



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分析



●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。

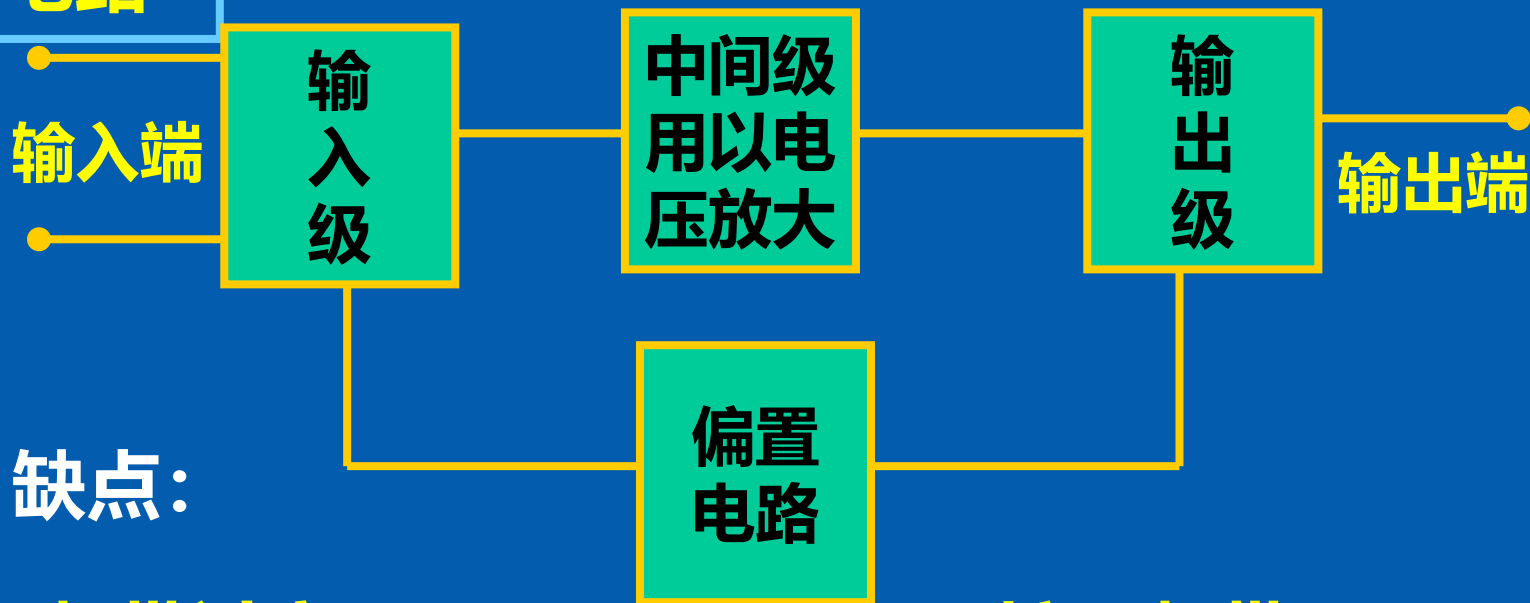


● 应用

- 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



● 电路



缺点：

①频带过窄

②线性范围小

加入负反馈



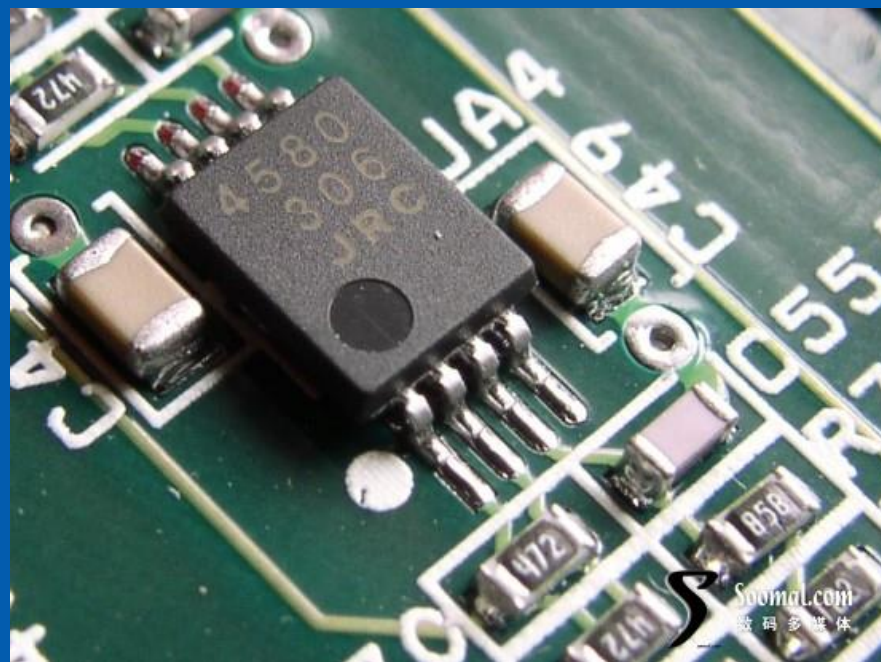
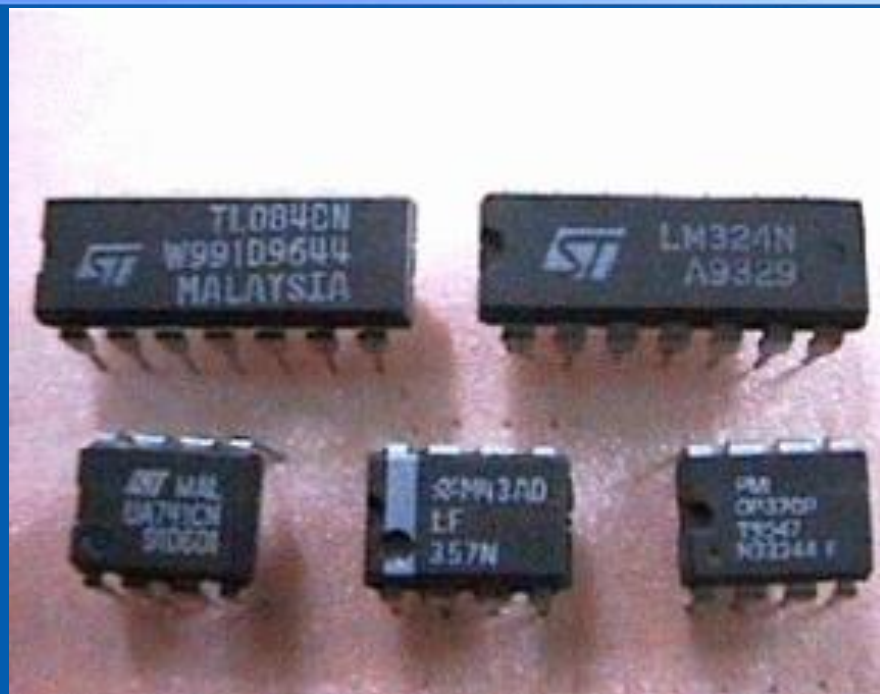
①扩展频带

②减小非线性失真

优点：

①高增益

②输入电阻大，输出电阻小



集成运算放大器



● 符号

8个管脚:

2: 倒向输入端

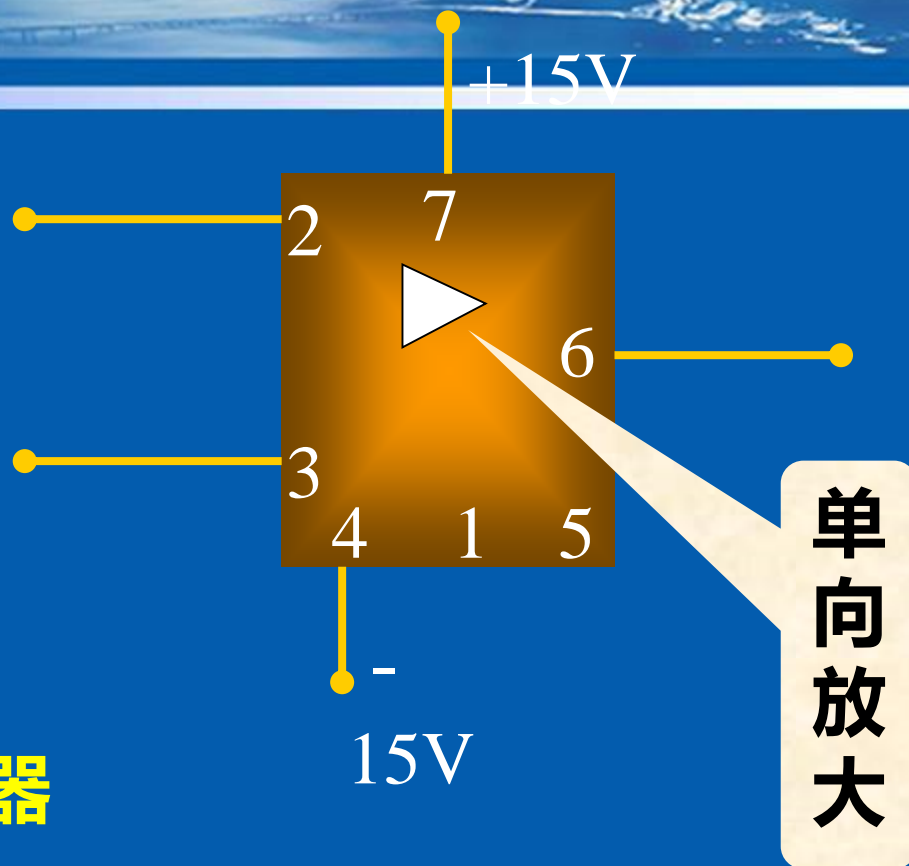
3: 非倒向输入端

4、7: 电源端

6: 输出端

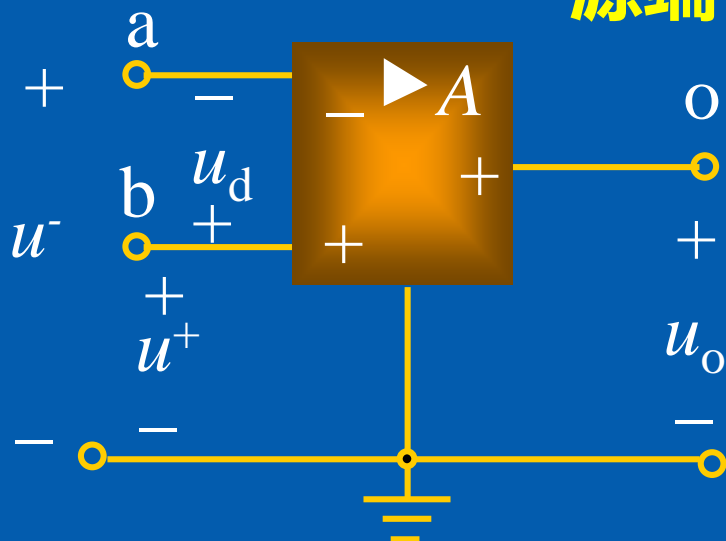
1、5: 外接调零电位器

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。



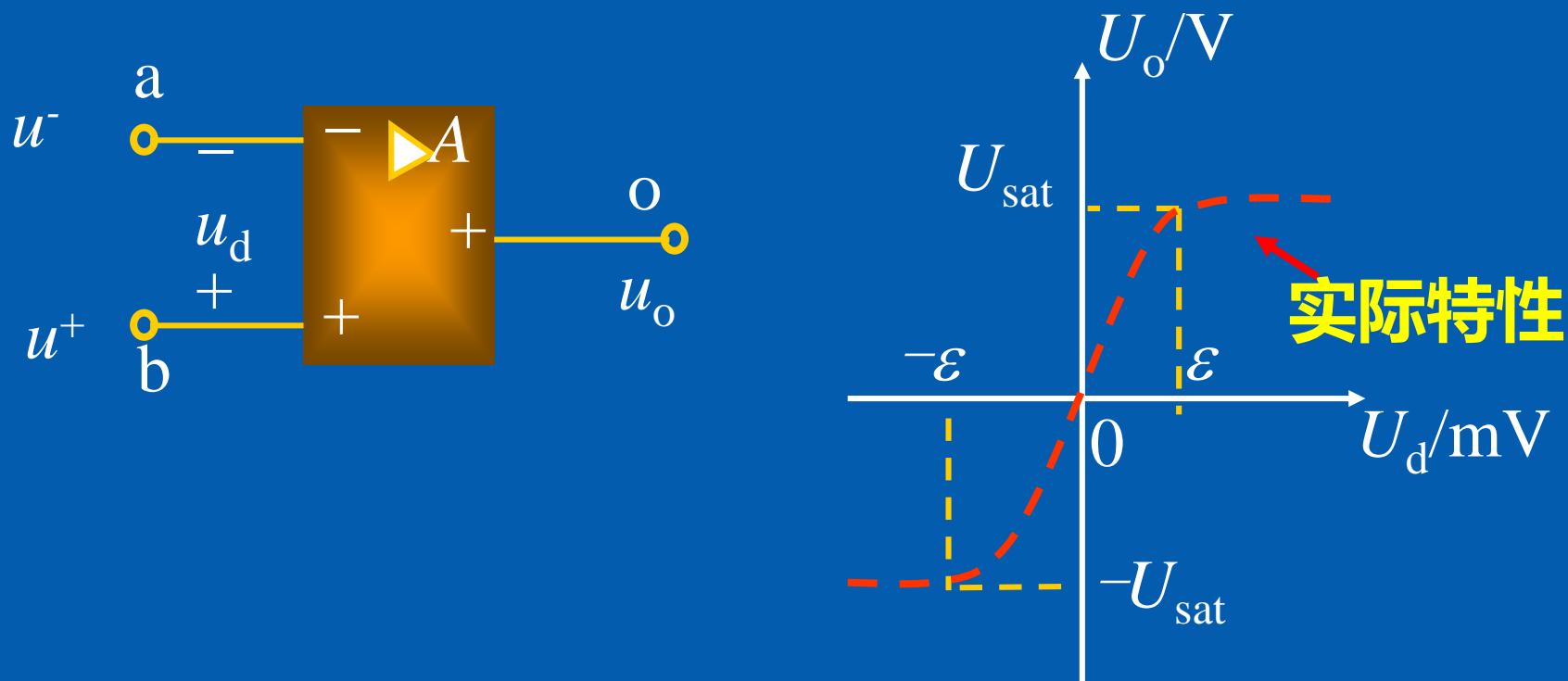
注意

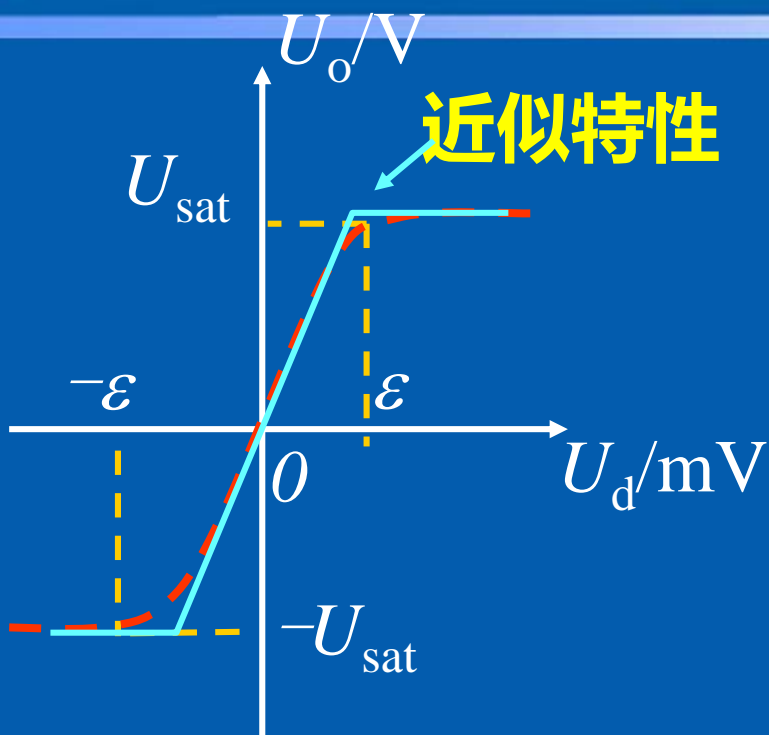
图中参考方向表示每一点对地的电压，在接地端未画出时尤须注意。



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:

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

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

ε 是一个数值很小的电压, 例如

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



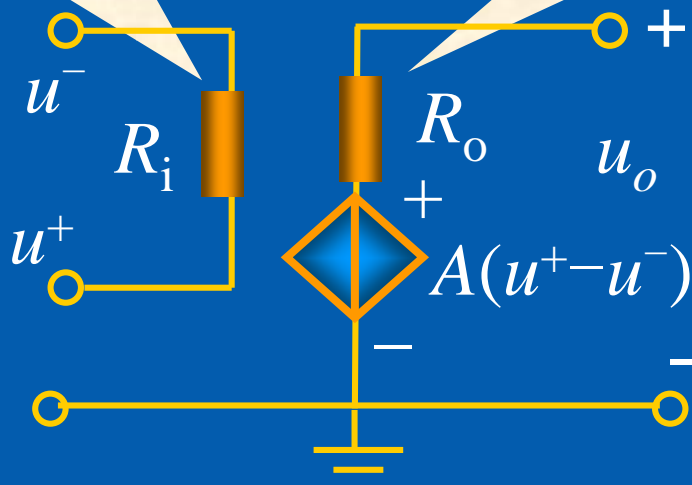
3. 电路模型

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:

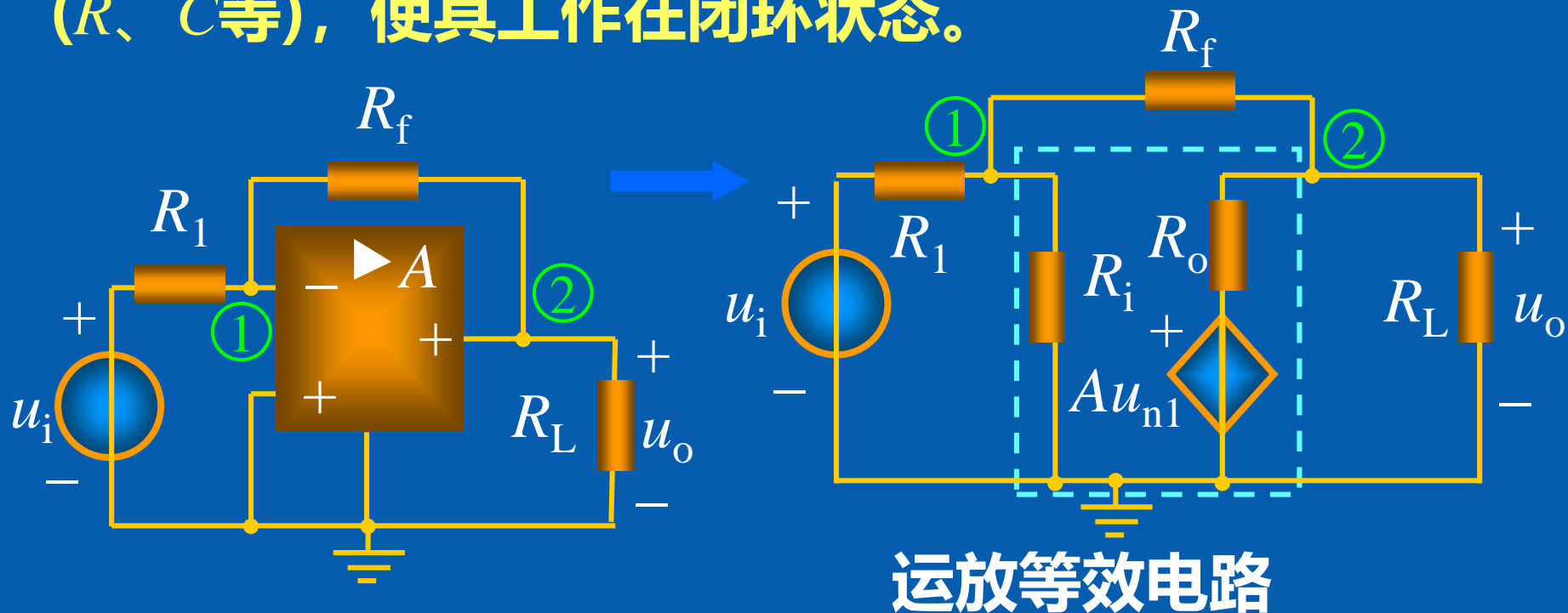
- ① $A \rightarrow \infty \rightarrow u_o$ 为有限值, 则 $u_d = 0$, 即 $u^+ = u^-$, 两个输入端之间相当于短路(虚短路)
- ② $R_i \rightarrow \infty \rightarrow i_+ = 0, i_- = 0$ 。即从输入端看进去, 元件相当于开路(虚断路)。
- ③ $R_o \rightarrow 0$



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)

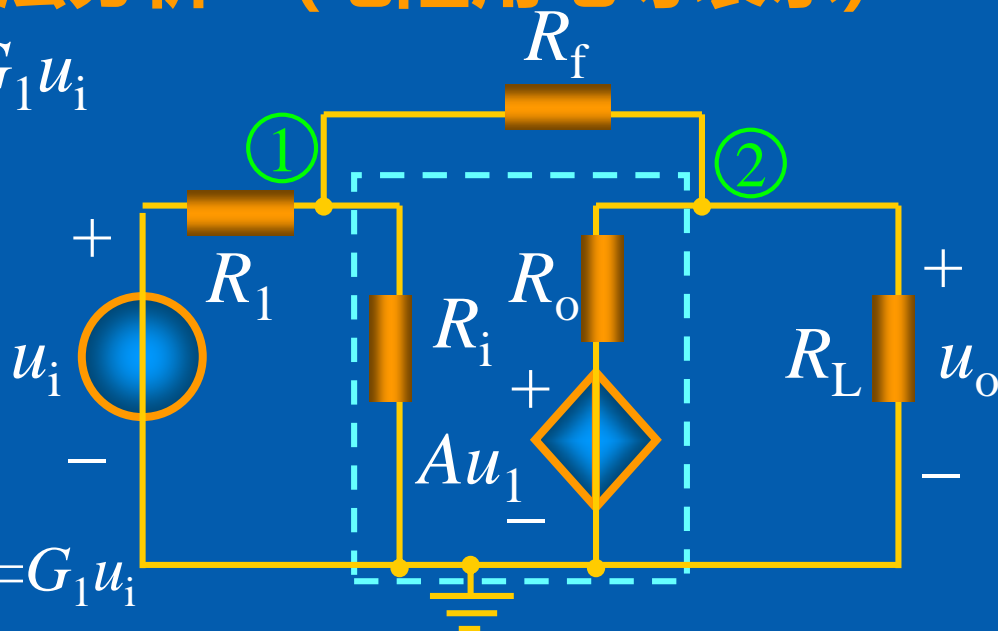
$$\begin{cases} (G_1 + G_i + G_f)u_{n1} - G_f u_{n2} = G_1 u_i \\ -G_f u_{n1} + (G_f + G_o + G_L)u_{n2} = G_o A u_1 \\ u_1 = u_{n1} \end{cases}$$

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：


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





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

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

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

u_o / u_i 只取决于反馈电阻 R_f 与 R_1 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)。



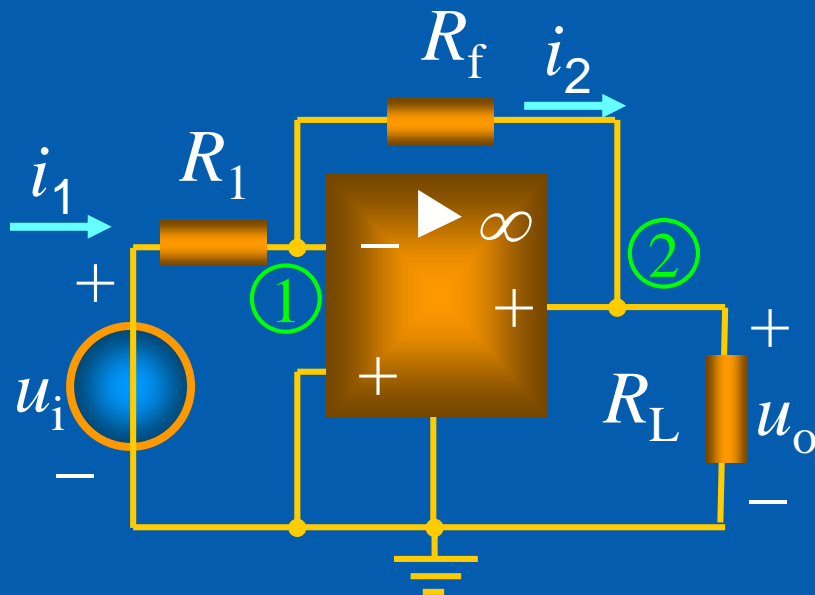
注意

以上近似结果可将运放看作理想情况而得到。由理想运放的特性：

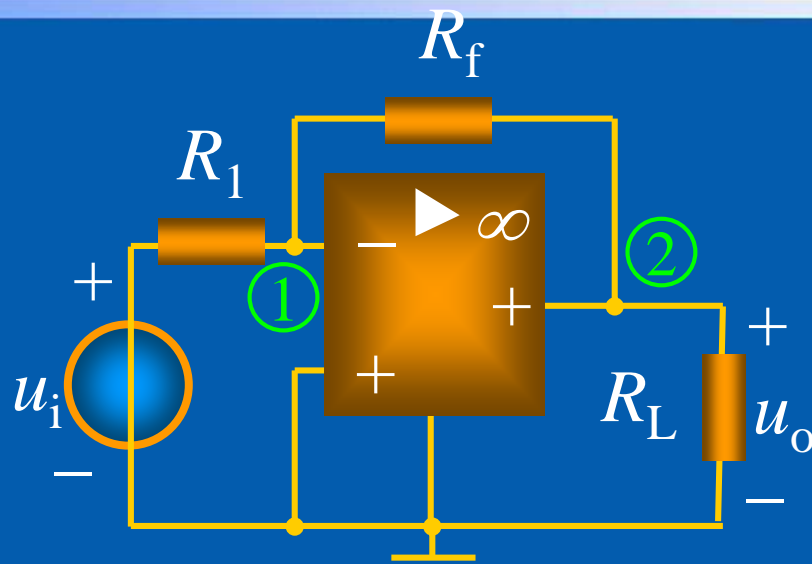
①根据“虚短”：

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

②根据“虚断”： $i^- = 0, \quad i_2 = i_1$



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



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



注意

- 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）”]。

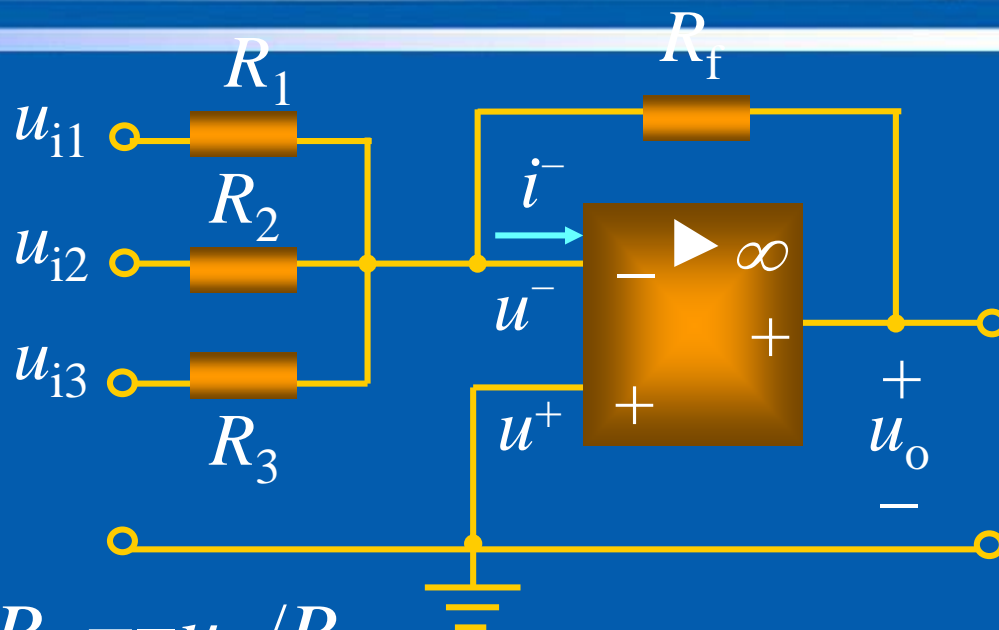
②合理地运用这两条规则，并与结点电压法相结合。



2. 典型电路

① 加法器

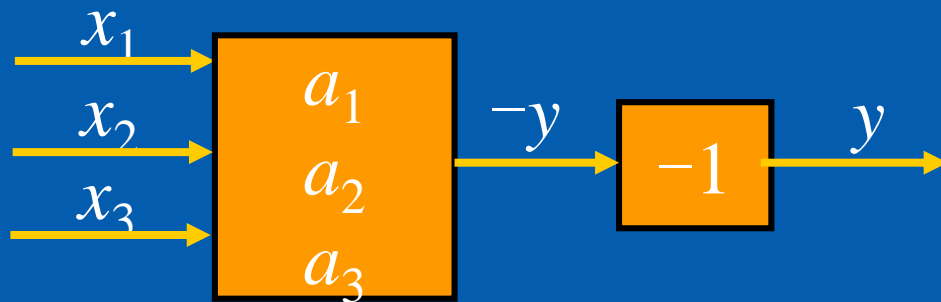
$$\begin{cases} u^- = u^+ = 0 \\ i^- = 0 \end{cases}$$



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

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

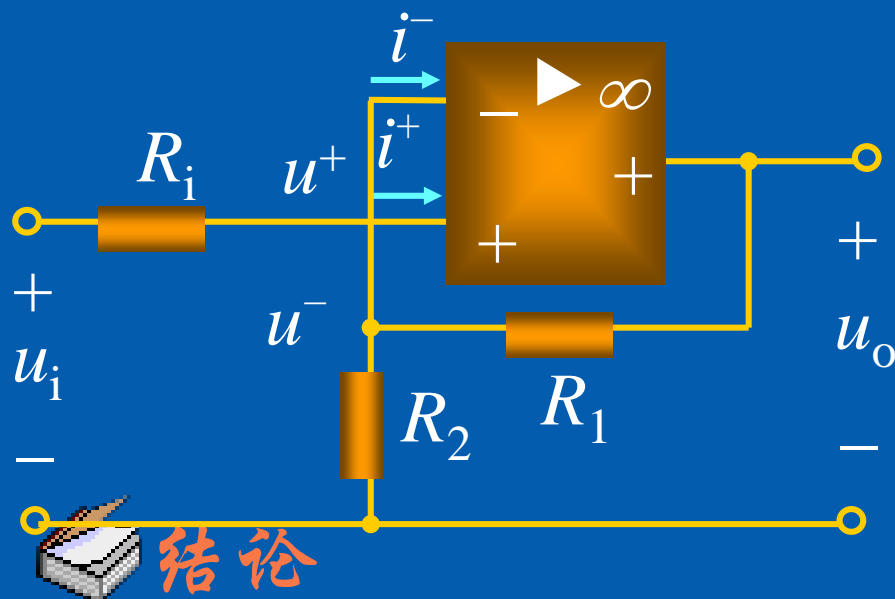
比例加法器： $y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3$ ，符号如下图：





②非倒向比例器

根据“虚短”和“虚断”

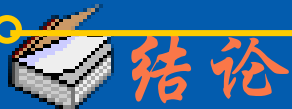


$$\begin{cases} u^+ = u^- = u_i \\ i^+ = i^- = 0 \end{cases}$$

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

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

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



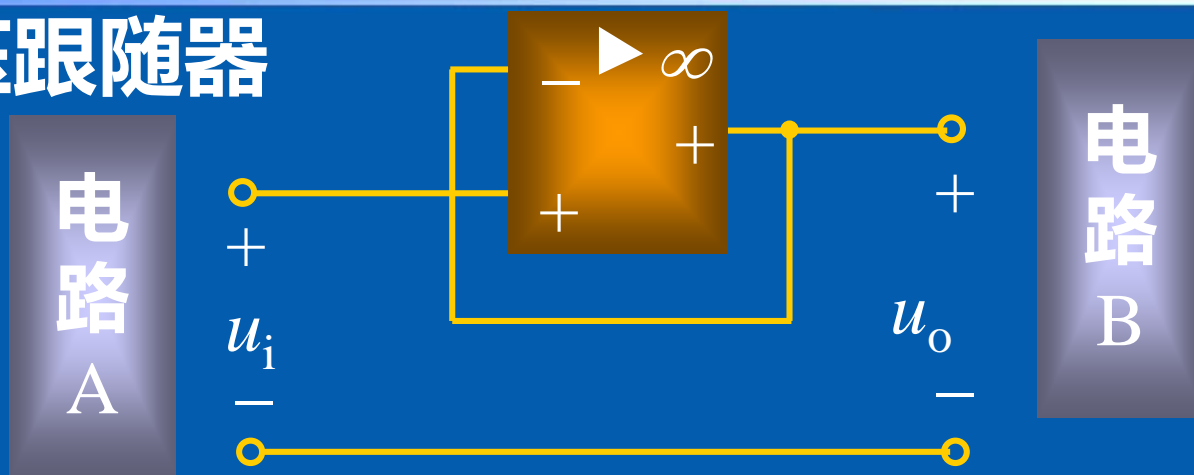
① u_o 与 u_i 同相

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

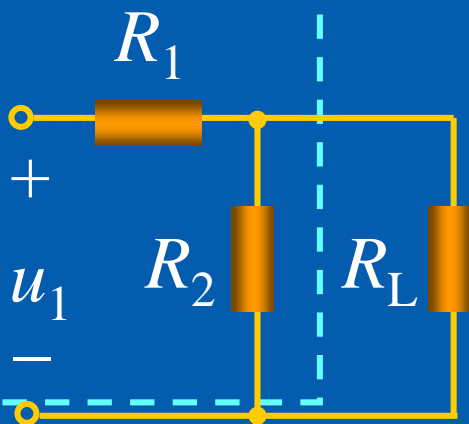
- ① 输入阻抗无穷大(虚断);
- ② 输出阻抗为零;
- ③ $u_o = u_i$ 。

应用：在电路中起隔离前后两级电路的作用。



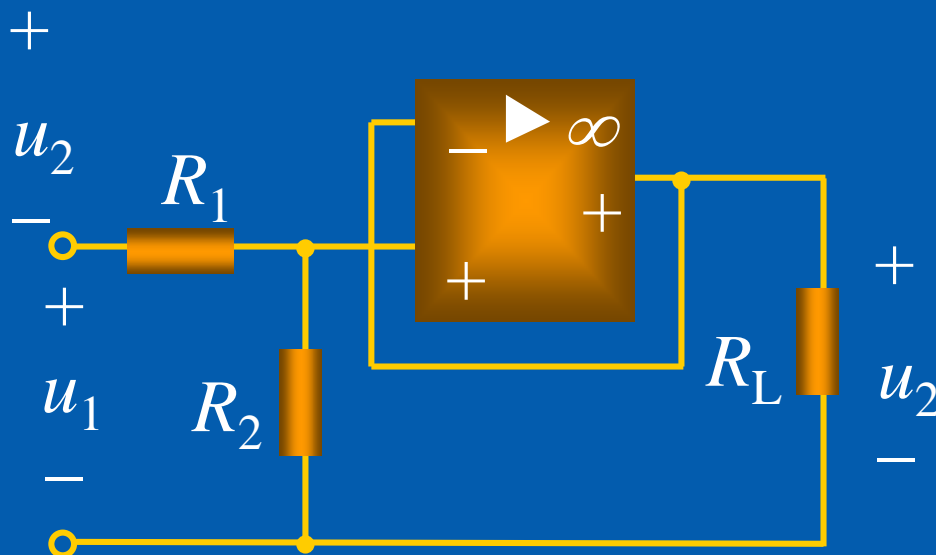
例

A
电路



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

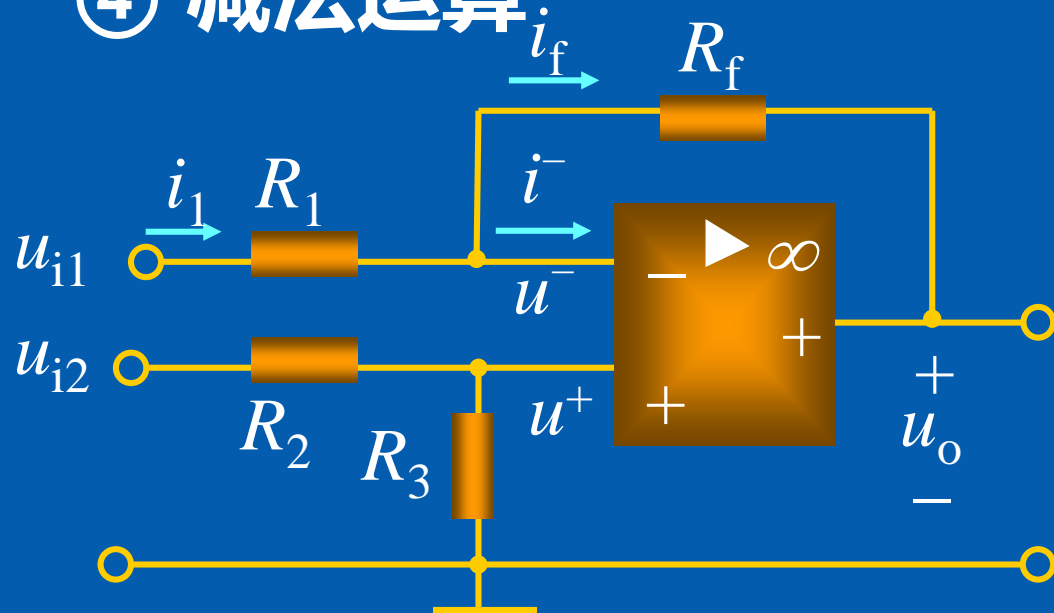
$$u_2 \neq \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_1$$



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



$$\begin{cases} u^- = u^+ \\ i^- = i^+ = 0 \\ i_1 = i_f \end{cases}$$

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

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

解得:

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

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



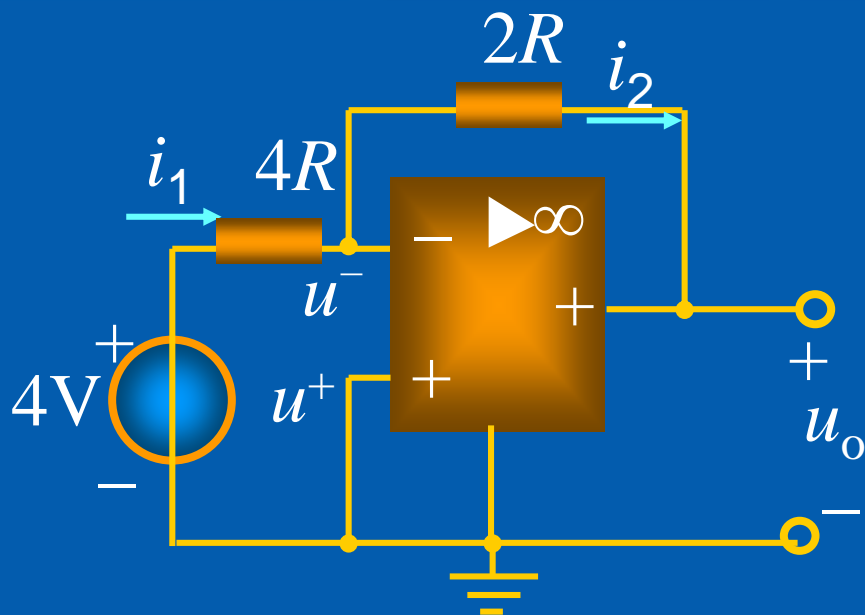
例1 求输出电压 u_o

解

倒向比例电路

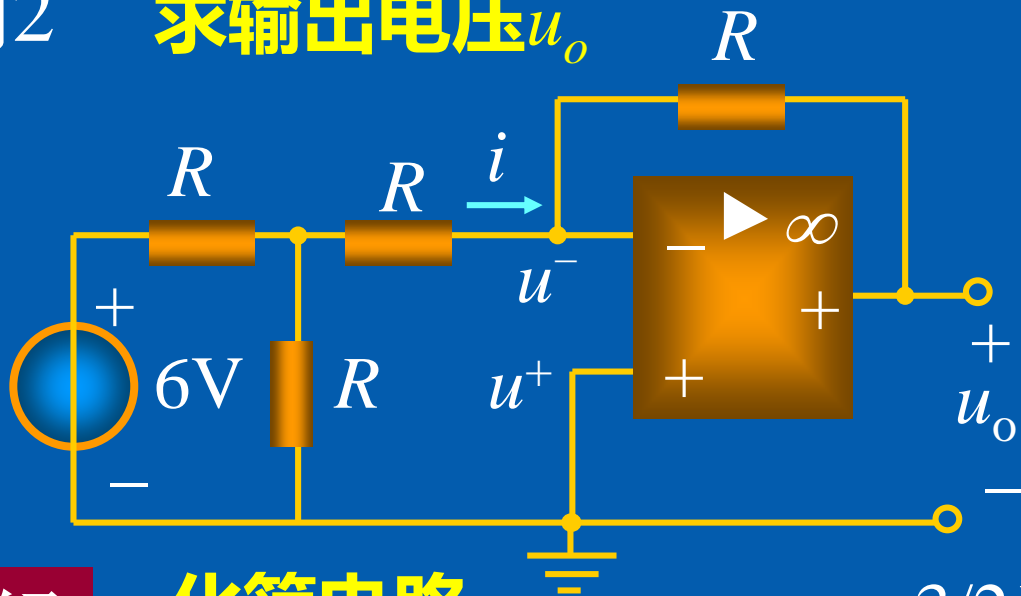
$$\frac{4}{4R} = -\frac{u_o}{2R}$$

$$u_o = -2V$$



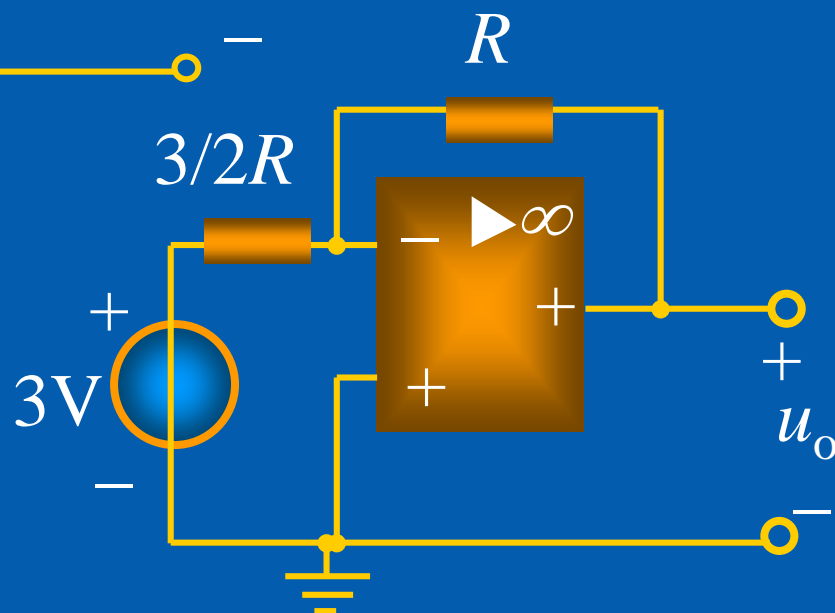


例2 求输出电压 u_o



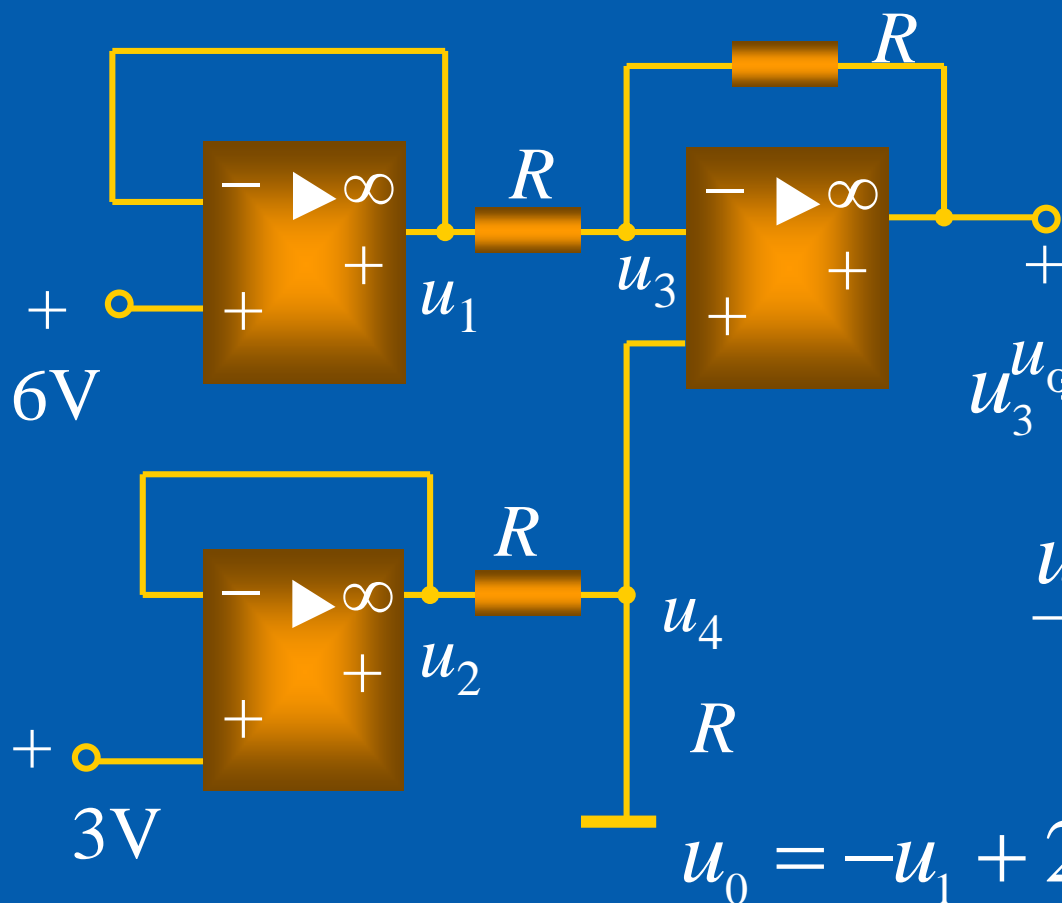
解 化简电路

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





例3 求输出电压 u_o



解

$$u_1 = 6V$$

$$u_2 = 3V$$

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

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

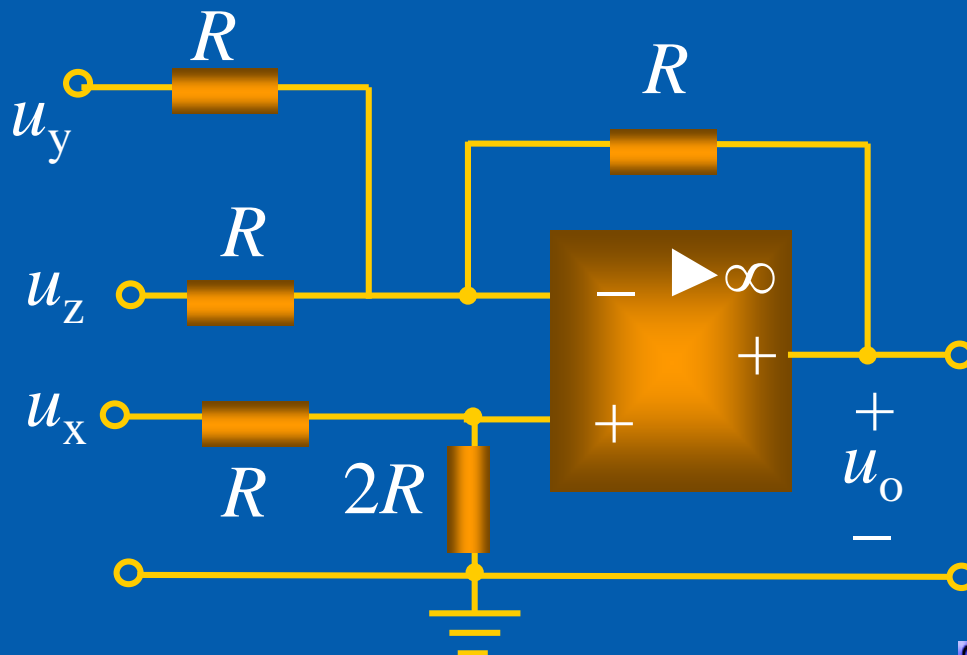
$$u_o = -u_1 + 2u_3 = -6 + 3 = -3V$$



例4 设计一个用运放和电阻组成的电路，其输出电压为：

其中 x 、 y 、 z 分别表示三个输入电压的值，设 x 、 y 、 z 不超过 10V ，同时要求每一个电阻的功率不超过 0.5W ，确定各电阻的值。

解





解 $R_y = R_z = R_f = R_a = 2R_b = R$

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

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

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

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

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



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

