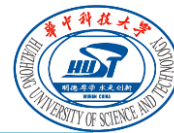


# 2 运算放大器及其基本运算电路



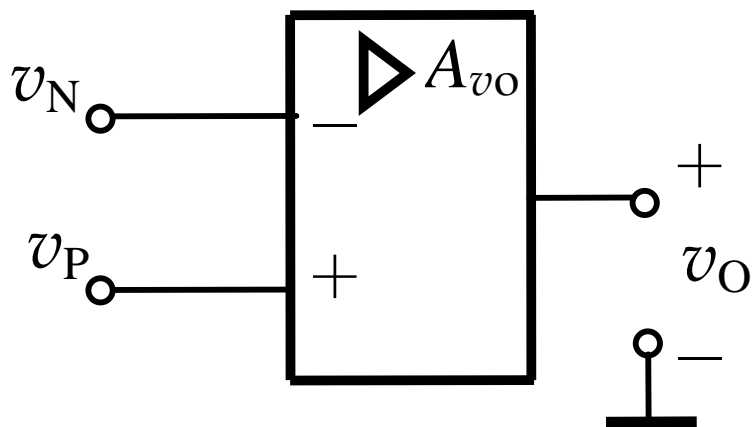
## 2.1 运算放大器基本特性

## 2.2 运放构成的基本电路

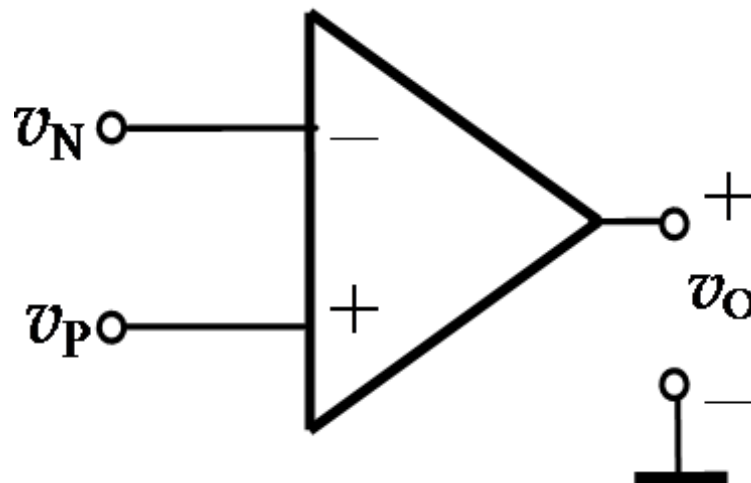
## 2.3 同相输入和反相输入放大电路的其他应用

## 2.1 运算放大器基本特性

### 1. 电路符号



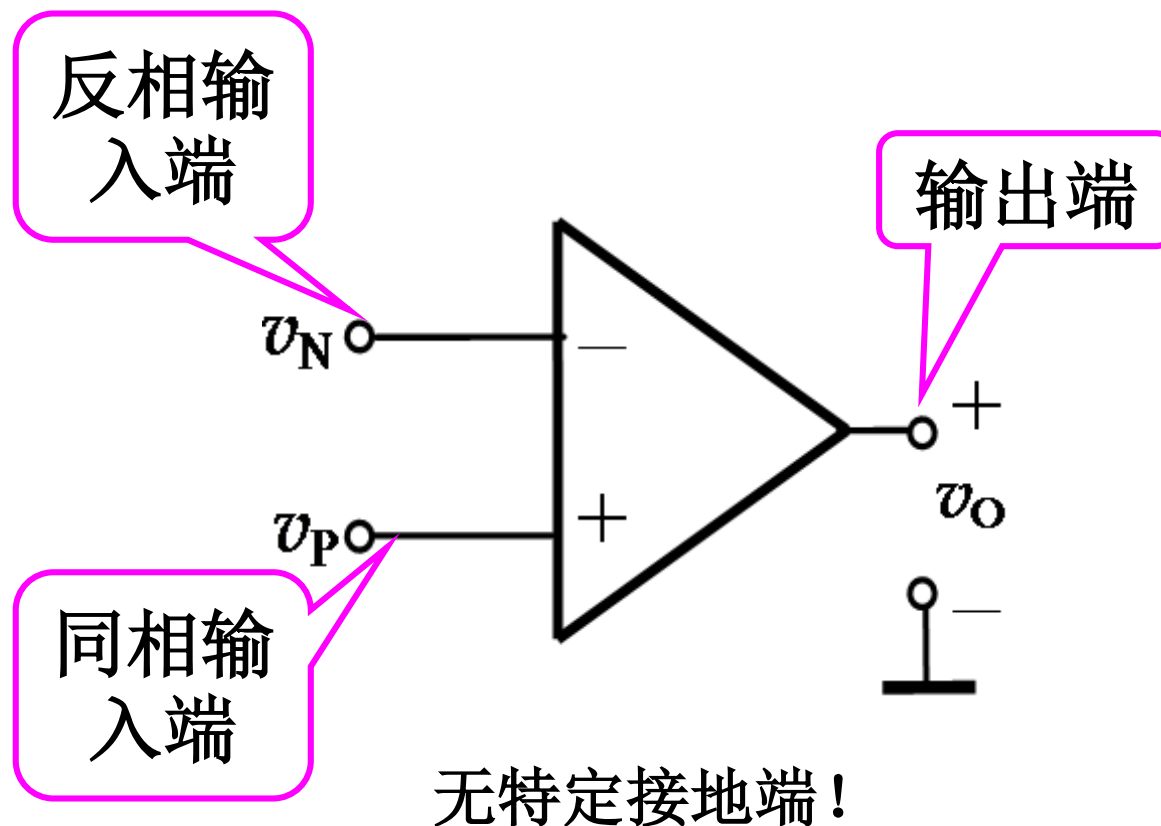
国标符号



常用符号

# 2.1 运算放大器基本特性

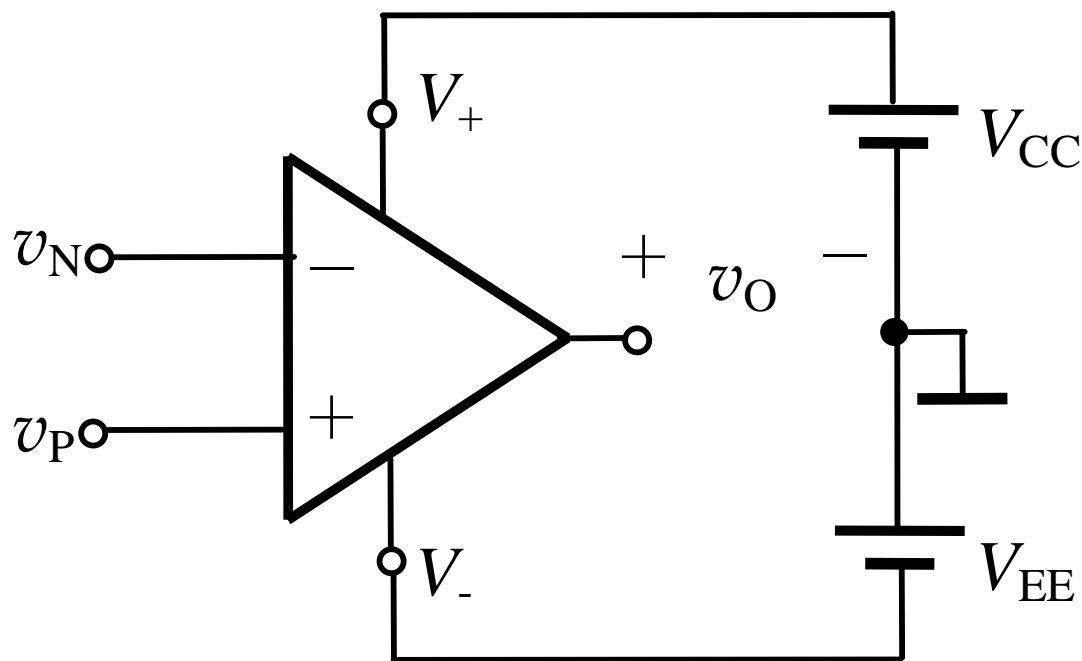
## 2. 端口意义



## 2.1 运算放大器基本特性

### 3. 外部电源连接

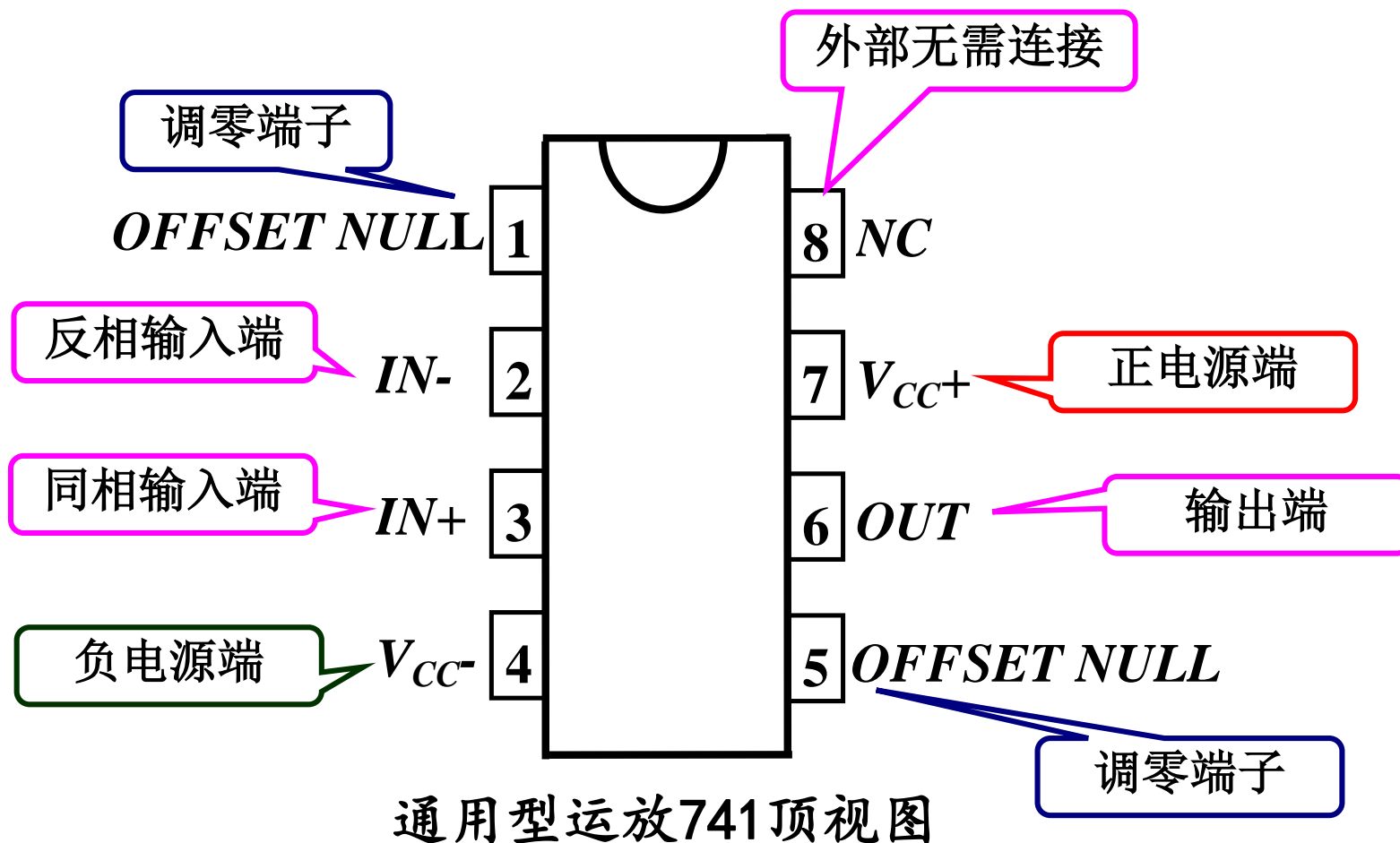
运算放大器正常工作时，必须提供工作电源，通常正负电源的连接方式为



运算放大器的电源连接

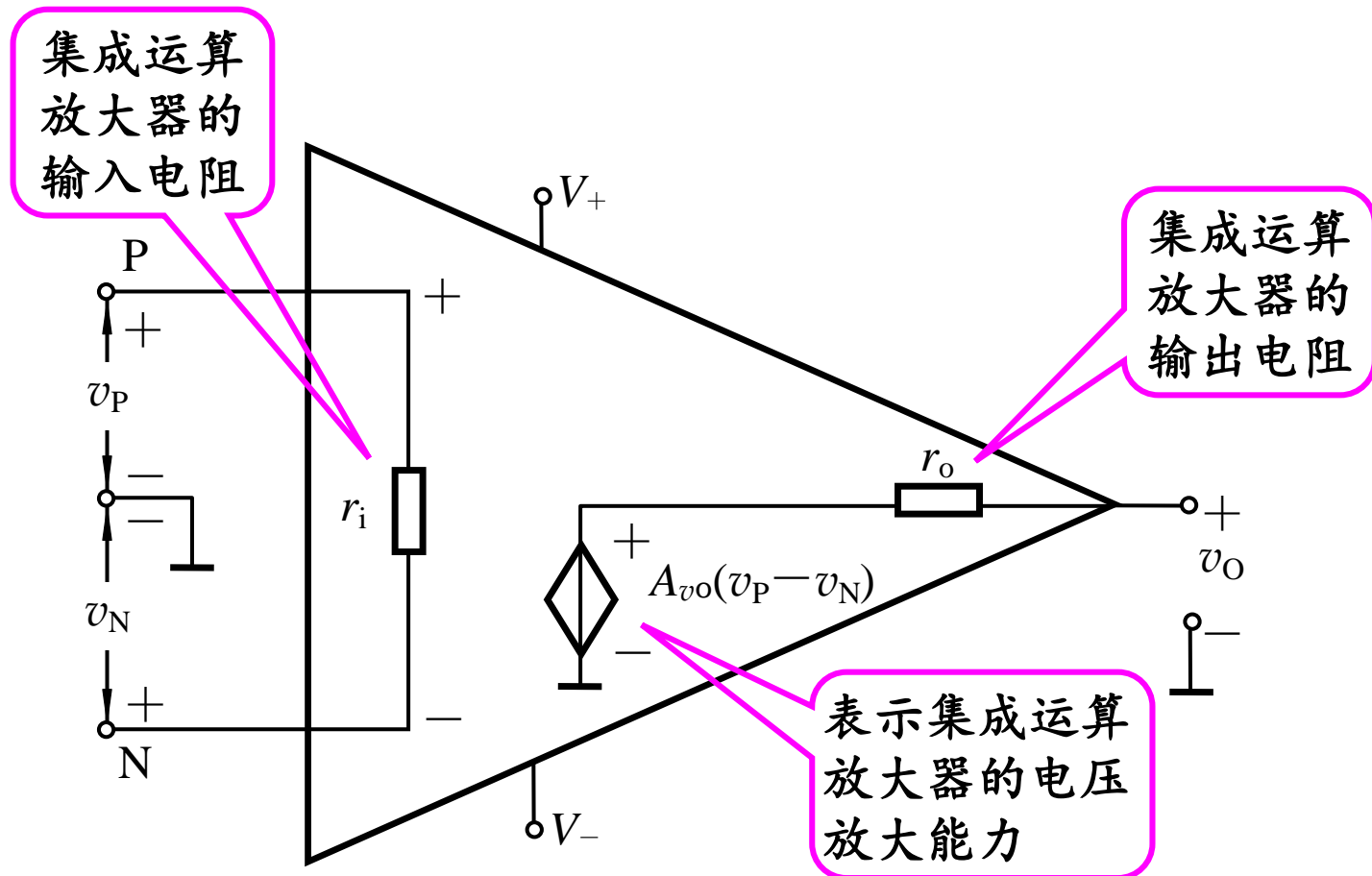
## 2.1 运算放大器基本特性

### 4. 实际运放外部引脚实例



# 2.1 运算放大器基本特性

## 5. 运算放大器的电路模型



# 2.1 运算放大器基本特性

## 6. 运算放大器的传输特性

通常：

- 开环电压增益

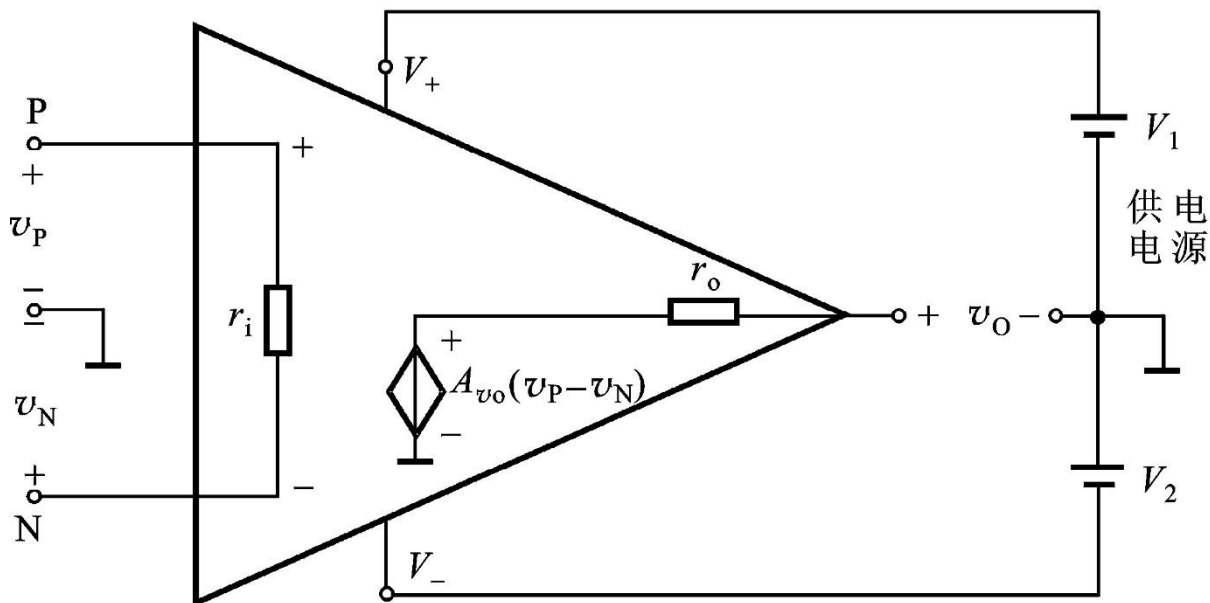
$A_{vo}$  的  $\geq 10^5$  (很高)

- 输入电阻

$r_i \geq 10^6 \Omega$  (很大)

- 输出电阻

$r_o \leq 100 \Omega$  (很小)



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

注意输入输出的相位关系

# 2.1 运算放大器基本特性

## 6. 运算放大器的传输特性

当 $(v_P - v_N) > 0$ , 且

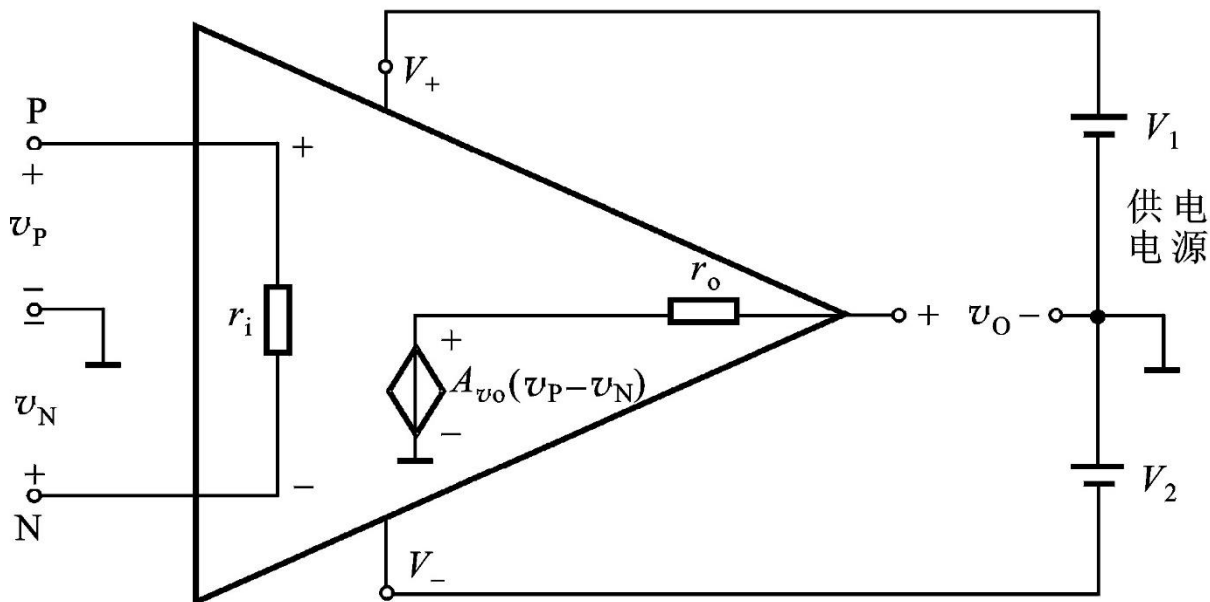
$A_{vo}(v_P - v_N) \geq V_+$  时

$$v_O = +V_{om} \approx V_+$$

当 $(v_P - v_N) < 0$ , 且

$A_{vo}(v_P - v_N) \leq V_-$  时

$$v_O = -V_{om} \approx V_-$$



电压传输特性

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



# 2.1 运算放大器基本特性

## 6. 运算放大器的传输特性

当 $(v_P - v_N) > 0$ , 且

$A_{vo}(v_P - v_N) \geq V_+$  时

$$v_O = +V_{om} \approx V_+$$

当 $(v_P - v_N) < 0$ , 且

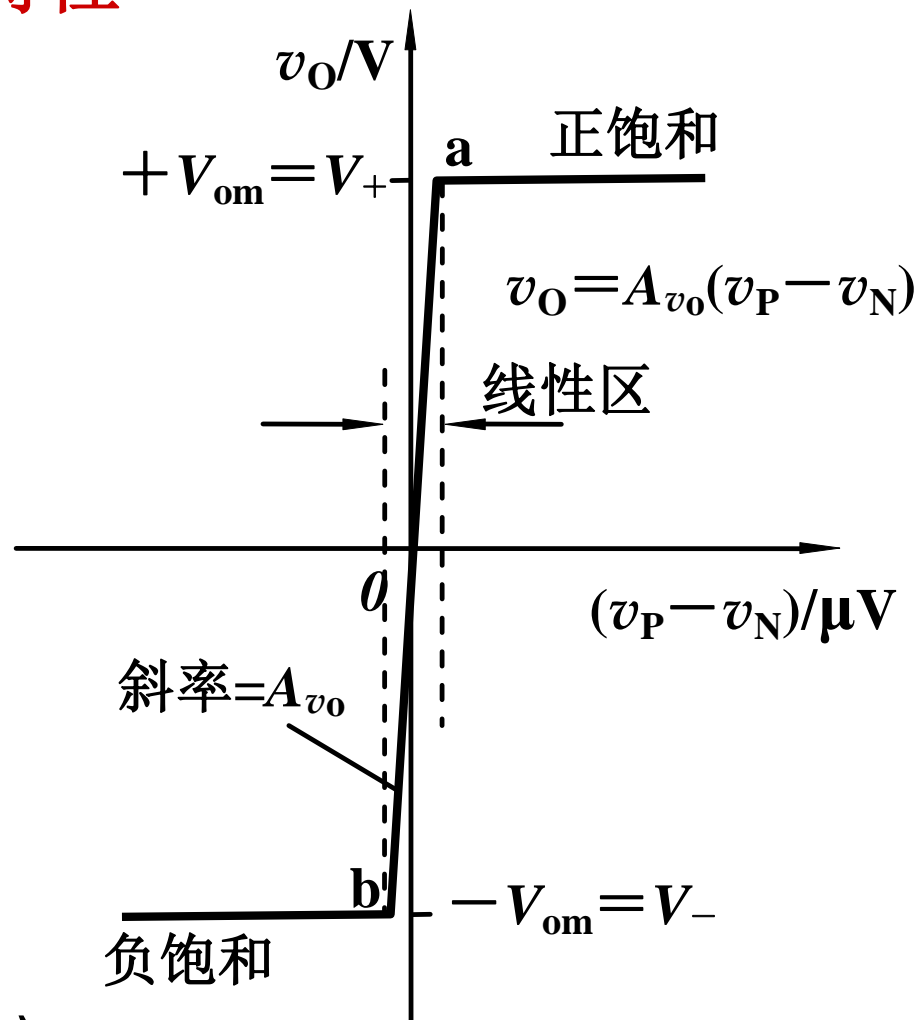
$A_{vo}(v_P - v_N) \leq V_-$  时

$$v_O = -V_{om} \approx V_-$$

电压传输特性

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

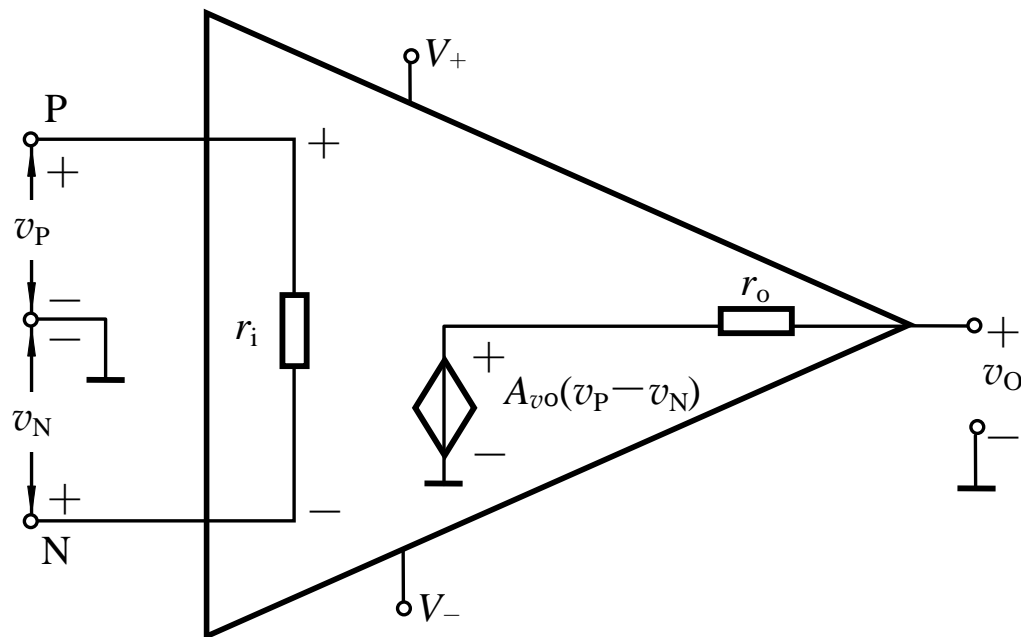
线性范围内  $v_O = A_{vo}(v_P - v_N)$



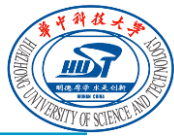
# 2.1 运算放大器基本特性

例2.1.1 运算放大器的等效电路模型如图2.1.2所示，已知运放的  $A_{vo}=2 \times 10^5$ ， $r_i=2\text{M}\Omega$ ， $r_o=75\Omega$ ， $V_+=12\text{V}$ ， $V_-=-12\text{V}$ ，设输出电压的最大饱和电压值为  $\pm V_{om}=\pm 11\text{V}$ 。

- (1) 如果  $v_P=25\mu\text{V}$ ， $v_N=100\mu\text{V}$ ，试求输出电压  $v_O$  的值；
- (2) 画出其电压传输特性曲线  $v_O=f(v_P-v_N)$ 。



# 2.1 运算放大器基本特性



解:

(1) 若运算放大器工作于线性区, 有  $v_O = A_{vo}(v_P - v_N)$ 。

由  $A_{vo} = 2 \times 10^5$ ,  $v_P = 25 \mu\text{V}$ ,  $v_N = 100 \mu\text{V}$ , 则

$$\begin{aligned} v_O &= A_{vo}(v_P - v_N) \\ &= 2 \times 10^5 (25 - 100) \times 10^{-6} \text{V} \\ &= -15 \text{V} \end{aligned}$$

而  $\pm V_{om} = \pm 11 \text{V}$ , 因此运算放大器已经负饱和,

$$v_O = V_{om} = -11 \text{V}$$

# 2.1 运算放大器基本特性

解:

(2) 画电压传输特性

$$\pm V_{om} = \pm 11V, A_{vo} = 2 \times 10^5,$$

$$v_P - v_N = \pm 11V / (2 \times 10^5) \\ = \pm 55\mu V.$$

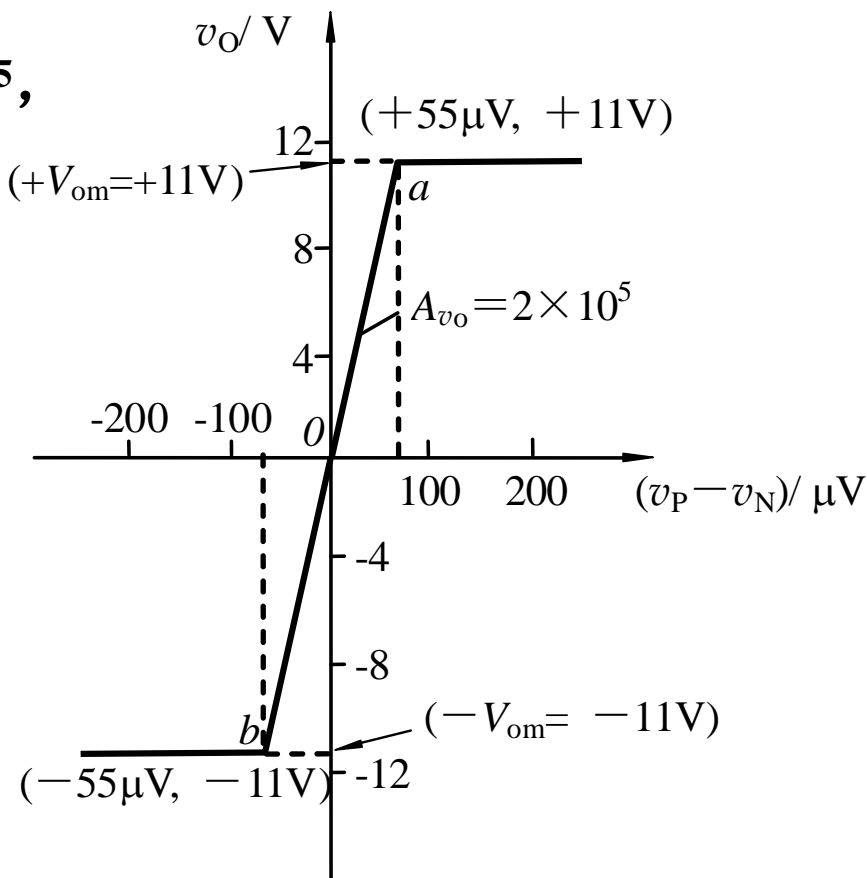
取 $a$ 点 $(+55\mu V, +11V)$ ,

$b$ 点 $(-55\mu V, -11V)$ ,

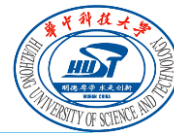
连接 $a$ 、 $b$ 两点的 $ab$ 直线段,

线性区斜率为 $A_{vo} = 2 \times 10^5$ ,

得到的传输特性如图所示。



# 2.1 运算放大器基本特性



## 7. 理想运算放大器的参数

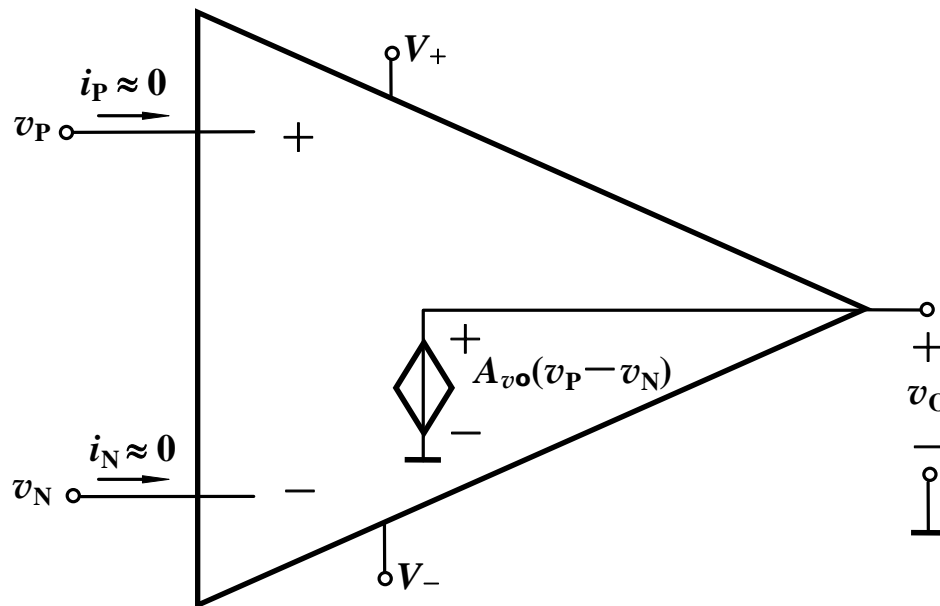
(1) 开环电压增益  $A_{v0} \rightarrow \infty$ ;

(2) 输入电阻  $r_i = \infty$ ;

(3) 输出电阻  $r_o = 0$ ;

(4) 开环带宽  $BW \rightarrow \infty$ ;

(5) 当  $v_P = v_N$  时,  $v_O = 0$ 。



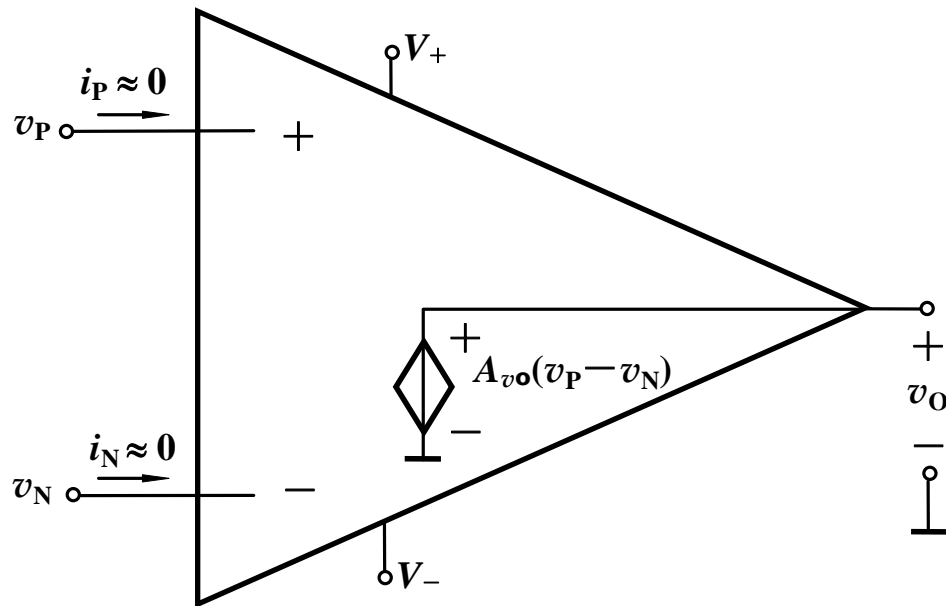
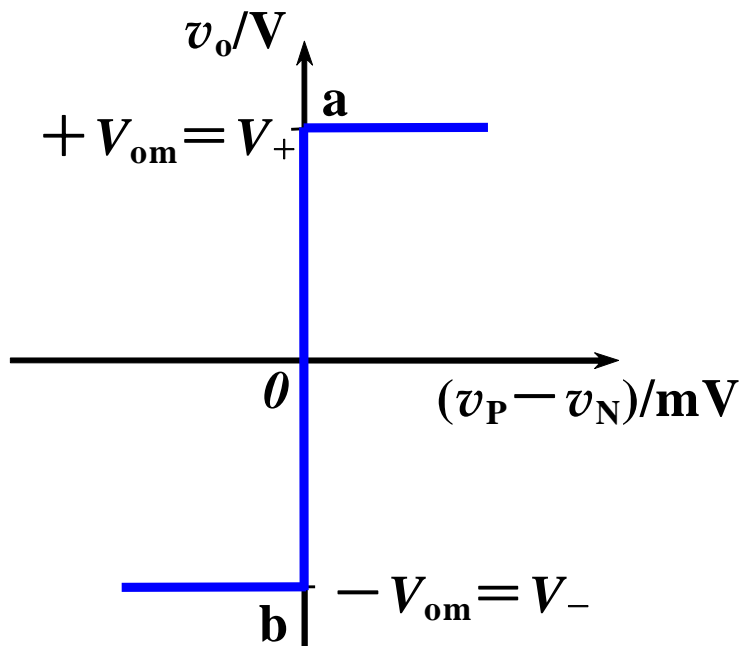
若  $V_- < v_O < V_+$  有  $v_O = A_{v0}(v_P - v_N)$

则  $(v_P - v_N) = v_O / A_{v0} \rightarrow 0$  即  $v_P \approx v_N$  虚短

输入电阻  $r_i$  的阻值很高, 使  $i_P \approx 0$ 、 $i_N \approx 0$  虚断

# 2.1 运算放大器基本特性

## 8. 理想运算放大器的传输特性

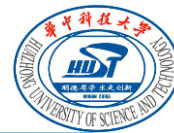


特别注意：

$$v_P \approx v_N, \quad i_P \approx 0, \quad i_N \approx 0$$

“虚短”和“虚断”是用来分析各种运放线性应用电路的有力法则，必须熟练掌握。

# 2 运算放大器及其基本运算电路

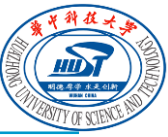


## 2.1 运算放大器基本特性

## 2.2 运放构成的基本电路

## 2.3 同相输入和反相输入放大电路的其他应用

## 2.2 运放构成的基本电路



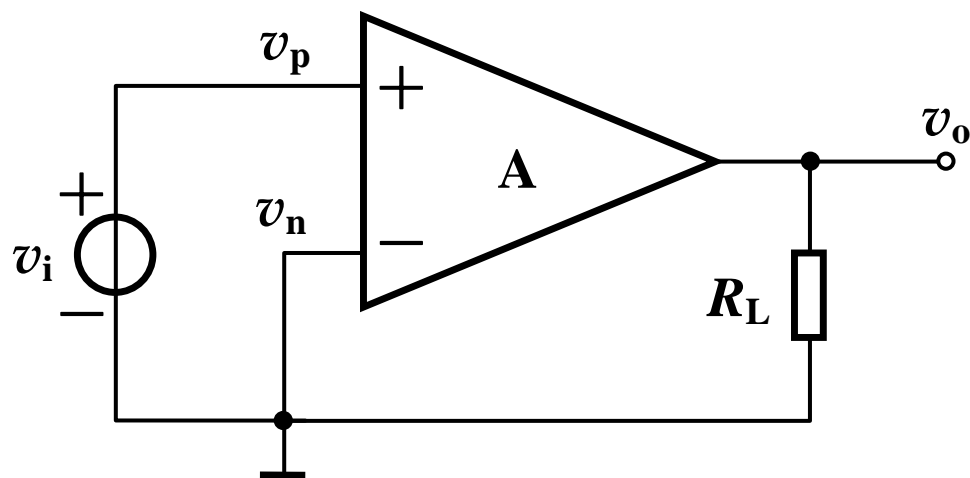
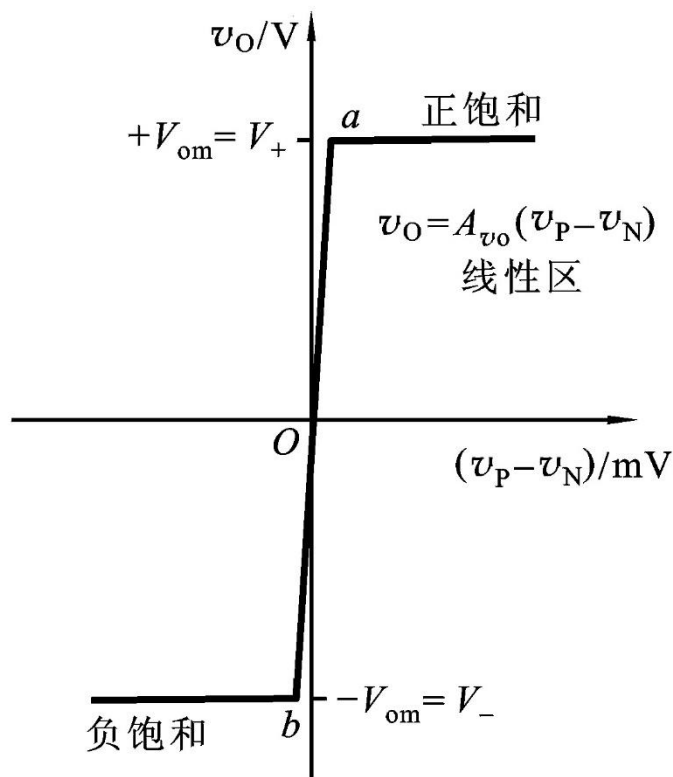
### 2.2.1 同相放大电路

### 2.2.2 反相放大电路



## 2.2.1 同相放大电路

➤ 能采用以下形式对信号进行线性放大吗？为什么？



线性区  $(v_P - v_N) \approx v_i < \frac{V_+}{A_{vo}}$

理论上可以，实际上很难。

要求输入信号非常小，且此时运放的带宽也很窄。

## 2.2.1 同相放大电路

实际应用中，线性放大时都需要引入负反馈

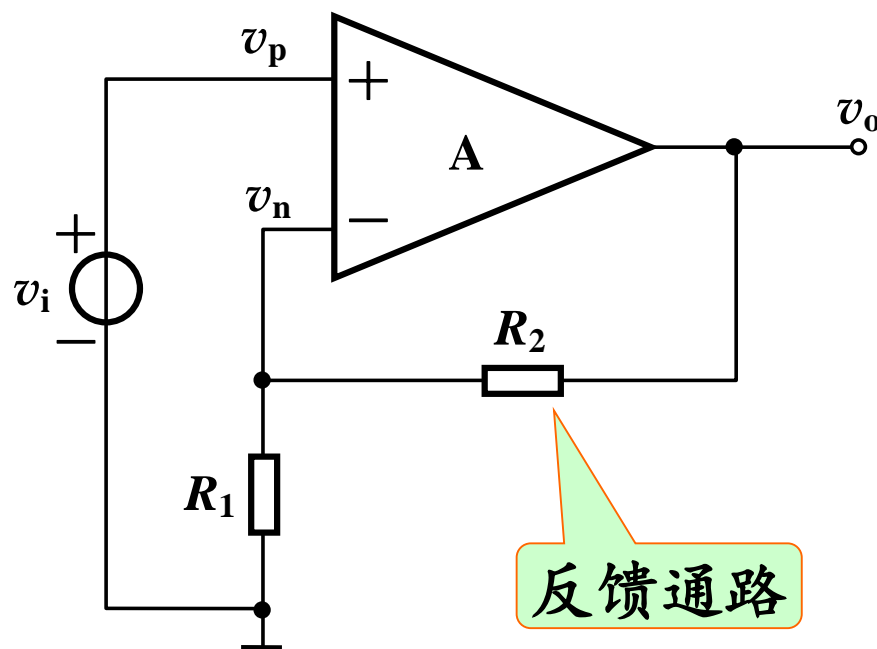
反馈：将输出量（电压或电流）送回到输入的过程

负反馈：反馈到输入的信号将减小原来加到放大器输入端的信号

使  $(v_P - v_N) \ll v_i$

容易满足  $(v_P - v_N) < \frac{V_+}{A_{v0}}$

运放工作在线性区



## 2.2.1 同相放大电路

由于实际运放与理想运放特性很接近，所以在工程应用时，都将实际运放当作理想运放来简化分析和设计。

需要特别注意，它们最大的差别是，理想运放的频带宽度是无限的，而实际运放的带宽是有限的。

### 理想特性：

$$r_i \approx \infty$$

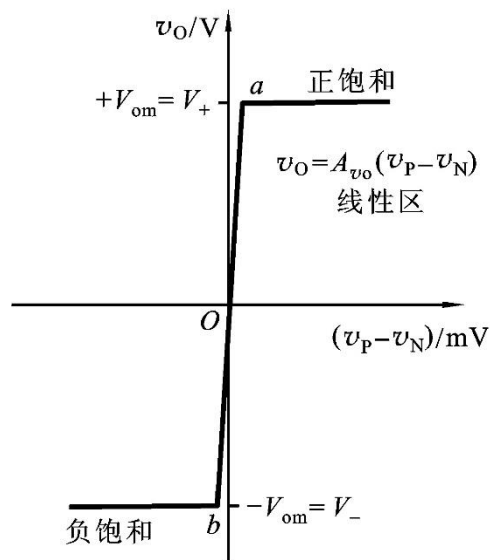
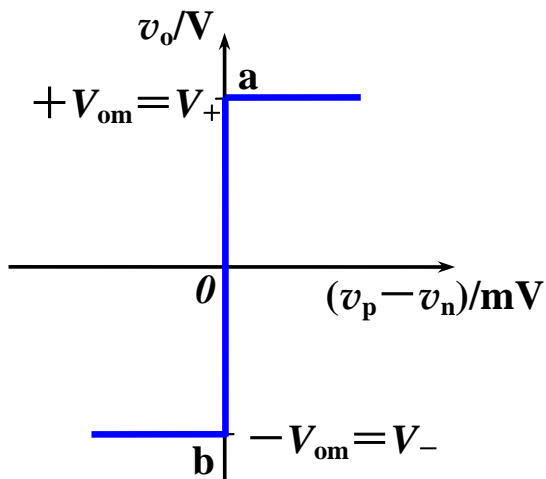
$$r_o \approx 0$$

$$A_{vo} \rightarrow \infty$$

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

$$v_P \approx v_N$$

$$i_P \approx 0, i_N \approx 0$$



## 2.2.1 同相放大电路

### 指标分析

#### (1) 电压增益 $A_v$

根据理想运放特性

$$v_p \approx v_n \quad (\text{虚短})$$

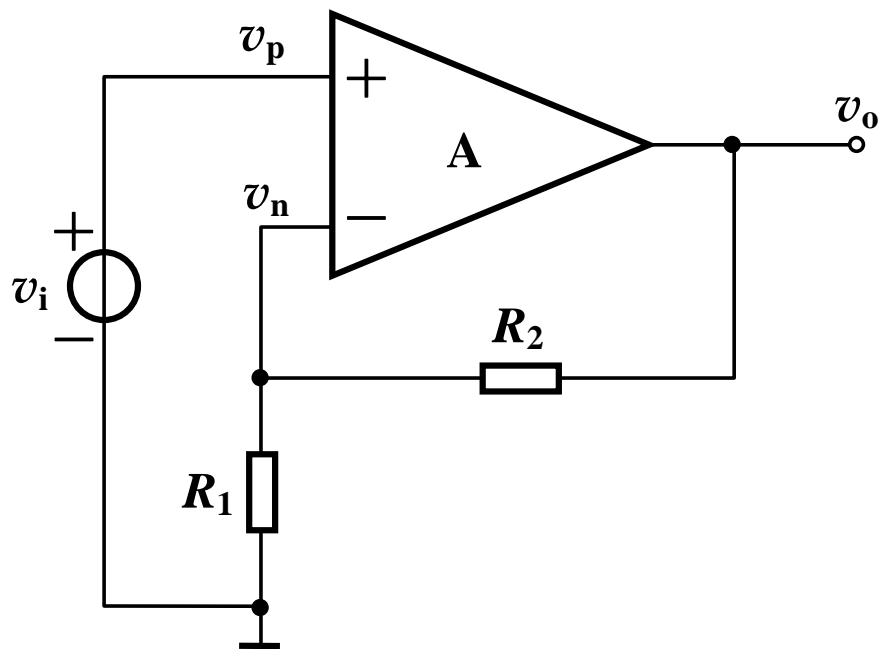
$$i_p = -i_n = 0 \quad (\text{虚断})$$

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)

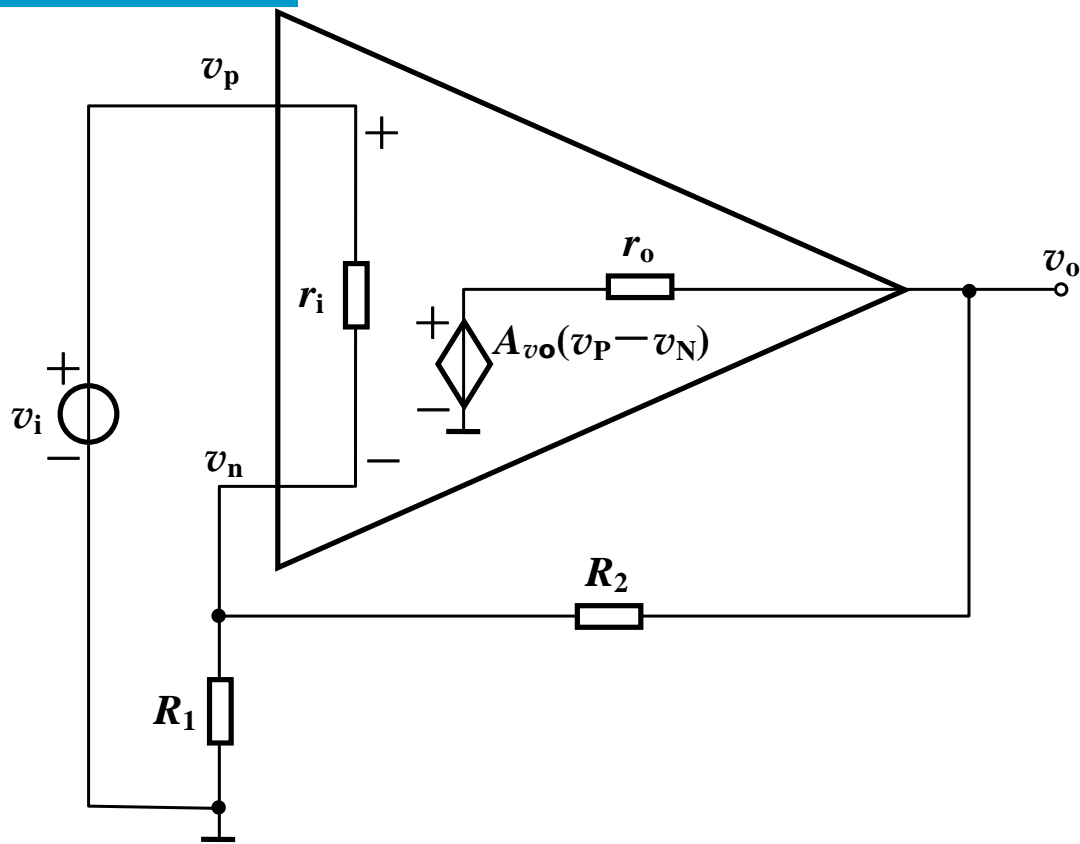


➤ 为什么称为同相放大电路？

## 2.2.1 同相放大电路

### 指标分析

► 用理想运放模型带来的误差有多少？（设  
 $A_{vo}=10^5$ ,  $r_i=10^6\Omega$ ,  
 $r_o=100\Omega$ ,  $R_1=1k\Omega$ ,  
 $R_2=49k\Omega$ ）



采用实际运放模型的电压增益 $A_v$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{A_{vo} \cdot \frac{r_i - (R_1 \parallel R_2 \parallel r_i)}{r_i} + \frac{r_o (R_1 \parallel R_2 \parallel r_i)}{R_2 r_i}}{1 + A_{vo} \cdot \frac{R_1 \parallel R_2 \parallel r_i}{R_2} + \frac{r_o}{R_2} - \frac{r_o (R_1 \parallel R_2 \parallel r_i)}{R_2^2}} \approx 49.975$$

## 2.2.1 同相放大电路

### 指标分析

➤ 用理想运放模型带来的误差有多少？（设 $A_{vo}=10^5$ ,  $r_i=10^6\Omega$ ,  $r_o=100\Omega$ ,  $R_1=1k\Omega$ ,  $R_2=49k\Omega$ ）

采用实际运放模型的电压增益 $A_v \approx 49.975$

采用理想运放模型的电压增益  $A_v = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 50$

产生的相对误差约为 0.05%

实际上，电阻 $R_1$ 和 $R_2$ 阻值通常都有5%~10%的误差，所以用理想运放代替实际运放进行电路分析和设计完全可行。

## 2.2.1 同相放大电路

### 指标分析

#### (2) 输入电阻 $R_i$

输入电阻定义

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

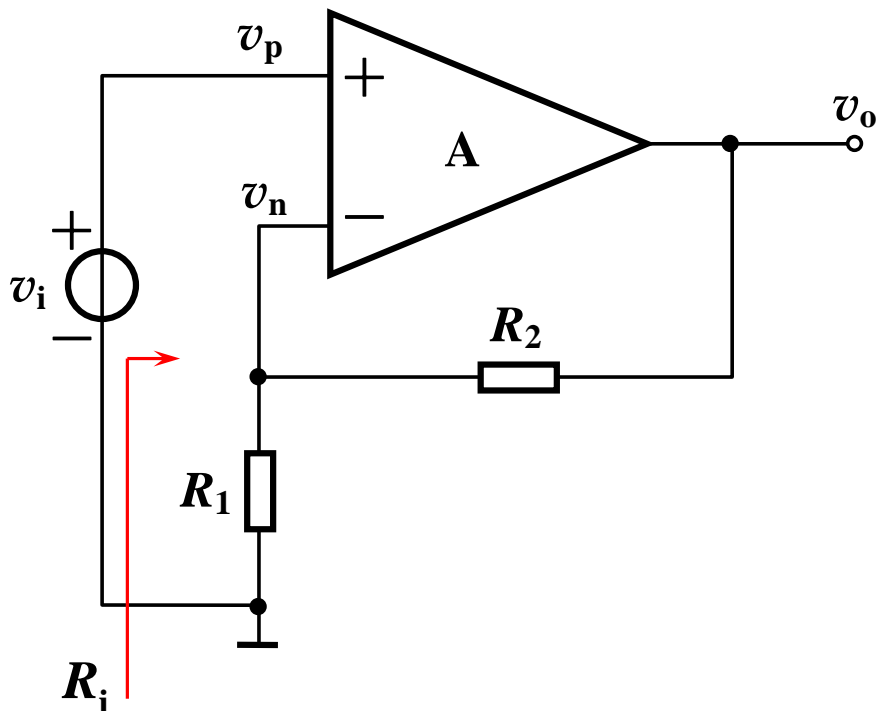
根据虚短和虚断有

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

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

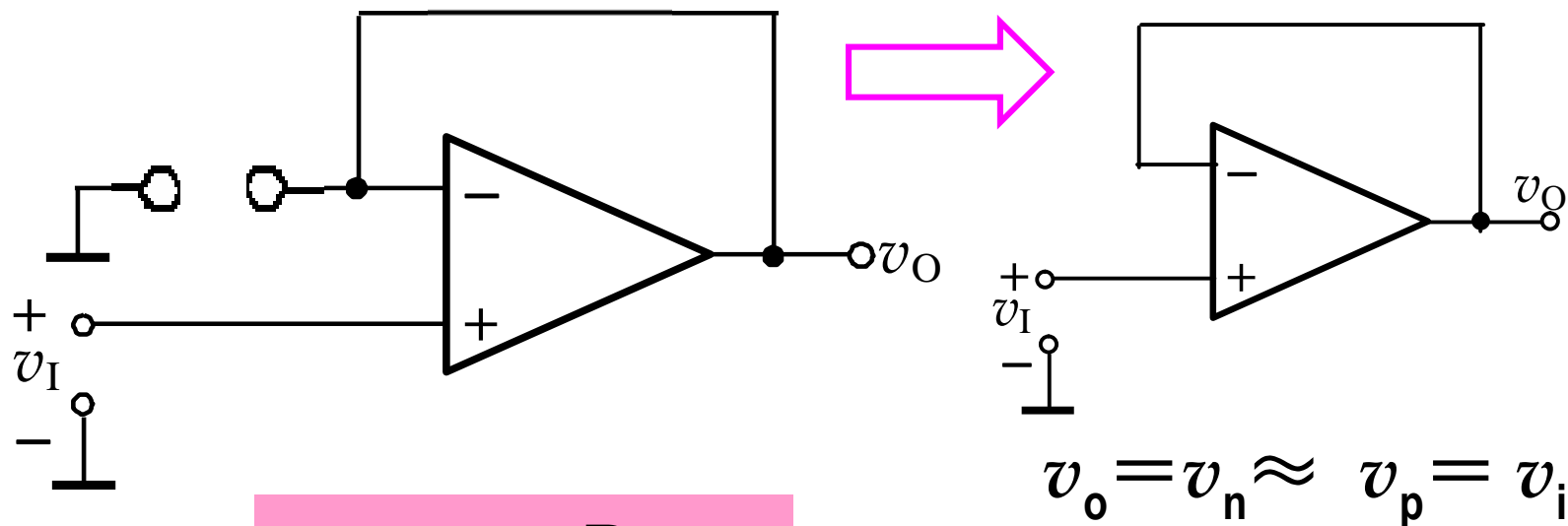
#### (3) 输出电阻 $R_o$     $R_o \rightarrow 0$

输入电阻趋于无穷大；输出电阻趋于0，因此带负载能力强，所带负载电阻大小不影响其运算关系。



## 2.2.1 同相放大电路

### 同相放大电路的一种特殊形式——电压跟随器

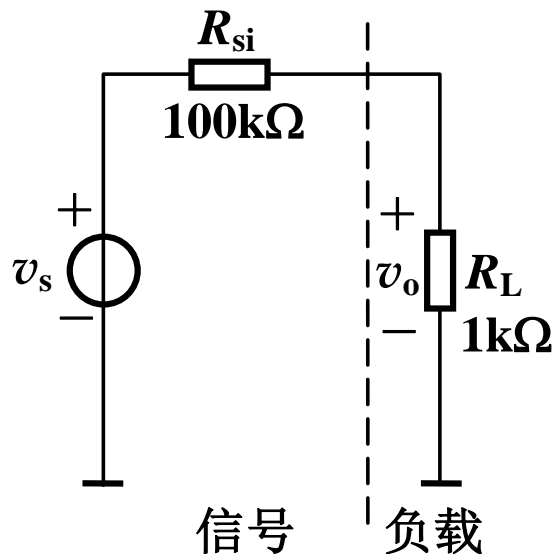


$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1$$



## 2.2.1 同相放大电路

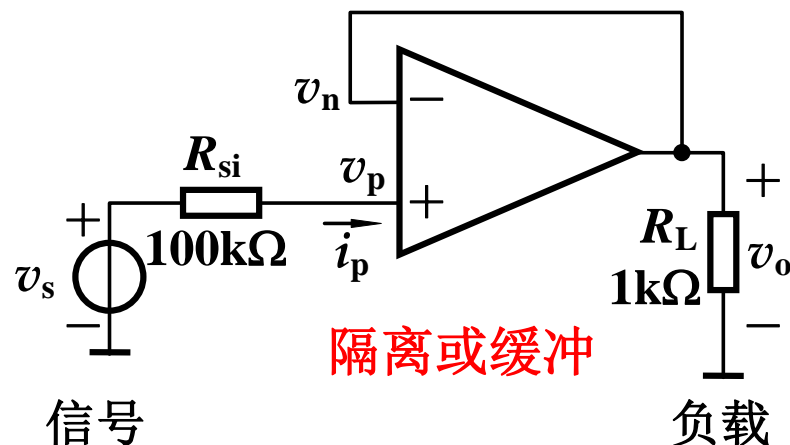
➤ 电压跟随器对电压增益有贡献吗？



无电压跟随器时  
负载上得到的电压

$$v_o = \frac{R_L}{R_s + R_L} \cdot v_s$$

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



有电压跟随器时  
根据虚短和虚断

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

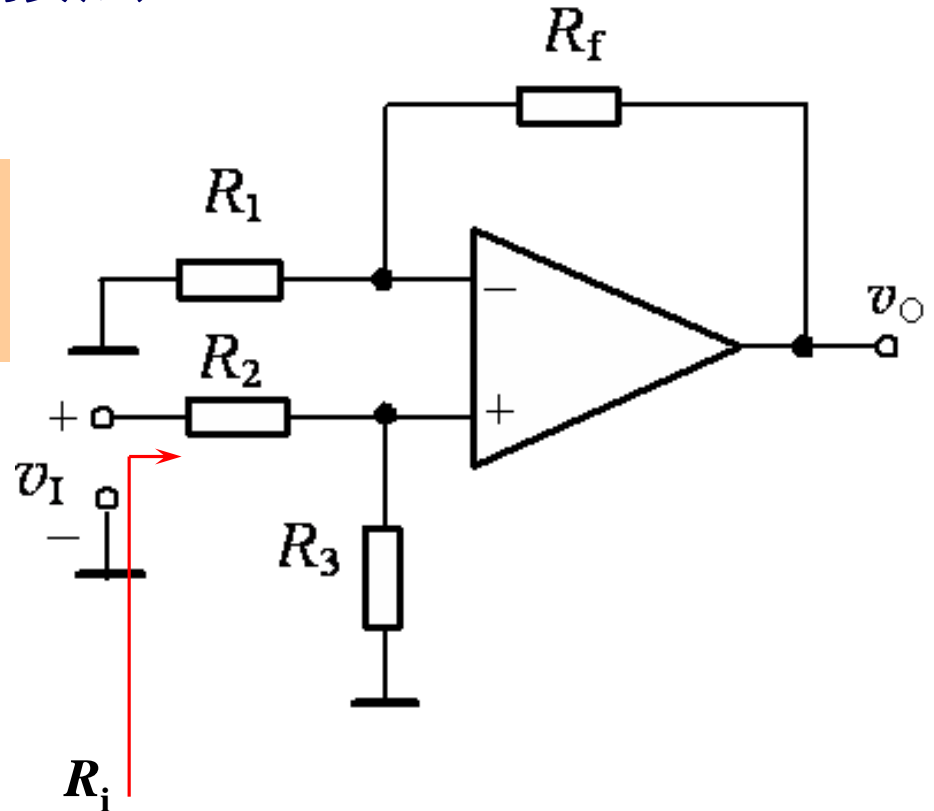
$$v_o = v_n \approx v_p = v_s$$

## 2.2.1 同相放大电路

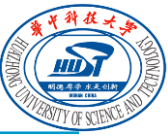
### 同相放大电路的另一种接法

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right)$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} \rightarrow \infty \quad ?$$



## 2.2 运放构成的基本电路

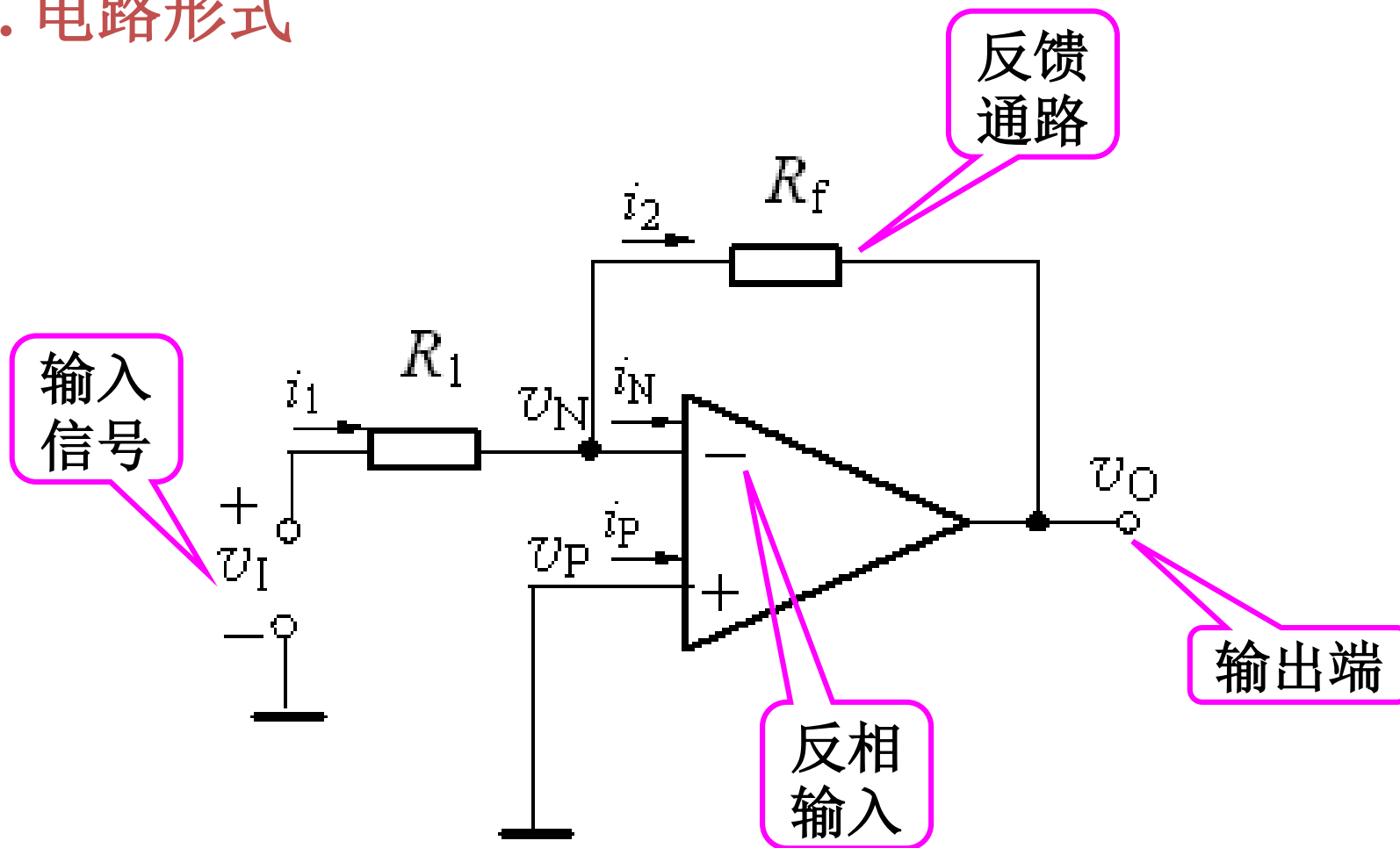


### 2.2.1 同相放大电路

### 2.2.2 反相放大电路

## 2.2.2 反相放大电路

### 1. 电路形式



## 2.2.2 反相放大电路

### 2. 指标分析

(1) 电压增益 $A_v$

根据虚短和虚断有

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

所以  $i_1 = i_2$

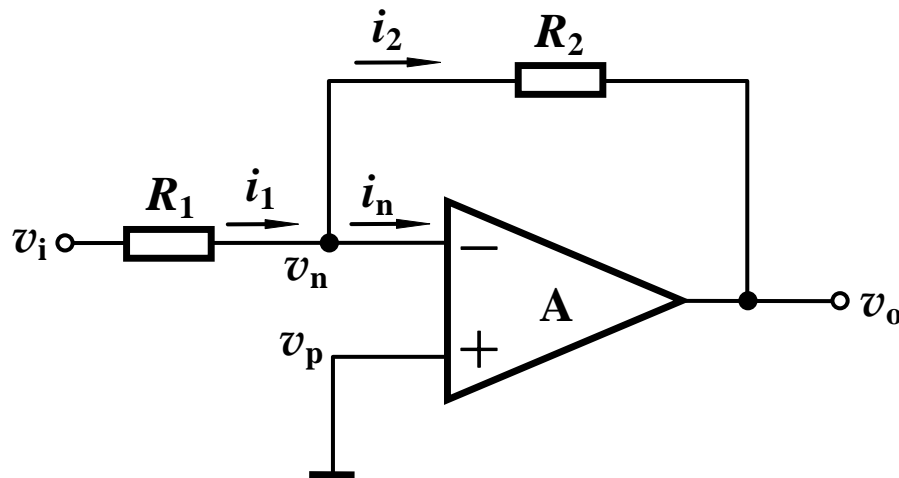
$$\text{即 } \frac{v_i - v_n}{R_1} = \frac{v_n - v_o}{R_2}$$

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

(可作为公式直接使用)

若 $R_1 = R_f$ 时,  $A_v = -1$ , 习惯称为反相器。

➤ 为什么称为反相放大电路?



## 2.2.2 反相放大电路

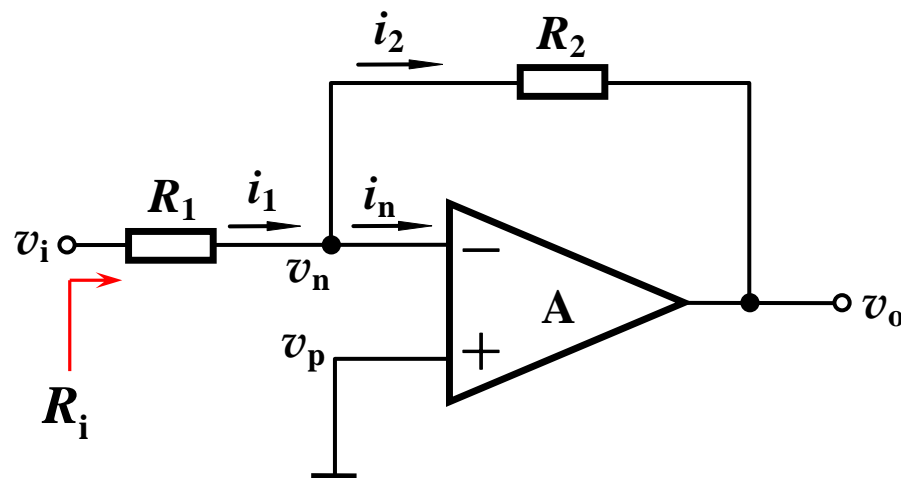
### 2. 指标分析

(2) 输入电阻 $R_i$

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

(3) 输出电阻 $R_o$

$$R_o \rightarrow 0$$



➤若信号源是非理想的电压信号源，采用哪种放大电路更好？

同相放大电路

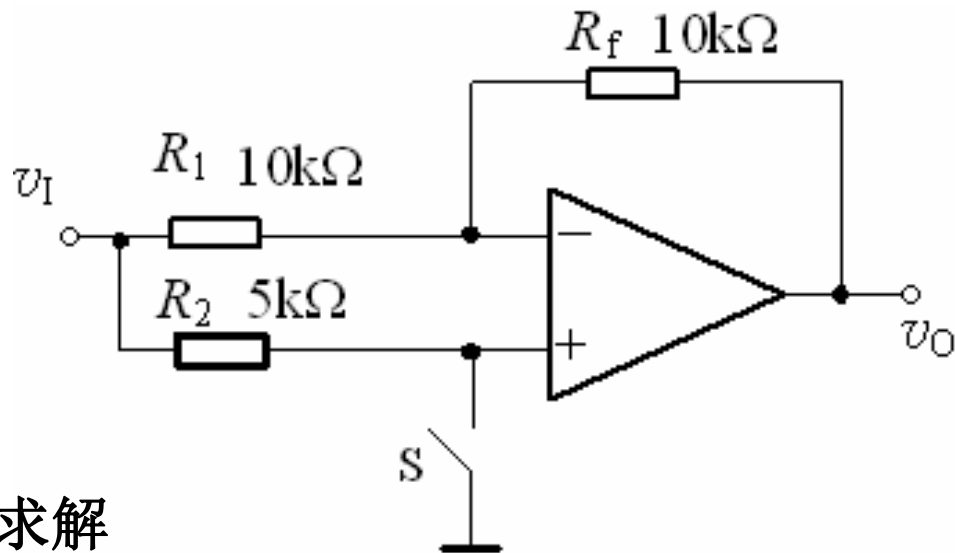
反相放大电路

## 2.2.2 反相放大电路

**例2.2.1** 电路如图所示，求当开关闭合和断开时电路的增益  $A_v = v_O / v_I$  的值。

**解：** 1) S 闭合，电路同相输入端接地，构成反比例电路，有：

$$A_v = \frac{v_O}{v_I} = -\frac{R_f}{R_1} = -1$$



2) S 断开，可以利用叠加原理求解

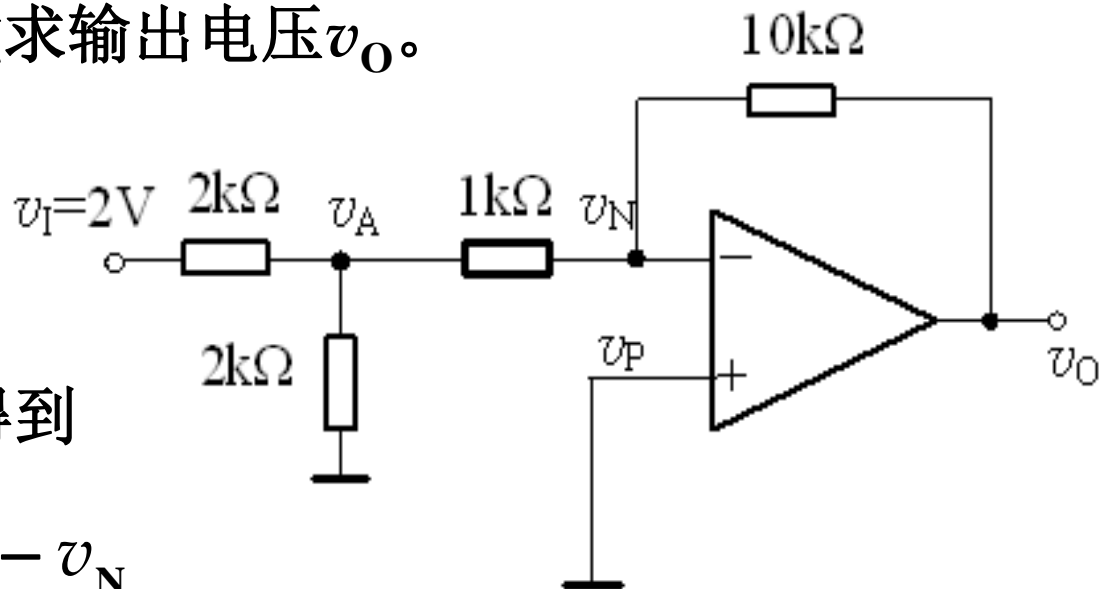
$$v_O' = -\frac{R_f}{R_1} v_I \quad v_O'' = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) v_I$$

$$v_O = v_O' + v_O'' = -\frac{R_f}{R_1} v_I + \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) v_I = v_I$$

$$A_v = \frac{v_O}{v_I} = 1$$

## 2.2.2 反相放大电路

**例2.2.2** 电路如图所示，假设运算放大器为理想的，当输入电压  $v_I = 2V$  时，试求输出电压  $v_O$ 。



解：对  $v_A$  点列KCL方程得到

$$\frac{v_I - v_A}{2} = \frac{v_A - 0}{2} + \frac{v_A - v_N}{1}$$

➡  $v_A = 0.5V$

$v_N = v_P = 0$  ➡  $v_O = -10 \times 0.5V = -5V$



## 2.2.2 反相放大电路

**例2.2.3** 电路如图所示，求电路的电压增益 $A_v = v_O / v_I$ 的值。

解：利用“虚短”和“虚断”，  
对反相输入端列出KCL方程  
程得到

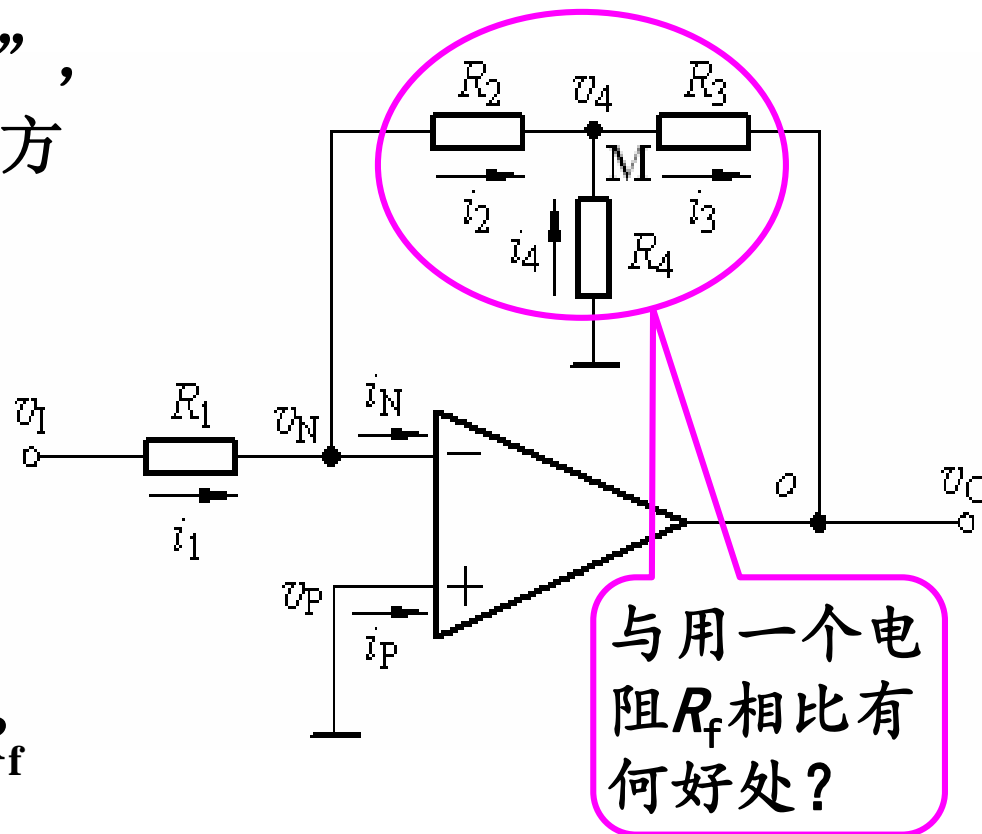
$$\frac{v_I - 0}{R_1} = \frac{0 - v_4}{R_2}$$

图中节点M的KCL方程

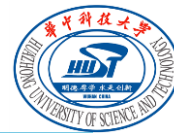
$$\frac{0 - v_4}{R_2} + \frac{0 - v_4}{R_4} = \frac{v_4 - v_O}{R_3}$$

解方程得到

$$A_v = \frac{v_O}{v_I} = - \frac{R_2 + R_3 + (R_2 R_3 / R_4)}{R_1} = - \frac{R_2}{R_1} \left( 1 + \frac{R_3}{R_2} + \frac{R_3}{R_4} \right)$$



# 2 运算放大器及其基本运算电路

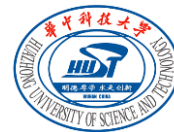


## 2.1 运算放大器基本特性

## 2.2 运放构成的基本电路

## 2.3 同相输入和反相输入放大电路的其他应用

## 2.3 同相输入和反相输入放大电路 的其他应用



### 2.3.2 加法电路

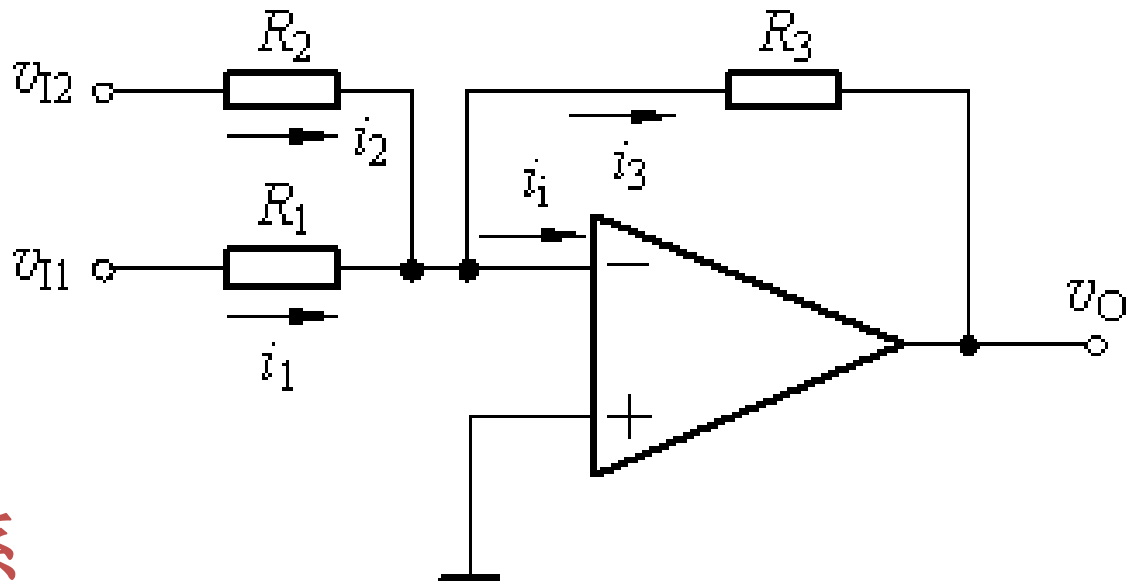
### 2.3.1 减法电路

### 2.3.3 仪用放大电路

### 2.3.4 积分和微分电路

## 2.3.2 加法电路

### 1. 反相加法



### 2. 输入输出关系

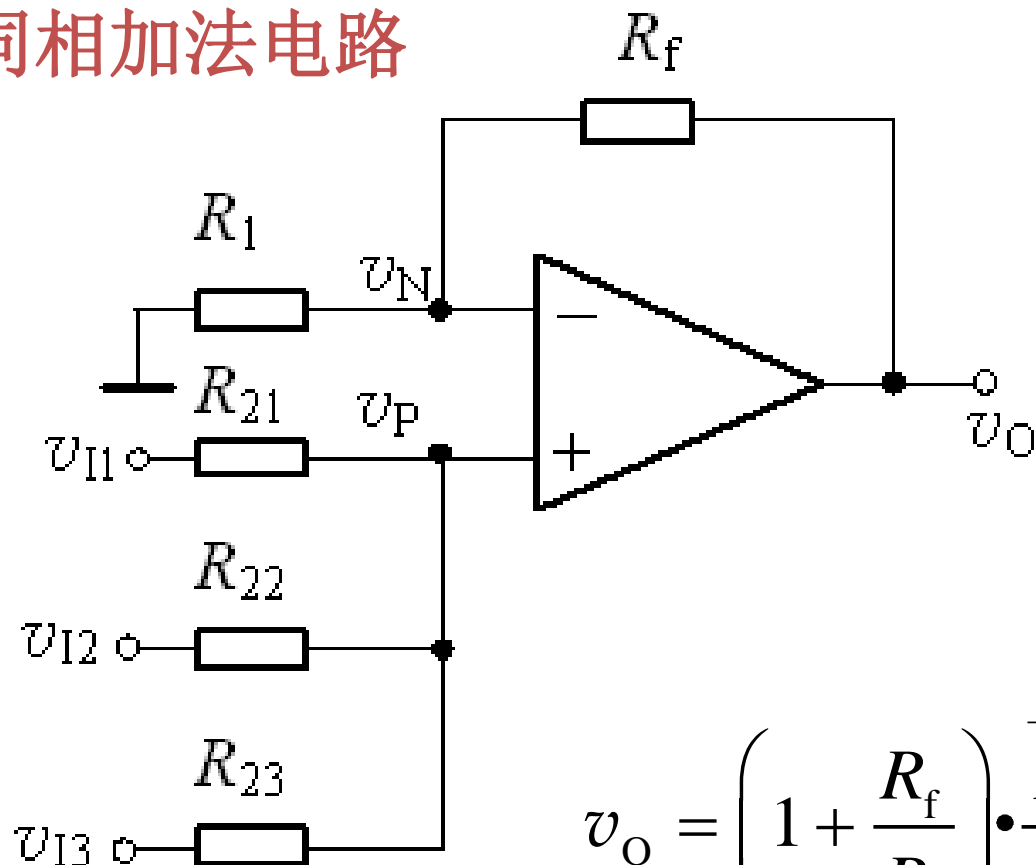
根据“虚短”、“虚断”和N点的KCL得：

$$\begin{cases} v_N = v_P = 0 \\ \frac{v_{I1} - v_N}{R_1} + \frac{v_{I2} - v_N}{R_2} = \frac{v_N - v_O}{R_3} \end{cases} \Rightarrow -v_O = \frac{R_3}{R_1} v_{I1} + \frac{R_3}{R_2} v_{I2}$$

若  $R_1 = R_2 = R_3$ ，则有  $-v_O = v_{I1} + v_{I2}$

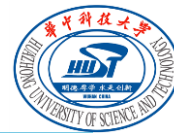
## 2.3.2 加法电路

### 3. 同相加法电路



$$v_O = \left( 1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \cdot \frac{\frac{v_{I1}}{R_{21}} + \frac{v_{I2}}{R_{22}} + \frac{v_{I3}}{R_{23}}}{\frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}} + \frac{1}{R_{23}}}$$

## 2.3 同相输入和反相输入放大电路 的其他应用



### 2.3.2 加法电路

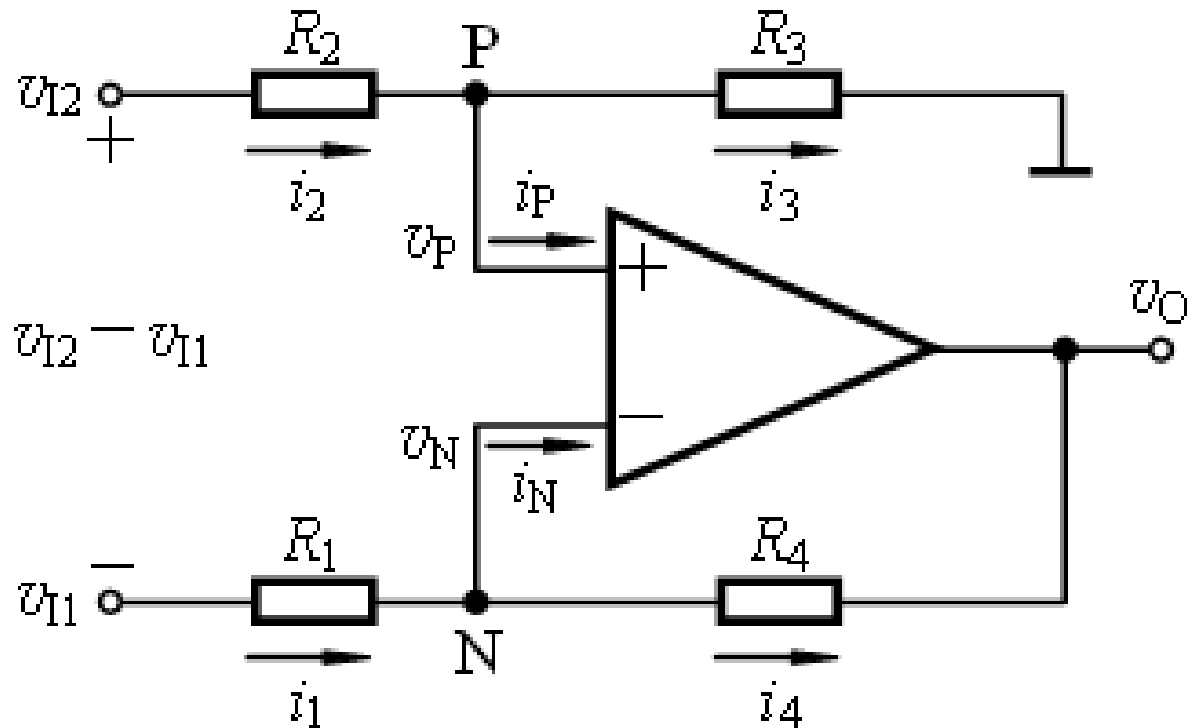
### 2.3.1 减法电路

### 2.3.3 仪用放大电路

### 2.3.4 积分和微分电路

## 2.3.1 减法电路

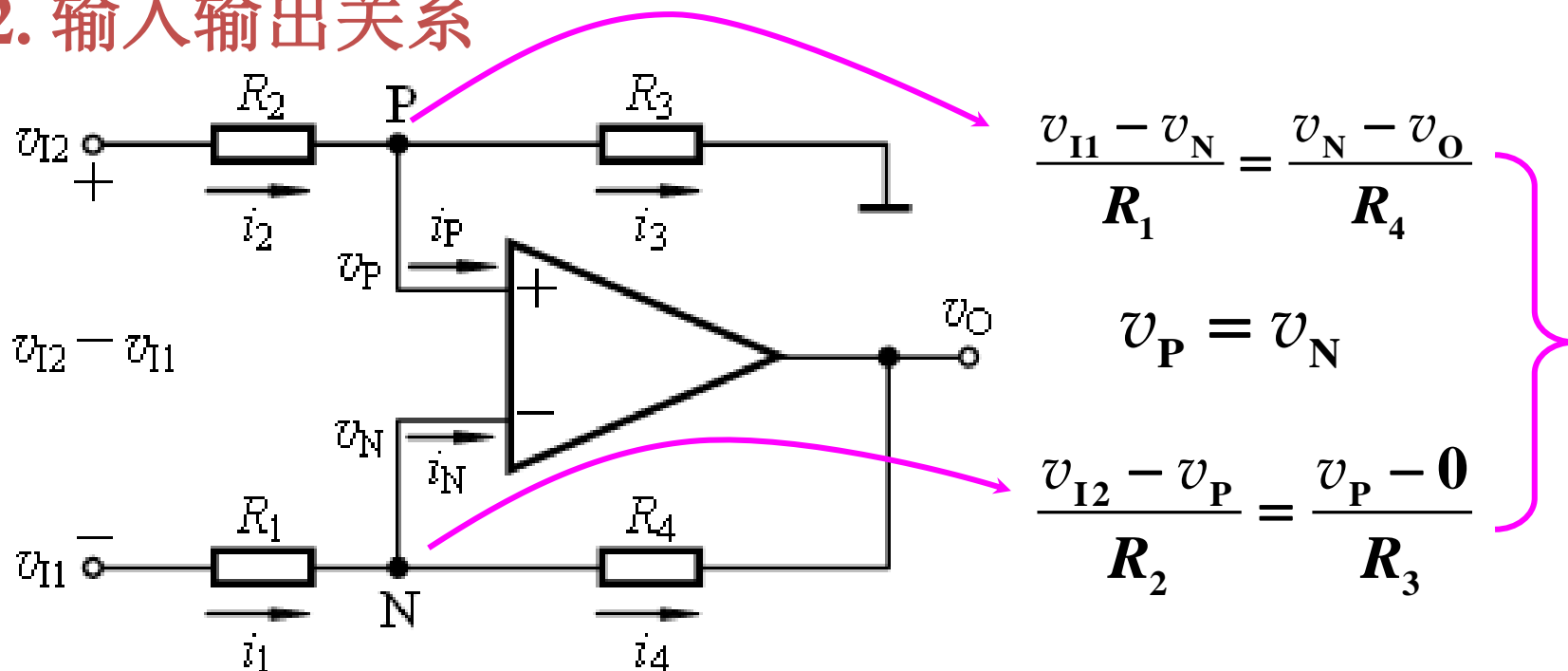
### 1. 电路形式



$$v_O = f(v_{I1}, v_{I2}) = ?$$

## 2.3.1 减法电路

### 2. 输入输出关系



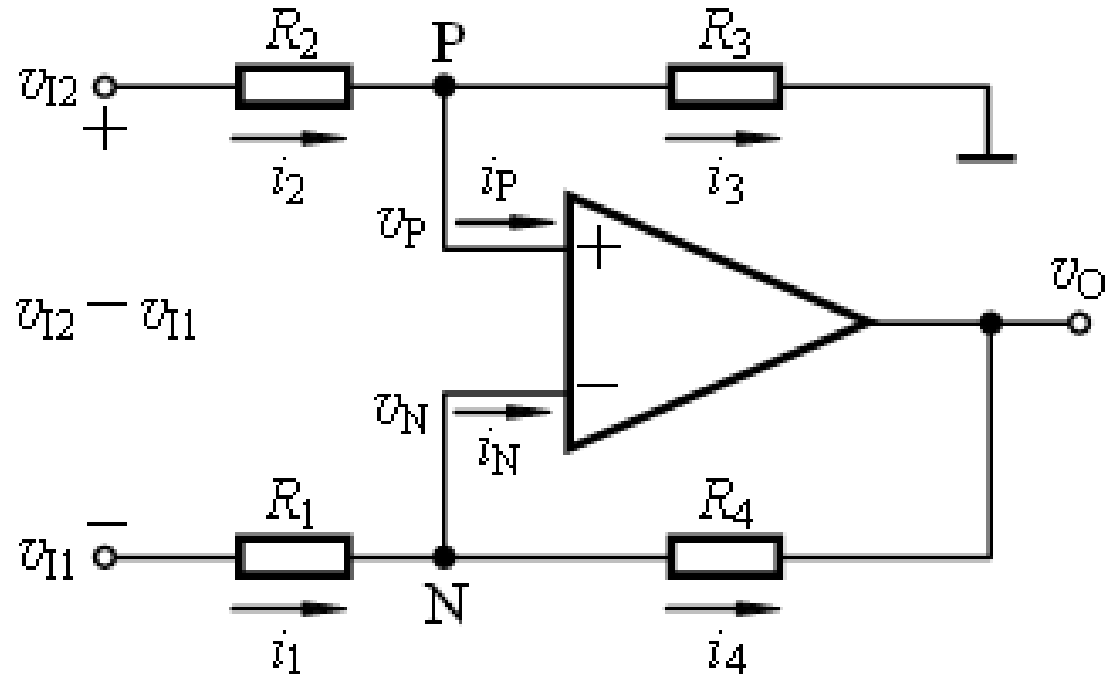
$$v_O = \left( \frac{R_1 + R_4}{R_1} \right) \left( \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) v_{I2} - \frac{R_4}{R_1} v_{I1}$$

$$R_3 / R_2 = R_4 / R_1, \quad v_O = \frac{R_4}{R_1} (v_{I2} - v_{I1})$$



## 2.3.1 减法电路

### 3. 电压增益



$$v_O = \frac{R_4}{R_1} (v_{I2} - v_{I1})$$

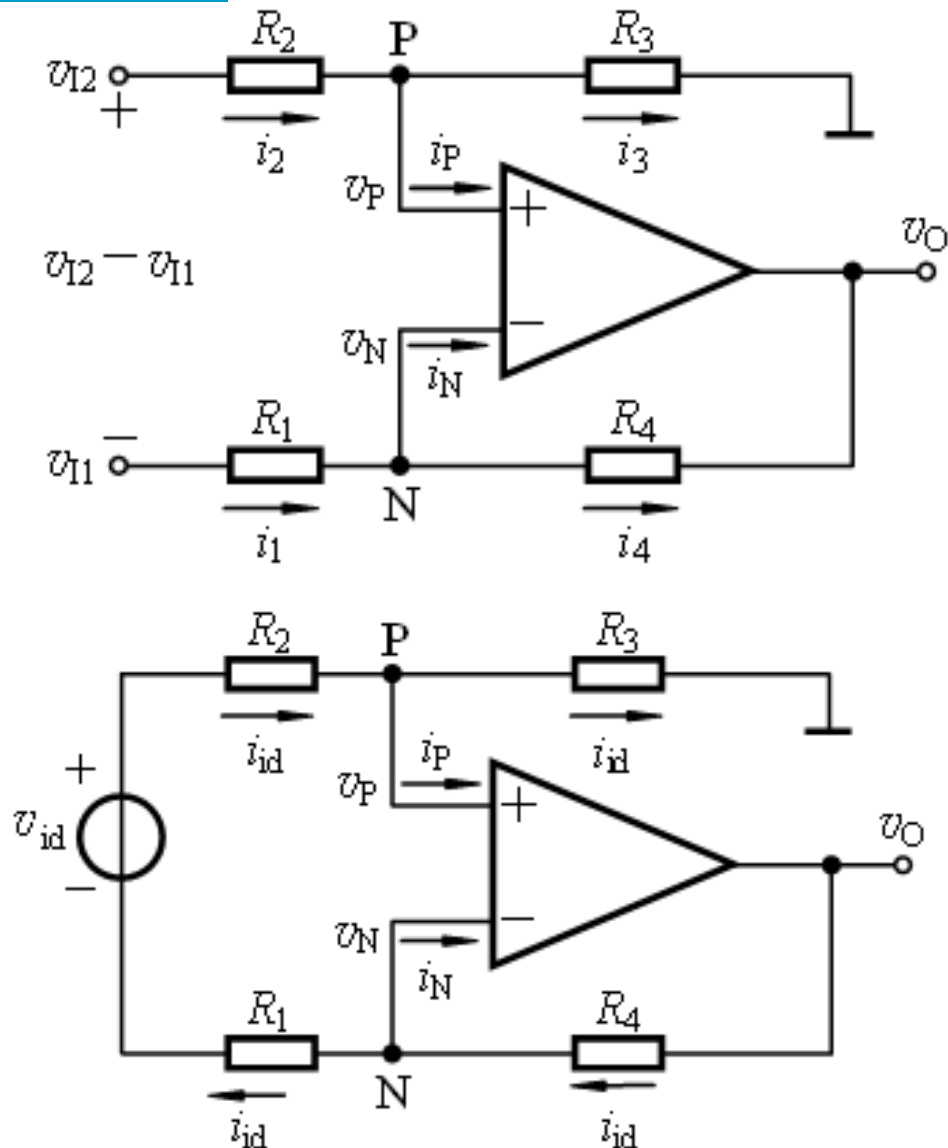
$$A_v = \frac{v_O}{v_{I2} - v_{I1}} = \frac{R_4}{R_1}$$

## 2.3.1 减法电路

### 4. 输入电阻

$$A_v = \frac{v_O}{v_{I2} - v_{I1}} = \frac{R_4}{R_1}$$

为了便于求解从电路的两个输入端看进去的电阻，将图重画如下



## 2.3.1 减法电路

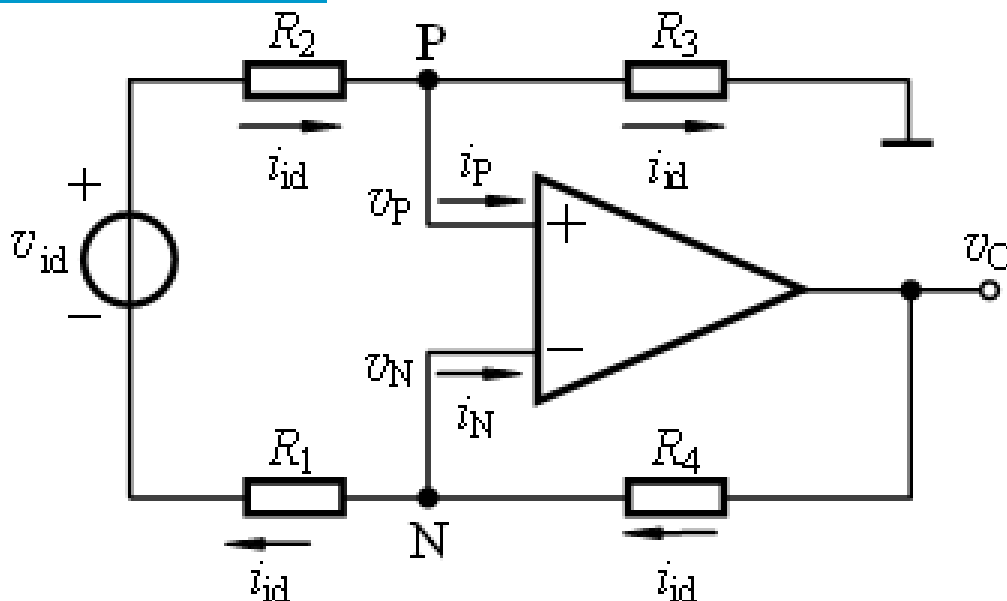
### 4. 输入电阻

利用“虚短”  
和“虚断”有

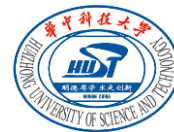
$$v_{id} = v_{I2} - v_{I1}$$

$$v_{id} = i_{id} R_1 + i_{id} R_2$$

$$R_{id} = \frac{v_{id}}{i_{id}} = R_1 + R_2$$



## 2.3 同相输入和反相输入放大电路 的其他应用



2.3.2 加法电路

2.3.1 减法电路

2.3.3 仪用放大电路

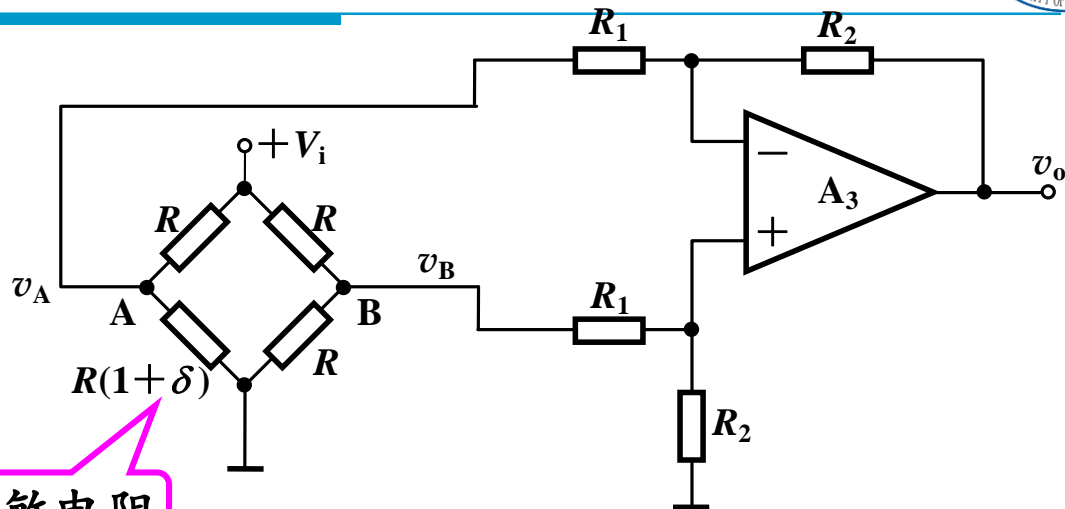
2.3.4 积分和微分电路

# 电桥测温电路

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1}(v_A - v_B)$$

➤ 能实现吗？

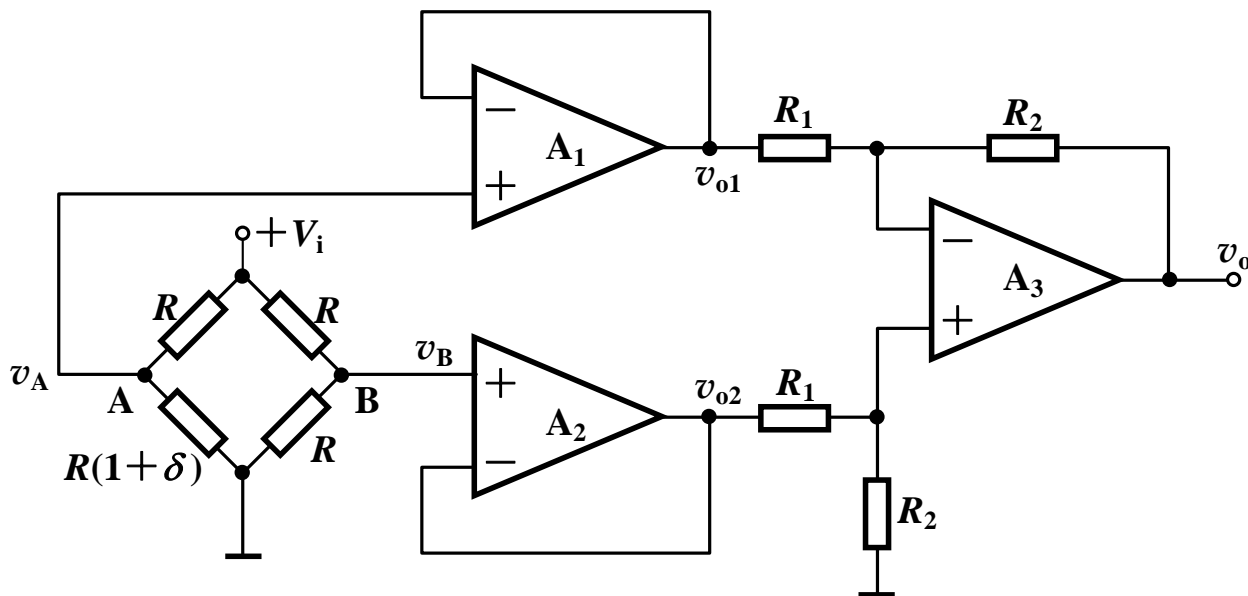
热敏电阻



## 改进电路

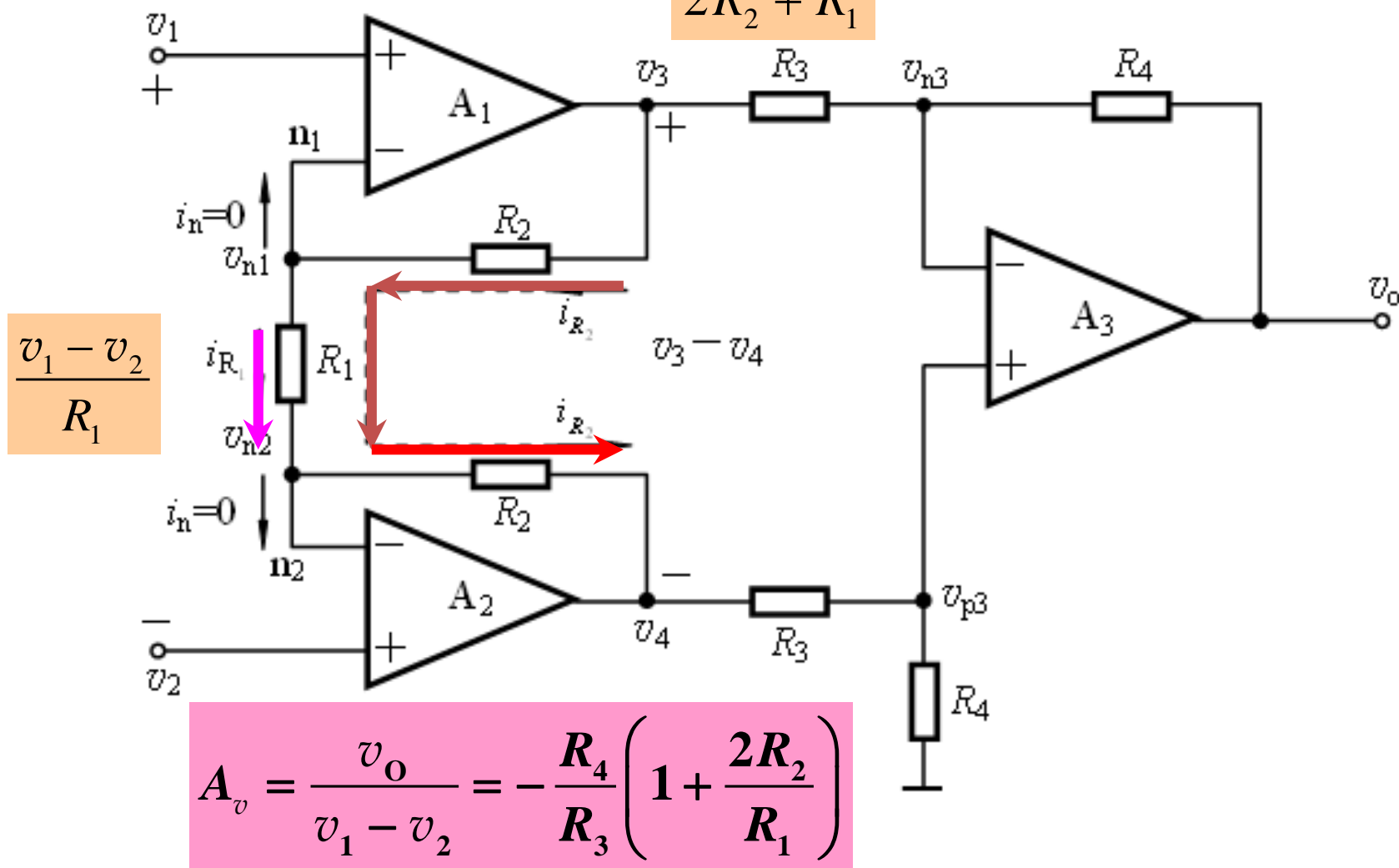
体现了输入电阻的重要性

➤ 有更好的电路吗？



## 2.3.3 仪用放大电路

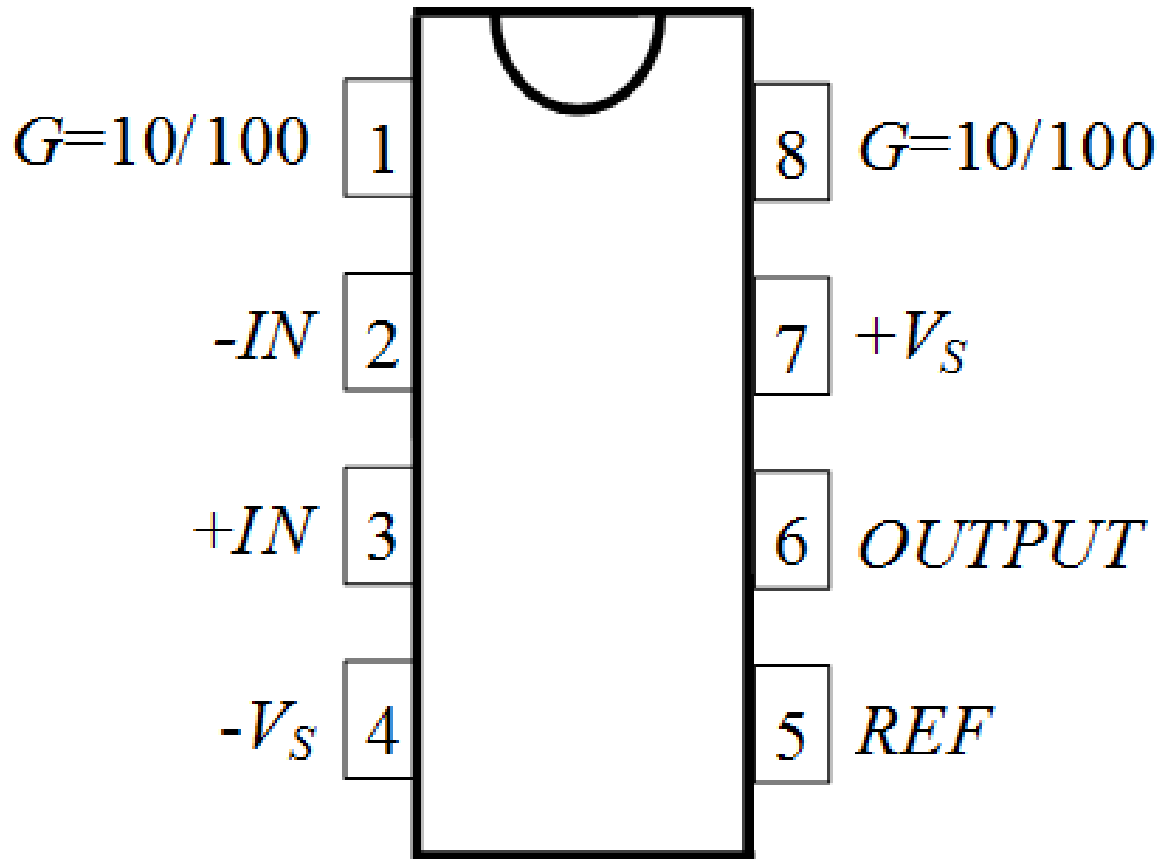
### 1. 电路及增益



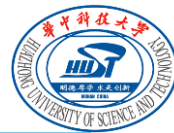
## 2.3.3 仪用放大电路

### 2. 集成仪用放大器

Analog Dev.公司AD621B



## 2.3 同相输入和反相输入放大电路 的其他应用



2.3.2 加法电路

2.3.1 减法电路

2.3.3 仪用放大电路

2.3.4 积分和微分电路



## 2.3.4 积分和微分电路

### 1. 积分电路

根据“虚短”，得  $v_N = v_P = 0$

根据“虚断”，得  $i_N = i_P = 0$

因此 
$$i_2 = i_1 = \frac{v_I}{R}$$

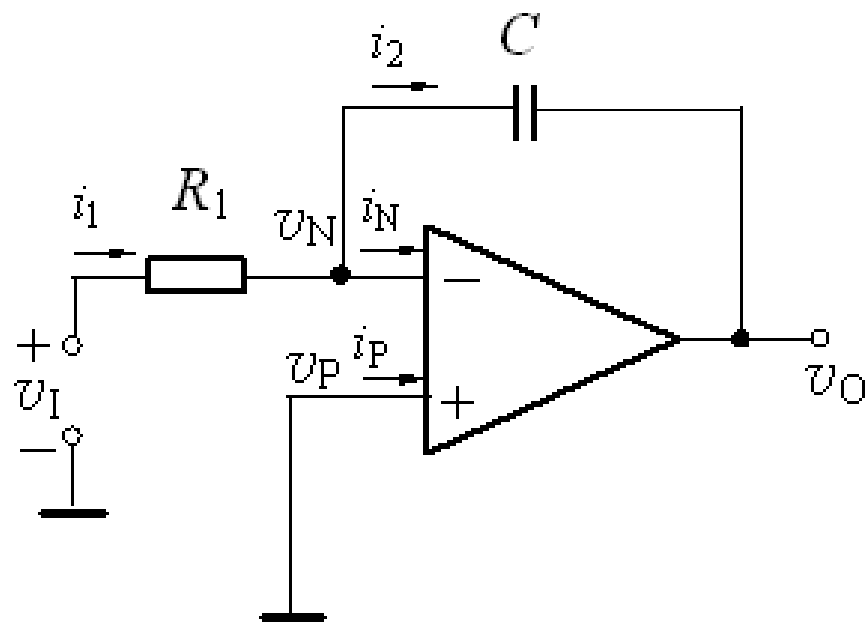
电容器被充电，其充电电流为  $i_2$

设电容器C的初始电压为零，则

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

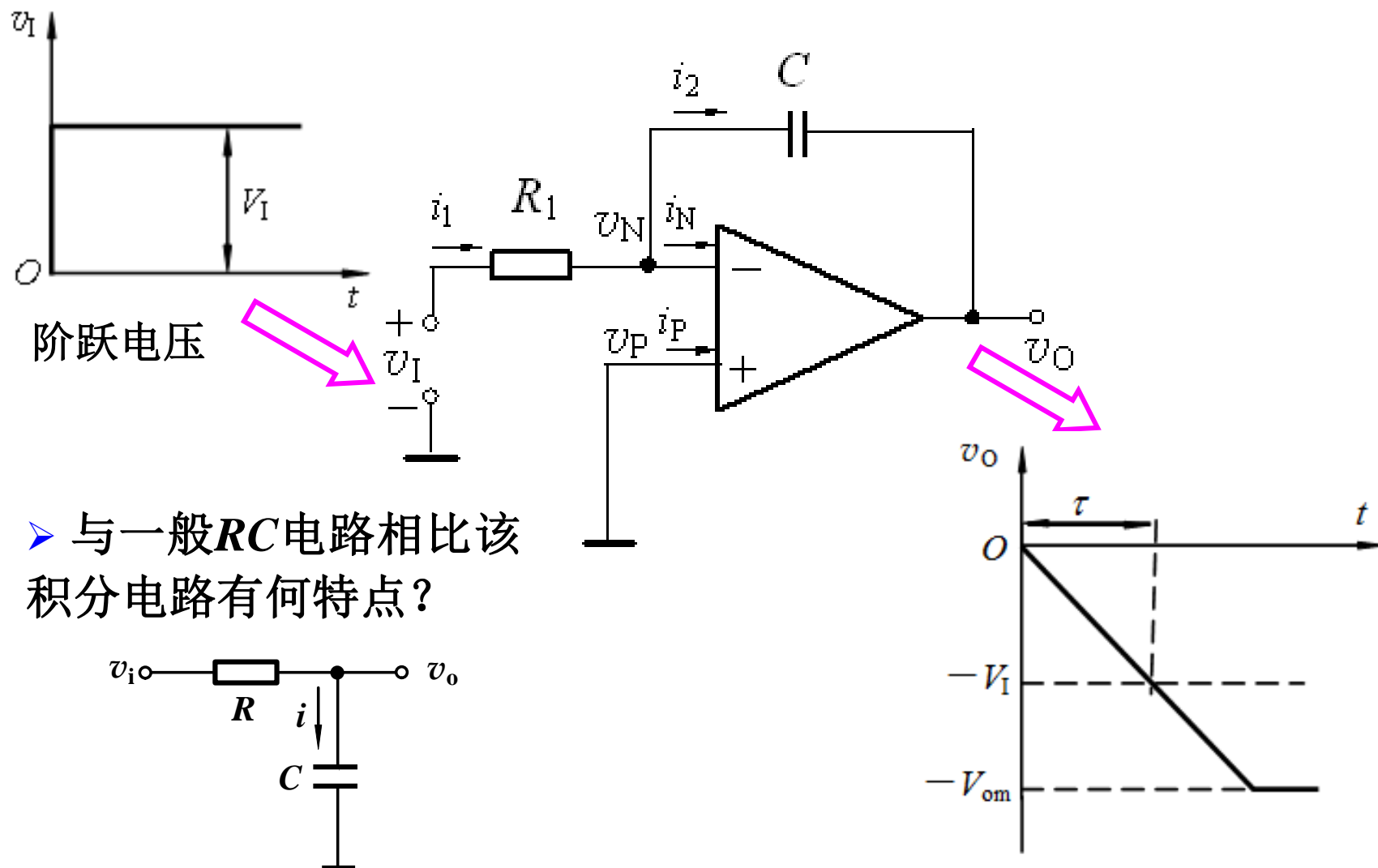
式中，负号表示  $v_O$  与  $v_I$  在相位上是相反的。

(积分运算)



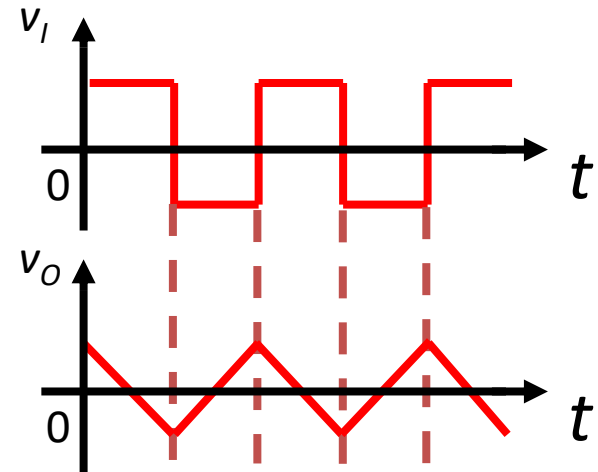
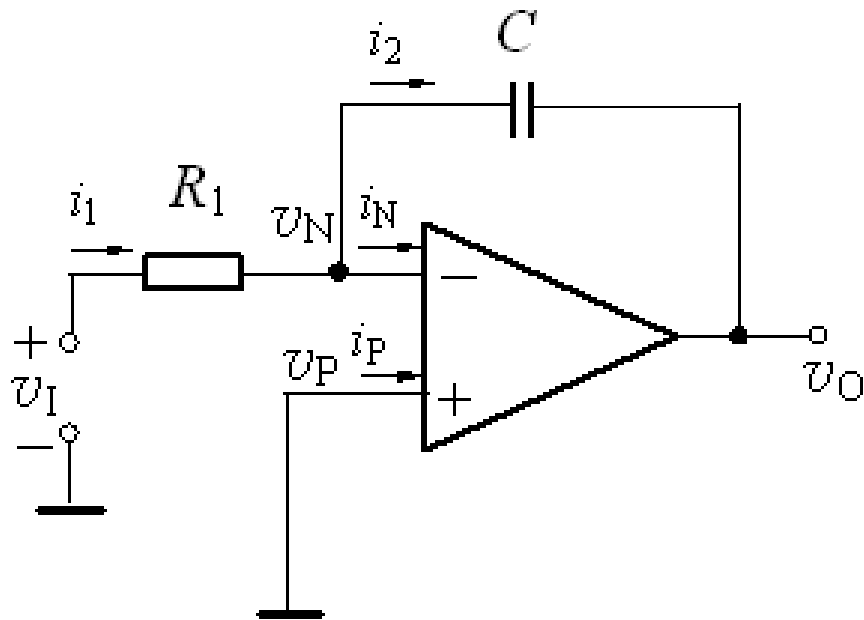
## 2.3.4 积分和微分电路

### 2. 积分电路的应用



## 2.3.4 积分和微分电路

### 2. 积分电路的应用



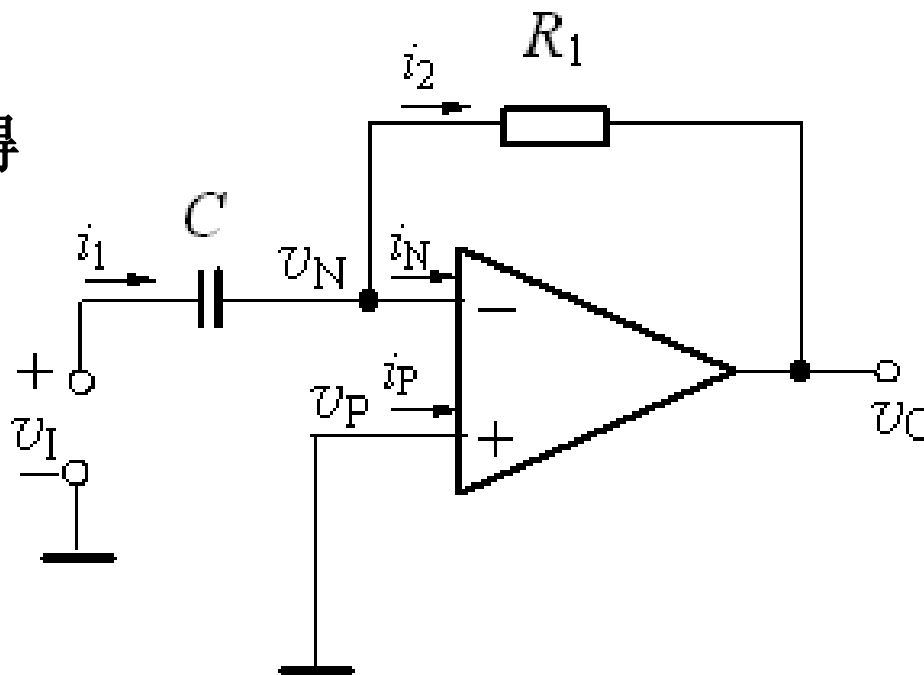
### 3. 微分电路

根据“虚短”和“虚断”得

$$i_1 = i_2$$

而 
$$i_1 = C \frac{dv_I}{dt}$$

$$i_2 = -\frac{v_O}{R_1}$$

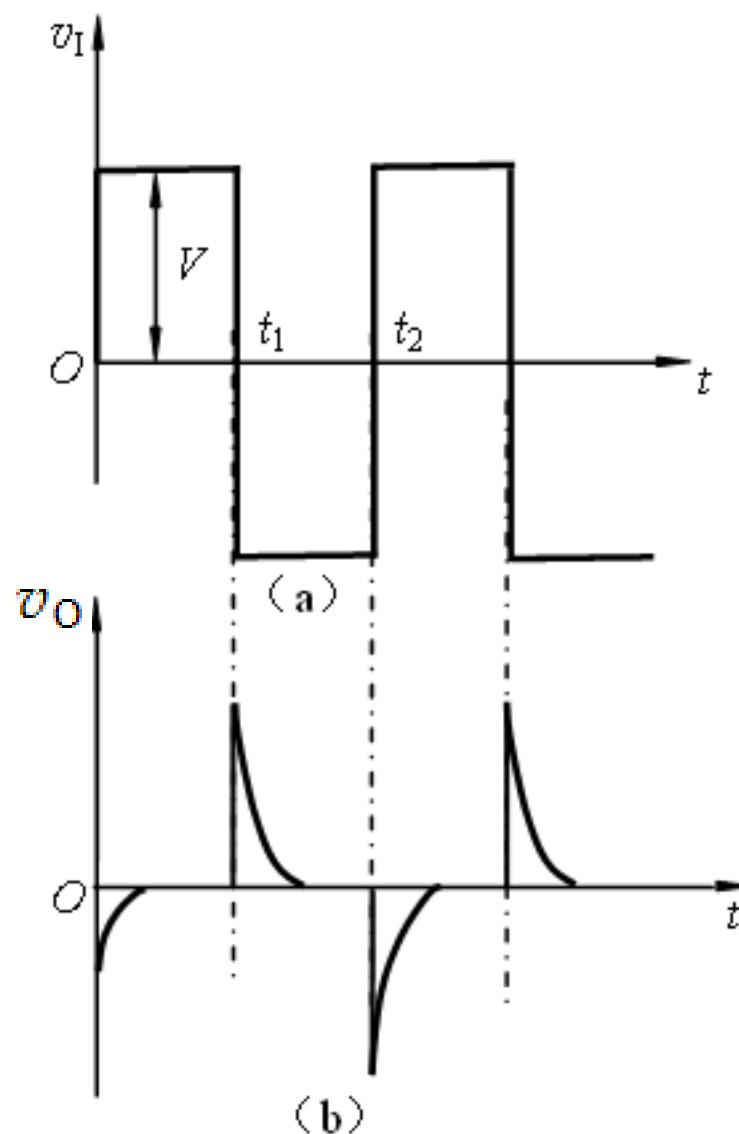


所以 
$$v_O = -i_2 R_1 = -R_1 C \frac{dv_I}{dt}$$

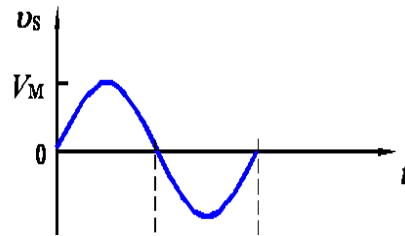
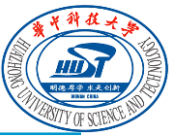
### 4. 微分电路的应用

方波输入信号

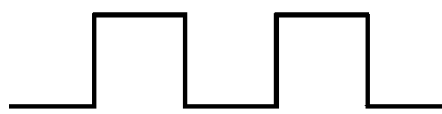
尖脉冲输出



## 2.3.4 积分和微分电路



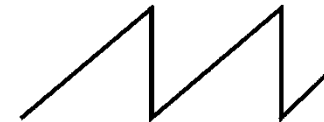
比较器



(a)

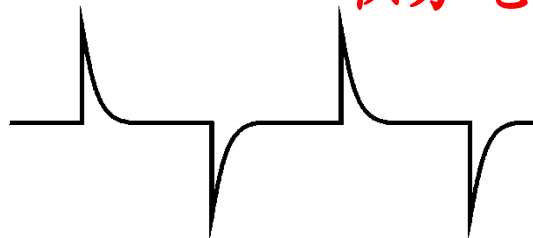


(b)



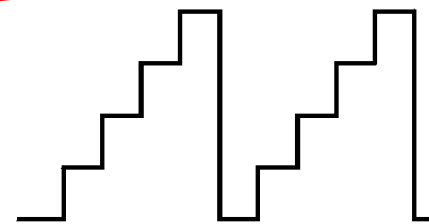
(c)

微分电路



(d)

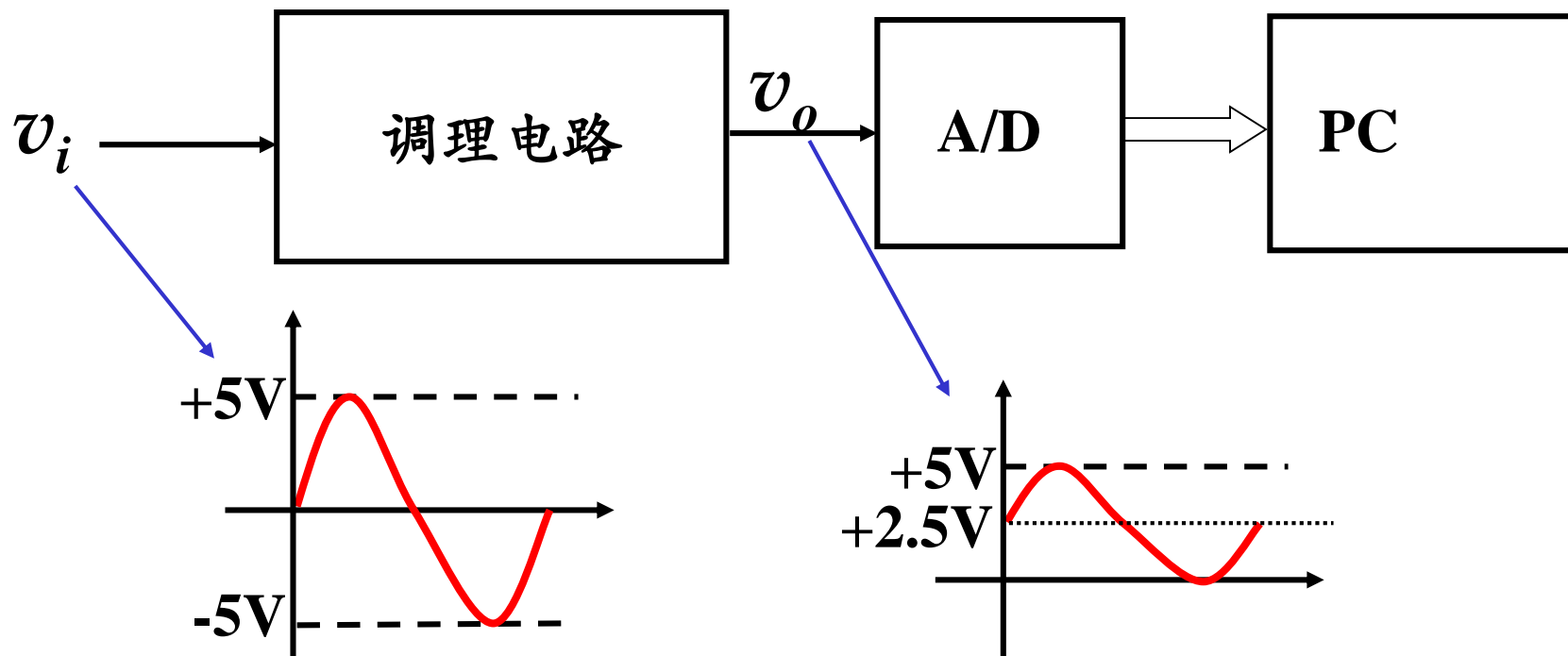
积分电路



(e)

# 思考

已知A/D转换器输入电压范围为  $0 \sim +5V$ ，而  $v_i$  电压范围为  $-5V \sim +5V$ 。试设计调理电路，使  $v_i$  满足A/D转换器的输入要求。



## 思考：

1. 实际运放和理想运放在特性方面最大的差异是什么？
2. 运放一般能在开环（无负反馈）状态下进行线性放大吗？
4. 运放的基本电路有哪些？如何分析设计？