



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

## § 5.2 差动放大器

**lugh@ustc.edu.cn**

**2016年11月8日**

1. 差动电路的交流性能指标
2. 半电路分析方法
3. 基本型差动放大器的交流分析
4. 电流源替代 $R_E$ 的差动放大器

# 零漂问题

## ■ 零点漂移

- 对直接耦合式放大器而言，当输入电压信号为**0**时，由于温度等的变化引起第一级放大器输出电压发生微弱变化，这种变化被逐级放大而导致最终的输出电压可能会漂移不定。即在预期的输出直流电位的基础上，产生了无规则、缓慢的变化，这种现象称为放大电路的输出零点漂移现象，简称零漂

## ■ 温漂

- 温度是引起放大器产生零点偏移现象的主要原因，故零漂也称为温漂

# 零漂问题

## ■ 温漂的危害

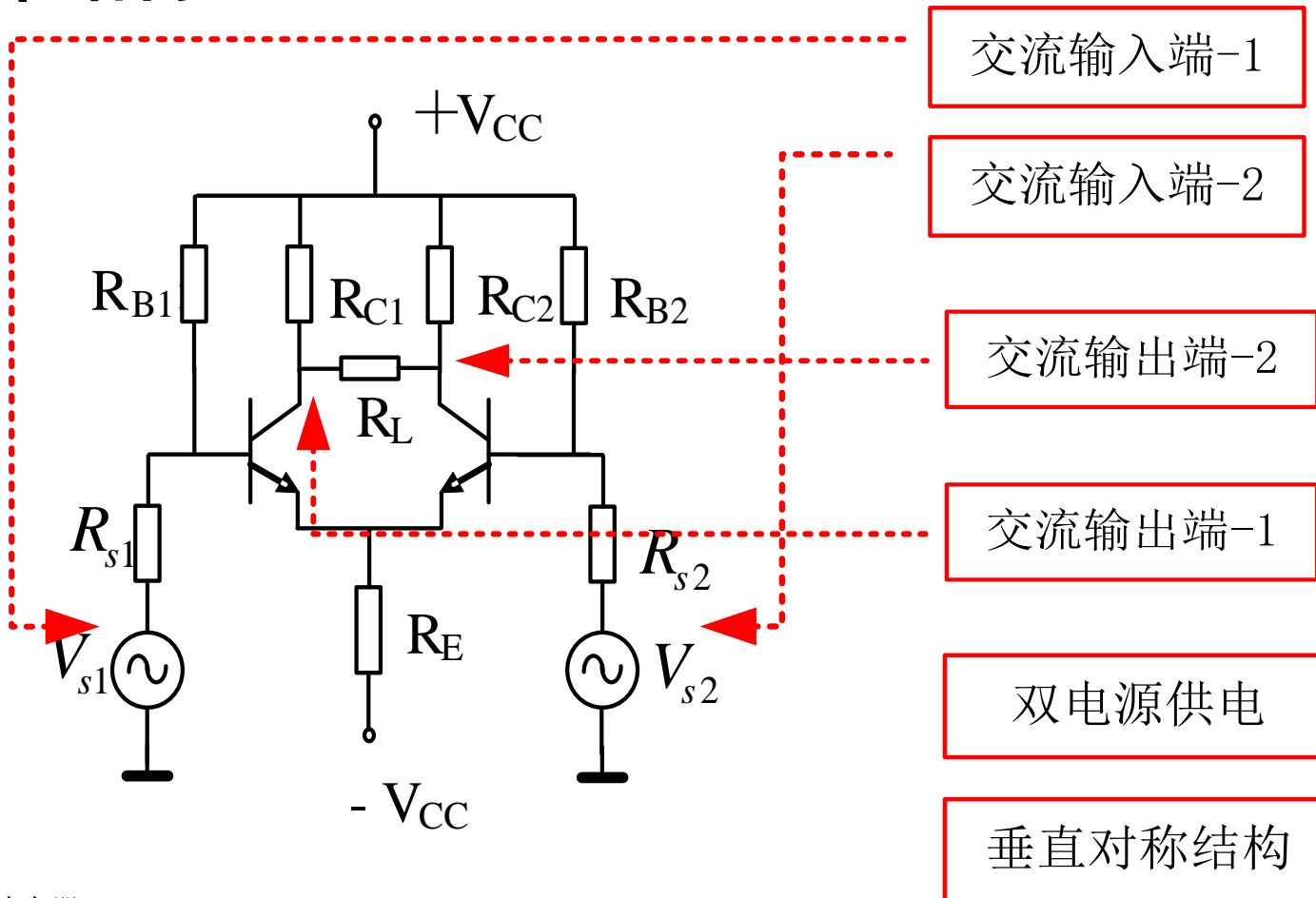
- 温漂导致多级放大器的输出级工作点偏离，使得放大器输出可能产生非线性失真
- 由于有用信号与温漂混杂，当有用输出信号与输出端的温漂大小相当时，有用信号将会被输出温漂所淹没，使得放大电路丧失小信号放大能力

## ■ 说明

- 在多级放大器中，输入级的温漂经多级放大以后，对输出温漂影响最大，故改善温漂现象应主要考虑输入级，多用差动放大

# 差动放大器

## ■ 基本结构

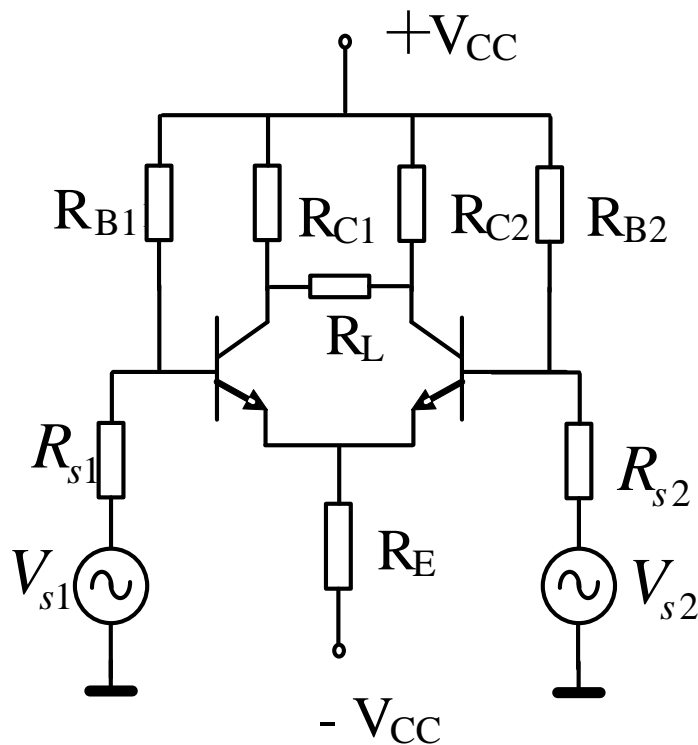


# 差动放大器

## ■ 结构要素

- 单端、双端输入
- 单端、双端输出
- 射极耦合
- 双电源偏置
- 垂直对称结构

$$\begin{cases} R_{B1} = R_{B2} \\ R_{C1} = R_{C2} \end{cases}$$



# 差动放大器

## ■ 差动放大器

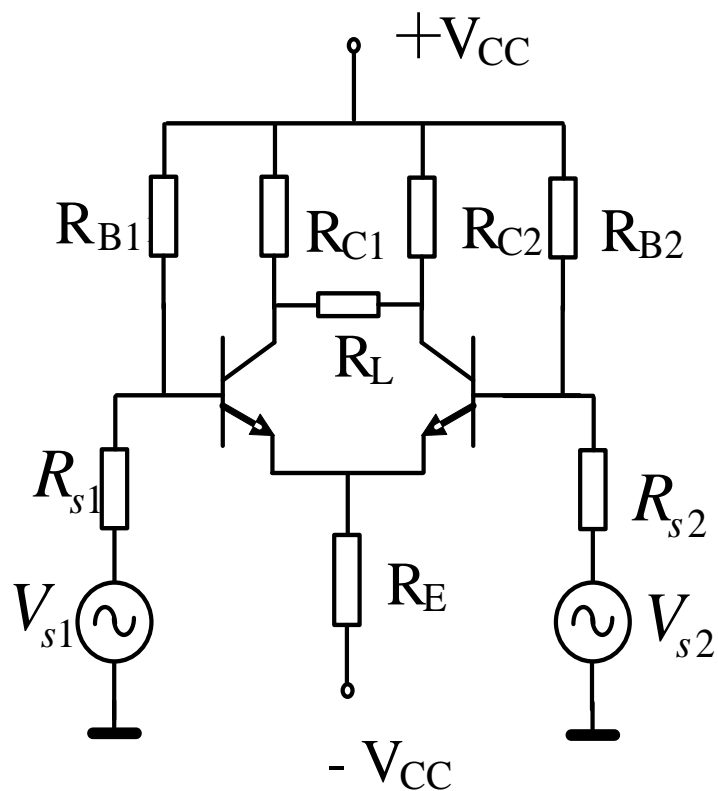
- 对两个输入信号的差进行放大，故称为差动放大器

## ■ 对温漂的抑制能力

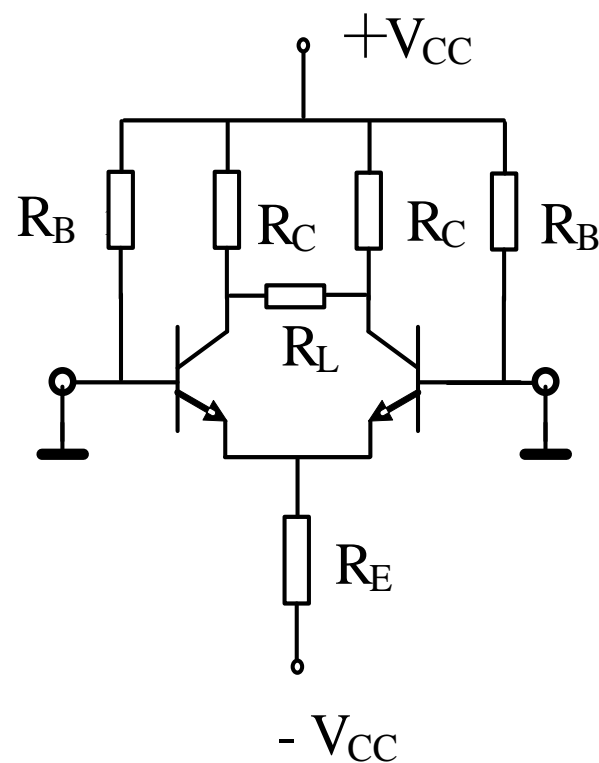
- 对差动放大器而言，温度变化对两侧电路的影响是相同的，故两个输出端的直流电位相等关系仍能保持
- 电路的对称性越好，双端输出时温漂的抑制能力越强

# 差动放大器

## ■ 直流分析



$\Rightarrow$





# 1. 差动电路的交流性能指标

## ■ 对输入信号分解

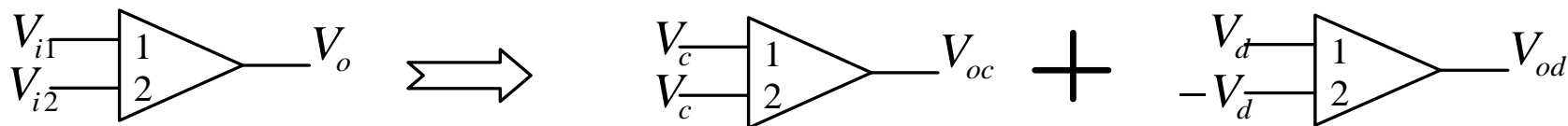
- 把输入信号分成共模信号（相同部分）和差模信号（不同部分）

$$\begin{cases} V_{i1} = V_c + V_d \\ V_{i2} = V_c - V_d \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_c = \frac{1}{2}(V_{i1} + V_{i2}) \\ V_d = \frac{1}{2}(V_{i1} - V_{i2}) \end{cases}$$

# 1. 差动电路的交流性能指标

## ■ 对放大器增益分解

- 将放大器增益分成差模增益和共模增益，也即将放大器对原输入信号的放大能力，等效为对差模信号和对共模信号的放大能力



# 1. 差动电路的交流性能指标

## ■ 共模增益

$$A_c = \frac{V_{oc}}{V_c} = \frac{V_o}{V_c} \Big|_{V_d=0}$$

## ■ 差模增益

$$A_d = \frac{V_{od}}{V_d} = \frac{V_o}{V_d} \Big|_{V_c=0}$$

# 1. 差动电路的交流性能指标

## ■ 共模抑制比CMRR

$$CMRR = \frac{|A_d|}{|A_c|}$$

$$CMRR(dB) = 20\lg CMRR$$

## ■ 说明

- **CMRR**表明一个差动放大器对共模信号的抑制能力，实际应用时，微弱信号通常以差模形式传输，而干扰一般是共模的，**CMRR**越大，表明放大电路抗干扰的能力越强

# 1. 差动电路的交流性能指标

## ■ 共模抑制比CMRR

$$\begin{aligned} V_o &= A_c V_c + A_d V_d = A_d V_d \left(1 + \frac{A_c}{A_d} \cdot \frac{V_c}{V_d}\right) \\ &= A_d V_d \left(1 \pm \frac{1}{CMRR} \cdot \frac{V_c}{V_d}\right) \end{aligned}$$

## ■ 说明

- 上式表明，实际选择时还要考虑共模信号和差模信号比值的大小，当比值很小时，**CMRR**不必选得很高

# 1. 差动电路的交流性能指标

## ■ 差动增益

$$A = \frac{V_o}{V_{i1} - V_{i2}} \Rightarrow A = \frac{A_c V_c + A_d V_d}{2V_d} = \frac{A_c}{2} \cdot \frac{V_c}{V_d} + \frac{A_d}{2}$$

## ■ 说明

- 差动增益不仅与电路本身有关，还与输入信号有关，这与基本线性放大电路的交流性能指标不同

# 1. 差动电路的交流性能指标

## ■ 例：差动放大电路交流性能指标

单端输出差动放大器，满足

$$\left. \begin{matrix} V_{i1} = 10mV \\ V_{i2} = 0 \end{matrix} \right\} \Rightarrow V_o = 5.5V, \left. \begin{matrix} V_{i1} = 0 \\ V_{i2} = 15mV \end{matrix} \right\} \Rightarrow V_o = -6.75V$$

求 $A_d$ ， $A_c$ 及 $CMRR$ 。

# 1. 差动电路的交流性能指标

## ■ 解

□ (1)  $V_c = \frac{1}{2}(V_{i1} + V_{i2}) = 5mV$     $V_d = \frac{1}{2}(V_{i1} - V_{i2}) = 5mV$

□ 由  $V_o = A_c V_c + A_d V_d$    得  $5.5 \times 10^3 = A_c \cdot 5 + A_d \cdot 5$

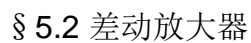
□ (2)  $-6.75 \times 10^3 = A_c \cdot 7.5 + A_d \cdot (-7.5)$

$$A_d = 1000 \quad A_c = 100 \quad CMRR = 10$$

- 以上两种情况的差动增益不同，所以差动增益不是固定值，而是和输入信号有关



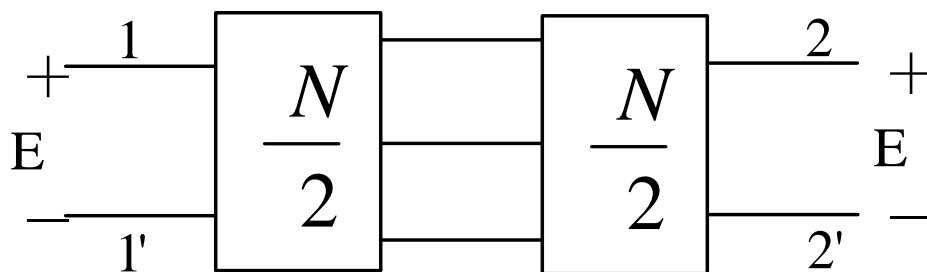
## ■ 电路结构



## 2. 半电路分析方法

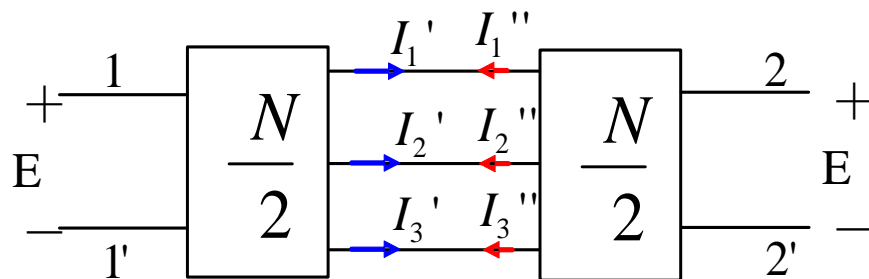
### ■ 基本思路

- 差动放大器的垂直对称结构，可采用垂直对称网络的二等分定理，将全电路的分析问题简化为对半电路的分析及对输出电量的合成

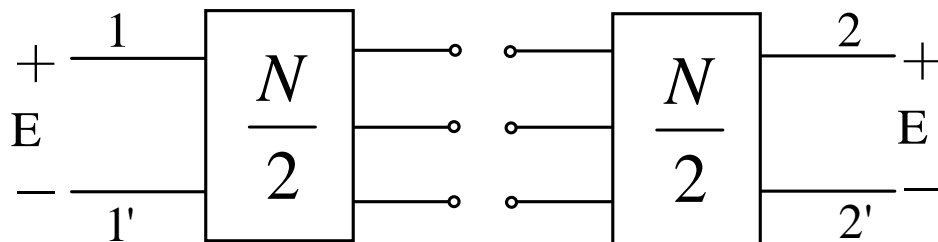


## 2. 半电路分析方法

### ■ 共模输入情况

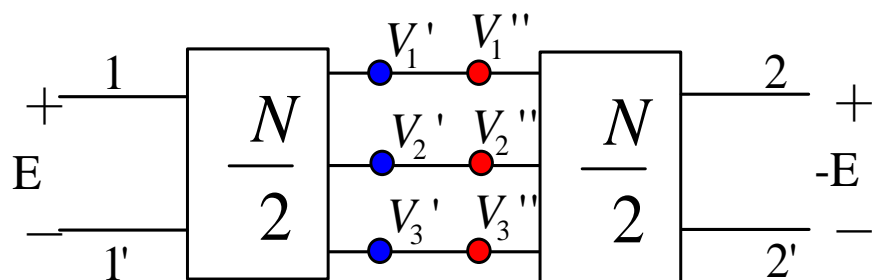


$$I_1 = I_1' + I_1'' = 0$$

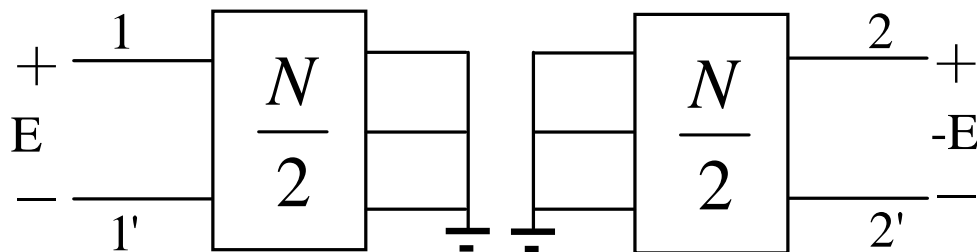


## 2. 半电路分析方法

### ■ 差模输入情况

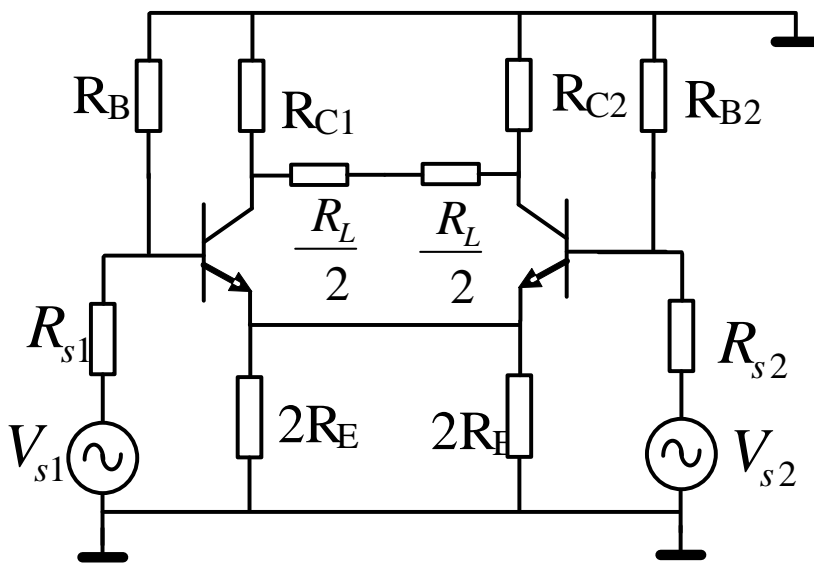
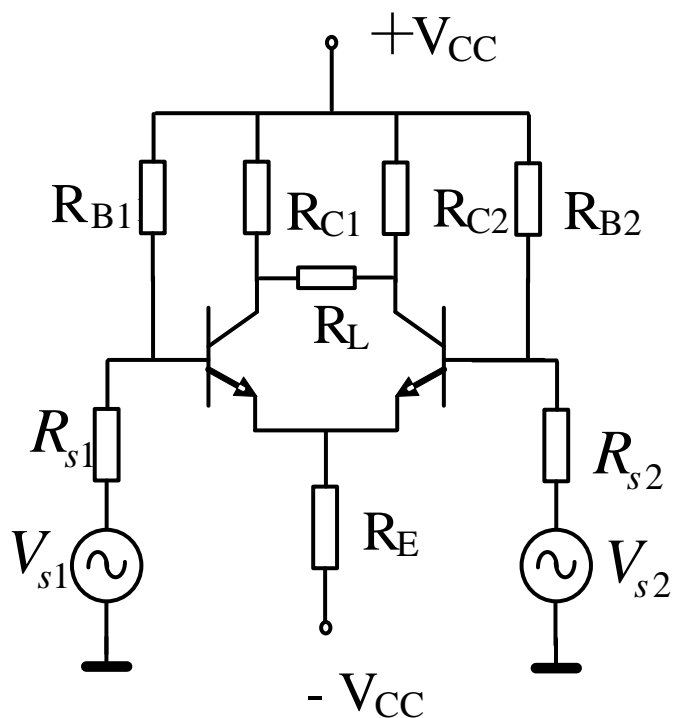


$$V_1 = V_1' + V_1'' = 0$$



### 3. 基本型差动放大器的交流分析

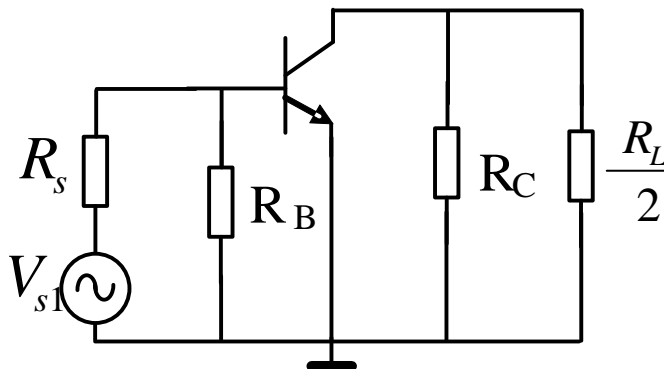
#### ■ 对称性改造



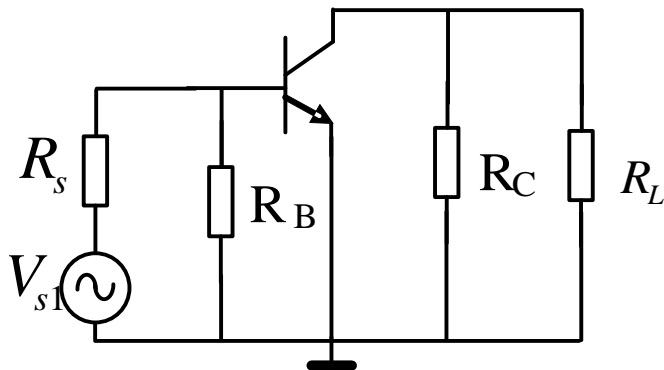
### 3. 基本型差动放大器的交流分析

#### ■ 差模半电路分析

□ 双端输出



□ 单端输出



### 3. 基本型差动放大器的交流分析

#### ■ 差模增益

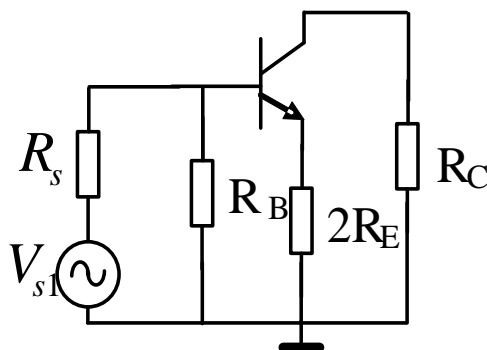
$$\text{双端输出: } A_{d\text{半}} = -\frac{\beta(R_C \parallel \frac{R_L}{2})}{h_{ie} + R_s \parallel R_B} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B}$$

$$\text{单端输出: } A_{d\text{半}} = -\frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{h_{ie} + R_s \parallel R_B} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B}$$

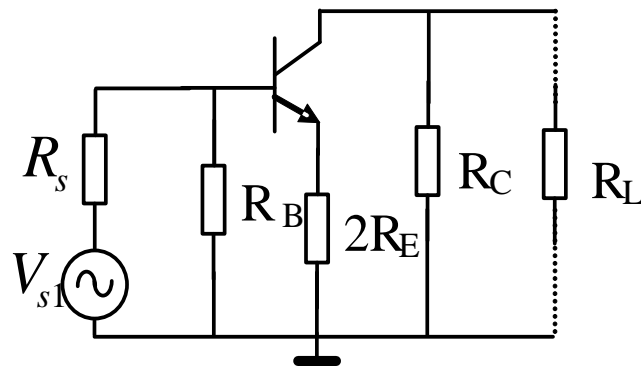
### 3. 基本型差动放大器的交流分析

#### ■ 共模半电路分析

##### □ 双端输出



##### □ 单端输出





### 3. 基本型差动放大器的交流分析

#### ■ 共模增益

$$\begin{aligned}\text{双端输出: } A_{c\text{半}} &= -\frac{\beta R_C}{h_{ie} + R_s \parallel R_B + 2(1 + \beta)R_E} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B} \\ &\approx \frac{-R_C}{2R_E}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{单端输出: } A_{c\text{半}} &= -\frac{\beta R_L'}{h_{ie} + R_s \parallel R_B + 2(1 + \beta)R_E} \cdot \frac{R_B}{R_s + R_B} \\ &\approx \frac{-R_L'}{2R_E}\end{aligned}$$

### 3. 基本型差动放大器的交流分析

#### ■ 全电路分析

##### □ 双端输出

$$\text{双端输出: } \begin{cases} V_o = V_{o1} - V_{o2} \\ V_{o1} = A_{c\text{半}} V_c + A_{d\text{半}} V_d \Rightarrow V_o = 2A_{d\text{半}} V_d = A_{d\text{半}} (V_{i1} - V_{i2}) \\ V_{o2} = A_{c\text{半}} V_c - A_{d\text{半}} V_d \end{cases}$$

$$\text{交流指标: } \begin{cases} A_c = 0 \\ A_d = 2A_{d\text{半}} \\ A = A_{d\text{半}} \\ CMRR = \infty \end{cases}$$

### 3. 基本型差动放大器的交流分析

#### □ 单端输出

$$\text{单端输出: } \left. \begin{array}{l} A_d = A_{d\text{半}} \\ A_c = A_{c\text{半}} \end{array} \right\} \Rightarrow CMRR = \left| \frac{A_{d\text{半}}}{A_{c\text{半}}} \right| \neq \infty$$

$$CMRR = \frac{-\frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{h_{ie} + R_s \parallel R_B}}{-\frac{\beta R_L'}{h_{ie} + R_s \parallel R_B + 2(1 + \beta)R_E}} \approx \frac{2(1 + \beta)R_E}{h_{ie} + R_s \parallel R_B}$$

### 3. 基本型差动放大器的交流分析

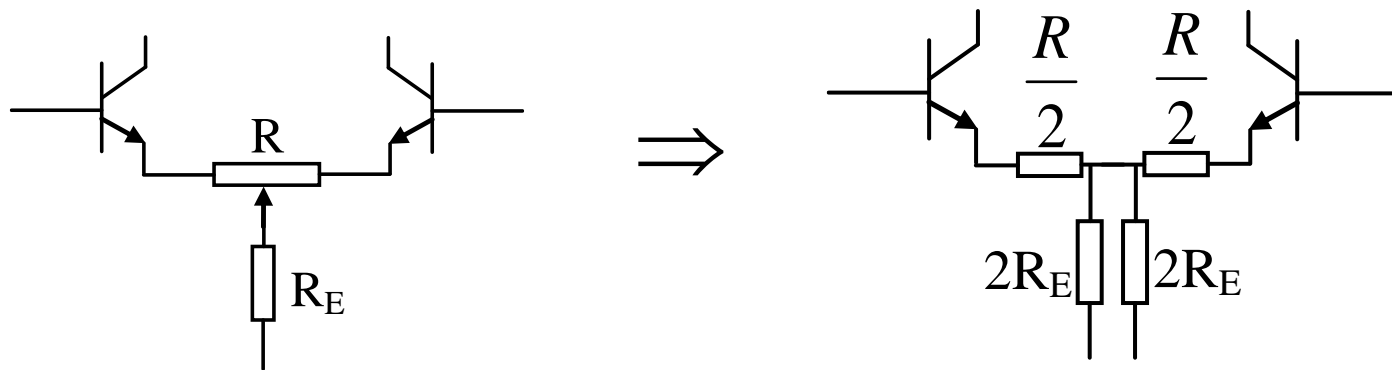
#### ■ 说明

- 引入了半电路分析方法，求 $A_{c\frac{1}{2}}$ 和 $A_{d\frac{1}{2}}$ 的主要区别是对发射极电阻的处理，分别为 $2R_E$ 和0
- 单端输出和双端输出的主要区别是对 $R_L$ 的处理，单端输出时均取 $R_L$ ，双端求 $A_{c\frac{1}{2}}$ 时为无穷，求 $A_{d\frac{1}{2}}$ 时 $R_L/2$

### 3. 基本型差动放大器的交流分析

#### ■ 思考

□ 如何改善实际电路双端输出时的**CMRR**?



□ 如何改善实际电路单端输出时的**CMRR**?

$$CMRR \approx \frac{2(1 + \beta)R_E}{h_{ie} + R_s \parallel R_B}$$

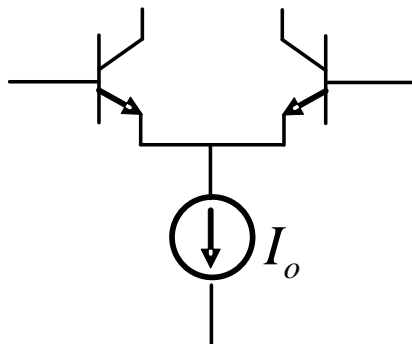
## 4. 电流源偏置的差动放大器

### ■ 基本思想

- 电流源电路能够提供足够的直流电流，较小的直流压降，可满足电源和功耗要求
- 同时，电流源交流时呈现极高阻抗，作为发射极偏置使用亦可满足提高**CMRR**的要求

### ■ 电路结构

- 理想电流源偏置



## 4. 电流源偏置的差动放大器

### ■ 工作原理

$$R_s = \infty$$

$$I_{c1} + I_{c2} = I_o$$

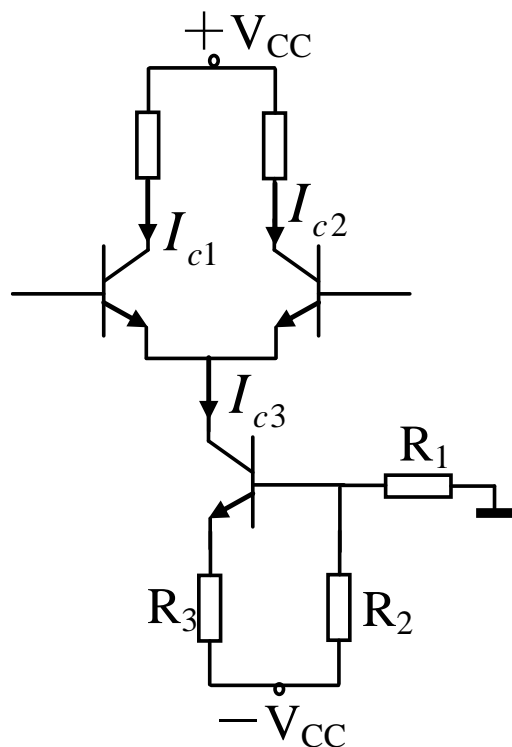
$$I_{c1} + i_{o1} + I_{c2} + i_{o2} = I_o \Rightarrow i_{o1} = -i_{o2} \Rightarrow A_c = 0$$

### ■ 说明

- 理想电流源偏置的差动放大器，**CMRR**可达无穷，即只允许信号有差模变化，共模信号输入时，共模输出为**0**

## 4. 电流源偏置的差动放大器

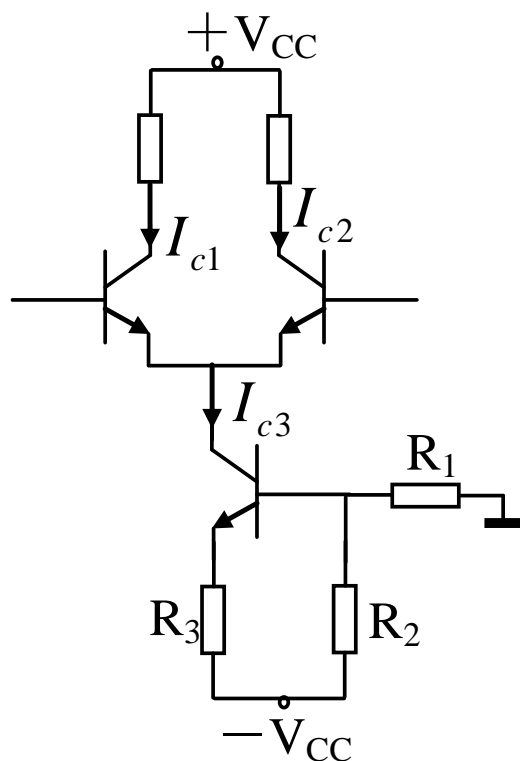
### ■ 例：基本电流源电路偏置的差动放大器分析





## 4. 电流源偏置的差动放大器

### ■ 对基本电流源电路作直流分析

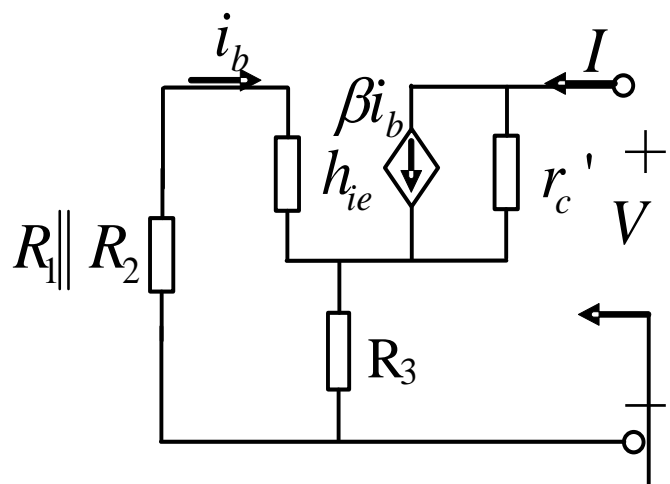


用戴维宁等效，得到

$$V_{B3} = -V_{CC} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$
$$I_{C3} = \frac{V_{B3} - V_{BEON} - (-V_{CC})}{R_3 + \frac{R_1 \parallel R_2}{1 + \beta}}$$

## 4. 电流源偏置的差动放大器

### ■ 对基本电流源电路作交流分析



$$\begin{cases} V = (I - \beta i_b) r_c' + (I + i_b) R_3 \\ -i_b (R_1 \parallel R_2 + h_{ie}) = (I + i_b) R_3 \end{cases}$$
$$R_o = \frac{V}{I}$$
$$= r_c' \left( 1 + \frac{\beta R_3}{h_{ie} + R_1 \parallel R_2 + R_3} \right) + (R_1 \parallel R_2 + h_{ie}) \parallel R_3$$

## 4. 电流源偏置的差动放大器

### ■ 分析差动电路的共模增益

$$A_{c\text{半}} = -\frac{\beta R_L'}{h_{ie} + R_s' + 2(1 + \beta)R_o} \approx -\frac{R_L'}{2R_o}$$

### ■ 共模抑制比

$$CMRR = \frac{2\beta R_o}{h_{ie} + R_s'}$$

## 4. 电流源偏置的差动放大器

### ■ 进一步提高单端输出时的CMRR

- 常用稳压二极管代替 $R_2$
- 增大  $\beta$

