

第7章 集成运算放大器

7.1 概述 + 直接耦合放大电路及其特殊问题

7.2 差动式放大电路

7.3 差动式放大电路的输入输出方式

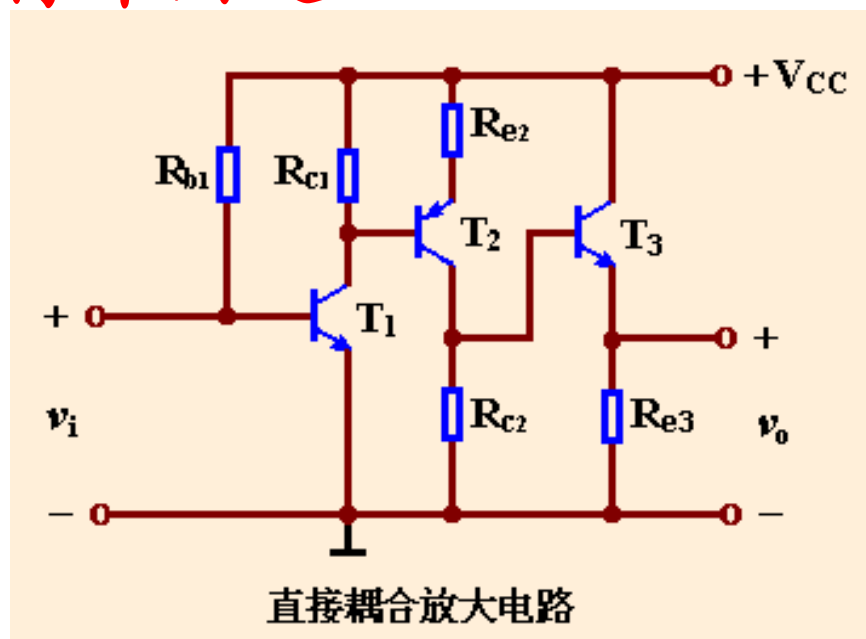
5.4 集成运算放大电路的概述

直接耦合放大电路及其特殊问题

1. 直接耦合放大电路

为什么一般的集成运算放大器都要采用直接耦合方式?

优点：大电容制作困难，
可以放大低频信号



2. 直接耦合放大电路的零点漂移

零漂：无输入信号时，输出仍有缓慢变化的电压产生

主要原因：温度变化引起，也称温漂。

电源电压波动
也是原因之一

温漂指标：温度每升高 1 度时，输出漂移电压按电压增益折算到输入端的等效输入漂移电压值。

例如

假设 $A_{V1} = 100$,

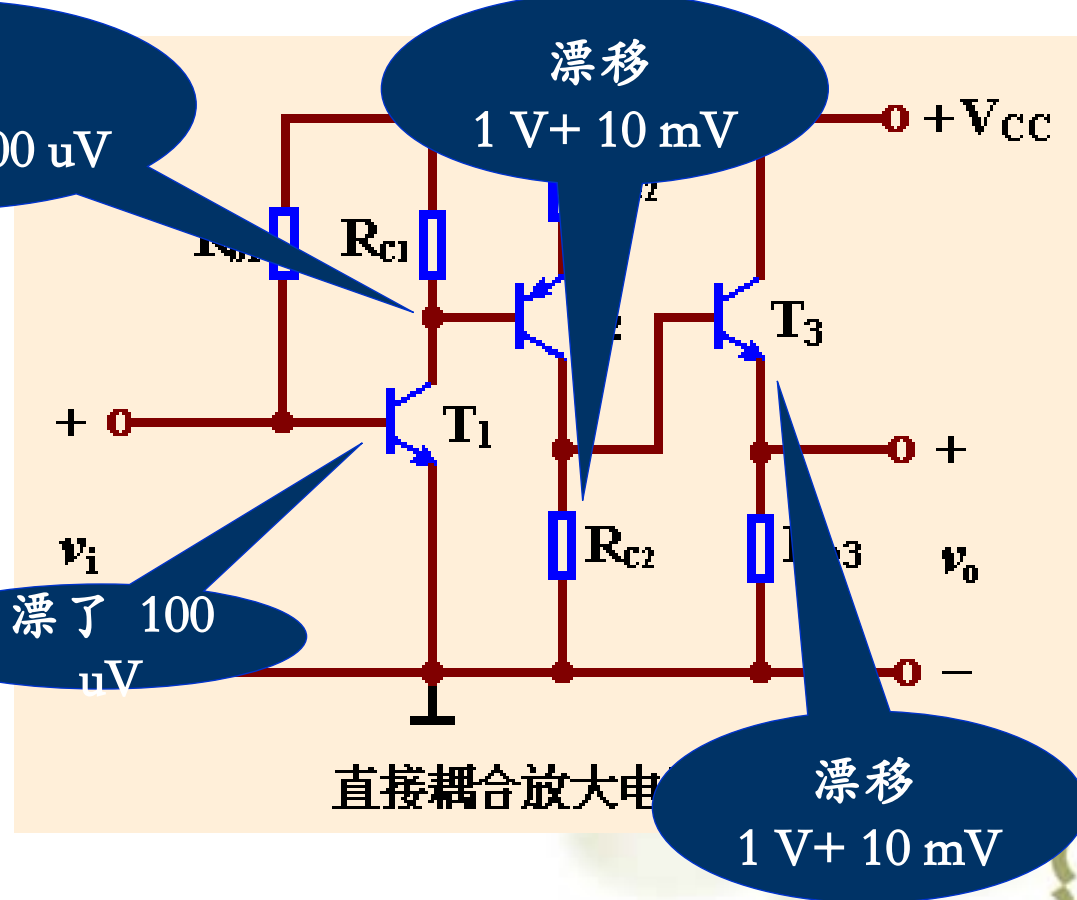
$A_{V2} = 100$, $A_{V3} = 1$ 。

若第一级漂了 $100\text{ }\mu\text{V}$,

则输出漂移 1 V 。

若第二级也漂了
 $100\text{ }\mu\text{V}$,

则输出漂移 10 mV 。



第一级是关键

3. 减小零漂的措施

⌚ 用非线性元件进行温度补偿

⌚ 采用差分式放大电路

7.2.1 基本差动放大电路

核心关键：对称性

1. 工作原理

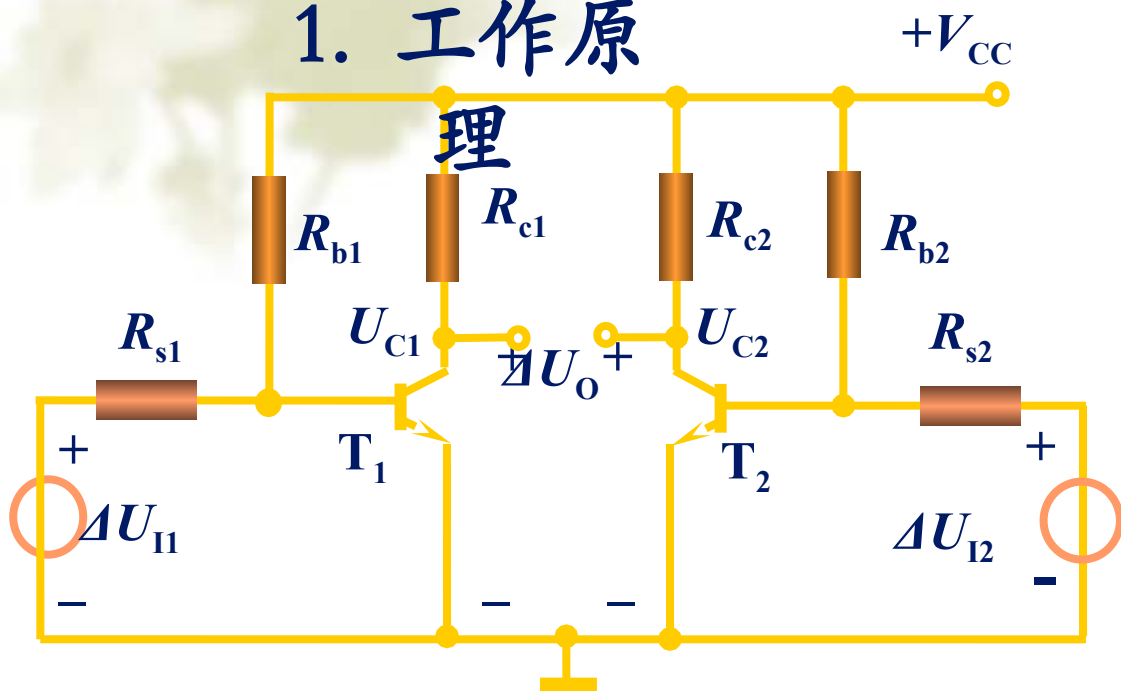


图 7.1 基本差动放大电路

➤ 组成：由两个相同的共射单管放大电路组成。即两边电路是完全对称的。

➤ 双端输入双端输出方式

➤ 输出： $\Delta U_O = U_{C1} - U_{C2}$ 。

当 $T(^{\circ}\text{C}) \uparrow$
 $\begin{cases} I_{C1} \uparrow \rightarrow U_{C1} \downarrow \\ I_{C2} \uparrow \rightarrow U_{C2} \downarrow \end{cases}$

思考：对称和抑制零点漂移的关系。 由于电路对称，变化量相等，即 $\Delta U_{C1} = \Delta U_{C2}$

当温度变化时： $\Delta u_o = (u_{C1} \pm \Delta u_{C1}) - (u_{C2} \pm \Delta u_{C2}) = 0$

(2) 动态分析 (共模输入)

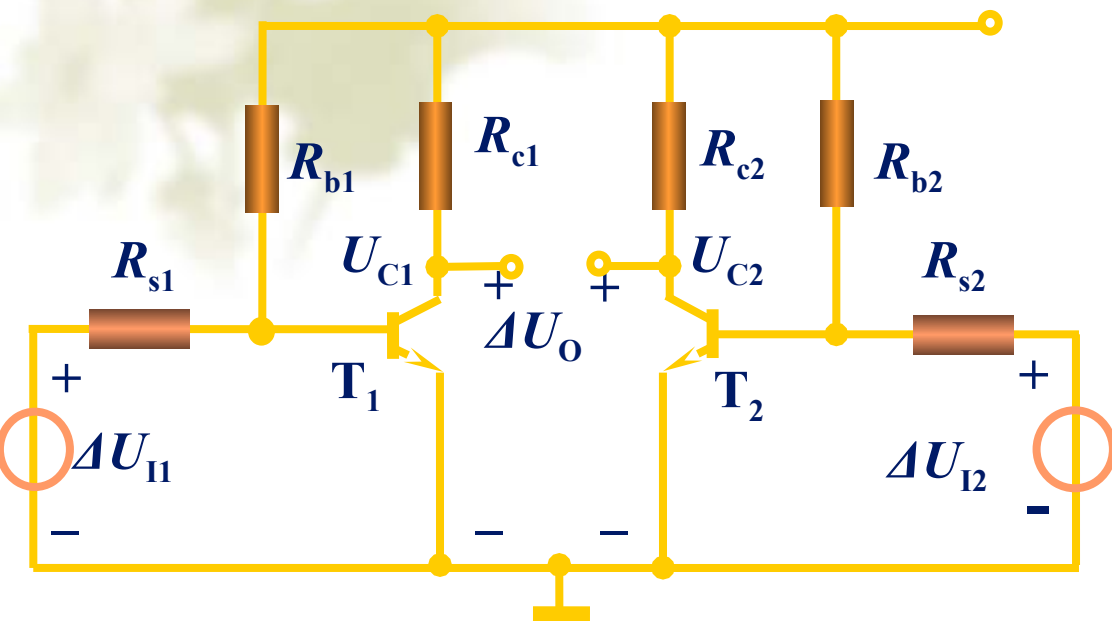


图 7.1 基本差动放大电路

• $\Delta U_{I1} = \Delta U_{I2} \rightarrow$ 共模信号 $\Delta U_{IC} = \Delta U_{I1}$

$= \Delta U_{I2}$

• 共模电压放大倍数 (Common-mode Gain):

$$A_{uc} = \frac{\Delta U_{OC}}{\Delta U_{IC}}$$

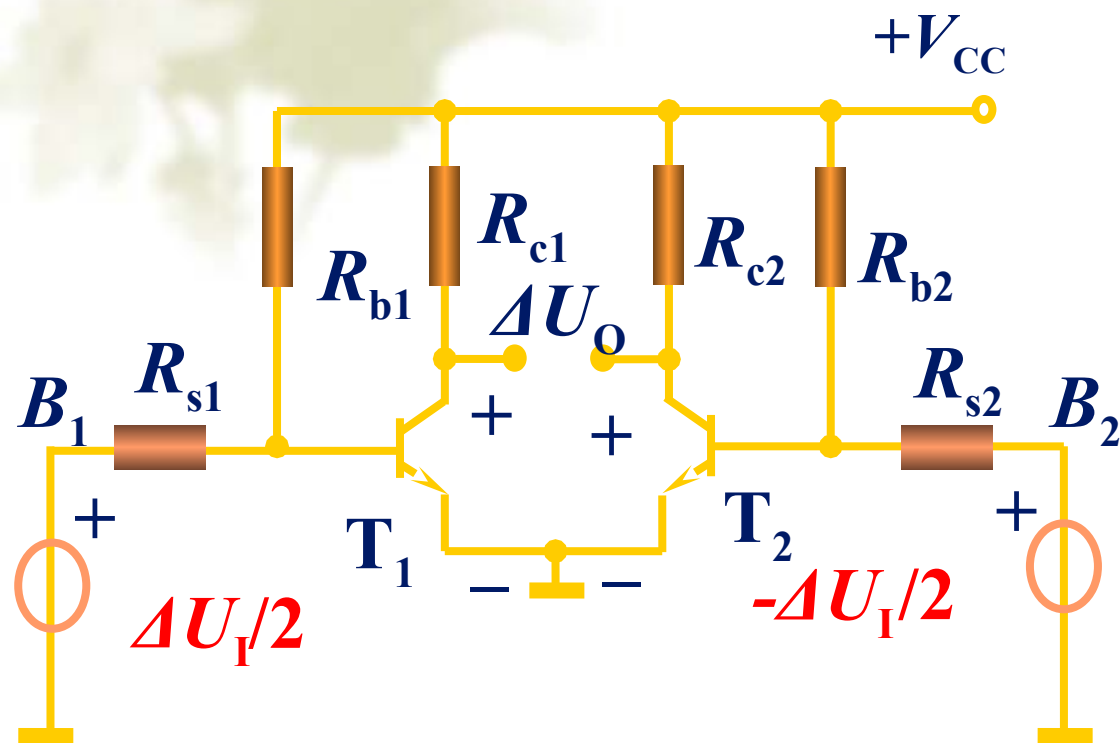
➤ 电路在理想对称情况下，双端输出时， $A_{uc} = 0$ 。可抑制共模信号

➤ 非理想对称情况下，输出不为 0

➤ A_{uc} 越小，抑制温漂作用越好。

疑问：放大能力会不会受影响？

(3) 动态分析 (差模输入)



在两边电路**完全对称**的条件下，输入信号 ΔU_I 相当于在两边电路的**输入端均分**，因此

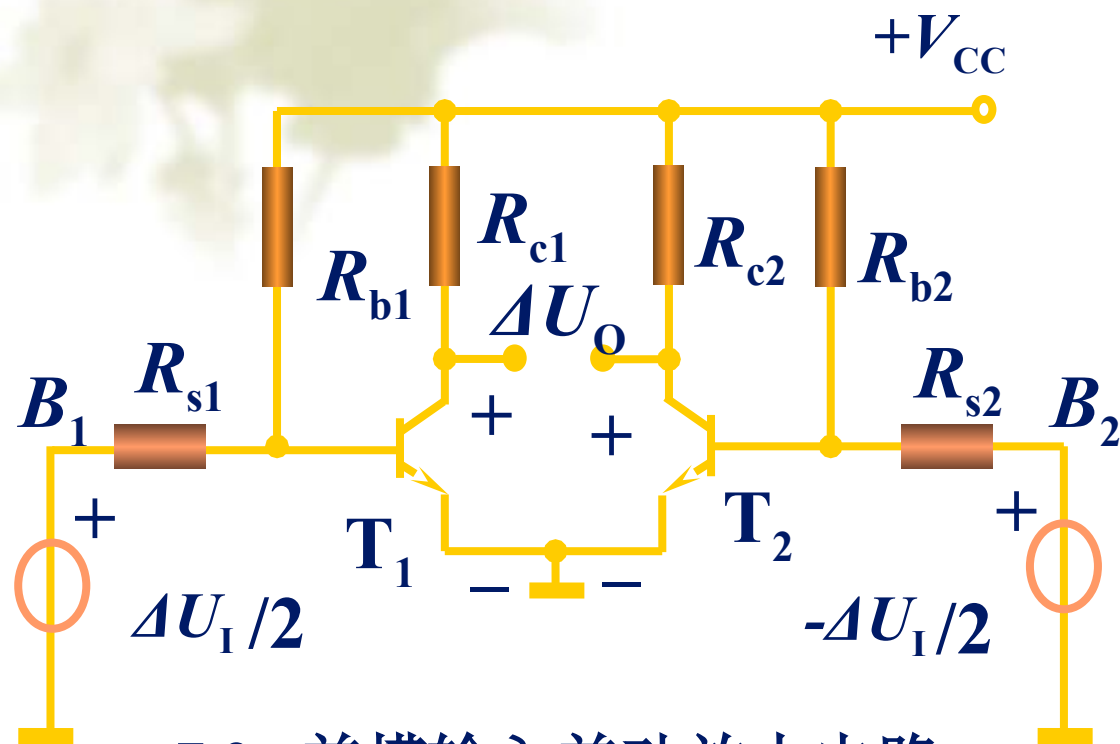
$$\Delta U_{I1} = \Delta U_I / 2,$$

$$\Delta U_{I2} = -\Delta U_I / 2$$

➤ T_1 和 T_2 的输入电压 ΔU_{I1} 和 ΔU_{I2} **大小相等，极性相反**，此时的输入信号 ΔU_I 称为**差模信号** (Difference-mode Signal)，记为 ΔU_{Id} 。 $\Delta U_{Id} = \Delta U_{I1} - \Delta U_{I2}$ 。

7.2 差模输入差动放大电路

(3) 动态分析 (差模输入)



7.2 差模输入差动放大电路

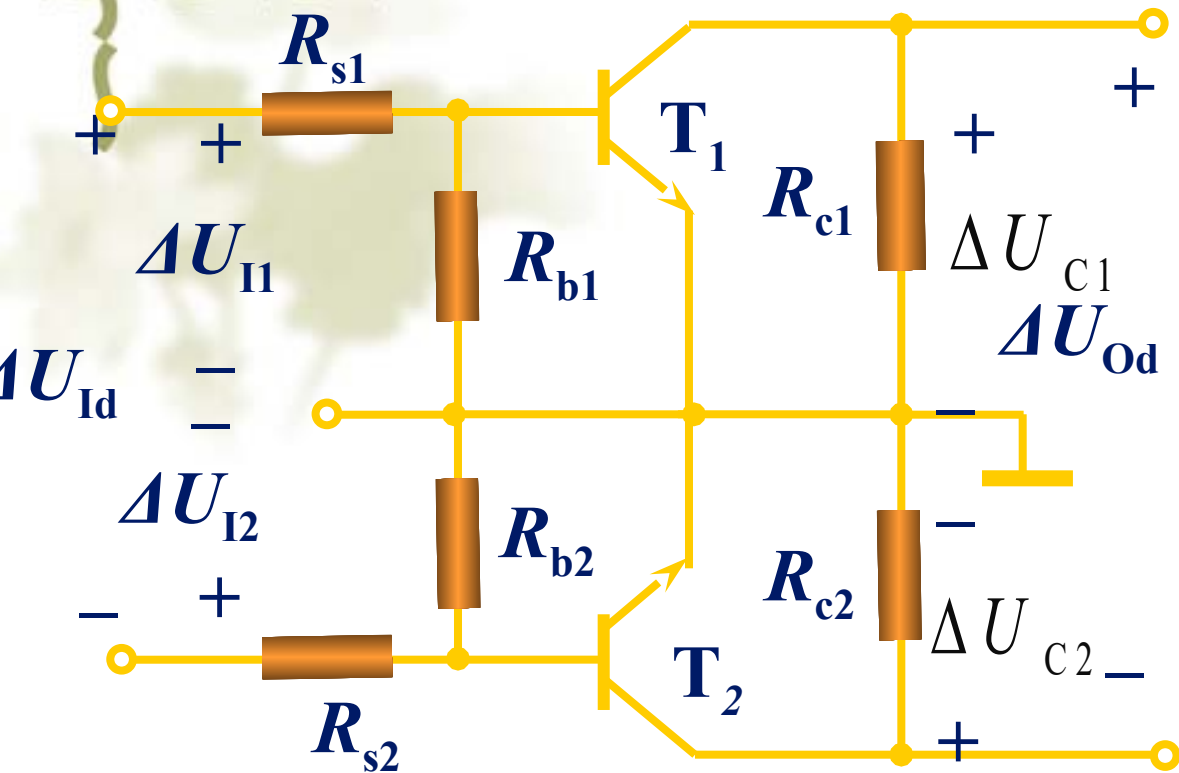
➤ 在差模信号作用下，
两管的 **电流和集电极电位** 变化相反。

➤ 当 ΔU_I 为正时，
 $\Delta U_{I1} > 0$, $\Delta U_{C1} < 0$

➤ $\Delta U_{I2} = -\Delta U_I/2 < 0$,
 $U_{C2} > 0$ 。

➤ 在两边电路完全对称的条件下， $\Delta U_{C1} = -$

$$\begin{aligned} \Delta U_O &= (U_{C1} + \Delta U_{C1}) - (U_{C2} + \Delta U_{C2}) \\ &= 2\Delta U_{C1} = -2\Delta U_{C2} < 0 \end{aligned}$$



根据图 7.3 可得在输入差模电压的作用下，
每边管子的输出电压为：

$$\begin{aligned}\Delta U_{C1} &= \Delta U_{I1} \cdot A_{U1} \\ &= \frac{1}{2} \Delta U_{Id} \cdot A_{U1} \\ \Delta U_{C2} &= \Delta U_{I2} \cdot A_{U2} \\ &= -\frac{1}{2} \Delta U_{Id} \cdot A_{U2}\end{aligned}$$

图 7.3 差模输入差动放大电路交流通路

➤ 因为电路对称

$A_{u1} = A_{u2}$ ，
所以总的
输出电压

$$\Delta U_{Od} = \Delta U_{C1} - \Delta U_{C2}$$

$$= \frac{1}{2} \Delta U_{Id} \cdot A_{U1} + \frac{1}{2} \Delta U_{Id} \cdot A_{U2}$$

$$= \Delta U_{Id} \cdot A_{U1} = \Delta U_{Id} \cdot A_{U2}$$

$$A_{ud} = \frac{\Delta U_{Od}}{\Delta U_{Id}}$$

$$= A_{u1} = A_{u2}$$

➤ 得到差模放大倍数为：

$$A_{ud} = \frac{\Delta U_{Od}}{\Delta U_{Id}} = A_{u1} = A_{u2}$$

➤ 差动放大电路电压放大倍数等于半边电路的放大倍数，
并没有提高放大倍数。

➤ 主要作用：抑制温漂。

放大差模，抑制共模，
能有效抑制零点漂移。

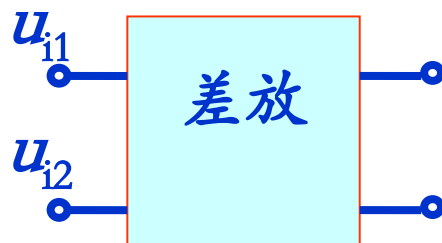
➤ 代价：多用一套电路。

1、差模信号、共模信号和任模信号

共模信号： $u_{i1} = u_{i2} = u_{ic}$ （大小相等极性相同）

差模信号： $u_{i1} = -u_{i2}$ （大小相等而极性相反）

任模信号： u_{i1} 、 u_{i2} 既非共模信号亦非差模信号。



2、任模信号的分解

任意的任模信号都可以分解为共模分量与差模分量的组合。

分解目的：方便应用差放对不同信号的放大公式。

$$\left. \begin{array}{l} \text{差模分量: } u_{id} = u_{i1} - u_{i2}; \\ \text{共模分量: } u_{ic} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2}); \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} u_{i1} = u_{ic} + \frac{1}{2} u_{id}; \\ u_{i2} = u_{ic} - \frac{1}{2} u_{id}; \end{array} \right.$$

思考：差放的一端输入为 1mV，且差模输入分量与共模输入分量相等，则另一端的输入信号为多少？

关于差动放大电路动态分析的小结

不管差放的输入方式和输入信号的类型是什么，差放的输出电压都可以用下式来计算：

$$u_O = A_{ud}u_{id} + A_{uC}u_{ic}$$

如果输入信号仅有差模成分时， $u_O = A_{ud}u_{id}$

如果输入信号仅有共模成分时， $u_O = A_{uC}u_{ic}$

当输入信号为任模信号时，将之分解为共模分量和差模分量的组合，然后利用叠加原理代入 $u_O = A_{ud}u_{id} + A_{uC}u_{ic}$ 中进行计算。

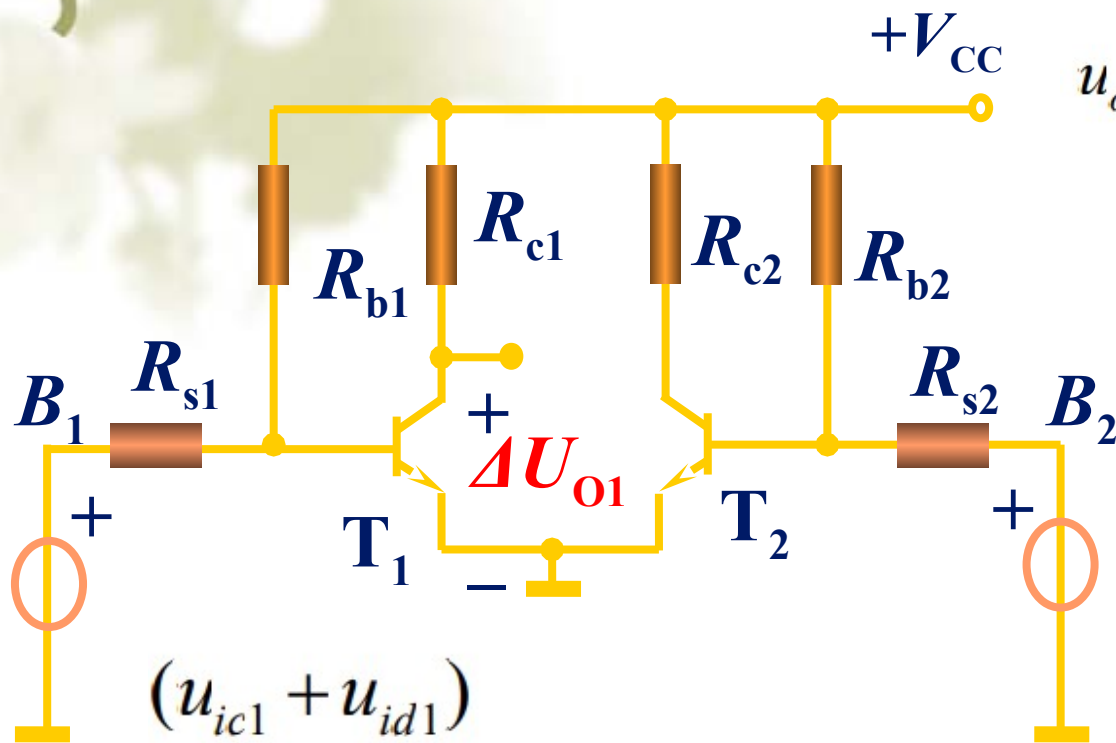
例如：已知某差放的 $A_{ud} = -100, A_{uC} = -0.1,$

$u_{i1} = 5 \sin \omega t (mV), u_{i2} = -3 \sin \omega t (mV),$ 写出输出电压 u_O 的表达式。

$$u_{id} = u_{i1} - u_{i2} = 8 \sin \omega t (mV); \quad u_{ic} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2}) = \sin \omega t (mV)$$

$$\begin{aligned} u_O &= A_{ud}u_{id} + A_{uC}u_{ic} = -100 \times 8 \sin \omega t + (-0.1) \times \sin \omega t \\ &= -(800 + 0.1) \sin \omega t (mV) \end{aligned}$$

思考：单端输出时，输出多少？



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

结论：基本差动电路在单端输出时是无法抑制共模信号。

差模输入差动放大电路

思路：让单侧电路对 u_{ic1} 和 u_{id1} 的放大倍数不同。

7.2.2 具有射极公共电阻的差放电路

1. 射极公共电阻的作用

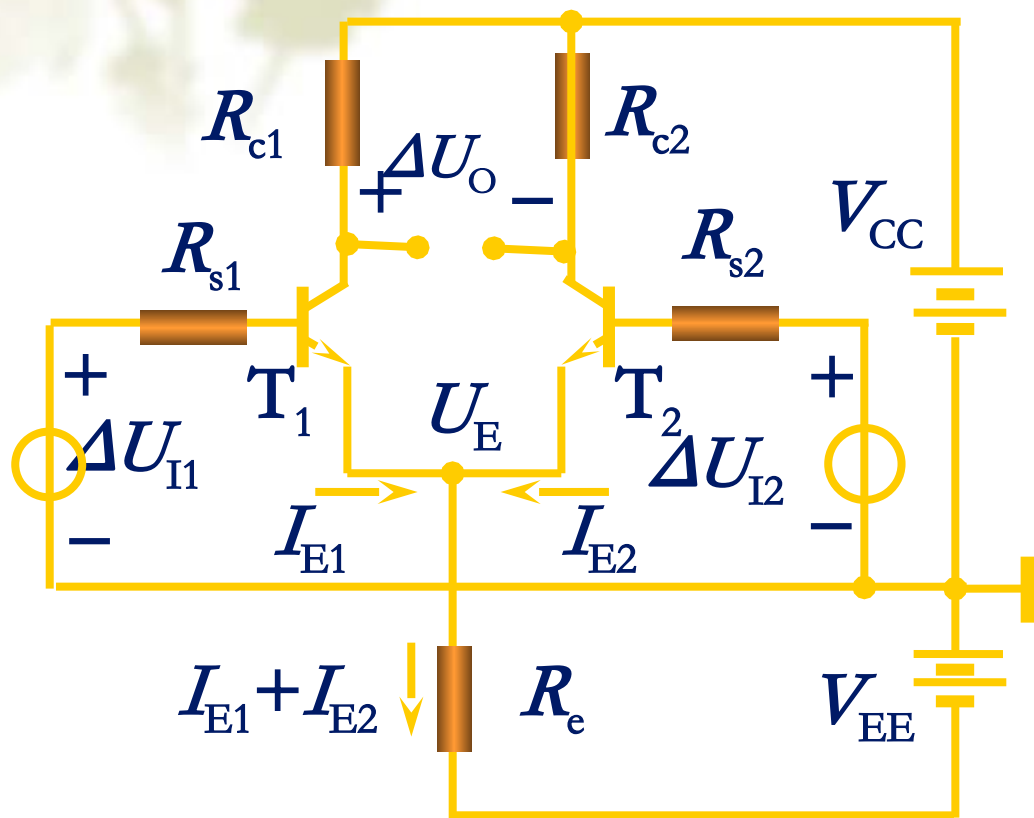


图 7.4 具有射极公共电阻的差放电路

由于温漂可以等效为输入端加共模信号，因此首先分析射极公共电阻 R_e 对共模信号的抑制作用。

也叫“长尾式差动放大电路”

考虑两个问题：

- 1 是否能抑制单边输出时的温漂？
- 2 是否会降低放大倍数？

(1) 电路结构

① T1、T2 差分对管组成对称电路。

$$R_{C1} = R_{C2} = R_C; \quad R_{s1} = R_{s2} = R_s;$$

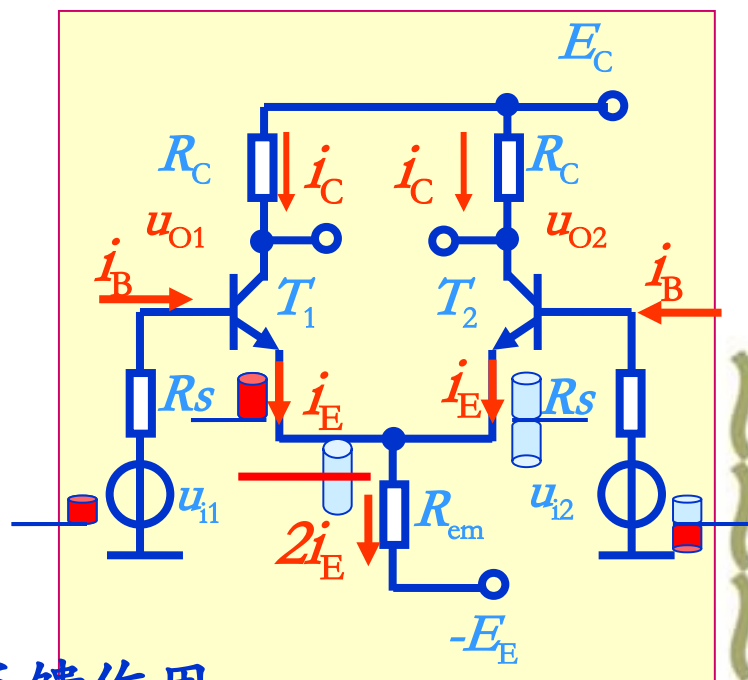
$$\beta_1 = \beta_2 = \beta; \quad r_{be1} = r_{be2} = r_{be}$$

② 采用双电源供电—— $E_C = -E_E$ 。

③ T1、T2 的发射极同时接射极电阻

R_{em} ，其作用是引入共模负反馈，

抑制共模信号，但对差模信号没有负反馈作用。



给电路加上正的
共模信号

$i_{B1}, i_{B2} \uparrow$

$i_{E1}, i_{E2} \uparrow$

$u_E \uparrow$

$u_{BE1}, u_{BE2} \downarrow$

$i_{B1}, i_{B2} \downarrow$

共模负反馈

加上差模
信号

$i_{B1} \uparrow, i_{B2} \downarrow$

$i_{E1} \uparrow, i_{E2} \downarrow$

u_E 不变

无负反馈作用
不会影响
放大倍数

(1) 电路结构

① T1、T2 差分对管组成对称电路。

$$R_{C1} = R_{C2} = R_C; \quad R_{s1} = R_{s2} = R_s;$$

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta; \quad r_{be1} = r_{be2} = r_{be}$$

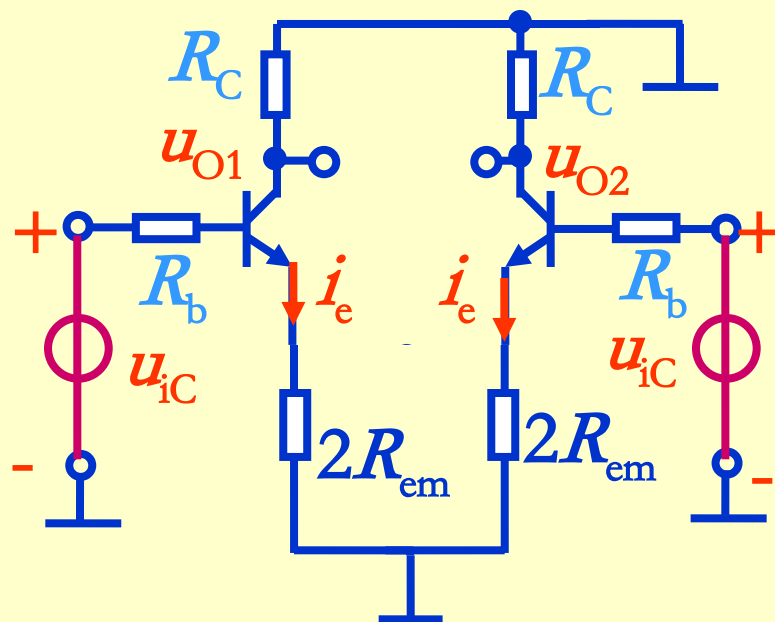
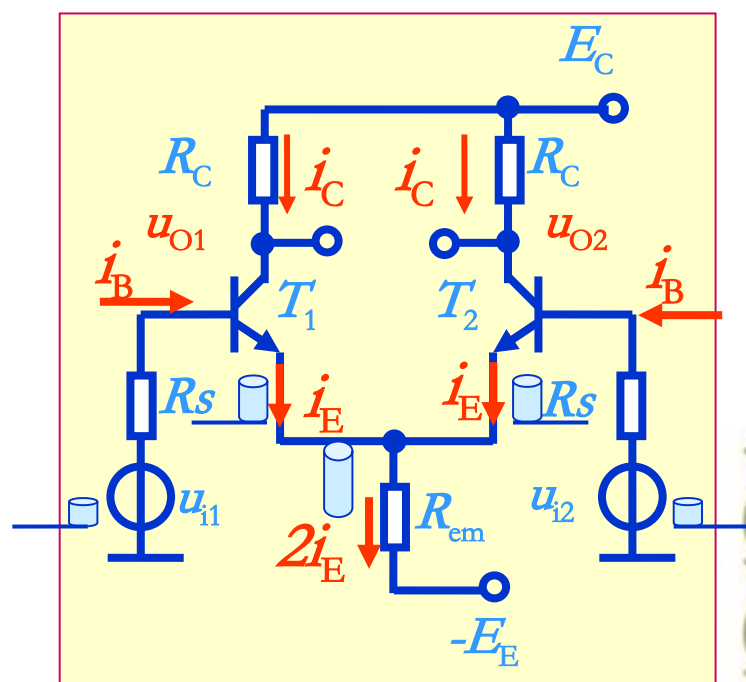
② 采用双电源供电—— $E_C = -E_E$ 。

③ T1、T2 的发射极同时接射极电阻 R_{em} ，其作用是引入共模负反馈，

可将 R_{em} 折合到两个差分对管的发射极。得到共模输入差放的交流等效电路如图所示：

$$A_{uC1} = u_{O1} / u_{iC}$$

$$\approx \frac{-R_C}{2R_{em}} \xrightarrow{R_{em} \gg R_C} |A_{uC1}| \ll 1$$



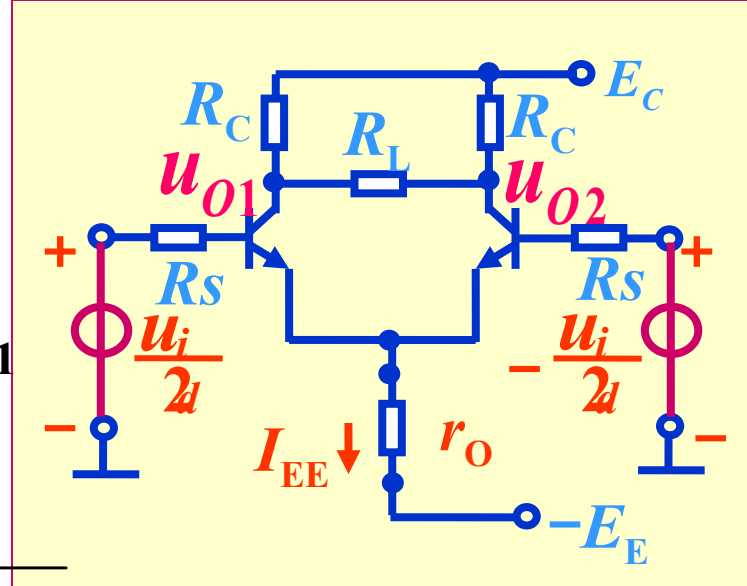
③ 双端输出差模电压增益:

$$A_{ud} = \frac{u_{Od}}{u_{id}} = \frac{u_{O1} - u_{O2}}{u_{i1} - u_{i2}} = \frac{2u_{O1}}{2u_{i1}} = A_{u1}$$

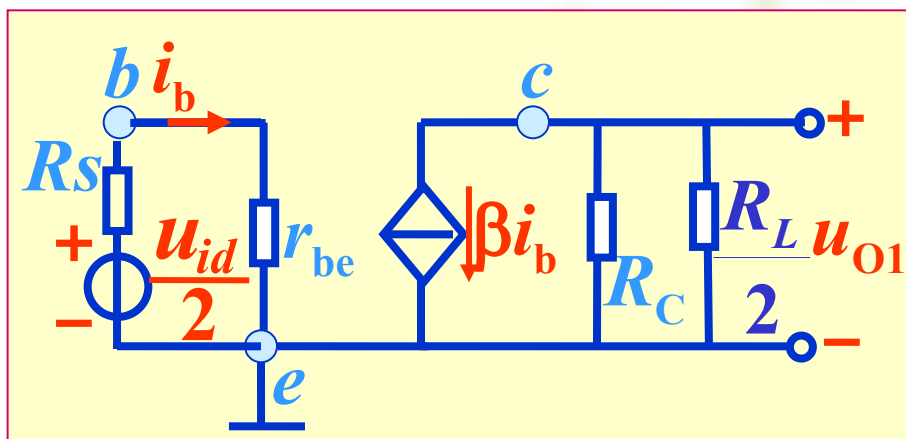
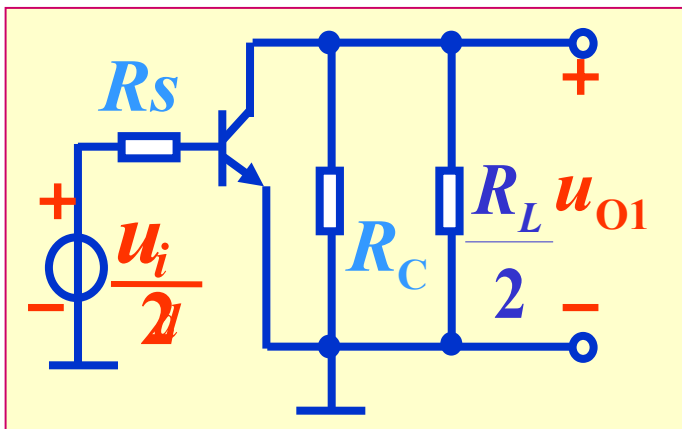
$$A_{ud} = \frac{u_{O1}}{u_{i1}} = \frac{-\beta i_b R'_L}{i_b (R_b + r_{be})} = -\beta \frac{R'_L}{R_b + r_{be}}$$

$$R'_L = R_C // (R_L / 2)$$

微变等效电路:



差放双端输出时的差模电压增益与单管电路的电压增益相等。

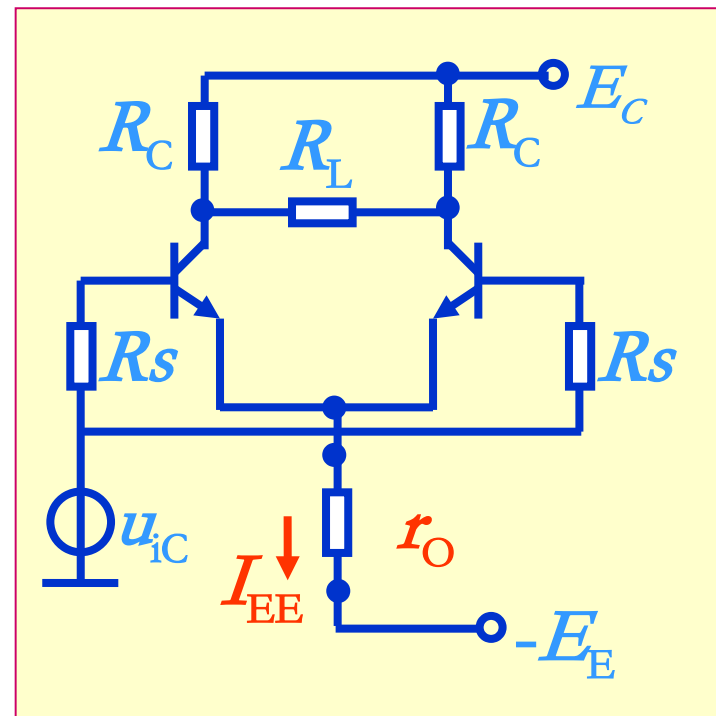


共模抑制比 K_{CMR}

---- 综合考察差放放大差模、
抑制共模的能力。

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right|$$

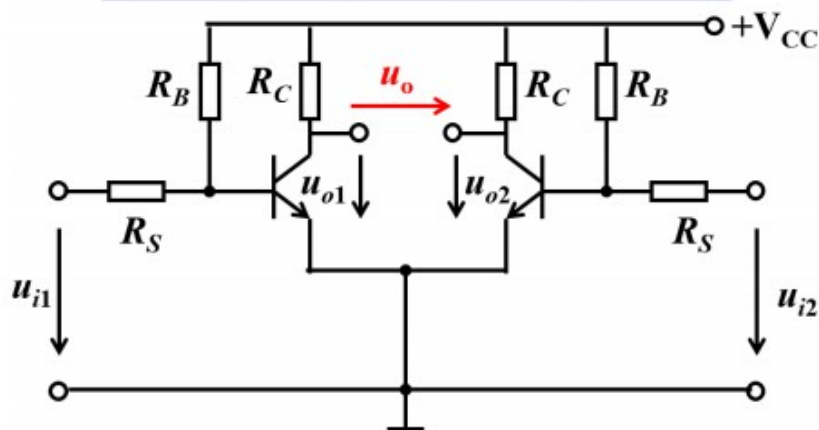
理想情况下, $K_{CMR} = \infty$



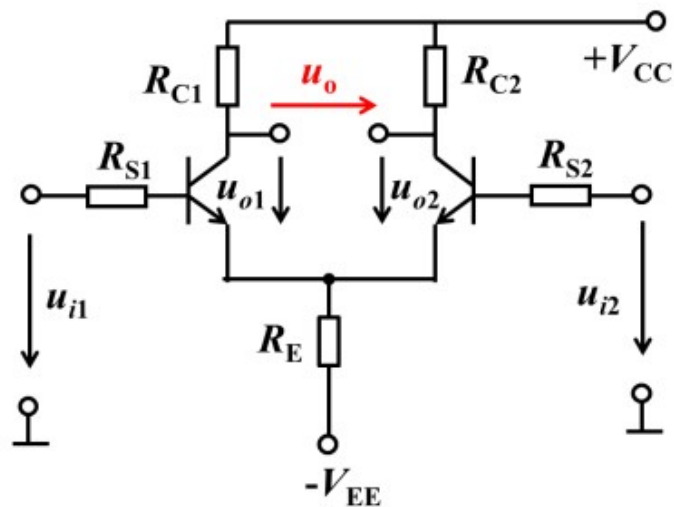
总 结

- 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、差动放大电路的特点：**有效地抑制共模信号，放大差模信号**
- 3、**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
- 4、**长尾差动电路的原理**：在**左右对称**的基础上，利用 R_E 对共模信号**引入负反馈**，在**单端输出**时也能有效抑制共模信号。

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



基本差动放大电路



长尾差动放大电路

如何衡量差动电路对共模信号抑制的能力？

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

调零装置 P203

左右完全对称

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

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

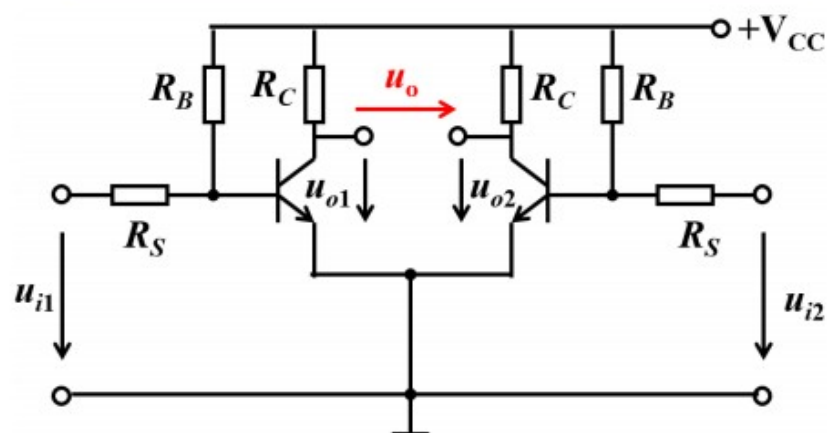
长尾差动 → K_{CMR} 很大

$$u_{i1} = u_{ic1} + u_{id1}$$

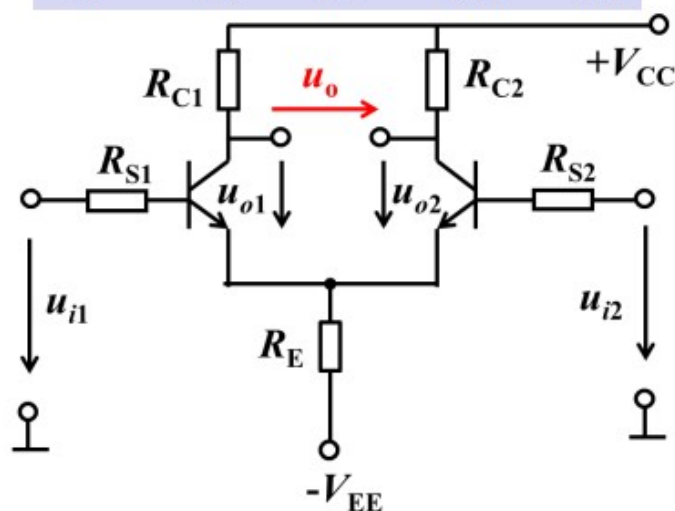
$$u_{i2} = u_{ic1} - u_{id1}$$

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

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



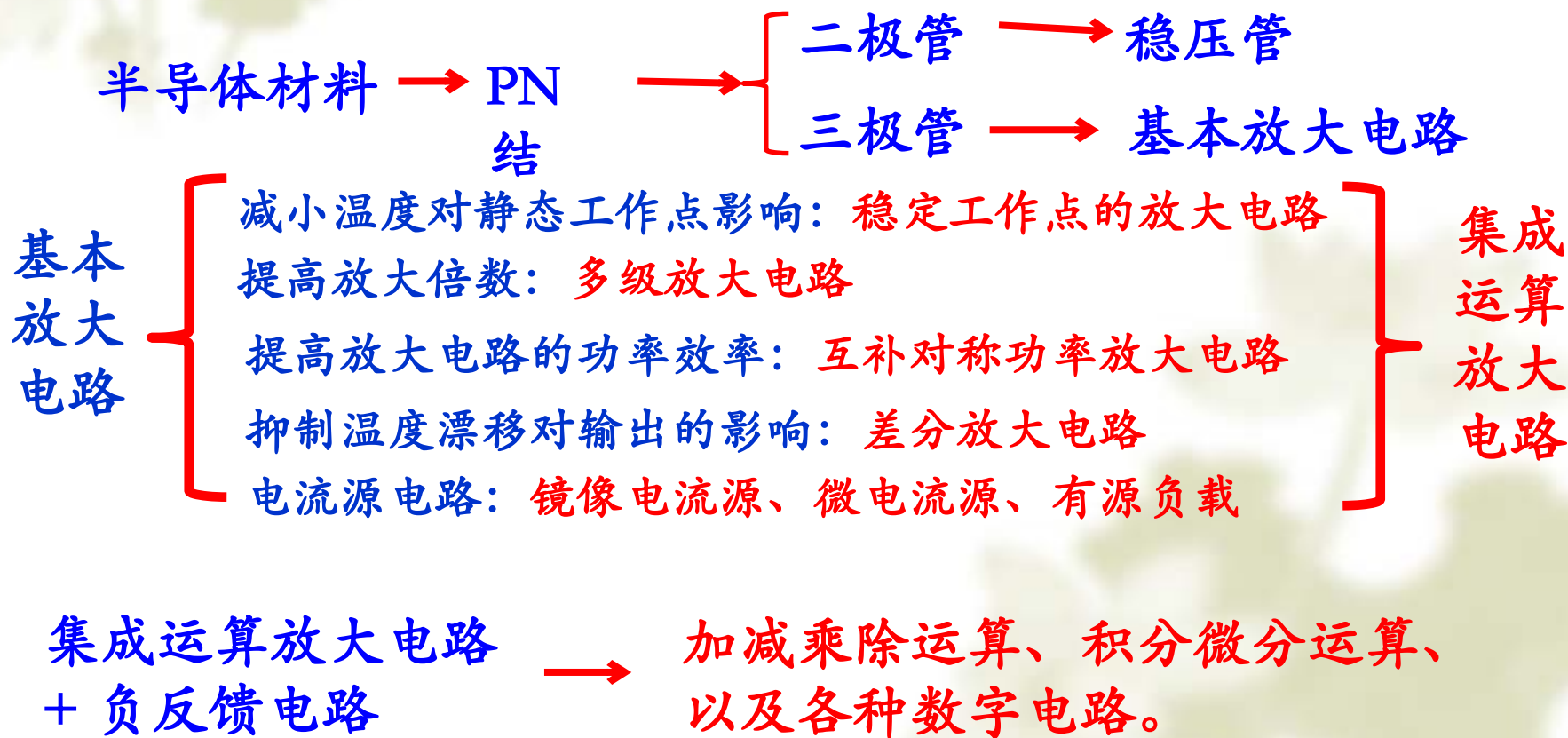
基本差动放大电路



长尾差动放大电路

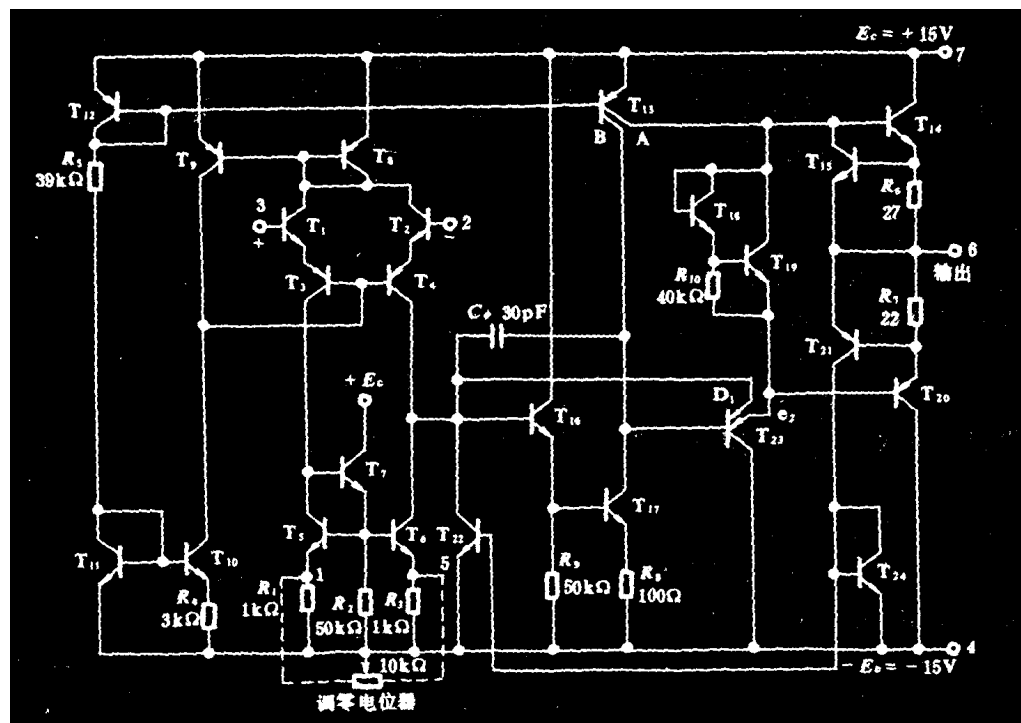
模电知识体系及学习特点

知识体系：



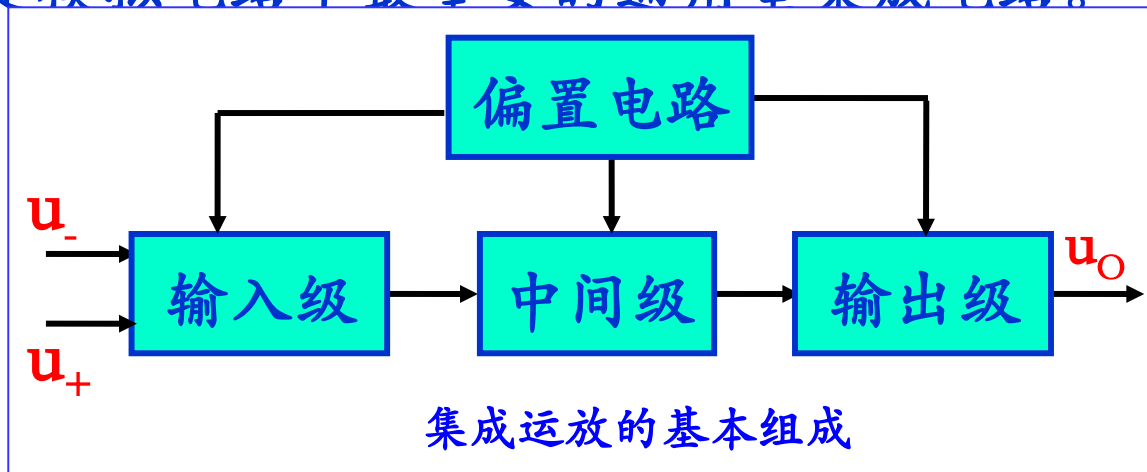
一，集成运算放大器结构特点

将有源器件、无源器件电阻电容及电路连线等都集中在一块半导体基片上，并封装在一个外壳内便形成一个完整的电路和系统。具有**很高电压放大倍数**的多级直接耦合放大电路。



二、集成运放及其基本构成

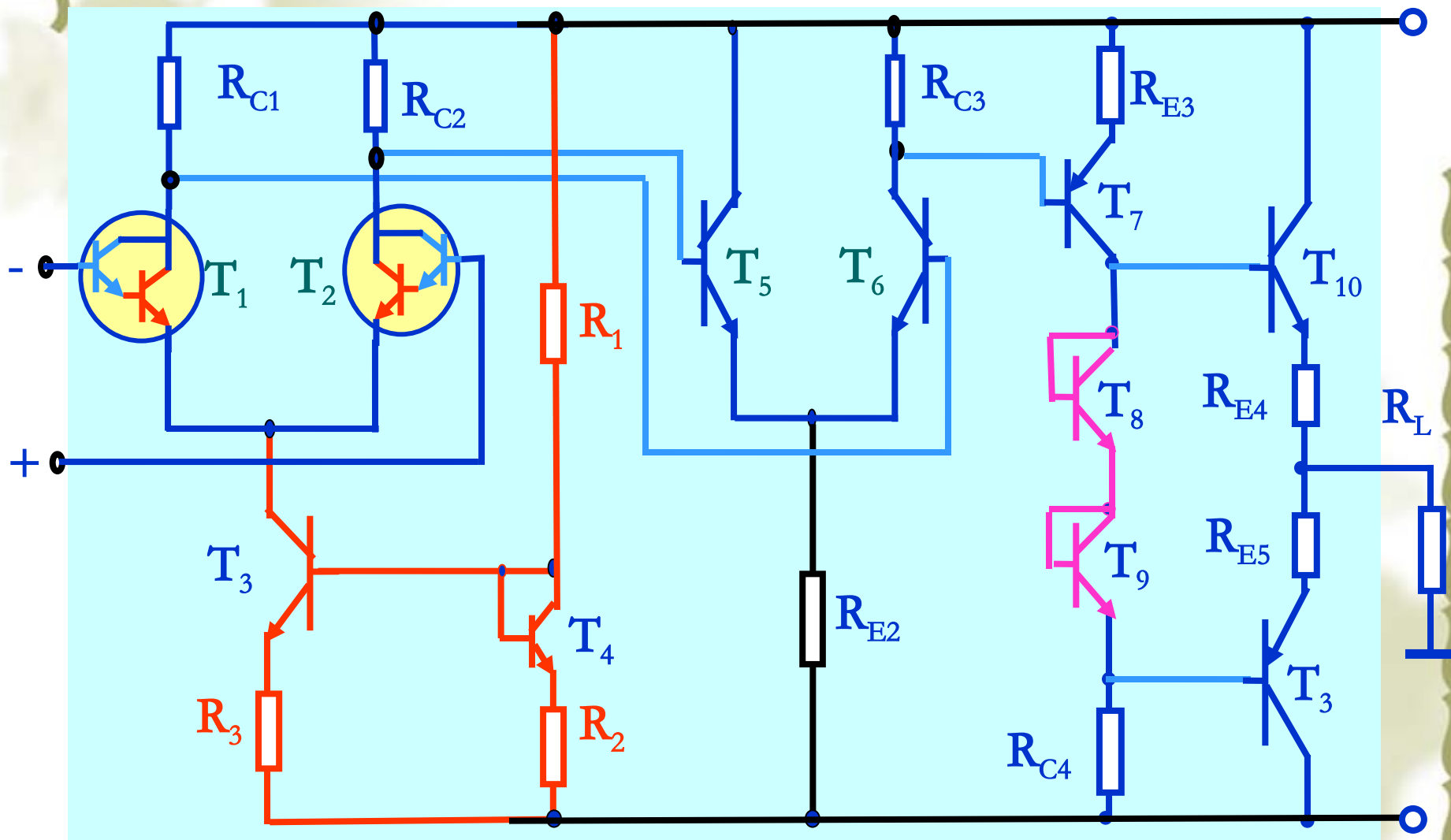
——集成运放即集成运算放大器，是一个高性能的直接耦合多级放大器，是模拟电路中最重要通用型集成电路。



- 一、输入级：输入电阻比较高，差模放大倍数大，抑制共模信号能力强。
- 二、中间级：采用共射（共源）放大电路，采用复合管做放大管，以恒流源做集电极负载。
- 三、输出级：输出电压线性范围广、输出电阻小、非线性失真小，多采用功率放大电路，互补对称输出电路。
- 四、偏置电路：用于设置集成运放各级放大电路的静态工作点，采用电流源电路设置静态工作电流。

集成运放内部结构 (举例)

第4级：功率放大电路



第1级：差动放大器

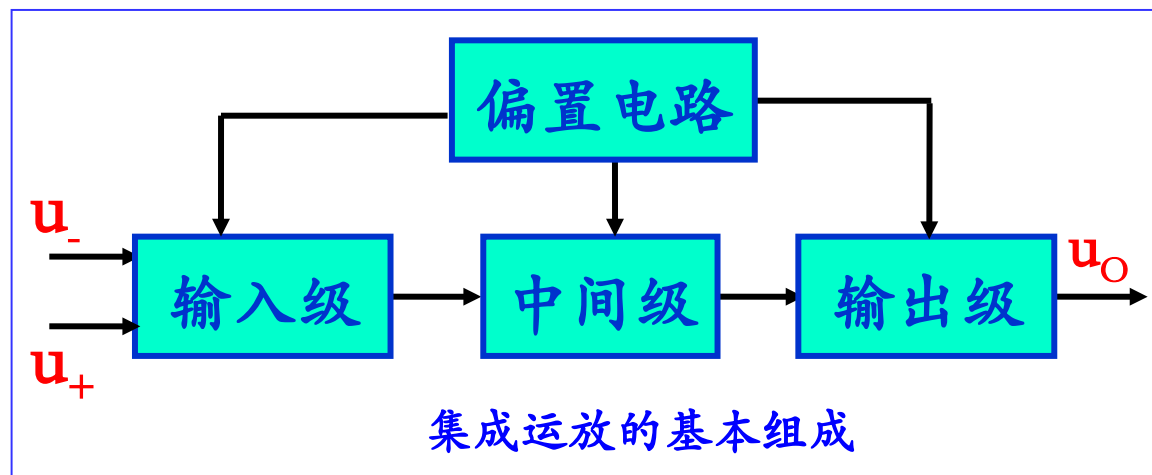
第2级：差动放大器

第3级：单管放大器

$-U_{EE}$

二、集成运放及其基本构成

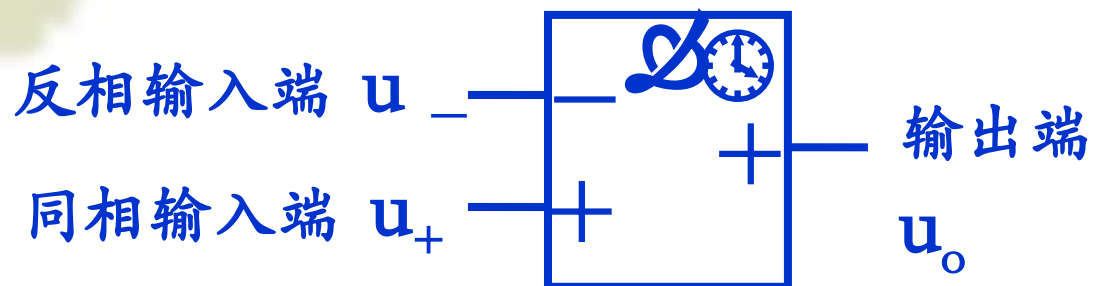
——集成运放即集成运算放大器，是一个高性能的直接耦合多级放大器，是模拟电路中最重要通用型集成电路。



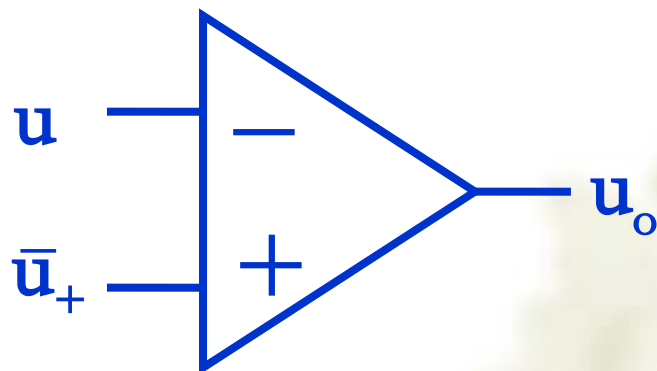
差动输入级有两个输入 U_+ 、 U_- ，当信号从 U_+ 输入，输出 U_o 与 U_+ 极性相同，称 U_+ 为同相输入端；当信号从 U_- 输入，输出 U_o 与 U_- 极性相反，称 U_- 为反相输入端。减小漂移

集成运算放大器符号

国内符号:



国际符号:



理想集成运算放大器及两个工作区域

一、理想运放的条件

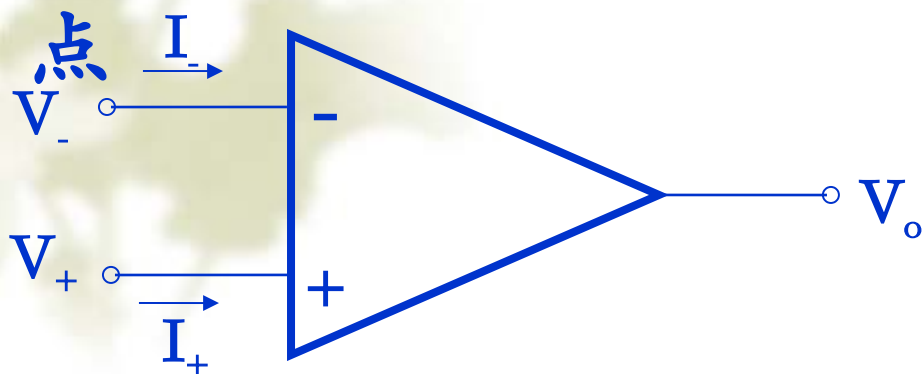
为简化对集成运放应用电路的分析，常把集成运放视为理想器件。其主要满足以下一些条件：

1. 差模电压增益 $A_{od}=\infty$;
2. 差模输入电阻 $R_{id}=\infty$;
3. 输出电阻 $R_o=0$;
4. 共模抑制比 $CMRR=\infty$;
5. 开环带宽 $BW=\infty$;
6. 失调、漂移和内部噪声为零。

主要条件

条件较难满足，
可采用专用运放
来近似满足。

二、理想运放的工作状态及其特点



V_{OH} 为正向输出饱和电压

V_{OL} 为负向输出饱和电压

其数值接近运放的正负电源电压

开环或引入正反馈

理想

实际

非线性区

非线性区

线性区很小

引入深度负反馈

分析应用电路的工作原理时，首先要分清运放工作在线性区还是非线性区。

运放的传输特性

由理想化运放

虚短路

$$A = \infty \quad u_o = A_0(u_+ - u_-) \quad \underline{u_+ = u_-}$$

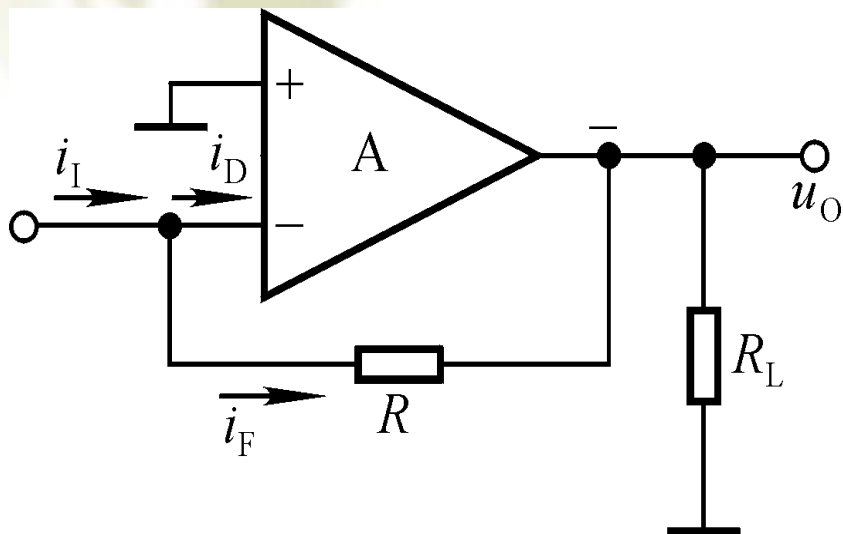
$$r_i = \infty \quad \underline{i_+ = i_- = (u_+ - u_-) / R_i = 0}$$

虚开路

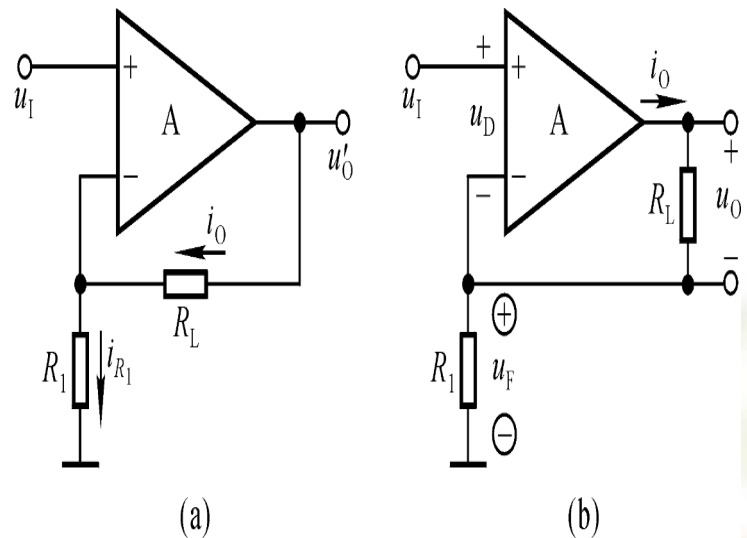
$$r_o = 0 \quad \underline{u_{oL} = u_o} \text{ 输出电压不受负载的影响。}$$

虚短路与虚开路是分析线性运算放大电路输出与输入关系的依据。

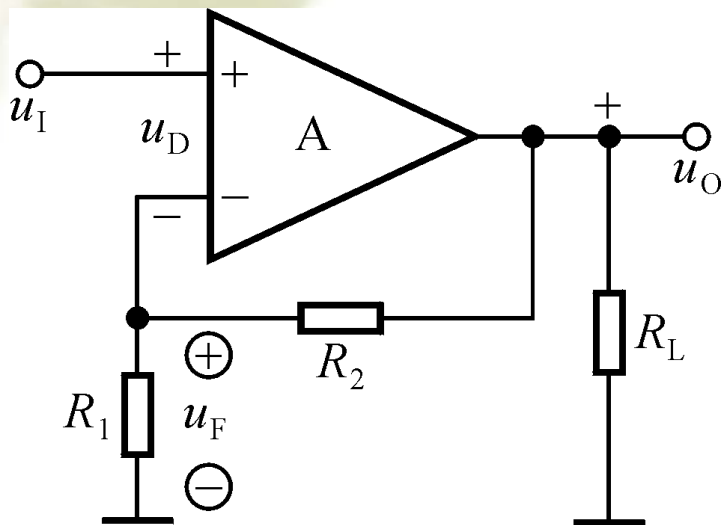
例：运放电路反馈的判断



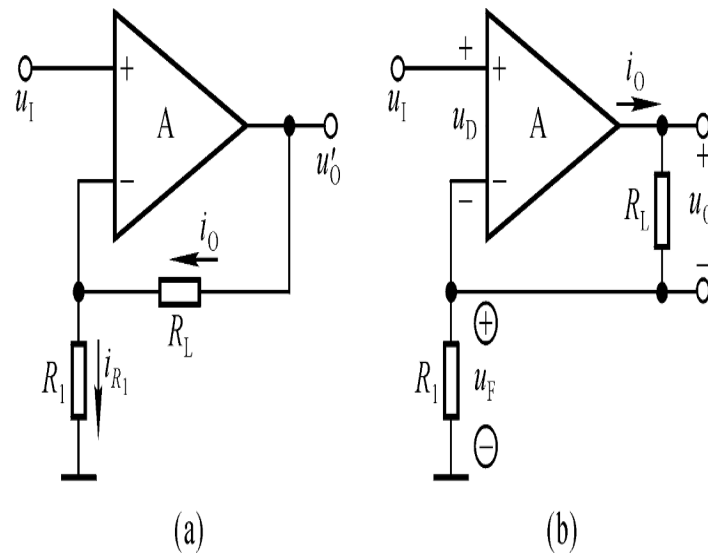
电压并联负反馈



电压串联负反馈电路



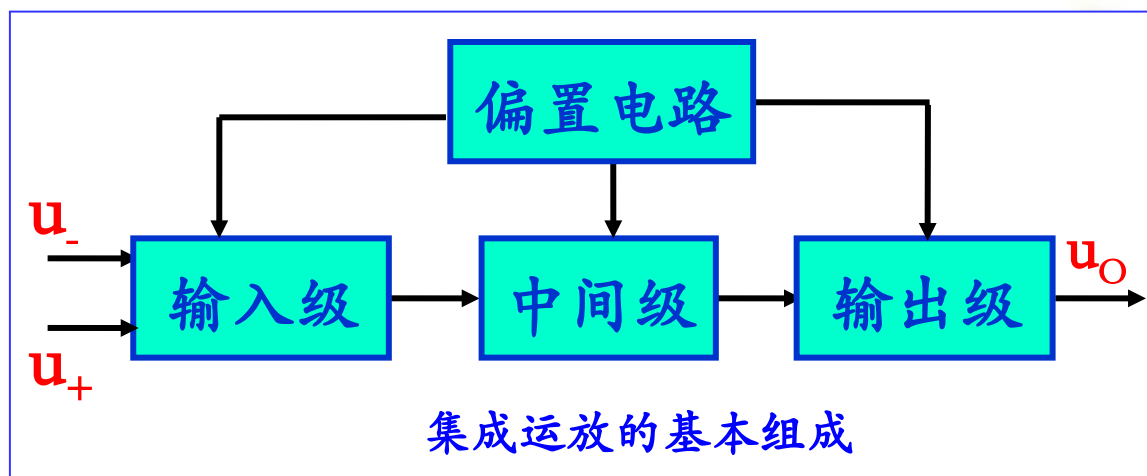
电压串联负反馈电路



电流串联负反馈电路

集成运算放大器结构特点

将有源器件、无源器件电阻电容及电路连线等都集中在一块半导体基片上，并封装在一个外壳内便形成一个完整的电路和系统。具有**很高电压放大倍数的直接耦合多级放大电路**。



集成运算放大电路
+ 负反馈电路



加减乘除运算、积分微分运算、
以及各种数字电路。

(1) 工作在线性区的特点：存在负反馈通路

由于 u_O 为有限值， $A_{od} = \infty$ ，因而净输入电压 $u_P - u_N = 0$ ，即

$$u_P = u_N \quad \text{——虚短路}$$

因为净输入电压为零，又因为输入电阻为无穷大，所以两个输入端的输入电流也均为零，即

$$i_P = i_N = 0 \quad \text{——虚断路}$$

“虚短”和“虚断”是分析工作在线性区的集成运放的应用电路的两个基本出发点。

(2) 工作在非线性区的特点

输出不是高电平 $+U_{OM}$ 就是低电平 $-U_{OM}$

“虚断”是分析工作在非线性区的集成运放的应用电路的基本出发点。但“虚短”不再适用。

1. 研究的问题

(1) 运算关系：运算电路的输出电压是输入电压某种运算的结果，如加、减、乘、除、乘方、开方、积分、微分、对数、指数等。

(运算电路必须工作在线性区)

(2) 描述方法：运算关系式 $u_O = f(u_I)$

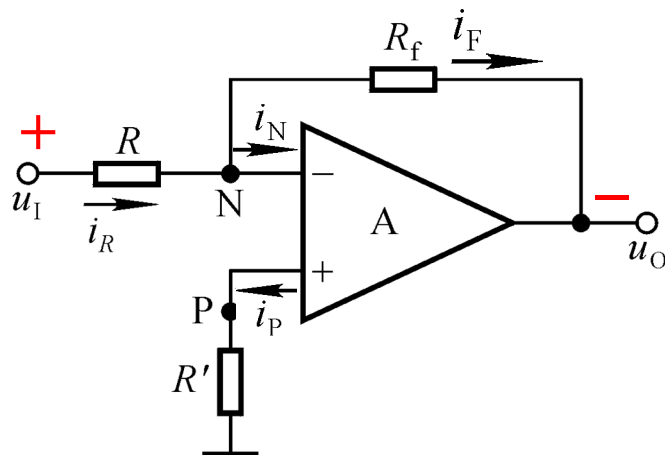
(3) 分析方法：“虚短”和“虚断”是基本出发点。

2、学习运算电路的基本要求

(1) 识别电路反馈类型；(工作在线性区还是非线性区)

(2) 掌握输出电压和输入电压运算关系式的求解方法。

1. 比例运算电路



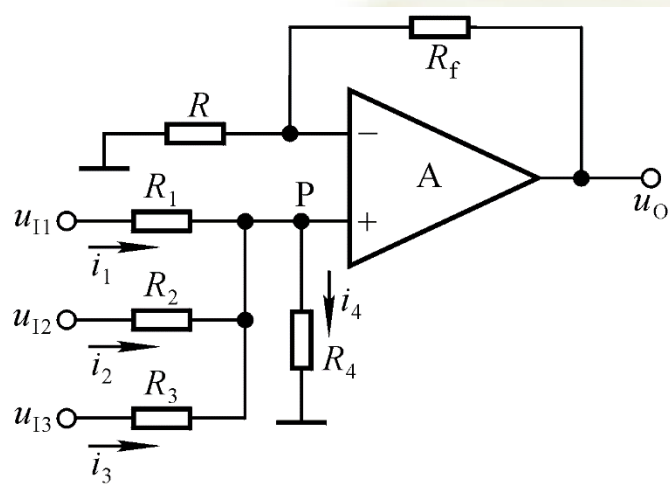
A_u

$$u_O = -i_F R_f = -\frac{R_f}{R} \cdot u_I$$

2. 同相求和

设 $R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel R_4 = R \parallel R_f$

$$u_O = R_f \cdot \left(\frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} + \frac{u_{I3}}{R_3} \right)$$



怎么分析这种电路?

第9章 信号的运算、处理及波形发生电路

一、概述

二、比例运算电路 (9.1.1)

三、加减运算电路 (9.1.2)

: 线性

四、电压比较器 (9.5)

: 非线性的

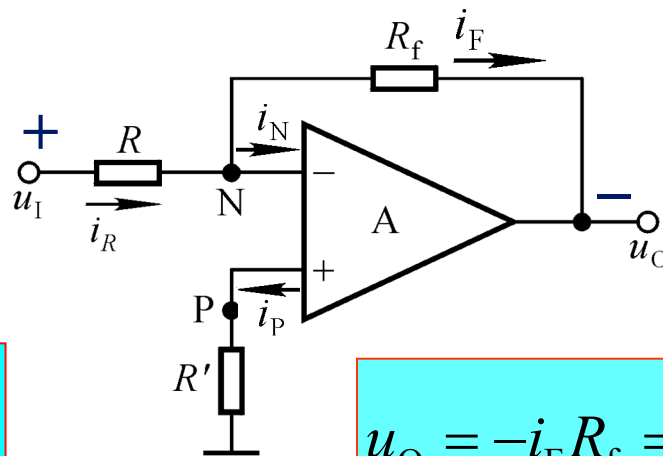
二、比例运算电路

1. 反相输入

$i_N = i_P = 0$, —— 虚断路

$u_N = u_P = 0$ —— 虚地

在节点 N : $i_F = i_R = \frac{u_I}{R}$



$$u_O = -i_F R_f = -\frac{R_f}{R} \cdot u_I$$

A_u

1) 电路的输入电阻为多少? $R_{if} = \frac{U_I}{I_1} = R$

2) 运放的共模输入电压为多少?

3) $R' = ?$ 为什么?

$$R' = R \parallel R_f$$

保证输入级的对称性

4) 若要 $R_i = 100\text{k}\Omega$, 比例系数为 -10 , $R' = ?$ $R_f = ?$

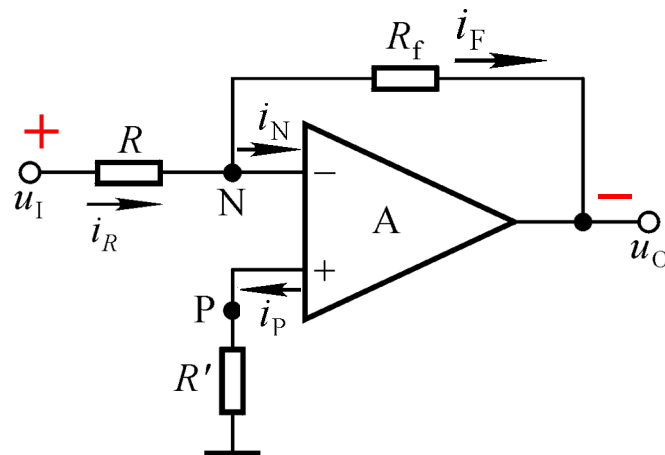
5) 若要用反相输入比例运算电路做放大电路, 则 $A_u = ?$

二、比例运算电路

3) $R' = ?$ 为什么?

$$R' = R \parallel R_f$$

保证输入级的对称性



R' 称为输入平衡电阻，选择参数时，应使 $R' = R \parallel R_f$ ，使集成运放两个输入端的外接等效电阻相等，确保其处于平衡对称的工作状态。这样同相端和反相端的静态工作电流才能相等。

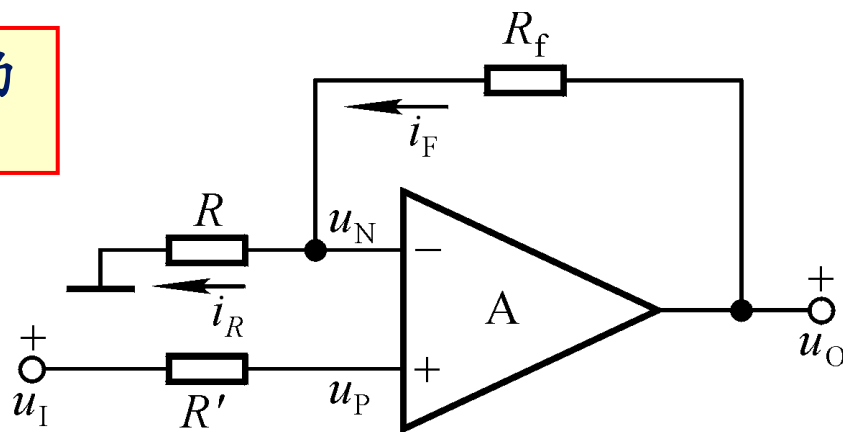
求法：所有电源都置 0 时，同相端和反相端像外看的等效内阻相等。

2. 同相输入

集成运放的
共模输入

$$u_N = u_P = u_I$$

$$i_N = i_P = 0, i_{R_f} = i_R = \frac{u_I}{R}$$



$$u_O = i_R (R + R_f)$$

$$u_O = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \cdot u_N = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \cdot u_I$$

$$A_u$$

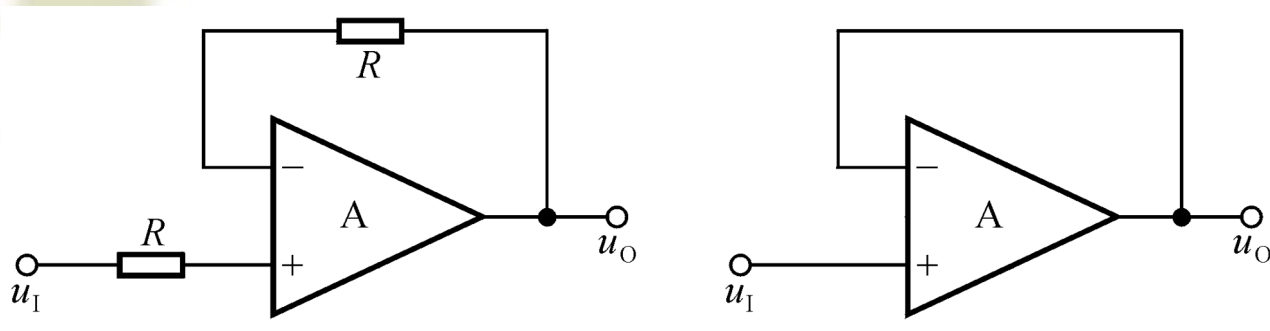
1) 输入电阻为多少? $R_{if} = \frac{U_I}{I_1} = \infty$

2) 电阻 R' = ? 为什么?

$$R' = R \parallel R_f$$

3) 若要用同相输入比例运算电路做放大电路, 则 $A_u = ?$

同相输入比例运算电路的特例：电压跟随器



$$u_O = u_N = u_P = u_I$$

1) $R_i = ?$

2) $u_{Ic} = ?$

习题 9-2