

电路原理

ECUST

信息学院 常青

changqing@ecust.edu.cn

运算放大器

主要内容

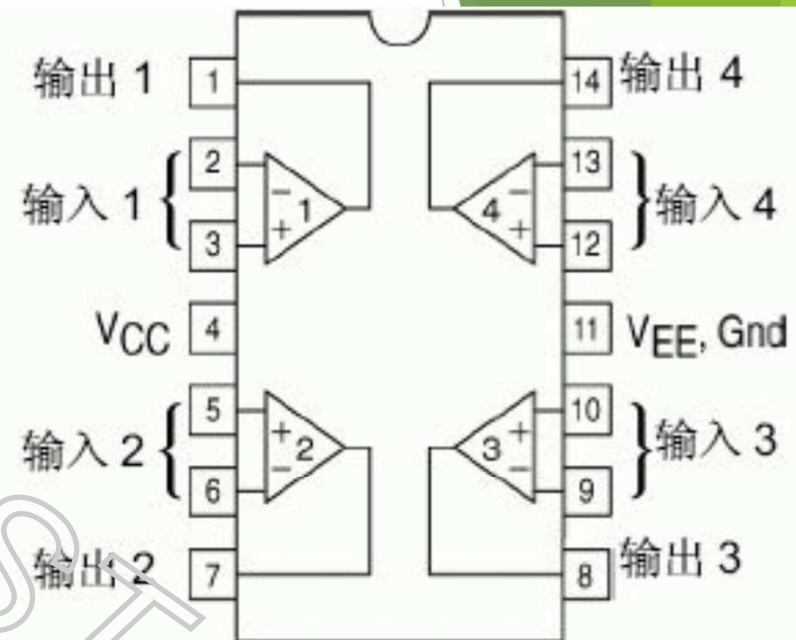
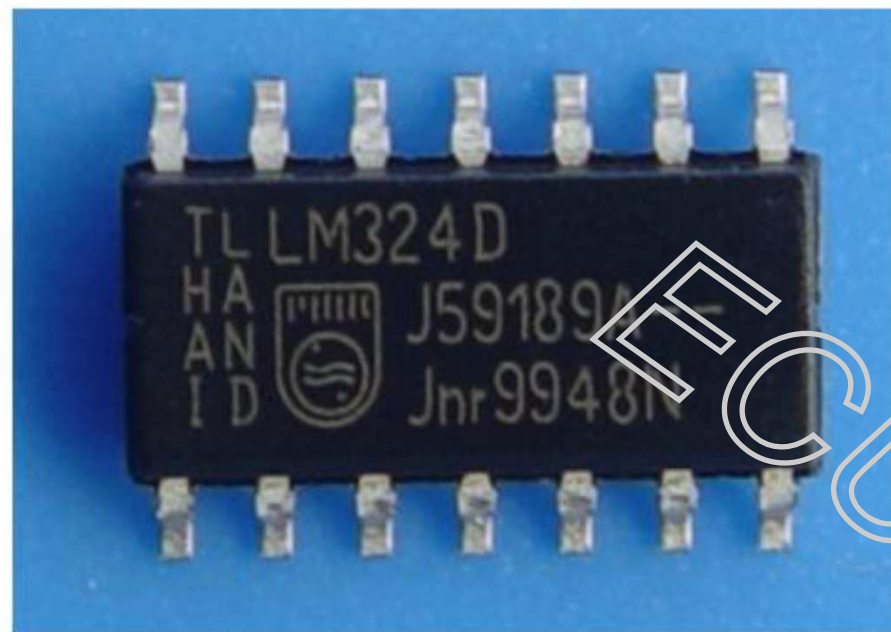
- ▶ 运算放大器 (Op Amp) 及其外特性
- ▶ 理想运算放大器 (Ideal Op Amp) 及其外特性
- ▶ 负反馈理想运算放大器电路分析

运算放大器(operational amplifier): 是高放大倍数的放大器

- ▶ 有源电路元件 (包含许多晶体管的集成电路)
- ▶ 多端器件
- ▶ 能完成数学运算 (比例、加、减、微、积分等)
- ▶ 高增益、高输入电阻、低输出电阻的放大器

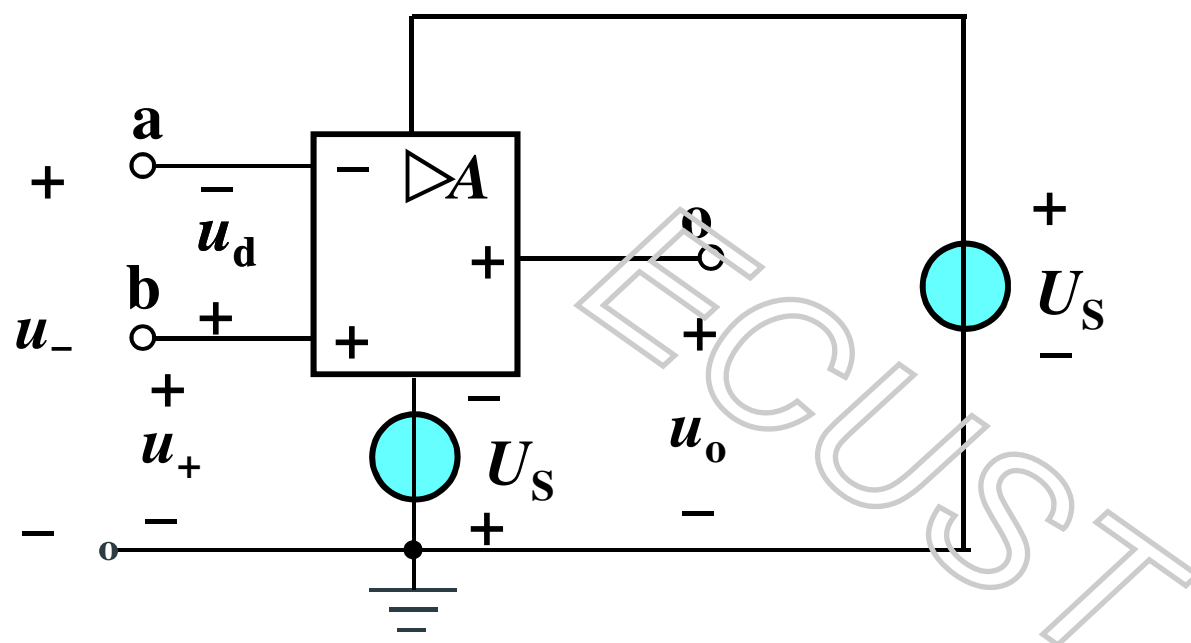


放大倍数 $A = \frac{u_o}{u_i} = 10^5$



一、运算放大器（Op Amp）及其外特性

1. 电路符号



a: 反相输入端 (*inverting input*) , 输入电压 u_- 。

b: 同相输入端 (*noninverting input*) , 输入电压 u_+ 。

o: 输出端 (*output*) , 输出电压 u_o 。

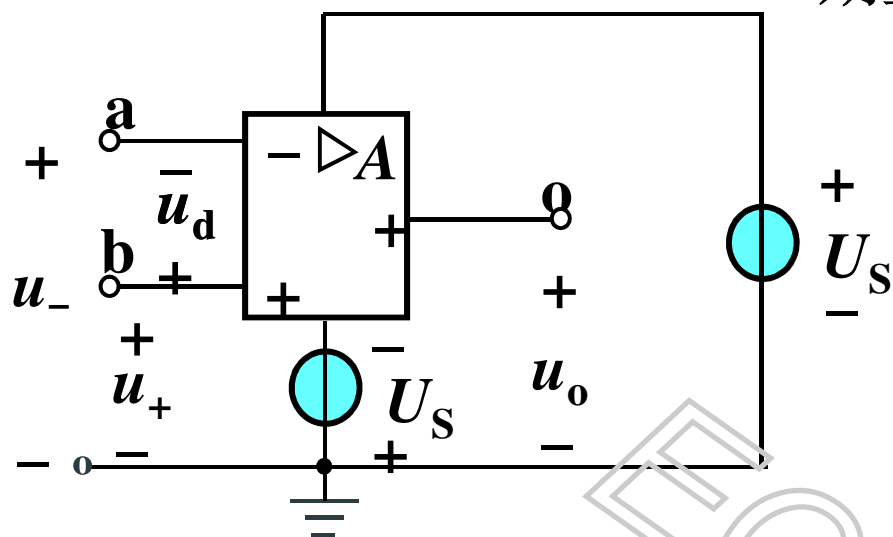
$\text{---}\text{---}\text{---}$: 公共端 (*ground*) 接地端。

A: 开环电压放大倍数 (*open-loop voltage gain*) 。

放大器的3个重要性质：

- 电压放大倍数： $A=10^5$ 次方
- 输入电阻：从 u_i 两端向输出端看的等效电阻 M欧级
- 输出电阻：从 u_o 两端向输入端看的等效电阻。几十欧的量级

2. 运算放大器的外特性

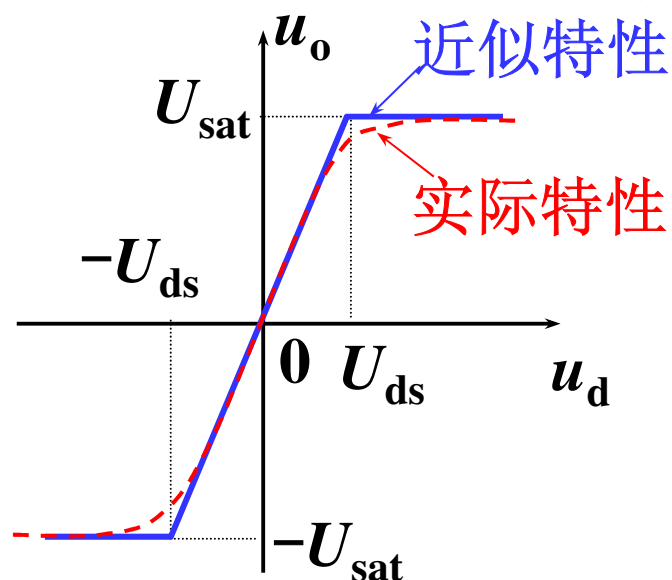


期望 $u_o = Au_d$

注意 U_d 的参考方向!

$$u_d = u_+ - u_-$$

运算放大器的外特性：
描述输出电压 u_o 和输入端电压 u_d 关系。



分三个区域讨论

① 线性工作区

$|u_d| < U_{ds}$, 则 $u_o = Au_d$

② 正相饱和区

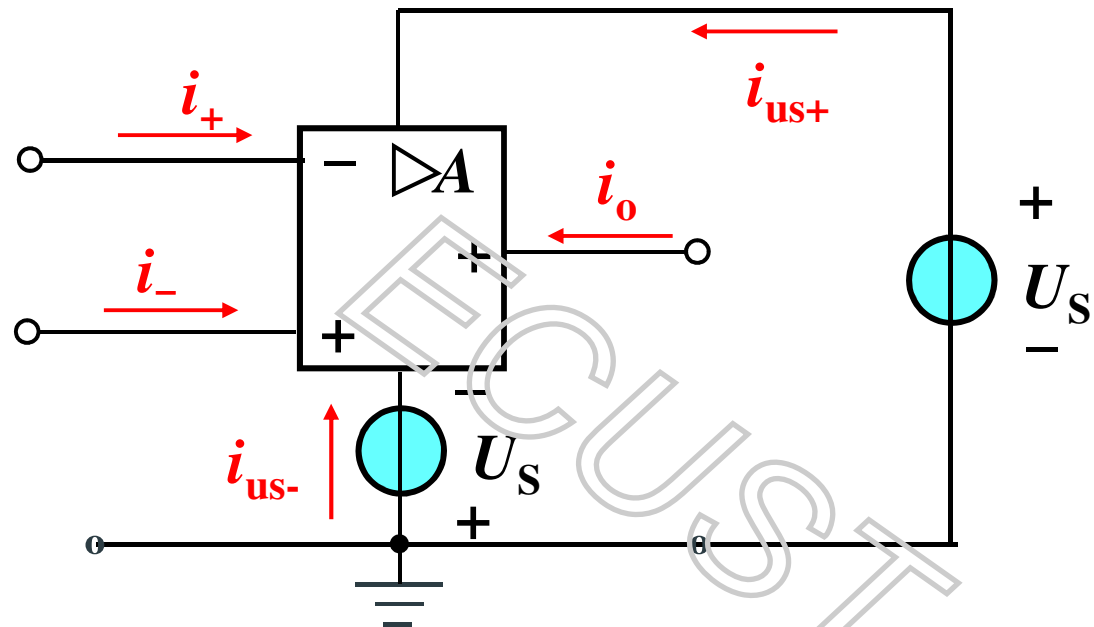
$u_d > U_{ds}$, 则 $u_o = U_{sat}$

③ 反相饱和区

$u_d < -U_{ds}$, 则 $u_o = -U_{sat}$

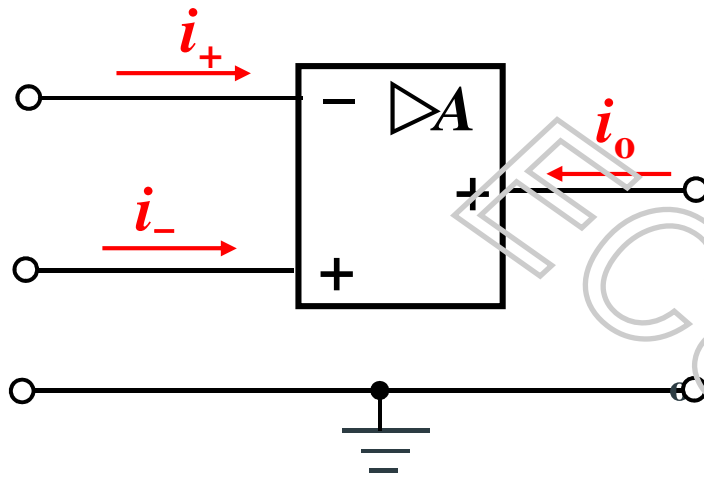
这里 U_{ds} 是一个数值很小的电压。当 $U_{sat} = 13V$ (U_{sat} 一般小于工作电源电压)、 $A = 10^5$ 时, $U_{ds} = 0.13mV$ 。

3. 运算放大器的端电流



$$i_+ + i_- + i_o + i_{us+} + i_{us-} = 0$$

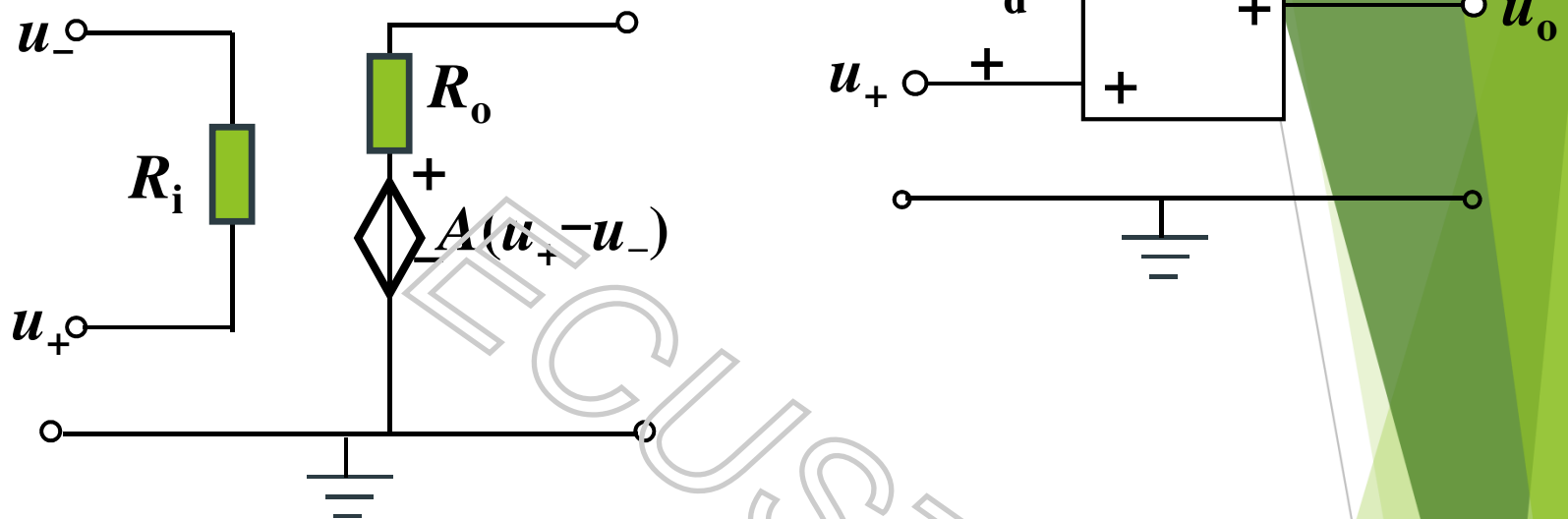
当放大器工作在线性区时，端电压关系式中不出现直流电源电压。在电路符号中去掉电源端，以简化符号。



注意：端电流仍是 $i_+ + i_- + i_o + i_{us+} + i_{us-} = 0$

$$i_+ + i_- + i_o \neq 0$$

4. 电路模型

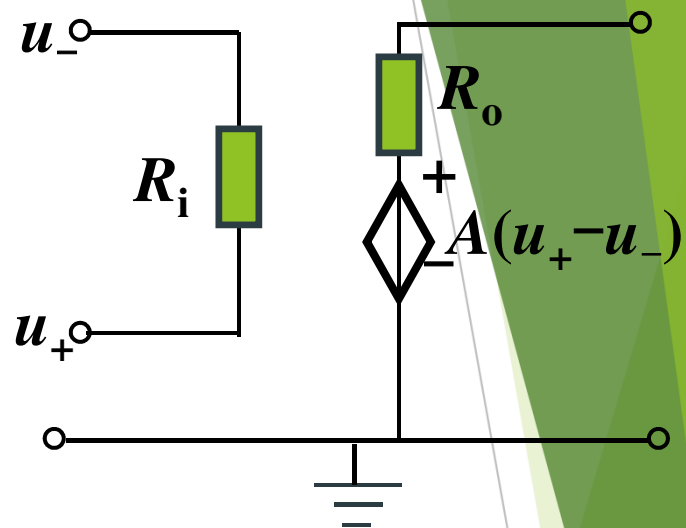
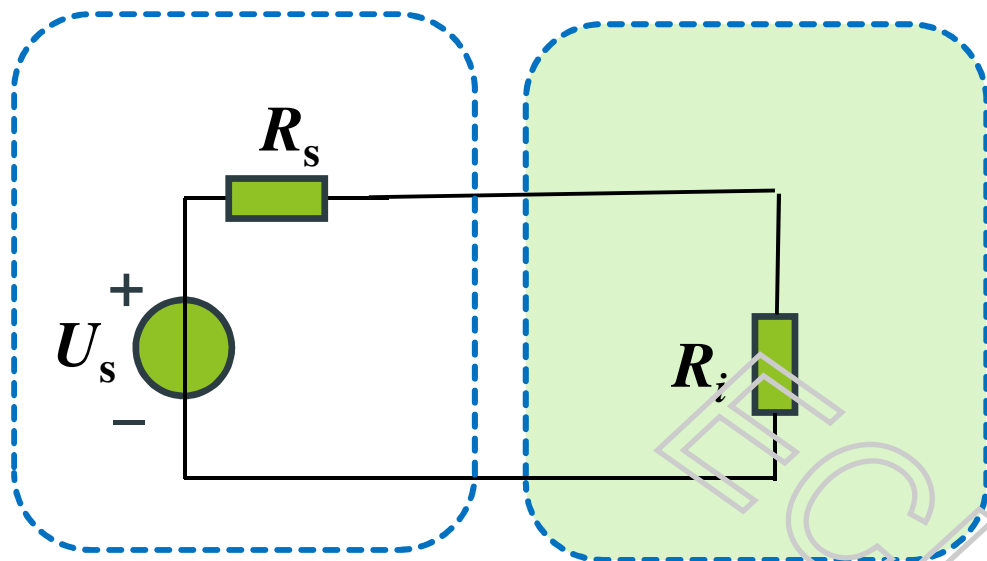


R_i : 运算放大器两输入端间的输入电阻，通常为 $10^6\Omega \sim 10^{13}\Omega$ 。

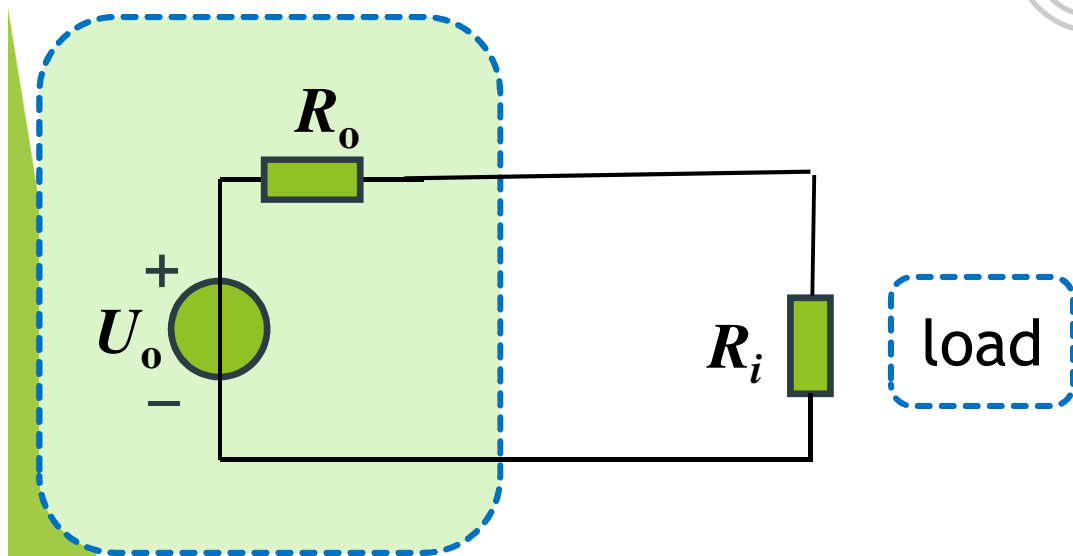
R_o : 运算放大器的输出电阻，通常为 $10\Omega \sim 100\Omega$ 。

外接电源

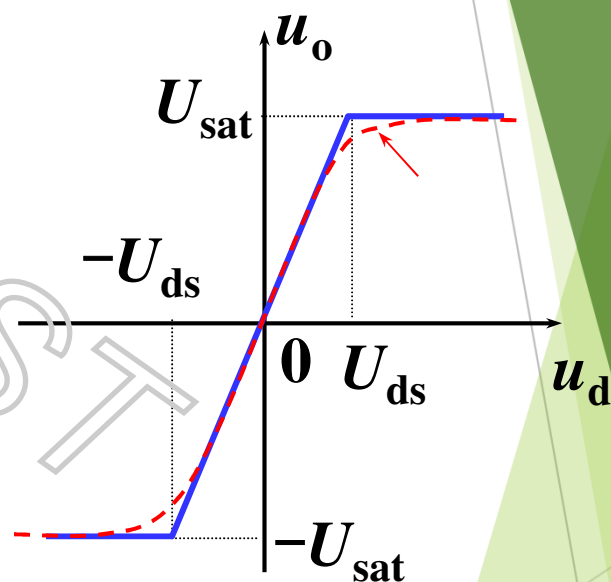
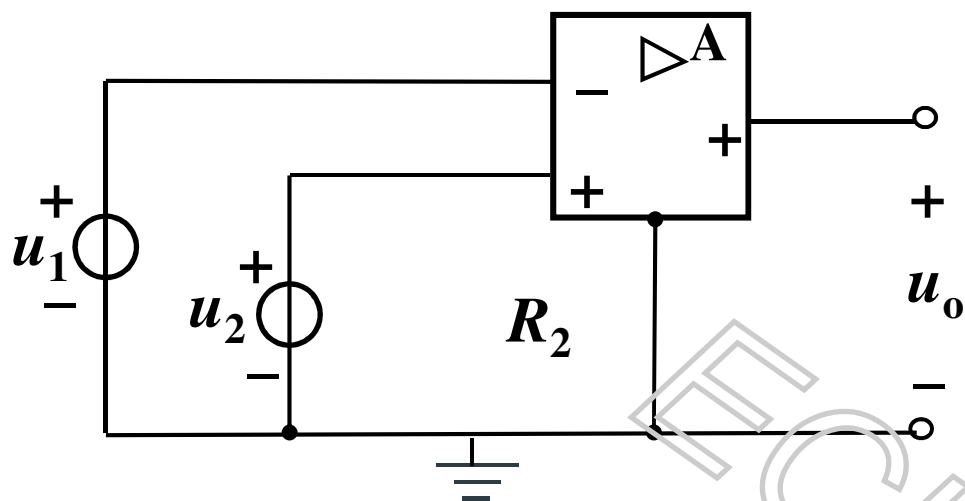
Op Amp



Op Amp



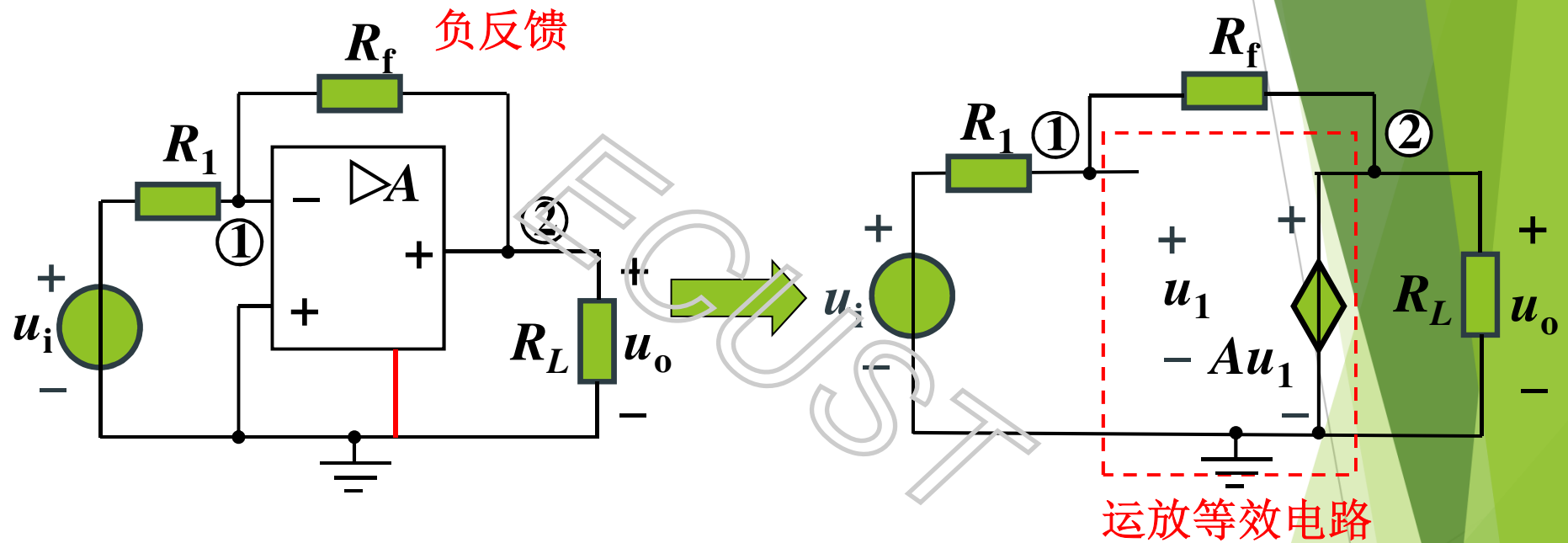
运放等效简化电路



会有什么问题？？

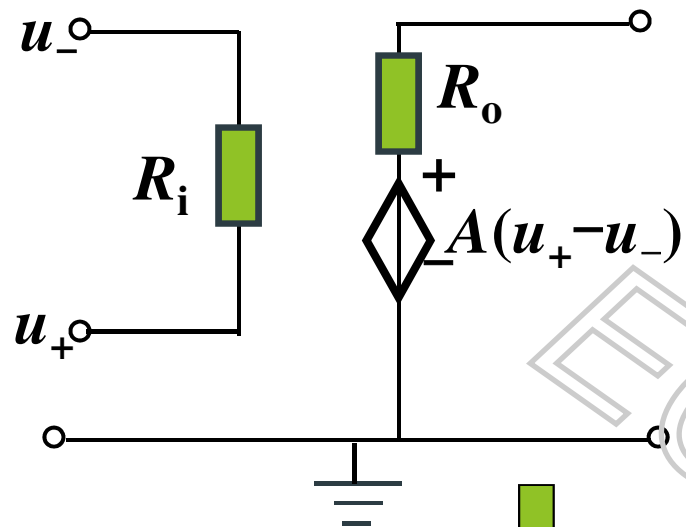
1. A 非常大 \rightarrow 允许的输入电压非常小，噪声明显
2. 不同的 Op Amp, A 不同 \rightarrow 设计的电路只能适用一个特定的运放
3. 温度不同, A 也不同 \rightarrow 运放无法正常工作

6. 负反馈放大器 (inverting amplifier)

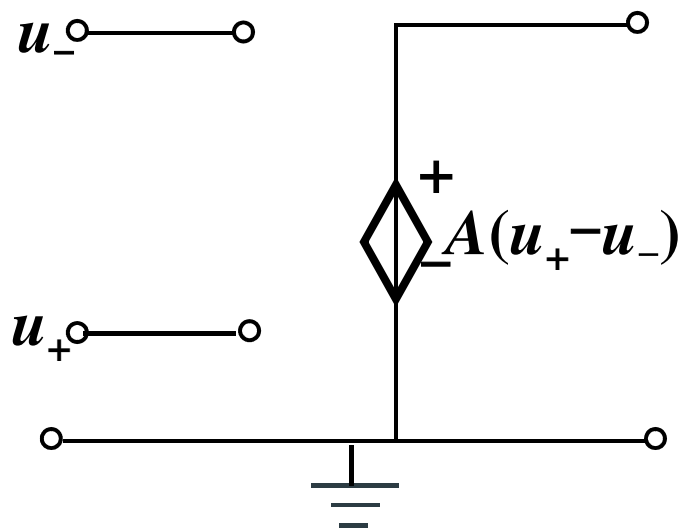


$$u_o = -\frac{AR_f}{(R_f + R_1) + AR_1} u_i \xrightarrow{A \text{ 足够大}} \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1}$$

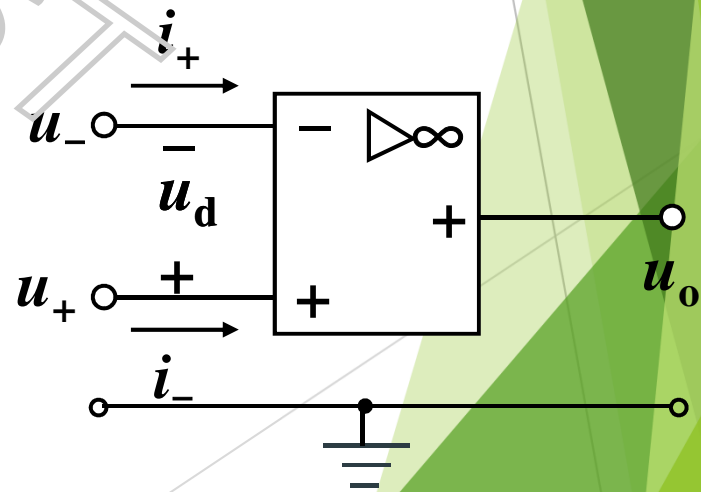
7. 理想运算放大器



$$R_i \rightarrow \infty, R_o \rightarrow 0$$

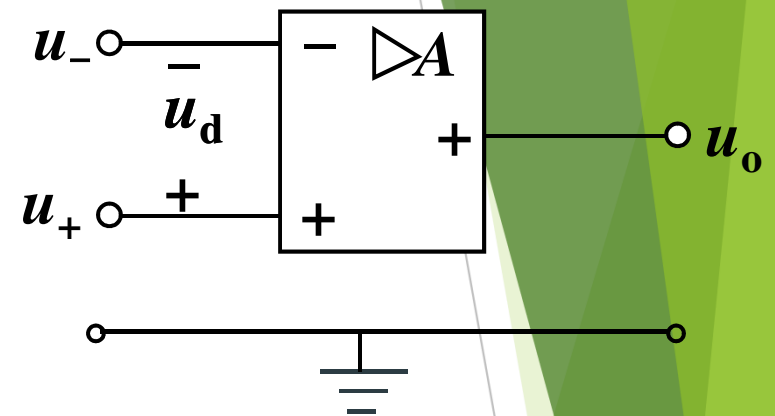


$$A \rightarrow \infty$$



理想运放的电路符号

实际运放的电路符号

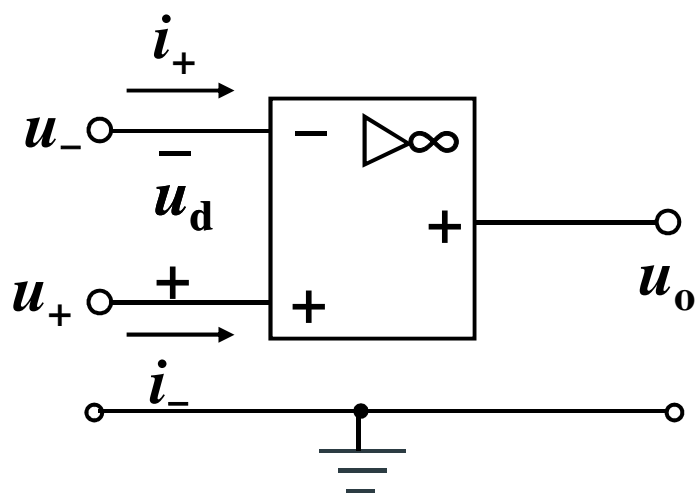


在线性放大区，将运放电路作如下的理想化处理：

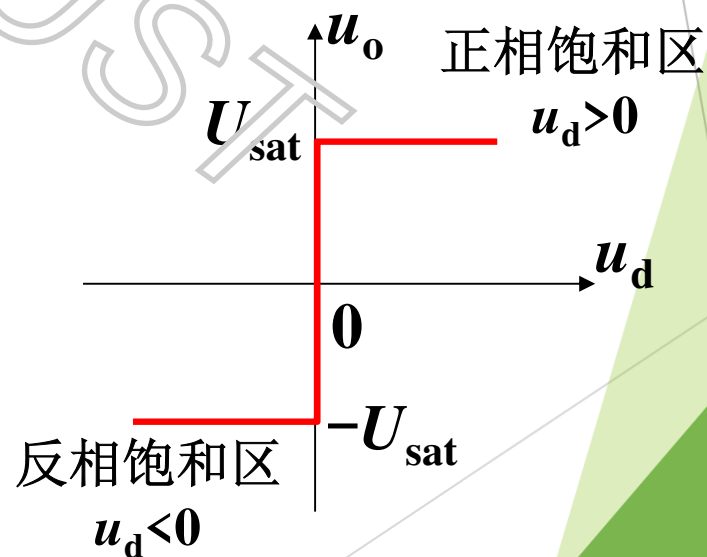
(1) $A \rightarrow \infty$

$\because u_o$ 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) $R_i \rightarrow \infty$ ， $R_o \rightarrow 0$ ， $i_+ = 0$ ， $i_- = 0$ 。即从输入端看进去，元件相当于开路（虚开路）。



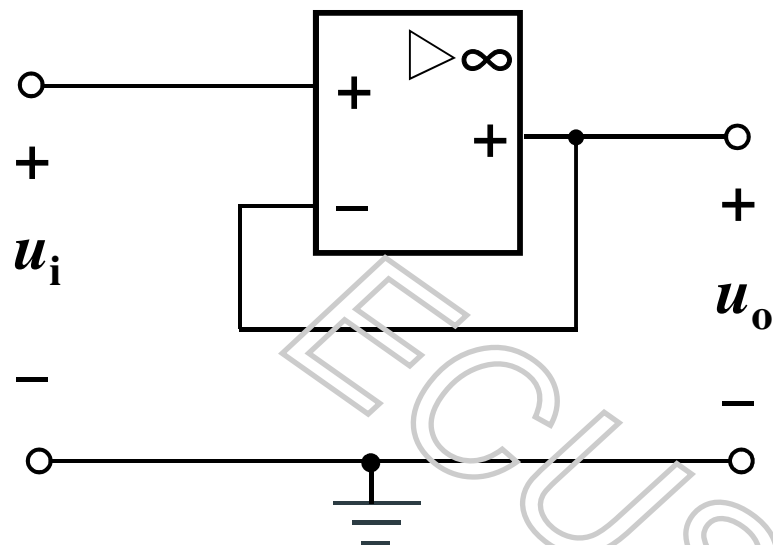
理想运放的电路符号



理想运放的静态特性

二、含负反馈理想运算放大器电路的分析

1. 电压跟随器 (*voltage follower*)

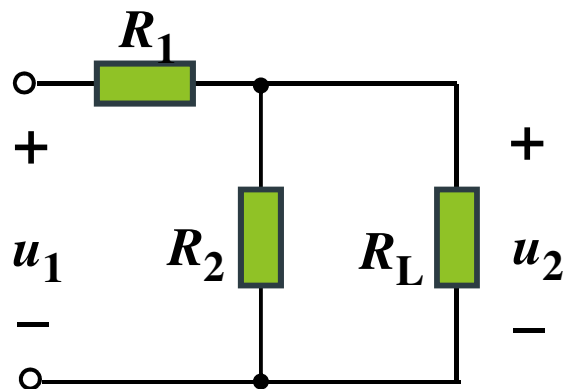


$$u_o = u_i$$

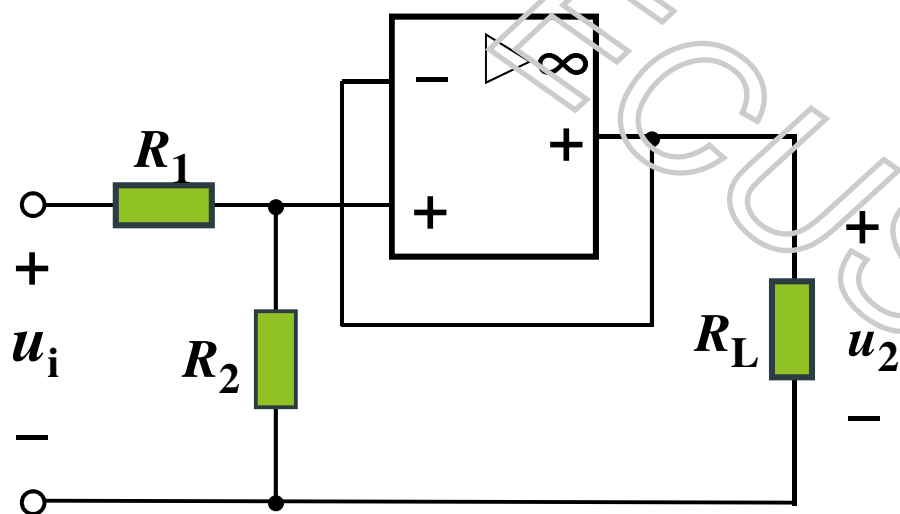
- 特点：
- ① 输入电阻无穷大（虚断）；
 - ② 输出电阻为零；

应用：在电路中起隔离前后两级电路的作用。

例



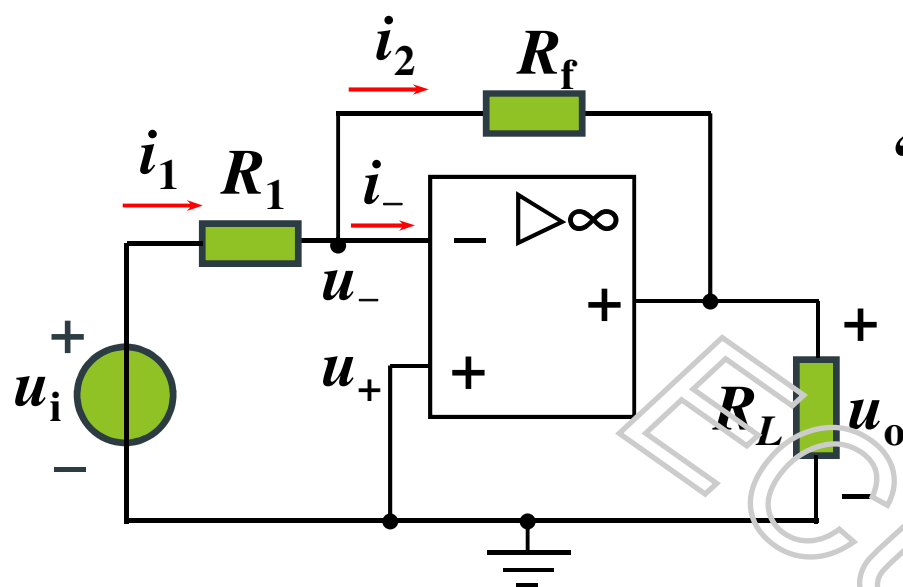
$$u_2 \neq \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_1$$



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

可见，加入跟随器后，隔离了前后两级电路的相互影响。

2. 反相放大器



“虚短”： $u_+ = u_- = 0$, $i_1 = u_i / R_1$
 $i_2 = -u_o / R_f$

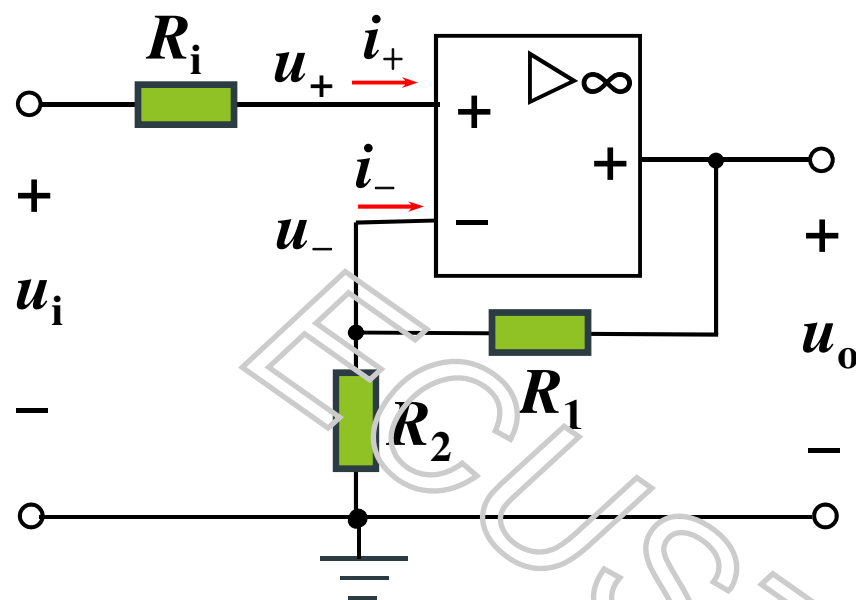
“虚断”： $i_- = 0$, $i_+ = 0$, $i_2 = i_1$

$$\therefore \frac{u_i}{R_1} = -\frac{u_o}{R_f} \quad \text{即: } u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i$$

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) 运放不能工作在开环状态（极不稳定，振荡在饱和），一般工作在闭环状态，输出电压由外电路决定。

3. 同相放大器 (*noninverting amplifier*)

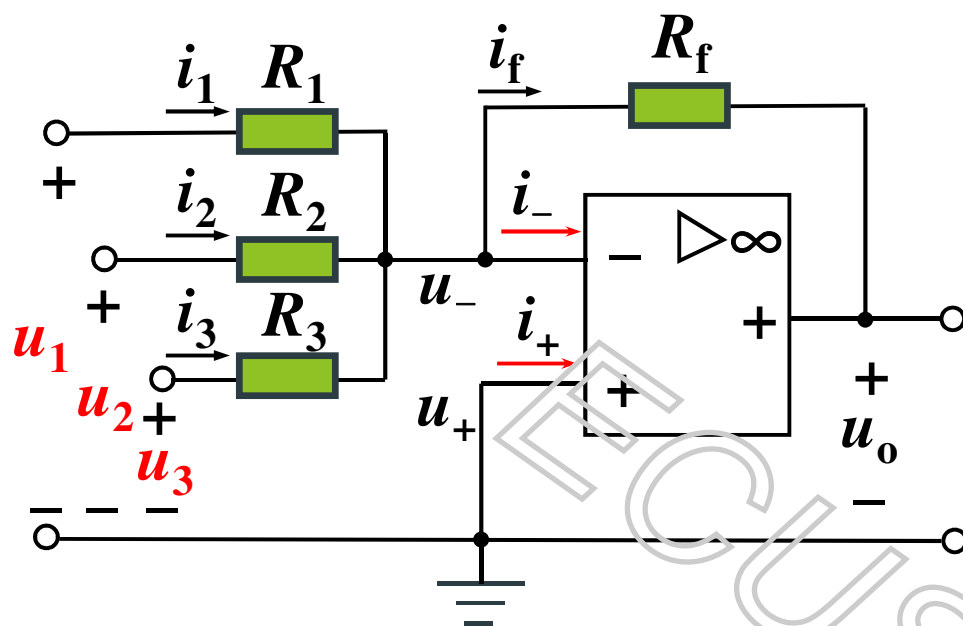


$$\begin{cases} u_+ = u_- = u_i \\ i_+ = i_- = 0 \end{cases}$$

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

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

4. 加法器 (summing amplifier)



$$\begin{cases} u_- = u_+ = 0 \\ i_- = i_+ = 0 \end{cases}$$

$$i_1 + i_2 + i_3 = i_f$$

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

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

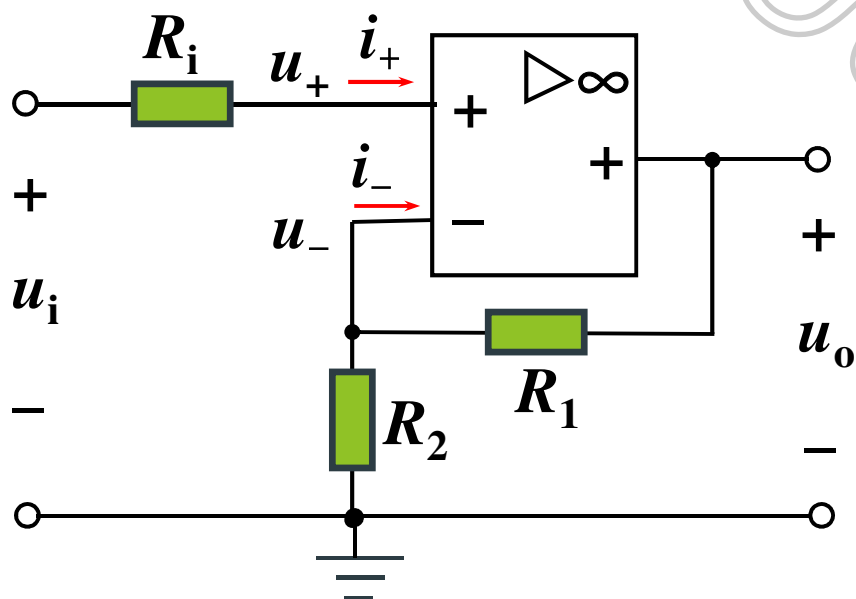
若 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$

则 $u_o = -(u_1 + u_2 + u_3)$ 实现了加法运算

5. 減法器 (difference amplifier)

同相比例放大器

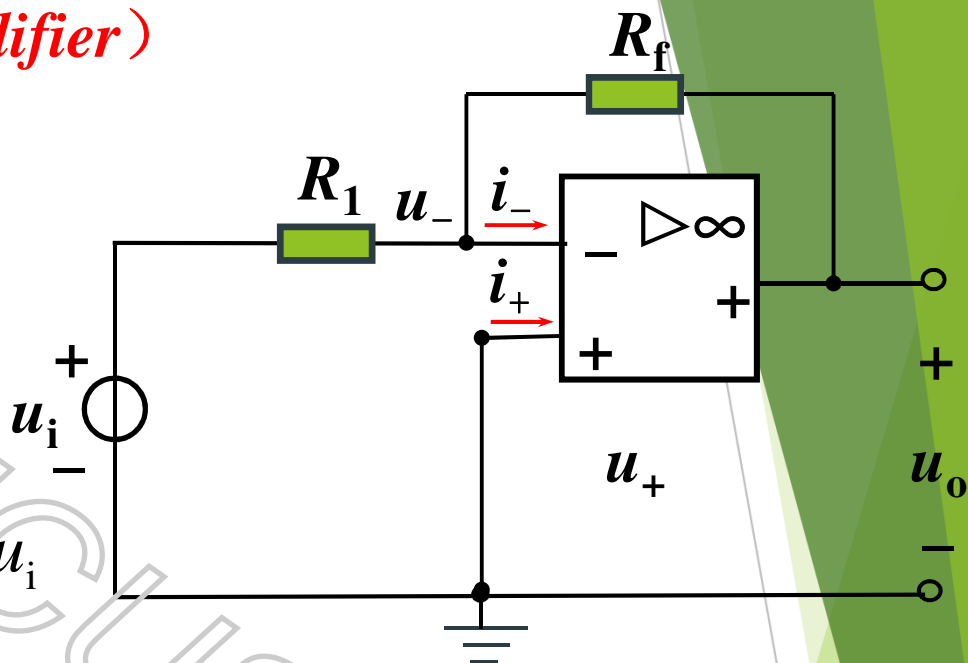
$$u_o = \frac{R_1 + R_2}{R_2} u_i = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) u_i$$

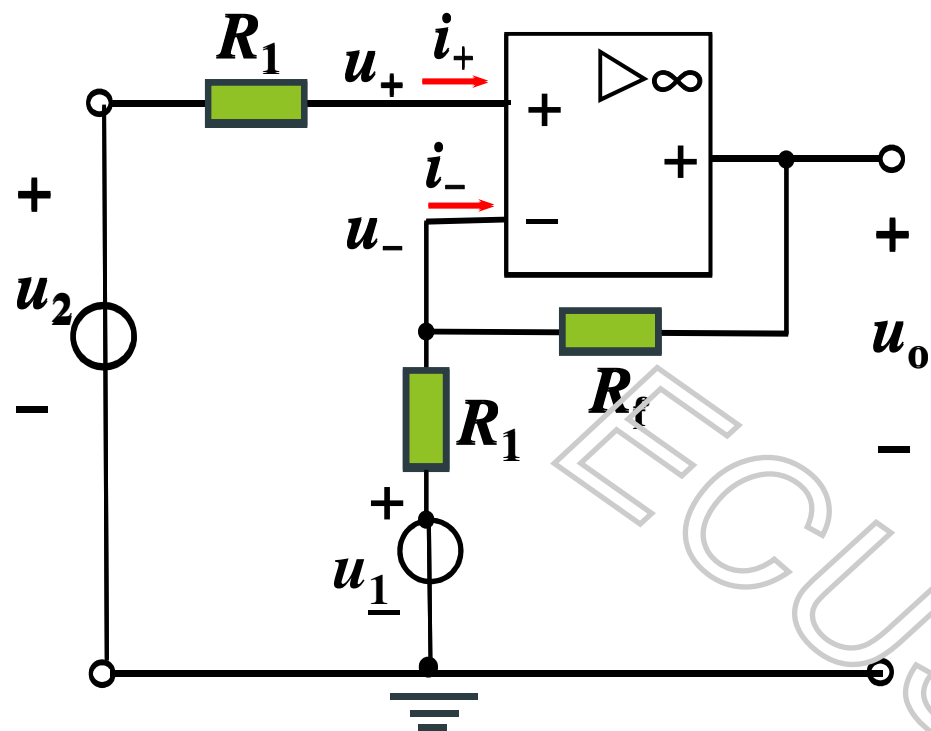


反相比例放大器

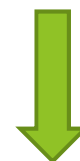
$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i$$

$$u_o = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) u_1 - \frac{R_f}{R_1} u_2$$

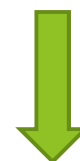




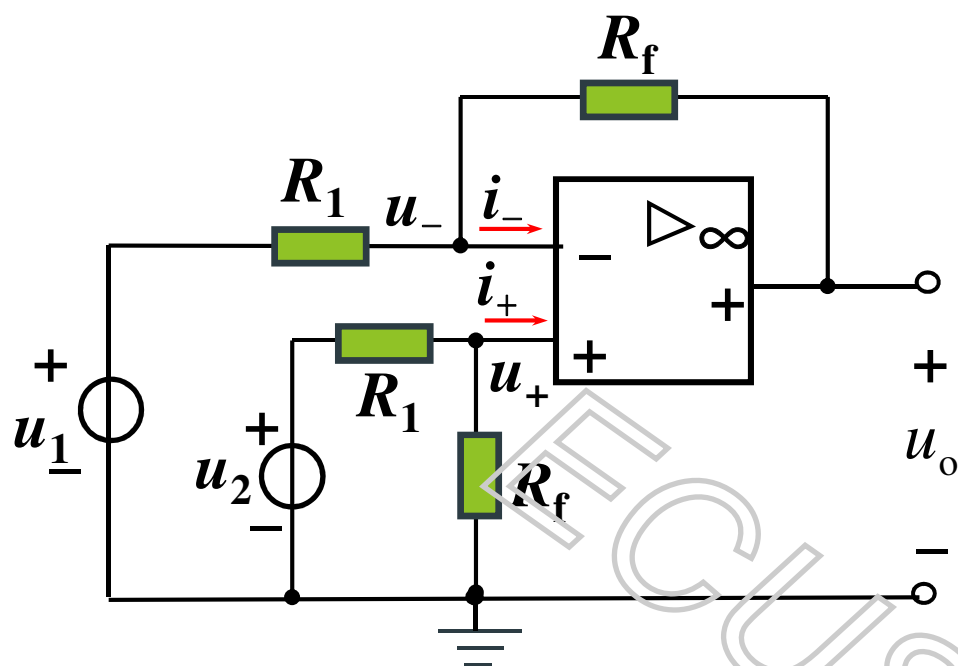
$$\frac{u_o - u_-}{R_f} = \frac{u_- - u_1}{R_1}$$



$$u_o = -\frac{R_f}{R_1}u_1 + \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)u_-$$



$$u_o = -\frac{R_f}{R_1}u_1 + \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)u_2$$



$$u_- = u_+ = \frac{R_f}{R_1 + R_f} u_2$$

$$\frac{u_1 - u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_o}{R_f}$$



$$u_o = \frac{R_2}{R_1} (u_2 - u_1)$$

实现了减法运算。

含有理想运算放大器的电路分析

①根据理想运放的性质，抓住以下两条规则：

(a) 同相输入端和反相输入端的输入电流均为零
[“虚断(路)”]；

(b) 对于公共端(地)，同相输入端的电压与反相输入端的电压相等
[“虚短(路)”]。

②合理地运用这两条规则，并与结点电压法相结合。

5. 运算放大器所吸收的瞬时功率

由“虚短”、“虚断”，运放吸收的功率

$$p = u_o i_o$$

右示电路，运放同相输入端与电压源 u_s 相连，输出端连接电阻 R_L 。由于 $i_1 = i_a = i_b = 0$ ， $u_i = 0$ ，故有

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

由于 $u_2 = -R_L i_2$ ， $u_s = u_1$ ，图中红框所示二端口部分(由运放及线性非时变电阻 R_1 和 R_f 组成)吸收的功率为

$$p = u_1 i_1 + u_2 i_2 = u_2 \left(-\frac{u_2}{R_L} \right) = -\frac{1}{R_L} \left(u_s \frac{R_1 + R_f}{R_1} \right)^2$$

式中负号表明二端口向负载 R_L 输出功率。由于电阻 R_1 和 R_f 是无源的，故意味着运放向负载提供功率。因此，运算放大器是一种有源元件。

