

# 第五章 含有运算放大器的电阻电路

## 本章重点

5-1

运算放大器的电路模型

5-2

比例电路的分析

5-3

含有理想运算放大器的电路的分析

首页

## ●重点

1. 理想运算放大器的外部特性
2. 含理想运算放大器的电阻电路分析
3. 一些典型的电路

# 5-1 运算放大器的电路模型

## 1. 简介

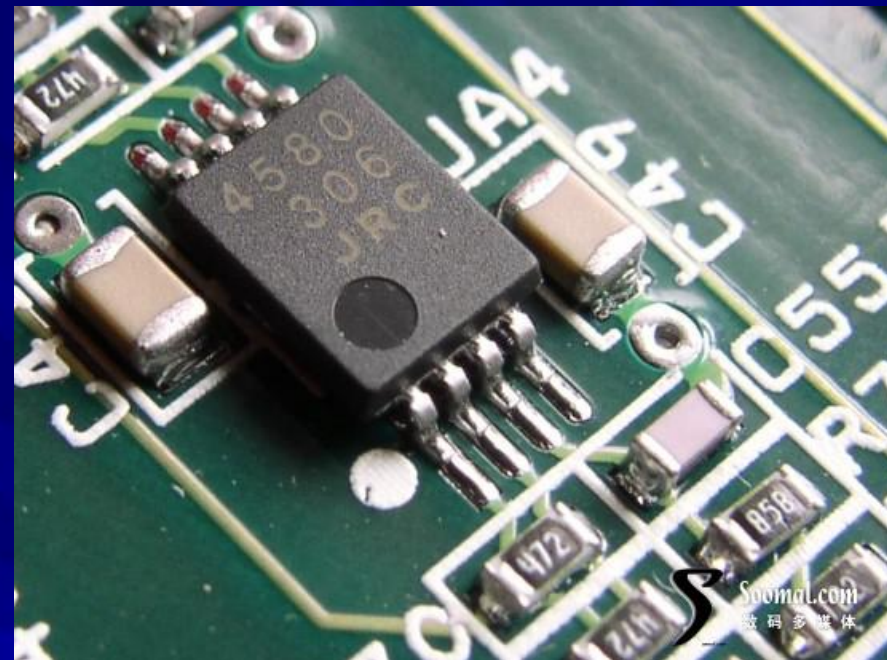
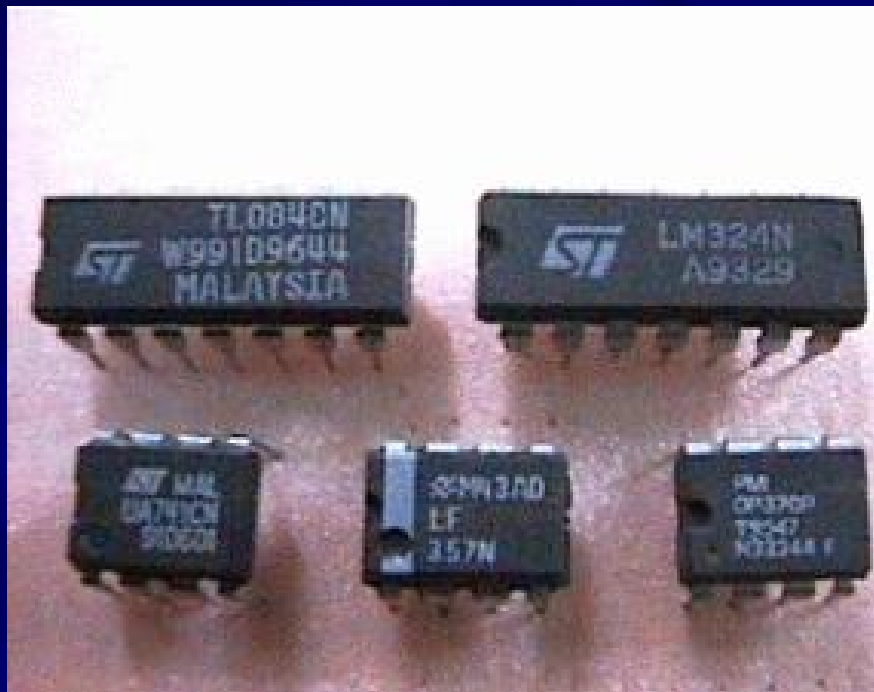
### ● 运算放大器

是一种有着十分广泛用途的电子器件。最早开始应用于1940年。1960年后，随着集成电路技术的发展，运算放大器逐步集成化，大大降低了成本，获得了越来越广泛的应用。

## ● 应用

- ①信号的运算电路 → 比例、加、减、对数、指数、积分、微分等运算。
- ②信号的处理电路 → 有源滤波器、精密整流电路、电压比较器、采样-保持电路。
- ③信号的发生电路 → 产生方波、锯齿波等波形。





## 集成运算放大器

## ● 符号

8个管脚：

2：倒向输入端

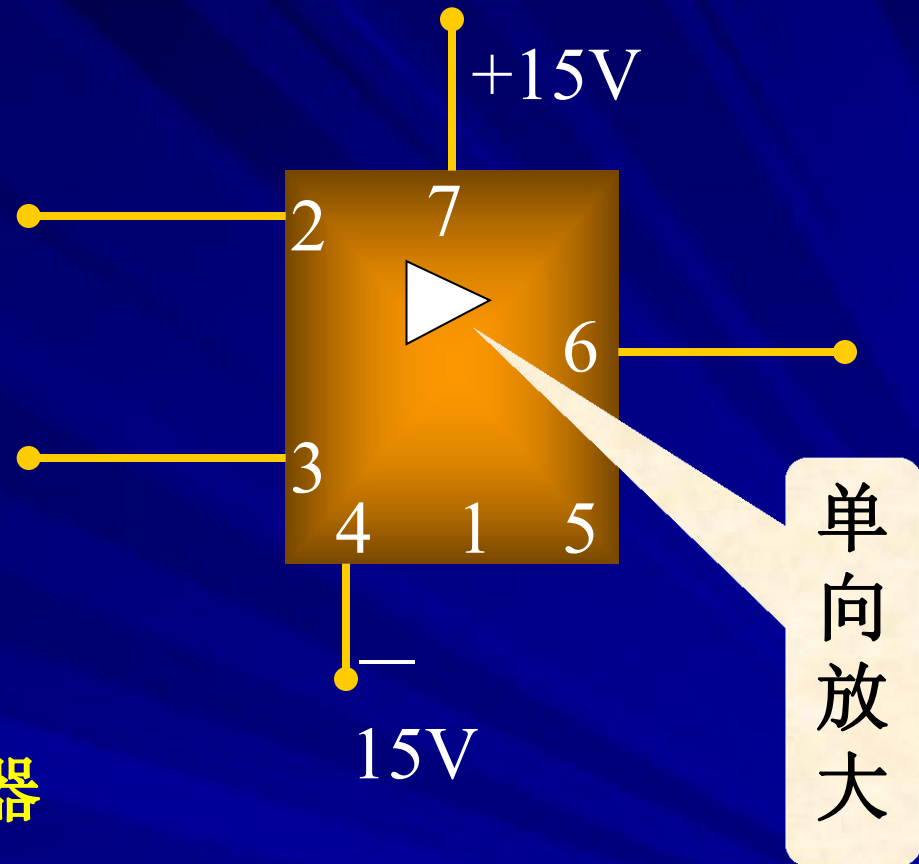
3：非倒向输入端

4、7：电源端

6：输出端

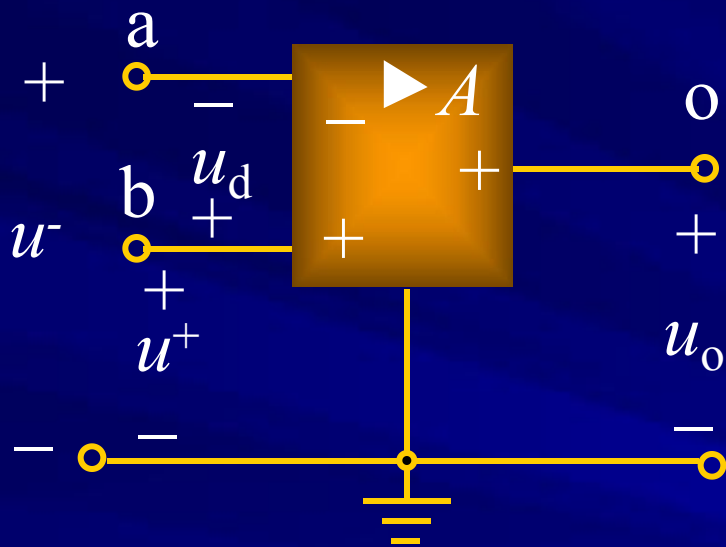
1、5：外接调零电位器

8：空脚



## ● 电路符号

在电路符号图中一般不画出直流电源端，而只有a、b、o三端和接地端。



a: 倒向输入端，输入电压  $u^-$   
 b: 非倒向输入端，输入电压  $u^+$   
 o: 输出端，输出电压  $u_o$

 : 公共端(接地端)

$A$ : 开环电压放大倍数，可达十几万倍。



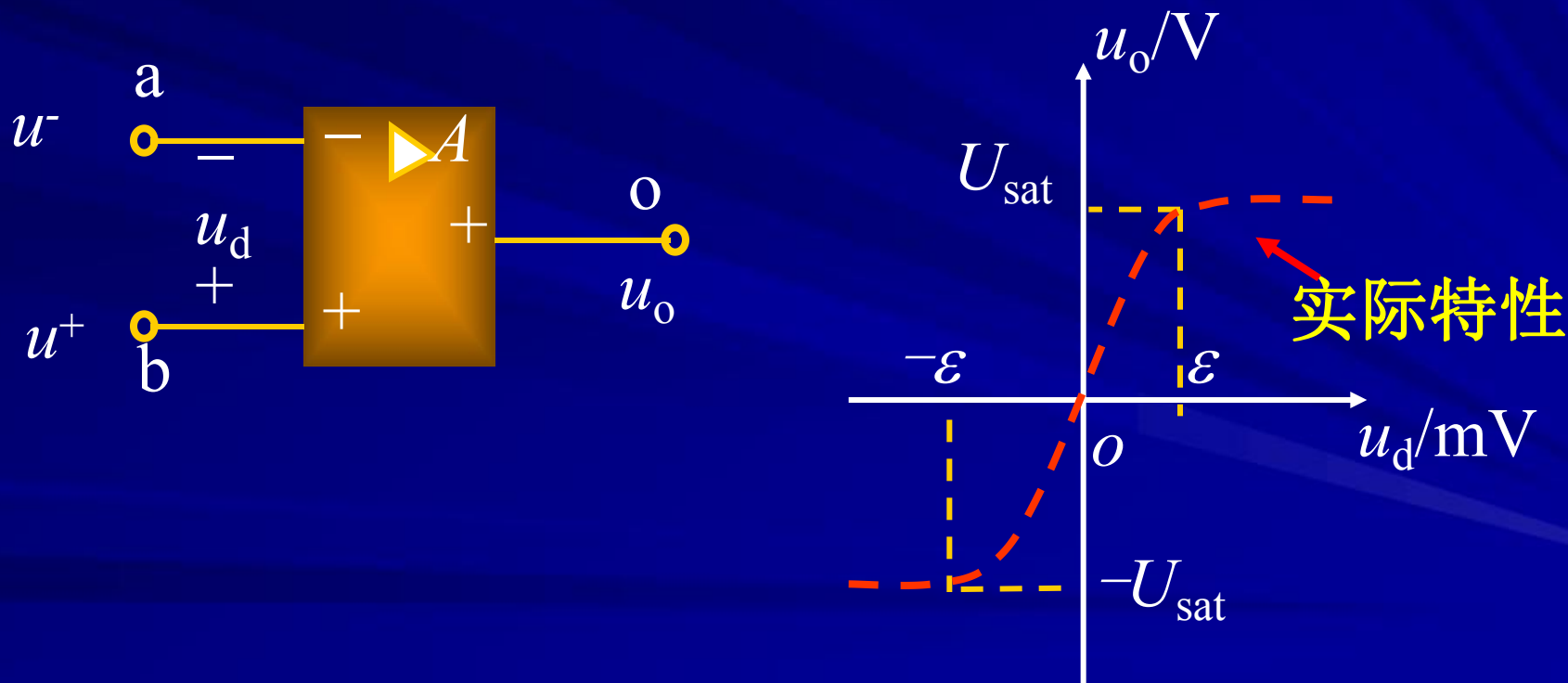
注意

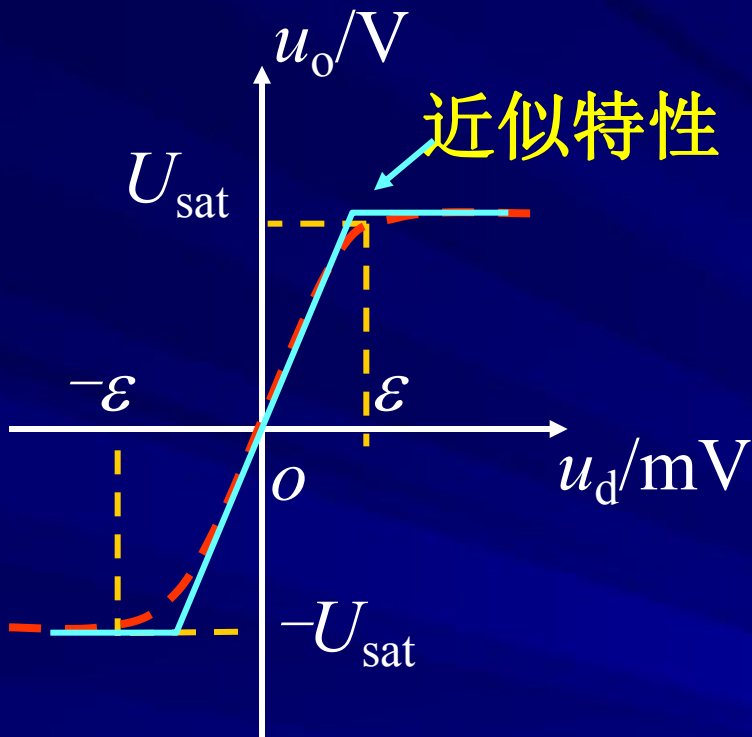
图中参考方向表示每一点对地的电压，在接地端未画出时尤须注意。



## 2. 运算放大器的静特性

在a、b间加一电压  $u_d = u^+ - u^-$ ，可得输出  $u_o$  和输入  $u_d$  之间的转移特性曲线如下：





分三个区域：

①线性工作区：

$$|u_d| < \varepsilon \quad \text{则} \quad u_o = Au_d$$

②正向饱和区：

$$u_d > \varepsilon \quad \text{则} \quad u_o = U_{\text{sat}}$$

③反向饱和区：

$$u_d < -\varepsilon \quad \text{则} \quad u_o = -U_{\text{sat}}$$



注意

$\varepsilon$ 是一个数值很小的电压，例如

$$U_{\text{sat}} = 13\text{V}, A = 10^5, \quad \text{则} \quad \varepsilon = 0.13\text{mV}.$$

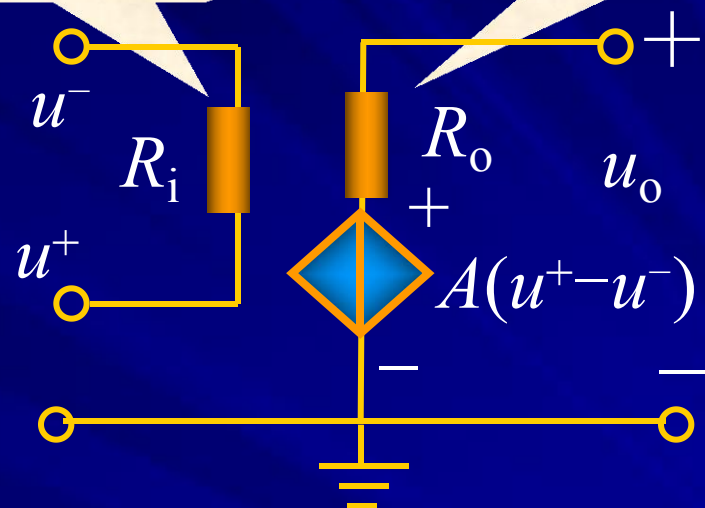
### 3. 电路模型

当： $u^+ = 0$ ，则  $u_o = -Au^-$

当： $u^- = 0$ ，则  $u_o = Au^+$

输入电阻

输出电阻



### 4. 理想运算放大器

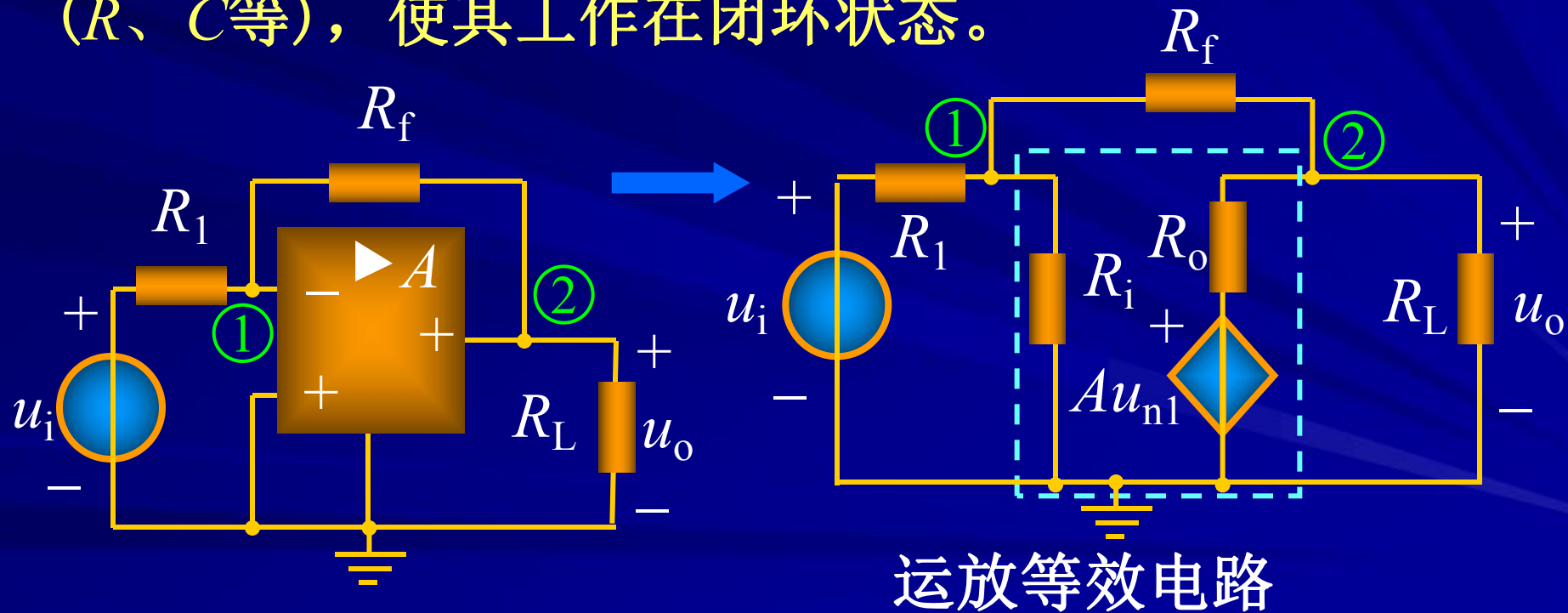
在线性放大区，将运放电路作如下理想化处理：

- ①  $A \rightarrow \infty$   $\longrightarrow$   $u_o$  为有限值，则  $u_d = 0$ ，即  $u^+ = u^-$ ，两个输入端之间相当于短路（虚短路）。
- ②  $R_i \rightarrow \infty$   $\longrightarrow$   $i_+ = 0$ ， $i_- = 0$ 。即从输入端看进去，器件相当于开路（虚断路）。
- ③  $R_o \rightarrow 0$

## 5-2 比例电路的分析

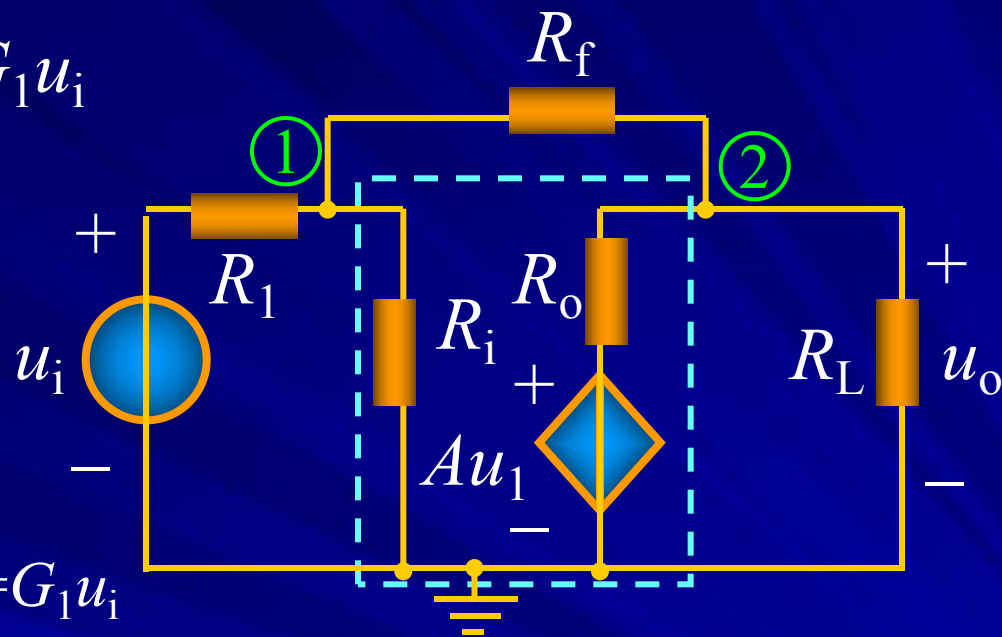
### 1. 倒向比例器

运放开环工作极不稳定，一般外部接若干元件 ( $R$ 、 $C$ 等)，使其工作在闭环状态。



## 2. 电路分析 用结点法分析(电阻用电导表示)

$$\begin{cases} (G_1 + G_i + G_f)u_{n1} - G_f u_{n2} = G_1 u_i \\ -G_f u_{n1} + (G_f + G_o + G_L)u_{n2} = G_o A u_1 \\ u_1 = u_{n1} \end{cases}$$



整理，得

$$\begin{cases} (G_1 + G_i + G_f)u_{n1} - G_f u_{n2} = G_1 u_i \\ (-G_f + G_o A)u_{n1} + (G_f + G_o + G_L)u_{n2} = 0 \end{cases}$$

解得

$$u_o = u_{n2} = -\frac{G_1}{G_f} \times \frac{G_f (AG_o - G_f)}{G_f (AG_o - G_f) + (G_1 + G_i + G_f)(G_f + G_o + G_L)} u_i$$

$$u_o = u_{n2} = -\frac{G_1}{G_f} \frac{G_f(AG_o - G_f)}{G_f(AG_o - G_f) + \cancel{(G_1 + G_i + G_f)(G_f + G_o + G_L)}} u_i$$

因 $A$ 一般很大，上式分母中 $G_f(AG_o - G_f)$ 一项的值比 $(G_1 + G_i + G_f)(G_f + G_o + G_L)$ 要大得多。所以

$$u_o \approx -\frac{G_1}{G_f} u_i = -\frac{R_f}{R_1} u_i$$



表明

$u_o / u_i$ 只取决于反馈电阻 $R_f$ 与 $R_1$ 的比值，而与放大器本身的参数无关。负号表明 $u_o$ 和 $u_i$ 总是符号相反（倒向比例器）。



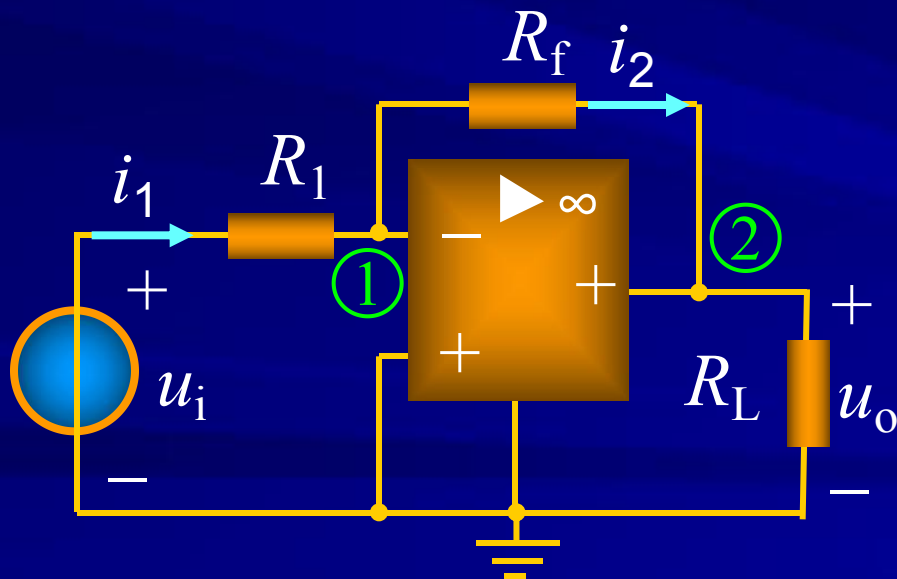
**注意**

以上近似结果是将运放看作理想情况而得到。由理想运放的特性：

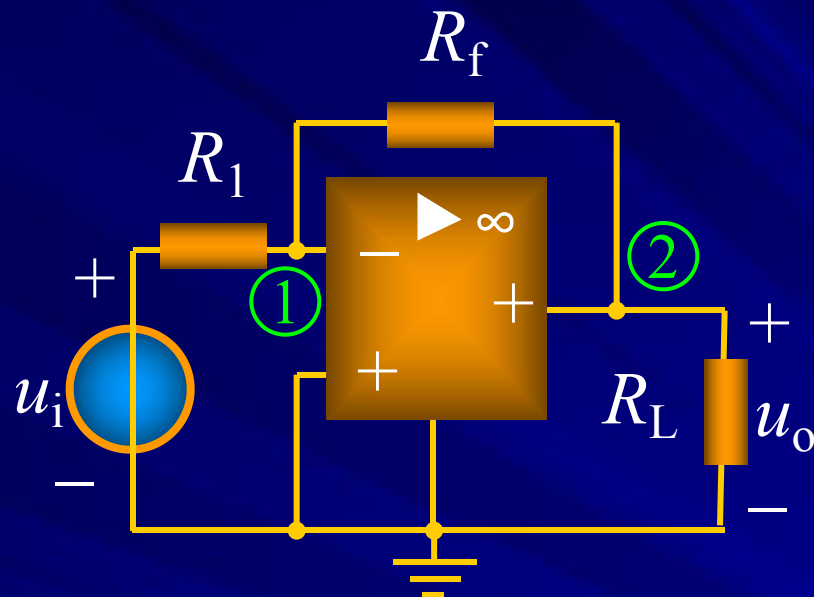
①根据“虚短”：

$$u^+ = u^- = 0, \quad i_1 = u_i / R_1 \quad i_2 = -u_o / R_f$$

②根据“虚断”：  $i^- = 0, \quad i_2 = i_1$



$$\rightarrow u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i$$



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



- ① 当 $R_1$ 和 $R_f$ 确定后，为使 $u_o$ 不超过饱和电压（即保证工作在线性区），对 $u_i$ 有一定限制。
- ② 运放工作在开环状态极不稳定，振荡在饱和区；工作在闭环状态，输出电压由外电路决定。  
( $R_f$ 接在输出端和反相输入端，称为负反馈。)



# 5-3 含有理想运算放大器的电路的分析

## 1. 分析方法

① 根据理想运放的性质，抓住以下两条规则：

(a) 倒向端和非倒向端的输入电流均为零

[ “虚断（路）” ]；

(b) 对于公共端（地），倒向输入端的电压与非倒向输入端的电压相等

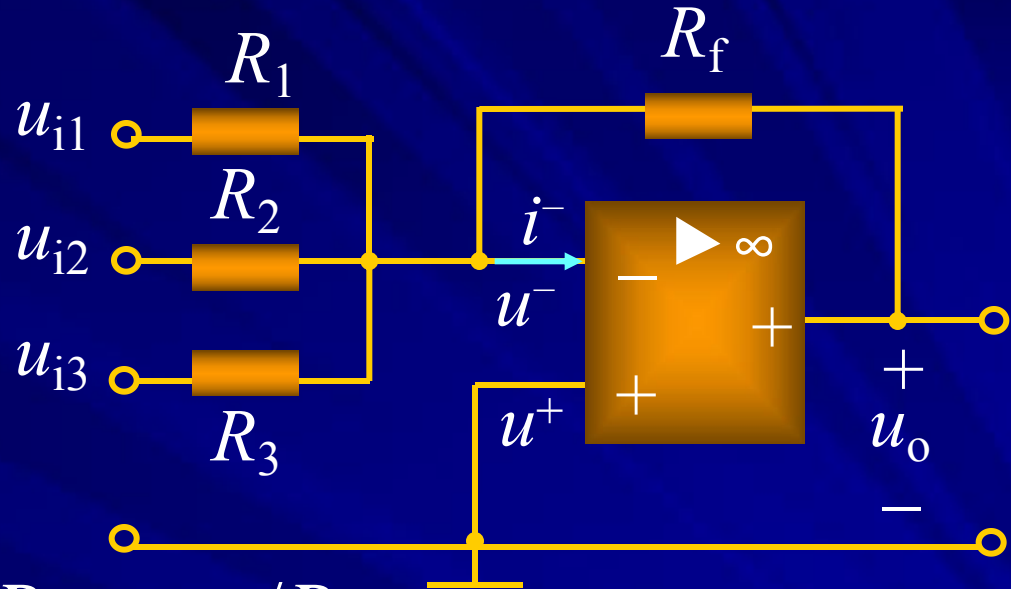
[ “虚短（路）” ]。

② 合理地运用这两条规则，并与结点电压法相结合。

## 2. 典型电路

### ① 加法器

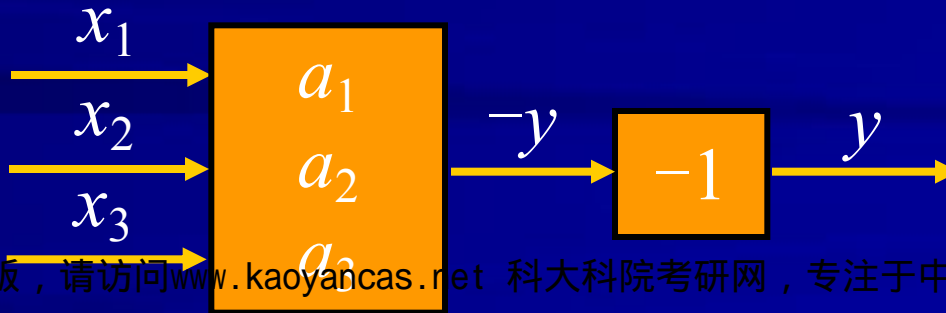
$$\begin{cases} u^- = u^+ = 0 \\ i^- = 0 \end{cases}$$



$$u_{i1}/R_1 + u_{i2}/R_2 + u_{i3}/R_3 = -u_o/R_f$$

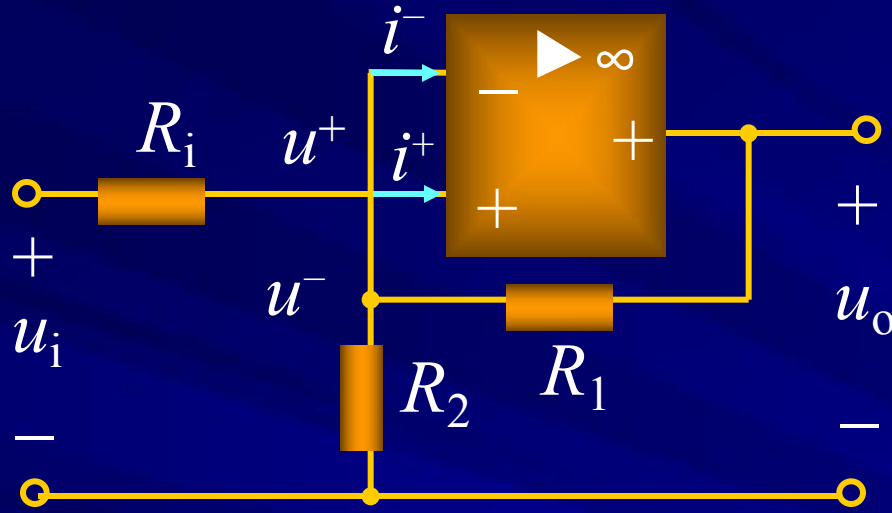
$$\rightarrow u_o = -(R_f/R_1 u_{i1} + R_f/R_2 u_{i2} + R_f/R_3 u_{i3})$$

比例加法器：  $y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$ ，符号如下图：



## ②非倒向比例器

根据“虚短”和“虚断”



$$\begin{cases} u^+ = u^- = u_i \\ i^+ = i^- = 0 \end{cases}$$

$$(u_o - u^-) / R_1 = u^- / R_2$$

$$u_o = [(R_1 + R_2) / R_2] u_i$$

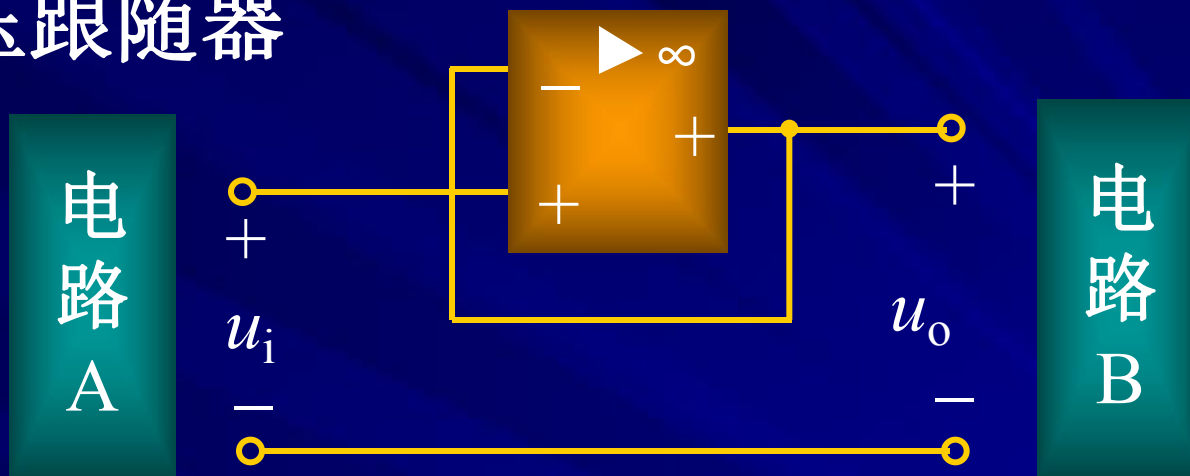
$$= (1 + R_1 / R_2) u_i$$



### 结论

- ①  $u_o$  与  $u_i$  同相。
- ② 当  $R_2 = \infty$ ,  $R_1 = 0$  时,  $u_o = u_i$ , 为电压跟随器。
- ③ 输入、输出关系与运放本身参数无关。

### ③ 电压跟随器

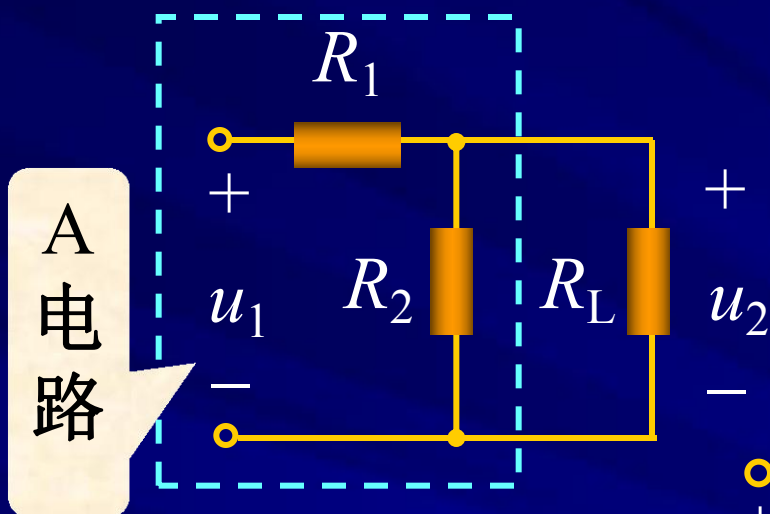


#### 特点

- ① 输入电阻无穷大(虚断)。
- ② 输出电阻为零。
- ③  $u_o = u_i$ 。

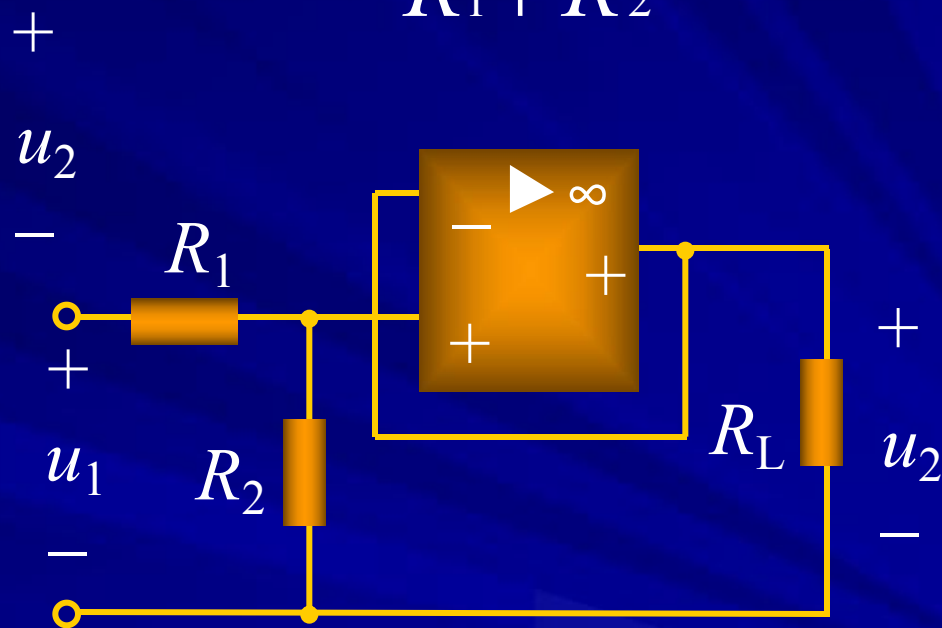
应用：在电路中起隔离前、后两级电路的作用。

## 分压电路



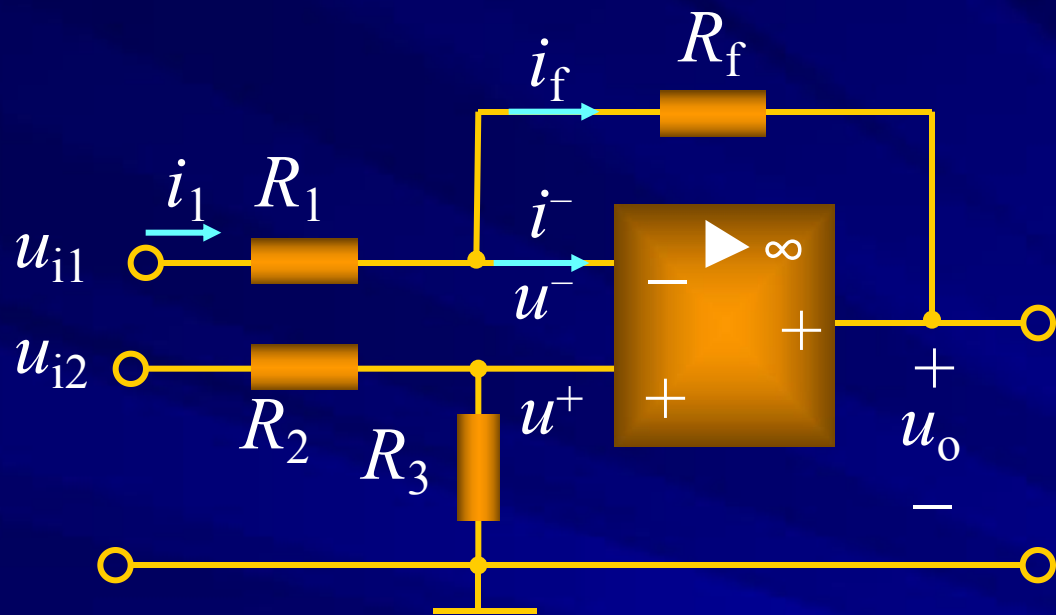
$$u_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_1$$

$$u_2 \neq \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_1$$



可见，加入跟随器后，隔离了前后两级电路的相互影响。

### ④ 减法运算



$$\begin{cases} u^- = u^+ \\ i^- = i^+ = 0 \end{cases}$$

$$i_1 = i_f$$

$$i_1 = \frac{u_{i1} - u^-}{R_1} = \frac{u^- - u_o}{R_f}$$

$$u^- = u^+ = u_{i2} \frac{R_3}{R_2 + R_3}$$

解得

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

$$\text{当 } R_1 = R_2, R_f = R_3 \quad u_o = (u_{i2} - u_{i1}) \frac{R_f}{R_1}$$

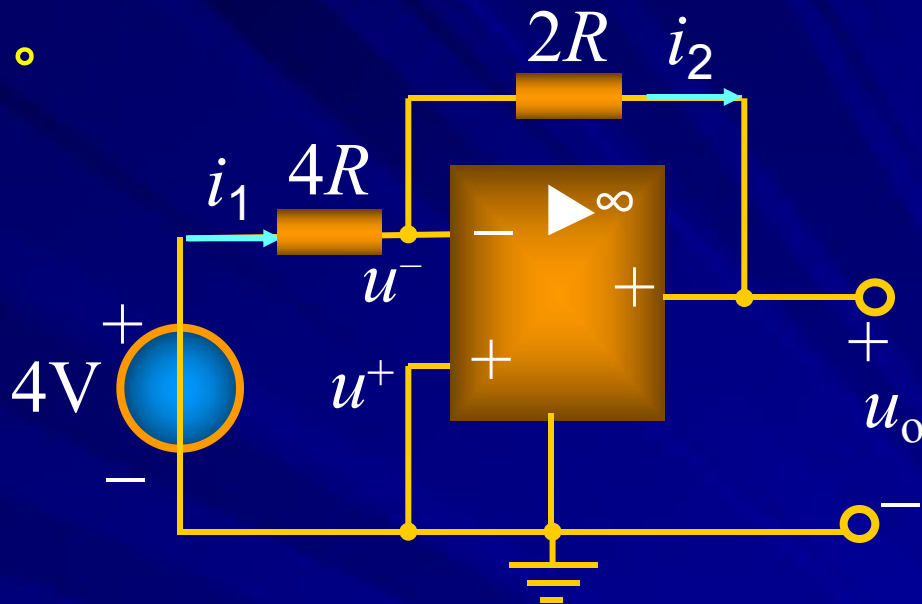
例3-1 求输出电压 $u_o$ 。

解

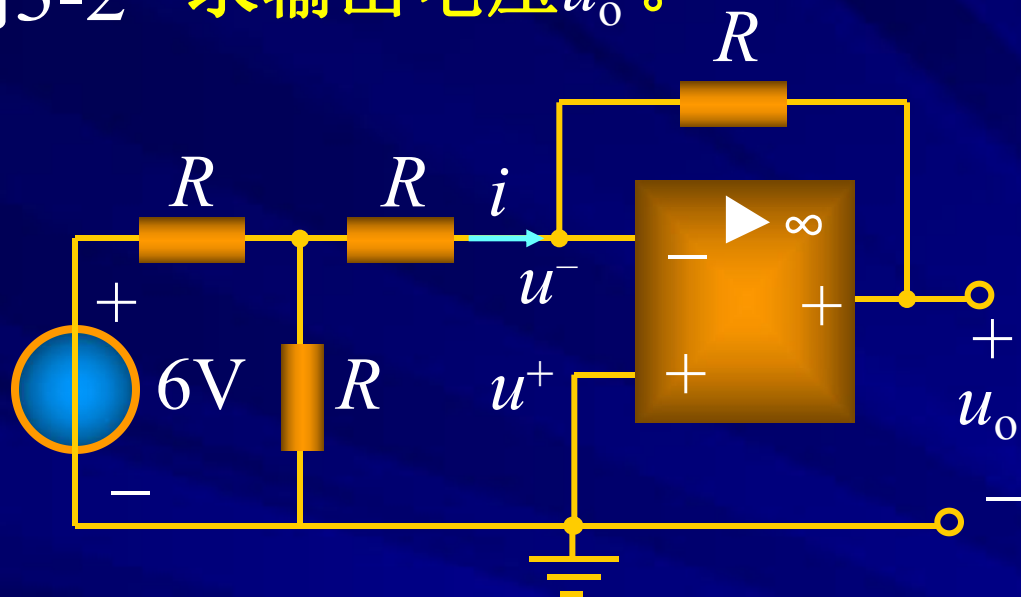
倒向比例电路

$$\frac{4}{4R} = -\frac{u_o}{2R}$$

$$u_o = -2V$$



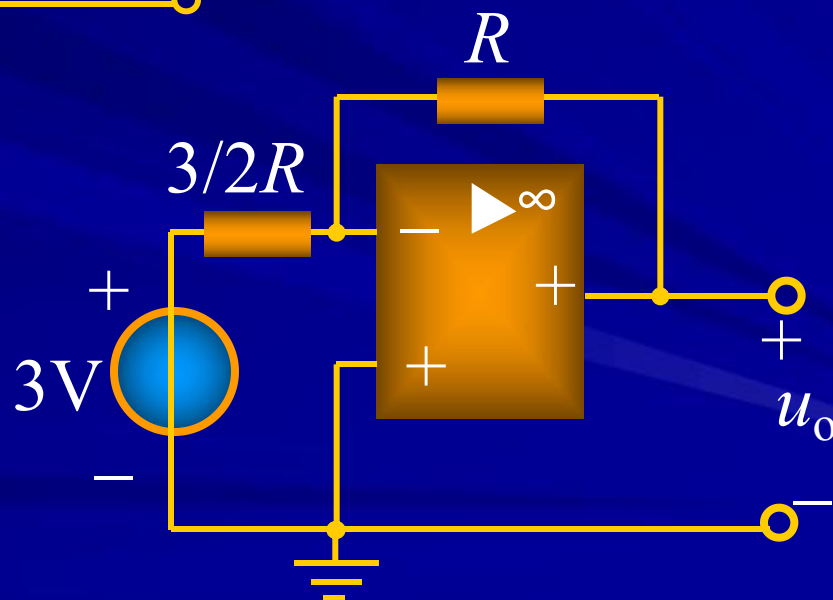
### 例3-2 求输出电压 $u_o$ 。



解

化简电路

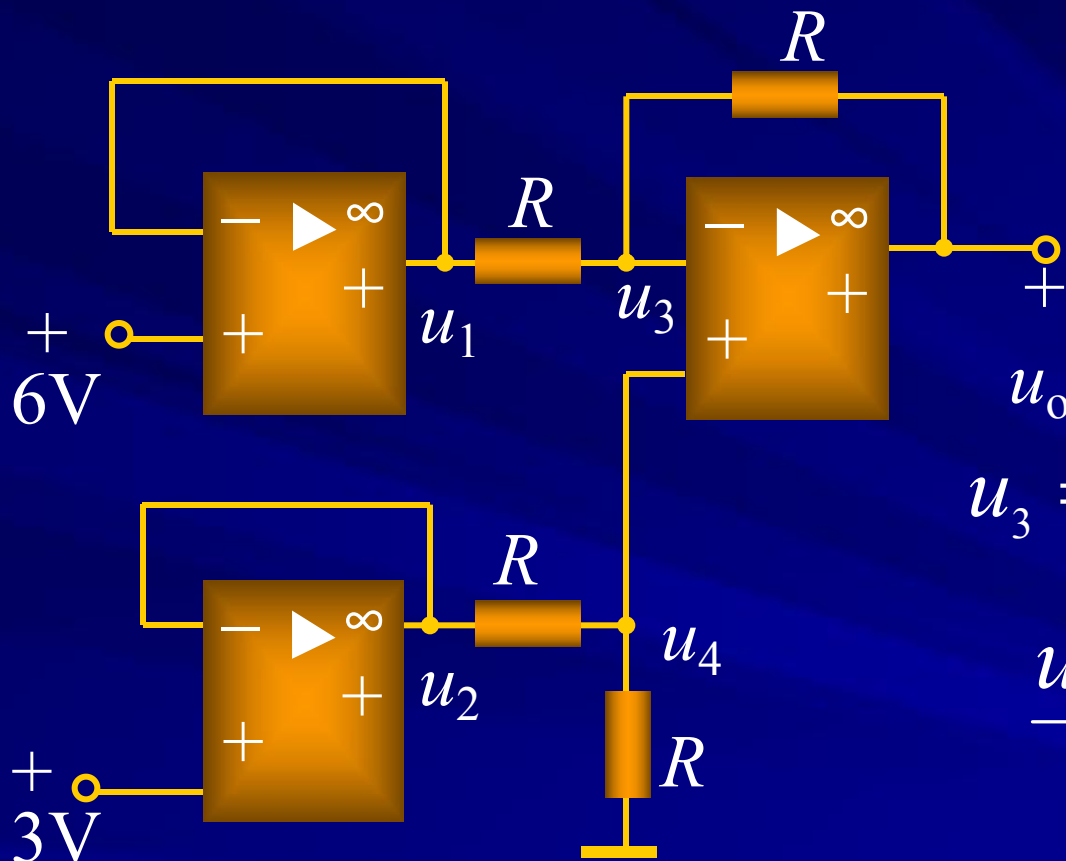
$$u_o = -\frac{R}{3/2R} u_i = -2V$$





### 例3-3 求输出电压 $u_o$ 。

解



$$u_1 = 6V$$

$$u_2 = 3V$$

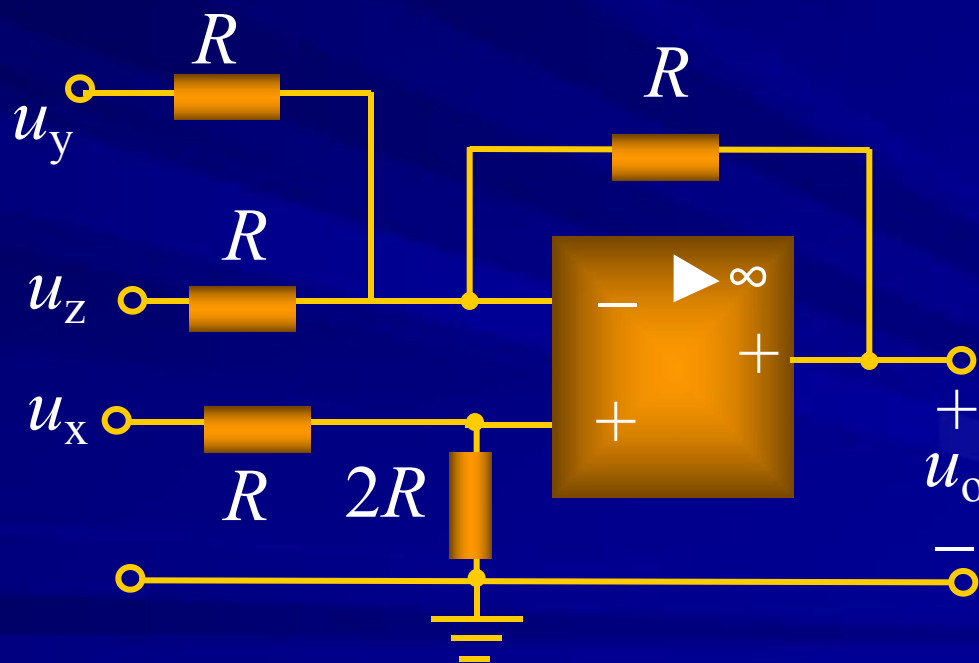
$$u_3 = u_4 = u_2 / 2 = 1.5V$$

$$\frac{u_1 - u_3}{R} = \frac{u_3 - u_o}{R}$$

$$u_o = -u_1 + 2u_3 = (-6 + 3)V = -3V$$

例3-4 设计一个用运放和电阻组成的电路，其输出电压为  $2x - y - z$ 。其中  $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别表示三个输入电压的值，设  $x$ 、 $y$ 、 $z$  不超过  $10\text{V}$ ，同时要求每一个电阻的功率不超过  $0.5\text{W}$ ，确定各电阻的值。

解



解

$$R_y = R_z = R_f = R_a = R = \frac{R_b}{2}$$

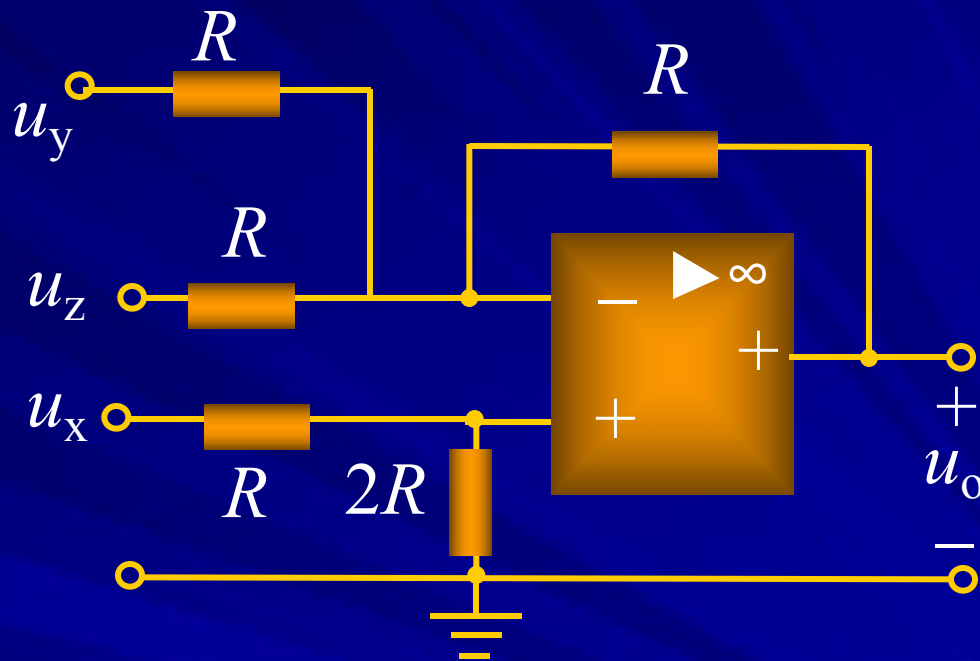
$$P_{Ry} = \frac{1}{R} \left( u_y - \frac{2}{3} u_x \right)^2 \leq \frac{100}{R}$$

$$P_{Rz} = \frac{1}{R} \left( u_z - \frac{2}{3} u_x \right)^2 \leq \frac{100}{R}$$

$$P_{Ra} = \left( \frac{u_x}{R_a + R_b} \right)^2 R_a$$

$$P_{Rb} = \left( \frac{u_x}{R_a + R_b} \right)^2 R_b \leq \frac{400}{9R_b}$$

$$P_{Rf} = \frac{1}{R} \left( u_o - \frac{2}{3} u_x \right)^2 = \frac{1}{R} \left( \frac{4}{3} u_x - u_y - u_z \right)^2 \leq \frac{1600}{9R}$$



→  $R > 355.56\Omega$      $R_b > 88.89\Omega$