第5章
含运算放大器的电路

第5章
含运算放大器的电路

目标： 1.了解实际运算放大器特性和电路模型。

2.理解理想运放特性。

3.熟练分析含理想运放的电路。

4.了解基本运算电路的设计。

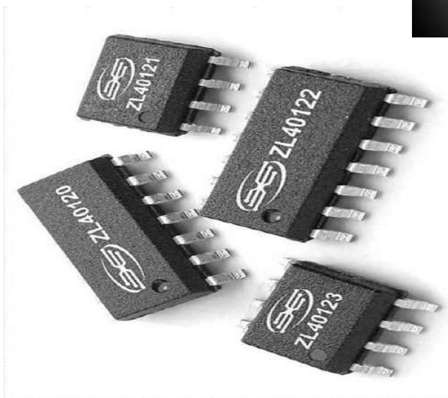
难点： 运算电路设计。

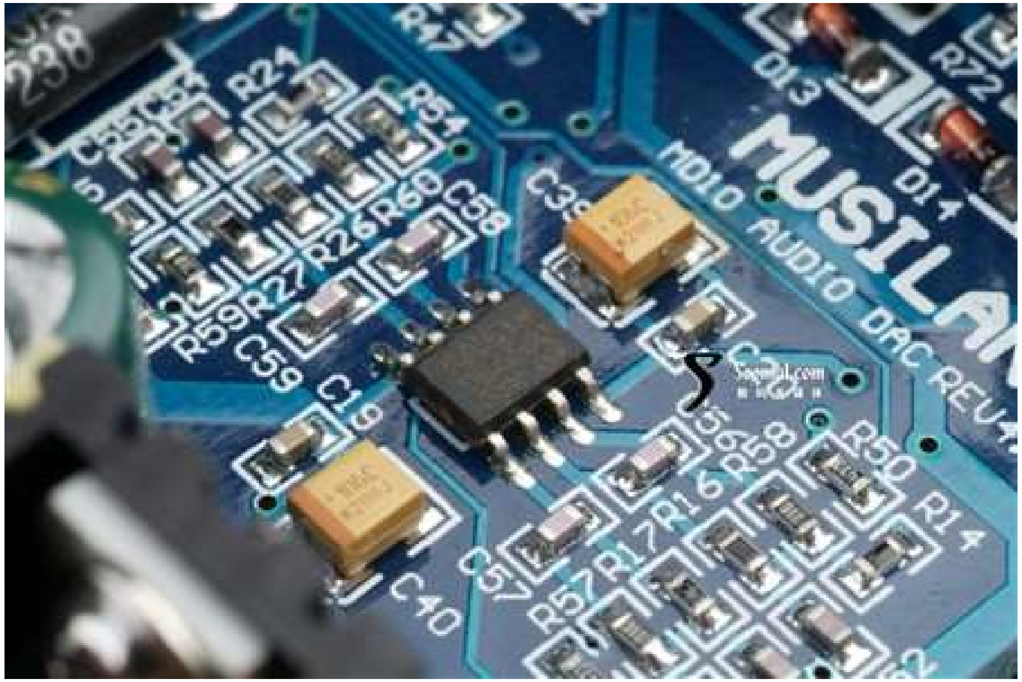
讲授学时： 1.5 **讨论学时：** 0.5

5.1集成运算放大器 operational amplifiers

•有源电子器件，由电阻、电容、三极管实现

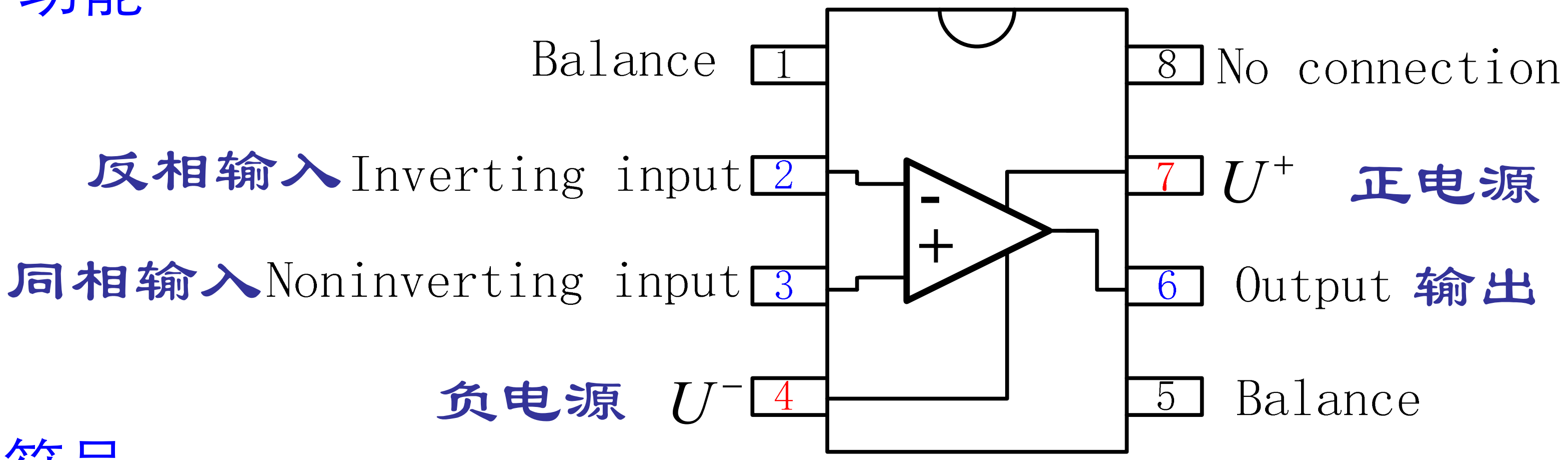
•掌握其端口特性



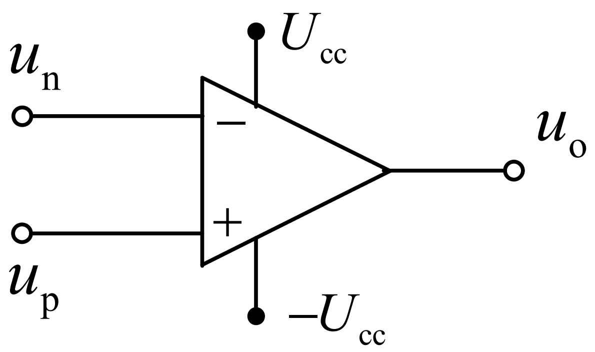


5.1集成运算放大器 operational amplifiers

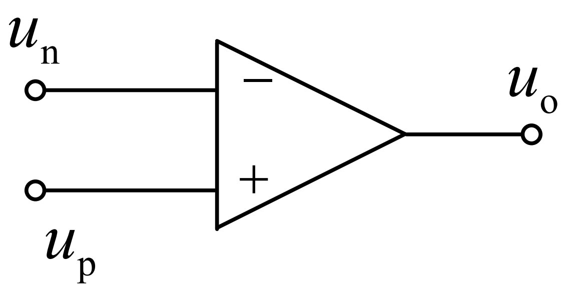
1.端子功能



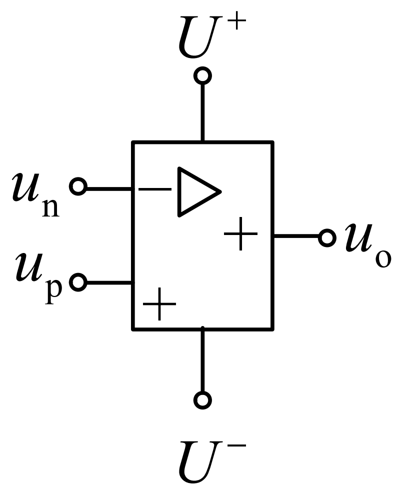
2.电路符号



(a)

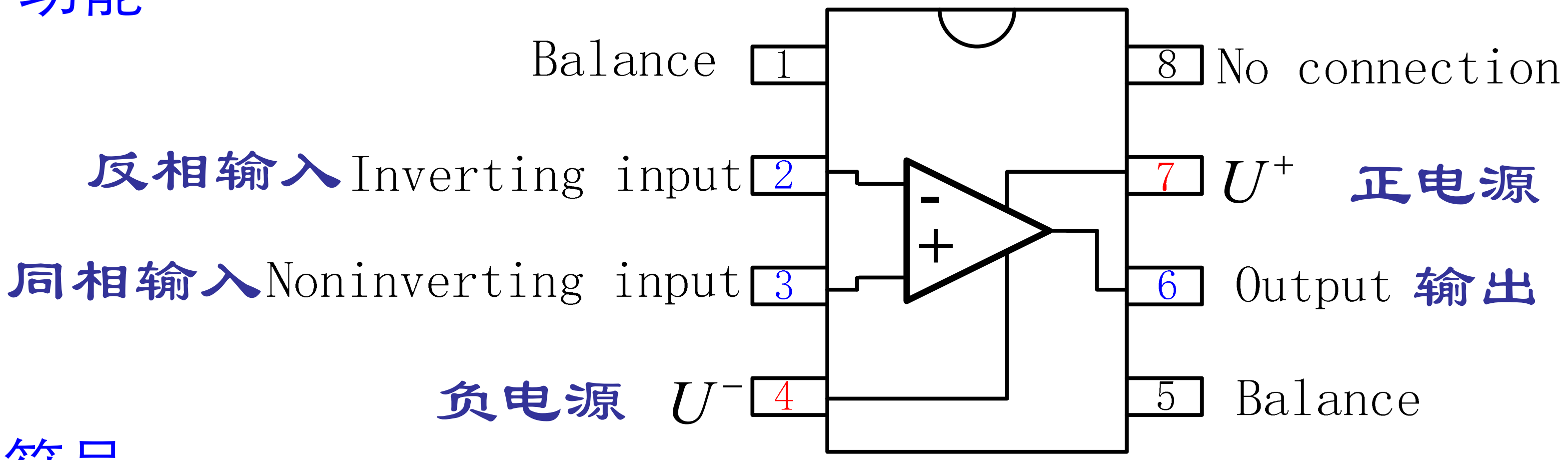


(b)

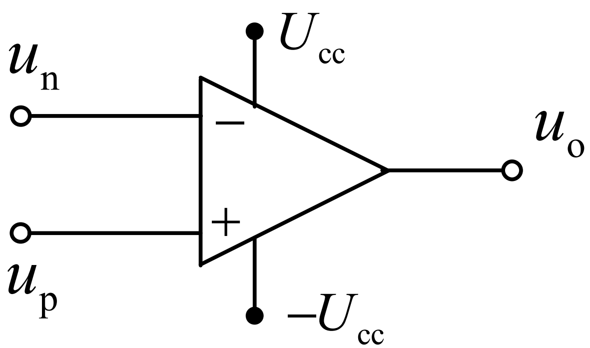


5.1集成运算放大器 operational amplifiers

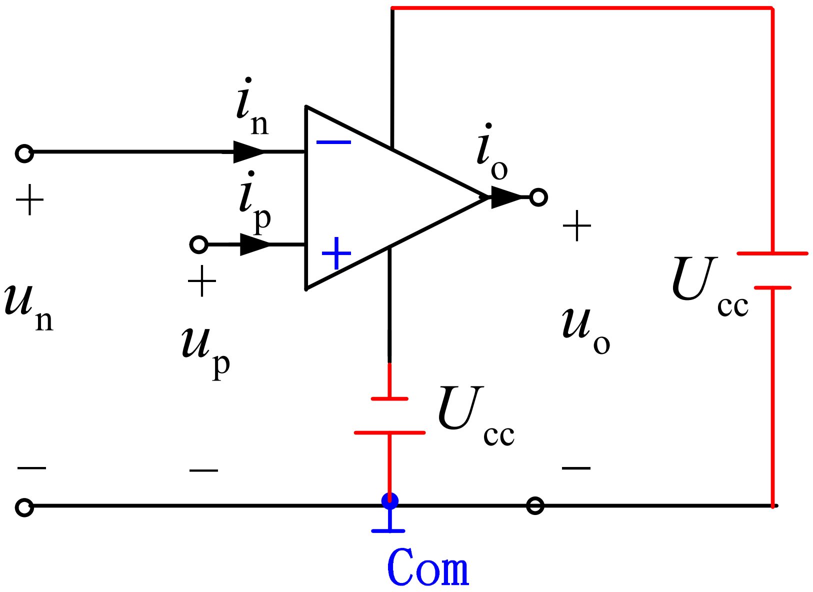
1.端子功能



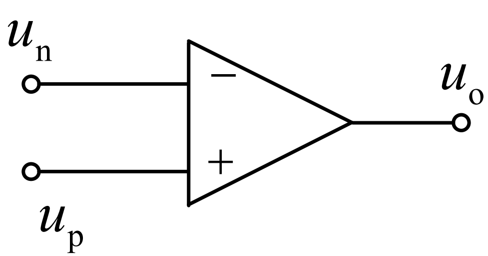
2.电路符号

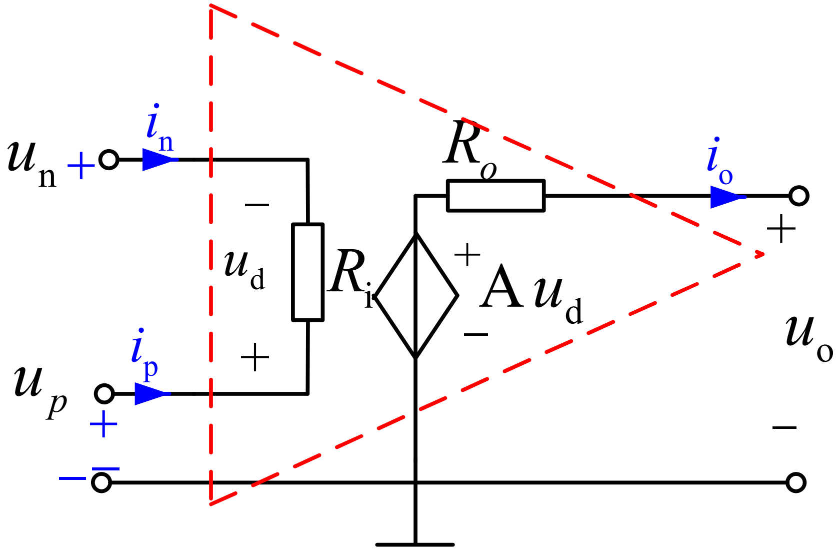


(a)



3. 实际运放的简化电路模型





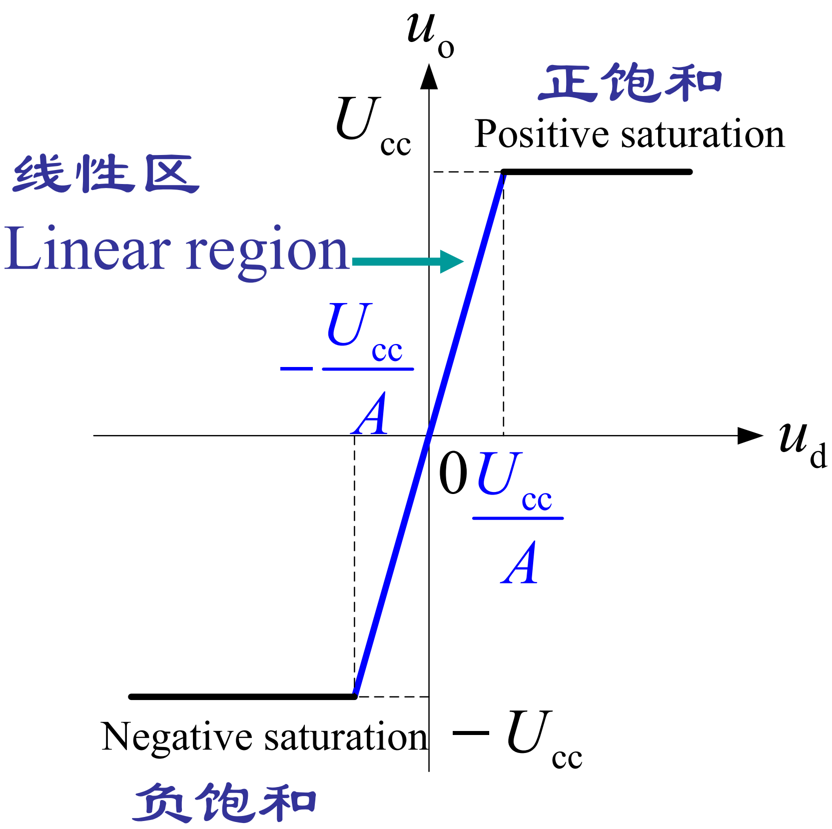
➢R_i：输入电阻，一般值为10^6~$10^{13}\Omega$。

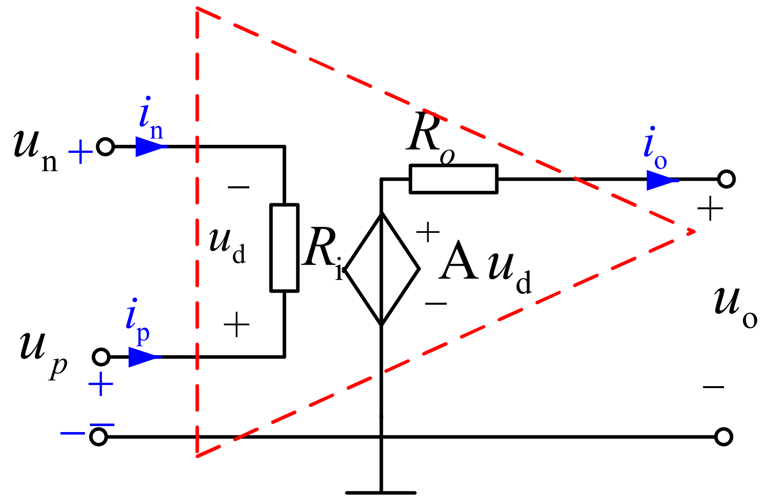
➢R_o：输出电阻，一般值为10Ω~100Ω。

➢A为开环电压放大倍数，一般值为10^5~ 10^7。

➢u_d=u_p-u_n，u_d为差动电压。

4. 实际运放的输入输出特性

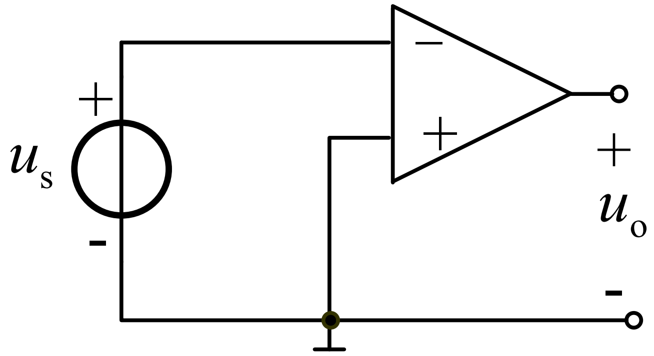




$$u_o=\begin{cases} U_{cc} & u_d > U_{cc}/A \\ A u_d & -U_{cc}/A < u_d < U_{cc}/A \\ -U_{cc} & u_d < -U_{cc}/A \end{cases}$$

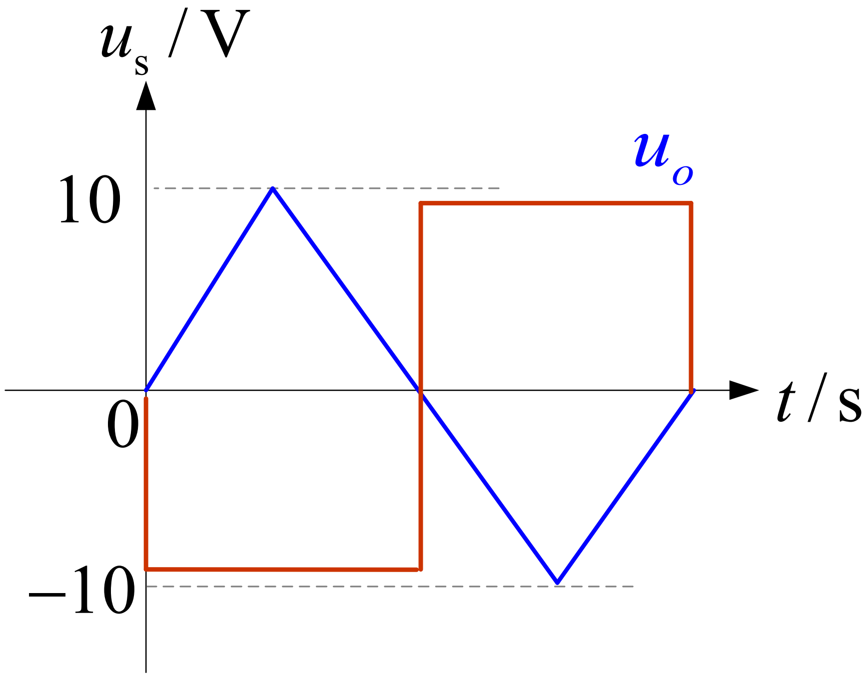
- 线性区：输出电压与差动电压成正比。
- 饱和区：输出电压保持定值-U_{om}或U_{om}，这一现象称为饱和。饱和电压略低于外加直流电源的电压。

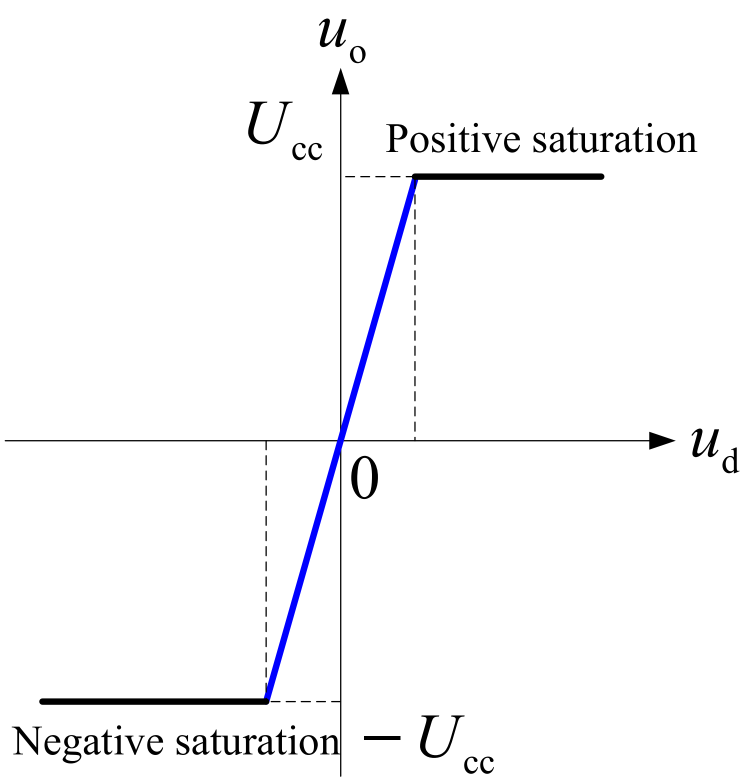
5. 开环工作——工作于饱和区——比较器 Comparator



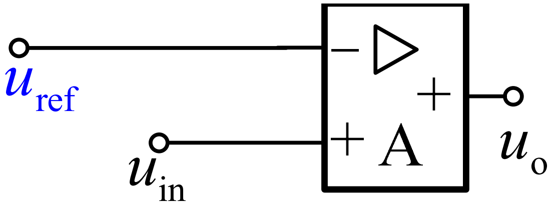
$$A = 10000$$

$$U_{cc} = 10\text{V}$$



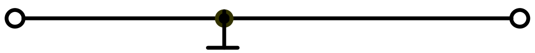


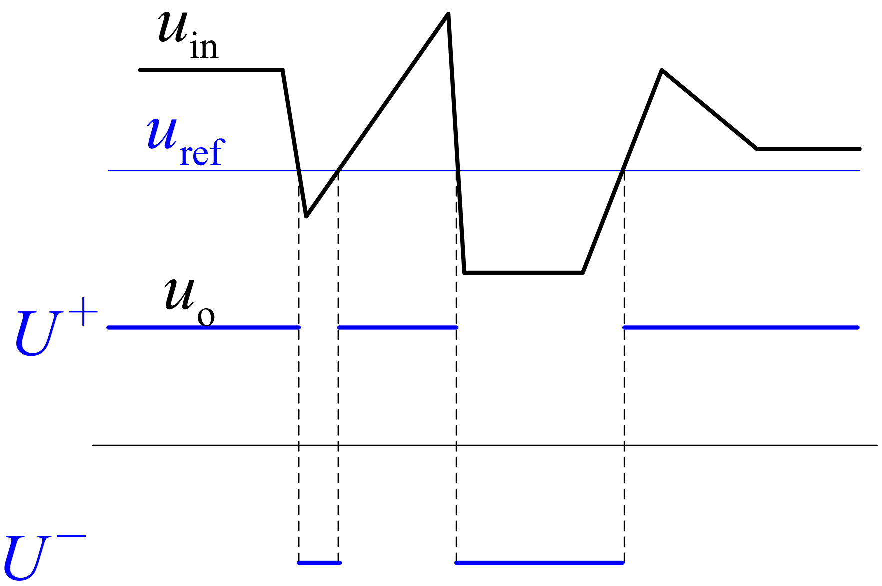
5. 开环工作——工作于饱和区——比较器 Comparator

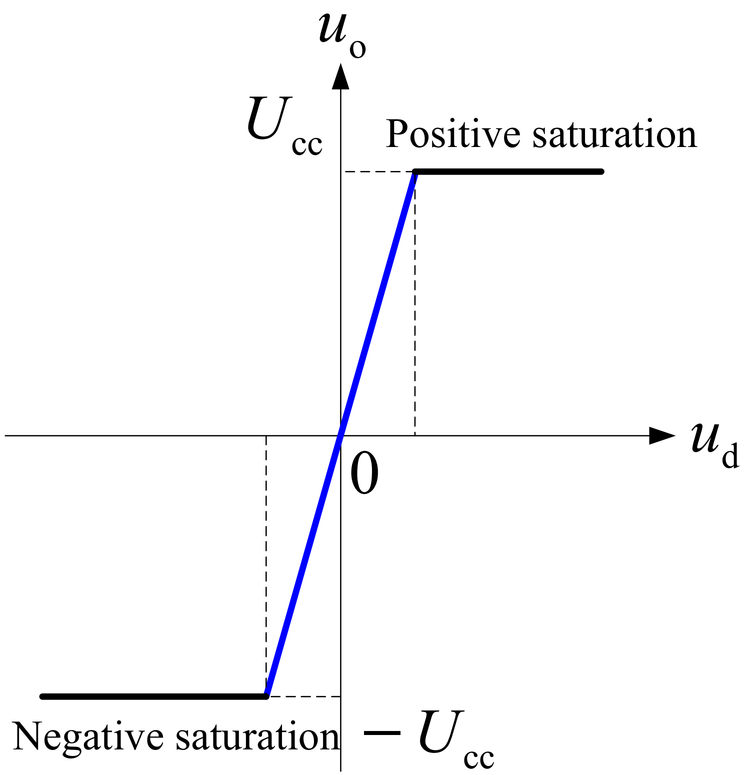


$A = 10000$

$U_{cc} = 10\text{V}$

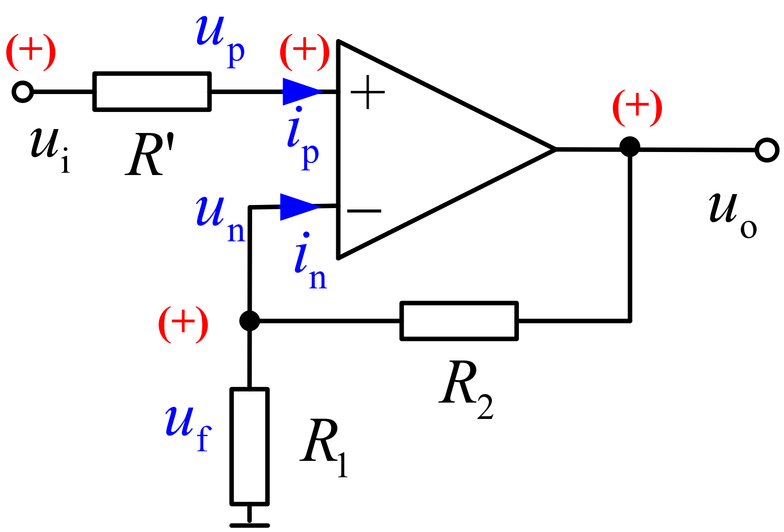




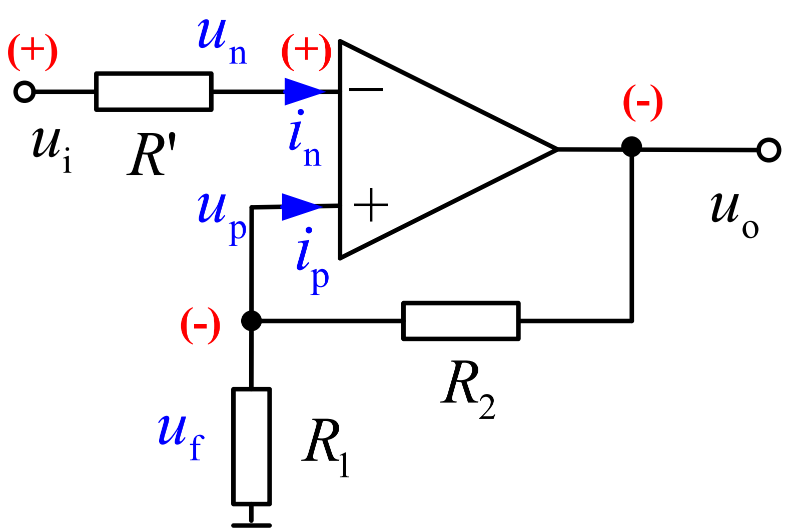


6.正反馈与负反馈

负反馈：



正反馈：



负反馈：

扰动 $\rightarrow u_i \uparrow \rightarrow u_o \uparrow \rightarrow u_f \uparrow \rightarrow u_d = (u_i - u_f) \downarrow \rightarrow u_o \downarrow$

正反馈：

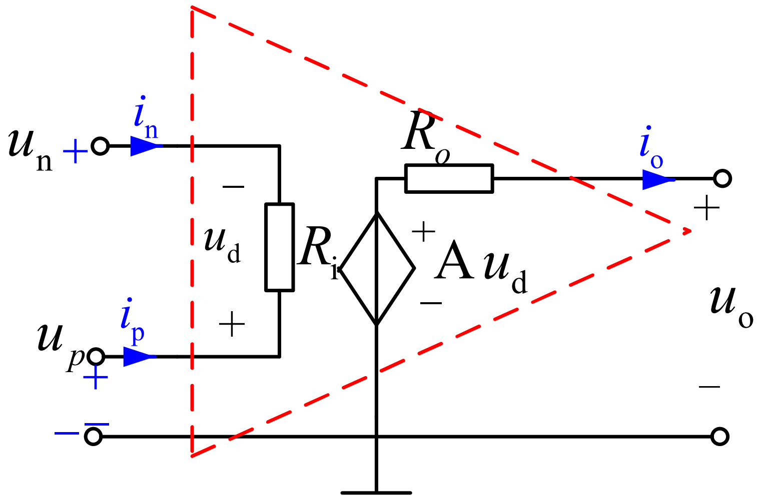
扰动 $\rightarrow u_i \uparrow \rightarrow u_o \downarrow \rightarrow u_f \downarrow \rightarrow u_d = (u_i - u_f) \uparrow \rightarrow u_o \uparrow$

5.3　　理想运算放大器

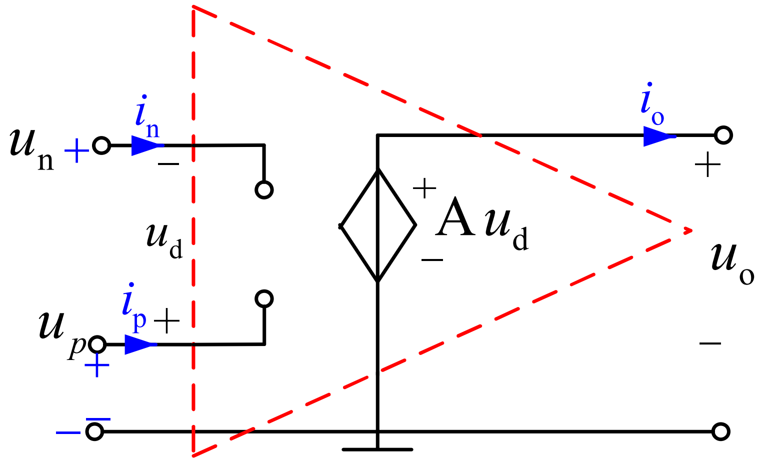
1. 理想运放的电路模型

将运算放大器的参数指标进行理想化处理，得到的模型称为理想放大器。

$$A \to \infty \quad R_i \to \infty \quad R_o \to 0$$

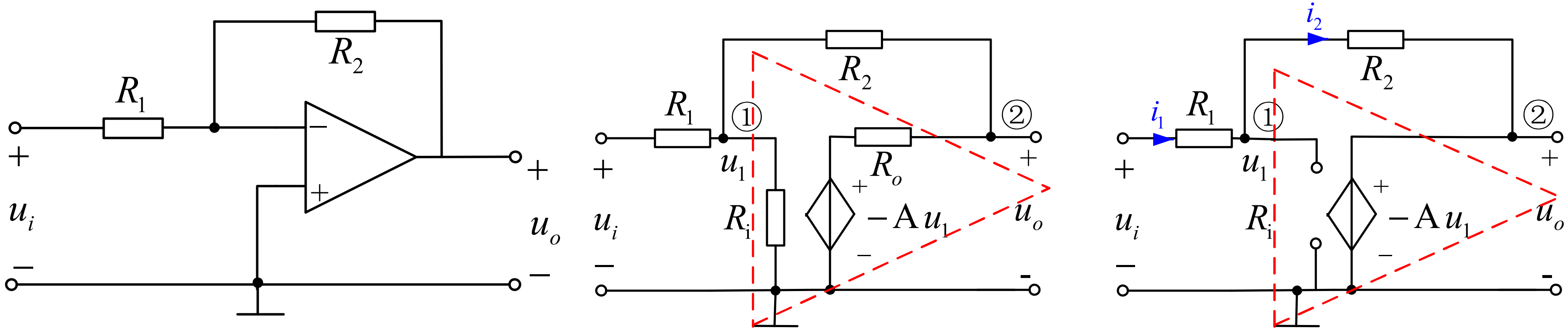


(a)实际运放模型



(b)理想运放模型

【例 1】已知运放参数为$R_i=2\times10^6\Omega$，$R_0=100\Omega$，$A=5\times10^4$，$R_1=100\Omega$，$R_2=200\Omega$。求：u_0/u_i



(a) (b) (c)

解　将运放用电路模型表示，如图（b）所示。对结点①、②由结点法得

$$\begin{cases}(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_i})u_1-\frac{1}{R_2}u_o=\frac{u_i}{R_1}\\ -\frac{1}{R_2}u_1+(\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_o})u_o=\frac{-Au_1}{R_o}\end{cases}$$

解得：

$$u_o=\frac{\frac{1}{R_1}(\frac{1}{R_2}-\frac{A}{R_o})}{(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_i})(\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_o})+\frac{1}{R_2}(-\frac{1}{R_2}+\frac{A}{R_o})}u_i$$

$$u_1=\frac{\frac{1}{R_1}(\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_o})}{(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_i})(\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_o})+\frac{1}{R_2}(-\frac{1}{R_2}+\frac{A}{R_o})}u_i$$

代入参数得： $u_o=-1.9998u_i$

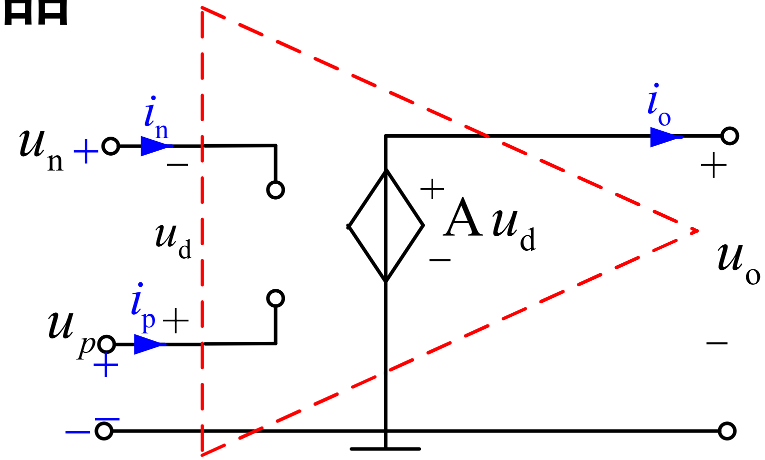
$u_1=0.0001u_i$

若令$A\to\infty$，$R_i\to\infty$，$R_o\to0$

$$u_o=-\frac{R_2}{R_1}u_i=-2u_i$$

5. 3　　理想运算放大器

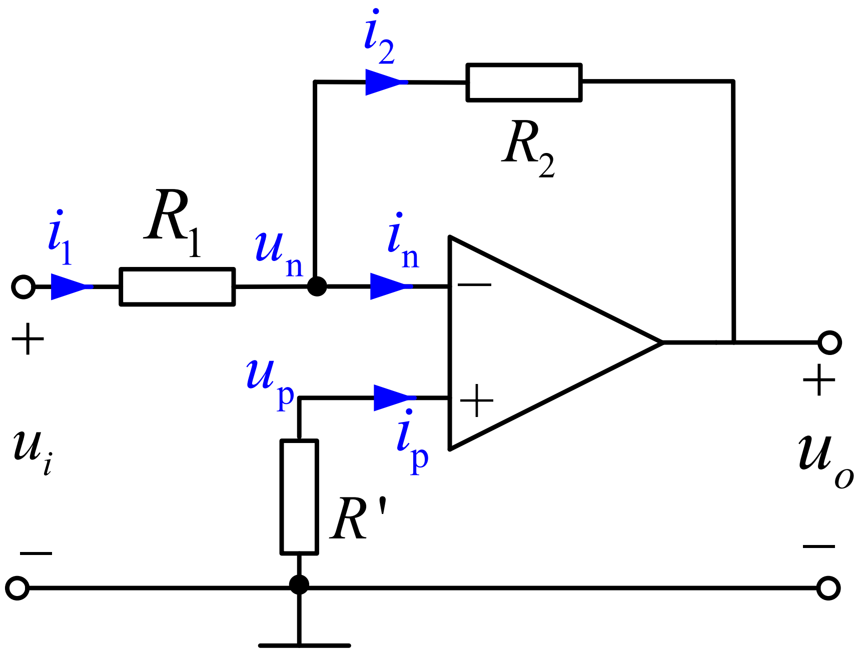
2. 理想运放的重要特性



- $u_n = u_p$，即两个输入端之间趋于短路，称为“虚短路”（A=∞）
- $i_n = i_p = 0$，即两个输入端的电流都等于0，称为“虚断路”。（R_i=∞
- 如果不是差动输入，而是把同相端（或反相端）接地，由于u_p =0（或u_n =0），则u_n =0（或 u_p =0），不论哪端接地，都有u_n =u_p =0
称为“虚地”（virtual ground）。
- 理想放大器电路属于有源电路。

5. 4　含运算放大器电路的分析

5.4.1反相比例运算电路



由虚断路：　$i_n = i_p \approx 0$

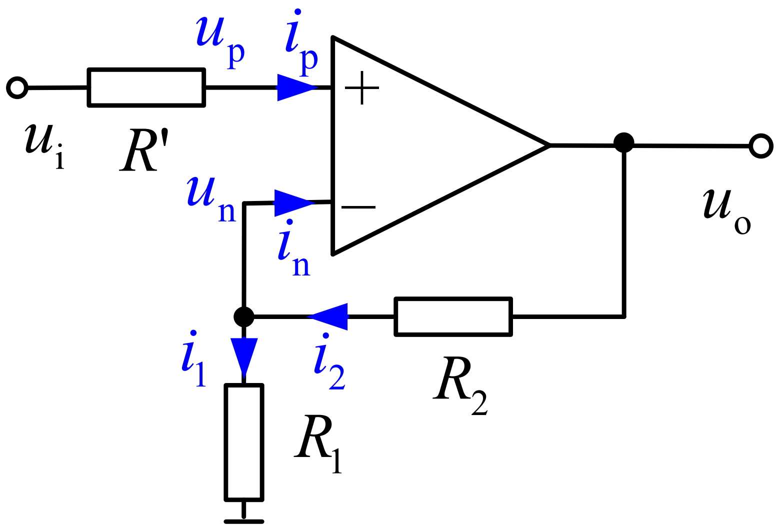
得出：　$i_1 = i_2$

由虚短路：　$u_n \approx u_p = 0$

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

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

5.4.2同相比例运算电路



由虚断路： $i_n = i_p \approx 0$

得出： $i_1 = i_2$

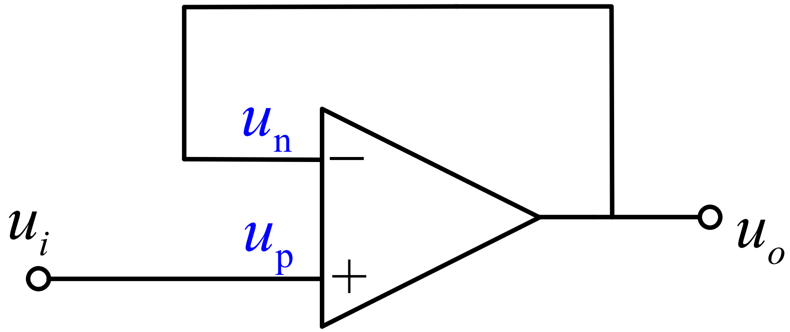
由虚短路： $u_n \approx u_p = u_i$

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

$$\boldsymbol{u_o = (1 + \frac{R_f}{R_1}) u_i}$$

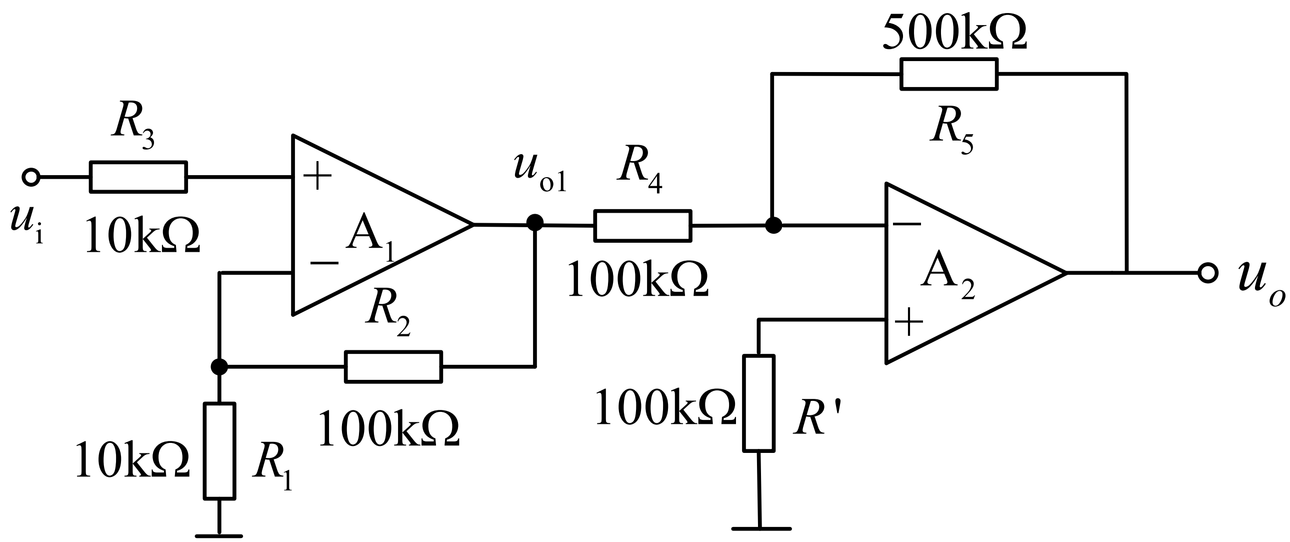
$$\boxed{\frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1}}$$

5.4.3 电压跟随器



$$\boxed{u_o = u_n = u_p = u_i}$$

【例 2】求输出电压



解:

运放A_1放构成同相比例运算电路

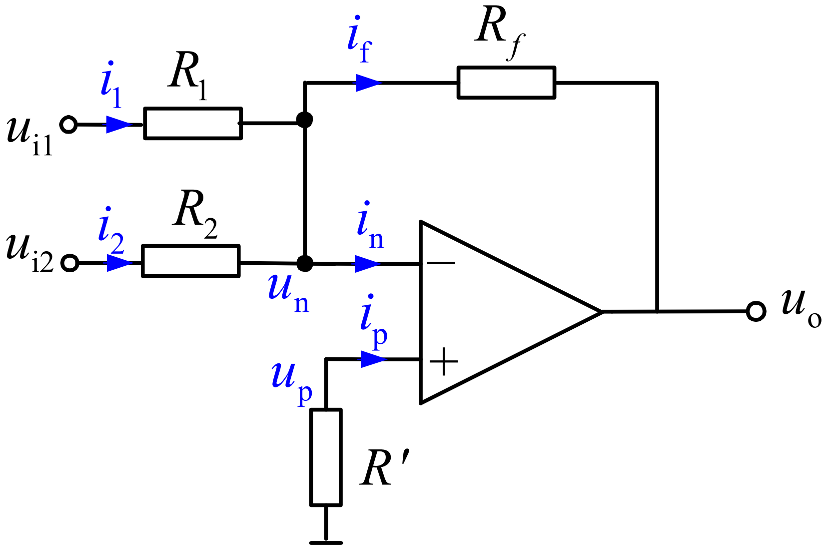
$$u_{o1} = (1 + \frac{R_2}{R_1})u_i = (1 + \frac{100}{10})u_i = 11u_i$$

运放A_2放构成反相比例运算电路

则有:
$$u_o = -\frac{R_5}{R_4}u_{o1} = -5u_{o1}$$

$$u_o = -55u_i$$

5.4.4 加法（求和）运算电路



由虚断路：　$i_n = i_p \approx 0$

得出：　$i_1 + i_2 = i_f$

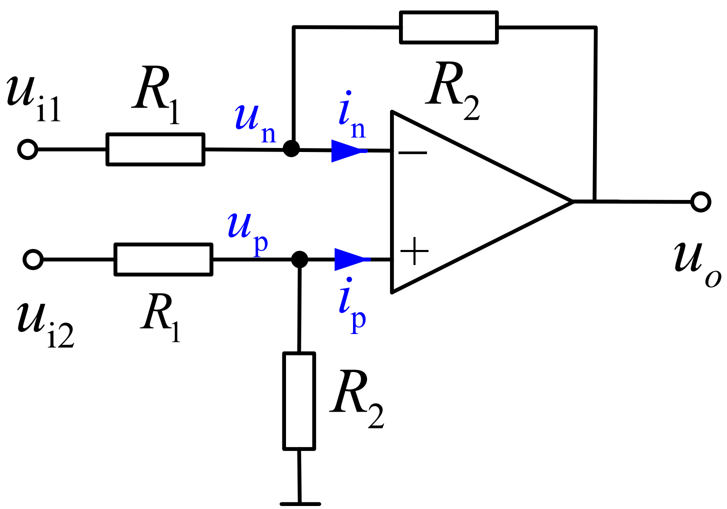
由虚短路：　$u_n \approx u_p = 0$

$$\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} = \frac{-u_o}{R_f}$$

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

调节反相求和电路的某一路信号的输入电阻，不影响输入电压和输出电压的比例关系，调节方便。

5.4.5 减法（求差）运算电路



根据虚断的概念，对输入结点由**KCL**得：

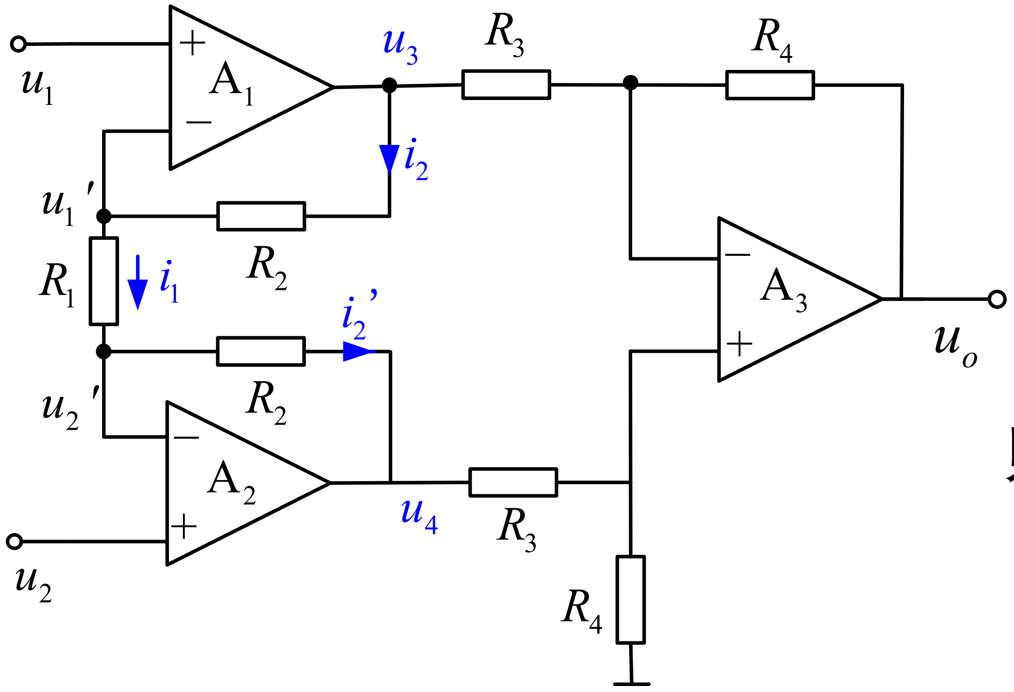
$$\frac{u_{i1}-u_n}{R_1}=\frac{u_n-u_o}{R_2} \qquad \frac{u_{i2}-u_p}{R_1}=\frac{u_p}{R_2} \Rightarrow u_p=\frac{R_2}{R_1+R_2}u_{i2}$$

利用虚短路的概念 $u_n \approx u_p$

联立求解得：

$$u_o=\frac{R_2}{R_1}(u_{i2}-u_{i1})$$

【例3】证明: $$u_o = -\frac{R_4}{R_3}(1+\frac{2R_2}{R_1})(u_1 - u_2)$$



证明: 对运放A_1、A_2

由运放的"虚短"、"虚断"

$$u_1 = u_1', \qquad u_2 = u_2'$$

则有: $$i_1 = i_2 = i_2'$$

$$\frac{u_1 - u_2}{R_1} = \frac{u_3 - u_4}{2R_2 + R_1}$$

得: $$u_3 - u_4 = (1+\frac{2R_2}{R_1})(u_1 - u_2)$$

对A_3:

$$u_o = \frac{R_4}{R_3}(u_4 - u_3) = -\frac{R_4}{R_3}(1+\frac{2R_2}{R_1})(u_1 - u_2)$$

证毕

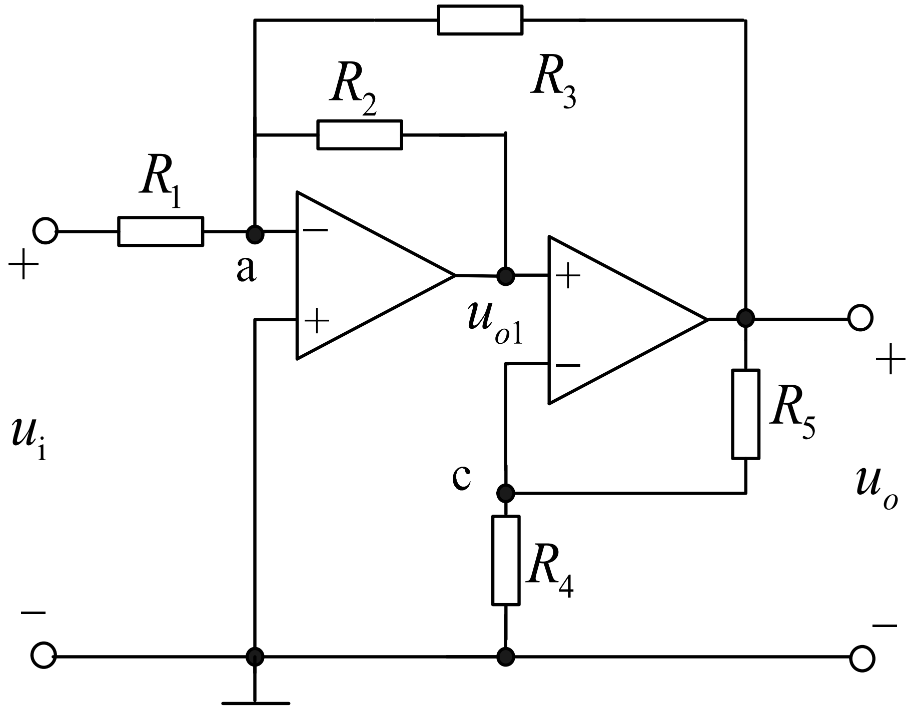
【例4】确定输出电压。

$$\frac{u_{\mathrm{i}}-0}{R_1}+\frac{u_{o1}-0}{R_2}+\frac{u_{\mathrm{o}}-0}{R_3}=0$$

$$u_{\mathrm{c}}=\frac{R_4}{R_5+R_4}u_{\mathrm{o}}$$

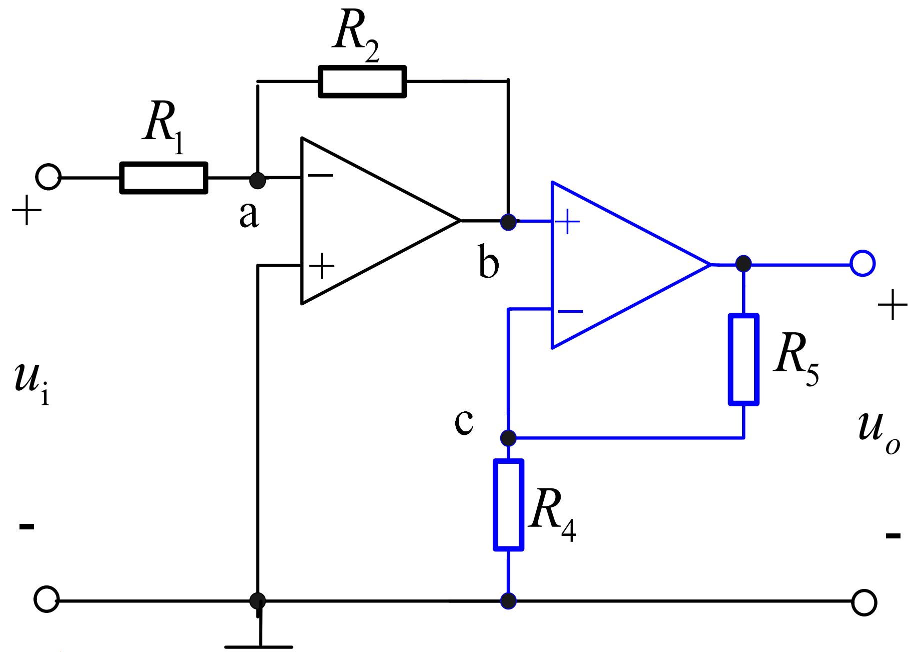
$$u_{\mathrm{o1}}=u_{\mathrm{c}}$$

$$\frac{u_{\mathrm{o}}}{u_{\mathrm{i}}}=-\frac{R_2R_3(R_4+R_5)}{R_1(R_2R_4+R_2R_5+R_3R_4)}$$



$$u_{\mathrm{b}}=-\frac{R_2}{R_1}u_{\mathrm{i}} \qquad u_{\mathrm{o}}=(1+\frac{R_5}{R_4})u_{\mathrm{b}}$$

$$u_{\mathrm{o}}=-\frac{R_2}{R_1}(1+\frac{R_5}{R_4})u_{\mathrm{i}}$$



计划学时：2学时；课后学习4学时

作业：

5-2 集成运算放大器
5-6、5-7、5-10 理想运算放大器
5-13 运算放大电路
5-22 运算放大电路级联