



第四章 集成运算放大电路

Operational Amplifier, Opamp

4.1 集成运放简介

4.2 差分放大电路

4.3 互补输出级

4.4 电流源

4.5 集成运放电路简介

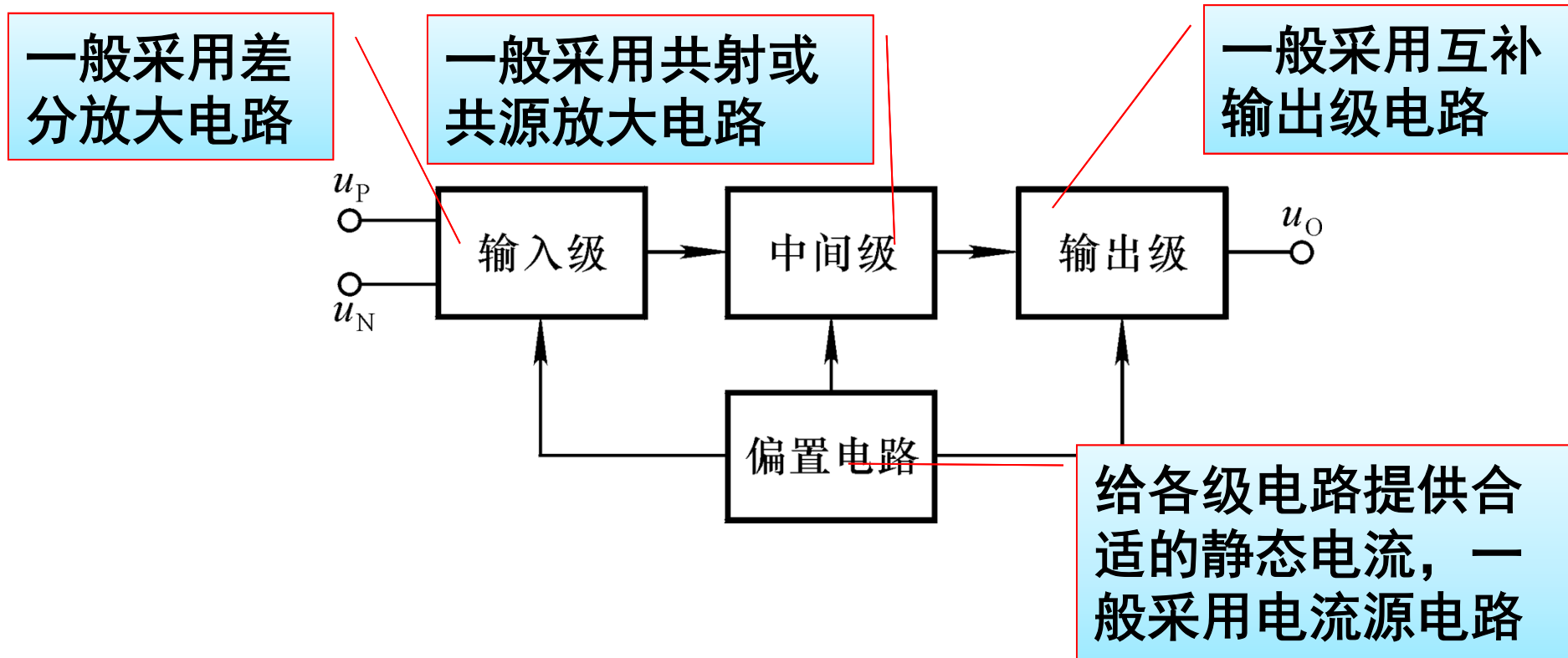
4.6 集成运放的性能指标和低频等效电路

4.7 集成电路的发展概况及分类



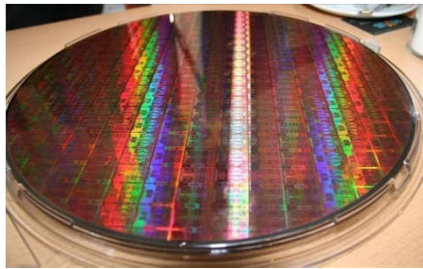
4.1 集成运放电路简介

集成运放是一种高放大倍数、高输入电阻、低输出电阻的直接耦合多级放大电路。通常由输入级、中间级、输出级等电路组成。

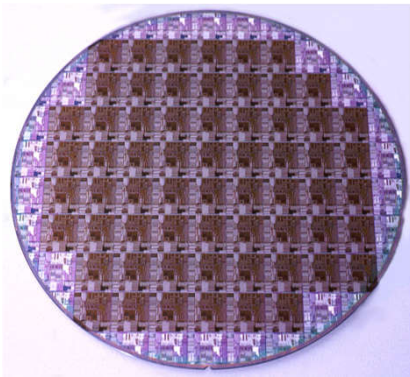


一、集成电路特点

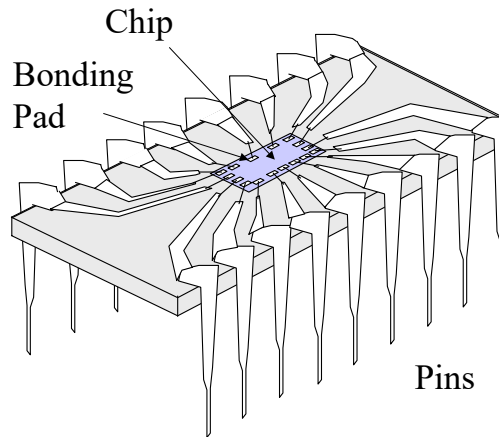
Wafer



45nm 300mm

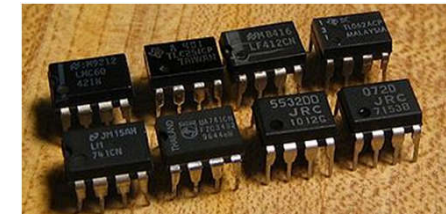


IC Chip Packaging



- 1) 相邻元件对称性和一致性好，便于制作特性相同的元件
- 2) 制作管子占用面积小
- 3) 不制作大电容：采用直接耦合
- 4) 不制作大电阻：用电流源代替

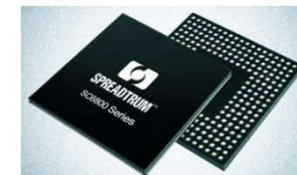
DIP



QFN



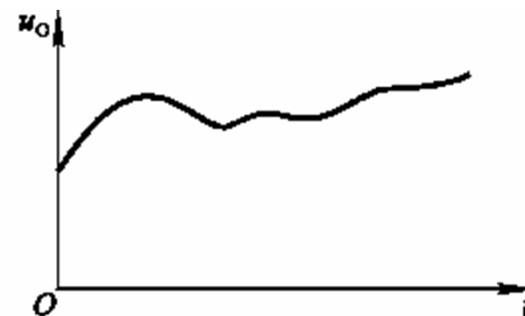
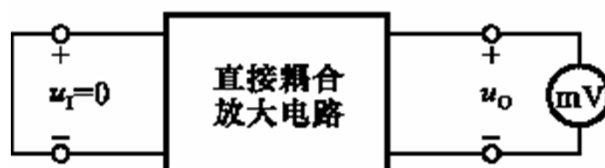
BGA



二、集成运放要解决的问题

1. 零点漂移

➤ 现象： $u_I=0$ ，而 $u_O \neq 0$ 且缓慢变化



➤ 产生的原因：

电源电压波动、元器件老化、半导体器件参数随温度变化
其中温度影响最主要，因此又称为温度漂移，简称温漂。

➤ 抑制方法：采用差分放大电路作为第一级，有效抑制温漂

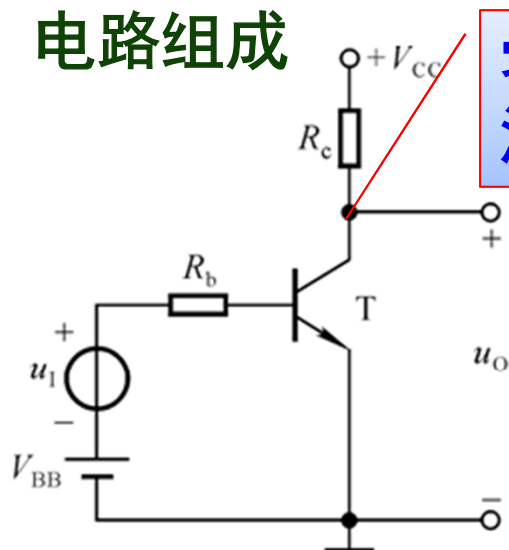
2. 负载静态功耗为零且 U_{om} 尽可能大：采用互补输出级电路



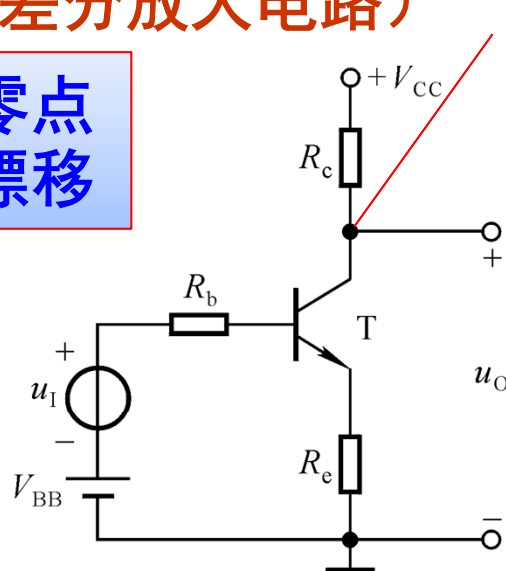
4.2 差分放大电路 (Differential Amplifier)

1. 基本电路 (长尾式差分放大电路)

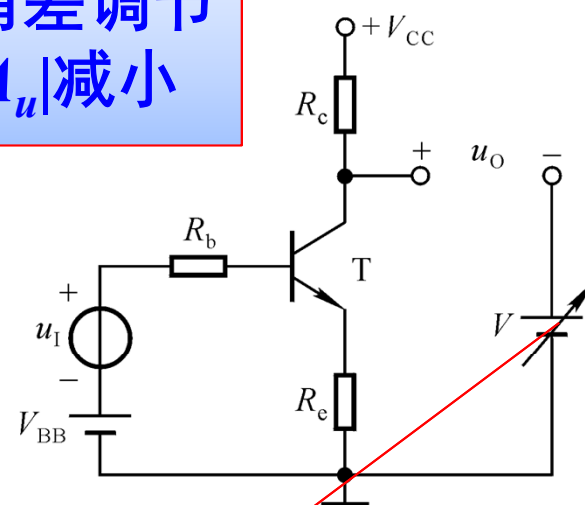
(1) 电路组成



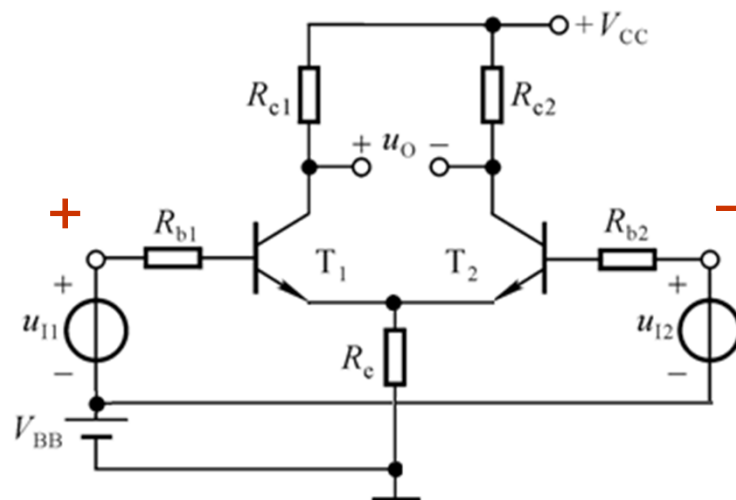
零点
漂移



•有差调节
• $|A_u|$ 减小

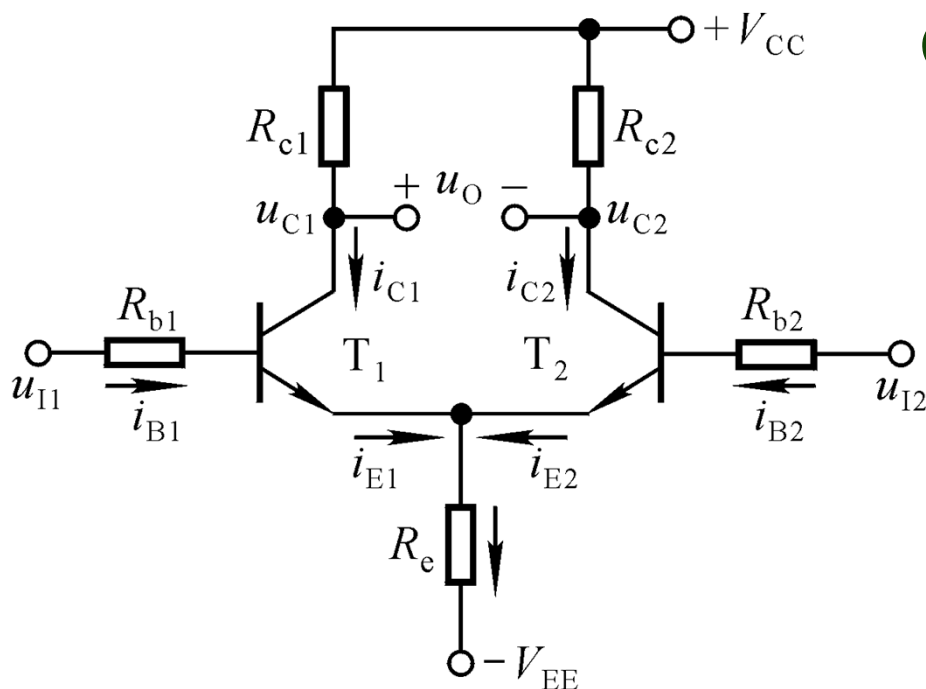


若 V 与 U_C 的
变化一样,
则输出电压
没有漂移



1. 基本电路（长尾式差分放大电路）

差分放大电路：作为直接耦合放大电路的第一级，利用参数相同的一对晶体管来进行补偿，从而有效地抑制温漂。



(2) 电路特点

- 对称性

电路结构对称

电路参数对称：

T_1 和 T_2 特性完全相同

$$R_{b1}=R_{b2}=R_b$$

$$R_{c1}=R_{c2}=R_c$$

- 两个输入端、两个输出端
- 双电源

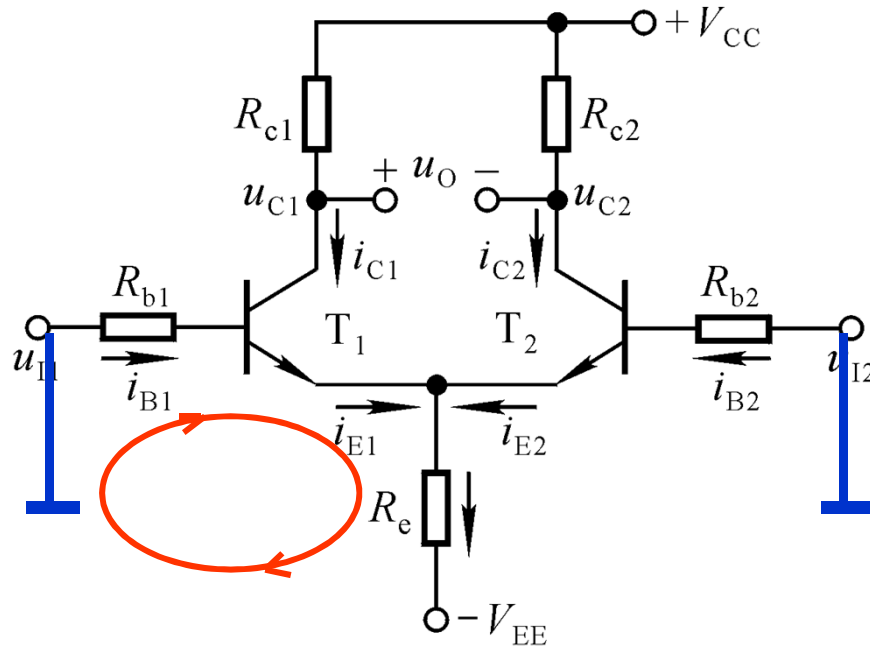
集成电路
容易做到

(3) 抑制温漂原理

静态 $U_{C1}=U_{C2}$, $U_O=0$

从而抑制了温漂

(4) 静态工作点的估算



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

$$I_{B1} = I_{B2} = I_{BQ}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = I_{CQ}$$

$$I_{E1} = I_{E2} = I_{EQ}$$

输入回路:

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

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

输出回路:

$$U_{C1} = U_{C2} = V_{CC} - I_{CQ}R_c$$

$$U_{CEQ} = (V_{CC} - I_{CQ}R_c) - (-I_{BQ}R_b - U_{BEQ})$$

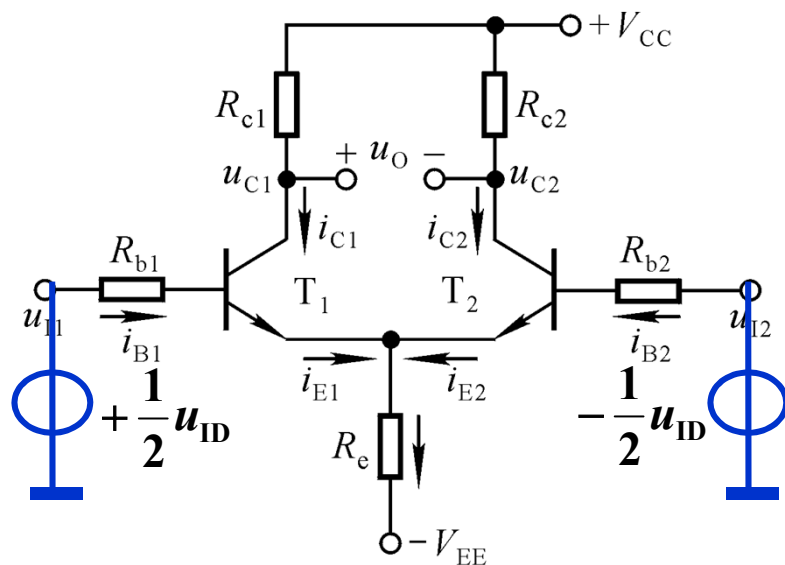
$$U_O = U_{C1} - U_{C2} = 0$$

(5) 交流性能分析

a) 差模信号与共模信号

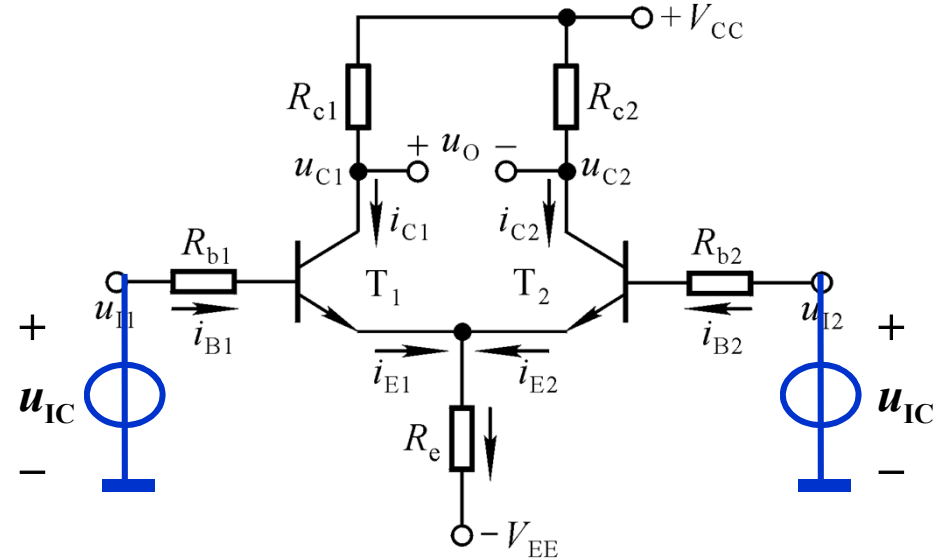
差模信号: 两个输入信号之差, 用 u_{Id} 表示。可分解为一对大小相等, 极性相反的输入信号, 用 $\pm u_{Id}/2$ 表示;

共模信号: 一对大小相等, 极性相同的输入信号, 用 u_{Ic} 表示。



差模信号:

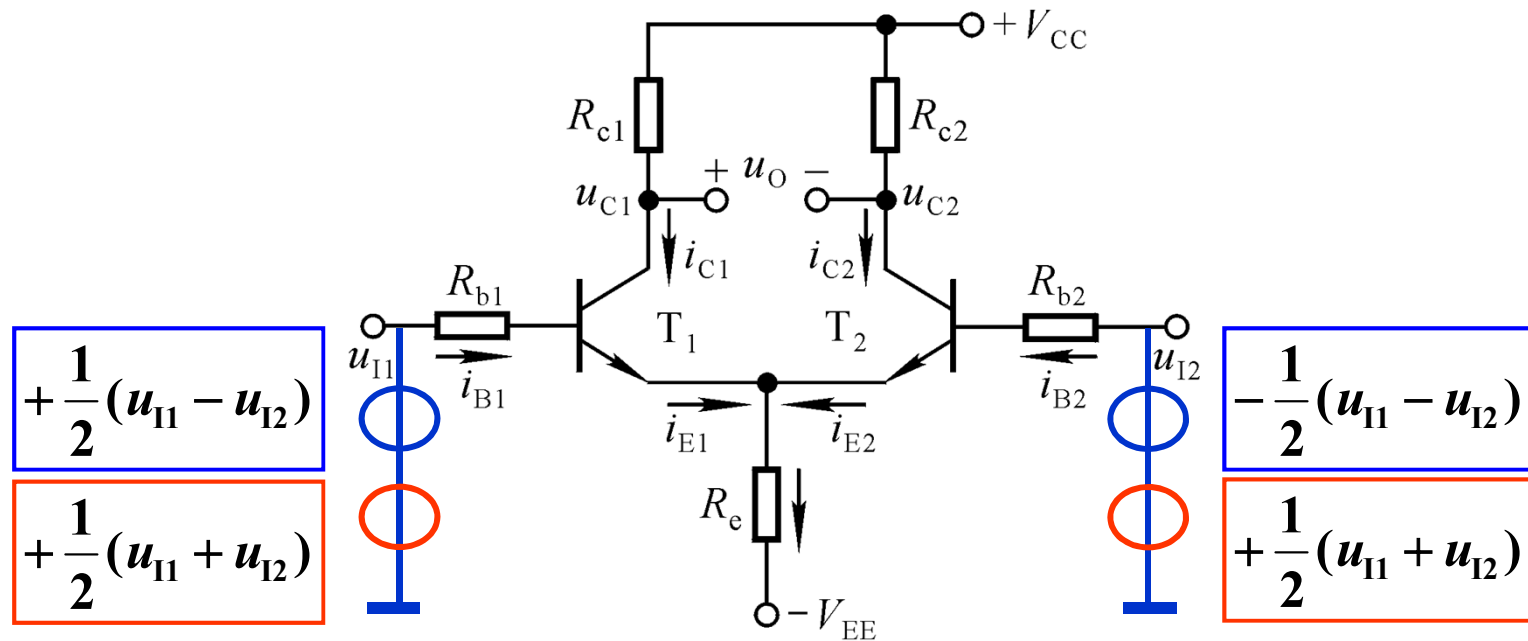
- 需要被放大的有用信号



共模信号: 需要被抑制的信号

- 环境温度变化引起的 i_B 变化
- 干扰信号引起的 i_B 变化
- 其它信号

b) 输入信号的分解：分解为一对差模信号和一对共模信号



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

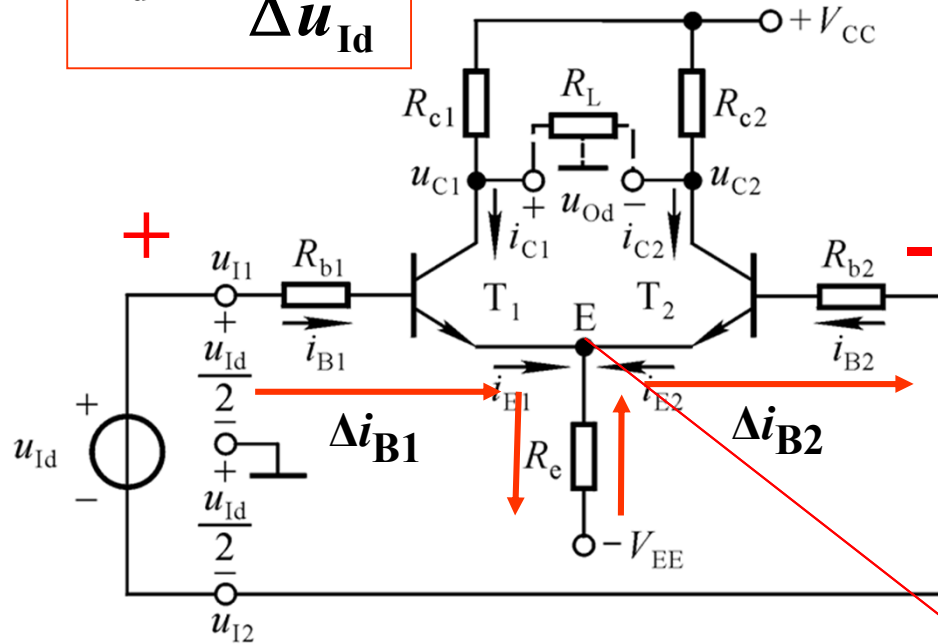
$$u_{Ic} = \frac{u_{I1} + u_{I2}}{2}$$

u_{ID} = 输入信号之差

u_{IC} = 输入信号平均值

c) 差模电压放大倍数：输入差模信号时的电压放大倍数

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



• E点的交流电位

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

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

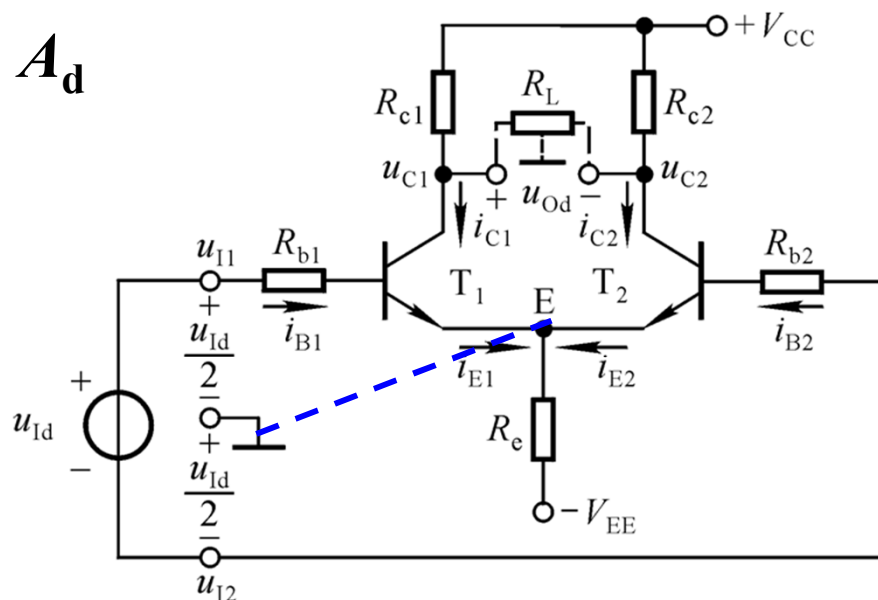
$$\Delta i_E = \Delta i_{E1} + \Delta i_{E2} = 0$$

$$\Delta u_{Re} = R_e * \Delta i_E = 0$$

输入为差模信号时称为差分输入

$\Delta u_{Re} = 0$ ，加入差模信号时E点相当于交流接地

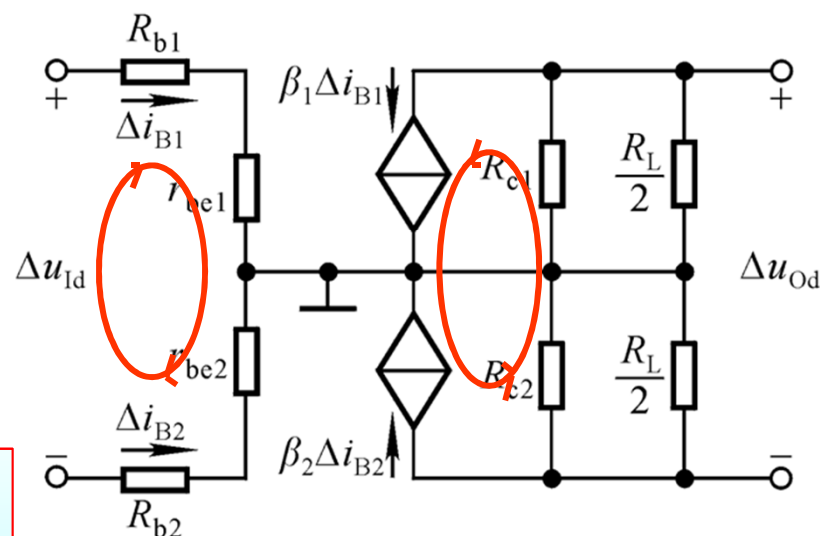
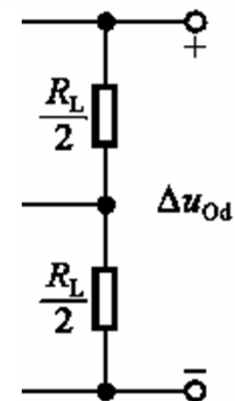
• A_d



$$A_d = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}} = \frac{-\beta \Delta i_{B1} \times 2(R_{C1} // \frac{1}{2} R_L)}{\Delta i_{B1} \times 2(R_b + r_{be})}$$

$$= -\frac{\beta(R_{C1} // \frac{1}{2} R_L)}{R_b + r_{be}}$$

与单管CE放大
电路 A_u 相当

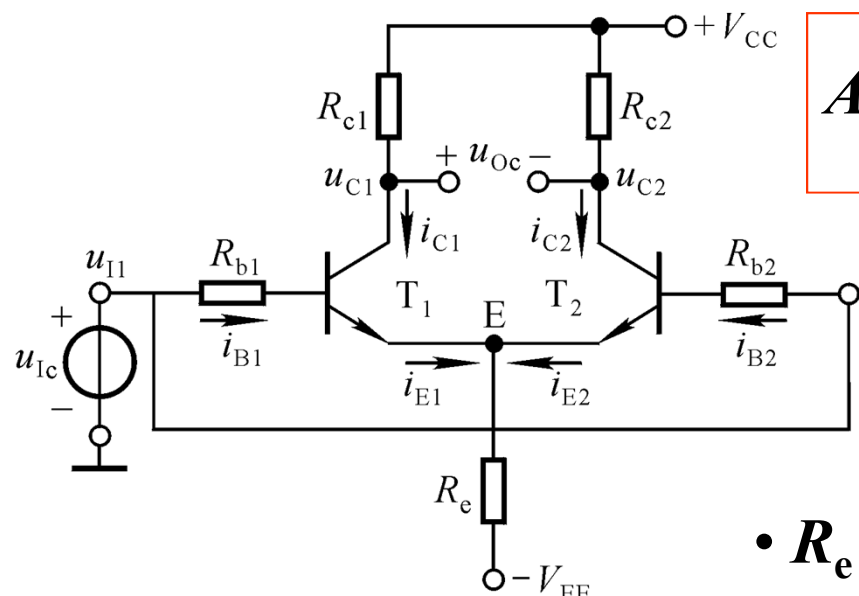


$$R_i = 2(R_b + r_{be})$$

$$R_o = 2R_c$$

问题：为何用两个管子实现单管的放大倍数？
 R_e 不影响 A_d ，是否可以去掉？

d) 共模电压放大倍数 A_c : 输入共模信号时的电压放大倍数



$$A_c = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}}$$

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

$$\Delta u_{Oc} = 0$$

$$A_c = 0 \quad \text{抑制 } u_O \text{ 变化}$$

依靠电路对称性和 R_e 的负反馈作用抑制温漂

• R_e 的共模负反馈作用 抑制 u_C 、 i_C 变化

$$u_{Ic} \uparrow \rightarrow i_{B1} (i_{B2}) \uparrow \rightarrow i_{C1} (i_{C2}) \uparrow \rightarrow u_{C1} (u_{C2}) \downarrow$$

$$\rightarrow i_{E1} (i_{E2}) \uparrow \rightarrow u_E \uparrow \rightarrow u_{BE1} (u_{BE2}) \downarrow \rightarrow i_{C1} (i_{C2}) \downarrow \rightarrow u_{C1} (u_{C2}) \uparrow$$

• 共模抑制比 K_{CMR} (*Common Mode Rejection Ration*)

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

K_{CMR} : 衡量放大电路放大差模信号、抑制共模信号（抑制温漂）的能力。

2. 差分放大电路的四种接法

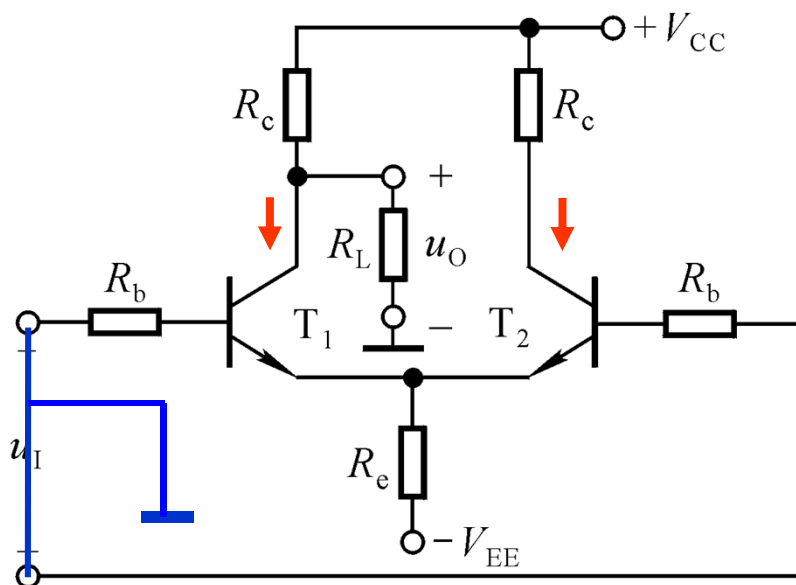
双端输入通常
指差分输入

根据输入端与输出端接“地”情况的不同，分为：

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

(1) 双端输入单端输出



➤ 静态

输入回路对称、
输出回路不对称

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

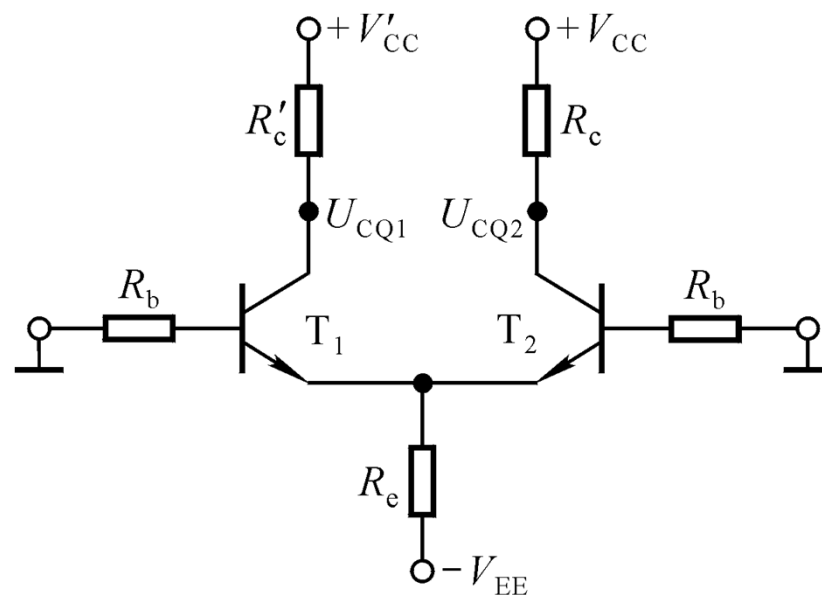
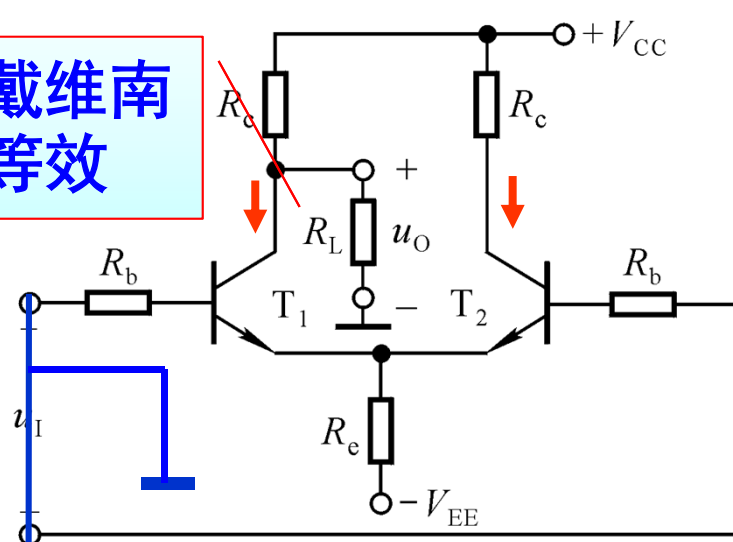
$$I_{CQ1} = I_{CQ2}$$

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

$$U_{CQ1} \neq U_{CQ2}$$

$$U_{CQ2} = V_{CC} - I_{CQ} R_C$$

戴维南
等效

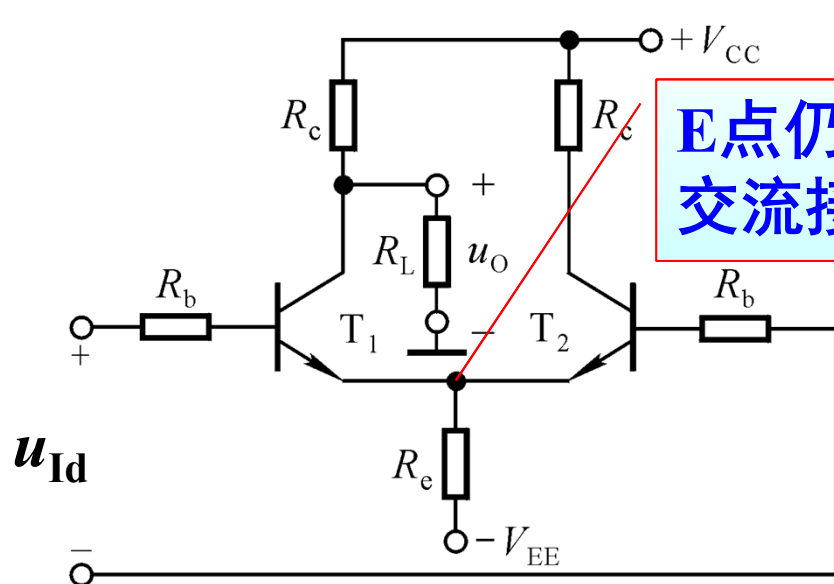


$$U_{CQ1} = V_{CC}' - I_{CQ} R_c'$$

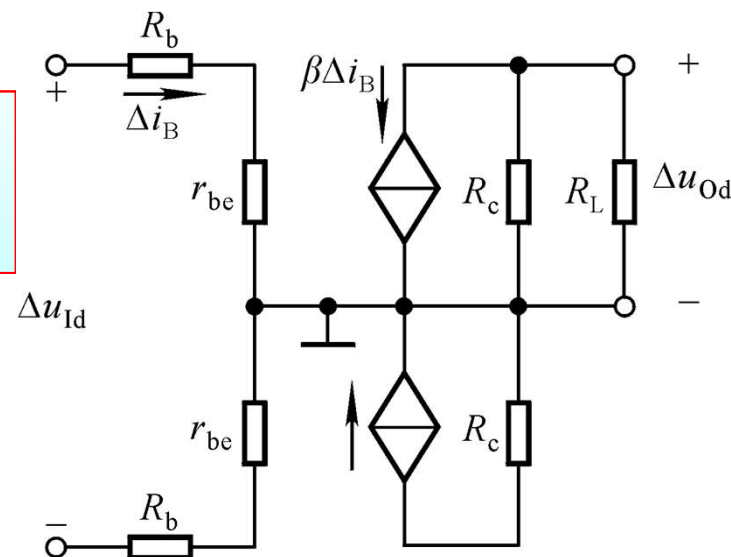
$$V_{CC}' = \frac{R_L}{R_c + R_L} V_{CC}$$

$$R_c' = R_c // R_L$$

➤ 差模电压放大倍数 A_d



E点仍相当于
交流接地点



大致为双端
输出的一半

$$A_d = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}} = \frac{-\beta \Delta i_B * (R_c // R_L)}{\Delta i_B * 2(R_b + r_{be})} = -\frac{1}{2} \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

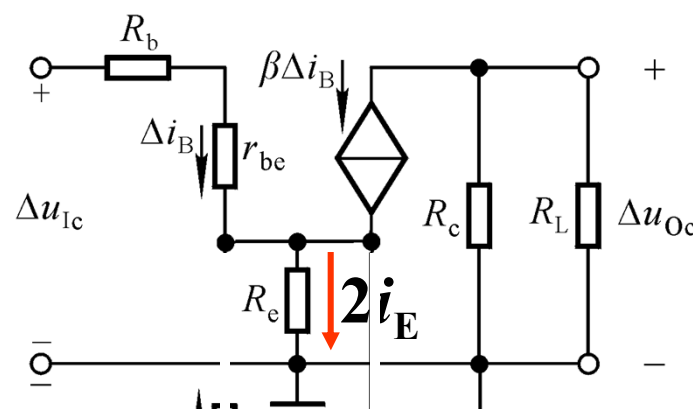
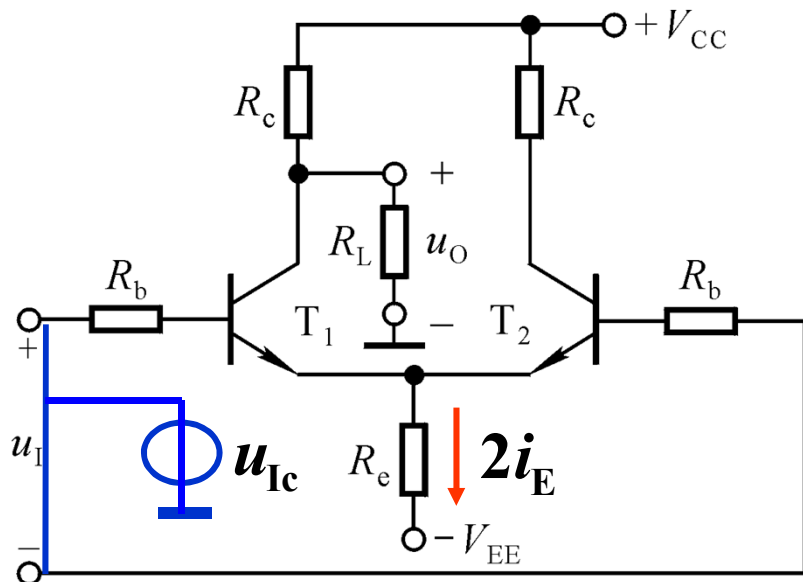
$$R_i = 2(R_b + r_{be})$$

$$R_o = R_c$$

问题：

- 若 u_O 从 T_2 集电极输出，则 A_d ？
- 既然失去对称性，静态 $U_O \neq 0$ ，为何还用差分电路？

➤ 共模电压放大倍数 A_c 及共模抑制比 K_{CMR} **思考：** R_e 是否越大越好？



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

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

当 $(1 + \beta)2R_e \gg (R_b + r_{be})$ 时

$$A_c \approx -\frac{R_c // R_L}{2R_e} \quad R_e \uparrow \rightarrow |A_c| \downarrow, K_{CMR} \uparrow$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \approx \frac{\beta R_e}{R_b + r_{be}}$$

“长尾”式差分电路： R_e 对共模信号具有负反馈的作用，能抑制共模信号，同时又不影响差模信号的放大。