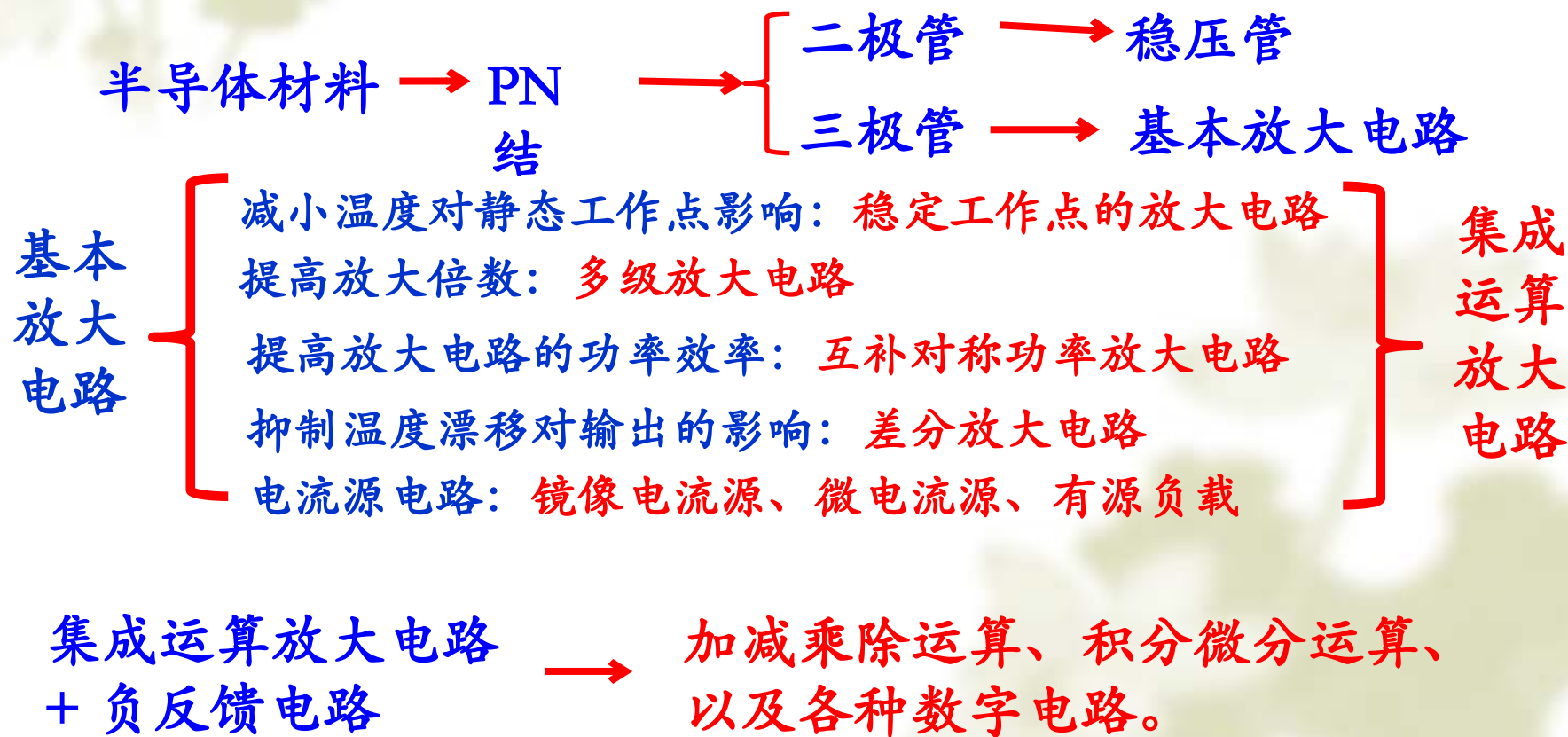


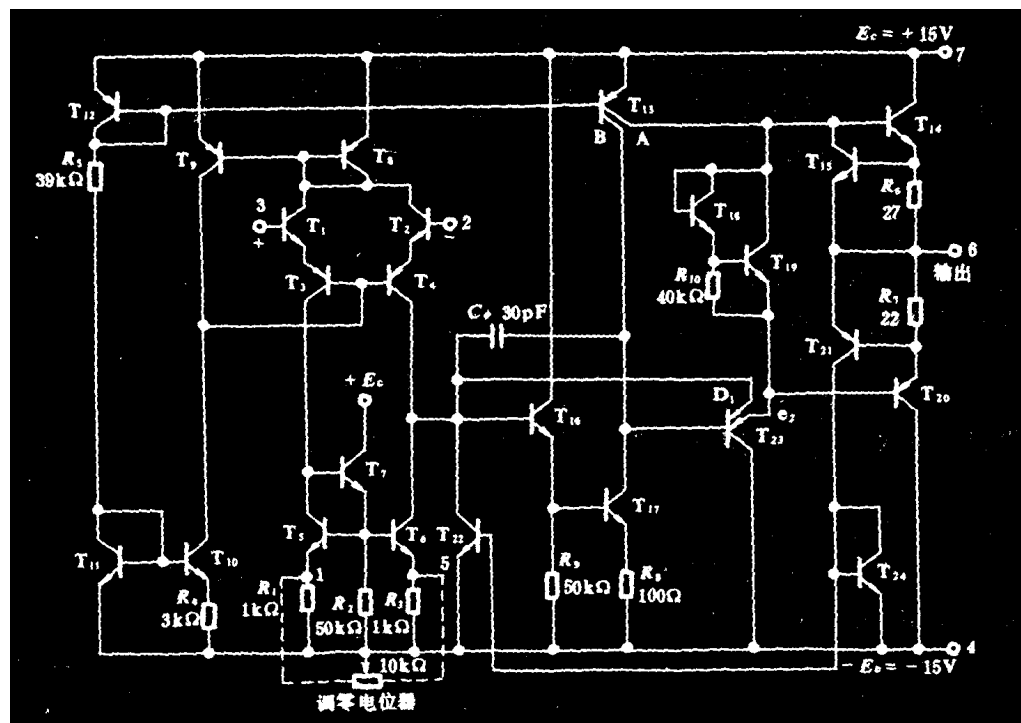
# 模电知识体系及学习特点

知识体系：



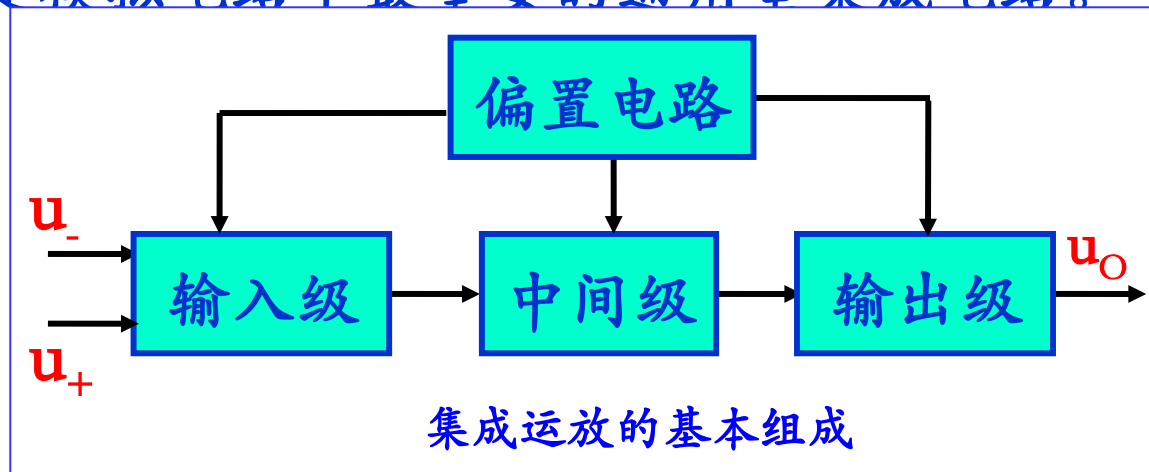
# 一，集成运算放大器结构特点

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

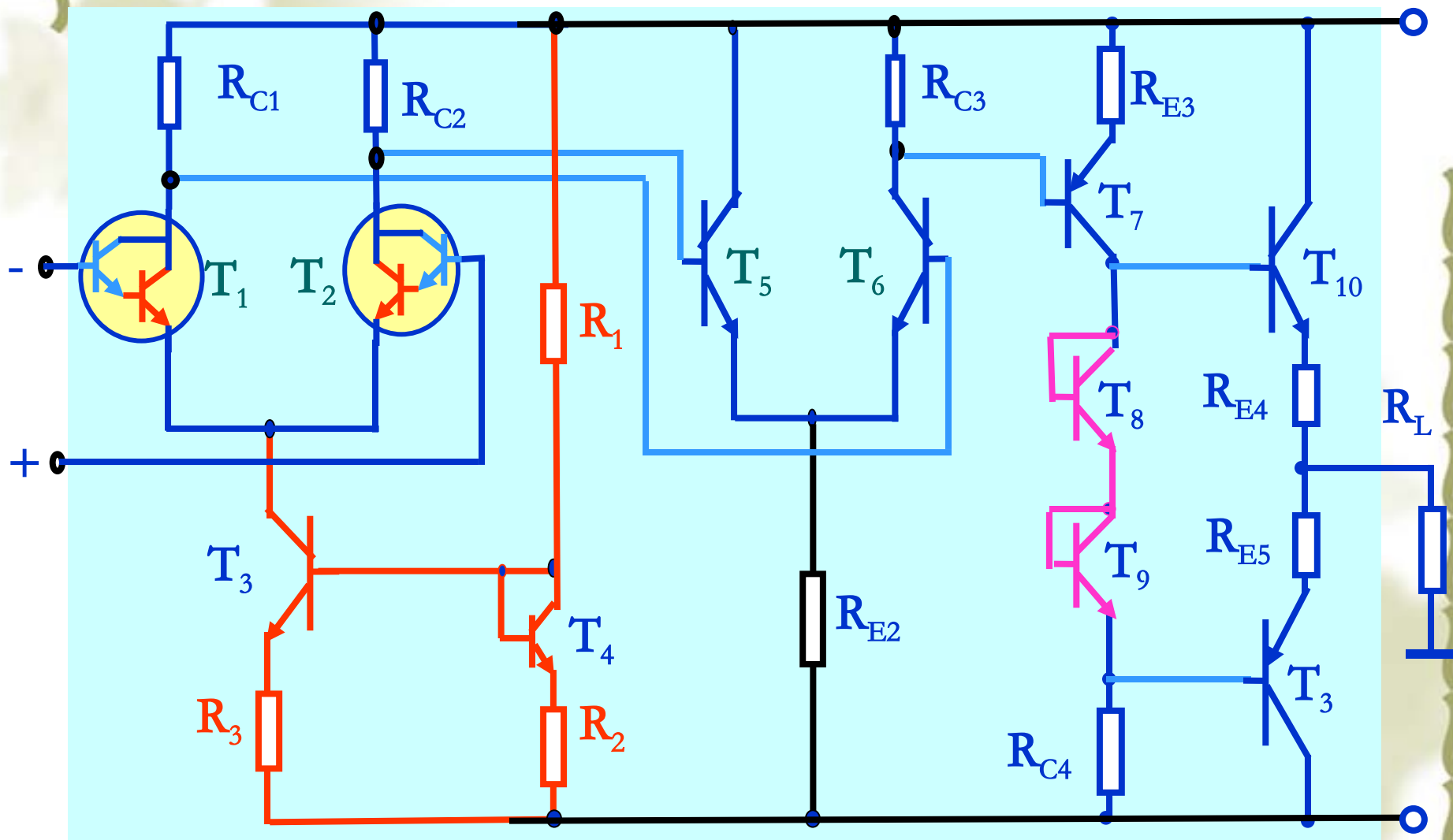
——集成运放即集成运算放大器，是一个高性能的直接耦合多级放大器，是模拟电路中最重要通用型集成电路。



- 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

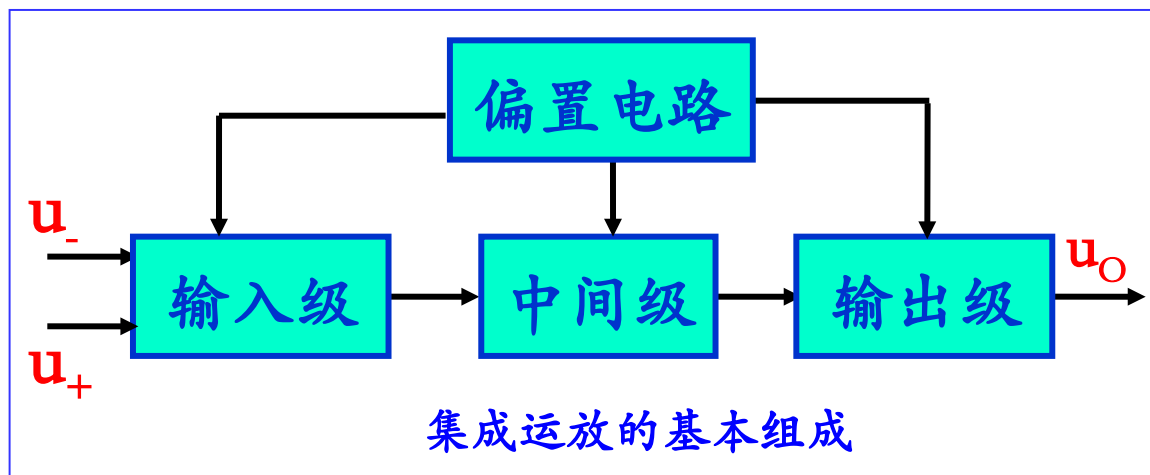
第2级：差动放大器

第3级：单管放大器

$-U_{EE}$

## 二、集成运放及其基本构成

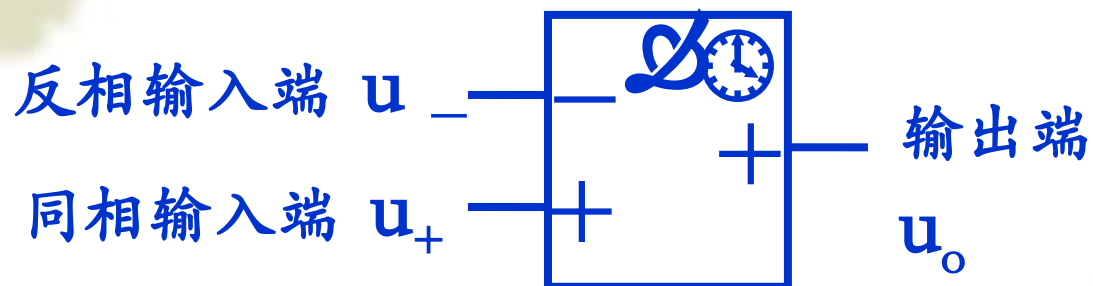
——集成运放即集成运算放大器，是一个高性能的直接耦合多级放大器，是模拟电路中最重要通用型集成电路。



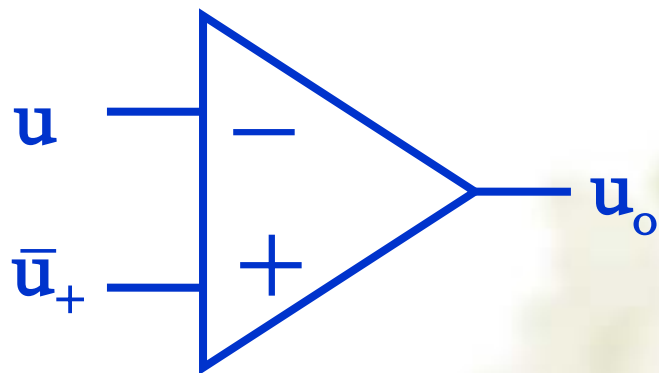
差动输入级有两个输入  $U_+$ 、 $U_-$ ，当信号从  $U_+$  输入，输出  $U_o$  与  $U_+$  极性相同，称  $U_+$  为同相输入端；当信号从  $U_-$  输入，输出  $U_o$  与  $U_-$  极性相反，称  $U_-$  为反相输入端。减小漂移

# 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

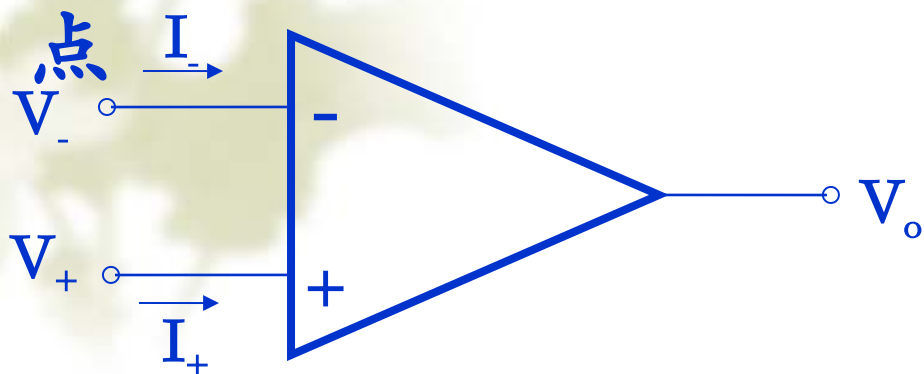
为简化对集成运放应用电路的分析，常把集成运放视为理想器件。其主要满足以下一些条件：

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

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

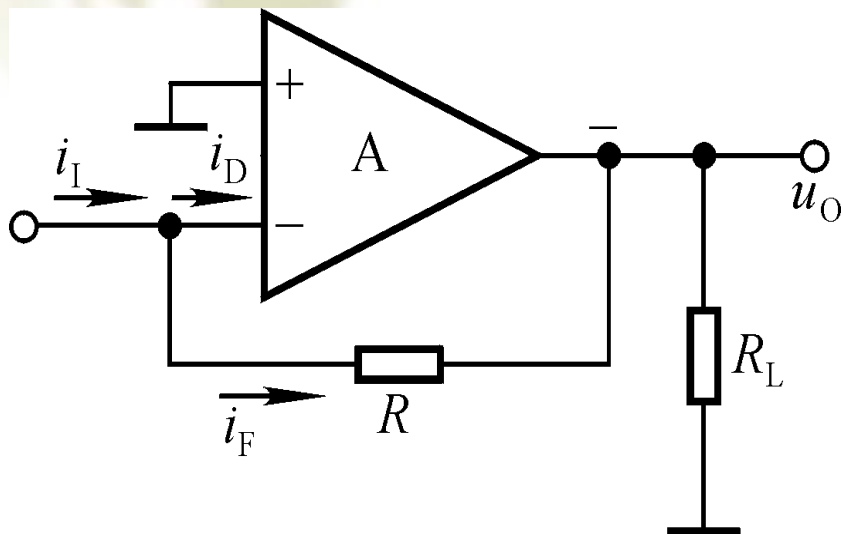
$$r_i = \infty \quad \underline{i_+ = i_- = (u_+ - u_-) / R_i = 0}$$

虚开路

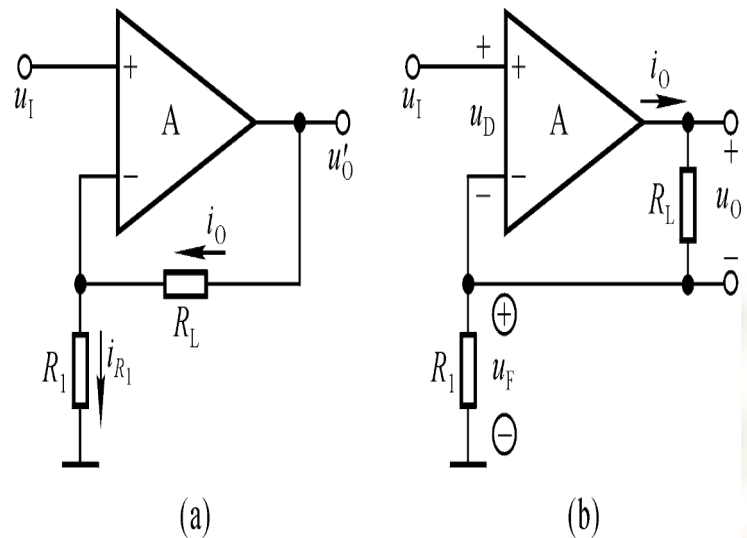
$$r_o = 0 \quad \underline{u_{oL} = u_o} \text{ 输出电压不受负载的影响。}$$

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。

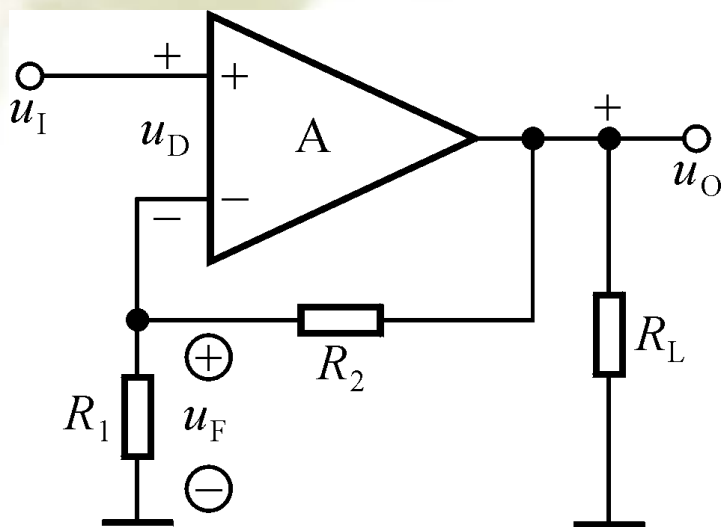
## 例：运放电路反馈的判断



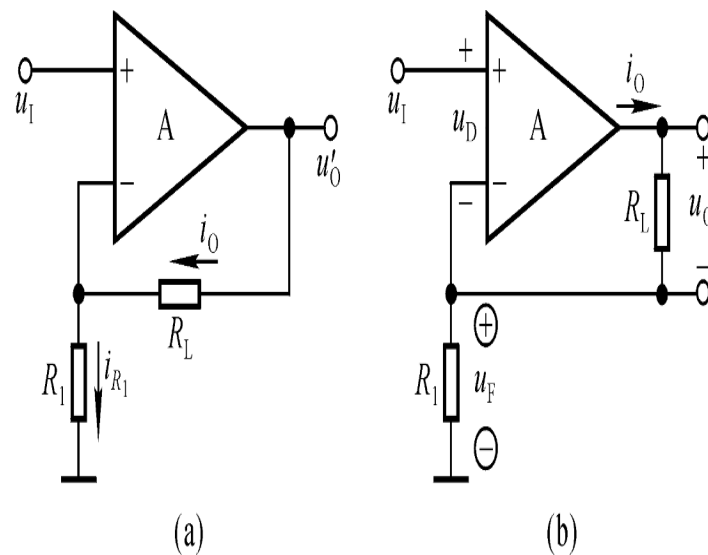
电压并联负反馈



电压串联负反馈电路



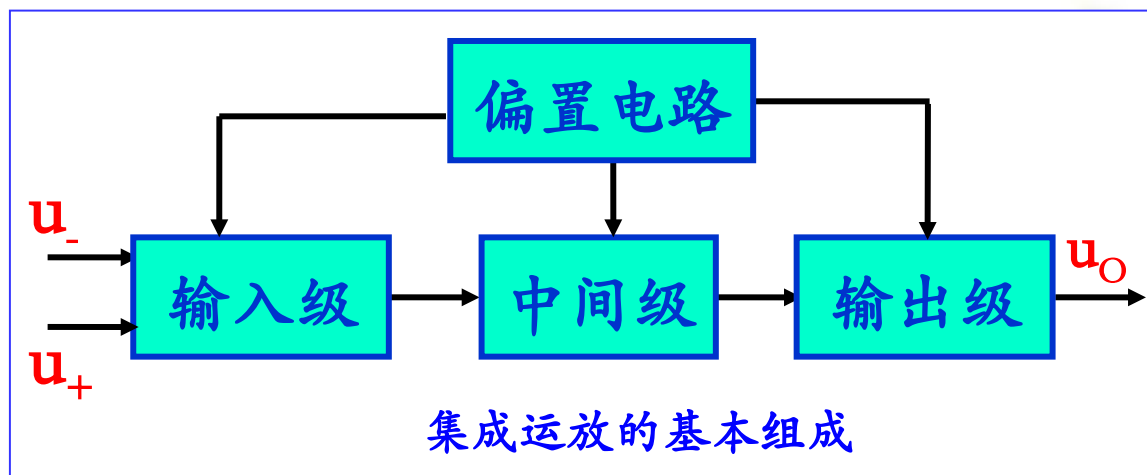
电压串联负反馈电路



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。

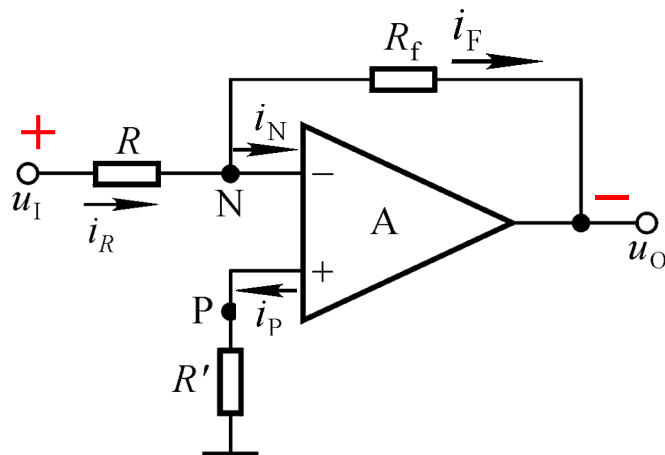
## 2、学习运算电路的基本要求

(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



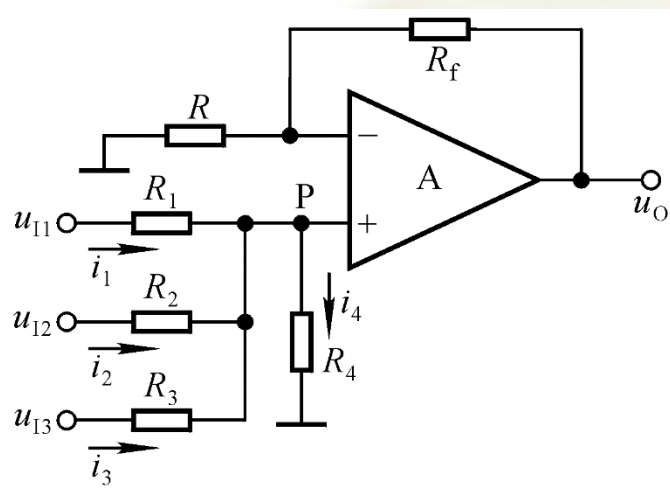
$A_u$

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

## 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

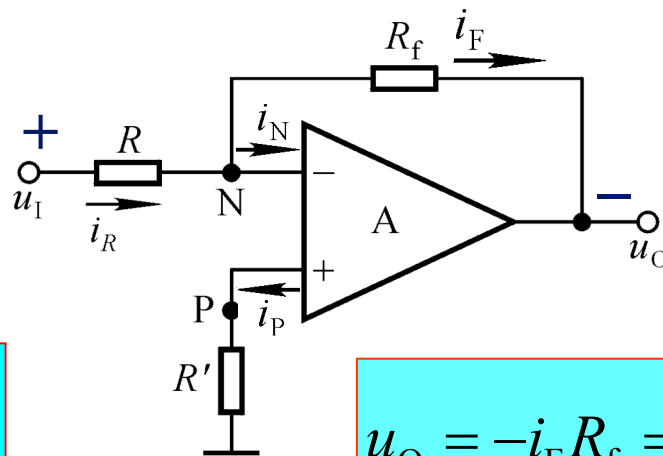
## 二、比例运算电路

### 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  $R_i = 100k\Omega$  , 比例系数为  $-10$  ,  $R' = ?$   $R_f = ?$

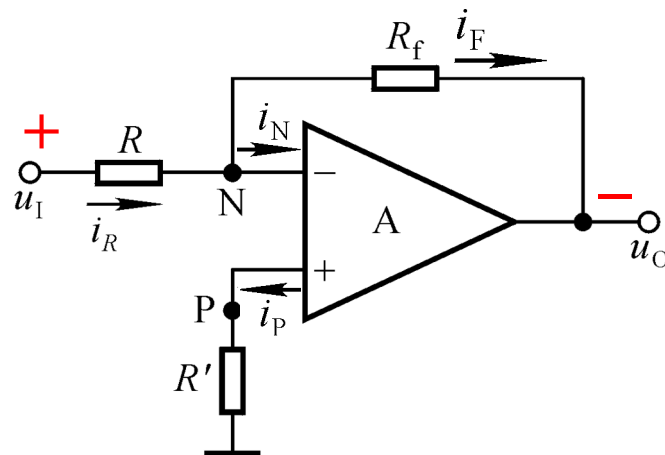
5) 若要用反相输入比例运算电路做放大电路, 则  $A_u = ?$

## 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。

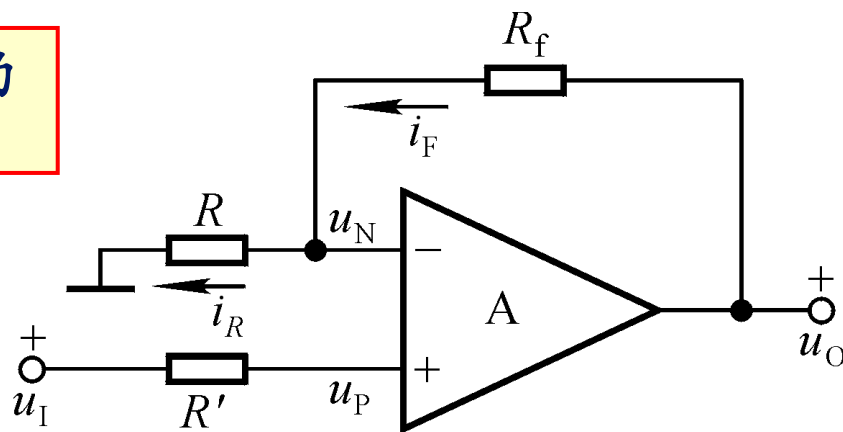
求法：所有电源都置 0 时，同相端和反相端像外看的等效内阻相等。

## 2. 同相输入

集成运放的  
共模输入

$$u_N = u_P = u_I$$

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



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

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

$$A_u$$

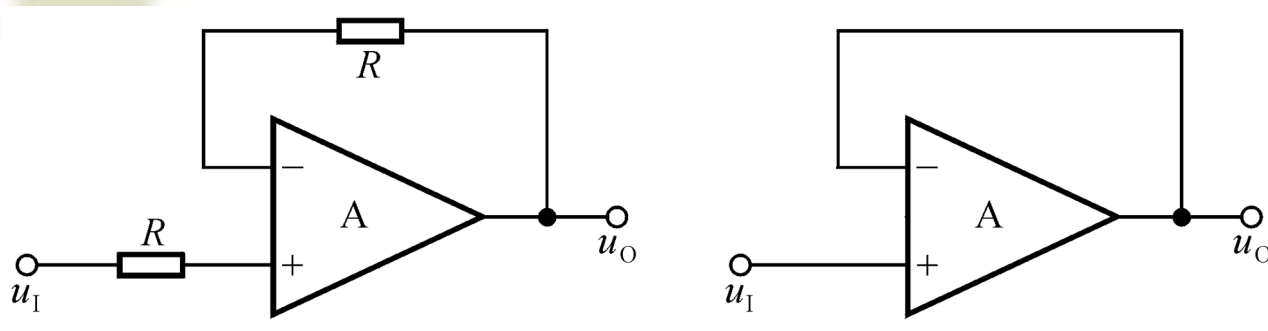
1) 输入电阻为多少?  $R_{if} = \frac{U_I}{I_1} = \infty$

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)  $R_i = ?$

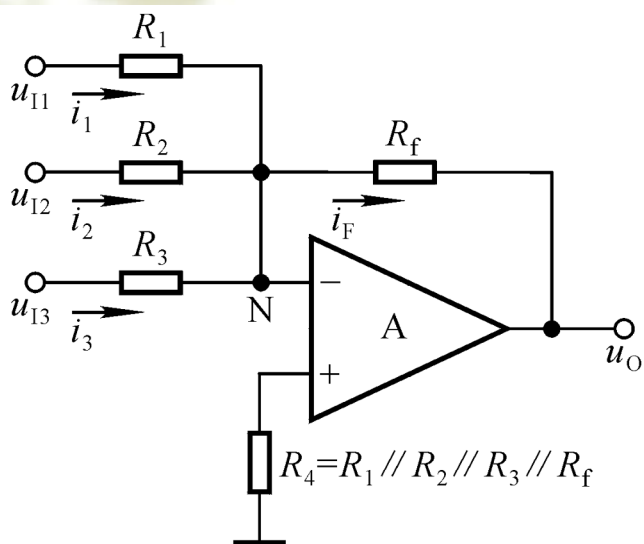
2)  $u_{Ic} = ?$

习题 9-2



### 三、加减运算电路

#### 1. 反相求和



方法一：节点电位法

$$i_N = i_P = 0$$

$$u_N = u_P = 0$$

$$i_F = i_{R1} + i_{R2} + i_{R3}$$

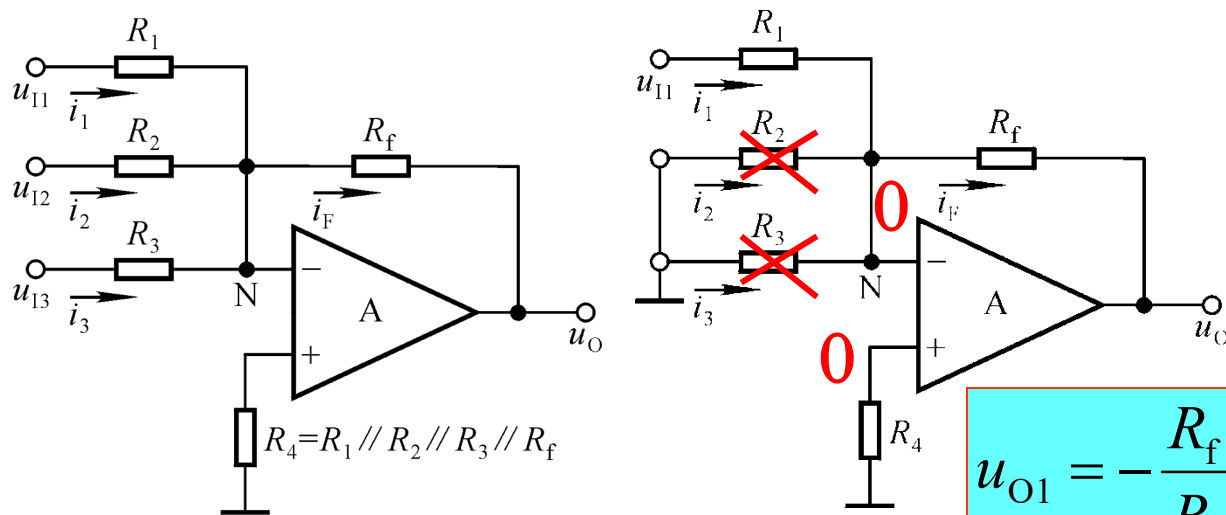
$$= \frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} + \frac{u_{I3}}{R_3}$$

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

## 1. 反相求和

### 方法二：利用叠加原理

首先求解每个输入信号单独作用时的输出电压，然后将所有结果相加，即得到所有输入信号同时作用时的输出电压。



同理可得

$$u_{O2} = -\frac{R_f}{R_2} \cdot u_{I2}$$

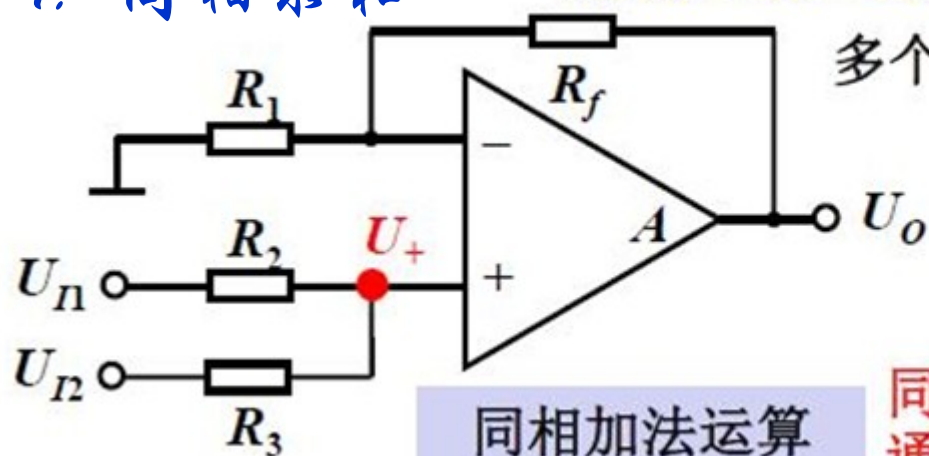
$$u_{O1} = -\frac{R_f}{R_1} \cdot u_{I1}$$

$$u_{O3} = -\frac{R_f}{R_3} \cdot u_{I3}$$

$$u_O = u_{O1} + u_{O2} + u_{O3} = -\frac{R_f}{R_1} \cdot u_{I1} - \frac{R_f}{R_2} \cdot u_{I2} - \frac{R_f}{R_3} \cdot u_{I3}$$

# 1. 同相求和

加减运算电路 → 有多个输入信号



多个信号同时从同相输入端进来

∵ 虚断 →  $I_- = 0$

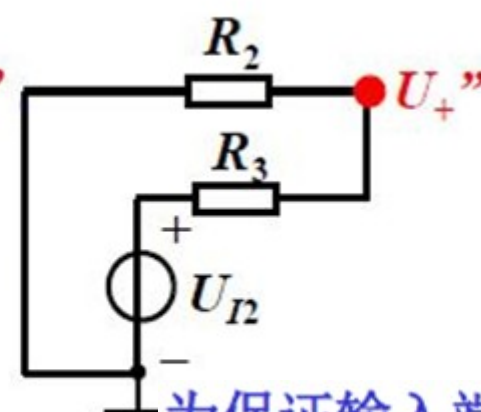
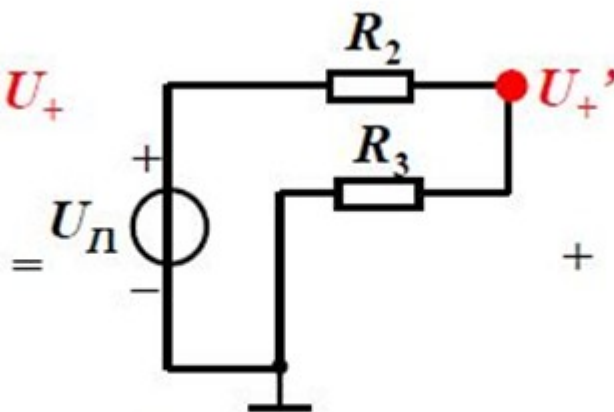
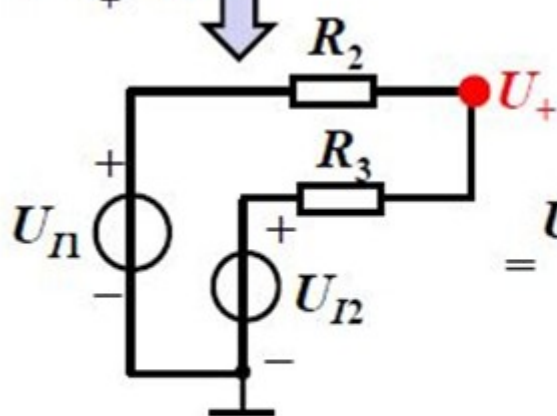
$$U_- = \frac{R_1}{R_1 + R_f} U_o = U_+$$

同相加法运算

同相输入的通用表达式

$$U_o = (1 + \frac{R_f}{R_1}) U_+$$

∵  $I_+ = 0$



$$U_o = (1 + \frac{R_f}{R_1}) (\frac{R_3}{R_2 + R_3} U_1 + \frac{R_2}{R_2 + R_3} U_2)$$

为保证输入端平衡

$$R_1 // R_f = R_2 // R_3$$

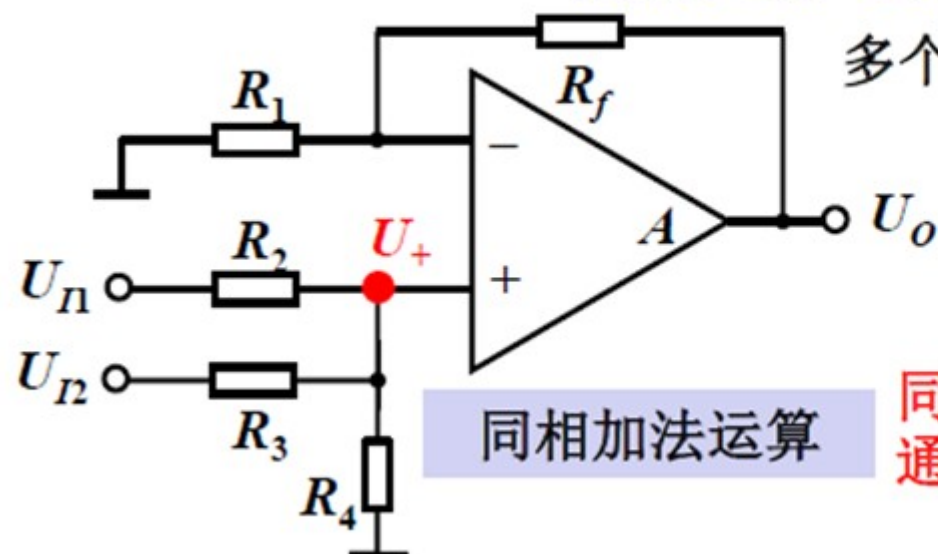
缺点：无法灵活调整比例关系

## 加减运算电路 → 有多个输入信号

多个信号同时从同相输入端进来

∵ 虚断 →  $I_- = 0$

$$U_- = \frac{R_1}{R_1 + R_f} U_o = U_+$$



同相加法运算

同相输入的  
通用表达式

$$U_o = (1 + \frac{R_f}{R_1}) U_+$$

叠加原理:  $U_+ = \frac{R_3 // R_4}{R_2 + R_3 // R_4} U_{11} + \frac{R_2 // R_4}{R_3 + R_2 // R_4} U_{12}$

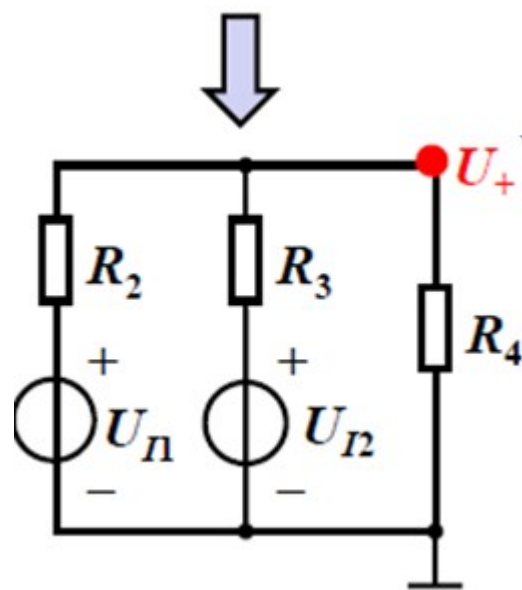
$$U_+ = \frac{\sum \frac{U_s}{R}}{\sum \frac{1}{R}} = \frac{\frac{U_{11}}{R_2} + \frac{U_{12}}{R_3}}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}}$$

为保证输入端平衡

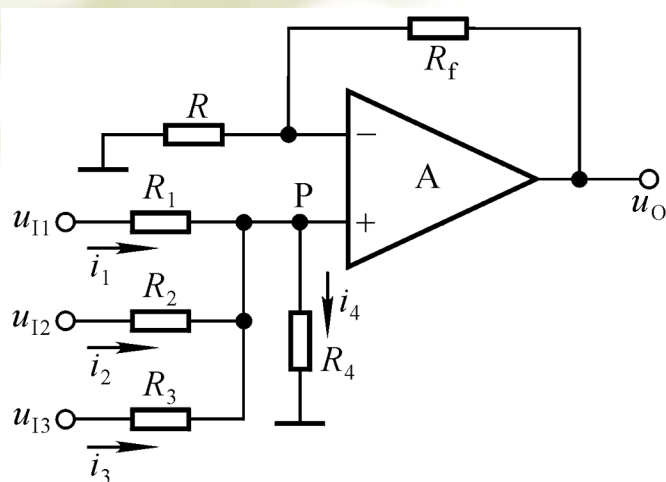
$$R_1 // R_f = R_2 // R_3 // R_4$$

缺点: 无法灵活调整比例关系

办法: 用反相加法+反相比例实现同相加法



## 2. 同相求和 (如果三输入)



$$U_o = (1 + \frac{R_f}{R_1})U_+$$

$$U_+ = \frac{\sum \frac{U_s}{R}}{\sum \frac{1}{R}}$$

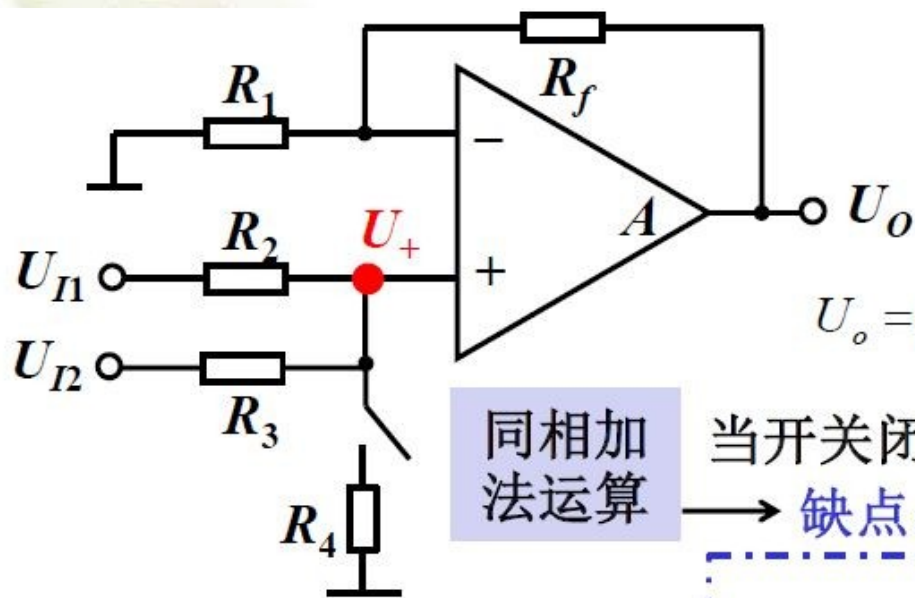
为保证输入端平衡



$$\text{设 } R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel R_4 = R \parallel R_f$$

参数很难方便设定





$\because$  虚断  $\rightarrow i_+ = 0$

$$U_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} U_{11} + \frac{R_2}{R_2 + R_3} U_{12}$$

$$U_o = (1 + \frac{R_f}{R_1}) (\frac{R_3}{R_2 + R_3} U_{11} + \frac{R_2}{R_2 + R_3} U_{12})$$

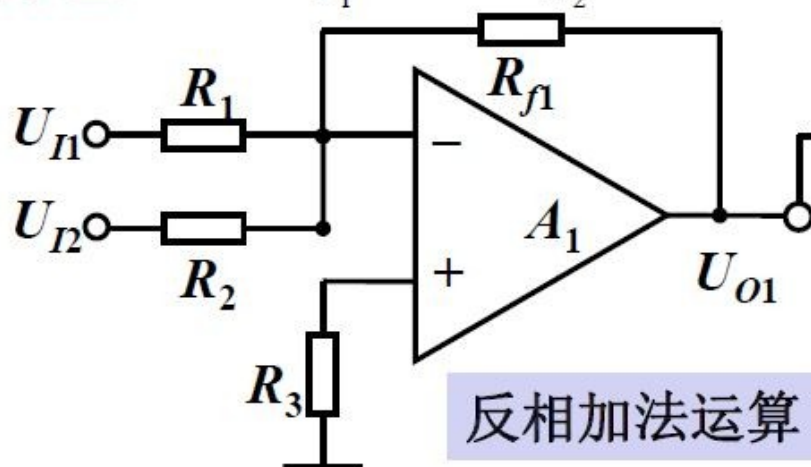
同相加  
法运算

当开关闭合可用两节点电压公式求  $U_+$   
 $\rightarrow$  缺点：无法灵活调整比例关系

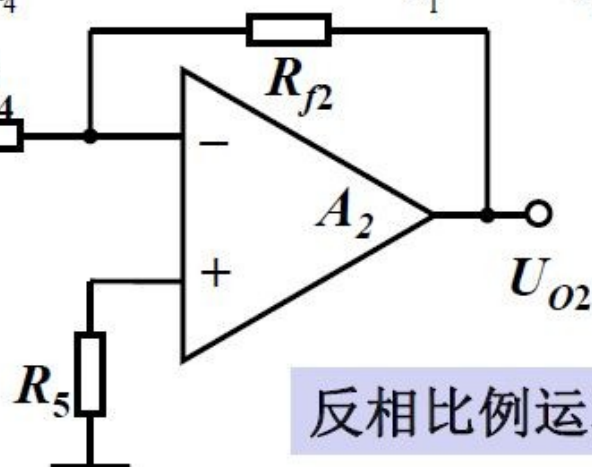
叠加  
原理：

$$U_{o1} = (-\frac{R_{f1}}{R_1} U_{11}) + (-\frac{R_{f1}}{R_2} U_{12}) \quad U_{o2} = -\frac{R_{f2}}{R_4} U_{o1} \xrightarrow{R_4=R_{f2}} U_{o2} = \frac{R_{f1}}{R_1} U_{11} + \frac{R_{f1}}{R_2} U_{12}$$

电压并联深度负反馈



反相加  
法运算

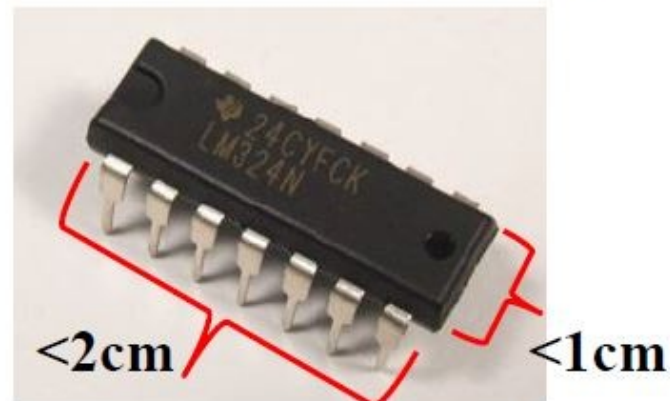
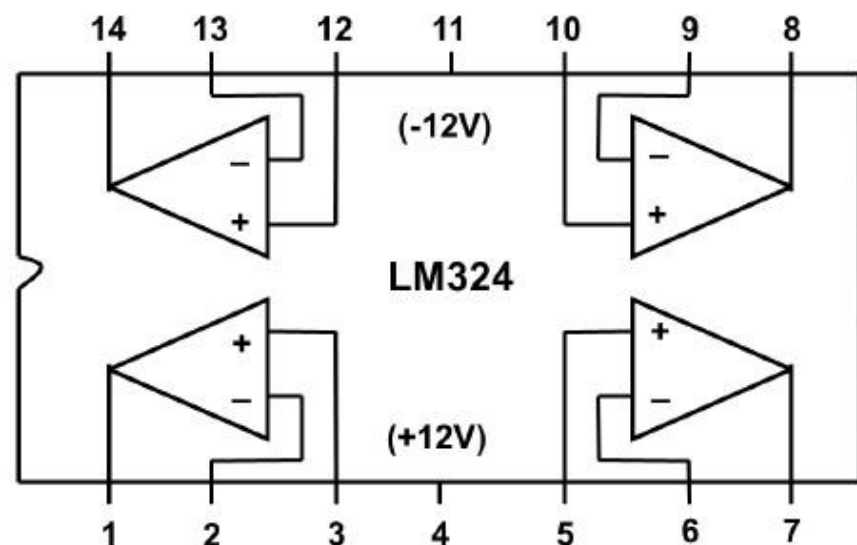


反比例  
运算



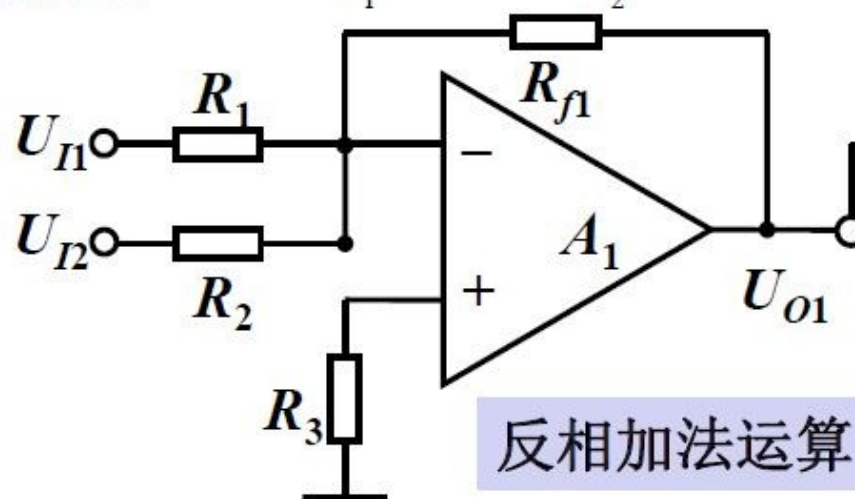
集成电路中通常集成多个运放，组合电路并不会增加成本。

注意：四个集成运放可以共用驱动芯片的正负直流电源

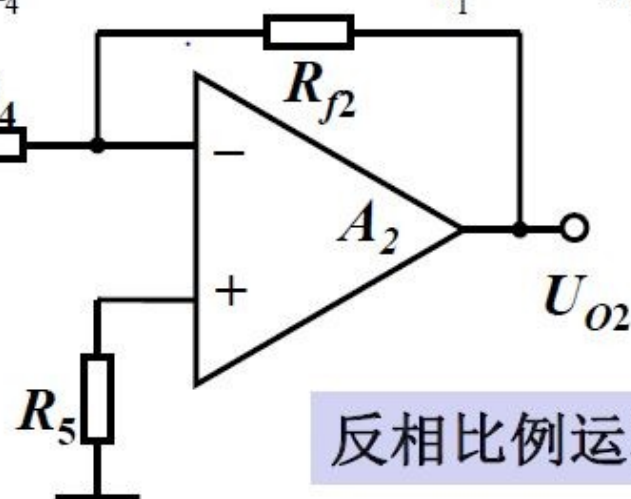


叠加原理:

$$U_{o1} = \left(-\frac{R_{f1}}{R_1}U_{I1}\right) + \left(-\frac{R_{f1}}{R_2}U_{I2}\right) \quad U_{o2} = -\frac{R_{f2}}{R_4}U_{o1} \xrightarrow{R_4=R_{f2}} U_{o2} = \frac{R_{f1}}{R_1}U_{I1} + \frac{R_{f1}}{R_2}U_{I2}$$



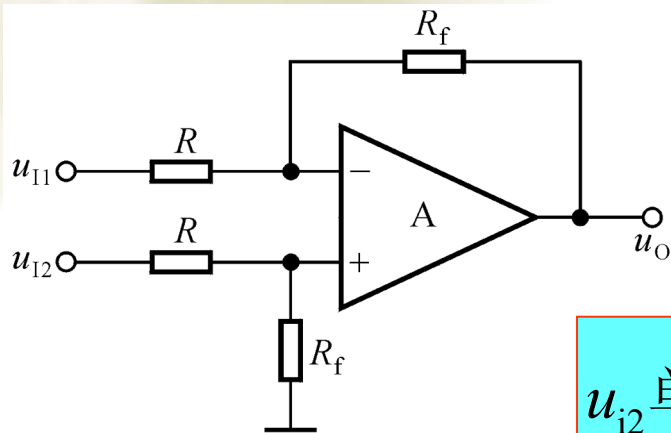
反相加法运算



反比例运算

### 3. 加减运算

利用求和运算电路的分析结果  
结合叠加原理。



$$u_{I1} \text{ 单独作用时, } u_{O1} = -\frac{R_f}{R} u_{I1}$$

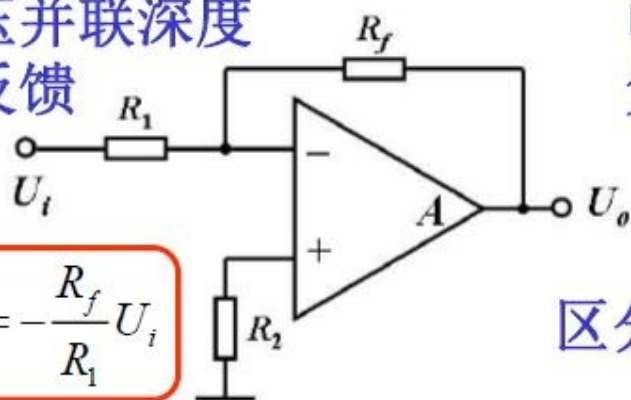
$$u_{I2} \text{ 单独作用时, } u_{O2} = \frac{R_f + R}{R} u_N, u_P = \frac{R_f}{R_f + R} u_{I2}$$

$$\text{联立 } u_{O2} = \frac{R_f}{R} u_{I2}$$

$$\text{分量叠加后 } u_O = u_{O1} + u_{O2} = \frac{R_f}{R} \cdot (u_{I2} - u_{I1})$$

实现了差分  
放大电路

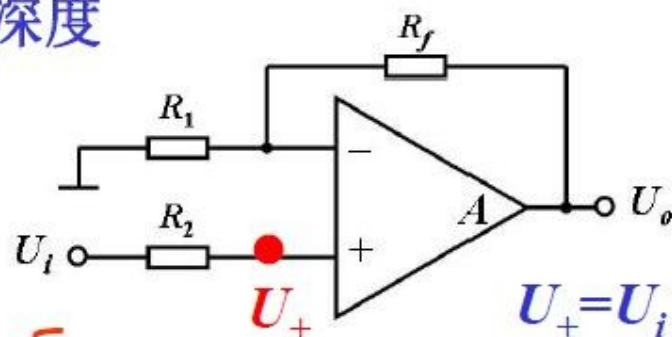
电压并联深度  
负反馈



$$U_o = -\frac{R_f}{R_1} U_i$$

反相比例运算电路

电压串联深度  
负反馈

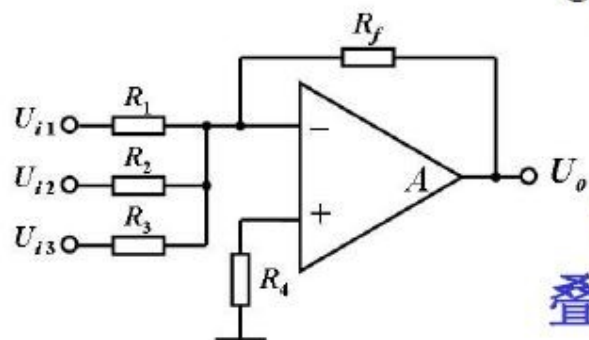


$$U_+ = U_i$$

同相比例运算电路

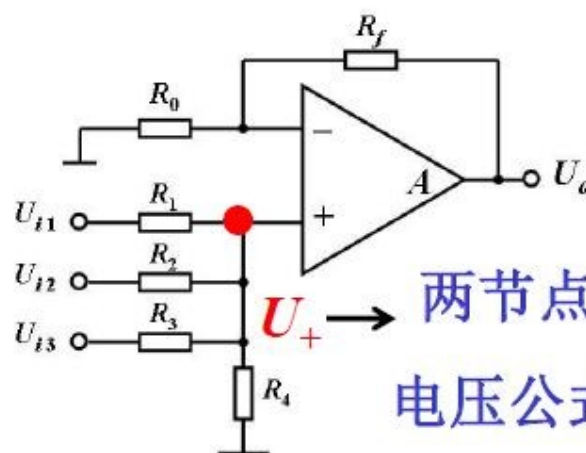
区分看输入

$$U_o = (1 + \frac{R_f}{R_1}) U_+$$



反相加法运算电路

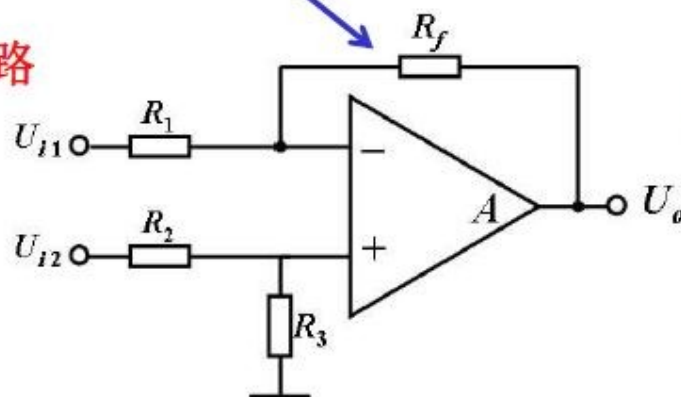
叠加原理



两节点  
电压公式

同相加法运算电路

减法运算电路



## 总结:

运算电路的关系式  $u_o = f(u_i)$

分析方法: “虚短”和“虚断”是基本出发点。

$$u_+ = u_- \quad i_+ = i_- = 0$$

## 分析步骤:

1 判断运算电路必须工作在线性区: 存在负反馈通路,

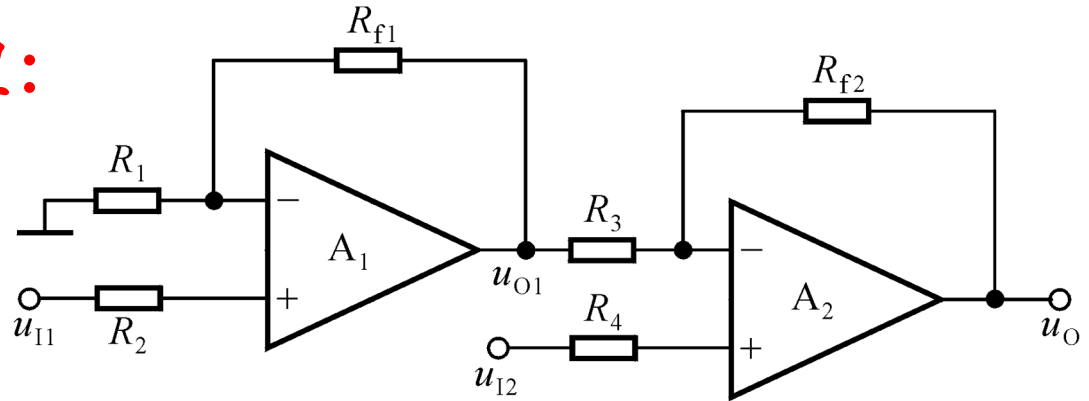
2 运放的已知条件是“虚短”和“虚断”, 外围电路分析用第一章直流分析中的各种分析方法分析, 如 KCL, KVL 等。

3 最后整理方程式, 列出关系式  $u_o = f(u_i)$ , 分析电路的运算关系。

注: 某些电阻的求解是要符合同相端和反相端的等效电阻相等的原理。

## 讨论一：电路如图所示

级联的电路分级处理：



第一级：

$$u_{o1} = u_{I1} \frac{R_{f1} + R_1}{R_1} = \left( 1 + \frac{R_{f1}}{R_1} \right) u_{I1}$$

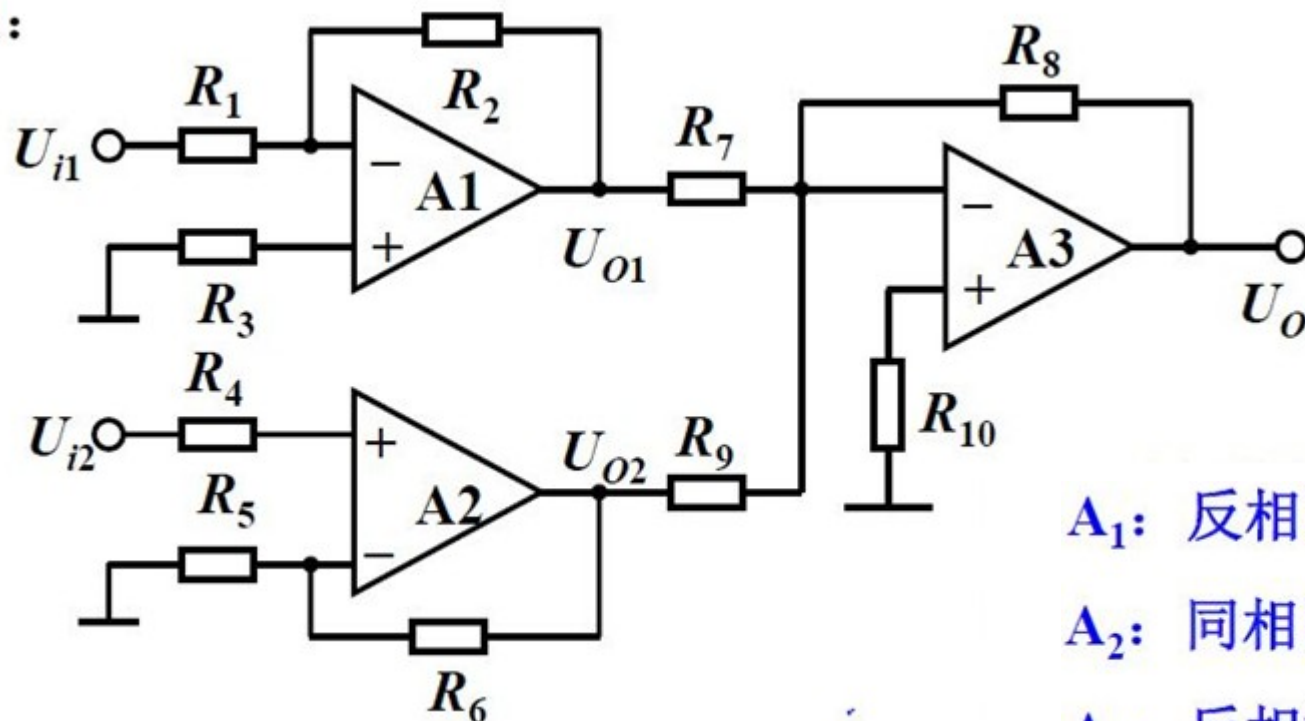
第二级：

$$\frac{u_o - u_{I2}}{R_{f2}} = \frac{u_{I2} - u_{o1}}{R_3}$$

联立求解：  $u_O = f(u_{I1}, u_{I2})$



# 例题1:



$A_1$ : 反相比例运算

$A_2$ : 同相比例运算

$A_3$ : 反相加法运算

$$U_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} \times U_{i1} \quad U_{o2} = \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right) \times U_{i2} \quad U_o = \left(-\frac{R_8}{R_7}\right) \times U_{o1} + \left(-\frac{R_8}{R_9} \times U_{o2}\right)$$

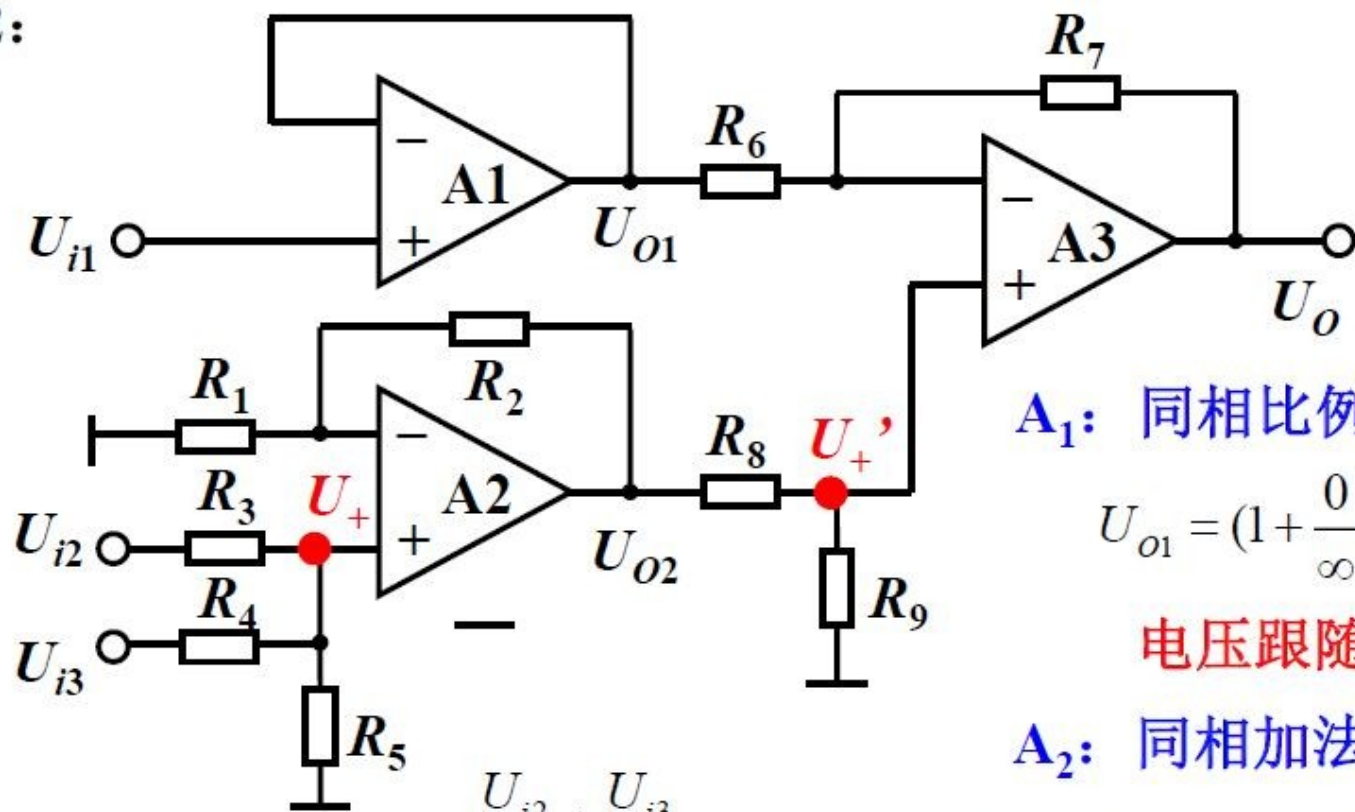
思考: 若要求  $U_o = -5U_{o1} + -4U_{o2}$ , 已知  $R_8 = 100\text{k}\Omega$ ,

$R_7 = ?$   $R_9 = ?$   $R_{10} = ?$

$$R_7 = 20\text{k}\Omega; \quad R_9 = 25\text{k}\Omega; \\ R_{10} = R_7 // R_8 // R_9 = 10\text{k}\Omega$$



## 例题2:



**A<sub>1</sub>: 同相比值运算**

$$U_{o1} = (1 + \frac{0}{\infty}) \times U_{i1}$$

**电压跟随器**

**A<sub>2</sub>: 同相加法运算**

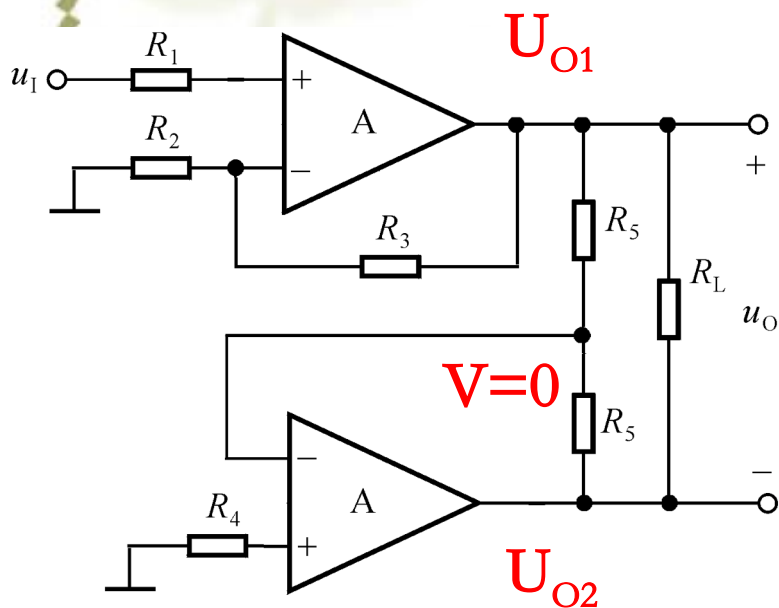
$$R_1 // R_2 = R_3 // R_4 // R_5$$

**A<sub>3</sub>: 减法运算**  $R_6 // R_7 = R_8 // R_9$

$$U_{o2} = (1 + \frac{R_2}{R_1}) U_+ = (1 + \frac{R_2}{R_1}) \frac{\frac{U_{i2}}{R_3} + \frac{U_{i3}}{R_4}}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}}$$

$$U_o = (1 + \frac{R_7}{R_6}) \times U_+' + (-\frac{R_7}{R_6} \times U_{o1}) = (1 + \frac{R_7}{R_6}) \times \frac{R_9}{R_8 + R_9} U_{o2} - \frac{R_7}{R_6} \times U_{o1}$$

## 讨论二



## 并联的电路分电位处理

$$u_o \rightarrow u_{o1} \rightarrow u_{1-} \rightarrow u_{1+} \rightarrow u_I$$

$$\quad \quad \quad \searrow \quad \quad \quad u_{o2} \rightarrow u_{2-} \rightarrow u_{2+}$$

电位点 o1 :  $u_I = \frac{u_{o1} R_2}{R_3 + R_2}$

电位点  
o2:

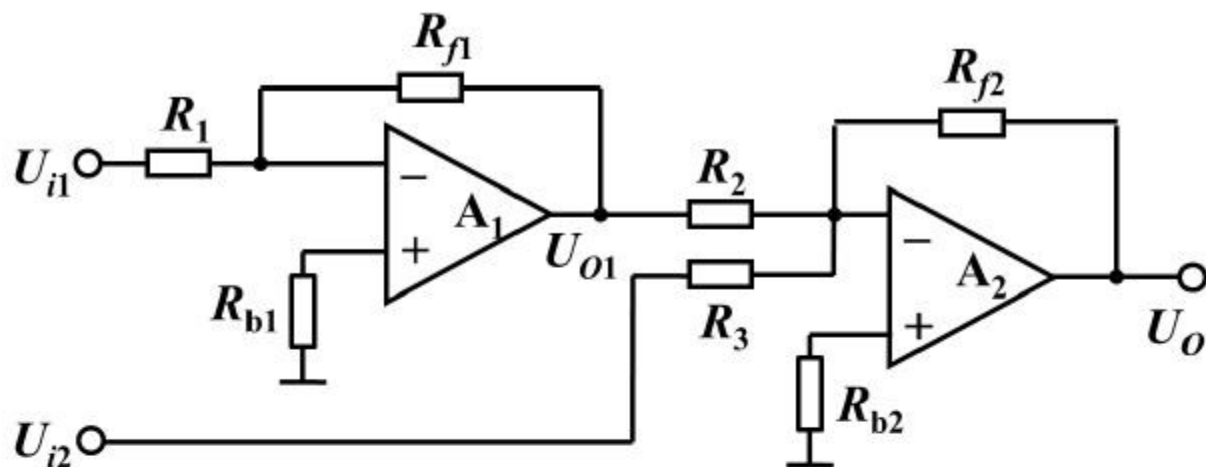
$$\frac{u_{o2} - 0}{R_5} = \frac{0 - u_{o1}}{R_5} \rightarrow u_{o2} = -u_{o1}$$

联立求解:  $u_o = u_{o1} - u_{o2} = 2u_{o1} = 2\left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right)u_I$

作业：P 294 图9-75

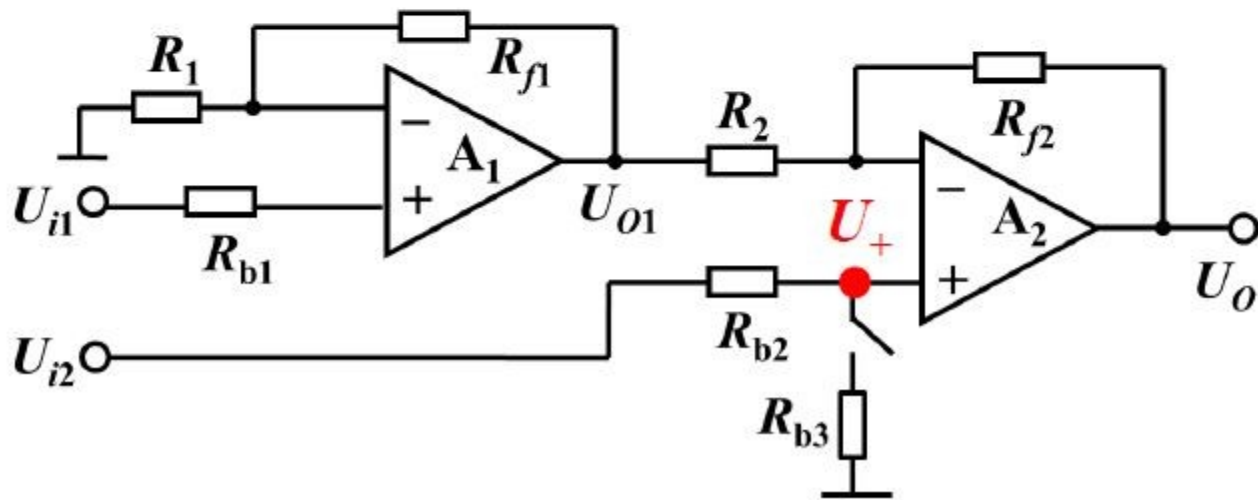
(1) 请问 $A_1$ 和 $A_2$ 分别实现了什么运算？

(2) 写出 $U_{O1}$ 、 $U_O$ 和 $R_{b2}$ 的计算表达式



P 294 图9-74 (a) (1) 请说明 $A_1$ 和 $A_2$ 分别实现了什么运算？

(2) 请写出 $U_{O1}$ 、开关打开时和闭合后 $U_O$ 的计算表达式



- P294 图9-73 (1) 请说明 $A_1$ 、 $A_2$ 和 $A_3$ 分别实现了什么运算？
- (2) 请写出 $U_{O1}$ 、 $U_{O2}$ 和 $U_{O3}$ 的计算表达式
- (3) 请找出图中两个错误的地方，并进行订正

