脉冲与数字电路习题解

何绪芃　解世果　杨钟英　编

电子科技大学出版社

脉冲与数字电路习题解

何绪芃　解世果　杨钟英　等编

电子科技大学出版社
· 1991 ·

内容提要

本书编选了脉冲与数字电路中带有典型性的习题及其解答近200题。脉冲电路部分包括基本知识，半导体二极管及晶体三极管开关，脉冲单元电路；数字电路部分包括数制与编码，逻辑代数与逻辑门，触发器，组合逻辑电路及时序逻辑电路的分析与设计，数一模及模一数变换。

本书可作为学习脉冲与数字电路课程的参考书。对各类大专院校、中等专业学校中的无线电技术、电子计算机等专业的师生，工厂、研究所有关专业技术人员以及业余自学的读者都会有所裨益。

脉冲与数字电路习题解

何绪芃　解世果　杨钟英　等编

*

电子科技大学出版社出版

（中国成都建设北路二段五号）

成都东方彩印厂胶印

四川省新华书店发行

*

开本 878×1092　1/16 印张　7.812　字数 200 千字

版次 1986 年 6 月第一版　印次 1991 年 4 月第二次印刷

印数 9501—11500

中国标准书号 ISBN　7-81016-292-6/TN·90

（15452·136）　　定价：2.60元

脉冲电路部分

第一章　恒值激励下线性电路的过渡过程

1—1　$X(t)=X(\infty)+[X(0^+)-X(\infty)]e^{-t/\tau}$ 称三要素公式。问：

(1) 公式的应用条件是什么？

(2) 初始值 $X(0^+)$ 与 $X(0^-)$ 的含义有何不同？在电容、电感和电阻中两者有无固定的关系？

解：(1) 三要素公式只适用于阶跃信号作用下的一阶线性电路。

(2) $X(0^+)$是对应过渡过程开始($t=0^+$)瞬间的电压或电流值。$X(0^-)$是指过渡过程开始前一瞬间($t=0^-$)在同一讨论点的电压或电流值。由于电容C的端电压和电感L中的电流在换路瞬间不能突变，二者的关系必须满足换路定律，即 $v_C(0^+)=v_C(0^-)$，$i_L(0^+)=i_L(0^-)$。对于其它电量两者无固定关系。因此，在应用三要素公式时，必须统一代$X(0^+)$的值。

1—2　试用三要素公式写出图 1-1 和图 1-2 所示两种指数曲线的解析式。

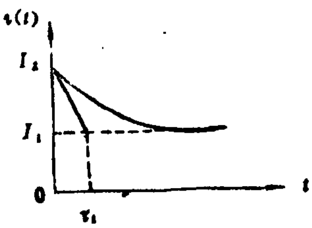

图　1-1

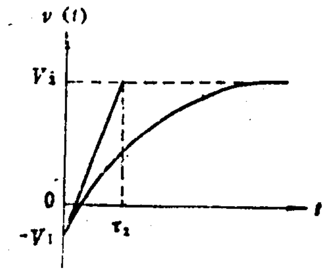

图　1-2

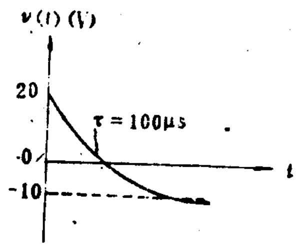

图　1-3

解：(1) 对图1-1：∵　$i(0^+)=I_2$，$i(\infty)=I_1$，$\tau=\tau_1$

$$\therefore\ i(t)=I_1+(I_2-I_1)e^{-t/\tau_1}$$

(2) 对图1-2：∵　$v(0^+)=-V_1$，$v(\infty)=V_2$，$\tau=\tau_2$

$$\therefore\ v(t)=V_2-(V_1+V_2)e^{-t/\tau_2}$$

1—3　已知指数曲线的三要素，试写出表达式并画出对应的波形图。

(1) $V(0^+)=20\text{V}$，$V(\infty)=-10\text{V}$，$\tau=100\mu s$；

(2) $i(0^+)=5\text{mA}$，$i(\infty)=20\text{mA}$，$\tau=100\text{ns}$。

解：(1) $v(t)=-10+[20-(-10)]e^{-t/100\times10^{-6}}$

$$=(-10+30e^{-10^4t})\text{V}$$

(2) $i(t)=20+(5-20)e^{-t/100\times10^{-9}}$

$$=(20-15e^{-10^7t})\text{mA}$$

$v(t)$ 和 $i(t)$ 的波形见图 1-3 和图 1-4。

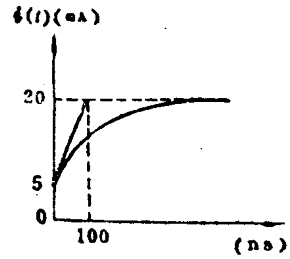

图　1-4

1—4 指数曲线如图1-5所示。已知三要素，试推证：

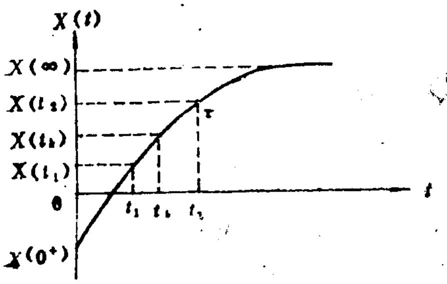

图 1-5

(1) 从初始值 $X(0^+)$ 变化到某一中间值 $X(t_K)$ 所需时间 t_K 的通用公式为

$$t_K=\tau\ln\frac{X(\infty)-X(0^+)}{X(\infty)-X(t_K)}$$

(2) 从 $X(t_1)$ 变化到 $X(t_2)$ 的时间间隔 t_2-t_1 的通用公式为

$$t_2-t_1=\tau\ln\frac{X(\infty)-X(t_1)}{X(\infty)-X(t_2)}$$

解：(1) 由三要素公式可写出当 $t=t_K$ 时的表达式为

$$X(t_K)=X(\infty)+[X(0^+)-X(\infty)]e^{-t_K/\tau}$$

则

$$X(\infty)-X(t_K)=[X(\infty)-X(0^+)]e^{-t_K/\tau}$$

$$e^{t_K/\tau}=\frac{X(\infty)-X(0^+)}{X(\infty)-X(t_K)}$$

$\therefore$

$$t_k=\tau\ln\frac{X(\infty)-X(0^+)}{X(\infty)-X(t_K)}$$

(2) 引用上面公式可直接写出：

$$t_1=\tau\ln\frac{X(\infty)-X(0^+)}{X(\infty)-X(t_1)}\qquad t_2=\tau\ln\frac{X(\infty)-X(0^+)}{X(\infty)-X(t_2)}$$

$\therefore$

$$t_2-t_1=\tau\left[\ln\frac{X(\infty)-X(0^+)}{X(\infty)-X(t_2)}-\ln\frac{X(\infty)-X(0^+)}{X(\infty)-X(t_1)}\right]$$

$$=\tau\ln\frac{X(\infty)-X(t_1)}{X(\infty)-X(t_2)}$$

1—5 求图1-6中四种电路的时间常数。

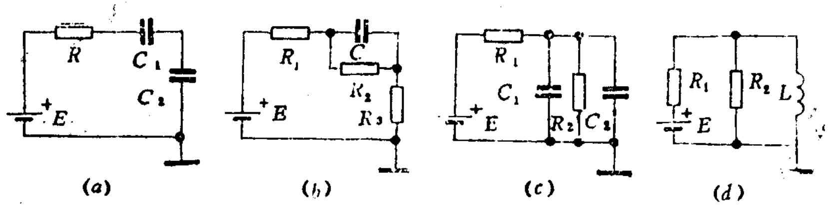

图 1-6

解：应用等效电源法将各电路中的电源短接，可求得各电路的时间常数如下：

电路 (*a*) $\tau=R\dfrac{C_1C_2}{C_1+C_2}$　　　电路(*c*) $\tau=\dfrac{R_1R_2}{R_1+R_2}(C_1+C_2)$

电路 (*b*) $\tau=\dfrac{(R_1+R_3)R_2}{R_1+R_3+R_2}C$　　　电路(*d*) $\tau=\dfrac{L}{R_1R_2/(R_1+R_2)}=\dfrac{R_1+R_2}{R_1R_2}L$

1—6 电路及其参数如图1-7(*a*)所示，若在 $t=0$ 时加入阶跃信号 $v_i(t)=E$，试求：

(1) $E=10$V 和 $E=20$V 两种情况下，电路达到稳态所需的时间？

(2) 设 $v_C(0^-)=0$，求 $v_o(t)$ 的变化规律并画出其波形。

解：(1) 工程上认为过渡过程结束只需要 $(3\sim5)\tau$。该电路的时间常数为

$$\tau=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}C=\frac{10\times10}{10+10}\times10^3\times0.01\times10^{-6}=50\mu s$$

由于过渡过程只决定于电路的时间常数，与 E 的大小无关，故两种情况电路达到稳态所需时间相同，均为 $(3\sim5)\tau=(150\sim250)\mu s$。

(2) 已知 $v_C(0^+)=v_C(0^-)=0$，当 $t=0^+$ 时，电容 C 可视为短路，从而求出 $v_o(0^+)=E$。

电路达稳态后，可将电容 C 看作开路，从而求出终值。

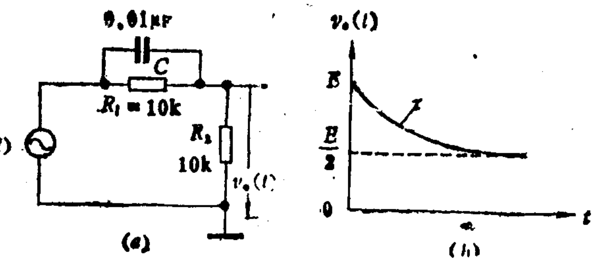

图 1-7

$$v_o(\infty)=\frac{R_2}{R_1+R_2}E=\frac{10}{10+10}E=\frac{1}{2}E$$

将 $\tau=50\mu s$ 代入三要素公式可得

$$v_o(t)=\frac{1}{2}E+(E-\frac{1}{2}E)e^{-t/50\times10^{-6}}=\frac{1}{2}E(1+e^{-2\times10^4t})$$

$v_o(t)$的波形见图1-7(b)。

1—7 在图1-8(a)电路中，开关 S 原接位置“1”，当 $t=0$ 时将 S 转接到位置“2”，求 $v_o(t)$的变化规律并画出其波形。

解：因 $v_C(0^+)=v_C(0^-)=-E$。由电阻 R_1 和 R_2 对 $v_C(0^+)$ 在R_1上的分压可得：

$$v_o(0^+)=v_{R_1}(0^+)=-E\frac{R_1}{R_1+R_2}$$

又 $$v_o(\infty)=0,\quad \tau=(R_1+R_2)C$$

∴ $$v_o(t)=-E\frac{R_1}{R_1+R_2}e^{-t/\tau}$$

$v_o(t)$的波形见图1-8(b)。

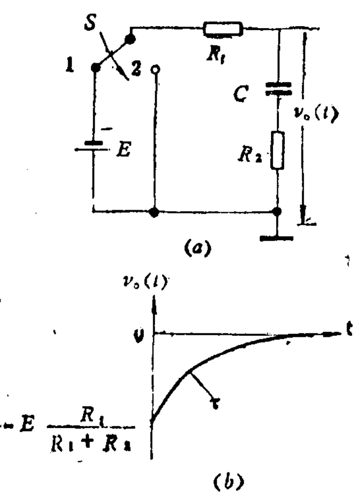

图 1-8

1—8 图1-9电路中，联动开关 S 原接位置“1”时电路已达到稳态，$t=0$ 瞬间，开关S转接到位置“2”，试求：

(1) $v_o(t)$ 的变化规律并画出波形图；

(2) $v_o(t)$ 变化到 0 电平所经历的时间 t_0。

解：(1)首先应根据换路前(S 接“1”时)的电路求出 $v_C(0^-)=E_C$(极性如图示)。

当 $t=0$ 时，开关 S 由“1”转接到“2”瞬间，由于电容电压不能突变，从换路后电路可求出：

$$v_o(0^+)=-v_C(0^+)=-v_C(0^-)=-E_C$$

$t>0$ 后，电源 E_C 将通过电阻 R_2 对电容 C 进行反向充电。稳定后，电容 C 两端电压的值仍为 E_C，但极性却与原来 $v_C(0^+)$相反，所以有

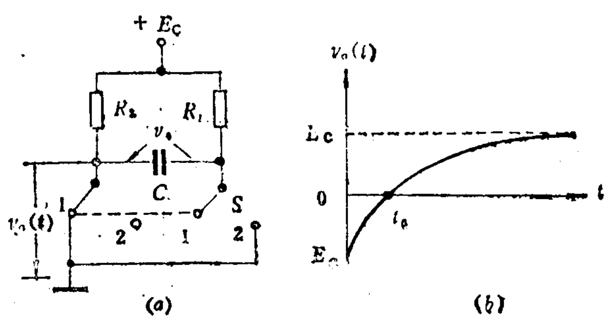

图 1-9

$$v_o(\infty)=v_C(\infty)=E_C.$$

又 $$\tau=R_2C$$

∴ $$\begin{aligned}v_o(t)&=E_C+(-E_C-E_C)e^{-t/\tau}\\&=E_C-2E_Ce^{-t/\tau}=E_C(1-2e^{-t/\tau})\end{aligned}$$

$v_o(t)$ 的波形见图 1-9 (b)。

(2) 求出由 $v_o(0^+)$ 变化到 $v_o(t_0)=0$ 所需的时间为

$$t_r = \tau \ln \frac{E_C - (-E_C)}{E_C - 0} = \tau \ln 2 \approx 0.7\tau$$

1—9 在图 1-10(a) 电路中，设 $E=10\text{V}$，$R_1=5.1\text{ k}$，$R_2=15\text{ k}$，$C=1000\text{ pF}$，$v_C(0^-)=0$。$t=0$ 时，将开关 S 接位置"1"，经 $t=t_1=7.6\mu s$ 后，S 由"1"转接到位置"2"，试画出 $v_o(t)$ 的波形。

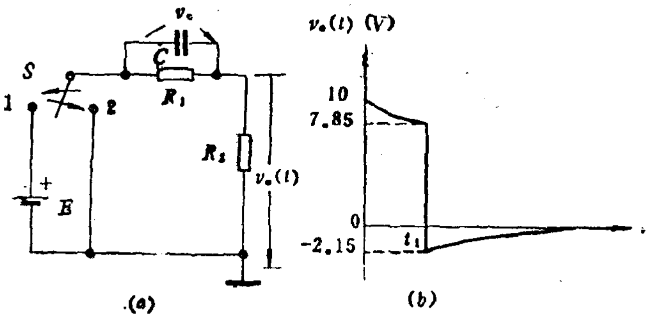

图 1-10

解：首先考虑 S 接"1"的情况。由题设知：$v_C(0^+)=v_C(0^-)=0$，可将电容看作短路。

则 $v_o(0^+)=E=10\text{V}$

$$v_o(\infty)=\frac{R_2}{R_1+R_2}E = \frac{15}{5.1+15}\times 10 \approx 7.5\text{V}$$

$$\tau = \frac{R_1R_2}{R_1+R_2}C = \frac{(5.1\times 15)\times 10^6}{(5.1+15)\times 10^3}\times 1000\times 10^{-12}=3.8\mu s$$

可见 $t_1=7.6\mu s=2\tau$ 时，电路未达到稳态。

$$v_o(t_1)=7.5+(10-7.5)e^{-2}=7.5+2.5\times 0.14=7.85\text{V}$$

根据以上数据可画出 $t=0$ 到 $t=t_1$ 这段时间的波形。

$t=t_1$ 时，电容 C 上的压降为

$$v_C(t_1)=E-v_o(t_1)=10-7.85=2.15\text{V}$$

现在讨论 $t=t_1$ 时，开关 S 由"1"转接到位置"2"的情况。

由换路后的电路可求得

$$v_o(t_1^+)=-v_C(t_1)=-2.15\text{V},\ v_o(\infty)=0,\ \tau=3.8\mu s。$$

根据以上数据可画出 $t>t_1$ 后的波形。完整的波形图见图 1-10(b)。

1—10 图 1-11 (a) 所示电路，开关 S 已接通并使电路达到稳态。当 $t=0$时将开关 S 断开，试求电阻 R_2 上的电压 $v_{R_2}(t)$ 的变化规律并画出其波形图。

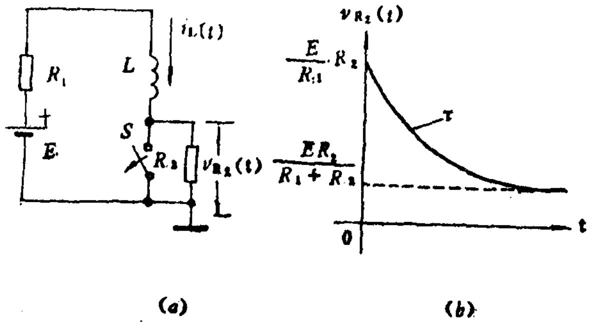

图 1-11

解：用三要素公式求解。开关 S 断开前，电感 L 中流过的稳态电流 $i_L(0^-)=E/R_1$。再根据 $t=0$ 时，S 断开后的电路便可求出。

$$i_L(0^+)=i_L(0^-)=E/R_1=i_{R_2}(0^+)$$

则

$$v_{R_2}(0^+)=i_{R_2}(0^+)R_2=\frac{R_2}{R_1}E$$

$$v_{R_2}(\infty)=\frac{R_2}{R_1+R_2}E\text{（将}L\text{看作短路）},\ \tau=\frac{L}{R_1+R_2}$$

$$\therefore v_{R_2}(t)=\frac{R_2}{R_1+R_2}E+\left(\frac{R_2}{R_1}E-\frac{R_2E}{R_1+R_2}\right)e^{-t/\tau}$$

$$=\frac{R_2}{R_1+R_2}E+\left[R_2E\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_1+R_2}\right)\right]e^{-t/\tau}$$

$$= \frac{R_2}{R_1+R_2}E\left(1+\frac{R_2}{R_1}e^{-t/\tau}\right)$$

$v_{R_2}(t)$ 的波形见图 1-11(b)。

1—11 在图 1-12 (a) R-L-C 并联电路中，开关 S 先闭合，电路达到稳态后再在 $t=0$ 时断开，试分析 S 断开后电路产生的过渡过程。

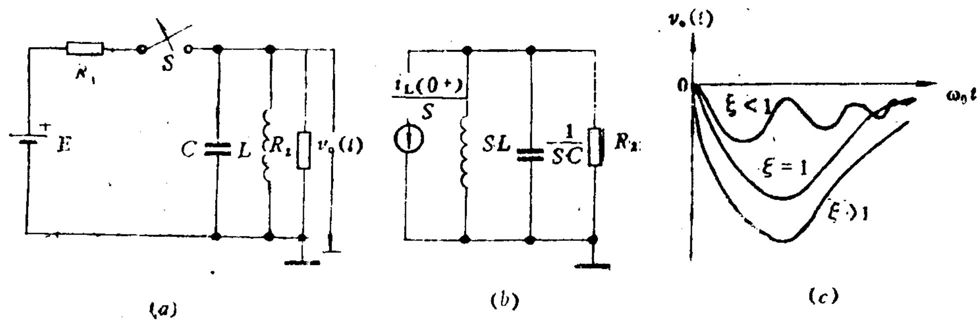

图 1-12

解：此电路不是一阶线性电路，不能应用三要素公式。下面用复频域分析法求解。

在开关 S 未打开前电路稳定时，将电容 C 看作开路，电感 L 看作短路，可求得电感中流过的稳态电流 $i_L(0^-)=E/R_1$

$t=0$ 时，S 打开瞬间，电感中电流不变。

$$i_L(0^+)=i_L(0^-)=E/R_1$$

根据题意，作出 S 断开后的运算等效电路如图 1-12(b) 所示。由等效电路可求出其阻抗的复数形式为

$$Z(S)=\frac{1}{\frac{1}{SL}+SC+\frac{1}{R_2}}=\frac{S/C}{S^2+\frac{S}{R_2C}+\frac{1}{LC}}$$

$$\therefore\ v_o(S)=-\frac{i_L(0^+)}{S}Z(S)=-\frac{E}{SR_1}\cdot\frac{S/C}{S^2+\frac{1}{R_2C}S+\frac{1}{LC}}$$

$$=-\frac{R_2}{R_1}E\cdot\frac{1/R_2C}{S^2+\frac{1}{R_2C}S+\frac{1}{LC}}$$

令 $$\frac{1}{LC}=\omega_o^2,\quad \frac{1}{2R_2}\sqrt{\frac{L}{C}}=\zeta$$

则 $$2\zeta\omega_o=\frac{1}{R_2}\sqrt{\frac{L}{C}}\sqrt{\frac{1}{LC}}=\frac{1}{R_2C}$$

代入 $v_o(S)$ 中得：$$v_o(S)=-\frac{R_2}{R_1}E\,\frac{2\zeta\omega_o}{S^2+2\zeta\omega_oS+\omega_o^2}$$

讨论：①当 $\zeta>1$ 时，为过阻尼情况

$$S_{1,2}=(-\zeta\pm\sqrt{\zeta^2-1})\omega_o$$

由 $v_o(S)$ 求其拉氏反变换得

$$v_o(t)=-\frac{R_2}{R_1}E\frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2-1}}e^{-\zeta\omega_ot}\left(e^{\sqrt{\zeta^2-1}\ \omega_ot}-e^{-\sqrt{\zeta^2-1}\ \omega_ot}\right)$$

②当 $\zeta<1$ 时，为欠阻尼情况

$$S_{1,2}=(-\zeta\pm j\sqrt{1-\zeta^2}\ )\omega_o$$

由 $v_o(S)$ 求其拉氏反变换得

$$v_o(t)=-\frac{R_2}{R_1}E\frac{2\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}e^{-\zeta\omega_o t}\sin\sqrt{1-\zeta^2}\ \omega_o t$$

③ 当 $\zeta=1$ 时，为临界阻尼情况

$$v_o(S)=-\frac{R_2}{R_1}E\frac{2\omega_o}{(S+\omega_o)^2}$$

由 $v_o(S)$ 求其拉氏反变换得

$$v_o(t)=-\frac{R_2}{R_1}E2\omega_o te^{-\omega_o t}$$

三种不同情况的波形均见图 1-12(*c*)。

1—12 矩形波 $v_1(t)$ 和阶梯波 $v_2(t)$ 分别如图 1-13(*a*) 和 (*b*) 所示。

(1) 试将矩形波 $v_1(t)$ 和阶梯波 $v_2(t)$ 分解为阶跃波；

(2) 若矩形脉冲或阶梯形脉冲作用于一阶线性电路时，能否应用三要素公式求解其暂态过程？

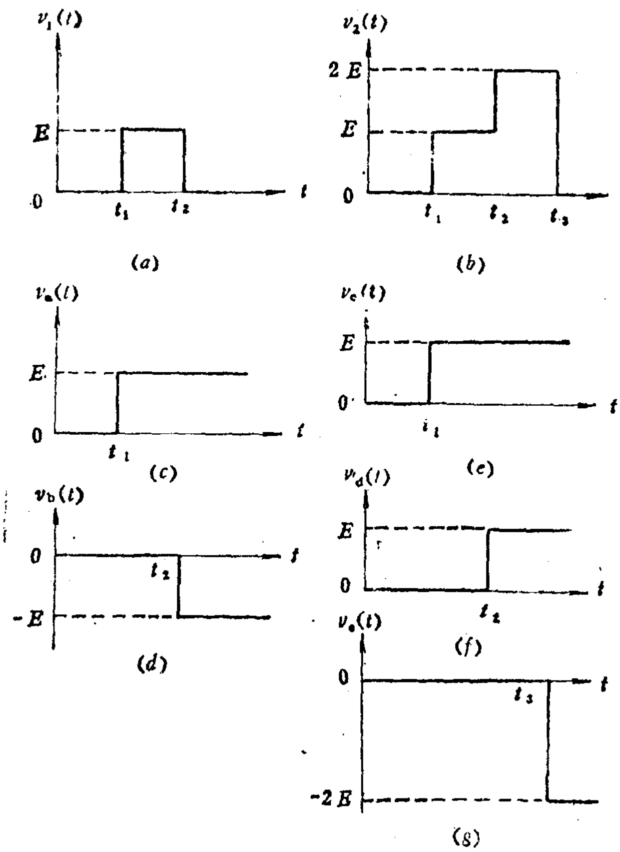

图 1-13

解：(1) 图(*a*)的矩形波 $v_1(t)$ 可分解成 $v_a(t)$ 和 $v_b(t)$ 两个阶跃波，即 $v_1(t)=v_a(t)+v_b(t)$。

$v_a(t)$ 和 $v_b(t)$ 的波形见图 1-13(*c*) 和 (*d*)。

图 (*b*) 的阶梯波可分解成三个阶跃波，即 $v_2(t)=v_c(t)+v_d(t)+v_e(t)$。

$v_c(t)$、$v_d(t)$、$v_e(t)$ 的波形见图1-13(*e*)、(*f*)、(*g*)。

(2) 由于线性电路可应用叠加原理，而矩形脉冲或阶梯形脉冲都可视为若干阶跃信号的叠加，故一阶线性电路在矩形脉冲或阶梯形脉冲作用下可以应用三要素公式求解其暂态过程。由于每个突变段都对应某个阶跃信号的作用，因此必须对输入信号的各突变段分别应用一次三要素公式。

1—13 输入理想方波 $v_i(t)$ 的波形如图 1-14(*d*) 所示。

(1) 试判别图 1-14(*a*)、(*b*)、(*c*) 各电路的性质；

(2) 在电路 (*c*) 中，设 $v_C(0)=5\text{V}$，极性如图中所示，试画出 $v_o(t)$ 的波形并求出 $0\leqslant t<t_1$ 时的变化规律。

解：(1) 由 $v_i(t)$ 的波形知：方波宽度 $t_p=5\mu s$；幅度 $v_{im}=5\text{V}$。

对电路(*a*)：可求出 $\tau_a=51\times10^3\times1000\times10^{-12}=51\mu s$

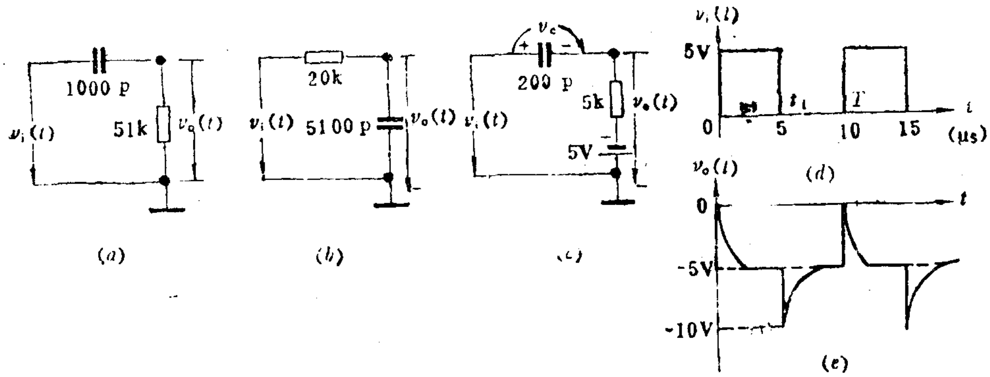

图 1-14

由于 $\tau_a \gg t_p(=5\mu s)$，故 (a) 为耦合电路。

对电路 (b)：因电路时间常数 $\tau_b = 20\times10^3\times5100\times10^{-12} = 102\mu s$

由于 $\tau_b \gg T(=10\mu s)$，且从电容C上输出，故 (b) 为积分电路。

对电路 (c)：$\tau_c = 200\times10^{-12}\times5\times10^3 = 1\mu s$

由于 $\tau_c \ll T$，且从电阻上输出，故 (c) 为微分电路。

(2) 已知 $v_C(0)=5V$（极性如图），在 $t=0^+$ 瞬间，$v_i(0^+)=5V$，则 $v_o(0^+)=v_i(0^+)-v_C(0^+)=5-5=0$，又 $v_o(\infty)=-5V$，$\tau_c=1\mu s$，由三要素公式可求出在 $0\leqslant t<t_1(=5\mu s)$ 期间 $v_o(t)$ 的变化规律为

$$v_o(t) = -5+[0-(-5)]e^{-10^6 t} = (-5+5e^{-10^6 t})V$$

由于电路 (c) 为微分电路，过渡过程在 $v_i(t)$ 的宽度内可结束，故输出 $v_o(t)$ 的波形为对应 $v_i(t)$ 的正、负跳边的正负相间、幅度为5V的尖脉冲，其稳态值为 $-5V$，波形见图 (e)。

1—14 对图 1-15(a) 所示电路，当输入如图 (b) 所示的正极性脉冲 $v_i(t)$，试画出输出电压 $v_o(t)$ 的波形并标明各突变点电压值。

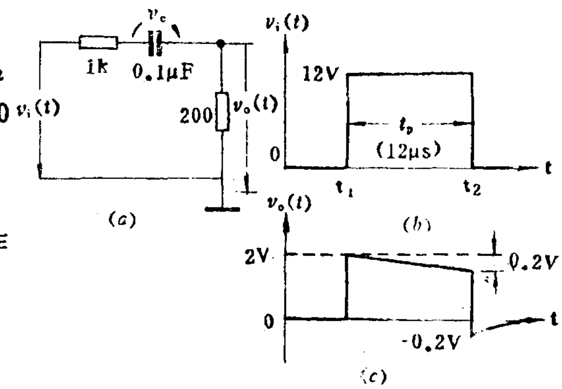

图 1-15

解：由图 (b) 知 $v_i(t)$ 的脉冲宽度 $t_p=t_2-t_1=12\mu s$，而电路 (a) 的时间常数 $\tau=(1000+200)\times0.1\times10^{-6}=120\mu s$。因 $\tau\gg t_p$，故 (a) 为耦合电路。

当 $t=t_1$ 时，$v_i(t)$ 正跳变 12V，将电容看作短路，则 $v_o(t_1^+)$ 的跳变量为两电阻的分压值，

即 $v_o(t_1^+) = 12\dfrac{0.2}{1.2} = 2V$。

又 $v_o(\infty)=0V$，所以在 $t_1<t<t_2$ 内有

$$v_o(t-t_1) = 2e^{-(t-t_1)/\tau}$$

在 $t=t_2$ 时，已经历 $t_2-t_1=t_p=12\mu s$

则 $$v_o(t_2) = 2e^{-t_p/\tau} = 2e^{-0.1} \approx 2\times0.9 = 1.8V$$

平顶降落 $$\triangle = 2-1.8 = 0.2V$$

对电容：因 $$v_C(t_1^+)=0,\quad v_C(\infty)=12V$$

则 $$v_C(t-t_1) = 12[1-e^{-(t-t_1)/\tau}]V$$

故 $v_C(t_2)=12(1-0.9)=1.2\text{V}$，极性如图示。

在 $t=t_2^+$ 时，输入 $v_i(t)$ 跃变为 0，此时，$v_o(t_2^+)$ 由两电阻对 $v_c(t_2)=1.2\text{V}$ 分压决定。

则
$$v_o(t_2^+)=-1.2\frac{0.2}{1.2}=-0.2\text{V}$$

在 $t>t_2$后，$v_o(t)$ 以时间常数 τ 指数变化到终值 $v_o(\infty)=0$。

$v_o(t)$ 的波形见图1-15(c)。

1—15 图1-16 (a) 所示电路，时间常数 $\tau=RC=1\text{ms}$。输入矩形脉冲 $v_i(t)$ 如图(b) 所示，试求输出电压 $v_o(t)$ 的幅度及其上升边沿起点和终点的变化速率并画出其波形。

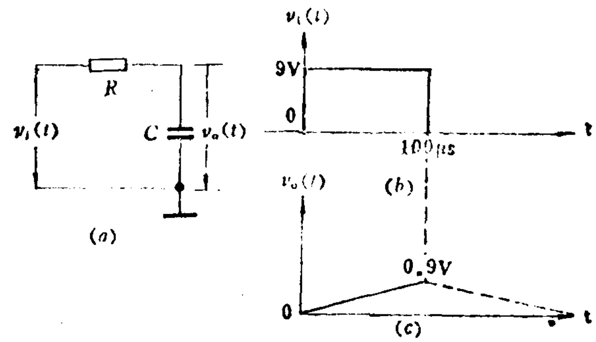

图 1-16

解：因 $v_o(0^-)=v_C(0^-)=0$，当 $t=0^+$ 时，$v_i(t)$ 正跳变9V，因电容电压不能突变，故 $v_o(0^+)=v_o(0^-)=0$，$v_o(\infty)=9\text{V}$，$\tau=1\text{ms}$，则 $v_o(t)$ 上升边沿的变化规律为

$$v_o(t)=9(1-e^{-10^3t})\text{V}$$

令 $t=t_p=100\mu\text{s}$，可求得输出电压的幅度为

$$V_{om}=v_o(100\mu\text{s})=9(1-e^{-0.1})$$
$$\approx 9\times 0.1=0.9\text{V}$$

$v_o(t)$的变化速率为

$$\frac{dv_o(t)}{dt}=9\times10^3e^{-10^3t}\ \text{V/s}$$

上升边沿起始点的变化速率为

$$\left.\frac{dv_o(t)}{dt}\right|_{t=0}=9\times10^3\text{V/s}$$

终点的变化速率为

$$\left.\frac{dv_o(t)}{dt}\right|_{t=100\mu s}=9\times10^3e^{-(10^3\times10^{-4})}=9\times10^3\times0.9=8.1\times10^3(\text{V/s})$$

当 $t>100\ \mu\text{s}$后，因 $v_i(t)$ 负跳变到 0，$v_o(t)$ 随电容放电形成下降边沿，终值为 0，变化规律为：$v_o(t)=0.9e^{-\frac{t-10^{-4}}{\tau}}$ V，经（3～5）τ 后达稳态，故是一条完整的指数衰减曲线（以虚线表示），波形见图(c)，为清楚起见幅度稍有放大。

1—16 图1-17(a) 所示电路，$R=6\ \text{k}\Omega$，$C=51\text{pF}$。当输入 $v_i(t)$ 的波形分别如图(b)、(c)中的矩形脉冲及阶梯形脉冲时，试画出与之对应的稳定输出 $v_o(t)$ 的波形并求其最大、最小值。

解：电路的时间常数 $\tau=RC=6\times10^3\times51\times10^{-12}=306\ \text{ns}$。

由于 τ 远小于图(b)、(c)中输入波形的各突变点间的宽度，故电路是微分性的。因此，可将输入信号各突变段看作不同时刻加入的阶跃波，且这些阶跃波引起的过渡过程都能在各突变点间结束。由电路知：$v_o(t)$的稳态值 $v_o(\infty)=0$，故$v_o(t)$的稳定波形就是对应 $v_i(t)$ 正、负跳变的正、负尖脉冲。正、负尖脉冲的幅度等于 $v_i(t)$的跳变量，而稳态值为 0。所以，当输入图 1-17 (b) 矩形脉冲时，$v_o(t)$的波形如图 1-17 (d)，其最大值为 25 V，最小值为 -25 V。当输入图 1-17 (c) 的阶梯形脉冲时，$v_o(t)$的波形如图 1-17(e)，其最大值为 10V，

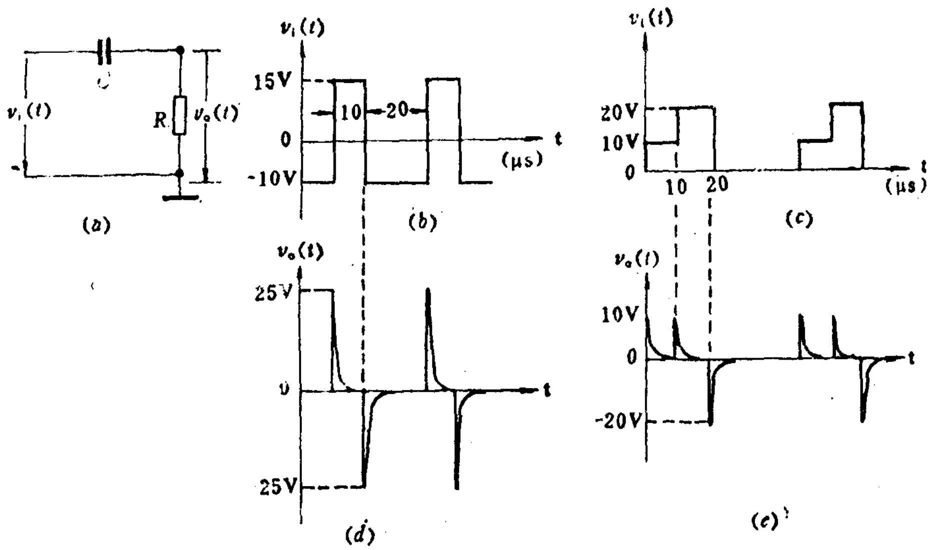

图 1-17

最小值为 -20 V。

1—17 图 1-18(a)所示电路，$R=10\ \mathrm{k\Omega}$，$C=0.01\mu\mathrm{F}$。当输入 $v_i(t)$ 的波形分别如图1-18(b)、(c)所示时，画出与之对应的$v_o(t)$的波形并标明各点电压值（设 t_1 前电路已稳定）。

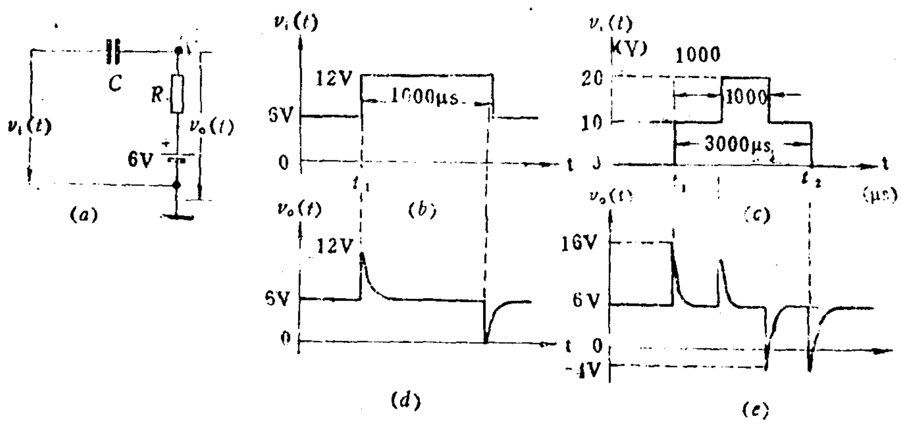

图 1-18

解： 先求出电路(a)的时间常数 $\tau=RC=10\times10^3\times0.01\times10^{-6}=100\mu s$

可见 τ 远小于 $v_i(t)$各恒值段的宽度，故电路(a)具有微分性质。

由题给条件知，t_1 前 $v_o(t)$的稳态值为 6 V。

根据上面分析，可画出与(b)、(c)所示 $v_i(t)$对应的 $v_o(t)$波形分别如图 1-18 (d)、(e)所示。

1—18 对图 1-19(a)所示的 RC 微分电路，若输入图 1-19(b)、(c)所示的两个正方波 v_{i1} 和 v_{i2} 时，试画出输出 $v_o(t)$的波形并标明电压值 [设初始条件为 $v_o(0)=v_C(0)=0$]。

解： 对一阶线性电路可用三要素公式和叠加原理求解。

(1) 先求只有 v_{i1} 作用下的输出波形 $v_{o1}(t)$。根据微分电路特性，无 v_{i2} 作用时，$v_{o1}(t)$的波形就是对应 v_{i1} 的正、负跳变边沿的正、负尖脉冲，其稳态值为零，幅度等于 v_{i1} 的跳变量。$v_{o1}(t)$波形见图1-19(d)。

(2) 再求只有 v_{i2} 作用下的输出 $v_{o2}(t)$ 的波形。在无 v_{i1} 作用时，$v_{o2}(t)=v_C(t)$。$v_{o2}(t)$波形如图1-19(e)所示。

(3) 将 $v_{o1}(t)$ 和 $v_{o2}(t)$叠加，则得 $v_o(t)$波形。

即 $v_o(t)=v_{o1}(t)+v_{o2}(t)$

由于电路的时间常数 $\tau=RC$ 不变，所以指数变化规律相同。在波形相加时，变化相反则抵消，变化相同则加倍。(d)和(e)叠加得到的 $v_o(t)$波形见图 1-19(f)。

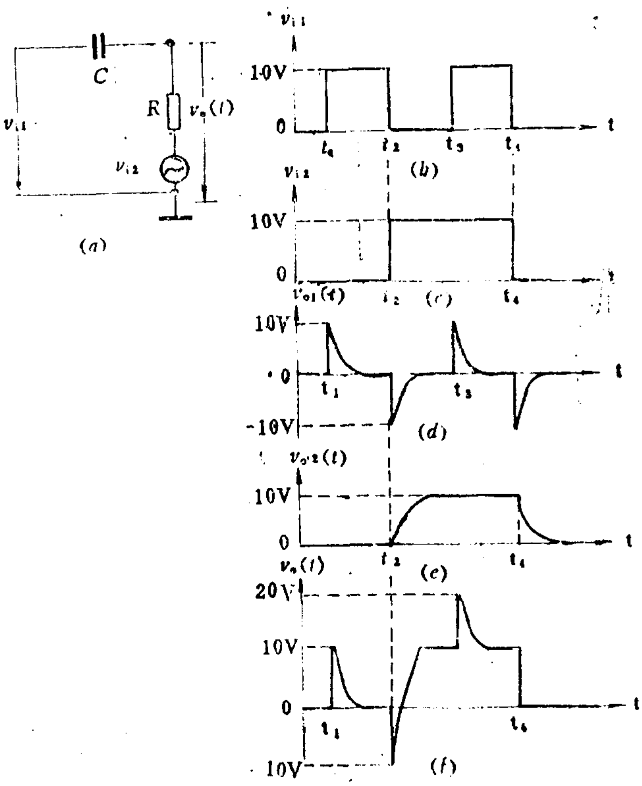

图 1-19

1—19 已知输入方波 $v_i(t)$ 的周期 $T=200\mu s$，幅度 $v_{im}=10V$，信号源内阻 $R_i=50\Omega$。设计一个 RC 微分电路，要求输出尖脉冲 $v_o(t)$ 的幅度 $V_{om}\geq 9V$，在 $0.1V_{om}$ 处的宽度$t_p=23\mu s$。

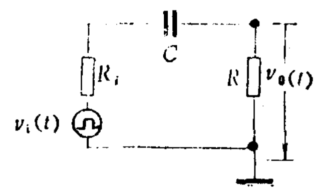

图 1-20

解：要求设计的 RC 微分电路形式如图 1-20 所示。余下的任务是要确定 R 和 C 的值。

(1) 由微分条件知，电路的时间常数必须远小于输入方波宽度。要输出尖脉冲至少应满足：$(3\sim5)\tau\leq T/2$。

若取 $5\tau\leq T/2$，则应满足：$\tau<T/(2\times5)=200\times10^{-6}/10=20\mu s$。

(2) 根据对 V_{om} 的要求确定 R 的值。

因
$$V_{om}=\frac{R}{R+R_i}V_{im}$$

则要求
$$\frac{R}{R+R_i}V_{im}\geq 9V,\quad 10R\geq 9R+9R_i$$

∴ $R\geq 9\times50=450\Omega$，为保证幅度，选 $R=570\Omega$。

(3) 根据对 t_p 的要求确定 C 的值。

由 $t_p=2.3\tau=2.3(R+R_i)C$，可求得

$$C=\frac{t_p}{2.3(R+R_i)}=\frac{23\times10^{-6}}{2.3(570+50)}=\frac{10\times10^{-6}}{620}=0.016\times10^{-6}=0.016\mu F$$

最后应验算一下是否满足微分条件。

$$\tau=620\times0.016\times10^{-6}\doteq10\mu s\ll200\mu s$$

故满足要求。

1—20 图1-21(a)所示的RC高通网络，$\tau=RC=10\text{ms}$，输入$v_i(t)$的波形如图1-21(b)所示，试求$v_o(t)$的变化规律并画出波形图。

解：由于$v_i(t)$不是恒值激励，不能应用三要素公式。下面将$v_i(t)$分两段求解。

(1) $0\leqslant t<100\text{ms}$时，$v_i(t)$为斜升波，其斜率$K=20/100\times10^{-3}=200\text{V/s}$，则$v_i(t)=Kt$。

已知高通网络的阶跃响应为：

$$a(t)=e^{-t/\tau}。$$

又$v'_i(t)=K$，$v_i(0)=0$，应用杜阿美尔积分可得

$$v_o(t)=a(t)v_i(0)+\int_0^t v_i'(t-\zeta)a(\zeta)d\zeta$$

$$=K\int_0^t e^{-t/\tau}d\zeta=K\tau(1-e^{-t/\tau})$$

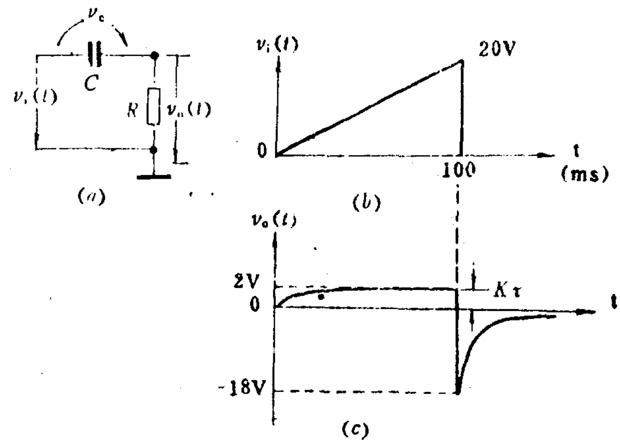

图 1-21

由上式知，当$t\to\infty$时，$v_o(t)$趋向稳态值$K\tau$。从工程上看，由于$t=100\text{ms}\gg\tau=10\text{ms}$，故可认为：$v_o(100\text{ms})\approx K\tau=200\times10\times10^{-3}=2\text{V}$。

此时电容C上已充电到

$$v_C(100\text{ms})=v_i(100\text{ms})-v_o(100\text{ms})=20-2=18\text{V}（极性如图示）。$$

(2) 当$t=100\text{ms}$时，由于$v_i(t)=0$，电容电压不能突变，此时从电路知

$$v_o(100\text{ms})=-v_C(100\text{ms})=-18\text{V}$$

当$t>100\text{ms}$后，电容C以初值$v_C(100\text{ms})$通过电阻R放电经$(3\sim5)\tau$达稳态值$v_C(\infty)=0$。

由三要素公式可直接写出：$v_o(t)=-18Ve^{-(t-10^{-1})/\tau}$

$v_o(t)$的完整波形见图1-21(c)。

1—21 如图1-22(a)所示电路，由R_1和C_1组成低通网络，R和C组成高通网络，两级间用理想跟随器隔离。当输入幅度为E的阶跃波$v_i(t)$时，试求输出$v_o(t)$的变化规律并画出波形图。

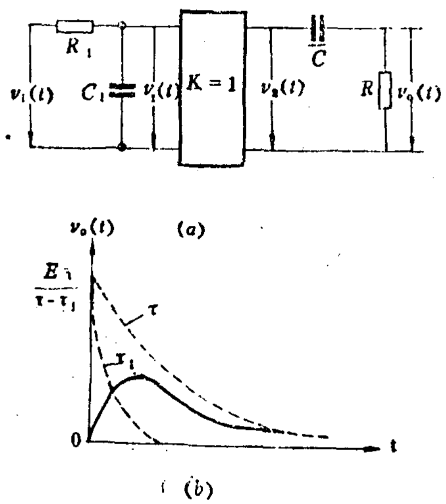

图 1-22

解：由于加有隔离级，可分别计算各级。

对第一级：可直接应用三要素公式求得输出电压$v_1(t)$。已知阶跃波的幅度为E，则有

$$v_1(\infty)=E,\quad \tau_1=R_1C_1,\quad v_1(0^+)=0$$

$$\therefore\quad v_1(t)=E(1-e^{-t/\tau_1})$$

对隔离级：$\because K=1$，则$v_2(t)=Kv_1(t)=E(1-e^{-t/\tau_1})$

对第三级高通网络：由于输入为$v_2(t)$的指数波，不能用三要素公式，下面用拉氏变换求解。

根据电路先写出电压方程

$$RC\frac{dv_C(t)}{dt}+v_C(t)=E(1-e^{-t/\tau_1})\qquad(1)$$

令 $RC=\tau$，$v_C(0^+)=0$，对式(1)求拉氏变换后得

$$\tau S v_C(S)+v_C(S)=\frac{E}{S(S\tau_1+1)}$$

则
$$v_C(S)=\frac{E}{S(S\tau_1+1)(S\tau+1)} \tag{2}$$

由电路知
$$v_o(t)=RC\frac{dv_C(t)}{dt}=\tau\frac{dv_C(t)}{dt}$$

经拉氏变换得
$$v_o(S)=\tau S v_C(S) \tag{3}$$

式(2)代入式(3)得

$$v_o(S)=\tau S\frac{E}{S(S\tau_1+1)(S\tau+1)}=\frac{E}{\tau_1(S+\frac{1}{\tau})(S+\frac{1}{\tau_1})}$$

$$=\frac{E}{\tau_1}\cdot\frac{1}{\frac{1}{\tau_1}-\frac{1}{\tau}}\cdot\frac{1/\tau_1-1/\tau}{(S+\frac{1}{\tau})(S+\frac{1}{\tau_1})}$$

查表可得其反变换为
$$v_o(t)=\frac{E\tau}{\tau-\tau_1}(e^{-t/\tau}-e^{-t/\tau_1}) \tag{4}$$

由(4)式知：当高通网络输入指数波时，其输出 $v_o(t)$ 的波形是两条指数曲线之差，如图1-22(b)所示。可见，当高通网络作为微分环节时，与输入阶跃波时相比，输入指数边沿脉冲时，将使其输出尖脉冲的幅度减小，宽度增加。故欲得宽度较窄、幅度较大的尖脉冲，在电路时间常数一定时，要求输入指数波的时间常数 $\tau_1\ll\tau$，即希望输入矩形脉冲的边沿时间愈小愈好。

1—22 脉冲分压器电路如图1-23(a)所示，已知 $R_2=1\text{k}$，$C_2=510\text{pF}$，当输入幅度为 E 的阶跃波 $v_i(t)$ 时，若要求将输入信号衰减十倍，试求：

(1) 无失真传递下 R_1 和 C_1 的值；

(2) 要求 $v_o(t)$ 有10%的过冲时，R_1 和 C_1 应为多少？

(3) 画出两种情况下 $v_o(t)$ 的波形。

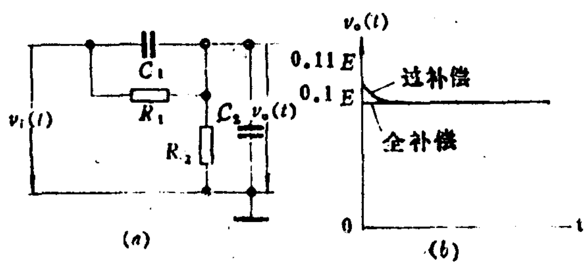

图 1-23

解：(1) 要输入信号无失真传递，电路应工作在全补偿状态。即

$$v_o(0^+)=v_o(\infty)。$$

在 $t=0$ 瞬间，不能将电容视为短路，否则将使信号源短接。由于输入阶跃波对应高频分量($\omega\to\infty$)，这时容抗 $Z_{C1}\ll R_1$，$Z_{C2}\ll R_2$，可将电阻看作开路，输出 $v_o(t)$ 由电容分压决定，即

$$v_o(0^+)=C_1E/(C_1+C_2)。$$

稳定后，将电容看作开路，则终值应由电阻分压确定，即 $v_o(\infty)=R_2E/(R_1+R_2)$。

为使 $v_i(t)$ 无失真衰减十倍，则应使

$$v_o(0^+)=v_o(\infty)=0.1E$$

即
$$C_1/(C_1+C_2)=R_2/(R_1+R_2)=0.1$$

$$C_1=\frac{0.1}{0.9}C_2=0.11C_2=56\text{pF}$$

$$R_1 = \frac{0.9}{0.1} R_2 = 9R_2 = 9\text{k}$$

(2) 要求 $v_o(t)$ 有 10% 的过冲，电路应工作于过补偿状态，即要求 $v_o(0^+) = (0.1 + 0.01)E = 0.11E$。

由于

$$C_1/(C_1 + C_2) = 0.11$$

$$C_1 = \frac{0.11}{0.89} C_2 \approx 0.12C_2 = 0.12 \times 510 = 61\text{pF}$$

$$R_1 = 9\text{k 不变}\quad\text{(因衰减系数不变)}$$

这时电路时间常数为

$$\tau = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}(C_1 + C_2) = 0.9 \times 571 \approx 0.5\mu\text{s}$$

(3) 两种情况下 $v_o(t)$ 的波形见图 1-23(b)。

第二章 半导体二极管、三极管开关及其简单电路

2—1 电路如图 2-1(a) 所示。输入方波 $v_i(t)$ 的波形如图 2-1(b) 所示。问：

(1) 输出 $v_o(t)$ 的波形如何？

(2) 将二极管倒接，$v_o(t)$ 的波形又如何？

(3) 从手册上查得二极管 D 的反向恢复时间 $t_R = 10\text{ns}$，输入方波 $v_i(t)$ 的最高工作频率 $f\max$ 为多少？

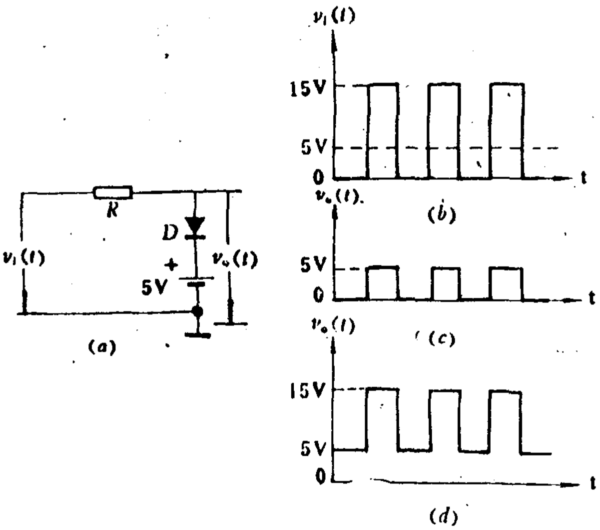

图 2-1

解： (1) 图 2-1(a)是限幅电平为5V的并联二极管上限限幅器。若将D视为理想开关，由于二极管导通时限幅、截止时传输 $v_i(t)$，故 $v_o(t)$ 波形如图 2-1(c) 所示。

(2)将二极管倒接、电路(a)成为并联二极管下限限幅器，限幅电平仍为5V，故这时$v_o(t)$的波形如图 2-1(d) 所示。

(3) 由于二极管的正向导通时间小于其反向恢复时间，所以输入方波 $v_i(t)$ 的最高工作频率主要受t_R的限制。只有二极管能可靠截止时，电路才能稳定工作。故要求输入方波的周期T最小应等于（或大于）反向恢复时间的二倍，即 $T \geqslant 2t_R$。

故输入方波的最高工作频率应为

$$f\max = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \times 10 \times 10^{-9}} = \frac{100 \times 10^6}{2} = 50\text{MHz}$$

2—2 图 2-2(a) 电路，$R_1 = R_2 = 20\text{k}$，$E = 10\text{V}$，将二极管看作理想开关，输入 $v_i(t)$波形如图 2-2(b) 所示，画出输出 $v_o(t)$ 的波形。

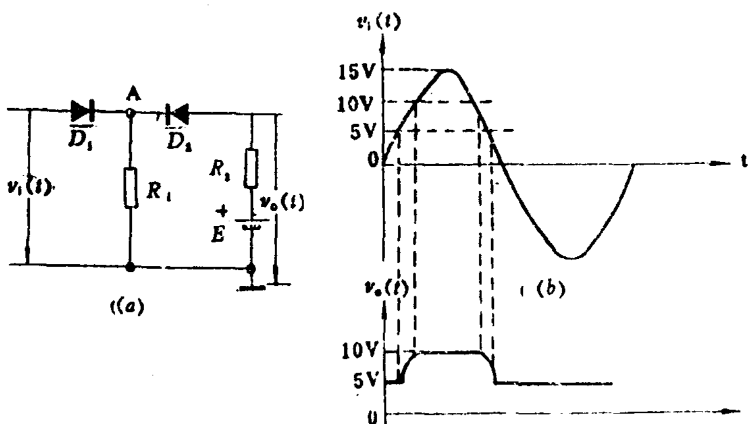

图 2-2