

第3章 电子器件及其电路模型

(semiconductor elements) (circuit analysis)

3.0* 半导体基础知识

3.1 半导体二极管

3.2 晶体三极管

3.3 场效应管

3.4 集成运算放大器

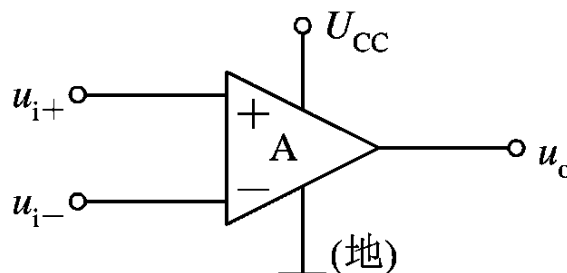
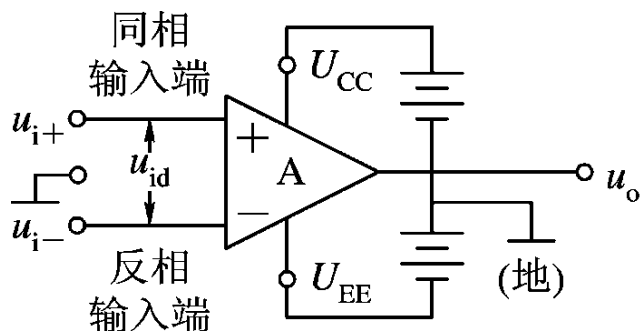
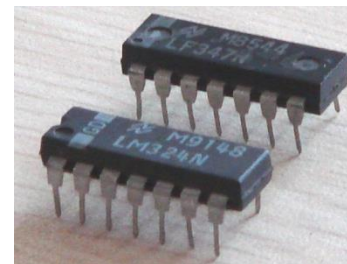
3.5 数字逻辑电路基础

§ 3.4 集成运算放大器

- 一、运算放大器特性与等效电路模型
- 二、运算放大器线性应用电路的分析
- 三*、工作在饱和状态的理想运算放大器
电路分析

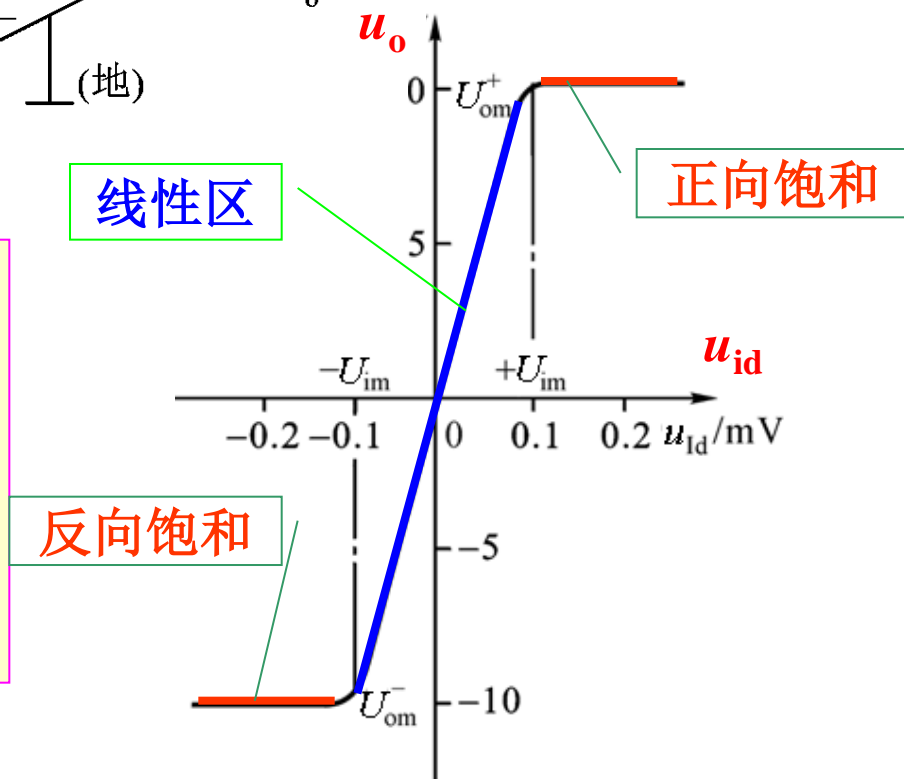
一、运算放大器特性与等效电路模型

若将集成运放看成一个“黑盒子”，则可等效为一个双端输入、单端输出的电路。



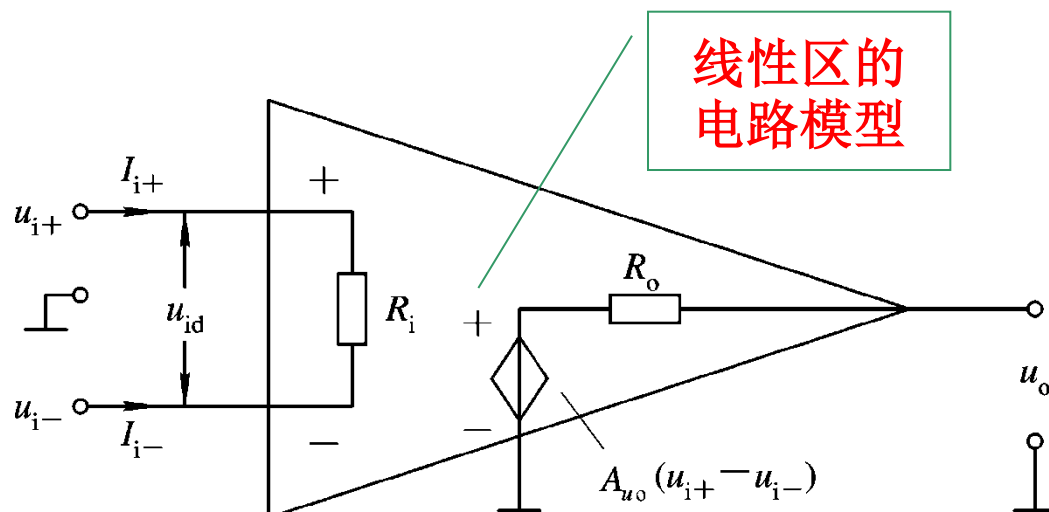
电压传输特性

$$u_o = f(u_{i+} - u_{i-})$$

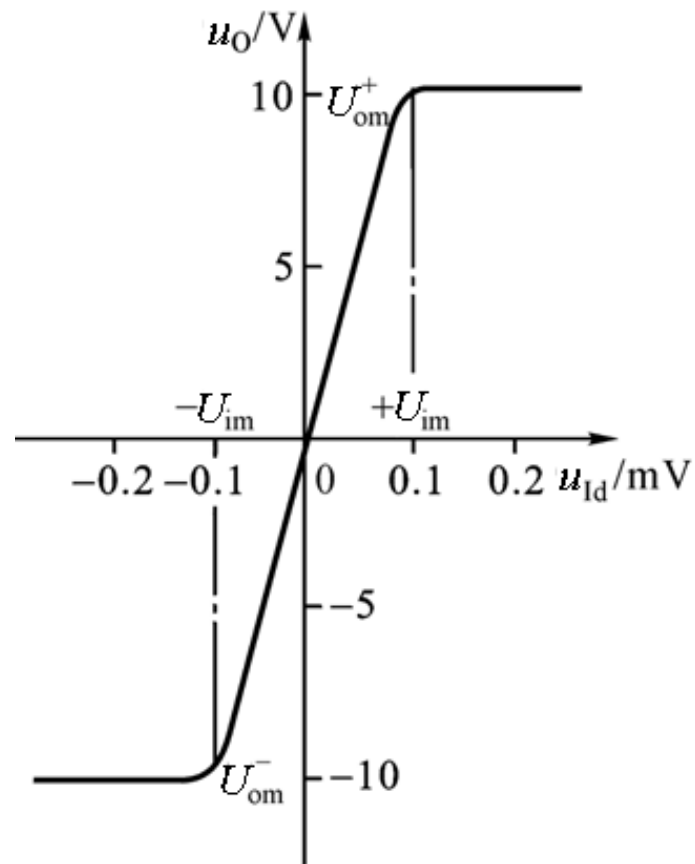


$u_{id} = u_{i+} - u_{i-}$: 差模输入电压
 u_o : 输出电压, $\leq U_{CC}$
 A_{uo} : 开环电压放大倍数, 非常大
 R_i : 输入电阻, 近似为 ∞ ;
 R_o : 输出电阻, 近似为0。

集成运算放大器的模型

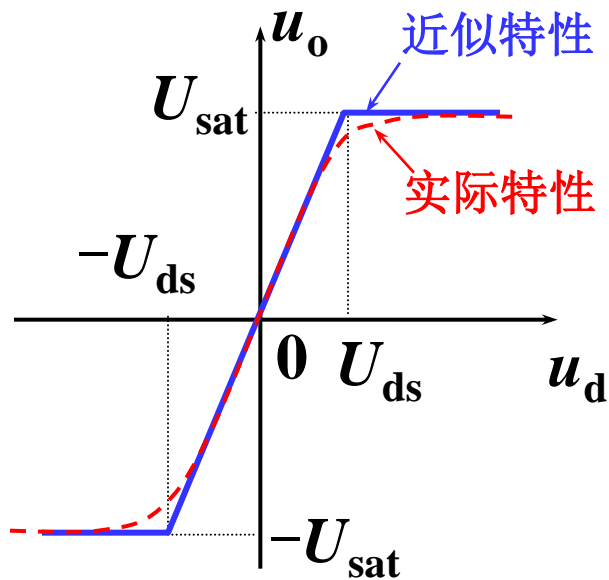


$u_{id} = u_{i+} - u_{i-}$: 差模输入电压
 A_{uo} : 开环电压放大倍数;
 R_i : 输入电阻;
 R_o : 输出电阻。

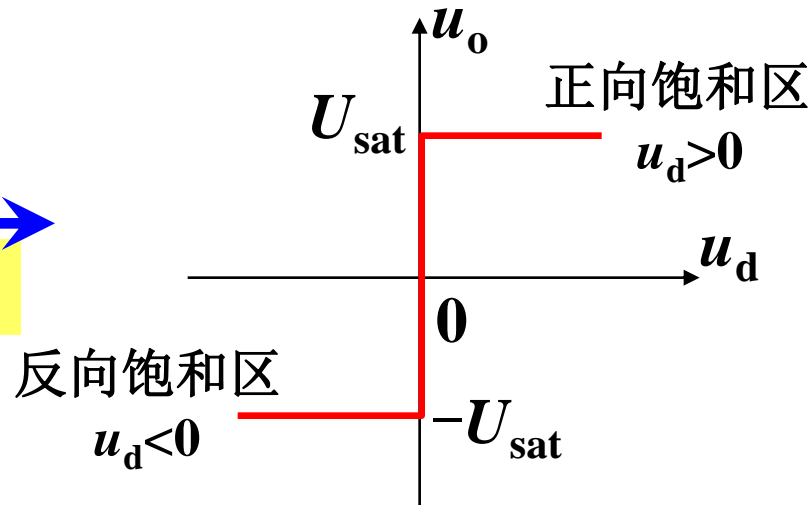


若运放工作在饱和区 \longrightarrow $\pm U_{om}$ 的电压源

运算放大器传输特性的理想化近似



理想化
 $u_d = u_+ - u_-$



U_{sat} 一般小于工作电源电压。

当 $U_{sat} = 13V$ 、 $A = 10^5$ 时， $U_{ds} = 0.13mV$

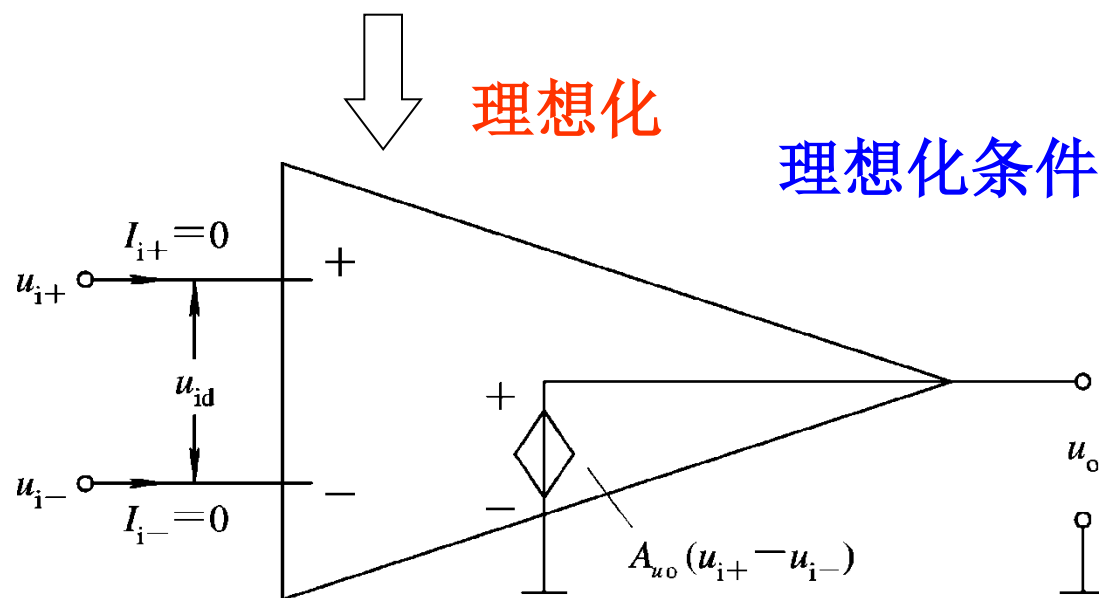
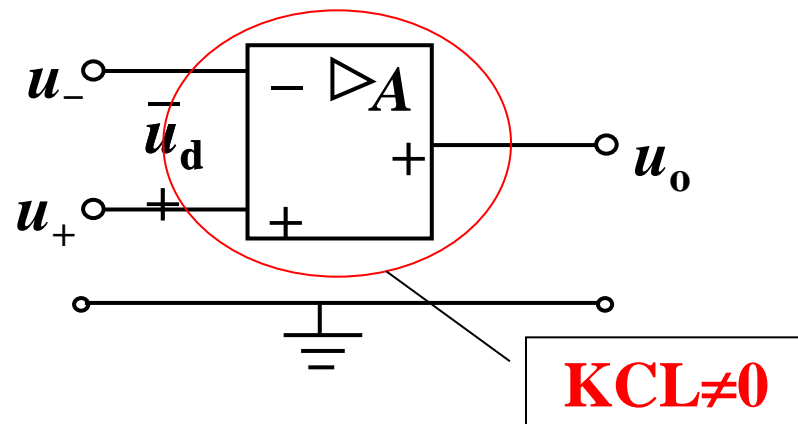
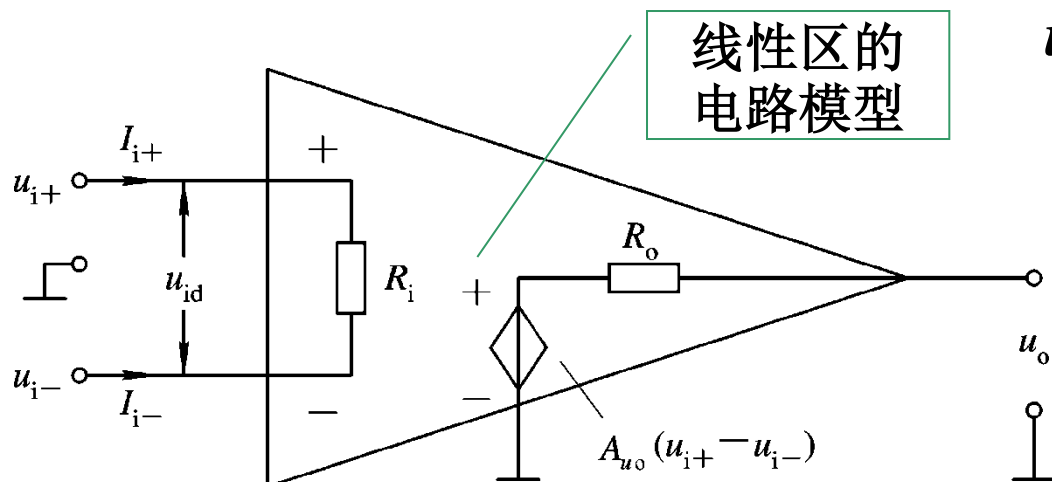
(1) $A \rightarrow \infty$, $u_d = 0$, 即 $u_+ = u_-$ 。

输入端虚短路；

(2) $R_i \rightarrow \infty$, $i_+ = 0$, $i_- = 0$ 。

输入端虚开路

集成运算放大器的模型



理想化条件

$$R_i \rightarrow \infty$$

$$R_o \rightarrow 0$$

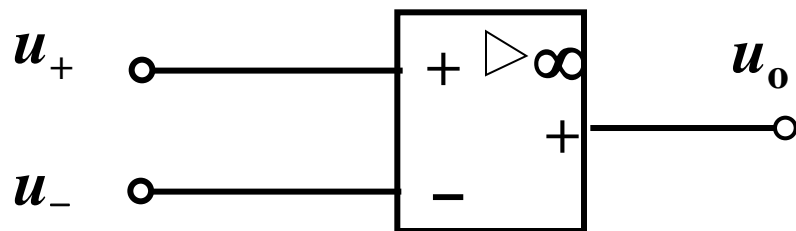
$$A_{uo} \rightarrow \infty$$

$$I_{i+} = I_{i-} \rightarrow 0$$

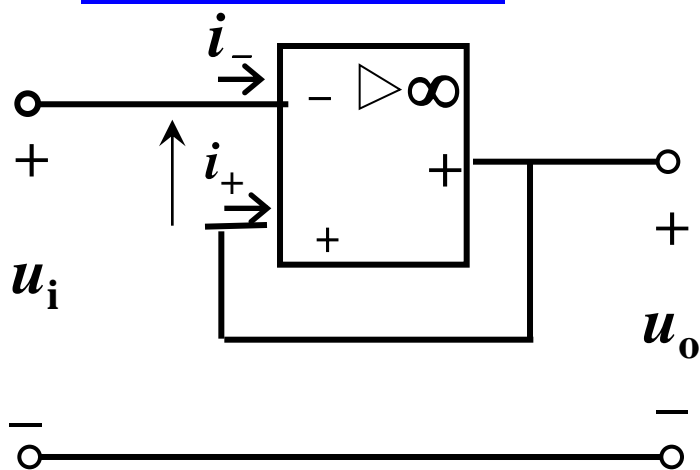
$u_{id} \rightarrow 0$
“虚短路”

“虚断路”

无反馈(开环)



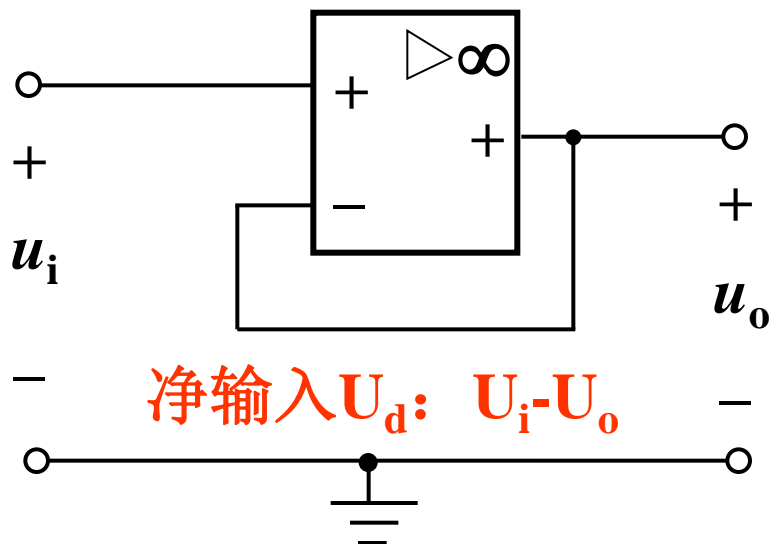
正反馈(闭环)



净输入 U_d : $U_o - (-U_i)$

工作于
线性区

负反馈(闭环)



反馈：输出影响到净输入

负反馈：净输入信号减少

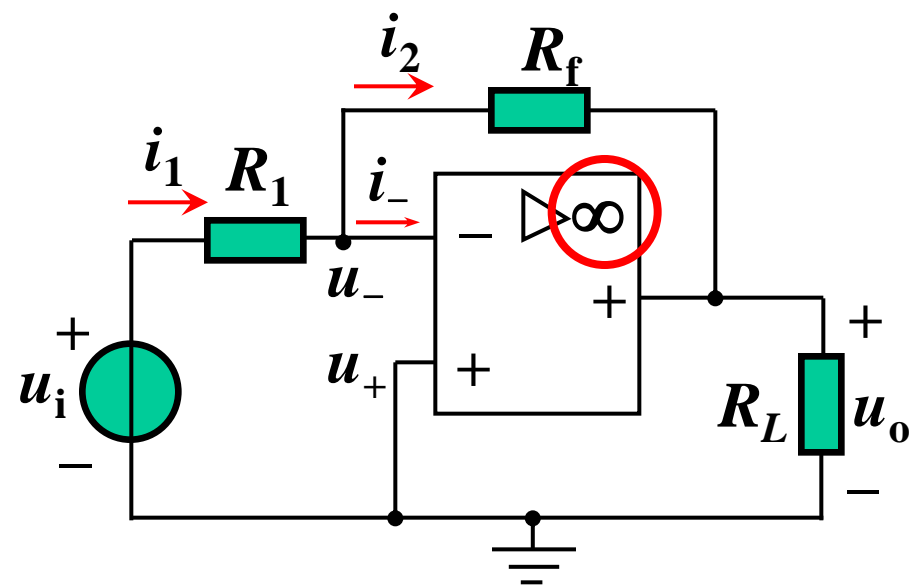
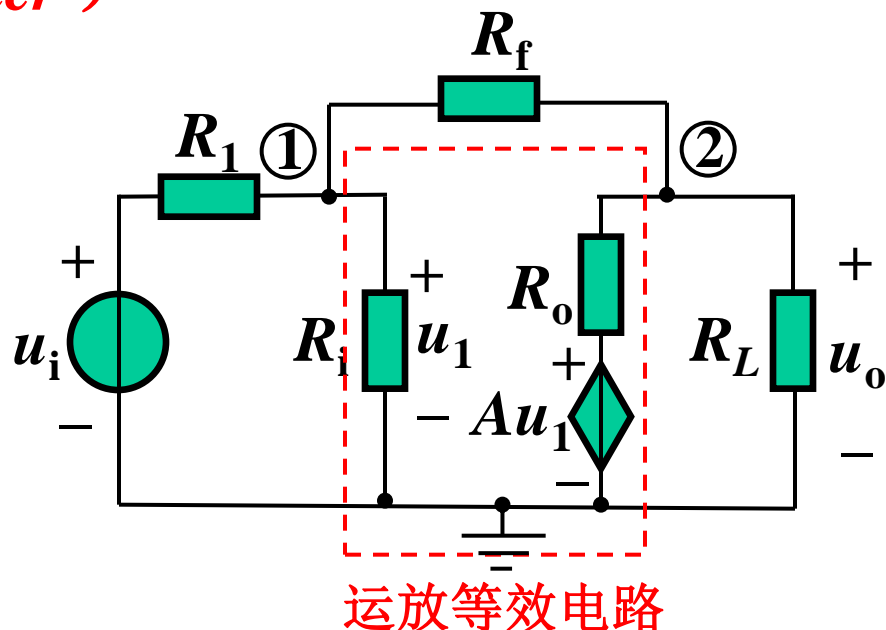
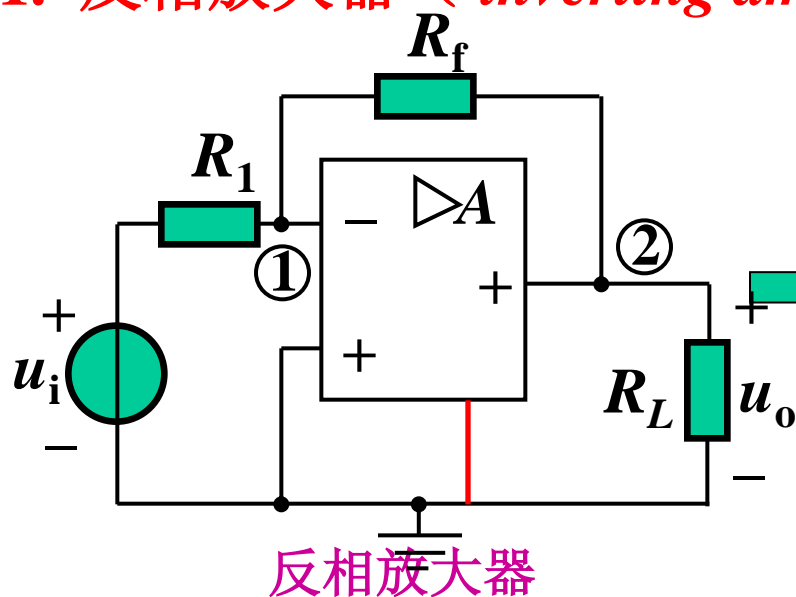
正反馈：净输入信号增加

净输入信号： $u_d = u_+ - u_-$

工作于
饱和区

二、运算放大器线性应用电路的分析

1. 反相放大器 (inverting amplifier)



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

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

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

以节点对地的电压 u_{n1} 、 u_{n2} 为变量列节点的KCL方程（电阻用电导表示）：

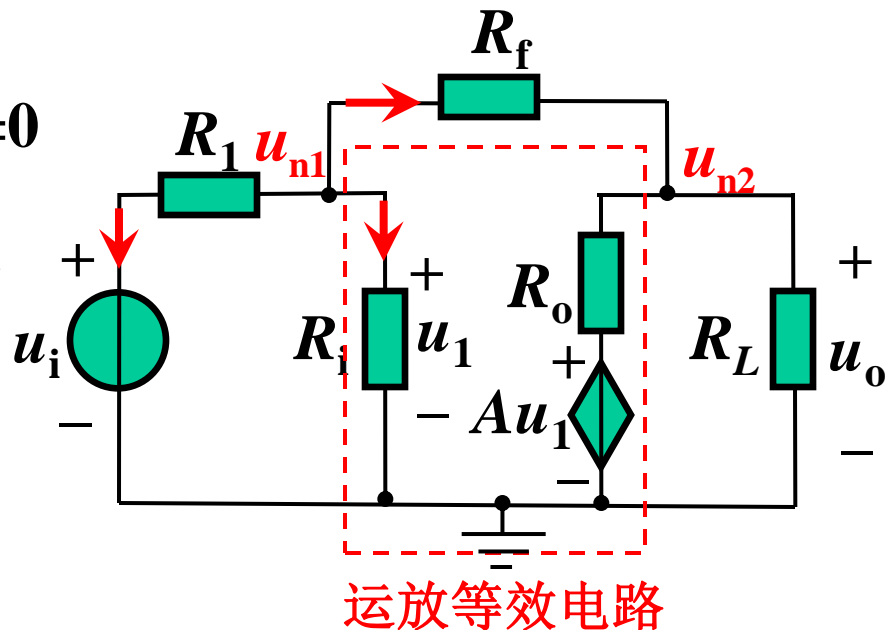
$$\begin{cases} G_1(u_{n1} - u_i) + G_i u_{n1} + G_f(u_{n1} - u_{n2}) = 0 \\ -G_f u_{n1} + (G_f + G_o + G_L)u_{n2} = G_o A u_1 \\ u_1 = u_{n1} \end{cases}$$

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

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



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

因A一般很大，上式分母中 $G_f (AG_o - G_f)$ 一项的值比 $(G_1 + G_i + G_f) \times (G_f + G_o + G_L)$ 要大得多。所以，后一项可忽略，得

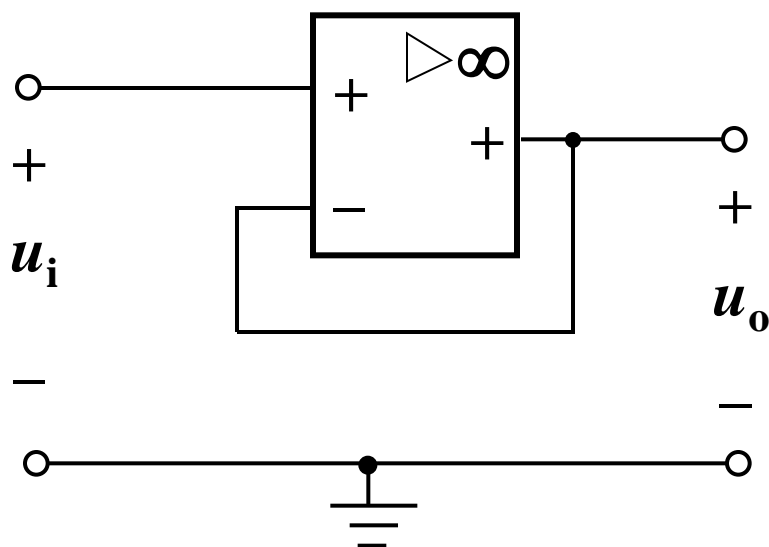
$$u_o \approx -\frac{G_1}{G_f} u_i = -\frac{R_f}{R_1} u_i \quad \begin{array}{l} u_o/u_i \text{只取决于反馈电阻} R_f \\ \text{与} R_1 \text{比值（反相比例器）} \end{array}$$

此近似结果可将运放看作理想情况而得到。

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，趋于饱和），一般工作在闭环状态，输出电压与A无关，由外电路决定。

2. 电压跟随器 (*voltage follower*)

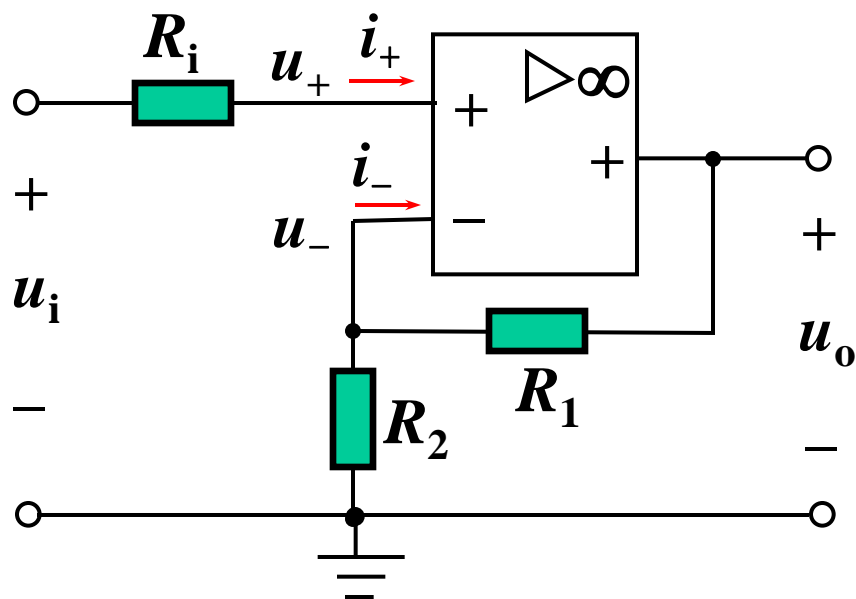


$$u_o = u_i$$

- 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。

4. 同相放大器 (*noninverting amplifier*)

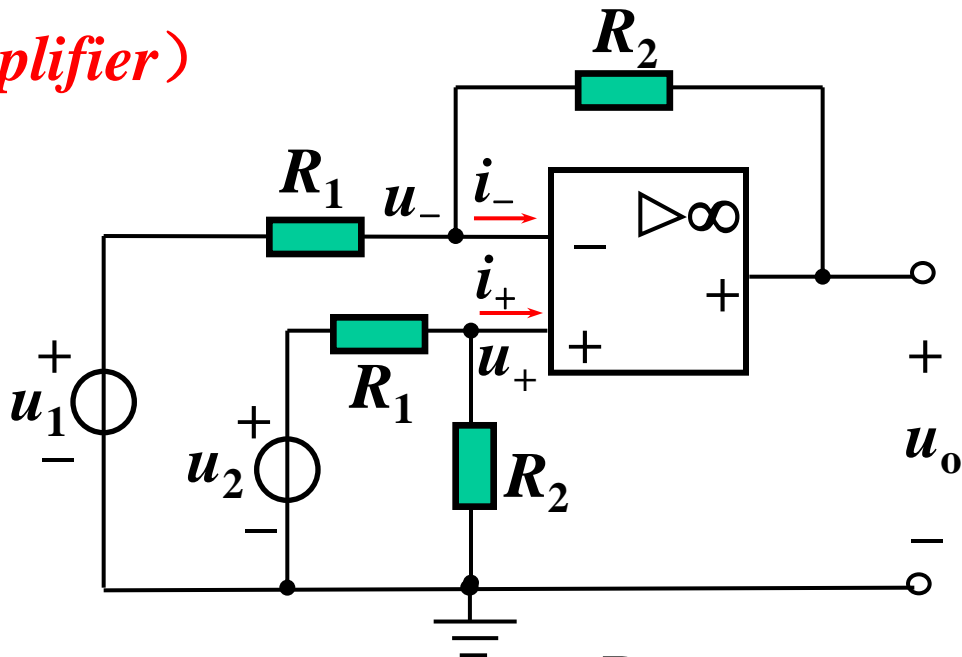


$$\begin{cases} u_+ = u_- = u_i \\ i_+ = i_- = 0 \end{cases}$$

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

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

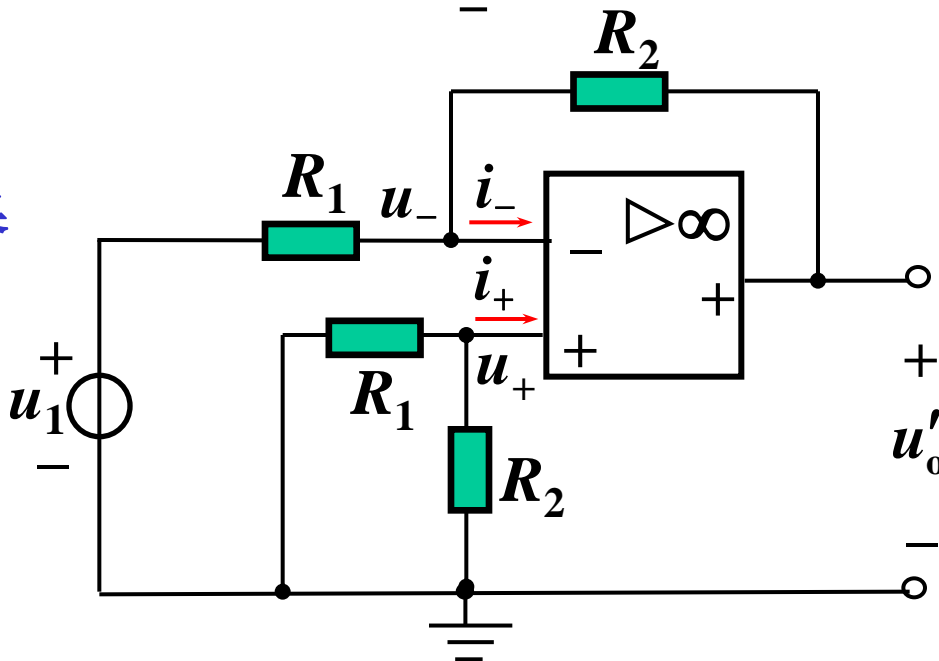
5. 减法器 (*difference amplifier*)



叠加计算:

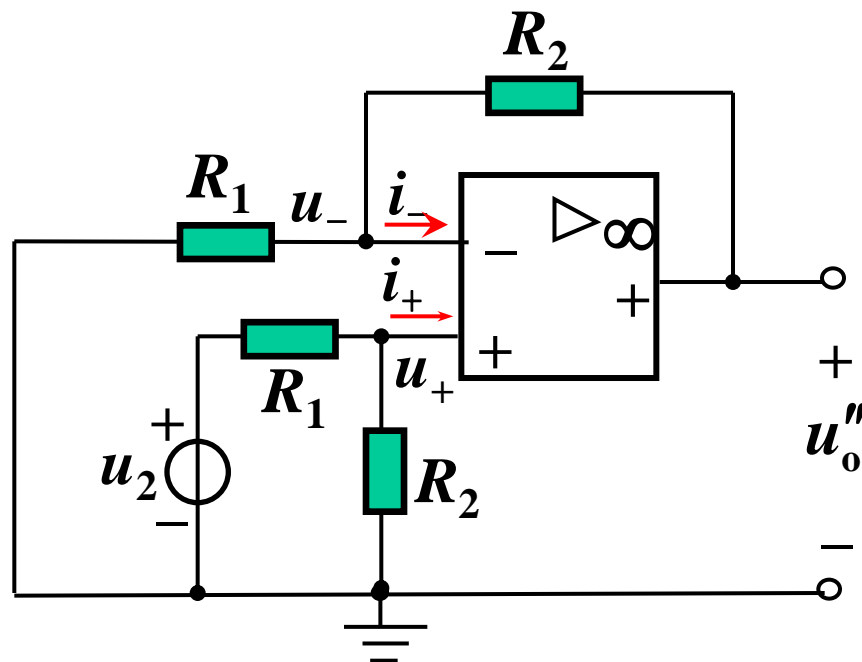
u_1 单独作用: 反相比例器

$$u'_o = -\frac{R_2}{R_1} u_1$$



u_2 单独作用：同相比值电路

$$\begin{aligned} u'_o &= \frac{R_1 + R_2}{R_1} u_+ \\ &= \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_2 \\ &= \frac{R_2}{R_1} u_2 \end{aligned}$$



u_1 、 u_2 共同作用时

$$u_o = u'_o + u''_o = -\frac{R_2}{R_1} u_1 + \frac{R_2}{R_1} u_2 = \frac{R_2}{R_1} (u_2 - u_1) \text{ 实现了减法运算}$$

作业

- 3.1, 2, 3~7 (波形) 二极管
- 3.9, 10, 11 稳压管
- 3.12, 13, 14, 15, 16 三极管工作状态
- 3.17, 18, 19, 22, 23 场效应管
- 3.29, 30, 31, 32 运算放大器
- 3.36, 37, 39 (6, 7) 数电基础