

# 电子技术基础模拟部分

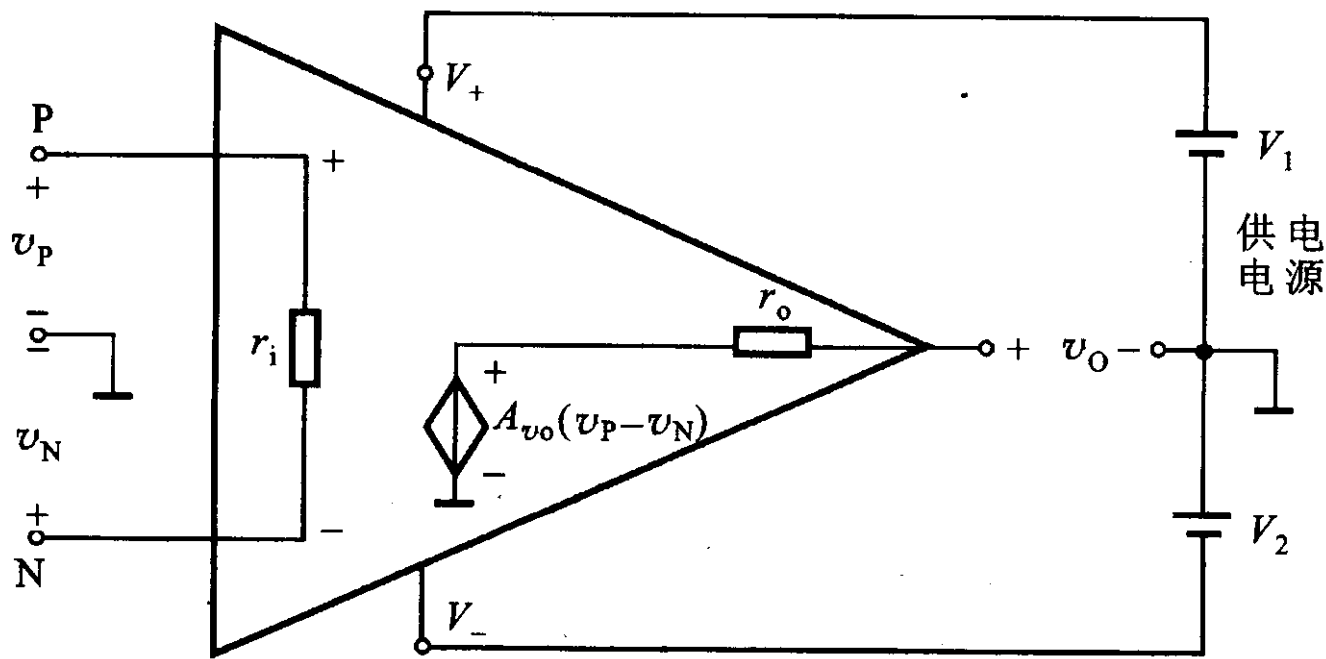
## 第五版

### 第二章作业题解答

## 2 运算放大器

### 2.1 集成电路运算放大器

2.1.1 电路如图题 2.1.1 (主教材图 2.1.3) 所示, 运放的开环电压增益  $A_{vo} = 10^6$ , 输入电阻  $r_i = 10^9 \Omega$ , 输出电阻  $r_o = 75 \Omega$ , 电源电压  $V_+ = +10 \text{ V}$ ,  $V_- = -10 \text{ V}$ 。(1) 求运放输出电压为饱和值时输入电压的最小幅值  $v_P - v_N = ?$  (2) 输入电流  $i_i = ?$



图题 2.1.1

解: (1) 输入电压的最小幅值  $v_P - v_N = v_O / A_{vo}$ , 当  $v_O = \pm V_{om} = \pm 10 \text{ V}$  时  $v_P - v_N = \pm 10 \text{ V} / 10^6 = \pm 10 \mu\text{V}$ 。

(2) 输入电流  $i_i = (v_P - v_N) / r_i = \pm 10 \mu\text{V} / 10^9 \Omega = \pm 1 \times 10^{-8} \mu\text{A}$ 。

2.1.2 电路如图题 2.1.1 (主教材图 2.1.3) 所示, 运放的  $A_{vo} = 2 \times 10^5$ ,  $r_i = 2 \text{ M}\Omega$ ,  $r_o = 75 \Omega$ ,  $V_+ = 12 \text{ V}$ ,  $V_- = -12 \text{ V}$ , 设输出电压的最大饱和电压值  $\pm V_{om} = \pm 11 \text{ V}$ 。(1) 如果  $v_P = 25 \mu\text{V}$ ,  $v_N = 100 \mu\text{V}$ , 试求输出电压  $v_O = ?$  实际上  $v_O$  应为多少? (2) 设  $V_{om} = \pm 11 \text{ V}$ , 画出它的传输特性。

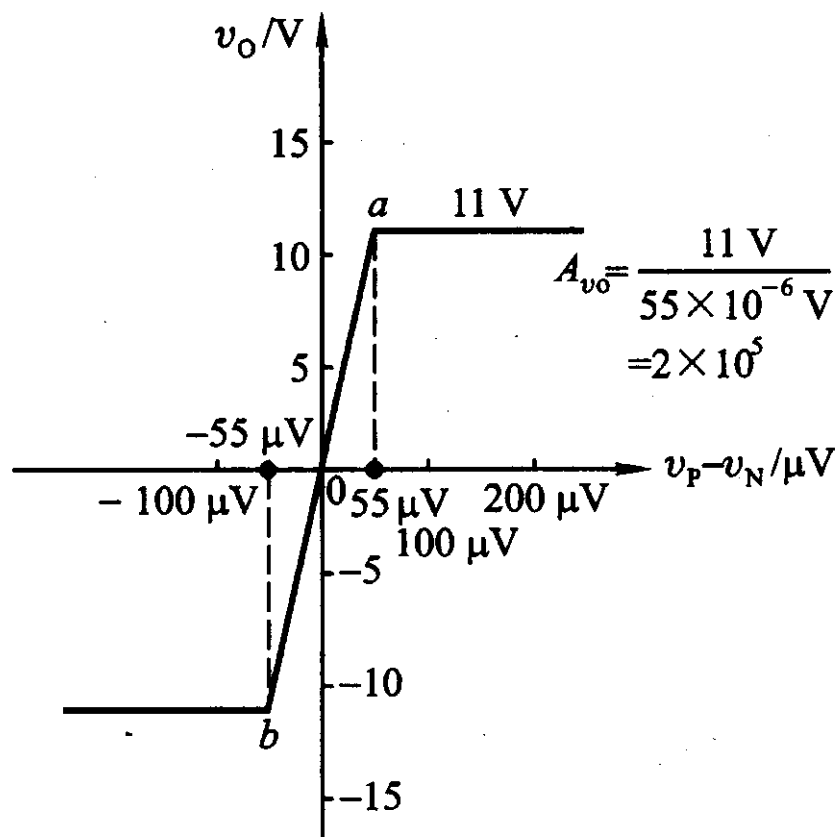
解: (1)  $v_O = A_{vo}(v_P - v_N) = 2 \times 10^5 \times (25 - 100) \times 10^{-6} \text{ V} = -15 \text{ V}$ 。

因为此时运放已饱和,  $V_{om} = -11 \text{ V}$ , 所以  $v_O$  不能小于  $-11 \text{ V}$ , 因此  $v_O$  不可能达到  $-15 \text{ V}$ 。

(2)  $V_{om} = \pm 11 \text{ V}$  时

$$v_P - v_N = \pm \frac{11 \text{ V}}{2 \times 10^5} = \pm 55 \mu\text{V}$$

纵轴以  $v_o/V$  取  $\pm 11$  V，横轴取  $(v_p - v_n)/\mu V = \pm 55 \mu V$ ，即取  $a(55 \mu V, 11 V)$ 、 $b(-55 \mu V, -11 V)$  两点作传输特性，线性区斜率为  $A_{vo} = \frac{11 V}{55 \times 10^{-6} V} = 2 \times 10^5$ ，参见图解 2.1.2。



图解 2.1.2  $v_o = f(v_p - v_n)$

### 2.3 基本线性运放电路

2.3.1 设图题 2.3.1 中的 A 为理想器件，试求出图 a、b、c、d 中电路输出电压  $v_o$  的值。

解：利用虚短和虚断的概念： $v_n = v_p$ ， $i_i = 0$ 。

由图(a)可知

$$i_1 = i_2, \quad \frac{0 - v_1}{R_1} = \frac{v_1 - v_o}{R_2}$$

$$\frac{0 - 2 V}{10 k\Omega} = \frac{2 V - v_o}{20 k\Omega}, \quad v_o = 6 V$$

由图(b)可得

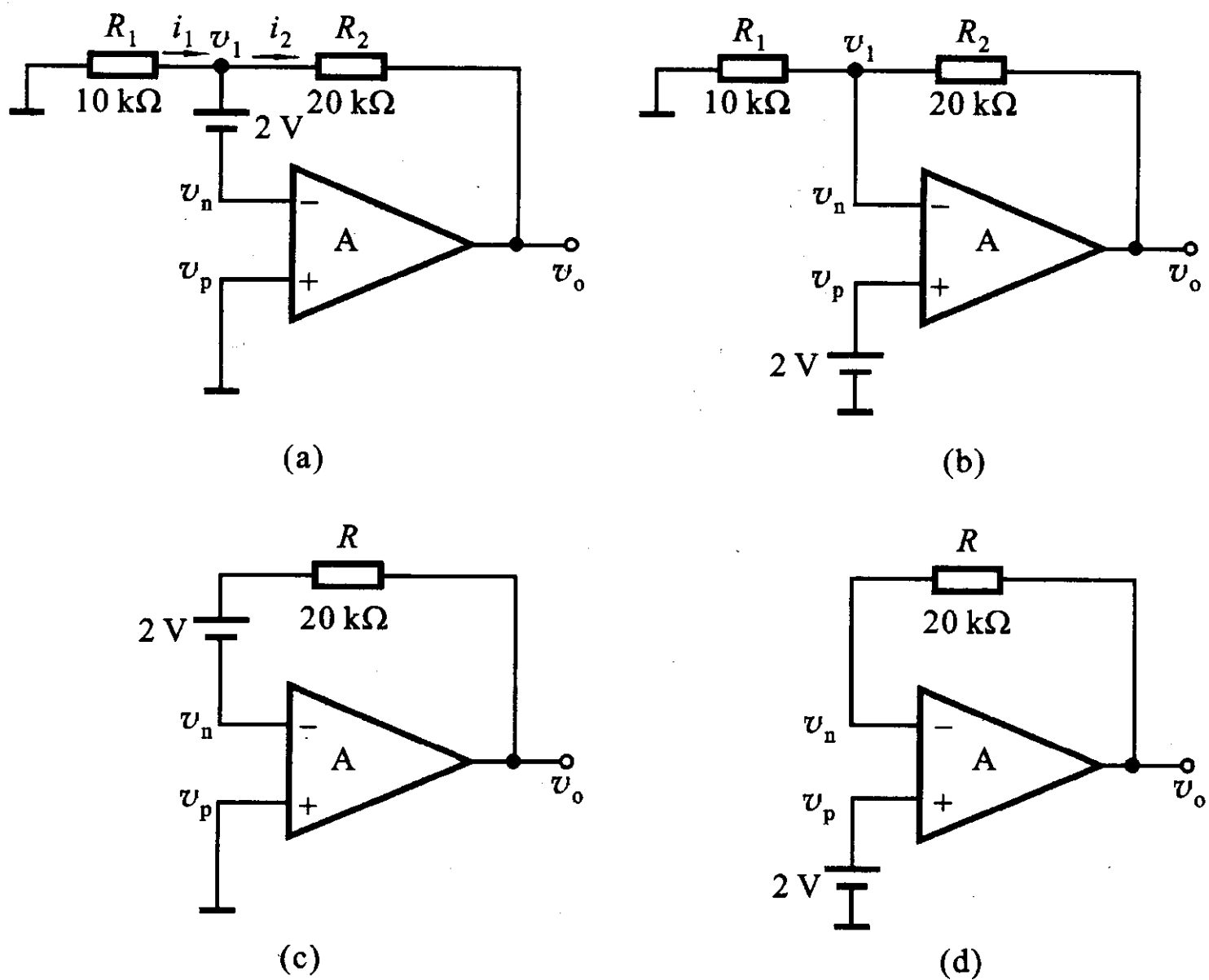
$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)v_p = \left(1 + \frac{20}{10}\right) \times 2 V = 6 V$$

由图(c)可知

$$v_n = v_p = 0, \quad v_o = +2 V$$

由图(d)可知

$$v_n = v_p = +2 V, \quad v_o = +2 V$$



图题 2.3.1

2.3.2 电路如图题 2.3.2 所示, 设运放是理想的, 图 a 电路中的  $v_i = 6\text{ V}$ , 图 b 电路中的  $v_i = 10\sin \omega t(\text{mV})$ , 图 c 电路中的  $v_{i1} = 0.6\text{ V}$ 、 $v_{i2} = 0.8\text{ V}$ , 求各放大电路的输出电压  $v_o$  和 a、b 图中各支路的电流。

解: 图(a)利用虚短、虚断的概念:  $v_n = v_p$ ,  $i_n = i_p = 0$

$$v_p = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_i = \frac{6}{12 + 6} \times 6\text{ V} = 2\text{ V}$$

$$v_o = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) v_p = \left(1 + \frac{10}{10}\right) \times 2\text{ V} = 4\text{ V}$$

$$i_1 = i_2 = \frac{v_i - v_p}{R_1} = \frac{(6 - 2)\text{ V}}{12\text{ k}\Omega} \approx 0.33\text{ mA}$$

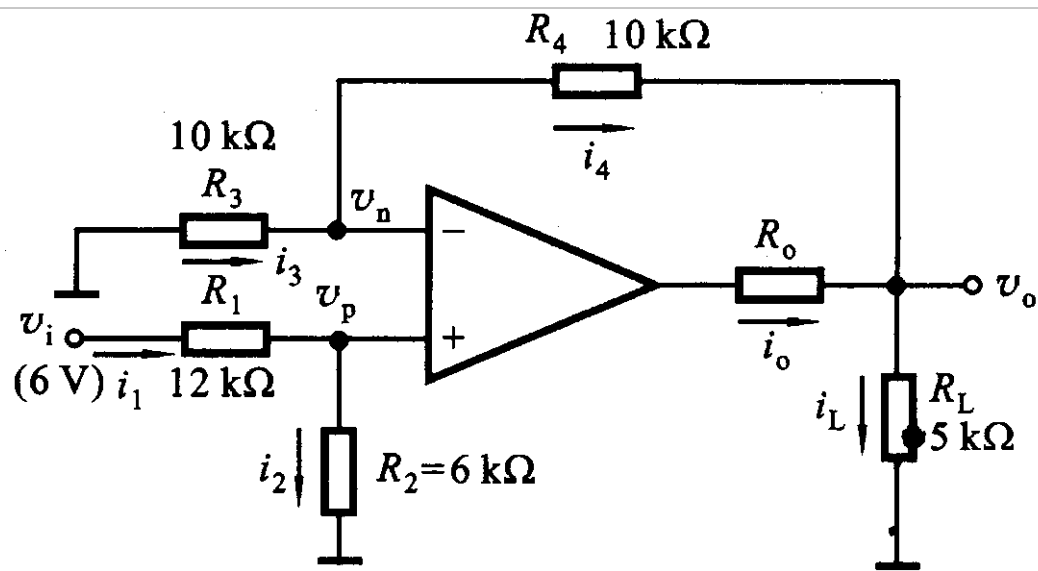
$$i_3 = i_4 = \frac{-v_n}{R_3} = \frac{-v_p}{R_3} = -\frac{2\text{ V}}{10\text{ k}\Omega} = -0.2\text{ mA}$$

$$i_L = \frac{v_o}{R_L} = \frac{4\text{ V}}{5\text{ k}\Omega} = 0.8\text{ mA}$$

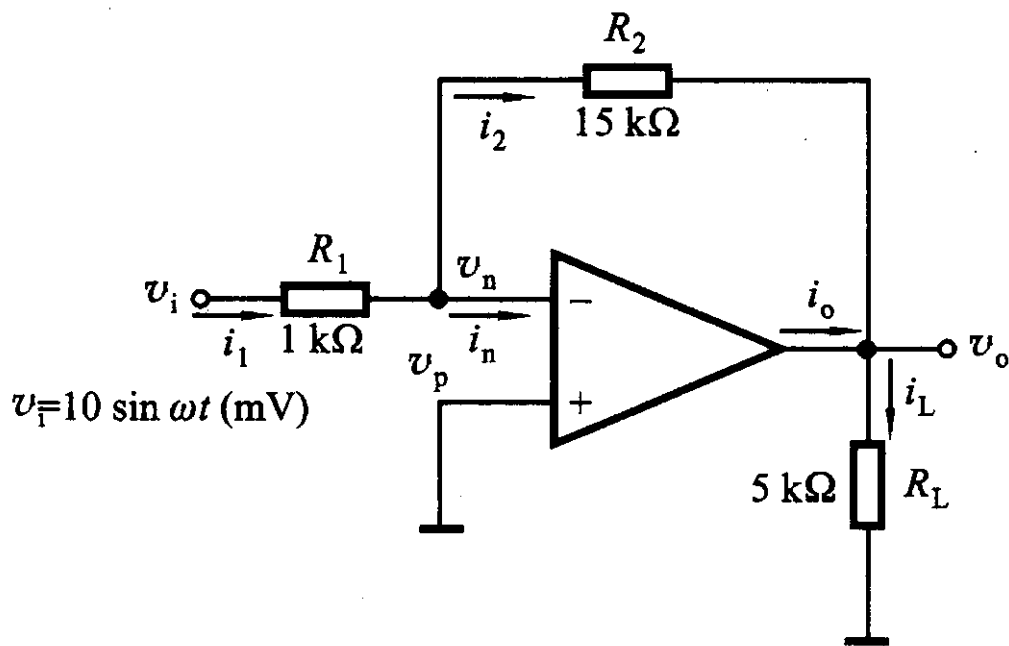
$$i_L = i_4 + i_o$$

$$i_o = i_L - i_4 = [0.8 - (-0.2)]\text{ mA} = 1\text{ mA}$$

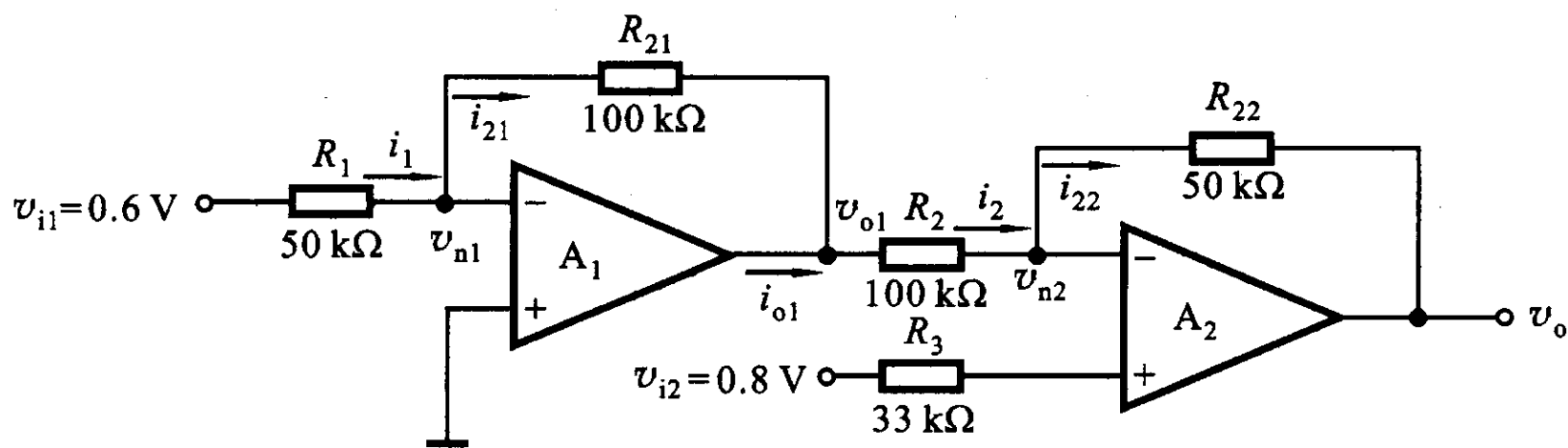
图(b)因  $v_n = v_p = 0$ ,  $i_n = i_p = 0$



(a)



(b)



(c)

图题 2.3.2

$$v_o = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right)v_i = -\frac{15}{1}(10\sin \omega t) \text{ mV} = -150\sin \omega t (\text{mV})$$

$$i_2 = i_1 = \frac{v_i - v_n}{R_1} = (10\sin \omega t) \text{ mV} / 1 \text{ k}\Omega = 10\sin \omega t (\mu\text{A})$$

$$i_L = \frac{v_o}{R_L} = \frac{-150\sin \omega t (\text{mV})}{5 \text{ k}\Omega} = -30\sin \omega t (\mu\text{A})$$

$$i_o = i_L - i_2 = (-30\sin \omega t - 10\sin \omega t) (\mu\text{A}) \\ = -40\sin \omega t (\mu\text{A})$$

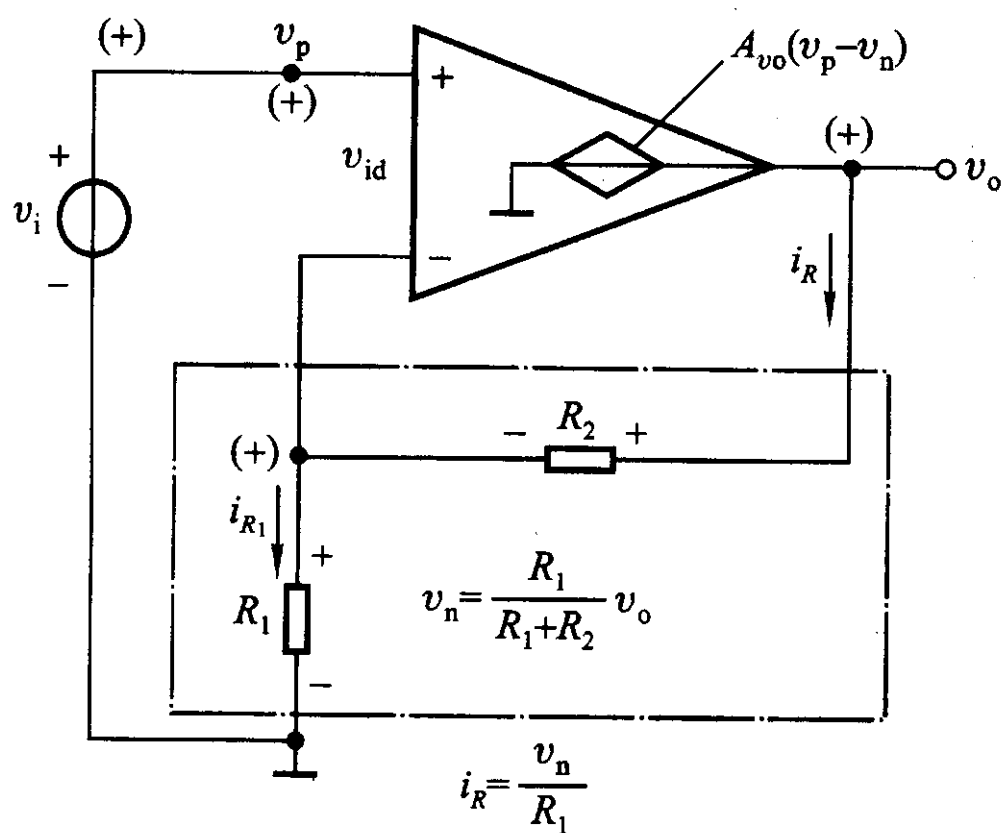
图(c)运算电路  $A_1$  的输出电压为

$$v_{o1} = -\frac{R_{21}}{R_1}v_{i1} = -\frac{100}{50} \times 0.6 \text{ V} = -1.2 \text{ V}$$

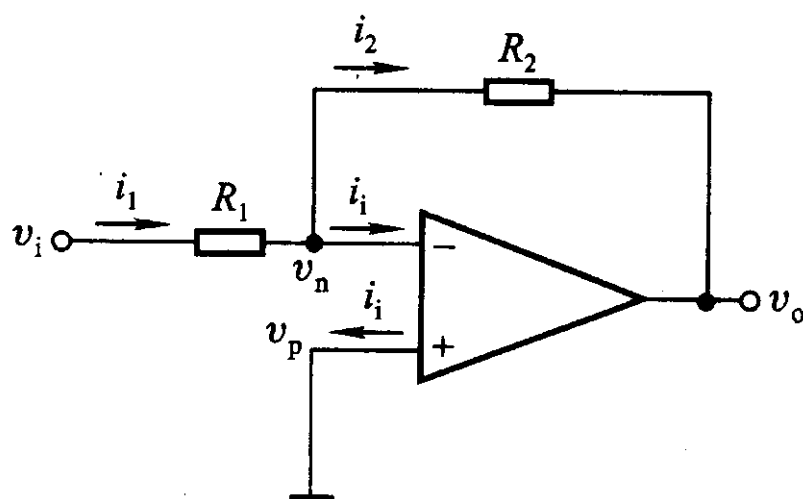
差分式运算电路  $A_2$  的输出电压为

$$\begin{aligned} v_o &= -\frac{R_{22}}{R_2}v_{o1} + \left(1 + \frac{R_{22}}{R_2}\right)v_{i2} \\ &= -\frac{50}{100} \times (-1.2) \text{ V} + \left(1 + \frac{50}{100}\right) \times 0.8 \text{ V} \\ &= (0.6 + 1.2) \text{ V} = 1.8 \text{ V} \end{aligned}$$

2.3.3 (1)设计一同相放大电路,如图题2.3.3a所示,其闭环增益  $A_v = 10$ ,当  $v_i = 0.8 \text{ V}$  时,流过每一电阻的电流小于  $100 \mu\text{A}$ ,求  $R_1$  和  $R_2$  的最小值;(2)设计一反相放大电路,如图2.3.3b所示,要求电压增益  $A_v = v_o/v_i = -8$ ,当输入电压  $v_i = -1 \text{ V}$  时,流过  $R_1$  和  $R_2$  的电流小于  $20 \mu\text{A}$ ,求  $R_1$  和  $R_2$  的最小值。



(a)



(b)

图题 2.3.3

解:(1)同相放大电路如图题2.3.3a所示,

$$v_n = v_p = v_i, i_{R1} = \frac{v_n}{R_1} = \frac{v_i}{R_1}$$

$$R_{1\min} = \frac{v_i}{i_{R1\max}} = \frac{0.8 \text{ V}}{100 \times 10^{-3} \text{ mA}} = 8 \text{ k}\Omega$$

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

$$10 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \times 0.8$$

$$\frac{10 - 0.8}{0.8} = \frac{R_2}{R_1}$$

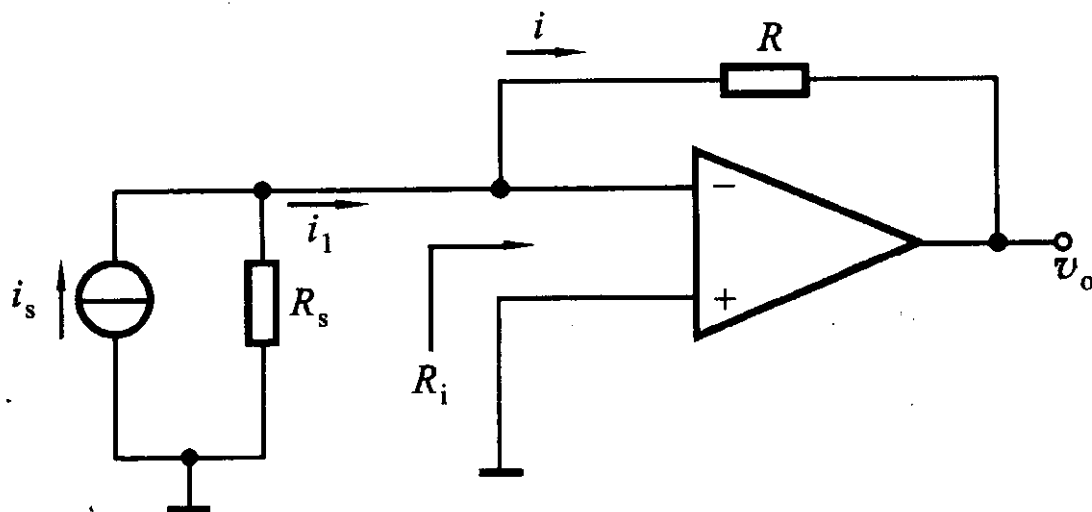
$$R_{2\min} = 11.5R_{1\min} = 11.5 \times 8 \text{ k}\Omega = 92 \text{ k}\Omega$$

(2) 反相放大电路如图题 2.3.3b 所示,

$$R_{1\min} = \frac{|v_i|}{i_{1\max}} = \frac{1 \text{ V}}{20 \times 10^{-3} \text{ mA}} = 50 \text{ k}\Omega$$

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1} = -8, \quad R_{2\min} = 8R_{1\min} = 8 \times 50 \text{ k}\Omega = 400 \text{ k}\Omega$$

2.3.4 电流-电压转换器如图题 2.3.4 所示。设光探测试仪的输出电流作为运放输入电流  $i_s$ ；信号内阻  $R_s \gg R_i$ ，试证明输出电压  $v_o = -i_s R$ 。



图题 2.3.4

解：因为  $R_s \gg R_i$ ，所以  $i_s = i_1 = i$ ，则

$$v_o = -iR = -i_s R$$

2.3.5 电路如图题 2.3.5 所示，设运放是理想的，三极管 T 的  $V_{BE} = V_B - V_E = 0.7 \text{ V}$ 。(1) 求出三极管的 c、b、e 各极的电位值；(2) 若电压表读数为  $200 \text{ mV}$ ，试求三极管电流放大系数  $\beta = I_C / I_B$  的值。

解：(1) 利用虚短概念，c、b、e 各极电位为

$$V_C = v_{n1} = v_{p1} = V_2 = 6 \text{ V}, \quad V_B = v_{n2} = v_{p2} = 0 \text{ V},$$

$$V_{BE} = V_B - V_E = 0.7, \quad V_E = V_B - V_{BE} = -0.7 \text{ V}$$

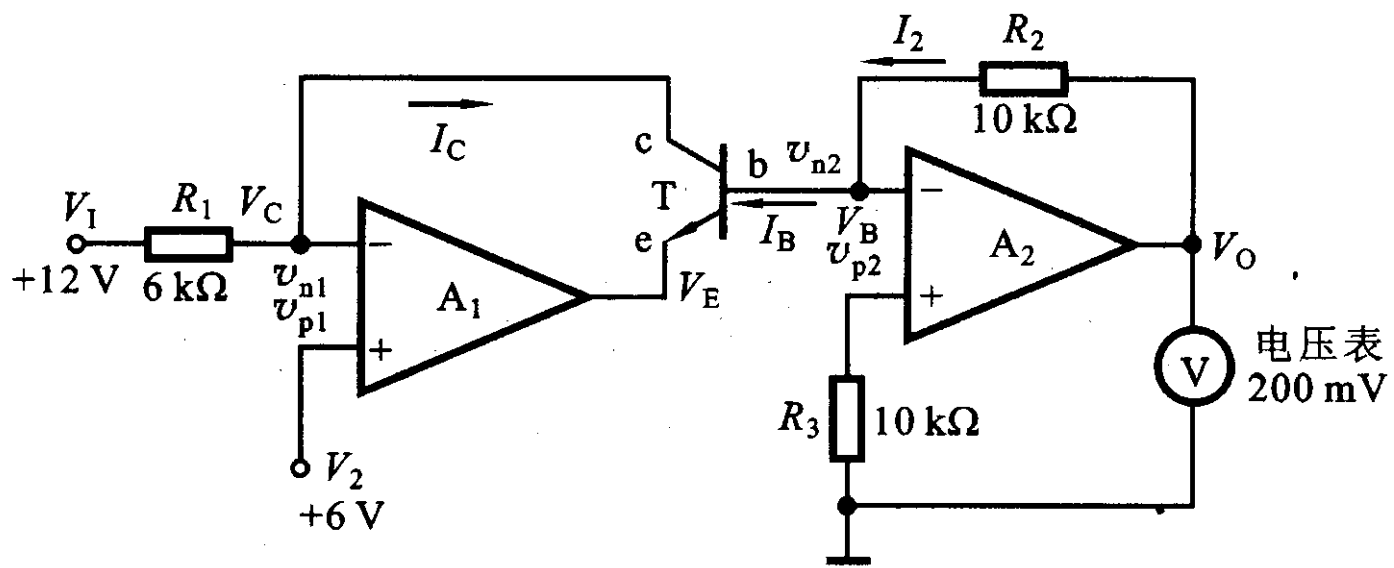
(2) 三极管的  $\beta$  值

$$I_C = \frac{V_I - v_{n1}}{R_1} = \frac{12 \text{ V} - 6 \text{ V}}{6 \times 10^3 \Omega} = 1 \times 10^{-3} \text{ A} = 1 \text{ mA}$$

$$I_B = \frac{V_O - v_{n2}}{R_2} = \frac{200 \times 10^{-3} \text{ V}}{10 \times 10^3 \Omega} = 20 \times 10^{-6} \text{ A} = 20 \mu\text{A}$$

所以电流放大系数

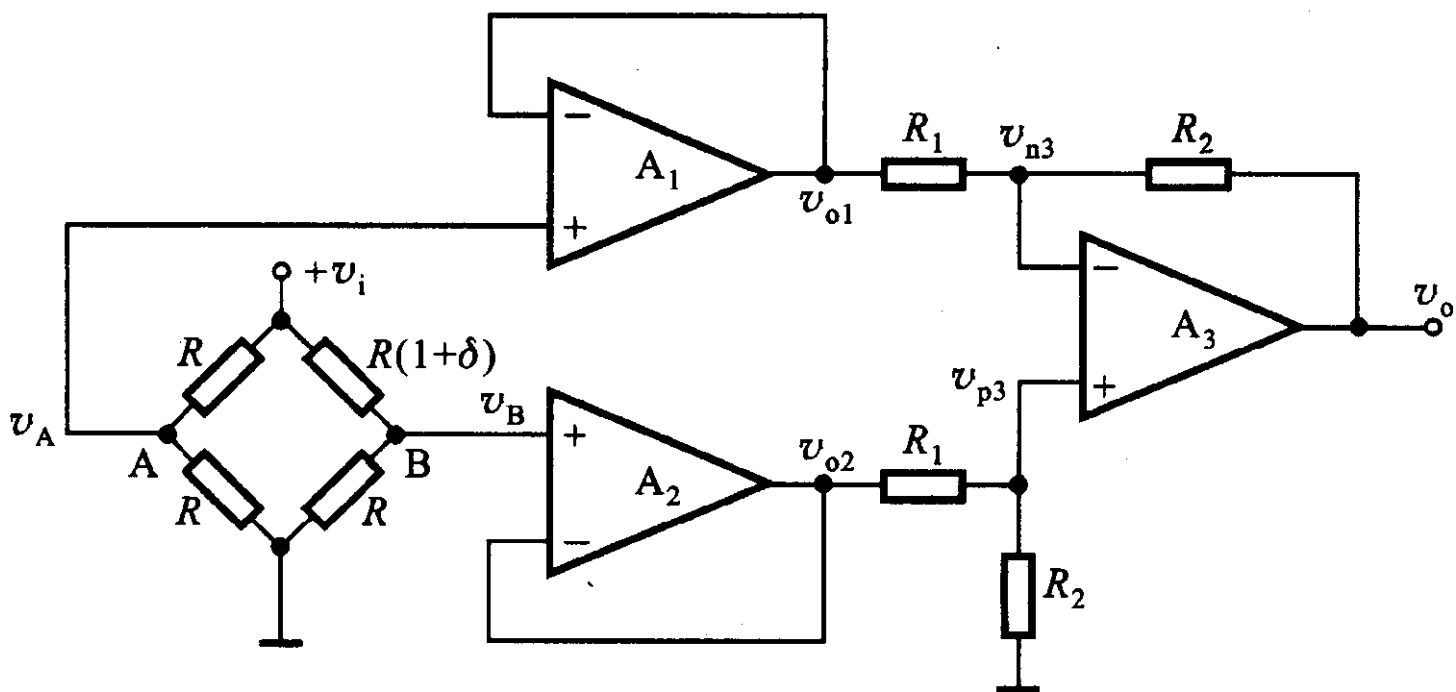
$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1 \times 10^{-3}}{20 \times 10^{-6}} = 50$$



图题 2.3.5

## 2.4 同相输入和反相输入放大电路的其他应用

2.4.1 一高输入电阻的桥式放大电路如图题 2.4.1 所示，试写出  $v_o = f(\delta)$  的表达式 ( $\delta = \Delta R/R$ )。



图题 2.4.1

解：因  $A_1$ 、 $A_2$  为电压跟随器，有

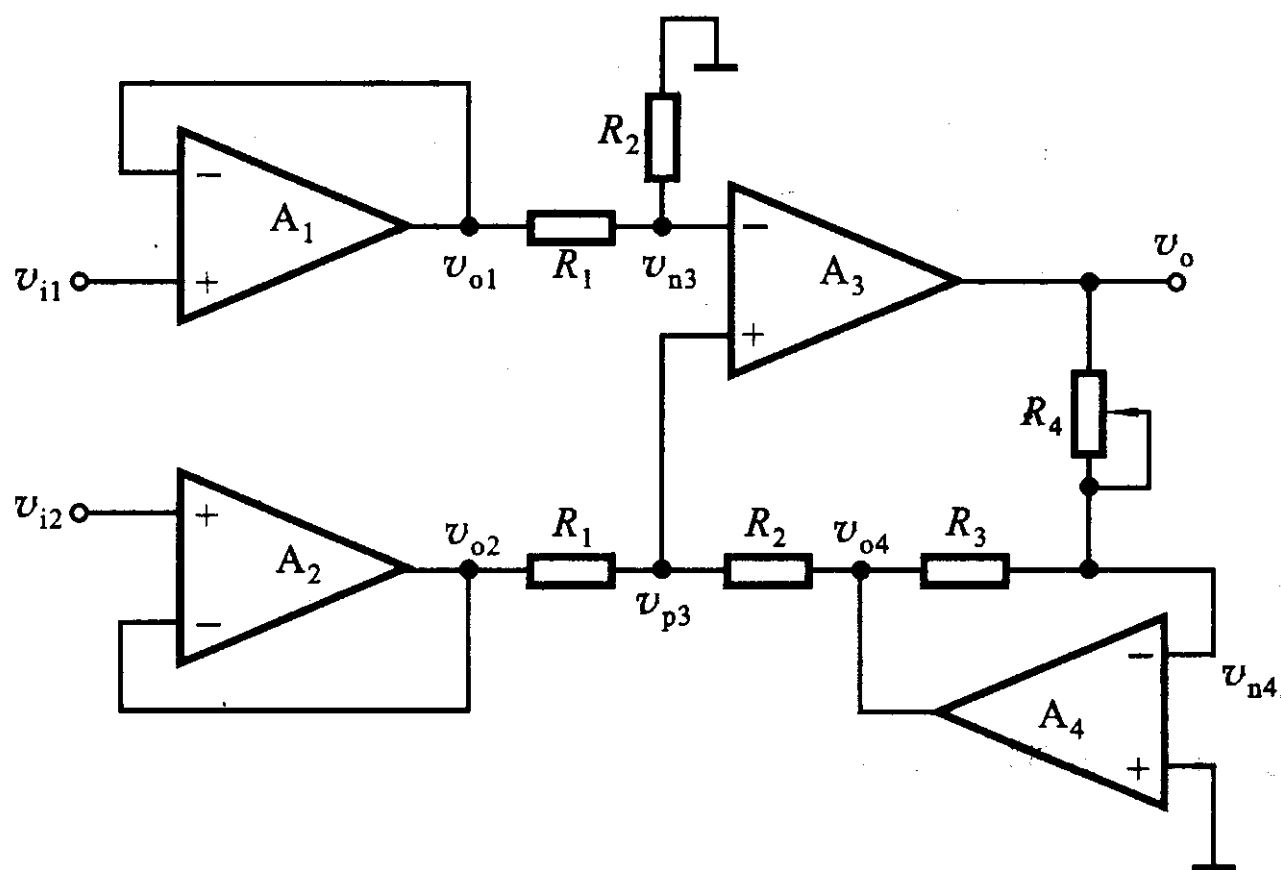
$$v_{o1} = v_A = \frac{v_i}{2}, \quad v_{o2} = v_B = \frac{R}{2R + \delta R} v_i = \frac{1}{2 + \delta} v_i$$

$v_{o1}$ 、 $v_{o2}$  为差分式运算电路  $A_3$  的输入信号电压，即有

$$\begin{aligned} v_o &= -\frac{R_2}{R_1} v_{o1} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) v_{o2} \\ &= \frac{R_2}{R_1} \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2 + \delta}\right) v_i = \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{-\delta}{4 + 2\delta}\right) v_i \end{aligned}$$

2.4.2 图题 2.4.2 所示为一增益线性调节运放电路，试求出该电路的电

压增益  $A_v = v_o / (v_{i1} - v_{i2})$  的表达式。



图题 2.4.2

解：A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 是电压跟随器，有

$$v_{o1} = v_{i1}, v_{o2} = v_{i2}$$

利用虚短和虚断概念，有

$$\begin{cases} \frac{v_{o1} - v_{n3}}{R_1} = \frac{v_{n3}}{R_2} \\ \frac{v_{o2} - v_{p3}}{R_1} = \frac{v_{p3} - v_{o4}}{R_2} \\ v_{o4} = -\frac{R_3}{R_4}v_o \\ v_{n3} = v_{p3} \end{cases}$$

将上述方程组联立求解，得

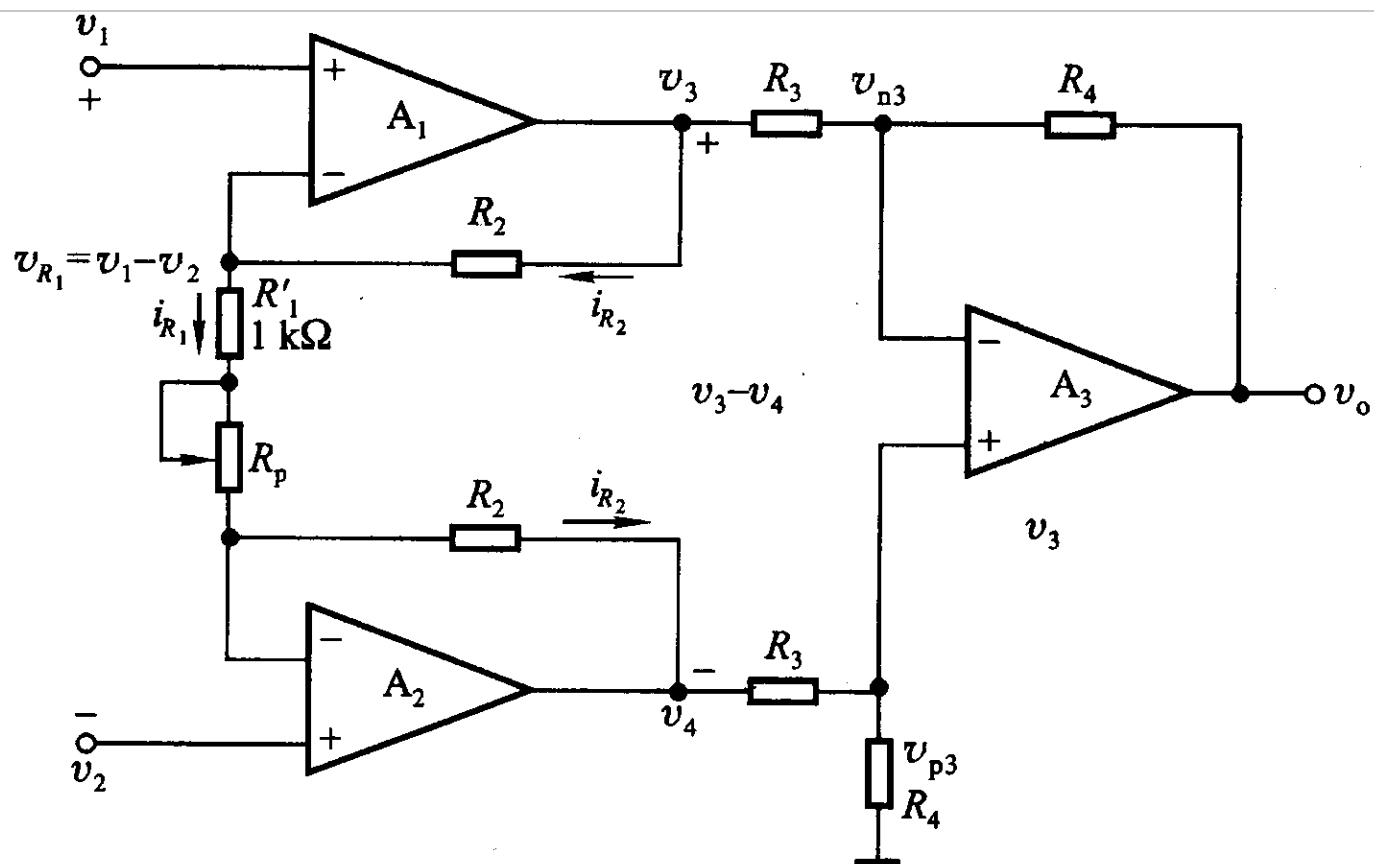
$$R_2 v_{o1} - R_2 v_{o2} = -\left(\frac{R_1 R_3}{R_4}\right)v_o$$

故

$$A_v = \frac{v_o}{v_{i1} - v_{i2}} = -\frac{R_2 R_4}{R_1 R_3}$$

2.4.3 仪用放大器电路如图题 2.4.3 (主教材图 2.4.3) 所示，设电路中  $R_4 = R_3$ ， $R_1$  为一固定电阻  $R'_1 = 1 \text{ k}\Omega$  和一电位器  $R_p$  串联，若要求电压增益在 5 ~ 400 之间可调，求所需电阻  $R_2$ 、 $R_p$  的阻值范围。并选取  $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  和  $R_p$ ，但电路中每个电阻值必须小于 250 k $\Omega$ 。

解：由式 (2.4.9) 可知， $A_{vd} = -\frac{R_4}{R_3}\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)$ ，当最大增益  $|A_{vd\max}| = 400$  时



图题 2.4.3

设  $R_1 = R_1' + R_p$ ，当  $R_1 = R_1' = 1 \text{ k}\Omega$ ，得

$$400 = \frac{R_4}{R_3} \left( 1 + \frac{2R_2}{R_1'} \right) = 1 \left( 1 + \frac{2R_2}{1 \text{ k}\Omega} \right)$$

$$R_2 = [(400 - 1)/2] \text{ k}\Omega = 199.5 \text{ k}\Omega, \text{ 取 } R_2 = 200 \text{ k}\Omega$$

最小电压增益  $|A_{v\text{dmin}}| = 5$  时，为

$$5 = 1 \left( 1 + \frac{2 \times 200}{1 + R_p} \right)$$

$$R_p = \frac{400 - 4}{4} \text{ k}\Omega = 99 \text{ k}\Omega, \text{ 取 } R_p = 100 \text{ k}\Omega$$

取  $R_3 = R_4 = 51 \text{ k}\Omega$ ， $R_2 = 200 \text{ k}\Omega$ ， $R_p = 100 \text{ k}\Omega$ （电位器）可满足  $A_{v\text{d}}$  在（5 ~ 400）之间可调。

2.4.4 设计一反相加法器，使其输出电压  $v_o = -(7v_{i1} + 14v_{i2} + 3.5v_{i3} + 10v_{i4})$ ，允许使用的最大电阻为  $280 \text{ k}\Omega$ ，求各支路的电阻。

解：设反相加法器各支路的电阻为  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ ，反馈支路电阻为  $R_5$ 。由  $v_o = -(7v_{i1} + 14v_{i2} + 3.5v_{i3} + 10v_{i4})$  可写为

$$v_o = - \left( \frac{R_5}{R_1} v_{i1} + \frac{R_5}{R_2} v_{i2} + \frac{R_5}{R_3} v_{i3} + \frac{R_5}{R_4} v_{i4} \right)$$

由上式可知最大电阻应为  $R_5$ ，故选  $R_5 = 280 \text{ k}\Omega$ ，所以各支路电阻分别为

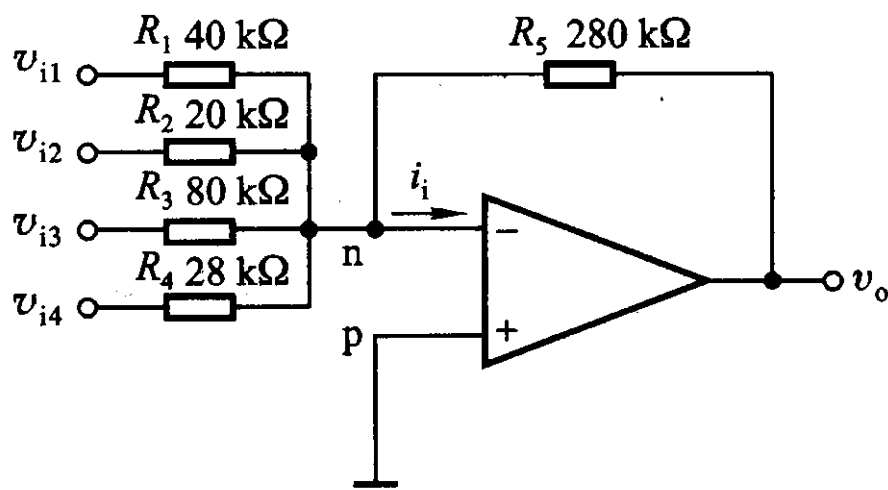
$$R_1 = \frac{R_5}{7} = \frac{280 \text{ k}\Omega}{7} = 40 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{R_5}{14} = \frac{280 \text{ k}\Omega}{14} = 20 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = \frac{R_5}{3.5} = \frac{280 \text{ k}\Omega}{3.5} = 80 \text{ k}\Omega$$

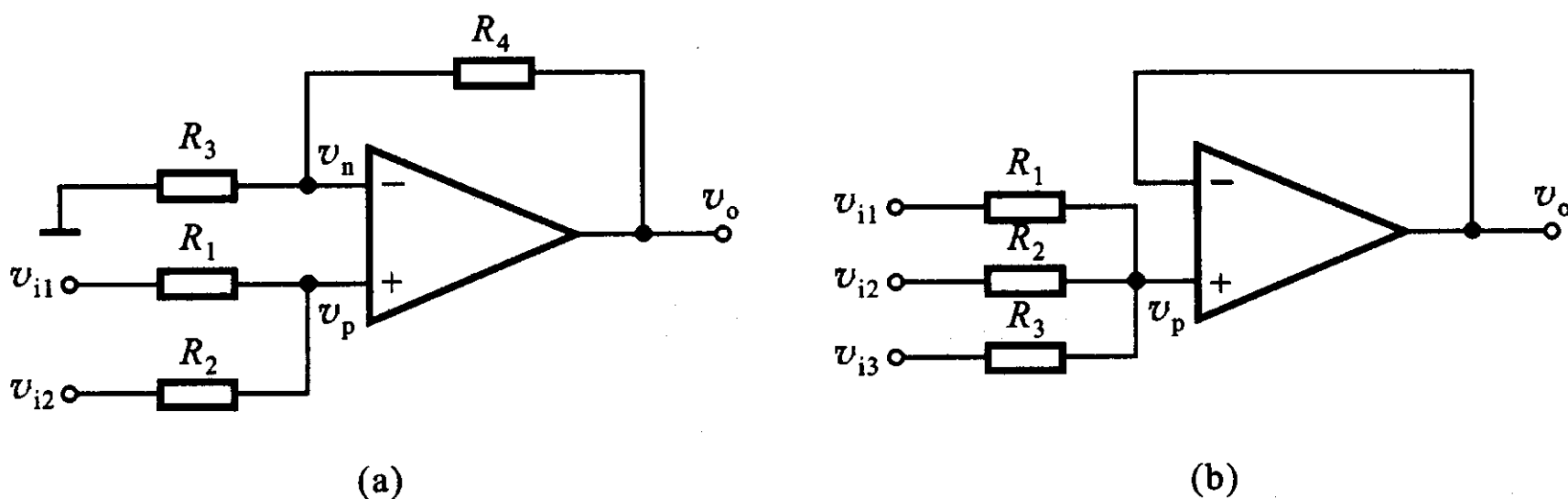
$$R_4 = \frac{R_5}{10} = \frac{280 \text{ k}\Omega}{10} = 28 \text{ k}\Omega$$

由已计算出的电阻值，可画出设计的反相加法器电路如图解 2.4.4 所示。



图解 2.4.4

2.4.5 同相输入加法电路如图题 2.4.5a、b 所示。(1) 求图 a 中输出电压  $v_o$  表达式。当  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$  时， $v_o = ?$  (2) 求图 b 中输出电压  $v_o$  表达式，当  $R_1 = R_2 = R_3$  时， $v_o = ?$



图题 2.4.5

解：(1) 图 a 的输出电压为

$$v_o = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) v_p$$

式中

$$v_p = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{i1} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_{i2}$$

即

$$v_o = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \left(\frac{1}{R_1 + R_2}\right) (R_2 v_{i1} + R_1 v_{i2})$$

若  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ，则

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

(2) 由于 A 是电压跟随器，故图 b 的输出电压为

$$v_o = v_p \text{ (A 同相端电压)}$$

而

$$v_p = \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + R_2 \parallel R_3} v_{i1} + \frac{R_1 \parallel R_3}{R_2 + R_1 \parallel R_3} v_{i2} + \frac{R_1 \parallel R_2}{R_3 + R_1 \parallel R_2} v_{i3}$$

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/688072037143006127>