



模拟电子技术基础

# 集成运算放大电路

雷 飞

010-67392914      leifei@bjut.edu.cn

### 5.1 集成运算放大电路概述

集成电路简称 IC (Integrated Circuit)

功 能

数字集成电路

模拟集成电路

类 型

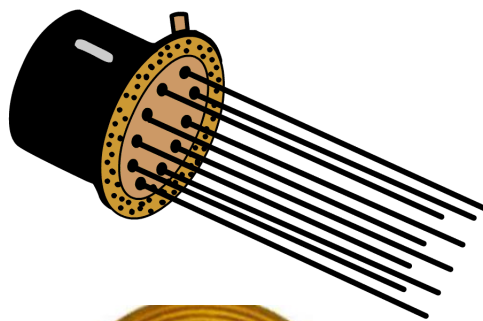
集成运算放大器；集成功率放大器；  
集成高频放大器；集成中频放大器；  
集成比较器；集成乘法器；集成稳压器；  
集成数/模或模/数转换器等。

## 05 集成运算放大电路

### 集成电路的外形



(a) 双列直插式



(b) 圆壳式



(c) 扁平式

集成电路的外形

### 1 集成运放的电路结构特点

一. 对称性好，适用于构成差分放大电路。

二. 集成电路中电阻，其阻值范围一般在几十欧到几十千欧之间，如需高阻值电阻时，要在电路上另想办法。

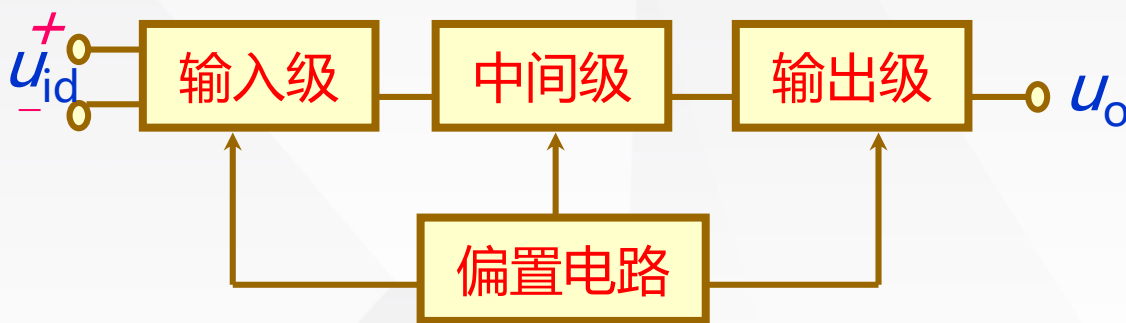
三. 在芯片上制作三极管比较方便，常常用三极管代替电阻(特别是大电阻)。

四. 在芯片上制作比较大的电容和电感非常困难，电路通常采用直接耦合电路方式。

五. 集成电路中的 NPN 、 PNP管的  $\beta$  值差别较大，通常 PNP 的  $\beta \leq 10$  。常采用复合管的形式。

### 2 集成运放电路的组成及其各部分的作用

实质上是一个具有高放大倍数的多级直接耦合放大电路。



#### 集成运算的基本组成

- 一、输入级 差分电路，大大减少温漂。
- 二、中间级 采用有源负载的共发射极电路，增益大。
- 三、输出级 互补对称 电路，带负载能力强
- 四、偏置电路 电流源电路，为各级提供合适的静态工作点。

### 5.2 集成运放中的电流源电路

集成运放电路中的晶体管和场效应管除了作为放大管外，还构成**电流源电路**，**为各级提供合适的静态电流**；

作为**有源负载****取代高阻值电阻**，从而增大放大电路的电压放大倍数。

## 05 集成运算放大电路

### 1 基本电流源电路

#### 一、镜像电流源 (电流镜 Current Mirror)

基准电流 
$$I_{\text{REF}} = \frac{V_{\text{CC}} - U_{\text{BE1}}}{R}$$

由于  $U_{\text{BE1}} = U_{\text{BE2}}$ ,  $T_1$  与  $T_2$  参数基本相同, 则

$$I_{\text{B1}} = I_{\text{B2}} = I_{\text{B}}; \quad I_{\text{C1}} = I_{\text{C2}} = I_{\text{C}}$$

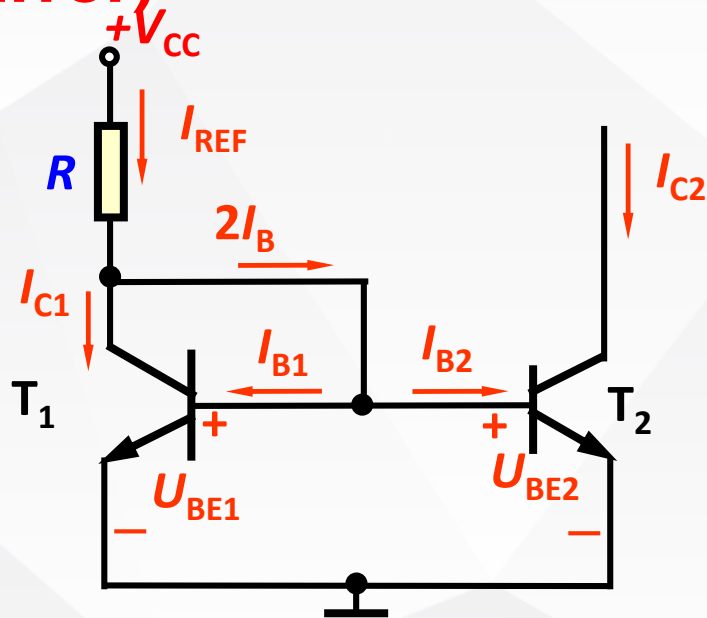
$$I_{\text{C2}} = I_{\text{C1}} = I_{\text{REF}} - 2I_{\text{B}} = I_{\text{REF}} - 2 \frac{I_{\text{C2}}}{\beta}$$

所以 
$$I_{\text{C2}} = I_{\text{REF}} \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}}$$

具有温度补偿作用。

当满足  $\beta \gg 2$  时, 则

$$I_{\text{C2}} = I_{\text{REF}} = \frac{V_{\text{CC}} - U_{\text{BE1}}}{R}$$



## 05 集成运算放大电路

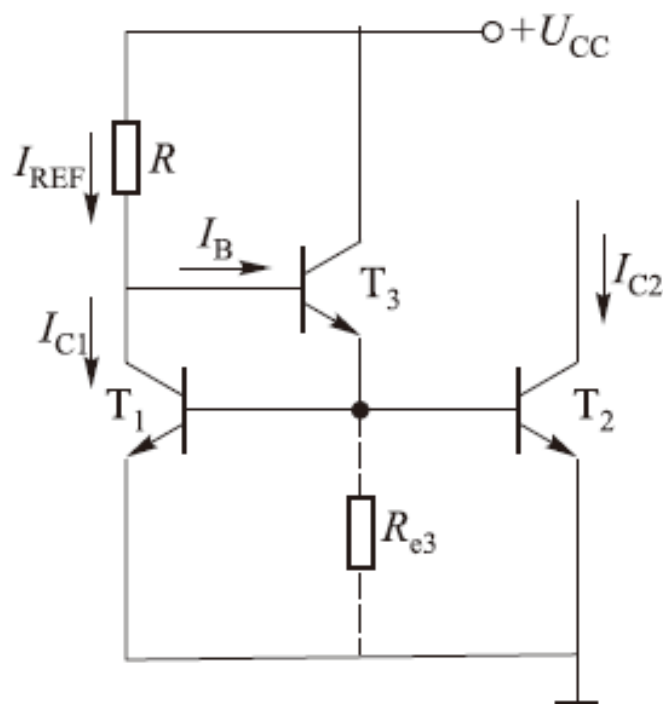
### 改进型镜像电流源电路

问题：镜像电流源电路在 $\beta$ 很小时， $I_R$ 和 $I_{C2}$ 相差很大

$$\begin{aligned} I_{C2} &= I_{C1} = I_{REF} - I_{B3} \\ &= I_{REF} - I_{E3} / (\beta + 1) \\ &= I_{REF} - \frac{2I_{B2}}{\beta + 1} = I_{REF} - \frac{2I_{C2}}{\beta(\beta + 1)} \\ \therefore I_{C2} &= \frac{I_{REF}}{1 + \frac{1}{\beta(\beta + 1)}} \approx I_{REF} \end{aligned}$$

如 $\beta = 10$   $I_{C2} = 0.982 I_{REF}$

增加电阻 $R_{e3}$  目的是使 $I_{E3}$ 增大。





### 二、比例电流源

由图可得

$$U_{BE1} + I_{E1}R_1 = U_{BE2} + I_{E2}R_2$$

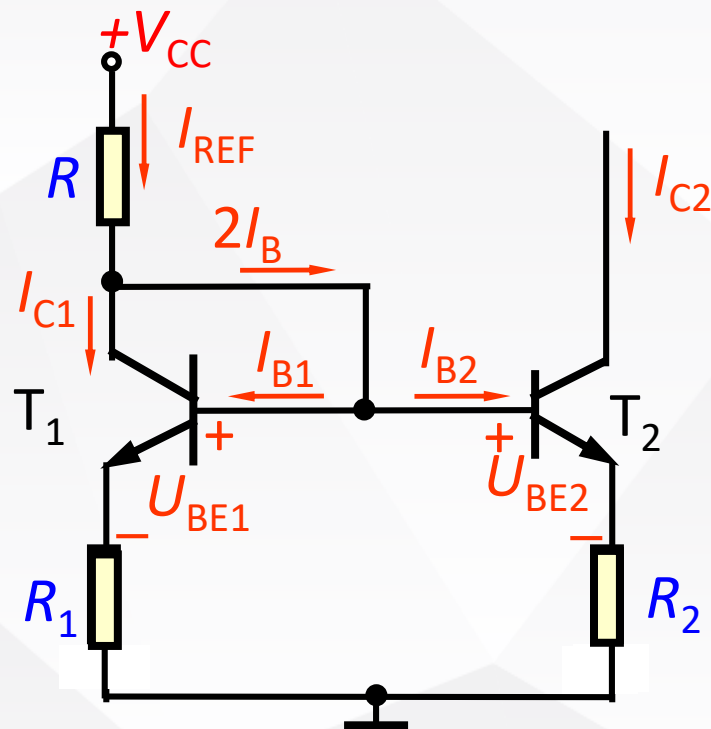
由于  $U_{BE1} \approx U_{BE2}$ ，则

$$I_{E1}R_1 \approx I_{E2}R_2$$

忽略基极电流，可得

$$I_{C2} \approx \frac{R_1}{R_2} I_{C1} \approx \frac{R_1}{R_2} I_{REF}$$

两个三极管的集电极电流之比近似与发射极电阻的阻值成反比，故称为比例电流源。



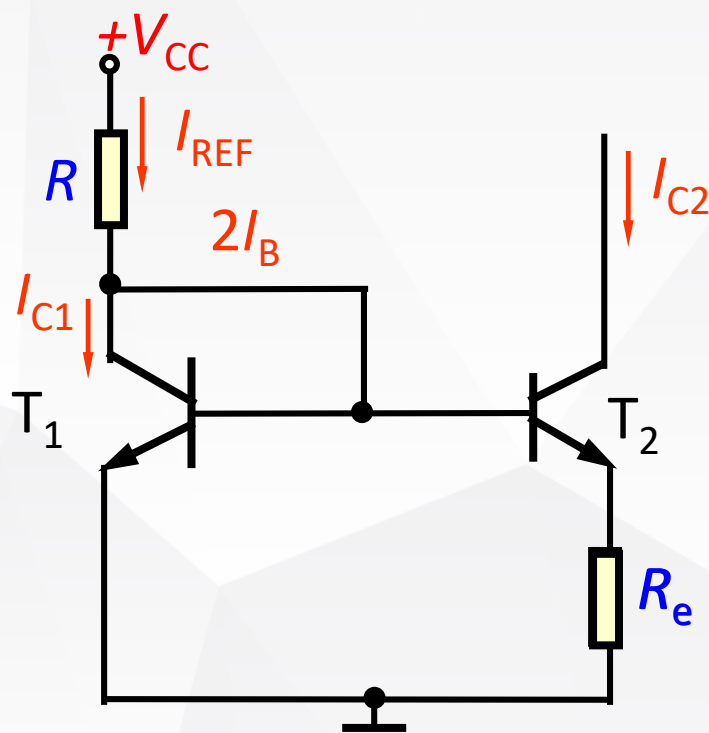
比例电流源

### 三、微电流源

引入 $R_e$ 使 $U_{BE2} < U_{BE1}$ ，且 $I_{C2} \ll I_{C1}$ ，即在 $R_e$ 值不大的情况下，得到一个比较小的输出电流 $I_{C2}$ 。

$$U_{BE1} - U_{BE2} = I_{E2}R_e \approx I_{C2}R_e$$

$$I_{C2} \approx \frac{U_{BE1} - U_{BE2}}{R_e}$$



微电流源

### 四、多路电流源

$$I_{C0} = I_{E0} = I_{REF} - \sum I_B / (\beta + 1)$$

当 $\beta$ 较大时  $I_{C0} = I_{REF}$

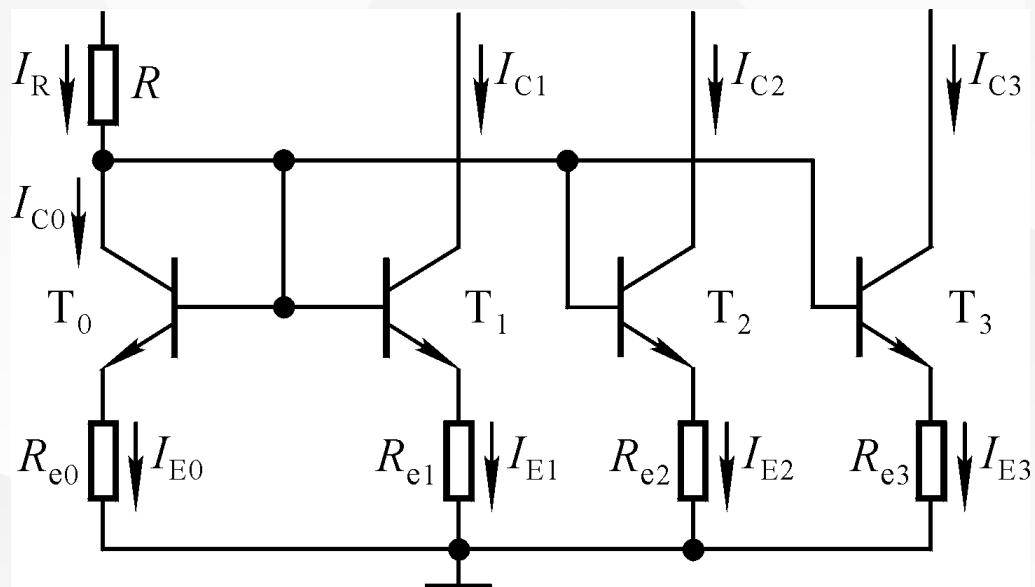
由于各管的 $\beta$ ,  $U_{BE}$ 相同,

$$I_{E0} R_{E0} \approx I_{REF} R_{E0} = I_{E1} R_{E1}$$

$$= I_{E2} R_{E2} = I_{E3} R_{E3}$$

所以

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{C1} \approx I_{E1} = I_{REF} R_{E0} / R_{E1} \\ I_{C2} \approx I_{E2} = I_{REF} R_{E0} / R_{E2} \\ I_{C3} \approx I_{E3} = I_{REF} R_{E0} / R_{E3} \end{array} \right.$$



多路电流源

## 05 集成运算放大电路

**例** 图示电路是F007的电流源部分。其中 $T_{10}$ 与 $T_{11}$ 为纵向NPN管； $T_{12}$ 与 $T_{13}$ 是横向PNP管，它们的 $\beta$ 为5，b-e间电压值约为0.7V，试求各管的电电流。

解

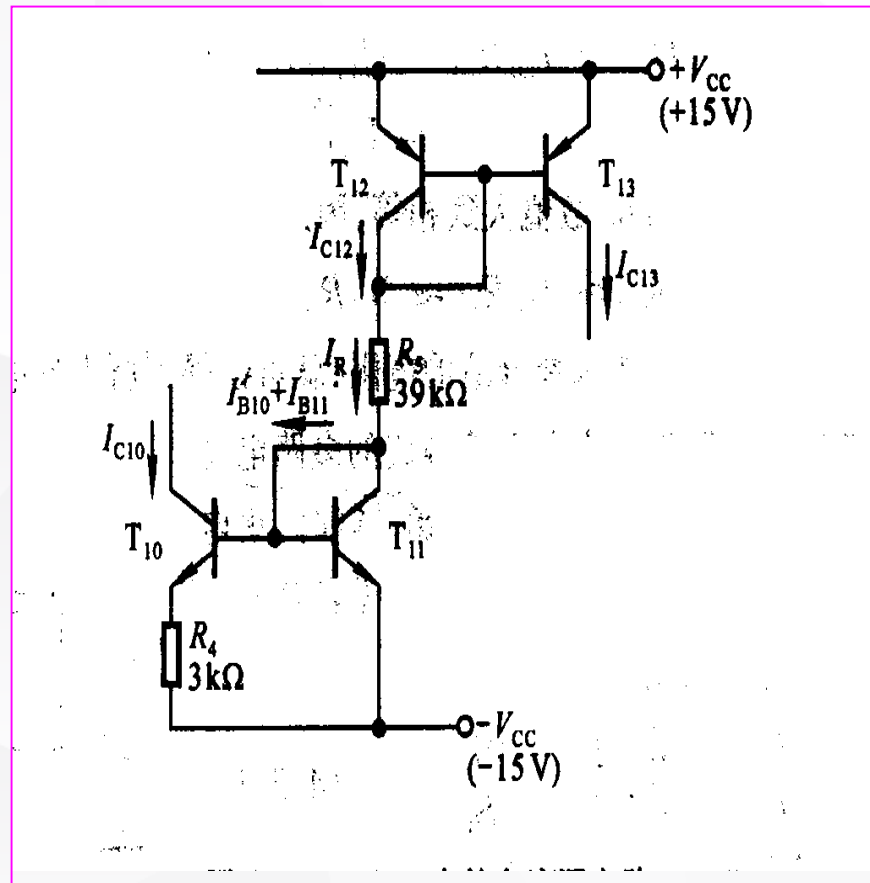
$$I_{\text{REF}} = \frac{V_{\text{CC}} + V_{\text{CC}} - U_{\text{BE12}} - U_{\text{BE11}}}{R_5}$$

$\approx 0.73 \text{ mA}$

$$U_T \ln \frac{I_R}{I_{C10}} \approx I_{C10} R_4$$

$$I_{C10} \approx 28 \mu A$$

$$I_{C13} = I_{C12} = I_R \frac{\beta}{\beta + 2} \approx 0.52 \text{mA}$$

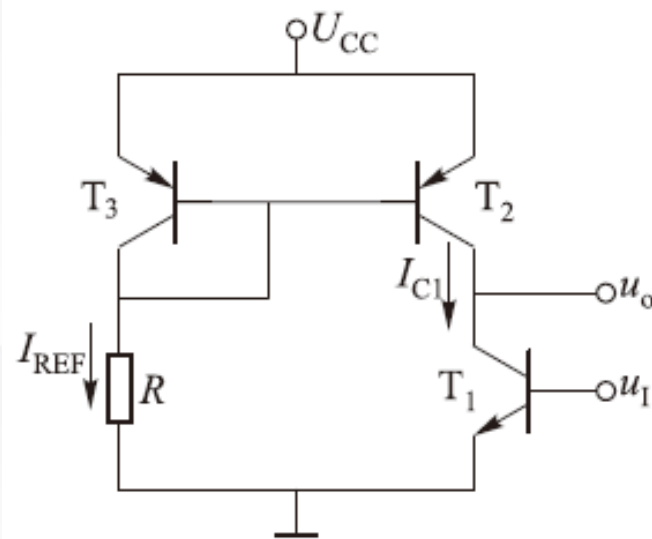


### 五、电流源用作有源负载

在集成运放中，常用电流源电路取代 $R_C$ 或 $R_d$ ，这样在电源电压不变的情况下，既可获得合适的静态电流，对于交流信号，又可获得很大的等效 $R_C$ 或 $R_d$ 的。

$$I_{C1Q} \approx I_{REF} = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R} \approx \frac{U_{CC}}{R}$$

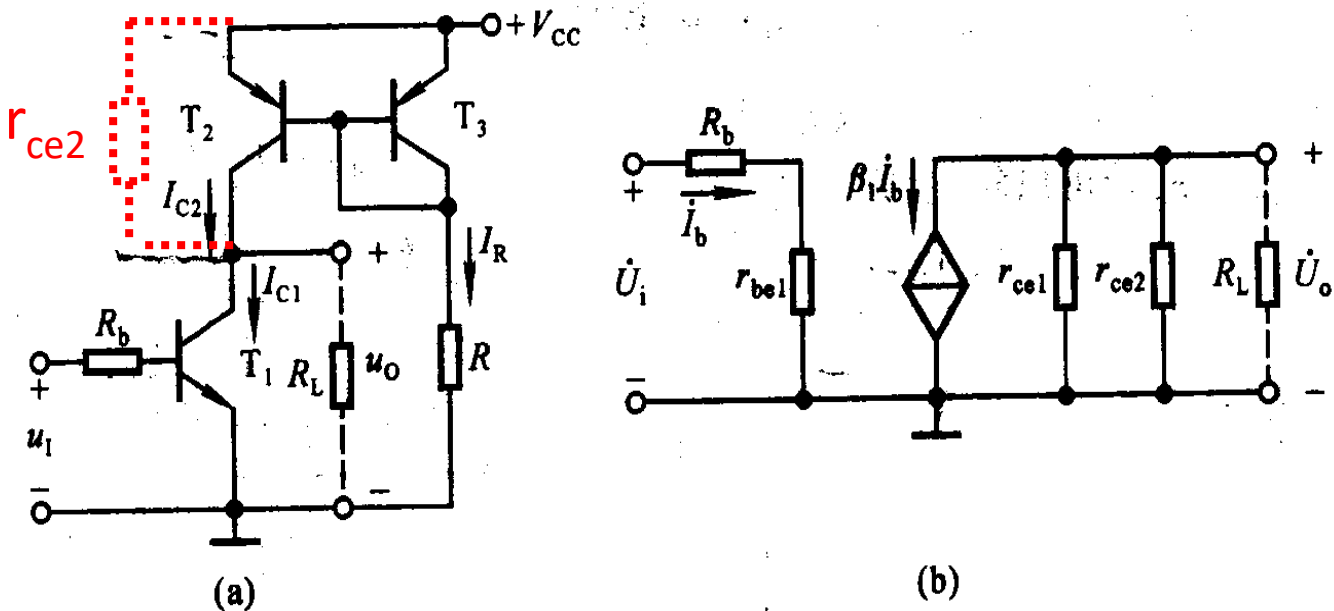
$T_1$  放大管交流等效电阻大，故放大倍数可做得很大，每级电压放大倍数可达1000 或更高，是用纯电阻作负载所无法达到的



电流源负载

## 05 集成运算放大电路

### 例 有源负载共射放大电路



1. 电路图

2. 静态分析（求参考电流，略）

3. 动态分析

$$\dot{A}_U = -\frac{\beta_1(r_{ce1} // r_{ce2} // R_L)}{R_b + r_{be1}}$$

$$\dot{A}_U = -\frac{\beta_1 R_L}{R_b + r_{be}}$$

### 5.3 差分放大电路

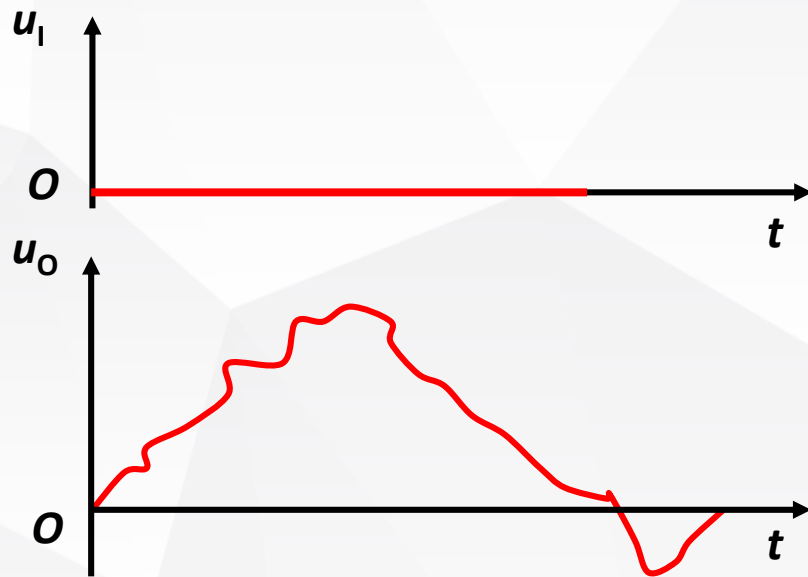
#### 1. 直接耦合放大电路的零点漂移现象

##### 一、 零点漂移现象及其产生的原因

直接耦合时，输入电压为零，但输出电压离开零点，并缓慢地发生不规则变化的现象。

**原因：**放大器件的参数受温度影响而使  $Q$  点不稳定。也称**温度漂移**。

放大电路级数愈多，放大倍数愈高，零点漂移问题愈严重。

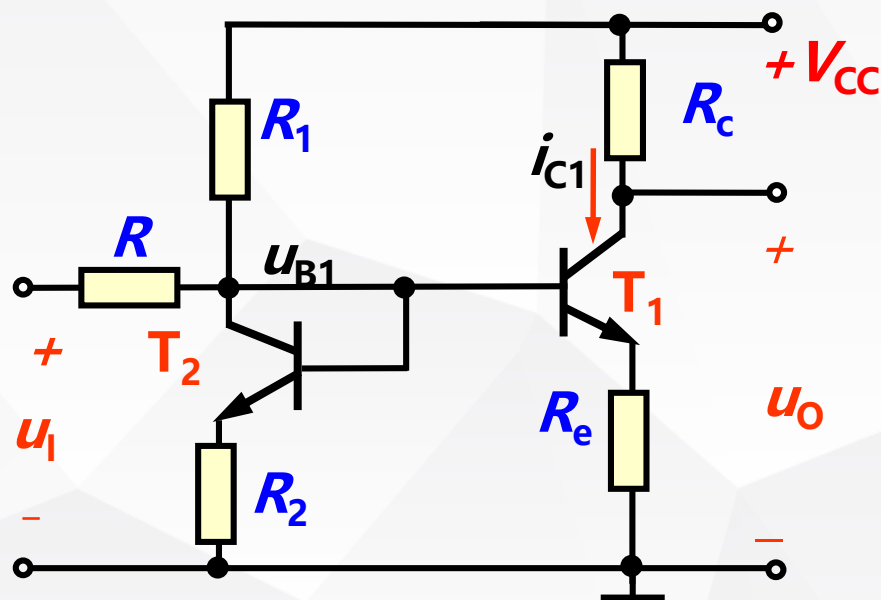


零点漂移现象

## 05 集成运算放大电路

### 二、抑制温度漂移的方法：

- (1) 引入直流负反馈以稳定  $Q$  点；
- (2) 利用热敏元件补偿放大器的零漂；



利用热敏元件补偿零漂

- (3) 采用差分放大电路。



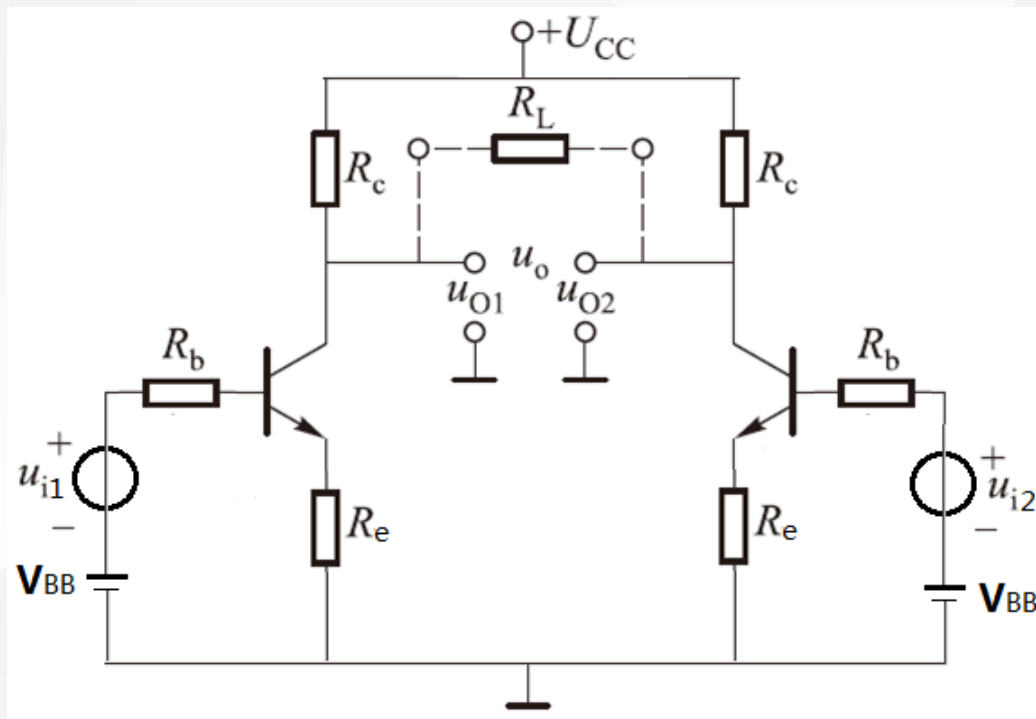
## ➤ 05 集成运算放大电路

### 2. 差分放大电路

差分放大电路是构成多级直接耦合放大电路的基本单元电路

#### 一、电路的组成

参数完全相同，管子特性也相同

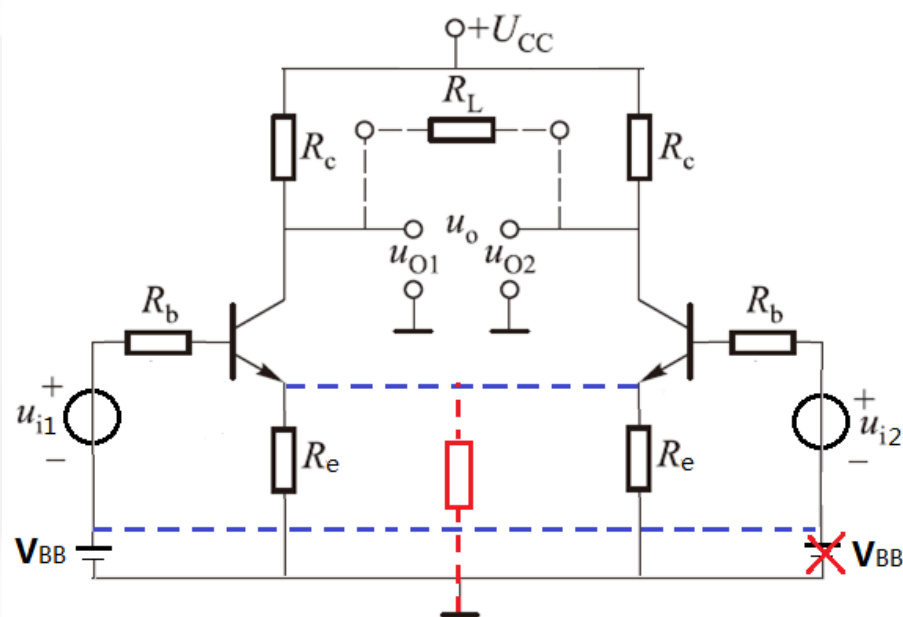


差分放大电路

差分放大电路也称为差动放大电路

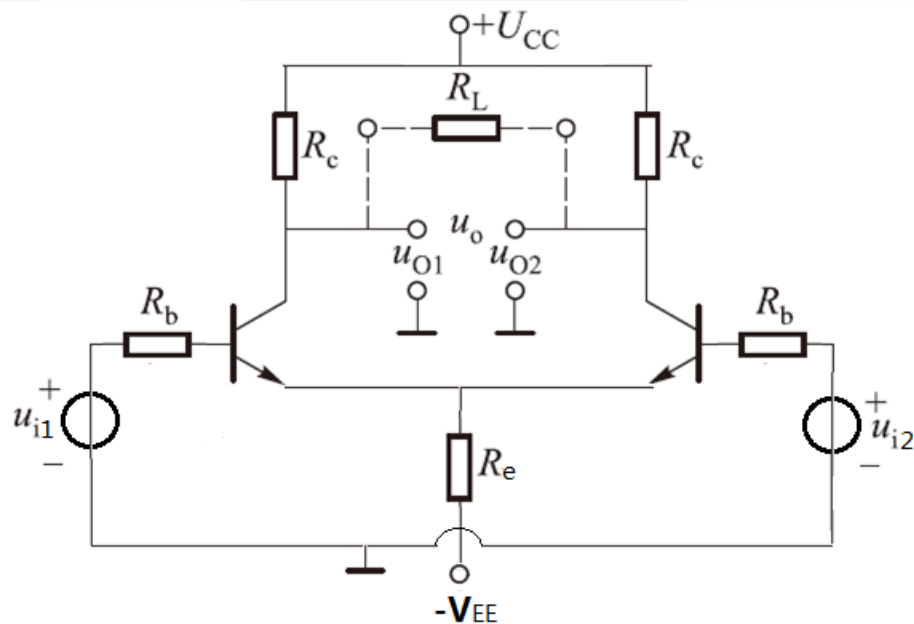
电路以两只管子集电极电位差为输出，可克服温度漂移

## 05 集成运算放大电路



差分放大电路的改进图

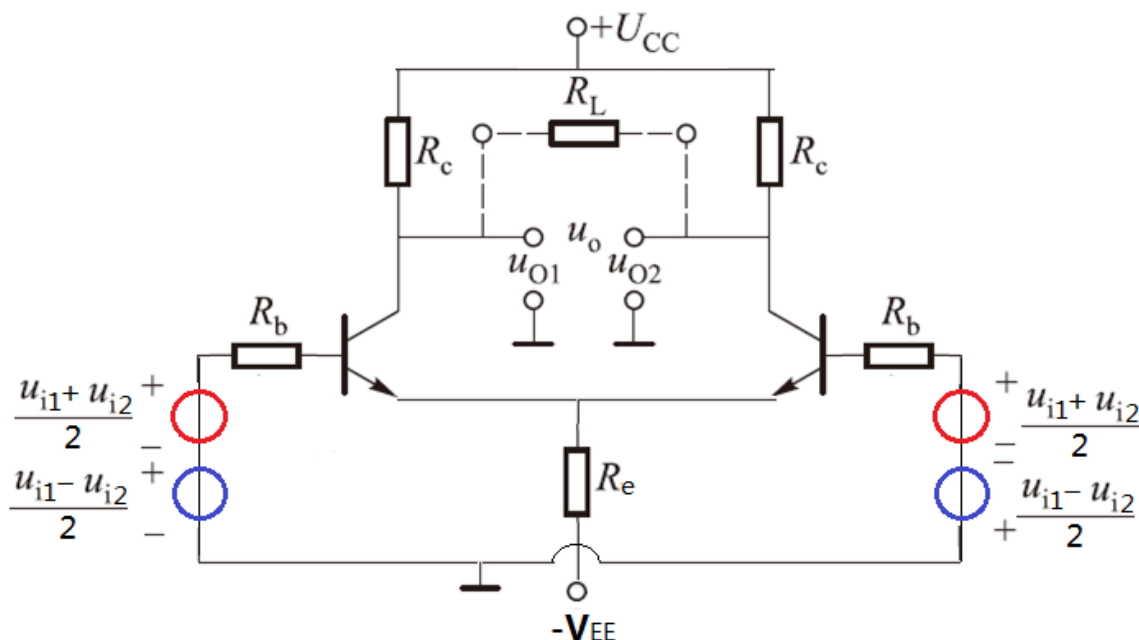
将发射极电阻合二为一、  
对差模信号  $R_e$  相当于短路



典型差分放大电路

长尾式差分放大电路  
便于调节静态工作点，电源和信号源能共地

## 05 集成运算放大电路



差分放大电路

### 共模信号

输入信号  $u_{i1}$  和  $u_{i2}$  大小相等，极性相同

### 差模信号

输入信号  $u_{i1}$  和  $u_{i2}$  大小相等，极性相反

### 二、长尾式差分放大电路分析

基于不同的应用场合，有双、单端输入和双、单端输出的情况

所谓“单端”指一端接地。

<A> 双入、双出

<B> 双入、单出

<C> 单入、双出

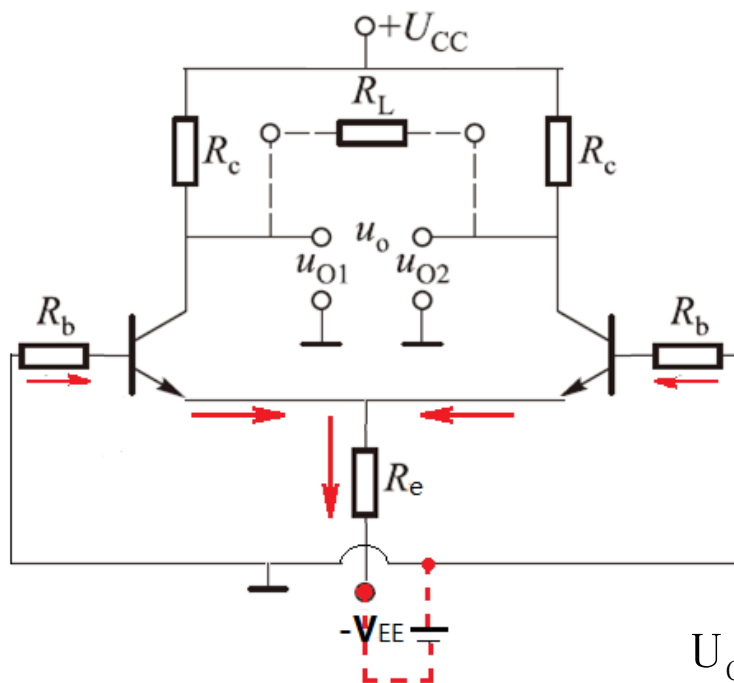
<D> 单入、单出

“单端”的情况，还具有共模抑制能力吗？

如何进一步改进呢？

## 05 集成运算放大电路

### <A> 双入双出



长尾式差分放大电路

### 1) 静态分析

$$I_{B1} = I_{B2} = \frac{V_{EE} - U_{BE}}{R_b + 2(1 + \beta)R_e} \approx \frac{V_{EE} - U_{BE}}{2(1 + \beta)R_e}$$

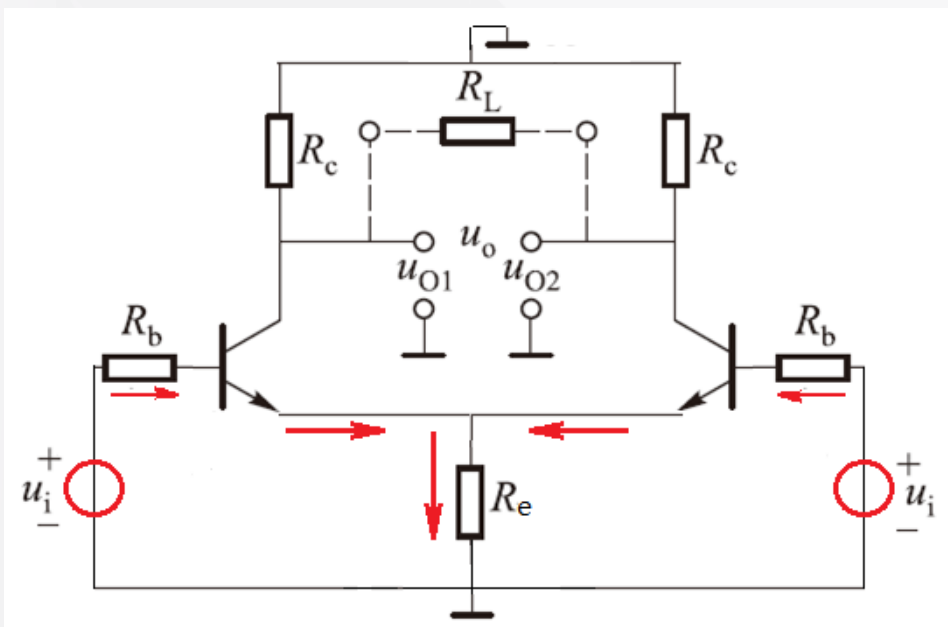
$$I_{E1} = I_{E2} = (1 + \beta)I_B$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} + V_{EE} - I_{CQ}R_C - 2(1 + \beta)I_B R_e$$

$$U_O = 0$$

## 05 集成运算放大电路

### 2) 动态分析-共模信号



$$i_b = - \frac{u_i}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta) R_e}$$

$$i_c = \beta i_b$$

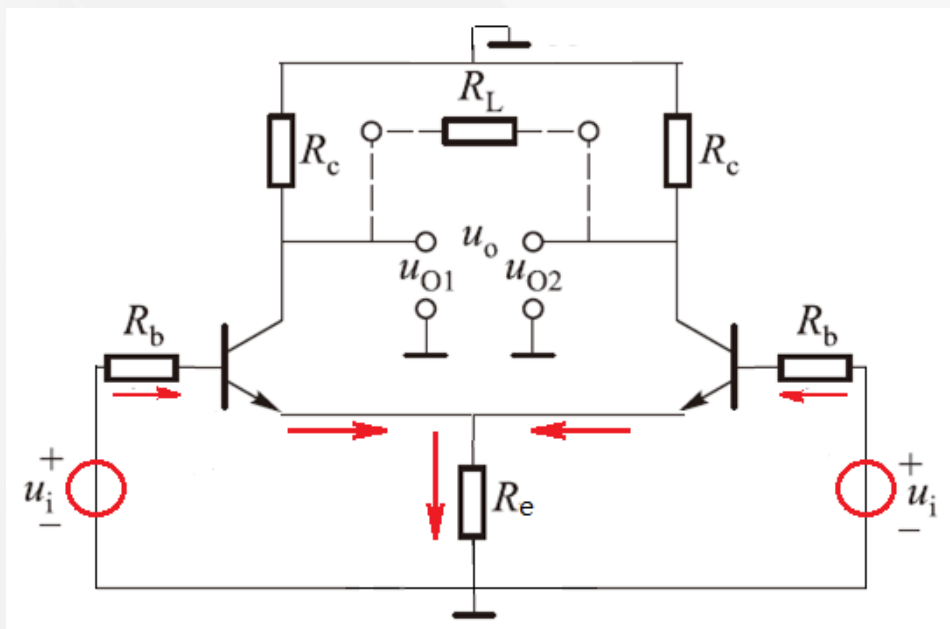
$$u_{oc1} = u_{oc2} = -i_c * R_c$$

$$\begin{aligned} A_{c1} &= A_{c2} = \frac{u_{oc1}}{u_i} \\ &= - \frac{\beta R_c}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta) R_e} \end{aligned}$$

$$\text{共模增益 } A_c = \frac{u_{oc1} - u_{oc2}}{u_i} = 0$$

## 05 集成运算放大电路

### 2) 动态分析-共模信号



共模信号的输入使两管集电极电压有相同的变化。

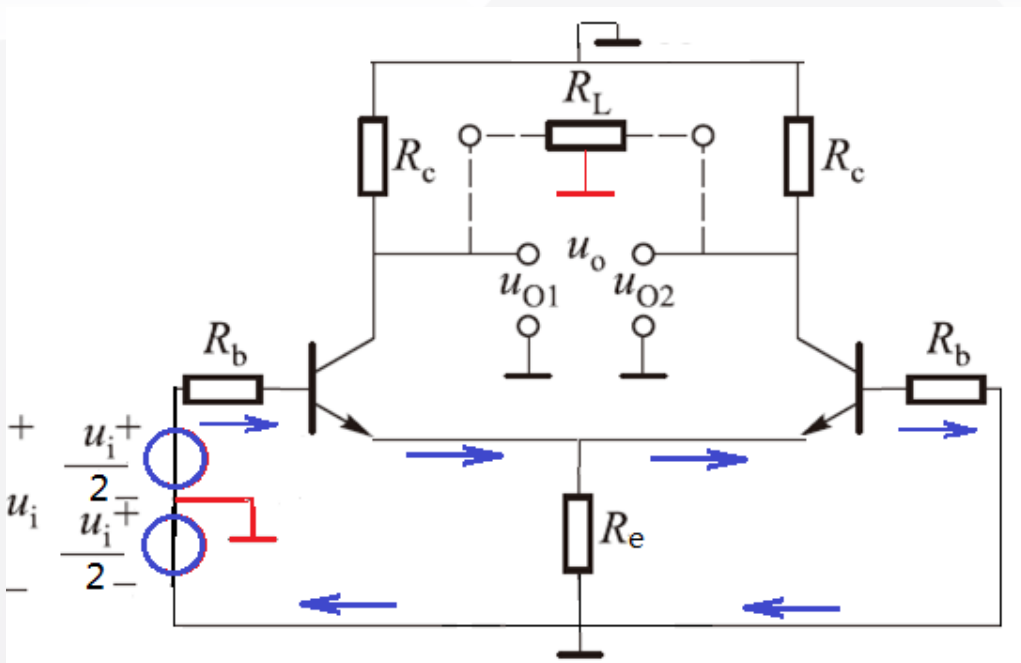
$$\text{所以 } u_{oc} = u_{oc1} - u_{oc2} \approx 0$$

电路参数的理想对称性，温度变化时管子的电流变化完全相同，故可以将温度漂移等效成共模信号，差分放大电路对共模信号有很强的抑制作用。

射极电阻  $R_e$  对共模信号的负反馈作用，抑制了每只晶体管集电极电流的变化，从而抑制集电极的电位的变化。

## 05 集成运算放大电路

### 3) 动态分析-差模信号



差分放大电路加差模信号

分析时注意二个“虚地”

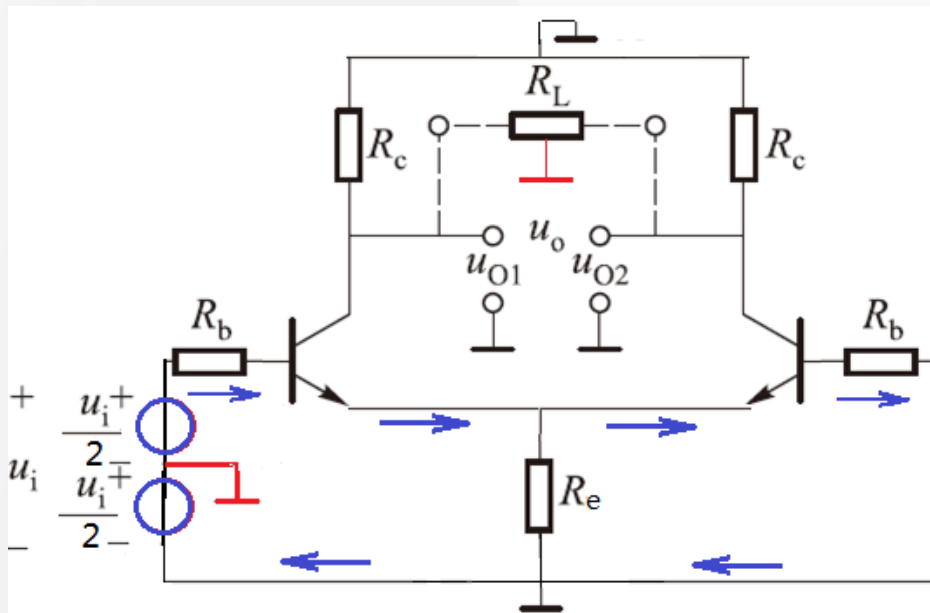
E点电位在差模信号作用下不变，相当于接“地”。

负载电阻的中点电位在差模信号作用下不变，相当于接“地”。



## 05 集成运算放大电路

### 3) 动态分析-差模信号



差模增益

$$A_d = \frac{u_{O1} - u_{O2}}{u_i} = \frac{-2\beta * R_c // \frac{1}{2} R_L}{2(R_b + r_{be})} = \frac{-\beta * R_c // \frac{1}{2} R_L}{R_b + r_{be}}$$

$$i_b = \frac{u_i}{2R_b + 2r_{be}}$$

$$i_c = \beta i_b$$

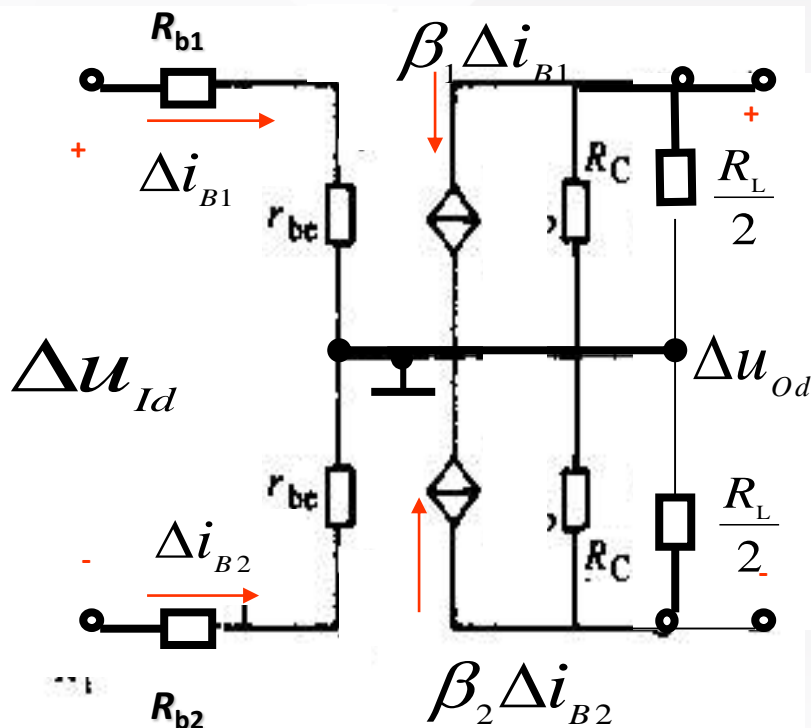
$$u_{O1} = -\beta i_b * R_c // \frac{1}{2} R_L$$

$$u_{O2} = \beta i_b * R_c // \frac{1}{2} R_L$$

$$A_{d1} = \frac{u_{O1}}{u_i} = -\frac{\beta(R_c // \frac{1}{2} R_L)}{2(R_b + r_{be})}$$

## 05 集成运算放大电路

### 3) 动态分析-差模信号



差模信号作用下的等效电路

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

$$R_{od} = 2R_C$$

共模抑制比  $K_{CMR} = \left| \frac{A_D}{A_C} \right|$

$$K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_D}{A_C} \right| \text{ dB}$$

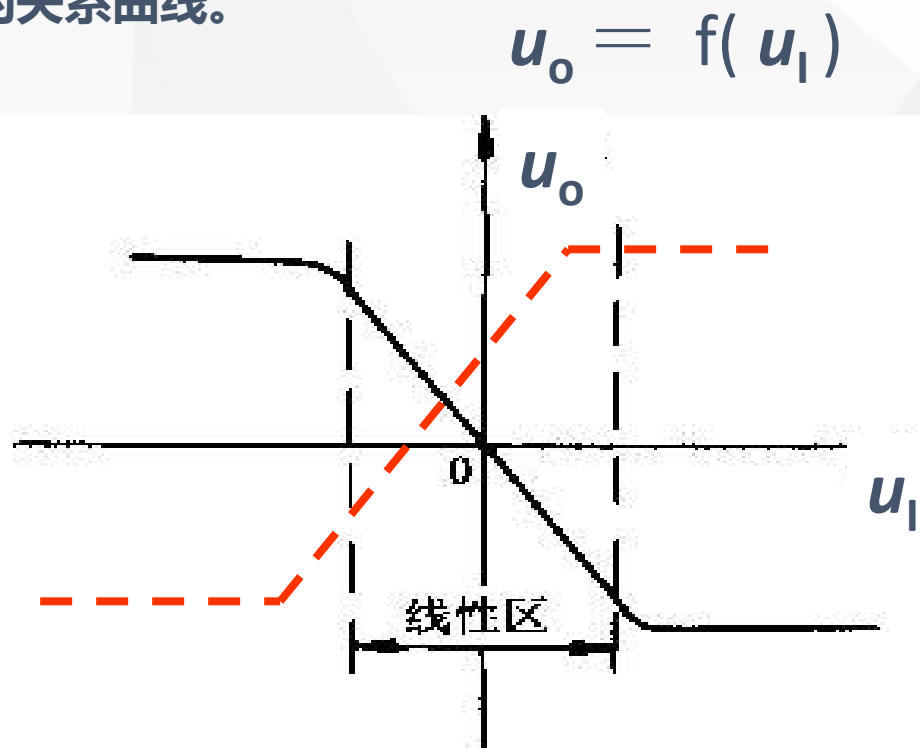
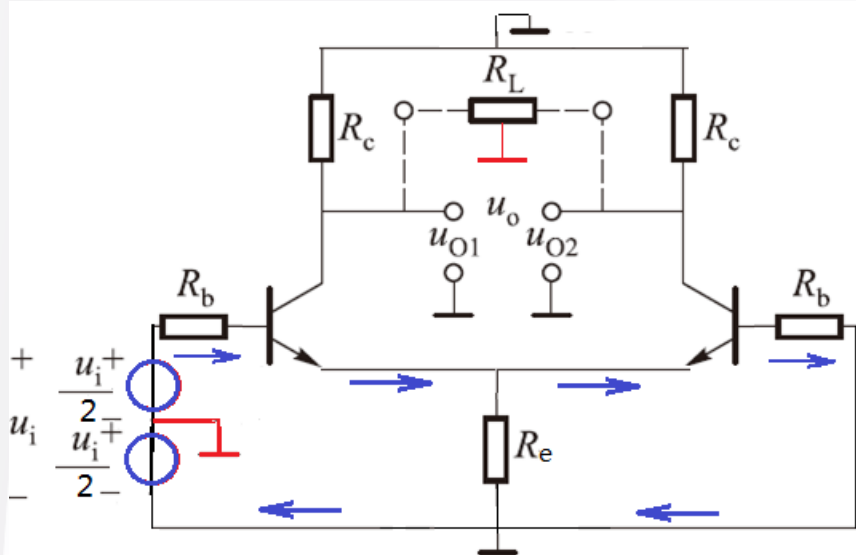
双端输出，理想情况  $K_{CMR} = \infty$

## 05 集成运算放大电路

### 3) 动态分析-差模信号

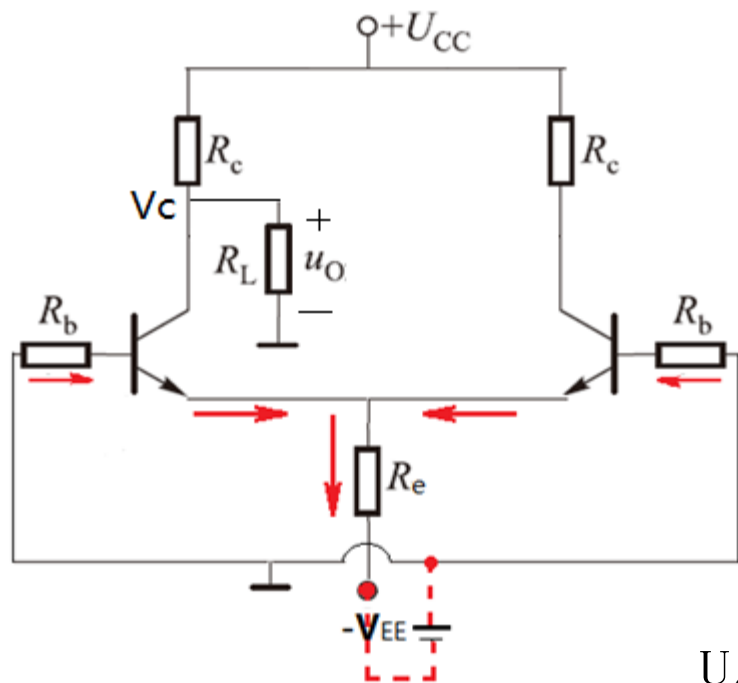
#### 电压传输特性

放大电路的输出电压和输入电压之间的关系曲线。



## 05 集成运算放大电路

### <B>双入单出



长尾式差分放大电路

#### 1) 静态分析

$$I_{B1} = I_{B2} = \frac{V_{EE} - U_{BE}}{R_b + 2(1 + \beta)R_e}$$
$$\approx \frac{V_{EE} - U_{BE}}{2(1 + \beta)R_e}$$

$$I_{E1} = I_{E2} = (1 + \beta)I_B$$

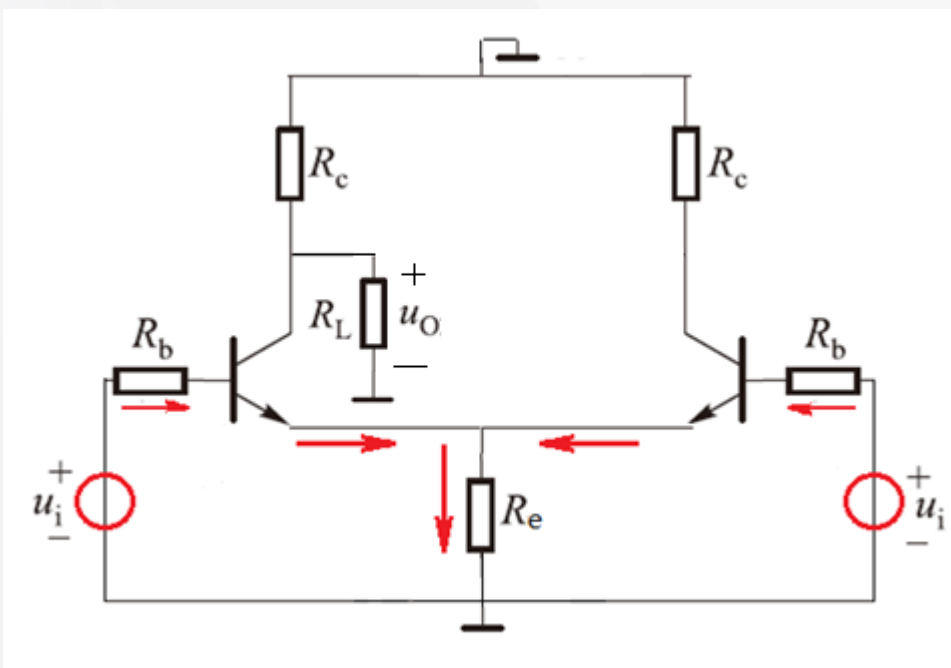
$$U_{CEQ1} = V_C + V_{EE} - 2(1 + \beta)I_B R_e$$

$$U_{CEQ2} = V_{CC} + V_{EE} - \beta I_B R_C - 2(1 + \beta)I_B R_e$$

$$U_O = 0$$

## 05 集成运算放大电路

### 2) 动态分析-共模信号



$$i_b = - \frac{u_i}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta) R_e}$$

$$i_c = \beta i_b$$

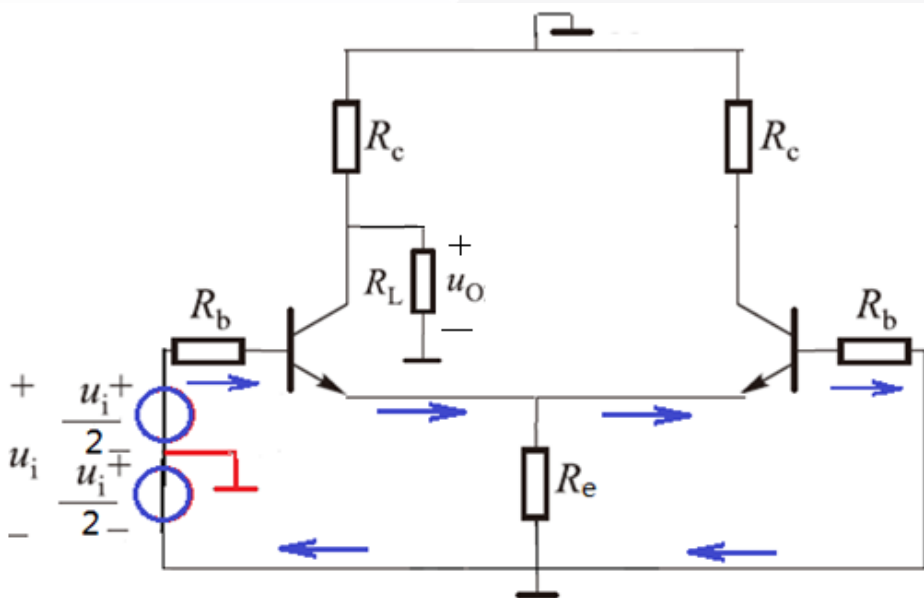
$$u_{oc} = -i_c * R_c // R_L$$

$$A_c = \frac{u_o}{u_i}$$

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

## 05 集成运算放大电路

### 3) 动态分析-差模信号



$$i_b = \frac{u_i}{2R_b + 2r_{be}}$$

$$i_c = \beta i_b$$

$$u_o = -\beta i_b * R_c // R_L$$

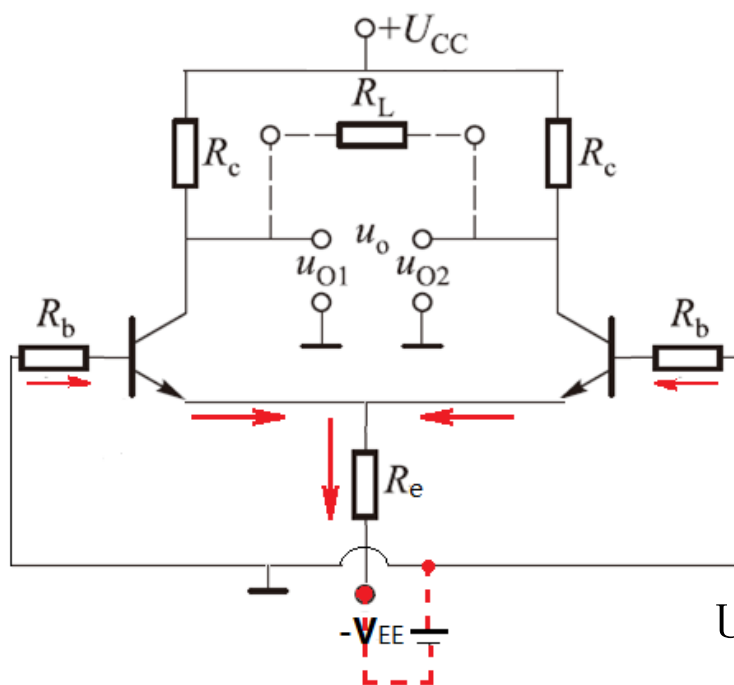
$$A_d = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{2(R_b + r_{be})}$$

放大倍数比双出降了一半

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

$$R_{od} = R_c$$

## <C>单入双出



长尾式差分放大电路

### 1) 静态分析同双入双出

$$I_{B1} = I_{B2} = \frac{V_{EE} - U_{BE}}{R_b + 2(1 + \beta)R_e}$$

$$\approx \frac{V_{EE} - U_{BE}}{2(1 + \beta)R_e}$$

$$I_{E1} = I_{E2} = (1 + \beta)I_B$$

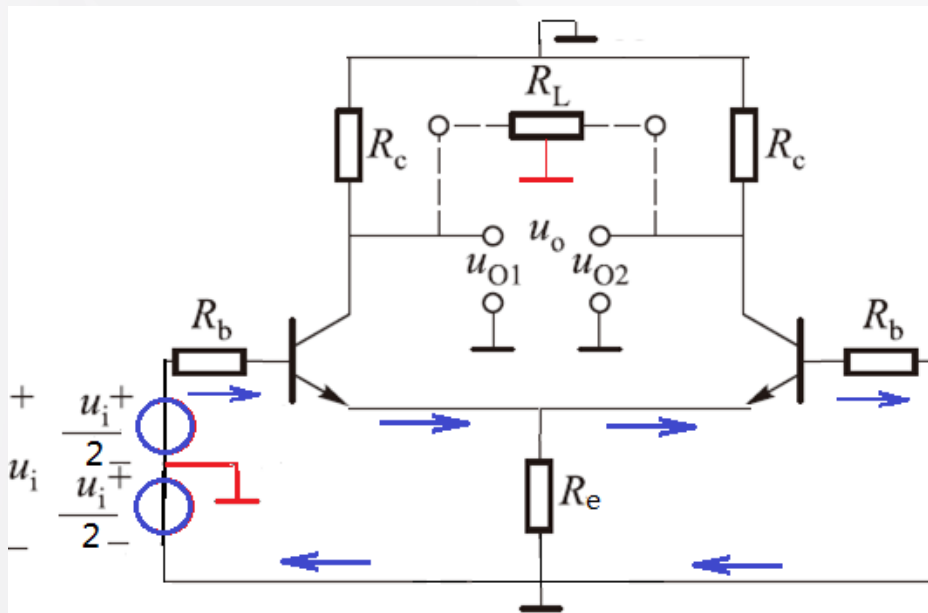
$$U_{CEQ1} = V_C + V_{EE} - 2(1 + \beta)I_B R_e$$

$$U_{CEQ2} = V_{CC} + V_{EE} - \beta I_B R_C - 2(1 + \beta)I_B R_e$$

$$U_O = 0$$

## 05 集成运算放大电路

### 2) 动态分析-共模信号



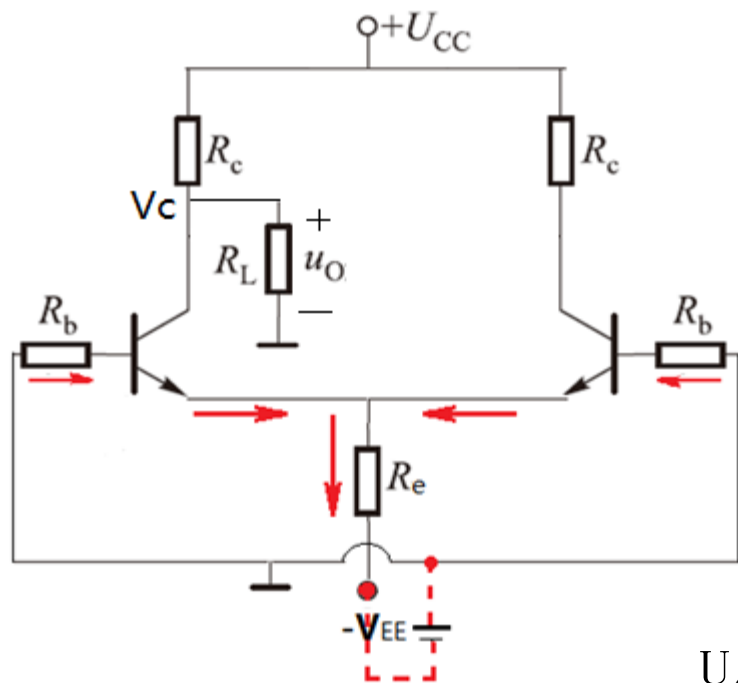
输入引入了共模干扰，  
但被双输出抑制

差模分析计算与双入双  
出相同



## 05 集成运算放大电路

### <D>单入单出



长尾式差分放大电路

#### 1) 静态分析同双入单出

$$I_{B1} = I_{B2} = \frac{V_{EE} - U_{BE}}{R_b + 2(1 + \beta)R_e}$$
$$\approx \frac{V_{EE} - U_{BE}}{2(1 + \beta)R_e}$$

$$I_{E1} = I_{E2} = (1 + \beta)I_B$$

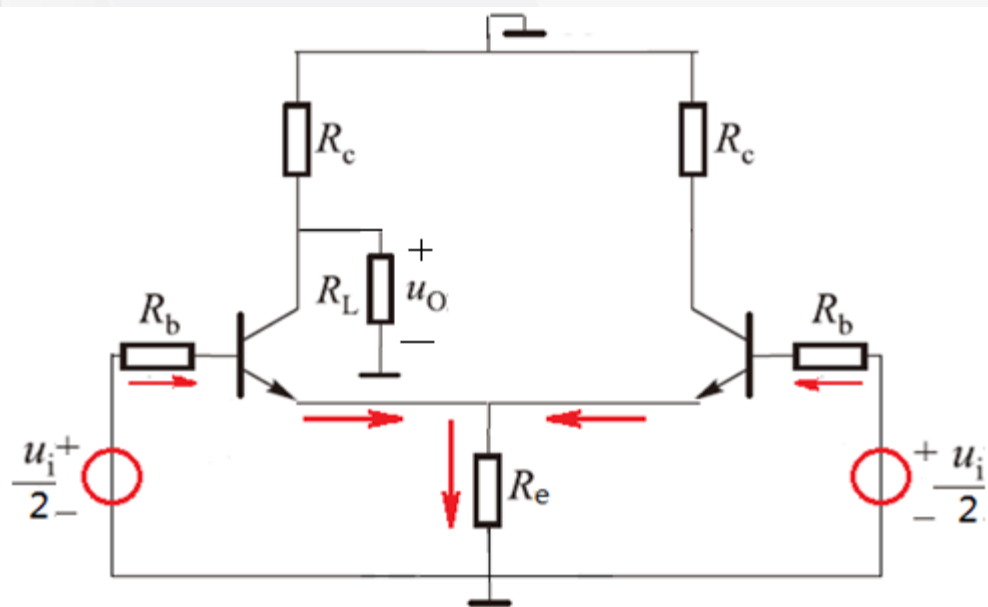
$$U_{CEQ1} = V_C + V_{EE} - 2(1 + \beta)I_B R_e$$

$$U_{CEQ2} = V_{CC} + V_{EE} - \beta I_B R_C - 2(1 + \beta)I_B R_e$$

$$U_O = 0$$

## 05 集成运算放大电路

### 2) 动态分析-共模信号



$$i_b = - \frac{u_i / 2}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta) R_e}$$

$$i_c = \beta i_b$$

$$u_{oc} = -i_c * R_c // R_L$$

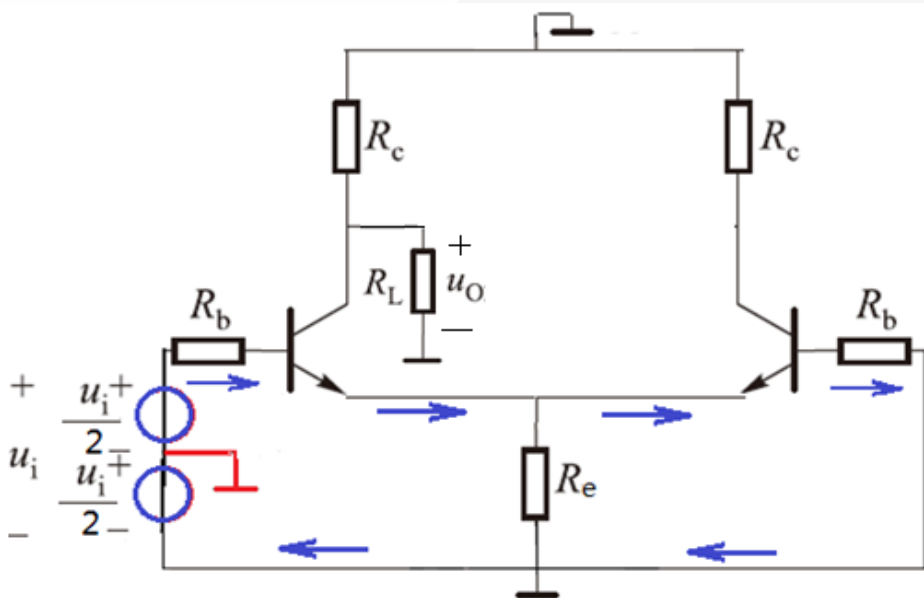
$$A_c = \frac{u_o}{u_i / 2}$$

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

输入方式引入了共模干扰

## 05 集成运算放大电路

### 3) 动态分析-差模信号



#### 差模信号分析同双入单出

$$i_b = \frac{u_i}{2R_b + 2r_{be}}$$

$$i_c = \beta i_b$$

$$u_{od} = -\beta i_b * R_c // R_L$$

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

放大倍数比双出降了一半

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

$$R_{od} = R_c$$

### 差动放大器动态参数计算总结

#### (1) 差模电压放大倍数

与单端输入还是双端输入无关，只与输出方式有关：

双端输出时：

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

单端输出时：

$$A_{vd} = \pm \frac{\beta(R_c // R_L)}{2(R_b + r_{be})}$$

#### (2) 共模电压放大倍数

与单端输入还是双端输入无关，只与输出方式有关：

双端输出时：  $A_{vc} = 0$       单端输出时：  $A_{vc} \approx -\frac{R'_L}{2R_e}$

### (3) 差模输入电阻

不论是单端输入还是双端输入，差模输入电阻  $R_{id}$  是基本放大电路的两倍。

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

### (4) 输出电阻

单端输出时  $R_o = R_c$

双端输出时  $R_o = 2R_c$

### (5)共模抑制比

共模抑制比 $K_{\text{CMR}}$ 是差分放大器的一个重要指标

$$K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_{\text{vd}}}{A_{\text{vc}}} \right|$$

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

双端输出时 $K_{\text{CMR}}$ 可认为等于无穷大,  
单端输出时共模抑制比:

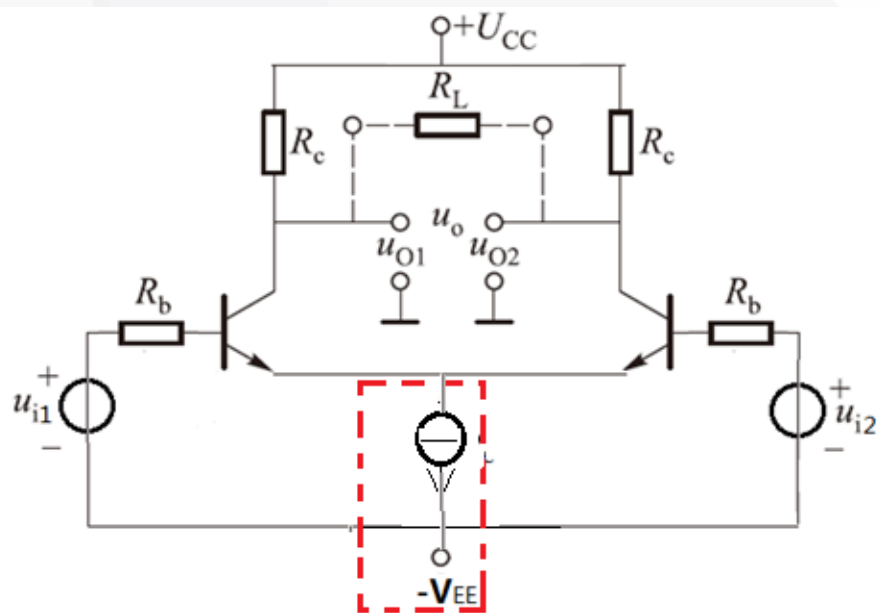
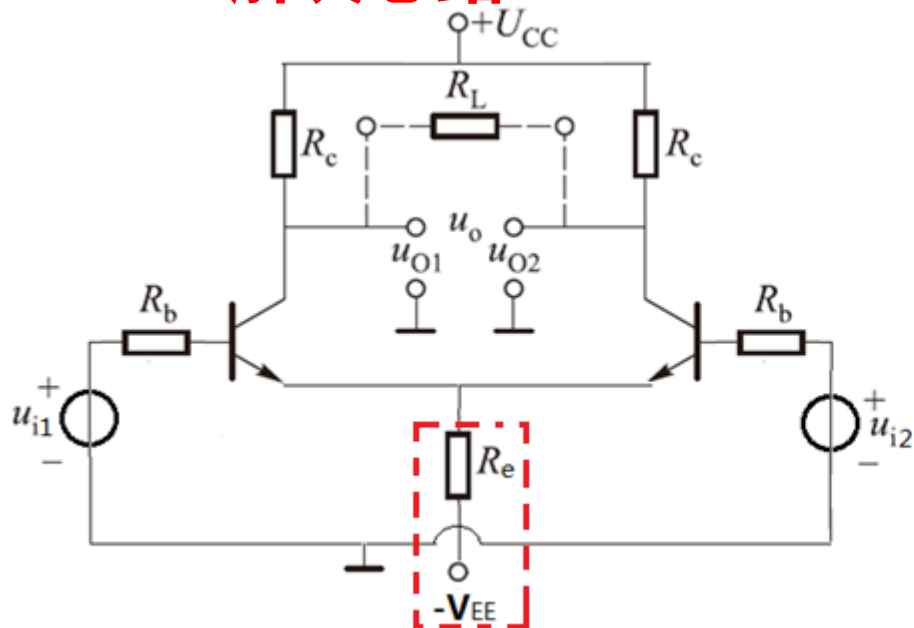
$$K_{\text{CMR}} = \frac{-\beta R'_L / 2(R_b + r_{\text{be}})}{-R'_L / 2R_e} \approx \frac{\beta R_e}{R_b + r_{\text{be}}}$$

## ➤ 05 集成运算放大电路

### 三、恒流源差分放大电路

为减小共模放大倍数，增加 $R_e$ ， $R_e$ 增加的同时为保证偏置电流， $V_{EE}$ 也要增大。

解决思路：



$R_e$ 无穷大，用电流源保证偏置电流，构成恒流源式差分放大电路

## 05 集成运算放大电路

### 恒流源式差分放大电路

#### 1) 静态分析

$$U_{R_{b1}} = \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} (V_{CC} + V_{EE})$$

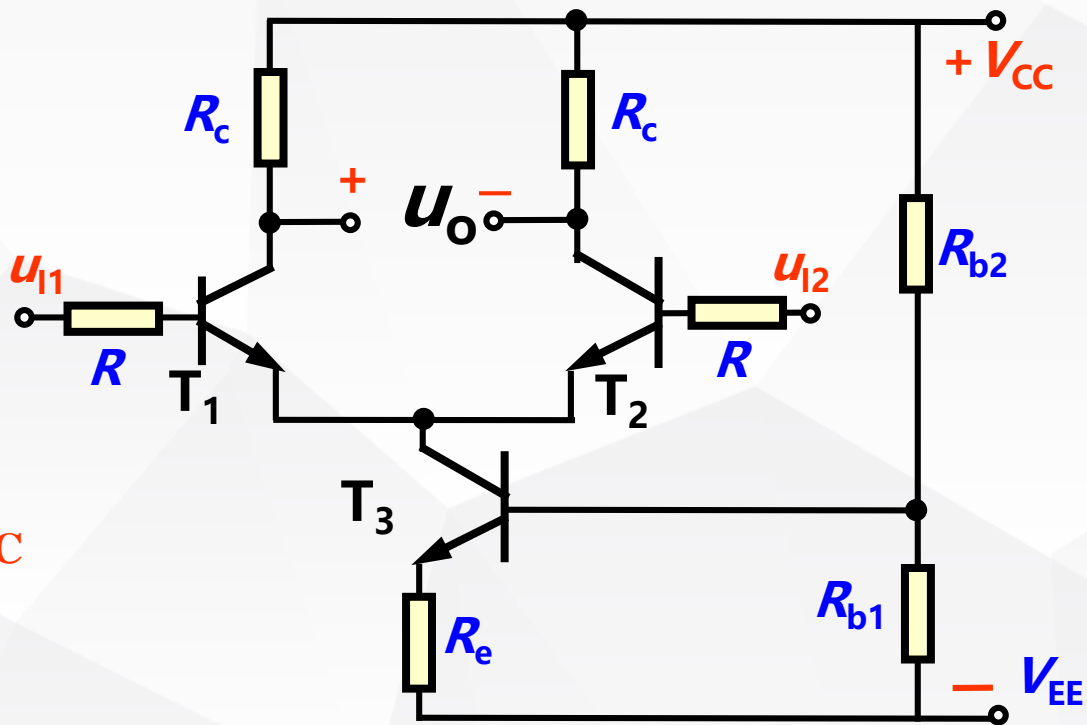
$$I_{CQ3} \approx I_{EQ3} = \frac{U_{R_{b1}} - U_{BEQ3}}{R_e}$$

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} \approx \frac{1}{2} I_{CQ3}$$

$$U_{CQ1} = U_{CQ2} = V_{CC} - I_{CQ1} R_c$$

$$I_{BQ1} = I_{BQ2} \approx I_{CQ1} / \beta_1$$

$$U_{BQ1} = U_{BQ2} = -I_{BQ1} R$$



恒流源的差分放大电路



### 2) 动态分析

由于恒流三极管相当于一个阻值很大的长尾电阻，它的作用也是引入一个共模负反馈，对差模电压放大倍数没有影响，所以与长尾式交流通路相同。

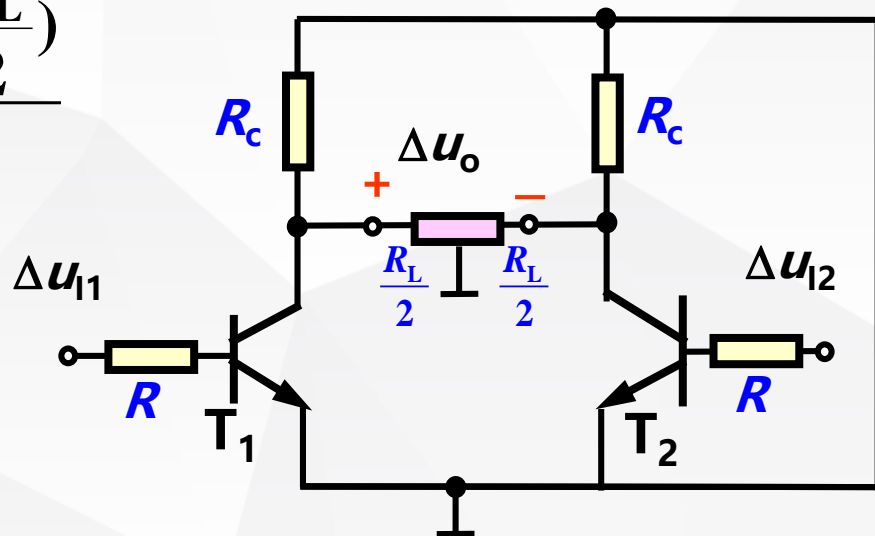
差模电压放大倍数为

$$A_d = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_{I1} - \Delta u_{I2}} = - \frac{\beta(R_C // \frac{R_L}{2})}{R + r_{be}}$$

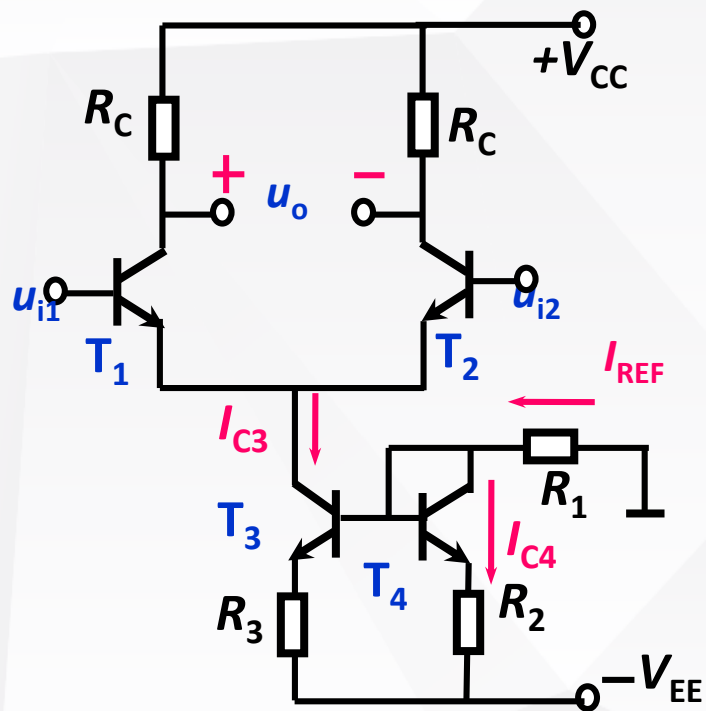
差模输入电阻为

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

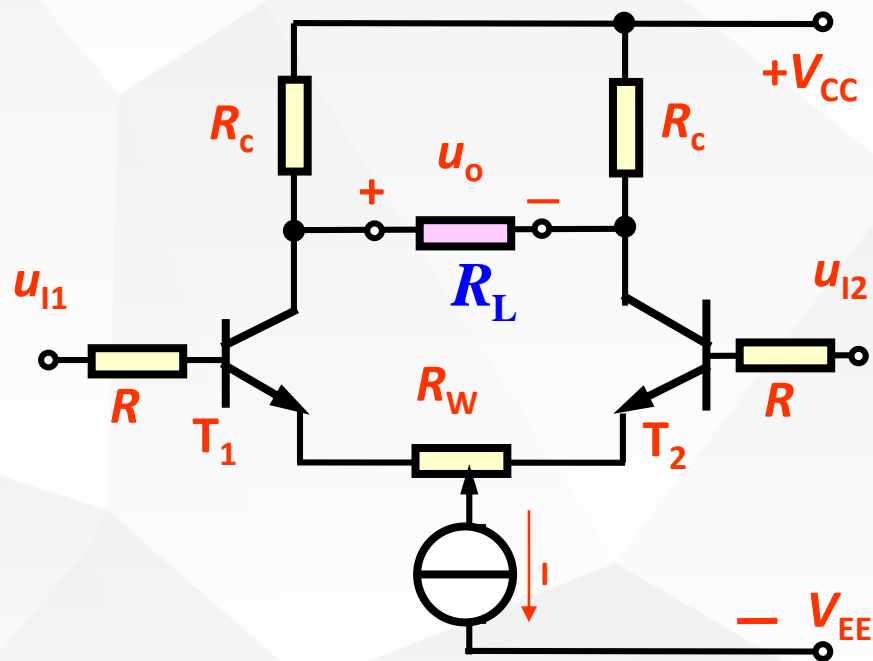
差模输出电阻为  $R_o = 2R_C$



### 四、其他类型差分放大电路



具有电流源的差分放大电路



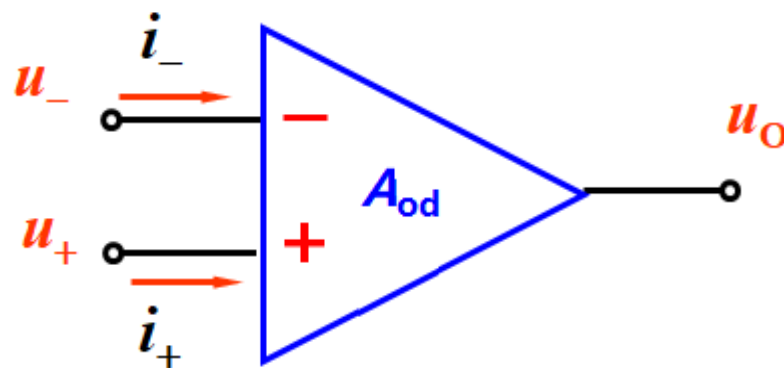
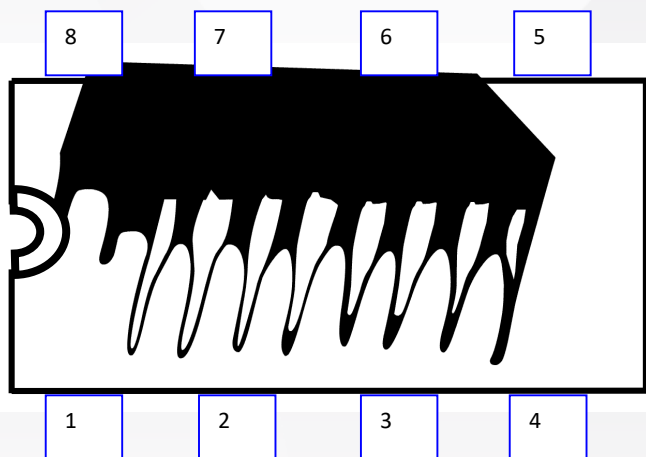
带调零措施的恒流源差分放大电路

调节电位器  $R_W$  的滑动端位置可使电路在  $u_{i1}=u_{i2}=0$  时,  $u_o=0$

### 5.4 集成运放电路简介

典型的集成运放 { 双极型集成运放 F007  
CMOS 集成运放 C14573

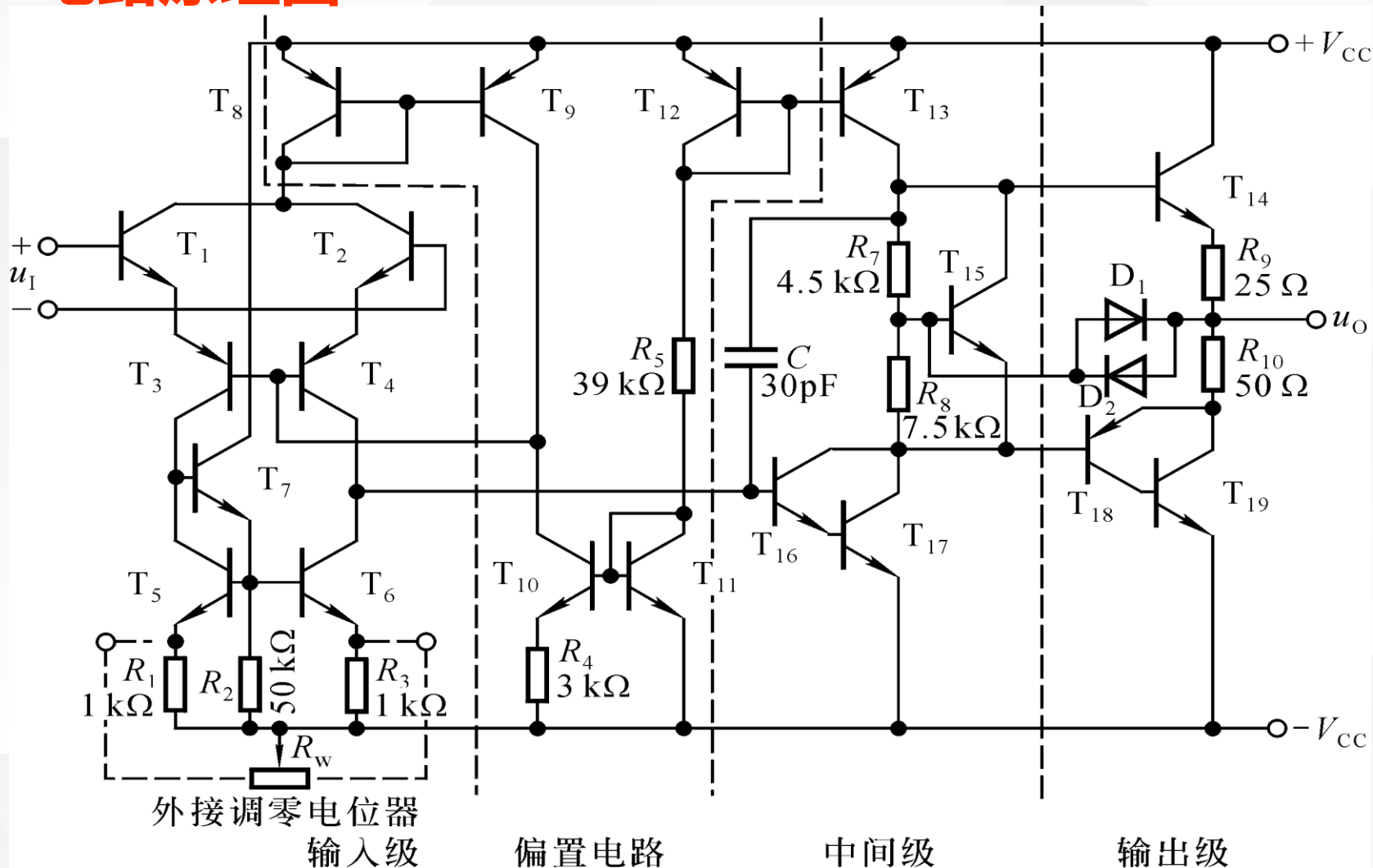
#### 1. 双极型集成运放 F007



F007 的引脚及连接示意图

# 05 集成运算放大电路

## 2. 电路原理图



F007 电路原理图

## 05 集成运算放大电路

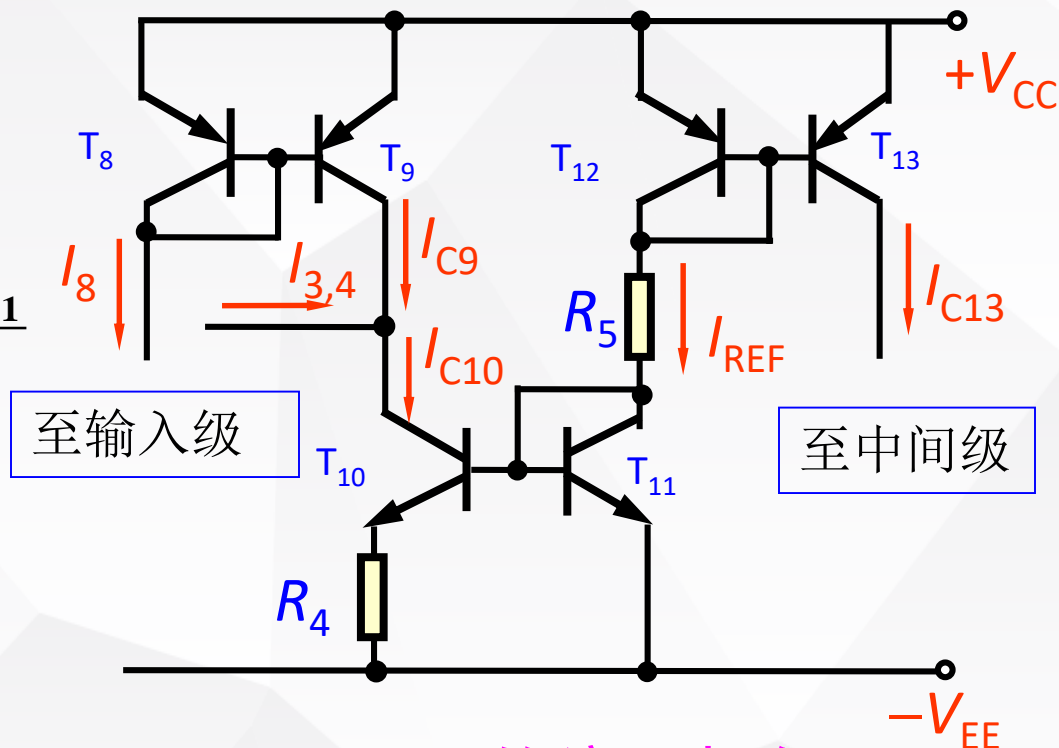
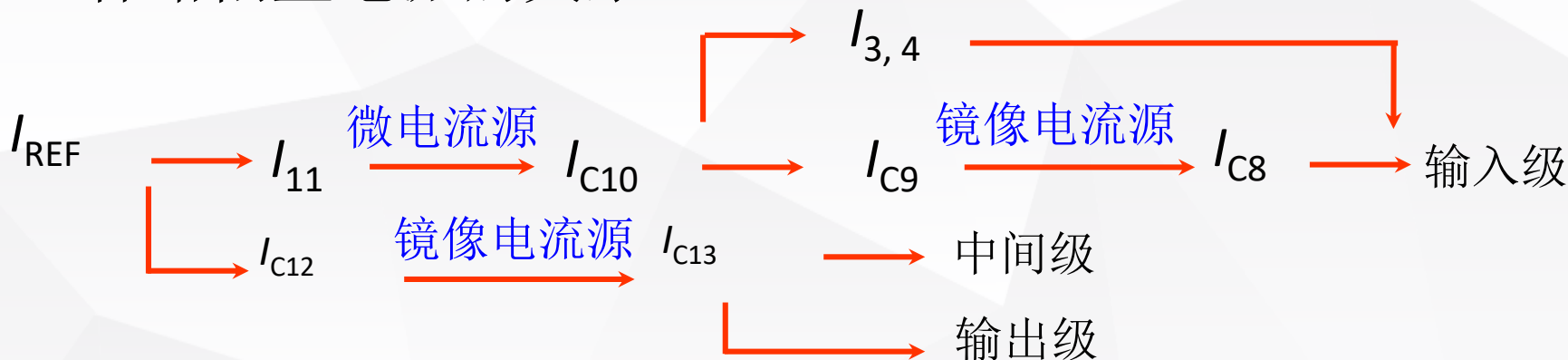
### 1) 偏置电路

基准电流:

$$I_{\text{REF}} = \frac{V_{\text{CC}} + V_{\text{EE}} - U_{\text{BE12}} - U_{\text{BE11}}}{R_5}$$

基准电流产生各放大级所需的偏置电流。

各路偏置电流的关系:



## 05 集成运算放大电路

### 2) 输入级

$T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  组成共集 - 共基差分放大电路；

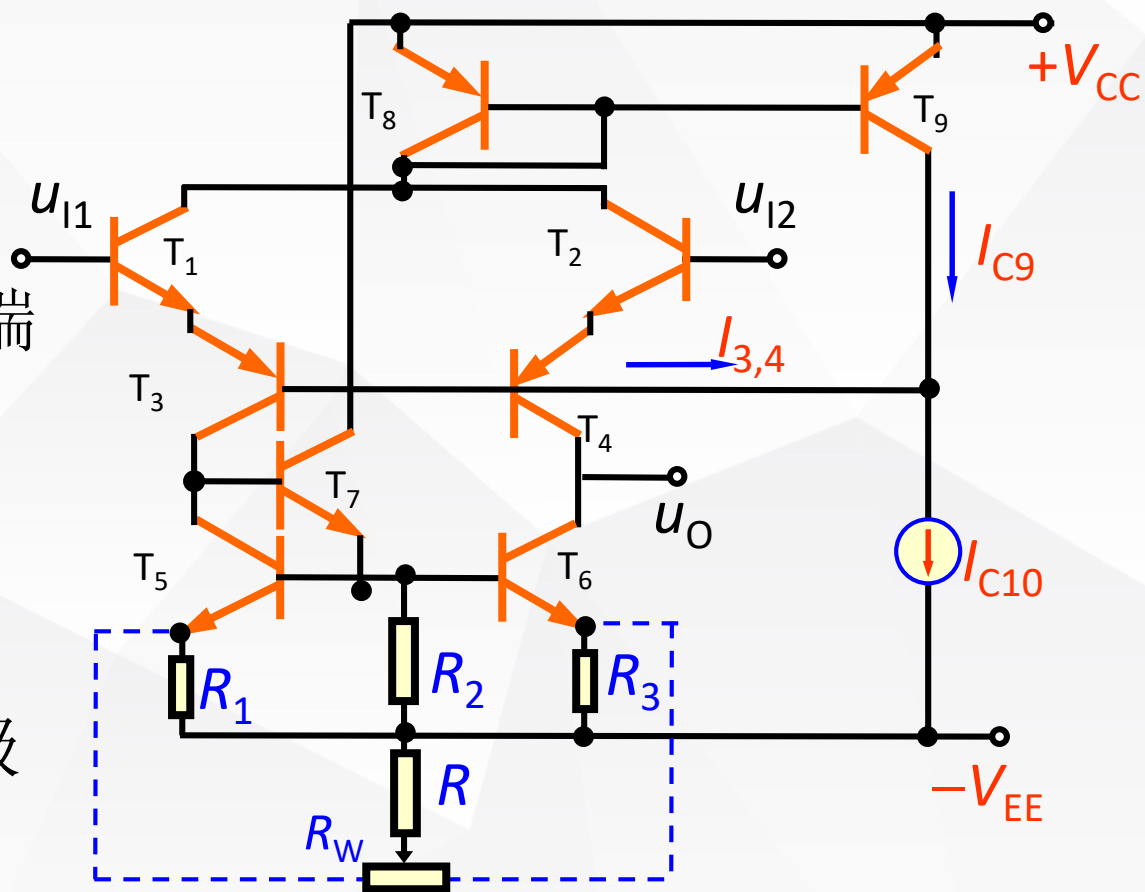
$T_1$ 、 $T_2$  基极接收差分输入信号。

$T_5$ 、 $T_6$  有源负载；

$T_4$  集电极送出单端输出信号至中间级。

$R_W$  调零电阻， $R$  外接电阻。

$T_7$  与  $R_2$  组成射极输出器。



## 05 集成运算放大电路

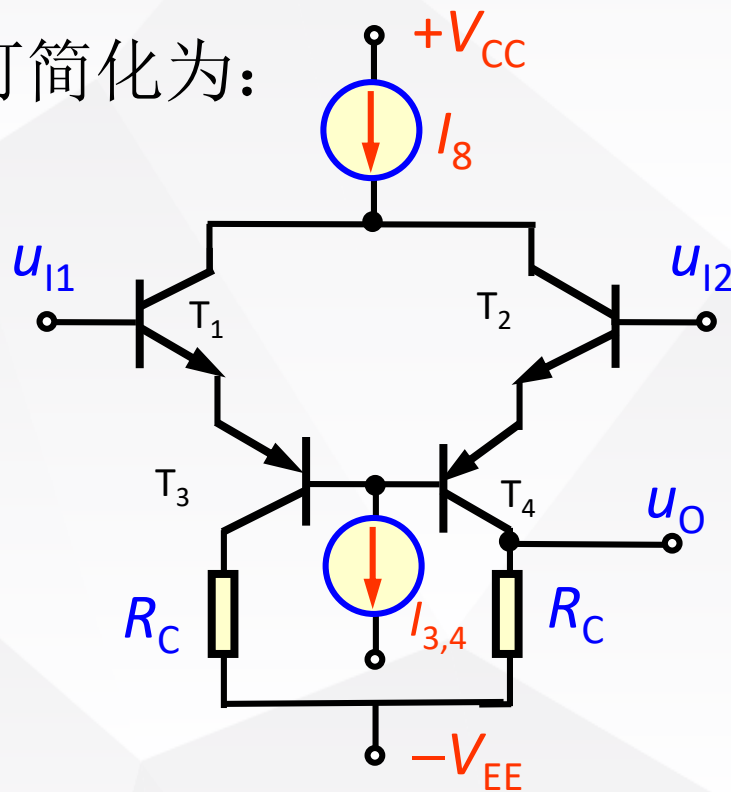
若暂不考虑  $T_7$  和调零电路则电路可简化为：

(1).  $T_1$ 、 $T_2$  共集组态，具有较高的差模输入电阻和共模输入电压。

(2). 共基组态的  $T_3$ 、 $T_4$ ，与有源负载  $T_5$ 、 $T_6$  组合，可以得到很高的电压放大倍数。

(3).  $T_3$ 、 $T_4$  共基接法能改善频率响应。

(4). 该电路具有共模负反馈，能减小温漂，提高共模抑制比。



## 05 集成运算放大电路

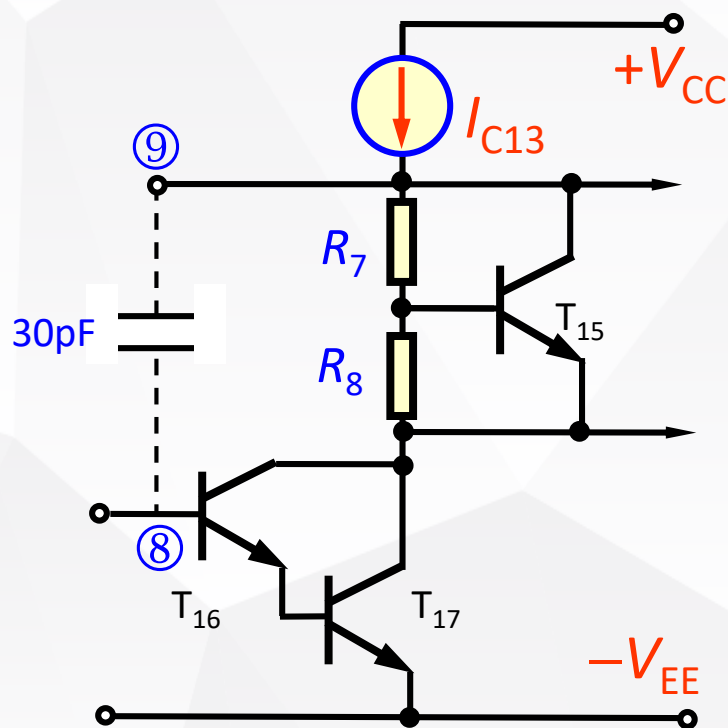
### 3) 中间级

输入来自  $T_4$  和  $T_6$  集电极；

输出接在输出级的两个互补对称放大管的基极。

中间级  $T_{16}$ 、 $T_{17}$  组成复合管， $T_{13}$  作为其有源负载。

8、9 两端外接  $30\text{pF}$  校正电容防止产生自激振荡。



中间级示意图



## 05 集成运算放大电路

### 4. 输出级

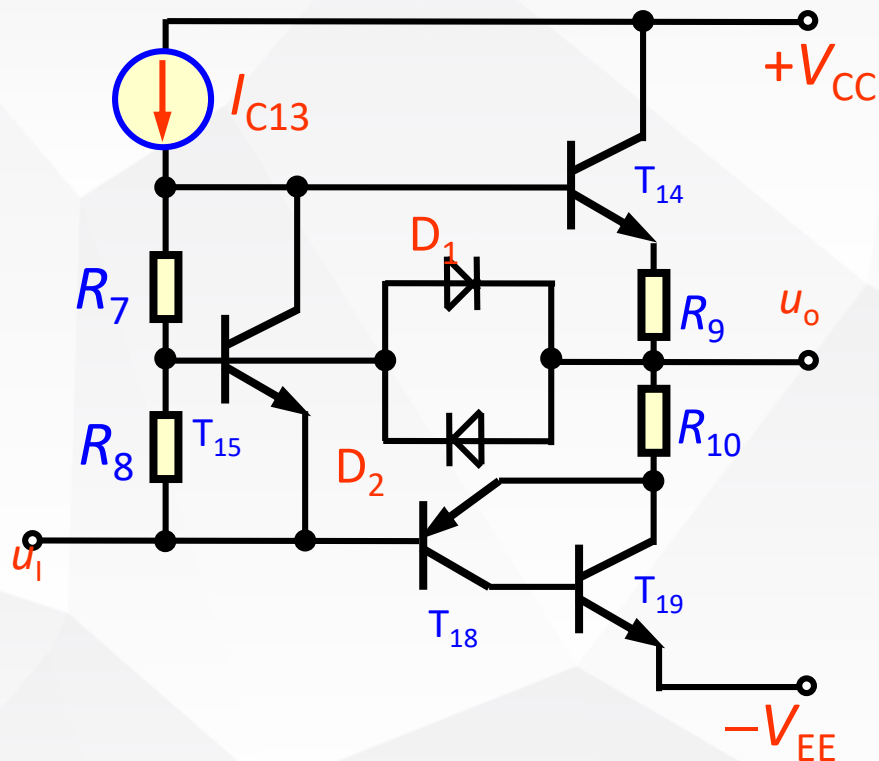
$T_{14}$ 、 $T_{18}$ 、 $T_{19}$  准互补对称电路；

$D_1$ 、 $D_2$ 、 $R_9$ 、 $R_{10}$   
过载保护电路；

$T_{15}$ 、 $R_7$ 、 $R_8$  为功率管提供静态基流。

$$U_{CE15} \approx \frac{R_7 + R_8}{R_8} U_{BE15} \approx \left(1 + \frac{R_7}{R_8}\right) \times 0.7 \text{ V}$$

F007 输出级原理电路



调节  $R_7$ 、 $R_8$  阻值可调节两个功率管之间的电压差。这种电路称为  $U_{BE}$  倍增电路。

### 5.6 集成运放在信号放大及运算方面的应用

#### 一、电子信息系统组成



## 05 集成运算放大电路

### 二、理想运放

#### 1. 性能指标

开环差模电压增益  $A_{od} = \infty$ ;

差模输入电阻  $r_{id} = \infty$ ;

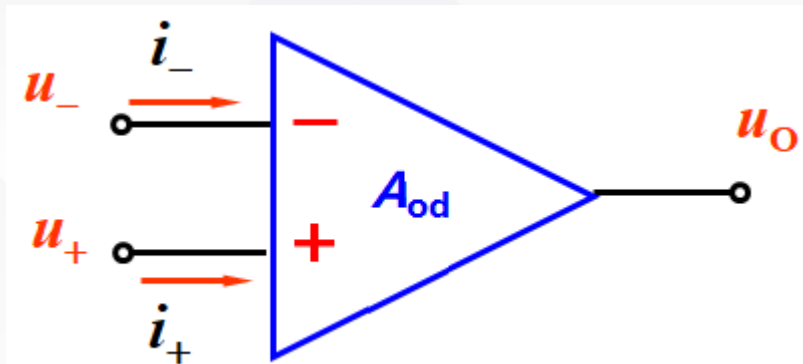
输出电阻  $r_o = 0$ ;

共模抑制比  $K_{CMR} = \infty$ ;

$U_{IO} = 0$ 、 $I_{IO} = 0$ 、 $\alpha_{UO} = \alpha_{IO} = 0$ ;

输入偏置电流  $I_{IB} = 0$ ;

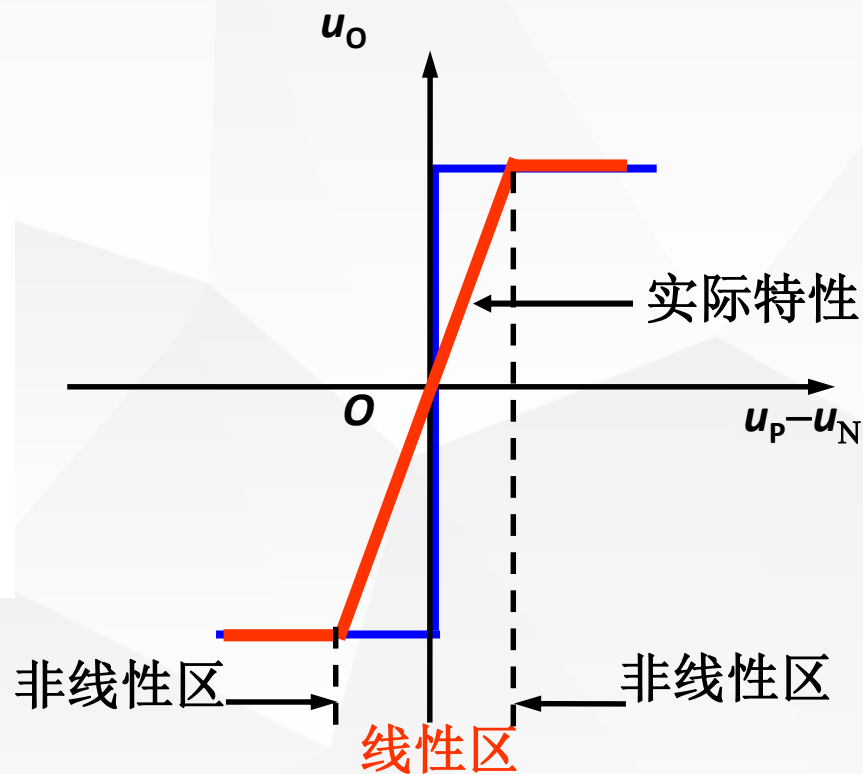
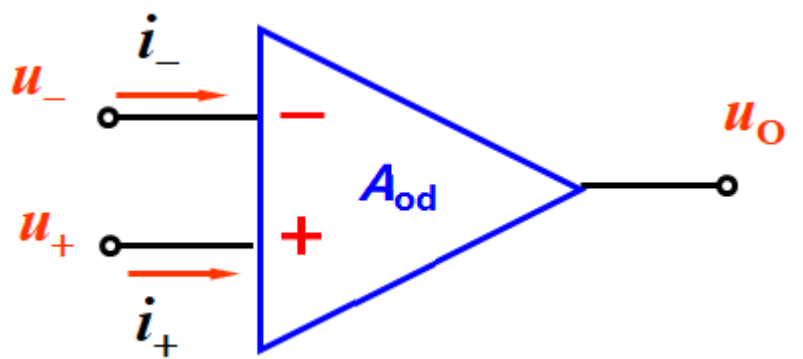
- 3 dB 带宽  $f_H = \infty$



# 05 集成运算放大电路

## 二、理想运放

### 2. 工作区：线性区和非线性区



## 05 集成运算放大电路

### 3. 线性区：虚短虚断

输出电压与其两个输入端的电压之间存在线性放大关系：

$$u_o = A_{od}(u_+ - u_-)$$

理想运放工作在线性区特点：

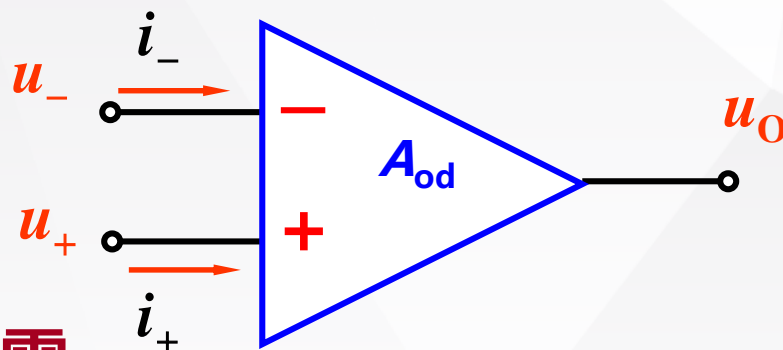
1) 理想运放的差模输入电压等于零

$$(u_+ - u_-) = \frac{u_o}{A_{od}} = 0 \quad \text{即} \quad u_+ = u_- \quad \text{—— “虚短”}$$

2) 理想运放的输入电流等于零

由于  $r_{id} = \infty$ ，两个输入端均没有电流，即

$$i_+ = i_- = 0 \quad \text{—— “虚断”}$$



## 05 集成运算放大电路

### 4. 非线性区

#### 1) $u_o$ 的值只有两种可能

当  $u_p > u_N$  时,  $u_o = + U_{OM}$

当  $u_p < u_N$  时,  $u_o = - U_{OM}$

在非线性区内,  $(u_p - u_N)$  可能很大, 即  $u_p \neq u_N$ 。 “虚地” 不存在

#### 2) 理想运放的输入电流等于零

$$i_P = i_N = 0$$

### 三、基本运算电路

**集成运放的应用首先表现在它能够构成各种运算电路上。**

**在运算电路中，集成运放必须工作在线性区，在深度负反馈条件下，利用反馈网络能够实现各种数学运算。**

**基本运算电路包括：**

**比例、加减、积分、微分、对数、指数**

## 05 集成运算放大电路

### 1. 比例运算电路

#### 1) 反相比例运算电路

由于“虚断”， $i_+ = 0$ ， $u_+ = 0$ ；

由于“虚短”， $u_- = u_+ = 0$

—— “虚地”

由  $i_1 = i_F$ ，得

$$\frac{u_I - u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_o}{R_F}$$

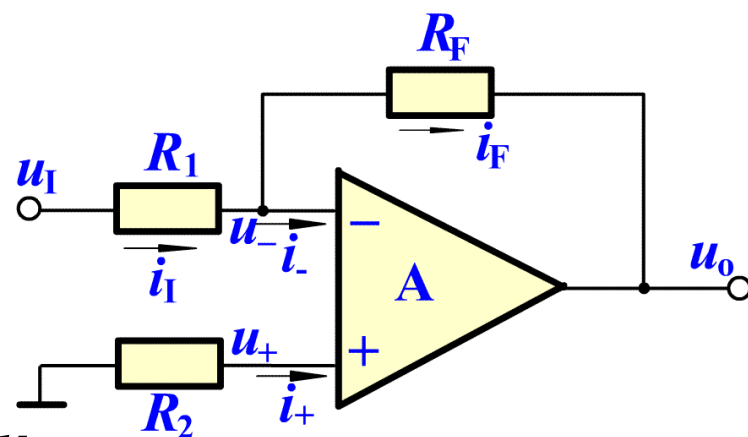
$$u_o = -\frac{R_F}{R_1} u_I$$

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_I} = -\frac{R_F}{R_1}$$

$$* R_2 = R_1 // R_F$$

反相输入端“虚地”，电路的输入电阻为  $R_{if} = R_1$

输出电阻为  $R_{of} = 0$





## 05 集成运算放大电路

### 2) T型网络反相比例运算电路

电阻  $R_2$ 、 $R_3$  和  $R_4$  构成T形网络电路

节点N的电流方程为

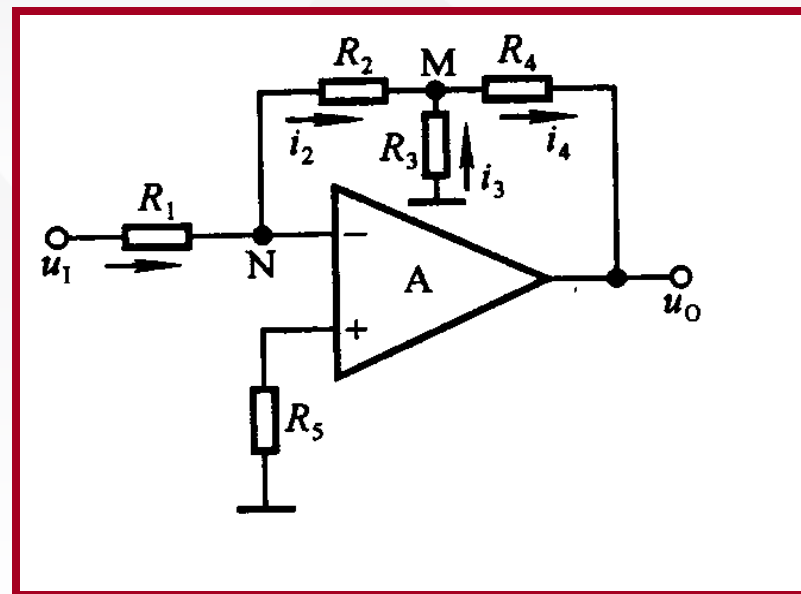
$$\frac{u_I}{R_1} = \frac{-u_M}{R_2} = i_2$$

所以 
$$i_3 = -\frac{u_M}{R_3} = -\frac{R_2}{R_1 R_3} u_I$$

$$i_4 = i_2 + i_3$$

输出电压 
$$u_O = -i_2 R_2 - i_4 R_4$$

将各电流代入上式 
$$u_O = -\frac{R_2 + R_4}{R_1} \left(1 + \frac{R_2 // R_4}{R_3}\right) u_I$$



T型网络反相比例运算电路

## 05 集成运算放大电路

### 3) 同相比例运算电路

根据“虚短”和“虚断”的特点，可知

$$i_+ = i_- = 0;$$

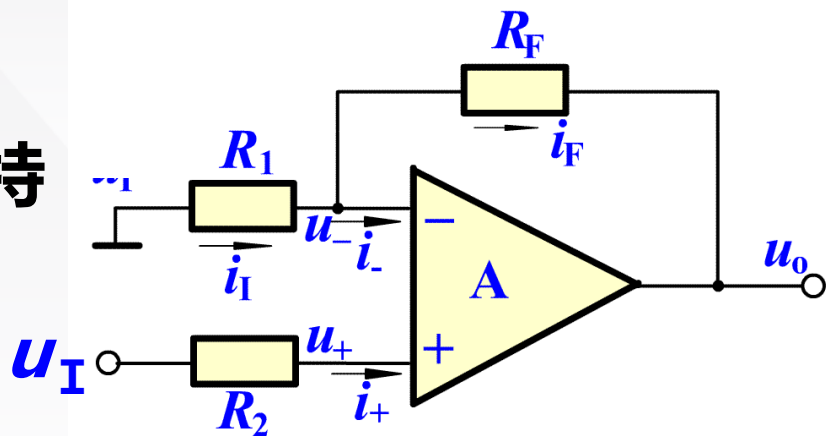
所以 
$$u_- = \frac{R_1}{R_1 + R_F} u_O$$

又  $u_- = u_+ = u_I$  所以

$$\frac{R_1}{R_1 + R_F} u_O = u_I$$

得: 
$$u_O = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_I$$

$$A_{uf} = \frac{u_O}{u_I} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$



$$*R_2 = R_1 // R_F$$

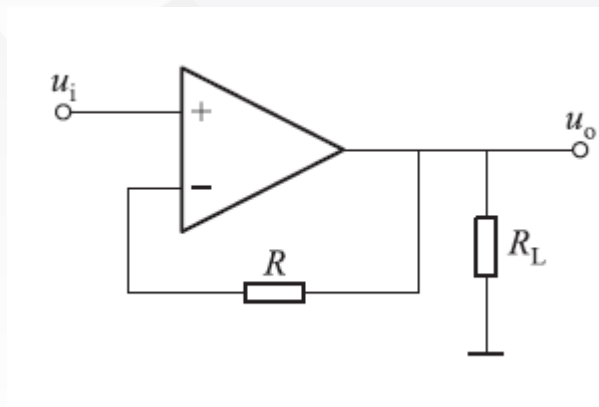
## 05 集成运算放大电路

### 4) 电压跟随器

当  $R_F = 0$  或  $R_1 = \infty$  时

$$u_o = u_i$$

$$A_{uf} = 1$$



#### 计算方法小结

1. 列出关键结点的电流方程，如N点和P点。
2. 根据虚短(地)、虚断的原则，进行整理。

## 05 集成运算放大电路

### 5) 差分比例运算电路

在理想条件下，由于“虚断”， $i_+ = i_- = 0$

$$u_+ = \frac{R'_F}{R'_1 + R'_F} u'_I$$

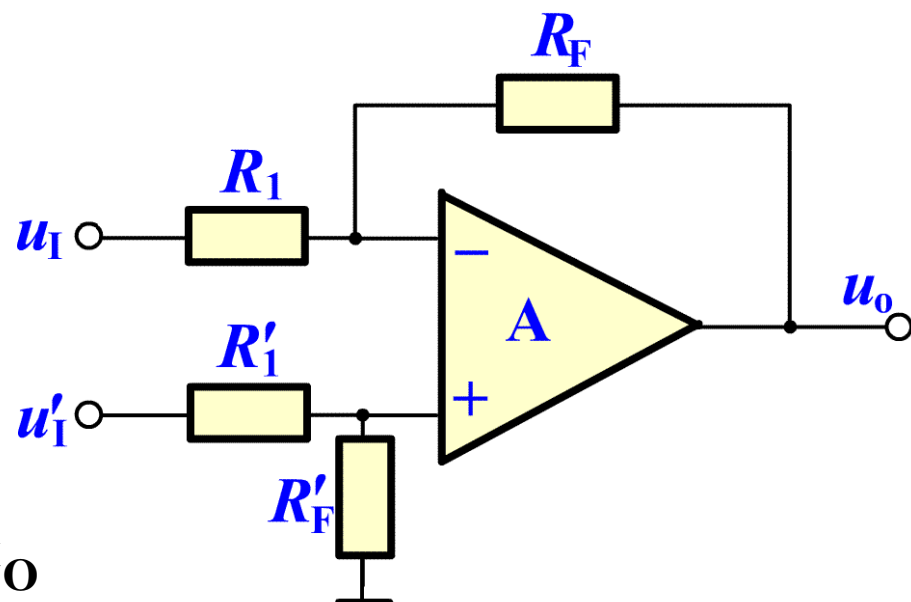
$$u_- = \frac{R_F}{R_1 + R_F} u_I + \frac{R_1}{R_1 + R_F} u_O$$

由于“虚短”， $u_+ = u_-$ ，所以：

$$\frac{R_F}{R_1 + R_F} u_I + \frac{R_1}{R_1 + R_F} u_O = \frac{R'_F}{R'_1 + R'_F} u'_I$$

电压放大倍数

$$A_{uf} = \frac{u_O}{u_I - u'_I} = -\frac{R_F}{R_1}$$



差分比例运算电路

差模输入电阻

$$R_{if} = 2R_1$$

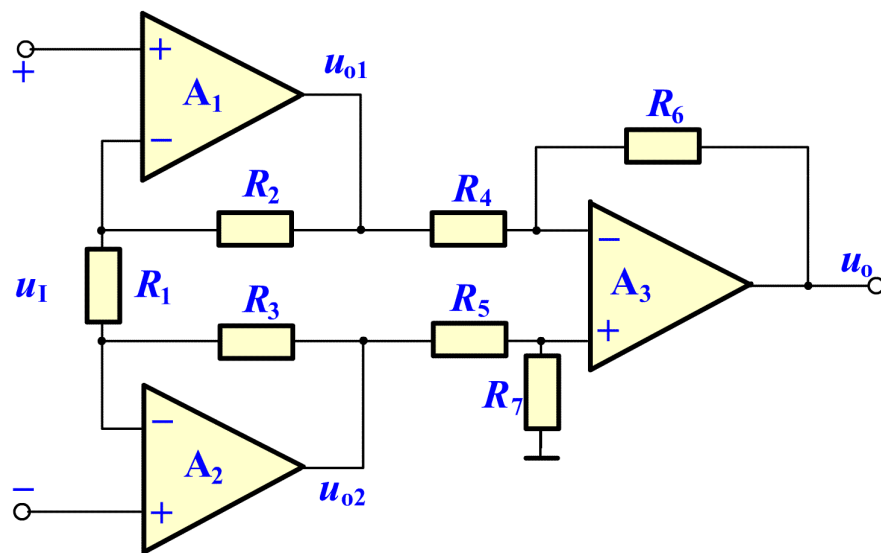
## 05 集成运算放大电路

### 例 比例电路应用实例

两个放大级。结构对称的  $A_1$ 、 $A_2$  组成第一级，互相抵消漂移和失调。

$A_3$  组成差分放大级，将差分输入转换为单端输出。

当加入差模信号  $u_i$  时，若  $R_2 = R_3$ ，则  $R_1$  的中点为交流地电位， $A_1$ 、 $A_2$  的工作情况将如下页图中所示。

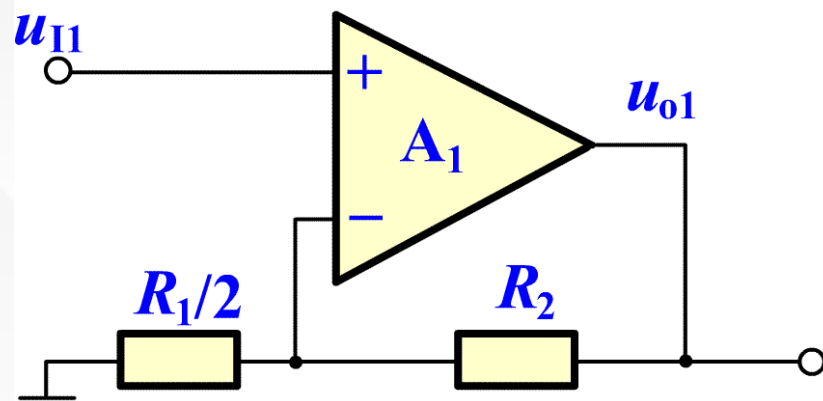


三运放数据放大器原理图

## 05 集成运算放大电路

由同相比例运放的电压放大倍数公式，得

$$\frac{u_{O1}}{u_{I1}} = 1 + \frac{R_2}{R_1/2} = 1 + \frac{2R_2}{R_1}$$



则  $u_{O1} = (1 + \frac{2R_2}{R_1})u_{I1}$

同理  $u_{O2} = (1 + \frac{2R_2}{R_1})u_{I2} = (1 + \frac{2R_2}{R_1})u_{I2}$

所以  $u_{O1} - u_{O2} = (1 + \frac{2R_2}{R_1})(u_{I1} - u_{I2}) = (1 + \frac{2R_2}{R_1})u_I$

则第一级电压放大倍数为：

$$\frac{u_{O1} - u_{O2}}{u_I} = 1 + \frac{2R_2}{R_1}$$

改变  $R_1$ ，即可调节放大倍数。

$R_1$  开路时，得到单位增益。

## 05 集成运算放大电路

$A_3$  为差分比例放大电路。

当  $R_4 = R_5$ ,  $R_6 = R_7$  时, 得第二级的电压放大倍数为

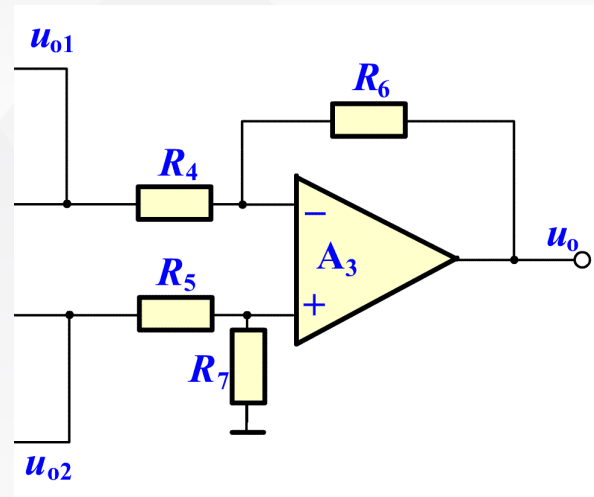
$$\frac{u_O}{u_{O1} - u_{O2}} = -\frac{R_6}{R_4}$$

所以总的电压放大倍数为

$$A_u = \frac{u_o}{u_I} = \frac{u_o}{u_{O1} - u_{O2}} \cdot \frac{u_{O1} - u_{O2}}{u_I} = -\frac{R_6}{R_4} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)$$

在电路参数对称的条件下, 差模输入电阻等于两个同相比例电路的输入电阻之和

$$R_i = 2\left(1 + \frac{R_1}{R_1 + 2R_2} A_{od}\right) R_{id}$$



## 05 集成运算放大电路

### 2. 加减运算电路

#### 1) 反相求和运算电路

由于“虚断”， $i_- = 0$

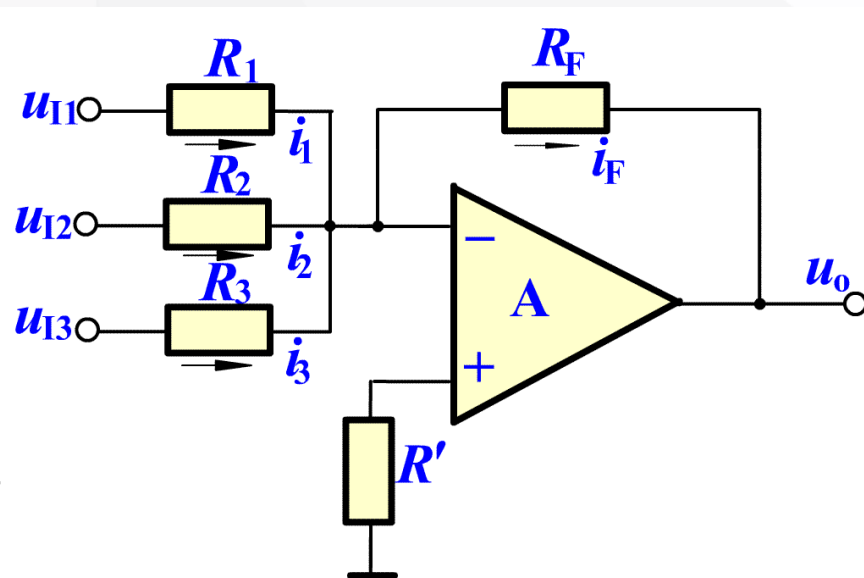
所以： $i_1 + i_2 + i_3 = i_F$

又因“虚地”， $u_- = 0$

$$\text{所以：} \frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} + \frac{u_{I3}}{R_3} = -\frac{u_O}{R_F}$$

$$u_O = -\left(\frac{R_F}{R_1} u_{I1} + \frac{R_F}{R_2} u_{I2} + \frac{R_F}{R_3} u_{I3}\right) \quad R' = R_1 // R_2 // R_3 // R_F$$

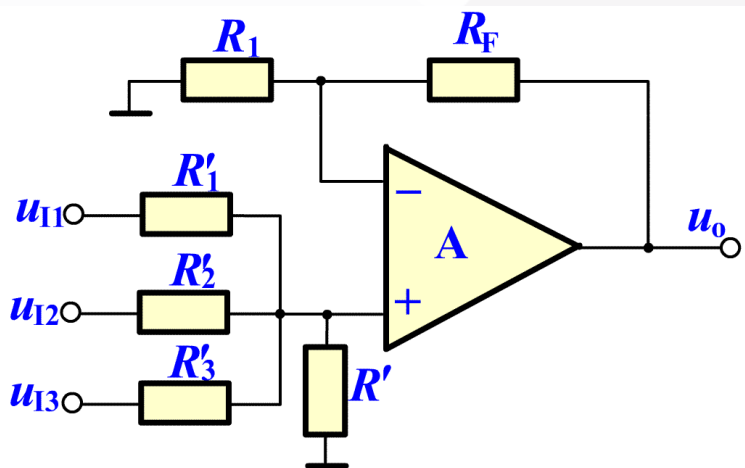
$$\text{当 } R_1 = R_2 = R_3 = R \text{ 时, } u_O = -\frac{R_F}{R_1} (u_{I1} + u_{I2} + u_{I3})$$





## 05 集成运算放大电路

### 2) 同相求和运算电路



由于“虚断”， $i_+ = 0$ ，所以：

$$\frac{u_{I1} - u_+}{R'_1} + \frac{u_{I2} - u_+}{R'_2} + \frac{u_{I3} - u_+}{R'_3} = \frac{u_+}{R'}$$

$$u_+ = \frac{R_+}{R'_1} u_{I1} + \frac{R_+}{R'_2} u_{I2} + \frac{R_+}{R'_3} u_{I3}$$

其中： $R_+ = R'_1 // R'_2 // R'_3 // R'$       由于“虚短”， $u_+ = u_-$

解得：

$$\begin{aligned} u_O &= \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_- = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_+ \\ &= \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \left( \frac{R_+}{R'_1} u_{I1} + \frac{R_+}{R'_2} u_{I2} + \frac{R_+}{R'_3} u_{I3} \right) \end{aligned}$$

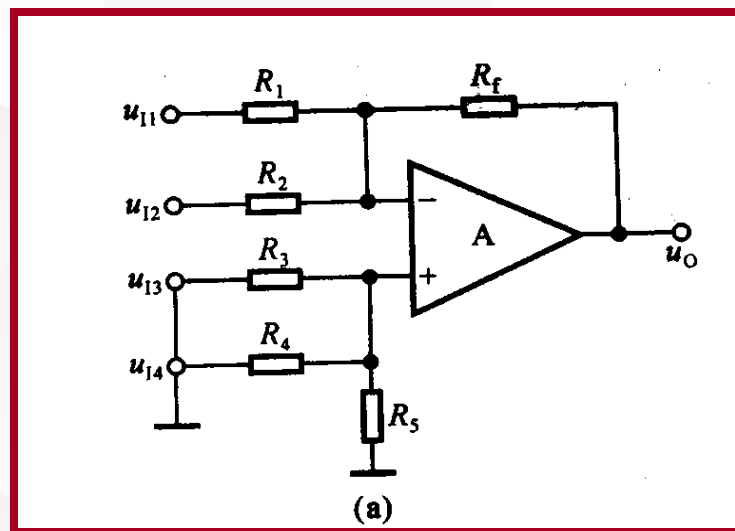
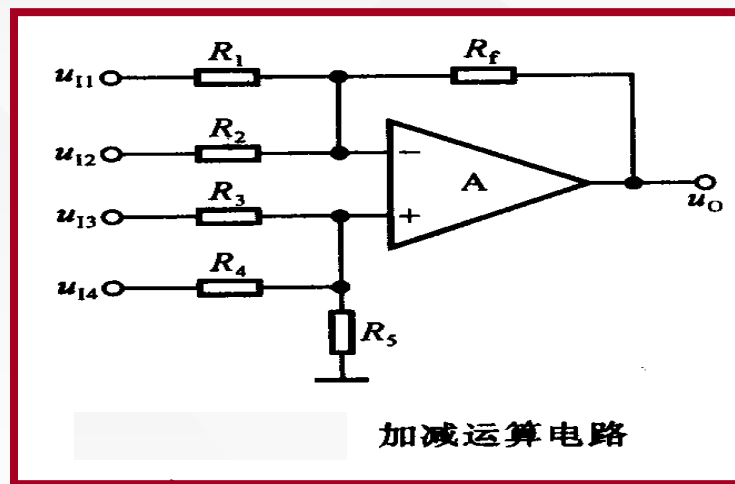
## 05 集成运算放大电路

### 3) 加减混合运算电路

利用叠加原理求解

图(a)为反相求和运算电路

$$u_{O1} = -\left(\frac{R_F}{R_1} u_{I1} + \frac{R_F}{R_2} u_{I2}\right)$$



## 05 集成运算放大电路

图(b)为同相求和运算电路

若 $R_1//R_2//R_f = R_3//R_4//R_5$

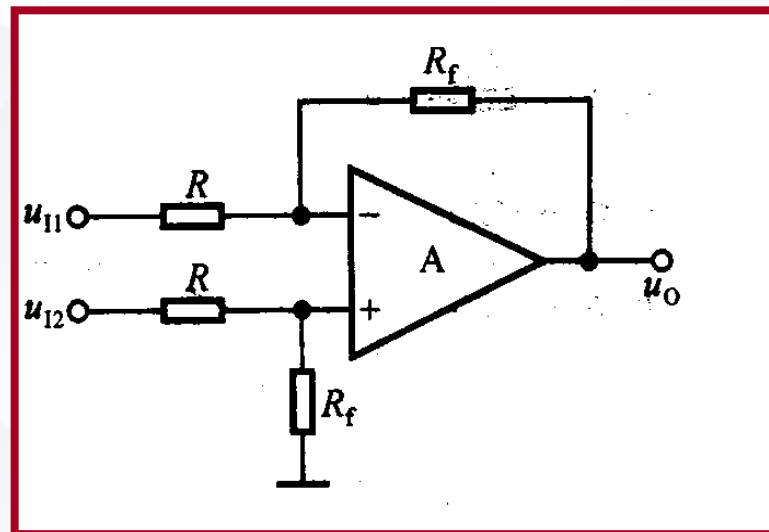
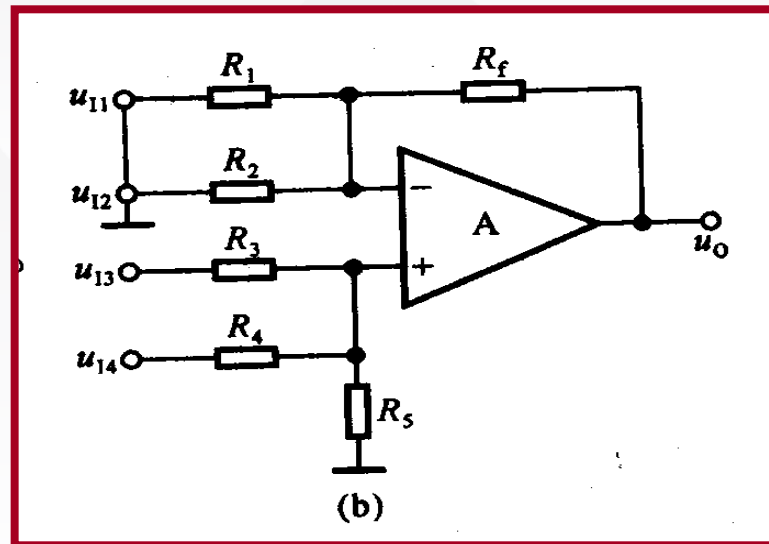
$$u_{O2} = \left( \frac{R_F}{R_3} u_{I3} + \frac{R_F}{R_4} u_{I4} \right)$$

$$u_O = R_F \left( \frac{u_{I3}}{R_3} + \frac{u_{I4}}{R_4} - \frac{u_{I1}}{R_1} - \frac{u_{I2}}{R_2} \right)$$

若电路只有二个输入，且参数对称，电路如图

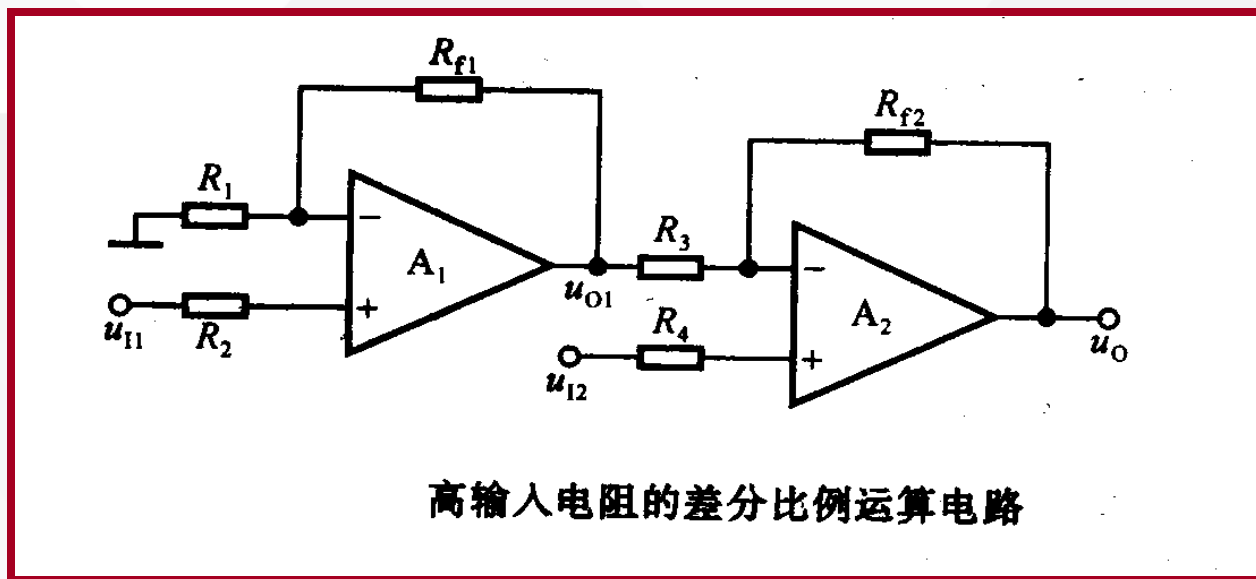
上式则为 
$$u_O = \frac{R_F}{R} (u_{I2} - u_{I1})$$

电路实现了对输入差模信号的比例运算



## 05 集成运算放大电路

### 改进电路图：高输入电阻差分比例运算电路



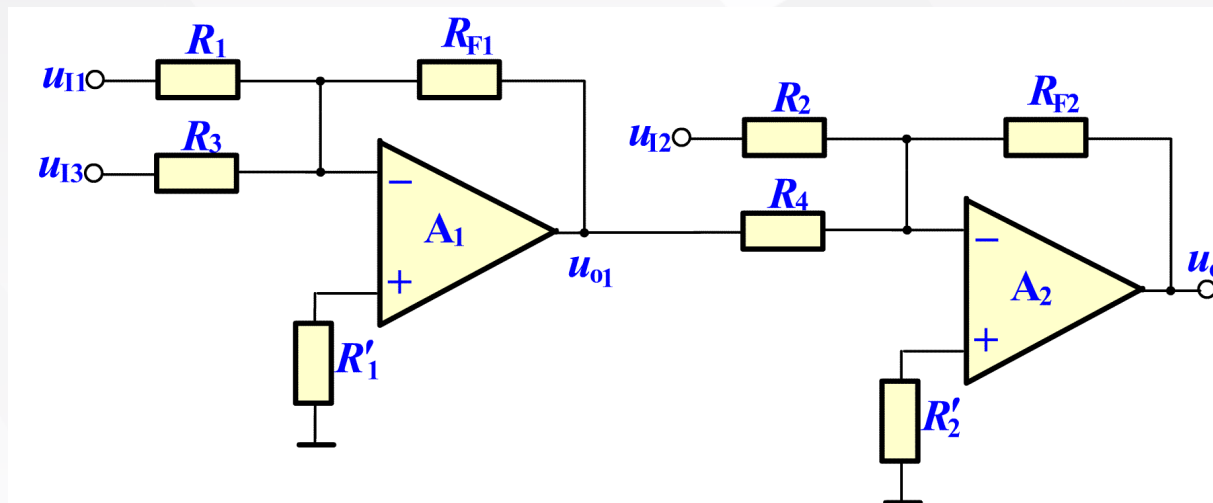
$$u_{o1} = \left(1 + \frac{R_{F1}}{R_I}\right) u_{I1} \quad u_o = -\frac{R_{F2}}{R_3} u_{o1} + \left(1 + \frac{R_{F2}}{R_3}\right) u_{I2}$$

$$\text{若 } R_1 = R_{F2}, R_3 = R_{F1} \quad u_o = \left(1 + \frac{R_{F2}}{R_3}\right) (u_{I2} - u_{I1})$$

## 05 集成运算放大电路

例：用集成运放实现以下运算关系

$$u_O = 0.2u_{I1} - 10u_{I2} + 1.3u_{I3}$$



**解：**  $u_{O1} = -\left(\frac{R_{F1}}{R_1}u_{I1} + \frac{R_{F1}}{R_3}u_{I3}\right) = -(0.2u_{I1} + 1.3u_{I3})$

$$u_O = -\left(\frac{R_{F2}}{R_2}u_{O1} + \frac{R_{F2}}{R_4}u_{I2}\right) = -(u_{O1} + 10u_{I2})$$

## 05 集成运算放大电路

$$u_{O1} = -\left(\frac{R_{F1}}{R_1} u_{I1} + \frac{R_{F1}}{R_3} u_{I3}\right) = -(0.2u_{I1} + 1.3u_{I3})$$

$$u_O = -\left(\frac{R_{F2}}{R_4} u_{O1} + \frac{R_{F2}}{R_2} u_{I2}\right) = -(u_{O1} + 10u_{I2})$$

比较得：

$$\frac{R_{F1}}{R_1} = 0.2, \quad \frac{R_{F1}}{R_3} = 1.3, \quad \frac{R_{F2}}{R_4} = 1, \quad \frac{R_{F2}}{R_2} = 10$$

选  $R_{F1} = 20 \text{ k}\Omega$ , 得:  $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 15.4 \text{ k}\Omega$

选  $R_{F2} = 100 \text{ k}\Omega$ , 得:  $R_4 = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$

$$R'_1 = R_1 // R_3 // R_{F1} = 8 \text{ k}\Omega$$

$$R'_2 = R_2 // R_4 // R_{F2} = 8.3 \text{ k}\Omega$$

## 05 集成运算放大电路

### 3. 积分运算电路和微分运算电路

#### 1) 积分运算电路

由于“虚地”， $u_- = 0$ ，故

$$u_O = -u_C$$

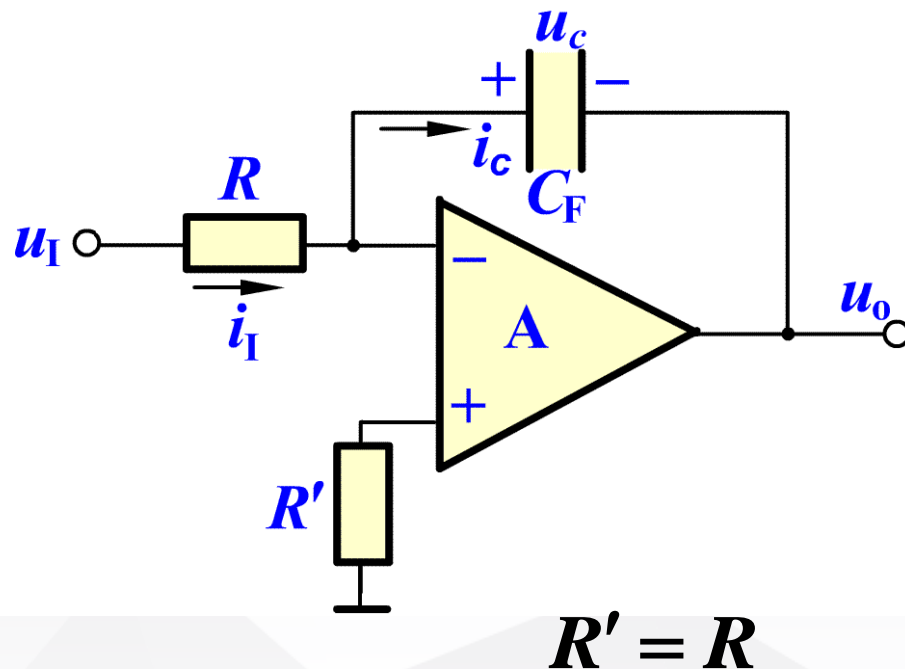
由于“虚断”， $i_i = i_C$ ，故

$$u_i = i_i R = i_C R$$

$$\text{得: } u_O = -u_C = -\frac{1}{C} \int i_C dt = -\frac{1}{RC} \int u_i dt$$

$$\tau = RC$$

——积分时间常数



## 05 集成运算放大电路

### 2) 微分运算电路

由于“虚断”， $i_- = 0$ ，故  $i_C = i_R$

又由于“虚地”， $u_+ = u_- = 0$

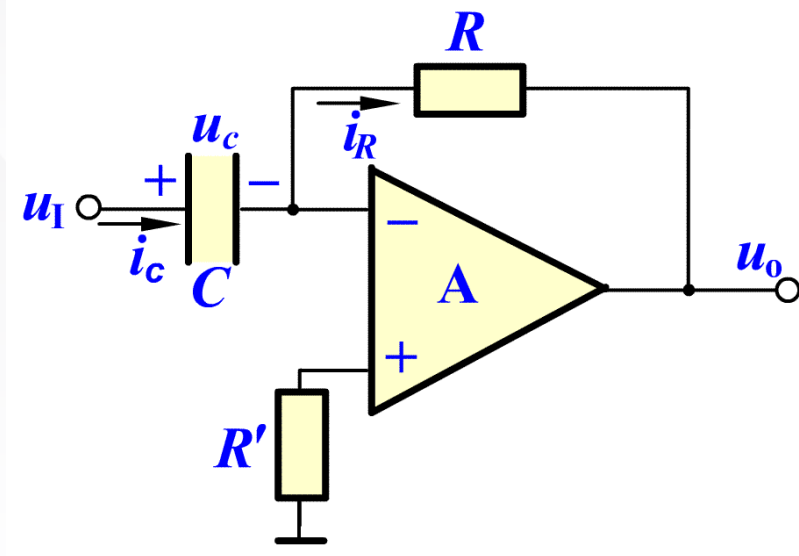
$$u_O = -i_R R = -i_C R = -RC \frac{du_C}{dt}$$

可见，输出电压正比于输入电压对时间的微分。

**微分电路的作用：**

微分电路的作用有移相功能。

实现波形变换，如将方波变成双向尖顶波。



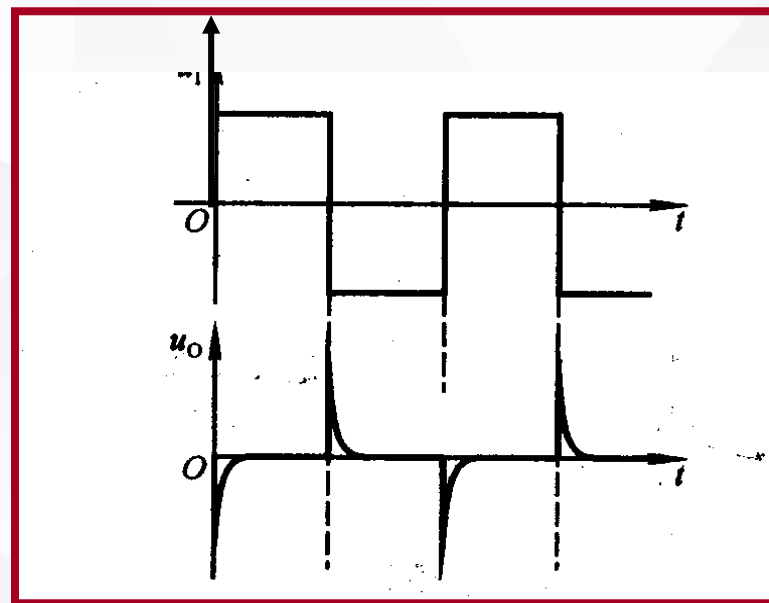
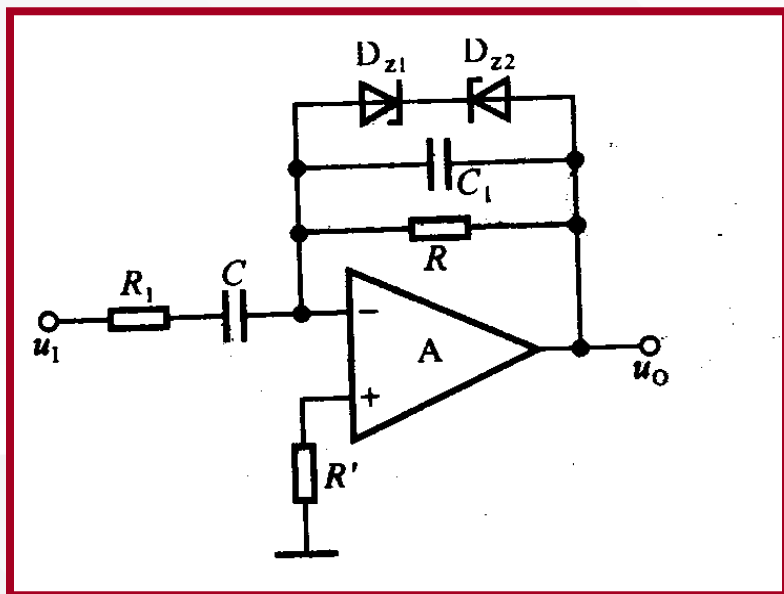
基本微分电路



## 05 集成运算放大电路

### 实用微分运算电路

基本微分运算电路在输入信号时，集成运放内部的放大管会进入饱和或截止状态，以至于即使信号消失，管子还不能脱离原状态回到放大区，出现**阻塞现象**。

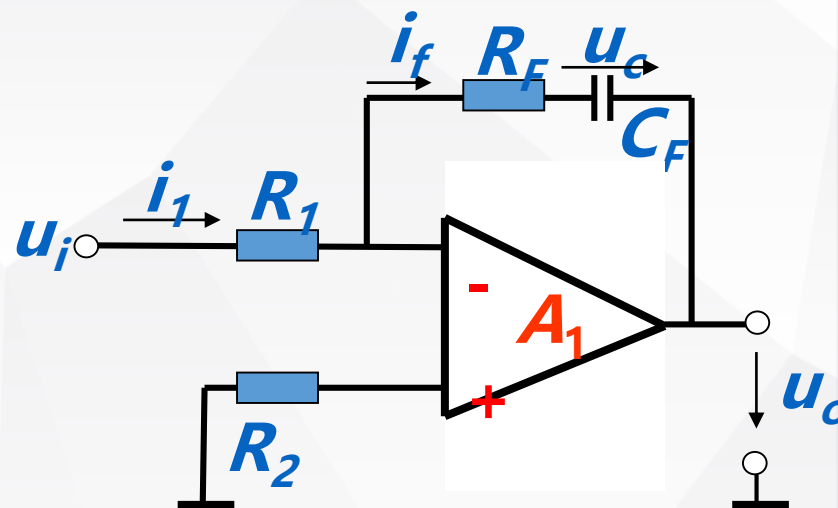


## 05 集成运算放大电路

### 比例积分运算电路-PI调节器

$$i_f = i_1 = \frac{u_i}{R_1}$$
$$u_c = \frac{1}{C_F} \int i_f dt = \frac{1}{R_1 C_F} \int u_i dt$$

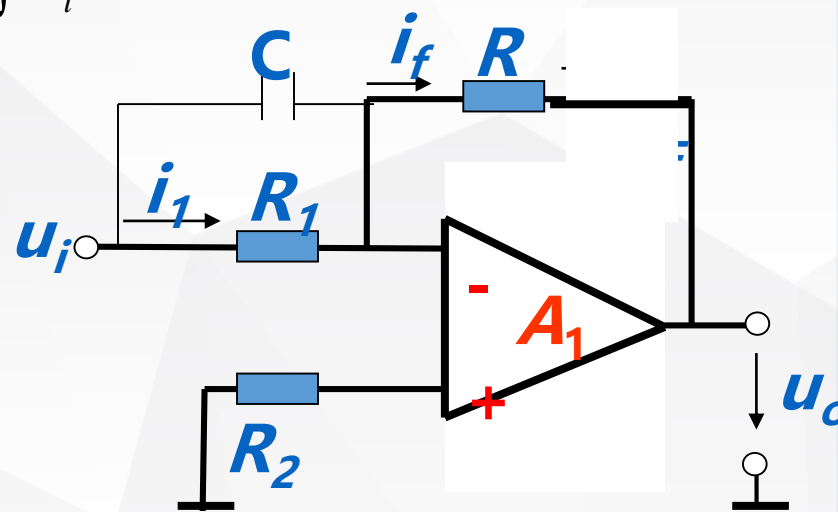
$$u_o = -i_f R_F - u_c = -\frac{R_F}{R_1} u_i - \frac{1}{R_1 C_F} \int u_i dt$$



PI调节器

### 比例微分运算电路-PD调节器

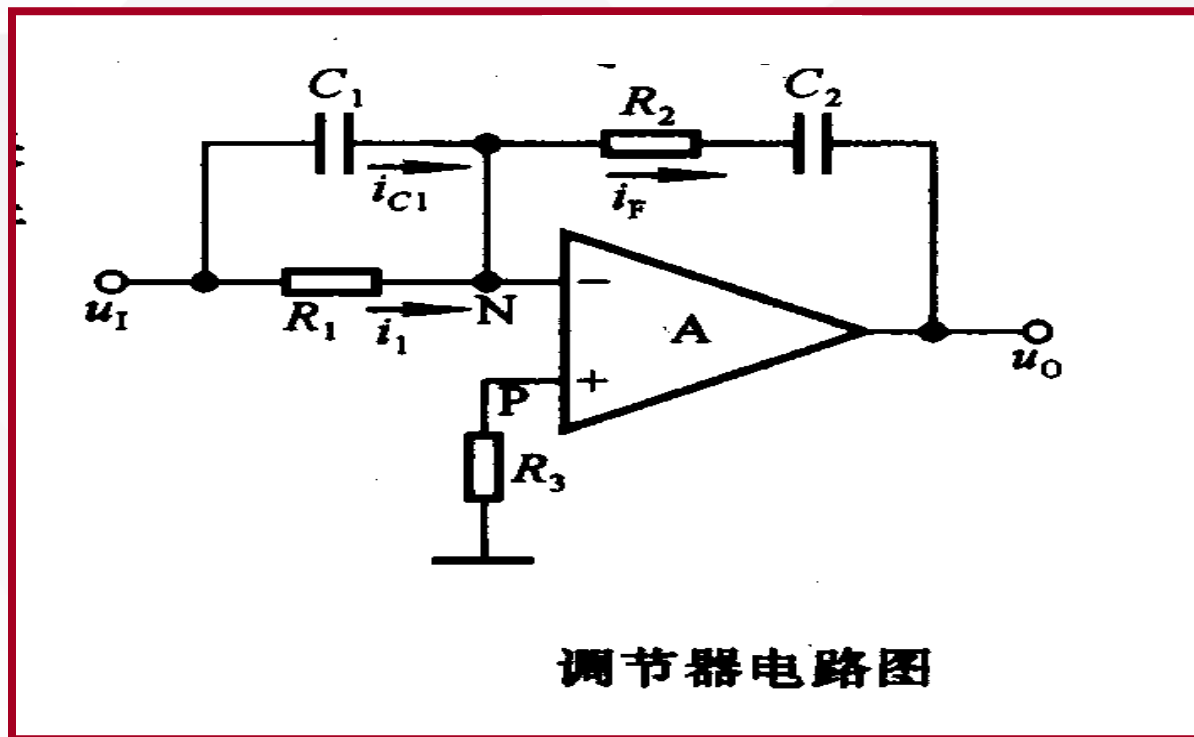
$$u_o = -\left(\frac{R}{R_1} u_i + RC \frac{du_i}{dt}\right)$$



PD调节器

## 05 集成运算放大电路

### 比例、积分、微分运算电路---PID电路



$$u_o = -\left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{C_1}{C_2}\right)u_I - R_2C_1 \frac{du_I}{dt} - \frac{1}{R_1C_2} \int u_I dt$$

## 05 集成运算放大电路

### 4.对数运算电路和指数运算电路

#### 1) 对数运算电路

由二极管方程知  $i_D = I_S (e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1)$

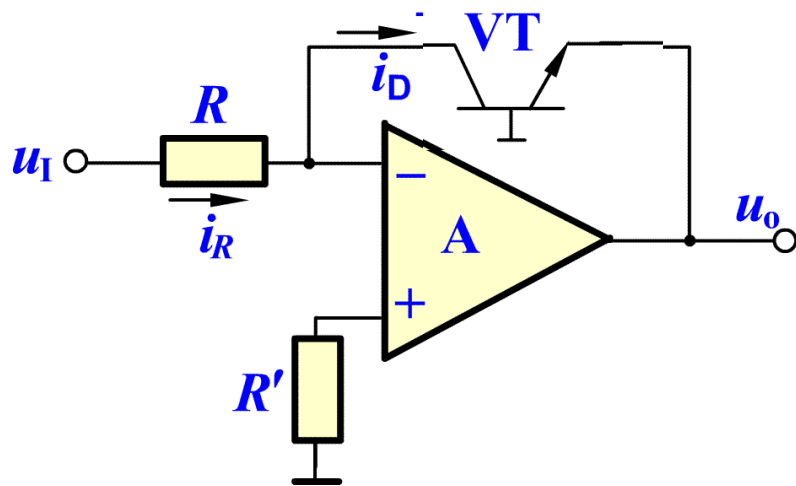
当  $u_D \gg U_T$  时,  $i_D \approx I_S e^{\frac{u_D}{U_T}}$

或:  $u_D \approx U_T \ln \frac{i_D}{I_S}$

利用“虚地”原理, 可得:

$$u_O = -u_D \approx -U_T \ln \frac{i_D}{I_S} = -U_T \ln \frac{i_R}{I_S} = -U_T \ln \frac{u_I}{I_S R}$$

用三极管代替二极管可获得较大的工作范围。



## 05 集成运算放大电路

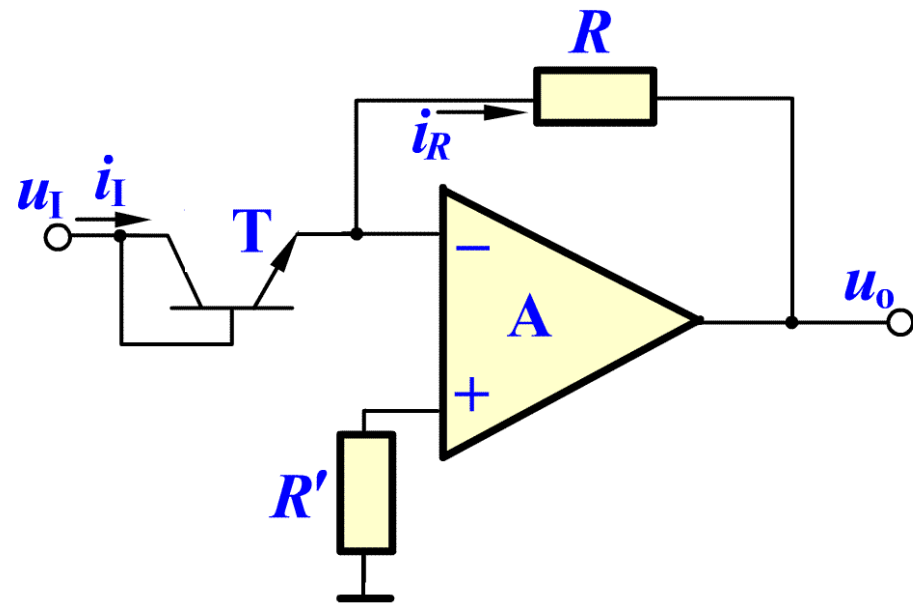
### 2) 指数运算电路

当  $u_I > 0$  时, 根据集成运放反相输入端“虚地”及“虚断”的特点, 可得:

$$i_I \approx I_S e^{\frac{u_{BE}}{U_T}} = I_S e^{\frac{u_I}{U_T}}$$

$$\text{所以: } u_O = -i_R R = -i_I R = -I_S R e^{\frac{u_I}{U_T}}$$

可见, 输出电压正比于输入电压的指数。



指数运算电路