

8 信号的运算与处理电路

8.1.1 同相输入加法电路如图题 8.1.1 所示, 求输出电压 v_o ; 当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$ 时, $v_o = ?$

解 输出电压为

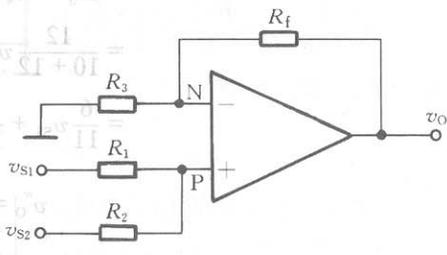
$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_3}\right) v_P$$

式中
$$v_P = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{S1} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_{S2}$$

即
$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_3}\right) \left(\frac{1}{R_1 + R_2}\right) (R_2 v_{S1} + R_1 v_{S2})$$

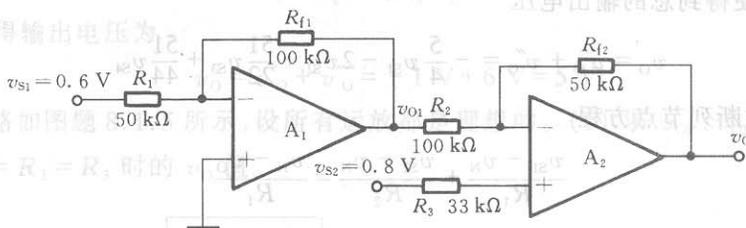
若 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$, 则

$$v_o = v_{S1} + v_{S2}$$



图题 8.1.1

8.1.2 电路如图题 8.1.2 所示, 假设运放是理想的, 试求出电路的输出电压 v_o 的值。



图题 8.1.2

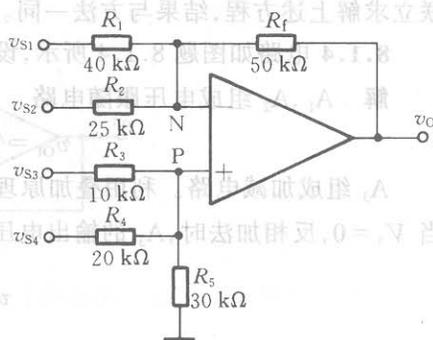
解 运算电路 A_1 的输出电压为

$$v_{O1} = -\frac{R_{f1}}{R_1} v_{S1} = -\frac{100}{50} (0.6 \text{ V}) = -1.2 \text{ V}$$

差分式运算电路 A_2 的输出电压为

$$\begin{aligned} v_o &= -\frac{R_{f2}}{R_2} v_{O1} + \left(1 + \frac{R_{f2}}{R_2}\right) v_{S2} \\ &= -\frac{50}{100} (-1.2 \text{ V}) + \left(1 + \frac{50}{100}\right) (0.8 \text{ V}) \\ &= (0.6 + 1.2) \text{ V} = 1.8 \text{ V} \end{aligned}$$

8.1.3 加减运算电路如图题 8.1.3 所示, 求输出电压 v_o 的表达式。



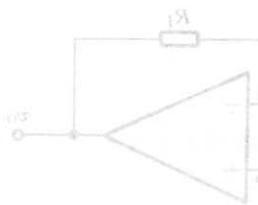
图题 8.1.3

解 方法一:应用虚短概念和叠加原理。令 $v_{S3} = v_{S4} = 0$, 则

$$v'_o = -\frac{R_f}{R_1} v_{S1} - \frac{R_f}{R_2} v_{S2} = -\frac{5}{4} v_{S1} - 2 v_{S2}$$

再令 $v_{S1} = v_{S2} = 0$, 则

$$v_p = \frac{R_4 \parallel R_5}{R_3 + R_4 \parallel R_5} v_{S3} + \frac{R_3 \parallel R_5}{R_4 + R_3 \parallel R_5} v_{S4}$$



$$= \frac{12}{10+12} v_{S3} + \frac{7.5}{20+7.5} v_{S4}$$

$$= \frac{6}{11} v_{S3} + \frac{3}{11} v_{S4}$$

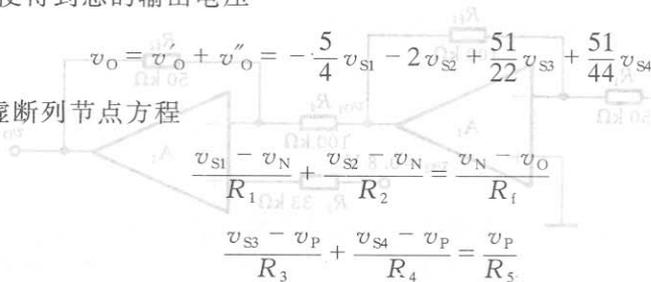
$$v''_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1 \parallel R_2} \right) v_p$$

$$= \left(1 + \frac{50}{15.4} \right) \left(\frac{6}{11} v_{S3} + \frac{3}{11} v_{S4} \right)$$

$$= \frac{51}{22} v_{S3} + \frac{51}{44} v_{S4}$$

将 v'_o 和 v''_o 叠加便得到总的输出电压

方法二:用虚断列节点方程



$$\frac{v_{S1} - v_N}{R_1} + \frac{v_{S2} - v_N}{R_2} = \frac{v_N - v_o}{R_f}$$

$$\frac{v_{S3} - v_p}{R_3} + \frac{v_{S4} - v_p}{R_4} = \frac{v_p}{R_5}$$

$$\text{令 } v_p = v_N$$

联立求解上述方程,结果与方法一同。

8.1.4 电路如图题 8.1.4 所示,设运放是理想的,试求 v_{O1} 、 v_{O2} 及 v_O 的值。

解 A_1 、 A_2 组成电压跟随器

$$v_{O1} = V_1 = -3 \text{ V}, v_{O2} = V_2 = 4 \text{ V}$$

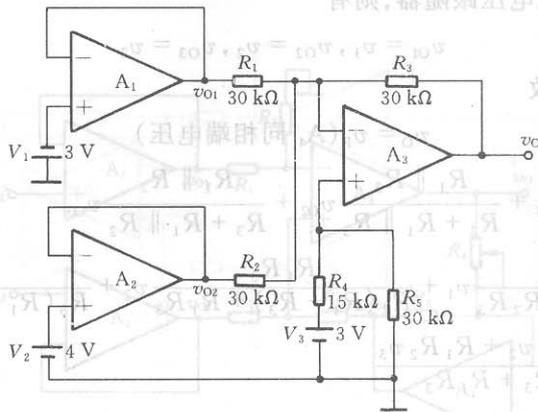
A_3 组成加减电路。利用叠加原理。

当 $V_3 = 0$, 反相加法时, A_3 的输出电压为

$$v'_o = -\frac{R_3}{R_1} v_{O1} - \frac{R_3}{R_2} v_{O2}$$

$$= -\frac{30}{30} (-3 \text{ V}) - \frac{30}{30} (4 \text{ V}) = 1 \text{ V}$$

当 $v_{O1} = 0, v_{O2} = 0, V_3 = +3 \text{ V}$ 时, A_3 的输出电压为



图题 8.1.4

8.1.4 由运放组成的 BT 电压源放大电路如图题 8.1.4 所示, 设 BT 的 $V_{BE} = 0.7\text{V}$ 。(1) 求出 BT 的 c, b, e 各极的电压表读数为 200mV 时的基极电压 V_B 和发射极电压 V_E 的值; (2) 若 $R_1 = R_2 = R_3$ 时, 求 v_o 的值。

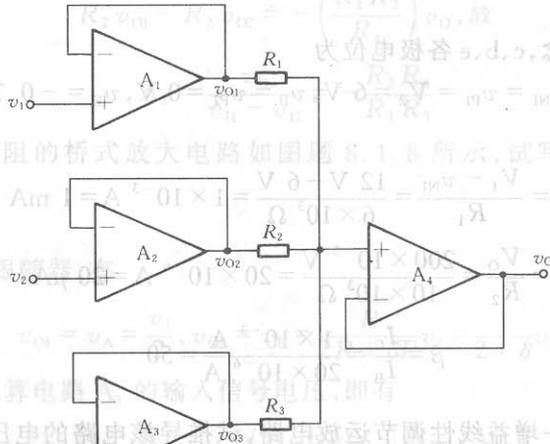
$$v_p = \frac{R_3}{R_4 + R_3} (V_3) = \frac{30}{15 + 30} (3\text{V}) = 2\text{V}$$

$$v''_o = \left(1 + \frac{30}{15}\right) \times 2\text{V} = 6\text{V}$$

v'_o 与 v''_o 叠加得输出电压为

$$v_o = v'_o + v''_o = -1\text{V} + 6\text{V} = 5\text{V}$$

8.1.5 电路如图题 8.1.5 所示, 设所有运放都是理想的。(1) 求 v_{O1} 、 v_{O2} 、 v_{O3} 及 v_o 的表达式; (2) 当 $R_1 = R_2 = R_3$ 时的 v_o 值。



图题 8.1.5

解 A_1 、 A_2 、 A_3 均组成电压跟随器,则有

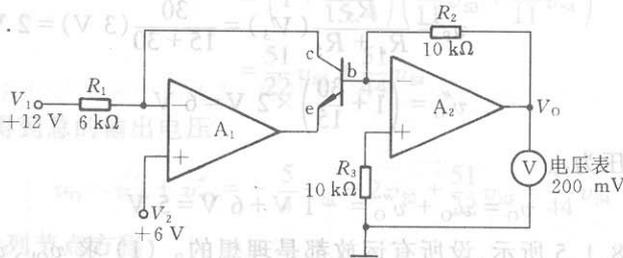
A_4 亦是电压跟随器,故

$$\begin{aligned} v_{O1} &= v_1, v_{O2} = v_2, v_{O3} = v_3 \\ v_O &= v_P(A_4 \text{ 同相端电压}) \\ \text{而 } v_P &= \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + R_2 \parallel R_3} v_{O1} + \frac{R_1 \parallel R_3}{R_2 + R_1 \parallel R_3} v_{O2} + \frac{R_1 \parallel R_2}{R_3 + R_1 \parallel R_2} v_{O3} \\ &= \frac{R_2 R_3}{R_1(R_2 + R_3) + R_2 R_3} v_1 + \frac{R_1 R_3}{R_2(R_1 + R_3) + R_1 R_3} v_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3(R_1 + R_2) + R_1 R_2} v_3 \\ &= \frac{R_2 R_3 v_1 + R_1 R_3 v_2 + R_1 R_2 v_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3} \end{aligned}$$

当 $R_1 = R_2 = R_3$ 时,则

$$v_O = \frac{1}{3}(v_1 + v_2 + v_3)$$

8.1.6 由运放组成的 BJT 电流放大系数 β 的测试电路如图题 8.1.6 所示,设 BJT 的 $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ 。(1) 求出 BJT 的 c、b、e 各极的电位值;(2) 若电压表读数为 200 mV ,试求 BJT 的 β 值。



图题 8.1.6

解 (1) 利用虚短概念,c、b、e 各极电位为

$$v_C = v_{N1} = v_{P1} = V_2 = 6 \text{ V}, v_B = v_{P2} = 0 \text{ V}, v_E = -0.7 \text{ V}$$

(2) BJT 的 β 值

$$I_C = \frac{V_1 - v_{N1}}{R_1} = \frac{12 \text{ V} - 6 \text{ V}}{6 \times 10^3 \Omega} = 1 \times 10^{-3} \text{ A} = 1 \text{ mA}$$

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

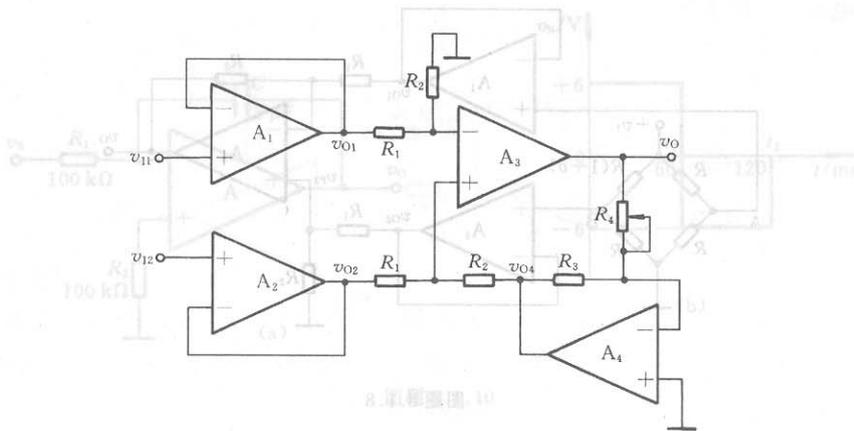
所以

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

8.1.7 图题 8.1.7 为一增益线性调节运放电路,试推导该电路的电压增益 $A_v = \frac{v_O}{(v_{I1} - v_{I2})}$ 的表达式。

解 A_1 、 A_2 是电压跟随器,有

$$v_{O1} = v_{I1}, v_{O2} = v_{I2}$$



图题 8.1.7

图题 8.1.7 所示电路，当 $v_{11} = 60 \text{ mV}$ 时， v_o 的幅值为

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

$$R_2 v_{O1} - R_2 v_{O2} = -\left(\frac{R_1 R_3}{R_4}\right) v_o, \text{ 故}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_{11} - v_{12}} = -\frac{R_2 R_4}{R_1 R_3}$$

8.1.8 一高输入电阻的桥式放大电路如图题 8.1.8 所示，试写出 $v_o = f(\delta)$ 的表达式

$$\left(\delta = \frac{\Delta R}{R}\right)$$

解 A_1, A_2 为电压跟随器，有

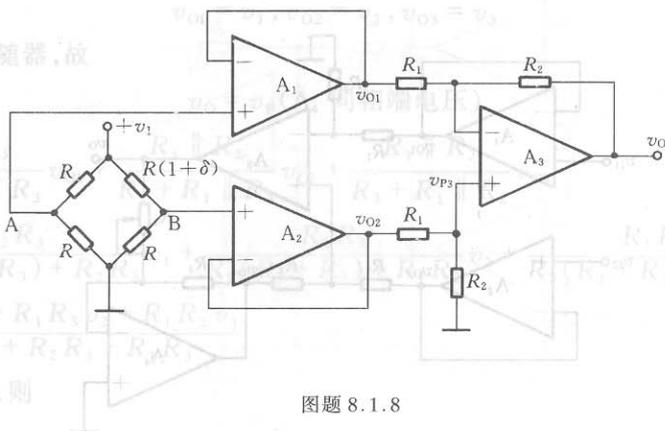
$$v_{O1} = v_A = \frac{v_1}{2}, v_{O2} = v_B = \frac{R}{2R + \delta R} v_1 = \frac{1}{2 + \delta} v_1$$

v_{O1}, v_{O2} 为差分式运算电路 A_3 的输入信号电压，即有

$$\begin{aligned} v_o &= -\frac{R_2}{R_1} v_{O1} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) v_{O2} \\ &= \frac{R_2}{R_1} \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2 + \delta}\right) v_1 = \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{-\delta}{4 + 2\delta}\right) v_1 \end{aligned}$$

解 A_1, A_2, A_3 均组成电压跟随器,则有

A_3 亦是电压跟随器,故



图题 8.1.8

8.1.9 为了用低值电阻实现高电压增益的比例运算,常用一 T 型网络以代替 R_1 , 如图题 8.1.9 所示, 试证明

$$\frac{v_o}{v_s} = - \frac{R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_4}}{R_1}$$

解 利用虚短和虚断概念列节点方程, 有

$$\begin{cases} \frac{v_s}{R_1} = - \frac{v_4}{R_2} \\ \frac{v_4}{R_4} + \frac{v_4 - v_o}{R_3} = - \frac{v_4}{R_2} \end{cases}$$

解上述方程组得

$$v_o = \frac{(R_2 R_3 + R_2 R_4 + R_3 R_4) v_4}{R_2 R_4}$$

$$= - \frac{(R_2 R_3 + R_2 R_4 + R_3 R_4)}{R_2 R_4} \times \frac{R_2 v_s}{R_1}$$

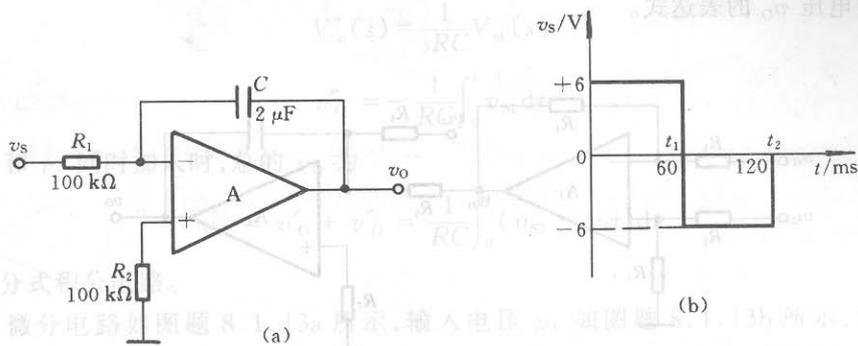
$$\frac{v_o}{v_s} = - \frac{R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_4}}{R_1}$$

图题 8.1.9

8.1.10 积分电路如图题 8.1.10a 所示, 设运放是理想的, 已知初始状态时 $v_c(0) = 0$, 试回答下列问题: (1) 当 $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$, $C = 2 \text{ }\mu\text{F}$, 若突然加入 $v_s(t) = 1 \text{ V}$ 的阶跃电压, 求 1 s 后输出电压 v_o 值; (2) 当 $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$, $C = 0.47 \text{ }\mu\text{F}$, 输入电压 v_s 波形如图题 8.1.10b 所示, 试画出 v_o 的波形, 并标出 v_o 的幅值和回零时间。

解 (1) 当输入电压为 $v_s(t) = 1 \text{ V}$ 的阶跃电压, $t = 1 \text{ s}$ 时, 输出电压 v_o 的波形如图解 8.1.10a 所示, 其 v_o 的幅值为

$$v_o = - \frac{v_s(t)}{R_1 C} t = - \frac{1 \text{ V}}{100 \times 10^3 \Omega \times 2 \times 10^{-6} \text{ F}} \times 1 \text{ s} = -5 \text{ V}$$



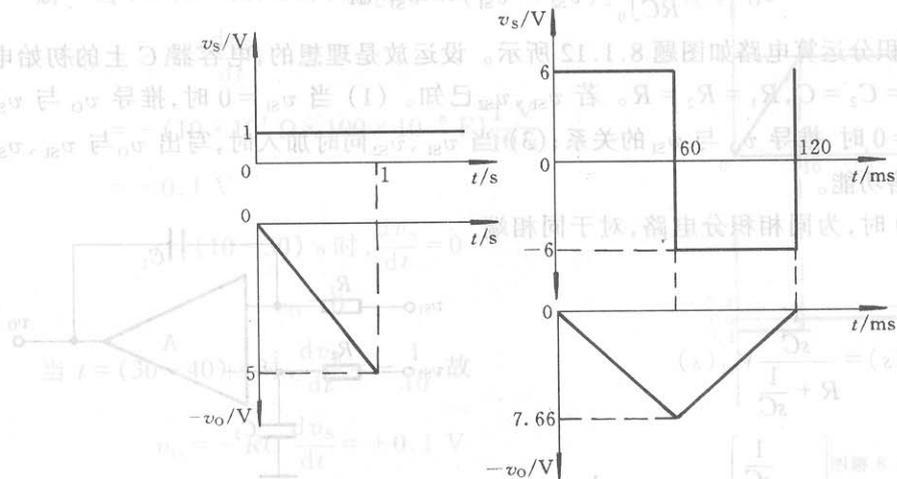
图题 8.1.10

(2) 当 $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$, $C = 0.47 \text{ }\mu\text{F}$, v_s 如图题 8.1.10b 所示, v_o 的波形如图解 8.1.10b 所示, 当 $t_1 = 60 \text{ ms}$ 时, v_o 的幅值为

$$v_o(60) = -\frac{v_s}{R_1 C} t_1 = -\frac{+6 \text{ V}}{100 \times 10^3 \Omega \times 0.47 \times 10^{-6} \text{ F}} \times 60 \times 10^{-3} \text{ s} = -7.66 \text{ V}$$

而当 $t_2 = 120 \text{ ms}$ 时, v_o 幅值

$$\begin{aligned} v_o(120) &= v_o(60) - \frac{-6 \text{ V}}{100 \times 10^3 \Omega \times 0.47 \times 10^{-6} \text{ F}} (120 - 60) \times 10^{-3} \text{ s} \\ &= -7.66 \text{ V} + 7.66 \text{ V} = 0 \text{ V} \end{aligned}$$



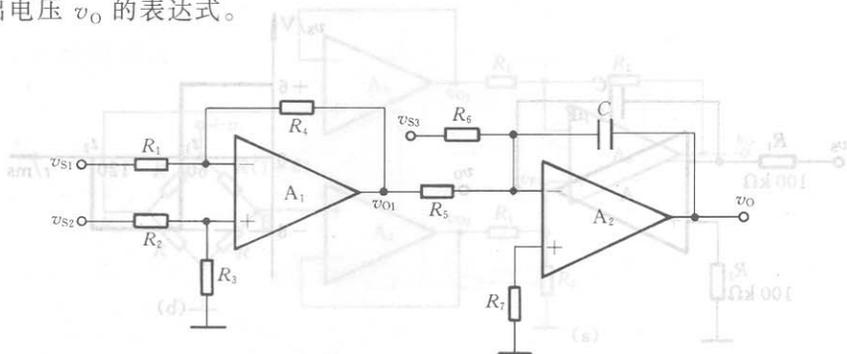
(a)

(b)

图题 8.1.10

8.1.11 电路如图题 8.1.11 所示, A_1 、 A_2 为理想运放, 电容器 C 的初始电压 $v_C(0) = 0 \text{ V}$ 。

- (1) 写出 v_o 与 v_{s1} 、 v_{s2} 和 v_{s3} 之间的关系式；(2) 当电路中电阻 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$ 时, 求输出电压 v_o 的表达式。



图题 8.1.11

解 (1) A_1 组成差分式运算电路, A_2 组成积分电路。 A_1 的输出电压为

$$v_{o1} = \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \left(1 + \frac{R_4}{R_1} \right) v_{s2} - \frac{R_4}{R_1} v_{s1}$$

A_2 的输出电压为

$$v_o = -\frac{1}{C} \int_0^t \left(\frac{v_{o1}}{R_5} + \frac{v_{s3}}{R_6} \right) dt$$

(2) 当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$

$$v_{o1} = v_{s2} - v_{s1}$$

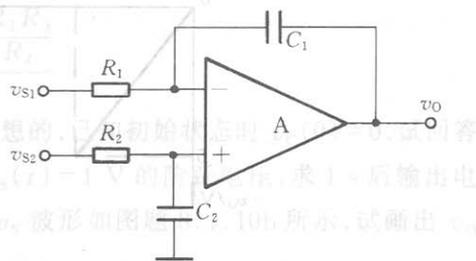
$$v_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t [(v_{s2} - v_{s1}) + v_{s3}] dt$$

8.1.12 差分式积分运算电路如图题 8.1.12 所示。设运放是理想的, 电容器 C 上的初始电压 $v_c(0) = 0$, 且 $C_1 = C_2 = C, R_1 = R_2 = R$ 。若 v_{s1}, v_{s2} 已知。(1) 当 $v_{s1} = 0$ 时, 推导 v_o 与 v_{s2} 的关系；(2) 当 $v_{s2} = 0$ 时, 推导 v_o 与 v_{s1} 的关系；(3) 当 v_{s1}, v_{s2} 同时加入时, 写出 v_o 与 v_{s1}, v_{s2} 的关系式。说明电路功能。

解 (1) $v_{s1} = 0$ 时, 为同相积分电路, 对于同相端电压为

$$V_P(s) = \frac{1}{sC} V_{s2}(s)$$

$$V'_o(s) = \left[1 + \frac{1}{sC} \right] V_P(s) = \frac{1}{sRC} V_{s2}(s)$$



图题 8.1.12

8. 因 $\frac{1}{s}$ 表示积分, 故有

$$v_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_{s2} dt$$

(2) 当 $v_{S2} = 0$ 时, 为反相积分电路, 有

$$V_o''(s) = \frac{1}{sRC} V_{s1}(s)$$

同理

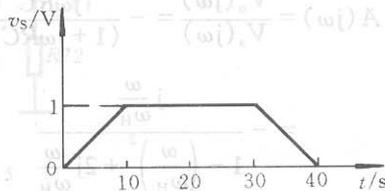
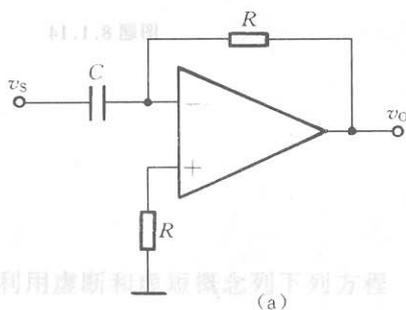
$$v_o'' = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_{s1} dt$$

(3) v_{s1} 和 v_{s2} 同时加入时, 总的 v_o 为

$$v_o = v_o' + v_o'' = \frac{1}{RC} \int_0^t (v_{s2} - v_{s1}) dt$$

该电路为差分式积分电路。

8.1.13 微分电路如图题 8.1.13a 所示, 输入电压 v_s 如图题 8.1.13b 所示, 设电路 $R = 10 \text{ k}\Omega$, $C = 100 \mu\text{F}$, 运放是理想的。试画出输出电压 v_o 的波形, 并标出 v_o 的幅值。



图题 8.1.13

解 当 $t = (0 \sim 10) \text{ s}$ 时, v_o 幅值为

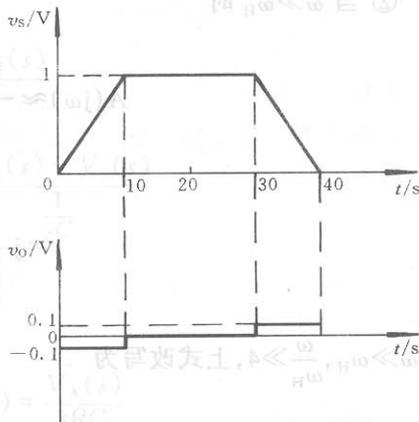
$$\begin{aligned} v_o &= -RC \frac{dv_s}{dt} \\ &= -(10 \times 10^3 \Omega \times 100 \times 10^{-6} \text{ F}) \frac{1 \text{ V}}{10 \text{ s}} \\ &= -0.1 \text{ V} \end{aligned}$$

$$t = (10 \sim 30) \text{ s 时, } \frac{dv_s}{dt} = 0$$

$$v_o = 0$$

$$\text{当 } t = (30 \sim 40) \text{ s 时, } \frac{dv_s}{dt} = -\frac{1}{10}, \text{ 故}$$

$$v_o = -RC \frac{dv_s}{dt} = +0.1 \text{ V}$$



图解 8.1.13

其输出电压 v_o 的波形如图解 8.1.13 所示。

8.1.14 一实用微分电路如图题 8.1.14 所示, 它具有衰减高频噪声的作用。(1) 确定电路的传递函数 $V_o(s)/V_s(s)$; (2) 若 $R_1 C_1 = R_2 C_2$, 试问输入信号 v_s 的频率应当怎样限制, 才能使电路不失去微分的功能。

解 (1) 确定电路传递函数

(1) 写出 v_{o1} 与 v_{o2} 、 v_{o3} 和 v_{o4} 之间的关系式 (2) 当 $V_o(s)$ 求输出电压 v_o 的表达式

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

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

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

(2) 讨论电路的功能

当 $R_1C_1 = R_2C_2 = RC$ 时

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

令 $s = j\omega$ 时

$$A(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_s(j\omega)} = - \frac{j\omega RC}{(1 + j\omega RC)^2}$$

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

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

$$A(j\omega) \approx - \frac{j \frac{\omega}{\omega_H}}{-\left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2 + j2 \frac{\omega}{\omega_H}}$$

$$= j \frac{\frac{\omega}{\omega_H} + j2}{\left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2 + 4} = \frac{j \frac{\omega}{\omega_H}}{\left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2 + 4} + \frac{2}{\left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2 + 4}$$

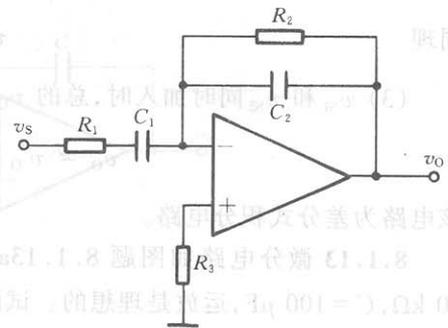
因 $\omega \gg \omega_H, \frac{\omega}{\omega_H} \gg 4$, 上式改写为

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

此时电路具有积分功能。

③ 当 $\omega \ll \omega_H$

$$A(j\omega) = - \frac{j \frac{\omega}{\omega_H}}{1 + j2 \frac{\omega}{\omega_H}} = \frac{-j \frac{\omega}{\omega_H} (1 - j2 \frac{\omega}{\omega_H})}{\left(1 - j2 \frac{\omega}{\omega_H}\right) \left(1 + j2 \frac{\omega}{\omega_H}\right)}$$



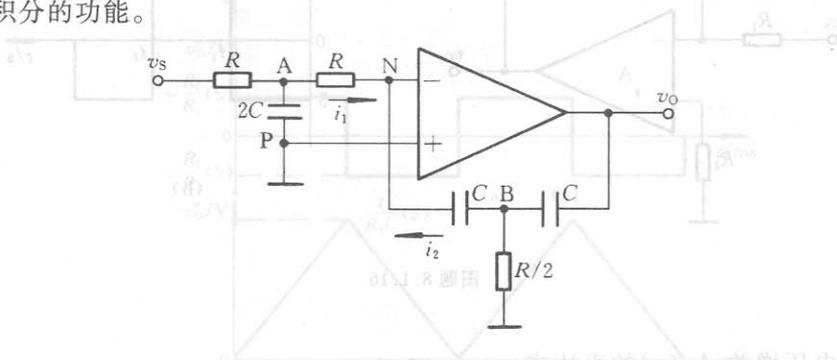
图题 8.1.14

$$= -\frac{j\frac{\omega}{\omega_H} + 2\left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2}{1 + 4\left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2} \approx -j\frac{\omega}{\omega_H} = -j\omega RC$$

电路具有微分功能。

由此可见,只有 v_s 的角频率 ω 比电路中 RC 的固有角频率 ω_H 小很多时,电路才有微分功能。

8.1.15 用一只集成运放实现二重积分的电路如图题 8.1.15 所示,试由它的传递函数证明它具有二重积分的功能。



图题 8.1.15

解 利用虚断和虚短概念列下列方程

$$\begin{cases} \frac{V_s(s) - V_A(s)}{R} = \frac{V_A(s)}{s2C} + \frac{V_A(s)}{R} \\ \frac{V_A(s) - V_N(s)}{R} = \frac{V_N(s) - V_B(s)}{sC} \\ \frac{V_N(s) - V_B(s)}{sC} = \frac{V_B(s)}{R/2} + \frac{V_B(s) - V_o(s)}{sC} \\ V_N(s) = V_P(s) = 0 \end{cases}$$

解上述方程组得

$$V_A(s) = \frac{V_s(s)}{2(1+sRC)}, \quad V_B(s) = \frac{V_A(s)}{sRC}$$

所以
$$V_o(s) = \frac{2(1+sRC)}{sRC} V_B(s) = \frac{V_s(s)}{(sRC)^2}$$

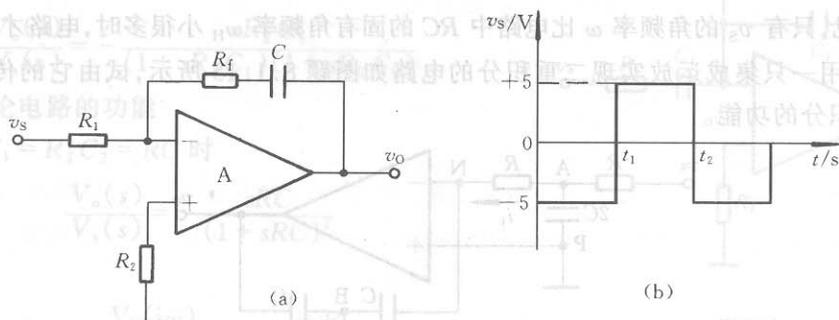
经拉氏反变换,得出

$$v_o(t) = \frac{1}{R^2 C^2} \iint v_s(t) dt$$

证明该电路具有二重积分的功能。

8.1.16 电路如图题 8.1.16a 所示, A 为理想运放, 当 $t=0$ 时, 电容器 C 的初始电压 $v_C(0) =$

0。(1) 写出电路的电压增益 $A_V(s) = \frac{V_o(s)}{V_s(s)}$ 的表达式；(2) 若输入电压 $v_s(t)$ 为一方波，如图题 8.1.16b 所示，试画出 v_o 稳态时的波形。



图题 8.1.16

解 (1) 电压增益 $A_V(s)$ 的表达式

$$A_V(s) = \frac{V_o(s)}{V_s(s)} = -\frac{Z_f(s)}{Z_1(s)} = -\left[\frac{R_f}{R_1} + \frac{1}{sR_1C} \right] \quad (8.1.16-1)$$

(2) 由输入电压 $v_s(t)$ ，画出 $v_o(t)$ 的波形

由式(8.1.16-1)可写出输出电压 $v_o(t)$ 的表达式

$$v_o(t) = -\left[\frac{R_f}{R_1} v_s(t) + \frac{1}{R_1 C} \int v_s(t) dt \right] \Big|_{t_1}^{t_2} + v_o(t_1) \quad (8.1.16-2)$$

方法一：当 $t = t_1 = 0$ ， $v_c(0) = 0$ ， $v_o(0) = 0$ ，由式(8.1.16-2)看出， $v_o(t)$ 与 $v_s(t)$ 成比例积分运算关系。该电路中运放 A 是理想器件，由 A、R 和 C 组成的是线性电路，故可用叠加原理进行计算，令

$$v_o(t) = v_o'(t) + v_o''(t)$$

其中

$$v_o'(t) = -\frac{R_f}{R_1} v_s(t)$$

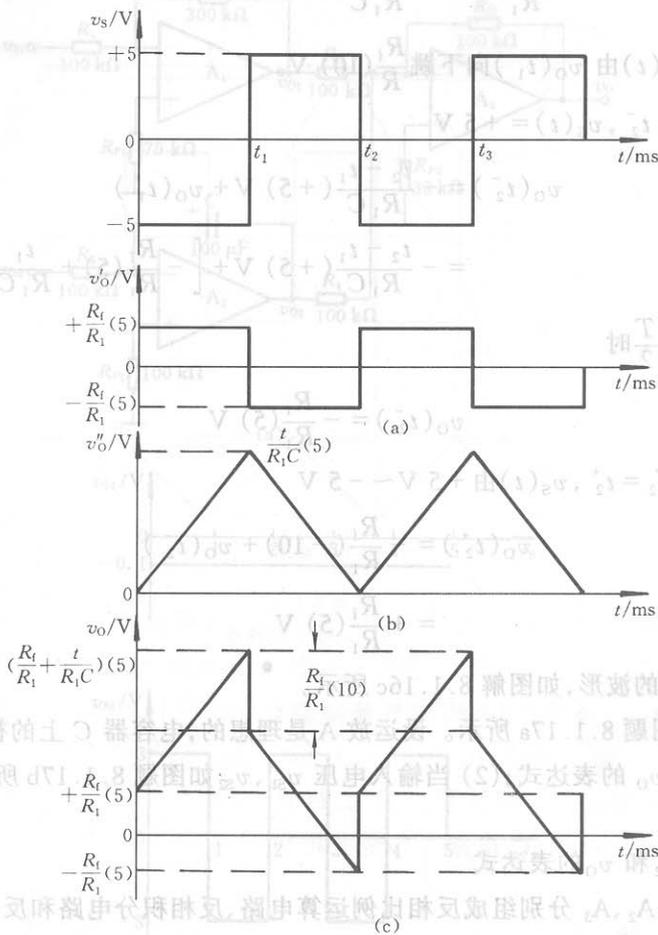
$$v_o''(t) = -\frac{t}{R_1 C} \int_{t_1}^{t_2} v_s(t) dt + v_o''(t_1)$$

由上式可画出 $v_s(t)$ 、 $v_o'(t)$ 、 $v_o''(t)$ 的波形，如图解 8.1.16a、b 所示。再运用叠加原理，将 $v_o'(t)$ 和 $v_o''(t)$ 波形叠加，得 $v_o(t)$ ，如图解 8.1.16c 所示。

方法二：由式(8.1.16-2)可画出 $v_o(t)$ 的波形。

① 当 $t = t_1 = 0$ 时， $v_s(t) = -5 \text{ V}$ ， $v_c(0) = 0$

$$v_o(0) = -\frac{R_f}{R_1} (-5) \text{ V} = +\frac{R_f}{R_1} (5) \text{ V}$$



图解 8.1.16

② $t'_1 = 0, t'_2 = t_1^-$ 时, $v_s = -5 \text{ V}$

$$v_o(t'_1) = 0$$

$$v_o(t_1^-) = \left[\frac{R_f}{R_1}(5) + \frac{t_1}{R_1 C}(5) \right] V + v_o(t'_1)$$

$$= \left[\frac{R_f}{R_1} + \frac{t_1}{R_1 C} \right] (5) \text{ V}$$

③ $t'_1 = t_1^-, t'_2 = t_1^+, v_s(t) = -5 \text{ V} \sim +5 \text{ V}$

$$v_o(t_1^+) = \left[\frac{R_f}{R_1} v_s(t) + \frac{t_1}{R_1 C} v_s(t) \right] \Big|_{t_1^-}^{t_1^+} + v_o(t_1^-)$$

$$v_o(t_1^+) = - \left\{ \frac{R_f}{R_1} [(+5) - (-5)] \text{ V} \right\} + \left[\frac{R_f}{R_1} + \frac{t_1}{R_1 C} \right] (5) \text{ V}$$

用类似方法,可画出 v_o 的波形,如图解 8.1.17 所示。

0。(1) 写出电路的电压增益表达式, (2) 若输入电压 $v_s(t)$ 为一方波, 如图题

8.1.16b 所示, 试画出 $v_o(t)$ 的波形。

④ $t_1' = t_1^+, t_2'' = t_2^-, v_s(t) = +5 \text{ V}$

$$\begin{aligned} v_o(t_2^-) &= -\frac{t_2 - t_1}{R_1 C} (+5) \text{ V} + v_o(t_1^+) \\ &= -\frac{t_2 - t_1}{R_1 C} (+5) \text{ V} + \left[-\frac{R_f}{R_1} (5) + \frac{t_1}{R_1 C} (5) \right] \text{ V} \end{aligned}$$

当 $t_1 = t_2 - t_1 = \frac{T}{2}$ 时

$$v_o(t_2^-) = -\frac{R_f}{R_1} (5) \text{ V}$$

⑤ 当 $t_1' = t_2^+, t_2' = t_2^+, v_s(t)$ 由 $+5 \text{ V} \sim -5 \text{ V}$

$$\begin{aligned} v_o(t_2^+) &= -\frac{R_f}{R_1} (-10) + v_o(t_2^-) \\ &= +\frac{R_f}{R_1} (5) \text{ V} \end{aligned}$$

由分析可画出 $v_o(t)$ 的波形, 如图解 8.1.16c 所示。

8.1.17 电路如图题 8.1.17a 所示。设运放 A 是理想的, 电容器 C 上的初始电压 $v_c(0) = 0$ 。

(1) 求出 v_{o1} 、 v_{o2} 和 v_o 的表达式; (2) 当输入电压 v_{s1} 、 v_{s2} 如图题 8.1.17b 所示时, 试画出 v_o 的波形。

解 (1) v_{o1} 、 v_{o2} 和 v_o 的表达式

由图可看出, A_1 、 A_2 、 A_3 分别组成反相比例运算电路、反相积分电路和反相求和电路, 因此有

$$v_{o1} = -\frac{R_{f1}}{R_1} v_{s1} = -\frac{300 \text{ k}\Omega}{100 \text{ k}\Omega} (-0.1 \text{ V}) = +0.3 \text{ V}$$

$$v_{o2} = -\frac{1}{R_2 C} \int_0^t v_{s2} dt$$

其中

$$v_o = -\left[\frac{R_{f3}}{R_3} v_{o1} + \frac{R_{f3}}{R_4} v_{o2} \right]$$

将给定参数代入上式, 得

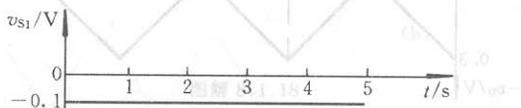
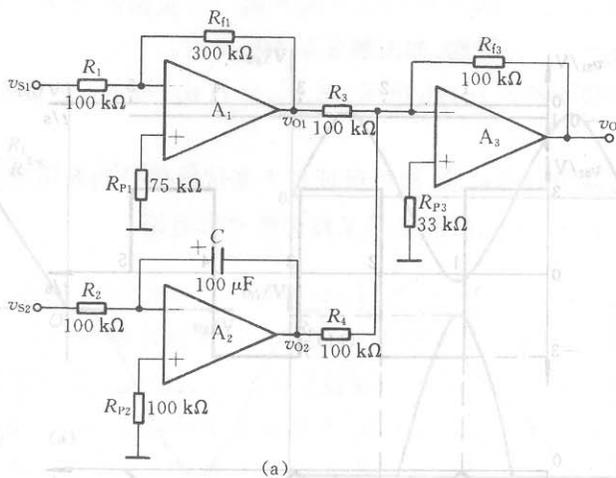
$$\tau = R_2 C = (100 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-6}) \text{ s} = 10 \text{ s}$$

$$v_o = -\frac{1}{10 \text{ s}} \int_0^t v_{s2} dt$$

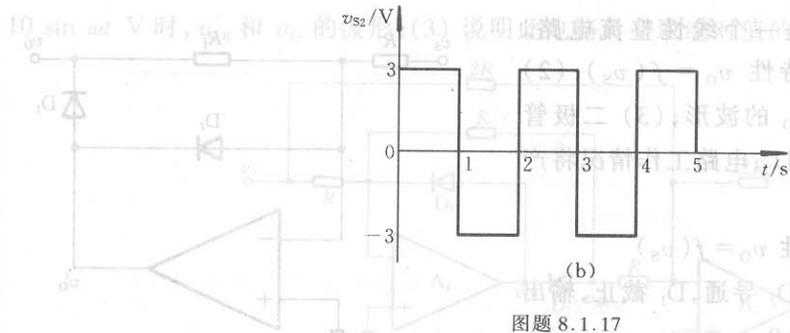
$$v_o = -\left[+\frac{100}{100} v_{o1} - \frac{1}{\tau} \int v_{s2} dt \right]$$

$$v_o = -0.3 \text{ V} + \frac{1}{\tau} \int v_{s2} dt$$

(2) v_o 的波形



8.1.19 如图题 8.1.19 所示电路中, A_1 组成一线性半波整流电路, A_2 组成一加法电路, 二者构成一线性全波整流电路。(1) 试画出其输入-输出特性 $v_{O1} = f(v_{S1})$; (2) 试画出 $v_{S1} = 10 \sin \omega t$ V 时, v_{O1} 和 v_{O2} 的波形; (3) 说明此电路最高增益对输入信号幅度的影响。



图题 8.1.17

由 $t=0$ 时, $v_C(0)=0$, $v_{S1} = -0.1$ V, $v_{O1} = +0.3$ V, $v_{O2} = 0$ V, 则有 $v_O = -0.3$ V。

当 $t=1$ s 时, $v_{O1} = +0.3$ V, $v_{O2} = \frac{-3}{10} \times 1 = -0.3$ V, 有

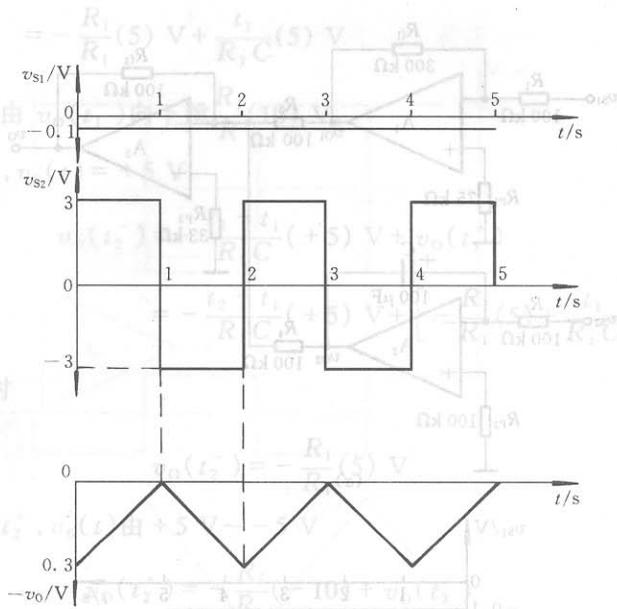
解 (1) 求 $v_O = f(v_{S2})$ 关系 由图可知, 当 $v_{S2} > 0$ 时, D_1 截止, D_2 导通, $v_O = v_{S2}$; 当 $v_{S2} < 0$ 时, D_1 导通, D_2 截止, $v_O = -v_{S2}$ 。因此, $v_O = |v_{S2}|$ 。

当 $t=2$ s, $v_{S1} = -0.1$ V, v_{S2} 由 +3 V 变到 -3 V, 输出电压为

$$v_O = +3v_{S1} - \left[\frac{1}{\tau} \int_0^{1s} v_{S2} dt - \frac{1}{\tau} \int_1^{2s} v_{S2} dt \right]$$

$$= -0.3 \text{ V} - \left[\frac{3 \times 1 \text{ s}}{10 \text{ s}} - \frac{3(2-1) \text{ s}}{10 \text{ s}} \right] = -0.3 \text{ V}$$

用类似方法, 可画出 v_O 的波形, 如图解 8.1.17 所示。



图解 8.1.17
 v_{S1} 、 v_{S2} 和 v_O 的波形

8.1.18 图题 8.1.18 是一个线性整流电路。

- (1) 试画出其输入 - 输出特性 $v_O = f(v_S)$; (2) $v_S = 10 \sin \omega t$ V 时, 画出 v_O 的波形; (3) 二极管 D_1 、 D_2 各起什么作用? 去掉 D_2 , 电路工作情况将产生什么变化?

解 (1) 输入 - 输出特性 $v_O = f(v_S)$

当 v_S 为正时, v'_O 为负, D_2 导通, D_1 截止, 输出电压 v_O 为零, 即 $v_S > 0, v_O = 0$;

当 v_S 为负时, v'_O 为正, D_1 导通, D_2 截止, 电路处于反相比例运算状态, 即

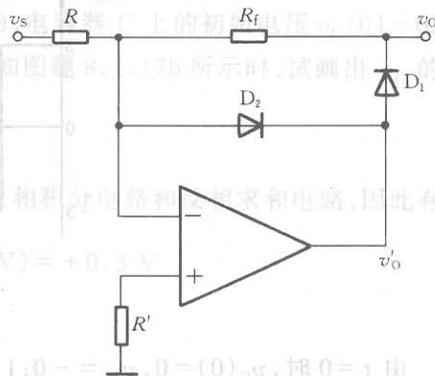
$$v_S < 0 \quad v_O = \left(-\frac{R_f}{R} \right) v_S$$

由以上分析可知, 输入 - 输出特性如图解 8.1.18a 所示, 即

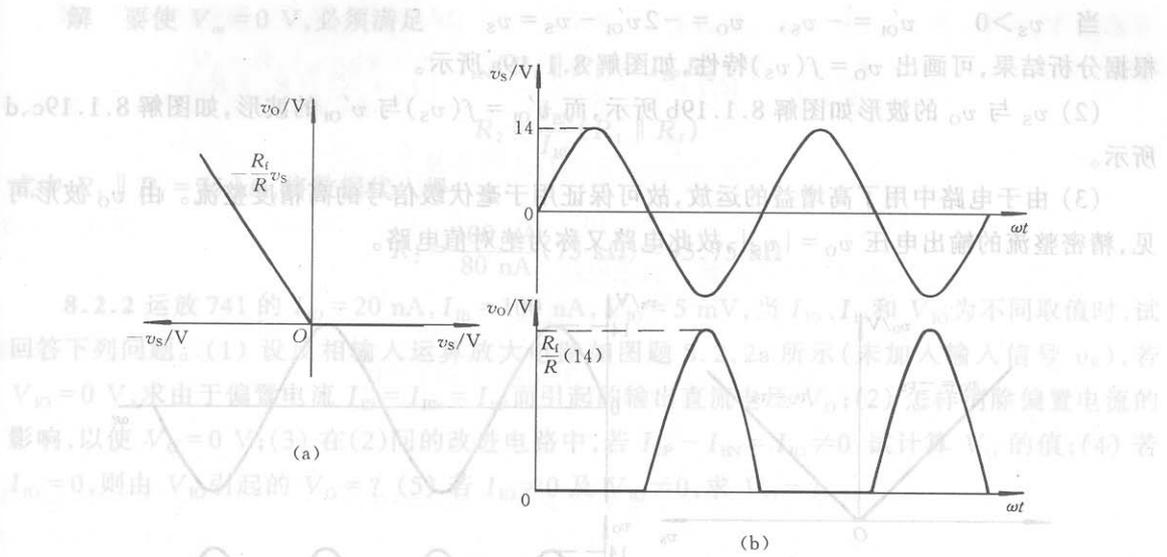
$$v_O = \begin{cases} 0 & v_S > 0 \\ -\frac{R_f}{R} v_S & v_S < 0 \end{cases}$$

(2) 在 $v_S = 10 \sin \omega t$ V 时, v_O 的波形如图解 8.1.18b 所示。

(3) 从 $v_O = f(v_S)$ 传输特性上分析, D_1 担负整流作用; D_2 在反馈支路, 用于防止 v_S 为正时, 因 D_1 截止而使集成运放处于开环状态, 同时可加速电路动作时间, 使输入电压为零时, 输出电压亦为零, 从而减小二极管正向压降所造成的误差。

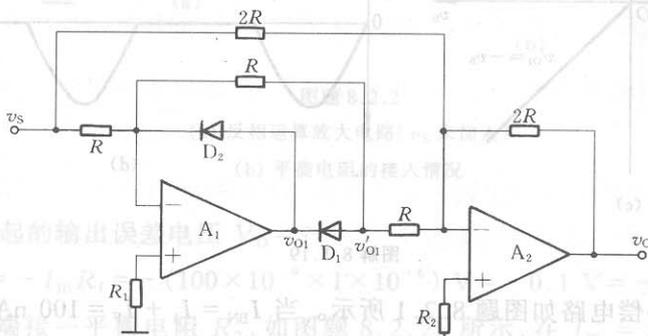


图题 8.1.18



图解 8.1.18

8.1.19 如图题 8.1.19 所示电路中, A_1 组成一线性半波整流电路, A_2 组成一加法电路, 二者构成一线性全波整流电路。(1) 试画出其输入-输出特性 $v_o = f(v_s)$; (2) 试画出 $v_s = 10 \sin \omega t \text{ V}$ 时, v_{o1} 和 v_o 的波形; (3) 说明此电路具有取绝对值的功能。



图题 8.1.19

解 (1) 求 $v_o = f(v_s)$ 关系

当 $v_s > 0$, v_{o1} 为负, D_2 截止, D_1 导通, $v_{o1} = -v_s$

$v_s < 0$, v_{o1} 为正, D_1 截止, D_2 导通, 因此 $v_{o1} = 0$, 故 v_{o1} 与 v_s 的关系为

$$v_{o1} = \begin{cases} 0 & v_s < 0 \\ -v_s & v_s > 0 \end{cases}$$

A_1 为线性半波整流电路, A_2 为反相加法器。

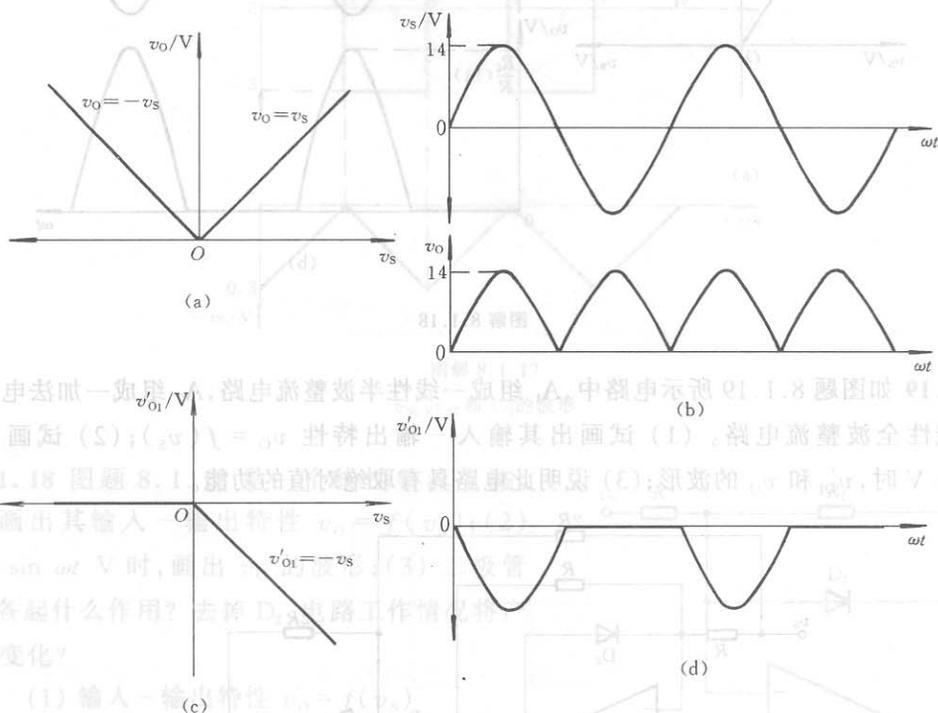
当 $v_s < 0$ $v_{o1} = 0$ $v_o = -v_s$

当 $v_s > 0$ 时 $v_{o1} = -v_s$, $v_o = -2v_{o1} - v_s = v_s$

根据分析结果,可画出 $v_o = f(v_s)$ 特性,如图解 8.1.19a 所示。

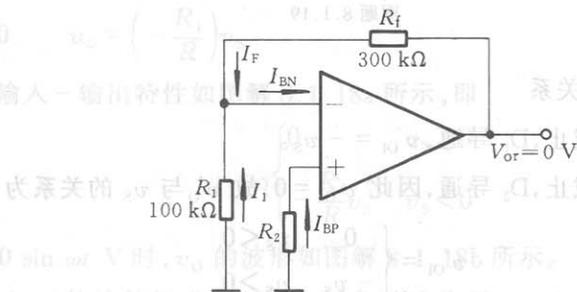
(2) v_s 与 v_o 的波形如图解 8.1.19b 所示,而 $v_{o1} = f(v_s)$ 与 v_{o1} 的波形,如图解 8.1.19c、d 所示。

(3) 由于电路中用了高增益的运放,故可保证用于毫伏级信号的高精度整流。由 v_o 波形可见,精密整流的输出电压 $v_o = |v_s|$,故此电路又称为绝对值电路。



图解 8.1.19

8.2.1 失调电流补偿电路如图题 8.2.1 所示。当 $I_{BN} = I_1 + I_F = 100 \text{ nA}$, $I_{BP} = 80 \text{ nA}$, 使输出误差电压 $V_{or} = 0 \text{ V}$ 时,求平衡电阻 R_2 的值是多少?



图题 8.2.1

解 要使 $V_o = 0 \text{ V}$, 必须满足

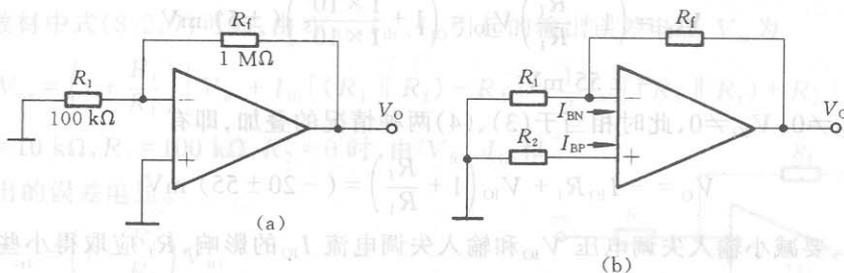
$$I_{\text{BN}}(R_1 \parallel R_f) = I_{\text{BP}}R_2$$

$$R_2 = \frac{I_{\text{BN}}}{I_{\text{BP}}}(R_1 \parallel R_f)$$

式中 $R_1 \parallel R_f = 75 \text{ k}\Omega$, 将数据代入得

$$R_2 = \frac{100 \text{ nA}}{80 \text{ nA}}(75 \text{ k}\Omega) = 93.75 \text{ k}\Omega$$

8.2.2 运放 741 的 $I_{\text{IO}} = 20 \text{ nA}$, $I_{\text{IB}} = 100 \text{ nA}$, $V_{\text{IO}} = 5 \text{ mV}$, 当 I_{IO} 、 I_{IB} 和 V_{IO} 为不同取值时, 试回答下列问题。(1) 设反相输入运算放大电路如图题 8.2.2a 所示(未加入输入信号 v_s), 若 $V_{\text{IO}} = 0 \text{ V}$, 求由于偏置电流 $I_{\text{IB}} = I_{\text{BN}} = I_{\text{BP}}$ 而引起的输出直流电压 V_o ; (2) 怎样消除偏置电流的影响, 以使 $V_o = 0 \text{ V}$; (3) 在(2)问的改进电路中, 若 $I_{\text{BP}} - I_{\text{BN}} = I_{\text{IO}} \neq 0$, 试计算 V_o 的值; (4) 若 $I_{\text{IO}} = 0$, 则由 V_{IO} 引起的 $V_o = ?$ (5) 若 $I_{\text{IO}} \neq 0$ 及 $V_{\text{IO}} \neq 0$, 求 $V_o = ?$



图题 8.2.2

(a) 反相运算放大电路(v_s 未加入)

(b) 平衡电阻的接入情况

解 (1) I_{IB} 引起的输出误差电压 $V_o = ?$

$$V_o = -I_{\text{IB}}R_f = -(100 \times 10^{-9} \times 1 \times 10^6) \text{ V} = -0.1 \text{ V} = -100 \text{ mV}$$

(2) 当在同相端接一平衡电阻 R_2 , 如图题 8.2.2b 所示, 在 $I_{\text{BN}} = I_{\text{BP}}$ 时, $R_2 = R_1 \parallel R_f = 90.9 \text{ k}\Omega$, 使 $V_o = 0$ 。

(3) 当 $I_{\text{IO}} = I_{\text{BP}} - I_{\text{BN}} \neq 0$ 时, $V_o = ?$

同相端、反相端的偏流和电压分别为

$$I_{\text{BP}} = I_{\text{IB}} - \frac{I_{\text{IO}}}{2}$$

$$I_{\text{BN}} = I_{\text{IB}} + \frac{I_{\text{IO}}}{2}$$

$$V_{\text{P}} = -\left(I_{\text{IB}} - \frac{I_{\text{IO}}}{2}\right)R_2$$

$$V_{\text{N}} = V_o \left(\frac{R_1}{R_1 + R_f}\right) - \left(I_{\text{IB}} + \frac{I_{\text{IO}}}{2}\right)(R_1 \parallel R_f)$$

考虑到 $V_N \approx V_P$ 和 $R_2 = R_f \parallel R_1$, 所以有

$$-\left(I_{IB} - \frac{I_{IO}}{2}\right)(R_1 \parallel R_f) + V_O \left(\frac{R_1}{R_1 + R_f}\right) = -\left(I_{IB} + \frac{I_{IO}}{2}\right)(R_1 \parallel R_f)$$

$$V_O \frac{R_1}{R_1 + R_f} = -I_{IO}(R_1 \parallel R_f)$$

$$V_O = -I_{IO}R_f = -(20 \times 10^{-9} \times 1 \times 10^6) \text{ V} = -20 \text{ mV}$$

(4) 当 $I_{IO} = 0$ 时, 由 V_{IO} 引起的输出误差电压

$$V_N = V_O \frac{R_1}{R_1 + R_f} - I_{IB}(R_1 \parallel R_f) - V_{IO}$$

同时考虑到 $V_N = V_P$ 和 $R_2 = R_f \parallel R_1$, 可得

$$V_O \frac{R_1}{R_1 + R_f} - I_{IB}(R_1 \parallel R_f) - V_{IO} = -I_{IB}R_2$$

$$V_O = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) V_{IO} = \left(1 + \frac{1 \times 10^6}{1 \times 10^5}\right) (\pm 5) \text{ mV}$$

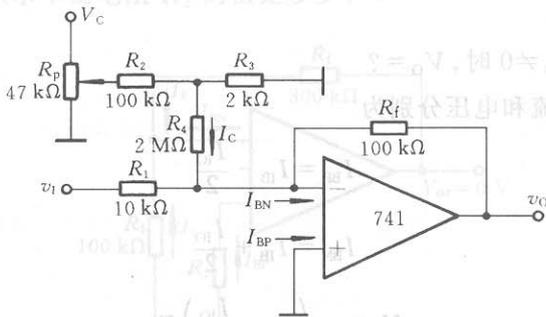
$$= \pm 55 \text{ mV}$$

(5) 当 $I_{IO} \neq 0, V_{IO} \neq 0$, 此时相当于(3)、(4)两种情况的叠加, 即有

$$V_O = -I_{IO}R_f + V_{IO} \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) = (-20 \pm 55) \text{ mV}$$

上述表明, 要减小输入失调电压 V_{IO} 和输入失调电流 I_{IO} 的影响, R_f 应取得小些。但由于电压增益取决于 $\frac{R_f}{R_1}$ 值, 当 R_f 取得较小时, 则可通过调节 R_1 的值来满足要求, 同时还要保证 $R_2 = R_1 \parallel R_f$ 。

8.2.3 I_{IO} 和 I_{IB} 的补偿电路如图题 8.2.3 所示, 设运放的 $I_{BN} = 90 \text{ nA}$, $I_{BP} = 70 \text{ nA}$ 时, 运放同相端接入一电阻 $R_5 = 9 \text{ k}\Omega$ (图中未画出), 当 $v_1 = 0$ 时, 要使输出误差电压 V_O 为零, 补偿电路应提供多大的补偿电流 I_C 。



图题 8.2.3

解 当同相端接一电阻 $R_5 = 9 \text{ k}\Omega$, 则同相端电压为

$$V_p = R_5 I_{BP} = (9 \times 10^3 \times 70 \times 10^{-9}) \text{ V} = 0.63 \times 10^{-3} \text{ V} = 0.63 \text{ mV}$$

考虑到 $V_N = V_p = 0.63 \text{ mV}$, 而

$$I_f = \frac{V_N}{R_f} = \frac{0.63 \times 10^{-3}}{100 \times 10^3} \text{ A} = 0.63 \times 10^{-8} \text{ A} = 6.3 \text{ nA}$$

当 $v_i = 0$ 时

$$I_{R_1} = \frac{V_N}{R_1} = \frac{0.63 \times 10^{-3}}{10 \times 10^3} \text{ A} = 63 \text{ nA}$$

因此, 要使输出误差电压 $V_o = 0$, 应提供的补偿电流为

$$I_C = I_{BN} - I_f - I_{R_1} = (90 - 6.3 - 63) \text{ nA} = 20.7 \text{ nA}$$

8.2.4 电路如图题 8.2.4 所示, 其 $A_{VF} = -10$, 若运放的 $V_{IO} = 2 \text{ mV}$, $I_{IB} = 80 \text{ nA}$, $I_{IO} = 20 \text{ nA}$, 求下列几种情况下电路输出的误差电压: (1) $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_f = 100 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 0$; (2) $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_f = 100 \text{ k}\Omega$, $R_2 = R_1 \parallel R_f$; (3) $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_f = 1 \text{ M}\Omega$, $R_2 = 0$ 。

解 由教材中式(8.2.7)可知, 由 V_{IO} 、 I_{IB} 、 I_{IO} 引起的输出误差电压 V_{or} 为

$$V_{or} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \left\{ V_{IO} + I_{IB} [(R_1 \parallel R_f) - R_2] + \frac{1}{2} I_{IO} [(R_1 \parallel R_f) + R_2] \right\}$$

(1) $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_f = 100 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 0$ 时, 由 V_{IO} 、 I_{IO} 和

I_{IB} 引起的输出的误差电压。

$$\begin{aligned} V_{or1} &= \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) V_{IO} \\ &= \left(1 + \frac{100}{10}\right) \times 2 \text{ mV} = 22 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$V_{or2} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) I_{IB} [(R_1 \parallel R_f) - R_2]$$

式中 $R_1 \parallel R_f = 9.1 \text{ k}\Omega$, 故

$$V_{or2} = (1 + 10) [80 \times 10^{-9} \times 9.1 \times 10^3] \text{ V} = 8 \text{ mV}$$

$$\begin{aligned} V_{or3} &= \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \left[\frac{1}{2} I_{IO} (R_1 \parallel R_f + R_2) \right] \\ &= 11 \times \left[\frac{1}{2} \times 20 \times 10^{-9} \times 9.1 \times 10^3 \right] \text{ V} = 1 \text{ mV} \end{aligned}$$

输出的误差电压为三个误差电压的叠加, 即

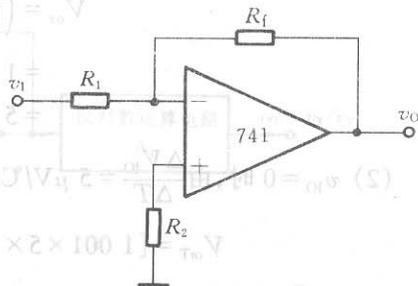
$$V_{or} = V_{or1} + V_{or2} + V_{or3} = (22 + 8 + 1) \text{ mV} = 31 \text{ mV}$$

(2) $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_f = 100 \text{ k}\Omega$, $R_2 = R_1 \parallel R_f$, 由 V_{IO} 、 I_{IB} 和 I_{IO} 引起的输出误差电压分别为 $V_{or1} = 22 \text{ mV}$, $V_{or2} = 0$, $V_{or3} = 2 \text{ mV}$ 则输出的误差电压为

$$V_{or} = (22 \text{ mV} + 2 \text{ mV}) = 24 \text{ mV}$$

(3) 当 $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_f = 1 \text{ M}\Omega$, $R_2 = 0$ 时, 由 V_{IO} 、 I_{IB} 和 I_{IO} 引起的输出误差电压分别为

$$V_{or1} = \left(1 + \frac{10^3}{100}\right) V_{IO} = 11 \times 2 \text{ mV} = 22 \text{ mV}$$



图题 8.2.4

$$V_{or2} = \left(1 + \frac{10^3}{100}\right) [I_{IB}(R_1 \parallel R_f)] = [11 \times 80 \times 10^{-9} \times 91 \times 10^3] \text{ V}$$

$$= 80 \text{ mV}$$

$$V_{or3} = \left(1 + \frac{10^3}{100}\right) \left[\frac{1}{2} I_{IO}(R_1 \parallel R_f)\right] = [11 \times 10 \times 10^{-9} \times 91 \times 10^3] \text{ V}$$

$$= 10 \text{ mV}$$

则

$$V_{or} = V_{or1} + V_{or2} + V_{or3} = (22 + 80 + 10) \text{ mV} = 112 \text{ mV}$$

8.2.5 电路如图题 8.2.4 所示,当温度 $T = 25^\circ\text{C}$ 时,运放失调电压 $V_{IO} = 5 \text{ mV}$,输入失调电压温漂 $\frac{\Delta V_{IO}}{\Delta T} = 5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。(1) 当 $\frac{R_f}{R_1} = 1000$ 时,求 $T = 125^\circ\text{C}$ 时,输出误差电压 $V_{or} = ?$ (2) 若采取调零措施消除 V_{IO} 引起的 V_{or} ,求由 $\frac{\Delta V_{IO}}{\Delta T}$ 引起的 $V_{orT} = ?$ (3) 如 $\frac{R_f}{R_1} = 100$,允许 $V_{or} = 540 \text{ mV}$ 时的温度不能超过多少?

解 (1) 由 V_{IO} 和 $\frac{\Delta V_{IO}}{\Delta T}$ 引起的输出误差电压 V_{or}

$$V_{or} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \left[V_{IO} + \frac{\Delta V_{IO}}{\Delta T} (\Delta T)\right]$$

$$= 1001 [5 \text{ mV} + 5 \mu\text{V}/^\circ\text{C} \times 10^{-3} \times (125 - 25) ^\circ\text{C}] \text{ mV}$$

$$= 5506 \text{ mV} = 5.506 \text{ V}$$



(2) $v_{IO} = 0$ 时,由 $\frac{\Delta V_{IO}}{\Delta T} = 5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 引起的输出误差电压

$$V_{orT} = [1001 \times 5 \times 10^{-6} (125 - 25)] \text{ V} = 0.505 \text{ V} = 505 \text{ mV}$$

(3) 若 $\frac{R_f}{R_1} = 100$,允许 $V_{or} = 540 \text{ mV}$ 时的 $T = ?$

$$V_{or} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \left(V_{IO} + \frac{\Delta V_{IO}}{\Delta T} \Delta T\right)$$

$$540 \text{ mV} = 101 [5 \text{ mV} + 5 \times 10^{-3} \times \Delta T] \text{ mV}$$

$$\Delta T = \frac{540 - 505}{5 \times 10^{-3} \times 101} ^\circ\text{C} = \frac{35}{0.505} ^\circ\text{C} = 69.3 ^\circ\text{C}$$

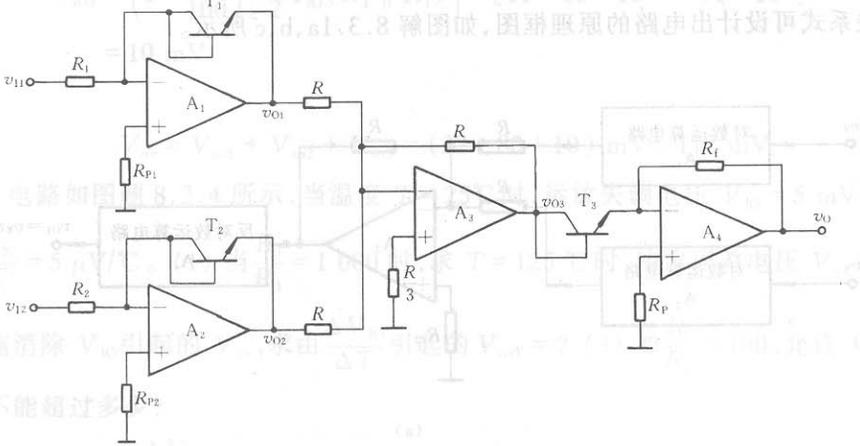
$$T = 25 ^\circ\text{C} + 69.3 ^\circ\text{C} = 94.3 ^\circ\text{C}$$

8.3.1 用对数、反对数、加法或减法运算电路,设计出 $v_{O1} = v_X v_Y$ 、 $v_{O2} = \frac{v_X}{v_Y}$ 和 $v_{O3} = \frac{v_X v_Y}{v_Z}$ 的原理框图。

解 对于 $v_{O1} = v_X v_Y$ 、 $v_{O2} = \frac{v_X}{v_Y}$ 和 $v_{O3} = \frac{v_X v_Y}{v_Z}$ 的表达式,可写成如下关系式:

$$v_{O1} = v_X v_Y = \exp(\ln v_X + \ln v_Y)$$

8.3.2 电路如图题 8.3.2 所示,若电路中的 BJT T_1 、 T_2 、 T_3 相互匹配,试求 v_o 的表达式,说明此电路完成何种运算功能。



图题 8.3.2

解 A_1 和 A_2 组成对数运算电路,有

$$v_{O1} = -V_T \ln \frac{v_{11}}{I_{ES1} R_1}$$

$$v_{O2} = -V_T \ln \frac{v_{12}}{I_{ES2} R_2}$$

A_3 为反相加法运算电路,有

$$v_{O3} = -(v_{O1} + v_{O2})$$

$$= V_T \left(\ln \frac{v_{11}}{I_{ES1} R_1} + \ln \frac{v_{12}}{I_{ES2} R_2} \right)$$

A_4 为反对数运算电路,因此可得

$$v_O = -I_{ES3} R_f e^{v_{O3}/V_T}$$

$$= -\frac{I_{ES3} R_f v_{11} v_{12}}{I_{ES1} I_{ES2} R_1 R_2}$$

当 $I_{ES1} = I_{ES2} = I_{ES3} = I_{ES}$, $R_1 = R_2 = R_f = R$ 时,有

$$v_O = -\frac{1}{I_{ES} R} v_{11} v_{12}$$

此电路完成乘法运算的功能。

8.4.1 电路如图题 8.4.1 所示,运放和乘法器都具有理想特性。(1) 求 v_{O1} 、 v_{O2} 和 v_O 的表达式;(2) 当 $v_{S1} = V_{sm} \sin \omega t$, $v_{S2} = V_{sm} \cos \omega t$ 时,说明此电路具有检测正交振荡幅值的功能(又称平方律振幅检测电路)。

解 (1) 求 v_{O1} 、 v_{O2} 、 v_O 。设 $K_1 = K_2 = K$, 则

解方程可得

$$v_{O1} = Kv_{S1}^2$$

$$v_{O2} = Kv_{S2}^2$$

式中令 $v_O = -\frac{R}{R}K(v_{S1}^2 + v_{S2}^2) = -K(v_{S1}^2 + v_{S2}^2)$

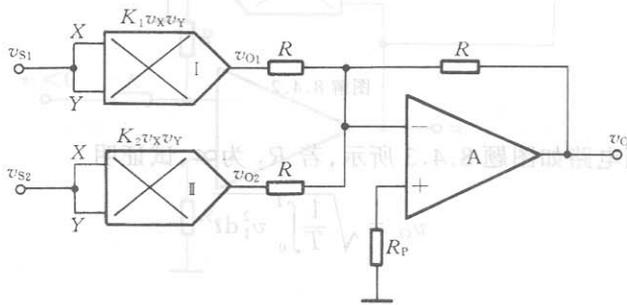
(2) 当 $v_{S1} = V_{sm} \sin \omega t, v_{S2} = V_{sm} \cos \omega t$ 时, 输出电压为

$$v_O = -K(V_{sm}^2 \sin^2 \omega t + V_{sm}^2 \cos^2 \omega t)$$

因 $\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1$, 所以

$$v_O = -KV_{sm}^2$$

此电路具有检测正交振荡幅值的功能, 又称平方律振幅检测电路。



图题 8.4.1

8.4.2 以模拟乘法器为基本电路, 设计一个电路, 实现 $v_O = K \sqrt{v_X^2 + v_Y^2}$ 的运算功能。

解 从表达式分析, 为实现 $v_O = K \sqrt{v_X^2 + v_Y^2}$ 功能, 它应包括三种基本运算电路; (1) 用两个模拟乘法器组成两个平方运算电路; (2) 由运算放大器组成求和的加法运算电路; (3) 由模拟乘法器和运算放大器组成的开方运算电路。由三个基本运算电路即构成, 如图解 8.4.2 所示, 证明如下:

$$v_{O1} = K_1 v_X^2, v_{O2} = K_1 v_Y^2, v_{O3} = -K_1 (v_X^2 + v_Y^2), v_{O4} = K_1 v_O^2, \text{ 则有}$$

$$v_O = \sqrt{\frac{v_{O4}}{K_1}}$$

考虑到

$$-\frac{v_{O3}}{R_1} = \frac{v_{O4}}{R_2}, \quad v_{O4} = -\frac{v_{O3} R_2}{R_1}$$

因此有及其可调范围。

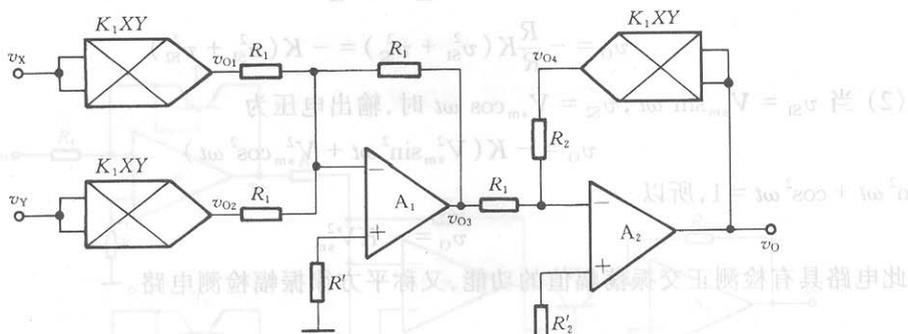
解 由图题 8.4.5 可知

$$v_O = \sqrt{\frac{K_1 (v_X^2 + v_Y^2) R_2}{R_1}}$$

设 $\sqrt{\frac{K_1 R_2}{R_1}} = K$, 则

$$v_O = K \sqrt{v_X^2 + v_Y^2}$$

8.3.2 电路如图题 8.3.2 所示,若电路中的晶体管 T_1, T_2, T_3 相互匹配,试求 v_o 的表达式,说明此电路完成何种运算功能。

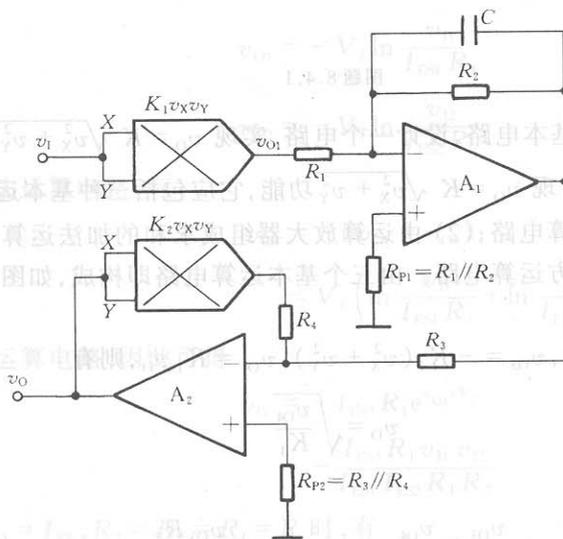


图解 8.4.2

8.4.3 有效值检测电路如图题 8.4.3 所示,若 R_2 为 ∞ ,试证明

$$v_o = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_1^2 dt}$$

解 A_1 和 A_2 组成对数运算电路,有



图题 8.4.3

解 当 R_2 为 ∞ 时,由图题 8.4.3 可列节点方程

$$K_1 v_1^2 = -CR_1 \frac{dv_{o1}}{dt}$$

$$\frac{K_2 v_o^2}{R_4} = -\frac{v_{o2}}{R_3}$$

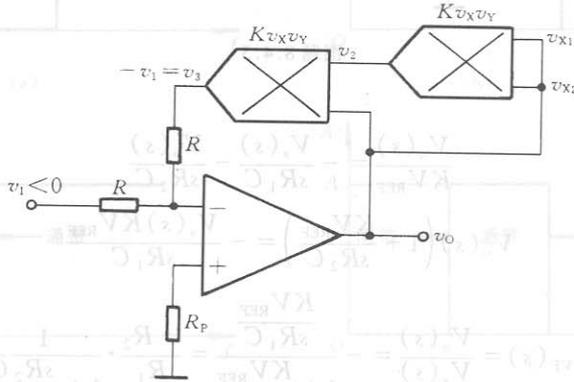
解方程可得

$$v_1^2 = + \frac{CR_1 \cdot K_2 R_3}{K_1 \cdot R_4} \cdot \frac{dv_0^2}{dt}$$

式中令 $\frac{CR_1 K_2 R_3}{K_1 R_4} = T$, 则上式为

$$v_0 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_1^2 dt}$$

8.4.4 电路如图题 8.4.4 所示, 试求输出电压 v_o 的表达式。



图题 8.4.4

解 由图题 8.4.4 可知

$$v_2 = K v_0^2$$

$$v_3 = K (K v_0^2) v_0 = K^2 v_0^3$$

则有

$$\frac{-v_1}{R} = \frac{v_3}{R}$$

$$-v_1 = v_3 = K^2 v_0^3$$

$$v_0 = \sqrt[3]{\frac{-v_1}{K^2}}$$

从 v_0 表达式中看出, 要满足 $v_1 < 0$, 才能保证运算放大器处于负反馈工作状态。

8.4.5 压控电路如图题 8.4.5 所示, 设电路中的器件是理想的, 乘法器的系数 $K = 0.1 \text{ V}^{-1}$,

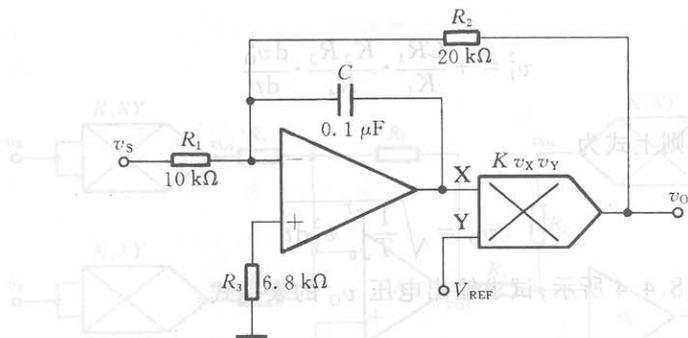
V_{REF} 为直流控制电压, 其值在 $+5 \text{ V} \sim +10 \text{ V}$ 间可调, 试求 $A_{VF}(s) = \frac{V_o(s)}{V_s(s)}$ 的表达式、电路的截止频率及其可调范围。

解 由图题 8.4.5 可知

$$V_o(s) = K V_x(s) V_y(s)$$

$$V_y(s) = V_{REF}$$

$$V_x(s) = -\frac{V_s(s)}{sR_1C} - \frac{V_o(s)}{sR_2C}$$



图题 8.4.5

整理后可得

$$\frac{V_o(s)}{KV_{REF}} = -\frac{V_s(s)}{sR_1 C} - \frac{V_o(s)}{sR_2 C}$$

$$V_o(s) \left(1 + \frac{KV_{REF}}{sR_2 C} \right) = -\frac{V_s(s) KV_{REF}}{sR_1 C}$$

$$A_{VF}(s) = \frac{V_o(s)}{V_s(s)} = -\frac{\frac{KV_{REF}}{sR_1 C}}{1 + \frac{KV_{REF}}{sR_2 C}} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{KV_{REF}}{sR_2 C}}$$

令 $s = j\omega$, 则可求出该电路的截止频率

$$\omega_c = \frac{KV_{REF}}{R_2 C}, \quad f_c = \frac{KV_{REF}}{2\pi R_2 C}$$

当 V_{REF} 为 +5 V ~ 10 V 间可调时, 其可调范围为

$$f_c = \frac{0.1 \text{ V}^{-1} \times (5 \text{ V})}{2\pi R_2 C} \sim \frac{0.1 \text{ V}^{-1} (10 \text{ V})}{2\pi R_2 C}$$

$$= \frac{0.5}{2\pi \times 20 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6}} \text{ Hz} \sim \frac{1}{2\pi \times 20 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6}} \text{ Hz}$$

$$= 39.8 \text{ Hz} \sim 79.6 \text{ Hz}$$

8.5.1 在下列几种情况下, 试回答应分别采用哪种类型的滤波电路(低通、高通、带通、带阻):

- (1) 有用信号频率为 100 Hz;
- (2) 有用信号频率低于 400 Hz;
- (3) 希望抑制 50 Hz 交流电源的干扰;
- (4) 希望抑制 500 Hz 以下的信号。

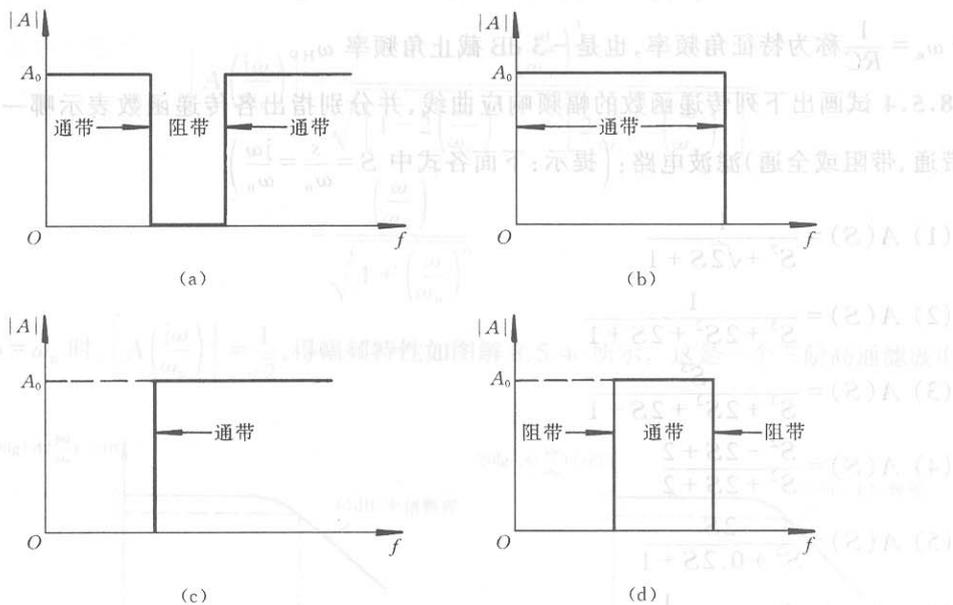
解 (1) 带通滤波电路; (2) 低通滤波电路; (3) 带阻滤波电路; (4) 高通滤波电路。

8.5.2 设运放为理想器件。在下列几种情况下, 试回答它们应分别属于哪种类型的滤波电路(低通、高通、带通、带阻)。并定性画出其幅频特性。

- (1) 理想情况下, 当 $f = 0$ 和 $f = \infty$ 时的电压增益相等, 且不为零;
- (2) 直流电压增益就是它的通带电压增益;
- (3) 在理想情况下, 当 $f \rightarrow \infty$ 时的电压增益就是它的通带电压增益;

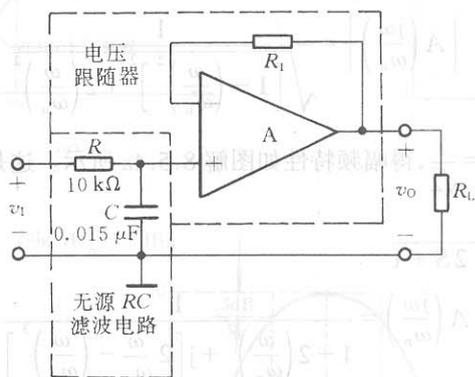
(4) 在 $f=0$ 和 $f \rightarrow \infty$ 时, 电压增益都等于零。

解 (1) 带阻滤波电路; (2) 低通滤波电路; (3) 高通滤波电路; (4) 带通滤波电路。它们的幅频特性示意图分别如图解 8.5.2a、b、c、d 所示。



图解 8.5.2

8.5.3 图题 8.5.3 所示为一个一阶低通滤波器电路, 试推导电路的传递函数, 并求出其 -3 dB 截止角频率 ω_H 。(A 为理想运放)



图题 8.5.3

解 这是一个一阶有源低通滤波电路。考虑到其通带电压增益 $A_{VF} = 1$, 且电压跟随器的输入阻抗很高、输出阻抗很低, 因此可得下列关系式

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

电路的传递函数为

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_n}}$$

式中 $\omega_n = \frac{1}{RC}$ 称为特征角频率,也是 -3 dB 截止角频率 ω_H 。

8.5.4 试画出下列传递函数的幅频响应曲线,并分别指出各传递函数表示哪一种(低通、高通、带通、带阻或全通)滤波电路:(提示:下面各式中 $S = \frac{s}{\omega_n} = \frac{j\omega}{\omega_n}$)

(1) $A(S) = \frac{1}{S^2 + \sqrt{2}S + 1}$

(2) $A(S) = \frac{1}{S^3 + 2S^2 + 2S + 1}$

(3) $A(S) = \frac{S^3}{S^3 + 2S^2 + 2S + 1}$

(4) $A(S) = \frac{S^2 - 2S + 2}{S^2 + 2S + 2}$

(5) $A(S) = \frac{2S}{S^2 + 0.2S + 1}$

解 (1) $A(S) = \frac{1}{S^2 + \sqrt{2}S + 1}$

$$A\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right) = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + j\sqrt{2}\frac{\omega}{\omega_n}}$$

$$\left| A\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right) \right| = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 2\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

当 $\omega = \omega_n$ 时, $\left| A\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right) \right| = \frac{1}{\sqrt{2}}$, 得幅频特性如图解 8.5.4a 所示。这是一个二阶低通滤波电路。

(2) $A(S) = \frac{1}{S^3 + 2S^2 + 2S + 1}$

$$A\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right) = \frac{1}{1 - 2\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + j\left[2\frac{\omega}{\omega_n} - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3\right]}$$

$$\left| A\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right) \right| = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - 2\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\frac{\omega}{\omega_n} - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3\right]^2}}$$

当 $\omega = \omega_n$ 时, $\left| A\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right) \right| = \frac{1}{\sqrt{2}}$, 得幅频特性如图解 8.5.4b 所示。这是一个三阶低通滤波电路。

(3) $A(S) = \frac{S^3}{S^3 + 2S^2 + 2S + 1}$

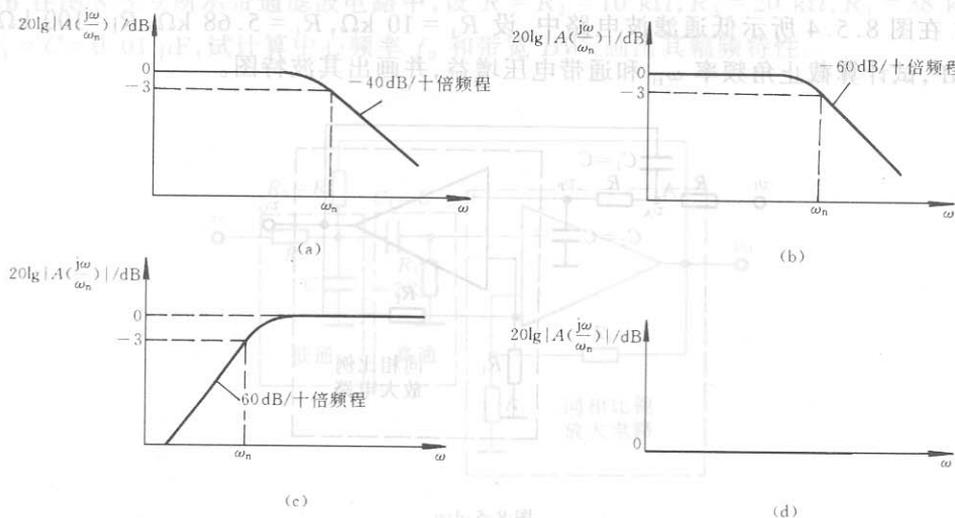
即 -3 dB 截止角频率 $\omega_{1c} = \omega_n = 100 \text{ rad/s}$ 。其波特图如图解 8.5.5 所示。

$$A\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right) = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3 - j\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - 2\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + j\left[2\frac{\omega}{\omega_n} - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3\right]}$$

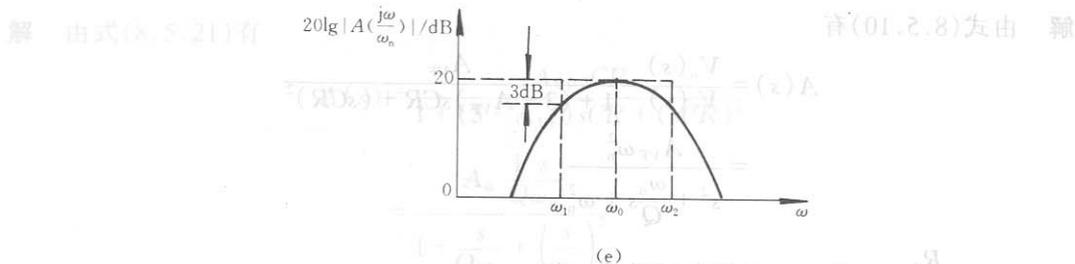
$$\left|A\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right)\right| = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3}{\sqrt{\left[1 - 2\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\frac{\omega}{\omega_n} - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3\right]^2}}$$

$$= \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^6}}$$

当 $\omega = \omega_n$ 时, $\left|A\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right)\right| = \frac{1}{\sqrt{2}}$, 得幅频特性如图解 8.5.4c 所示。这是一个三阶高通滤波电路。



图解 8.5.4



图解 8.5.4

$$(4) A(S) = \frac{S^2 - 2S + 2}{S^2 + 2S + 2}$$

为同相比例放大电路的电压增益

电路的传递函数为

$$A\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right) = \frac{2 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 - j2\frac{\omega}{\omega_n}}{2 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + j2\frac{\omega}{\omega_n}}$$

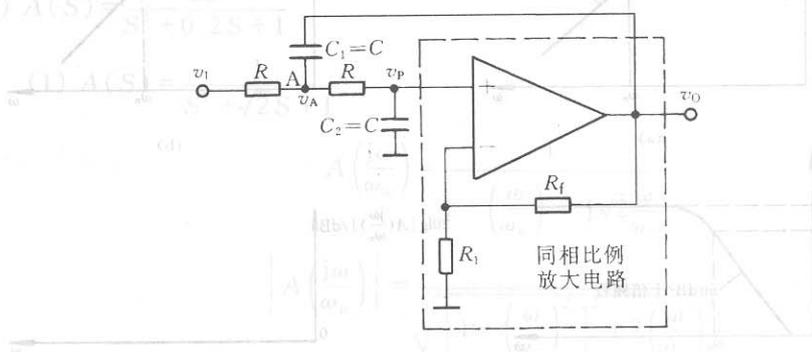
由上式可得 $\left|A\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right)\right| = 1$, 得幅频特性如图解 8.5.4d 所示。这是一个全通滤波电路。

$$(5) A(S) = \frac{2S}{S^2 + 0.2S + 1}$$

$$(1) A(S) = \frac{1}{S^2 + \sqrt{2}S + 1} \quad A\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right) = \frac{j2\frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + j0.2\frac{\omega}{\omega_n}}$$

当 $\omega = \omega_n = \omega_0$ 时, $\left|A\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right)\right| = 10$, 得幅频特性如图解 8.5.4e 所示, 这是一个带通滤波电路。

8.5.5 在图 8.5.4 所示低通滤波电路中, 设 $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_f = 5.68 \text{ k}\Omega$, $R = 100 \text{ k}\Omega$, $C_1 = C_2 = 0.1 \mu\text{F}$, 试计算截止角频率 ω_H 和通带电压增益, 并画出其波特图。



当 $\omega = \omega_c$ 时, $\left|A\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right)\right| = \frac{1}{\sqrt{2}}$, 得幅频特性如图解 8.5.4d 所示。这是一个低通滤波电路。

解 2 由式(8.5.10)有

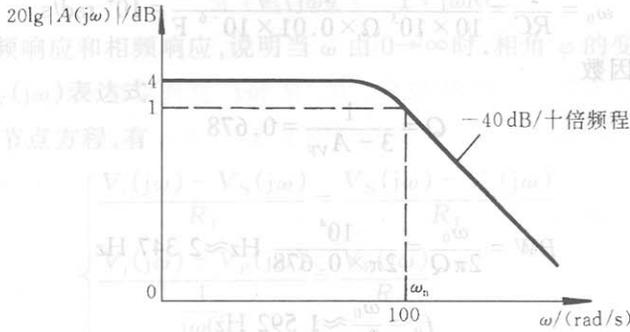
$$\begin{aligned} A(s) &= \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{A_{VF}}{1 + (3 - A_{VF})sCR + (sCR)^2} \\ &= \frac{A_{VF}\omega_n^2}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q}s + \omega_n^2} \end{aligned}$$

式中 $A_{VF} = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1.586$, 为通带电压增益。

当 $\omega = \omega_c$ 时, $\left|A\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right)\right| = \frac{1}{\sqrt{2}}$, 得幅频特性如图解 8.5.4d 所示。这是一个低通滤波电路。

$$(3) A(S) = \frac{S^2}{S^2 + \omega_n S} = \frac{1}{RC} = \frac{1}{100 \times 10^3 \Omega \times 0.1 \times 10^{-6} \text{ F}} = 100 \text{ rad/s}$$

即 -3 dB 截止角频率 $\omega_H = \omega_n = 100 \text{ rad/s}$ 。其波特图如图解 8.5.5 所示。



图解 8.5.5

8.5.6 在图 8.5.9 所示带通滤波电路中, 设 $R = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 20 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 38 \text{ k}\Omega$, $R_f = 20 \text{ k}\Omega$, $C_1 = C = 0.01 \mu\text{F}$, 试计算中心频率 f_0 和带宽 BW , 画出其幅频特性。

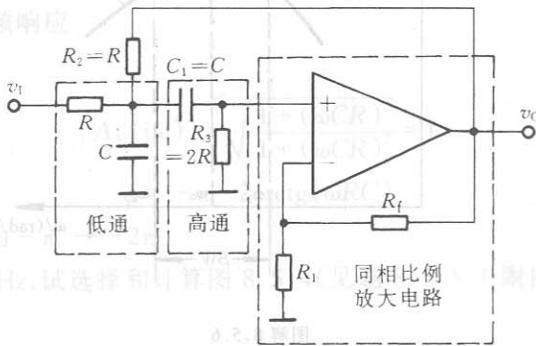


图 8.5.9

解 由式(8.5.21)有

$$A(s) = \frac{A_{VF} sCR}{1 + (3 - A_{VF})sCR + (sCR)^2}$$

$$= \frac{A_0 \frac{1}{Q\omega_0}}{1 + \frac{s}{Q\omega_0} + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}$$

式中

$$A_{VF} = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1 + \frac{20}{38} = 1.526$$

为同相比例放大电路的电压增益,

$$A_0 = \frac{A_{VF}}{3 - A_{VF}} = \frac{1.526}{3 - 1.526} = 1.035$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} = \frac{1}{10 \times 10^3 \Omega \times 0.01 \times 10^{-6} \text{ F}} = 10^4 \text{ rad/s}$$

称为中心角频率,品质因数

$$Q = \frac{1}{3 - A_{VF}} = 0.678$$

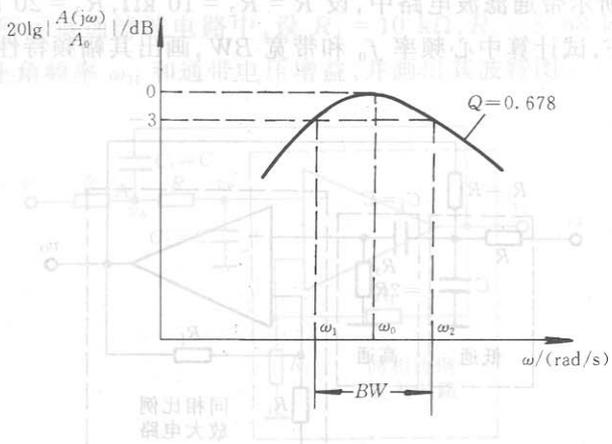
由此可算出

$$BW = \frac{\omega_0}{2\pi Q} = \frac{10^4}{2\pi \times 0.678} \text{ Hz} \approx 2347 \text{ Hz}$$

和

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \approx 1592 \text{ Hz}$$

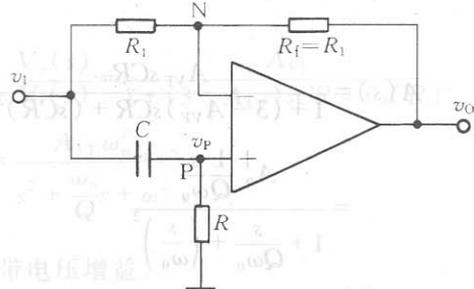
其选频特性示意图如图解 8.5.6 所示。



图解 8.5.6

8.5.7 图题 8.5.7 所示是一阶全通滤波电路的一种形式。

解 由式(8.5.10)有



图题 8.5.7

(1) 证明电路的电压增益表达式为

$$A_V(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = -\frac{1-j\omega RC}{1+j\omega RC}$$

(2) 试求它的幅频响应和相频响应,说明当 ω 由 $0 \rightarrow \infty$ 时,相角 φ 的变化范围。

解 (1) 证明 $A_V(j\omega)$ 表达式

利用虚短概念列节点方程,有

$$\begin{cases} \frac{V_i(j\omega) - V_N(j\omega)}{R_1} = \frac{V_N(j\omega) - V_o(j\omega)}{R_1} \\ \frac{V_i(j\omega) - V_P(j\omega)}{1} = \frac{V_P(j\omega)}{R} \\ \frac{1}{j\omega C} \\ V_N(j\omega) = V_P(j\omega) \end{cases} \quad (8.5.7-1)$$

解方程组得

$$\begin{aligned} \frac{V_i(j\omega) + V_o(j\omega)}{2} &= \frac{j\omega CR}{1+j\omega RC} \cdot V_i(j\omega) \\ A_V(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} &= -\frac{1-j\omega RC}{1+j\omega RC} \end{aligned} \quad (8.5.7-2)$$

(2) 求幅频响应及相频响应

由式(8.5.7-2)可得

$$\begin{aligned} |A_V(j\omega)| &= \sqrt{\frac{1 + (\omega CR)^2}{1 + (\omega CR)^2}} = 1 \\ \varphi &= -\pi - 2\arctg(\omega RC) \end{aligned}$$

和
当 ω 由 $0 \rightarrow \infty$ 时,相角 φ 由 $-\pi \rightarrow -2\pi$ 。

8.5.8 已知 $f_H = 500$ Hz,试选择和计算图 8.5.4(见题 8.5.5 中附图)所示电路形式的巴特沃思低通滤波电路的参数。

解 (1) 根据 f_H 选择和计算 C 、 R 值

通常 C 的容量不应超过 $1 \mu\text{F}$, R 的阻值应在千欧至兆欧的范围内。

取 $C = 0.1 \mu\text{F}$, 则由 $f_H = \frac{1}{2\pi RC}$ 可得

$$R = \frac{1}{2\pi \times 0.1 \times 10^{-6} \text{ F} \times 500 \text{ Hz}} \approx 3183.1 \Omega$$

(2) 根据 Q 值求 R_1 和 R_f

对于图 8.5.4 所示电路形式的二阶巴特沃思低通滤波器,对照表 8.5.1 知,其 $Q = 0.707$, 则由式(8.5.12)有

$$Q = \frac{1}{3 - A_{VF}} = 0.707$$

即

$$A_{VF} = 1.586$$

根据 A_{VF} 与 R_1 、 R_f 的关系和集成运放两个输入端外接电阻的对称条件,有

$$\begin{cases} 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1.586 \\ R_1 \parallel R_f = R + R \end{cases}$$

联合求解得 $R_1 = 17\,230\ \Omega$, $R_f = 10\,096.8\ \Omega$ 。

由于阻容参数对滤波特性影响较大, R_1 、 R_f 、 R 和 C 宜选用精密电阻和电容。

8.5.9 已知 $f_H = 200\ \text{Hz}$, $|A_0| = 6$, 试选择图 8.5.14 所示电路形式的巴特沃思低通滤波电路的参数。

解 由式(8.5.40)和(8.5.41)有

$$R_2 = \frac{a_1 C_1 - \sqrt{a_1^2 C_1^2 - 4C_1 C_2 b_1 (1 - A_0)}}{4\pi f_c C_1 C_2} \quad (8.5.9-1)$$

$$R_1 = -\frac{R_2}{A_0} \quad (8.5.9-2)$$

$$R_3 = \frac{b_1}{4\pi^2 f_c^2 C_1 C_2 R_2} \quad (8.5.9-3)$$

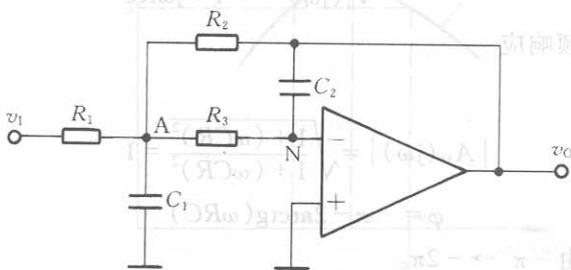


图 8.5.14

和 $\frac{C_1}{C_2} \geq \frac{4b_1(1 - A_0)}{a_1^2} \quad (8.5.9-4)$

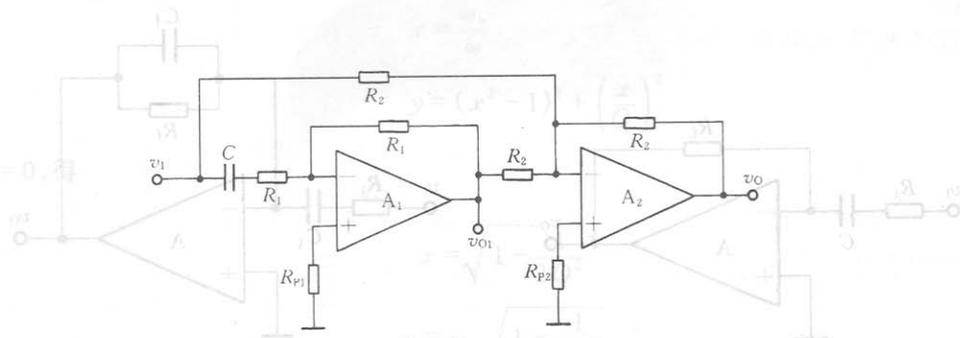
这里的 $f_c = f_H$, 对照教材中表 8.5.1 可知, $a_1 = \frac{1}{Q} = \sqrt{2}$, $b_1 = 1$ 。选择 $C_1 = 0.1\ \mu\text{F}$, $C_2 = 0.0068\ \mu\text{F}$, 则可满足式(8.5.9-4)的条件(注意 A_0 为负值)。于是, 利用式(8.5.9-1)~(8.5.9-3)可得 $R_2 \approx 43\,934.6\ \Omega$, $R_1 = -\frac{R_2}{A_0} = 7\,322.4\ \Omega$, 而

$$R_3 = \frac{1}{4\pi^2 \times (200)^2 \times 0.1 \times 10^{-6} \times 0.0068 \times 10^{-6} \times 43\,934.6} \Omega = 21\,198.65\ \Omega$$

如果从工程实践考虑, 运放的同相端到“地”应接一平衡电阻 $R_p = R_3 + R_2 \parallel R_1$ 。

8.5.10 电路如图题 8.5.10 所示, 设 A_1 、 A_2 为理想运放。(1) 求 $A_1(s) = \frac{V_{o1}(s)}{V_i(s)}$ 及 $A(s) =$

$\frac{V_o(s)}{V_i(s)}$; (2) 根据导出的 $A_1(s)$ 和 $A(s)$ 表达式判断它们分别属于什么类型的滤波电路。



图题 8.5.10

解 (1) 求 $A_1(s)$ 及 $A(s)$

$$A_1(s) = \frac{V_{o1}(s)}{V_i(s)} = -\frac{R_1}{R_1 + \frac{1}{sC}} = -\frac{sCR_1}{1 + sCR_1}$$

A_2 组成反相求和电路, 故有

$$V_o(s) = -V_{o1}(s) - V_i(s) = -\frac{V_i(s)}{1 + sCR_1}$$

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{1}{1 + sCR_1}$$

(2) 由 $A_1(s)$ 和 $A(s)$ 可看出, A_1 组成一阶高通滤波电路, 整个电路为一阶低通滤波电路。

8.5.11 设 A 为理想运放, 试写出图题 8.5.11 所示电路的传递函数, 指出这是一个什么类型的滤波电路。

解 由图题 8.5.11 有

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{R_f}{R_1 + \frac{1}{sC}} = -\frac{sCR_f}{1 + sCR_1}$$

上式说明, 这是一个一阶高通滤波电路。

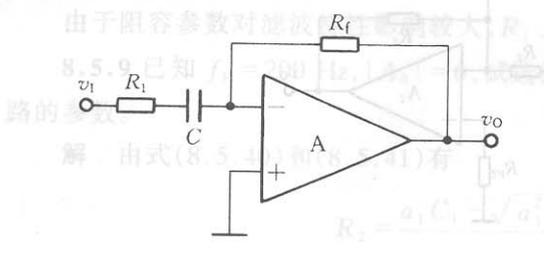
8.5.12 设 A 为理想运放, 试写出图题 8.5.12 所示电路的传递函数, 指出这是一个什么类型的滤波电路。

解 由图题 8.5.12 有

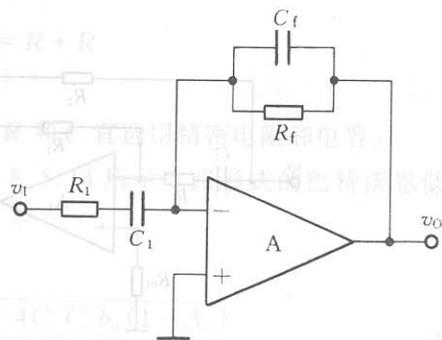
$$\begin{aligned} A(s) &= \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{\left(R_f \parallel \frac{1}{sC_f}\right)}{R_1 + \frac{1}{sC_1}} \\ &= -\frac{sC_1 R_f}{1 + s(C_1 R_1 + C_f R_f) + s^2 C_1 C_f R_1 R_f} \end{aligned}$$

上式说明, 这是一个带通滤波电路。

联合求解得 $R_1 = 17\ 230\ \Omega$, $R_2 = 10\ 096\ \Omega$ 。



图题 8.5.11



图题 8.5.12

8.5.13 已知某有源滤波电路的传递函数为

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{-1}{s^2 + \frac{3}{R_1 C} s + \frac{1}{R_1 R_2 C^2}}$$

(1) 试定性分析该电路的滤波特性(低通、高通、带通或带阻)(提示:可从增益随角频率变化情况判断);

(2) 求通带增益 A_0 、特征角频率(中心频率) ω_0 及等效品质因数 Q 。

解 (1) 电路的滤波特性

令 $\omega_0 = \frac{1}{C\sqrt{R_1 R_2}}$, 原式可改写为

$$A(j\omega) = \frac{-1}{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 - j\frac{\omega_0}{\omega} \times 3\sqrt{\frac{R_2}{R_1}}} \quad (8.5.13-1)$$

对于上式, 当 $\omega \rightarrow 0$ 时, $|A(j\omega)| \rightarrow 0$; 当 $\omega \rightarrow \infty$ 时, $|A(j\omega)| \rightarrow 1$ 。因此, 电路具有高通特性。

(2) 求 A_0 、 ω_0 及 Q

由式(8.5.13-1)可知, $A_0 = -1$, $\omega_0 = \frac{1}{C\sqrt{R_1 R_2}}$, $Q = \frac{1}{3}\sqrt{\frac{R_1}{R_2}}$ 。

8.5.14 高通电路如图 8.5.6 所示。已知 $Q = 1$, 试求其幅频响应的峰值以及峰值所对应的角频率。设 $\omega_n = 2\pi \times 200\ \text{rad/s}$ 。

解 此电路为压控电压源高通滤波器, 其频率特性表达式为

$$A(j\omega) = \frac{A_{VF} \omega^2}{\omega_n^2 - \omega^2 + j\omega_n \omega / Q}$$

即

$$|A(j\omega)| = \frac{A_{VF}}{\sqrt{\left[\left(\frac{\omega_n}{\omega}\right)^2 - 1\right]^2 + \left(\frac{\omega_n}{\omega Q}\right)^2}}$$

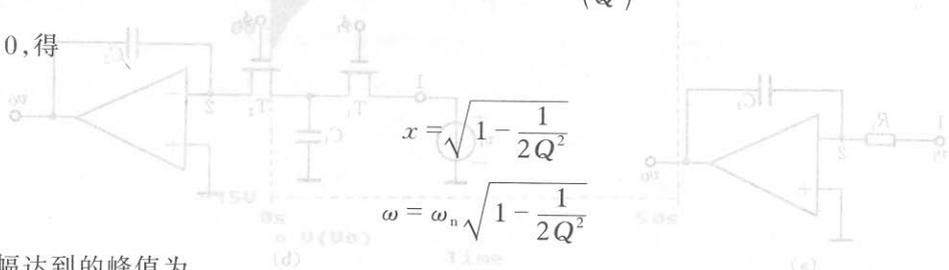
8.5.10 电路如图题 8.5.10 所示, 求 $A_1(s)$ 及 $A_2(s)$ 。

求表达式分母的最小值,可求得振幅达最大值所对应的角频率 ω 值。令

$$x = \frac{\omega_n}{\omega}$$

则
$$y = (x^2 - 1)^2 + \left(\frac{x}{Q}\right)^2$$

求 $\frac{dy}{dx} = 0$, 得



即

$$\omega = \omega_n \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}$$

此时振幅达到的峰值为

$$|A(j\omega)|_{\max} = \frac{A_{VF} Q}{\sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}}$$

当 $Q=1$, 由 $Q = \frac{1}{3 - A_{VF}}$, 有

$$A_{VF} = 3 - \frac{1}{Q} = 2$$

幅频特性的峰值为

$$|A(j\omega)|_{\max} = \frac{A_{VF} Q}{\sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}} = \frac{2}{\sqrt{1 - \frac{1}{2}}} = 2.828$$

对应的角频率

$$\omega = \frac{\omega_n}{\sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}} = \sqrt{2} \omega_n = \sqrt{2} \times 200 \text{ rad/s}$$

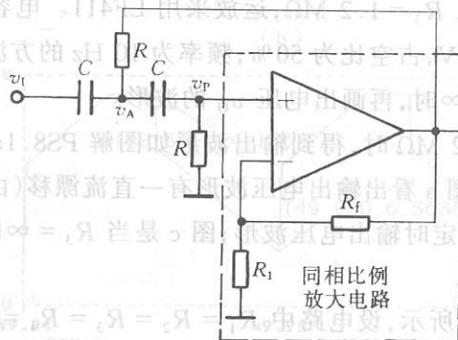


图 8.5.6

8.6.1 影响开关电容滤波器频率响应的时间常数决定于什么? 为什么时钟频率 f_{CP} 通常比滤波器的工作频率(例如截止频率 f_0)要大得多(例如 $\frac{f_{CP}}{f_0} > 100$)?

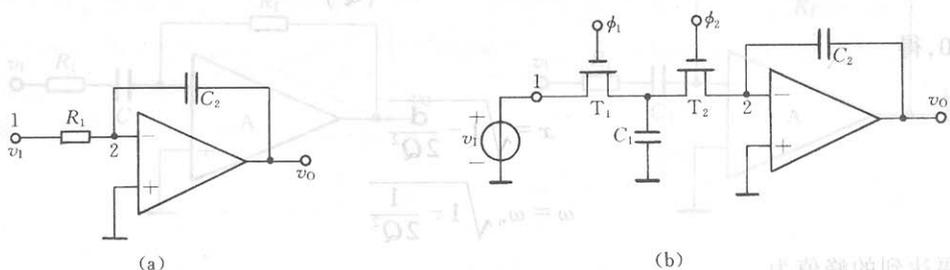


图 8.6.1

解 (1) 影响开关电容滤波器频率响应的时间常数取决于时钟周期 T_c 和电容比值 C_2/C_1 , 而与电容的绝对值无关。

(2) 只有时钟频率 $f_{CP} \left(= \frac{1}{T_c} \right)$ 比滤波器的工作频率(例如截止频率 f_0)大得多, 才可以如图 8.6.1a、b 所示, 用一个接地电容 C_1 和 MOS 三极管 T_1 、 T_2 (用作开关)来代替输入电阻 R_1 , 且这时由于 $f_{CP} \gg f_0$, 由 MOS 开关引起的噪声对通带内信号几乎无影响。

8.6.2 开关电容滤波器与一般 RC 有源滤波电路相比有何主要优点?

解 开关电容滤波器不需要模数转换器, 可以对模拟量的离散值直接进行处理。与数字滤波器比较, 省略了量化过程, 因而具有处理速度快, 整体结构简单等优点。此外, 它制造简单, 早已实现了单片集成化, 目前性能已达到相当高水平, 大有取代一般有源滤波器的趋势。

PSPICE 习题

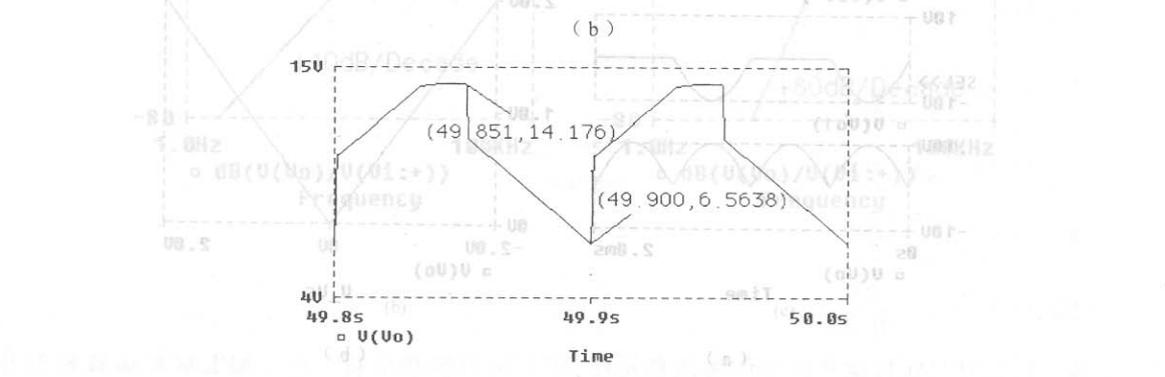
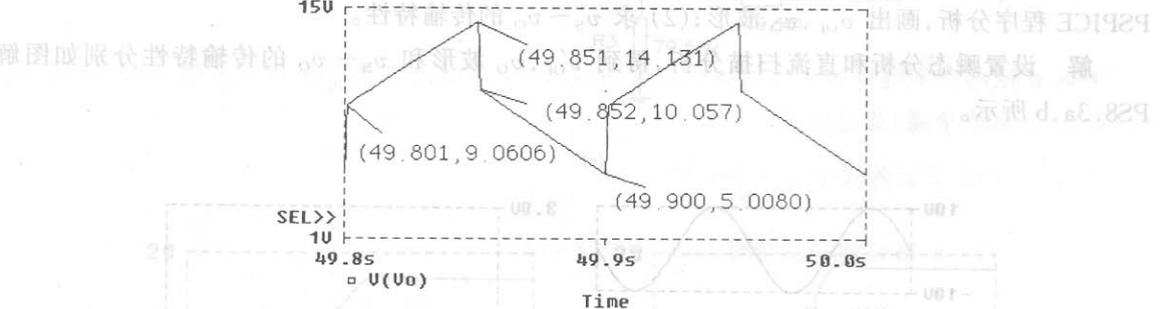
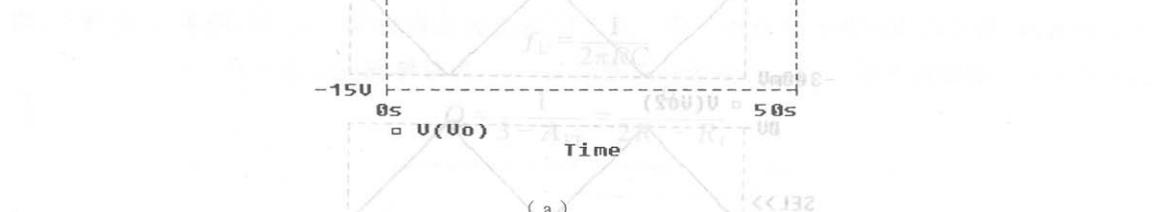
PS8.1 电路如图题 8.1.16a 所示, 设电路中 $R_1 = R_2 = 12 \text{ k}\Omega$, $R_f = 5 \text{ k}\Omega$, $C = 4 \mu\text{F}$, 运放的输出端与反相输入端之间并联电阻 $R_3 = 1.2 \text{ M}\Omega$, 运放采用 LF411。电容器初始电压 $v_C(0) = 0$, 输入电压 v_s 幅度为 $+5 \text{ V} \sim -5 \text{ V}$, 占空比为 50%, 频率为 10 Hz 的方波, 如图题 8.1.16b 所示。试画出电压 v_o 的波形; 当 $R_3 = \infty$ 时, 再画出电压 v_o 的波形。

解 设置瞬态分析, $R_3 = 1.2 \text{ M}\Omega$ 时, 得到输出波形如图解 PS8.1a、b 所示。图 a 表示输出电压 $v_o(t)$ 建立过程的波形, 由图 a 看出输出电压波形有一直流漂移(由于运放是非理想器件); 图 b 为图 a 的局部放大后输出稳定时输出电压波形; 图 c 是当 $R_3 = \infty$ 时, 输出电压 v_o 的波形, 此时输出已达到饱和状态。

PS8.2 电路如图题 8.1.17a 所示, 设电路中 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_{p2} = R_{p3} = 100 \text{ k}\Omega$, $C = 100 \mu\text{F}$, $R_{n1} = 300 \text{ k}\Omega$, $R_{p1} = 75 \text{ k}\Omega$, $R_{p3} = 33 \text{ k}\Omega$, 运放采用 LF411, 电容上初始电压 $v_C(0) = 0$, 设输入信号 $v_{s1} = -0.1 \text{ V}$, v_{s2} 为幅度 $-3 \text{ V} \sim +3 \text{ V}$, 占空比 50%, 频率 $f = 0.5 \text{ Hz}$ 的方波, 如图题 8.1.17b 所示。试画出 v_{o1} 、 v_{o2} 和 v_o 的波形。

PS8.1 设二阶压控电压源电路如图 8.10 所示, 试求当输入电压 U_i 为正弦波时, 电路的幅频特性, 并计算当 $U_i = 10 \text{ V}$ 时, 电路的输出电压 U_o 的幅值和相位。选择并计算电容、电阻值, 画出幅频特性曲线, 并讨论其幅频特性有何变化?

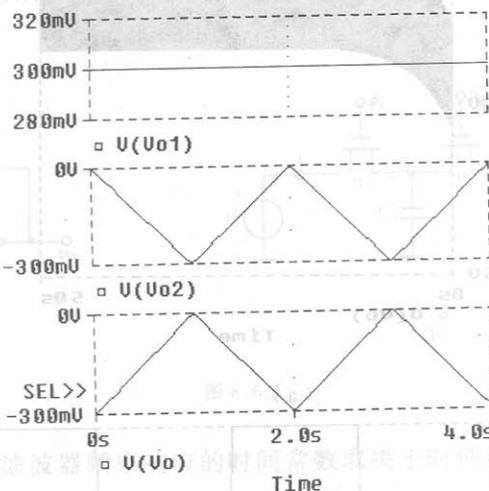
提示: (1) 计算电路参数时, 电容值选择范围分别为: 几百皮法、几纳法、几十千欧~几百千欧; (2) 电容值和电阻值的选取应满足平衡条件; (3) 电容值和电阻值的选取应使电路的幅频特性曲线在 10 Hz 附近具有足够的增益, 且相位裕度足够大。



图解 PS8.1

解 设置瞬态分析,得到输入、输出波形,如图解 PS8.2 所示。

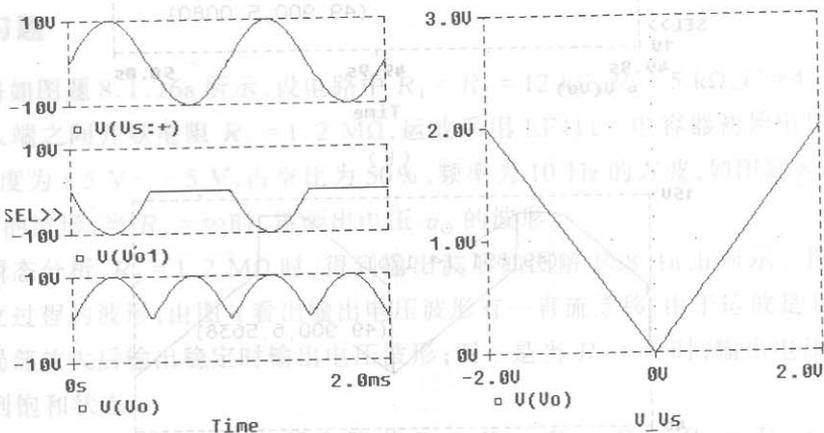
滤波器的的工作频率(例如截止频率)



图解 PS8.2

PS8.3 绝对值电路如图题 8.1.19 所示, A_1 、 A_2 用 $\mu A741$, 二极管 D_1 、 D_2 用 D1N4148。电路中 $R=10\text{ k}\Omega$, 运放同相端电阻为零。(1) 当输入电压 $v_s=10\sin\omega t\text{ V}$, $f=1\text{ kHz}$ 时, 试运用 PSPICE 程序分析, 画出 v_{o1} 、 v_o 波形; (2) 求 $v_s \sim v_o$ 的传输特性。

解 设置瞬态分析和直流扫描分析, 得到 v_{o1} 、 v_o 波形和 $v_s \sim v_o$ 的传输特性分别如图解 PS8.3a、b 所示。



图解 PS8.3

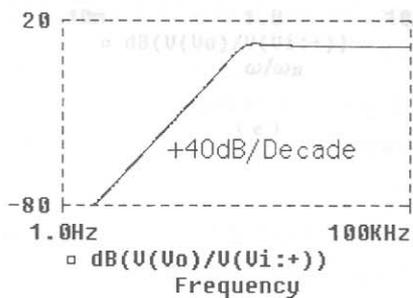
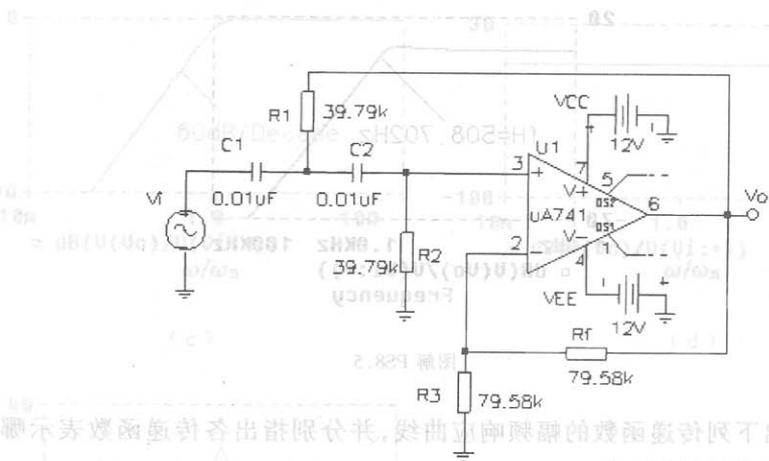
PS8.4 设二阶压控电压源高通滤波电路的截止频率 $f_L = 400 \text{ Hz}$, $Q = 1$ 。要求画出电路图, 选择和计算电容、电阻值, 画出幅频响应。若将上述两个相同的滤波电路串联起来, 其幅频响应有何变化?

提示: (1) 计算电路参数时, 要求运放的两输入端外接电阻满足平衡条件; (2) 电容值和电阻值的选择范围分别为: 几百皮法~1 微法, 几十千欧~几百千欧。

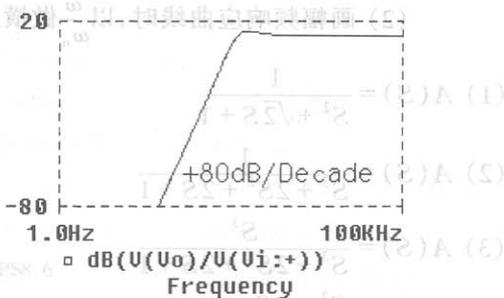
解 二阶压控电压源高通滤波器电路图如图解 PS8.4a 所示, 选择 $R_1 = R_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$, 则频率和品质因数表达式为

$$f_L = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$Q = \frac{1}{3 - A_{VF}} = \frac{R_3}{2R_3 - R_1}$$



(b)



(c)

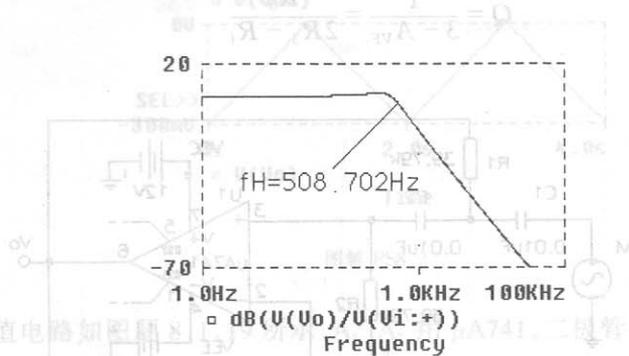
图 PS8.4 所示为二阶压控电压源高通滤波电路。图中 V_i 为输入电压, V_o 为输出电压。图中 $R_1 = R_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$ 。图中 $R_3 = 79.58 \text{ k}\Omega$, $R_f = 79.58 \text{ k}\Omega$ 。图中 $V_{CC} = 12 \text{ V}$, $V_{EE} = -12 \text{ V}$ 。图中 U_1 为 UA741 运放。

图 由于 $f_L = 400 \text{ Hz}$, 取 $C = 0.01 \mu\text{F}$, 则 $R = 39.79 \text{ k}\Omega$; 由 $Q = 1$, 得 $R_3 = R_f$, 在运放的两输入端外接电阻满足平衡条件时, 则 $R_3 = R_f = 2R = 79.58 \text{ k}\Omega$ 。

滤波器的幅频响应如图解 PS8.4b 所示。两个相同的滤波器串联起来后, 其幅频响应如图解 PS8.4c 所示。

PS8.5 用 PS8.4 所得二阶压控电压源高通滤波电路参数, 改接成二阶压控电压源低通滤波电路, 画出其幅频响应, 比较高通、低通滤波电路的对偶性。

解 设置交流扫描分析, 得幅频响应曲线如图解 PS8.5 所示。由图可看出, 在 $\omega > \omega_n$ 时, 随着 ω 的增加, 增益以 40 dB/十倍频程 下降。而二阶高通滤波器在 $\omega < \omega_n$ 时, 随着 ω 的减小, 增益以 40 dB/十倍频程 下降。即二阶低通和高通以 $\omega = \omega_n$ 为对称轴成镜像关系。



图解 PS8.5

PS8.6 试画出下列传递函数的幅频响应曲线, 并分别指出各传递函数表示哪一种(低通、高通、带通、带阻或全通)滤波电路。

提示: (1) 下面各式中 $S = \frac{s}{\omega_n} = \frac{j\omega}{\omega_n}$;

(2) 画幅频响应曲线时, 以 $\frac{\omega}{\omega_n}$ 做横坐标。

$$(1) A(S) = \frac{1}{S^2 + \sqrt{2}S + 1}$$

$$(2) A(S) = \frac{1}{S^3 + 2S^2 + 2S + 1}$$

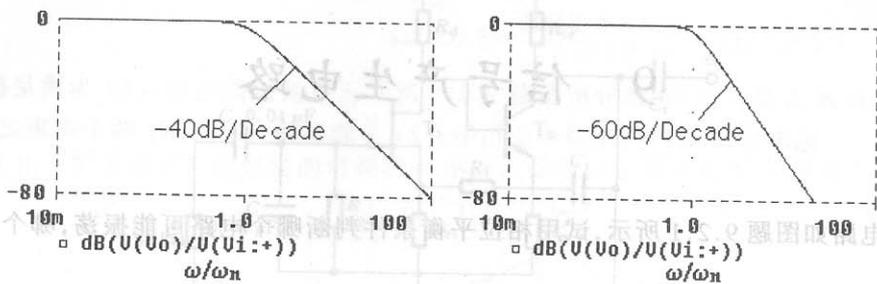
$$(3) A(S) = \frac{S^3}{S^3 + 2S^2 + 2S + 1}$$

$$(4) A(S) = \frac{S^2 - 2S + 1}{S^2 + 2S + 1}$$

$$(5) A(S) = \frac{2S}{S^2 + 0.2S + 1}$$

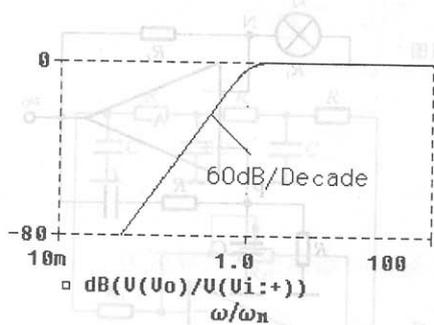
解 以 LAPLACE 运算模型作为仿真元件, 接上信号源和负载。将 LAPLACE 运算模型分别设置成题中的传递函数, 进行交流分析, 得到如图解 PS8.6 所示的幅频响应曲线。图 PS8.6a、b、c、d、e 依次为传递函数 1、2、3、4、5 的幅频响应。由图看出, 传递函数 1 为二阶低通滤波器, 2

为三阶低通滤波器,3为三阶高通滤波器,4为全通滤波器,5为带通滤波器。

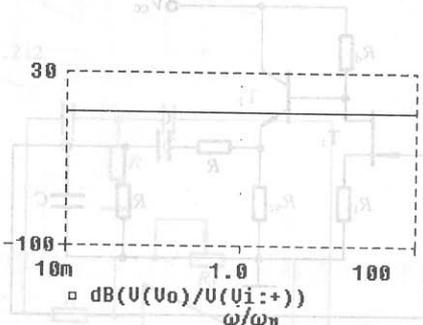


(a)

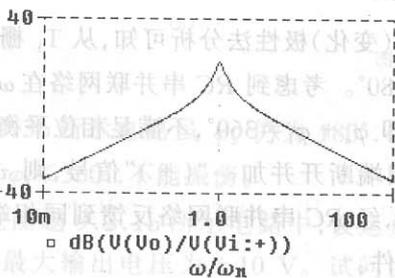
(b)



(c)



(d)



(e)

图解 PS8.6

解 当 R_1 断开时, 相当于同相放大器的电压增益
 解 由 $A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 3$, 可得