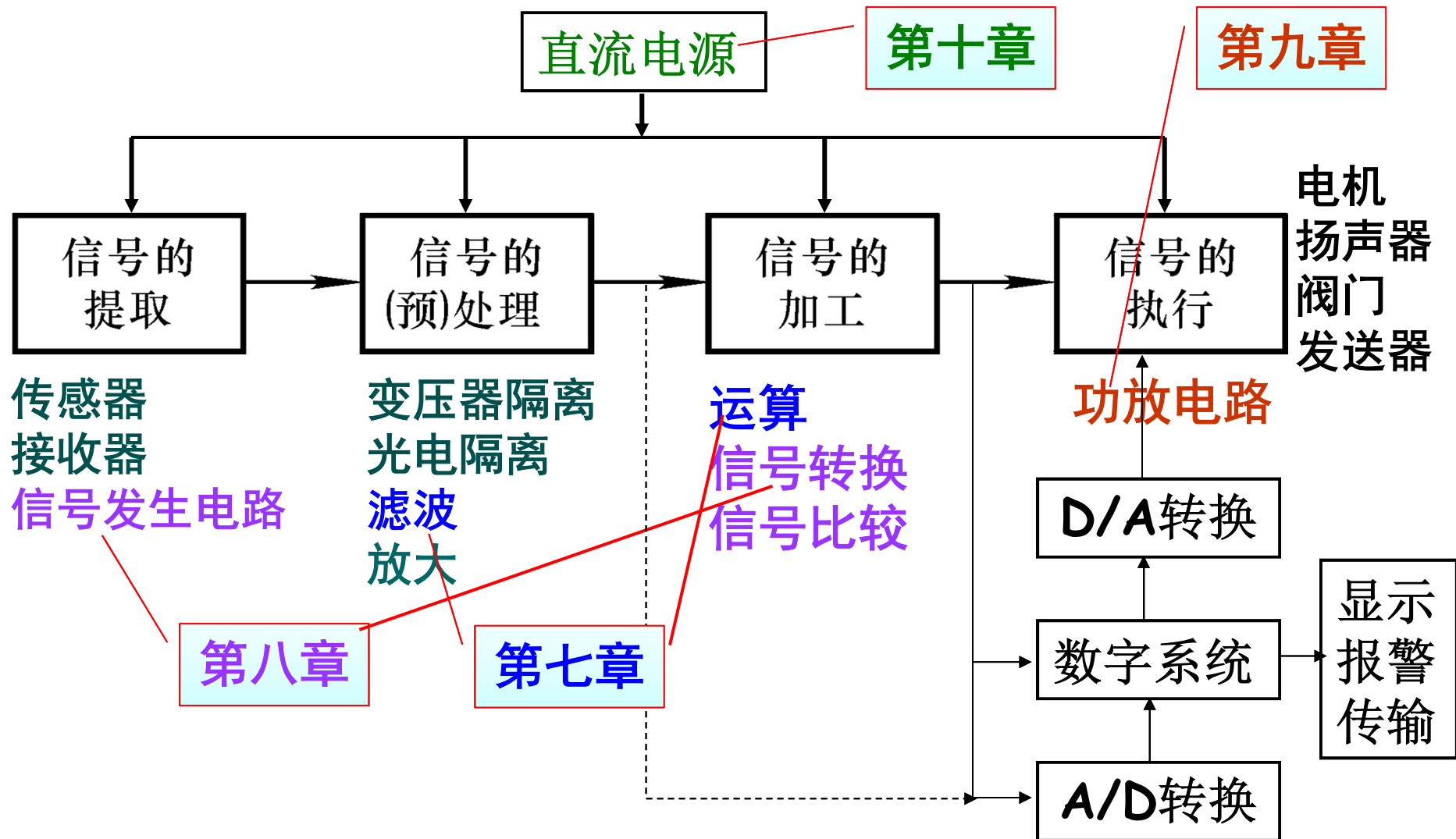


# Construction of Electronic System





# 第七章 信号的运算和处理

7.1 概述

7.2 基本运算电路

7.3 模拟乘法器在运算电路中的应用

7.4 有源滤波电路



## 7.1 概述

### 一、理想运放的性能指标

$$A_{od} \rightarrow \infty$$

$$A_{oc} \rightarrow 0$$

$$K_{CMR} \rightarrow \infty$$

$$R_{id} \rightarrow \infty$$

$$R_{od} \rightarrow 0$$

$$SR \rightarrow \infty$$

所有失调=0

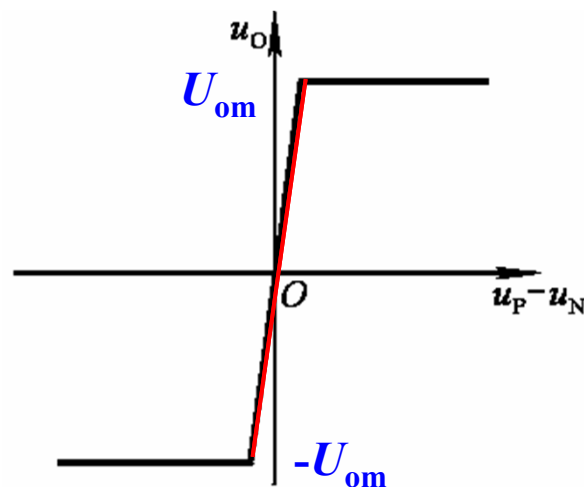
### 二、理想运放的两个工作区

#### 1. 线性工作区：

集成运放引入了负反馈

理想集成运放引入的负反馈必为深度负反馈

利用‘虚短’、‘虚断’分析电路





## 7.1 概述

### 2. 非线性工作区：开环或者只引入了正反馈

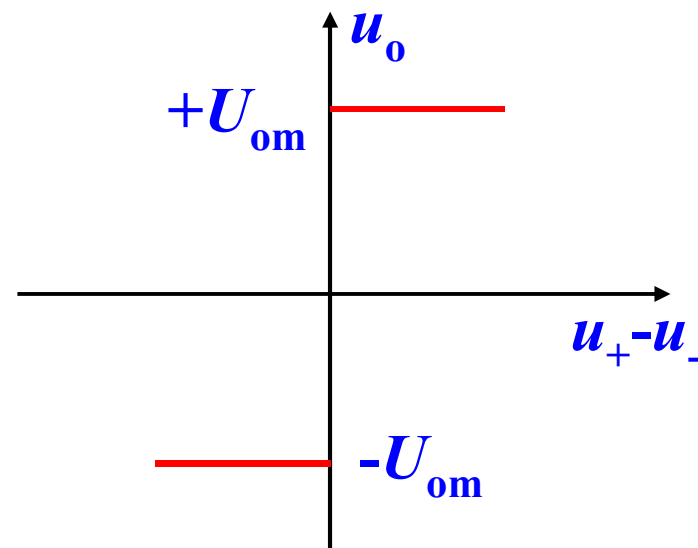
- $u_O = A_{od}(u_+ - u_-) \quad A_{od} \rightarrow \infty$

$$u_+ > u_- \text{ 时 } u_O = +U_{om}$$

$$u_+ < u_- \text{ 时 } u_O = -U_{om}$$

- $R_{id} \rightarrow \infty \quad i_+ = i_- \approx 0$

虚断



集成运放工作非线性区具有‘虚断’特点



## 7.1 概述

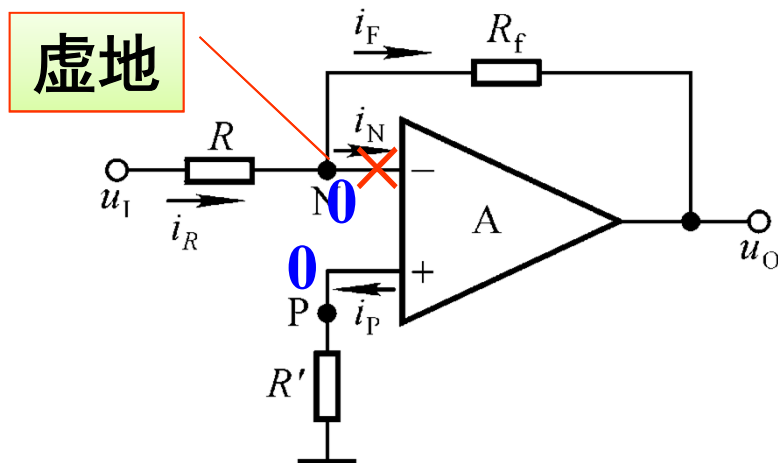
### 三、信号运算电路概述

1. 电路组成：运放引入电压负反馈
2. 电路功能：实现数学运算
3. 运算关系： $u_O = f(u_I)$
4. 基本分析方法：“虚短”和“虚断”
5. 学习要领：
  - ① 识别电路，掌握运算关系式的求解方法；
  - ② 根据设计要求选择电路，掌握电路性能特点。



## 7.2 比例运算电路

### 一、反相比例运算电路 (Inverting amplifier)



2. 利用虚短、虚断  
分析运算关系

$$A_{uf} = \frac{u_O}{u_I} = -\frac{R_f}{R}$$

#### 1. 平衡电阻 $R'$

静态时  $u_I=0$ ,  $u_O=0$

$R_n=R//R_f$ ,  $R_p=R'$

令  $R'=R//R_f$

$R'$ 称为平衡电阻

#### 3. $R_i$ 、 $R_o$

$R_i=R$

$R_o=0$

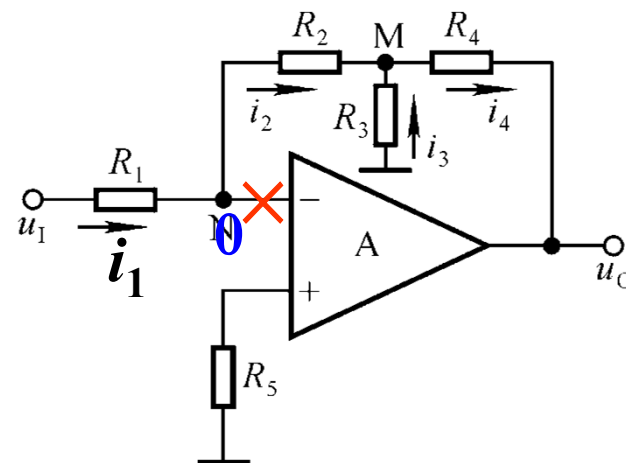
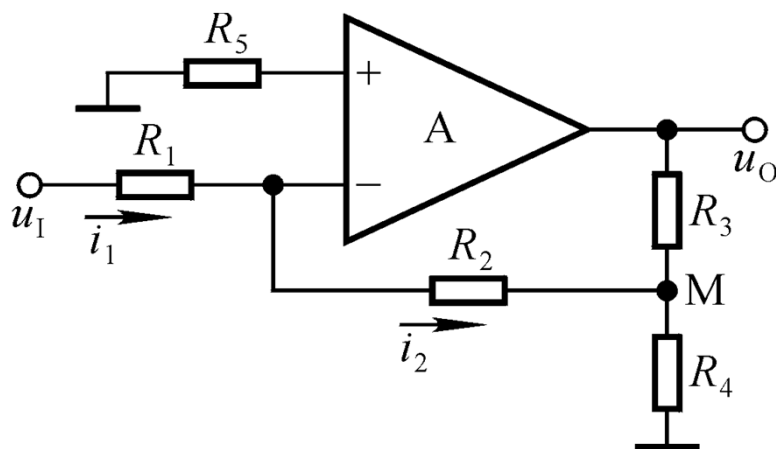
#### 4. 集成运放的共模输入电压 $u_{Ic}$

$u_N=u_P=0$ ,  $u_{Ic}=0$

## 5. 优缺点

- $R_o=0$ , 带负载能力强;
- $U_{Ic}=0$ , 对运放的 $K_{CMR}$ 要求低;
- 输入电阻小。

6. 采用T型反馈网络代替 $R_f$ ,  
在保证 $R_i$ 不至于太小的情况  
下, 能保证 $A_{uf}$ 值较大。



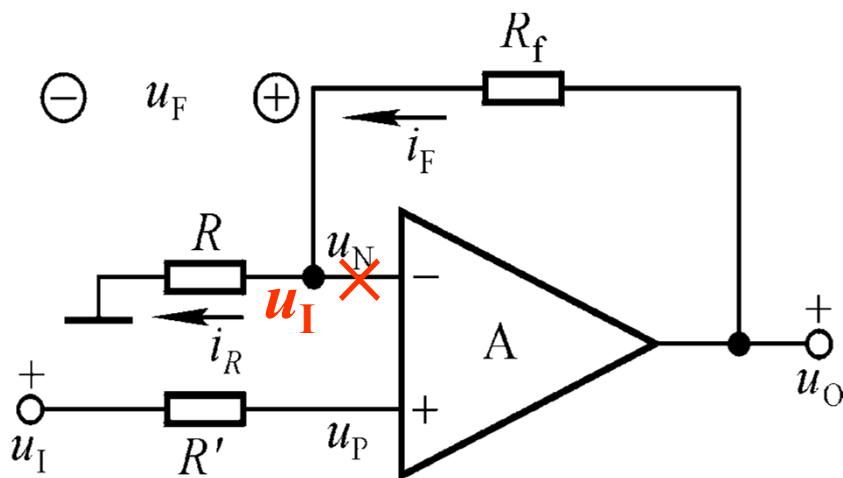
$$i_1 = i_2 = \frac{u_1}{R_1} \quad u_M = -i_2 \times R_2$$

$$i_4 = i_2 + i_3$$

$$A_{uf} = \frac{u_O}{u_I} = -\frac{R_2 + R_4}{R_1} \left(1 + \frac{R_2 // R_4}{R_3}\right)$$

运算电路分析方法1:  
虚短、虚断 + 节点电流法

## 二、同相比例运算电路 ( Noninverting amplifier )



从同相端输入,  $u_O$  与  $u_I$  同相

1. 平衡电阻  $R' = R // R_f$

### 2. 运算关系

$$A_{uf} = \frac{u_O}{u_I} = 1 + \frac{R_f}{R}$$

### 3. $R_i$ 、 $R_o$ 、 $u_{Ic}$

$$R_i = \infty \quad u_{Ic} = u_I$$

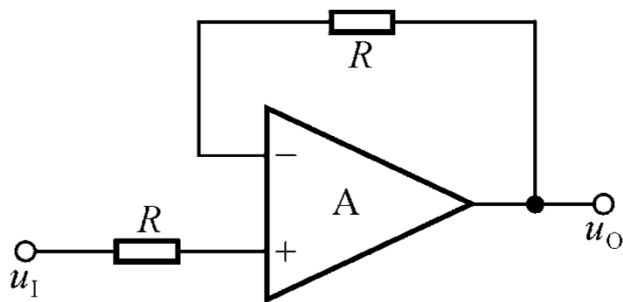
$$R_o = 0$$

### 4. 优缺点

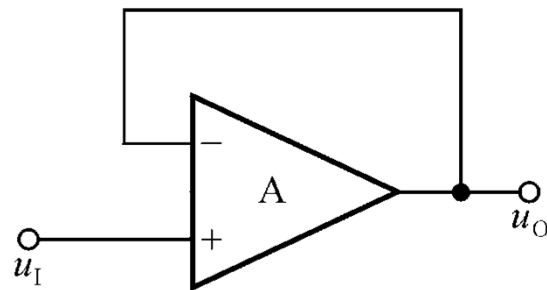
- $R_i = \infty$ ,  $R_o = 0$ ;
- 运放有共模输入信号,  $u_{Ic} = u_I$ , 对运放的  $K_{CMR}$  要求高。



## 5. 电压跟随器(Voltage follower)



(a)



(b)

$$u_I = u_P = u_N = u_O$$

$$A_{uf} = 1$$

### 特点:

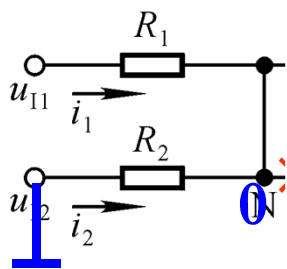
- 全反馈，电压跟随器；
- $R_i$ 大， $R_o$ 小，可作为缓冲器；
- 但负反馈深度大（ $F=1$ ），易产生自激振荡。



## 7.3 加减运算电路

### 一、求和电路 (Summing Amplifier)

#### 1. 反相求和电路 两个或两个以上输入，从反相端输入



#### ➤ 运算关系

$$i_F = i_1 + i_2 \quad \frac{-u_O}{R_f} = \frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2}$$

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

#### ➤ $R_i$ 、 $R_o$ 、 $u_{IC}$

#### 输入电阻

- 对于  $u_{I1}$ ，令  $u_{I2}=0$

$$R_{i1} = u_{I1} / i_1 = R_1$$

- 对于  $u_{I2}$ ，令  $u_{I1}=0$

$$R_{i2} = R_2$$

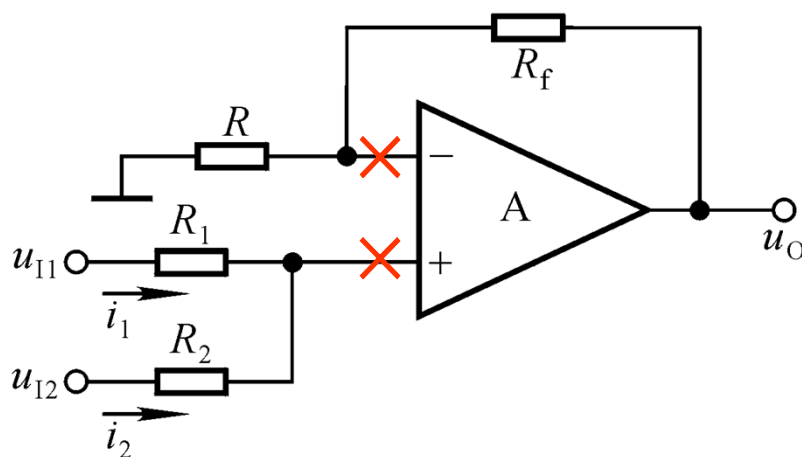
#### 输出电阻

$$R_o = 0$$

#### 运放共模输入电压

$$u_{IC} = 0$$

## 2. 同相求和电路 两个或两个以上输入，从同相端输入



### ➤ 运算关系

$$\begin{aligned} \text{同相端: } u_P &= \frac{R_2 u_{I1}}{R_1 + R_2} + \frac{R_1 u_{I2}}{R_1 + R_2} \\ &= R_1 // R_2 \left( \frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} \right) \end{aligned}$$

$$\text{反相端: } u_N = \frac{R}{R + R_f} u_O = \frac{R // R_f}{R_f} u_O$$

$$u_O = \frac{R_1 // R_2}{R // R_f} R_f \left( \frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} \right)$$

$$\text{令: } R_1 // R_2 = R // R_f$$

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

### ➤ $R_i$ 、 $R_o$ 、 $u_{IC}$

输入电阻:

对于  $u_{I1}$ :  $R_{i1} = R_1 + R_2$

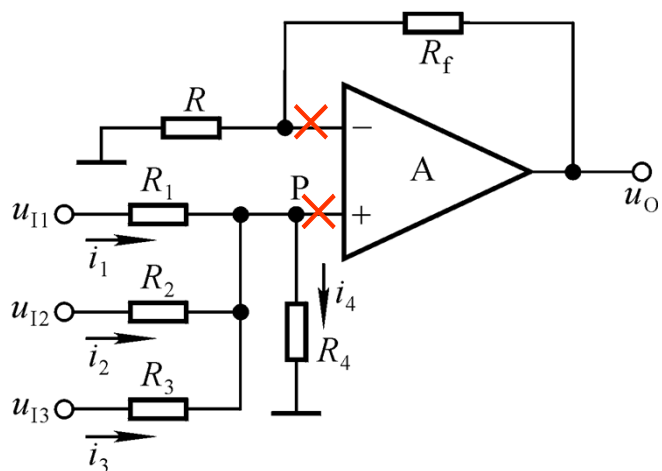
对于  $u_{I2}$ :  $R_{i2} = R_2 + R_1$

输出电阻:  $R_o = 0$

运放共模输入电压:

$$u_{Ic} = u_P \neq 0$$

## 2. 同相求和电路 两个或两个以上输入，从同相端输入



### ➤ 运算关系

同相端: 
$$\frac{u_{I1} - u_P}{R_1} + \frac{u_{I2} - u_P}{R_2} + \frac{u_{I3} - u_P}{R_3} = \frac{u_P}{R_4}$$

$$\frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} + \frac{u_{I3}}{R_3} = \frac{u_P}{R_1 // R_2 // R_3 // R_4}$$

反相端: 
$$u_N = \frac{R}{R + R_f} u_O = \frac{R // R_f}{R_f} u_O$$

令:  $R_P = R_1 // R_2 // R_3 // R_4$ ,  $R_N = R // R_f$  
$$u_O = R_f \frac{R_P}{R_N} \left( \frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} + \frac{u_{I3}}{R_3} \right)$$

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

➤  $R_i$ 、 $R_o$ 、 $u_{IC}$  输入电阻:

对于  $u_{I1}$ :  $R_{i1} = R_1 + R_2 // R_3$

对于  $u_{I2}$ :  $R_{i2} = R_2 + R_1 // R_3$

对于  $u_{I3}$ :  $R_{i3} = R_3 + R_1 // R_2$

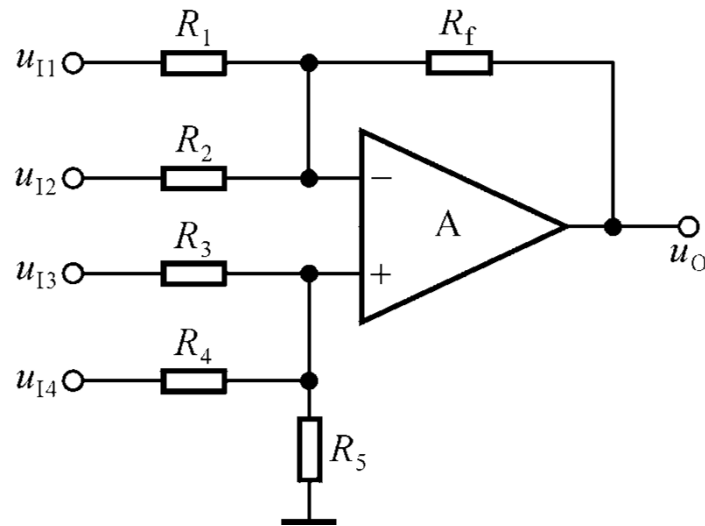
输出电阻:  $R_o = 0$

共模输入电压:

$$u_{IC} = u_P \neq 0$$

## 二、加减运算电路

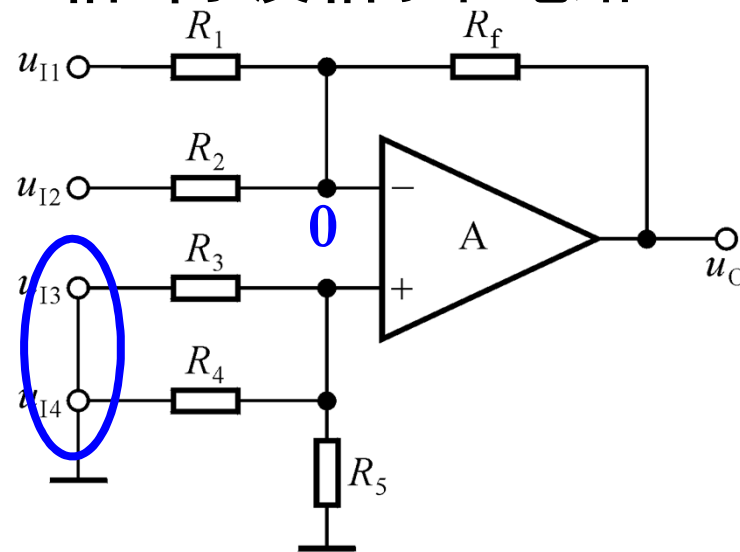
### 1. 单运放加减运算电路



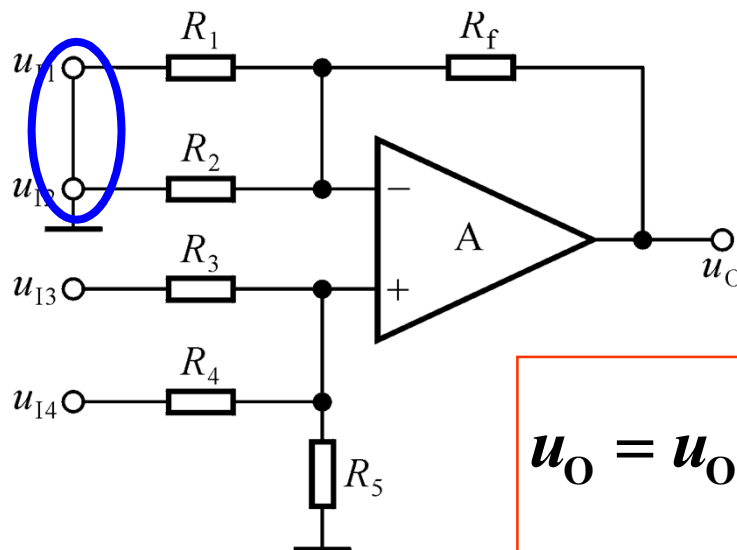
$$u_{O1} = -R_f \left( \frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} \right)$$

运算电路分析方法2：  
利用虚短、虚断和叠加原理

a. 同相端  $u_{I3}=u_{I4}=0$   
相当于反相求和电路



b. 反相端  $u_{I1}=u_{I2}=0$   
相当于同相求和电路



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

要求:  $R_1 // R_2 // R_f = R_3 // R_4 // R_5$

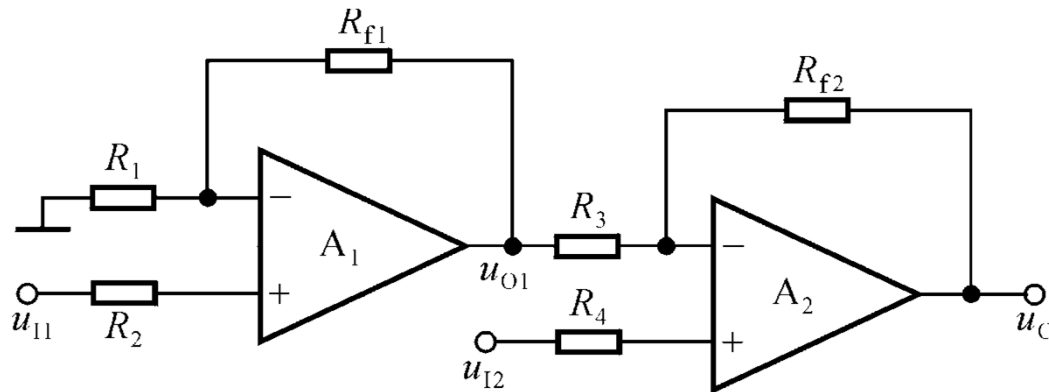
$$u_O = u_{O1} + u_{O2} = R_f \left( \frac{u_{I4}}{R_4} + \frac{u_{I3}}{R_3} - \frac{u_{I2}}{R_2} - \frac{u_{I1}}{R_1} \right)$$

**注意:** 同相求和电路或加减运算电路

- $R_n=R_p$ 时, 运算关系简单,  $R_n$ 、 $R_p$ 不影响运算关系
- $R_n \neq R_p$ 时, 运算关系要考虑  $R_n$ 、 $R_p$ 的影响

**用单运放实现加减运算电路的问题:** 输入电阻一般较低

## 2. 用多运放实现 $u_O = k_2 u_{I2} - k_1 u_{I1}$ ，可使输入电阻高



多运放分析方法  
逐级求解，将前  
一级的输出作为  
后一级的输入

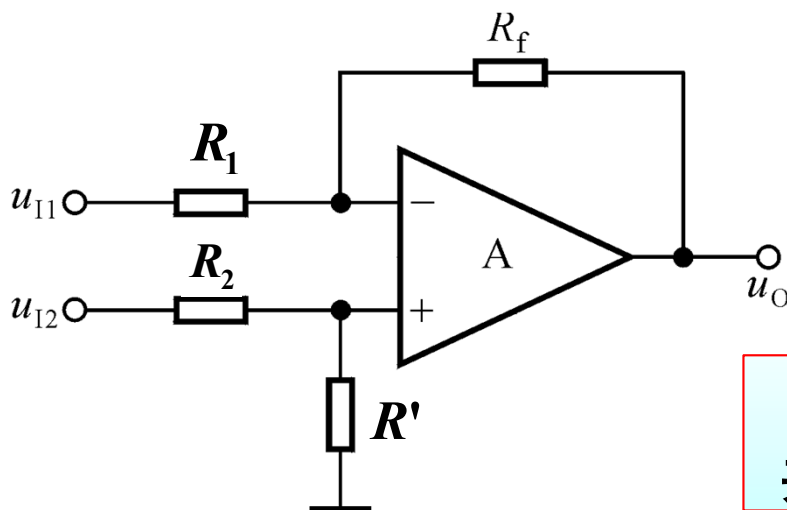
同相比例运算电路 + 加减运算电路

$$u_{O1} = \left(1 + \frac{R_{f1}}{R_1}\right) u_{I1} \quad u_O = -\frac{R_{f2}}{R_3} u_{O1} + \left(1 + \frac{R_{f2}}{R_3}\right) u_{I2}$$

$$u_O = -\frac{R_{f2}}{R_3} \left(1 + \frac{R_{f1}}{R_1}\right) u_{I1} + \left(1 + \frac{R_{f2}}{R_3}\right) u_{I2}$$

$$\text{设 } R_1 = R_{f2}, \quad R_3 = R_{f1} \quad u_O = \left(1 + \frac{R_{f2}}{R_3}\right) (u_{I2} - u_{I1})$$

**讨论1：**设计一个单运放差分比例运算电路 $u_O = k(u_{I2} - u_{I1})$



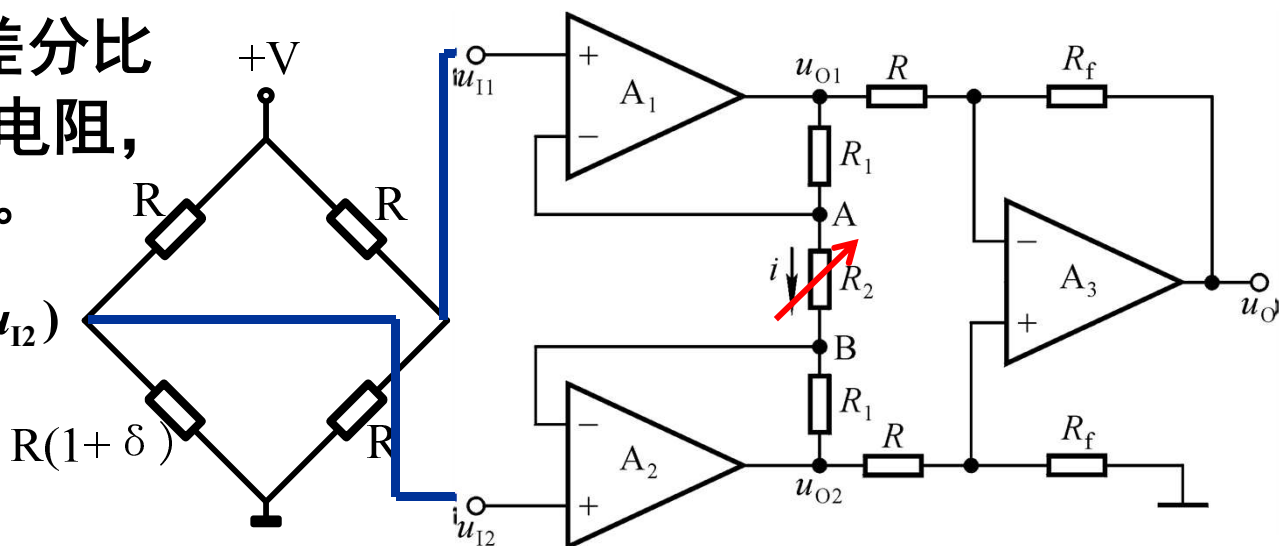
$$u_O = R_f \left( \frac{u_{I2}}{R_2} - \frac{u_{I1}}{R_1} \right)$$

$$u_O = \frac{R_f}{R} (u_{I2} - u_{I1}) = \frac{R_f}{R} u_{Id}$$

**特点：**放大差模输入信号，对共模输入信号放大倍数为零。

• 为了提高单运放差分比例运算电路的输入电阻，可采用电压跟随器。

$$u_O = \left( 1 + 2 \frac{R_1}{R_2} \right) \cdot \frac{R_f}{R} \cdot (u_{I1} - u_{I2})$$



仪用放大器应用：电桥，温度、压力、密度、声波、心电信号等



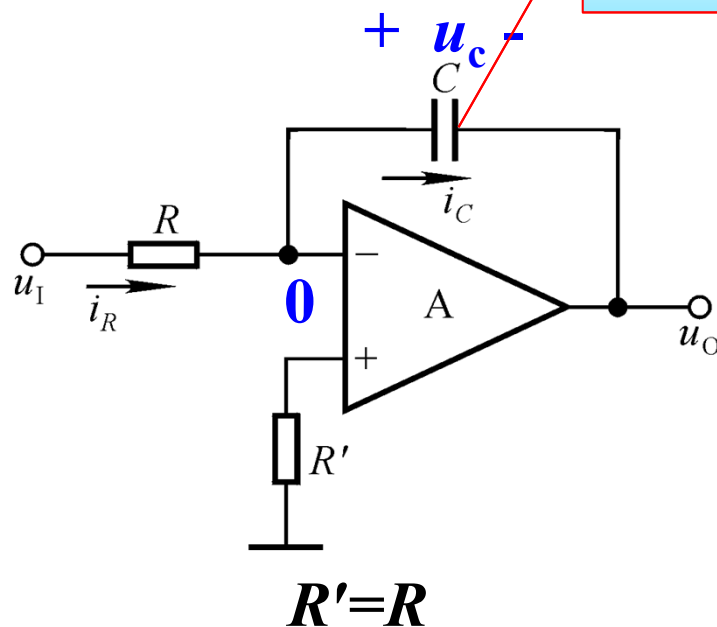


## 7.4 积分电路和微分电路

### 一、积分电路(Integrator)

#### 1. 基本积分电路

交流负反馈



$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt$$

➤ 运算关系

$$i_C = i_R = \frac{u_I}{R}$$

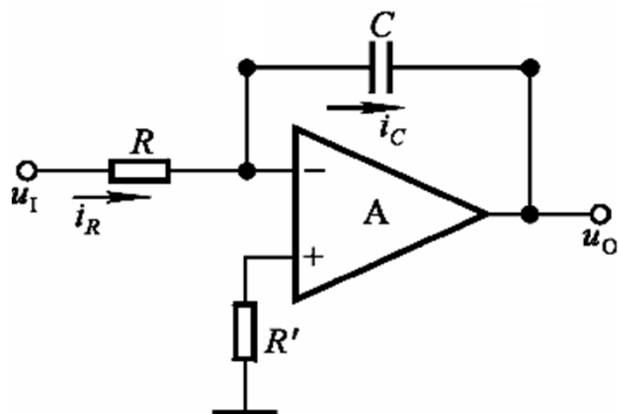
$$u_O = -\frac{1}{C} \int i_C dt = -\frac{1}{RC} \int u_I dt$$

分段积分

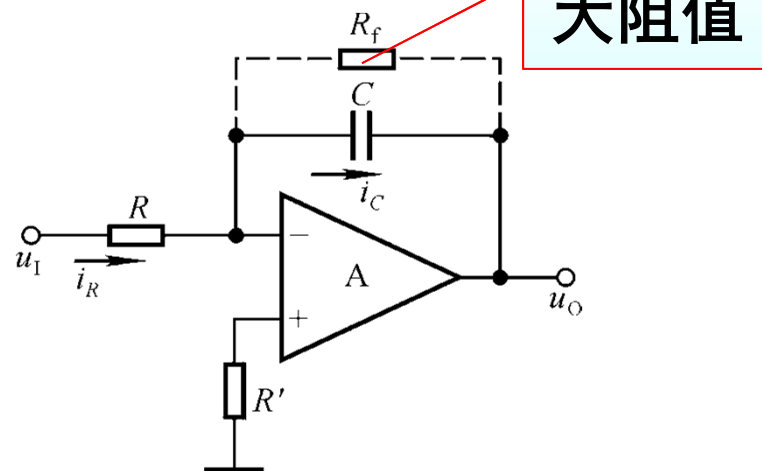
$$u_O = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} u_I dt + u_O(t_1)$$

起始值

- **问题：**无直流负反馈，对直流信号为开环



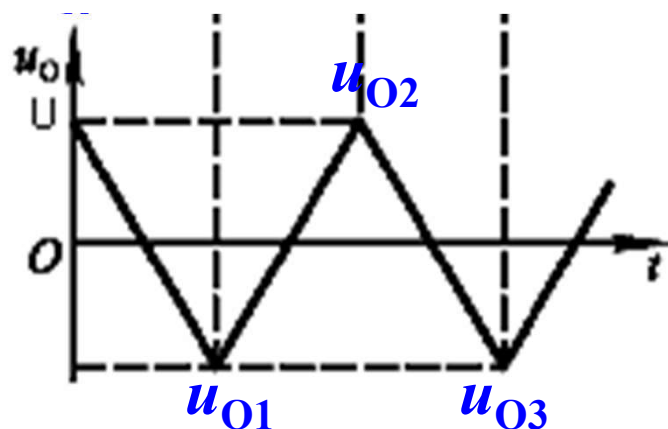
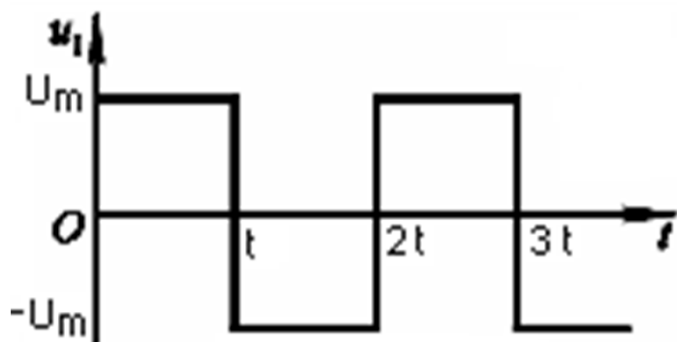
- **解决办法：**利用电阻引入直流负反馈



电路对于直流信号的放大倍数为 $\infty$ ，微小的直流电压使得输出接近饱和

## 讨论2: 1) 方波积分 变为三角波

分段积分 设  $u_o(0)=U$



$$u_{o1} = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_i dt + u_o(0)$$

$$= U - \frac{1}{RC} U_m \cdot t \Big|_0^t$$

$$u_{o2} = \frac{1}{RC} U_m \cdot t \Big|_t^{2t} + U_{o1}$$

$$u_{o3} = -\frac{1}{RC} U_m \cdot t \Big|_{2t}^{3t} + U_{o2}$$

## 2) 正弦波积分 变为余弦波

TI专用积分电路芯片ACF2101