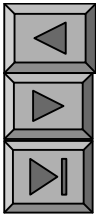


# 第五章 含有运算放大器的电阻电路

## 内容提要

- 运算放大器的电路模型
- 理想运放的两条重要规则
- 含理想运放电路的分析要点
- 几个典型电路。

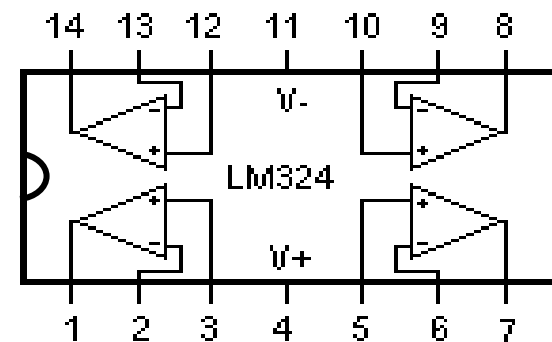


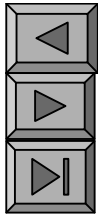
## § 5-1 运算放大器的电路模型

### 一、集成运算放大器简介

是一个包含许多晶体管的集成电路，**电压放大倍数**(输出电压与输入电压的比值) **很高**。

最初主要用于模拟计算机，故称集成运算放大器。如今，集成运算放大器的应用早已超出模拟计算的范畴。它象一个性能很高的晶体管，只要外加少数几个元件，就能方便地完成各种各样的功能。





## 二、集成运放的应用

应用广泛，电路形式千变万化，但从工作状态看，分为线性应用和非线性应用两大类。

### 1. 线性应用

运放工作于线性放大状态。

信号处理

可构成各种电压放大器、有源滤波器和比例、加、减、乘、除、指数、对数、微分、积分等线性运算电路；

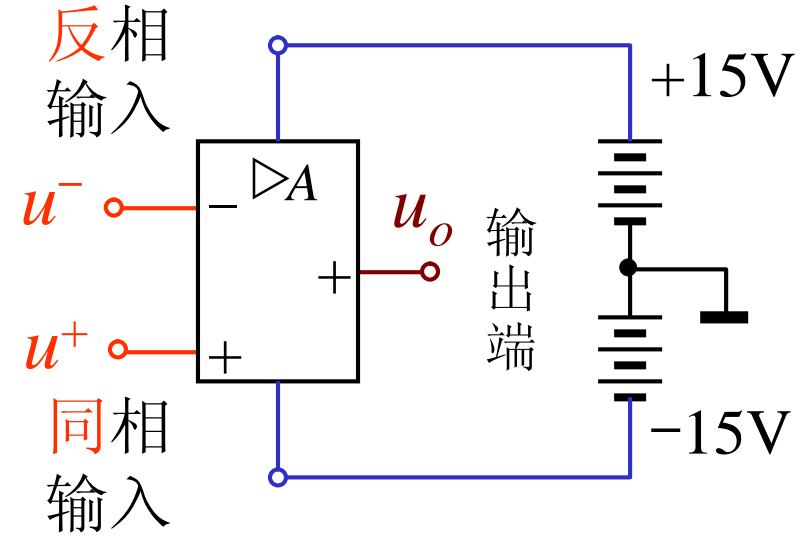
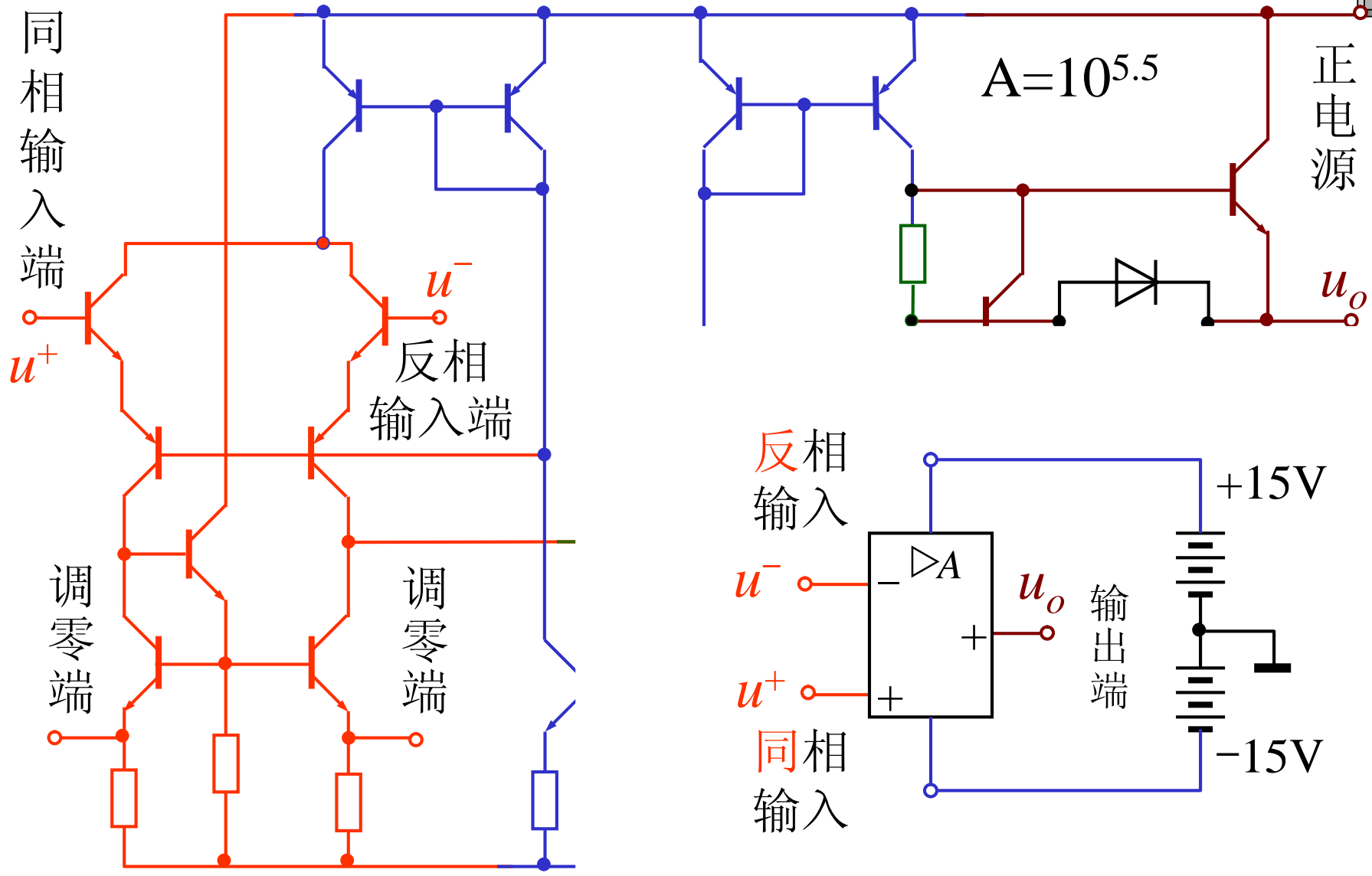
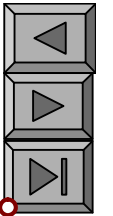
模拟运算

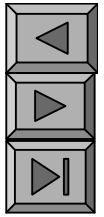
### 2. 非线性应用

运放工作于开关状态。

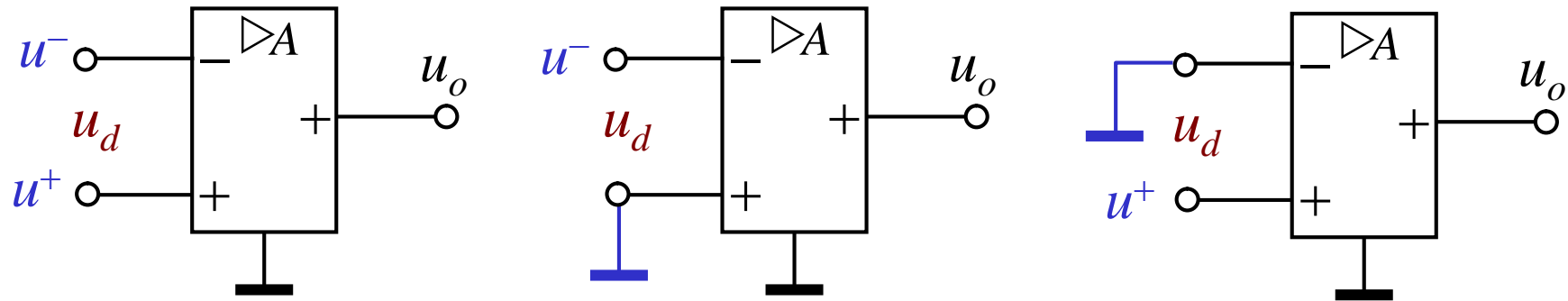
构成电压比较器、各种非正弦波发生器(方波、三角波、锯齿波)等。

# 国产F007内部原理图(对应国外 $\mu A741$ )





### 三、集成运放的输入、外特性、电路模型



#### 1. 输入情况

(1) 若在两个输入端同时加输入电压  $u^+$  和  $u^-$

有:  $u_o = A(u^+ - u^-) = A u_d$

这叫做双端输入。

$u_d = u^+ - u^-$  称差动电压。

因此也称差动输入方式。

(2) 若只在一个输入端加输入电压, 另一端接地, 则称为单端输入。

反相输入:  $u_o = -A u^-$

同相输入:  $u_o = A u^+$

## 2. 外特性 (电压传输特性)

(1) 当  $|u_d| < \varepsilon$  时

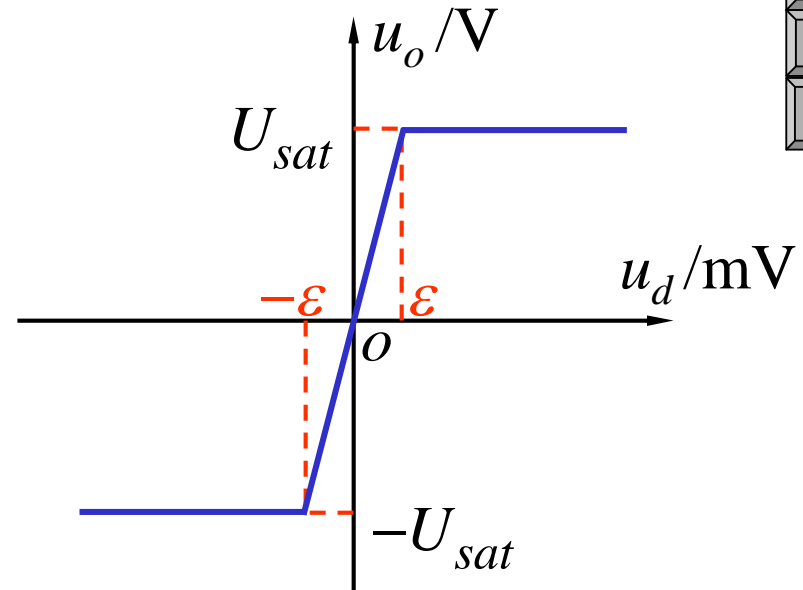
$$u_o = A u_d$$

运放在线性放大  
状态下工作。

$$|u_d| = \left| \frac{u_o}{A} \right| \leq \left| \frac{\pm 13}{10^{5.5}} \right|$$

F007:  $A \approx 10^{5.5}$   
 $E_C = \pm 15V$   
 $U_{sat} \approx \pm 13V$

$A$  很大, 传输特性很陡,

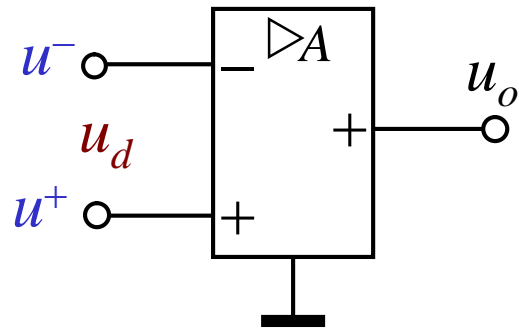


$u_d$  的变化范围非常小。

(2) 当  $|u_d| > \varepsilon$  时

$u_o \approx \pm U_{sat}$ , 不再随输入  $u_d$  的变化而改变  
运放处于饱和状态。

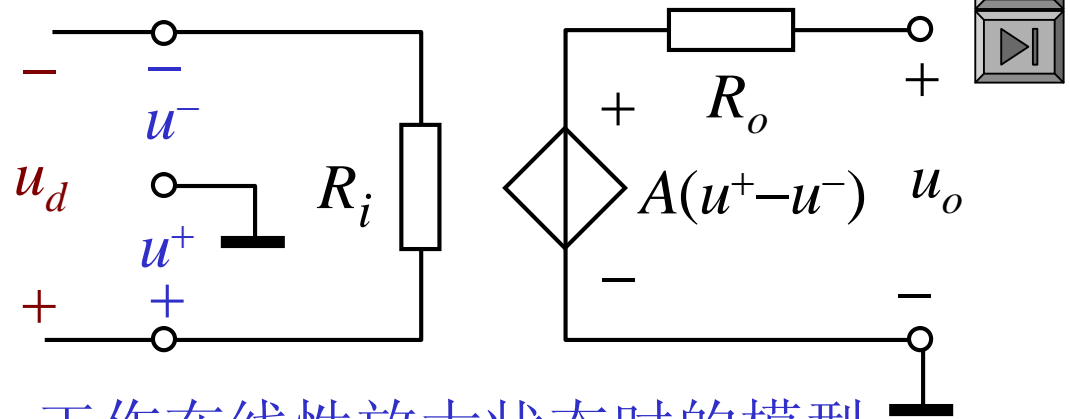
### 3. 运放的电路模型



$R_i$  是输入电阻，一般为  $10^3 \sim 10^{12} \Omega$ 。

用VCVS表示输入电压对  $u_o$  的控制作用。

$R_o$  是输出电阻，一般为十几~几百  $\Omega$ 。

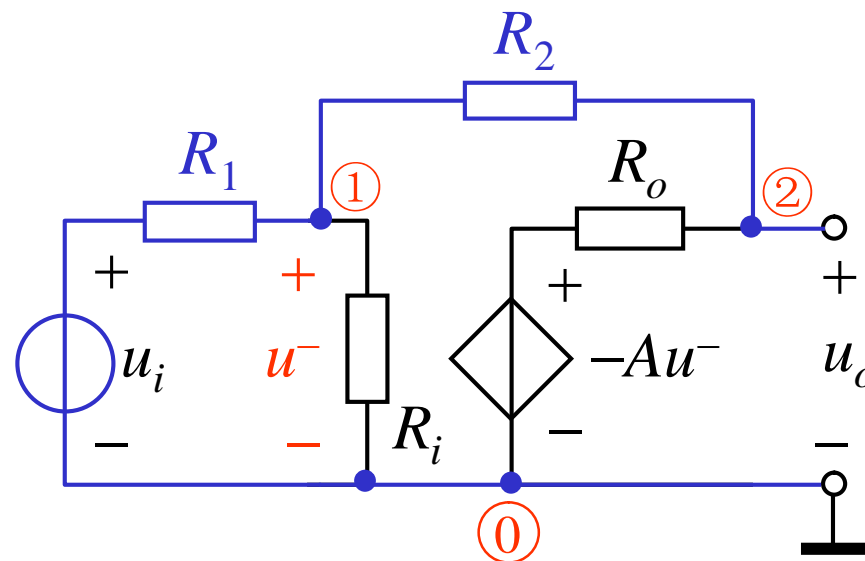
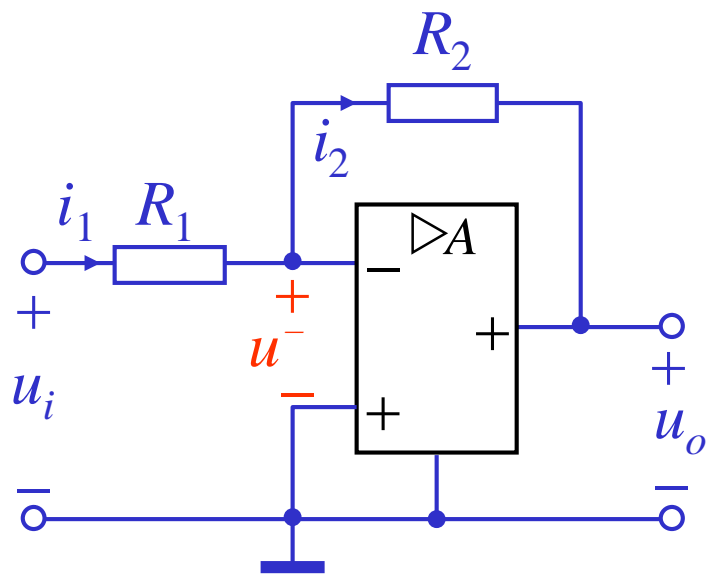


工作在线性放大状态时的模型

开环运行：因内有完整的多级放大器，故不需外围元件，接通电源就能工作。

闭环运行：实用中，必须通过一个(反馈)网络把输出端与反相端连接起来才行。

## § 5-2 比例电路分析

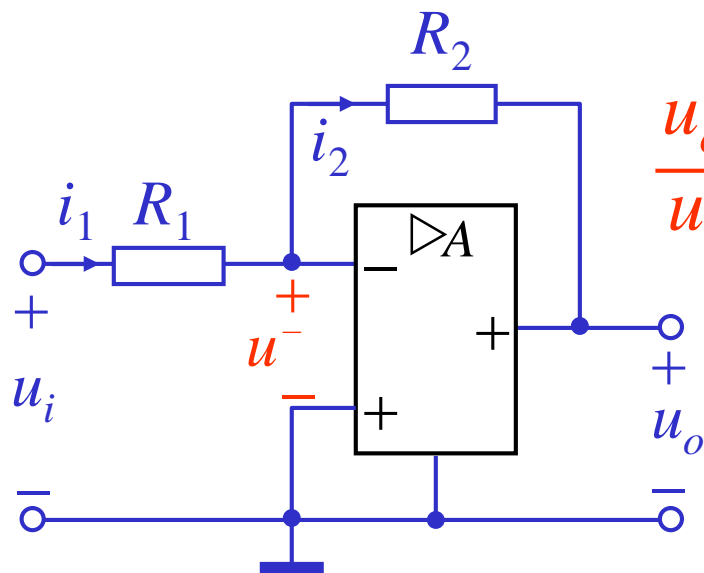


用结点法分析  $u_o$  与  $u_i$  的关系  $u_{n1} = u^-$ ,  $u_{n2} = u_o$ ,

$$\begin{cases} \left[ \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_2} \right] u^- - \frac{1}{R_2} u_o = \frac{u_i}{R_1} \\ -\frac{1}{R_2} u^- + \left[ \frac{1}{R_o} + \frac{1}{R_2} \right] u_o = \frac{-Au^-}{R_o} \end{cases}$$

消去中间  
变量  $u^-$  并  
整理





$$\frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{\left(1 + \frac{R_2}{R_o}\right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_i}\right)}{A - \frac{R_o}{R_2}}}$$

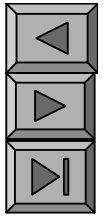
一些高精度的集成运放， $A$ 可达 $10^7$ 。

因 $A$ 很大，结果足够精确，并说明：

$$\frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$u_o = -\frac{R_2}{R_1} u_i$$

- (1) 选不同的 $R_1$ 和 $R_2$ ，可获得不同的比例系数，或放大倍数；
- (2) 集成运放性能稍有改变，比例系数基本不受影响。



## § 5-3 含理想运放的电路分析

### 一、理想运放在线性应用时的两条规则

理想运放的参数：

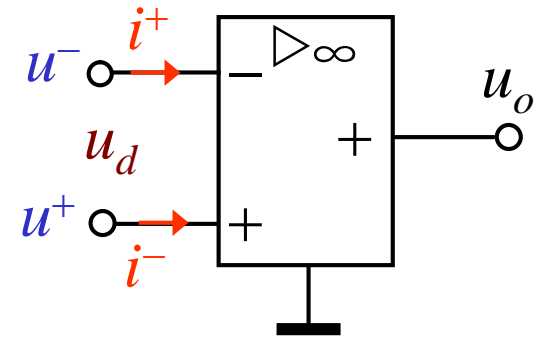
$$A \rightarrow \infty, R_i \rightarrow \infty, R_o = 0 \dots$$

$$R_i \rightarrow \infty \longrightarrow (1) i^- = i^+ = 0$$

输入端相当于开路(“虚断”路)。

$$\frac{u_o}{A} = u_d = (u^+ - u^-) \rightarrow 0 \longrightarrow (2) u^+ = u^-$$

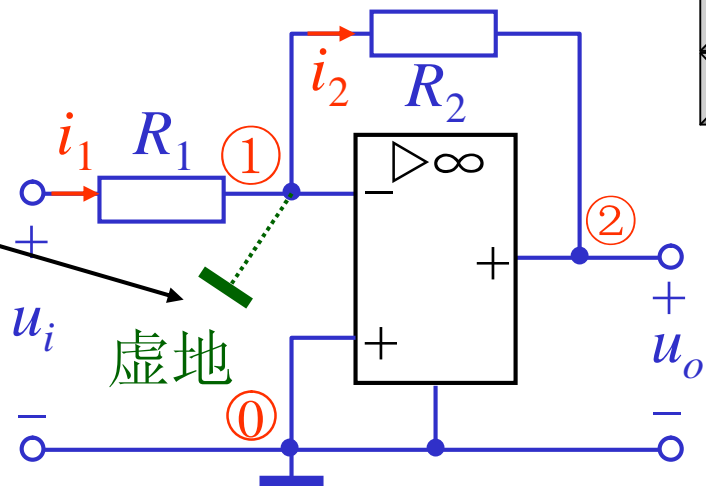
反相端与同相端相当于短路(“虚短”路)。



由规则2

由规则1:  $i_1 = i_2$

$$\frac{u_i}{R_1} = - \frac{u_o}{R_2} \longrightarrow \frac{u_o}{u_i} = - \frac{R_2}{R_1}$$



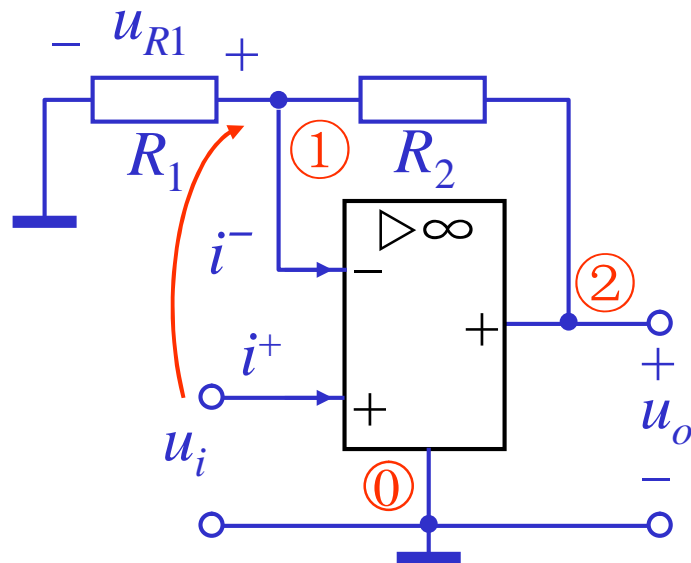
## 二、同相比例电路

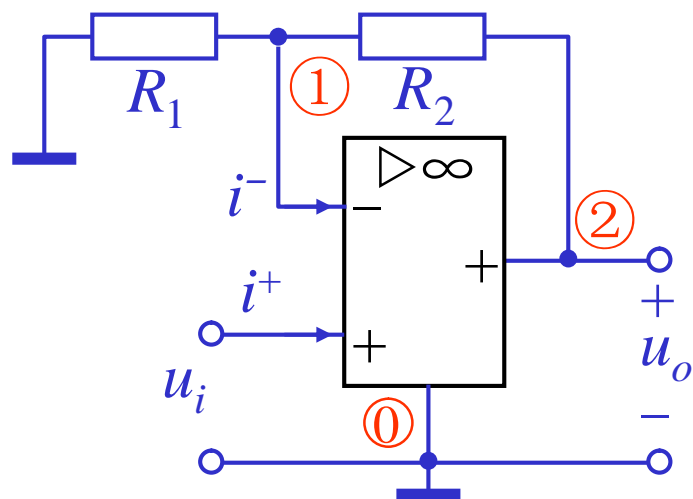
由规则1:  $R_1$ 、 $R_2$ 为串联,

由分压公式:  $u_{R1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_o$

由规则2:  $u_{R1} = u_i$ ,

$$u_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} u_i \longrightarrow \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

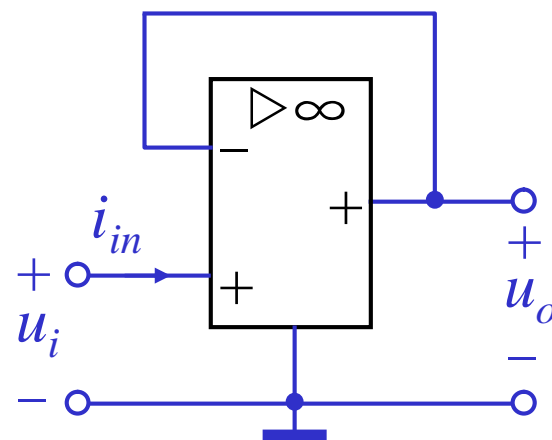




$$\frac{u_o}{u_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

若  $R_2=0$

$R_1$  断开

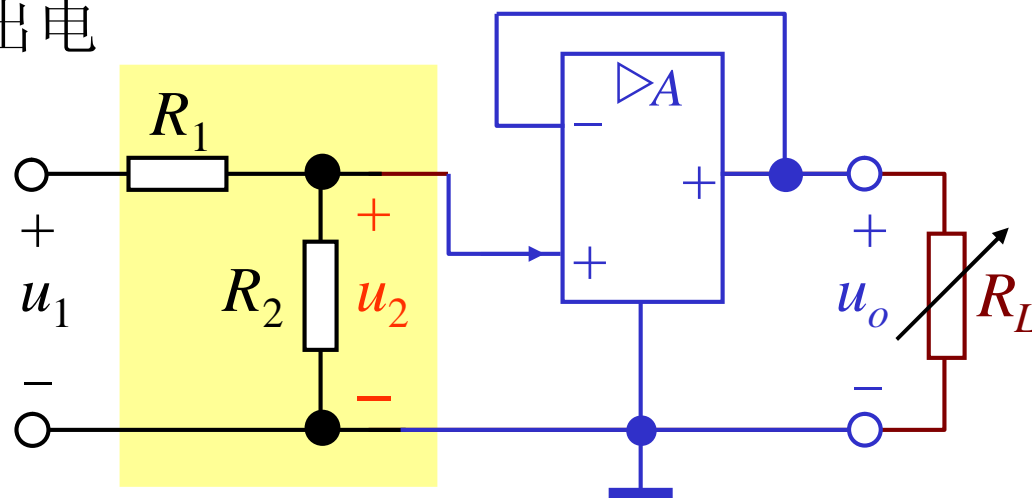


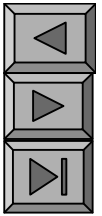
则  $u_o = u_i$ ，称 电压跟随器。

实际运放的  $R_i$  很大，起“隔离”作用，亦称 缓冲放大器。

当负载发生变化时，输出电压  $u_o$  也会跟着发生变化。

插入缓冲放大后， $R_L$  的变化不会影响  $u_2 (= u_o)$ 。





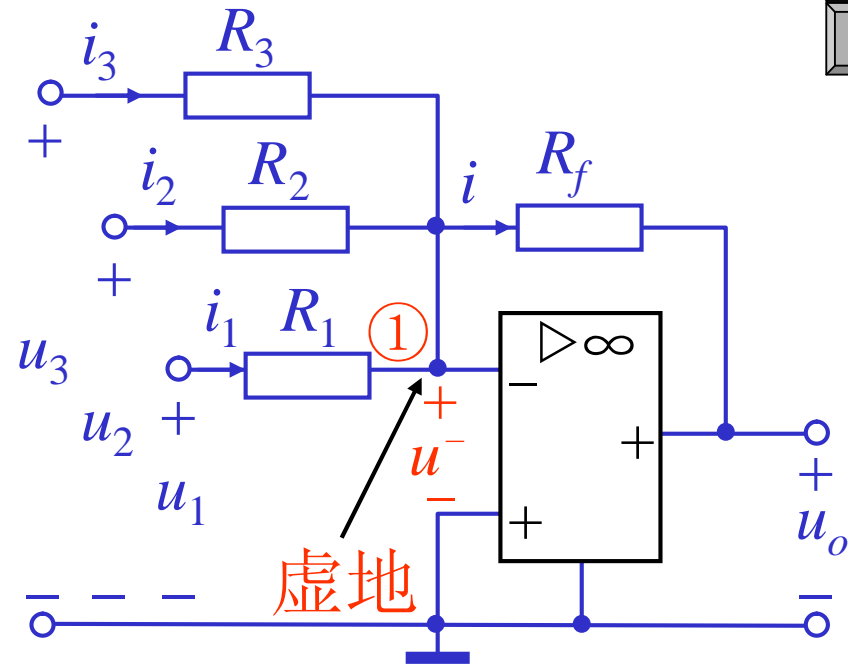
### 三、反相加法器

$$\because i^- = 0$$

$$\because i_1 + i_2 + i_3 = i$$

$$\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \frac{u_3}{R_3} = -\frac{u_o}{R_f}$$

$$u_o = -\left[ \frac{R_f}{R_1} u_1 + \frac{R_f}{R_2} u_2 + \frac{R_f}{R_3} u_3 \right]$$



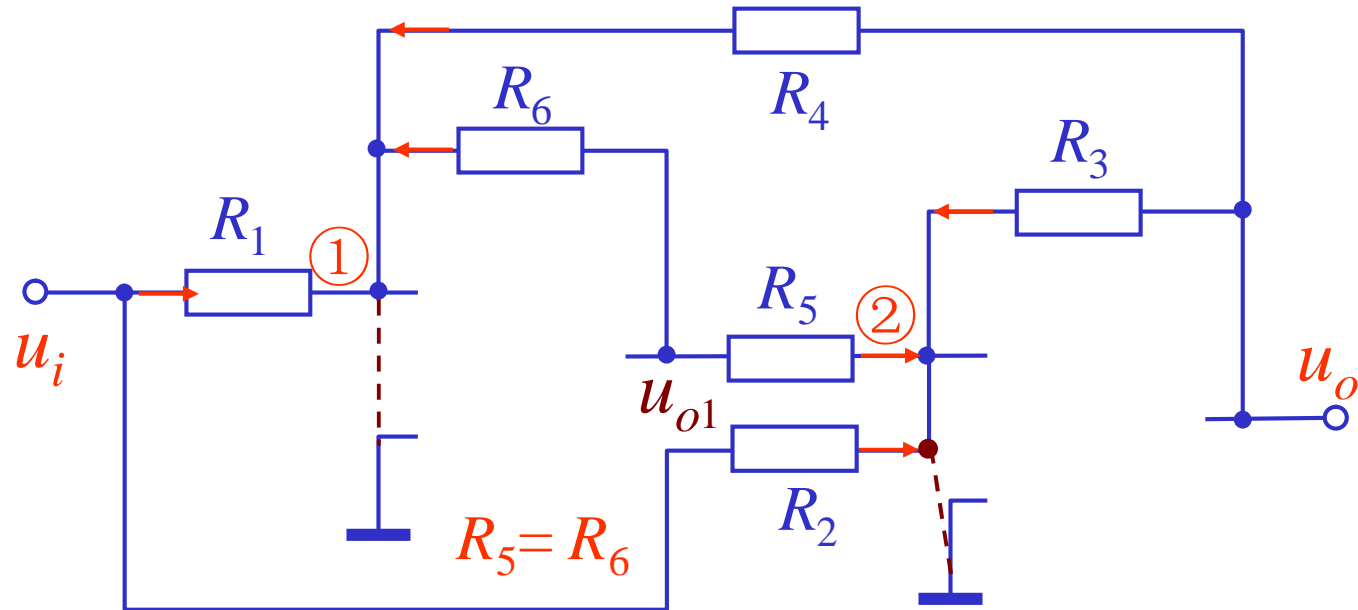
若用叠加原理，则可以直接引用反相比例运算的结论。

若用结点电压法：

若  $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$   
则  $u_o = -(u_1 + u_2 + u_3)$

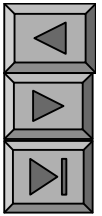
$$\left[ \text{自导} \right]_{\text{虚地}} u_{n1} = \frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \frac{u_3}{R_3} + \frac{u_o}{R_f} = 0$$

### 例5-3



$$\left. \begin{aligned} \frac{u_i}{R_1} + \frac{u_o}{R_4} + \frac{u_{o1}}{R_6} &= 0 \\ \frac{u_i}{R_2} + \frac{u_o}{R_3} + \frac{u_{o1}}{R_5} &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{两式} \\ \text{相减} \end{array} \rightarrow \frac{u_i}{R_1} - \frac{u_i}{R_2} + \frac{u_o}{R_4} - \frac{u_o}{R_3} = 0$$

$$(G_1 - G_2)u_i = (G_3 - G_4)u_o \quad \frac{u_o}{u_i} = \frac{(G_1 - G_2)}{(G_3 - G_4)}$$



题5-7 求图示电路的 $u_o$ 与 $u_{s1}$ 、 $u_{s2}$ 之间的关系。

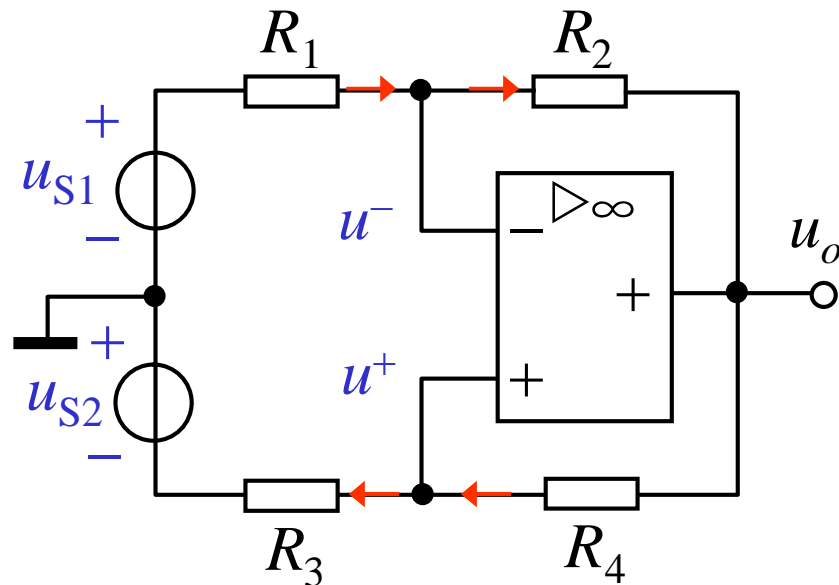
解：

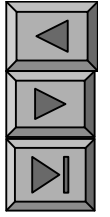
$$\left. \begin{aligned} \frac{u_{s1} - u^-}{R_1} &= \frac{u^- - u_o}{R_2} \\ \frac{u^+ + u_{s2}}{R_3} &= \frac{u_o - u^+}{R_4} \end{aligned} \right\}$$

$$u^+ = u^-$$

消去 $u^+$ 、 $u^-$ 并整理得

$$u_o = \frac{(G_3 + G_4) G_1 u_{s1} + (G_1 + G_2) G_3 u_{s2}}{G_1 G_4 - G_2 G_3}$$





本章结束