

电子技术  
模拟电路部分

## 第二章

# 基本放大电路

## 第二章 基本放大电路

本章要求:

1. 理解单管交流放大电路的放大作用和共发射极、共集电极放大电路的性能特点。
2. 掌握静态工作点的估算方法和放大电路的微变等效电路分析方法。
3. 了解放大电路输入、输出电阻的概念，
4. 掌握多级阻容耦合放大电路的分析方法。
5. 了解场效应管的电流放大作用、主要参数的意义。

# 第二章 基本放大电路

## § 2.1 概论

## § 2.2 放大电路的组成和工作原理

## § 2.3 放大电路的分析方法

## § 2.4 静态工作点的稳定

## § 2.5 射极输出器

## § 2.6 场效应管放大电路

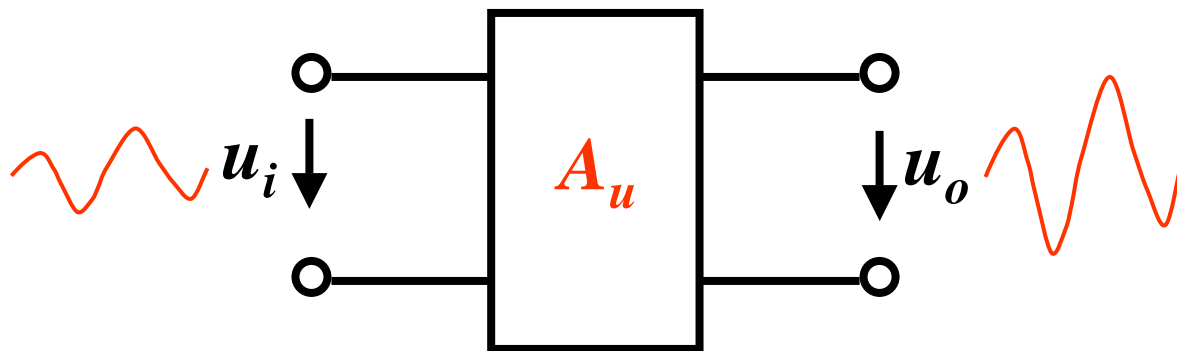
## § 2.7 多级阻容耦合放大电路

## § 2.1 概论

### 2.1.1 放大的概念

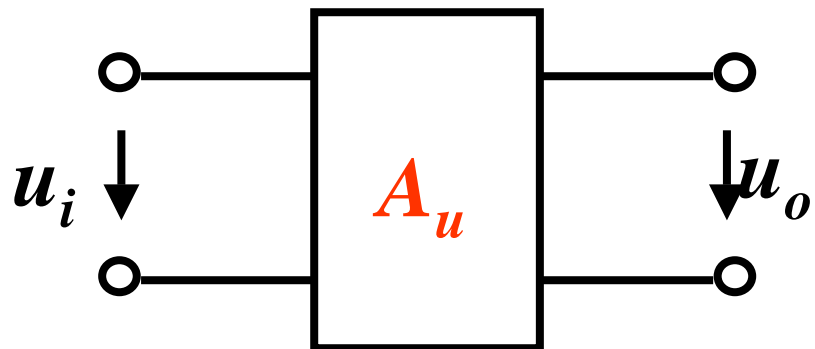
电子学中放大的目的是将微弱的变化信号放大成较大的信号。这里所讲的主要是电压放大电路。

电压放大电路可以用有输入口和输出口的四端网络表示，如图：



## 2.1.2 放大电路的性能指标

### 一、电压放大倍数 $A_u$



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

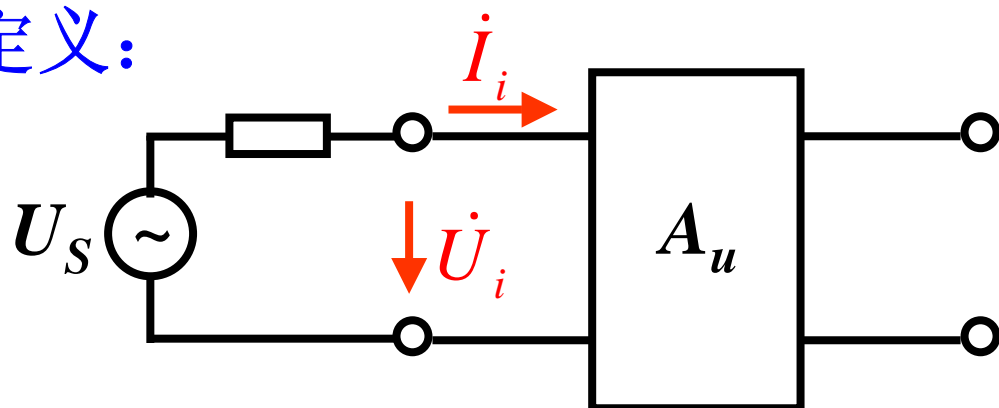
$A_u$ 是复数，反映了输出和输入的幅值比与相位差。

$$|A_u| = \frac{U_o}{U_i}$$

$U_i$ 和 $U_o$ 分别是输入和输出电压的有效值。

## 二、输入电阻 $r_i$

定义:



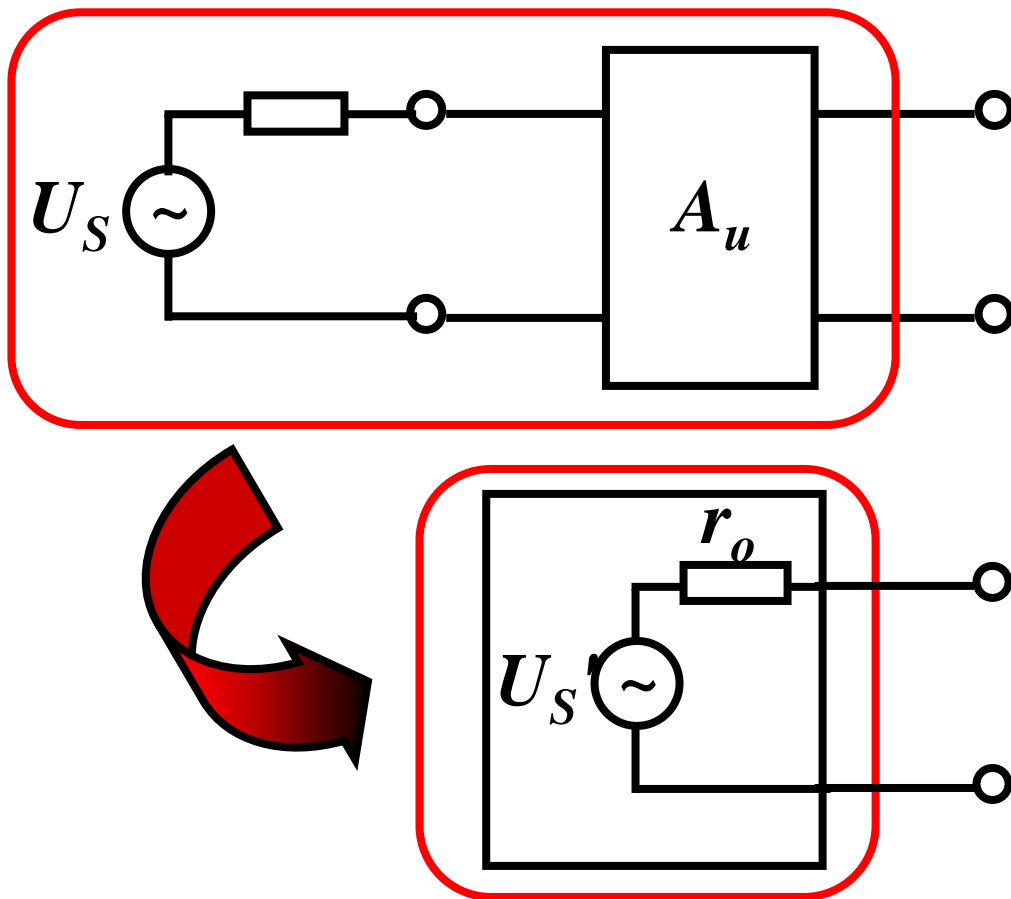
$$r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}$$

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 $u_s$

### 三、输出电阻 $r_o$

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

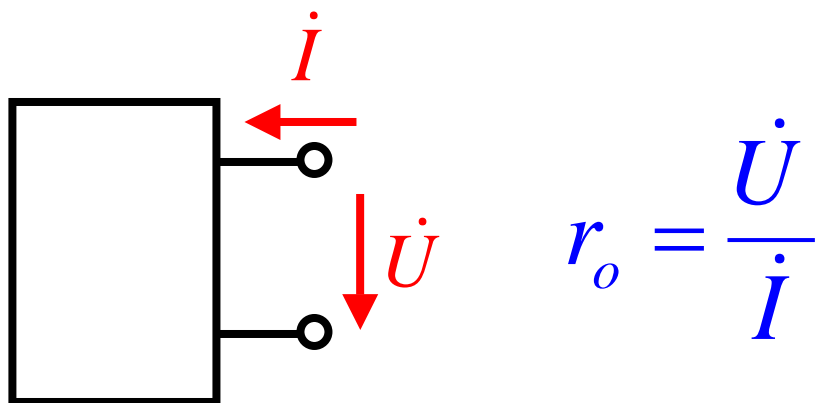


## 如何确定电路的输出电阻 $r_o$ ？

方法一：计算。

步骤：

1. 所有的电源置零 (将独立源置零，保留受控源)。
2. 加压求流法。

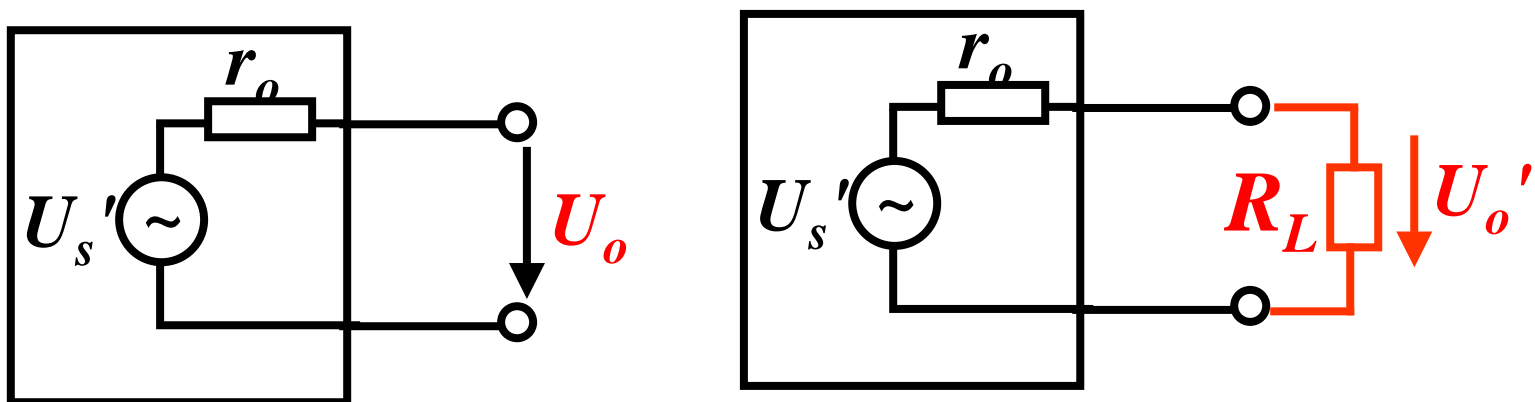




## 方法二：测量。

步骤：

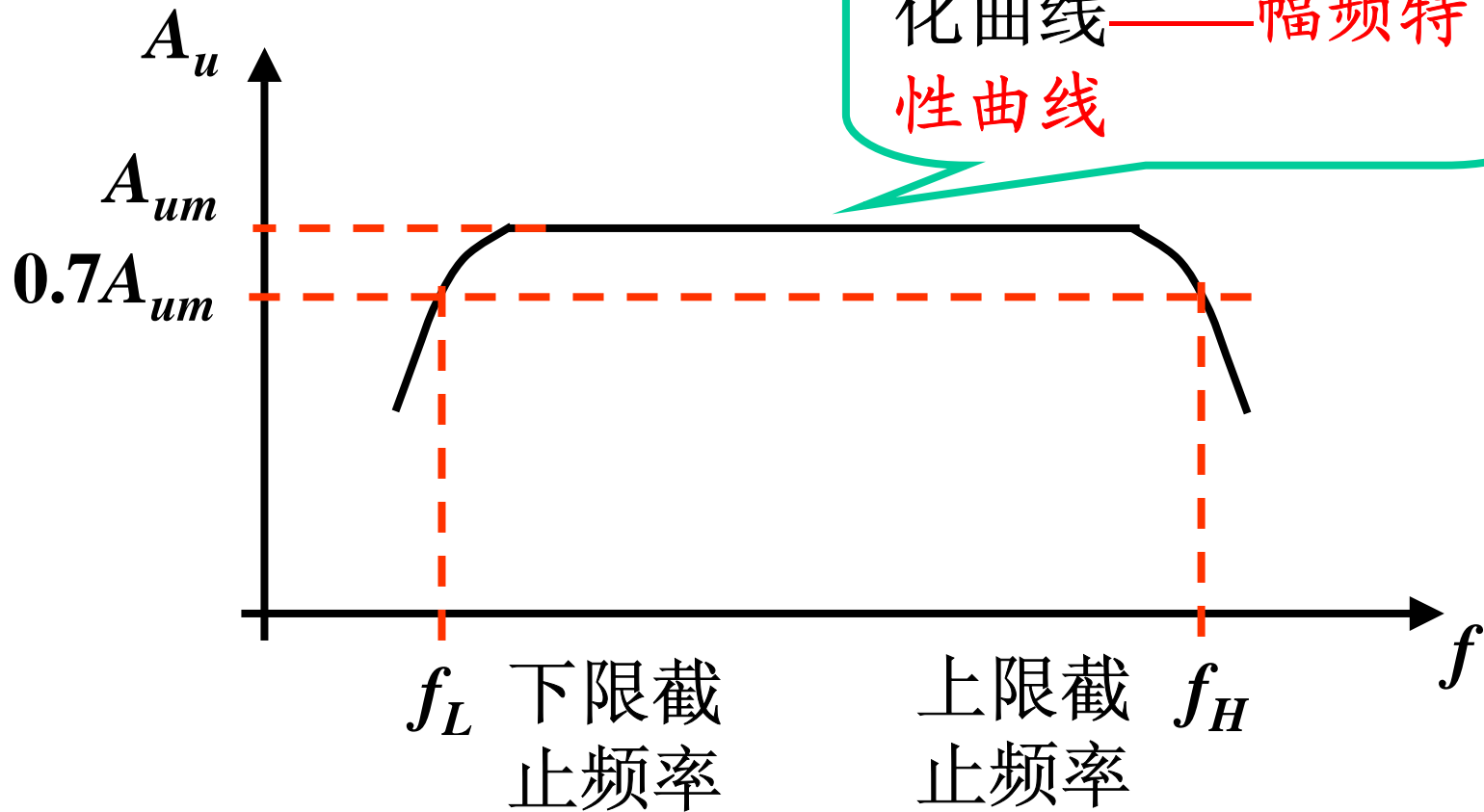
1. 测量开路电压。
2. 测量接入负载后的输出电压。



3. 计算。

$$r_o = \left( \frac{U_o}{U_o'} - 1 \right) R_L$$

## 四、通频带



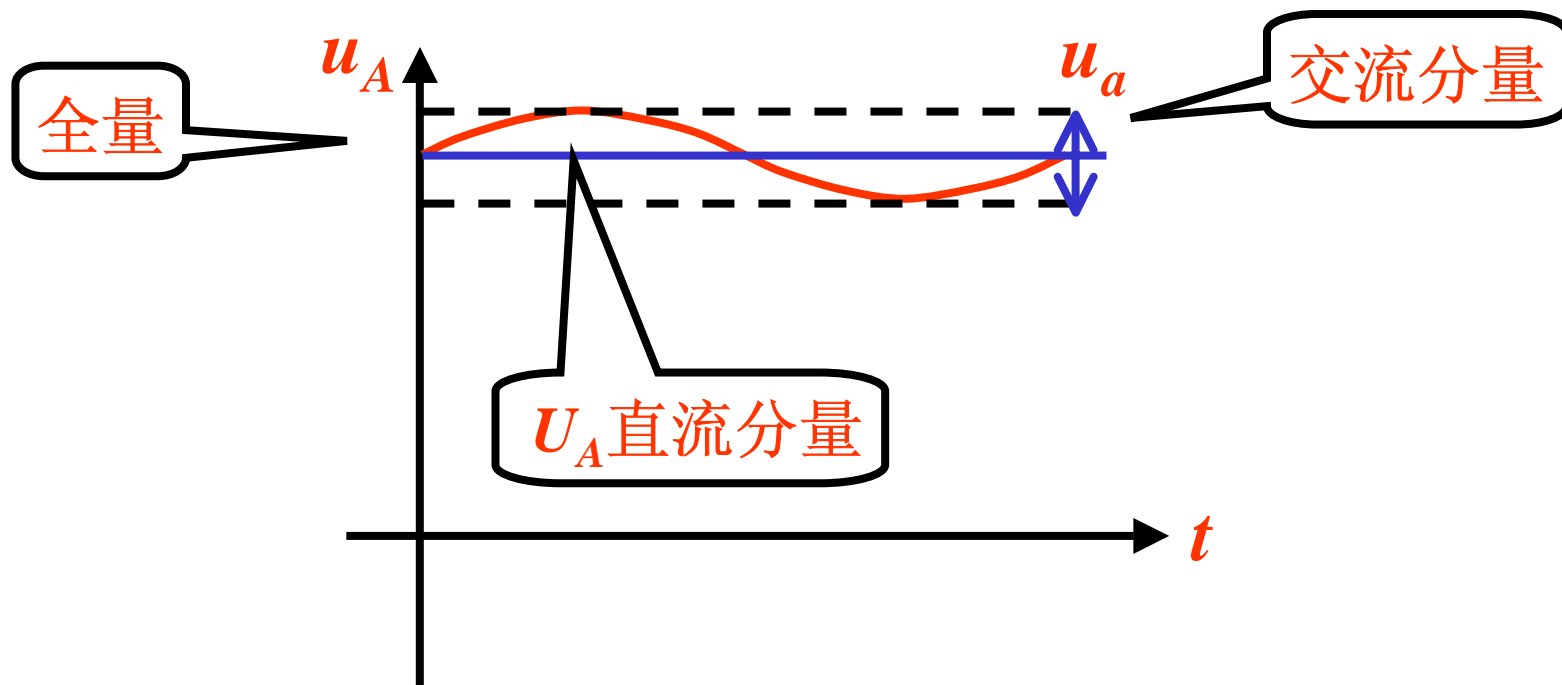
通频带:  $f_{bw} = f_H - f_L$

## 2.1.3 符号规定

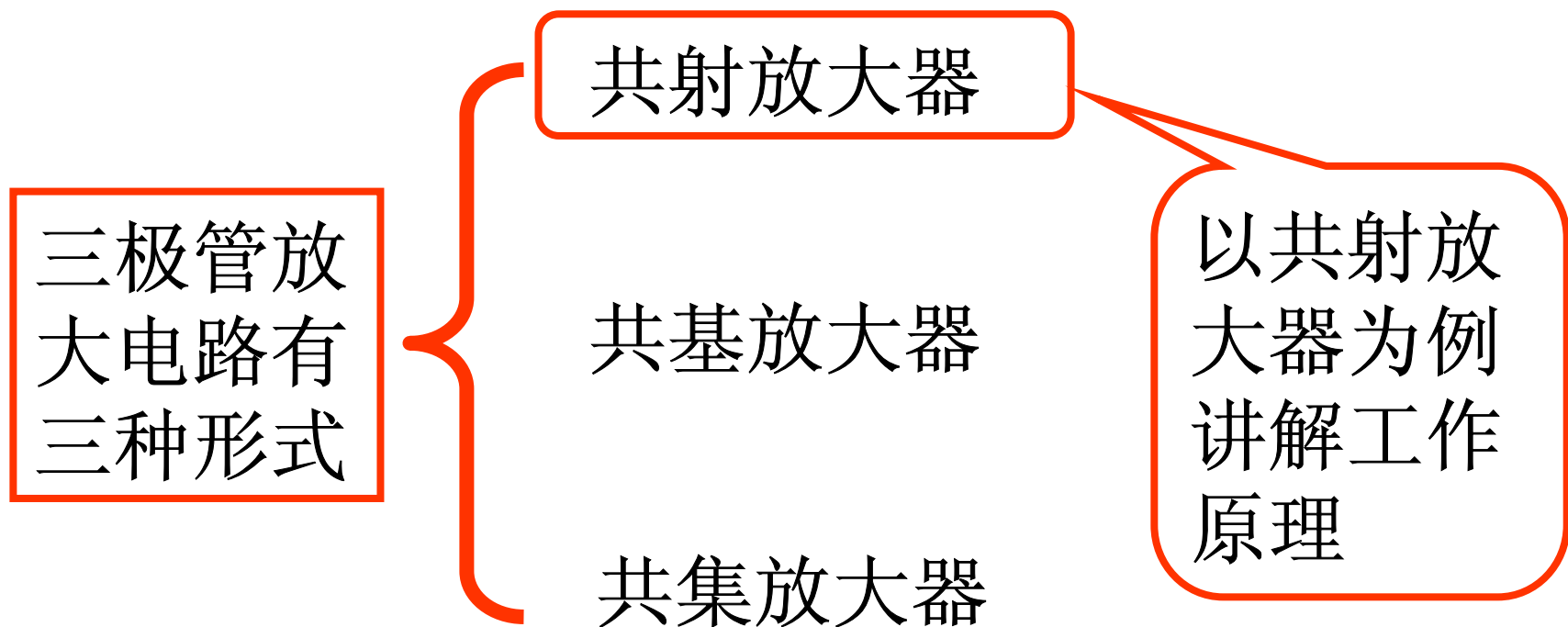
$U_A$  大写字母、大写下标，表示直流量。

$u_A$  小写字母、大写下标，表示全量。

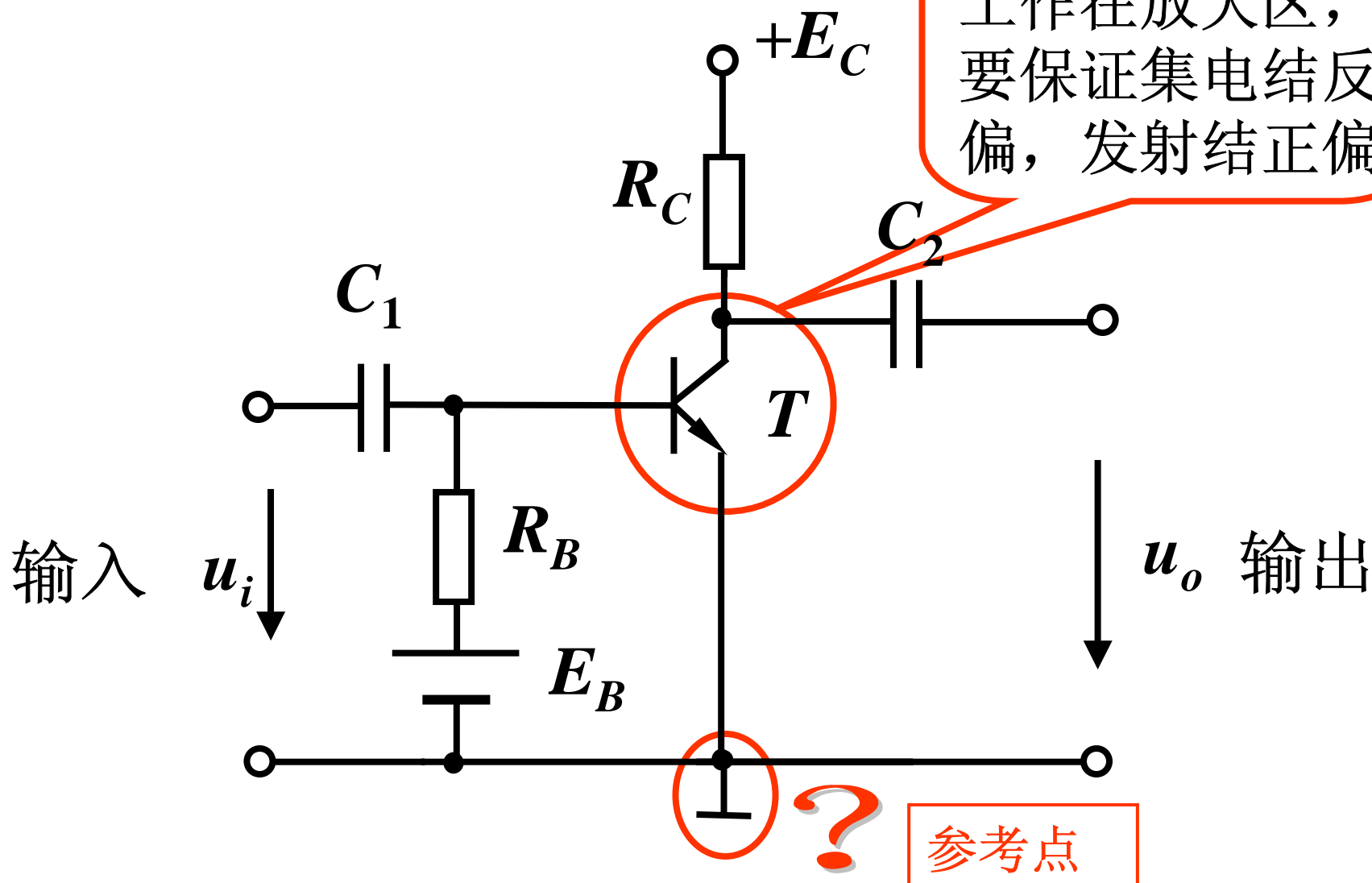
$u_a$  小写字母、小写下标，表示交流分量。

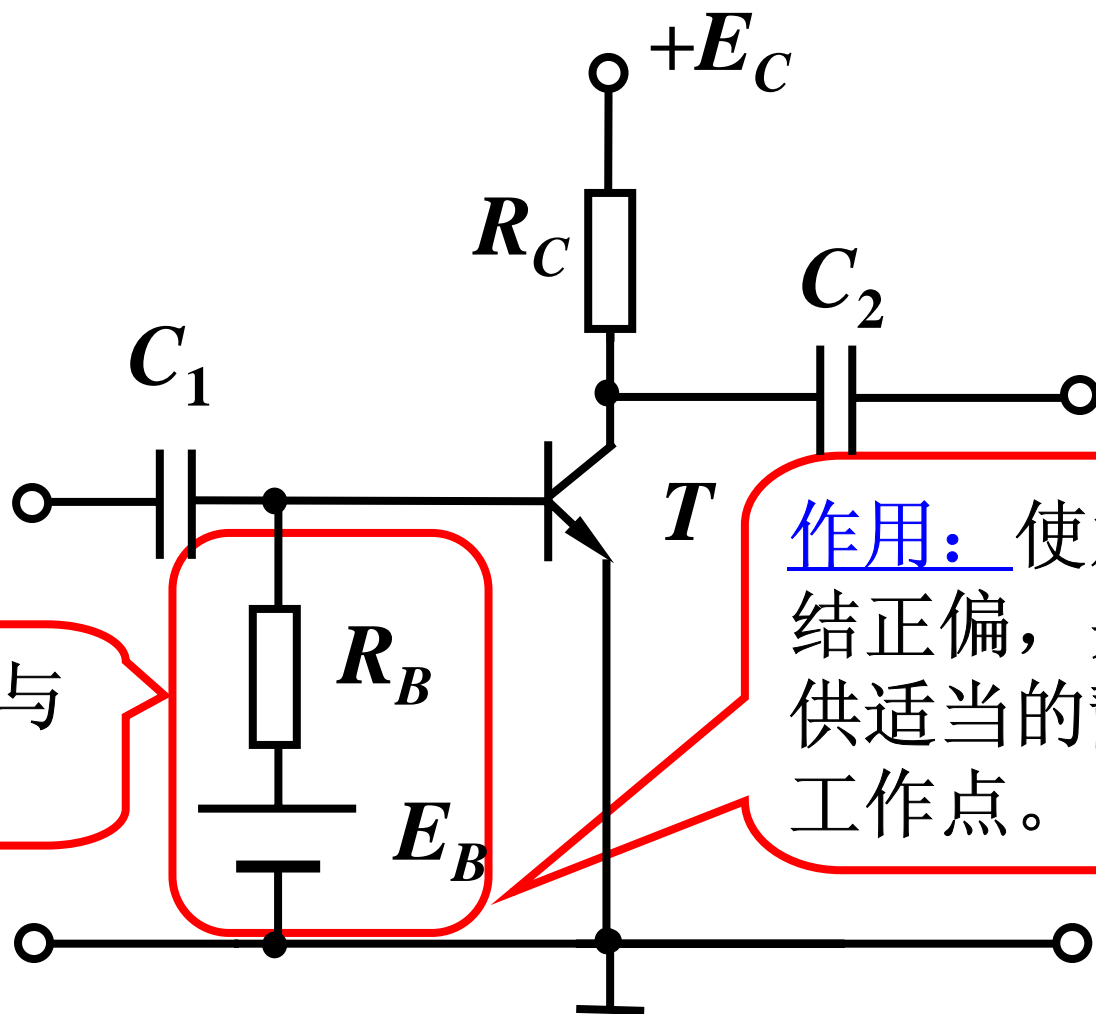


## § 2.2 基本放大电路的组成和工作原理



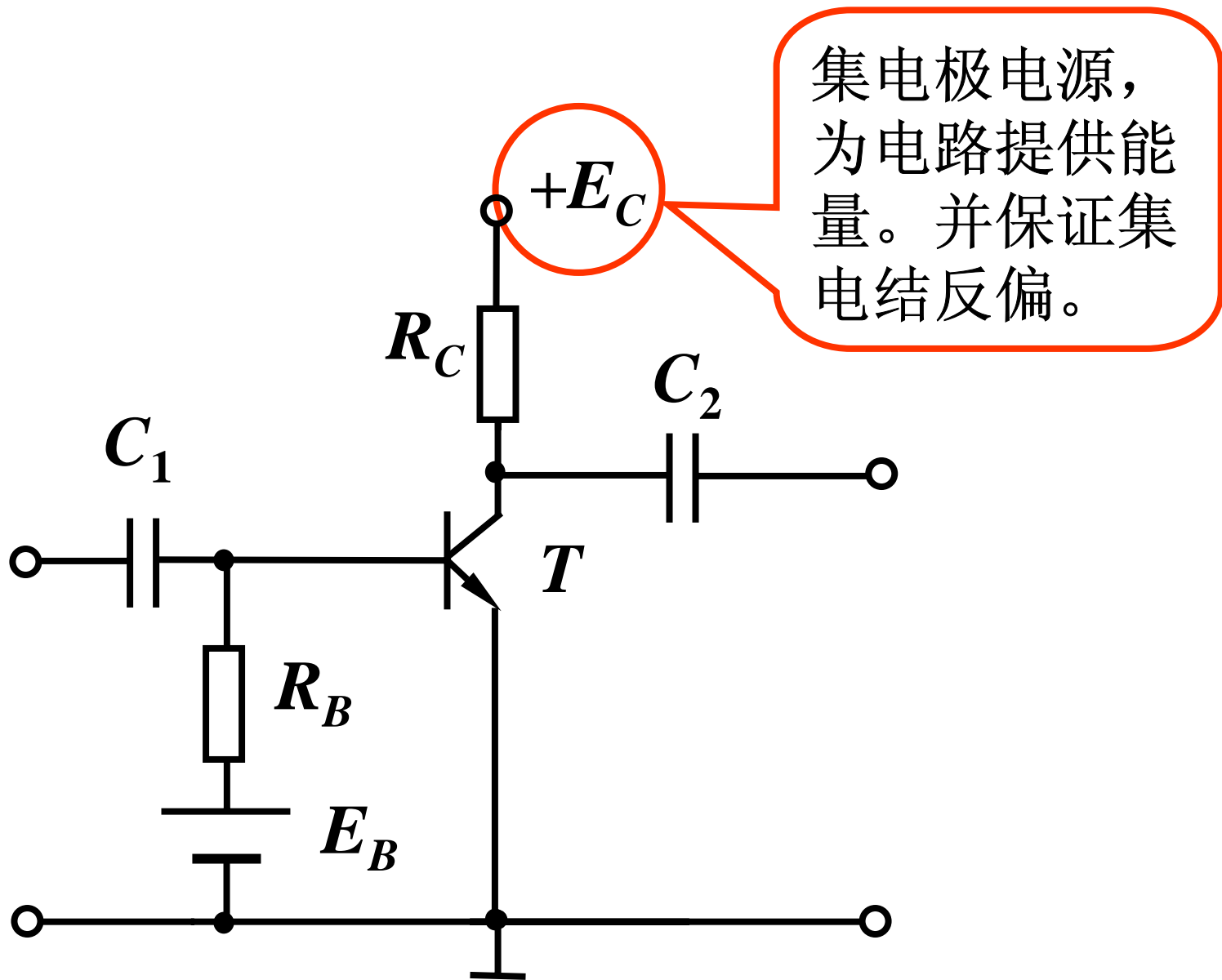
## 2.2.1 共射放大电路的基本组成

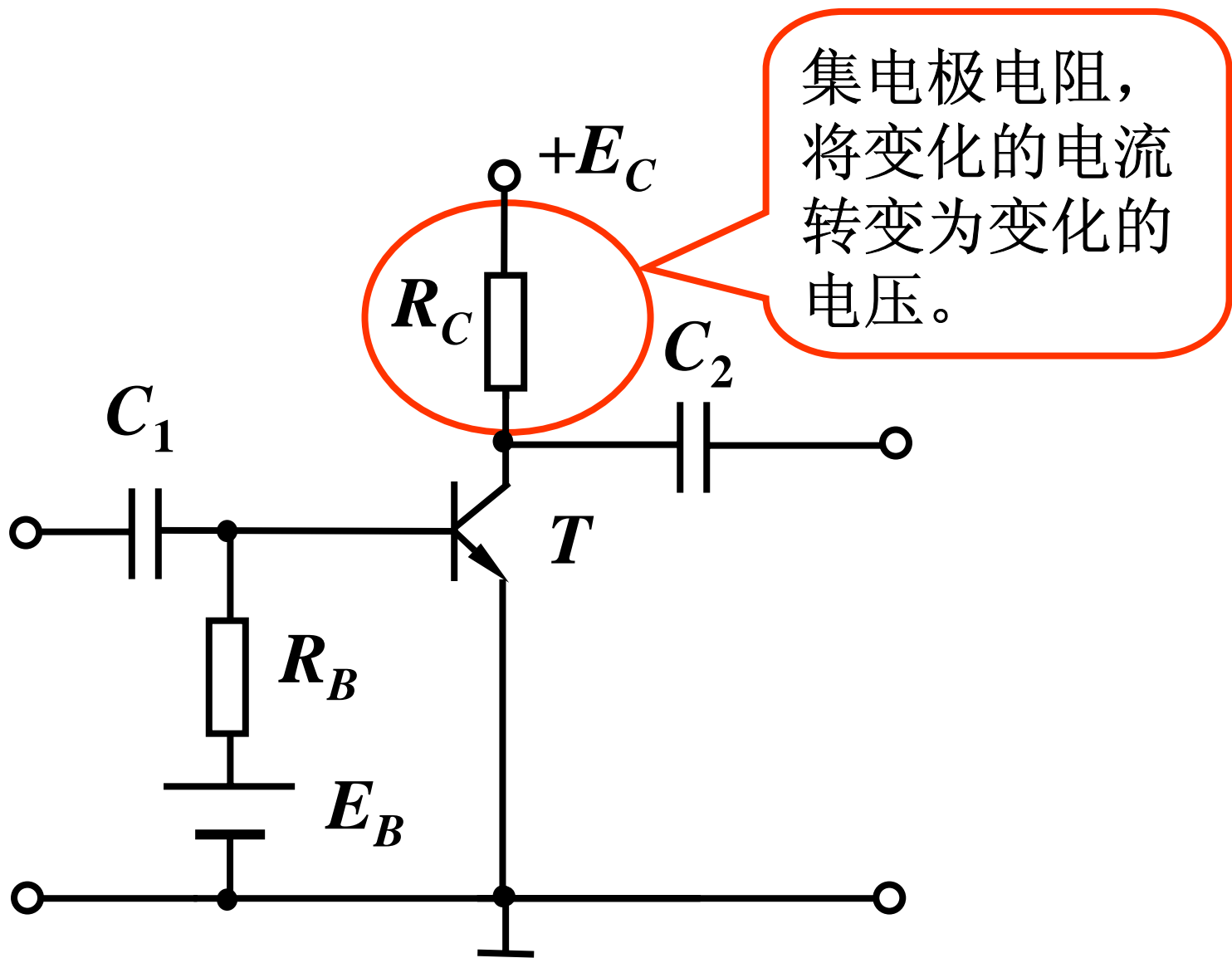




基极电源与  
基极电阻

作用：使发射  
结正偏，并提  
供适当的静态  
工作点。



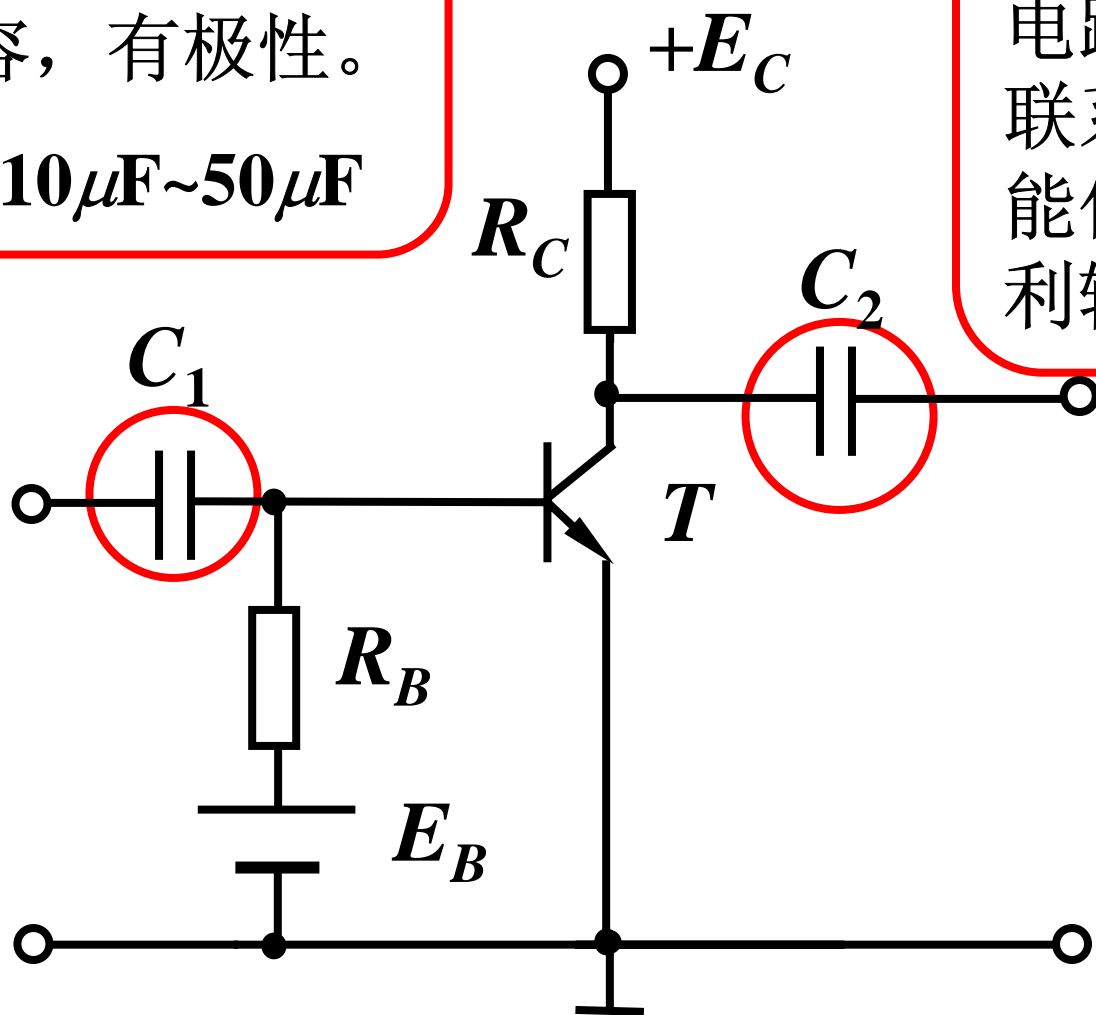




耦合电容:

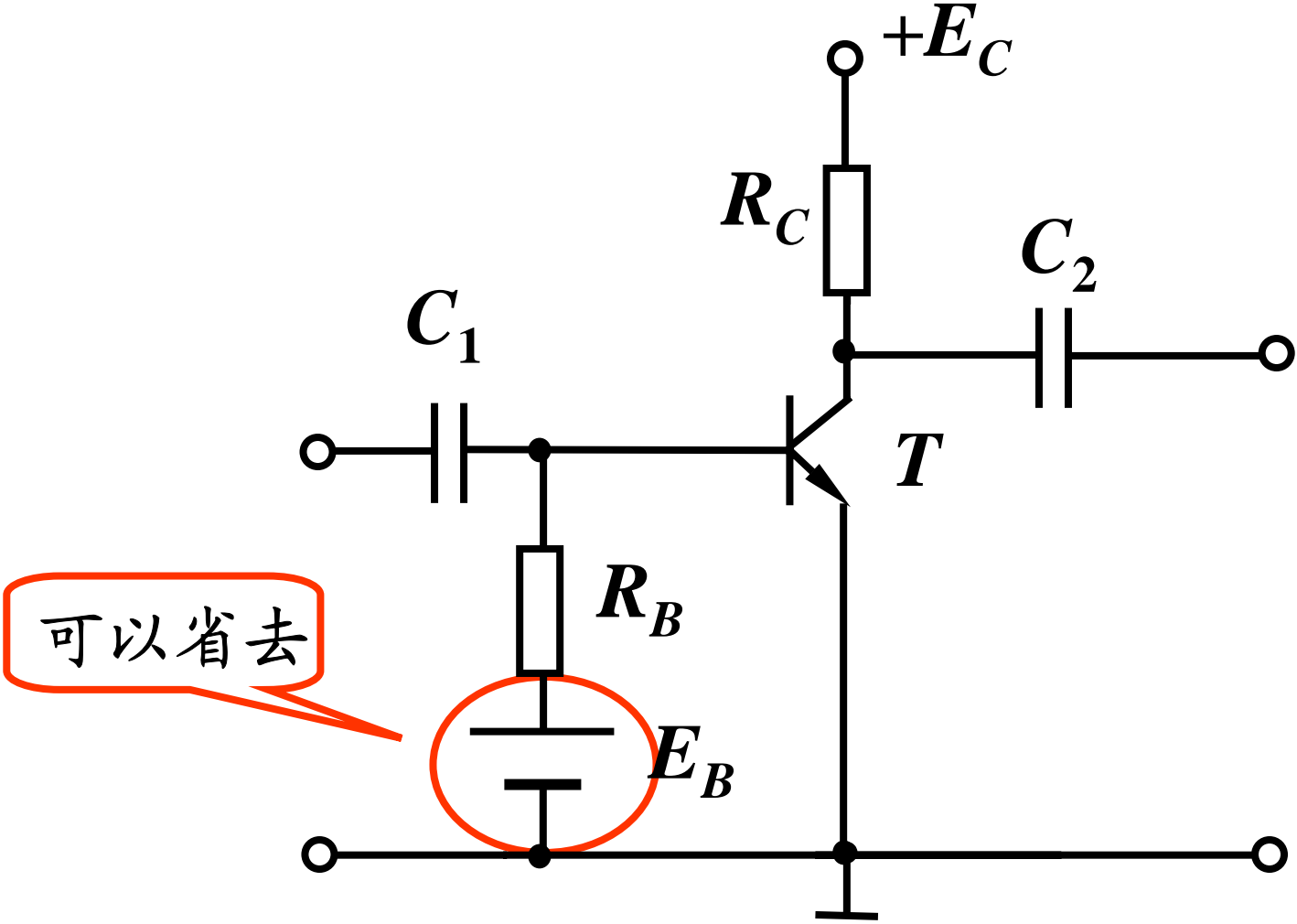
电解电容, 有极性。

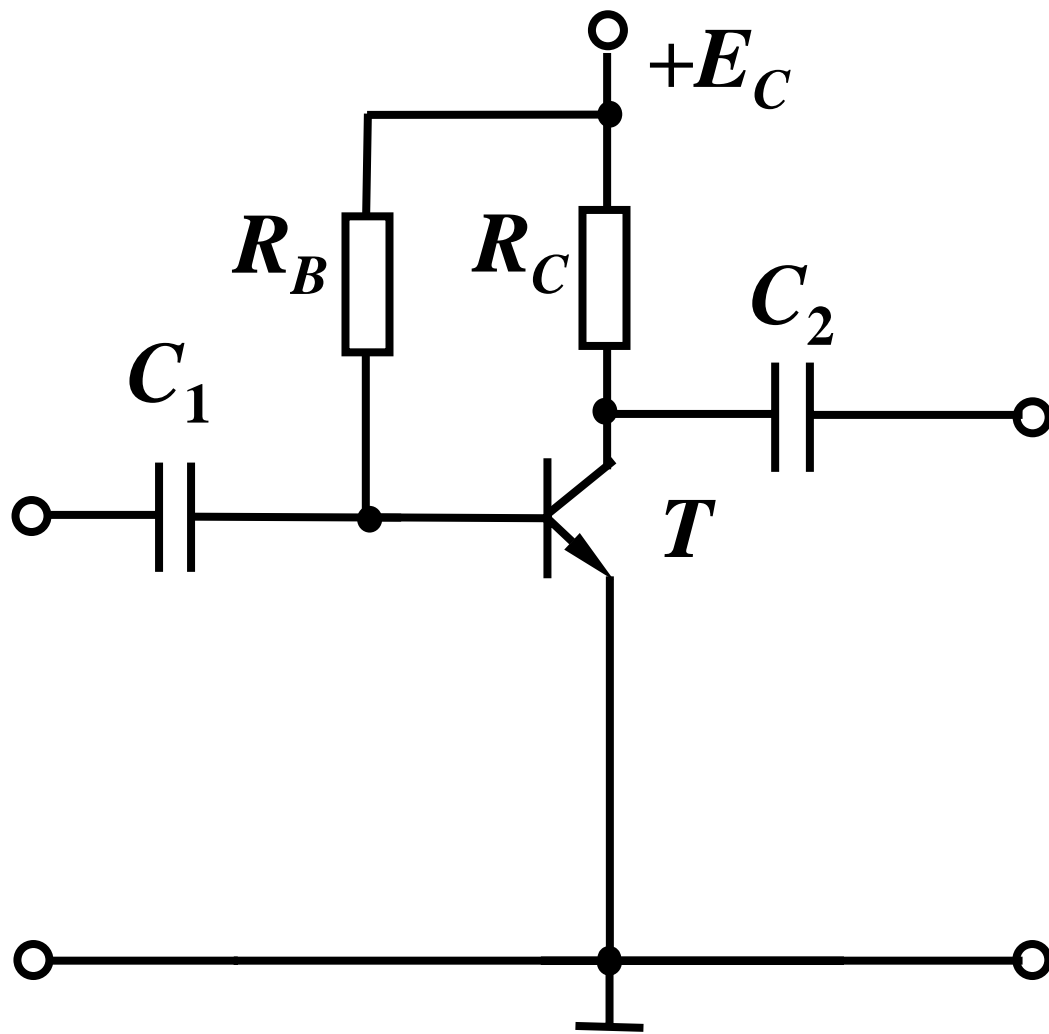
大小为 $10\mu\text{F}\sim 50\mu\text{F}$



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。

# 电路改进：采用单电源供电

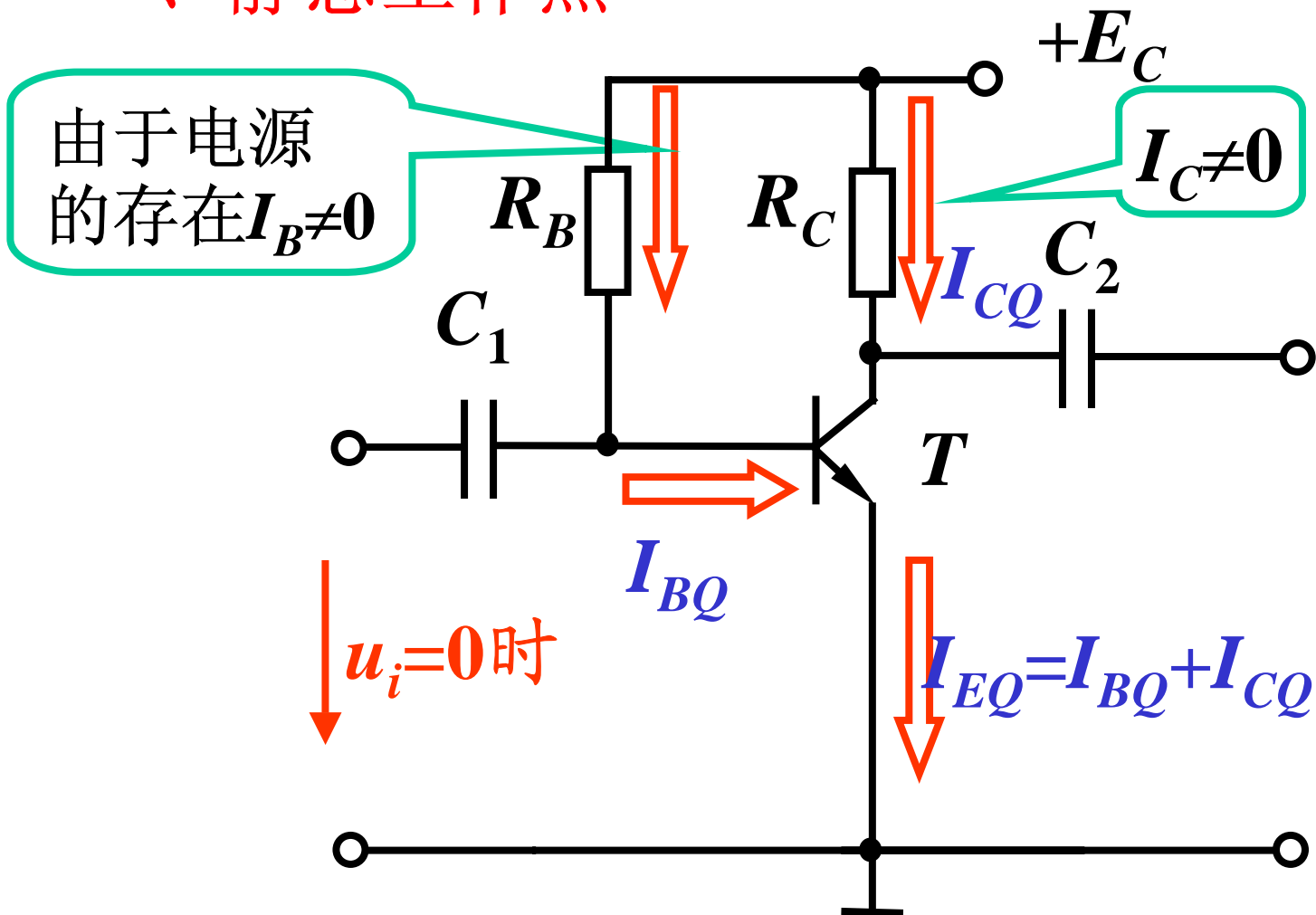


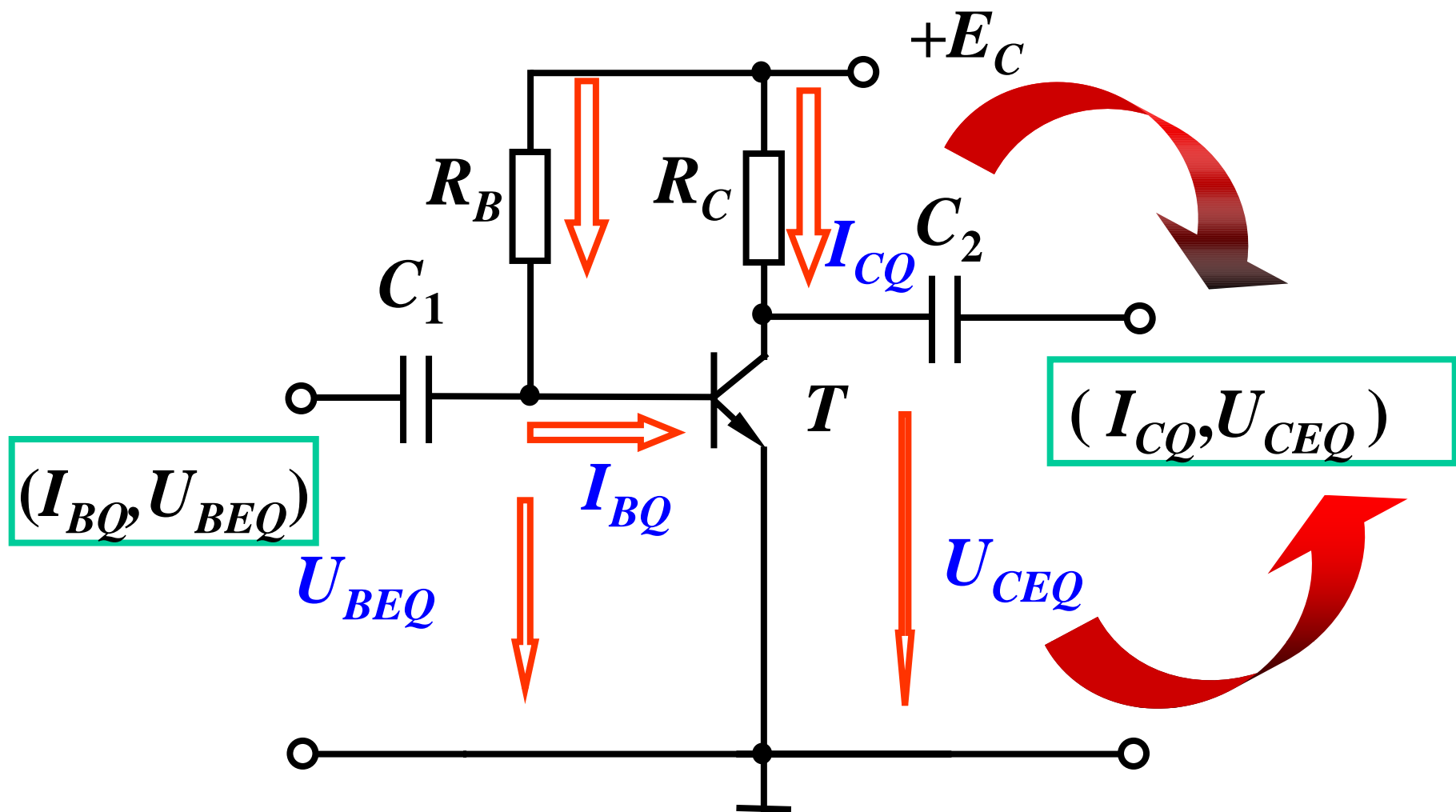


单电源供电电路

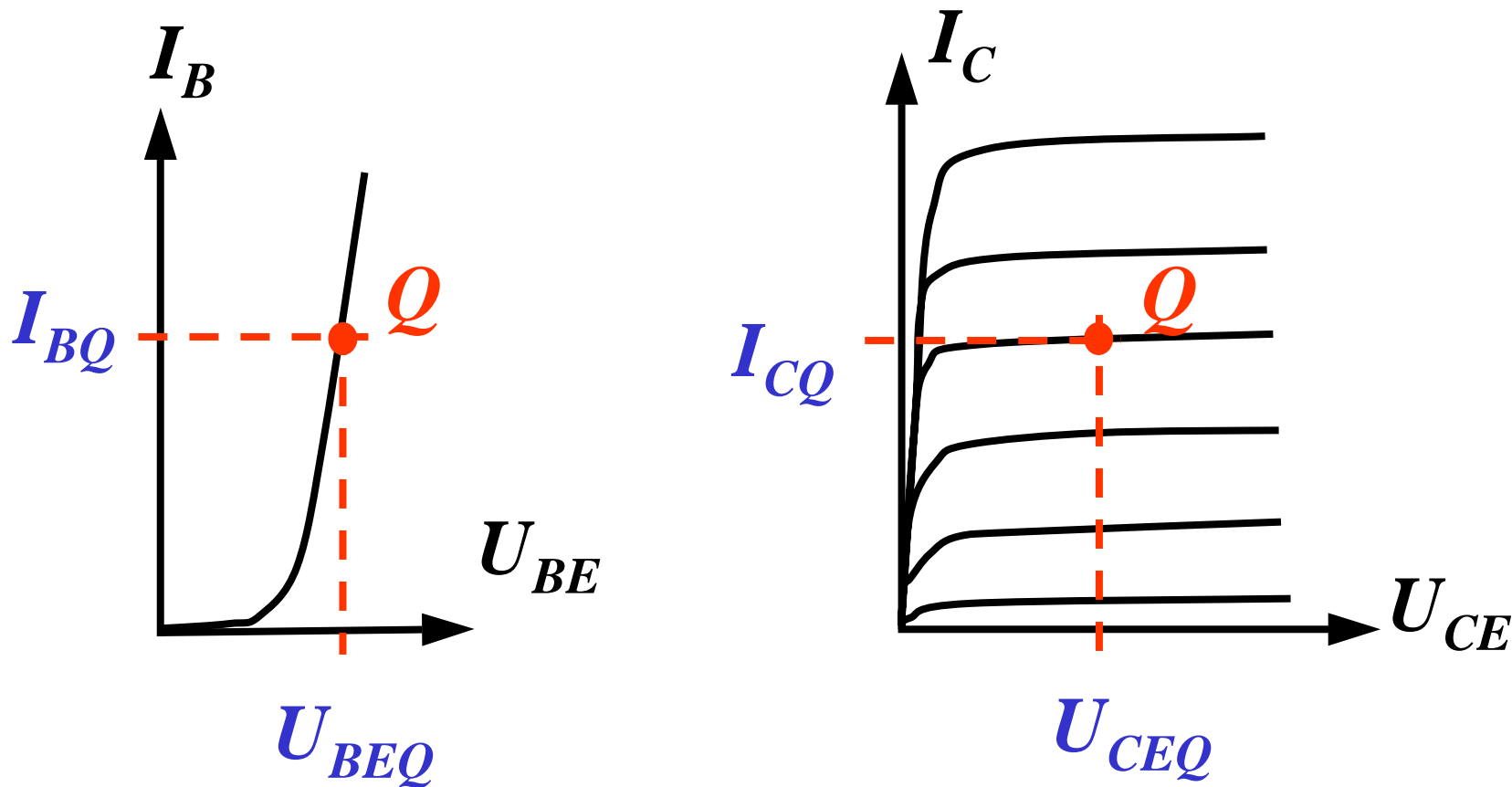
## 2.2.2 基本放大电路的工作原理

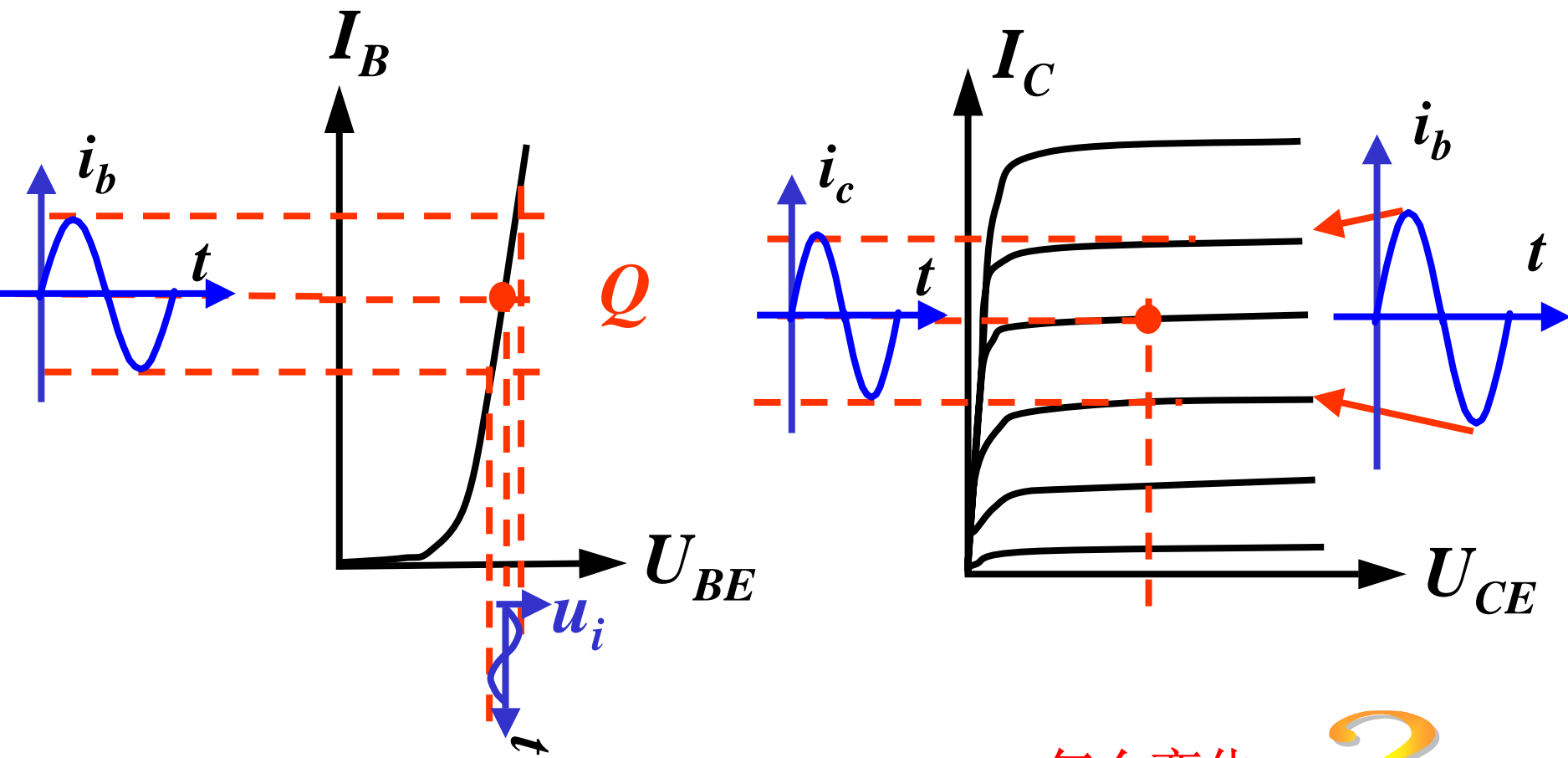
### 一、静态工作点





$(I_{BQ}, U_{BEQ})$  和  $(I_{CQ}, U_{CEQ})$  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。

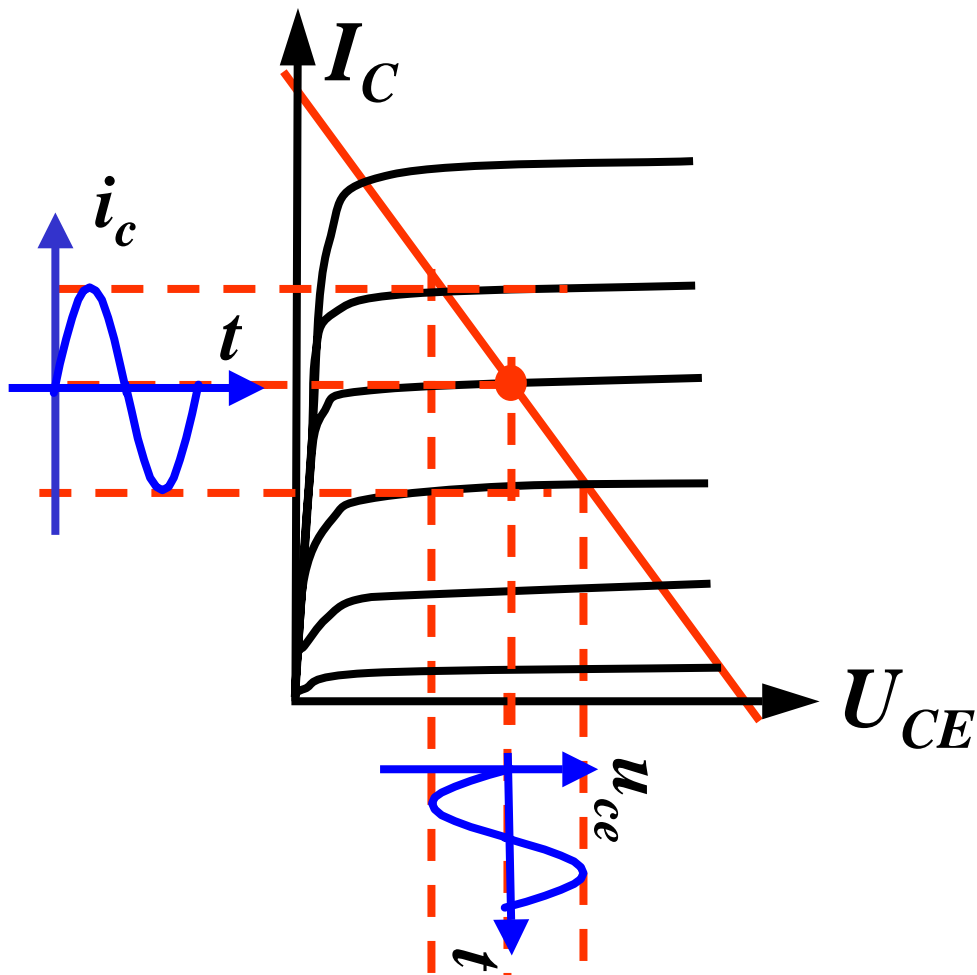




假设  $u_{BE}$  有一微小的变化

$u_{CE}$  怎么变化





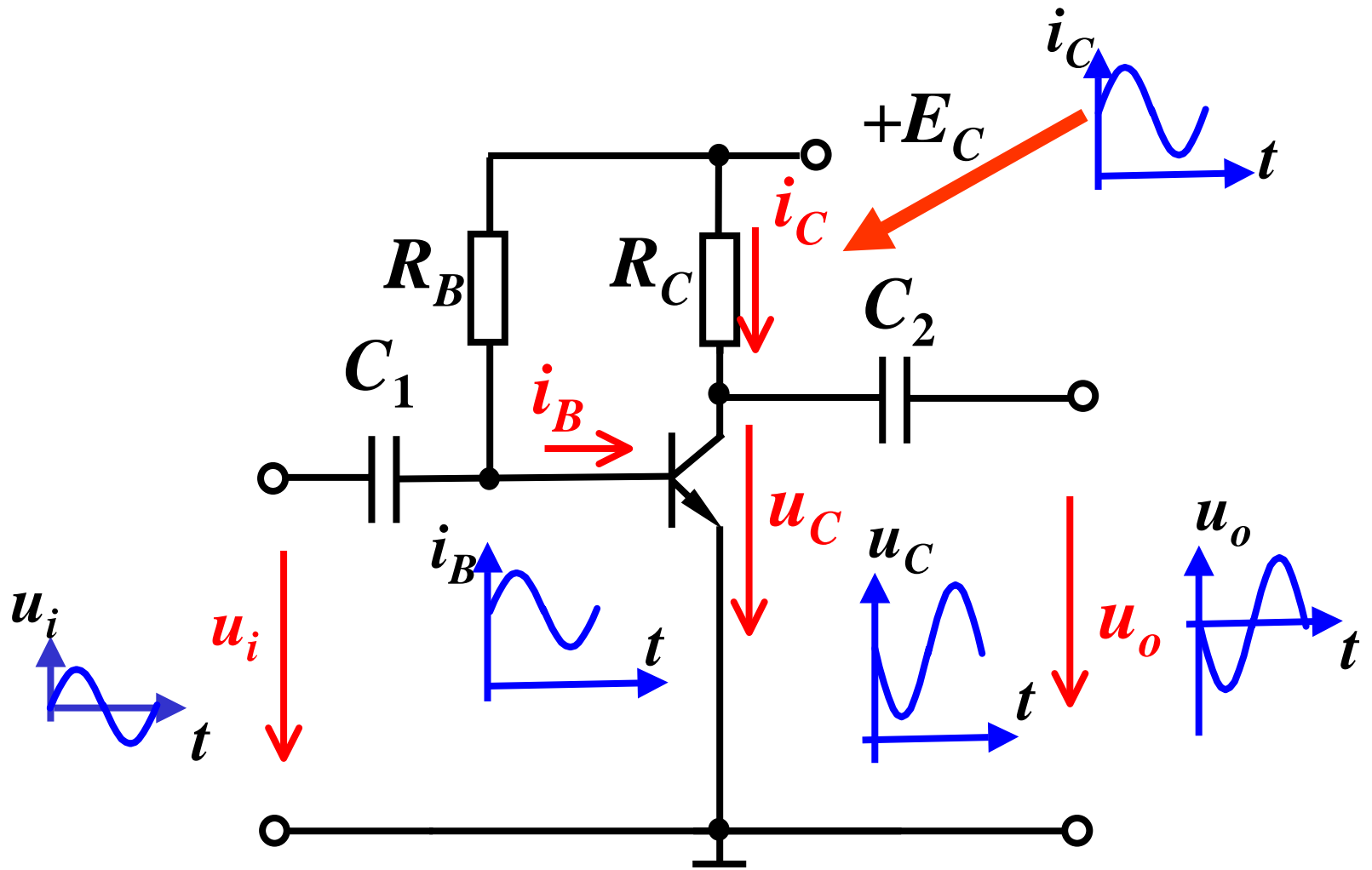
$u_{CE}$ 的变化沿一条直线

$u_{ce}$ 相位如何 ?

$u_{ce}$ 与 $u_i$ 反相!



# 各点波形



# 实现放大的条件

1. 晶体管必须偏置在放大区。发射结正偏，集电结反偏。
2. 正确设置静态工作点，使整个波形处于放大区。
3. 输入回路将变化的电压转化成变化的基极电流。
4. 输出回路将变化的集电极电流转化成变化的集电极电压，经电容滤波只输出交流信号。

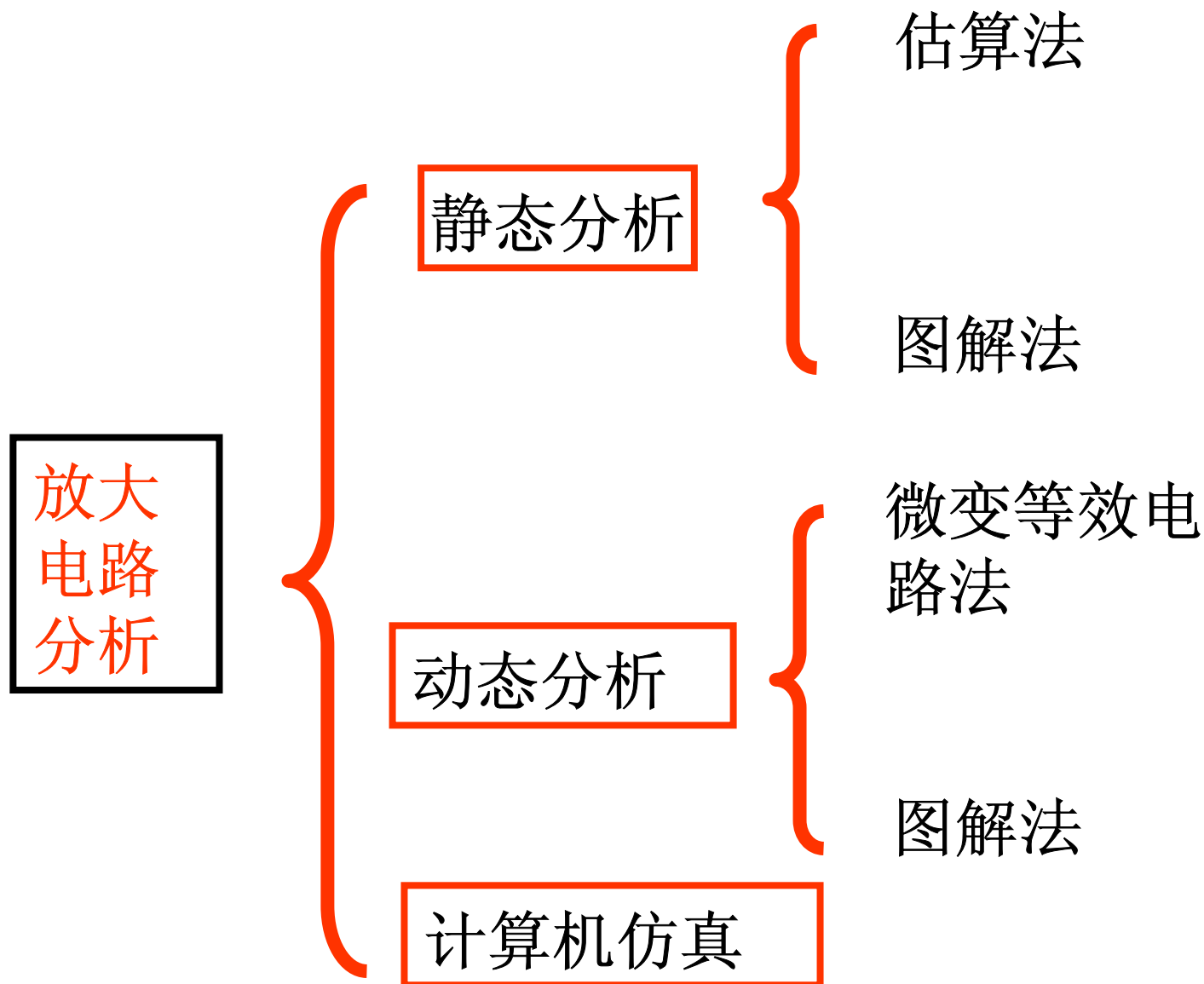
# 如何判断一个电路是否能实现放大？

与实现放大的条件相对应，判断的过程如下：

1. 信号能否输入到放大电路中。
2. 信号能否输出。
3. 晶体管必须偏置在放大区。发射结正偏，集电结反偏。
4. 正确设置静态工作点，使整个波形处于放大区。

如果已给定电路的参数，则计算静态工作点来判断；如果未给定电路的参数，则假定参数设置正确。

## § 2.3 放大电路的分析方法



## 2.3.1 直流通道和交流通道

放大电路中各点的电压或电流都是在静态直流上附加了小的交流信号。

但是，电容对交、直流的作用不同。如果电容容量足够大，可以认为它对交流不起作用，即对交流短路。而对直流可以看成开路，这样，交流直流所走的通道是不同的。

交流通道：只考虑交流信号的分电路。

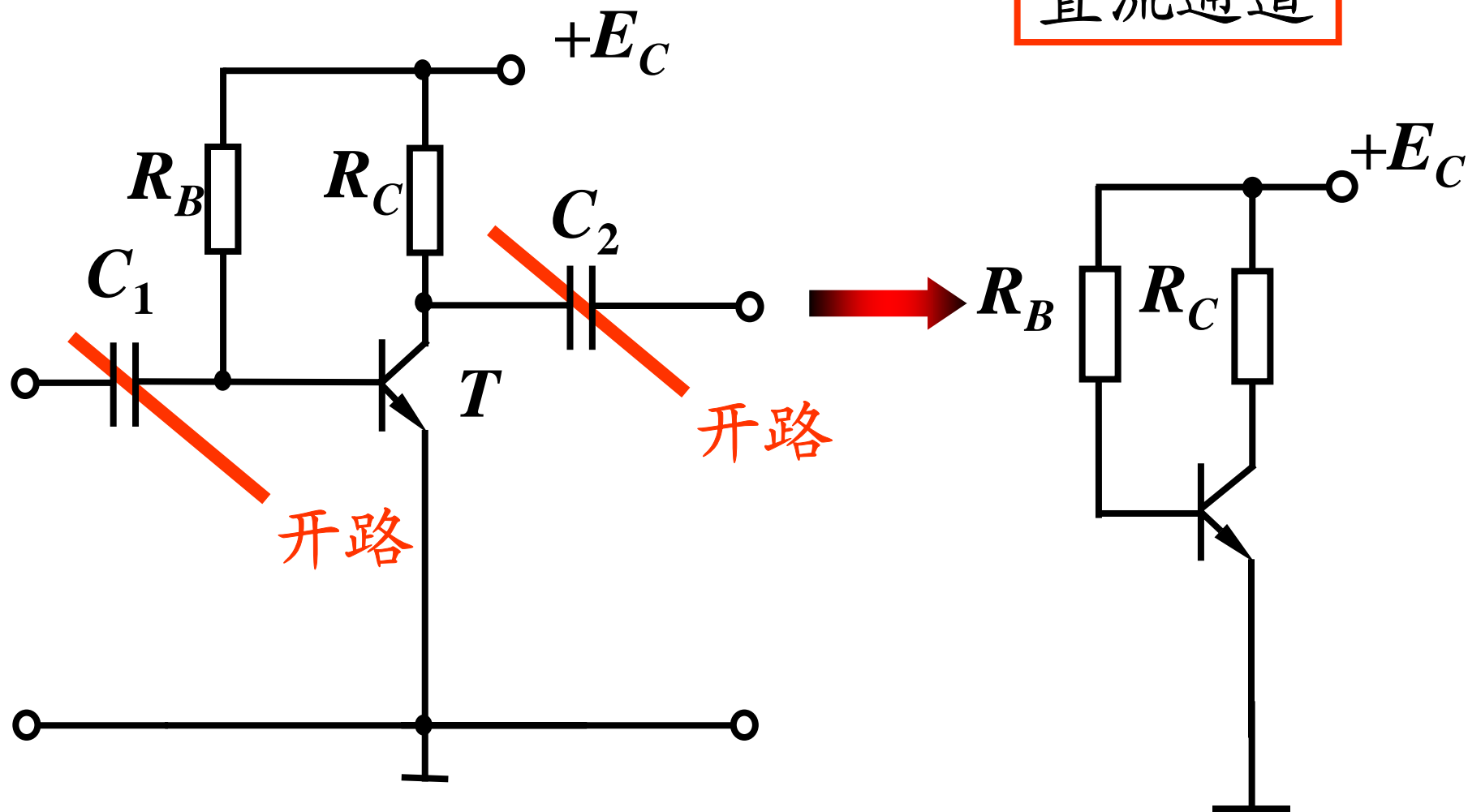
直流通道：只考虑直流信号的分电路。

信号的不同分量可以分别在不同的通道分析。

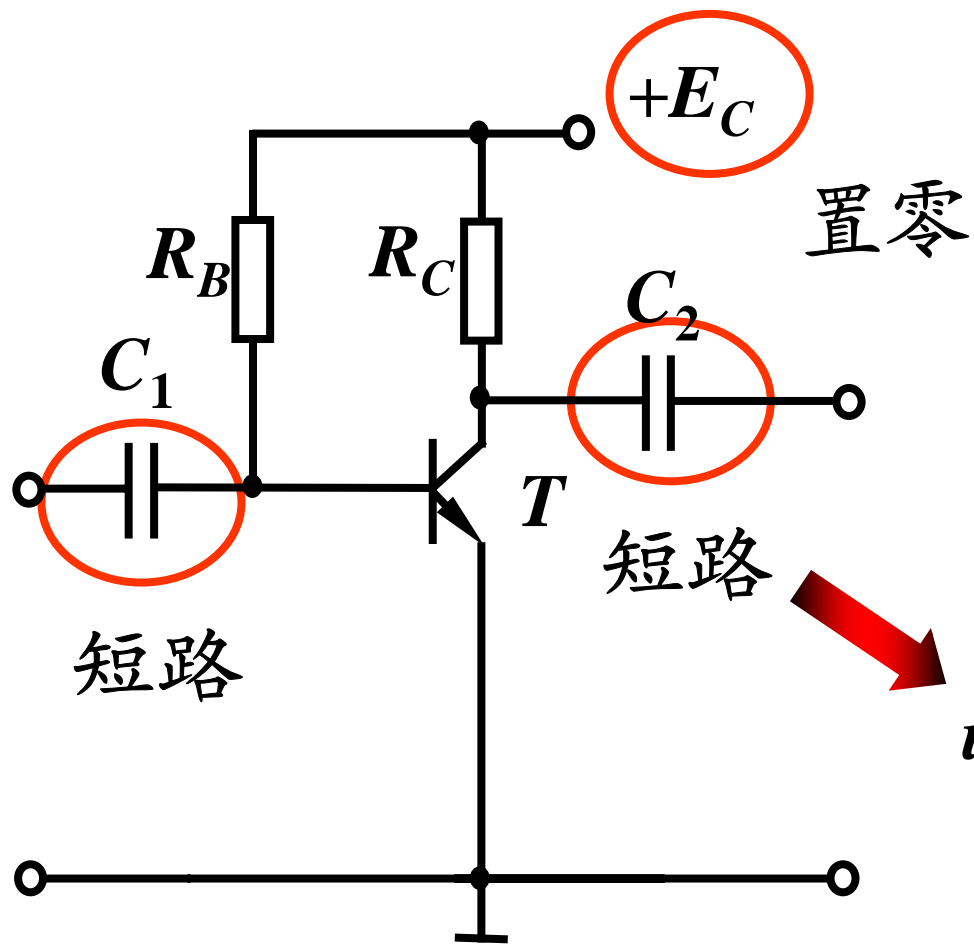
例:

对直流信号 (只有 $+E_C$ )

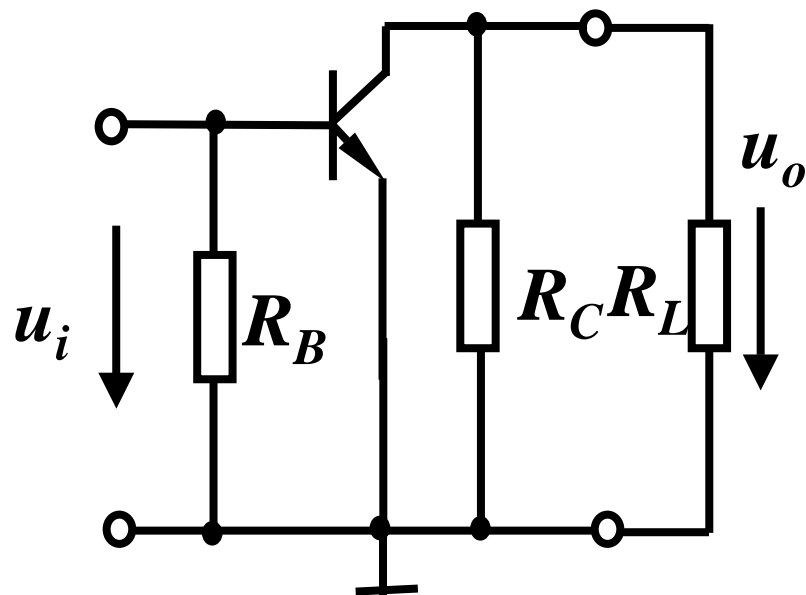
直流通道



对交流信号(输入信号 $u_i$ )

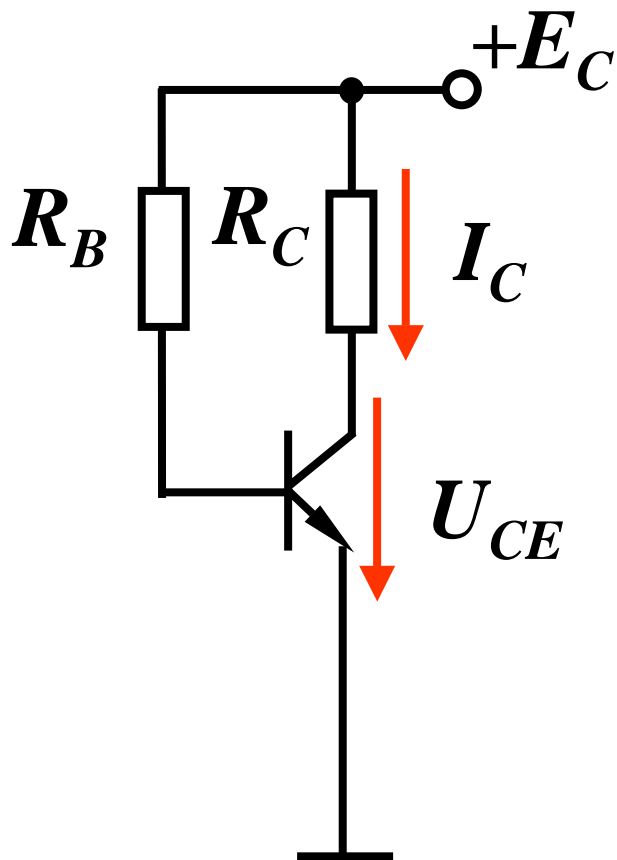


交流通路



## 2.3.2 直流负载线和交流负载线

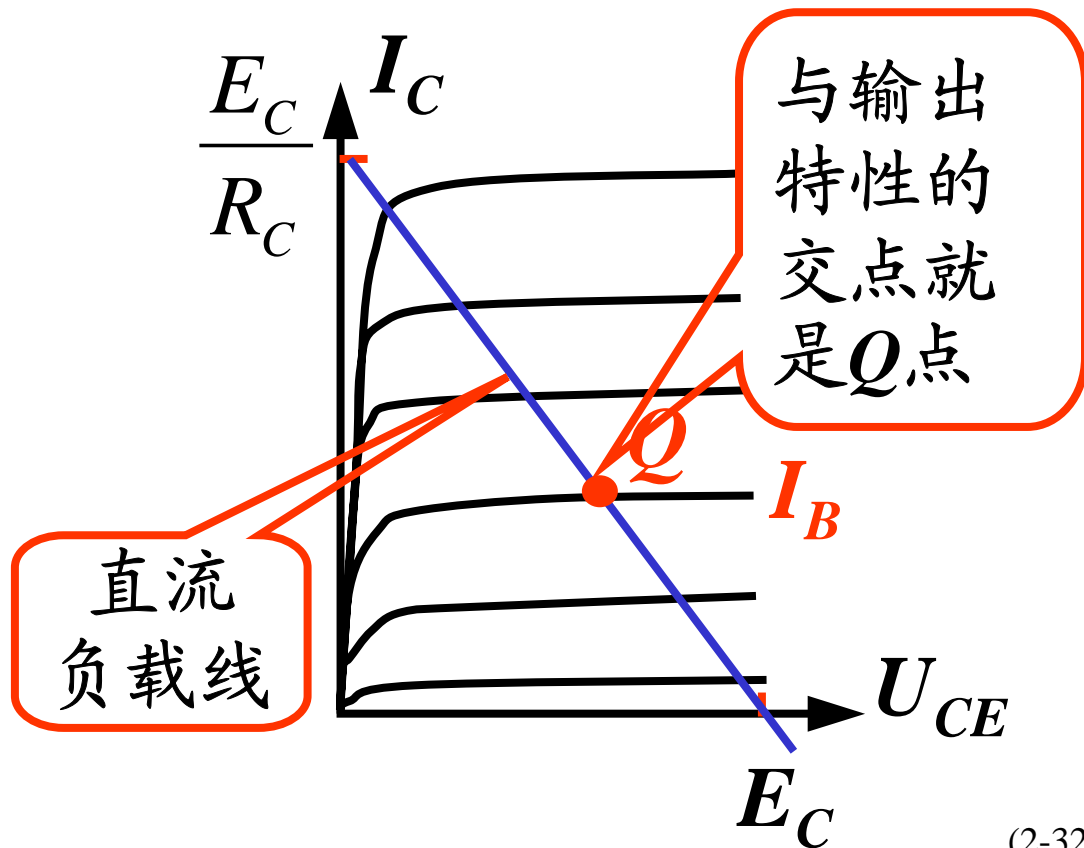
### 一、直流负载线



直流通道

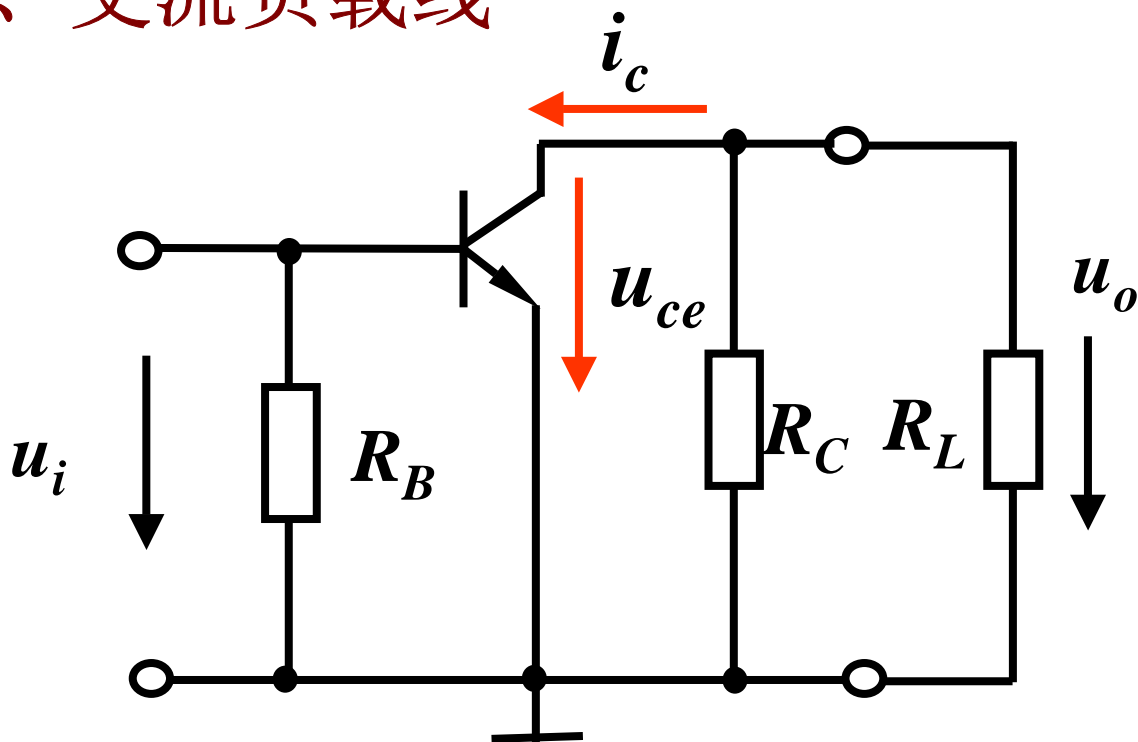
$U_{CE} \sim I_C$  满足什么关系?

1. 三极管的输出特性。
2.  $U_{CE} = E_C - I_C R_C$ 。





## 二、交流负载线



交流通路

$$\frac{i_c}{u_{ce}} = -\frac{1}{R'_L}$$

其中： $R'_L = R_L // R_C$

$i_C$  和  $u_{CE}$  是全量，与交流量  $i_c$  和  $u_{ce}$  有如下关系

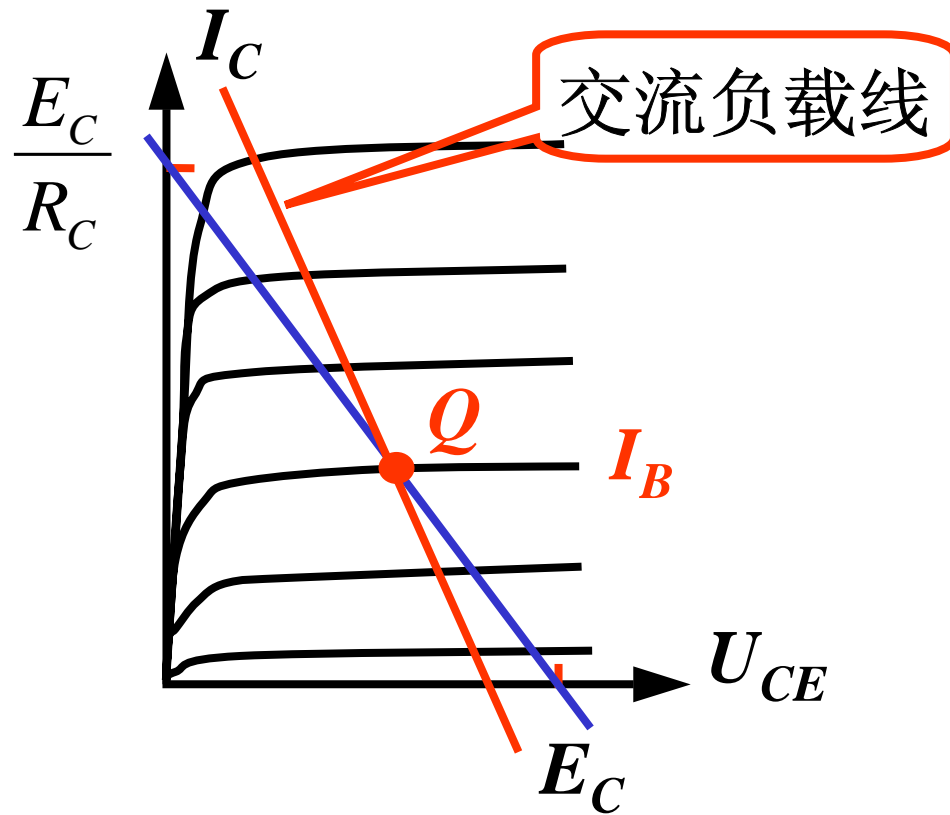
$$i_c = \Delta i_C \quad u_{ce} = \Delta u_{CE}$$

所以：
$$\frac{\Delta i_C}{\Delta u_{CE}} = -\frac{1}{R'_L}$$

即：交流信号的变化沿着斜率为： $-\frac{1}{R'_L}$  的直线。

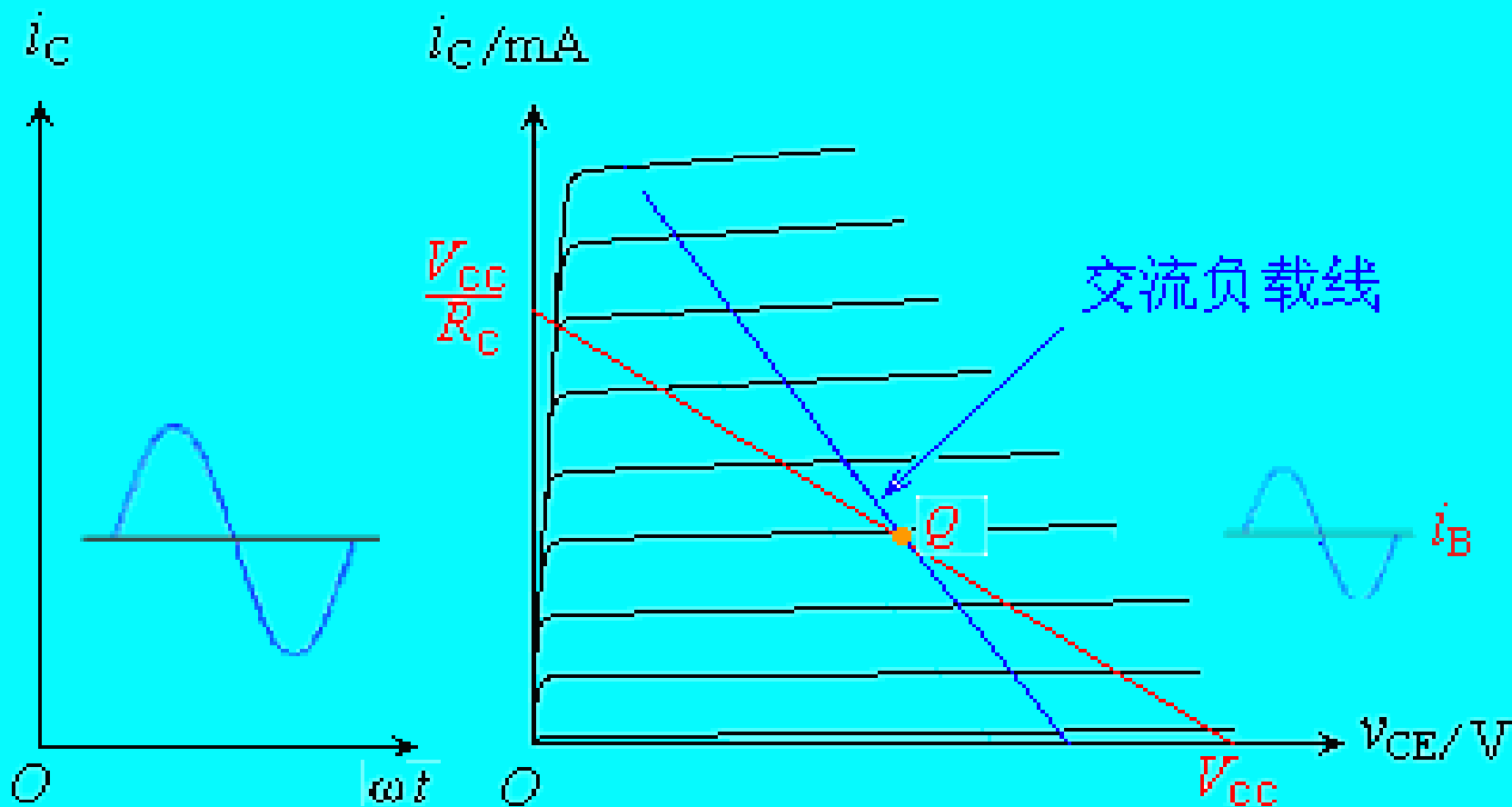
这条直线通过  $Q$  点，称为交流负载线。

# 交流负载线的作法



过 $Q$ 点作一条直线，斜率为： $-\frac{1}{R'_L}$

# 交流动态范围示意图

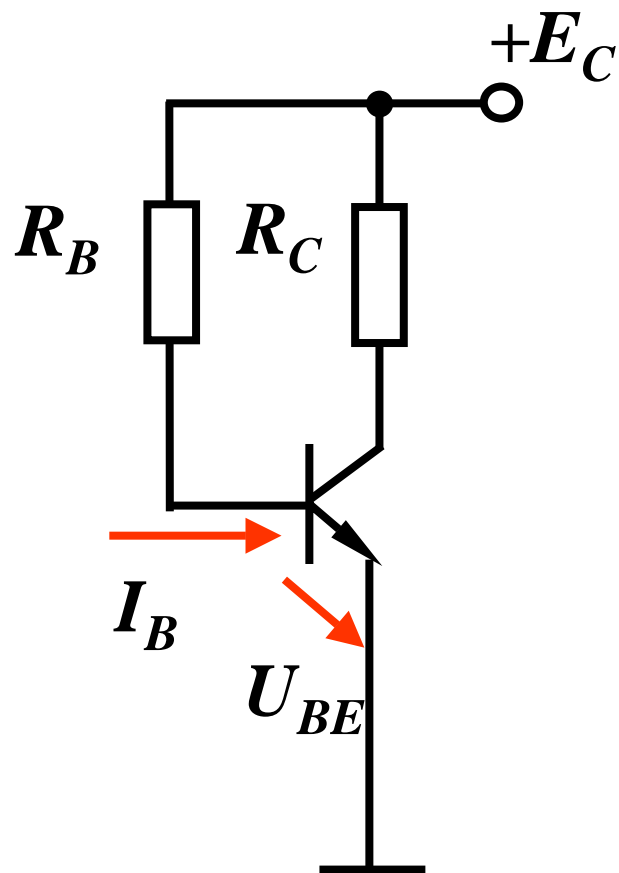


3-4. avi

## 2.3.3 静态分析

### 一、估算法

(1) 根据直流通道估算 $I_B$

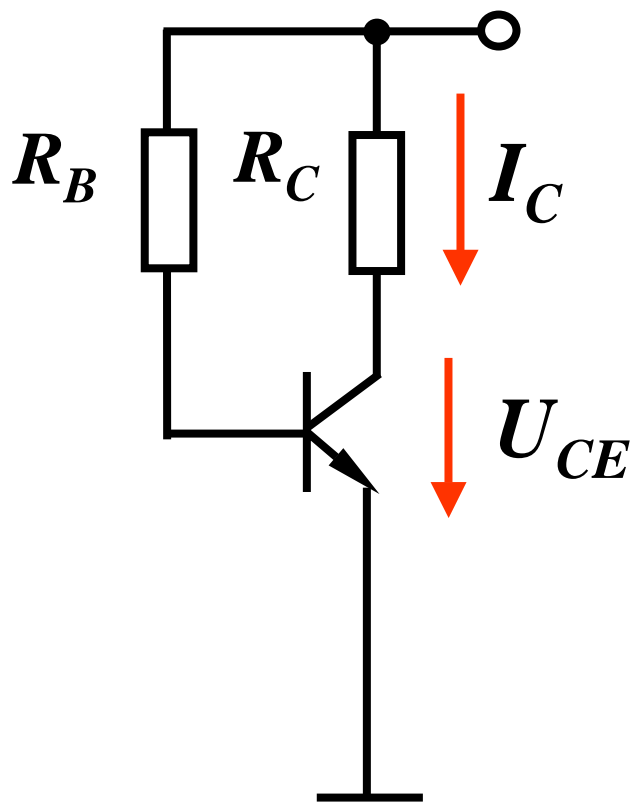


直流通道

$$I_B = \frac{E_C - U_{BE}}{R_B}$$
$$\approx \frac{E_C - 0.7}{R_B} \approx \frac{E_C}{R_B}$$

$R_B$ 称为偏置电阻， $I_B$ 称为偏置电流。

(2) 根据直流通道估算 $U_{CE}$ 、 $I_C$



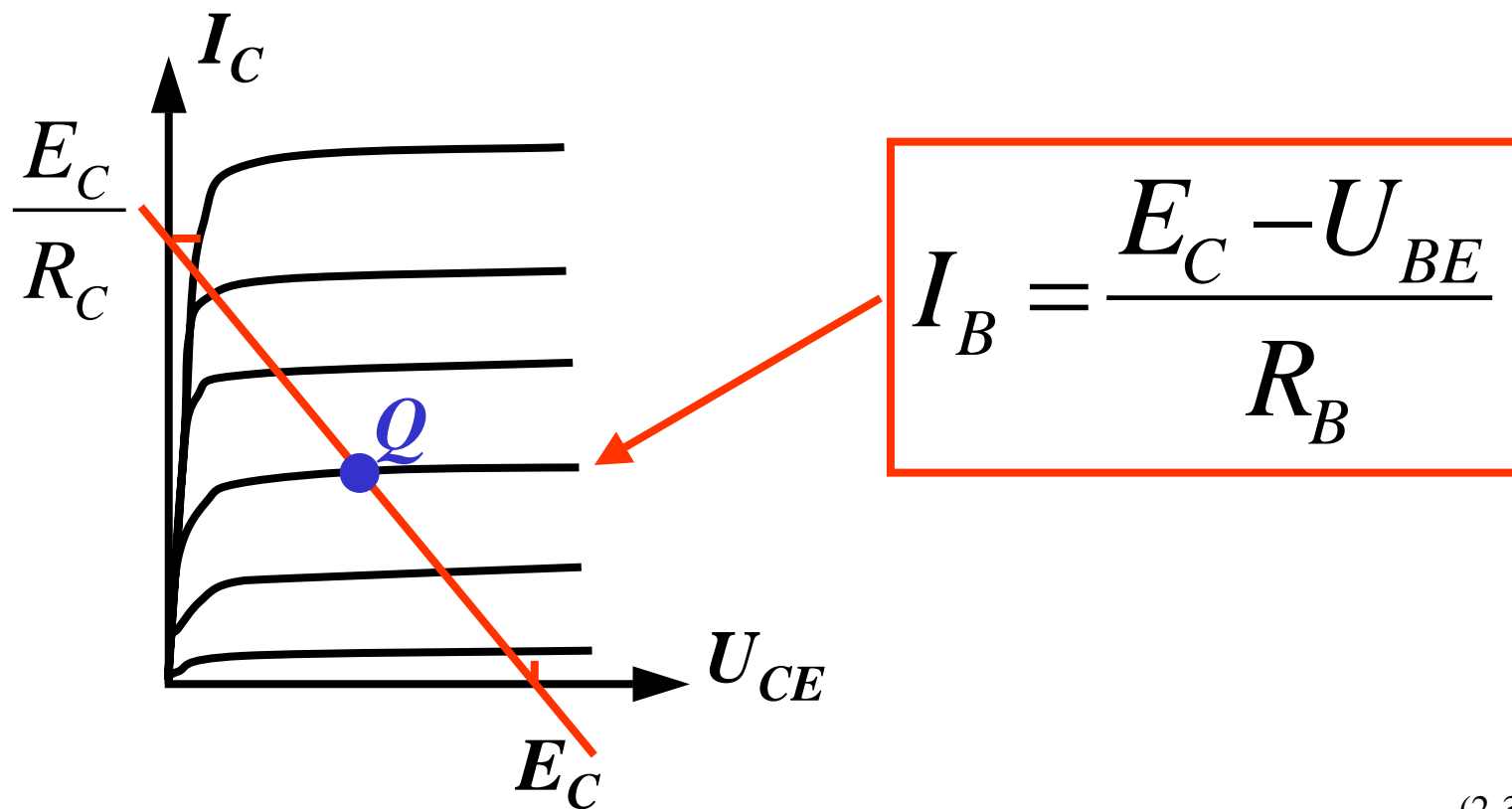
$$I_C = \beta I_B + I_{CEO}$$
$$\approx \beta I_B$$

$$U_{CE} = E_C - I_C R_C$$

直流通道

## 二、图解法

先估算  $I_B$ ，然后在输出特性曲线上作出直流负载线，与  $I_B$  对应的输出特性曲线与直流负载线的交点就是  $Q$  点。



**例：**用估算法计算静态工作点。

已知： $E_C=12\text{V}$ ， $R_C=4\text{k}\Omega$ ， $R_B=300\text{k}\Omega$ ， $\beta=37.5$ 。

**解：**

$$I_B \approx \frac{E_C}{R_B} = \frac{12}{300} = 0.04 \text{ mA} = 40 \mu\text{A}$$

$$I_C \approx \bar{\beta} I_B = \beta I_B = 37.5 \times 0.04 = 1.5 \text{ mA}$$

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

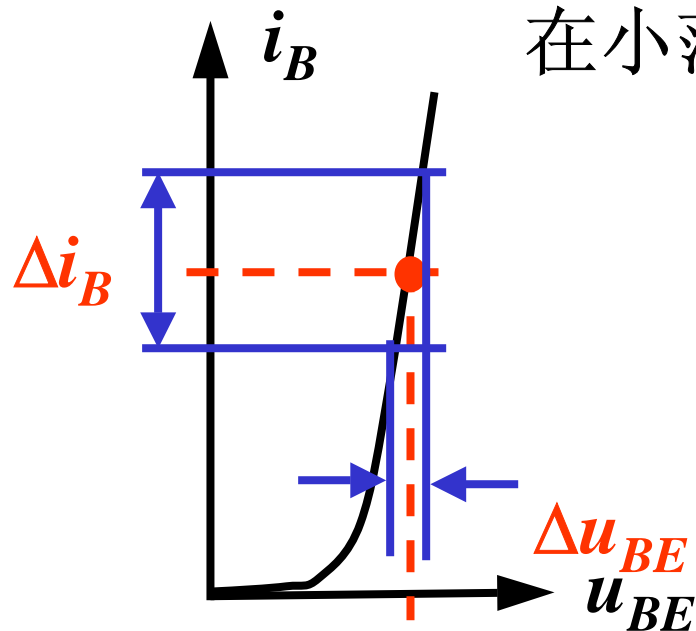
请注意电路中 $I_B$ 和 $I_C$ 的数量级。



## 2.3.4 动态分析

### 一、三极管的微变等效电路

1. 输入回路 当信号很小时，将输入特性在小范围内近似线性。



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

对输入的小交流信号而言，三极管相当于电阻  $r_{be}$ 。

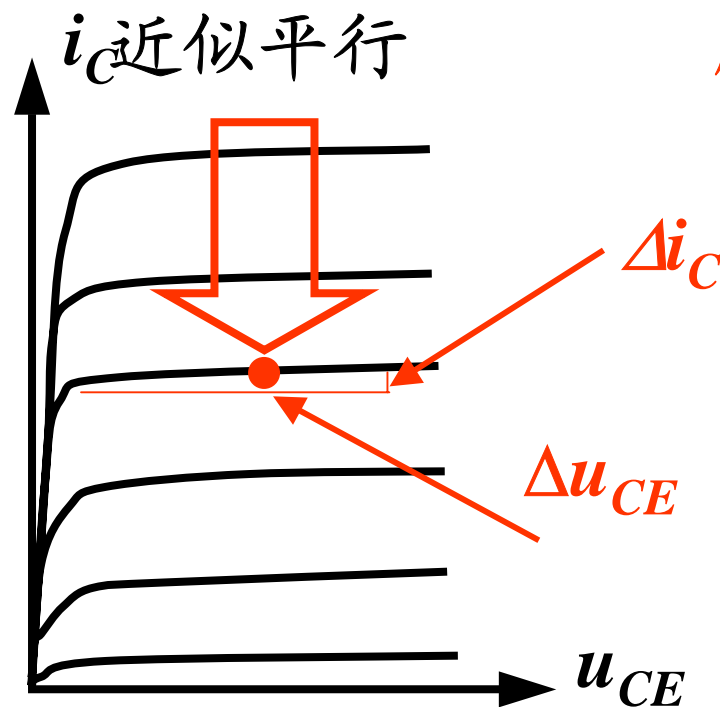
对于小功率三极管：
$$r_{be} = 300(\Omega) + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_E(\text{mA})}$$

$r_{be}$  的量级从几百欧到几千欧。

## 2. 输出回路

$$\begin{aligned}i_C &= I_C + i_c = \beta(I_B + i_b) \\ &= \beta I_B + \beta i_b\end{aligned}$$

所以： $i_c = \beta i_b$

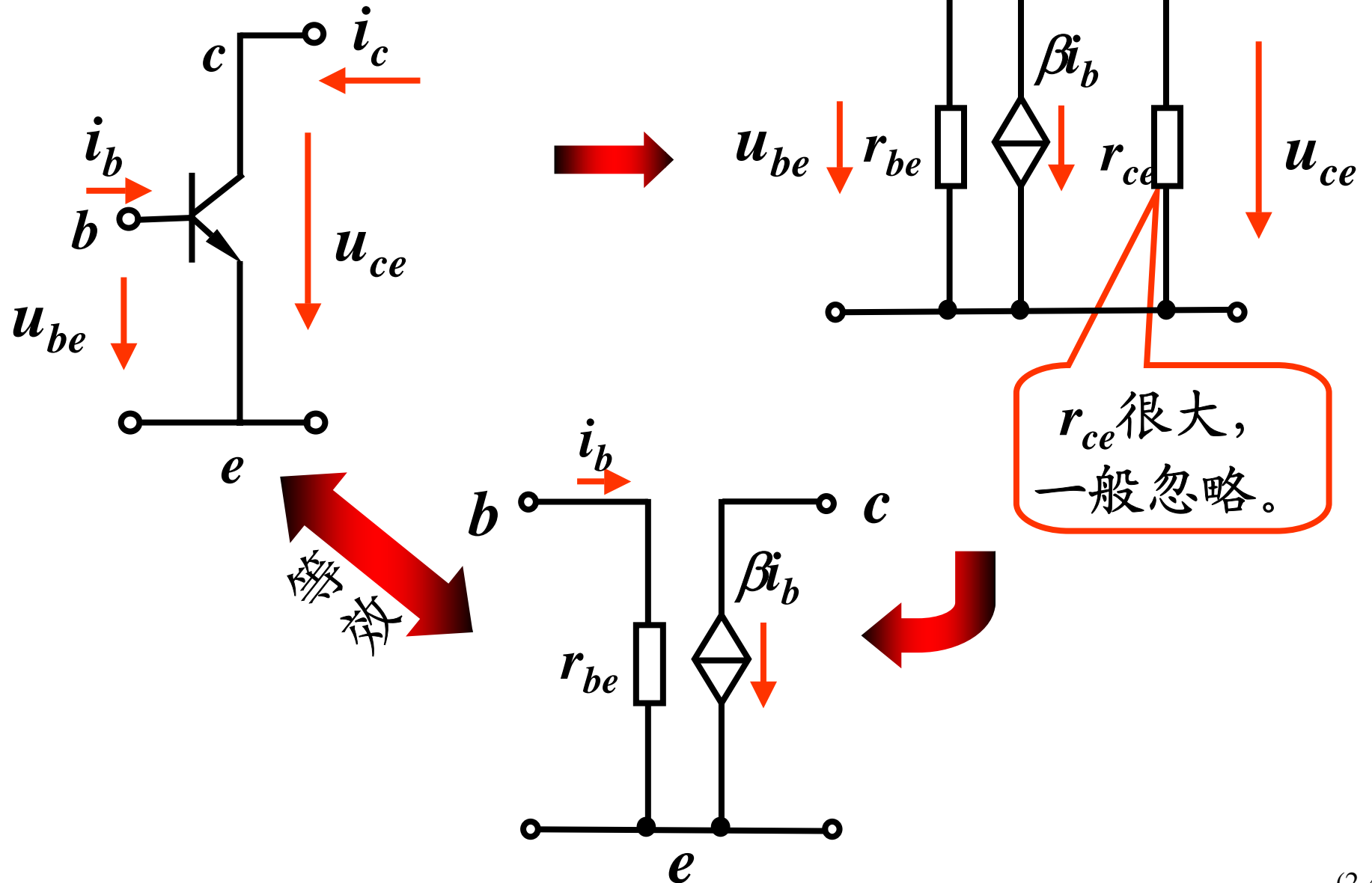


(1) 输出端相当于一个受  $i_b$  控制的电流源。

(2) 考虑  $u_{CE}$  对  $i_C$  的影响，输出端还要并联一个大电阻  $r_{ce}$ 。

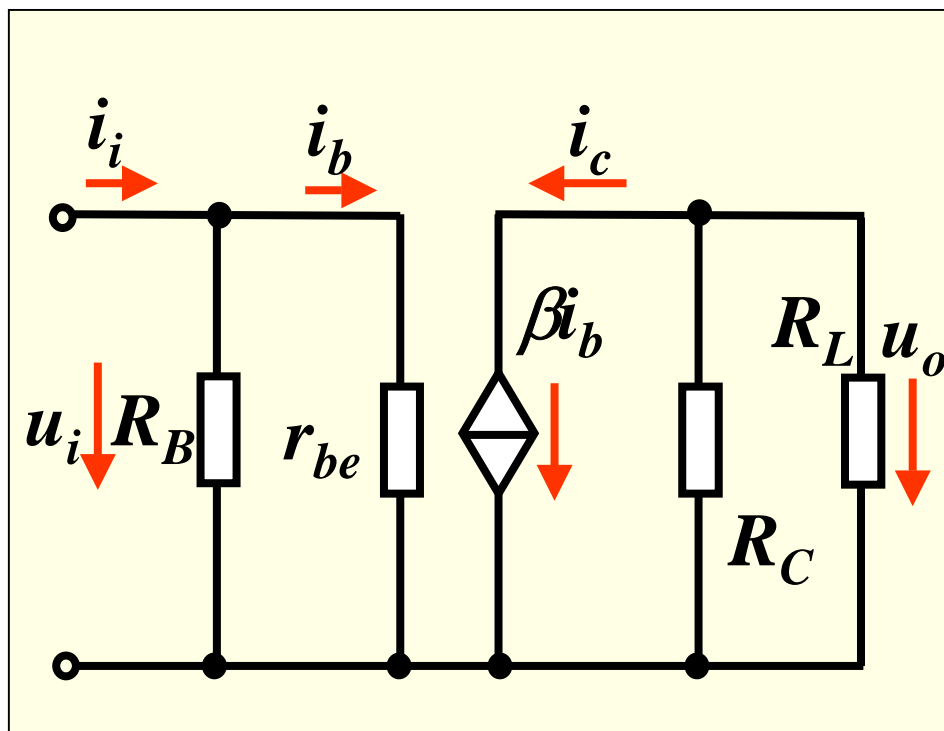
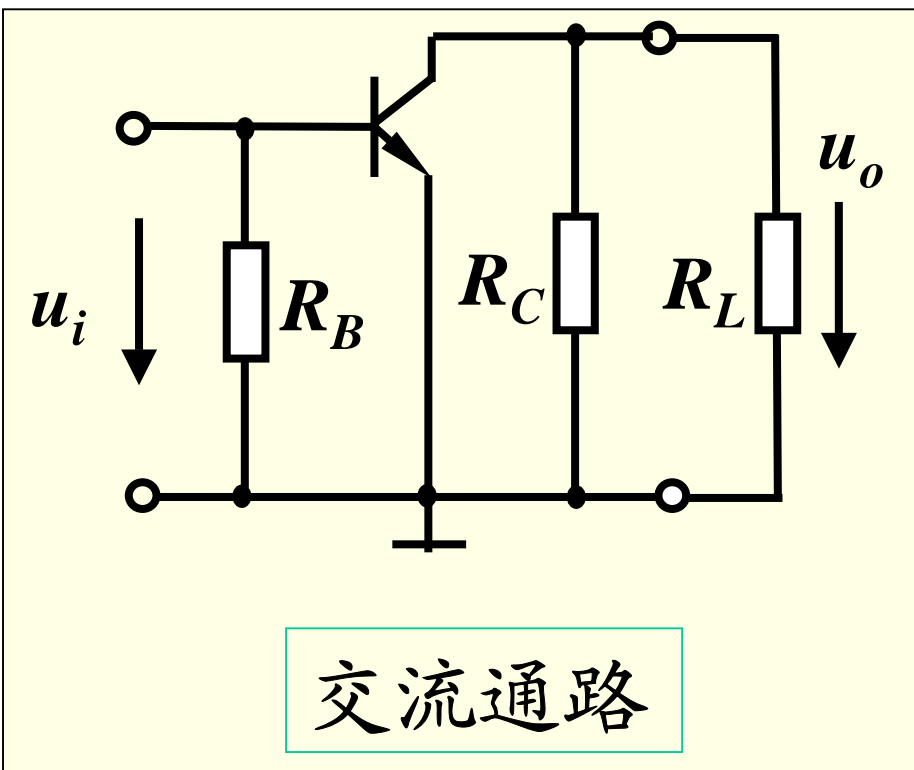
$r_{ce}$  的含义  $r_{ce} = \frac{\Delta u_{CE}}{\Delta i_C} = \frac{u_{ce}}{i_c}$

### 3. 三极管的微变等效电路



## 二、放大电路的微变等效电路

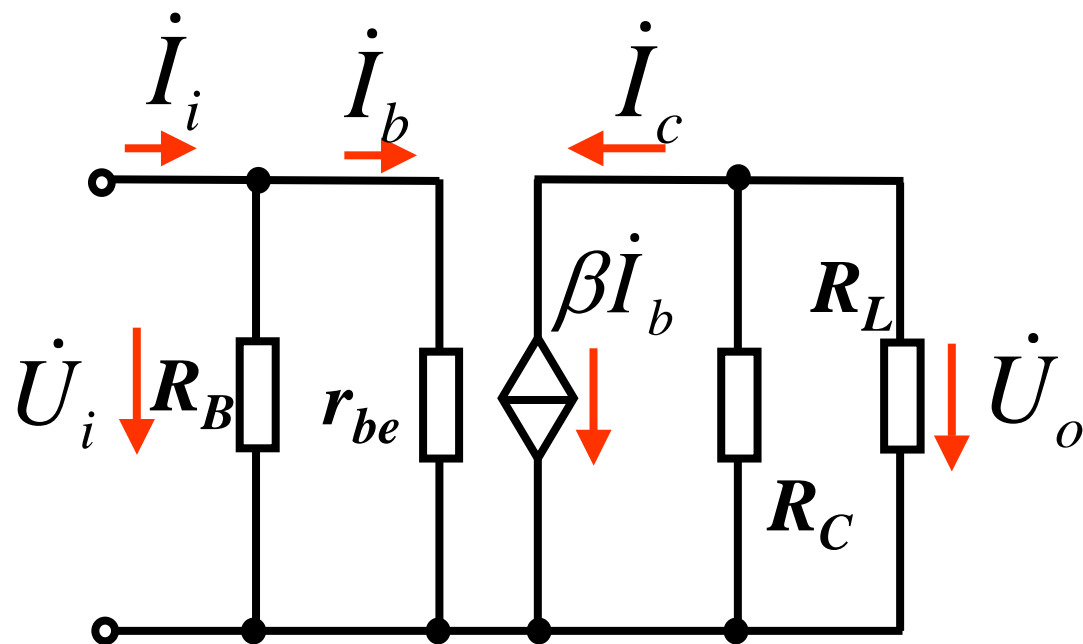
将交流通道中的三极管用微变等效电路代替：





3-7. avi

### 三、电压放大倍数的计算



$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be}$$
$$\dot{U}_o = -\beta \dot{I}_b R'_L$$

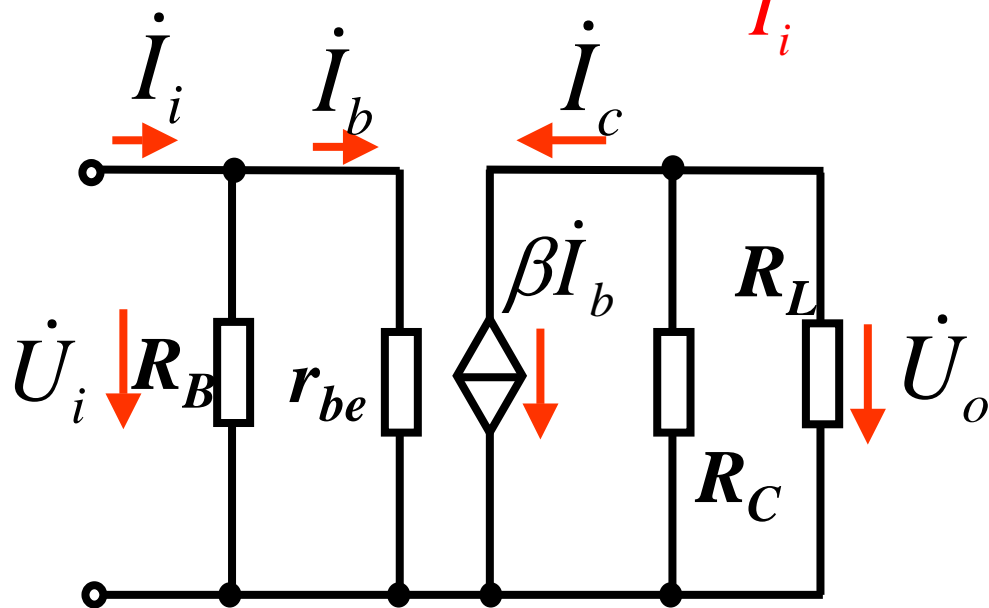
$$A_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} \quad R'_L = R_C // R_L$$

**特点：**负载电阻越小，放大倍数越小。

## 四、输入电阻的计算

对于为放大电路提供信号的信号源来说，放大电路是负载，这个负载的大小可以用输入电阻来表示。

输入电阻的定义： $r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}$  是动态电阻。



$$\begin{aligned} r_i &= \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} \\ &= R_B // r_{be} \\ &\approx r_{be} \end{aligned}$$

电路的输入电阻越大，从信号源取得的电流越小，因此一般总是希望得到较大的输入电阻。

## 五、输出电阻的计算

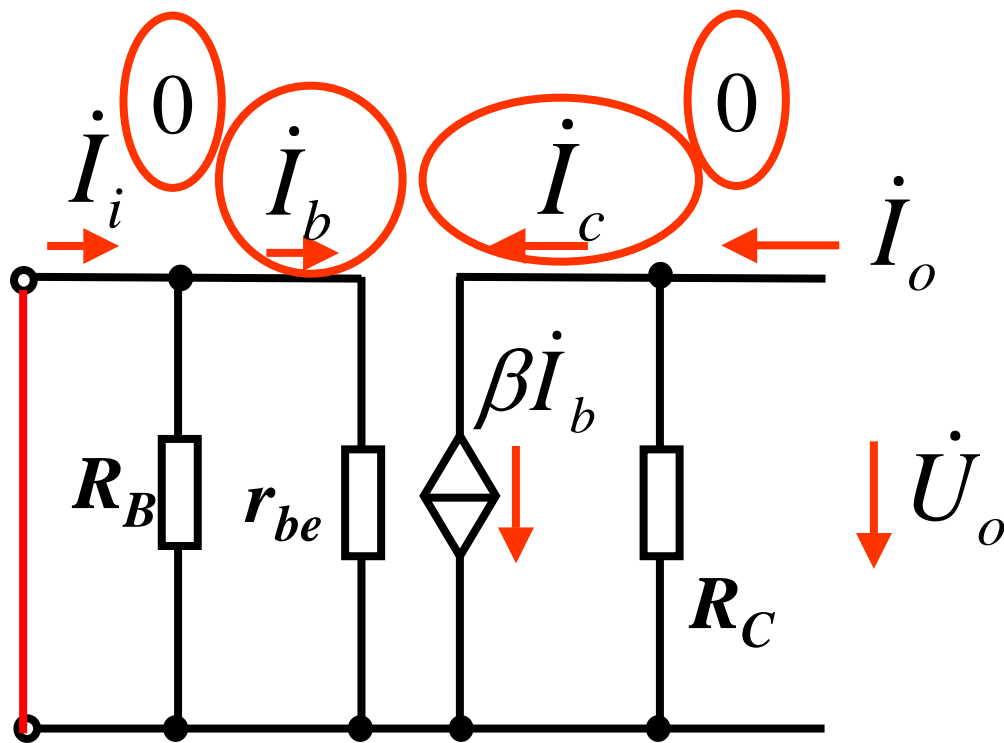
对于负载而言，放大电路相当于信号源，可以将它进行戴维南等效，戴维南等效电路的内阻就是输出电阻。

计算输出电阻的方法：

- (1) 所有电源置零，然后计算电阻（对有受控源的电路不适用）。
- (2) 所有独立电源置零，保留受控源，加压求流法。



用加压求流法求输出电阻：



所以：

$$r_o = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} = R_C$$

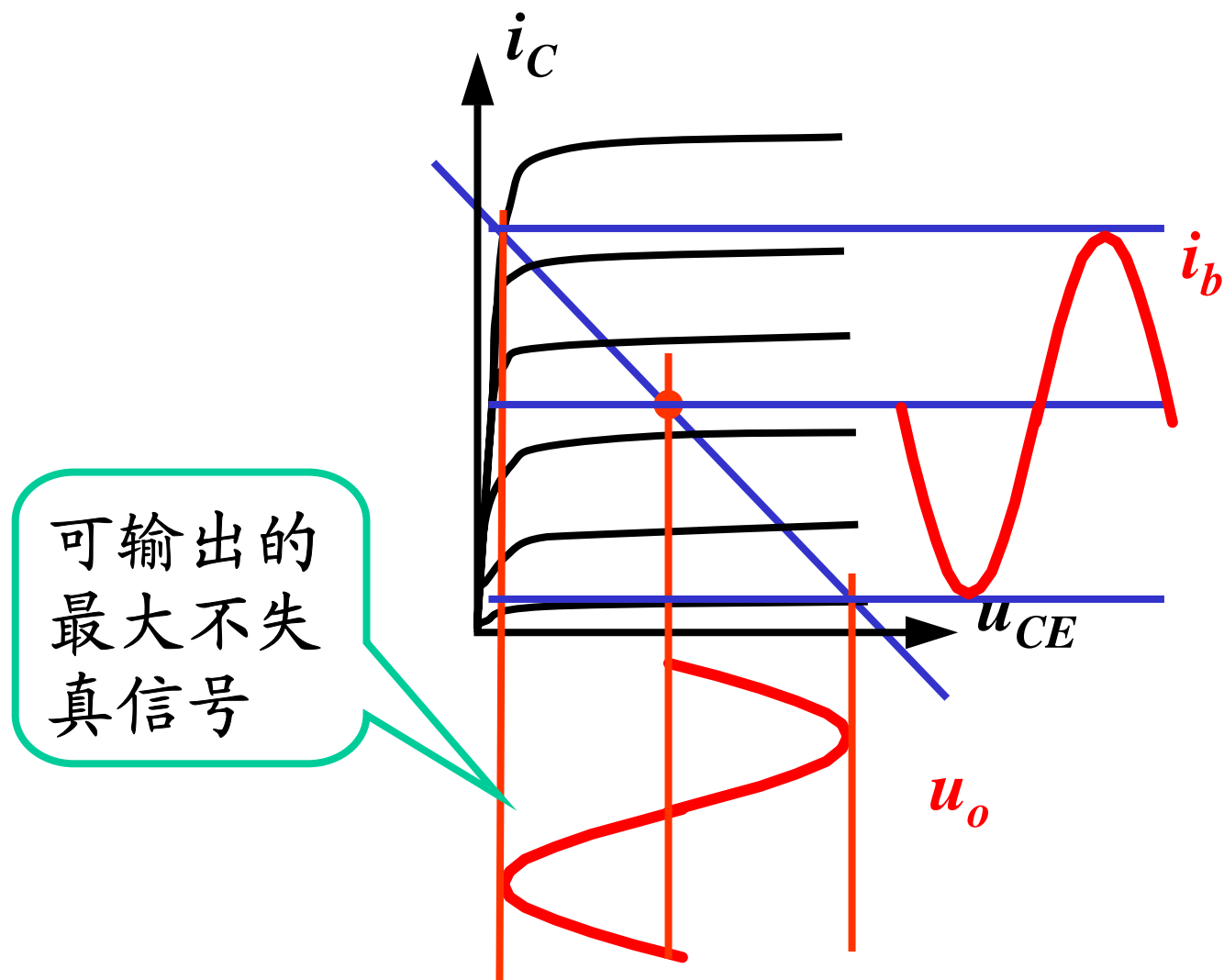
## 2.3.5 失真分析

在放大电路中，输出信号应该成比例地放大输入信号（即线性放大）；如果两者不成比例，则输出信号不能反映输入信号的情况，放大电路产生非线性失真。

为了得到尽量大的输出信号，要把 $Q$ 设置在交流负载线的中间部分。如果 $Q$ 设置不合适，信号进入截止区或饱和区，则造成非线性失真。

下面将分析失真的原因。为简化分析，假设负载为空载( $R_L = \infty$ )。

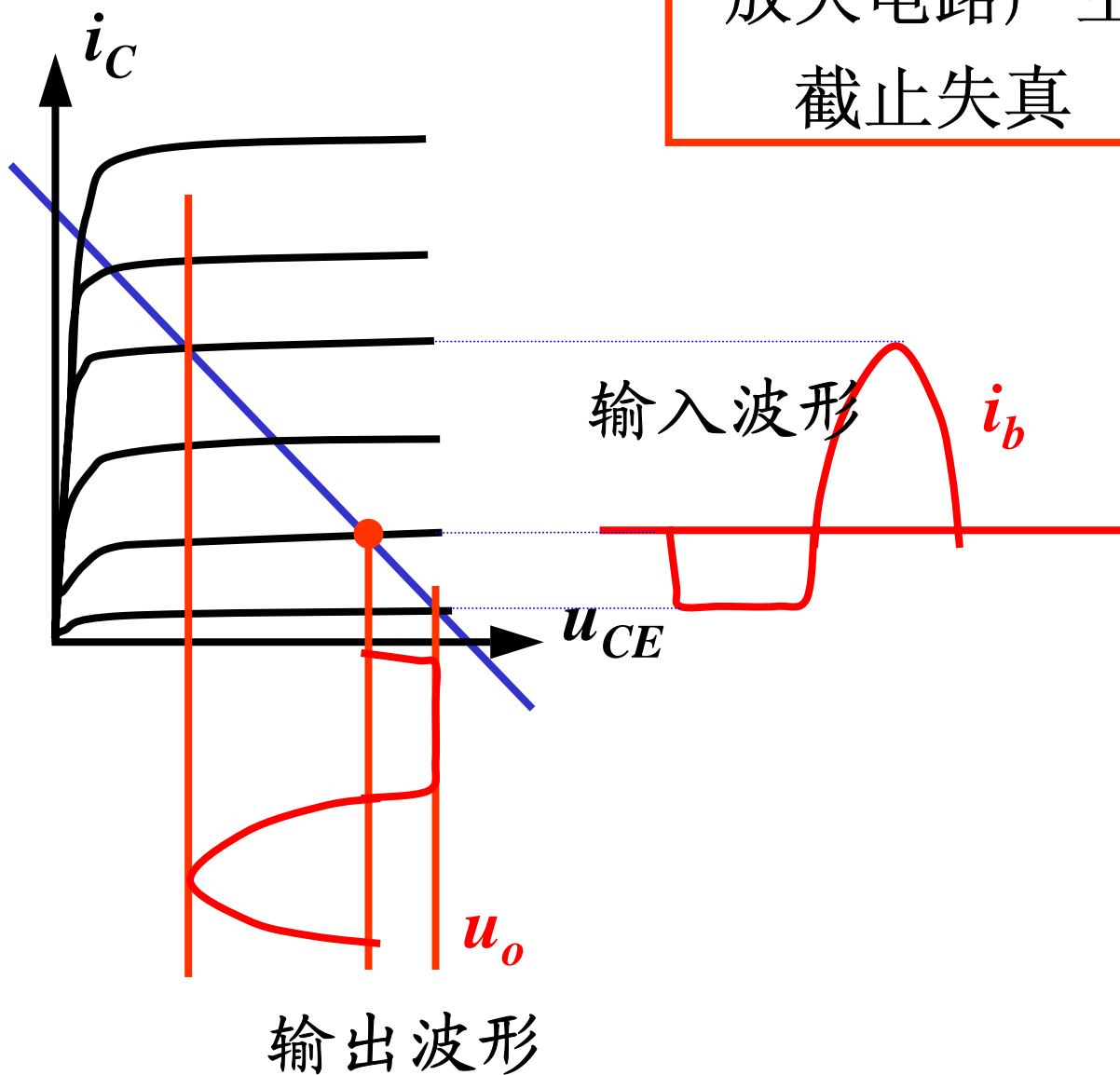
# 选择静态工作点



可输出的  
最大不失  
真信号

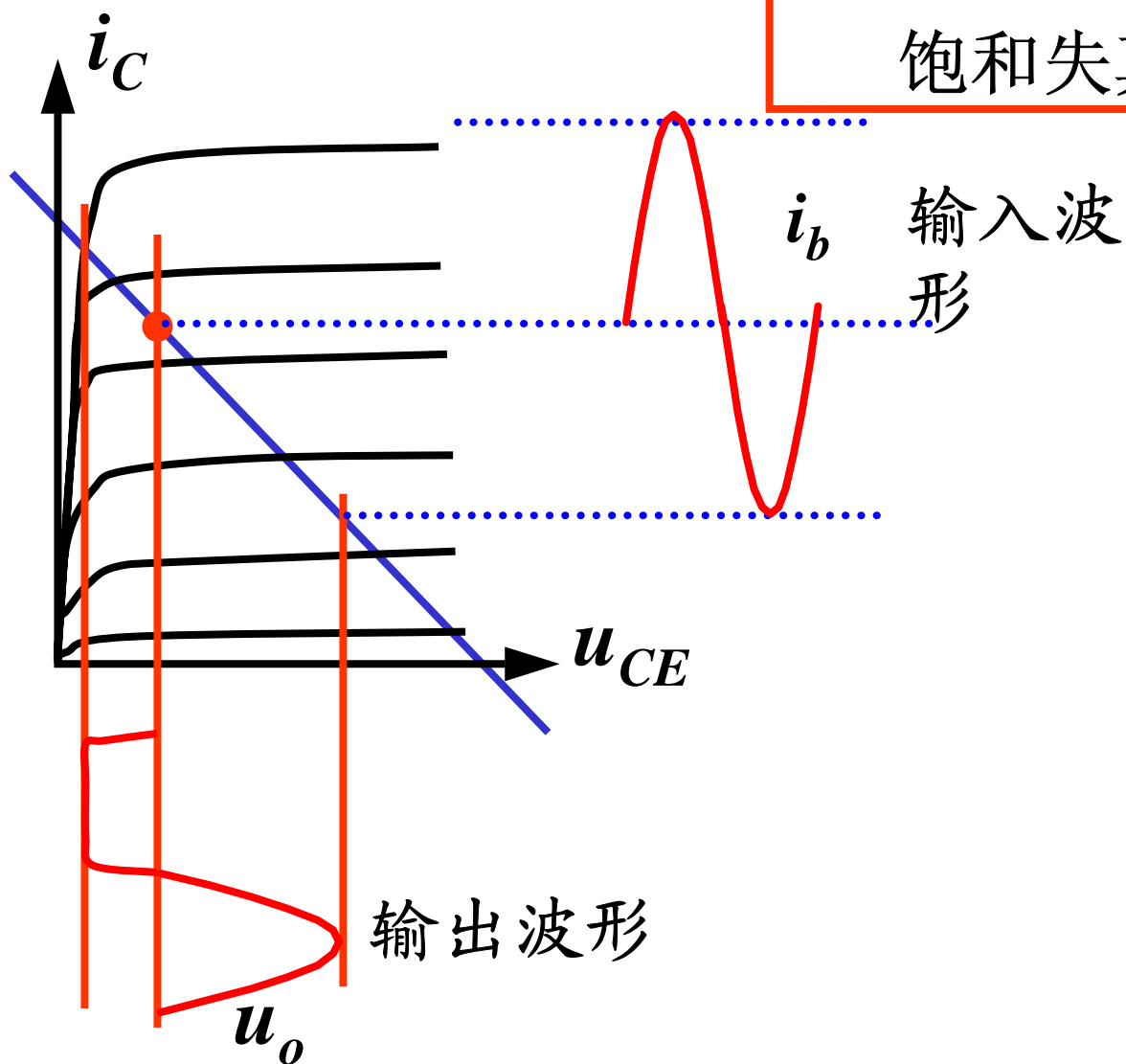
# 1. $Q$ 点过低，信号进入截止区

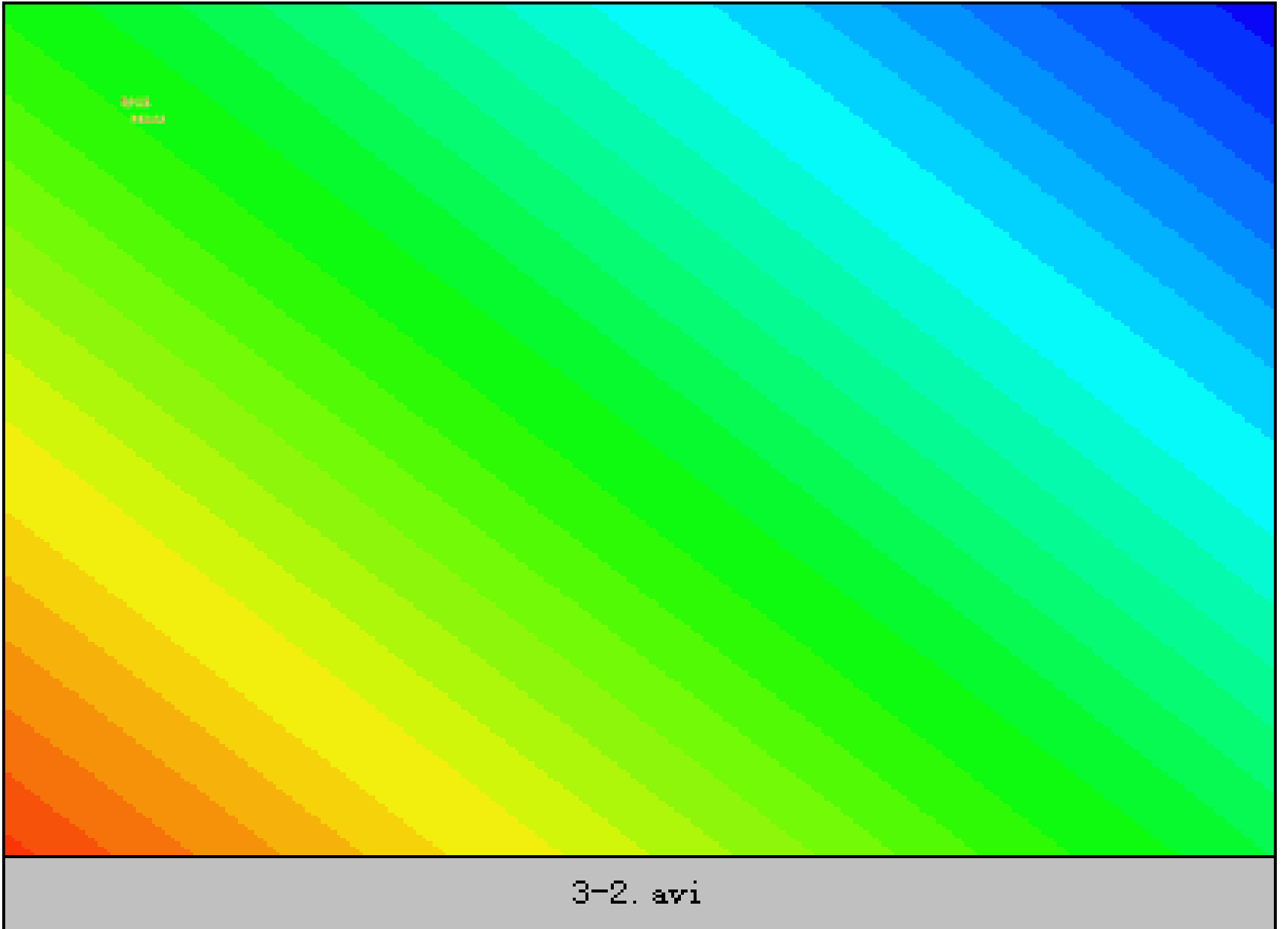
放大电路产生  
截止失真



## 2. $Q$ 点过高，信号进入饱和区

放大电路产生  
饱和失真

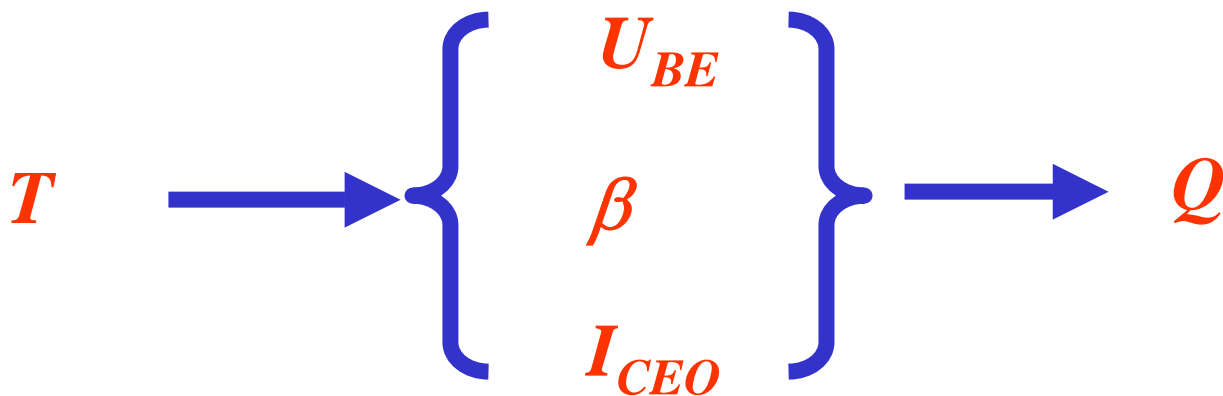




## § 2.4 静态工作点的稳定

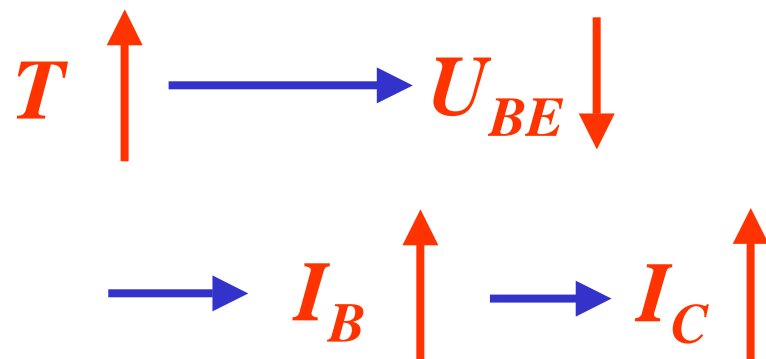
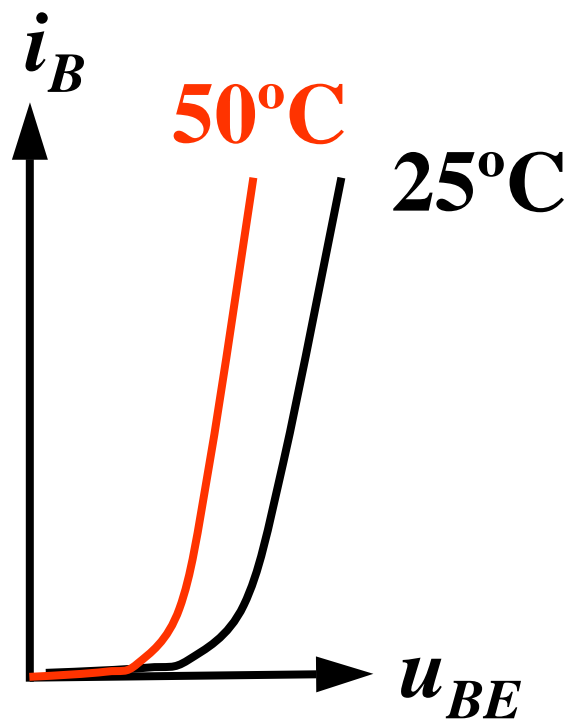
为了保证放大电路的稳定工作，必须有合适的、稳定的静态工作点。但是，温度的变化严重影响静态工作点。

对于前面的电路（固定偏置电路）而言，静态工作点由 $U_{BE}$ 、 $\beta$ 和 $I_{CEO}$ 决定，这三个参数随温度而变化，温度对静态工作点的影响主要体现在这一方面。



# 一、温度对 $U_{BE}$ 的影响

$$I_B = \frac{E_C - U_{BE}}{R_B}$$

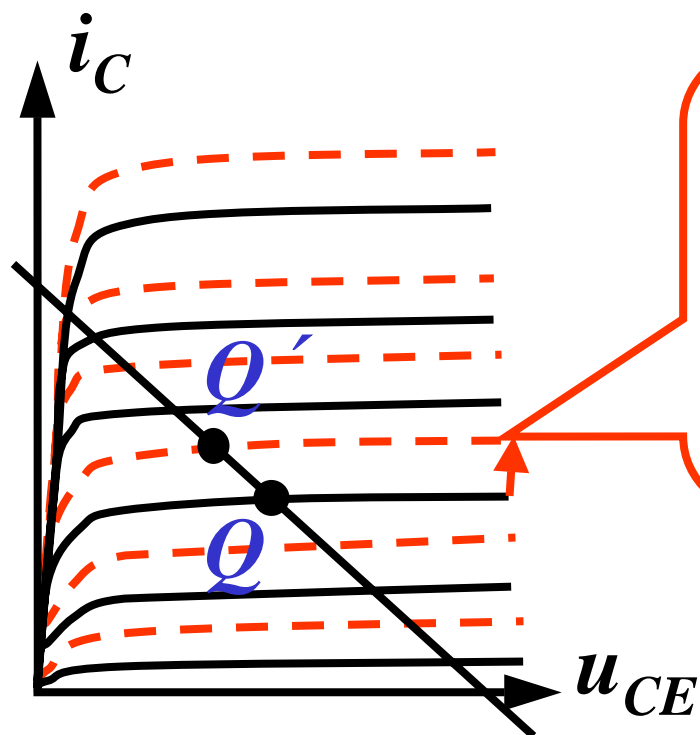




## 二、温度对 $\beta$ 值及 $I_{CEO}$ 的影响

$T \uparrow \longrightarrow \beta, I_{CEO} \uparrow \longrightarrow I_C \uparrow$

总的效果是：



温度上升时，  
输出特性曲  
线上移，造  
成 $Q$ 点上移。

3-8. avi

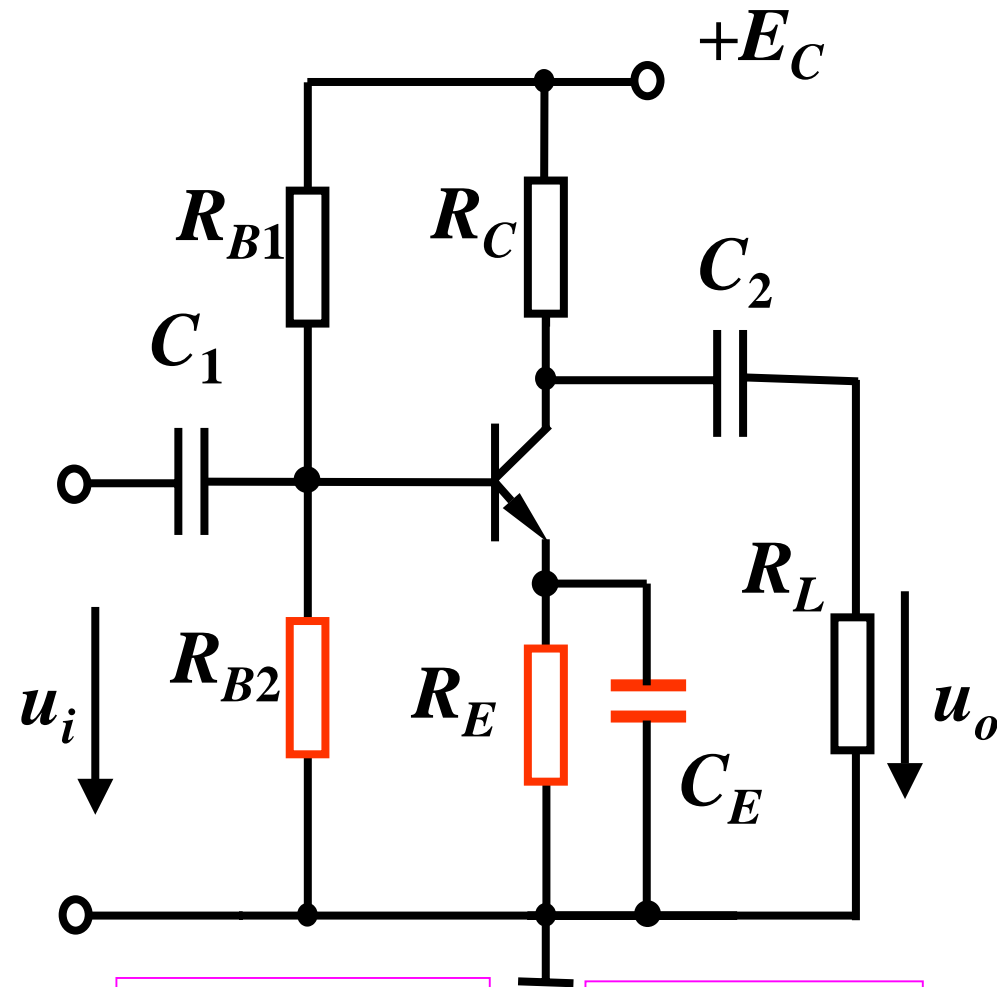
小结:

$$T \uparrow \longrightarrow I_C \uparrow$$

固定偏置电路的 $Q$ 点是不稳定的。 $Q$ 点不稳定可能会导致静态工作点靠近饱和区或截止区，从而导致失真。为此，需要改进偏置电路，当温度升高、 $I_C$ 增加时，能够自动减少 $I_B$ ，从而抑制 $Q$ 点的变化。保持 $Q$ 点基本稳定。

常采用分压式偏置电路来稳定静态工作点。  
电路见下页。

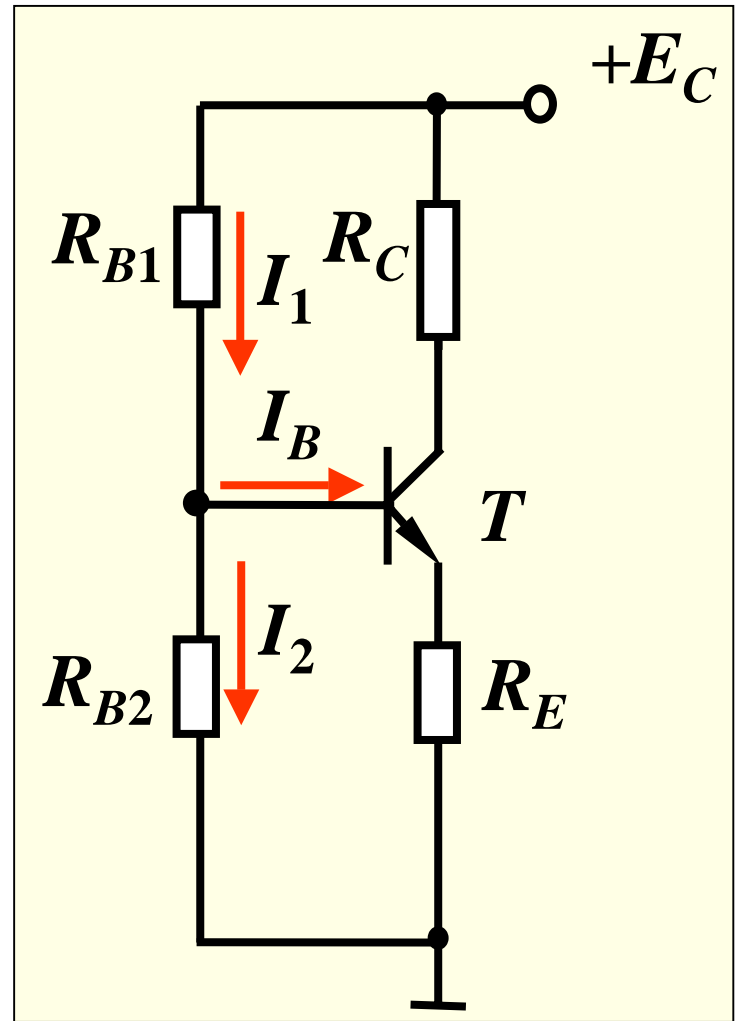
# 分压式偏置电路:



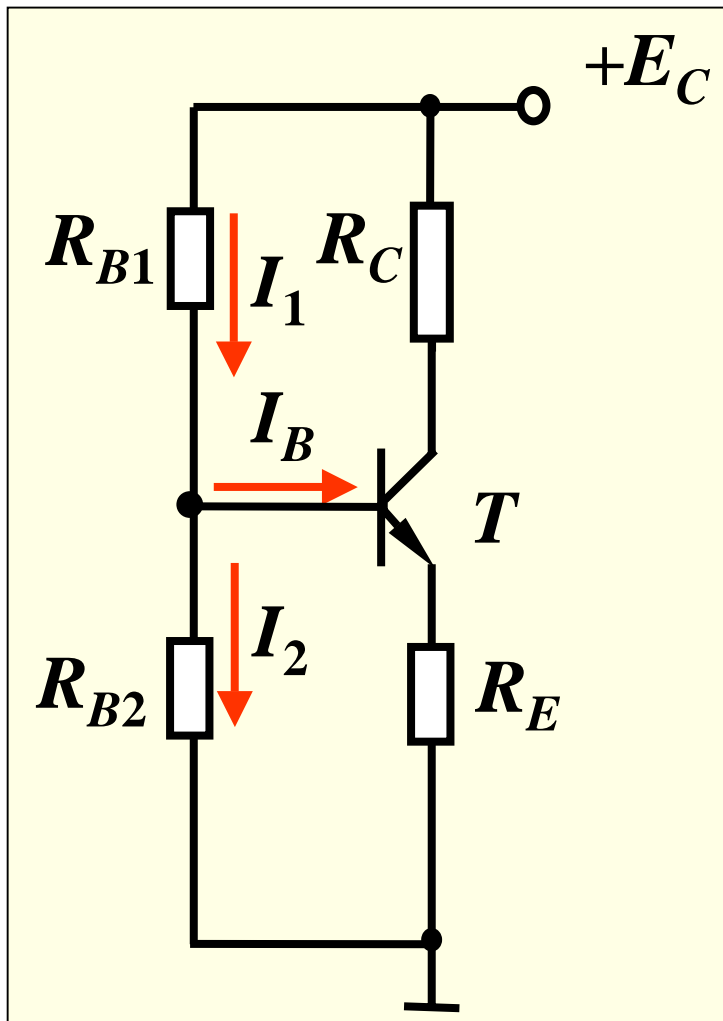
$R_E$  射极直流  
负反馈电阻

$C_E$  交流旁  
路电容

## 一、静态分析

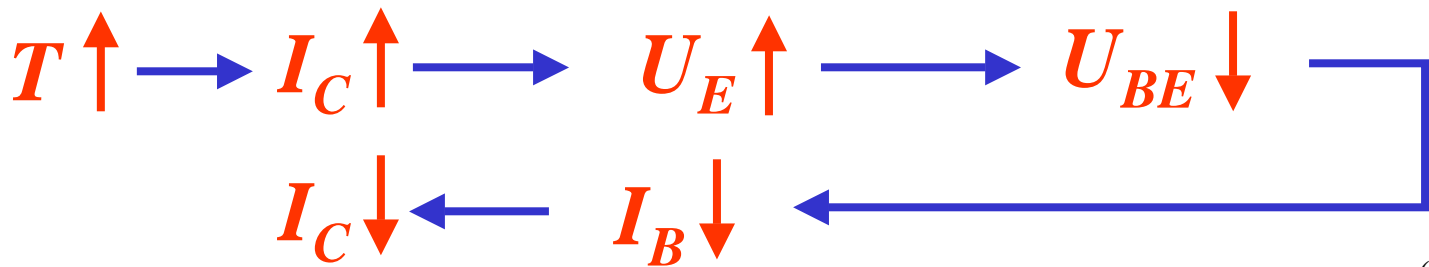


直流通路

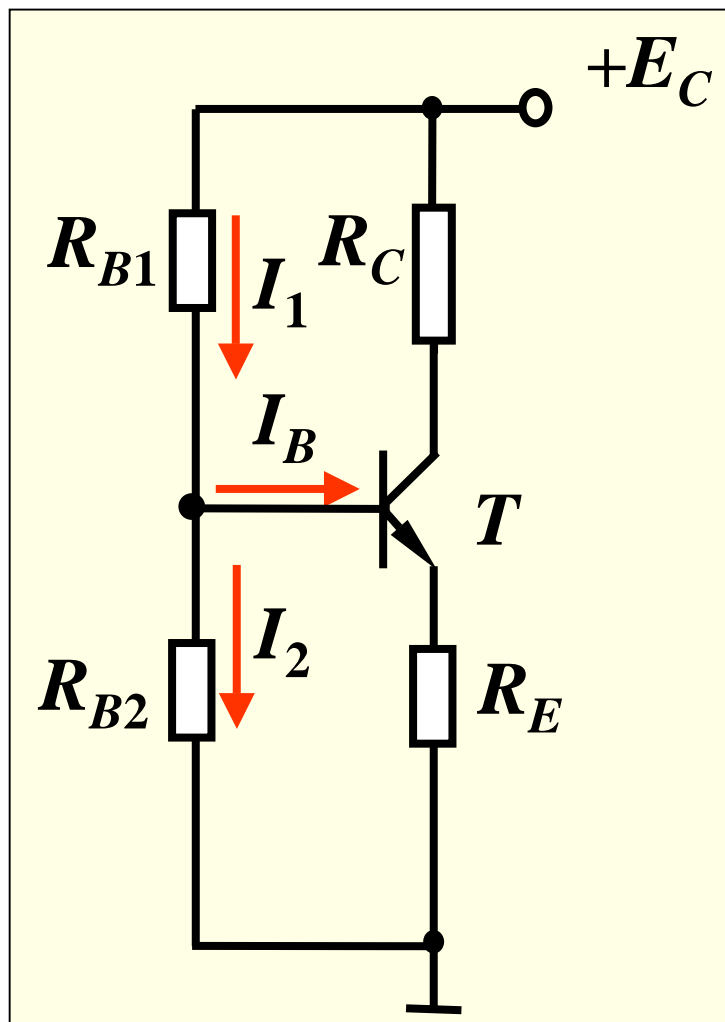


## 1. 静态工作点稳定的原理

本电路稳压的过程实际是由于加了  $R_E$  形成了负反馈过程



## 2. 求静态工作点



直流通路

算法一：

$$E_C = I_1 R_{B1} + U_{BE} + I_E R_E$$

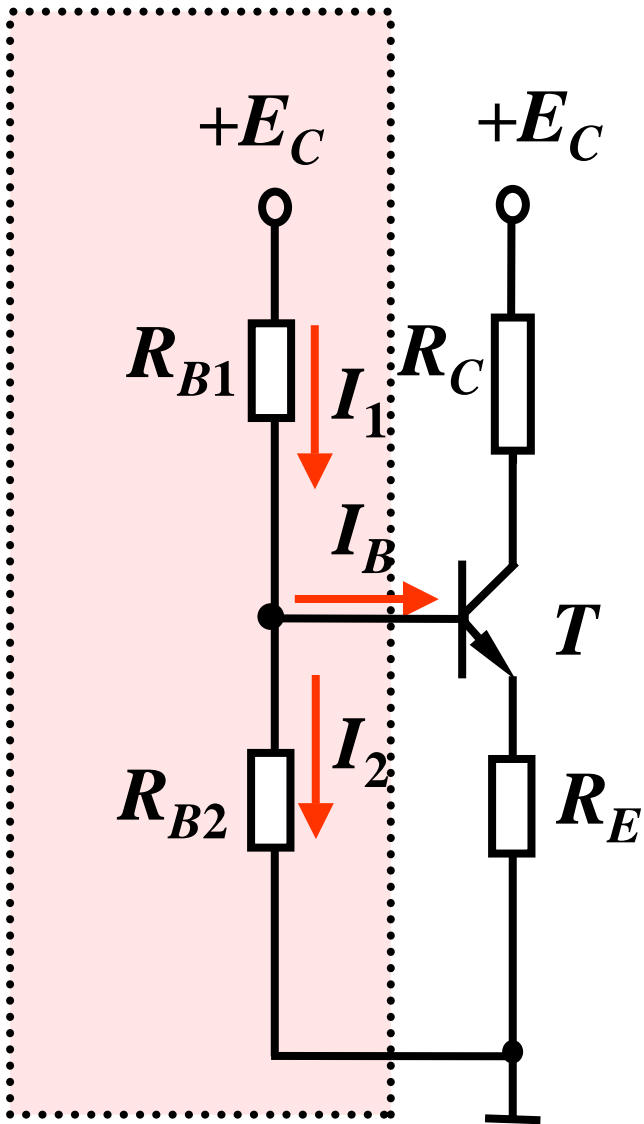
$$I_2 R_{B2} = U_{BE} + I_E R_E$$

$$I_1 = I_2 + I_B$$

$$I_E = (1 + \beta) I_B$$

上述四个方程联立，可求出  $I_E$ ，进而，可求出  $U_{CE}$ 。

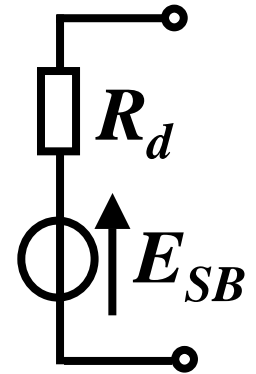
本算法比较麻烦，通常采用下面介绍的算法二、三。



直流通路

## 算法二：

方框中部分用戴维南定理等效为：



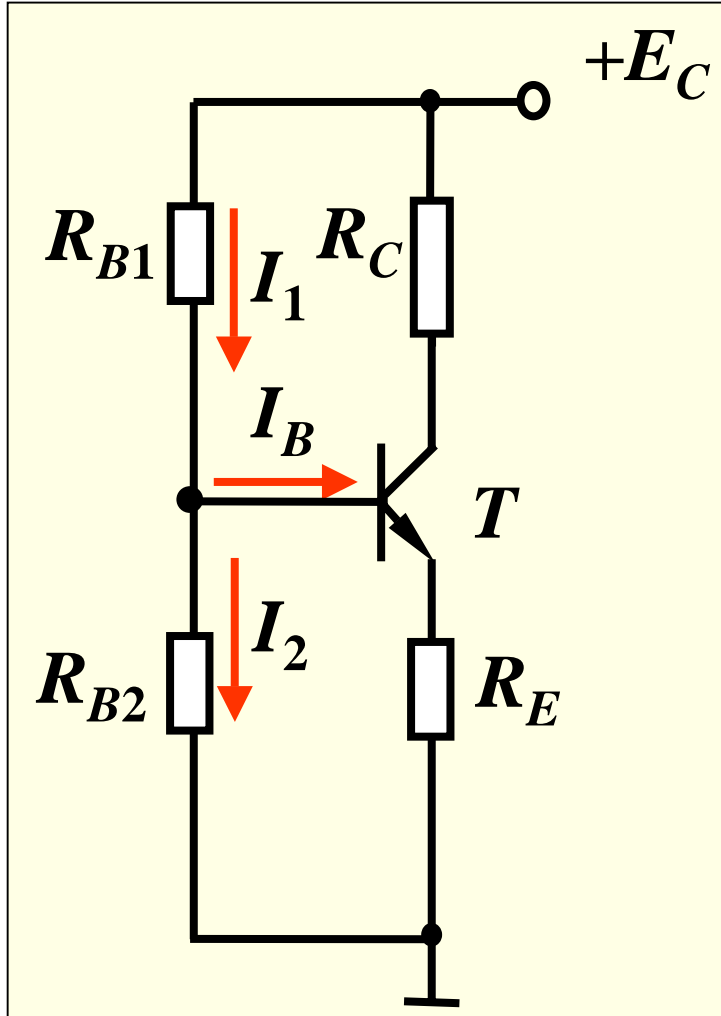
$$R_d = R_{B1} // R_{B2}$$

$$U_{SB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} E_C$$

$$I_B = \frac{U_{SB} - U_{BE}}{R_d + (1 + \beta) R_E}$$

进而，可求出  $I_E$ 、 $U_{CE}$ 。

### 算法三:



直流通路

$$I_2 \gg I_B$$

$$I_1 \approx I_2 \approx \frac{E_C}{R_{B1} + R_{B2}}$$

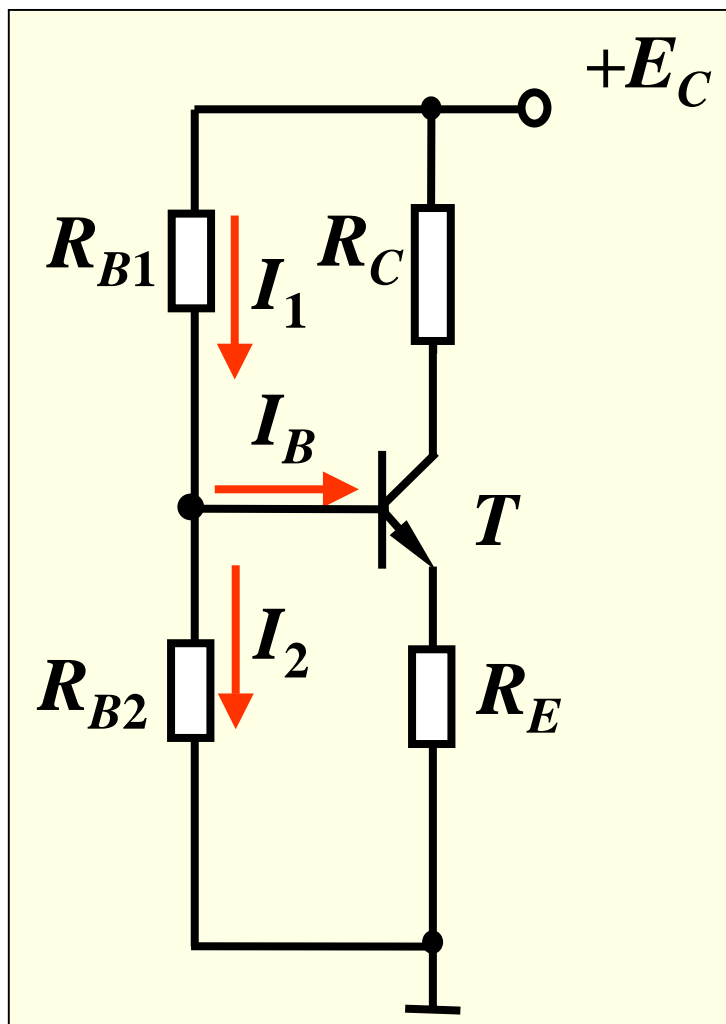
$$V_B = I_2 R_{B2} \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} E_C$$

$$U_{BE} = V_B - V_E = V_B - I_E R_E$$

$$I_C \approx I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} \approx \frac{U_B}{R_E}$$

$$U_{CE} = E_C - I_C \cdot R_C - I_E \cdot R_E$$





直流通路

$$I_C \approx \frac{U_B}{R_E}$$

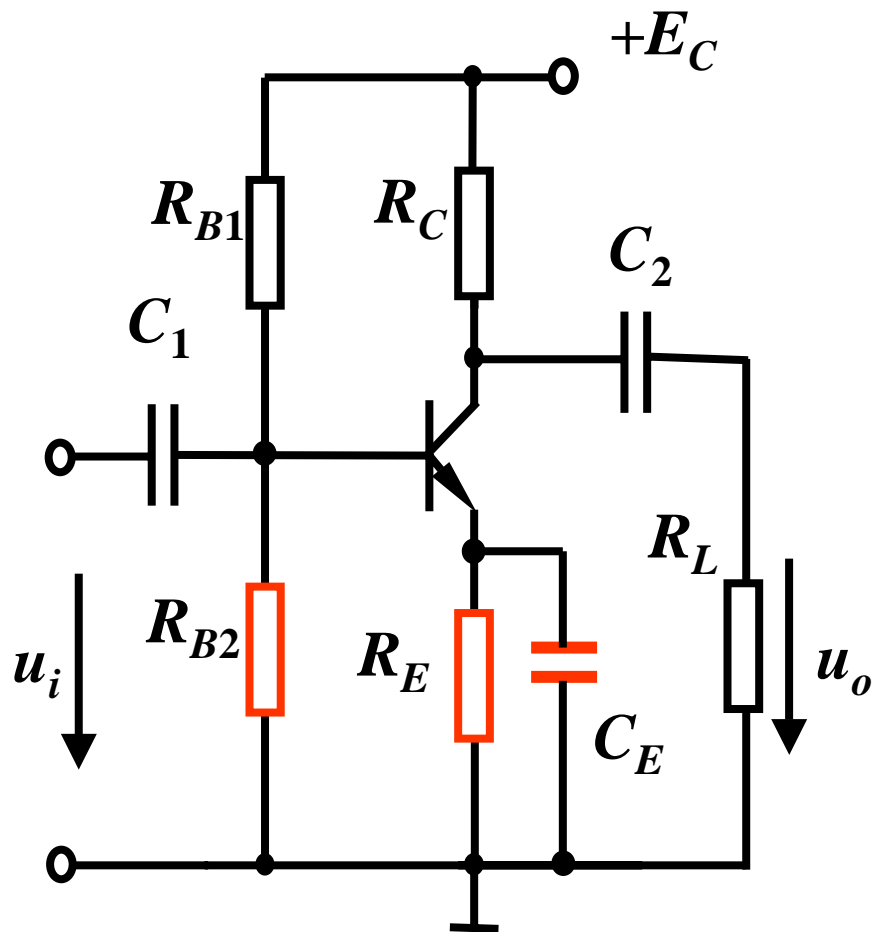
可以认为与温度无关。

似乎 $I_2$ 越大越好，  
但是 $R_{B1}$ 、 $R_{B2}$ 太小，  
将增加损耗，降低输入电阻。因此一般取  
几十 $k\Omega$ 。

Q点偏高 → 饱和失真

Q点偏低 → 截止失真

**例:** 已知  $\beta=50$ ,  $E_C=12V$ ,  $R_{B1}=7.5k\Omega$ ,  $R_{B2}=2.5k\Omega$ ,  $R_C=2k\Omega$ ,  $R_E=1k\Omega$ , 求该电路的静态工作点。



算法一、二的结果:

$$I_B = 0.0435 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta I_B = 2.175 \text{ mA}$$

$$U_{CE} = E_C - I_C R_C - I_E R_E = 5.43 \text{ V}$$

算法三的结果:

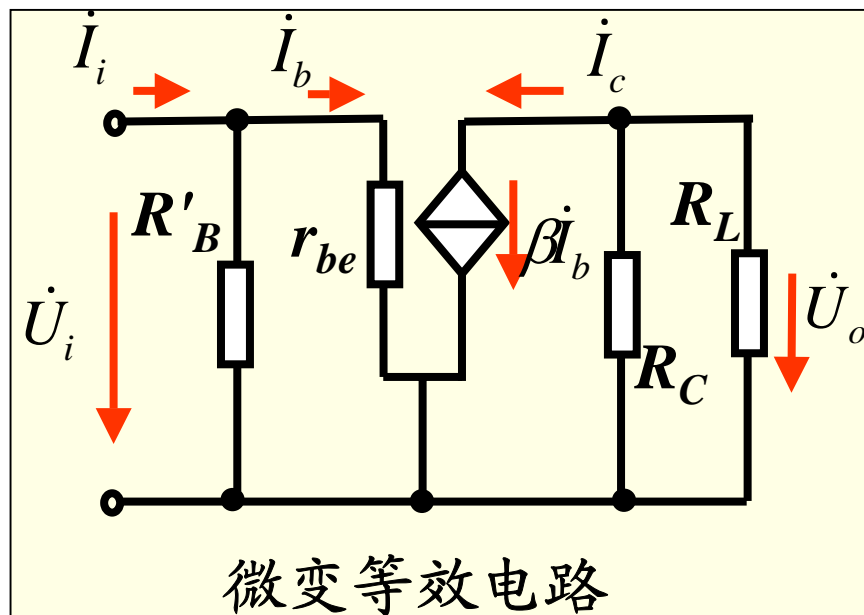
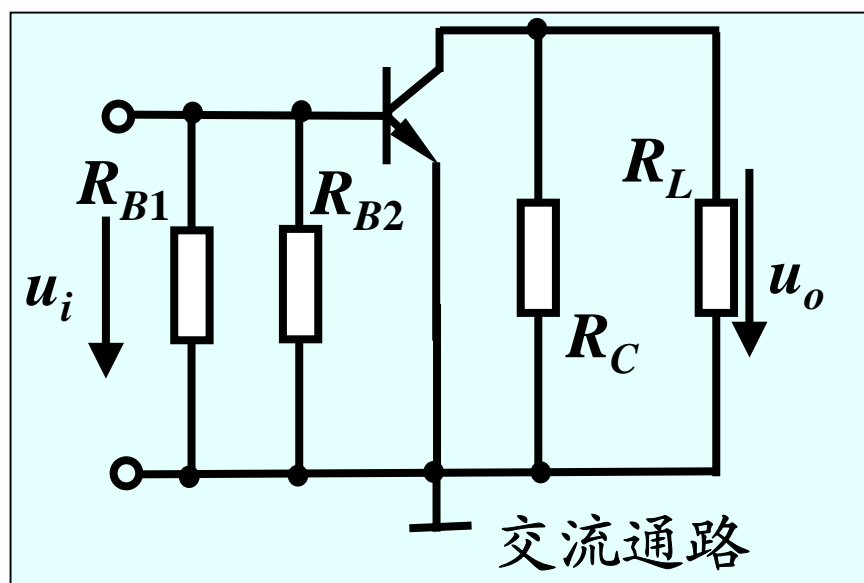
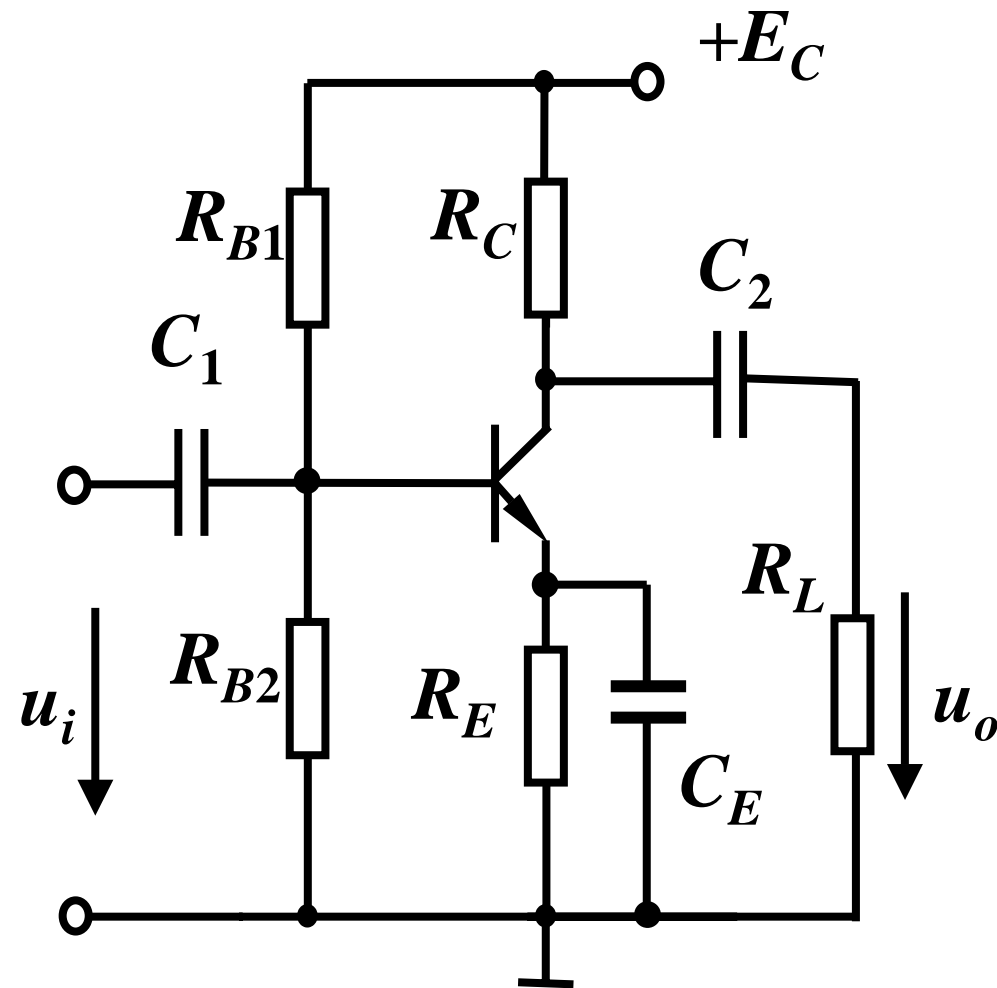
$$V_B \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} E_C = 3 \text{ V}$$

$$I_E \approx 2.3 \text{ mA}$$

$$U_{CE} \approx 5.1 \text{ V}$$

**结论:** 三种算法的结果近似相等, 但算法三的计算过程要简单得多。

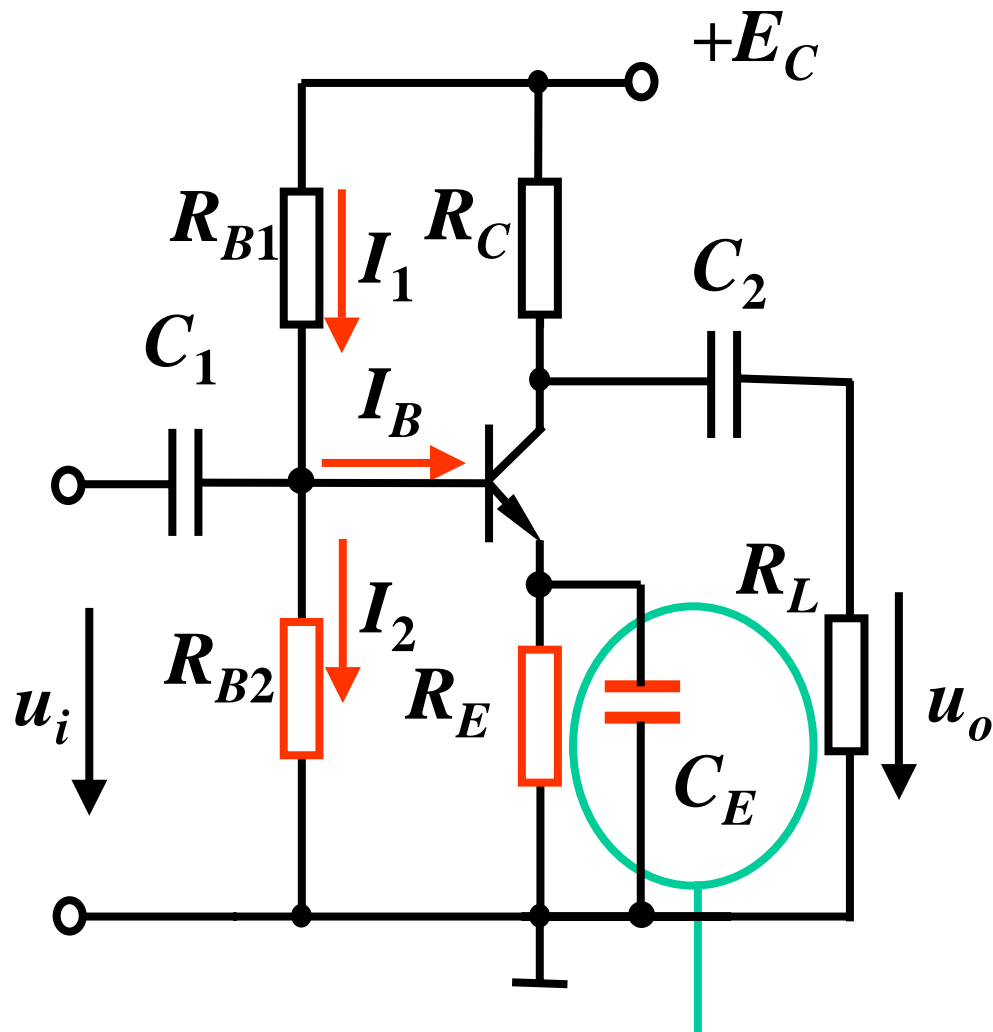
## 二、动态分析



$$A_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}}$$

$$r_i = R'_B // r_{be} \approx r_{be}$$

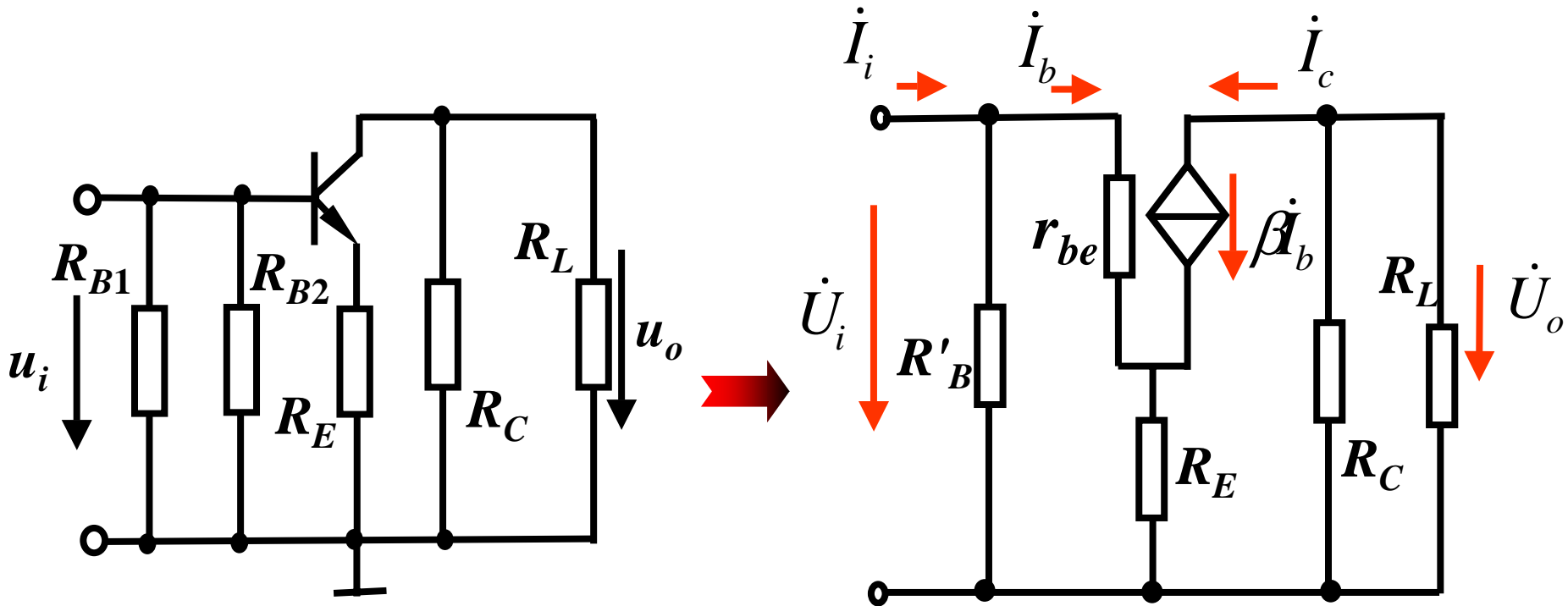
$$r_o = R_C$$



**问题1:** 如果去掉 $C_E$ ,  
放大倍数怎样?

$C_E$ 的作用: 交流通路中,  $C_E$ 将 $R_E$ 短路,  
 $R_E$ 对交流不起作用, 放大倍数不受影响。

去掉  $C_E$  后的交流通路和微变等效电路:



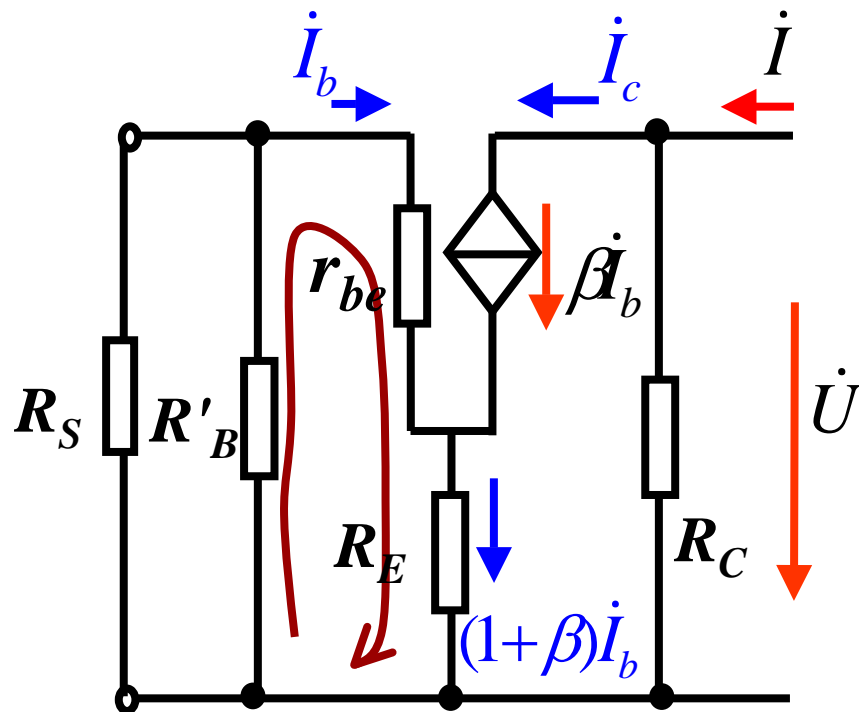
$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R_E$$

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

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

$$r_i = R'_B // \{r_{be} + (1 + \beta) R_E\}$$

用加压求流法求输出电阻。

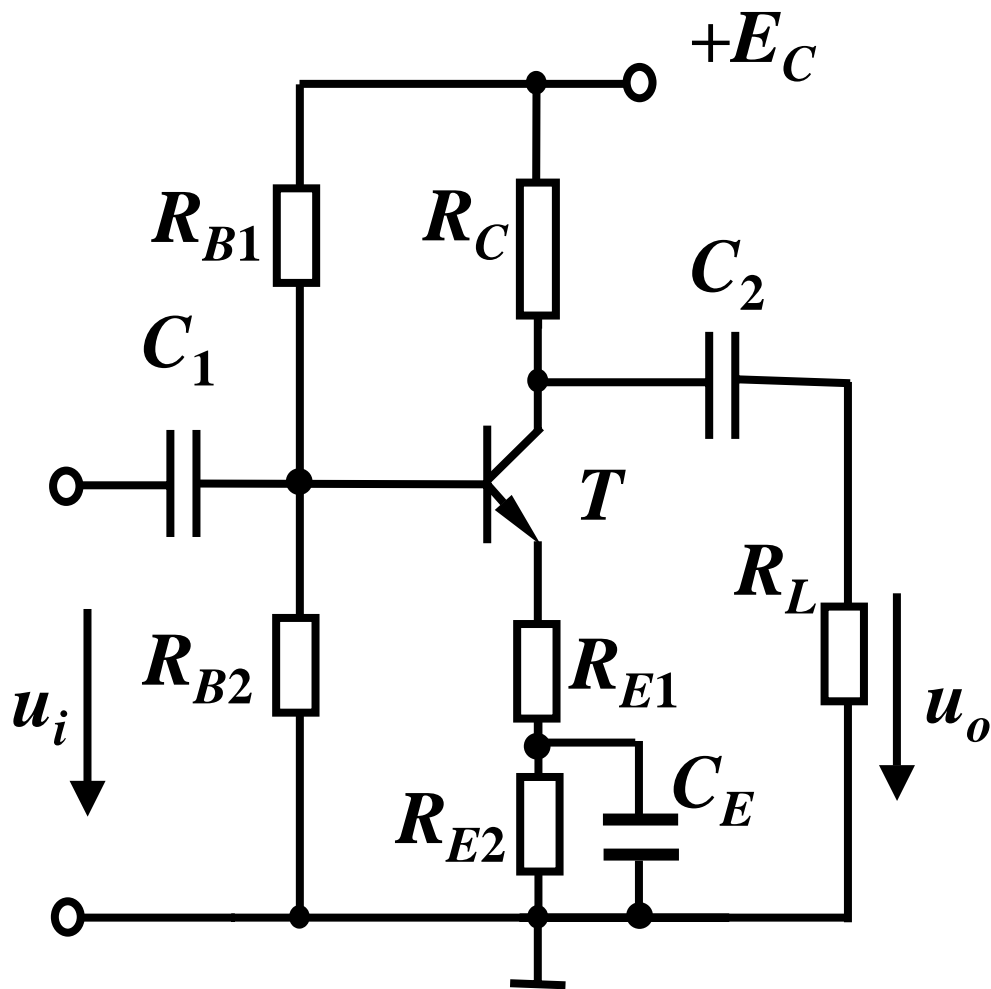


$$\dot{I}_b (R_S // R_{B1} // R_{B2} + r_{be}) + (1 + \beta) \dot{I}_b R_E = 0$$

$$\Rightarrow \dot{I}_b = 0 \Rightarrow \dot{I}_c = 0 \Rightarrow r_o = R_C$$

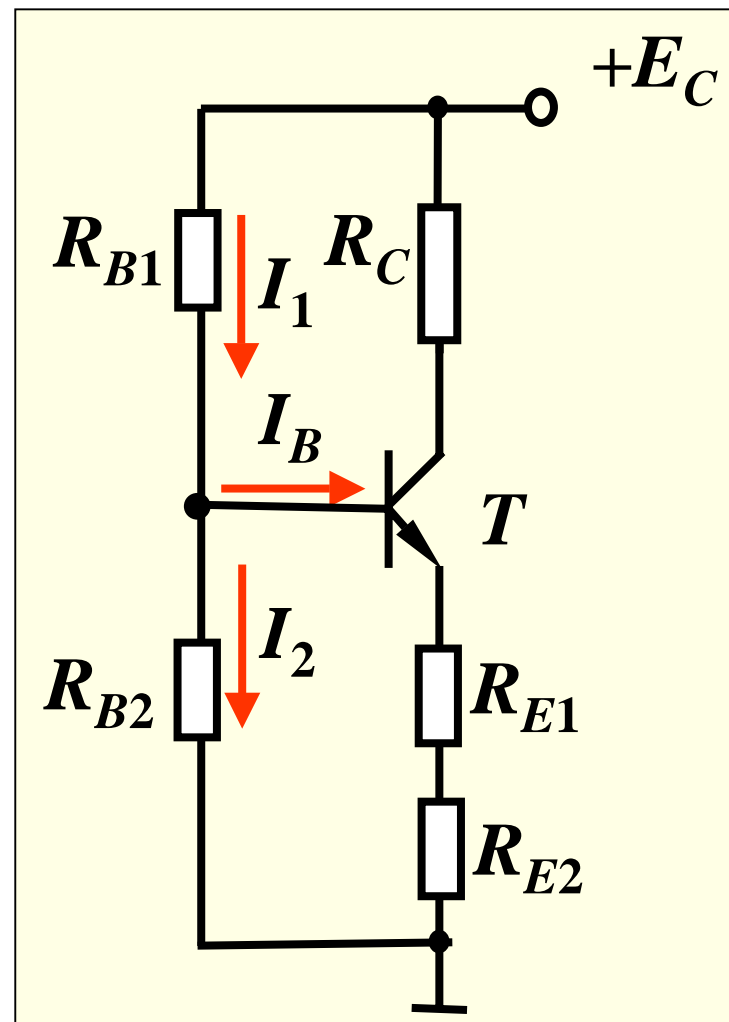
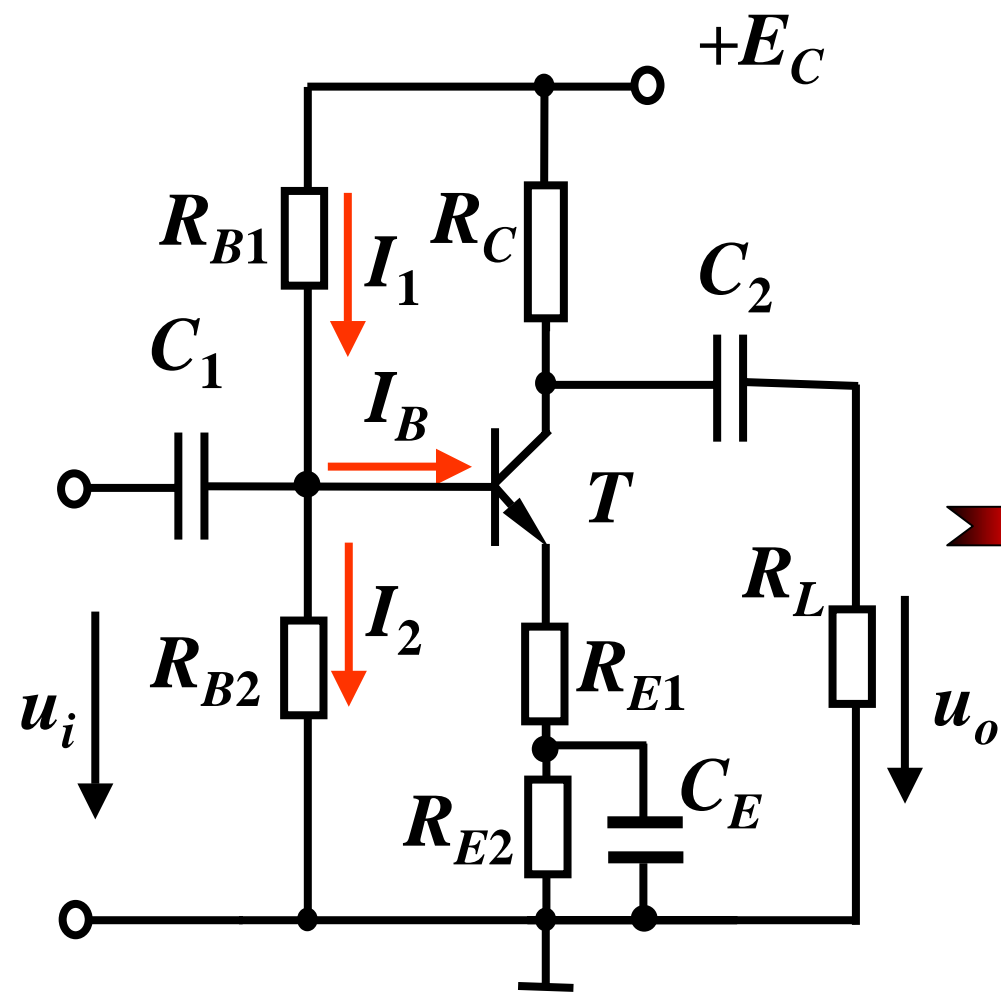
可见，去掉 $C_E$ 后，放大倍数减小、输出电阻不变，但输入电阻增大了。

**问题2:** 如果电路如下图所示，如何分析？



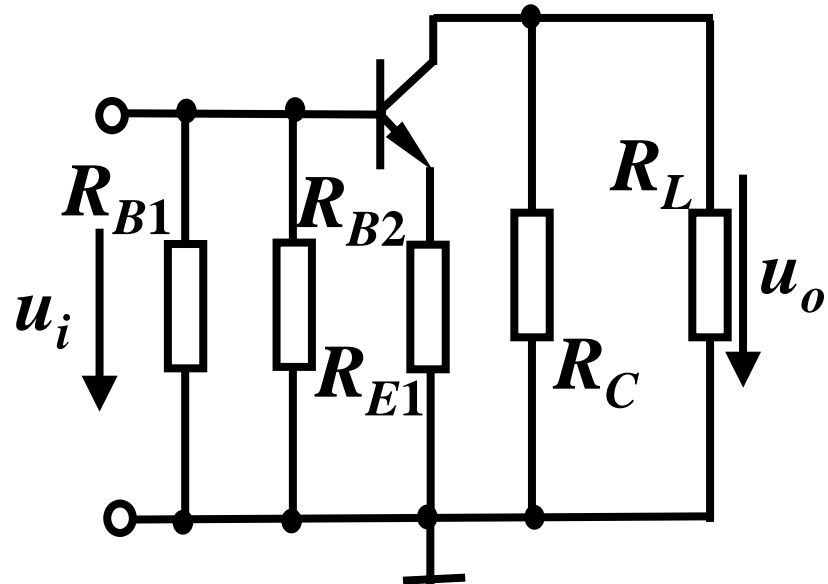
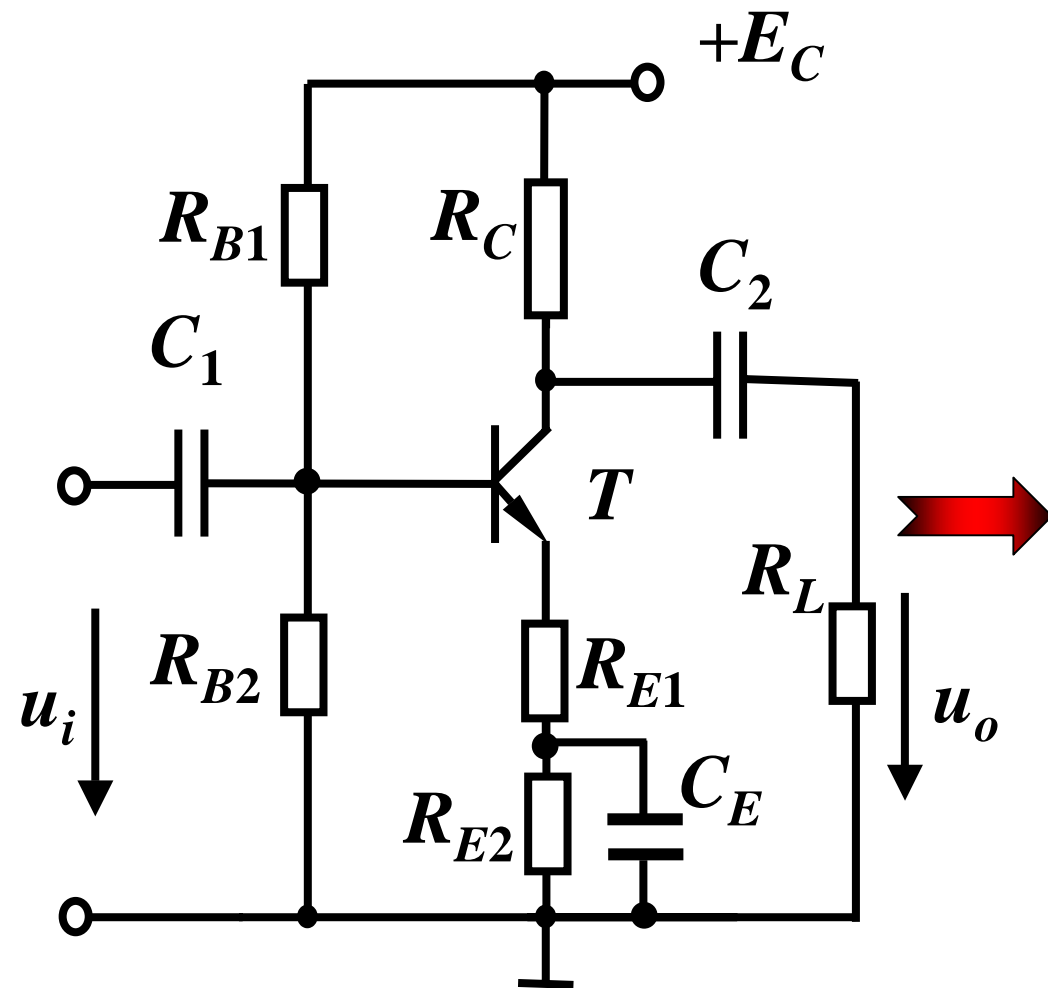


# 静态分析:

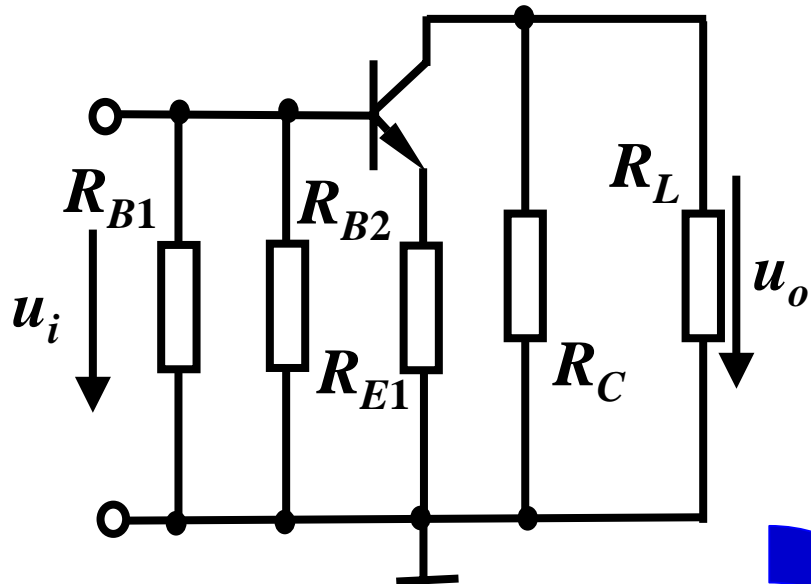


直流通路

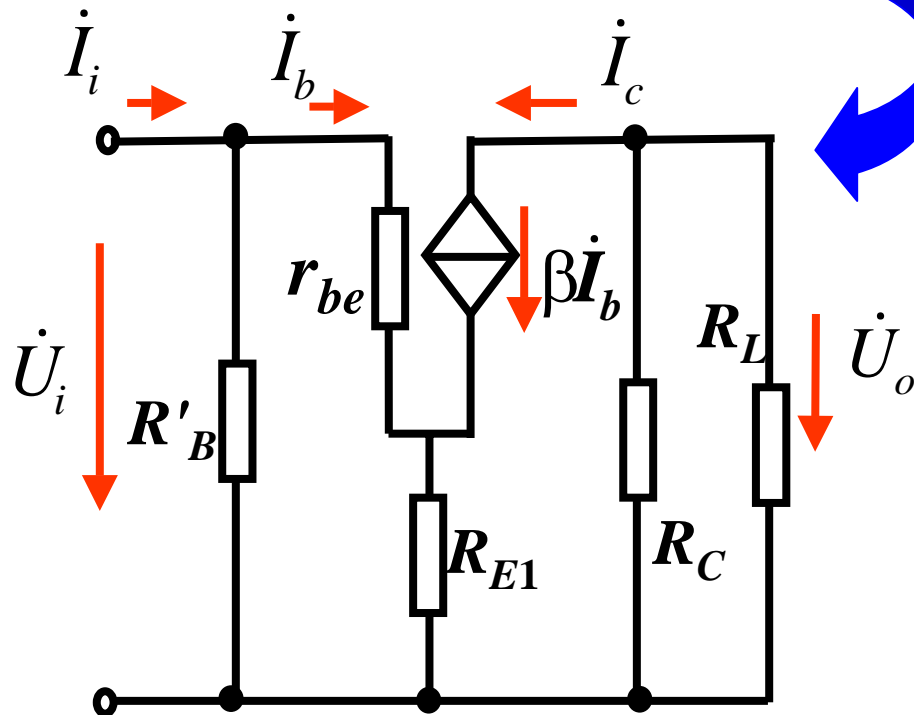
# 动态分析:

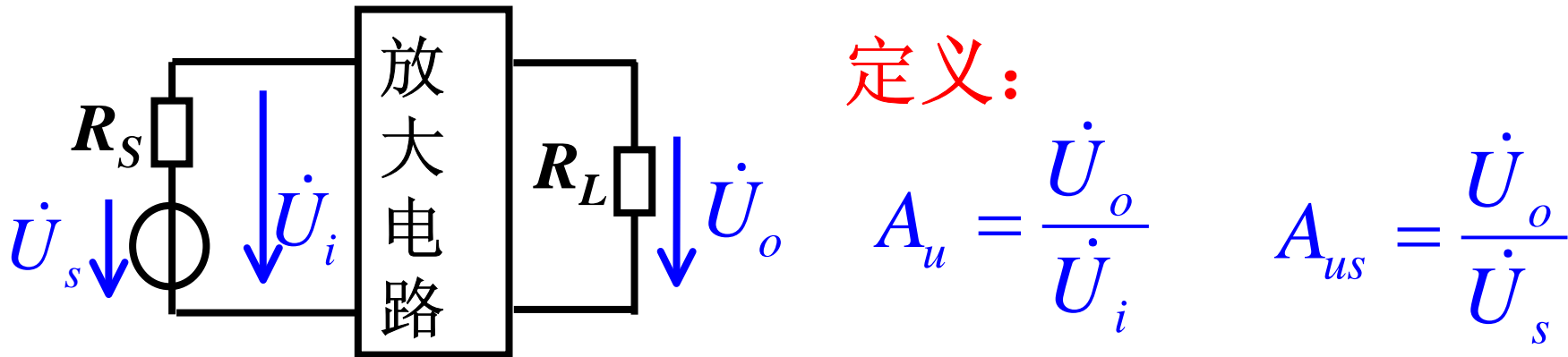


交流通路:



微变等效电路:





定义:

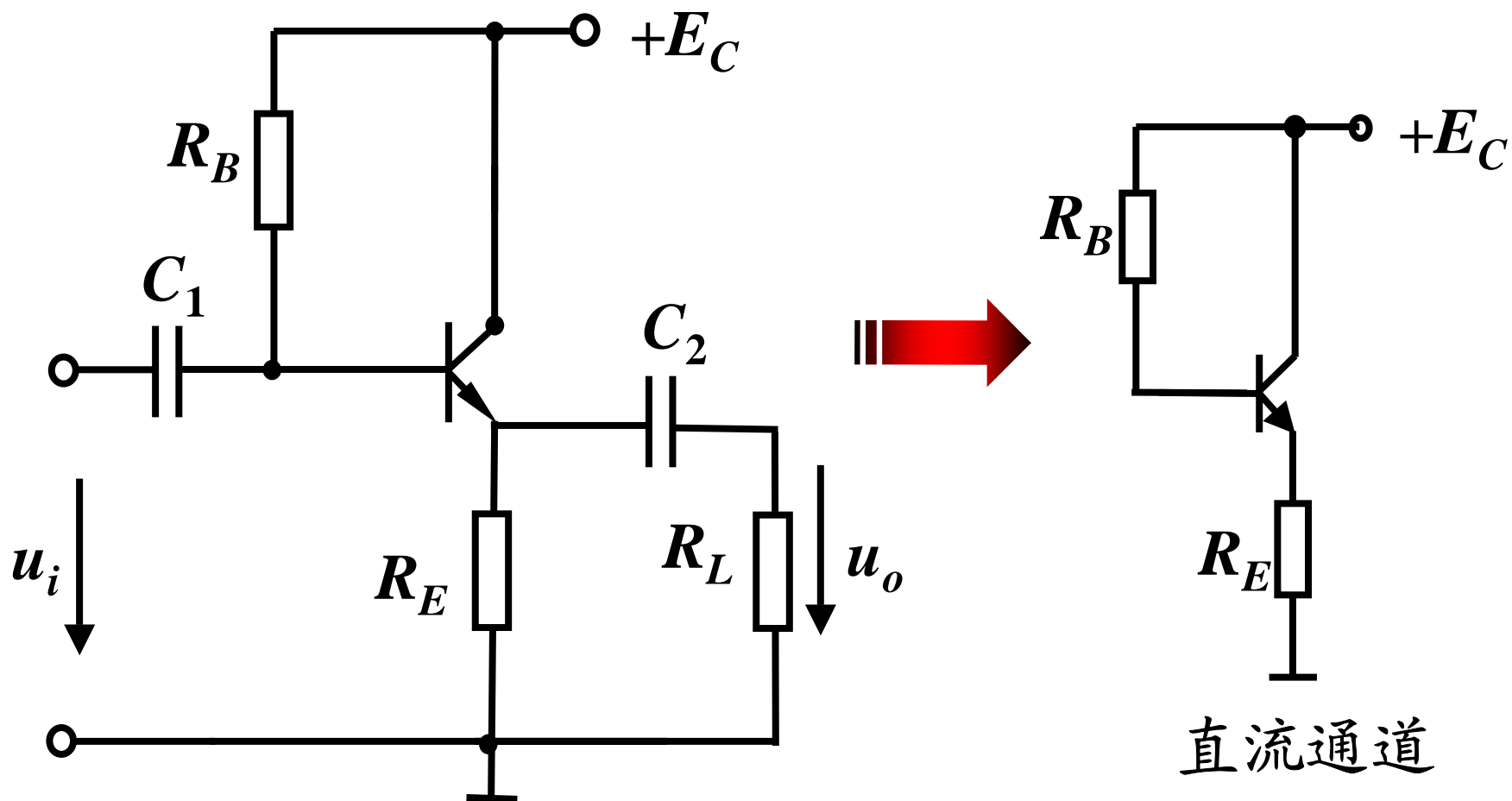
$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

$$A_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s}$$

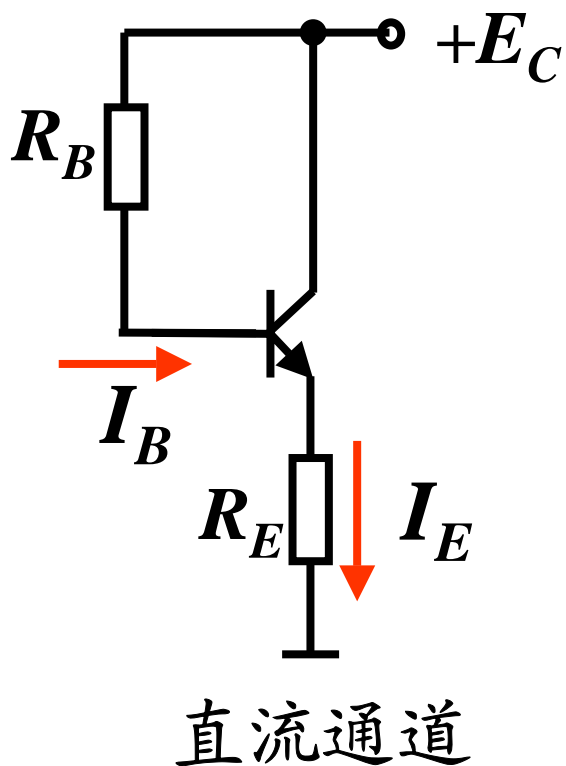
问题:  $A_u$  和  $A_{us}$  的关系如何?

$$\left. \begin{aligned} A_{us} &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \\ \dot{U}_i &= \frac{r_i}{R_S + r_i} \dot{U}_s \end{aligned} \right\} \Rightarrow A_{us} = \frac{r_i}{R_S + r_i} A_u$$

## § 2.5 射极输出器



# 一、静态分析



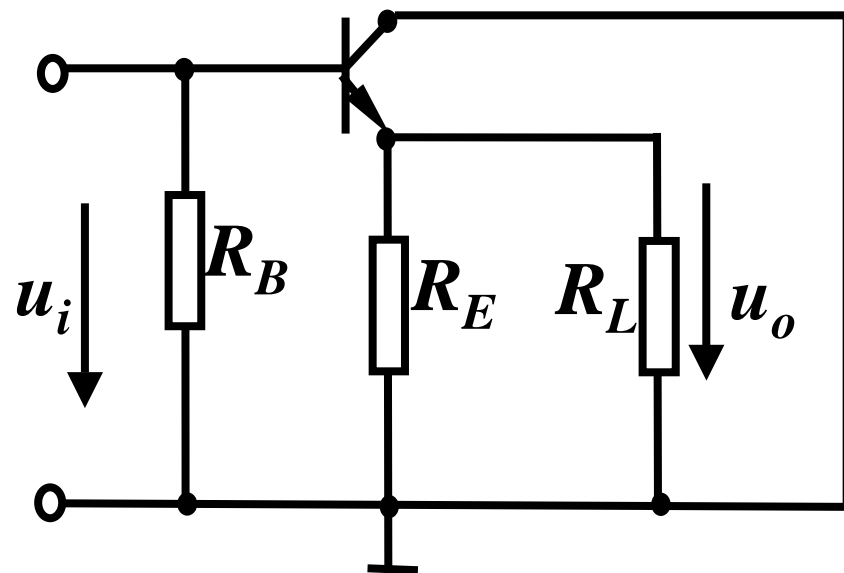
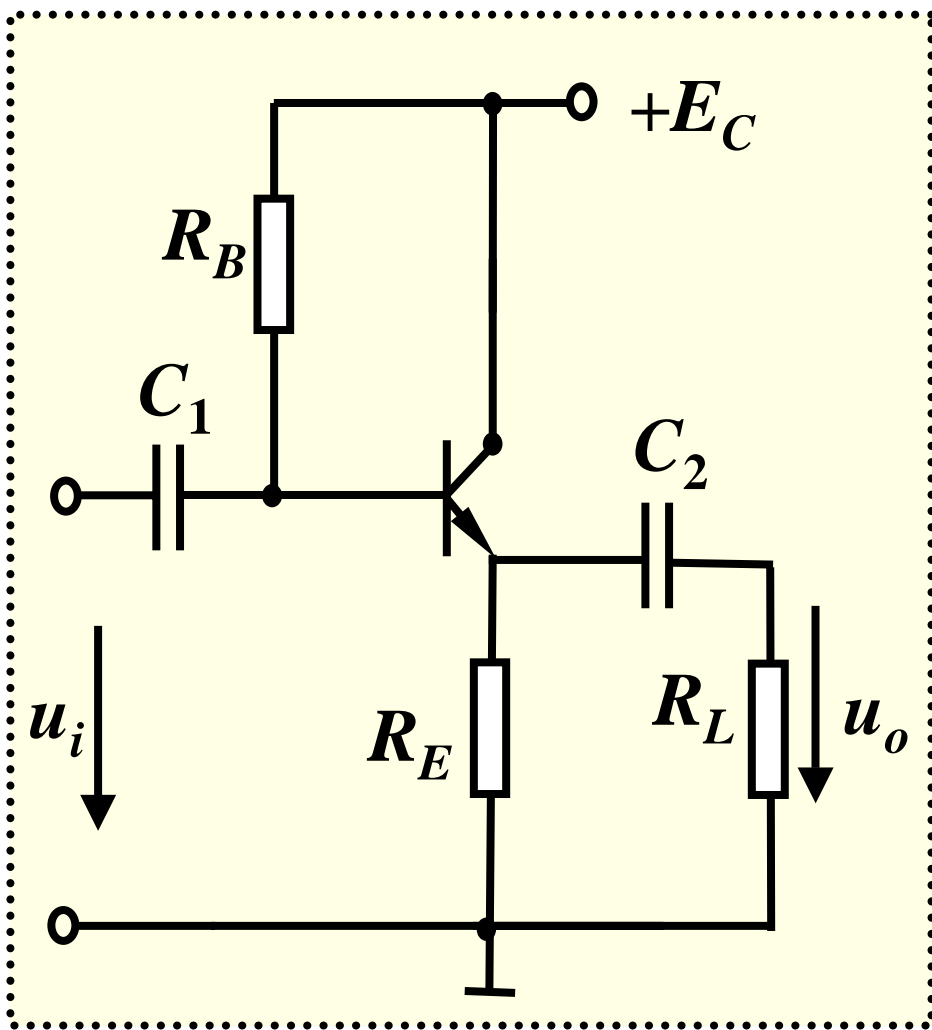
$$I_B = \frac{E_C - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E}$$

折算

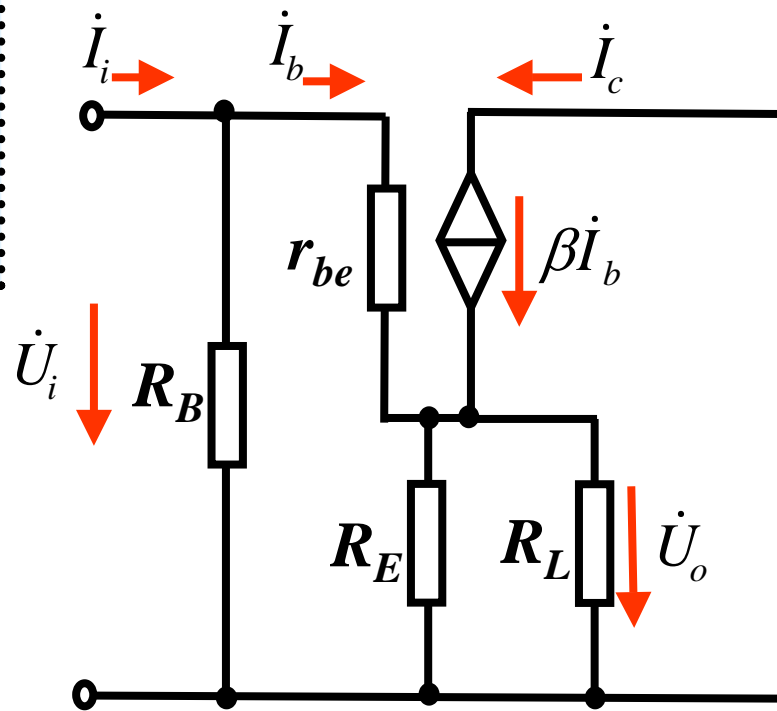
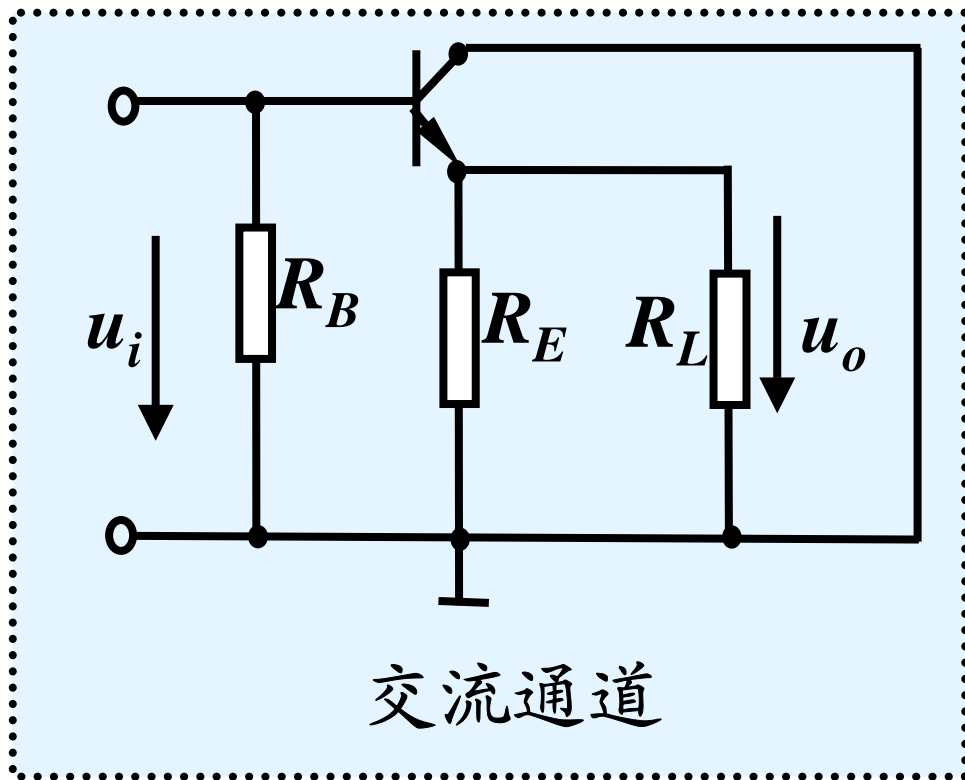
$$I_E = (1 + \beta)I_B$$

$$U_{CE} = E_C - I_E R_E$$

## 二、动态分析



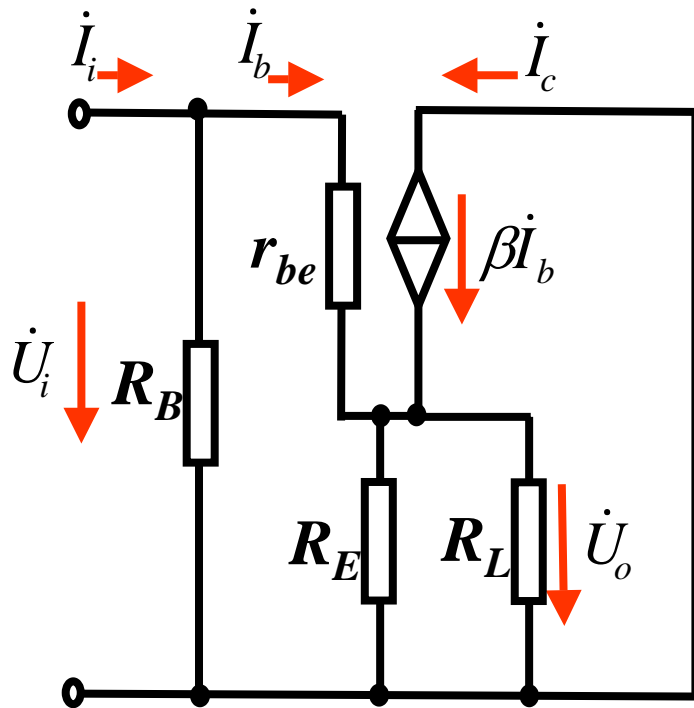
交流通道



微变等效电路



# 1. 电压放大倍数



$$R'_L = R_E // R_L$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_o &= \dot{I}_e R'_L \\ &= (1 + \beta) \dot{I}_b R'_L\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_i &= \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R'_L \\ &= \dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R'_L\end{aligned}$$

$$A_u = \frac{(1 + \beta) \dot{I}_b R'_L}{\dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R'_L} = \frac{(1 + \beta) R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R'_L}$$

$$A_u = \frac{(1 + \beta) R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R'_L}$$

结论:

1.  $r_{be} \ll (1 + \beta) R'_L$ , 所以  $A_u \approx 1$ ,  
但是, 输出电流 $I_e$ 增加了。
2. 输入输出同相, 输出电压跟随输入电压,  
故称电压跟随器。

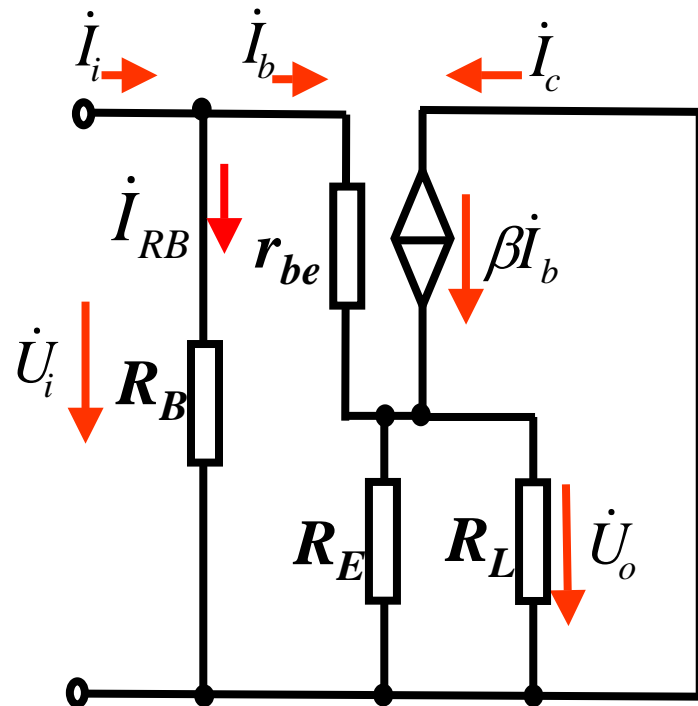
## 2. 输入电阻

$$\dot{I}_i = \dot{I}_b + \dot{I}_{RB}$$

$$\dot{I}_{RB} = \frac{\dot{U}_i}{R_B}$$

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_i}{r_{be} + (1 + \beta)R'_L}$$

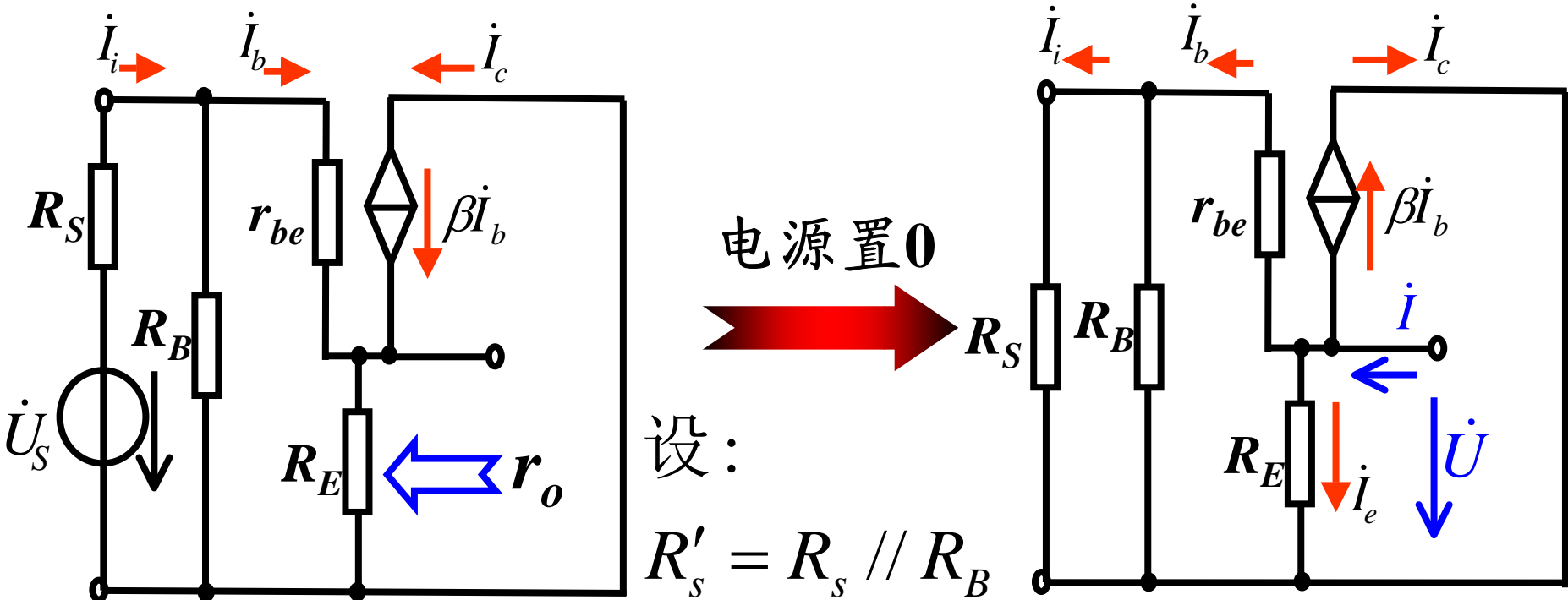
$$r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_B // \{ r_{be} + (1 + \beta)R'_L \}$$



输入电阻较大，作为前一级的负载，对前一级的放大倍数影响较小且取得的信号大。

### 3. 输出电阻

用加压求流法求输出电阻。



$$\dot{I} = \dot{I}_b + \beta \dot{I}_b + \dot{I}_e = \frac{\dot{U}}{r_{be} + R'_s} + \beta \cdot \frac{\dot{U}}{r_{be} + R'_s} + \frac{\dot{U}}{R_E}$$

$$r_o = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = 1 / \left( \frac{1 + \beta}{r_{be} + R'_s} + \frac{1}{R_E} \right) = R_E // \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta}$$

$$r_o = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = 1 / \left( \frac{1 + \beta}{r_{be} + R'_s} + \frac{1}{R_E} \right) = R_E // \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta}$$

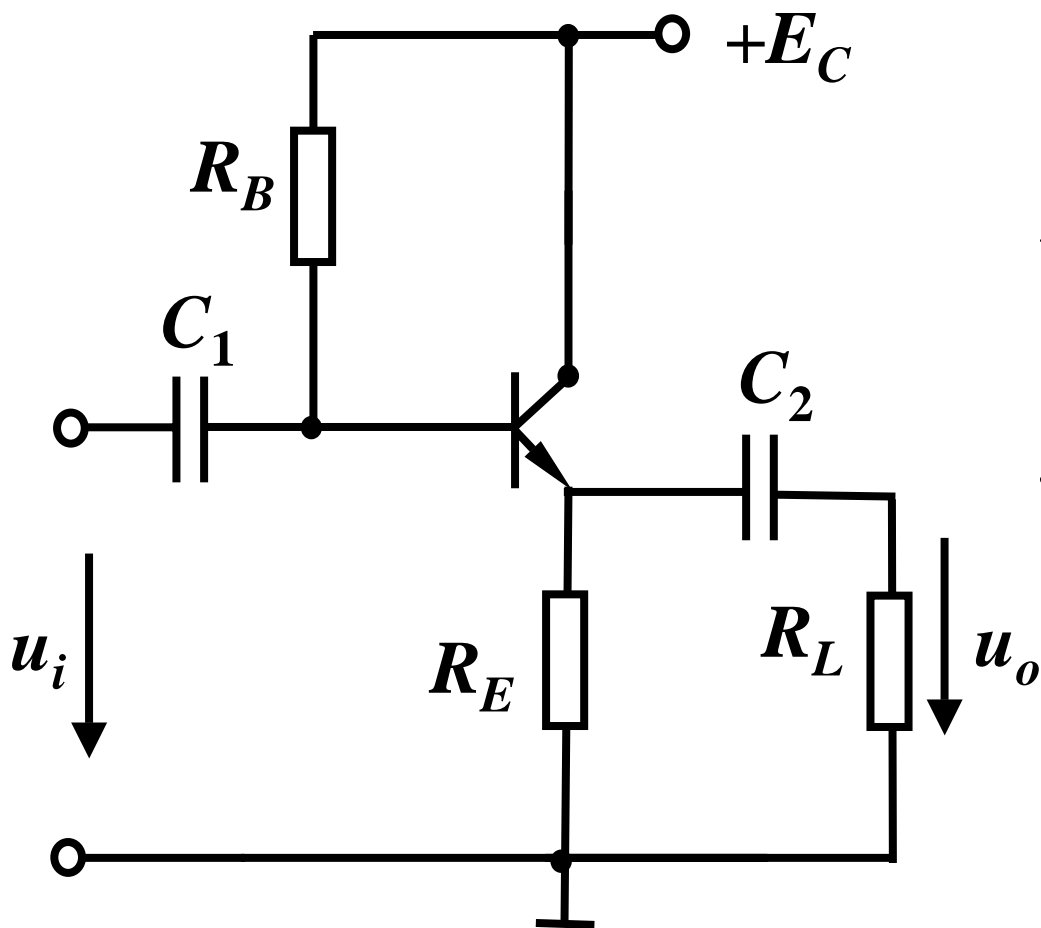
$$\text{一般: } R_E \gg \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta}$$

$$\text{所以: } r_o \approx \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta}$$

射极输出器的输出电阻很小，带负载能力强。

所谓**带负载能力强**，是指当负载变化时，放大倍数基本不变。

**例：**已知射极输出器的参数如下： $R_B=570\text{k}\Omega$ ， $R_E=5.6\text{k}\Omega$ ， $R_L=5.6\text{k}\Omega$ ， $\beta=100$ ， $E_C=12\text{V}$



1. 求  $A_u$ 、 $r_i$  和  $r_o$ 。
2. 设： $R_S=1\text{ k}\Omega$ ，  
求： $A_{us}$ 、 $r_i$  和  $r_o$ 。
3.  $R_L=1\text{ k}\Omega$  时，求  $A_u$ 。

$$R_B=570\text{k}\Omega, R_E=5.6\text{k}\Omega, \\ R_L=5.6\text{k}\Omega, \beta=100, E_C=12\text{V}$$

$$I_B = \frac{E_C - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E}$$

$$I_E = (1 + \beta)I_B \\ = 1.01\text{mA}$$

$$r_{be} = 300(\Omega) + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_E(\text{mA})} \\ = 300 + 101 \times \frac{26}{1.01} = 2.9\text{k}\Omega$$

1. 求  $A_u$ 、 $r_i$  和  $r_o$ 。

$R_B=570\text{k}\Omega$ ,  $R_E=5.6\text{k}\Omega$ ,  
 $R_L=5.6\text{k}\Omega$ ,  $\beta=100$ ,  $E_C=12\text{V}$

$$r_{be}=2.9\text{ k}\Omega, R_S=0$$

$$A_u = \frac{(1 + \beta) R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R'_L}$$

$$= \frac{101 \times 2.8}{2.9 + 101 \times 2.8} = 0.99$$

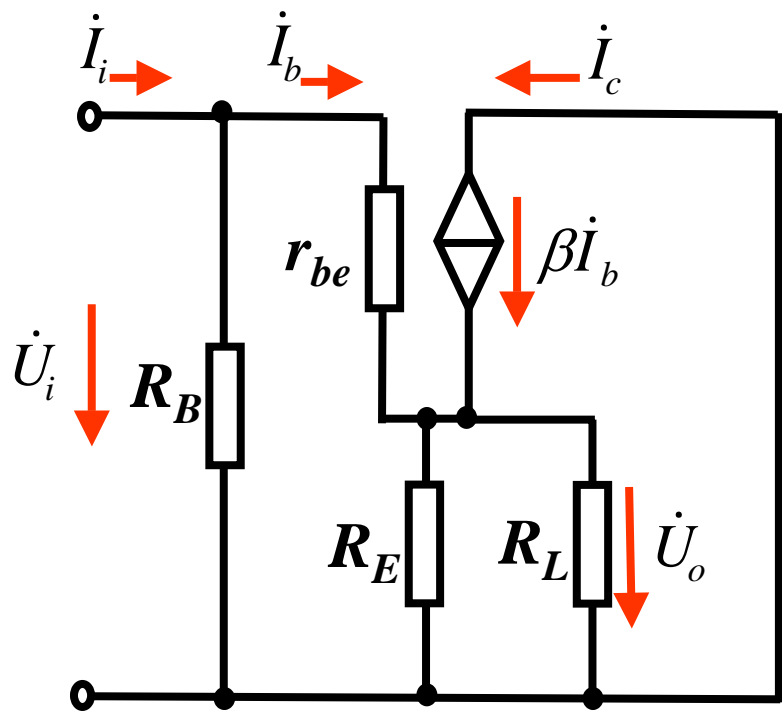
$$r_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta) R'_L]$$

$$= 570 // [2.9 + (1 + 100) \times 2.8]$$

$$= 190\text{k}\Omega$$

$$r_o = R_E // \frac{[r_{be} + R'_S]}{1 + \beta}$$

$$= 5.6 // \frac{[2.9 + 0]}{101} = 28\Omega$$



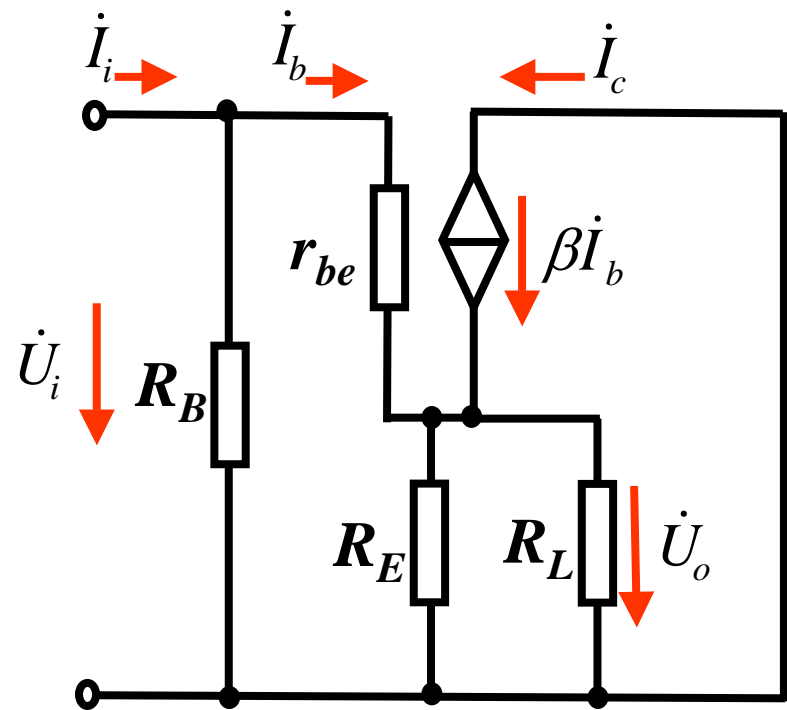
微变等效电路



2. 设:  $R_S=1\text{ k}\Omega$ , 求:  $A_{us}$ 、 $r_i$ 和 $r_o$

$R_B=570\text{ k}\Omega$ ,  $R_E=5.6\text{ k}\Omega$ ,  
 $R_L=5.6\text{ k}\Omega$ ,  $\beta=100$ ,  $E_C=12\text{ V}$

$$r_{be}=2.9\text{ k}\Omega, R_S=0$$



微变等效电路

$$r_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)R'_L]$$

$$= 190\text{ k}\Omega$$

$$A_{us} = \frac{r_i}{r_i + R_S} A_u$$

$$= \frac{190}{190 + 1} \times 0.99 = 0.985$$

$$r_o = R_E // \frac{[r_{be} + R'_S]}{1 + \beta} = 5.6 // \frac{[2.9 + 570 // 1]}{101} = 38\Omega$$

### 3. $R_L=1\text{k}\Omega$ 和 $\infty$ 时, 求 $A_u$ 。

$$A_u = \frac{(1 + \beta) R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R'_L}$$

•  $R_L=1\text{k}\Omega$ 时  $A_u = \frac{101 \times (5.6 // 1)}{2.9 + 101 \times (5.6 // 1)} = 0.967$

•  $R_L=\infty$ 时  $A_u = \frac{101 \times 5.6}{2.9 + 101 \times 5.6} = 0.995$

比较: 空载时,  $A_u=0.995$

$R_L=5.6\text{k}\Omega$ 时,  $A_u=0.990$

$R_L=1\text{k}\Omega$ 时,  $A_u=0.967$

可见: 射极输出器  
带负载能力强。

## 射极输出器的使用

1. 将射极输出器放在电路的首级，可以提高输入电阻。
2. 将射极输出器放在电路的末级，可以降低输出电阻，提高带负载能力。
3. 将射极输出器放在电路的两级之间，可以起到电路的匹配作用。

## § 2.6 场效应管放大电路

### 组成原则:

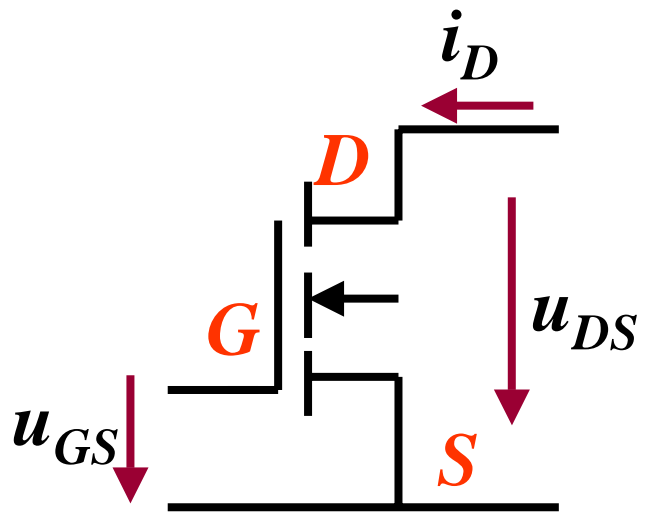
- (1) 静态: 适当的静态工作点, 使场效应管工作在恒流区, 场效应管的偏置电路相对简单。
- (2) 动态: 能为交流信号提供通路。

### 分析方法:

静态分析: 估算法、图解法。

动态分析: 微变等效电路法。

## 2.6.1 场效应管的微变等效电路



$$i_D = f(u_{GS}, u_{DS})$$

$$\Delta i_D = \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \cdot \Delta u_{GS} + \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} \cdot \Delta u_{DS}$$

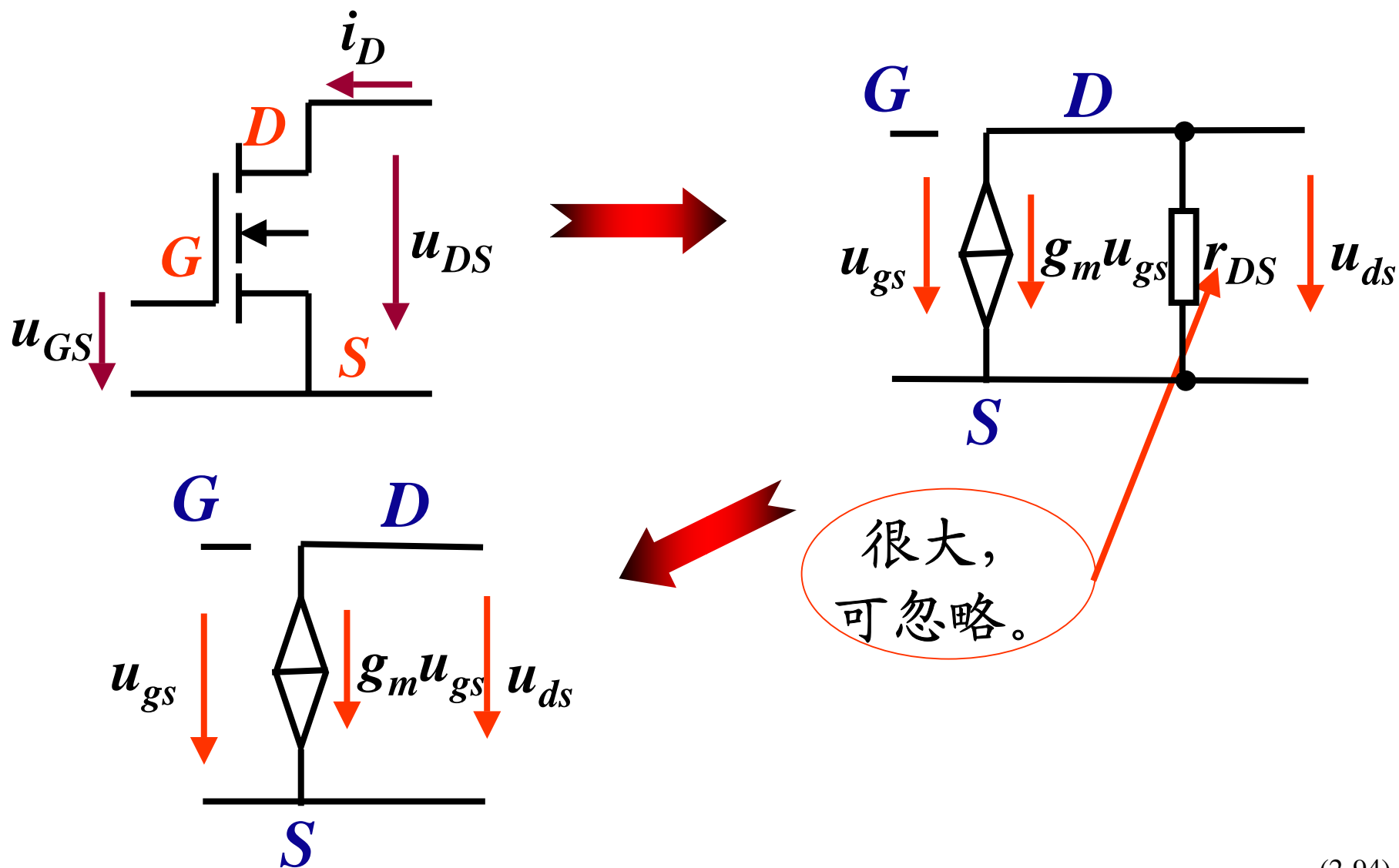
$$= g_m \cdot \Delta u_{GS} + \frac{1}{r_{DS}} \cdot \Delta u_{DS}$$

---

$$g_m = \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \quad \text{—— 跨导}$$

$$r_{DS} = \frac{\partial u_{DS}}{\partial i_D} \quad \text{—— 漏极输出电阻}$$

场效应管的微变等效电路为：



## 2.6.2 场效应管的共源极放大电路

### 一、静态分析

求：  $U_{DS}$  和  $I_D$ 。

设：  $U_G \gg U_{GS}$

则：  $U_G \approx U_S$

而：  $I_G = 0$

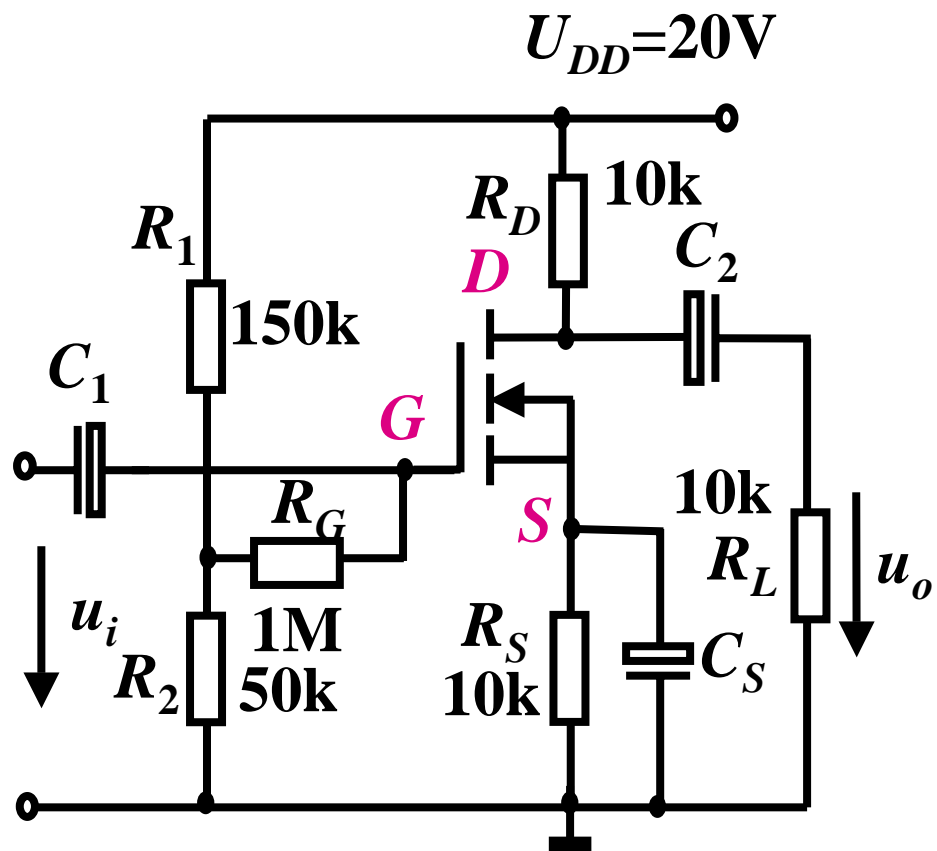
所以：

$$U_G \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{DD} = 5 \text{ V}$$

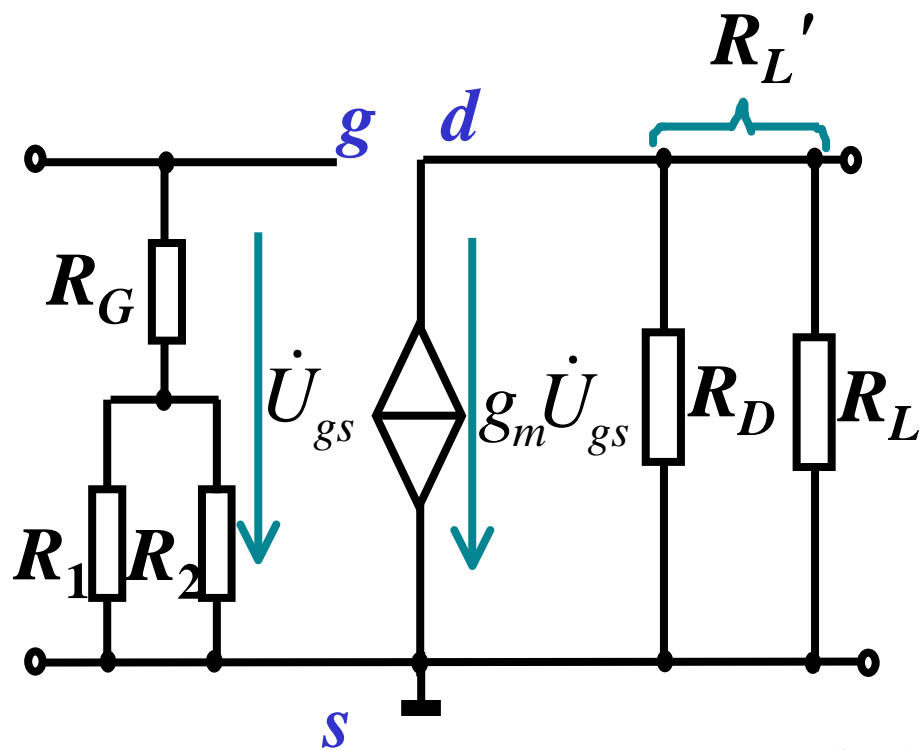
$$I_D = \frac{U_S}{R_S} \approx \frac{U_G}{R_S} = 0.5 \text{ mA}$$

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D \cdot (R_S + R_D) = 10 \text{ V}$$

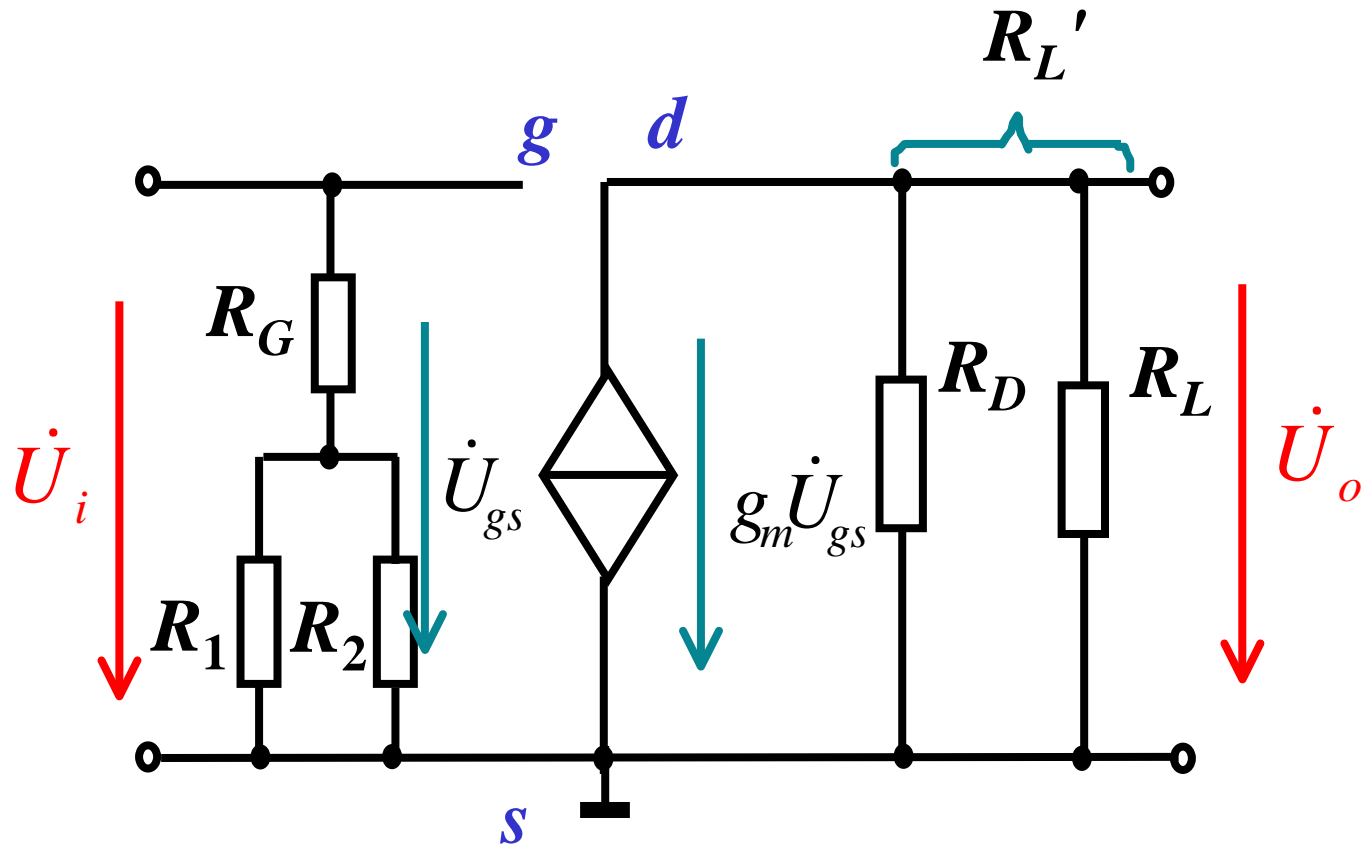
## 二、动态分析



微变等效电路







$$\dot{U}_i = \dot{U}_{gs}$$

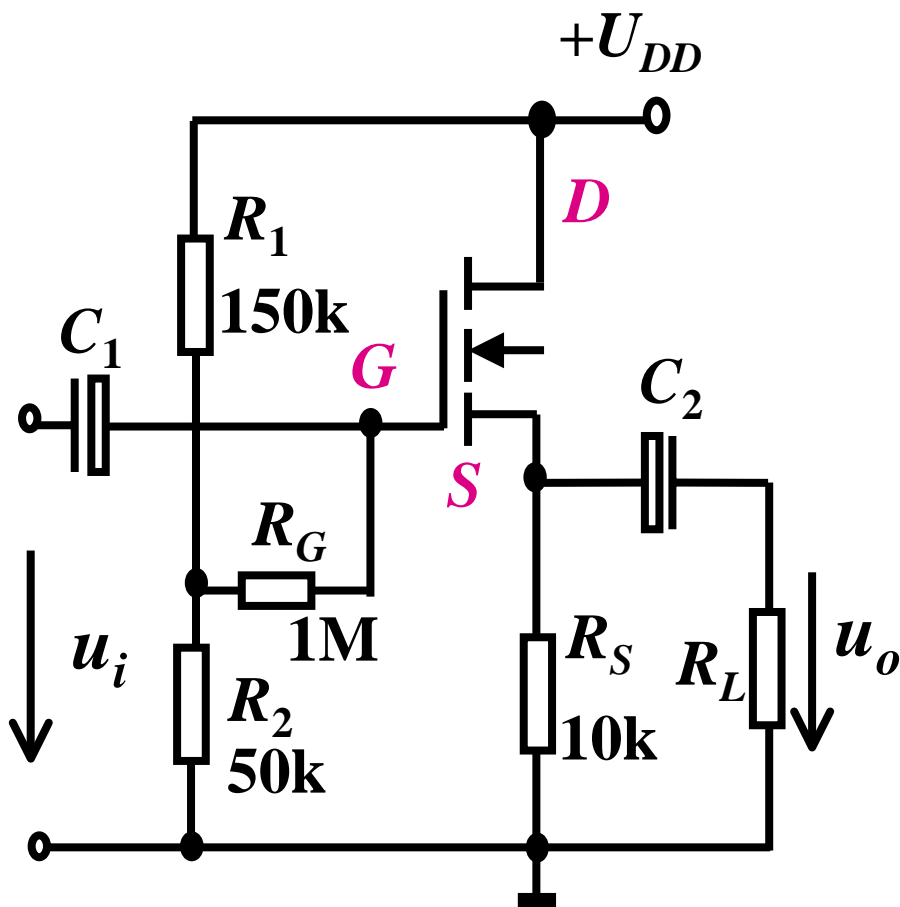
$$r_i = R_G + R_1 // R_2 = 1.0375 \text{ M}\Omega$$

$$\dot{U}_o = -g_m \cdot \dot{U}_{gs} \cdot (R_D // R_L)$$

$$r_o = R_D = 10 \text{ k}\Omega$$

$$\dot{A}_u = -g_m \cdot R'_L$$

## 2.6.3 源极输出器



### 一、静态分析

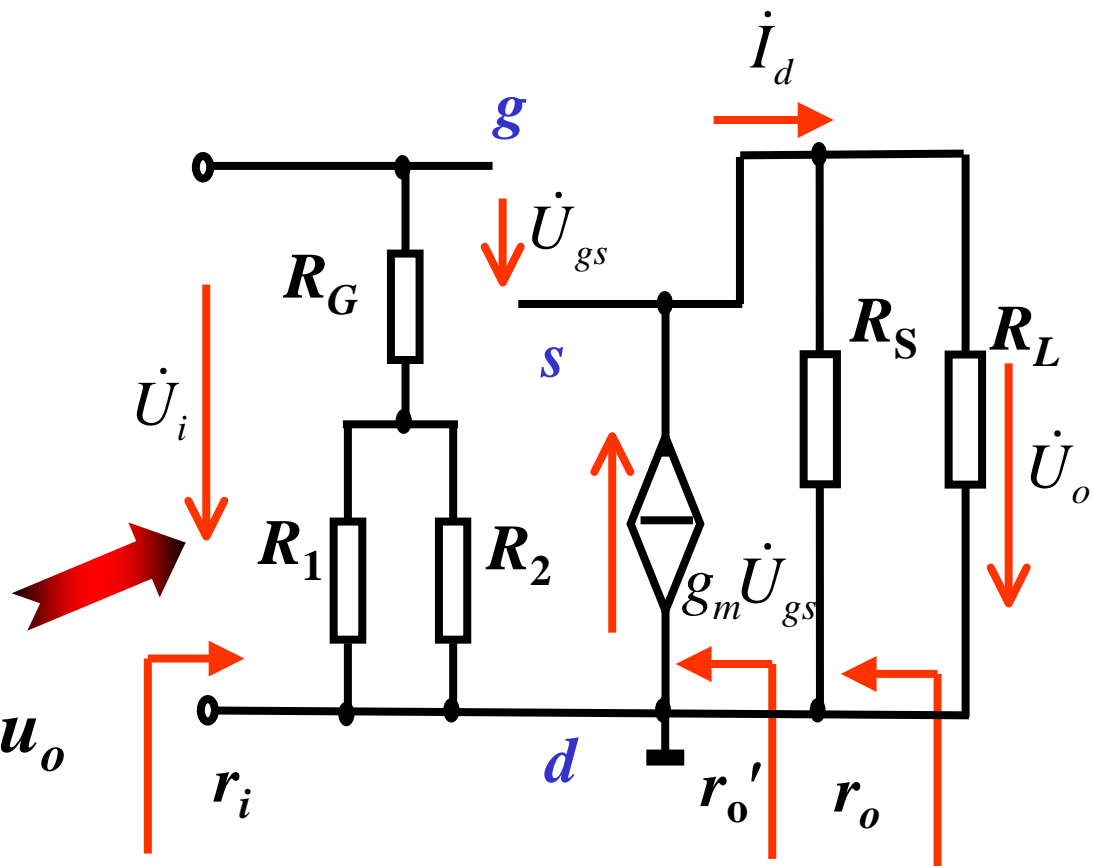
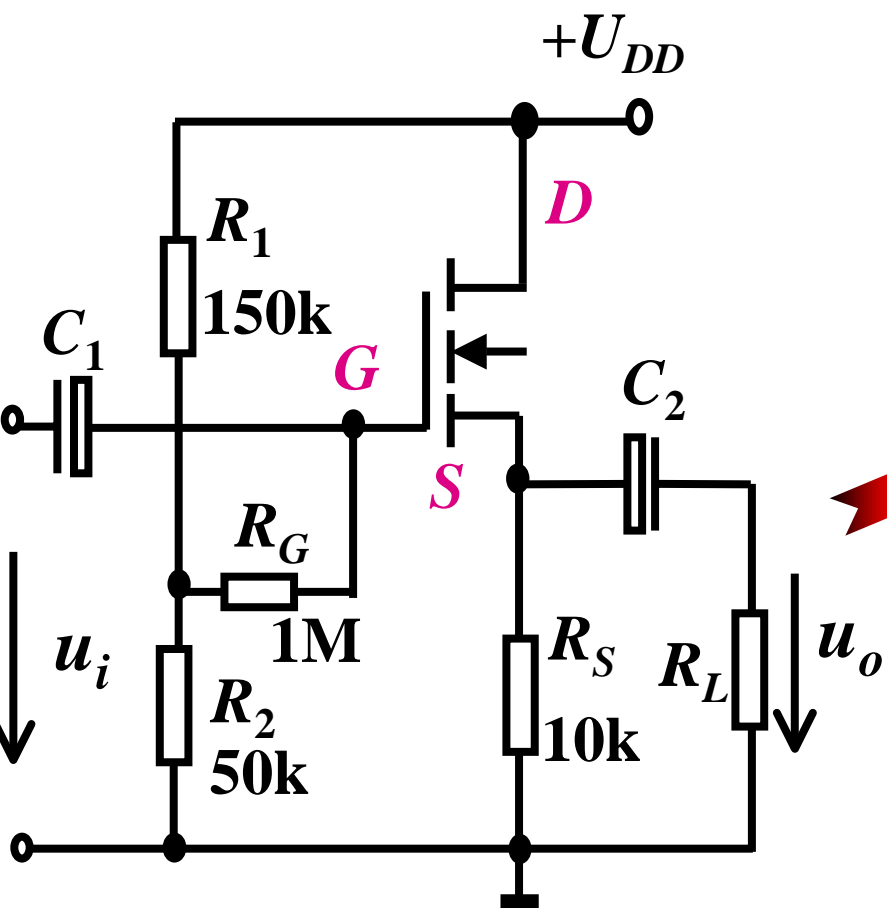
$$U_G = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times U_{DD} = 5\text{V}$$

$$U_S \approx U_G$$

$$I_D = \frac{U_S}{R_S} \approx \frac{U_G}{R_S} = 0.5\text{mA}$$

$$U_{DS} = U_{DD} - U_S = 20 - 5 = 15\text{V}$$

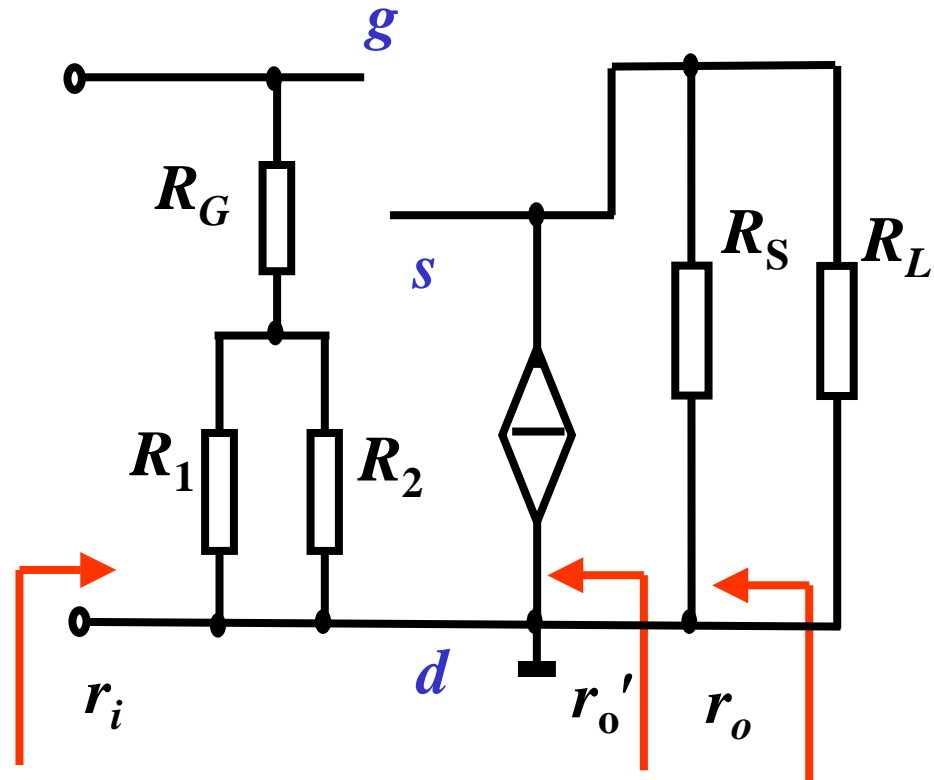
## 二、动态分析



微变等效电路

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{g_m \dot{U}_{gs} \cdot R'_L}{U_{gs} + g_m \dot{U}_{gs} R'_L} = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L} \approx 1$$

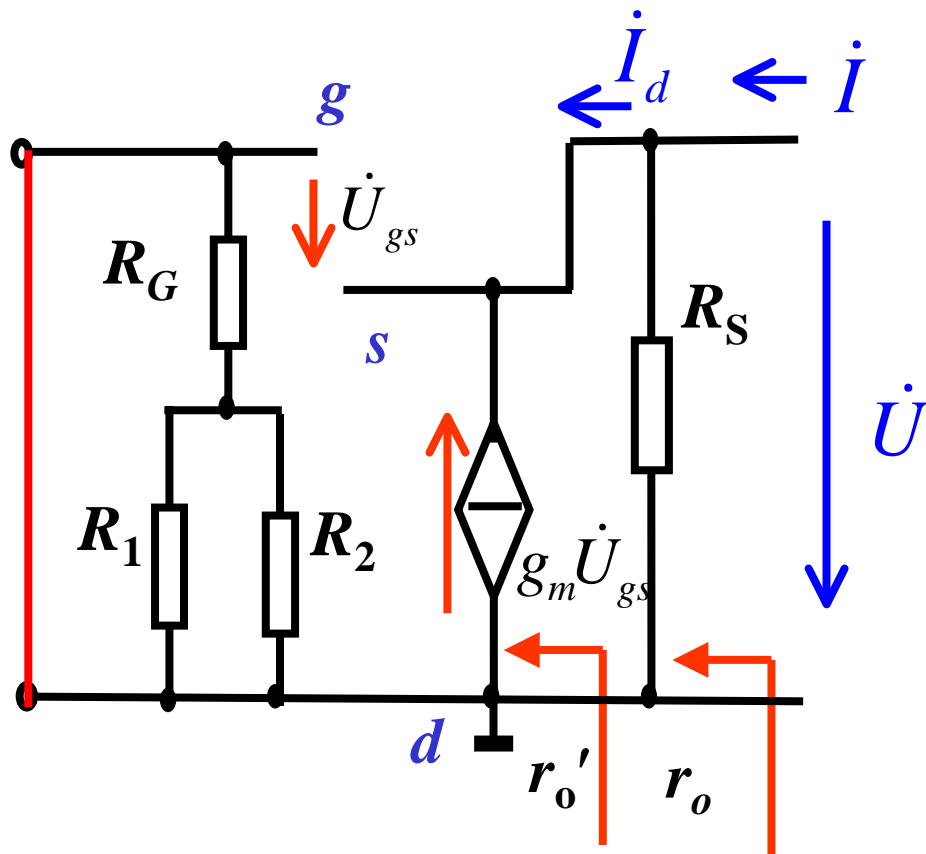
输入电阻  $r_i$



微变等效电路

$$\begin{aligned} r_i &= R_G + R_1 // R_2 \\ &= 1.0375 \text{ M}\Omega \end{aligned}$$

# 输出电阻 $r_o$ 加压求流法



$$r_o' = \frac{\dot{U}}{\dot{I}_d} = \frac{-\dot{U}_{gs}}{-g_m \dot{U}_{gs}} = \frac{1}{g_m}$$

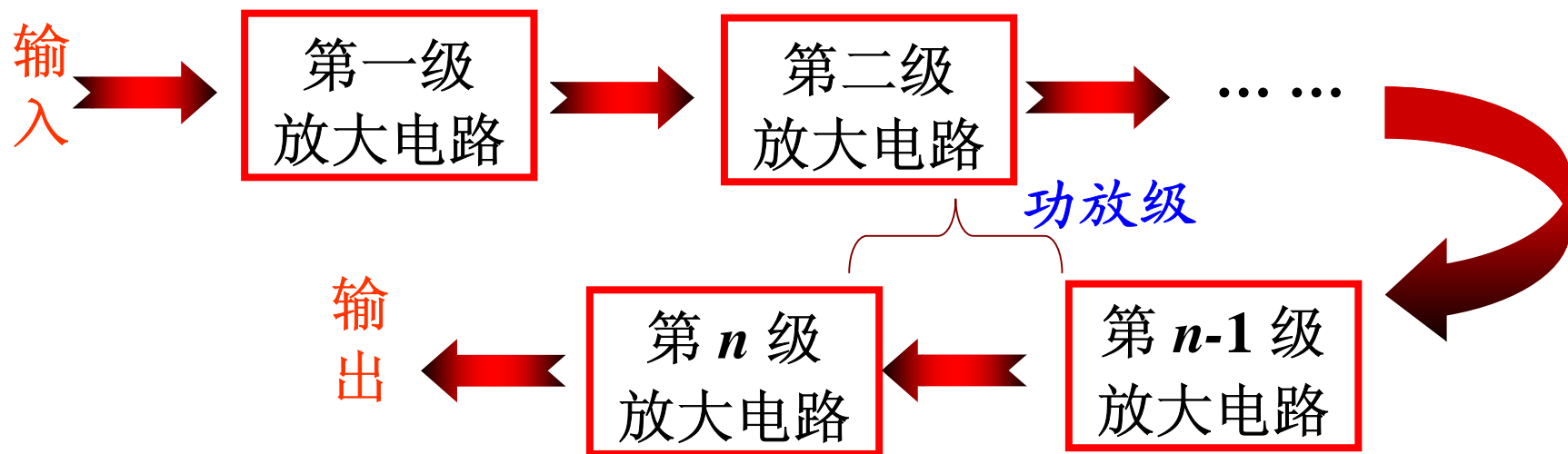
$$r_o = r_o' // R_S$$

微变等效电路

## 场效应管放大电路小结

- (1) 场效应管放大器输入电阻很大。
- (2) 场效应管共源极放大器(漏极输出)输入输出反相，电压放大倍数大于1；输出电阻= $R_D$ 。
- (3) 场效应管源极跟随器输入输出同相，电压放大倍数小于1且约等于1；输出电阻小。

## § 2.7 多级阻容耦合放大电路



**耦合：**即信号的传送。

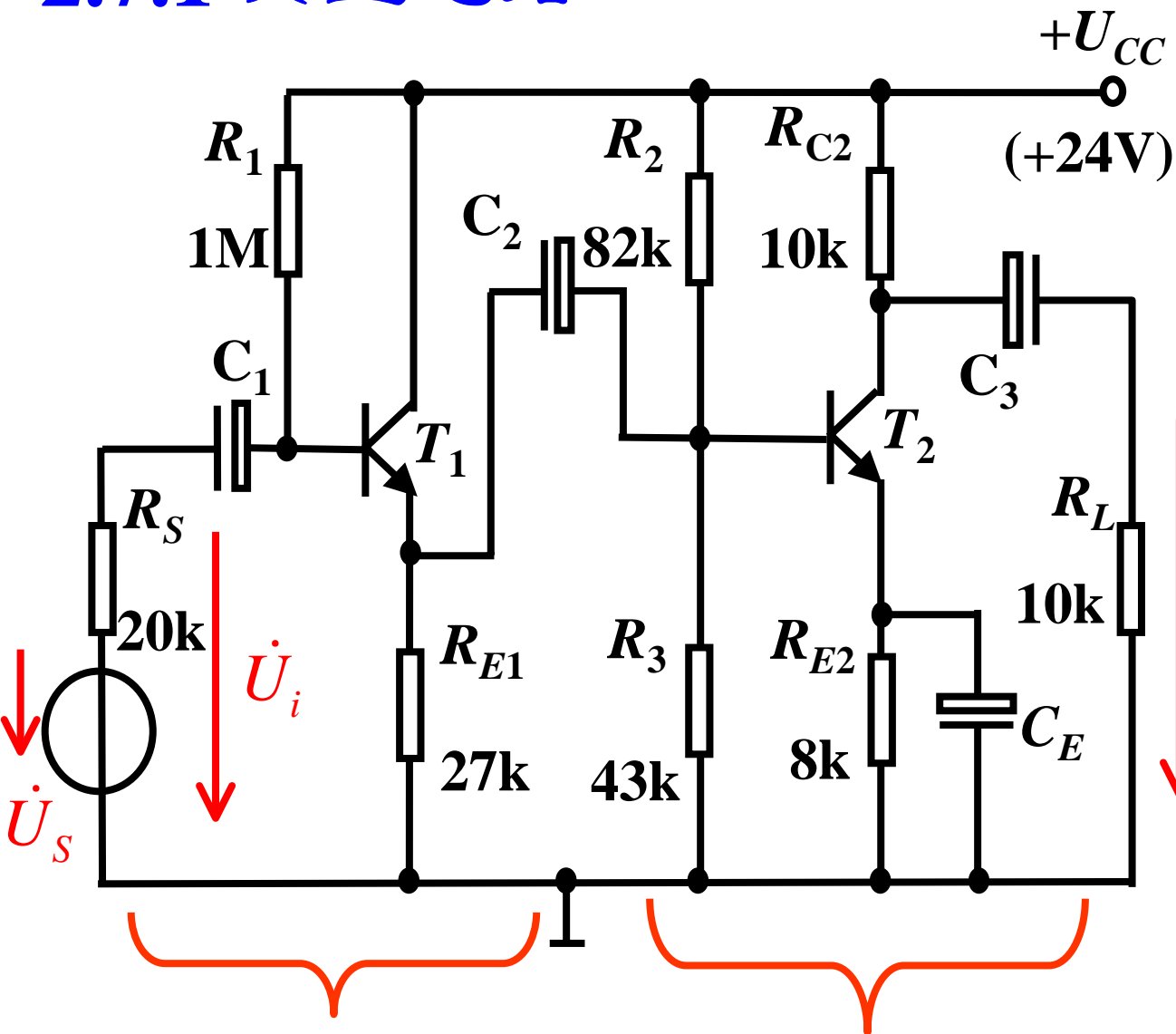
**耦合方式：**直接耦合；阻容耦合；变压器耦合；光电耦合。

### 多级放大电路对耦合电路要求：

1. 静态：保证各级 $Q$ 点设置
2. 动态：传送信号。

**要求：**波形不失真，减少压降损失。

## 2.7.1 典型电路



设:  $\beta_1 = \beta_2 = 50$ ,  
 $r_{be1} = 2.9 \text{ k}\Omega$ ,  
 $r_{be2} = 1.7 \text{ k}\Omega$

求:  $A$ 、 $r_i$ 、 $r_o$

前级

后级



## 2.7.2 性能分析

1. 静态:  $Q$ 点同单级。

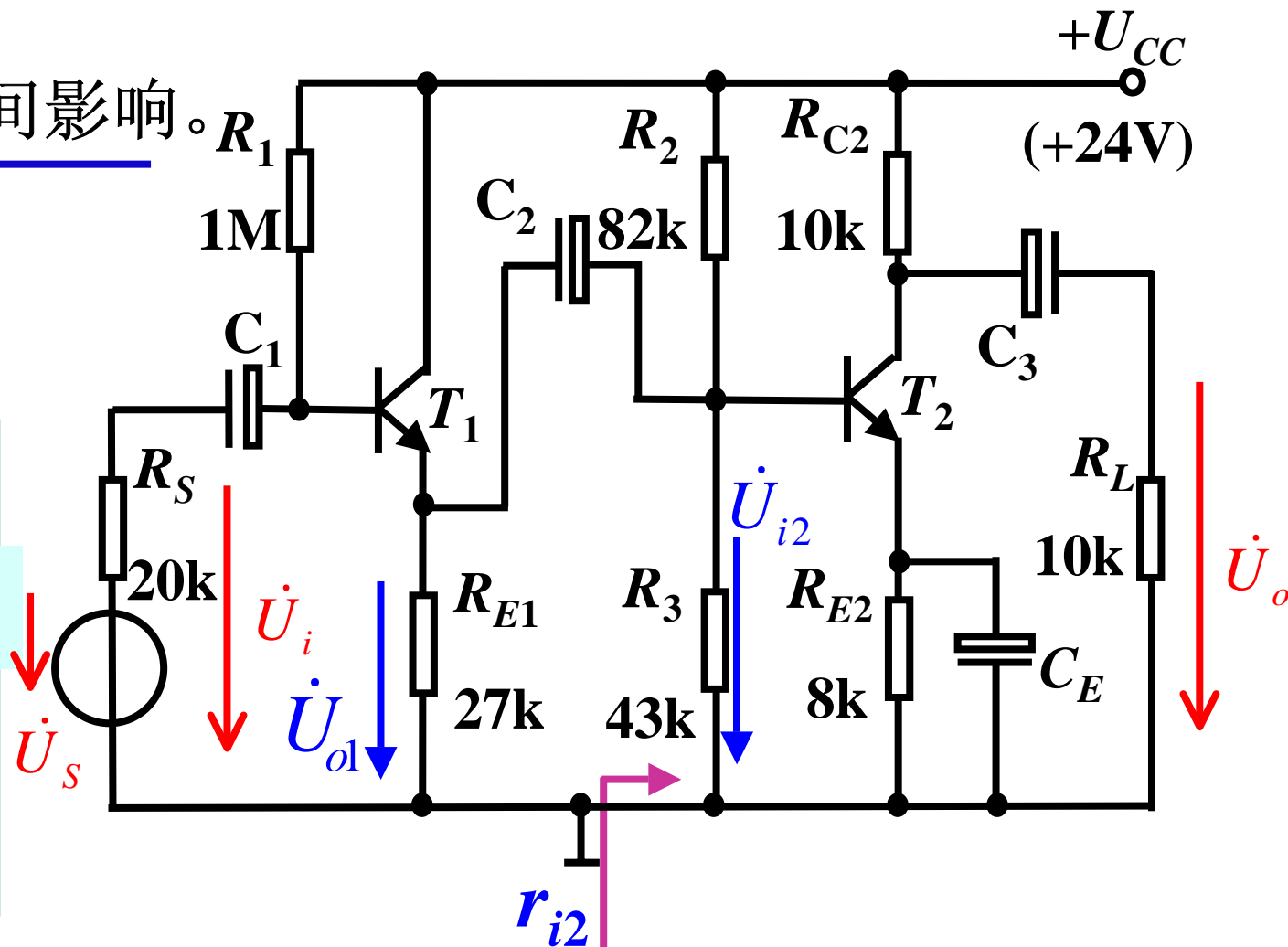
2. 动态性能:

关键: 考虑级间影响。

方法:

$$r_{i2} = R_{L1}$$

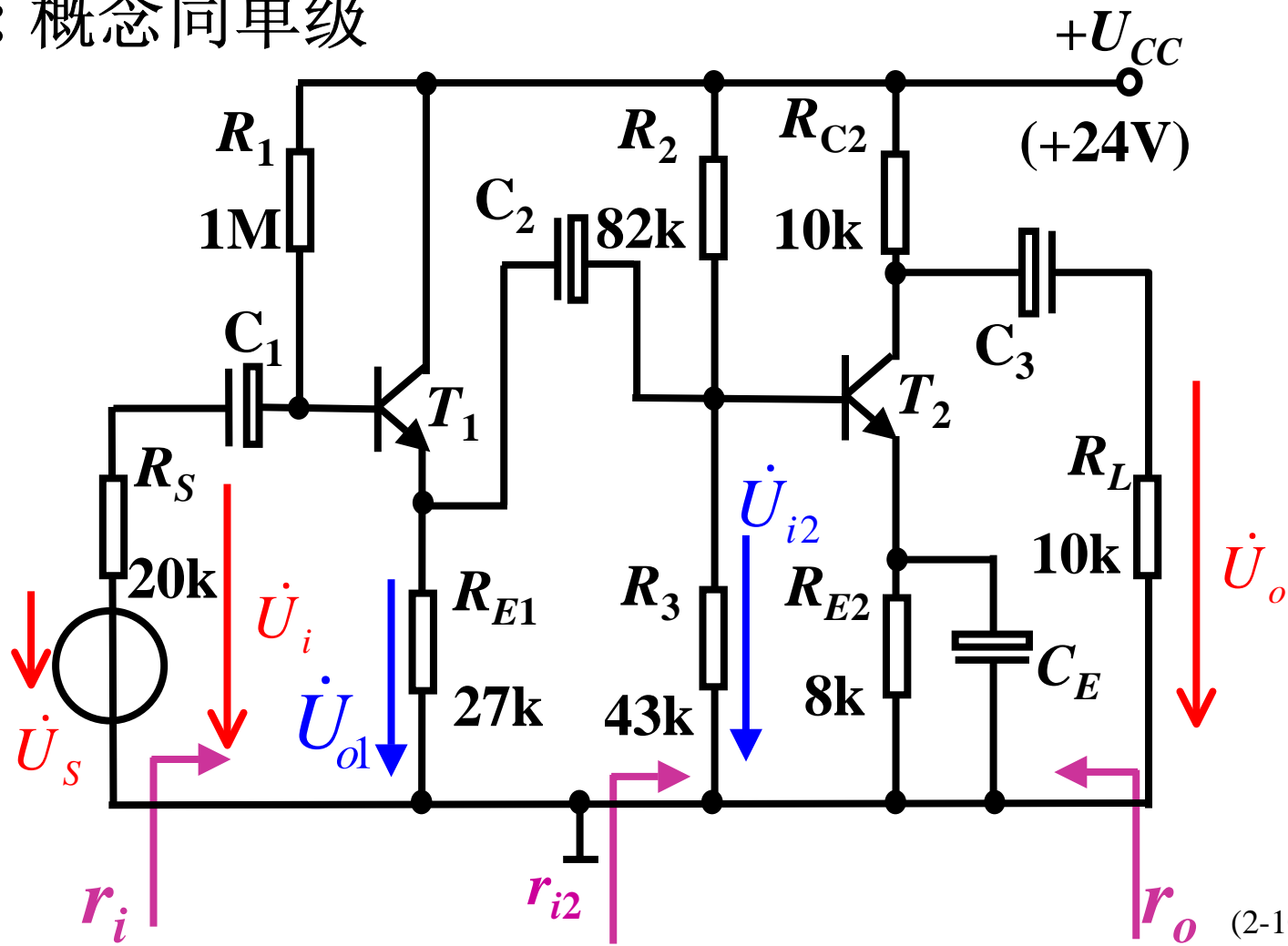
$$\dot{U}_{o1} = \dot{U}_{i2}$$

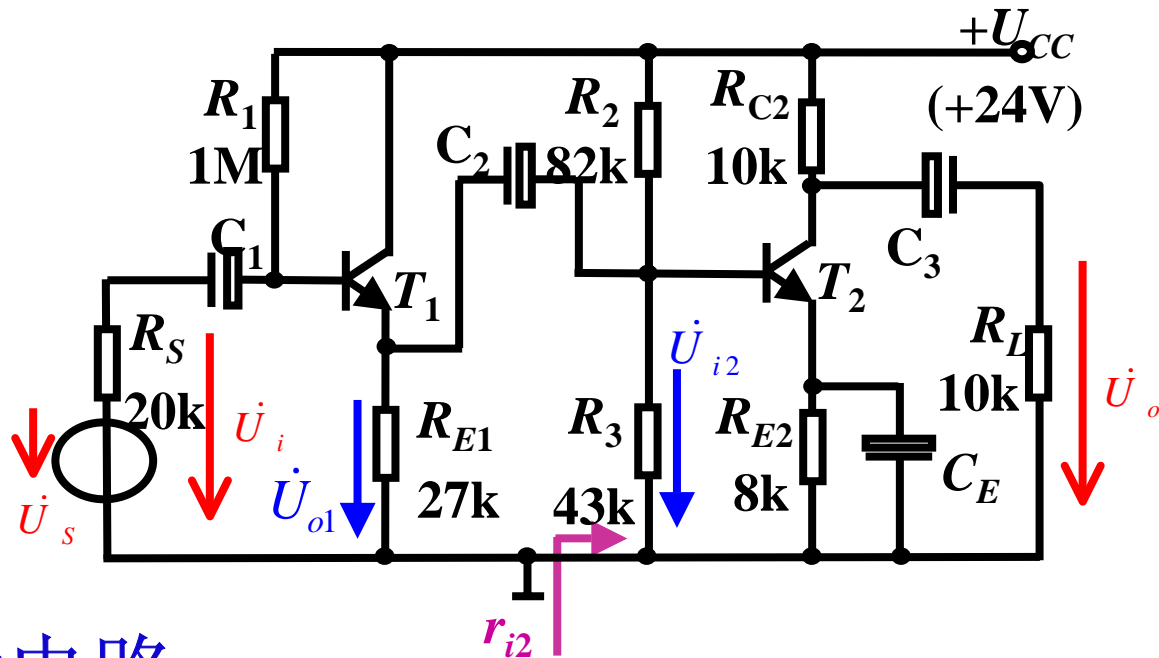


① 
$$A_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{i2}} \times \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_s} = A_{us1} \times A_{u2}$$

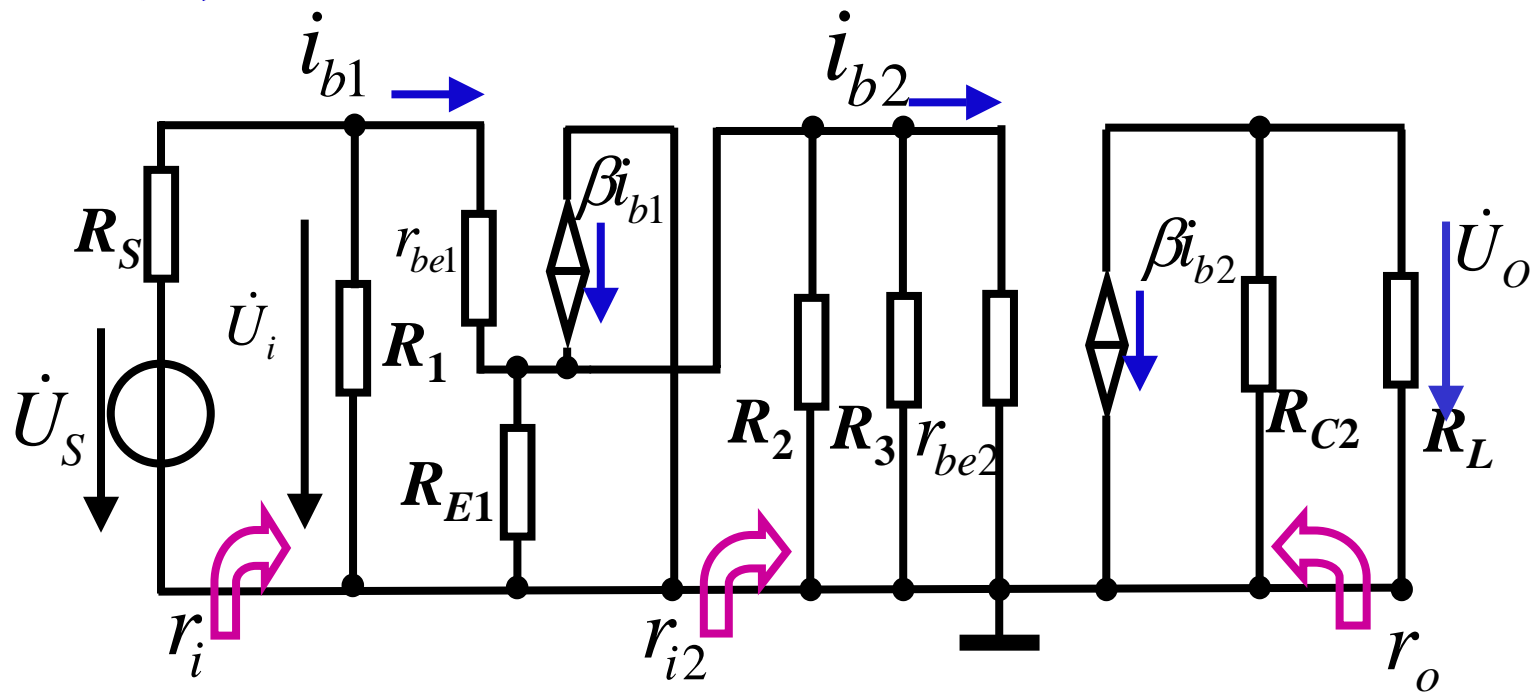
考虑级间影响

②  $r_i$  ,  $r_o$  : 概念同单级





微变等效电路：

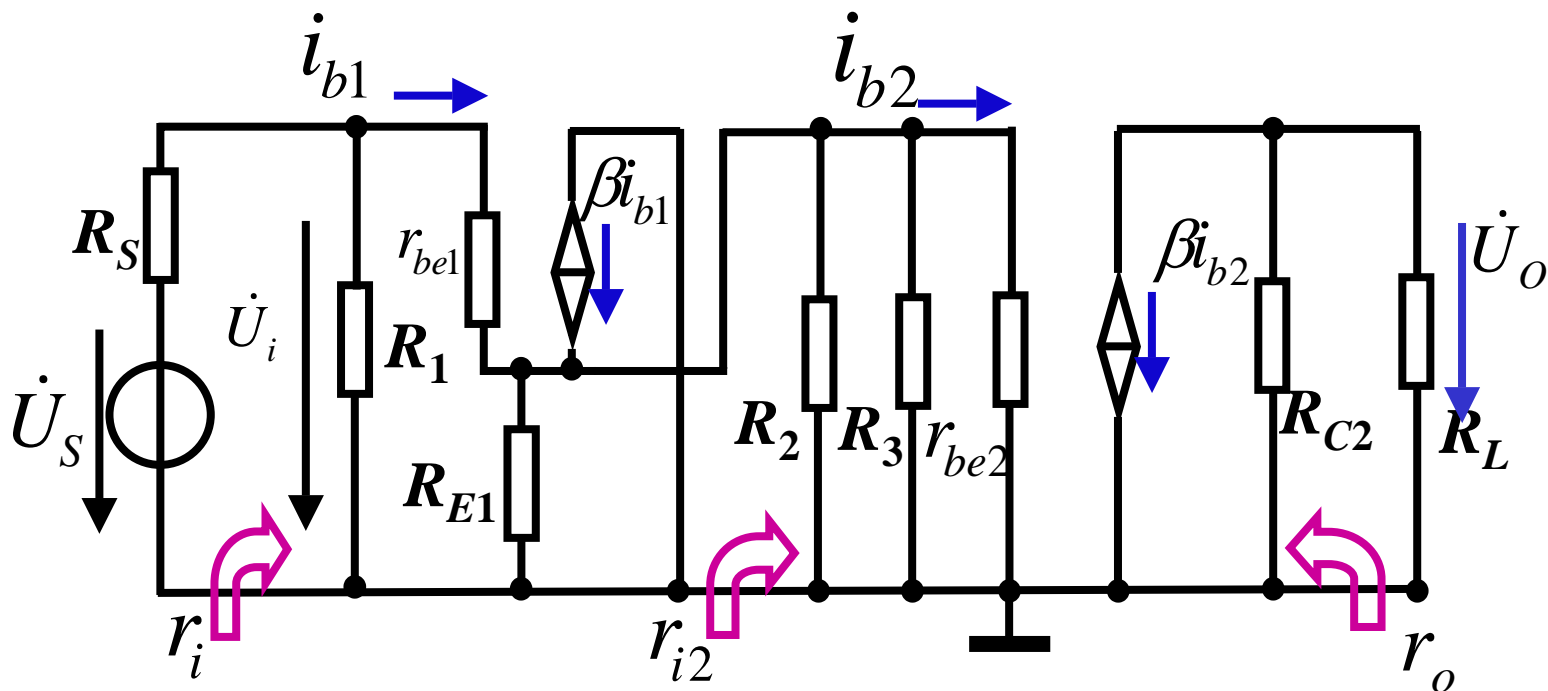


$$1. r_i = R_1 // [r_{be1} + (\beta + 1)R_{L1}']$$

$$\begin{aligned} \text{其中: } R_{L1}' &= R_{E1} // r_{i2} = R_{E1} // R_2 // R_3 // r_{be1} = R_{E1} // R_{L1} \\ &= R_{E1} // r_{i2} = 27 // 1.7 \approx 1.7\text{k}\Omega \end{aligned}$$

$$\therefore r_i = 1000 // (2.9 + 51 \times 1.7) \approx 82\text{k}\Omega$$

$$2. r_o = R_{C2} = 10\text{k}\Omega$$

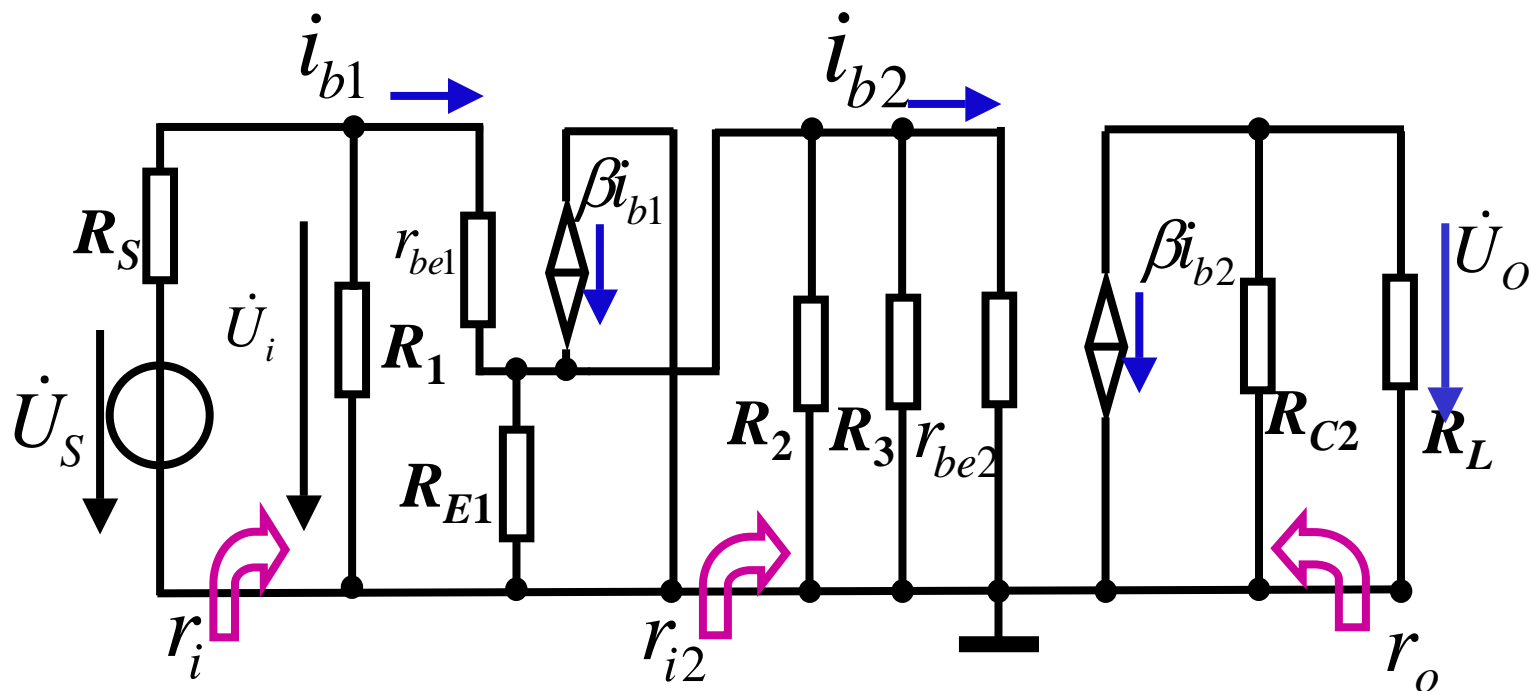


3. 中频电压放大倍数:  $A_{us1} = \frac{r_i}{r_i + R_s} \cdot A_{u1}$

其中:

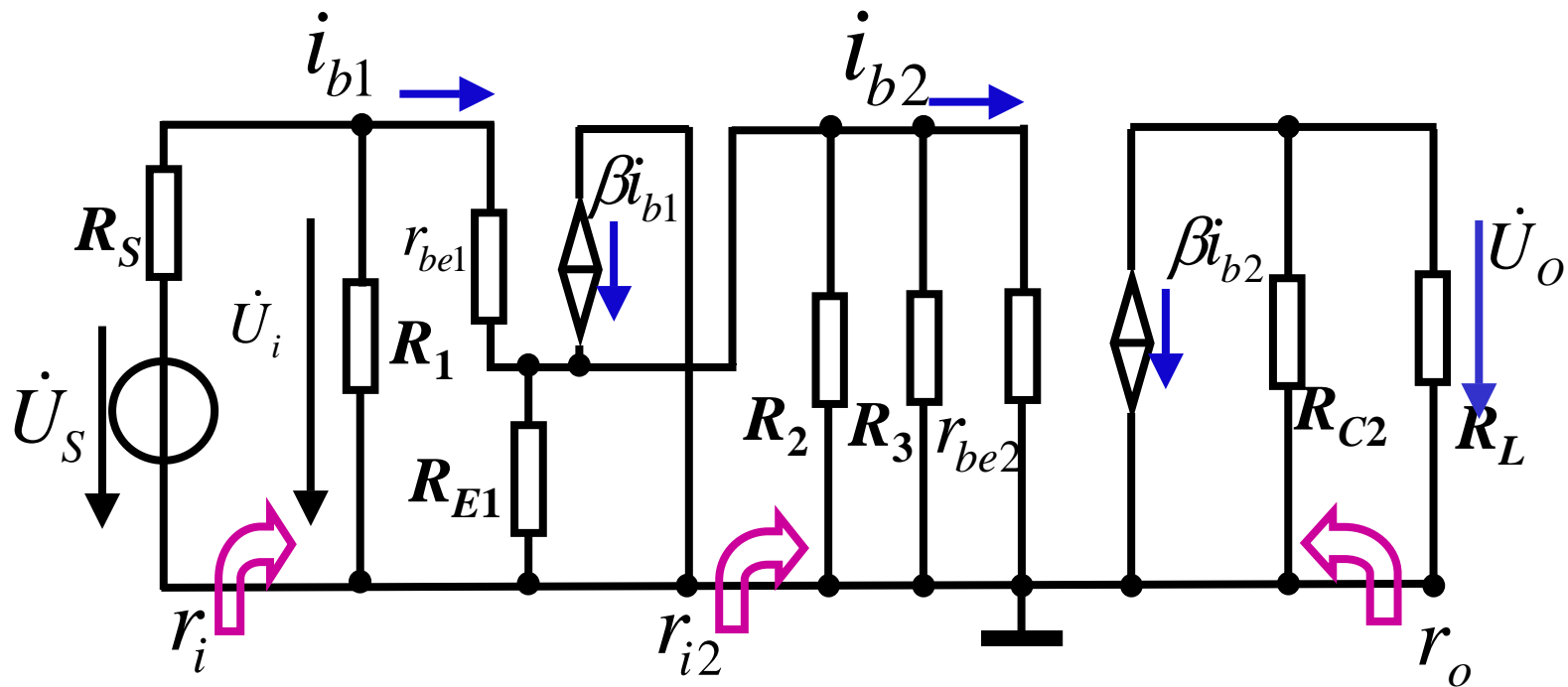
$$A_{u1} = \frac{(\beta_1 + 1)R'_{L1}}{r_{be1} + (\beta_1 + 1)R'_{L1}} = \frac{51 \times 1.7}{2.9 + 51 \times 1.7} \approx 0.968$$

$$A_{us1} = \frac{r_{i1}}{r_{i1} + R_s} A_{u1} = \frac{82}{82 + 20} \times 0.968 = 0.778$$



$$A_{u2} = -\frac{\beta_2 R'_{L2}}{r_{be2}} = -\frac{50 \times (10 // 10)}{1.7} = -147$$

$$A_{us} = A_{us1} \times A_{u2} = -147 \times 0.778 = -114.4$$



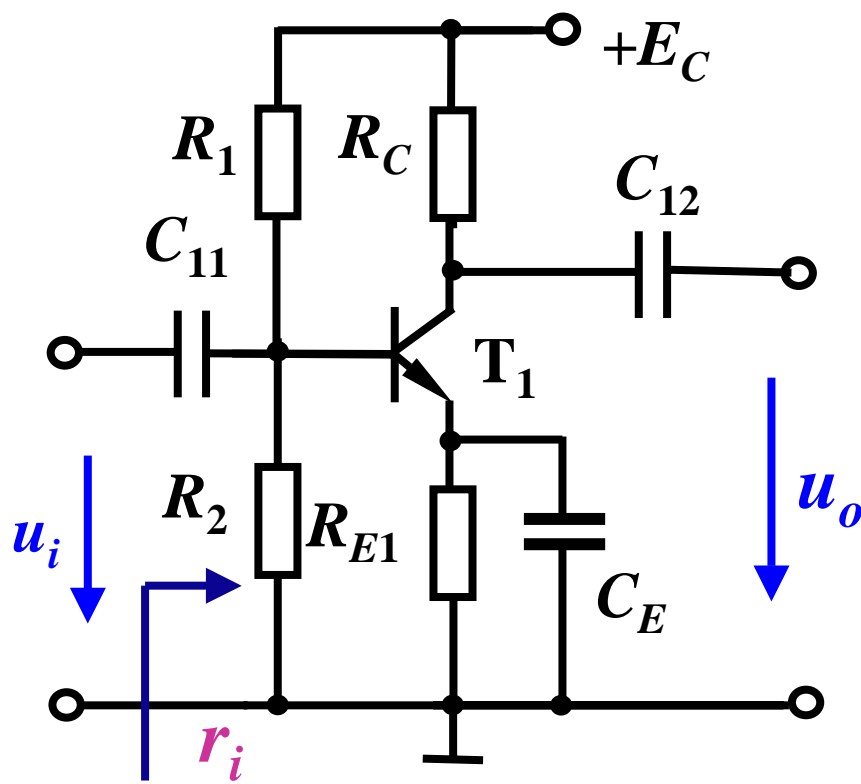
## 多级阻容耦合放大器的特点:

- (1) 由于电容的隔直作用，各级放大器的静态工作点相互独立，分别估算。
- (2) 前一级的输出电压是后一级的输入电压。
- (3) 后一级的输入电阻是前一级的交流负载电阻。
- (4) 总电压放大倍数=各级放大倍数的乘积。
- (5) 总输入电阻  $r_i$  即为第一级的输入电阻  $r_{i1}$ 。
- (6) 总输出电阻即为最后一级的输出电阻。

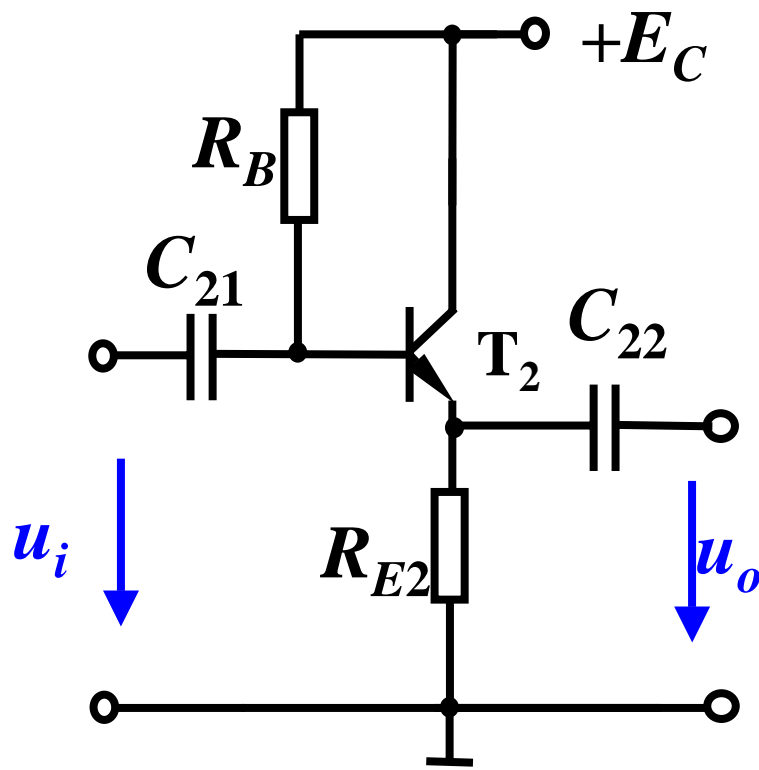
由上述特点可知，射极输出器接在多级放大电路的首级可提高输入电阻；接在末级可减小输出电阻；接在中间级可起匹配作用，从而改善放大电路的性能。

**例1:** 放大电路由下面两个放大电路组成。已知

$E_C=15\text{V}$  ,  $R_1=100\text{k}\Omega$  ,  $R_2=33\text{k}\Omega$  ,  $R_{E1}=2.5\text{k}\Omega$  ,  
 $R_C=5\text{k}\Omega$  ,  $\beta_1=60$  , ;  $R_B=570\text{k}\Omega$  ,  $R_{E2}=5.6\text{k}\Omega$  ,  
 $\beta_2=100$  ,  $R_S=20\text{k}\Omega$  ,  $R_L=5\text{k}\Omega$

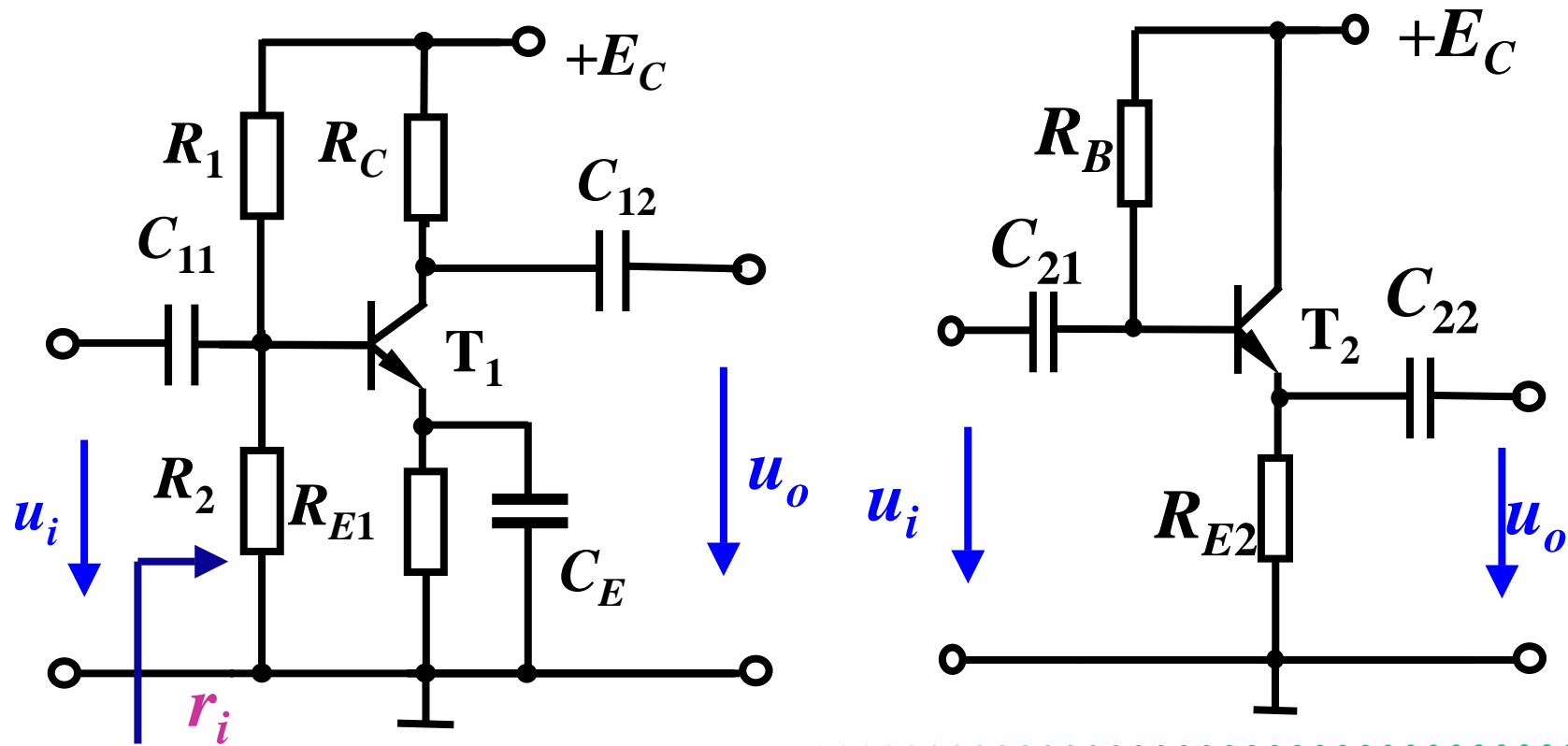


放大电路一



放大电路二

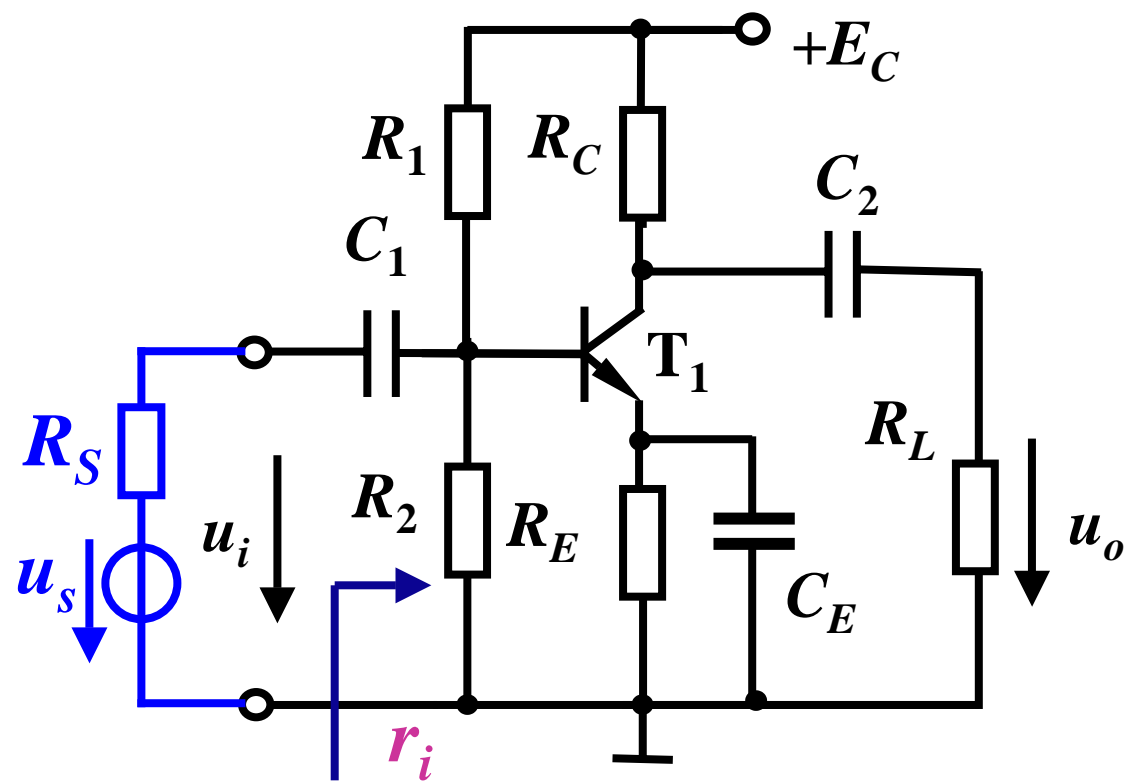




1. 求直接采用放大电路一的放大倍数 $A_u$ 和 $A_{us}$ 。
2. 若信号经放大电路一放大后，再经射极输出器输出，求放大倍数 $A_u$ 、 $r_i$ 和 $r_o$ 。
3. 若信号经射极输出器后，再经放大后放大电路一输出，求放大倍数 $A_{us}$ 。

$$r_{be1}=1.62 \text{ k}\Omega, \quad r_{be2}=2.36 \text{ k}\Omega$$

1. 求直接采用放大电路一的放大倍数 $A_u$ 和 $A_{us}$ 。



$$A_u = -\beta_1 \frac{R'_L}{r_{be1}} = -93$$

$$r_i = R_1 // R_2 // r_{be} = 1.52 \text{ k}\Omega$$

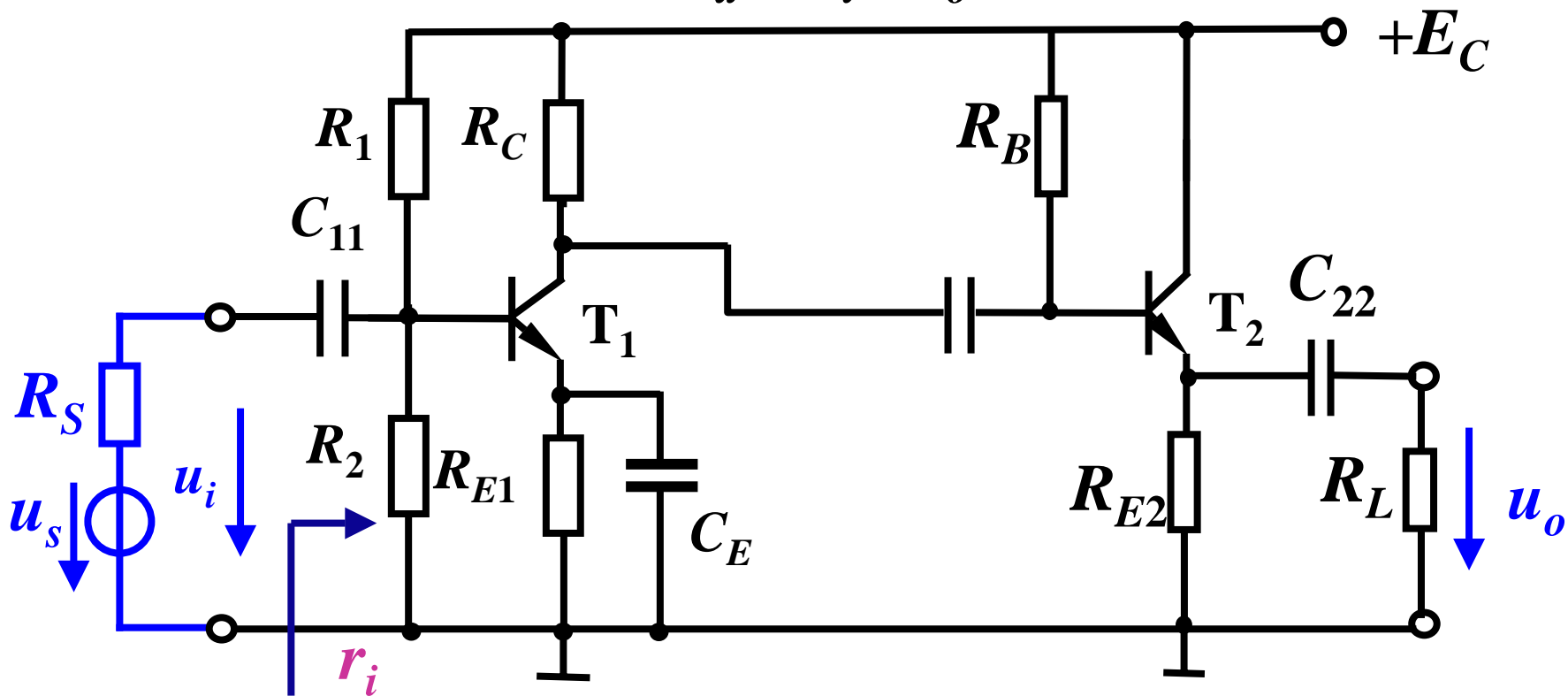
$$A_{us} = A_u \frac{r_i}{r_i + R_s} = -93 \times \frac{1.52}{1.52 + 20} = -6.6$$

(1) 由于 $R_s$ 大，而 $r_i$ 小，致使放大倍数降低；

(2) 放大倍数与负载的大小有关。例：

$$R_L=5\text{k}\Omega \text{ 时, } A_u = -93; \quad R_L=1\text{k}\Omega \text{ 时, } A_u = -31。$$

2. 若信号经放大电路一放大后，再经射极输出器输出，求放大倍数 $A_u$ 、 $r_i$ 和 $r_o$ 。



$$r_{be1} = 1.62 \text{ k}\Omega \quad r_{o1} = R_C = 5 \text{ k}\Omega \quad r_{be2} = 2.36 \text{ k}\Omega$$

$$R_{L1} = r_{i2} = R_B // [r_{be2} + (1 + \beta_2) R'_{E2}] = 173 \text{ k}\Omega$$

$$A_{u1} = -\beta_1 \frac{R'_{L1}}{r_{be1}} = -60 \times \frac{5 // 173}{1.62} = -185$$

$$A_{u2} = \frac{(1 + \beta_2) R'_L}{r_{be2} + (1 + \beta_2) R'_L} = 0.99$$

$$A_u = A_{u1} \times A_{u2} = -185 \times 0.99 = -183$$

$$\begin{aligned} r_o &= R_E // \frac{r_{be} + R_B // R_S}{1 + \beta} = R_E // \frac{r_{be} + R_B // r_{o1}}{1 + \beta} \\ &= 5.6 // \frac{2.36 + 570 // 5}{1 + 100} = 73 \Omega \end{aligned}$$

$$r_i = r_{i1} = R_1 // R_2 // r_{be1} = 1.52 \text{k}\Omega$$

讨论：带负载能力。

### 1. 输出接射极输出器时的带负载能力：

$$R_L=5 \text{ k}\Omega \text{ 时： } A_{u1}=-185, A_{u2}=0.99, r_{i2}=173 \text{ k}\Omega$$

$$\rightarrow A_u = A_{u1} A_{u2} = -183$$

$$R_L=1 \text{ k}\Omega \text{ 时： } A_{u1}=-174, A_{u2}=0.97, r_{i2}=76 \text{ k}\Omega$$

$$\rightarrow A_u = A_{u1} A_{u2} = -169$$

即：当 $R_L$ 由 $5\text{k}\Omega$ 变为 $1\text{k}\Omega$ 时，放大倍数降低到原来的92.3%。

### 2. 输出不接射极输出器时的带负载能力：

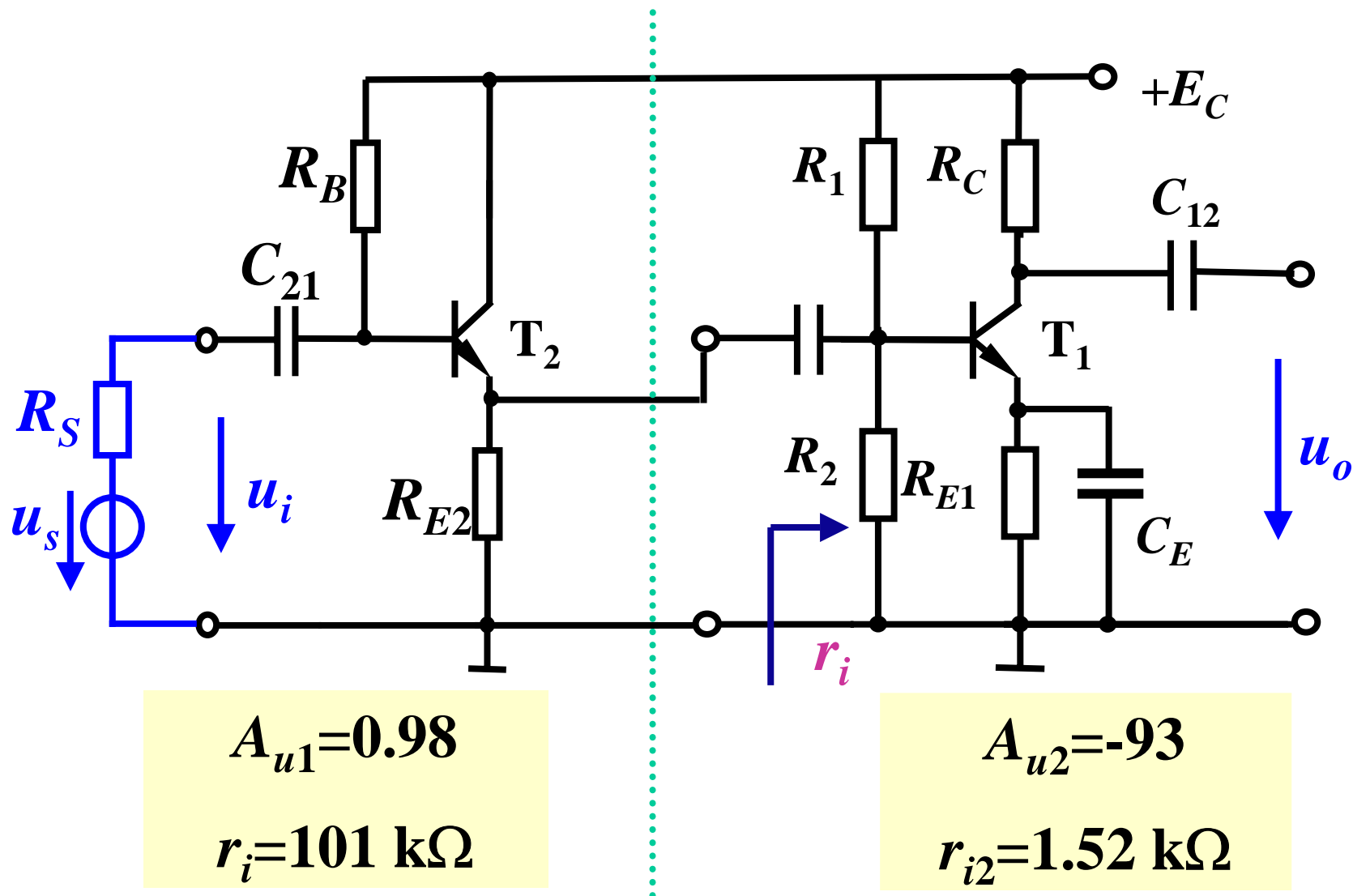
$$R_L=5\text{k} \Omega \text{ 时： } A_u=-93$$

$$R_L=1\text{k} \Omega \text{ 时： } A_u=-31$$

放大倍数降低到原来的30%

可见输出级接射极输出器后，可稳定放大倍数 $A_u$ 。

3. 若信号经射极输出器后，再经放大电路一输出，求放大倍数 $A_{us}$ 。



$$A_{us} = A_{u1} \times A_{u2} \times \frac{r_i}{r_i + R_S} = -93 \times 0.98 \times \frac{101}{101 + 20} = -76$$

---

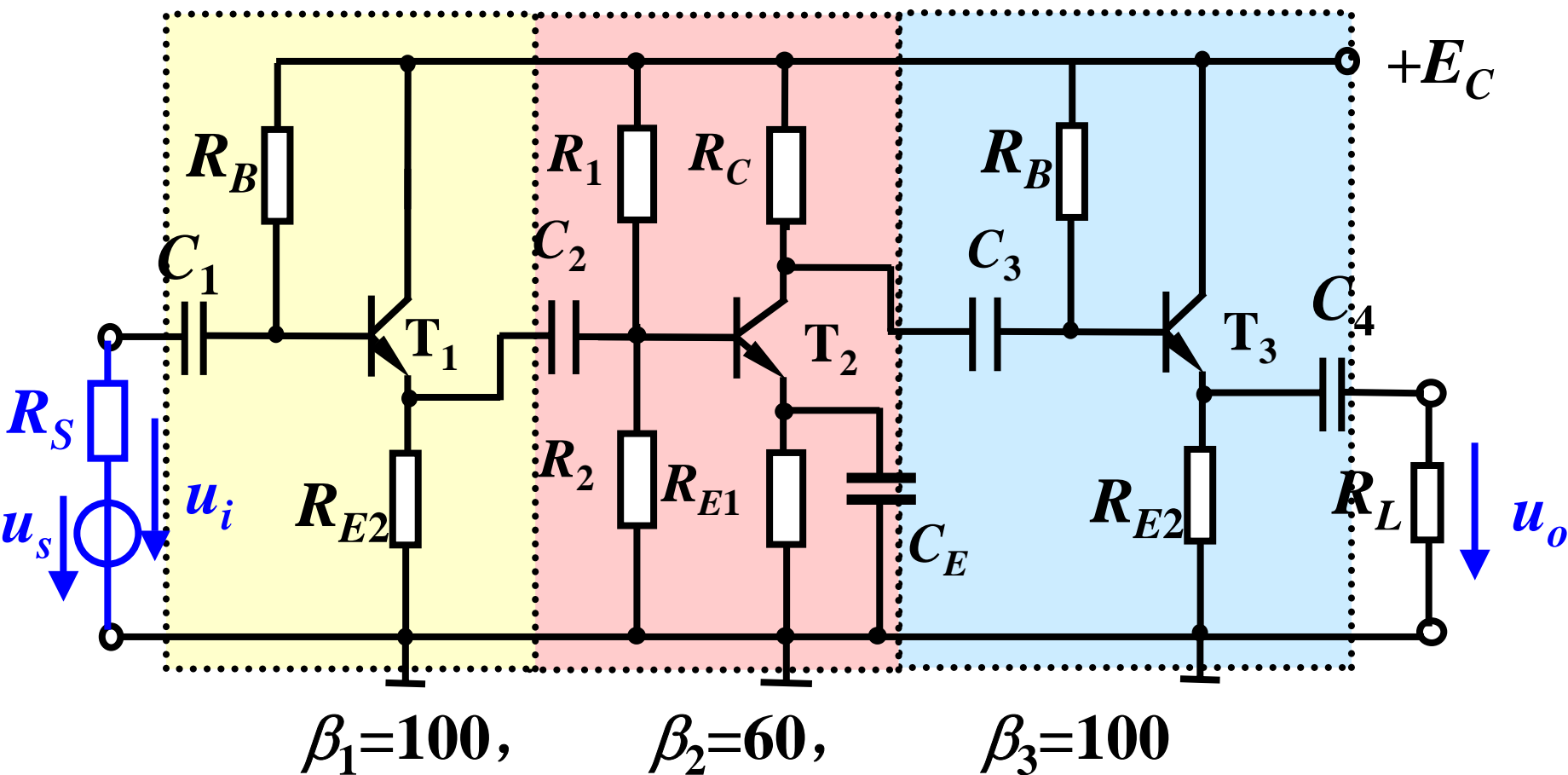
输入不接射极输出器时：

$$A_{us} = A_u \frac{r_i}{r_i + R_S} = -93 \times \frac{1.52}{1.52 + 20} = -6.6$$

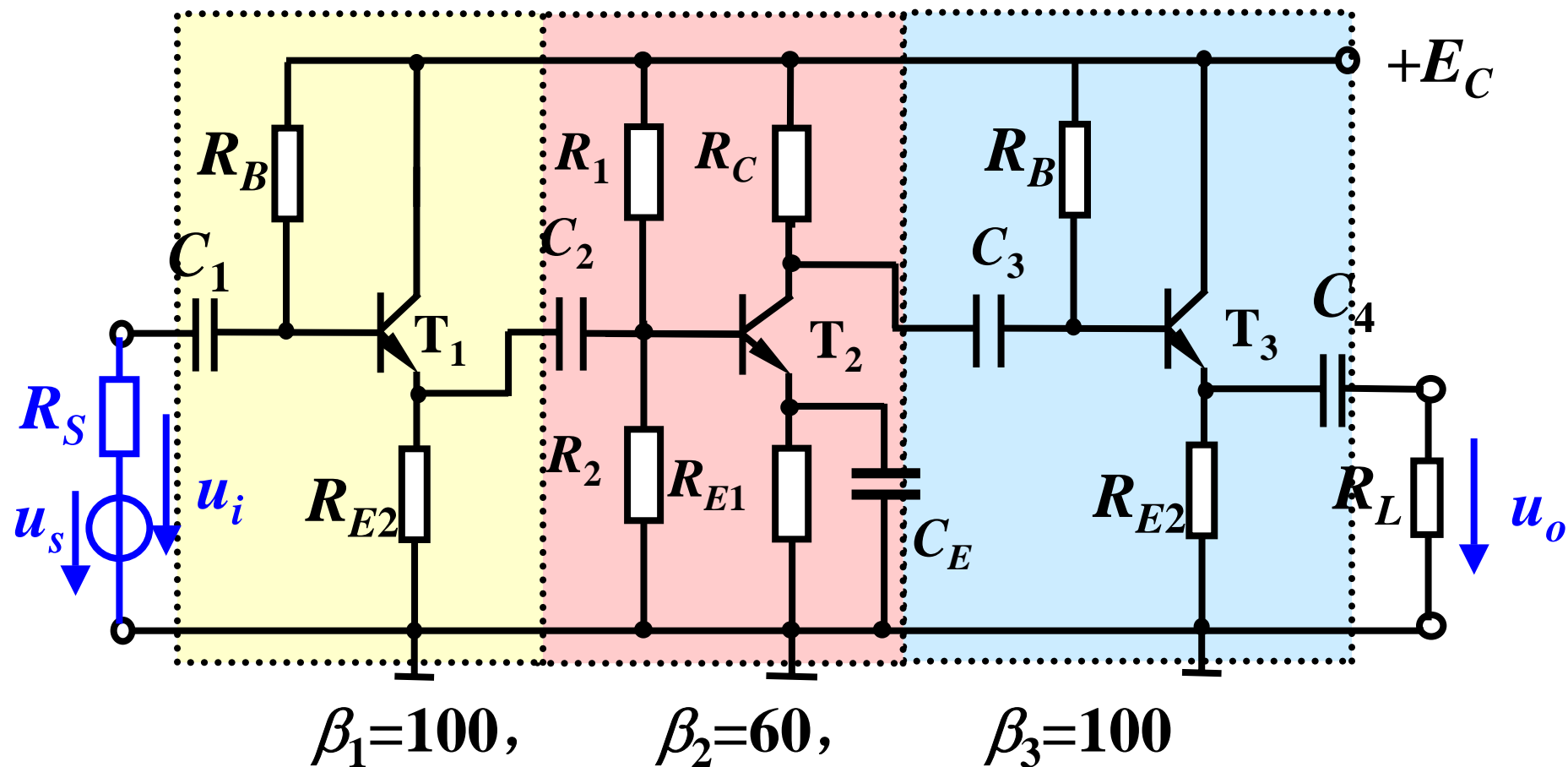
---

可见输入级接射极输出器后，由于从信号源取的信号增加，从而可提高整个放大电路的放大倍数 $A_{us}$ 。

**思考题：**若首级接射极输出器、中间级接共射放大电路、末级接射极输出器，射极输出器和共射放大电路的参数同前。求该三级放大电路的放大倍数 $A_u$ 、 $A_{us}$ 、 $r_i$ 和 $r_o$ 。





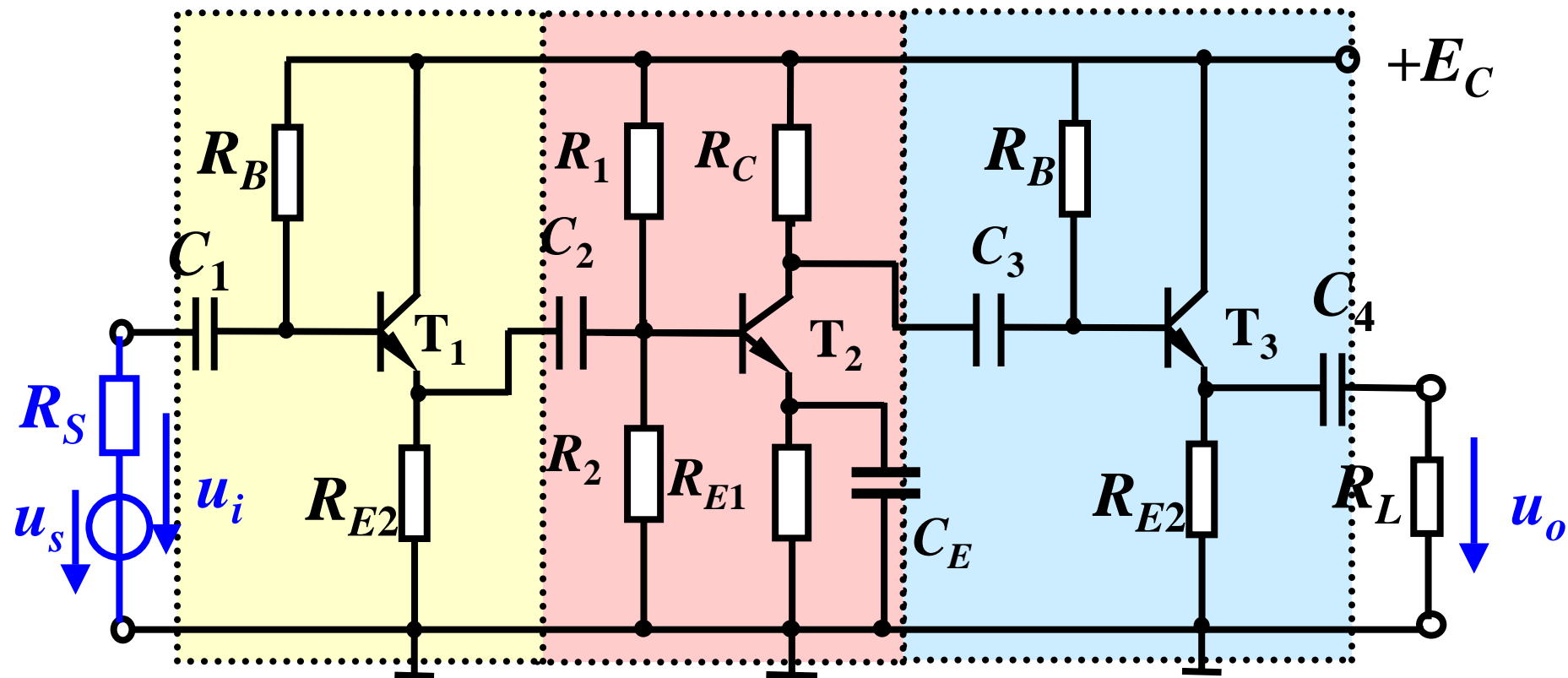


$$r_{be1}=2.36 \text{ k}\Omega, \quad r_{be2}=1.62 \text{ k}\Omega, \quad r_{be3}=2.36 \text{ k}\Omega$$

$$R_{L1} = r_{i2} = R_1 // R_2 // r_{be2} = 1.52 \text{ k}\Omega$$

$$R_{S3} = r_{o2} = R_C = 5 \text{ k}\Omega \qquad R'_{L3} = R_{E2} // R_L$$

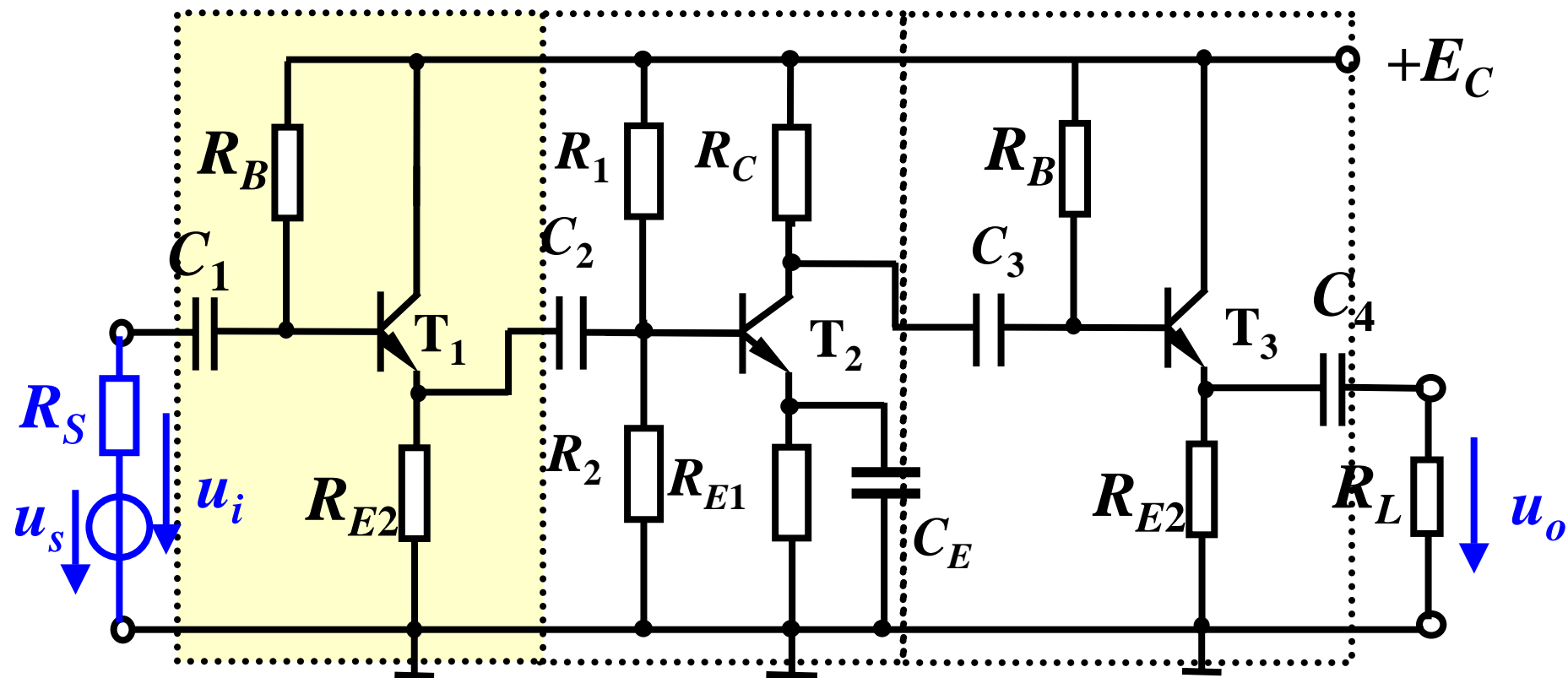
$$R_{L2} = r_{i3} = R_B // [r_{be3} + (1 + \beta_3)R'_{L3}]$$



$$r_i = r_{i1} = R_B // [r_{be1} + (1 + \beta_1)(R_{E2} // R_{L1})]$$

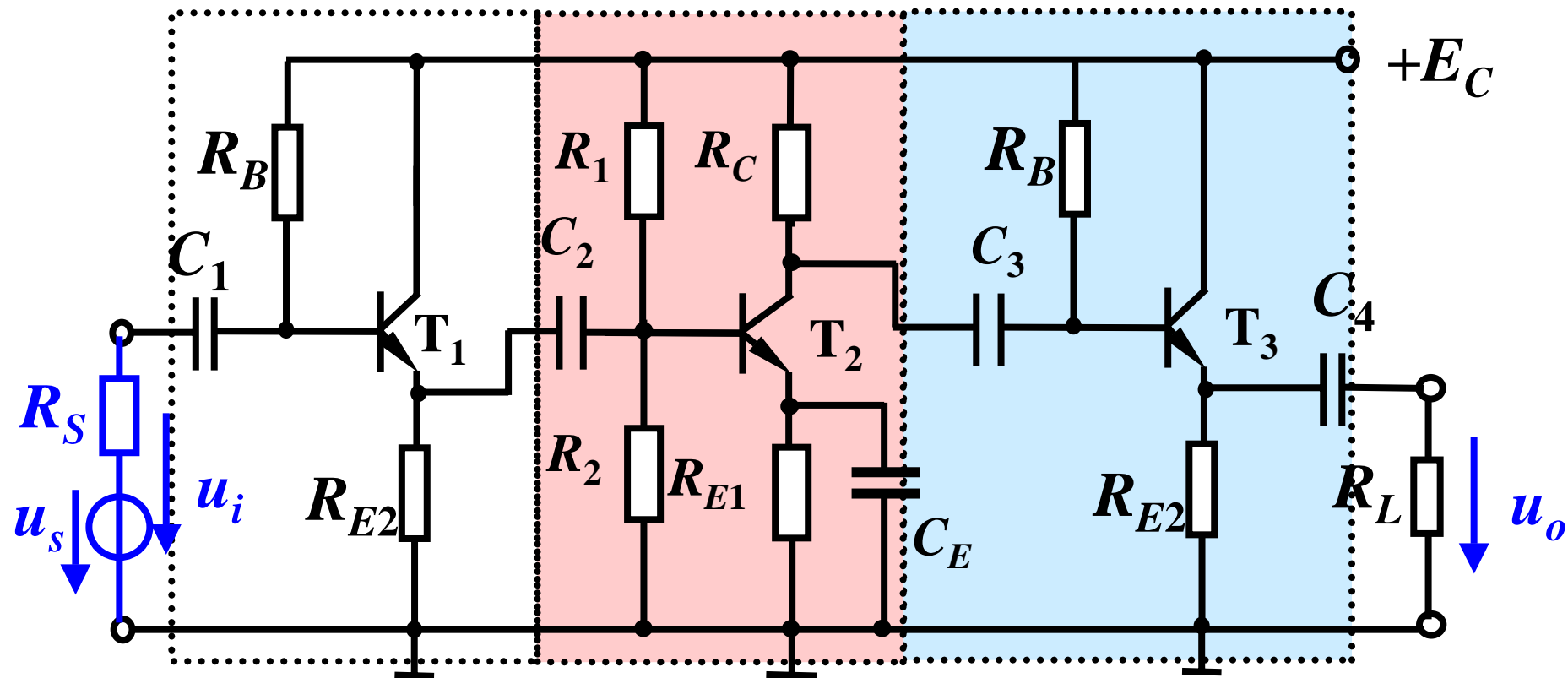
$$= 570 // [2.36 + (1 + 100)(5.6 // 1.52)] = 101\text{k}\Omega$$

$$r_o = r_{o3} = R_{E2} // \frac{(R_B // R_{S3}) + r_{be3}}{1 + \beta_3} = 5.6 // \frac{2.36 + 570 // 5}{1 + 100} = 73\Omega$$



$$R_{L1} = r_{i2} = R_1 // R_2 // r_{be2} = 1.52\text{k}\Omega$$

$$A_{u1} = \frac{(1 + \beta_1)R_{E2} // R_{L1}}{r_{be1} + (1 + \beta_1)R_{E2} // R_{L1}} = \frac{101 \times 5.6 // 1.52}{2.36 + 101 \times 5.6 // 1.52} = 0.98$$



$$A_{u2} = -\beta \frac{R_C // r_{i3}}{r_{be2}} = -60 \times \frac{5 // r_{i3}}{1.62}$$

$$A_{u3} = \frac{(1 + \beta_3) R'_L}{r_{be3} + (1 + \beta_3) R'_L}$$

$R_L=5 \text{ k}\Omega$ 时:  $r_{i2}=173 \text{ k}\Omega$  ,  $A_{u2}=-185$  ,  $A_{u3}=0.99$

$R_L=1 \text{ k}\Omega$ 时:  $r_{i2}=76 \text{ k}\Omega$  ,  $A_{u2}=-174$  ,  $A_{u3}=0.97$

$$r_i = 101\text{k}\Omega \quad , \quad R_S = 20\text{k}\Omega, \quad A_{u1} = 0.98$$

$$\underline{R_L = 5 \text{ k}\Omega \text{ 时:}} \quad r_{i2} = 173 \text{ k}\Omega, \quad A_{u2} = -185, \quad A_{u3} = 0.99$$

$$\underline{R_L = 1 \text{ k}\Omega \text{ 时:}} \quad r_{i2} = 76 \text{ k}\Omega, \quad A_{u2} = -174, \quad A_{u3} = 0.97$$

$$A_u = A_{u1} \times A_{u2} \times A_{u3}$$

$$A_{us} = A_u \times \frac{r_i}{r_i + R_S}$$

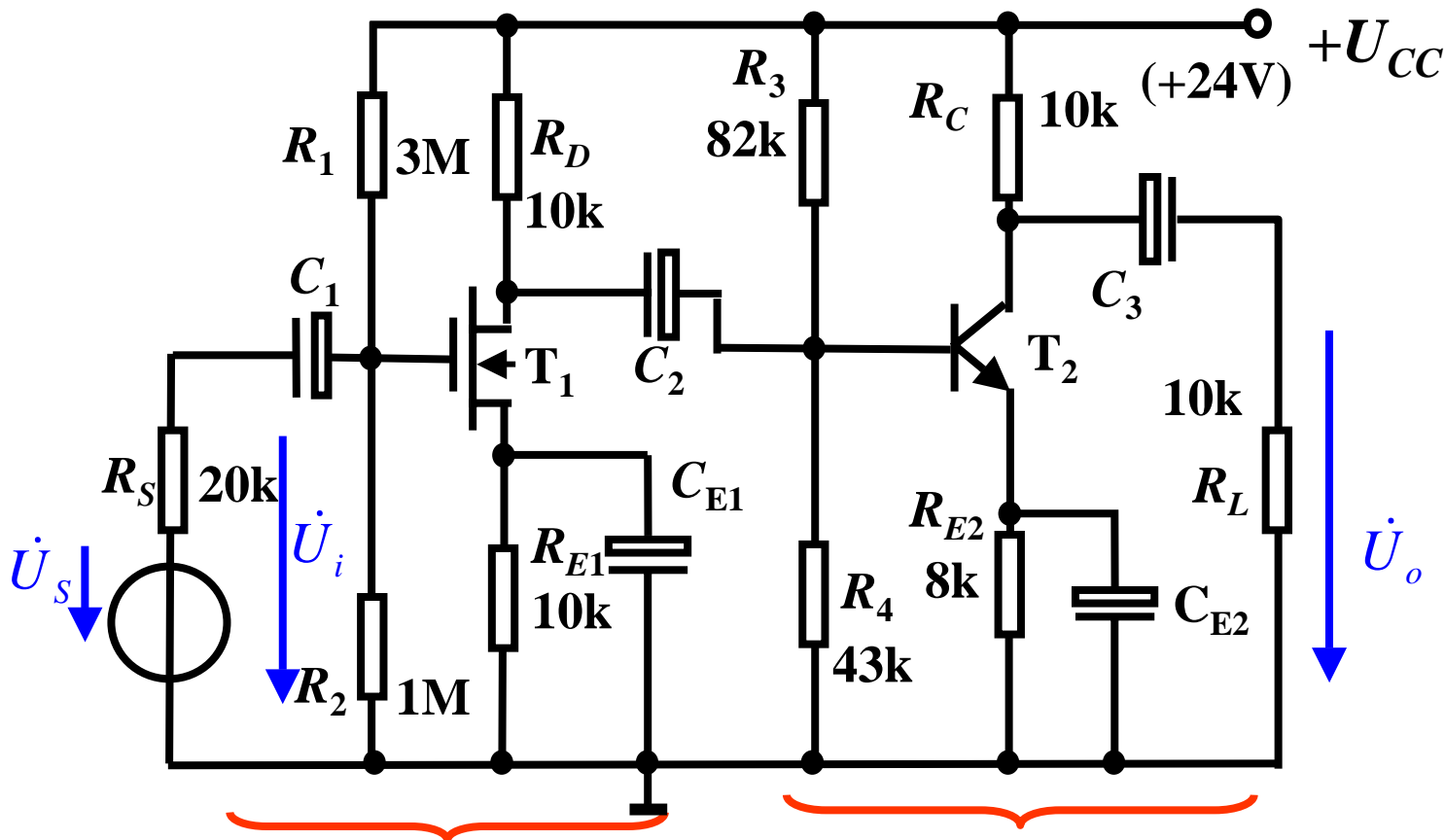
$R_L = 5 \text{ k}\Omega$  时:

$$A_u = 0.98 \times (-185) \times 0.99 = -179.5 \quad A_{us} = A_u \times \frac{101}{101 + 20} = -149.8$$

$R_L = 1 \text{ k}\Omega$  时:

$$A_u = 0.98 \times (-174) \times 0.97 = -165.4 \quad A_{us} = A_u \times \frac{101}{101 + 20} = -138.1$$

**例2:** 设  $g_m=3\text{mA/V}$ ,  $\beta=50$ ,  $r_{be}=1.7\text{k}$



前级:场效应管  
共源极放大器

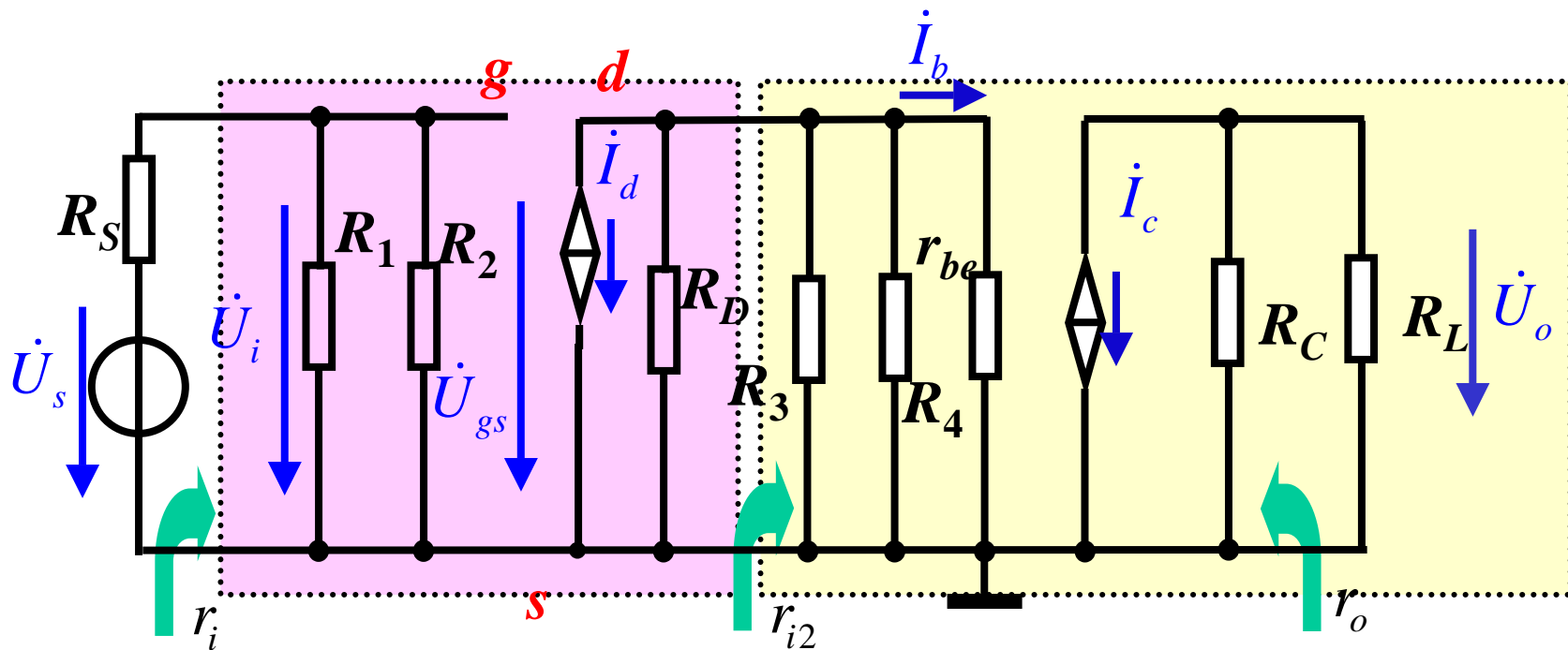
后级:晶体管  
共射极放大器

求: 总电压放大倍数、输入电阻、输出电阻。

(1) 估算各级静态工作点：（略）

(2) 动态分析：

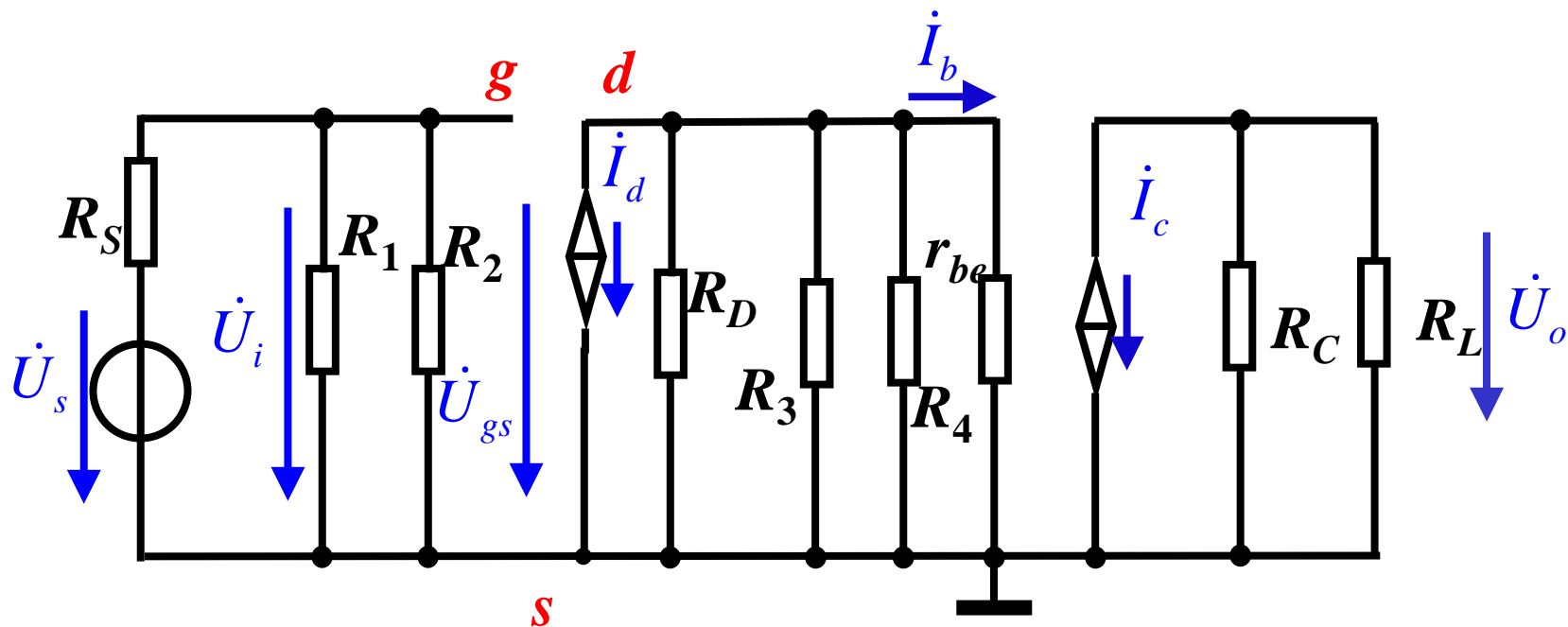
### 微变等效电路



首先计算第二级的输入电阻：

$$r_{i2} = R_3 // R_4 // r_{be} = 82 // 43 // 1.7 = 1.7 \text{ k}\Omega$$

## 第二步：计算各级电压放大倍数

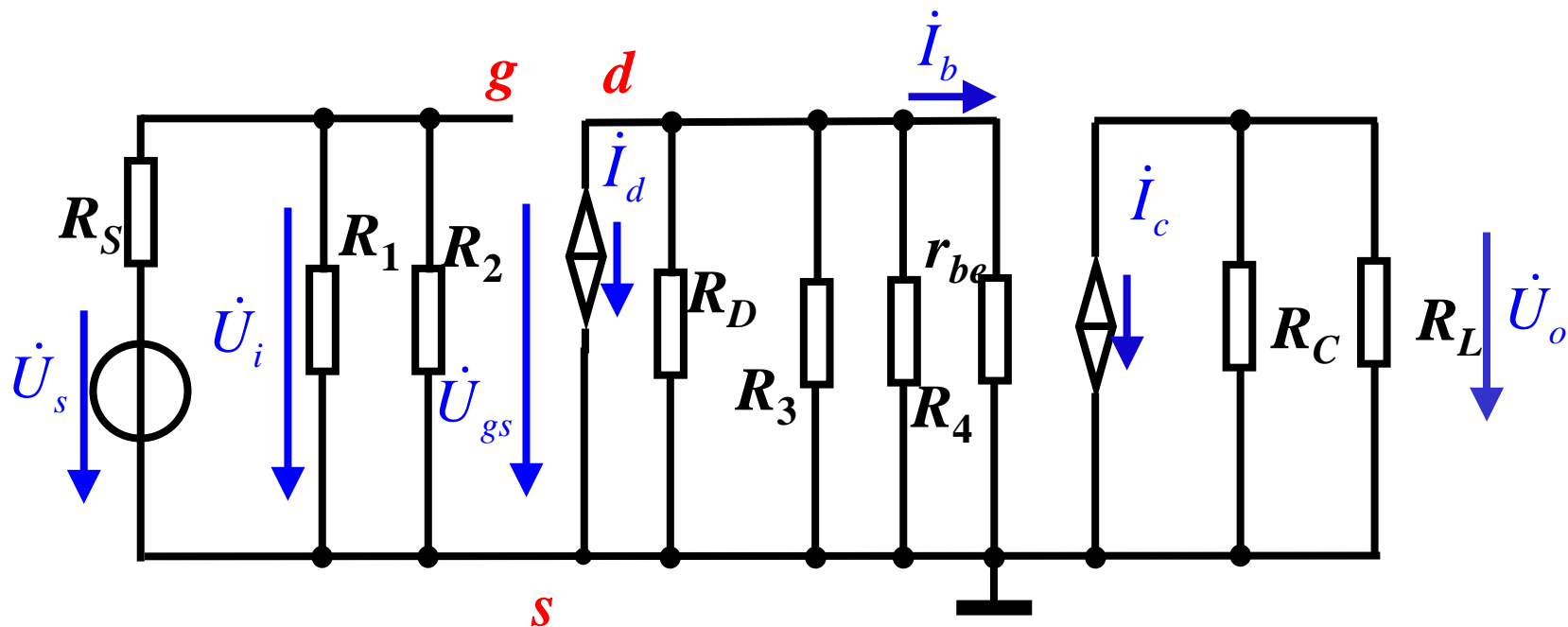


$$A_{u1} = -g_m R'_{L1} = -g_m (R_D // r_{i2}) = -3(10 // 1.7) = -4.4$$

$$A_{u2} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} = -\beta \frac{R_C // R_L}{r_{be}} = \frac{-50(10 // 10)}{1.7} = -147$$



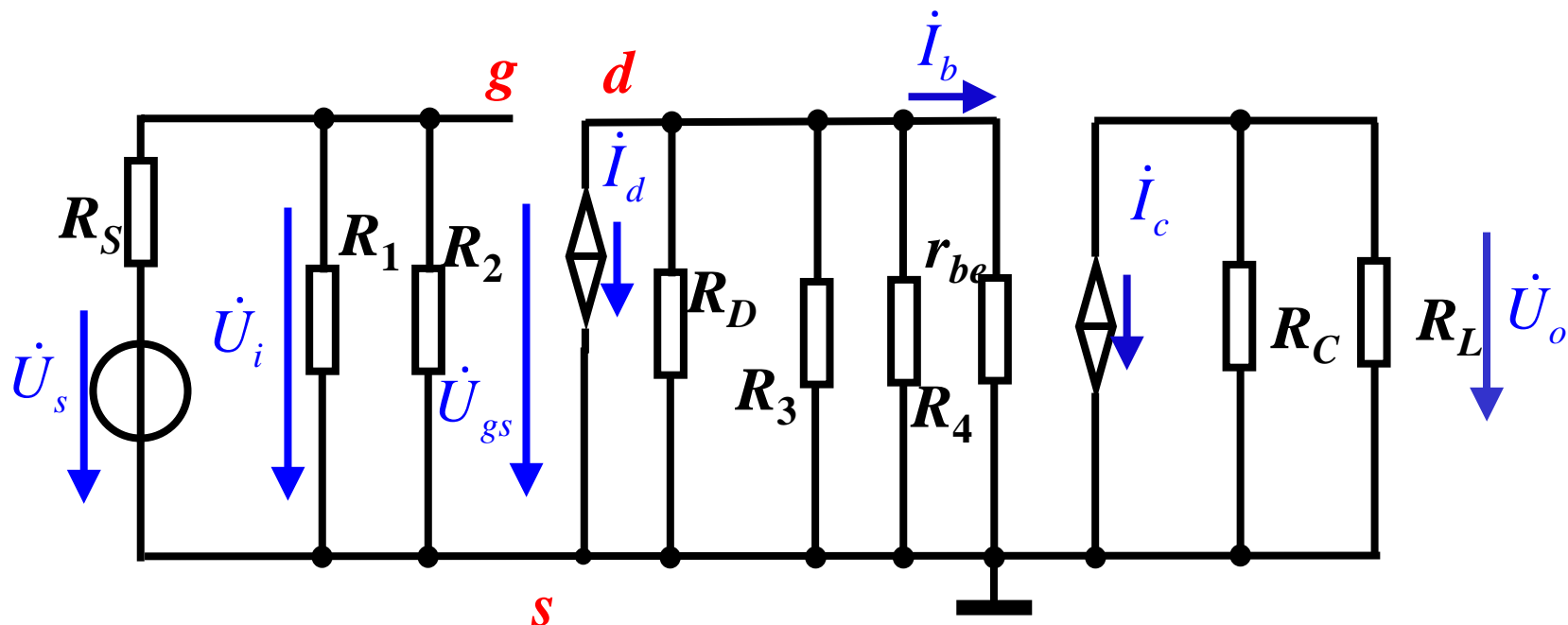
第三步：计算输入电阻、输出电阻



$$r_i = R_1 // R_2 = 3 // 1 = 0.75 \text{ M } \Omega$$

$$r_o = R_C = 10 \text{ k } \Omega$$

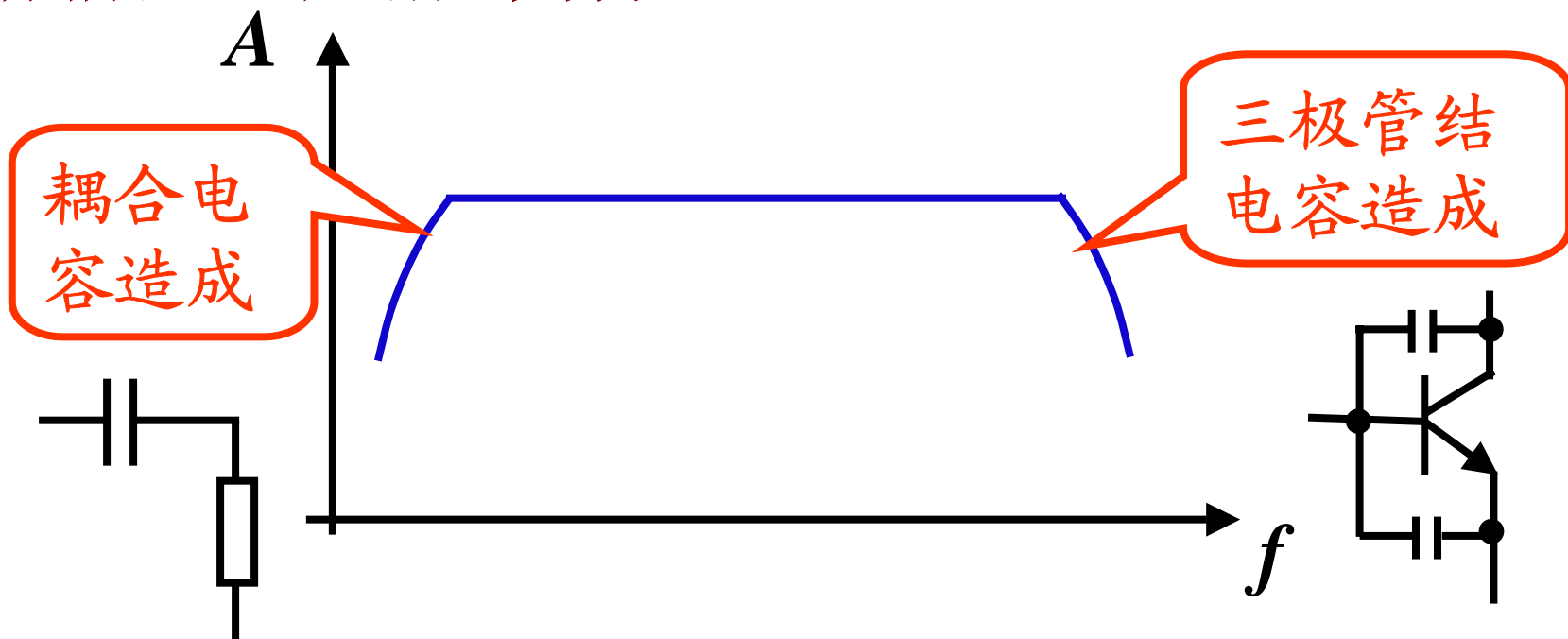
## 第四步：计算总电压放大倍数



$$A_u = A_{u1} A_{u2} = (-4.4) \times (-147) = 647$$

$$A_{us} = A_u \times \frac{r_i}{R_S + r_i} = 647 \times \frac{750}{20 + 750} = 630$$

## 阻容耦合电路的频率特性：



阻容耦合电路缺点：不能放大直流信号。

采用直接耦合的方式可放大缓慢变化的信号，扩大通频带。下面将要介绍的差动放大器即采用直接耦合方式。

电子技术  
模拟电路部分

# 第二章

# 结束