



2 运算放大器

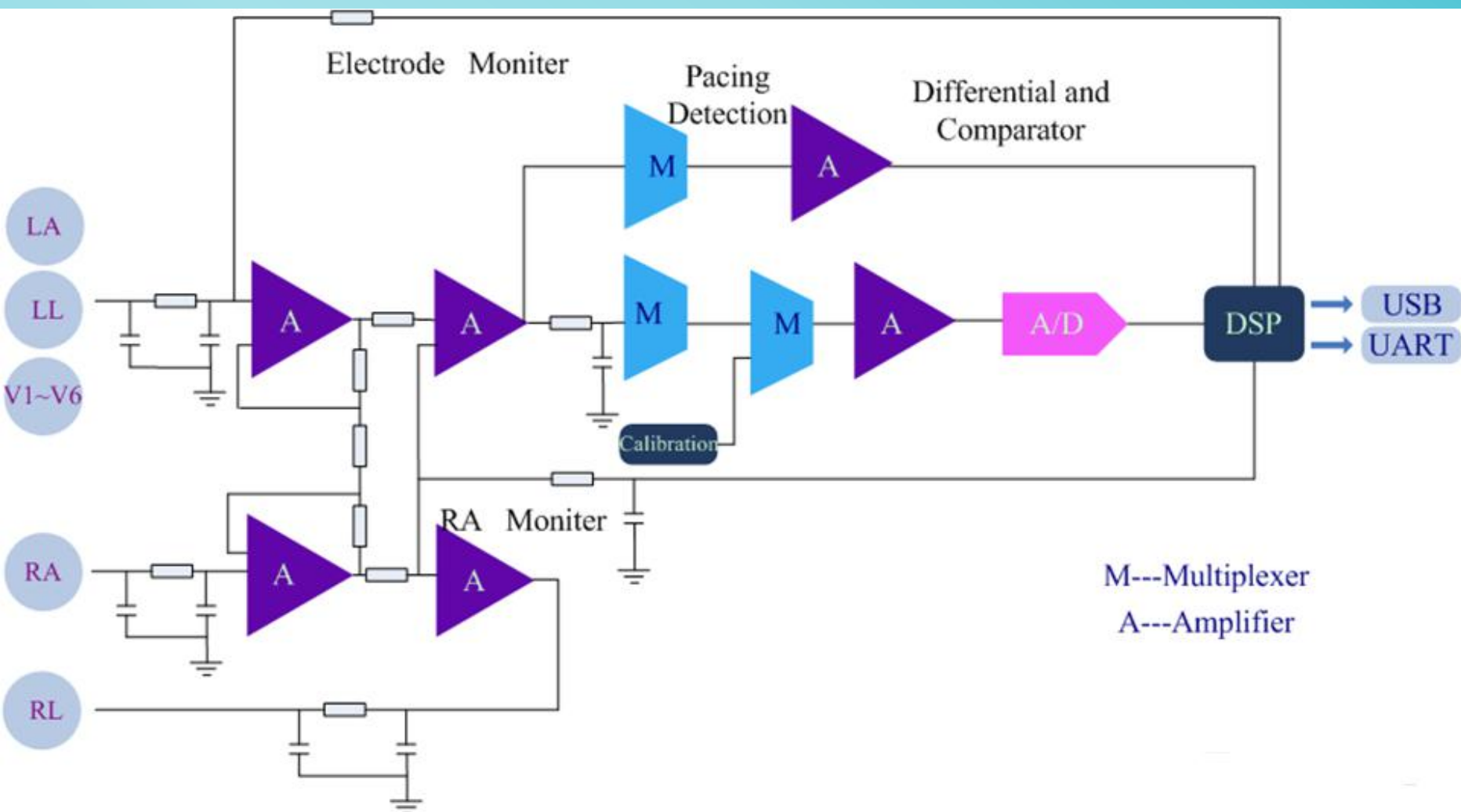
2.1 集成电路运算放大器

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

心电测量与处理电路



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

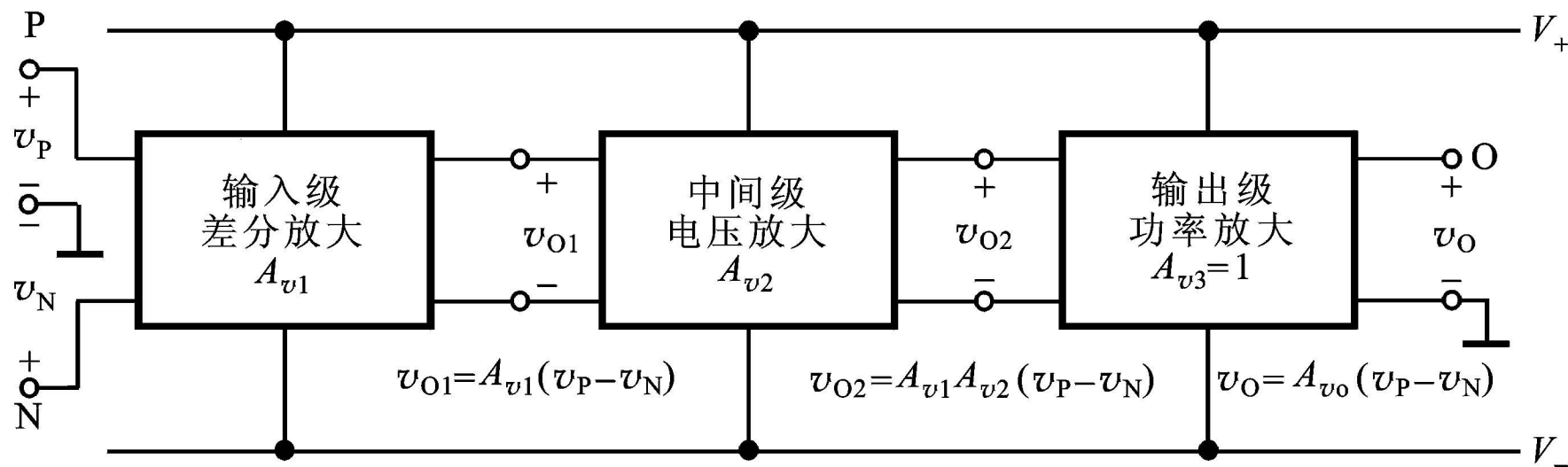


图2.1.1 集成运算放大器的内部结构框图

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

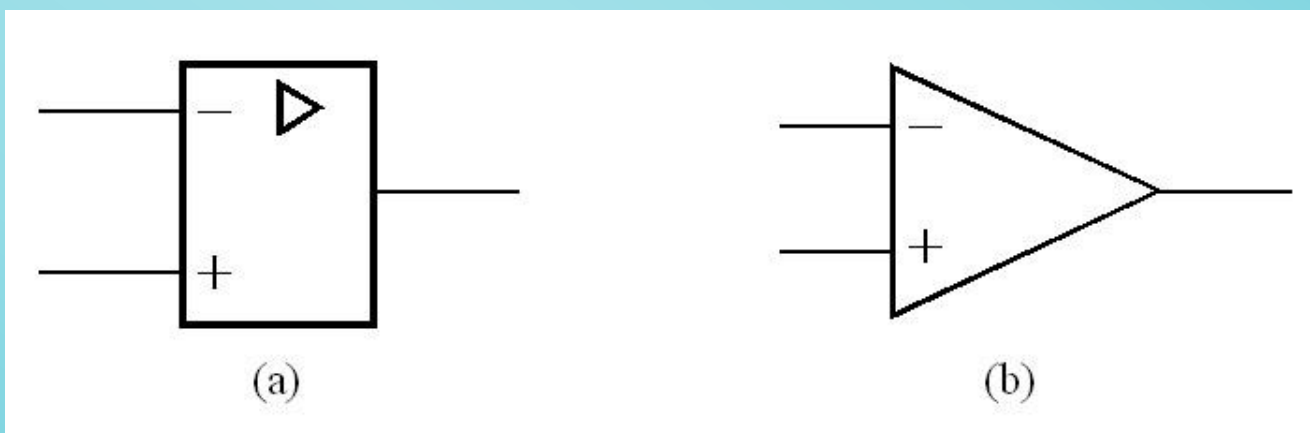


图2.1.2 运算放大器的代表符号

(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_{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)

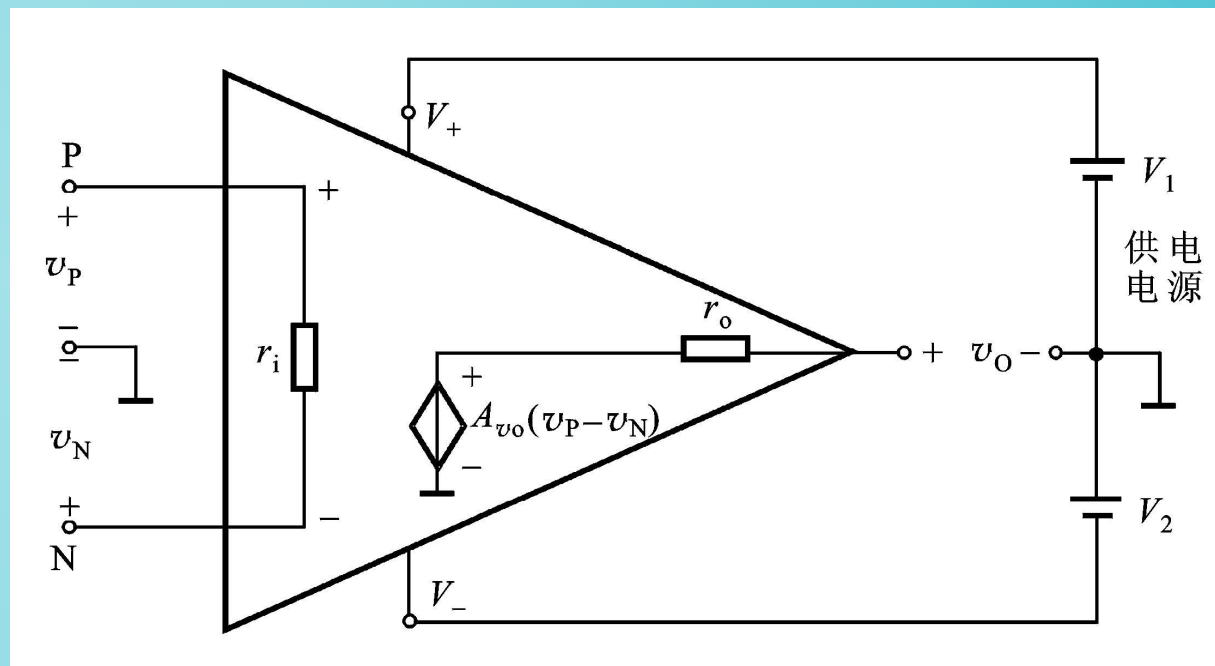


图2.1.3 运算放大器的电路模型

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

注意输入输出的相位关

系

川北医学院生物医学工程

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

$$v_O = V_-$$

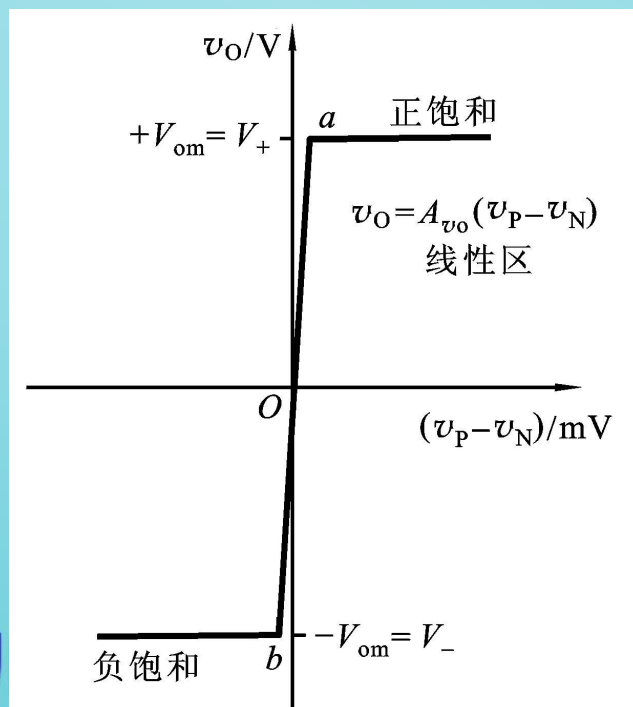
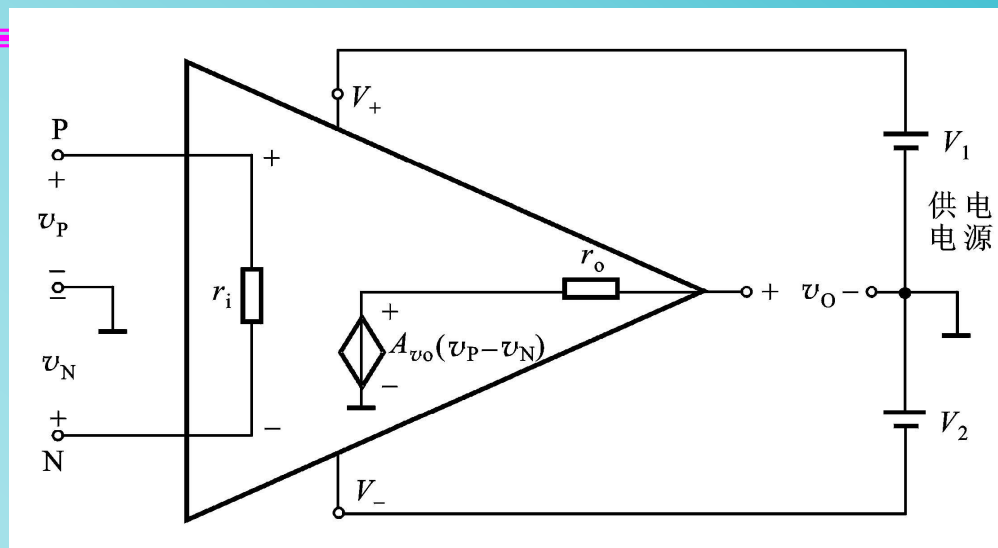
电压传输特性

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

线性范围内

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

A_{vo} ——斜率



end

2. 运算放大器的电路模型

例题：运放的开环增益 $A_{vo} = 2 \times 10^5$ ，输入电阻 $r_i = 0.6 \text{M}\Omega$
电源电压 $V_+ = +12\text{V}$, $V_- = -12\text{V}$ 。

(1) 试求当 $v_o = \pm V_{om} = \pm 12\text{V}$ 时输入电压的最小幅值 $v_P - v_N = ?$ 输入电流 $i_i = ?$ (2) 画出传输特性曲线 $v_O = f(v_P - v_N)$ 。说明运放的两个区域。

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, $r_o \approx 0$

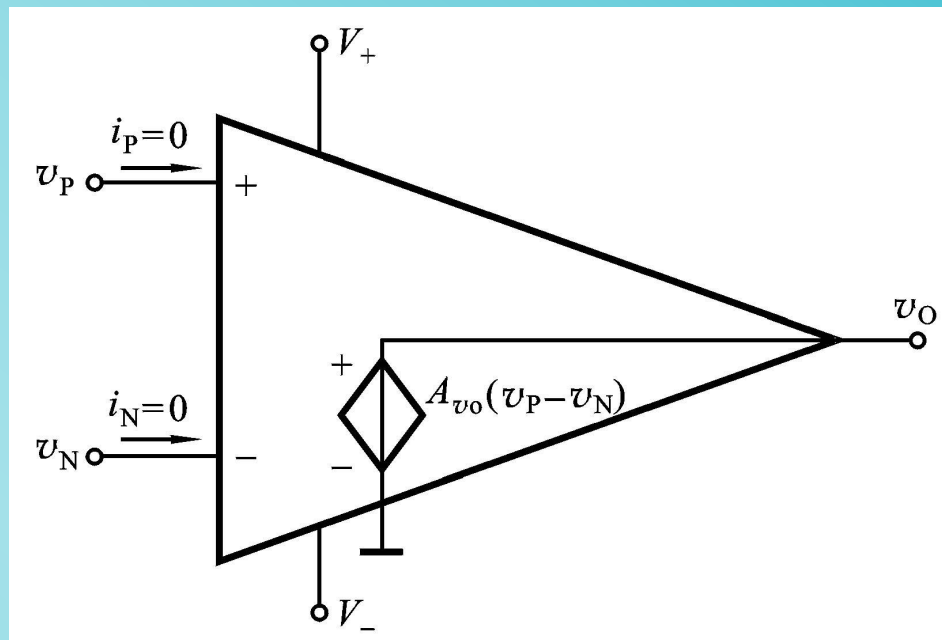


图2.2.1 运放的简化电路模型

理想: $r_i \approx \infty$

$r_o \approx 0$

$A_{vo} \rightarrow \infty$

$v_O = A_{vo}(v_N -$

end



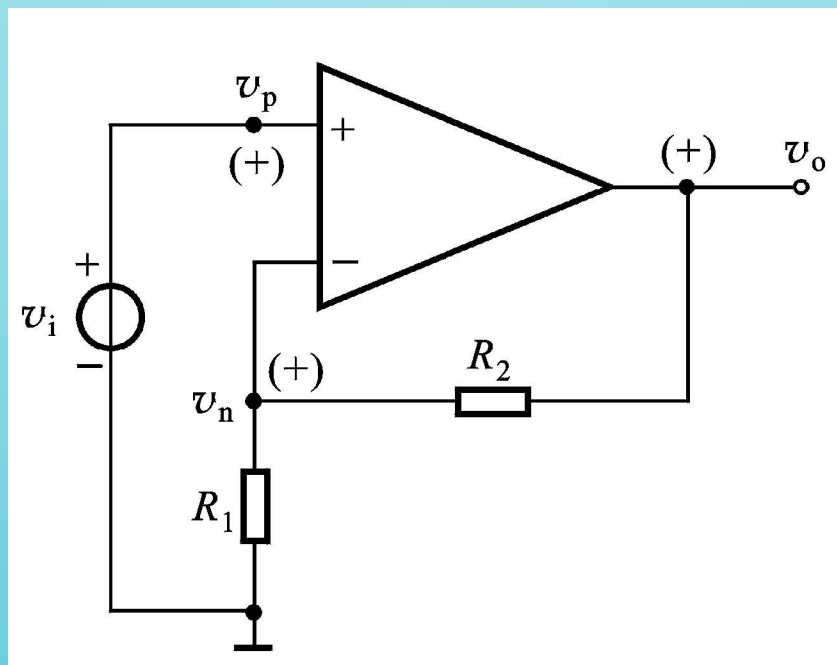
2.3 基本线性运放电路

2.3.1 同相放大电路

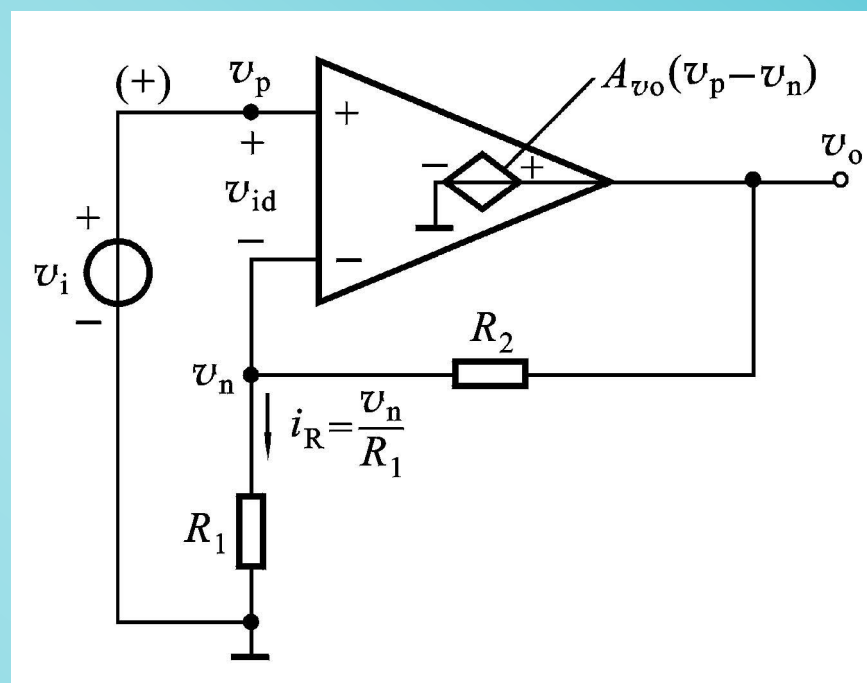
2.3.2 反相放大电路

2.3.1 同相放大电路

1. 基本电路



(a) 电路图



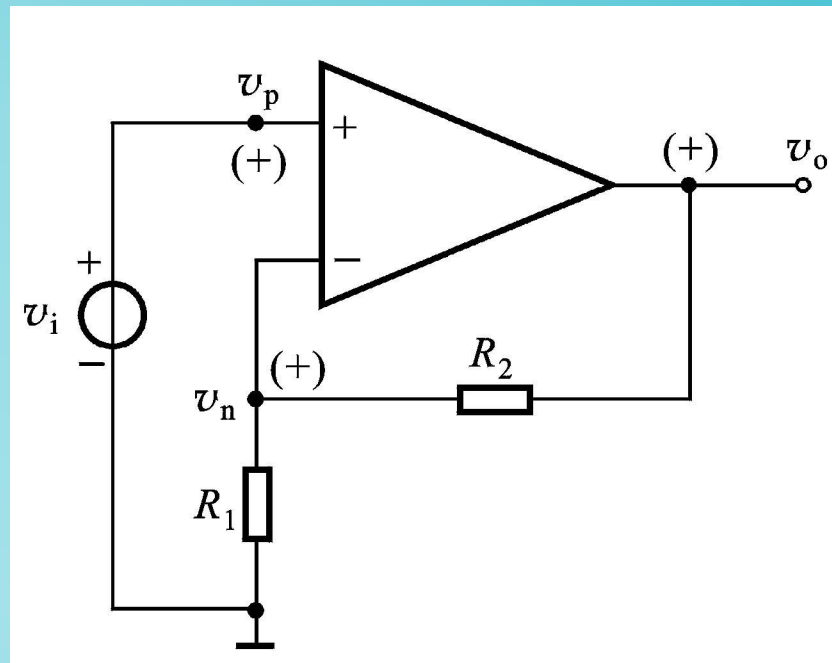
(b) 小信号电路模型

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 $\rightarrow (v_p - v_n) \downarrow \rightarrow v_o \downarrow$

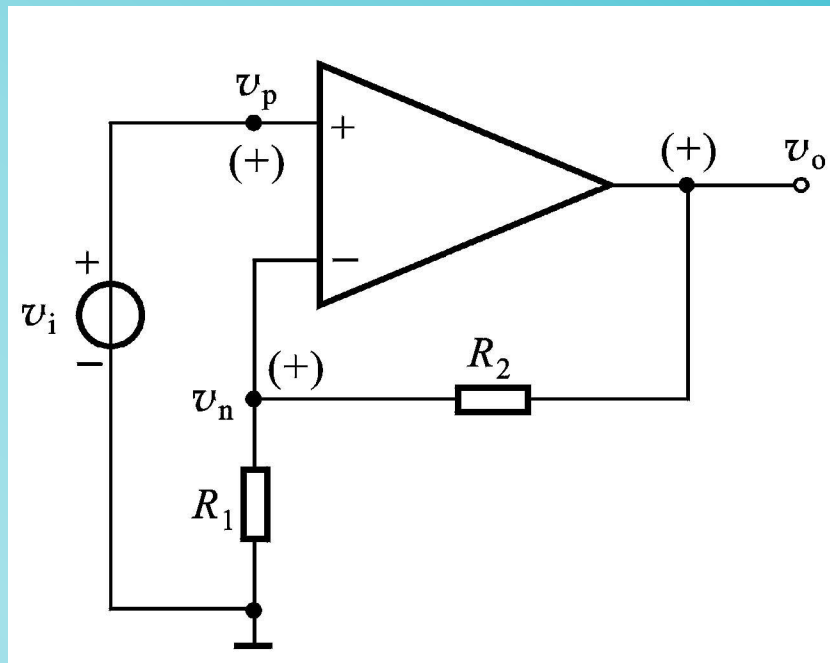
使输出减小了，增益 $A_v = v_o / v_i$ 下降了，这时的反馈称为**负反馈**。

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

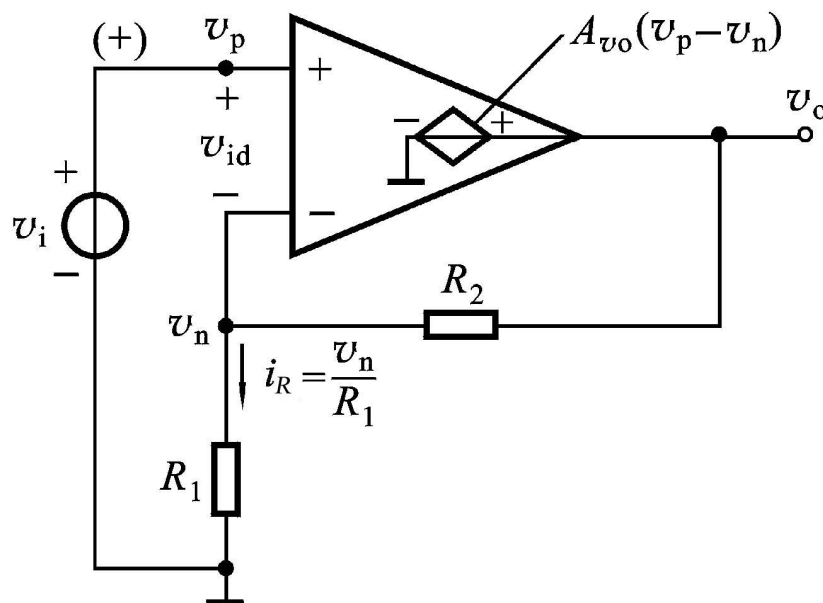
根据虚短和虚断的概念有

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

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

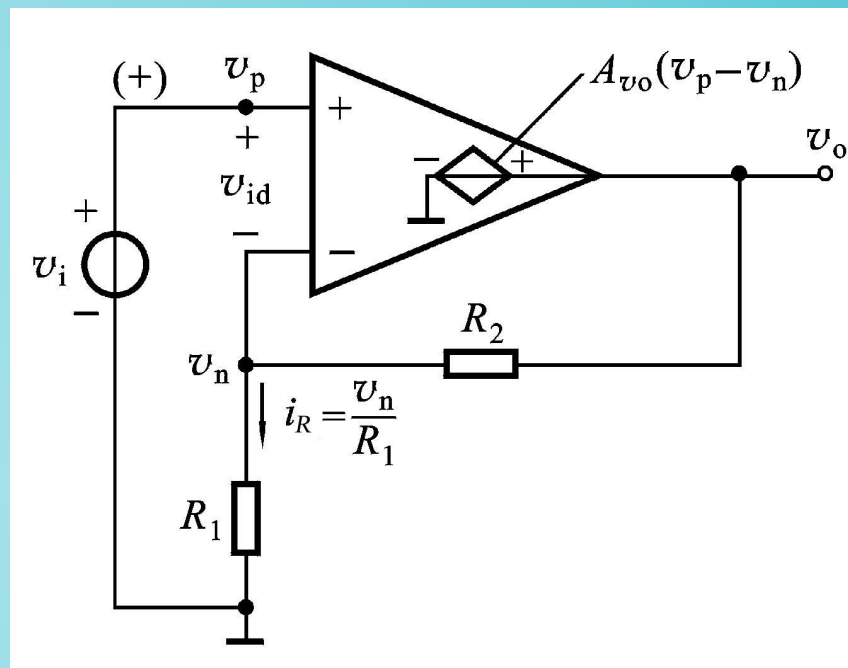
$$R_i = \frac{V_i}{i_i}$$

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

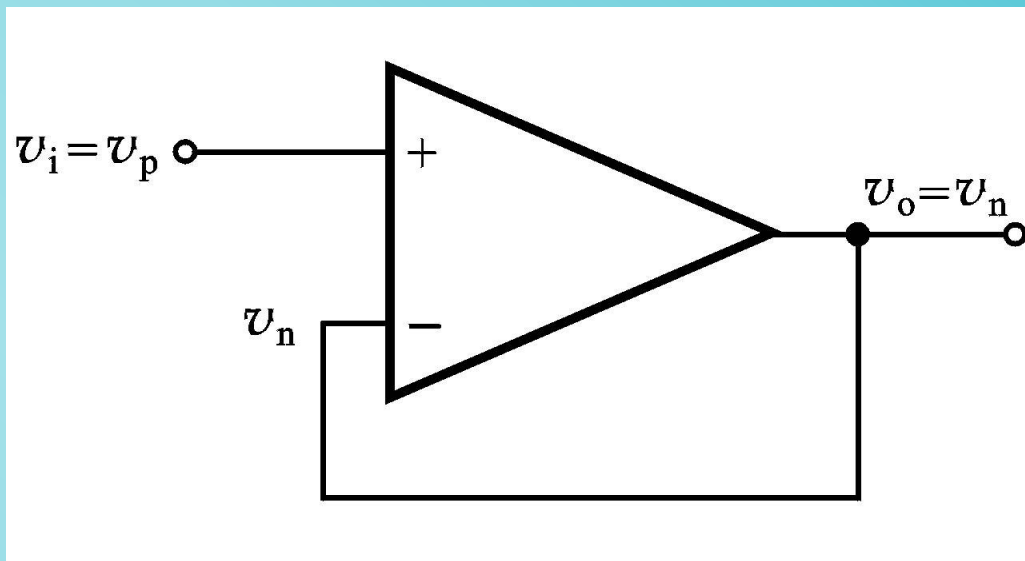
5. 电压跟随器

根据虚短和虚断有

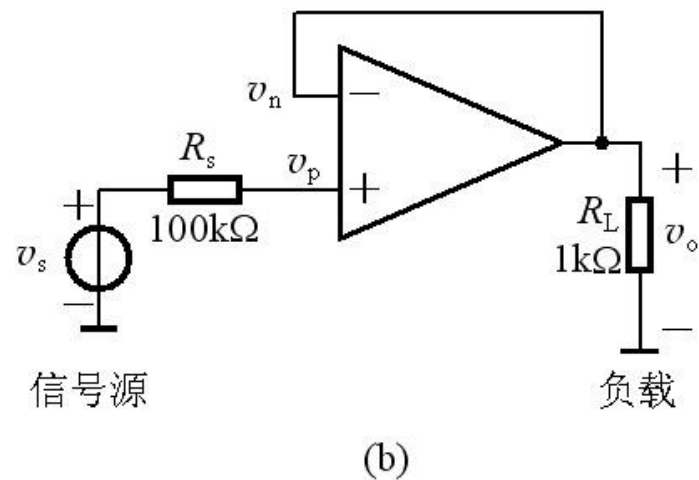
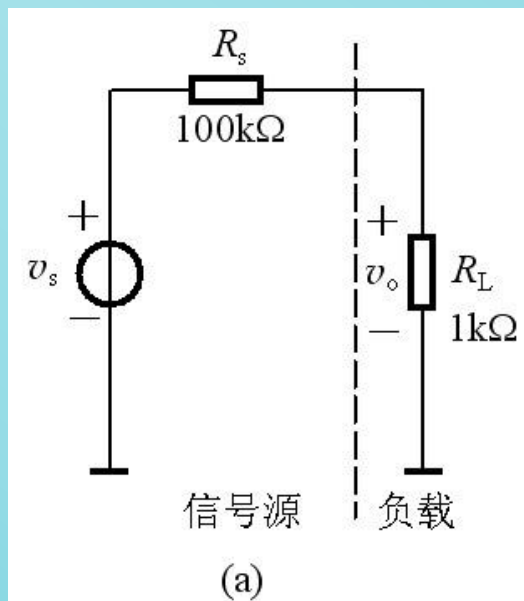
$$V_o = V_n \approx V_p = V_i$$

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

(可作为公式直接使用)



电压跟随器的作用



无电压跟随器时

负载上得到的电压

$$V_o = \frac{R_L}{R_s + R_L} \cdot V_s$$
$$= \frac{1}{100 + 1} \cdot V_s \approx 0.01 V_s$$

电压跟随器时

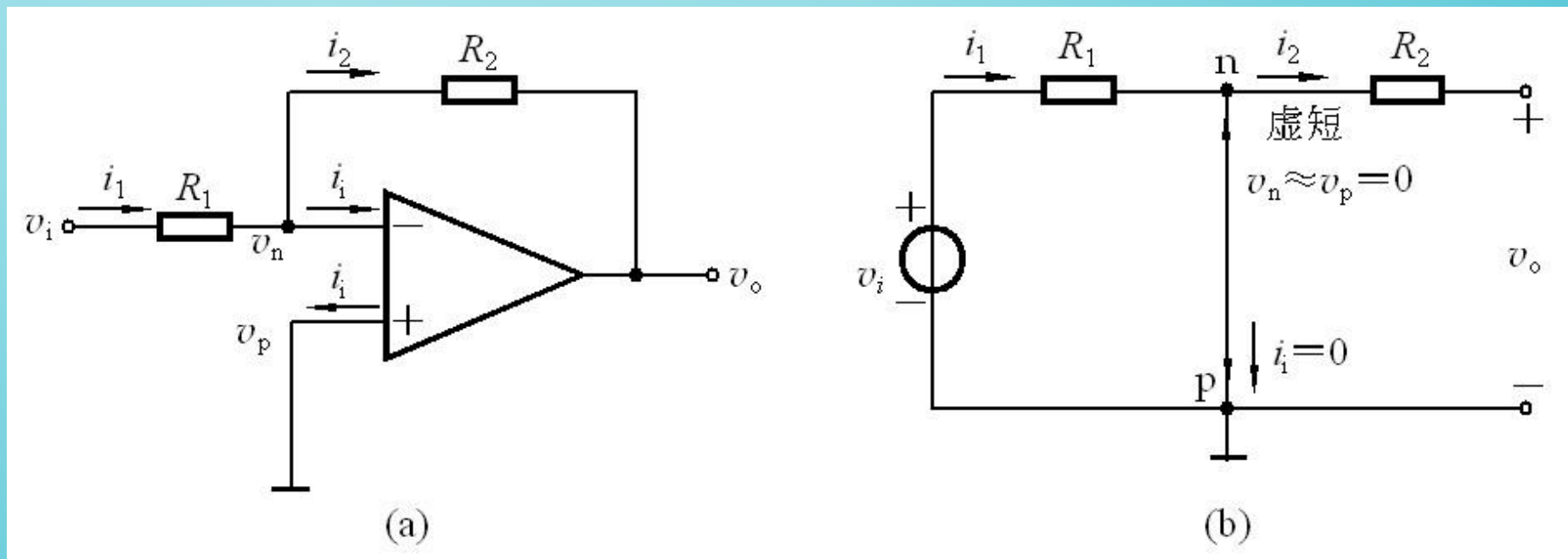
$$i_p \approx 0, \quad v_p = v_s$$

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 $v_n \approx v_p = 0$

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

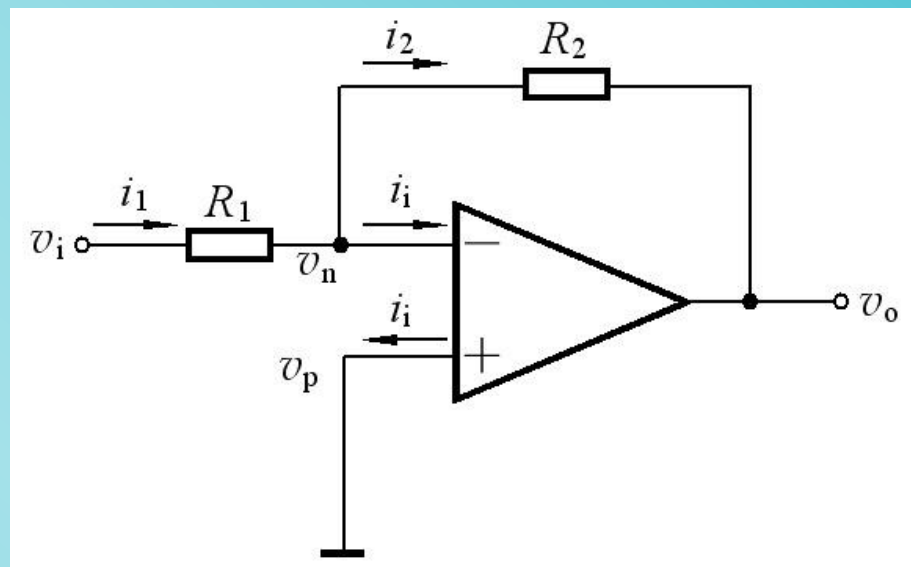
$$v_n \approx v_p = 0, \quad i_i = 0$$

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

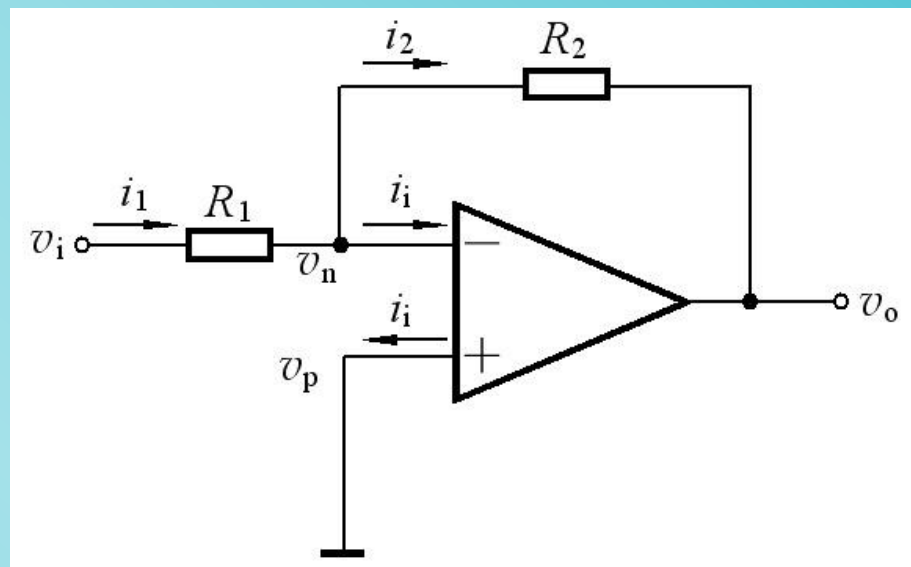
2. 几项技术指标的近似计算

(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 $I_{M(\text{max})} = ?$

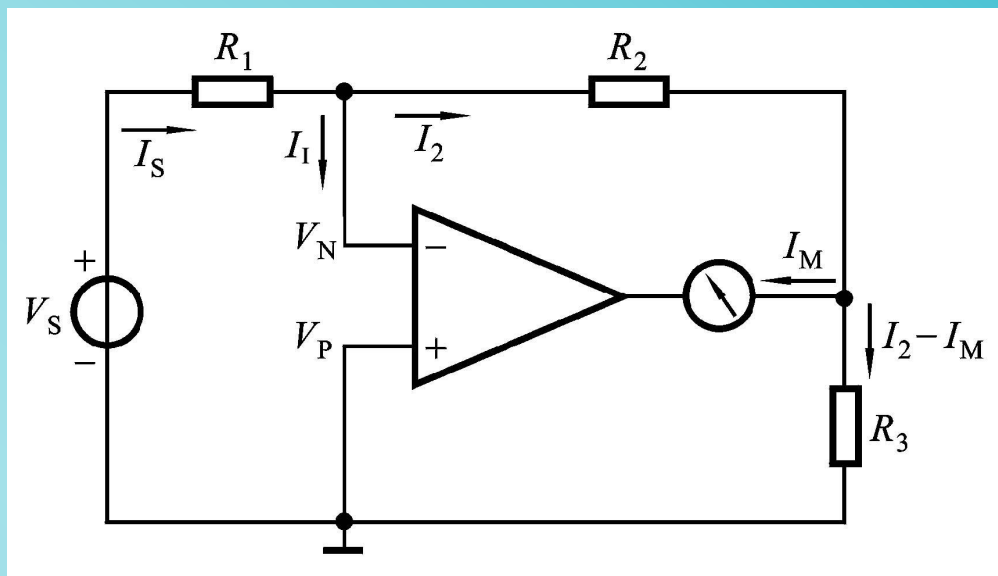
解: (1) 根据虚断有 $I_1 = 0$

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。

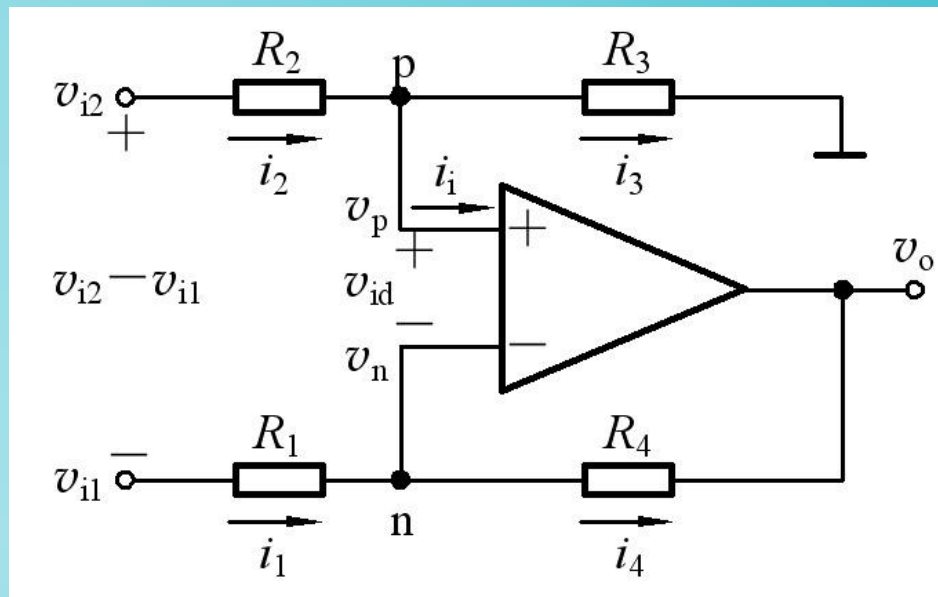
根据虚短、虚断和n、p点的KCL得：

$$\begin{cases} V_n = V_p \\ \frac{V_{i1} - V_n}{R_1} = \frac{V_n - V_o}{R_4} \\ \frac{V_{i2} - V_p}{R_2} = \frac{V_p - 0}{R_3} \end{cases}$$

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

$$\text{当 } \frac{R_4}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}, \text{ 则 } V_o = \frac{R_4}{R_1}(V_{i2} - V_{i1})$$

若继续有 $R_4 = R_1$ ，则 $V_o = V_{i2} - V_{i1}$



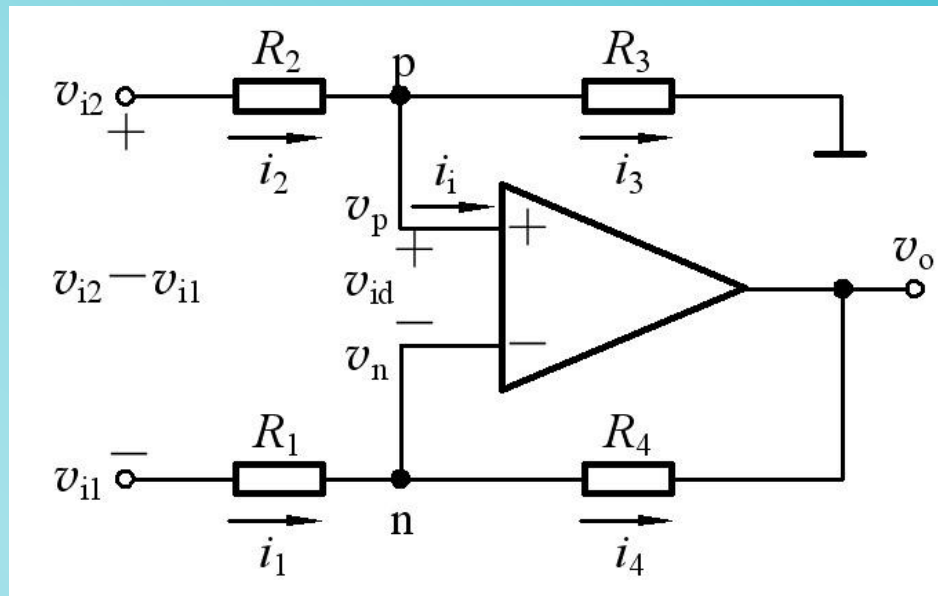
2.4.1 求差电路

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

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

从放大器角度看

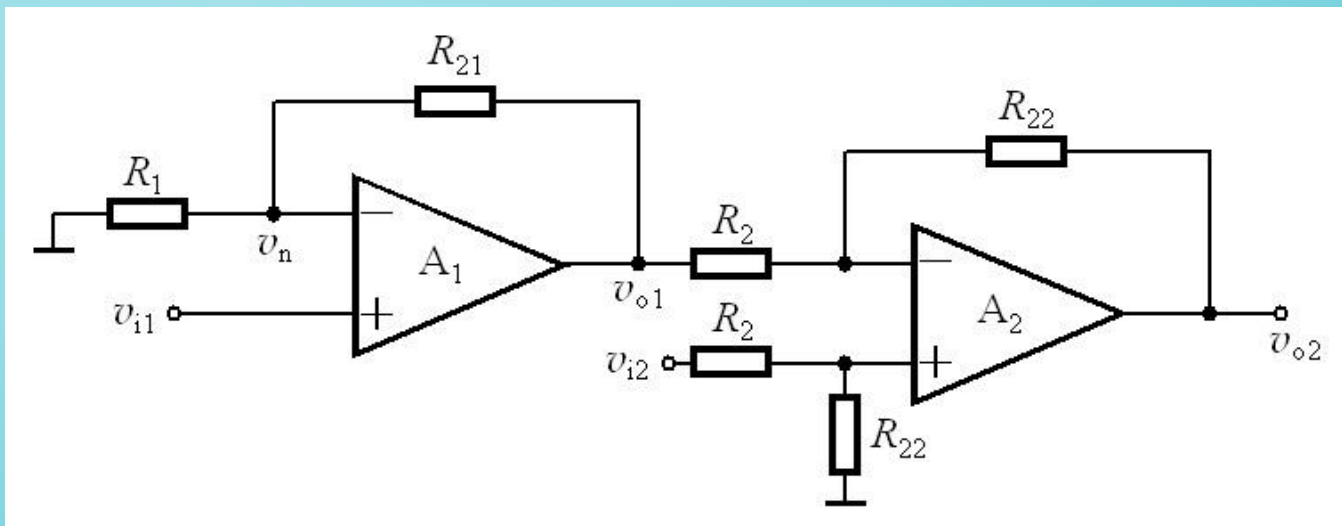
$$\text{增益为 } A_{vd} = \frac{v_o}{v_{i2} - v_{i1}} = \frac{R_4}{R_1}$$



(该电路也称为差分电路或减法电路)

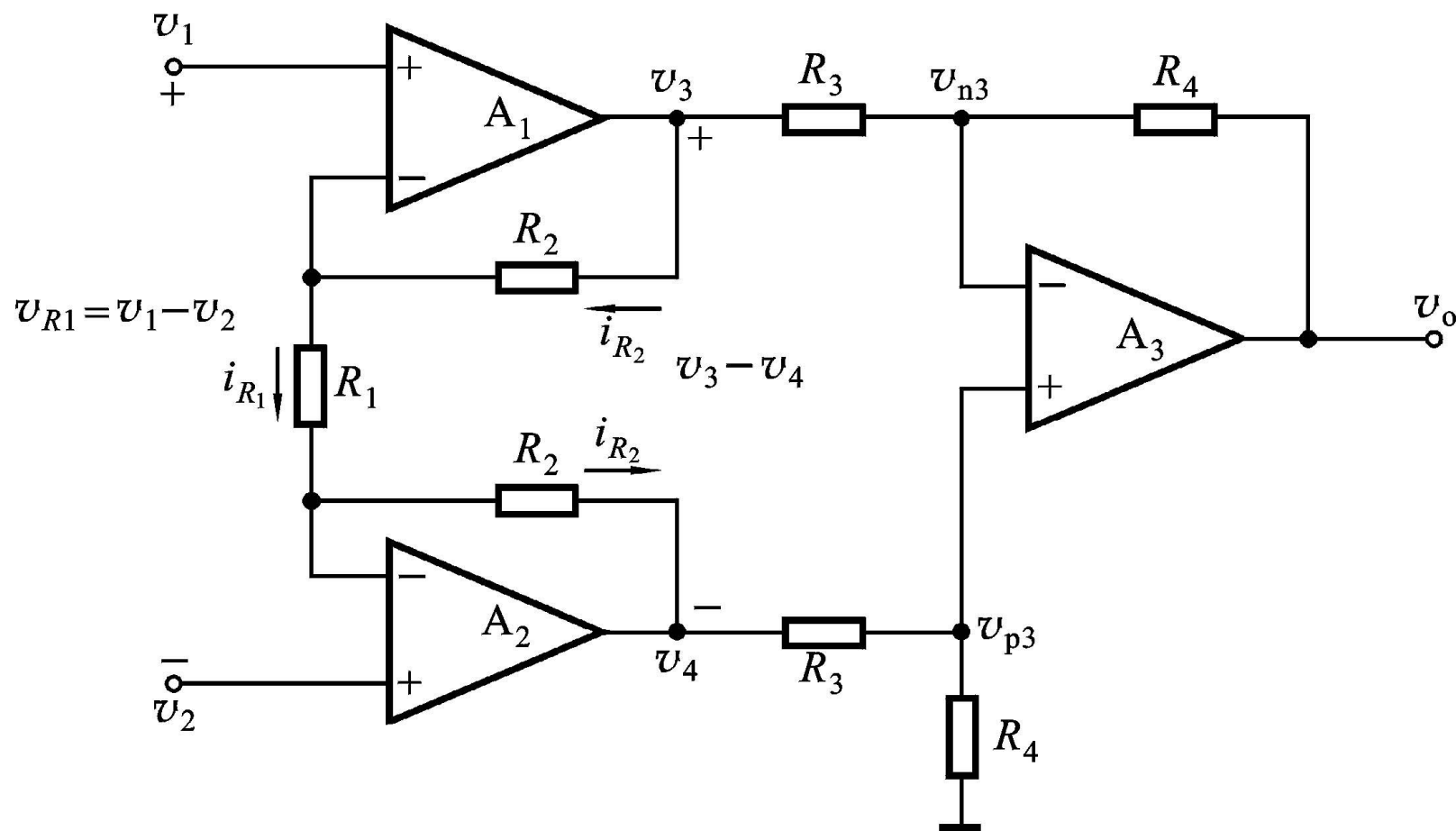
2.4.1 求差电路

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

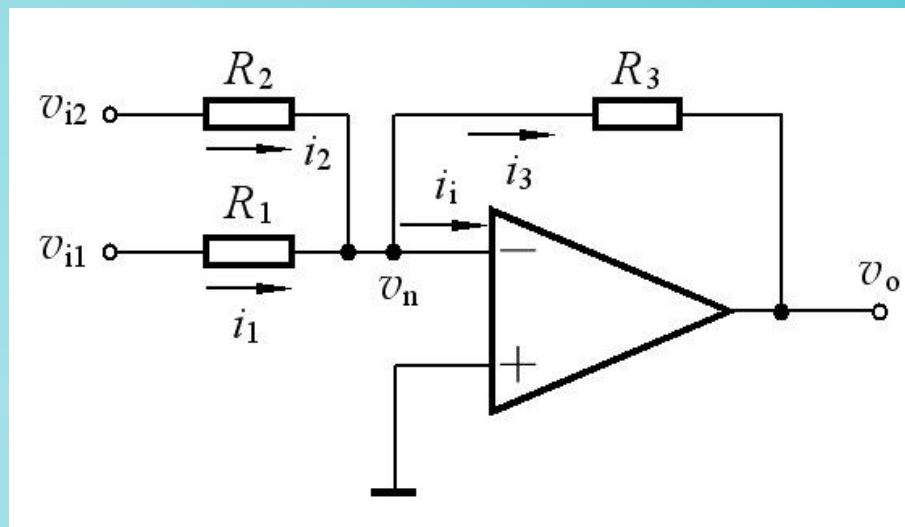
根据虚短、虚断和n点的KCL得：

$$\begin{cases} V_n = V_p = 0 \\ \frac{V_{i1} - V_n}{R_1} + \frac{V_{i2} - V_n}{R_2} = \frac{V_n - V_o}{R_3} \end{cases}$$

$$\Rightarrow -V_o = \frac{R_3}{R_1} V_{i1} + \frac{R_3}{R_2} V_{i2}$$

$$\text{若 } R_1 = R_2 = R_3$$

$$\text{则有 } -V_o = V_{i1} + V_{i2}$$



(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”， $V_N = 0$

根据“虚断”， $i_1 = 0$

得 因此 $i_2 = i_1 = \frac{V_I}{R}$

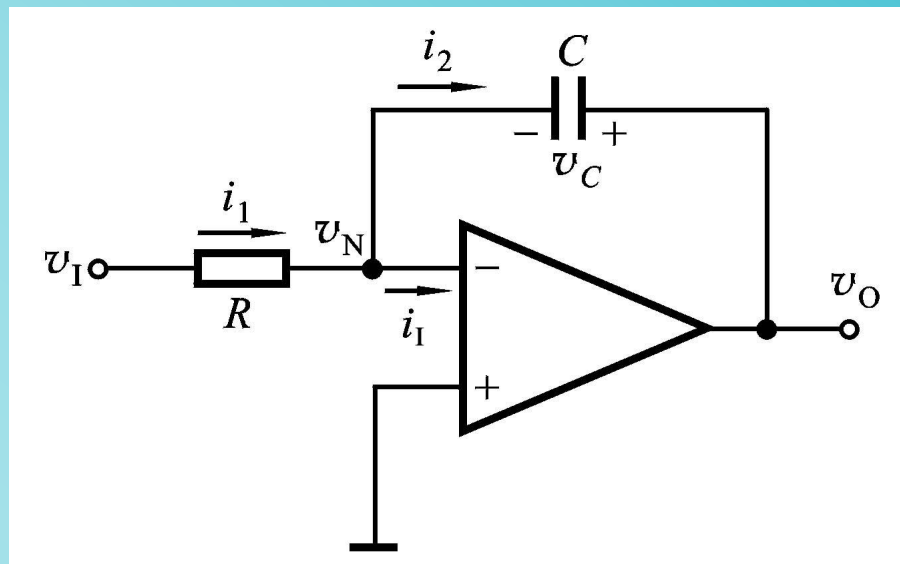
电容器被充电，其充电电流为 i_2

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)



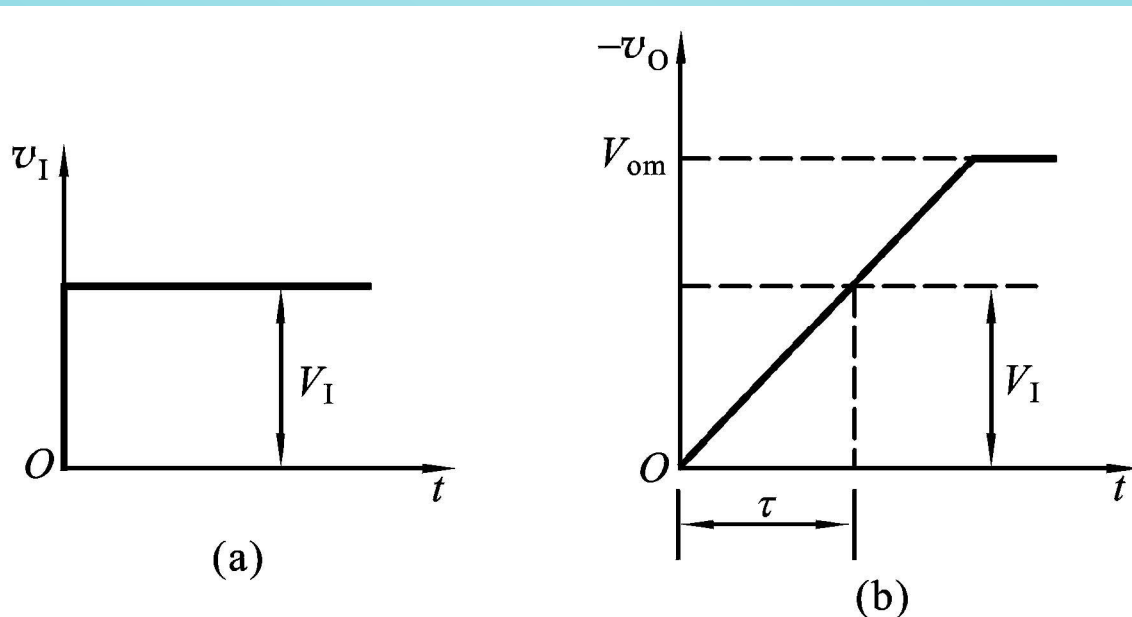
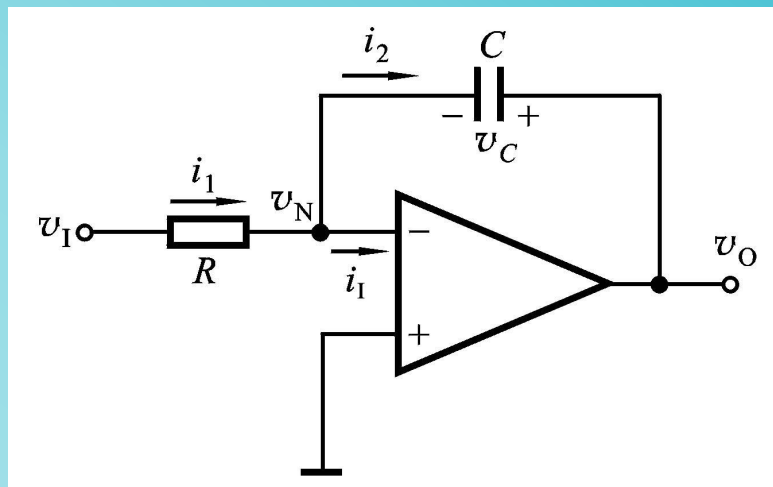
2.4.4 积分电路和微分电路

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

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

