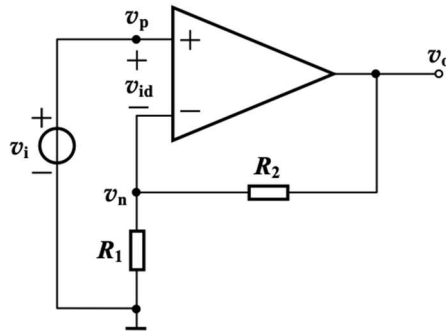


## 运算放大器

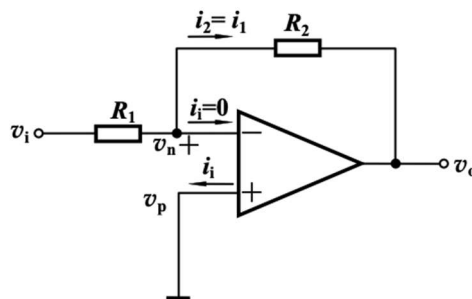
1、如图所示同相放大电路，增益和输入电阻分别是多少？



参考答案：

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad R_i = \frac{v_i}{i_i} \rightarrow \infty$$

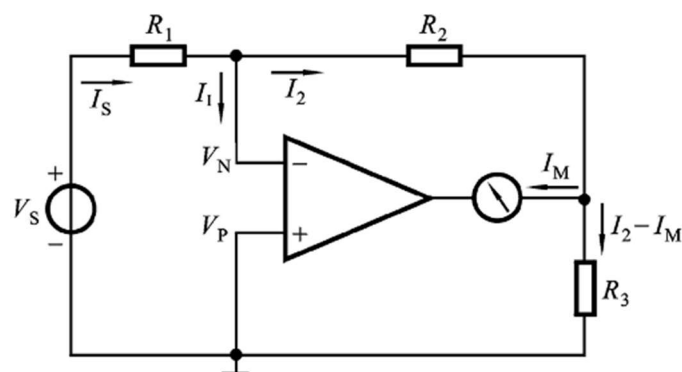
2、如图所示反相放大电路，增益和输入电阻分别是多少？



参考答案：

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1} \quad R_i = \frac{v_i}{i_1} = \frac{v_i}{v_i / R_1} = R_1$$

3、如图所示直流毫伏表电路，试证明  $V_s = (R_3 R_1 / R_2) I_m$



参考答案：

解 (1) 根据虚短和虚断有

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

所以  $I_2 = I_s = V_s / R_1$

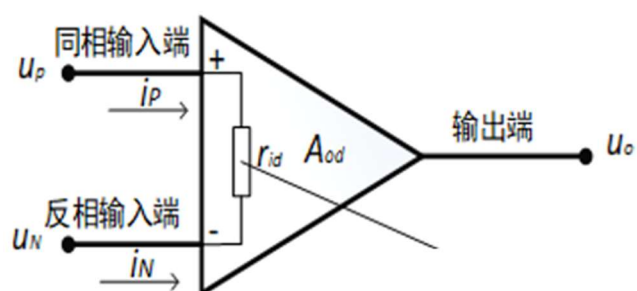
$R_2$  和  $R_3$  相当于并联，

所以  $-I_2 R_2 = R_3 (I_2 - I_m)$

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

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

4、为什么运算放大器具有虚断特性？



参考答案：

集成运放的对输入信号的差模输入电阻  $r_{id}$  非常大，都以  $M\Omega$  为单位。那么流入运放内部的电流  $I_P$  和  $I_N$  就十分微小，近似认为等于 0，就相当于内部“开路”。

5、什么是运算放大器的虚短特性？

参考答案：

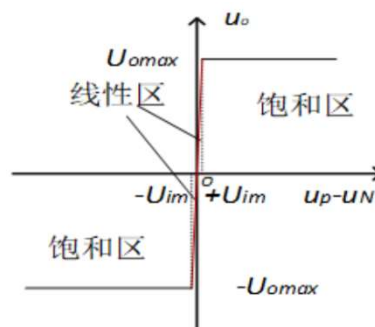
差模开环放大倍数  $A_{od}$  非常大，可达几十万倍。因此，运放的线性区就非常陡峭，线性区间就非常窄，接近于 0。当运算放大器工作在线性区时，可以近似认为  $u_P = u_N$ 。

附：

运放的输出电压是  $u_P - u_N$  的函数。

$u_P$  是同向端电压

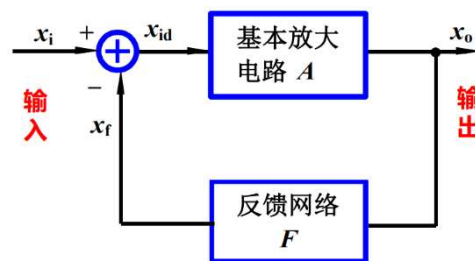
$u_N$  是反向端电压



6、什么是负反馈放大电路的深度负反馈？

参考答案：

由闭环增益的一般表达式：

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$


当  $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$  时，

**深度负反馈**

$A = \frac{x_o}{x_{id}}$  开环增益

$F = \frac{x_f}{x_o}$  反馈系数

$A_f = \frac{x_o}{x_i}$  闭环增益

7、为什么在深度负反馈条件下，运算放大器具有“虚短”特性？

参考答案：

由于  $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$

则  $\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \approx \frac{\dot{A}}{\dot{A}\dot{F}} = \frac{1}{\dot{F}}$

这时，闭环增益只与反馈网络有关，

又因为  $\dot{A}_f = \frac{\dot{x}_o}{\dot{x}_i}$   $\dot{F} = \frac{\dot{x}_f}{\dot{x}_o}$

代入  $\dot{A}_f \approx \frac{\dot{A}}{\dot{A}\dot{F}} = \frac{1}{\dot{F}}$

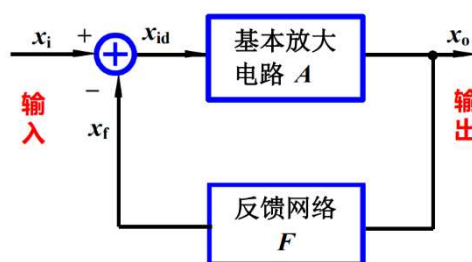
得  $\dot{x}_f \approx \dot{x}_i$  (也常写为  $x_f \approx x_i$ )

**2) 输入量近似等于反馈量**

**3) 净输入量近似等于零**

$\dot{x}_{id} = \dot{x}_i - \dot{x}_f \approx 0$

由此可得**深度负反馈**条件下，基本放大电路“**虚短**”的概念



8、下图所示电路中，输入缓冲电路的作用是什么？

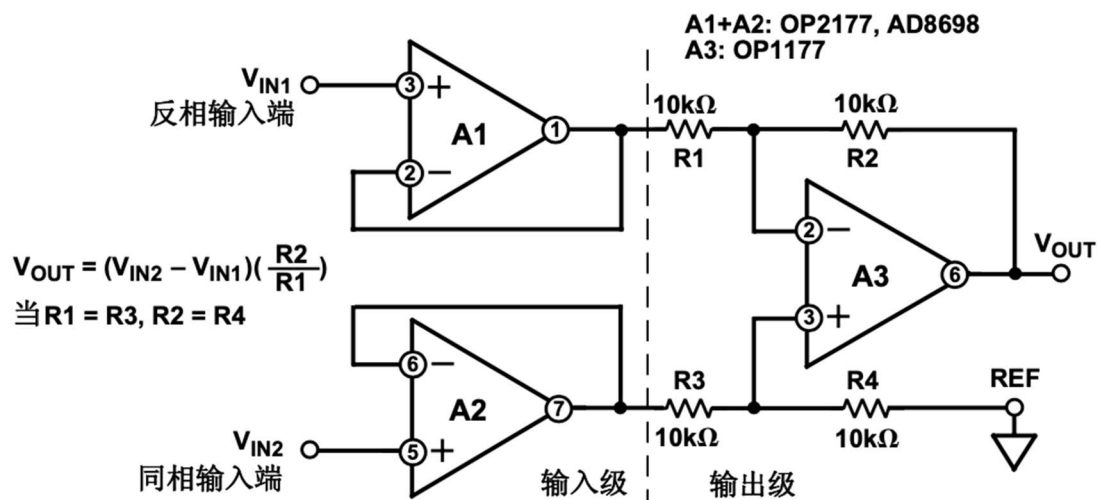


图 2-2. 带输入缓冲的减法器电路

参考答案：作用是提高输入电阻，使输入源阻抗对电路共模抑制的影响为最小

9、希望抑制 50Hz 的干扰信号，应选用哪种类型的滤波电路？

参考答案：带阻滤波

10、放大音频信号，应选用哪种类型的滤波电路？

参考答案：带通滤波

- 11、 复习思考题 2.3.5 反相放大电路如图 2.3.6a 所示。若要求电路的闭环增益  $A_v = -10$ , 输入电阻  $R_i = 10 \text{ k}\Omega$ , 求出  $R_1$  和  $R_2$  的值。

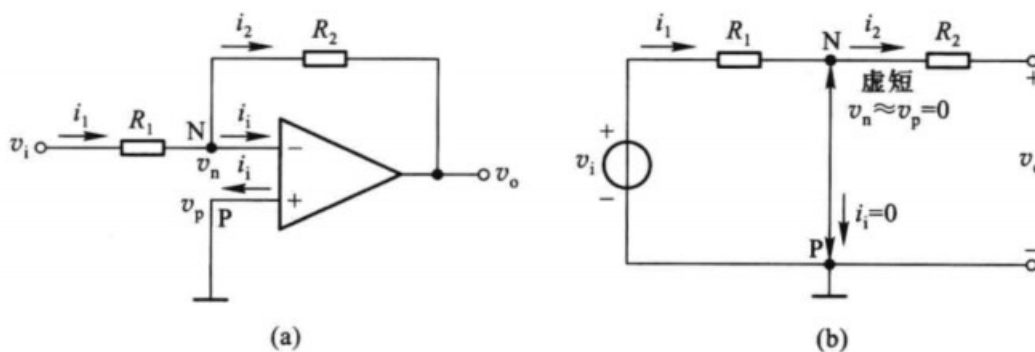


图 2.3.6 反相放大电路  
(a) 电路图 (b) 由虚短引出虚地  $v_n \approx 0$

参考答案:

解, 由  $R_i = 10 \text{ k}\Omega \Rightarrow R_1 = 10 \text{ k}\Omega$   
 由  $A_v = -\frac{R_2}{R_1} = -10 \Rightarrow R_2 = 100 \text{ k}\Omega$

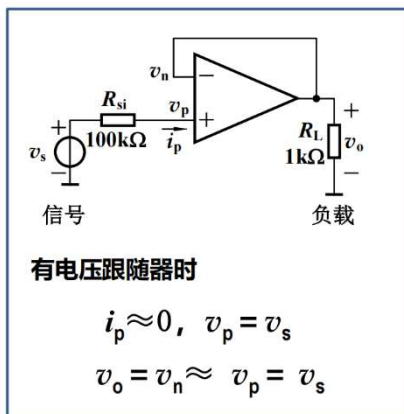
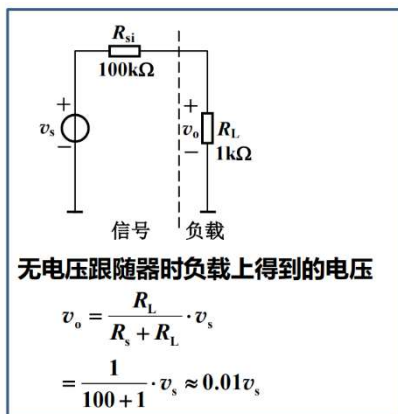
- 12、 复习思考题 2.3.6 电压跟随器电路有什么特点? 一般用于什么场合? 若信号电压  $v_s = 1 \text{ V}$ , 内阻  $R_{si} = 1 \text{ M}\Omega$ , 直接连接负载电阻  $R = 1 \text{ k}\Omega$  时, 负载电压  $v_o = ?$  若中间接一电压跟随器, 则输出电压  $v_o = ?$

参考答案:

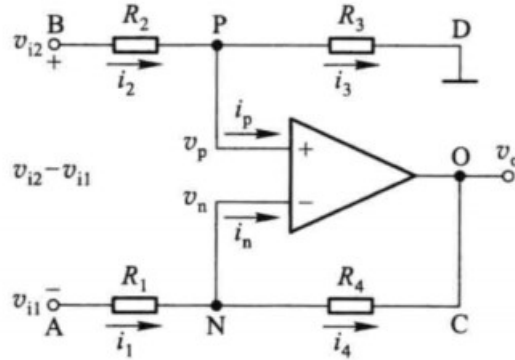
特点:  $A_v = \frac{v_o}{v_i} \approx 1$

输入阻抗很大, 同相, 可以提高负载上的电压

类似于这样算:



- 13、 复习思考题 2.4.1 在图 2.4.1 所示求差电路中用 INA105 模块, 读者自行组合连接, 实现  $A_{vd}=v_o/(v_{i2}-v_{i1})=1$ ,  $A_v=v_o/v_i=-1$ 、 $+1$ 、 $+2$  和  $1/2$  的电路功能, 画出电路结构图。



参考答案:

由  $A_{vd} = \frac{V_o}{V_{i2}-V_{i1}} = 1$

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

$$\Rightarrow R_1=R_4, R_2=R_3 \quad \frac{3}{2} \times \frac{1}{3}$$

①  $A_v = \frac{V_o}{V_i} = -1$

让  $V_{i2}$  接地即可  $V_{i1}$  接  $V_i$

②  $A_v = \frac{V_o}{V_i} = 1$

让  $V_{i1}$  接地即可  $V_{i2}$  接  $V_i$

③ 可以任意搭配, 满足  $A_v = +2$  即可

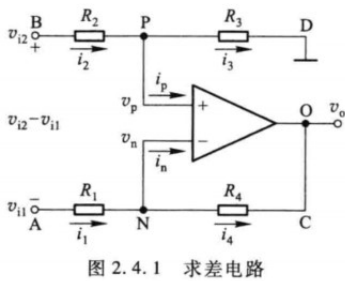
eg:  $V_{i1}$  接地  $R_4=3R_1$   $R_2=R_3$   $V_{i2}$  接  $V_i$

④ ①③

eg:  $R_1=2R_4$   $R_2=2R_3$   $V_{i1}$  接地,  $V_{i2}$  接  $V_i$

14、 复习思考题 2.4.2 试画出下列电路:(1) 求差电路;(2) 仪用放大器;(3) 反相求和电路;(4) 反相积分和微分电路。利用理想运放的特性求每个电路输出电压  $v_o$  和输入电压  $v_i$  的关系并说明各种电路的性能。

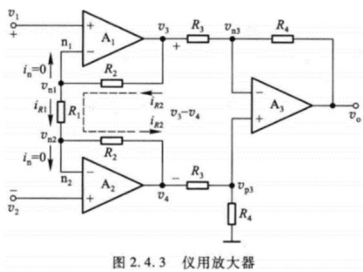
参考答案:



1. 求差电路

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

当  $\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$  时:  $v_o = \frac{R_4}{R_1} (v_{i2} - v_{i1})$   $R_{id} = \frac{v_{id}}{i_{id}} = R_1 + R_2$

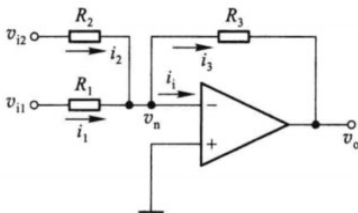


2. 仪用放大器

$$v_o = -\frac{R_4}{R_3} (v_3 - v_4) = -\frac{R_4}{R_3} \left( 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) (v_1 - v_2)$$

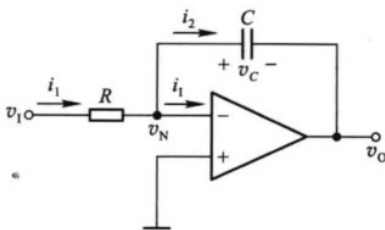
有很强的抑制共模电压的能力

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



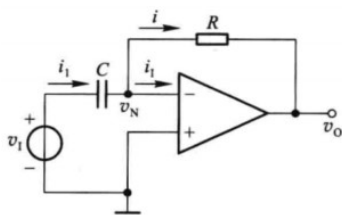
3. 求和电路

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



4. 积分电路

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



5. 微分电路

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

- 15、 复习思考题 2.4.3 如图 2.4.3 所示仪用放大器, 它有一干扰电压  $v_{ic}=5$  V,  $v_1=(5+0.005\sin \omega t)$  V,  $v_2=(5-0.005\sin \omega t)$  V, 电路中  $R_1=1$  k  $\Omega$ ,  $R_2=0.5$  M  $\Omega$ ,  $R_3=R_4=10$  M  $\Omega$ , 求电路中  $v_3$ 、 $v_4$  和  $v_o$  的值。

参考答案:

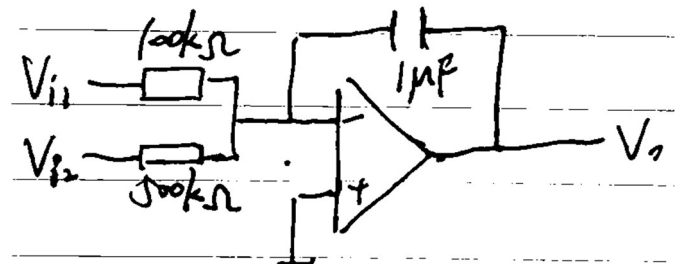
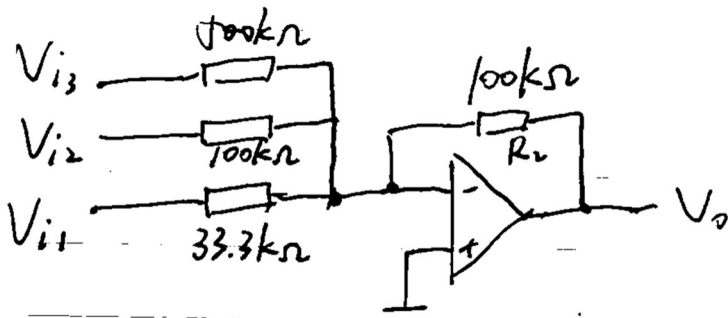
$$\begin{aligned} \text{解: 由 } \frac{V_3-V_1}{R_2} &= \frac{V_4-V_2}{R_1} = \frac{V_2-V_4}{R_2} \\ \Rightarrow \begin{cases} V_3 = \frac{R_1+R_2}{R_1} V_1 - \frac{R_2}{R_1} V_2 \\ V_4 = \frac{R_1+R_2}{R_1} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \end{cases} &\Rightarrow \begin{cases} V_3 = \frac{100k+1k}{1k} V_1 - 100 V_2 \\ V_4 = \frac{100k+1k}{1k} V_2 - 100 V_1 \end{cases} \\ \Rightarrow V_3 \approx 100(V_1 - V_2) & \quad V_4 \approx 100(V_2 - V_1) \\ \Rightarrow V_3 = 1 \sin \omega t \text{ V} & \\ V_4 = -1 \sin \omega t \text{ V} & \\ \text{由 } V_o = -\frac{R_4}{R_3} (V_3 - V_4) & \Rightarrow V_o = -(V_3 - V_4) = -1.0 \sin \omega t \text{ V} \end{aligned}$$

- 16、 复习思考题 2.4.4 画出实现下列关系的电路

(1)  $v_o = -3v_{i1} - v_{i2} - 0.2v_{i3}$ , (设跨接在输出端和反相输入端之间的电阻  $R_2 = 100$  k  $\Omega$ )

(2)  $v_o = -10 \int_0^1 v_{i1}(t) dt - 2 \int_0^1 v_{i2}(t) dt$  (给定  $C_1 = 1 \mu F$ ,  $v_o(t)|_{t=0} = 0$ )

参考答案:





- 17、 习题 2.4.1 差分放大电路如图题 2.4.1 (教材图 2.4.1) 所示, 运放是理想的, 电路中  $R_4/R_1=R_3/R_2$ 。(1) 设  $R_1=R_2$ , 从 B、A 两端看进去的输入电阻  $R_{id}=20\text{ k}\Omega$ ,  $A_v=10$ , 求在  $v_{i2}-v_{i1}$  作用下电阻值  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  和  $R_4$ 。 ; (2)  $v_{i2}=0$  时, 求从  $v_{i1}$  输入信号端看进去的输入电阻  $R_{i1}$  值; (3)  $v_{i1}=0$  时, 求从  $v_{i2}$  输入端看进去的输入电阻  $R_{i2}$  值。

参考答案:

解: (1) 由主教材中式 (2.4.6) 得知, 在  $v_{i2}-v_{i1}$  作用下输入电阻为

$$R_{id} = R_1 + R_2 = 20\text{ k}\Omega, \text{ 选 } R_1 = R_2 = 10\text{ k}\Omega$$

由主教材中式 (2.4.5) 得

$$A_{vd} = \frac{v_o}{v_{i2} - v_{i1}} = \frac{R_4}{R_1} = 10$$

$$R_4 = 10R_1 = 10 \times 10\text{ k}\Omega = 100\text{ k}\Omega$$

$$\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}, \text{ 所以 } R_3 = R_4 = 100\text{ k}\Omega$$

(2)  $v_{i2}=0$  时,  $v_{i1}$  作用下的输入电阻  $R_{i1}$

由理想运放的特性有  $v_p = v_n$ ,  $i_2 = i_3$ ,  $i_1 = i_4$ 。列出如下方程

$$\begin{cases} i_1 = \frac{v_{i1} - v_n}{R_1} \\ \frac{v_{i1} - v_n}{R_1} = \frac{v_n - v_o}{R_4} \\ v_n = v_p = \frac{R_3}{R_2 + R_3} v_{i2} \end{cases}$$

由上式可以解得

$$i_1 = \frac{1}{R_1} \left( v_{i1} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} v_{i2} \right)$$

所以  $v_{i1}$  端的输入电阻为

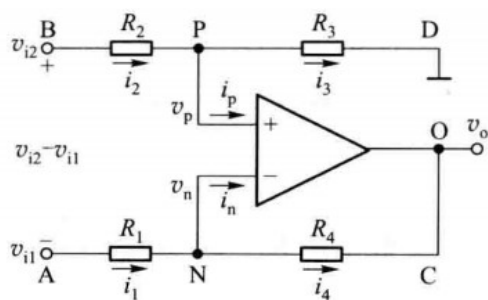
$$R_{i1} = \frac{v_{i1}}{i_1} = \frac{v_{i1} R_1}{\left( v_{i1} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} v_{i2} \right)}$$

由此看出,  $v_{i1}$  端看进去的电阻与  $v_{i2}$  的大小有关系。当  $v_{i2}=0$  时,  $R_{i1} = \frac{v_{i1}}{i_1} = R_1$ 。

(3)  $v_{i1}=0$  时,  $v_{i2}$  作用下的输入电阻  $R_{i2}$

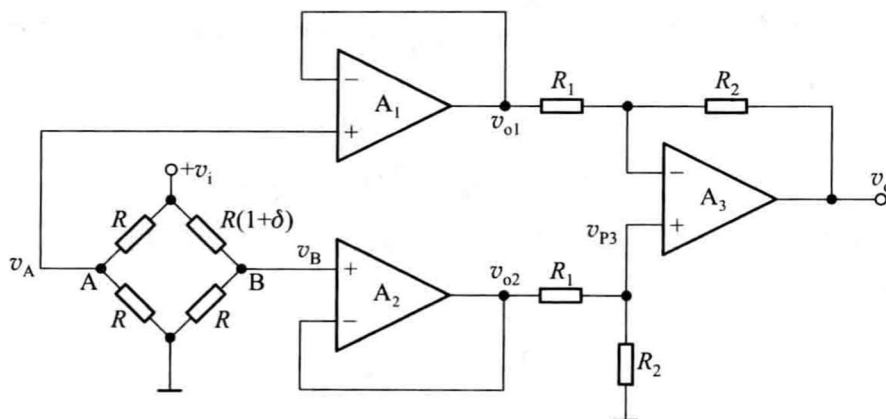
由  $i_1=0$ ,  $i_2=i_3$ , 所以  $v_{i2} = (R_2 + R_3) i_2$ ,  $v_{i2}$  作用下的输入电阻为

$$R_{i2} = \frac{v_{i2}}{i_2} = R_2 + R_3$$



图题 2.4.1

- 18、 习题 2.4.2 一高输入电阻的桥式放大电路如图题 2.4.2 所示, (1) 试写出  $v_o = f(\delta)$  的表达式 ( $\delta = \Delta R/R$ ) ; (2) 当  $v_i = 7.5 \text{ V}$ ,  $\delta = 0.01$  时, 求  $v_A$ 、 $v_B$ 、 $v_{AB}$  和  $v_o$ 。



图题 2.4.2

参考答案:

解: 由KCL:  $V_A = \frac{V_i}{2}$   $V_B = \frac{1}{2+\delta} V_i$

$$\begin{aligned} V_o &= -\frac{R_2}{R_1} V_A + \frac{R_1+R_2}{R_1} \cdot \frac{R_2}{R_1+R_2} V_B = -\frac{R_2}{R_1} V_A + \frac{R_2}{R_1} V_B \\ &= -\frac{R_2}{2R_1} V_i + \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{2+\delta} V_i \\ &= \frac{R_2}{R_1} \cdot \left( -\frac{\delta}{4+2\delta} \right) V_i \end{aligned}$$

(2)  $V_i = 7.5 \text{ V}$ ,  $\delta = 0.01$

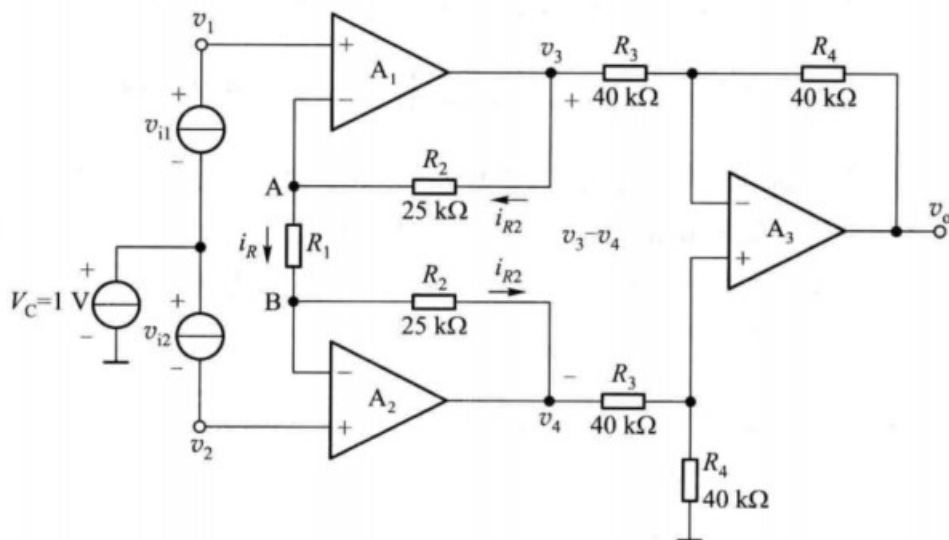
$\Rightarrow V_A = 3.75 \text{ V}$ ,  $V_B = \frac{7.5 \text{ V}}{2.01} = 3.73 \text{ V}$

$V_{AB} = 0.02 \text{ V}$

$V_o = \frac{R_2}{R_1} \times \frac{-0.01}{4.02} \times 7.5 = -0.01866 = -\frac{R_2}{R_1}$

19、 习题 2.4.4 (仪表放大器)、INA2128 型仪用放大器。电路如图题

2.4.4 所示, 其中  $R_1$  是外接电阻。(1) 它的输入干扰电压  $V_c = 1\text{ V}$  (直流), 输入信号  $v_{i1} = -v_{i2} = 0.04\sin\omega t\text{ V}$ , 输入端电压  $v_1 = (V_c + 0.04\sin\omega t)\text{ V}$ ,  $v_2 = (V_c - 0.04\sin\omega t)\text{ V}$ , 当  $R_1 = 1\text{ k}\Omega$  时, 求出  $v_3$ 、 $v_4$ 、 $v_3 - v_4$  和  $v_o$  的电压值; (2) 当输入电压  $V_{id} = V_1 - V_2 = 0.01866\text{ V}$  时, 要求  $V_o = -5\text{ V}$ , 求此时外接电阻  $R_1$  的值。



图题 2.4.4 仪用放大器

参考答案:

解: 
$$\begin{cases} V_3 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_1 - \frac{R_2}{R_1} V_2 \\ V_4 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_3 = 26V_1 - 24V_2 \\ V_4 = 26V_2 - 24V_1 \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_3 = V_c + 1 \times 0.04\sin\omega t = V_c + 2.0\sin\omega t\text{ V} = 1 + 2.0\sin\omega t\text{ V}$$

$$V_4 = V_c - 1 \times 0.04\sin\omega t = V_c - 2.0\sin\omega t\text{ V} = 1 - 2.0\sin\omega t\text{ V}$$

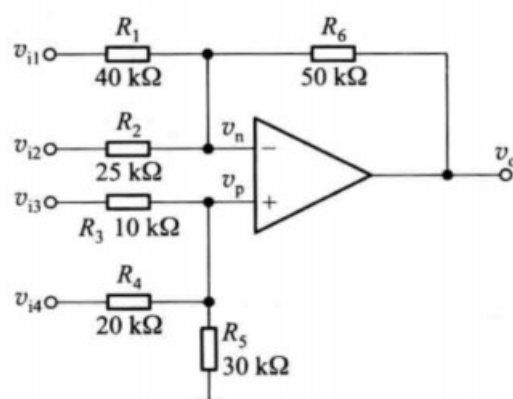
$$V_3 - V_4 = 4.0\sin\omega t\text{ V}$$

$$V_o = -\frac{R_4}{R_3}(V_3 - V_4) = -4.0\sin\omega t\text{ V}$$

(2) 
$$V_3 - V_4 = \left(2\frac{R_2}{R_1} + 1\right)(V_1 - V_2)$$

$$V_o = \left(1 + 2\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \left(-\frac{R_4}{R_3}\right) \cdot (V_1 - V_2) \Rightarrow R_1 = 1873\Omega$$

- 20、 习题 2.4.8（加减法电路）、加减运算电路如图题 2.4.8 所示, 求输出电压  $v_o$  的表达式。

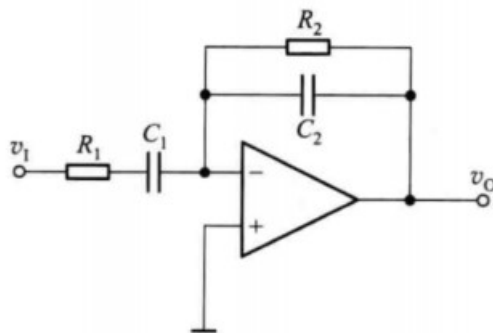


图题 2.4.8

参考答案:

$$\begin{aligned}
 & \text{解: 由 } \frac{V_{i3}-V_n}{10} + \frac{V_{i4}-V_n}{20} = \frac{V_n}{30} \\
 & \Rightarrow 6V_{i3}-6V_n+3V_{i4}-3V_n=2V_n \\
 & \Rightarrow 11V_n=6V_{i3}+3V_{i4} \quad V_n=\frac{6}{11}V_{i3}+\frac{3}{11}V_{i4} \\
 & \text{再由 } \frac{V_{i1}-V_n}{40} + \frac{V_{i2}-V_n}{25} = \frac{V_n-V_o}{50} \\
 & \Rightarrow \frac{5}{4}V_{i1}-\frac{5}{4}V_n+2V_{i2}-2V_n=V_n-V_o \\
 & \Rightarrow V_o=\frac{17}{4}V_n-\frac{5}{4}V_{i1}-2V_{i2} \\
 & =\frac{51}{22}V_{i3}+\frac{9}{44}V_{i4}-\frac{5}{4}V_{i1}-2V_{i2}
 \end{aligned}$$

- 21、 习题 2.4.14 (微分电路) 一实用微分电路如图题 2.4.14 所示, 它具有衰减高频噪声的作用。(1) 确定电路的传递函数  $V_o(s)/V_i(s)$ ; (2) 若  $R_1=R_2=R, C_1=C_2=C$ , 试问输入信号  $v_i$  的频率应当怎样限制, 才能使电路不失去微分的功能?



图题 2.4.14

参考答案:

解:(1) 确定电路传递函数

$$\frac{V_i(s)}{R_1 + \frac{1}{sC_1}} = - \frac{V_o(s)}{\left(sC_2 + \frac{1}{R_2}\right)^{-1}}$$

$$\frac{V_i(s)sC_1}{1 + sR_1C_1} = -V_o(s) \frac{1 + sR_2C_2}{R_2}$$

所以

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = - \frac{sR_2C_1}{(1 + sR_1C_1)(1 + sR_2C_2)}$$

(2) 讨论电路的功能

当  $R_1 = R_2 = R, C_1 = C_2 = C$  时,  $R_1C_1 = R_2C_2 = RC$ , 则

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = - \frac{sRC}{(1 + sRC)^2}$$

令  $s = j\omega$  时

$$\begin{aligned} A(j\omega) &= \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = - \frac{j\omega RC}{(1 + j\omega RC)^2} \\ &= - \frac{j \frac{\omega}{\omega_H}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2 + 2j \frac{\omega}{\omega_H}} \end{aligned}$$

式中  $\omega_H = \frac{1}{RC}$ 。下面分三种情况进行讨论。

① 当  $\omega = \omega_H$  时,  $A = -\frac{1}{2}$ , 电路构成反相比例运算电路。

② 当  $\omega \gg \omega_H$  时

$$\begin{aligned} A(j\omega) &\approx -\frac{j\frac{\omega}{\omega_H}}{-\left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2 + j2\frac{\omega}{\omega_H}} = -\frac{j}{-\frac{\omega}{\omega_H} + 2j} \\ &= j\frac{\frac{\omega}{\omega_H} + j2}{\left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2 + 4} = \frac{j\frac{\omega}{\omega_H}}{\left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2 + 4} - \frac{2}{\left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2 + 4} \end{aligned}$$

因  $\omega \gg \omega_H$ ,  $\frac{\omega}{\omega_H} \gg 4$ , 上式改写为

$$A(j\omega) = j\frac{\omega_H}{\omega} - 2\left(\frac{\omega_H}{\omega}\right)^2 \approx j\frac{\omega_H}{\omega} = -\frac{1}{j\omega RC}$$

此时电路具有反相积分功能。

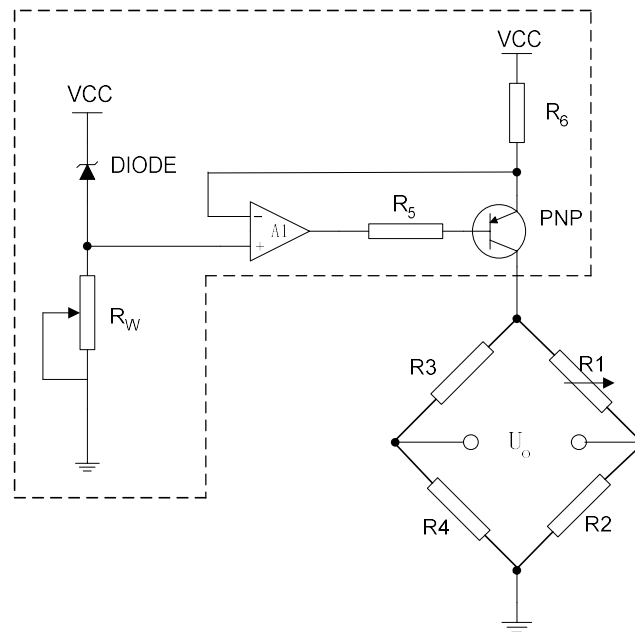
③ 当  $\omega \ll \omega_H$

$$\begin{aligned} A(j\omega) &\approx -\frac{j\frac{\omega}{\omega_H}}{1 + j2\frac{\omega}{\omega_H}} = \frac{-j\frac{\omega}{\omega_H}\left(1 - j2\frac{\omega}{\omega_H}\right)}{\left(1 - j2\frac{\omega}{\omega_H}\right)\left(1 + j2\frac{\omega}{\omega_H}\right)} \\ &= -\frac{j\frac{\omega}{\omega_H} + 2\left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2}{1 + 4\left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2} \approx -j\frac{\omega}{\omega_H} = -j\omega RC \end{aligned}$$

电路具有微分功能。

由此可见, 只有  $v_1$  的角频率  $\omega$  比电路中  $RC$  的固有角频率  $\omega_H$  小很多时, 即  $f \ll f_H = \frac{1}{2\pi RC}$ , 电路才有微分功能。

22、说明下图虚线框所示恒流源的原理，并说明如何选择稳压二极管、可变电阻  $R_W$ ，限流电阻  $R_6$ ，PNP 晶体管等器件的规格。



参考答案：

原理：稳压二极管使同相端、反向端电压恒定，使射极电流  $i_E$  恒定，当 BJT 工作在放大区时，进而使  $i_C$  恒定。

规格： $R_W$  使齐纳二极管工作在击穿线性区， $R_6$  控制电流源输出大小，晶体管规格是使它工作在放大区。