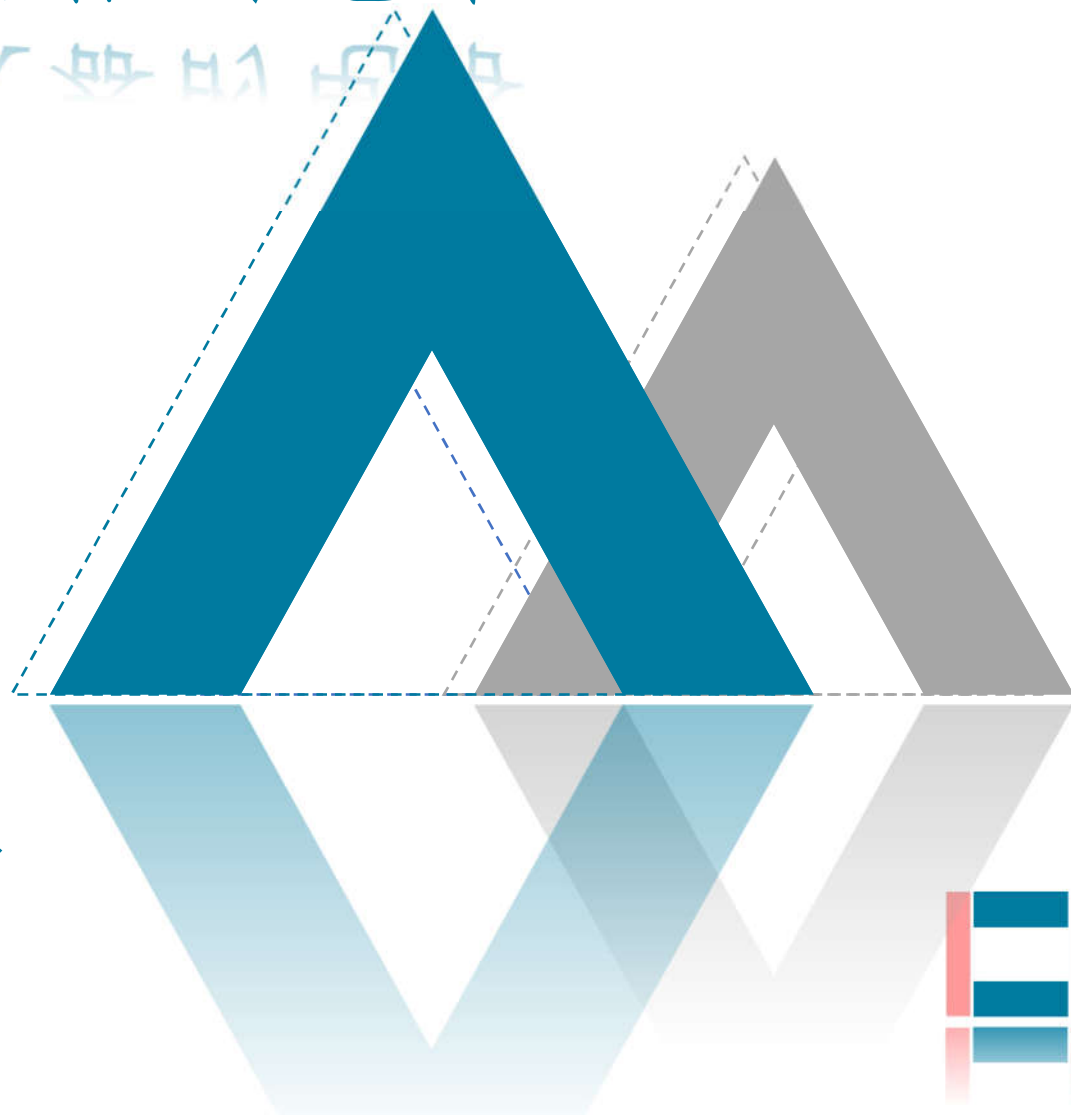


含有运算放大器的电路

第17章

主讲人：邹建龙

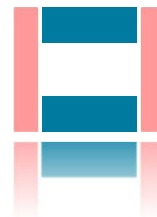
时 间： 年 月 日





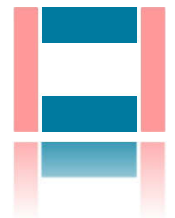
17 含有运算放大器的电路——主要内容

- 引言
- 17.1 运算放大器
- 17.2 理想运算放大器
- 17.3 含理想运算放大器电路的求解方法
- 17.4 运算放大器的应用
- 小结





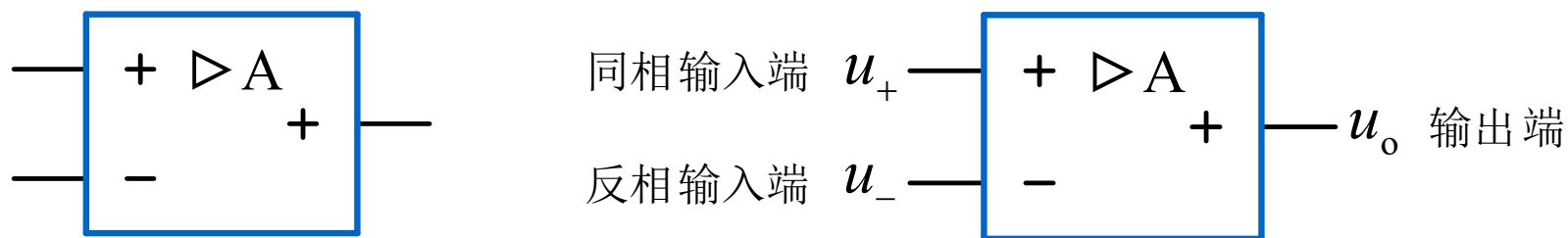
17 含有运算放大器的电路——引言



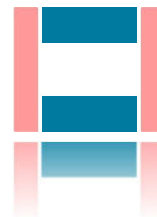
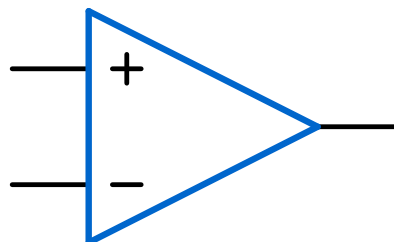
17.1 运算放大器

运算放大器的定义：

运算放大器，简称运放，是将晶体管、电阻、电容等电路元件集成到一起的**集成电路**。运算放大器的图形符号如图所示。



以上是国家标准规定的运算放大器电路图形符号，在实际中，还有另外一种运放的图形符号。本课程采用国家标准的符号。

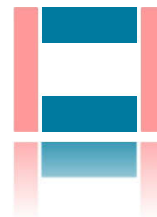
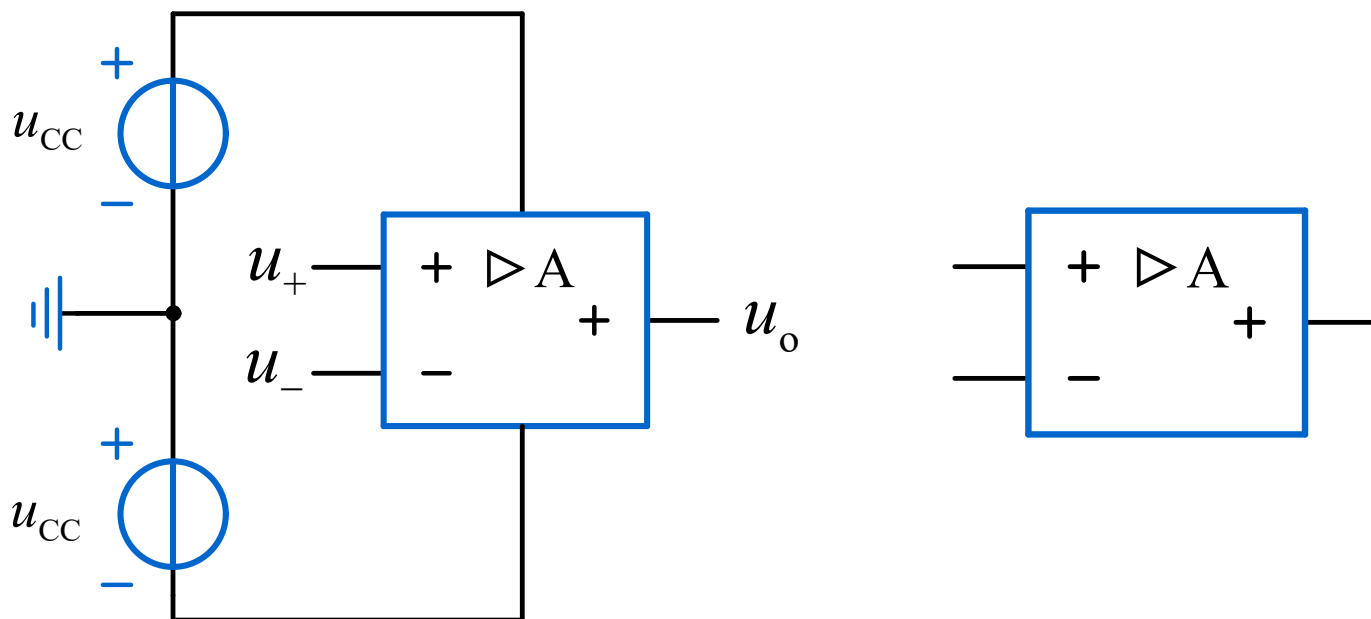


17.1 运算放大器

运算放大器的特性

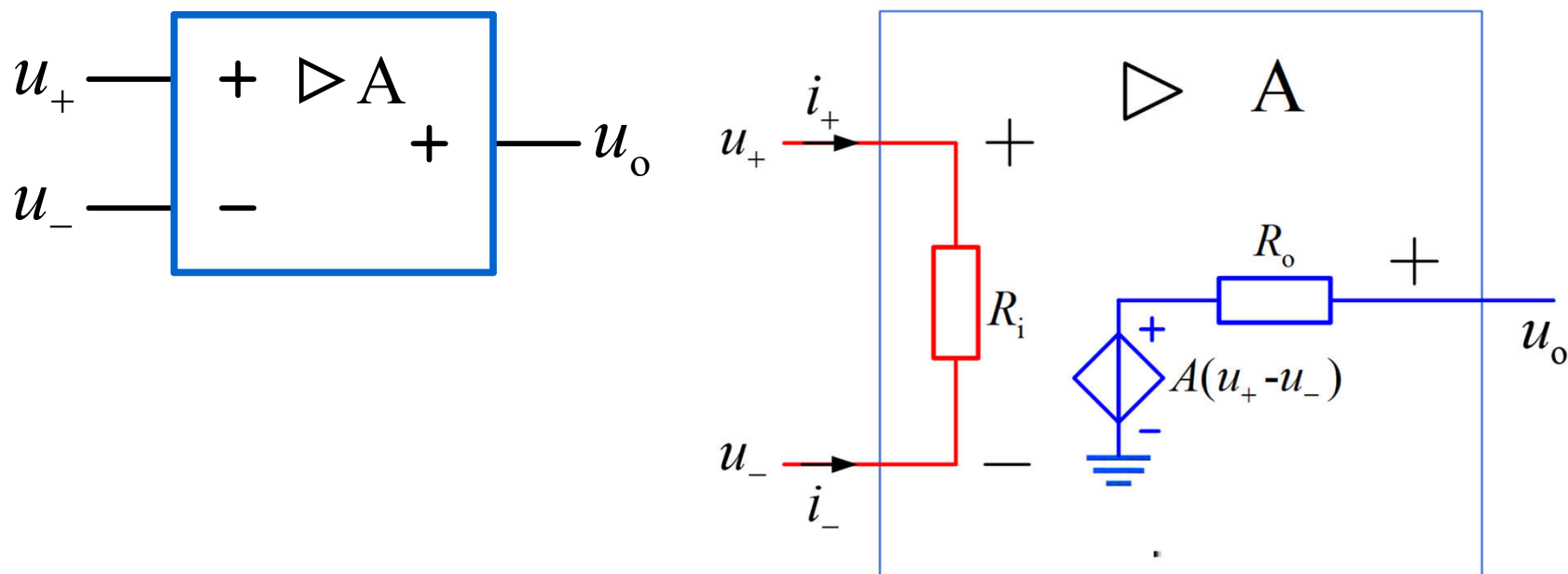
运算放大器是有源电路元件，其自身需要电源供电。由于电源提供功率，运算放大器可以实现信号放大。

运放的供电电源使得运放看起来比较复杂，因此通常将电源省略。



17.1 运算放大器

运算放大器的特性——电路模型

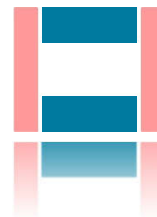


R_i 为输入电阻，一般在1 M Ω

A 为放大倍数，一般在100000以上

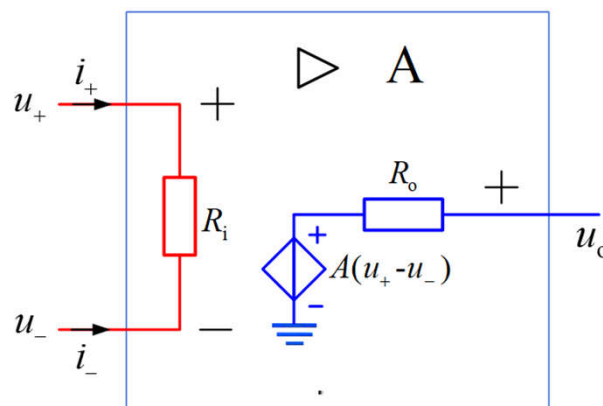
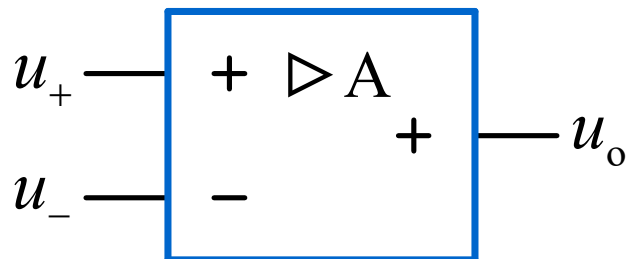
R_o 为输出电阻，近似可以认为是零

$$u_o = A(u_+ - u_-)$$



17.1 运算放大器

运算放大器的特性——输入输出特性



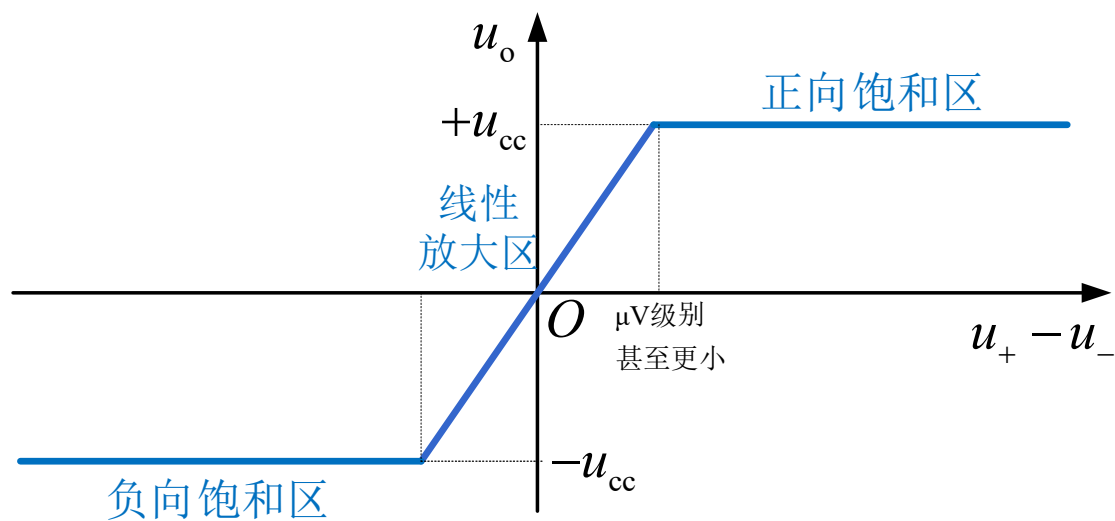
$$u_o = A(u_+ - u_-)$$

不是永远成立

运放输出电压

无法超过

供电电源电压

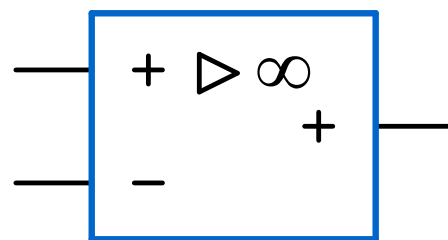
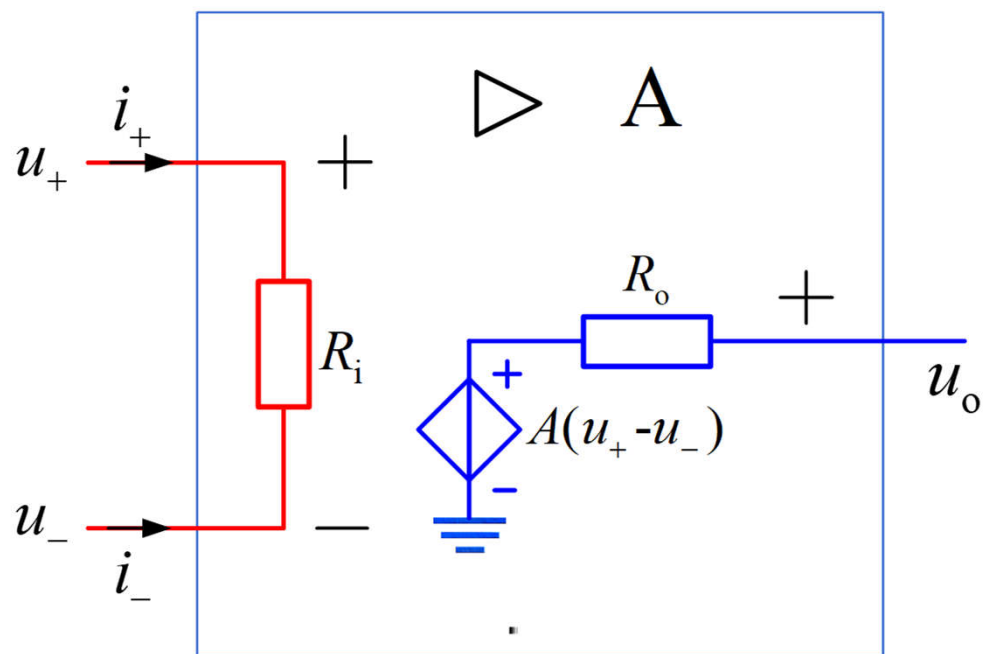


17.2 理想运算放大器

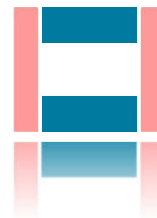
理想运算放大器的定义

当图示运算放大器的
等效电路模型满足
以下三个条件时，
称为理想运算放大器：

- 输入电阻 R_i 无穷大
- 放大倍数 A 无穷大
- 输出电阻 R_o 为零



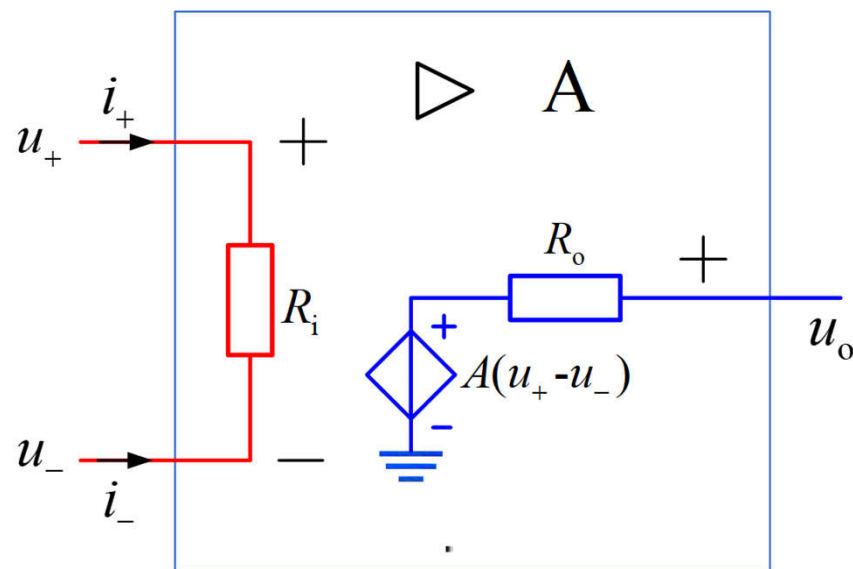
理想运算放大器的图形符号



17.2 理想运算放大器

理想运算放大器的

“虚断”和“虚短”特性



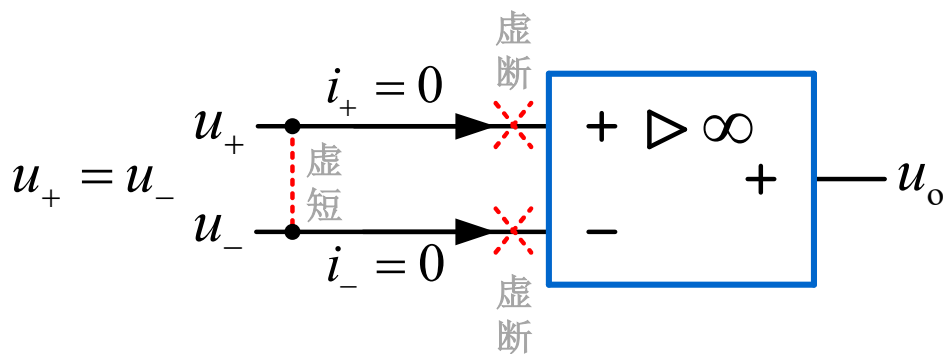
线性区: $u_o = A(u_+ - u_-)$

由输入电阻 R_i 无穷大, 可以推出 $i_+ = -i_- \approx 0$ (虚断)

当运放工作在线性区时, 由放大倍数 A 无穷大, 输出电阻 R_o 为零, 可以推出

$(u_+ - u_-) = \text{无穷小}$

$u_+ \approx u_-$ (虚短)



17.2 理想运算放大器

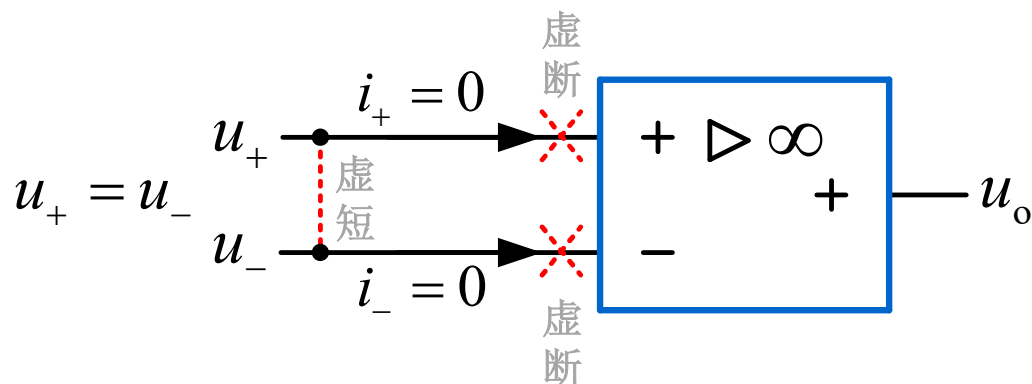
含理想运算放大器电路的求解方法（三步）

第一步：根据“虚断”和“虚短”示意图，在电路中所有运放的输入端完整地标记出“虚断”和“虚短”。

第二步：对电路中运放的输入端列写KCL方程。

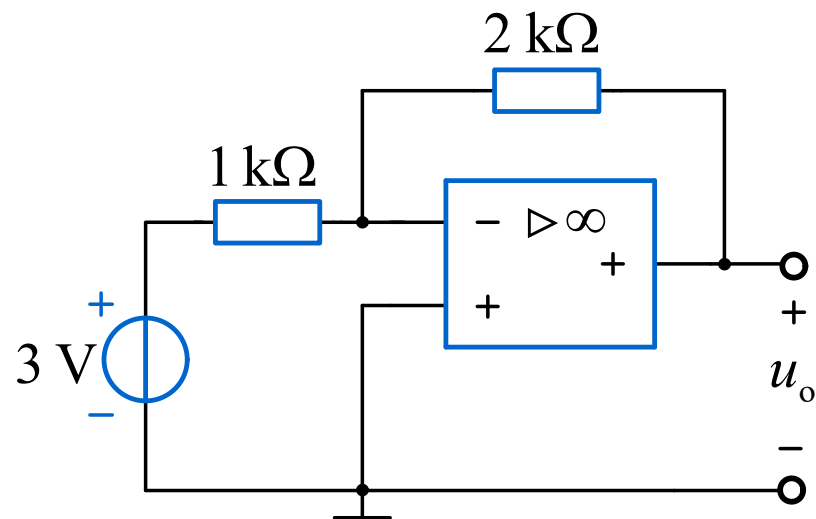
（千万注意运放输出端电流可能不等于零，不能用虚断！）

第三步：求解KCL方程，得到输出电压。



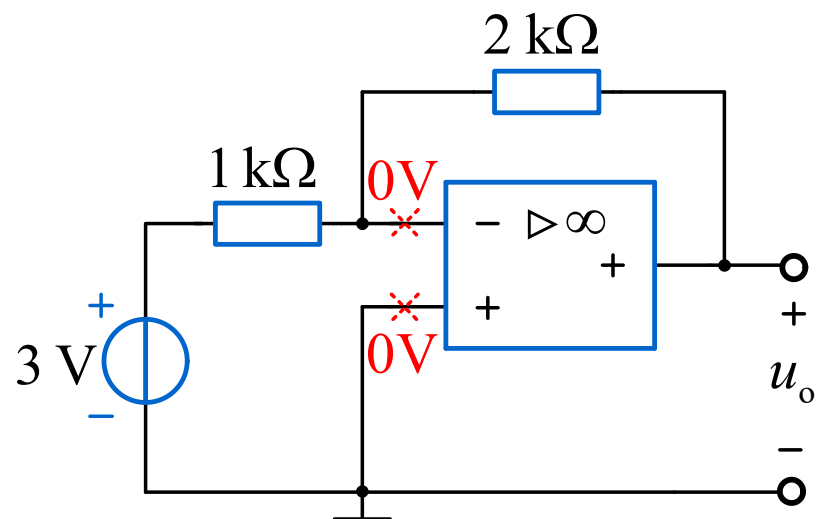
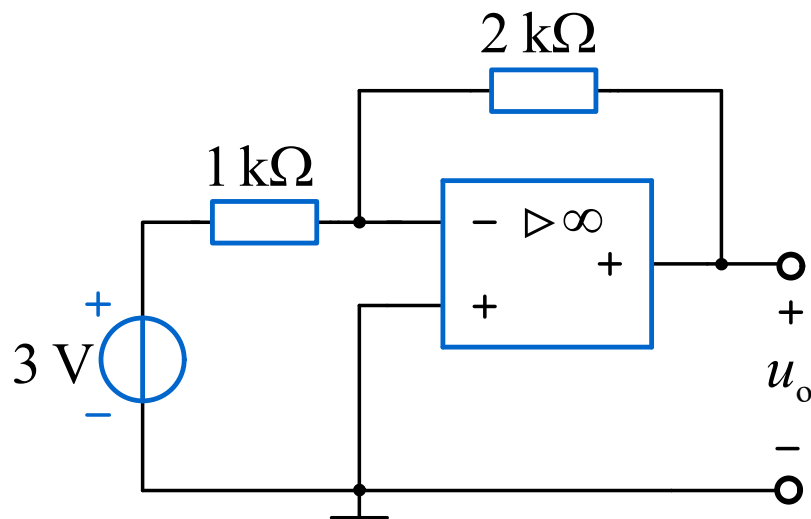
17.2 理想运算放大器——求解

例题1 (基础) 求 u_o



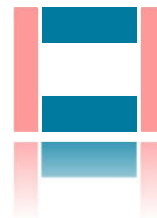
17.2 理想运算放大器——求解

例题1 (基础) 求 u_o



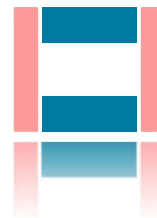
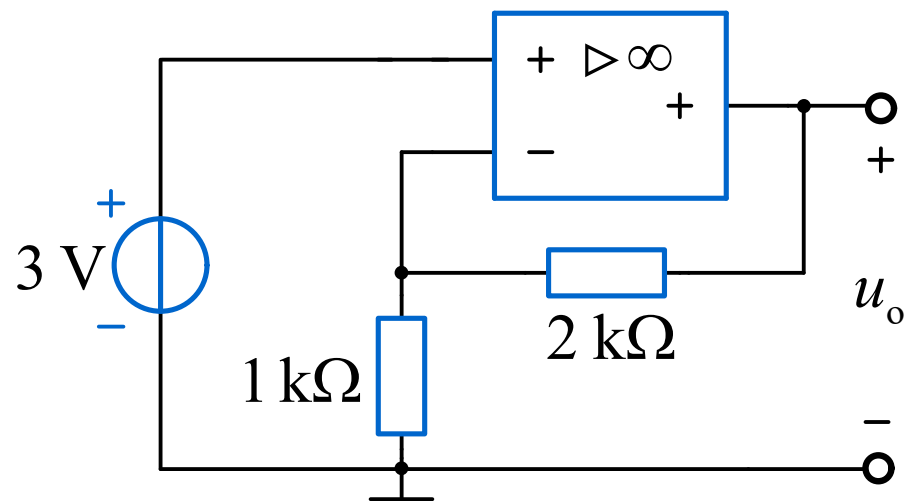
$$\frac{3 - 0}{1} = \frac{0 - u_o}{2}$$

$$u_o = -6 \text{ V}$$



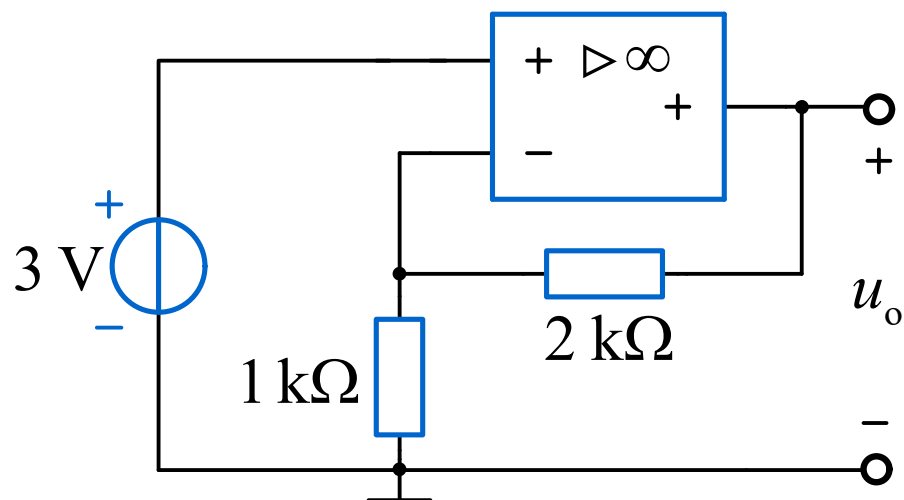
17.2 理想运算放大器——求解

同步练习题1（基础） 求 u_o



17.2 理想运算放大器——求解

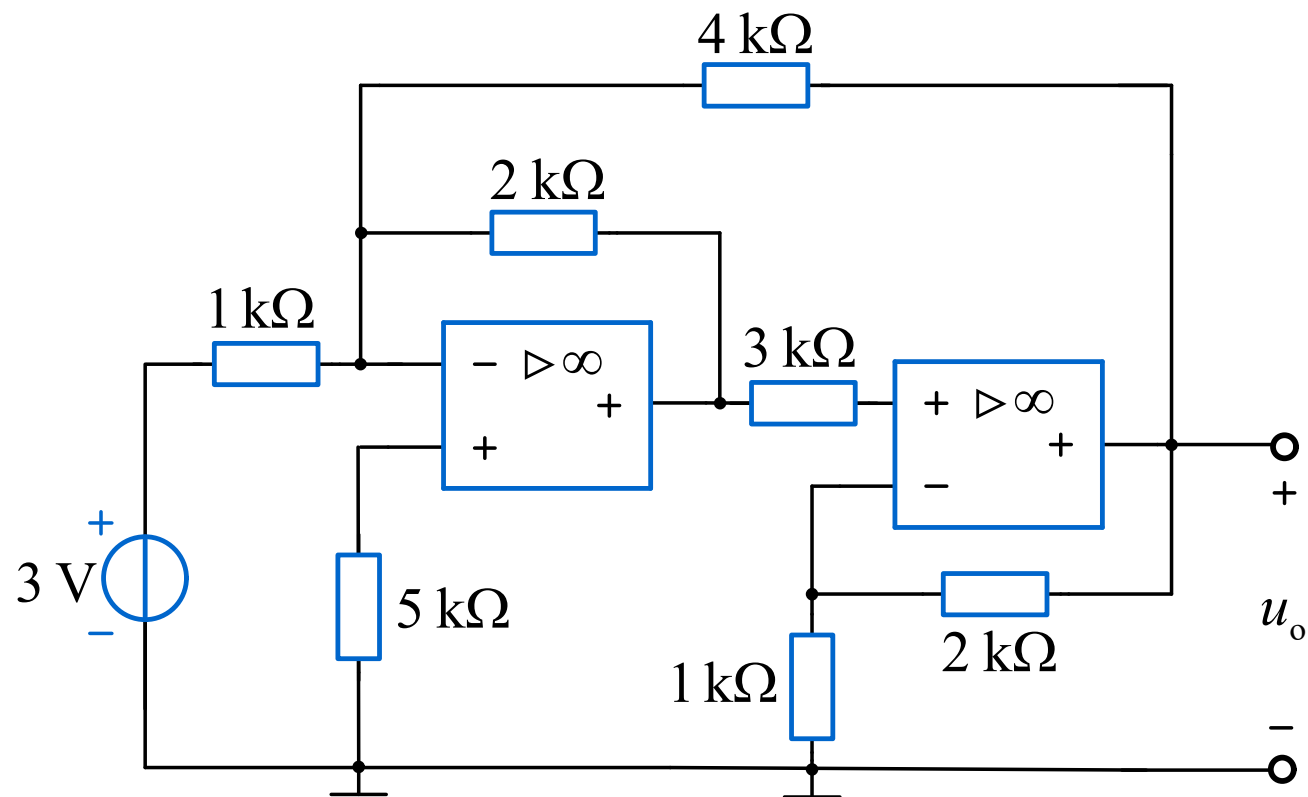
同步练习题1（基础） 求 u_o



答案: $u_o = 9 \text{ V}$

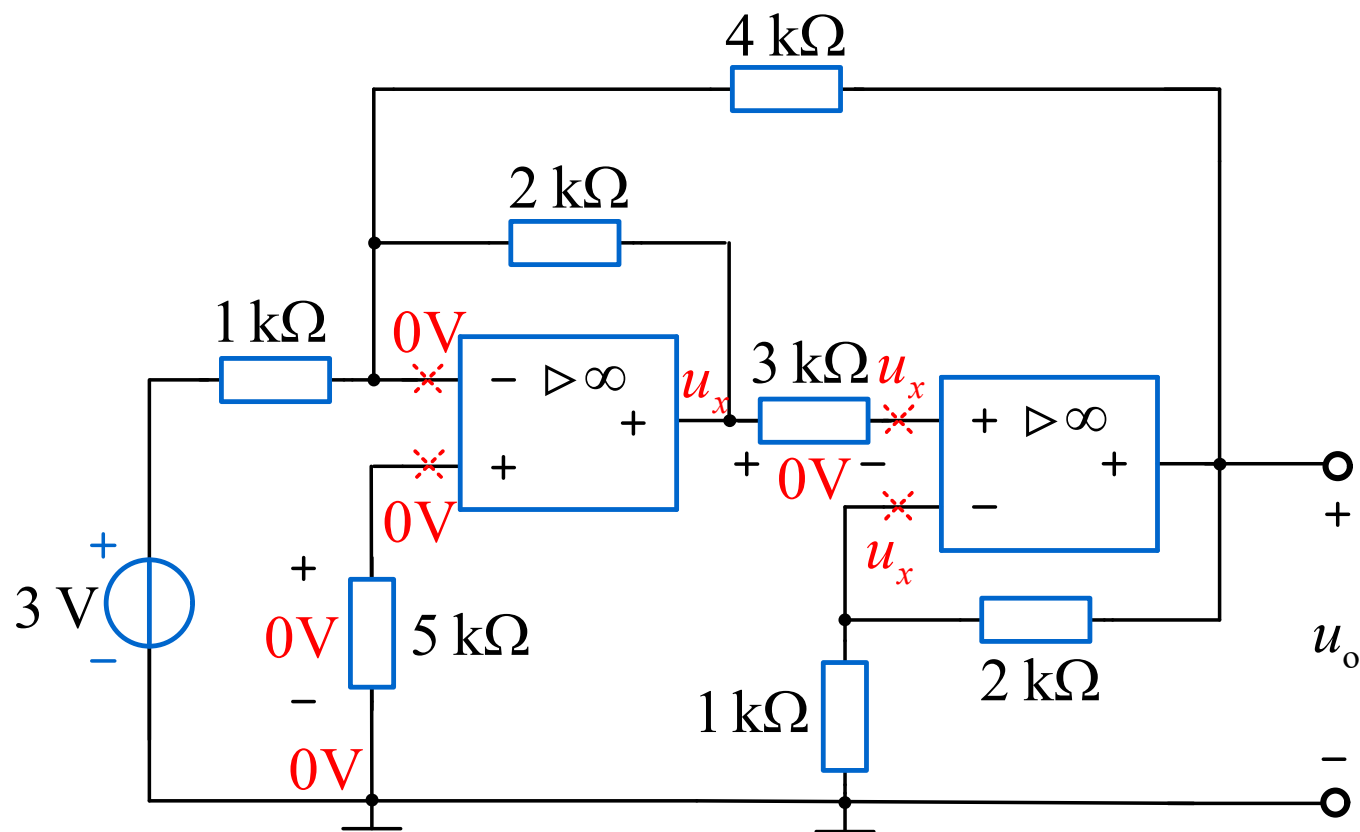
17.2 理想运算放大器——求解

例题2（提高） 求 u_o



17.2 理想运算放大器——求解

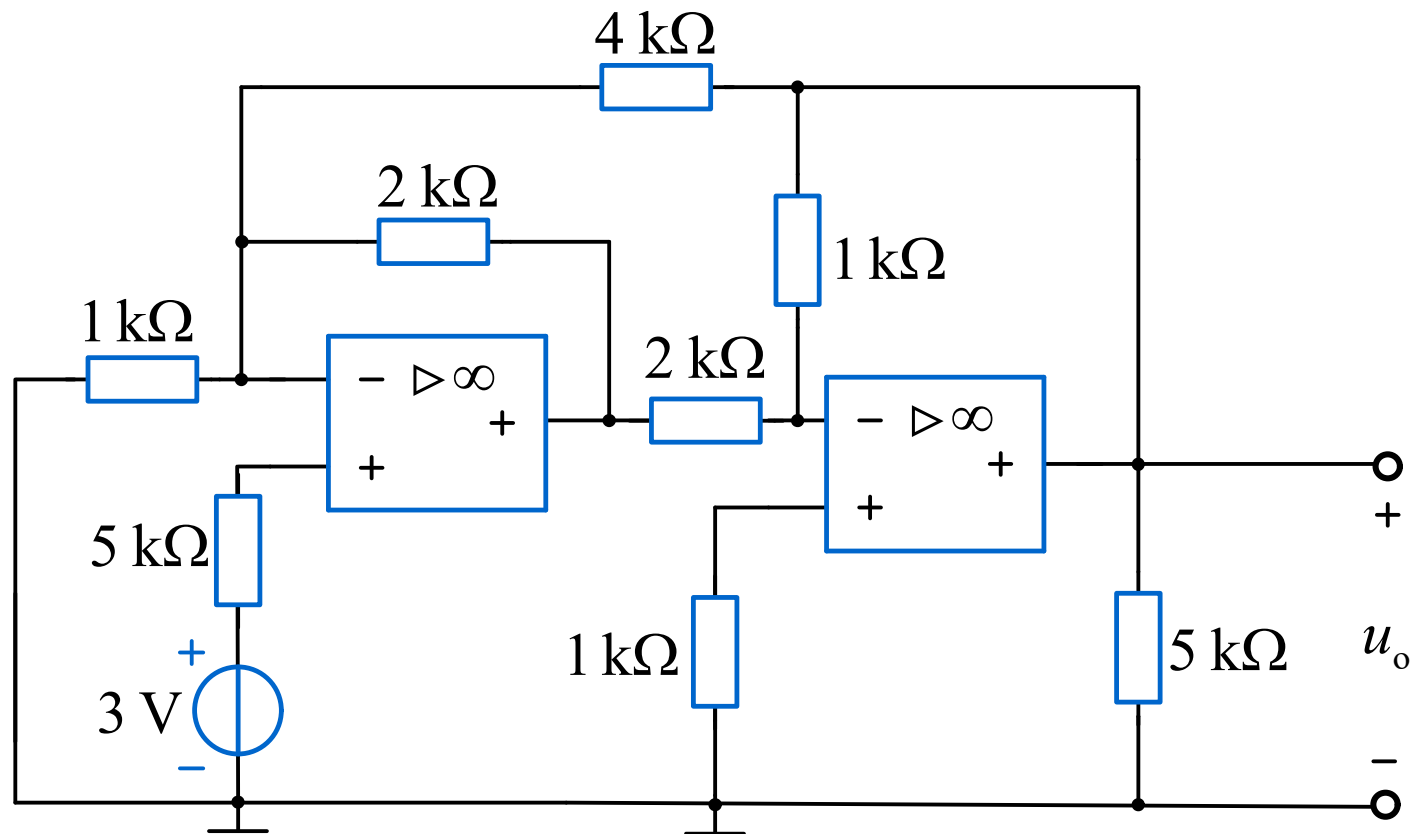
例题2 (提高) 求 u_o



$$\frac{3-0}{1} = \frac{0-u_o}{4} + \frac{0-u_x}{2} \quad \frac{0-u_x}{1} = \frac{u_x-u_o}{2} \quad u_o = -7.2 \text{ V}$$

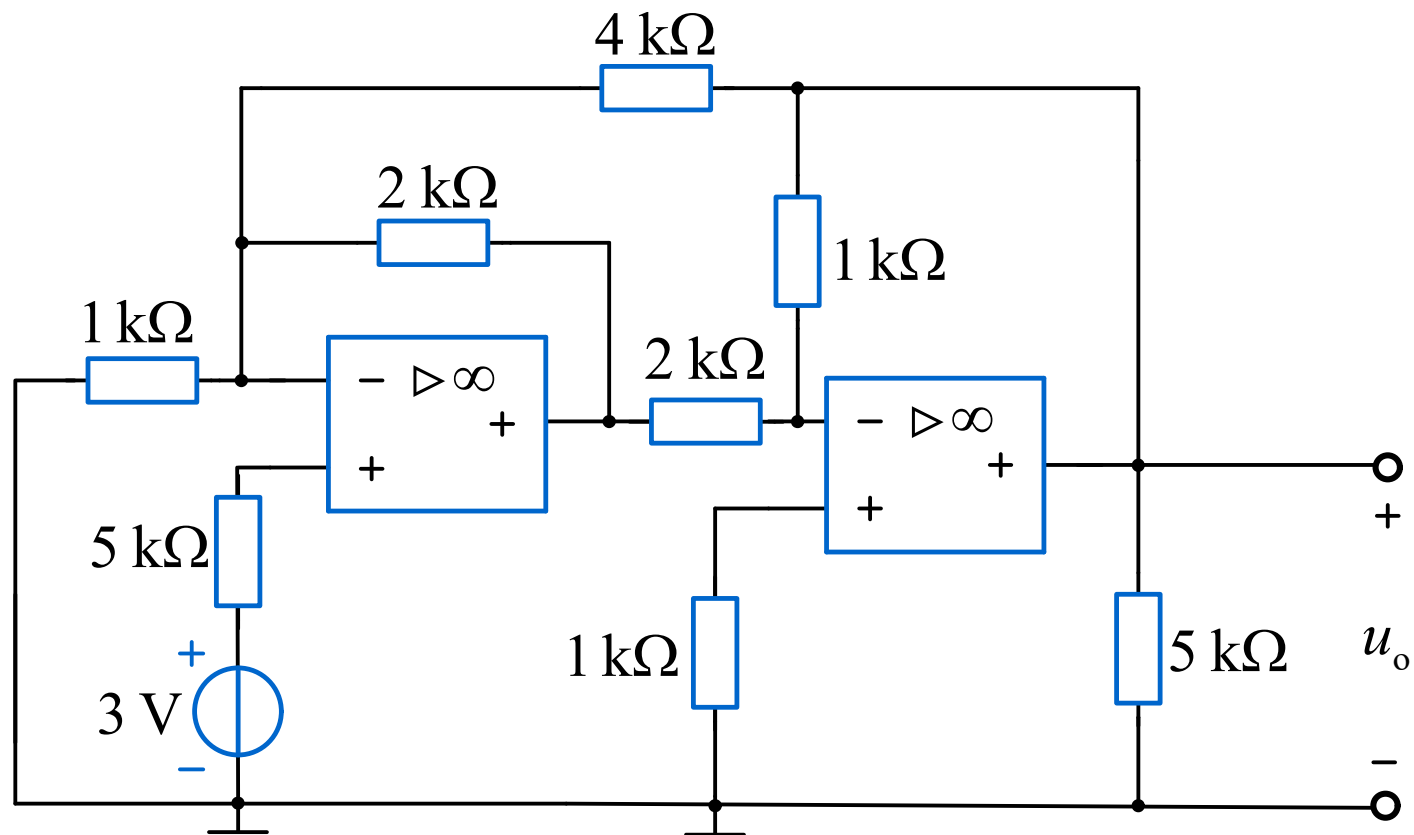
17.2 理想运算放大器——求解

同步练习题2 (提高) 求 u_o



17.2 理想运算放大器——求解

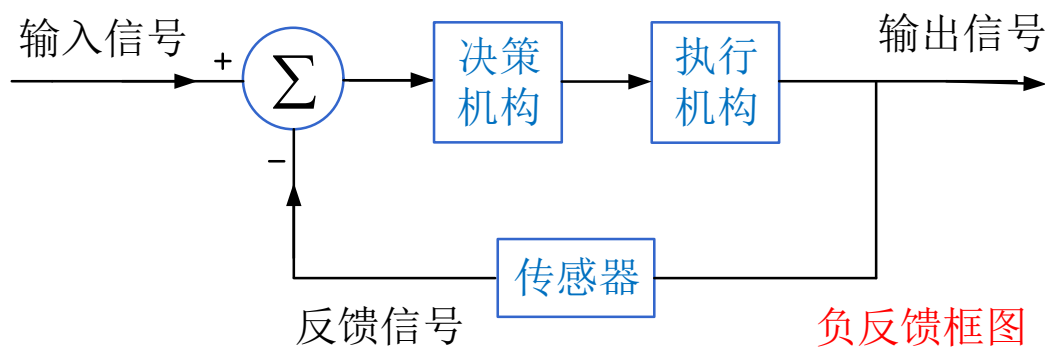
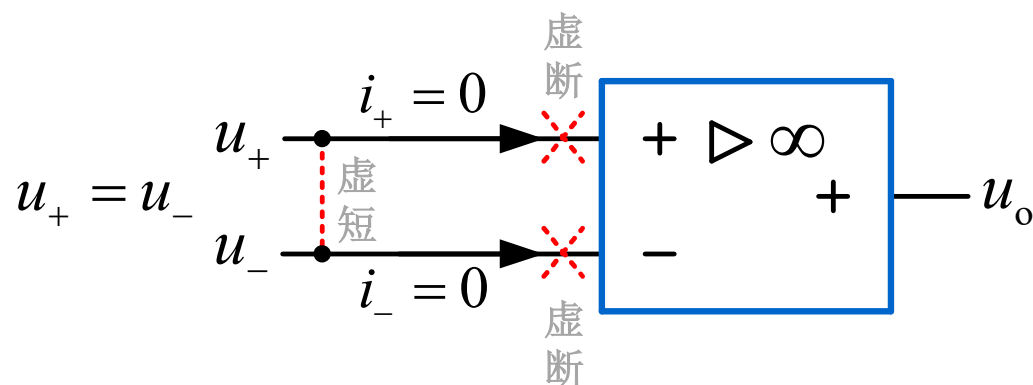
同步练习题2 (提高) 求 u_o



答案: $u_o = -7 \text{ V}$

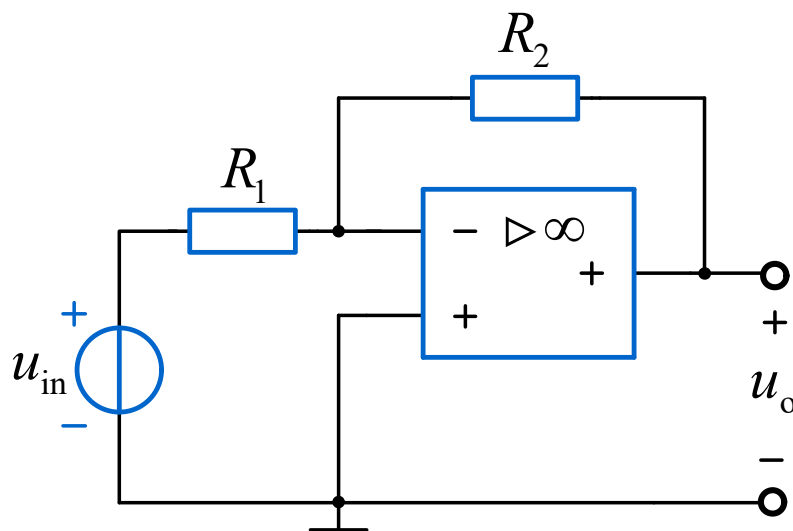
17.3 由运算放大器构成的运算电路

应用运放的“虚断”和“虚短”特性，结合负反馈等技术，可以构成各种广泛应用于实际的运算电路，例如比例电路、加减法电路、微积分电路等。



17.3 由运算放大器构成的运算电路

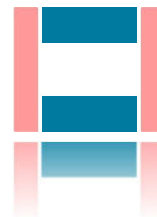
基于运放构成反比例电路



$$u_+ = u_- = 0$$

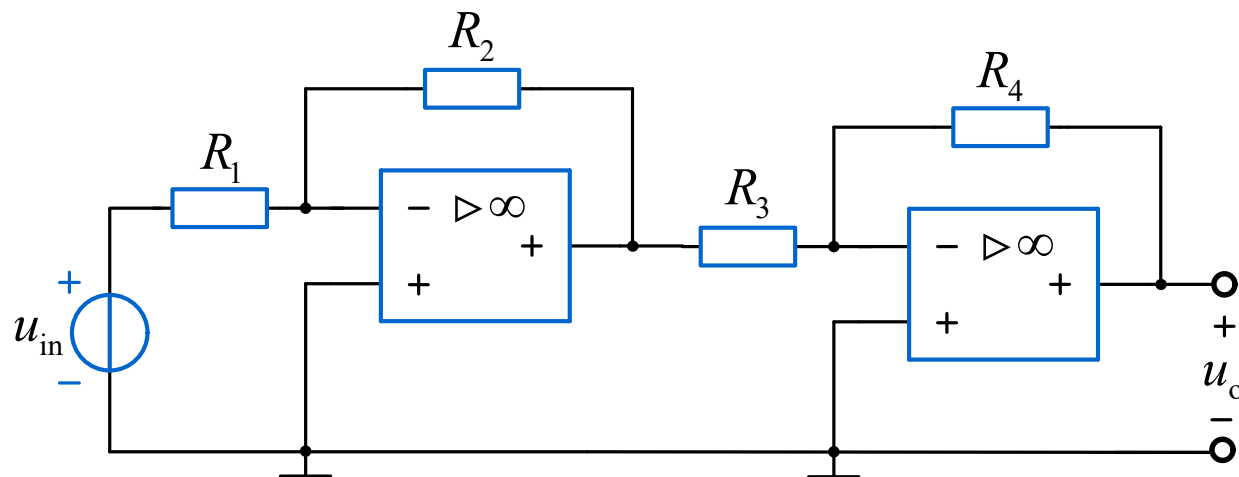
$$\frac{u_{\text{in}} - 0}{R_1} = \frac{0 - u_o}{R_2}$$

$$u_o = -\frac{R_2}{R_1} u_{\text{in}}$$

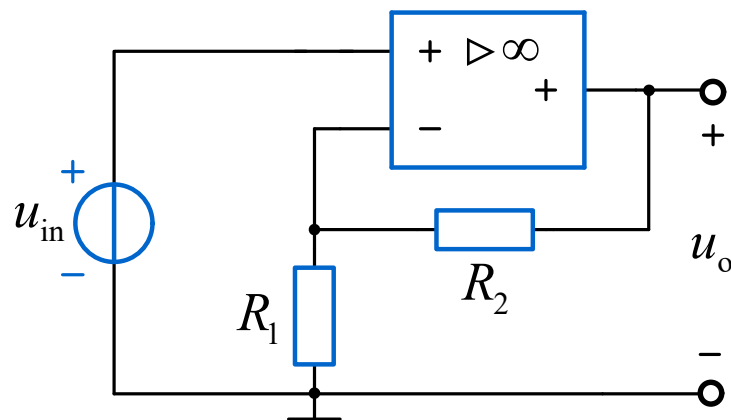


17.3 由运算放大器构成的运算电路

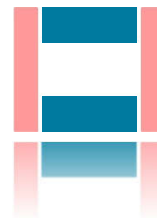
基于运放构成同相比例电路



$$u_o = \frac{R_2}{R_1} \times \frac{R_4}{R_3} u_{in}$$

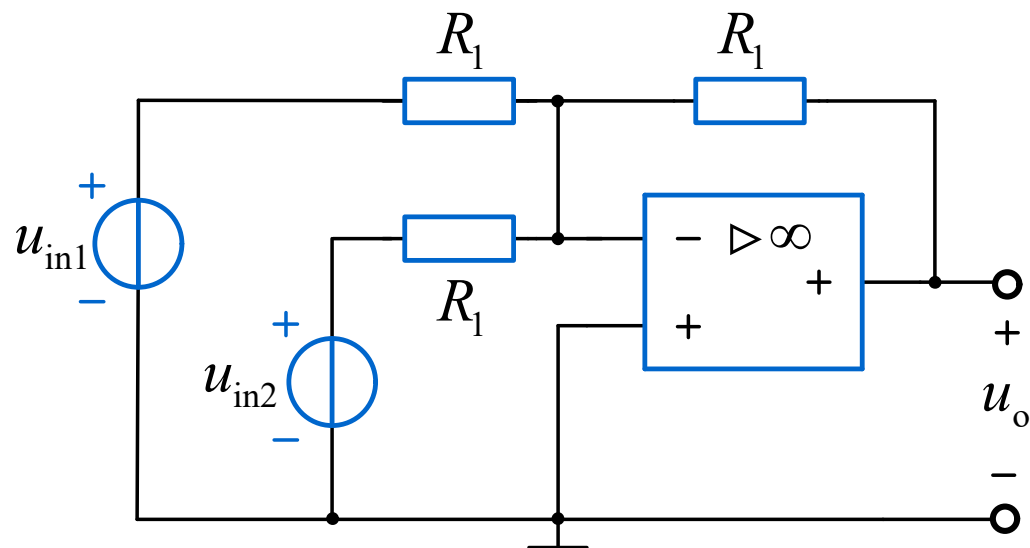


$$u_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} u_{in}$$

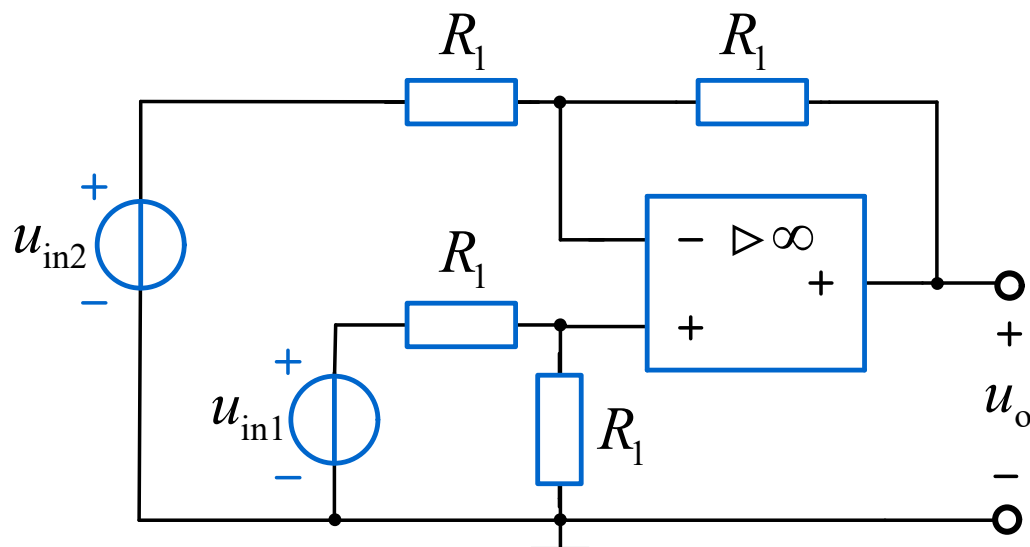


17.3 由运算放大器构成的运算电路

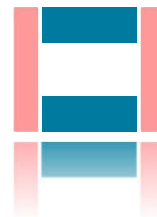
基于运放构成反相加法电路和减法电路



$$u_o = -(u_{in1} + u_{in2})$$

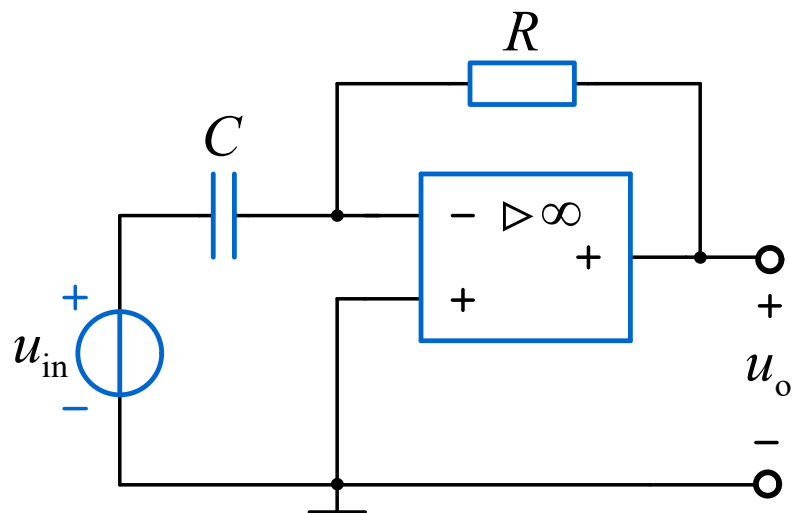


$$u_o = u_{in1} - u_{in2}$$



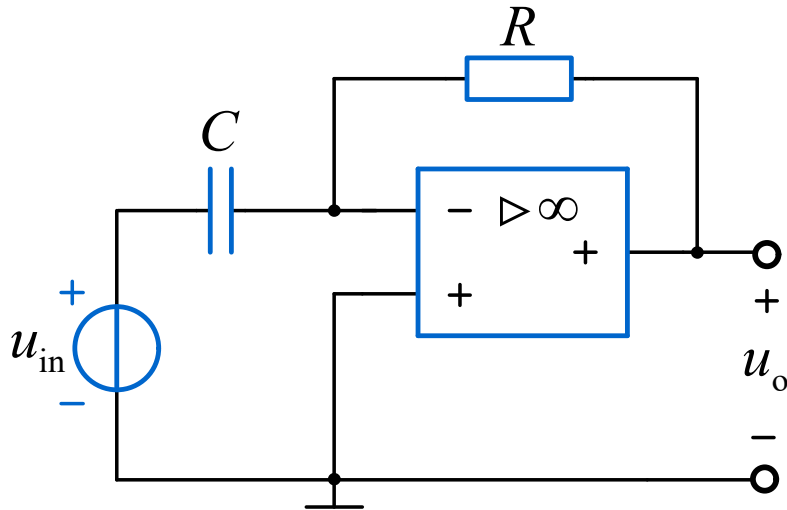
17.3 由运算放大器构成的运算电路

反相微分电路



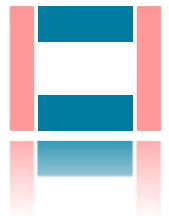
17.3 由运算放大器构成的运算电路

反相微分电路



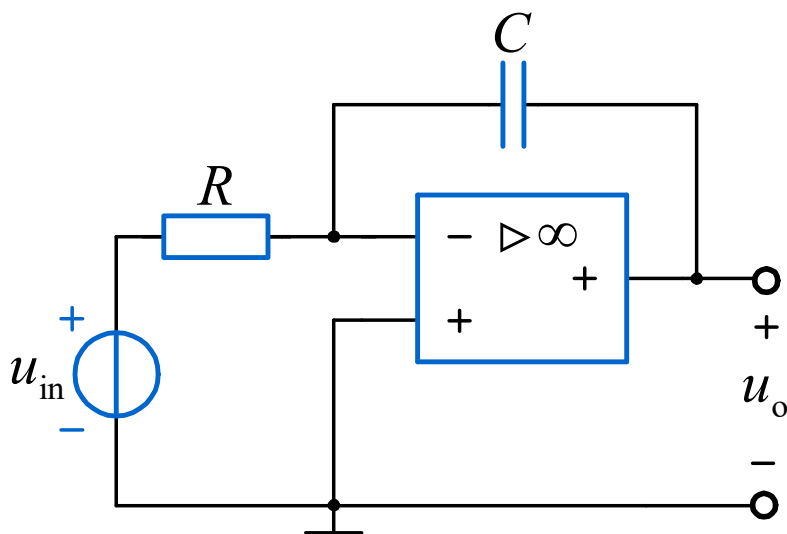
$$C \frac{d(u_{in} - 0)}{dt} = \frac{0 - u_o}{R}$$

$$u_o = -RC \frac{du_{in}}{dt}$$

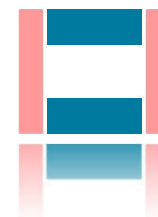


17.3 由运算放大器构成的运算电路

反相积分电路



$$u_o = -\frac{1}{RC} \int u_{in} dt$$



17.4 运算放大器的应用

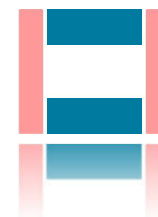
运放除了可以用于构成运算电路，还有很多其他应用。

这些应用也不仅限于依据“虚断”和“虚短”，

也不仅限于采用负反馈技术。

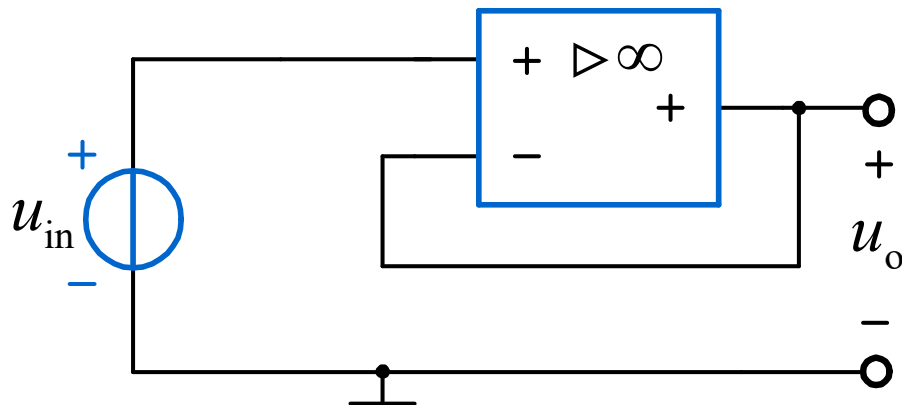
以下介绍4种运放的应用：

- 电压跟随器和限幅器
- 有源滤波器
- 负电阻
- 比较器

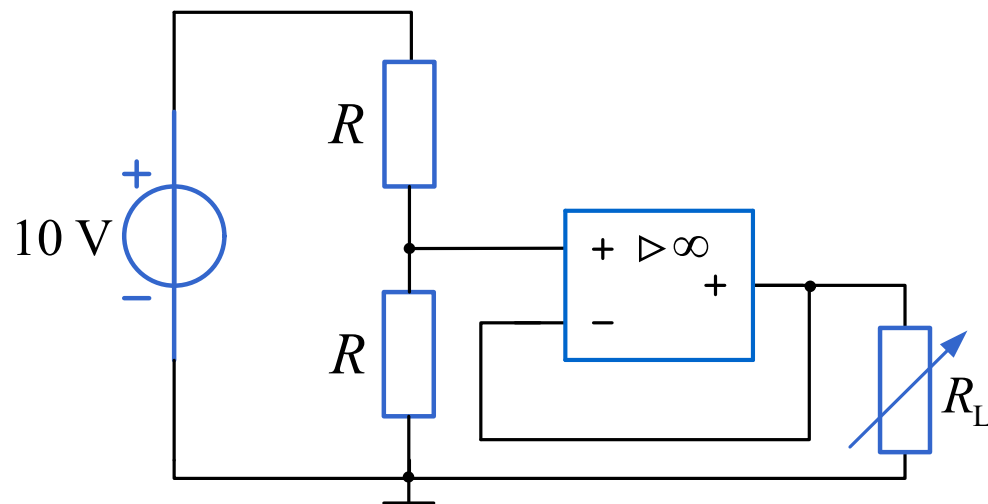


17.4 运算放大器的应用

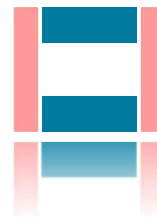
电压跟随器



电压跟随 $u_o = u_{in}$

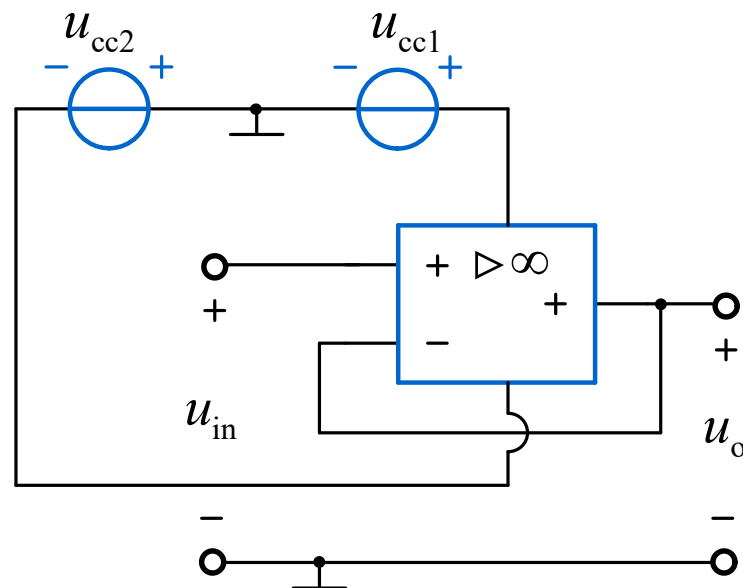


无论负载电阻如何变化，
负载电阻电压始终为5 V



17.4 运算放大器的应用

电压限幅器



如果输入电压 u_{in} 在供电电压范围，可以实现电压跟随 $u_o = u_{in}$

如果输入电压 u_{in} 超出供电电压范围，

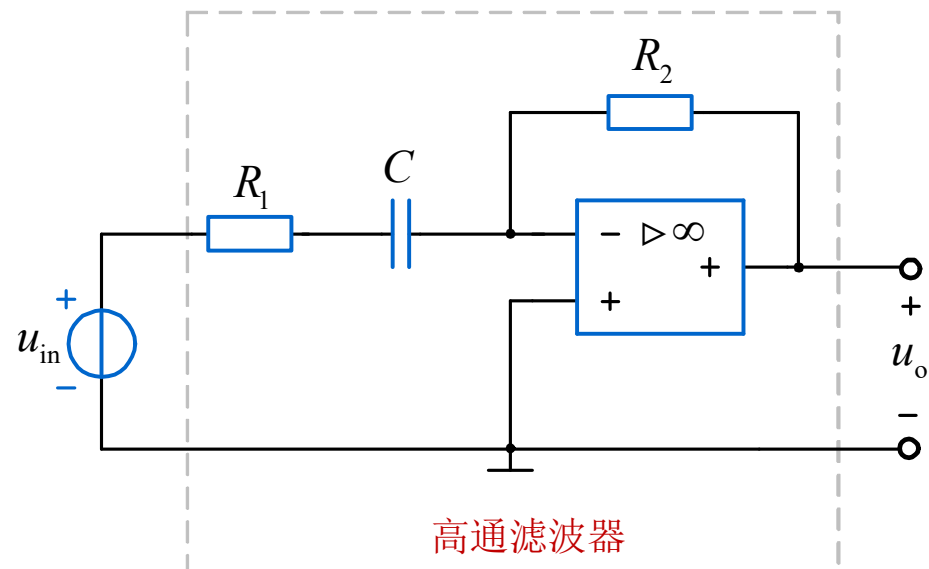
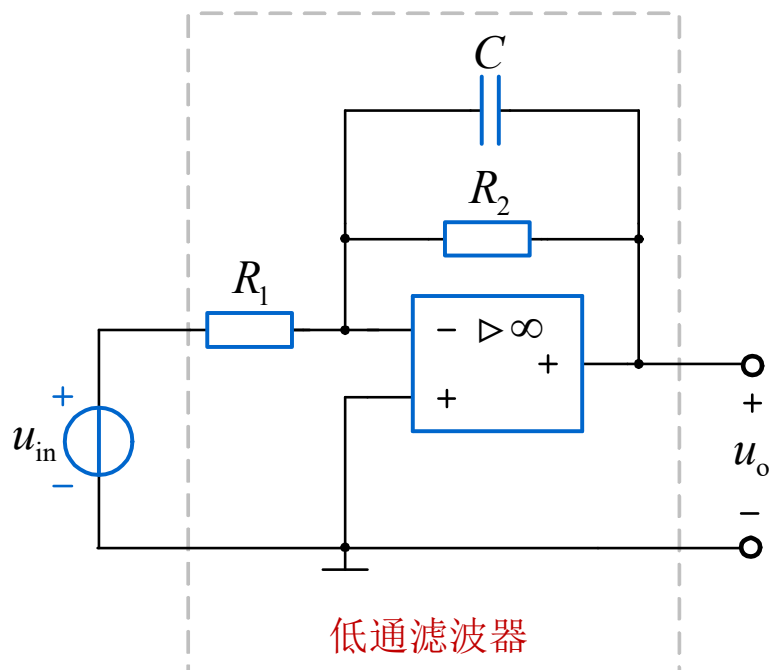
输出电压将无法继续跟随输入电压，

输出电压将饱和，并且不会超出供电电压范围，

从而起到电压限幅器的作用，对后面所接电路起到保护作用。

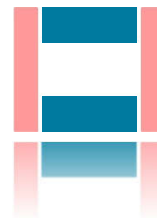
17.4 运算放大器的应用

有源滤波器



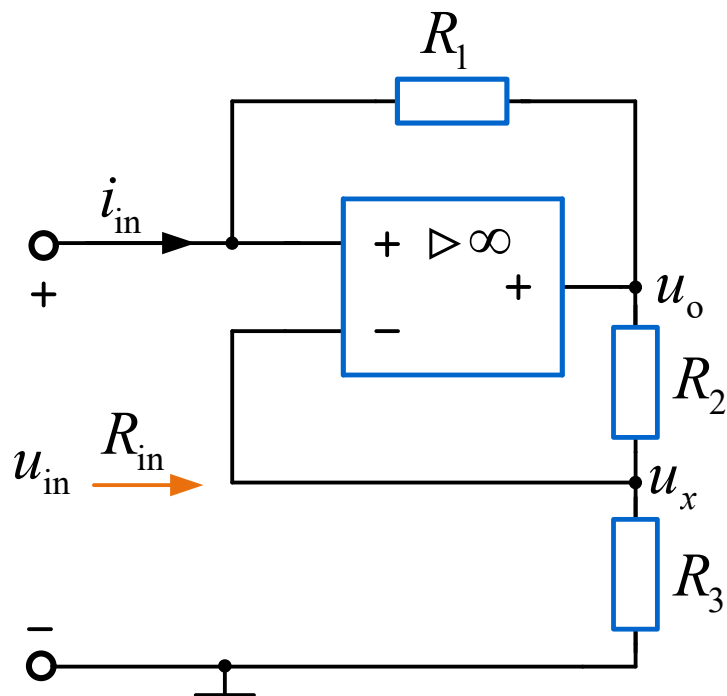
有源滤波器只需要电容，不需要电感

有源滤波器可以实现功率放大。



17.4 运算放大器的应用

负电阻



$$u_x = u_{in}$$

$$u_x = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_o$$

$$i_{in} = \frac{u_{in} - u_o}{R_1}$$

$$R_{in} = \frac{u_{in}}{i_{in}} = -\frac{R_1 R_3}{R_2}$$

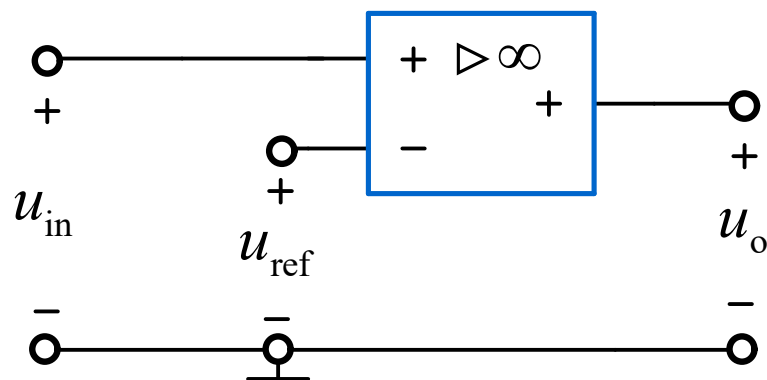
该电路既有负反馈，又有正反馈。

负反馈使电路工作在线性区。正反馈使电路工作在饱和区。

此处只分析运放工作在线性区的情况。

17.4 运算放大器的应用

比较器

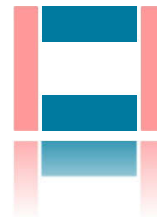


$u_{in} > u_{ref}, u_o = +u_{cc}$, 输出高电平

$u_{in} < u_{ref}, u_o = -u_{cc}$, 输出低电平

该电路没有反馈，处于开环工作状态。

比较器输出为高电平或低电平，广泛用于数字逻辑电路和电力电子控制电路等领域。



17 含有运算放大器的电路——小结

- 运算放大器是**有源电路元件**，需要电源供电才能工作
- 运算放大器可以实现**信号放大**
- 运放输出电压**有上下限**，不能超出供电电压范围
- 满足输入电阻无穷大、放大倍数无穷大、输出电阻为零的运算放大器称为**理想运算放大器**
- 理想运算如果工作在线性区，则具有“**虚断**”和“**虚短**”特性
- “虚断”指运放两个**输入端**的电流近似为零，永远成立
- “虚短”指运放两个**输入端**近似等电位，可近似认为短路
- **运放的输出端不具有“虚断”和“虚短”特性**
- 含理想运放电路求解的三个步骤：**虚短虚断、KCL、求解**
- 结合负反馈基础，基于运放可以构成各种**运算电路**
- 运放具备的各种神奇特性，使得运放在实际中**应用极为广泛**

感谢大家聆听

主讲人：邹建龙

时 间： 年 月 日

