



# 模拟电子技术基础



# 回顾

---

01

半导体基础知识

02

半导体二极管、稳压管（单向导电性以及稳压应用）

03

半导体三极管（放大原理、动态参数等效模型）

04

场效应晶体管（特性曲线）

课后作业： 1-7、 1-9、 1-10、 1-11,、 1-12、 1-13、 1-14、 1-15、 1-17  
(1) 、 1-19、 1-21、 1-22



---

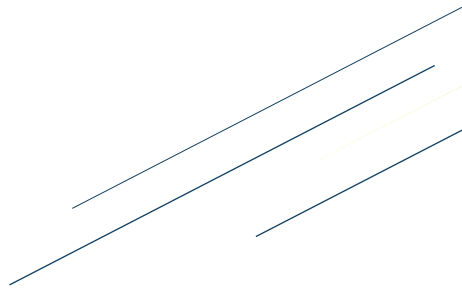
## 第二章 基本单元电路

---

# 第二章 基本单元电路

本章教学主要内容

- 第一讲 放大电路的组成及工作原理**
- 第二讲 放大电路的分析方法**
- 第三讲 工作点稳定电路**
- 第四讲 放大电路的三种组态及其性能比较**
- 第五讲 场效应管基本放大电路**
- 第六讲 差动放大电路**
- 第七讲 电流源电路**



# **第一讲 基本共射放大电路的 工作原理**

- 一、放大的概念与放大电路的性能指标**
- 二、基本共射放大电路的组成及各元件的作用**
- 三、设置静态工作点的必要性**
- 四、基本共射放大电路的工作原理**
- 五、放大电路的组成原则**

# 第一节 放大的概念及放大电路的性能指标

## 1. 放大的概念



将微弱的电信号通过放大电路(也称放大器)放大到具有足够大的功率去推动负载，这就是放大。

放大的对象：变化量(正弦波)

放大的本质：能量的控制

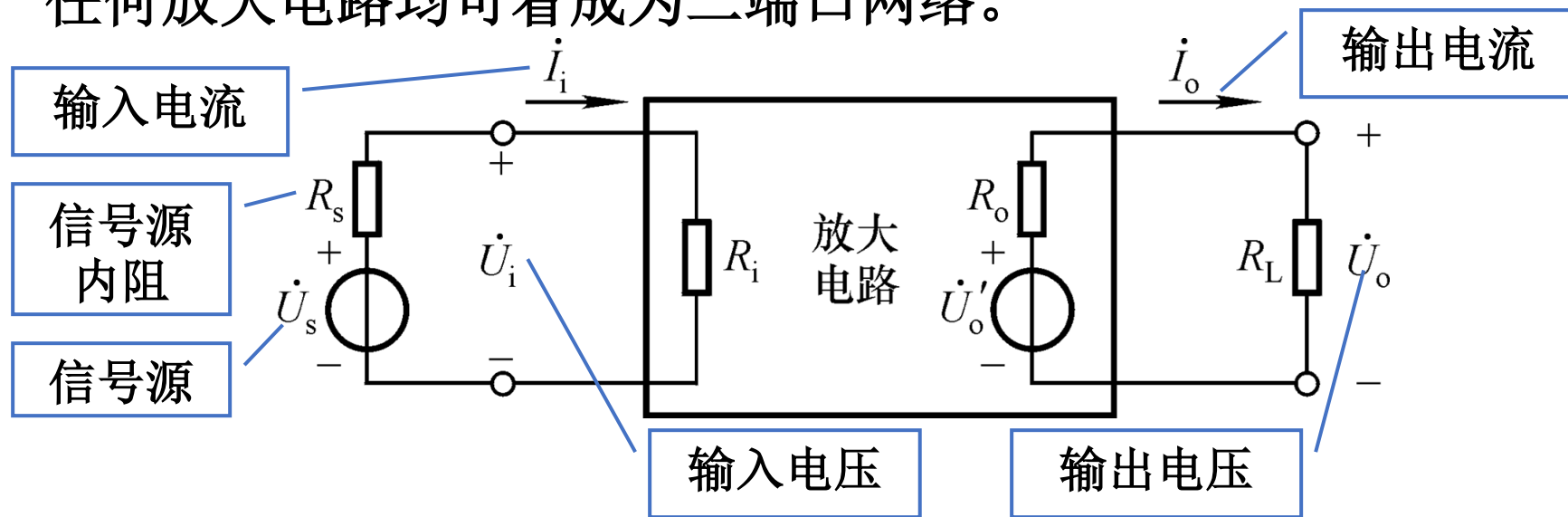
放大的特征：功率放大

放大的基本要求：不失真，放大的前提

**能量的控制和转换**:在输入信号下，通过放大电路将直流电源的能量转换成负载所获得的能量。

## 2. 性能指标

任何放大电路均可看成为二端口网络。



1) 放大倍数：输出量与输入量之比

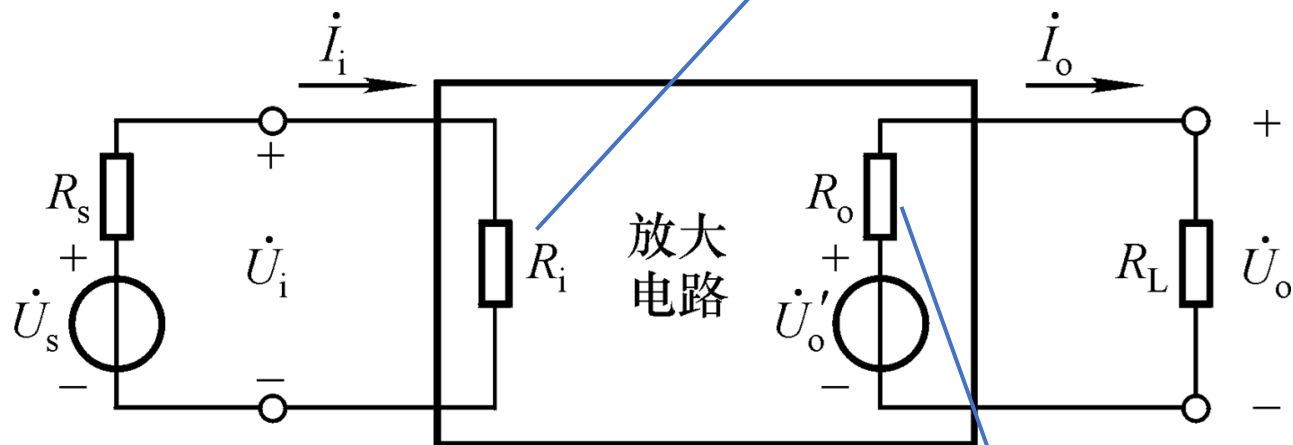
$$\dot{A}_{uu} = \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

$$\dot{A}_{ii} = \dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$$

电压放大倍数是最常被研究和测试的参数



## 2) 输入电阻和输出电阻



从输入端看进去的  
等效电阻

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

输入电压与  
输入电流有  
效值之比。

$$R_o = \frac{U'_o - U_o}{\frac{U_o}{R_L}} = \left( \frac{U'_o}{U_o} - 1 \right) R_L$$

空载时输出  
电压有效值

带  $R_L$  时的输出电  
压有效值

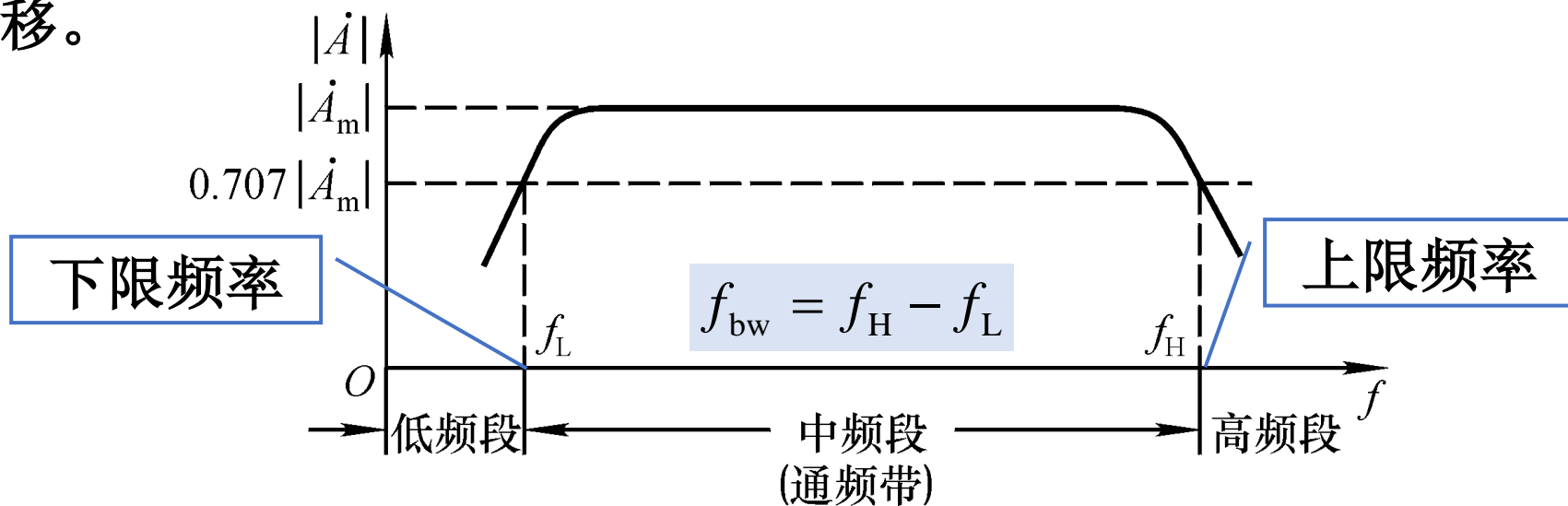
负载开路时从  
放大电路输出  
端看进去的交流  
等效内阻。

一般来说：输入电阻越大越好，输出电阻越小越好。

### 3) 通频带

衡量放大电路对不同频率信号的适应能力。

由于电容、电感及半导体器件PN结的电容效应，使放大电路在信号频率较低和较高时电压放大倍数数值下降，并产生相移。



放大电路放大倍数与信号频率的关系曲线为**幅频特性曲线**。  
**通频带越宽，放大电路对不同频率信号的适应能力越强。**

#### 4、非线性失真系数 $D$

输出波形中的谐波成分总量与基波之比称为非线性失真系数  $D$ 。

$$D = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \cdots}}{U_1}$$

#### 5、最大不失真输出电压 $U_{om}$

当输入电压再增大就会使输出波形产生非线性失真时的输出电压值。

#### 6、最大输出功率 $P_{om}$ 与效率 $\eta$

在输出信号不失真的情况下，负载上能够获得的最大功率。此时输出电压达到最大不失真输出电压。

直流电源能量的利用率称为效率  $\eta$ ，设电源消耗的功率为  $P_V$ ，则效率  $\eta$  等于最大输出功率  $P_{om}$  与  $P_V$  之比，即

$$\eta = \frac{P_{om}}{P_V}$$

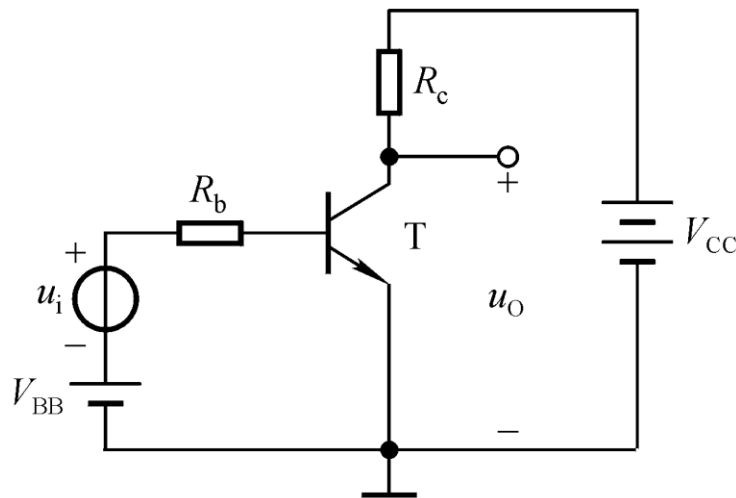
## 二、基本共射放大电路的组成及各元件的作用

$V_{BB}$ 、 $R_b$ ：使 $U_{BE} > U_{on}$ ，且有合适的 $I_B$ 。

$V_{CC}$ ：使 $U_{CE} \geq U_{on}$ ，同时作为负载的能源。

$R_c$ ：将 $\Delta i_c$ 转换成 $\Delta u_{CE}(u_o)$ 。

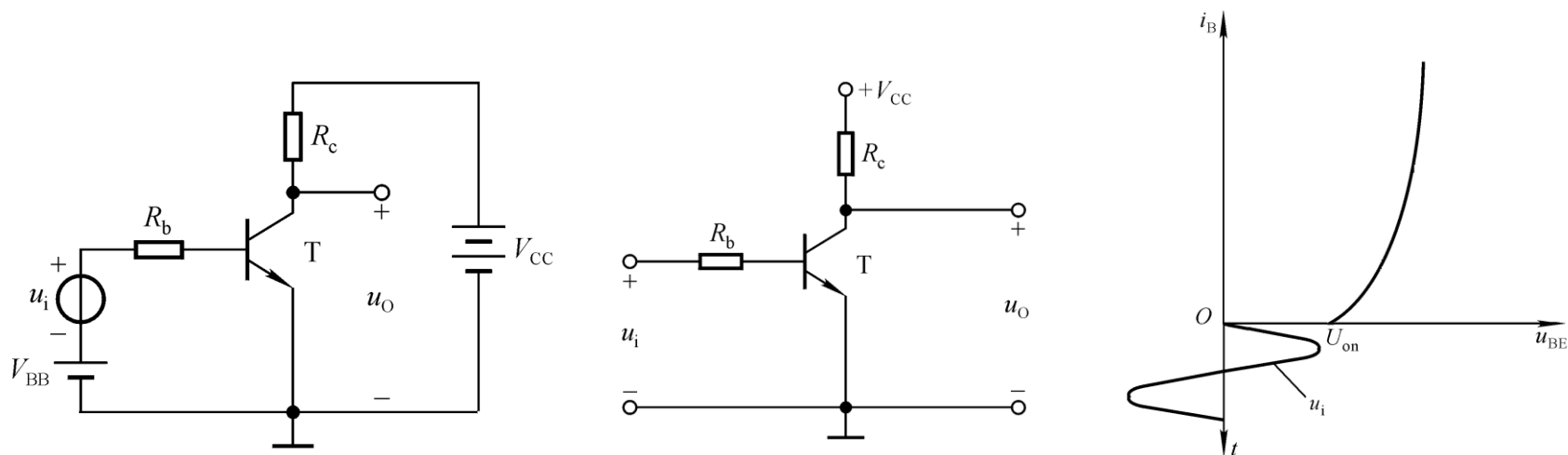
动态信号作用时： $u_i \rightarrow i_b \rightarrow i_c \rightarrow \Delta i_{R_c} \rightarrow \Delta u_{CE}(u_o)$



输入电压 $u_i$ 为零时，晶体管各极的电流、b-e间的电压、管压降称为静态工作点 $Q$ ，记作 $I_{BQ}$ 、 $I_{CQ}$  ( $I_{EQ}$ )、 $U_{BEQ}$ 、 $U_{CEQ}$ 。

### 三、设置静态工作点的必要性

为什么放大的对象是动态信号，却要晶体管在信号为零时有合适的直流电流和极间电压？



输出电压必然失真！

设置合适的静态工作点，首先要解决失真问题，但 $Q$ 点几乎影响着所有的动态参数！

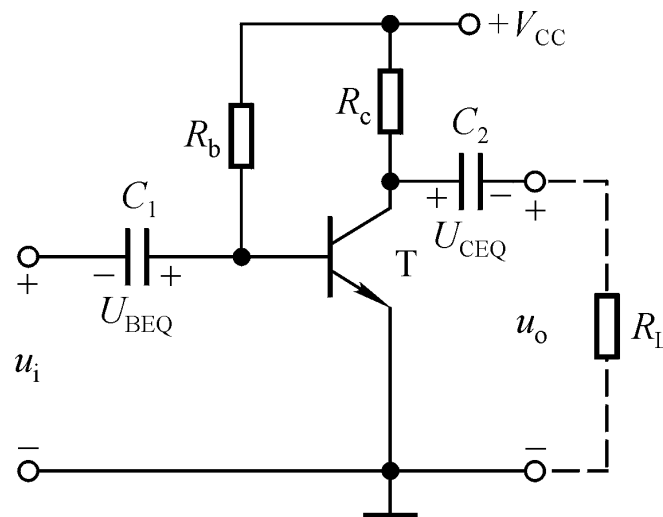
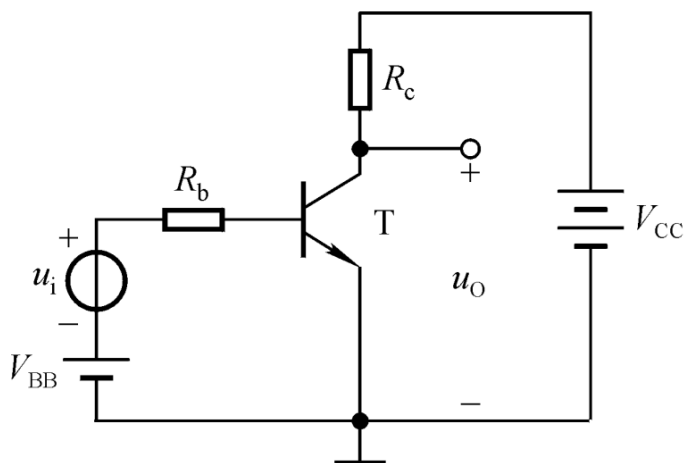
放大电路建立正确的静态工作点，是为了使三极管工作在线性区，以保证信号不失真

## 四、基本共射放大电路的工作原理

### 常见共射放大电路的画法

- 对实用放大电路的要求：共地、直流电源种类尽可能少、负载上无直流分量。

$C_1$ 、 $C_2$ 为耦合电容！

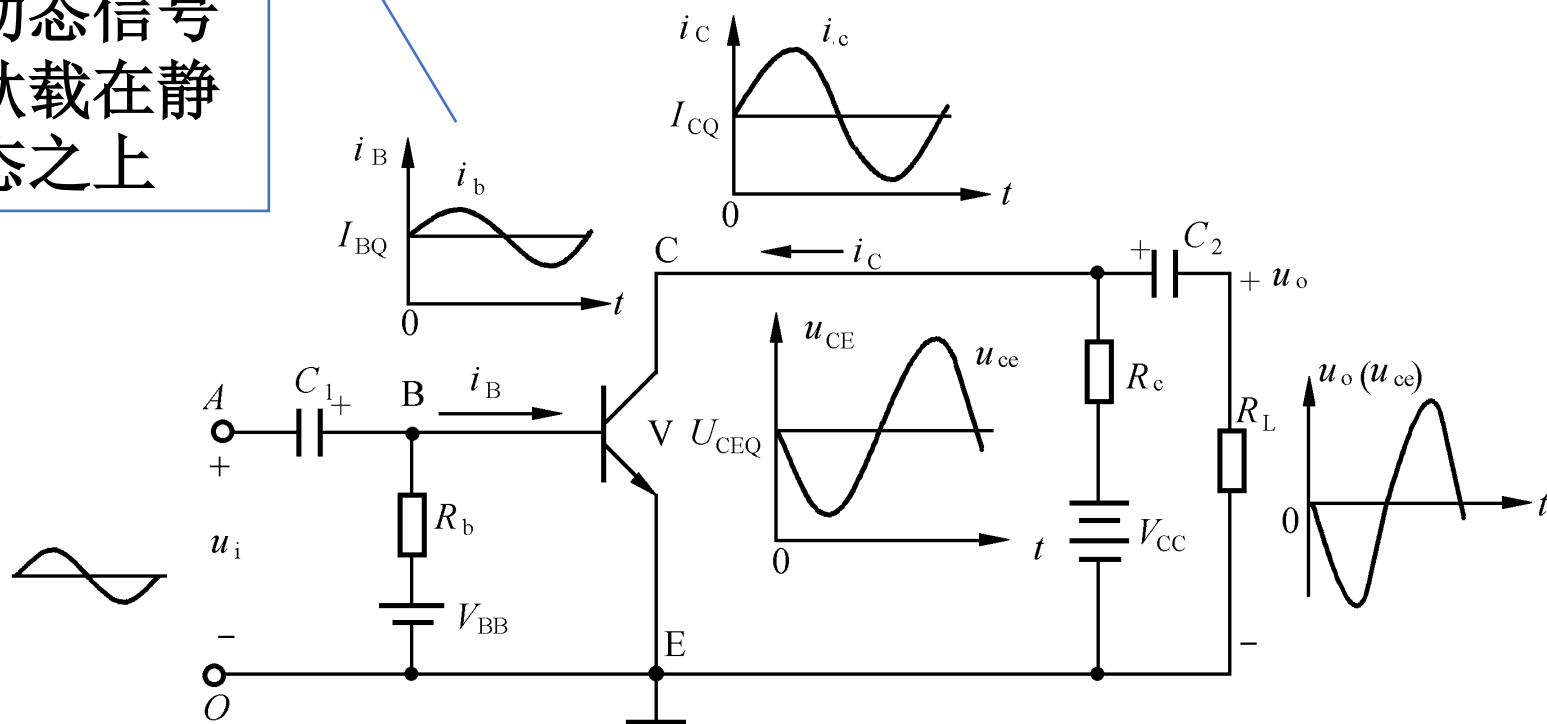


耦合电容的容量应足够大，即对于交流信号近似为短路。其作用是“隔离直流、通过交流”。

## 四、基本共射放大电路的工作原理

### 波形分析

动态信号  
驮载在静  
态之上



# 五、放大电路的组成原则

## 放大电路的组成原则

1. 发射结正偏，集电结反偏。（合适的直流源）
2. 输入回路应使交流输入信号能加到管子上，产生交流电流 $i_b$ （动态信号能够作用于晶体管的输入回路）
3. 输出回路应使输出电流尽可能多地流到负载上（在负载上能够获得放大的动态信号）
4. 为了保证放大电路不失真地放大信号，在没有外加信号时应使放大管有一个合适的静态工作点，保证交流叠加在直流上。



# 第二讲 放大电路的分析方法

静态分析、动态分析

- 一、放大电路的直流通路和交流通路
- 二、图解法
- 三、等效电路法

# 一、放大电路的直流通路和交流通路

通常，放大电路中直流电源的作用和交流信号的作用共存，这使得电路的分析复杂化。为简化分析，将它们分开作用，引入直流通路和交流通路的概念。

1直流通路实在直流源作用下直流电流（静态）流经的通路，用于研究静态工作点。

2交流通路是输入信号作用下交流信号流经的通路，用于动态参数研究。

1. 直流通路：①  $U_s=0$ ，保留 $R_s$ ；②电容开路；  
③电感相当于短路（线圈电阻近似为0）。

2. 交流通路：①大容量电容相当于短路；  
②直流电源相当于短路（内阻为0）。

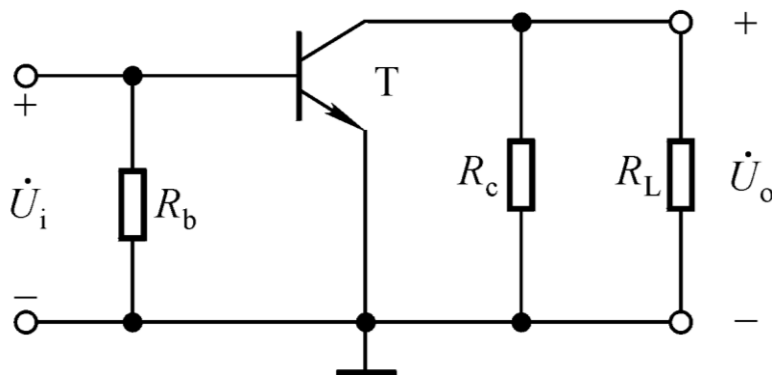
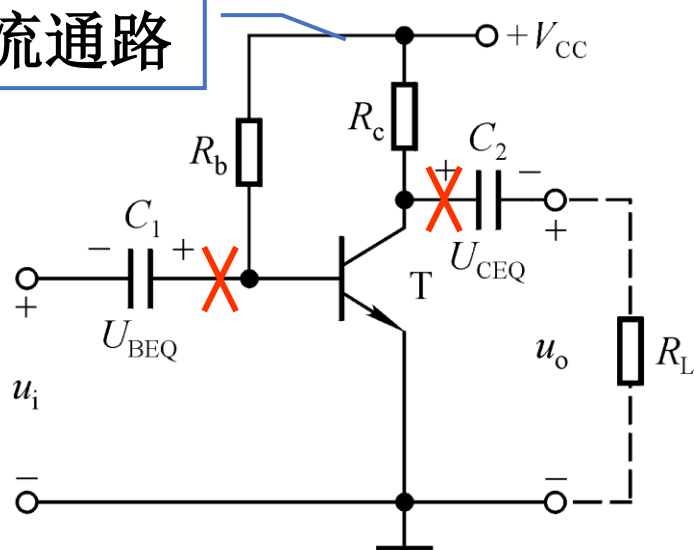
# 一、放大电路的直流通路和交流通路

- 1、晶体管基本放大电路的分析包括静态分析和动态分析。分析放大电路时，必须根据先静态、后动态的原则。
- 2、放大电路的静态分析用放大电路的直流通路来分析。具体的分析方法有计算法和图解法。
- 3、放大电路的动态分析用放大电路的交流通路来分析。具体的分析方法有图解法和微变等效电路法。

# 阻容耦合单管共射放大电路的直流通路和交

$V_{CC}$ 越大,  $U_{BEQ}$ 取不同的值所引起的 $I_{BQ}$ 的误差越小。

## 直流通路



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

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

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

当 $V_{CC} \gg U_{BEQ}$ 时,  $I_{BQ} \approx \frac{V_{CC}}{R_b}$

已知:  $V_{CC} = 12V$ ,

$R_b = 600k\Omega$ ,

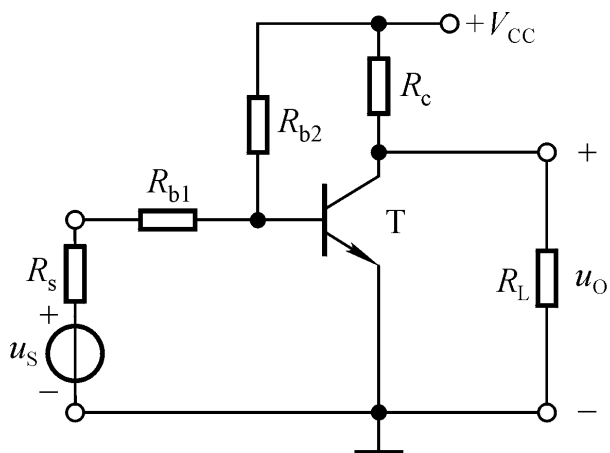
$R_c = 3k\Omega$ ,

$\beta = 100$ 。

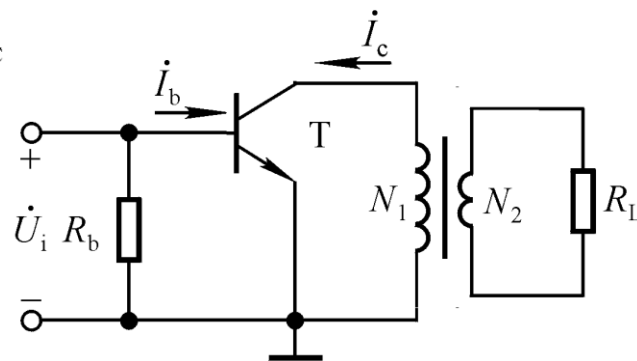
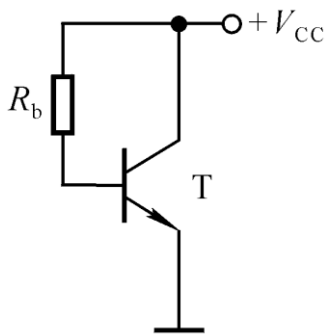
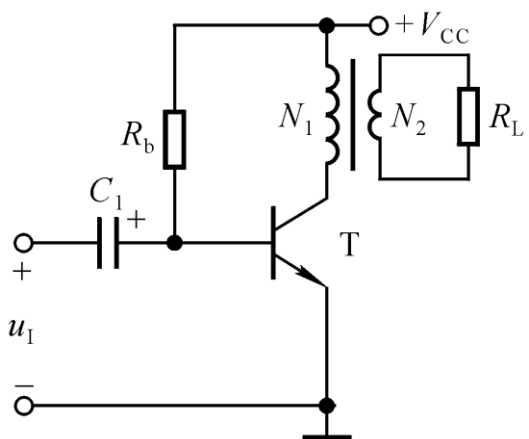
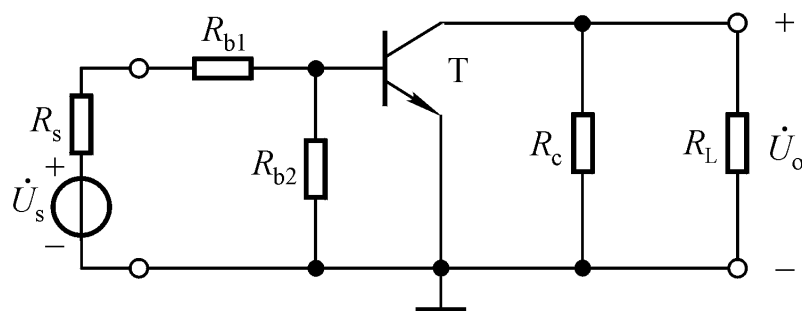
$Q = ?$

# 讨论一

画出图示电路的直流通路和交流通路。



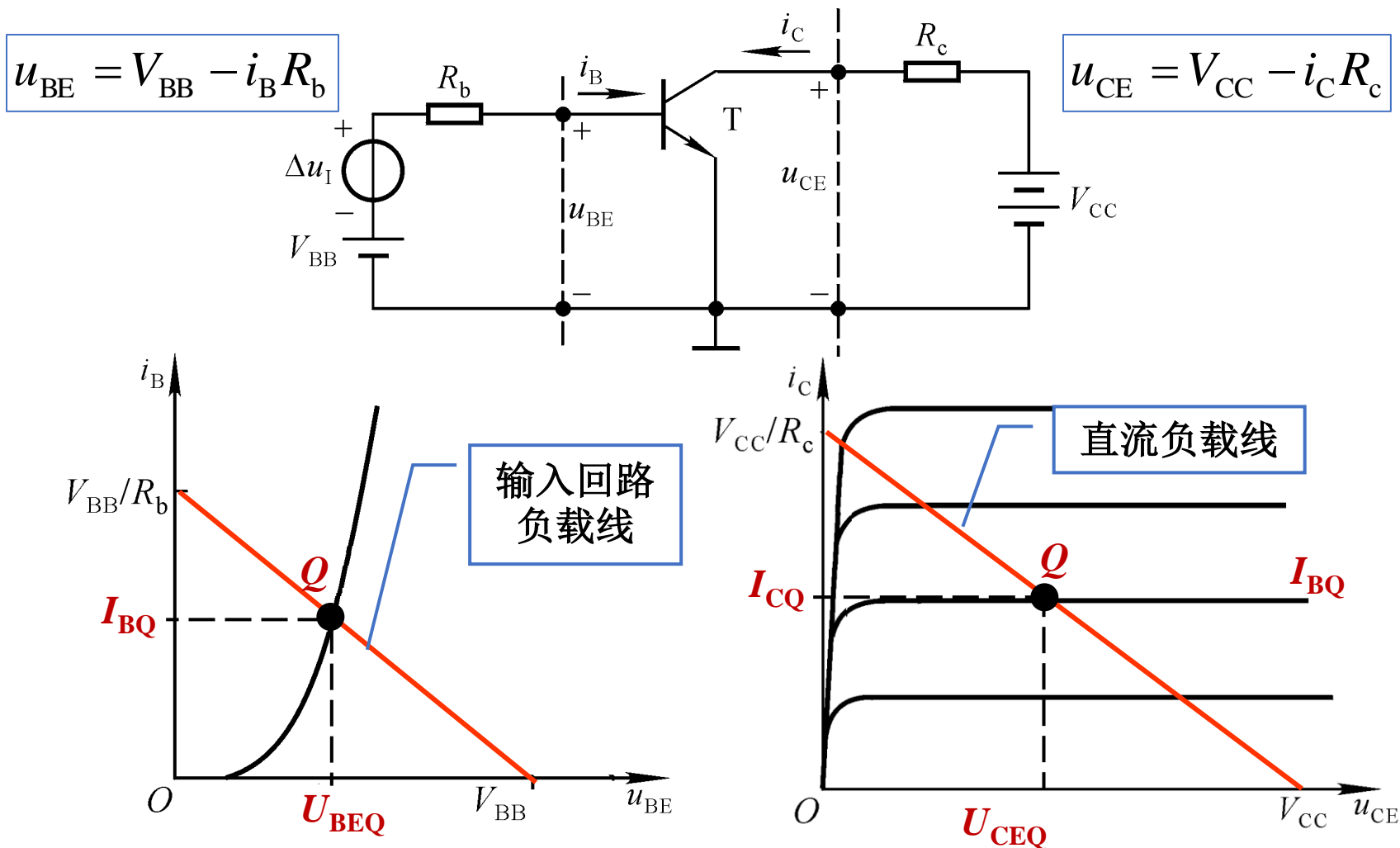
将 $u_s$ 短路，即为直流通路。



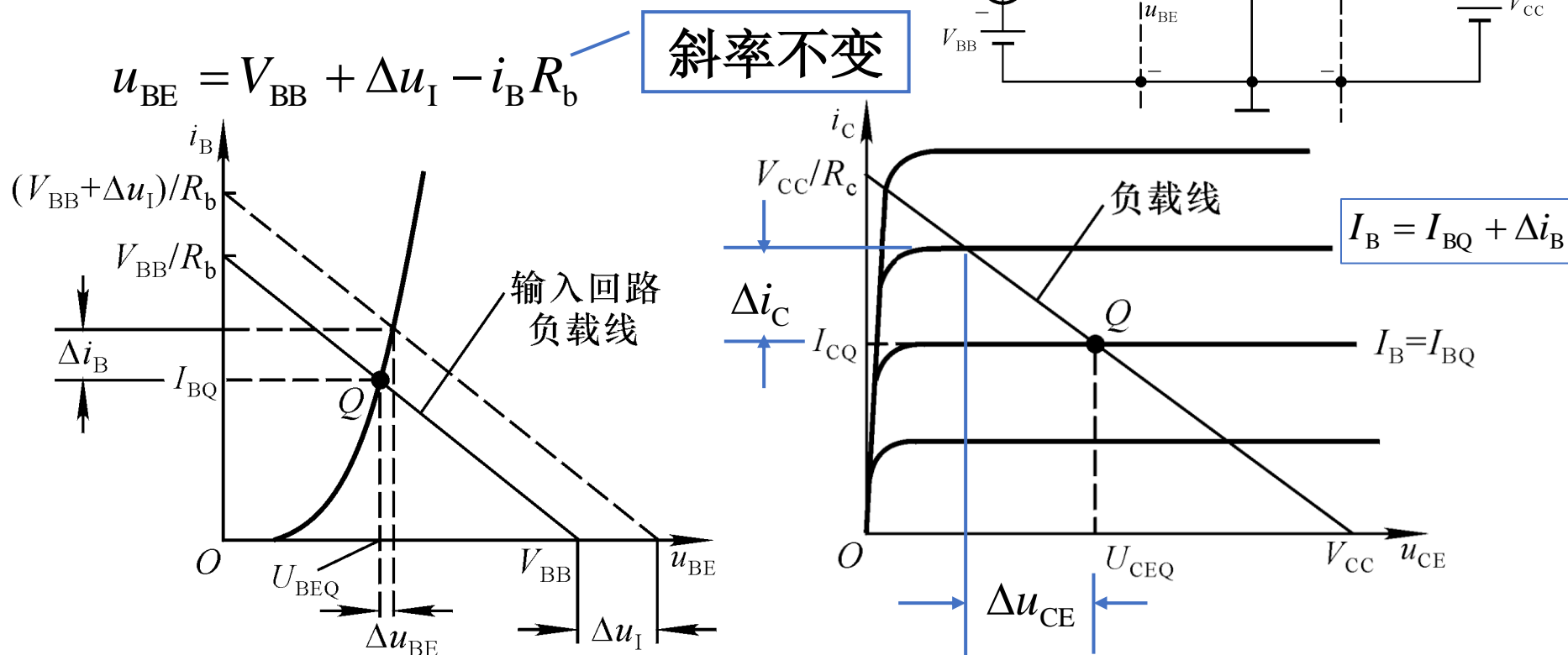
## 二、图解法

在管子的特性曲线上用作图的方法分析

### 1. 静态分析：图解二元方程



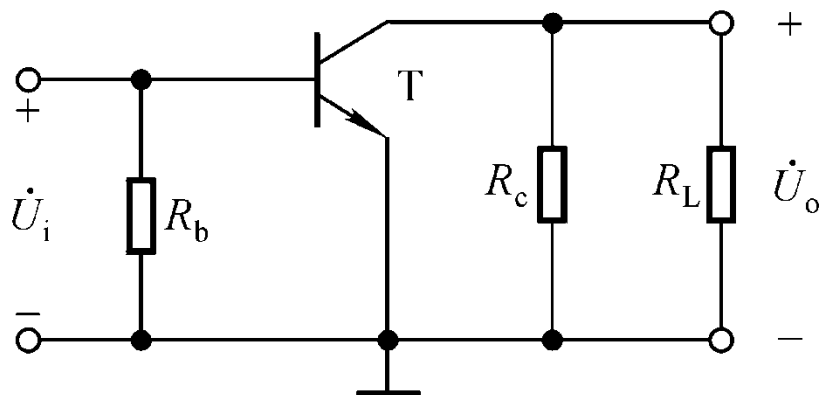
## 2. 放大倍数分析



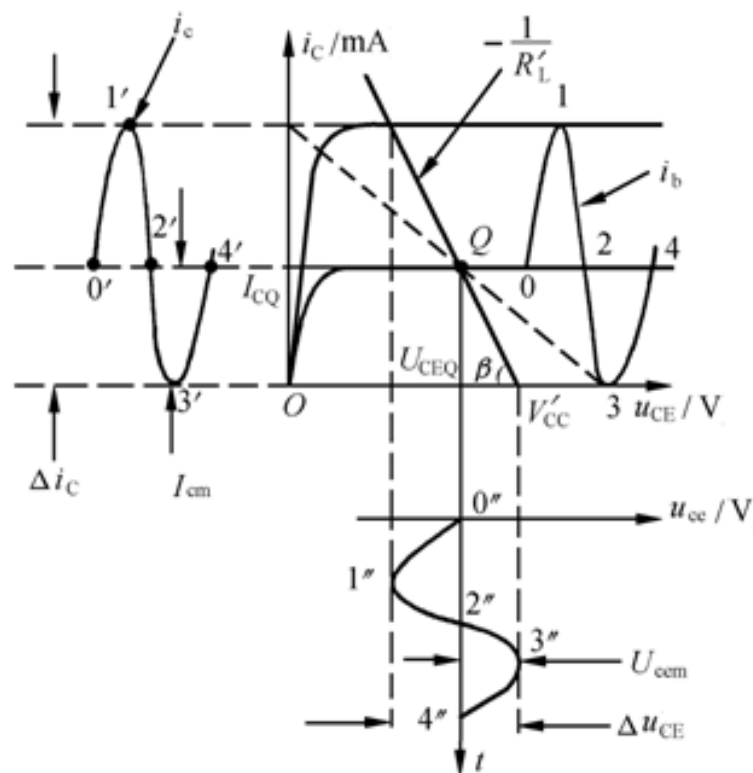
给定  $\Delta u_I \rightarrow \Delta i_B \rightarrow \Delta i_C \rightarrow \Delta u_{CE} (\Delta u_O) \rightarrow A_u = \frac{\Delta u_O}{\Delta u_I}$

$\Delta u_O$  与  $\Delta u_I$  反相,  $A_u$  符号为 “-”。

交流负载线 $ACL$ —交流输出回路方程表示的直线。



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



什么时候交流负载线与直流负载线重合？

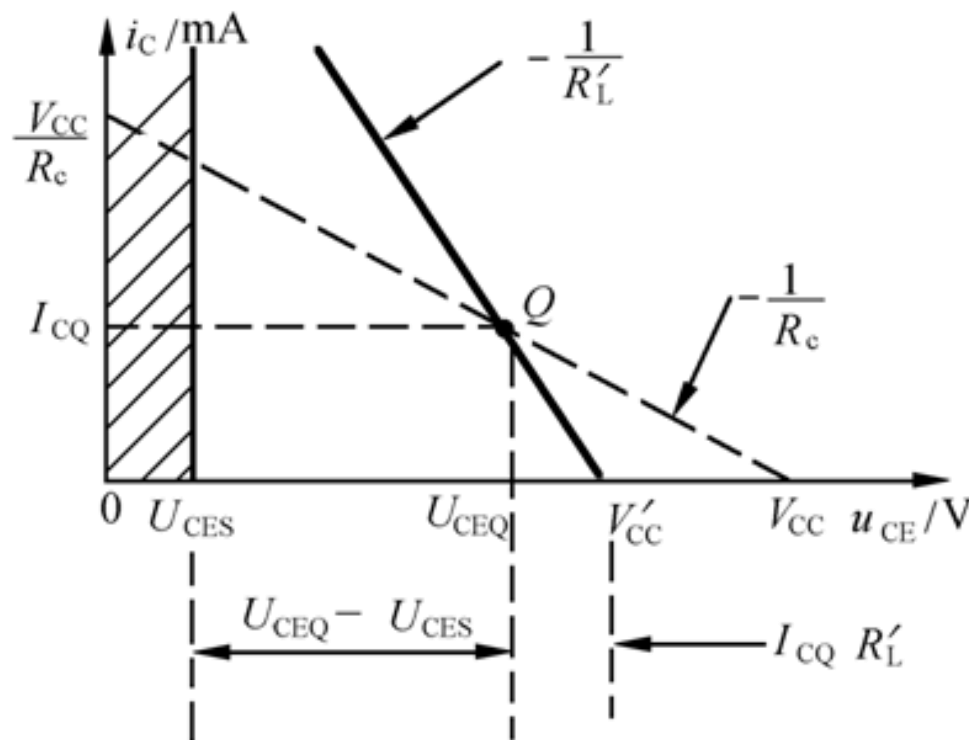
$$V'_{CC} = U_{CEQ} + I_{CQ} \cdot R'_L$$



### 3. 图解最大不失真输出电压 $U_{om}$

具体步骤：

- ①确定 $Q$ 点；
- ②画出交流负载线；
- ③确定 $U_{om}$



最大不失真输出电压 $U_{om}$ ：

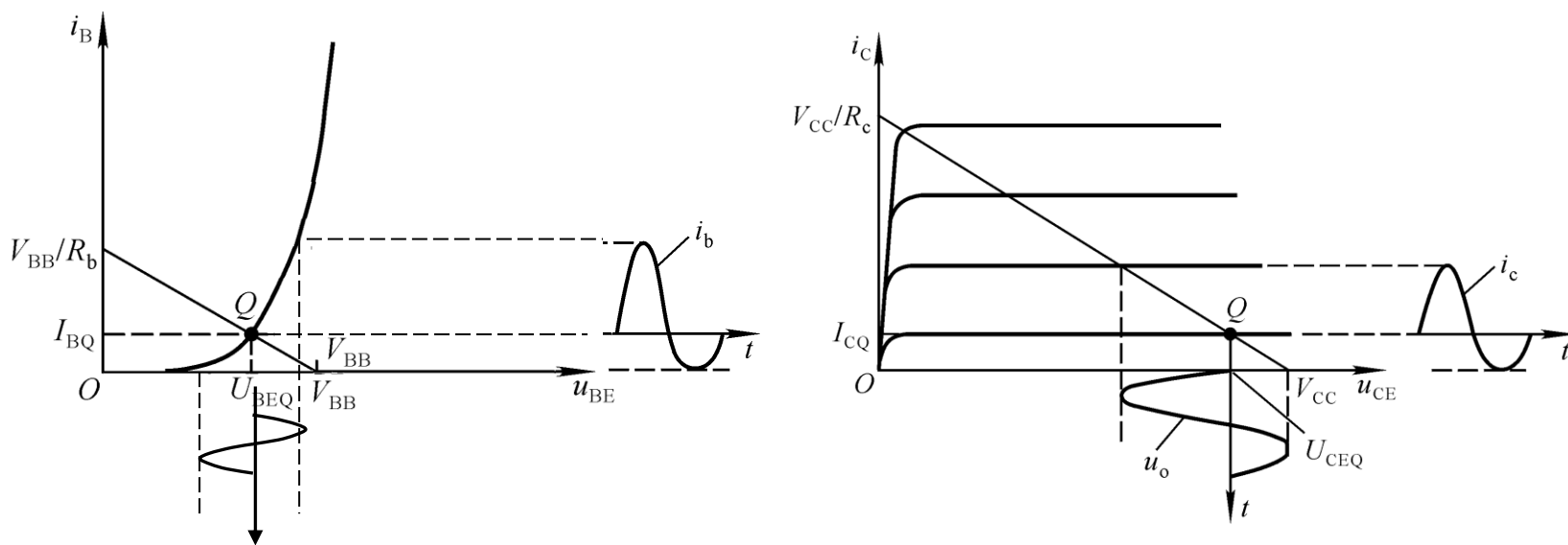
比较  $U_{CEQ} - U_{CES}$  与  $V'_{CC} - U_{CEQ}$  (或  $I_{CQ} R'_L$ ) 取其小者。

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

## 4. 失真分析

- 截止失真

当 $Q$ 点过低（如图所示靠近截止区的  $Q'$ ）时，输出电压  $u_o$  波形产生顶部失真，即上削波，这种失真又称**截止失真**。

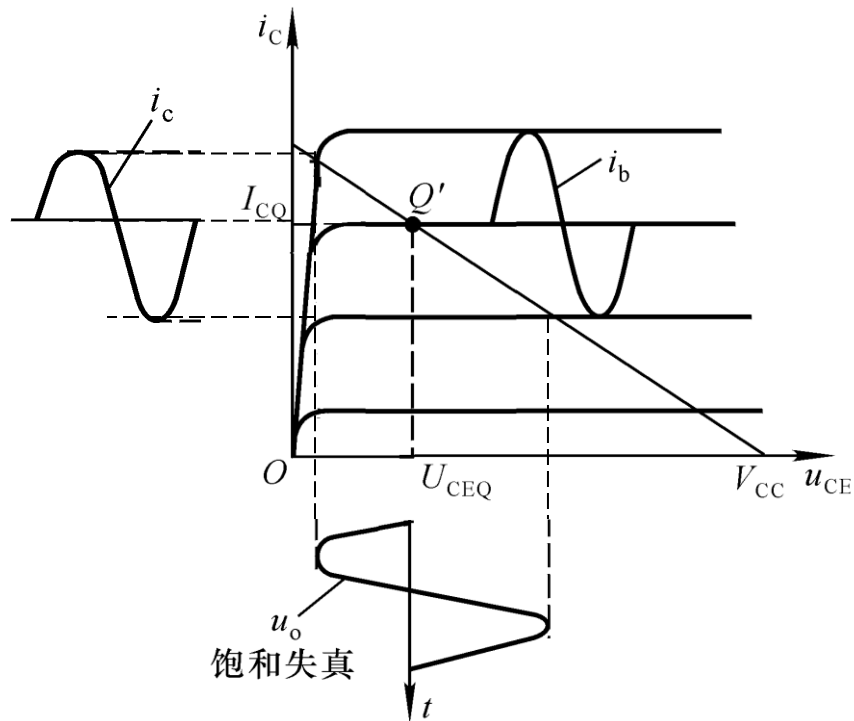
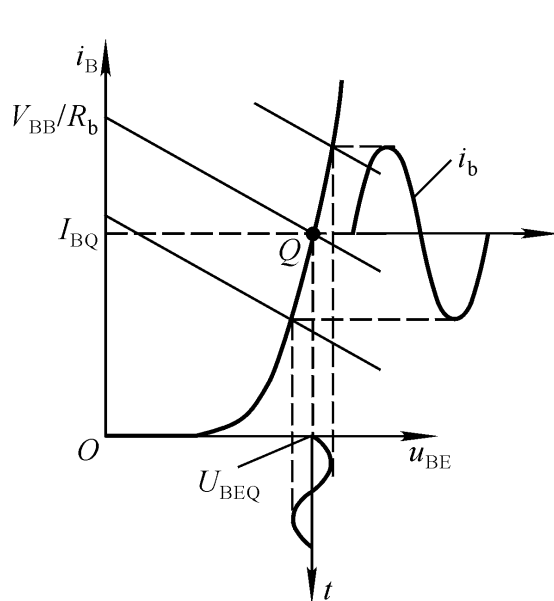


消除方法：增大  $V_{BB}$ ，即向上平移输入回路负载线。

减小  $R_b$  能消除截止失真吗？

## • 饱和失真

当 $Q$ 点过高（如图所示靠近饱和区的  $Q'$ ）时，输出电压  $u_o$  波形产生底部失真，即下削波，这种失真又称**饱和失真**。

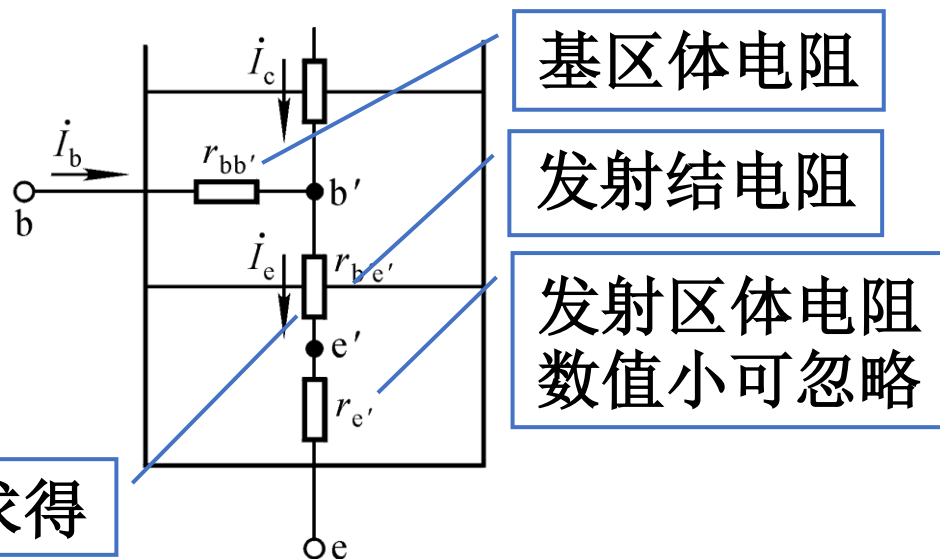
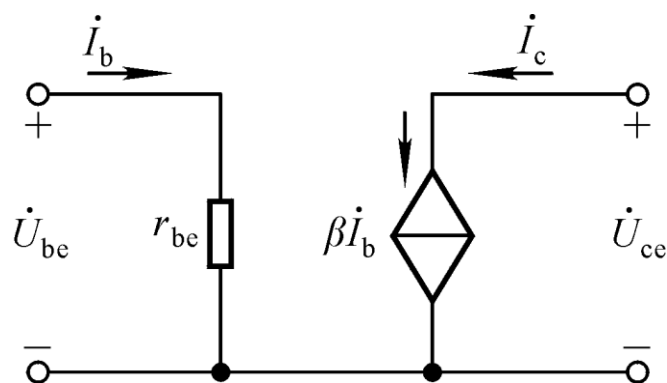


- 消除方法：增大 $R_b$ ，减小 $V_{BB}$ ，减小 $R_c$ ，减小 $\beta$ ，增大 $V_{CC}$ 。

## 5.图解法的特点

- 形象直观;
- 适应于 $Q$ 点分析、失真分析、最大不失真输出电压的分析;
- 能够用于大信号分析;
- 不易准确求解;
- 不能求解输入电阻、输出电阻、频带等参数。

### 三、h参数微变等效电路法



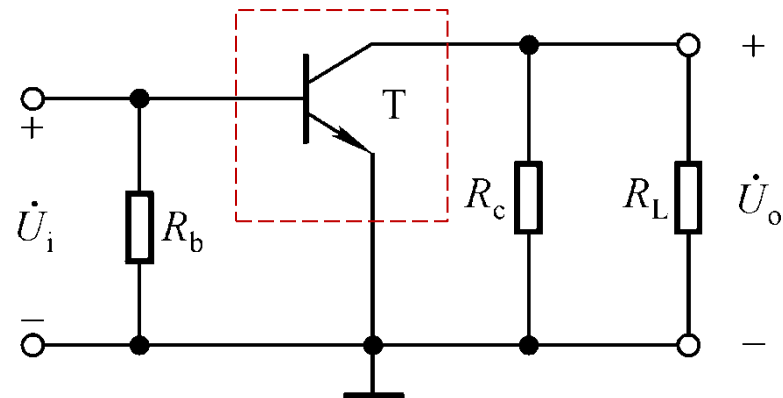
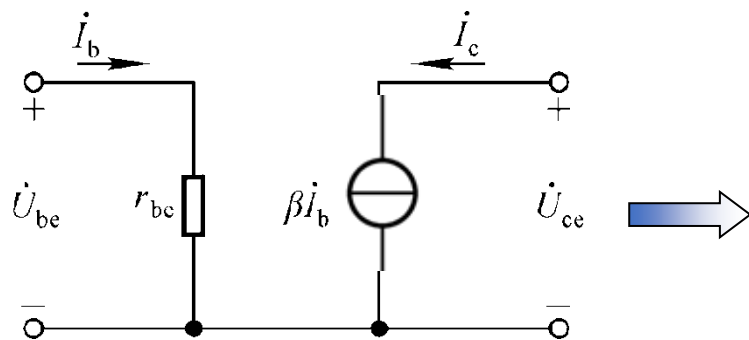
利用PN结的电流方程可求得

$$r_{be} = \frac{U_{be}}{I_b} = r_{bb'} + r_{b'e} \approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}}$$

查阅手册

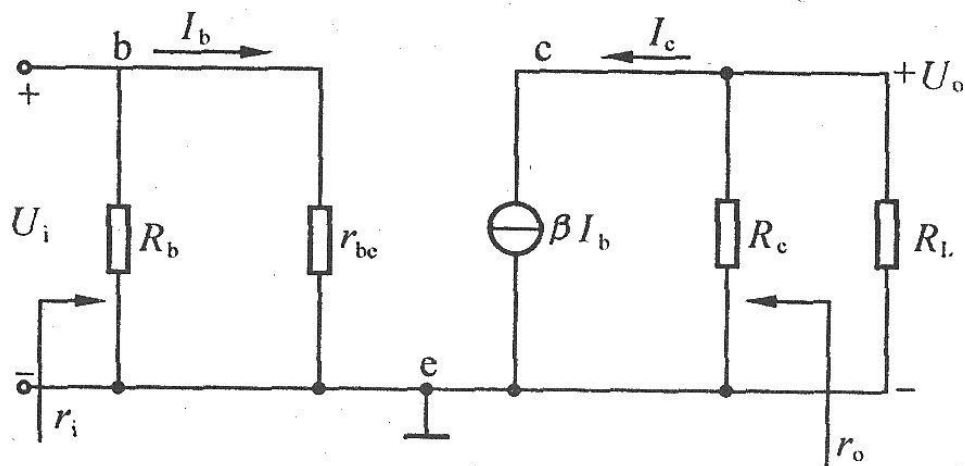
由 $I_{EQ}$ 算出

在输入特性曲线上， $Q$ 点越高， $r_{be}$ 越小！



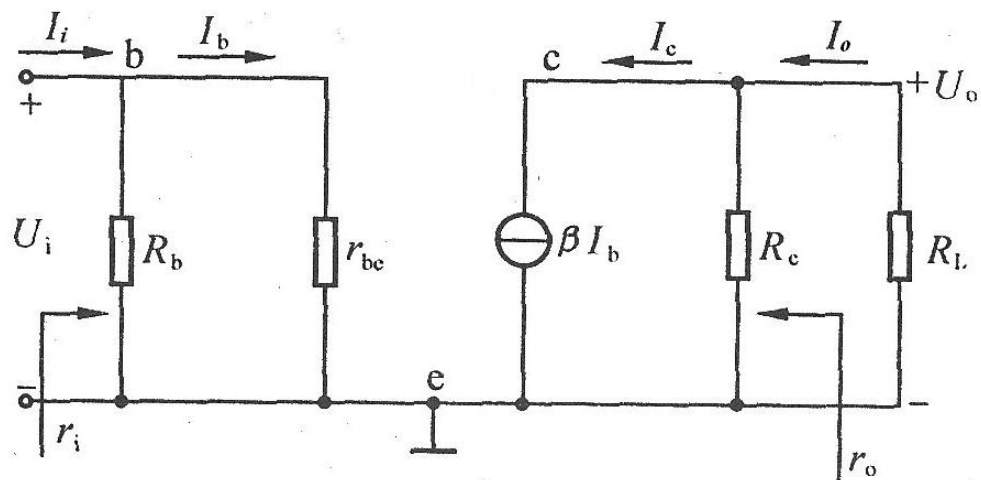
## ⑩ 晶体管的h参数等效模型

共射电路的交流通路



共射电路h参数  
微变等效电路

## 放大电路的动态分析（微变等效电路）



$$r_i = \frac{U_i}{I_i} = R_b // r_{be}$$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26mV}{I_{EQ}mA}$$

$$r_o \approx R_C$$

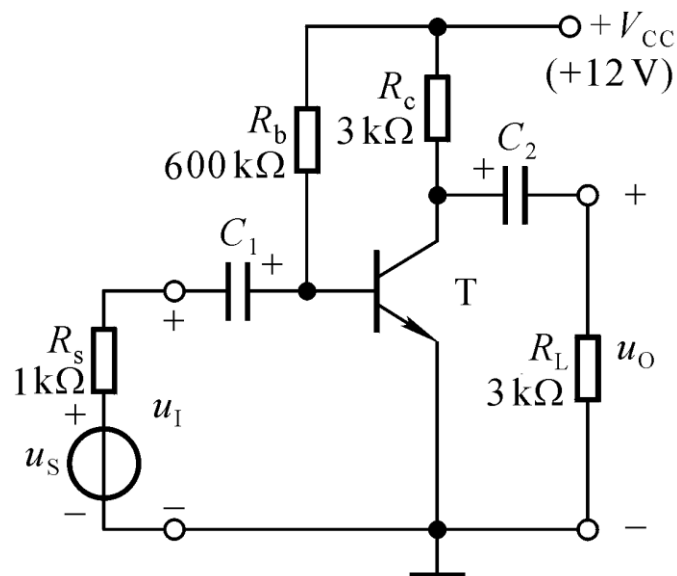
电压放大倍数  $A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-I_c R'_L}{I_b r_{be}} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \quad (R'_L = R_C // R_L)$

电流放大倍数  $A_i \approx \beta \frac{R'_L}{R_L}$

$$A_{uS} = \frac{U_o}{U_S} = \frac{U_o}{U_i} \times \frac{U_i}{U_S} \quad U_i = \frac{r_i}{R_S + r_i} U_S$$

## 讨论二

## 阻容耦合共射放大电路的静态分析



$$\beta = 80, \quad r_{be} = 1\text{ k}\Omega$$

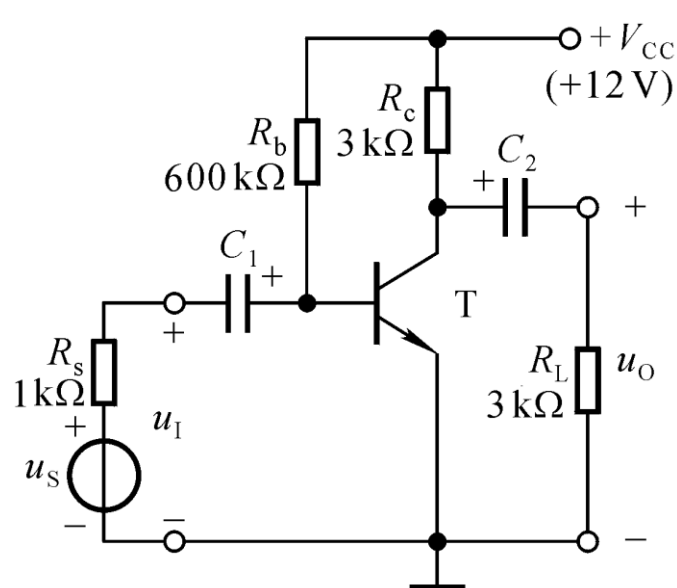
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b} \approx 20\mu\text{A}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} \approx 1.6\text{ mA}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c \approx 7.2\text{ V}$$



# 阻容耦合共射放大电路的动态分析



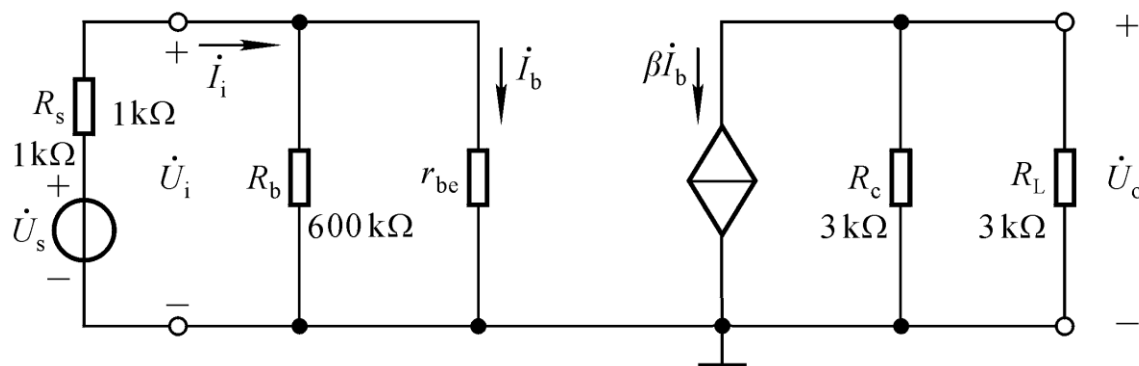
$$\beta = 80, \quad r_{be} = 1\text{k}\Omega$$

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}} \approx -120$$

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} \cdot \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}} =$$

$$R_i = R_b // r_{be} \approx 1\text{k}\Omega$$

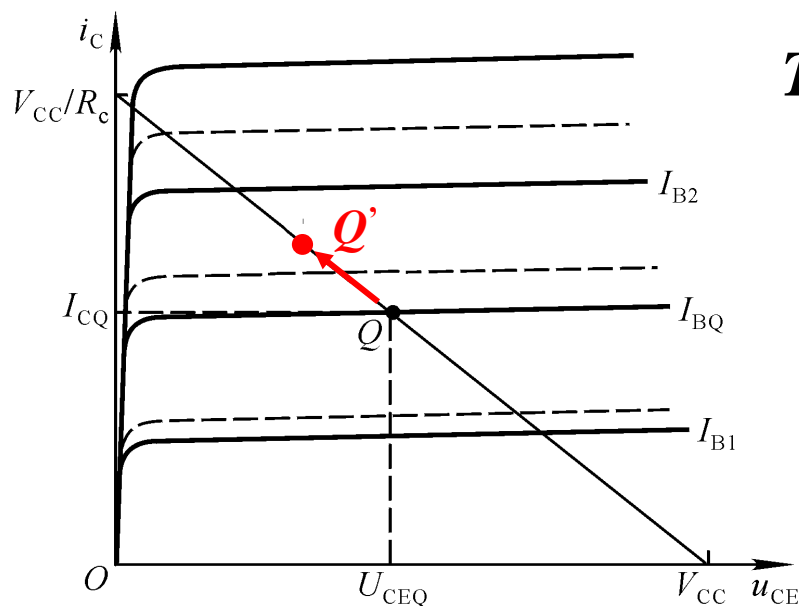
$$R_o = R_c = 3\text{k}\Omega$$



# **第三讲 静态工作点的稳定**

- 一、温度对静态工作点的影响**
- 二、静态工作点稳定的典型电路**
- 三、稳定静态工作点的方法**

# 一、温度对静态工作点的影响



$$T ( ^\circ\text{C} ) \rightarrow \beta \uparrow \rightarrow I_{CQ} \uparrow \rightarrow Q'$$

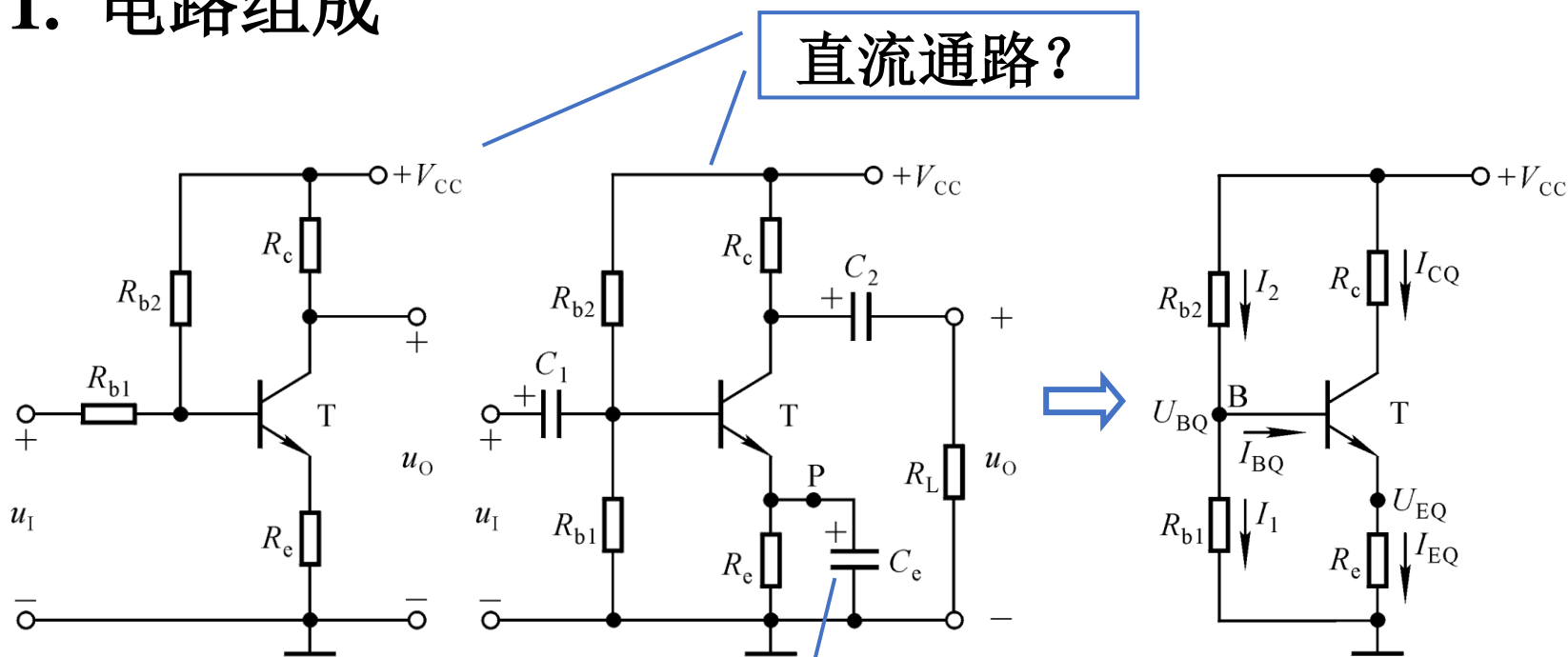
$$\begin{array}{l} \nearrow I_{CEO} \uparrow \\ \nearrow \text{若 } U_{CEQ} \text{ 不变 } I_{BQ} \uparrow \end{array}$$

若温度升高时要 $Q'$ 回到 $Q$ ,  
则只有减小 $I_{BQ}$

所谓 $Q$ 点稳定, 是指 $I_{CQ}$ 和 $U_{CEQ}$ 在温度变化时基本不变,  
这是靠 $I_{BQ}$ 的变化得来的。

## 二、静态工作点稳定的典型电路

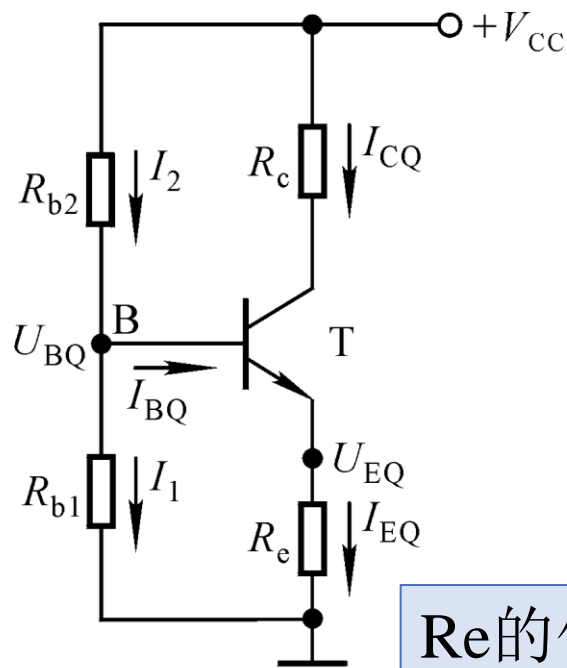
### 1. 电路组成



直流通路?

$C_e$ 为旁路电容，在交流通路中可视为短路

## 2. 稳定原理



为了稳定 $Q$ 点, 通常 $I_1 \gg I_B$ , 即  
 $I_1 \approx I_2$ ; 因此

$$U_{BQ} \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

基本不随温度变化。

Re的作用?

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

$U_{EQ}$ 远远大于 $\Delta U_{BE}$ , 近似认为 $U_{EQ}$ 电压稳定, 则 $I_{EQ}$   
稳定,  $I_{CQ}$ 稳定。

## $R_e$ 的作用

$$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow U_E \uparrow \rightarrow U_{BE} \downarrow \quad (U_B \text{基本不变}) \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$$

关于反馈的一些概念：

将输出量通过一定的方式引回输入回路影响输入量的措施称为反馈。

直流通路中的反馈称为直流反馈。

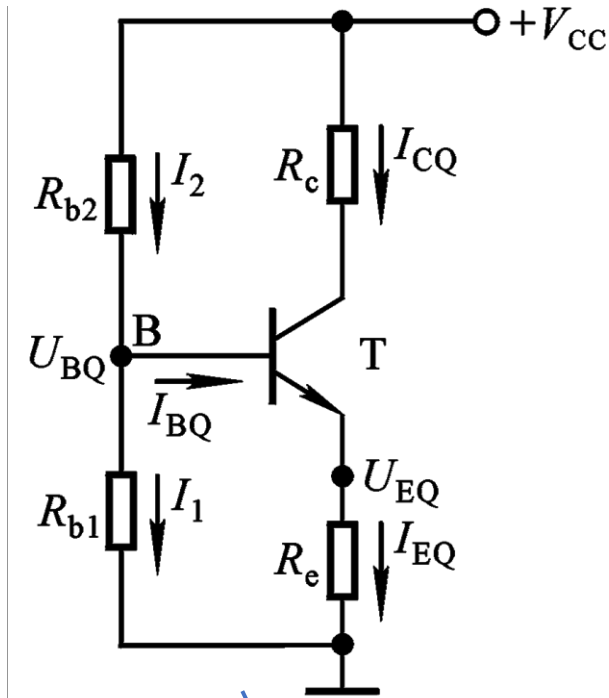
反馈的结果使输出量的变化减小的称为负反馈，反之称为正反馈。

$I_C$  通过  $R_e$  转换为  $\Delta U_E$  影响  $U_{BE}$

温度升高  $I_C$  增大，反馈的结果使之减小

$R_e$  起直流负反馈作用，其值越大，反馈越强， $Q$  点越稳定。

### 3. $Q$ 点分析



$$U_{BQ} \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

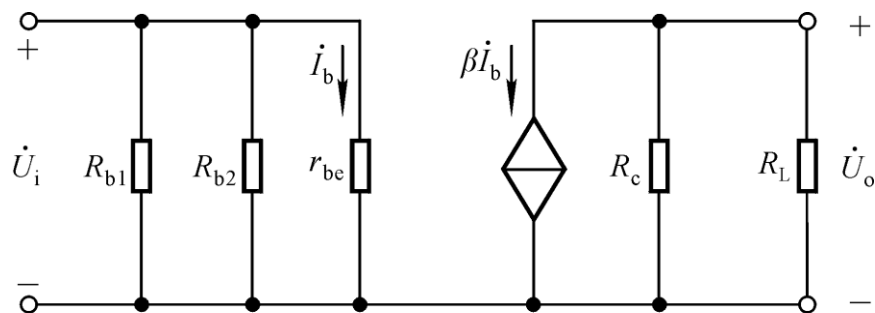
$$I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{\beta}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c - I_{EQ}R_e \\ \approx V_{CC} - I_{EQ}(R_c + R_e)$$

分压式电流负反馈工作点稳定电路

## 4. 动态分析

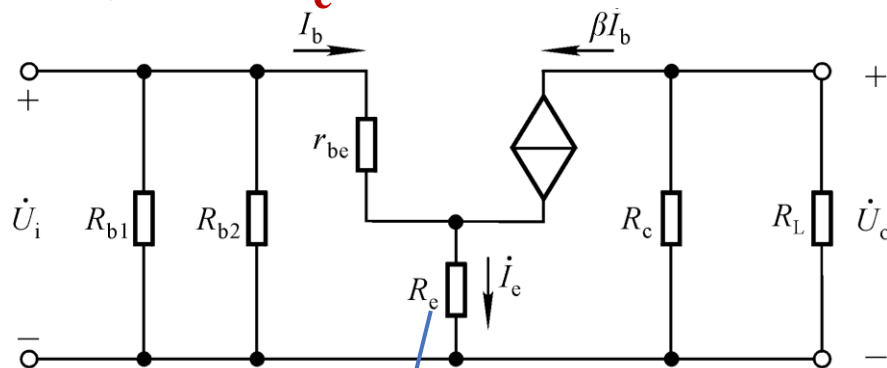


$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be}$$

$$R_o = R_c$$

无旁路电容 $C_e$ 时:



$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_e]$$

$$\begin{aligned} \dot{A}_u &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \\ &= \frac{-\beta \dot{I}_b (R_c // R_L)}{\dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_e} \\ &= -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} \end{aligned}$$

利?弊?

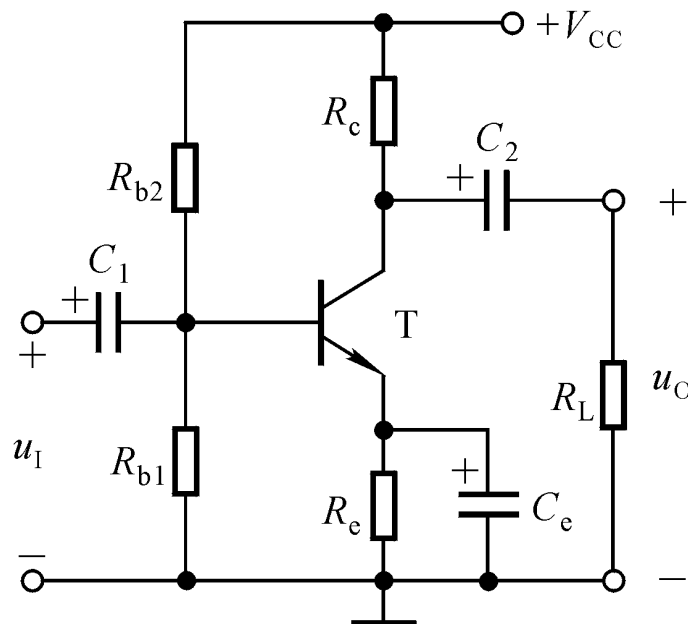
若 $(1 + \beta)R_e \gg r_{be}$ , 则 $A_u \approx -\frac{R'_L}{R_e}$



### 三、稳定静态工作点的方法

- 引入直流负反馈
- 温度补偿：利用对温度敏感的元件，在温度变化时直接影响输入回路。

例如， $R_{b1}$ 或 $R_{b2}$ 采用热敏电阻。 $R_{b1}$ 应具有负温度系数， $R_{b2}$ 应具有正温度系数。



$$\begin{array}{ccccccc} T(^{\circ}\text{C}) \uparrow & \rightarrow & I_C \uparrow & \rightarrow & U_E \uparrow & \rightarrow & U_{BE} \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow \\ & \searrow & & & & & \\ & & R_{b1} \downarrow & \rightarrow & U_B \downarrow & \nearrow & \end{array}$$

## 第四讲 晶体管放大电路的三种接法

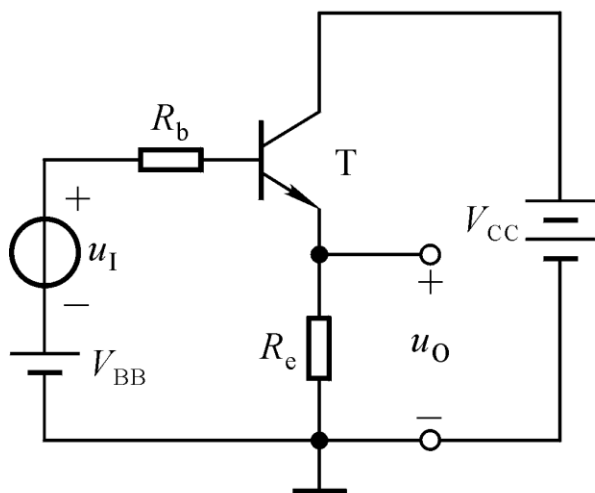
一、基本共集放大电路

二、基本共基放大电路

三、三种接法放大电路的比较

# 一、基本共集放大电路

## 1. 静态分析



$$V_{BB} = I_{BQ} R_b + U_{BEQ} + I_{EQ} R_e$$

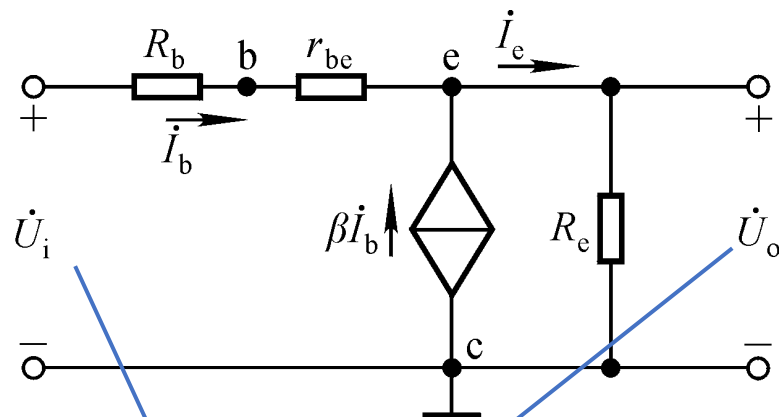
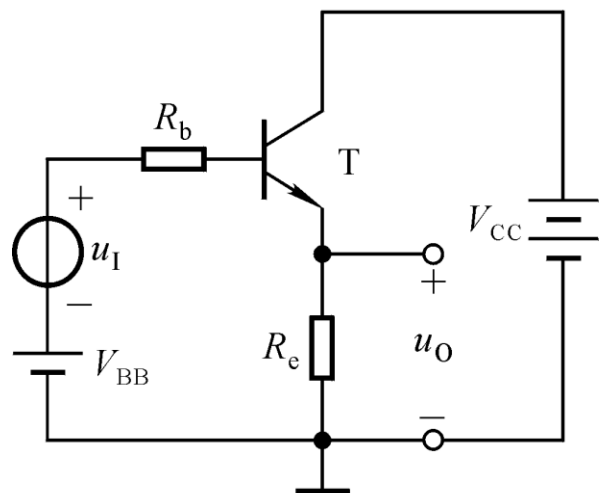
$$V_{CC} = U_{CEQ} + I_{EQ} R_e$$

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta) R_e}$$

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

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ} R_e$$

## 2. 动态分析：电压放大倍数



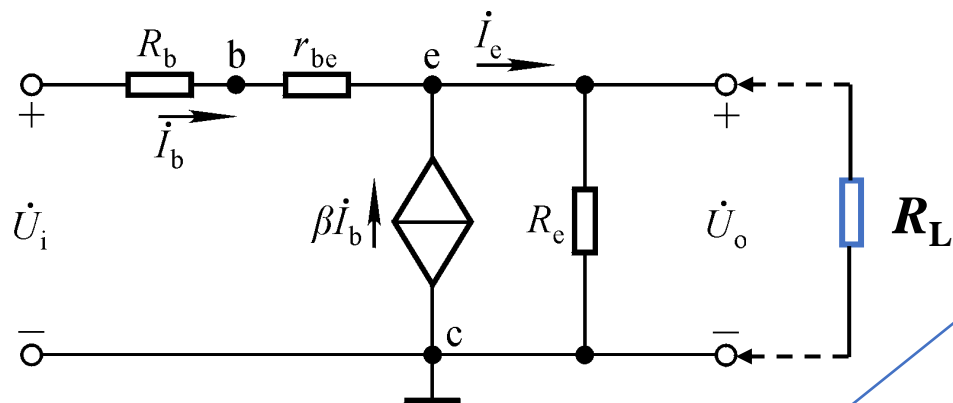
$$\begin{aligned}\dot{A}_u &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{I}_e R_e}{\dot{I}_b (R_b + r_{be}) + \dot{I}_e R_e} \\ &= \frac{(1 + \beta) R_e}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) R_e}\end{aligned}$$

$$U_o < U_i$$

故称之为射  
极跟随器

若  $(1 + \beta) R_e \gg R_b + r_{be}$ , 则  $\dot{A}_u \approx 1$ , 即  $U_o \approx U_i$ 。

## 2. 动态分析：输入电阻的分析



从基极看  $R_e$ ,  
被增大到  $1+\beta$  倍

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{I_b} = R_b + r_{be} + (1 + \beta)R_e$$

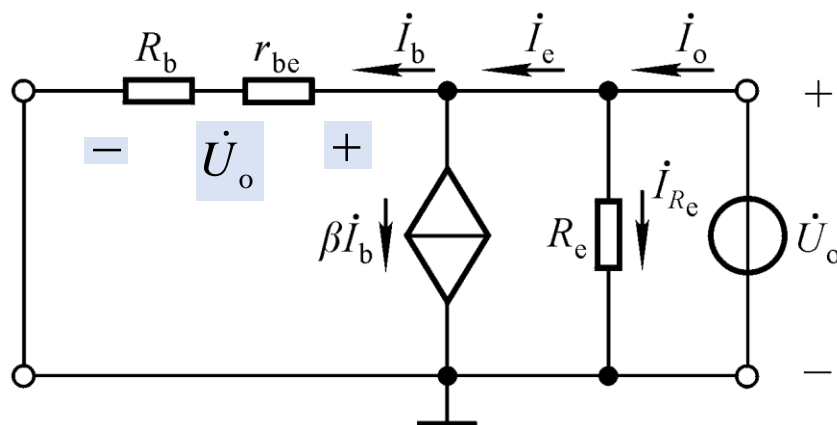
带负载电阻后

$$R_i = R_b + r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)$$

**$R_i$  与负载有关!**

## 2. 动态分析：输出电阻的分析

令 $U_s$ 为零，保留 $R_s$ ，在输出端加 $U_o$ ，产生 $I_o$ ， $R_o = U_o / I_o$



**$R_o$ 与信号源内阻有关！**

$$\begin{aligned} R_o &= \frac{U_o}{I_o} = \frac{U_o}{I_{R_e} + I_e} \\ &= \frac{U_o}{\frac{U_o}{R_e} + (1 + \beta) \frac{U_o}{R_b + r_{be}}} \\ &= R_e // \frac{R_b + r_{be}}{1 + \beta} \end{aligned}$$

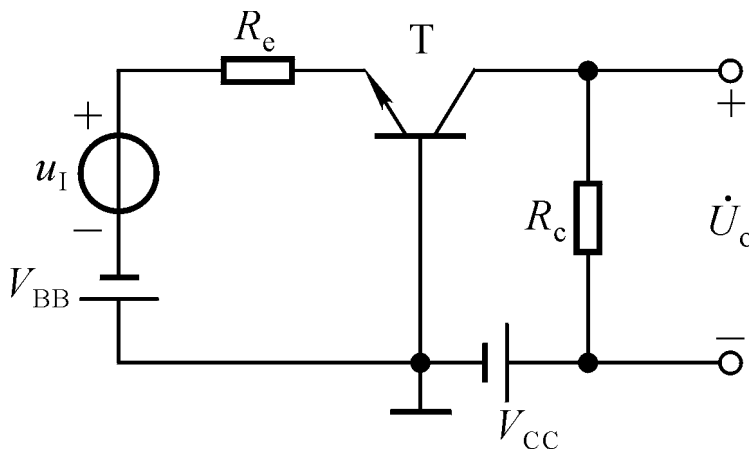
从射极看基极  
回路电路，被  
减小到 $1+\beta$ 倍

## 3. 特点

**输入电阻大，输出电阻小；只放大电流，不放大电压；  
在一定条件下有电压跟随作用！**

## 二、基本共基放大电路

### 1. 静态分析

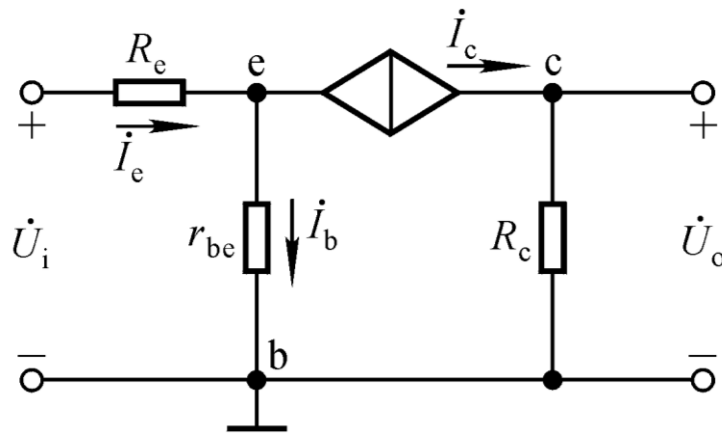
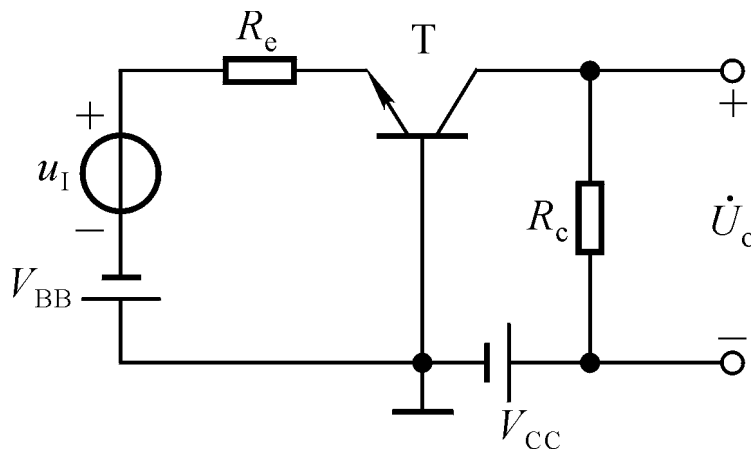


$$\begin{cases} U_{BEQ} + I_{EQ}R_e = V_{BB} \\ I_{CQ}R_c + U_{CEQ} - U_{BEQ} = V_{CC} \end{cases}$$

$$I_{EQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_e} \quad I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$$

$$U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{EQ}R_c + U_{BEQ}$$

## 2. 动态分析



$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{i}_c R_c}{\dot{i}_e R_e + \dot{i}_b r_{be}} = \frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$

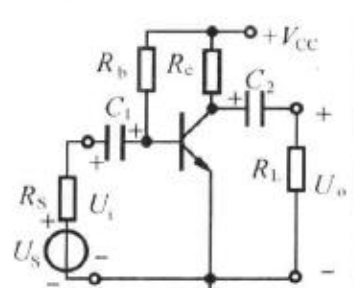
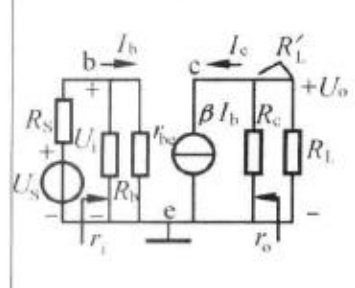
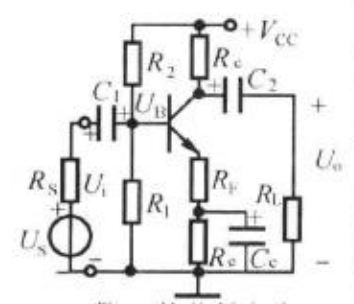
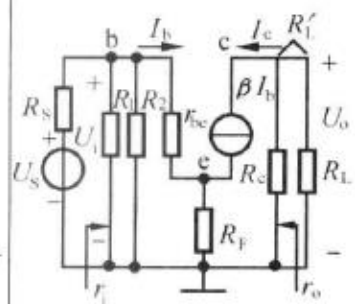
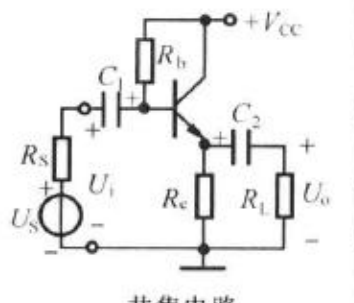
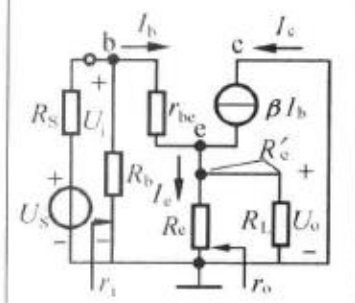
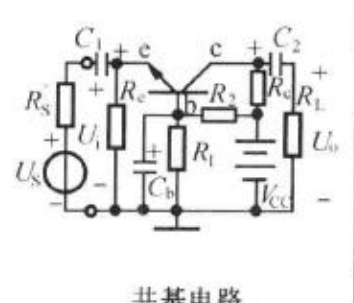
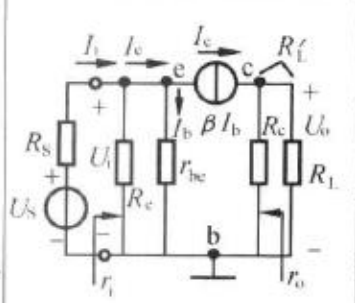
$$R_i = R_e + \frac{r_{be}}{(1 + \beta)}$$

$$R_o = R_c$$

## 3. 特点:

输入电阻小，频带宽！只放大电压，不放大电流！



 <p>共射电路</p>	$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_b}$ $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$ $U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} \cdot R_c$		$A_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \text{ (高)}$ $r_i = R_b // r_{be}$ $r_o \approx R_c \text{ (高)}$ <p>多级放大电路的中间级</p>
 <p>带 <math>R_F</math> 的共射电路</p>	$U_B = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{CC}$ $I_{CQ} = \frac{U_B - U_{BE}}{R_f + R_e}$ $I_{BQ} = I_{CQ} / \beta$ $U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} (R_c + R_f + R_e)$		$A_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_f}$ $r_i = R_1 // R_2 // [r_{be} + (1 + \beta) R_f] \text{ (高)}$ <p>多级放大电路的中间级</p>
 <p>共集电路</p>	$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_b + (1 + \beta) R_e}$ $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$ $U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} \cdot R_e$		$A_u = \frac{(1 + \beta) R'_e}{r_{be} + (1 + \beta) R'_e} \text{ (低)}$ $r_i = R_b // [r_{be} + (1 + \beta) R'_e] \text{ (高)}$ $r_o = R_e // \frac{r_{be} + R_s // R_b}{1 + \beta} \text{ (低)}$ <p>输入级 输出级 缓冲级</p>
 <p>共基电路</p>	$U_B = \frac{R_1}{R_1 + R_1} V_{CC}$ $I_{CQ} = \frac{U_B - U_{BE}}{R_e}$ $I_{BQ} = I_{CQ} / \beta$ $U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} \cdot (R_c + R_e)$		$A_u = \frac{\beta R'_L}{r_{be}} \text{ (高)}$ $r_i = R_e // \frac{r_{be}}{1 + \beta} \text{ (低)}$ $r_o \approx R_c \text{ (高)}$ <p>高频, 宽频带电路, 恒流源电路</p>

### 三、三种接法的比较

综上所述，晶体管放大电路三种基本接法的特点归纳如下：

(1) **共射电路**既能放大电流又能放大电压，其输入电阻和输出电阻比较适中。

(2) **共集电路**只能放大电流不能放大电压，在三种接法中输入电阻最大、输出电阻最小，并具有电压跟随的特点。常用作多级放大电路的输入级和输出级。

(3) **共基电路**只能放大电压不能放大电流，输入电阻小，电压放大倍数和输出电阻与共射电路相当，在三种组态中频率特性最好，常用作宽频带放大电路。

# **第五讲 场效应管及其放大电路**

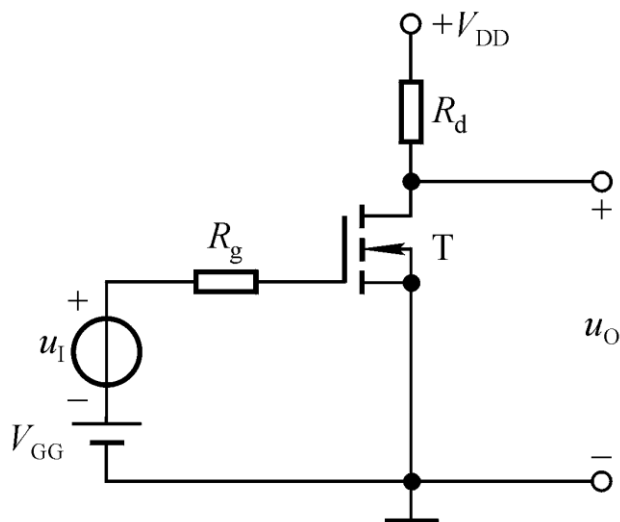
**一、场效应管放大电路静态工作点的设置方法**

**二、场效应管放大电路的动态分析**

# 一、场效应管静态工作点的设置方法

## 1. 基本共源放大电路

根据场效应管工作在恒流区的条件，在g-s、d-s间加极性合适的电源

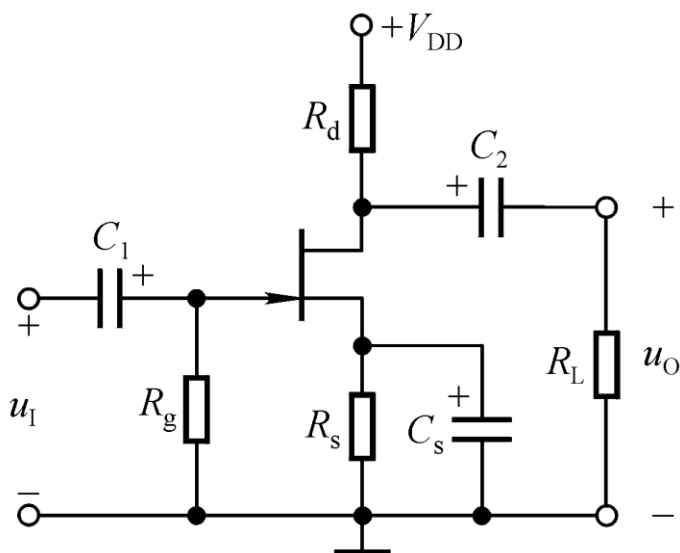


$$U_{GSQ} = V_{BB}$$

$$I_{DQ} = I_{DO} \left( \frac{V_{BB}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$$

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_d$$

## 2. 自给偏压电路



$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}}\right)^2$$

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ}(R_d + R_s)$$

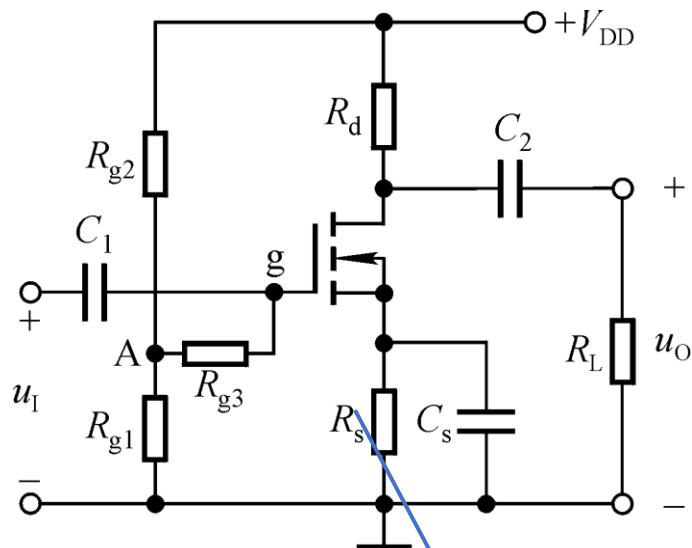
$$U_{GQ} = 0, \quad U_{SQ} = I_{DQ}R_s$$
$$U_{GSQ} = U_{GQ} - U_{SQ} = -I_{DQ}R_s$$

自给偏压  
由正电源获得负偏压

哪种场效应管能够采用这种电路形式设置 $Q$ 点？

### 3. 分压式偏置电路

即典型的 $Q$ 点稳定电路



为什么加 $R_{g3}$ ?

$$U_{GQ} = U_{AQ} = \frac{R_{g1}}{R_{g1} + R_{g2}} \cdot V_{DD}$$

$$U_{SQ} = I_{DQ} R_s$$

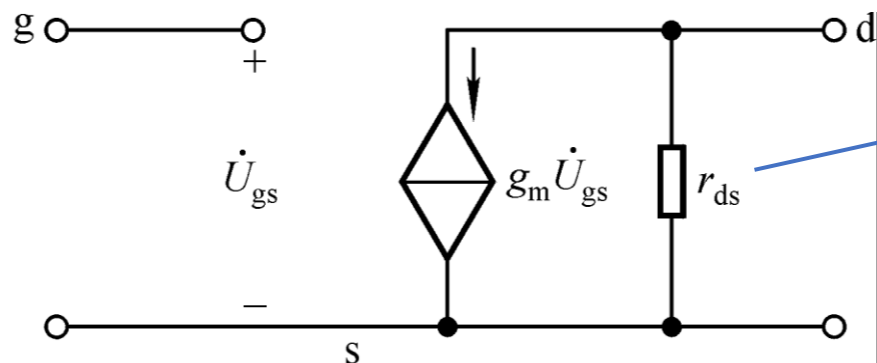
$$I_D = I_{DO} \left( \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$$

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} (R_d + R_s)$$

## 二、场效应管放大电路的动态分析

### 1. 场效应管的交流等效模型

与晶体管的 $h$ 参数等效模型类比：

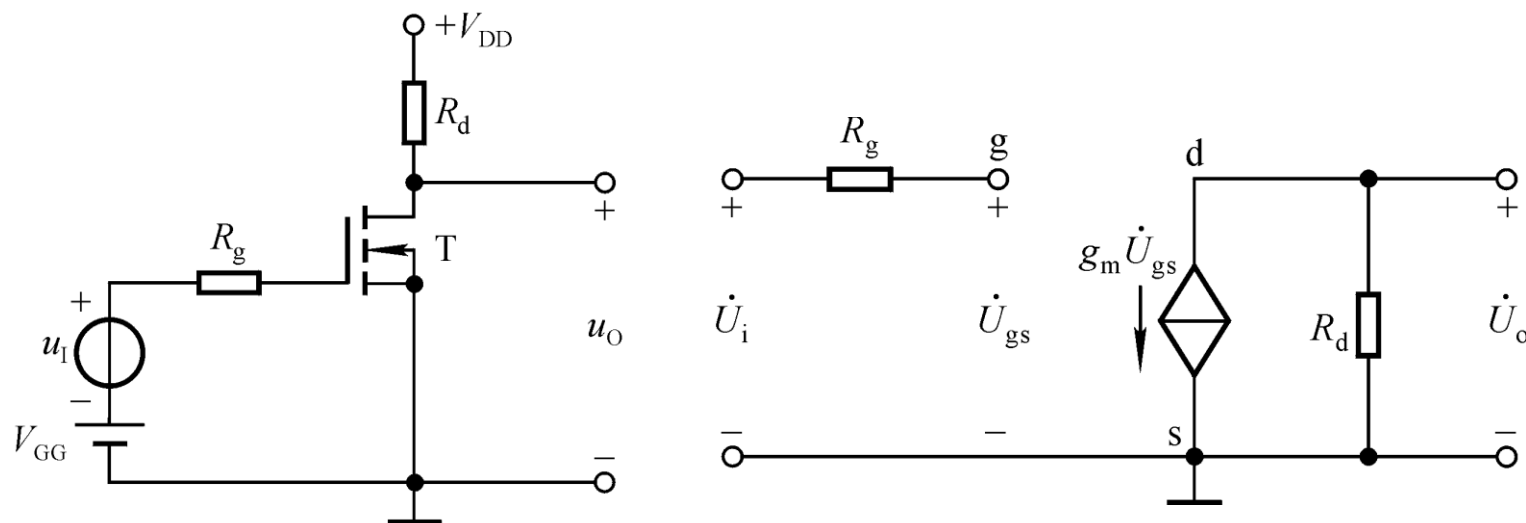


近似分析时可认为其为无穷大！

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{U_{DS}}$$

根据 $i_D$ 的表达式或转移特性可求得 $g_m$ 。

## 2. 基本共源放大电路的动态分析



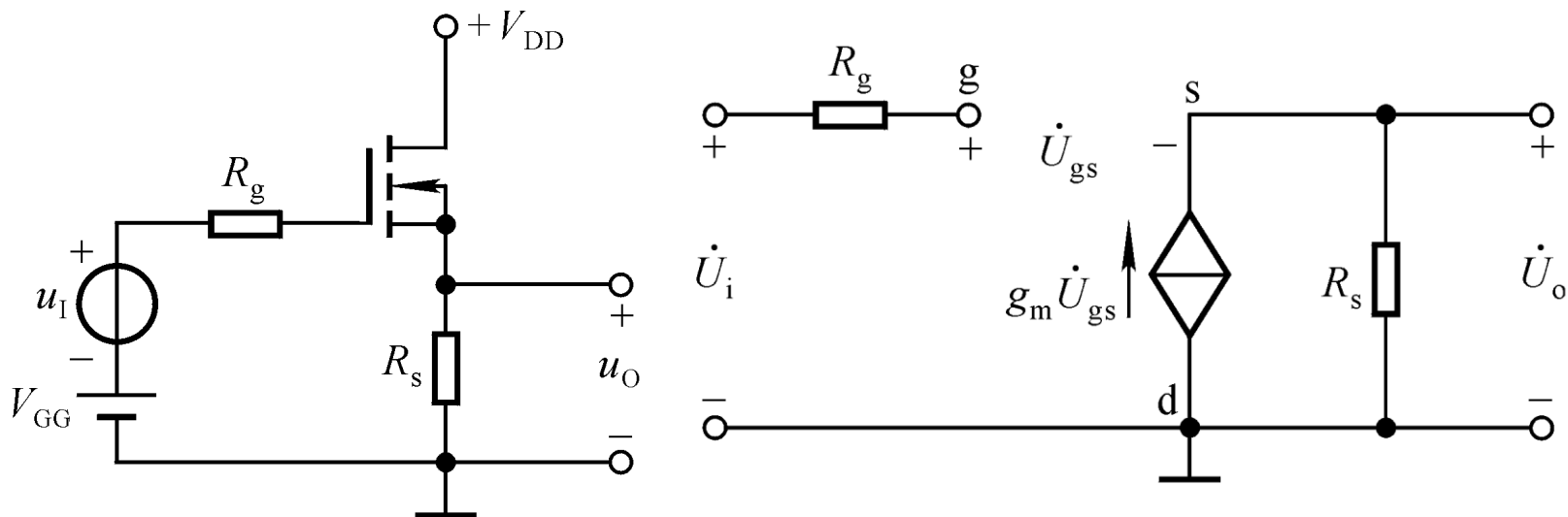
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\dot{I}_d R_d}{\dot{U}_{gs}} = -g_m R_d$$

$$R_i = \infty$$

$$R_o = R_d$$



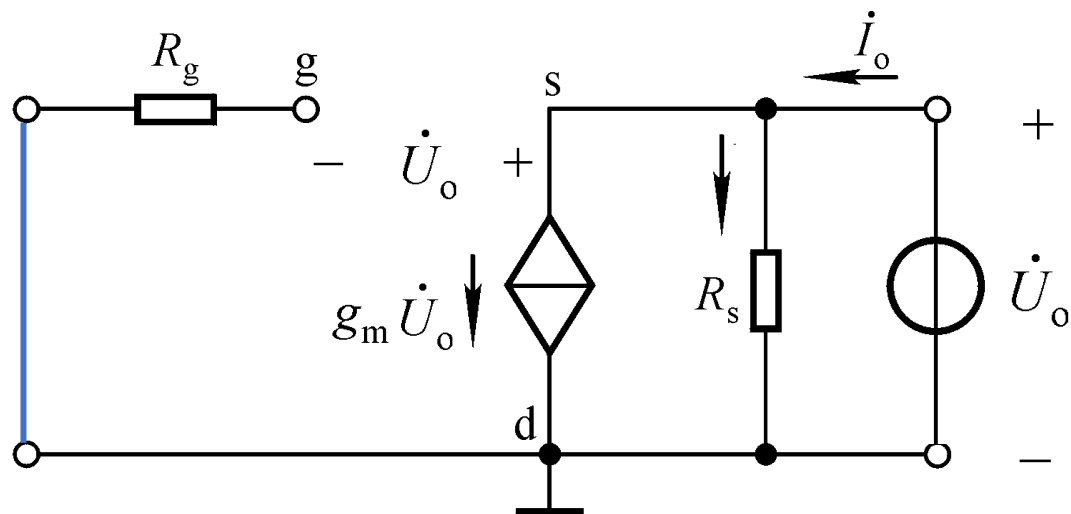
### 3. 基本共漏放大电路的动态分析



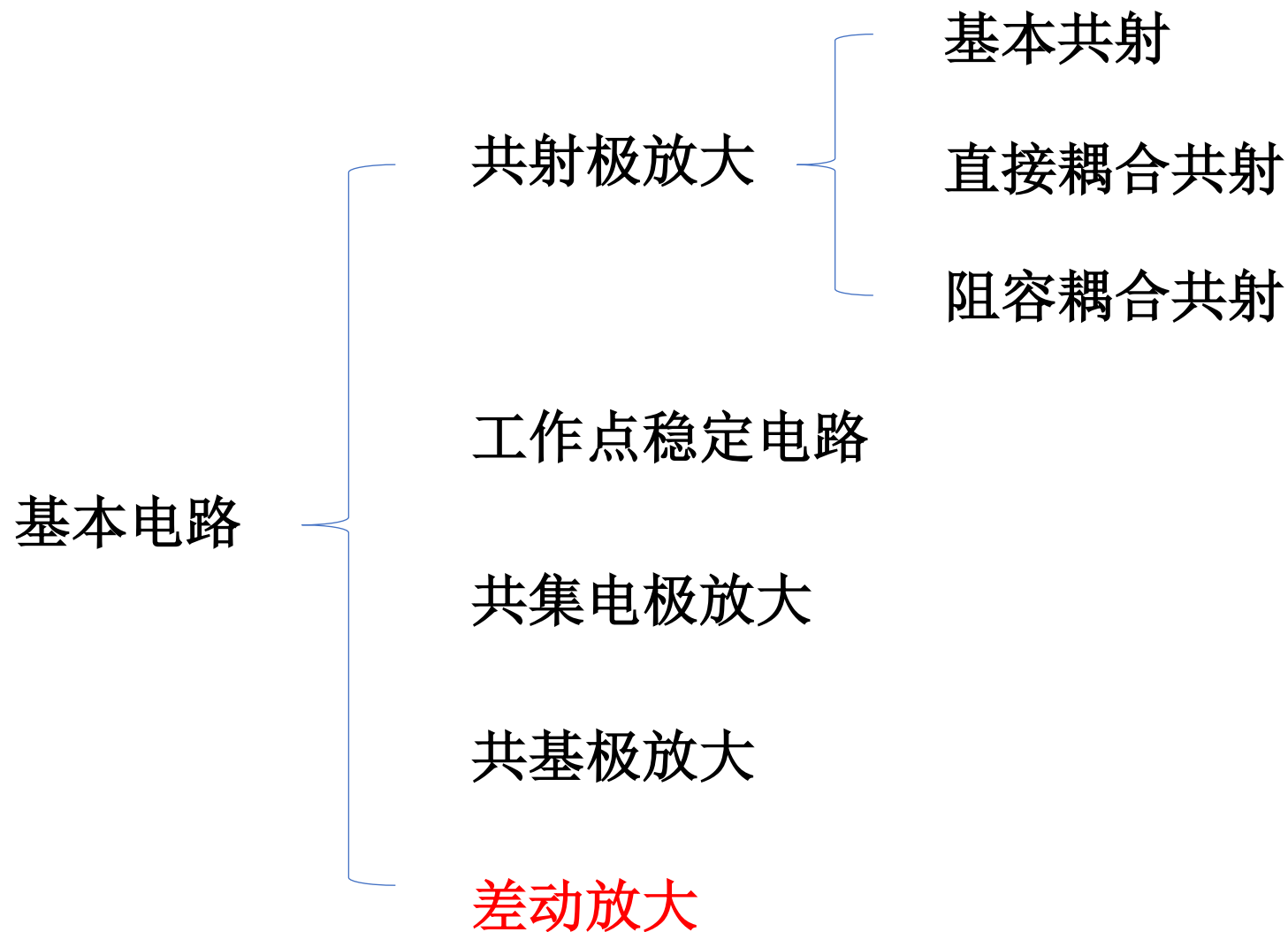
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{I}_d R_s}{\dot{U}_{gs} + \dot{I}_d R_s} = \frac{g_m R_s}{1 + g_m R_s}$$

$$R_i = \infty$$

# 基本共漏放大电路输出电阻的分析



$$R_o = \frac{U_o}{I_o} = \frac{U_o}{\frac{U_o}{R_s} + g_m U_o} = R_s // \frac{1}{g_m}$$

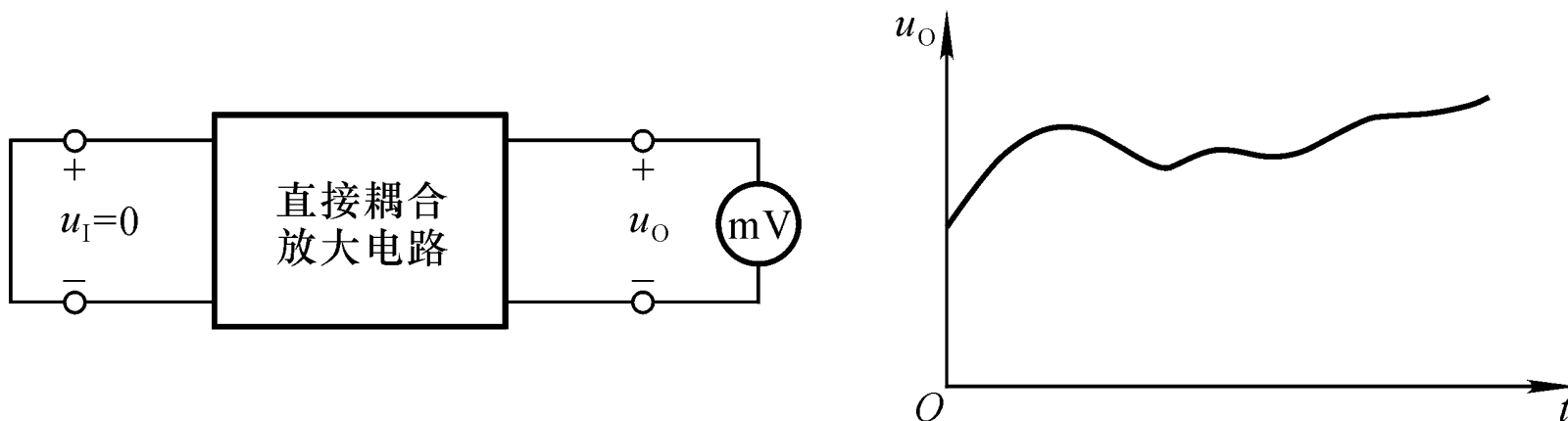


## **第六讲 差分放大电路**

- 一、零点漂移现象及其产生的原因**
- 二、长尾式差分放大电路的组成**
- 三、长尾式差分放大电路的分析**
- 四、差分放大电路的四种接法**
- 五、具有恒流源的差分放大电路**

# 一、零点漂移现象及其产生的原因

1. 什么是零点漂移现象：  $\Delta u_I = 0$ ，  $\Delta u_O \neq 0$  的现象。

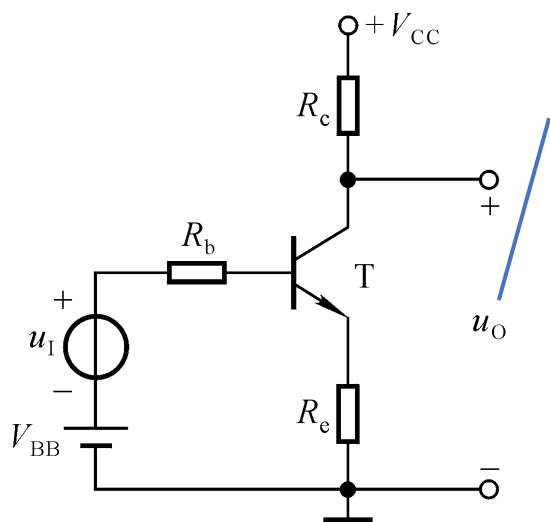


产生原因：温度变化，直流电源波动，元器件老化。其中晶体管的特性对温度敏感是主要原因，故也称零漂为温漂。

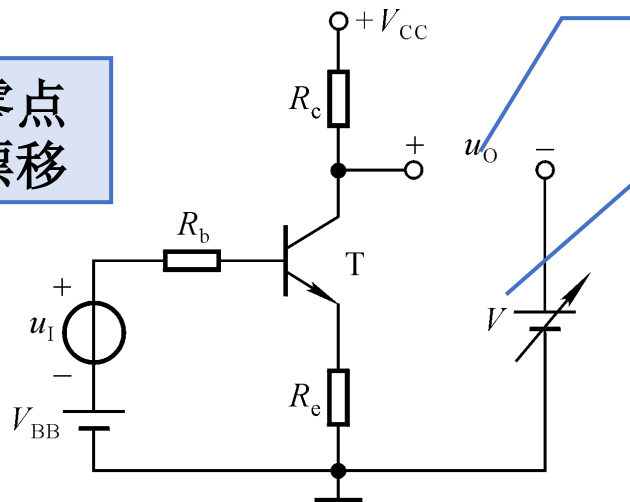
克服温漂的方法：引入直流负反馈，温度补偿。

典型电路：差分放大电路

## 二、长尾式差分放大电路的组成



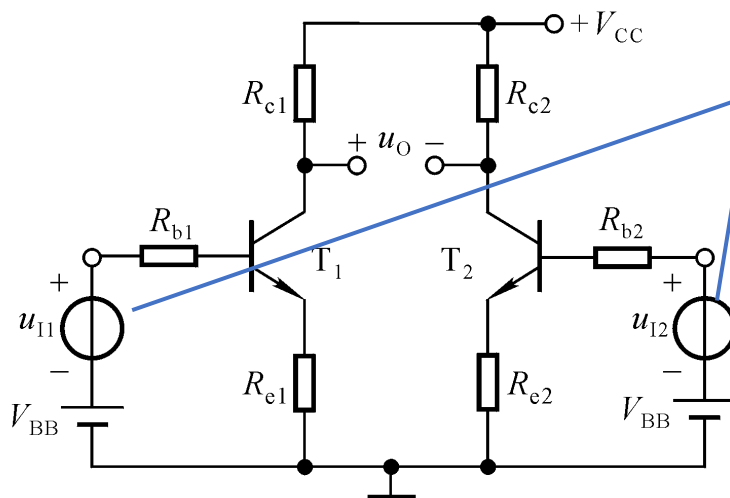
零点  
漂移



零输入  
零输出

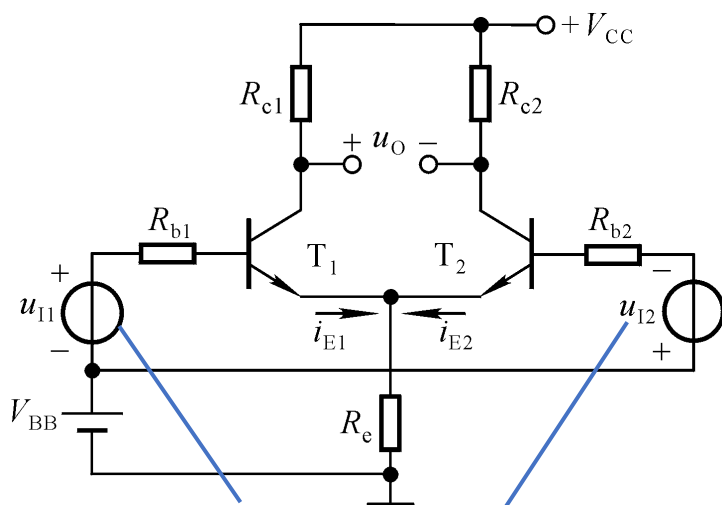
若 $V$ 与 $U_C$ 的  
变化一样，  
则输出电压  
就没有漂移

参数理想对称：  
 $R_{b1} = R_{b2}$ ， $R_{c1} = R_{c2}$ ，  
 $R_{e1} = R_{e2}$ ；  
 $T_1$ 、 $T_2$ 在任何温度  
下特性均相同。



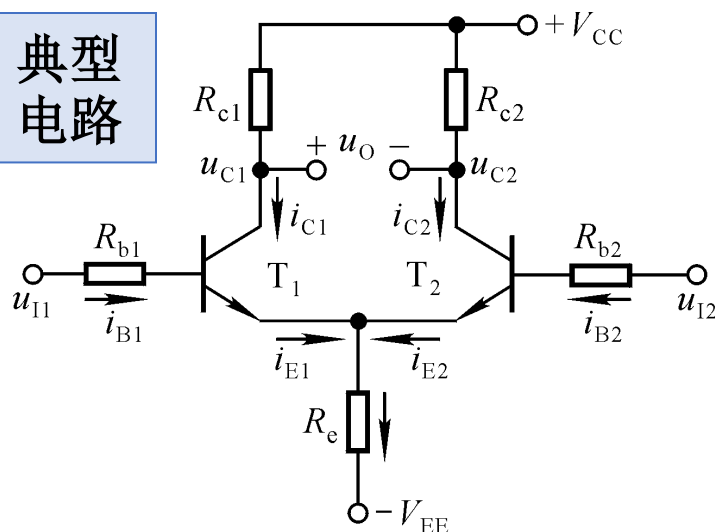
信号特点？  
能否放大？

# 长尾式差分放大电路的组成特点



信号特点?

典型电路

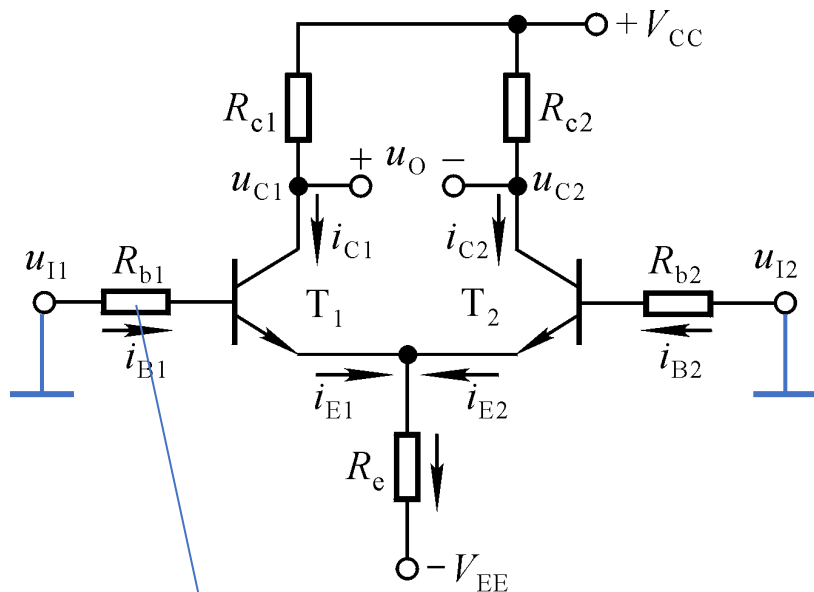


在理想对称的情况下:

1. 克服零点漂移;
2. 零输入零输出。(负载没有直流分量)

### 三、长尾式差分放大电路的分析

1.  $Q$ 点: 令  $u_{I1} = u_{I2} = 0$



$R_b$ 是必要的吗?

$$I_{BQ1} = I_{BQ2} = I_{BQ}$$

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} = I_{CQ}$$

$$I_{EQ1} = I_{EQ2} = I_{EQ}$$

$$U_{CQ1} = U_{CQ2} = U_{CQ}$$

$$u_O = U_{CQ1} - U_{CQ2} = 0$$

$$V_{EE} = I_{BQ} R_b + U_{BEQ} + 2I_{EQ} R_e$$

因为  $R_b$  小, 且  $I_{BQ}$  很小, 所以

$$I_{EQ} \approx \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{2R_e}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}, \quad U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ} R_c + U_{BEQ}$$



## 2. 抑制共模信号

共模信号：数值相等、极性相同的输入信号，即

$$u_{I1} = u_{I2} = u_{Ic}$$

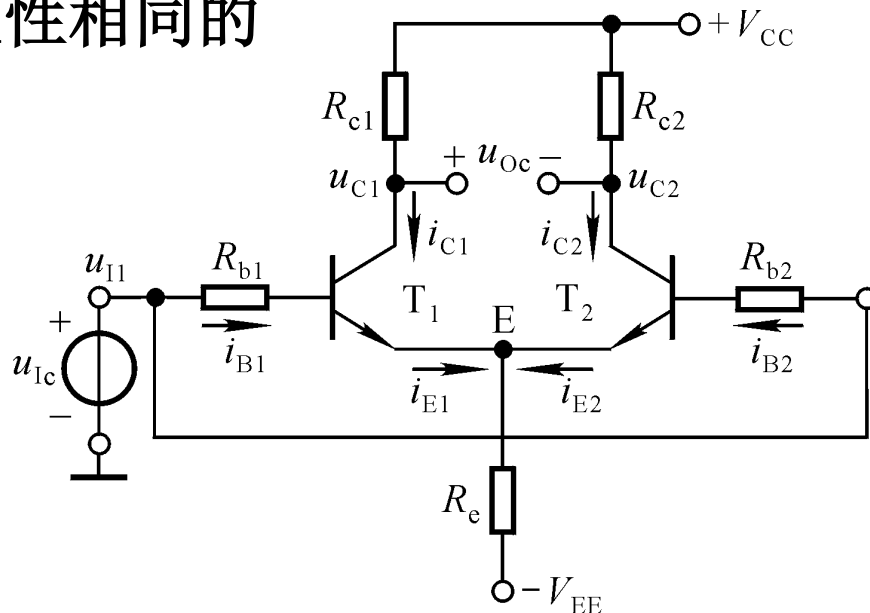
$$\Delta i_{B1} = \Delta i_{B2}$$

$$\Delta i_{C1} = \Delta i_{C2}$$

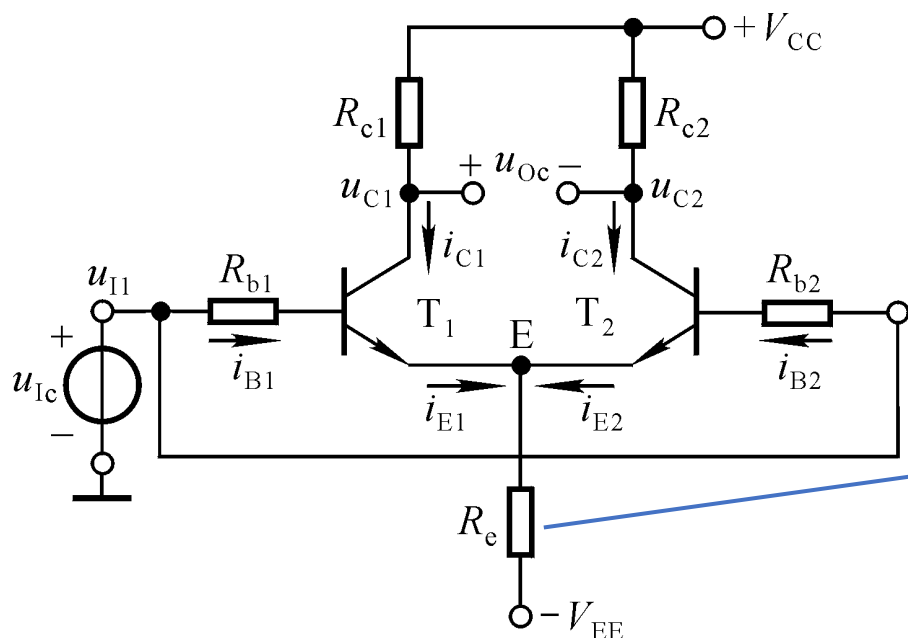
$$\Delta u_{C1} = \Delta u_{C2}$$

$$u_O = u_{C1} - u_{C2} = (u_{CQ1} + \Delta u_{C1}) - (u_{CQ2} + \Delta u_{C2}) = 0$$

$$\text{共模放大倍数 } A_c = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}}, \text{ 参数理想对称时 } A_c = 0$$



## 2. 抑制共模信号： $R_e$ 的共模负反馈作用



$$\text{共模放大倍数 } A_c = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}}$$

参数理想对称时  $A_c = 0$

对于每一边  
电路， $R_e = ?$

$R_e$ 的共模负反馈作用：温度变化所引起的变化等效为共模信号

如  $T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_{C1} \uparrow I_{C2} \uparrow \rightarrow U_E \uparrow \rightarrow I_{B1} \downarrow I_{B2} \downarrow \rightarrow I_{C1} \downarrow I_{C2} \downarrow$

抑制了每只差分管集电极电流、电位的变化。

## 2. 抑制共模信号

抑制共模信号原理总结：

- (1) 电路的理想对称性和双端输出方式
- (2)  $R_e$  的共模负反馈作用

### 3. 放大差模信号

差模信号：数值相等，极性相反的输入信号，即

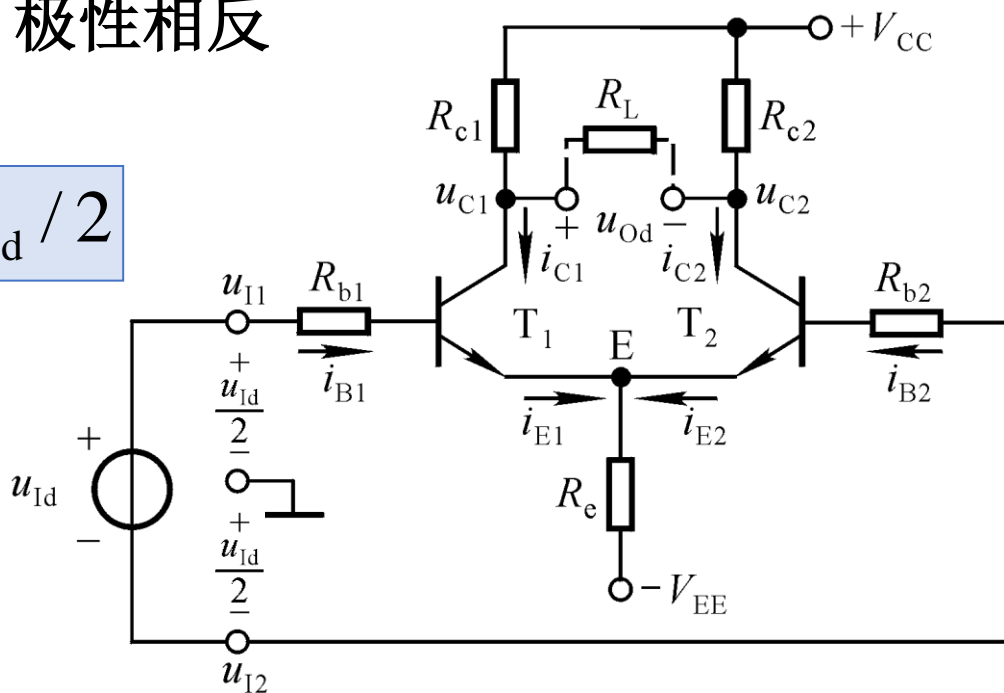
$$u_{I1} = -u_{I2} = u_{Id} / 2$$

$$\Delta i_{B1} = -\Delta i_{B2}$$

$$\Delta i_{C1} = -\Delta i_{C2}$$

$$\Delta u_{C1} = -\Delta u_{C2}$$

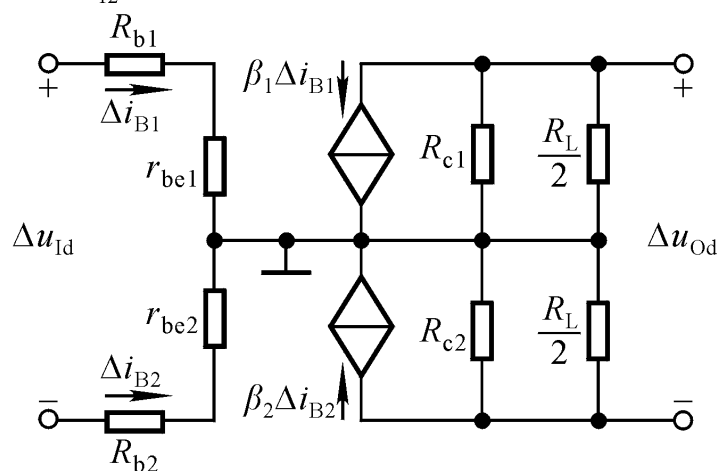
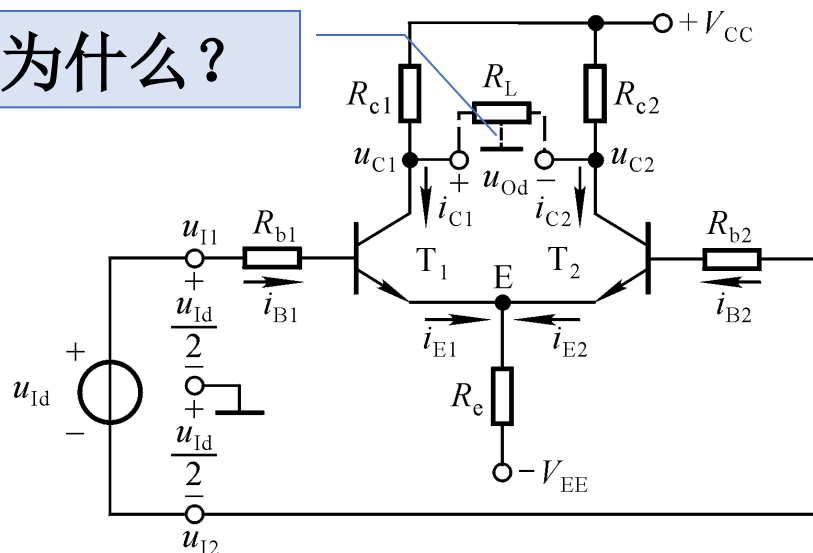
$$\Delta u_O = 2\Delta u_{C1}$$



$\Delta i_{E1} = -\Delta i_{E2}$ ,  $R_e$  中电流不变，即  $R_e$  对差模信号无反馈作用。

# 差模信号作用时的动态分析

为什么？



差模放大倍数

$$A_d = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}}$$

$$A_d = -\frac{\beta (R_c // \frac{R_L}{2})}{R_b + r_{be}}$$

$$R_i = 2(R_b + r_{be}), \quad R_o = 2R_c$$

$$\Delta u_{Id} = \Delta i_B \cdot 2(R_b + r_{be})$$

$$\Delta u_{Od} = -\Delta i_C \cdot 2(R_c // \frac{R_L}{2})$$

#### 4. 动态参数： $A_d$ 、 $R_i$ 、 $R_o$ 、 $A_c$ 、 $K_{CMR}$

共模抑制比 $K_{CMR}$ ：综合考察差分放大电路放大差模信号的能力和抑制共模信号的能力。

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

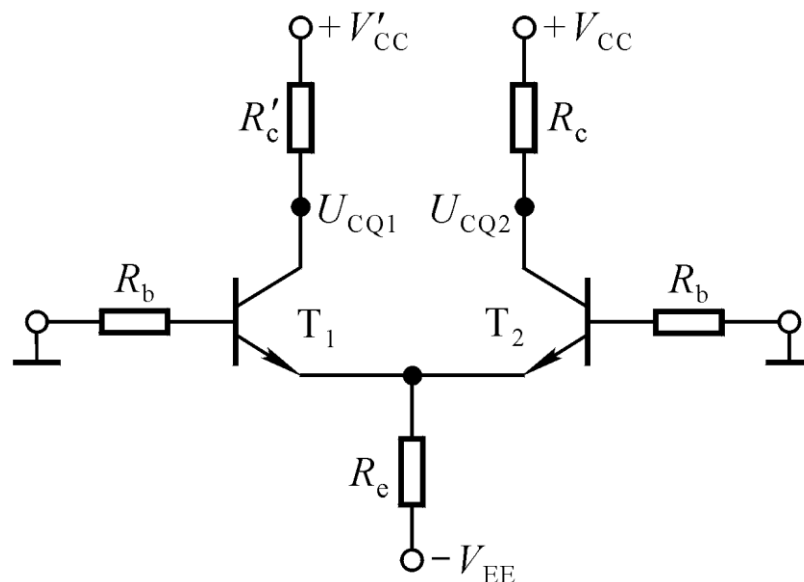
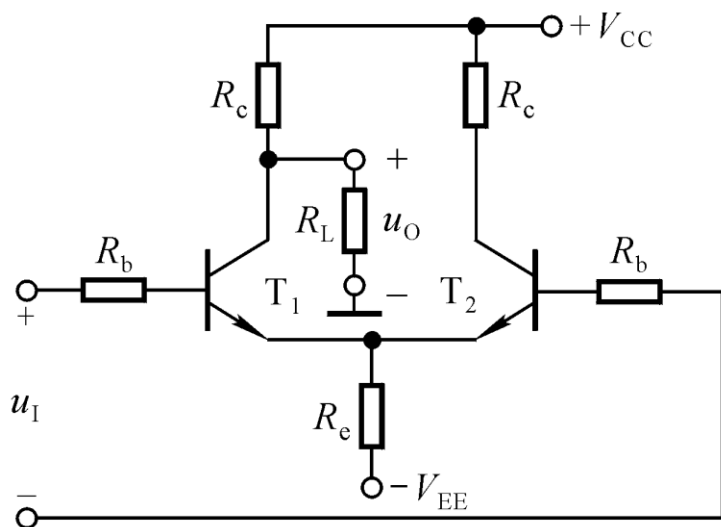
在参数理想对称的情况下， $K_{CMR} = \infty$ 。

在实际应用时，信号源需要有“接地”点，以避免干扰；或负载需要有“接地”点，以安全工作。

根据信号源和负载的接地情况，差分放大电路有四种接法：双端输入双端输出、双端输入单端输出、单端输入双端输出、单端输入单端输出。

## 四、差分放大电路的四种接法

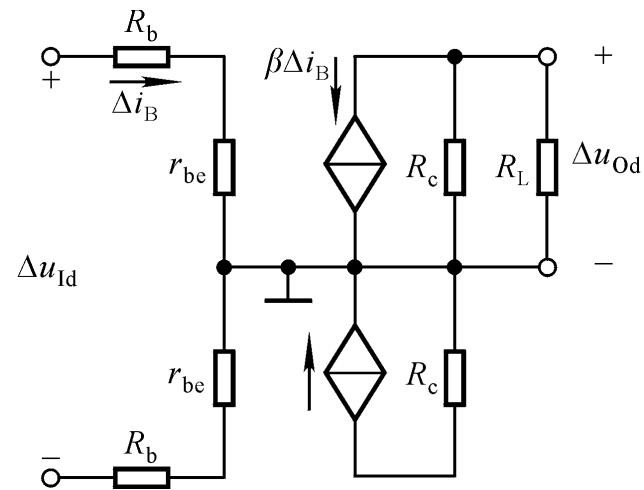
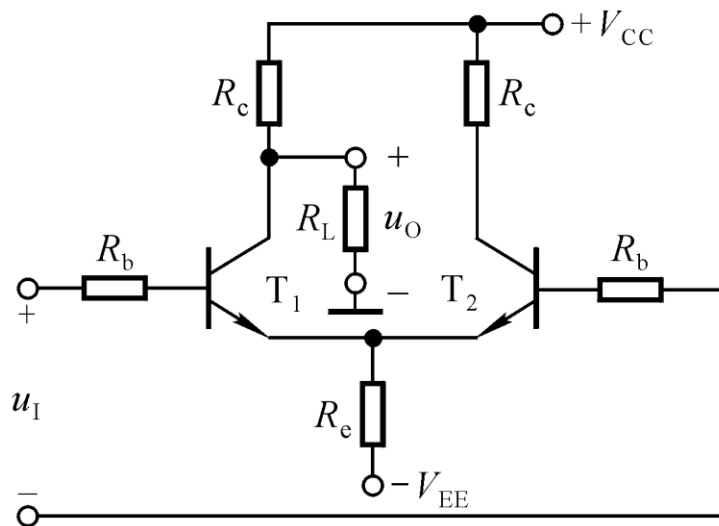
### 1. 双端输入单端输出： $Q$ 点分析



由于输入回路没有变化，所以 $I_{EQ}$ 、 $I_{BQ}$ 、 $I_{CQ}$ 与双端输出时一样。但是 $U_{CEQ1} \neq U_{CEQ2}$ 。

$$U_{CQ1} = \frac{R_L}{R_c + R_L} \cdot V_{CC} - I_{CQ}(R_c // R_L)$$
$$U_{CQ2} = V_{CC} - I_{CQ}R_c$$

# 1. 双端输入单端输出：差模信号作用下的分析

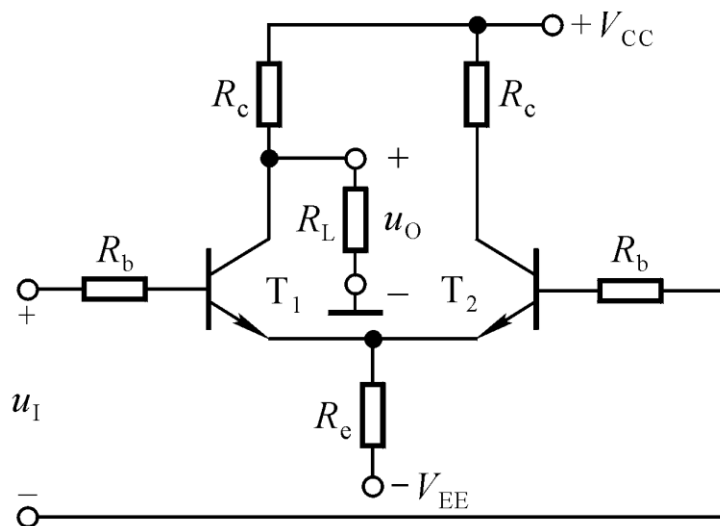


$$A_d = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

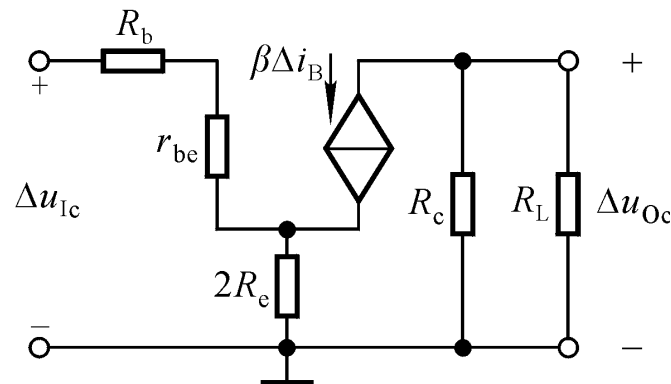
$$R_i = 2(R_b + r_{be}), \quad R_o = R_c$$



# 1. 双端输入单端输出：共模信号作用下的分析



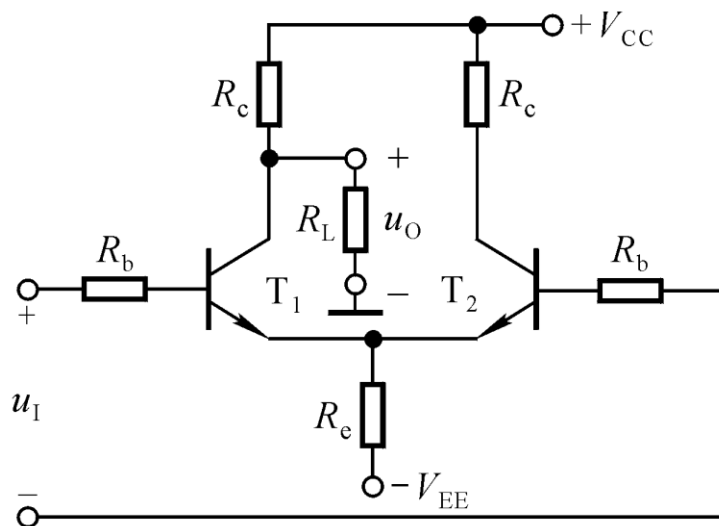
$$A_d = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$



$$A_c = -\frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}$$

$$K_{CMR} = \frac{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}{2(R_b + r_{be})}$$

# 1. 双端输入单端输出：问题讨论



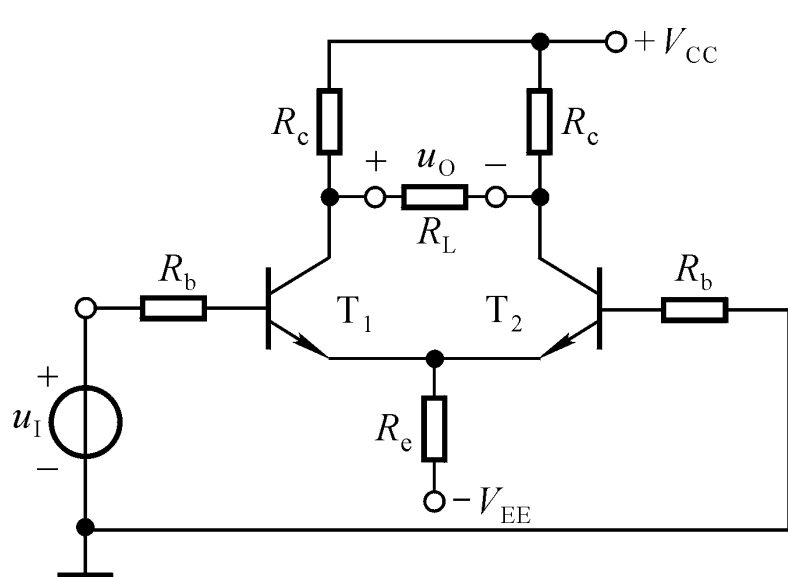
$$A_d = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

$$K_{CMR} = \frac{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}{2(R_b + r_{be})}$$

$$R_i = 2(R_b + r_{be}), \quad R_o = R_c$$

- (1)  $T_2$ 的 $R_c$ 可以短路吗？
- (2) 什么情况下 $A_d$ 为“+”？
- (3) 双端输出时的 $A_d$ 是单端输出时的2倍吗？

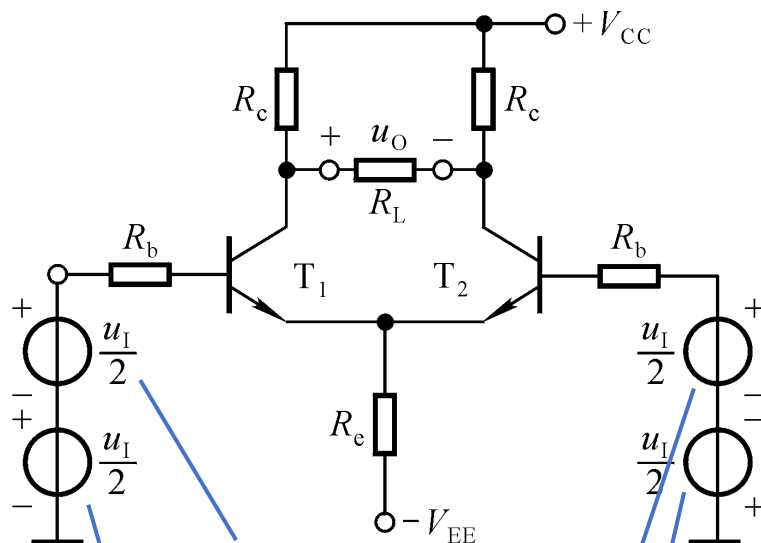
## 2. 单端输入双端输出



在输入信号作用下发射极的电位变化吗？说明什么？

输入差模信号的同时总是伴随着共模信号输入：

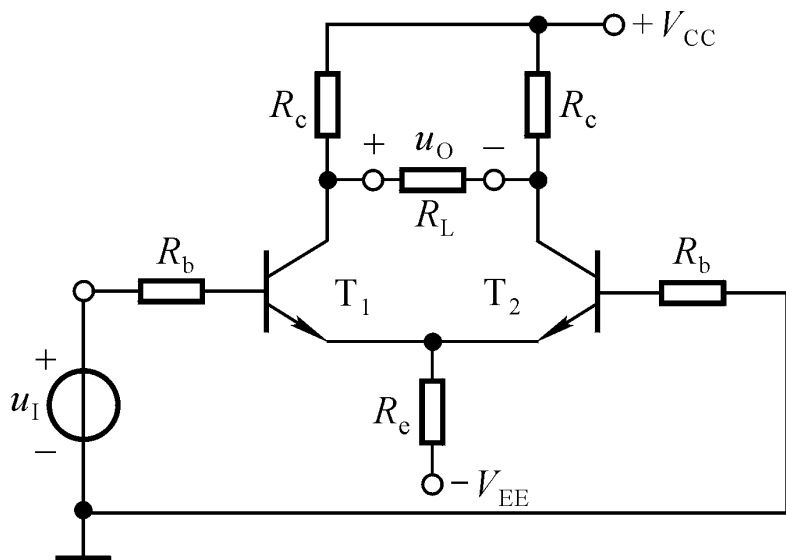
$$u_{Id} = u_I, \quad u_{Ic} = u_I / 2$$



共模输入电压

差模输入电压

## 2. 单端输入双端输出



问题讨论:

(1)  $U_{OQ}$ 产生的原因?

(2) 如何减小共模输出电压?

静态时的值

$$u_O = A_d \cdot u_I + A_c \cdot \frac{u_I}{2} + U_{OQ}$$

差模输出

共模输出

### 3. 四种接法的比较：电路参数理想对称条件下

输入方式：  $R_i$  均为  $2(R_b + r_{be})$ ；双端输入时无共模信号输入，单端输入时有共模信号输入。

输出方式：  $Q$  点、  $A_d$ 、  $A_c$ 、  $K_{CMR}$ 、  $R_o$  均与之有关。

$$\begin{aligned}\text{双端输出: } A_d &= \frac{\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{R_b + r_{be}} \\ A_c &= 0 \\ K_{CMR} &= \infty \\ R_o &= 2R_c\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{单端输出: } A_d &= \frac{\beta(R_c // R_L)}{2(R_b + r_{be})} \\ A_c &= \frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e} \\ K_{CMR} &= \frac{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}{2(R_b + r_{be})} \\ R_o &= R_c\end{aligned}$$

## 五、具有恒流源的差分放大电路

为什么要采用电流源？

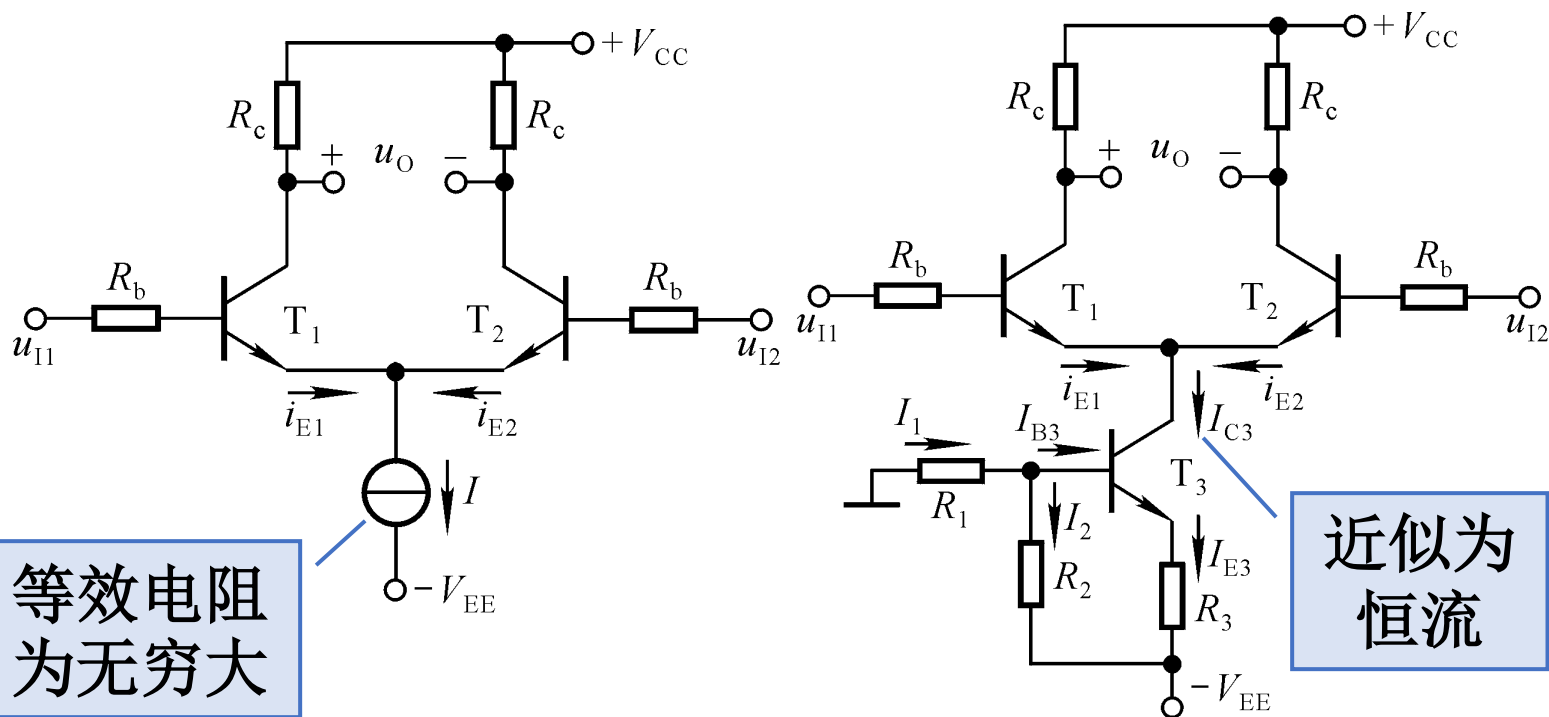
$R_e$  越大，共模负反馈越强，单端输出时的  $A_c$  越小， $K_{CMR}$  越大，差分放大电路的性能越好。

但为使静态电流不变， $R_e$  越大， $V_{EE}$  越大，以至于  $R_e$  太大就不合理了。

需在低电源条件下，得到趋于无穷大的  $R_e$ 。

**解决方法：采用交流电阻大、直流电阻小的恒流源！**

## 五、具有恒流源的差分放大电路

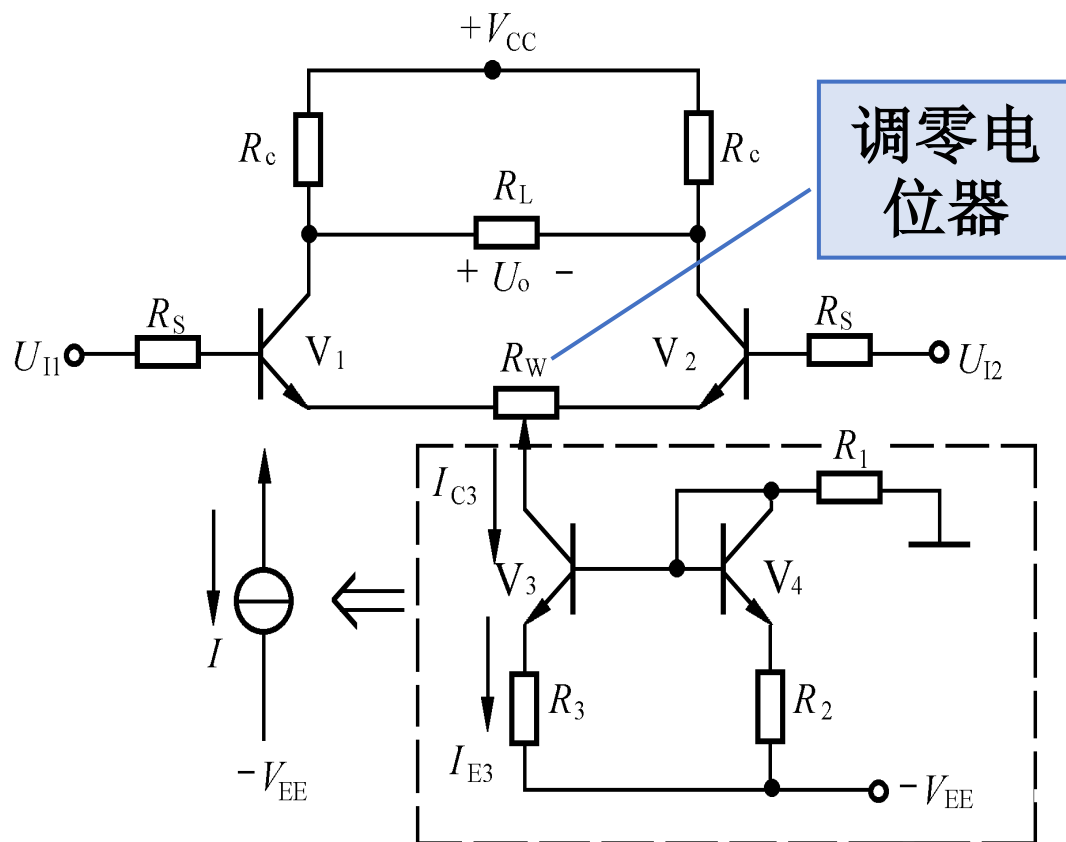


等效电阻  
为无穷大

近似为  
恒流

$$I_2 \gg I_{B3}, \quad I_{E3} \approx \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{EE} - U_{BEQ}}{R_3}$$

# 讨论三



使 $u_{I1}=0$ ,  $u_{I2}=0$ 时,  $u_o=0$



# 1. 静态参数

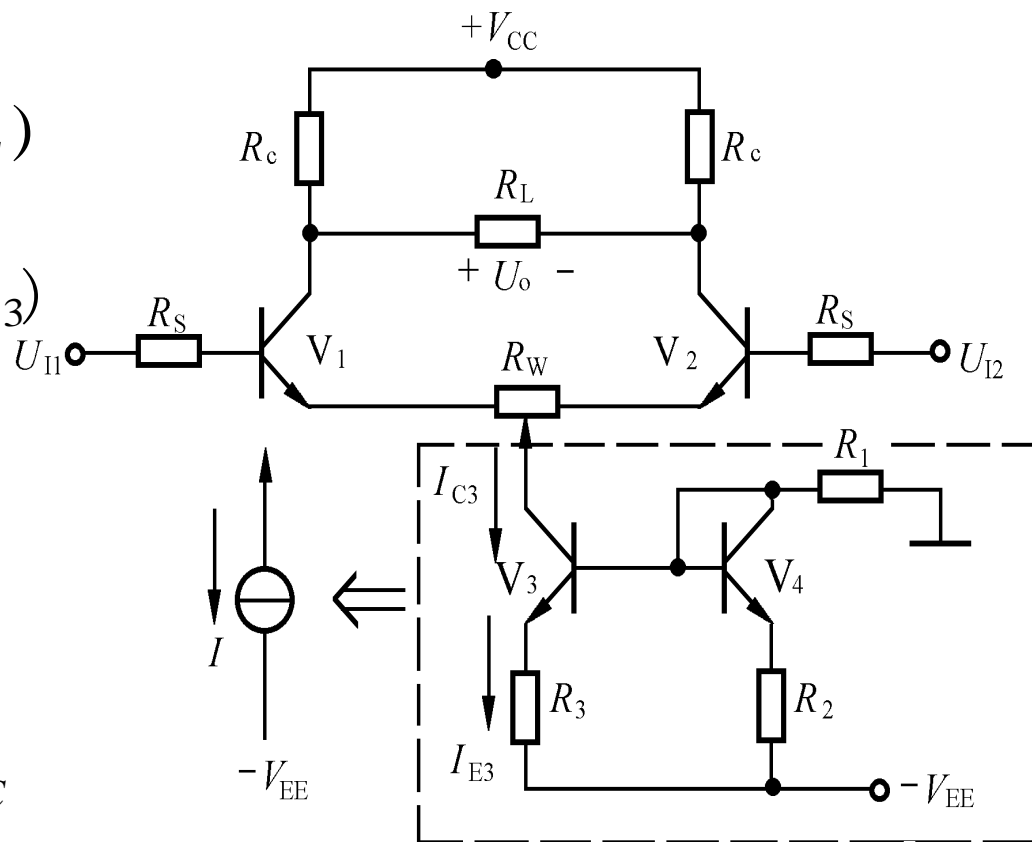
$$U_{R_2} \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} (V_{EE} - U_{BE})$$

(忽略  $I_{BQ3}$ )

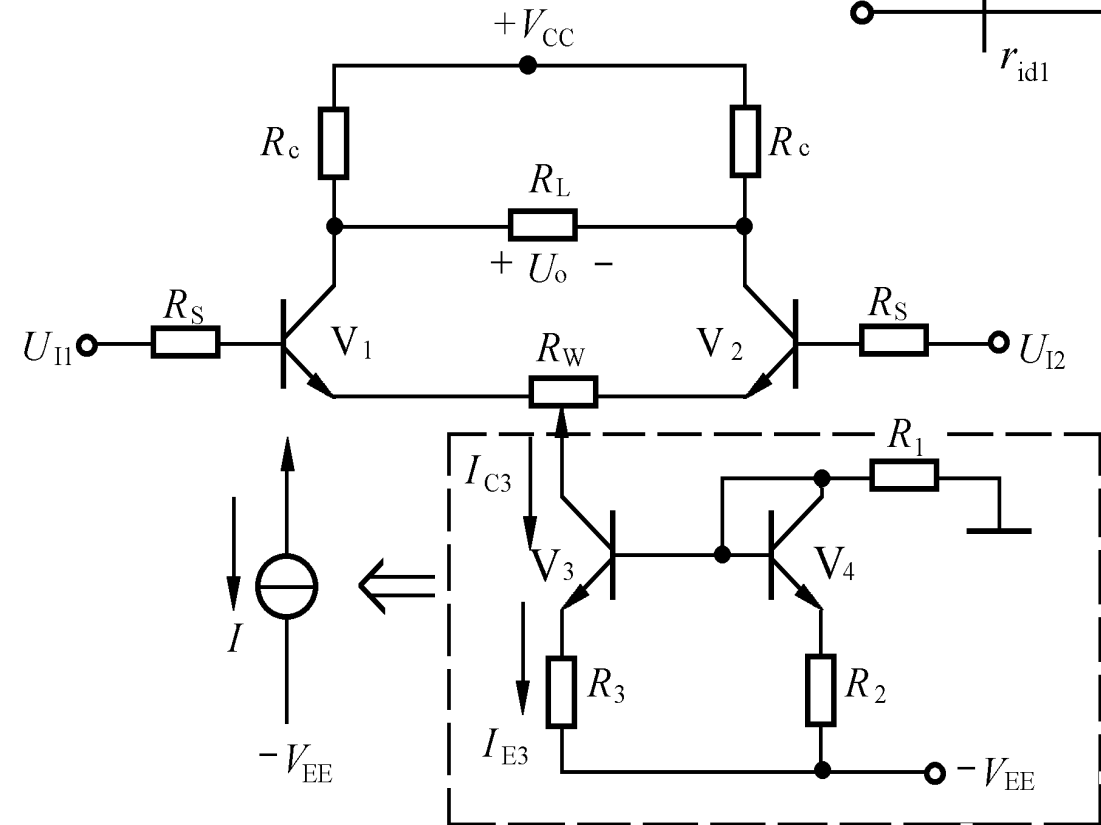
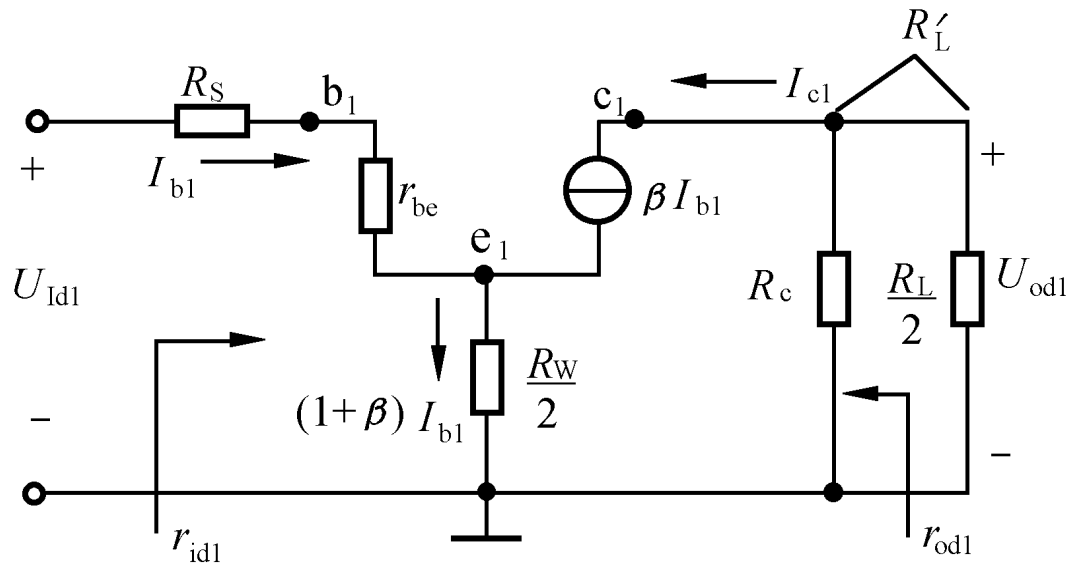
$$I_{CQ3} \approx I_{EQ3} = \frac{U_{R_2}}{R_3}$$

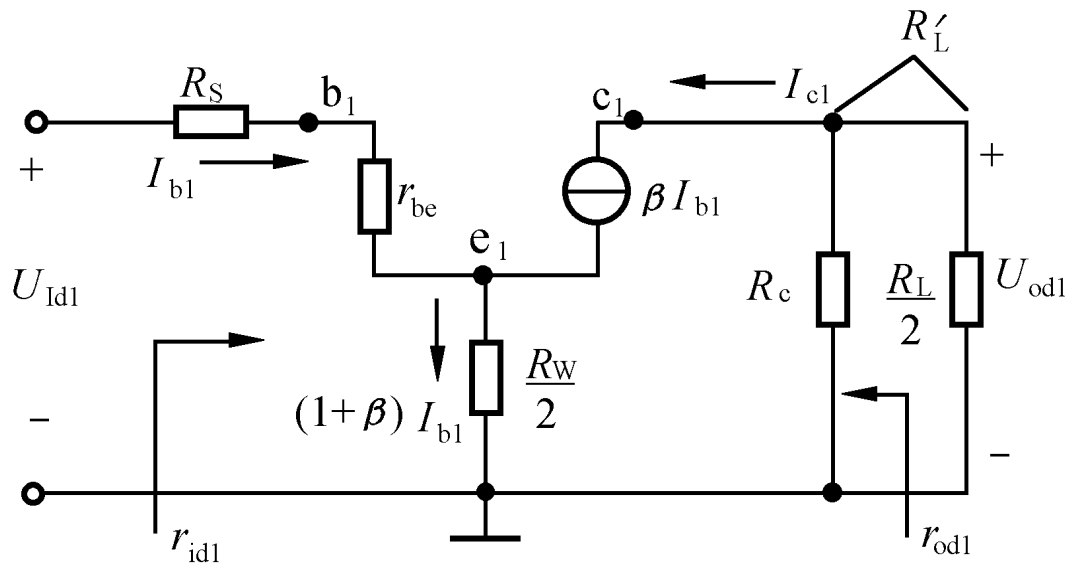
$$I_{CQ1} = I_{CQ2} = \frac{1}{2} I_{CQ3} = \frac{U_{R_2}}{2R_3}$$

$$U_{CQ1} = U_{CQ2} = V_{CC} - I_{CQ1} \cdot R_C$$



## 2. 动态参数





$$A_d = A_1 = \frac{U_{od1}}{U_{Id1}} \quad r_{id} = 2r_{id1} = 2[R_S + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_W}{2}]$$

$$= -\beta \frac{R_C // \frac{R_L}{2}}{R_S + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_W}{2}}$$

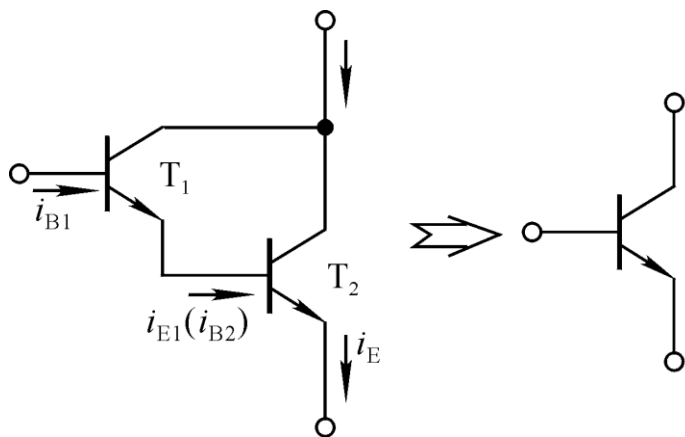
$$r_{od} = 2R_C$$

$$A_C = 0$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_C} \right| = \infty$$

# 复合管

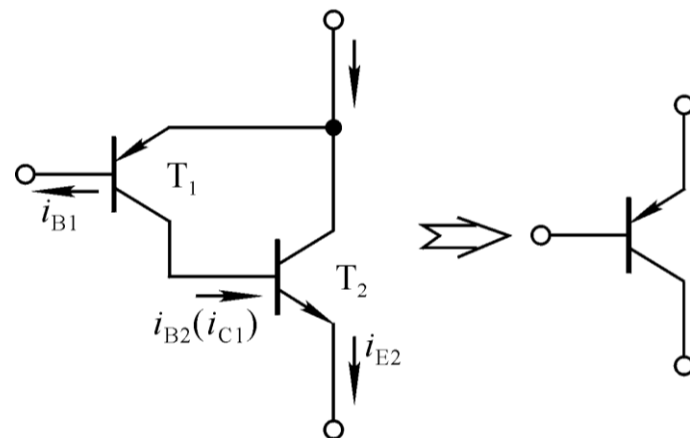
复合管的组成：多只管子合理连接等效成一只管子。  
目的：增大 $\beta$ ，减小前级驱动电流，改变管子的类型。



$$i_E = i_{B1}(1 + \beta_1)(1 + \beta_2)$$

$$\beta \approx \beta_1 \beta_2$$

$$r_{be} = r_{be1} + (1 + \beta_1)r_{be2}$$

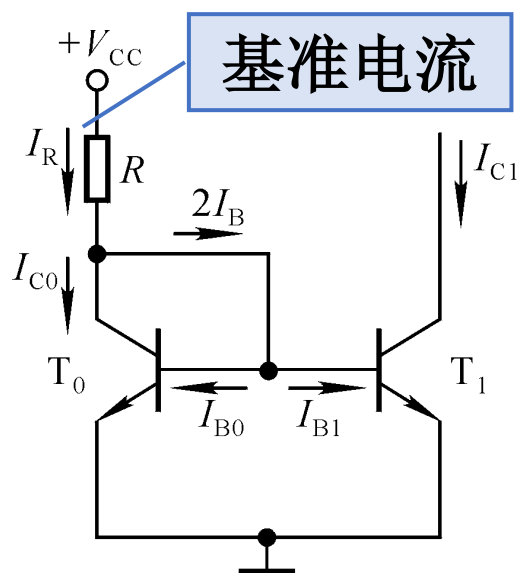


不同类型的管子复合后，其类型决定于 $T_1$ 管。

# 第七讲 电流源电路

电流源电路多用于集成运放中作偏置电路。电流源具有交流电阻大而直流电阻较小的特点，适合作有源负载，代替共射放大电路中的 $R_e$ 、差放中的 $R_e$ 等。

## 1. 镜像电流源 $T_0$ 和 $T_1$ 特性完全相同。



$$I_R = (V_{CC} - U_{BE}) / R$$

$$U_{BE1} = U_{BE0}, \quad I_{B1} = I_{B0}$$

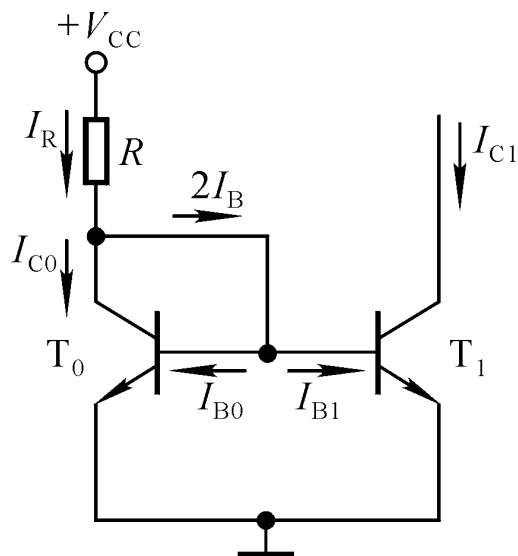
$$I_{C1} = I_{C0} = I_C$$

$$I_R = I_{C0} + I_{B0} + I_{B1} = I_C + \frac{2I_C}{\beta}$$

$$I_C = \frac{\beta}{\beta + 2} \cdot I_R$$

$$\text{若 } \beta \gg 2, \text{ 则 } I_C \approx I_R$$

# 1. 镜像电流源



优点:

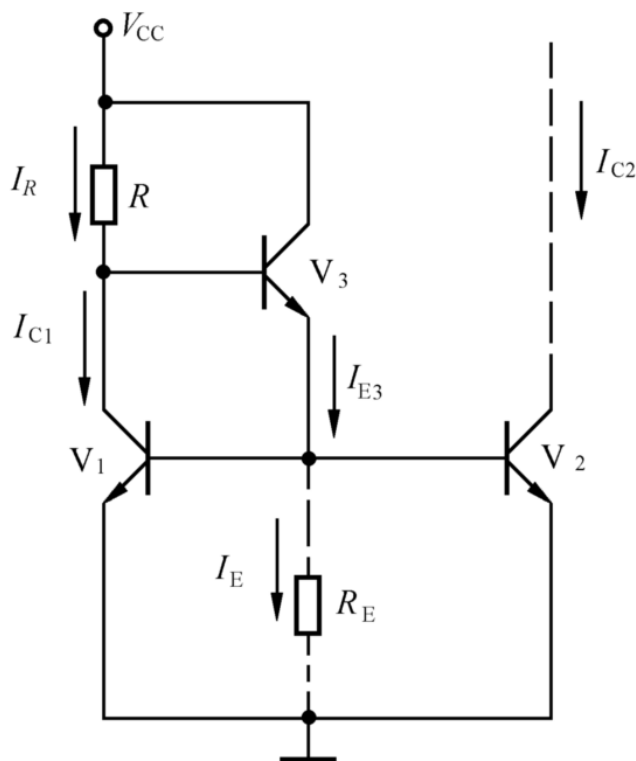
电路简单，具有温度补偿作用；

$$I_{C2} \approx I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R}$$

缺点:

- (1)  $I_{C2}$  直接受  $V_{CC}$  影响，故要求  $V_{CC}$  十分稳定；
- (2)  $R$  取值不宜过大，否则不宜集成化；
- (3) 当  $\beta$  较小时带来的误差较大。

## 2. 减小 $\beta$ 影响的镜像电流源



$$I_R = I_{C1} + I_{B3}$$

$$I_{B3} = I_{E3} / (1 + \beta)$$

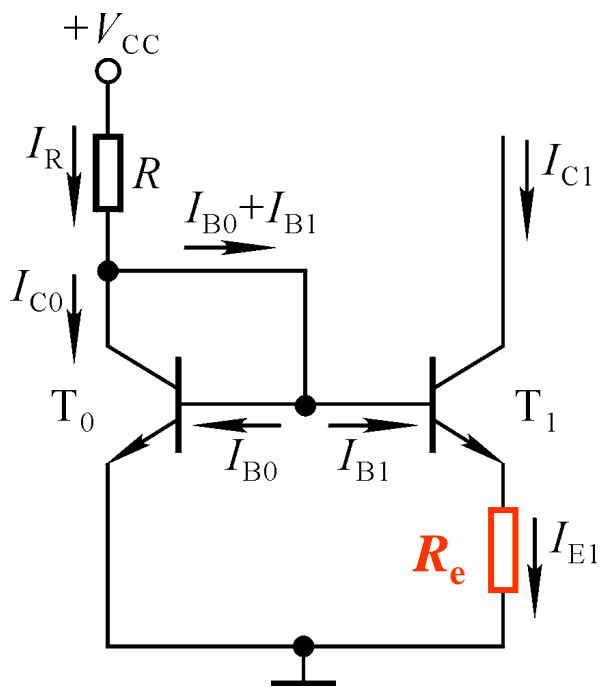
$$I_{E3} = I_{B1} + I_{B2} = 2I_B$$

$$I_R = I_{C1} + \frac{2I_B}{1 + \beta} = I_{C2} + \frac{2I_{C2}}{(1 + \beta)\beta} \approx I_{C2}$$

$$I_R = \frac{V_{CC} - 2U_{BE}}{R}$$

### 3. 微电流源

要求提供很小的静态电流，又不能用电阻。



$$I_{E1} = (U_{BE0} - U_{BE1}) / R_e$$

$$I_{E1} \approx I_{C1}$$

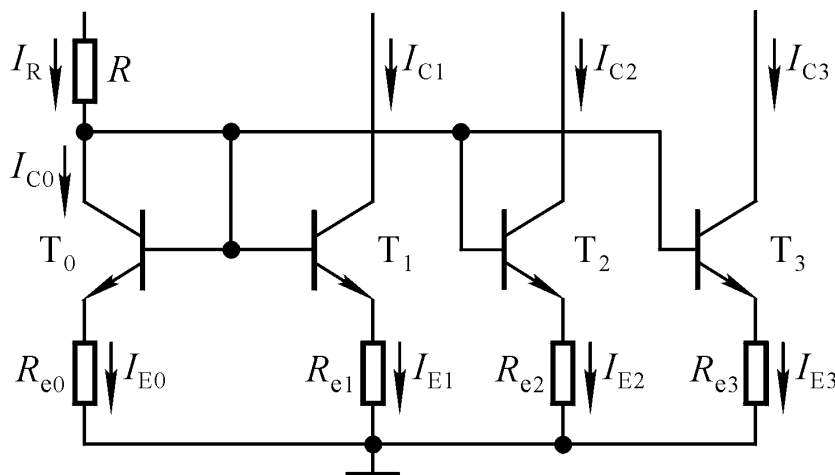
$$I_{E0} \approx I_{C0} \approx I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE0}}{R}$$

设计过程很简单，首先确定 $I_{E0}$ 和 $I_{E1}$ ，然后选定 $R$ 和 $R_e$ 。



## 4. 多路电流源

### 基于比例电流源的多路电流源



$$\begin{aligned} &U_{BE0} + I_{E0}R_{e0} \\ &= U_{BE1} + I_{E1}R_{e1} \\ &= U_{BE2} + I_{E2}R_{e2} \\ &= U_{BE3} + I_{E3}R_{e3} \end{aligned}$$

因为 $U_{BE}$ 相差不多，故 $I_{E0}R_{e0} \approx I_{E1}R_{e1} \approx I_{E2}R_{e2} \approx I_{E3}R_{e3}$

根据所需静态电流，来选取发射极电阻的数值。

特别鸣谢清华大学电子技术实验室电子学教研组

<http://lab.au.tsinghua.edu.cn/lab>