

第五章 含有运算放大器的电阻电路

本章内容

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

●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

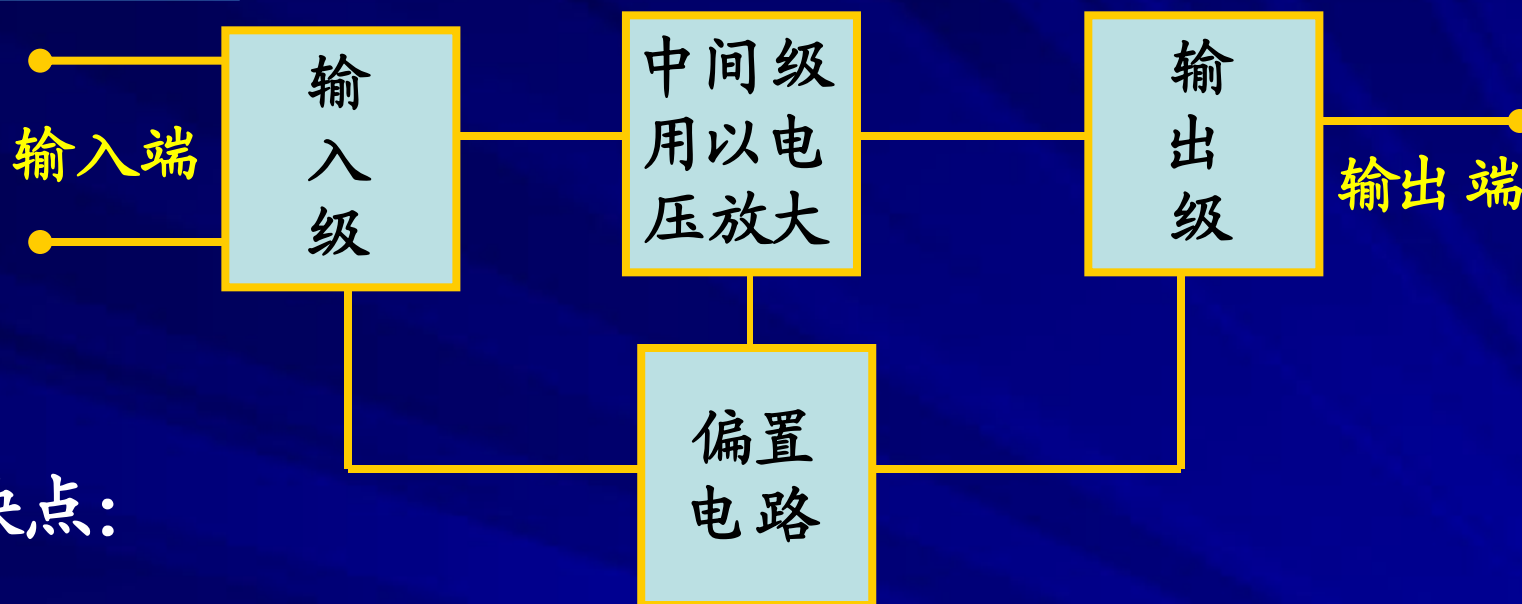
● 运算放大器

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。 加入负反馈

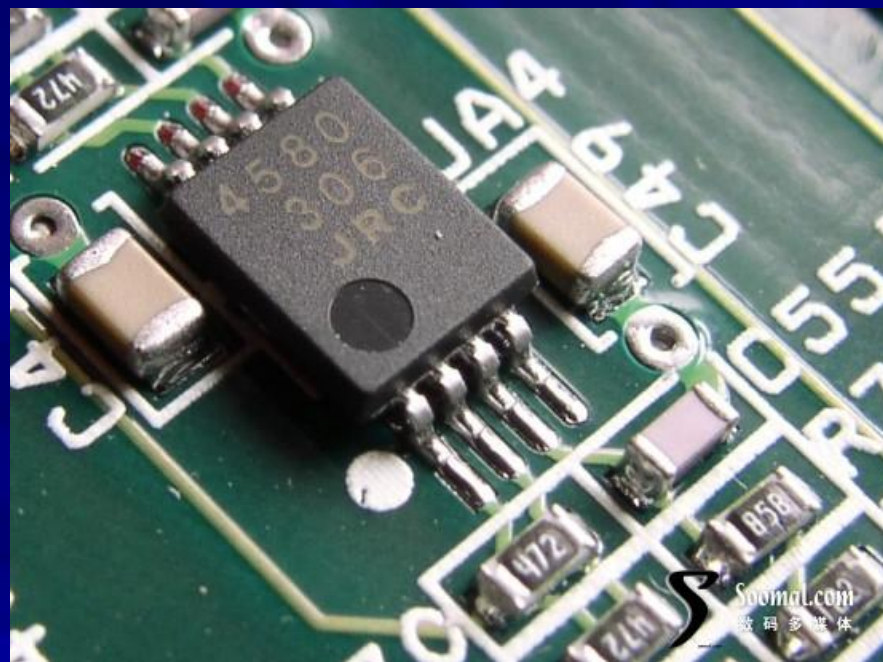
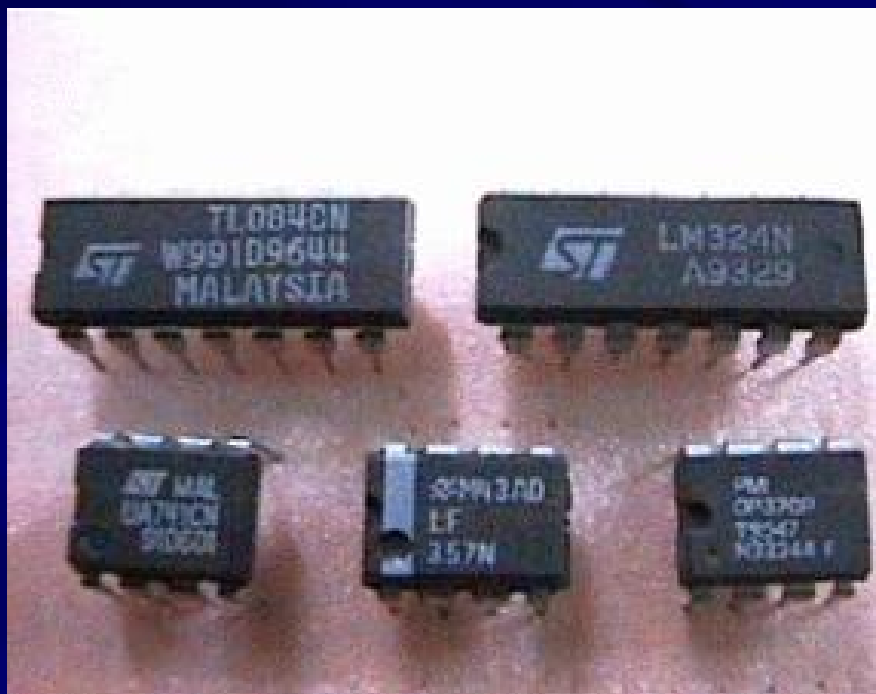
② 线性范围小。

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

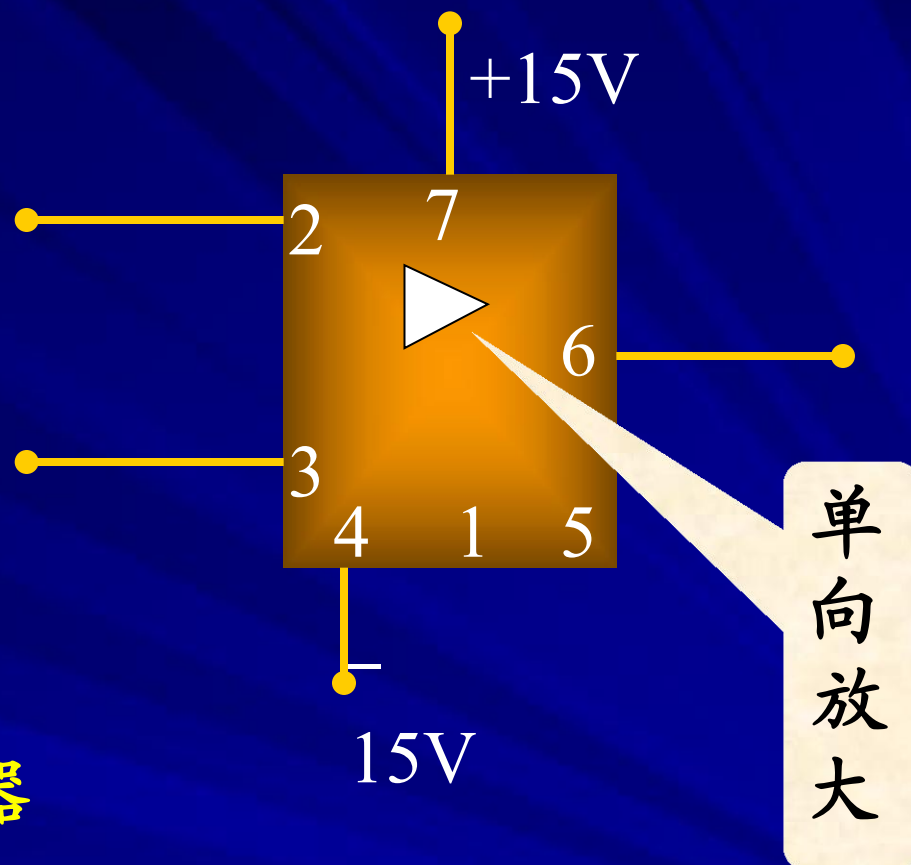
3: 非倒向输入端

4、7: 电源端

6: 输出端

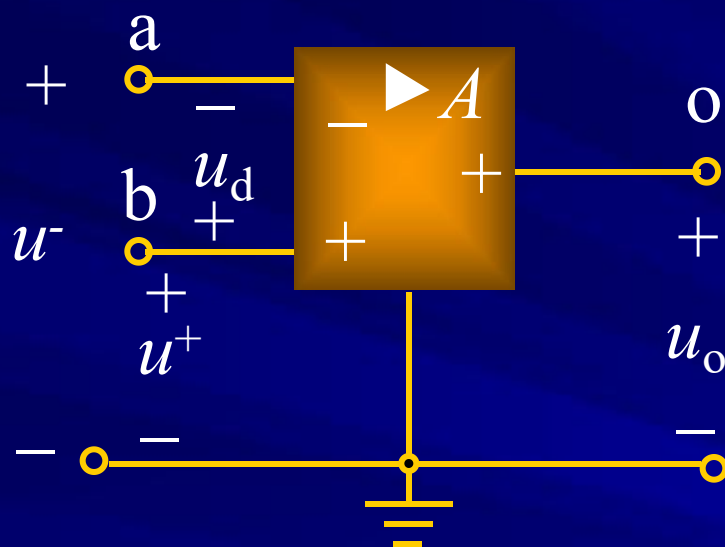
1、5: 外接调零电位器

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

$\text{---}\perp\text{---}$: 公共端(接地端)

A: 开环电压放大倍数,
可达十几万倍。

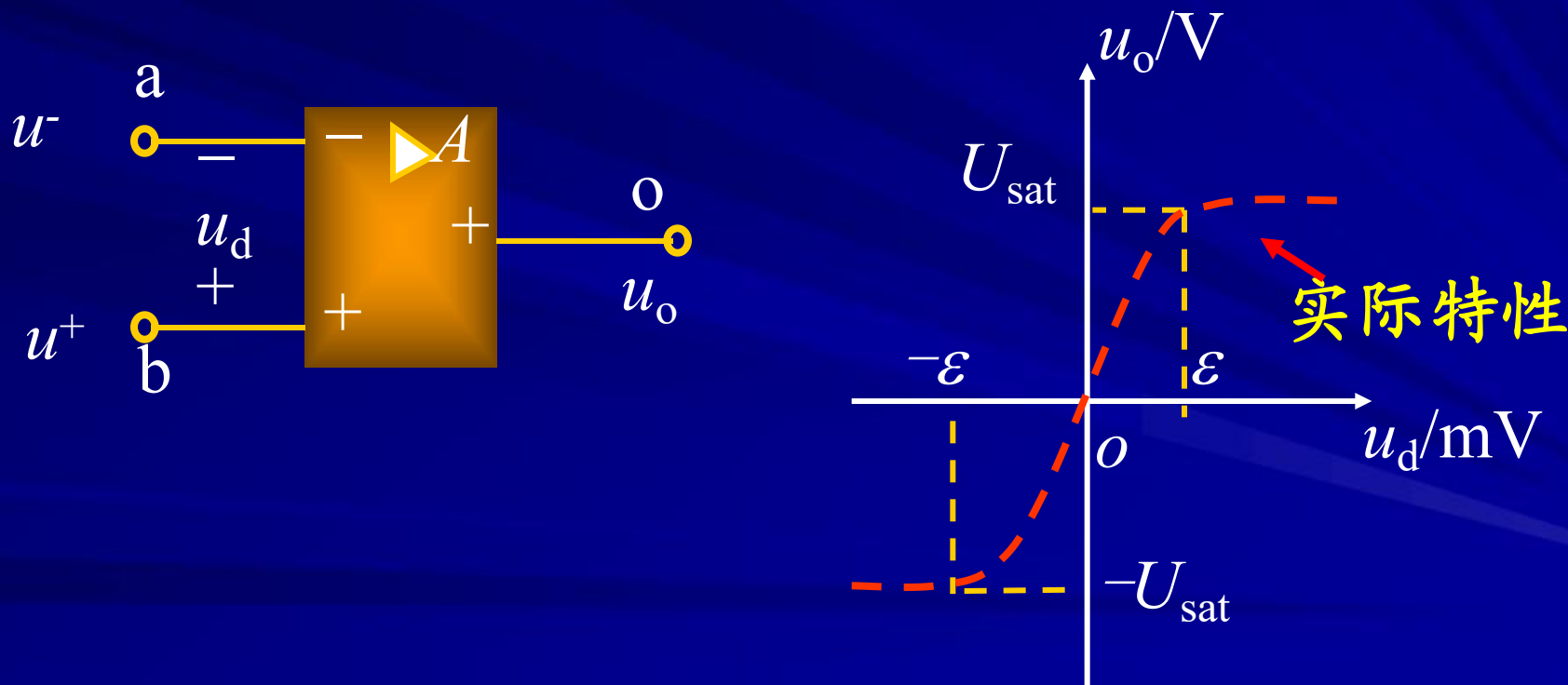


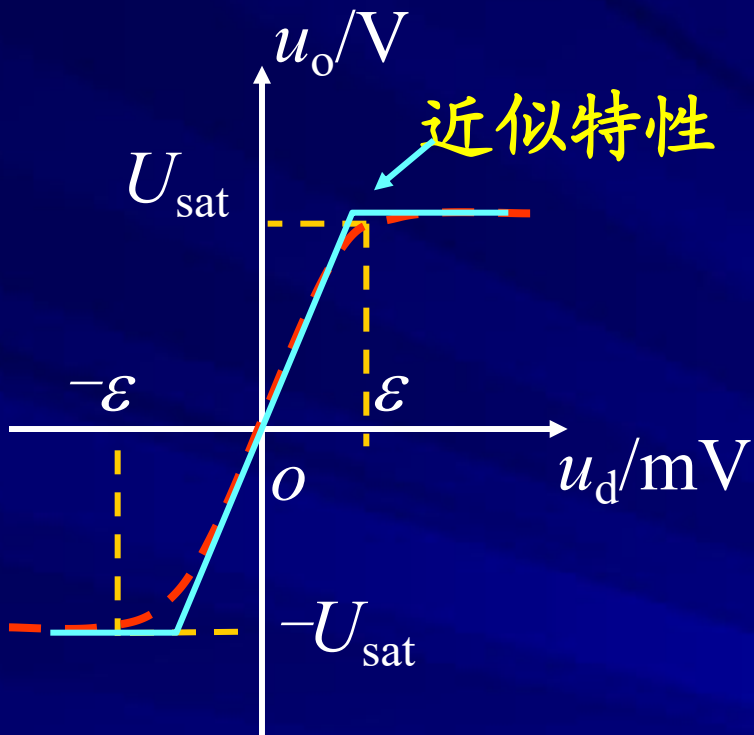
注意

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:

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

② 正向饱和区:

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

③ 反向饱和区:

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



注意

ϵ 是一个数值很小的电压, 例如

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

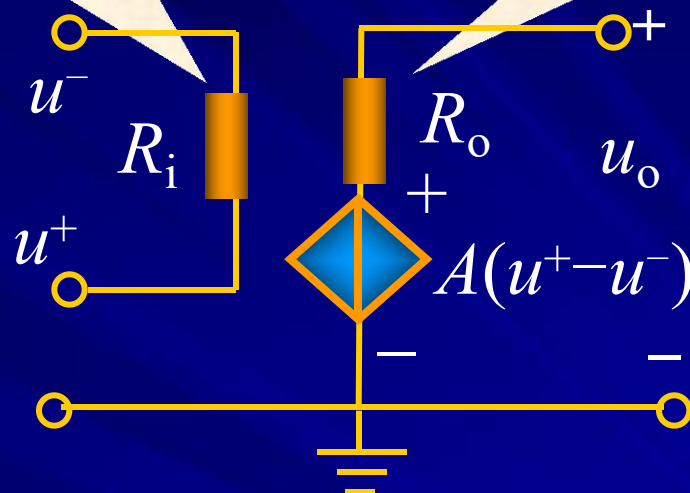
3. 电路模型

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

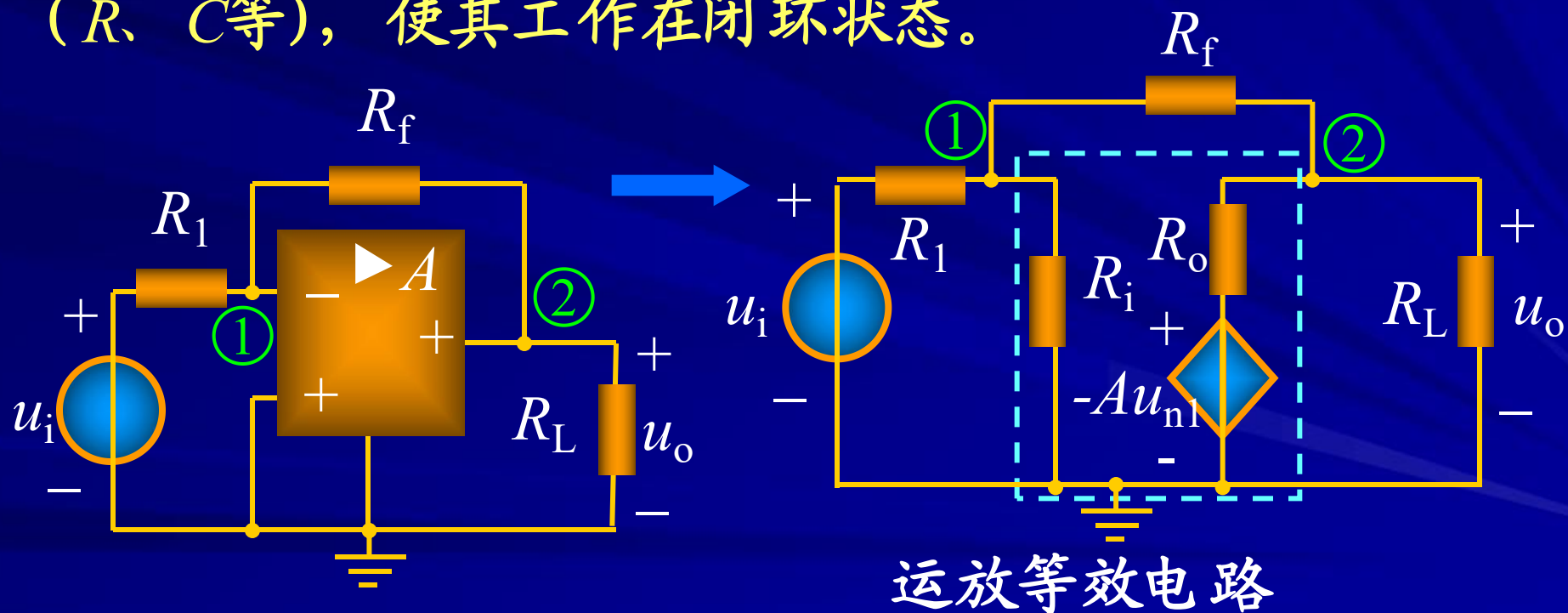
在线性放大区，将运放电路作如下理想化处理：

- 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。

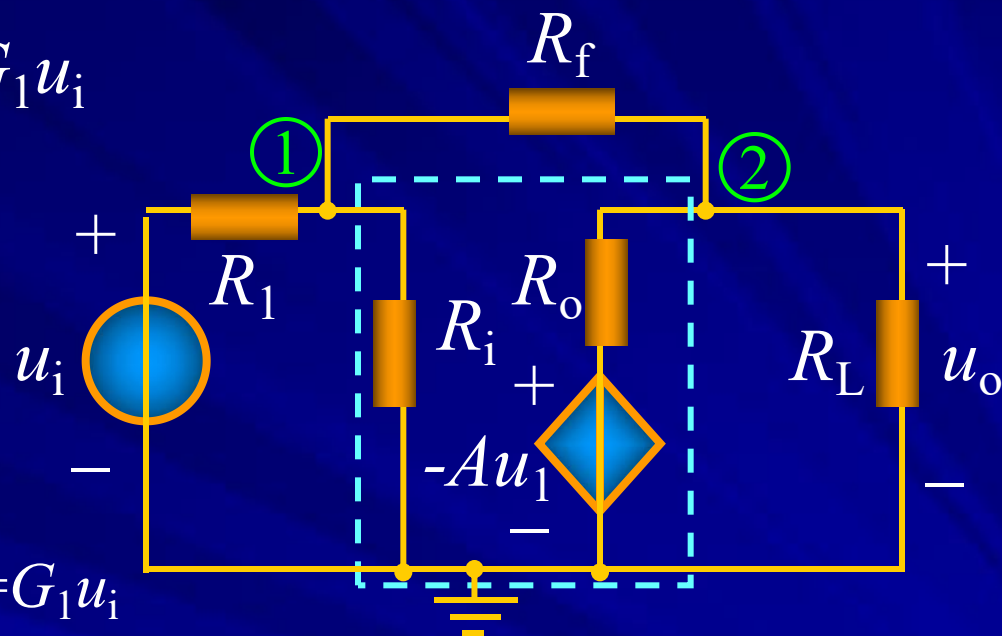


2. 电路分析 用节点法分析(电阻用电导表示)

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

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

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

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

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)。

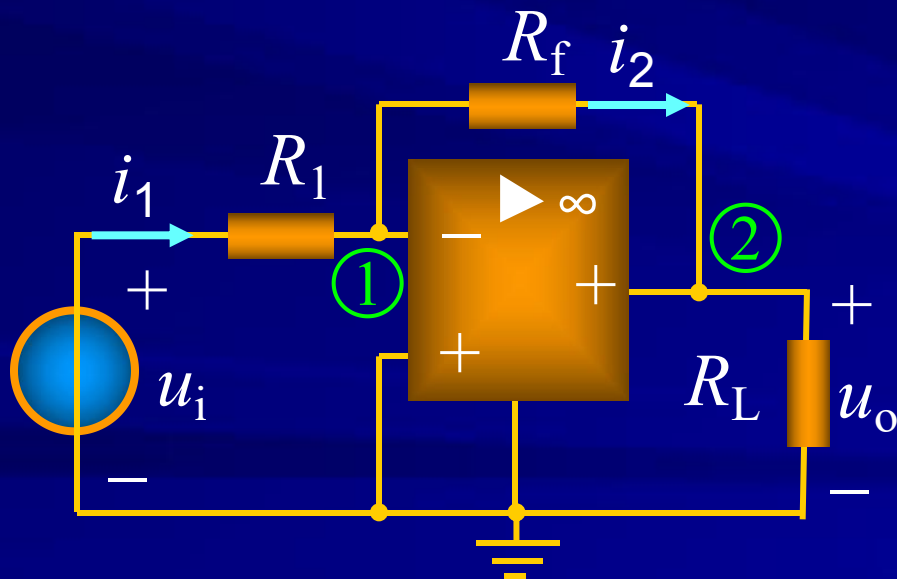


注意 以上近似结果是将运放看作理想情况而得到。由理想运放的特性：

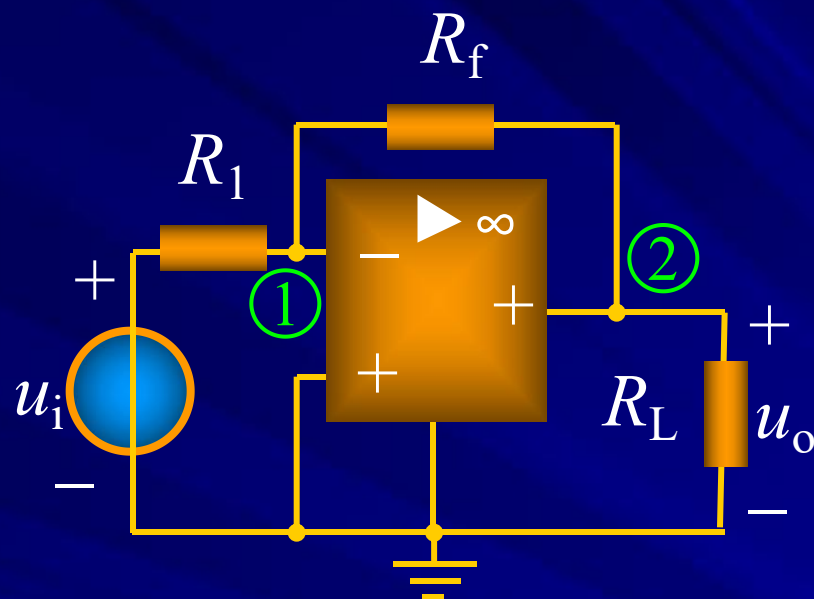
① 根据“虚短”：

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

② 根据“虚断”： $i^- = 0, \quad i_2 = i_1$



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



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



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

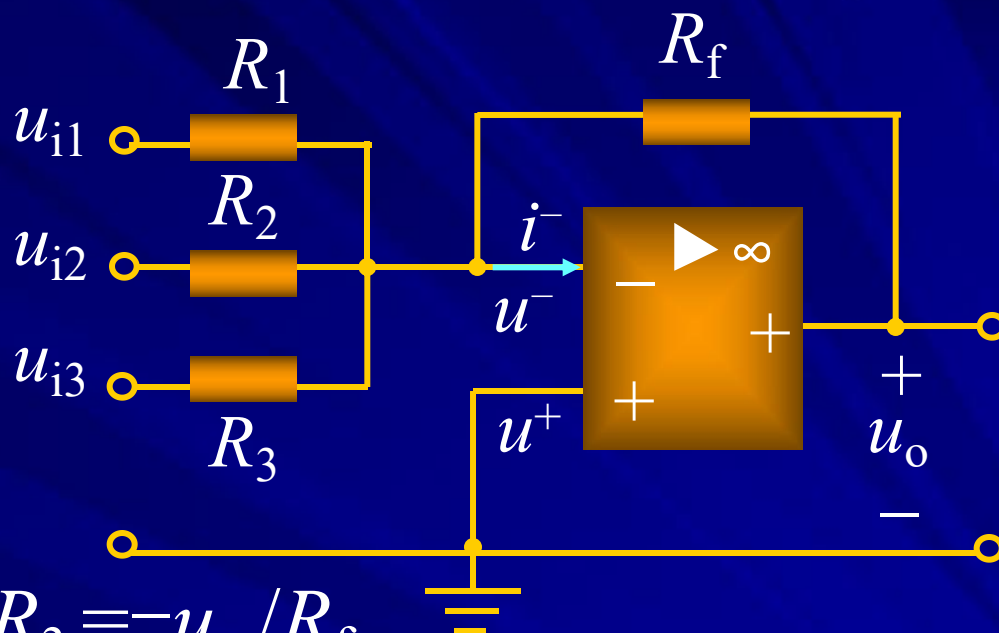
[“虚短(路) ”]。

② 合理地运用这两条规则，并与节点电压法相结合。

2. 典型电路

① 加法器

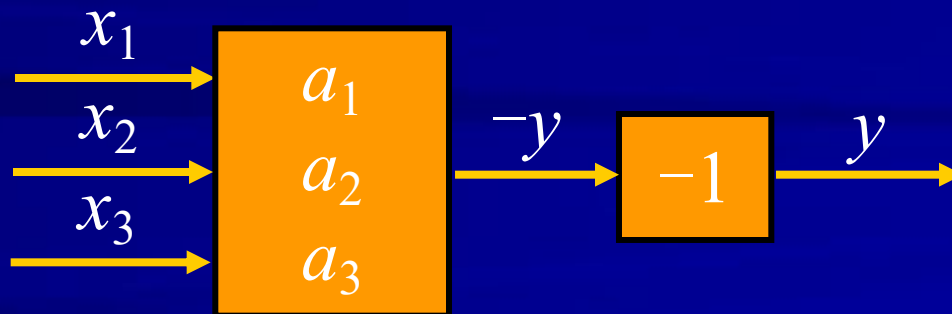
$$\begin{cases} u^- = u^+ = 0 \\ i^- = 0 \end{cases}$$



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

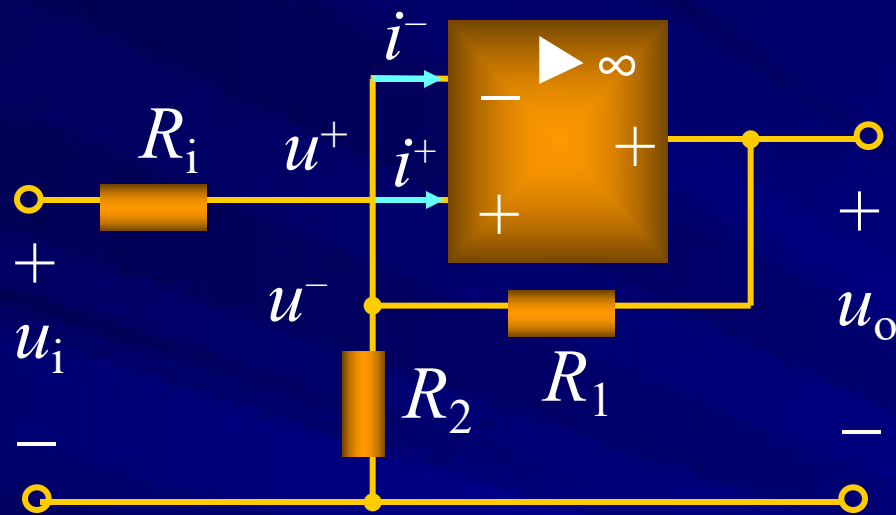
$$\longrightarrow u_o = -(R_f/R_1 u_{i1} + R_f/R_2 u_{i2} + R_f/R_3 u_{i3})$$

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”



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

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

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



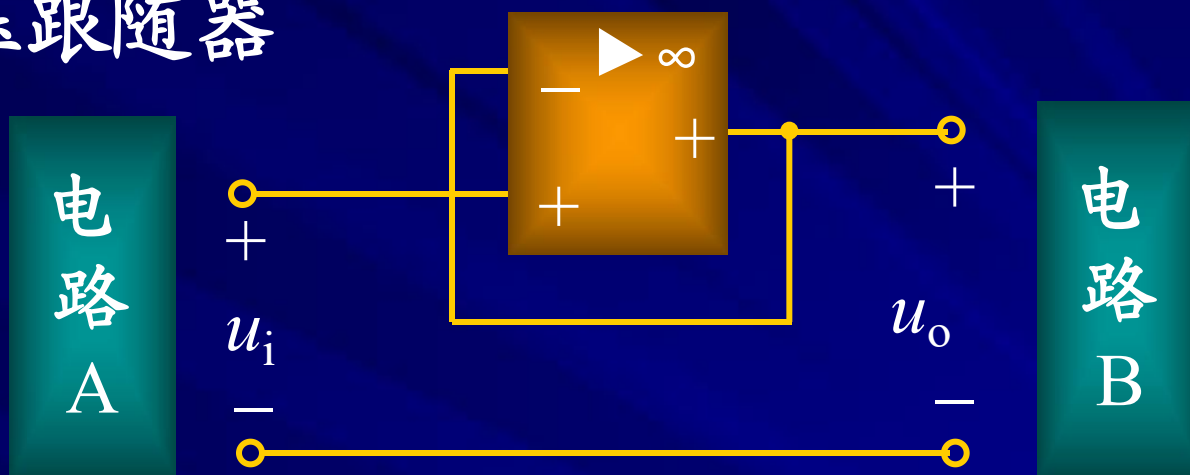
结论

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

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

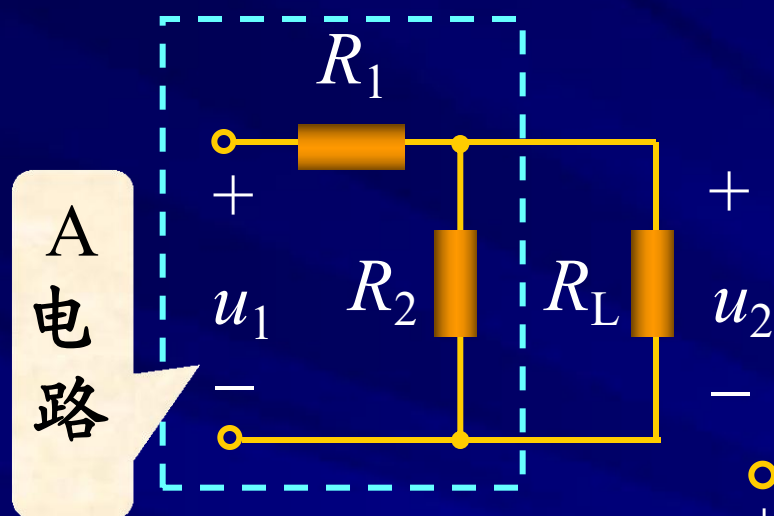


特点

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

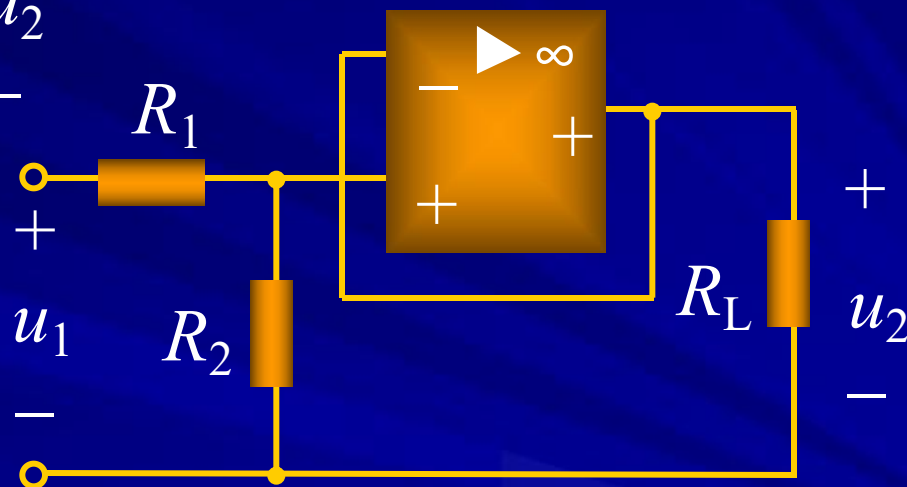
应用：在电路中起隔离前、后两级电路的作用。

分压电路



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

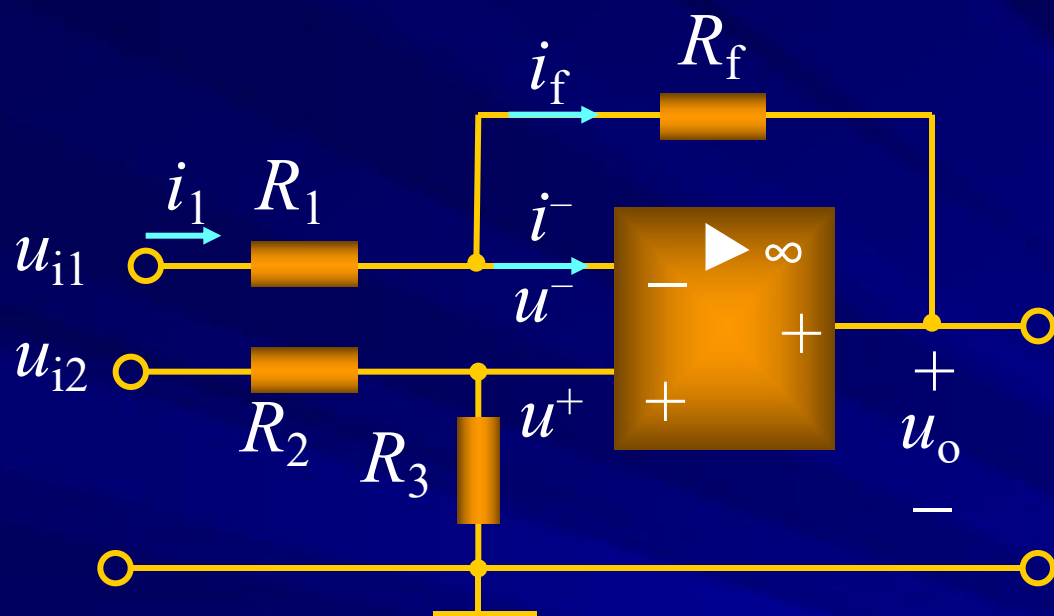
$$u_2 \neq \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_1$$



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

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

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

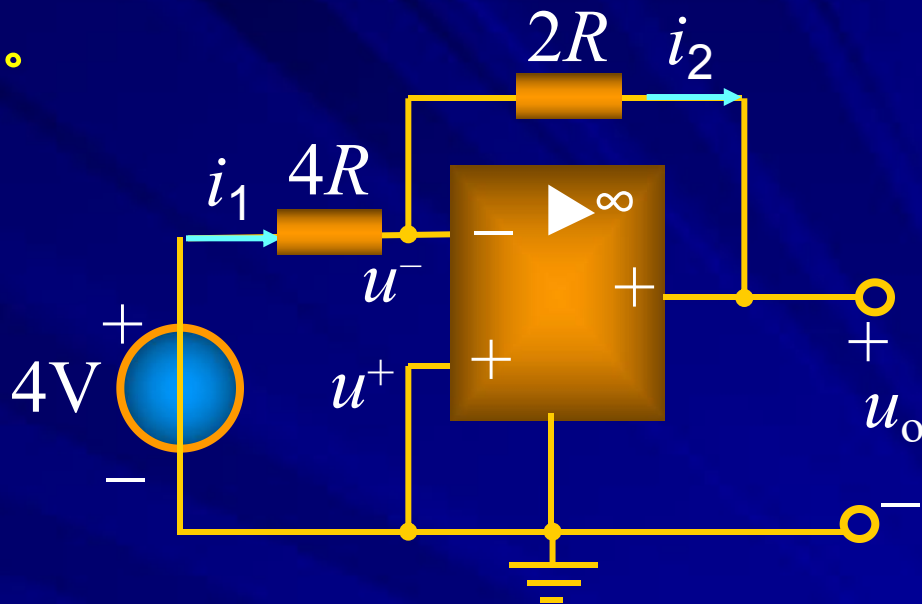
例3-1 求输出电压 u_o 。

解

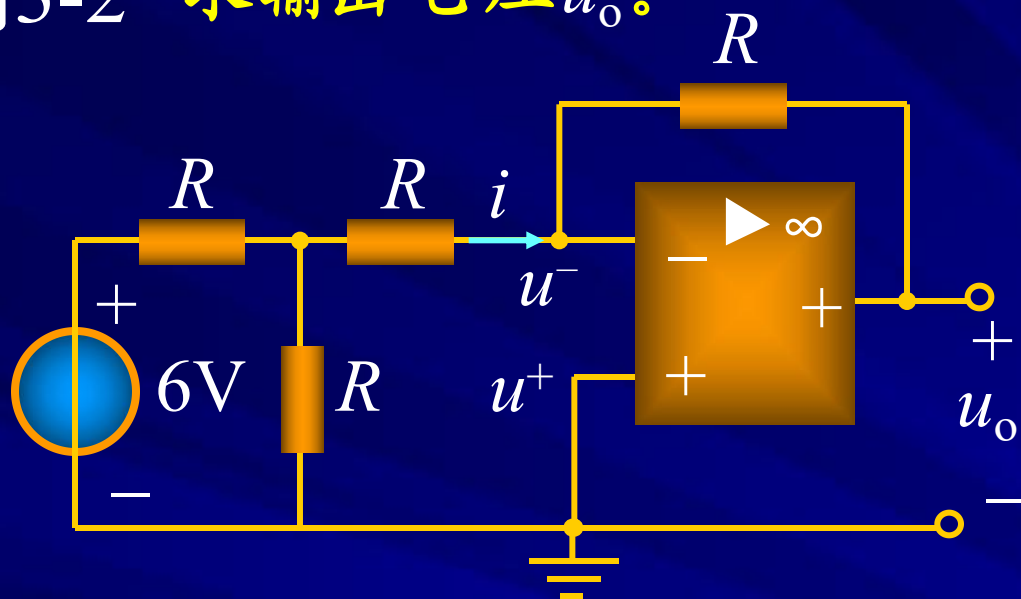
倒向比例电路

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

$$u_o = -2V$$



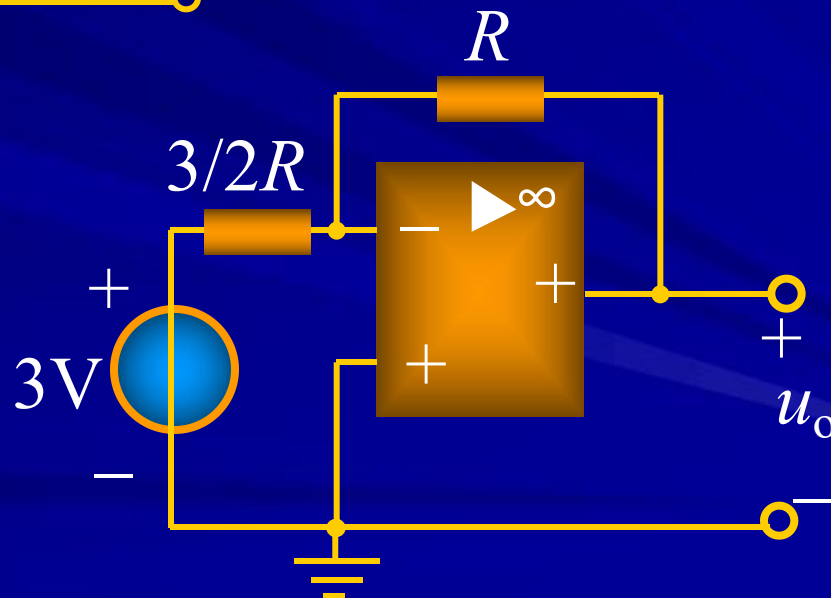
例3-2 求输出电压 u_o 。



解

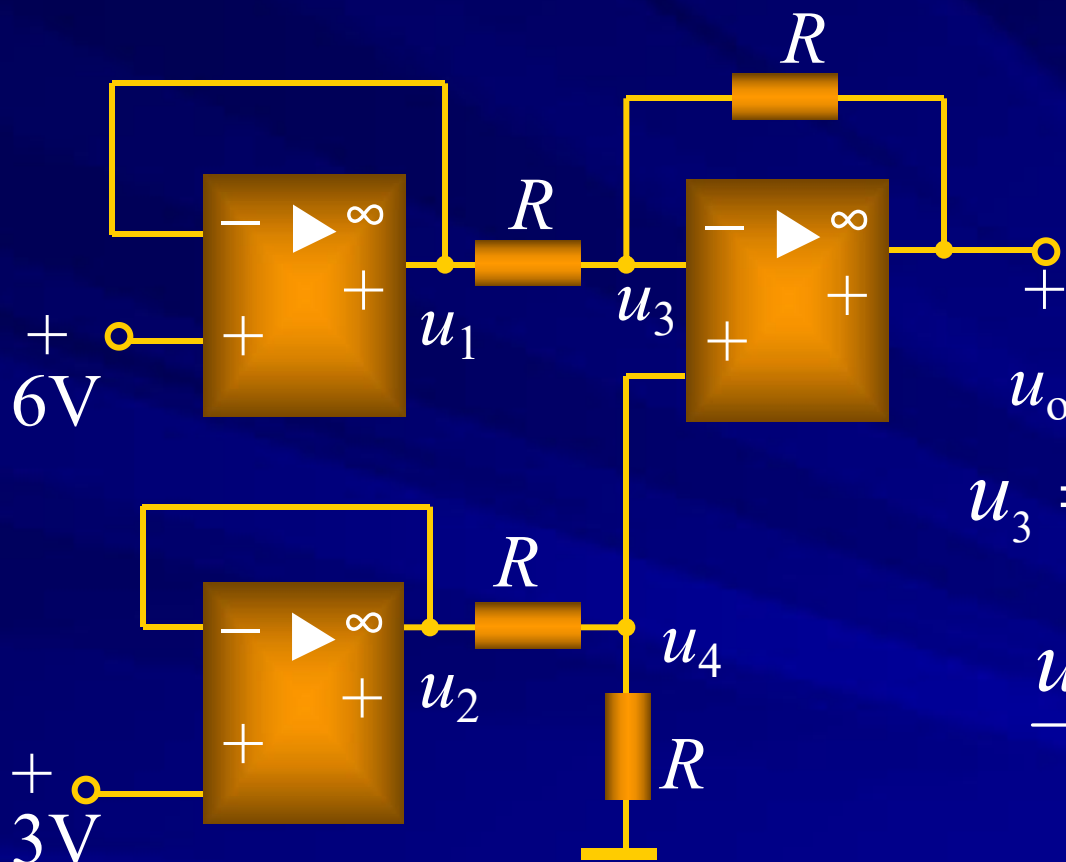
化简电路

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



例3-3 求输出电压 u_o 。

解



$$u_1 = 6V$$

$$u_2 = 3V$$

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

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

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