

2 运算放大器

2 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

2.1 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

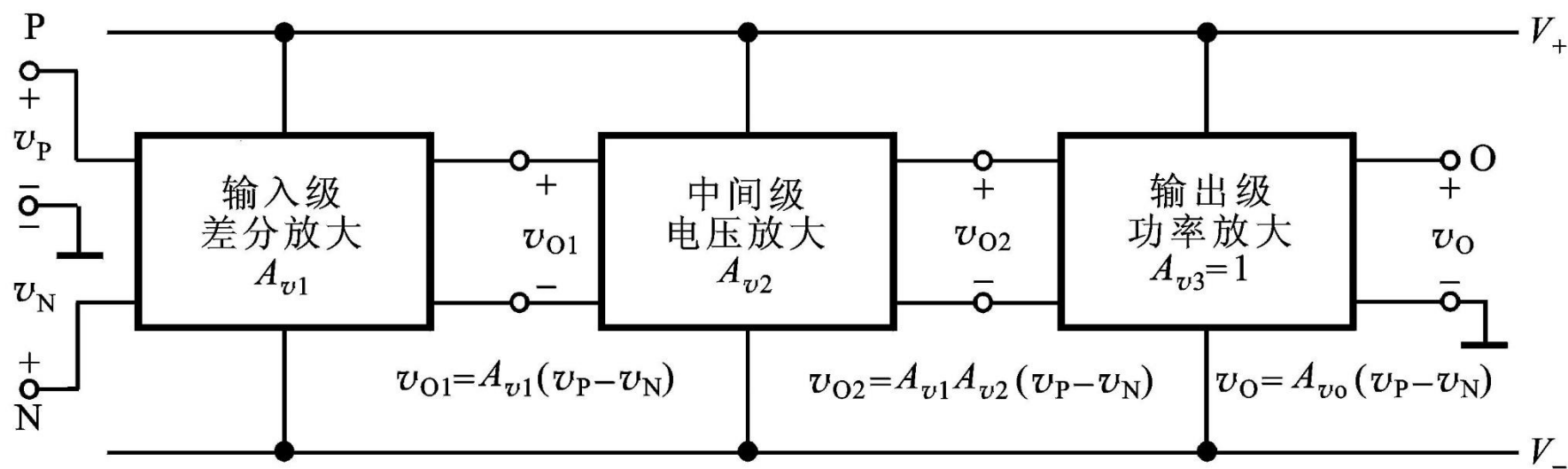


图2.1.1 集成运算放大器的内部结构框图

本章不讨论集成运放的内部电路，仅从其电路模型和外特性出发，讨论运放构成的放大电路和典型的线性应用电路。

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 符号

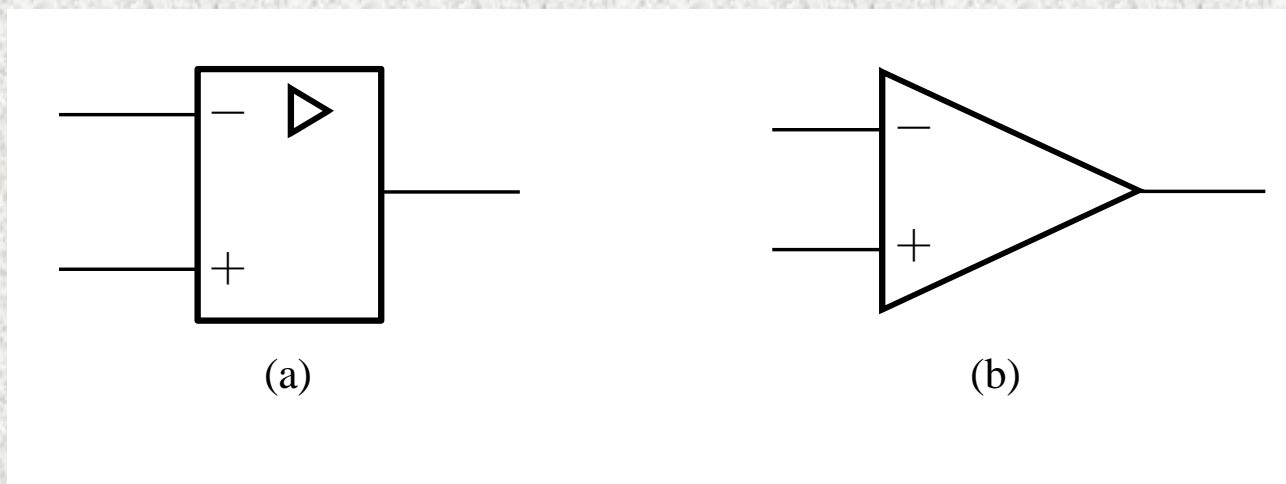


图2.1.2 运算放大器的代表符号

(a) 国家标准规定的符号 (b) 国内外常用符号

2.1 集成电路运算放大器

放大：在输入信号控制下，放大电路将供电电源能量转换成为输出信号能量。

通常：

- 开环电压增益

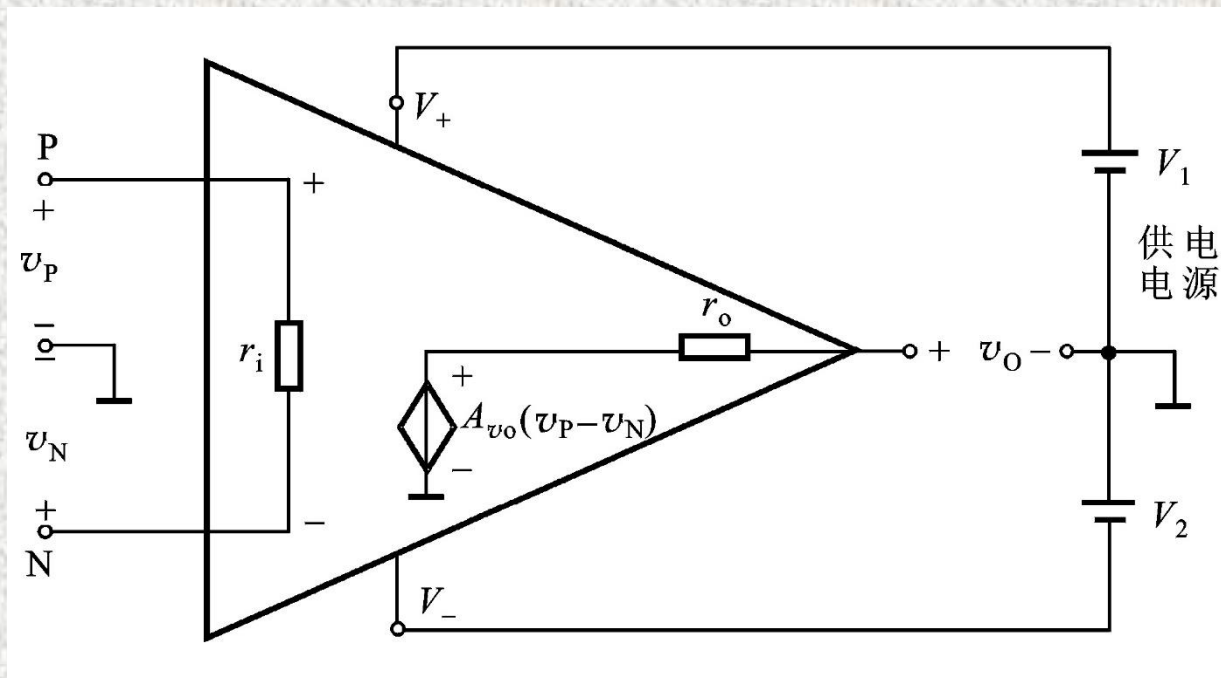
A_{vo} 的 $\geq 10^5$ (很高)

- 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 集成电路运算放大器

当 $A_{vo}(v_P - v_N) \geq V_+$ 时

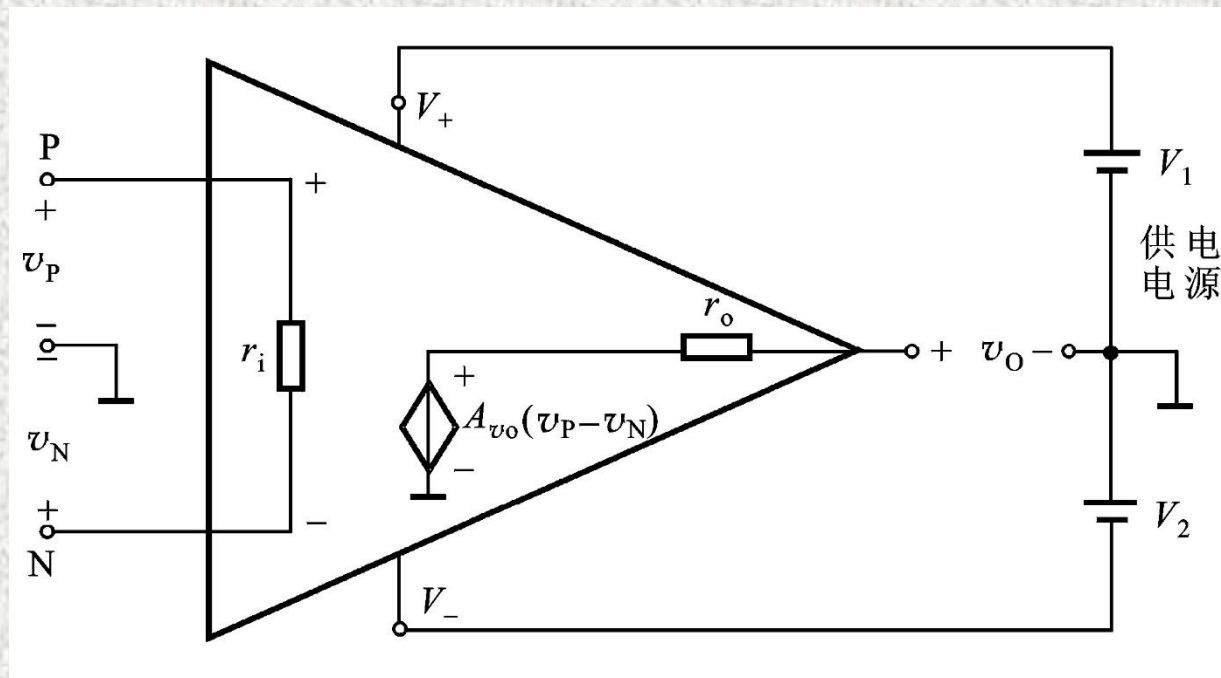
$$v_O = V_+$$

当 $A_{vo}(v_P - v_N) \leq V_-$ 时

$$v_O = V_-$$

电压传输特性

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



2.1 集成电路运算放大器

当 $A_{vo}(v_P - v_N) \geq V_+$ 时

$$v_O = V_+$$

当 $A_{vo}(v_P - v_N) \leq V_-$ 时

$$v_O = V_-$$

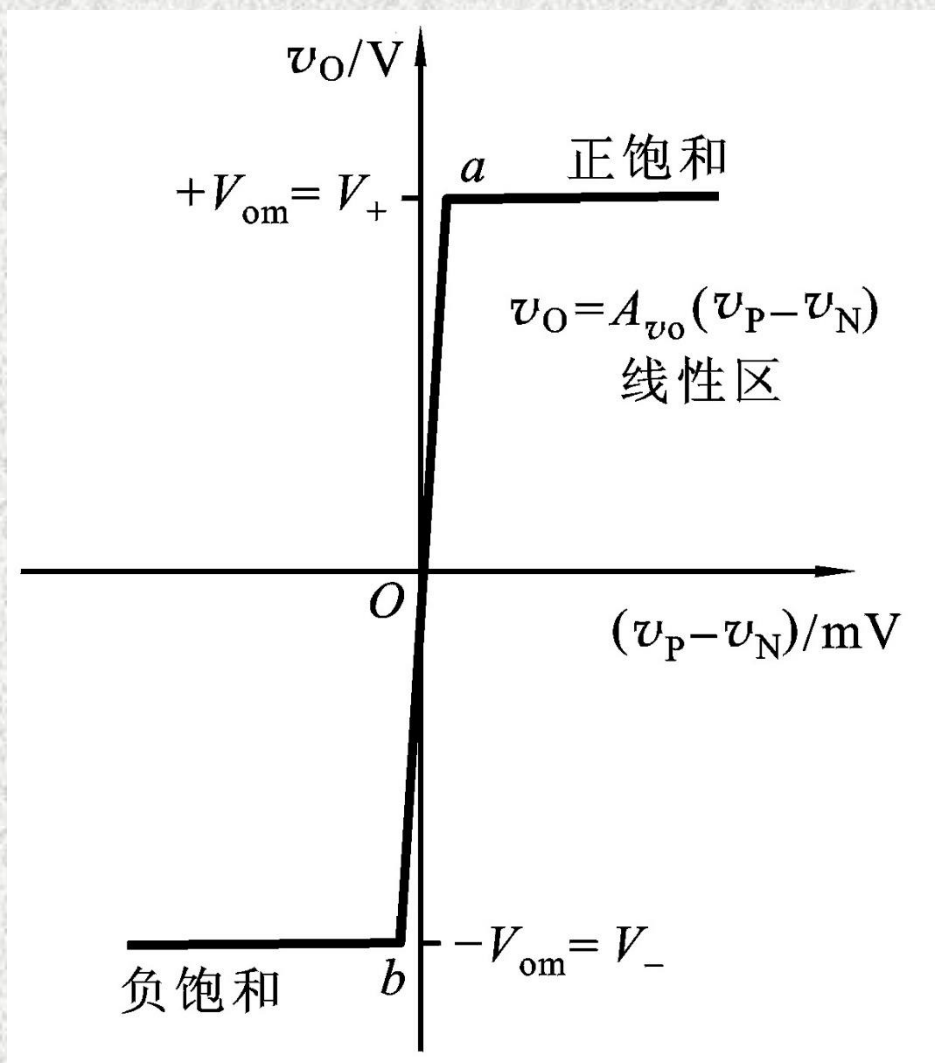
电压传输特性

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

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 $v_o = -V_{om} = V_-$

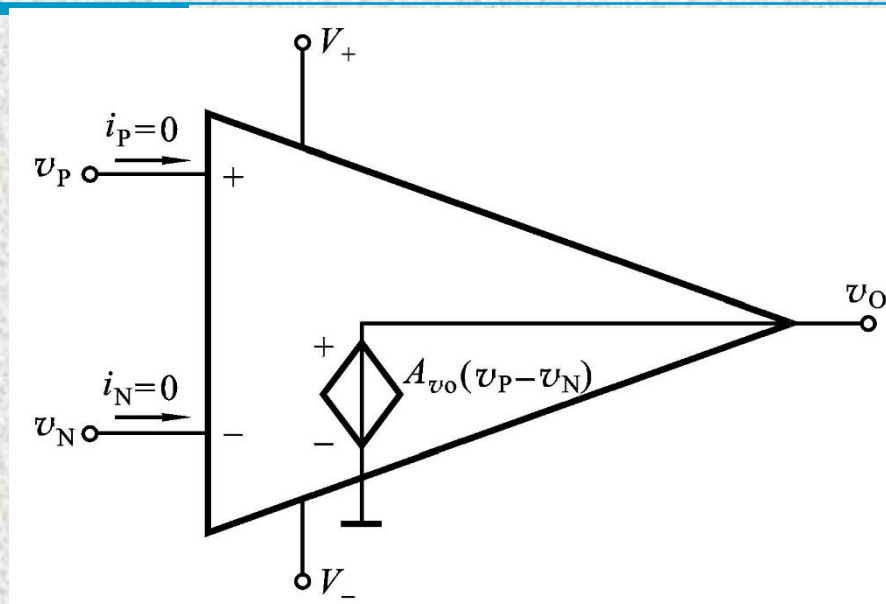
3. 若 $V_- < v_o < V_+$

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, $r_o \approx 0$



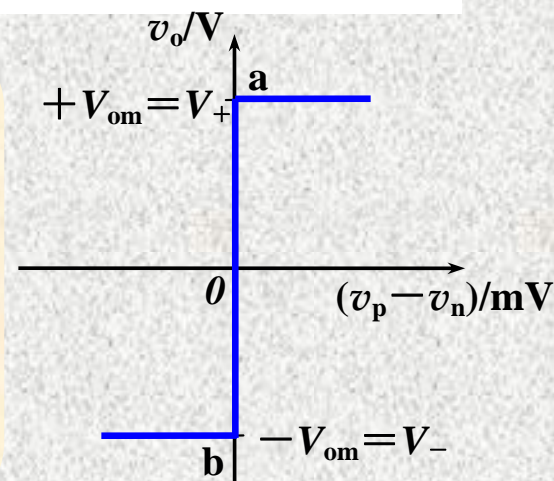
理想:

$$r_i \approx \infty$$

$$r_o \approx 0$$

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

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



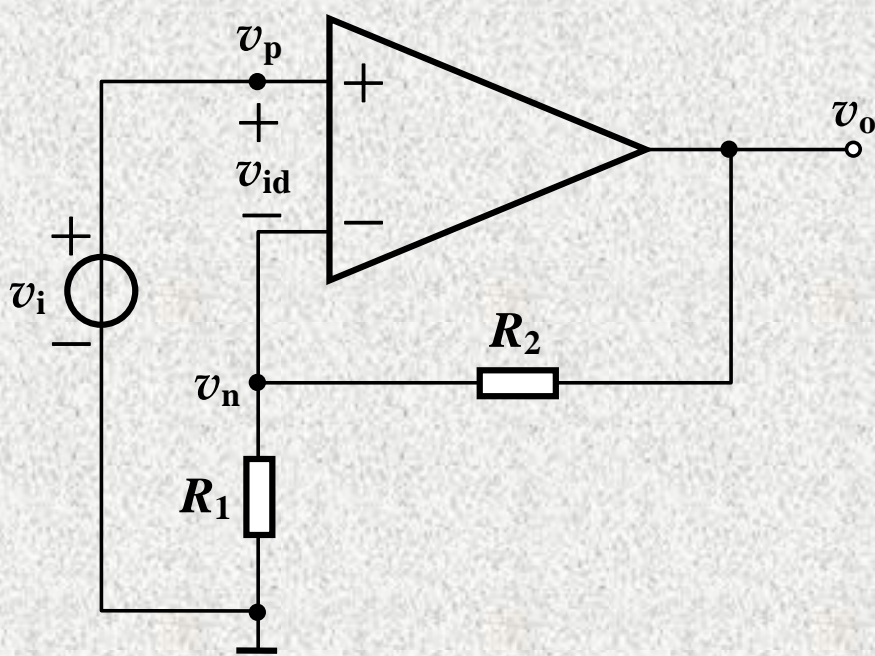
2.3 基本线性运放电路

2.3.1 同相放大电路

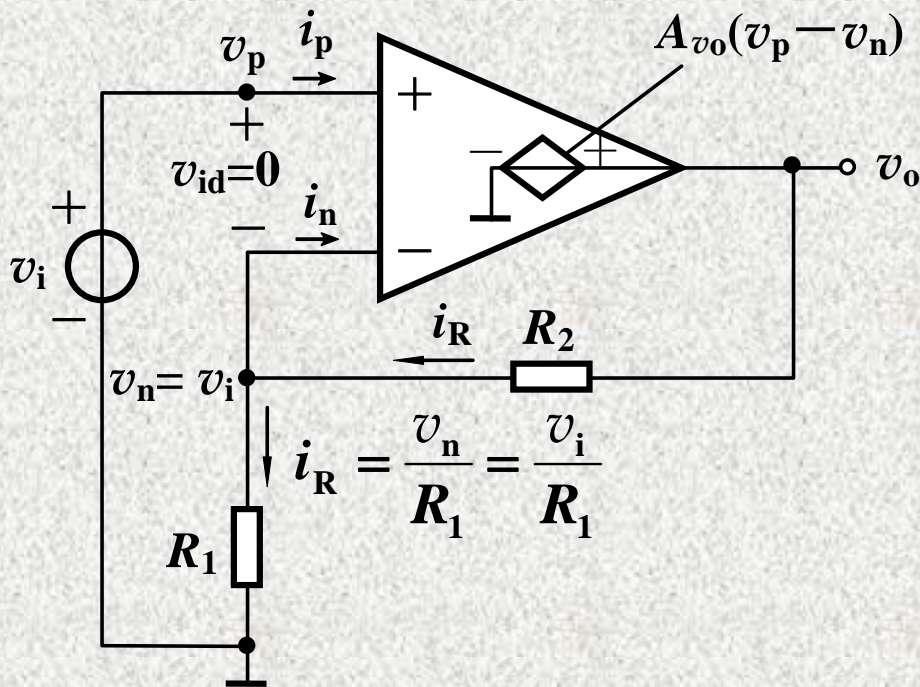
2.3.2 反相放大电路

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

2.3.1 同相放大电路

2. 几项技术指标的近似计算

(1) 电压增益 A_v

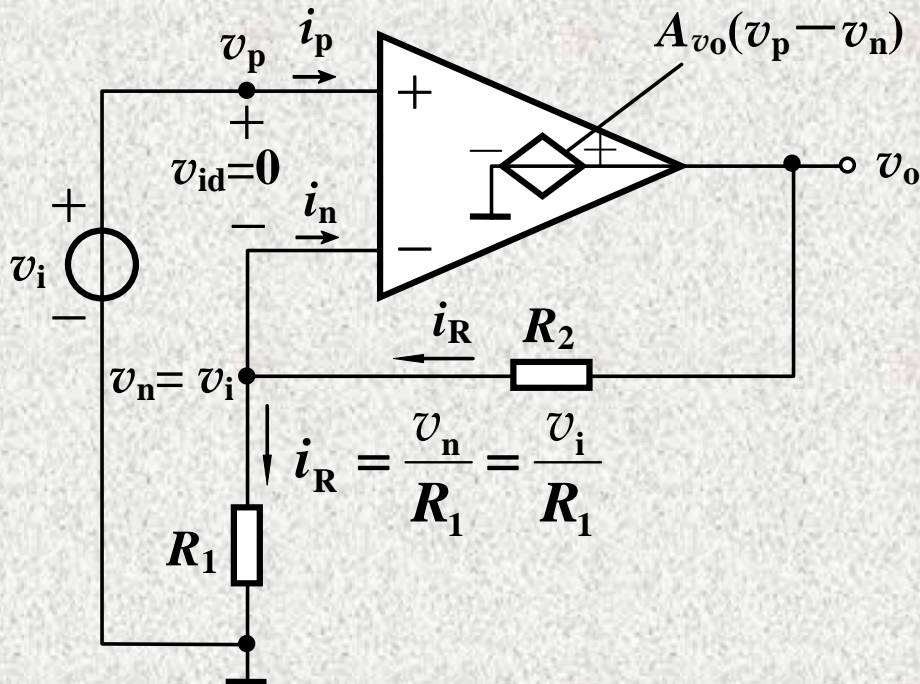
根据**虚短**和**虚断**的概念有

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

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

2. 几项技术指标的近似计算

(2) 输入电阻 R_i

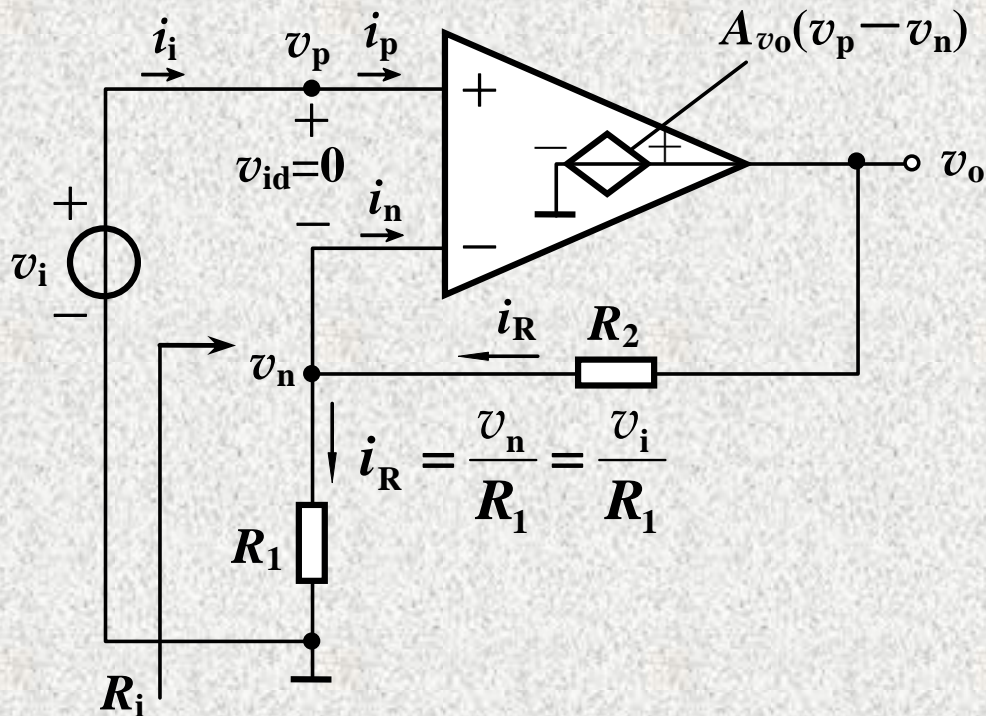
输入电阻定义

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

根据虚短和虚断有

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

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



(3) 输出电阻 R_o $R_o \rightarrow 0$

2.3.1 同相放大电路

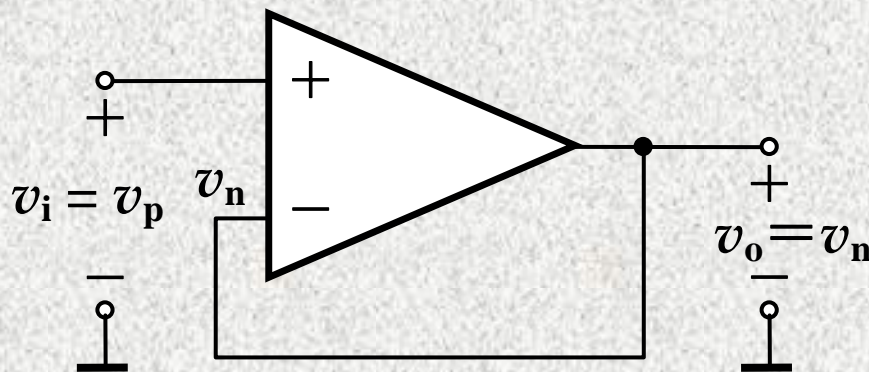
3. 电压跟随器

根据虚短和虚断有

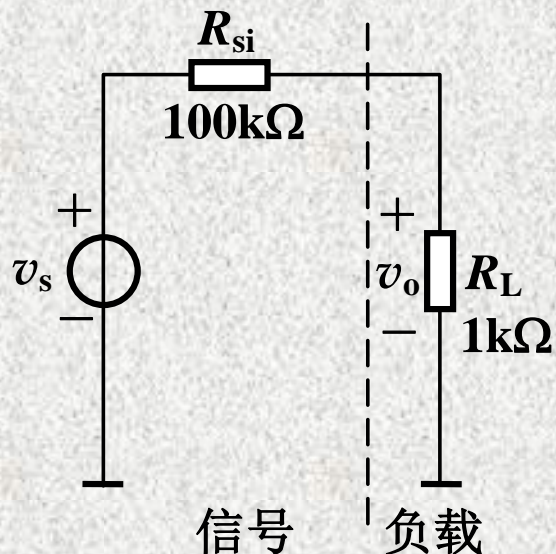
$$v_o = v_n \approx v_p = v_i$$

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

(可作为公式直接使用)

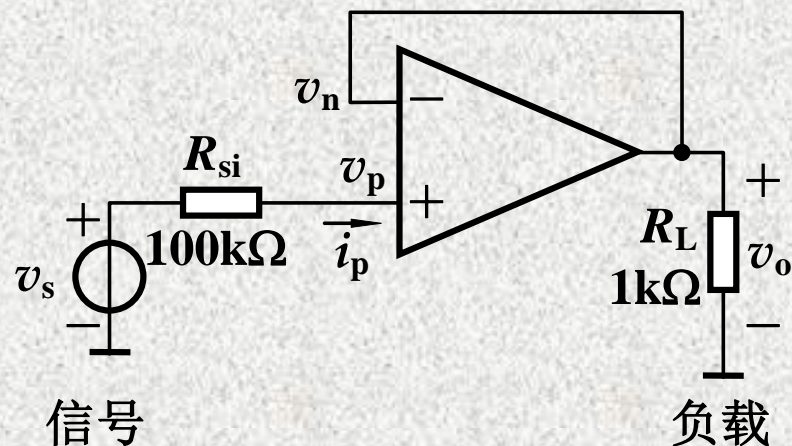


电压跟随器的作用



无电压跟随器时
负载上得到的电压

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

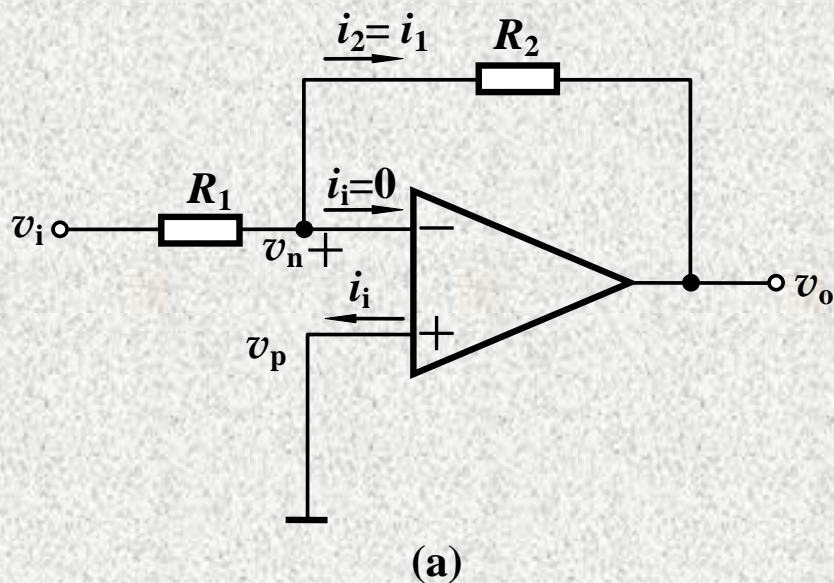


有电压跟随器时
根据虚短和虚断

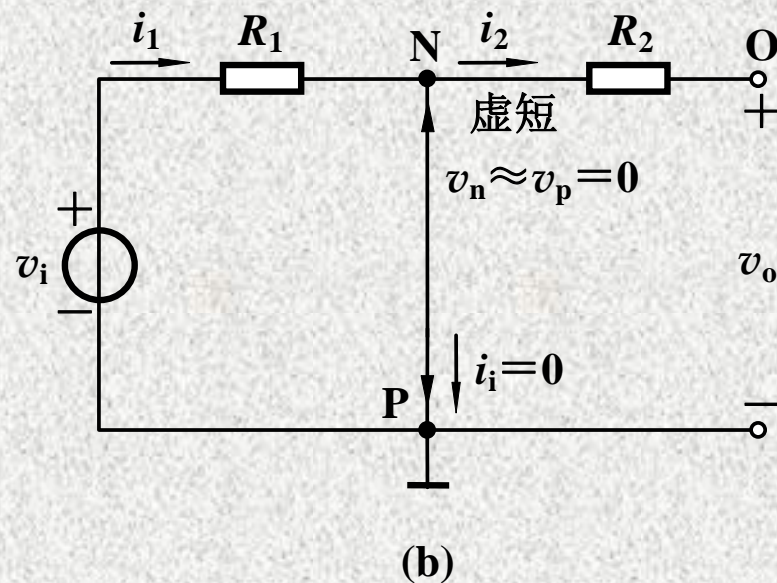
$$i_p \approx 0, \quad v_p = v_s$$
$$v_o = v_n \approx v_p = v_s$$

2.3.2 反相放大电路

1. 基本电路



(a) 电路图



(b) 由虚短引出虚地 $v_n \approx 0$

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

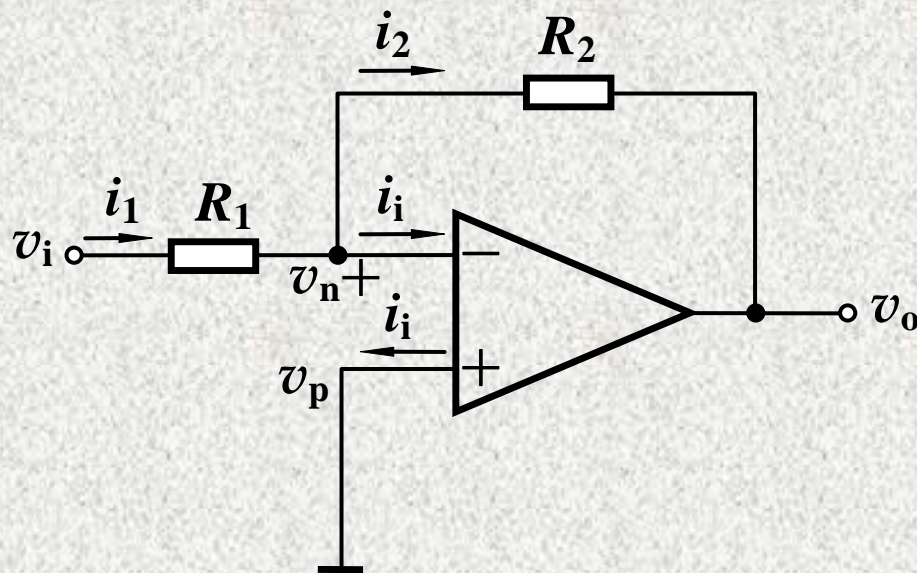
$$v_n \approx v_p = 0, \quad i_i = 0$$

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)

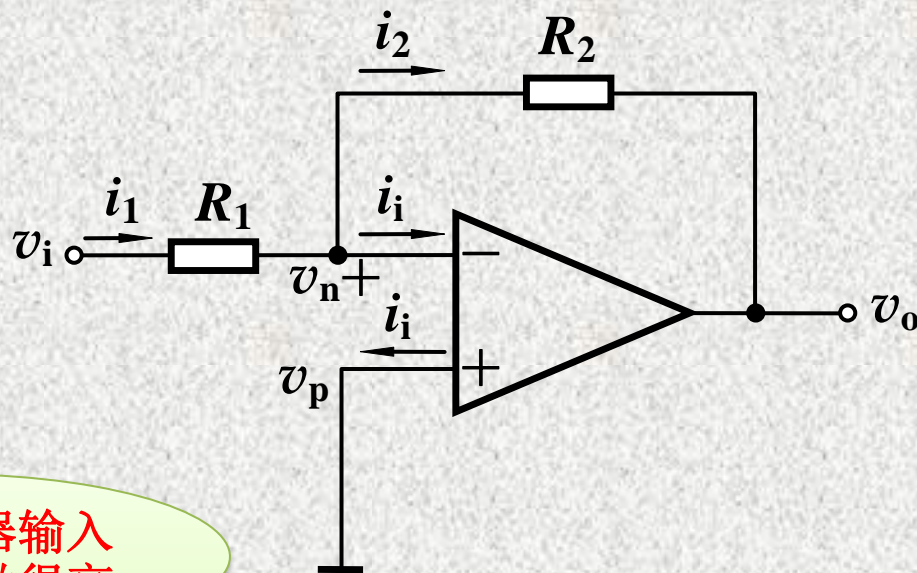


2.3.2 反相放大电路

2. 几项技术指标的近似计算

(2) 输入电阻 R_i

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



(3) 输出电阻 R_o

$$R_o \rightarrow 0$$

同相放大器输入
阻抗容易做得高

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

2.3.2 反相放大电路

3、同相放大器和反相放大器区别

(1) 同相放大器

优点：输入阻抗和运放的输入阻抗相等，接近无穷大

缺点：放大器没有虚地，有较大共模电压，抗干扰能力较差，另放大倍数只能大于1

(2) 反相放大器

优点：两个输入端电位近似为零，只有差模信号，抗干扰能力强

缺点：输入阻抗很小，等于信号到输入端的串联电阻的阻值

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
毫伏表的电流 $I_{m(\max)} = ?$

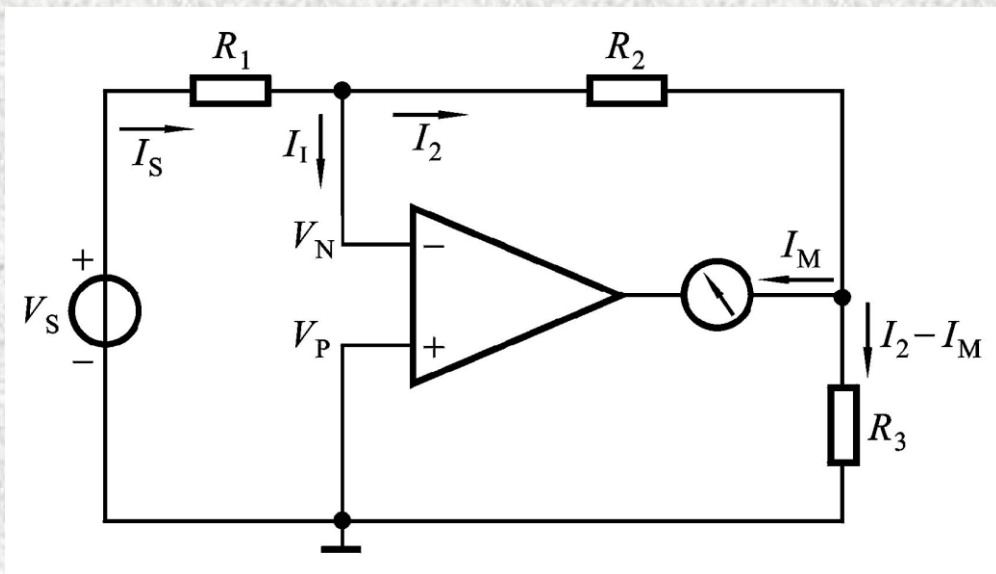
解 (1) 根据虚短和虚断有

$$I_i = 0 \quad V_p = V_n = 0$$

所以 $I_2 = I_s = V_s / R_1$

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

(2) 代入数据计算即可



R_2 和 R_3 相当于并联, 所以 $-I_2 R_2 = R_3 (I_2 - I_m)$

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

(指针偏转角度与 I_m 是线性关系)

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。

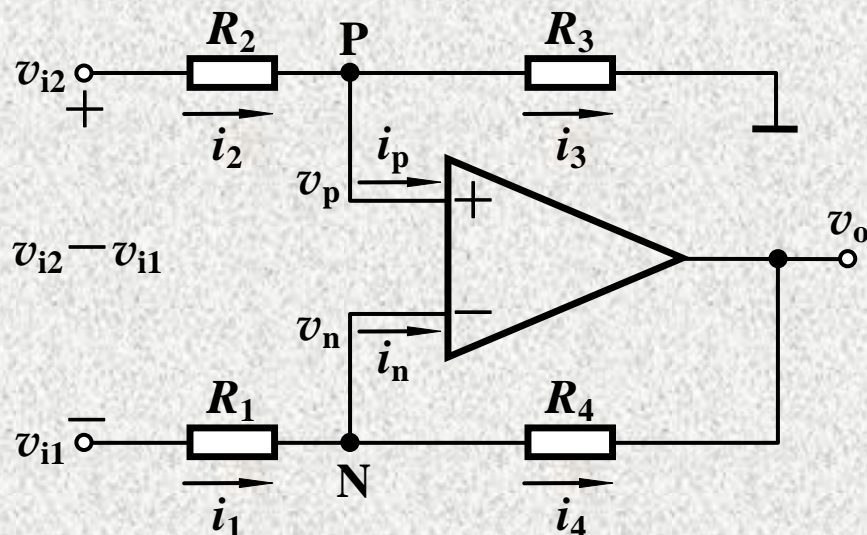
根据**虚短**、**虚断**和N、P点的KCL得：

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

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

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

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



2.4.1 求差电路

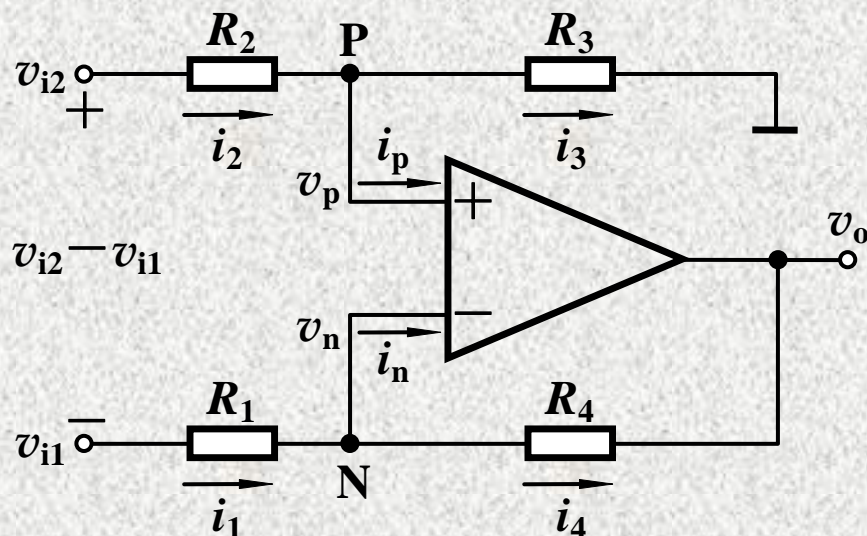
当 $\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$ 时

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

从放大器角度看

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

当 $\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$ 时

差模输入电阻

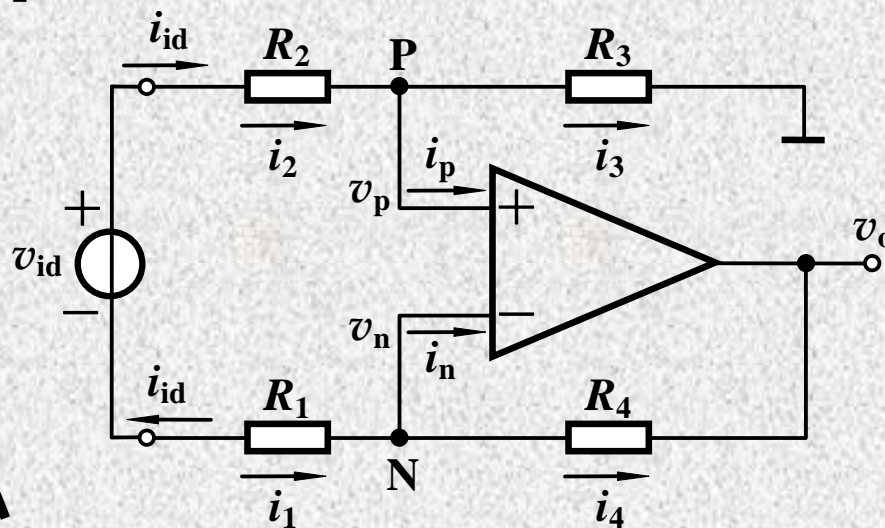
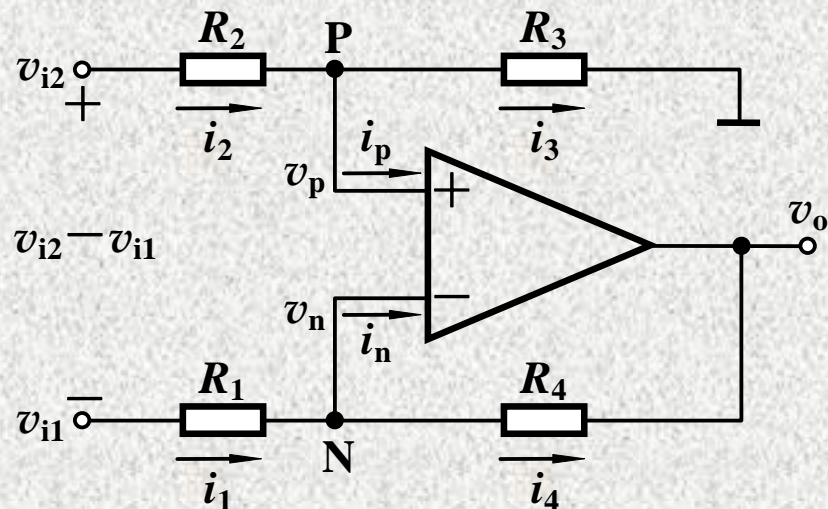
$$v_{id} = v_{i2} - v_{i1}$$

此时有 $i_{id} = i_2 = i_3 = -i_1 = -i_4$

$$\begin{cases} v_{id} = i_{id}(R_2 + R_3) - [v_o - i_{id}(R_1 + R_4)] \\ v_p = i_{id}R_2 \\ v_n = v_o - i_{id}R_4 \\ v_p = v_n \end{cases}$$

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

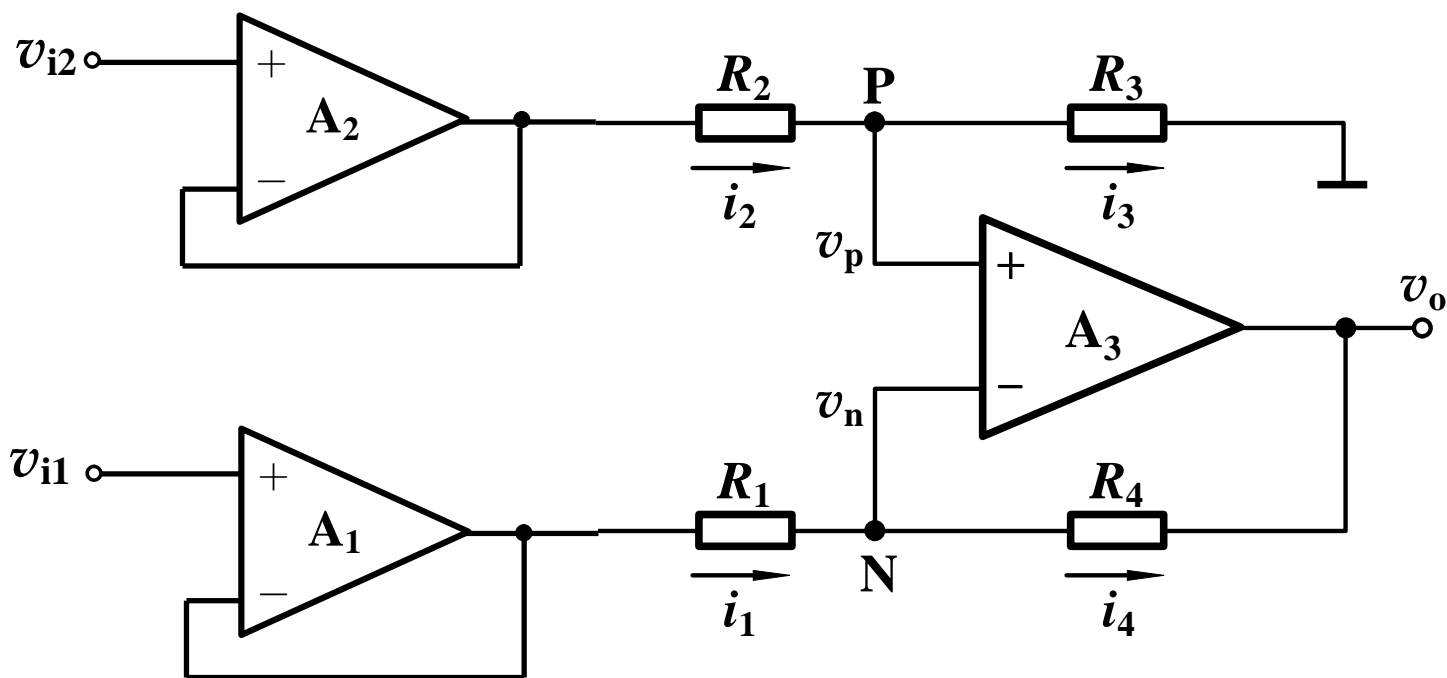
输入电阻较小



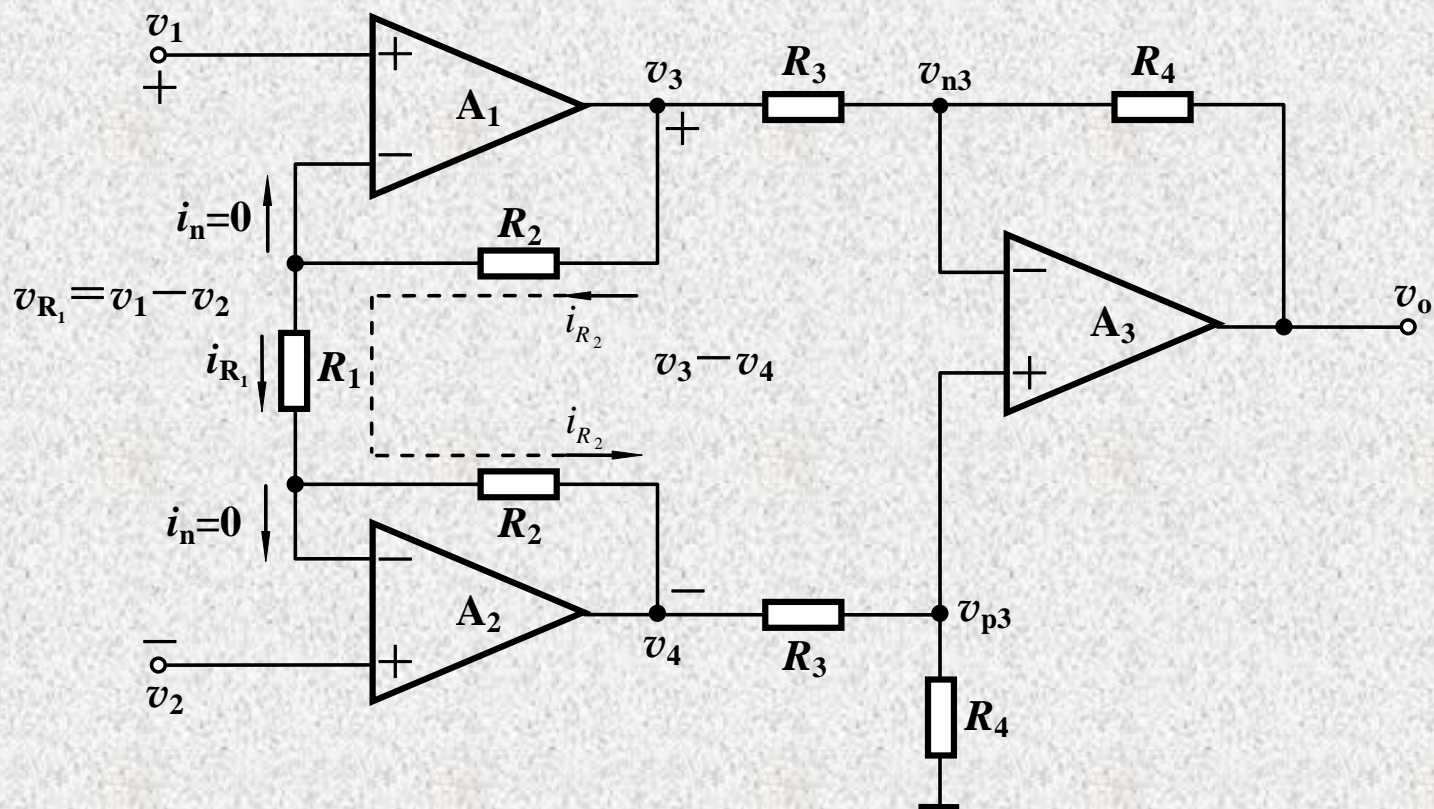
2.4.1 求差电路

一种高输入电阻的差分电路

如何提高输入电阻？



2.4.2 仪用放大器



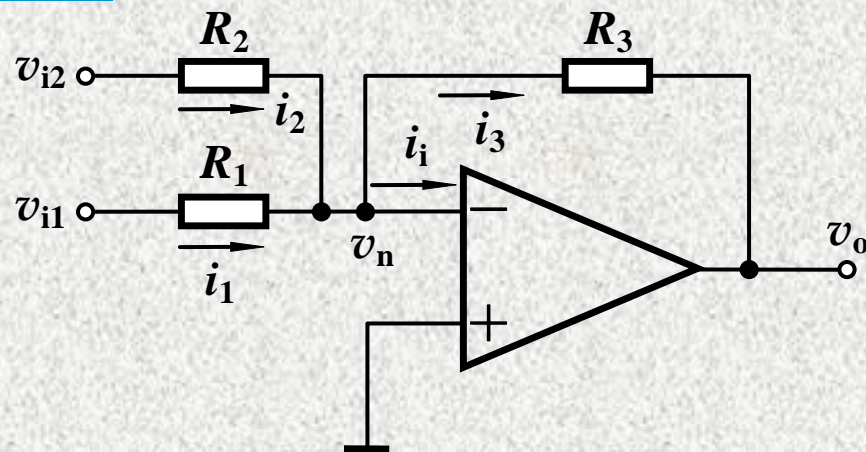
$$A_v = \frac{v_o}{v_1 - v_2} = -\frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right)$$

2.4.3 求和电路

(该电路也称为加法电路)

根据**虚短**、**虚断**和N点的KCL得：

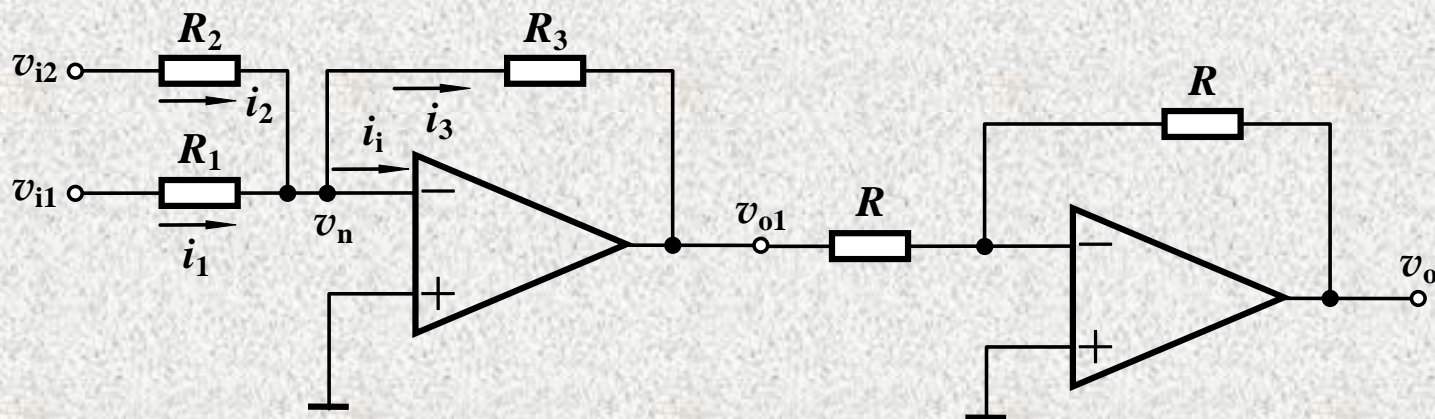
$$\begin{cases} v_n = v_p = 0 \\ \frac{v_{i1} - v_n}{R_1} + \frac{v_{i2} - v_n}{R_2} = \frac{v_n - v_o}{R_3} \end{cases}$$



$\Rightarrow -v_o = \frac{R_3}{R_1}v_{i1} + \frac{R_3}{R_2}v_{i2}$ 若 $R_1 = R_2 = R_3$ 则有 $-v_o = v_{i1} + v_{i2}$

输出再接一级反相电路

可得 $v_o = v_{i1} + v_{i2}$



2.4.4 积分电路和微分电路

1. 积分电路

根据“虚短”，得 $v_n = v_p = 0$

根据“虚断”，得 $i_i = 0$

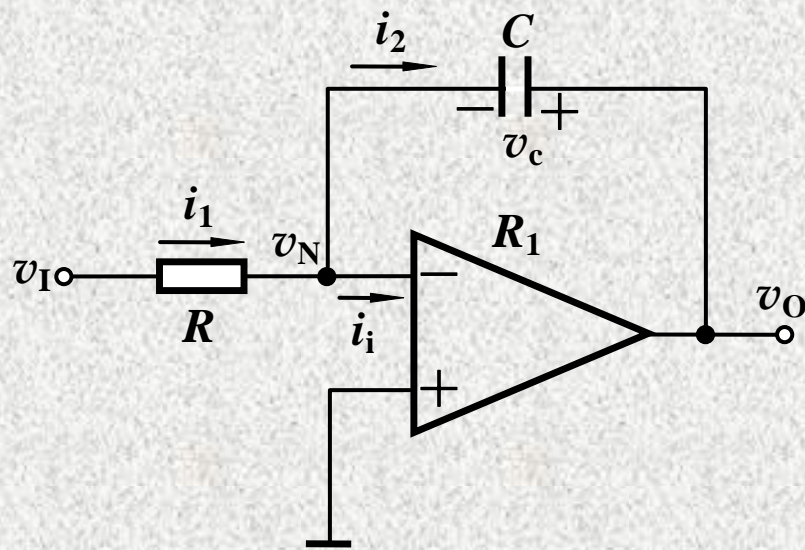
因此 $i_2 = i_1 = \frac{v_i}{R}$

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)



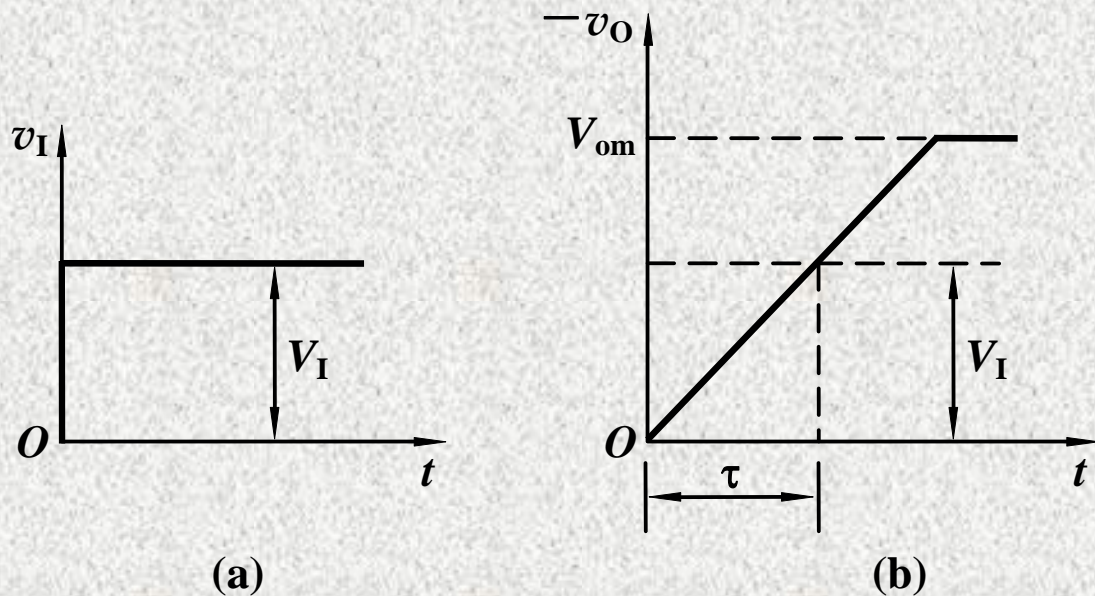
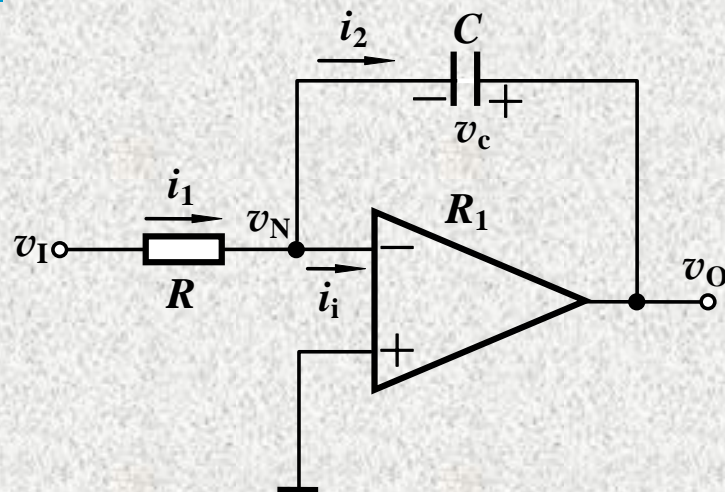
2.4.4 积分电路和微分电路

1. 积分电路

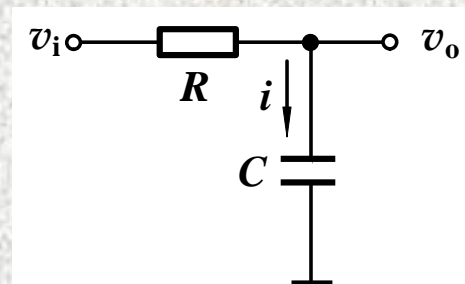
当 v_i 为阶跃电压时，有

$$v_o = -\frac{1}{RC} \int v_i dt = -\frac{V_i}{RC} t = -\frac{V_i}{\tau} t$$

v_o 与 t 成线性关系



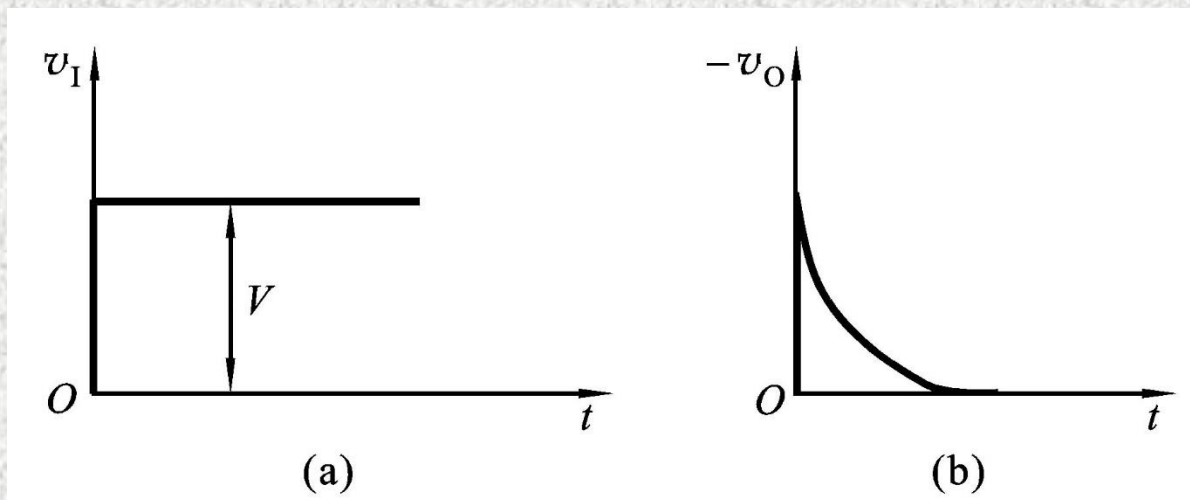
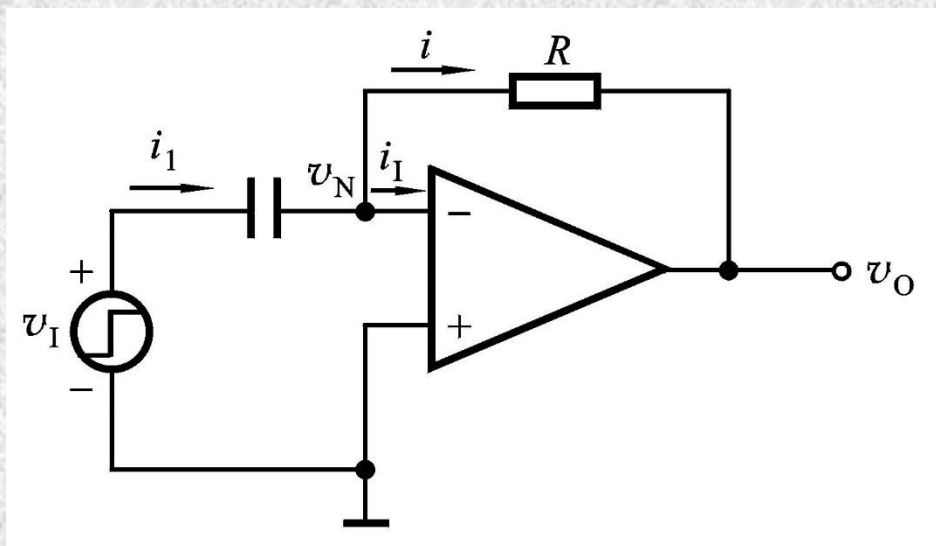
与一般RC电路相比该积分电路有何特点？



2.4.4 积分电路和微分电路

2. 微分电路

$$v_o = -RC \frac{dv_i}{dt}$$



补充知识

运放工作在线性区的特点

理想运放的条件

运放工作在线性区特点

$$A_{uo} = \infty \quad \Rightarrow$$

$$u_o = A_{uo}(u_+ - u_-)$$

虚短路: $u_- \approx u_+$

$$r_{id} = \infty \quad \Rightarrow$$

$$i_+ = i_- \approx 0$$

$$r_o = 0 \quad \Rightarrow$$

放大倍数与负载无关。分析多个运放级联组合的线性电路时可以分别对每个运放进行。

运放工作在饱和区的特点

$$u_o \neq A_{uo}(u_+ - u_-)$$

虚短路不成立： $u_+ \neq u_-$

$i_+ = i_- \approx 0$ 虚开路成立

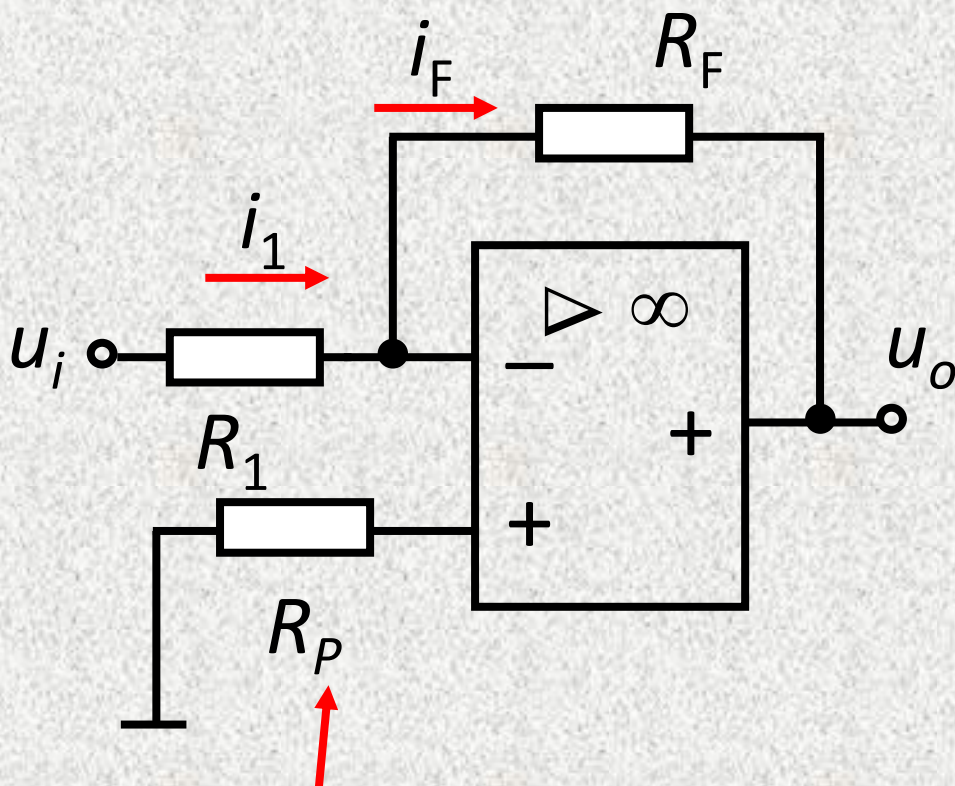
反馈概念

凡是将放大电路输出端信号（电压或电流）的一部分或全部引回到输入端，与输入信号迭加，就称为反馈。

负反馈对放大电路的影响

- 串联负反馈 $\rightarrow r_i \uparrow$; 并联负反馈 $\rightarrow r_i \downarrow$;
- 电压负反馈 $\rightarrow r_o \downarrow$; 电流负反馈 $\rightarrow r_o \uparrow$;

补充知识



平衡电阻：可使输入端对地的静态电阻相等，保证静态时输入级的对称性。

只在同相端加。

反相放大器的电路的输入电阻

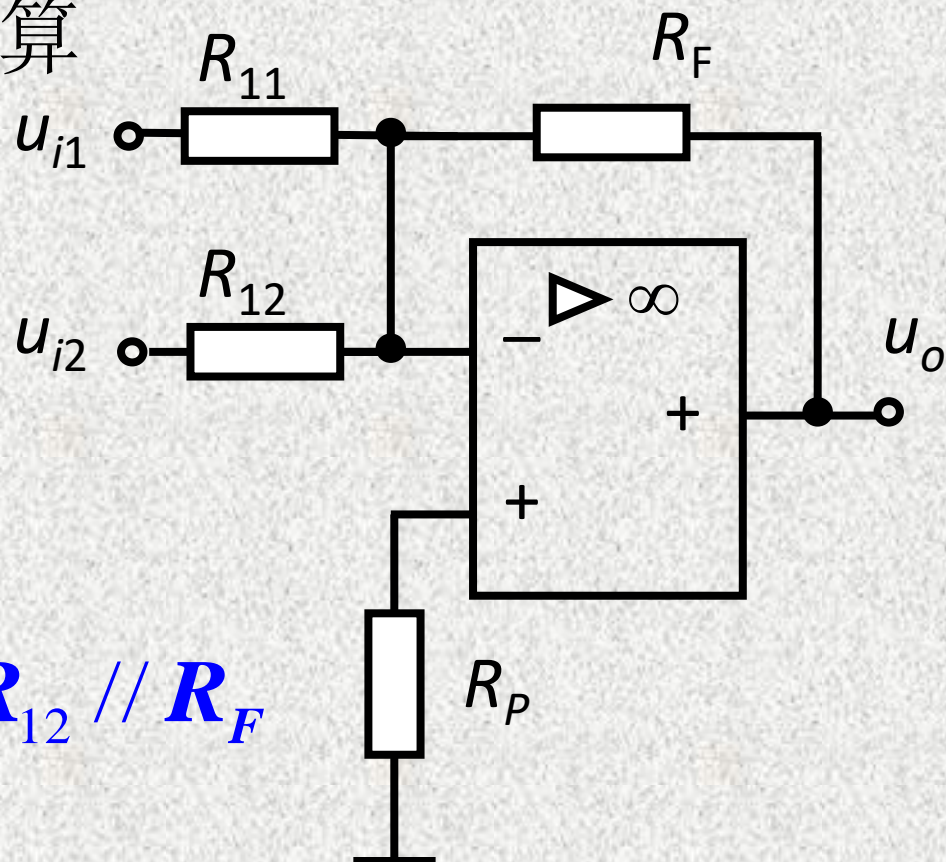
$$r_i = R_1$$

$$R_p = R_1 // R_F$$

为保证一定的输入电阻，当放大倍数大时，需增大 R_F ，而大电阻的精度差，因此，在放大倍数较大时，该电路结构不再适用。

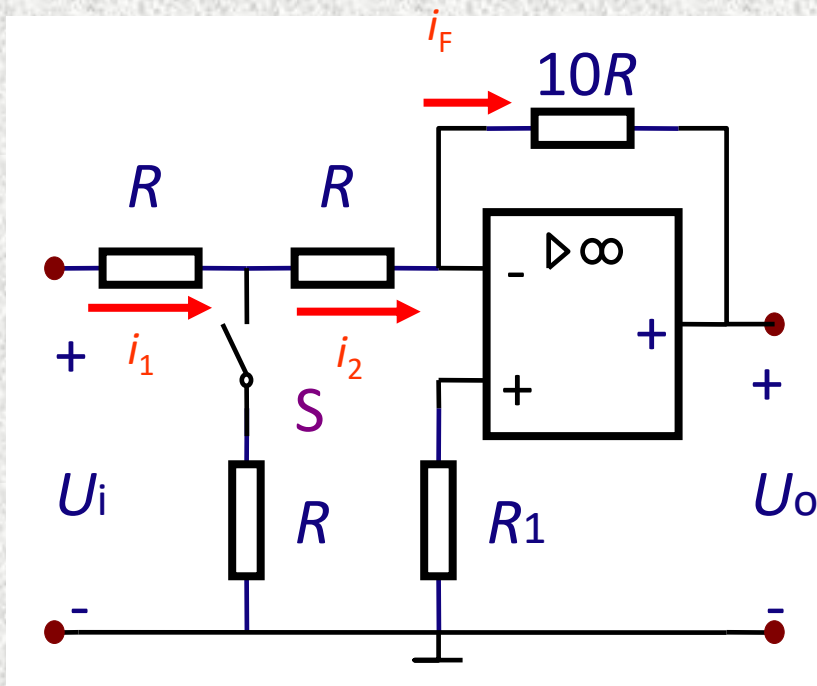
补充知识

反相求和运算时 R_P 计算



$$R_P = R_{11} // R_{12} // R_F$$

例： 试计算下图开关S断开和闭合时的 A_u



S闭合:

$$i_1 = \frac{u_i}{R + R/2} = \frac{2u_i}{3R}$$

$$i_2 = i_1/2$$

$$i_F = \frac{(u_- - u_o)}{10R} = -\frac{u_o}{10R}$$

由 $i_2 = i_F$ 知:

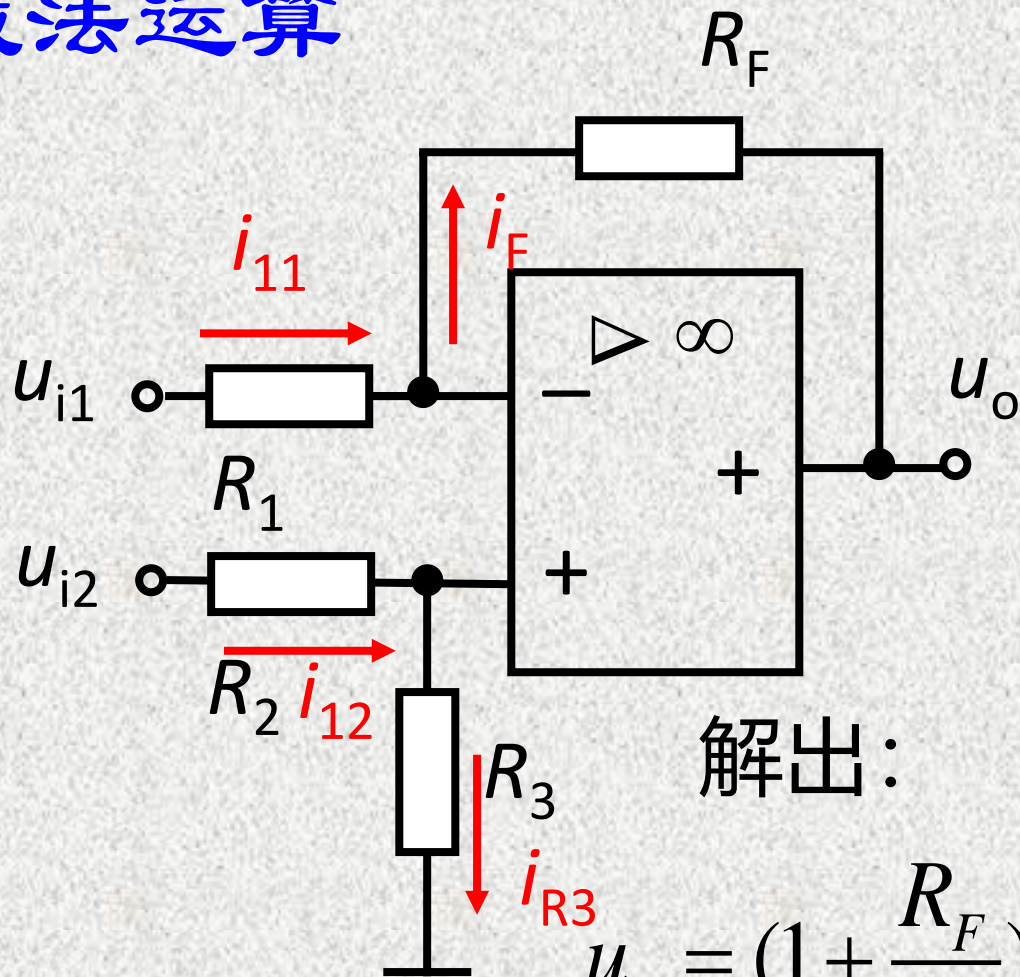
$$\frac{u_i}{3R} = -\frac{u_o}{10R}$$

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = -3.3$$

解： S断开:

$$\begin{aligned} A_u &= -\frac{R_F}{R+R} \\ &= -\frac{10R}{R+R} = -5 \end{aligned}$$

减法运算



$$u_+ \approx u_-$$

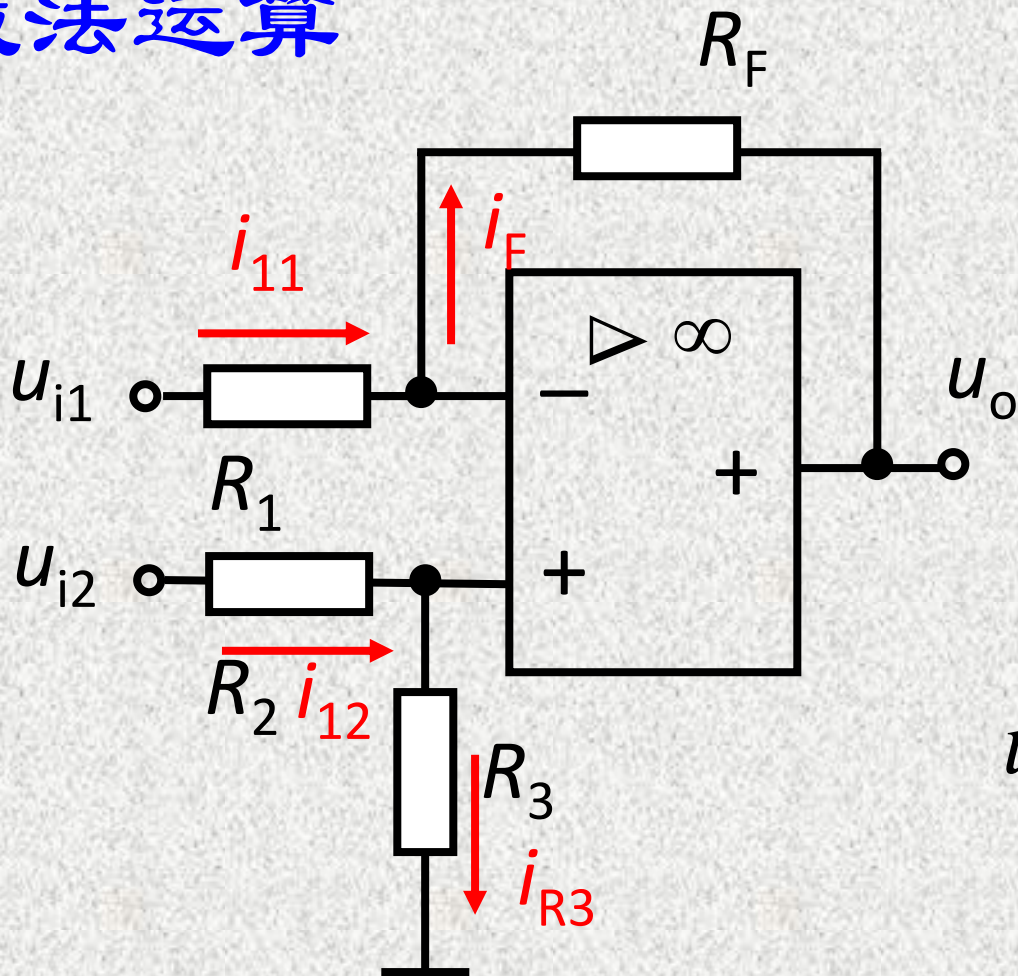
$$\frac{u_o - u_+}{R_F} = \frac{u_+ - u_{i1}}{R_1}$$

$$\frac{u_{i2} - u_+}{R_2} = \frac{u_+}{R_3}$$

解出：

$$\begin{aligned} u_o &= \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} - \frac{R_F}{R_1} u_{i1} \\ &= \frac{R_F}{R_1 // R_F} \bullet (R_2 // R_3) \bullet \frac{u_{i2}}{R_2} - \frac{R_F}{R_1} u_{i1} \end{aligned}$$

减法运算

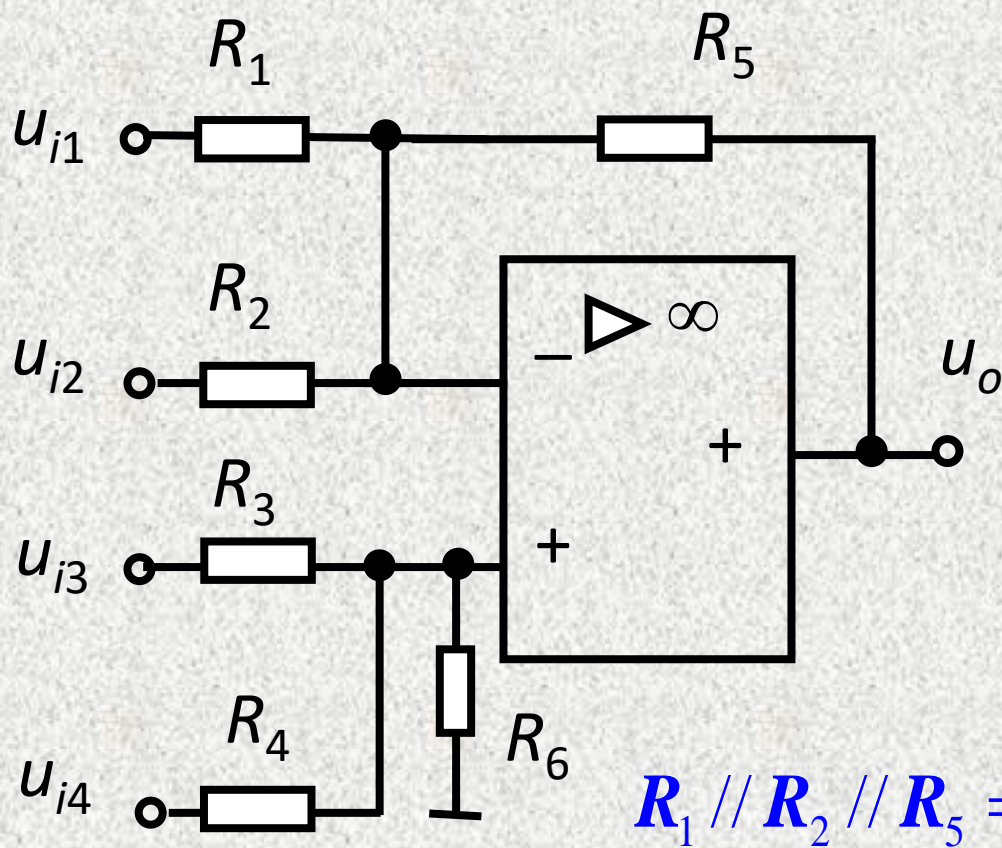


如果

$$R_1 // R_F = R_2 // R_3$$

则：

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



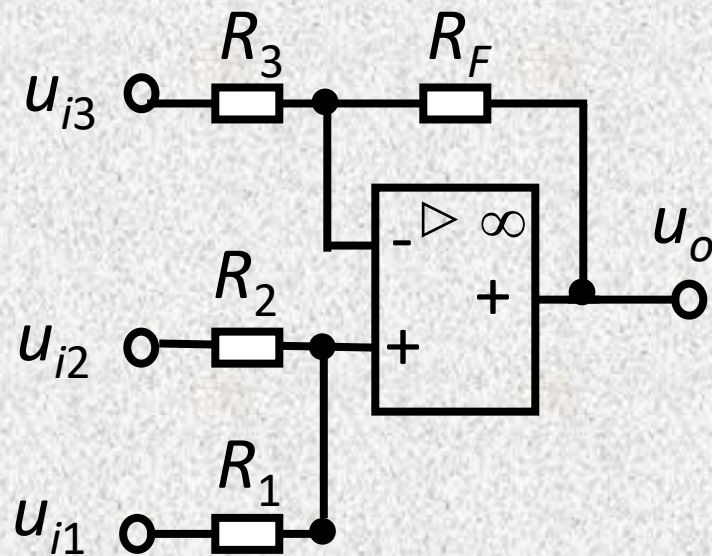
实际应用时可适当增加或减少输入端的个数，以适应不同的需要。

例：设计一加减运算电路， $R_F=240\text{k}\Omega$ ，使

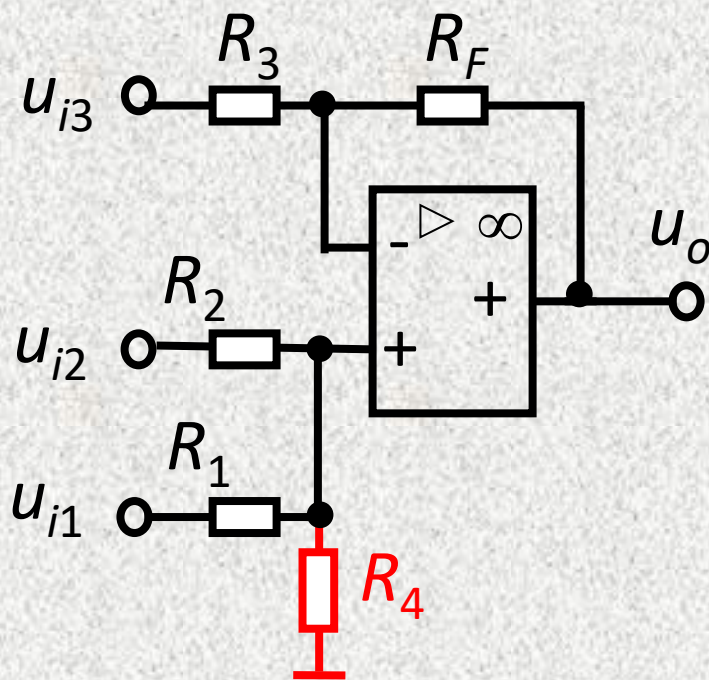
$$u_o = 10u_{i1} + 8u_{i2} - 20u_{i3}$$

解：(1) 画电路。

系数为负的
信号从反相端
输入，系数为
正的信号从同
相端输入。



(2) 求各电阻值。



$$\begin{cases} R_3 // R_F = R_1 // R_2 \\ u_o = R_F \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} - \frac{u_{i3}}{R_3} \right) \\ R_F = 240\text{k}\Omega \end{cases}$$

$$R_1 = 24\text{k}\Omega$$

$$R_2 = 30\text{k}\Omega$$

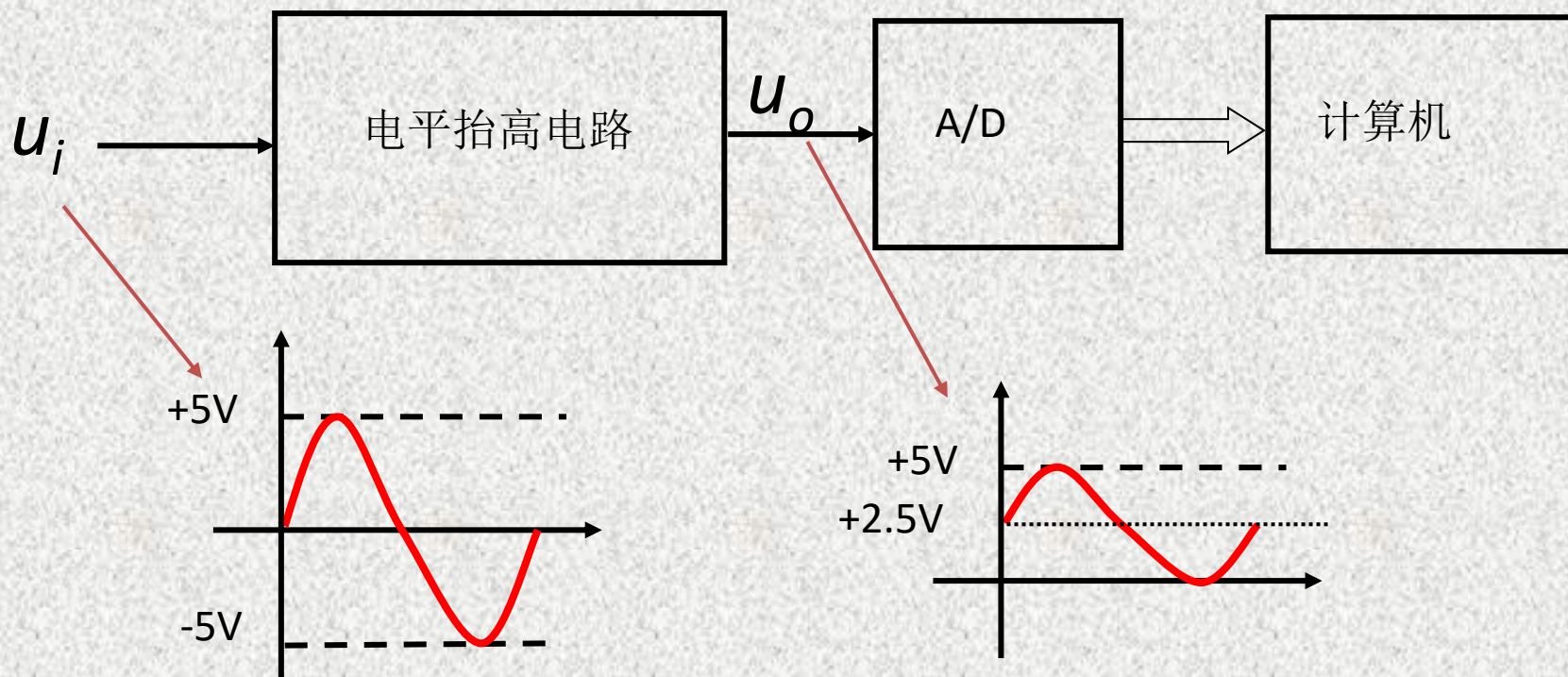
$$R_3 = 12\text{k}\Omega$$

$$u_o = 10u_{i1} + 8u_{i2} - 20u_{i3}$$

$$\because R_3 // R_F < R_1 // R_2$$

$$\therefore R_4 = 80\text{k}\Omega \quad \text{应接在同相端}$$

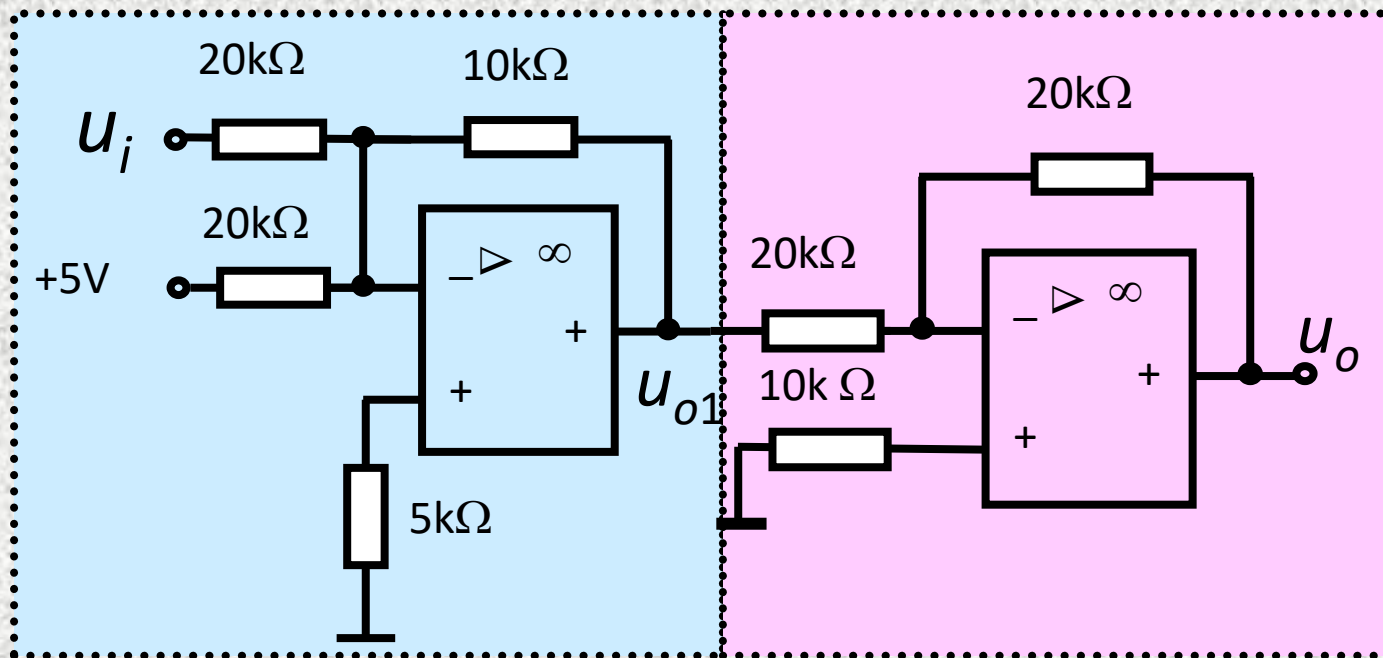
例: A/D变换器要求其输入电压的幅度为 $0 \sim +5\text{V}$ ，现有信号变化范围为 $-5\text{V} \sim +5\text{V}$ 。试设计一电平抬高电路，将其变化范围变为 $0 \sim +5\text{V}$ 。



$$u_o = 0.5u_i + 2.5 \quad \text{V}$$

$$u_o = 0.5u_i + 2.5 \quad \text{V}$$

$$= 0.5(u_i + 5) \quad \text{V}$$



$$u_{o1} = -\frac{10}{20} \times (u_i + 5) = -0.5(u_i + 5)$$

$$u_o = -\frac{20}{20} \times u_{o1} = 0.5(u_i + 5)$$

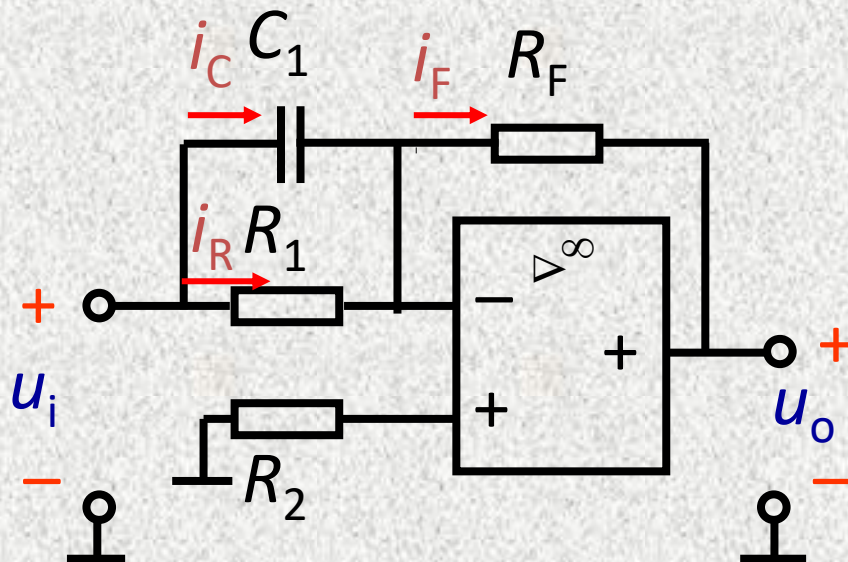
比例-微分运算电路—PD调节器

$$u_o = -R_F i_F$$

$$i_F = i_R + i_C$$

$$= \frac{u_i}{R_1} + C_1 \frac{du_i}{dt}$$

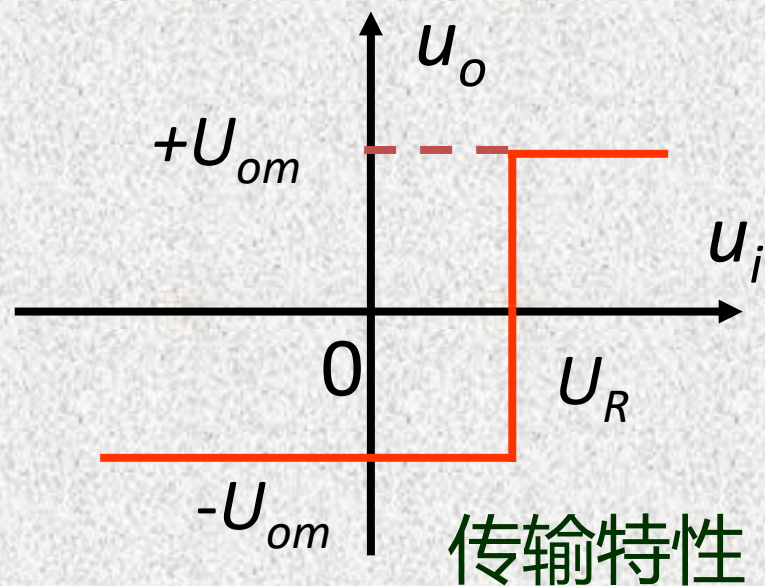
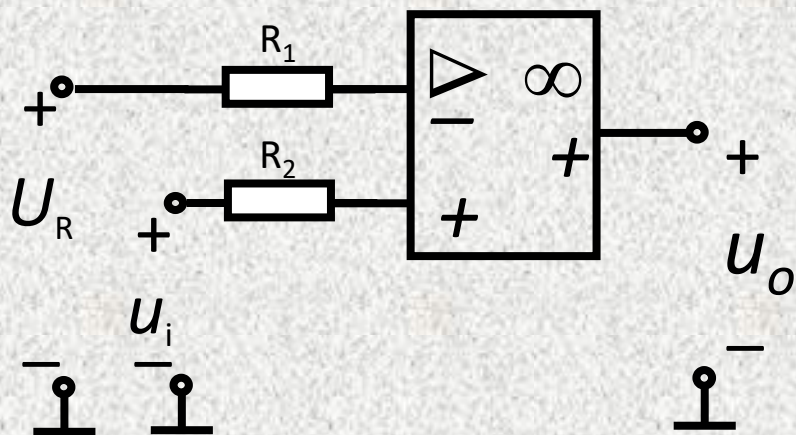
$$u_o = -\left(\frac{R_F}{R_1} u_i + R_F C_1 \frac{du_i}{dt}\right)$$



上式表明：输出电压是对输入电压的比例-微分

比例-微分运算电路 — 电压比较器

一、 u_i 从同相端输入



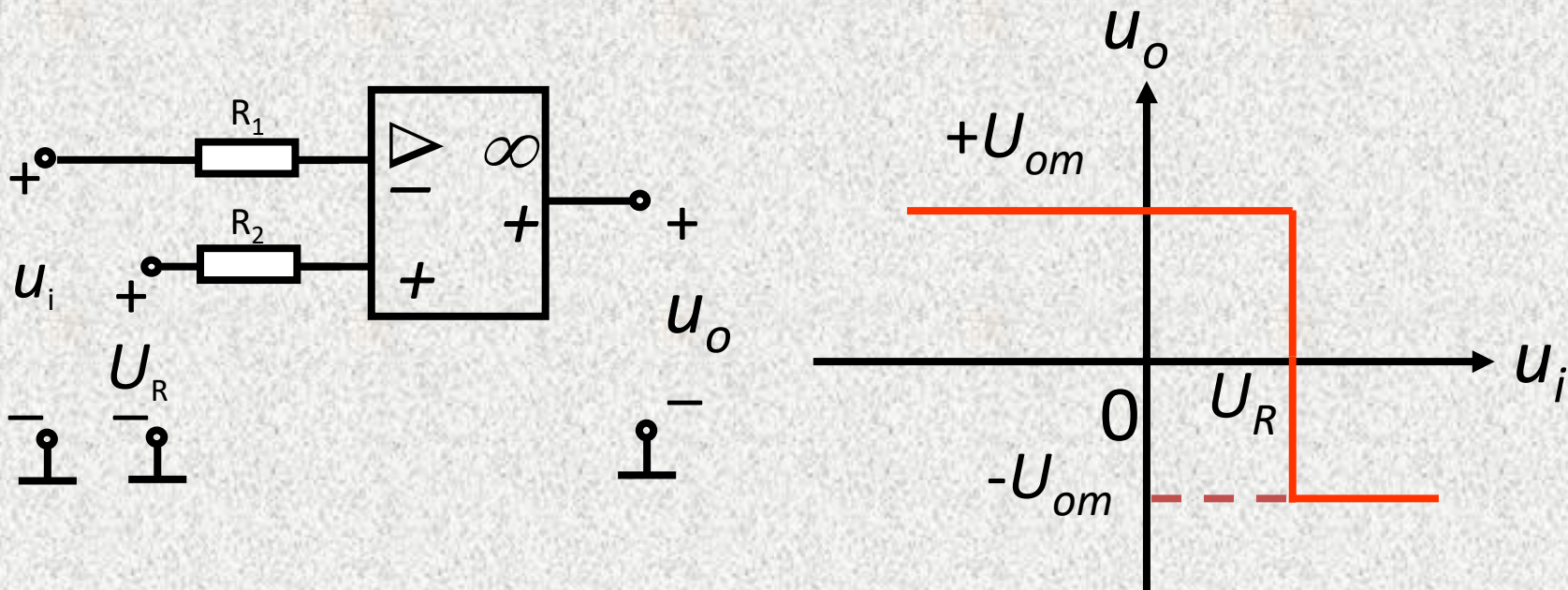
U_R : 参考电压

u_i : 被比较信号

特点：运放处于开环状态。

当 $u_i > U_R$ 时, $u_o = +U_{om}$
当 $u_i < U_R$ 时, $u_o = -U_{om}$

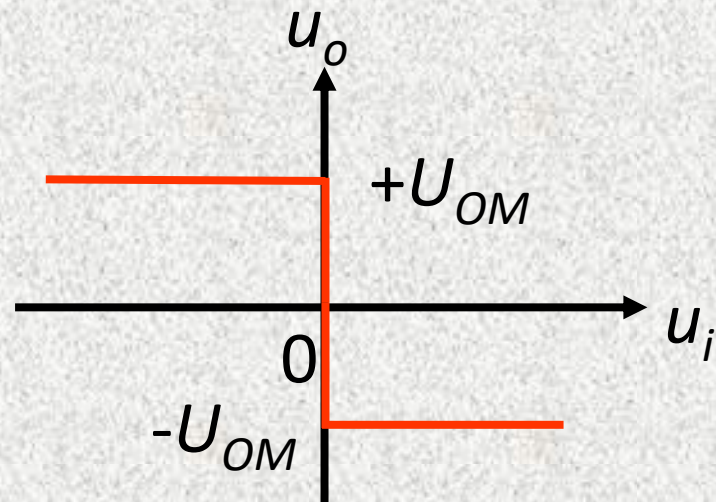
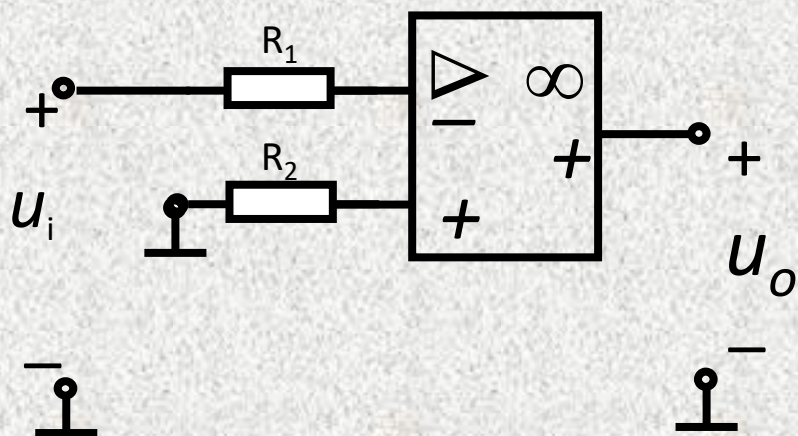
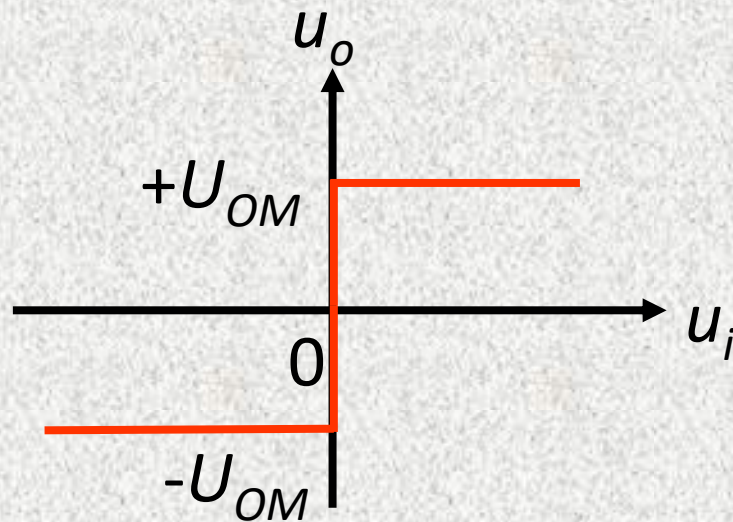
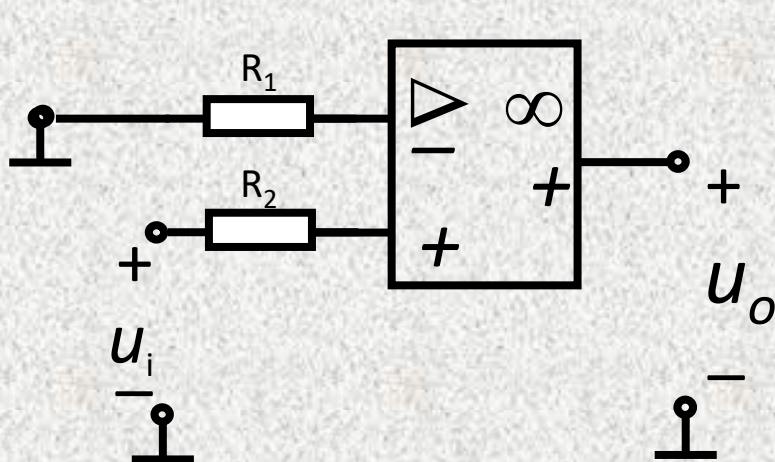
二、 u_i 从反相端输入



当 $u_i < U_R$ 时, $u_o = +U_{om}$

当 $u_i > U_R$ 时, $u_o = -U_{om}$

三、过零比较器: ($U_R = 0$ 时)



例：利用电压比较器将正弦波变为方波。

