



电子技术基础模拟部分

第1章 绪论

第2章 运算放大器

第3章 二极管及其基本电路

第4章 场效应三极管及其放大电路

第5章 双极结型三极管及其放大电路

第6章 频率响应

第7章 模拟集成电路

第8章 反馈放大电路

第9章 功率放大电路

第10章 信号处理与信号产生电路

第11章 直流稳压电源



第2章 运算放大器

2.1 模拟运算放大器行为级概述

2.2 基于运放的基本线性放大电路

2.3 基于运放的基本模拟运算电路

1941: A vacuum tube op-amp. U.S. Patent 2,401,779. Throughout [World War II](#), Swartzel's design proved opamp's value by being liberally used in the M9 [artillery director](#) designed at Bell Labs. This artillery director worked with the SCR584 [radar](#) system to achieve extraordinary hit rates (near 90%) that would not have been possible otherwise!



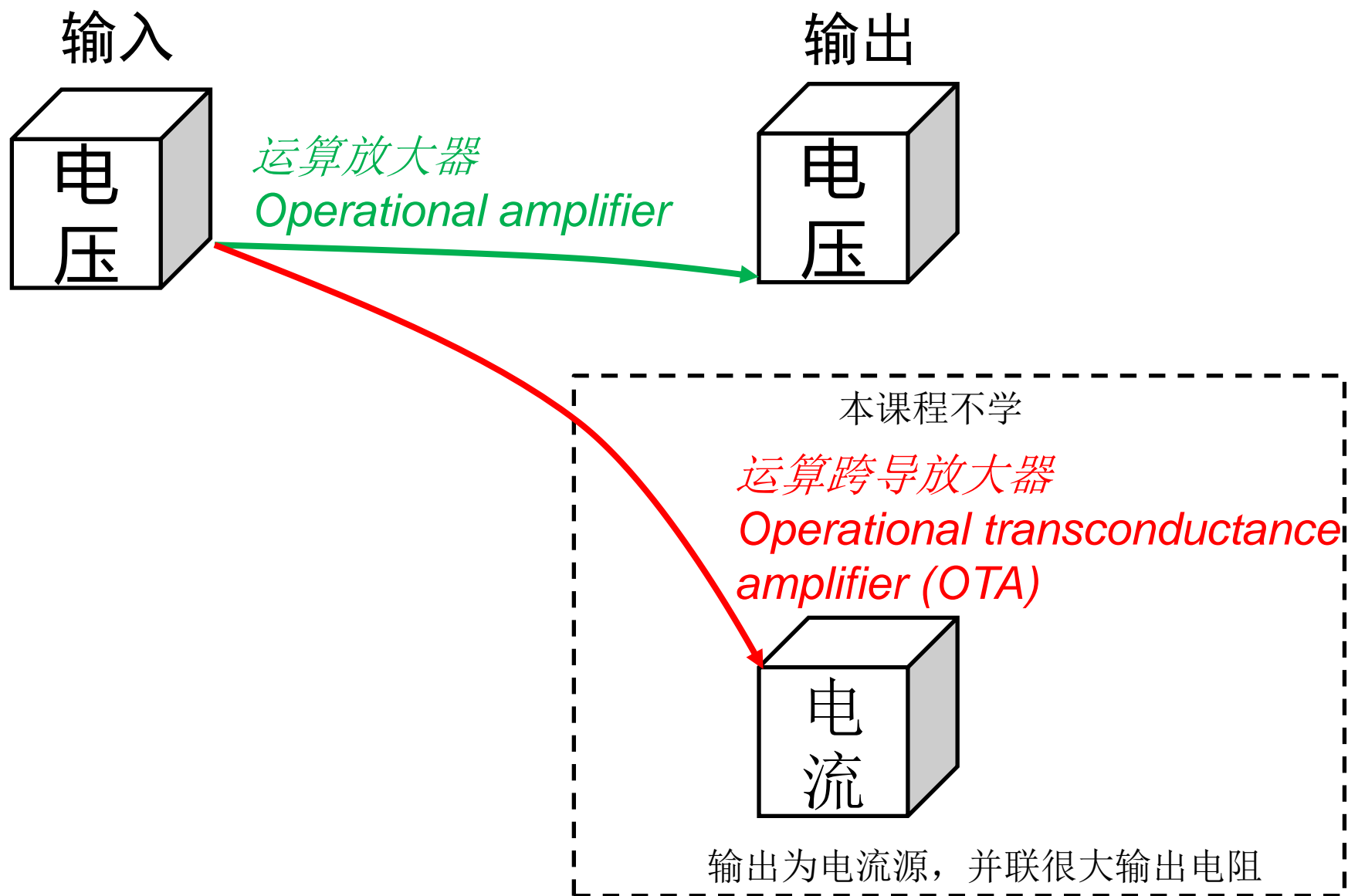
运放在信号的运算、处理、测量及波形产生与变换等方面有广泛的应用，被誉为模拟设计之王！



1963: A monolithic IC op-amp.
1968: Release of the μ A741



第2章 运算放大器





2.1 模拟运算放大器行为级概述

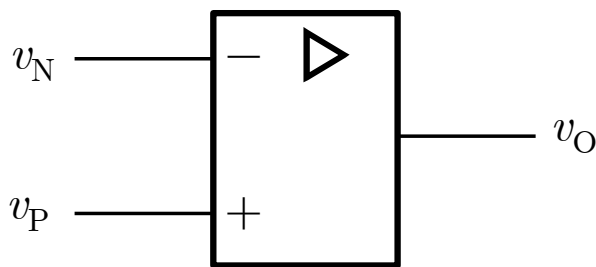
1. 运放的概念:

运算放大器 (operational amplifier, op-amp, opamp), 简称运放, 是一种具有双端差分输入的高增益电压放大器, 一般只有一个输出端口, 特殊时会做差分输出。

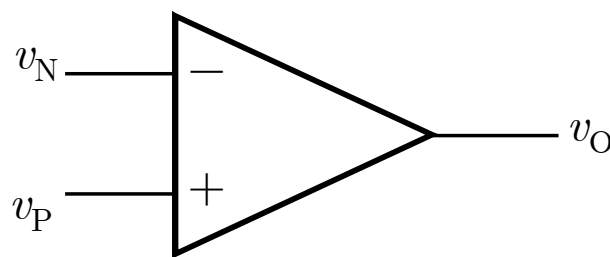
$$v_O = A_{OL} \times (v_P - v_N)$$

v_O : 输出信号; A_{OL} : 运放 (开环) 增益

v_P : 正相端口输入信号; v_N : 反相端口输入信号



(a)



(b)

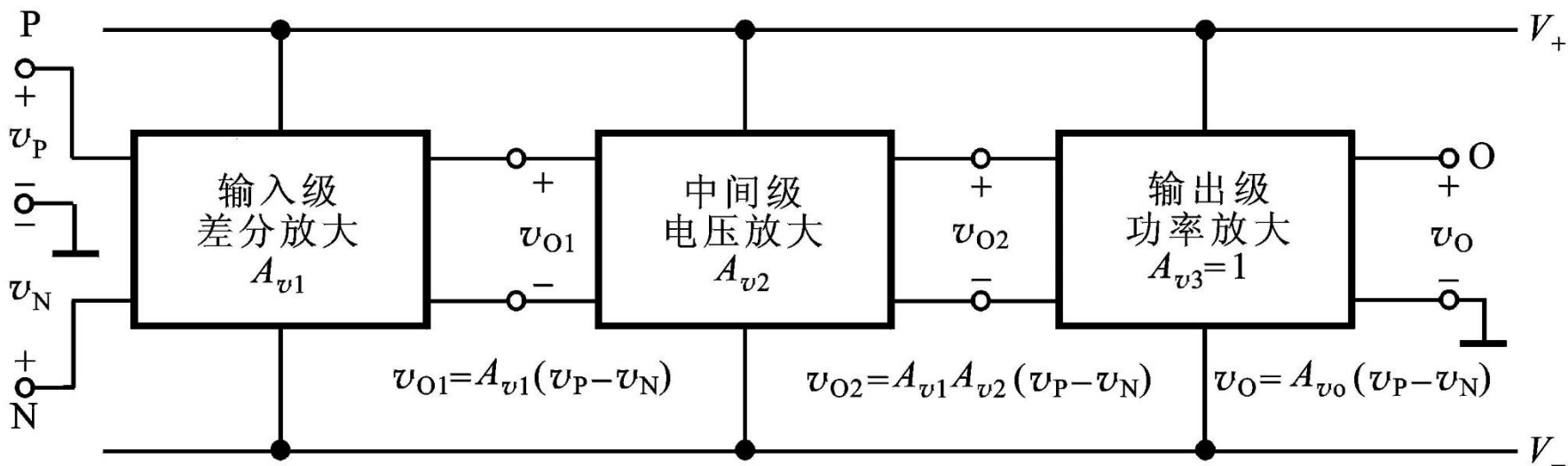
运算放大器的电路符号

(a) 国家标准规定的符号 (b) 国内外常用符号



2.1 模拟运算放大器行为级概述

2. 集成电路运算放大器的内部组成单元



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。



3. 运放的电路模型

通常：

- ## ■ 开环电压增益

A_{ν_0} 的 $\geq 10^5$ (很高)

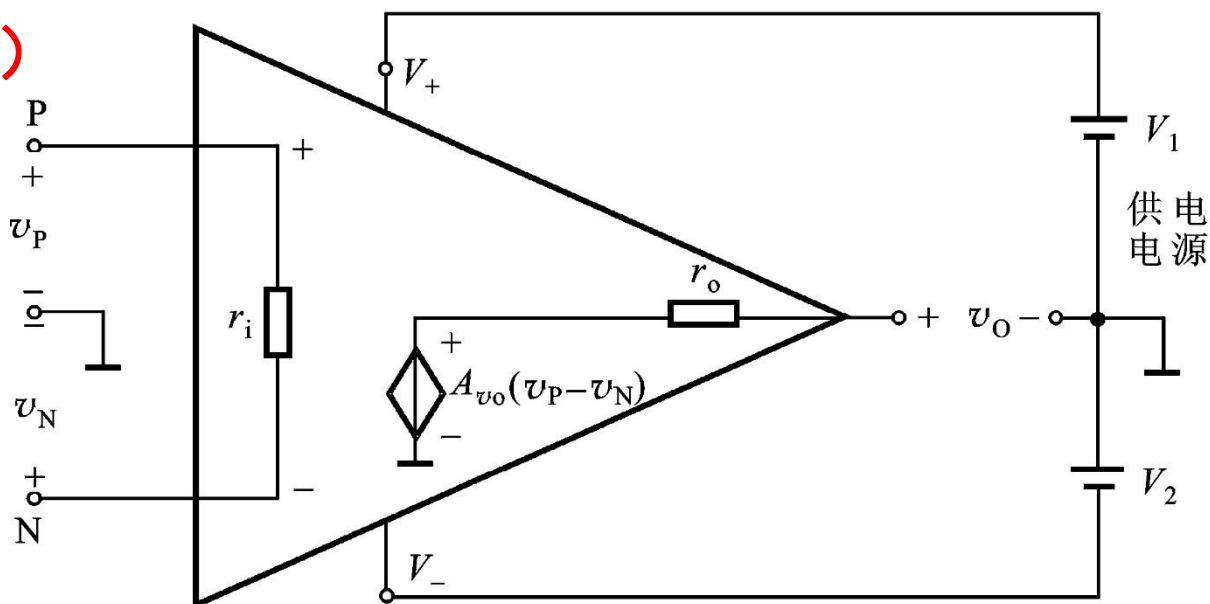
- ## ■ 输入电阻

$$r_i \geq 10^6 \Omega \quad (\text{很大})$$

- ## ■ 输出电阻

$r_0 \leq 100\Omega$ (很小)

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。



$$\mathbf{v}_0 = A_{v_0}(\mathbf{v}_P - \mathbf{v}_N) \quad (V_- < v_0 < V_+)$$

注意输入输出的相位关系



2.1 模拟运算放大器行为级概述

当 $A_{vo}(v_P - v_N) \geq V_+$ 时

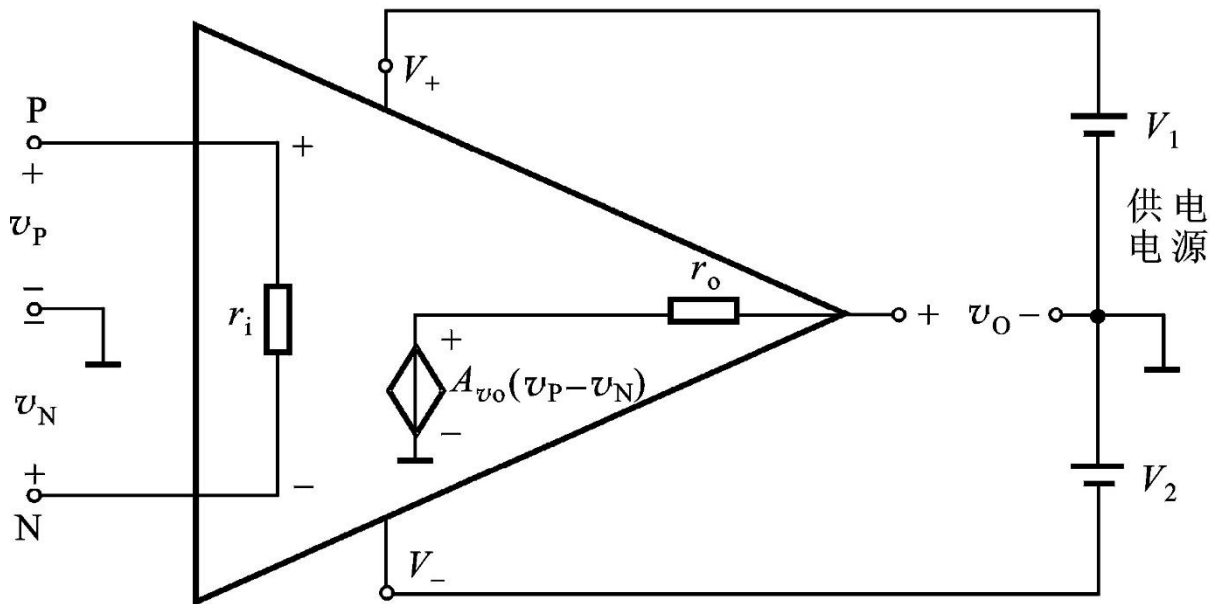
$$v_O = V_+$$

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 模拟运算放大器行为级概述

当 $A_{vo}(v_P - v_N) \geq V_+$ 时

$$v_O = V_+$$

当 $A_{vo}(v_P - v_N) \leq V_-$ 时

$$v_O = V_-$$

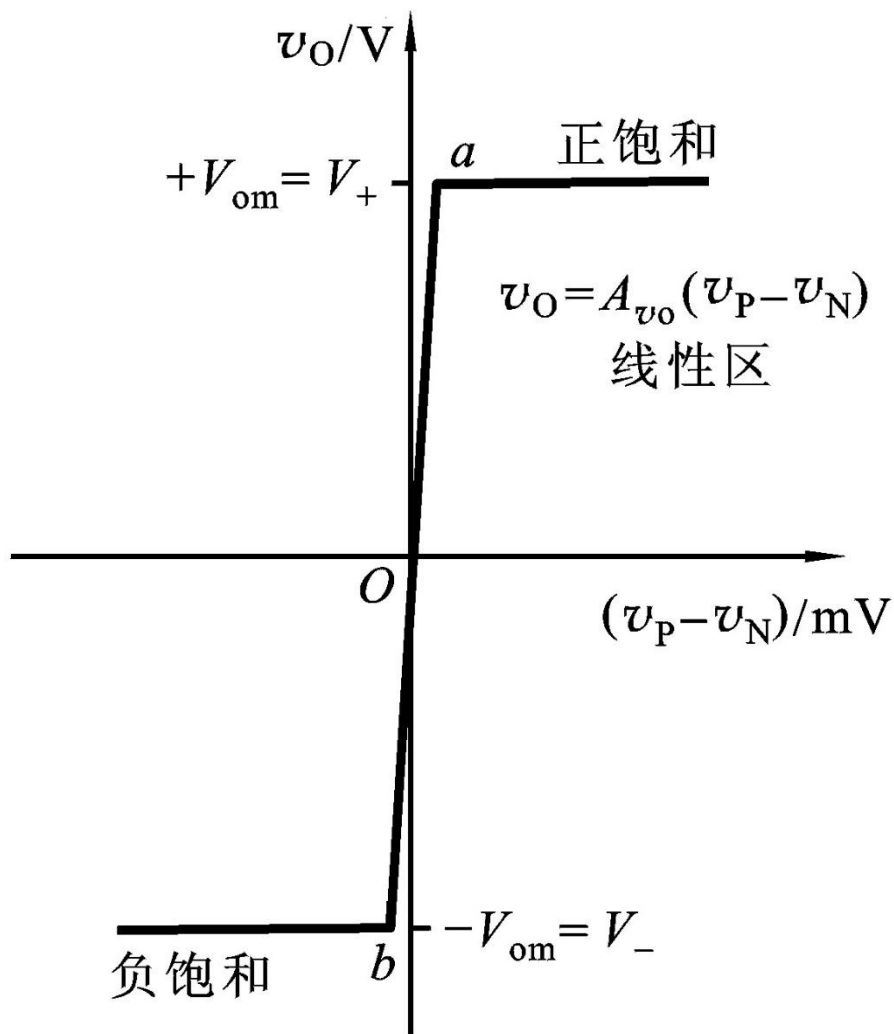
电压传输特性

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

线性范围内

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

A_{vo} —— 斜率





2.1 模拟运算放大器行为级概述

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

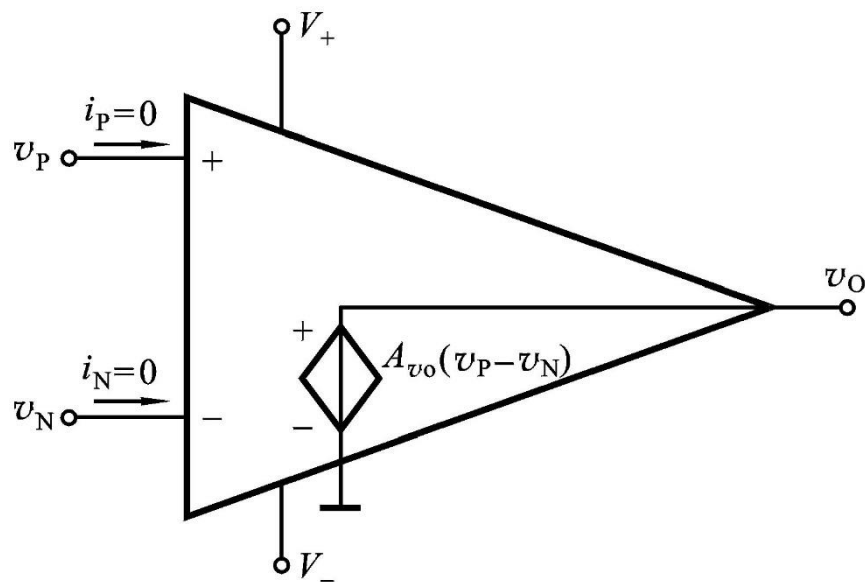
3. 若 $V_- < v_o < V_+$

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, $r_o \approx 0$



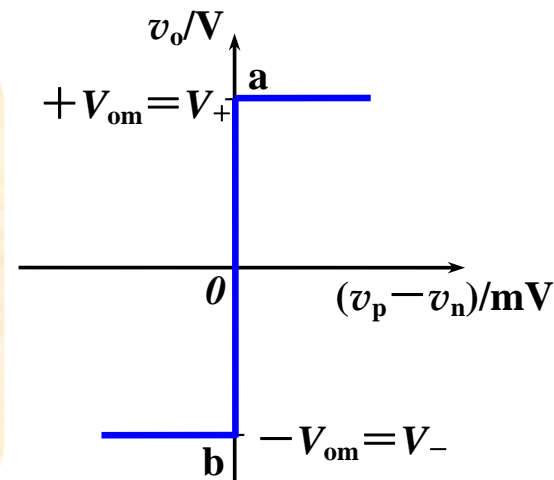
理想:

$$r_i \approx \infty$$

$$r_o \approx 0$$

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

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





2.2 基于运放的基本线性放大电路

2.2.1 同相放大电路

2.2.2 反相放大电路

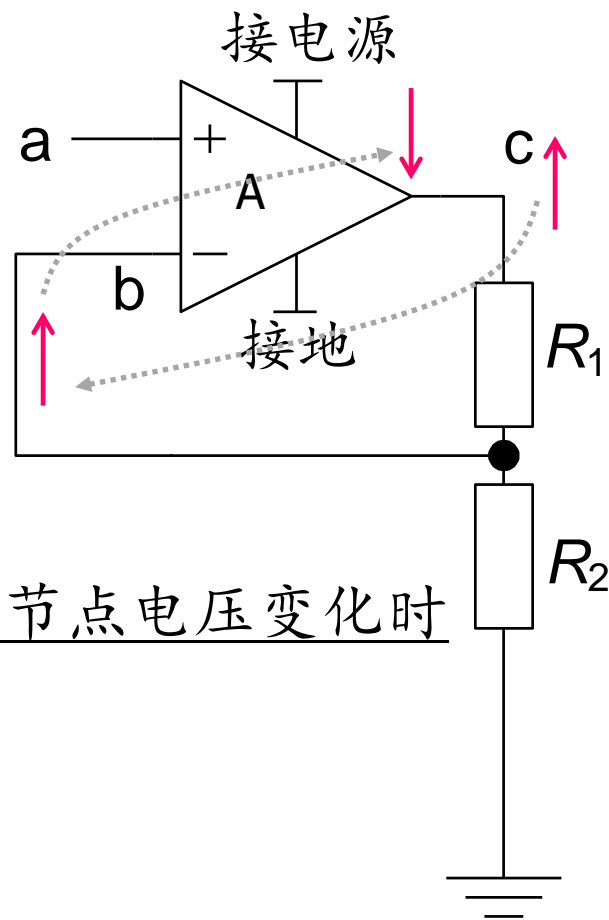


2.2.1 同相放大电路

1. 同相放大器

1.1 电路结构

- 运放的增益为 A
- 输入信号在运放正端，记为 a
- 运放负端输入信号记为 b
- 运放输出 c 通过 R_1 和 R_2 分压后产生 b
- **电路处于负反馈状态：**（当环路中任意节点电压变化时环路会抑制这种变化！）





2.2.1 同相放大电路

1. 同相放大器

1.2 电路分析

- 基于运放的定义有：

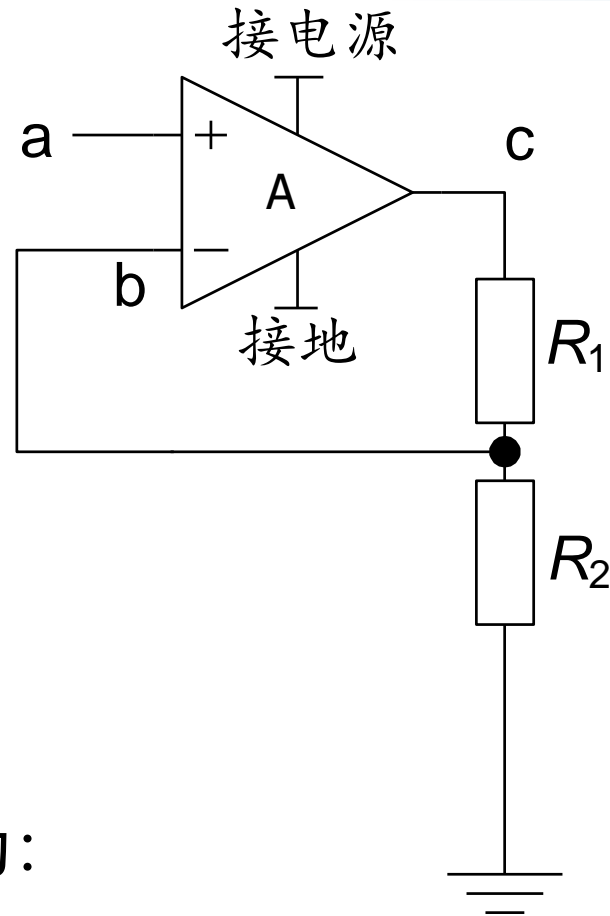
$$c = A(a - b)$$

- 由于b是由c分压得到的，所以：

$$b = c \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

- 这样可以得到c和输入信号a的关系为：

$$c = A\left(a - c \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) = a \frac{A}{1 + A \frac{R_2}{R_1 + R_2}} = a \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{R_2}{R_1 + R_2}}$$





2.2.1 同相放大电路

1. 同相放大器

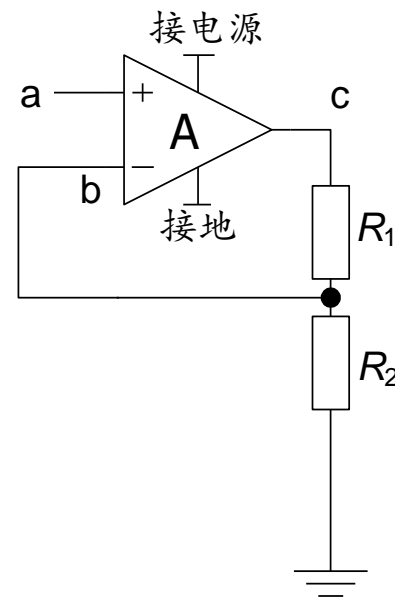
1.2 电路分析 (续)

- c 和输入信号 a 的关系:

$$c = a \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{R_2}{R_1 + R_2}}$$

- 当 $A \rightarrow \infty$ 时 $c = a \frac{1}{0 + \frac{R_2}{R_1 + R_2}} = a \frac{R_1 + R_2}{R_2}$

- 结论1:** 当运放增益无穷大时, 同相放大器的增益由反馈网络决定! 而且, 若反馈网络电阻物理类型相同, 这个增益可以获得较好的抗环境变化能力!





2.2.1 同相放大电路

1. 同相放大器

1.2 电路分析 (续)

- c 和输入信号 a 的关系:

$$c = a \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{R_2}{R_1 + R_2}}$$

- 若 A 并非无穷大呢?

- 如果假设 $R_1=R_2$ 时: $c = a / (1 / A + 0.5)$

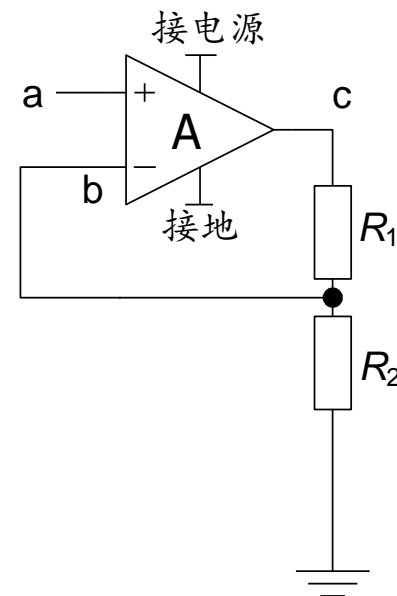
✓ 当 $A=10000$ 时 $c=a/(10^{-4}+0.5)=1.9996000799840031993601279744051*a$

✓ 当 $A=1000$ 时 $c=a/(10^{-3}+0.5)=1.9960079840319361277445109780439*a$

✓ 当 $A=100$ 时 $c=a/(10^{-2}+0.5)=1.960784313725490196078431372549 *a$

✓ 当 $A=10$ 时 $c=a/(10^{-1}+0.5)=1.66666666666666666666666666666667*a$

- 结论2:** 当运放的增益足够大时, 同相放大器增益对运放增益不敏感, 仅有电阻分压网络所决定, 增益误差小! 如何选择运放增益?





2.2.1 同相放大电路

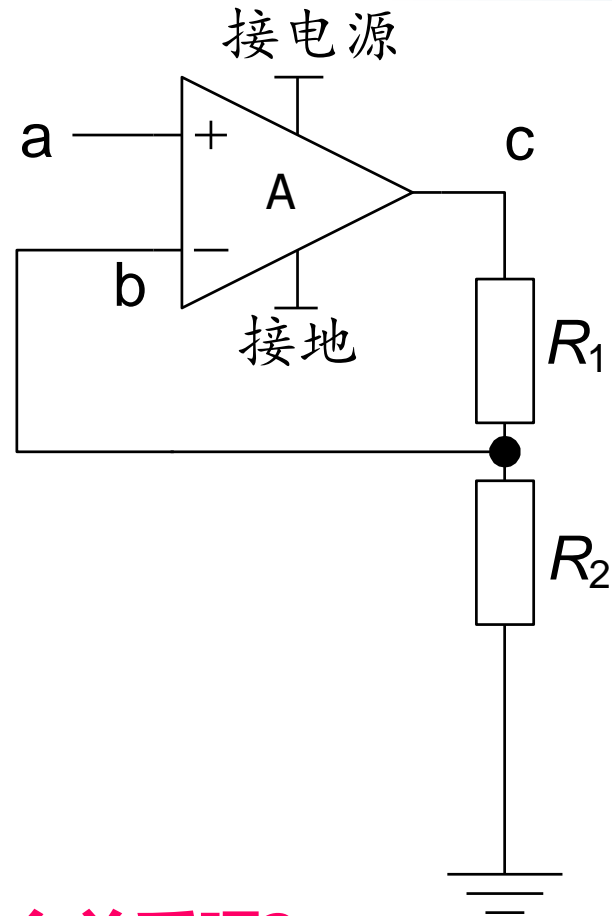
- 由于b是由c分压得到：

$$b = c \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

- c和输入信号a的关系为：

$$c = a \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{R_2}{R_1 + R_2}}$$

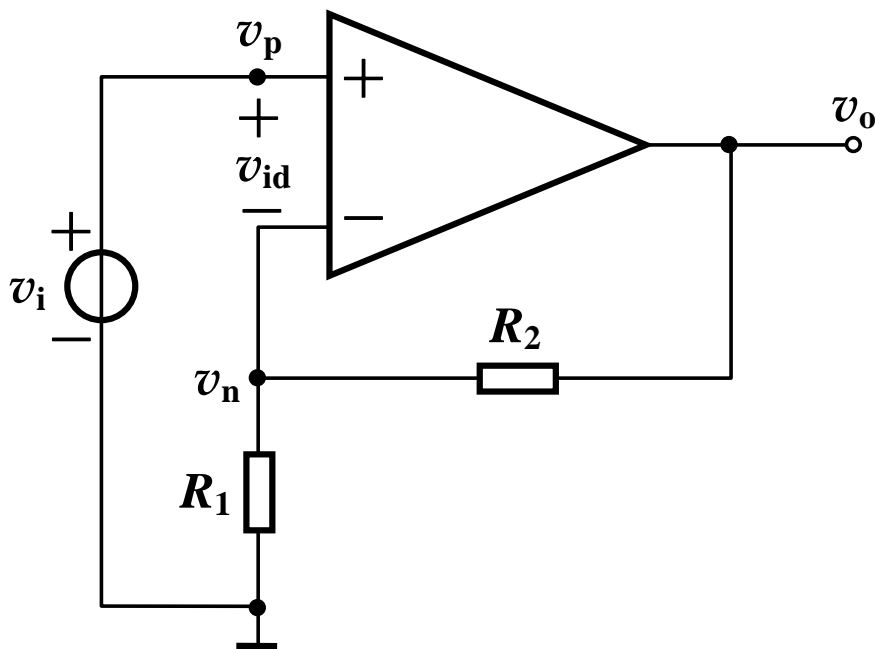
- 当 $A \rightarrow \infty$ 或者非常大时，a和b会有什么关系呢？
a和b相同既——虚短，a到b就没有电流——虚断



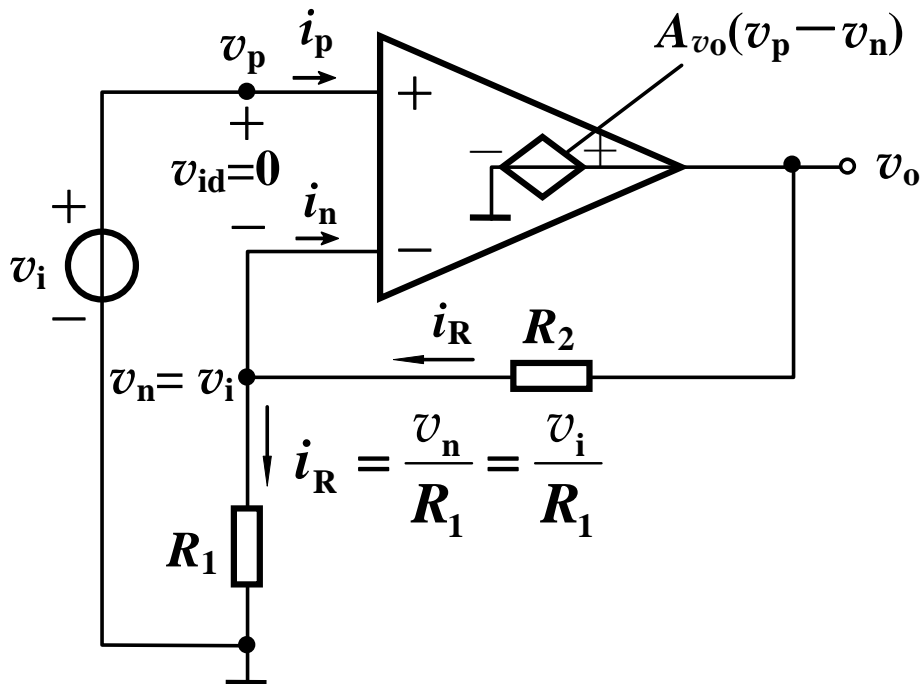


2.2.1 同相放大电路

虚短、虚断



(a) 电路图



(b) 小信号电路模型

- 当放大器的增益非常大，甚至趋近于无穷时，且当运放处于负反馈状态时，由于放大器输出电压为有限值，不论交、直流，数学上会有 $v_p \approx v_n$ ， $i_p = -i_n = 0$ ，既所谓“虚短”和“虚断”！——是模拟运放中最为重要的一个概念之一！



2.2.1 同相放大电路

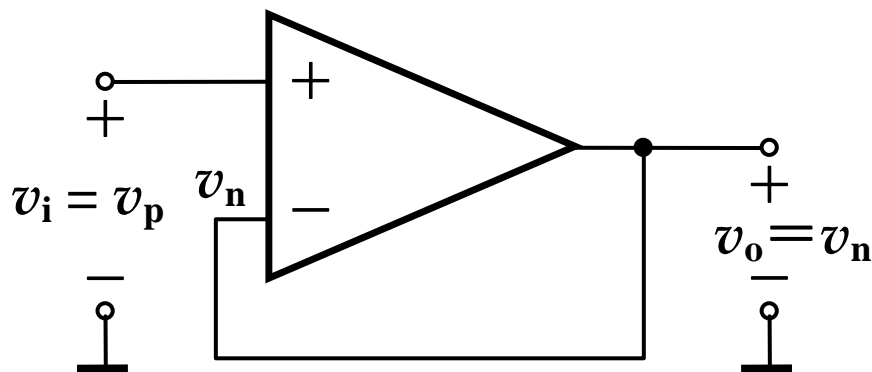
2. 电压跟随器

根据虚短和虚断有

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

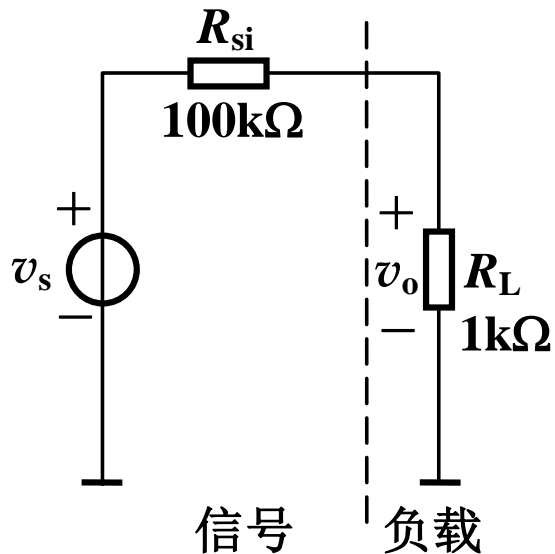
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \approx 1$$

(可作为公式直接使用)



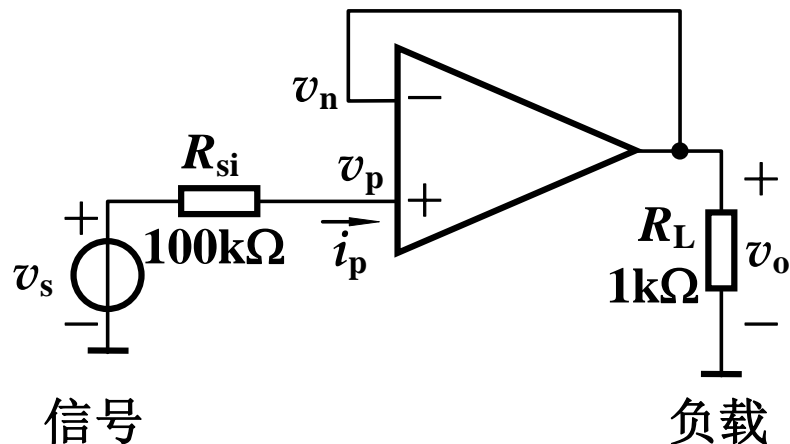


电压跟随器的作用



无电压跟随器时
负载上得到的电压

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



有电压跟随器时
根据虚短和虚断

$$\begin{aligned} i_p &\approx 0, \quad v_p = v_s \\ v_o = v_n &\approx v_p = v_s \end{aligned}$$



2.2.1 同相放大电路

3. 几项技术指标的近似计算

(1) 电压增益 A_v

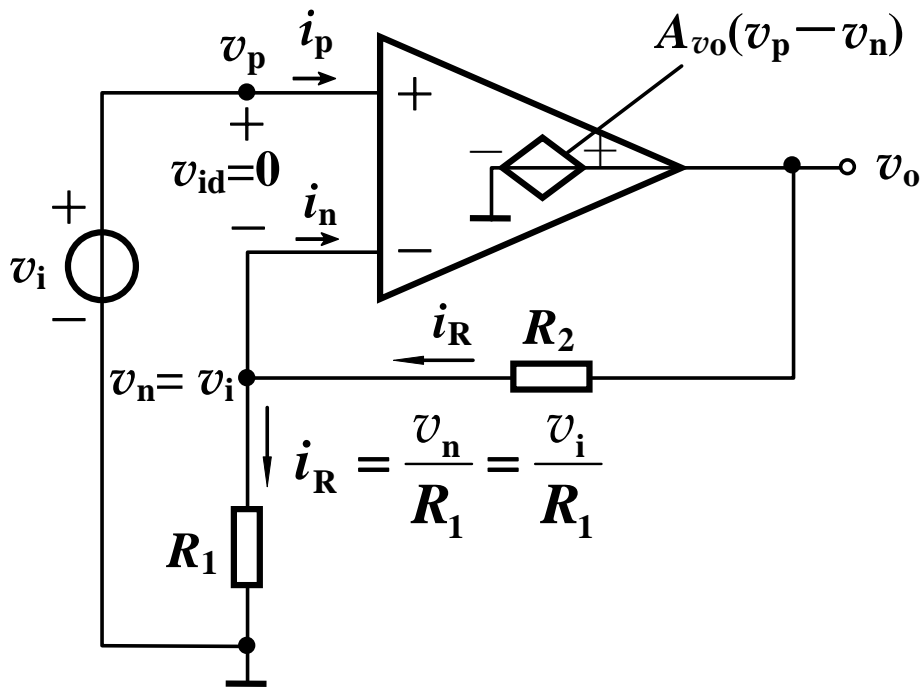
根据**虚短**和**虚断**的概念有

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

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)



3. 几项技术指标的近似计算

(2) 输入电阻 R_i

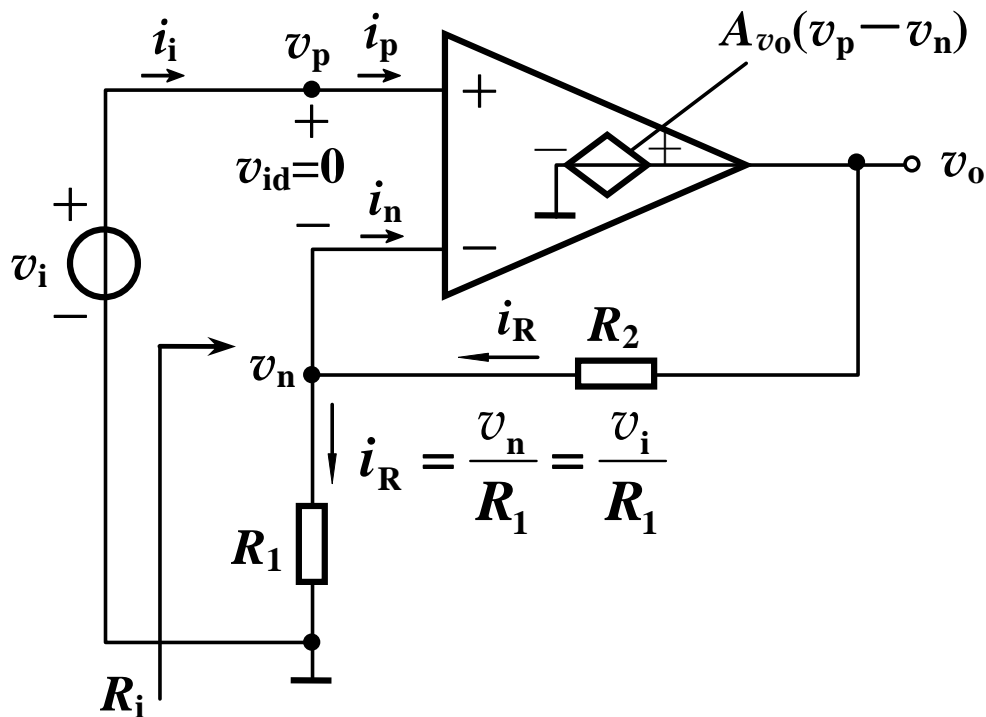
输入电阻定义

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

根据虚短和虚断有

$$v_i = v_p, \quad \dot{i}_i = \dot{i}_p \approx 0$$

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



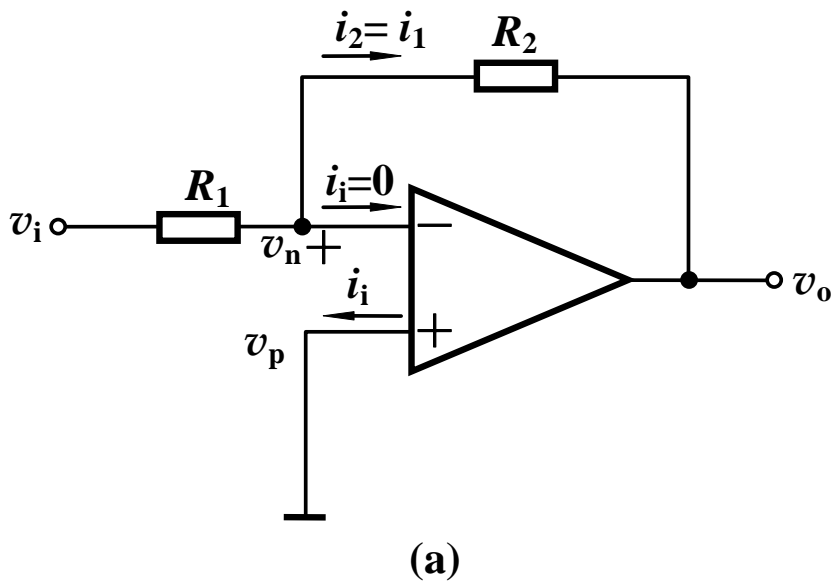
(3) 输出电阻 R_o

$R_0 \rightarrow 0$ (如何理解?)

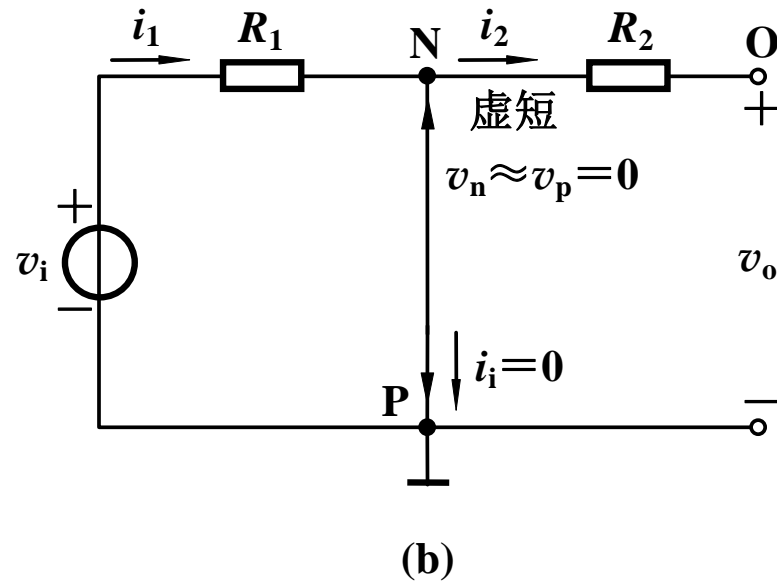


2.2.2 反相放大电路

1. 基本电路



(a) 电路图



(b) 由虚短引出虚地 $v_n \approx 0$



2.2.2 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

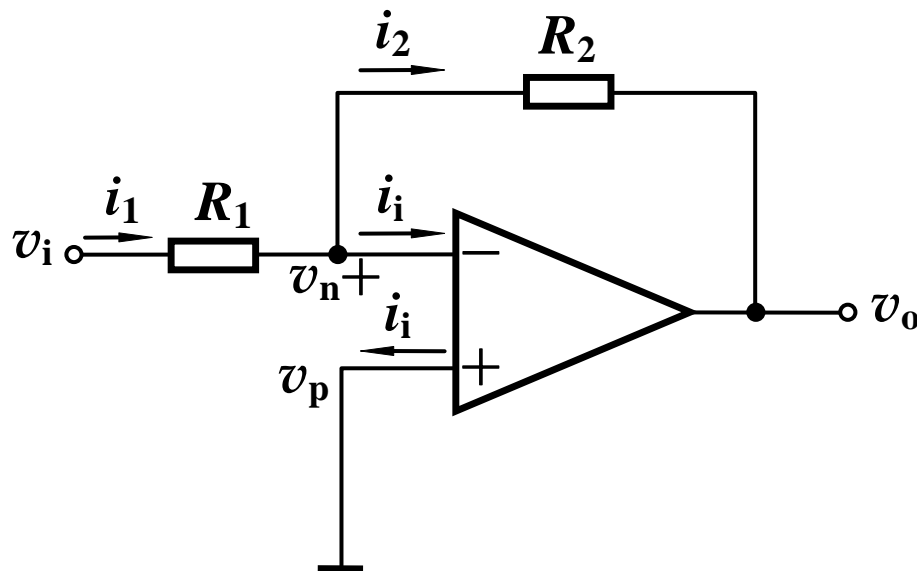
$$v_n \approx v_p = 0, \quad i_i = 0$$

所以 $i_1 = i_2$

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)





2.2.2 反相放大电路

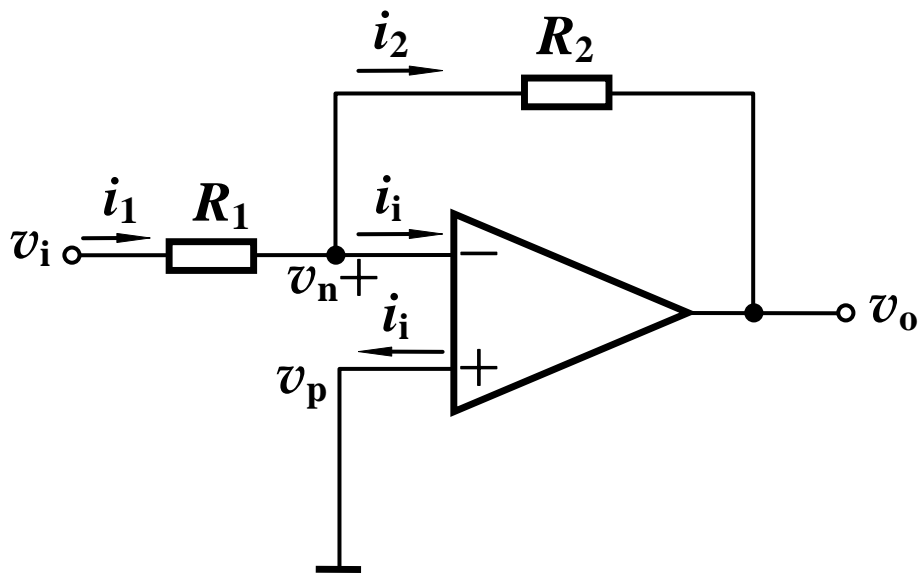
2. 几项技术指标的近似计算

(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

$$R_o \rightarrow 0$$



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

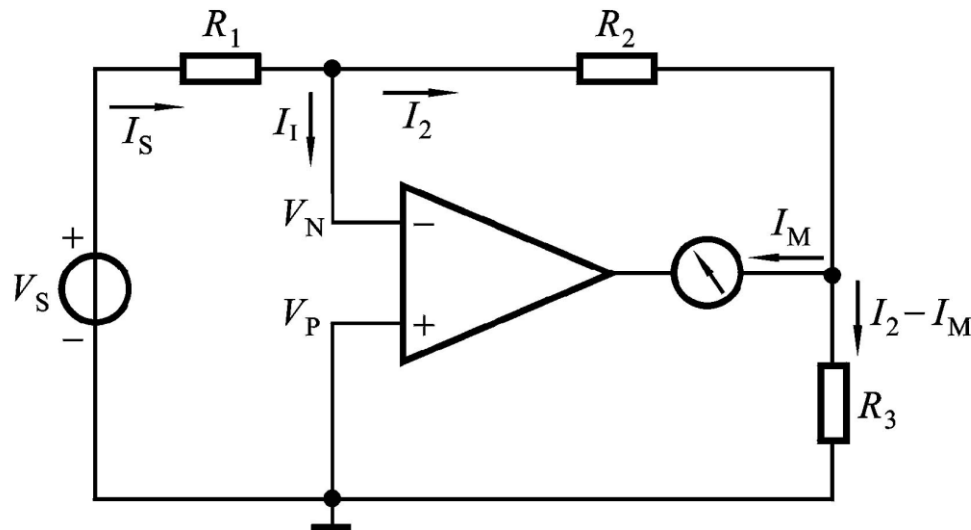


例 直流毫伏表电路

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 $I_M = ?$



解 (1) 根据虚短和虚断有

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

所以 $I_2 = I_s = V_s / R_1$

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

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

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

(指针偏转角度与 I_m 是线性关系)

(2) 代入数据计算即可得为 $I_M = 0.1\text{V} / 1\text{k} = 100 \mu\text{A}$



2.3 基于运放的基本模拟运算电路

2.3.1 求差电路

2.3.2 仪器放大器

2.3.3 求和电路

2.3.4 积分电路和微分电路

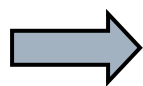


2.3.1 求差电路

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：

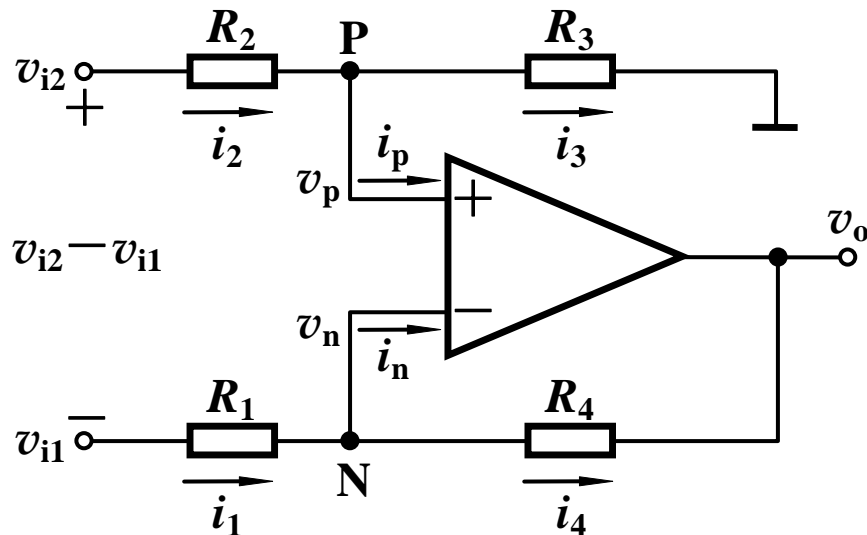
$$\begin{cases} v_n = v_p \\ \frac{v_{i1} - v_n}{R_1} = \frac{v_n - v_o}{R_4} \\ \frac{v_{i2} - v_p}{R_2} = \frac{v_p - 0}{R_3} \end{cases}$$



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

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





2.3.1 求差电路

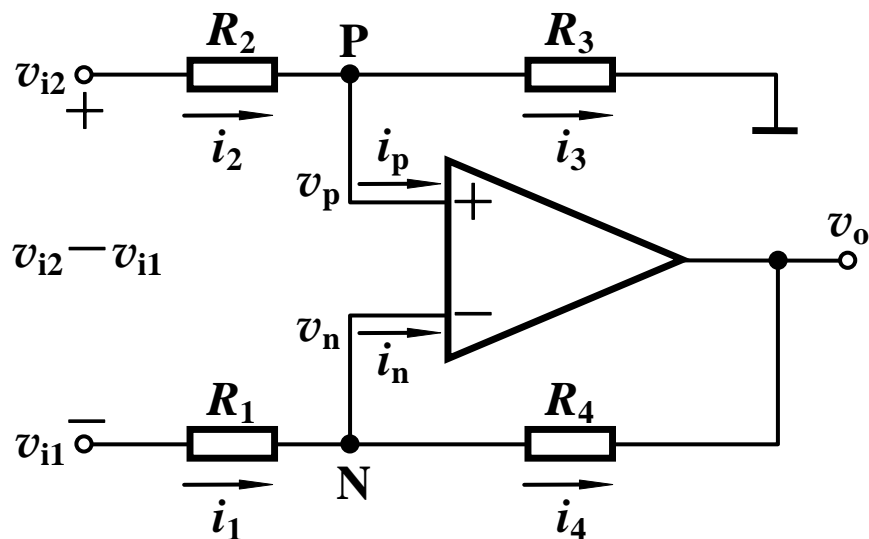
当 $\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$ 时

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

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)





2.3.1 求差电路

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

求差模输入电阻，首先差模电压为： $v_{id} = v_{i2} - v_{i1}$

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

$$v_{id} = i_{id}(R_2 + R_3) - [v_o - i_{id}(R_1 + R_4)]$$

$$v_p = i_{id}R_3$$

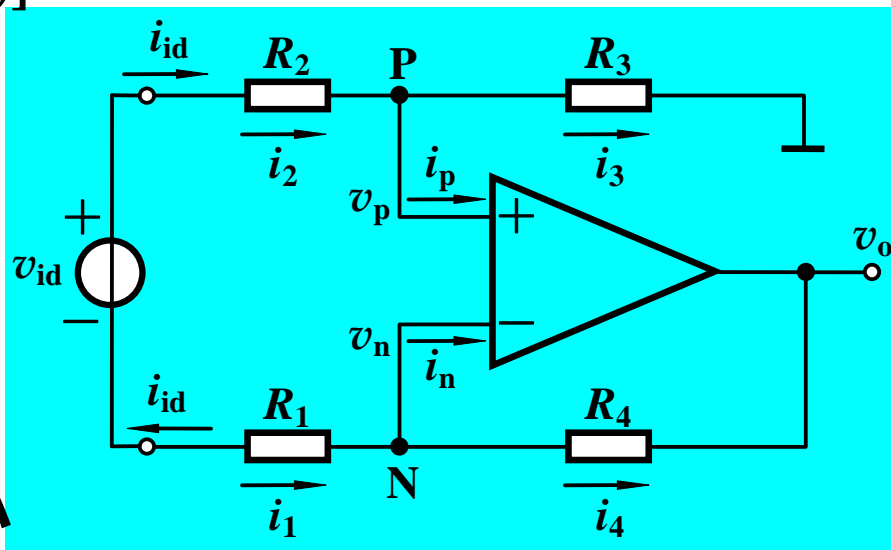
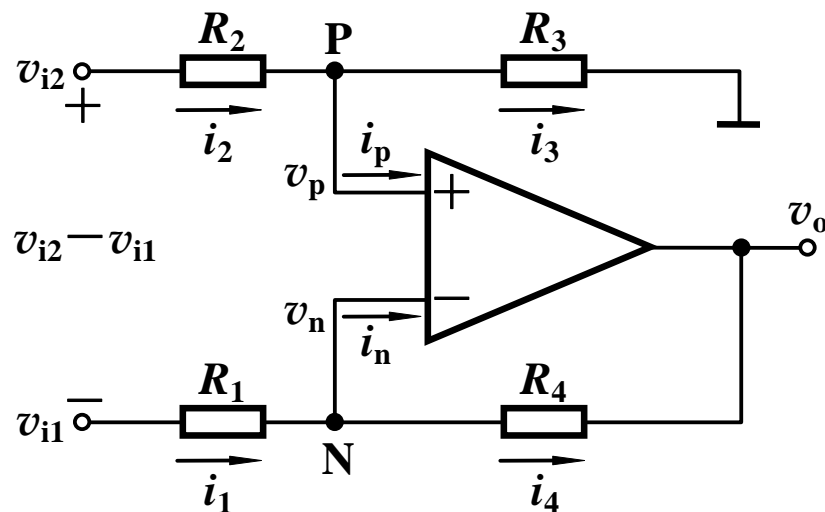
$$v_n = v_o - i_{id}R_4$$

$$v_p = v_n$$



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

输入电阻较小

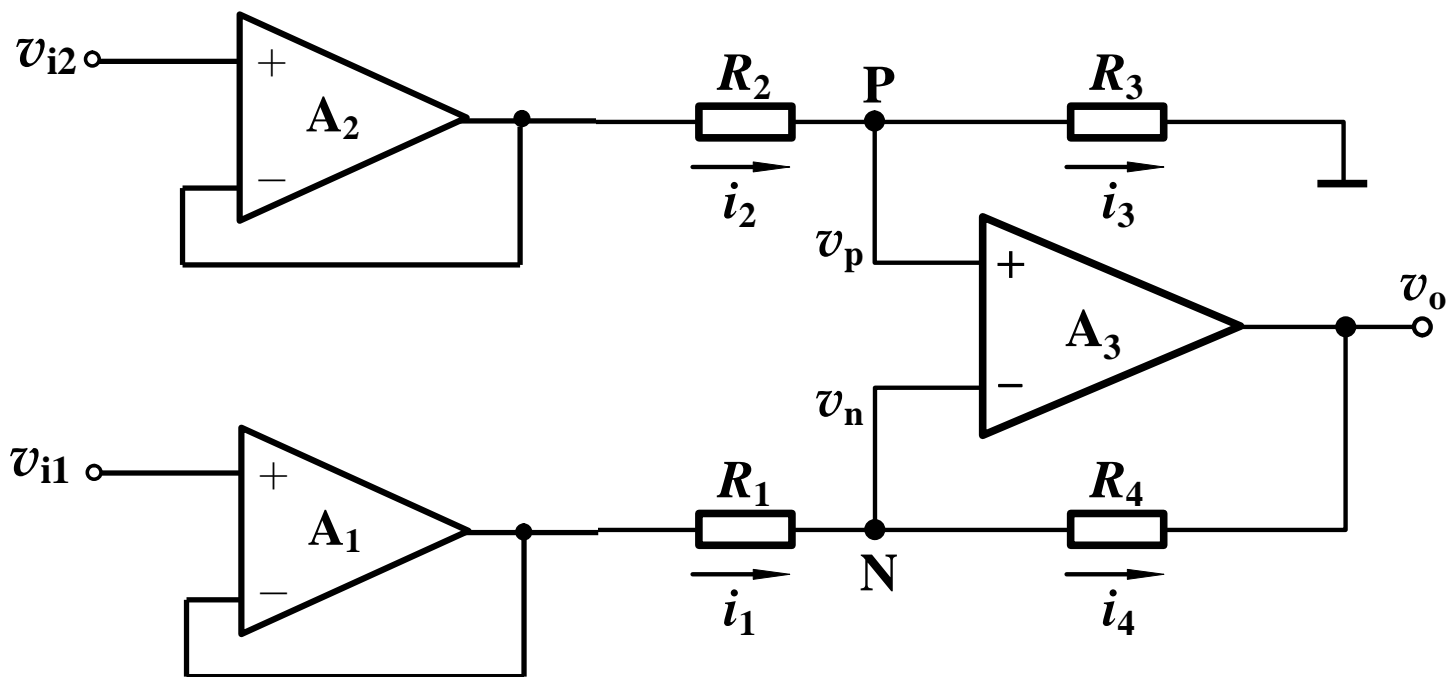




2.3.1 求差电路

一种高输入电阻的差分电路

如何提高输入电阻？





2.3 基于运放的基本模拟运算电路

2.3.1 求差电路

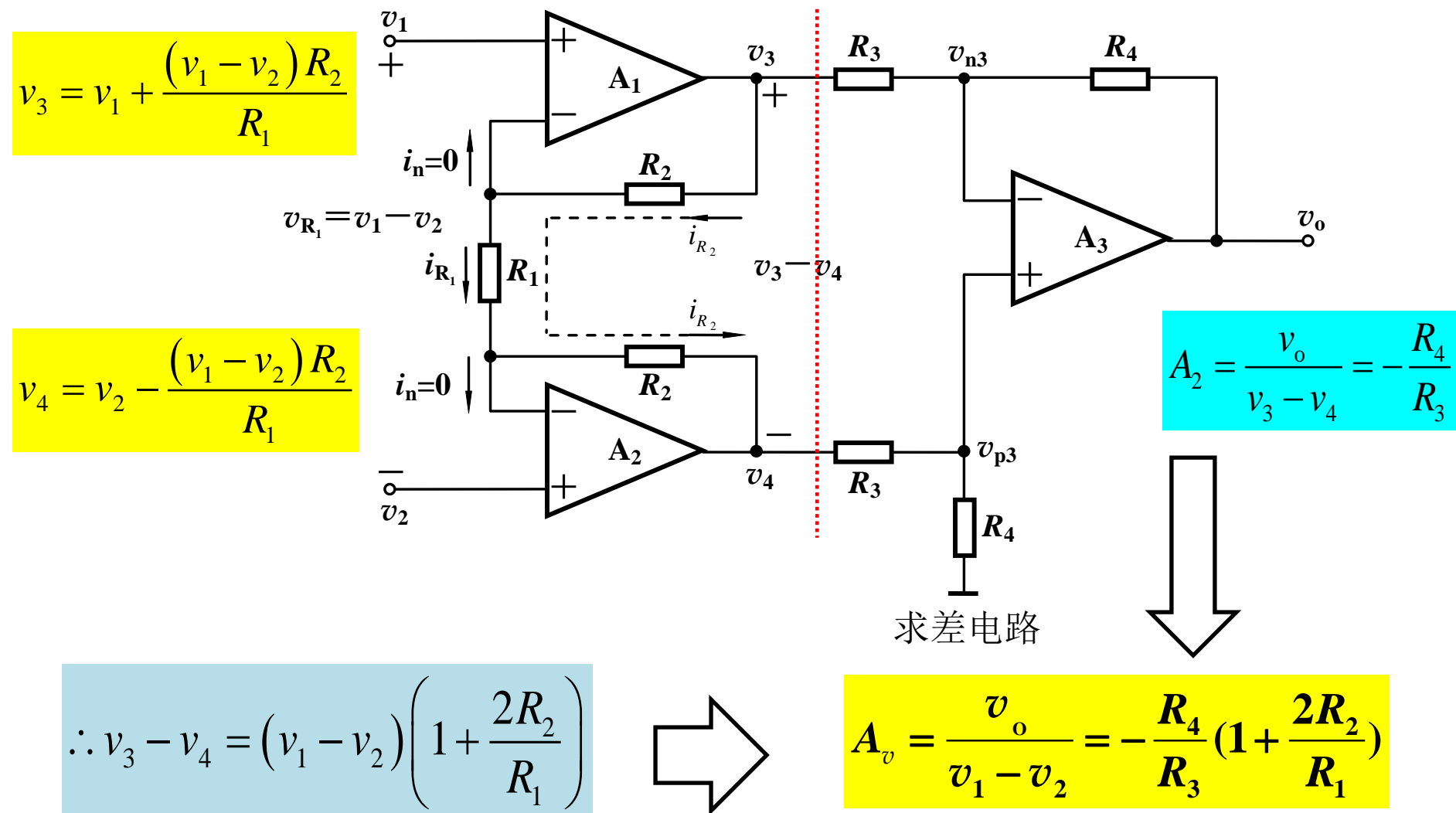
2.3.2 仪器放大器

2.3.3 求和电路

2.3.4 积分电路和微分电路



2.3.2 仪器放大器





2.3 基于运放的基本模拟运算电路

2.3.1 求差电路

2.3.2 仪器放大器

2.3.3 求和电路

2.3.4 积分电路和微分电路

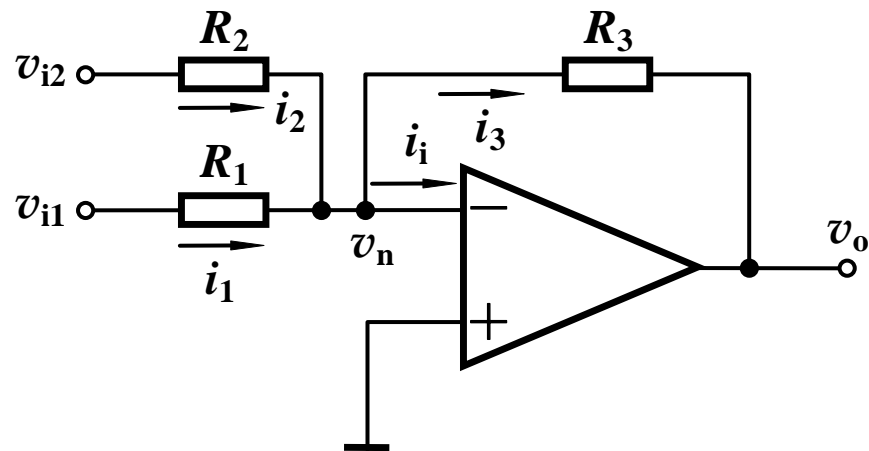


2.3.3 求和电路

(该电路也称为加法电路)

根据**虚短**、**虚断**和N点的KCL得:

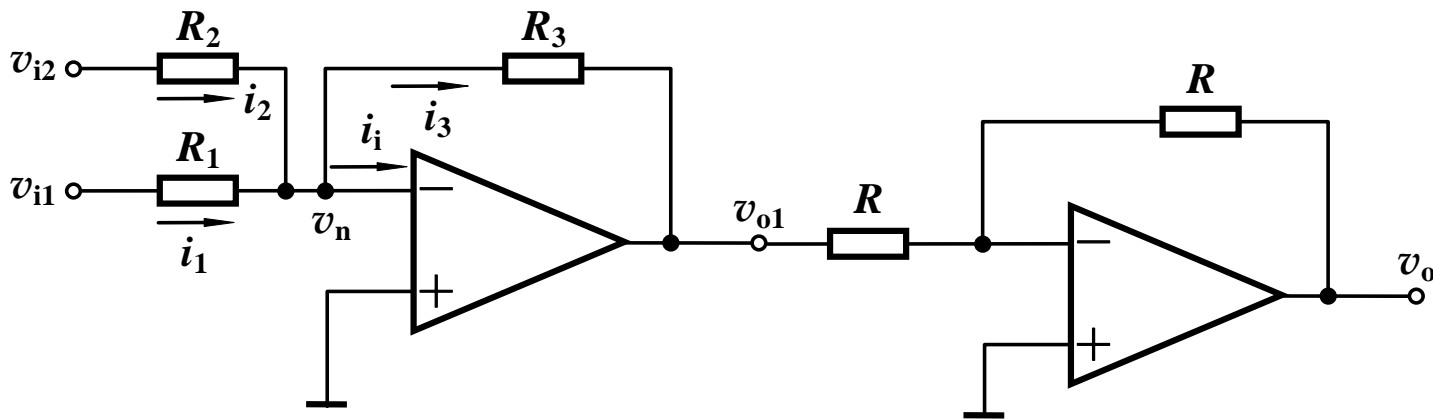
$$\begin{cases} v_n = v_p = 0 \\ \frac{v_{i1} - v_n}{R_1} + \frac{v_{i2} - v_n}{R_2} = \frac{v_n - v_o}{R_3} \end{cases}$$



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



多个输入呢?



2.3 基于运放的基本模拟运算电路

2.3.1 求差电路

2.3.2 仪器放大器

2.3.3 求和电路

2.3.4 积分电路和微分电路



2.3.4 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 $i_i = 0$

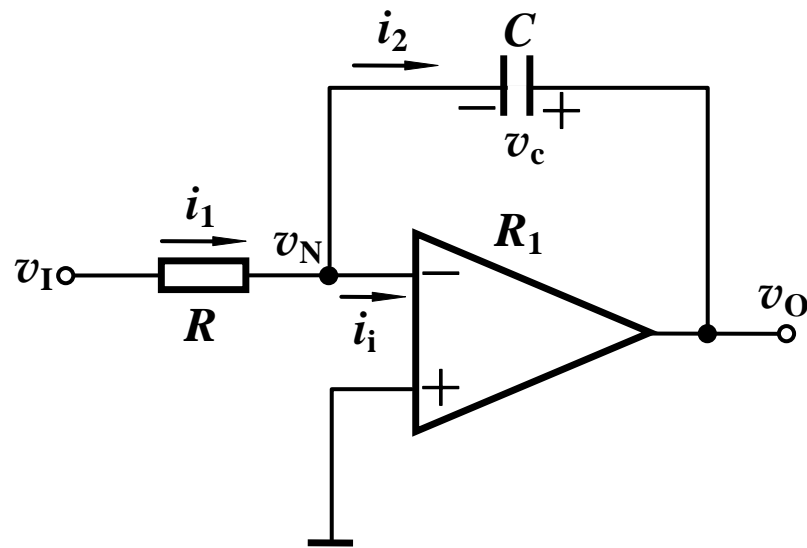
因此
$$i_2 = i_1 = \frac{v_i}{R}$$

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)





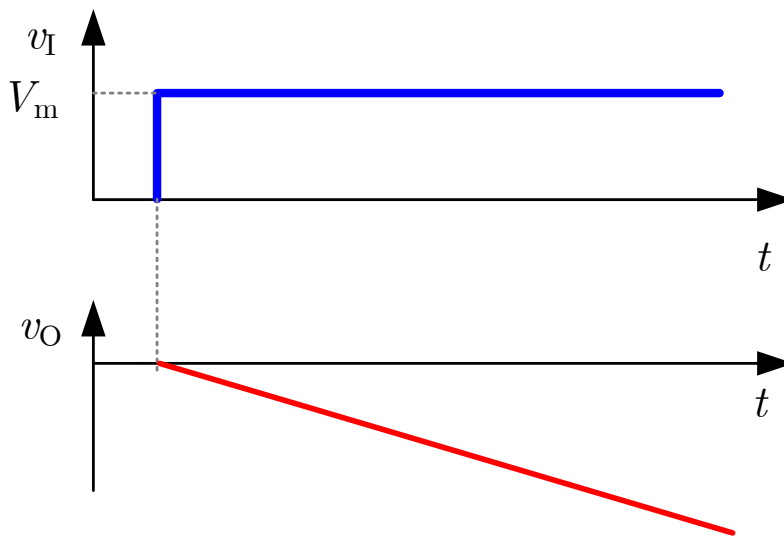
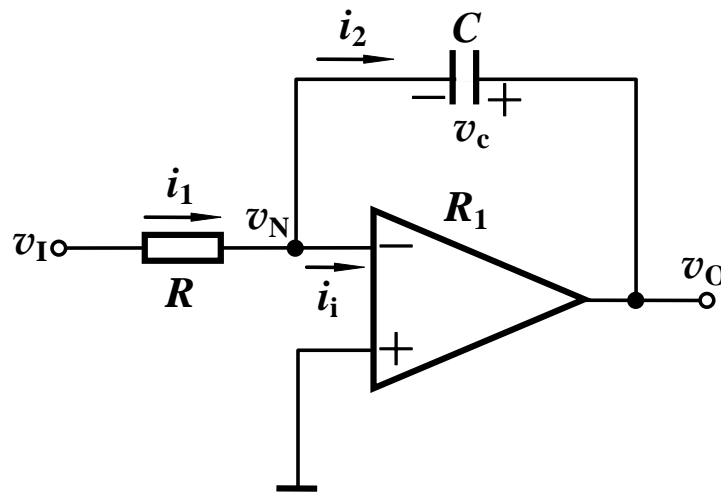
2.3.4 积分电路和微分电路

1. 积分电路

假设电容初始无电压，当 v_i 为阶跃电压时，有：

$$v_o = -\frac{1}{C} \int \frac{v_I}{R} dt = -\frac{V_m}{RC} t = -\frac{V_m}{\tau} t$$

v_o 与 t 成线性关系





2.3.4 积分电路和微分电路

1. 积分电路

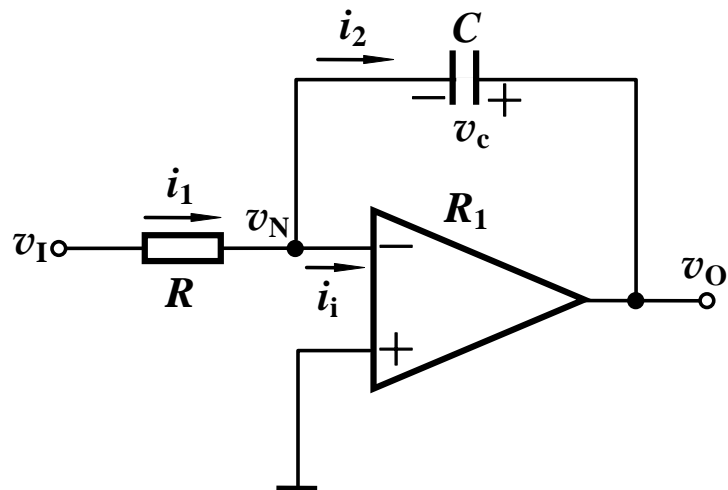
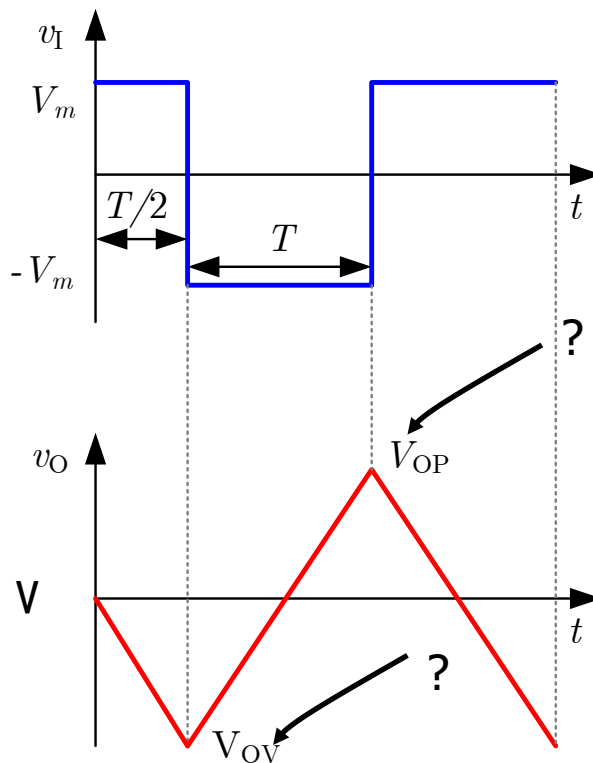
输出电压的变化公式为：

$$\Delta v_o = v_o(T_2) - v_o(T_1) = -\frac{1}{C} \int_{T_1}^{T_2} \frac{v_I(t)}{R} dt$$

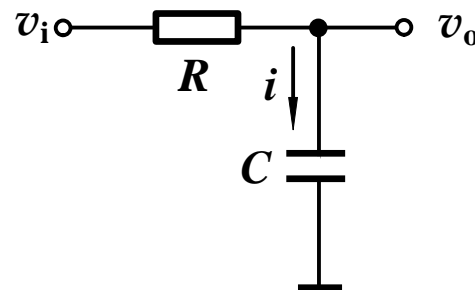
$$V_{OV} = -\frac{1}{RC} V_m \cdot \frac{T}{2}$$

$$\begin{aligned} V_{OP} &= V_{OV} - \frac{1}{RC} (-V_m) \cdot T \\ &= \frac{1}{RC} V_m \cdot \frac{T}{2} = -V_{OV} \end{aligned}$$

假设 v_o 初始态为 0 V



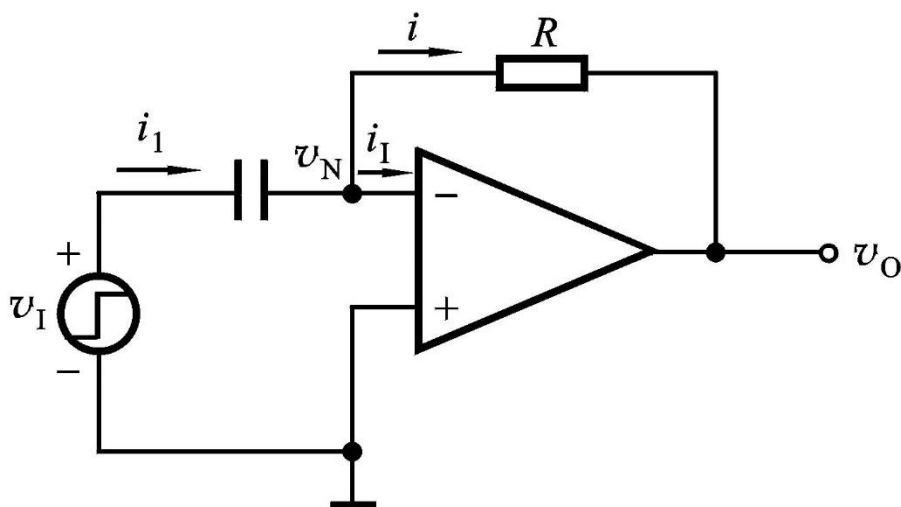
- 如果第一个高电平不是 $T/2$ 呢？
- 如果 v_o 初始电压不是 0 呢？
- 与一般 RC 电路相比该积分电路有何特点？



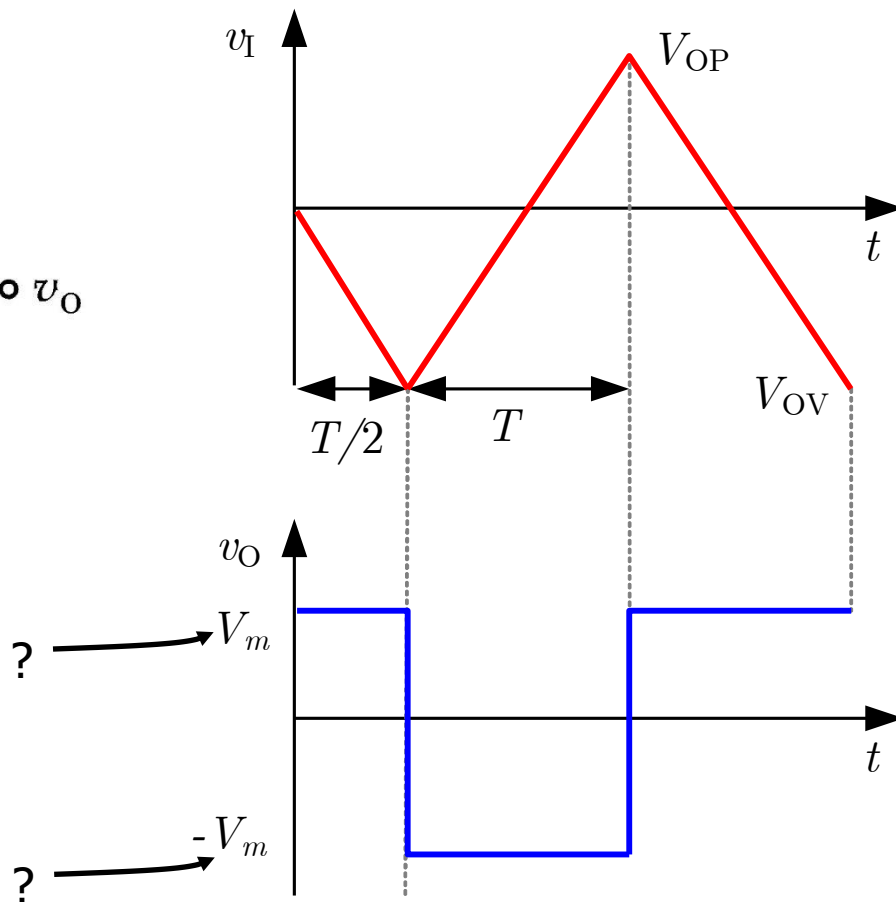


2.3.4 积分电路和微分电路

2. 微分电路



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



- 输出电压是否与输入以及电容的初始电压有关系？

$$V_m = -RC \frac{V_{OP} - V_{OV}}{T}$$



总结

- 1. (电压) 运算放大器的电路模型：两个差分输入口、一个放大输出。**
- 2. 本章运放应用电路输出反馈到输入均为负反馈接法。其计算理论的基础是“虚短”、“虚断”——产生原因是在负反馈下 (1) 增益高、 (2) 输入阻抗高。**
- 3. 掌握运放电路同相放大、反相放大、求和、求差、积分、微分的分析方法。**

下一课开始学习如何用晶体管器件实现丰富多彩的模拟电路！