

# 基础电路与电子学

主讲：陈开志

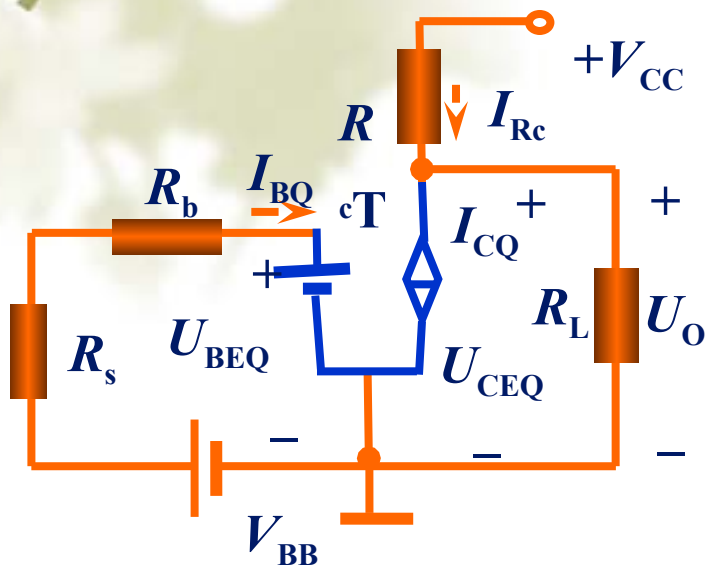
办公室：学院 2 号楼 304

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

# 第5章 放大电路基础

- 5.1 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

## 总结：计算法求静态工作点



(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，通过输入回路求  $I_{BQ}$ ，
- 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 通过输出回路求  $U_{CEQ}$ ，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

## 5.3 计算分析法

### ◆ 静态工作点计算

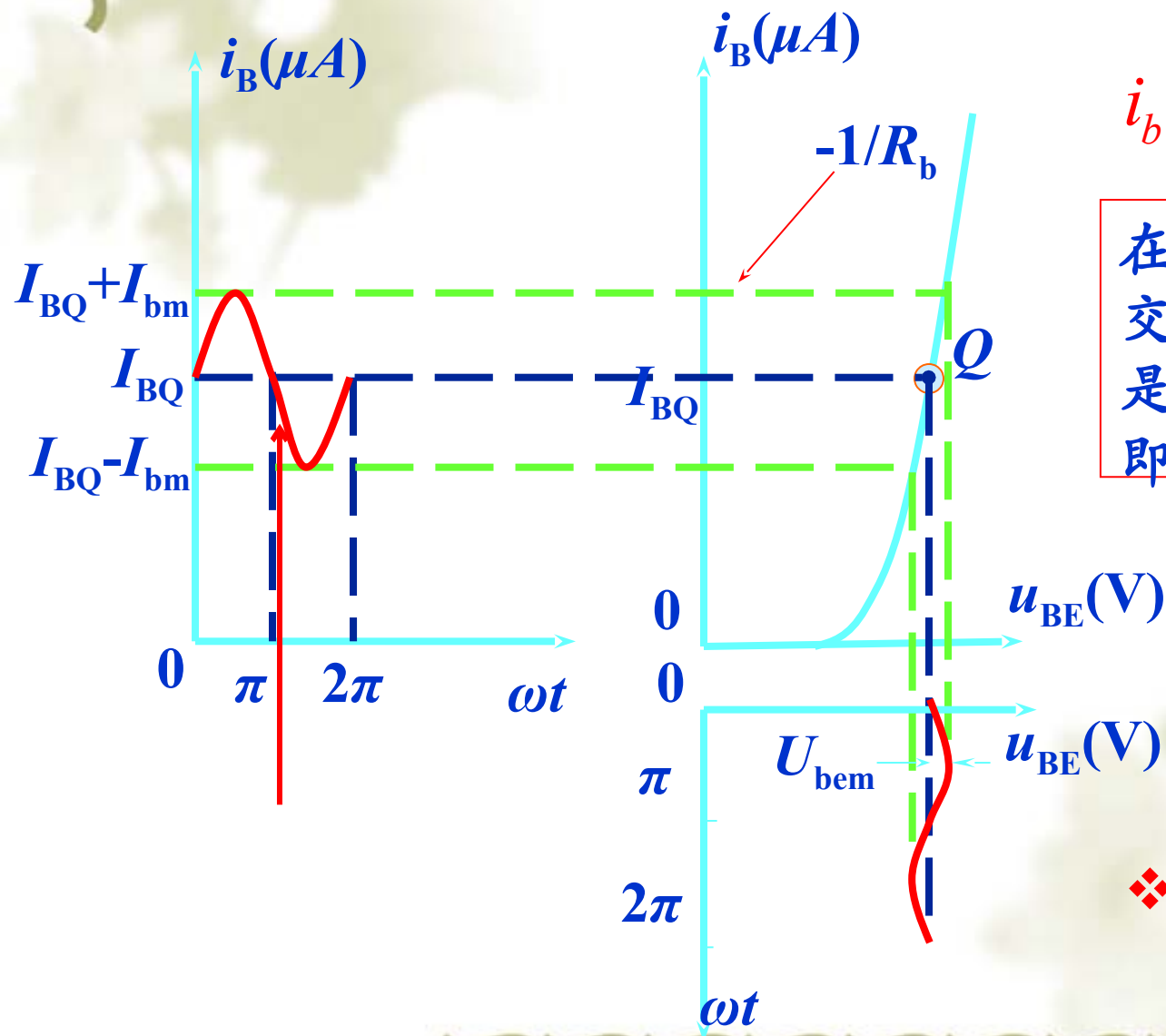
### ◆ 交流通路的分析

- 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  $U_{\text{omax}}$

# 图解法求 $u_{BE}$ 及 $i_B$ 波形

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

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



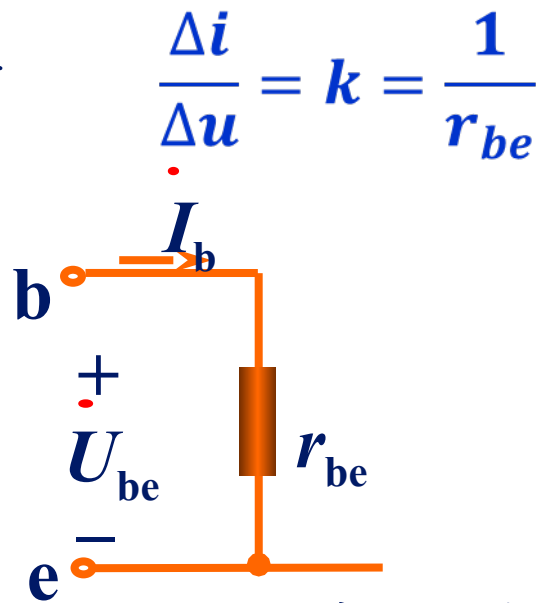
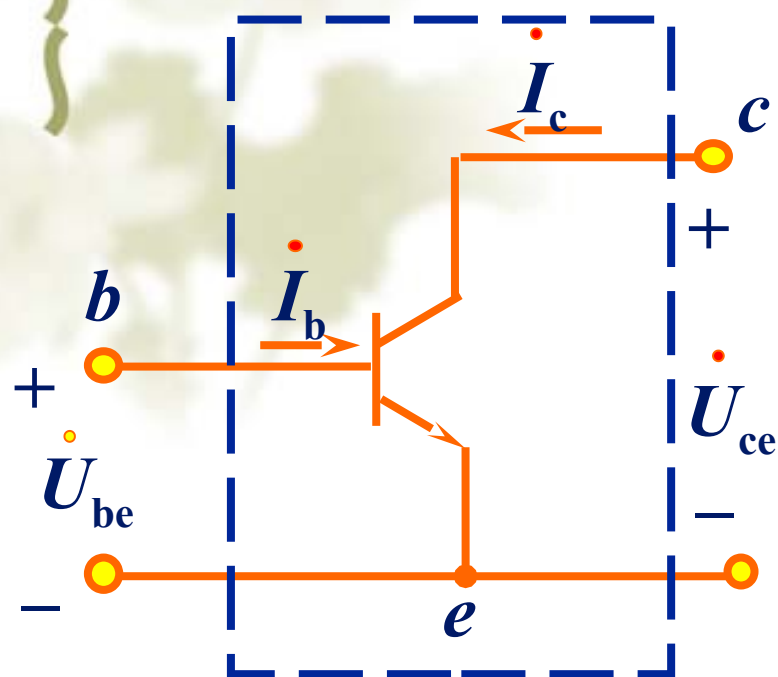
在交流信号传输中，交流电流和交流电压是近似等效为线性，即该点的斜率。

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

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

❖ 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

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

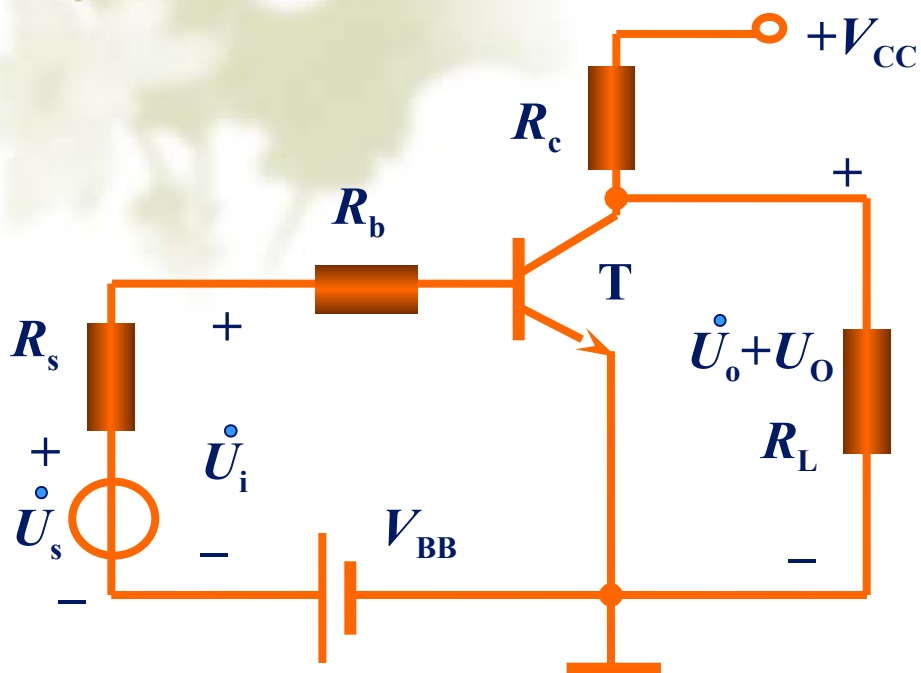
$$i_C = \bar{\beta} i_B = \bar{\beta} I_B + \bar{\beta} I_{bm} \sin \omega t = I_C + I_{cm} \sin \omega t$$

❖ 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。

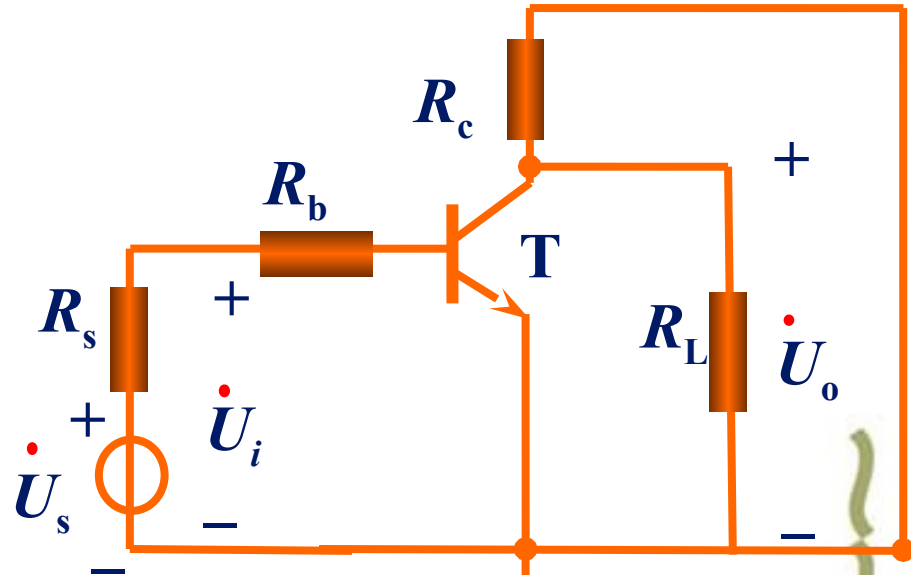
# 5.3 计算分析法

## (4) 简化 $h$ 参数微变等效电路



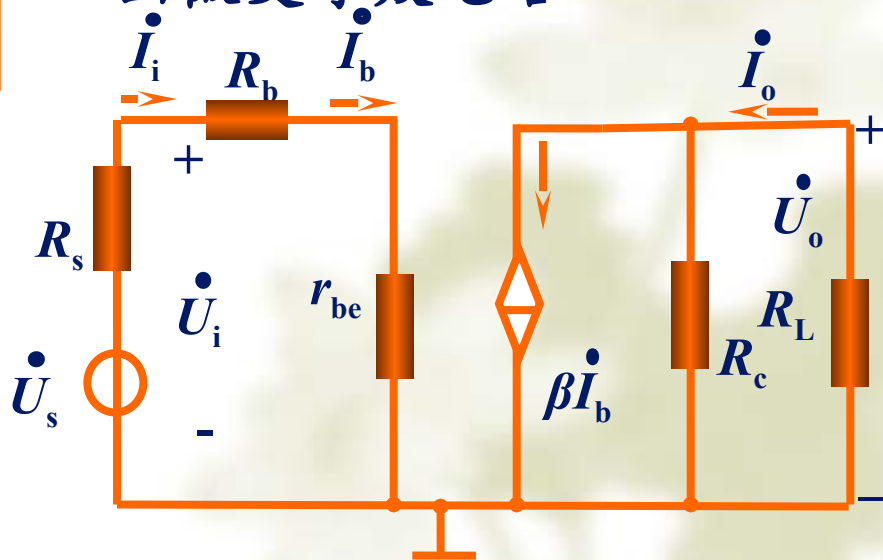
放大电路

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



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  $U_{\text{omax}}$



### 3. 用计算分析法计算主要性能指标

#### (1) 计算电压放大倍数

● **电压放大倍数**  $\dot{A}_u$  是放大电路的一个重要性能指标。它表示放大器放大信号电压的能力，定义为输出正弦电压与输入正弦电压复数值之比。即为

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{U_o \angle \phi_o}{U_i \angle \phi_i} = A_u \angle \phi$$

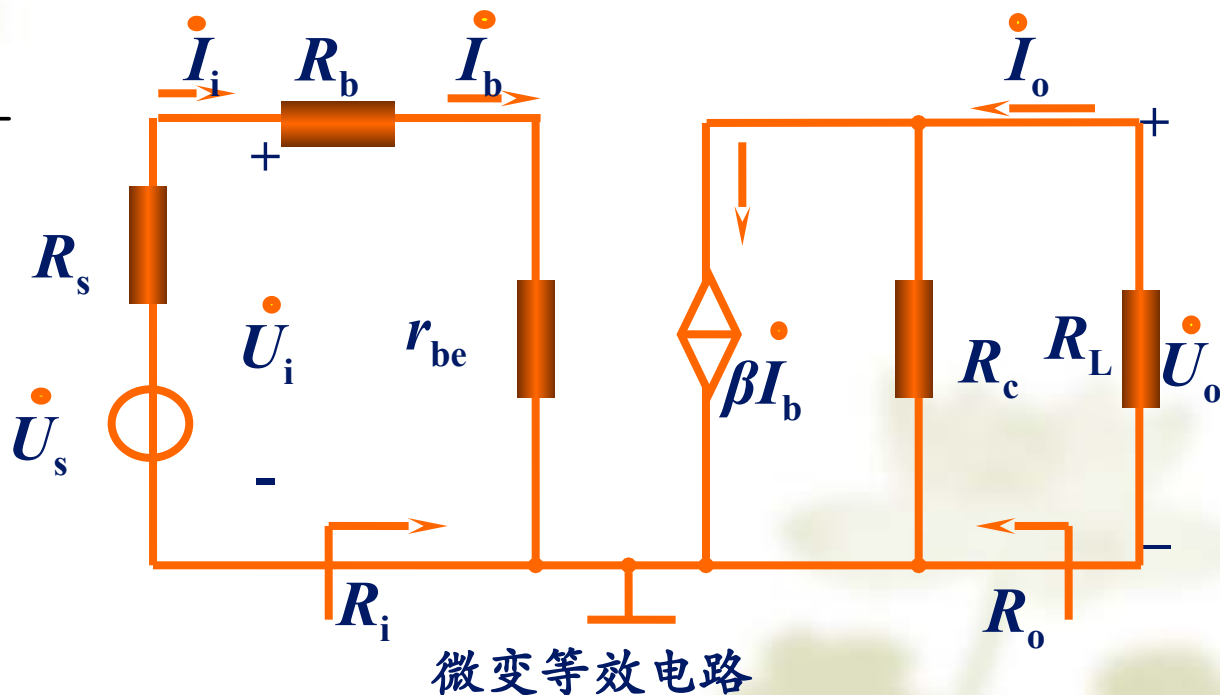
式中：  $A_u = U_o / U_i$  (有效值之比)，  $\phi = \phi_o - \phi_i$

● 放大倍数亦常用 **增益** 来表示，单位是分贝(dB)，  
公式： $A_u(\text{dB}) = 20 \lg A_u$

### 3. 用计算分析法计算主要性能指标

#### (1) 计算电压放大倍数

❖ 计算  $\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$



$$\dot{U}_i = \dot{I}_b (R_b + r_{be})$$

$$\dot{U}_o = -\beta \dot{I}_b (R_c // R_L) = -\beta \dot{I}_b R'_L$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b R'_L}{\dot{I}_b (R_b + r_{be})} = \frac{-\beta R'_L}{R_b + r_{be}}$$

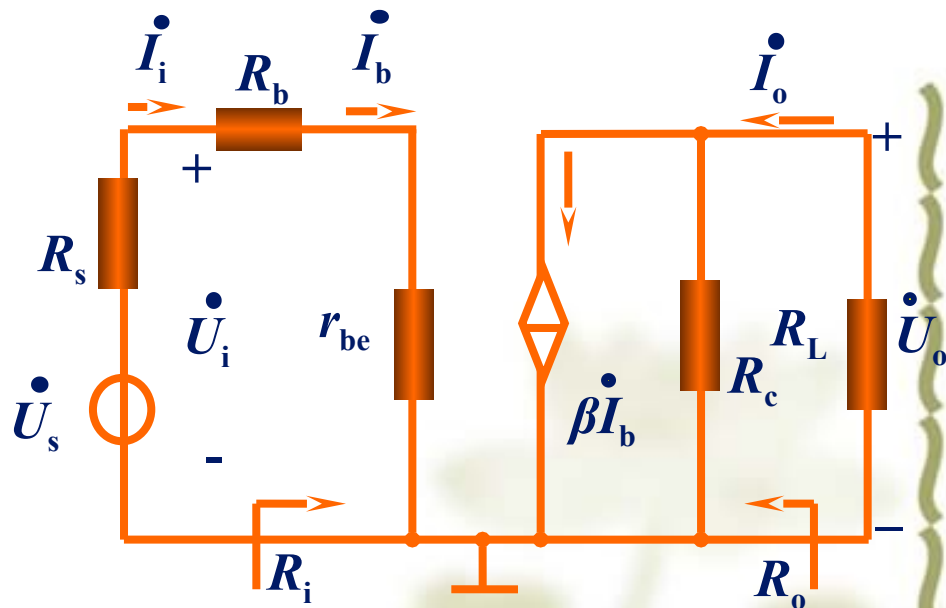
### ③ 考虑信号源内阻 $R_s$ 时电压放大倍数的计算

对信号源电压  $\dot{U}_s$  的电压放大倍数定义为

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s}$$

由微变等效电路可得

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} = \dot{A}_u \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s}$$



(b) 微变等效电路

$$\frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{I}_i(R_b + r_{be})}{\dot{I}_i(R_s + R_b + r_{be})} = \frac{R_b + r_{be}}{R_s + R_b + r_{be}}$$

### ③ 考虑信号源内阻 $R_s$ 时电压放大倍数的计算

式中  $R_b + r_{be}$  就是放大电路的输入电阻，用  $R_i$  表示。因此  $\dot{A}_{us}$  可以表示为

$$\dot{A}_{us} = \dot{A}_u \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i}$$

$$\dot{A}_{us} = \frac{-\beta R'_L}{R_b + r_{be}} \cdot \frac{R_b + r_{be}}{R_s + R_b + r_{be}} = \frac{-\beta R'_L}{R_s + R_b + r_{be}}$$

比较式  $\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta R'_L}{R_b + r_{be}}$  和上式

可见  $\dot{A}_{us} < \dot{A}_u$ 。原因是信号源电压  $\dot{U}_s$  的一部分电压分到信号源内阻  $R_s$  上。

### 3. 用计算分析法计算主要性能指标

#### (2) 计算电流放大倍数

电流放大倍数表示放大器放大信号电流的能力。它是放大器的一个性能指标，定义输出信号电流与输入信号电流之比。即

$$\dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} = \frac{I_o \angle \phi_o}{I_i \angle \phi_i} = A_i \angle \phi$$

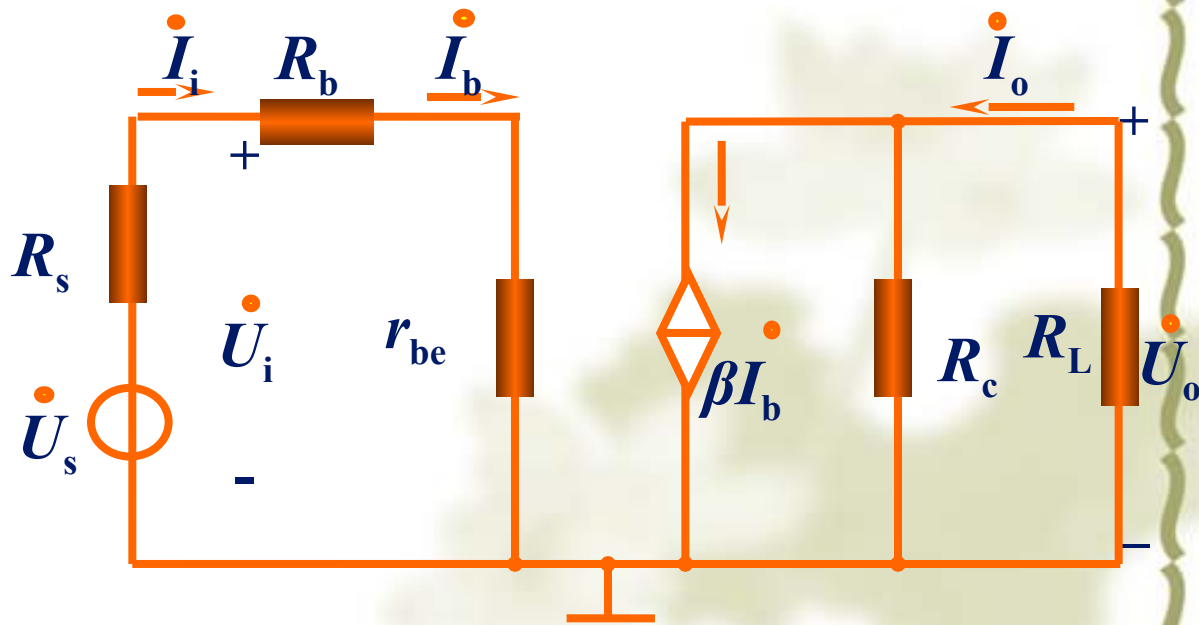
根据微变等效电路

$$\dot{I}_i = \frac{\dot{U}_i}{R_b + r_{be}}$$

$$\dot{I}_o = \frac{-\dot{U}_o}{R_L}$$

$$\dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} = \frac{-\dot{U}_o}{R_L} \cdot \frac{R_b + r_{be}}{\dot{U}_i}$$

$$= -\dot{A}_u \frac{R_b + r_{be}}{R_L}$$



## ② 关于提高 $A_u$ 的讨论

式

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta R'_L}{R_b + r_{be}}$$

要提高  $A_u$

- 可以增大  $\beta$  ;
- 增大交流负载电阻  $R'_L$  ;
- 减小  $R_b$  ;
- 增大静态发射极电流  $I_{EQ}$  来使  $r_{be}$  减小。
- 但实际上,  $A_u$  与这些参数之间并不是简单的正比关系。



# 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  $U_{omax}$



### (3) 计算输入电阻和输出电阻

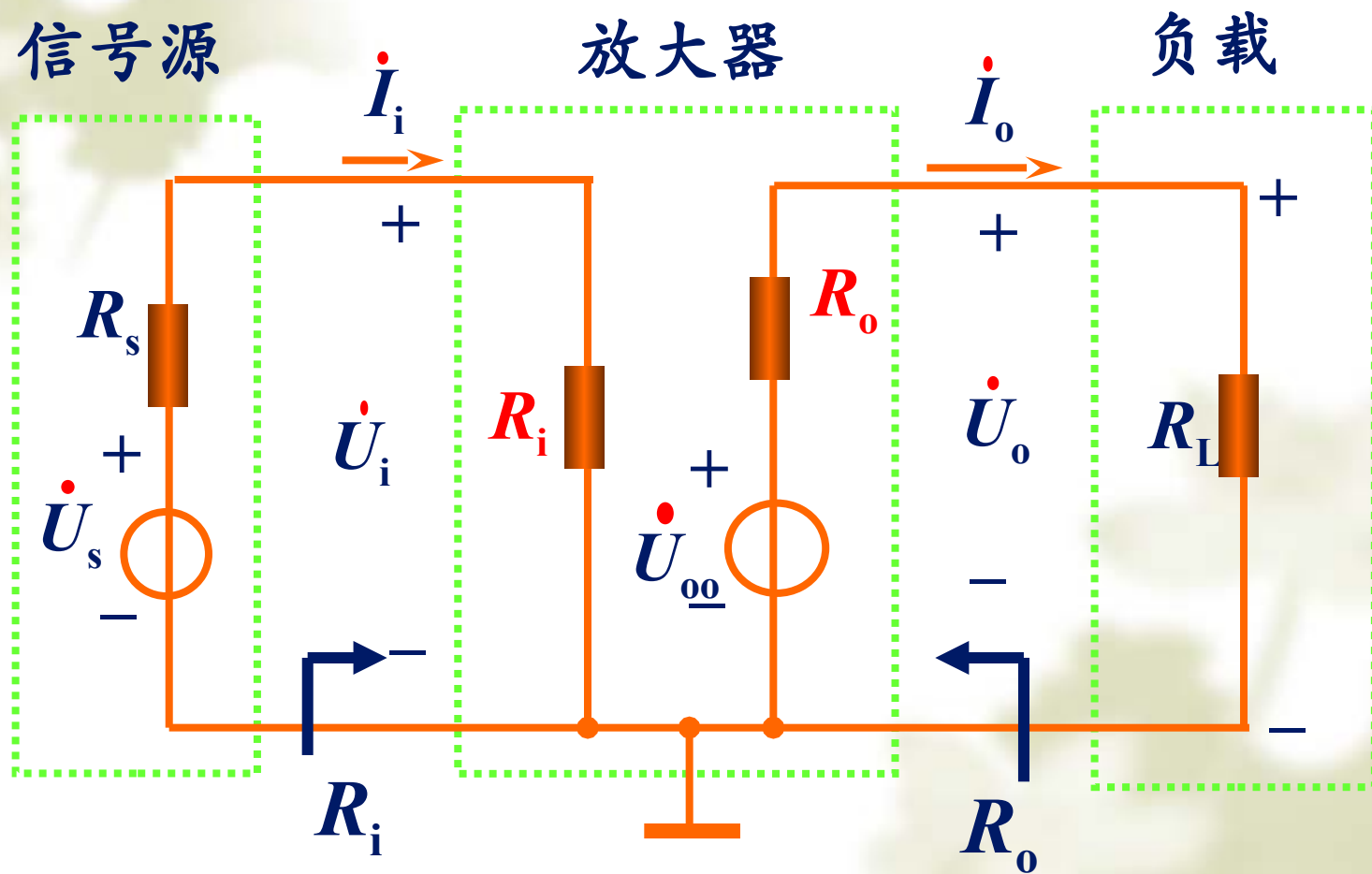


图 5-22 放大器的输入电阻和输出电阻

### (3) 计算输入电阻和输出电阻

问题：为什么要计算输入电阻？

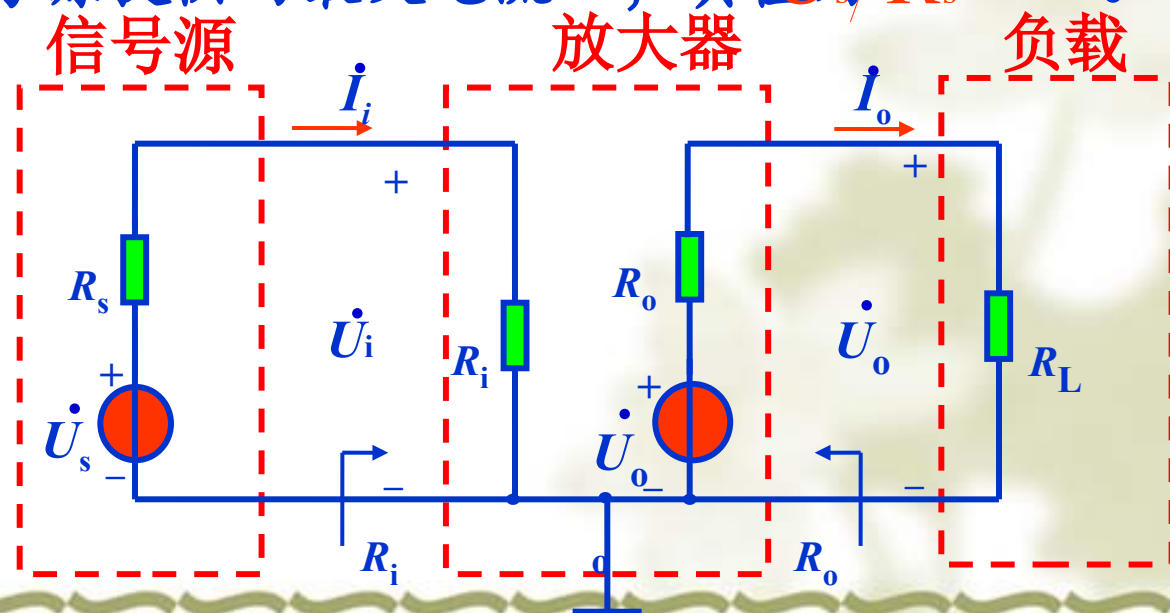
$$\dot{U}_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} \dot{U}_s \quad \dot{I}_i = \frac{\dot{U}_s}{R_s + R_i}$$

$R_i$  越大，放大器输入端得到的信号电压  $\dot{U}_i$  也越大，即信号源电压衰减的少；但大器从信号源取的电流越小

若  $R_i \gg R_s$  则  $\dot{U}_i \approx \dot{U}_s$

反之  $R_i$  越小，放大器从信号源取的电流越大，放大器的输入电流就越接近信号源提供的最大电流，其值为  $\dot{U}_s / R_s$ 。

输入电阻用于衡量放大器对信号源的影响



### (3) 计算输入电阻和输出电阻

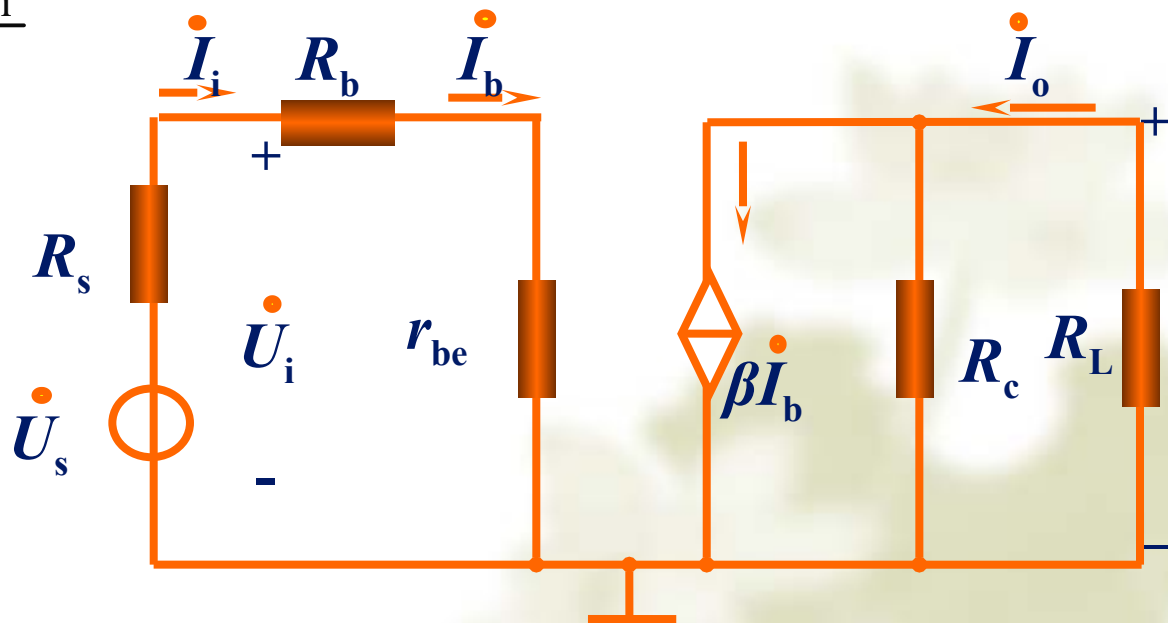
计算输入电阻  $R_i$

输入电阻  $R_i$  是用来衡量放大器对信号源的影响的一个性能指标。它定义为输入信号电压  $\dot{U}_i$  与输入信号电流  $\dot{I}_i$  之比。即

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}$$

根据定义微变等效电路可以计算共射放大电路的输入电阻。

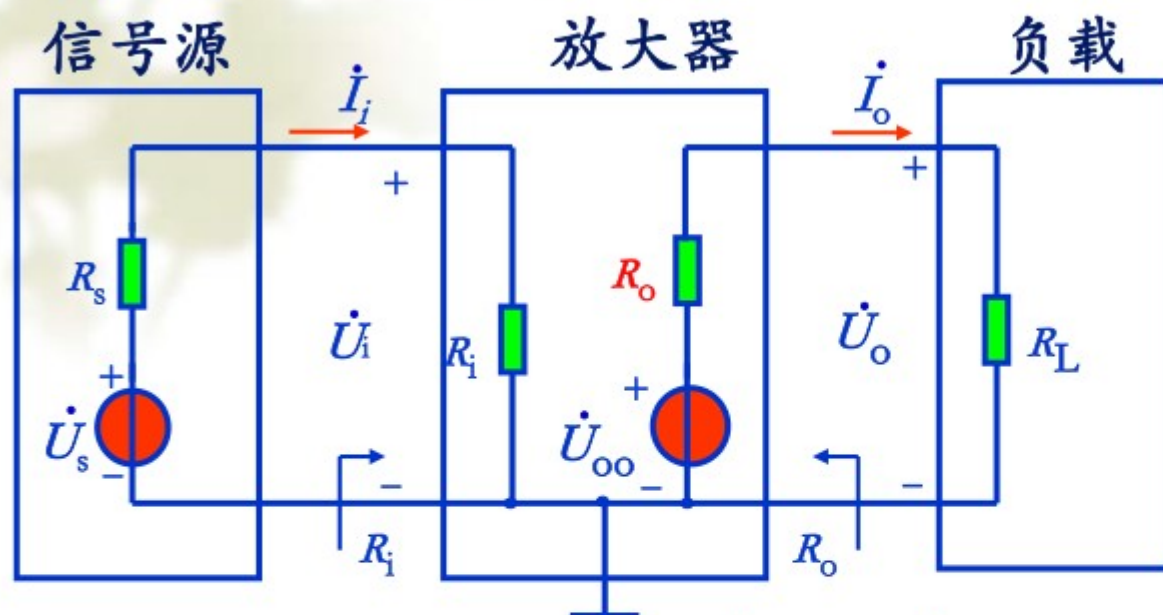
$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_b + r_{be}$$



微变等效电路

### (3) 计算输入电阻和输出电阻

为什么要计算输出电阻 $R_o$ ?



$$\dot{U}_o = \frac{R_L}{R_o + R_L} \dot{U}_{oo}$$

$$\dot{I}_o = \frac{\dot{U}_{oo}}{R_o + R_L}$$

$$R_o = \left( \frac{\dot{U}_{oo}}{\dot{U}_o} - 1 \right) R_L$$

若 $R_o$ 很小,  $\ll R_L$  则  $\dot{U}_o \approx \dot{U}_{oo}$

当 $R_L$ 在较大范围内变化时, 可基本维持输出信号电压的恒定。

反之, 若 $R_o$ 很大 $\gg R_L$  则  $\dot{I}_o \approx \dot{U}_{oo}/R_o$

当 $R_L$ 在较大范围内变化时, 可基本维持输出信号电流的恒定。

输出电阻用来衡量放大器带负载能力的强弱。

### (3) 计算输入电阻和输出电阻

计算输出电阻  $R_o$  : 受控源电路

1 : 开路短路法

2 : 加压求流法

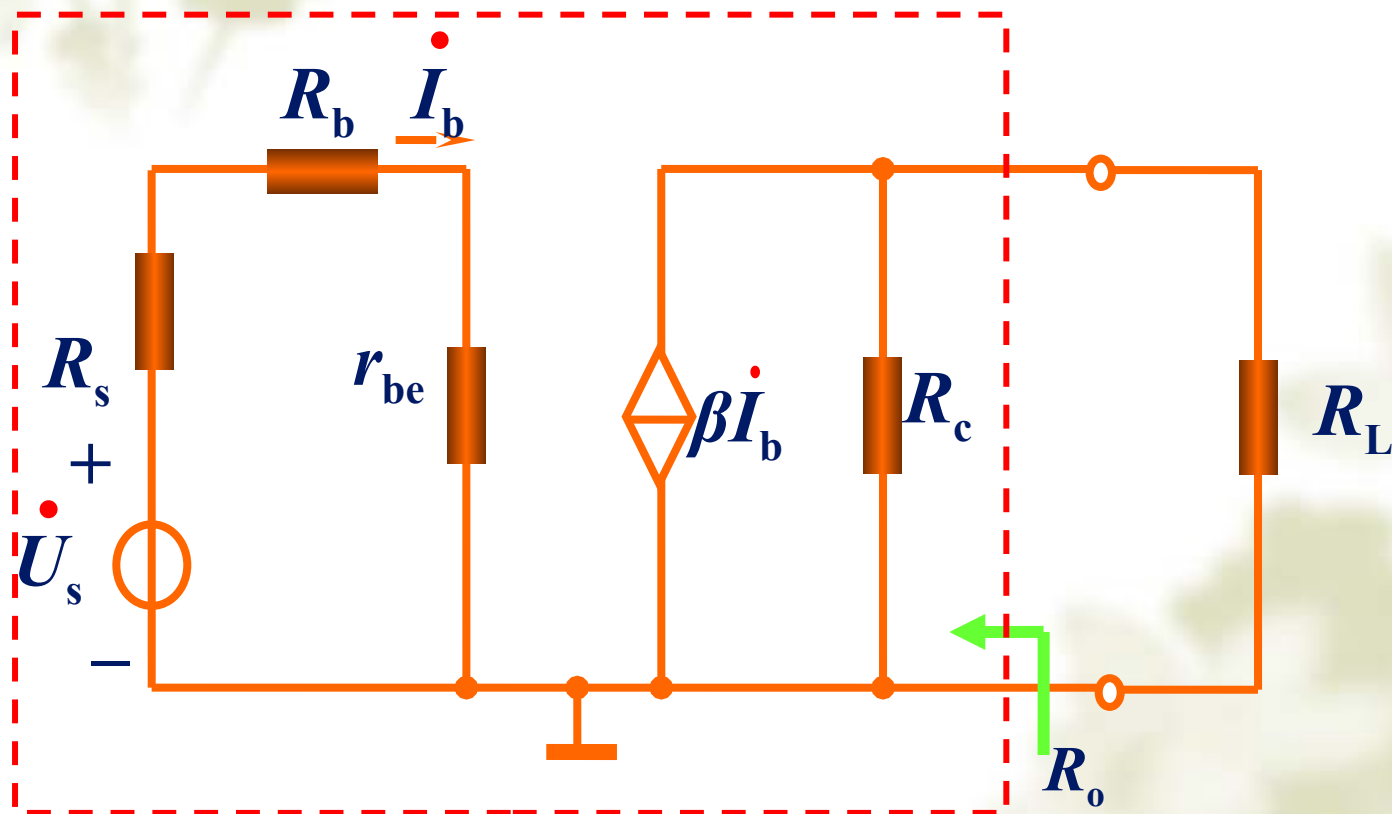


图 5-24 计算输出电阻  $R_o$  的等效电路



### (3) 计算输入电阻和输出电阻

#### 计算输出电阻 $R_o$

将信号源短路，即  $\dot{U}_s = 0$ ，负载电阻  $R_L$  开路，外加交流信号源  $\dot{U}_o$ ，电流源支路开路。

$$R_o = \frac{\dot{U}_o'}{\dot{I}_o'} \Big|_{\dot{U}_s=0, R_L=\infty}$$

$$R_o = \dot{U}_o' / \dot{I}_o' = R_c$$

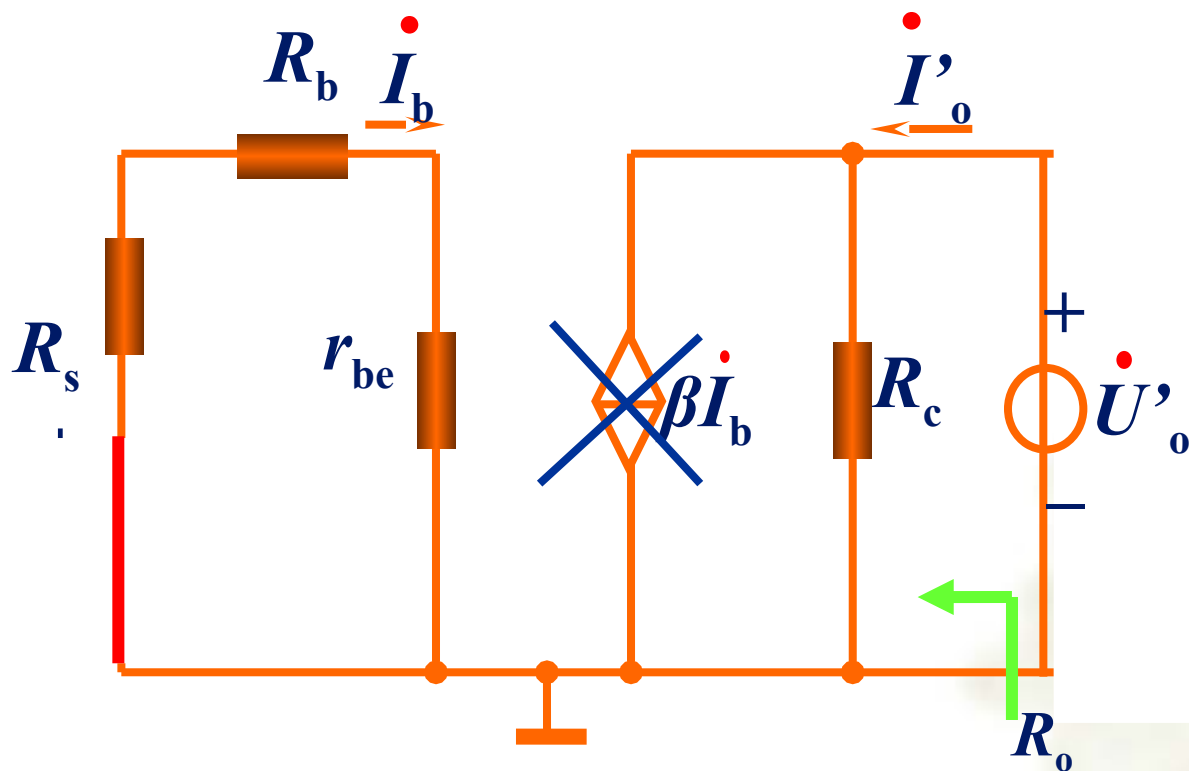


图 5-24 计算输出电阻  $R_o$  的等效电

# 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  $U_{omax}$



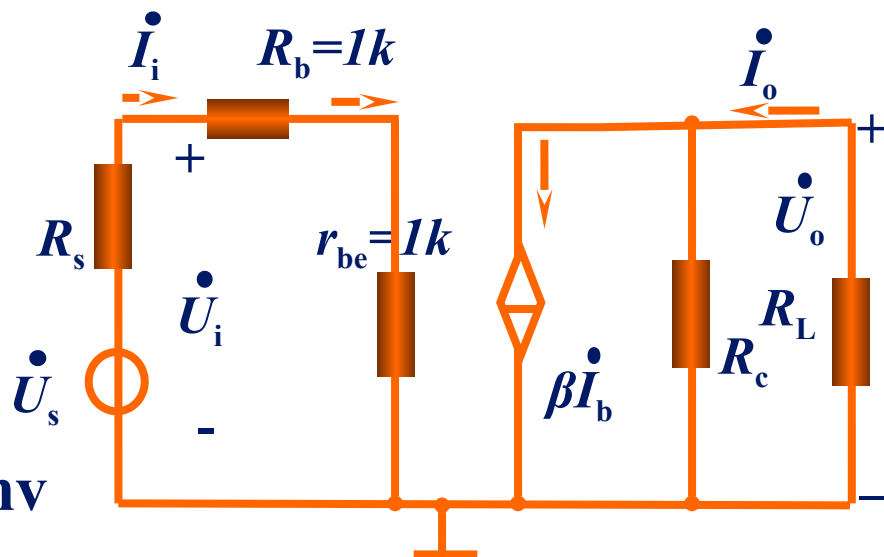
什么是最大输出电压？  
为什么输出电压有限制？

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta R'_L}{R_b + r_{be}}$$

假设放大倍数等于 10 倍

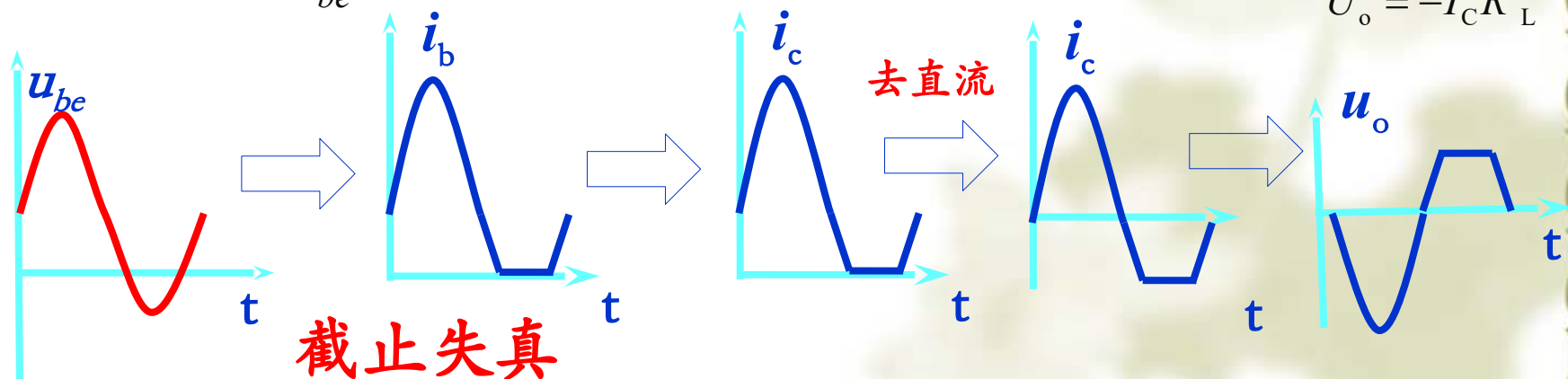
$U_{im}$  幅度值为 1mV, 则  $U_{om}=10\text{mV}$

$U_{im}$  幅度值为 2V, 则  $U_{om}=20\text{V}$  ✗



(b) 微变等效电路

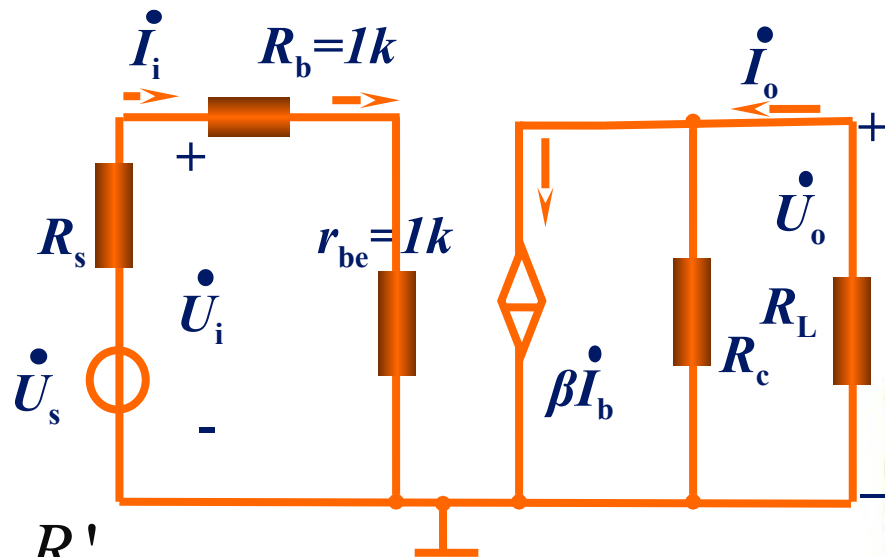
电路是用 **叠加原理** 分析，任何一点都是交流直流叠  
加。交直流叠加  $u_{be} = 1 \sin \omega t + 0.7\text{V}$



思考：减小  $u_i$ , 什么时候刚好不发生截止失真？

# 什么是最大输出电压?

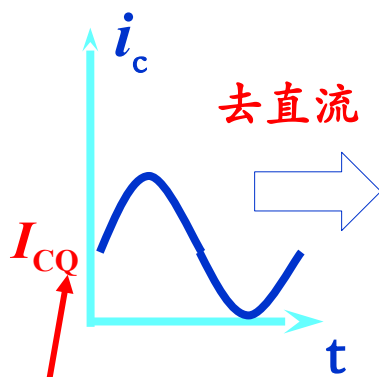
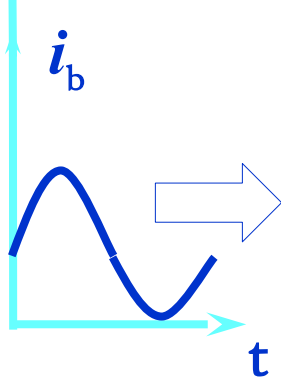
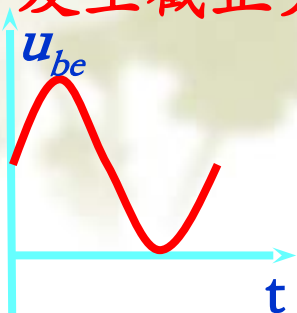
减小  $u_i$ , 什么时候刚好不发生截止失真?



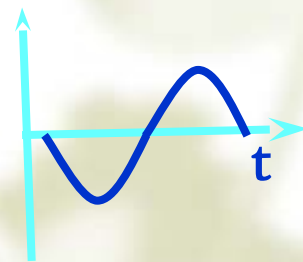
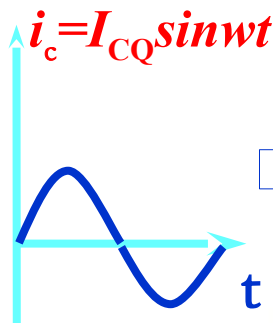
$$\dot{U}_o = -\dot{I}_C R'_L$$

(b) 微变等效电路

$$u_o = -I_{CQ} R'_L \sin \omega t$$



去直流



极限情况, 交流  $i_c$  幅度值不能大于  $I_{CQ}$

所以不发生截止失真下 输出的最大电压幅度值为

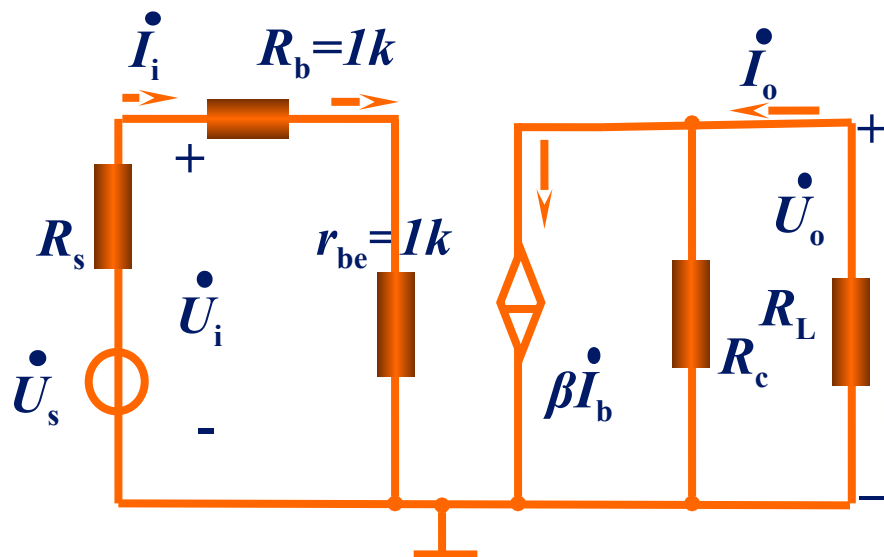
$$I_{CQ} R'_L$$

什么是最大输出电压？  
为什么输出电压有限制？

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta R'_L}{R_b + r_{be}}$$

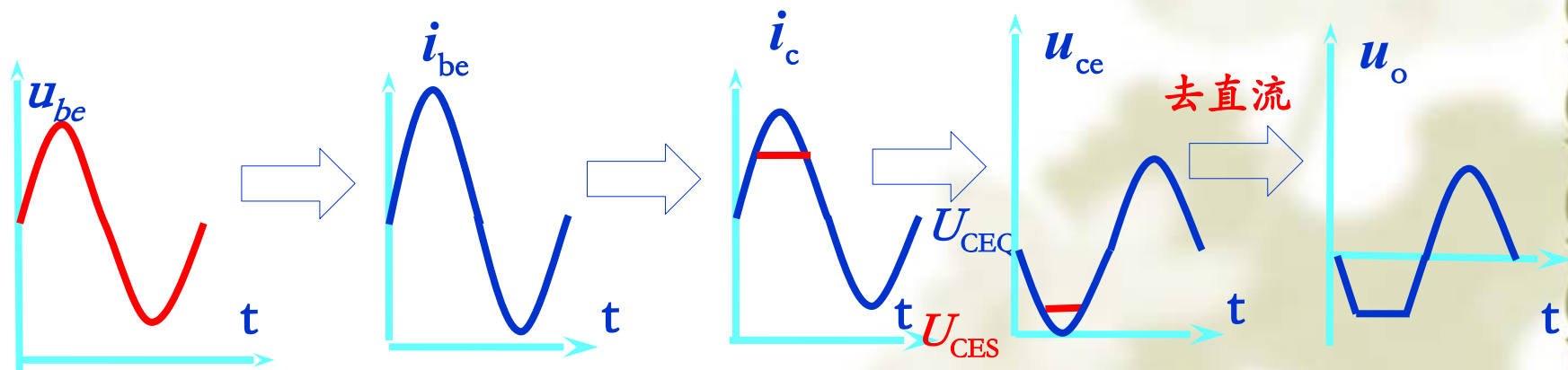
假设放大倍数等于 100 倍

$U_{im}$  幅度值为 100mV, 则  ~~$U_{om}$~~  = 10V



(b) 微变等效电路

$$u_{ce} = U_{CEQ} - I_C \sin \omega t \cdot R'_L$$



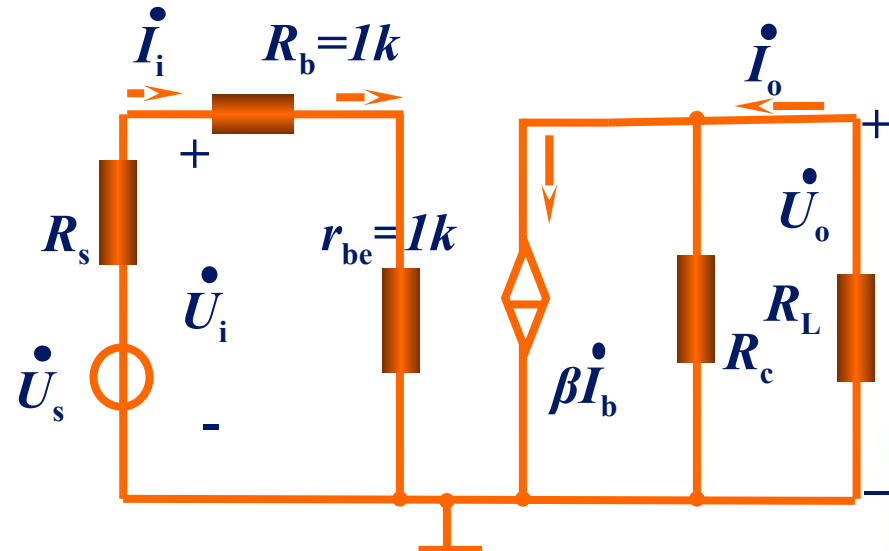
思考：减小  $u_i$ , 什么时候刚好不发生饱和失真 **饱和失真** 真？

什么是最大输出电压？  
为什么输出电压有限制？

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta R'_L}{R_b + r_{be}}$$

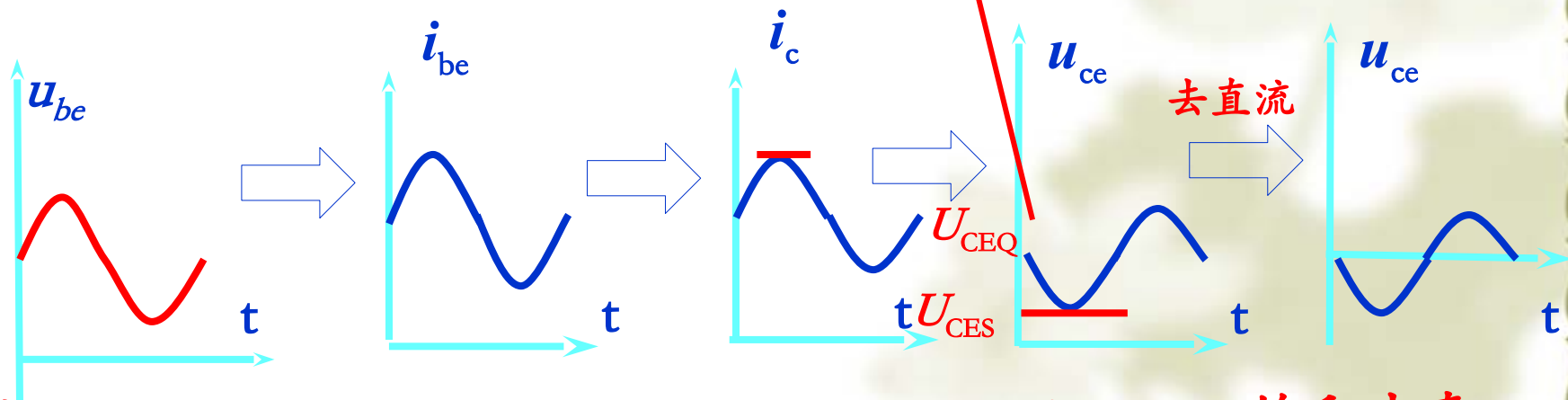
所以不发生饱和失真下  
输出的最大电压幅度值为

$$U_{OM} \leq U_{CEQ} - U_{CES}$$



(b) 微变等效电路

$$\begin{aligned} u_{ce} &= U_{CEQ} - I_C \sin \omega t \cdot R'_L \\ &= U_{CEQ} - U_{OM} \sin \omega t \geq U_{CES} \end{aligned}$$



减小  $u_i$ , 什么时候刚好不发生饱和失真？

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

$$U_{omax} = \min \{ U_{CEQ} - U_{CES}, I_{CQ} R'_L \}$$

- 在电路条件一定的情况下，将静态工作点设置得使  $U_{CEQ} - U_{CES} = I_{CQ} R'_L$ ，这时放大电路有最大的输出电压幅值  $U_{omax}$ ，或者说有最大的输出动态范围。

**作业 5-5 , 5-7,5-9**