

## 第5章 习题与答案

**5.1** 电路如图 P5.1 (a)、(b) 所示。设集成运算放大器输出电压的最大幅值为 $\pm 14V$ 。

- (1) 判断反馈类型，并分别求出输出电压  $u_o$  与输入电压  $u_i$  的关系式；
- (2) 当输入电压  $u_i$  为  $0.1V$ 、 $0.5V$ 、 $1.0V$ 、 $1.5V$  时，求出输出电压  $u_o$  的值。

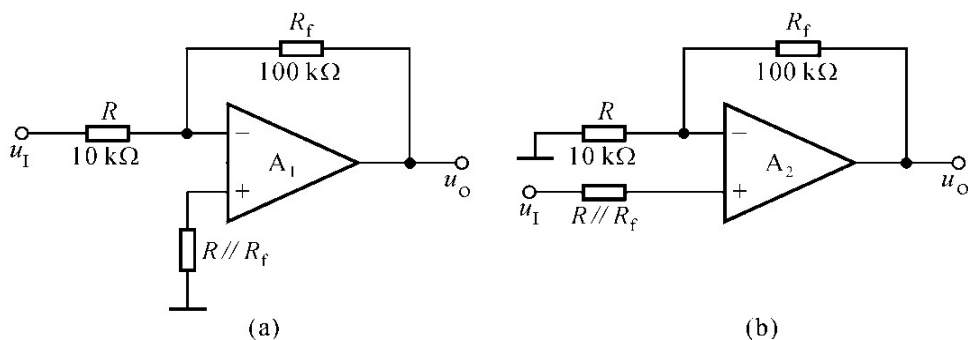
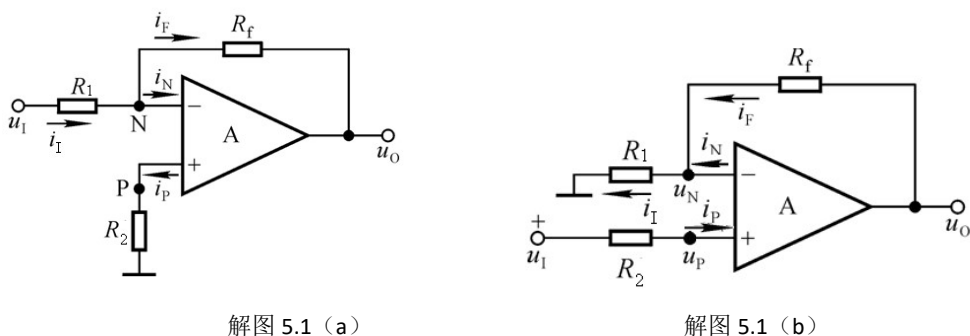


图 P5.1

**解：**(a) 电压并联负反馈，图中标出电流的参考方向如解图 5.1 (a) 所示。



利用“虚地”和“虚断”的概念，可得

$$i_I = \frac{u_I - u_N}{R_1} = \frac{u_I}{R_1}$$

$$i_F = \frac{u_N - u_O}{R_f} = -\frac{u_O}{R_f}$$

所以  $u_O = -\frac{R_f}{R_1} u_I$ ，即  $u_O = -\frac{100}{10} u_I = -10u_I$

(a) 电压串联负反馈，图中标出电流的参考方向如解图 5.1 (b) 所示。

$$i_F = \frac{u_O - u_N}{R_f} = \frac{u_O - u_I}{R_f}$$

$$i_I = \frac{u_N}{R_1} = \frac{u_I}{R_1}$$

因此，可得

$$u_o = \frac{R_1 + R_f}{R_1} u_1 = (1 + \frac{R_f}{R_1}) u_1, \text{ 即 } u_o = (1 + \frac{100}{10}) u_1 = 11 u_1$$

(2) 当集成运放工作到非线性区时，输出电压不是+14V，就是-14V。

输入电压 $u_1(\text{V})$	0.1	0.5	1.0	1.5
图(a)的输出电压(V)	-1	-5	-10	-14
图(b)的输出电压(V)	1.1	5.5	11	+14

5.2 运算电路如图 P5.2 所示。试求输出电压  $u_o$  与输入电压  $u_{11}$ 、 $u_{12}$  的关系式。

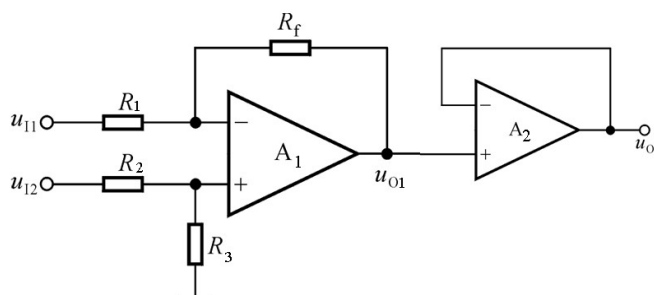


图 P5.2

解：对于  $A_1$ ，利用虚短和虚断可有

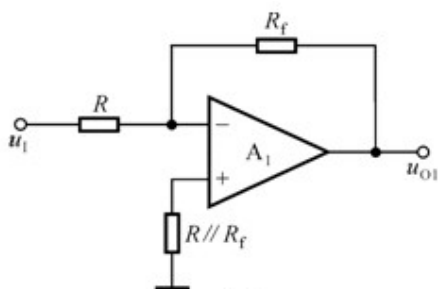
$$\left. \begin{aligned} u_N = u_P &= \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{12} \\ \frac{u_{11} - u_N}{R_1} &= \frac{u_N - u_{O1}}{R_f} \end{aligned} \right\} \Rightarrow u_{O1} = (1 + \frac{R_f}{R_1}) (\frac{R_3}{R_2 + R_3}) u_{12} - \frac{R_f}{R_1} u_{11}$$

对于  $A_2$ ，构成了电压跟随，即  $u_o = u_{O1}$

所以 
$$u_o = (1 + \frac{R_f}{R_1}) (\frac{R_3}{R_2 + R_3}) u_{12} - \frac{R_f}{R_1} u_{11}$$

5.3 设计一个比例运算电路。要求：输入电阻  $R_i = 20k\Omega$ ，比例系数为-100。

解：可采用反相比例运算电路，电路形式如解图 5.3 所示， $R = 20k\Omega$ ， $R_f = 2M\Omega$ 。



解图 5.3

5.4 电路如图 P5.4 所示，试求其输入电阻和比例系数。

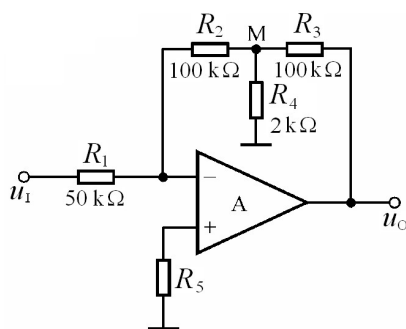


图 P5.4

**解：**根据“虚短”和“虚地”的概念可得：  $u_N = u_P = 0$

M 点的节点电流可得：  $i_2 = i_3 + i_4$

$$\left. \begin{aligned} \frac{u_i - 0}{R_1} &= \frac{0 - u_M}{R_2} \\ \frac{0 - u_M}{R_2} &= \frac{u_M - u_O}{R_3} + \frac{u_M}{R_4} \end{aligned} \right\} \Rightarrow u_O = -104u_i$$

输入电阻为：  $R_i = R_1 = 50\text{k}\Omega$

**5.5** 试求图 P5.5 所示各电路输出电压与输入电压的运算关系式。

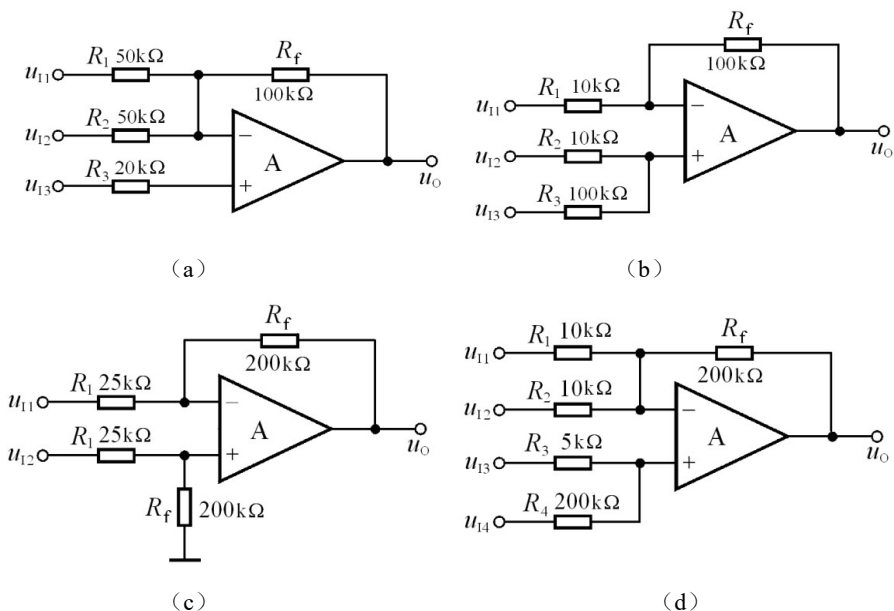


图 P5.5

**解：**

**方法：**利用“虚短”和“虚断”及 KCL 列电流方程求输出电压与输入电压的关系。图中应标出电流的参考方向。

(a)

$$\left. \begin{aligned} u_N &= u_P = u_{I3} \\ \frac{u_{I1} - u_N}{R_1} + \frac{u_{I2} - u_N}{R_2} &= \frac{u_N - u_O}{R_f} \end{aligned} \right\} \Rightarrow u_O = \left(1 + \frac{R_f}{R_1} + \frac{R_f}{R_2}\right)u_{I3} - \frac{R_f}{R_1}u_{I1} - \frac{R_f}{R_2}u_{I2}$$

$$\Rightarrow u_O = -2u_{I1} - 2u_{I2} + 5u_{I3}$$

(b)

$$\left. \begin{aligned} u_N &= u_P \\ \frac{u_{I1} - u_N}{R_1} &= \frac{u_N - u_O}{R_f} \\ \frac{u_{I2} - u_P}{R_2} &= \frac{u_P - u_{I3}}{R_3} \end{aligned} \right\} \Rightarrow u_O = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)\left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right)u_{I2} + \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)\left(\frac{R_2}{R_2 + R_3}\right)u_{I3} - \frac{R_f}{R_1}u_{I1}$$

$$\Rightarrow u_O = -10u_{I1} + 10u_{I2} + u_{I3}$$

(c)

$$\left. \begin{aligned} u_N &= u_P = \frac{R_f}{R_1 + R_f}u_{I2} \\ \frac{u_{I1} - u_N}{R_1} &= \frac{u_N - u_O}{R_f} \end{aligned} \right\} \Rightarrow u_O = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)\left(\frac{R_f}{R_1 + R_f}\right)u_{I2} - \frac{R_f}{R_1}u_{I1}$$

$$\Rightarrow u_O = 8(u_{I2} - u_{I1})$$

(d)

$$\left. \begin{aligned} u_N &= u_P \\ \frac{u_{I1} - u_N}{R_1} + \frac{u_{I2} - u_N}{R_2} &= \frac{u_N - u_O}{R_f} \\ \frac{u_{I3} - u_P}{R_3} &= \frac{u_P - u_{I4}}{R_4} \end{aligned} \right\} \Rightarrow u_O = \left(1 + \frac{R_f}{R_1} + \frac{R_f}{R_2}\right)\left(\frac{R_4}{R_4 + R_3}\right)u_{I3} + \left(1 + \frac{R_f}{R_1} + \frac{R_f}{R_2}\right)\left(\frac{R_3}{R_4 + R_3}\right)u_{I4} - \frac{R_f}{R_2}u_{I2} - \frac{R_f}{R_1}u_{I1}$$

$$\Rightarrow u_O = 40u_{I3} + u_{I4} - 20u_{I2} - 20u_{I1}$$

5.6 图 P5.6 所示是一个具有高输入电阻和低输出电阻的精密仪表放大电路。假设集成运算放大器是理想的。试证明  $u_O = \frac{R_f}{R}\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right)(u_{I2} - u_{I1})$

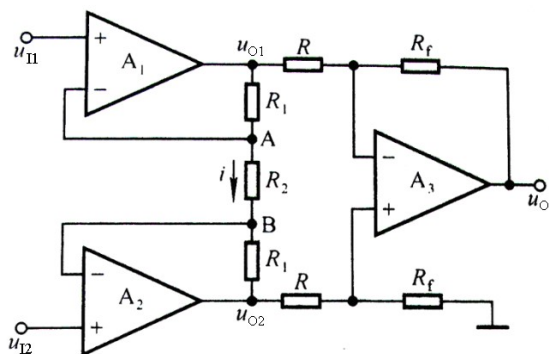


图 P5.6

解:

对  $A_1$ 、 $A_2$  而言, 都工作在同相比例运算状态,

$$u_A = u_{N1} = u_{P1} = u_{I1} \quad u_B = u_{N2} = u_{P2} = u_{I2}$$

由于三个电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_1$  从上而下流过同一电流,

所以

$$u_{O1} = u_A + \frac{u_{I1} - u_{I2}}{R_2} R_1 \quad u_{O2} = u_B - \frac{u_{I1} - u_{I2}}{R_2} R_1$$

$\therefore$  减法器  $A_3$  输出

$$u_o = \frac{R_f}{R} (u_{O2} - u_{O1}) = \frac{R_f}{R} \left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right) (u_{I2} - u_{I1})$$

5.7 在图 P5.7 (a) 所示电路中,  $u_{I1}$ 、 $u_{I2}$  的波形如图 P5.7 (b) 所示。试画出输出电压  $u_o$  的波形。

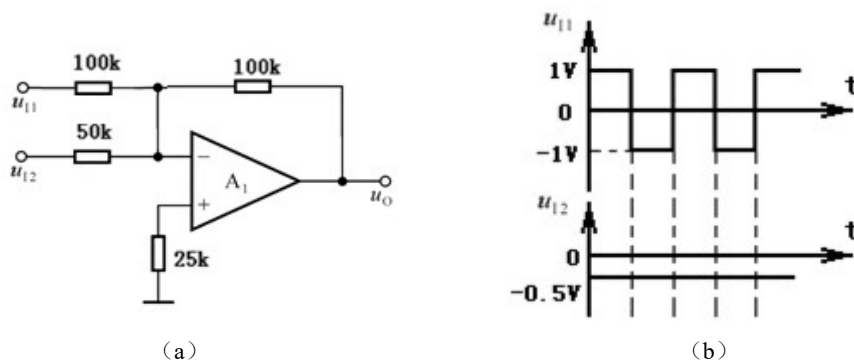
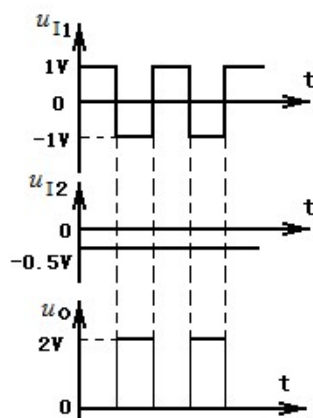


图 P5.7

解:

$$u_o = -\left(\frac{100}{100} \cdot u_{I1} + \frac{100}{50} u_{I2}\right) \\ \dots = -(u_{I1} + 2u_{I2})$$

因此输出波形如解图 P5.7 所示。



解图 P5.7

5.8 电路如图 P5.8 (a) 所示。已知: 输入电压  $u_i$  的波形如图 P5.8 (b) 所示; 当  $t=0$  时,

$u_C=0$ 。试画出输出电压  $u_O$  的波形。

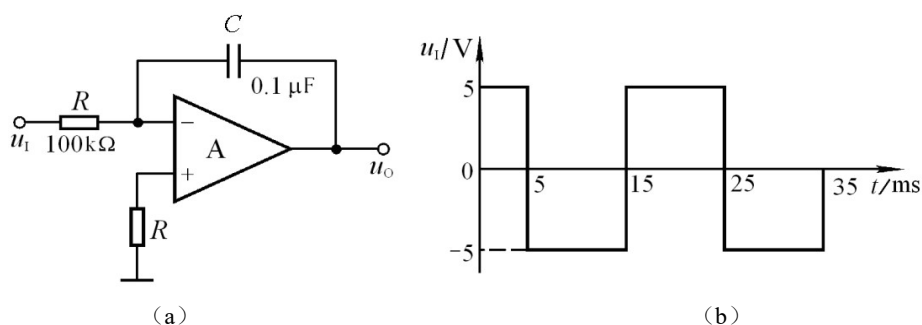


图 P5.8

解:

$$\text{输出电压的表达式为 } u_O = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} u_I dt + u_O(t_1)$$

当  $u_I$  为常量时:

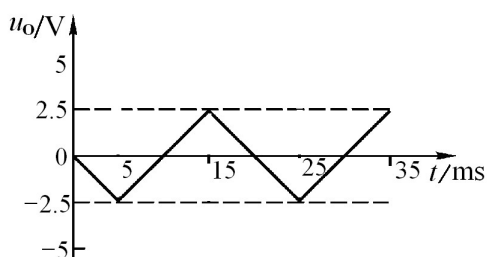
$$u_O = -\frac{1}{RC} u_I (t_2 - t_1) + u_O(t_1) = -\frac{1}{10^5 \times 10^{-7}} u_I (t_2 - t_1) + u_O(t_1) = -100 u_I (t_2 - t_1) + u_O(t_1)$$

若  $t=0$  时  $u_O=0$ ; 则

$$\text{当 } t=5\text{ms} \text{ 时, } u_O = -100 \times 5 \times 5 \times 10^{-3} \text{V} = -2.5\text{V}$$

$$\text{当 } t=15\text{ms} \text{ 时, } u_O = [-100 \times (-5) \times 10 \times 10^{-3} + (-2.5)] \text{V} = 2.5\text{V}$$

因此输出波形如解图 P5.8 所示。



解图 P5.8

**5.9** 电路如图 P5.9 (a) 所示。已知: 输入电压  $u_I$  的波形如图 P5.9 (b) 所示; 当  $t=0$  时  $u_C=0$ 。试画出输出电压  $u_O$  的波形。

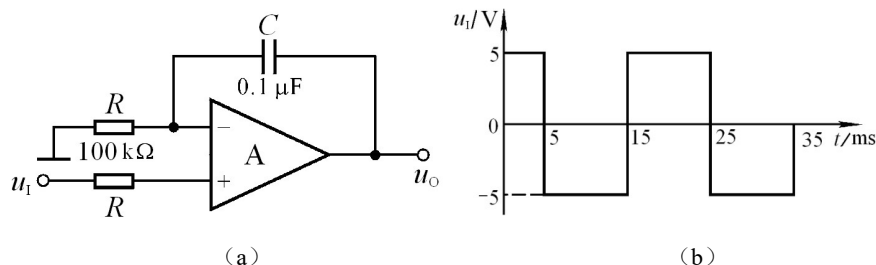


图 P5.9

解: 图中可见,  $u_N = u_P = u_I$ ,  $\therefore -\frac{u_I}{R} = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{d(u_I - u_O)}{dt}$

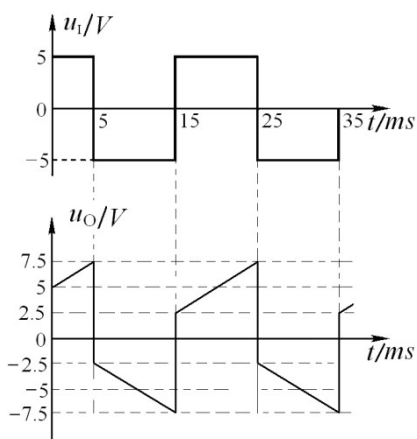
$$\text{即: } \frac{du_O}{dt} = \frac{du_I}{dt} + \frac{u_I}{RC}$$

∴ 输出电压与输入电压的运算关系为：

$$u_o(t) = u_I + \frac{1}{RC} u_I t + u_C(0)$$

或 
$$u_o(t) = 100u_I t + u_I + u_C(0)$$

设当  $t=0$  时,  $u_C=0$ 。分段画出波形如解图 P5.9 所示。



解图 P5.9

**5.11** 要求电路实现的运算关系如下, 分别画出各个运算电路, 并计算各电阻的阻值。

(1)  $u_o = 2u_I$

(2)  $u_o = -(u_{I1} + 0.2u_{I2})$

(3)  $u_o = 5u_I$

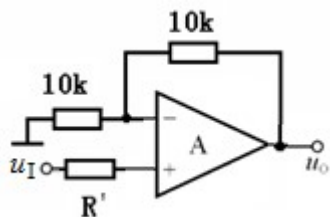
(4)  $u_o = -u_{I1} + 2u_{I2}$

(5)  $u_o = -3u_{I1} + 2u_{I2} + 3u_{I3} + 4u_{I4}$

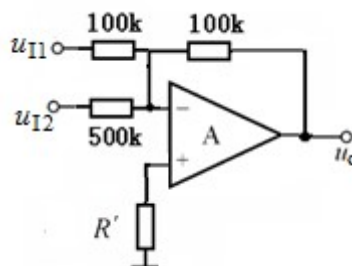
(6)  $u_o = -10 \int u_{I1} - 2 \int u_{I2}$

**解:** 用熟悉的电路结构实现相关运算, 注意电路一定是负反馈。实现方法可能不唯一。

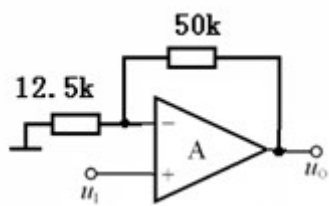
- (1) 用反相比例运算电路实现, 如解图 5.11 (a);
- (2) 用反相求和运算电路实现, 如解图 5.11 (b);
- (3) 用同相比例运算电路实现, 如解图 5.11 (c);
- (4) 用减法电路实现, 如解图 5.11 (d);
- (5) 用同相求和运算电路和减法电路实现, 如解图 5.11 (e);
- (6) 用两输入的反相积分电路实现, 如解图 5.11 (f)。



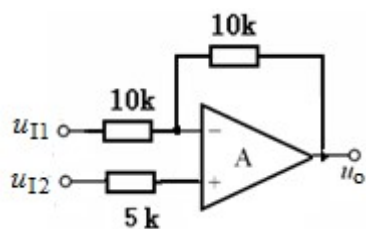
(a)



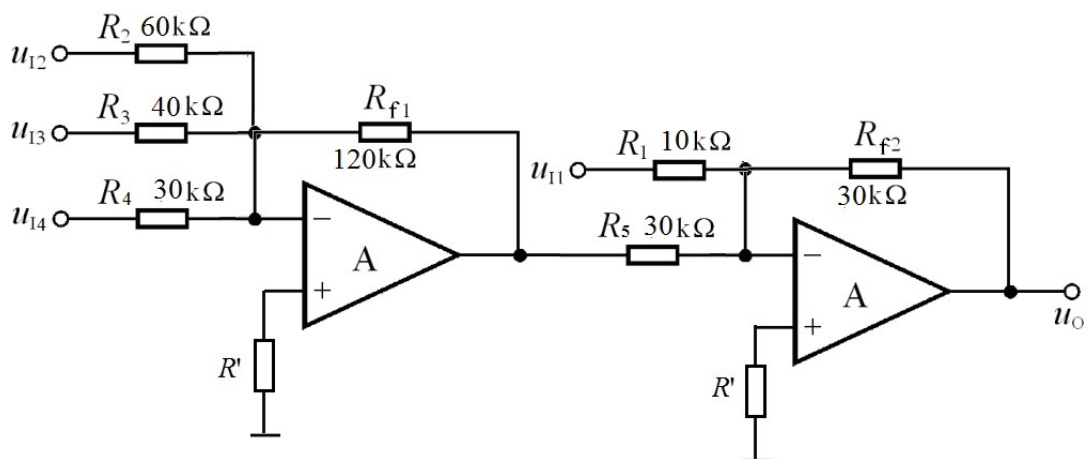
(b)



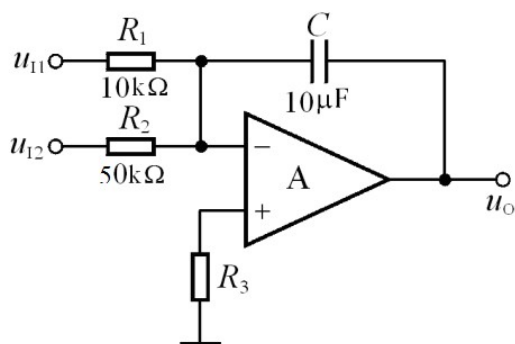
(c)



(d)



(e)



(f)

解图 P5.11

5.14 电路如图 P5.14 所示。试求解：(1)  $R_w$  的下限值；(2) 振荡频率的调节范围。

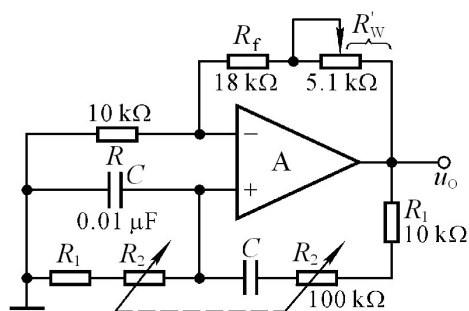




图 P5.14

解: (1)根据起振条件

$$R_f + R'_w > 2R, R'_w > 2k\Omega$$

故  $R_w$  的下限值为  $2k\Omega$ 。

(2)振荡频率的最大值和最小值分别为

$$f_{0\max} = \frac{1}{2\pi R_1 C} \approx 1.6kHz$$

$$f_{0\min} = \frac{1}{2\pi(R_1 + R_2)C} \approx 145Hz$$

5.15 电路如图 P5.15 所示, 稳压管起稳幅作用, 其稳压值为  $\pm 6V$ 。试估算:

(1) 在不失真情况下, 输出电压的有效值;

(2) 电路的振荡频率。

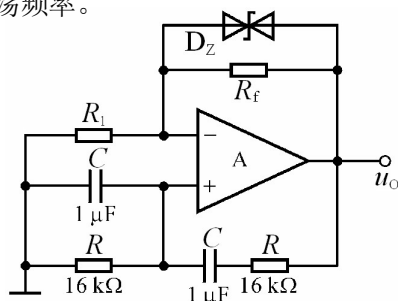


图 P5.15

解: (1)设输出电压不失真情况下的峰值为  $U_{om}$ , 此时  $U_N = U_P = \frac{1}{3}U_{om}$

$$\text{由图可知} \quad U_{om} - \frac{1}{3}U_{om} = \frac{2}{3}U_{om} = U_Z$$

$$\text{所以} \quad U_{om} = \frac{3}{2}U_Z = 9V$$

$$\text{有效值为} \quad U_o = \frac{U_{om}}{\sqrt{2}} \approx 6.36V$$

$$(2)\text{电路的振荡频率} \quad f_o = \frac{1}{2\pi RC} \approx 9.95Hz$$

5.17 桥式  $RC$  正弦波振荡电路如图 P5.17 所示。已知:  $R_f=10k\Omega$ ; 双联可变电容器可调范围是  $3\sim 30pF$ ; 电路输出正弦波电压  $u_o$  的频率为  $10\sim 100kHz$ 。试回答:

(1)  $R$  应如何选择? (2) 具有正温度特性的热敏电阻  $R_1$  应如何选择?

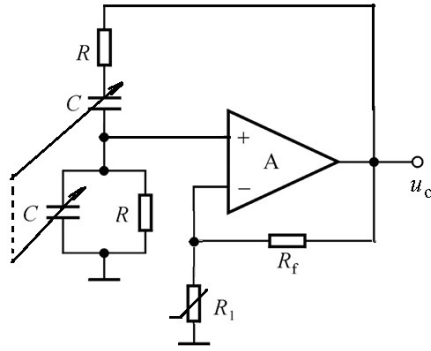


图 P5.17

解: (1)

$$C = 30\text{pF}, \text{ 时 } f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = 10\text{kHz}$$

$$C = 3\text{pF}, \text{ 时 } f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = 100\text{kHz}$$

$$\Rightarrow R = 530\text{K}\Omega$$

(2) 电路的电压放大倍数为

$$A_f = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

稳定输出时  $A_f=3$ , 满足  $R_f=2R_1$ , 所以  $R_1=5\text{K}$

起振时  $A_f>3$ , 随着输出电压升高, 电流会升高, 温度也会升高, 则而  $A_f$  应减小, 使稳定的时候达到  $A_f=3$ 。则热敏电阻  $R_1$  应具有正温度特性, 即温度升高,  $R_1$  升高, 放大倍数降低。

即: (1)  $R=530\text{K}\Omega$  (2) 具有正温度特性的热敏电阻  $R_1=5\text{K}$ 。

5.18 试画出如图 P5.18 所示电压比较器的电压传输特性。

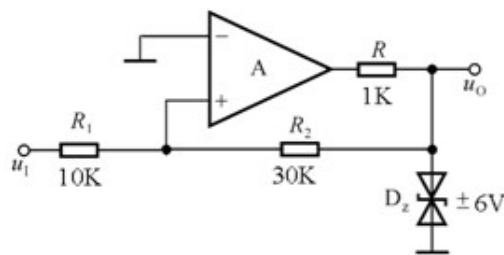
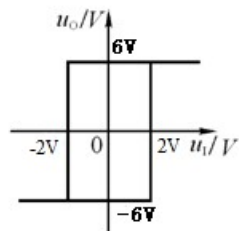


图 P5.18

解: 图 P5.18 所示电路为同相输入的滞回比较器, 两个阈值电压为  $\pm U_T = \pm 2\text{V}$ , 计算过程如下:

$$u_p = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_o + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot u_i = u_N = 0 \Rightarrow u_T = \pm \frac{R_1}{R_2} U_Z = \pm 2\text{V}$$

其传输特性曲线如解图 P5.18 所示。



解图 P5.18

**5.19** 电路如图 P5.19 所示。已知： $u_i=12\sin\omega t$  (V)，基准电压  $U_{REF}$  分别为 3V 和 -3V。试分别画出电压传输特性和输出电压的波形。

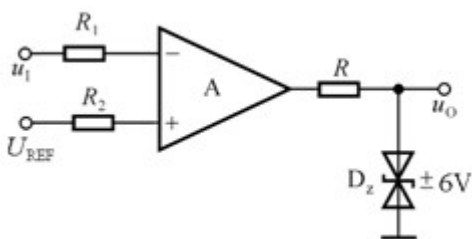
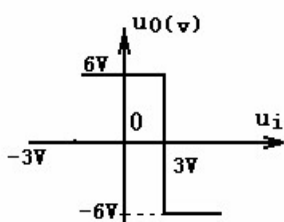
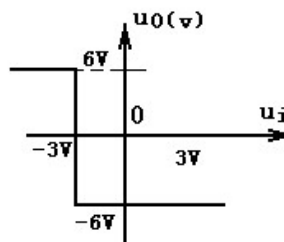


图 P5.19

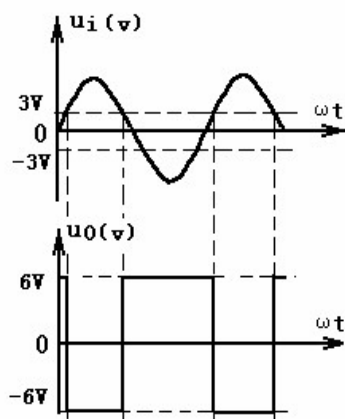
**解：**基准电压  $U_{REF}$  分别为 3V 和 -3V 时的电压传输特性曲线如解图 P5.19 (a)、(b) 所示，输出电压的波形如解图 P5.19 (c)、(d) 所示。



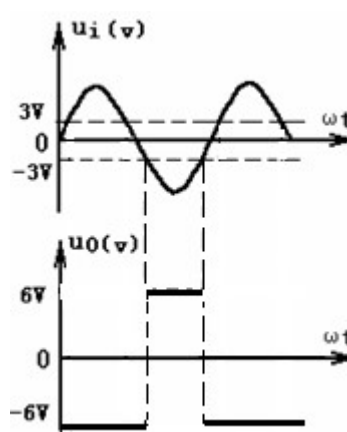
(a)



(b)



(c)



(d)

解图 P5.19

**5.20** 电路如图 P5.20 (a)、(b) 所示。已知： $u_i=12\sin\omega t$  (V)，基准电压  $U_{REF}$  分别为

3V 和-3V。试分别画出电压传输特性和输出电压的波形。

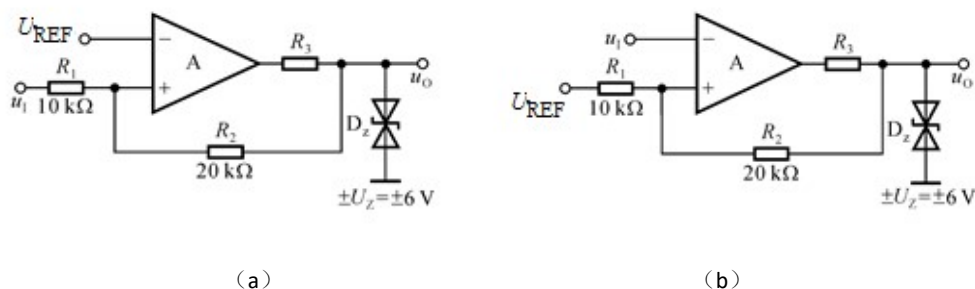


图 P5.20

解:

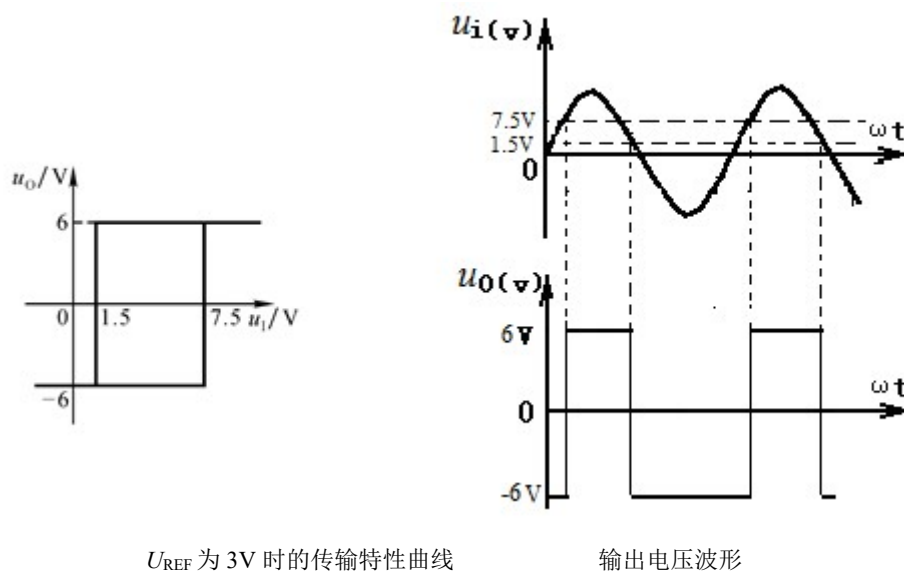
图 (a) 所示电路为同相输入的滞回比较器,  $u_O = \pm U_Z = \pm 6V$ 。

$$u_P = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot u_I + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_{O1} = u_N = U_{REF}$$

当  $U_{REF}$  为 3V 时, 求出阈值电压  $U_{T1} = 1.5V$   $U_{T2} = 7.5V$ ; 其电压传输特性和输出电压波形如解图 P7.20 (a) 所示。

当  $U_{REF}$  为 -3V 时, 求出阈值电压  $U_{T1} = -7.5V$   $U_{T2} = -1.5V$ ; 其电压传输特性和输出电压波形如解图 P7.20 (b) 所示。

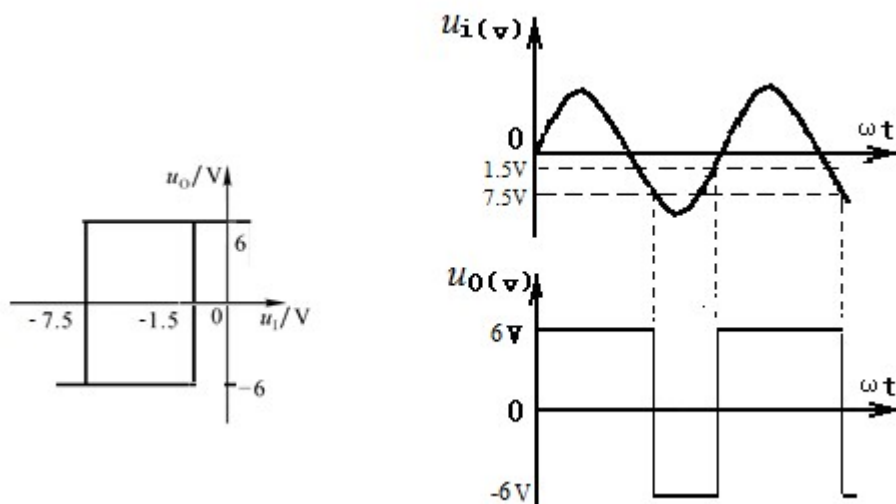
可见, 改变  $U_{REF}$  可在 x 轴方向移动传输特性曲线。



$U_{REF}$  为 3V 时的传输特性曲线

输出电压波形

解图 P7.20 (a)



$U_{REF}$  为  $-3V$  时的传输特性曲线

输出电压波形

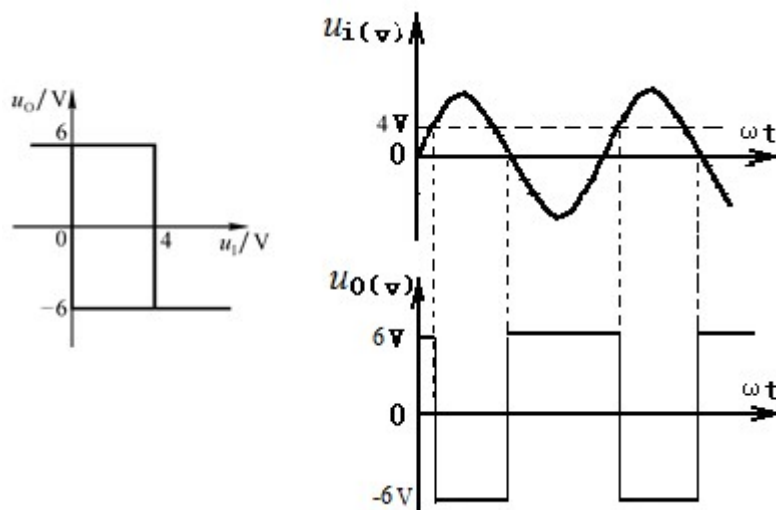
解图 P7.20 (b)

图 (b) 所示电路为反相输入的滞回比较器,  $u_O = \pm U_Z = \pm 6V$ 。

$$u_P = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_O + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{REF} = u_N = u_I$$

当  $U_{REF}$  为  $3V$  时, 求出阈值电压  $U_{T1} = 0V$   $U_{T2} = 4V$ ; 其电压传输特性和输出电压波形如解图 P7.4.2 (c) 所示。

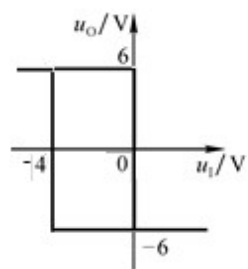
当  $U_{REF}$  为  $-3V$  时, 求出阈值电压  $U_{T1} = -4V$   $U_{T2} = 0V$ ; 其电压传输特性和输出电压波形如解图 P7.4.2 (d) 所示。



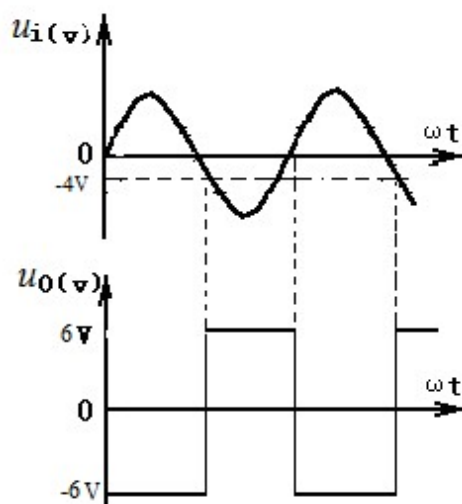
$U_{REF}$  为  $3V$  时的传输特性曲线

输出电压波形

解图 P7.4.2 (c)



$U_{REF}$  为  $-3V$  时的传输特性曲线



输出电压波形

解图 P7.4.2 (d)