



合肥工业大学

HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

# 集成运算放大器

Integrated Operational Amplifier



## 目录 / contents

01

集成运放的简单介绍

02

理想运放的分析依据

03

理想运放的特点总结



# 01 集成运放的简单介绍

## 01 集成运放的简介

### 1、电路的说明

# 集 成 电 路

## 定义

- 就是把整个电路的各个元器件以及相互之间的连接同时制造在一块半导体芯片上，组成一个不可分割的整体。

## 特点

- 体积更小、
- 重量更轻、
- 功耗更低、
- 成本更低、
- 可靠性更高

## 分类

### 模拟集成电路

- 集成运算放大器
- 集成稳压电源
- 集成功率放大器
- .....

### 数字集成电路

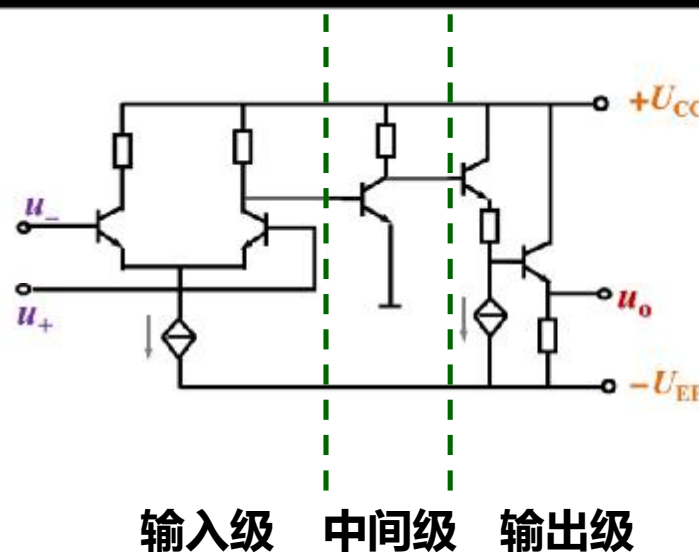
## 01 集成运放的简介

### 1、电路的说明

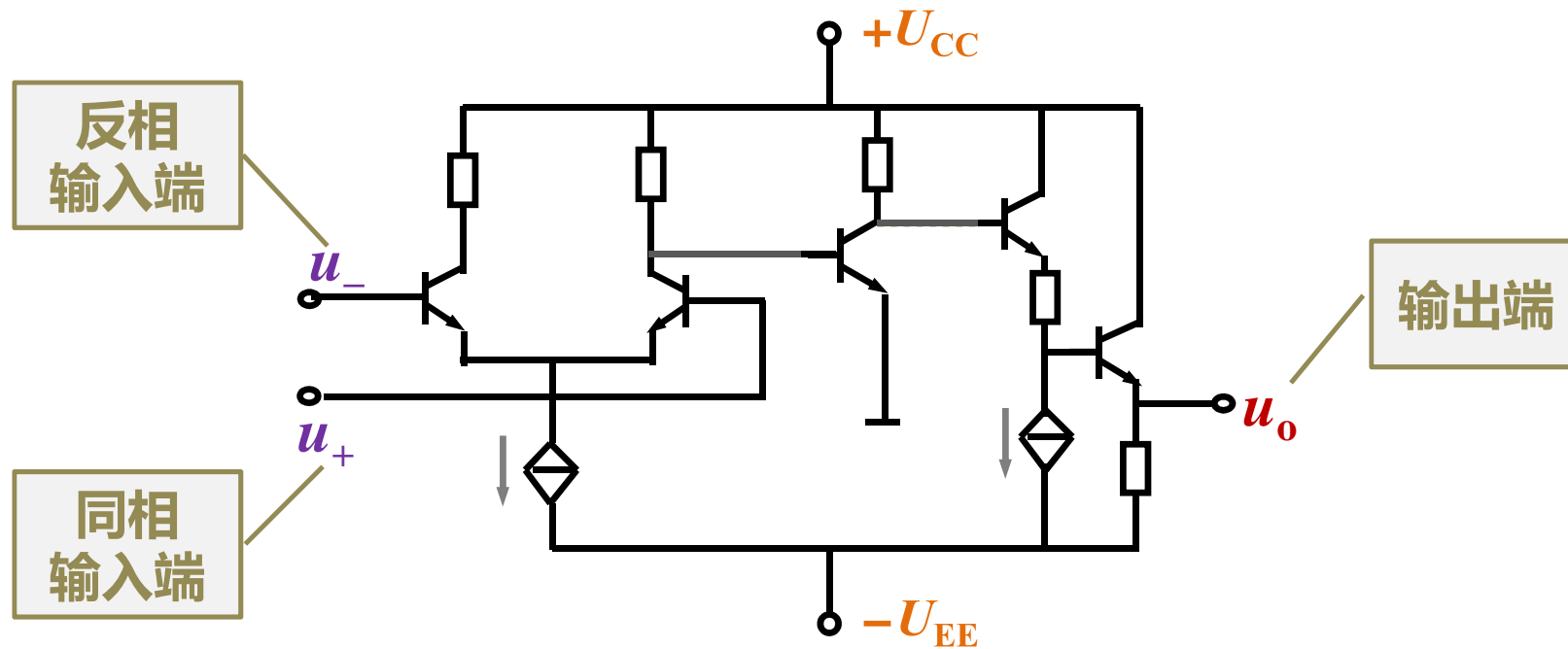
集成运算放大器是一种具有**很高放大倍数**的模拟**集成电路**。

多级直接耦合放大电路

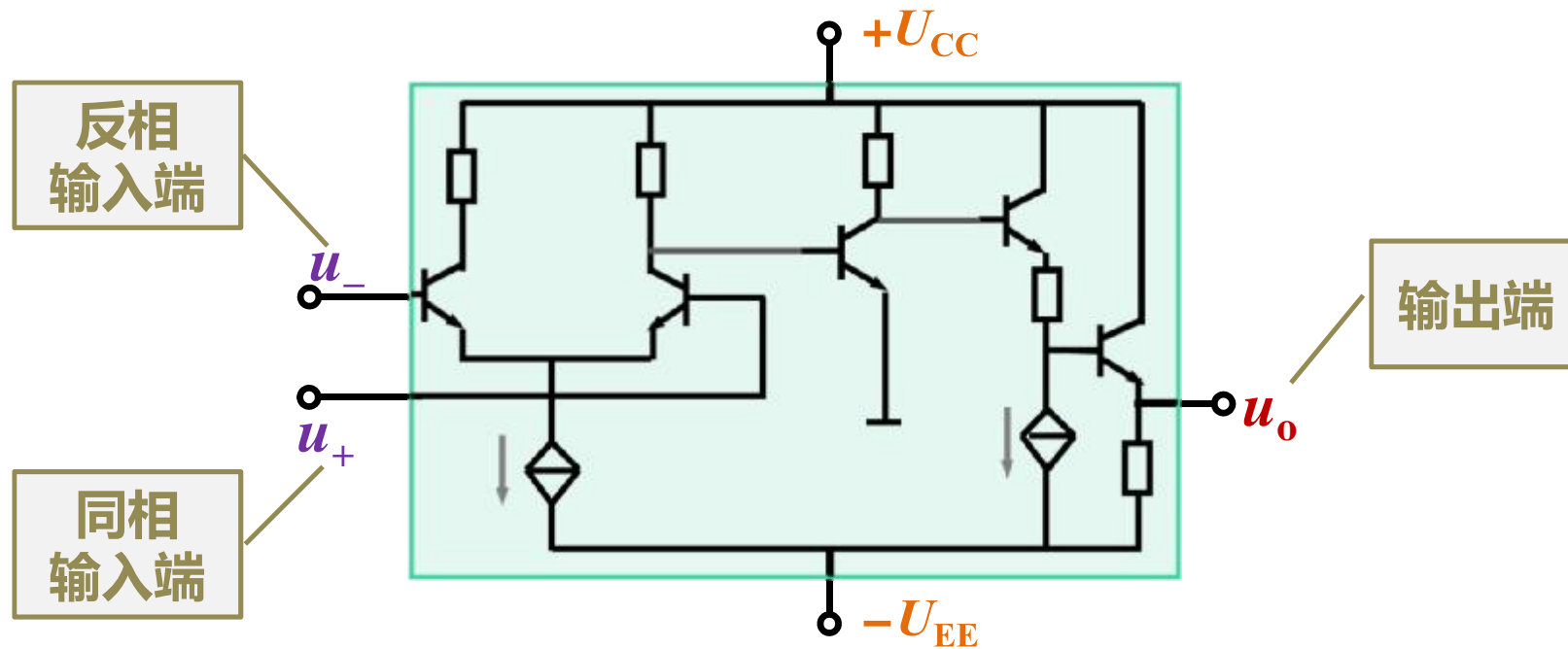
集成运放的结构



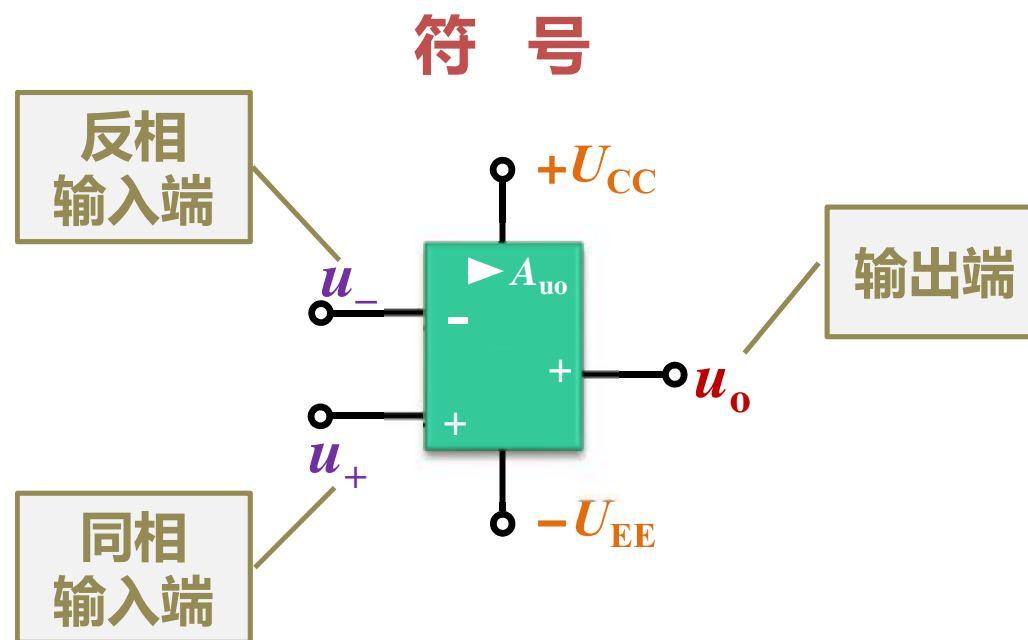
# 集成运放的结构



# 集成运放的结构



# 集成运放的结构





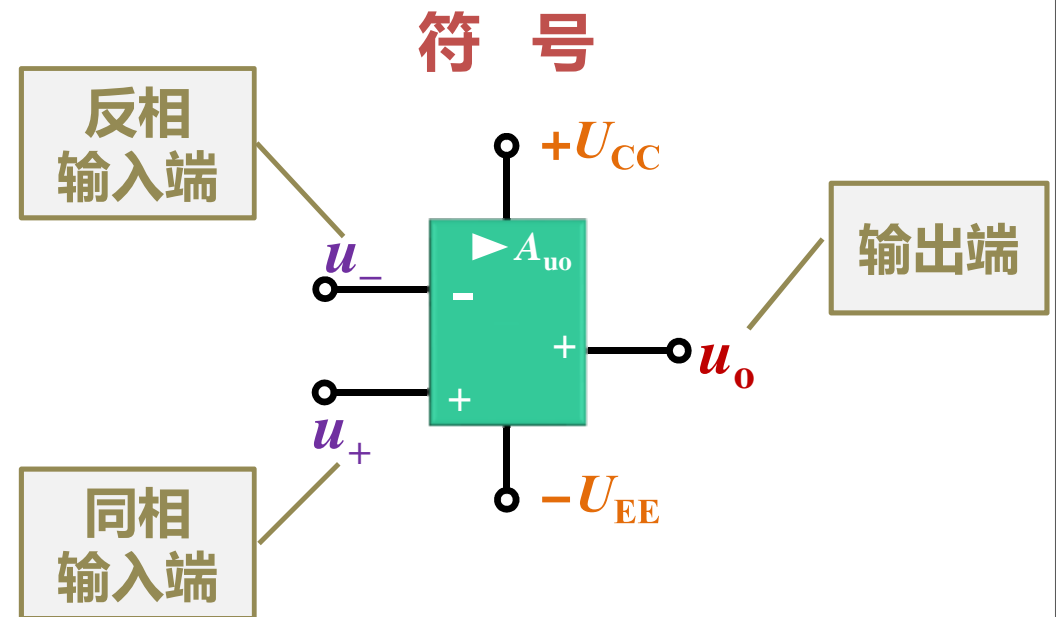
# 集成运放的结构

$u_-$  : 反相输入端  
 $u_+$  : 同相输入端  
 $u_o$  : 输出端

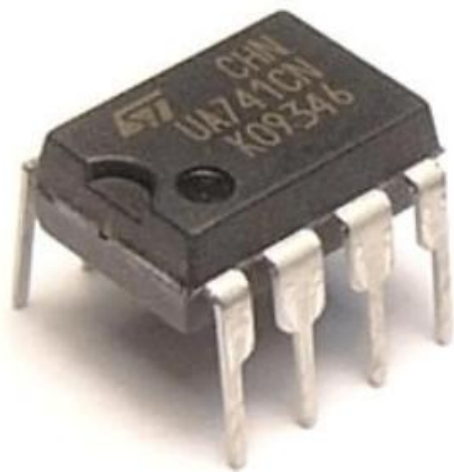
对地电位  
对地电位

▷ : 表示信号传输方向

$A_{uo}$  : 开环电压放大倍数



为了简化起见，常将电源端省去。



## 01 集成运放的简介

### 2、主要参数

#### 主要参数

##### ① 工作参数

- 最大输出电压  $U_{OPP}$
- 开环差模电压增益  $A_{uo}$

能使输出和输入保持不失真关系的最大输出电压。

无反馈时差模电压放大倍数。  
(愈大愈好)

##### ② 影响精度的参数

- 输入失调电压  $U_{IO}$
- 输入失调电流  $I_{IO}$
- 输入偏置电流  $I_{IB}$

(愈小愈好)

##### ③ 安全参数

- 共模输入电压范围  $U_{ICM}$

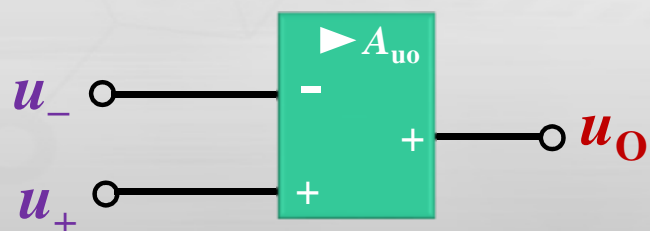
运放所能承受的共模输入电压最大值。  
(超出此值, 运放的共模抑制性能下降, 甚至造成器件损坏)

# 01 集成运放的简介

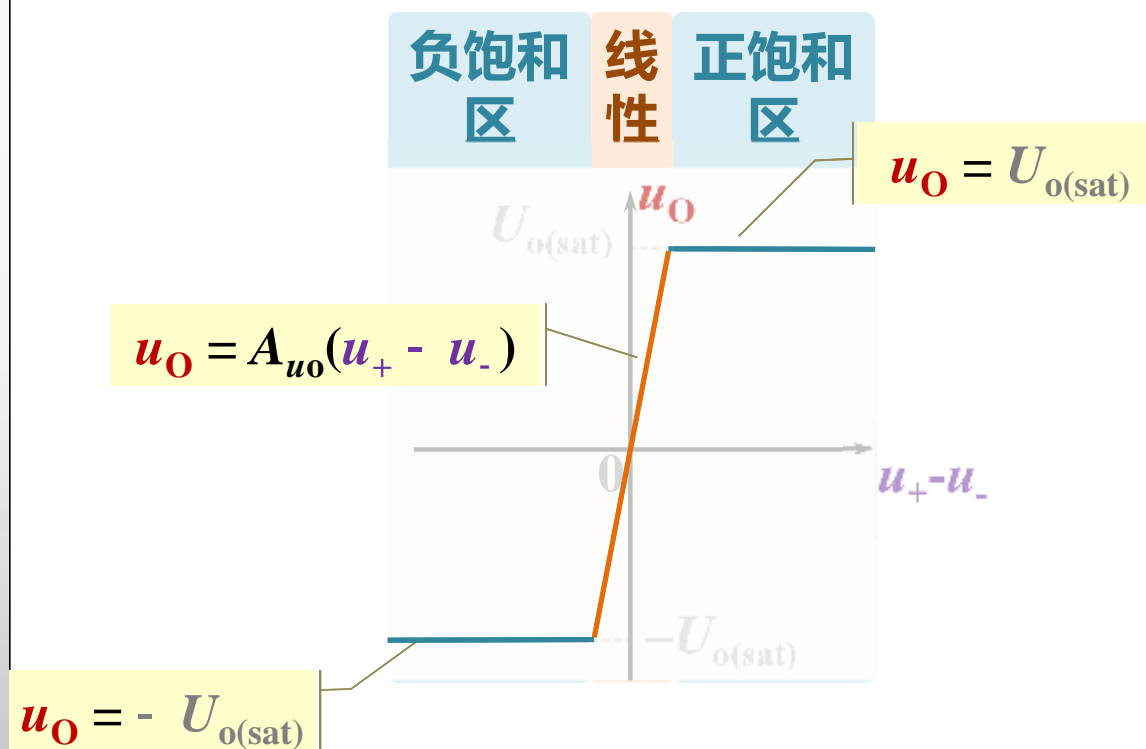
## 2、电压传输特性

### 传输特性

——表示输出电压与输入电压之间关系的曲线。



### 电压传输特性

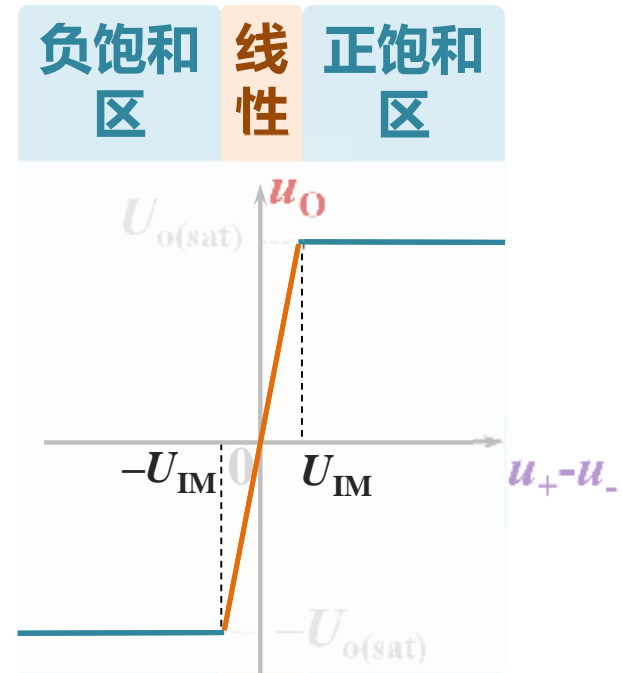


# 电压传输特性

若  $A_{uo} = 10^6$  ,  $\pm U_{o(sat)} = \pm 15 \text{ V}$   
则  $\pm U_{IM} = ?$

解： 由于  $u_O = A_{uo}(u_+ - u_-)$

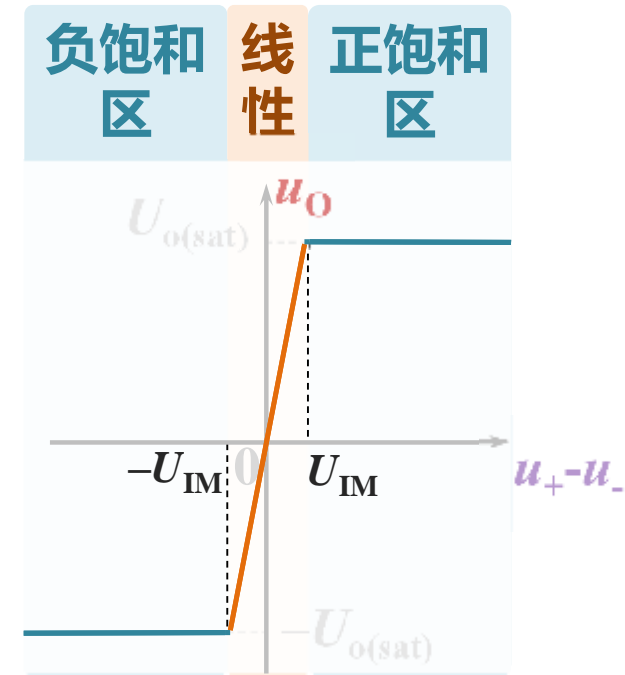
则  $\pm U_{IM} = \pm 0.015 \text{ mV}$



# 电压传输特性

如果  $A_{uo} \rightarrow \infty$  , 则传输特性有什么变化？

$A_{uo}$  越大，运放的线性范围越小。  
必须加负反馈才能使其工作于线性区

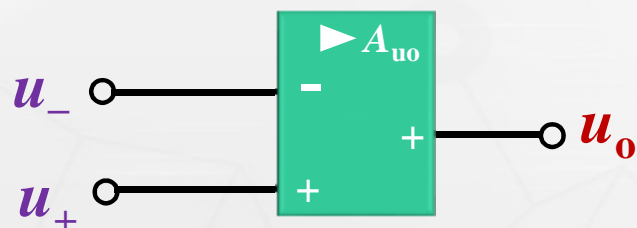


理想运算放大器！

## 02 理想运放的分析依据

## 02 理想运放分析

### 1. 理想运算放大器



#### 运算放大器理想化的主要条件

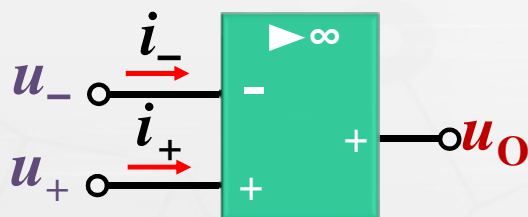
- |             |                              |
|-------------|------------------------------|
| 1. 开环电压放大倍数 | $A_{uo} \text{ (R)} \infty$  |
| 2. 差模输入电阻   | $r_{id} \text{ (R)} \infty$  |
| 3. 开环输出电阻   | $r_o \text{ (R)} 0$          |
| 4. 共模抑制比    | $K_{CMR} \text{ (R)} \infty$ |

**结论：** 实际运放的以上指标接近于**理想运放**，因而用理想运放代替实际运放进行分析，误差不大，但是简化了分析。因此**以后出现的运放都当作是理想运放**来分析。



## 02 理想运放分析

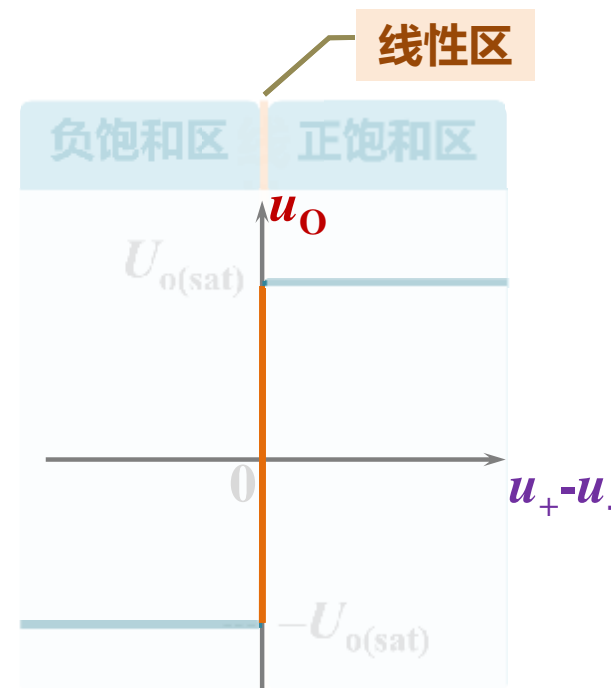
### 2. 理想运放的工作特点（线性区）



(1) 差模输入电压约等于 0  
即  $u_+ = u_-$ , 称“虚短”

因为  $u_O = A_{uo}(u_+ - u_-)$

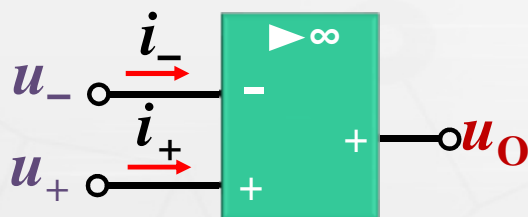
而  $A_{uo} \rightarrow \infty$ ,  $u_O$  受电源限制, 是有限值



电压传输特性  
(理想运放)

## 02 理想运放分析

### 2. 理想运放的工作特点（线性区）

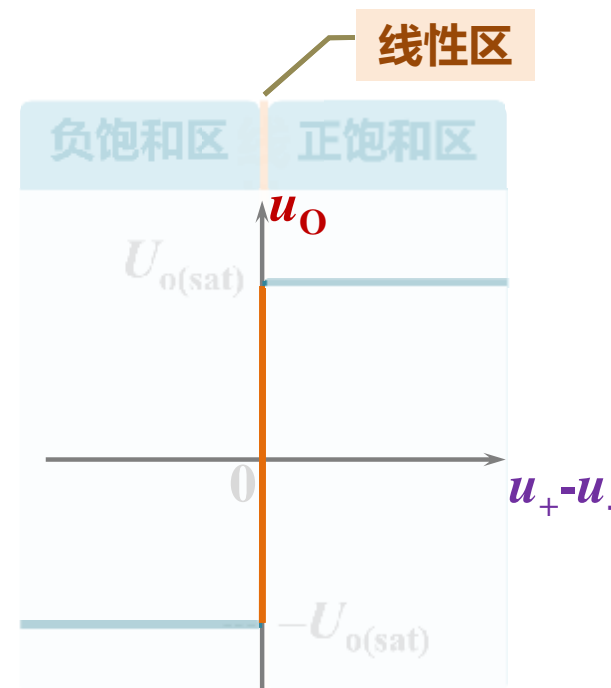


又  $i_+ = (u_+ - u_-) / r_{id}$

而  $r_{id} \textcircled{R} \neq$

(2) 输入电流约等于 0

即  $i_+ = i_- \gg 0$ , 称“虚断”



电压传输特性  
(理想运放)

## 02 理想运放分析

### 2. 理想运放的工作特点（线性区）

(1) 输出只有两种可能,  $+U_{o(sat)}$  或  $-U_{o(sat)}$

$u_+ > u_-$  时,  $u_o = +U_{o(sat)}$

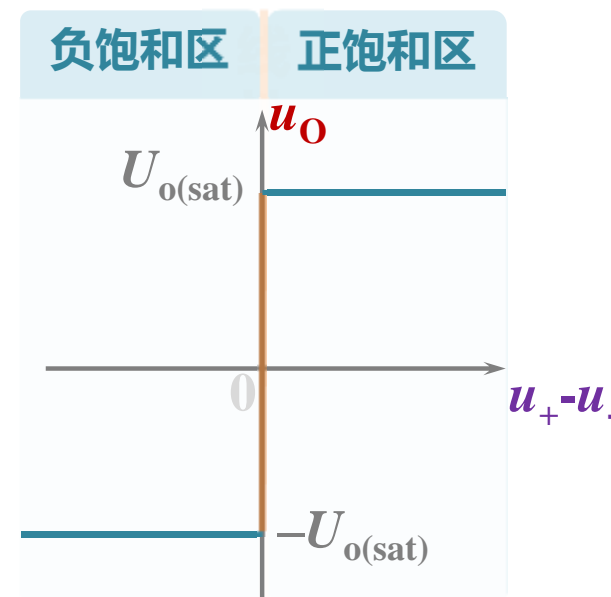
$u_+ < u_-$  时,  $u_o = -U_{o(sat)}$

不存在“虚短”现象

(2)  $i_+ = i_- \gg 0$ , 仍存在“虚断”现象

又  $i_+ = (u_+ - u_-) / r_{id}$

而  $r_{id} \textcircled{R} \neq \infty$ ,  $(u_+ - u_-)$  有限



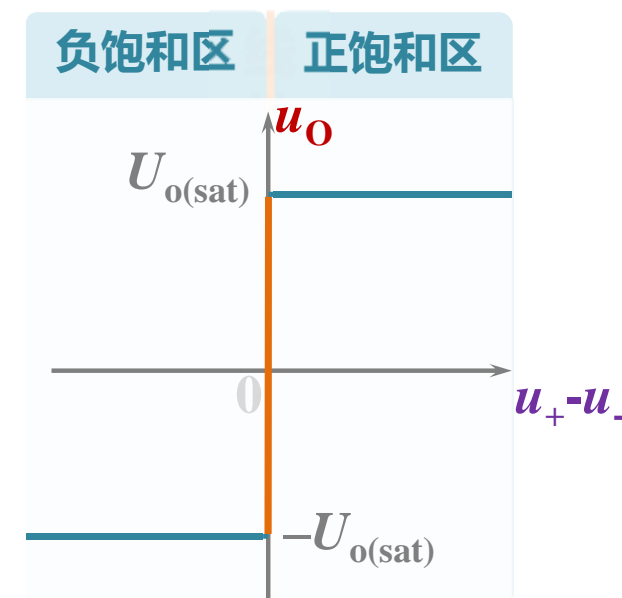
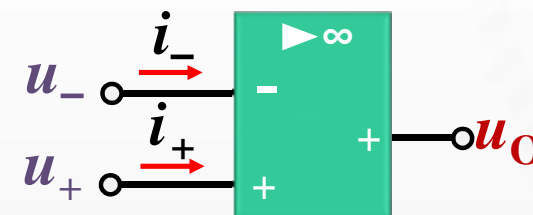
电压传输特性  
(理想运放)

## 03 理想运放的特点总结

### 03 工作特点总结

理想运放工作在线性区和饱和区的特点

工作区	线性区	饱和区
虚断	成立	成立
虚短	成立	不成立
输出	$-U_{o(sat)} < u_o < +U_{o(sat)}$	$u_o = +U_{o(sat)}, u_+ > u_-$ $u_o = -U_{o(sat)}, u_+ < u_-$
工作条件 (一般)	引入负反馈	开环, 或引入正反馈



电压传输特性  
(理想运放)



合肥工业大学

HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

# 运算放大器的线性应用

Linear Applications of Operational Amplifiers



## 目录 / contents

01

模拟运算的概念

02

比例运算与减法运算

03

其它运算电路

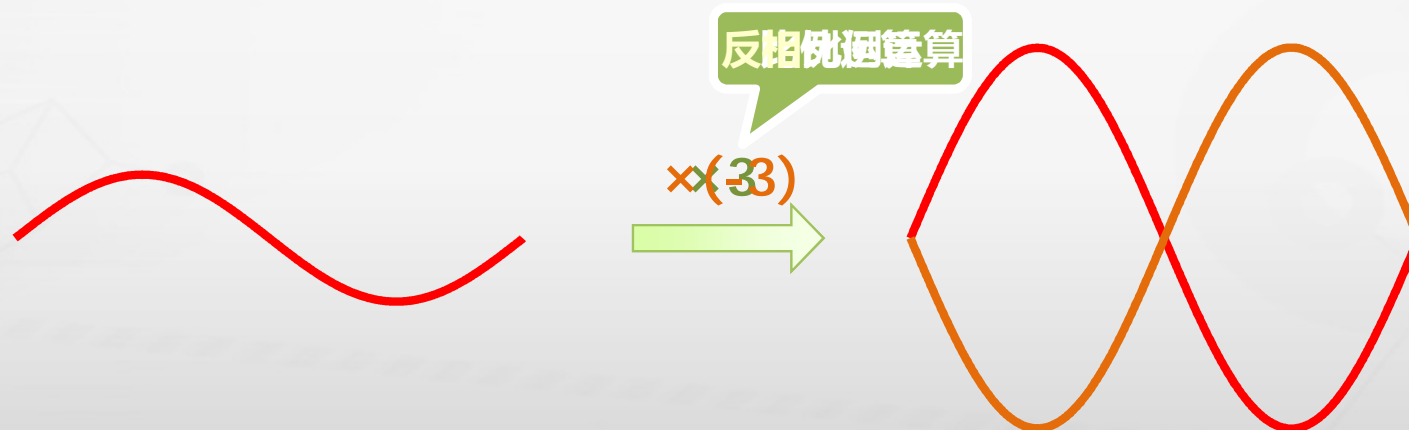


# 01 模拟运算的概念



### 问题一

什么是模拟运算？它和数字运算有何不同？

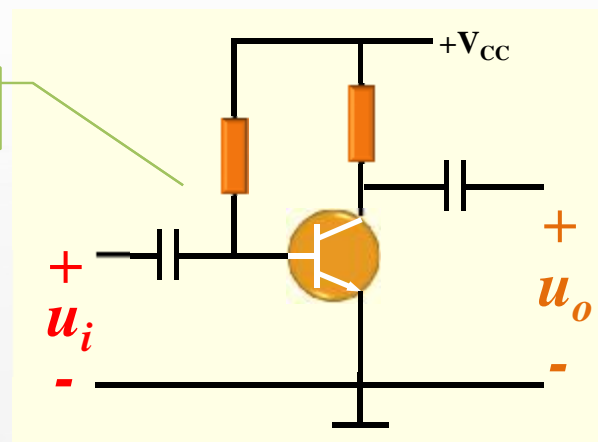


## 01 模拟运算的概念

### 问题

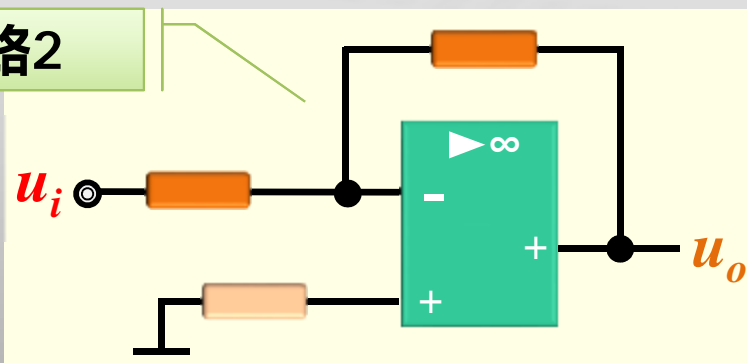
除了比例运算，还有哪些常见的模拟运算？

运算电路1



$\times (-3)$

运算电路2



## 01 模拟运算的概念

①比例运算

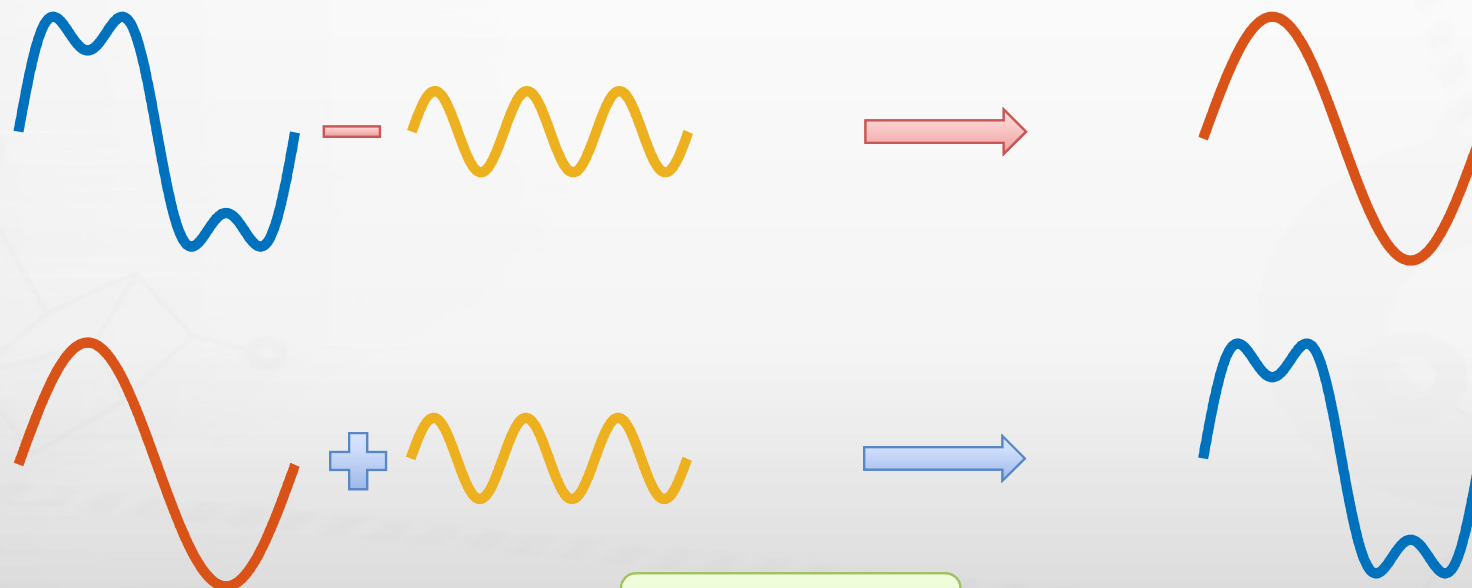
②减法运算

③加法运算

④积分运算

⑤微分运算

.....



遵循“虚短”原则

工作于线性区  
必须加负反馈

遵循“虚断”原则

# 01 模拟运算的概念

①比例运算

②减法运算

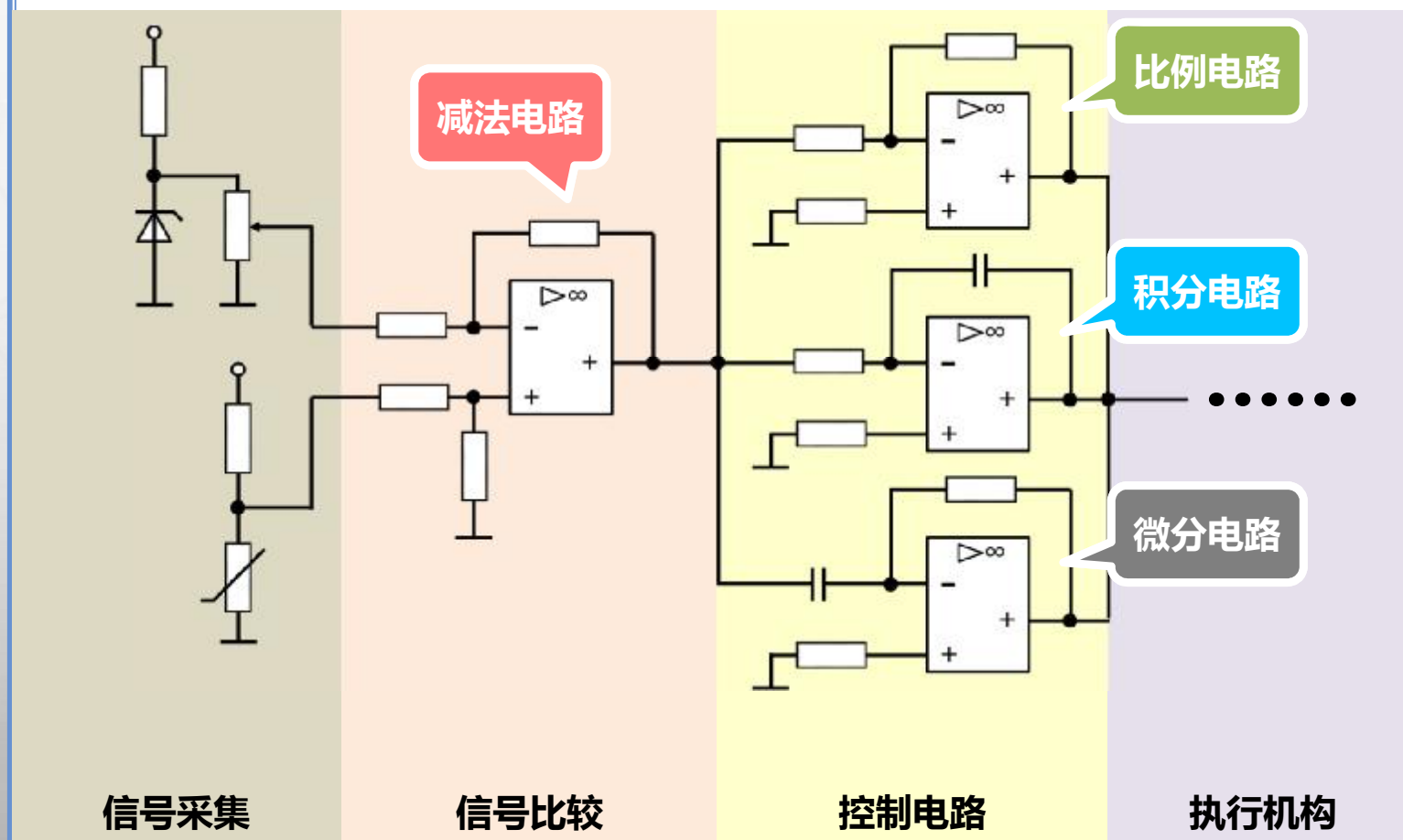
③加法运算

④积分运算

⑤微分运算

.....

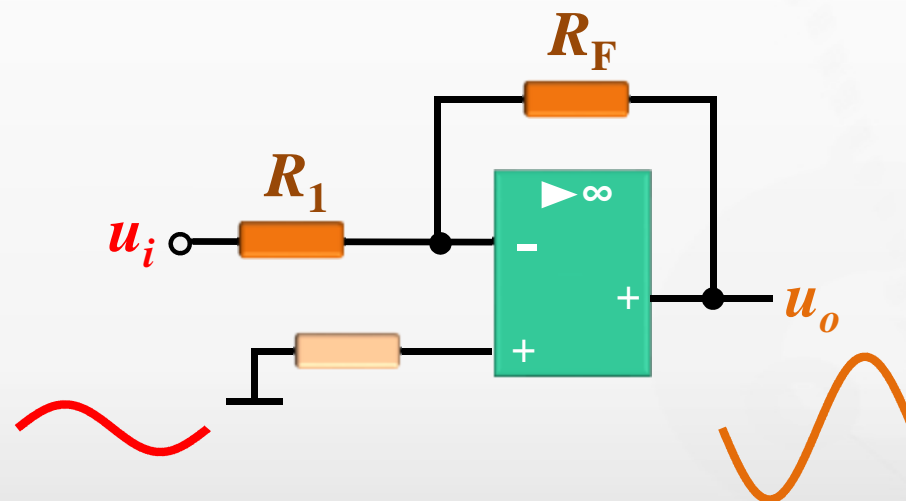
## 恒温控制电路



## 02 比例运算与减法运算

## 02 比例/减法运算

### 1. 比例运算电路



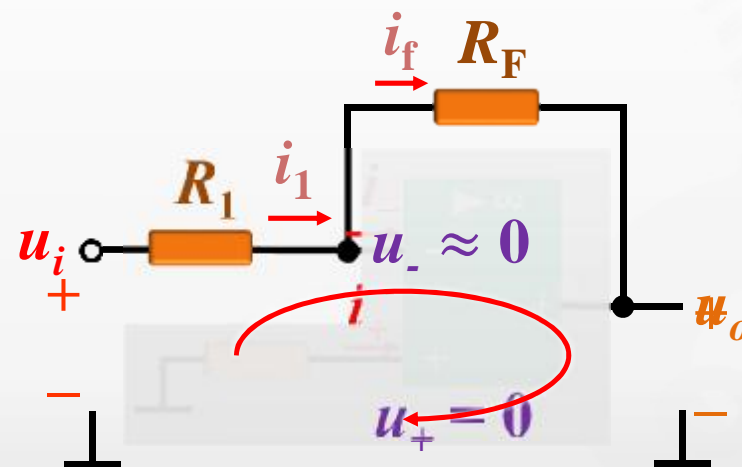
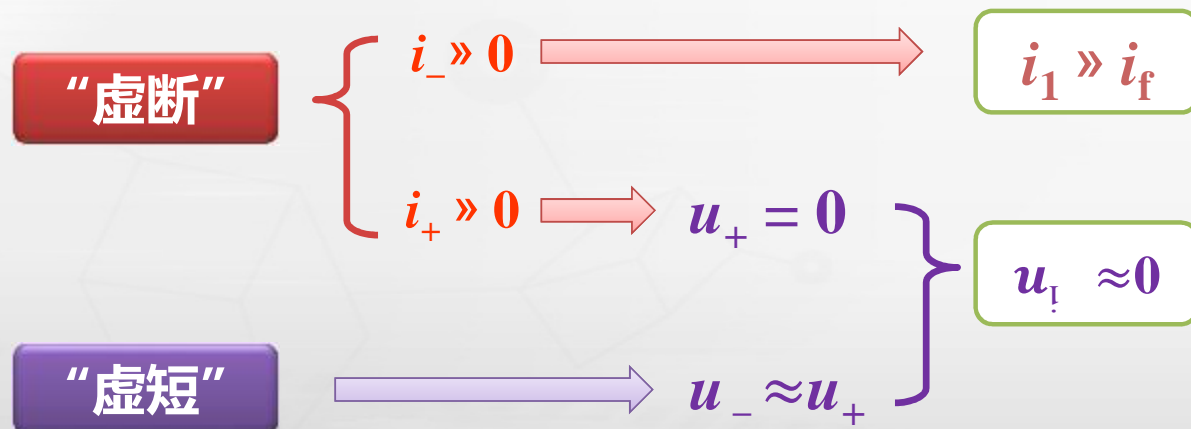
### 分析依据

$i_+ = i_- \approx 0$ , “虚断”

有负反馈  $u_+ \approx u_-$ , “虚短”  
(深度)

## 02 比例/减法运算

### 1. 比例运算电路



分析总结

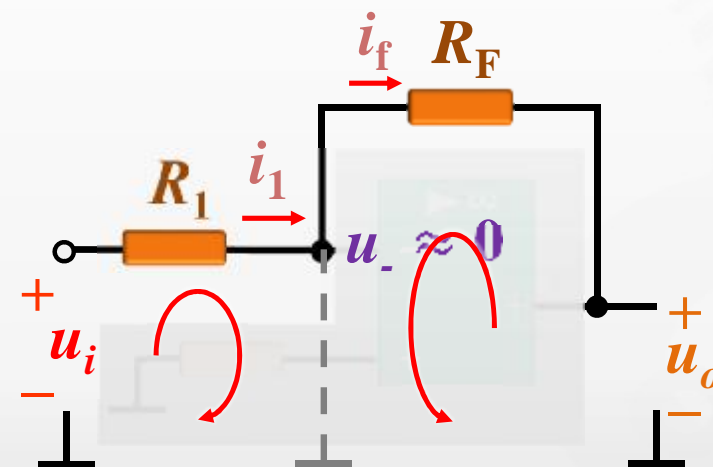
- $r_{id} \rightarrow \infty$   $i_+ = i_- \approx 0$ , “虚断”
- 有负反馈  $u_+ \approx u_-$ , “虚短”

## 02 比例/减法运算

### 反相比例运算电路

$$i_1 \gg i_f$$

$$u_- \approx 0$$



结论：

$$\textcircled{1} \quad u_o = -\frac{R_F}{R_1} u_i$$

$$i_{i1} = \frac{u_i}{R_1} \quad i_{f1} = -\frac{u_o}{R_F}$$



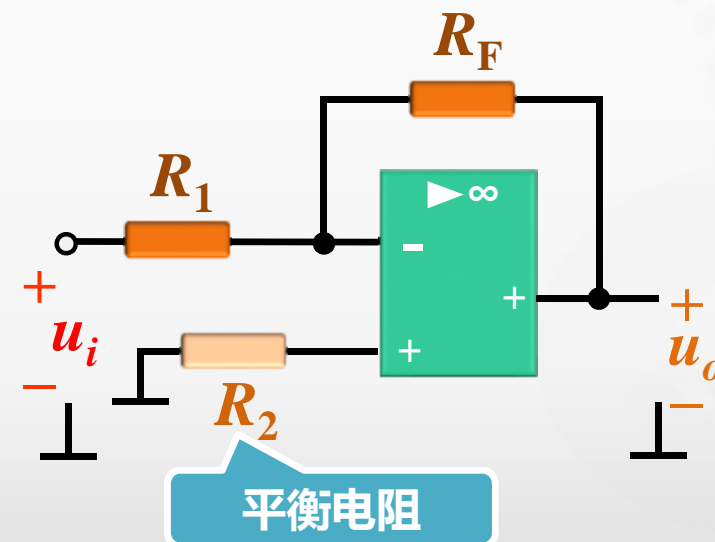
$$u_o = -\frac{R_F}{R_1} u_i$$

$$\sim \text{电压} : \beta \frac{u_i}{R_1}$$



## 02 比例/减法运算

### 反相比例运算电路



结论：

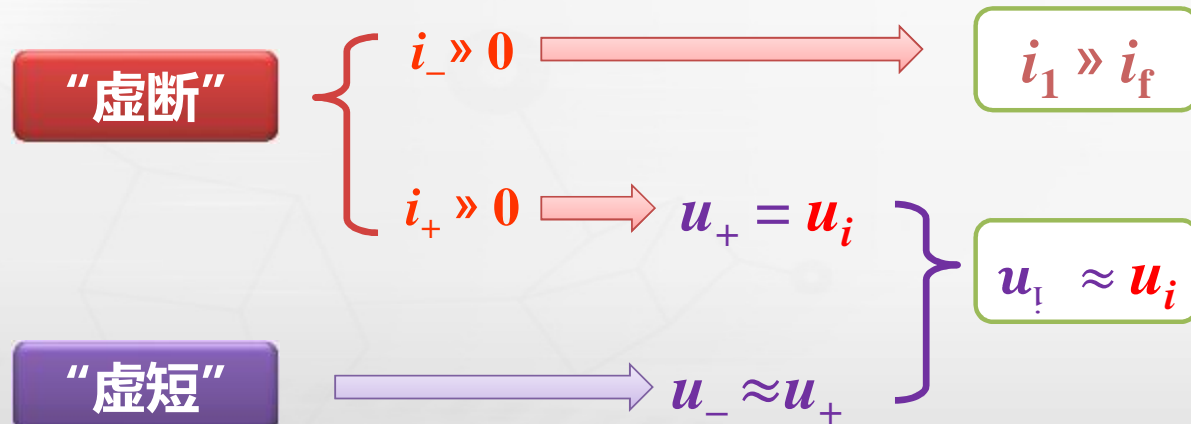
①  $u_o = -\frac{R_F}{R_1} u_i$

② 平衡电阻  $R_2 = R_1 // R_F$

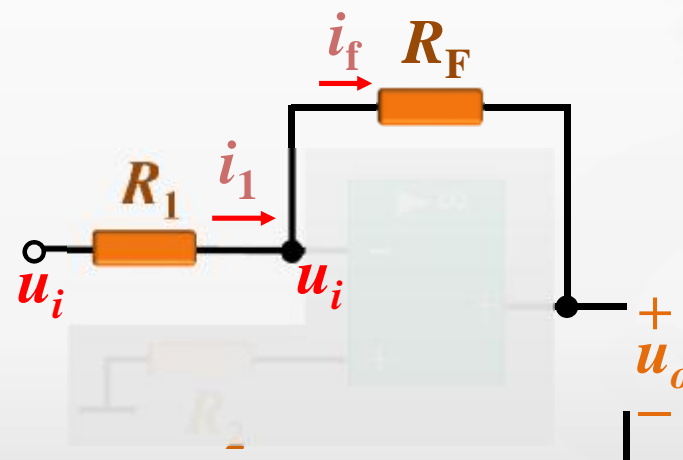
要求静态时  
 $u_+$ 、 $u_-$  对地电阻相同

## 02 比例/减法运算

### 1. 比例运算电路



### 同相比例运算电路

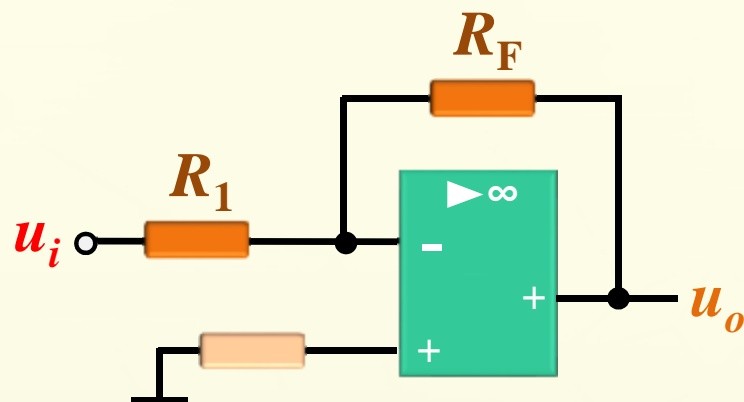


结论：

$$\textcircled{1} u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_i$$

## 02 比例/减法运算

### 反相比例运算电路

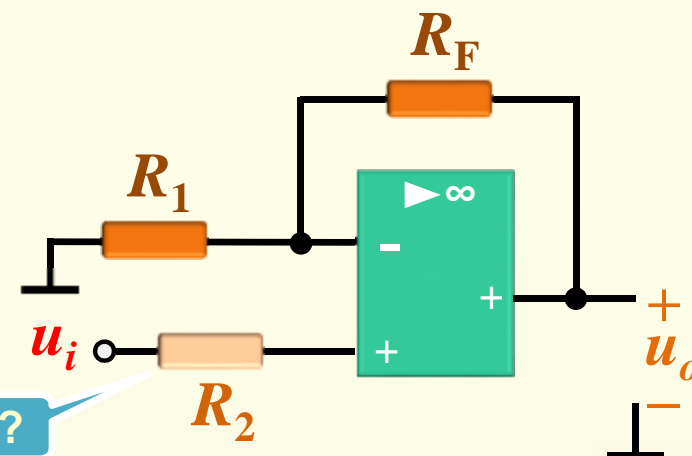


结论：

$$\textcircled{1} \quad u_o = -\frac{R_F}{R_1} u_i$$

$$\textcircled{2} \quad \text{平衡电阻 } R_2 = R_1 // R_F$$

### 同相比例运算电路



平衡电阻？

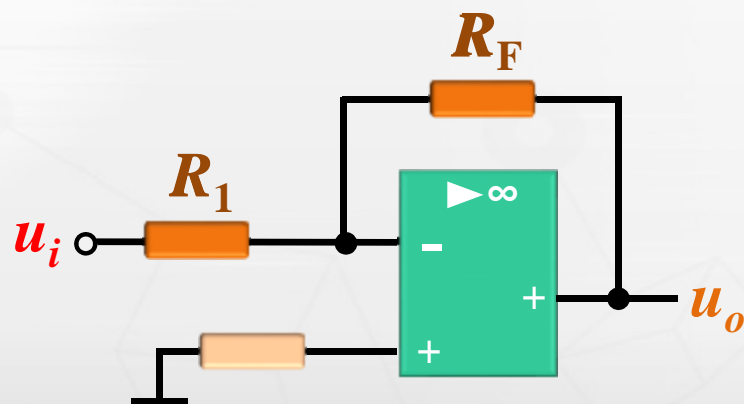
结论：

$$\textcircled{1} \quad u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_i$$

$$\textcircled{2} \quad \text{平衡电阻 } R_2 = R_1 // R_F$$

## 02 比例/减法运算

### 反相比例运算电路



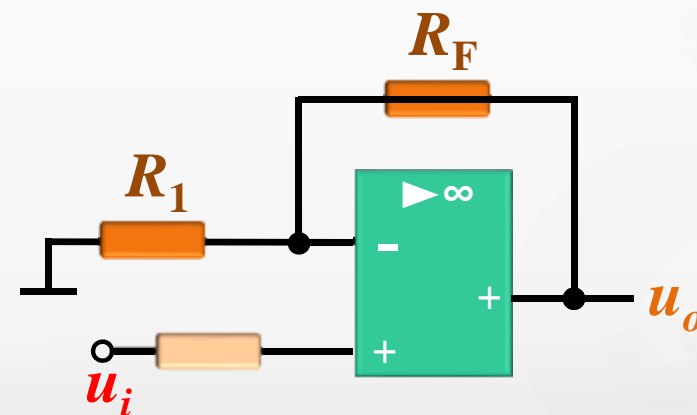
若  $R_1 = R_F$

$$\textcircled{1} \quad u_o = -\frac{R_F}{R_1} u_i$$

$$u_o = -u_i$$

反相器

### 同相比例运算电路



若  $R_F = 0$   
或  $R_1 = \infty$

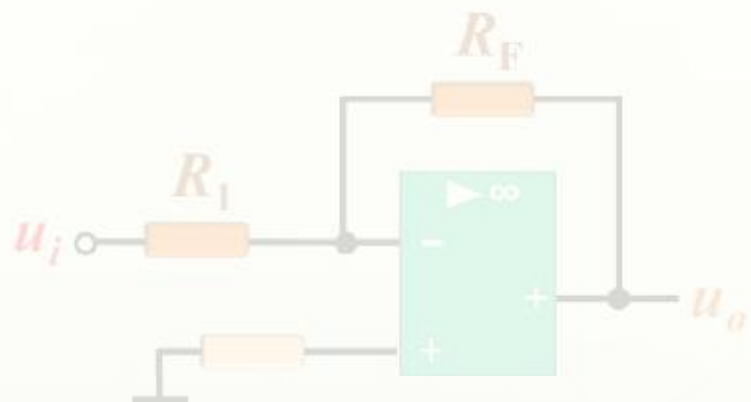
$$\textcircled{1} \quad u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_i$$

电压跟随器

$$u_o = u_i$$

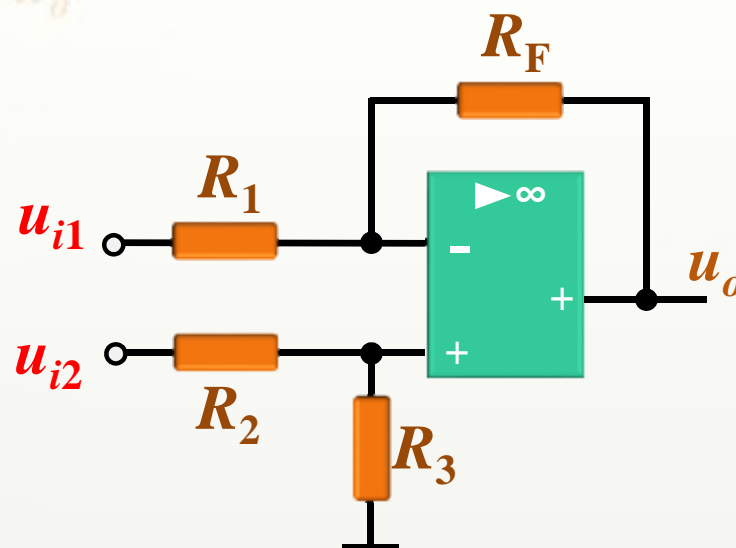
## 02 比例/减法运算

### 反相比例运算电路

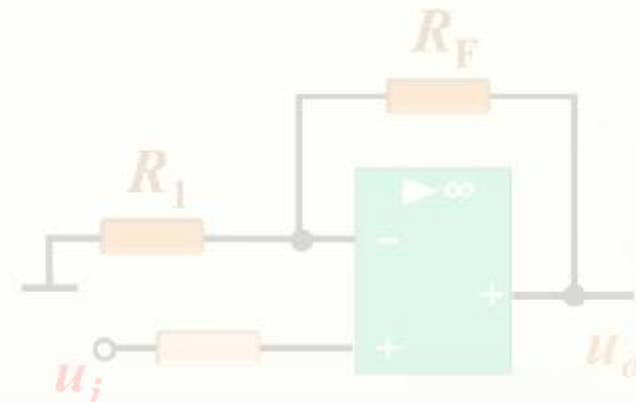


### 减法运算电路

如何求解？

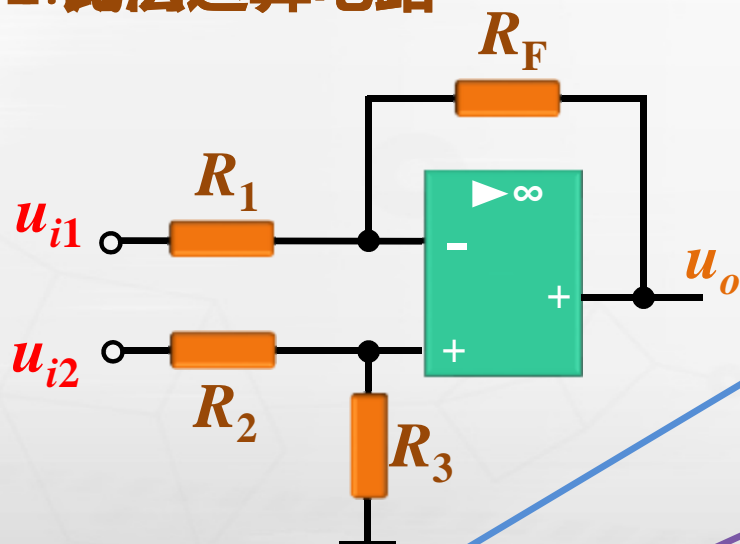


### 同相比例运算电路



## 02 比例/减法运算

### 2. 减法运算电路



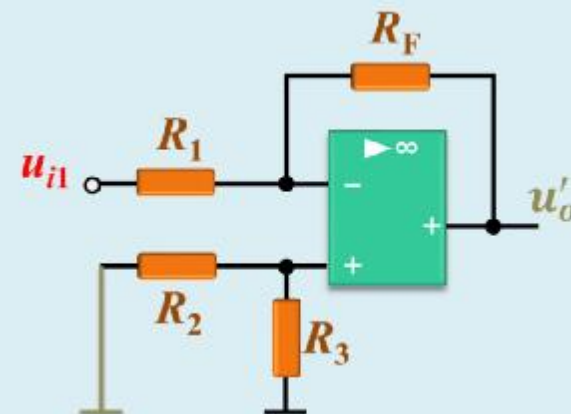
#### 方法1：叠加原理

$$u_o = u_o' + u_o''$$

$$= \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} - \frac{R_F}{R_1} u_{i1}$$

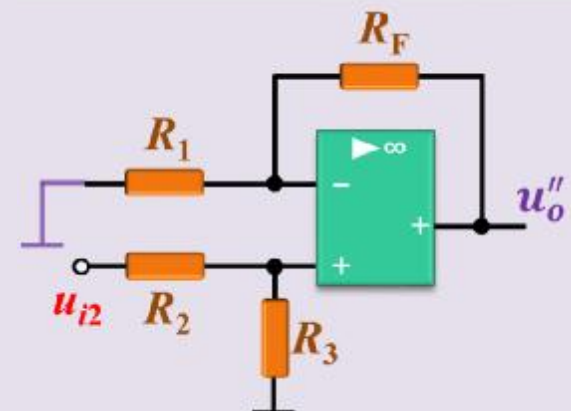
$u_{i1}$  单独作用:

$$u_o' = -\frac{R_F}{R_1} u_{i1}$$



$u_{i2}$  单独作用:

$$u_o'' = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2}$$



## 02 比例/减法运算

### 2. 减法运算电路

方法2：虚短、虚断

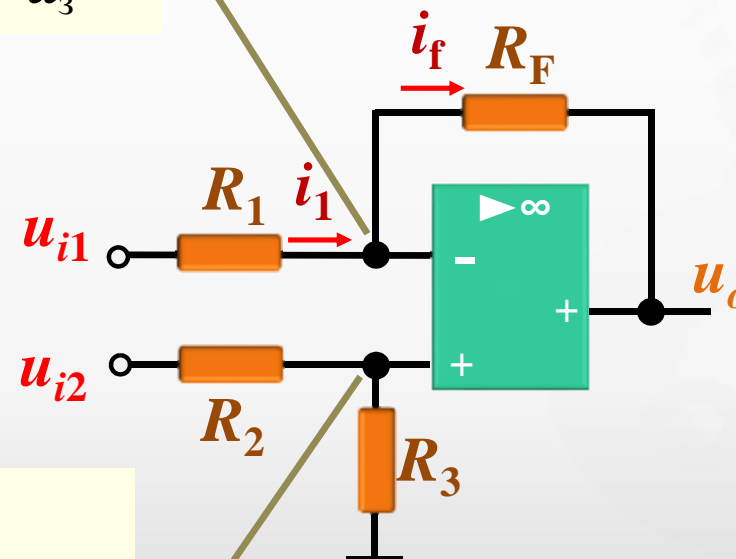
$$i_{\tilde{i}} = \frac{u_{\tilde{i}} - u_{\tilde{i}}}{R_{\tilde{i}}}$$

$$i_{\check{h}} = \frac{u_{\check{h}} - u_{\check{h}}}{R}$$

$$i_{\tilde{i}} = i_{\check{h}}$$

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} - \frac{R_F}{R_1} u_{i1}$$

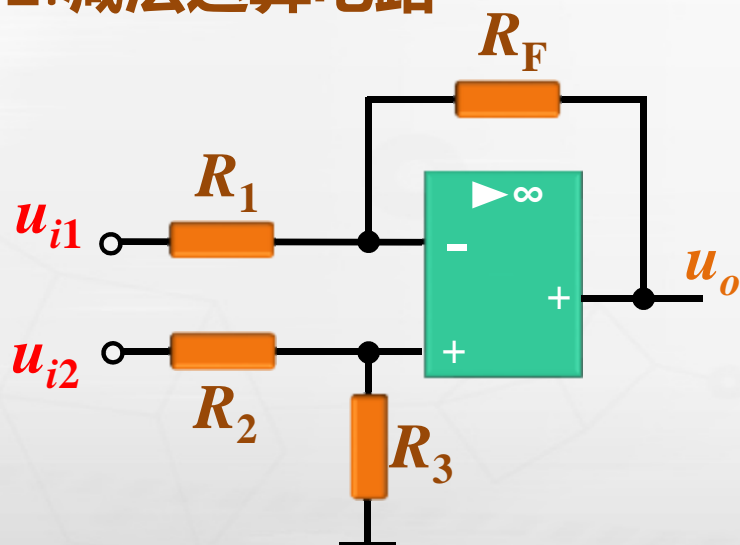
$$u_{\tilde{i}} = u_3$$



$$u_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2}$$

## 02 比例/减法运算

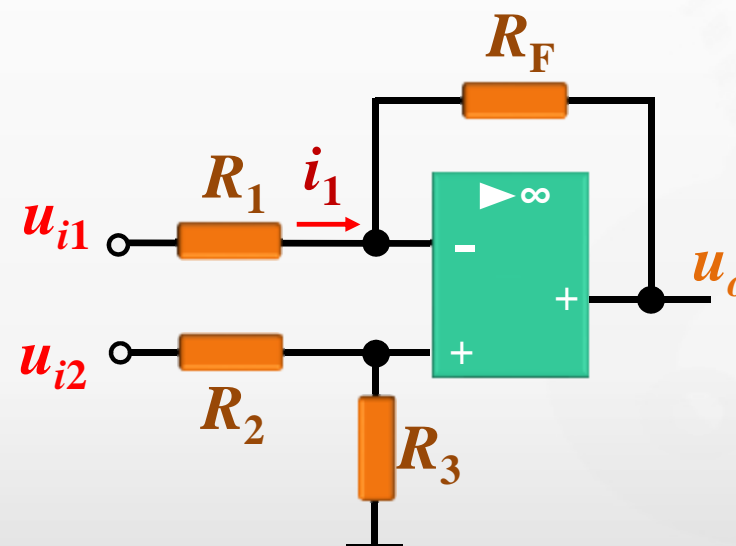
### 2. 减法运算电路



#### 方法1：叠加原理

$$u_o = u_{o\phi} + u_{o\psi}$$

$$= \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} - \frac{R_F}{R_1} u_{i1}$$



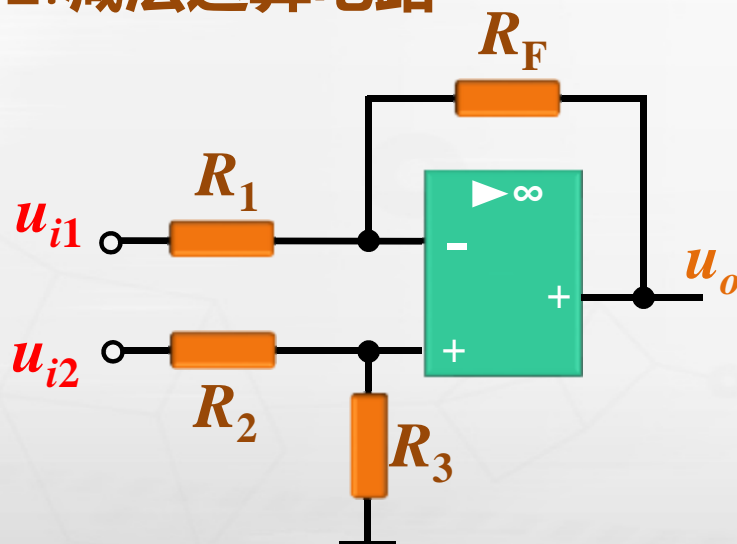
#### 方法2：虚短、虚断

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} - \frac{R_F}{R_1} u_{i1}$$



## 02 比例/减法运算

### 2. 减法运算电路



$$u_o = u_o^+ + u_o^-$$

$$= \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} - \frac{R_F}{R_1} u_{i1}$$

当  $R_{\tilde{i}} = R_{\bar{i}}$  ,  $R_{\tilde{e}} = R_{\bar{e}}$  时

$$u_c = -\frac{R_{\tilde{e}}}{R_{\tilde{i}}} (u_{\tilde{i}} - u_{\bar{i}})$$

当  $R_{\tilde{i}} = R_{\tilde{e}}$  时

$$A_{v\tilde{h}} = -\frac{R_{\tilde{e}}}{R_{\tilde{i}}}$$

$$u_c = -(u_{\tilde{i}} - u_{\bar{i}})$$

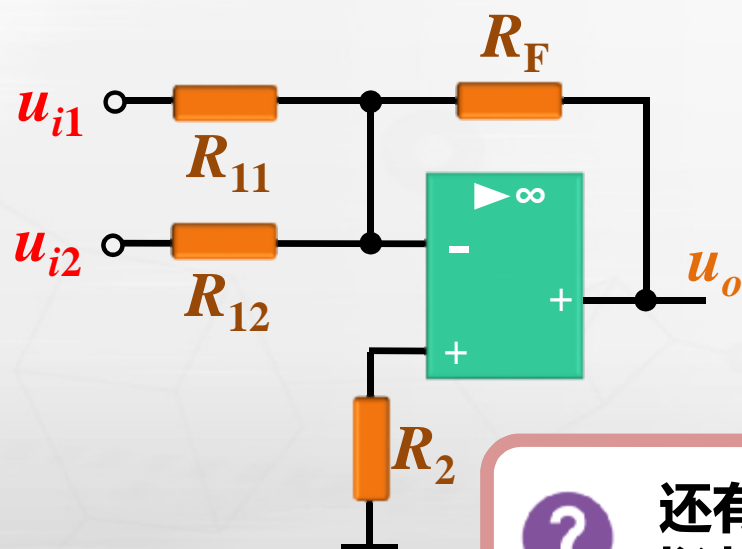
注：

$$R_2 // R_3 = R_1 // R_F$$

## 03 其它运算电路

## 03 其它运算电路

### 1. 反相加法运算电路



$$u_o = u_o' + u_o''$$

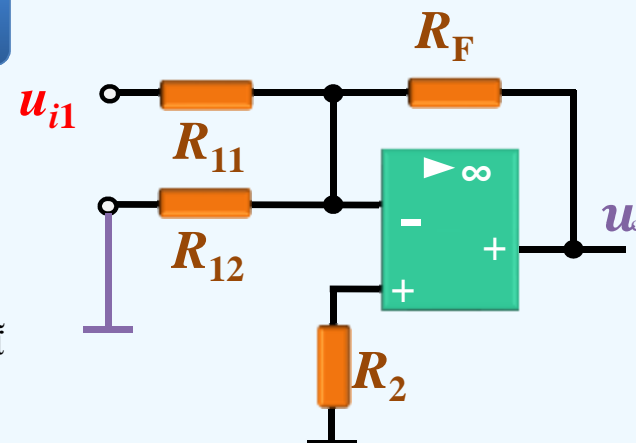
$$= -\left(\frac{R_F}{R_{11}} u_{i1} + \frac{R_F}{R_{12}} u_{i2}\right)$$



还有别的求法吗？

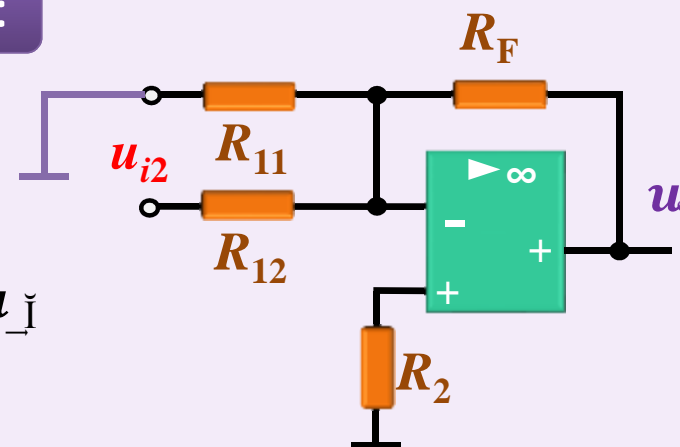
$u_{i1}$  单独作用:

$$u_o = -\frac{R_F}{R_{11}} u_{i1}$$



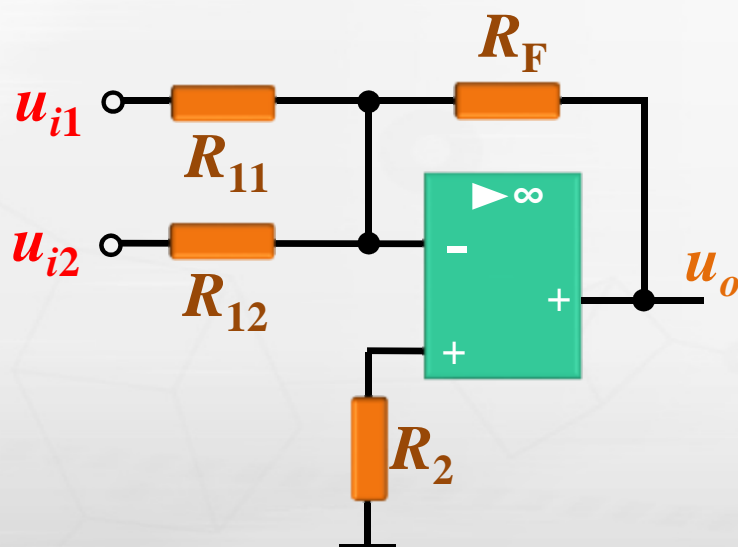
$u_{i2}$  单独作用:

$$u_o = -\frac{R_F}{R_{12}} u_{i2}$$



## 03 其它运算电路

### 1. 反相加法运算电路



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

$$= -\left(\frac{R_F}{R_{11}} u_{i1} + \frac{R_F}{R_{12}} u_{i2}\right)$$

当  $R_{11} = R_{12} = R_p$  时

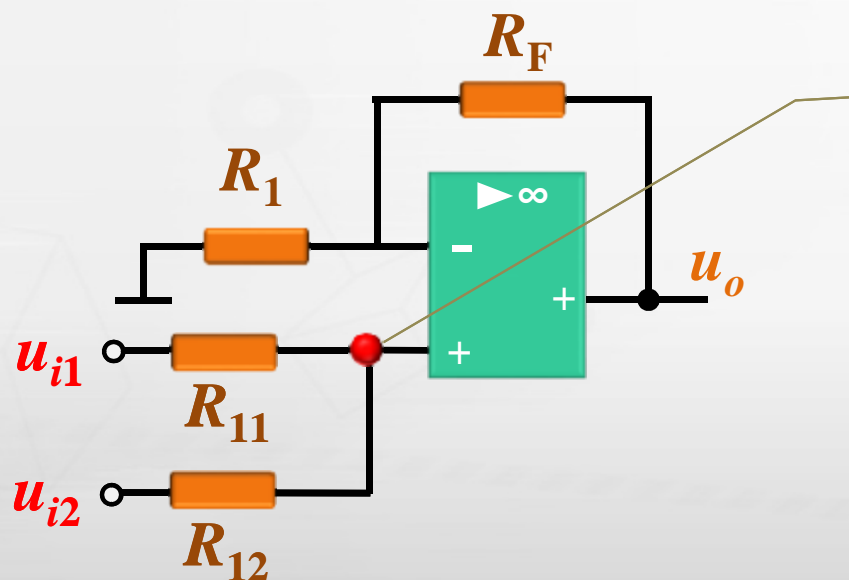
$$u_o = -\frac{R}{R_{\tilde{i}}} (u_{\tilde{i}} + u_{\check{i}})$$

当  $R_{\tilde{i}} = R_{\check{i}}$  时

$$u_o = -(u_{\tilde{i}} + u_{\check{i}})$$

平衡电阻  $R_2 = R_{11} // R_{12} // R_F$

### 2. 同相加法运算电路



$u_+ = ?$

$$\begin{aligned} u_+ &= (u_{i1} - u_{i2}) \frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}} + u_{i2} \\ &= \frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}} u_{i1} + \frac{R_{11}}{R_{11} + R_{12}} u_{i2} \end{aligned}$$

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_+ \quad u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \left( \frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}} u_{i1} + \frac{R_{11}}{R_{11} + R_{12}} u_{i2} \right)$$