

# 运算放大器

---

1. 集成运算放大器
2. 集成运算放大器的应用

# 1. 集成运算放大器

集成电路分类

**模拟集成电路：** 集成运算放大器、

集成功率放大器、集成稳压电源、

集成A/D D/A等。

**数字集成电路**

**集成运算放大器**是一种**高电压增益**、**高输入电阻**和**低输出电阻**的多级直接耦合放大电路。是发展最早、应用最广泛的一种**模拟集成电路**。

集成运算放大器的特点

(1) 级间采用直接耦合方式

在集成电路工艺中难于制造电感元件；制造容量大于200pF的电容也比较困难，因而放大器各级之间都采用直接耦合，必须使用电容的场合，也大多采用外接的方法。

# 1. 集成运算放大器

---

## (2) 电路结构和参数具有对称性

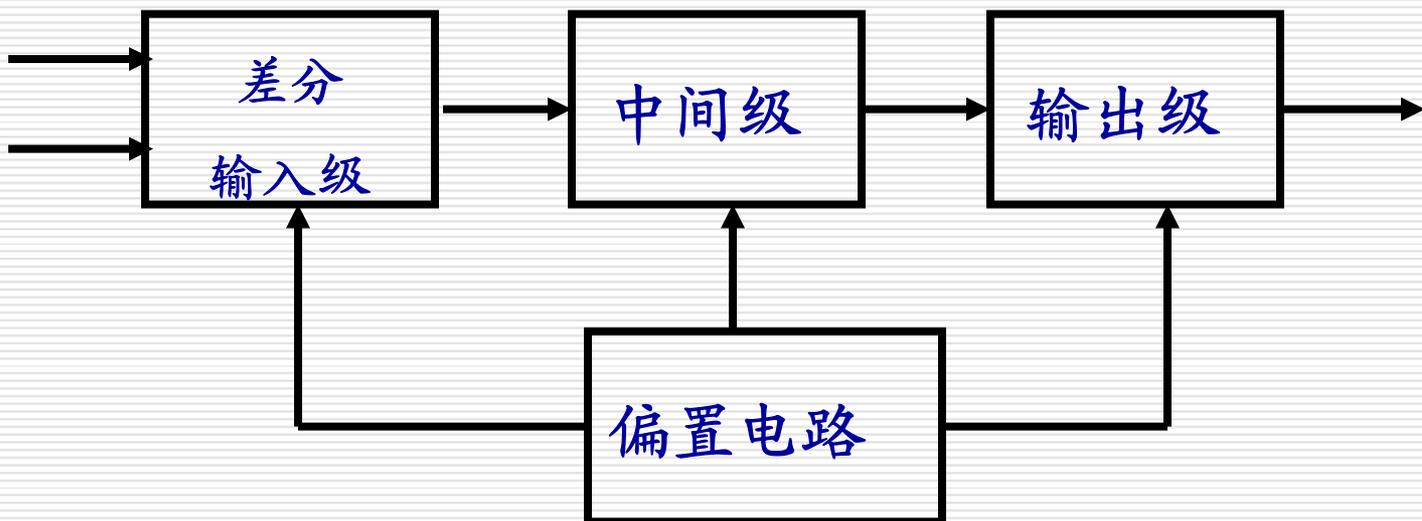
由于集成电路中的各个元件是通过同一工艺过程制作在同一硅片上，同一片内的元件参数绝对值有同向的偏差，温度均一性好

## (3) 用有源器件代替无源器件

集成电路中的电阻是由硅半导体的体电阻构成，阻值大约为 $100\Omega \sim 30K$ ，且阻值精度不高，因此常常用晶体管恒流源代替电阻（动态电阻）；必须使用直流高阻值的场合，也大多采用外接的方法。

# 1. 集成运算放大器

## 一、电路的基本组成及作用



**输入级：**要求输入电阻高，差模放大倍数高，抑制零点漂移和共模干扰信号的能力强。都采用差分放大电路。

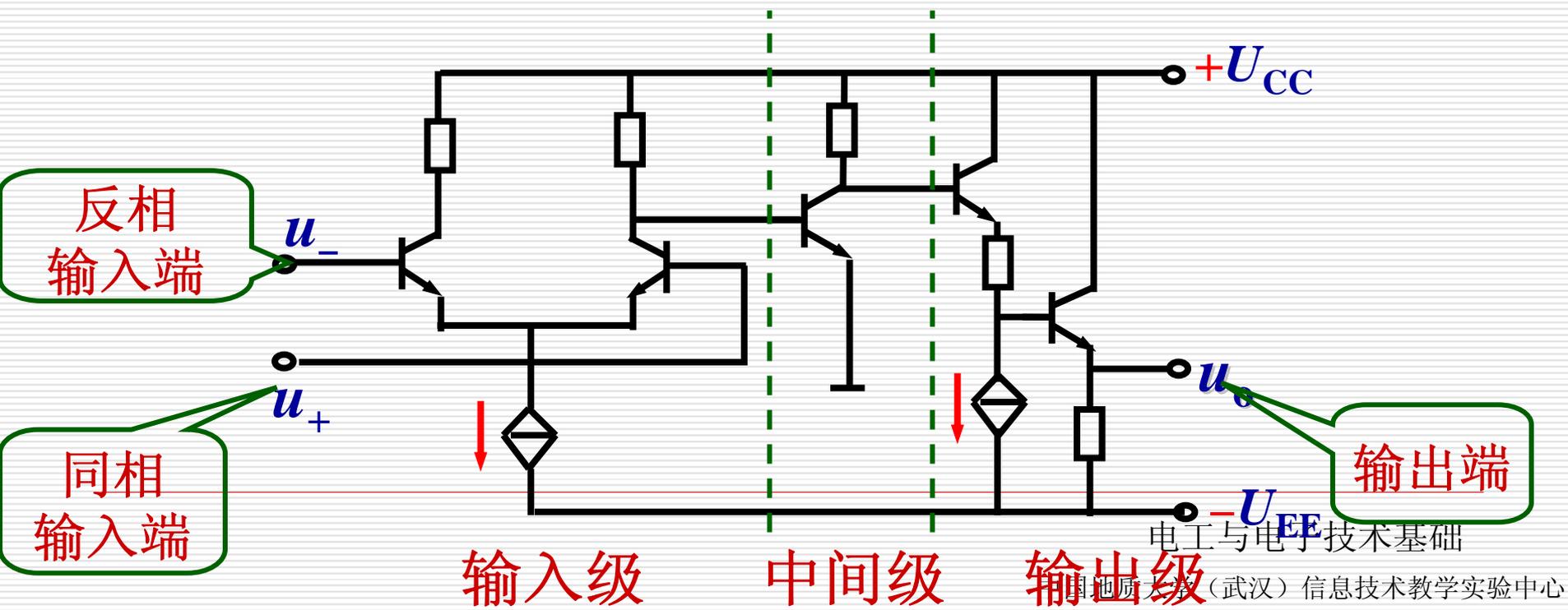
**中间级：**要求电压放大倍数高。常采用带恒流源的共发射极放大电路构成。

# 1. 集成运算放大器

## 一、电路的基本组成及作用

**偏置电路：**为各级放大电路提供稳定和合适的偏置电流，决定各级的静态工作点，一般由恒流源电路构成。

**输出级：**与负载相接，要求输出电阻低，带负载能力强，一般由互补对称电路或射极输出器构成。



# 1. 集成运算放大器

## 主要参数

1. 最大输出电压  $U_{OPP}$

能使输出和输入保持不失真关系的最大输出电压。

2. 开环差模电压增益  $A_{uo}$

运放没有接反馈电路时的差模电压放大倍数。  $A_{uo}$  愈高，所构成的运算电路越稳定，运算精度也越高。

3. 输入失调电压  $U_{I0}$

4. 输入失调电流  $I_{I0}$

5. 输入偏置电流  $I_{IB}$

} 愈小愈好

6. 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。

# 1. 集成运算放大器

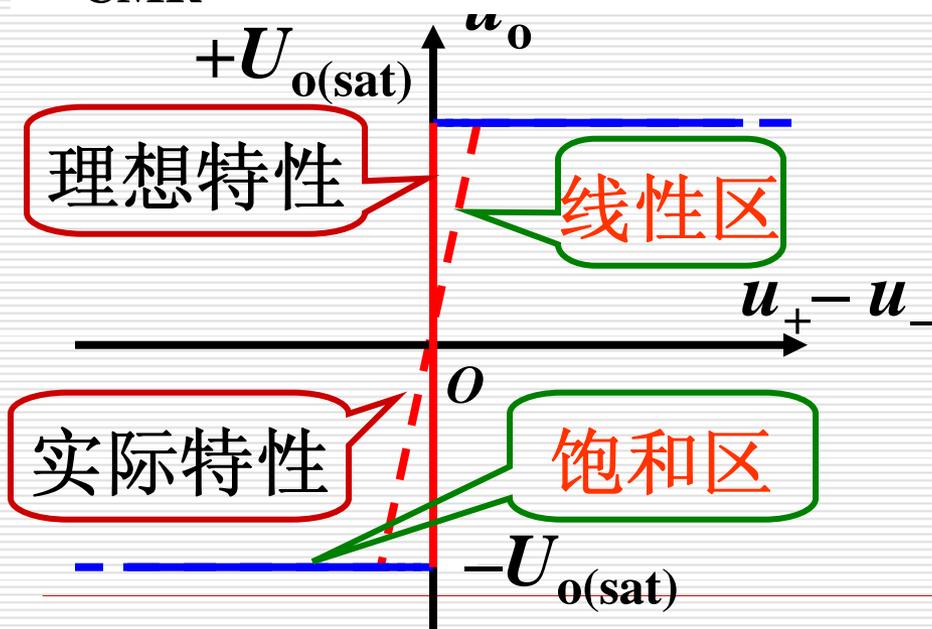
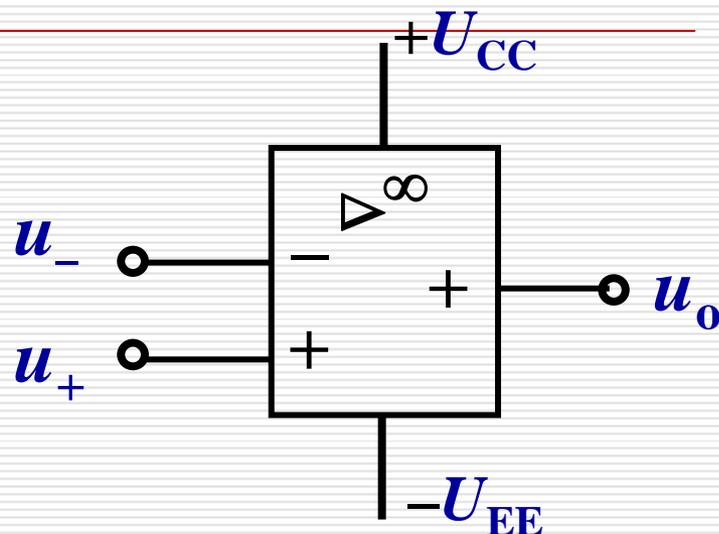
## 理想运算放大器及其分析依据

$A_{uo}$  高: 80dB~140dB

$r_{id}$  高:  $10^5 \sim 10^{11}\Omega$

$r_o$  低: 几十 $\Omega$  ~ 几百 $\Omega$

$K_{CMR}$  高: 70dB~130dB



线性区:

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

非线性区:

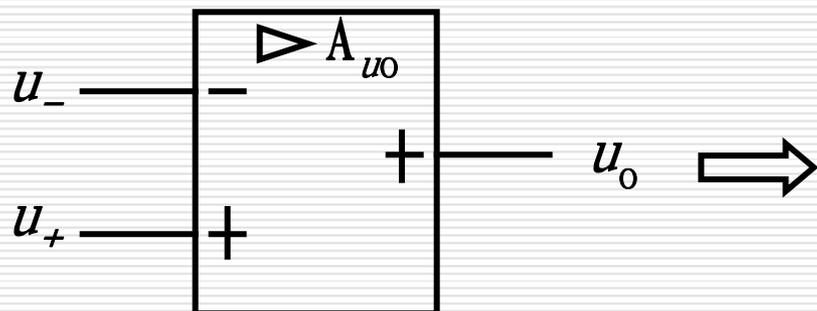
$$u_+ > u_- \text{ 时, } u_o = +U_{o(sat)}$$

$$u_+ < u_- \text{ 时, } u_o = -U_{o(sat)}$$

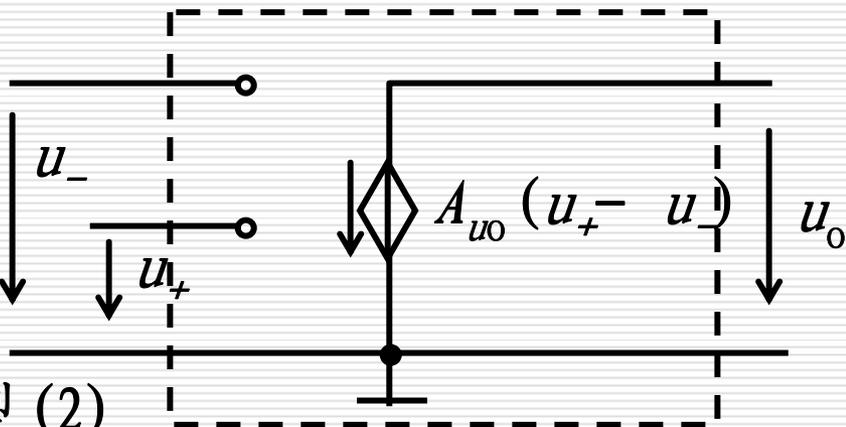
# 1. 集成运算放大器

## 集成运算放大器的等效电路模型 (1)

线性工作区

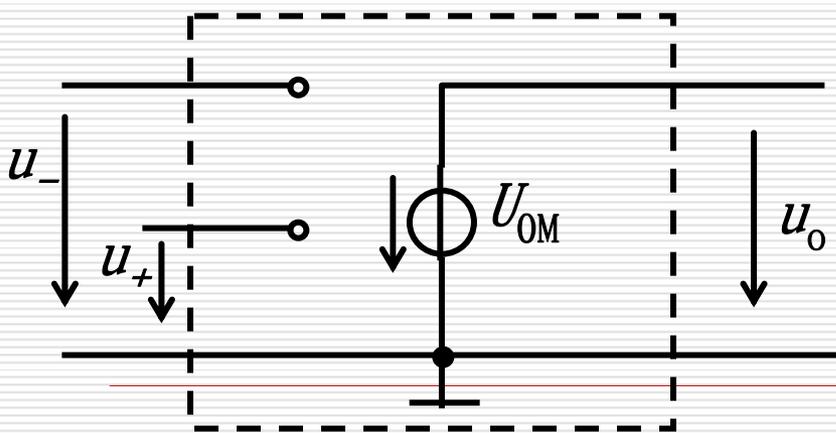


线性工作-受控源,



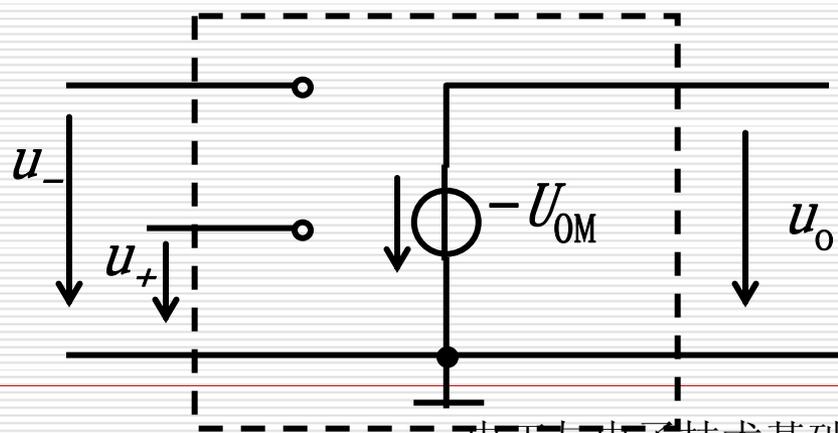
## 集成运算放大器的等效电路模型 (2)

饱和工作区 (非线性)



正饱和

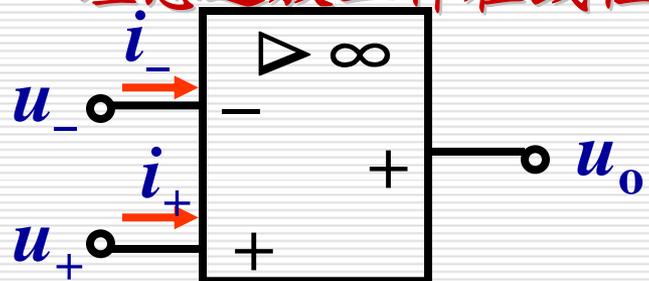
饱和工作-恒压源



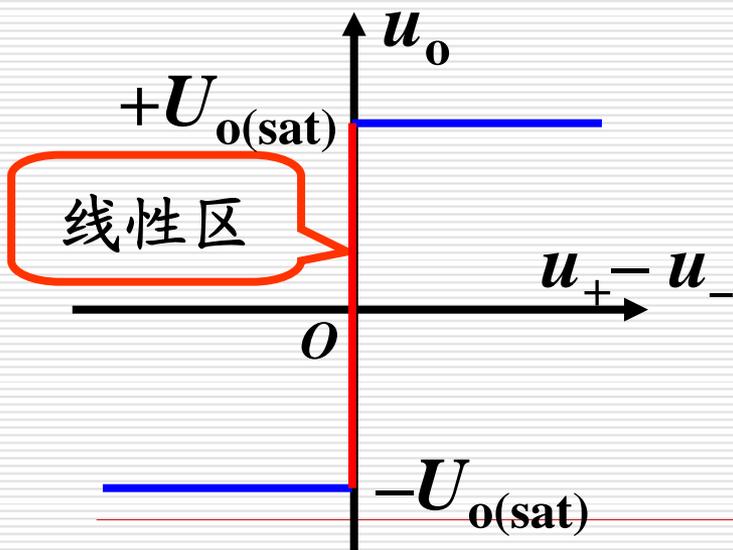
负饱和

# 1. 集成运算放大器

3. 理想运放工作在线性区的特点 因为  $u_o = A_{uo}(u_+ - u_-)$



电压传输特性



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

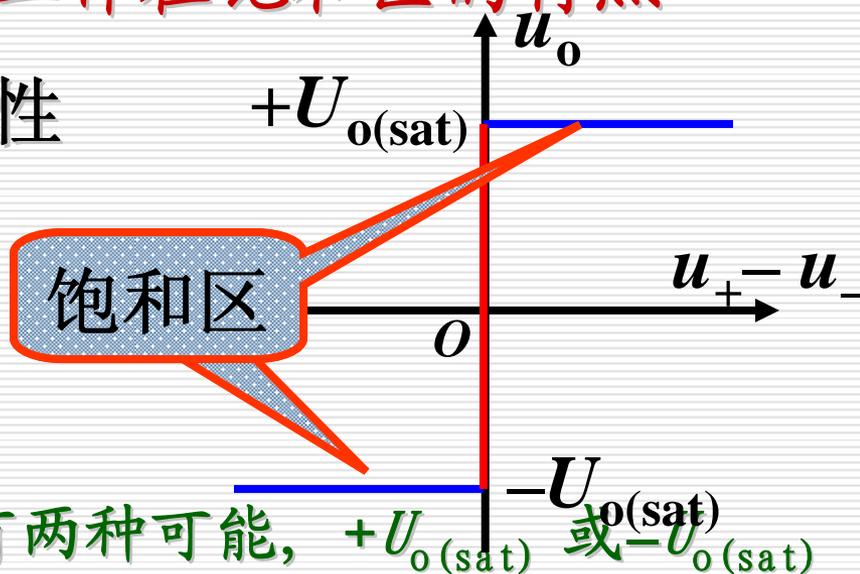
(2) 输入电流约等于 0  
即  $i_+ = i_- \approx 0$ , 称“虚断”

$A_{uo}$  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。

# 1. 集成运算放大器

## 4. 理想运放工作在饱和区的特点

电压传输特性



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

不再满足  $u_o = A_{uo}(u_+ - u_-)$

因而不存在“虚短”现象

当  $u_+ > u_-$  时,  $u_o = +U_{o(sat)}$

$u_+ < u_-$  时,  $u_o = -U_{o(sat)}$

(2)  $i_+ = i_- \approx 0$ , 仍存在“虚断”现象

# 2. 集成运算放大器的应用

## 集成运算放大器的应用

### 1. 线性应用

电路结构上存在从输出端到反向输入端的负反馈支路，输入信号幅度足够小，以保证集成运算放大器的输出处于最大输出电压的范围内。

### 2. 非线性应用

电路结构上，集成运算放大器处于开环（无反馈）或存在从输出端到同相输入端的正反馈支路，输出总是处于饱和状态，即输出在正、负最大值之间变化。

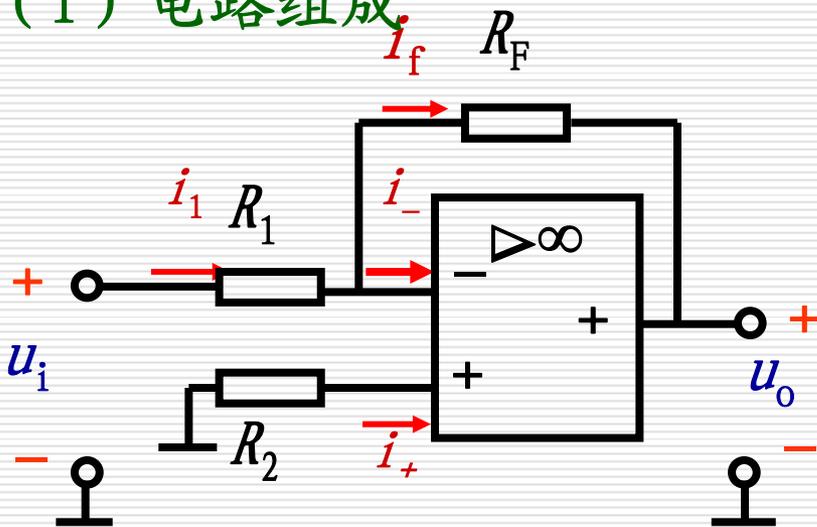
### 集成运算放大器电路分析的方法

首先判断应用类型，然后利用理想运算放大器的特征对电路进行分析。

## 2. 集成运算放大器的应用

### 1. 反相比例运算

#### (1) 电路组成



以后如不加说明，输入、输出的另一端均为地(⊥)。

因要求静态时  $u_+$ 、 $u_-$  对地电阻相同，所以平衡电阻  $R_2 = R_1 // R_F$

#### (2) 电压放大倍数

因虚断， $i_+ = i_- = 0$ ，

所以  $i_1 \approx i_f$

$$i_1 = \frac{u_i - u_-}{R_1} \quad i_f = \frac{u_- - u_o}{R_F}$$

因虚短，所以  $u_- = u_+ = 0$ ，称反相输入端“虚地”——反相输入的重要特点

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

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

## 2. 集成运算放大器的应用

---

### 1. 反相比例运算

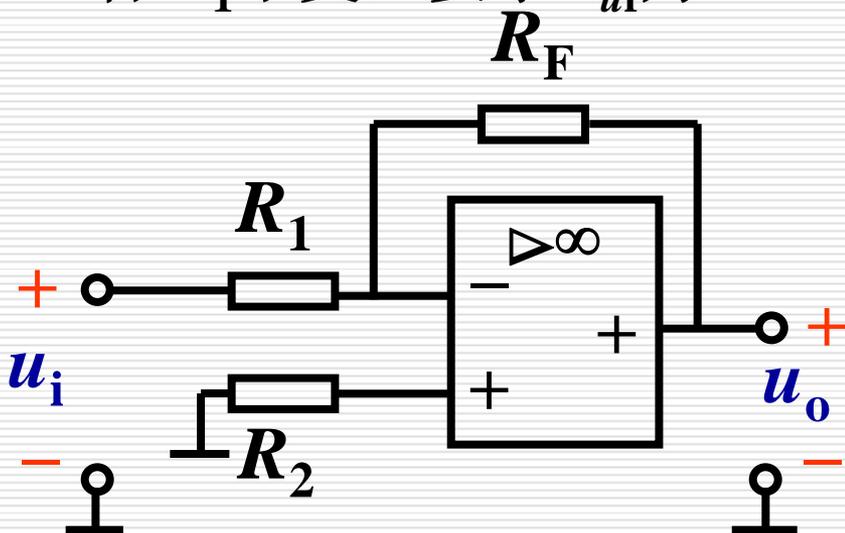
- 结论:
- ①  $A_{uf}$  为负值, 即  $u_o$  与  $u_i$  极性相反。因为  $u_i$  加在反相输入端。
  - ②  $A_{uf}$  只与外部电阻  $R_1$ 、 $R_F$  有关, 与运放本身参数无关。
  - ③  $|A_{uf}|$  可大于 1, 也可等于 1 或小于 1。
  - ④ 因  $u_- = u_+ = 0$ , 所以反相输入端“虚地”。

## 2. 集成运算放大器的应用

例：电路如下图所示，已知  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ， $R_F = 50 \text{ k}\Omega$ 。

求：1.  $A_{uf}$ 、 $R_2$ ；

2. 若  $R_1$  不变，要求  $A_{uf}$  为  $-10$ ，则  $R_F$ 、 $R_2$  应为多少？



解：1.  $A_{uf} = -R_F / R_1$   
 $= -50 / 10 = -5$

$$R_2 = R_1 // R_F$$
$$= 10 \times 50 / (10 + 50)$$
$$= 8.3 \text{ k}\Omega$$

2. 因  $A_{uf} = -R_F / R_1 = -R_F / 10 = -10$

故得  $R_F = -A_{uf} \times R_1 = -(-10) \times 10 = 100 \text{ k}\Omega$

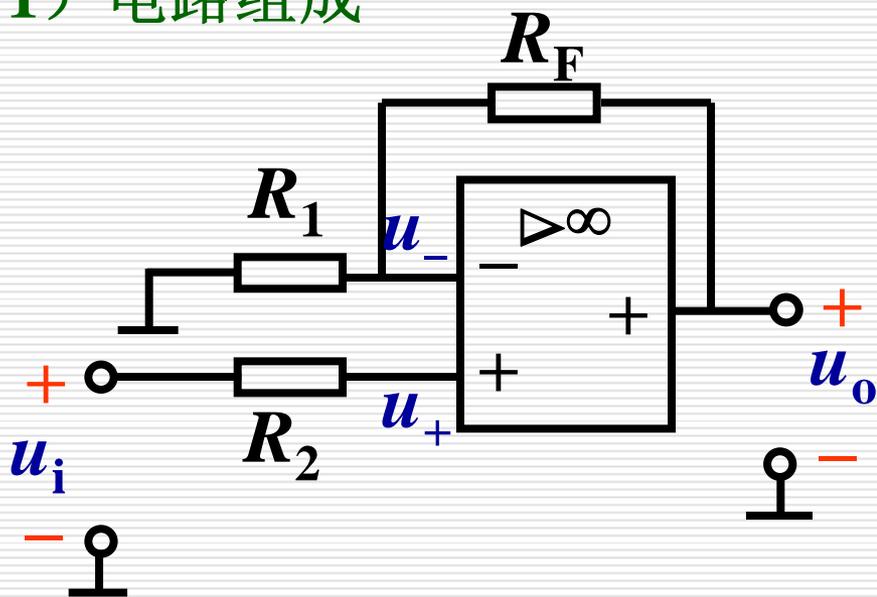
$R_2 = 10 \times 100 / (10 + 100) = 9.1 \text{ k}\Omega$

# 2. 集成运算放大器的应用

## (2) 电压放大倍数

### 2. 同相比例运算

#### (1) 电路组成



因虚断，所以  $u_+ = u_i$

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

因虚短，所以  $u_- = u_+$ ，  
反相输入端不“虚地”

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

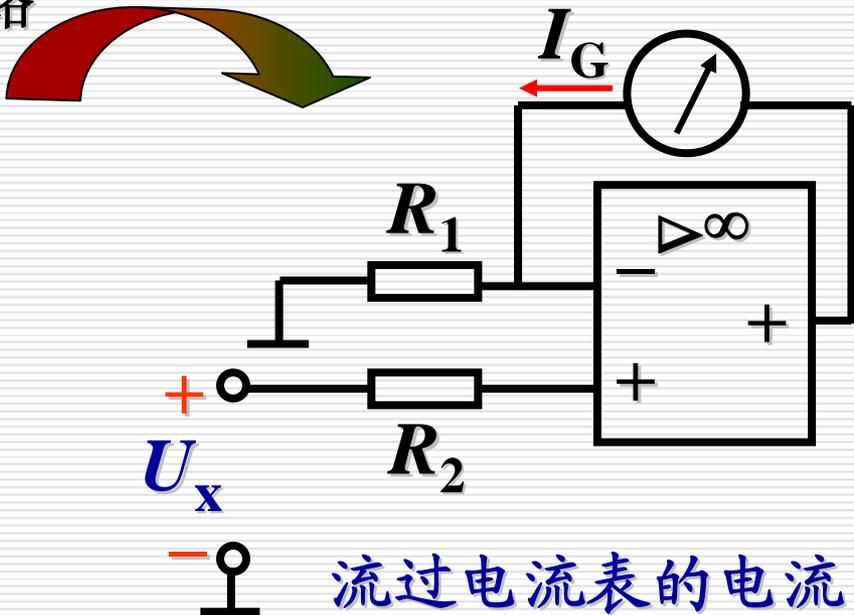
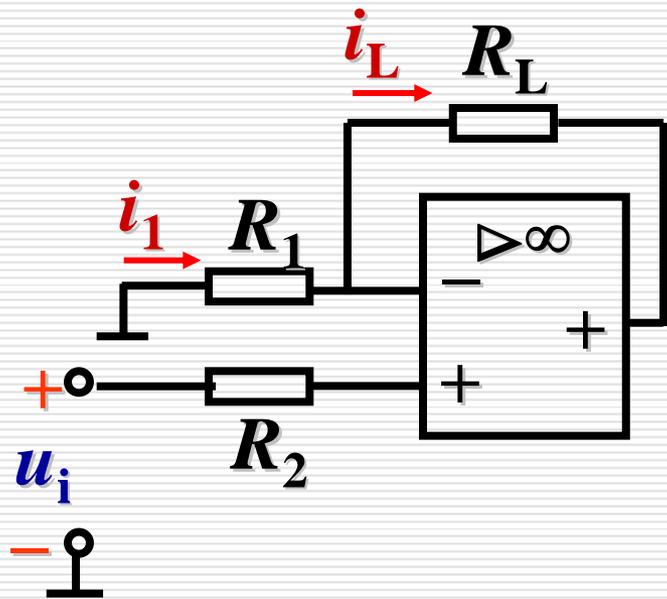
因要求静态时  $u_+$ 、 $u_-$  对地电阻相同，

所以平衡电阻  $R_2 = R_1 // R_F$

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

## 2. 集成运算放大器的应用

例2: 电压-电流的转换电路



流过电流表的电流

$$i_L = i_1 = -\frac{u_-}{R_1} = -\frac{u_i}{R_1}$$

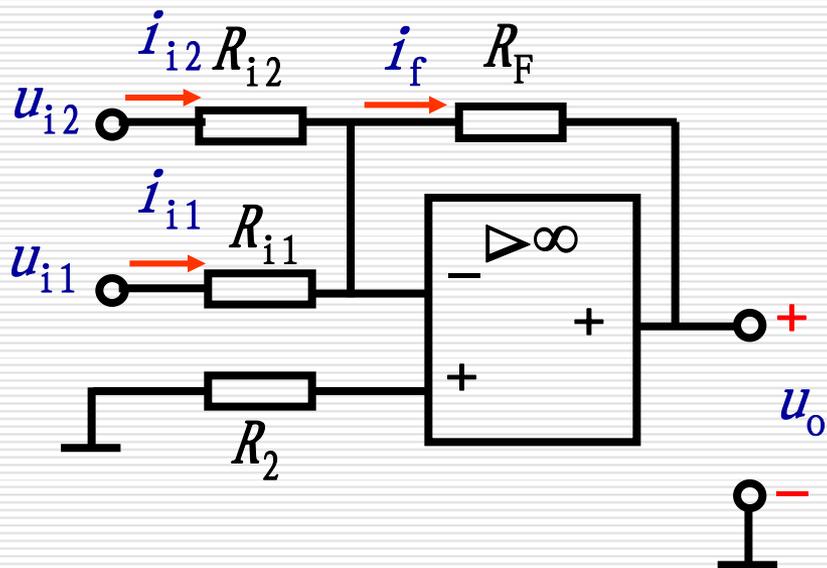
$$I_G = \frac{U_x}{R_1}$$

- 负载电流的大小与负载无关。
1. 能测量较小的电压;
  2. 输入电阻高, 对被测电路影响小。

电工与电子技术基础

## 2. 集成运算放大器的应用

### 1. 反相加法运算电路



平衡电阻:

$$R_2 = R_{i1} // R_{i2} // R_F$$

因虚断,  $i_- = 0$

所以  $i_{i1} + i_{i2} = i_f$

$$\frac{u_{i1} - u_-}{R_{i1}} + \frac{u_{i2} - u_-}{R_{i2}} = \frac{u_- - u_o}{R_F}$$

因虚短,  $u_- = u_+ = 0$

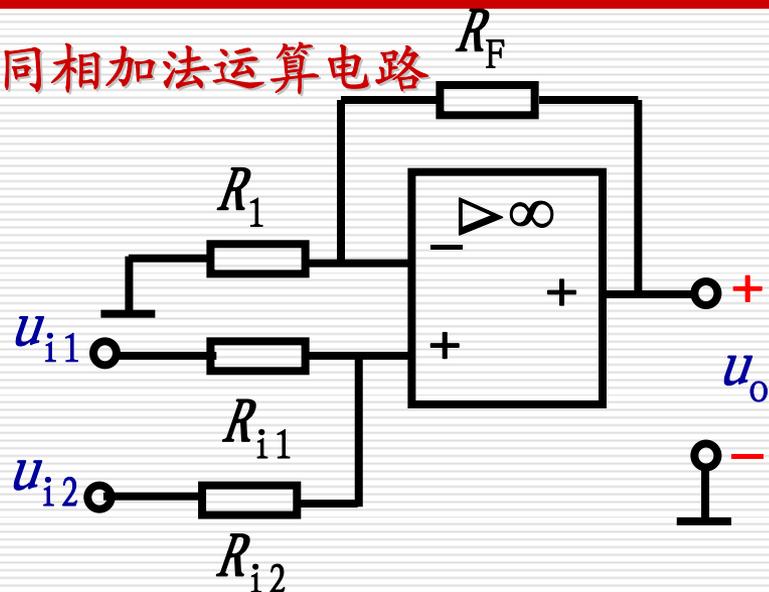
$$\text{故得 } \frac{u_{i1}}{R_{i1}} + \frac{u_{i2}}{R_{i2}} = -\frac{u_o}{R_F}$$

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

电工与电子技术基础

## 2. 集成运算放大器的应用

### 2. 同相加法运算电路



$$u_+ = \frac{R_{i2}u_{i1} + R_{i1}u_{i2}}{R_{i1} + R_{i2}}$$

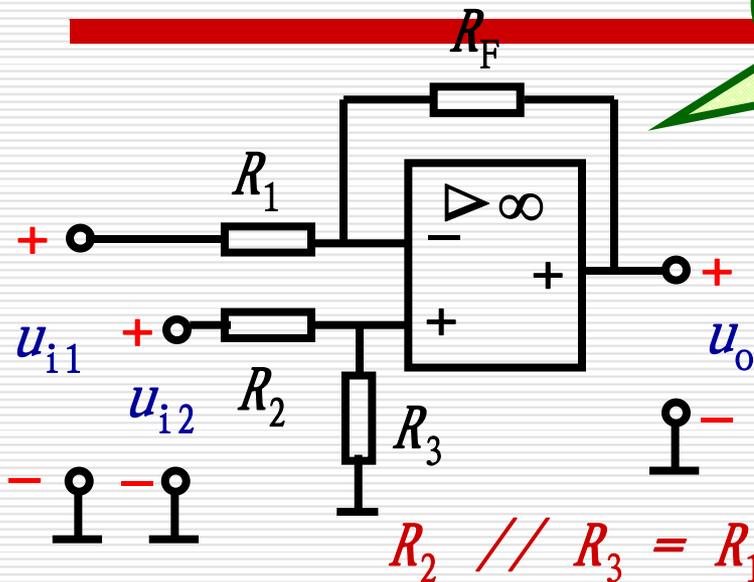
$$\frac{u_o}{R_1 + R_F} = \frac{u_+}{R_1}$$

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

# 2. 集成运算放大器的应用

常用做测量  
放大电路

法1:



由虚断可得:

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

$$u_- = u_{i1} + u_{R1}$$

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

由虚短可得:  $u_- = u_+$

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

如果取  $R_1 = R_2$ ,  $R_3 = R_F$

则:  $u_o = \frac{R_F}{R_1} (u_{i2} - u_{i1})$

如  $R_1 = R_2 = R_3 = R_F$

则:  $u_o = u_{i2} - u_{i1}$

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

输出与两个输入信号的差值成正比。