

# 第3章 放大电路基础

3.1 放大电路的基本概念

3.2 共发射极放大电路

3.3 放大电路的分析方法

3.4 用H参数小信号模型分析共发射基本放大电路

3.5 稳定静态工作点的放大电路

3.6 共集电极电路和共基放大电路

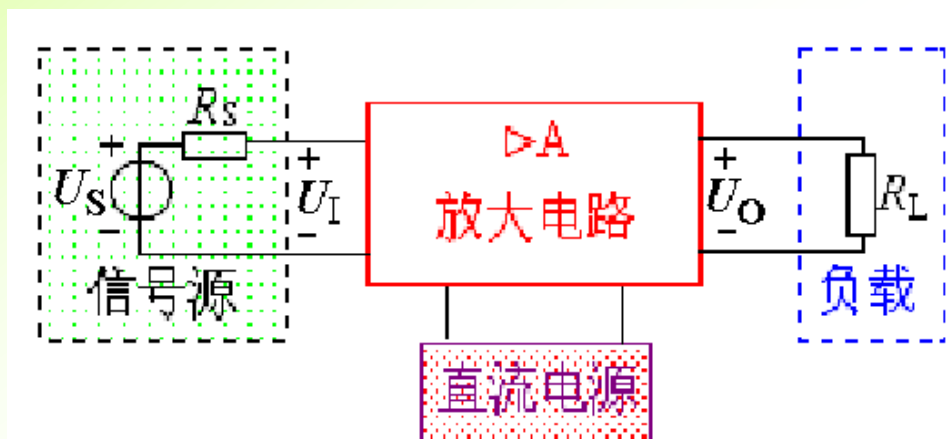
3.7 放大电路的频率响应

3.8 场效应管放大电路

3.9 多级放大电路

3.10 放大电路主要性能指标

## 3.1 放大电路的基本概念

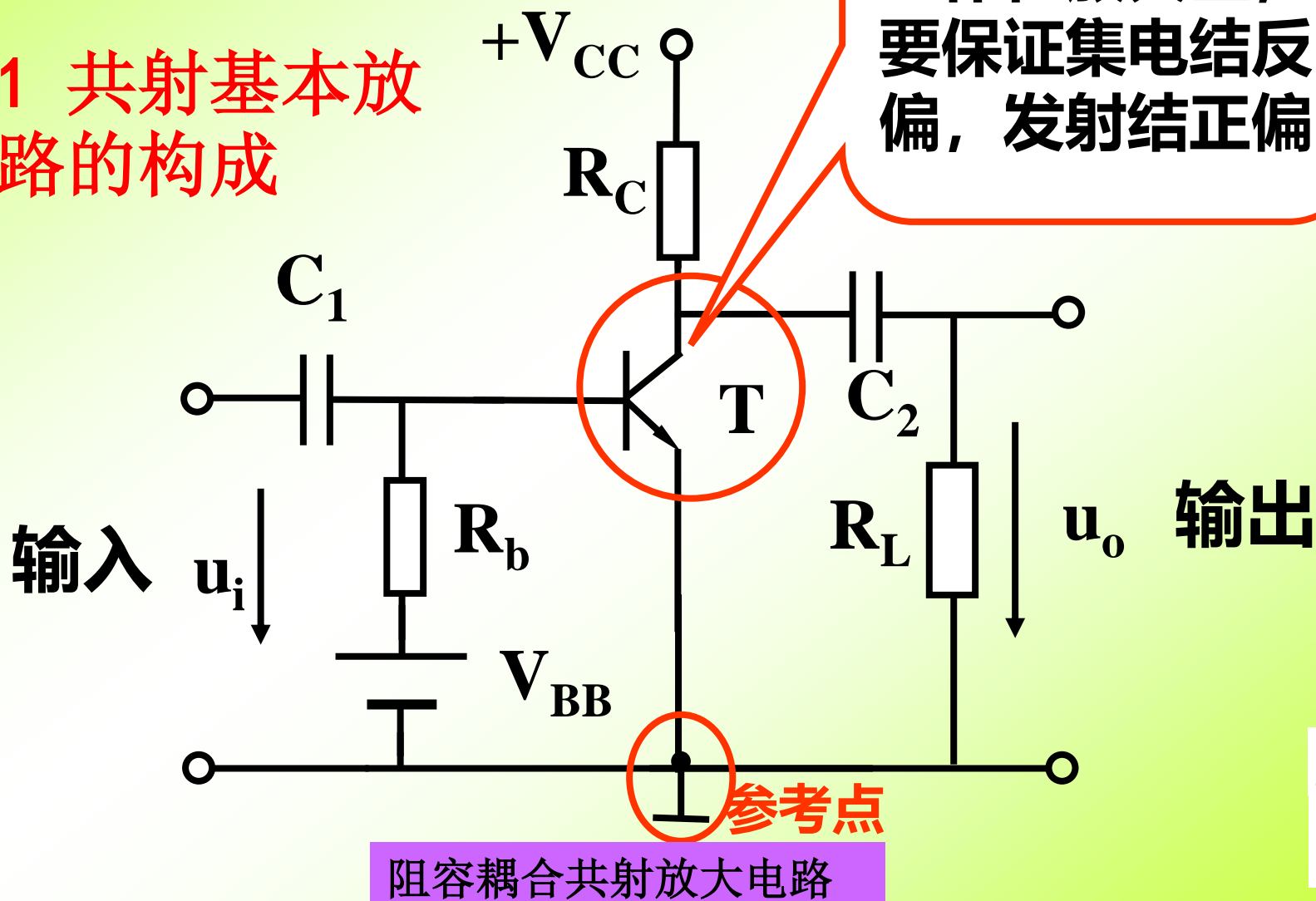


1. 放大电路主要用于放大微弱信号，输出电压或电流在幅度上得到了放大，输出信号的能量得到了加强。
2. 输出信号的能量实际上是由直流电源提供的，只是经过三极管的控制，使之转换成信号能量，提供给负载。

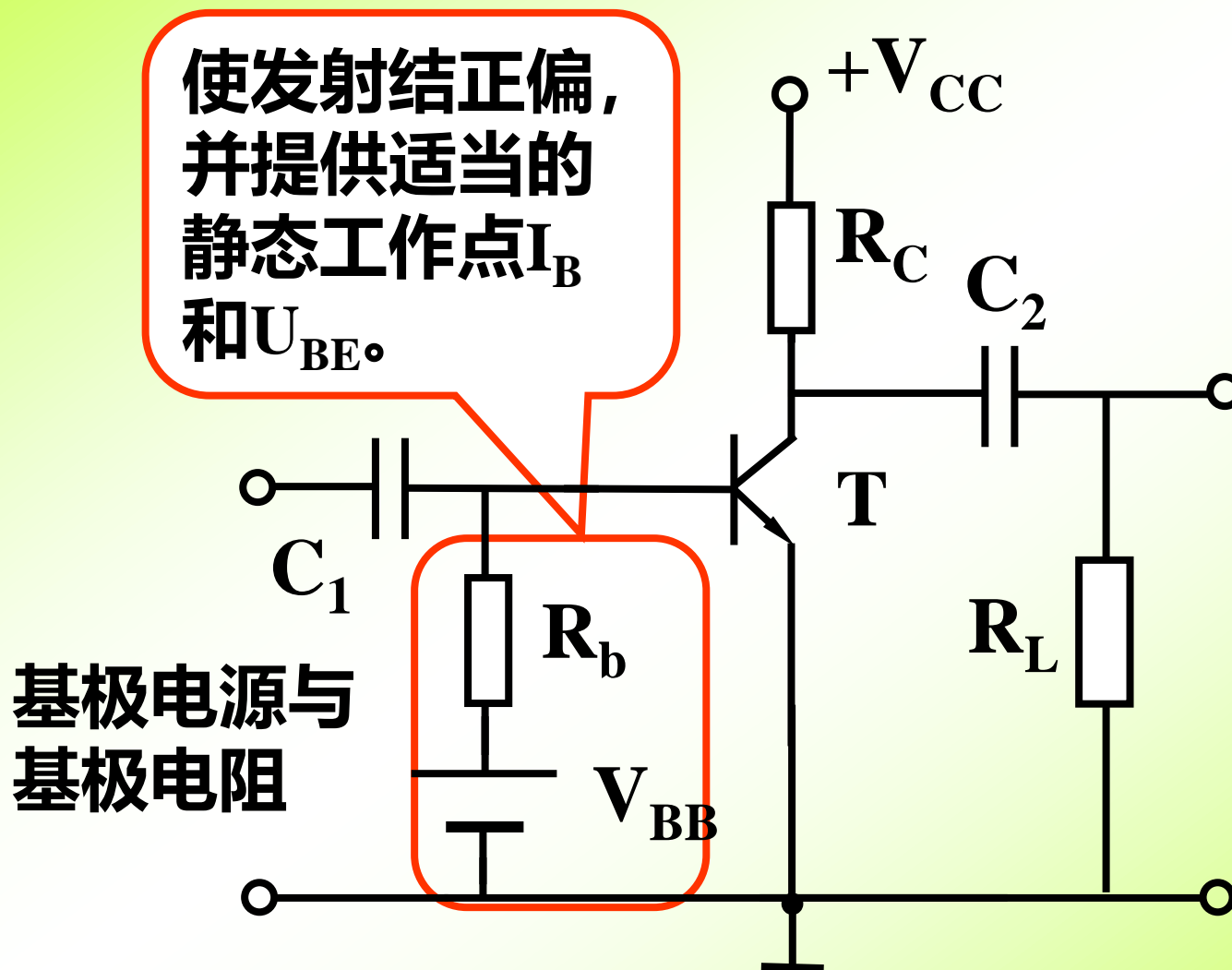


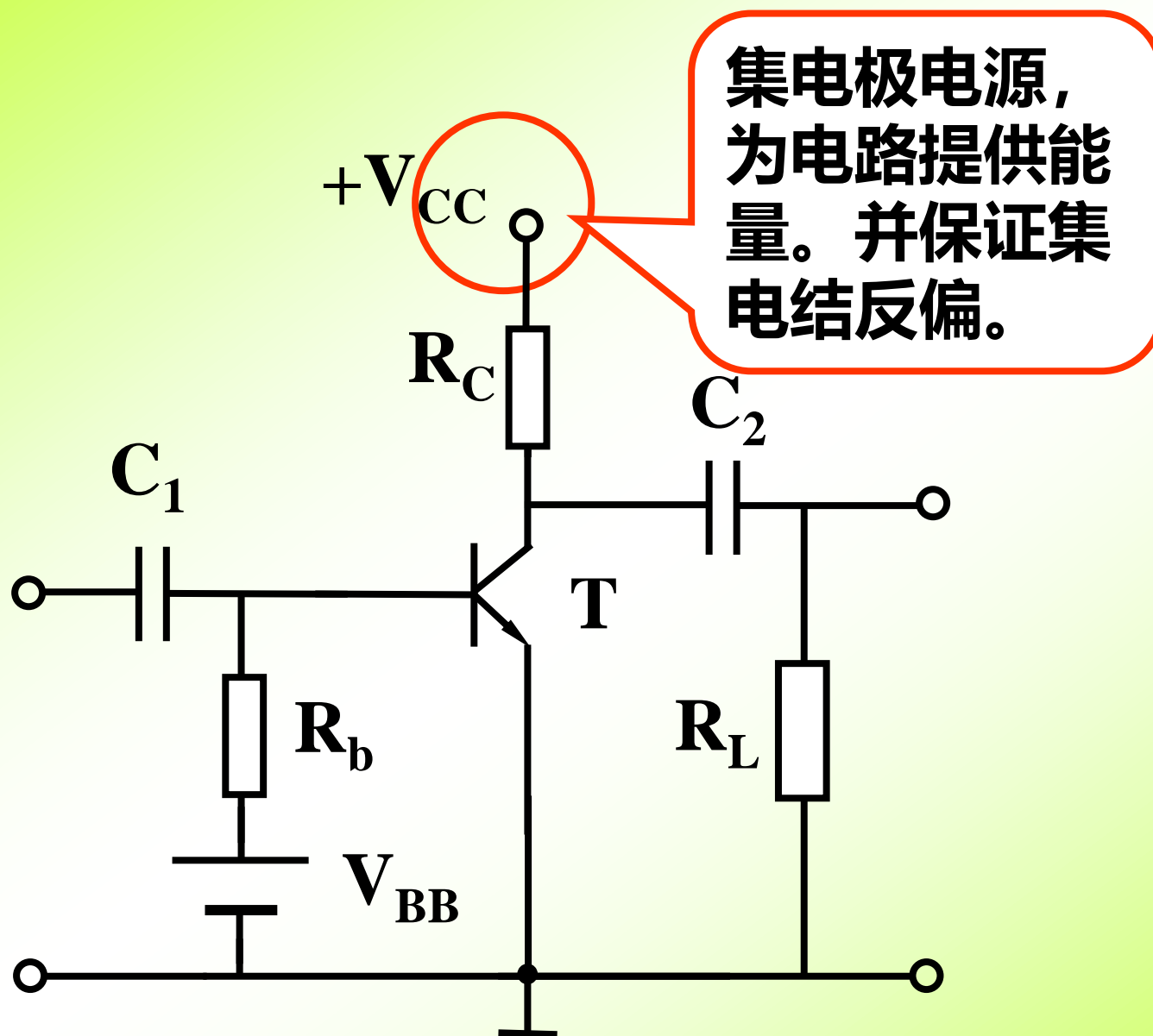
## 3.2 共发射极放大电路

### 3.2.1 共射基本放大电路的构成

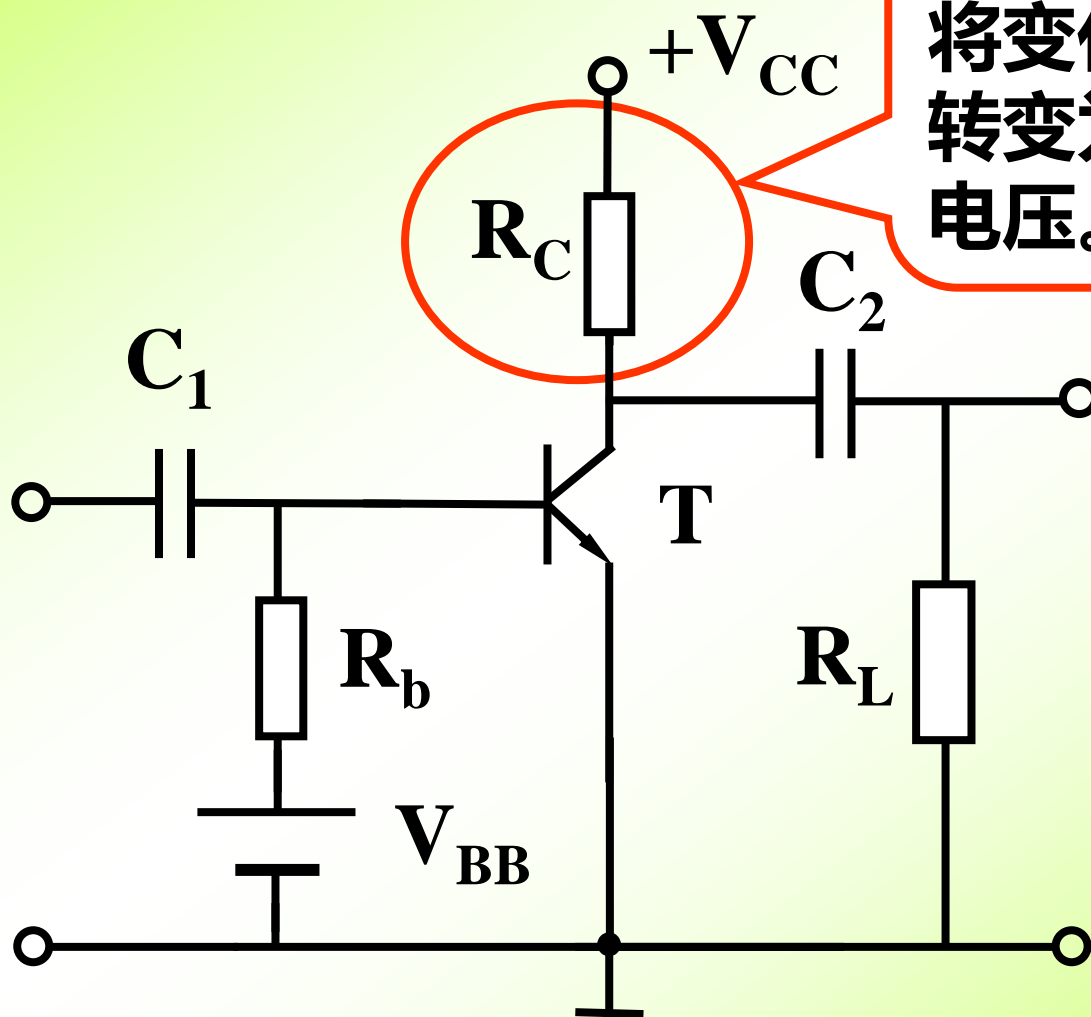


# 共射放大电路组成





# 共射放大电路

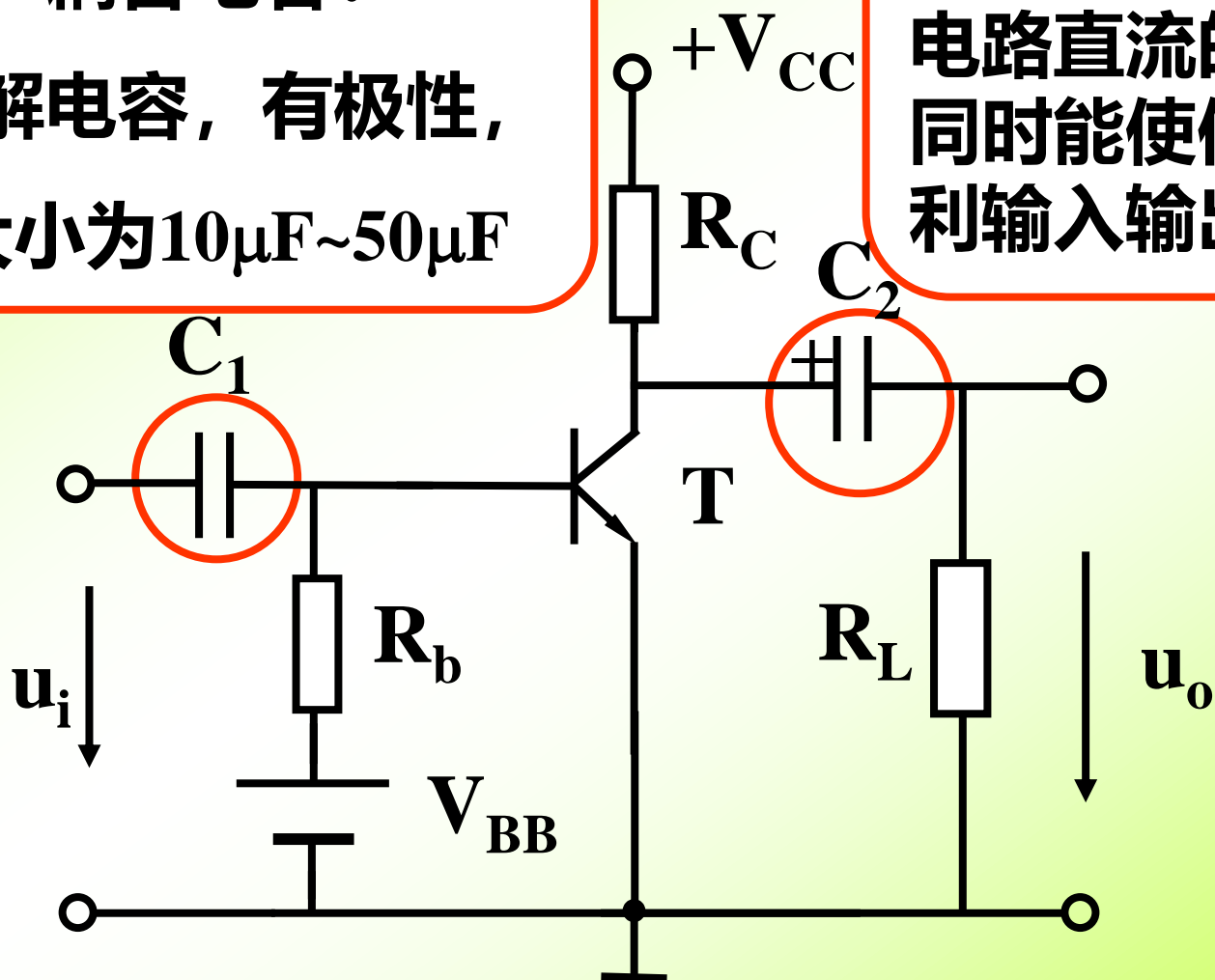


集电极电阻，  
将变化的电流  
转变为变化的  
电压。

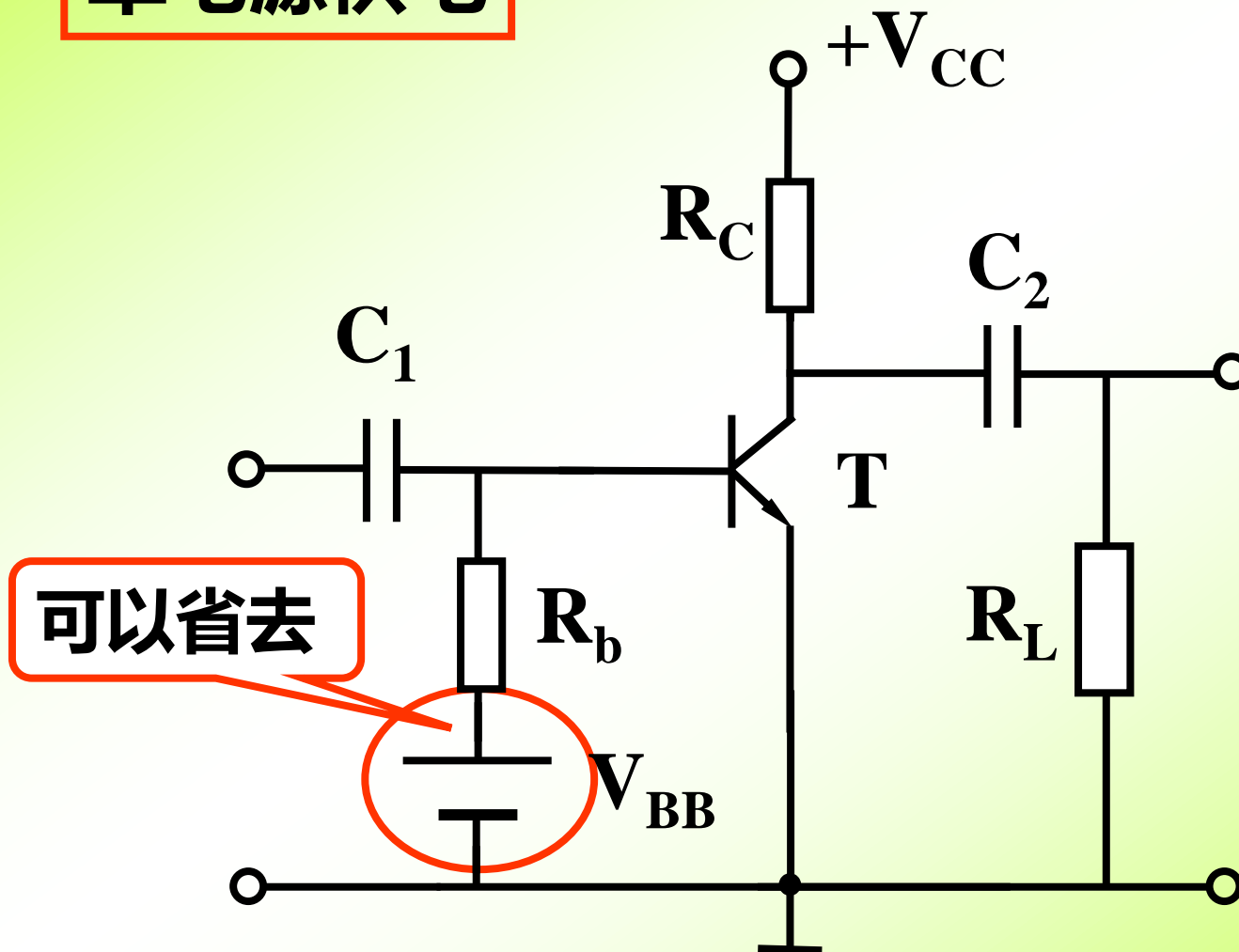


**耦合电容：**  
**电解电容，有极性，**  
**大小为 $10\mu\text{F}\sim 50\mu\text{F}$**

**作用：隔直通交**  
**隔离输入输出与**  
**电路直流的联系，**  
**同时能使信号顺**  
**利输入输出。**

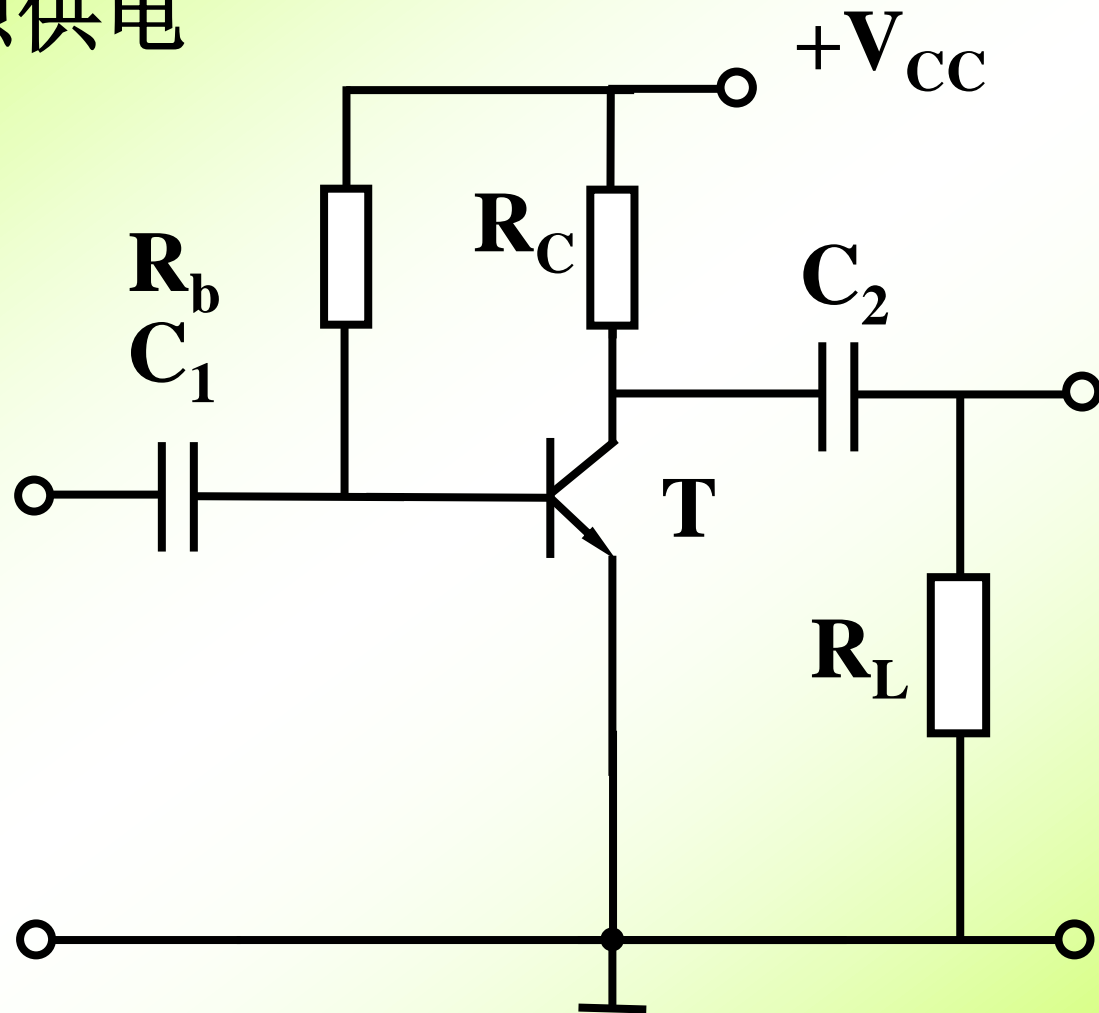


# 单电源供电





# 单电源供电



## 3.2.2 共射基本放大电路的工作原理

三极管工作在放大区：

发射结正偏，

集电结反偏。

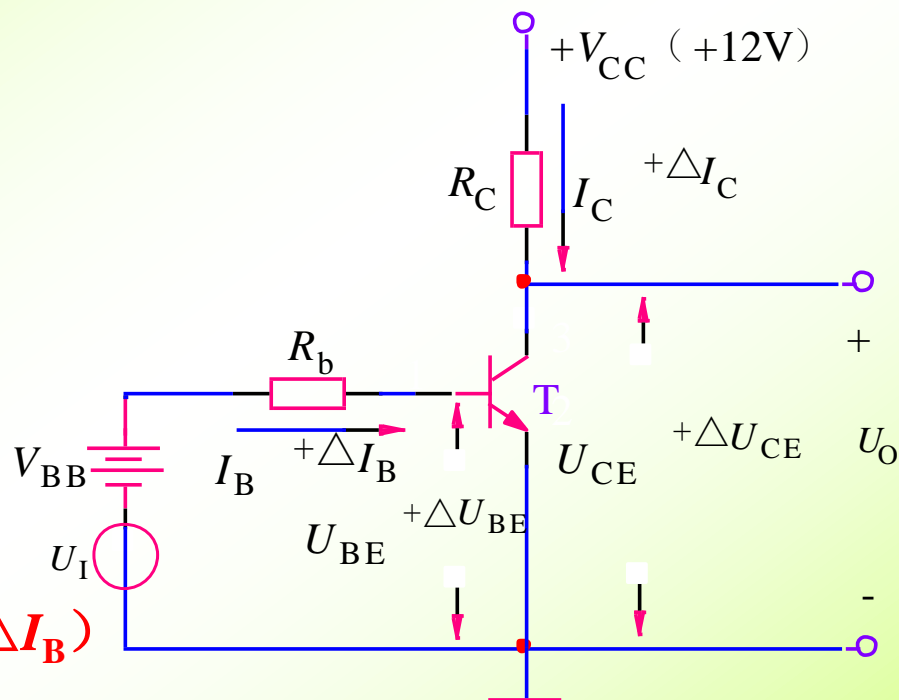
放大原理：

$$\dot{U}_i \rightarrow \Delta U_{BE} \rightarrow \Delta I_B \rightarrow \Delta I_C (\beta \Delta I_B)$$

$$\rightarrow \Delta U_{CE} (-\Delta I_C \times R_c) \rightarrow \dot{U}_o$$

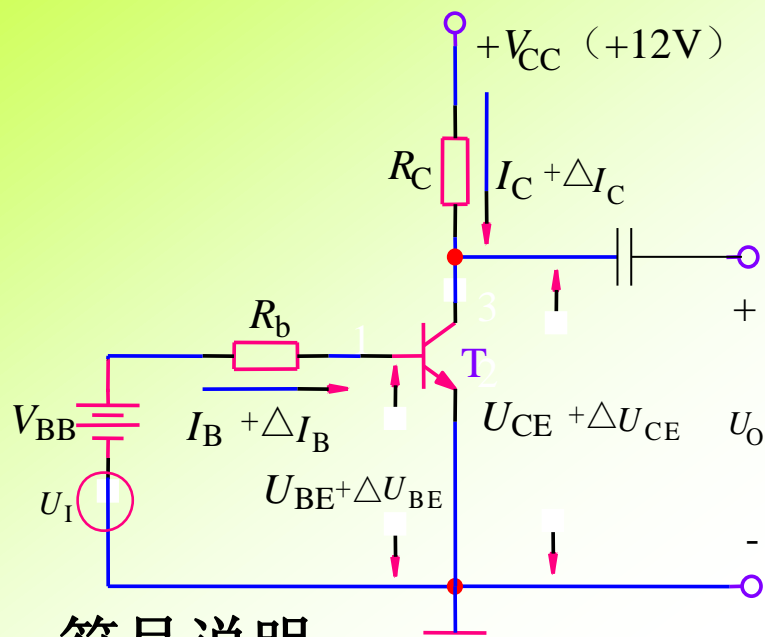
电压放大倍数：

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$



直接耦合共射放大电路





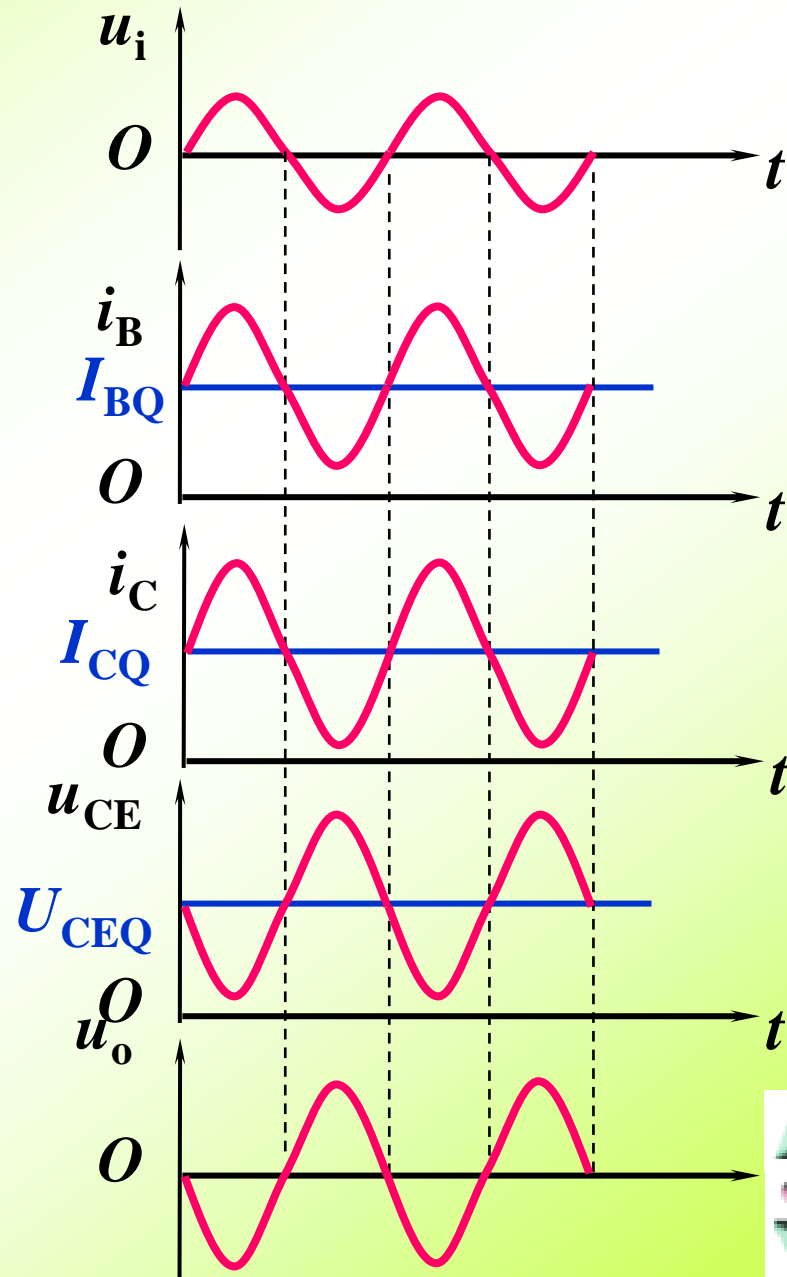
符号说明

$$u_{BE} = U_{BE} + u_{be}$$

$$i_B = I_B + i_b$$

$$i_C = I_C + i_c$$

$$u_{CE} = U_{CE} + u_{ce}$$



**问：** 既然直流不参与输入输出，为什么需要直流参与？

## 3.3 放大电路的分析方法

### 3.3.1 静态和动态

### 3.3.2 直流通路和交流通路

## 分析三极管电路的基本思想和方法

### 基本思想

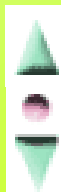
非线性电路经适当近似后可按线性电路对待，利用叠加定理，分别分析电路中的交、直流成分。

直流通路 ( $u_i = 0$ ) 分析静态。

交流通路 ( $u_i \neq 0$ ) 分析动态，只考虑变化的电压和电流。

画交流通路原则：

1. 固定不变的电压源都视为短路；
2. 固定不变的电流源都视为开路；
3. 视电容对交流信号短路  $1/j\omega C \approx 0$



### 3.3.3 放大电路的静态分析

放大电路没有输入信号 ( $u_i = 0$ ) 时的工作状态称为**静态**。

**静态**分析的任务是根据电路参数和三极管的

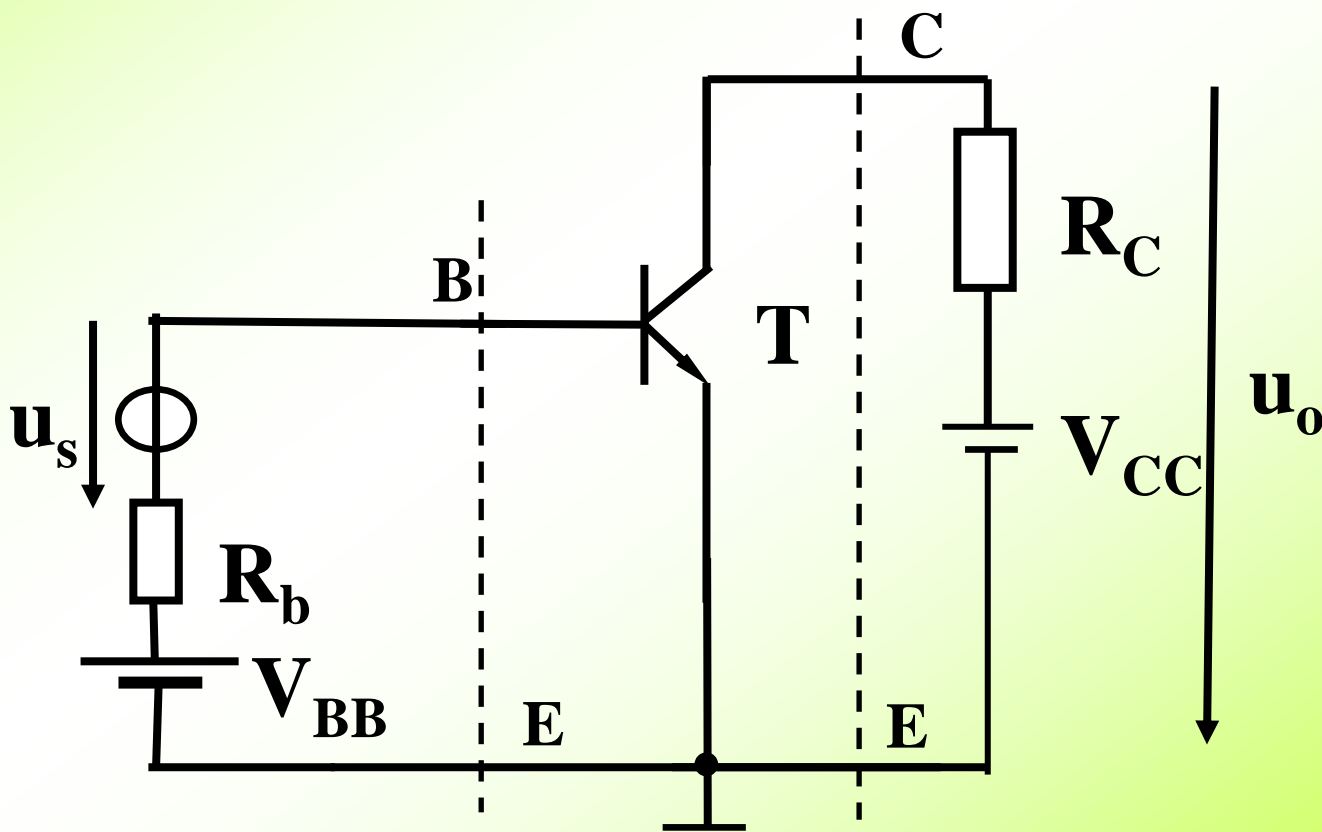
特性**确定静态值（直流值）**  $U_{BE}$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  和  $U_{CE}$ 。

可用放大电路的**直流通路**来分析。



## (一) 直接耦合共射放大电路静态图解分析

令 $u_s=0$ ，在输入、输出特性曲线上求Q点的值

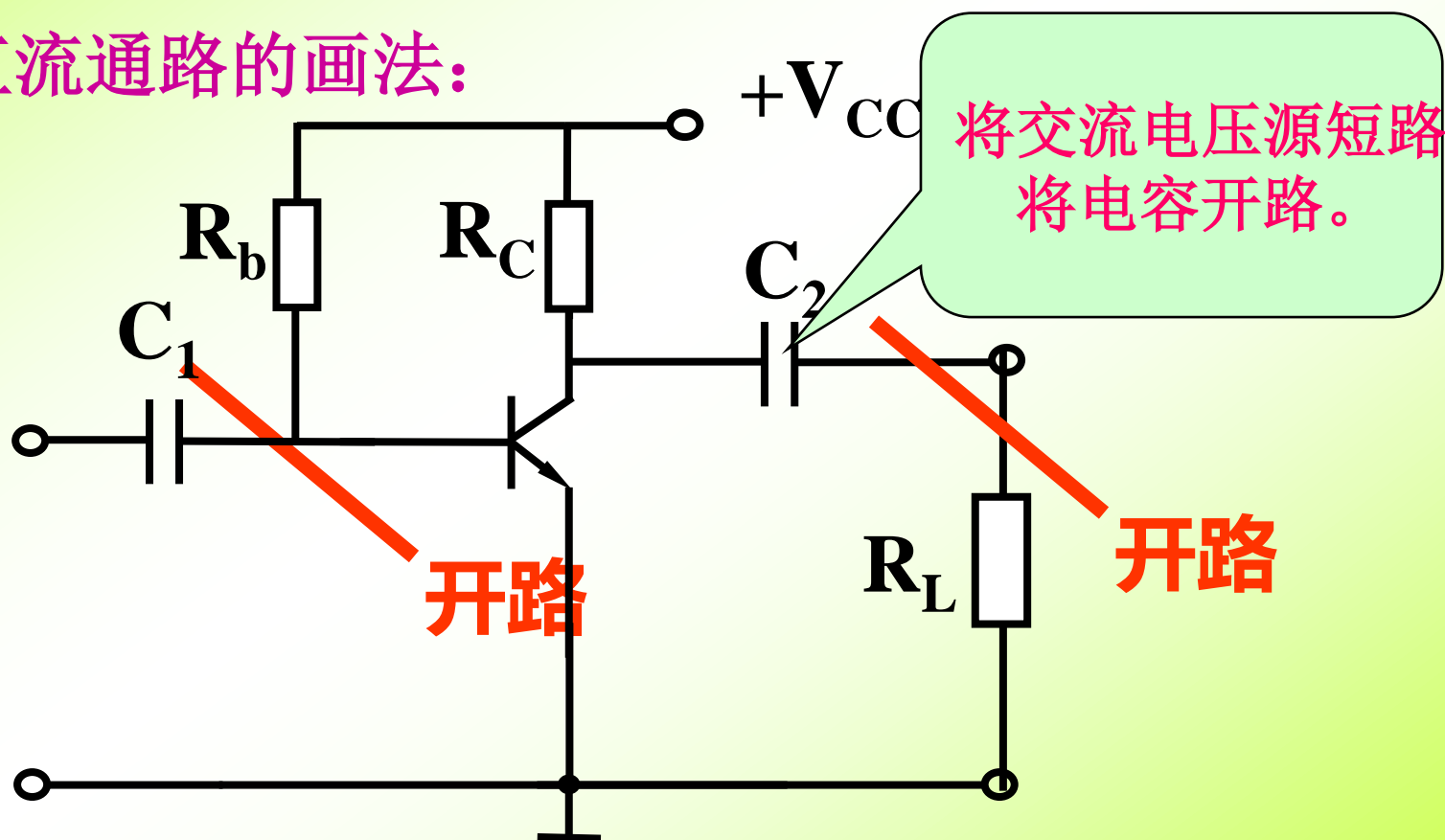


## (二) 阻容耦合共射放大电路静态图解分析

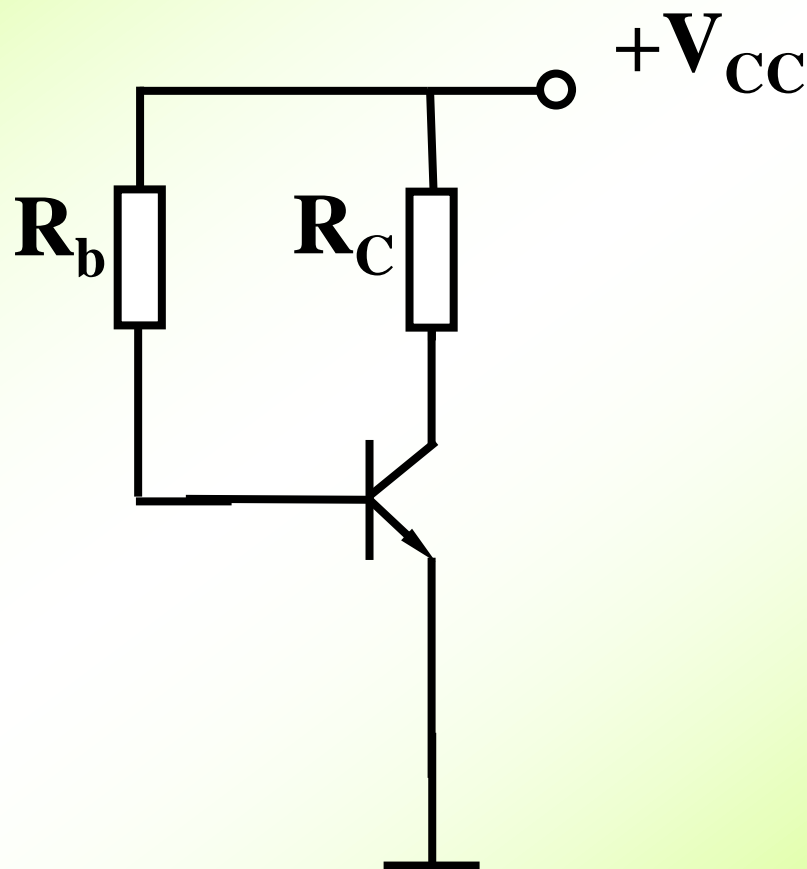
### 1. 静态工作点的估算

#### 画出放大电路的直流通路

直流通路的画法:



## 直流通道



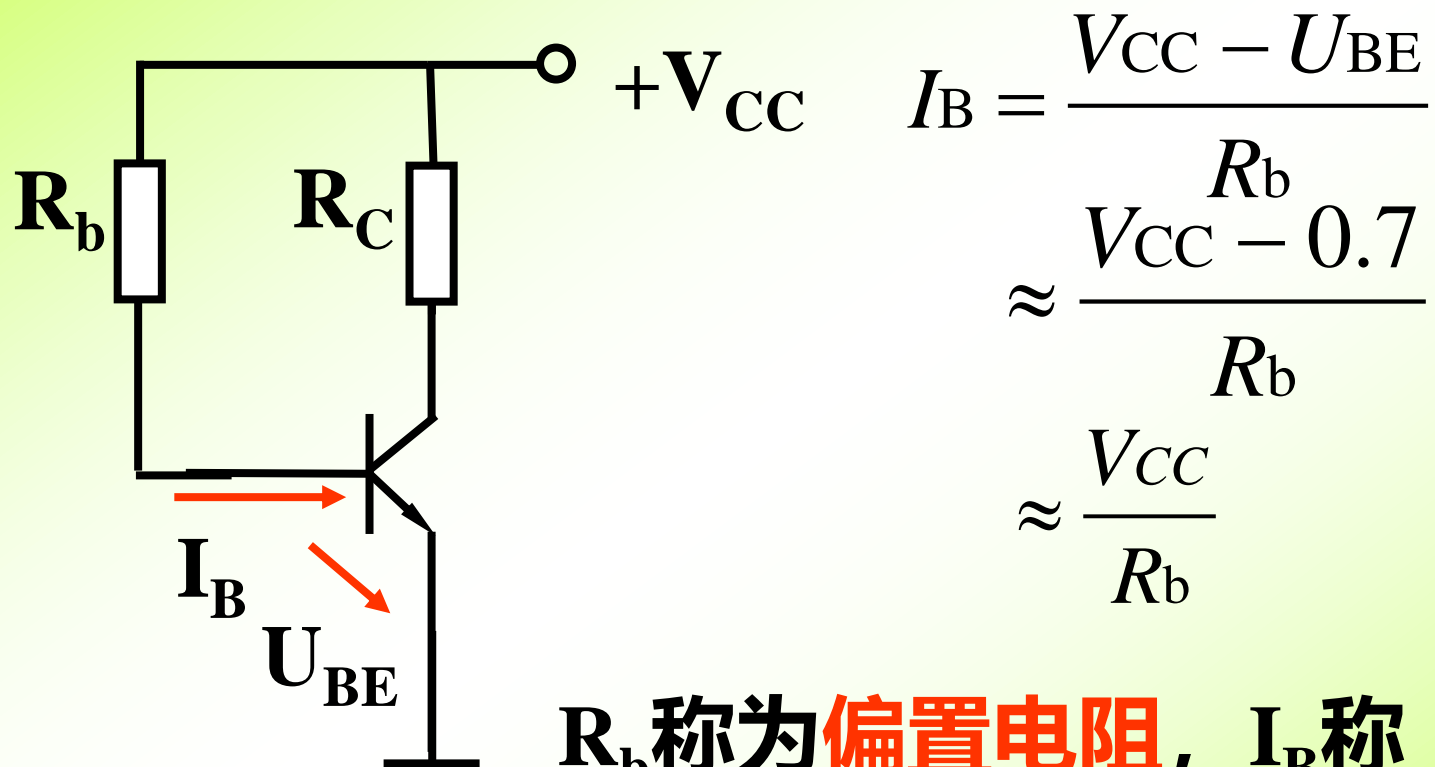
用估算法分析放大器的静态工作点

(  $I_B$ 、  $U_{BE}$ 、  $I_C$ 、  $U_{CE}$  )





# (1) 估算 $I_B$ ( $U_{BE} \approx 0.7V$ )

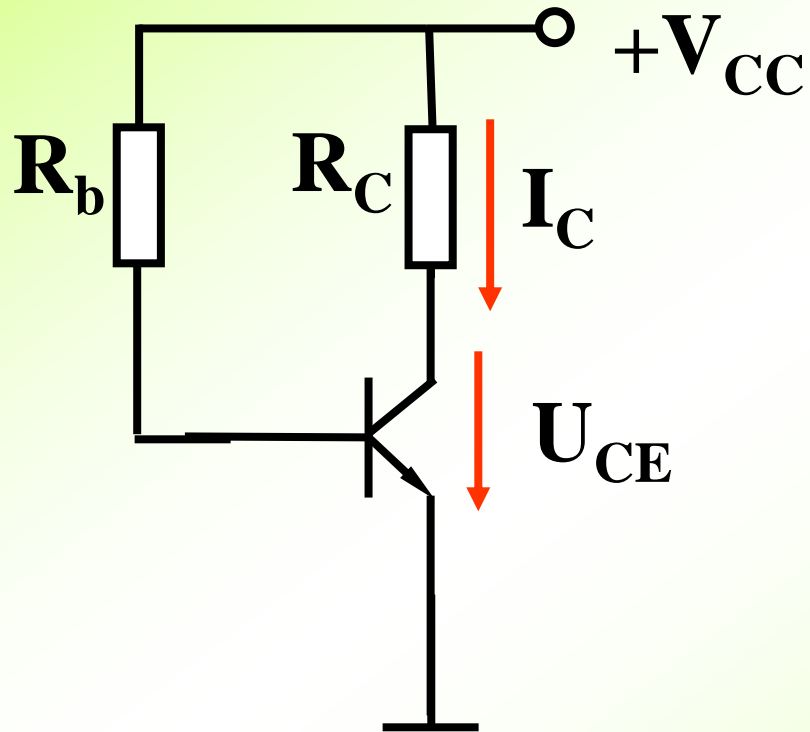


$$I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_b}$$
$$\approx \frac{V_{CC} - 0.7}{R_b}$$
$$\approx \frac{V_{CC}}{R_b}$$

$R_b$ 称为偏置电阻,  $I_B$ 称为偏置电流。



## (2) 估算 $U_{CE}$ 、 $I_C$



$$I_C = \beta I_B$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$



**例：用估算法计算静态工作点。**

**已知：  $V_{CC}=12V$ ,  $R_C=4K\Omega$ ,**

**$R_b=300K\Omega$ ,  $\beta=37.5$ 。**

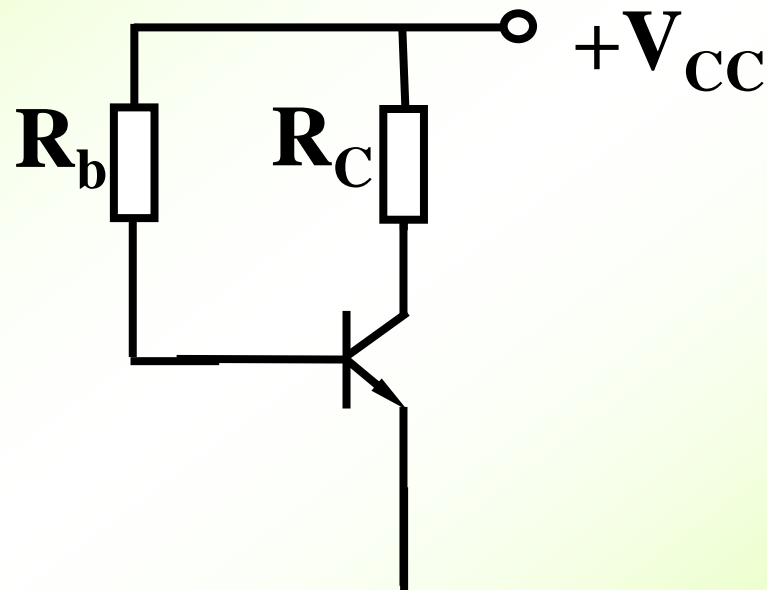
**解：  $U_{BE} \approx 0.7V$**

$$I_B \approx \frac{V_{CC}}{R_b} = \frac{12}{300} = 0.04mA = 40\mu A$$

$$I_C \approx \beta I_B = 37.5 \times 0.04 = 1.5mA$$

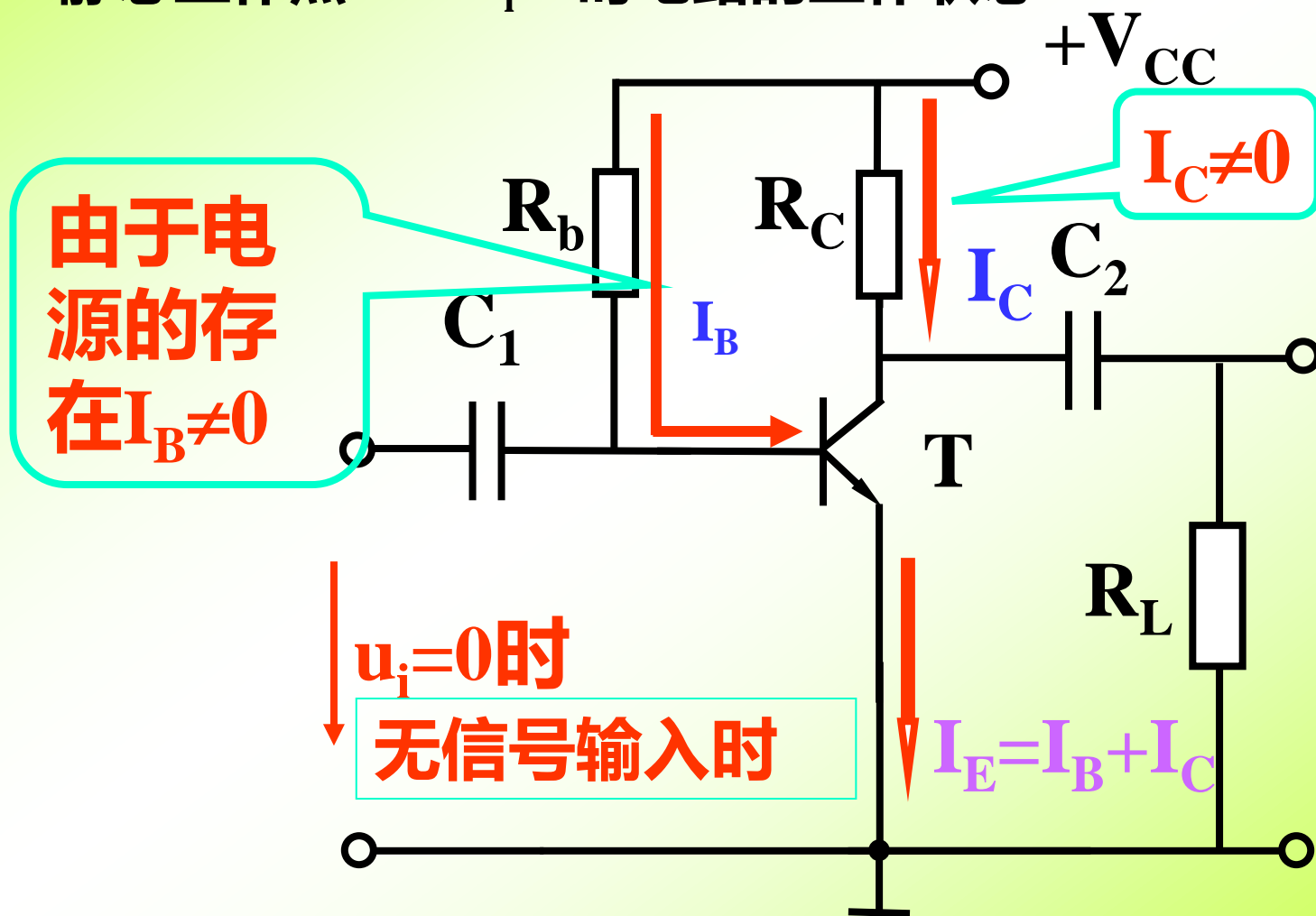
$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 12 - 1.5 \times 4 = 6V$$

 **请注意电路中 $I_B$ 和 $I_C$ 的数量级**

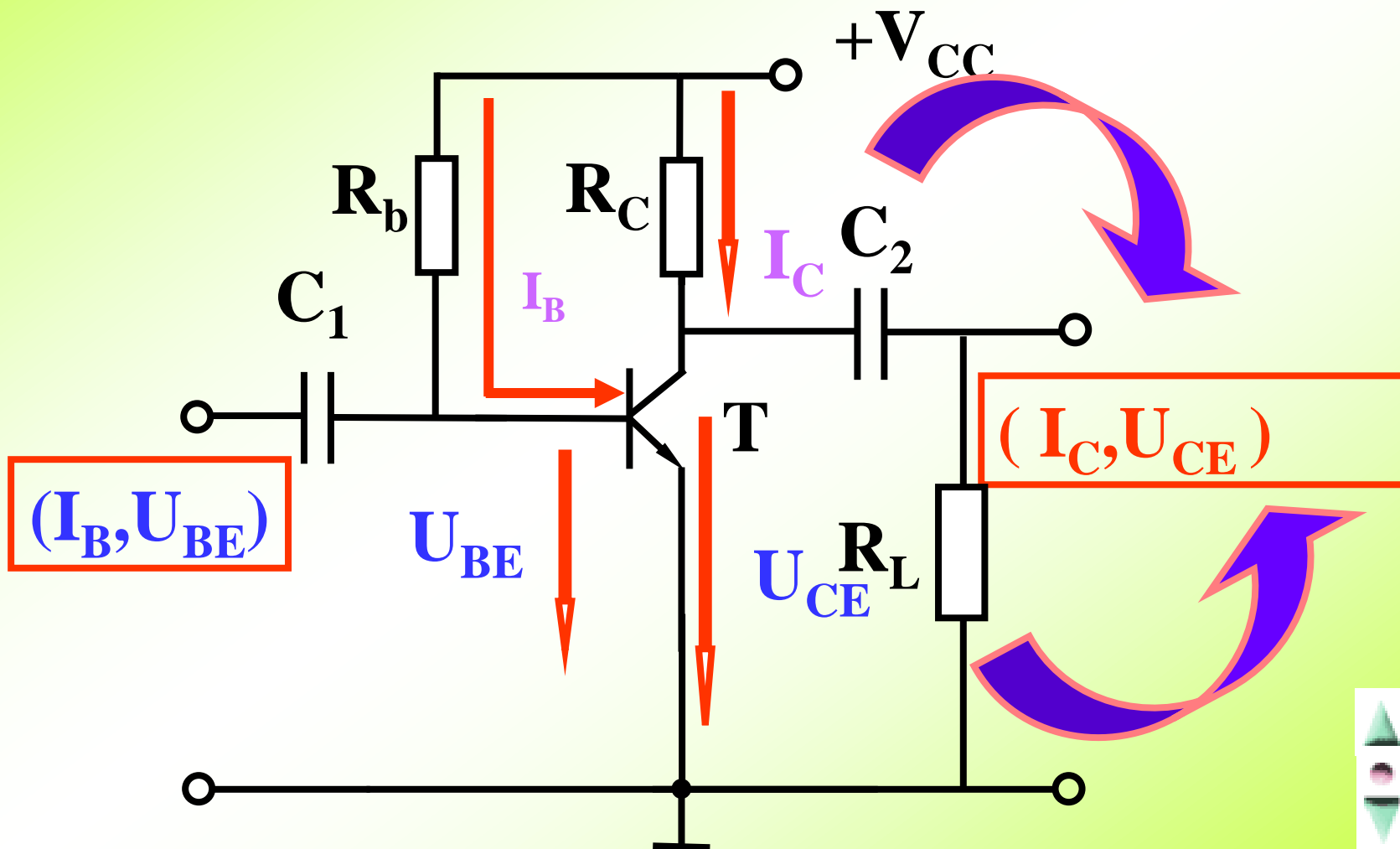


## 2. 用图解法确定静态工作点

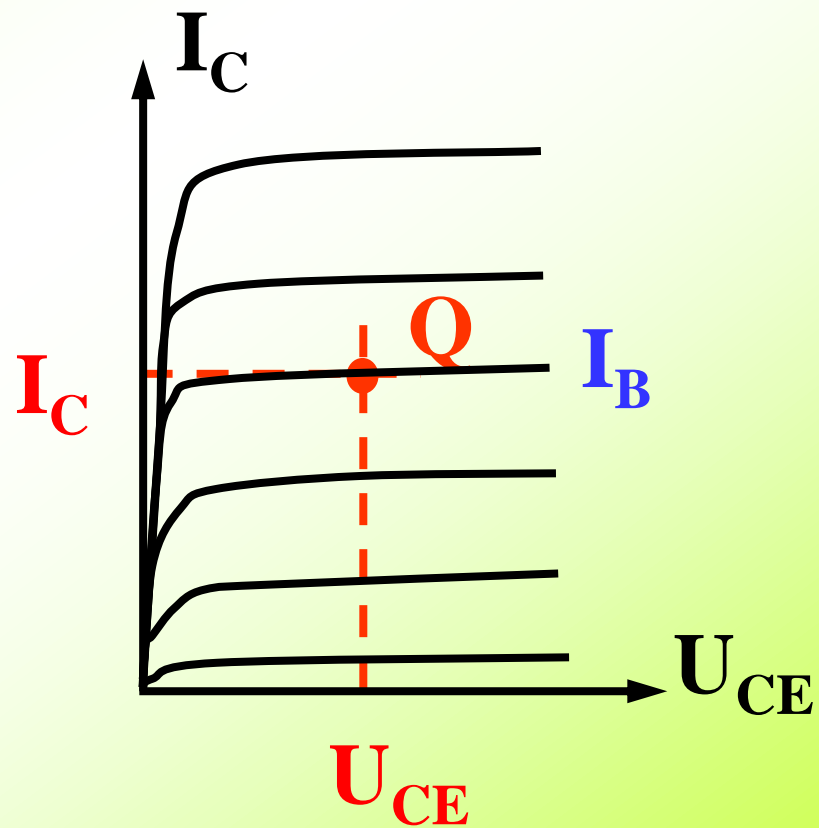
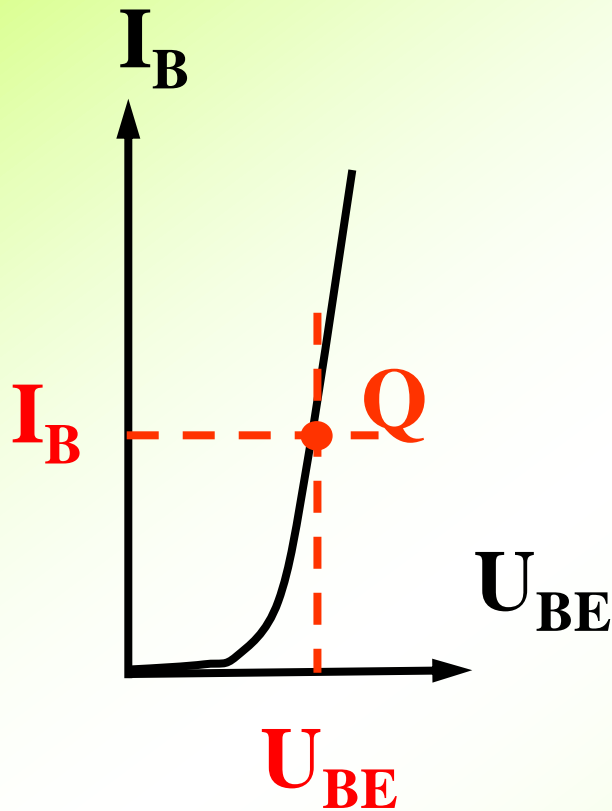
### 1. 静态工作点—— $U_i=0$ 时电路的工作状态



# 静态工作点

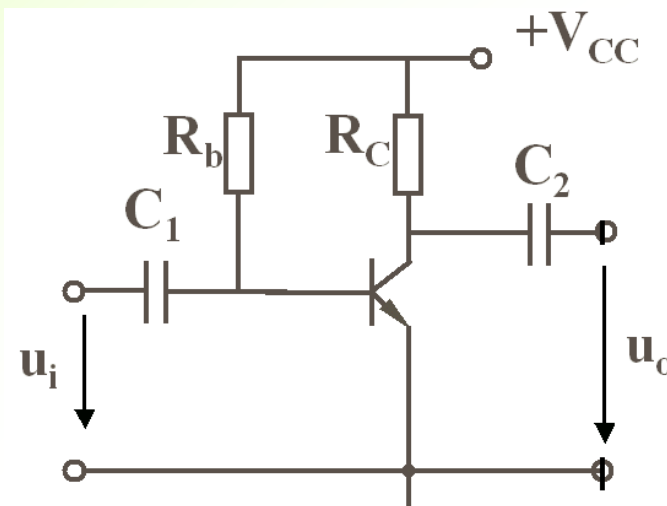
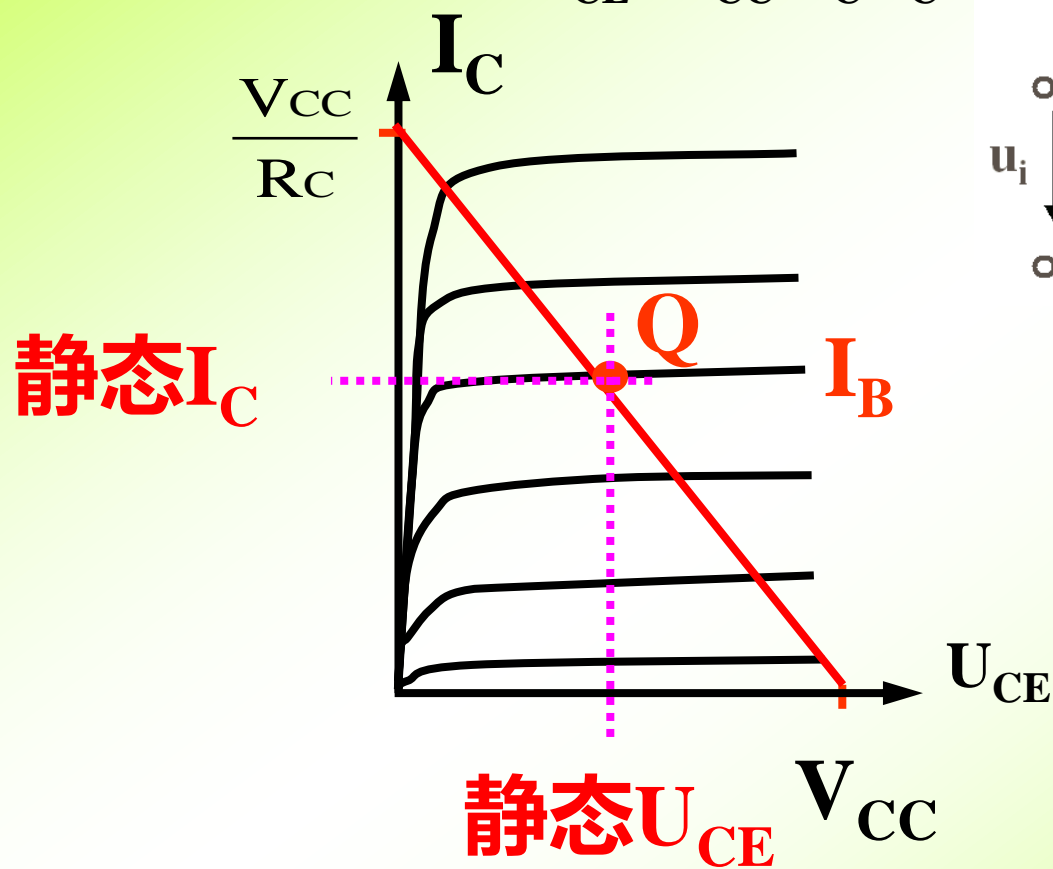


$(I_B, U_{BE})$  和  $(I_C, U_{CE})$  分别对应于输入输出特性曲线上的一个点称为静态工作点。



## 直流负载线

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

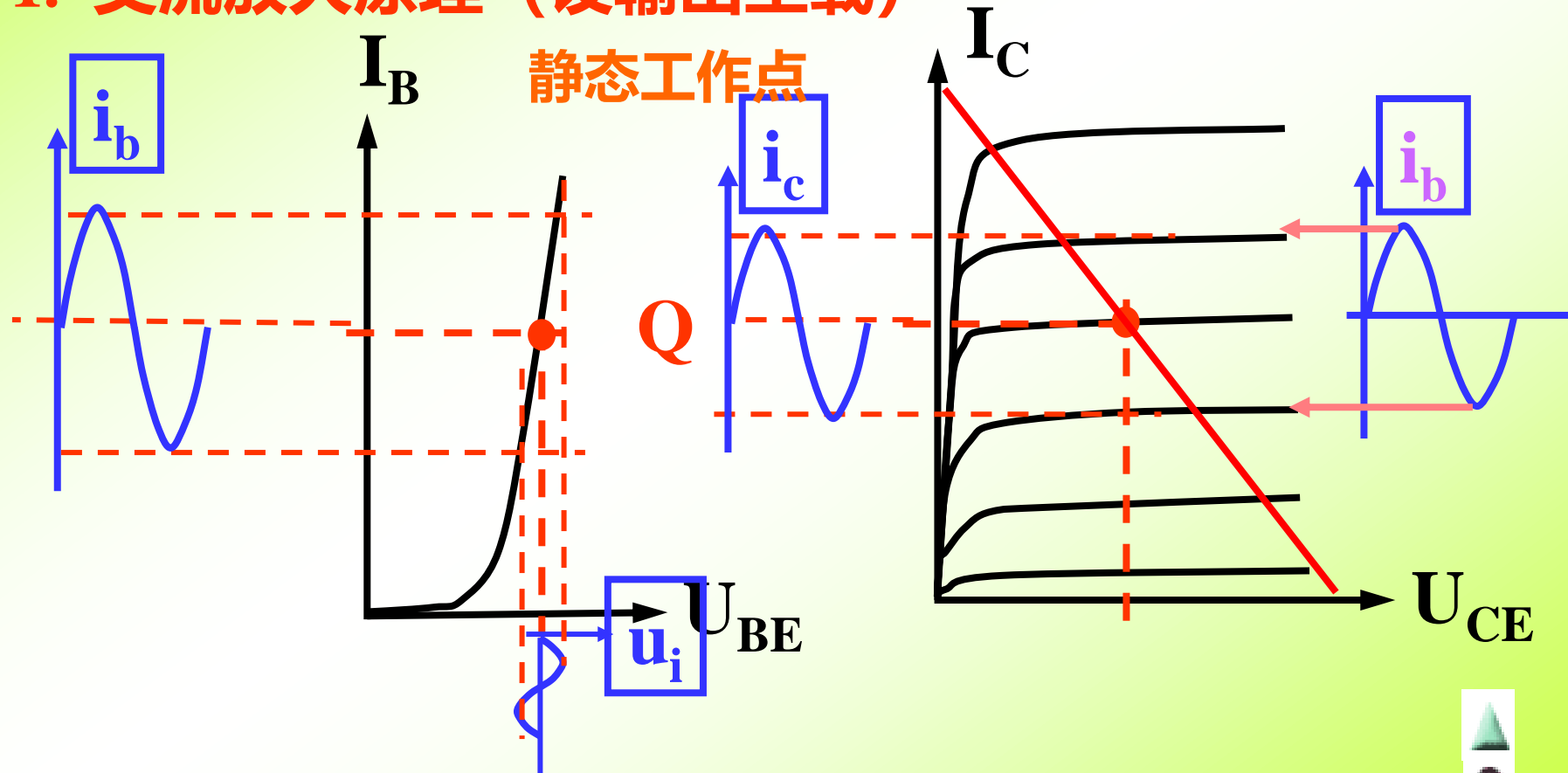


由估算法求出  $I_B$ ,  
 $I_B$  对应的输出特  
性与直流负载  
线的交点就是  
工作点  $Q$



### 3.3.4 放大电路的动态分析— 图解分析法

#### 1. 交流放大原理 (设输出空载)

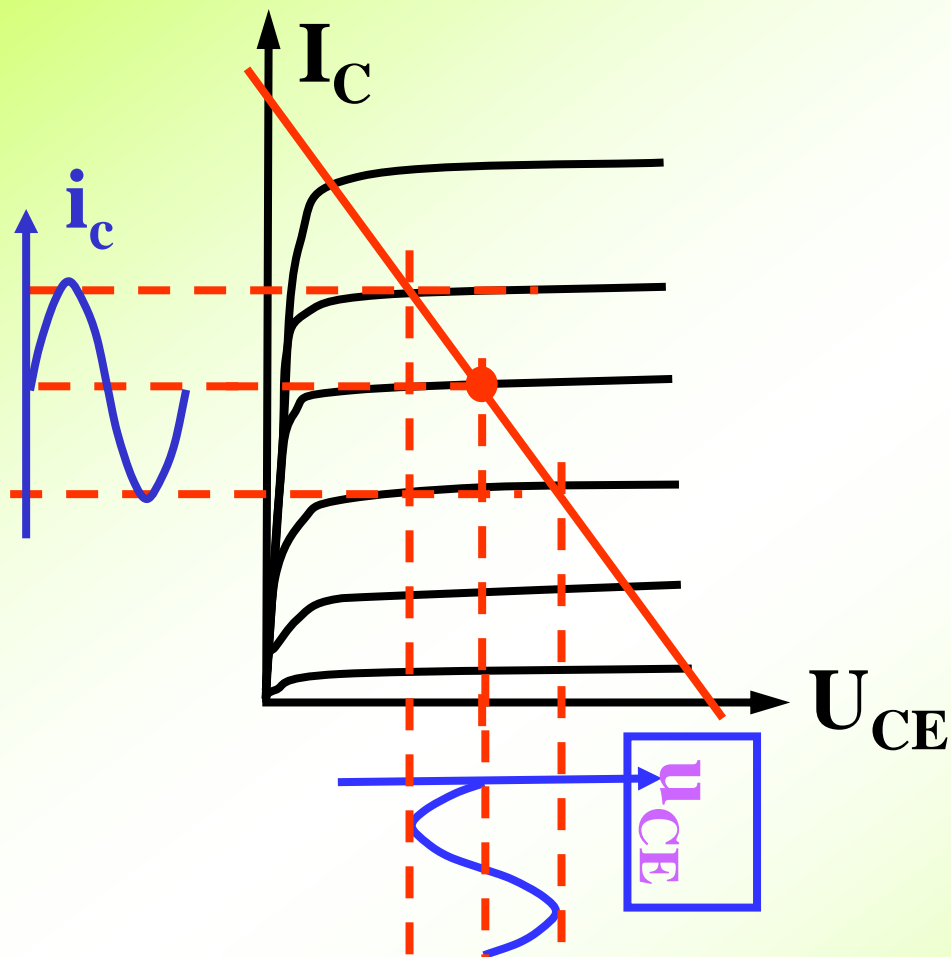


假设在静态工作点的基础上，输入一微小的正弦信号  $u_i$





$u_{CE}$ 怎么变化 ?



$u_{CE}$ 也沿着  
负载线变化

$U_{CE}$ 与 $U_i$ 反相!



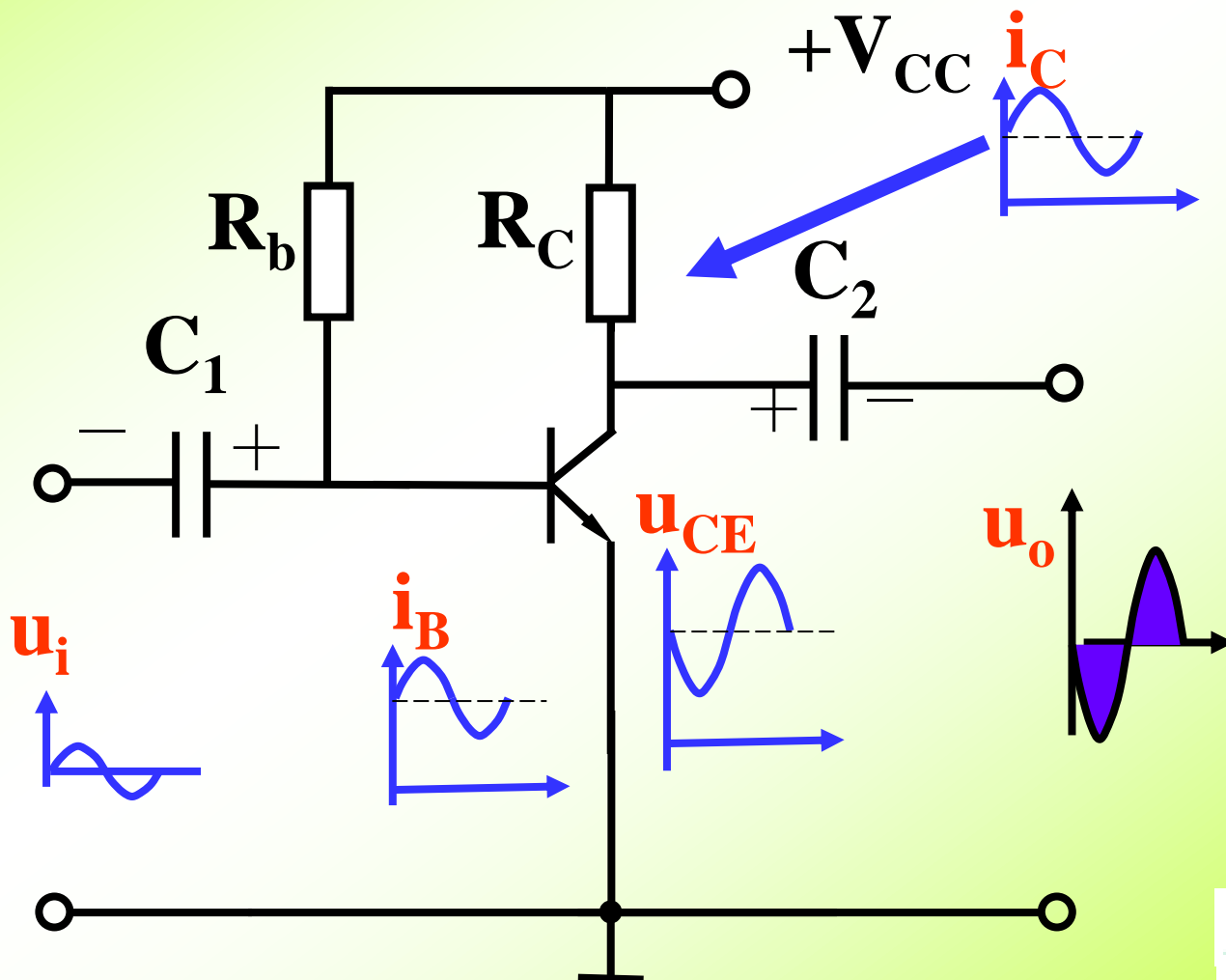
## 各点波形

$$u_{BE} = U_{BE} + u_{be}$$

$$i_B = I_B + i_b$$

$$i_C = I_C + i_c$$

$$u_{CE} = U_{CE} + u_{ce}$$



$u_o$  比  $u_i$  幅度放大且相位相反



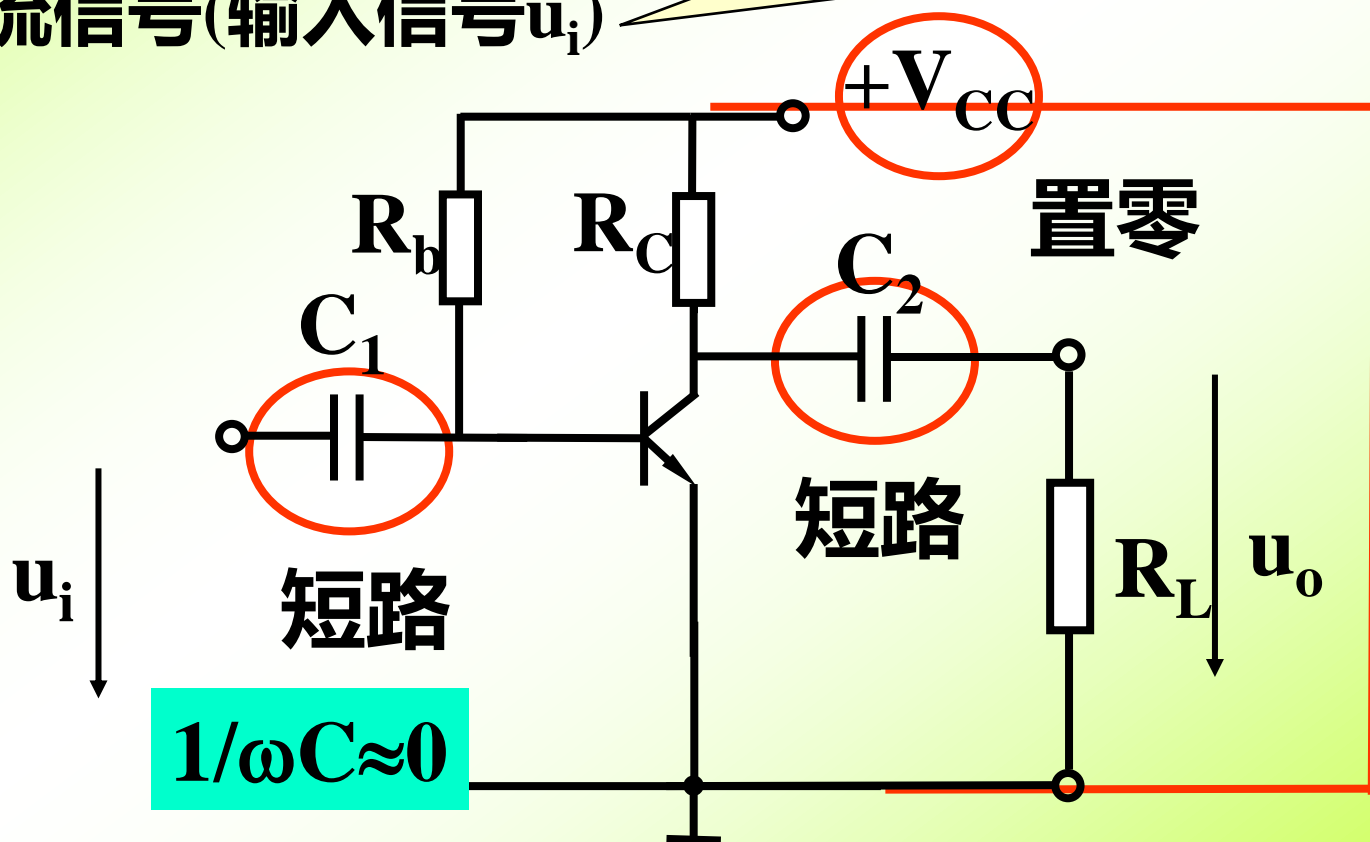
## 2.放大器的交流通路

交流通路——分析动态工作情况

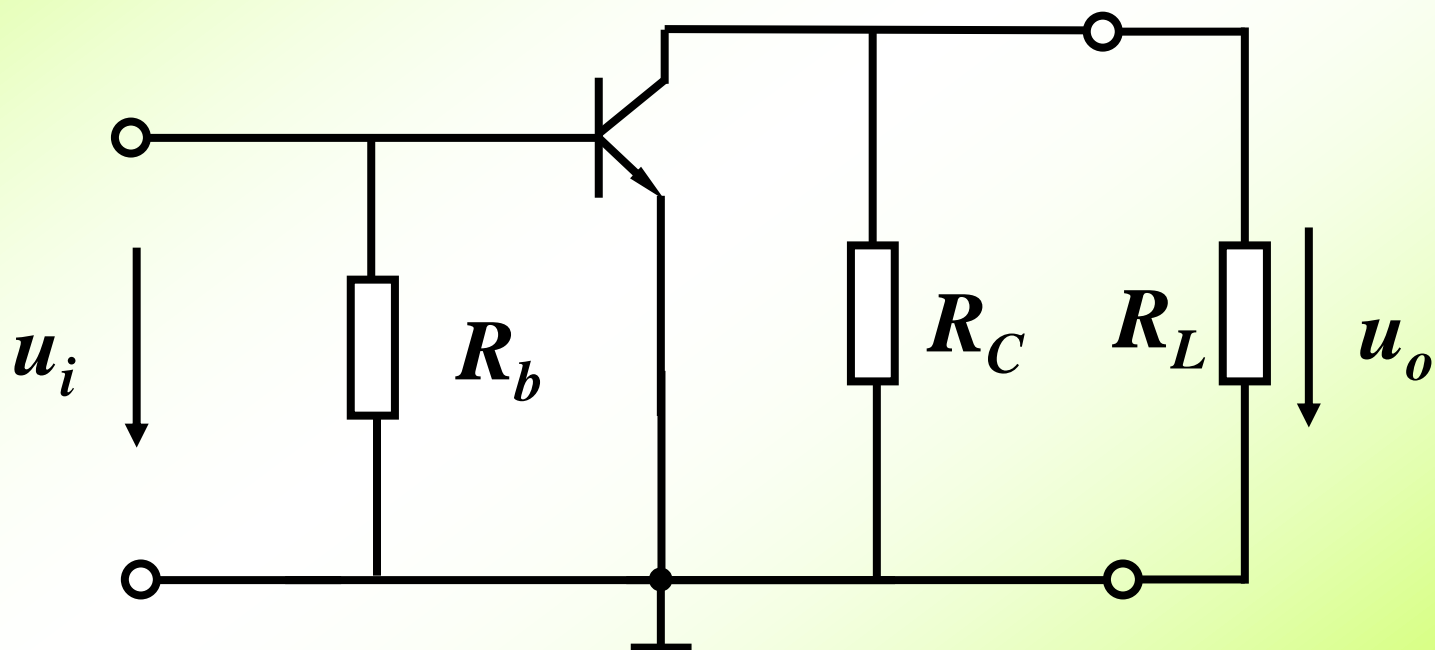
交流通路的画法:

对交流信号(输入信号 $u_i$ )

将直流电压源短路, 将电容短路。

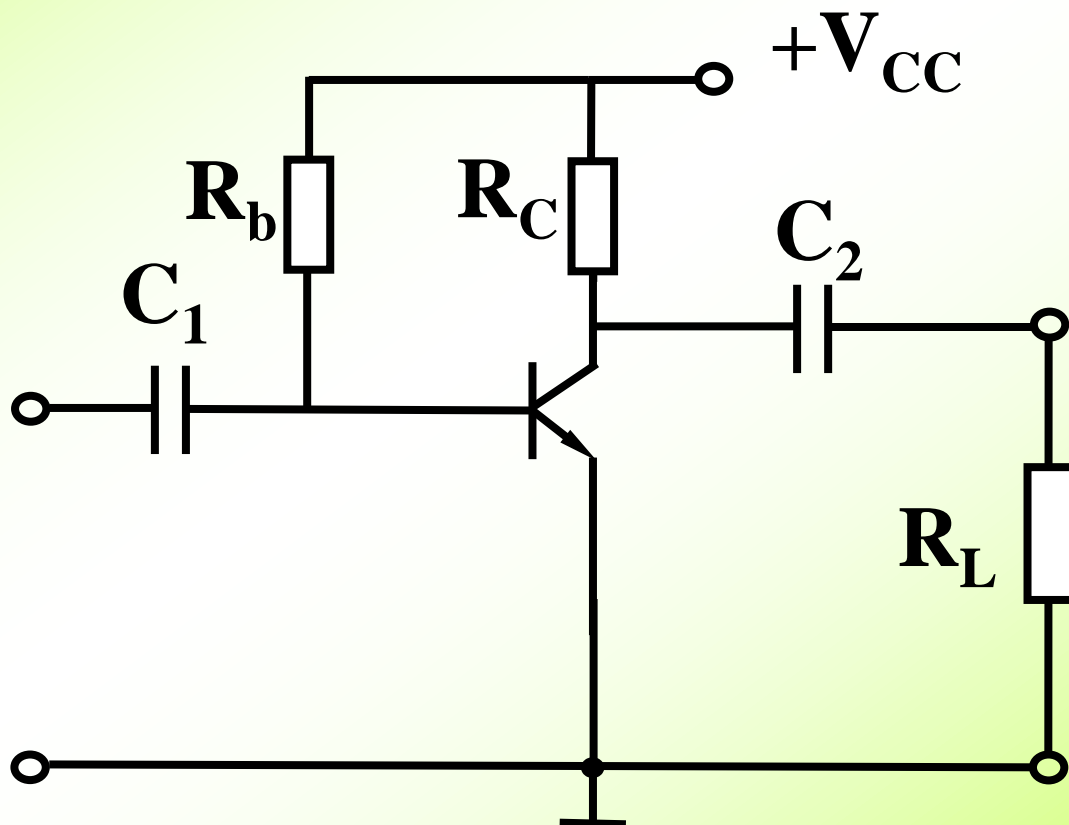


# 交流通路

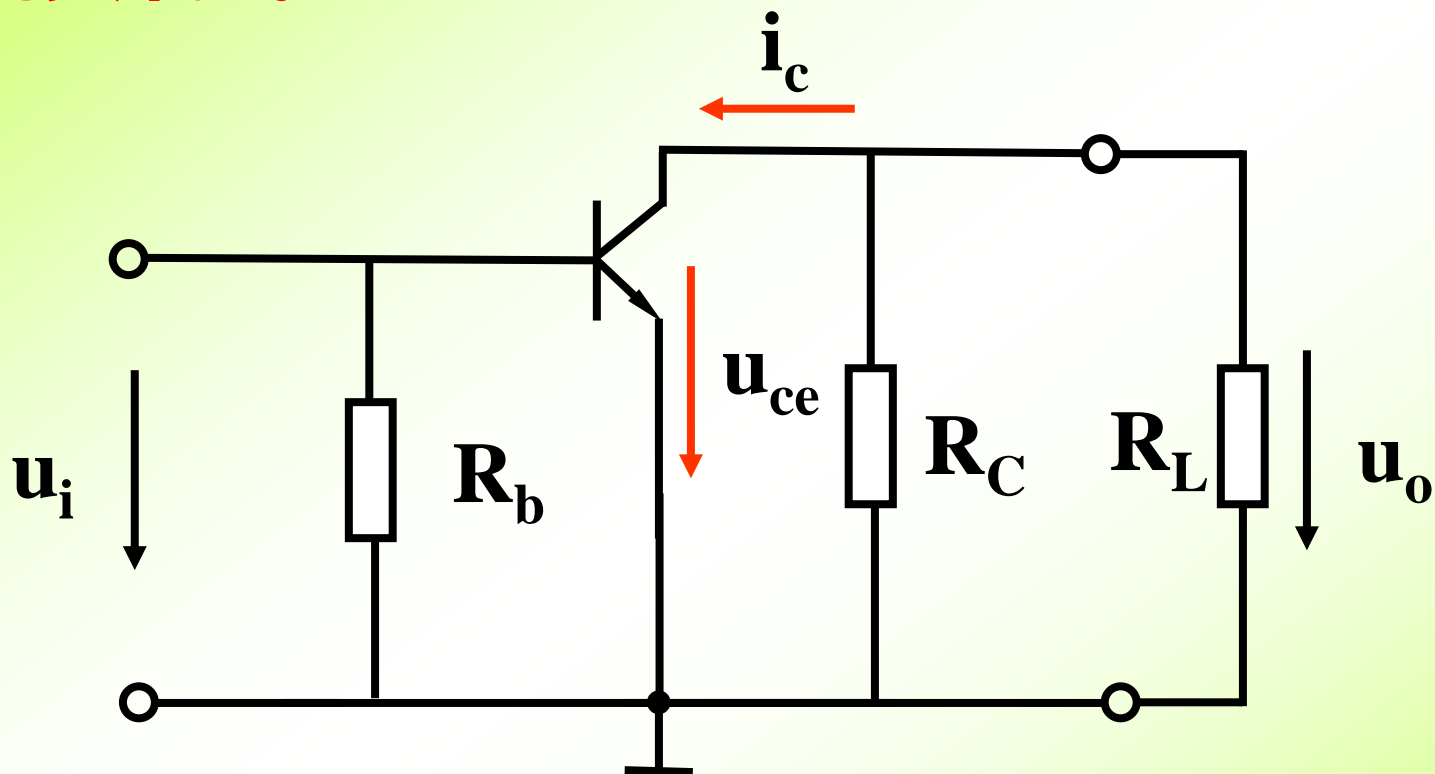


### 3.交流负载线

输出端接入负载 $R_L$ ：不影响 $Q$  影响动态！



# 交流负载线



$$u_{ce} = -i_c (R_C // R_L)$$

$$= -i_c R'_L$$

其中：  $R'_L = R_L // R_C$



交流量 $i_c$ 和 $u_{ce}$ 有如下关系:

$$u_{ce} = -i_c (R_C // R_L) = -i_c R'_L$$

$$\text{或 } i_c = (-1/R'_L) u_{ce}$$

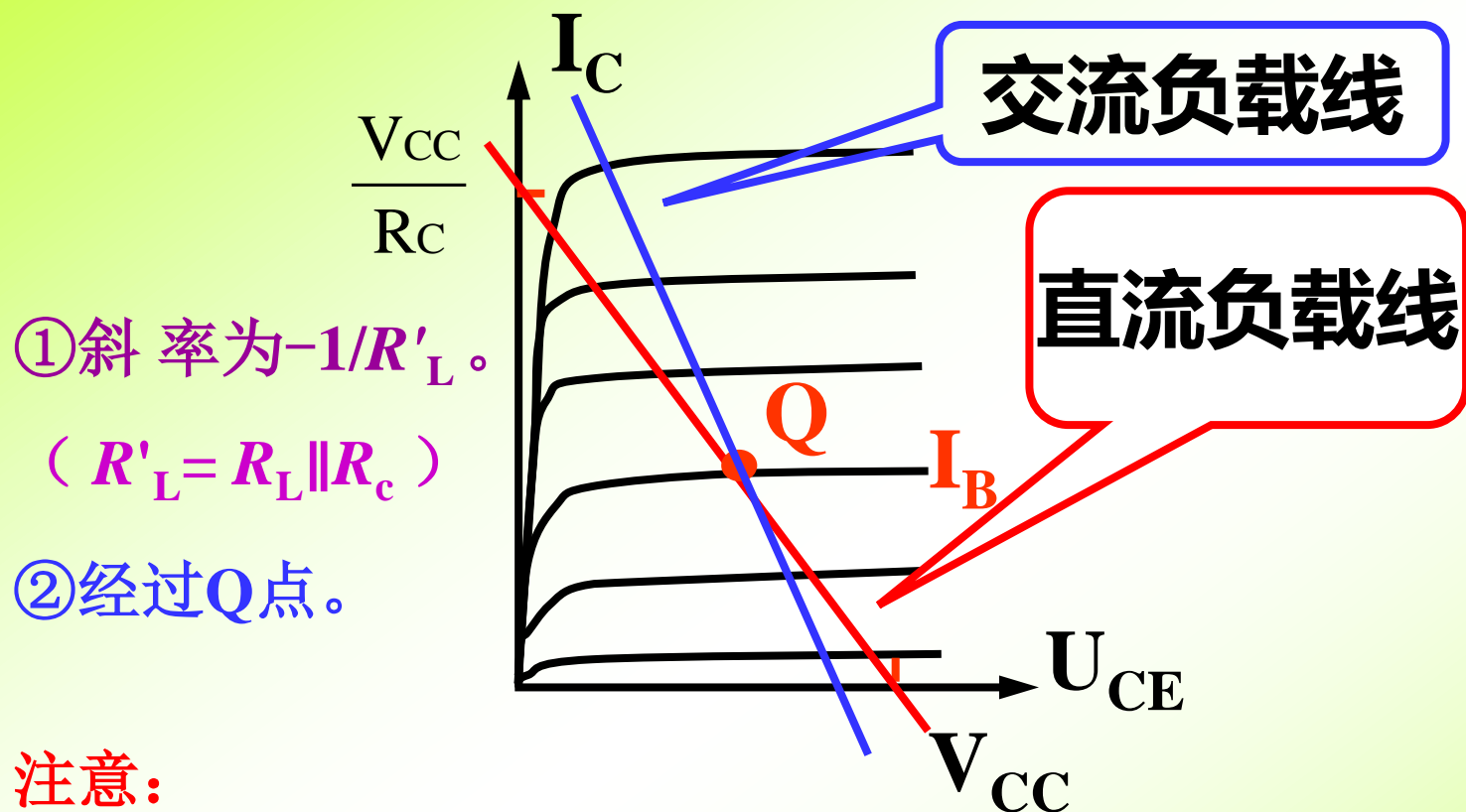
这就是说, 交流负载线的斜率为:  $-\frac{1}{R'_L}$

交流负载线的作法:

①斜 率为 $-1/R'_L$ 。(  $R'_L = R_L // R_c$  )

②经过Q点。





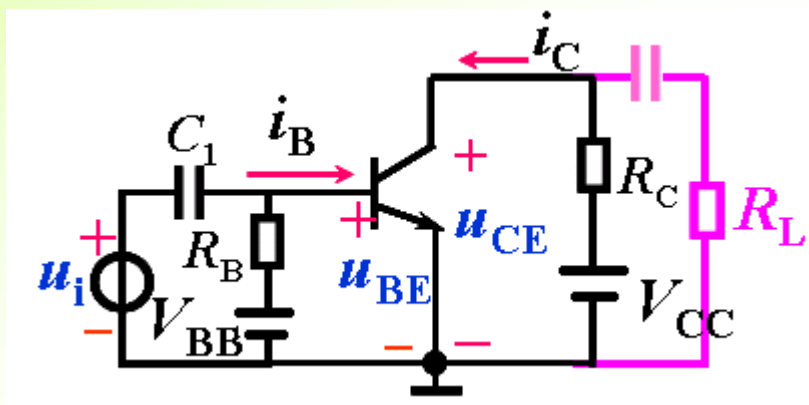
- (1) 交流负载线是有交流输入信号时工作点的运动轨迹。
- (2) 空载时，交流负载线与直流负载线重合。





例：

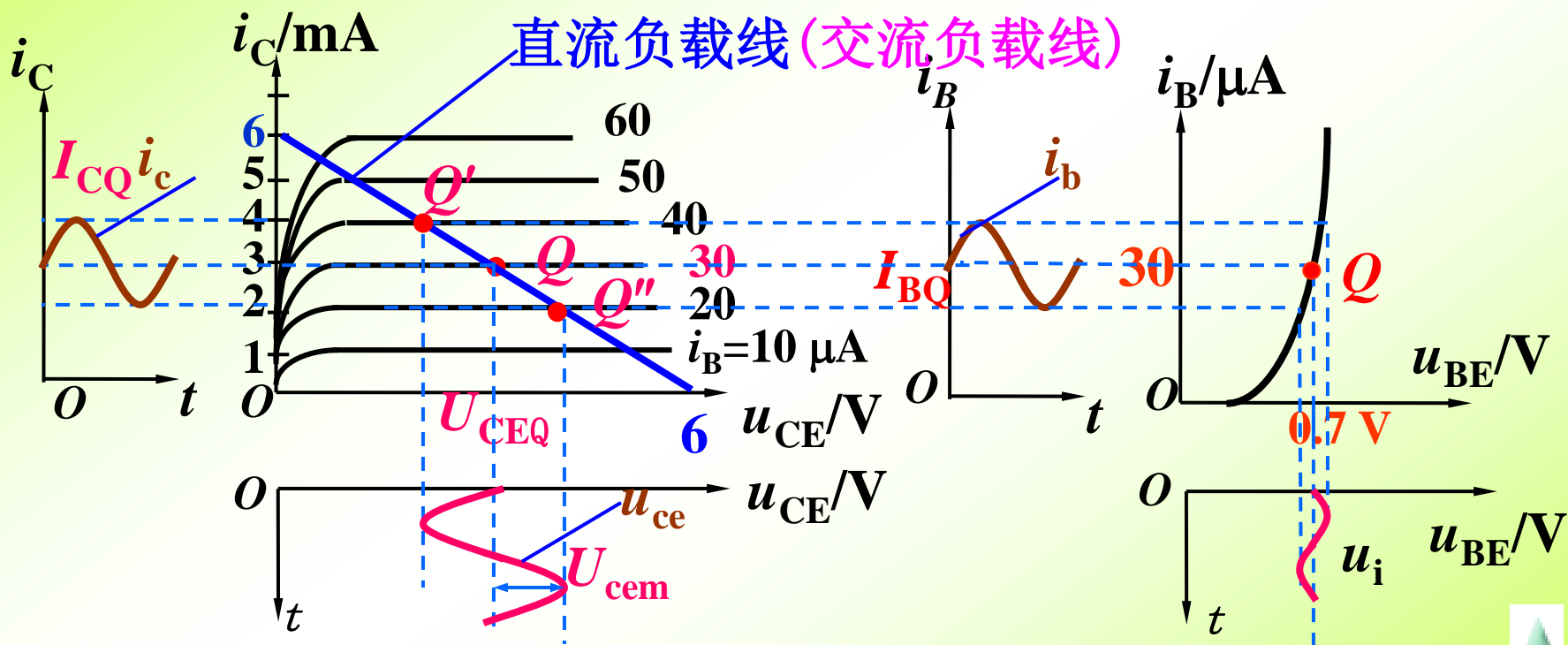
硅管， $u_i = 10 \sin \omega t$  (mV)， $R_B = 176 \text{ k}\Omega$ ， $R_C = 1 \text{ k}\Omega$ ， $V_{CC} = V_{BB} = 6 \text{ V}$ ，图解分析各电压、电流值。



[解] 令  $u_i = 0$ ，求静态电流  $I_{BQ}$

$$I_{BQ} = \frac{6 - 0.7}{176} = 0.03 \text{ (mA)} = 30 \text{ (}\mu\text{A)}$$





当  $u_i = 0$

$$u_{BE} = U_{BEQ}$$

$$i_B = I_{BQ}$$

$$i_C = I_{CQ}$$

$$u_{CE} = U_{CEQ}$$

当  $u_i = U_{im} \sin \omega t$

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

$$i_c = I_{cm} \sin \omega t$$

$$u_{ce} = -U_{cem} \sin \omega t$$

$$u_o = u_{ce}$$

$$|u_o| > |u_i|$$

$$i_B = I_{BQ} + I_{bm} \sin \omega t$$

$$i_C = I_{CQ} + I_{cm} \sin \omega t$$

$$u_{CE} = U_{CEQ} - U_{cem} \sin \omega t$$

$$= U_{CEQ} + U_{cem} \sin (180^\circ - \omega t)$$



## 选择工作点的原则：

当  $u_i$  较小时，为减少功耗和噪声，“ $Q$ ”可设得低一些；

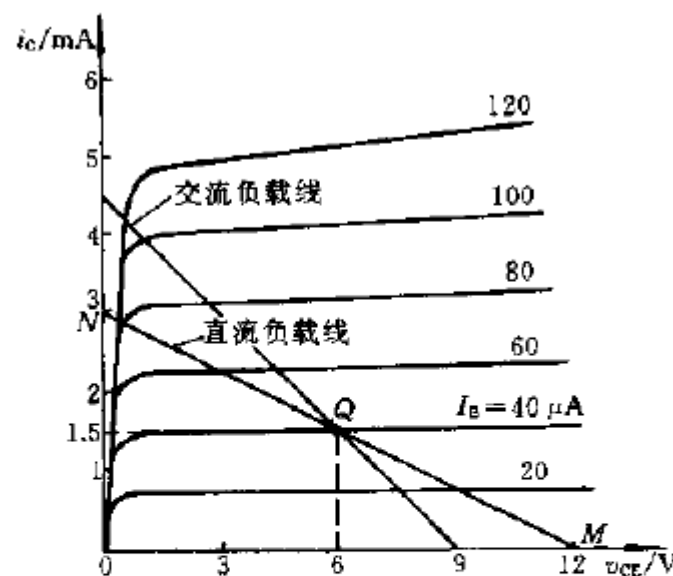
为提高电压放大倍数，“ $Q$ ”可以设得高一些；

为获得最大输出，“ $Q$ ”可设在交流负载线中点。



## Q点的选择

- Q点的选择可以采取比较灵活的原则。当信号幅度不大时，为了降低直流电源 $V_{CC}$ 的能量消耗，在不产生失真和保证一定的电压增益的前提下，可把Q点选得低一些。



- Q点选得过低，将产生截止失真；若Q点选得过高，将引起饱和失真。
- 一般，Q点选在交流负载线的中央，这时可获得最大的不失真输出，亦即可得到最大的动态工作范围。

### 3.3.5 放大电路的动态分析—— 小信号模型法

## BJT的小信号建模

### 建立小信号模型的意义

由于三极管是非线性器件，这样就使得放大电路的分析非常困难。建立小信号模型，就是将非线性器件做线性化处理，从而简化放大电路的分析和设计。

### 建立小信号模型的思路

当放大电路的输入信号电压很小时，就可以把三极管小范围内的特性曲线近似地用直线来代替，从而可以把三极管这个非线性器件所组成的电路当作线性电路来处理。

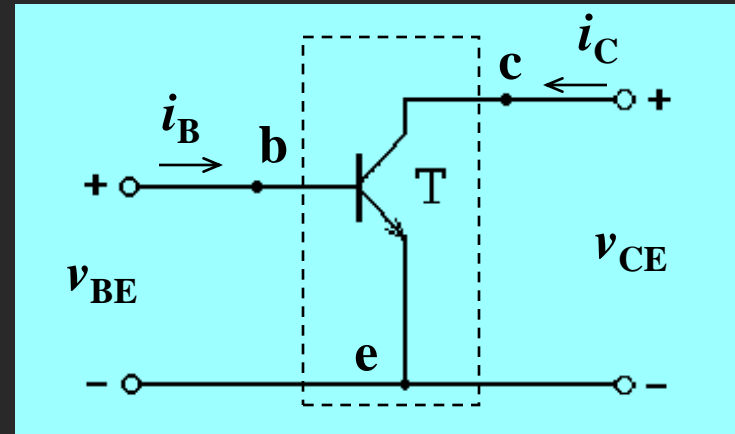
# 1. H参数的引出

对于BJT双口网络，我们已经知道输入输出特性曲线如下：

$$i_B = f(v_{BE}) \big|_{v_{CE} = \text{const}}$$

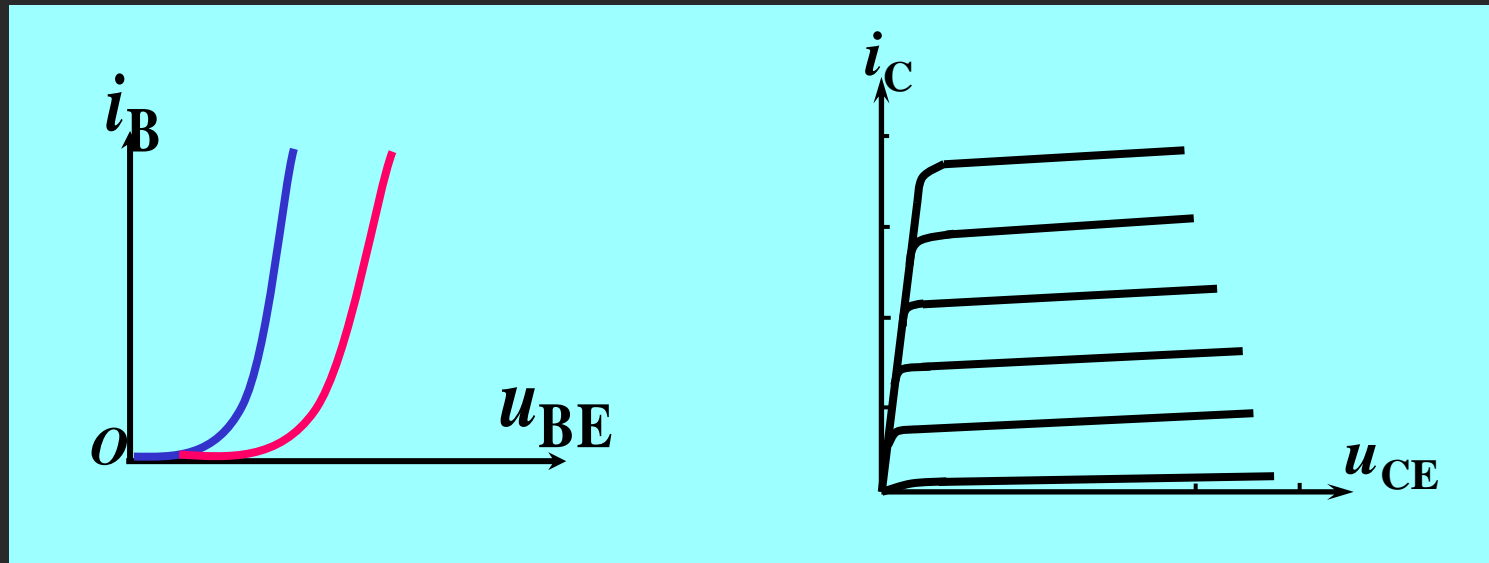
$$i_C = f(v_{CE}) \big|_{i_B = \text{const}}$$

可以写成： $v_{BE} = f(i_B, v_{CE})$



BJT双口网络

$$i_C = f(i_B, v_{CE})$$



# 1. H参数的引出

对于BJT双口网络，我们已经知道输入输出特性曲线如下：

$$i_B = f(v_{BE}) \Big|_{v_{CE} = \text{const}}$$

$$i_C = f(v_{CE}) \Big|_{i_B = \text{const}}$$

可以写成： $v_{BE} = f(i_B, v_{CE})$        $i_C = f(i_B, v_{CE})$

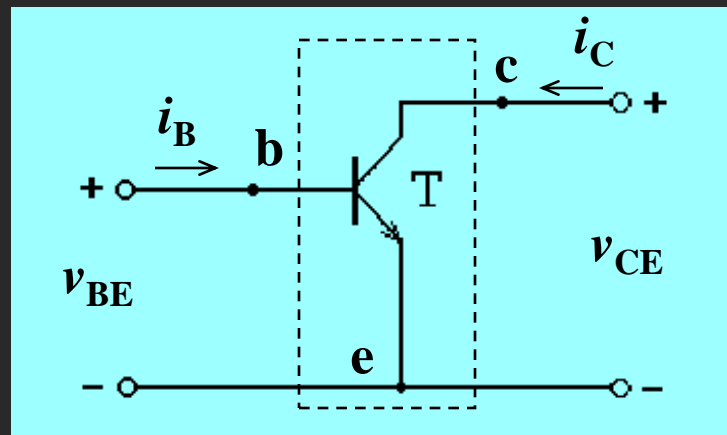
在小信号情况下，对上两式取全微分得

$$dv_{BE} = \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \Big|_{v_{CE}} \cdot di_B + \frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}} \Big|_{I_B} \cdot dv_{CE}$$

$$dv_{BE} = \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \Big|_{v_{CE}} \cdot di_B + \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \Big|_{I_B} \cdot dv_{CE}$$

用小信号交流分量表示  $v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce}$

$$i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce}$$



BJT双口网络



# 1. H参数的引出



$$v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce}$$

$$i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce}$$

其中：

$$h_{ie} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_{V_{CE}}$$

输出端交流短路时的输入电阻；

$$h_{fe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{V_{CE}}$$

输出端交流短路时的正向电流传输比或电流放大系数；

$$h_{re} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}} \right|_{I_B}$$

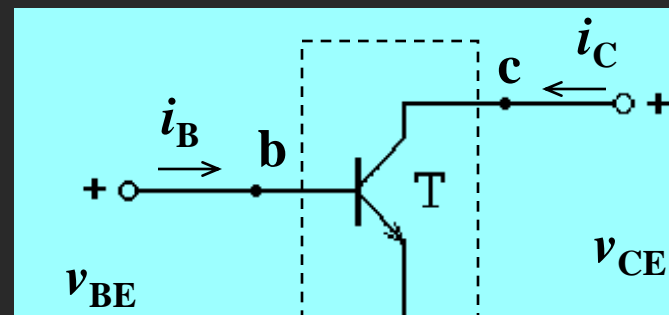
输入端交流开路时的反向电压传输比；

$$h_{oe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_{I_B}$$

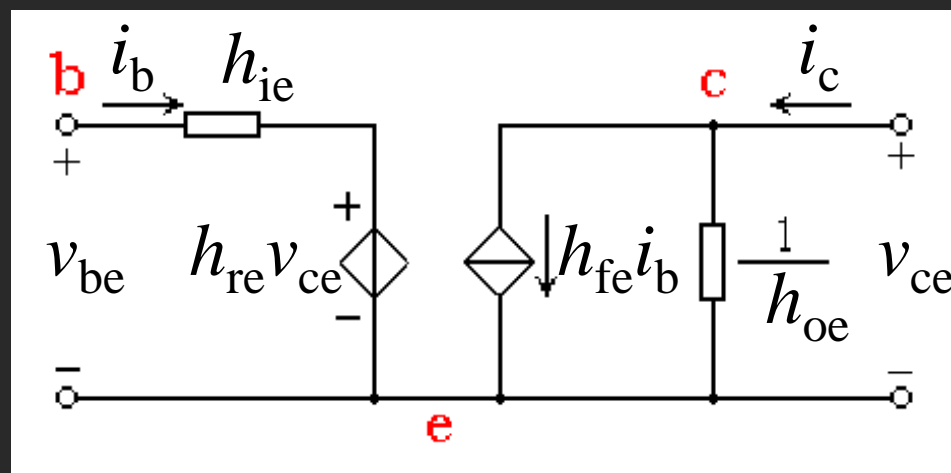
输入端交流开路时的输出电导。

四个参数量纲各不相同，故称为混合参数（H参数）。

### 3. H参数小信号模型



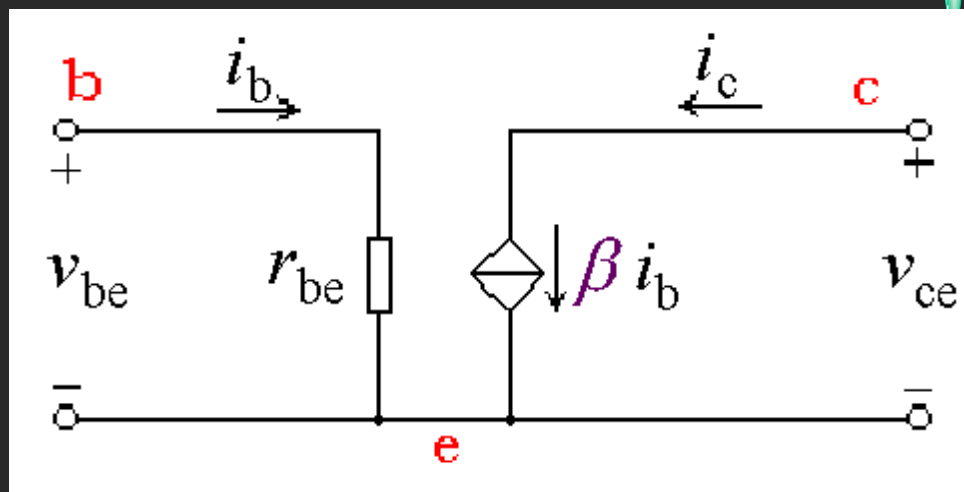
- H参数都是小信号参数，即微变参数或交流参数。
- H参数与工作点有关，在放大区基本不变。
- H参数都是微变参数，所以只适合对交流信号的分析。



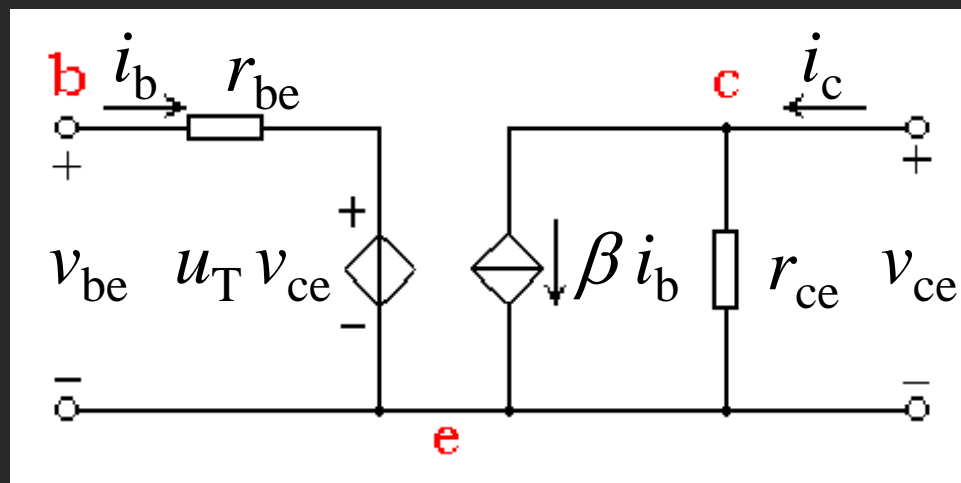
BJT的H参数模型

## 4. 模型的简化

- $\beta i_b$  是受控源，且为电流控制电流源(CCCS)。
- 电流方向与 $i_b$ 的方向是关联的。



- $u_T$  很小，一般为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ ，
- $r_{ce}$  很大，约为 $100\text{k}\Omega$ 。故一般可忽略它们的影响，得到简化电路



## 5. H参数的确定

- $\beta$  一般用测试仪测出;
- $r_{be}$  与  $Q$  点有关, 可用图示仪测出。

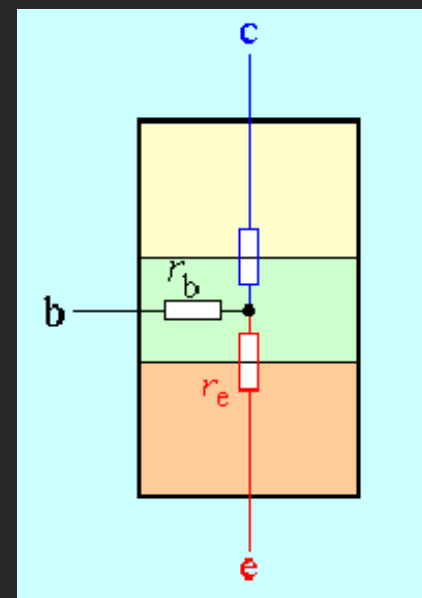
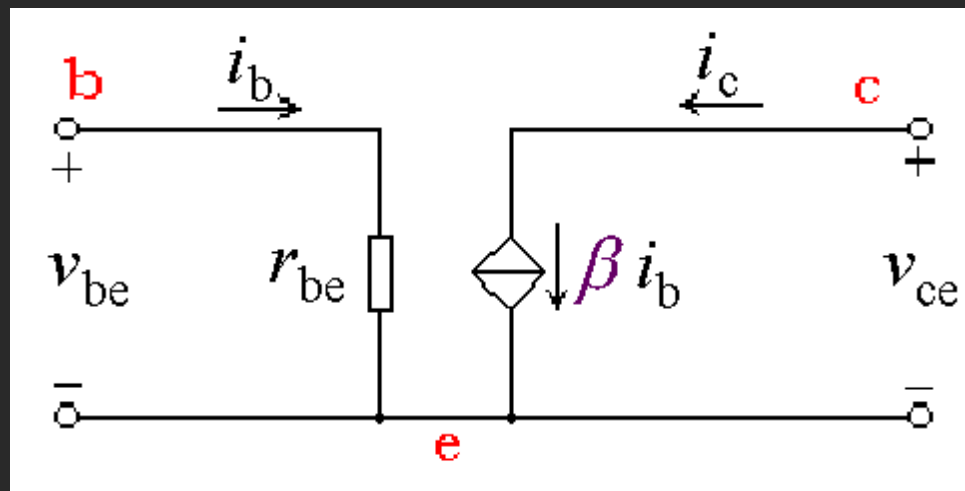
一般也用公式估算  $r_{be}$

$$r_{be} = r_b + (1 + \beta) r_e$$

其中对于低频小功率管  $r_b \approx 200\Omega$

而 
$$r_e = \frac{V_T(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} = \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} \quad (T=300\text{K})$$

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



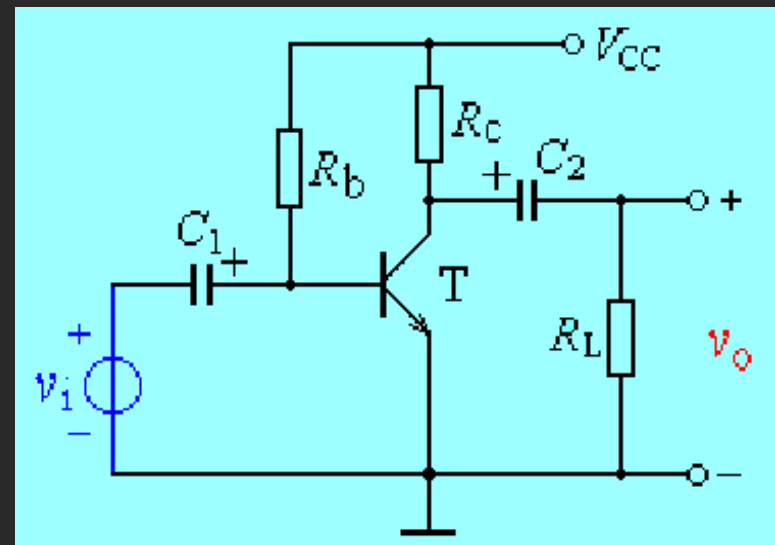
### 3.4 用H参数小信号模型分析 共发射极基本放大电路

#### 1. 利用直流通路求Q点

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

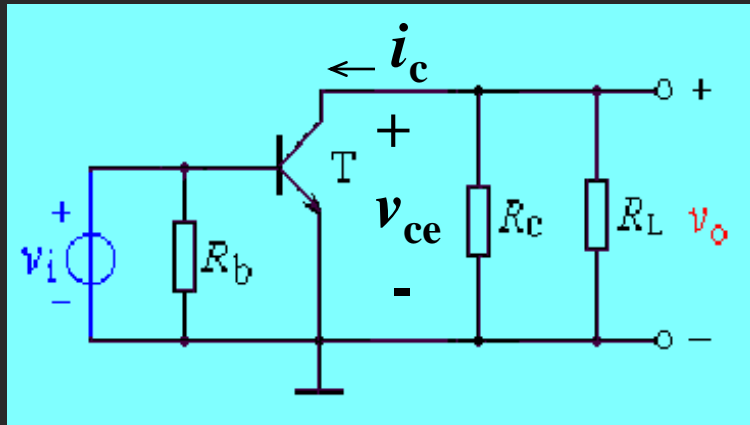
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c$$



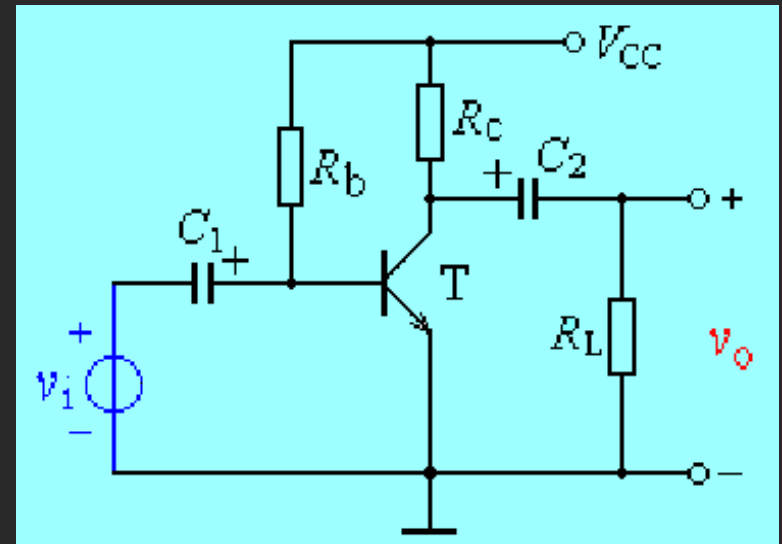
共射极放大电路

一般硅管 $V_{BE}=0.7V$ ，锗管 $V_{BE}=0.2V$ ， $\beta$ 已知。

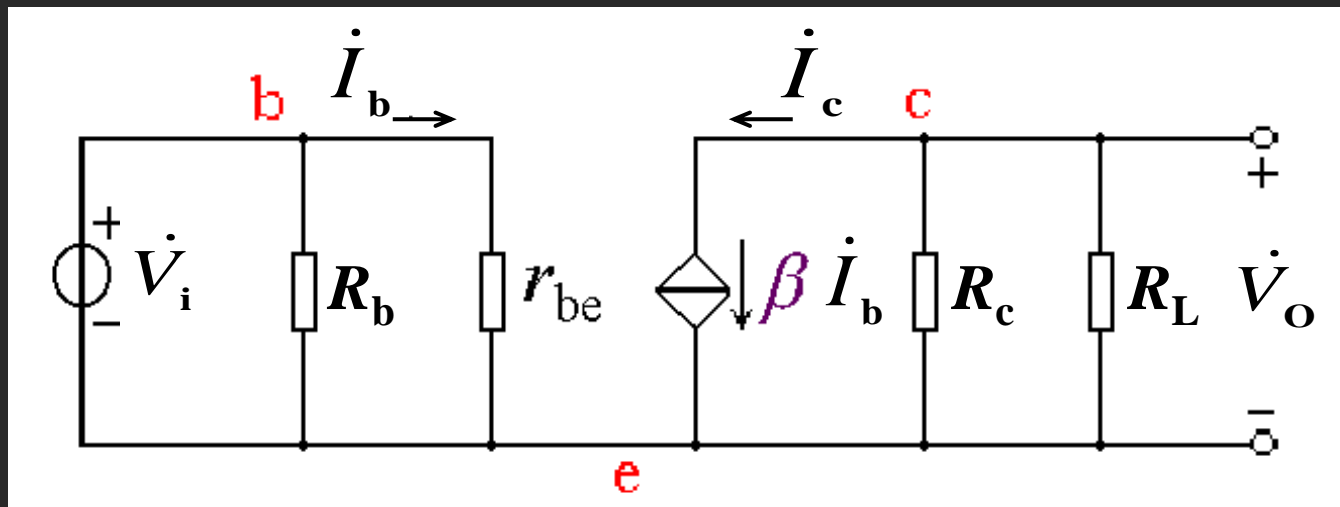
## 2. 画出小信号等效电路



交流通路

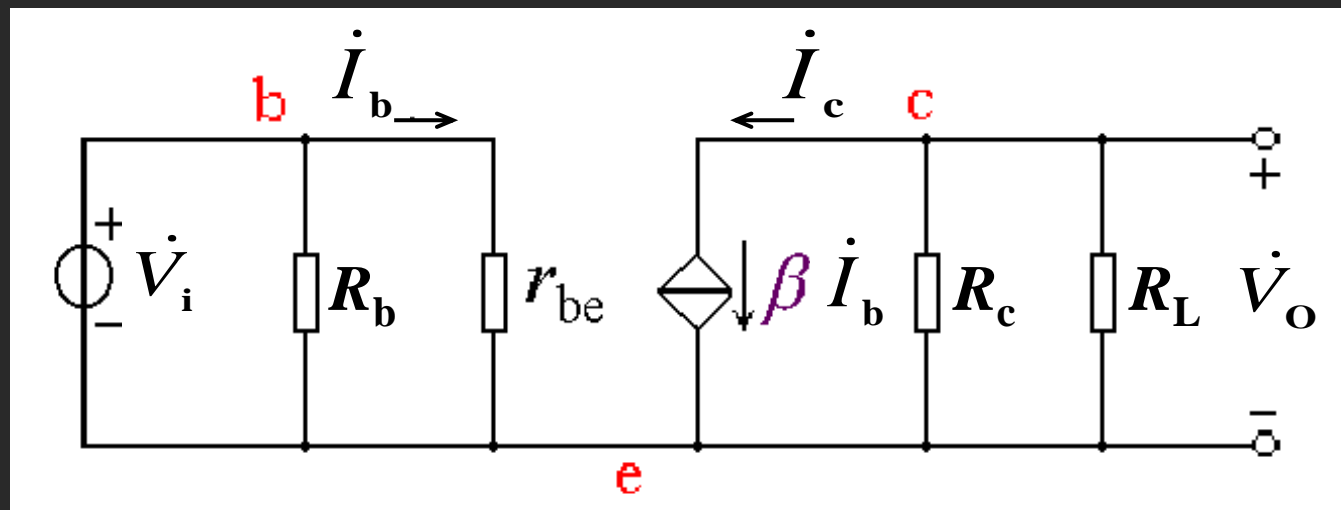


共射极放大电路



H参数小信号等效电路

### 3. 求电压增益



根据

$$\dot{V}_i = \dot{I}_b \cdot r_{be} \quad \dot{I}_c = \beta \cdot \dot{I}_b$$

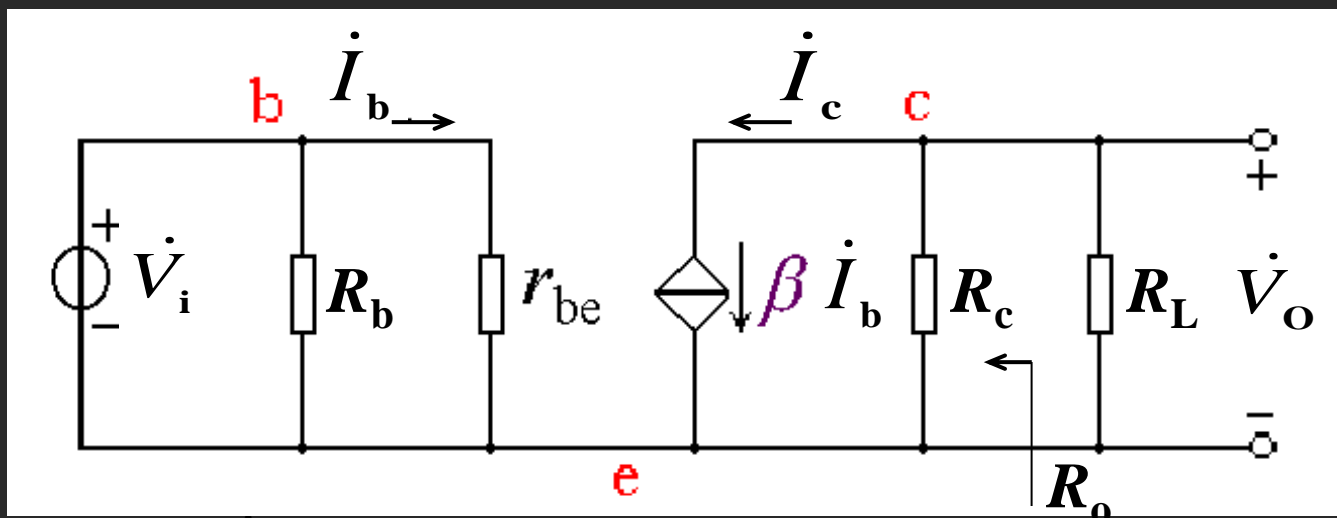
$$\dot{V}_O = -\dot{I}_c \cdot (R_c // R_L)$$

则电压增益为

$$\begin{aligned} \dot{A}_V &= \frac{\dot{V}_O}{\dot{V}_i} = \frac{-\dot{I}_c \cdot (R_c // R_L)}{\dot{I}_b \cdot r_{be}} \\ &= \frac{-\beta \cdot \dot{I}_b \cdot (R_c // R_L)}{\dot{I}_b \cdot r_{be}} = -\frac{\beta \cdot (R_c // R_L)}{r_{be}} \end{aligned}$$

(可作为公式)

## 4. 求输入电阻



$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = R_b // r_{be}$$

## 5. 求输出电阻

$$\text{令 } \dot{V}_i = 0 \quad \rightarrow \quad \dot{I}_b = 0 \quad \rightarrow \quad \beta \cdot \dot{I}_b = 0$$

$$\text{所以 } R_o = R_c$$

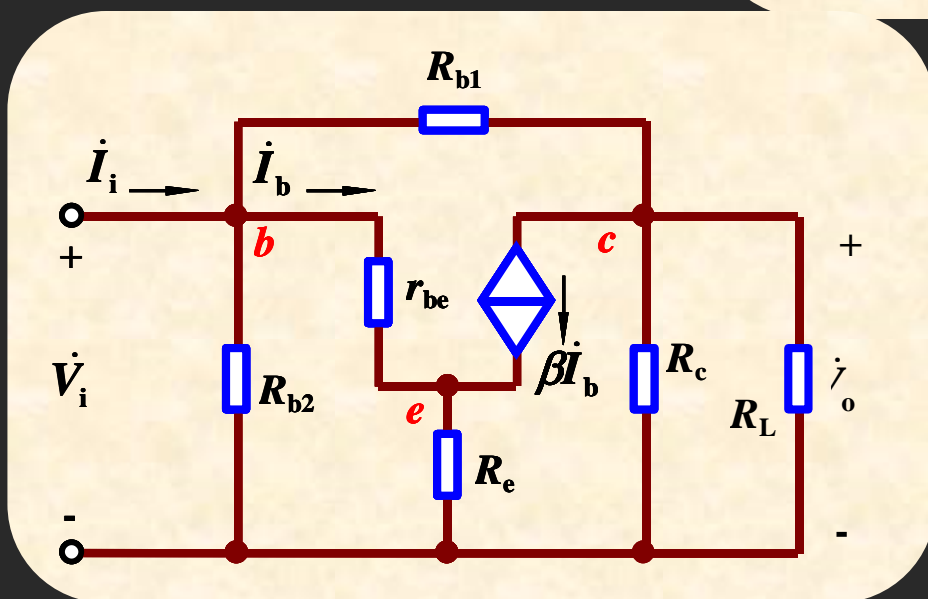
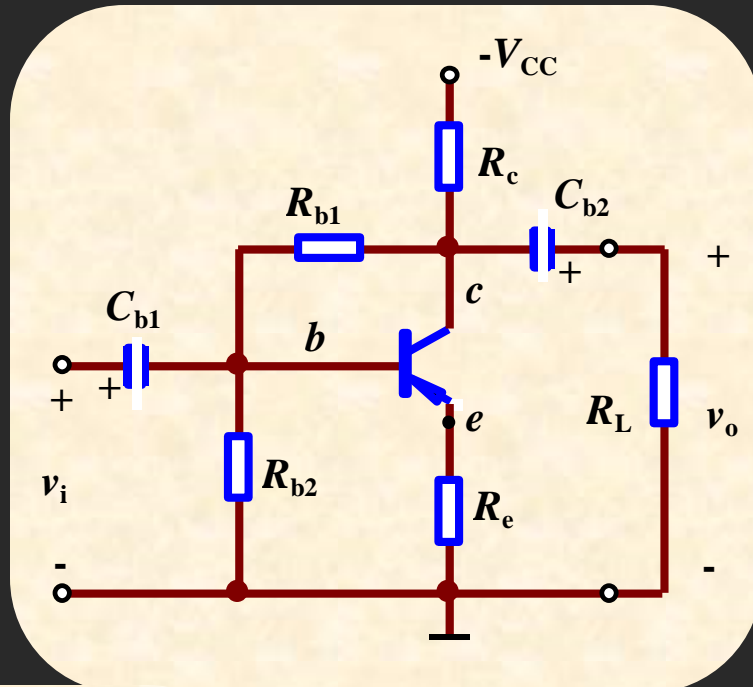
输入/输出电阻为从输入/输出端看过去的放大电路内阻，输入电阻通常建议大一点，而输出电阻通常小一点较好。



# 例题

1. 电路如图所示。试画出其小信号等效模型电路。

解：



# 例题

2. 放大电路如图所示。试求：（1）Q点；（2） $\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}$ 、 $\dot{A}_{vs} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s}$ 、 $R_i$ 、 $R_o$ 。 已知 $\beta=50$ 。

解：（1）

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b} \approx \frac{V_{CC}}{R_b} = \frac{12V}{300k\Omega} = 40\mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 50 \times 40\mu A = 2mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c = 12 - 2mA \times 4k\Omega = 4V$$

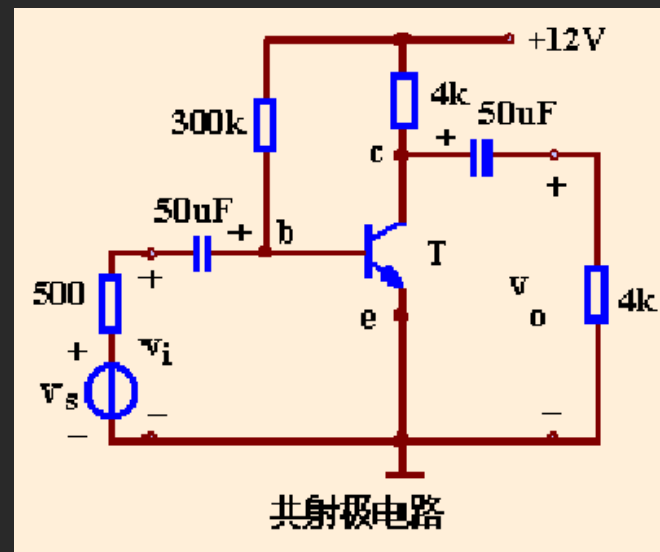
$$(2) \quad r_{be} \approx 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_E(mA)}$$

$$\approx 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_C(mA)}$$

$$= 863\Omega$$

$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = - \frac{\beta \cdot (R_c // R_L)}{r_{be}} = -115.87$$

$$R_i = R_b // r_{be} \approx r_{be} = 863\Omega$$



$$R_o = R_c = 4k$$

$$\dot{A}_{vs} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \dot{A}_v$$

$$= \frac{863}{863 + 500} \times (-115.87)$$

$$= -73.36$$

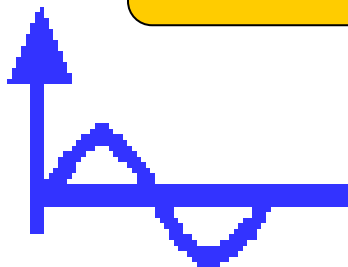
## 3.5 稳定静态工作点的放大电路

问题的提出——

单管共射放大电路存在的问题

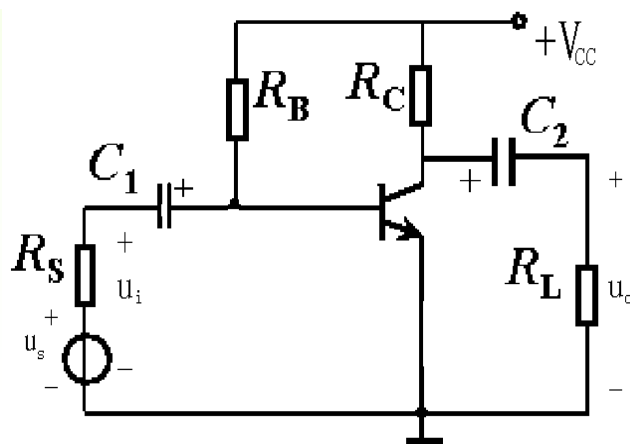
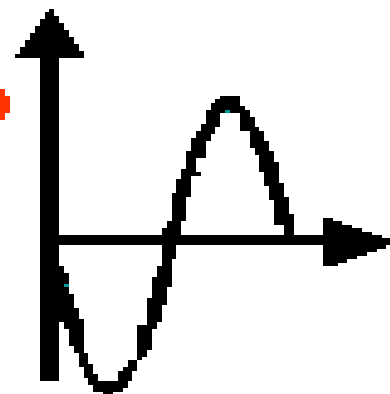


$u_i$

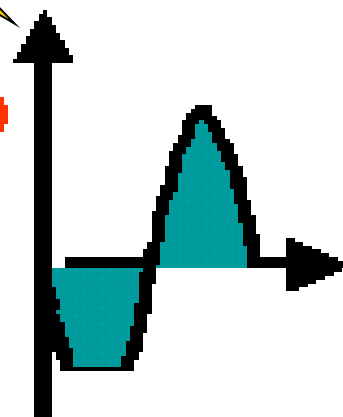


当环境温度发生变化时

$u_o$



$u_o$



## 3.5.1 温度对工作点的影响

### 1. 温度对晶体管参数的影响

$T \uparrow \rightarrow I_{CB0} \uparrow$ , 温度每升高 $10^{\circ}\text{C}$ ,  $I_{CB0} \uparrow$  一倍

$T \uparrow \rightarrow U_{BE} \downarrow$ , 温度每升高 $1^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{BE} \downarrow 2.5\text{mV}$

$T \uparrow \rightarrow \beta \uparrow$ , 温度每升高 $1^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta \beta / \beta \uparrow 0.5\text{—}1\%$



## 2. 温度对静态工作点的影响

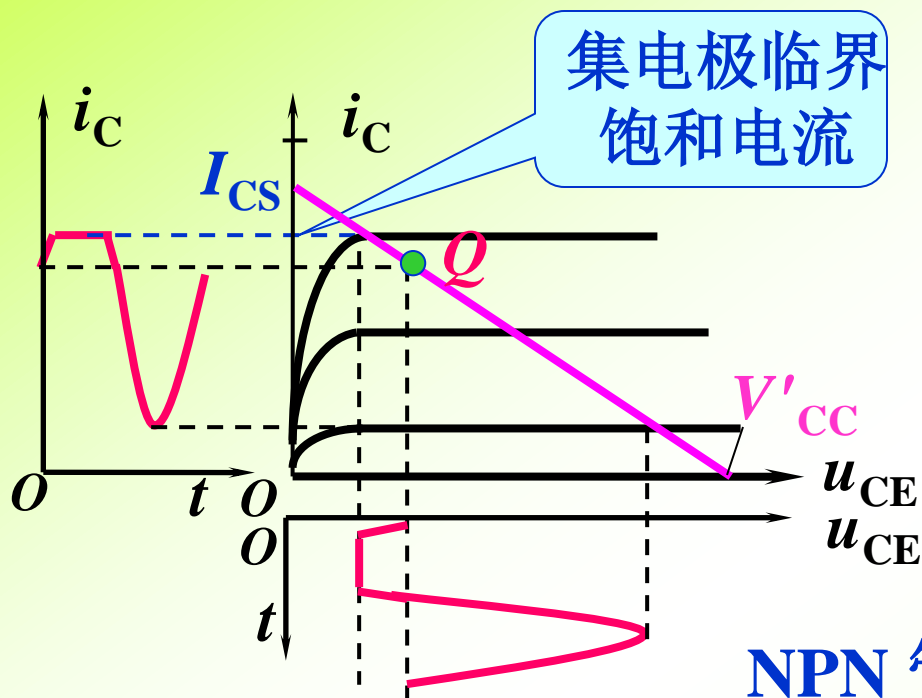
$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} + (1 + \beta) I_{CBO}$$

$$I_{BQ} = (V_{CC} - U_{BE}) / R_B \rightarrow T \uparrow \rightarrow I_{CQ} \uparrow \rightarrow Q \uparrow \rightarrow \text{饱和失真}$$

## 3 工作点上移时输出波形分析



## “ $Q$ ” 过高引起饱和失真



静态是基础，动态是目的

NPN 管：

底部失真为饱和失真。

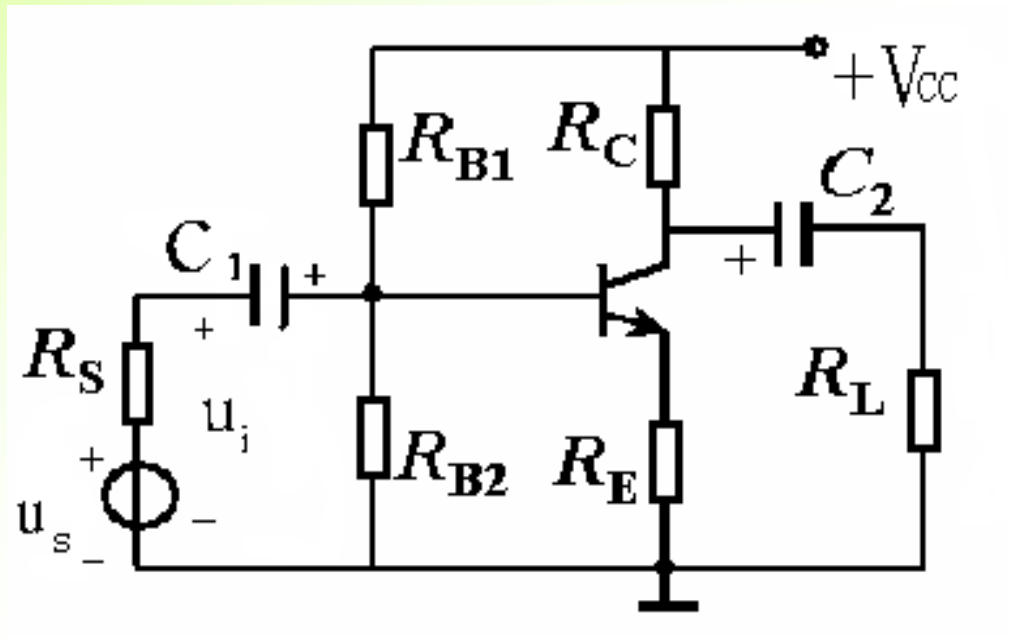
不接负载时，交、直流负载线重合



## 3.5.2 分压式偏置电路

### 稳定静态工作点的措施

#### 1. 电路组成



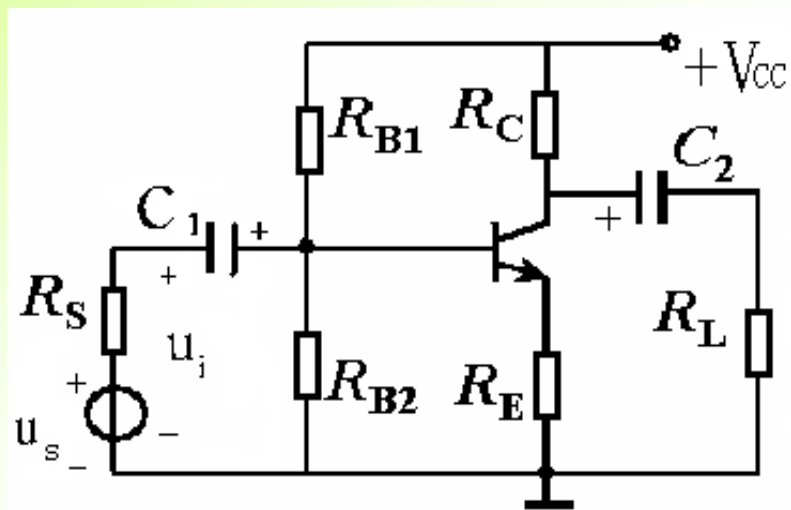
特点： $R_{B1}$ —上偏流电阻、 $R_{B2}$ —下偏流电阻、  
 $R_E$ —发射极电阻                  共发射极电路





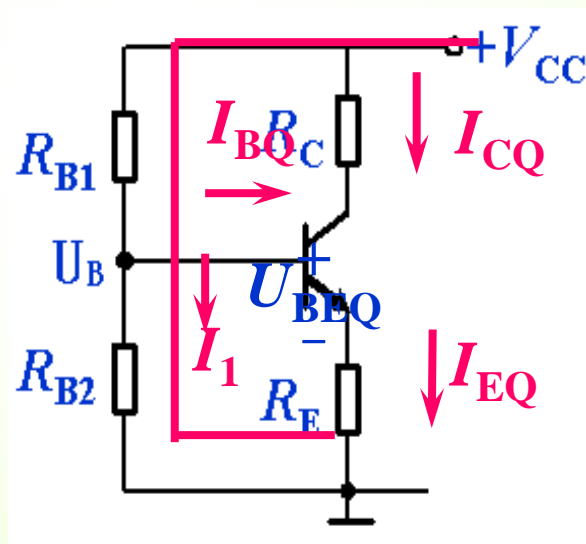
## 2. 电路的静态分析和动态分析

### (1) 静态分析



直流通路的画法

### 直流通路



## 稳定过程（原理）

$$T \uparrow \rightarrow I_{CQ} \uparrow \rightarrow I_{CQ} \times R_E \uparrow \rightarrow U_B \text{固定} \rightarrow U_{BE} \downarrow \rightarrow I_{BQ} \downarrow \rightarrow I_{CQ} \downarrow$$

若电路调整适当，可以使 $I_{CQ}$ 基本不变。

稳定的条件  $U_B$ 固定  $U_B = V_{CC} \times R_{B2} / (R_{B1} + R_{B2})$

(1)  $I_1 \gg I_B$

硅管  $I_1 = (5--10) I_{BQ}$

锗管  $I_1 = (10--20) I_{BQ}$

(2)  $U_B \gg U_{BE}$

硅管  $U_B = (3--5) V$

锗管  $U_B = (1--3) V$



求Q点 ( $I_{BQ}$ 、 $I_{CQ}$ 、 $U_{CEQ}$ )

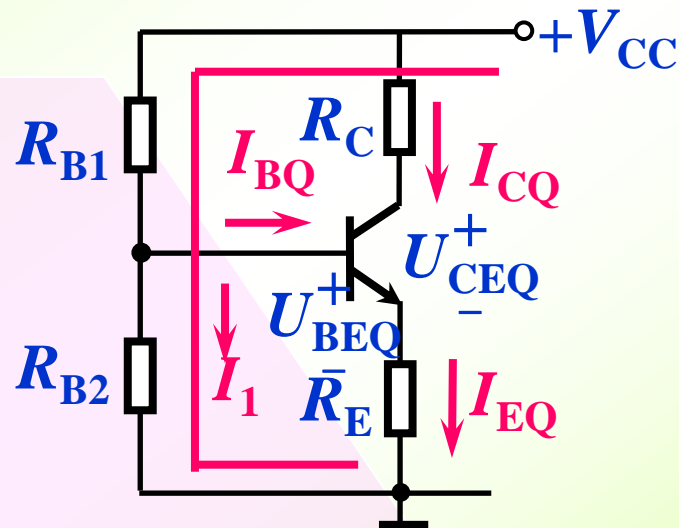
$$I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_E}$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ}$$

$$I_{BQ} \approx I_{CQ} / \beta$$

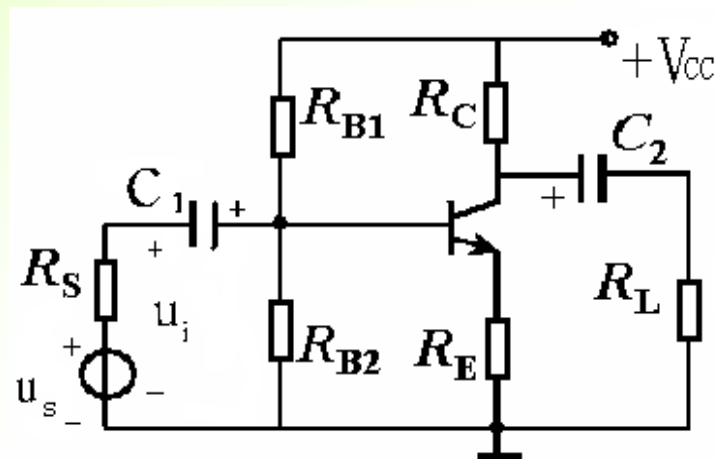
$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E)$$

说明Q是否合适



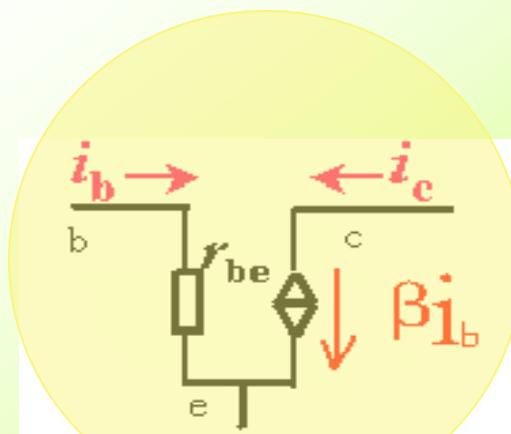
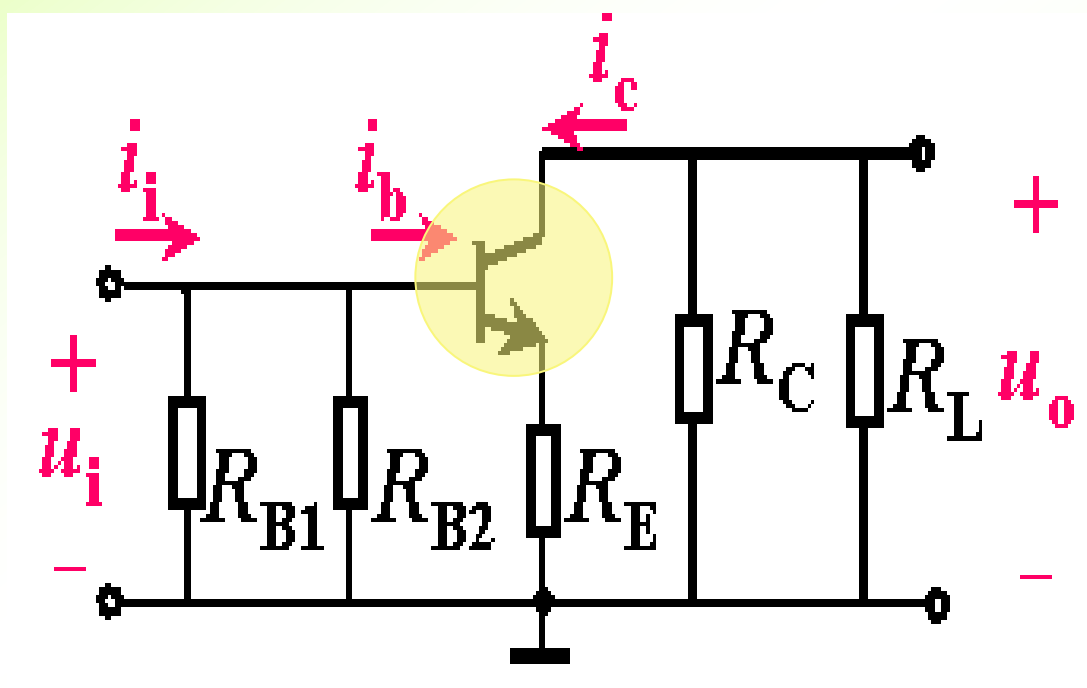
## (2) 动态分析

求  $A_U$ 、 $R_i$ 、 $R_o$

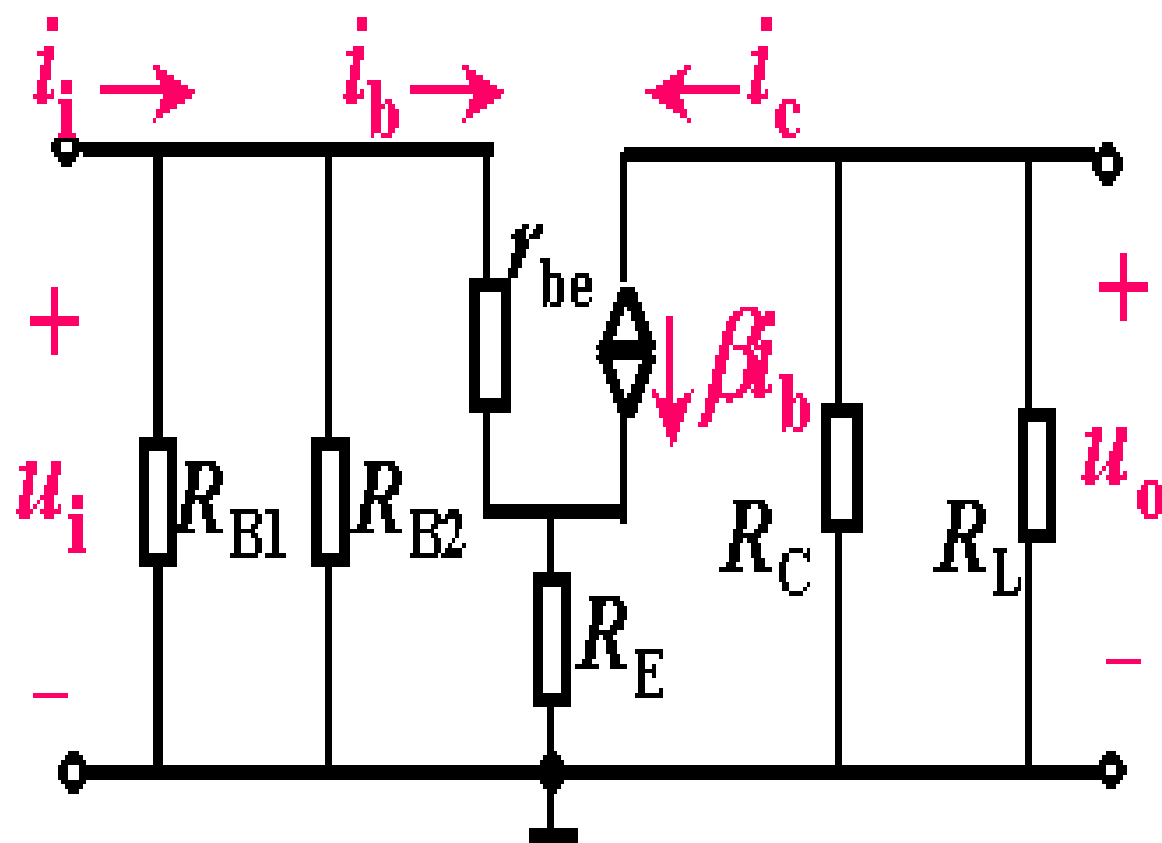


(一) 画出放大电路的微变等效电路

1. 画出交流通路

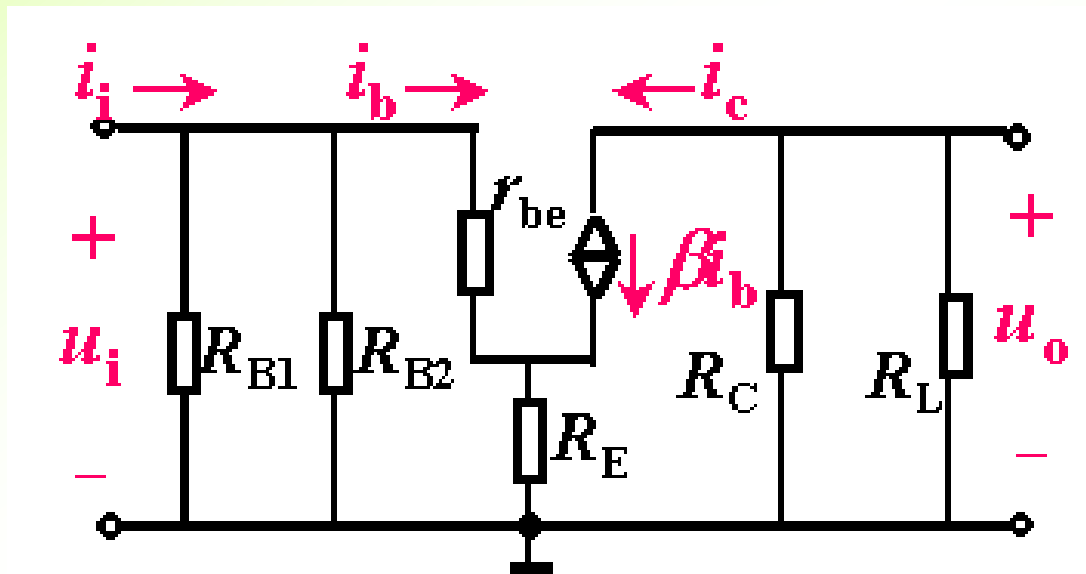


## 2. 画出放大电路的微变等效电路



## (二) 计算动态性能指标

### 1. 计算 $A_u$



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

$$A_u = - \frac{\beta R_L'}{r_{be} + (1 + \beta) R_E}$$

- “-” 表示 $U_o$ 和 $U_i$ 反相。
- $A_u$ 的值比固定偏流放大电路小了。



## 2. 计算输入电阻

$R_i \uparrow$

$$R_i = u_i / i_i$$

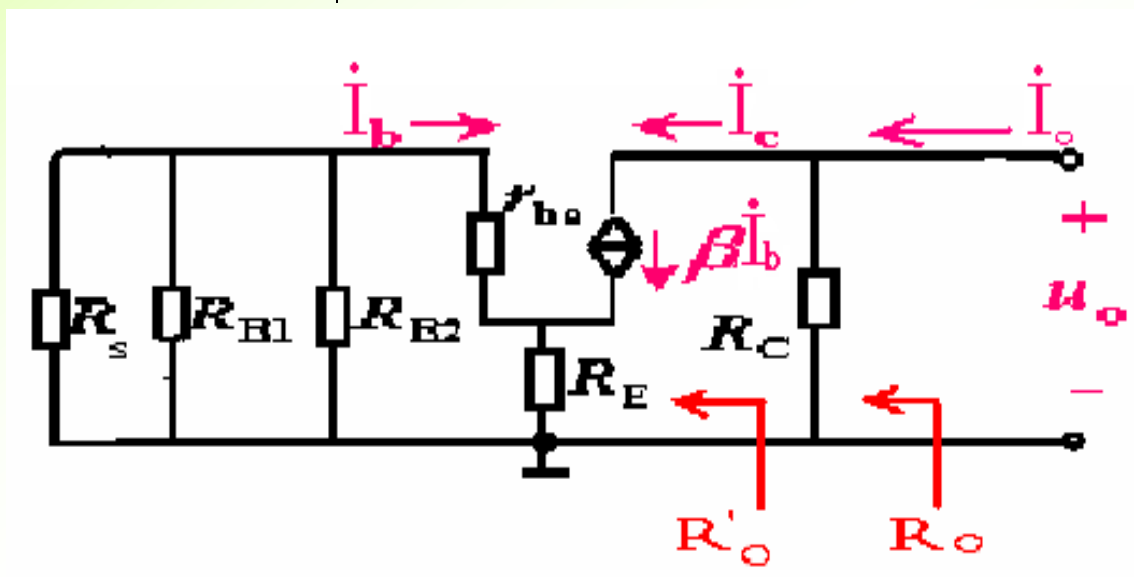
$$R_i = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_E]$$





### 3. 计算输出电阻 $R_o$

$$R_o = u_o / i_o \quad \left| \begin{array}{l} U_s = 0 \\ R_L = \infty \end{array} \right.$$



$u_o$  在  $R_E$  两端的电压可以忽略不计，因此  $R_o \approx R_C$ 。

