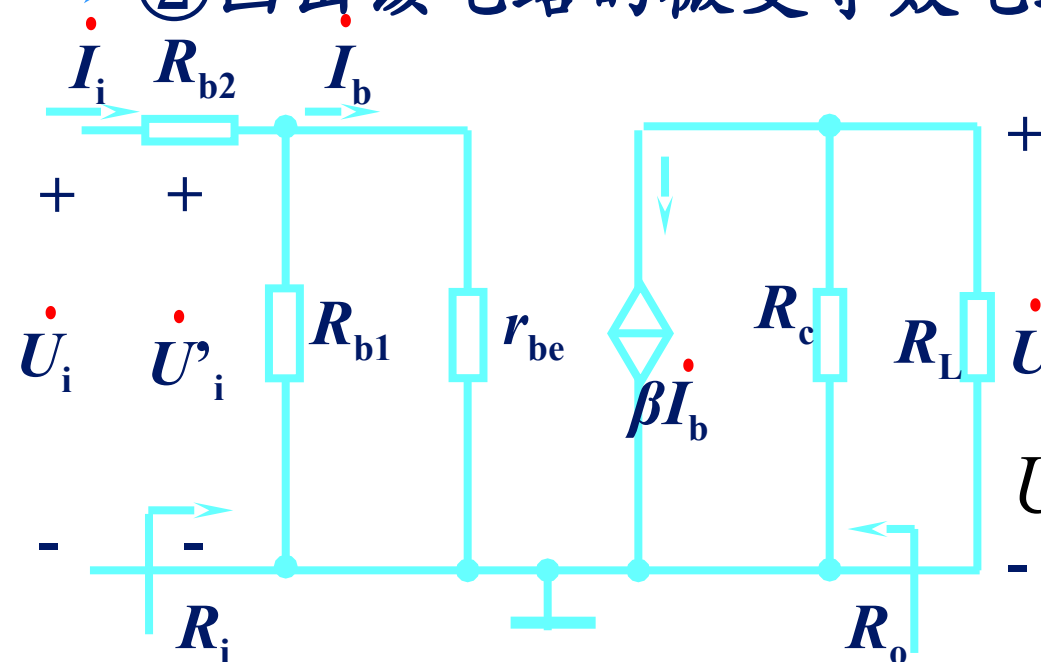
$$U_{CEQ} = V_{CC} - (I_{CQ} + I_{LQ}) \cdot R_C = V_{CC} - (I_{CQ} + \frac{U_{CEQ}}{R_L}) \cdot R_C$$

**[例]**

$$U_{CEQ} = (V_{CC} - I_{CQ} \cdot R_C) \frac{R_L}{R_C + R_L} = (12 - 1.2 \times 3) \times \frac{6.8}{3 + 6.8} \approx 5.83(\text{V})$$

$$r_{be} = 300 + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} = 300 + \frac{51 \times 26}{1.224} \approx 1383(\Omega) \approx 1.38(\text{k}\Omega)$$

➤ ② 画出该电路的微变等效电路



根据微变等效电路可以列出以下各式：

$$\dot{U}_o = -\beta \dot{I}_b (R_C // R_L)$$

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b \cdot r_{be} + \left( \dot{I}_b + \frac{\dot{I}_b \cdot r_{be}}{R_{b1}} \right) \cdot R_{b2}$$

[ 例 ]

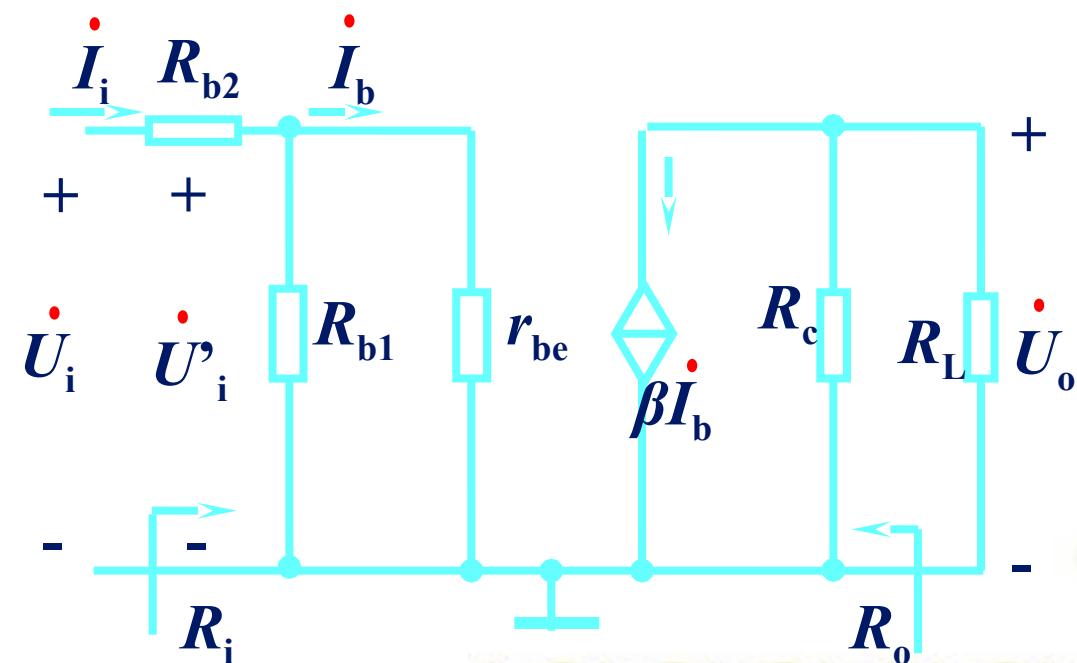
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + R_{b2} + \frac{R_{b2} \cdot r_{be}}{R_{b1}}}$$

由于  $R_{b1} \gg r_{be}$  ,  
上式可写为

$$\dot{A}_u = \frac{-\beta R'_L}{R_{b2} + r_{be}}$$

$$R'_L = R_c // R_L$$

$$\begin{aligned} \dot{A}_u &= \frac{-50 \times (3 // 6.8)}{10 + 1.38} \\ &= -9.15 \end{aligned}$$



# 计算分析法

## ➤ 主要矛盾——如何处理三极管的非线性问题

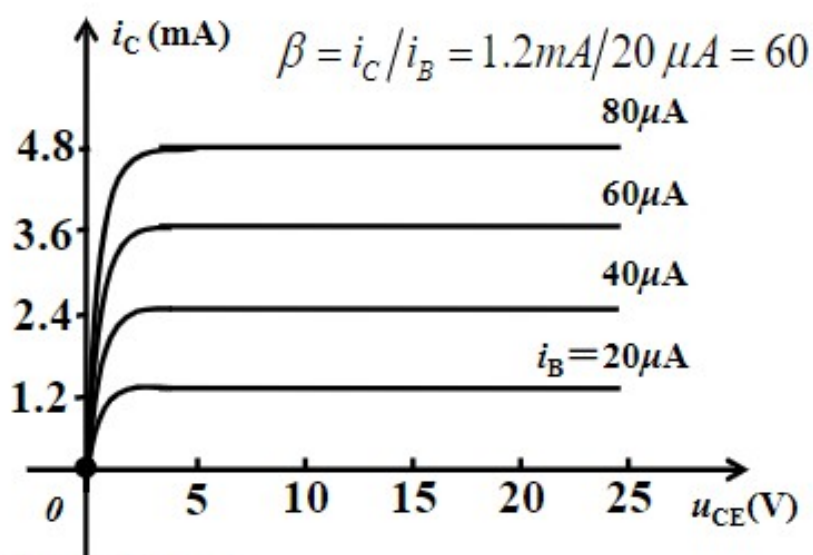
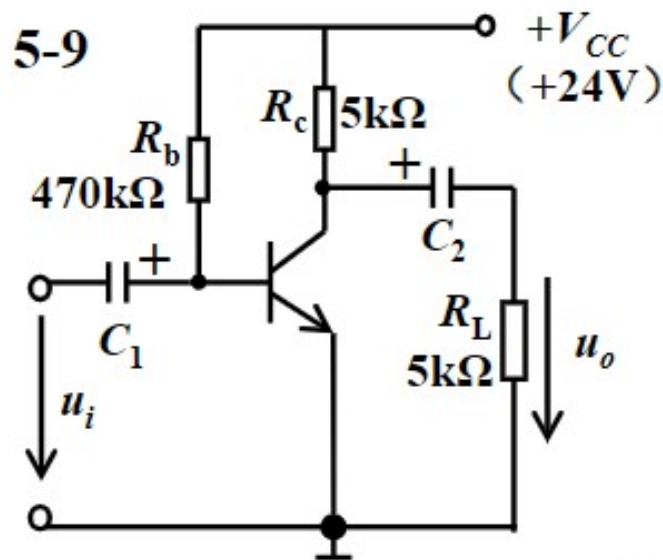
### ➤ 线性近似

所谓放大电路的分析方法是指怎样求解静态工作点，怎样求解电路的动态指标。

	静态分析	动态分析
待求问题	静态工作点 $Q$ ( $I_{BQ}$ 、 $I_{CQ}$ 、 $U_{CEQ}$ )	求动态指标： $R_i$ 、 $R_o$ $A_u$ 、 $A_i$ 等
电路	直流通路	交流通路
分析方法	直流电路分析方法，近似估算法	微变等效电路法

交直流分开计算，分析过程是“先静后动”。





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

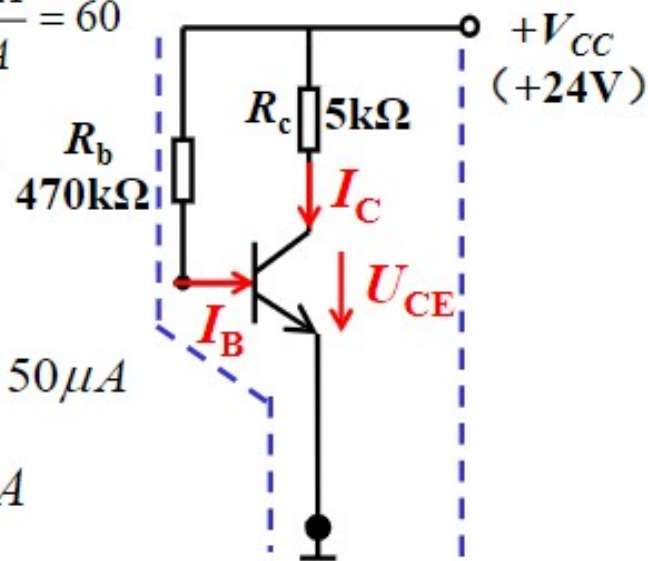
支路1  $\rightarrow V_{CC} = I_B R_b + U_{BE}$

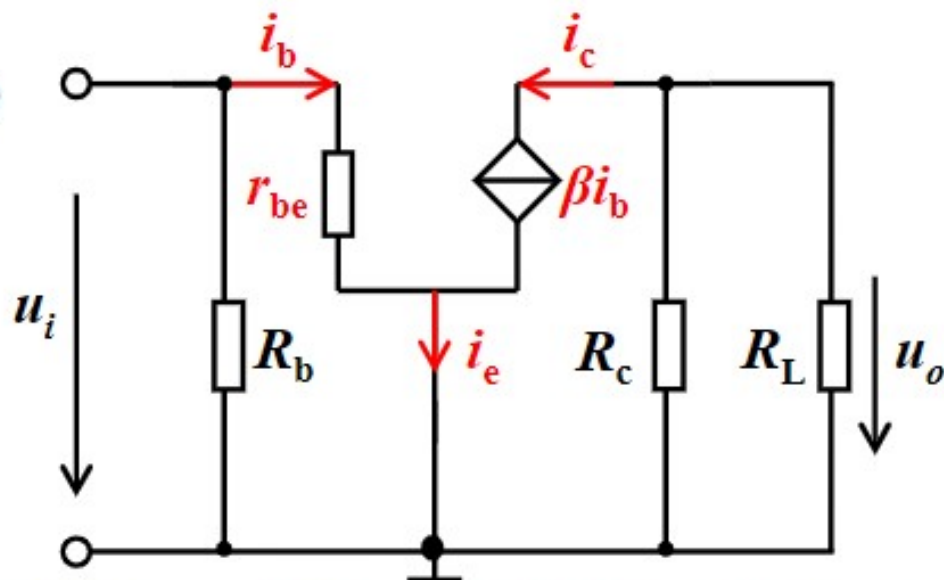
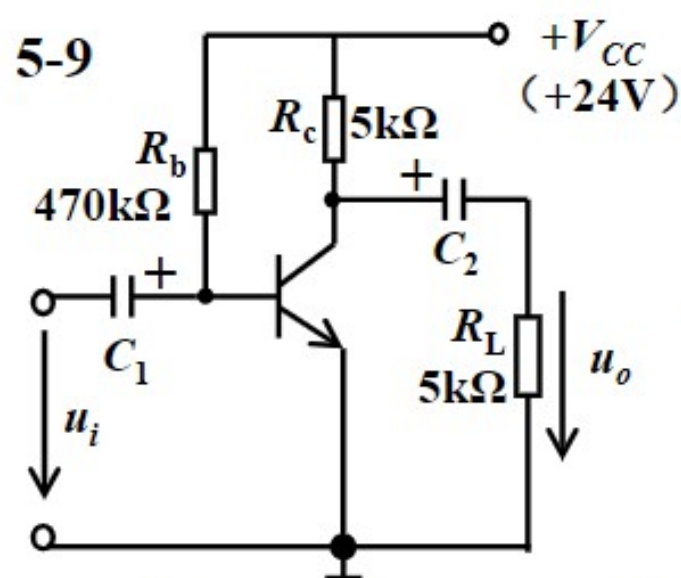
$$I_B = \frac{V_{CC} - 0.7}{R_b} \approx 50 \mu\text{A}$$

$\beta$  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

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



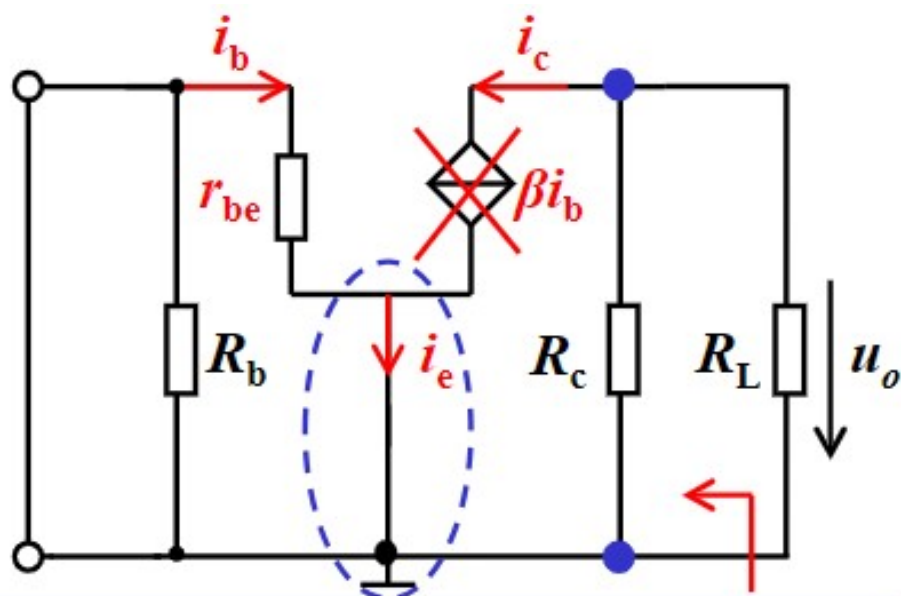
$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-i_c(R_c // R_L)}{i_b r_{be}} \quad \text{反相放大}$$

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

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

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

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



(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

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

$$U_{\text{omax}} = \min \{ U_{\text{CEO}} - U_{\text{CES}} , I_{\text{CO}} R_{\text{C}} \}$$

**问题1:** 如何用图解法求解最大不失真输出电压幅值 $U_{\text{omax}}$ ?

既不发生饱和失真又不发生截止失真时的输出电压最大值

静态决定动态 ← 和静态工作点Q有关      和是否有载有关

求解  $U_{omax}$  的步骤: ① 求解静态工作点Q ( $U_{BE}$ ;  $I_B$ ;  $I_C$ ;  $U_{CE}$ )

② 不出现饱和失真的最大输出电压幅值  $U_{Rm} = U_{CE} - U_{CES}$

③ 不出现截止失真的最大输出电压幅值  $U_{Em}$   $\swarrow$   $= I_C R_C$   $\nwarrow$  空载

$$\textcircled{4} U_{\text{omax}} = \min\{U_{\text{Rm}}, U_{\text{Fm}}\}$$

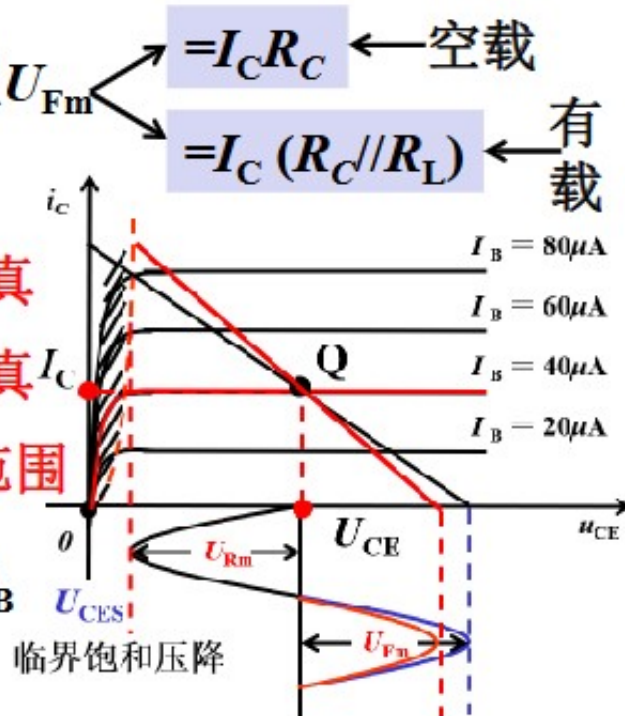
若  $U_{Fm} < U_{Rm}$  则增大  $u_i$ ,  $u_o$  先出现截止失真

若  $U_{Bm} < U_{Em}$  则增大  $u_i$ ,  $u_o$  先出现饱和失真

若  $U_{Rm} = U_{Em}$  则电路具有最大输出动态范围

求出最好的  $I_C \rightarrow$  利用  $I_C / \beta$  求出最好的  $I_B$

在直流通路上求出最好的 $R_B$





- (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  $R_L \quad \therefore U_{Fm} = 3mA * 2.5k\Omega = 7.5V$

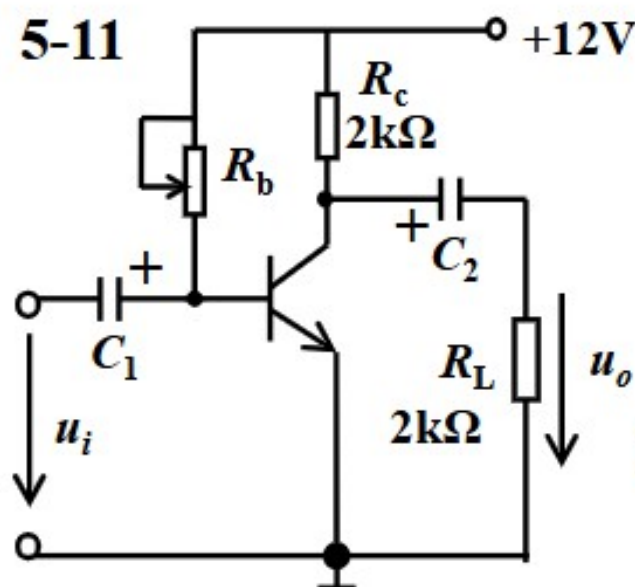
$\because$  交流信号要求对称  $\therefore U_{omax} = \min\{U_{Rm}, U_{Fm}\} = 7.5V$

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



5-11

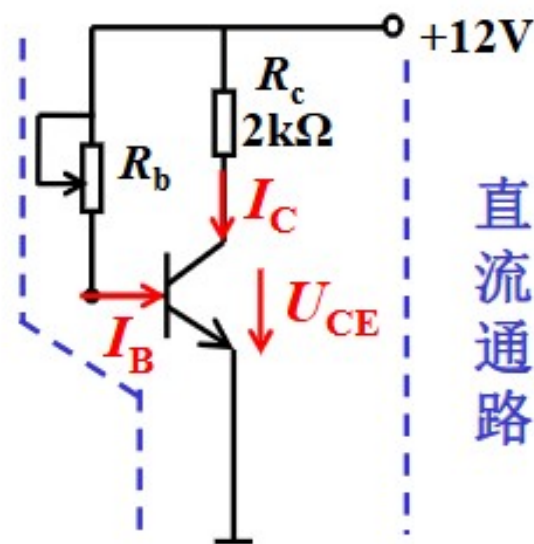
假设  $\beta=50$ ,  $U_{BE}=U_{CES}=0V$ 。(1) 若要有最大输出动态范围, 问  $R_b=?$ 

$$\because U_{omax} = \min\{U_{Rm}, U_{Fm}\}$$

$\therefore$  当  $U_{Rm}=U_{Fm}$  时可达到最大动态范围  
不出现饱和失真的最大输出电压幅值  $U_{Rm}$

$$\because U_{CES}=0 \quad \therefore U_{Rm}=U_{CE}-U_{CES}=U_{CE}$$

$\therefore$  有载  $\rightarrow$  不出现截止失真的最大输出电压幅值  $U_{Fm}=I_C(R_c//R_L)$



直流通路

$$\text{令 } U_{Rm}=U_{Fm} \rightarrow U_{CE}=V_{CC}-I_C R_c=I_C(R_c//R_L)$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = 80\mu A \leftarrow \text{求出 } I_C = 4mA$$

$$I_B = \frac{V_{CC}-U_{BE}}{R_b} \rightarrow R_b = 150k\Omega$$

# 第5章 放大电路基础

## 5.3 计算分析法

### ◆ 静态工作点计算

### ◆ 交流通路的分析

- 晶体管的  $h$  参数微变等效电路
  - 三极管如何等效成以前的普通电路
  - 在普通电路上进行计算
- 用计算分析法计算主要性能指标
  1. 电压放大倍数
  2. 电流放大倍数
  3. 输入电阻和输出电阻
  4. 最大输出电压幅值  $U_{\text{omax}}$