# 第5章
# 含运算放大器的电路

5.1 集成运算放大器 Operational amplifier

5.2 理想运算放大器 Ideal op amp

5.3 运算放大电路 Op amp circuits

# 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。

**学时：** 1.5(讲授学时)+0.5(讨论学时)

# 5.1集成运算放大器 operational amplifiers

## 什么是集成运算放大器?

- 就是通常所说的芯片。

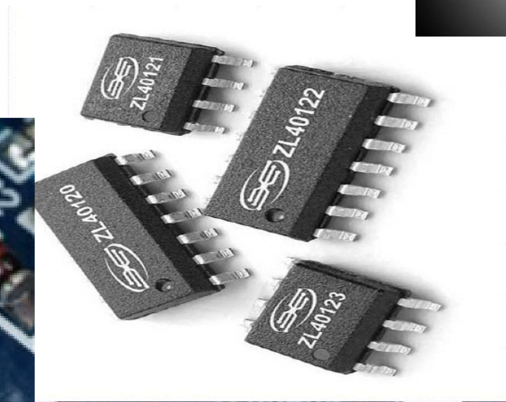
- 内部：由晶体管、场效应管、二极管、电阻、电容和电感等元件互连在一起，制作在半导体基片上。小规模集成放大器元件数量在2~30个元件，特大规模超过$10^9$个。

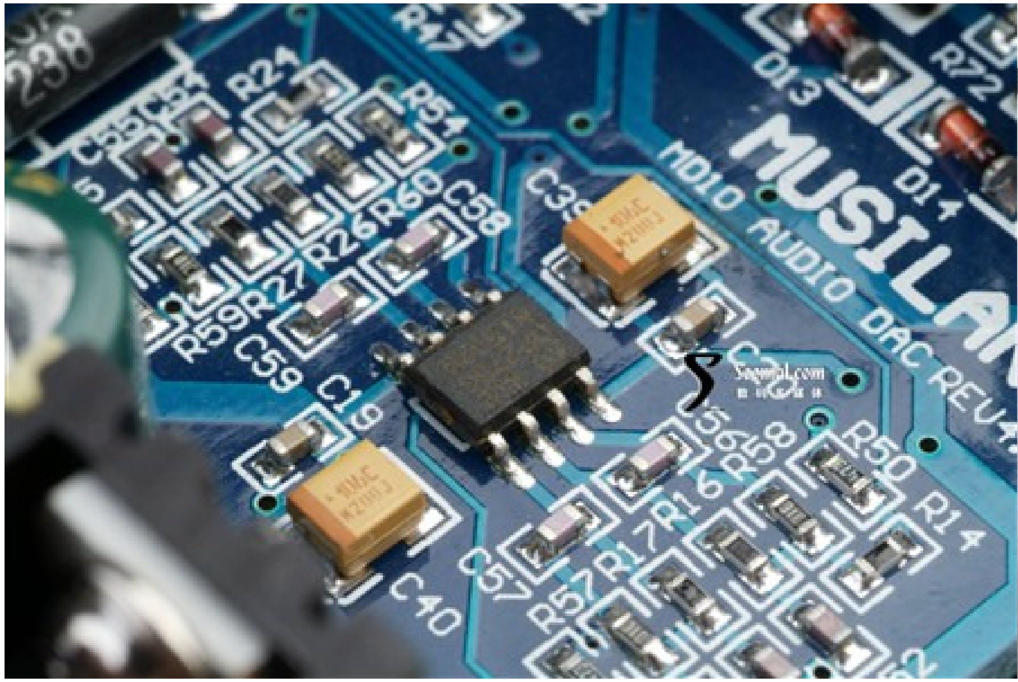
- 外部：内部元件封装在一个管壳内（陶瓷或者工程塑料），成为具有一定功能的微型结构。

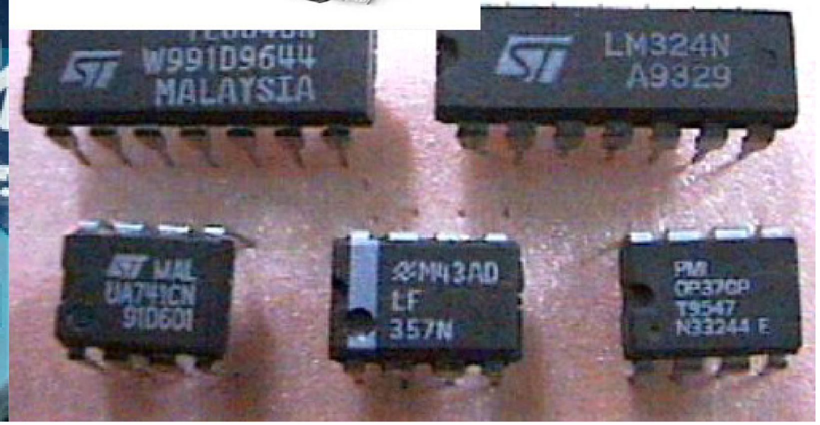
# 5.1集成运算放大器 operational amplifiers

## 什么是集成运算放大器?

➢外形:



# 5.1集成运算放大器 operational amplifiers

## 集成运算放大器发展历程?

- 1947年12月，贝尔实验室肖克莱等人发明了晶体管，这是微电子技术发展中第一个里程碑；
- 1950年4月，结型晶体管诞生；
- 1958年，“仙童公司”与“德仪公司”间隔数月分别发明了集成电路，开创了世界集成电路的历史；
- 1963年，F.M.Wanlass 和 C.T.Sah首次提出CMOS技术，今天，95%以上的集成电路芯片都是基于CMOS工艺；
- 1964年：Intel的摩尔提出摩尔定律，预测晶体管集成度将会每18个月增加1倍；
- 1971年：全球第一个微处理器4004由Intel公司推出，采用的是MOS工艺，这是一个里程碑式的发明；
- 1988年：16M DRAM问世，1平方厘米大小的硅片上集成有3500万个晶体管，标志着进入甚大规模集成电路（ULSI）阶段。

# 5.1集成运算放大器 operational amplifiers

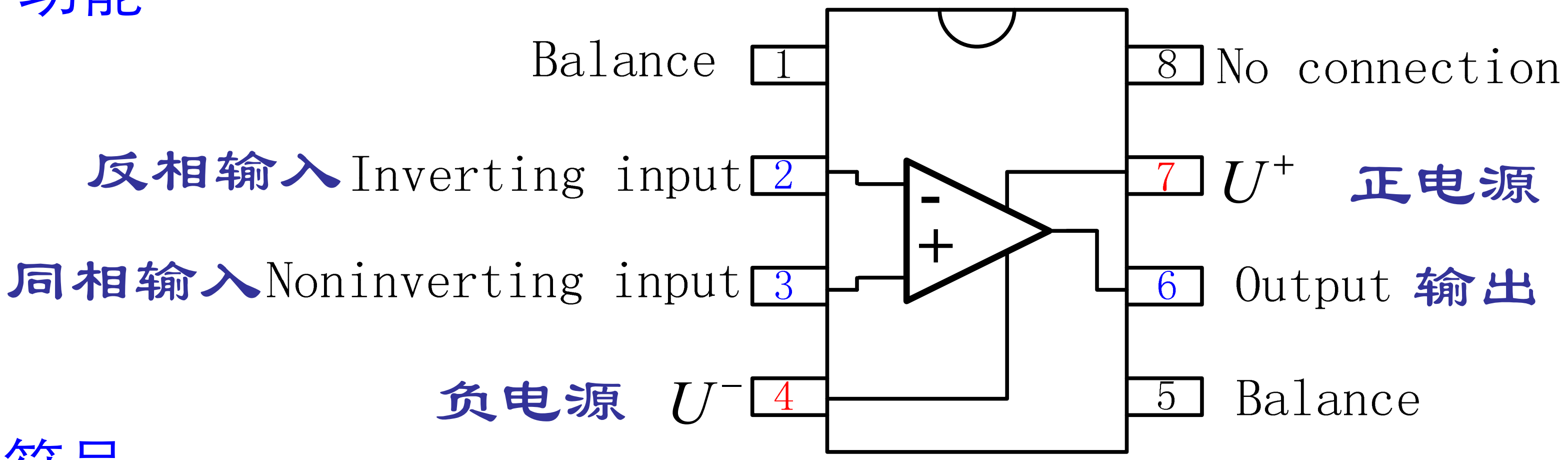
## 集成运算放大器用在哪里?

集成电路在生活中无处不在，已经成为一个国家信息产业发展的“核心竞争力”。

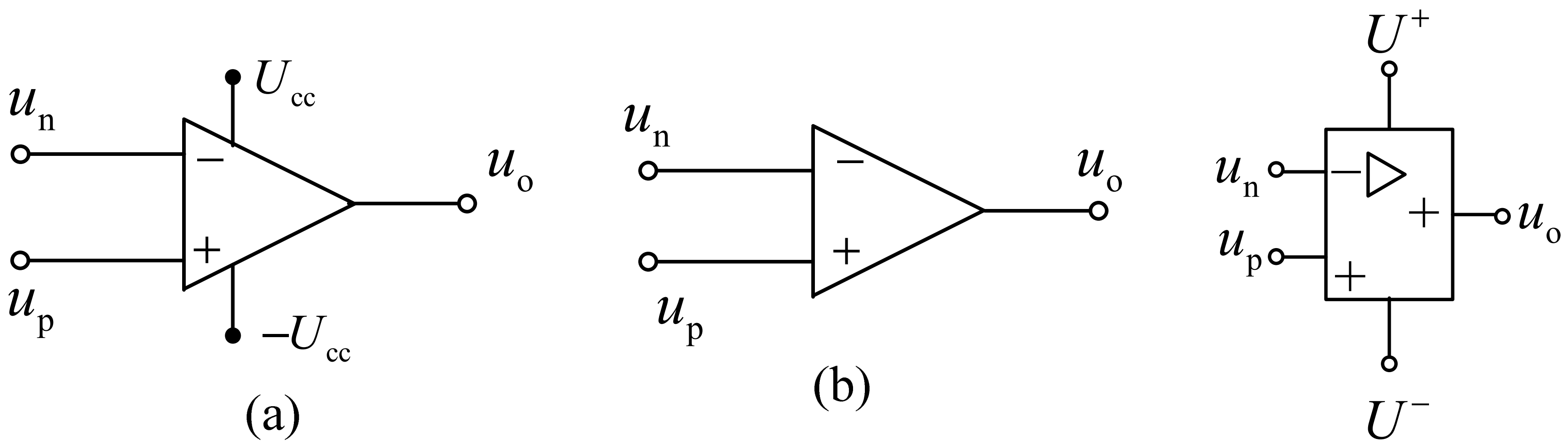
- 计算机、手机等移动智能终端，云计算、网络通信、金融电子、卫星导航等。

# 5.1集成运算放大器 operational amplifiers

## 1.端子功能

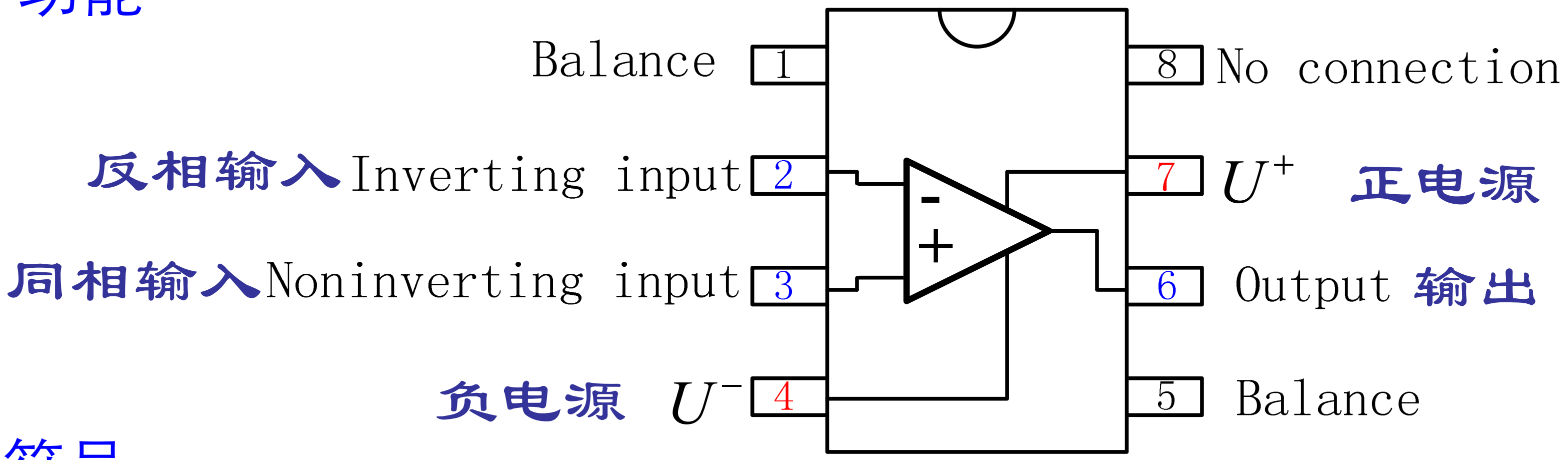



## 2.电路符号

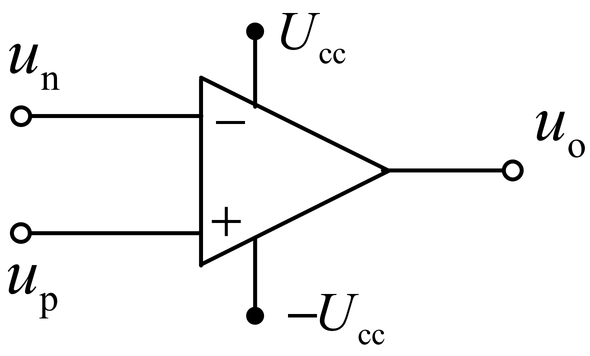


# 5.1集成运算放大器 operational amplifiers

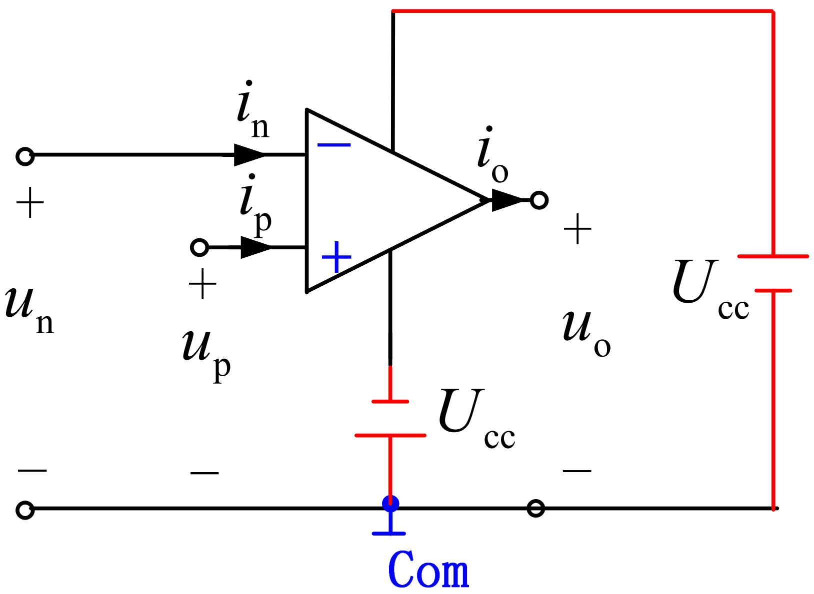
## 1. 端子功能



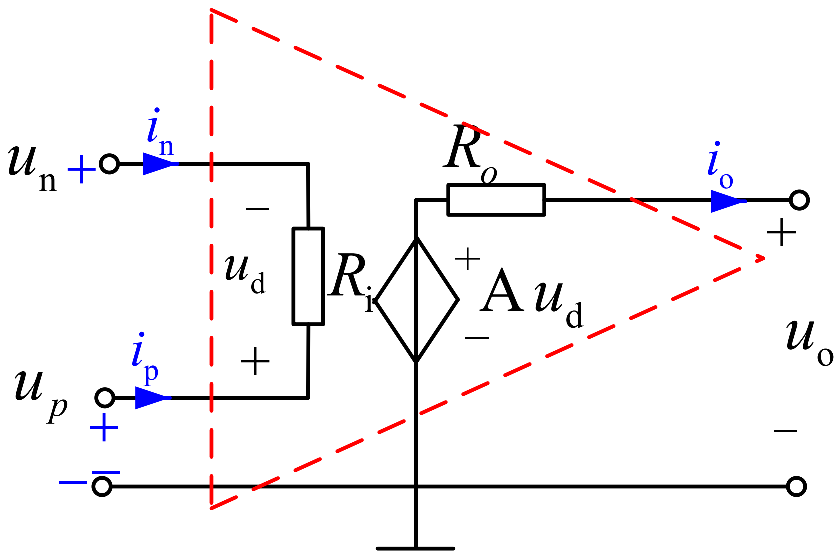

## 2.电路符号

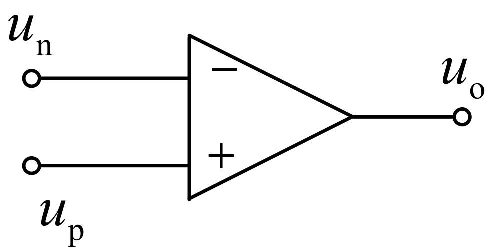


(a)



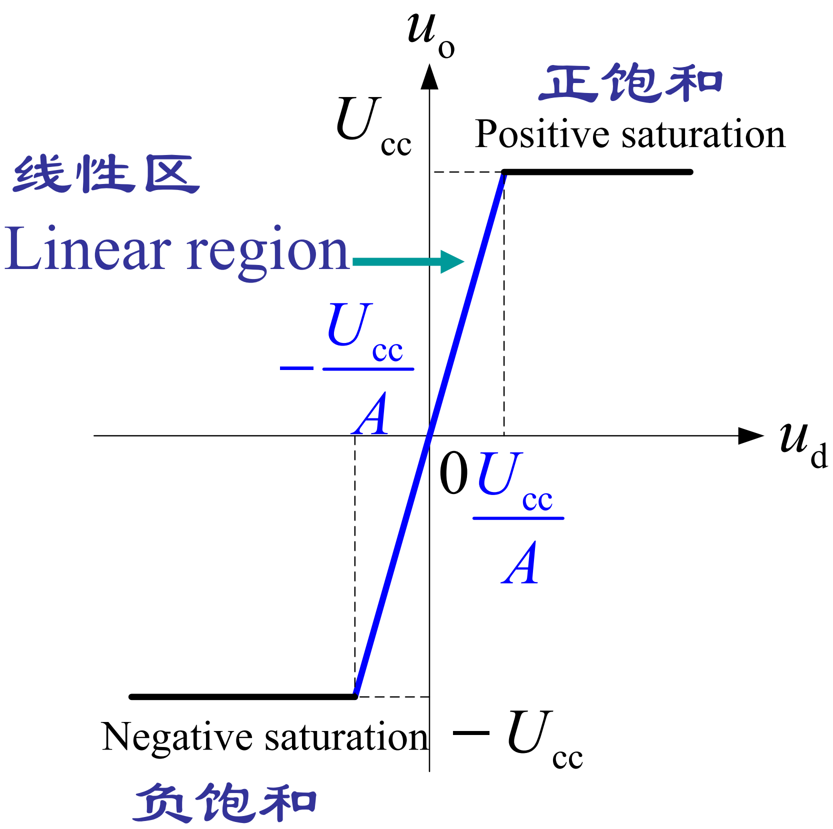
## 3. 实际运放的简化电路模型

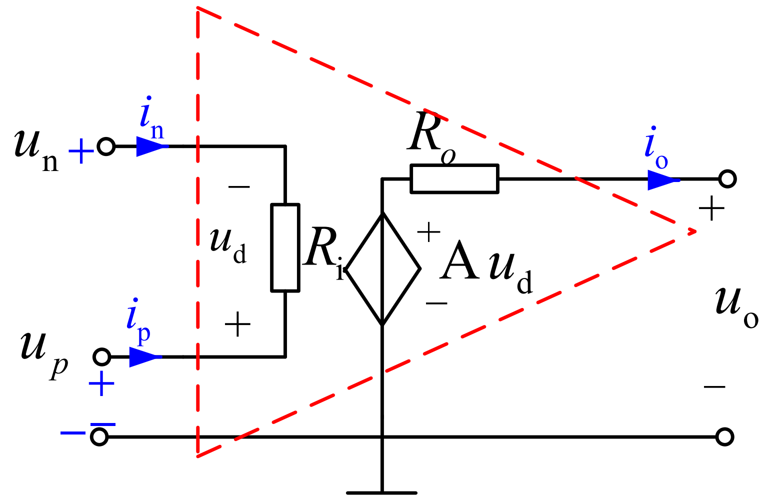



- $R_i$：输入电阻，一般值为$10^6$~$10^{13}\Omega$。
- $R_o$：输出电阻，一般值为$10\Omega$~$100\Omega$。
- A为开环电压放大倍数，一般值为$10^5$~ $10^7$。
- $u_d=u_p-u_n$，$u_d$为差动电压。

## 4 . 实际运放的输入输出特性

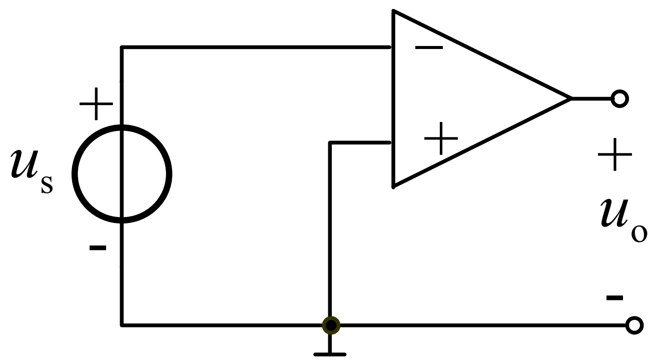



$$u_o = \begin{cases} U_{cc} & u_d > U_{cc}/A \\ A u_d & -U_{cc}/A < u_d < U_{cc}/A \\ -U_{cc} & u_d < -U_{cc}/A \end{cases}$$

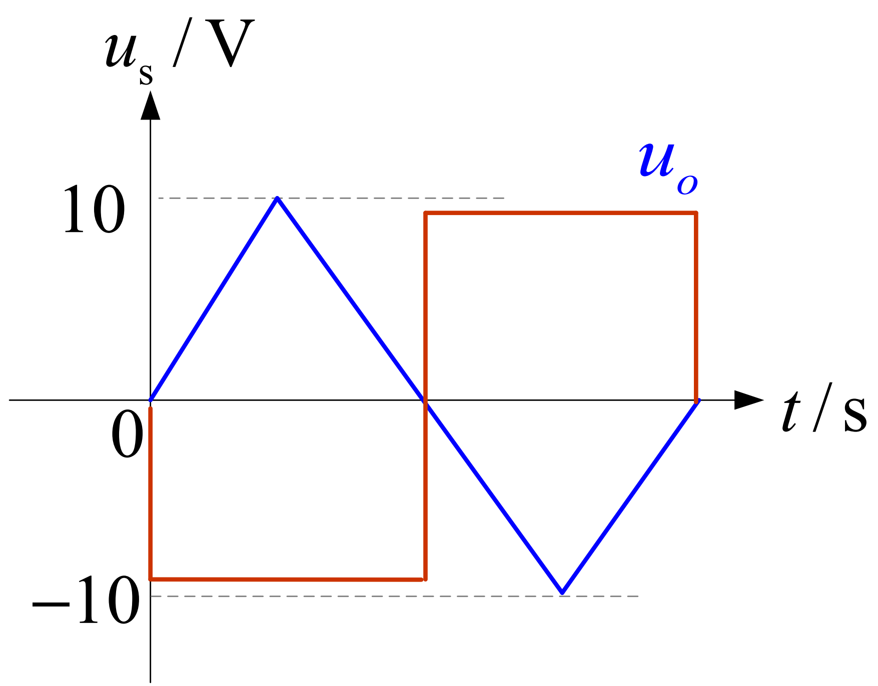
- 线性区：输出电压与差动电压成正比。
- 饱和区：输出电压保持定值-$U_{om}$或$U_{om}$，这一现象称为饱和。饱和电压略低于外加直流电源的电压。

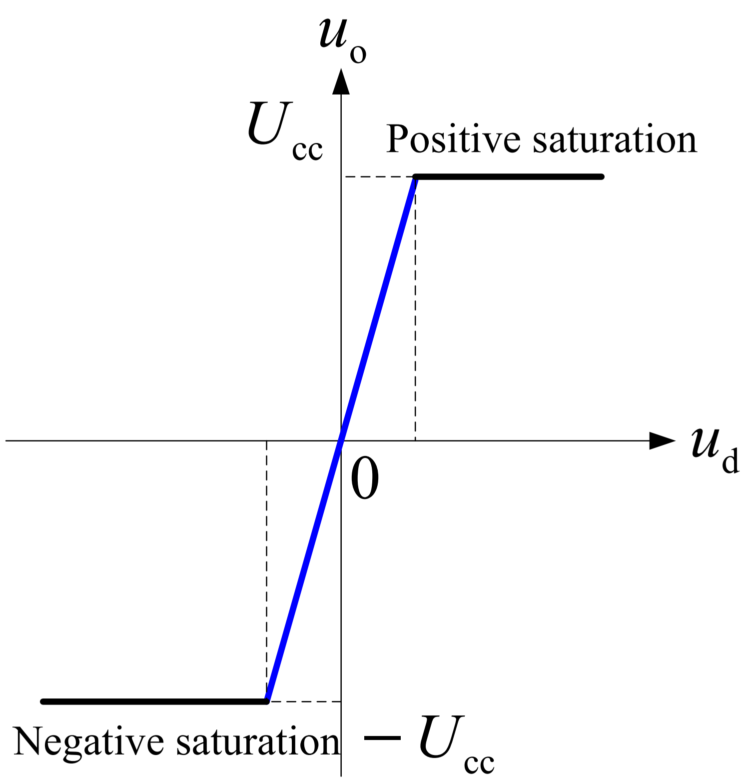
## 5. 开环工作——工作于饱和区——比较器 Comparator



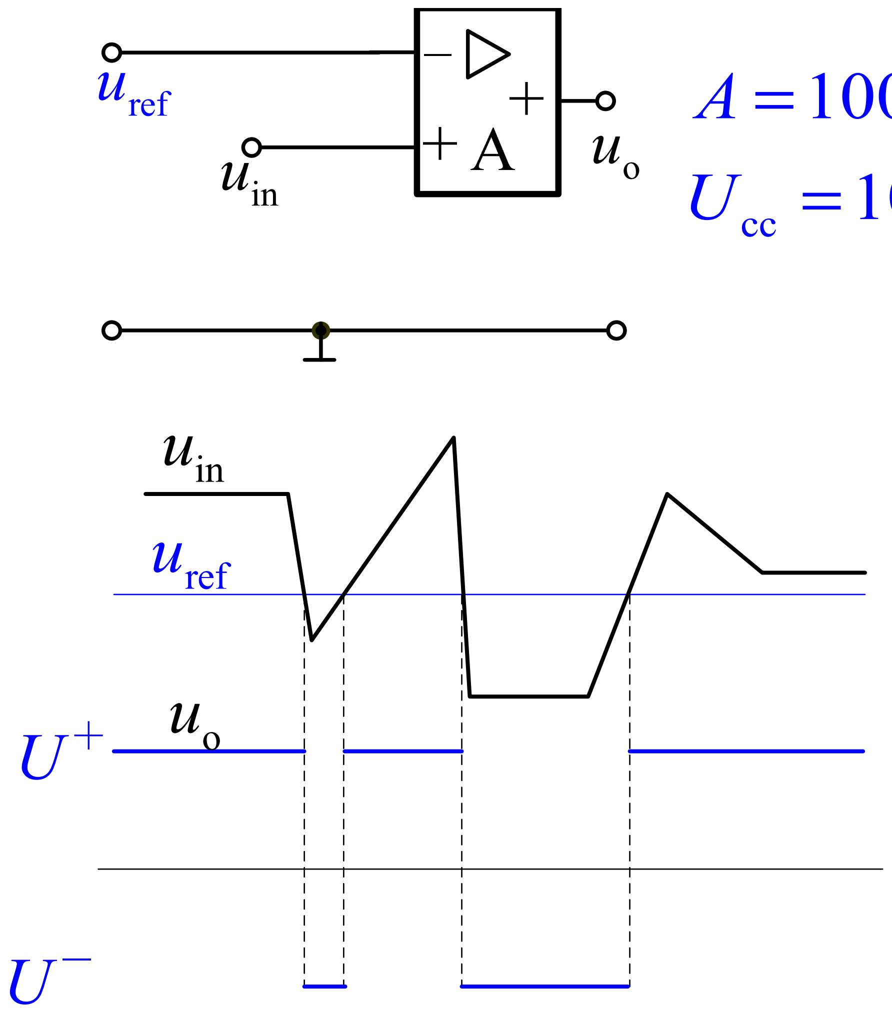

$A = 10000$

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



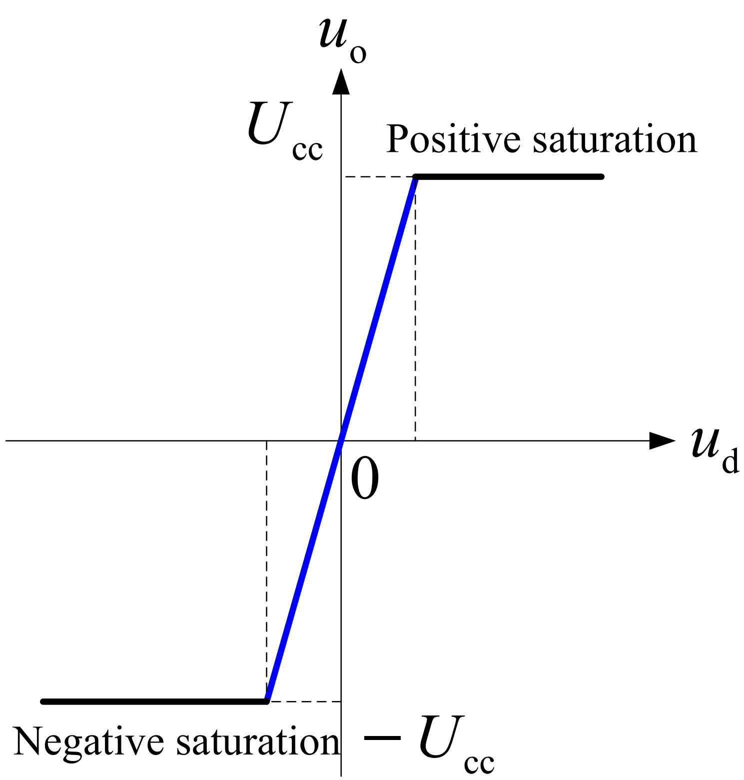



# 5. 开环工作——工作于饱和区——比较器 Comparator



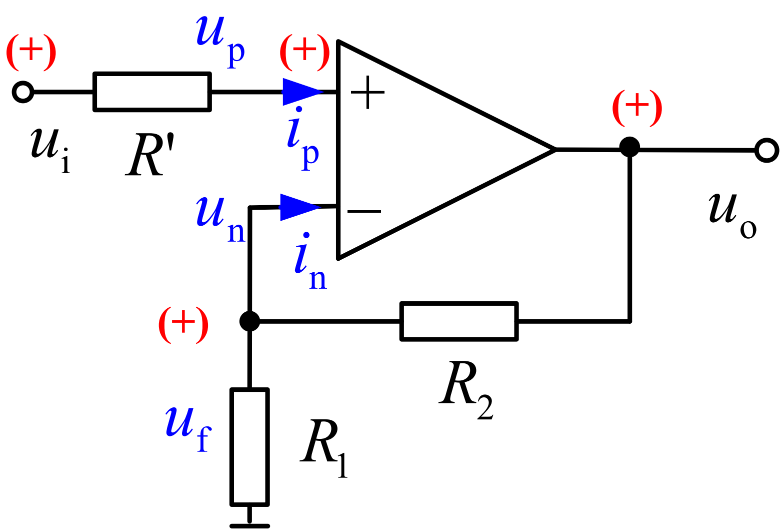

$A = 10000$

$U_{cc} = 10V$

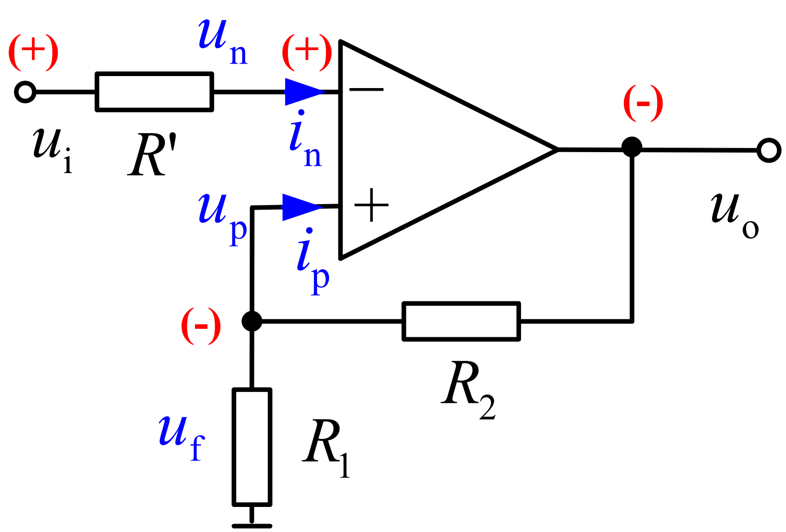


# 6.正反馈与负反馈

负反馈：




正反馈：




负反馈：

$$\text{扰动} \rightarrow u_i(+) \rightarrow u_o(+) \rightarrow u_f(+) \rightarrow u_d = (u_i - u_f)(-) \rightarrow u_o(-)$$

正反馈：

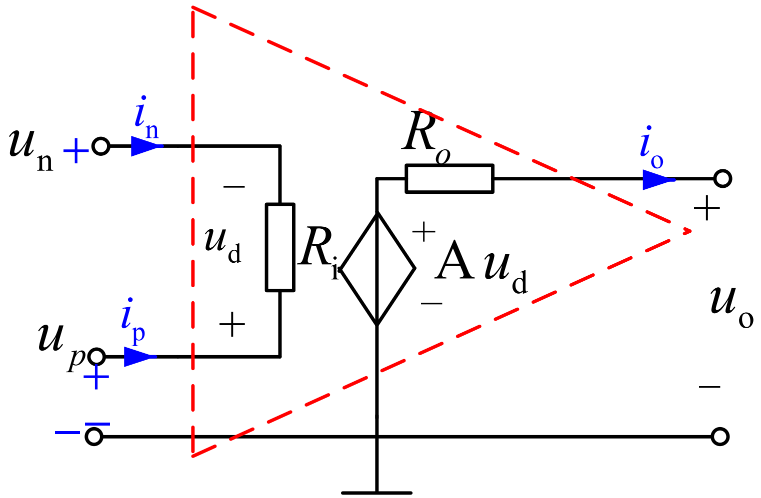
$$\text{扰动} \rightarrow u_i(+) \rightarrow u_o(-) \rightarrow u_f(-) \rightarrow u_d = (u_i - u_f)(+) \rightarrow u_o(+)$$

# 5.3 理想运算放大器

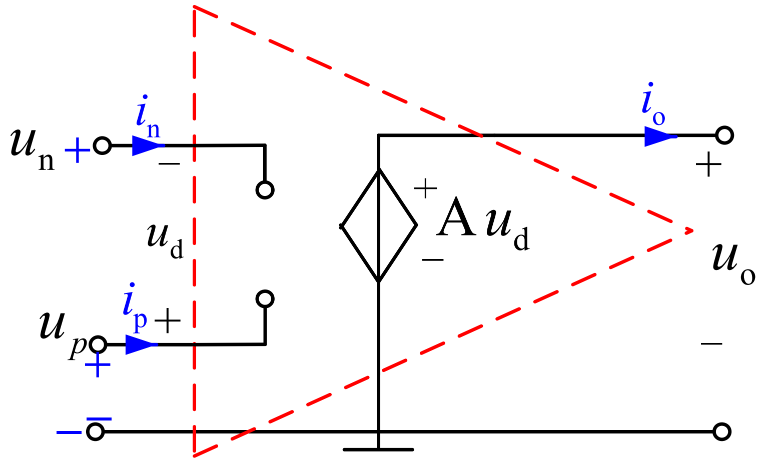
## 1. 理想运放的电路模型

**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。**

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

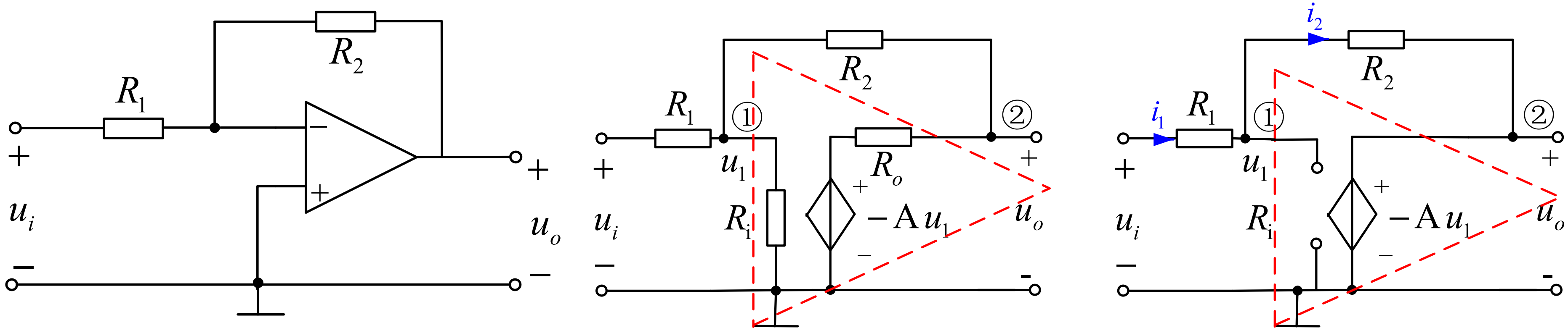



(a)实际运放模型




(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：** $u_o=-1.9998u_i$

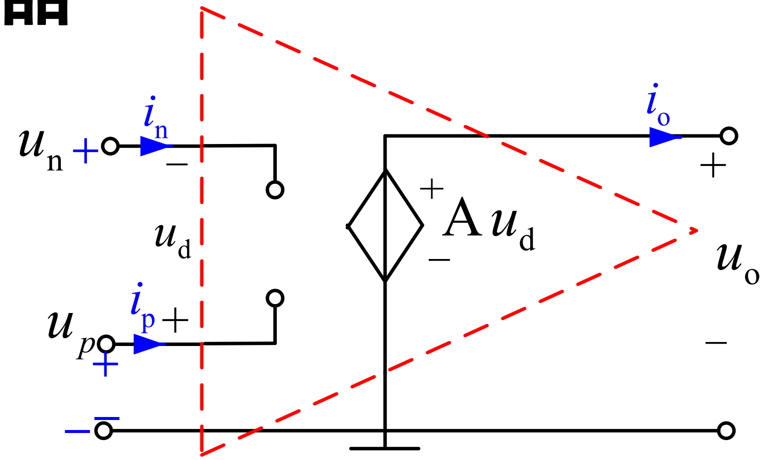
$u_1=0.0001u_i$

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

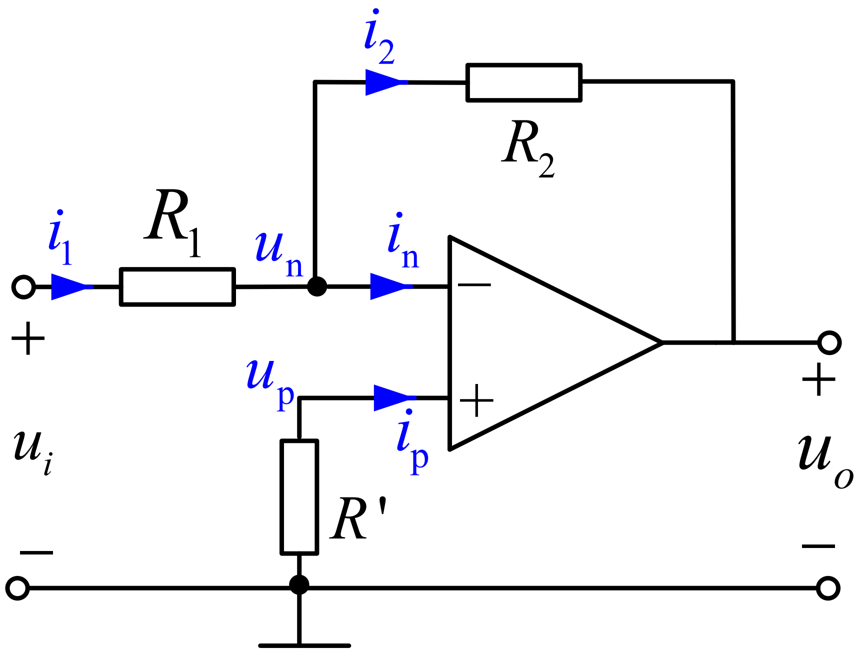
## 2. 理想运放的重要特性




- $u_n = u_p$，即两个输入端之间趋于短路，称为“虚短路” （A= ∞）
- $i_n = i_p = 0$，即两个输入端电流都等于0，称为“虚断路”。（$R_i = \infty$）
- 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：　$i_n = i_p \approx 0$

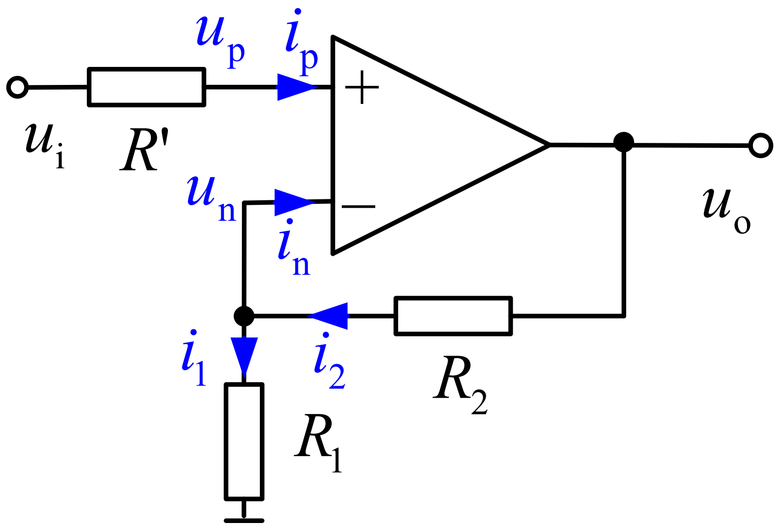
得出：　$i_1 = i_2$

由虚短路：　$u_n \approx u_p = 0$

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

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

# 5.4.2同相比例运算电路




由虚断路： $i_n = i_p \approx 0$

得出： $i_1 = i_2$

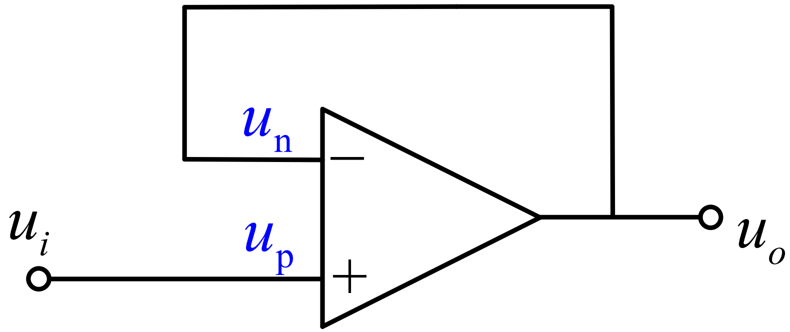
由虚短路： $u_n \approx u_p = u_i$

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

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

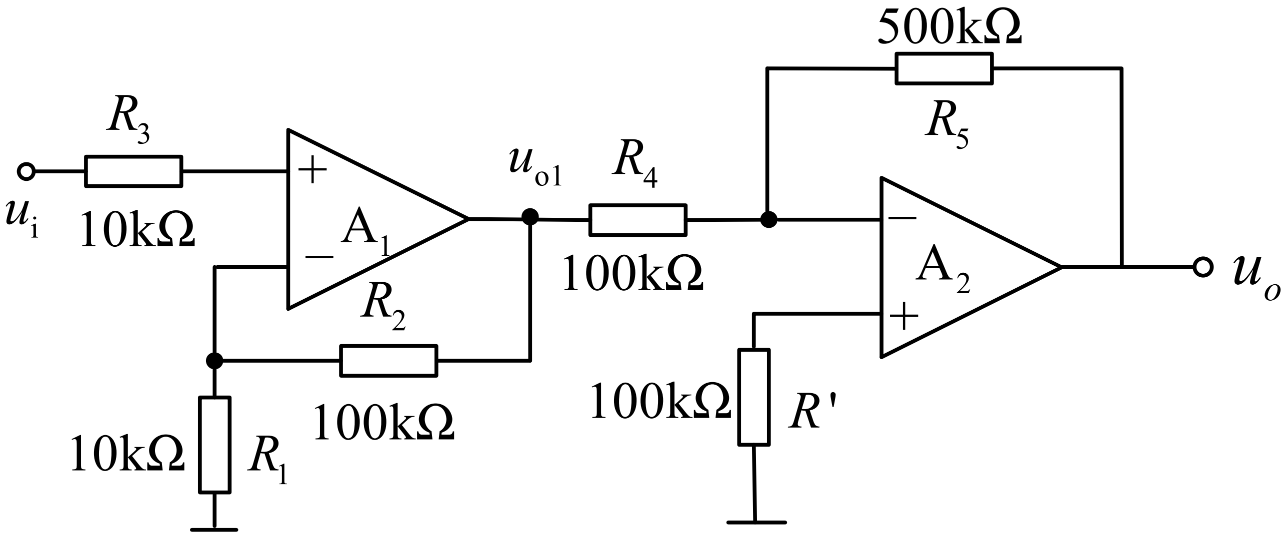
$$\boxed{\frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1}}$$

## 5.4.3 电压跟随器




$$u_o = u_n = u_p = u_i$$

【例 2】求输出电压




解:

运放$A_1$放构成同相比例运算电路

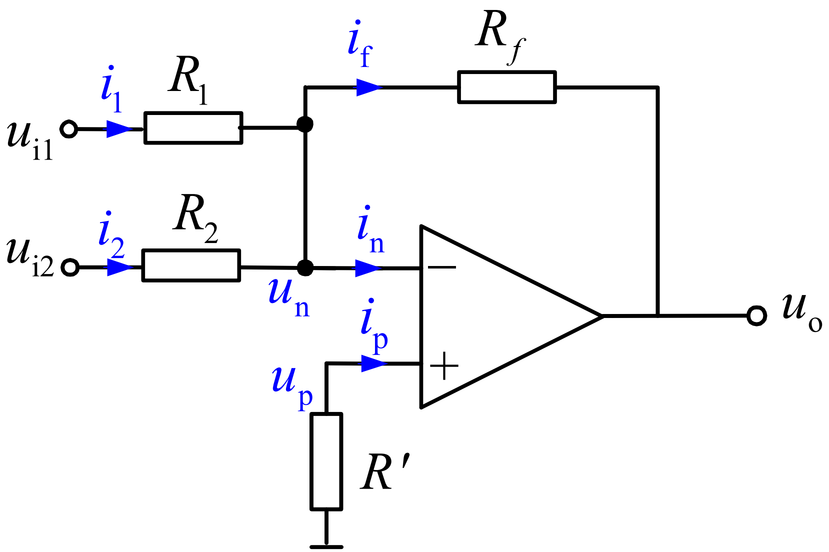
$$u_{o1}=(1+\frac{R_2}{R_1})u_i=(1+\frac{100}{10})u_i=11u_i$$

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： $i_1 + i_2 = i_f$

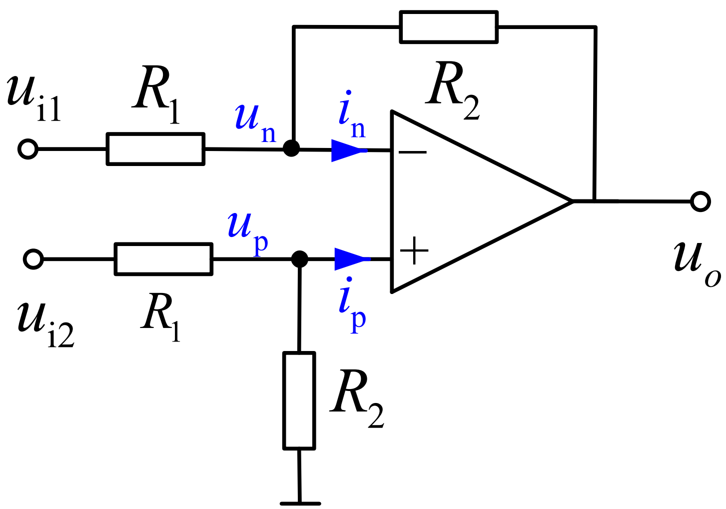
由虚短路： $u_n \approx u_p = 0$

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

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

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：**

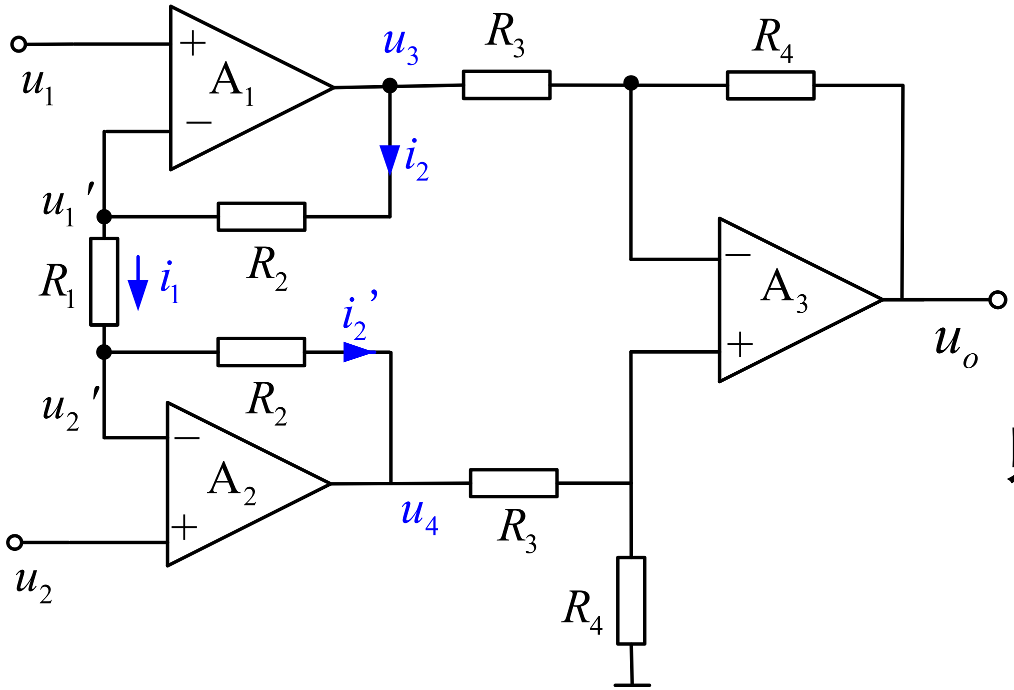
$$\frac{u_{i1}-u_n}{R_1}=\frac{u_n-u_o}{R_2} \qquad \frac{u_{i2}-u_p}{R_1}=\frac{u_p}{R_2} \Rightarrow u_p=\frac{R_2}{R_1+R_2}u_{i2}$$

**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

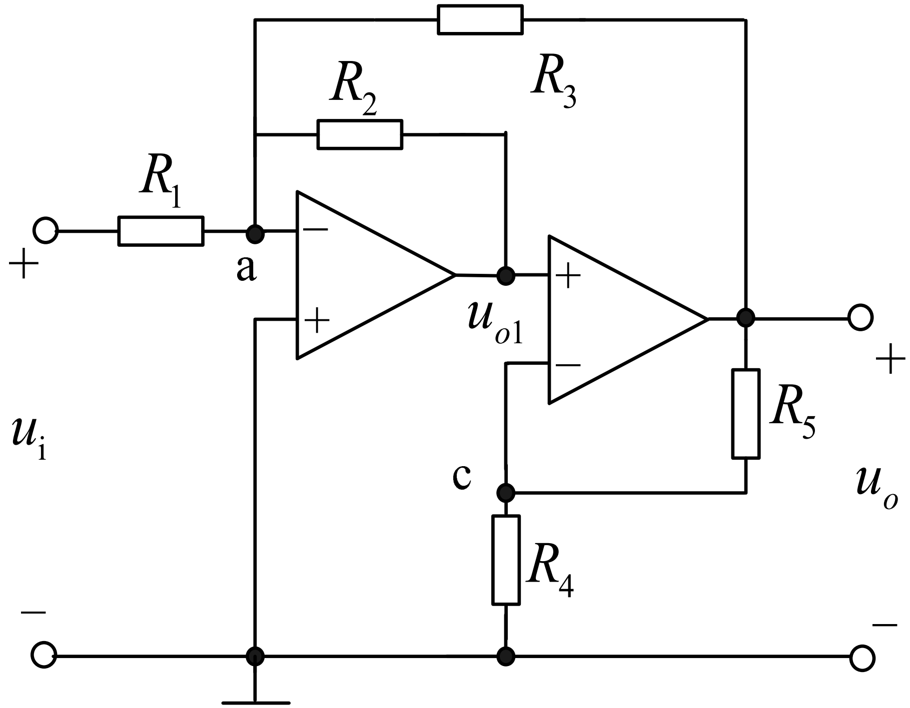
【例4】确定输出电压。

$$\frac{u_i - 0}{R_1} + \frac{u_{o1} - 0}{R_2} + \frac{u_o - 0}{R_3} = 0$$

$$u_c = \frac{R_4}{R_5 + R_4} u_o$$

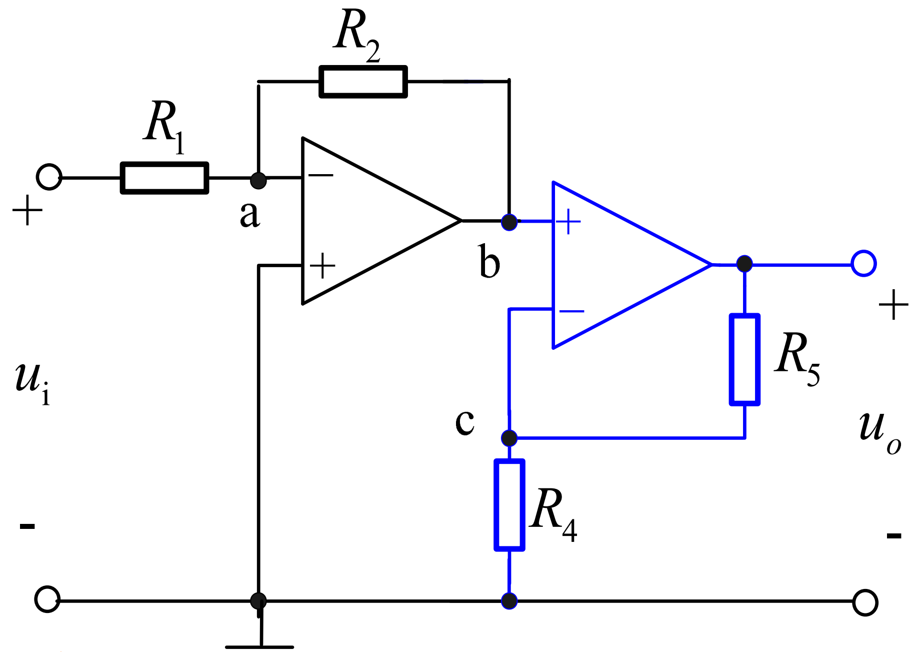
$$u_{o1} = u_c$$

$$\frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_2 R_3 (R_4 + R_5)}{R_1 (R_2 R_4 + R_2 R_5 + R_3 R_4)}$$




$$u_b = -\frac{R_2}{R_1} u_i \qquad u_o = (1 + \frac{R_5}{R_4}) u_b$$

$$u_o = -\frac{R_2}{R_1} (1 + \frac{R_5}{R_4}) u_i$$



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