

# 第3章 集成运算放大电路

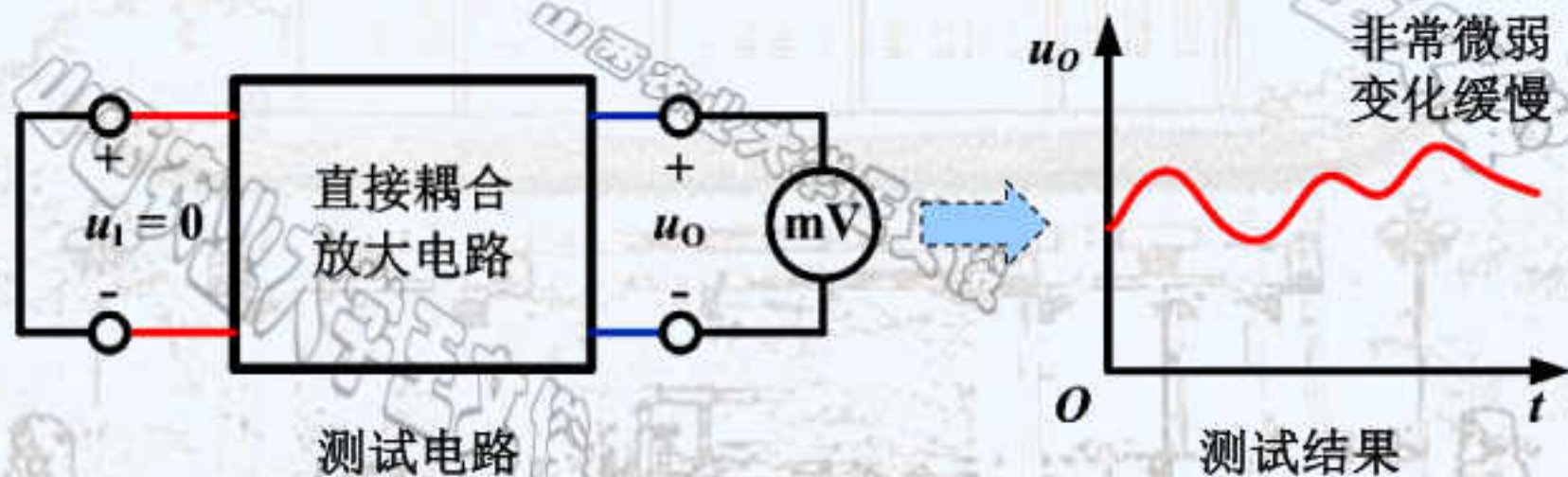
——王文俊

山西农业大学

# 十、直接耦合放大电路的零点漂移现象

## • 1、零点漂移现象

零点漂移现象指的是直接耦合放大电路输入电压 ( $\Delta u_i$ ) 为零而输出电压的变化 ( $\Delta u_o$ ) 不为零的现象。



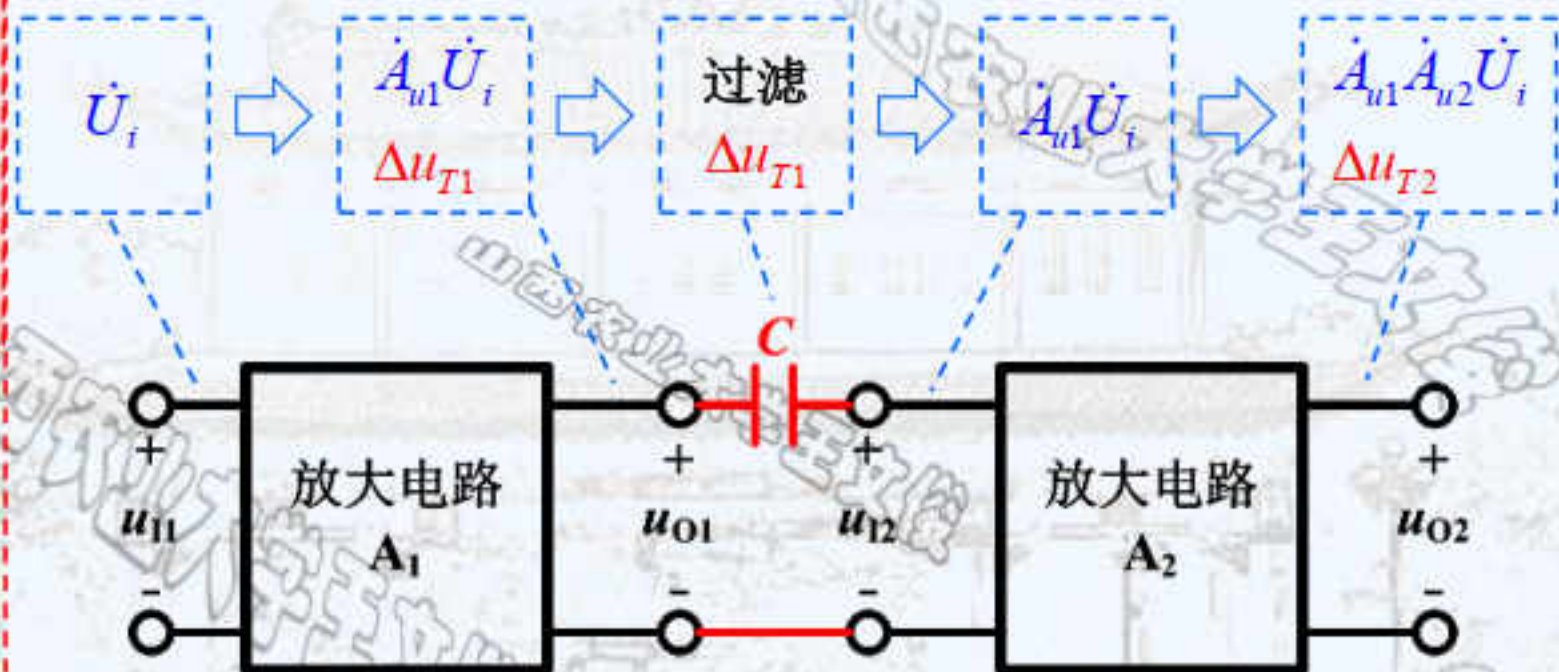
多级放大电路采用的耦合方式不同，零点漂移现象产生的影响也不同。



## • 1、零点漂移现象

阻容耦合

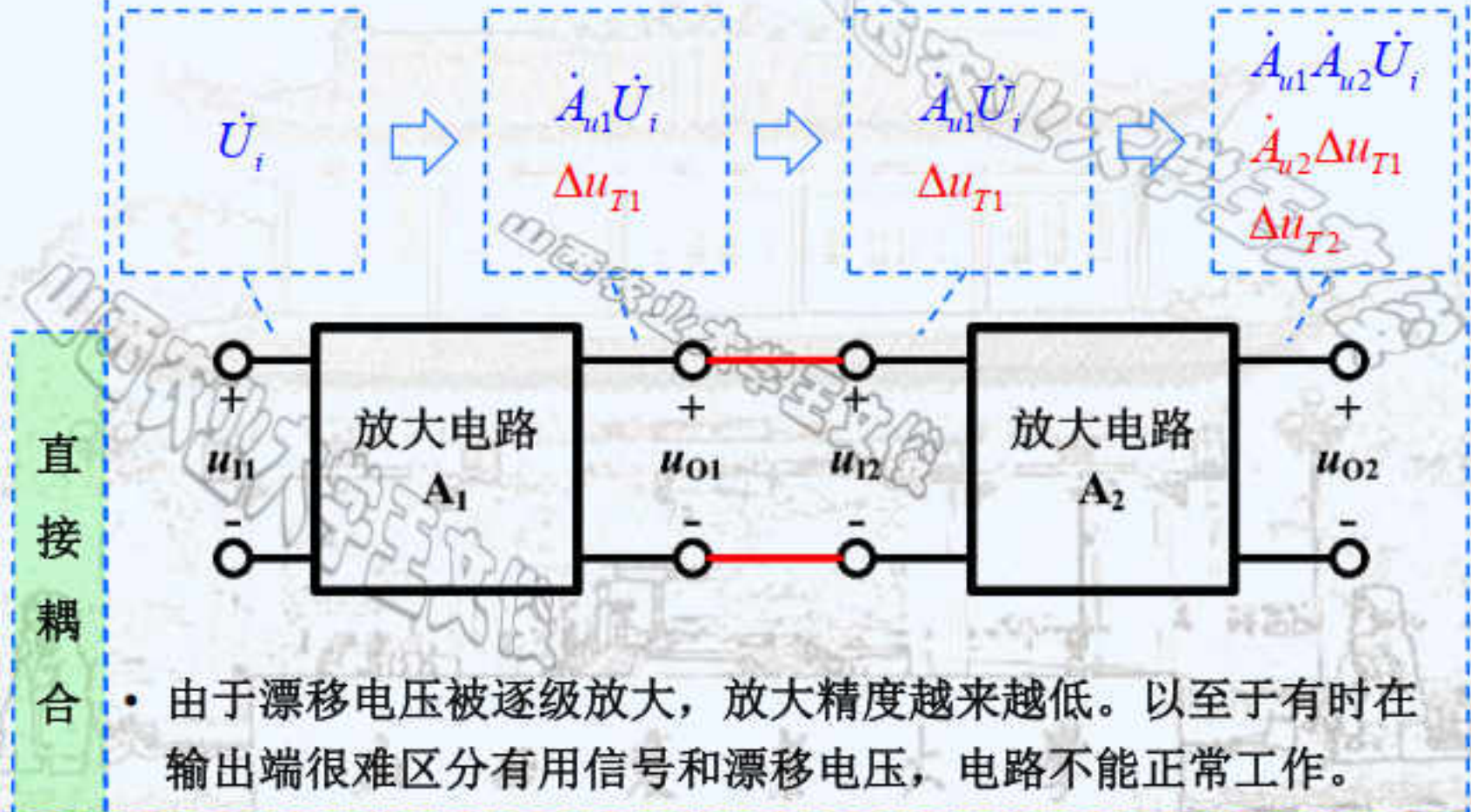
- 耦合电容具有“隔直流、通交流”的特点，对于缓慢变化的漂移电压具有过滤作用。



- 阻容耦合放大电路各级间存在耦合电容，缓慢变化的漂移电压将落在耦合电容上，不会传递到下一级电路被进一步放大。

## • 1、零点漂移现象

- 直接耦合放大电路各级之间直接相连，前一级的漂移电压会和有用信号一起被送到下一级，并被逐级放大。





## • 2、直接耦合放大电路的应用场合

工业控制中的很多物理量均为模拟量，如温度、流量、压力、液面、长度等，它们通过各种不同传感器转化成的电量也均为变化缓慢的非周期信号，而且比较微弱。此类信号均需放大后才能驱动负载。

### 直接耦合放大电路

- 具有良好的低频特性，可以放大变化缓慢的信号
- 便于集成化，构成集成电路

### 阻容耦合放大电路

- 低频特性差，不能放大缓慢变化的信号
- 不便于集成化

对于这类低频信号，一般都需要通过直接耦合放大电路来进行放大。只有克服直接耦合放大电路存在的零点漂移问题，才能使之实用。

### • 3、零点漂移产生的原因



由于温度的变化所引起的半导体器件参数的变化是产生零点漂移的主要原因，因此零点漂移也被称为温度漂移，简称温漂。

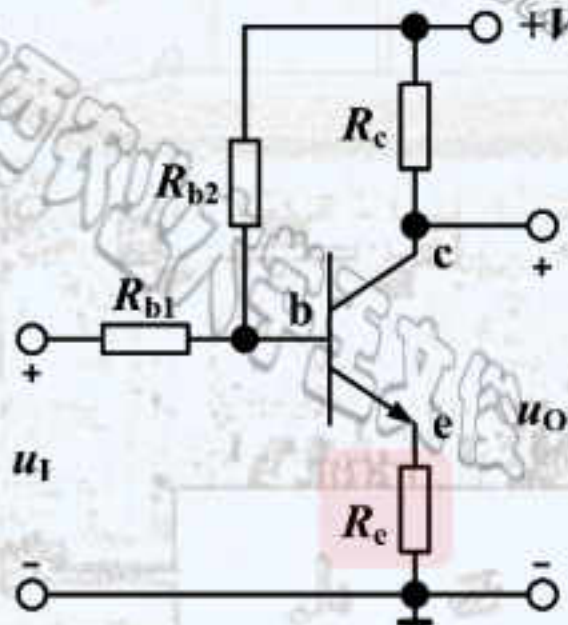


## • 4、抑制温度漂移的方法

从某种意义上讲，零点漂移就是  $Q$  点的漂移，因此稳定静态工作点的方法，就是抑制温度漂移的方法。

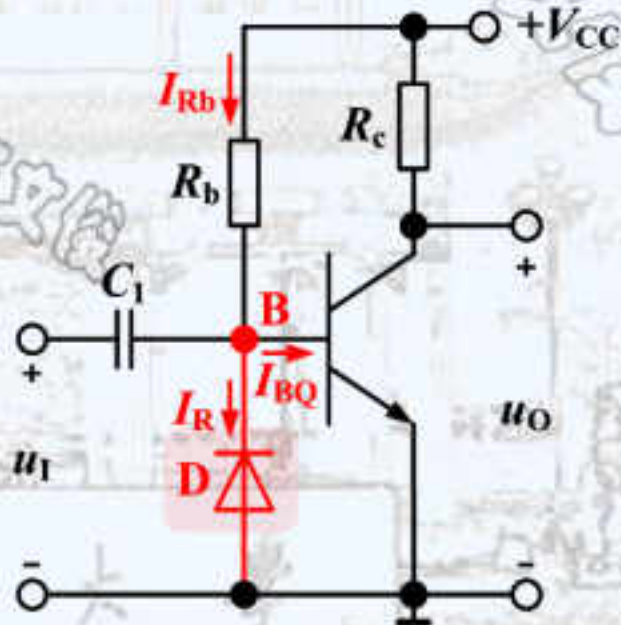
### ① 直流负反馈

- 在电路中引入直流负反馈，构成静态工作点稳定电路。



### ② 温度补偿

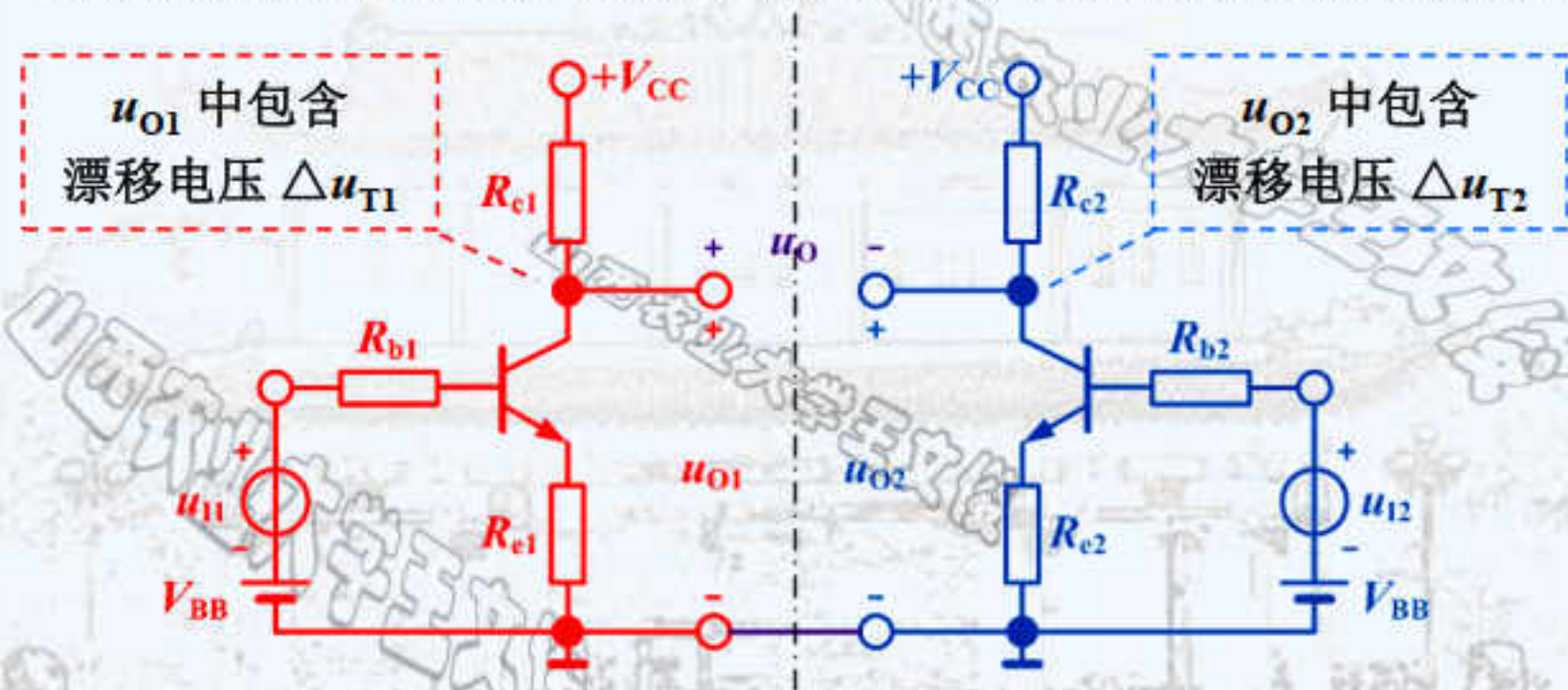
- 采用温度补偿的方法，利用热敏元件来抵消放大管的变化。



## • 4、抑制温度漂移的方法

### ③ 差分放大电路（属于温度补偿）

- 采用特性相同的管子，构成差分放大电路，使它们的温漂相互抵消。



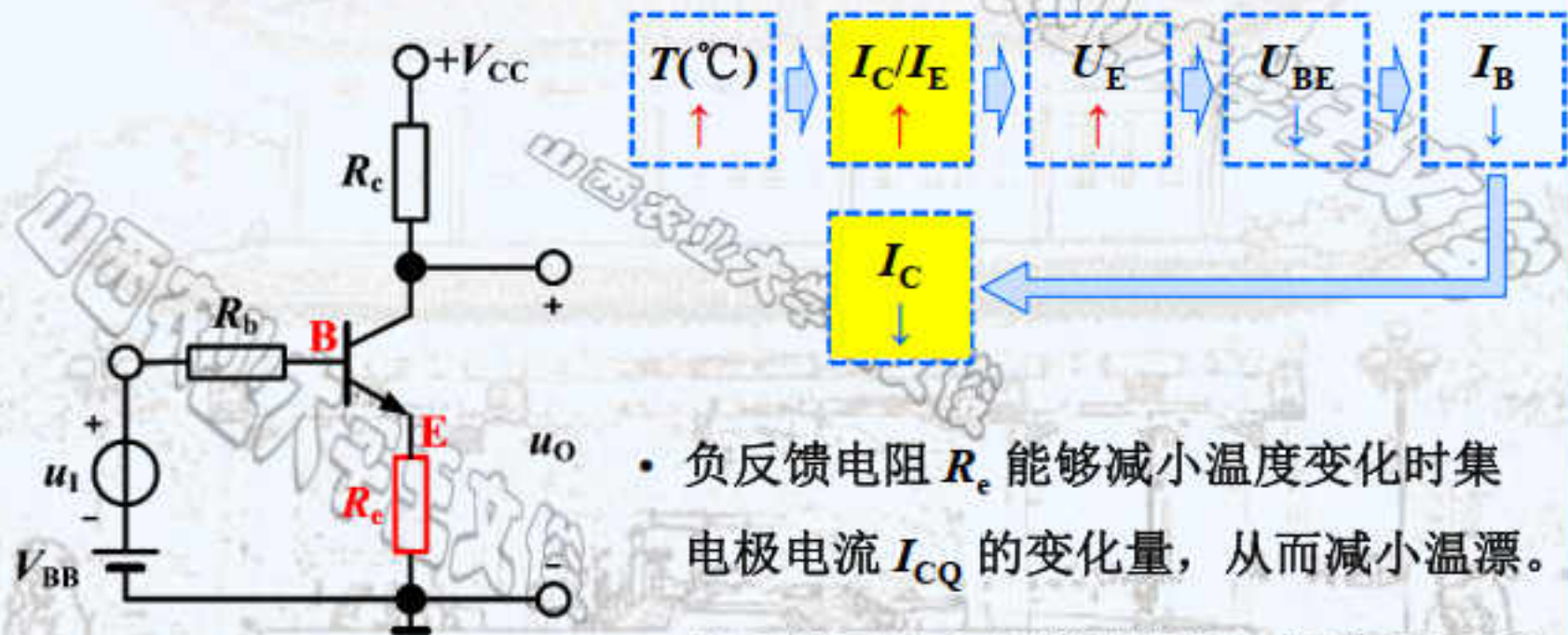
- 输出电压  $u_O = u_{O1} - u_{O2}$ ，输出电压中的漂移电压为  $\Delta u_{T1} - \Delta u_{T2}$ 。
- 若电路完全对称，则  $\Delta u_{T1} = \Delta u_{T2}$ ，两个漂移电压完全抵消。



# 十一、差分放大电路的组成

## • 1、差分放大电路的来源

差分放大电路是由典型的静态工作点稳定电路演变而来的。

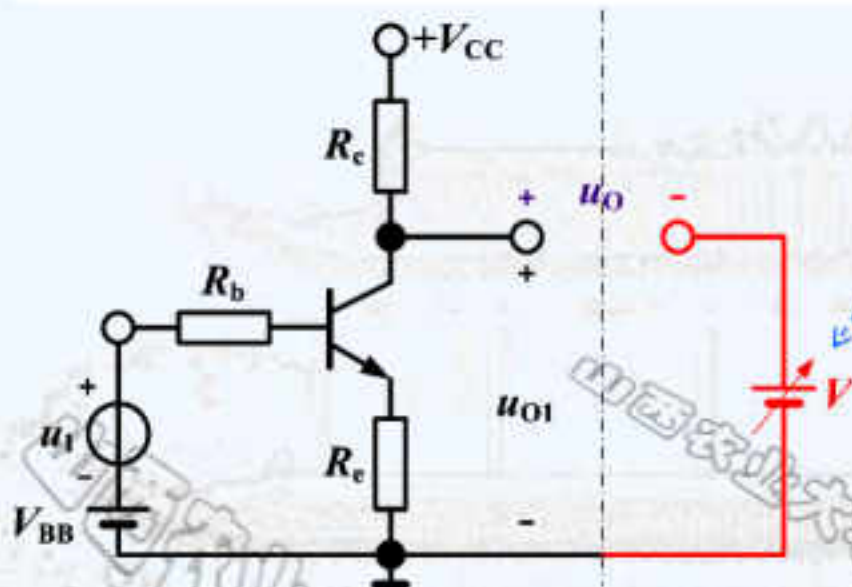


静态工作点稳定电路

- 负反馈电阻  $R_e$  能够减小温度变化时集电极电流  $I_{CQ}$  的变化量，从而减小温漂。
- 负反馈无法完全消除温漂，因此只要采用直接耦合方式，温漂就会逐级放大。

# 1、差分放大电路的来源

在输出端接一个受温度控制的直流电压源  $V$ 。



## 带有温控的电压源

- 温度变化时，电源电压  $V$  始终与晶体管集电极静态电位  $U_{CQ}$  保持相等。

$$V = U_{CQ}$$

输出电压 1:  $u_{O1} = U_{CQ} + u_o$

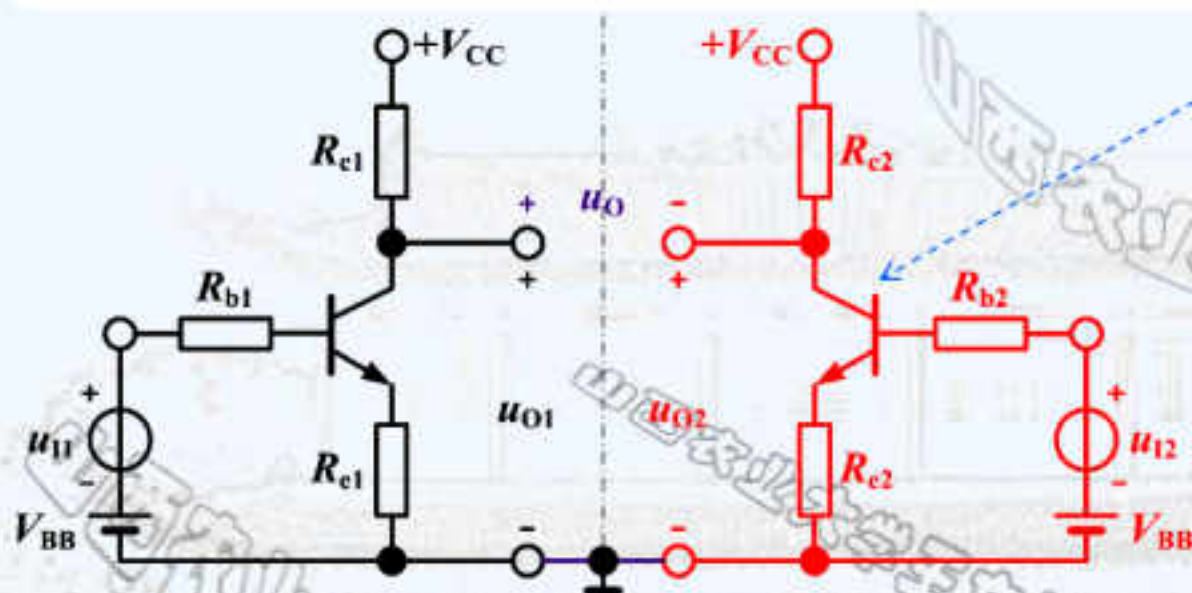
总输出电压: 
$$\begin{aligned} u_O &= u_{O1} - V \\ &= U_{CQ} + u_o - U_{CQ} \\ &= u_o \end{aligned}$$

- 输出电压中的直流分量和温漂量均相互抵消，只留下动态信号  $u_I$  作用产生的交流分量  $u_o$ 。
- 输出电压与晶体管静态工作电位  $U_{CQ}$  及其温漂无关，从而完全消除了温度漂移。



## • 1、差分放大电路的来源

采用对称式电路结构，电路参数和管子特性均完全相同。



### 对称式电路结构

- 温度变化时，两只晶体管的集电极静态电位始终保持相等。

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

输出电压 1:  $u_{O1} = u_{C1} = U_{CQ1} + u_{o1}$

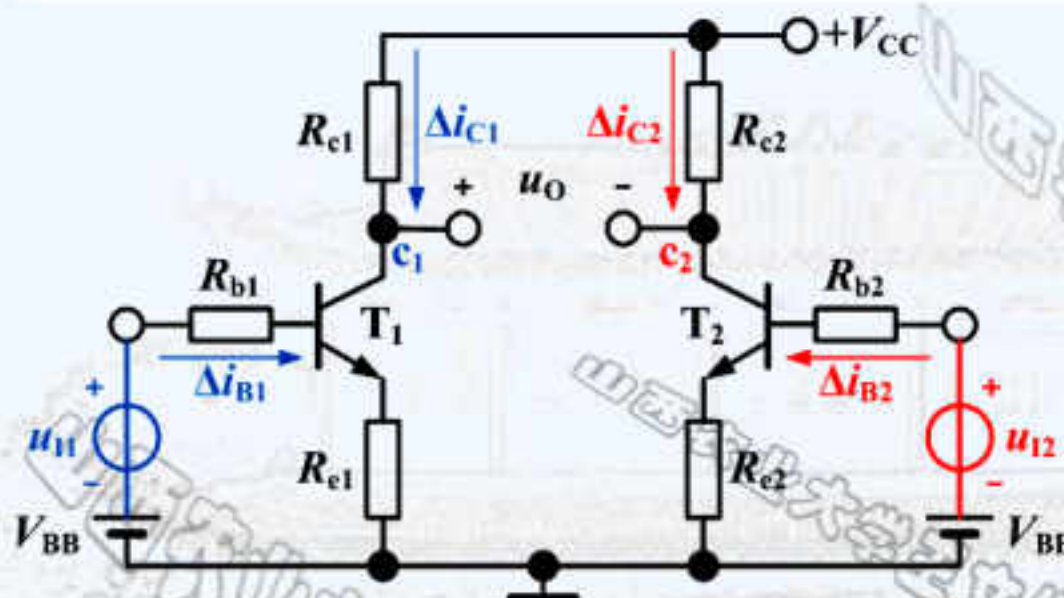
输出电压 2:  $u_{O2} = u_{C2} = U_{CQ2} + u_{o2}$

总输出电压:  $u_O = u_{O1} - u_{O2} = (U_{CQ1} + u_{o1}) - (U_{CQ2} + u_{o2}) = u_{o1} - u_{o2}$

- 电路以两只管子集电极电位差作为输出，从而完全消除了温度漂移。

## • 2、对称式电路对共模信号的抑制作用

在对称式电路的输入端加共模信号（大小相等，极性相同， $u_{I1} = u_{I2}$ ）



由于电路参数对称， $T_1$ 管和 $T_2$ 管所产生的电流变化量相等：

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

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

集电极电位变化量相等：

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

对称式电路加共模信号

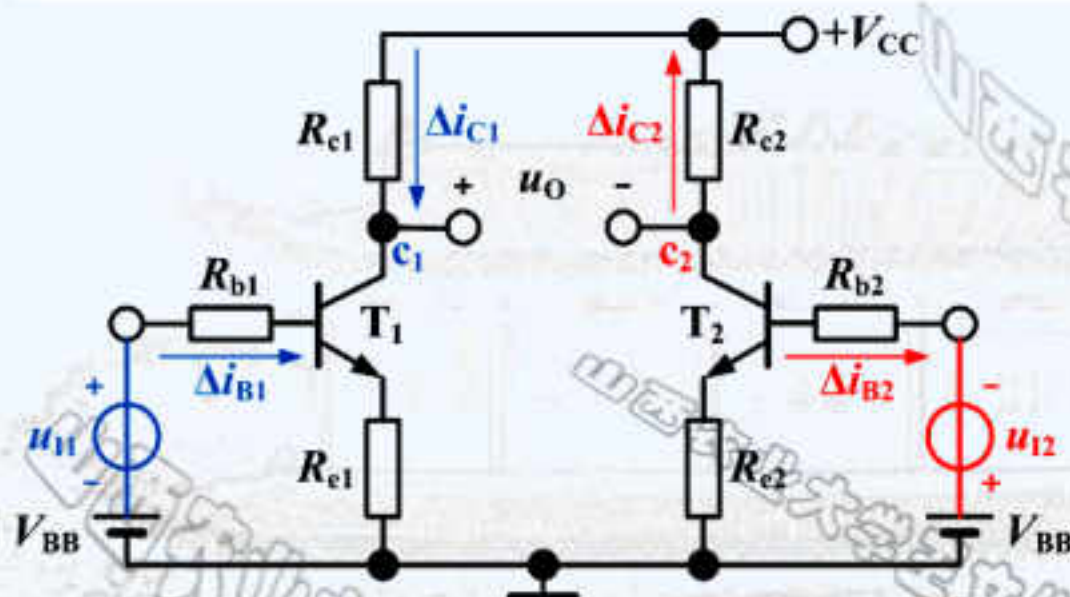
$$\begin{aligned} \text{输出电压: } u_O &= u_{C1} - u_{C2} = (U_{CQ1} + \Delta u_{C1}) - (U_{CQ2} + \Delta u_{C2}) \\ &= (U_{CQ1} - U_{CQ2}) + (\Delta u_{C1} - \Delta u_{C2}) = 0 \end{aligned}$$

- 对称式电路对共模信号具有很强的抑制作用。
- 在参数理想对称的情况下，共模输出为零。



### • 3、对称式电路对差模信号的放大作用

在对称式电路的输入端加差模信号（大小相等，极性相反， $u_{I1} = -u_{I2}$ ）



对称式电路加差模信号

电路参数对称， $T_1$  和  $T_2$  管所产生的电流变化量大小相等、方向相反：

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

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

集电极电位变化量大小相等、方向相反：

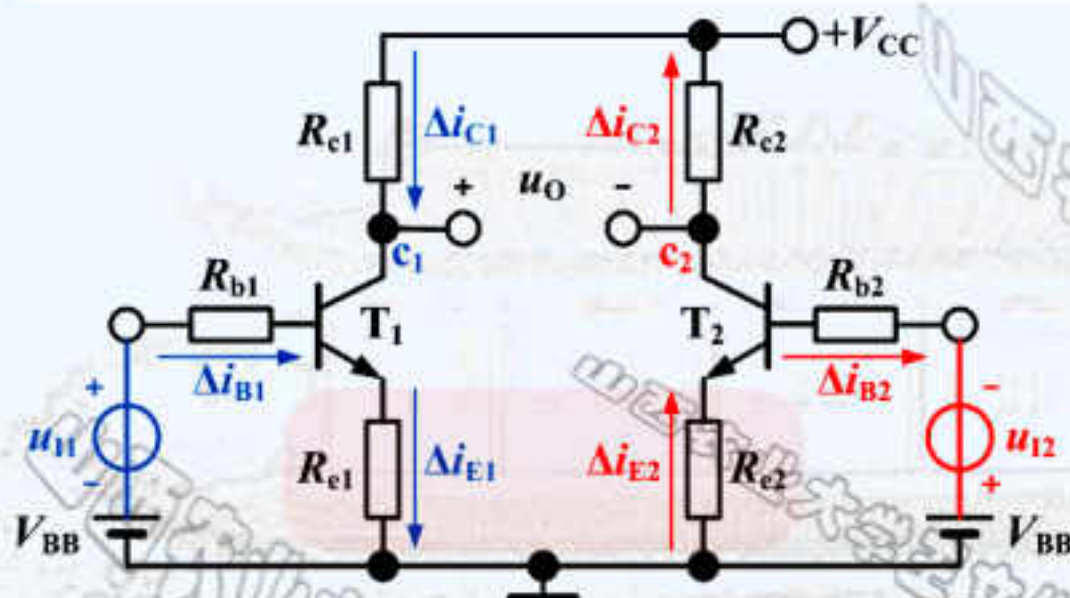
$$\Delta u_{C1} = -\Delta u_{C2}$$

$$\begin{aligned} \text{输出电压: } u_O &= u_{C1} - u_{C2} = (U_{CQ1} + \Delta u_{C1}) - (U_{CQ2} + \Delta u_{C2}) \\ &= (U_{CQ1} - U_{CQ2}) + (\Delta u_{C1} - \Delta u_{C2}) = 2\Delta u_{C1} = -2\Delta u_{C2} \end{aligned}$$

• 对称式电路对差模信号具有放大作用。

#### • 4、对称式电路存在的问题及改进措施

对称式电路对差模信号的放大能力较差。



对任意一侧的放大电路建立交流等效电路，可得其电压放大倍数为：

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta R_c}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$

对称式电路加差模信号

问题  
原因

- 由于发射极电阻  $R_{e1}$  和  $R_{e2}$  的存在，使电路的电压放大能力变差。当它们数值较大时，电路甚至不能放大。

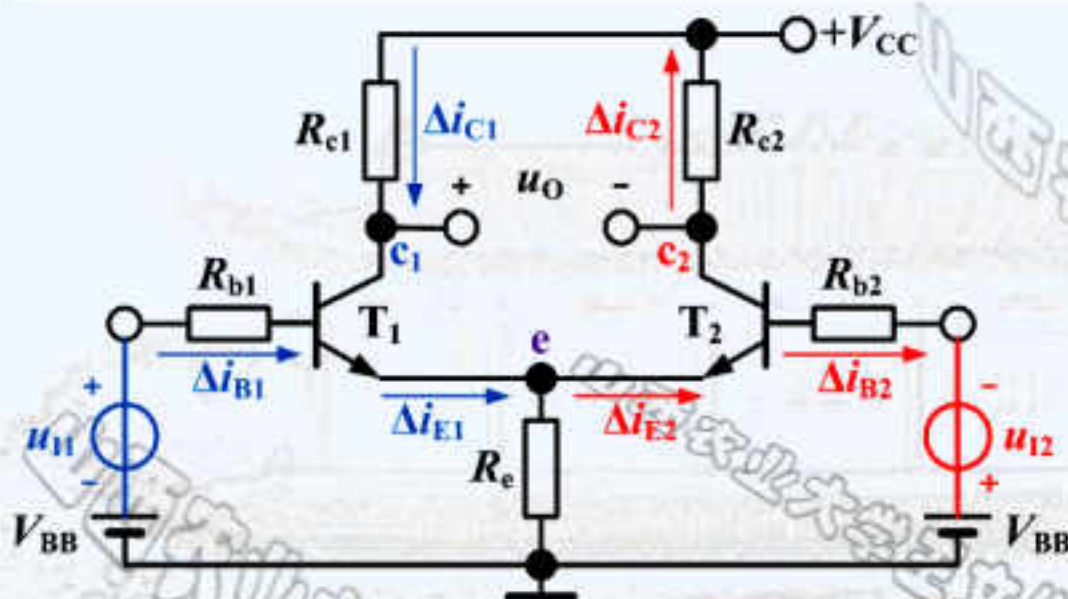
改进  
措施

- 将  $T_1$  和  $T_2$  管的发射极连在一起，将发射极电阻  $R_{e1}$  和  $R_{e2}$  合二为一，成为一个电阻  $R_e$ 。



## • 5、改进后的对称式电路

在改进后的对称式电路的输入端加差模信号 ( $u_{I1} = -u_{I2}$ )



由于电路参数对称,  $T_1$  和  $T_2$  管发射极电流变化量大小相等、方向相反:

$$\Delta i_{E1} = -\Delta i_{E2}$$

差模信号作用下,  $R_e$  的电流和电压变化量:

$$\Delta i_{Re} = 0$$

$$\Delta u_{Re} = \Delta i_{Re} R_e = 0$$

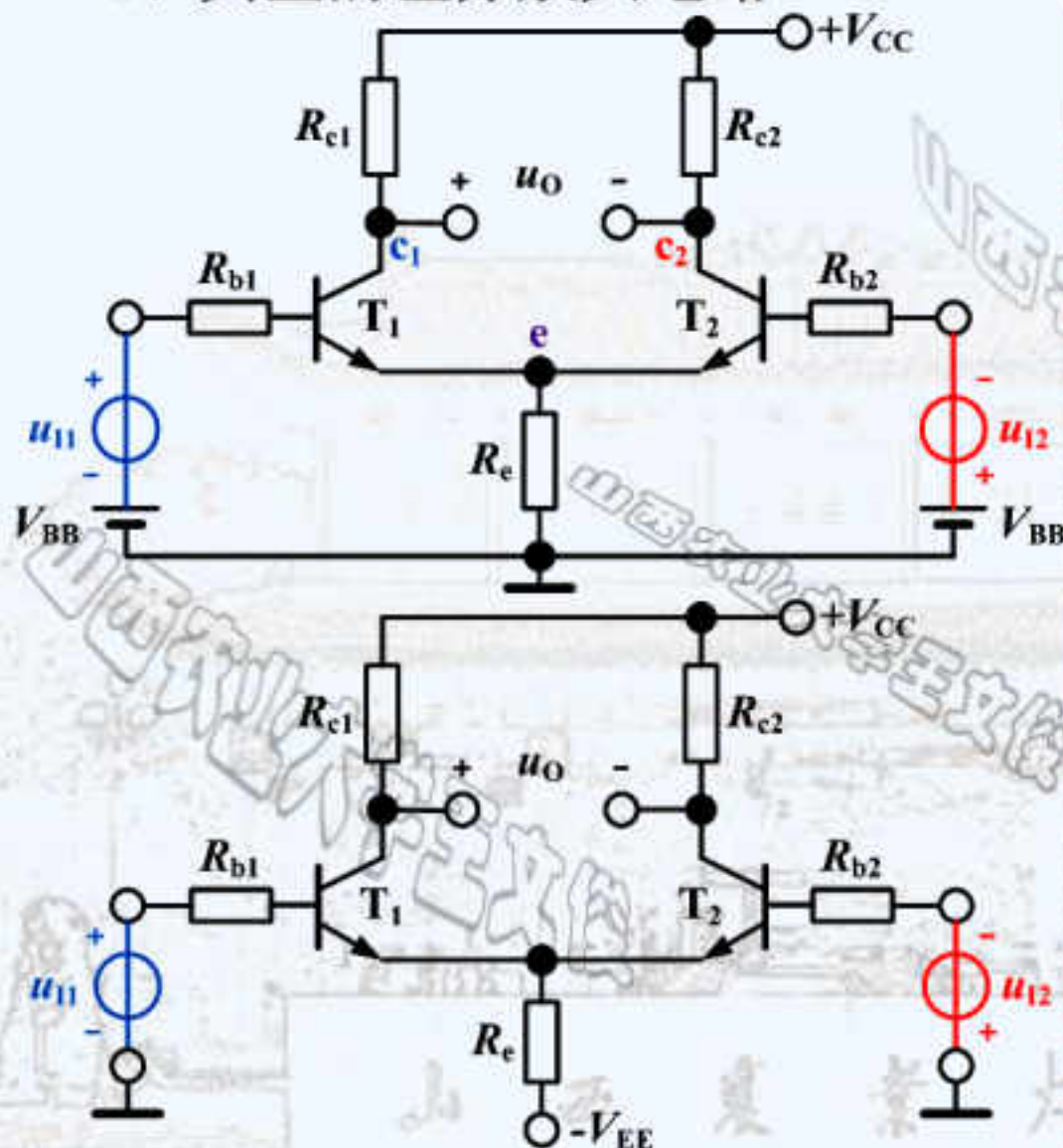
改进后的对称式电路加差模信号

发射极电阻  $R_e$  对差模信号无反馈作用, 相当于短路。此时, 单侧电路的电压放大倍数为:

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

• 改进后的对称式电路, 大大提高了对差模信号的放大能力。

## • 6、典型的差分放大电路



### 改进后的对称式电路

- 信号源与电源不共“地”。
- 为设置合适的  $Q$  点，输入信号必须叠加在直流偏置电压上。

### 典型的差分放大电路

- 信号源与电源共“地”
- 通过调整电源、电阻来调节静态工作点。
- 输入信号可直接作用于输入端。



## • 7、差分放大电路的分析前提

### ① 差分放大电路的分析前提

- 对差分放大电路的分析，多是在电路参数理想对称的情况下进行的。
- 电路参数理想对称：在对称位置的电阻值绝对相等，两只晶体管在任何温度下输入特性曲线和输出特性曲线均完全重合。

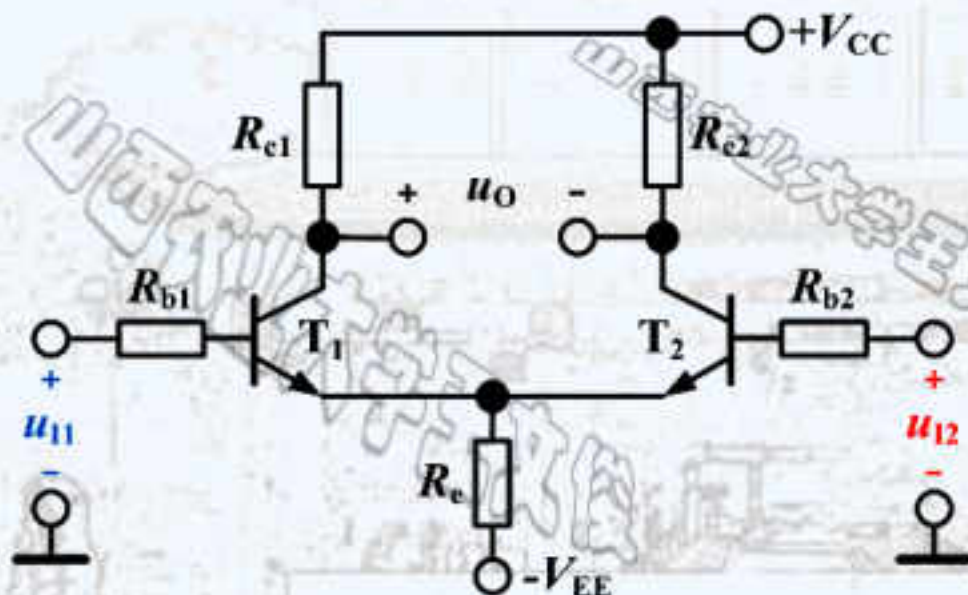
### ② 分立元件与集成差分放大电路

- 由于实际电阻阻值误差各不相同，特别是晶体管特性的分散性，任何分立元件差分放大电路的参数不可能理想对称，也就不可能完全抑制零点漂移。
- 集成电路中相邻元件具有良好的对称性，故能实现趋于参数理想对称的差分放大电路。

## 十二、差分放大电路的交直流等效电路

### • 1、长尾式差分放大电路的结构

在典型的差分放大电路中，由于  $R_e$  接负电源  $-V_{EE}$ ，拖一个尾巴，故称为长尾式差分放大电路。



长尾式差分放大电路

电路参数理想对称

• 对称位置电阻值完全相等

$$\begin{cases} R_{b1} = R_{b2} = R_b \\ R_{c1} = R_{c2} = R_c \end{cases}$$

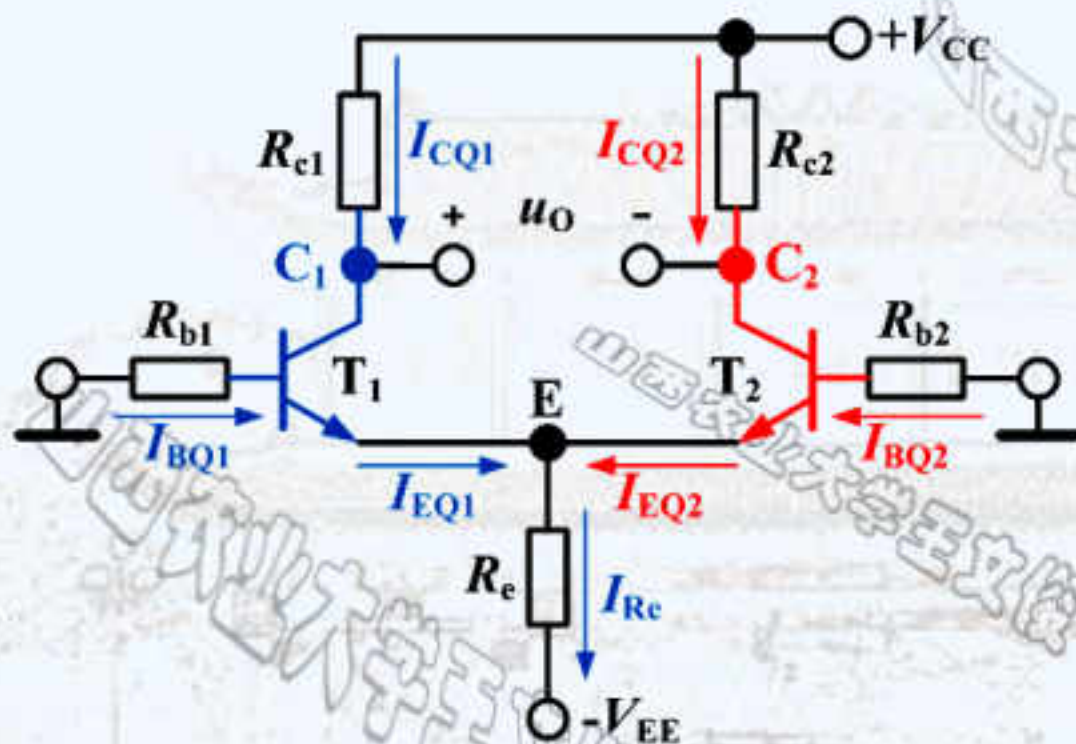
•  $T_1$  管和  $T_2$  管的特性相同

$$\begin{cases} \beta_1 = \beta_2 = \beta \\ r_{be1} = r_{be2} = r_{be} \end{cases}$$



## • 2、直流通路

令输入信号  $u_{I1} = u_{I2} = 0$ ，即可得到长尾式差分放大电路的直流通路。



由于输入回路对称，则：

$$\begin{cases} I_{BQ1} = I_{BQ2} = I_{BQ} \\ I_{CQ1} = I_{CQ2} = I_{CQ} \\ I_{EQ1} = I_{EQ2} = I_{EQ} \end{cases}$$

根据动态电阻计算公式：

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

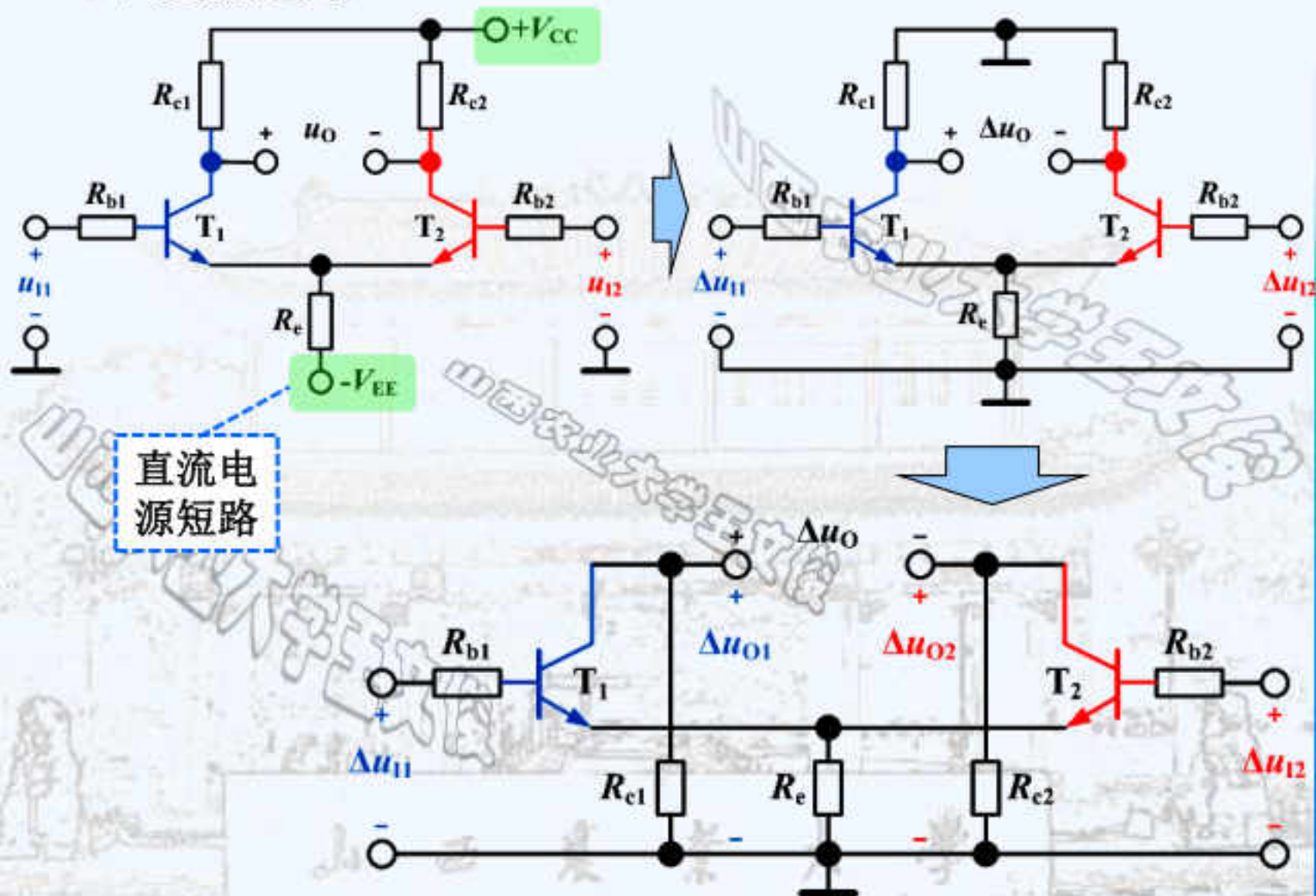
只要  $I_{EQ}$  相等，两管的动态电阻就可保持相等。

$$r_{be1} = r_{be2} = r_{be}$$

长尾式差分放大电路的直流通路

只要保证  $U_{BEQ}$ 、 $I_{BQ}$ 、 $I_{CQ}$  相等， $T_1$  和  $T_2$  管的交流等效模型就相同；而管压降  $U_{CEQ}$  是否相等，并不会影响交流等效电路的对称性。

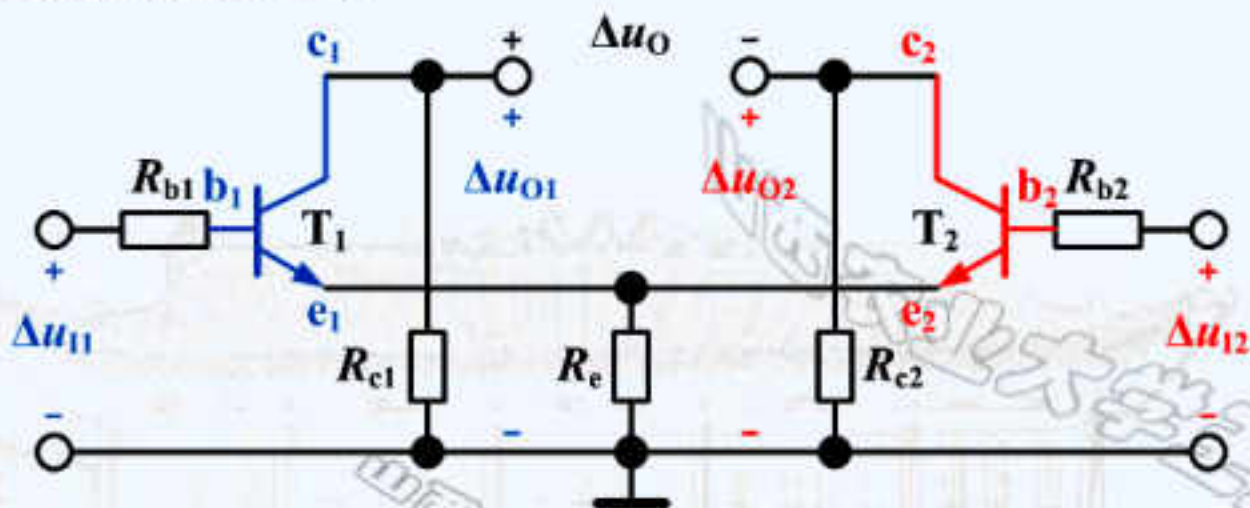
### 3、交流通路



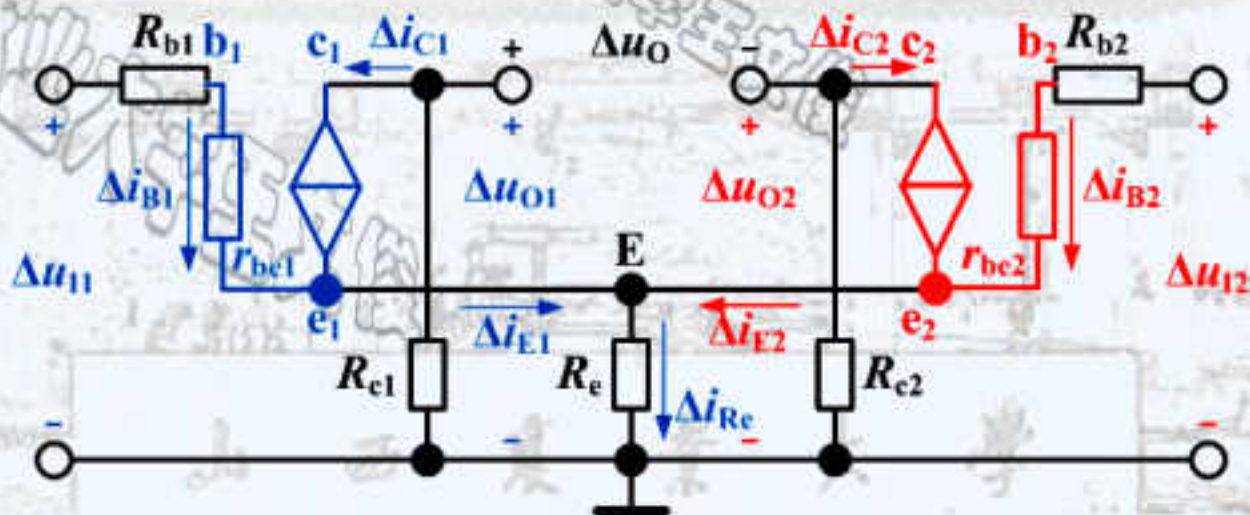


# 4、交流等效电路

交流通路

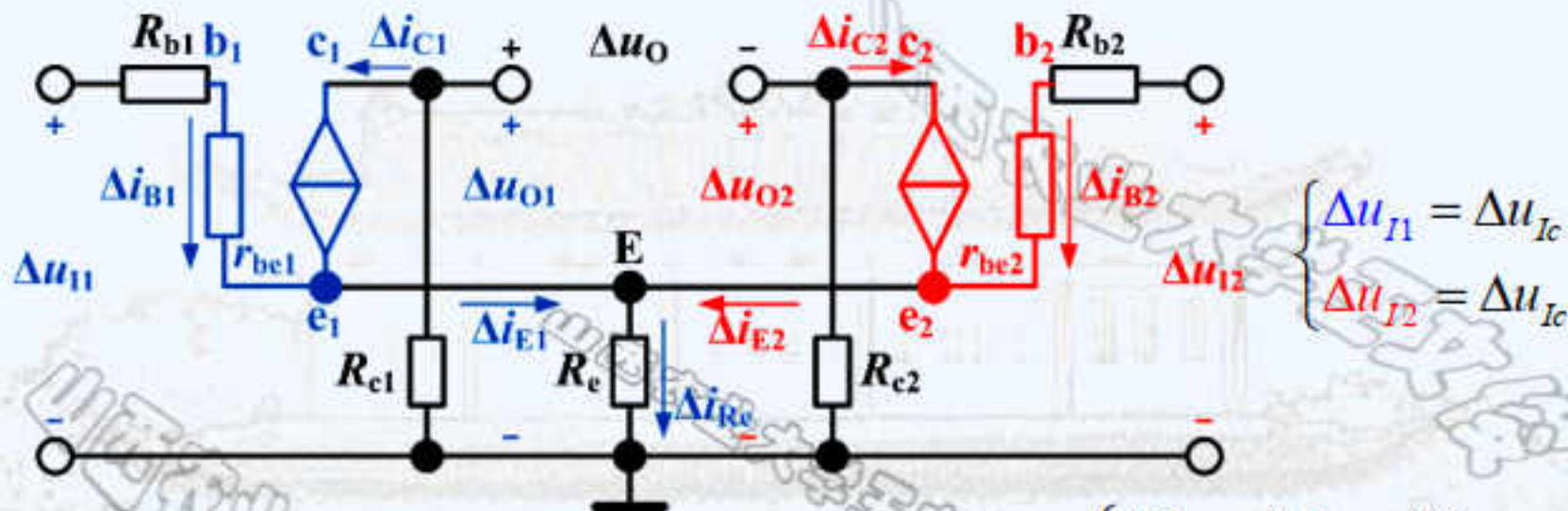


交流等效电路



## • 5、共模交流等效电路

共模交流等效电路：输入信号为共模信号  $\Delta u_{Ic}$  时的交流等效电路。



由于输入回路对称，两只管子电流变化量相等：

$$\begin{cases} \Delta i_{B1} = \Delta i_{B2} = \Delta i_B \\ \Delta i_{E1} = \Delta i_{E2} = \Delta i_E \end{cases}$$

电阻  $R_e$  上电流变化量为： $\Delta i_{Re} = 2\Delta i_E$

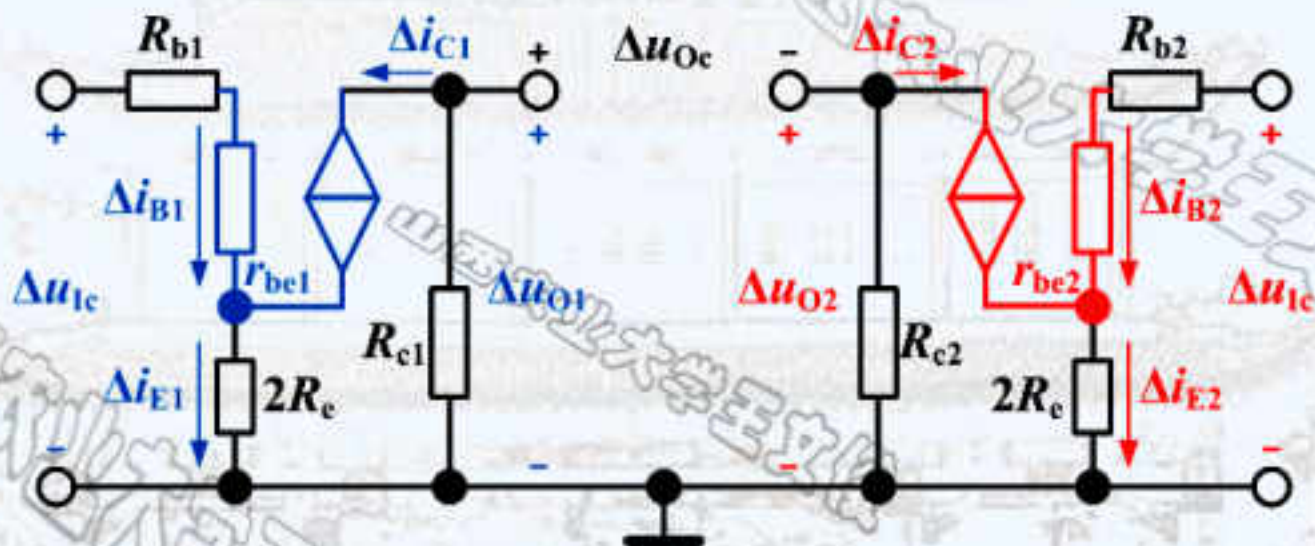
发射极的电位变化量为： $\Delta u_E = 2\Delta i_E R_e = \Delta i_{E1} (2R_e) = \Delta i_{E2} (2R_e)$

对每只管子而言，发射极电位的变化量可以看作是  $\Delta i_E$  的电流流过  $2R_e$  的电阻造成的。



## • 5、共模交流等效电路

公共的发射极电阻  $R_e$  可等效为两个阻值为  $2R_e$  的电阻分别接在两只管子的发射极与地之间。

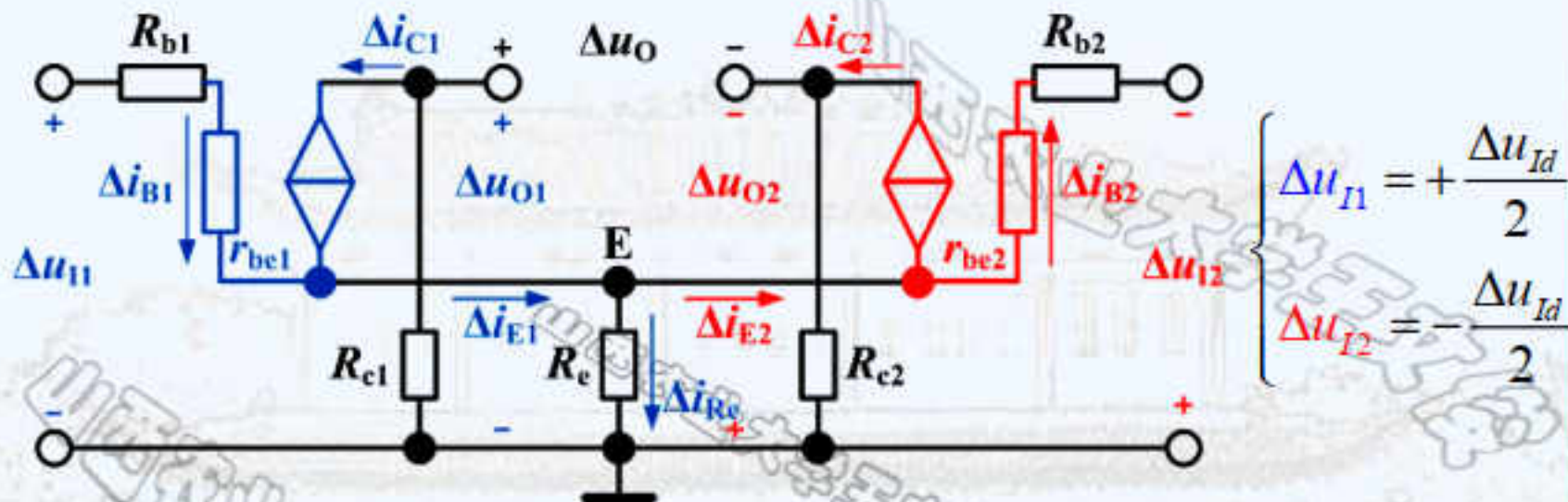


共模信号作用下的交流等效电路

只要输入回路对称，共模信号作用下的发射极电流的变化量就对称，该等效电路就能成立。而与电路是否空载、负载的接线方法无关。

## • 6、差模交流等效电路

差模交流等效电路：输入信号为差模信号  $\Delta u_{Id}$  时的交流等效电路。



两只管子发射极电流变化大小相等，反向相反： $\Delta i_{E1} = -\Delta i_{E2}$

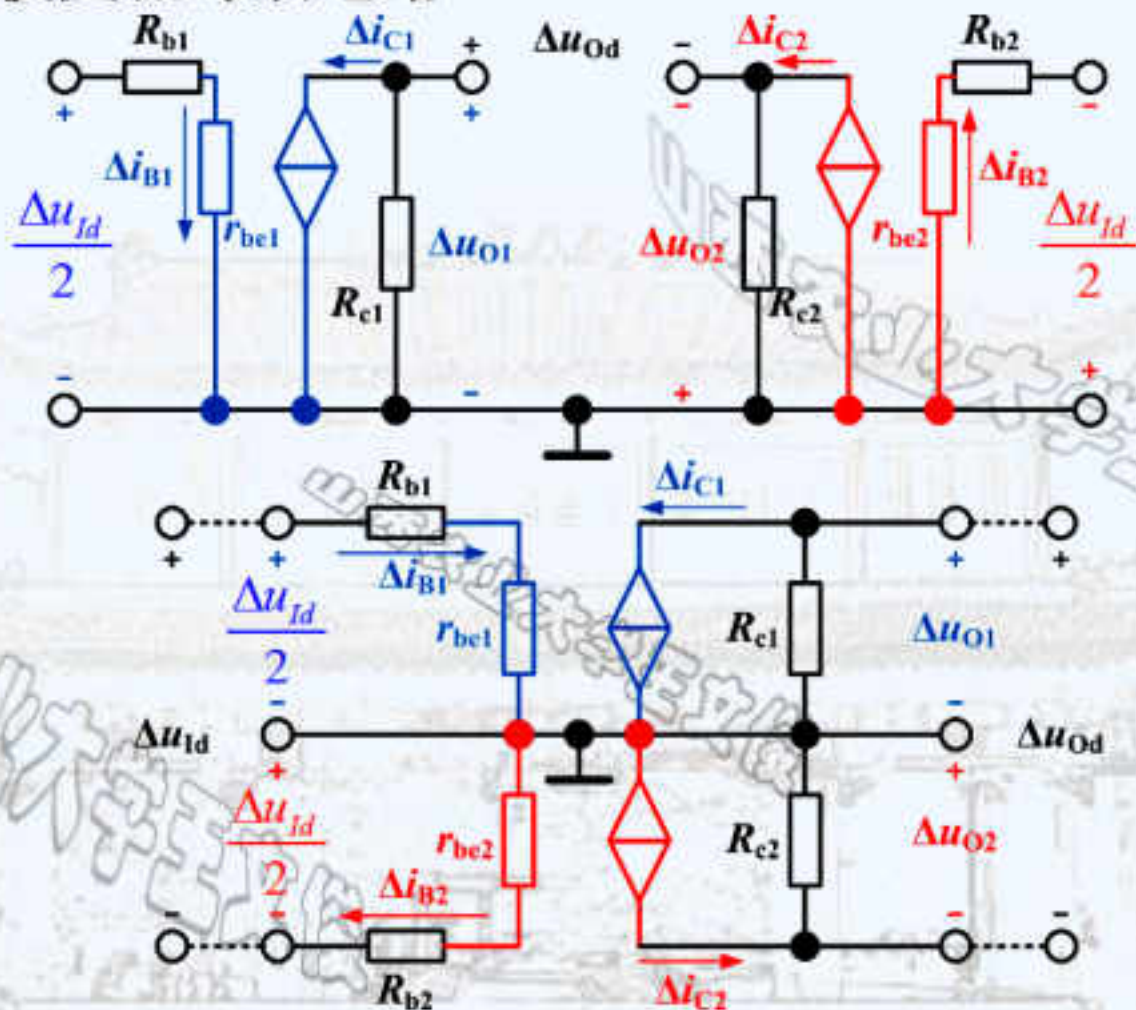
电阻  $R_e$  上电流变化量为： $\Delta i_{Re} = 0$

发射极的电位变化量为： $\Delta u_E = \Delta i_{Re} R_e = 0$

公共发射极电阻  $R_e$  两端的电位差为 0，相当于两只管子的发射极直接接地，电阻  $R_e$  被短路。



## • 6、差模交流等效电路



只要输入回路对称，差模信号作用下的发射极电流的变化量就对称，该等效电路就能成立。而与电路是否空载、负载的接线方法无关。

## • 7、输入端与输出端的不同接法

### ① 输入端的接法

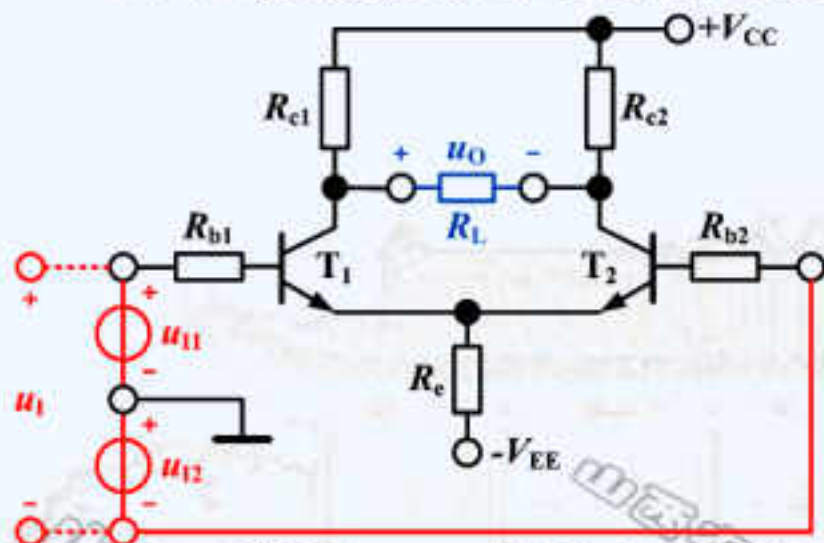
- 双端输入：输入端没有接地点，输入信号加载在两个输入端之间。（两个输入端均有输入信号。）
- 单端输入：输入端一端接地，输入信号加载在另一输入端与地之间。（只有一个输入端有输入信号。）

### ② 输出端的接法

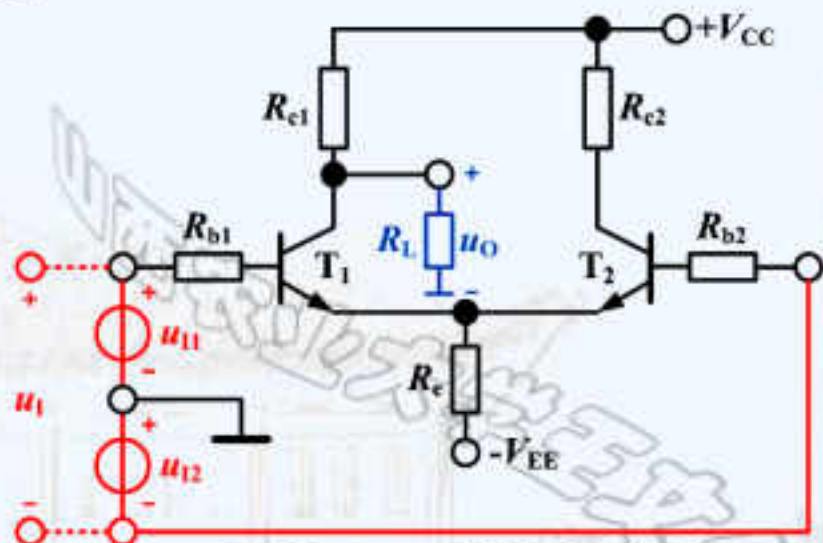
- 双端输出：有两个输出端，输出端没有接地点，负载接在两个输出端之间。
- 单端输出：只有一个输出端，负载接在该输出端与地之间。



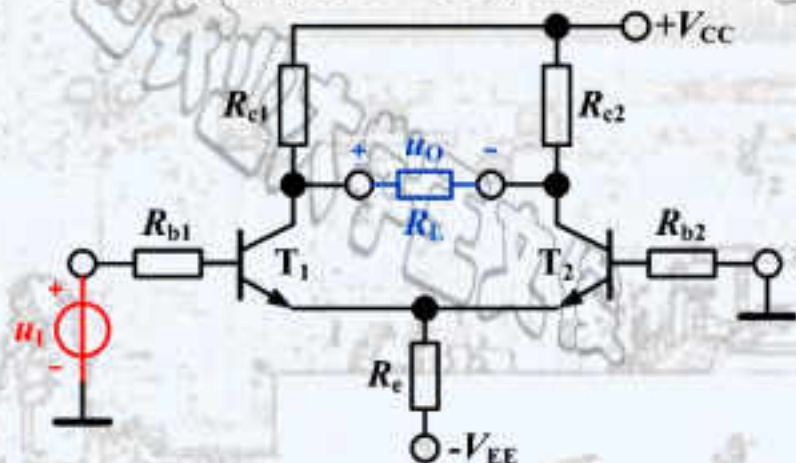
# 8、差分放大电路的四种接法



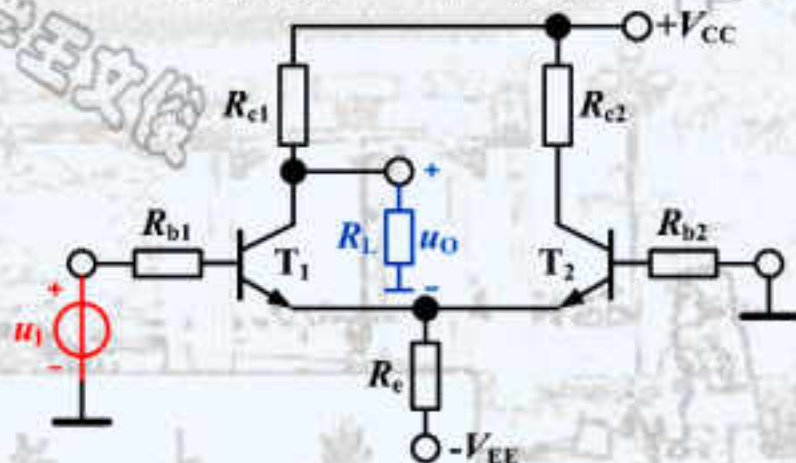
双端输入、双端输出



双端输入、单端输出



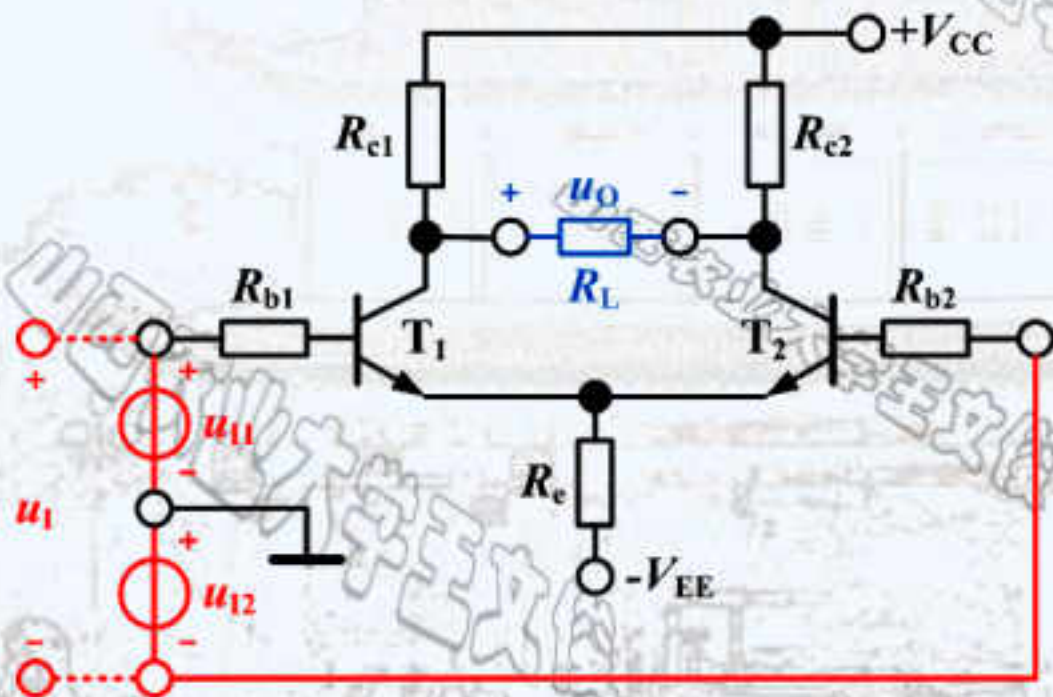
单端输入、双端输出



单端输入、单端输出

# 十三、双端输入双端输出的差分放大电路

## 1、双端输入、双端输出的差分放大电路



双端输入、双端输出的差分放大电路

静态分析

静态工作点  $Q$

动态分析

共模放大倍数  $A_c$

差模放大倍数  $A_d$

共模抑制比  $K_{CMR}$

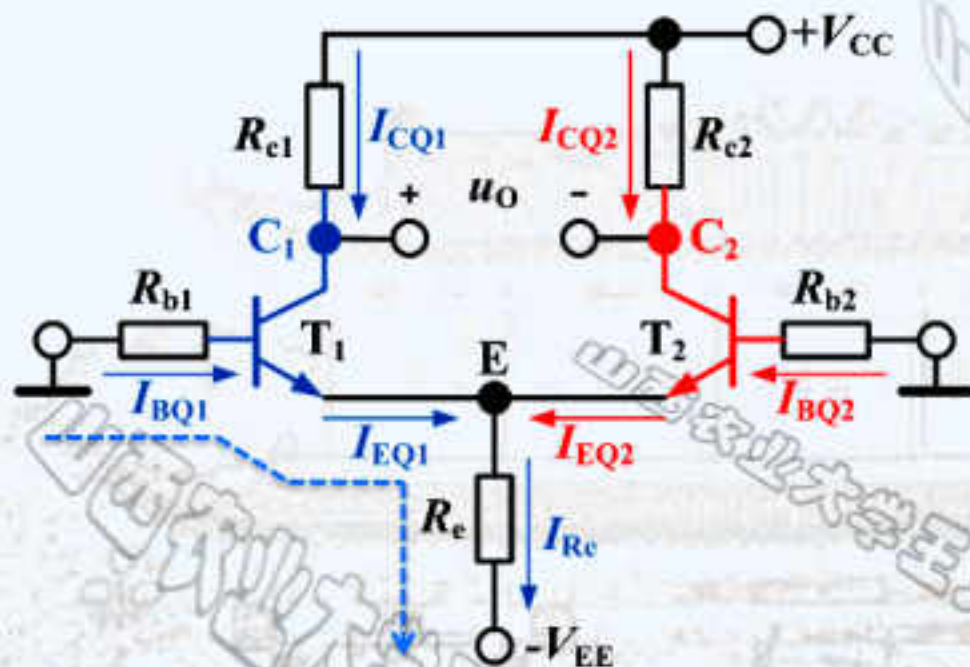
输入电阻  $R_i$

输出电阻  $R_o$



## • 2、静态分析

令输入信号  $u_{I1} = u_{I2} = 0$ ，对电路进行静态分析。



差分放大电路的直流通路

电阻  $R_e$  中的电流为  $T_1$  管和  $T_2$  管发射极电流之和：

$$I_{Re} = I_{EQ1} + I_{EQ2} = 2I_{EQ}$$

基极回路方程：

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

基极静态电流：

$$I_{BQ} = \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{R_b + 2(1 + \beta) R_e}$$

通常  $R_b$  为信号源内阻，阻值很小，满足： $R_b \ll 2(1 + \beta) R_e$

则，基极静态电流近似为：
$$I_{BQ} \approx \frac{1}{1 + \beta} \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{2R_e}$$

## • 2、静态分析

静态基极电流近似值为:

$$I_{BQ} \approx \frac{1}{1+\beta} \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{2R_e}$$

静态发射极电流:

$$I_{EQ} = (1+\beta)I_{BQ} \approx \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{2R_e}$$

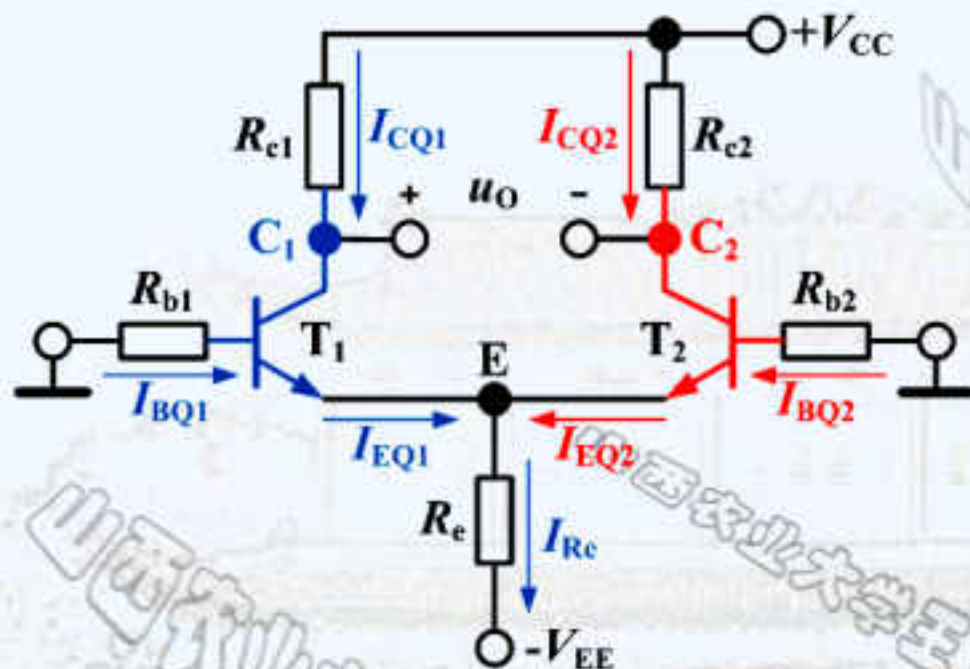
静态发射极电位:

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

静态管压降:  $U_{CEQ} = U_{CQ} - U_{EQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c + U_{BEQ}$

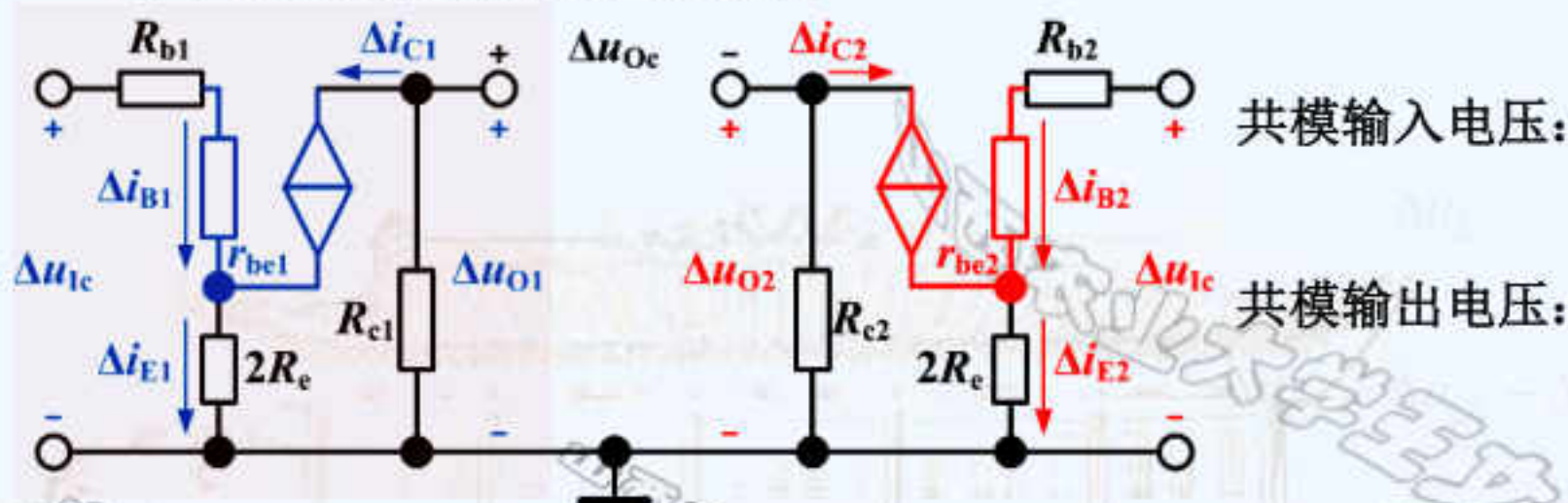
由于  $U_{CQ1} = U_{CQ2} = V_{CC} - I_{CQ}R_c$ , 所以  $u_O = U_{CQ1} - U_{CQ2} = 0$

由于电路的对称性, 双端输出时, 输出电压的直流分量为 0, 接负载后负载上电流为 0。因此无论是否接负载, 静态工作点  $Q$  均保持不变。





### • 3、对共模信号的抑制作用



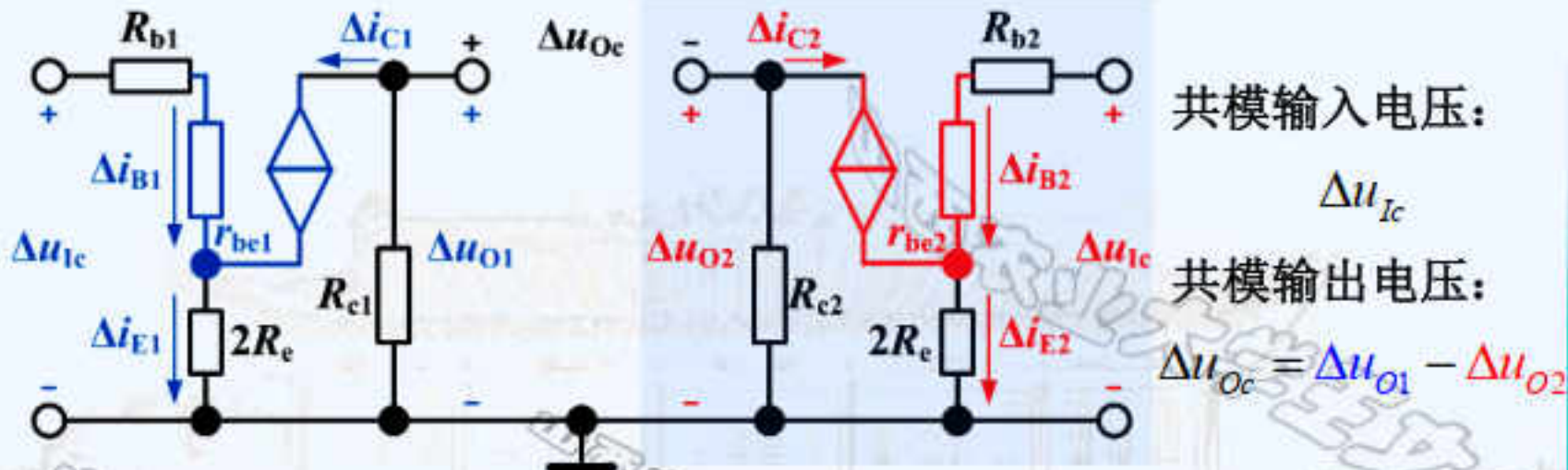
共模输入电压:  $\Delta u_{Ic} = \Delta i_{B1}(R_{b1} + r_{be1}) + (1 + \beta_1)\Delta i_{B1}2R_e$

T<sub>1</sub> 管输出电压:  $\Delta u_{O1} = -\Delta i_{C1}R_{c1} = -\beta_1\Delta i_{B1}R_{c1}$

T<sub>1</sub> 管的电压放大倍数:  $A_{u1} = \frac{\Delta u_{O1}}{\Delta u_{Ic}} = -\frac{\beta_1 R_{c1}}{R_{b1} + r_{be1} + 2(1 + \beta_1)R_e}$

电阻  $R_e$  对共模信号起负反馈作用, 限制了电路对共模信号的放大能力, 因此被称为共模负反馈电阻。

### • 3、对共模信号的抑制作用



$T_1$  管输出电压:  $\Delta u_{O1} = -\Delta i_{C1} R_{c1} = -\beta_1 \Delta i_{B1} R_{c1}$

同理,  $T_2$  管输出电压:  $\Delta u_{O2} = -\Delta i_{C2} R_{c2} = -\beta_2 \Delta i_{B2} R_{c2}$

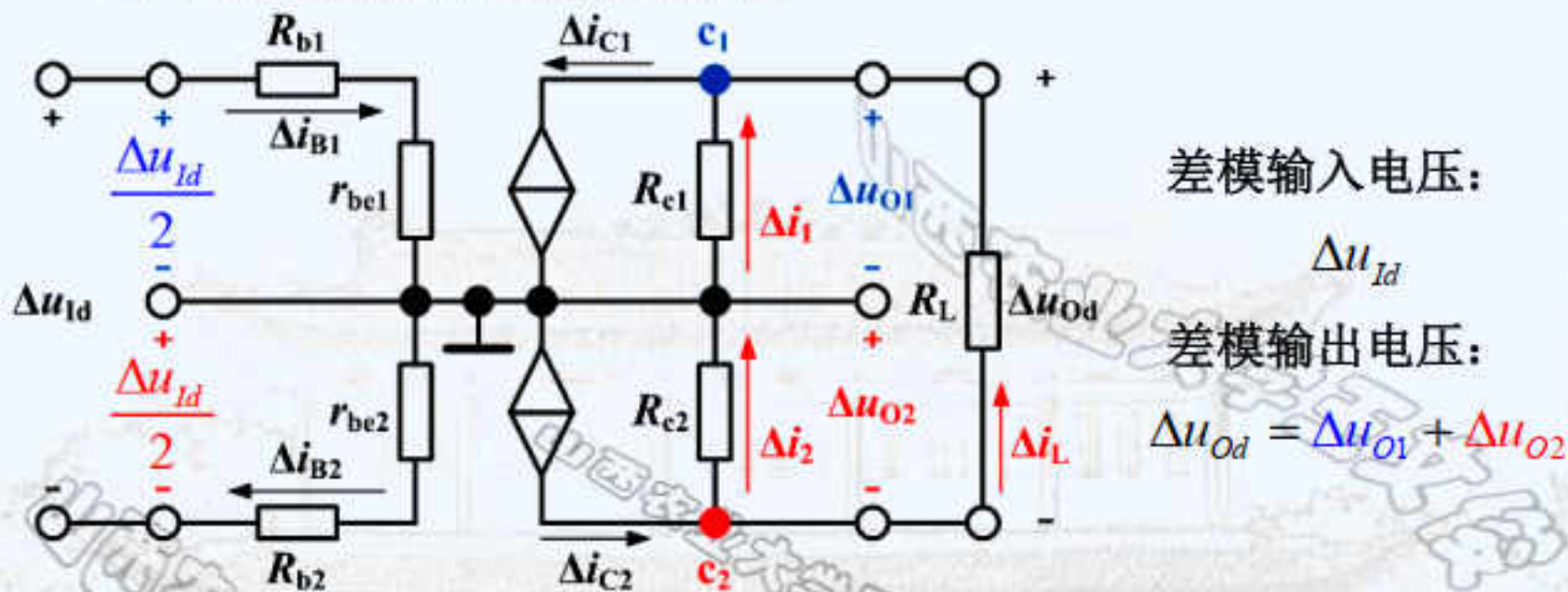
共模输出电压:  $\Delta u_{Oc} = \Delta u_{O1} - \Delta u_{O2} = \beta_2 \Delta i_{B2} R_{c2} - \beta_1 \Delta i_{B1} R_{c1}$

当电路参数理想对称时, 有  $\beta_1 = \beta_2, \Delta i_{B1} = \Delta i_{B2}, R_{c1} = R_{c2}$ , 则  $\Delta u_{Oc} = 0$

由于电路的对称性, 双端输出时, 共模输出电压为 **0**, 接负载后负载上电流为 **0**。因此无论是否接负载, 对共模信号的分析结果不变。



#### • 4、对差模信号的放大作用



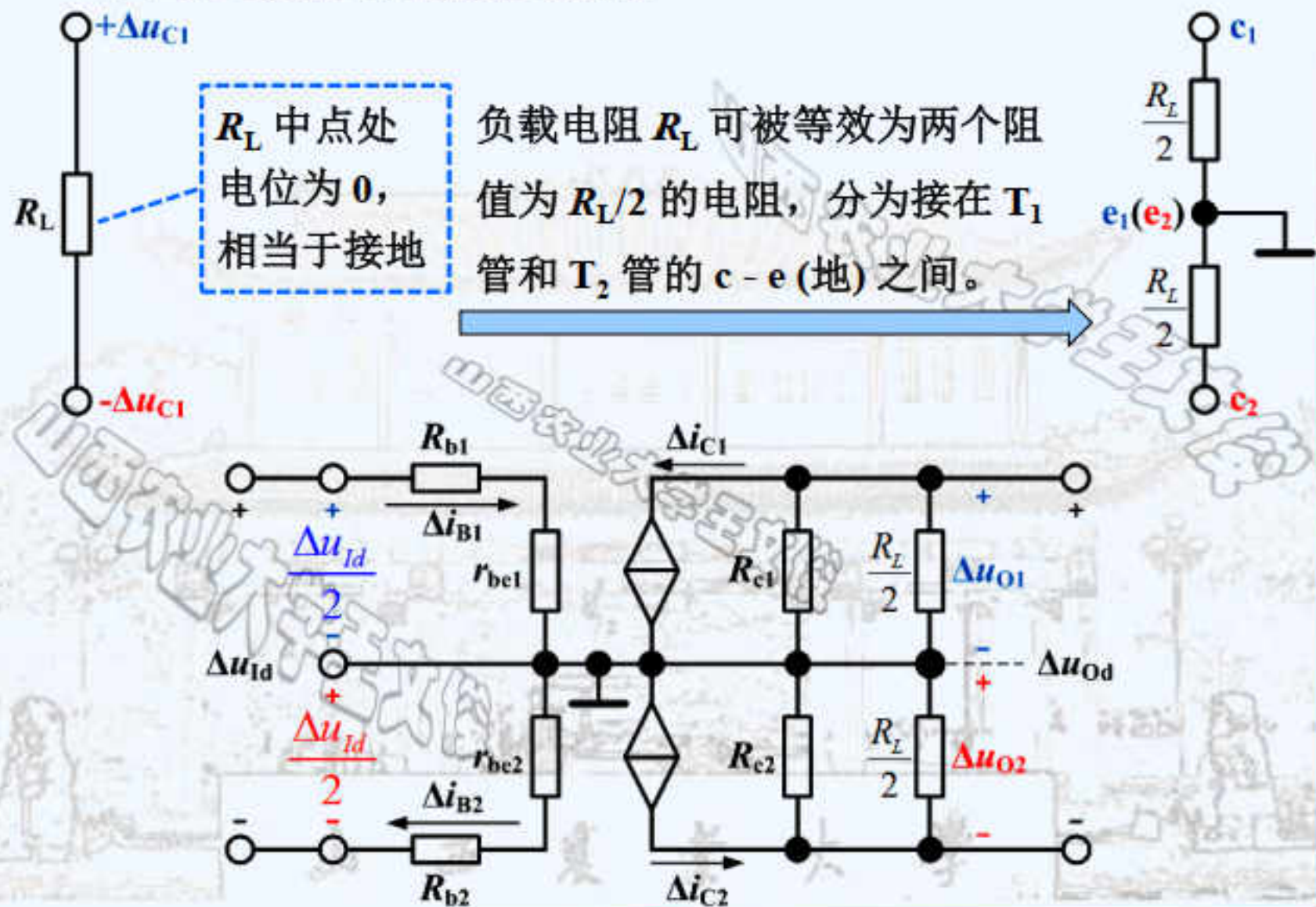
假设接入负载后,  $R_{c1}$ 、 $R_{c2}$ 、 $R_L$  上电流分别为  $\Delta i_1, \Delta i_2, \Delta i_L$

$c_1$  点电流方程:  $\Delta i_{C1} = \Delta i_1 + \Delta i_L$ ,  $c_2$  点电流方程:  $\Delta i_{C2} = \Delta i_2 + \Delta i_L$

由于电路对称性, 有  $\Delta i_{C1} = \Delta i_{C2}$ , 因此  $\Delta i_1 = \Delta i_2$

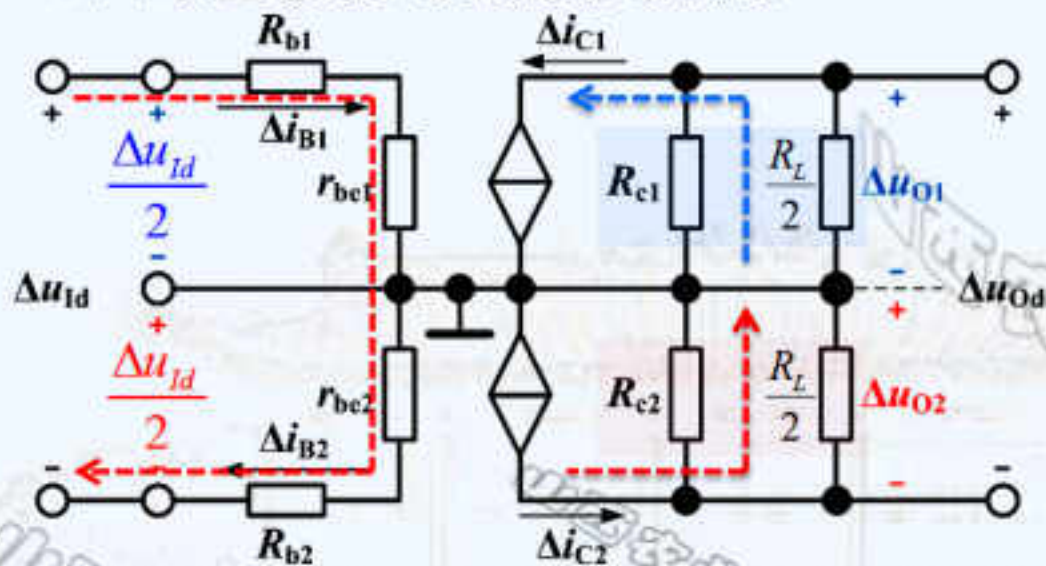
$c_1$  点电位:  $\Delta u_{C1} = -\Delta i_1 R_{c1}$ ,  $c_2$  点电位:  $\Delta u_{C2} = \Delta i_2 R_{c2} = -\Delta u_{C1}$

#### 4、对差模信号的放大作用





#### 4、对差模信号的放大作用



差模输入电压:

$$\Delta u_{Id}$$

差模输出电压:

$$\Delta u_{Od} = \Delta u_{O1} + \Delta u_{O2}$$

$$\text{差模输入电压: } \Delta u_{Id} = \Delta i_{B1}(R_{b1} + r_{be1}) + \Delta i_{B2}(R_{b2} + r_{be2}) = 2\Delta i_B(R_b + r_{be})$$

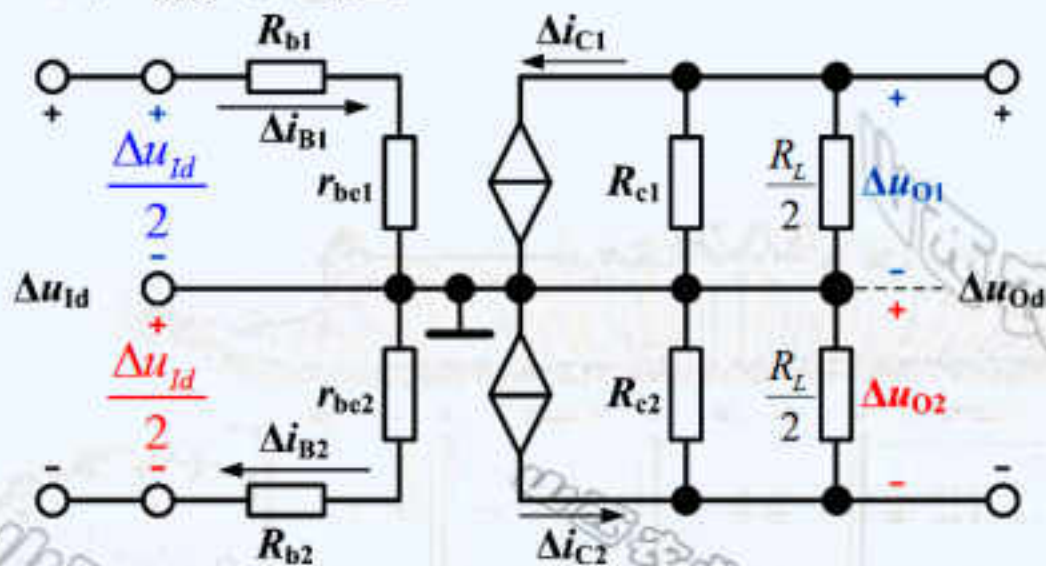
差模输出电压:

差模放大倍数:

$$\begin{aligned} \Delta u_{Od} &= \Delta u_{O1} + \Delta u_{O2} \\ &= -\Delta i_{C1}\left(R_{c1} \parallel \frac{R_L}{2}\right) - \Delta i_{C2}\left(R_{c2} \parallel \frac{R_L}{2}\right) \\ &= -2\beta\Delta i_B\left(R_c \parallel \frac{R_L}{2}\right) \end{aligned} \quad A_d = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}} = -\frac{\beta\left(R_c \parallel \frac{R_L}{2}\right)}{R_b + r_{be}}$$

$$\text{共模抑制比: } K_{CMR} = \left|\frac{A_d}{A_c}\right| = \infty$$

## • 5、输入电阻



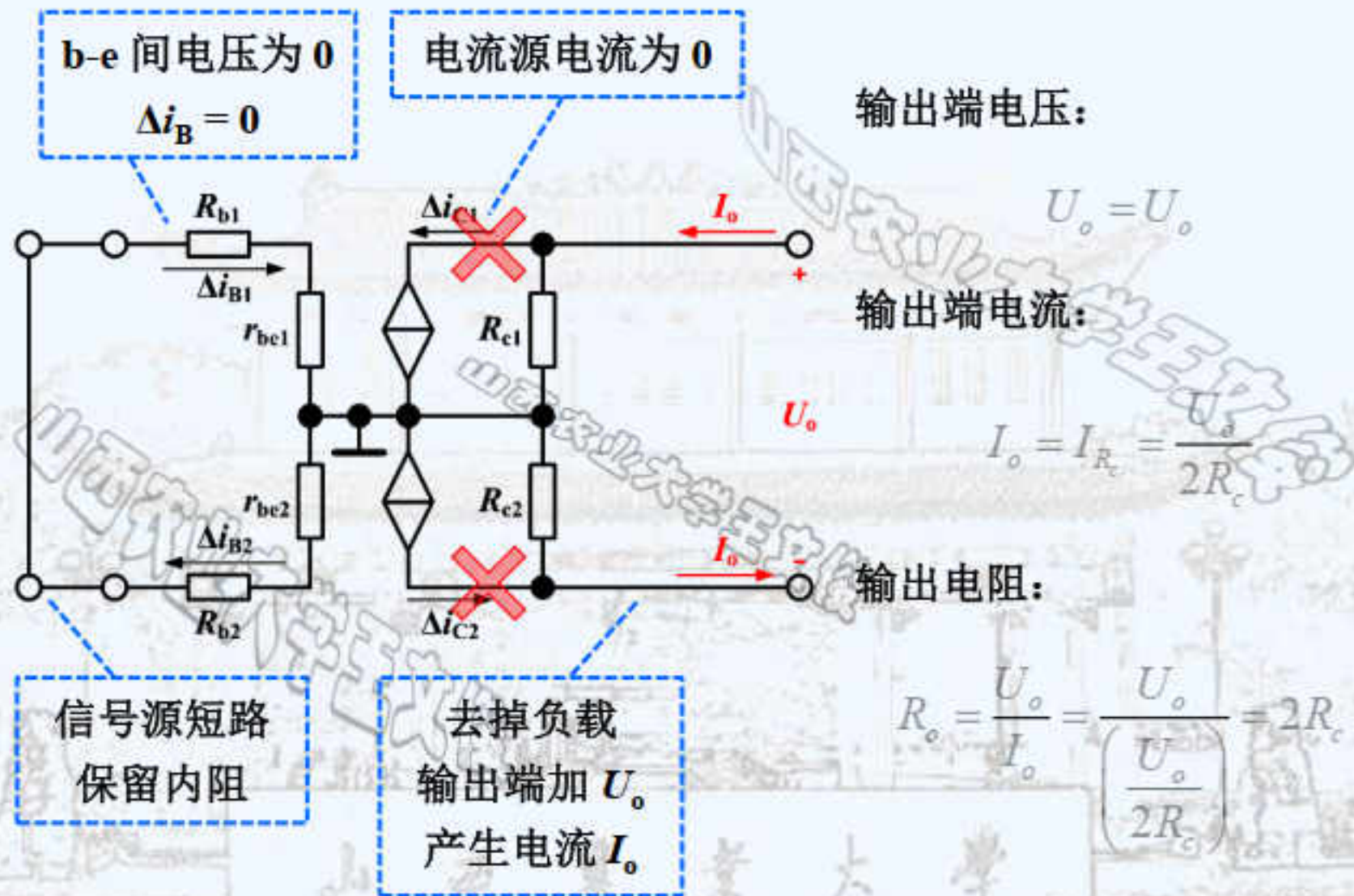
差模输入电压:  $\Delta u_{Id} = \Delta i_{B1} (R_{b1} + r_{be1}) + \Delta i_{B2} (R_{b2} + r_{be2}) = 2\Delta i_B (R_b + r_{be})$

差模输入电流:  $\Delta i_{Id} = \Delta i_{B1} = \Delta i_{B2} = \Delta i_B$

输入电阻:  $R_i = \frac{\Delta u_{Id}}{\Delta i_{Id}} = \frac{2\Delta i_B (R_b + r_{be})}{\Delta i_B} = 2(R_b + r_{be})$



## • 6、输出电阻



## • 7、差分放大电路与单管共射放大电路的对比

电路	单管共射放大电路	双端输入、双端输出
电压放大倍数	$-\frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{R_b + r_{be}}$	$-\frac{\beta\left(R_c \parallel \frac{R_L}{2}\right)}{R_b + r_{be}}$
输入电阻	$R_b + r_{be}$	$2(R_b + r_{be})$
输出电阻	$R_c$	$2R_c$

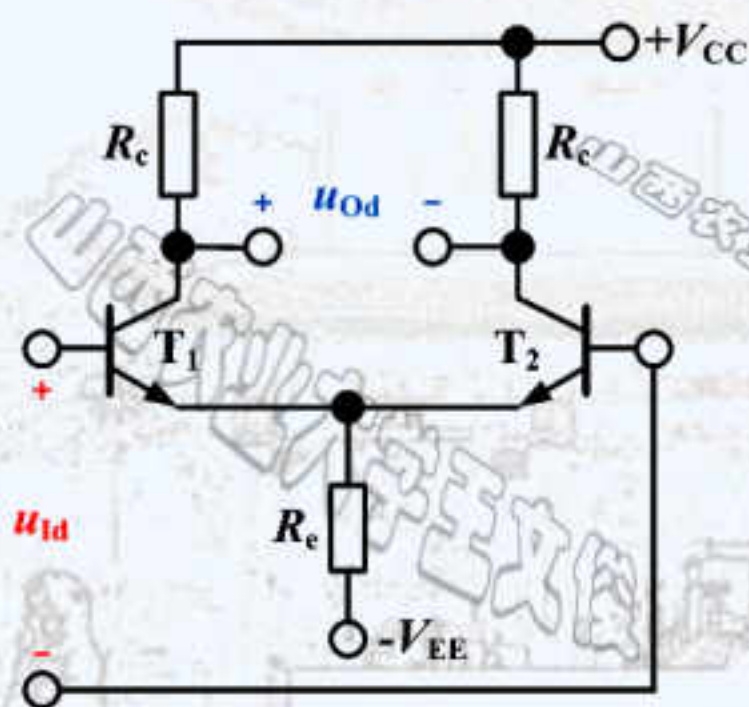
- 虽然差分放大电路用了两只晶体管，但它的放大能力只相当于单管共射放大电路。
- 差分放大电路是以牺牲一只管子的放大倍数为代价来换取低温漂的效果。
- 差分放大电路的输入电阻是单管共射放大电路输入电阻的两倍。
- 差分放大电路的输出电阻是单管共射放大电路输出电阻的两倍。



# 十四、差分放大电路的电压传输特性

## • 1、电压传输特性

放大电路输出电压与输入电压间的关系称为电压传输特性。 $u_O = f(u_I)$



差分放大电路

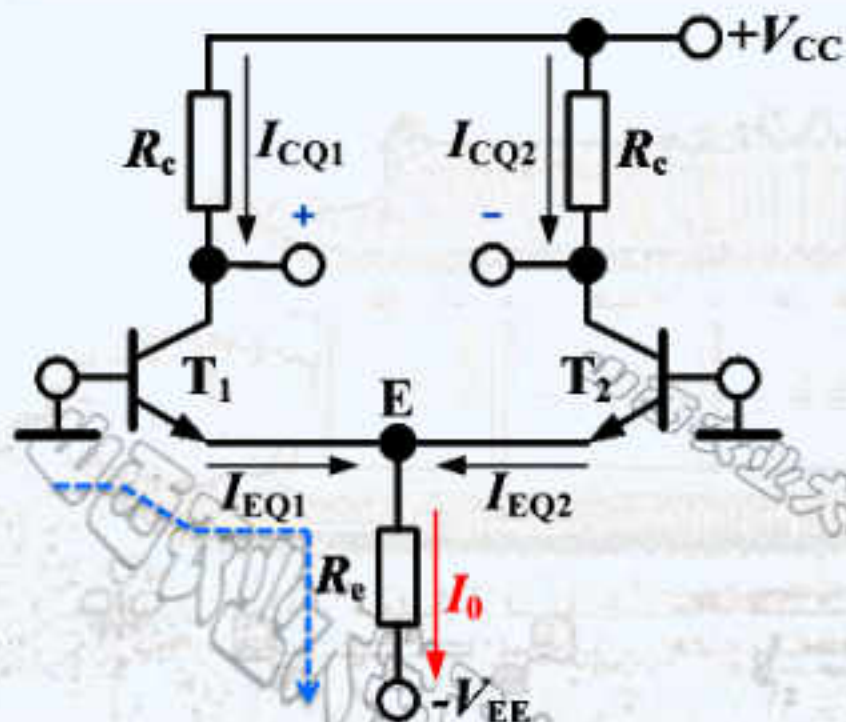
差分放大电路的电压传输特性：差模输出电压  $u_{Od}$  与差模输入电压  $u_{Id}$  间的关系曲线，也被称为差模传输特性，写为：

$$u_{Od} = f(u_{Id})$$

交流等效模型只适用于小信号的情况；当输入信号大范围变化时，则需要用电压传输特性曲线来进行描述。

## • 2、静态分析

令输入信号  $u_{Id} = 0$ ，对电路进行静态分析。



对称性

$$\begin{cases} I_{CQ1} = I_{CQ2} = I_{CQ} \\ I_{EQ1} = I_{EQ2} = I_{EQ} \\ I_0 = I_{EQ1} + I_{EQ2} = 2I_{EQ} \end{cases}$$

假设  $T_1$  管和  $T_2$  管 b - e 间静态电压均为  $U_{BEQ}$ ，则发射极电流为：

$$I_{EQ} = I_S \left( e^{\frac{U_{BEQ}}{U_T}} - 1 \right) \approx I_S e^{\frac{U_{BEQ}}{U_T}}$$

基极回路方程：

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

联立求解，得  $U_{BEQ}$  与  $I_{EQ}$

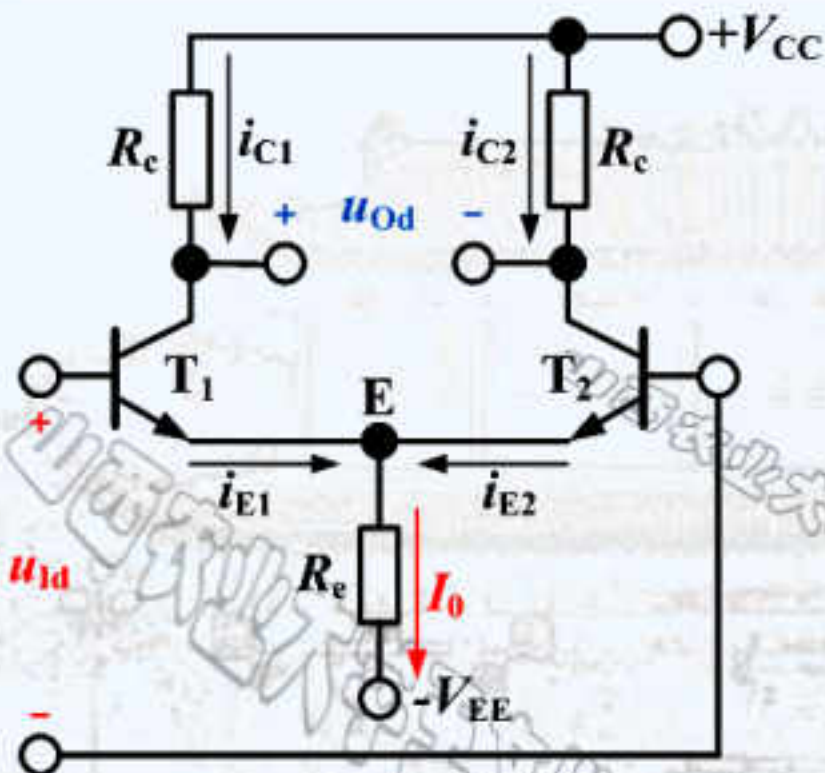
静态管压降：

$$\begin{aligned} U_{CEQ} &= U_{CQ} - U_{EQ} \\ &= V_{CC} - I_{CQ}R_c + U_{BEQ} \end{aligned}$$



### • 3、动态分析

输入信号为差模信号  $u_{Id}$ ，对电路进行动态分析。



E 点电流方程:

$$I_0 = i_{E1} + i_{E2}$$

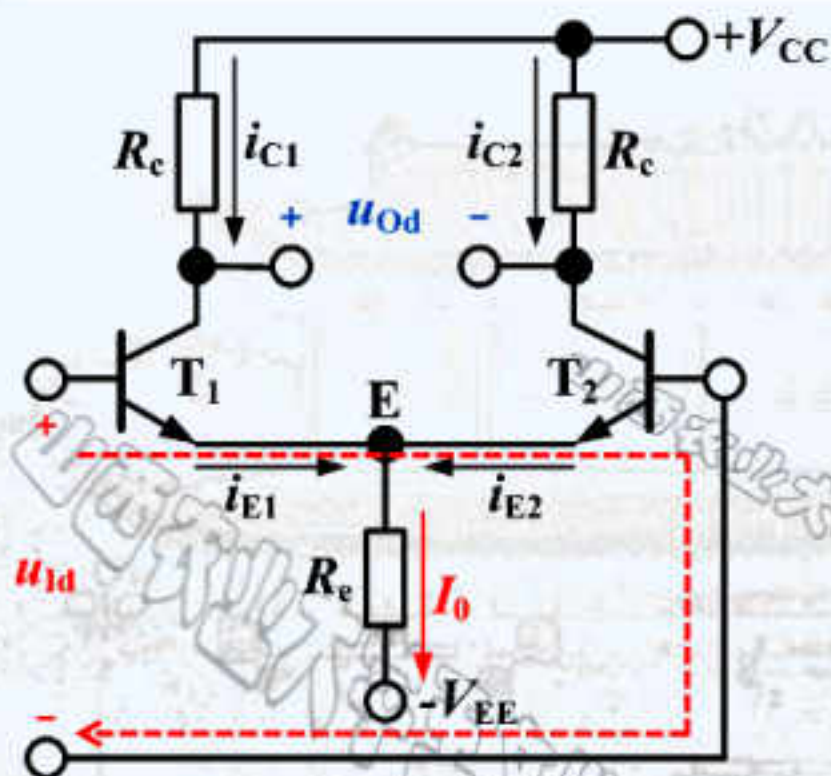
由于差模信号的作用， $T_1$  和  $T_2$  管 b - e 间电压不再相等，假设分别为  $u_{BE1}$ 、 $u_{BE2}$ ，则  $T_1$  和  $T_2$  管的发射极电流分别为：

$$\begin{cases} i_{E1} = I_S \left( e^{\frac{u_{BE1}}{U_T}} - 1 \right) \approx I_S e^{\frac{u_{BE1}}{U_T}} \\ i_{E2} = I_S \left( e^{\frac{u_{BE2}}{U_T}} - 1 \right) \approx I_S e^{\frac{u_{BE2}}{U_T}} \end{cases}$$

在差模信号作用下， $I_0$  保持不变。实际常用电流源代替电阻  $R_e$ ，使电流  $I_0$  保持恒定不变。

### • 3、动态分析

输入信号为差模信号  $u_{Id}$ ，对电路进行动态分析。



输入回路方程:

$$u_{Id} = u_{BE1} - u_{BE2}$$

$T_1$  和  $T_2$  管的集电极电位分别为:

$$\begin{cases} u_{C1} = V_{CC} - i_{C1}R_c \\ u_{C2} = V_{CC} - i_{C2}R_c \end{cases}$$

输出电压为:

$$\begin{aligned} u_{Od} &= u_{C1} - u_{C2} \\ &= -i_{C1}R_c + i_{C2}R_c \\ &= -(i_{C1} - i_{C2})R_c \\ &\approx -(i_{E1} - i_{E2})R_c \end{aligned}$$



### • 3、动态分析

• 输入电压:  $u_{Id} = u_{BE1} - u_{BE2}$

$$I_0 = i_{E1} + i_{E2}$$

$$= I_S e^{\frac{u_{BE1}}{U_T}} + I_S e^{\frac{u_{BE2}}{U_T}}$$

$$= I_S e^{\frac{u_{BE1}}{U_T}} \left( 1 + e^{\frac{u_{BE2} - u_{BE1}}{U_T}} \right)$$

$$= i_{E1} \left( 1 + e^{-\frac{u_{Id}}{U_T}} \right)$$



$$i_{E1} = \frac{I_0}{1 + e^{-\frac{u_{Id}}{U_T}}}$$

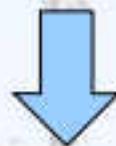
• 输出电压:  $u_{Od} \approx -(i_{E1} - i_{E2})R_c$

$$I_0 = i_{E1} + i_{E2}$$

$$= I_S e^{\frac{u_{BE1}}{U_T}} + I_S e^{\frac{u_{BE2}}{U_T}}$$

$$= I_S e^{\frac{u_{BE2}}{U_T}} \left( e^{\frac{u_{BE1} - u_{BE2}}{U_T}} + 1 \right)$$

$$= i_{E2} \left( 1 + e^{\frac{u_{Id}}{U_T}} \right)$$



$$i_{E2} = \frac{I_0}{1 + e^{\frac{u_{Id}}{U_T}}}$$

### • 3、动态分析

• 输入电压:  $u_{Id} = u_{BE1} - u_{BE2}$

$$\begin{aligned}
 i_{E1} - i_{E2} &= \frac{I_0}{1 + e^{-\frac{u_{Id}}{U_T}}} - \frac{I_0}{1 + e^{\frac{u_{Id}}{U_T}}} \\
 &= I_0 \frac{\left(1 + e^{\frac{u_{Id}}{U_T}}\right) - \left(1 + e^{-\frac{u_{Id}}{U_T}}\right)}{\left(1 + e^{-\frac{u_{Id}}{U_T}}\right)\left(1 + e^{\frac{u_{Id}}{U_T}}\right)} \\
 &= I_0 \frac{e^{\frac{u_{Id}}{U_T}} - e^{-\frac{u_{Id}}{U_T}}}{e^{\frac{u_{Id}}{U_T}} + 2 + e^{-\frac{u_{Id}}{U_T}}}
 \end{aligned}$$

• 输出电压:  $u_{Od} \approx -(i_{E1} - i_{E2})R_c$

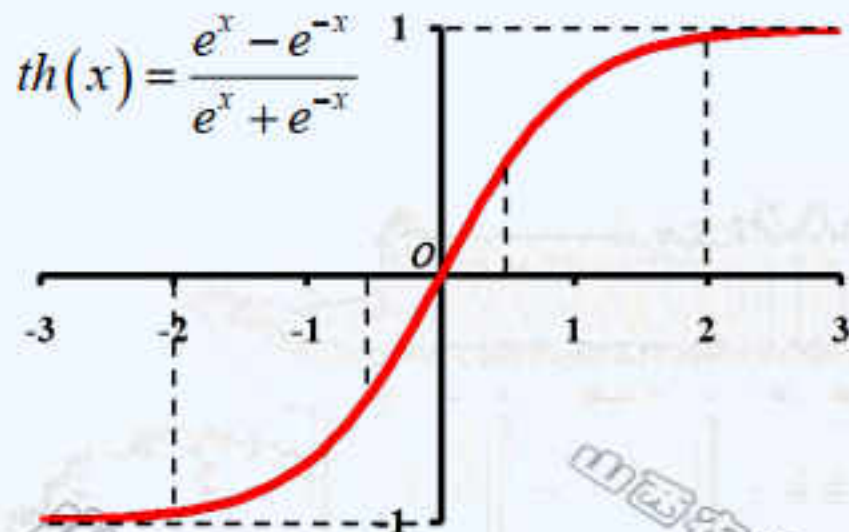
$$\begin{aligned}
 &= I_0 \frac{\left(e^{\frac{u_{Id}}{2U_T}} - e^{-\frac{u_{Id}}{2U_T}}\right)\left(e^{\frac{u_{Id}}{2U_T}} + e^{-\frac{u_{Id}}{2U_T}}\right)}{\left(e^{\frac{u_{Id}}{2U_T}} + e^{-\frac{u_{Id}}{2U_T}}\right)^2} \\
 &= I_0 \frac{e^{\frac{u_{Id}}{2U_T}} - e^{-\frac{u_{Id}}{2U_T}}}{e^{\frac{u_{Id}}{2U_T}} + e^{-\frac{u_{Id}}{2U_T}}} = I_0 \operatorname{th}\left(\frac{u_{Id}}{2U_T}\right)
 \end{aligned}$$

电压  
传输  
特性

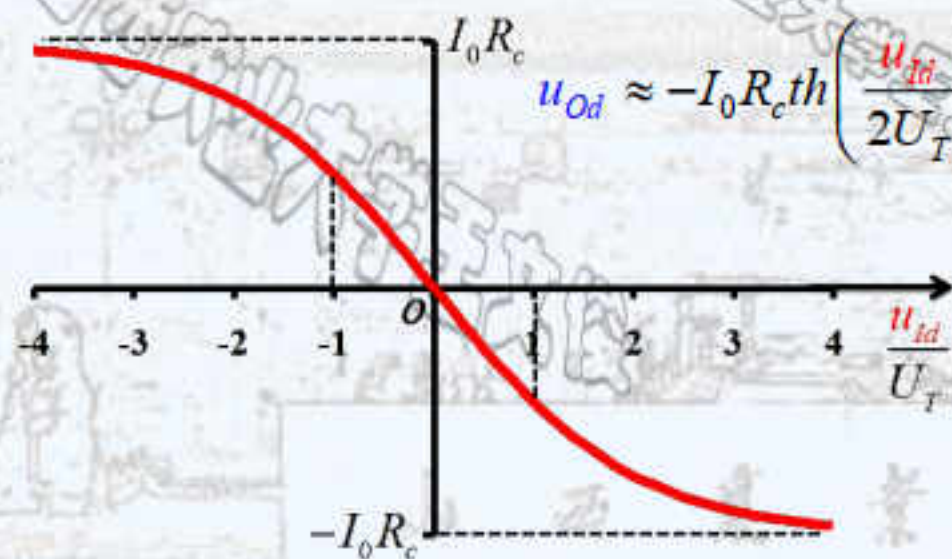
$$\begin{aligned}
 u_{Od} &\approx -I_0 R_c \operatorname{th}\left(\frac{u_{Id}}{2U_T}\right) \\
 &\approx -I_0 R_c \frac{u_{Id}}{2U_T}
 \end{aligned}$$



# 4、电压传输特性曲线



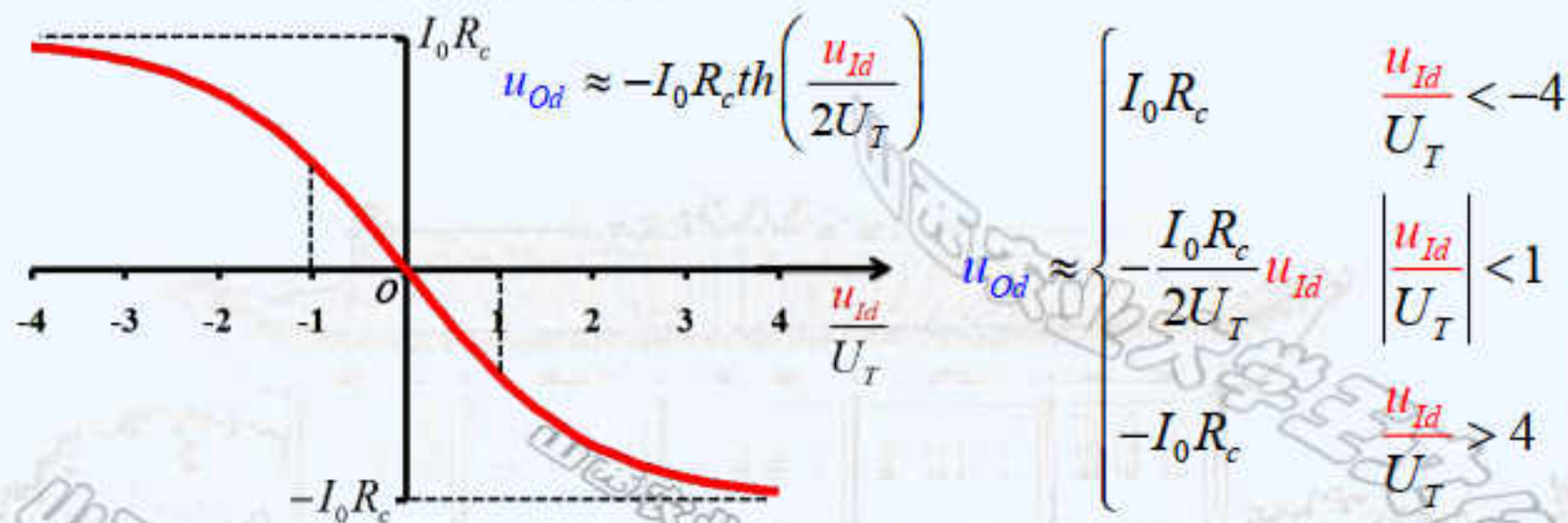
$$th(x) \approx \begin{cases} -1 & x < -2 \\ x & |x| < 0.5 \\ 1 & x > 2 \end{cases}$$



$$u_{Od} \approx -I_0 R_c th\left(\frac{u_{Id}}{2U_T}\right)$$

$$u_{Od} \approx \begin{cases} I_0 R_c & \frac{u_{Id}}{U_T} < -4 \\ -\frac{I_0 R_c}{2U_T} u_{Id} & \left| \frac{u_{Id}}{U_T} \right| < 1 \\ -I_0 R_c & \frac{u_{Id}}{U_T} > 4 \end{cases}$$

## • 4、电压传输特性曲线



- 当  $u_{Id} \ll 2U_T$  时，输出电压与输入电压呈线性关系。斜率就是电路的差模放大倍数。

$$A_d = \frac{u_{Od}}{u_{Id}} \approx -\frac{I_0 R_c}{2U_T}$$

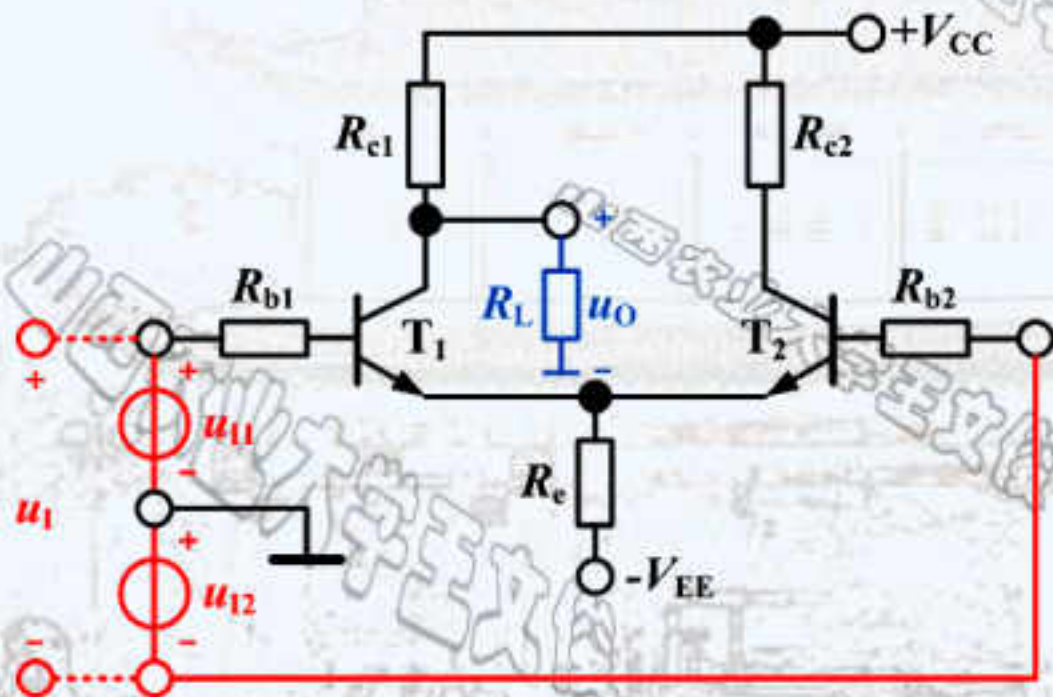
- 当输入电压幅值过大时，输出电压将产生失真，而趋于不变。

$$u_{Od} \approx \pm I_0 R_c$$



# 十五、双端输入单端输出的差分放大电路

## 1、双端输入、单端输出的差分放大电路



双端输入、单端输出的差分放大电路

静态分析

静态工作点  $Q$

动态分析

共模放大倍数  $A_c$

差模放大倍数  $A_d$

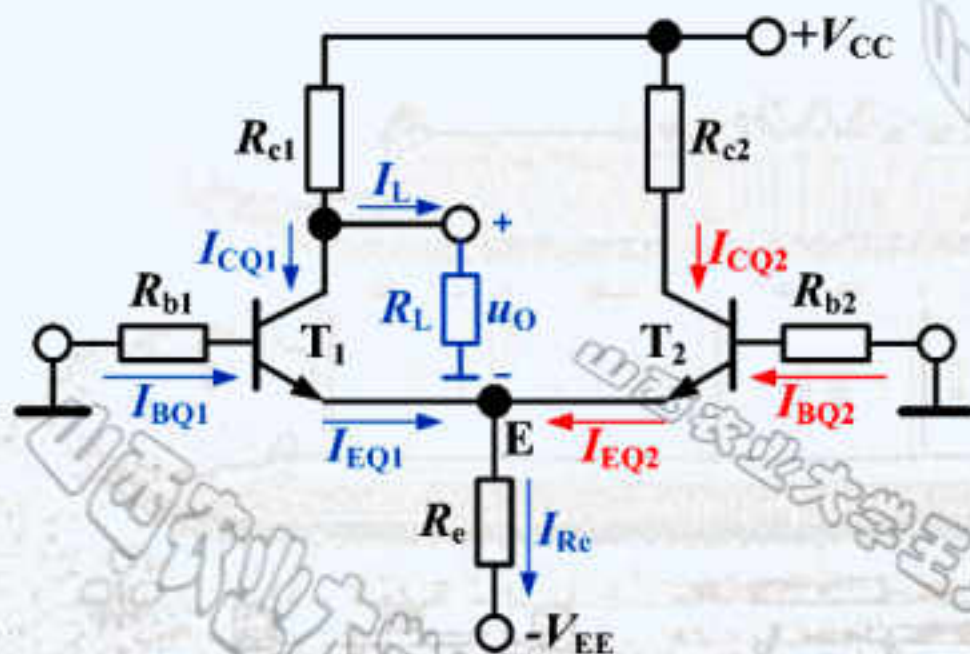
共模抑制比  $K_{CMR}$

输入电阻  $R_i$

输出电阻  $R_o$

## • 2、静态分析

令输入信号  $u_{I1} = u_{I2} = 0$ ，对电路进行静态分析。



差分放大电路的直流通路

输入回路， $T_1$  和  $T_2$  管的基极-发射极均经相同的基极电阻  $R_b$ ，接在地与 E 点之间：

$$U_{BEQ1} = U_{BEQ2} = U_{BEQ}$$

放大电路的输入回路参数对称，基极静态电流相等：

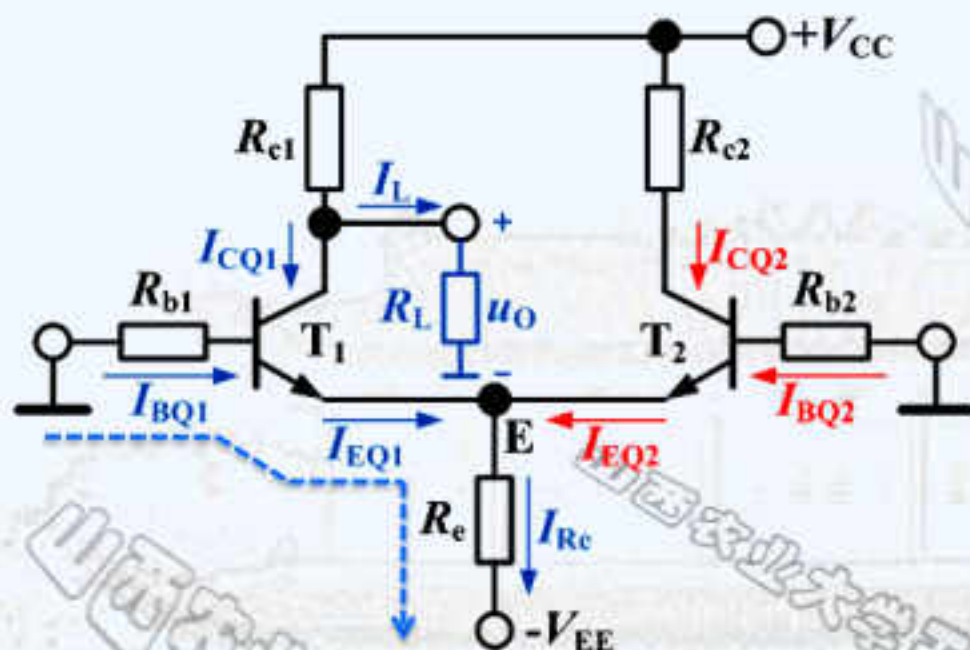
$$I_{BQ1} = I_{BQ2} = I_{BQ}$$

由于晶体管参数完全一致，则静态发射极电流也相等：

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



## • 2、静态分析



电阻  $R_e$  中的电流为  $T_1$  管和  $T_2$  管发射极电流之和:

$$I_{Re} = I_{EQ1} + I_{EQ2} = 2I_{EQ}$$

基极回路方程:

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

基极静态电流:

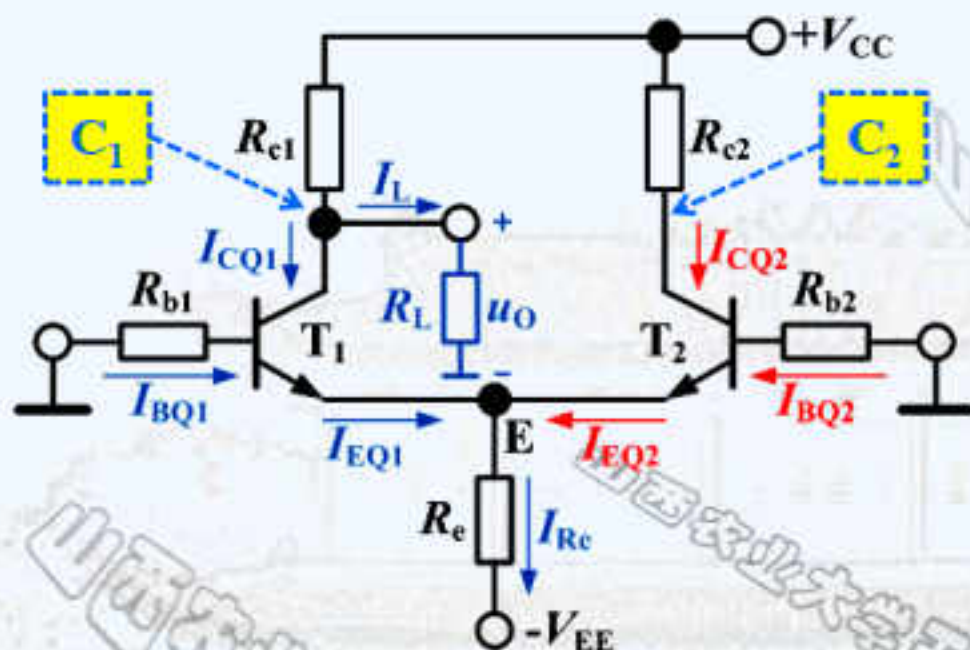
$$I_{BQ} = \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{R_b + 2(1 + \beta)R_e}$$

通常  $R_b$  为信号源内阻, 阻值很小, 满足:  $R_b \ll 2(1 + \beta)R_e$

则, 基极静态电流近似为:  $I_{BQ} \approx \frac{1}{1 + \beta} \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{2R_e}$

静态发射极电流:  $I_{EQ} = (1 + \beta)I_{BQ} \approx \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{2R_e}$

## • 2、静态分析



电阻  $R_{c1}$  的电流为:

$$I_{R_{c1}} = I_{CQ} + I_L$$

$T_1$  管的集电极电位为:

$$\begin{cases} U_{CQ1} = V_{CC} - I_{R_{c1}} R_{c1} \\ = V_{CC} - (I_{CQ} + I_L) R_{c1} \\ U_{CQ1} = I_L R_L \end{cases}$$

联立消去  $I_L$ , 得  $T_1$  管集电极电位:  $U_{CQ1} = \frac{R_L}{R_{c1} + R_L} V_{CC} - (R_{c1} \parallel R_L) I_{CQ}$

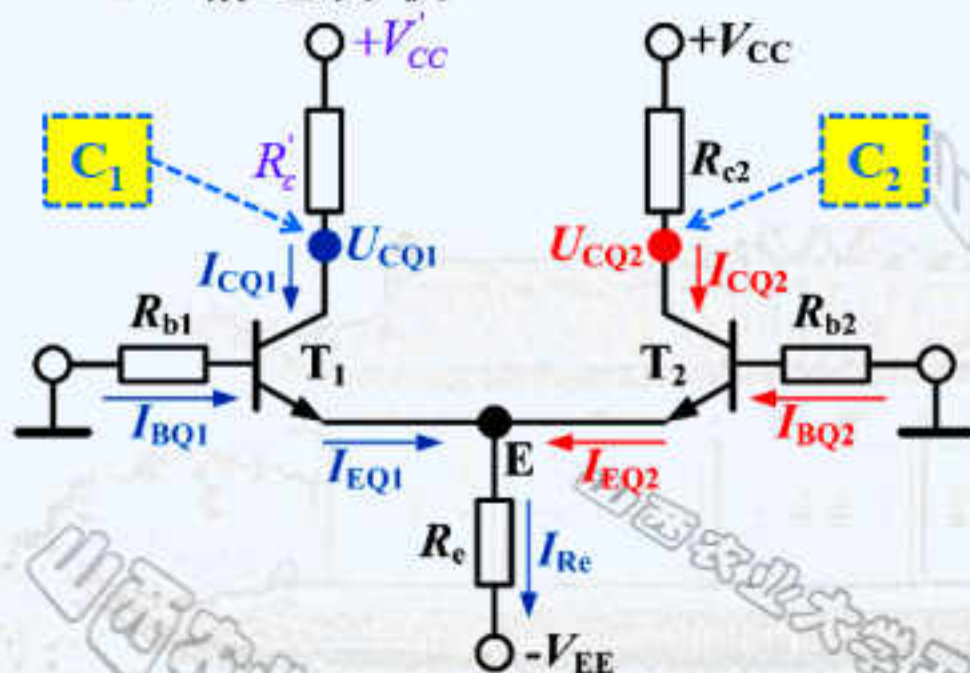
$$\text{令: } \begin{cases} V'_{CC} = \frac{R_L}{R_{c1} + R_L} V_{CC} \\ R'_c = R_{c1} \parallel R_L \end{cases}$$

$T_1$  管的静态集电极电位为:

$$U_{CQ1} = V'_{CC} - I_{CQ} R'_c$$



## • 2、静态分析



由于输出回路不对称， $T_1$  和  $T_2$  管的集电极电位不相等：

$$\begin{cases} U_{CQ1} = V'_{CC} - I_{CQ} R'_c \\ U_{CQ2} = V_{CC} - I_{CQ} R_c \end{cases}$$

静态发射极电位：

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

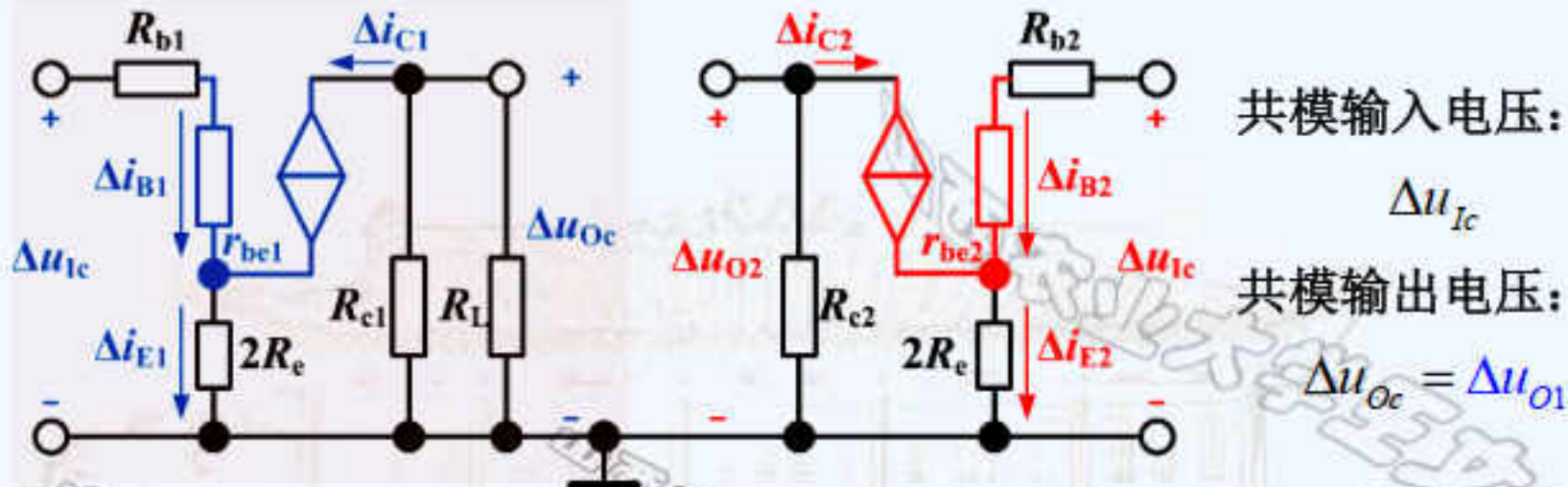
静态管压降也不相等：

$$\begin{cases} U_{CEQ1} = U_{CQ1} - U_{EQ} = V'_{CC} - I_{CQ} R'_c + U_{BEQ} \\ U_{CEQ2} = U_{CQ2} - U_{EQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c + U_{BEQ} \end{cases}$$

由于负载接在  $T_1$  管的集电极和地之间，所以  $u_o = U_{CQ1} \neq 0$

单端输出时，由于输出回路不对称，输出电压中包含直流分量。

### • 3、对共模信号的抑制作用



共模输入电压:  $\Delta u_{Ic} = \Delta i_{B1} (R_{b1} + r_{be1}) + (1 + \beta_1) \Delta i_{B1} 2R_e$

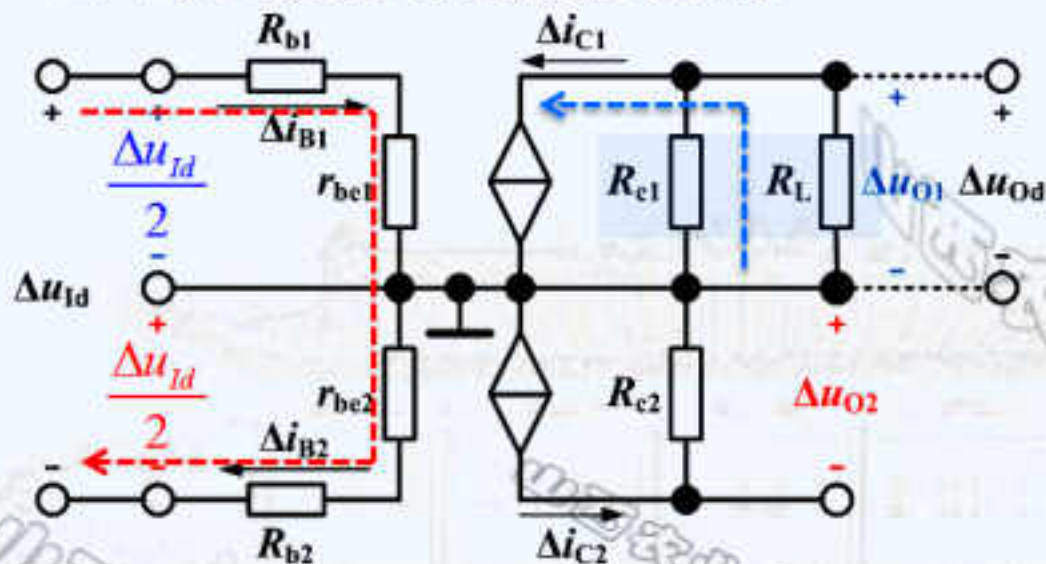
共模输出电压:  $\Delta u_{Oc} = -\Delta i_{C1} (R_{c1} \parallel R_L) = -\beta_1 \Delta i_{B1} (R_{c1} \parallel R_L)$

共模放大倍数:  $A_c = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}} = -\frac{\beta (R_c \parallel R_L)}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta) R_e}$

单端输出只利用了电阻  $R_e$  对共模信号的负反馈作用来减小温漂, 而并没有利用电路的对称性来抵消温漂, 因此共模放大倍数不为零。



#### • 4、对差模信号的放大作用



差模输入电压:

$$\Delta u_{Id}$$

差模输出电压:

$$\Delta u_{Od} = \Delta u_{O1}$$

$$\text{差模输入电压: } \Delta u_{Id} = \Delta i_{B1}(R_{b1} + r_{be1}) + \Delta i_{B2}(R_{b2} + r_{be2}) = 2\Delta i_B(R_b + r_{be})$$

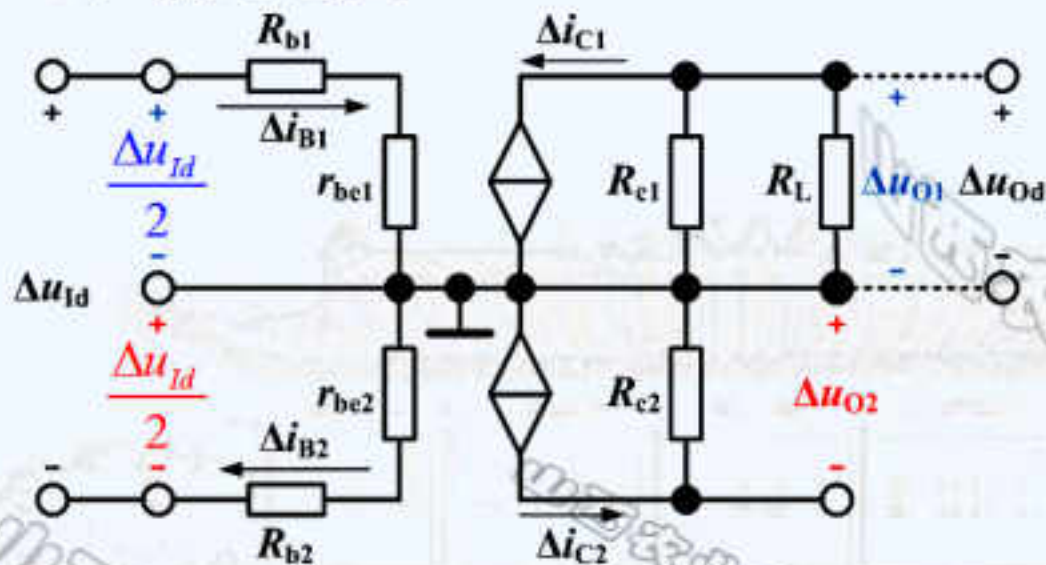
$$\text{差模输出电压: } \Delta u_{Od} = \Delta u_{O1} = -\Delta i_C(R_c \parallel R_L) = -\beta\Delta i_B(R_c \parallel R_L)$$

$$\text{差模放大倍数: } A_d = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}} = -\frac{1}{2} \frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{R_b + r_{be}}$$

$$\text{共模抑制比: } K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = \frac{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}{2(R_b + r_{be})}$$

单端输出的差模  
电压放大倍数为  
双端输出的一半。

## • 5、输入电阻



差模输入电压:  $\Delta u_{Id} = \Delta i_{B1}(R_{b1} + r_{be1}) + \Delta i_{B2}(R_{b2} + r_{be2}) = 2\Delta i_B(R_b + r_{be})$

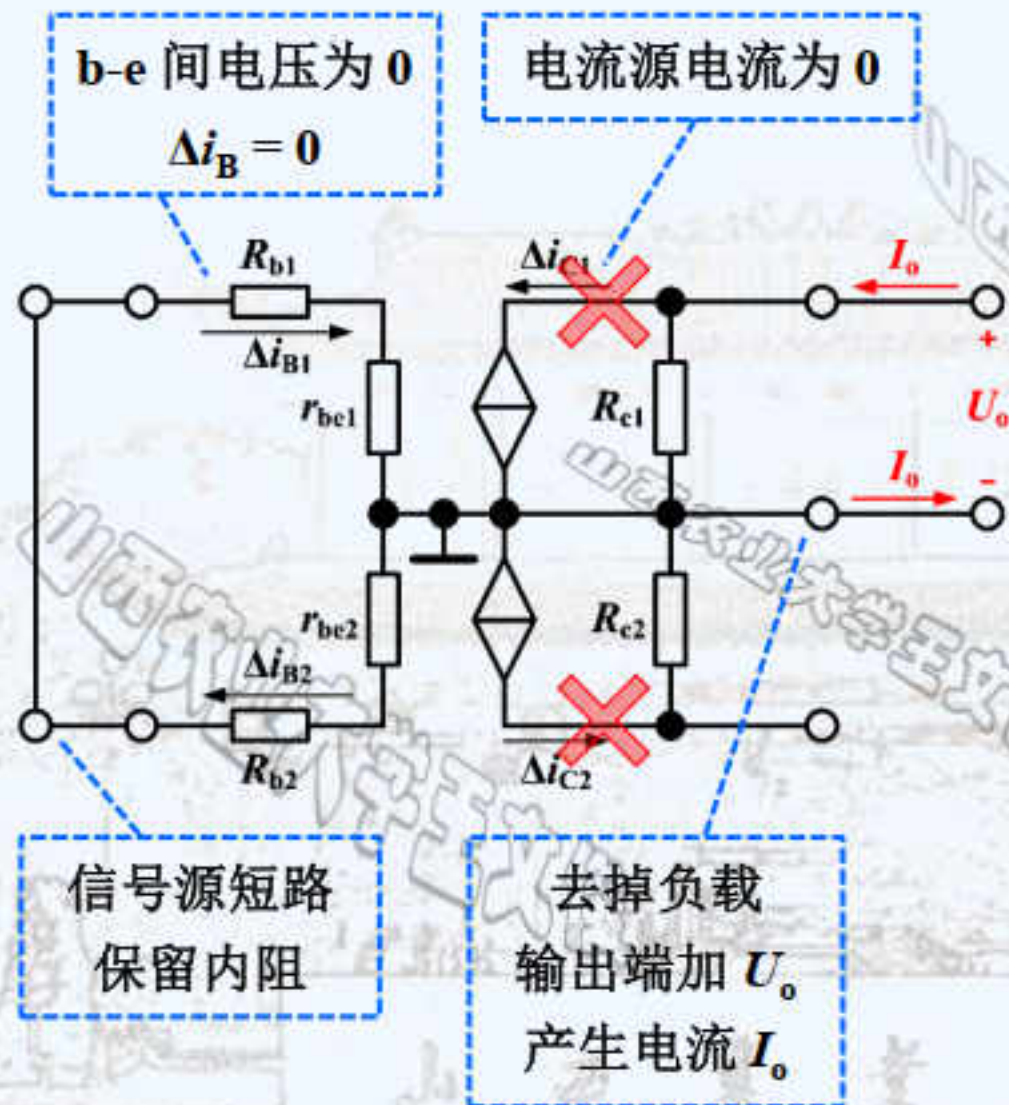
差模输入电流:  $\Delta i_{Id} = \Delta i_{B1} = \Delta i_{B2} = \Delta i_B$

输入电阻:  $R_i = \frac{\Delta u_{Id}}{\Delta i_{Id}} = \frac{2\Delta i_B(R_b + r_{be})}{\Delta i_B} = 2(R_b + r_{be})$

由于输入回路不变, 单端输出的输入电阻与双端输出的相等。



## • 6、输出电阻



输出端电压:

$$U_o = U_o$$

输出端电流:

$$I_o = I_{R_c} = \frac{U_o}{R_c}$$

输出电阻:

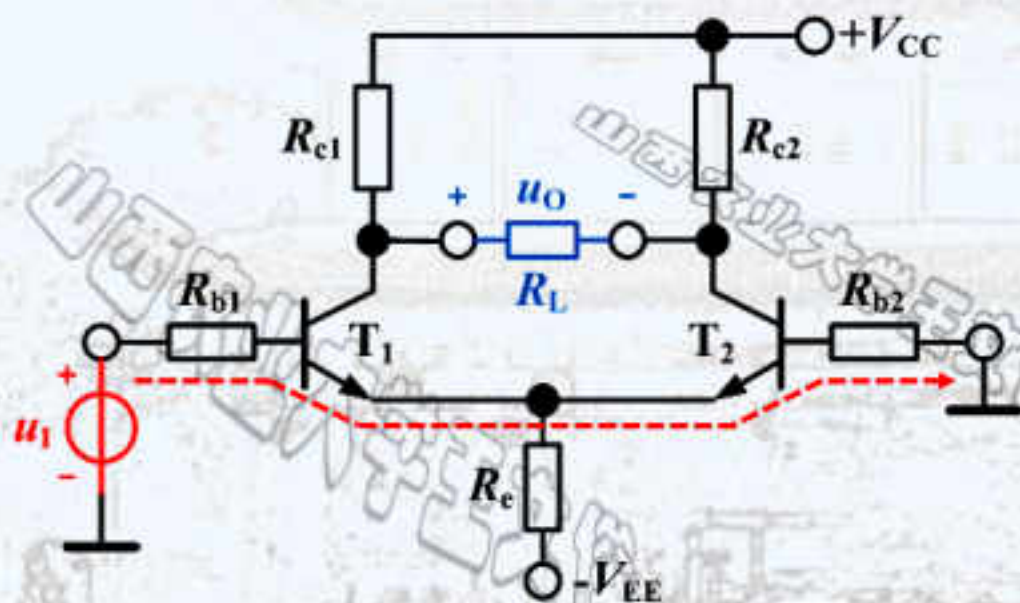
$$R_o = \frac{U_o}{I_o} = \frac{U_o}{\left(\frac{U_o}{R_c}\right)} = R_c$$

单端输出的输出电阻为双端输出的一半。

## 十六、单端输入的差分放大电路

### • 1、单端输入、双端输出的差分放大电路

单端输入：两个输入端有一个接地，输入信号加在另一端和地之间



单端输入、双端输出的差分放大电路

由于电路对于差模信号，是通过发射极相连的方式，将  $T_1$  管的发射极电流传递到  $T_2$  管的发射极的，因此称为射极耦合电路。

该电路的直流通路与双端输入、双端输出的差分放大电路的完全相同，因此静态工作点也完全相同。

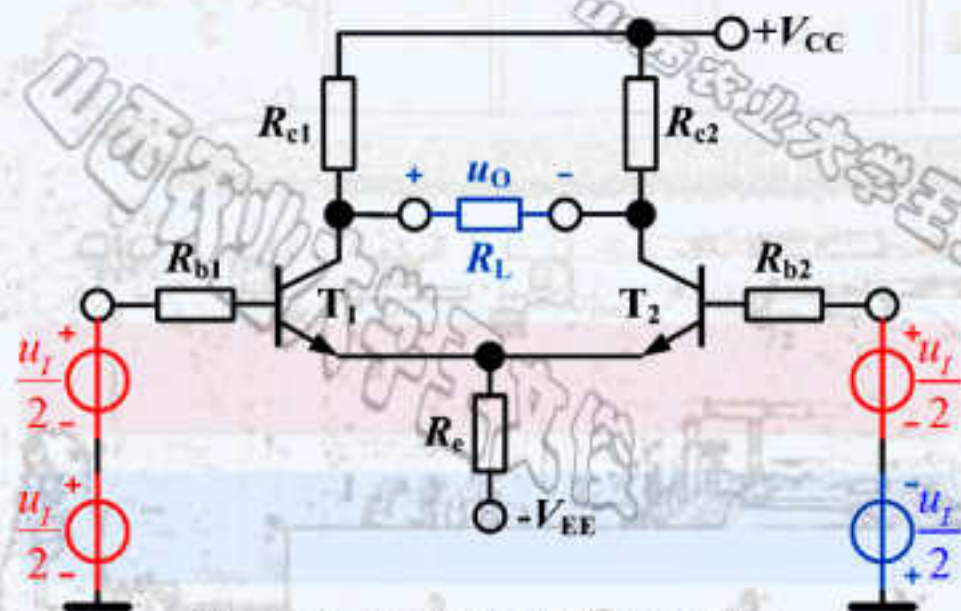


## • 2、输入信号的等效变换

任意一组输入信号都可分解为共模信号和差模信号之和。

输入信号  $\begin{cases} u_{I1} = u_I \\ u_{I2} = 0 \end{cases}$  分解  $\begin{cases} u_I = \frac{u_I}{2} + \frac{u_I}{2} \\ 0 = \frac{u_I}{2} - \frac{u_I}{2} \end{cases}$

共模信号:  $u_{Ic} = \frac{u_I}{2}$   
 差模信号:  $u_{Id} = u_I$



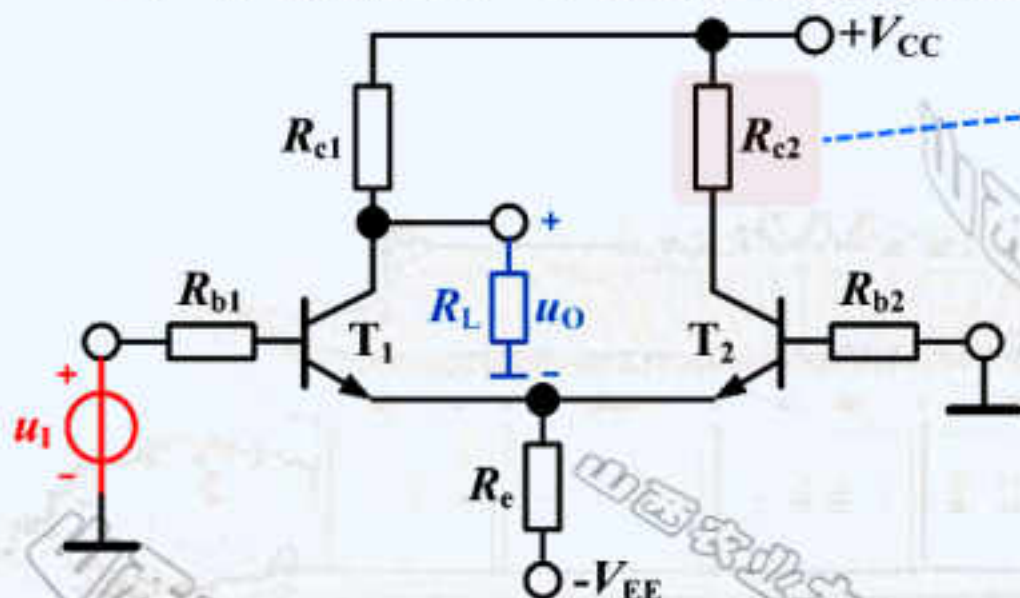
输入信号的等效变换电路

单端输入、双端输出的差分放大电路可等效为：共模信号  $u_I/2$  和差模信号  $u_I$  共同作用下的双端输入、双端输出的差分放大电路。

输出电压为：

$$\Delta u_O = A_d \Delta u_I + A_c \frac{\Delta u_I}{2}$$

### • 3、单端输入、单端输出的差分放大电路



对于单输出电路，常将不输出信号一边的  $R_c$  省掉。

该电路的直流通路与双端输入、单端输出的差分放大电路的完全相同，因此静态工作点也完全相同。

单端输入、单端输出的差分放大电路

单端输入、单端输出的差分放大电路可等效为：共模信号  $u_I/2$  和差模信号  $u_I$  共同作用下的双端输入、单端输出的差分放大电路。

单端输出的输出电压中包含直流分量：

$$\begin{cases} \Delta u_O = A_d \Delta u_I + A_c \frac{\Delta u_I}{2} \\ u_O = U_{CQ1} + \Delta u_O \end{cases}$$



#### • 4、四种接法的静态工作点对比

输出方式	双端输出	单端输出
$I_{EQ}$	$\approx \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{2R_e}$	$\approx \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{2R_e}$
$I_{BQ}$	$\frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$	$\frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$
$U_{CEQ}$	$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c + U_{BEQ}$	$U_{CEQ} = V'_{CC} - I_{CQ}R'_c + U_{BEQ}$ $V'_{CC} = \frac{R_L}{R_c + R_L} V_{CC}$ $R'_c = R_c \parallel R_L$
$U_O$	0	$u_O = U_{CQ1} \neq 0$

- 静态工作点与输出方式有关，与输入方式无关。
- 双端输出电压中无直流分量；单端输出电压中有直流分量。

## • 5、四种接法的动态参数比较

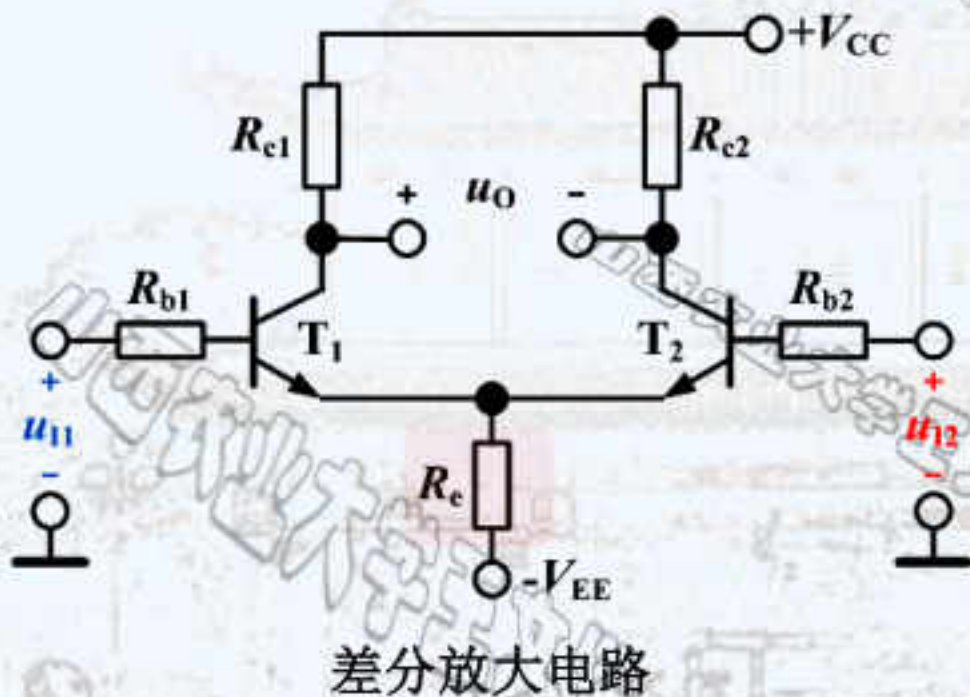
接法	双端输入 双端输出	双端输入 单端输出	单端输入 双端输出	单端输入 单端输出
$u_{Id}$	$u_I$	$u_I$	$u_I$	$u_I$
$u_{Ic}$	0	0	$u_I/2$	$u_I/2$
$A_c$	0	$\neq 0$	0	$\neq 0$
$K_{CMR}$	$\infty$	$\neq \infty$	$\infty$	$\neq \infty$
$R_i$	$2(R_b + r_{be})$	$2(R_b + r_{be})$	$2(R_b + r_{be})$	$2(R_b + r_{be})$
$R_o$	$2R_c$	$R_c$	$2R_c$	$R_c$

- 四种接法的输入电阻均为  $2(R_b + r_{be})$ 。
- 单端输入时，在差模信号输入的同时，总伴随着共模输入。
- $A_d$ 、 $A_c$ 、 $K_{CMR}$ 、 $R_o$  均与输出方式有关。
  - 双端输出：同时利用负反馈和电路对称性消除温漂， $A_c = 0$ ， $K_{CMR} = \infty$ ， $R_o = 2R_c$ 。
  - 单端输出，只利用负反馈抑制温漂， $A_c \neq 0$ ， $K_{CMR}$  为有限大， $R_o = R_c$ 。



## 十七、改进型差分放大电路

### 1、差分放大电路存在的问题



#### 发射极电阻 $R_e$

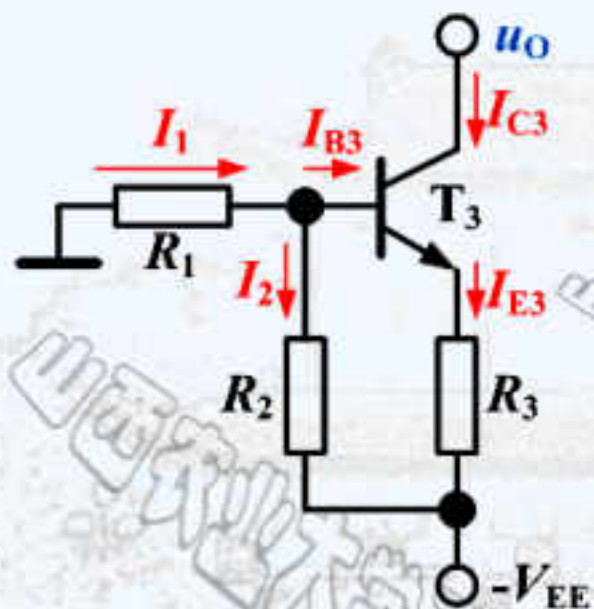
- 增大  $R_e$ ，能够有效抑制每一边电路的温漂，提高共模抑制比。 $R_e$  越大越好。

- 根据  $I_{EQ} \approx \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{2R_e}$ ， $I_{EQ}$  不变时，增大  $R_e$ ，必须增大  $V_{EE}$ ， $R_e$  不能过大。

差分放大电路需要既能采用较低的电源电压、又能有很大的等效电阻  $R_e$  的发射极电路，恒流源具备了上述特点。

## • 2、恒流源

静态工作点稳定电路可以作为恒流源。



一种实用的恒流源电路

$R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  和  $T_3$  组成工作点稳定电路，电源电压  $V_{EE}$  可取几伏，电路参数满足：

$$I_2 \gg I_{B3}$$

电流方程可近似为：

$$I_1 \approx I_2$$

因此， $R_2$  上的电压为：

$$U_{R2} \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{EE}$$

$T_3$  管的集电极电流为：

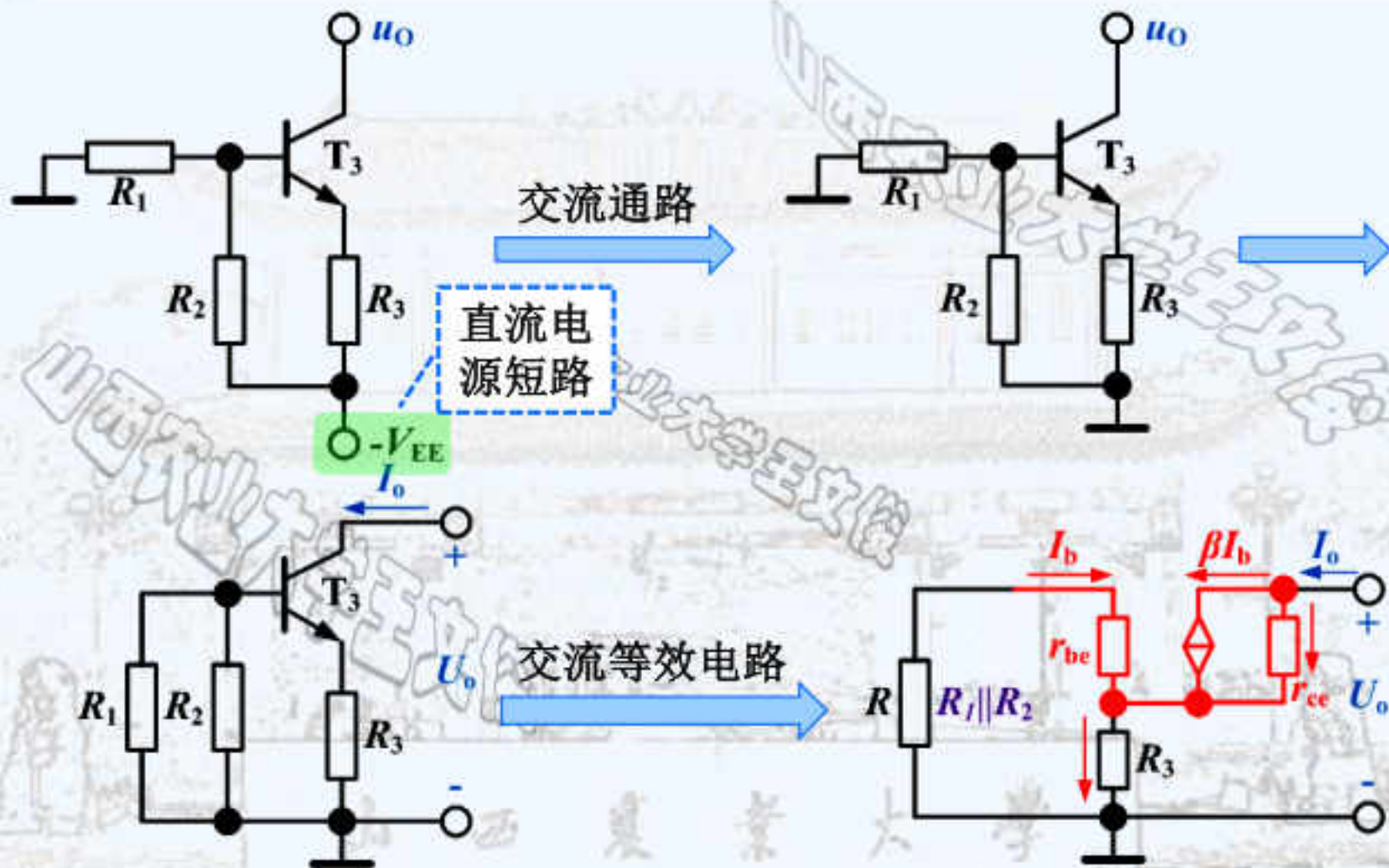
$$I_{C3} \approx I_{E3} = \frac{U_{R2} - U_{BE3}}{R_3}$$

若  $U_{BE3}$  的变化可以忽略，则  $I_{C3}$  基本不受温度影响，表现出恒流特性。

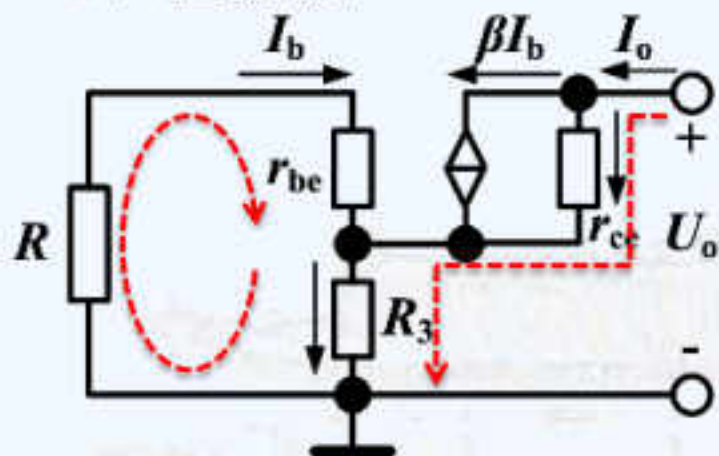


## • 2、恒流源

通过交流等效电路，对恒流源进行动态分析，确定其等效动态电阻。



## • 2、恒流源



$r_{ce}$  上的电流:

$$\dot{I}_{rce} = \dot{I}_o - \beta \dot{I}_b$$

$R_3$  上的电流:

$$\dot{I}_{R3} = \dot{I}_o + \dot{I}_b$$

输出端电压:  $\dot{U}_o = \dot{U}_{rce} + \dot{U}_{R3} = (\dot{I}_o - \beta \dot{I}_b) r_{ce} + (\dot{I}_o + \dot{I}_b) R_3$

回路方程:  $\dot{I}_b (R + r_{be}) + (\dot{I}_o + \dot{I}_b) R_3 = 0$

联立方程, 得输出电阻:

$$R_o = \frac{U_o}{I_o} = \left( 1 + \frac{\beta R_3}{r_{be} + R + R_3} \right) r_{ce} + R_3 \parallel (r_{be} + R) \approx \left( 1 + \frac{\beta R_3}{r_{be} + R + R_3} \right) r_{ce}$$

恒流源的输出电阻  $R_o$  极大 (理想情况下  $\rightarrow \infty$ )。增大反馈电阻  $R_3$ , 可以显著增大恒流源的输出电阻, 输出电流越接近恒流。

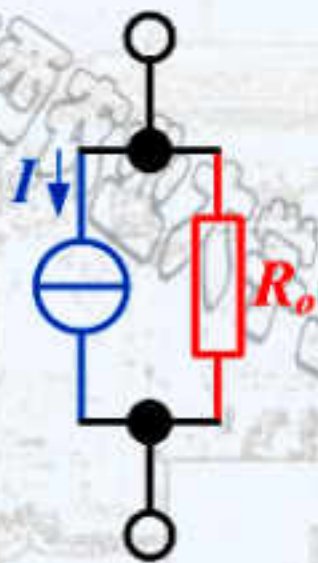


## • 2、恒流源

静态分析和动态分析时，恒流源的等效电路不同。

实际恒流源

实际恒流源可等效为一个理想恒流源与一个电阻并联。



直流等效电路

输出电阻阻值非常大，消耗电流极小，相当于开路。



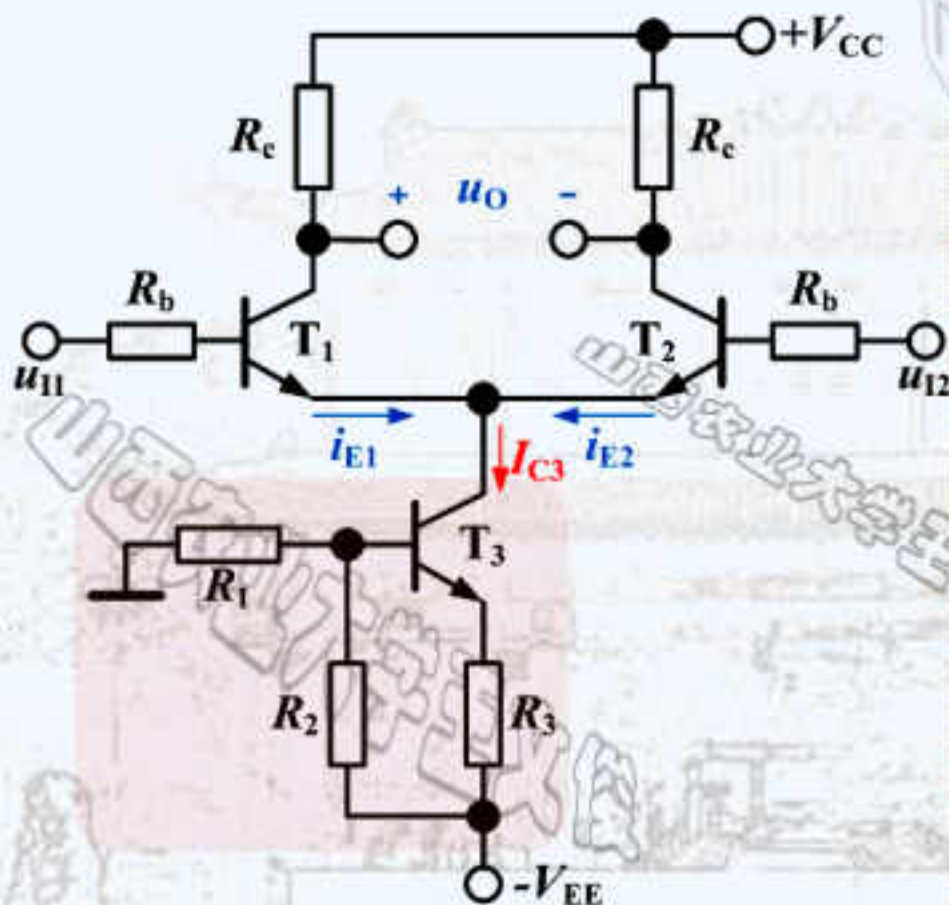
交流等效电路

理想恒流源的电流恒定不变，动态电阻无穷大，相当于开路。



### • 3、具有恒流源的差分放大电路

利用恒流源来取代  $R_e$ ，就得到具有恒流源的差分放大电路。



具有恒流源的差分放大电路

#### 静态分析

- 恒流源为差分放大电路提供合适的发射极静态电流

$$I_{EQ1} = I_{EQ2} = \frac{I_{C3}}{2}$$

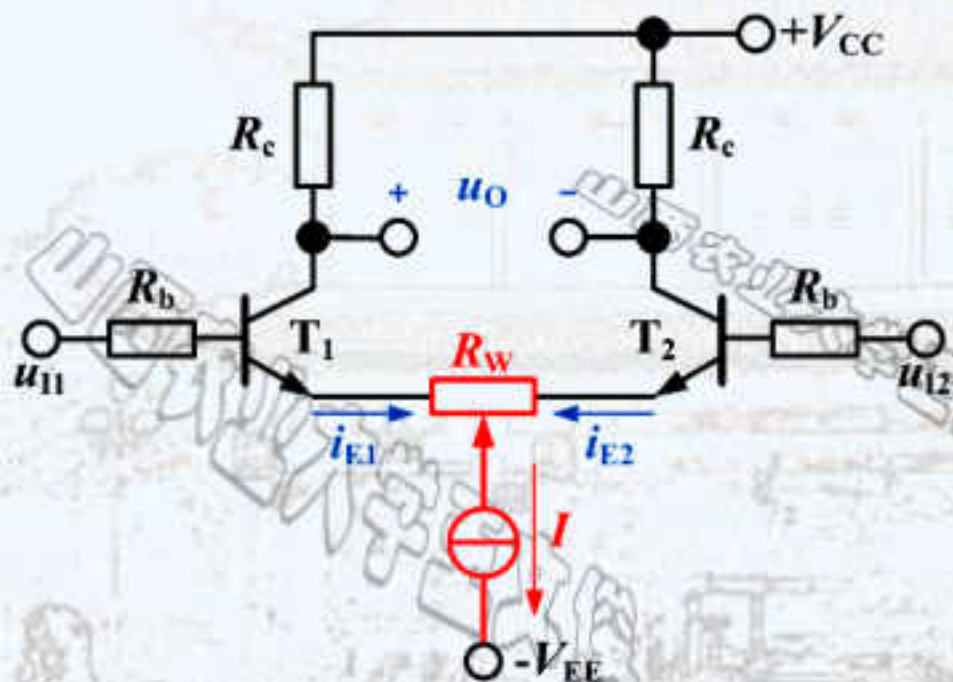
#### 动态分析

- 对共模信号等效为无穷大的电阻，负反馈作用无穷大， $A_c = 0$ ， $K_{CMR} = \infty$
- 差模信号作用下电阻被短路，对差模信号不起作用。



## • 4、带调零电位器的差分放大电路

在实际电路中，很难做到参数理想对称，因此常在两只管子的发射极之间加一个阻值很小的电位器，被称为调零电位器。



带调零电位器的差分放大电路

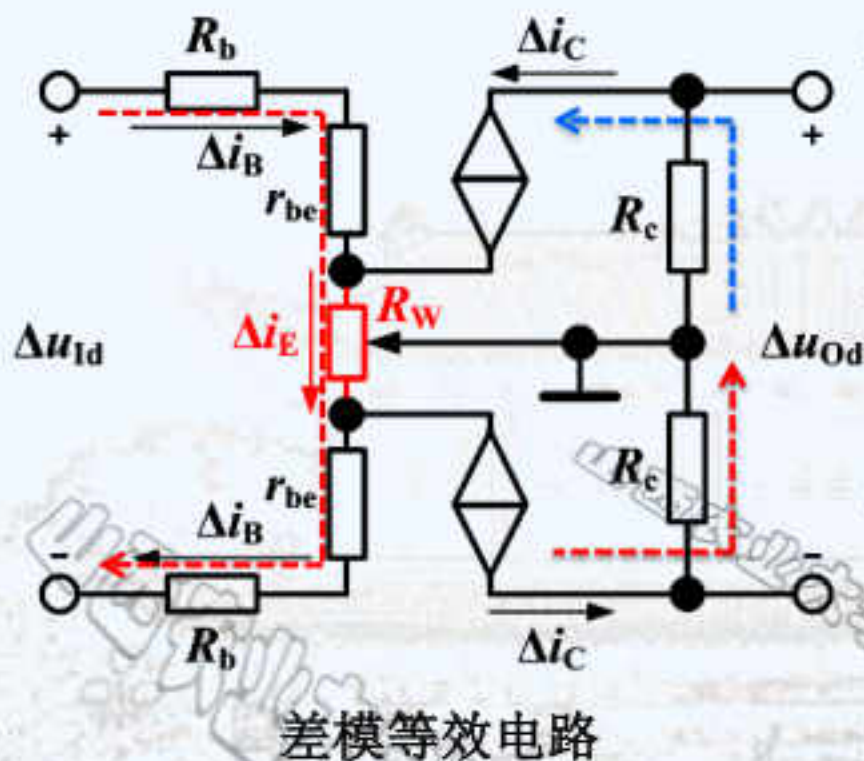
### 恒流源

- 恒流源的具体电路多种多样；在集成运放中常用电流源电路。
- 在简化画法中，常用恒流源符号取代具体电路。

### 调零电位器

- 调节电位器滑动端，使电路在  $u_{I1} = u_{I2} = 0$  时  $u_O = 0$

#### • 4、带调零电位器的差分放大电路



差模输入电压:

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

差模输出电压:

$$\Delta u_{Od} = -2\Delta i_C R_c = -2\beta\Delta i_B R_c$$

差模放大倍数:

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

输入电流:  $\Delta i_{id} = \Delta i_B$

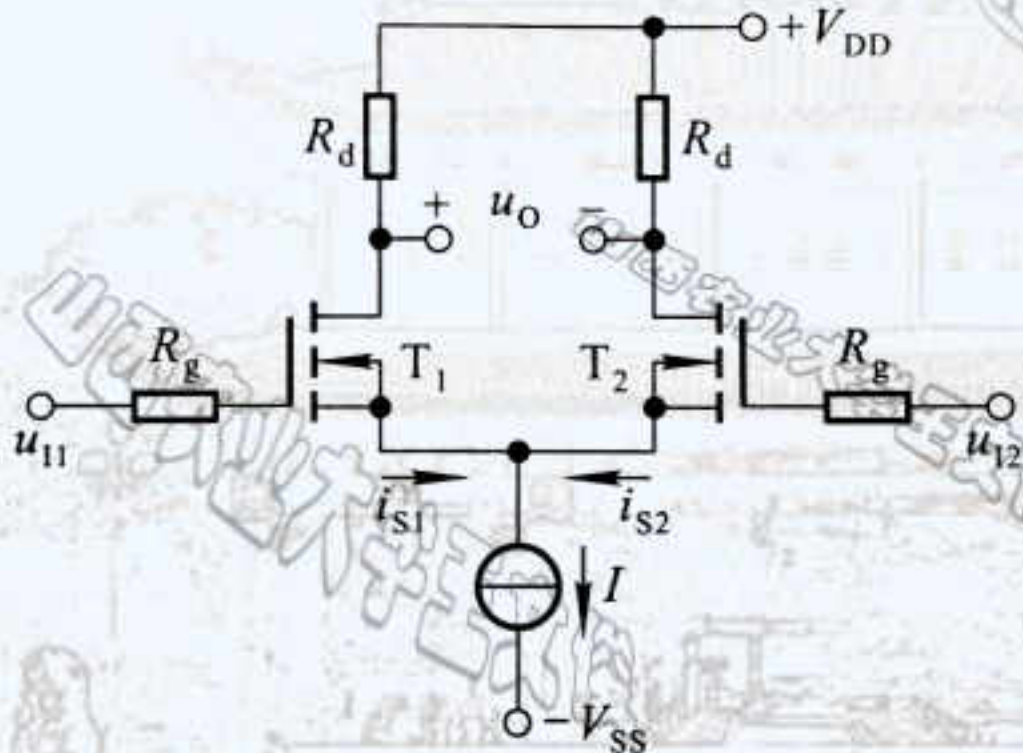
输入电阻:  $R_i = 2(R_b + r_{be}) + (1 + \beta)R_W$

输出电阻:  $R_o = 2R_c$



## • 5、场效应管差分放大电路

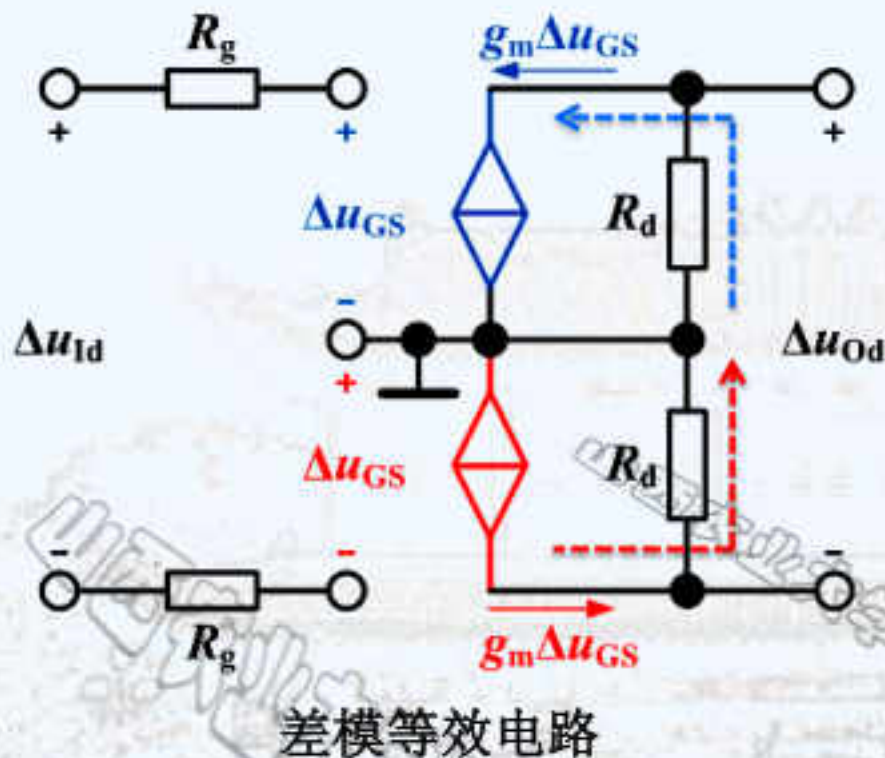
将前面所讲差分放大电路中的晶体管用场效应管取代，即可得到场效应管差分放大电路。



场效应管差分放大电路

- 场效应管的输入电阻极大，通常认为由它构成的差分放大电路的输入电阻无穷大。
- 特别适合做直接耦合多级放大电路的输入级。
- 与晶体管差分放大电路相同，场效应管差分放大电路也有四种接法，其分析方法与晶体管差分放大电路完全相同。

## • 5、场效应管差分放大电路



差模输入电压:

$$\Delta u_{Id} = 2\Delta u_{GS}$$

差模输出电压:

$$\Delta u_{Od} = -2g_m \Delta u_{GS} R_d$$

差模放大倍数:

$$A_d = -g_m R_d$$

输入电阻:

$$R_i = \infty$$

输出电阻:

$$R_o = 2R_d$$