

## 第4章 模拟集成运算放大电路

---



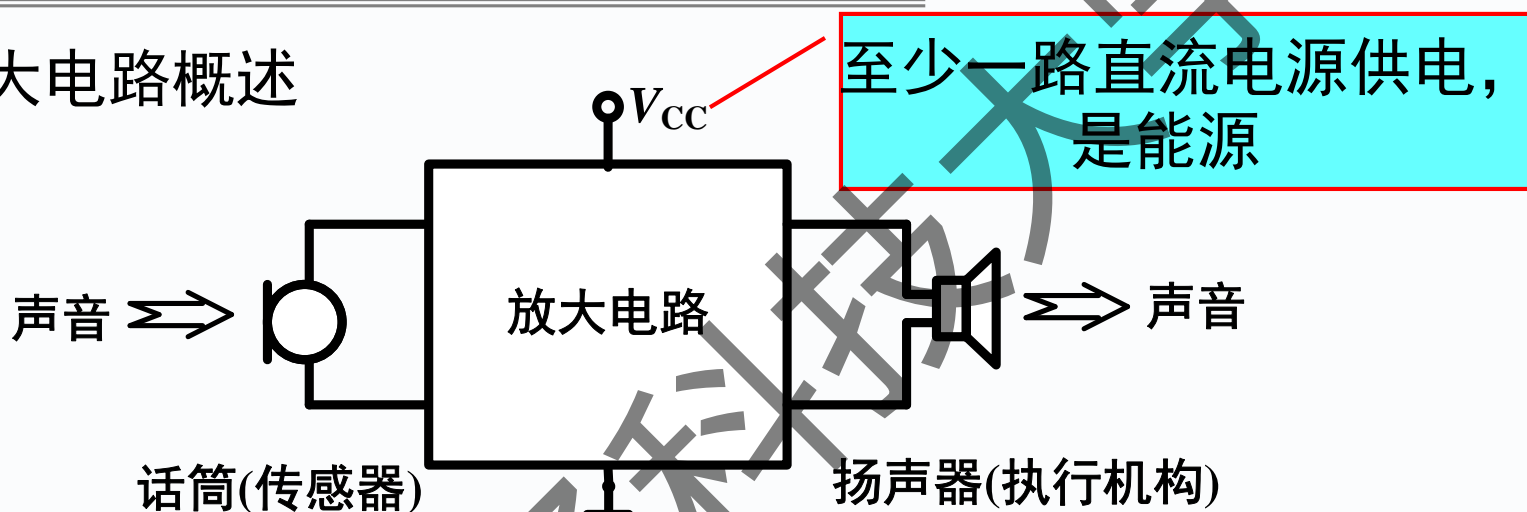
# 第4章 模拟集成运算放大电路

- 4.1 放大电路概述及其主要性能指标
- 4.2 模拟集成电路运算放大器
- 4.3 理想集成运算放大器
- 4.4 基本运算电路
- 4.5 集成运放的主要参数



## 4.1 放大电路概述及其主要性能指标

### 一、放大电路概述



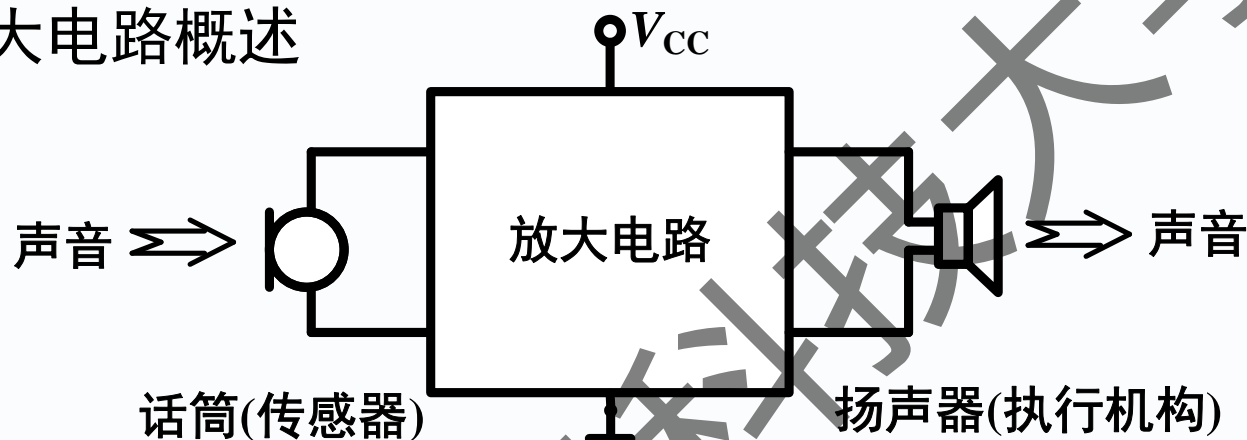
输入信号为零时为静态

- ◆放大的对象：变化量——常用正弦波做测试信号
- ◆放大的本质：能量的控制，利用有源元件实现

能够控制能量的元件

## 4.1 放大电路概述及其主要性能指标

### 一、放大电路概述



输入信号为零时为静态

◆放大的特征：功率放大

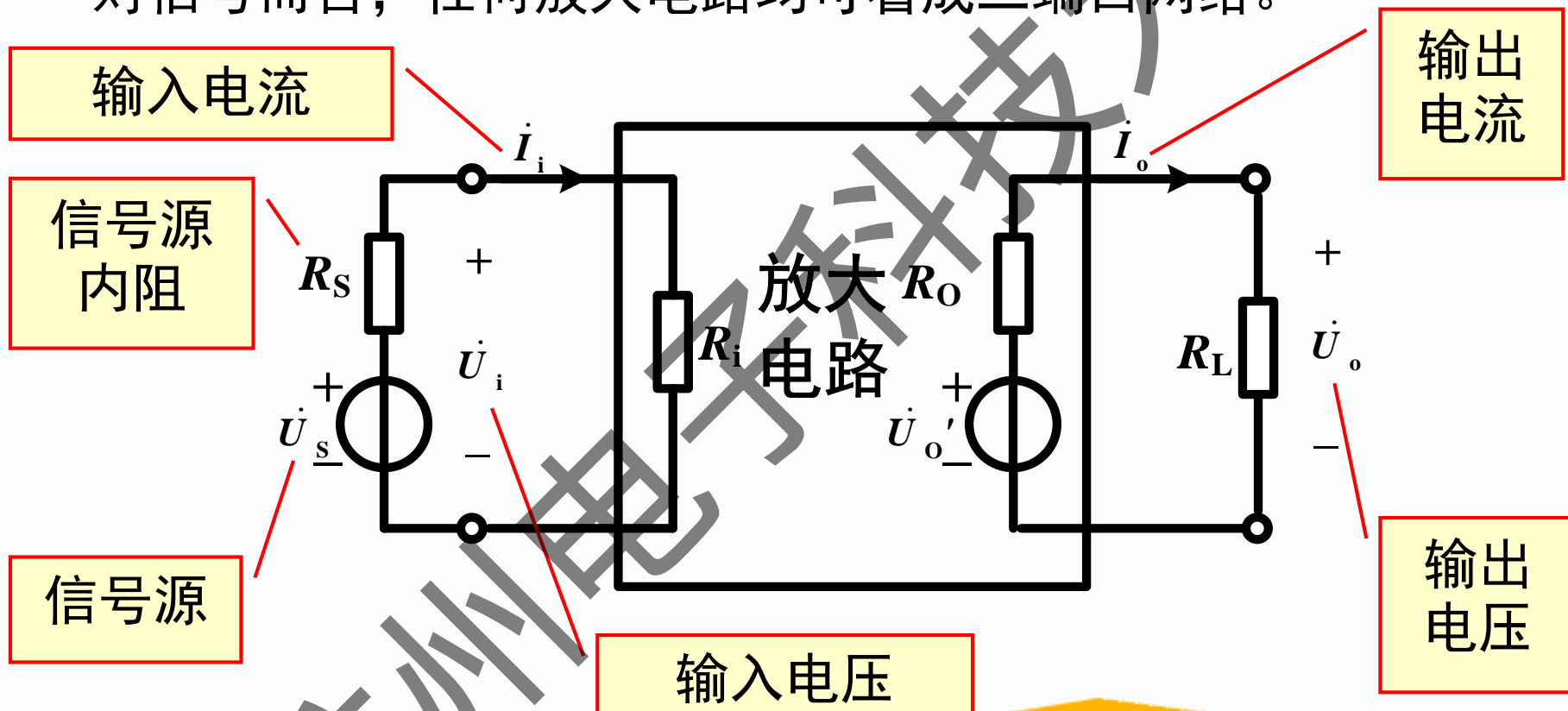
判断电路能否放大的  
基本出发点

◆放大的基本要求：不失真——放大的前提

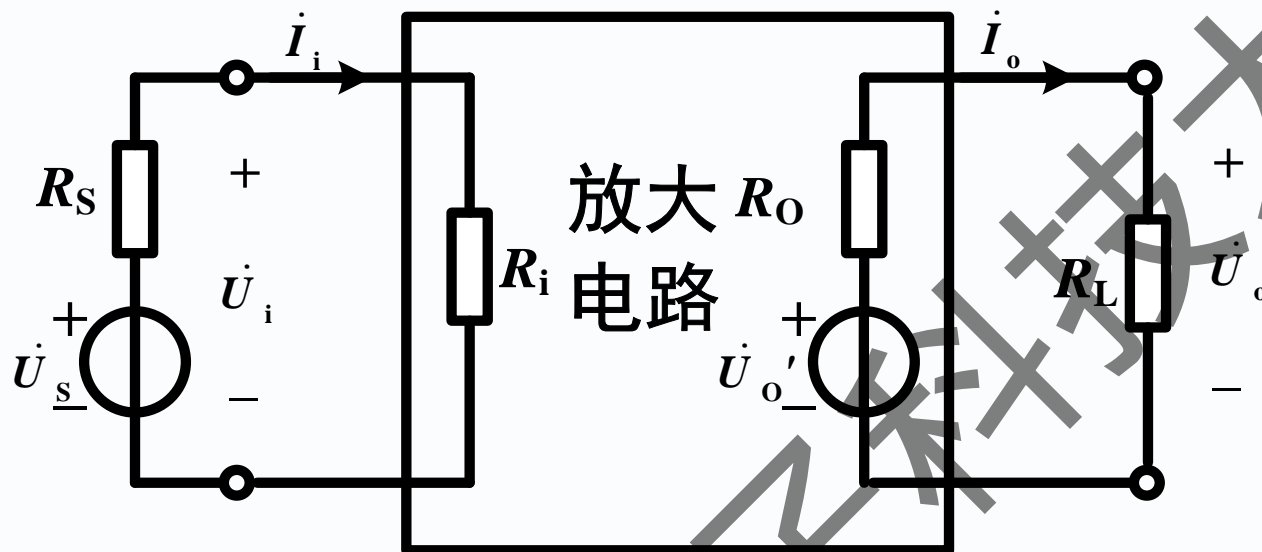
## 二、放大电路的方框图及其主要性能指标

研究的是动态性能。

对信号而言，任何放大电路均可看成二端口网络。



## 二、放大电路的方框图及其主要性能指标



1. 放大倍数：  
输出量与输入  
量之比

$$\dot{A}_{uu} = \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

电压放大倍数是最常被研究和测试的参数

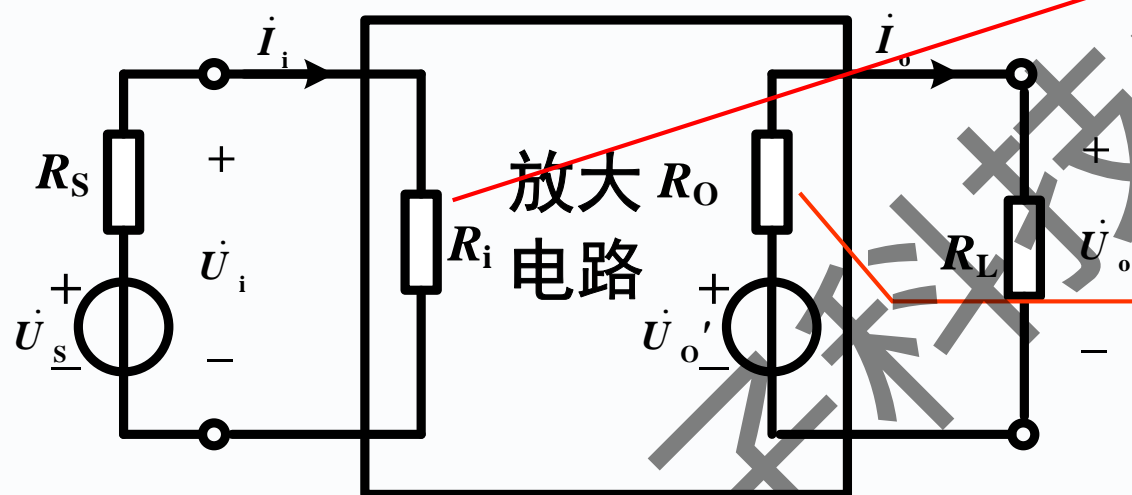
$$\dot{A}_{ii} = \dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$$

$$\dot{A}_{ui} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i}$$

$$\dot{A}_{iu} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i}$$

## 二、放大电路的方框图及其主要性能指标

### 2. 输入电阻和输出电阻



从输入端看进去的等效电阻

将输出等效成有内阻的电压源，内阻就是输出电阻。

$$R_i = \frac{U_i}{I_i}$$

输入电压与输入电流有效值之比。

$$R_o = \frac{U_o' - U_o}{U_o / R_L} = \left( \frac{U_o'}{U_o} - 1 \right) R_L$$

空载时输出电压有效值

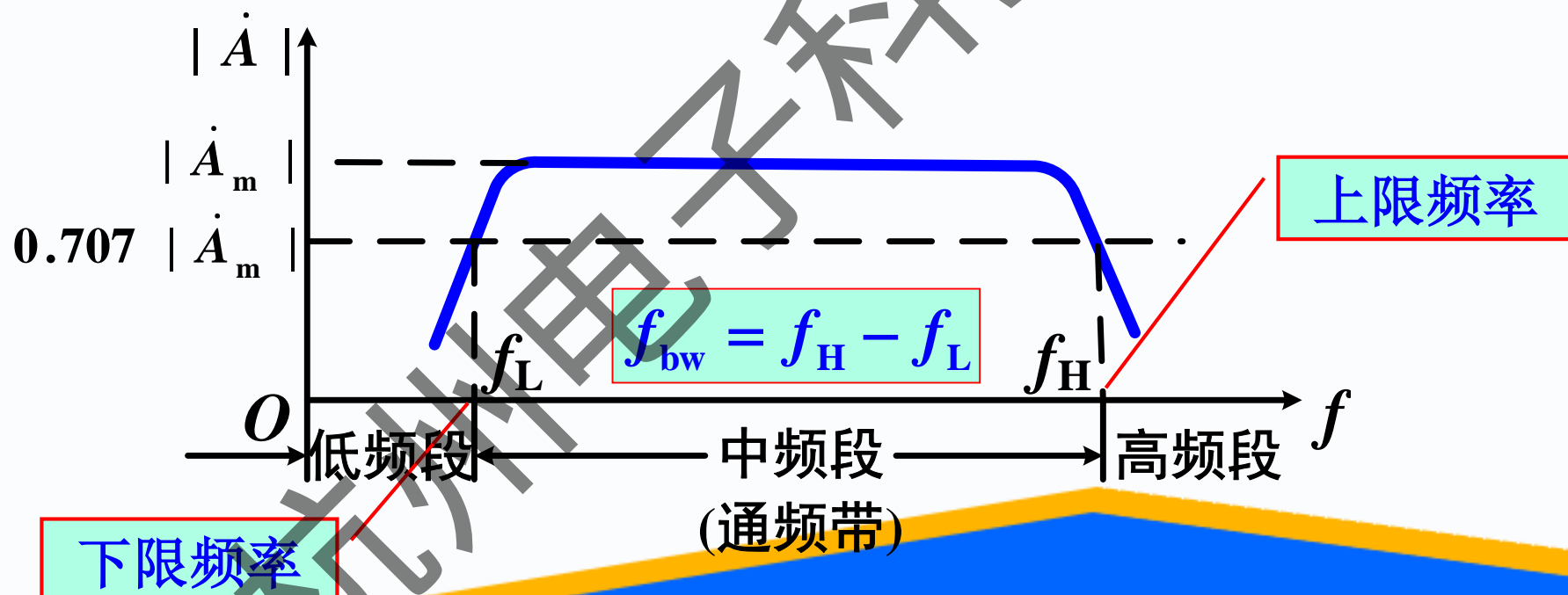
带  $R_L$  时的输出电压有效值

## 二、放大电路的方框图及其主要性能指标

### 3、通频带

衡量放大电路对不同频率信号的适应能力。

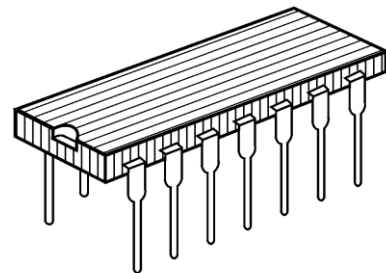
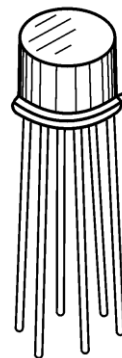
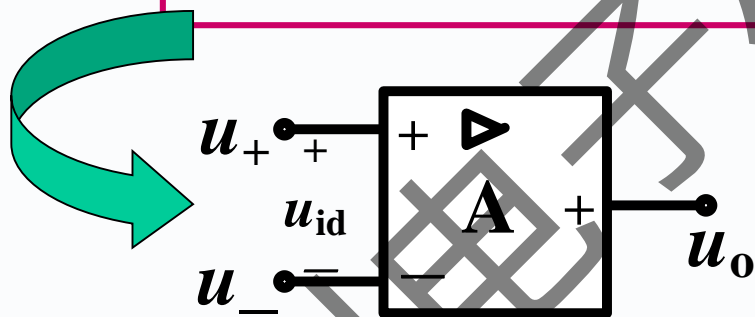
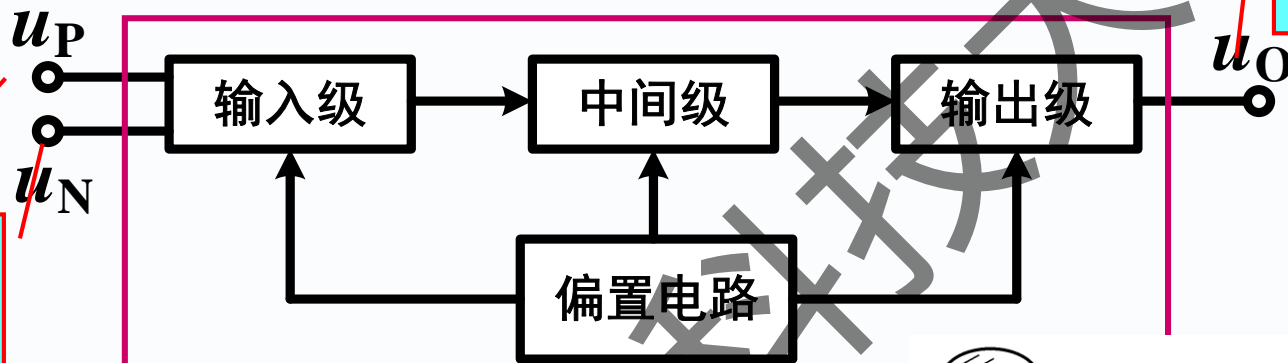
由于电容、电感及半导体元件的电容效应，使放大电路在信号频率较低和较高时电压放大倍数数值下降，并产生相移。





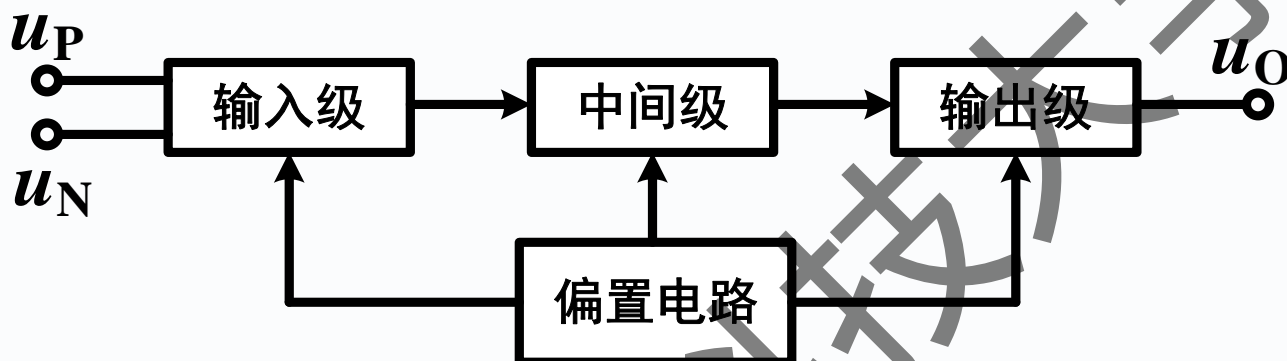
## 4.2 模拟集成电路运算放大器

### 一、 集成电路运算放大器的内部组成单元



若将集成运放看成为一个“黑盒子”，则可等效为一个双端输入、单端输出的差分放大电路。

## 集成运放电路四个组成部分的作用

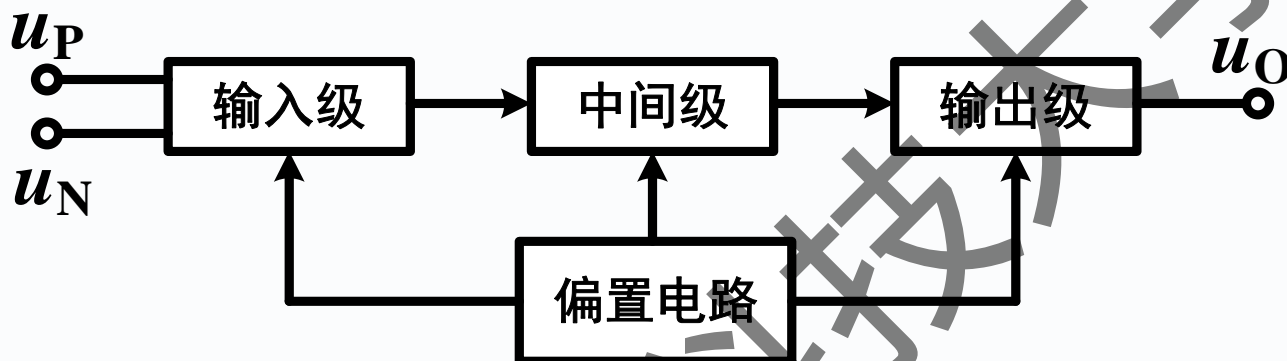


**输入级：**前置级，多采用差分放大电路。要求 $R_i$ 大， $A_d$ 大， $A_c$ 小，输入端耐压高。

**中间级：**主放大级，多采用共射放大电路。要求有足够的放大能力。

**输出级：**功率级，多采用准互补输出级。要求 $R_o$ 小，最大不失真输出电压尽可能大。

## 集成运放电路四个组成部分的作用



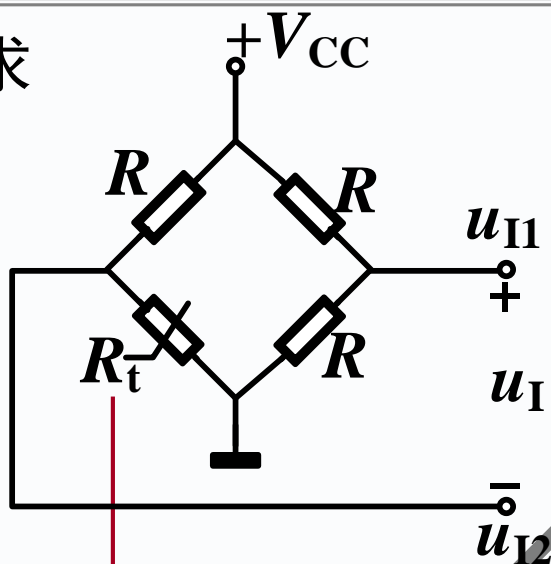
**偏置电路：**为各级放大电路设置合适的静态工作点。  
采用电流源电路。

**几代产品中输入级的变化最大！**

## 二、差分放大电路的概念

### 1. 需求

测温  
电桥



热电阻

环境温度变化  
阻值变化

某一标准温度下

$$u_{I1} = u_{I2} = V_{CC} / 2$$

$$u_I = u_{I1} - u_{I2} = 0$$

温度变化（即偏离标准温度）  
时，产生  $\Delta u_I$ ，这是放大的对象。

需要一种放大电路，对  $u_{I1}$  和  $u_{I2}$  共同的部分不放大，仅对它们的差值放大。

—— 差分放大电路



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

## 二、差分放大电路的概念

手机上的一个应用：双麦降噪

双卡双麦 让对方听得更清晰 W+G 双模切换更自由



专业“双mic抗噪技术”，收音麦克保持清晰通话，采样降噪麦克主动消除噪音，即便喧哗闹市，也有清晰音质！

W+G 双卡双待，支持 WCDMA 2100MHz、GSM 900/1800MHz、中国联通 3G+ (WCDMA) HSDPA 高速网络宽带链接，最高达 14.4Mbit/s 下行带宽。内置 WIFI 芯片，可随时随地蹭网，



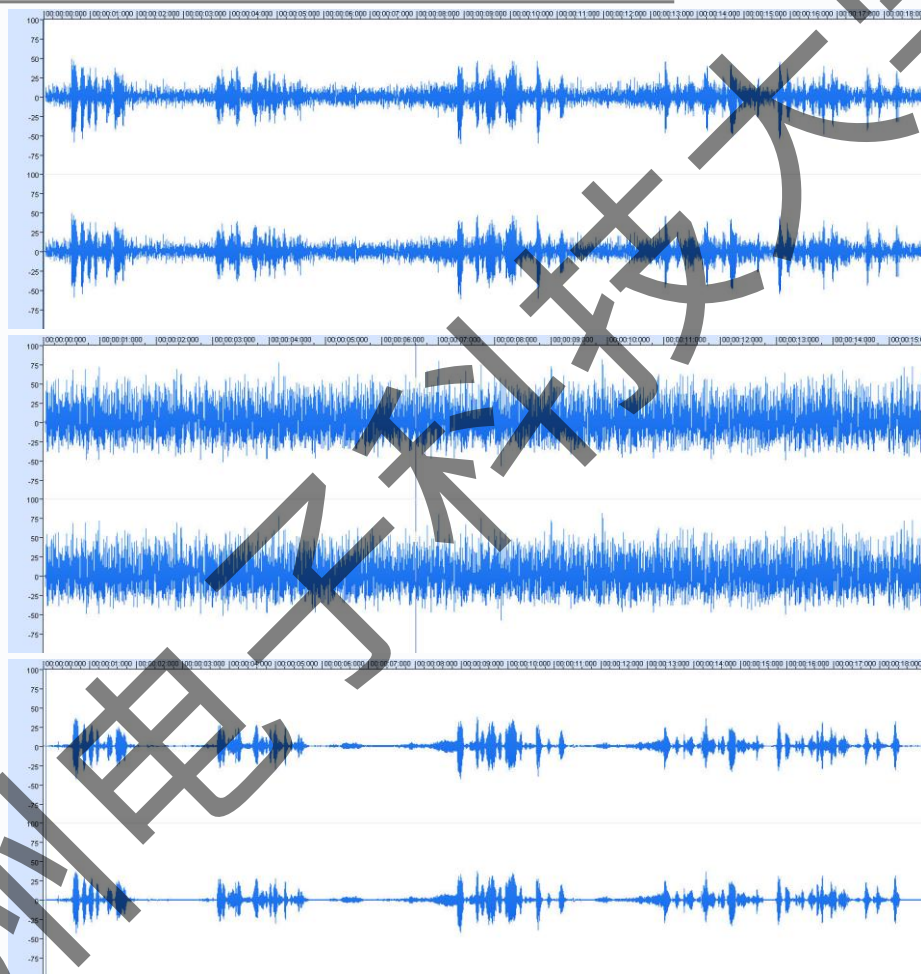
电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

## 二、差分放大电路的概念

主麦克：  
声音+噪音

副麦克：  
噪音采集

差分处理：  
降噪



## 2. 共模信号和差模信号

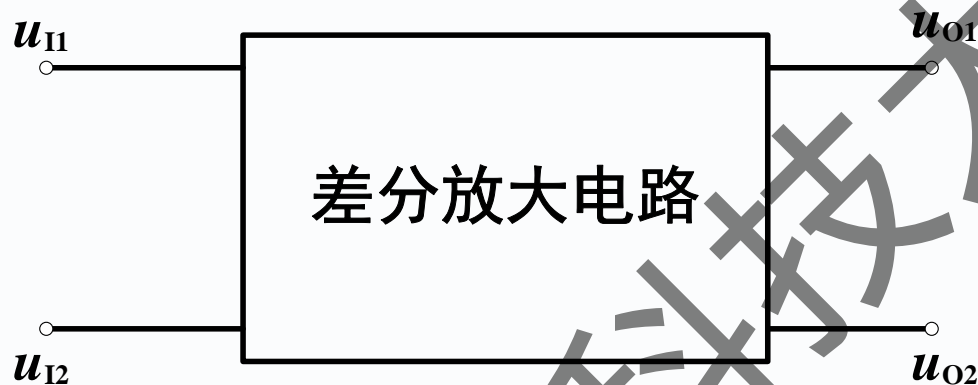
- 共模信号：若差分放大电路的两个输入端所输入的  
信号大小相等、极性相同，则称之为共模信号。
- 差模信号：若差分放大电路的两个输入端所输入的  
信号大小相等、**极性相反**，则称之为差模信号。
- 设任意两个输入信号 $u_{i1}$ 和 $u_{i2}$ ，则

差模信号  $u_{id} = u_{i1} - u_{i2}$       共模信号  $u_{ic} = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2}$

线性变换  $u_{i1} = u_{ic} + \frac{1}{2}u_{id}$        $u_{i2} = u_{ic} - \frac{1}{2}u_{id}$



### 3. 典型差分放大电路方框图

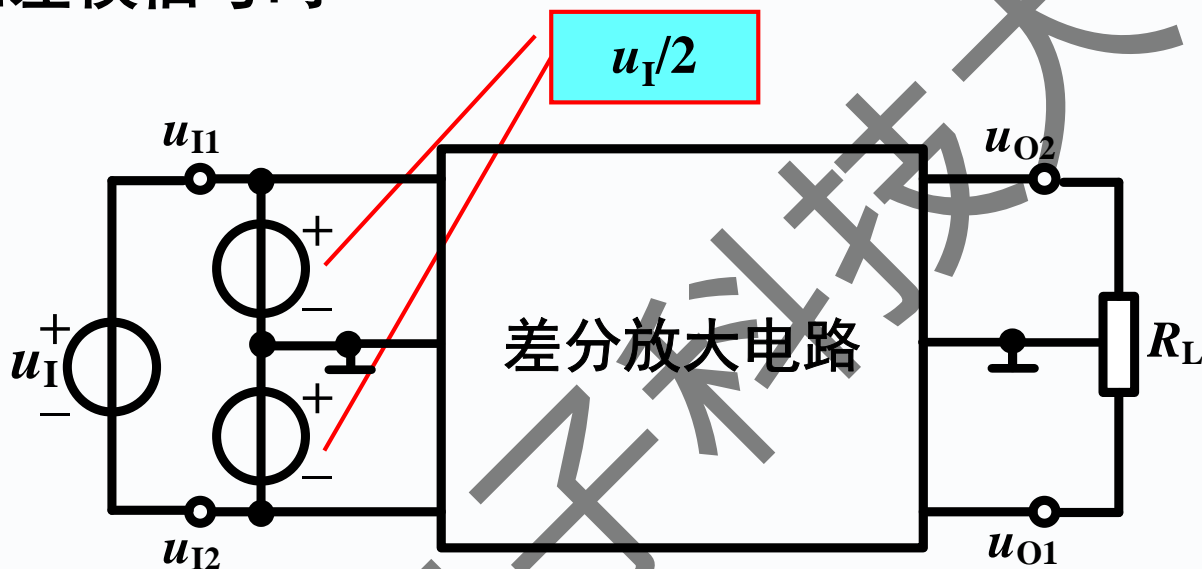


典型的差分放大电路有两个输入端、两个输出端，它们均不直接接地，这种电路形式称为**双端输入、双端输出**接法。



### 3. 典型差分放大电路方框图

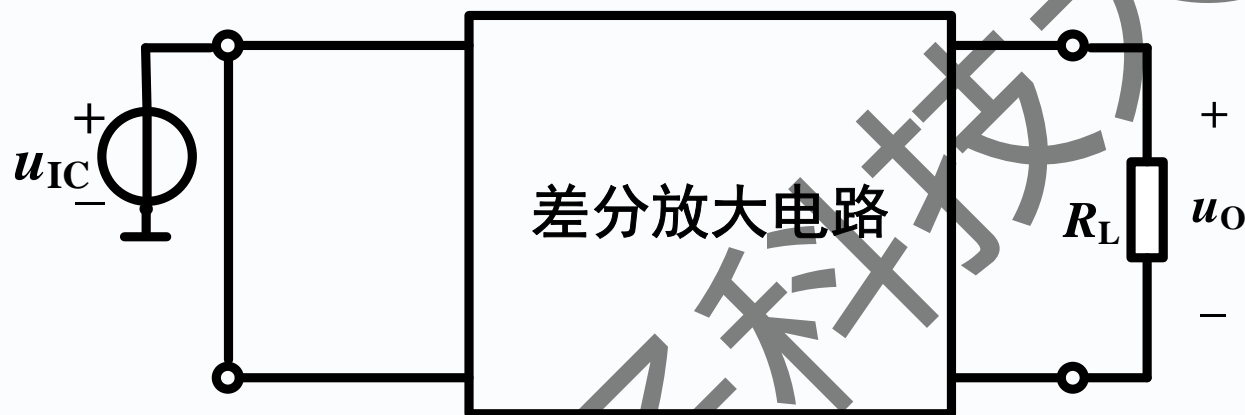
#### (1) 加差模信号时



差分放大电路的输入回路和输出回路均具有对称性，故输入回路和输出回路的中点电位不变，即动态电位为0，即为“地”。

### 3. 典型差分放大电路方框图

#### (2) 加共模信号时



差分放大电路具有理想对称性，温度变化所引起晶体管参数的变化可等效为共模信号输入。

## 4. 差分放大电路的放大倍数

差模放大倍数

$$A_{od} = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}}$$

绝对值  
越大越好

共模放大倍数

$$A_{oc} = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}}$$

绝对值  
越小越好

共模抑制比

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{od}}{A_{oc}} \right|$$

越大越好

为综合考察差分放大电路放大差模信号和抑制共模信号的能力，引入参数——共模抑制比。

实际上也常用分贝（dB）来表示，即

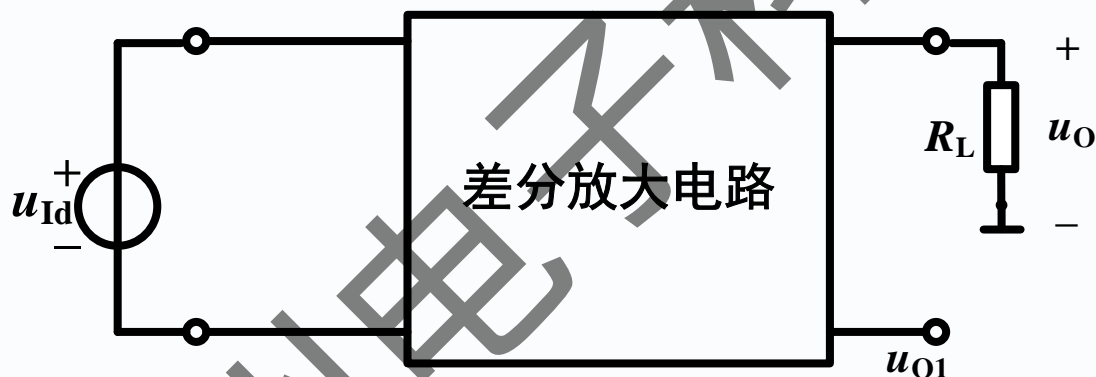
$$K_{CMR}(\text{dB}) = 20\lg \left| \frac{A_{od}}{A_{oc}} \right| (\text{dB})$$



## 5. 差分放大电路的四种接法

由于在实际应用场合，为避免干扰，输入信号源有接地端；为负载安全，负载常需有接地端，故差分放大电路有四种接法：即双端输入双端输出、双端输入单端输出、单端输入双端输出和单端输入单端输出。

双端输入、单端输出电路：

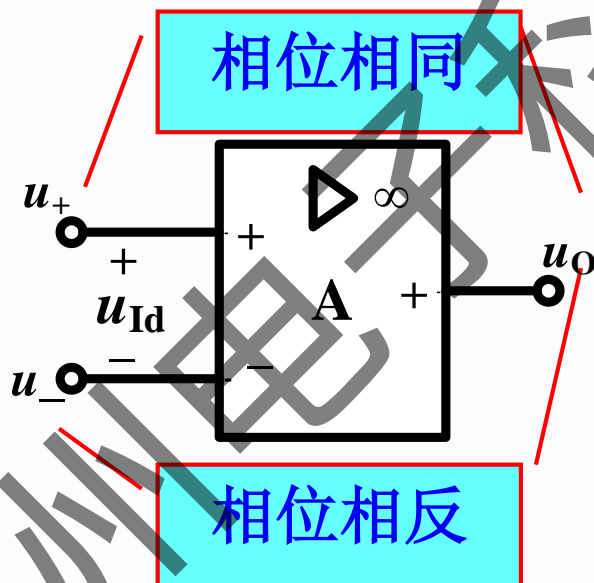


集成运放可等效为高性能的双端输入单端输出差分放大电路。

### 三、集成运放的符号及电压传输特性

- 集成运算放大电路因最初为实现信号的运算而得名。
- 高性能：输入电阻很大、输出电阻很小、差模放大倍数很大、共模放大倍数很小、频带很宽、受温度的影响很小.....

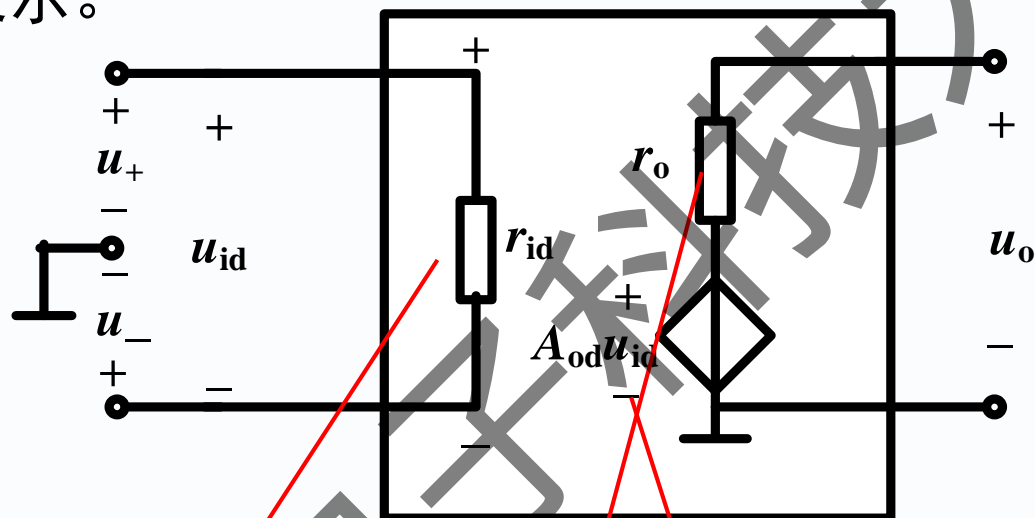
#### 1. 符号



不同型号的集成运放供电电源不同，有的两路电源供电，有的一路电源供电，有的两种情况均可。缺省时认为是 $\pm V_{CC}$ （常为 $\pm 15V$ ）供电。

## 2. 集成运算放大器的电路模型

- 集成运算放大器是电压放大器，因此可用双口网络来表示。



输入  
电阻

输出  
电阻

开环差模电压  
放大倍数

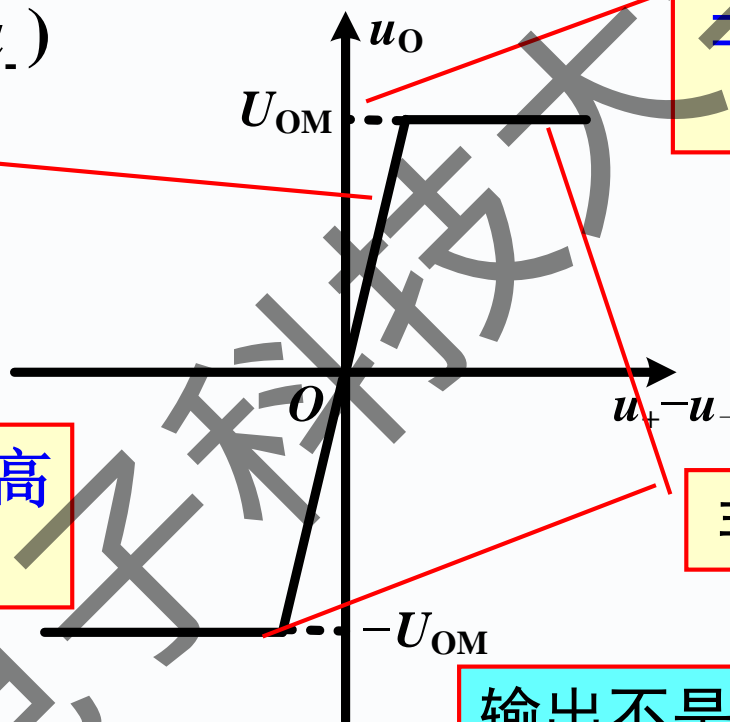
### 3、电压传输特性:输出电压与输入电压的函数关系

$$u_O = f(u_I) = f(u_+ - u_-)$$

线性区

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

开环差模增益高达几十万倍



$\pm U_{OM}$  的值决定于什么?

非线性区

输出不是高电平  $+U_{OM}$   
就是低电平  $-U_{OM}$

若  $\pm U_{OM} = \pm 14V$ ,  $A_{od} = 5 \times 10^5$ , 则  
为保证集成运放工作在线性区,  
输入信号的范围为多少?  $|u_+ - u_-|$   
 $< 28\mu V$

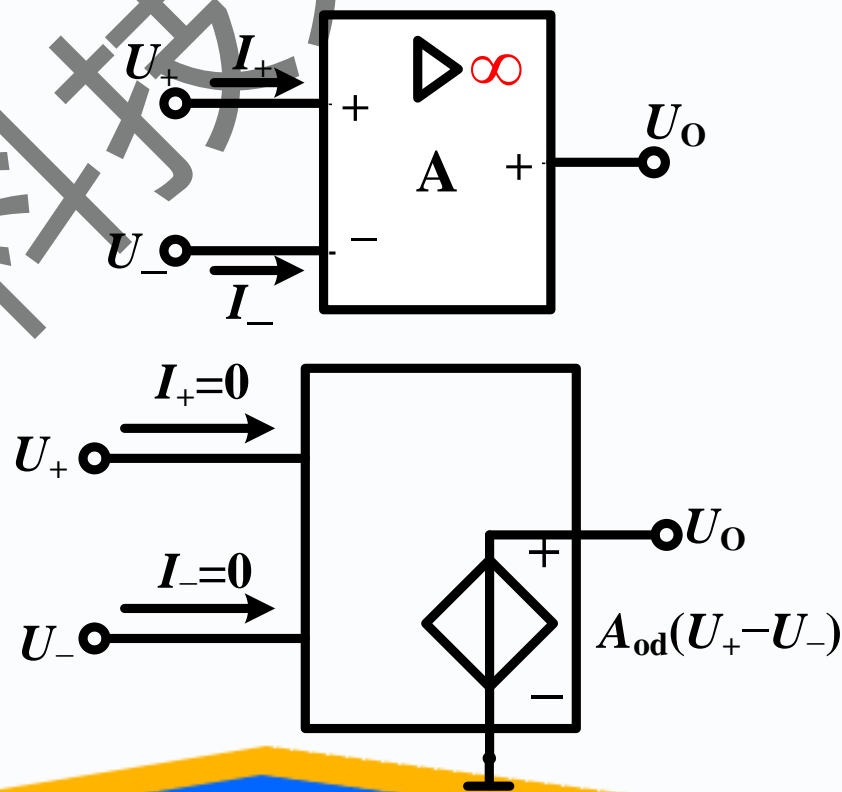


## 4.3 理想集成运算放大器

### ■ 一、理想运放的参数：

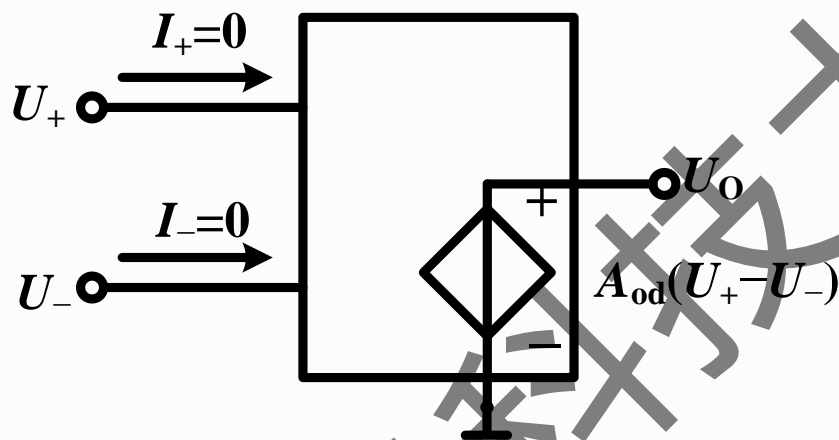
- 差模输入电阻  $r_{id}=\infty$ 、
- 输出电阻  $r_o=0$ 、
- 开环差模增益  $A_{od}=\infty$ 、
- 共模  $A_{oc}=0$ 、
- 共模抑制比  $K_{CMR}=\infty$ 、
- 频带无限宽、温度对参数无影响

理想运放的符号与简化电路模型如图所示





## 4.3 理想集成运算放大器



问题：

1. 若将输入信号直接加在理想运放的输入端，则理想运放有可能工作在线性区吗？(不能，因 $A_{od}=\infty$ ，需引入负反馈)
2. 负载电阻的阻值变化时，理想运放的输出电压变化吗？为什么？(不变，输出等效为恒压源)

## 二、理想运放工作在线性区的特点

### 1. 电路结构

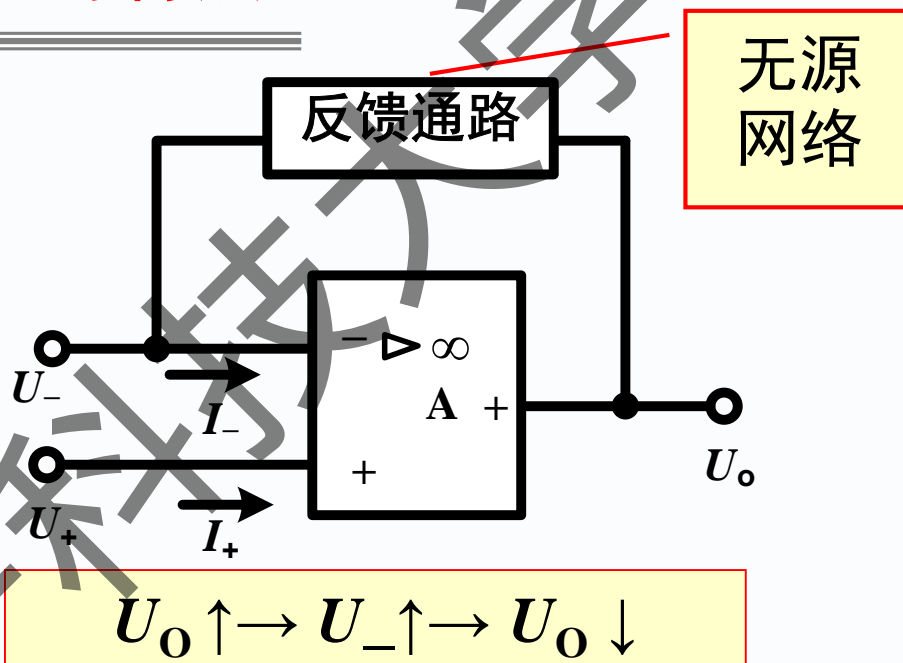
$$u_O = A_{od} (u_+ - u_-)$$

无穷大

有限值

无穷小

为保证理想运放工作在线性区，必须引入负反馈。



**反馈：**将放大电路的输出量通过一定的方式引回到输入回路来影响输入量，称为反馈。

**正、负反馈：**若反馈的结果使输出量的变化增大，则称为正反馈；若反馈的结果使输出量的变化减小，则称为负反馈。

## 2.工作在线性区的特点

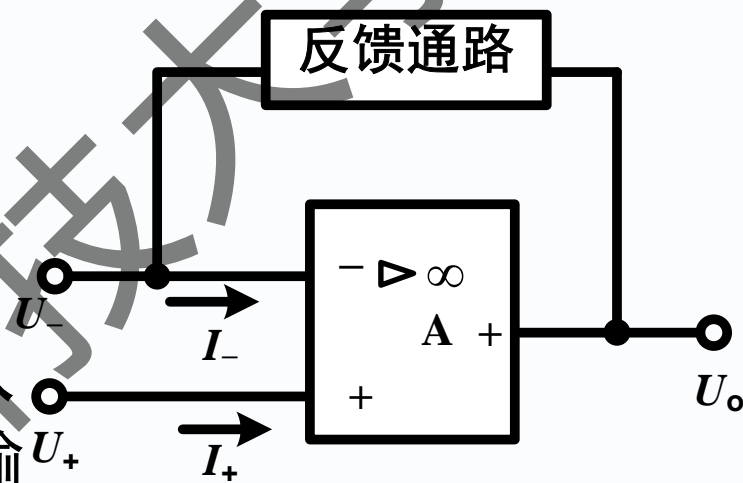
由于 $U_O$ 为有限值,  $A_{od}=\infty$ , 因而净输入电压 $U_+-U_-=0$ , 即

$$U_+=U_- \quad \text{——虚短路}$$

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

$$I_+=I_-=0 \quad \text{——虚断路}$$

“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。



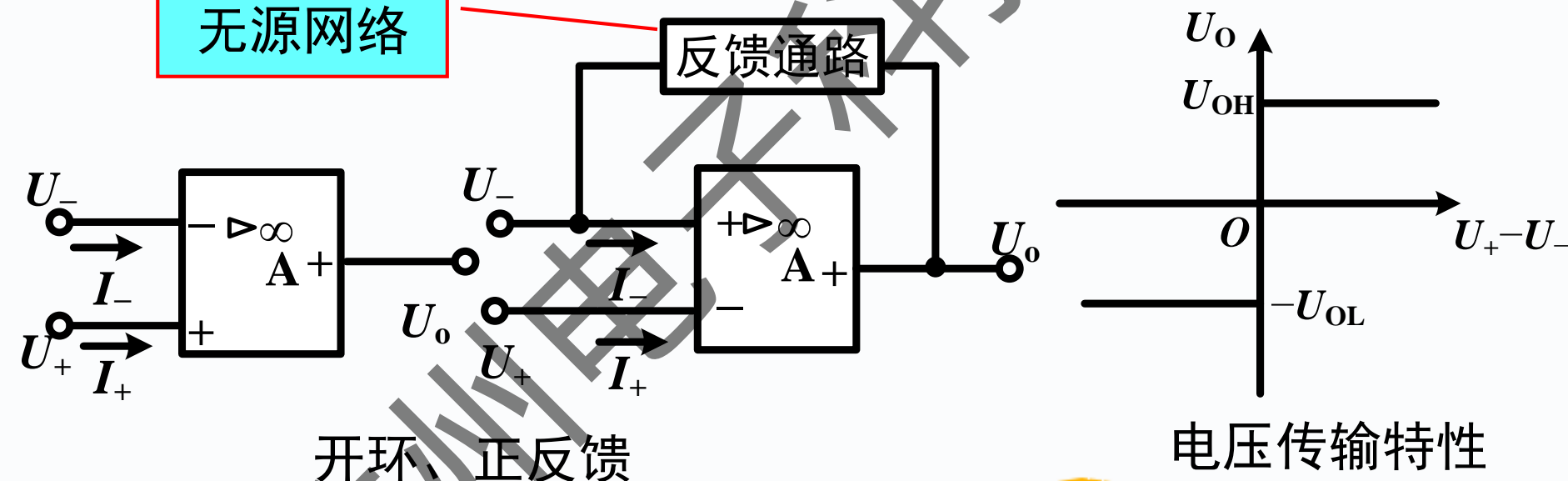
### 三、理想运放工作在非线性区的特点

#### 1. 电路特征

- 理想运放工作在开环状态
  - 引入正反馈，使其输出量的变化增大
- 势必工作在非线性区

无源网络

反馈通路



## 2.理想运放工作在非线性区的特点:

输出电压只有高、低两种电平

$$U_o = \begin{cases} U_{OH} & U_+ > U_- \\ U_{OL} & U_+ < U_- \end{cases}$$

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

$$I_+ = I_- = 0 \quad \text{——虚断路}$$

工作在非线性区的理想运放仍具有“虚断”的特点，但一般不具有“虚短”的特点。



## 4.4 基本运算电路

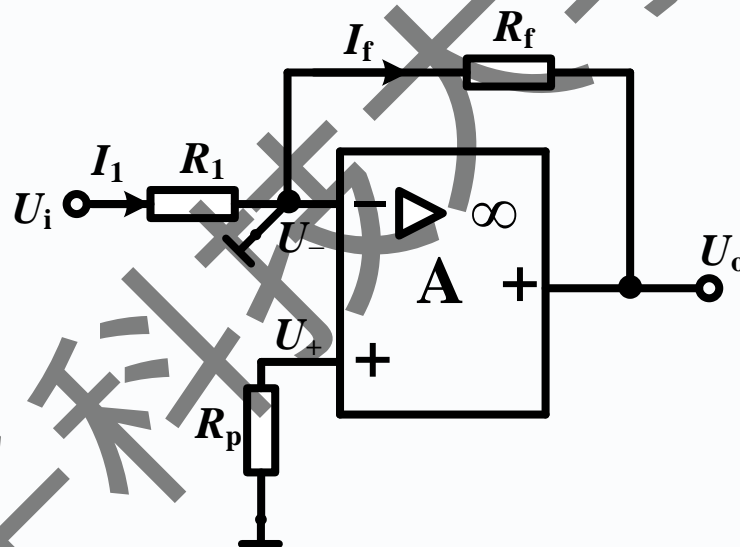
### 一、比例运算电路

#### 1. 反相输入

$$U_- = U_+ = 0 \quad \text{虚地}$$

$$I_1 = I_f$$

$$I_1 = \frac{U_i}{R_1} \quad I_f = -\frac{U_o}{R_f}$$



$$\Rightarrow U_o = -\frac{R_f}{R_1} U_i \quad (\text{可作为公式直接使用})$$

$$A_u$$

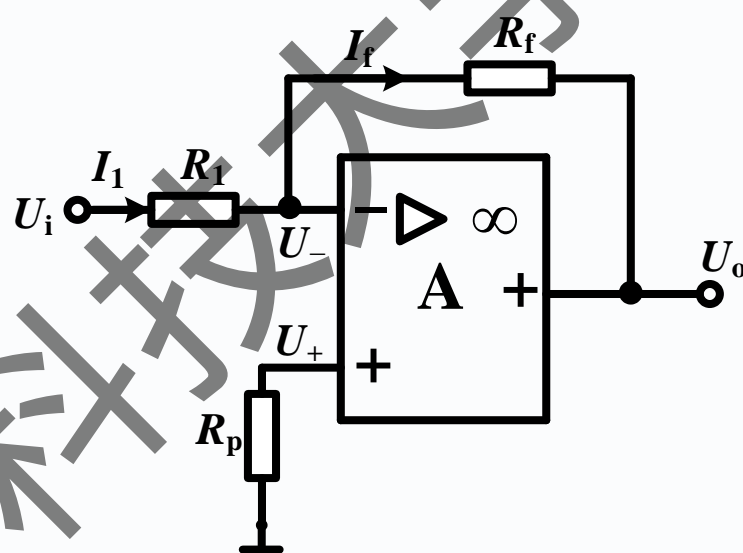


## 4.4 基本运算电路

### 一、比例运算电路

#### 1. 反相输入

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



- 1) 电路的输入电阻为多少？
- 2) 运放的共模输入电压为多少？

3)  $R_p = ?$  为什么？

$$R_p = R_1 \parallel R_f$$

保证输入级的对称性

4) 若要  $R_1 = 100\text{k}\Omega$ ，比例系数为  $-10$ ， $R_f = ?$

5) 若要用反相输入比例运算电路做放大电路，则  $A_u = ?$



# 一、比例运算电路

## 2. 同相输入

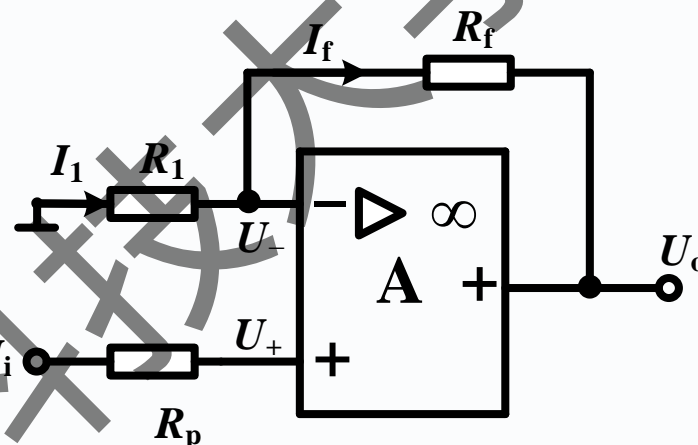
$$U_- = U_+ = U_i$$

集成运放的  
共模输入

$$I_- = I_+ = 0$$

运算关系的分析方法：  
节点电流法

$$I_1 = \frac{0 - U_-}{R_1}, I_f = \frac{U_- - U_o}{R_f}$$



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

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

(可作为公式直接使用)

$A_u$

输入电阻为多少?

无穷大



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY



# 一、比例运算电路

## 2. 同相输入

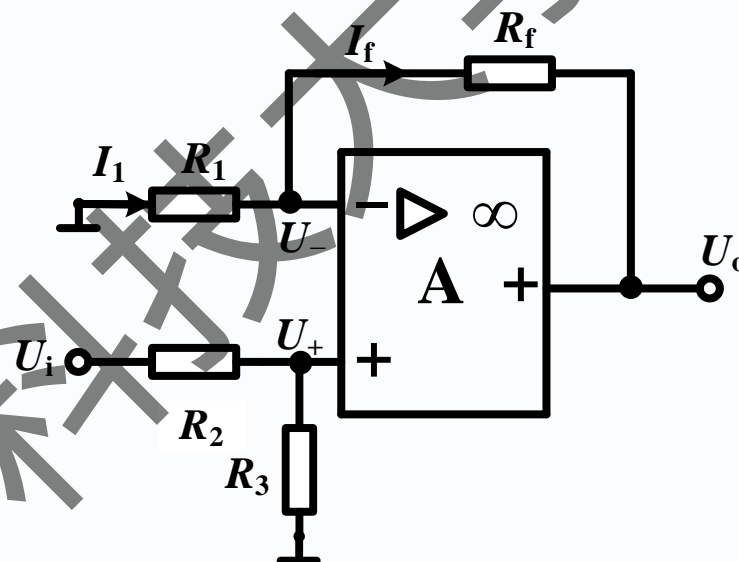
$$U_o = ?$$

$$U_- = U_+ \neq U_i$$

$$U_- = U_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} U_i$$

$$\therefore U_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) U_+ = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} U_i$$

同相比例记公式： $U_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) U_+$  再判断 $U_+$ 和 $U_i$ 的关系



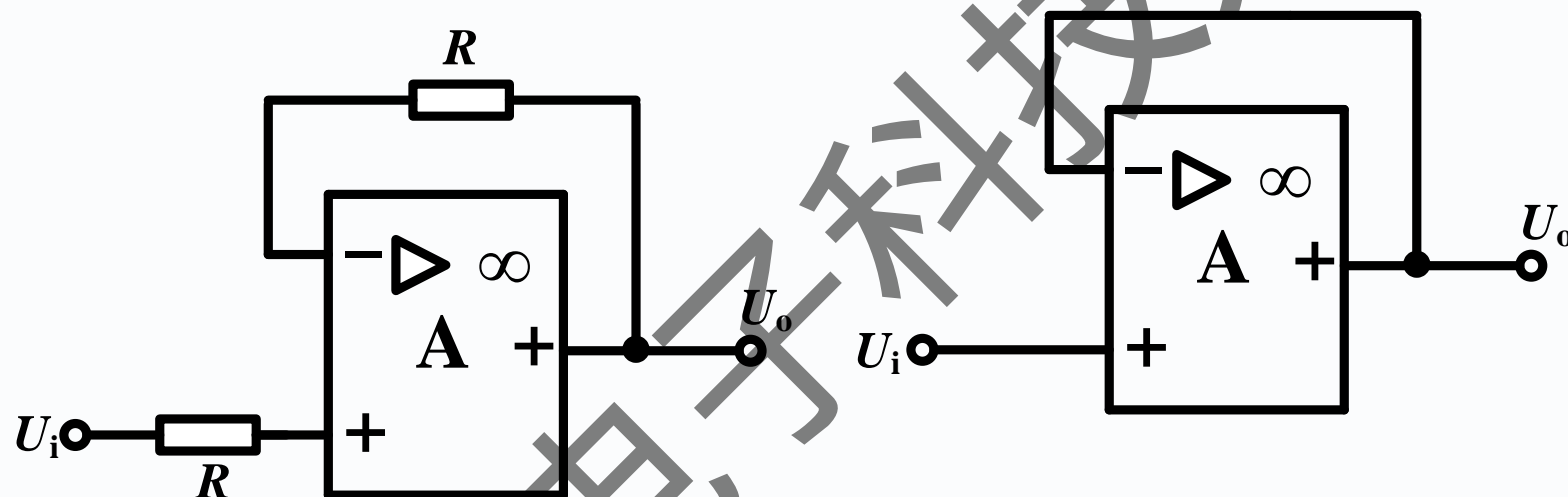
# 一、比例运算电路

同相输入比例运算电路的特例：  
电压跟随器

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

$$R_1 \rightarrow \infty$$

$$R_f \rightarrow 0$$



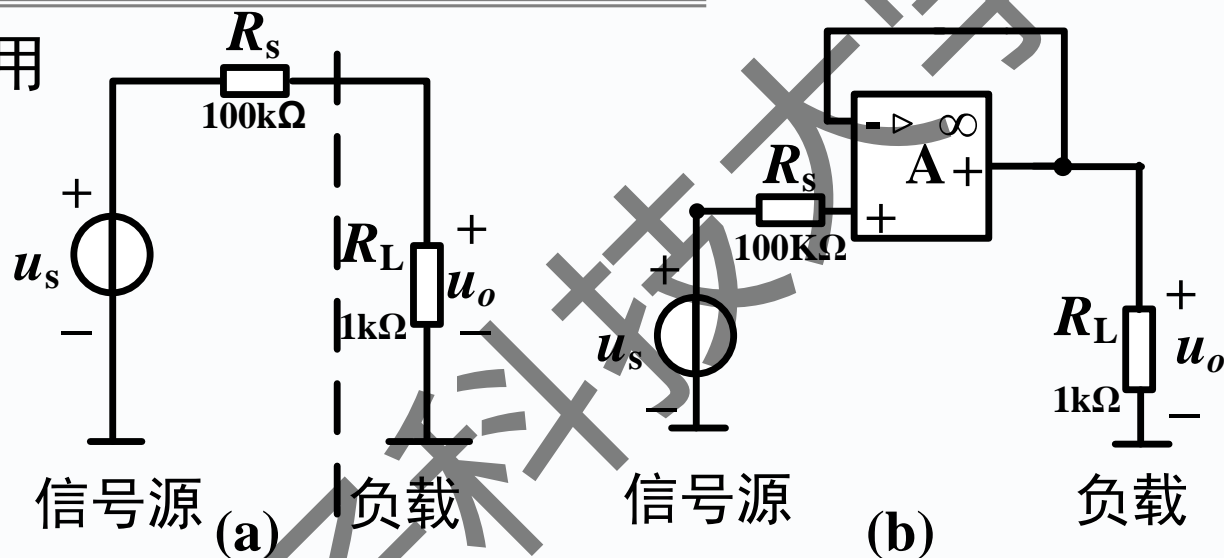
$$U_o = U_- = U_+ = U_i$$

$$R_i = ? \quad R_o = ?$$



# 一、比例运算电路

电压跟随器的作用



无电压跟随器时  
负载上得到的电压

$$u_o = \frac{R_L}{R_s + R_L} \cdot u_s$$

$$= \frac{1}{100 + 1} \cdot u_s \approx 0.01 u_s$$

电压跟随器时

$$i_+ \approx 0, u_+ = u_-$$

根据虚短和虚断有

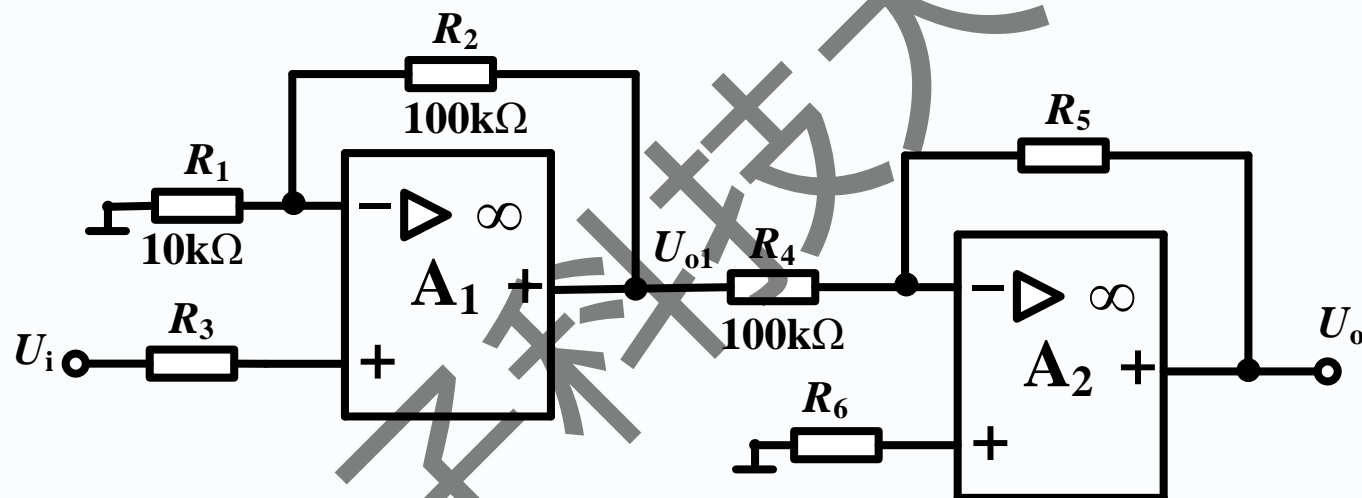
$$u_o = u_+ = u_- = u_s$$



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

# 一、比例运算电路

【例4.4.1】 电路如图4.4.4所示，已知 $U_o = -33U_i$ ，求 $R_3$ 、 $R_5$ 、 $R_6$ 的阻值



解：A<sub>1</sub>为同相比例电路

图4.4.4 例4.4.1电路图

$$U_{o1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_i = 11U_i$$

$R_3$ 为平衡电阻  $R_3 = R_1 // R_2 = 9.1k\Omega$

# 一、比例运算电路

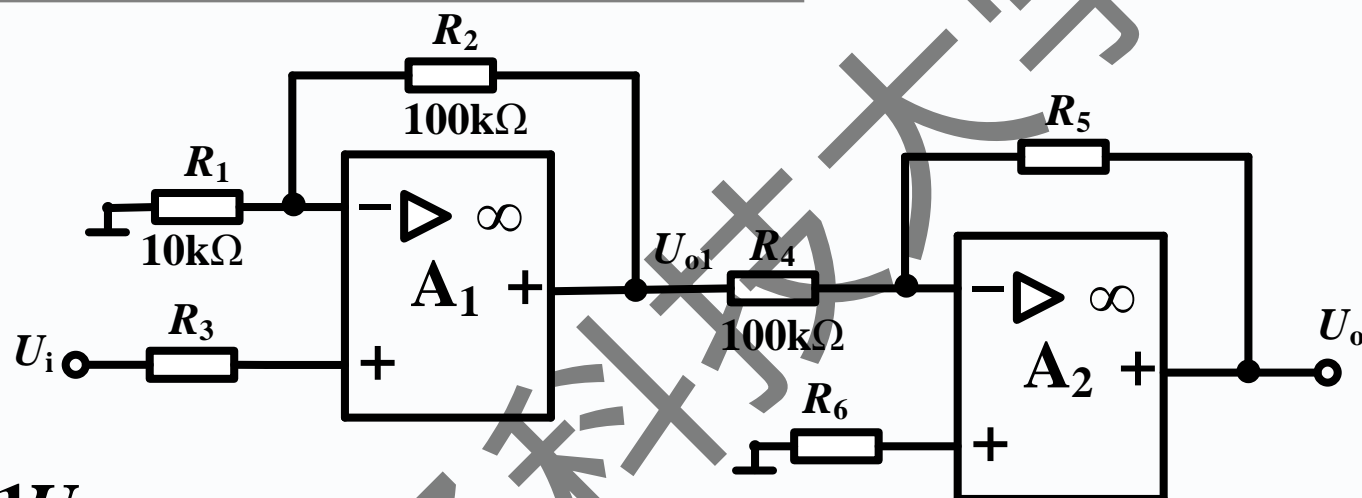


图4.4.4 例4.4.1电路图

$$U_{o1} = 11U_i$$

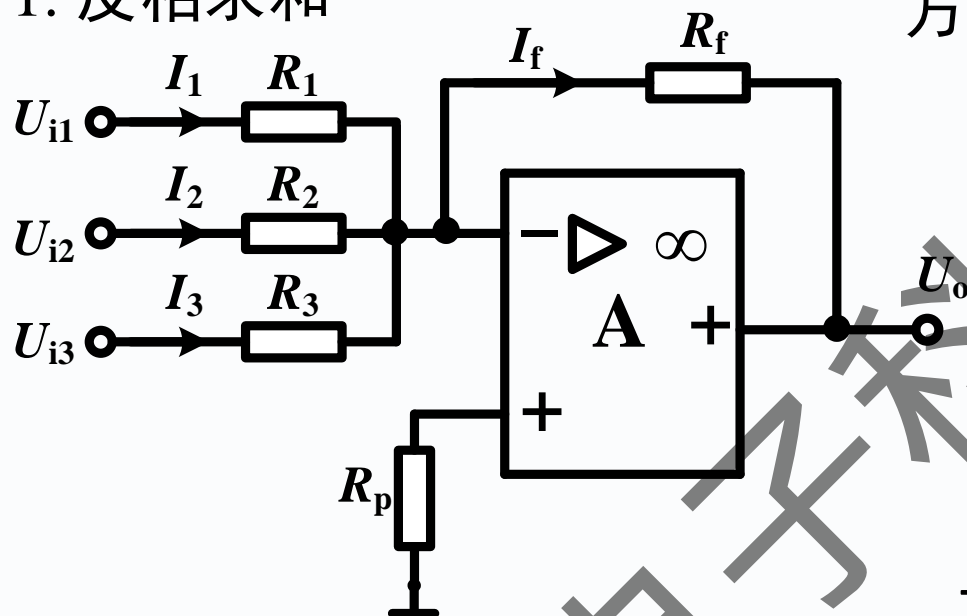
$A_2$ 为反相比例电路

$$U_o = -\frac{R_5}{R_4} U_{o1} = -\frac{R_5}{R_4} \times 11U_i = -33U_i \quad R_5 = 3R_4 = 300\text{k}\Omega$$

$$R_6 \text{为平衡电阻} \quad R_6 = R_4 // R_5 = 75\text{k}\Omega$$

## 二、加减运算电路

### 1. 反相求和



方法一：节点电流法

$$I_- = I_+ = 0$$

$$U_- = U_+ = 0$$

$$I_f = I_1 + I_2 + I_3$$

$$-\frac{U_o}{R_f} = \frac{U_{i1}}{R_1} + \frac{U_{i2}}{R_2} + \frac{U_{i3}}{R_3}$$

$$U_o = -R_f \left( \frac{U_{i1}}{R_1} + \frac{U_{i2}}{R_2} + \frac{U_{i3}}{R_3} \right)$$



## 二、加减运算电路

方法二：利用叠加原理

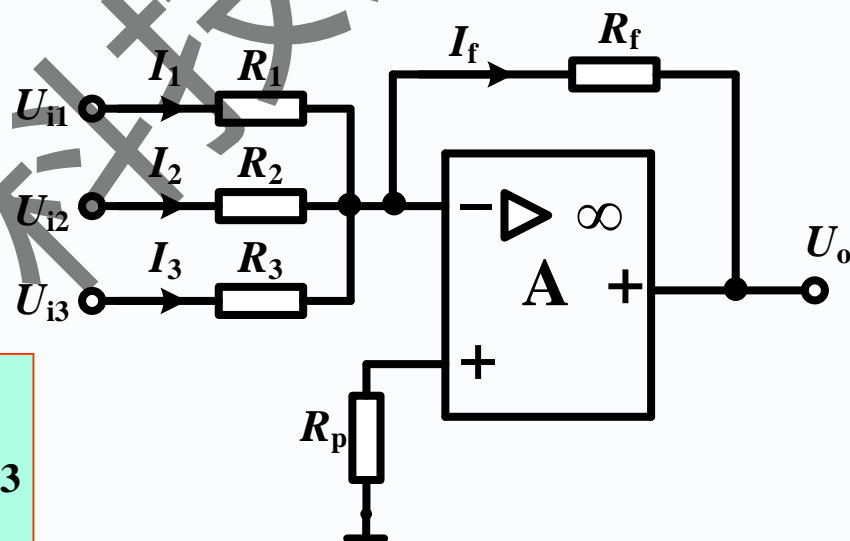
首先求解每个输入信号单独作用时的输出电压，然后将所有结果相加，即得到所有输入信号同时作用时的输出电压。

$$u_{O1} = -\frac{R_f}{R_1} \cdot u_{i1}$$

同理可得

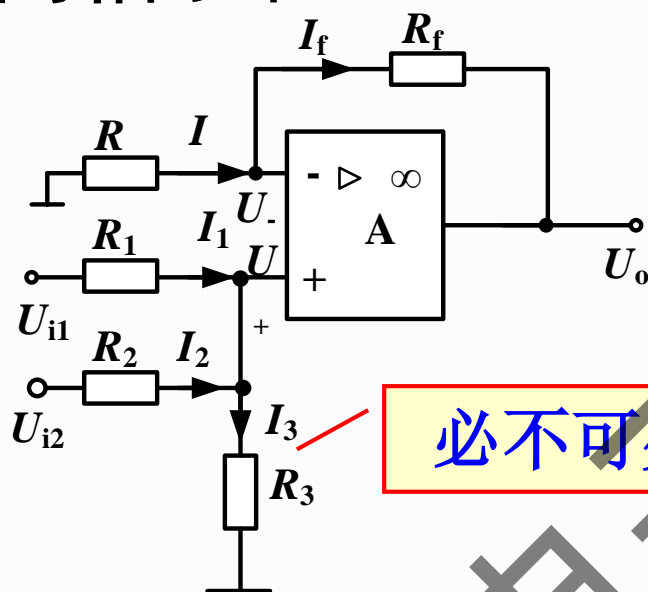
$$u_{O2} = -\frac{R_f}{R_2} \cdot u_{i2} \quad u_{O3} = -\frac{R_f}{R_3} \cdot u_{i3}$$

$$u_o = u_{O1} + u_{O2} + u_{O3} = -\frac{R_f}{R_1} \cdot u_{i1} - \frac{R_f}{R_2} \cdot u_{i2} - \frac{R_f}{R_3} \cdot u_{i3}$$



## 二、加减运算电路

### 2. 同相求和



必不可少吗?

用节点电流法:

$$I = I_f, I_1 + I_2 = I_3$$

$$\frac{0 - U_-}{R} = \frac{U_- - U_o}{R_f}$$

$$U_- = U_+$$

$$\frac{U_{i1} - U_+}{R_1} + \frac{U_{i2} - U_+}{R_2} = \frac{U_+}{R_3}$$

解得:

$$U_o = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) U_+ = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \left( \frac{R_2 // R_3}{R_1 + R_2 // R_3} U_{i1} + \frac{R_1 // R_3}{R_2 + R_1 // R_3} U_{i2} \right)$$

用叠加定理也可以写出:

$U_{i1}$ 作用时的 $U'_+$

$U_{i2}$ 作用时的 $U''_+$





## 二、加减运算电路

### 3. 减法电路

电路如图所示，电路平衡条件为

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

用叠加定理可以写出：

$$U_{i1} \text{ 作用时 } U'_o = -\frac{R_f}{R_1} U_{i1}$$

$$U_{i2} \text{ 作用时 } U_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} U_{i2}$$

$$U''_o = (1 + \frac{R_f}{R_1}) U_+ \quad U_o = U'_o + U''_o = (1 + \frac{R_f}{R_1}) \frac{R_3}{R_2 + R_3} U_{i2} - \frac{R_f}{R_1} U_{i1}$$

当电路电阻满足条件  $R_f / R_1 = R_3 / R_2$

$$U_o = -\frac{R_f}{R_1} (U_{i1} - U_{i2})$$

实现了差分放大



## 二、加减运算电路

### 双运放减法运算电路

双运放减法运算电路如图所示。

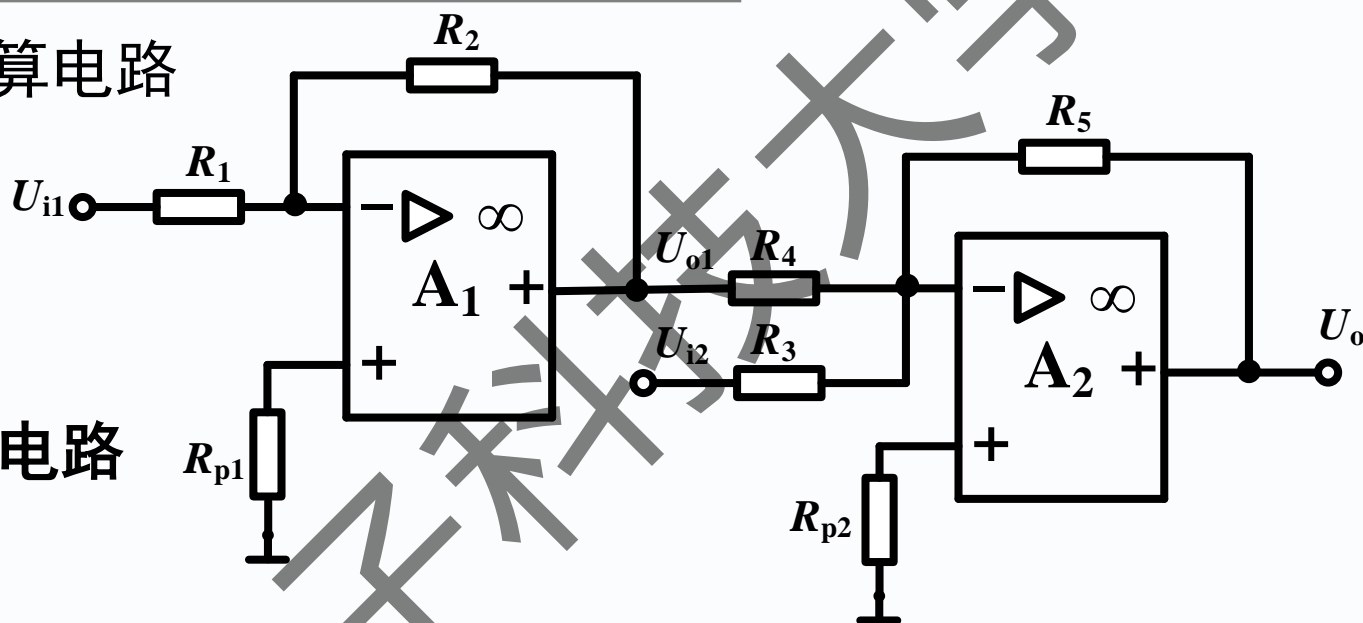
$A_1$  为反向比例电路

$$U_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} U_{i1}$$

$A_2$  为反相加法电路

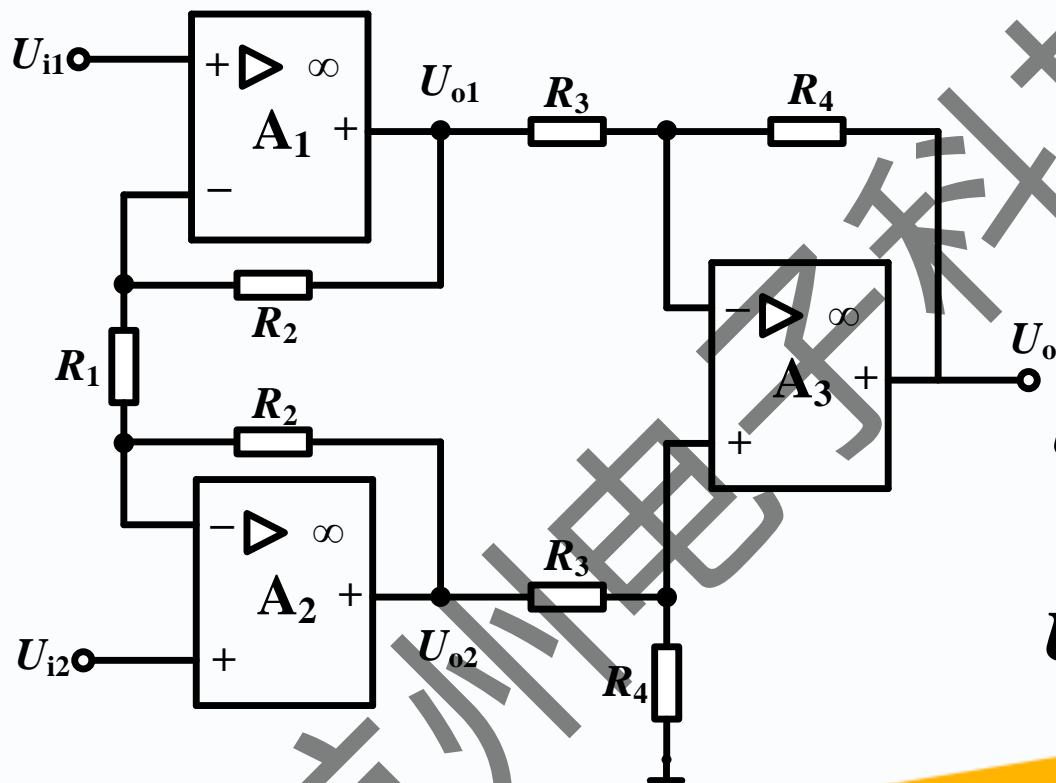
$$U_o = -R_5 \left( \frac{U_{o1}}{R_4} + \frac{U_{i2}}{R_3} \right)$$

$$U_o = -R_5 \left( -\frac{R_2}{R_1 R_4} U_{i1} + \frac{U_{i2}}{R_3} \right)$$



## 二、加减运算电路

【4.4.2】电路如图所示，(1) 试分别说明 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 各构成什么运算电路；(2) 求 $U_o$ 的表达式



解:

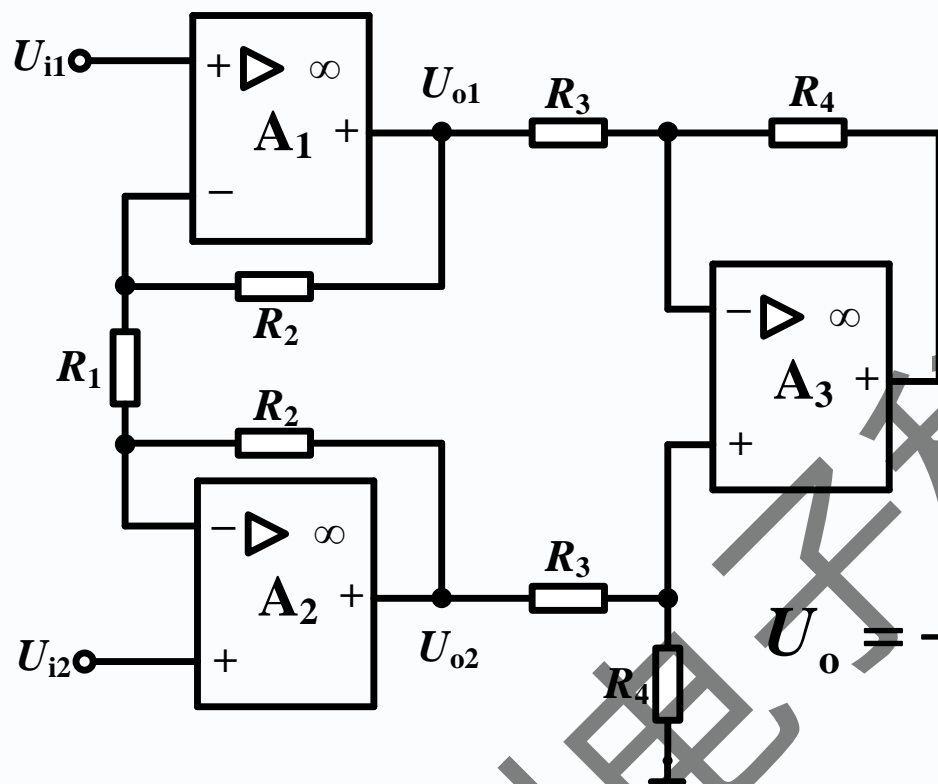
$A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 均为差放电路(减法电路)

$$U_{o1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)U_{i1} - \frac{R_2}{R_1}U_{i2}$$

$$U_{o2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)U_{i2} - \frac{R_2}{R_1}U_{i1}$$



## 二、加减运算电路



$$U_{o1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)U_{i1} - \frac{R_2}{R_1}U_{i2}$$

$$U_{o2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)U_{i2} - \frac{R_2}{R_1}U_{i1}$$

$$U_o = -\frac{R_4}{R_3}U_{o1} + \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)\frac{R_4}{R_3 + R_4}U_{o2}$$

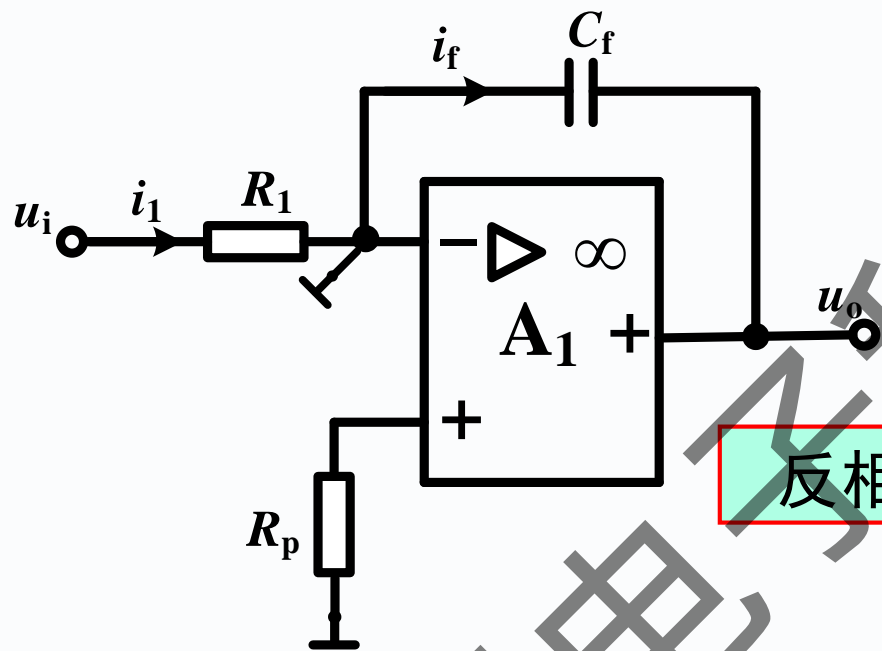
$$U_o = -\frac{R_4}{R_3}\left(1 + 2\frac{R_2}{R_1}\right)(U_{i1} - U_{i2})$$

实现了差分放大



### 三、积分运算电路和微分运算电路

#### 1. 积分运算电路



反相

若  $u_i$  在  $t_1 \sim t_2$  为常量, 则

$$i_f = i_1 \quad i_1 = \frac{u_i}{R_1} \quad i_f = -C_f \frac{du_o}{dt}$$

$$u_o = -\frac{1}{C_f} \int i_f dt = -\frac{1}{C_f} \int \frac{u_i}{R_1} dt$$

$$= -\frac{1}{R_1 C_f} \int u_i dt$$

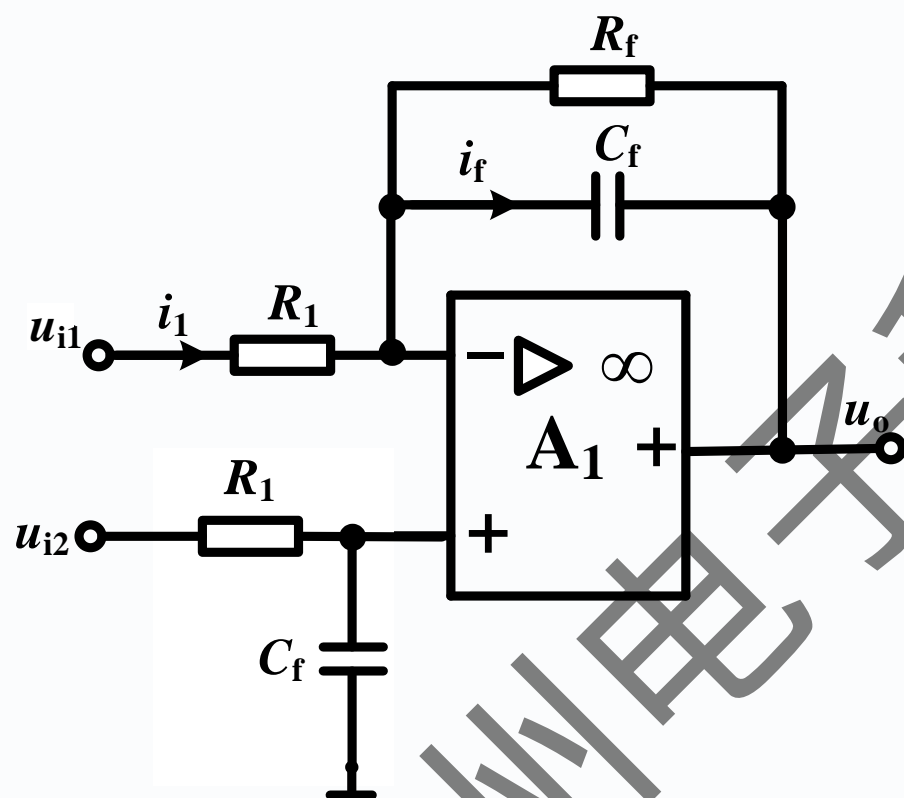
$$u_o = -\frac{1}{R_1 C_f} \int_{t_1}^{t_2} u_i dt + u_o(t_1)$$

$$u_o = -\frac{1}{R_1 C_f} \cdot u_i(t_2 - t_1) + u_o(t_1)$$



## 三、积分运算电路和微分运算电路

### 1. 积分运算电路

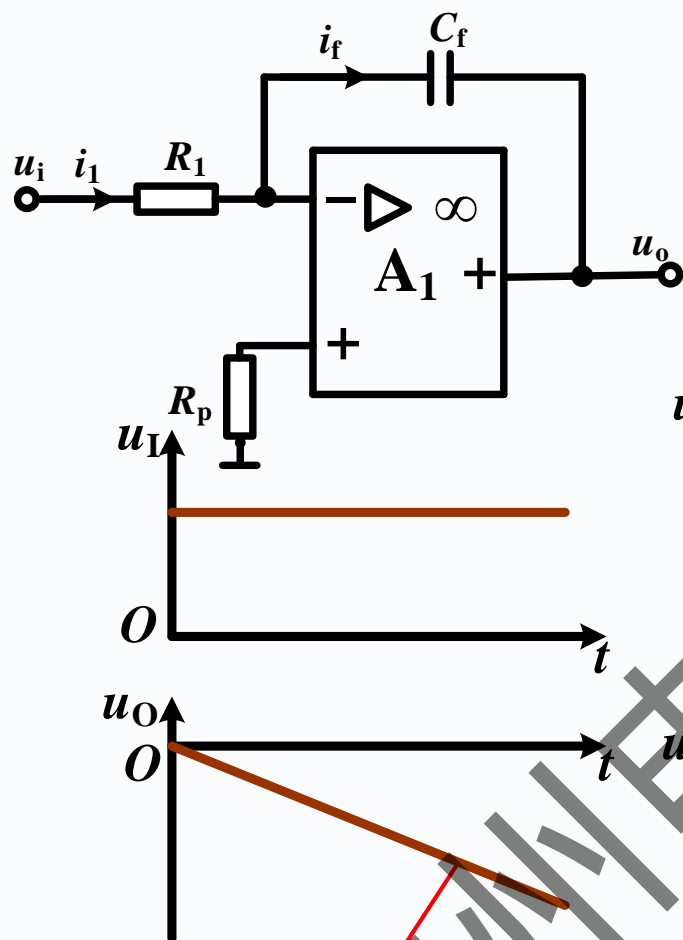


为了保证A不出现开环，可  
与 $C_f$ 并联一个大电阻 $R_f$

差动积分电路

$$u_o = -\frac{1}{R_1 C_f} \int (u_{i1} - u_{i2}) dt$$

# 利用积分运算的基本关系实现不同的功能

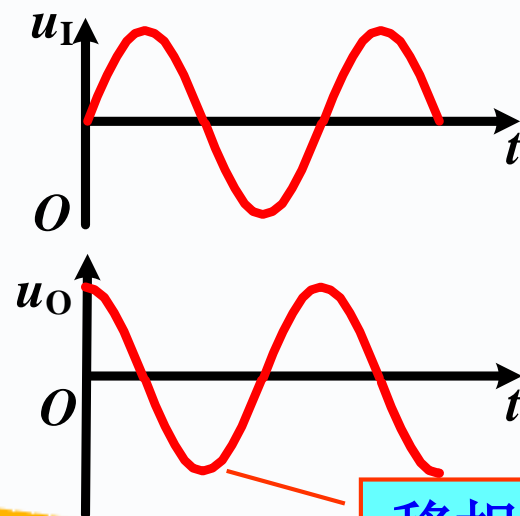
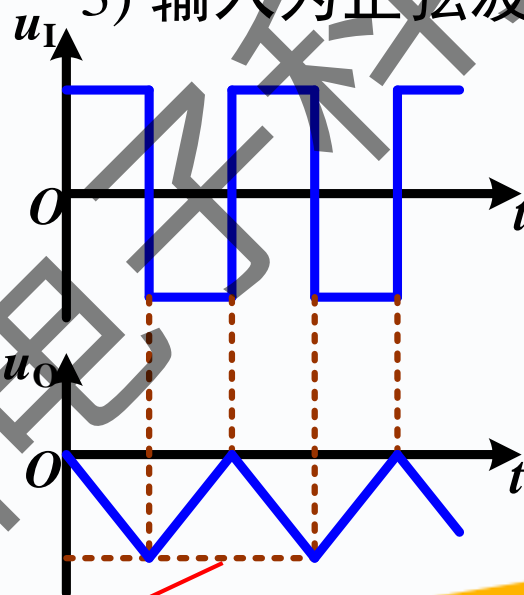


1) 输入为阶跃信号时的输出电压波形?

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int u_i dt = -\frac{U_I}{RC} t = -\frac{U_I}{\tau} t$$

2) 输入为方波时的输出电压波形?

3) 输入为正弦波时的输出电压波形?



移相

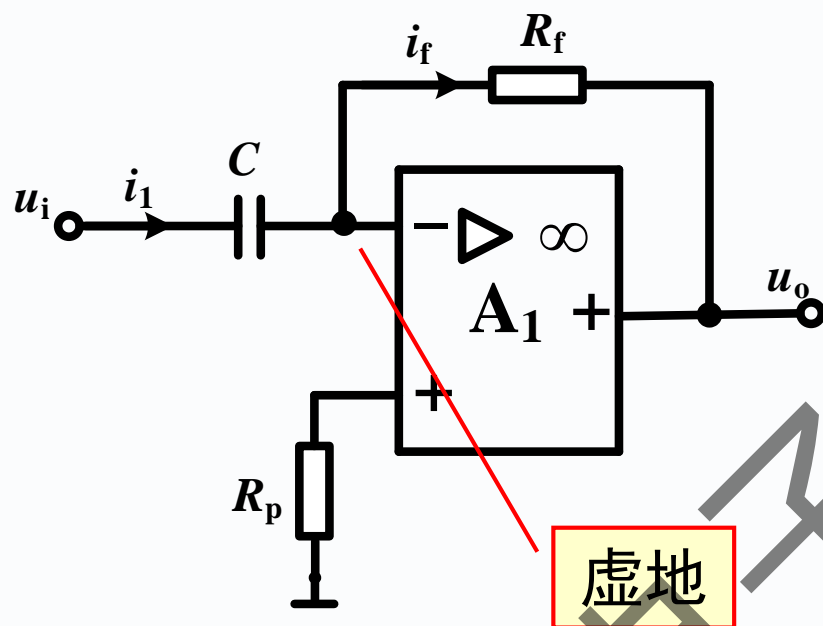
线性积分

波形变换



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

## 2. 微分运算电路



$$I_1 = C \frac{du_i}{dt}$$

$$u_o = -I_f R_f = -I_1 R_f = -R_f C \frac{du_i}{dt}$$

此微分电路很少直接使用  $u_i = U_m \sin \omega t$

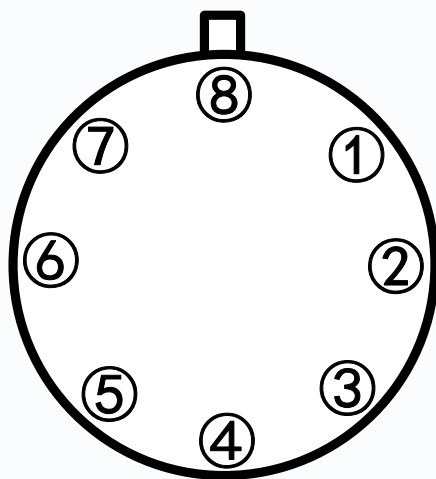
$u_o = -R_f C \omega U_m \cos \omega t$  随  $\omega \uparrow$ ,  $|U_o| \uparrow$

高频噪声幅值非常高

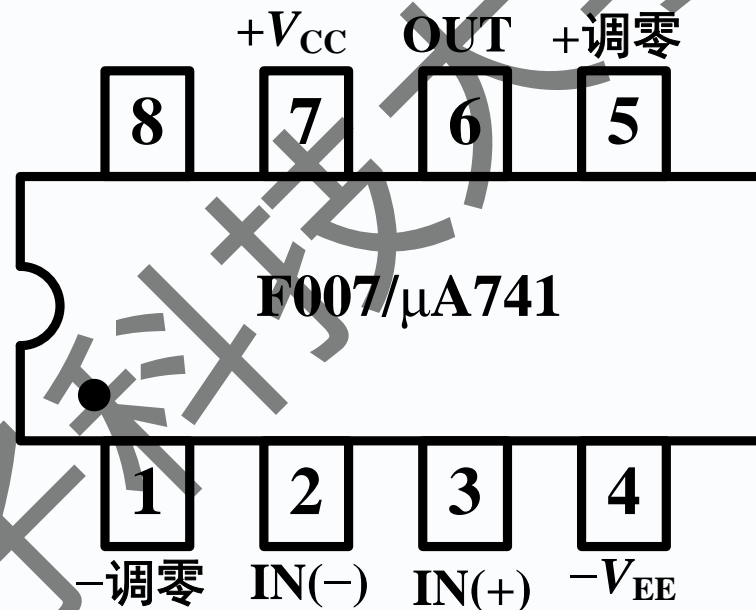




# 通用型集成运放的管脚说明



(a) 金属圆外壳



(b) 陶瓷双列直插式

F007/ $\mu$ A741的外形结构和引脚排列图