

# 基础电路与电子学

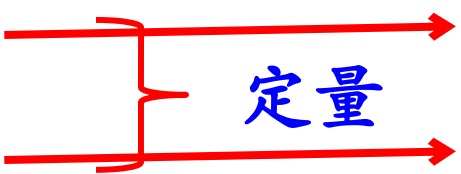
主讲：陈开志

办公室：学院 2 号楼 304

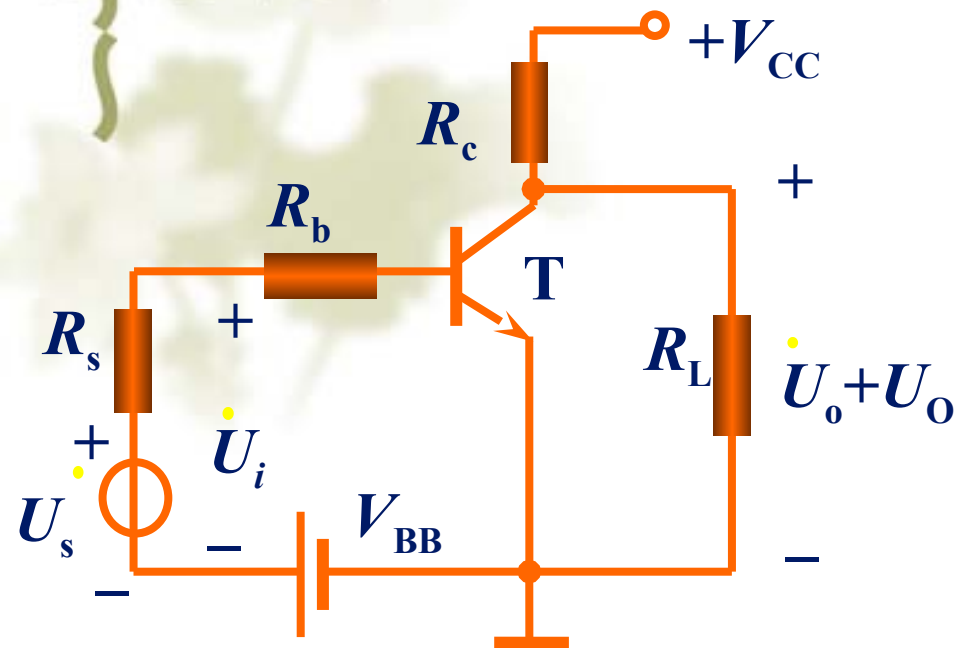
Email: [ckz@fzu.edu.cn](mailto:ckz@fzu.edu.cn)

QQ 群： 812010686

# 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
  - 5.4 放大电路的三种接法
  - 5.5 阻容耦合放大电路
  - 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
- 
- 定量
- 适合理论分析
- 适合实际计算

## 5.3 计算分析法



(a) 放大电路

### 放大电路组成的原则

- 发射结正偏，集电结反偏；保证  $T$  处于放大区。
- 输入信号得到足够的放大和顺利地传送。

### 放大电路的分析计算任务：

- 直流电路分析：分析静态工作点，是否  $T$  处于放大区。
- 交流电路分析：分析放大电路的性能参数：放大倍数，输入/输出电阻，输出最大幅值等。

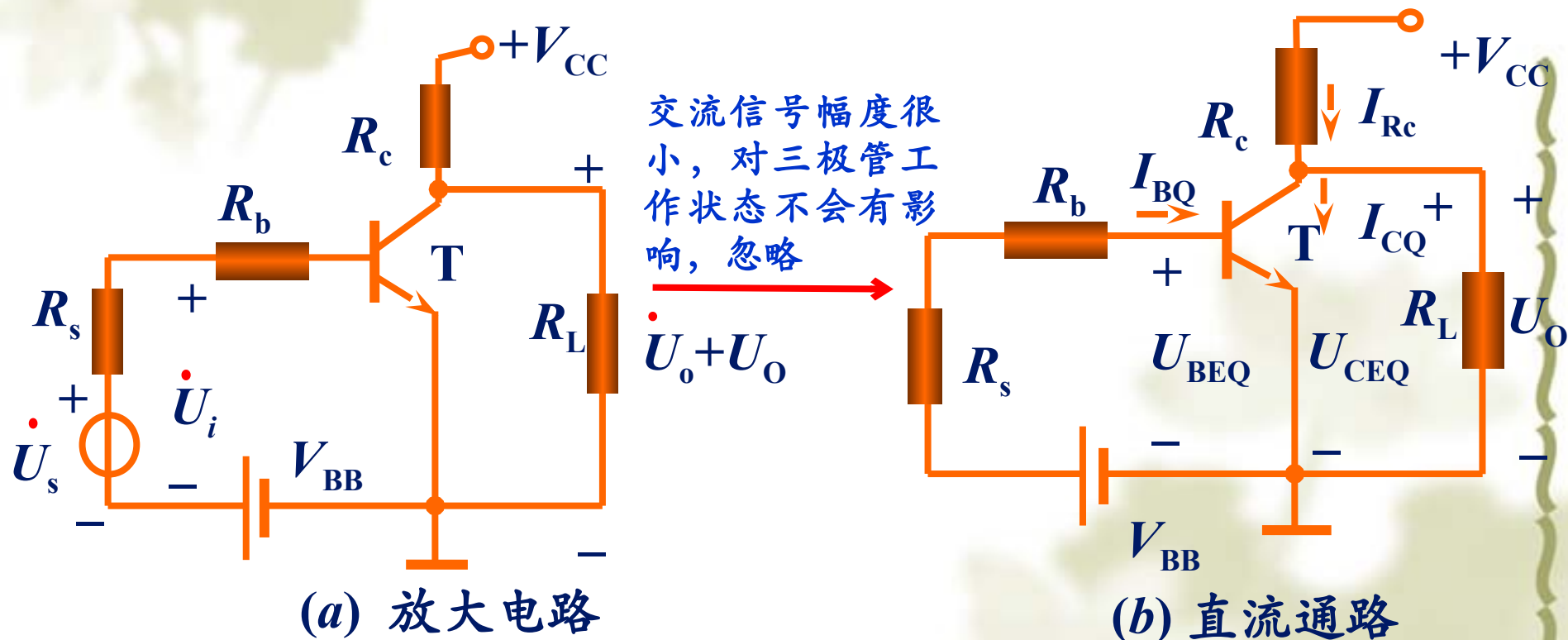
把工作在放大区的晶体管小范围的特性曲线近似地用直线来代替，从而用相应的线性等效电路来代替具有非线性特性的晶体管，然后运用电路理论进行分析计算。

## 5.3 计算分析法

### 1. 静态工作点的计算

目的：判断三极管是否处于放大区

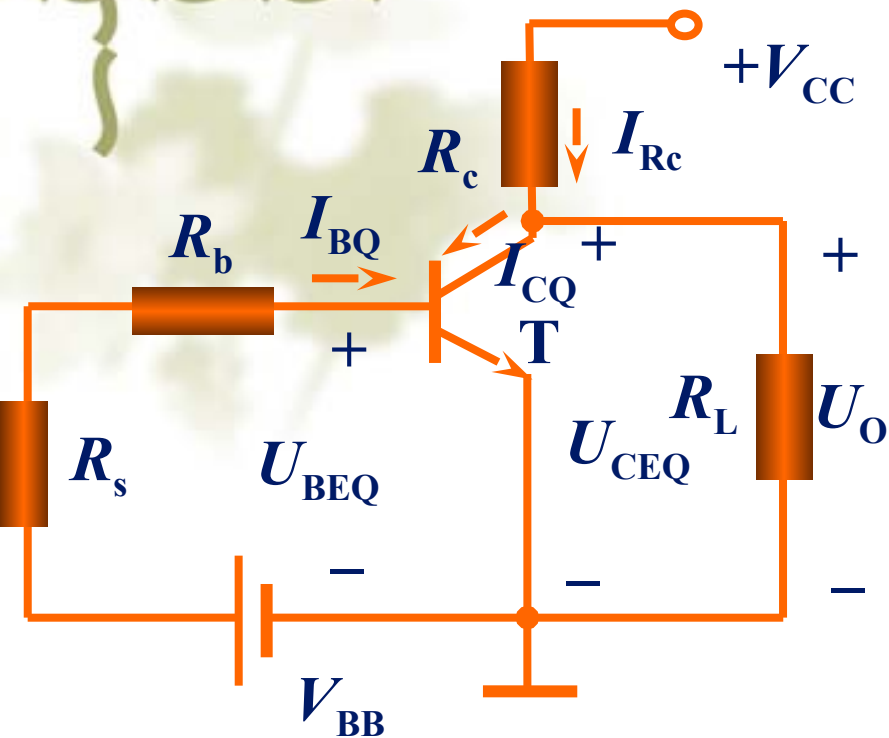
直流通路：输入  $\dot{U}_s = 0$ ，下标 Q 表示静态工作情况。



放大条件：发射结正偏，集电结反偏

$$U_{BEQ} > U_{on}, \quad U_{CEQ} > U_{BEQ}$$

# 1. 静态工作点的计算



(b) 直流通路

放大条件:

发射结正偏, 集电结反偏

$$U_{BEQ} > U_{on}, \quad U_{CEQ} >$$

$U_{BEQ}$

发射结正偏判断方法:

方法1: 断开 B, E 级, 看  
两端电压是否大于  $U_{on}$

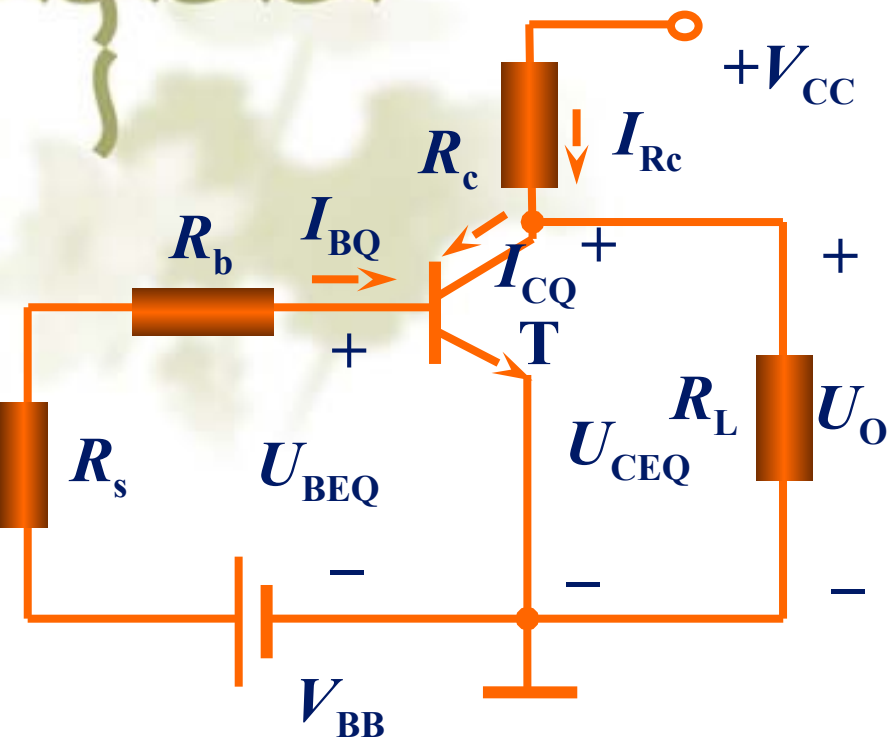
方法2: 先假设 BE 正偏,  
计算  $I_{BQ}$ , 如果  $>0$ , 即正偏,  
小于 0 则反偏。

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_s + R_b}$$

导通后  $U_{BE} = 0.7V$  (硅管) 或  $U_{BE} = 0.2V$  (锗管)

$$U_{BE} \approx U_{on}$$

# 1. 静态工作点的计算



(b) 直流通路

放大条件:

发射结正偏, 集电结反偏

$$U_{BEQ} > U_{on}, \quad U_{CEQ} >$$

$U_{BEQ}$

集电结反偏判断方法:

方法: 沿用二极管分析思想, 假设反偏断开, 判断两边电位差。行不行?

原因: 发射结正偏情况下, 假设集电结反偏, 三极管处在放大状态, 此时集电结上是有大电流  $I_C$  的, 不是断开的。

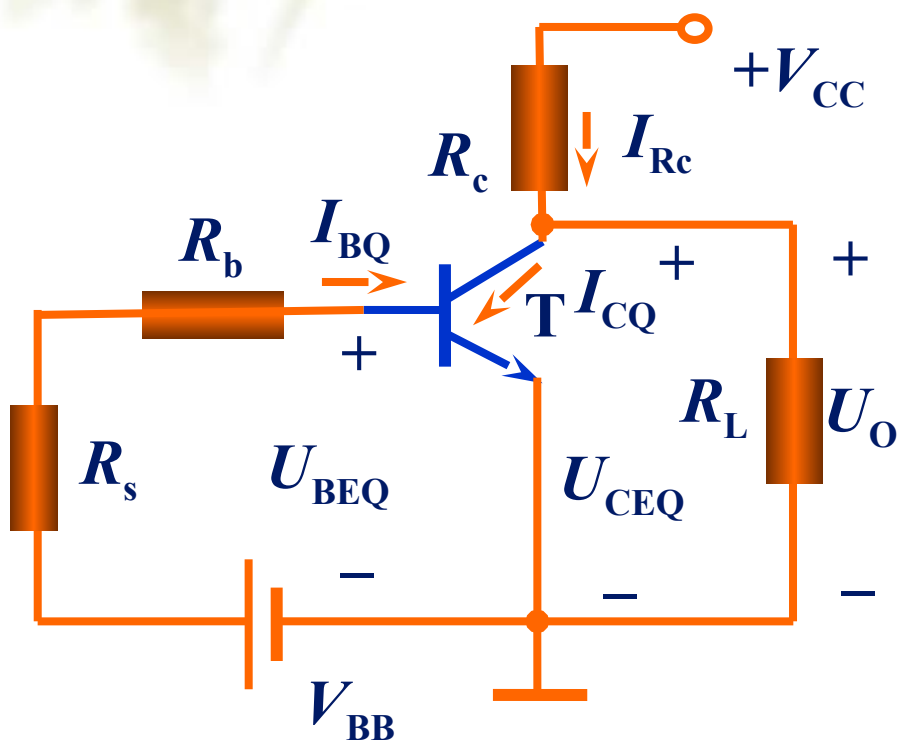
修改反证法方案: 发射结正偏情况下, 假设集电结反偏, 处在放大状态, 此时  $I_C \approx \beta I_B$  代入分析集电结两端电压是否反偏



# 1. 静态工作点的计算

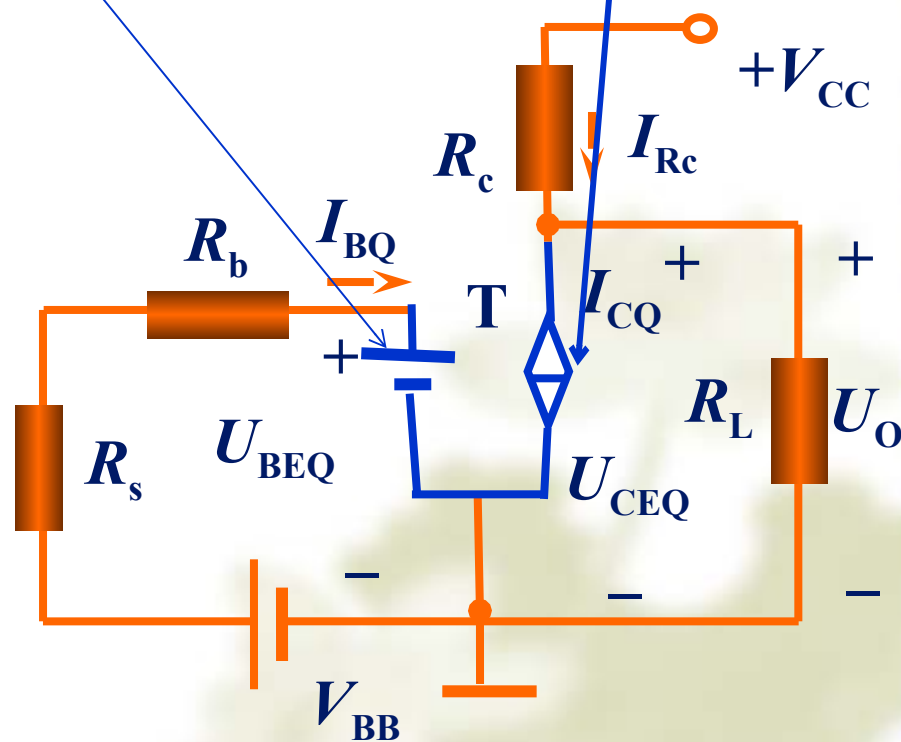
## 三极管直流下放大状态的等效电路。

修改反证法方案：发射结正偏情况下，假设集电结反偏，处在放大状态，此时  $I_C \approx \beta I_B$  代入分析



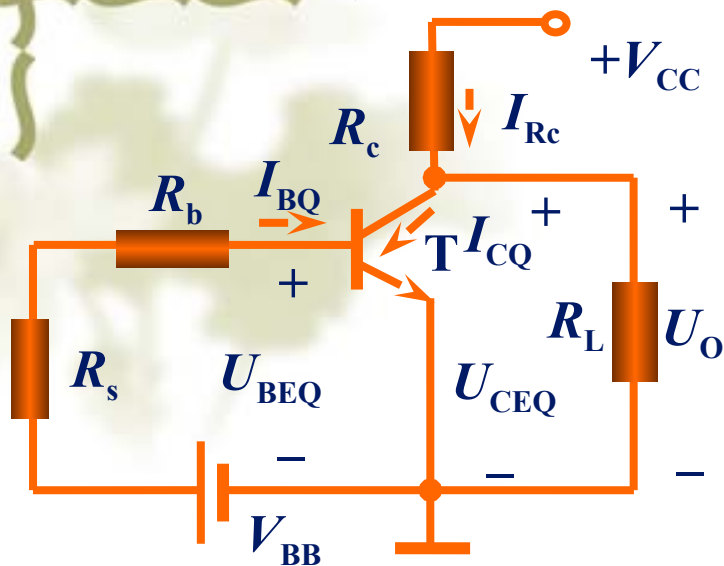
(b) 直流通路

直流等效模型

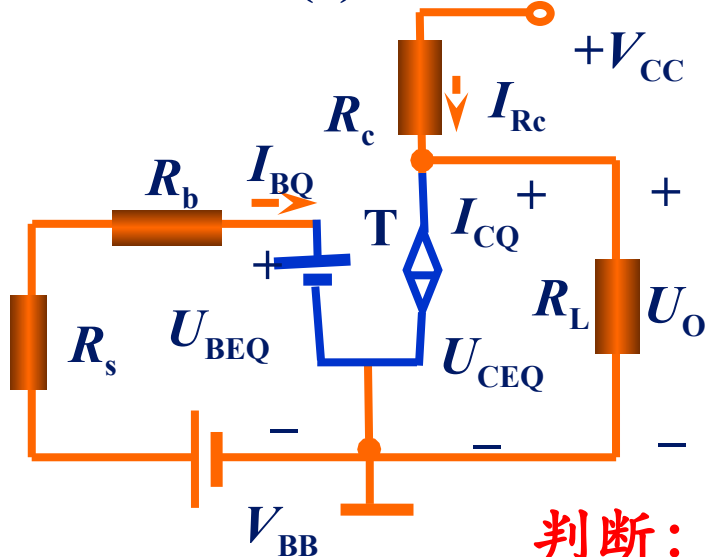


(b) 直流等效通路

# 1. 静态工作点的计算



(b) 直流通路



(b) 直流等效通路  $U_{BEQ}$

放大条件:

发射结正偏, 集电结反偏

$$U_{BEQ} > U_{on}, \quad U_{CEQ} >$$

集电结反偏判断方法:  $U_{CEQ} > U_{BEQ}$

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_s + R_b}$$

$$I_{CQ} = \bar{\beta} I_{BQ} + I_{CEO} \approx \beta I_{BQ}$$

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

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

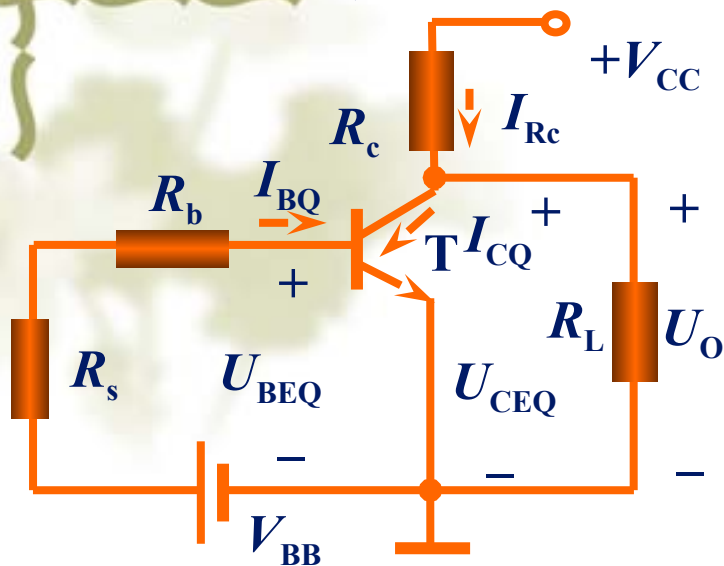
得: 
$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{Rc} \cdot R_c$$

判断:  $I_{BQ}$  是否大于 0,  $U_{CEQ}$  是否大于

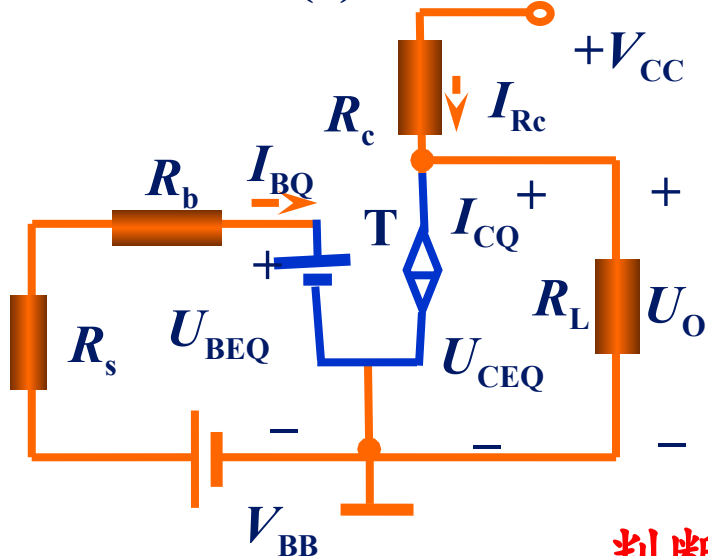
思考: 用两节点电位法求  $U_{CEQ}$



# 1. 静态工作点的计算



(b) 直流通路



(b) 直流等效通路

放大条件:

发射结正偏, 集电结反偏

$$U_{BEQ} > U_{on}, \quad U_{CEQ} >$$

集电结反偏判断方法:  $U_{CEQ} > U_{BEQ}$

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_s + R_b}$$

$$I_{CQ} = \bar{\beta} I_{BQ} + I_{CEO} \approx \beta I_{BQ}$$

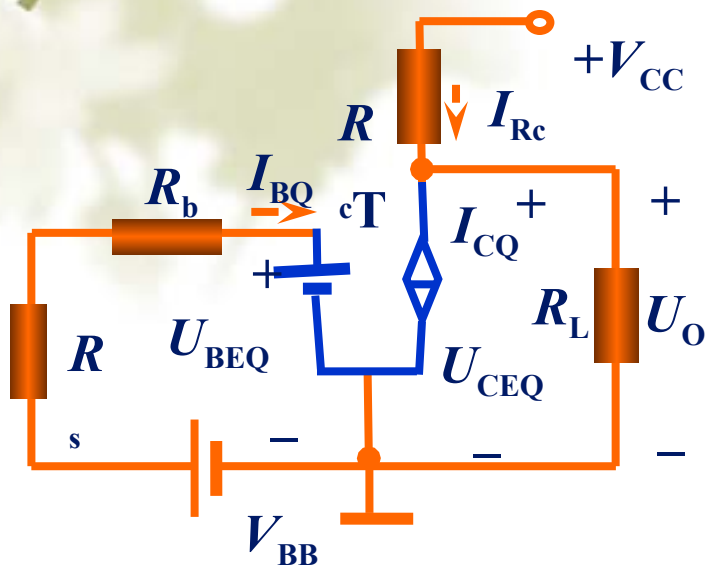
思考: 用两节点电位法求  $U_{CEQ}$

$$U_{CEQ} = \frac{\frac{V_{CC}}{R_C} - I_{CQ}}{\frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_L}}$$

判断:  $I_{BQ}$  是否大于 0,  $U_{CEQ}$  是否大于

$U_{BEQ}$

# 总结：静态工作点的计算



(b) 直流通路

放大条件：

发射结正偏，集电结反偏

$$U_{BEQ} > U_{on}, \quad U_{CEQ} >$$

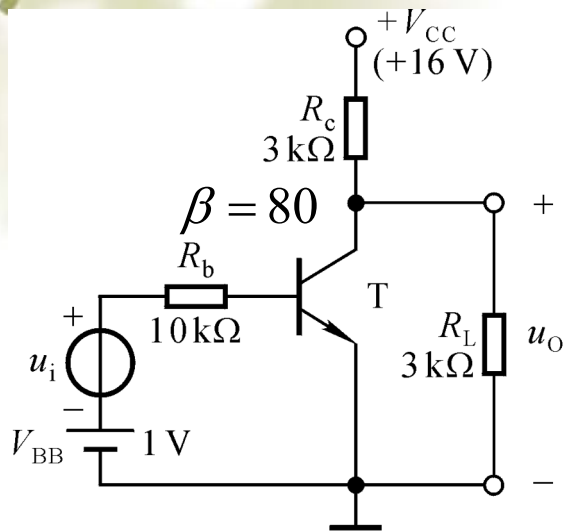
$$U_{BEQ}$$

分析步骤：

- 1 用直流等效模型替换，求  $I_{BQ}$ ，
- 2 若  $I_{BQ}$  小于 0，三极管处于截止区  
若  $I_{BQ}$  大于 0，求  $I_{CQ}$ ，
- 3 求  $U_{CEQ}$ ，若  $U_{CEQ}$  大于  $U_{BEQ}$ ，则处于放大区，小于则处于饱和区

# 1. 静态工作点的计算

方法一：  $I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b} = \frac{1 - 0.7}{10k} = 0.03mA$  发射结正偏



$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 2.4mA$$

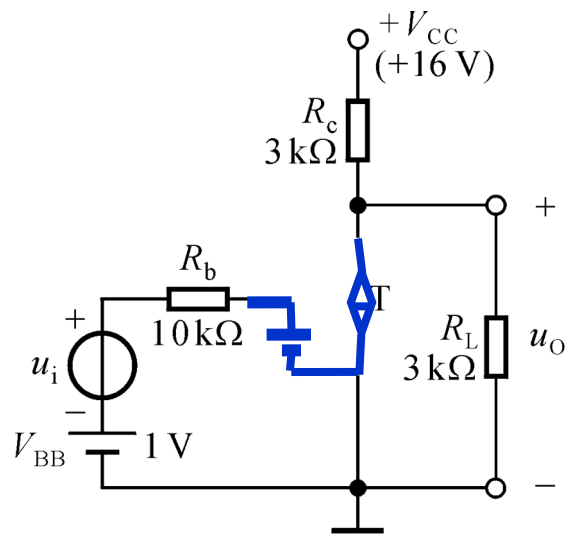
由  $V_{CC} = I_{R_c} \cdot R_c + (I_{R_c} - I_{CQ}) \cdot R_L$

得  $I_{R_c} = \frac{V_{CC} + I_{CQ} R_L}{R_c + R_L} = \frac{16 + 2.4 \cdot 3}{6} mA$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{R_c} \cdot R_c = 4.4V > 0.7$$

$I_{BQ} > 0$ ，极电结反偏，三极管处在放大区

思考：用节点电位法求  $U_{CEQ}$



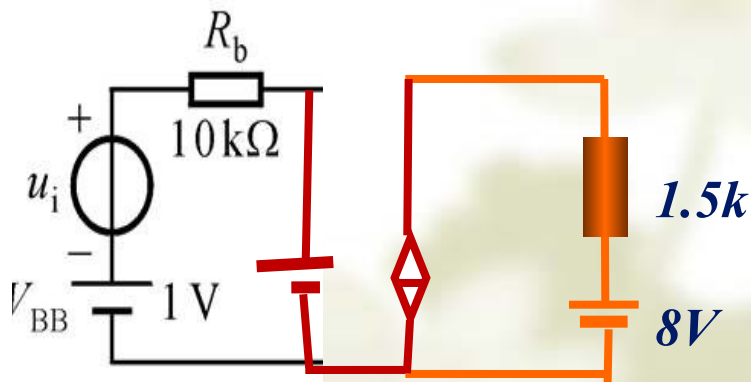
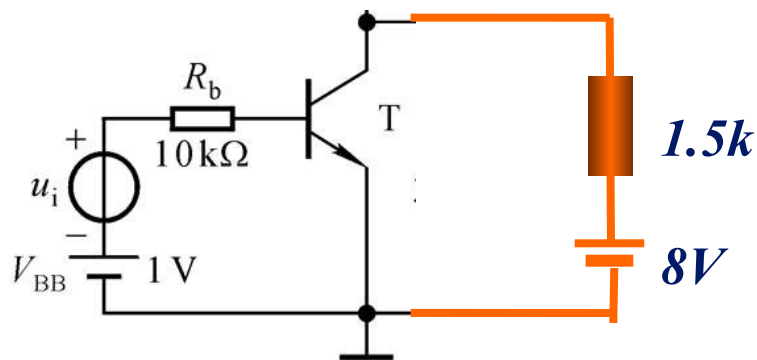
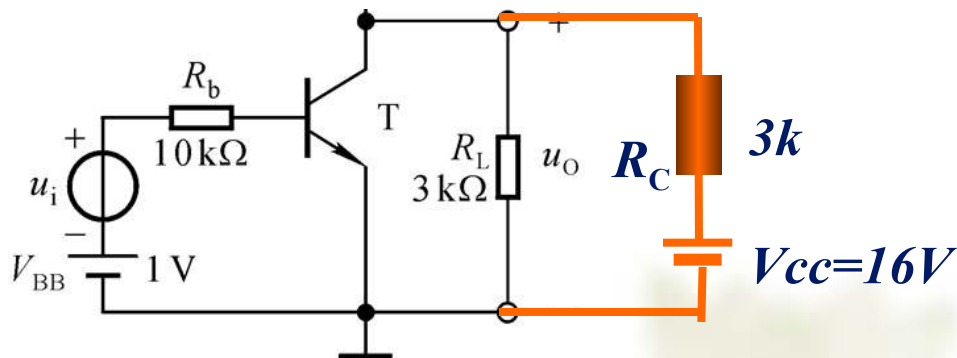
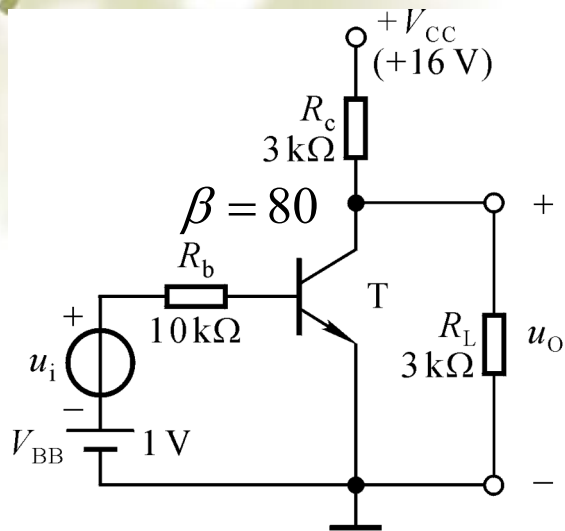
$$U_{CEQ} = \frac{\frac{V_{CC}}{R_c} - I_{CQ}}{\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_L}} = \frac{\frac{16}{3k} - 2.4mA}{\frac{1}{3k} + \frac{1}{3k}} = 4.4V$$

# 1. 静态工作点的计算

方法二：戴维南定理

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b} = \frac{1 - 0.7}{10k} = 0.03mA$$

发射结正偏



$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 2.4mA$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c = 8 - 2.4 * 1.5 = 4.4V$$

**例：** 共射放大电路如图所示。设：  $V_{CC} = 12V$  ，

$R_b = 300k\Omega, R_c = 3k\Omega$ ，三极管的  $\beta = 50$  。

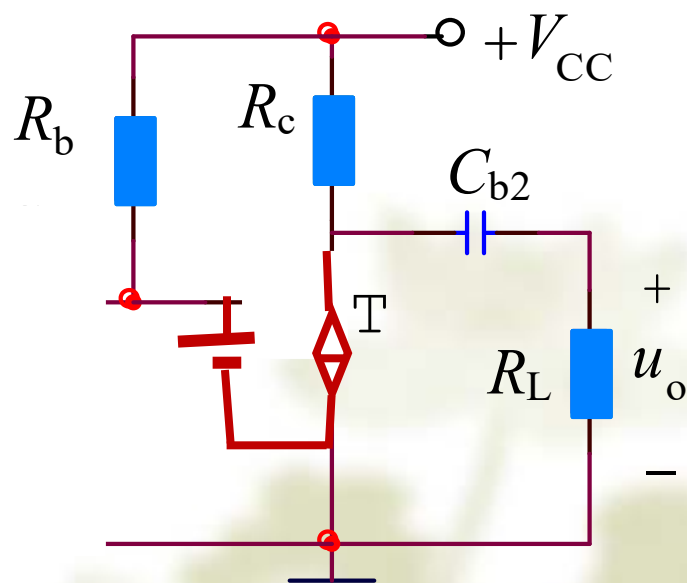
1、试求电路的静态工作点  
Q。

**解：**

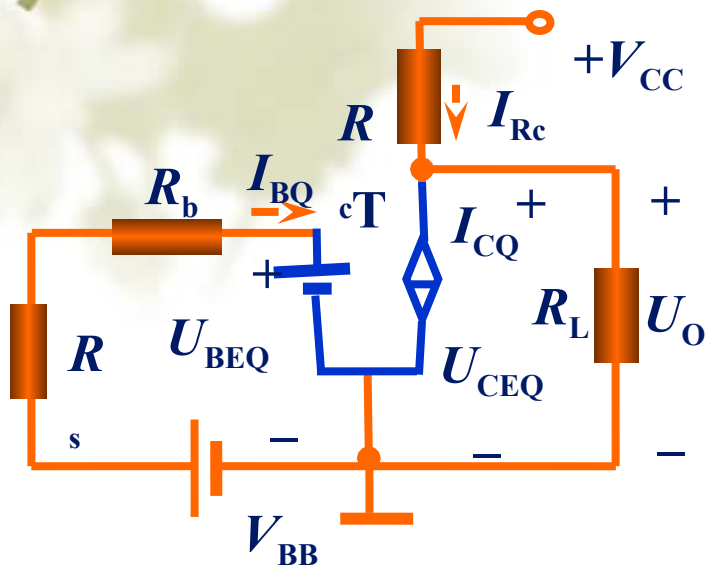
$$I_{BQ} \approx \frac{V_{CC}}{R_b} = \frac{12V}{300k} = 40\mu A$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 50 \times 40\mu A = 2mA$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c = 12V - 2mA \times 3k = 6V$$



# 总结：静态工作点的计算



(b) 直流通路

放大条件：

发射结正偏，集电结反偏

$$U_{BEQ} > U_{on}, \quad U_{CEQ} >$$

$$U_{BEQ}$$

分析步骤：

- 1 用直流等效模型替换，求  $I_{BQ}$ ，
- 2 若  $I_{BQ}$  小于 0，三极管处于截止区  
若  $I_{BQ}$  大于 0，求  $I_{CQ}$ ，
- 3 求  $U_{CEQ}$ ，若  $U_{CEQ}$  大于  $U_{BEQ}$ ，则处于放大区，小于则处于饱和区



# 第5章 放大电路基础

5.1 放大电路的组成及工作原理 (重点) → 定性

5.2 图解分析法

5.3 计算分析法 (重点)

} 定量

5.4 放大电路的三种接法

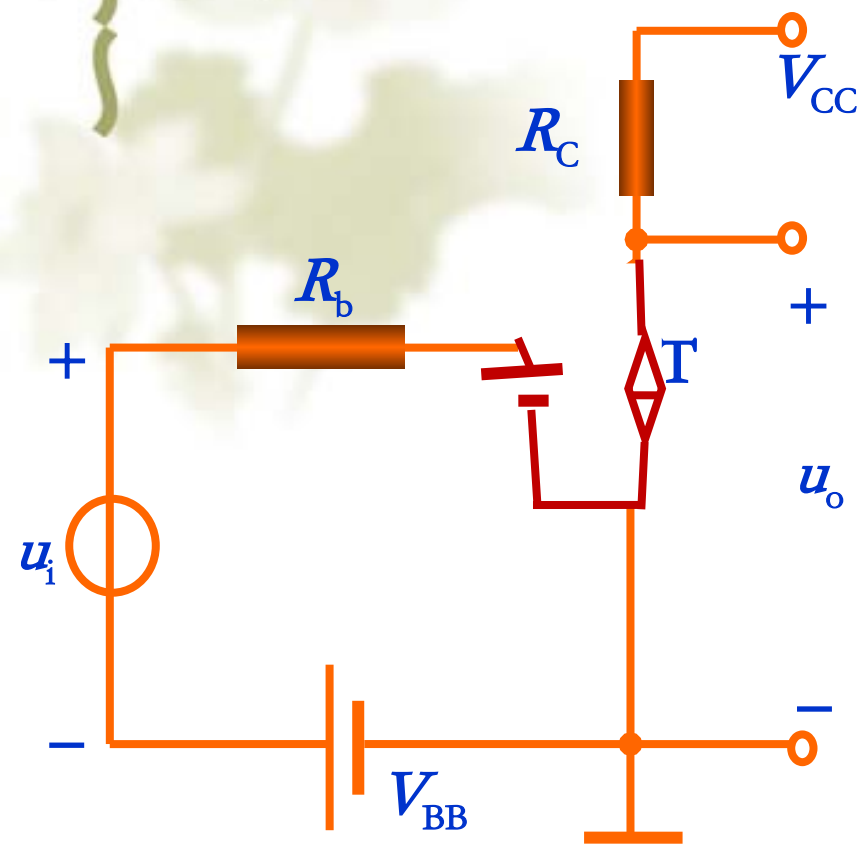
5.5 阻容耦合放大电路

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

## 回顾：计算法怎么做



(a) 共射极放大电路

分析静态的目的：确定  $Q$  点。

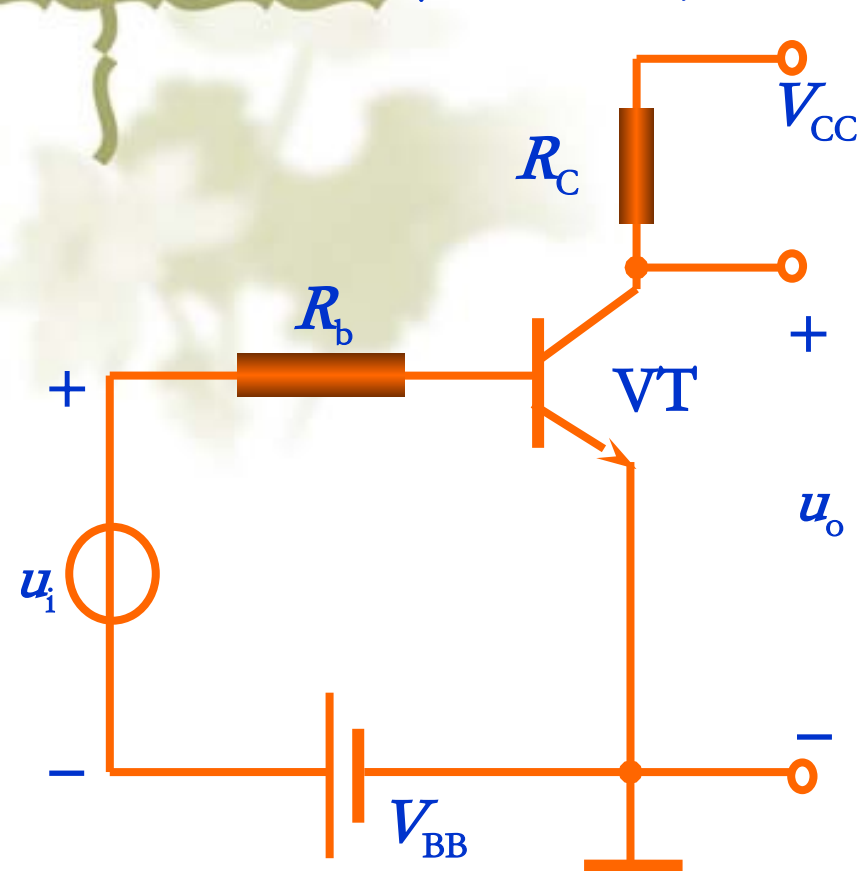
$Q$  点坐标为  $I_{BQ}$ 、 $U_{BEQ}$ 、

$$I_{CQ}、U_{CEQ}。 \\ I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b}$$

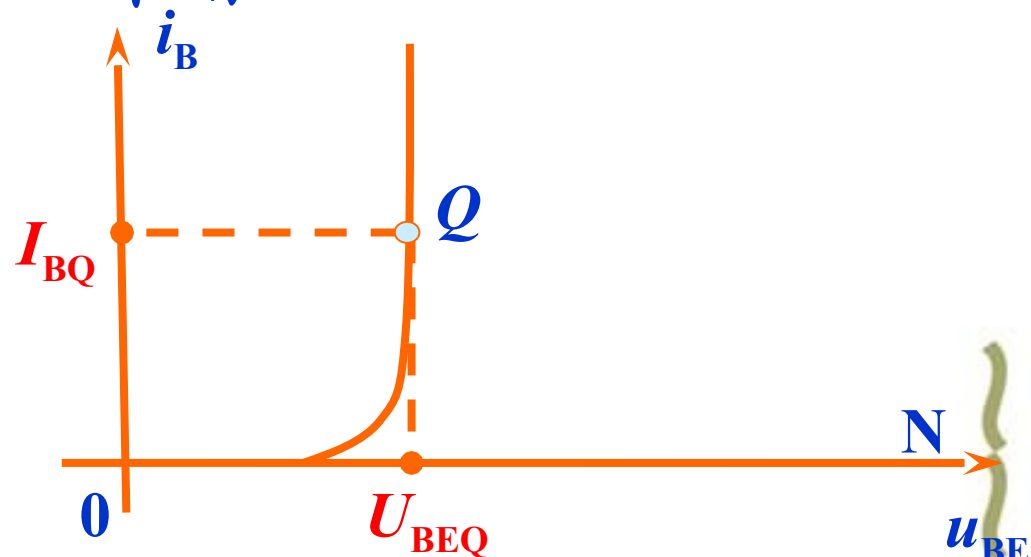
$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

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

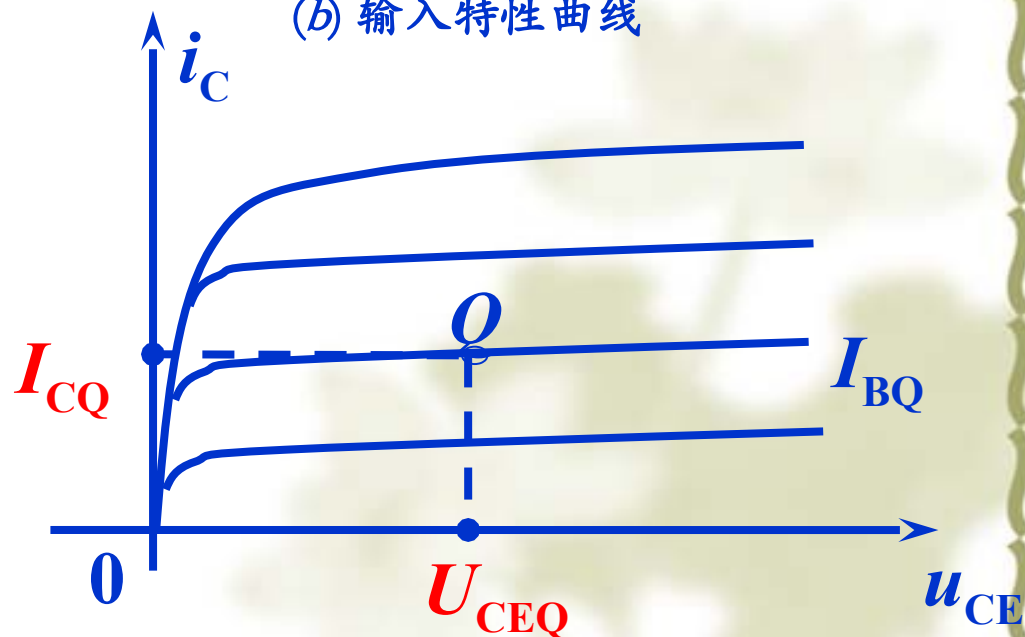
# 1. 用图解法分析静态工作情况



(a) 共射极放大电路



(b) 输入特性曲线

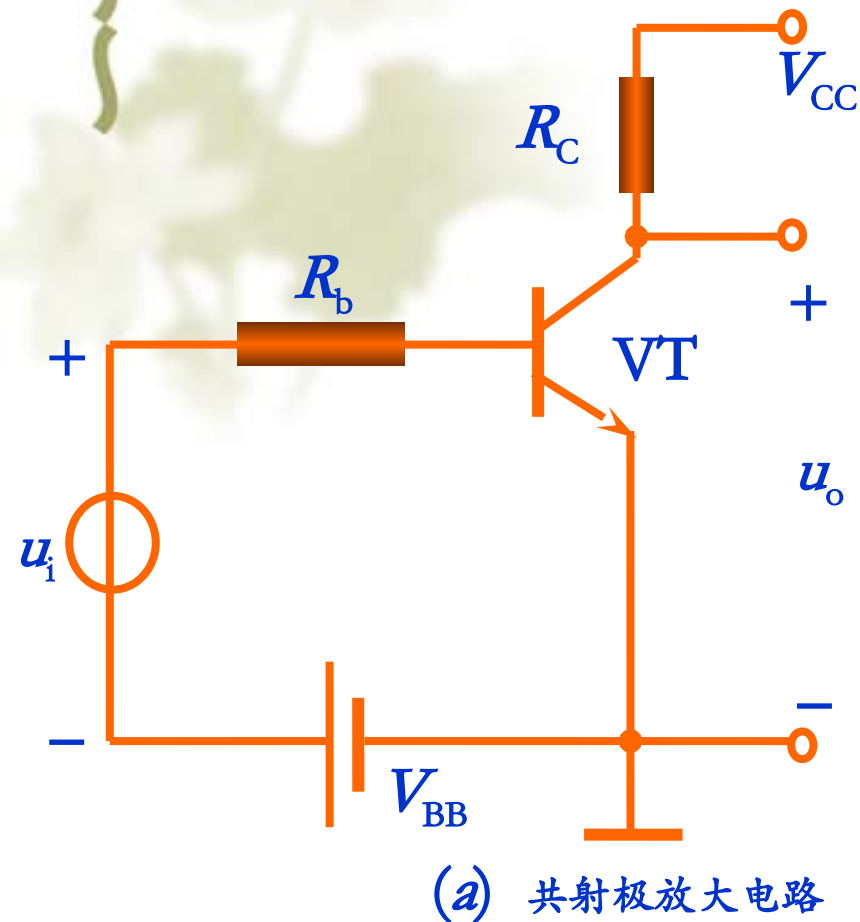


(b) 输出特性曲线

问题：用图解法来分析静态的目的：确定 Q 点。

Q 点坐标为  $I_{BQ}$ 、 $U_{BEQ}$ 、 $I_{CQ}$ 、 $U_{CEQ}$ 。

# 1. 用图解法分析静态工作情况



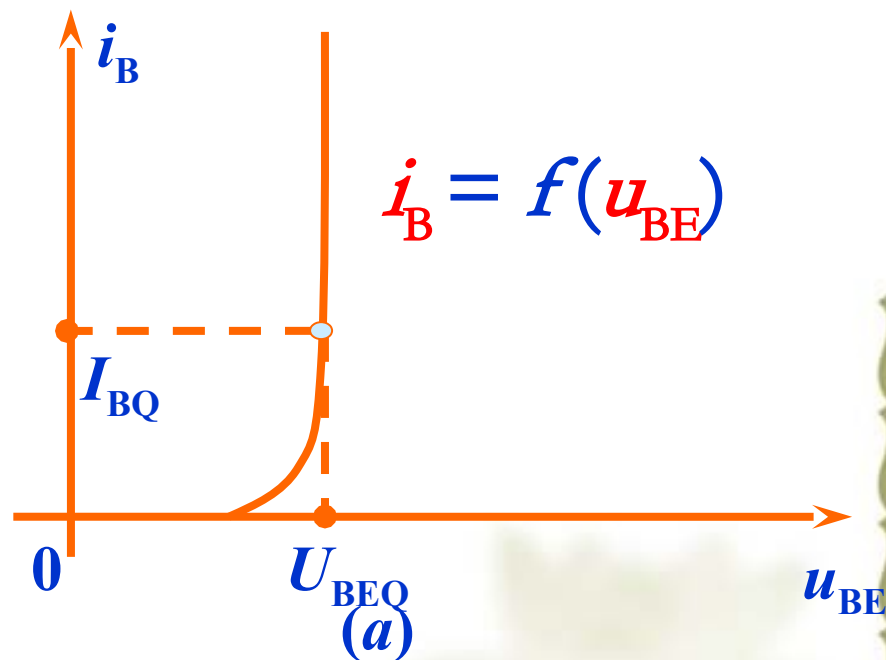
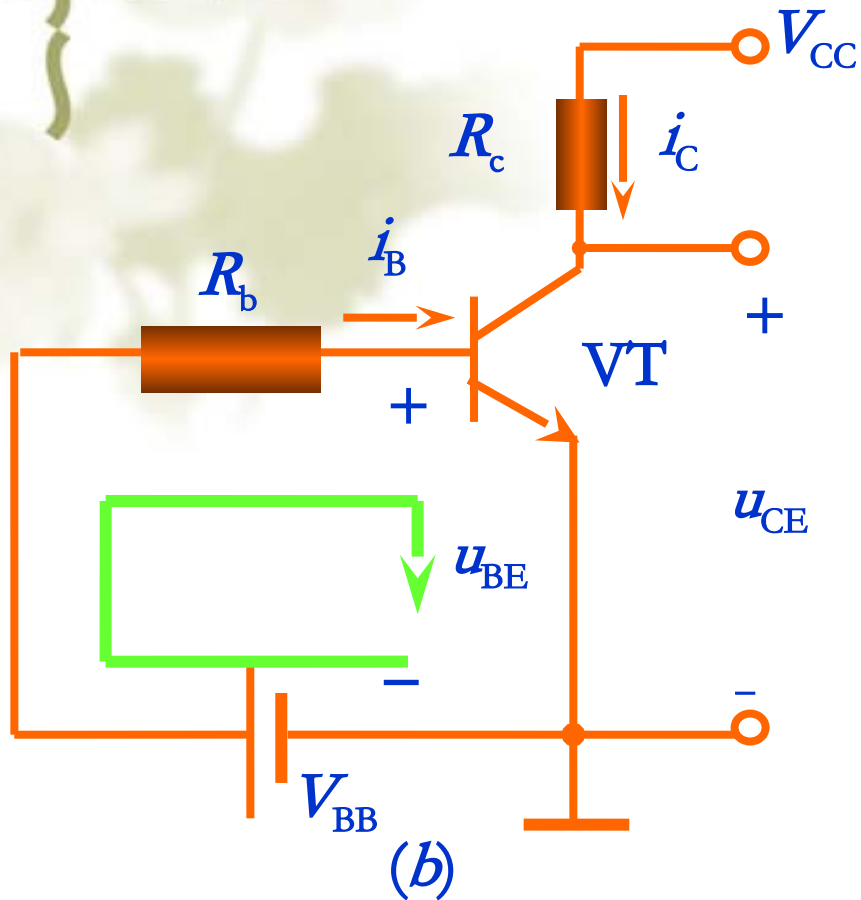
问题：用图解法来分析静态的目的：确定  $Q$  点。

$Q$  点坐标为  $I_{BQ}$ 、 $U_{BEQ}$ 、 $I_{CQ}$ 、 $U_{CEQ}$ 。

思路：和计算分析法类似。

1. 输入回路和输入特性曲线确定  $Q$  点坐标中的  $I_{BQ}$ 、 $U_{BEQ}$
2. 输出回路和输出特性曲线确定  $Q$  点坐标中的  $I_{CQ}$ 、 $U_{CEQ}$ 。

# (1) 利用输入特性曲线来确定 $I_{BQ}$ 和 $U_{BEQ}$



● 写输入特性曲线方程

$$i_B = f(u_{BE})$$

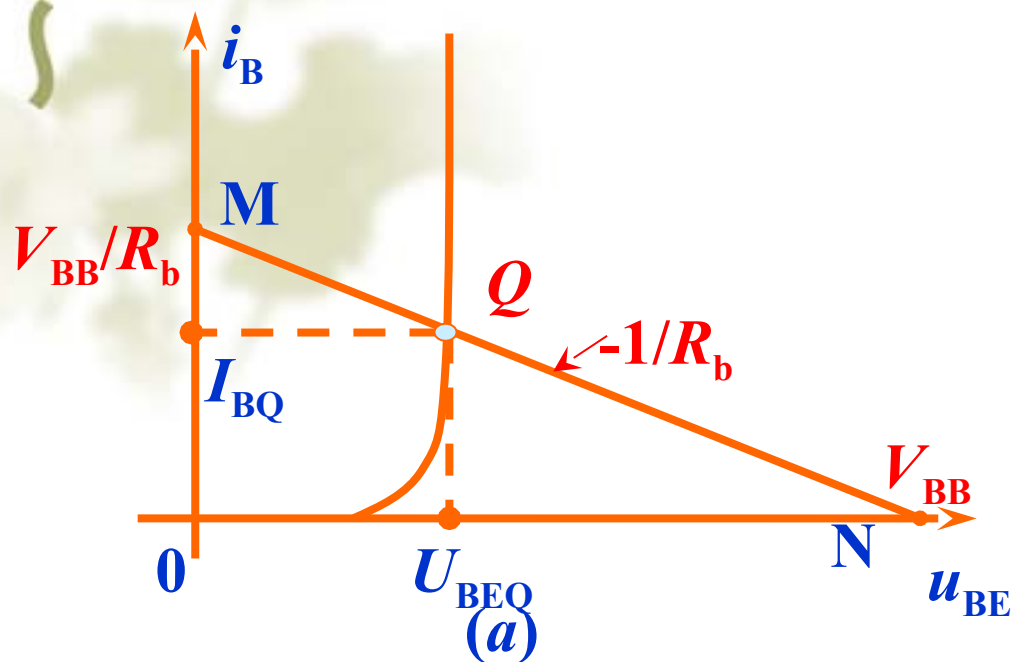
$$i_B = -\frac{1}{R_b} u_{BE} + \frac{V_{BB}}{R_b}$$

列输入回路方程。

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

● 两个方程联立求解，即为  $I_{BQ}$ 、  
 $U_{BEQ}$

# (1) 利用输入特性曲线来确定 $I_{BQ}$ 和 $U_{BEQ}$



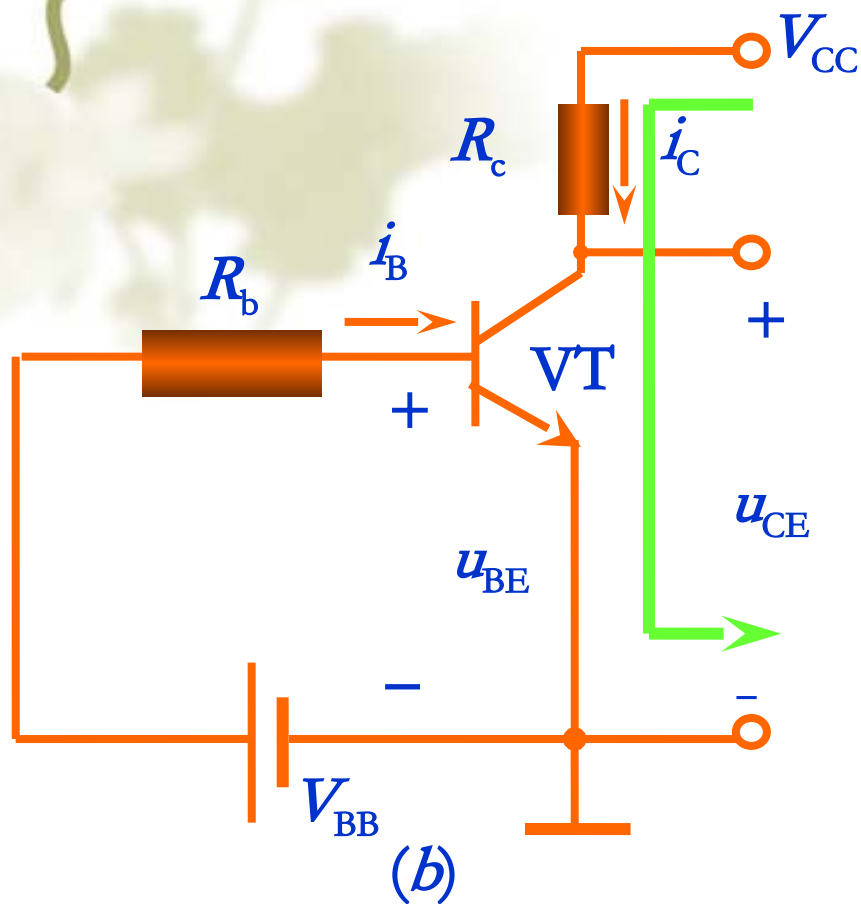
$$i_B = f(u_{BE})$$

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

- 方程联立求解就是图形上两曲线的交点。
- 取两点  $M(0, V_{CC}/R_c)$  ,  $N(V_{CC}, 0)$  , 连成直线。
- 与输入特性曲线交点, 即为  $I_{BQ}$  、  
 $U_{BEQ}$



## (2) 利用输出特性曲线确定 $U_{CEQ}$ 及 $I_{CQ}$



列输出回路及输出特性曲线方程:

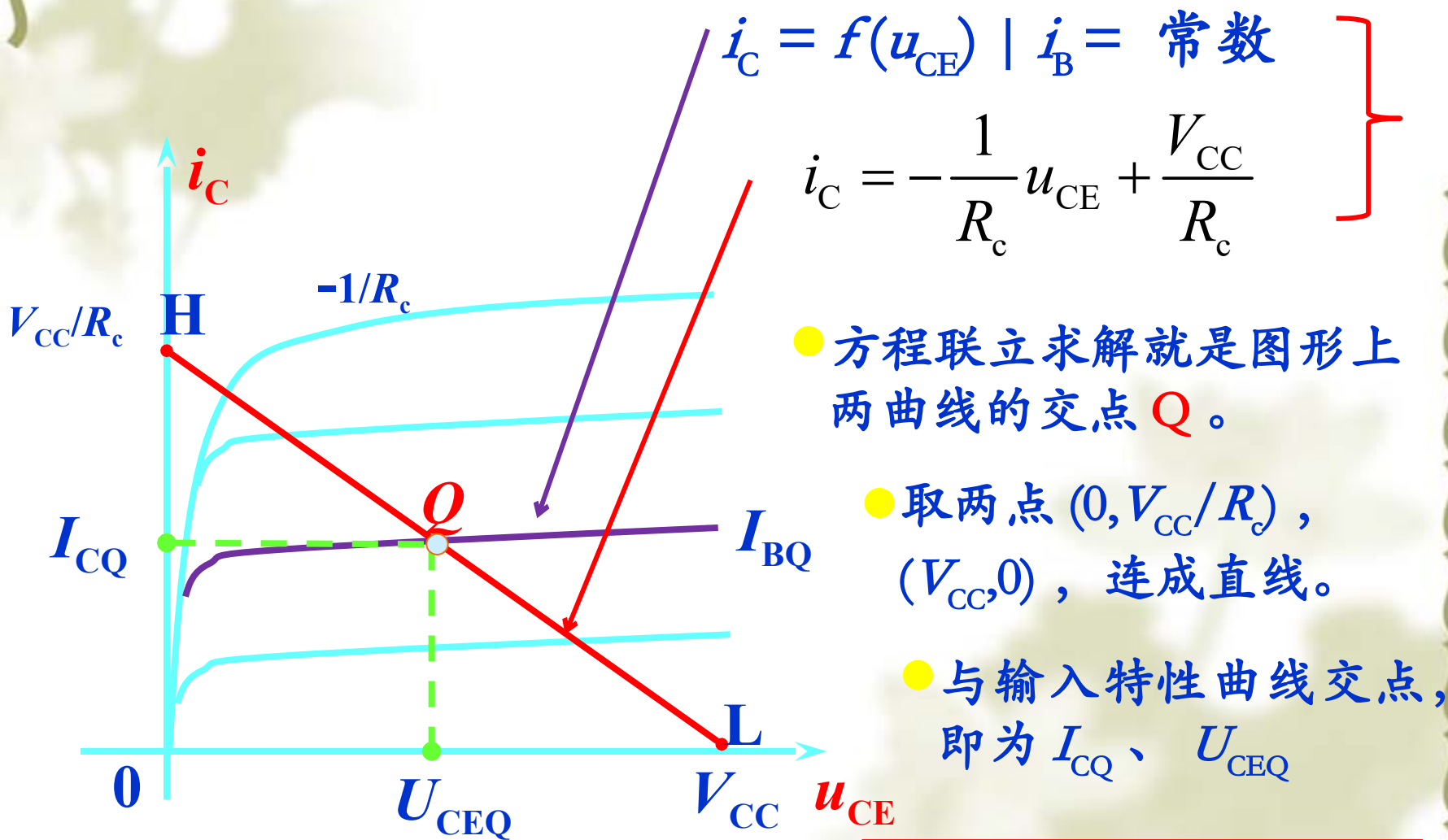
$$V_{CC} = i_C R_c + u_{CE}$$

$$i_C = f(u_{CE}) \mid i_B = \text{常数}$$

- 方程  $V_{CC} = i_C R_c + u_{CE}$  可写成斜截式方程

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

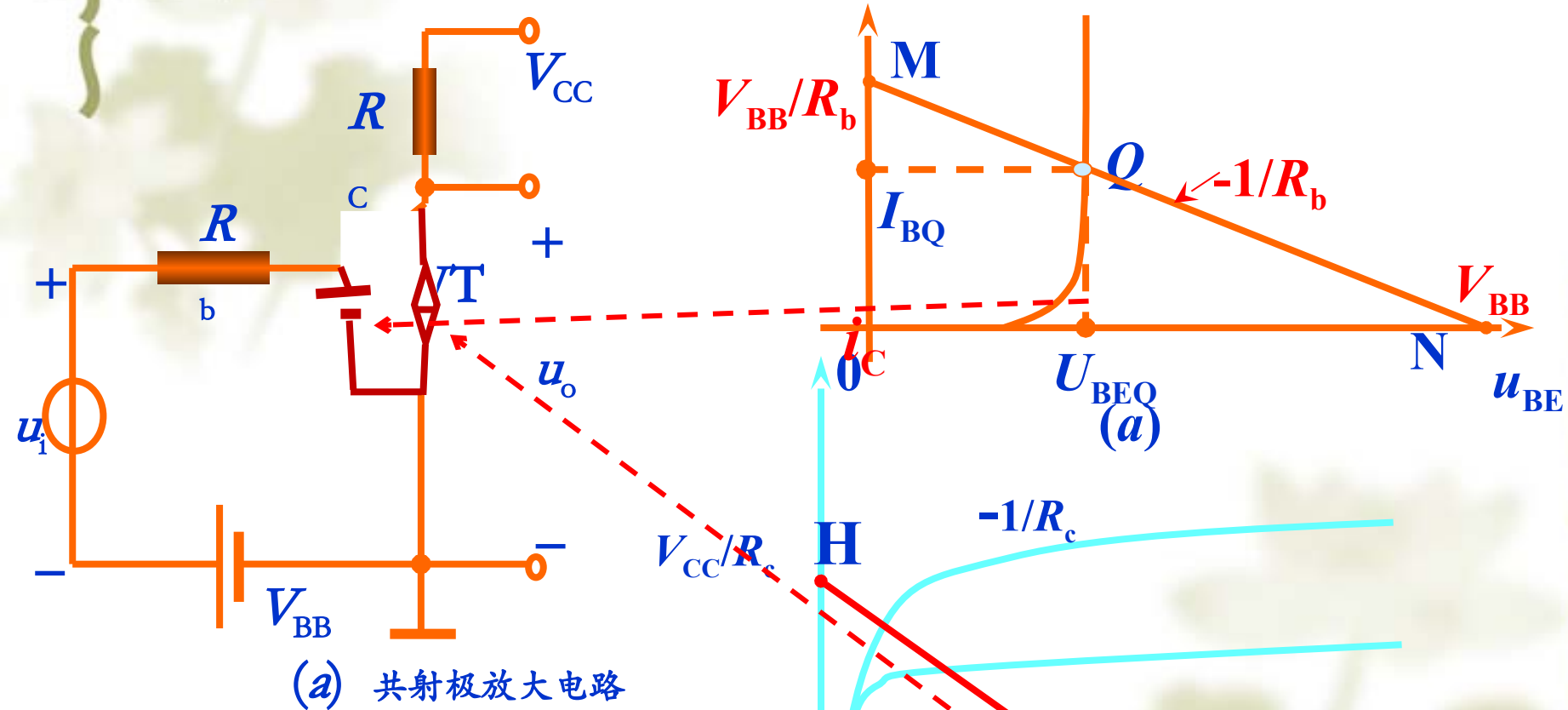
## (2) 利用输出特性曲线确定 $U_{CEQ}$ 及 $I_{CQ}$



(b)

静态工作点分析完成

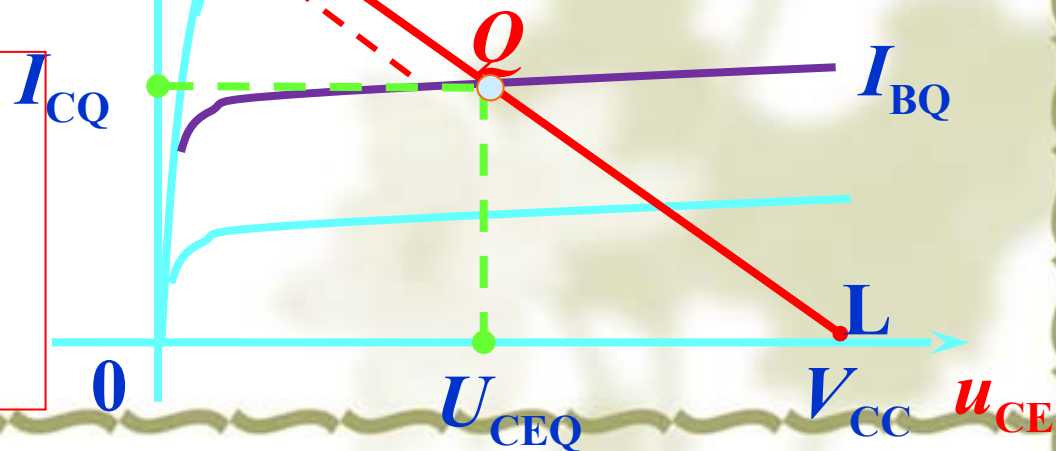
### (3) 总结 (计算法和图解法区别)



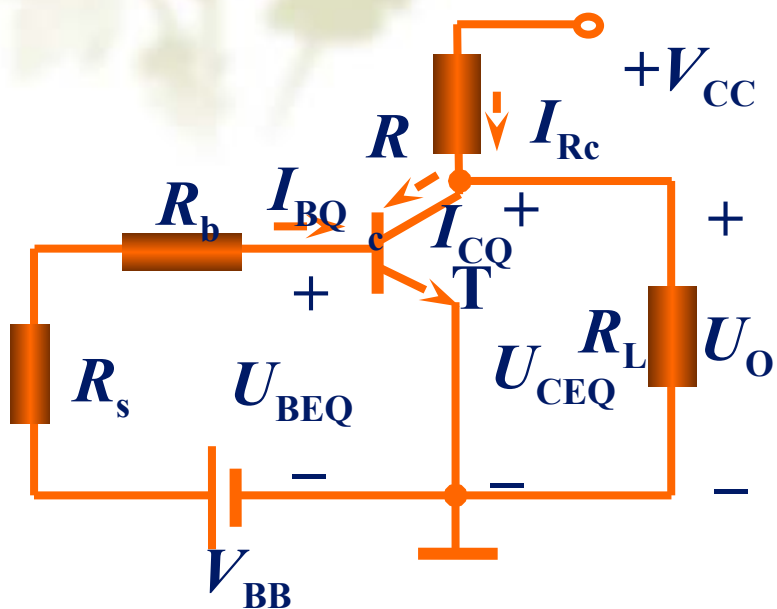
核心：计算法是对图解法进行了近似等效：

$U_{BEQ} = 0.7$  求  $I_{BQ}$ ，

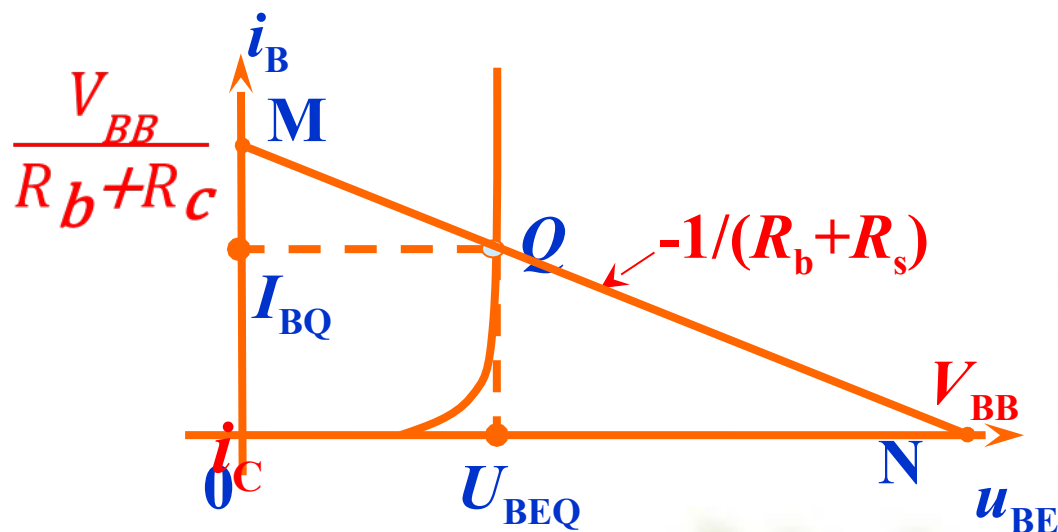
$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$ ，求  $U_{CEQ}$



思考：下图图解法怎么分析？



(b) 直流通路



(a) 输入图解法

$$V_{BB} = i_B(R_b + R_s) + u_{BE}$$

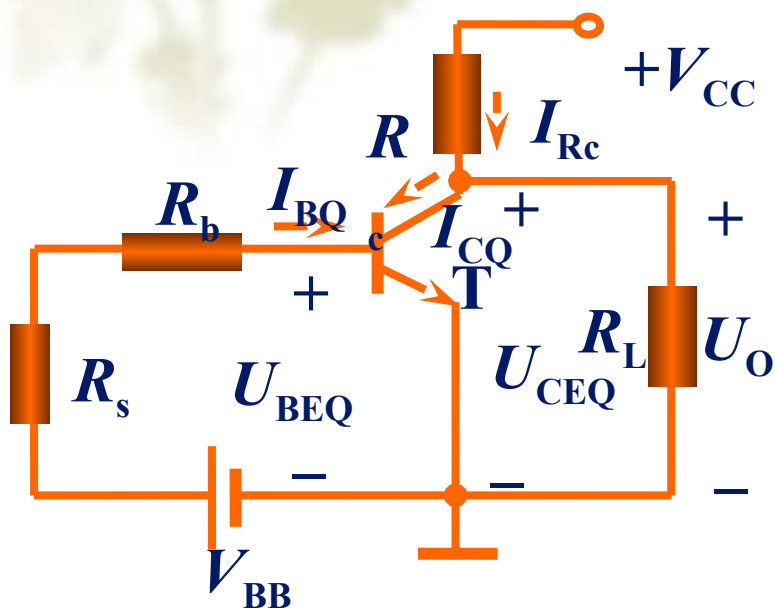
$$i_B = -\frac{1}{R_b + R_s} u_{BE} + \frac{V_{BB}}{R_b + R_s}$$

思考：下图图解法怎么分析？

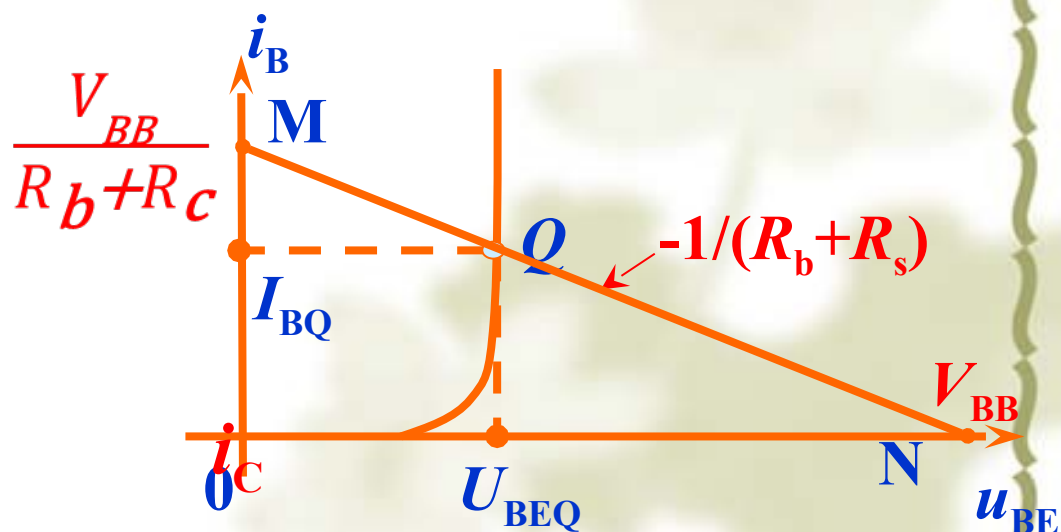
(a) 输入回路图解法

$$V_{BB} = i_B(R_b + R_s) + u_{BE}$$

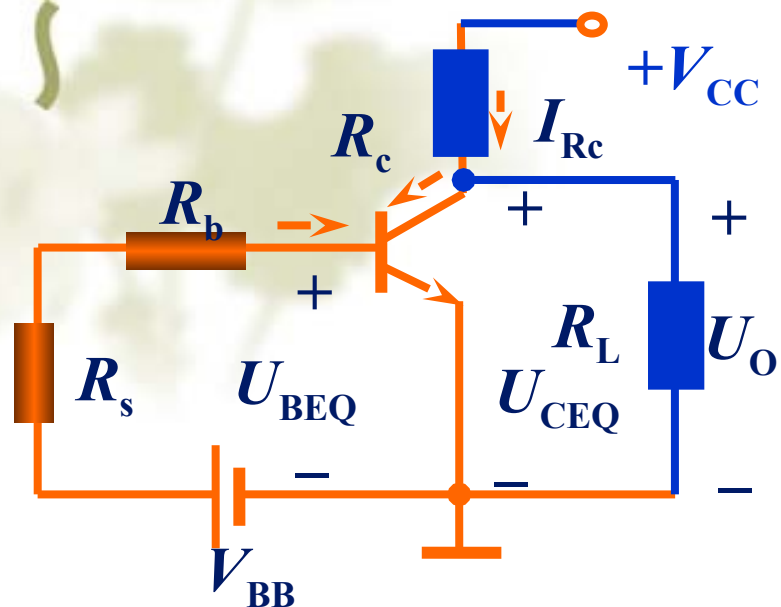
$$i_B = -\frac{1}{R_b + R_s} u_{BE} + \frac{V_{BB}}{R_b + R_s}$$



(b) 直流通路



思考：下图图解法怎么分析？



(a) 输出图解法

重点：列出  $i_c$  与  $u_{CE}$  的方程

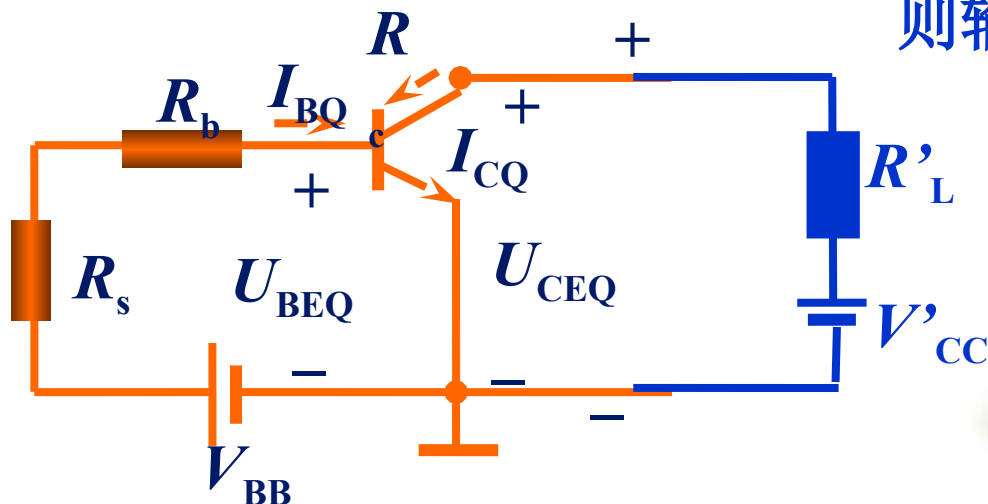
其中  $R'_L = R_c // R_L$

$$V'_{CC} = V_{CC} \frac{R_L}{R_c + R_L}$$

(b) 直流通路

则输出回路方程变为

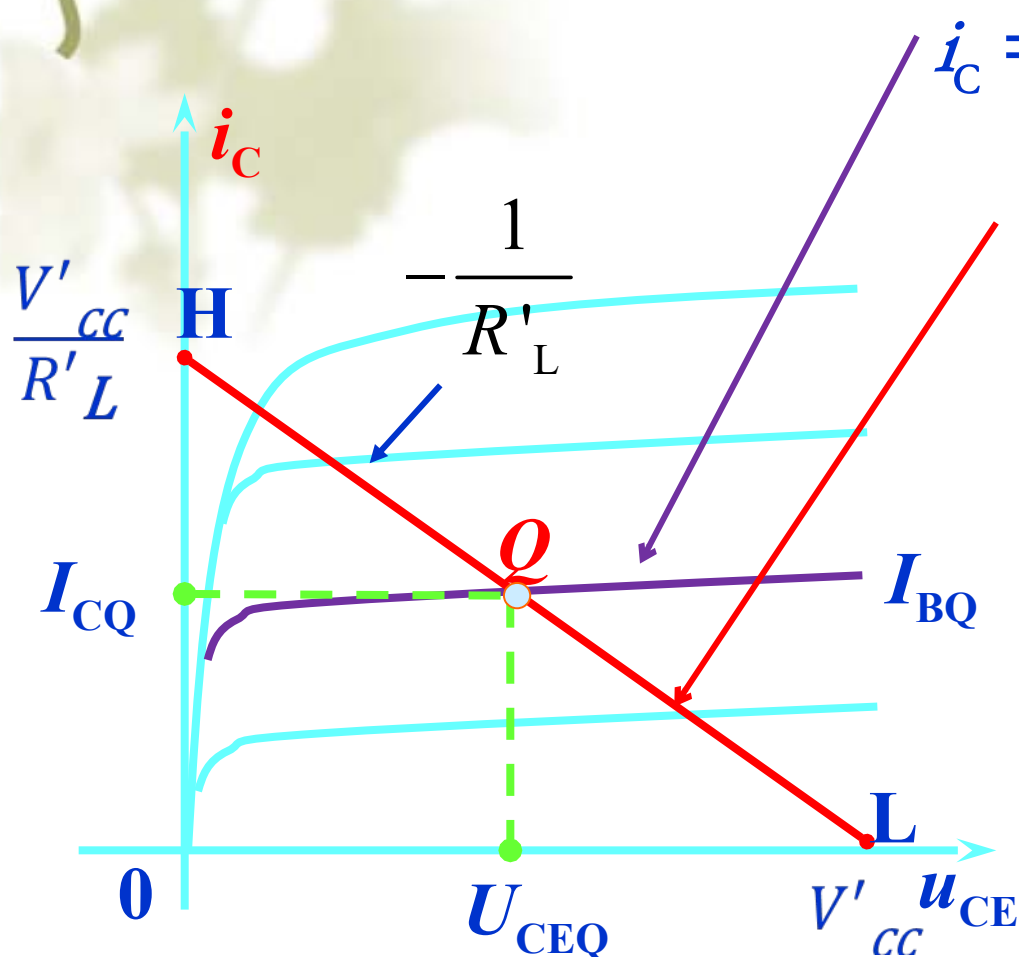
$$i_c = -\frac{1}{R'_L} u_{CE} + \frac{V'_{CC}}{R'_L}$$



(b) 戴维南等



## (2) 利用输出特性曲线确定 $U_{CEQ}$ 及 $I_{CQ}$



(b)

$$i_C = f(u_{CE}) \mid i_B = \text{常数}$$

$$i_C = -\frac{1}{R'_L} u_{CE} + \frac{V'_{CC}}{R'_L}$$

● 方程联立求解就是图形上两曲线的交点  $Q$ 。

● 与输入特性曲线交点，即为  $I_{CQ}$ 、 $U_{CEQ}$

重点结论：不同电路输入和输出回路可能不同，需

针对性列出方程，或进行

### 3. 电路参数对静态工作点的影响

由前面讨论已知

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

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

- 如果改变电路参数  $R_c$ 、 $R_b$ 、 $V_{BB}$ 、 $V_{CC}$  就会改变静态工作点。

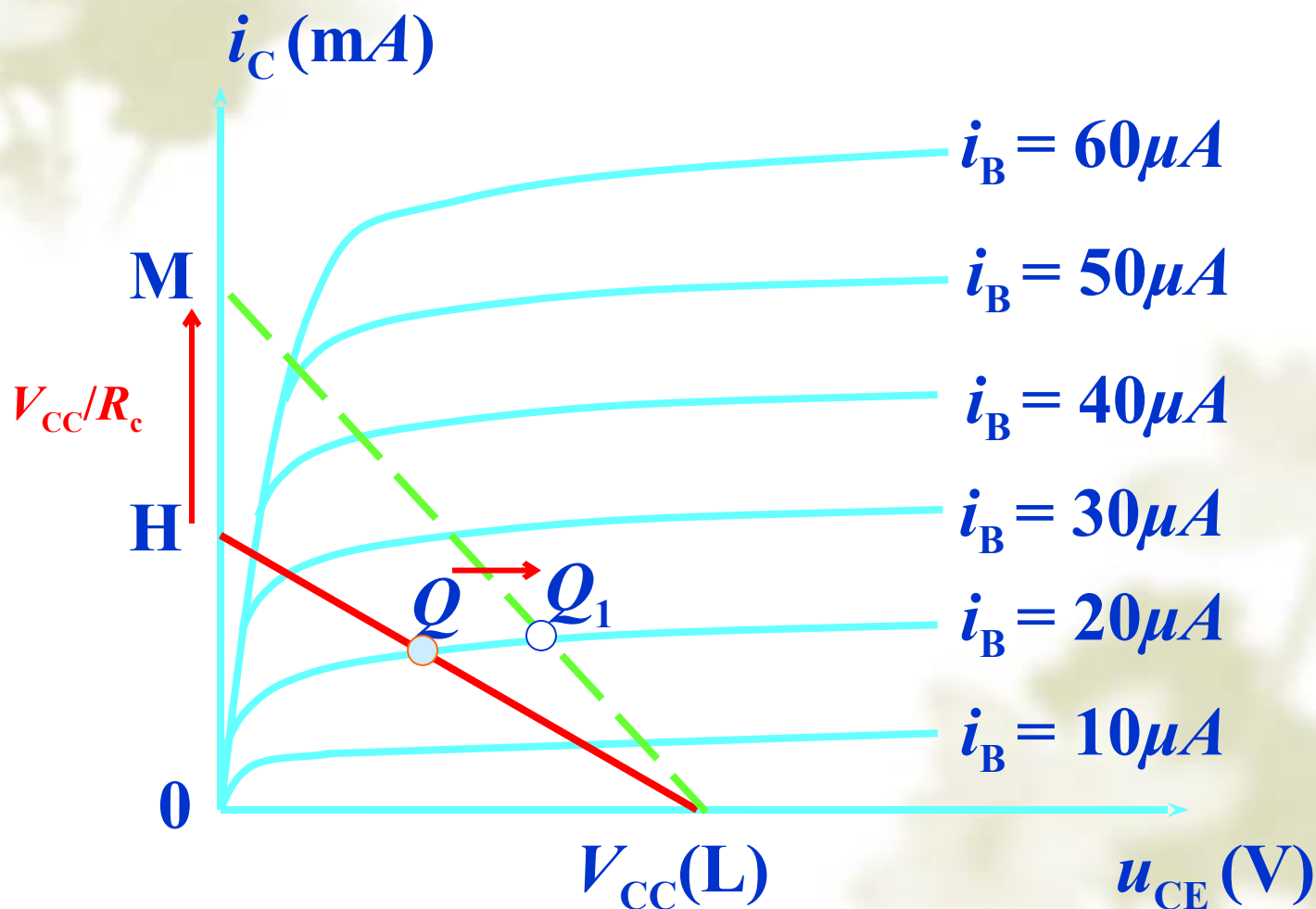
## $R_c$ 对 $Q$ 点的影响

假设  $R_c$  阻值改变时，其他参数不变。由式

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

- $R_c \downarrow \rightarrow 1/R_c \uparrow \rightarrow V_{CC}/R_c \uparrow \rightarrow$  负载线与曲线的交点右移。在图 (b) 中，设原有的直流负载线为  $HL$ 。
- $R_c \uparrow \rightarrow$  静态工作点左移。

减小  $R_c$  阻值

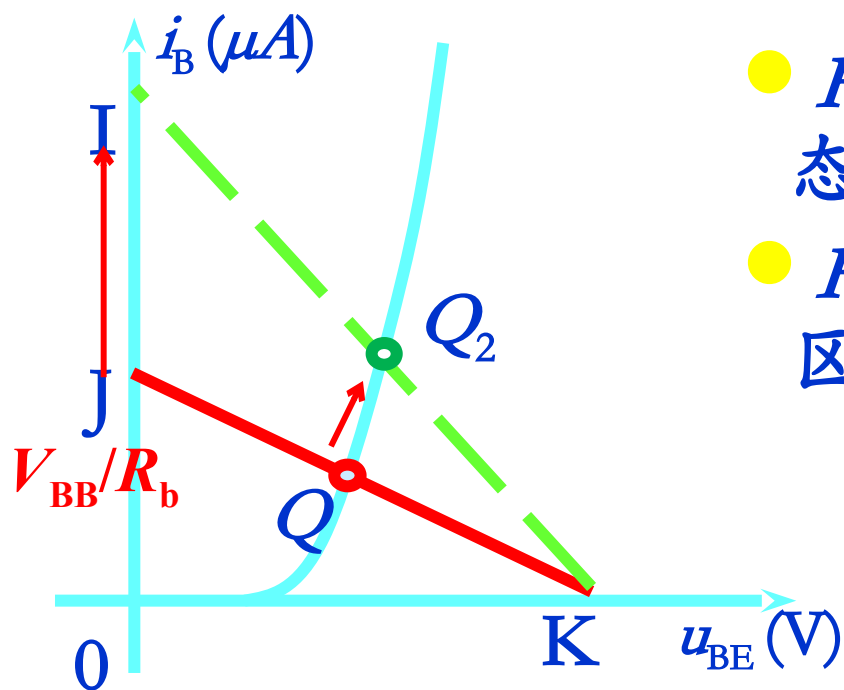


(b) 电路参数对输出特性上  $Q$  点的影响

# $R_b$ 对 $Q$ 点的影响

假设  $R_b$  阻值改变时，其他参数不变。由式

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



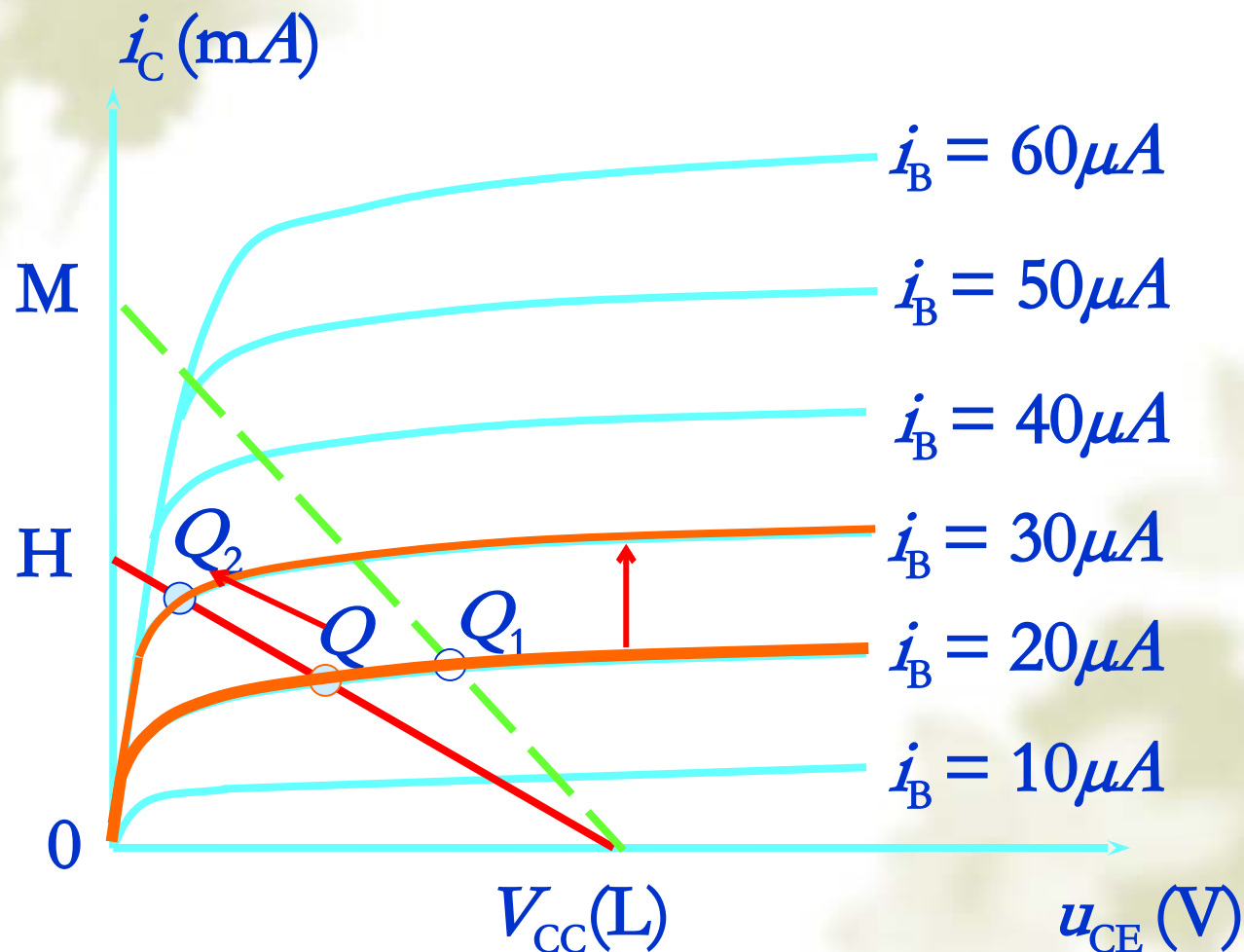
●  $R_b \downarrow \rightarrow 1/R_b \uparrow \rightarrow V_{BB}/R_b \uparrow \rightarrow$  静态工作点上移（饱和区）。

●  $R_b \uparrow \rightarrow$  静态工作点下移（截止区）。

● 如  $R_b$  减小， $I_{BQ}$  增大，则交点将由原来的  $J$  点上移到  $I$  点，静态工作点  $Q$  将移到  $Q_2$  点。

(a) 电路参数对输入特性上  $Q$  点影响

$R_b \downarrow, I_{BQ}$  增大, 假设从  $20\mu A$  增到  $30\mu A$



(b) 电路参数对输出特性上  $Q$  点的影响



# 第5章 放大电路基础

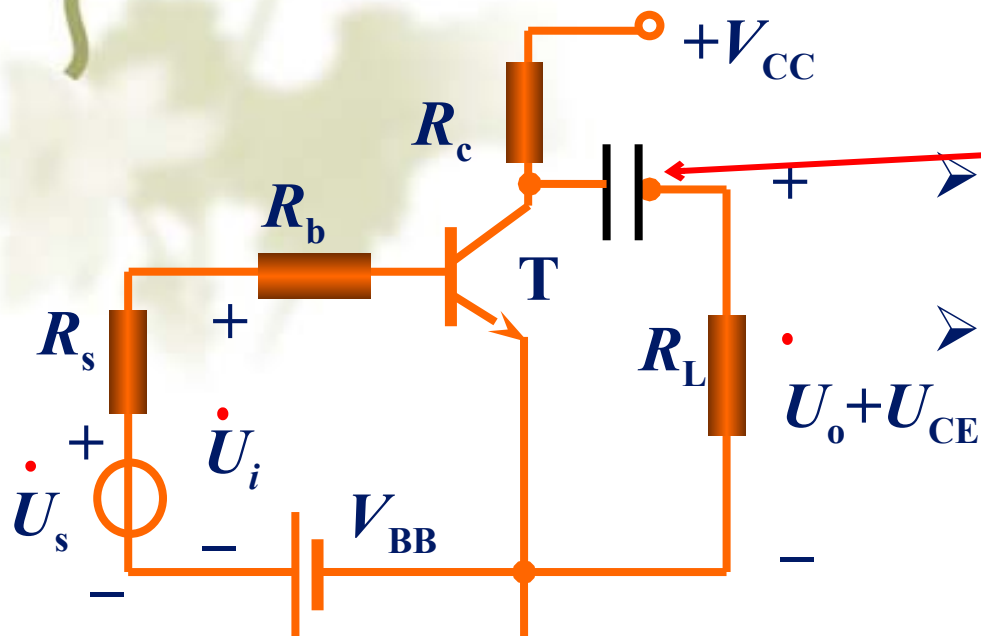
## 5.3 计算分析法

### ◆ 静态工作点计算

### ◆ 交流通路的分析

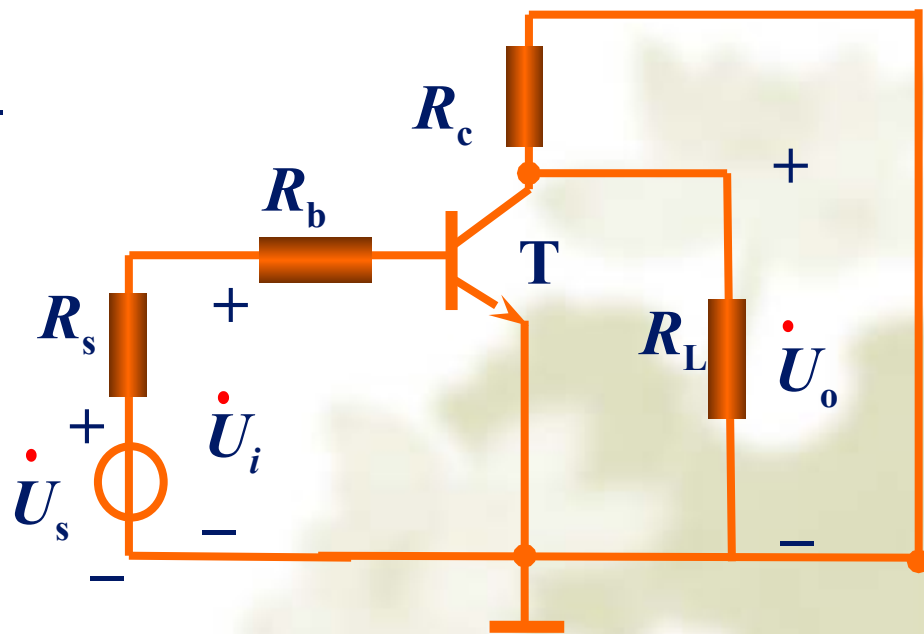
- 晶体管的  $h$  参数微变等效电路
  - 三极管如何等效成以前的普通电路
  - 在普通电路上进行计算
- 用计算分析法计算主要性能指标
  1. 电压放大倍数
  2. 电流放大倍数
  3. 输入电阻和输出电阻
  4. 最大输出电压幅值  $U_{\text{omax}}$

## 5.3 计算分析法



(a) 放大电路

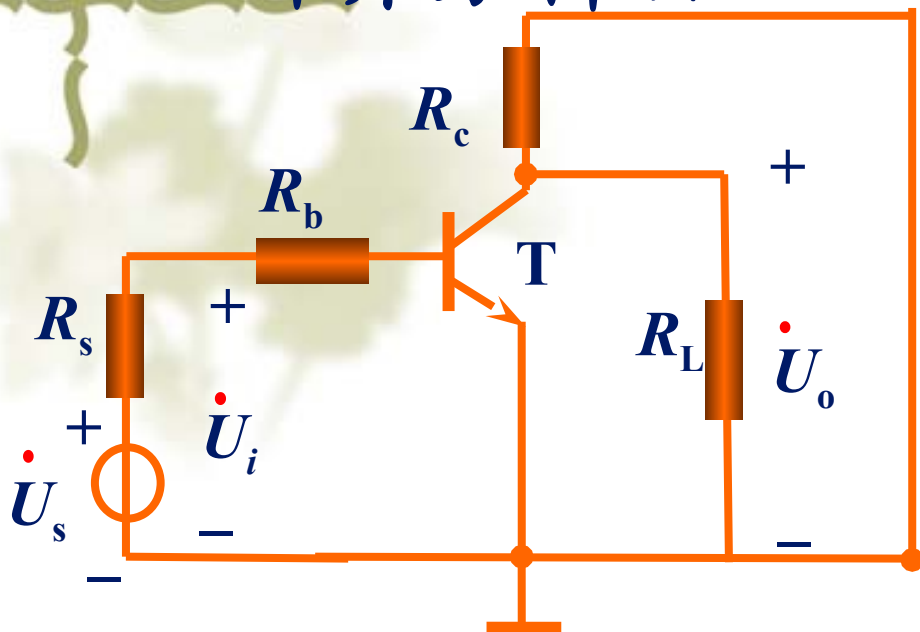
画交流通路：  
直流电源除源



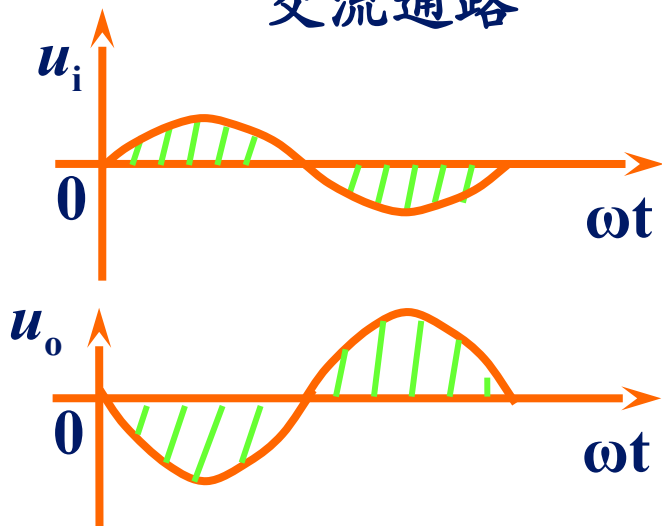
去直流后的交流通路

- 放大电路目的：小交流信号，放大成大的交流信号，加载到负载上。用电容隔直导交。
- 直流电源负责三极管工作在放大区。
- 分析方法：叠加原理

## 5.3 计算分析法



交流通路



去直流后，纯交流部分，如下

例：求放大倍数  $|u_o / u_i|$   
=

$$u_i = U_{im} \sin \omega t (mV)$$

$$u_{be} = U_{bem} \sin \omega t$$

$$i_b = I_{bm} \sin \omega t$$

$$i_c = \bar{\beta} i_b = \bar{\beta} I_{bm} \sin \omega t$$

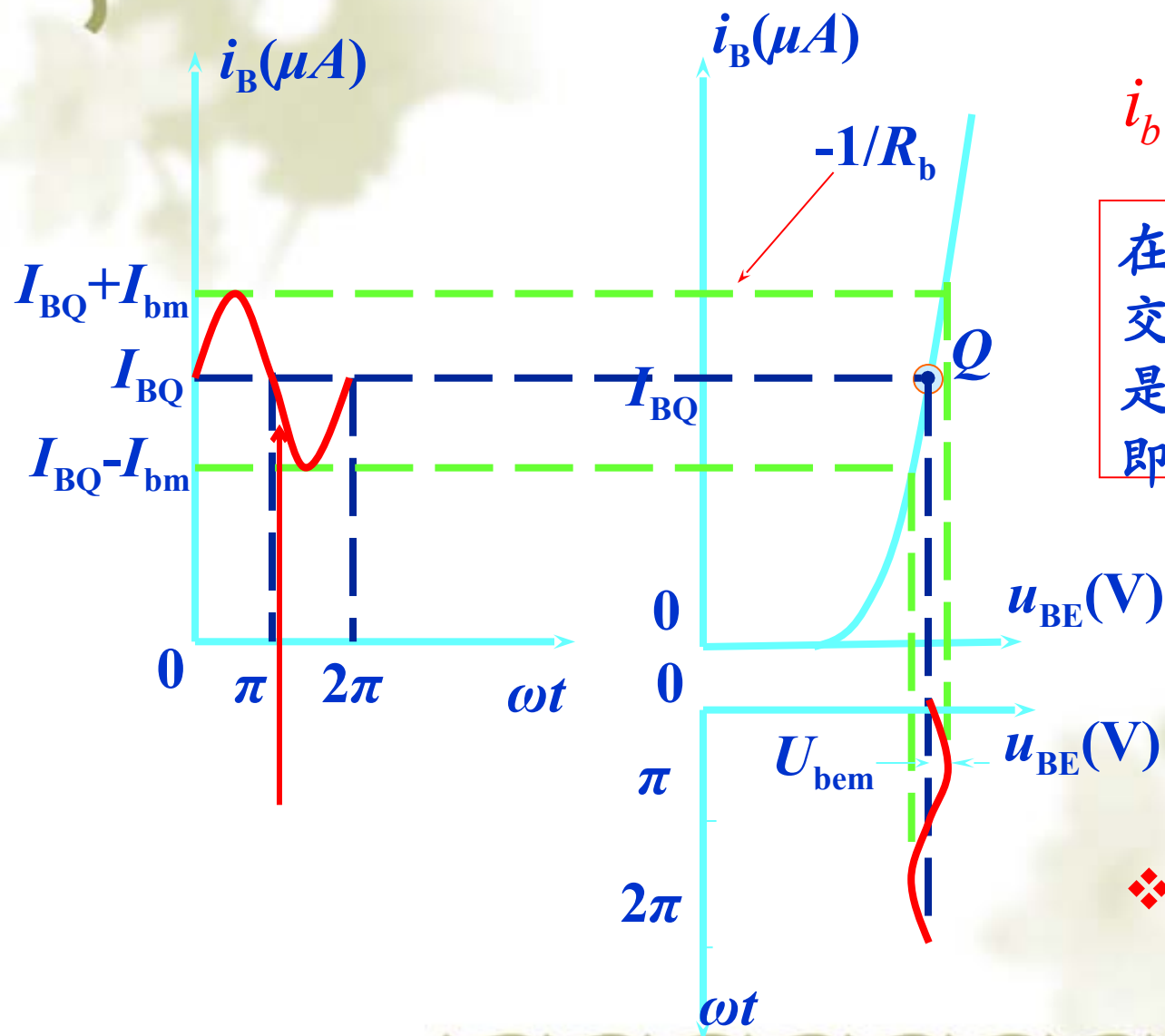
$$u_o = \beta I_{bm} R_c \sin(\omega t + 180^\circ)$$

问题：  $U_{bem}$ ，  $I_{bm}$  数值多大？

直流通路中，三极管 BE 近似等效 0.7V 的电压源。

思考：交流通路中，三极管的 BE 级如何等效？

### 图解法求 $u_{BE}$ 及 $i_B$ 波形



$$u_{be} = U_{bem} \sin \omega t$$

$$i_b = I_{bm} \sin \omega t$$

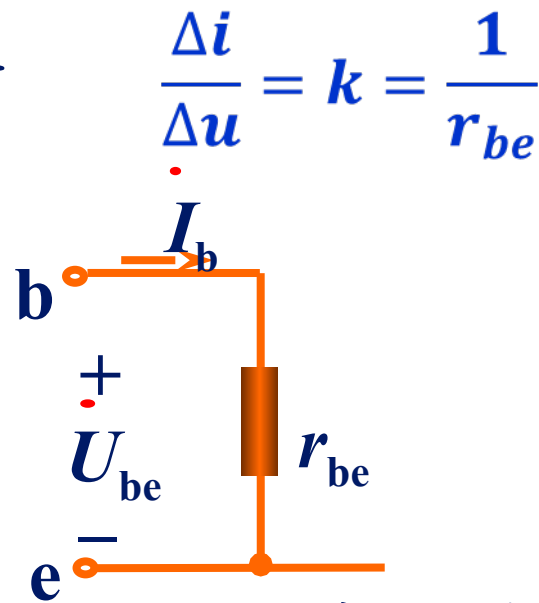
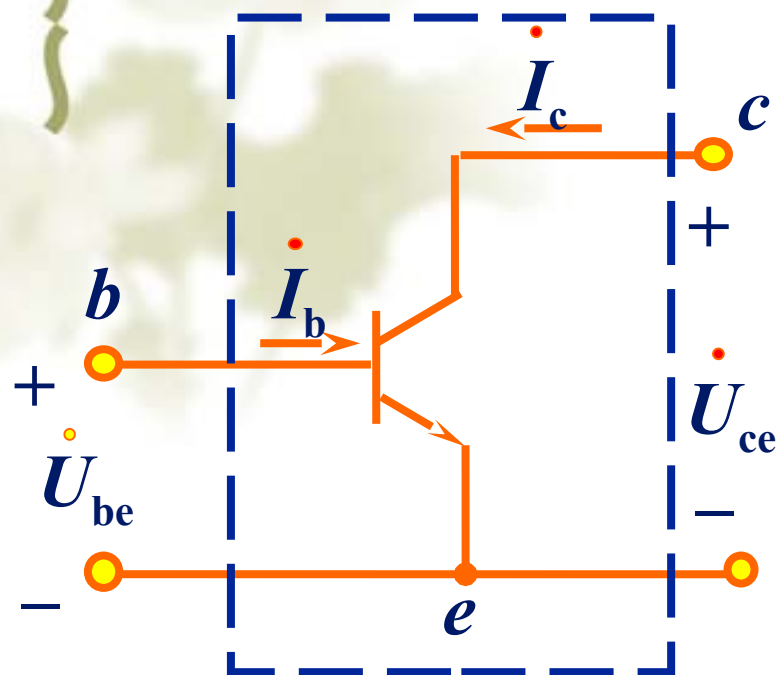
在交流信号传输中，  
交流电流和交流电压  
是近似等效为线性，  
即该点的斜率。

$$\frac{\Delta i}{\Delta u} = k = \frac{1}{r_{be}}$$

$$\frac{\Delta u}{\Delta i} = r_{be}$$

## ❖ BE 级在小信号下等效成交流电阻 $r_{be}$

#### (4) 简化 $h$ 参数微变等效电路



两个  $h$  参数的等效电路

$r_{be}$  等效电阻和静态工作点上的斜率有关

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

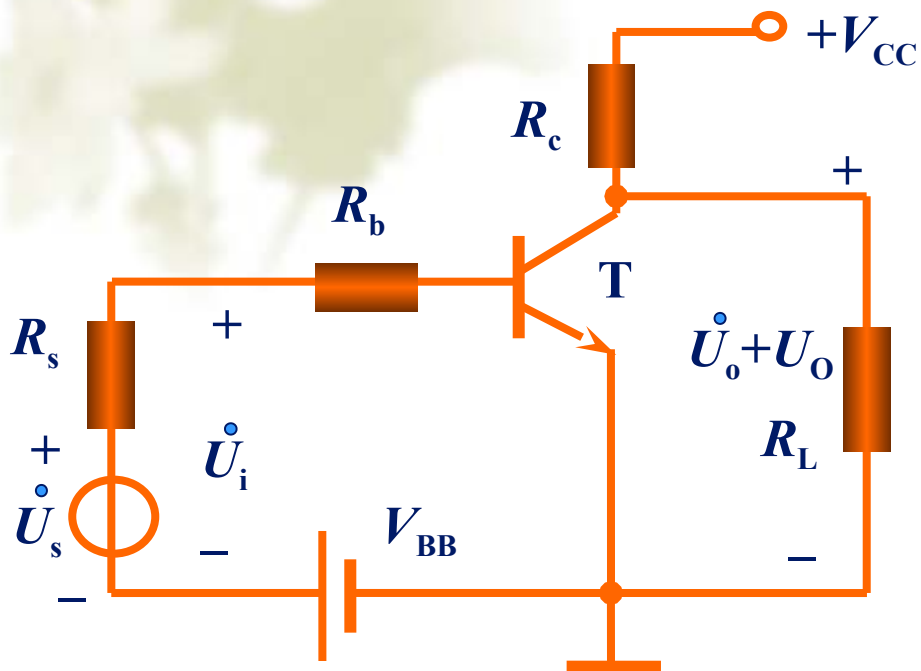
$$i_C = \bar{\beta} i_B = \bar{\beta} I_B + \bar{\beta} I_{bm} \sin \omega t = I_C + I_{cm} \sin \omega t$$

❖ 将晶体管当作一个线性双口网络。

❖ 小信号输入时求出的等效电路称为晶体管微变等效电路。

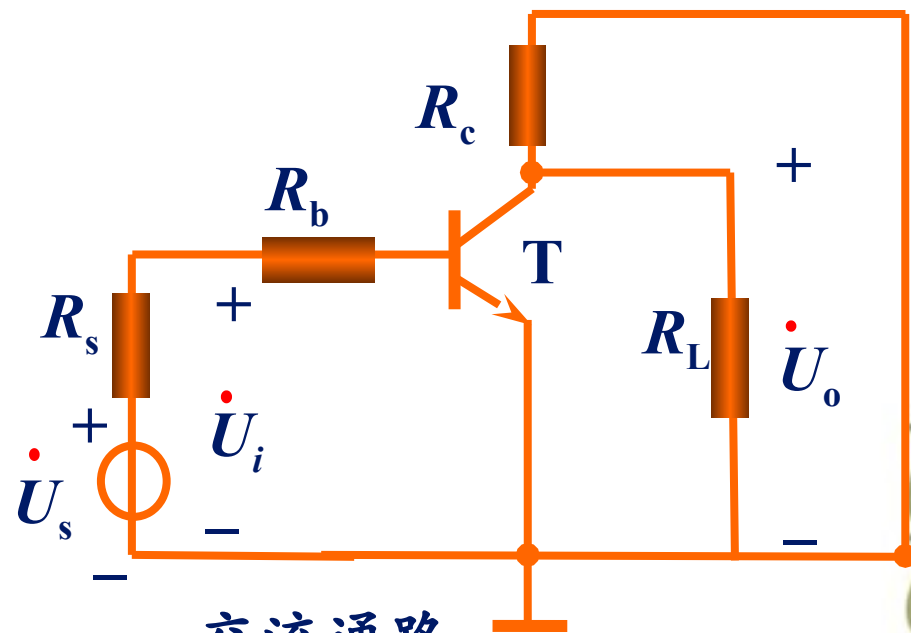
# 5.3 计算分析法

## (4) 简化 $h$ 参数微变等效电路



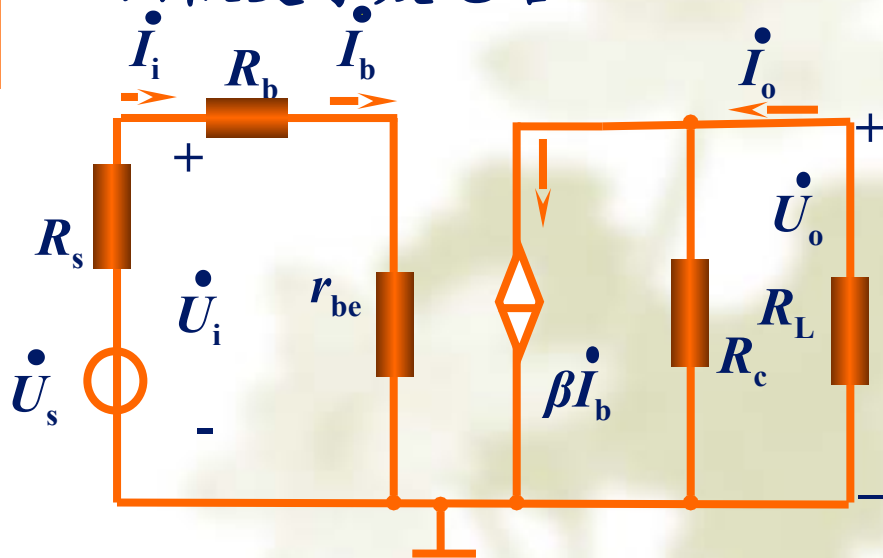
放大电路

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



交流通路

❖ 画微变等效电路



(b) 微变等效电路

# 第5章 放大电路基础

## 5.3 计算分析法

- ◆ 静态工作点计算
  - ◆ 交流通路分析
- 晶体管的  $h$  参数微变等效电路
  - 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. 等效输入电阻和输出电阻
    4. 最大输出电压幅值  $U_{omax}$