


第六章 模拟集成电路

6.1 差分放大电路（书中6.1&6.2）

- 
- 1 概念的引入 (6.2.1)
 - 2 长尾式差放
 - 3 带电流源的差动放大器 (6.2.2)
 - 4 电流源(6.1.1)
 - 5 电流源负载的双入单出差放 (P271)
 - 6 FET差放(6.2.3)

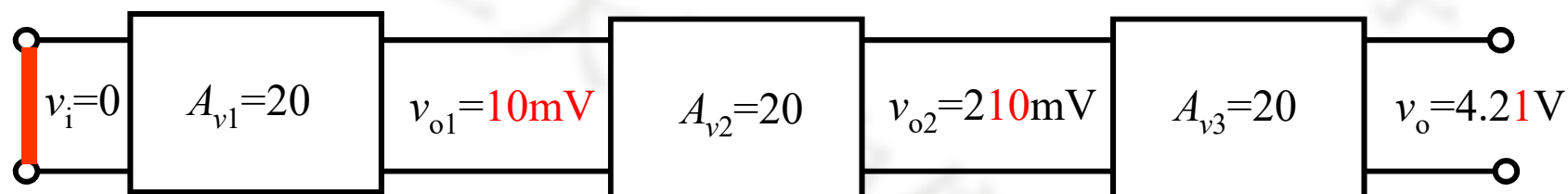
6.2 集成运算放大器（书中6.4）

6.1 差分(差动)放大器 Differential Amplifier

1. 概念的引入

多级高增益的直接耦合放大器存在零漂问题、噪声问题。

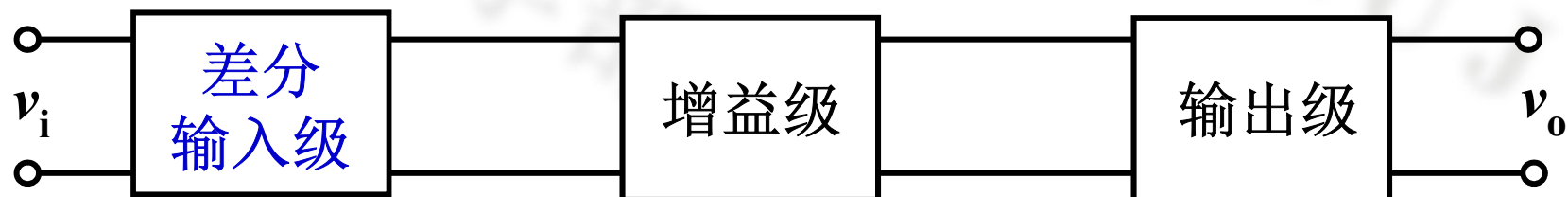
假设每级电路自身会产生10mV零漂（或噪声幅度），



目标：只放大有用信号，抑制零漂和环境噪声干扰。

总是第一级的影响最大! ➔ 输入级有优异的抗干扰性能。

实用的通用放大电路基本结构：



6.1 差分(差动)放大器

1. 概念的引入

目标：只放大有用信号，抑制零漂和环境噪声干扰。

v_1 ○ 信号线1

v_2 ○ 信号线2



通常，处于相同环境和电路中的信号收到的干扰非常相似。

两个信号之差可以抵消干扰，保留有用信号。

(1) 差分放大的概念：

- 放大信号之差（差模放大）；
- 削减信号之和（削弱干扰，共模抑制）。

1. 概念的引入 (2) 差模、共模

Differential-mode
Common-mode

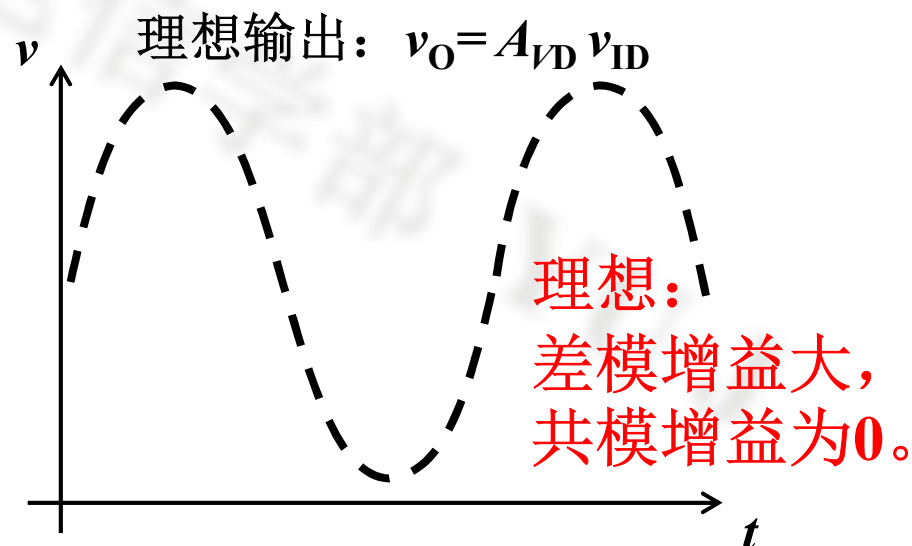
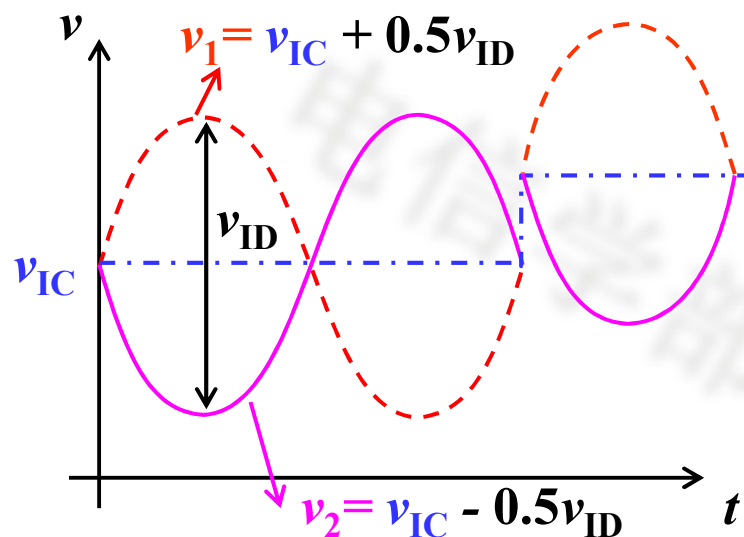
信号 v_1 、 v_2 分别接入差分放大器的两个输入端。

差模信号: $v_{ID} = v_1 - v_2$ 共模信号: $v_{IC} = \frac{v_1 + v_2}{2}$

$$\Leftrightarrow v_1 = v_{IC} + \frac{v_{ID}}{2} \quad v_2 = v_{IC} - \frac{v_{ID}}{2}$$

输出信号: $v_O = A_{VD}v_{ID} + A_{VC}v_{IC} = A_{VD}(v_1 - v_2) + A_{VC}\frac{v_1 + v_2}{2}$

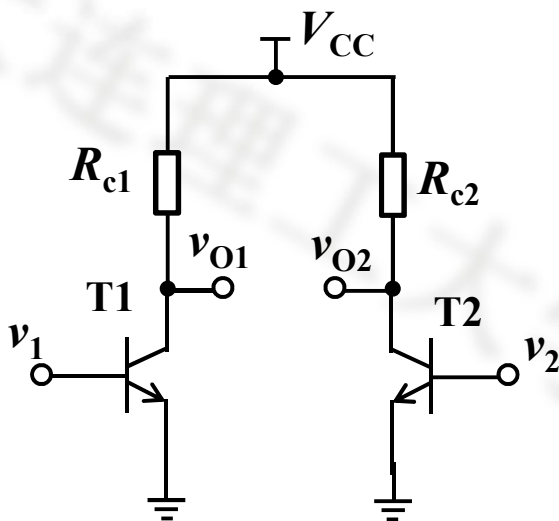
其中, A_{VD} 为差模电压增益; A_{VC} 为共模电压增益。



2. 长尾式差放

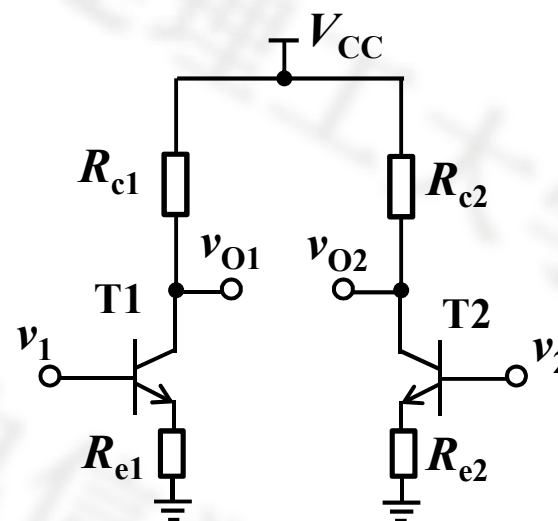
(1) 结构分析

考虑简单的对称共射放大电路（左右完美对称）：



$$A_{v1} = \frac{v_{o1}}{v_1} = -\frac{\beta_1(R_{C1} // R_L)}{r_{be1}}$$

大，用于差模信号



$$A_{v1} = \frac{v_{o1}}{v_1} = -\frac{\beta_1(R_{C1} // R_L)}{r_{be1} + (1 + \beta_1)R_{e1}}$$

大 R_{e1} 则增益小，用于共模信号

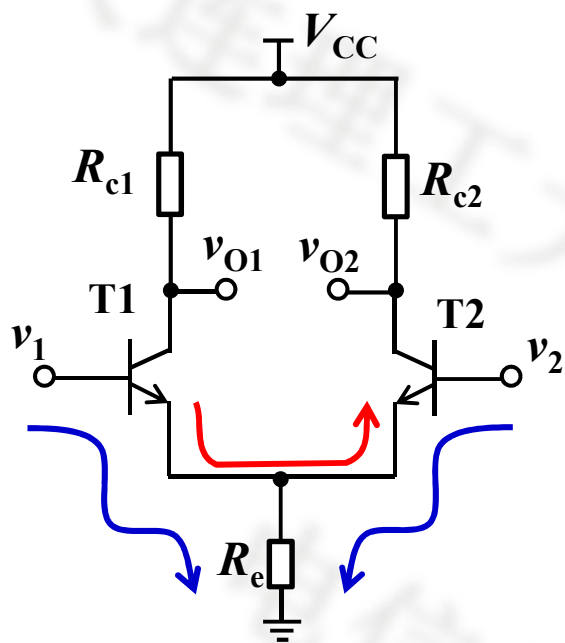
差模和共模无差别放大，不能解决共模抑制问题！

如何同时获得大的差模信号增益和小的共模信号增益？

2. 长尾式差放

(1) 结构分析

长尾式差放的结构：（左右完美对称，合并射极电阻）



抑制共模
(零漂、干扰)

直观分析差模信号、共模信号分别作用时的区别：

①只考虑共模信号

差模 $v_{ID}=0$ ，则 $v_1=v_2=v_{IC}$
此时，左右对称， R_e 起作用。

②只考虑差模信号

共模 $v_{IC}=0$ ，则 $v_1=0.5v_{id}=-v_2$
此时，左路增量等于右路减量， R_e 不起作用。

2. 长尾式差放 (2) 基本工作原理 (小信号分析)

共模增益分析:

① 只考虑共模信号

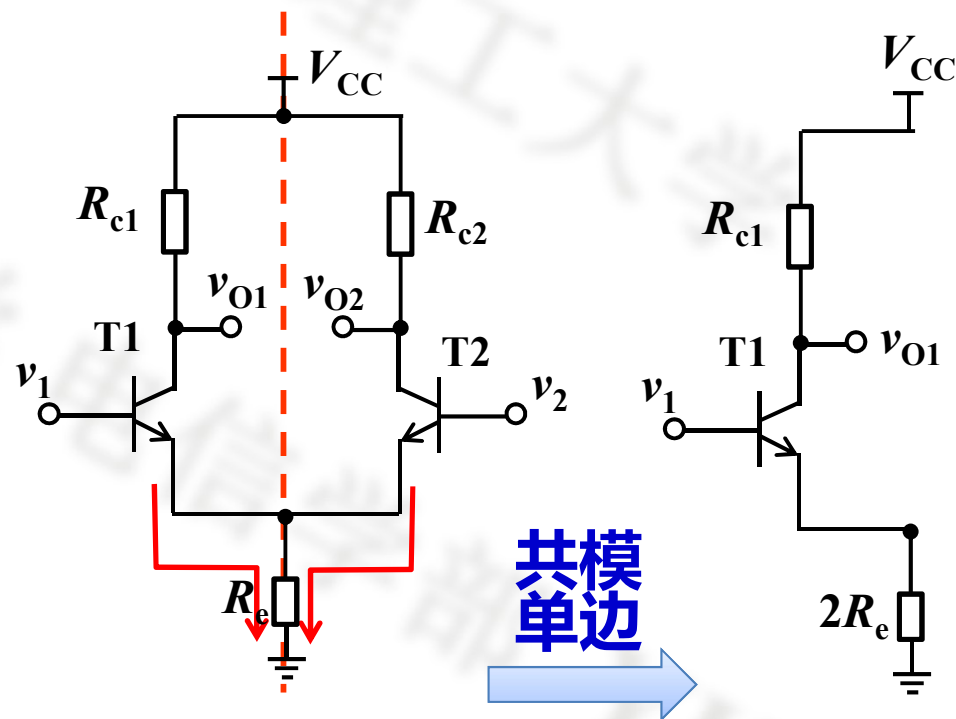
$$v_{1c} = v_{2c} = v_{ic}$$

② 完全对称: 可单边分析

③ 选择阻值大的 R_e
获得极小的共模增益。

$$A_{vc1} = - \frac{\beta_1 (R_{C1} // R_L)}{r_{be1} + (1 + \beta_1) \times 2R_e}$$

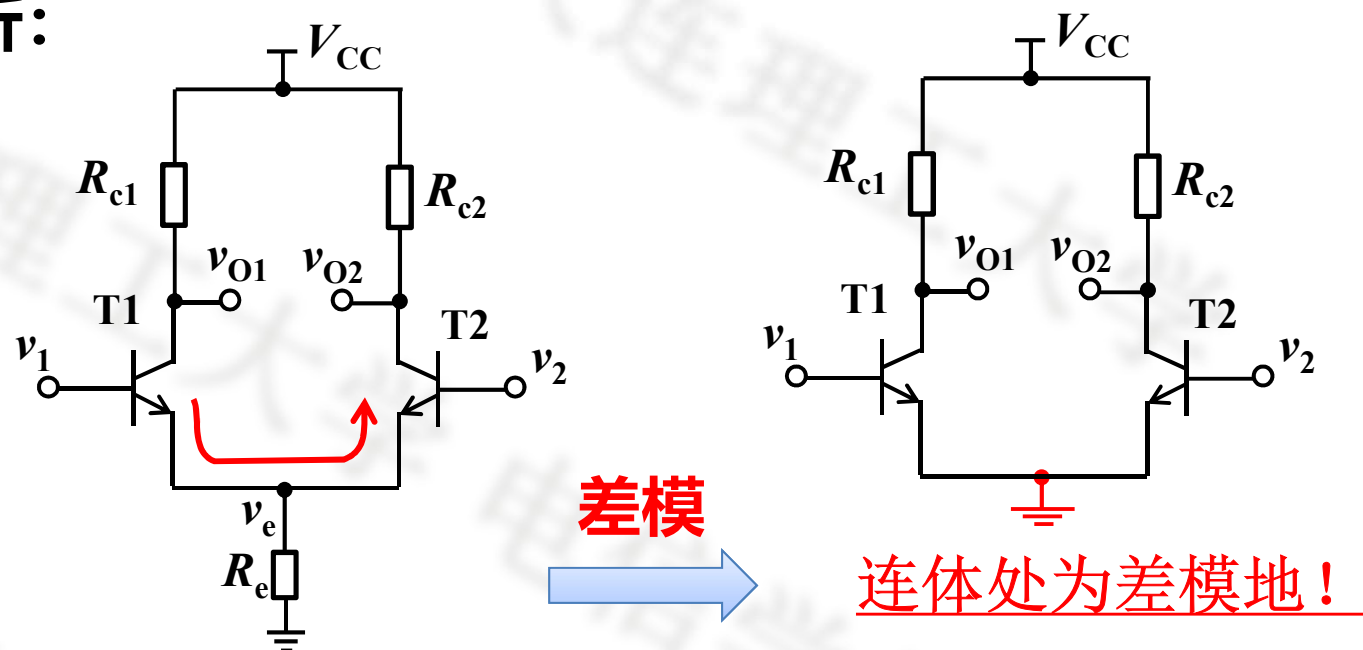
完美对称时, $A_{vc2} = A_{vc1}$



2. 长尾式差放

(2) 基本工作原理（小信号分析）

差模增益分析：



① 只考虑差模信号时： $v_1 = -v_2 = v_{id} / 2$

② 完全对称 $i_{b1} = -i_{b2} \Rightarrow i_{e1} = -i_{e2} \Rightarrow i_{Re} = 0 \Rightarrow v_e = 0$

③ 差模增益 $A_{vd1} = -\frac{\beta_1 (R_{C1} // R_L)}{r_{be1}}$ 完美对称时， $A_{vd2} = A_{vd1}$

2. 长尾式差放

(3) 两个结构要点

① 对称性十分重要！

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta$$

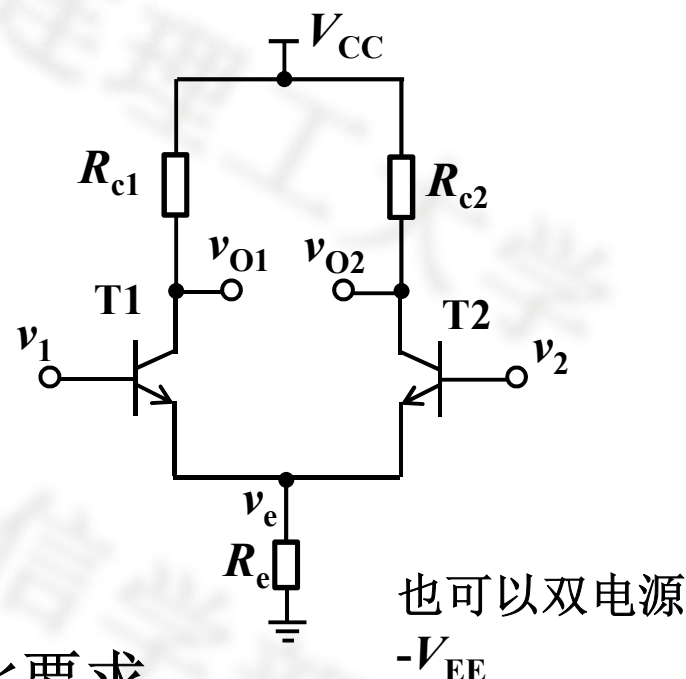
$$V_{BE1} = V_{BE2} = V_{BE}$$

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

$$I_{CBO1} = I_{CBO2} = I_{CBO}$$

$$R_{C1} = R_{C2} = R_C$$

高度匹配！集成电路技术能满足此要求。



② 大的尾电阻

R_e (阻值大，故称长尾)，抑制共模增益

2. 长尾式差放

(4) 静态工作点分析

静态平衡条件：左右支路完全对称；
若已知信号源直流分量为 V_S

忽略 R_b 上的压降 (i_b 和 R_b 都很小):

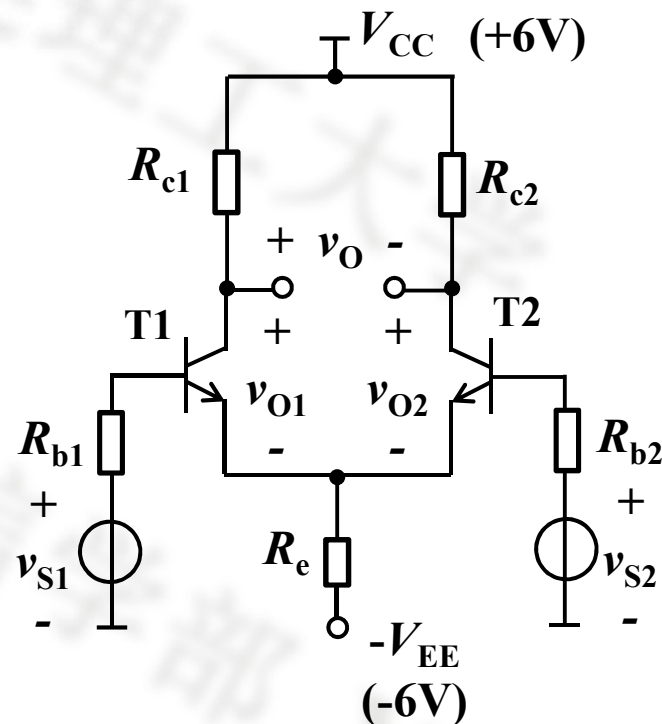
$$V_{B1}=V_{B2} \approx V_S$$

$$I_{Re} = \frac{V_{B1} - V_{BE} - (-V_{EE})}{R_e}$$

$$I_{C1}=I_{C2} \approx \frac{I_{Re}}{2}$$

$$I_{B1}=I_{B2} = \frac{I_{C1}}{\beta}$$

$$V_{CE1}=V_{CC} + V_{EE} - I_{C1}(R_{c1} + 2R_e)$$



注：有负载时， R_{c1} 应以 $R_{c1} // R_{L1}$ 代替。

2. 长尾式差放

(5) 动态小信号分析

差模和共模要分别分析。

$$v_{s1} = v_{sc} + v_{sd} / 2 \quad v_{s2} = v_{sc} - v_{sd} / 2$$

① 差模参数 (A_{vd} , R_{id} , R_o)

只考虑差模信号，**连接点等效接地**

$$v_{s1} = -v_{s2} = v_{sd}/2$$

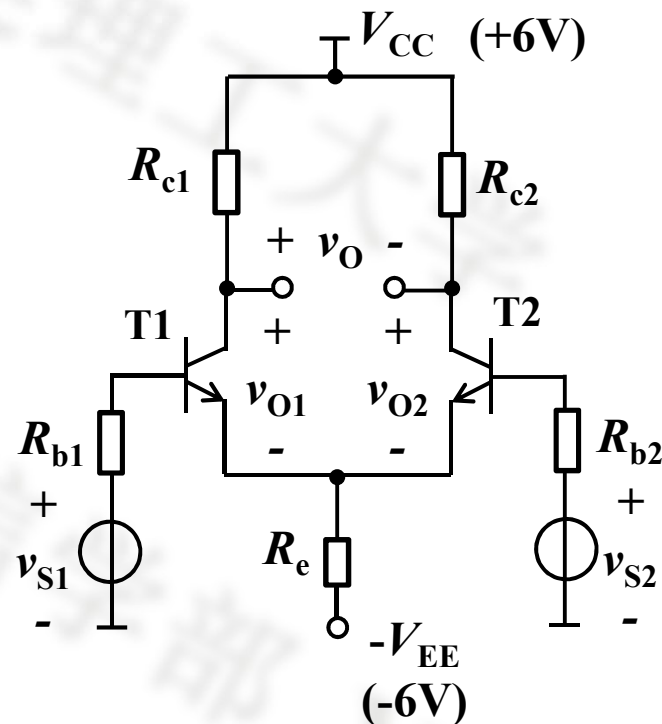
② 共模参数 (A_{vc} , R_{ic} , R_o)

只考虑共模信号

$$v_{s1} = v_{s2} = v_{sc}$$

注意：分析结果与负载连接方式有关，
分为 双端差动输出 单边输出。

此外，对于某一边输入接地的特例，也称为单端输入。



2. 长尾式差放

(5) 动态小信号分析

① 差模参数 (A_{vd} , R_{id} , R_o)

双端输出差模电压: $v_o = v_{o1} - v_{o2}$

差动输入电压: $v_{sd} = v_{s1} - v_{s2} = 2v_{s1}$

双出差模电压增益:

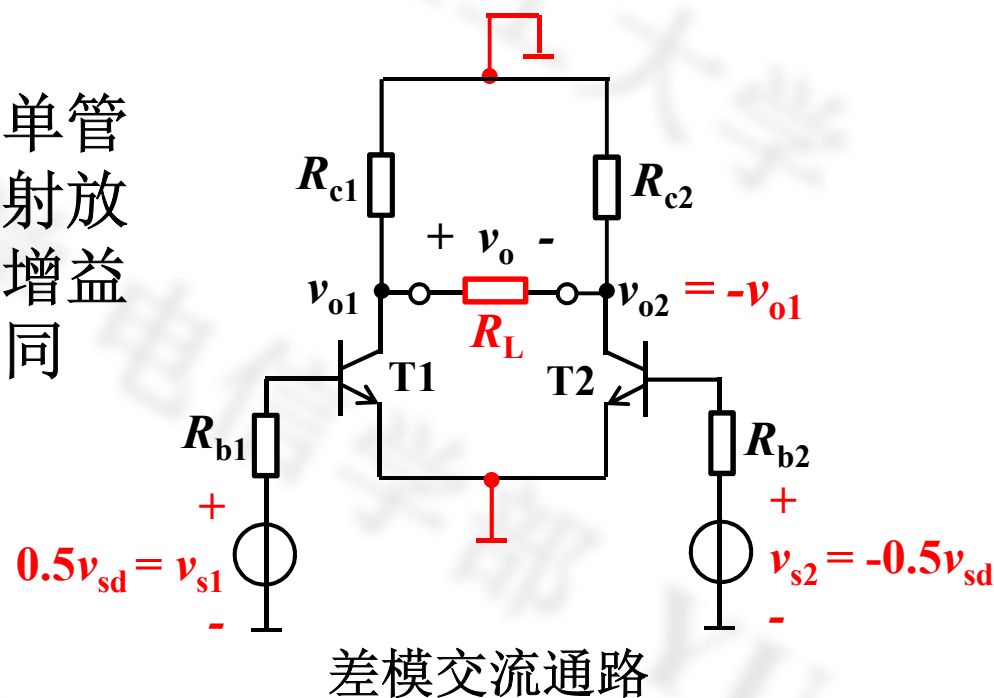
$$A_{vd} = \frac{v_o}{v_{sd}} = \frac{v_{o1} - v_{o2}}{v_{s1} - v_{s2}} \\ = \frac{2v_{o1}}{2v_{s1}} = -\frac{\beta R'_L}{R_b + r_{be}}$$

与单管
共射放
大增益
相同

差模输入电阻

$$R_{id} = 2(R_b + r_{be})$$

输出电阻 $R_o = 2R_c$



$$R'_L = R_c // \frac{R_L}{2}$$

2. 长尾式差放

(5) 动态小信号分析

① 差模参数 (A_{vd} , R_{id} , R_o)

单端输出电压: $v_o = v_{o1}$

差动输入电压: $v_{sd} = v_{s1} - v_{s2} = 2v_{s1}$

单出差模电压增益:

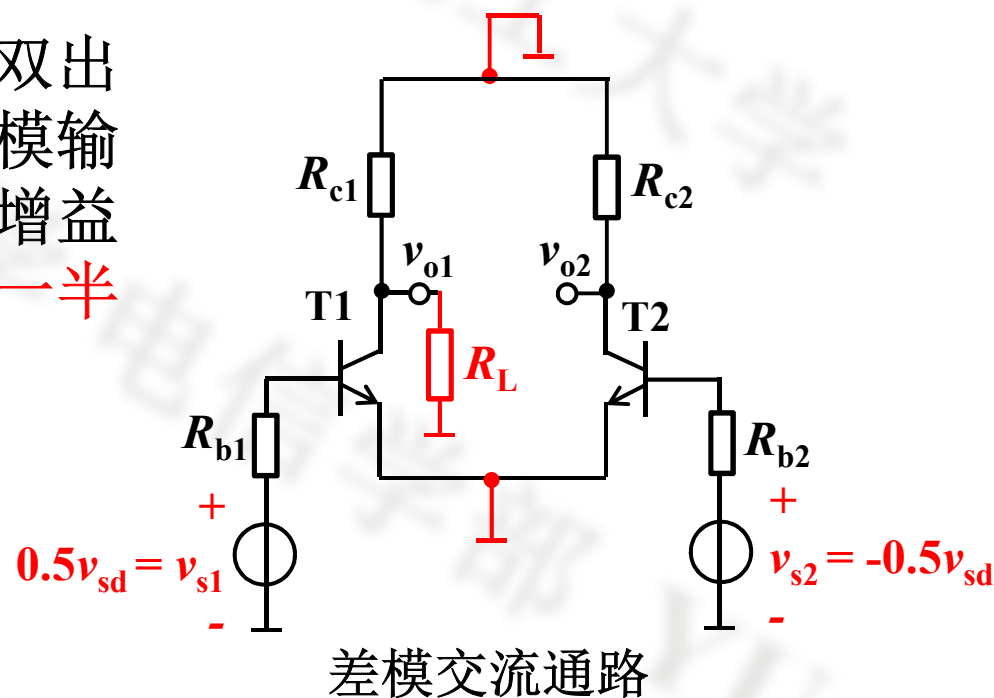
$$A_{vd1} = \frac{v_{o1}}{v_{s1} - v_{s2}} = \frac{v_{o1}}{2v_{s1}}$$
$$= \frac{A_{vd}}{2} = -\frac{\beta R'_L}{2(R_b + r_{be})}$$

是双出差模输出增益的一半

差模输入电阻

$$R_{id} = 2(R_b + r_{be})$$

输出电阻 $R_o = R_c$



$$R'_L = R_c // R_L$$

2. 长尾式差放

(5) 动态小信号分析

②共模参数 (A_{vc} , R_{ic} , R_o)

双端输出共模电压 $v_o = v_{o1} - v_{o2} = 0$

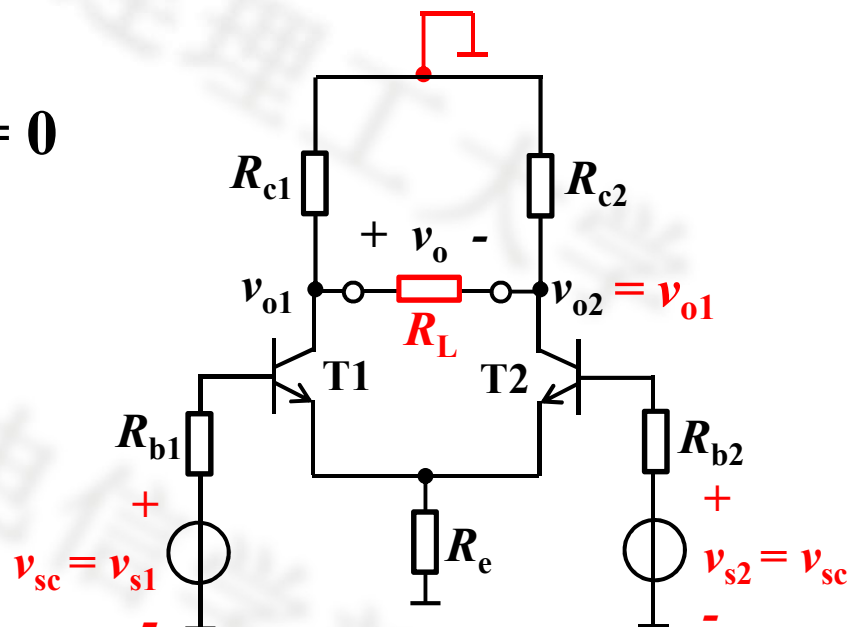
$$A_{vc} = \frac{v_o}{v_{sc}} = 0$$

共模输入电阻

$$R_{id} = \frac{1}{2} [R_b + r_{be} + (1+\beta) \times 2R_e]$$

输出电阻 (与差模相同)

$$R_o = 2R_c$$



共模交流通路

两输入端实际是并联的对地电压

2. 长尾式差放

(5) 动态小信号分析

②共模参数 (A_{vc} , R_{ic} , R_o)

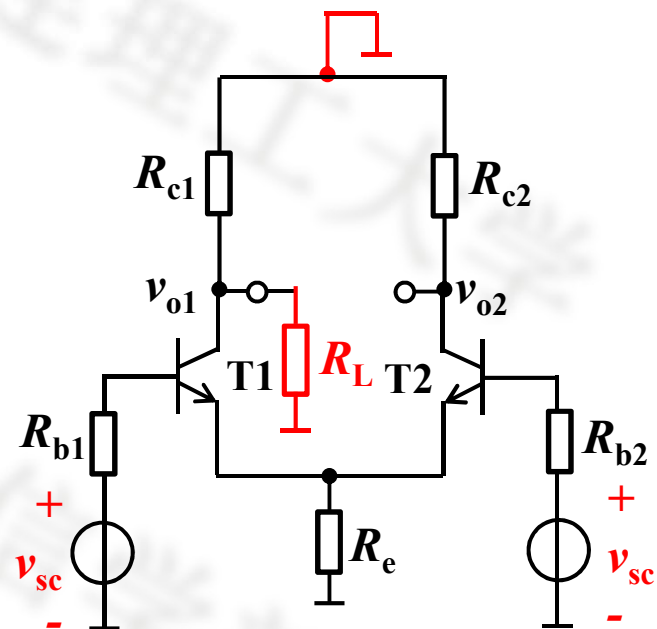
单端输出共模电压 $v_o = v_{o1}$

$$\begin{aligned} A_{vc1} &= \frac{v_{o1}}{v_{sc}} \quad \text{只看T1支路} \\ &\approx -\frac{\beta R'_L}{R_b + r_{be} + (1 + \beta)2R_e} \\ &\approx -\frac{R'_L}{2R_e} \end{aligned}$$

共模输入电阻

$$R_{id} = \frac{1}{2} [R_b + r_{be} + (1 + \beta) \times 2R_e]$$

输出电阻（与差模相同） $R_o = R_c$



共模交流通路

两输入端实际是并联的对地电压

2. 长尾式差放

(6) 共模抑制比 K_{CMR}

$$K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_{\text{vd}}}{A_{\text{vc}}} \right|, \text{ 或 } K_{\text{CMR}} = 20 \lg \left| \frac{A_{\text{vd}}}{A_{\text{vc}}} \right| \quad (\text{dB})$$

双出: $K_{\text{CMR}} = \infty$

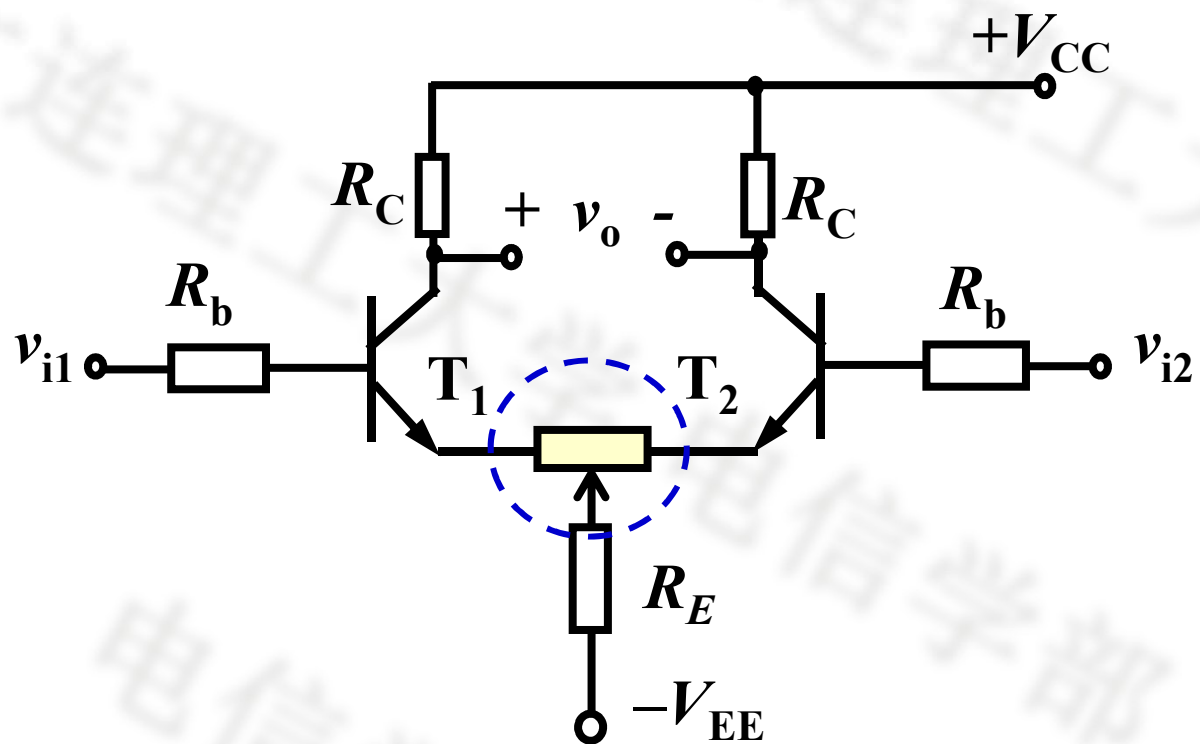
$$\text{单出: } K_{\text{CMR}} \approx \frac{-\beta R'_L / [2(R_b + r_{\text{be}})]}{-R'_L / (2R_e)} = \frac{\beta R_e}{R_b + r_{\text{be}}}$$

差放的总输出:

$$v_o = A_{\text{vd}} v_{\text{sd}} + A_{\text{vc}} v_{\text{sc}} = A_{\text{vd}} v_{\text{sd}} \left(1 + \frac{A_{\text{vc}} v_{\text{sc}}}{A_{\text{vd}} v_{\text{sd}}} \right)$$

$$= A_{\text{vd}} v_{\text{sd}} \left(1 + \frac{v_{\text{sc}}}{K_{\text{CMR}} v_{\text{sd}}} \right)$$

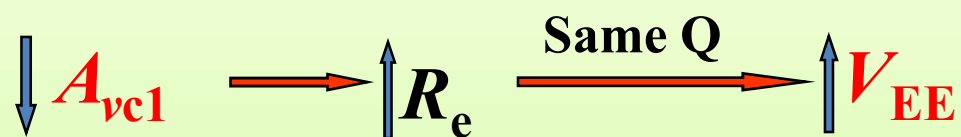
$\approx A_{\text{vd}} v_{\text{sd}}$ 共模抑制比足够大时, 共模输出可忽略不计



调零电位器：调节左右平衡使静态差模输出为0

3. 带恒流源的差动放大器

R_e 电阻大存在的问题: $A_{vc1} \approx -\frac{R'_L}{2R_e}$



IC中大电阻占用面积大，且不精确。

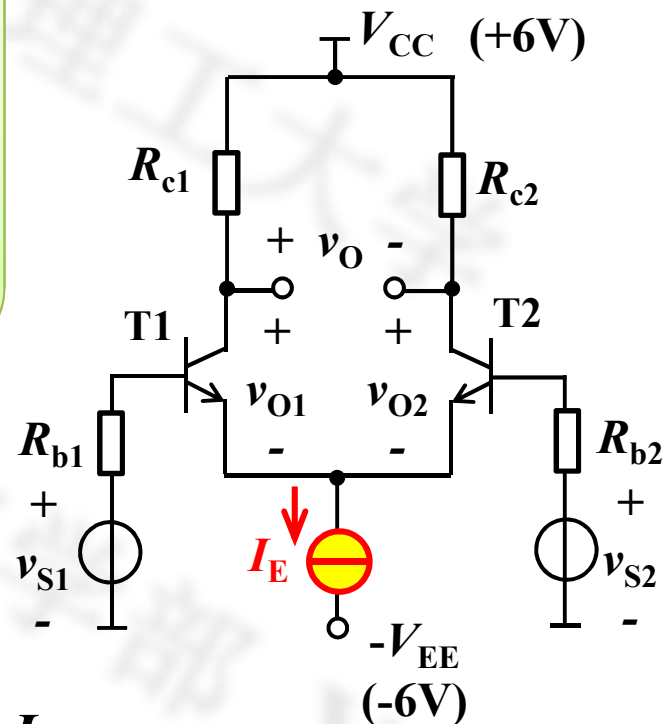
电流源（恒流源）代替 R_e :

动态电阻 r_o 大

直流电阻小（易于偏置）

电路分析: { 静态工作点: $I_{C1}=I_{C2} \approx \frac{I_E}{2}$
差模、共模小信号分析: r_o 代替 R_e

Summary: P270 Table 6.2.1



6.1 差放-长尾差放

小结

掌握：长尾差放的电路结构

掌握：静态工作点分析、差模分析、共模分析

掌握：共模抑制比的概念

预习：电流源电路

作业

P316: 6.2.2; P317: 6.2.5;

