

## 2.4 放大电路的动态分析

在静态分析基础上，分析电路中的交流分量之间关系。主要求出各种动态参数。

常用的分析方法 {  
    图解法  
    微变等效电路法

## 图解法的特点：

- (1) 便于观察。
- (2) 作图烦琐， $U_i$ 很小时难以作图。
- (3) 放大电路一些性能指标无法由图解法求得。

## 2.4.2 微变等效电路法在放大电路动态分析中的应用

### 1. 晶体管的H参数微变等效电路

(1) 晶体管线性化的条件：

电路工作在小信号状态。

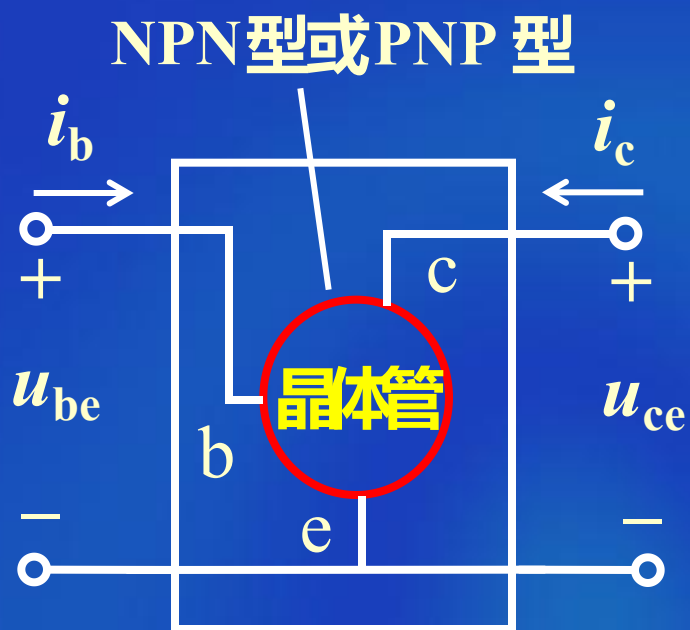
(2) 晶体管可线性化的主要依据：

a.  $\Delta i_B$  与  $\Delta u_{BE}$  之间具有线性关系

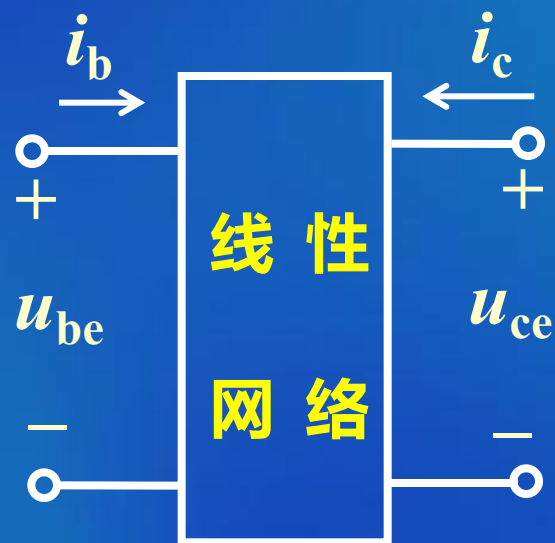
b.  $\beta$  值恒定

# 晶体管共射极接法线性化原理

晶体管



等效图



# 晶体管线性等效电路的H参数描述

$$\begin{cases} u_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} u_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} u_{ce} \end{cases}$$

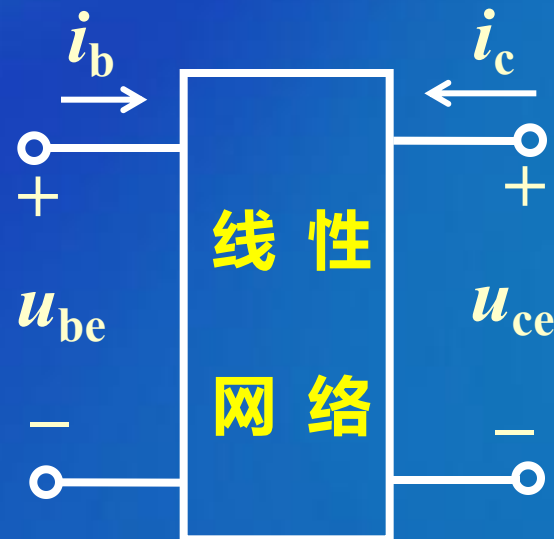
式中

$$h_{ie} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_{U_{ce}=0} = \left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B} \right|_{\Delta U_{CE}=0}$$

$$h_{re} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \right|_{I_b=0} = \left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta u_{CE}} \right|_{\Delta i_B=0}$$

$$h_{fe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{U_{ce}=0} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_{\Delta u_{CE}=0}$$

$$h_{oe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_{I_b=0} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta u_{CE}} \right|_{\Delta i_B=0}$$

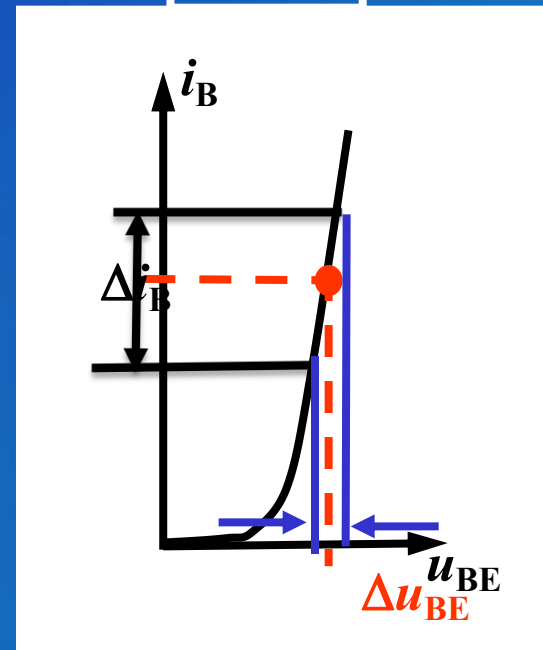
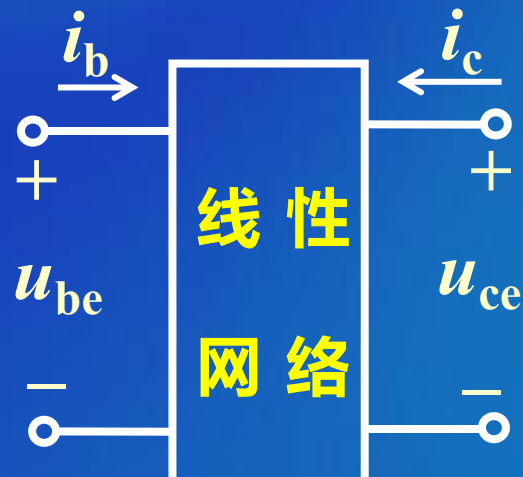


# 晶体管线性等效电路的H参数描述

$$\begin{cases} u_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} u_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} u_{ce} \end{cases}$$

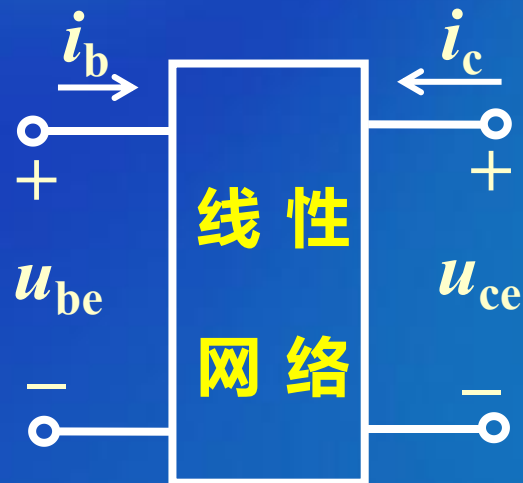
式中

$$h_{ie} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_{U_{ce}=0} = \left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B} \right|_{\Delta U_{CE}=0}$$



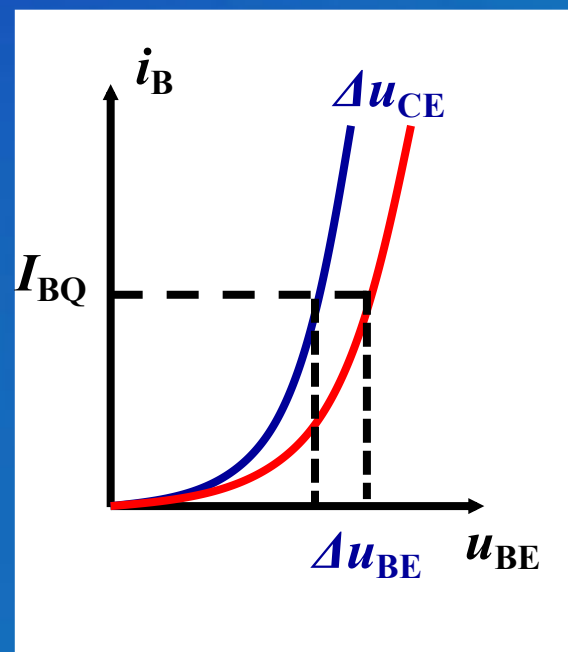
## 晶体管线性等效电路的H参数描述

$$\begin{cases} u_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} u_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} u_{ce} \end{cases}$$



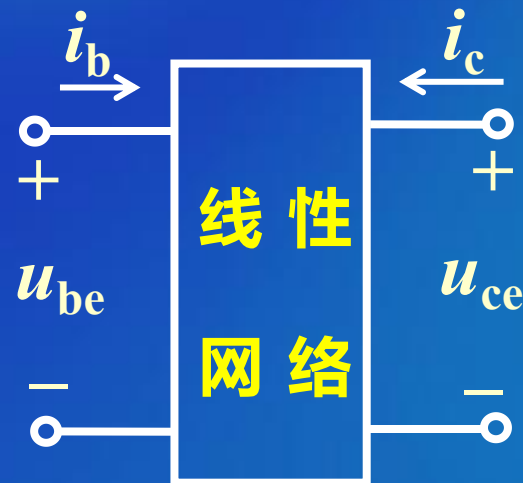
式中

$$h_{re} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \right|_{I_b=0} = \left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta u_{CE}} \right|_{\Delta i_B=0}$$



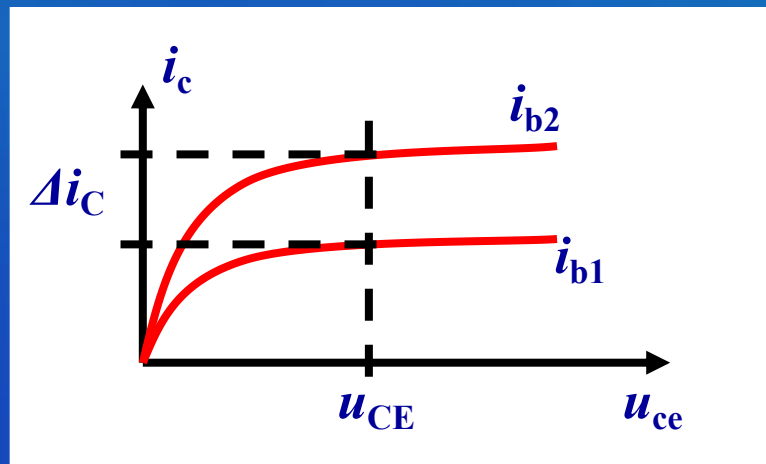
# 晶体管线性等效电路的H参数描述

$$\begin{cases} u_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} u_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} u_{ce} \end{cases}$$



式中

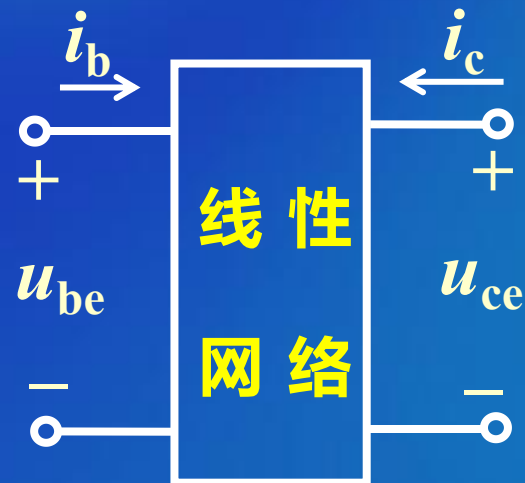
$$h_{fe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{U_{ce}=0} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_{\Delta u_{CE}=0}$$





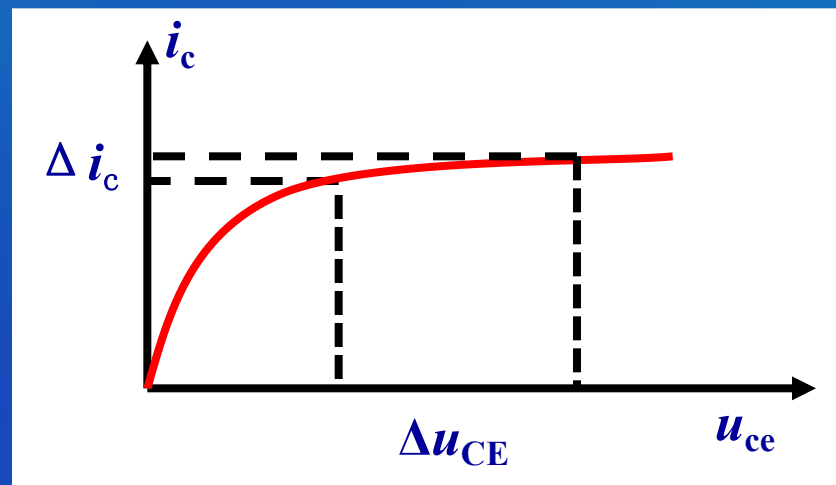
# 晶体管线性等效电路的H参数描述

$$\begin{cases} u_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} u_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} u_{ce} \end{cases}$$

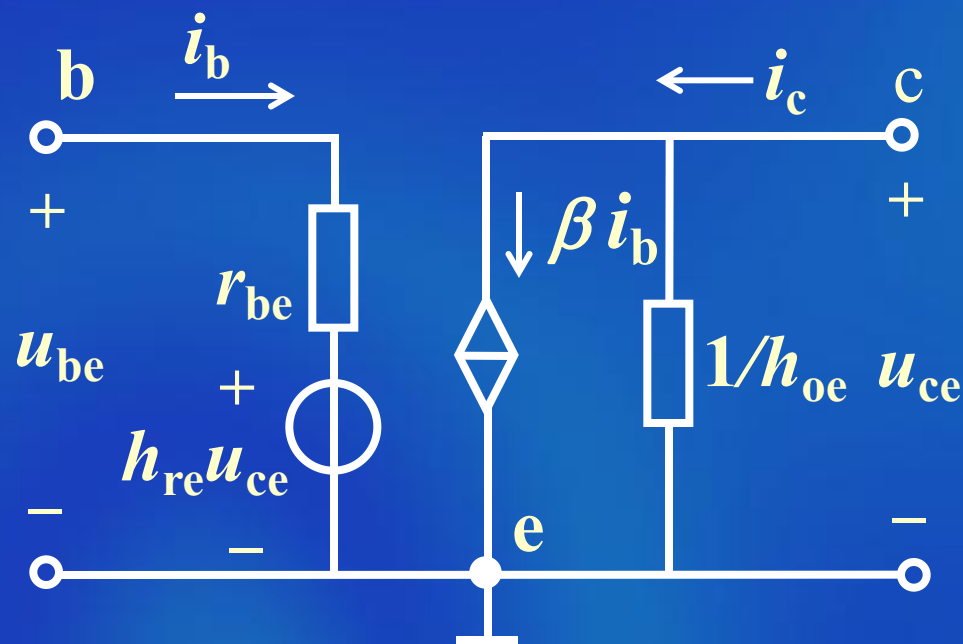


式中

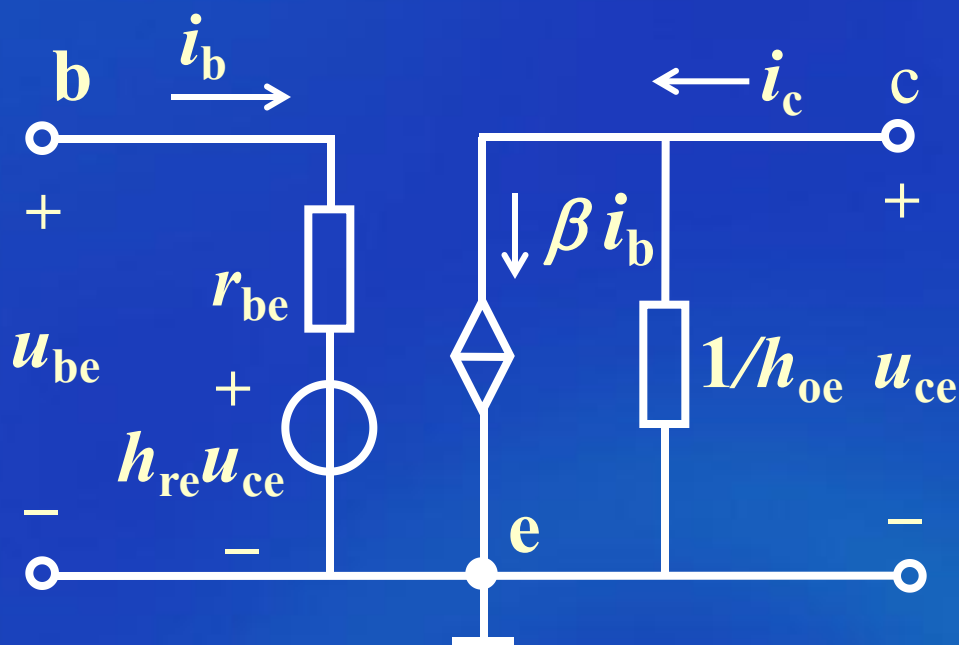
$$h_{oe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_{I_b=0} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta u_{CE}} \right|_{\Delta i_B=0}$$



由  $\begin{cases} u_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} u_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} u_{ce} \end{cases}$  可画出等效电路



晶体管的微变等效电路



图中

$$r_{be} = h_{ie} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{|I_{EQ}|}$$

称为晶体管的输入交流等效电阻

$U_T$ —热电压 在室温 ( $T=300K$ ) 时,  $U_T \approx 26mV$

式中  $r_{bb'} = 300\Omega$  称为晶体管的基区体电阻

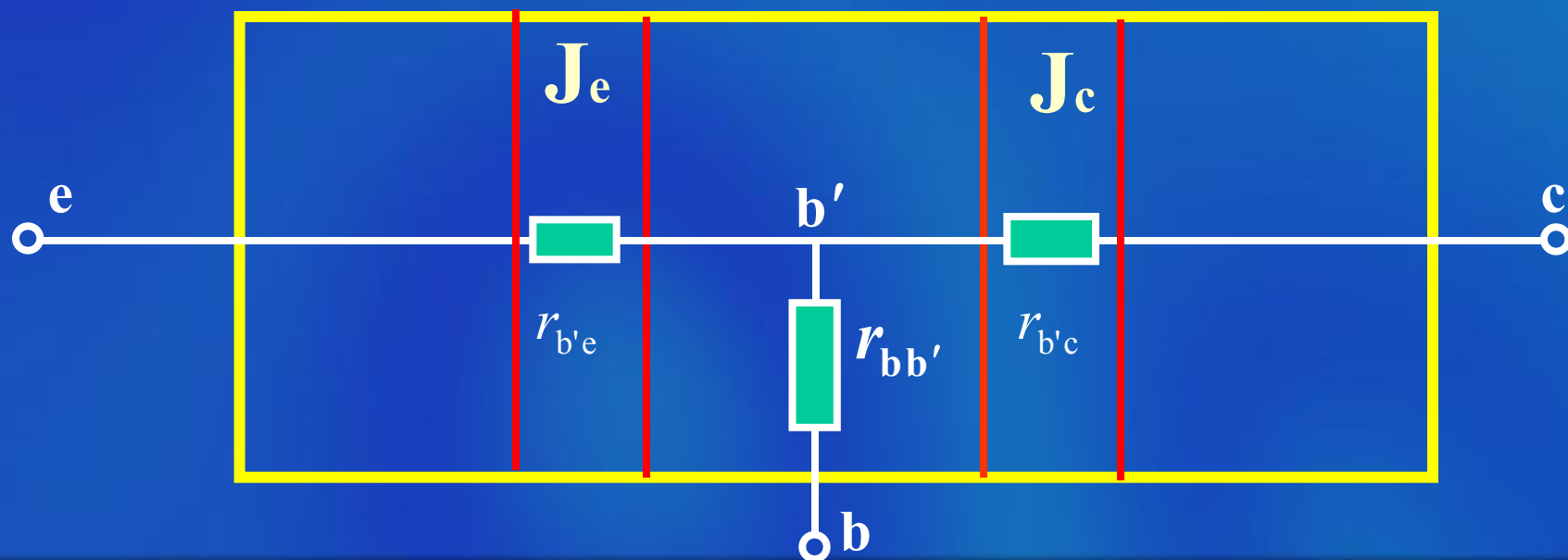
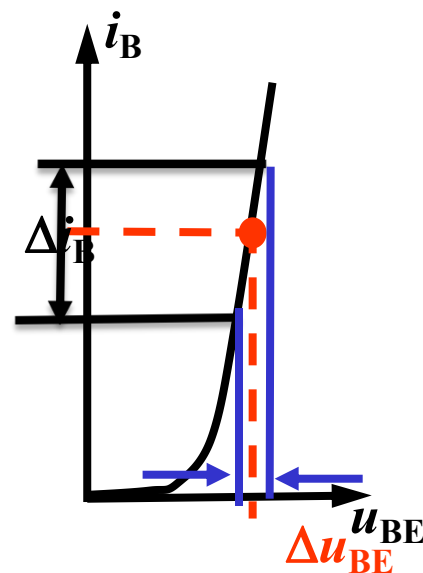
# 交流输入电阻的计算:

$$u_{be} = i_b r_{bb'} + (1 + \beta) i_b r_{b'e}$$

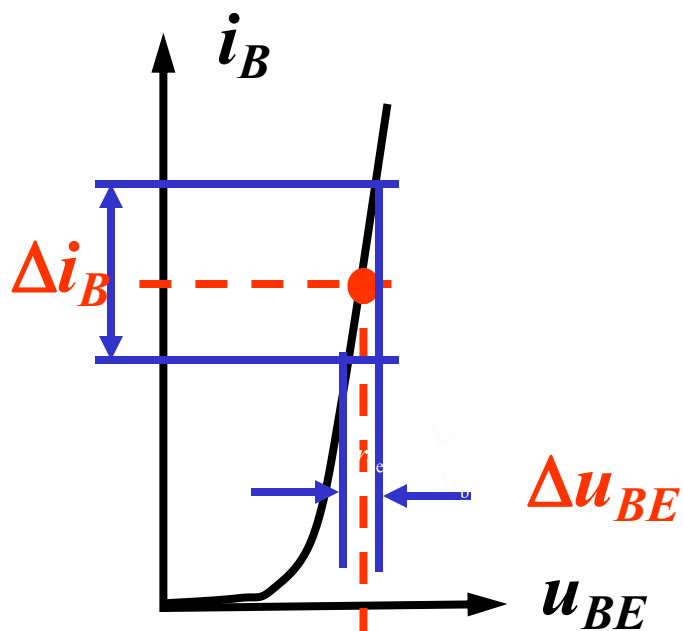
$$r_{be} = \frac{u_{be}}{i_b} = r_{bb'} + (1 + \beta) r_{b'e}$$

**P19, 公  
式  
( 1.2.6 )**

$$r_{b'e} = \frac{U_T}{I_{EQ}}$$



当信号很小时，将输入特性  
在小范围内近似线性。



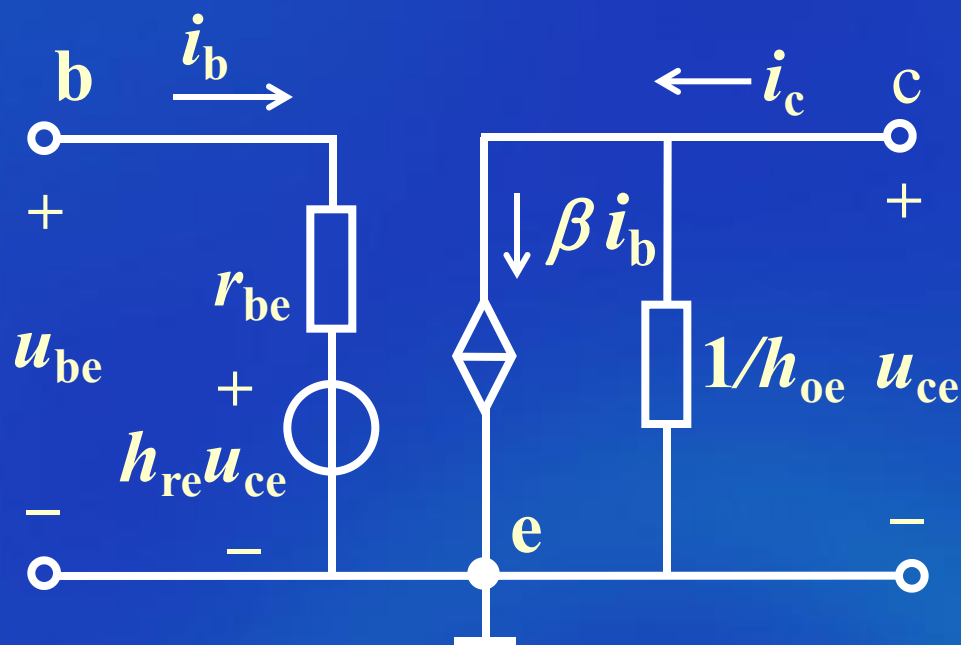
$$r_{be} = \frac{\Delta u_{be}}{\Delta i_b}$$

对输入的小交流信号而言，  
三极管相当于电阻  $r_{be}$ 。

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{|I_{EQ}|}$$

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

$r_{be}$  的量级从几百欧到  $1 \sim 4\text{k}\Omega$ 。



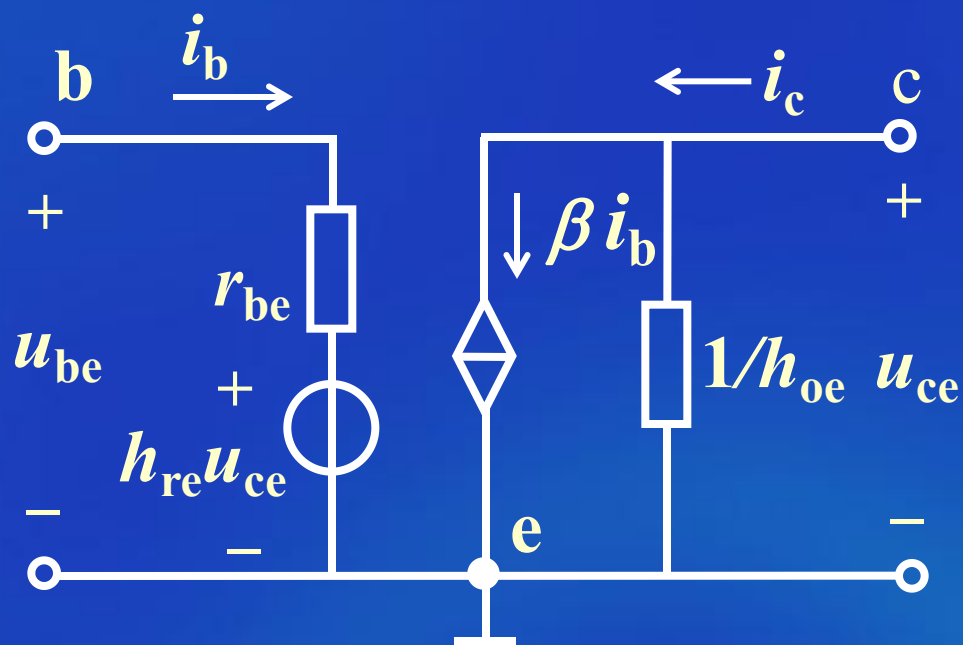
图中

$$r_{be} = h_{ie} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{|I_{EQ}|}$$

称为晶体管的交流等效  
输入电阻

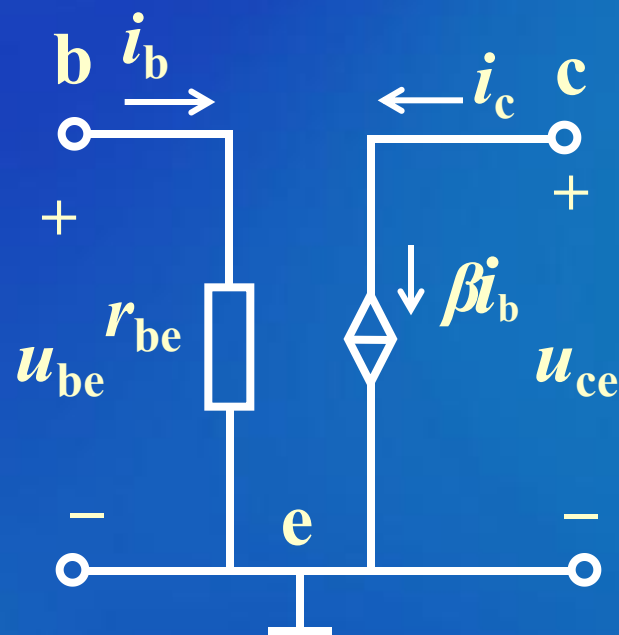
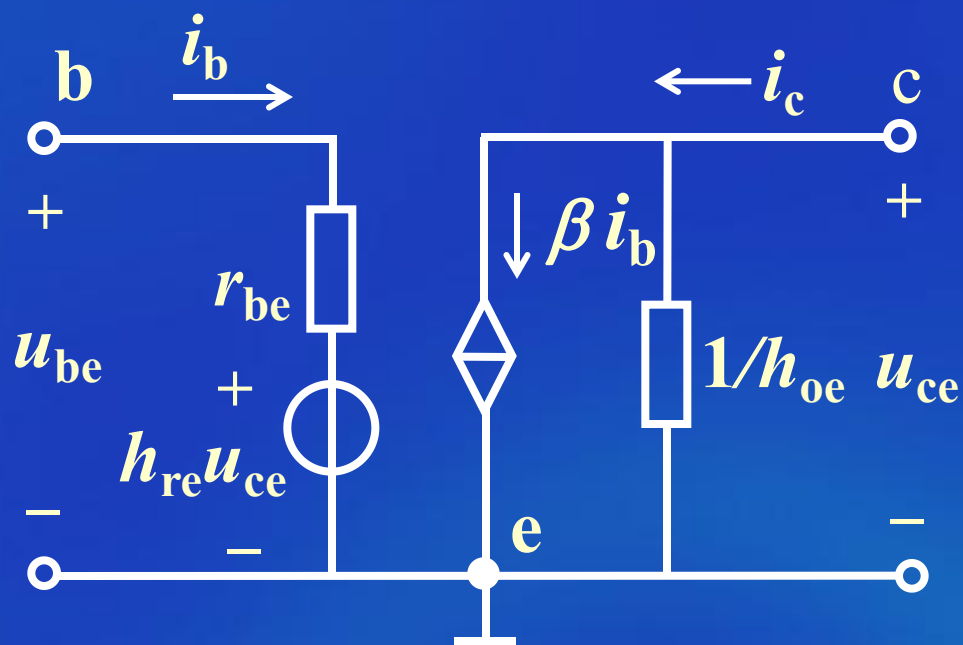
$h_{re}$ —反向传输电压比

$\beta = h_{fe}$  电流放大系数



$$h_{oe} = \frac{1}{r_{ce}} = \frac{|I_{CQ}|}{U_A}$$

称为晶体管共射极输出电导

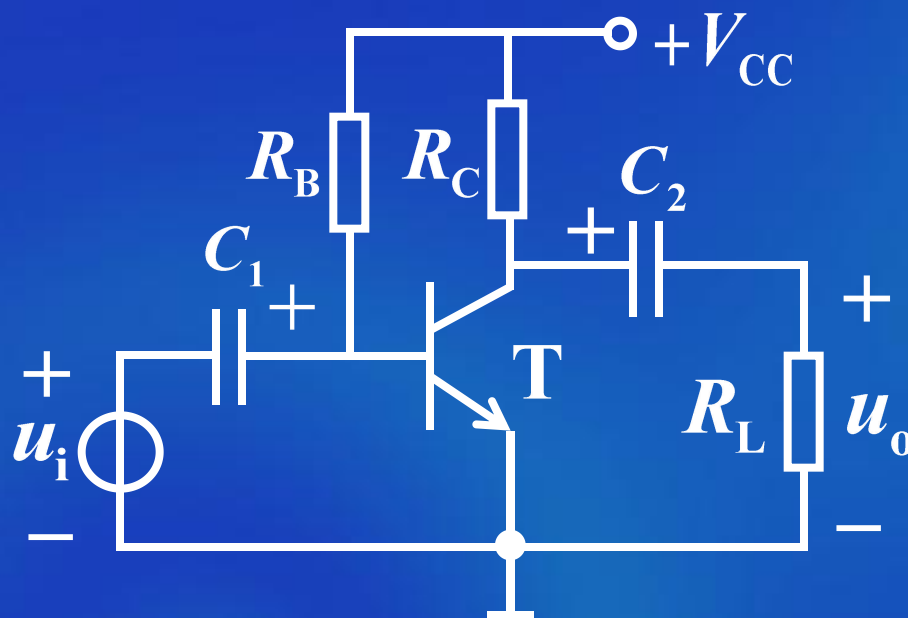


$h_{re}$ 、 $h_{oe}$ 一般比较小，可忽略不计

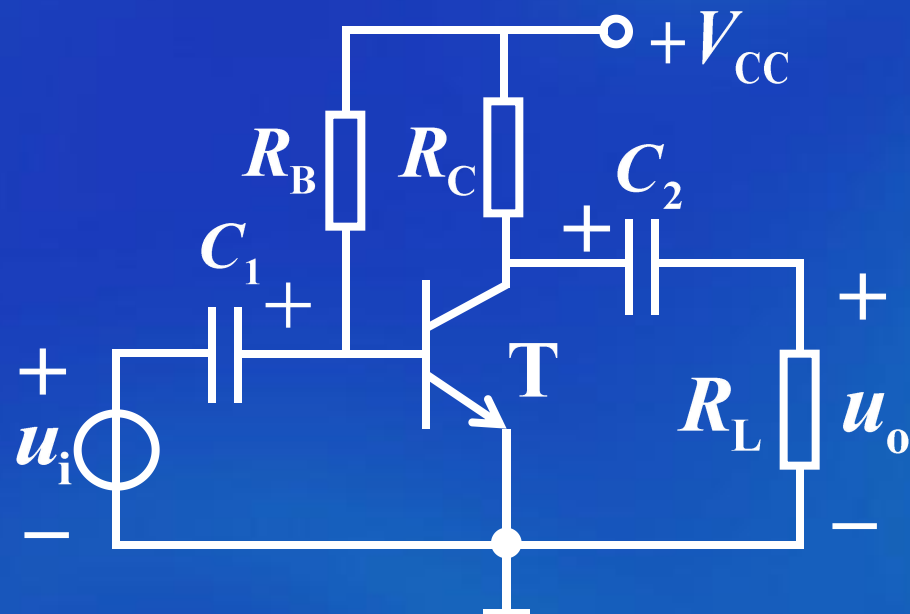
晶体管微变等效简化电路



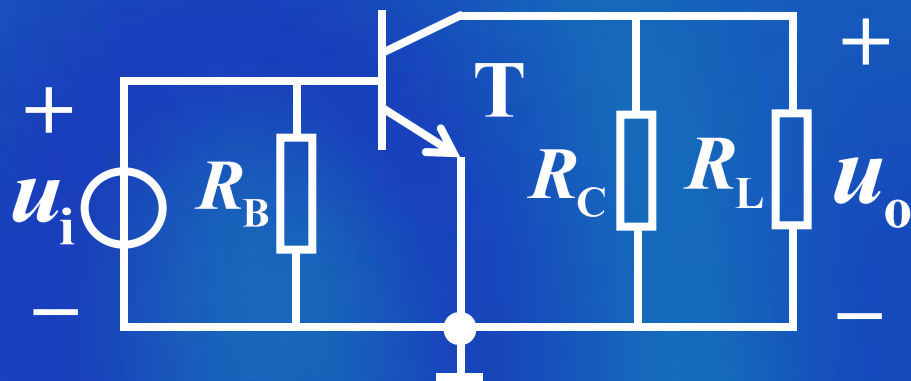
## 2. 微变等效电路法在放大电路动态分析中的应用

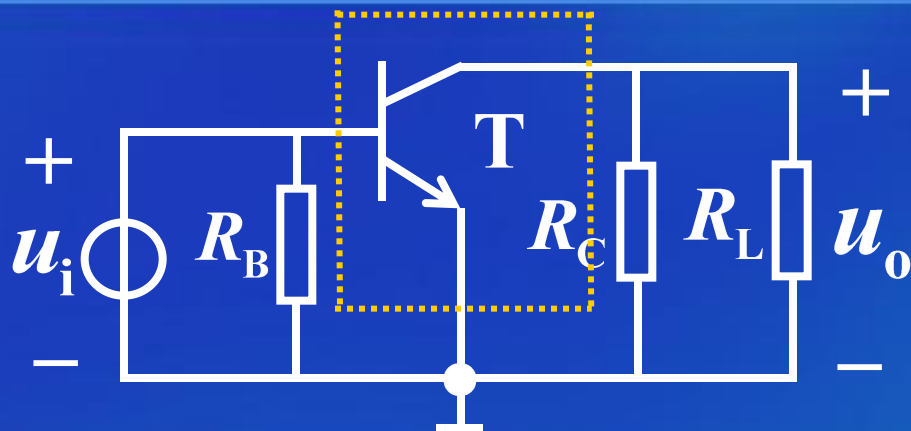


(1) 画出放大电路的交流通路



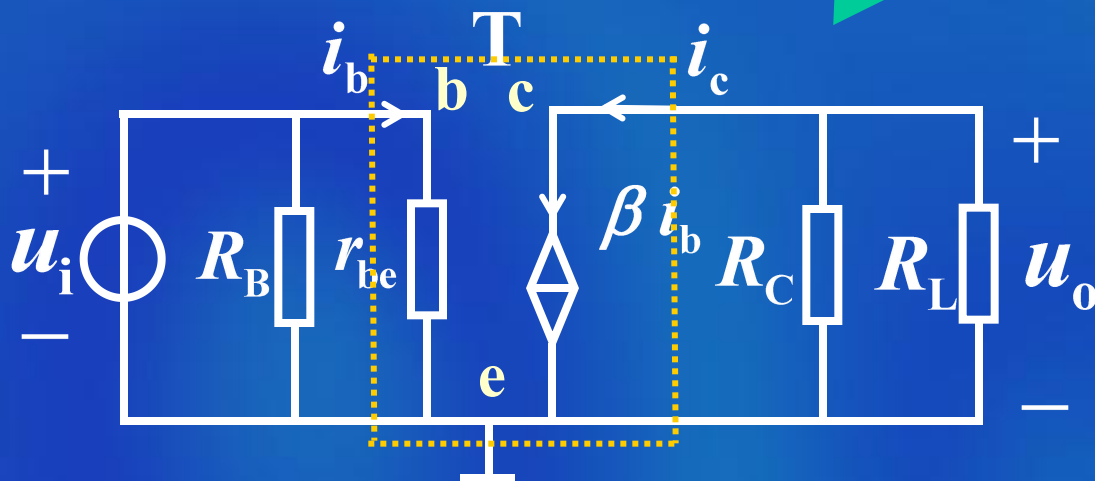
交流通路





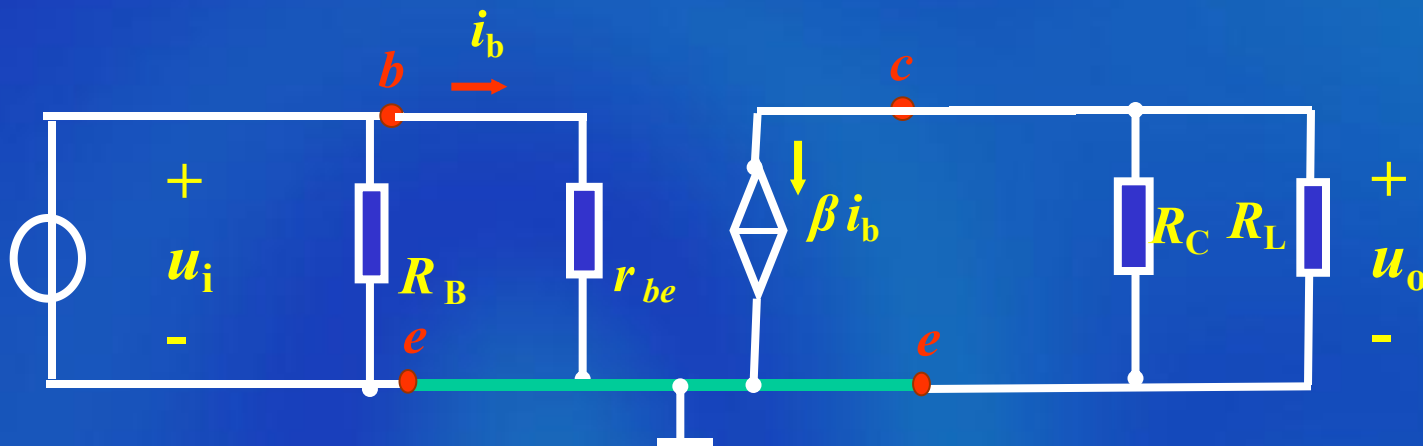
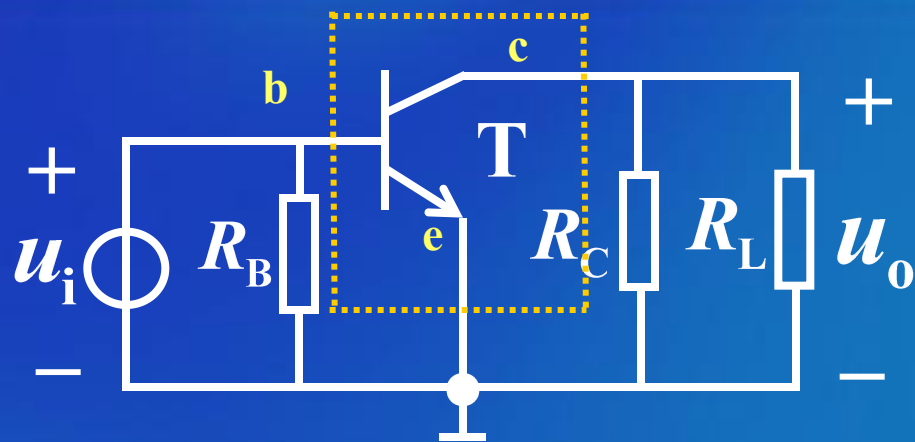
(2) 将晶体管微变等效

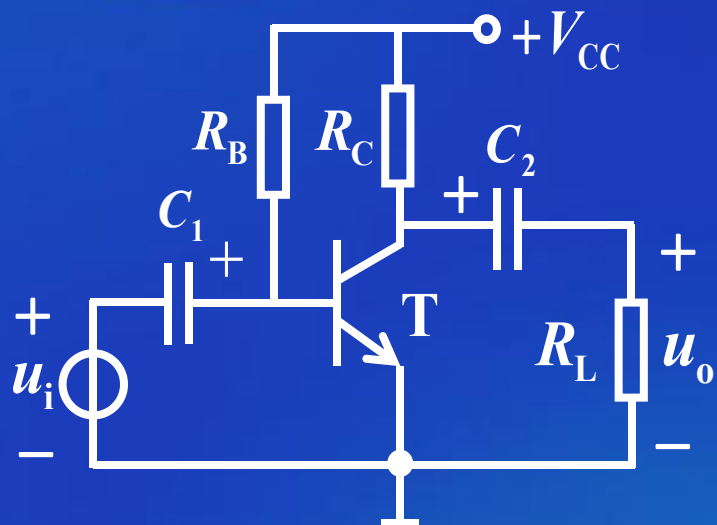
放大电路的微变等效电路



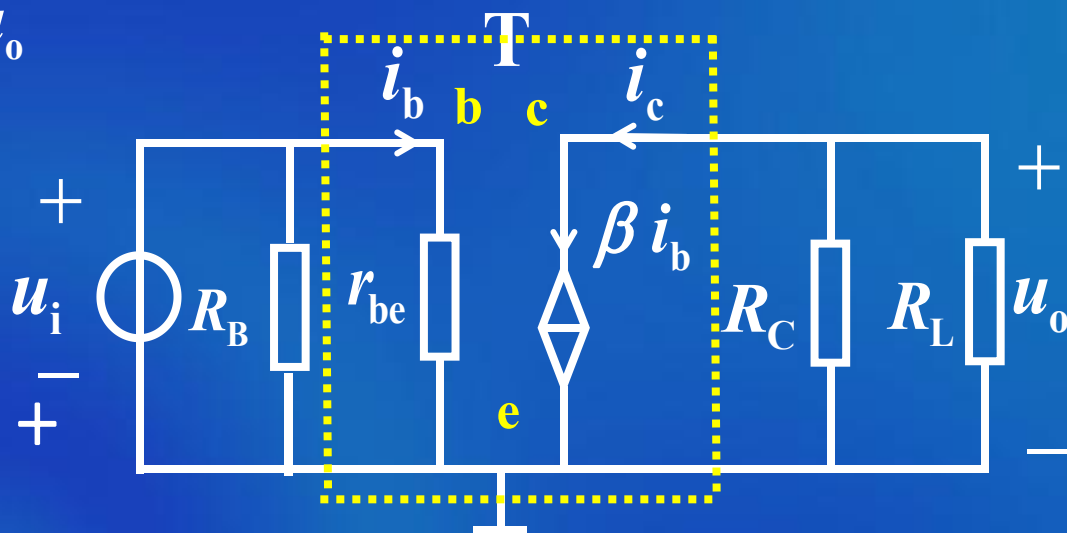
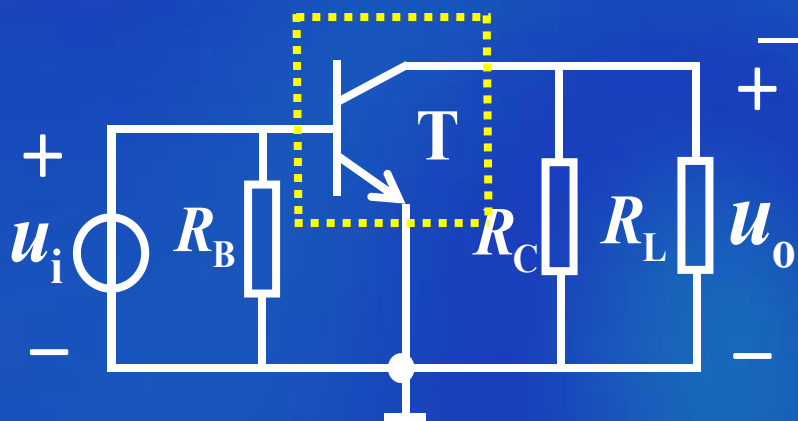
微变等效电路画法：

先中间，后两边



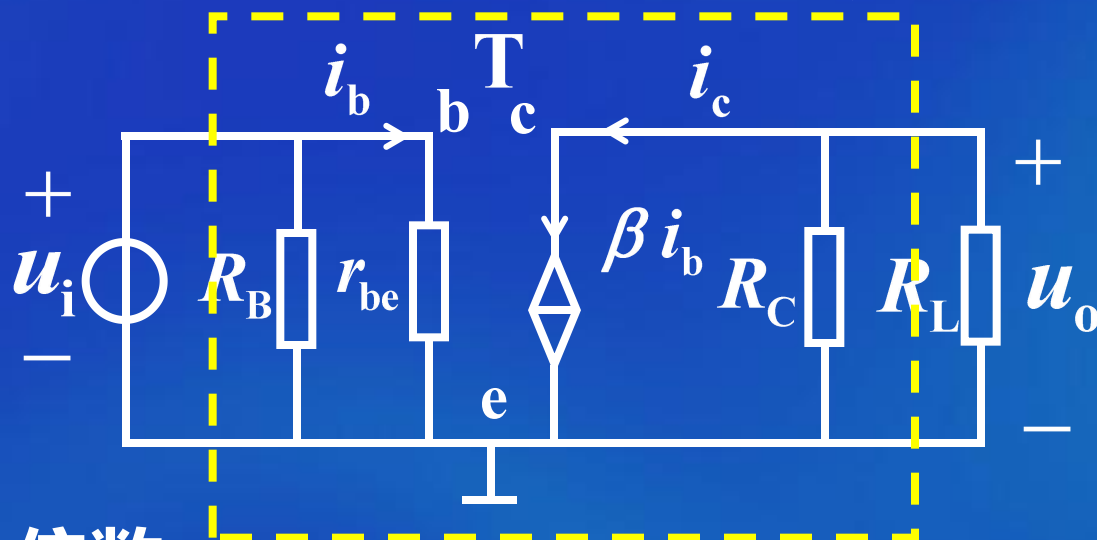


# 放大电路的微变等效电路



交流通路

## (2) 放大电路的主要性能指标的计算



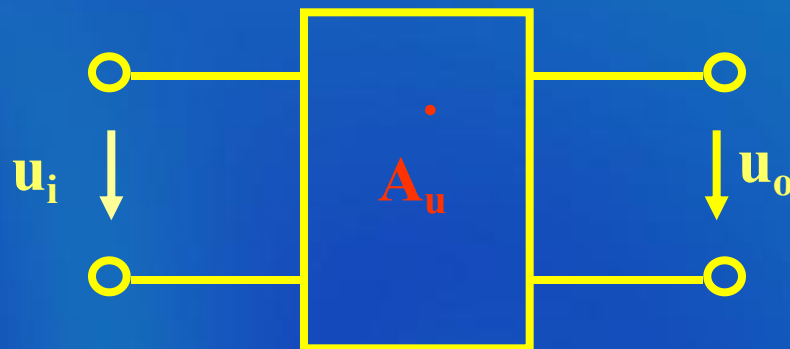
a. 电压放大倍数

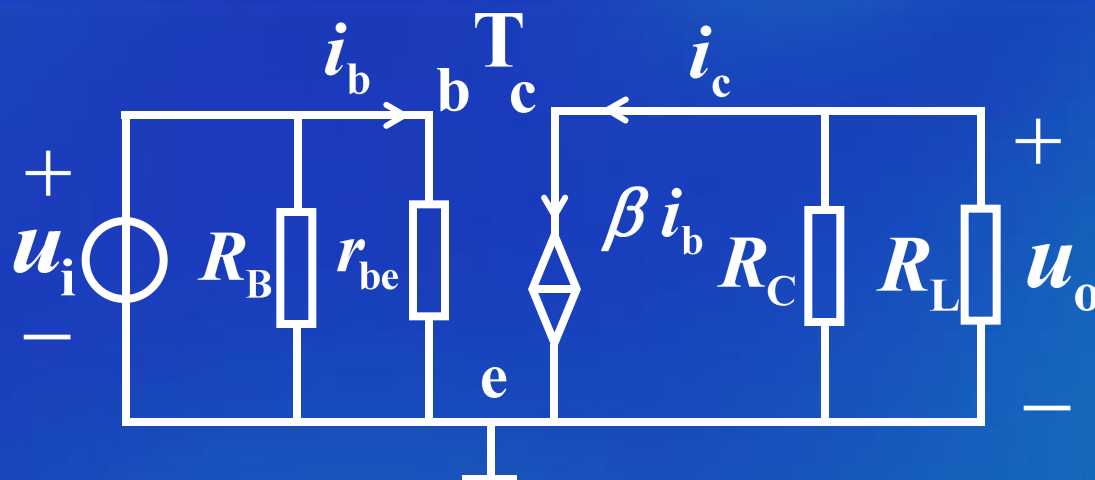
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

式中

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be}$$

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





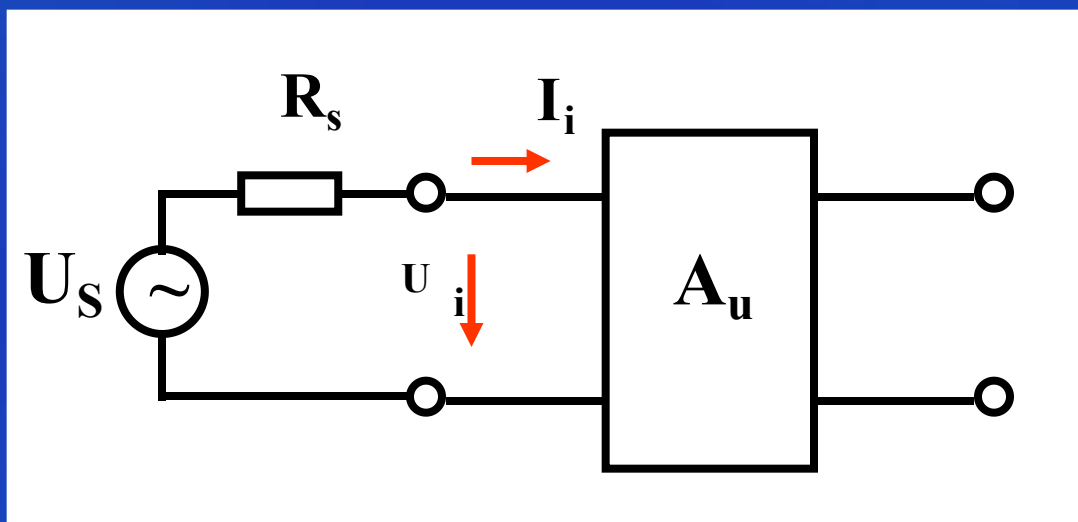
故

$$\begin{aligned} \dot{A}_u &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \\ &= \frac{-\beta \dot{I}_b (R_C // R_L)}{\dot{I}_b r_{be}} \\ &= -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \end{aligned}$$

$u_o$ 与 $u_i$ 相位相反

式中

$$R'_L = R_L // R_C$$

b、输入电阻 $R_i$ 

定义：

$$R_i = \frac{U_i}{I_i}$$

放大电路一定要有前级（信号源）为其提供信号，那么就要从信号源取电流。输入电阻是衡量放大电路从其前级取电流大小的参数。输入电阻越大，从其前级取得的电流越小，对前级的影响越小。

即： $R_i$  越大， $I_i$  就越小， $u_i$  就越接近  $u_s$

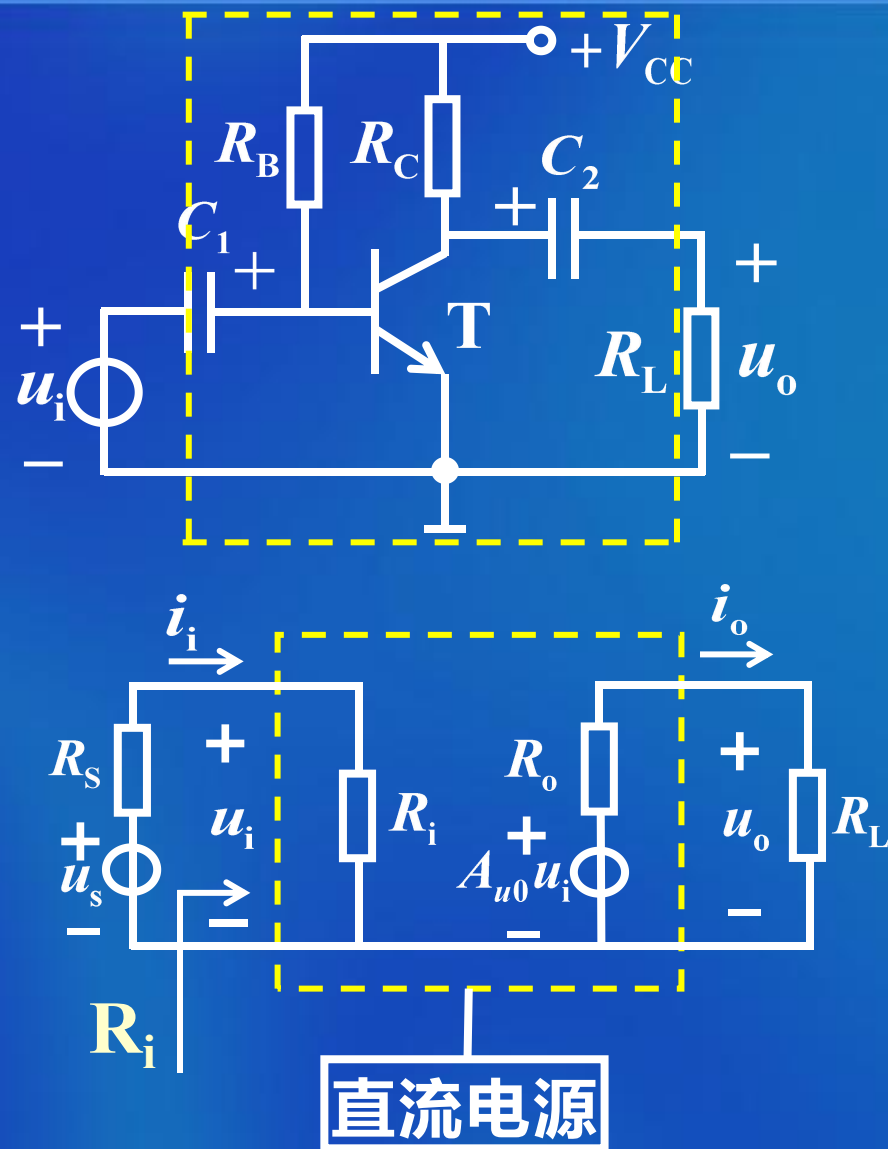


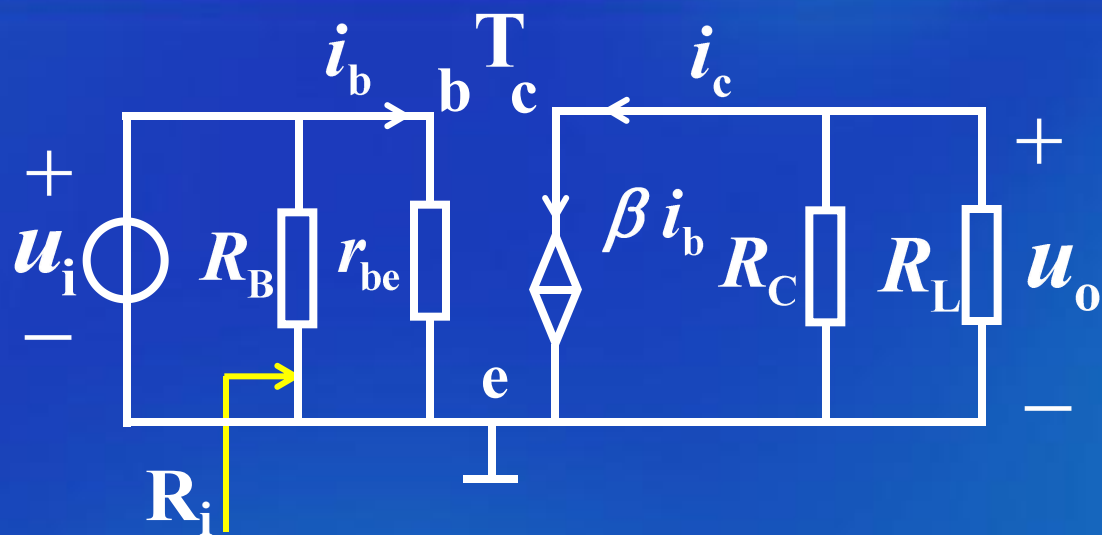
**b. 输入电阻  $R_i$**   $R_i = \frac{U_i}{I_i}$

由于  $U_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} U_s$

**$R_i$  越大,  $U_i$  也就越大,  
 $U_o = A_u U_i$  也就越大  
 电路的放大能力越强。**

$$\begin{aligned} \dot{A}_{us} &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \\ &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \dot{A}_u \end{aligned}$$



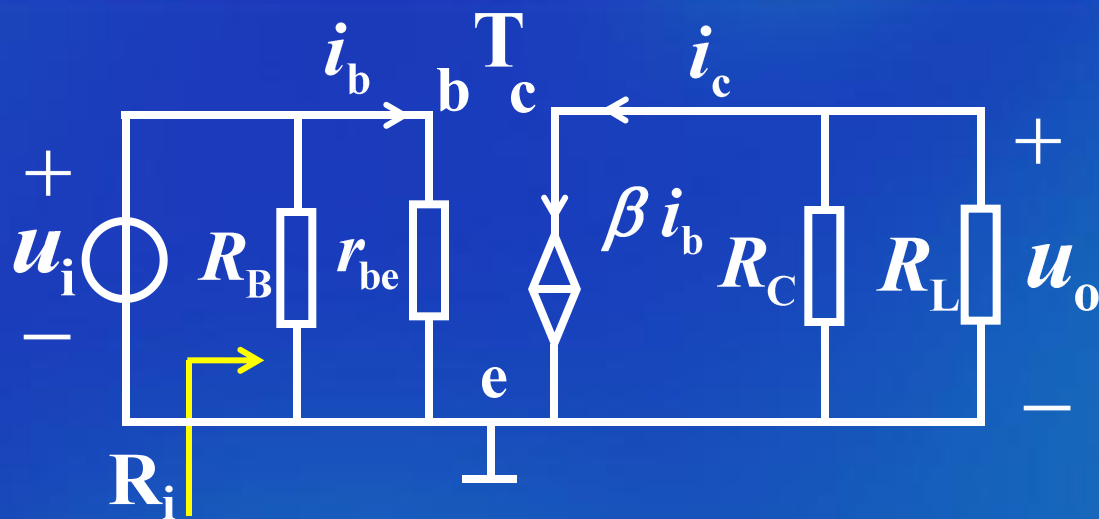


## b. 输入电阻 $R_i$

由图可知

$$R_i = \frac{U_i}{I_i}$$

$$I_i = \frac{U_i}{R_B} + \frac{U_i}{r_{be}}$$



故

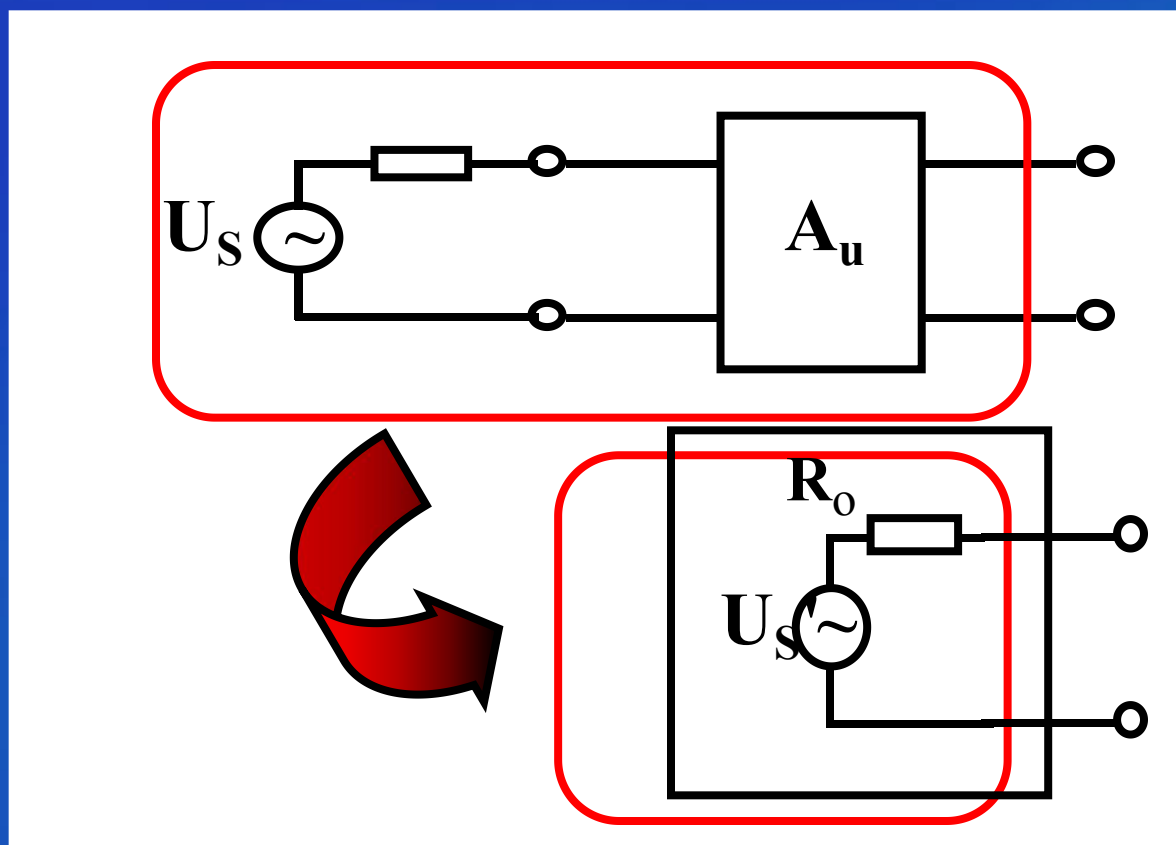
$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{\frac{U_i}{R_B} + \frac{U_i}{r_{be}}} = \frac{1}{\frac{1}{R_B} + \frac{1}{r_{be}}} = R_B // r_{be}$$

通常  $R_B \gg r_{be}$

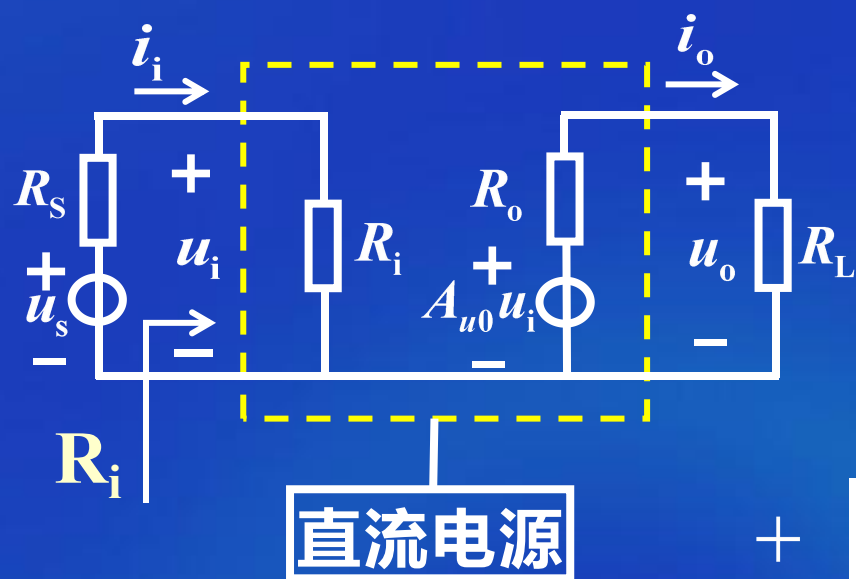
$$R_i \approx r_{be}$$

### c. 输出电阻 $R_o$

放大电路对其**负载**而言，相当于**负载**的信号源，我们可以将它等效为戴维南等效电路，这个等效电路的内阻就是放大电路的**输出电阻**。

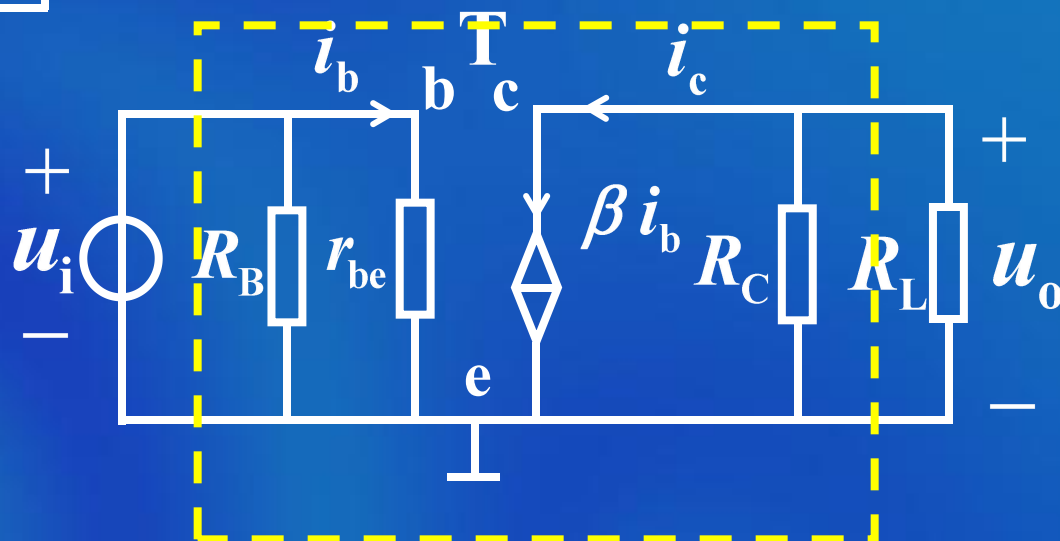


# c. 输出电阻 $R_o$



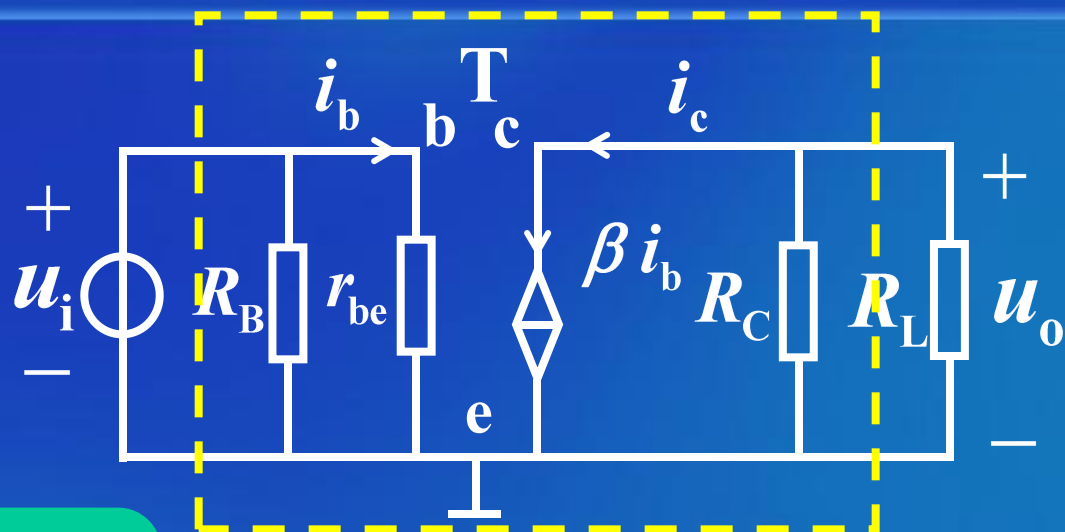
定义：

$$R_o = \frac{U}{I} \bigg|_{\substack{U_i=0 \\ R_L=\infty}}$$



定义：

$$R_o = \frac{U}{I} \bigg|_{\substack{U_i=0 \\ R_L=\infty}}$$



画出求输出电阻的等效电路

由图可知

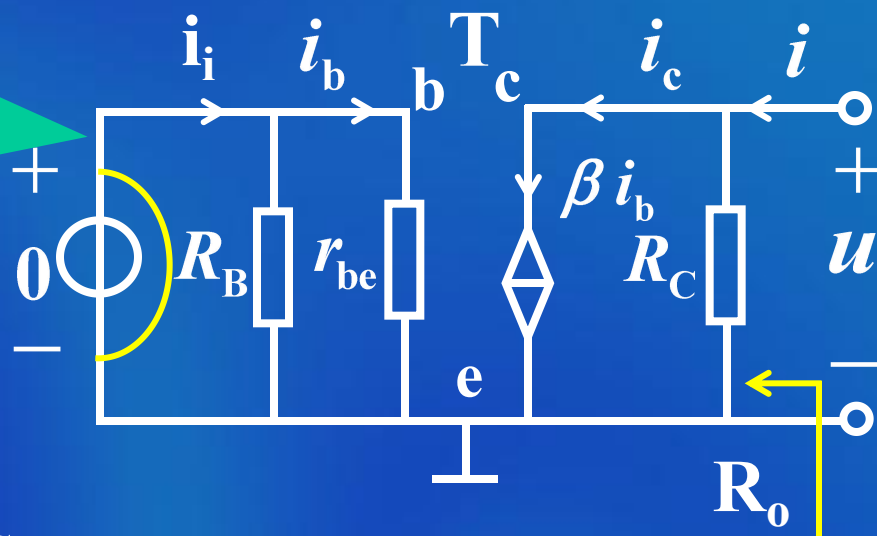
$$u_i = 0$$

$$i_b = 0$$

$$u_i = 0$$

故

$$R_o = \frac{U}{I} \bigg|_{\substack{U_i=0 \\ R_L=\infty}} = R_C$$



## 小 结

直流通路：只考虑直流信号的分电路。

交流通路：只考虑交流信号的分电路。

耦合电容开路

信号的不同分量可以  
分别在不同的通路分析。

耦合电容短路，直流电  
源接地

共射极放大电路的基本分析步骤：

1.直流分析用直流通路分析静态工作点

2.交流分析 用微变等效电路分析动态指标

三步法估算

$I_{BQ}$

$I_{CQ}$

$U_{CEQ}$

三步法

a.画出微变等效电路

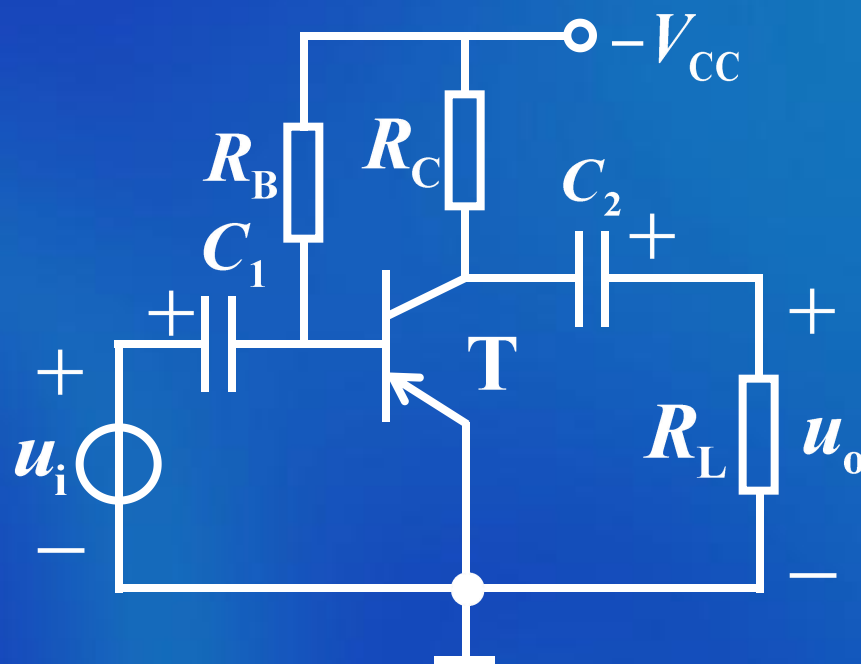
$r_{be}$  b.求出

c.求出3个指标 ( $R_i, R_o$ )

## [例]

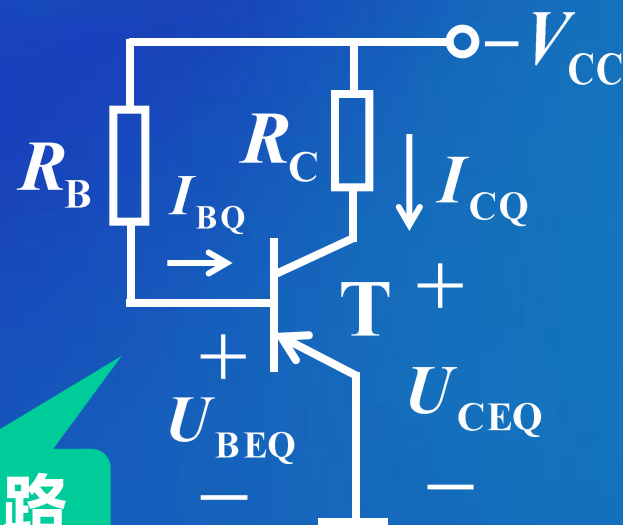
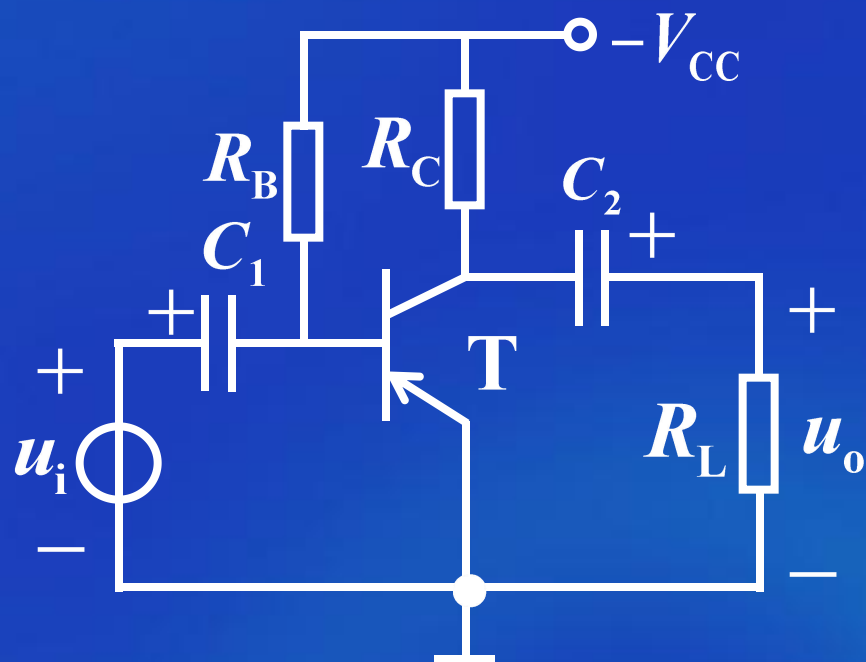
在图示电路中，已知： $V_{CC}=12V$ ， $R_C=2k\Omega$ ， $R_B=360k\Omega$ ；晶体管T为锗管  $\beta_{其}=\beta=60$ ， $r_{bb'}=300\Omega$ ； $C_1=C_2=10\mu F$ ， $R_L=2k\Omega$ 。试求：

- (a) 晶体管的 $I_{BQ}$ ， $I_{CQ}$  及 $U_{CEQ}$ ；
- (b) 放大电路的 $A_u$ ， $R_i$ ， $R_o$ 及  
 $U_{opp}$ 。



[解] (a) 画出放大电路的直流通路





直流通路

由图可知：

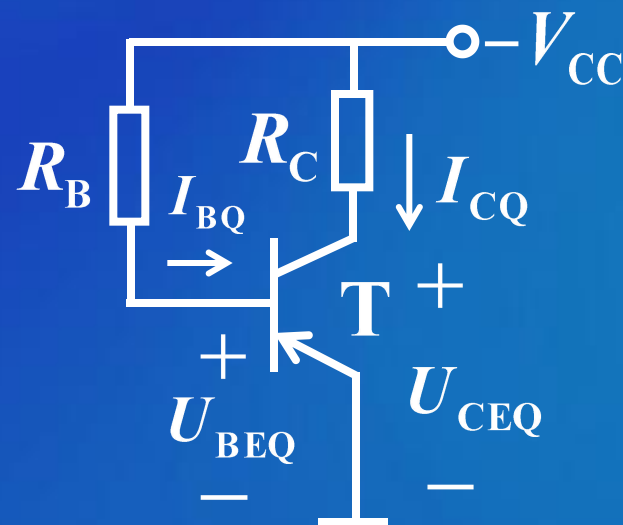
$$I_{BQ} = \frac{-V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B}$$

$$= \frac{-12 - (-0.3)}{360 \times 10^3}$$

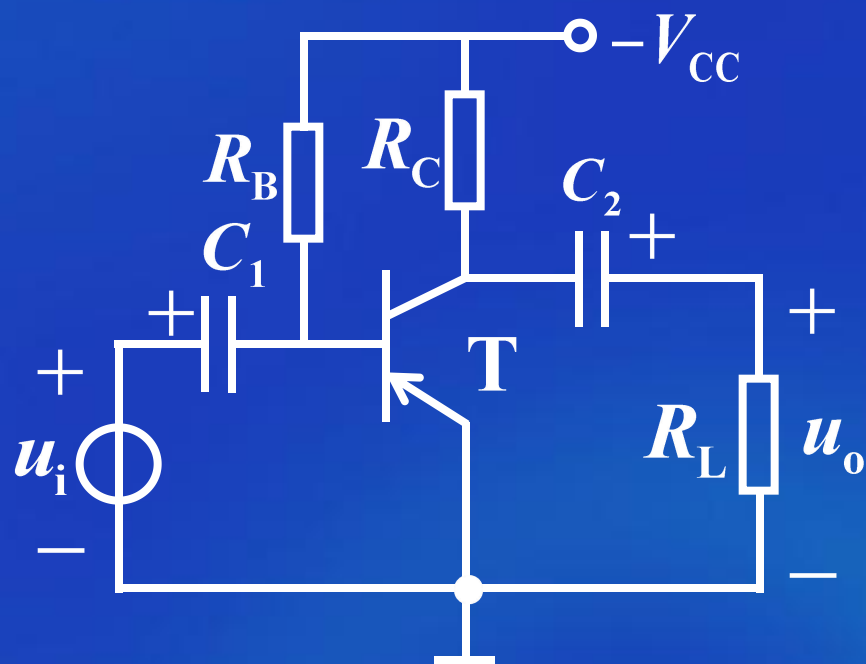
$$= -32.5 \mu\text{A}$$

$$\begin{aligned} I_{CQ} &= \bar{\beta} I_B \\ &= 60 \times (-32.5 \times 10^{-6}) \\ &= -1.95 \text{ mA} \end{aligned}$$

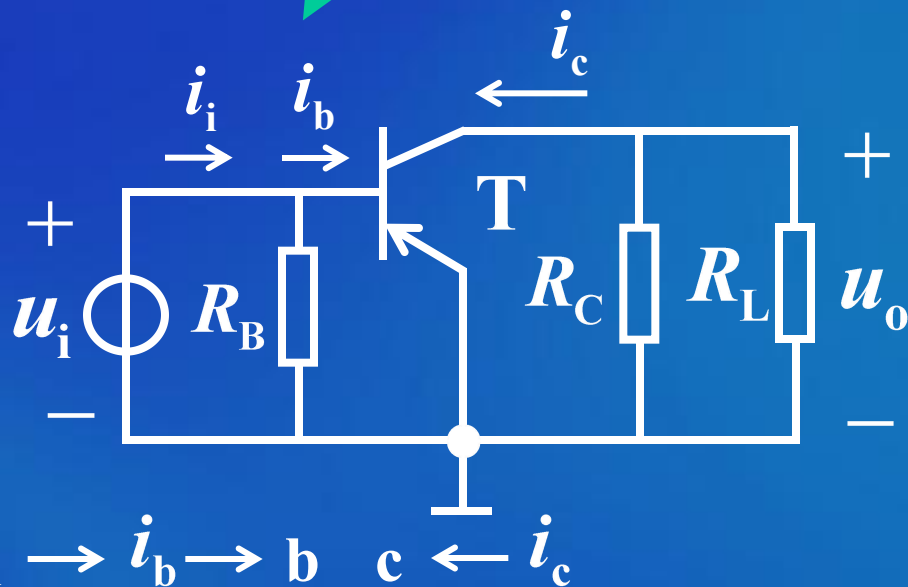
$$\begin{aligned} U_{CEQ} &= -V_{CC} - I_{CQ} R_C \\ &= -12 - (-1.95) \times 2 \\ &= -8.1 \text{ V} \end{aligned}$$



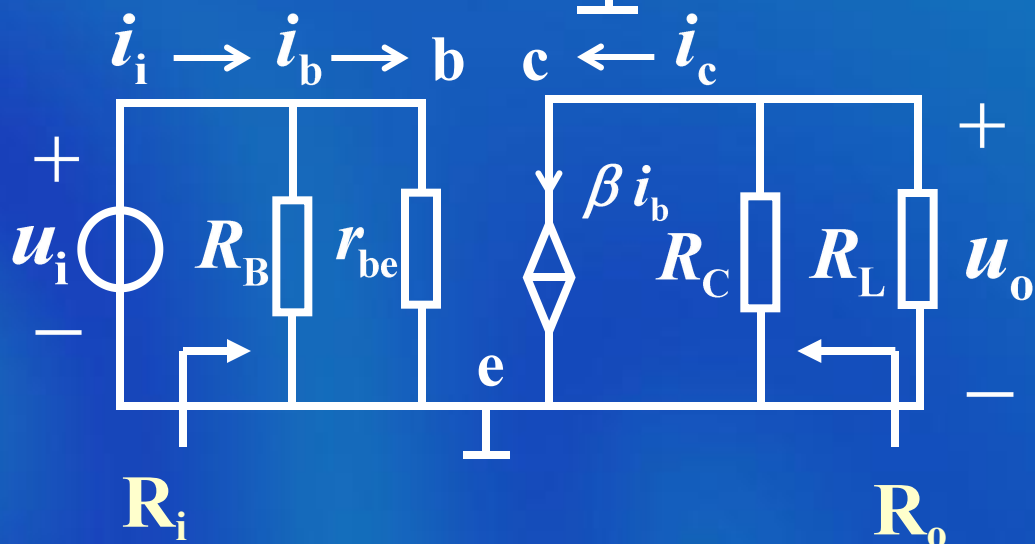
(b) 首先画出放大电路的交流通路



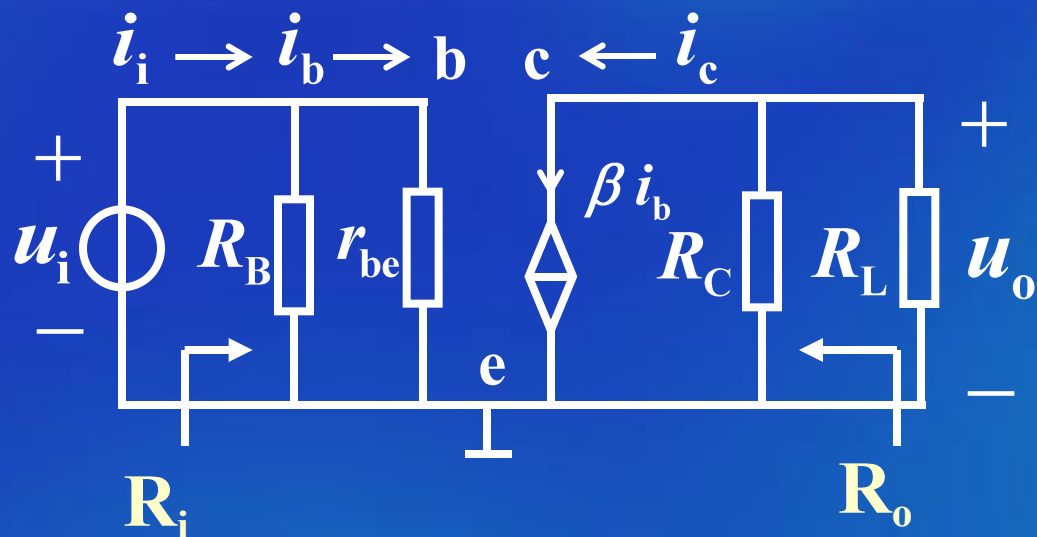
交流通路



微变等效电路



其次画出放大电路  
的微变等效电路



图中

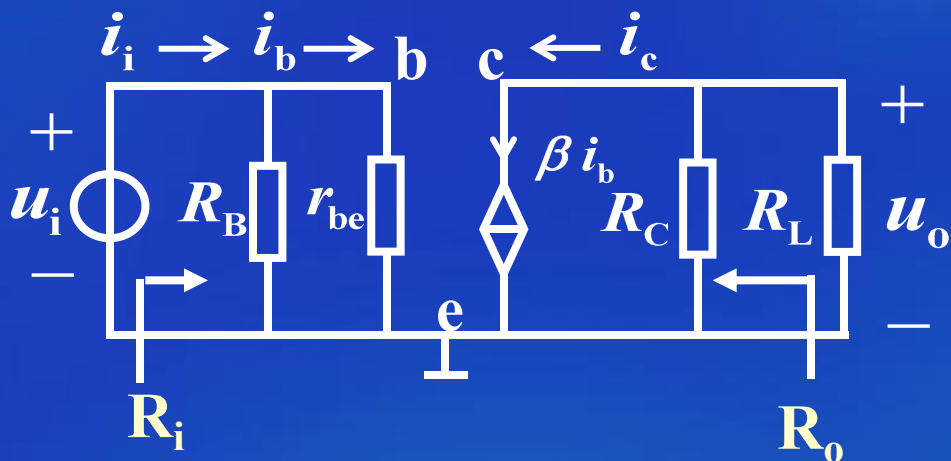
$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{|I_{EQ}|}$$

$$= 300 + (1 + 60) \times \frac{26}{1.95}$$

$$\approx 1.1\text{k}\Omega$$

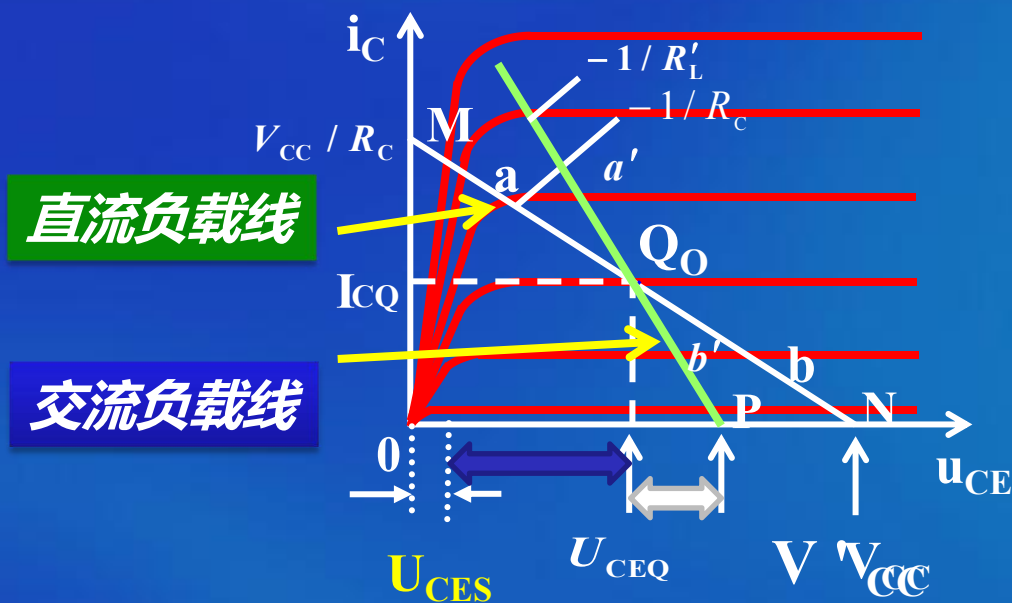
由微变等效电路得

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta(R_L // R_C)}{r_{be}} = -\frac{60 \times (2 // 2)}{1.1} = -54.5$$



$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = R_B // r_{be} \approx r_{be} = 1.1\text{k}\Omega$$

$$R_o = \frac{U}{I} \bigg|_{\substack{U_i=0 \\ R_L=\infty}} = R_C = 2\text{k}\Omega$$



因为  $2 |I_{CQ}| R_L' = 2 \times 1.95 \times (2//2) = 3.9 \text{ V}$

故

$$2U_{CEQ} = 2 \times 8.1 = 16.2 \text{ V}$$

$$U_{opp} = \min[2U_{CEQ}, 2 |I_{CQ}| R_L'] = 3.9 \text{ V}$$

## 小 结：



## 思考题

1. 晶体管用微变等效电路来代替，条件是什么？
2. 电压放大倍数 $A_u$ 是不是与 $\beta$ 成正比？
3. 为什么说当 $\beta$ 一定时通过增大 $I_E$ 来提高电压放大倍数是有限制的？试从 $I_C$ 和 $r_{be}$ 两方面来说明。
4. 能否增大 $R_C$ 来提高放大电路的电压放大倍数？当 $R_C$ 过大时对放大电路的工作有何影响？设 $I_B$ 不变。
5.  $r_{be}$ 、 $R_i$ 、 $R_o$ 是交流电阻，还是直流电阻？在 $R_o$ 中包括不包括负载电阻 $R_L$ ？
6. 如果输出波形失真，静态工作点不合适吗？