

## 第4章 模拟集成运算放大器及其应用

4.1 当负载开路 ( $R_L = \infty$ ) 时测得放大电路的输出电压  $u'_o = 2V$ ; 当输出端接入  $R_L = 5.1K\Omega$  的负载时, 输出电压下降为  $u_o = 1.2V$ , 求放大电路的输出电阻  $R_o$ 。

$$U_o = \frac{R_L}{R_L + R_o} \cdot U'_o$$

$$\therefore R_o = \left(\frac{U'_o}{U_o} - 1\right)R_L = 3.4K\Omega$$

4.2 当在放大电路的输入端接入信号源电压  $u_s = 15mV$ , 信号源电阻  $R_s = 1K\Omega$  时, 测得电路的输入端的电压为  $u_i = 10mV$ , 求放大电路的输入电阻  $R_i$ 。

$$U_i = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot U_s$$

$$\therefore R_i = \left(\frac{U_i}{U_s - U_i}\right)R_s = 2K\Omega$$

4.3 当在电压放大电路的输入端接入电压源  $u_s = 15mV$ , 信号源内阻  $R_s = 1K\Omega$  时, 测得电路输入端的电压为  $u_i = 10mV$ ; 放大电路输出端接  $R_L = 3K\Omega$  的负载, 测得输出电压为  $u_o = 1.5V$ , 试计算该放大电路的电压增益  $A_u$  和电流增益  $A_i$ , 并分别用 dB(分贝)表示。

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = 150$$

$$A_u(dB) = 20\lg|A_u| = 43.5dB$$

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{U_o/R_L}{(U_s - U_i)/R_s} = 100$$

$$A_i(dB) = 20\lg|A_i| = 40dB$$

4.4 某放大电路的幅频响应特性曲线如图 4.1 所示, 试求电路的中频增益  $A_{um}$ 、下限截止频率  $f_L$ 、上限截止频率  $f_H$  和通频带  $f_{BW}$ 。

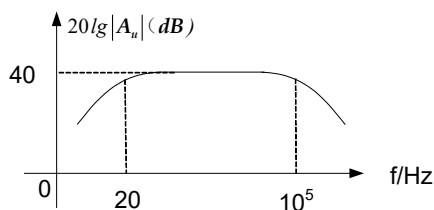


图 4.1 习题 4.4 电路图

$$A_{um}(dB) = 40dB \quad \therefore A_{um} = 100$$

$$f_H = 10^5 Hz \quad f_L = 20Hz$$

$$\therefore f_{BW} = f_H - f_L \approx f_H = 10^5 Hz$$

4.5 设两输入信号为  $u_{i1} = 40mV$ ,  $u_{i2} = 20mV$ , 则差模电压  $u_{id}$  和共模电压  $u_{ic}$  为多少。若电压的差模放大倍数为  $A_{ud} = 100$ , 共模放大倍数为  $A_{uc} = -0.5$ , 则总输出电压  $u_o$  为多少, 共模抑制比  $K_{CMR}$  是多少。

$$u_{id} = u_{i1} - u_{i2} = 20\text{mV} \quad u_{ic} = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2} = 30\text{mV}$$

$$u_o = A_{ud}u_{id} + A_{uc}u_{ic} = 1.985\text{V}$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| = 200$$

4.6 集成运算放大器工作在线性区和非线性区各有什么特点。

线性区：虚短；虚断

非线性区：输出仅为高、低两种电平；虚断

4.7 电路如图 4.2 所示，求输出电压  $u_o$  与各输入电压的运算关系式。

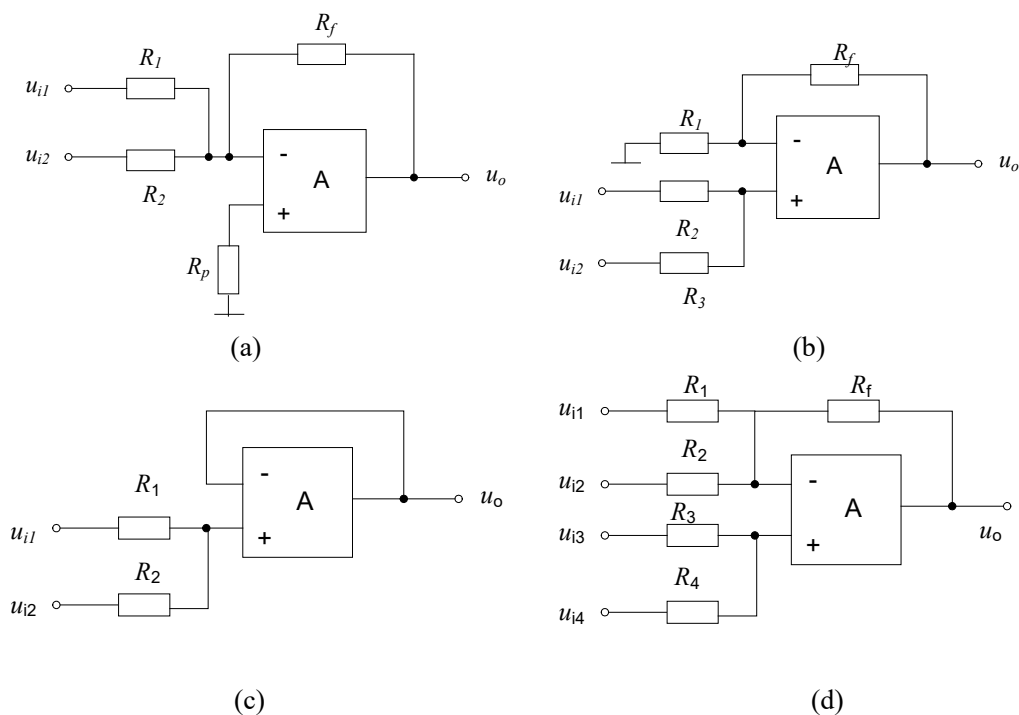


图 4.2 习题 4.7 电路图

$$(a) \quad u_o = -R_f \left( \frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} \right)$$

$$(b) \quad u_o = \left( 1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \left( \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i1} + \frac{R_2}{R_2 + R_3} u_{i2} \right)$$

$$(c) \quad u_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{i1} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_{i2}$$

$$(d) \quad u_o = -R_f \left( \frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} \right) + \left( 1 + \frac{R_f}{R_1 // R_2} \right) \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} u_{i3} + \frac{R_3}{R_3 + R_4} u_{i4} \right)$$

4.8 电路如图 4.3 所示，假设运放是理想的：(1) 写出输出电压  $U_o$  的表达式，并求出  $U_o$  的值；(2) 说明运放  $A_1$ 、 $A_2$  各组成何种基本运算电路。

$A_1$  反比例电路；  $A_2$  反相加法电路

$$u_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} u_{i1} = -10u_{i1}$$

$$u_o = -\frac{R_5}{R_3}u_{i2} - \frac{R_5}{R_4}u_{o1} = -5(u_{i2} + u_{o1}) = -5(u_{i2} - 10u_{i1}) = 7.5V$$

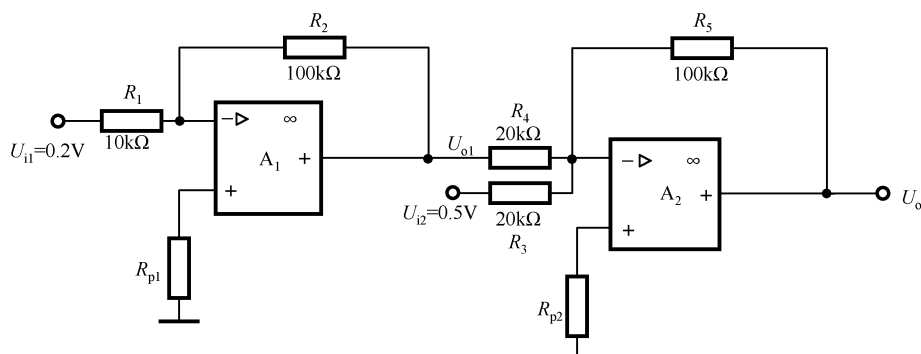
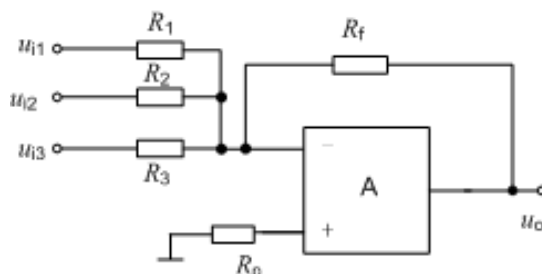


图 4.3 习题 4.8 电路图

4.9 采用一片集成运放设计一反相加法电路，要求关系式为  $u_o = -5(u_{i1} + 5u_{i2} + 3u_{i3})$ ，并且要求电路中最大的阻值不超过  $100K\Omega$ ，试画出电路图，计算各阻值。



$$u_o = -5(u_{i1} + 5u_{i2} + 3u_{i3}) = -(5u_{i1} + 25u_{i2} + 15u_{i3})$$

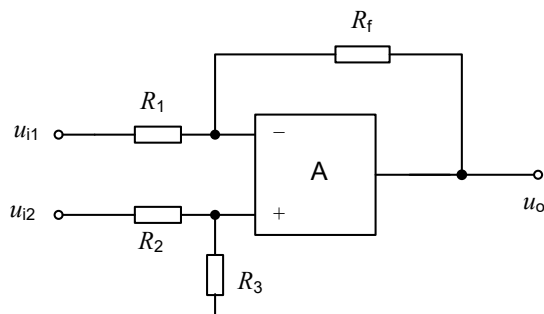
$$= -\left(\frac{R_f}{R_1}u_{i1} + \frac{R_f}{R_2}u_{i2} + \frac{R_f}{R_3}u_{i3}\right)$$

$$\therefore \frac{R_f}{R_1} = 5, \frac{R_f}{R_2} = 25, \frac{R_f}{R_3} = 15$$

取  $R_f = 100k\Omega$ , 则  $R_1 = 20K\Omega$ ,  $R_2 = 4K\Omega$ ,  $R_3 = 6.67K\Omega$ ,  $R_3$  取  $6.8K\Omega$

$R_p = 100 // 20 // 4 // 6.8 = 2.18K\Omega$ ，取  $2.2K\Omega$

4.10 采用一片集成运放设计一个运算电路，要求关系式为  $u_o = -10(u_{i1} - u_{i2})$ ，并且要求电路中最大的阻值不超过  $200K\Omega$ ，试画出电路图，计算各阻值。



$$u_o = -10(u_{i1} - u_{i2}) = -\frac{R_f}{R_1}u_{i1} + \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)\frac{R_3}{R_2 + R_3}u_{i2}$$

取  $R_f = 100k\Omega$  则  $R_1 = 10K\Omega$   $R_2 = 10K\Omega$   $R_3 = 100K\Omega$

**4.11** 电路如图 4.4 所示, 设运放是理想的, 求输出电压  $u_o$  的表达式。

$$\frac{u_i}{R_1} = -\frac{u_{o2}}{R_2}, \quad u_{o2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} u_o$$

$$\therefore u_o = -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) u_i$$

**4.12** 图 4.5 所示为带 T 形网络高输入电阻的反相比例运算电路。(1) 试推导输出电压  $u_o$  的表达式; (2) 若选  $R_1 = 51\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = R_3 = 390\text{k}\Omega$ , 当  $u_o = -100u_i$  时, 计算电阻  $R_4$  的阻值; (3) 直接用  $R_2$  代替 T 形网络, 当  $R_1 = 51\text{k}\Omega$ ,  $u_o = -100u_i$ , 求  $R_2$  的值; (4) 比较 (2)、(3) 说明该电路的特点。

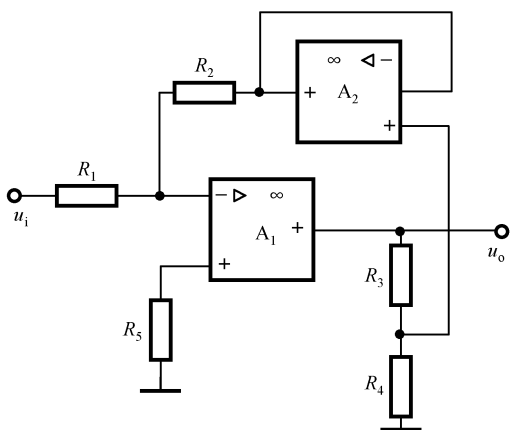


图 4.4 习题 4.11 电路图

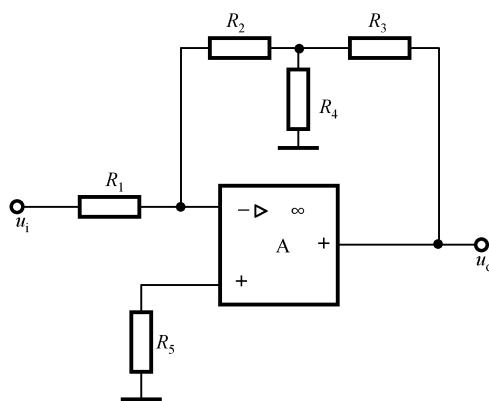


图 4.5 习题 4.12 电路图

$$(1) \frac{u_i}{R_1} = -\frac{R_2 // R_4}{R_3 + R_2 // R_4} \cdot \frac{u_o}{R_2}$$

$$\therefore u_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{(R_3 + R_2 // R_4)}{R_2 // R_4} u_i = -\frac{R_2 + R_3 + R_2 R_3 / R_4}{R_1} u_i$$

$$(2) A_u = -\frac{R_2 + R_3 + R_2 R_3 / R_4}{R_1} = \frac{390 + 390 + 390 \times 390 / R_4}{51} = -100$$

$$R_4 = 35.2\text{k}\Omega, \text{ 取 } 36\text{k}\Omega$$

$$(3) R_2 = -(A_u R_1) = -(-100 \times 51) = 5100\text{k}\Omega$$

(4) 由 (2)、(3) 分析可得: 用 T 型网络代替反馈电阻  $R_2$  时, 可用低阻值的网络得到高增益的放大电路。

**4.13** 电路如图 4.6 所示, 设所有运放都是理想的, 试求: (1)  $u_{o1}$ 、 $u_{o2}$ 、 $u_{o3}$  及  $u_o$  的表达式; (2) 当  $R_1 = R_2 = R_3$  时,  $u_o$  的值。

$$u_{o1} = u_1 \quad u_{o2} = u_2 \quad u_{o3} = u_3$$

$$u_o = \frac{R_2 // R_3}{R_1 + R_2 // R_3} u_1 + \frac{R_1 // R_3}{R_2 + R_1 // R_3} u_2 + \frac{R_1 // R_2}{R_3 + R_1 // R_2} u_3$$

$$\text{当 } R_1 = R_2 = R_3 = R \text{ 时, } u_o = \frac{1}{3}(u_1 + u_2 + u_3)$$

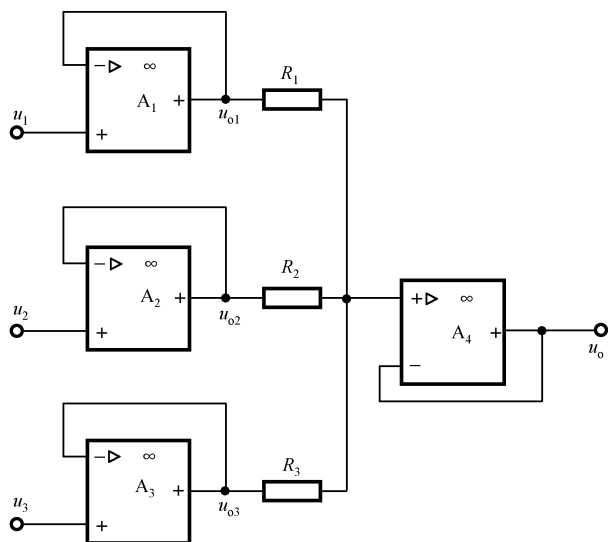


图 4.6 习题 4.13 电路图

4.14 电路如图 4.7 所示，运放均为理想的，试求电压增益  $A = \frac{u_o}{u_{i1} - u_{i2}}$  的表达式。

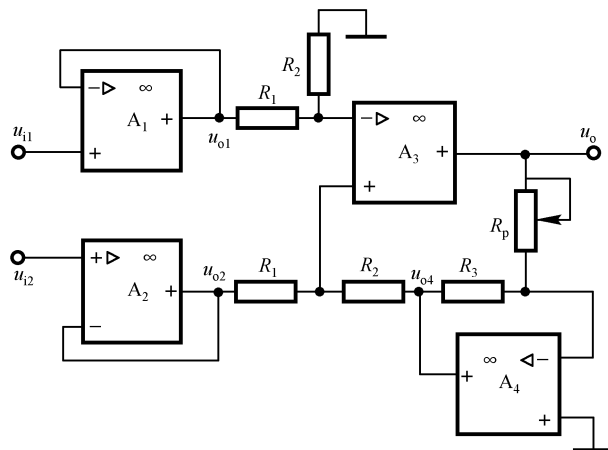


图 4.7 习题 4.14 电路图

$$u_{o1} = u_{i1} \quad u_{o2} = u_{i2}$$

$$\frac{u_{o2} - u_{3+}}{R_1} = \frac{u_{3+} - u_{o4}}{R_2}$$

$$\text{对 } A_3 \quad u_{3-} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{o1} \quad u_{3+} = u_{3-}$$

$$\text{对 } A_4 \quad \frac{u_{o4}}{R_3} = -\frac{u_o}{R_p}$$

$$\therefore u_o = -\frac{R_2 R_p}{R_1 R_3} (u_{i1} - u_{i2})$$

$$A = \frac{u_o}{u_{i1} - u_{i2}} = -\frac{R_2 R_p}{R_1 R_3}$$

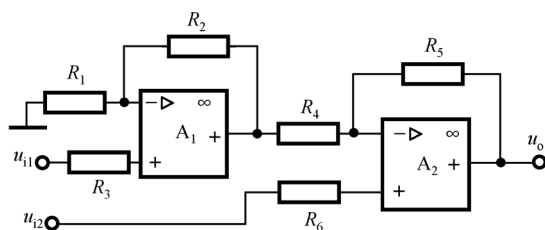
4.15 电路如图 4.8 所示，运放均为理想的，试求输出电压  $u_o$  的表达式。

$$(a) \quad u_{o1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_{i1}$$

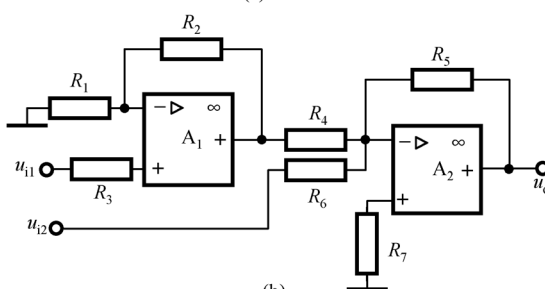
$$u_o = -\frac{R_5}{R_4}u_{o1} + (1 + \frac{R_5}{R_4})u_{i2} = -(1 + \frac{R_2}{R_1})\frac{R_5}{R_4}u_{i1} + (1 + \frac{R_5}{R_4})u_{i2}$$

$$(b) \quad u_{o1} = (1 + \frac{R_2}{R_1})u_{i1}$$

$$u_o = -\frac{R_5}{R_4}u_{o1} - \frac{R_5}{R_6}u_{i2} = -(1 + \frac{R_2}{R_1})\frac{R_5}{R_4}u_{i1} - \frac{R_5}{R_6}u_{i2}$$



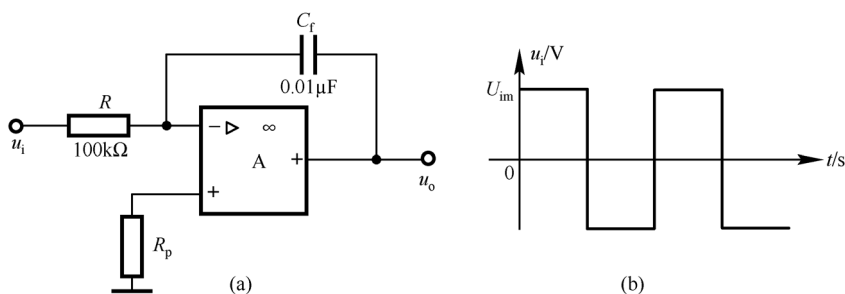
(a)



(b)

图 4.8 习题 4.15 电路图

**4.16** 电路如图4.9(a)所示，已知运放的最大输出电压  $U_{om} = \pm 12V$ ，输入电压波形如图 4.9(b)所示，周期为 0.1s。试画出输出电压的波形，并求出输入电压的最大幅值  $U_{im}$ 。



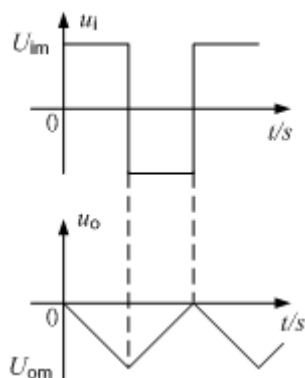
(a)

(b)

图 4.9 习题 4.16 电路图

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int u_i dt = -1000 \int u_i dt, \quad \because U_{om} = 12V, \quad T = 0.1s$$

$$\therefore U_{im} = 0.24V$$



**4.17** 电路如图 4.10 所示，运放均为理想的，电容的初始电压  $u_c(0) = 0$ ：（1）写出输出电压  $u_o$  与各输入电压之间的关系式；（2）当  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$  时，写出输出电压  $u_o$  的表达式。

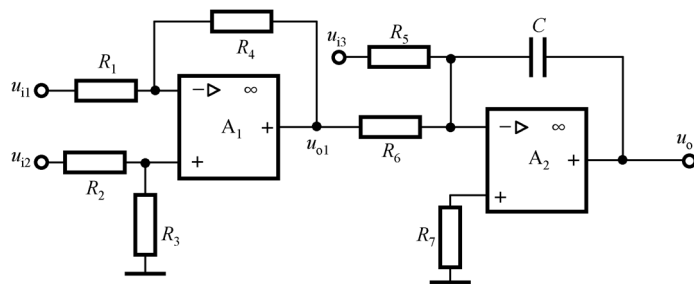


图 4.10 习题 4.17 电路图

$$u_{o1} = -\frac{R_4}{R_1} u_{i1} + \left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2}$$

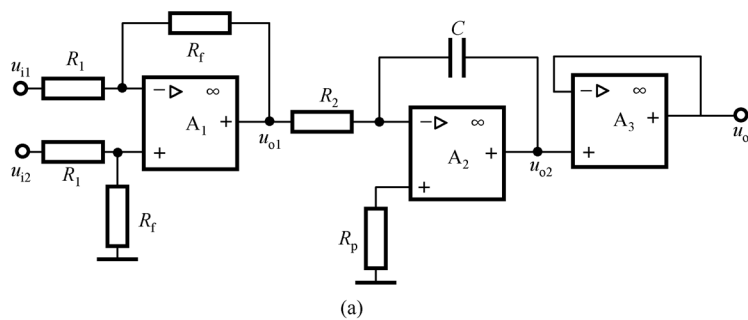
$$u_o = -\frac{1}{R_6 C} \int u_{o1} dt - \frac{1}{R_5 C} \int u_{i3} dt$$

当  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$  时

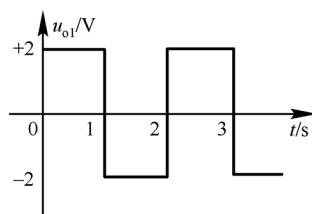
$$u_o = \frac{1}{RC} \int (u_{i1} - u_{i2} - u_{i3}) dt$$

**4.18** 电路如图 4.11(a)所示，运放均为理想的。（1） $A_1$ 、 $A_2$ 、和  $A_3$  各组成何种基本电路；（2）写出  $u_o$  的表达式；（3） $R_2 = 100\text{k}\Omega$ ， $C = 10\mu\text{F}$ ，电容的初始电压  $u_c(0) = 0$ ，已知  $u_{o1}$  的波形如图 4.11(b)所示，画出  $u_o$  的波形。

$A_1$  组成减法电路， $A_2$  组成积分电路， $A_3$  为电压跟随器



(a)

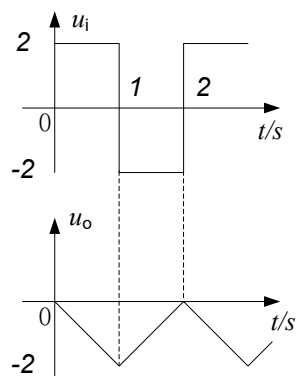


(b)

图 4.11 习题 4.18 电路图

$$u_{o1} = -\frac{R_f}{R_1} u_{i1} + \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_f}{R_1 + R_f} u_{i2} = -\frac{R_f}{R_1} (u_{i1} - u_{i2})$$

$$u_o = u_{o2} = -\frac{1}{R_2 C} \int u_{o1} dt = \frac{R_f}{R_1 R_2 C} \int (u_{i1} - u_{i2}) dt$$



**4.19** 电路如图 4.12(a)所示, 运放均为理想的, 电容的初始值  $u_c(0) = 0$ , 输入电压波形如图 4.12(b)所示: (1) 写出输出电压  $u_o$  的表达式; (2) 求  $t = 0$  时  $u_{o1}$ 、 $u_o$  的值; (3) 画出与  $u_i$  相对应的  $u_{o1}$  和  $u_o$  的波形, 并标出相应的幅度。

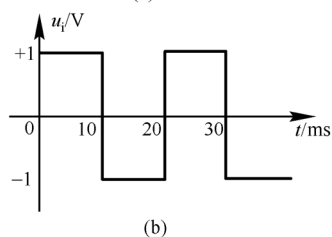
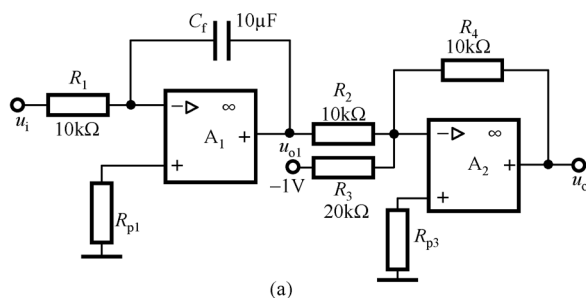
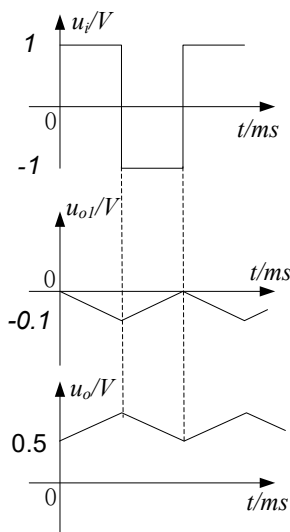


图 4.12 习题 4.19 电路图

$$u_{o1} = -\frac{1}{R_1 C_f} \int u_i dt = -10 \int u_i dt, \quad u_o = -\frac{R_4}{R_2} u_{o1} + \frac{R_4}{R_3} (-1) = 10 \int u_i dt + 0.5$$

$t=0$  时,  $u_{o1} = 0, \quad u_o = 0.5V$





**4.20** 电路如图 4.13 (a) 所示, 设运放为理想器件, (1) 求出门限电压  $U_{TH}$ , 画出电压传输特性 ( $u_o \sim u_i$ ), (2) 输入电压的波形如图 4.13 (b) 所示, 画出电压输出波形 ( $u_o \sim t$ )。

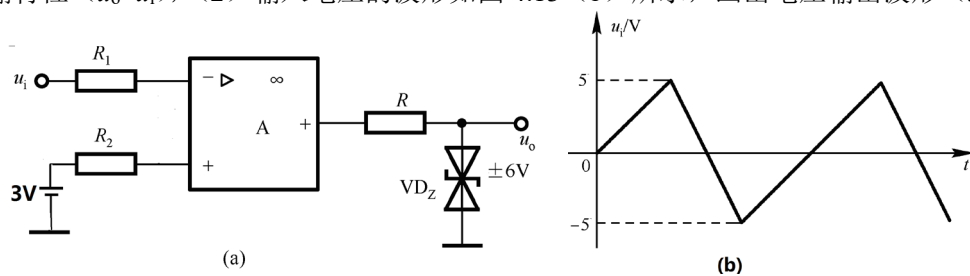
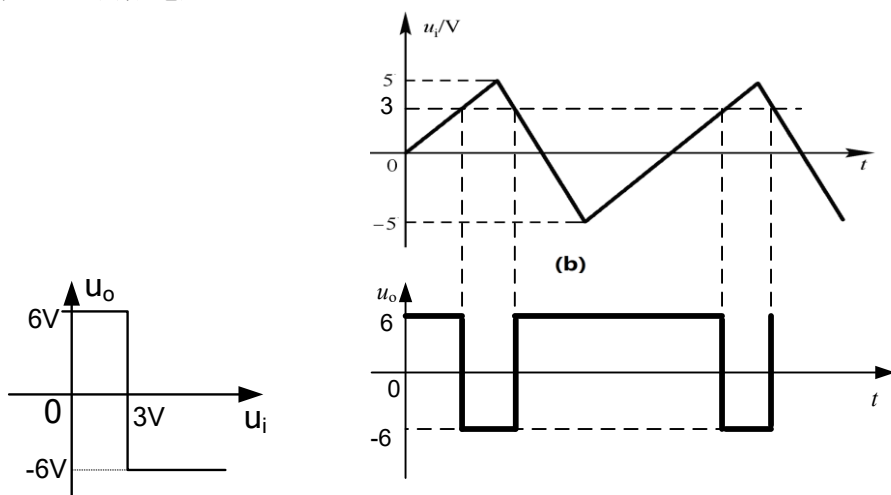


图 4.13 习题 4.20 电路图

解: (1) 门限电压  $U_{TH}=3V$ ,



**4.21** 电路如图 4.14 所示, 运放为理想的, 试求出电路的门限电压  $U_{TH}$ , 并画出电压传输特性曲线。

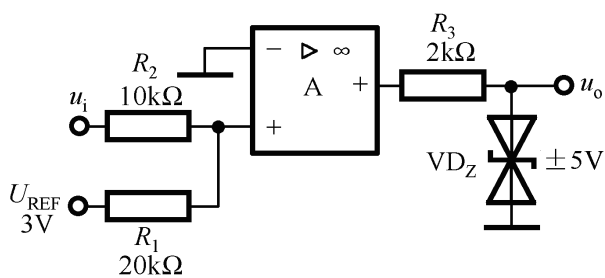


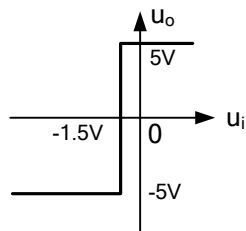
图 4.14 习题 4.21 电路图

$$\text{解: } u_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_i + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{REF} = \frac{2}{3} u_i + \frac{1}{3} U_{REF}$$

$$u_- = 0$$

输出状态翻转时,  $u_+ = u_-$ ,  $u_i = U_{TH}$

$$\therefore U_{TH} = -1.5V$$



4.22 电路如图 4.15 所示，已知运放最大输出电压  $U_{om} = \pm 12V$ ，试求出两电路的门限电压  $U_{TH}$ ，并画出电压传输特性曲线。

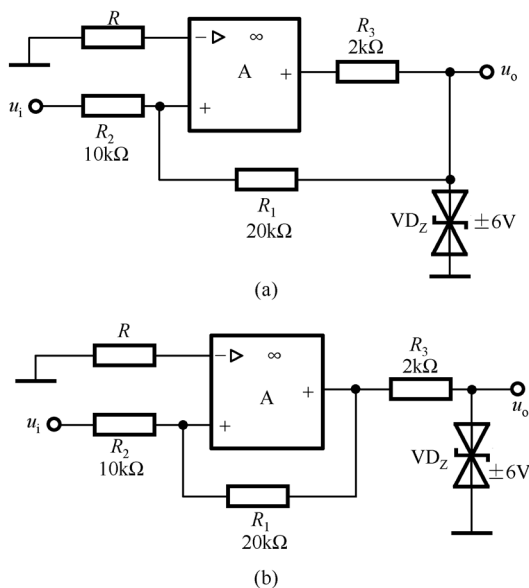


图 4.15 习题 4.22 电路图

$$(a) \quad u_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{TH} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_o = \frac{2}{3} U_{TH} + \frac{1}{3} u_o$$

$$u_o = \pm 6V$$

输出状态翻转时， $u_+ = u_- = 0$

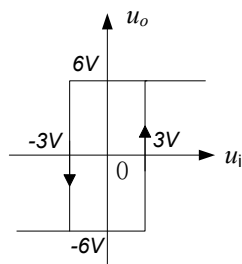
$$\therefore U_{TH} = \pm 3V$$

$$(b) \quad u_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{TH} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{om} = \frac{2}{3} U_{TH} + \frac{1}{3} U_{om}$$

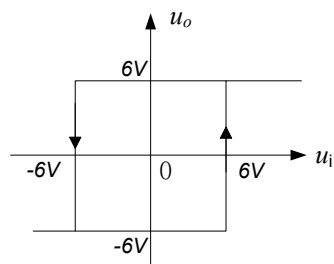
$$U_{om} = \pm 12V$$

输出状态翻转时， $u_+ = u_- = 0$

$$\therefore U_{TH} = \pm 6V$$



(a) 电压传输特性曲线



(b) 电压传输特性曲线

4.23 电路如图 4.16(a)所示，运放是理想的：(1) 试求电路的门限电压  $U_{TH}$ ，并画出电压

传输特性曲线；(2) 输入电压波形如图 4.16(b)所示，试画出输出电压  $u_o$  的波形。

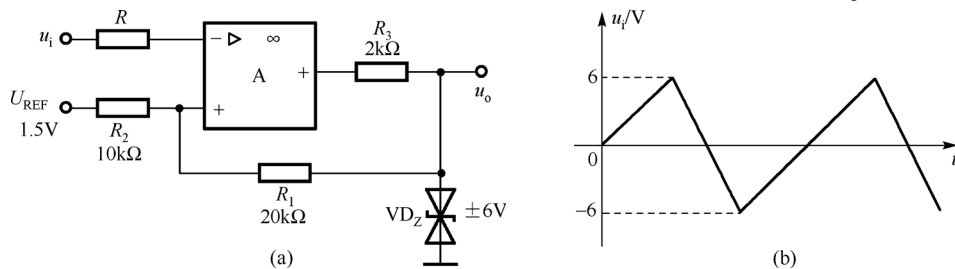
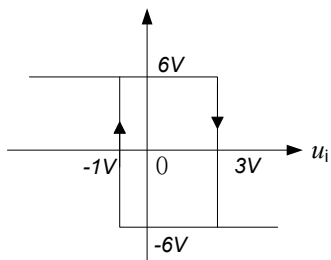


图 4.16 习题 4.23 电路图

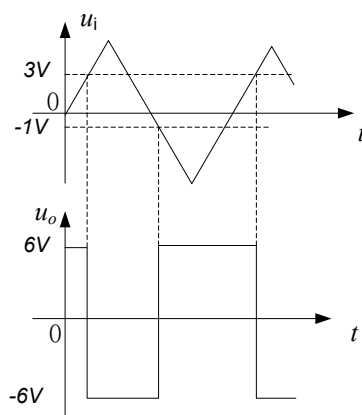
$$u_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{REF} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_o = \frac{2}{3} U_{REF} + \frac{1}{3} u_o$$

$$u_+ = u_- = u_i = U_{TH}, \quad u_o = \pm 6V$$

$$\therefore U_{TH+} = 3V, \quad U_{TH-} = -1V$$



(a) 电压传输特性曲线



(b) 电压输出波形

**4.24** 电路如图 4.17 所示，已知运放为理想的，运放最大输出电压  $U_{om} = \pm 15V$ ：(1)  $A_1$ 、 $A_2$ 、和  $A_3$  各组成何种基本电路；(2) 若  $u_i = 5\sin\omega t$  (V)，试画出与之对应的  $u_{o1}$ 、 $u_{o2}$  和  $u_o$  的波形。

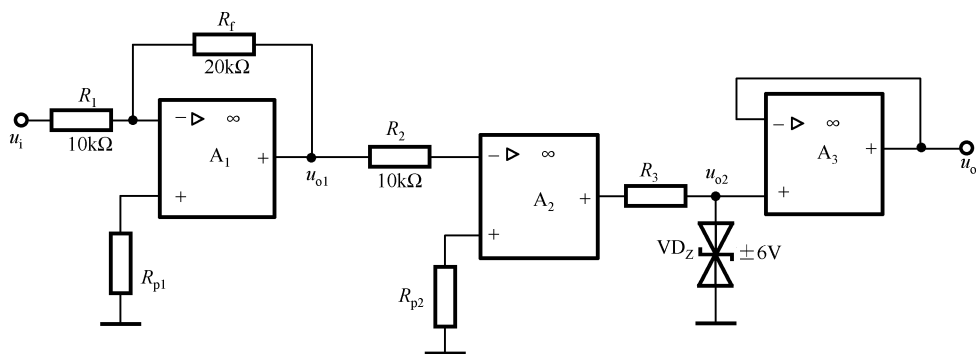
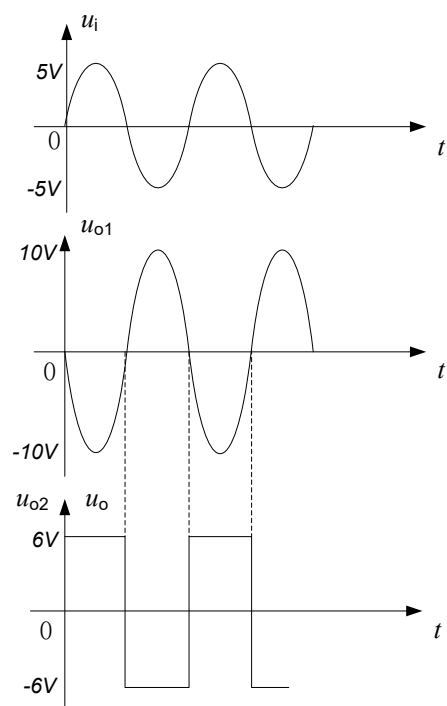


图 4.17 习题 4.24 电路图

- (1)  $A_1$  反相比例放大电路， $A_2$  简单电压比较器， $A_3$  电压跟随器  
(2)



各点电压输出波形图