

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

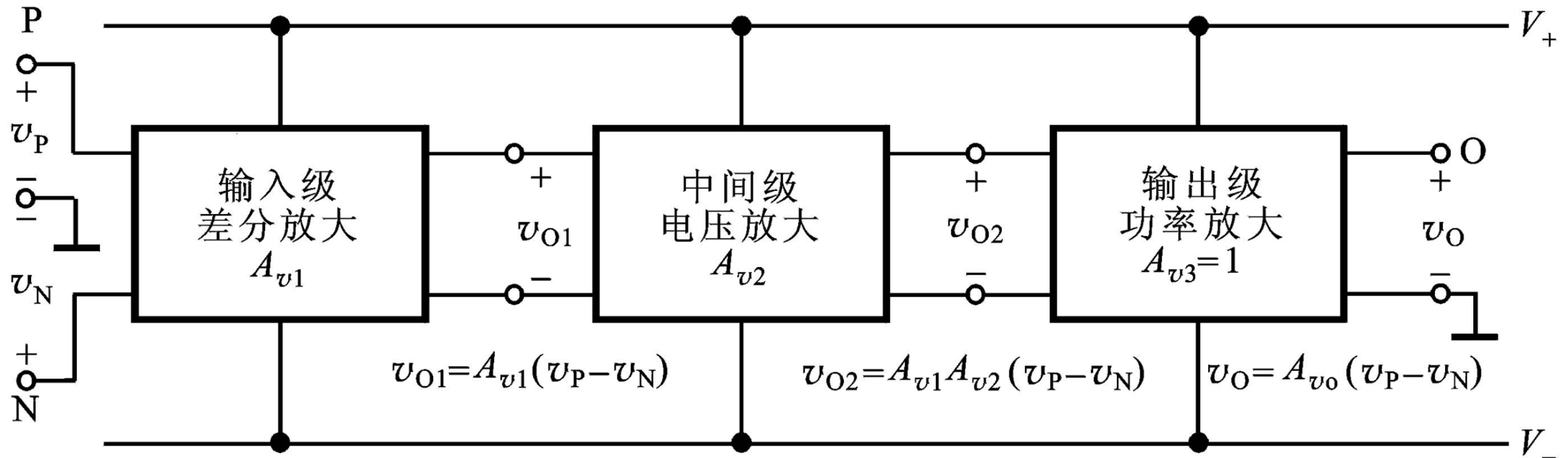


图2.1.1 集成运算放大器的内部结构框图

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

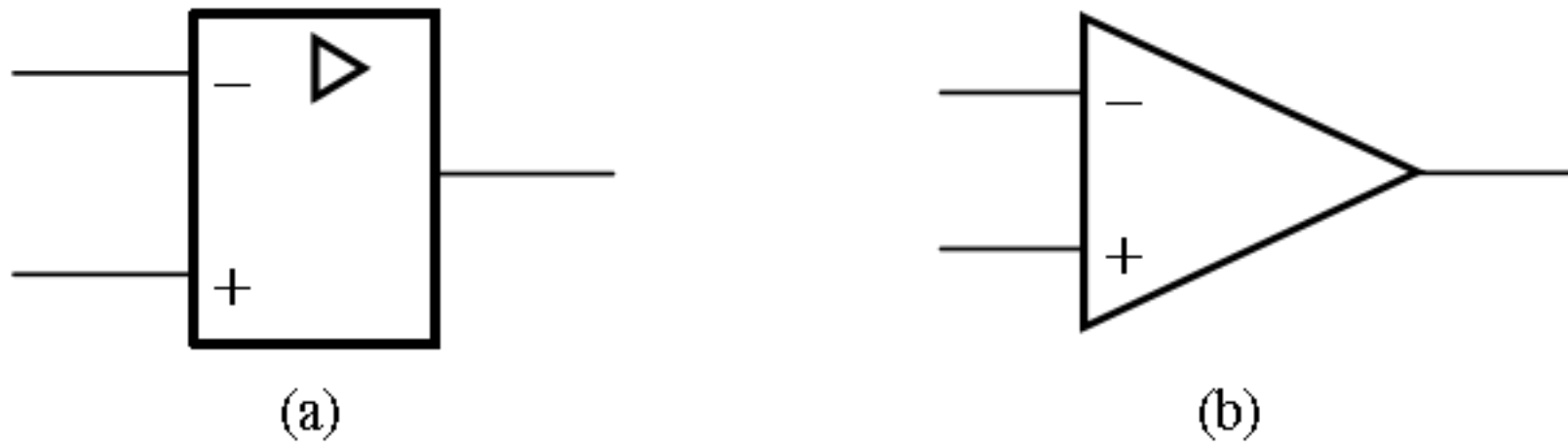


图2.1.2 运算放大器的代表符号

(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

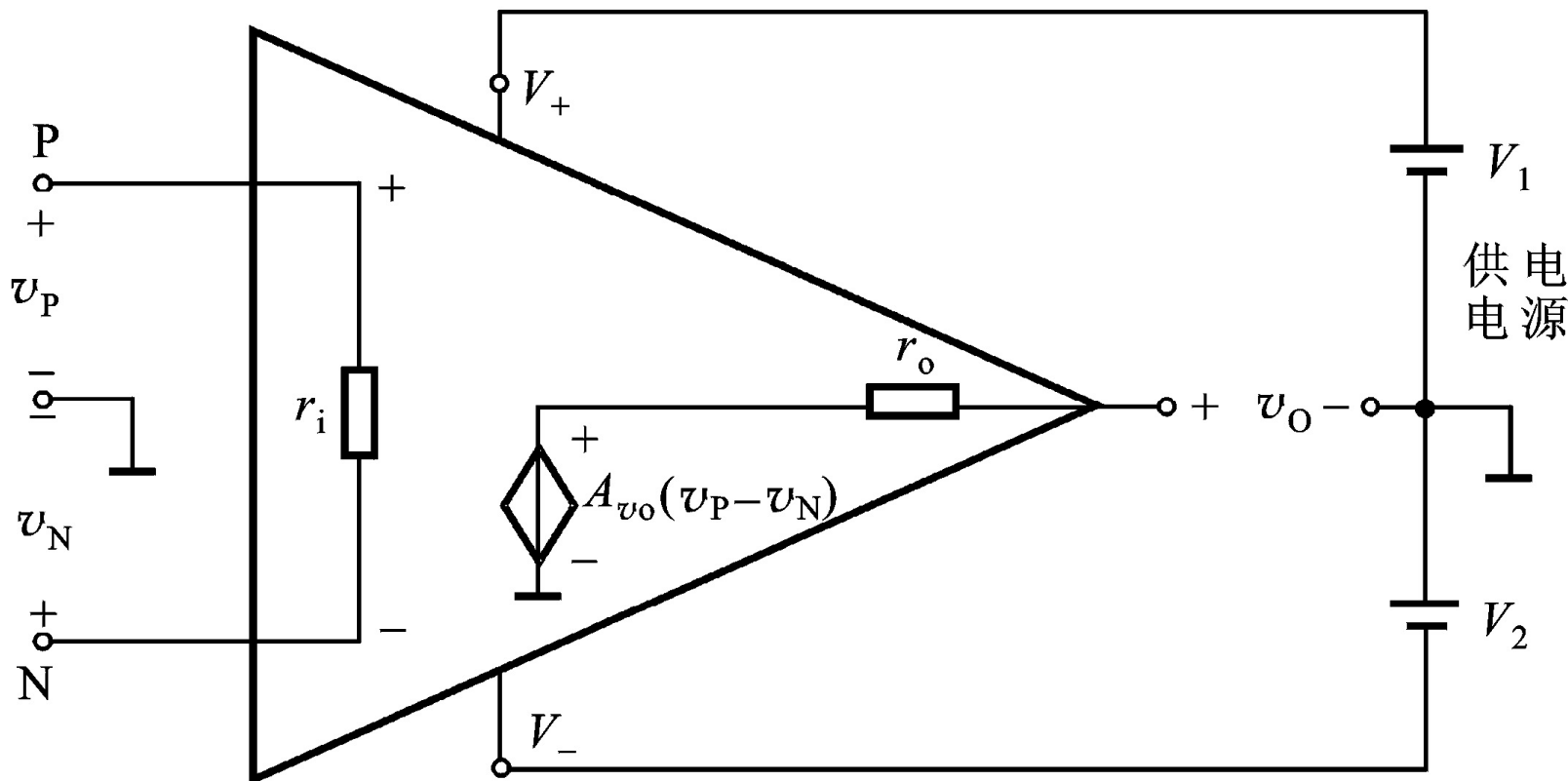
A_{vo} 的 $\geq 10^5$ (很高)

输入电阻

$r_i \geq 10^6 \Omega$ (很大)

输出电阻

$r_o \leq 100 \Omega$ (很小)



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

$$(V_- < v_O < V_+)$$

近似为电源电压

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

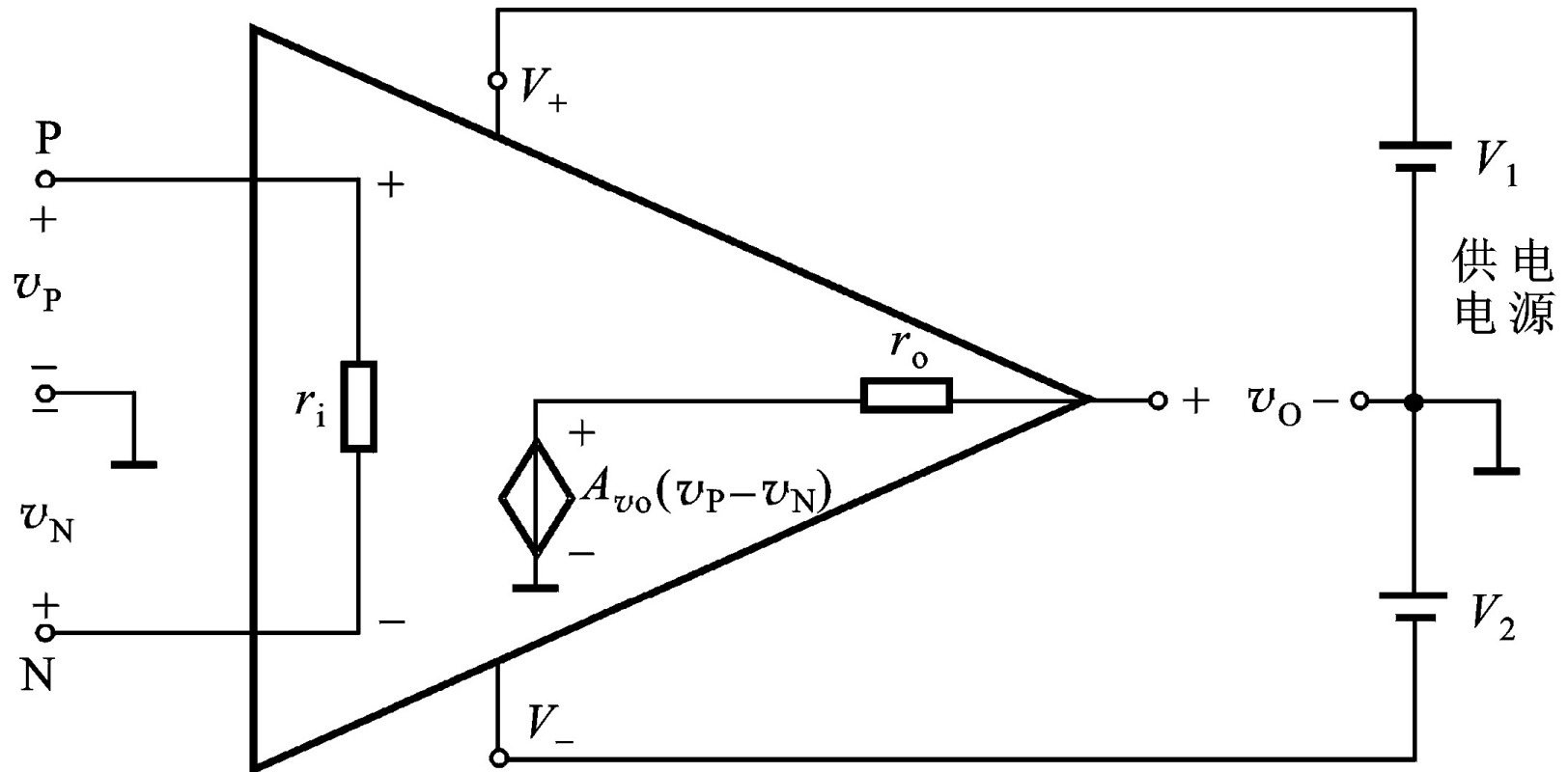
$$v_O = V_+$$

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

$$v_O = V_-$$

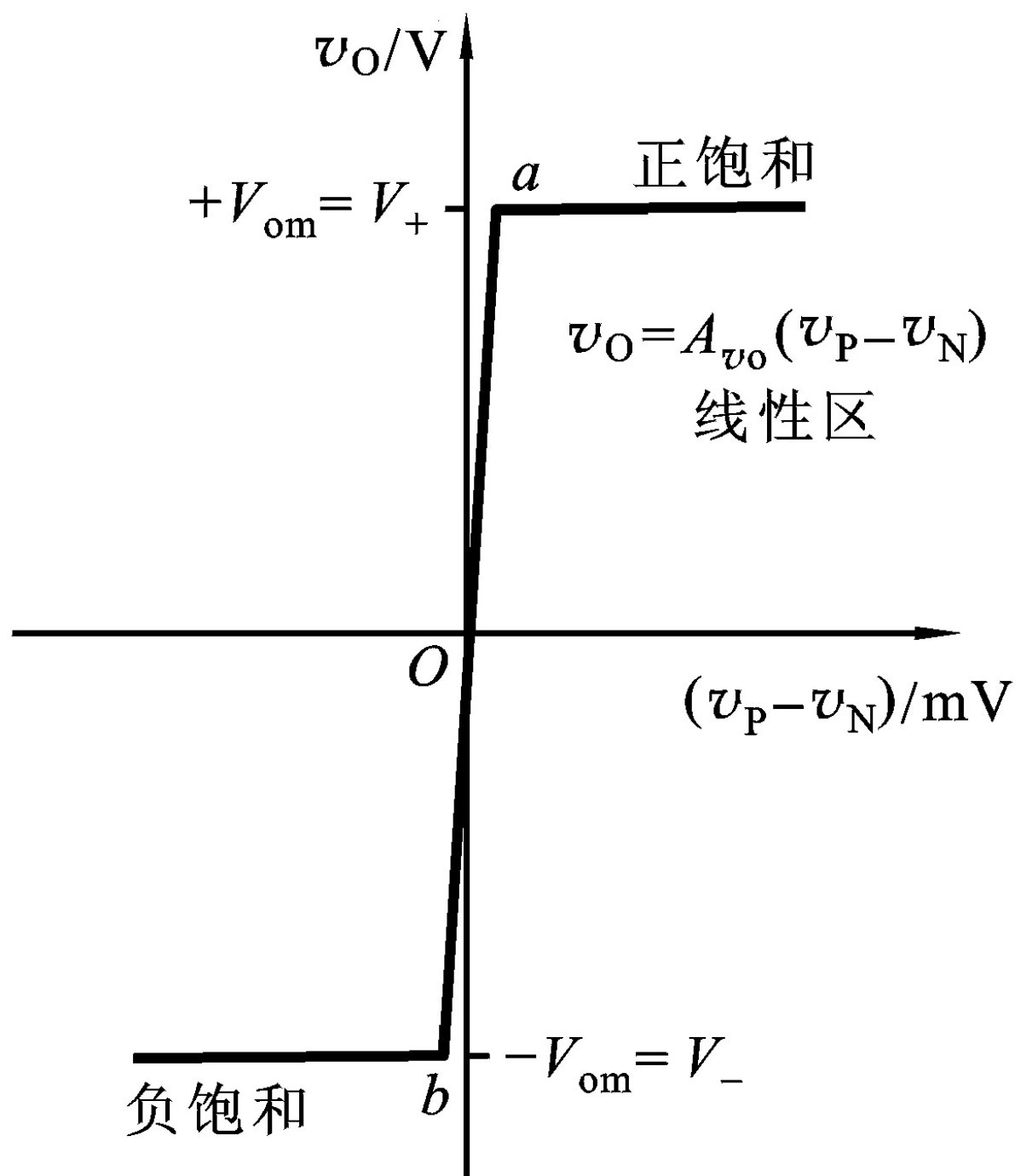
电压传输特性

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

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

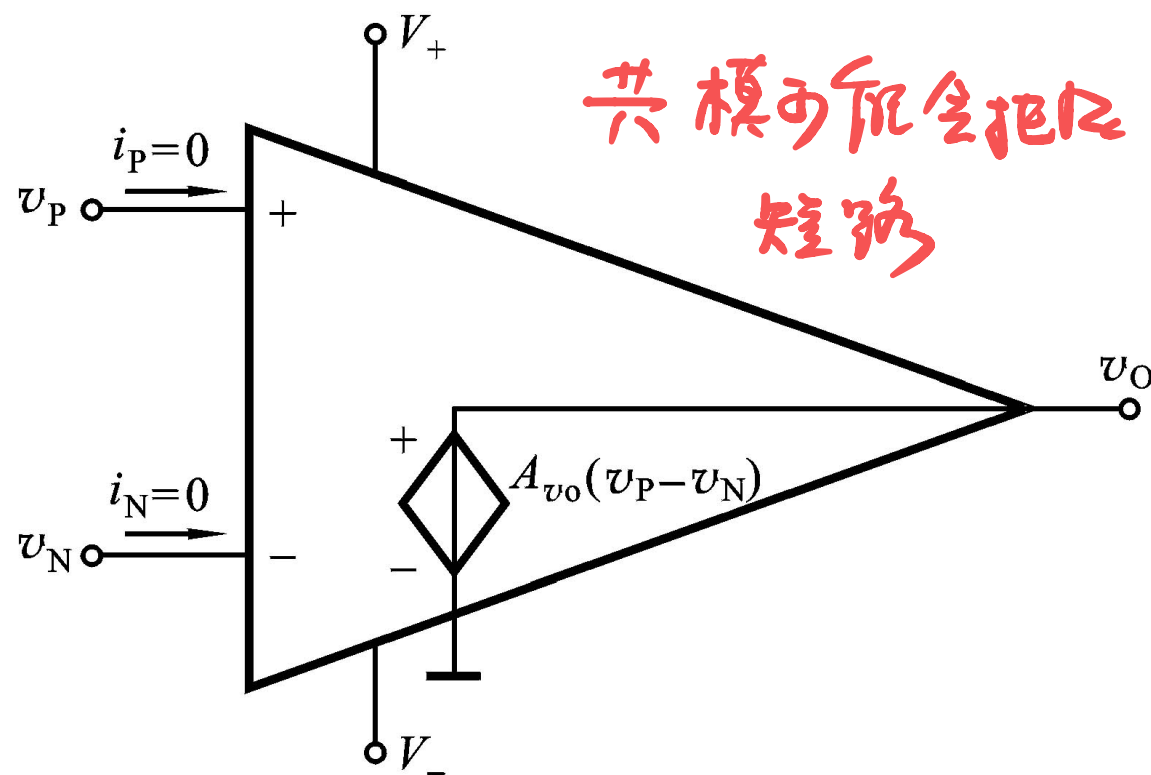
3. 若 $V_- < v_o < V_+$

虚短 则 $(v_p - v_n) \rightarrow 0$

4. 输入电阻 r_i 的阻值很高

虚断 使 $i_p \approx 0$ 、 $i_n \approx 0$

5. 输出电阻很小, $r_o \approx 0$



共模可能会引起短路

理想:

$r_i \approx \infty$

$r_o \approx 0$

$A_{vo} \rightarrow \infty$

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

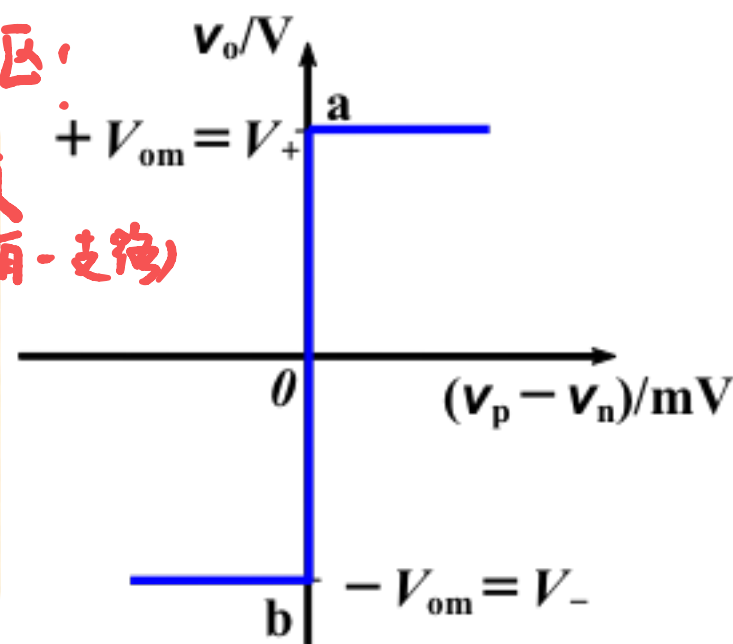
必须工作在线性区!

即有负反馈

(输入输出有负反馈)

否则不满足

都满足



$$v_p - v_n \approx \frac{v_o}{A_{vo}} \rightarrow 0$$

2.3 基本线性运放电路

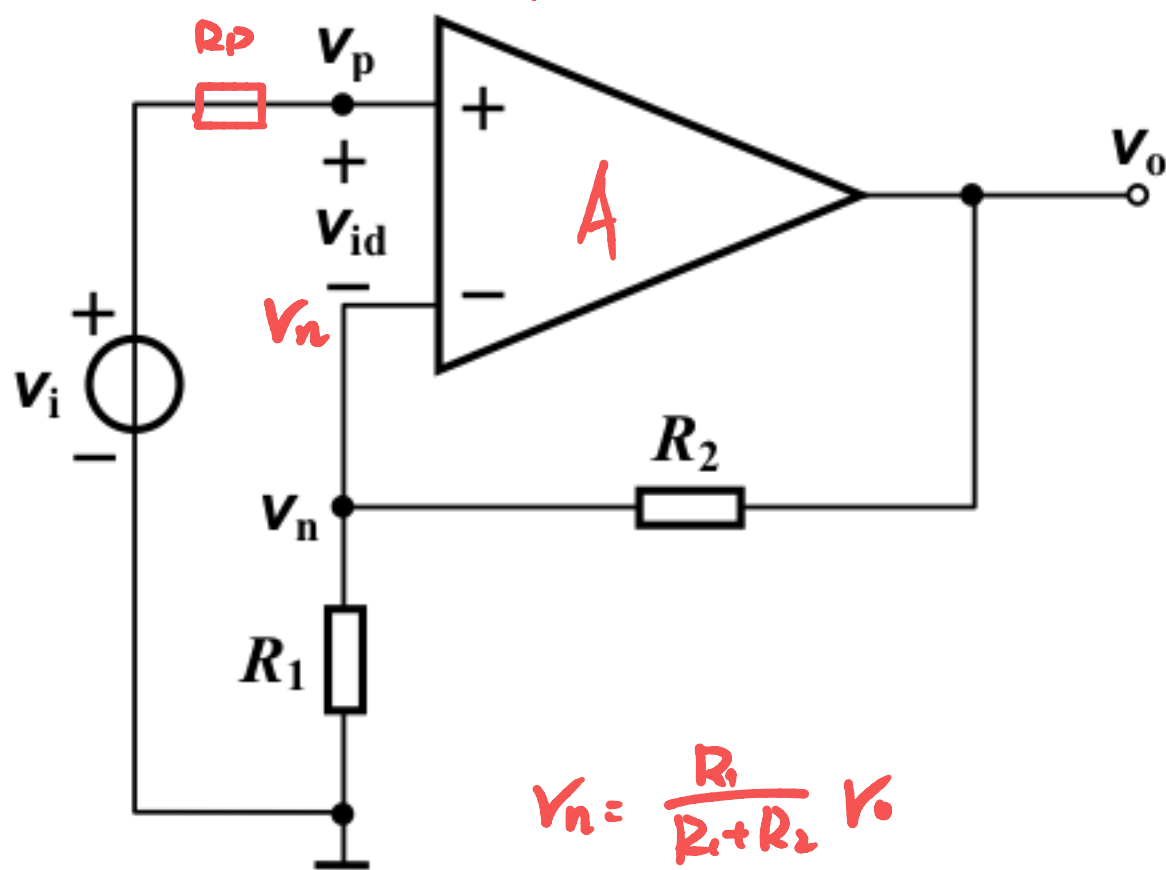
2.3.1 同相放大电路

2.3.2 反相放大电路

2.3.1 同相放大电路

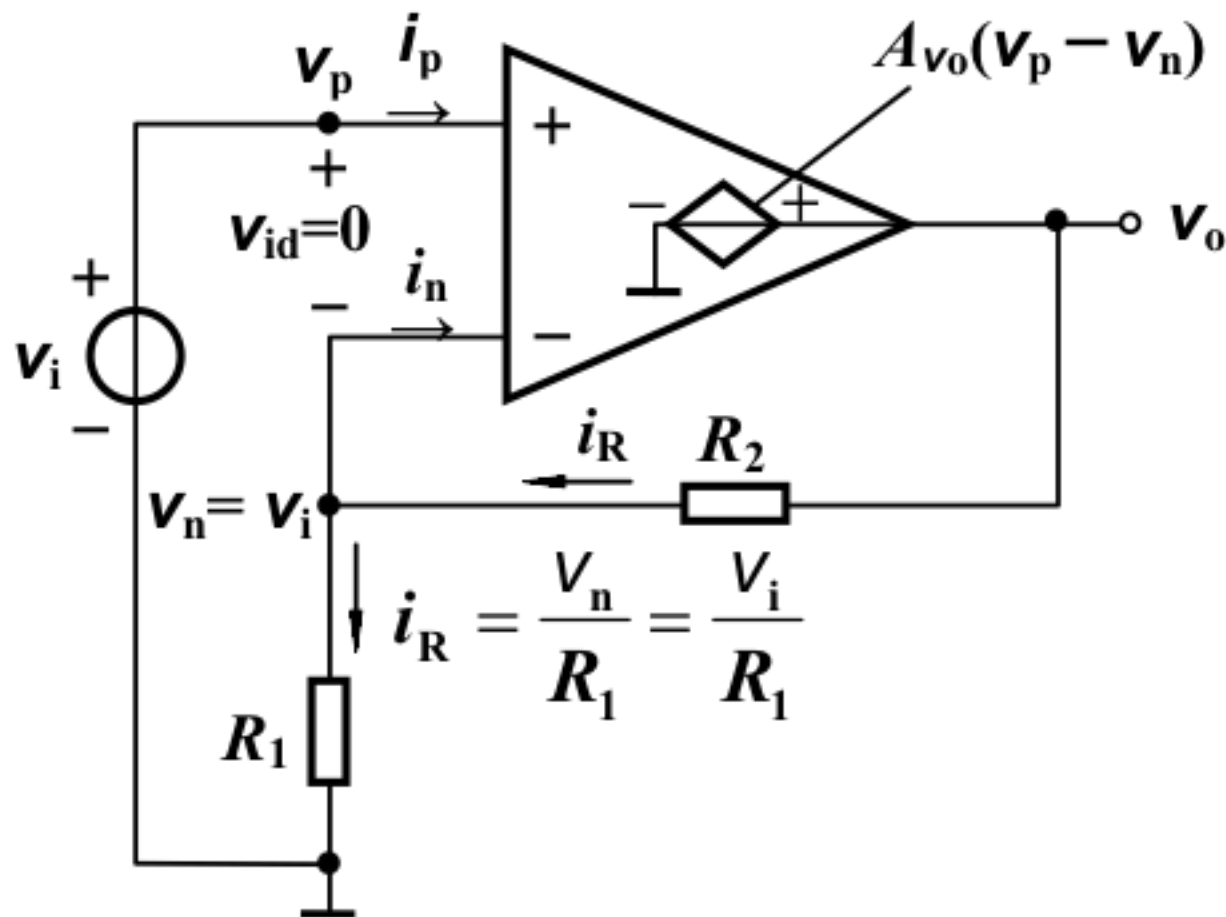
1. 基本电路

平衡电阻 $R_p \approx R_1 // R_2$ 防止输入失调电压不对称。



(a) 电路图

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



(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

(2) 输入电阻 R_i

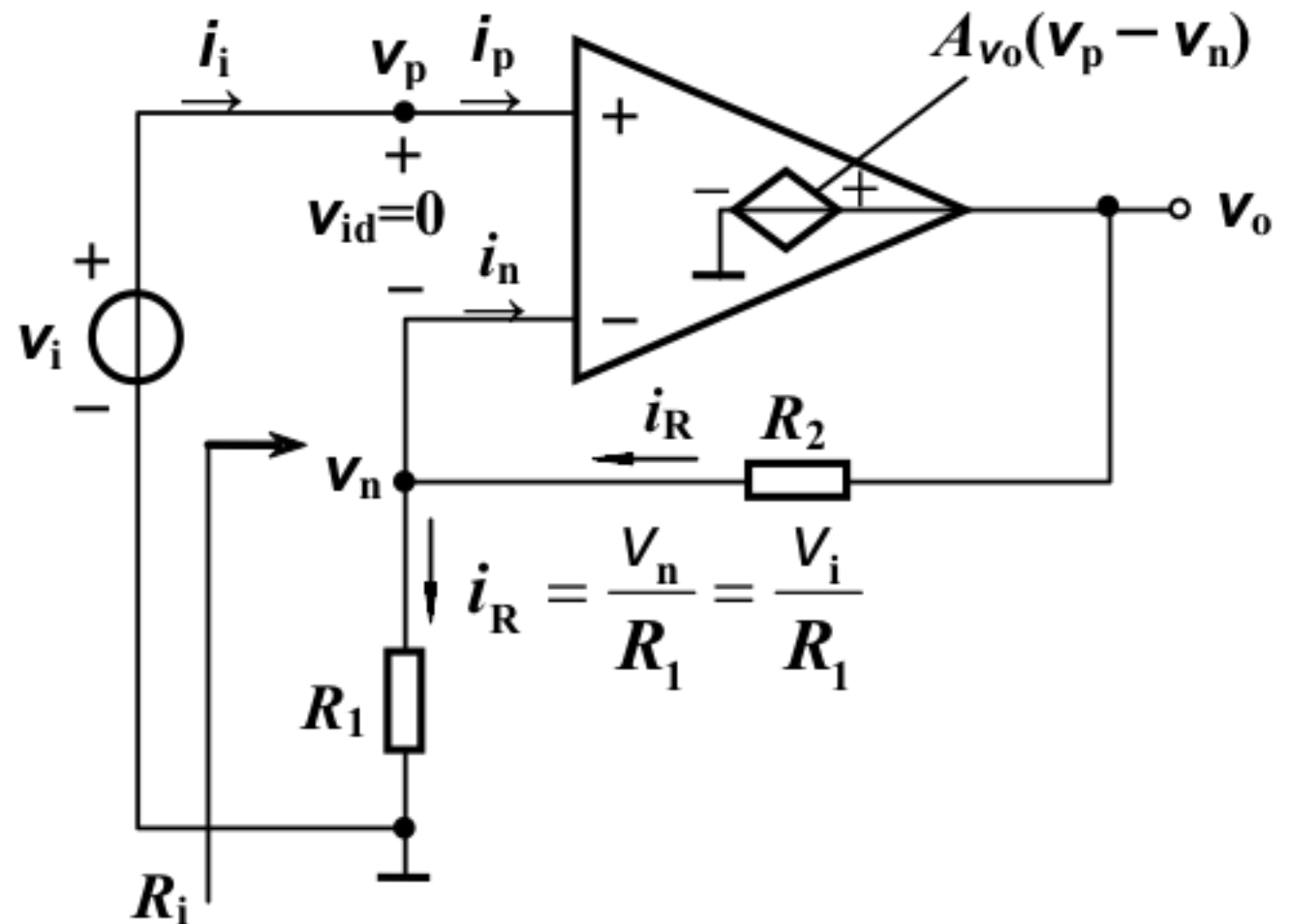
输入电阻定义

$$R_i = \frac{V_i}{I_i}$$

根据虚短和虚断有

$$V_i = V_p, \quad \underline{I_i = I_p \approx 0}$$

所以 $R_i = \frac{V_i}{I_i} \rightarrow \infty$



(3) 输出电阻 R_o

$$R_o \rightarrow 0$$

输入大
输出小

2.3.1 同相放大电路

3. 电压跟随器

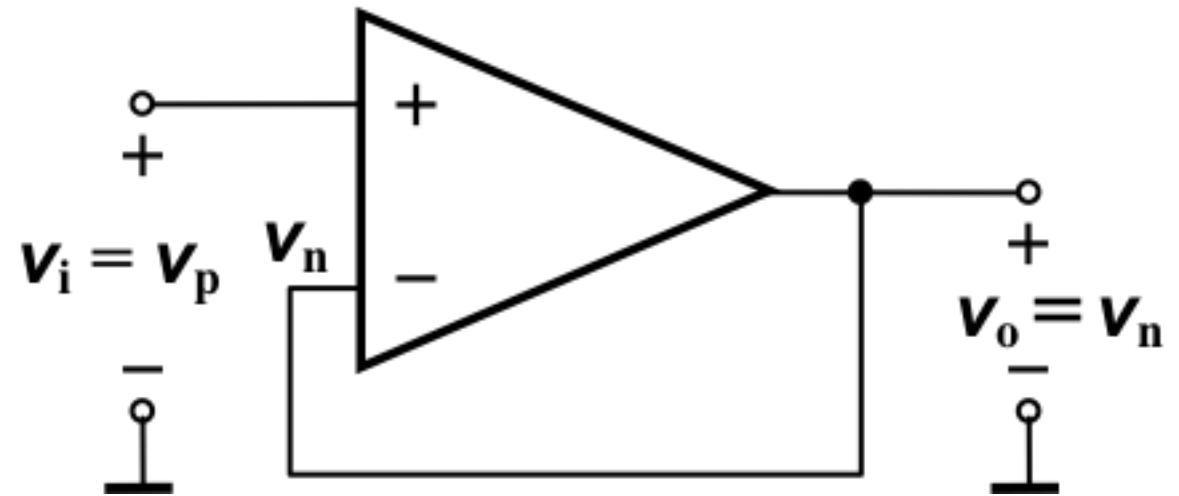
共集电极放大电路

根据虚短和虚断有

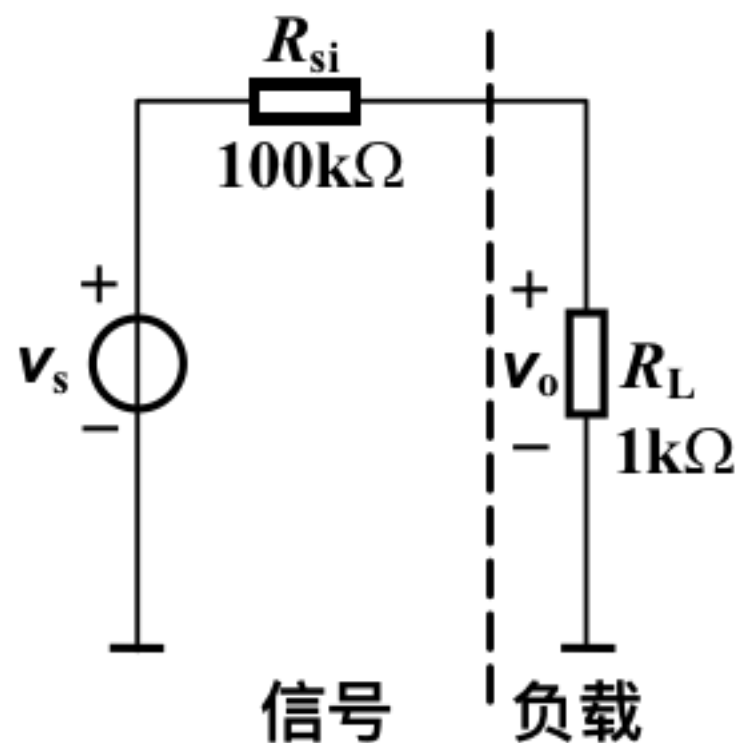
$$V_o = \underline{V_n} \approx V_p = V_i$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \approx 1$$

(可作为公式直接使用)

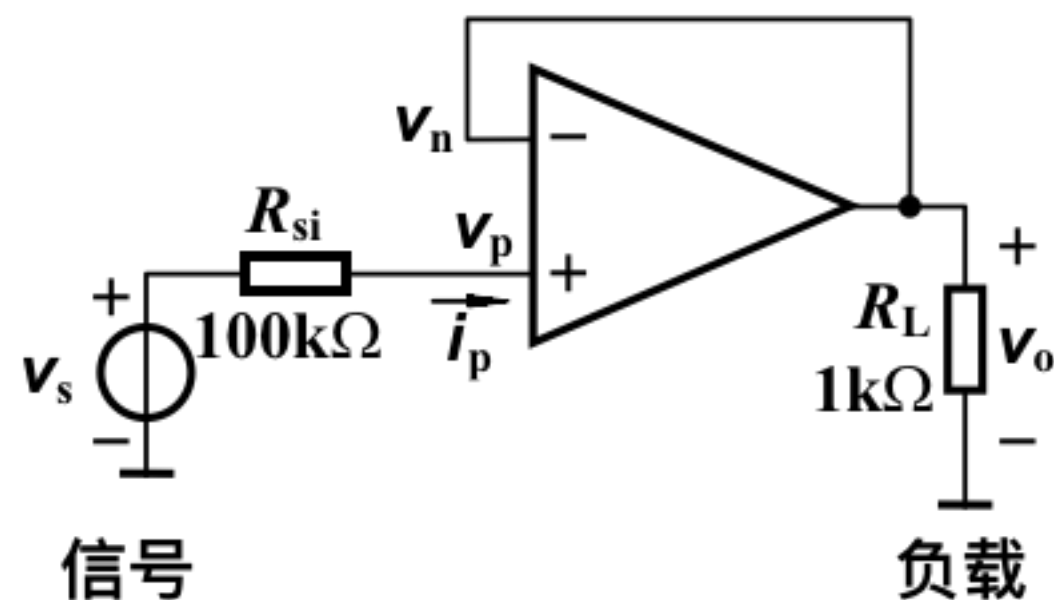


电压跟随器的作用



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

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

$$\underline{v_o} = v_n \approx v_p = \underline{v_s}$$

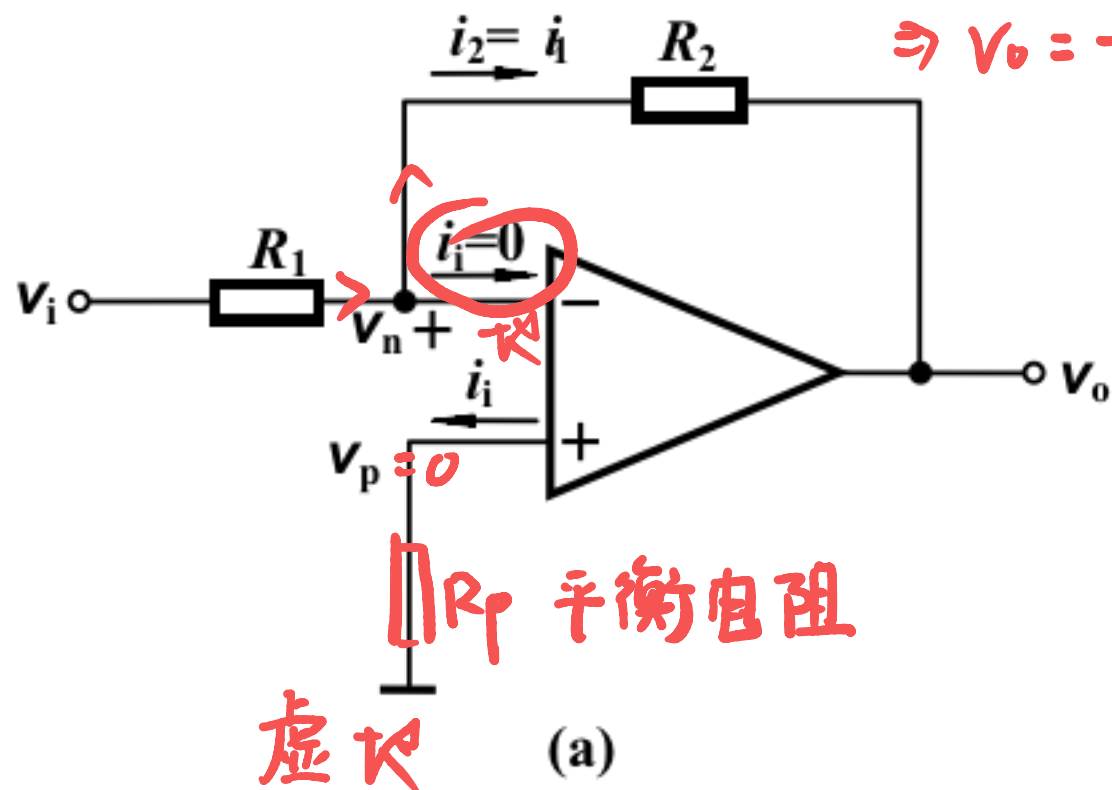
阻抗变换 提高性能

2.3.2 反相放大电路

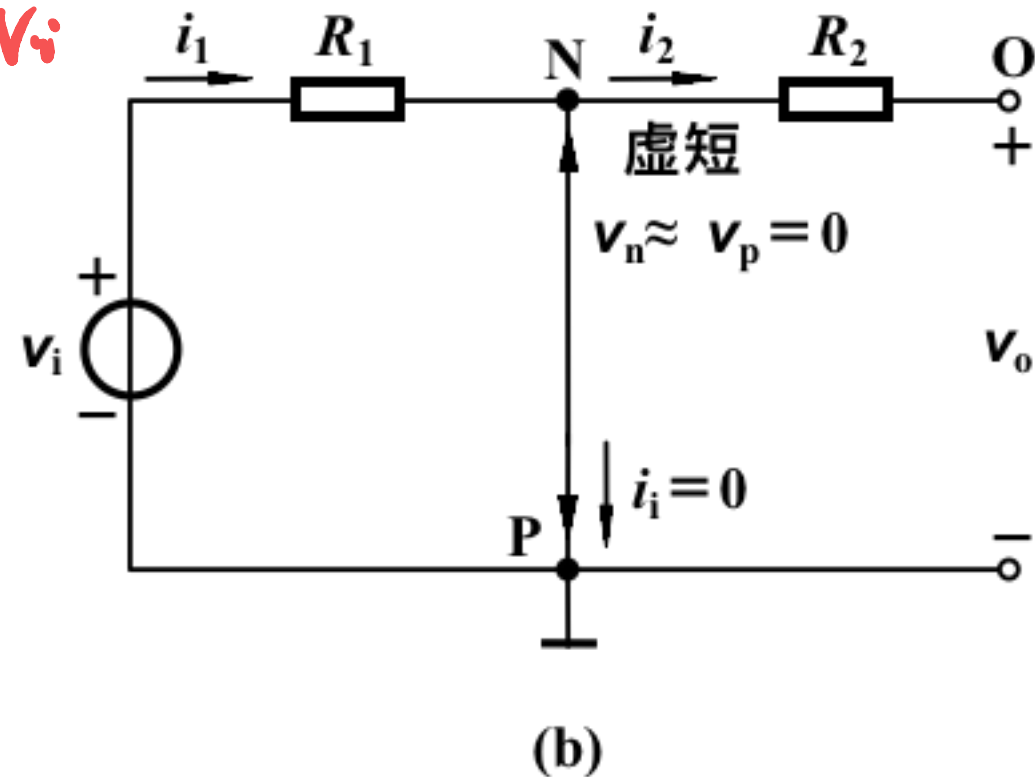
1. 基本电路

$$\frac{V_n - V_i}{R_1} = \frac{V_o - V_n}{R_2}$$

$$\Rightarrow V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i$$



(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

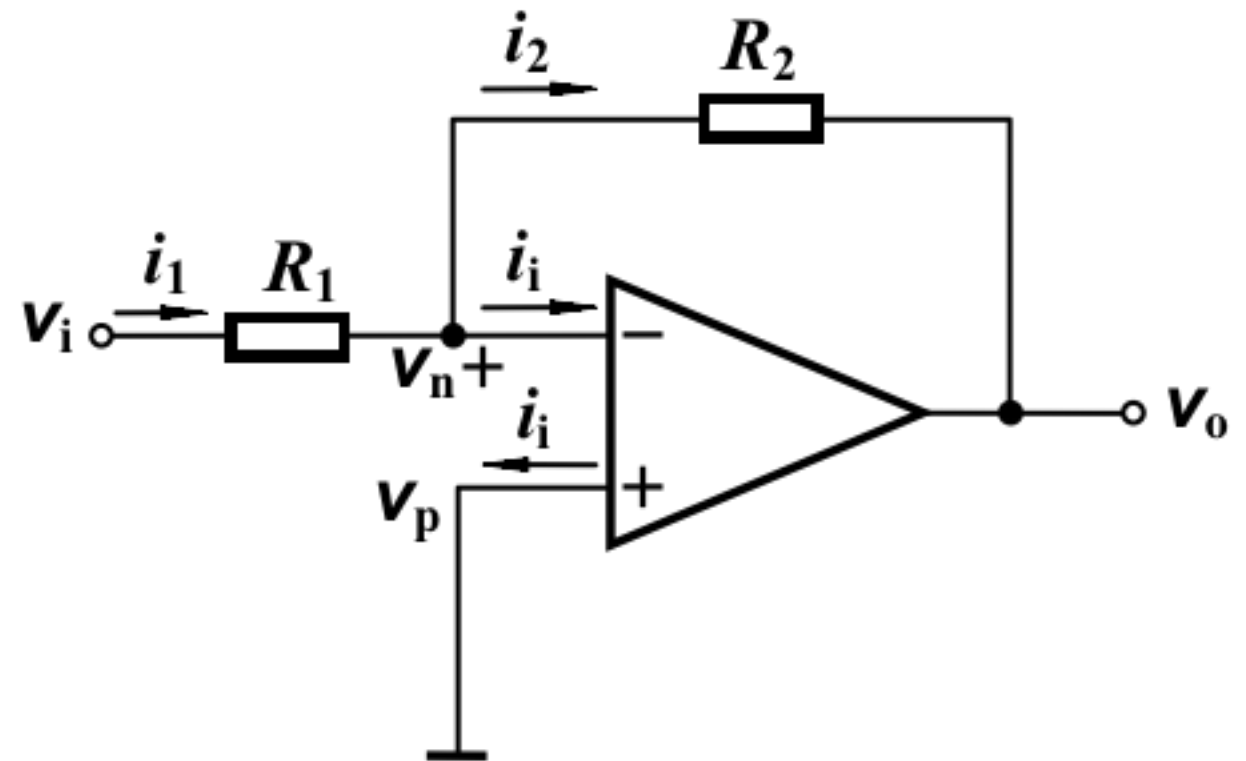
根据虚短和虚断的概念有

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

所以 $i_1 = i_2$

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

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



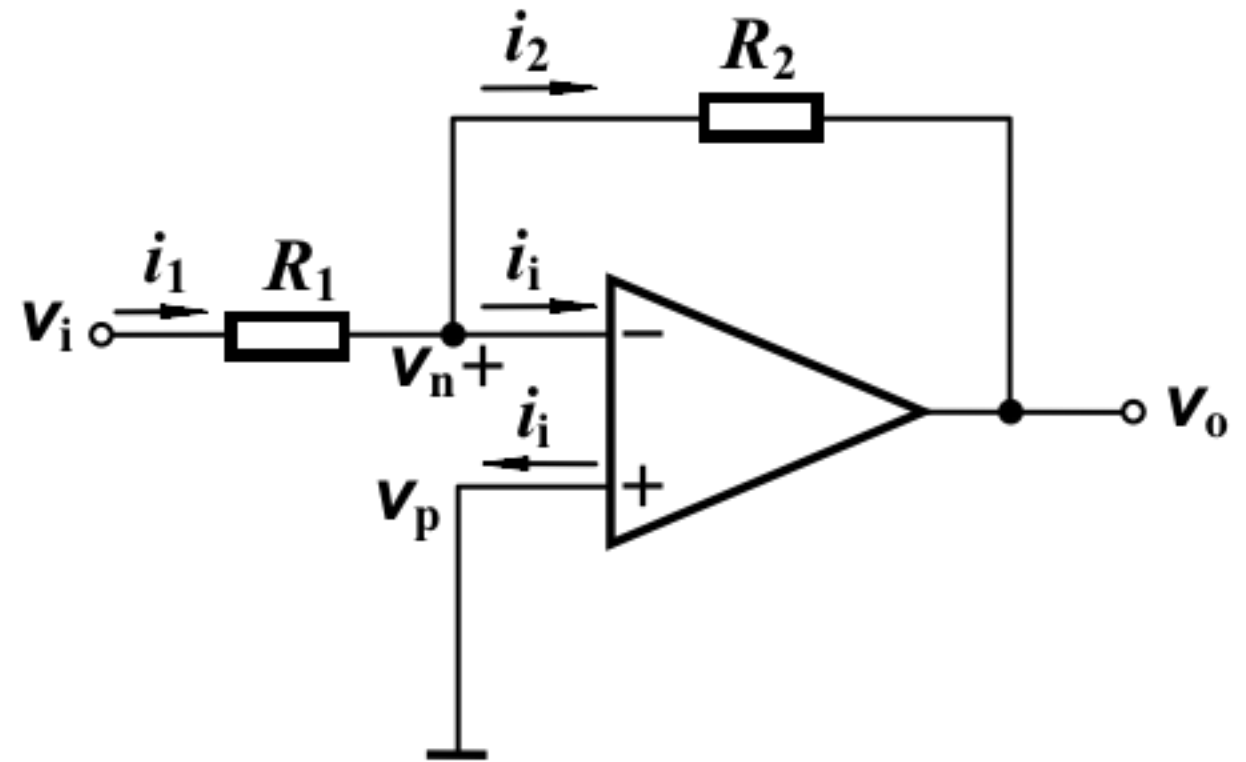
(可作为公式直接使用)

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

$$R_i = \frac{V_i}{i_1} = \frac{V_i}{V_i / R_1} = \underline{\underline{R_1}}$$



(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

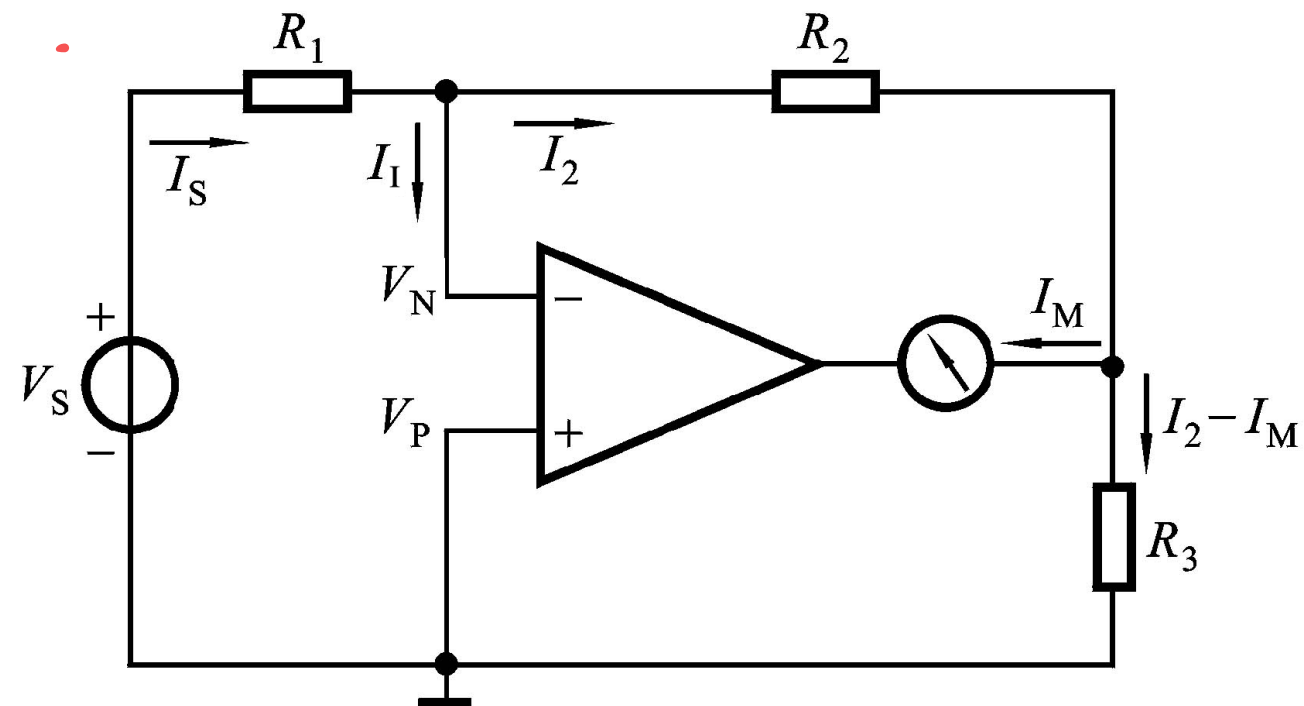


输入电阻越大越好

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。

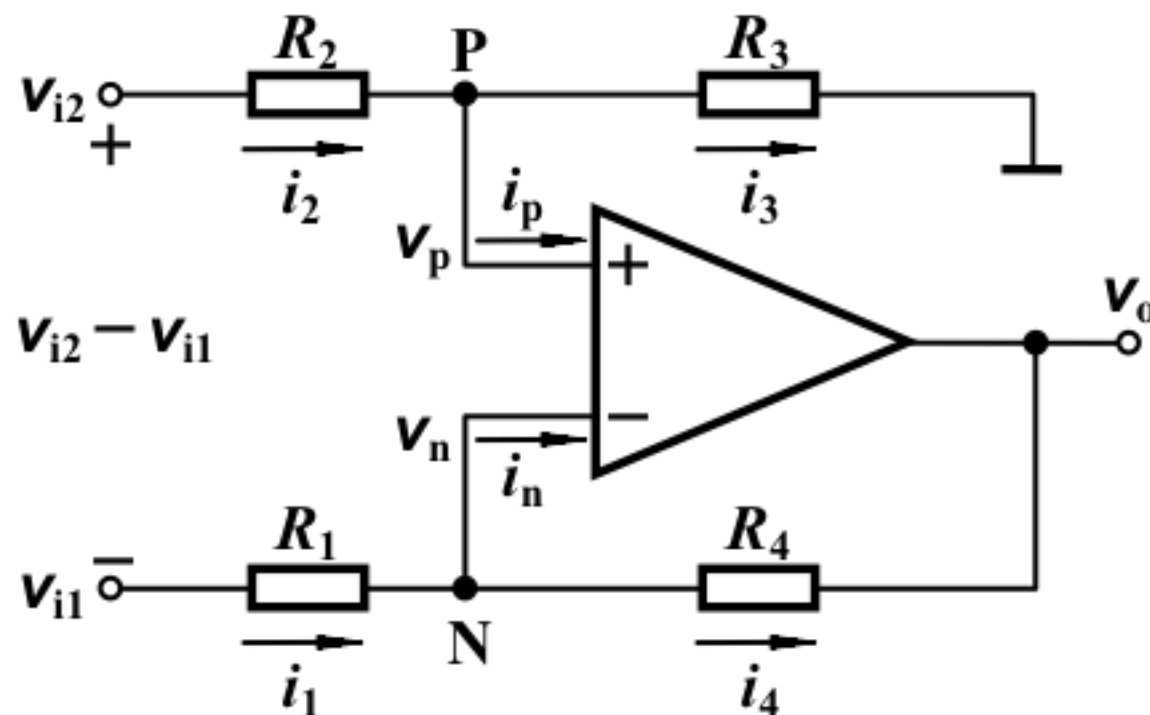
根据虚短、虚断和N、P点的KCL得：

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

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

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



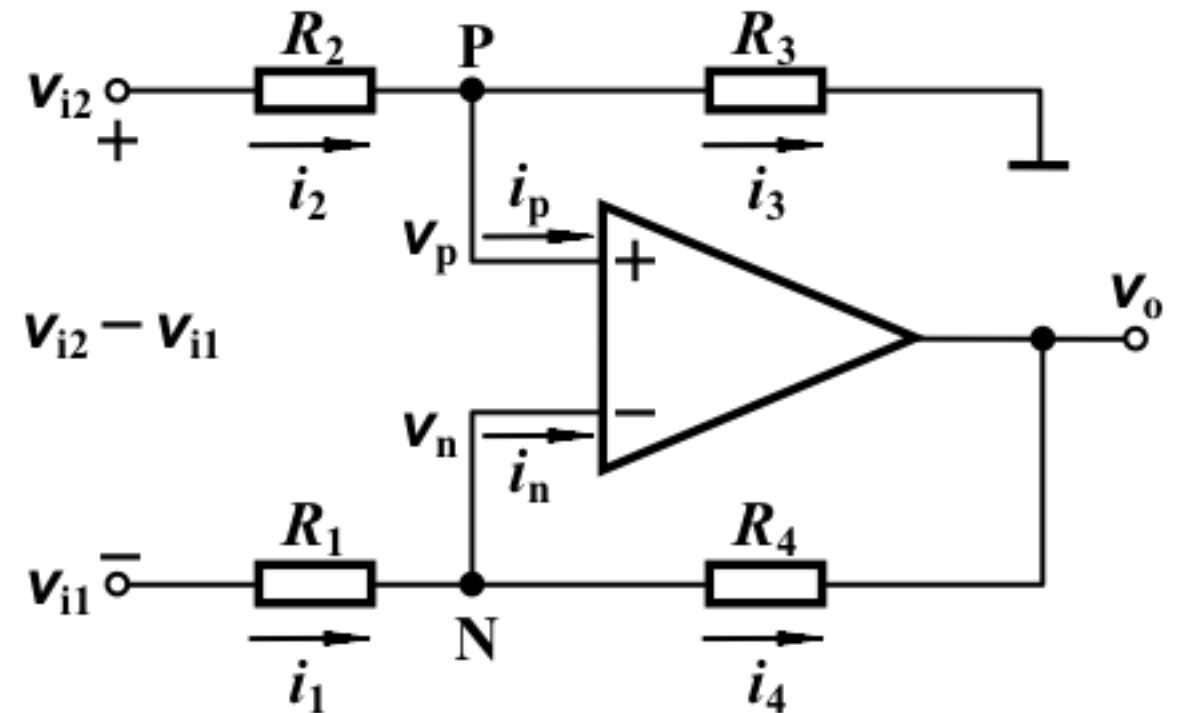
2.4.1 求差电路

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

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

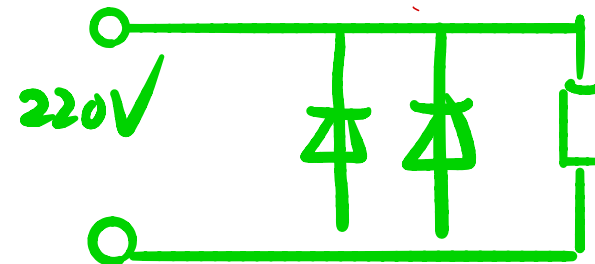
从放大器角度看

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



$$i_3 R_3 = v_{i1} - v_i R_1$$

(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

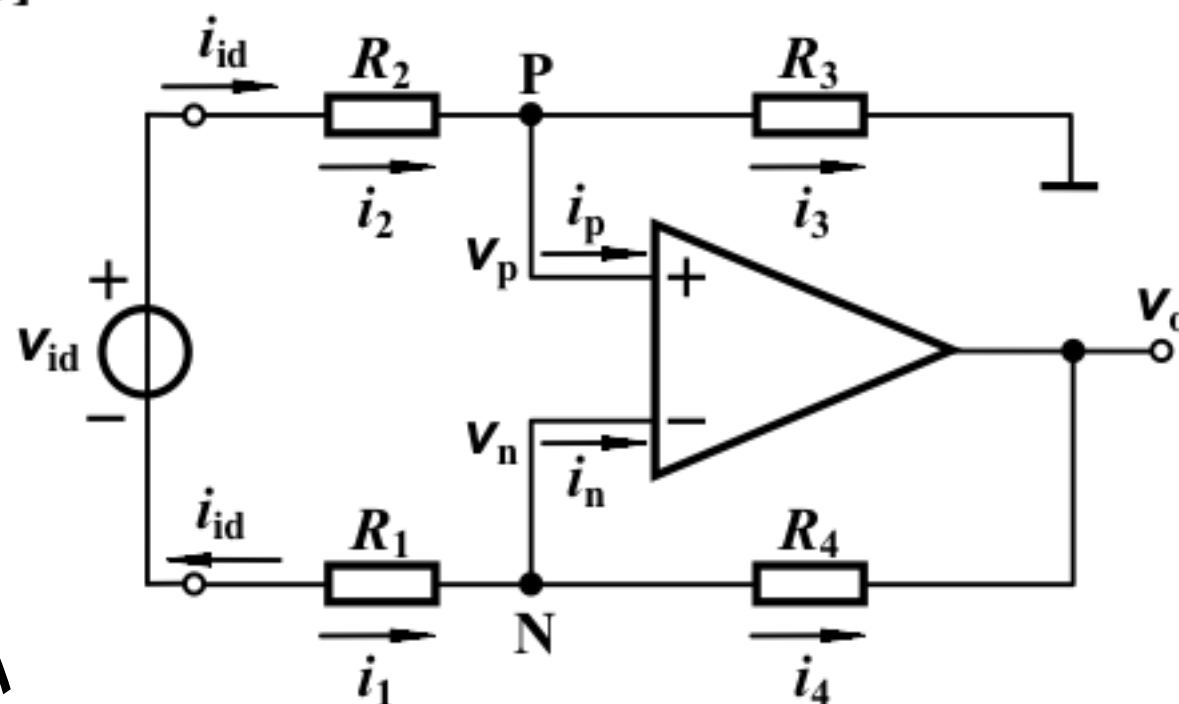
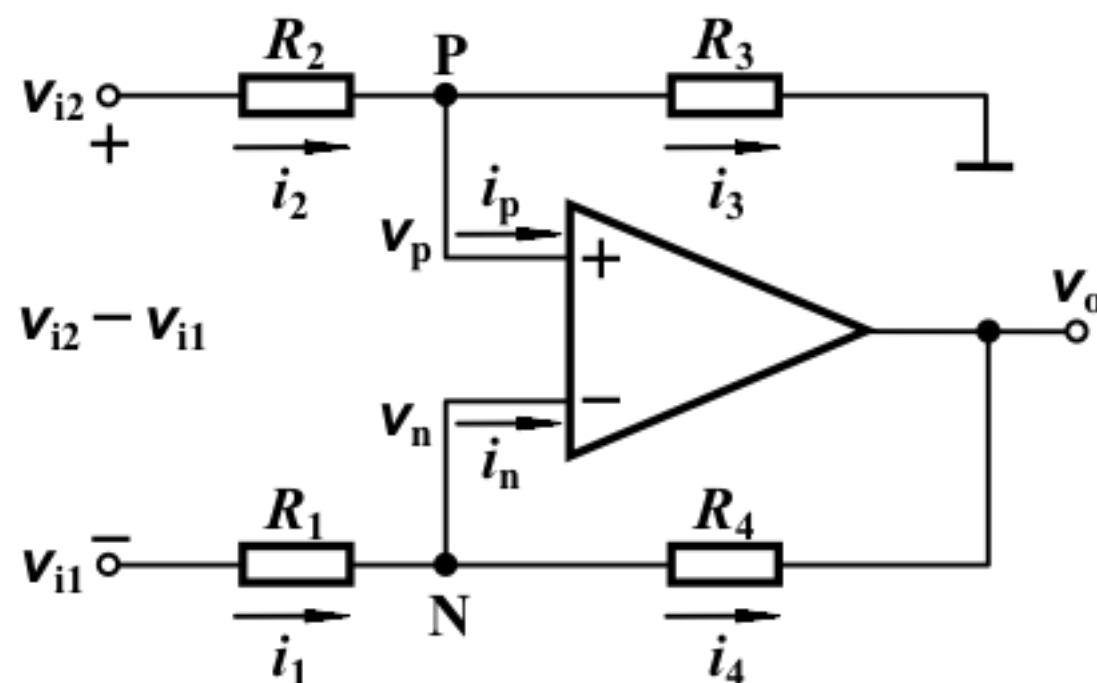
$$V_{id} = V_{i2} - V_{i1}$$

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

$$\begin{cases} V_{id} = i_{id}(R_2 + R_3) - [V_o - i_{id}(R_1 + R_4)] \\ V_p = i_{id}R_2 \\ V_n = V_o - i_{id}R_4 \\ V_p = V_n \end{cases}$$

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

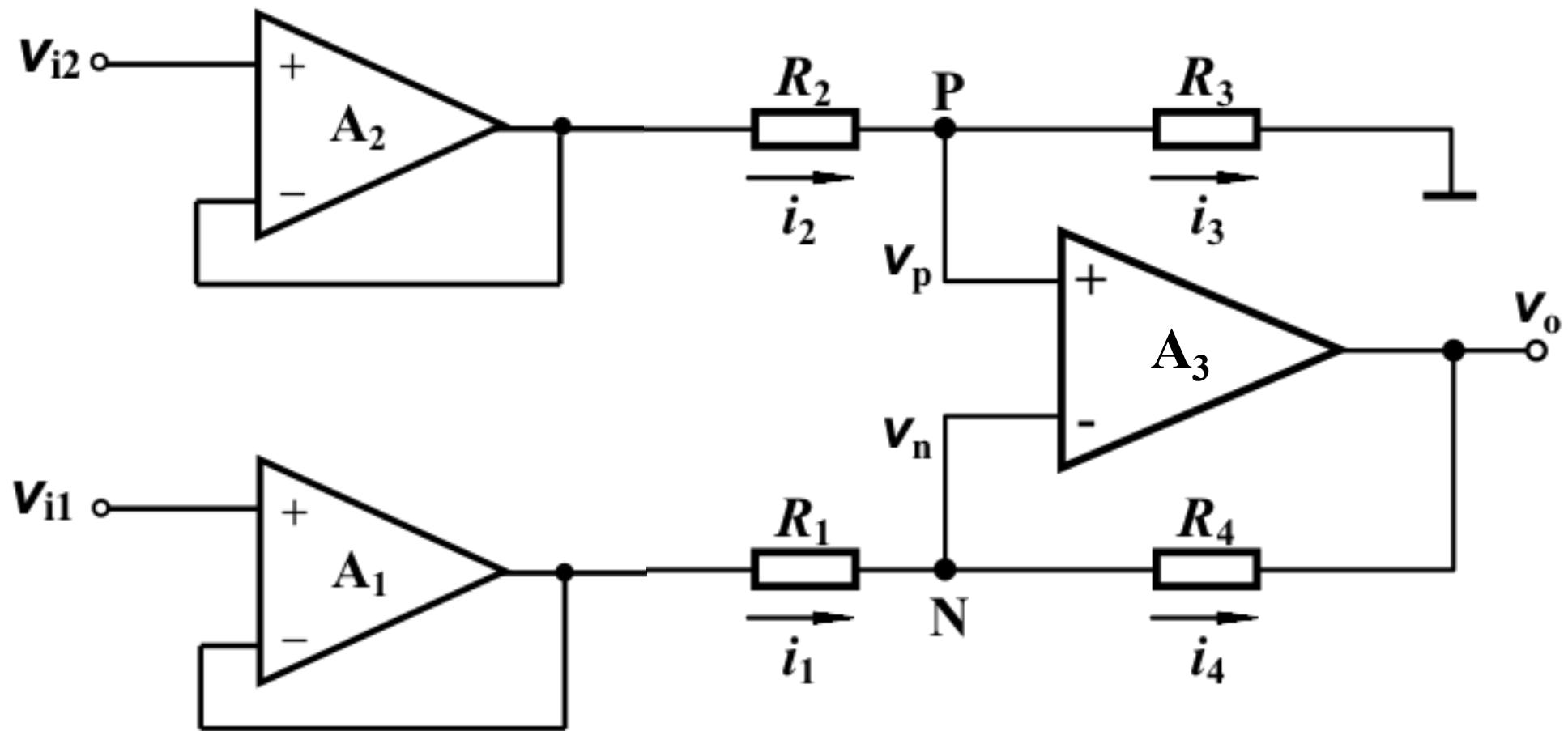
输入电阻较小



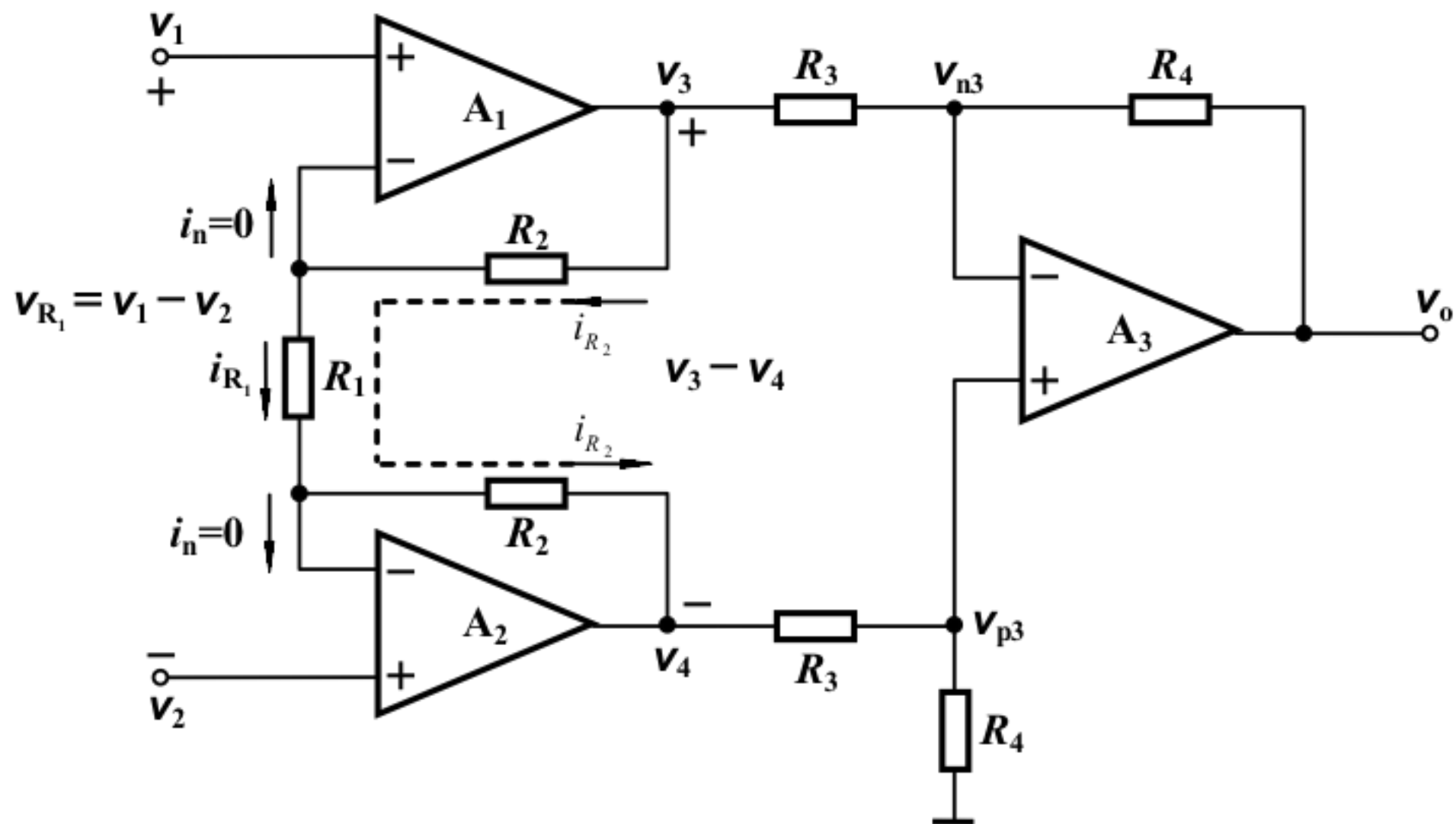
2.4.1 求差电路

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



$$A_v = \frac{V_o}{V_1 - V_2} = -\frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right)$$

$$V_o = \frac{R_4}{R_2} (V_4 - V_3)$$

$$i_{R_2} = \frac{V_3 - V_4}{2R_2 + R_1}$$

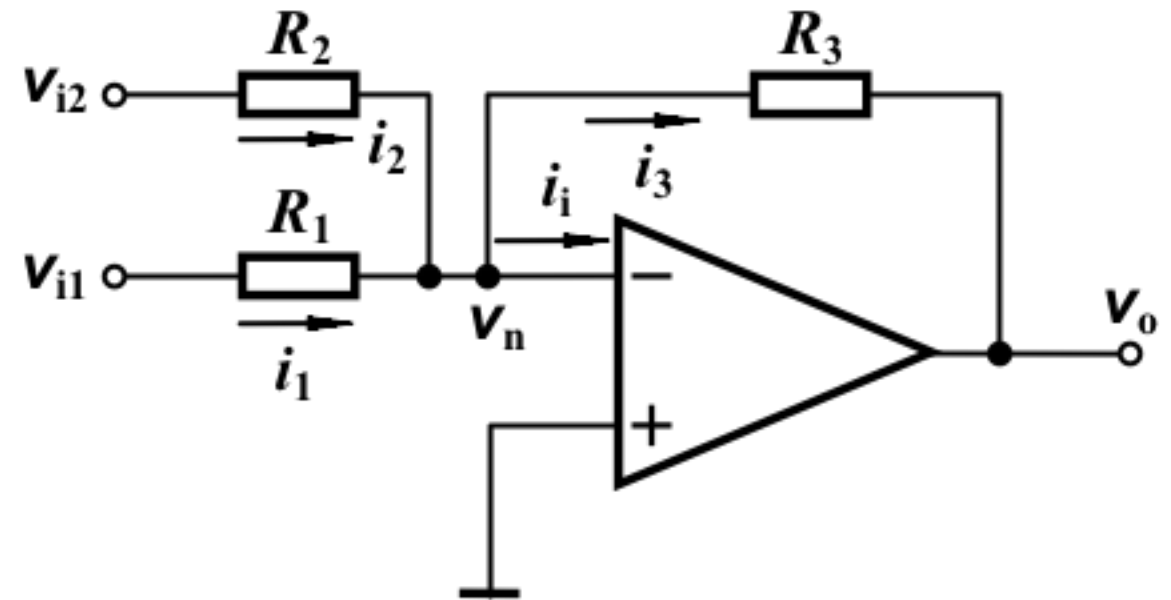
おの V_1, V_2

2.4.3 求和电路

(该电路也称为加法电路)

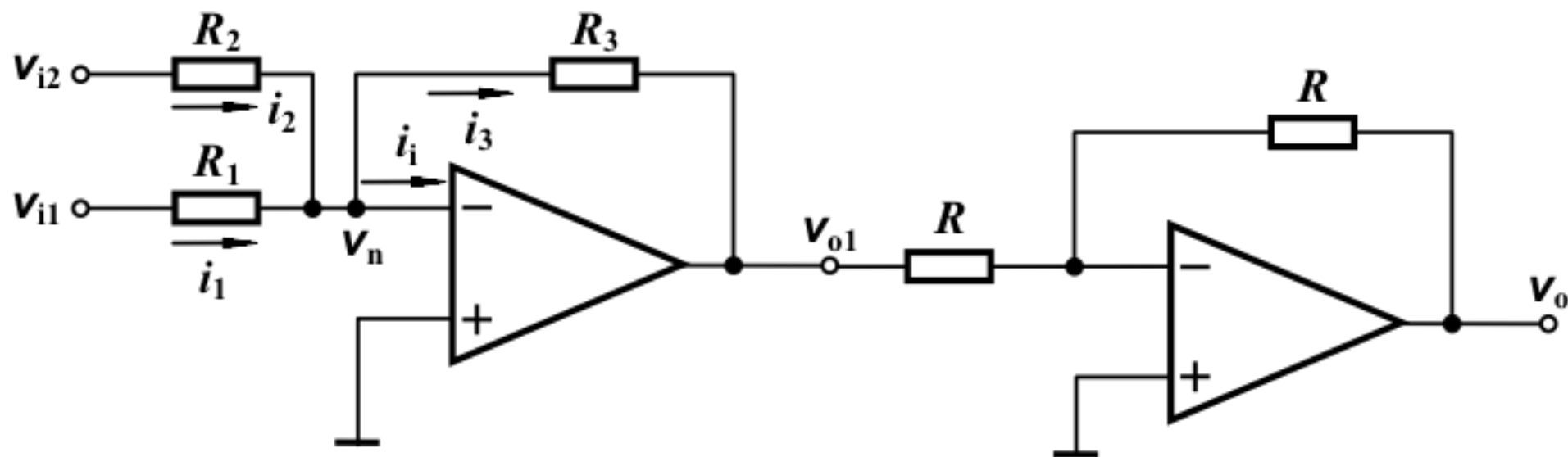
根据虚短、虚断和N点的KCL得：

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



$\Rightarrow -v_o = \frac{R_3}{R_1} v_{i1} + \frac{R_3}{R_2} v_{i2}$ 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 $i_i = 0$

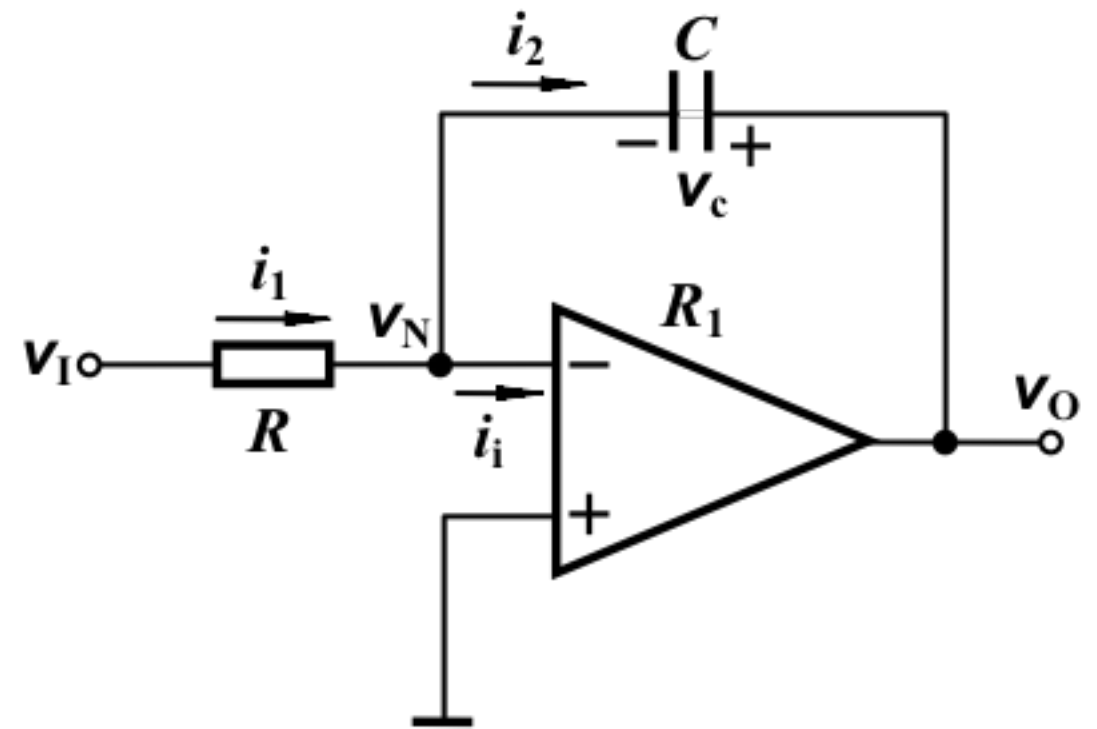
因此
$$i_2 = i_1 = \frac{v_i}{R}$$

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

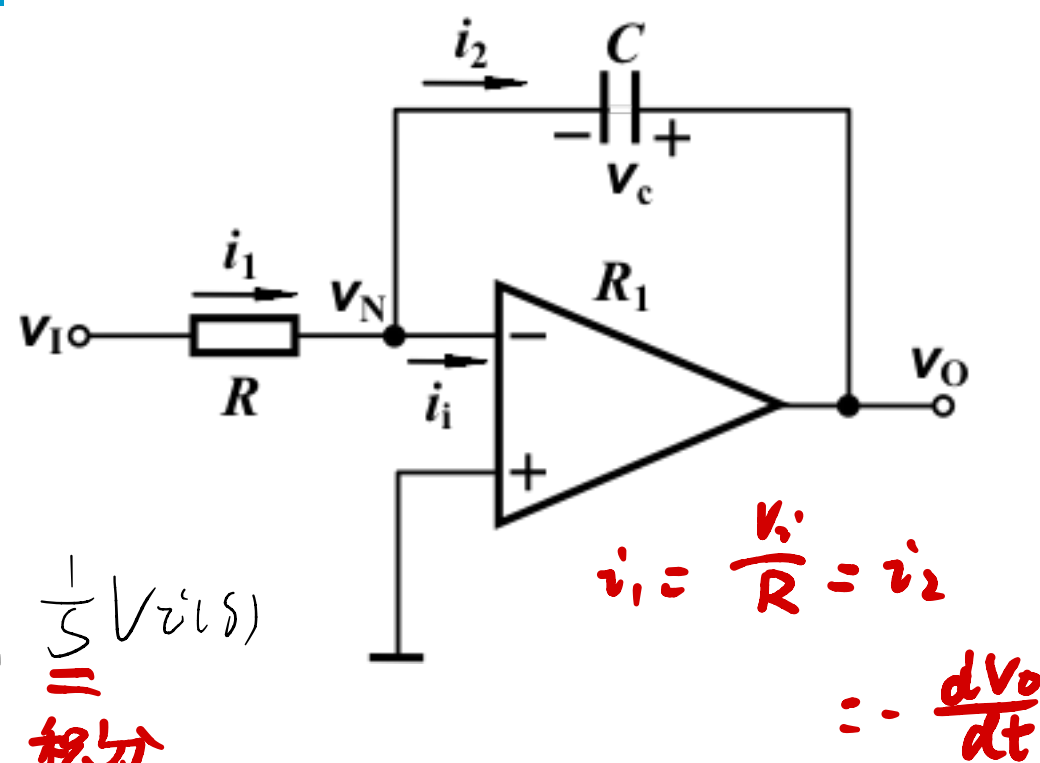
$$v_o = -\frac{1}{RC} \int_{-\infty}^t v_i dt = -\frac{V_i}{RC} t = -\frac{V_i}{\tau} t$$

v_o 与 t 成线性关系

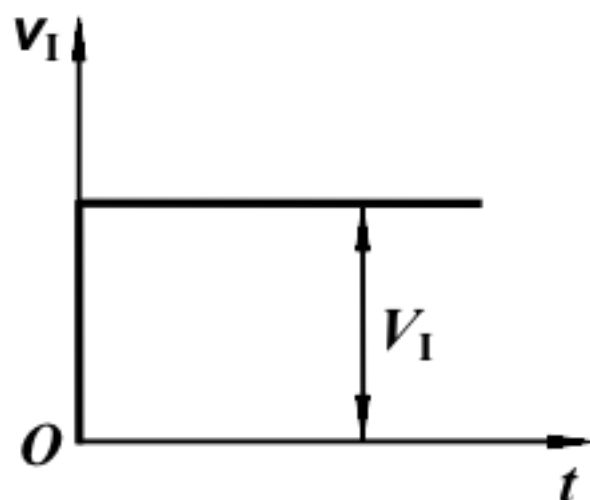
$$= V(0) - \frac{1}{RC} \int_0^t v_i dt$$

$$V_o(s) = -\frac{1}{sRC} \int V_i(s) ds$$

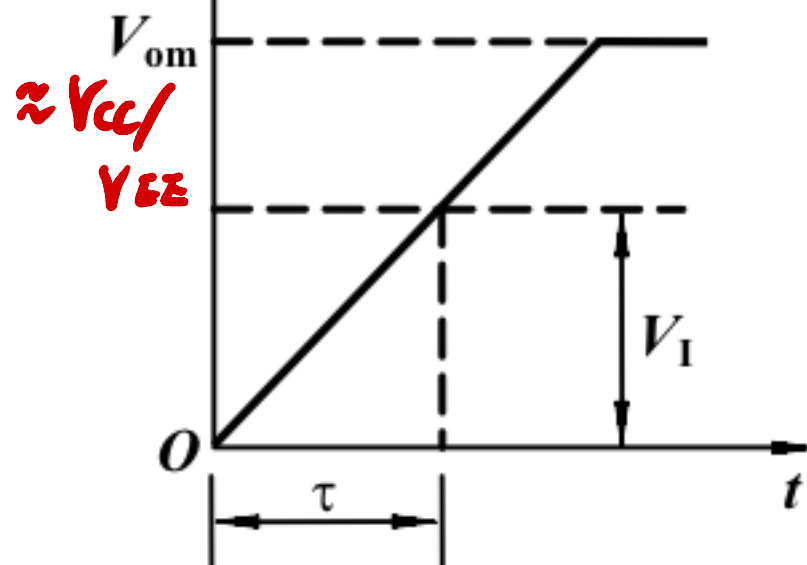
= 积分



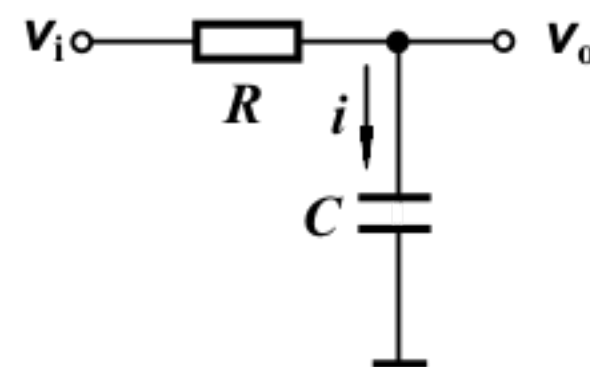
与一般RC电路相比该积分电路有何特点？



(a)



(b)

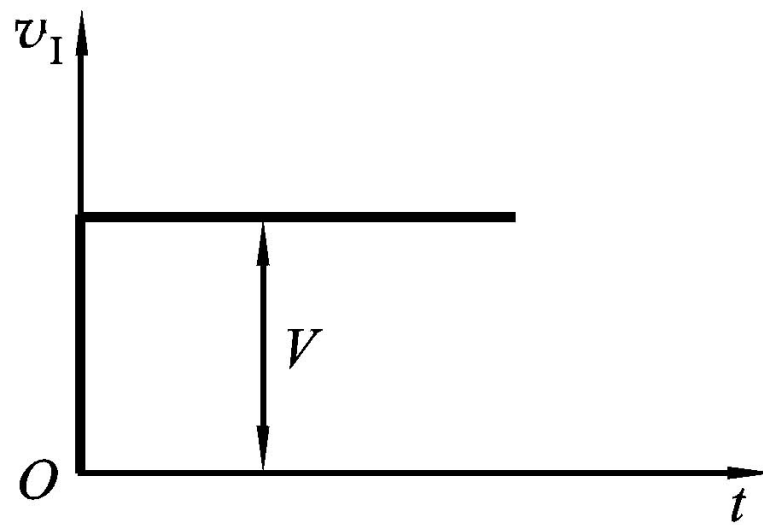
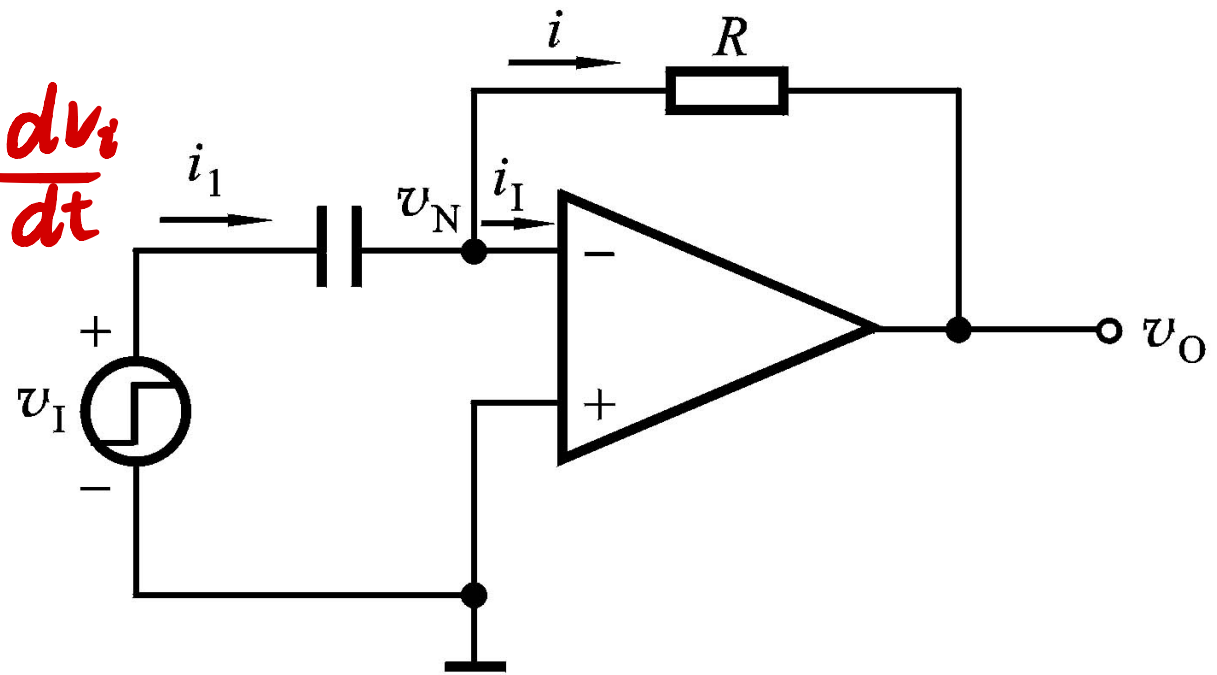


2.4.4 积分电路和微分电路

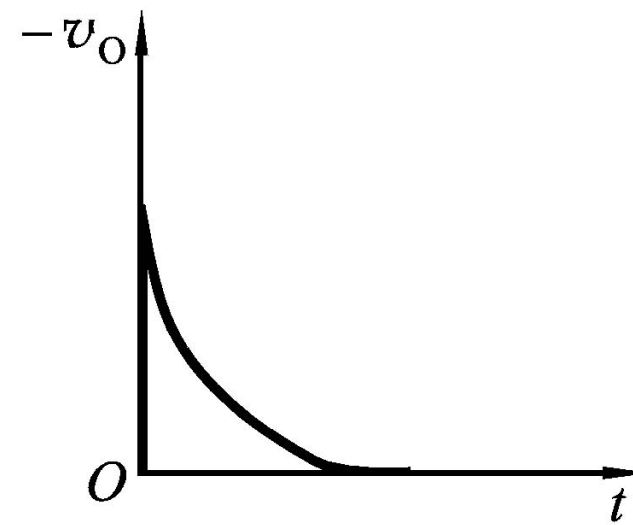
2. 微分电路

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

$$\frac{v_o}{R} = i_2 = -C \frac{dv_i}{dt}$$



(a)



(b)