



# 2 运算放大器

## 授课内容

2.1 集成电路运算放大器

2.2 理想运算放大器

2.3 基本线性运放电路

2.4 同相输入和反相输入放大电路的其他应用



# 2 运算放大器

## 教学目的、要求：

- 1.熟练掌握同相和反相输入比例运算等基本电路的结构及工作原理，会推导出输入输出的定量关系；
- 2.熟练运用虚短、虚断、虚地的概念对运算电路进行分析和计算



# 2 运算放大器



教学重点、难点：

1. 仪用放大电路的分析
2. 积分电路和微分电路分析

# 2.1 集成电路运算放大器

## 1. 集成电路运算放大器的内部组成单元

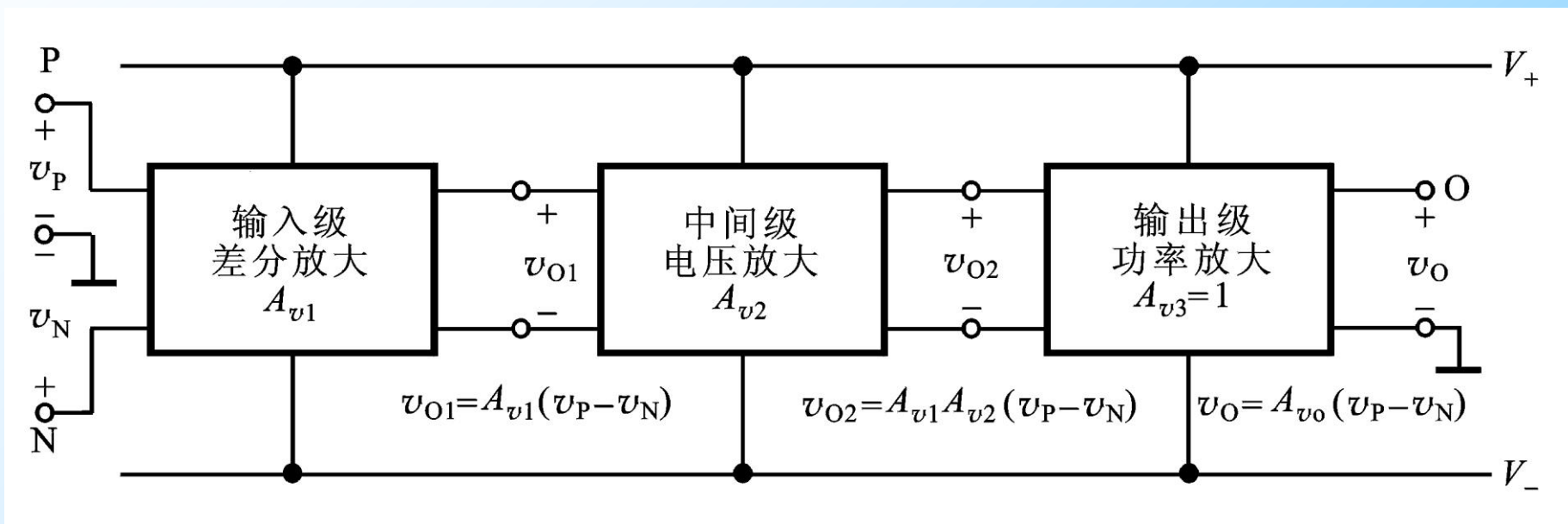


图2.1.1 集成运算放大器的内部结构框图

# 2.1 集成电路运算放大器

## 1. 集成电路运算放大器的内部组成单元

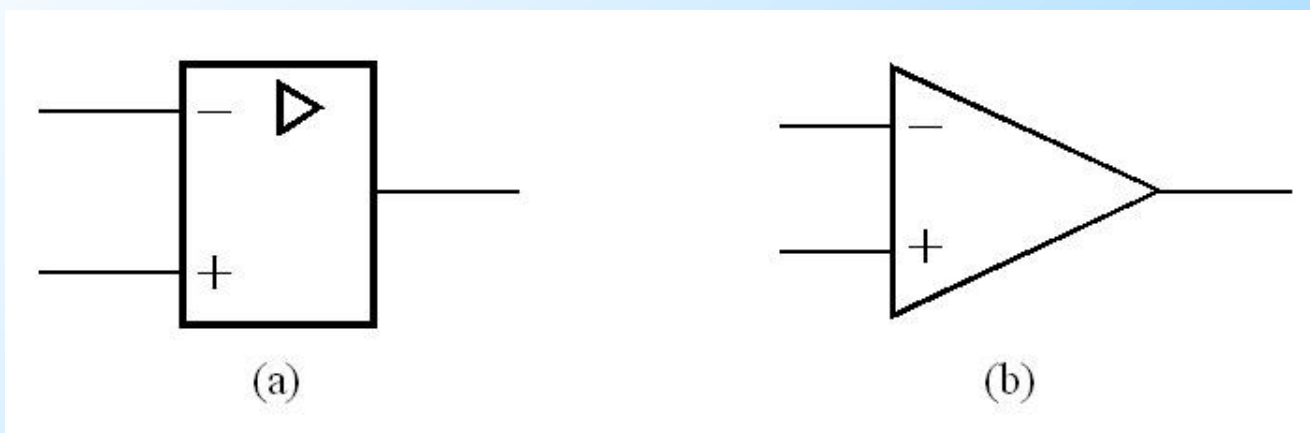


图2.1.2 运算放大器的代表符号

(a) 国家标准规定的符号 (b) 国内外常用符号

## 2. 运算放大器的电路模型

通常:

- 开环电压增益

$A_{v_o}$  的  $\geq 10^5$  (很高)

- 输入电阻

$r_i \geq 10^6 \Omega$  (很大)

- 输出电阻

$r_o \leq 100 \Omega$  (很小)

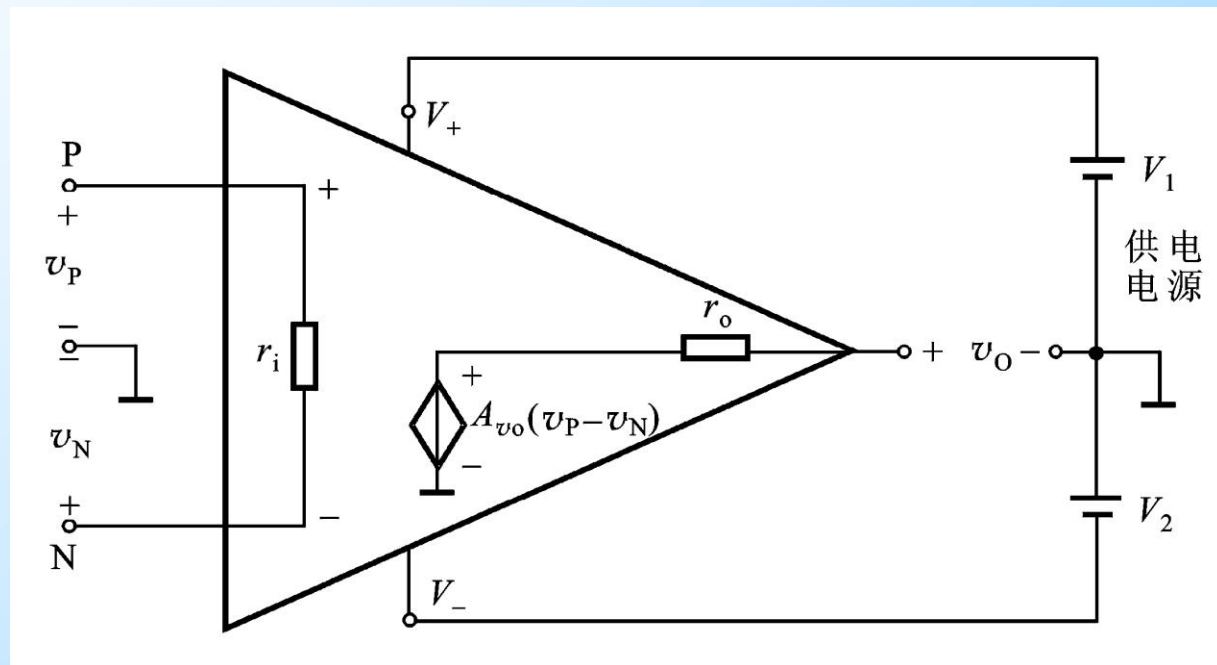


图2.1.3 运算放大器的电路模型

$$v_O = A_{v_o}(v_P - v_N) \quad (V_- < v_O < V_+)$$

注意输入输出的相位关系

## 2. 运算放大器的电路模型

当  $A_{vo}(v_P - v_N) \geq V_+$  时

$$v_O = V_+$$

当  $A_{vo}(v_P - v_N) \leq V_-$  时

$$v_O = V_-$$

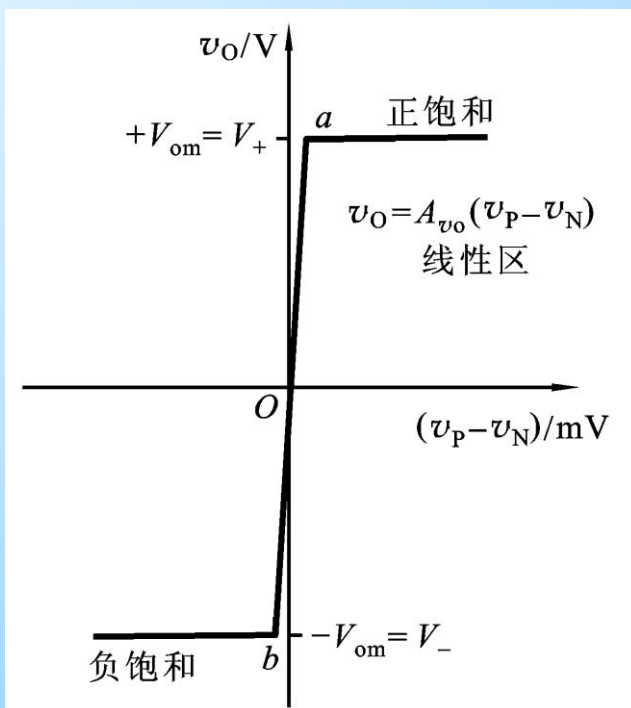
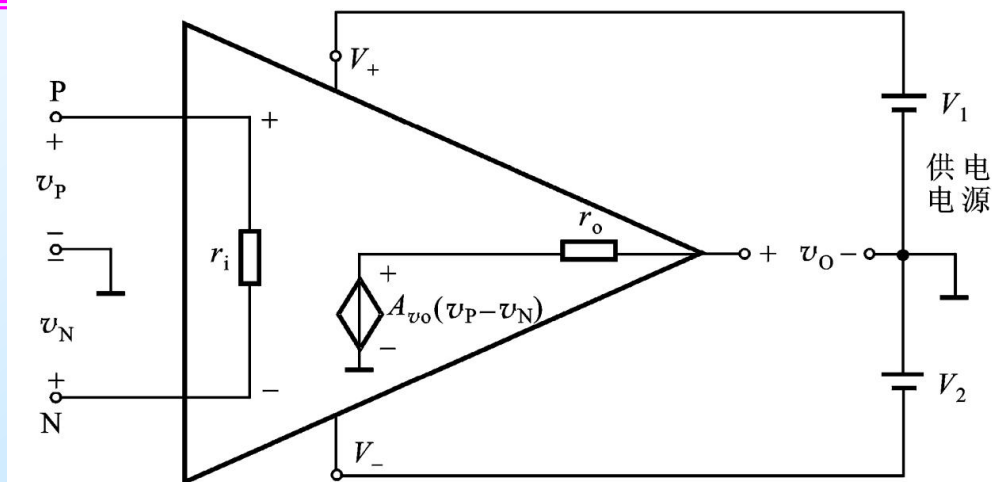
电压传输特性

$$v_O = f(v_P - v_N)$$

线性范围内

$$v_O = A_{vo}(v_P - v_N)$$

$A_{vo}$  —— 斜率



## 2.2 理想运算放大器

1.  $v_o$  的饱和极限值等于运放的电源电压  $V_+$  和  $V_-$

2. 运放的开环电压增益很高

若  $(v_P - v_N) > 0$

则  $v_O = +V_{om} = V_+$

若  $(v_P - v_N) < 0$

则  $v_O = -V_{om} = V_-$

3. 若  $V_- < v_O < V_+$

则  $(v_P - v_N) \rightarrow 0$

4. 输入电阻  $r_i$  的阻值很高

使  $i_P \approx 0$ 、 $i_N \approx 0$

5. 输出电阻很小,  $r_o \approx 0$

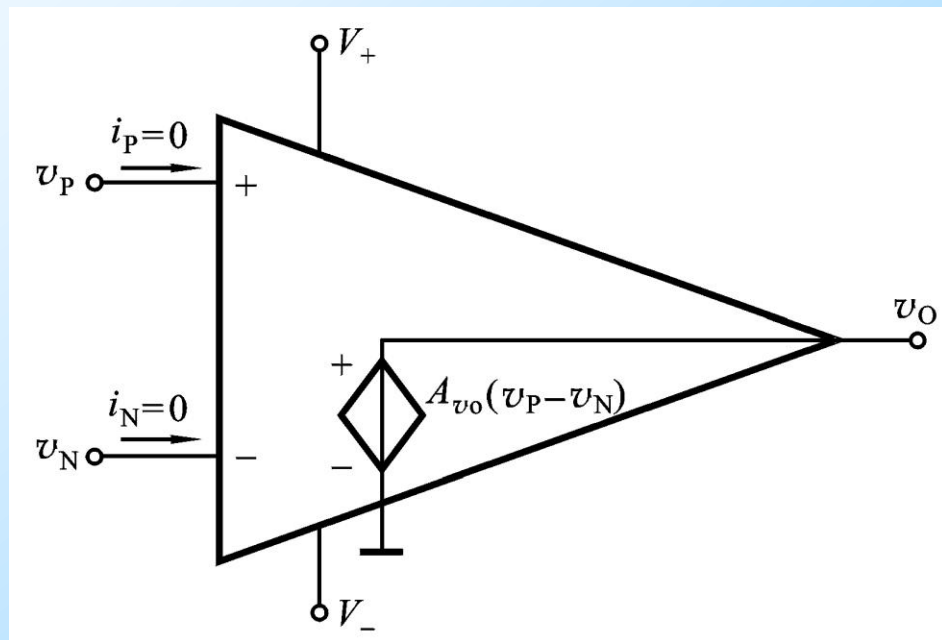


图2.2.1 运放的简化电路模型

理想:  $r_i \approx \infty$

$r_o \approx 0$

$A_{vo} \rightarrow \infty$

$v_o = A_{vo}(v_p - v_n)$





## 2.3 基本线性运放电路

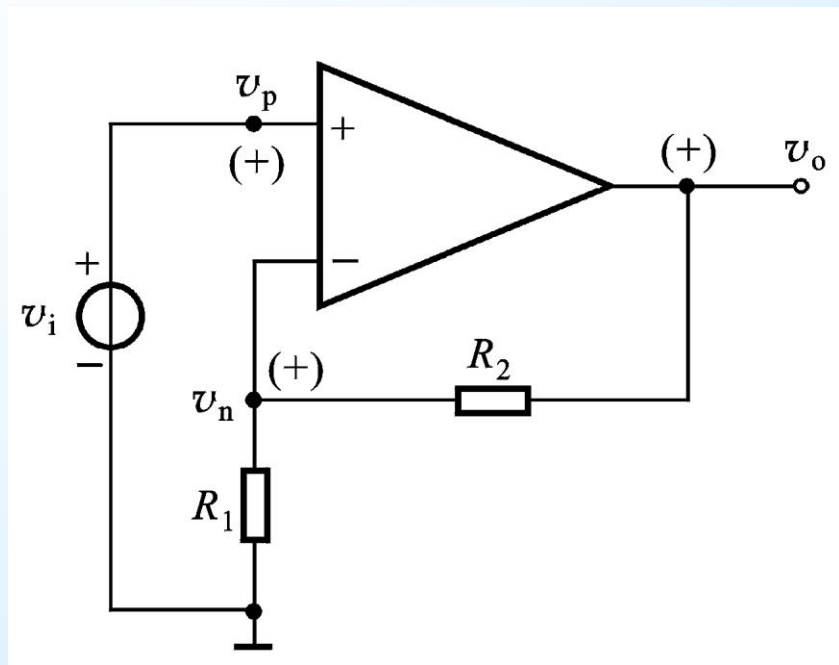
---

2.3.1 同相放大电路

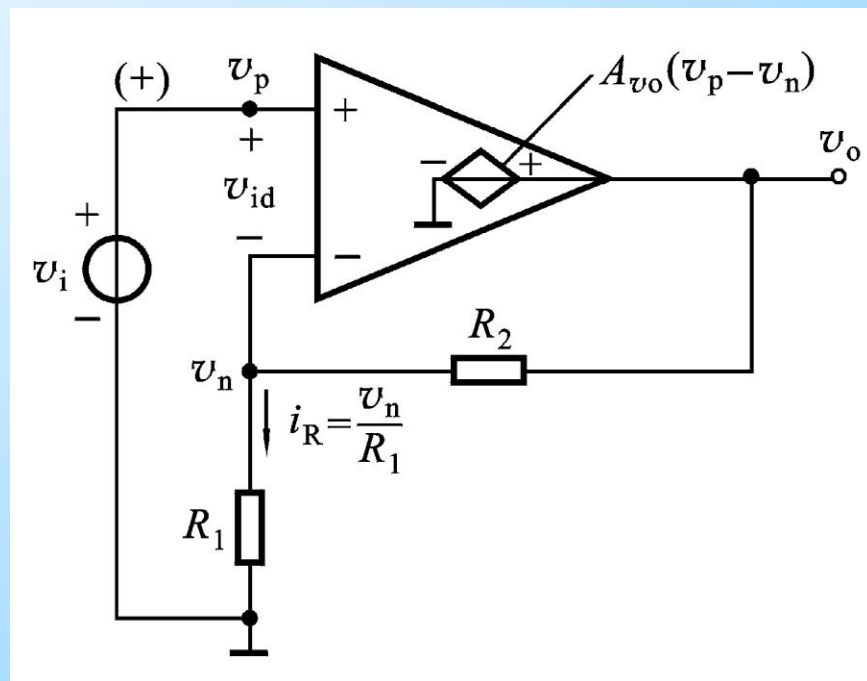
2.3.2 反相放大电路

## 2.3.1 同相放大电路

### 1. 基本电路



(a) 电路图



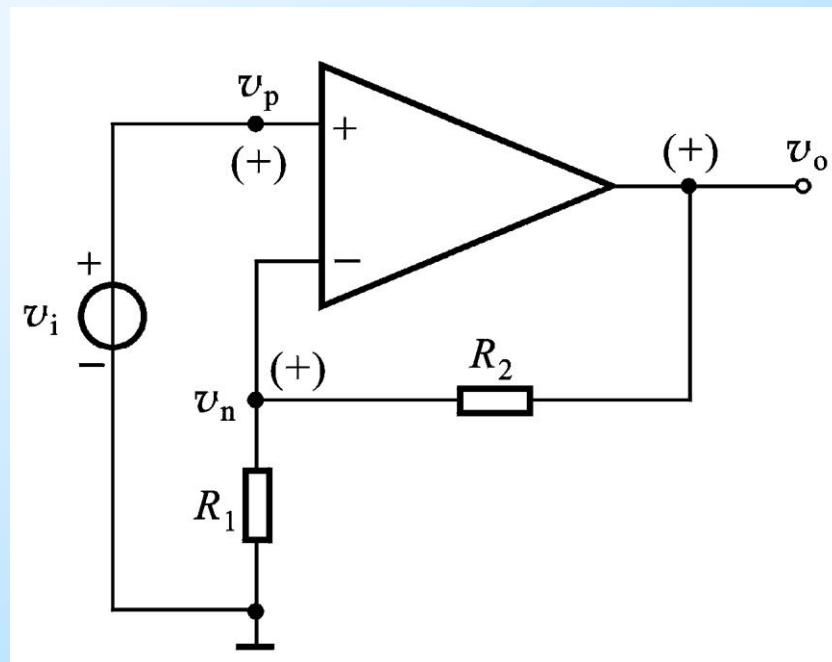
(b) 小信号电路模型

图2.3.1 同相放大电路

## 2.3.1 同相放大电路

### 2. 负反馈的基本概念

- 开环
- 闭环
- 反馈：将放大电路输出量，通过某种方式送回到输入回路的过程。



- 瞬时电位变化极性——某时刻电位的斜率

电路有  $v_o = A_{vo} (v_p - v_n)$

引入反馈后  $v_n \neq 0$ ,  $v_p(v_i)$  不变  $\rightarrow (v_p - v_n) \downarrow \rightarrow v_o \downarrow$

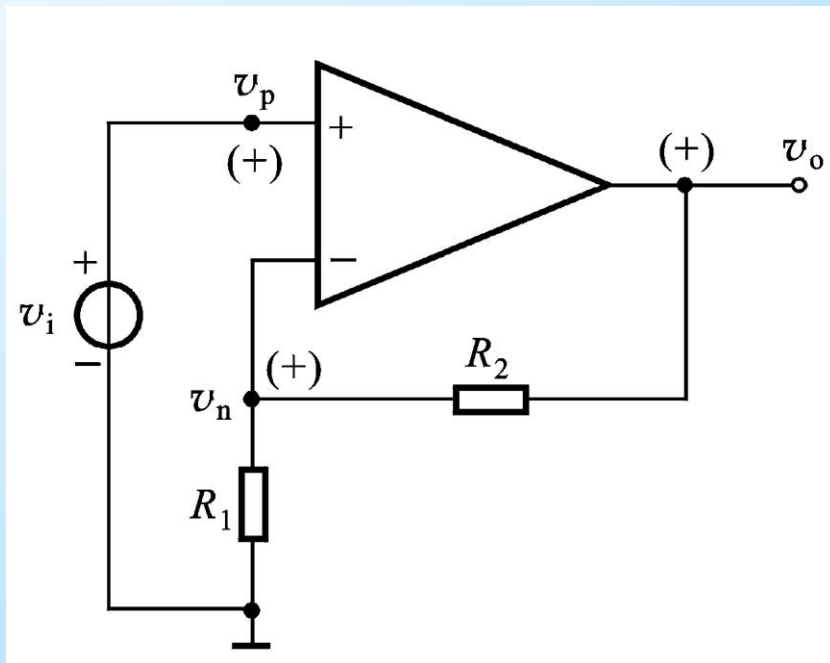
使输出减小了，增益  $A_v = v_o / v_i$  下降了，这时的反馈称为**负反馈**。

## 2.3.1 同相放大电路

### 3. 虚假短路

- 图中输出通过负反馈的作用，使 $v_n$ 自动地跟踪 $v_p$ ，即 $v_p \approx v_n$ ，或 $v_{id} = v_p - v_n \approx 0$ 。这种现象称为虚假短路，简称**虚短**

- 由于运放的输入电阻 $r_i$ 很大，所以，运放两输入端之间的 $i_p = -i_n = (v_p - v_n) / r_i \approx 0$ ，这种现象称为**虚断**。



由运放引入负反馈而得到的**虚短**和**虚断**两个重要概念，是分析由运放组成的各种线性应用电路的利器，必须熟练掌握。

## 2.3.1 同相放大电路

### 4. 几项技术指标的近似计算

#### (1) 电压增益 $A_v$

根据虚短和虚断的概念有

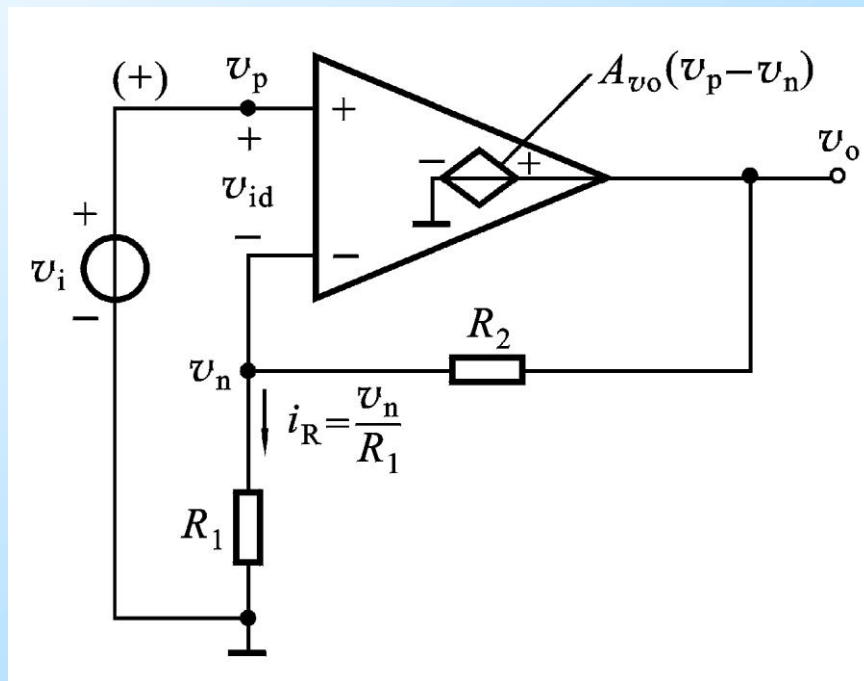
$$v_p \approx v_n, \quad i_p = -i_n = 0$$

所以

$$v_i = v_p = v_n = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot v_o$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

(可作为公式直接使用)



## 2.3.1 同相放大电路

### 4. 几项技术指标的近似计算

#### (2) 输入电阻 $R_i$

输入电阻定义

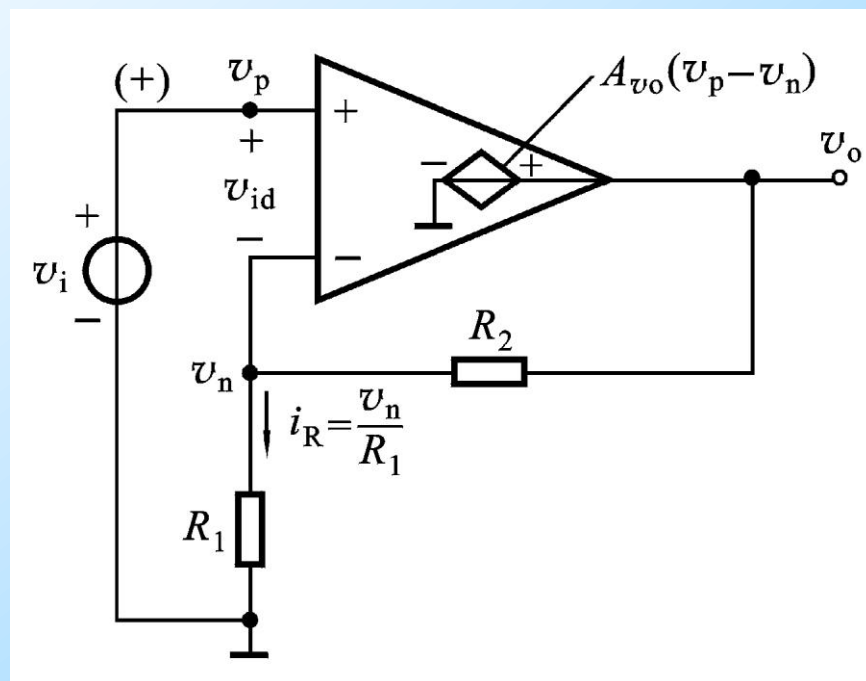
$$R_i = \frac{v_i}{i_i}$$

根据虚短和虚断有

$$v_i = v_p, \quad i_i = i_p \approx 0$$

$$\text{所以 } R_i = \frac{v_i}{i_i} \rightarrow \infty$$

$$(3) \text{ 输出电阻 } R_o \rightarrow 0$$



## 2.3.1 同相放大电路

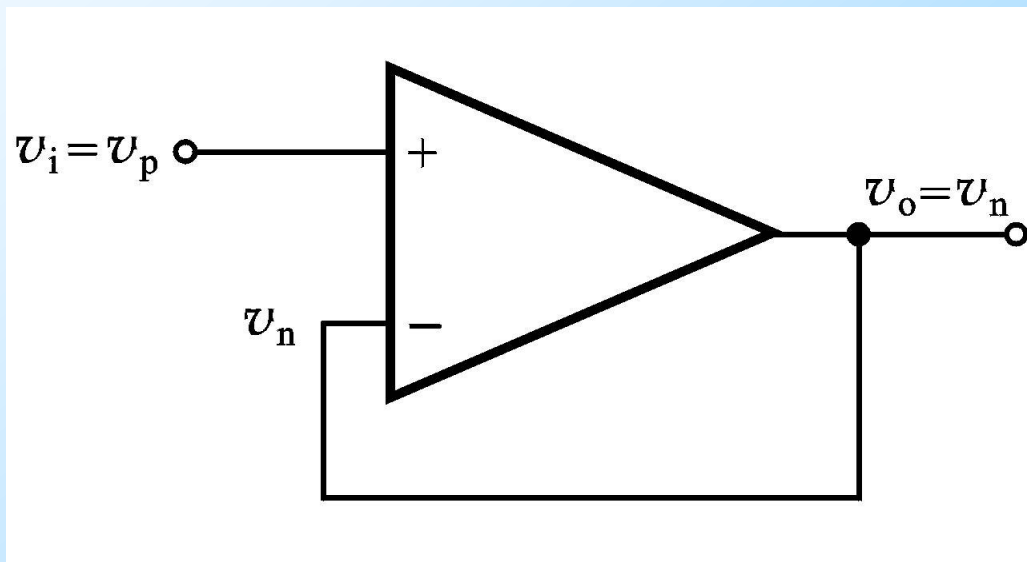
### 5. 电压跟随器

根据虚短和虚断有

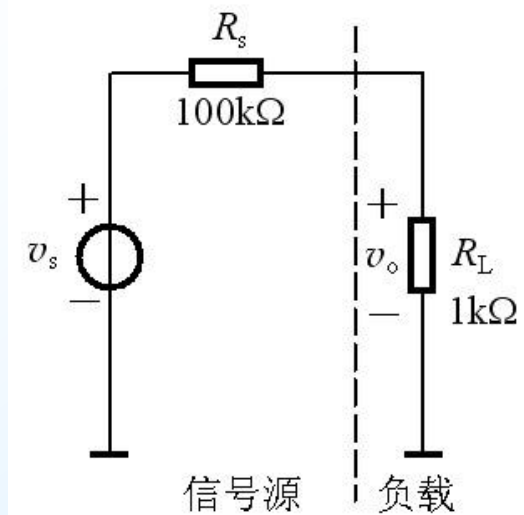
$$v_o = v_n \approx v_p = v_i$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \approx 1$$

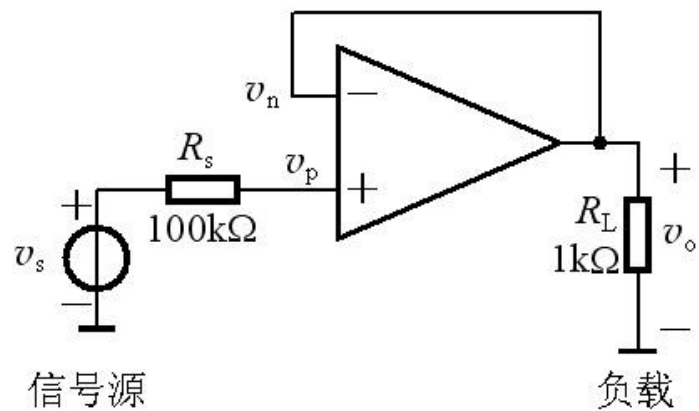
(可作为公式直接使用)



# 电压跟随器的作用



(a)



(b)

无电压跟随器时

负载上得到的电压

$$v_o = \frac{R_L}{R_s + R_L} \cdot v_s$$
$$= \frac{1}{100 + 1} \cdot v_s \approx 0.01v_s$$

电压跟随器时

$$i_p \approx 0, v_p = v_s$$

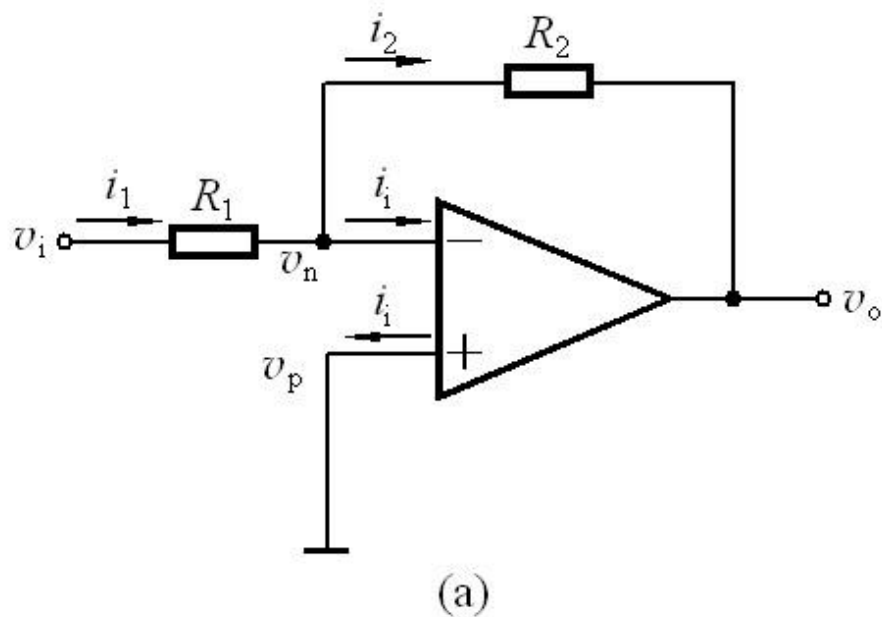
根据虚短和虚断有

$$v_o = v_n \approx v_p = v_s$$

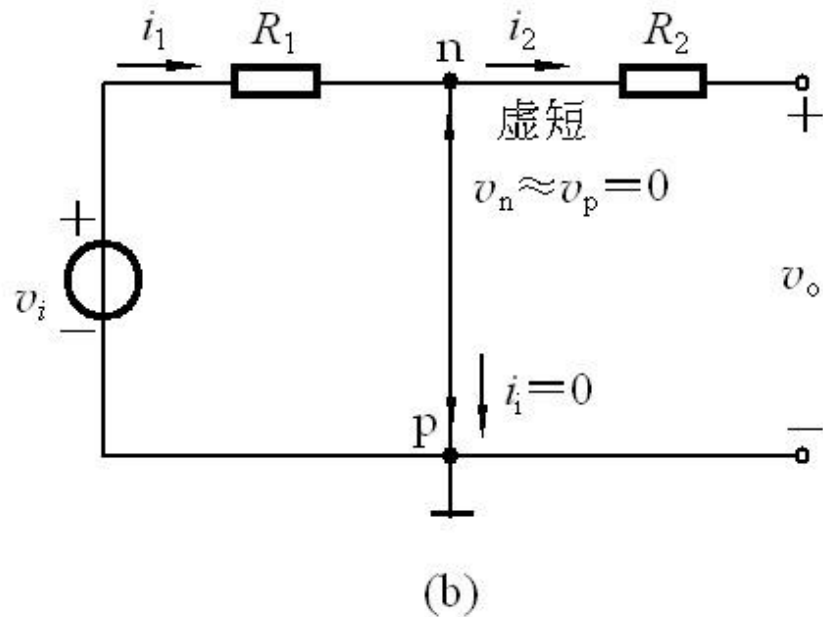


## 2.3.2 反相放大电路

### 1. 基本电路



(a) 电路图



(b) 由虚短引出虚地  $v_n \approx 0$

图2.3.5 反相放大电路

## 2.3.2 反相放大电路

### 2. 几项技术指标的近似计算

#### (1) 电压增益 $A_v$

根据虚短和虚断的概念有

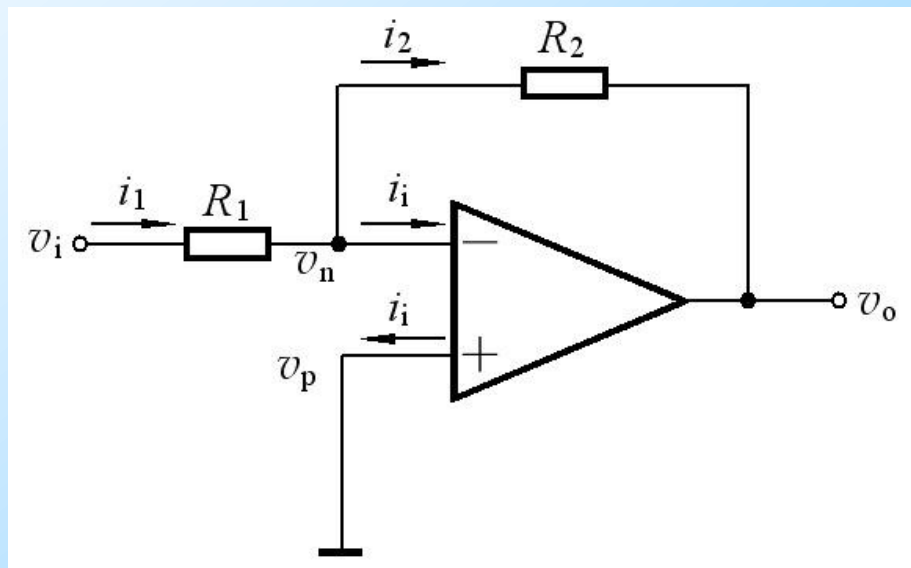
$$v_n \approx v_p = 0, \quad i_i = 0$$

所以  $i_1 = i_2$

$$\text{即 } \frac{v_i - v_n}{R_1} = \frac{v_n - v_o}{R_2}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

(可作为公式直接使用)



## 2.3.2 反相放大电路

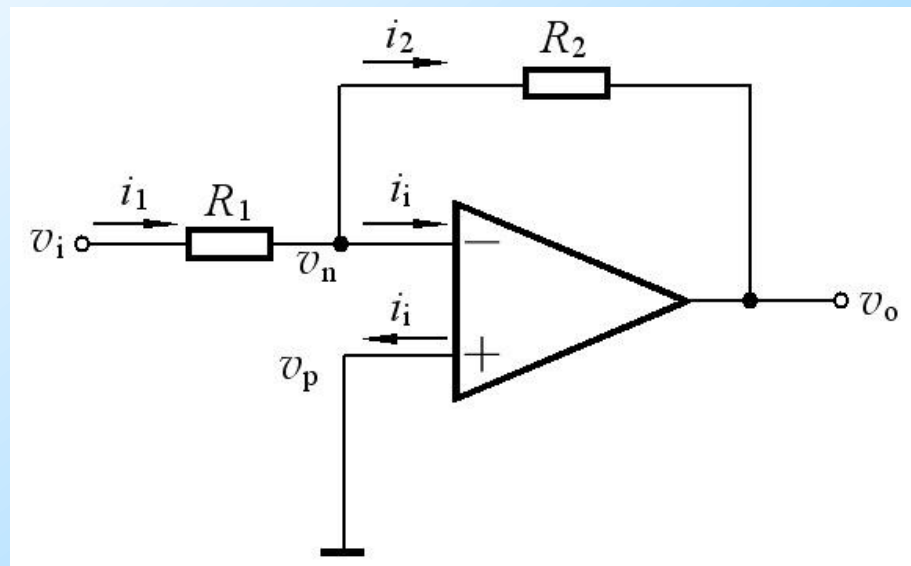
### 2. 几项技术指标的近似计算

#### (2) 输入电阻 $R_i$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{v_i}{v_i / R_1} = R_1$$

#### (3) 输出电阻 $R_o$

$$R_o \rightarrow 0$$



## 例2.3.3 直流毫伏表电路

当  $R_2 \gg R_3$  时,

(1) 试证明  $V_s = (R_3 R_1 / R_2) I_m$

(2)  $R_1 = R_2 = 150\text{k}\Omega$ ,  $R_3 = 1\text{k}\Omega$ ,  
输入信号电压  $V_s = 100\text{mV}$  时, 通过  
毫伏表的最大电流  $I_{m(\text{max})} = ?$

解 (1) 根据虚断有  $I_i = 0$

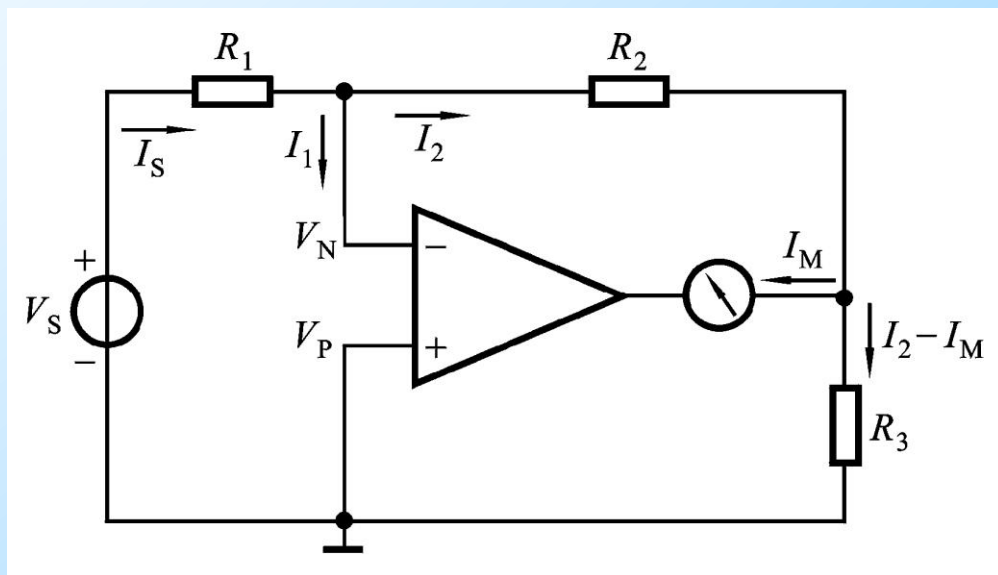
所以  $I_2 = I_s = V_s / R_1$

又根据虚短有  $V_p = V_n = 0$   $R_2$  和  $R_3$  相当于并联, 所以  $-I_2 R_2 = R_3 (I_2 - I_m)$

所以  $I_m = \left( \frac{R_2 + R_3}{R_3} \right) \frac{V_s}{R_1}$

当  $R_2 \gg R_3$  时,  $V_s = (R_3 R_1 / R_2) I_m$

(2) 代入数据计算即可



## 例2.3.3 直流毫伏表电路

当  $R_2 \gg R_3$  时,

(1) 试证明  $V_s = (R_3 R_1 / R_2) I_m$

(2)  $R_1 = R_2 = 150\text{k}\Omega$ ,  $R_3 = 1\text{k}\Omega$ ,  
输入信号电压  $V_s = 100\text{mV}$  时, 通过  
毫伏表的最大电流  $I_{m(\max)} = ?$

解 (1) 根据虚断有  $I_i = 0$

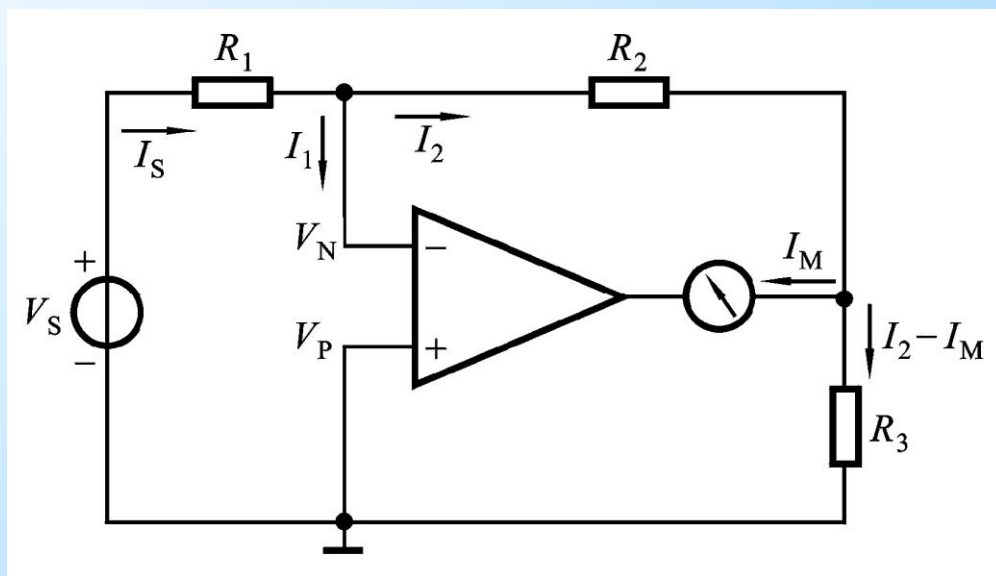
所以  $I_2 = I_s = V_s / R_1$

又根据虚短有  $V_p = V_n = 0$   $R_2$  和  $R_3$  相当于并联, 所以  $-I_2 R_2 = R_3 (I_2 - I_m)$

所以  $I_m = \left( \frac{R_2 + R_3}{R_3} \right) \frac{V_s}{R_1}$

当  $R_2 \gg R_3$  时,  $V_s = (R_3 R_1 / R_2) I_m$

(2) 代入数据计算即可





# 2.4 同相输入和反相输入放大电路的其他应用

---

2.4.1 求差电路

2.4.2 仪用放大器

2.4.3 求和电路

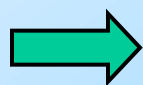
2.4.4 积分电路和微分电路

## 2.4.1 求差电路

从结构上看，它是反相输入和同相输入相结合的放大电路。

根据**虚短**、**虚断**和N、P点的KCL得：

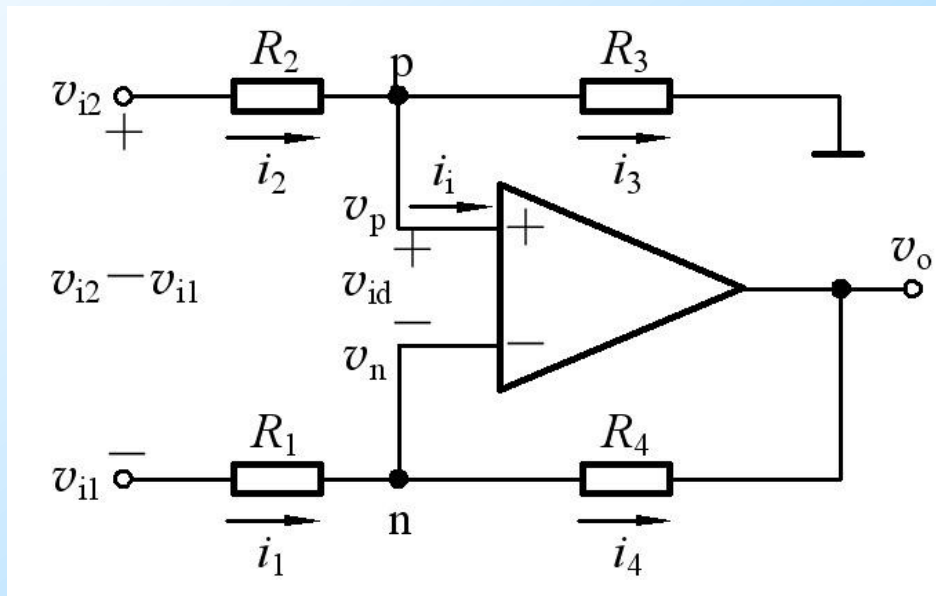
$$\begin{cases} v_n = v_p \\ \frac{v_{i1} - v_n}{R_1} = \frac{v_n - v_o}{R_4} \\ \frac{v_{i2} - v_p}{R_2} = \frac{v_p - 0}{R_3} \end{cases}$$



$$v_o = \left(\frac{R_1 + R_4}{R_1}\right)\left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right)v_{i2} - \frac{R_4}{R_1}v_{i1}$$

当  $\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$ ，则  $v_o = \frac{R_4}{R_1}(v_{i2} - v_{i1})$

若继续有  $R_4 = R_1$ ，则  $v_o = v_{i2} - v_{i1}$



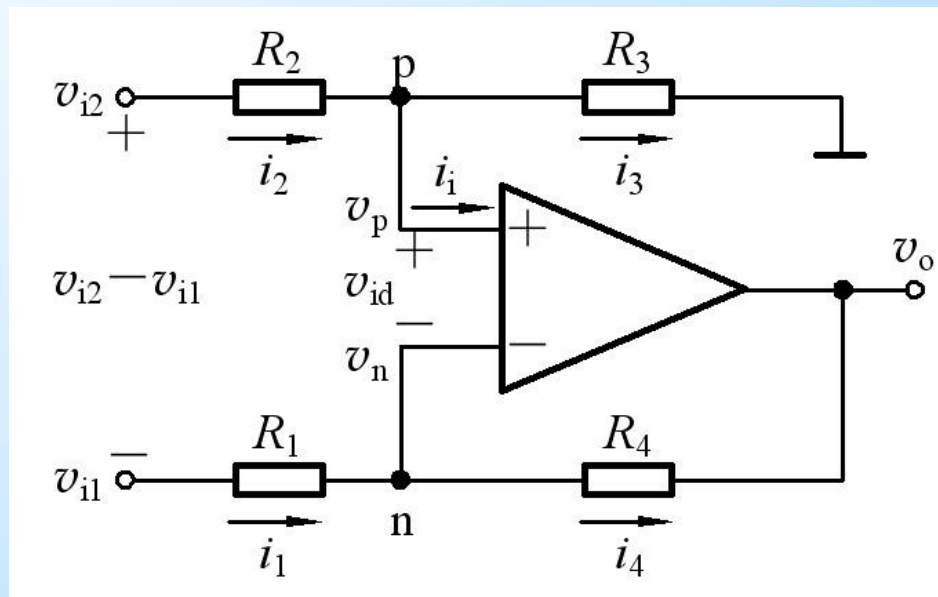
## 2.4.1 求差电路

$$\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} \text{ 时,}$$

$$v_o = \frac{R_4}{R_1} (v_{i2} - v_{i1})$$

从放大器角度看

$$\text{增益为 } A_{vd} = \frac{v_o}{v_{i2} - v_{i1}} = \frac{R_4}{R_1}$$

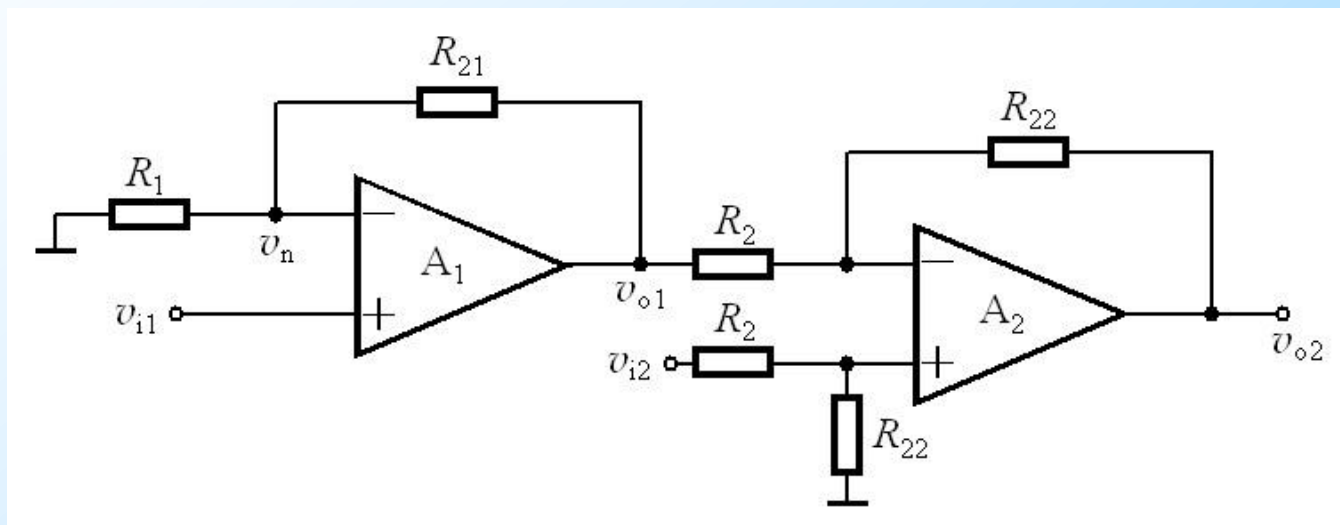


(该电路也称为差分电路或减法电路)



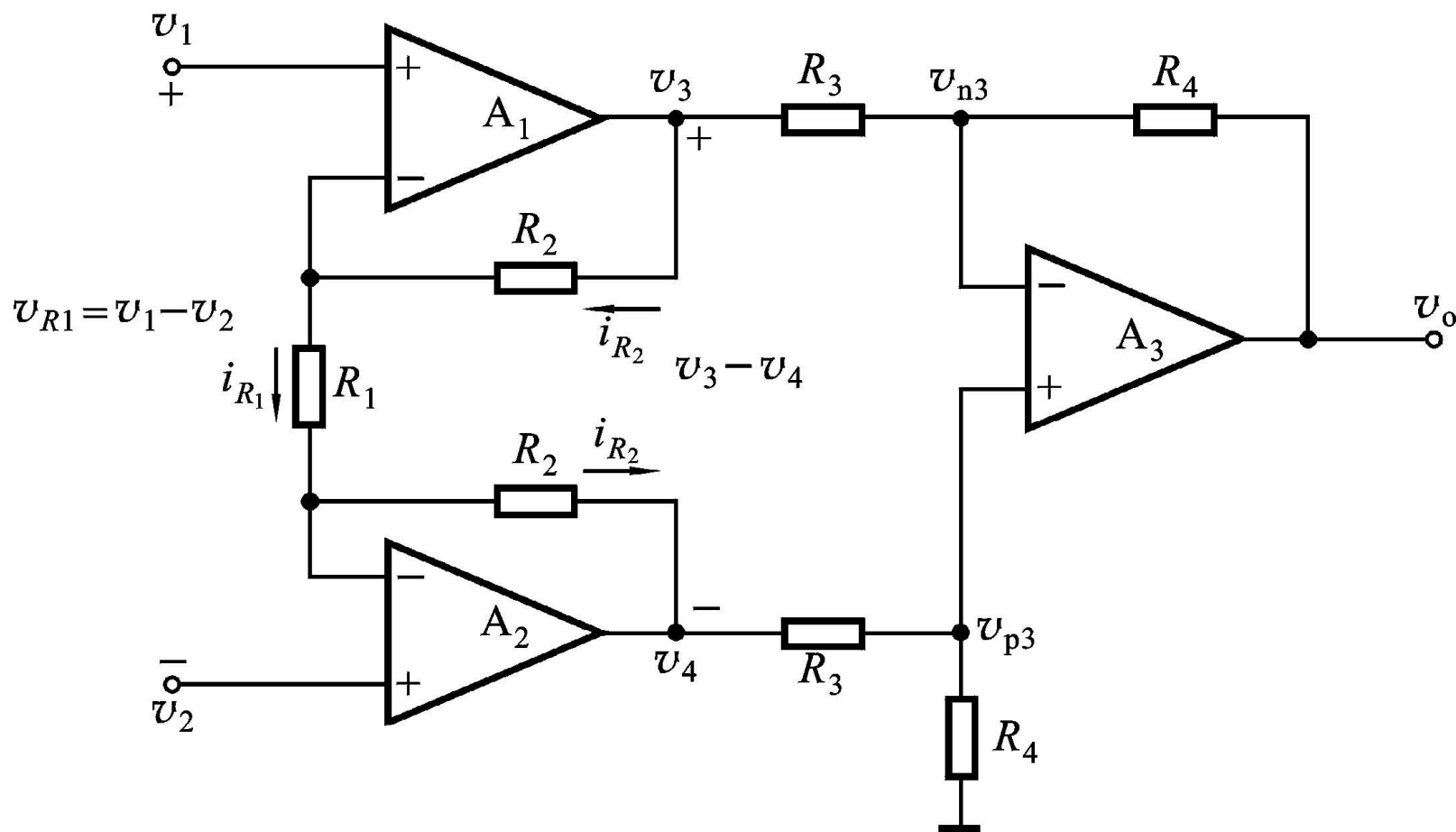
## 2.4.1 求差电路

一种高输入电阻的差分电路



## 2.4.2 仪用放大器

$$A_v = \frac{v_o}{v_1 - v_2} = -\frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)$$



## 2.4.3 求和电路

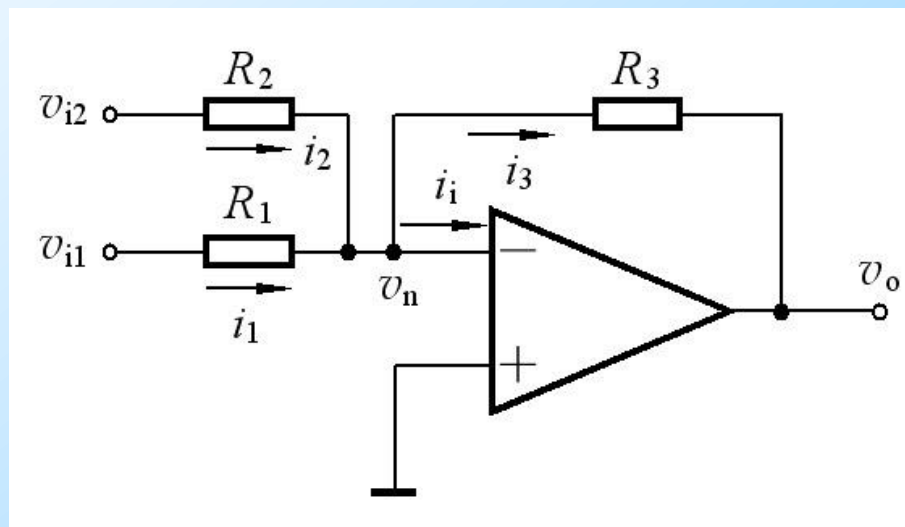
根据虚短、虚断和N点的KCL得:

$$\begin{cases} v_n = v_p = 0 \\ \frac{v_{i1} - v_n}{R_1} + \frac{v_{i2} - v_n}{R_2} = \frac{v_n - v_o}{R_3} \end{cases}$$

$$\rightarrow -v_o = \frac{R_3}{R_1}v_{i1} + \frac{R_3}{R_2}v_{i2}$$

若  $R_1 = R_2 = R_3$

则有  $-v_o = v_{i1} + v_{i2}$



(该电路也称为加法电路)

## 2.4.4 积分电路和微分电路

### 1. 积分电路

根据“虚短”， $v_P = v_N = 0$

根据“虚断”， $i_i = 0$

得 因此  $i_2 = i_1 = \frac{v_I}{R}$

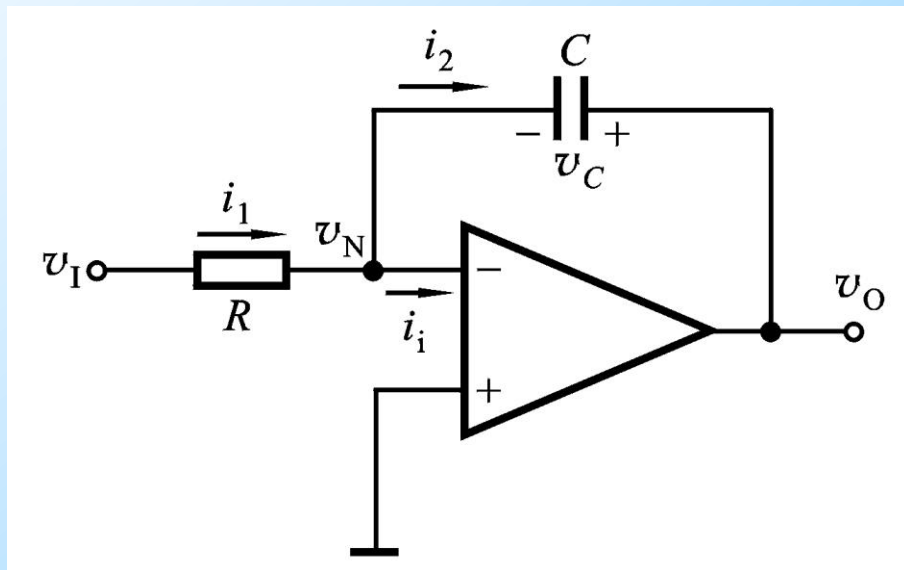
电容器被充电，其充电电流为  $i_2$

设电容器  $C$  的初始电压为零，则

$$v_N - v_O = \frac{1}{C} \int i_2 dt = \frac{1}{C} \int \frac{v_I}{R} dt \quad \Rightarrow \quad v_O = -\frac{1}{RC} \int v_I dt$$

式中，负号表示  $v_O$  与  $v_I$  在相位上是相反的。

(积分运算)



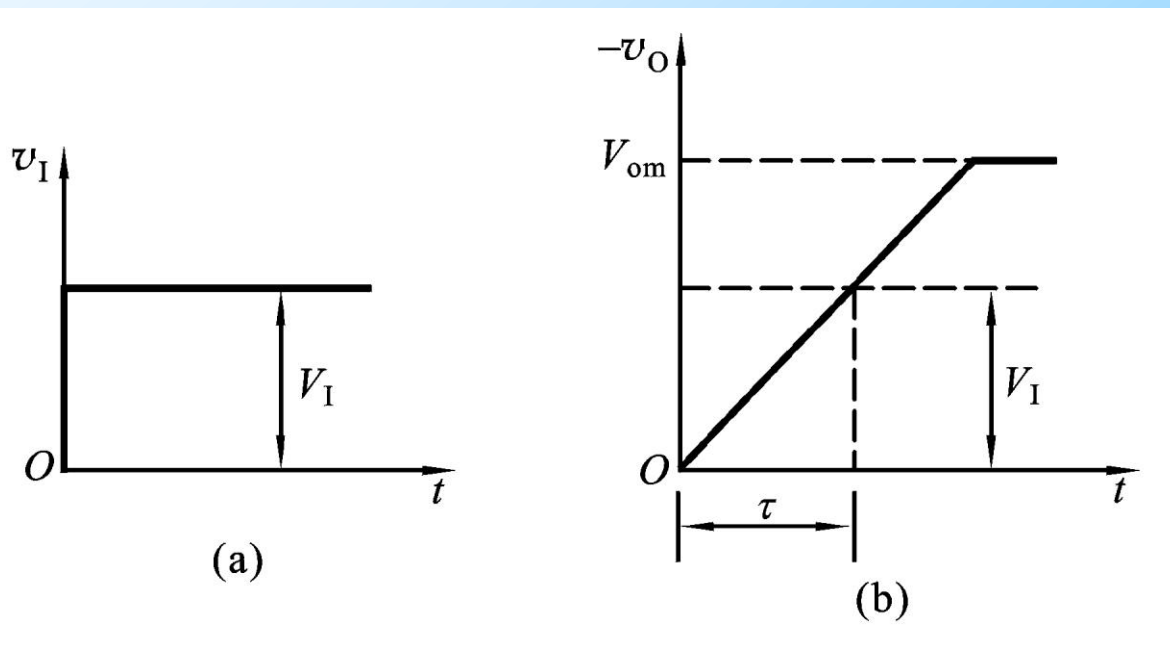
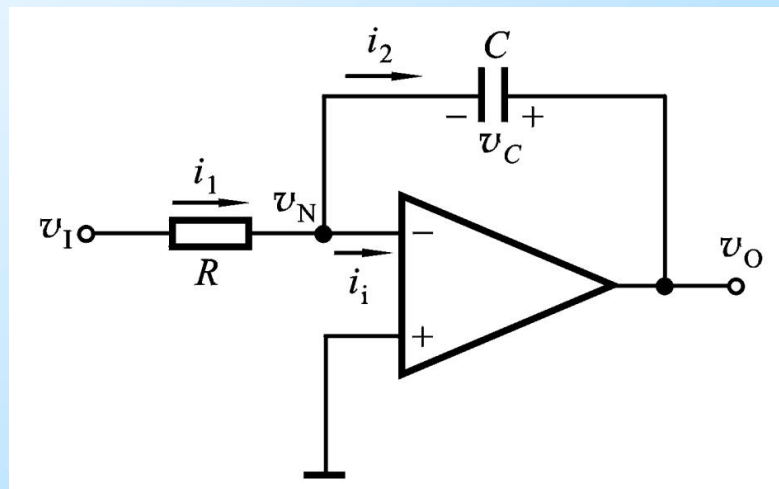
## 2.4.4 积分电路和微分电路

### 1. 积分电路

当  $v_I$  为阶跃电压时，有

$$v_O = -\frac{1}{RC} \int v_I dt = -\frac{V_i}{RC} t = -\frac{V_i}{\tau} t$$

$v_O$  与  $t$  成线性关系



## 2.4.4 积分电路和微分电路

### 2. 微分电路

$$v_O = -RC \frac{dv_I}{dt}$$

