

第一章 常见半导体器件

第二章 基本放大电路

第三章 负反馈放大电路

第四章 功率放大电路

分立元件电路

下篇

模拟电路基础

集成运算放大器

↓
信号运算

- ∴希望体积越小越好
- ∴电容是储能元件, 难以集成

具有极高的放大倍数

第五章 集成电路的应用

思考:
何种耦合方式?

∴采用直接耦合构成 多级放大电路

多级放大

阻容耦合 $u_i \rightarrow$ [第一级] \rightarrow [第二级] $\rightarrow u_o$

不易集成

优点：各级之间的静态工作点相互独立

缺点：无法放大直流信号和 f 很小的交流信号

直接耦合 $u_i \rightarrow$ [第一级] \rightarrow [第二级] $\rightarrow u_o$

易于集成

优点：可以放大直流信号和 f 很小的交流信号

缺点：各级之间的静态工作点相互影响

P166

严重的

零点漂移问题：当 $u_i = 0$ 时， $u_o \neq 0$

↑ 干扰信号

由温度造成的零点漂移
简称“温漂”

温漂原因：温度 T 的改变 $\rightarrow Q_1$ 改变 \rightarrow 逐级放大

如何稳定静态工作点 Q_1 ？方案1：引入直流负反馈

由于无法使用旁路电容，必然对交流也有负反馈，造成 $|A_u|$ 下降

若不希望牺牲 $|A_u|$ \rightarrow 可以增加元件为代价抑制干扰

※ 采用差动放大电路作为直接耦合多级电路的输入级（第一级）

差动（差分）放大电路 P200

一、电路的结构特点 以成倍元件为代价抑制直流/交流干扰

特点：由两个完全相同的共发射极放大电路面对面连接而成

① 左右两边的电路完全对称 → ② $Q_1=Q_2$ $A_{u1}=A_{u2}$

③ 两个输入端；两个输出端

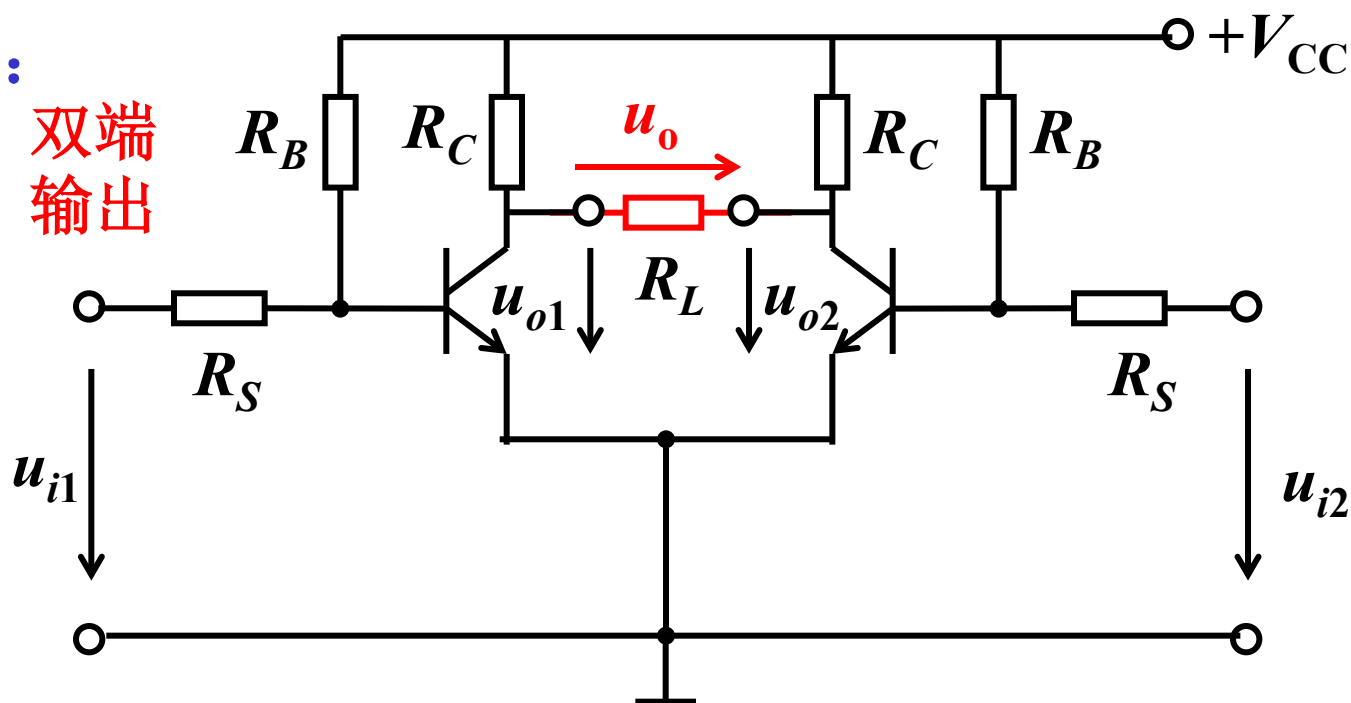
基本差动放大电路

负载的连接方式：

第一种： R_L 接在两个输出端之间

$$u_o = u_{o1} - u_{o2}$$

有效抑制干扰
(零漂)的关键



差动（差分）放大电路 P200

二、双端输出如何抑制零点漂移（温漂）？ 存在干扰

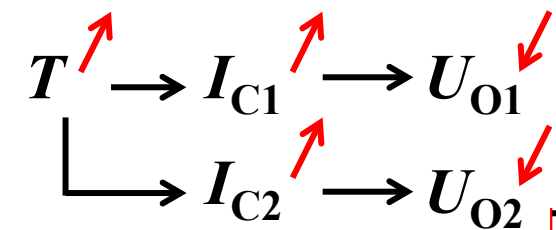
当 $u_{i1}=u_{i2}=0$ 时, $u_0=?$

当 T 改变时, Q 变 $\rightarrow u_i = 0, u_o \neq 0$

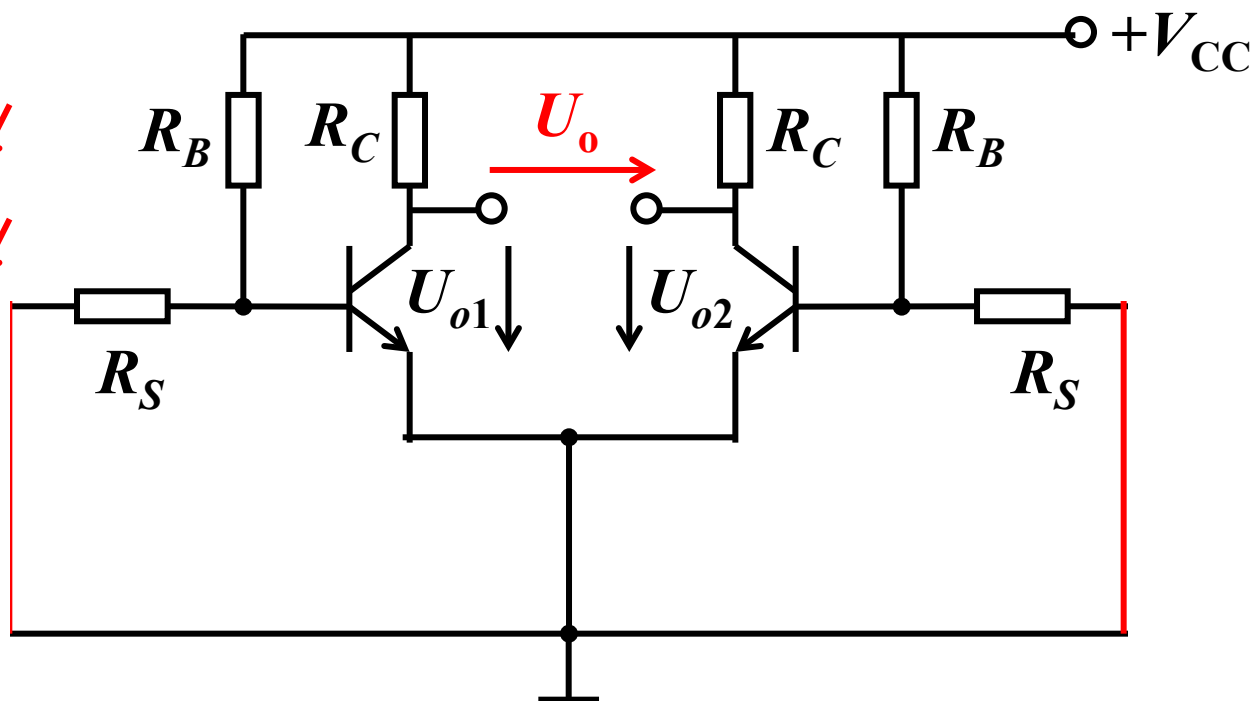
存在直流输出 \because 左右完全对称 $\therefore U_{O1}=U_{O2}$

∴ 双端输出 $\therefore U_O = U_{O1} - U_{O2} = 0$ 基本差动放大电路

当 T 改变时,



∴ 左右完全对称

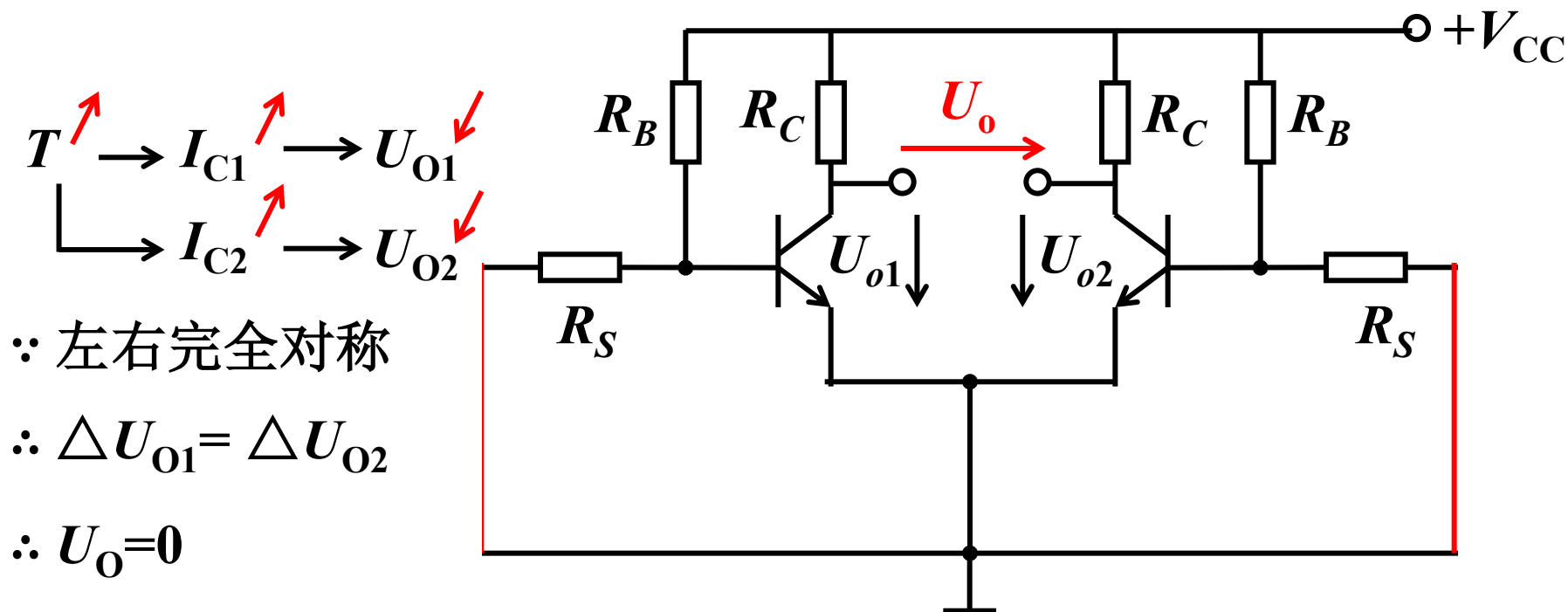
$$\therefore \Delta U_{01} = \Delta U_{02}$$
$$\therefore U_0 = 0$$


差动（差分）放大电路 P200

二、双端输出如何抑制零点漂移？

① 对于基本差动放大电路而言，当温度改变时，**单边仍然会产生零点漂移**现象。（**单端输出没有抗干扰能力**）

② 采用**双端输出**时，基本差动放大电路可利用**左右完全对称**的特点，把变化量相互抵消，从而**有效地抑制**零点漂移现象。



三、交流输入后的双端输出

∴ 有两个输入端 ∴ 分三种情况讨论

① $u_{i1} = u_{i2}$ → 输入一对共模信号

② $u_{i1} = -u_{i2}$ → 输入一对差模信号

③ $|u_{i1}| \neq |u_{i2}|$ → 输入一对任意信号

u_{ic} = 两个输入
相同的部分

$$A_{uc} = \frac{u_o}{u_{ic}} = \frac{u_o}{u_{i1}}$$

共模电压放大倍数 $A_{uc} = 0$

双端输出时 $u_o = ?$

很强的抗干扰能力

结论：采用双端输出时，差动放大电路对共模信号没有放大作用

① $u_{i1} = u_{i2}$ → $u_o = 0$

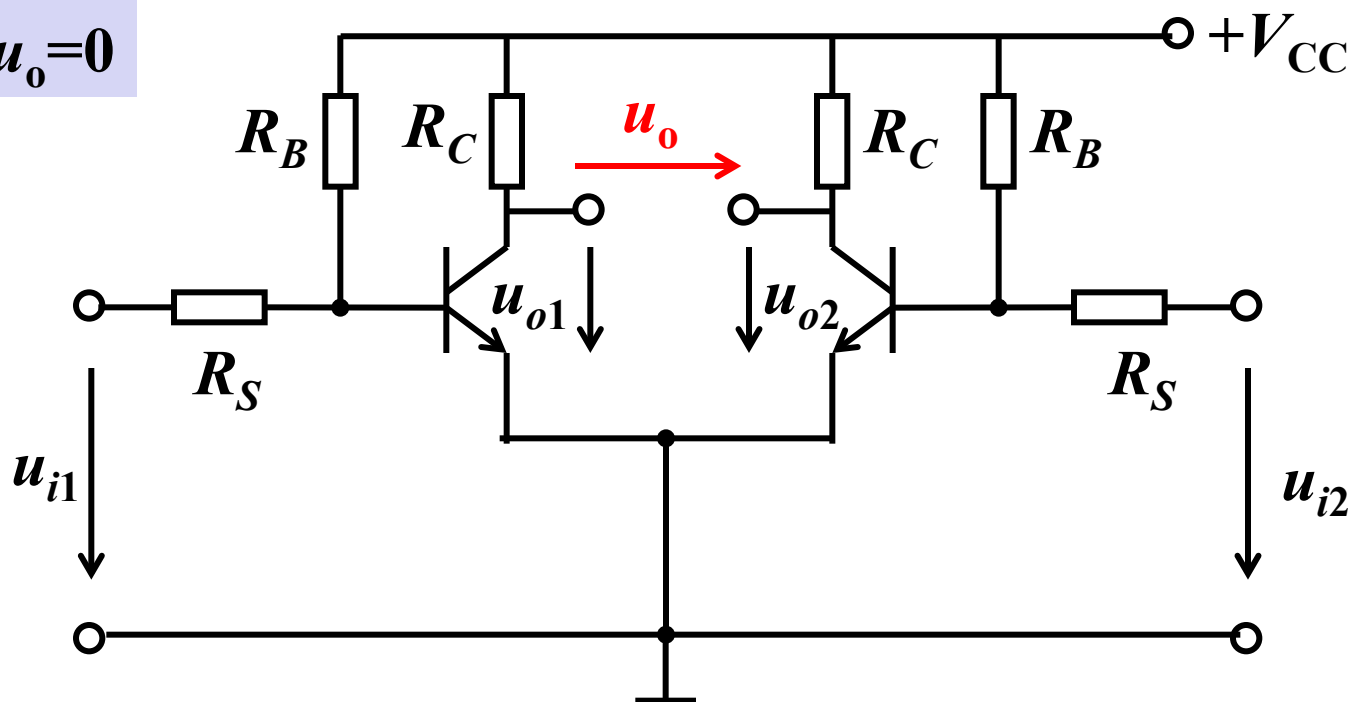
∴ 左右完全对称

∴ $A_{u1} = A_{u2}$

∴ $u_{o1} = u_{o2}$

∴ 双端输出

∴ $u_o = u_{o1} - u_{o2} = 0$



三、交流输入后的双端输出

∴ 有两个输入端 ∴ 分三种情况讨论

① $u_{i1} = u_{i2} \rightarrow$ 输入一对共模信号

② $u_{i1} = -u_{i2} \rightarrow$ 输入一对差模信号

∴ 左右完全对称 ∴ $A_{u1} = A_{u2}$ ∴ $u_{o1} = -u_{o2}$ ∴ $u_o = u_{o1} - u_{o2} = 2u_{o1}$

$$A_{ud} = \frac{u_o}{u_{id}} = \frac{u_{o1} - u_{o2}}{u_{i1} - u_{i2}} = \frac{2u_{o1}}{2u_{i1}} = A_{u1} = A_{u2}$$

u_{ic} = 两个输入
相同的部分

$$A_{uc} = \frac{u_o}{u_{ic}} = \frac{u_o}{u_{i1}}$$

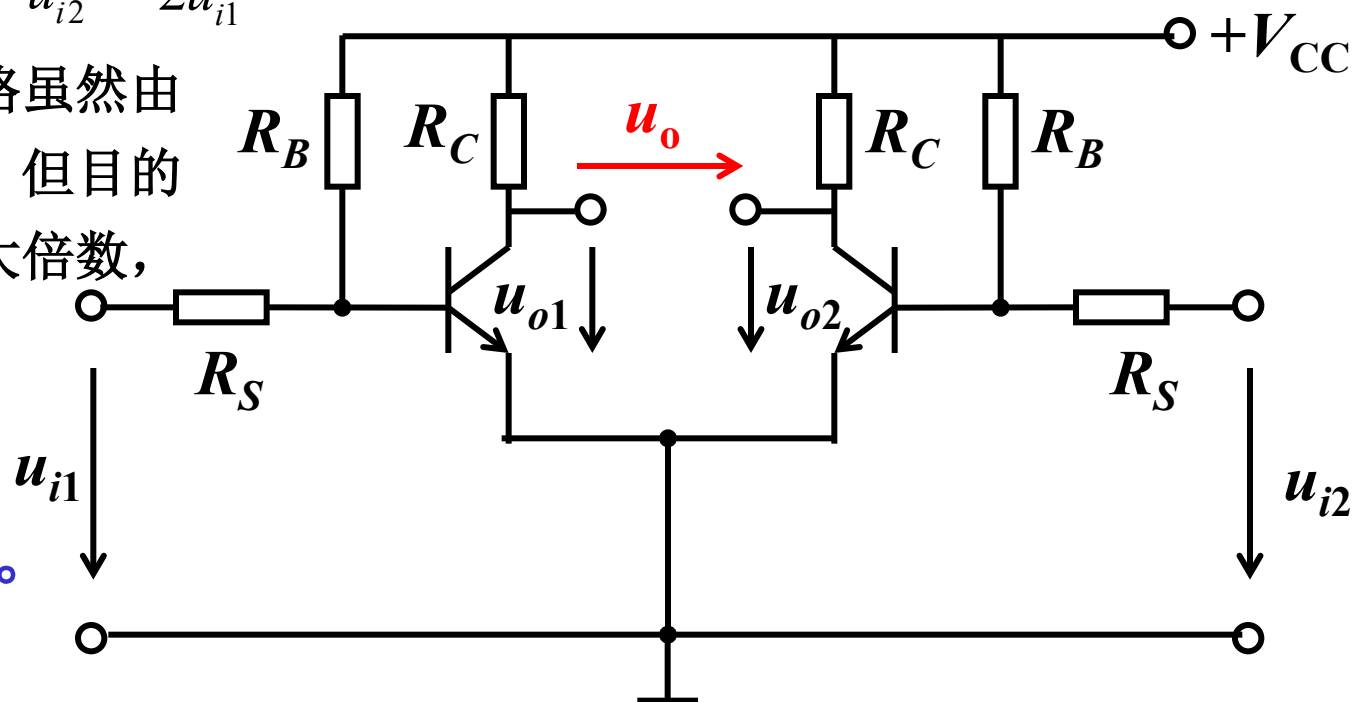
共模电压放大倍数 $A_{uc} = 0$

差模电压放大倍数 $A_{ud} = A_{u1}$

u_{id} = 两个输入差异的部分

结论：差动放大电路虽然由两个共射电路构成，但目的不在于增大电压放大倍数，

而是要利用左右对称在双端输出时抑制干扰信号。



三、交流输入后的双端输出

∴ 有两个输入端 ∴ 分三种情况讨论

① $u_{i1} = u_{i2} \rightarrow$ 输入一对共模信号

② $u_{i1} = -u_{i2} \rightarrow$ 输入一对差模信号

③ $|u_{i1}| \neq |u_{i2}| \rightarrow$ 输入一对任意信号 \rightarrow 双端输出时 $u_o = ?$

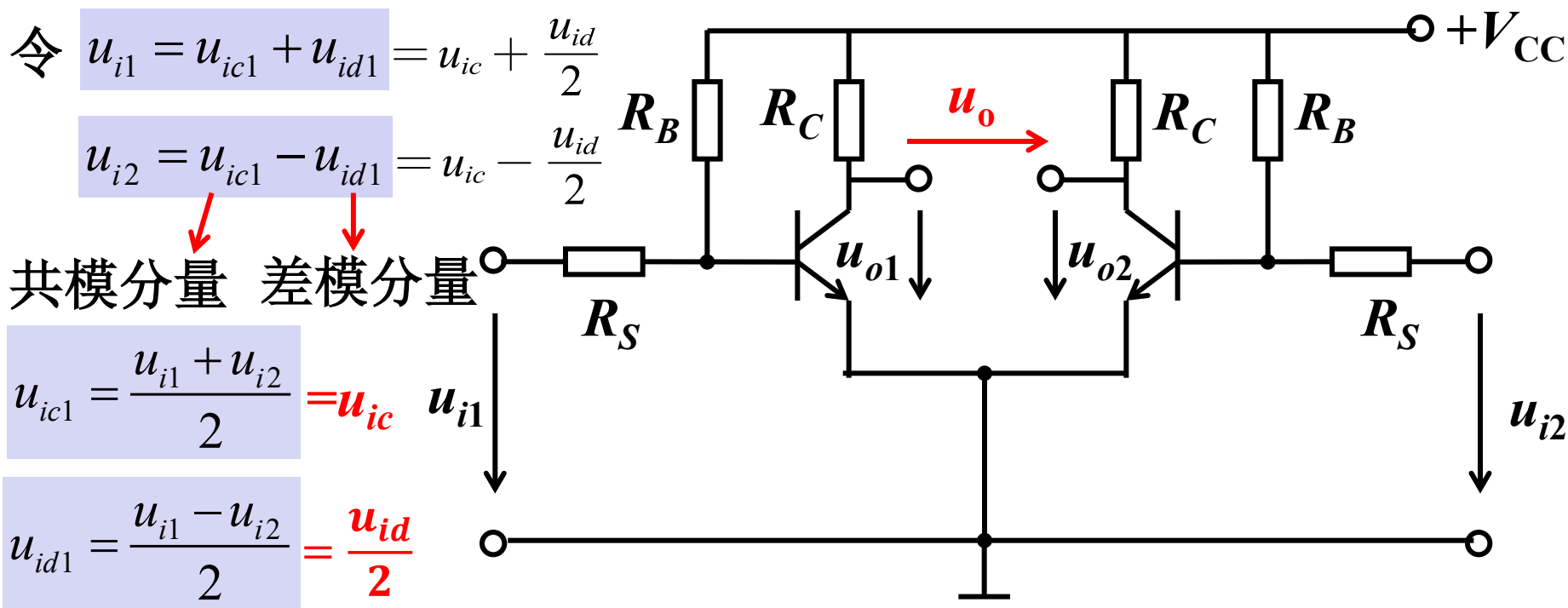
※ 一对任意信号可以拆成一对共模分量和一对差模分量的叠加

u_{ic} = 两个输入
相同的部分

$$A_{uc} = \frac{u_o}{u_{ic}} = \frac{u_o}{u_{i1}}$$

共模电压放大倍数 $A_{uc} = 0$

差模电压放大倍数 $A_{ud} = A_{u1}$



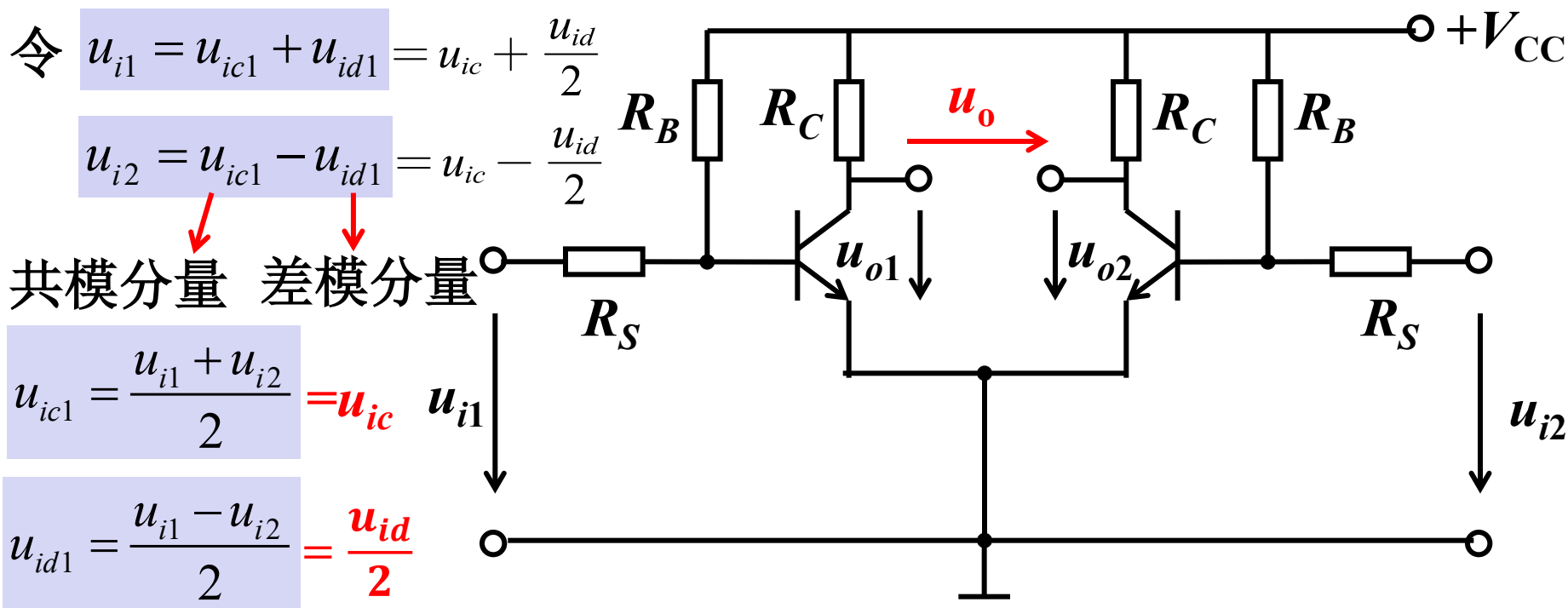
某瞬间, $u_{i1}=9\text{mV}$ $u_{i2}=-3\text{mV}$ 求: 共模分量=? 差模分量=?

$$u_{ic1} = \frac{9+(-3)}{2} = \mathbf{3\text{mV}} \quad u_{id1} = \frac{9-(-3)}{2} = \mathbf{6\text{mV}} \quad \begin{aligned} u_{i1} &= 9\text{mV} = 3\text{mV} + 6\text{mV} \\ u_{i2} &= -3\text{mV} = 3\text{mV} - 6\text{mV} \end{aligned}$$

某瞬间, $u_{i1}=10\text{mV}$ $u_{i2}=0\text{mV}$ 求: 共模分量=? 差模分量=?

$$u_{ic1} = \frac{10+0}{2} = \mathbf{5\text{mV}} \quad u_{id1} = \frac{10-0}{2} = \mathbf{5\text{mV}} \quad \begin{aligned} u_{i1} &= 10\text{mV} = 5\text{mV} + 5\text{mV} \\ u_{i2} &= 0\text{mV} = 5\text{mV} - 5\text{mV} \end{aligned}$$

结论: 差动电路的单端输入可以视为双端输入的一种特例。



任意输入在双端输出时的 $u_o=? \because A_{u1}=A_{u2}$

$$u_o = u_{o1} - u_{o2} = A_{u1} \times u_{i1} - A_{u2} \times u_{i2} = A_{u1} \times (u_{i1} - u_{i2}) = A_{u1} \times u_{id}$$

结论：双端输出的差动放大电路仅对两个输入端的差（ $u_{i1}-u_{i2}$ ）进行单倍放大。→ 差动放大电路名字的由来

差动放大电路在双端输出时具有极强的抗干扰能力。

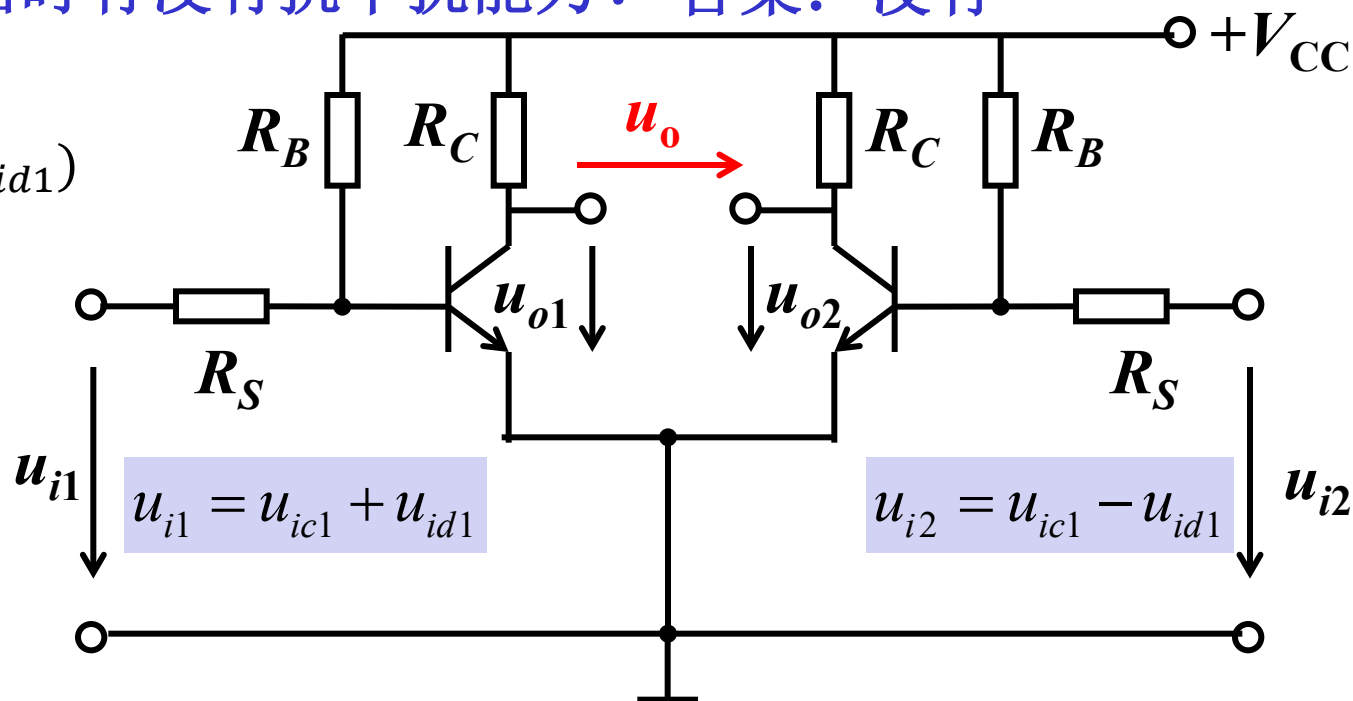
因为绝大多数的干扰信号都可视为一对共模信号，会被完全抑制

思考：单端输出时有没有抗干扰能力？ 答案：没有

$$\begin{aligned} u_{o1} &= A_{u1} \times u_{i1} \\ &= A_{u1} \times (u_{ic1} + u_{id1}) \end{aligned}$$

如何让单侧也有抗干扰能力？

做法：让单侧电路对 u_{ic1} 和 u_{id1} 的放大倍数不同。



四、长尾差动放大电路

① R_E 对共模分量 u_{ic1} 起负反馈

$$\because u_{i1} = u_{i2} = u_{ic1} \rightarrow i_{E1} = i_{E2}$$

$$\because i_{RE} = 2i_{E1} \quad \text{如何求 } A_{uc1} ?$$

相当于在单侧电路的发射极接入了 $2R_E$ 的电阻 (P203)

$$A_{uc1} = \frac{-\beta R_C}{R_S + r_{be} + (1 + \beta) \times 2R_E}$$

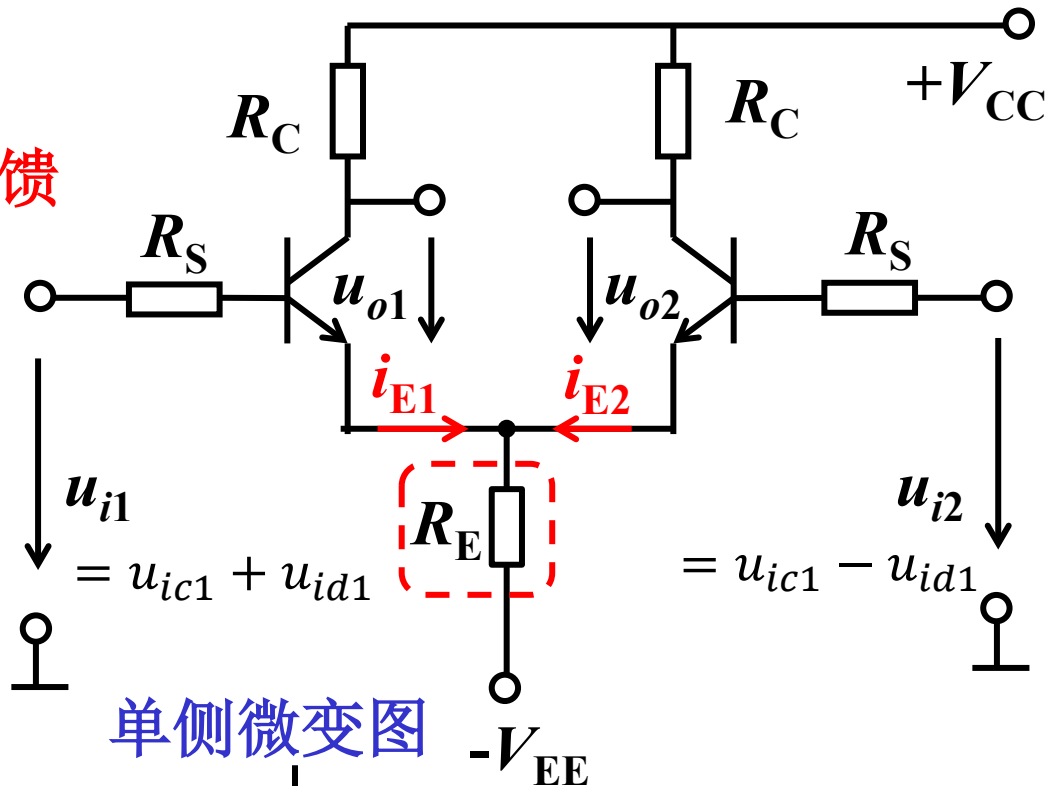
结论: R_E 越大, $|A_{uc1}|$ 越小

② R_E 对差模分量 u_{id1} 无负反馈

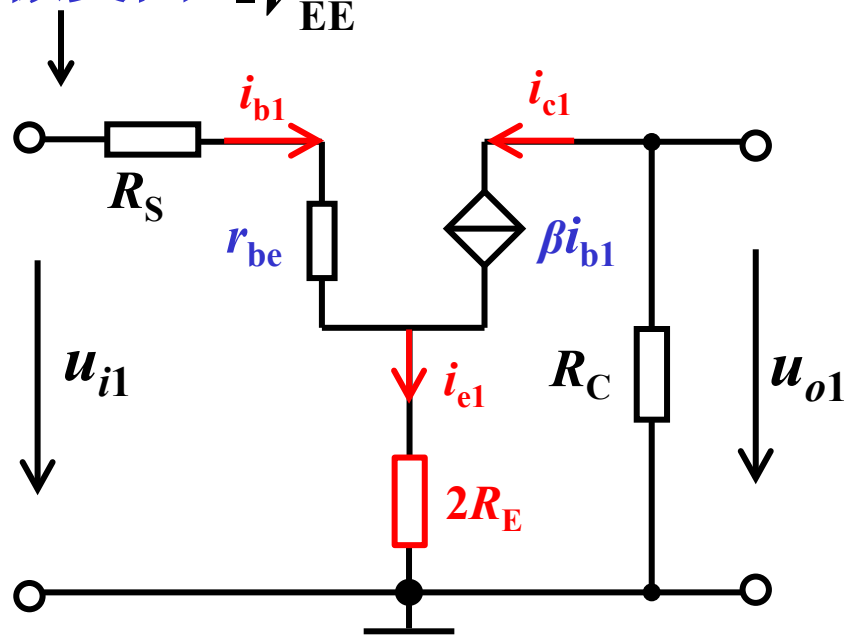
$$\because u_{i1} = u_{id1} \quad u_{i2} = -u_{id1} \rightarrow i_{E1} = -i_{E2}$$

$$\because i_{RE} = 0 \quad u_{RE} = 0 \quad \text{发射极直接接地}$$

$$A_{ud1} = \frac{-\beta R_C}{R_S + r_{be}} \quad |A_{ud1}| \text{ 很大, 不受 } R_E \text{ 影响}$$



单侧微变图



四、长尾差动放大电路

① R_E 对共模分量 u_{ic1} 起负反馈

$$\because u_{i1} = u_{i2} = u_{ic1} \rightarrow i_{E1} = i_{E2}$$

$$\because i_{RE} = 2i_{E1} \quad \text{如何求 } A_{uc1} ?$$

相当于在单侧电路的发射极接入了 $2R_E$ 的电阻 (P203)

$$A_{uc1} = \frac{-\beta R_C}{R_S + r_{be} + (1 + \beta) \times 2R_E}$$

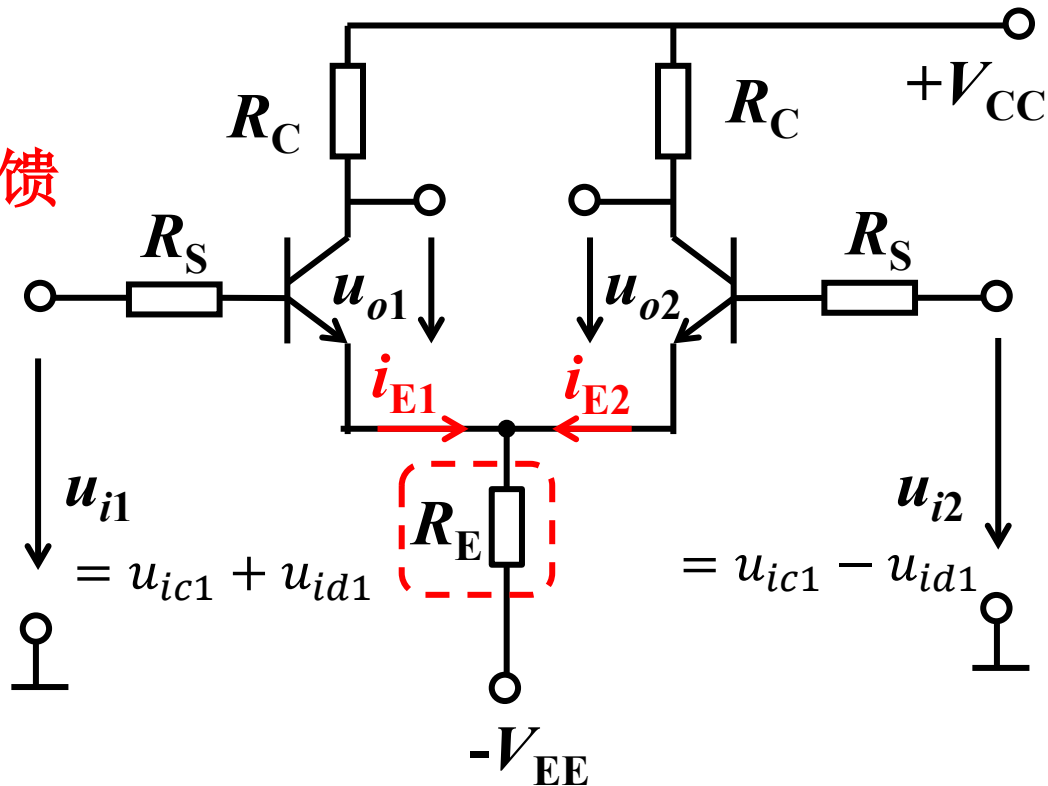
结论: R_E 越大, $|A_{uc1}|$ 越小

② R_E 对差模分量 u_{id1} 无负反馈

$$\because u_{i1} = u_{id1} \quad u_{i2} = -u_{id1} \rightarrow i_{E1} = -i_{E2}$$

$$\because i_{RE} = 0 \quad u_{RE} = 0 \quad \text{发射极直接接地}$$

$$A_{ud1} = \frac{-\beta R_C}{R_S + r_{be}} \quad |A_{ud1}| \text{ 很大, 不受 } R_E \text{ 影响}$$



$$u_{o1} = A_{uc1} \times u_{ic1} + A_{ud1} \times u_{id1}$$

$$\because |A_{uc1}| \ll |A_{ud1}| \therefore u_{o1} \approx A_{ud1} \times u_{id1}$$

结论: 单侧电路也能抑制干扰

它既可双端输出也可单端输出

R_E 太大静态损耗高且不易集成

改进: 用恒流源代替 R_E (P204)

总 结

以成倍的元件作为代价来抑制共模信号

1、引入差动放大电路是为了解决直接耦合带来的零点漂移问题

2、基本差动电路的原理：利用电路的左右对称，在双端输出时将两边的共模输出互相抵消。→ 此电路不允许单端输出

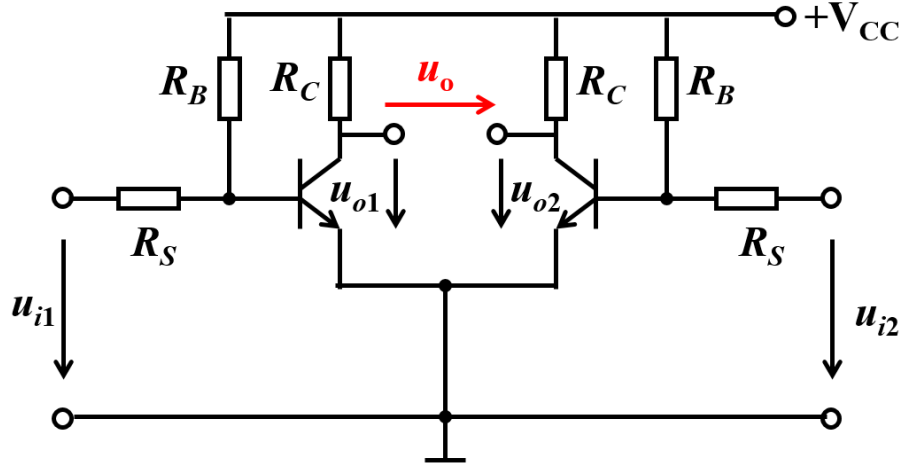
$u_{o1} = A_{u1} \times u_{i1} = A_{u1} \times (u_{ic1} + u_{id1})$ 基本差动电路单边没有抗干扰能力

3、长尾差动电路的原理：在左右对称的基础上，利用 R_E 对共模分量引入负反馈，在单端输出时也能有效抑制共模信号。

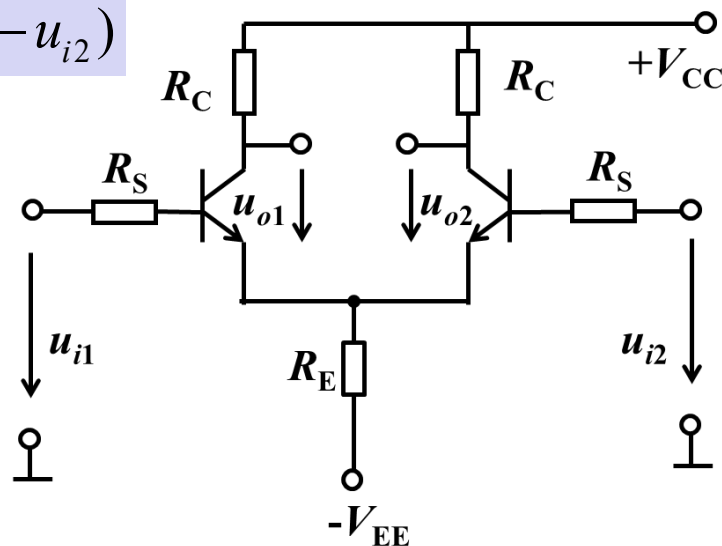
双端输出无差别

$$u_o = u_{o1} - u_{o2} = A_{ud} \times (u_{i1} - u_{i2})$$

$$= A_{u1}$$



基本差动放大电路



长尾差动放大电路

衡量差动电路对共模信号抑制的能力

需要调零装置 P207

主要指标：共模抑制比 $K_{CMR} = \frac{|A_{ud}|}{|A_{uc}|}$ → 越大越好

左右完全对称

输出方式 ↗ 双端输出 → $u_o = u_{o1} - u_{o2}$ → $A_{uc} = 0$ → $K_{CMR} = \infty$

↘ 单端输出 → $u_o = u_{o1}$ 或 u_{o2} → 基本差动 → K_{CMR} 很小

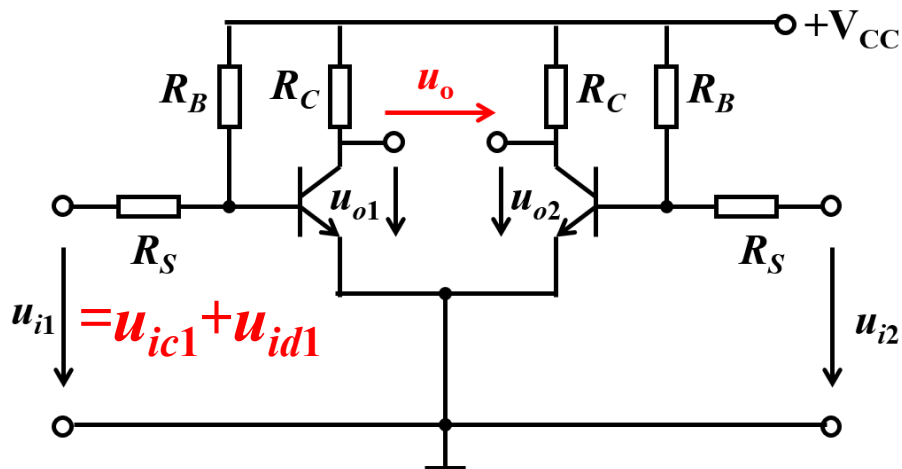
→ 长尾差动 → K_{CMR} 很大

基本差动电路不允许单端输出

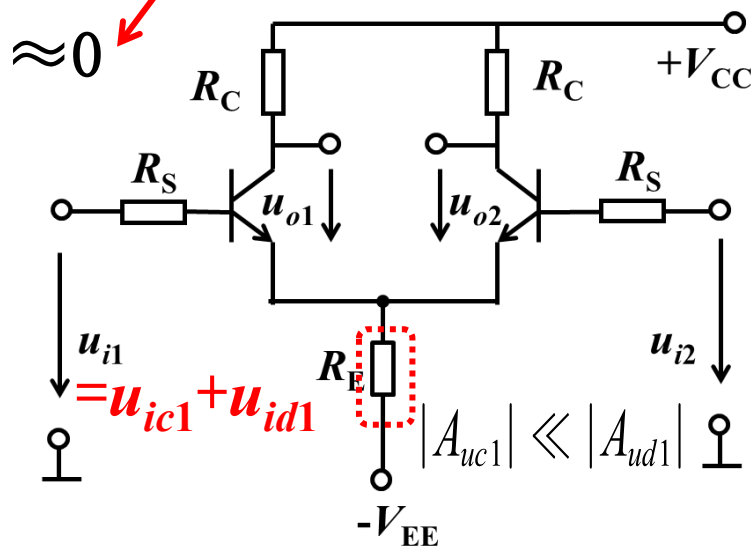
$$u_{o1} = A_{u1} \times u_{i1} = A_{u1} \times (u_{ic1} + u_{id1})$$

$$u_{o1} = A_{uc1} \times u_{ic1} + A_{ud1} \times u_{id1}$$

双端输出无差别 单端输出有差别



基本差动放大电路

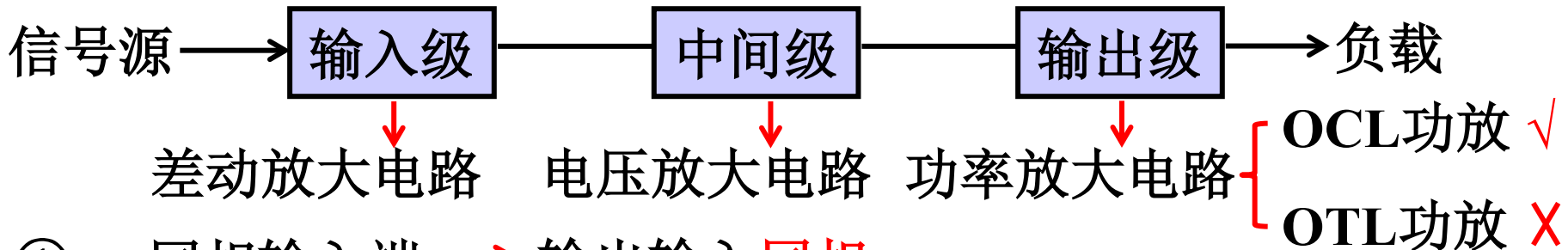


长尾差动放大电路

集成运算放大器→不可以使用大电容

集成运算放大器是一个具有高放大倍数的多级直接耦合放大电路。

差动放大电路：由两个完全相同的共射放大电路面对面连接而成。

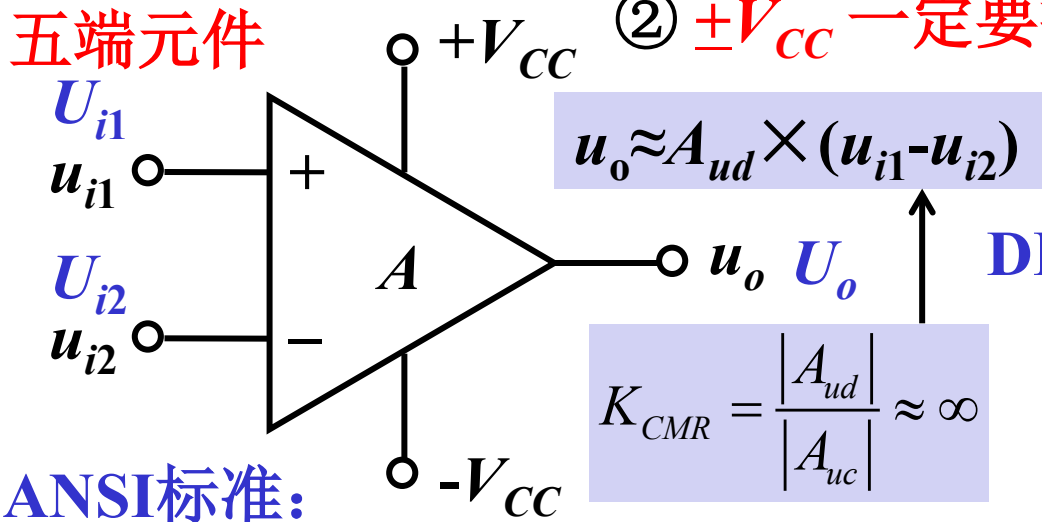


① +: 同相输入端 \rightarrow 输出输入同相

∴ 反相输入端 → 输出输入反相

OTL: 单电源+输出大电容

五端元件



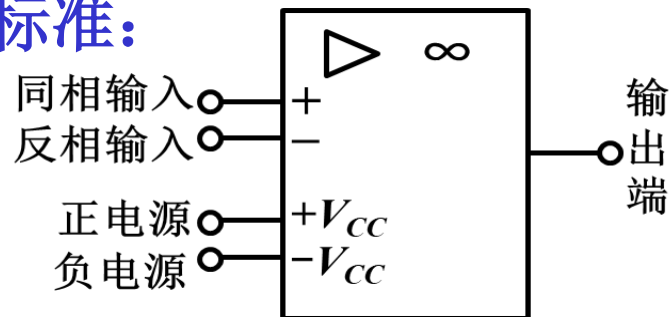
② $\pm V_{CC}$ 一定要接:

为各级提供合适的Q

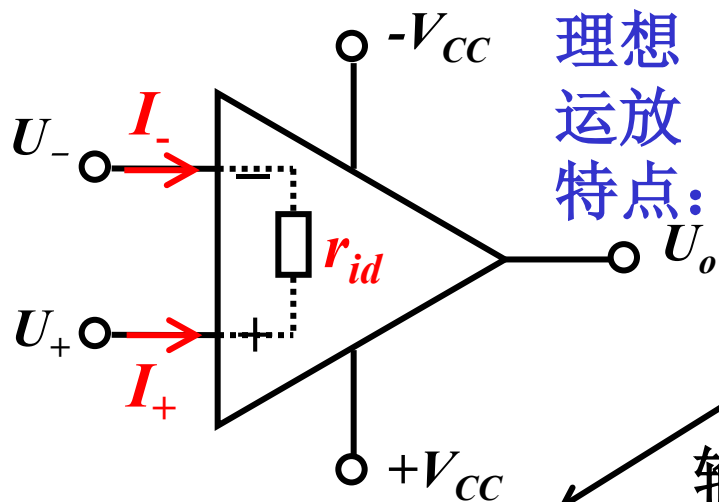
输出构成双电源OCL

说明：画图时可省略 $\pm V_{CC}$

DIN标准:



ANSI标准:



- ◆ 共模抑制比 $K_{CMR} = \infty$ $U_o = A_{ud}(U_+ - U_-)$
- ◆ 开环差模电压放大倍数 $A_{od} = \infty$ (无反馈)
- ◆ 开环差模输入电阻 $r_{id} = \infty$ **虚断**
- ◆ 开环输出电阻 $r_o = 0$ $I_+ = I_- \approx 0$

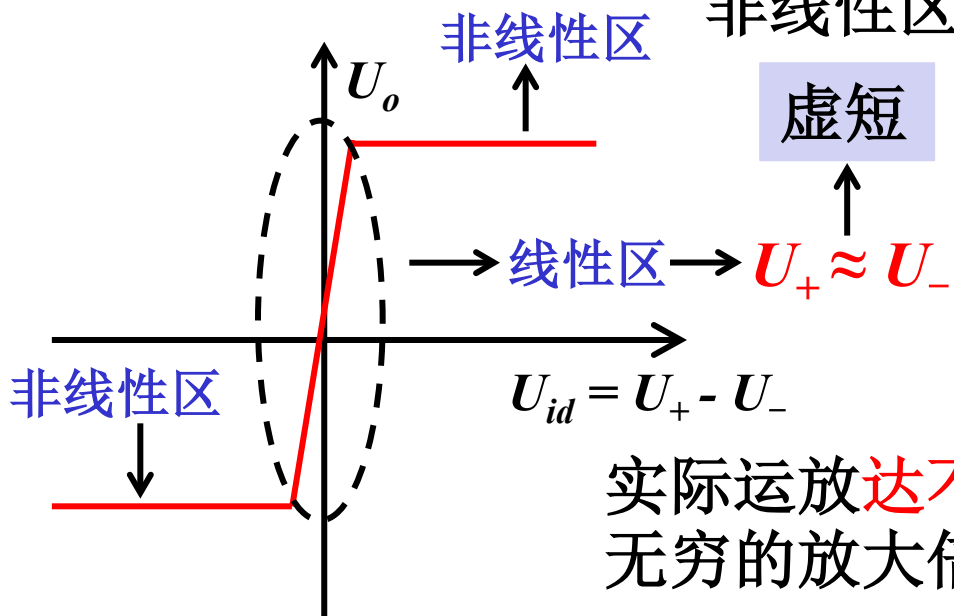
当多个运放组合在一起时，**每个都可单独分析**

输出近似为**恒压源**， U_o 和后续电路无关

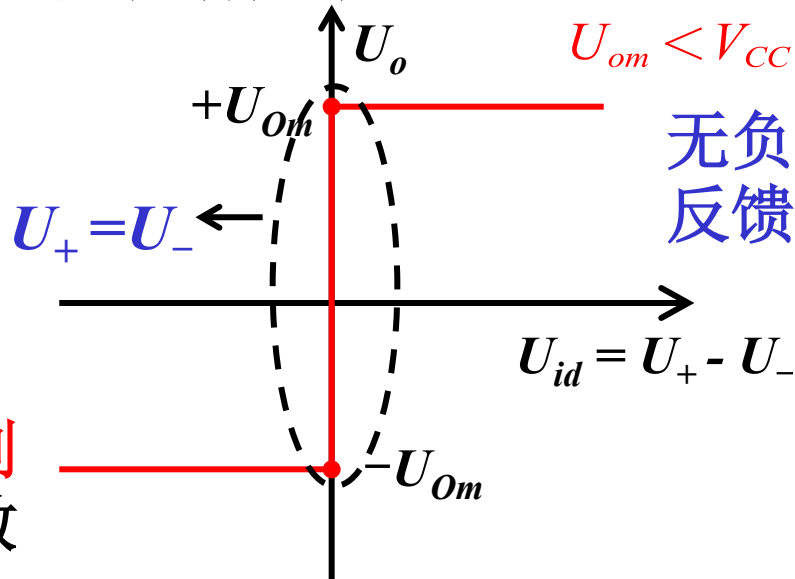
线性区特点：虚短和虚断

→ 信号运算
分析基础

非线性区无虚短但有虚断



实际运放电压传输特性曲线



理想运放电压传输特性曲线