



# 第二章 运算放大器

2.1 集成电路运算放大器

2.2 理想运算放大器

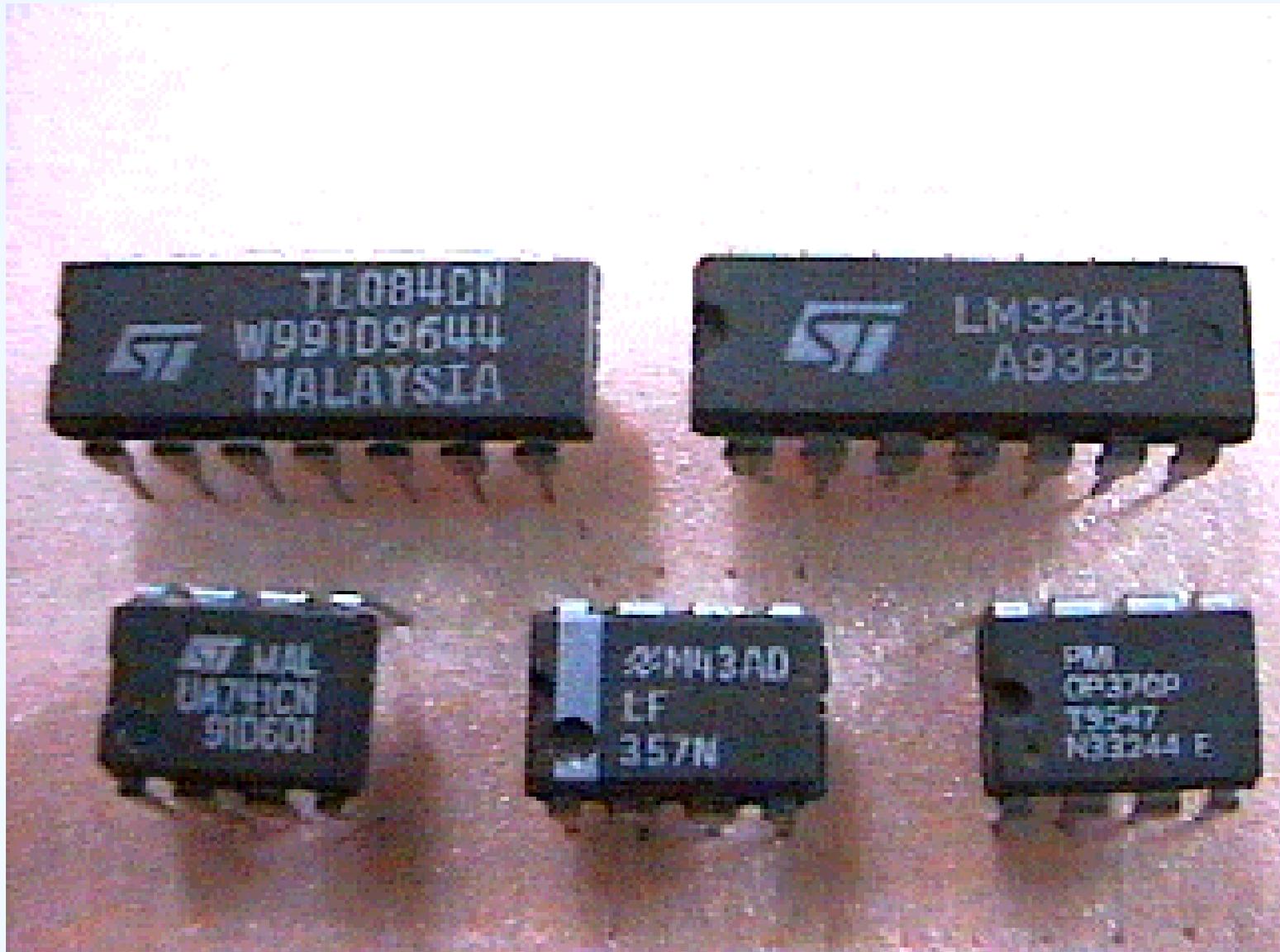
2.3 基本线性运放电路

2.4 同相输入和反相输入放大电路  
的其他应用

2.5 SPICE仿真例题

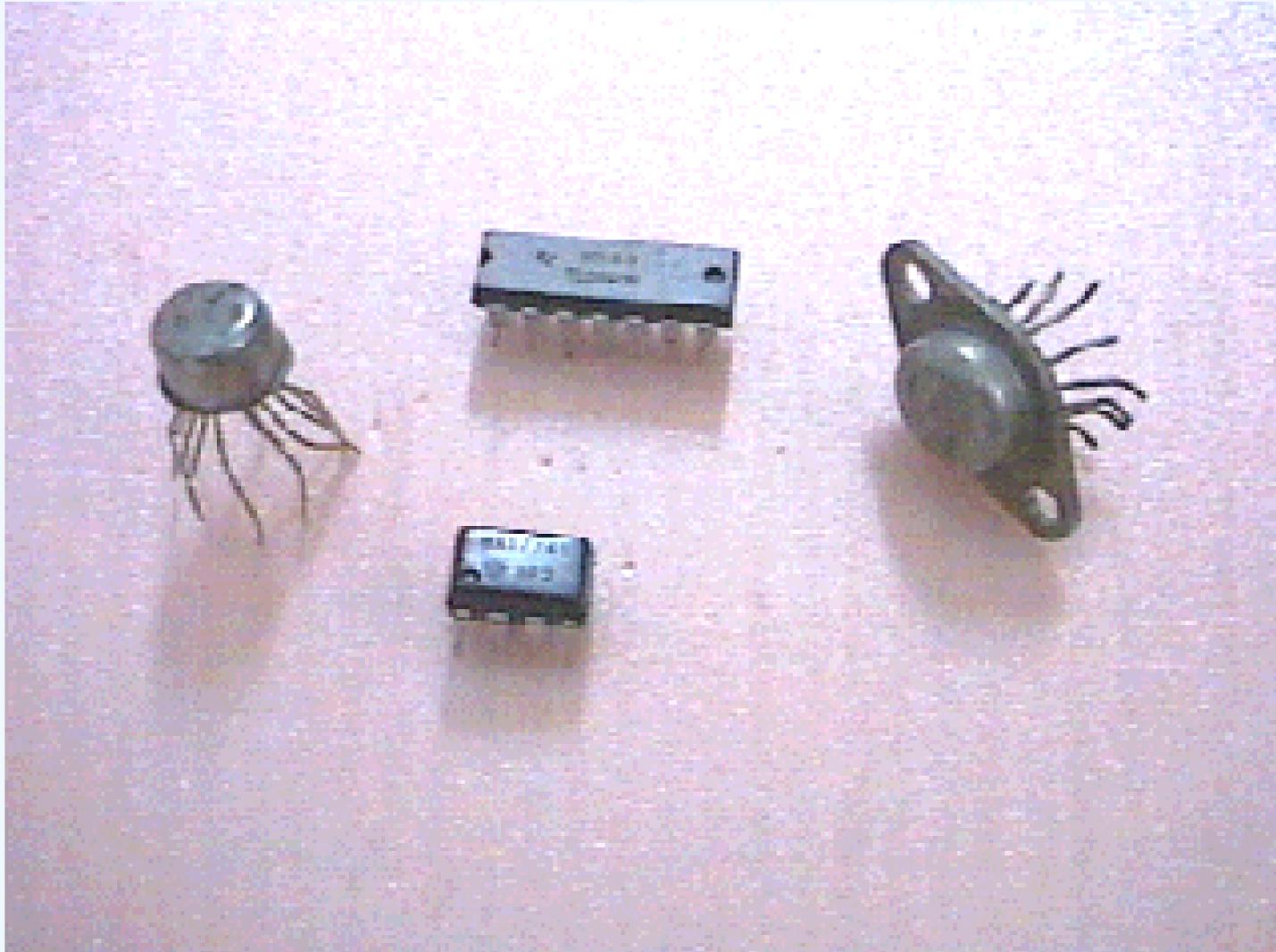
- 1、集成电路运算放大器的内部组成单元
- 2、运算放大器的电路模型

# 集成运算放大器外形图1



## 集成运算放大器外形图2

---



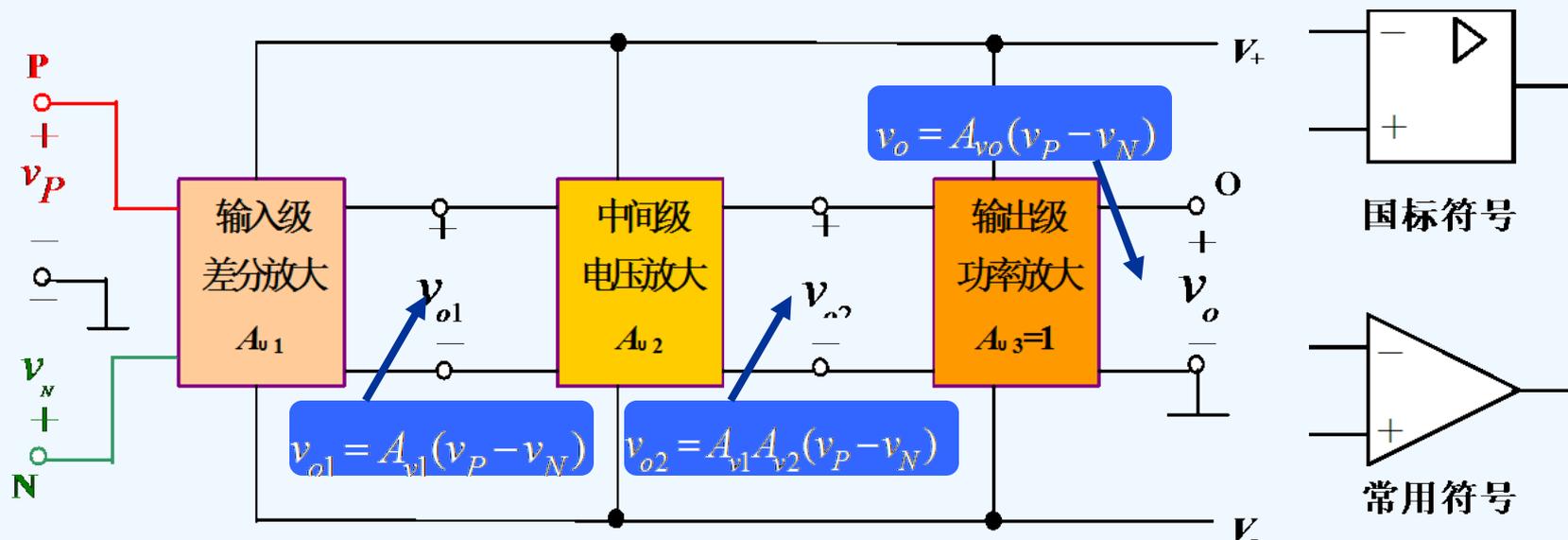
# 四运放集成电路LM324

---

- LM324是四运放集成电路，它采用14脚双列直插塑料封装，外形如图所示。它的内部包含四组形式完全相同的运算放大器，除电源共用外，四组运放相互独立。

运算放大器符号

# 1、集成电路运算放大器的内部组成单元

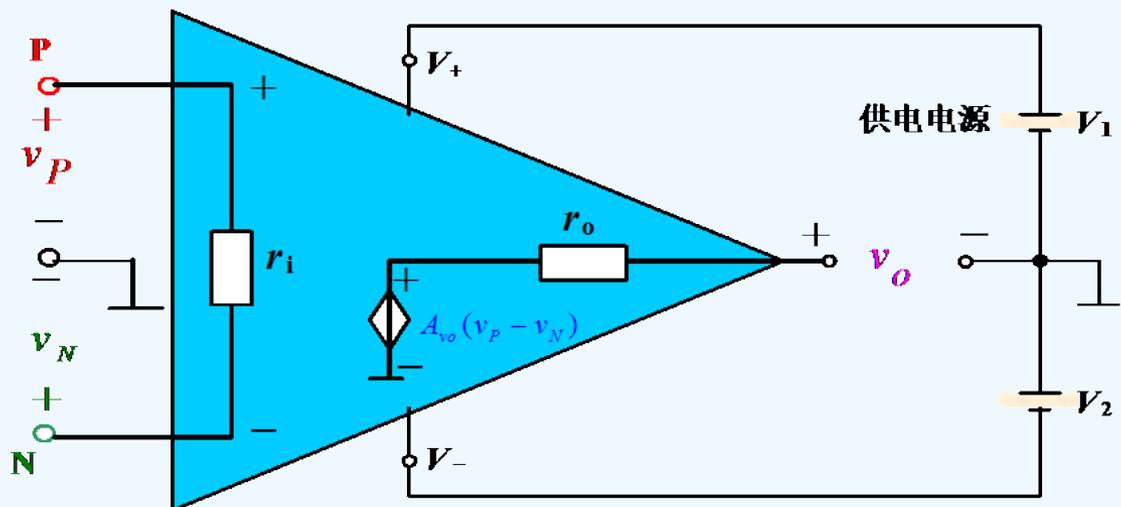


- 1、输入输出端口P、N、O。
- 2、各级的作用？
- 3、 $v_P$ 、 $v_N$ 、 $v_o$ 的参考电位点？ 正负电源的中间接点
- 4、运放的代表符号。

大家有疑问的，可以询问和交流

可以互相讨论下，但要

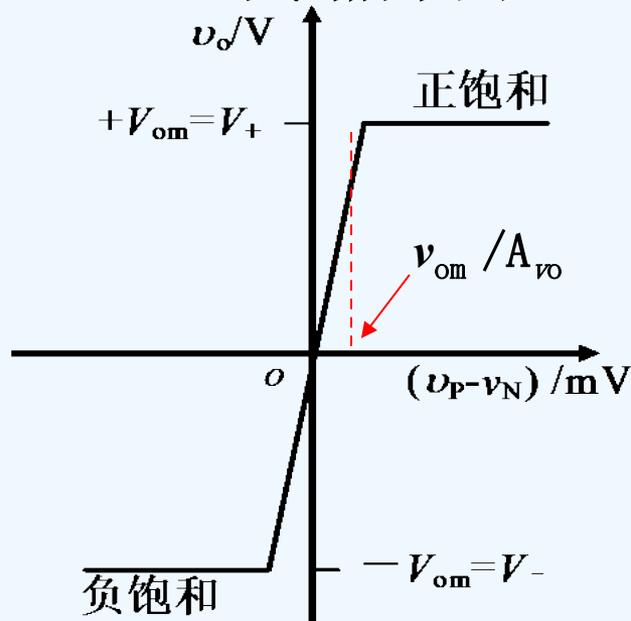
## 1、电路模型及说明



运算放大器的电路模型

- 输入电阻 $r_i$ 较大，通常为 $10^6\Omega$ 或更大；
- 输出电阻 $r_o$ 较小，通常为 $100\Omega$ 或更小；
- 开环电压增益 $A_{vo}$ 的值较高，至少为 $10^4$ ；
- 受控电压源： $A_{vo}(v_P - v_N)$ 。

## 2、电压传输特性



运算放大器电压传输特性

设  $v_P > v_N$ , 若

$V_- < A_{vo}(v_P - v_N) < V_+$ ,  
则  $v_o = A_{vo}(v_P - v_N)$ ;

若  $A_{vo}(v_P - v_N) \geq V_+$ ,  
则  $v_o = +V_{om} = V_+$ ;

若  $A_{vo}(v_P - v_N) \leq V_-$ ,  
则  $v_o = -V_{om} = V_-$ 。

输出电压  $v_o$  不可能超越正负电源的电压值。

? 当  $v_o = \pm V_{om}$  时输入电压的最小幅值  $v_P - v_N = ?$

■ 例2.1.1: 电路如图所示, 运放的  $A_{vo}=10^6$ , 输入电阻  $r_i=10^9 \Omega$ ,  $V_-=-10V$ 。(1) 试求当  $v_o=$  的最小幅值  $v_P-v_N=?$  输入电流特性曲线  $v_o=f(v_P-v_N)$ 。说明

解: (1) 当  $v_o=\pm V_{om}$  时, 输入电压最小幅值

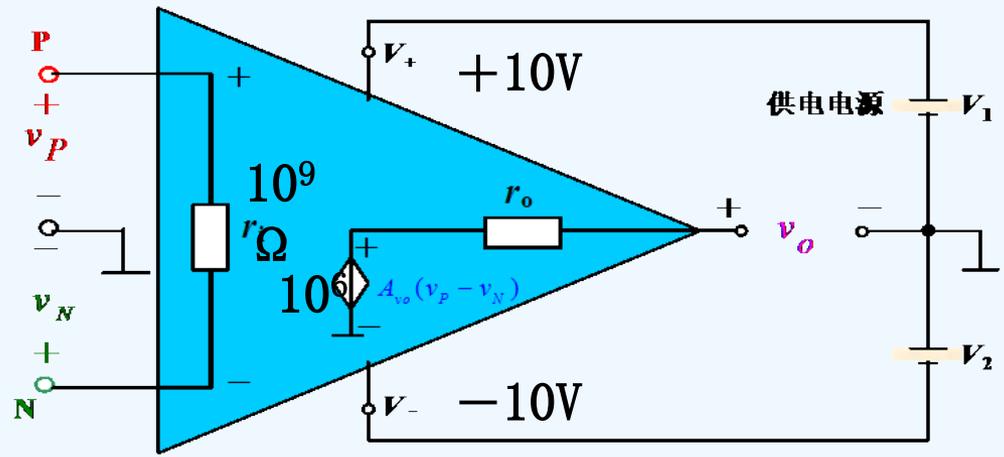
$$v_P - v_N = v_o / A_{vo} = \pm 10V / 10^6$$

$$= \pm 10\mu V$$

输入电流  $i_i = v_P - v_N / r_i$

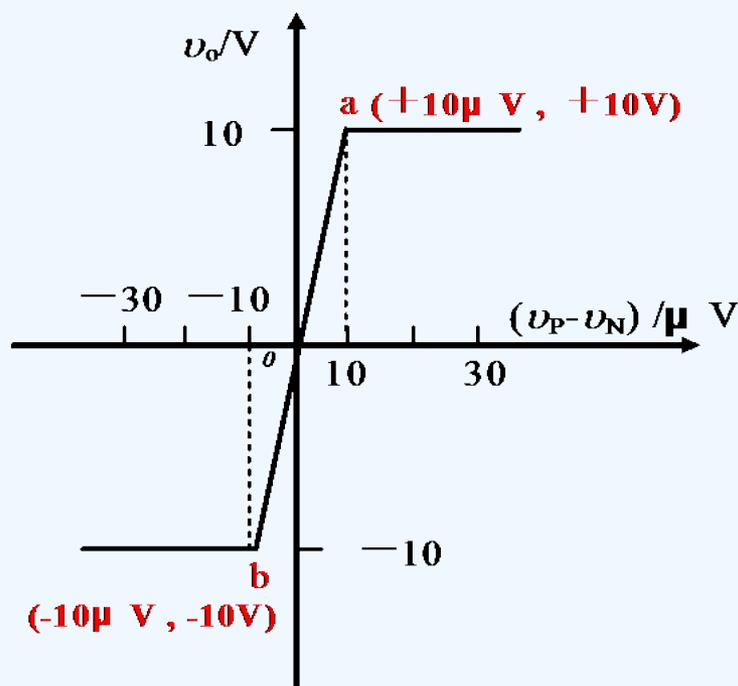
$$= \pm 10\mu V / 10^9 \Omega$$

$$= \pm 1 \times 10^{-8} \mu A$$



运算放大器的电路模型

■ 例2.1.1



例 2.1.1 运放电压传输特性

解: (2) 画传输特性曲线

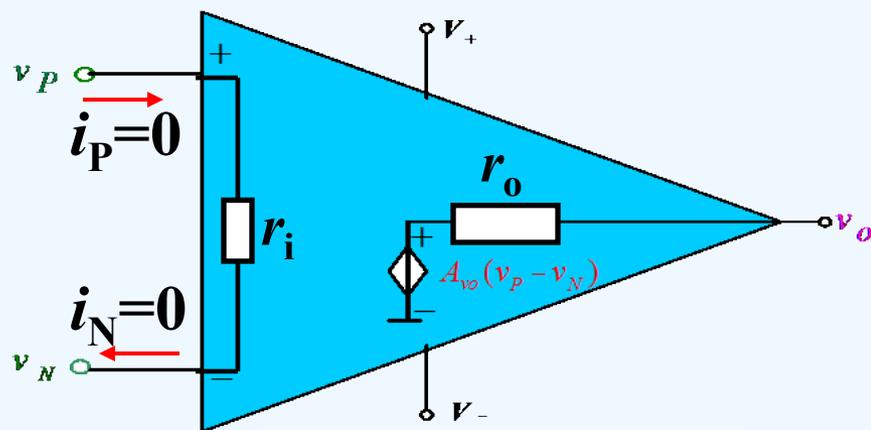
取a点 $(+10\mu V, +10V)$ ,  
 b点 $(-10\mu V, -10V)$ , 连接a, b两点得线段ab,  
 其斜率为 $A_{v0}=10^6$ ,  
 $|v_P - v_N| < 10\mu V$ , 电路工作在线性区, 否则工作在非线性区。电压传输特性曲线如左图所示。

## 近似理想运放模型

- 1、输出电压 $v_o$ 的饱和极限值等于运放的电源电压，即 $+V_{om}=V_+$ ， $-V_{om}=V_-$ 。
- 2、开环电压增益很高，差分输入电压（ $v_P - v_N$ ）的值很小也可使运放进入饱和区。
- 3、若 $v_o$ 未达到饱和极限，则差分输入电压（ $v_P - v_N$ ）必趋近于0。当 $v_o$ 处于 $V_+$ 与 $V_-$ 之间，则运放必工作在线性区。
- 4、内部的输入电阻 $r_i$ 的阻值很高，可近似地认为它为无穷大；由此可假定 $i_P=0$ ， $i_N=0$ 。
- 5、内部的输出电阻 $r_o$ 的阻值很低乃至可以认为它为0。

## 理想运放模型

■ 将近似理想运放的参数理想化 ( $+V_{om}=V_+$ ,  $-V_{om}=V_-$ ,  $A_{vo} \rightarrow \infty$ ,  $i_P=0$ ,  $i_N=0$ ,  $r_i=\infty$ ,  $r_o=0$ ), 便可得到理想运放的模型



运放电路模型

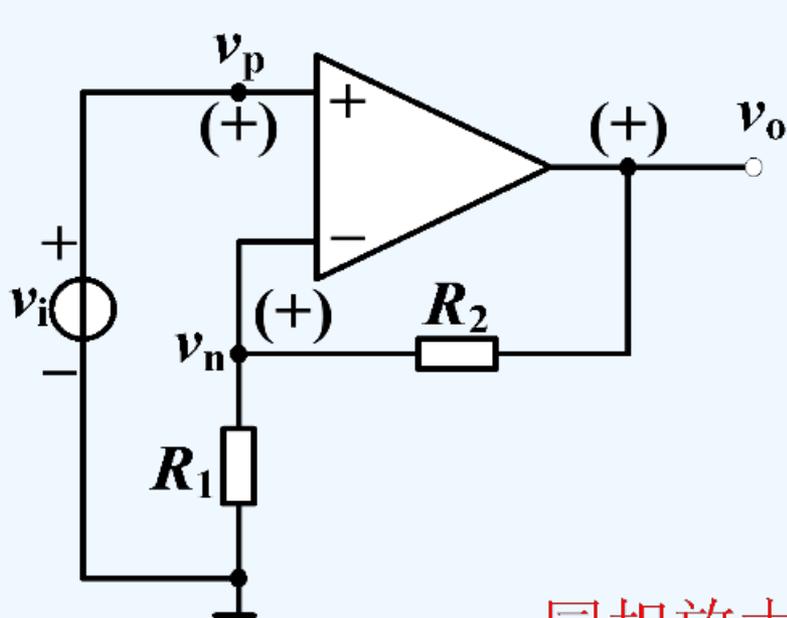
■ 该图表示输入端是开路的, 即  $r_i \approx \infty$ , 输出端电阻  $r_o \approx 0$ , 输出电压  $v_O = A_{vo}(v_P - v_N)$ , 其中  $A_{vo} \rightarrow \infty$

- 同相输入和反相输入是两种最基本的放大电路，许多由运放组成的功能电路都以此为基础。
- 在分析运放组成的各种应用电路时，其中的运放视为理想运放。
- [2.3.1 同相放大电路](#)
- [2.3.2 反相放大电路](#)

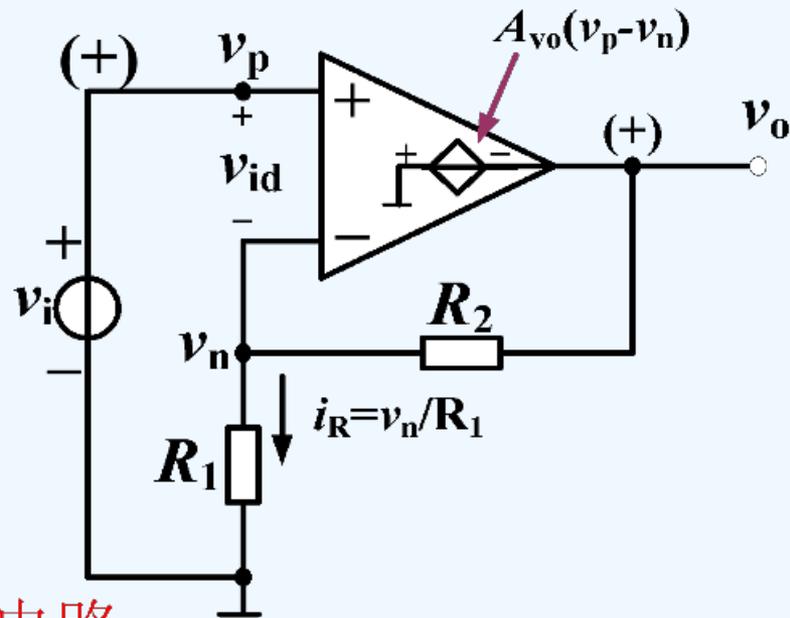
? 电压传输特性形状与  $A_{v0}(v_P - v_N)$  密切相关，由于  $A_{v0}$  很大，导致性能不稳定，怎

## 2.3.1 同相放大电路

### 1、基本电路



(a) 电路图



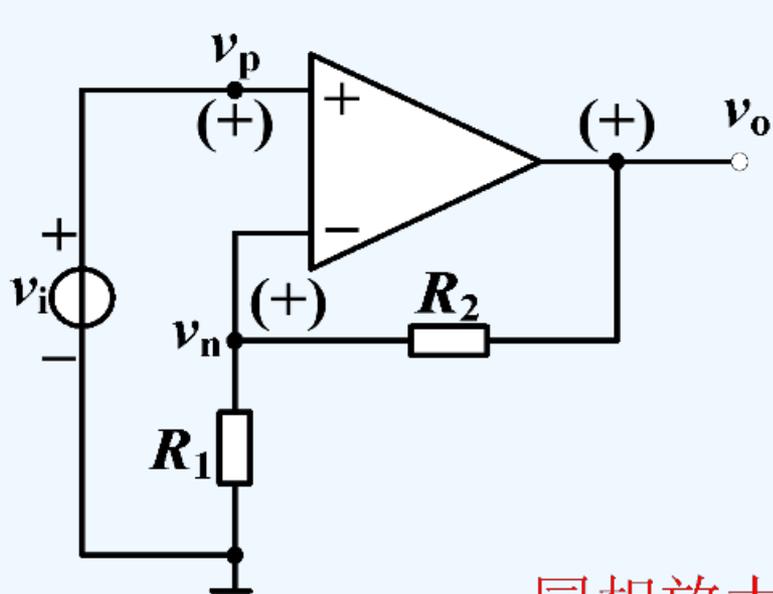
(b) 小信号电路模型

a、输入信号  $v_i$  加到运放的同相输入端 “+” 和地之间。

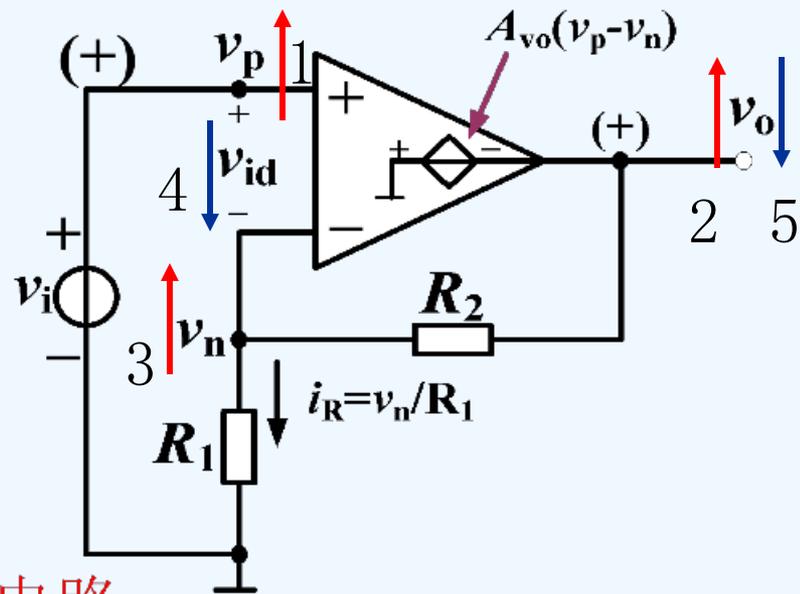
b、 $v_n = v_f = R_1 v_o / (R_1 + R_2)$  作用在反相输入端 “-”， $v_f$  表示反馈电压。

# 2.3.1 同相放大电路

## 2、负反馈基本概念

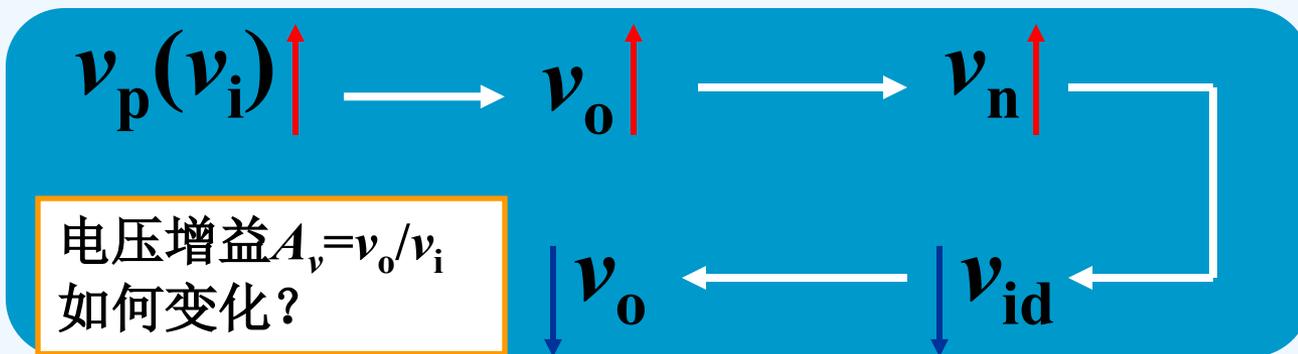


(a) 电路图



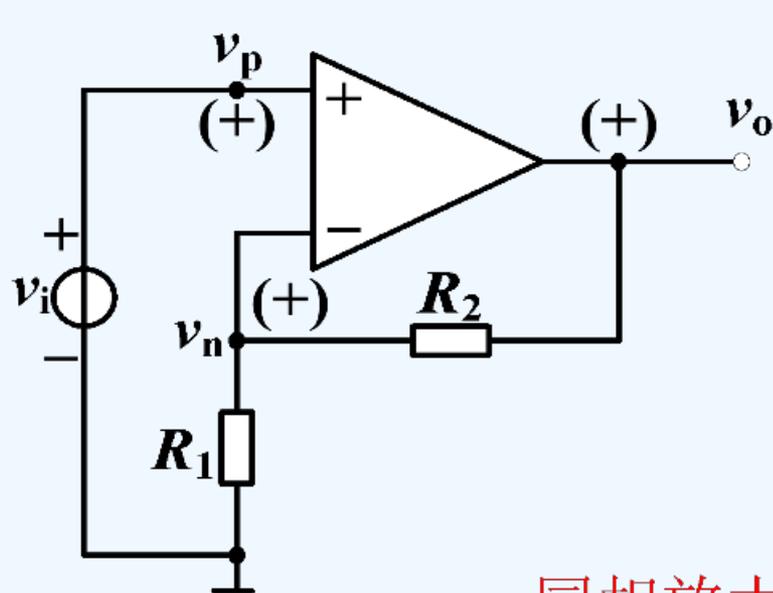
(b) 小信号电路模型

同相放大电路

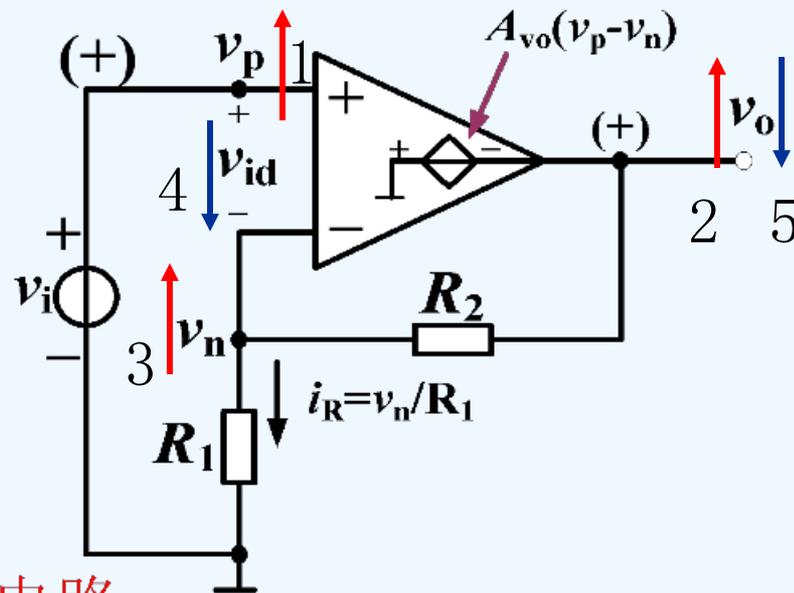


## 2.3.1 同相放大电路

### 3、虚短和虚断



(a) 电路图

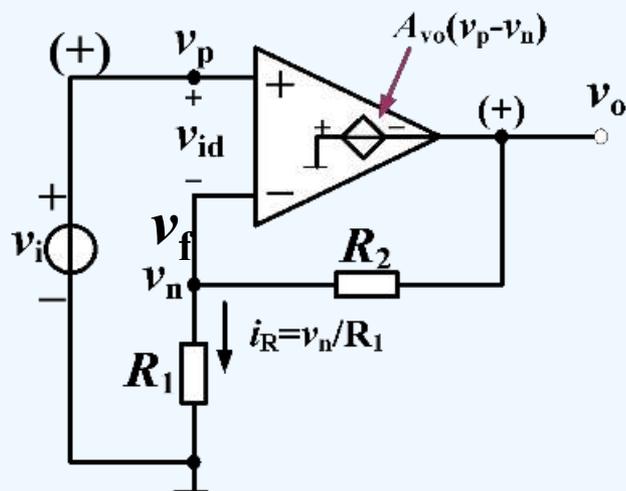


(b) 小信号电路模型

虚短： $v_p$  ( $v_i$   $\uparrow\downarrow$   $\longrightarrow$   $v_n$   $\uparrow\downarrow$   $\longrightarrow$   $v_p \approx v_n$  或  $v_{id} = v_p - v_n \approx 0$ )

虚断：由于虚短 ( $v_p - v_n \approx 0$ ) 且  $r_i$  很大，则  $i_p = i_n \approx 0$

## 4、技术指标近似计算



同相放大电路  
(b) 小信号电路模型

- 闭环电压增益  $A_v$

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

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

- 输入电阻  $R_i$

由于  $\hat{r}_i \rightarrow \infty$ , 必有  $\hat{i}_i \rightarrow 0$ ,

因此

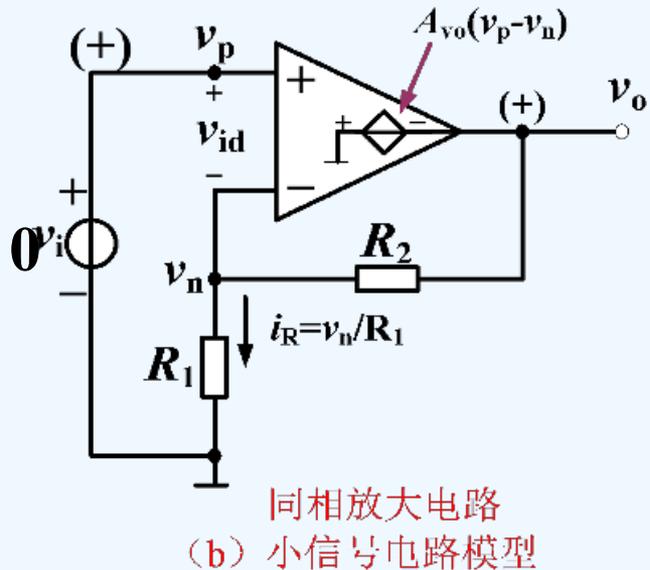
$$R_i = \frac{v_i}{\hat{i}_i} \rightarrow \infty$$

虚短:  $v_p \approx v_n$

虚断:  $i_p = i_n \approx 0$

## 2.3.1 同相放大电路

### 4、技术指标近似计算



- 输出电阻  $R_o$

$$R_o = r_o \parallel [(R_1 \parallel r_i) + R_2]$$

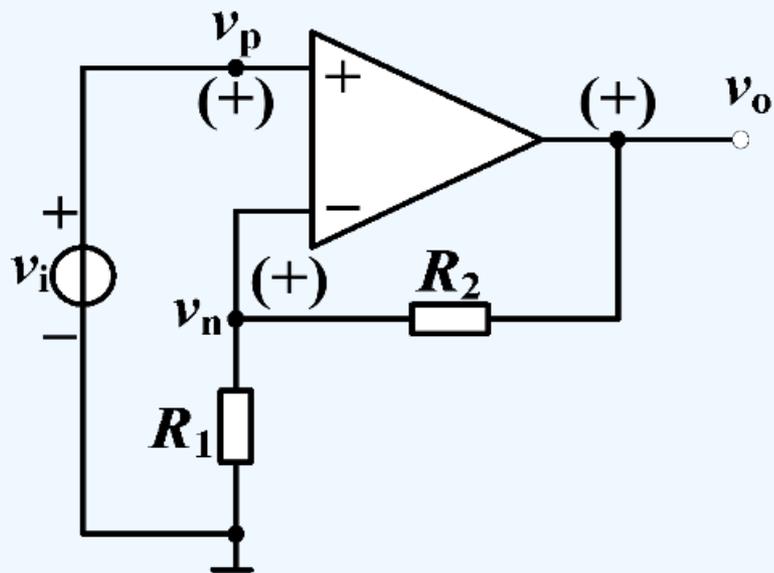
$$r_o = 0$$

$$R_o \rightarrow 0$$

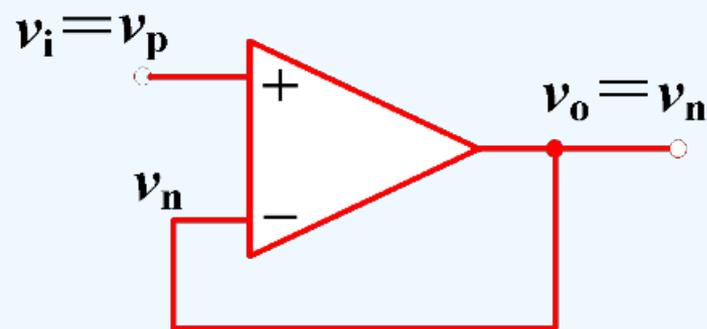
虚短:  $v_p \approx v_n$

虚断:  $i_p = i_n \approx 0$

## 5、电压跟随器



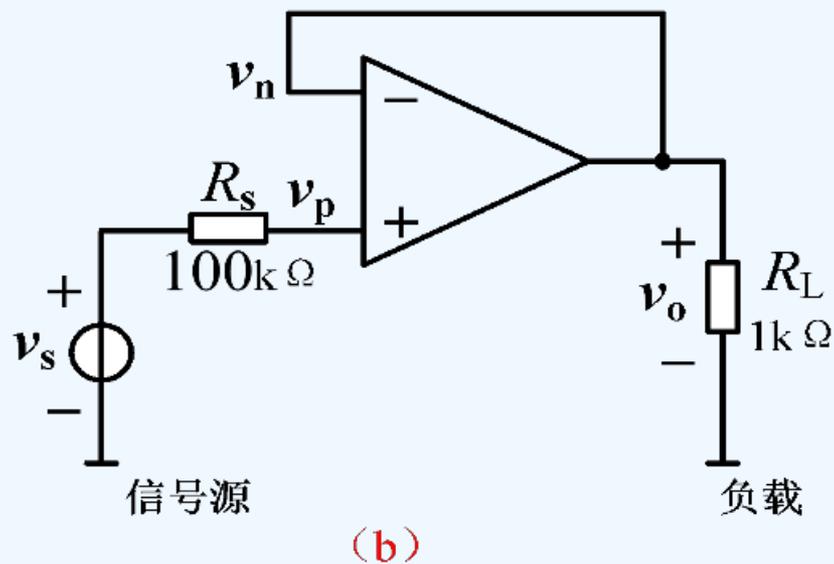
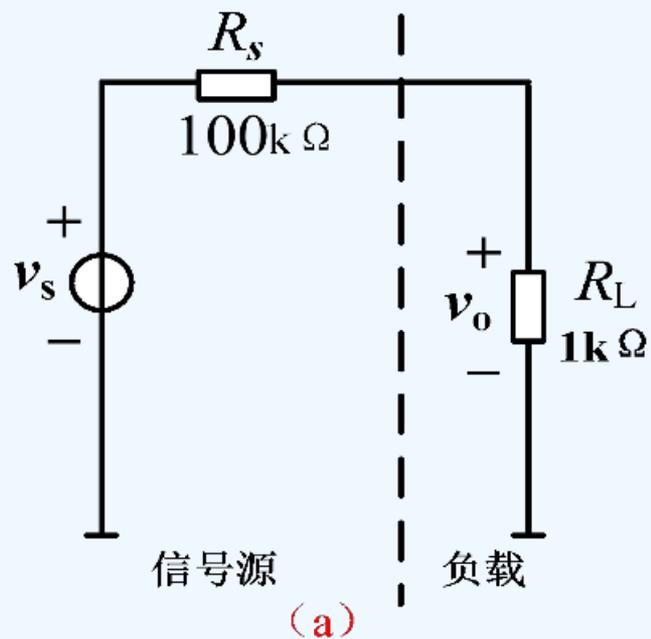
(a) 同相放大电路



(b) 电压跟随器

$v_o = v_i = v_p = v_n$   
 $A_v = v_o / v_i = 1$

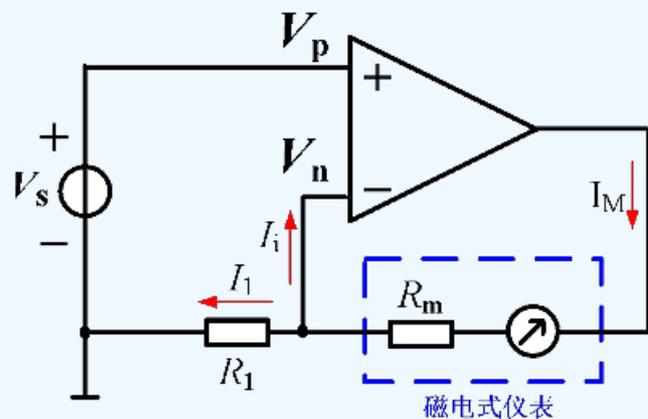
## 5、电压跟随器（应用示例）



$$(a) \quad v_o = \frac{R_L}{R_s + R_L} v_s = \frac{1}{100 + 1} v_s \approx 0.01 v_s$$

$$(b) \quad v_o = v_n = v_p = v_s$$

## 6、例2.3.1 直流电压表



直流电压表电路

电路如图，磁电式电流表指针偏移满刻度时，流过动圈电流  $I_M = 100 \mu\text{A}$ 。当  $R_1 = 20\text{k}\Omega$  时，可测的最大输入电压  $V_{S(\text{max})} = ?$

解：由虚短和虚断有  $V_P = V_S = V_N$ ， $I_i = 0$ ，则

$$\text{有 } I_M = I_1 = \frac{V_N}{R_1} = \frac{V_S}{R_1}$$

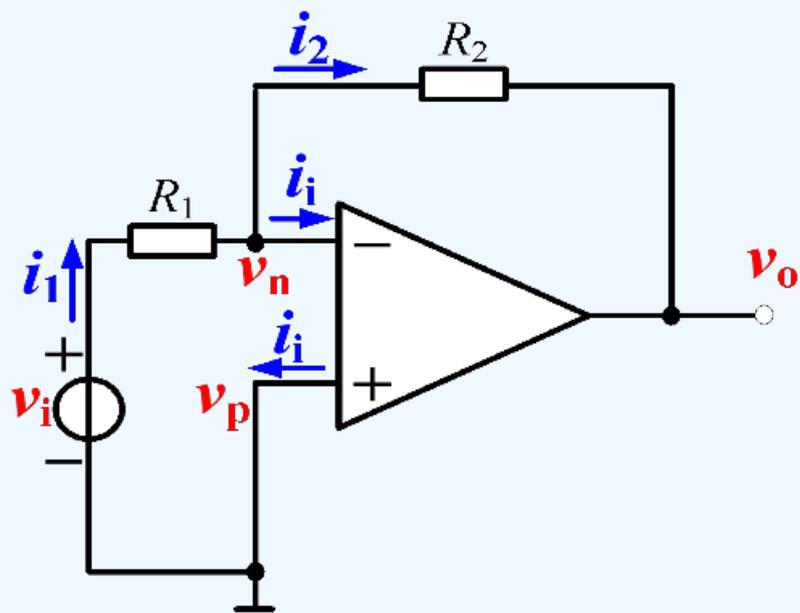
$$V_{S(\text{max})} = I_M R_1$$

$$= 100 \times 10^{-6} \text{ A} \times 2 \times 10^4 \Omega = 2\text{V}$$

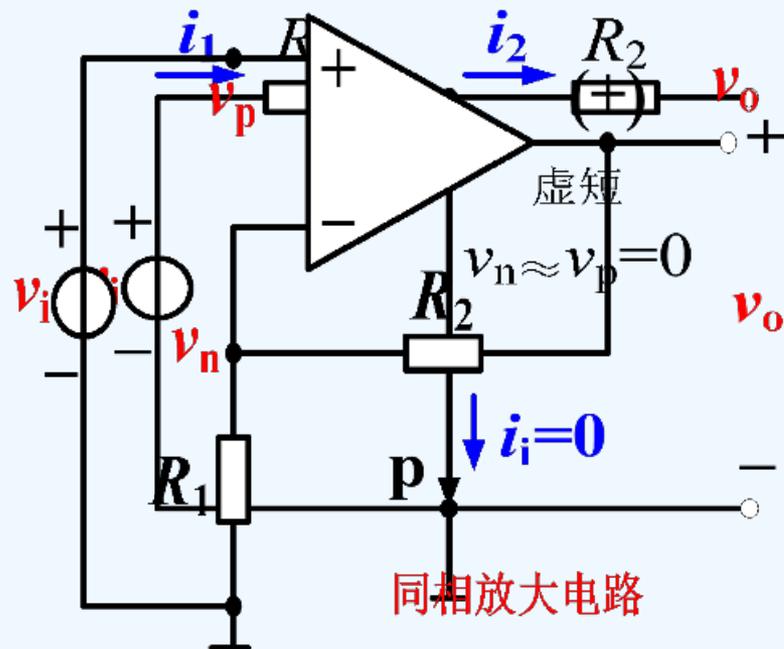
## ■ 作业P46、 P47

**2.1.1; 2.1.2;**

# 1、基本电路



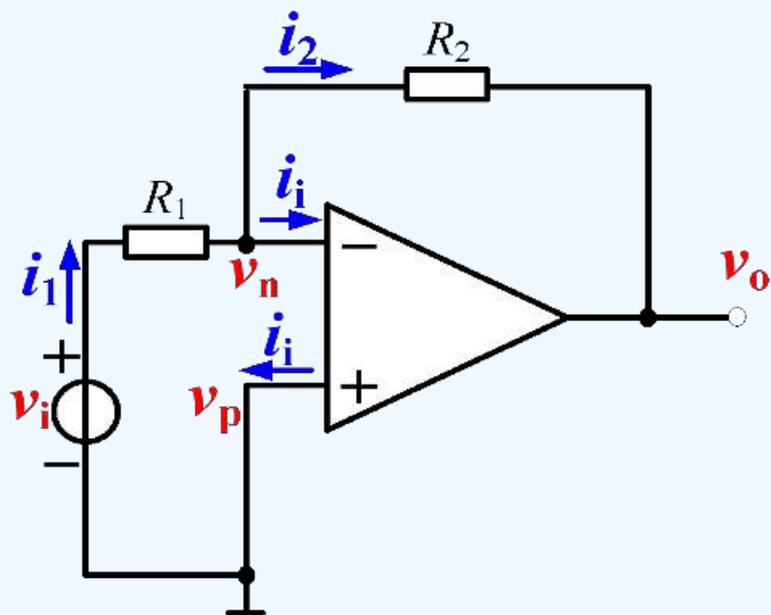
(a) 反相放大电路图



(b) 由虚短引出虚地  $v_n \approx 0$

虚地：由虚短  $v_n \approx v_p = 0$ ，则有  $v_n$  接近于地电位

## 2、几项技术指标的近似计算



(a) 反相放大电路图

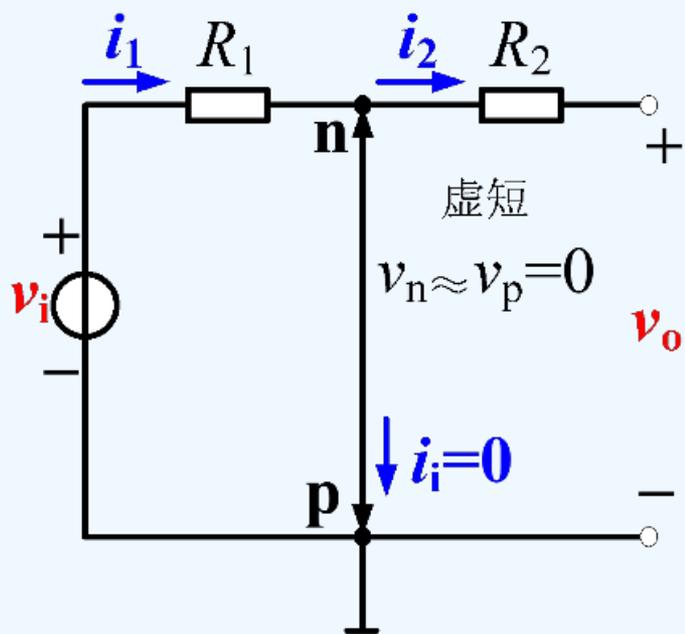
### (1) 电压增益

虚地  $v_n=0$ ，虚断  $i_p=i_n=0$ ，  
则  $i_1=i_2$ ，故有

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

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

## 2、几项技术指标的近似计算



### (2) 输入电阻

$$R_i = \frac{v_i}{i_1} = \frac{v_i}{v_i / R_1} = R_1$$

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/527050024110010016>