第十五讲 非线性电路答案

一、例题部分

例 1-解析：

i)

$i_1=2A$:　　　　$u_1=100\times2+2^3=208V$

$i_2=10A$:　　　　$u_2=100\times10+10^3=2000V$

$i_3=10mA$:　　　　$u_3=100\times10\times10^{-3}+\left(10\times10^{-3}\right)^3=\left(1+10^{-6}\right)V$

当$i_3=10mA$时，与100Ω线性电阻的电压比较误差为 0.0001%

ii)

$i=2\sin314t\text{A}$:　　　　$u=100\times2\sin314t+8\sin^3314t\text{V}$

利用三角恒等式$\sin3\theta=3\sin\theta-4\sin^3\theta$,得

$$u=206\sin314t-2\sin942tV \quad \text{（倍频作用）}$$

iii)由题意

$$u_{12}=f\left(i_1+i_2\right)=100\left(i_1+i_2\right)+\left(i_1+i_2\right)^3=u_1+u_2+2i_1i_2\left(i_1+i_2\right)$$

因此，$u_{12}\neq u_1+u_2$，即叠加定理不适用于非线性电阻

例 2-解析：

根据电路列 KCL 和 KVL 方程

$$\begin{cases}i=2-u-\dfrac{u}{2}\\ i=u+0.13u^2\end{cases}$$

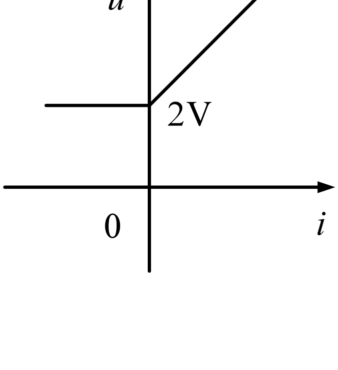
解得　$$\begin{cases}u_1=0.769\text{V}\\ i_1=0.846\text{A}\end{cases}\text{或者}\begin{cases}u_2=-20\text{V}\\ i_2=32\text{A}\end{cases}$$

例 3 解析：

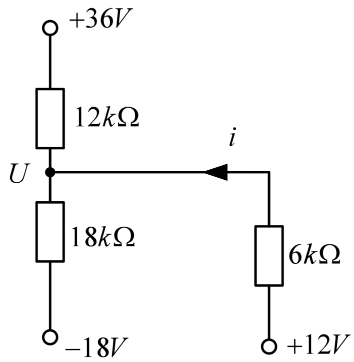
由电路图知

$u>2V$，二极管截止，$i=\dfrac{u-2}{1}=u-2\Rightarrow u=i+2$

$u<2V$，二极管导通，电压被钳位到 2V$\Rightarrow u=2$ **【电气考研课程联系水木珞研电路哥微信 dianluge1，电路哥 QQ：465256747】**



例 4-解析：



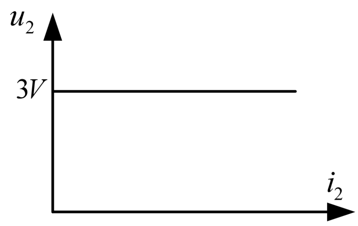
假设其导通，二极管相当于导线

$$\frac{36-U}{12k}+\frac{12-U}{6k}=\frac{U+18}{18k}$$

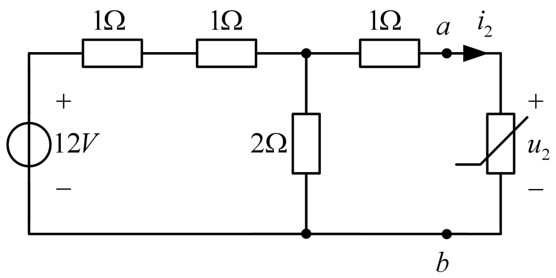
因为$U=13.09V>12V$，故其截止

得到 $$i=0A$$

例 5-解析：



可知：$i_2>0$时，$u_2=3$，原电路等效：

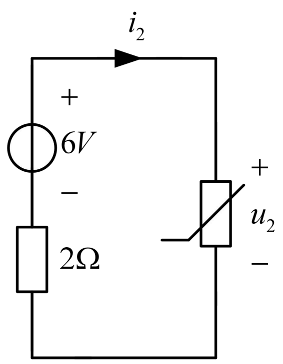


ab 左侧戴维南等效电路

开路电压 $$U_{OC}=12\times\frac{1}{2}=6V$$

等效电阻 $$R_{eq}=2\Omega$$

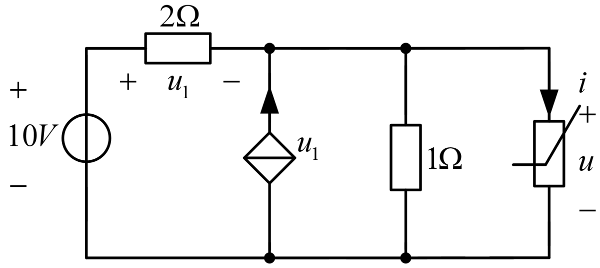
接入非线性电阻



根据 KVL 得　　$6=u_2+2i_2$

与 $i_2>0$ 时，$u_2=3$ 联立得　　$u_2=3V,i_2=\frac{3}{2}A$

例 6-解析：
先求静态工作点，作出等效电路如下图所示【名师电路课程联系水木珞研 Nero 哥微信：neroedu8】



根据电路 KCL 和 KVL　　$\begin{cases} i=\frac{u_1}{2}+u_1-u \\ 10=u_1+u \quad \Rightarrow u^2+2u-15=0 \\ i=u^2-0.5u \end{cases}$

解得　　$\begin{cases} u=-5V \\ i=27.5A \end{cases}$（舍去）$\begin{cases} u=3V \\ i=7.5A \end{cases}$

因此　　$u=3V,i=7.5A,u_1=7V$

动态电导　　$g_d=\left.\frac{di}{du}\right|_{u=3}=5.5s$

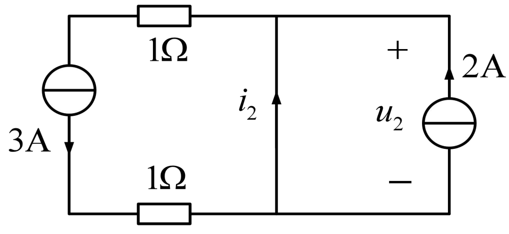
KVL 得　　$u_S=u_1+\frac{3}{2}u_1\cdot\left(1\,||\,\frac{1}{g_d}\right)\Rightarrow u_1=\frac{13}{32}\cos 2t$

$$\Delta u=\frac{3}{2}u_1\cdot\left(1\,||\,\frac{1}{g_d}\right)=\frac{6}{64}\cos 2t\text{，}\quad \Delta i=\Delta u\cdot g_d=\frac{33}{64}\cos 2t$$

解得　　$i=7.5+\frac{33}{64}\cos 2t,u_1(t)=7+\frac{13}{32}\cos 2t$

二、习题部分

题 1-解析：
假设 D_1 关断、D_2 导通，作出等效电路如下图所示



$$i_2=3A-2A=1A>0\text{，}\quad u_1=-(1+1)\times 3=-6V<0$$

故假设成立，则：

$$P_{3A}=3u_1=-18W\left(发出18W\right)，\ P_{2A}=0$$

用试探法【分情况讨论方法】，可知 D_1 截止，D_2 导通。得到：2A 电流源发出功率为 0；3A 电流源发出功率是18W；

题 2-解析：

在 $\left(0<t<1\right)$ 内：$u_S=6V$

故 V 导通 $$i=\frac{6}{1//2}=9\text{A}$$

在 $\left(1<t<2\right)$ 内：$u_S=-6\text{V}$

故 V 关断：$$i=\frac{-6}{2}=-3\text{A}$$

故：$$i\left(t\right)=\begin{cases}9\text{A} & 0<t<1s\\ -3\text{A} & 1s<t<2s\end{cases}$$

电流表 1 $$I_{\text{A}_1}=\frac{1}{2}\int_0^2 i\left(t\right)dt=\frac{1}{2}\left(\int_0^1 9dt-\int_1^2 3dt\right)=\frac{1}{2}\times 6=3\text{A}$$

电流表 2 $$I_{\text{A}_2}=\sqrt{\frac{1}{2}\int_0^2 i^2\left(t\right)dt}=\sqrt{\frac{1}{2}\left[\int_0^1 9^2dt+\int_1^2\left(-3\right)^2dt\right]}=3\sqrt{5}=6.7\text{A}$$

A_1 读数是 3A；A_2 读数是 6.7A；判断二极管的导通截止。

题 3-解析：

假设二极管导通，则：【名师电路课程联系水木珞研 Nero 哥微信：neroedu8】

$$I_d=I_S\cdot\frac{1}{4}-I_S\cdot\frac{2}{3}=-\frac{5}{12}I_S$$

①当 $I_S=6m\text{A}$ 时，$I_d<0$，假设不成立，故二极管关断：

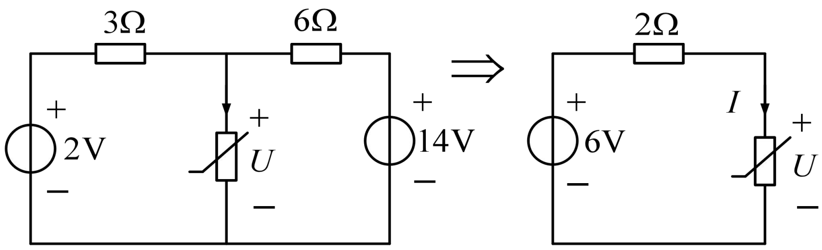
$$I_d=0$$

②当 $I_S=-6m\text{A}$ 时，$I_d=2.5m\text{A}>0$，假设成立，故：

$$I_d=2.5m\text{A}$$

题 4-解析：

对电路进行等效变换得



$$I=\frac{1}{3}U+\frac{5}{3}=\frac{U+5}{3}\quad\Rightarrow U=3I-5$$

假设非线性电阻工作在 AB 段：

$$\begin{cases}U=6-2I\\ U=3I-5\end{cases}$$

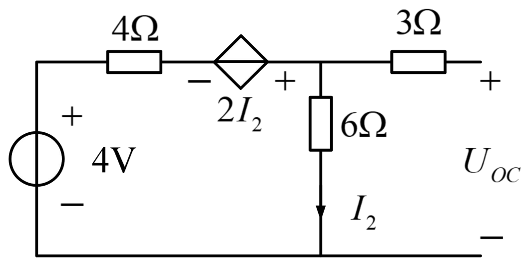
解得 $$I=\frac{11}{5}\text{A}，\ U=\frac{8}{5}\text{V}$$

而工作点$\left(\frac{8}{5},\frac{11}{5}\right)$在 AB 段工作区间内，假设成立。

故解得 $$U=\frac{8}{5}\text{V}$$

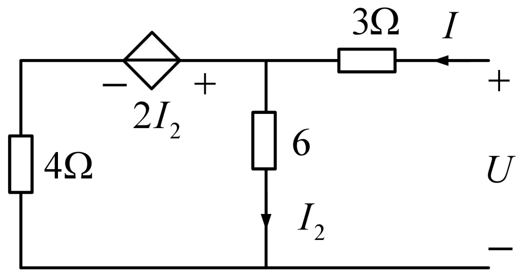
题 5-解析：

求U_{OC}：



$$I_2=\frac{4+2I_2}{4+6}\Rightarrow I_2=0.5\text{A}，\ U_{OC}=6I_2=3\text{V}$$

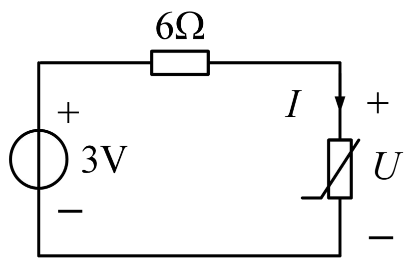
求 R_{eq}：



由电路得 $$I=\frac{6I_2-2I_2}{4}+I_2=2I_2 \quad U=3I+6I_2=12I_2$$

等效电阻 $$R_{eq}=\frac{U}{I}=6\Omega$$

等效电路如下：



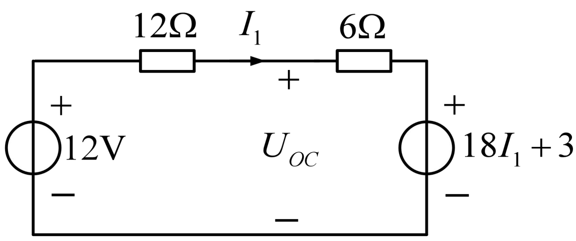
由电路图 $$\begin{cases} U=3-6I \\ U=I^2-5I-3(I>0) \end{cases}$$

联立得 $$I=2\text{A}，\ U=3-6I=-9\text{V}$$

功率 $$P=UI=-18W \text{（发出}18W\text{）}$$

题 6-解析：

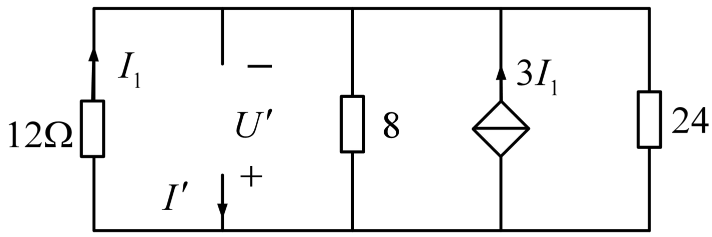
（1）求U_{OC}：



电压 $$I_1=\frac{12-18I_1-3}{12+6}\Rightarrow I_1=\frac{1}{4}\text{A}$$

开路电压 $$U_{OC}=12-12I_1=9\text{V}$$

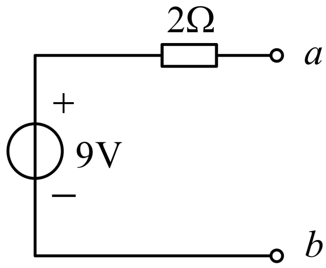
求 R_{eq}：



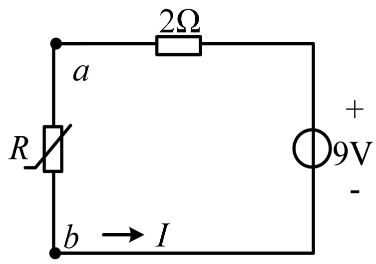
电路图知 $$I'=I_1+3I_1+\frac{1}{2}I_1+\frac{3}{2}I_1=6I_1 \quad U'=12I_1$$

等效电阻 $$R_{eq}=\frac{U'}{I'}=2\Omega$$

戴维南等效电路为：



（2）接入非线性电阻如下所示



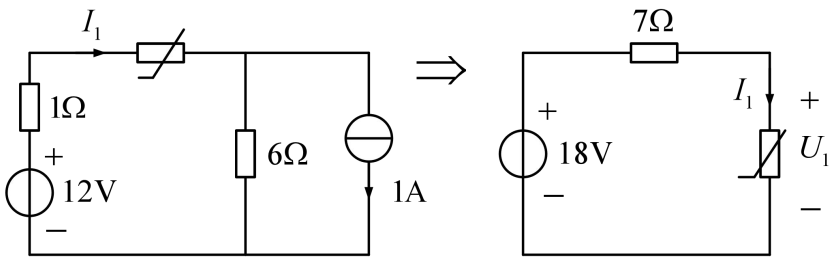
由题 $$\begin{cases}U=4I^2+3\\U=9-2I\end{cases}$$

联立得 $$I=1\text{A}$$

题 7-解析：

$$I_2=I-1=1\text{A}，\ U_2=I_2^2=1\text{V}$$

由替代定理：

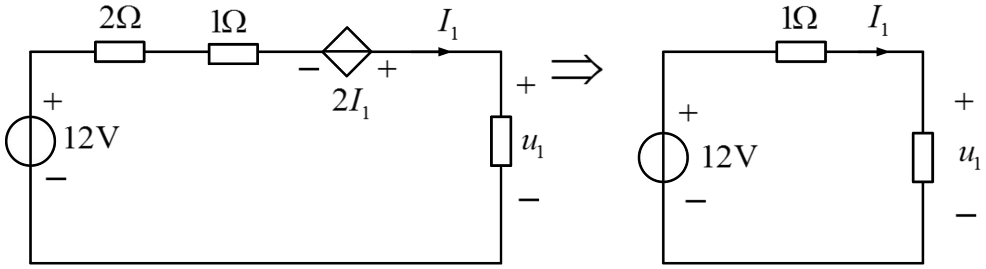


根据电路图有
$$\begin{cases} U_1 = I_1^2 \\ U_1 = 18 - 7I_1 \end{cases}$$

解得
$$I_1 = 2\text{A}，U_1 = I_1^2 = 4\text{V}$$

题 8-解析：

先求非线性电阻以外戴维南等效电路【电气考研课程联系水木珞研电路哥微信 dianluge1，电路哥 QQ：465256747】

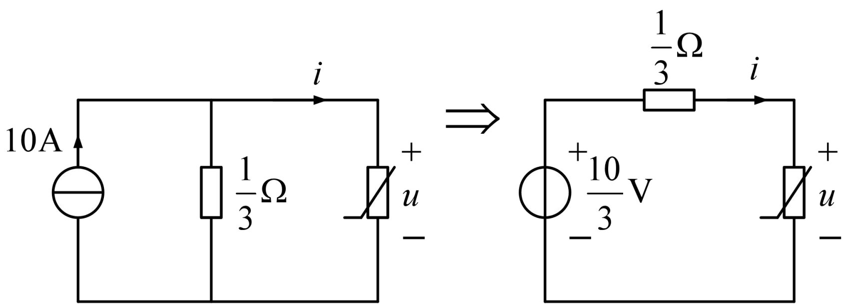


列方程得
$$\begin{cases} i_1 = u_1 + 2 \\ u_1 = 12 - i_1 \end{cases}$$

解得
$$u_1 = 5\text{V}，i_1 = 7\text{A}$$

题 9-解析：

直流作用时，作出等效电路如下图所示

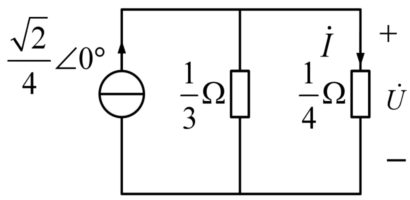


列方程
$$\begin{cases} i = u^2 \\ u = \dfrac{10}{3} - \dfrac{1}{3}i \end{cases}$$

解得静态工作点
$$\begin{cases} u_Q = 2\text{V} \\ i_Q = 4\text{A} \end{cases}$$

动态电阻
$$G_d = \frac{di}{du}\bigg|_{u=u_Q} = 4s，R_d = \frac{1}{G_d} = \frac{1}{4}\Omega$$

小信号作用时：



解得 $\dot{U}=\dfrac{\frac{\sqrt{2}}{4}\angle 0°}{3+4}=\dfrac{\sqrt{2}}{28}\angle 0°\text{V}$，$\dot{I}=\dfrac{\dot{U}}{\frac{1}{4}}=\dfrac{\sqrt{2}}{7}\angle 0°\text{A}$

故小信号产生的电压：$u=\dfrac{1}{14}\cos t\ \text{V}$　电流：$i=\dfrac{2}{7}\cos t\ \text{A}$

题 10-解析：

S 闭合后，换路定理　$u_C(0_+)=u_C(0_-)=0$

$u_1(0_+)=4\text{V}>2\text{V}$，故 D 关断，则：

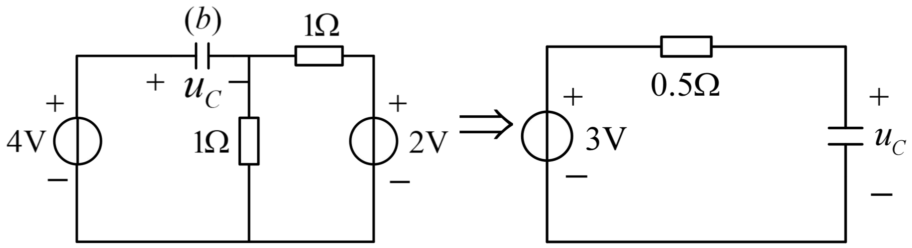
电容电压　$u_C(t)=4\left(1-e^{-t}\right)\text{V}\quad 0<t<t_1$

电阻电压　$u_{R_1}(t)=u_1(t)-u_C(t)=4e^{-t}$

解得　$u_{R_1}(t_1)=2\Rightarrow t_1=0.693s$

$t_1<t<2$ 时，D 导通　$u_C(t_{1+})=u_C(t_{1-})=2\text{V}$

等效电路为：



电容电压　$u_C(t)=3-e^{-2(t-t_1)}\text{V}\quad (t_1<t<2)$

当 $t>2$ 时　$u_C(2_+)=u_C(2_-)=2.927\text{V}$

故 D 仍导通，则　$u_C(\infty)=-1\text{V}$

故三要素　$u_C(t)=-1+3.927e^{-2(t-2)}\text{V}\ (t>2)$

综上：

$$u_C(t)=\begin{cases}4\left(1-e^{-t}\right)\text{V} & 0\le t<0.693s\\ 3-e^{-2(t-0.693)}\text{V} & 0.693\le t<2\\ -1+3.927e^{-2(t-2)} & t\ge 2\end{cases}$$

题 11-解析：

换路定则　$u_{C1}(0_+)=u_{C1}(0_-)=0$，$u_{C2}(0_+)=u_{C2}(0_-)=6.32\text{V}$

三要素法　$u_{C1}(t)=10\left(1-e^{-t}\right)\text{V}\quad (0<t<t_1)$

此时 D_1,D_2 均关断，由 $u_{C_1}(t_1)=10\left(1-e^{-t_1}\right)=6.32$ 得：$t_1=1s$

故 $0<t<1s$ 内，$u_{C_1}(t)=10\left(1-e^{-t}\right)\mathbf{V}$　　$u_{C_2}(t)=6.32\mathbf{V}$

当 $t\geq 1$ 时，D_1 导通，D_2 关断

电容电压　$$u_{C1}(t)=u_{C2}(t)=10-3.68e^{-\frac{1}{2}(t-1)}$$

$$u_{C1}(t_2)=8.64\Rightarrow t_2=3s$$

故当 $1\leq t<3$ 时　$$u_{C1}(t)=u_{C2}(t)=10-3.68e^{-\frac{(t-1)}{2}}\text{V}$$

当 $t\geq 3$ 时，D_1,D_2 均导通：

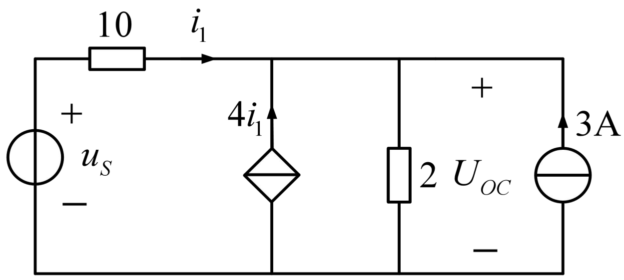
$$u_{C1}(t)=u_{C2}(t)=8.64\text{V}$$

故解得

$$u_{C1}(t)=\begin{cases}10\left(1-e^{-t}\right)\text{V} & 0\leq t<1\\ 10-3.68e^{-\frac{t-1}{2}}\text{V} & 1\leq t<3\\ 8.64\text{V} & t\geq 3\end{cases},\quad u_{C2}(t)=\begin{cases}6.32\text{V} & 0\leq t<1\\ 10-3.68e^{-\frac{t-1}{2}}\text{V} & 1\leq t<3\\ 8.64\text{V} & t\geq 3\end{cases}$$

题 12-解析：

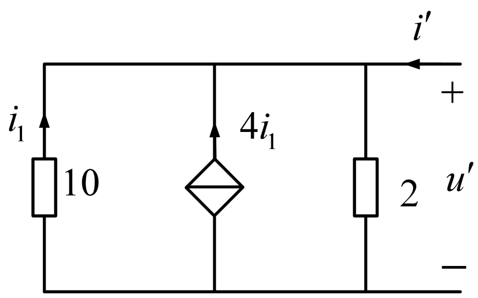
求 U_{OC}：



根据电路列　$$10i_1+2(5i_1+3)=u_S,\quad i_1=\frac{u_S-6}{20}$$

开路电压　$$U_{OC}=u_S-10i_1=\frac{1}{2}u_S+3=4.5+0.03\sin 5t\ \text{V}$$

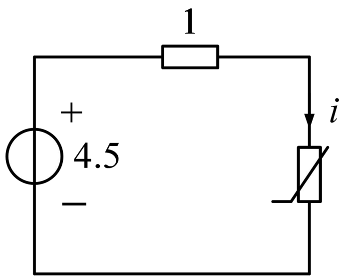
求 R_{eq}，外加电源法求等效电阻



由电路图得　$$-i'=5i_1+4i_1+i_1=10i_1,\quad -u'=10i_1$$

等效电阻　$$R_{eq}=\frac{u'}{i'}=\frac{-10i_1}{-10i_1}=1\Omega$$

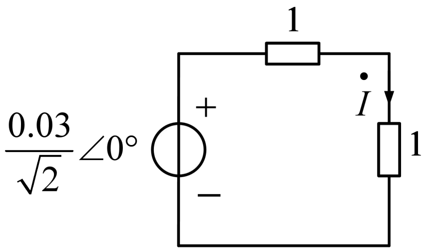
仅直流作用时，作出等效电路如下图所示



假设工作在第二段 $\begin{cases} 4.5 - i = u \\ i = u - 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} U_0 = 2.75\text{V} \\ I_0 = 1.75\text{A} \end{cases}$

假设成立，则动态电阻 $R_d = \dfrac{du}{di}\Big|_{i=I_0} = 1\Omega$

仅小信号作用时：

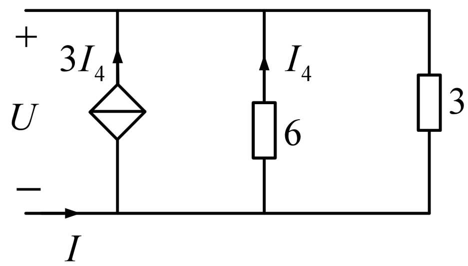


电流 $\dot{I} = \dfrac{\frac{0.03}{\sqrt{2}}\angle 0°}{1+1} = \dfrac{0.015}{\sqrt{2}}\angle 0°\text{A}$

故解得 $i = \left(1.75 + 0.015\sin 5t\right)\text{A}$

题 13-解析：

（1）求 R_{eq}，外加电源法求出等效电路如下图所示



KCL 得 $I = 3I_4 + I_4 + \dfrac{6I_4}{3} = 6I_4$， $U = 6I_4$

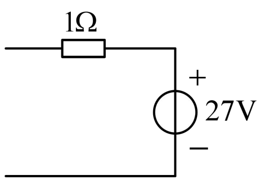
等效电阻 $R_{eq} = \dfrac{U}{I} = 1\Omega$

求 U_{OC}：

$$4I_4 \times 3 + 57 + 6\left(I_4 - 2\right) = 0，\ I_4 = -2.5\text{A}$$

开路电压 $U_{OC} = -6\left(I_4 - 2\right) = 27\text{V}$

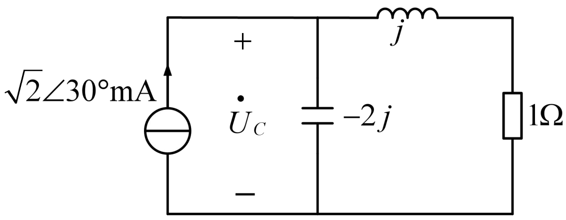
戴维南等效电路为



直流单独作用，静态工作点为：【电气考研课程联系水木珞研电路哥微信 dianluge1，电路哥 QQ：465256747】

$$U_{CQ}=U_{OC}=27\text{V}\quad C_d=\frac{dq}{du}\Big|_{u=U_{CQ}}=5\times10^{-5}F$$

小信号单独作用：

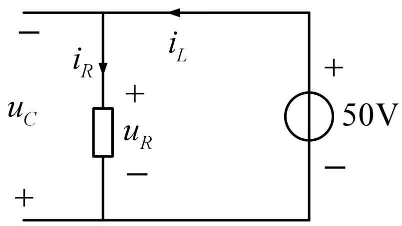


由电路图得　$\dot{U}_C=\dfrac{\sqrt{2}\angle30°}{\frac{1}{2}j+\frac{1}{1+j}}=2\sqrt{2}\angle30°m\mathbf{V}$，$\dot{I}_C=\dfrac{\dot{U}_C}{-2j}=\sqrt{2}\angle120°m\mathbf{A}$

故解得　$u_C(t)=27+4\times10^{-3}\sin\left(10^4t+30°\right)\text{V}$，$i_C(t)=2\sin\left(10^4t+120°\right)m\text{A}$

题 14-解析：

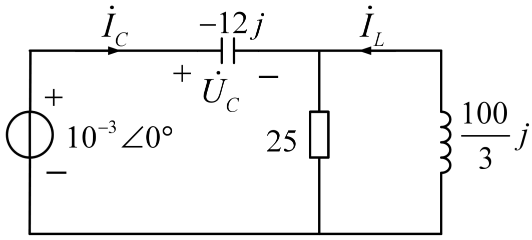
直流作用时



易得　$U_{C0}=-50\mathbf{V}$，$U_{R0}=50\mathbf{V}$ $I_{L0}=I_{R0}=1\mathbf{A}$

动态参数　$L_d=\dfrac{d\psi}{di_L}\Big|_{i_{L0}}=\dfrac{1}{30}\mathbf{H}$　$R_d=\dfrac{du_R}{di_R}\Big|_{i_R=I_{R0}}=25\Omega$

小信号作用时：



电容电流　$\dot{I}_C=\dfrac{10^{-3}\angle0°}{-12j+25//\frac{100}{3}j}=6.25\times10^{-5}\angle0°\mathbf{A}$

电容电压　$\dot{U}_C=\dot{I}_C(-12j)=7.5\times10^{-4}\angle-90°$

电感电流　$\dot{I}_L=-\dot{I}_C\cdot\dfrac{25}{25+\frac{100}{3}j}=-3.75\times10^{-5}\angle-53.1°\mathbf{A}$

最后　$$\begin{cases}u_C(t)=-50+7.5\sqrt{2}\times10^{-4}\sin\left(1000t-90°\right)\mathbf{V}\\ i_L(t)=1-3.75\sqrt{2}\times10^{-5}\sin\left(1000t-53.13°\right)\mathbf{A}\end{cases}$$

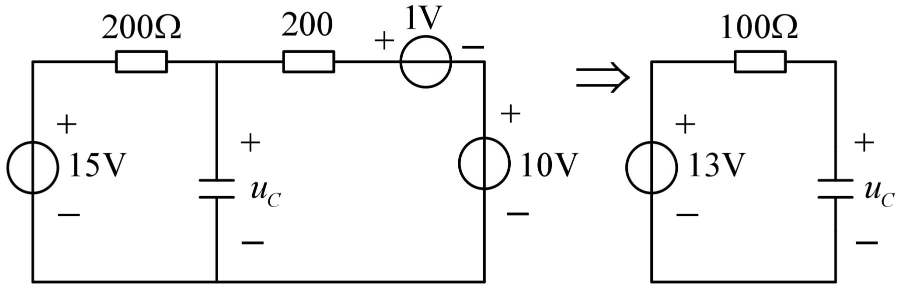
题 15-解析：

$t<0$时：$i=0$　$u=1\mathbf{V}$，非线性电阻工作在 AB 段：

$$u=200i+1，\ u_C(0_-)=u+10=11\mathbf{V}$$

S 闭合后：

$$u_C(0_+)=u_C(0_-)=11\mathbf{V}$$



时间常数
$$\tau=R_{eq}C=\frac{1}{50}s$$

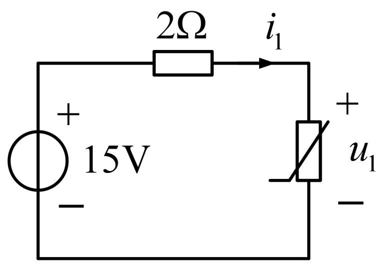
$$u_C(t)=13-2e^{-50t}\text{V}，\ u(t)=u_C(t)-10=3-2e^{-50t}\text{V}$$

故非线性电阻在$t>0$时始终工作在 AB 段。

解得
$$u_C(t)=\left(13-2e^{-50t}\right)\text{V}\,(t\ge 0)$$

题 16-解析：

直流作用时：



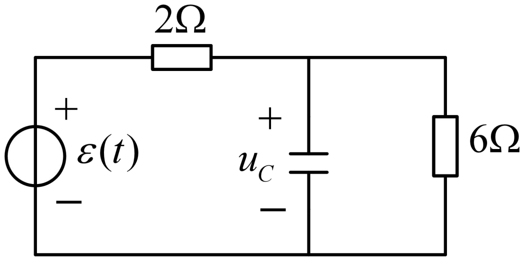
由题意
$$\begin{cases}u_1=15-2i_1\\u_1=i_1^2-4i_1\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}i_{10}=5\mathbf{A}\\u_{10}=5\mathbf{V}\end{cases}$$

动态电阻
$$R_d=\frac{du_1}{di_1}\Big|_{i_1=i_{10}}=6\Omega$$

$$u_{C_0}=u_{10}=5\mathbf{V}$$

动态电容
$$C_d=\frac{dq}{du}\Big|_{u=u_{C_0}}=\frac{1}{100}\mathbf{F}$$

小信号作用时：



电压稳态值
$$u_C(\infty)=1\times\frac{6}{6+2}=\frac{3}{4}\mathbf{V}$$

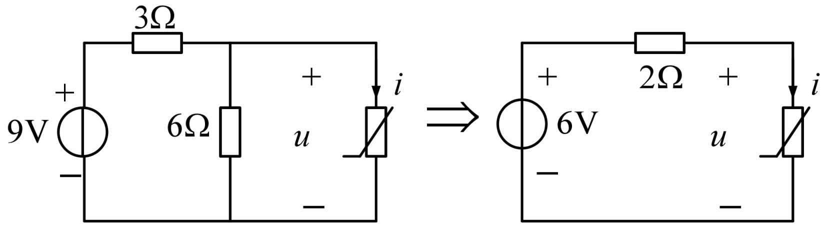
时间常数　$\tau = R_{eq}\cdot C = \dfrac{3}{200}S$

三要素　$u'_C(t) = \dfrac{3}{4}\left(1-e^{-\frac{200}{3}t}\right)\cdot\varepsilon(t)\mathbf{V}$

叠加　$u_C(t) = u_{C_0} + u'_C(t) = 5 + \dfrac{3}{4}\left(1-e^{-\frac{200t}{3}}\right)\cdot\varepsilon(t)\mathbf{V}$

题 17-解析：

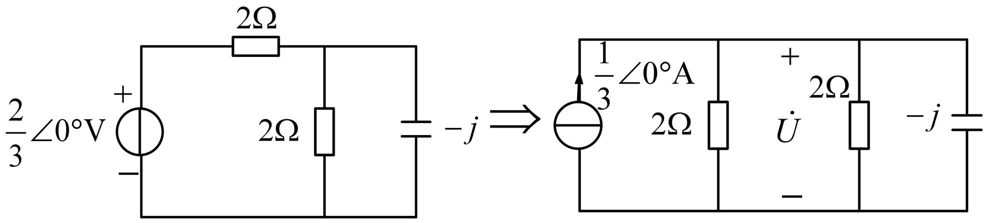
直流单独作用：



由电路得　$\begin{cases} u = 6-2i \\ u = 0.5i^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_0 = 2\mathbf{A} \\ u_0 = 2\mathbf{V} \end{cases}$

动态电阻　$R_d = \dfrac{du}{di}\Big|_{i=i_0} = 2\Omega$

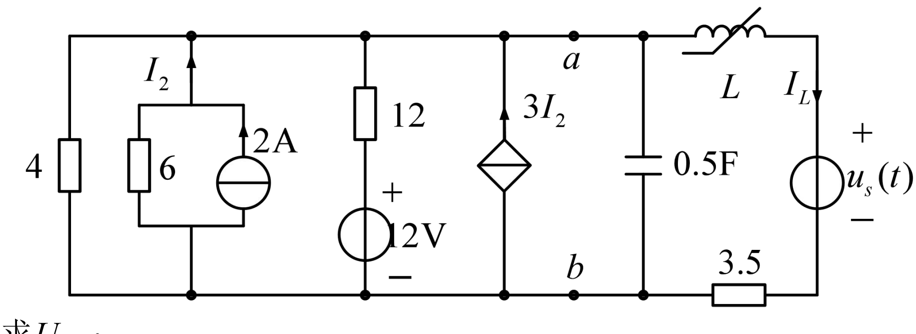
小信号单独作用：



由电路图　$\dot{U} = \dfrac{\frac{1}{3}\angle 0^\circ}{\frac{1}{2}+\frac{1}{2}+j} = \dfrac{\frac{1}{3}\angle 0^\circ}{1+j} = \dfrac{\sqrt{2}}{6}\angle -45^\circ\,\mathbf{V}$，$\dot{I} = \dfrac{\dot{U}}{2} = \dfrac{\sqrt{2}}{12}\angle -45^\circ\mathbf{A}$

解得　$i = 2 + \dfrac{1}{6}\cos\left(100t - 45^\circ\right)\mathbf{A}$

题 18-解析：

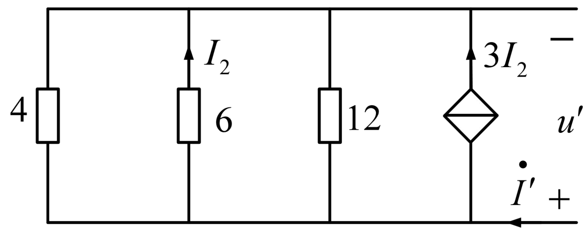


（1）求U_{OC}：

$$\left[\frac{(I_2-2)3}{2} + I_2 + 3I_2\right]\times 12 + 12 + 6\left(I_2-2\right) = 0 \Rightarrow I_2 = 0.5\mathbf{A}$$

解得　　$U_{OC}=-6\left(I_2-2\right)=9\mathbf{V}$

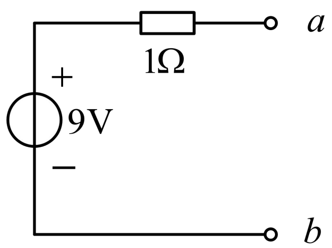
求 R_{eq}，外加电源法求等效电阻：



由电路图　　$u'=6I_2$，$i'=I_2+\frac{1}{2}I_2+\frac{3}{2}I_2+3I_2=6I_2$

等效电阻　　$R_{eq}=\frac{u'}{i'}=1\Omega$

戴维南等效电路为：

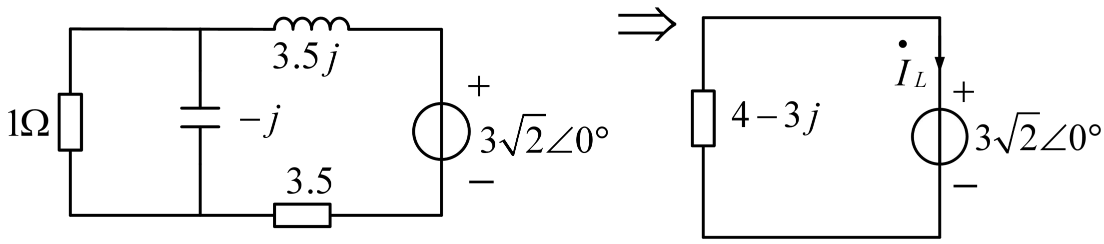


（2）直流作用时：

$$I_{L0}=\frac{9}{1+3.5}=2\mathbf{A}$$

故动态电感　　$\left.\frac{d\psi}{di}\right|_{i=I_{L0}}=1.75\mathbf{H}=L_d$

小信号作用时



电流　　$\dot{I}_L=-\frac{3\sqrt{2}\angle 0°}{4+3j}=\frac{3\sqrt{2}}{5}\angle 143.13° m\mathbf{A}$

故解得　　$i_L=2+1.2\times 10^{-3}\cos\left(2t+143.13°\right)\mathbf{A}$

题 19-解析：

A_1任何时候都通，A_2任何时候都不通，A_3只通$i>0$时的电流

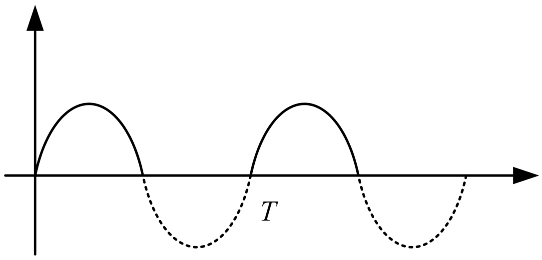
先算I_{A1}，基频：$I_{A1(1)}=\frac{1}{\sqrt{2}}$A，三次：$I_{A1(3)}=\frac{1}{4\sqrt{2}}$A

电流表 1　　$I_{A1}=\sqrt{I_{A1(1)}^2+I_{A1(3)}^2}=0.729$A

$$I_{A2}=0\text{（不通）}$$

因为主线路中是交流，A_2测不了

推导　$$I_{\mathrm{A1}}=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt}$$



直流：　$$I_{\mathrm{A3}}=I_{\mathrm{dA3(基)}}+I_{\mathrm{dA3(三次)}}$$

$$T=\frac{2\pi}{\omega}，\quad T_1=\frac{2\pi}{314}，\quad T_2=\frac{2\pi}{942}$$

基波　$$I_{\mathrm{dA3(基)}}=\frac{1}{T_1}\int_0^{\frac{T_1}{2}} i dt=\frac{1}{\frac{2\pi}{314}}\int_0^{\frac{\pi}{314}}\sin 314 dt=\frac{1}{\pi}$$

三次　$$I_{\mathrm{dA3(三次)}}=\frac{1}{T_2}\int_0^{\frac{T_2}{2}} i dt=\frac{1}{\frac{2\pi}{942}}\int_0^{\frac{\pi}{942}}\frac{1}{4}\sin 942 dt=\frac{1}{4\pi}$$

电流表 3　$$I_{\mathrm{A3}}=\frac{1}{\pi}+\frac{1}{4\pi}=0.398\mathrm{A}$$

综上　$$I_{\mathrm{A1}}=0.729\mathrm{A}，\ I_{\mathrm{A2}}=0，\ I_{\mathrm{A3}}=0.398\mathrm{A}$$

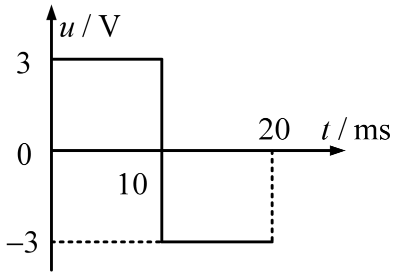
题 20-解析：

电压　$$U=-R_1 i_S \quad t\in(0,10)ms$$

稳态值　$$u_{C1}(\infty)=u_{C2}(\infty)=\frac{3}{6+3}\times 3=1\mathrm{V}$$

三要素　$$u_{C1}(t)=u_{C2}(t)=1-e^{-\frac{250}{3}t}\mathrm{V}$$

$t=10ms$ 时，$u_{C1}(10)=u_{C2}(10)=0.565\mathrm{V}$



$t\in(10,20)ms$，设 D 截止

稳态值　$$U_{C1}(\infty)=\frac{-3}{6+3}\times 3=-1\mathrm{V}$$

时间常数　$$\tau=2000\times 3\times 10^{-6}=\frac{3}{500}s$$

则 $U_{C1}(t)=\left(-1+1.565e^{-\frac{500}{3}\left(t-10^{-2}\right)}\right)1\left(t-10^{-2}\right)$　当 $U_{C1}(t)<0.565$，固 D 截止

此时$U_{C2}(t)=0.565\text{V}$，当$t>20ms$时，$U_{C1}(20)=-0.704\text{V}$

$$U_{C2}(20)=0.565\text{V}，U_{C1}(\infty)=0$$

三要素 $$U_{C1}(t)=-0.704e^{-\frac{500}{3}(t-2\times10^{-2})}1(t-2\times10^{-2})$$

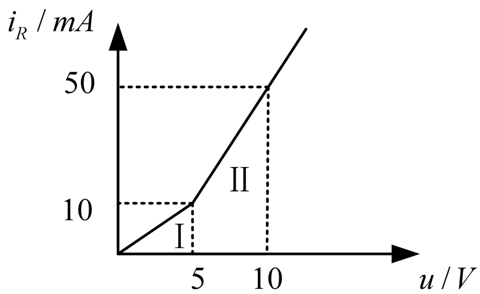
此时 $$u_{C2}(t)=0.565\text{V}$$

$t\in(0,10)ms$，$u_{C1}(t)=u_{C2}(t)=(1-e^{-\frac{250}{3}t})\varepsilon(t)$ V

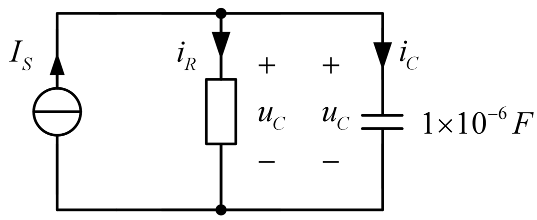
$t\in(10,20)ms$，$u_{C1}(t)=\left(-1+1.565e^{-\frac{500}{3}(t-10^{-2})}\right)\varepsilon(t-10^{-2})$，$u_{C2}(t)=0.565\text{V}$

题 21-解析：

因为本题电容电压没有跳变的条件，故必然从 0 开始，即从第I段到第II段（左I右II）



$t>0$时



KCL： $$I_S=i_R+i_C=i_R+1\times10^{-6}\frac{du_C}{dt}=5\times10^{-2}\ ①$$

I段的斜率 $$k=\frac{1\times10^{-2}}{5}$$

电流 $$i_R=\frac{1}{5}\times10^{-2}u_C$$

代入① $$\frac{1}{5}\times10^{-2}u_C+1\times10^{-6}\frac{du_C}{dt}=5\times10^{-2}\Rightarrow u_C(t)=-25e^{-2\times10^3t}+25$$

令 $$u_C(t_0)=5\Rightarrow t_0=1.115\times10^{-4}s$$

$t>t_0$时

$u_C(t_{0+})=5\text{V}$，非线性电阻$R_d=\frac{10-5}{(5-1)\times10^{-2}}=125\Omega$（斜率II段）

$u_C(\infty)=10\text{V}$（由图像得），u 最终为 10V

时间常数 $$\tau=125\times1\times10^{-6}$$

电容电压 $$u_C(t)=10-5e^{-8000(t-t_0)}\text{V}$$

综上 $$u_C(t)=\begin{cases}25-25e^{-2000t},0<t<1.115\times10^{-4}s\\10-5e^{-8000\left(t-1.115\times10^{-4}\right)},t\geq1.115\times10^{-4}s\end{cases}$$

题 22-解析：

根据库一伏特性

$$\begin{cases}q=10^{-7}u_C+10^{-6}\left(u_C\geq10\right)\\q=2\times10^{-7}u_C\left(0\leq u_C\leq10\right)\end{cases}$$

确定初值 $$u_C\left(0_-\right)=u_C\left(0_+\right)=0\text{V}$$

列写微分方程 $$I_S-\frac{u_C}{R}=\frac{dq}{dt}=2\times10^{-7}\frac{du_C}{dt}$$

整理得 $$\frac{du_C}{dt}+1000u_C=2.5\times10^4$$

三要素法 $$u_C(t)=25-25e^{-1000t}$$

其中 $$u_C\left(t_0\right)=10\text{V}\Rightarrow t_0=5.1\times10^{-4}s$$

当$t\geq t_0$时，进入非线性电容第二段

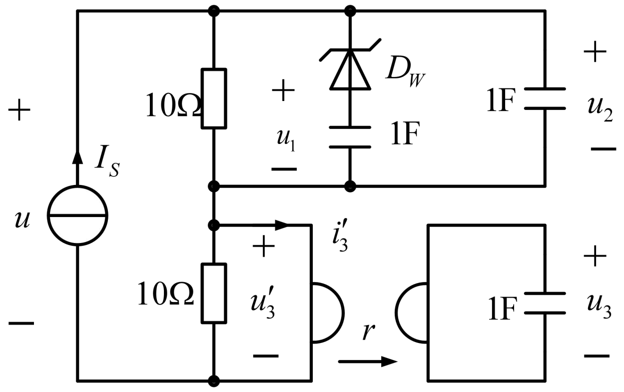
$$I_S-\frac{u_C}{R}=\frac{dq}{dt}=10^{-7}\frac{du_C}{dt}$$

整理得 $$\frac{du_C}{dt}+2000u_C=5\times10^4$$

得 $$u_C(t)=\left[25-15e^{-2000\left(t-t_0\right)}\right]\varepsilon\left(t-t_0\right)$$

题 23-解析：

回转电阻$r=1\Omega$的回转器将$1F$ 的电容回转成$1H$ 的电感。此外，将电流源I_S沿着与两个10Ω电阻所形成的回路拆开，则该电路成为两个独立的一阶电路。



开始时稳压管未被击穿，则有　$u_2(t)=10\left(1-e^{-0.1t}\right)\text{V}$

当$u_2(t)$上升到5V时，理想稳压管被击穿，维持5V的反向电压

由$u_2\left(t_0\right)=10\left(1-e^{-0.1t_0}\right)\text{V=5V}$，可求得$t_0=\left(10\ln2\right)s=6.931s$

此时 5V 电压源与$1F$ 电容器的串联，相当于初态为5V的$1F$ 电容器，

故这两个非零态电容并联，可简化为初态为5V的$2F$的电容器，于是$t\geq6.931s$后

$u_1(t)=u_2(t)=\left[10-5e^{-0.05t}\right]\text{V}$，即$u_1(t)=u_2(t)=\left[10-5e^{-0.05(t-6.933)}\right]\text{V}$

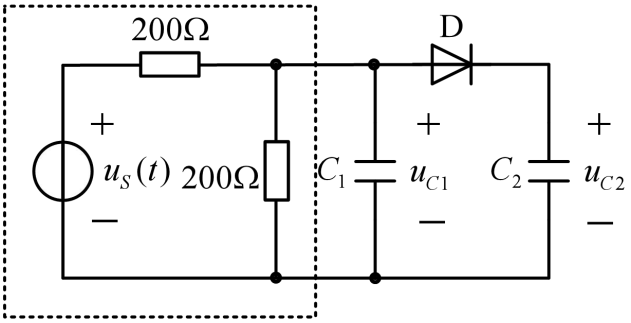
得到
$$u_2(t)=\begin{cases}10\left(1-e^{-0.1t}\right)\text{V} & 0<t<6.931s\\ \left[10-5e^{-0.05(t-6.933)}\right]\text{V} & t>6.931s\end{cases}$$

而 $i_3'(t)=\left(1-e^{-10t}\right)\text{A}$，$u_3'(t)=10\Omega\times\left[1A-i_3'(t)\right]=10e^{-10t}\text{V}$

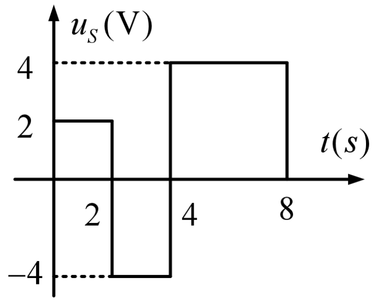
$$u_3(t)=-ri_3'=\left(e^{-10t}-1\right)\text{V}，\ i_3(t)=-C\frac{du_3}{dt}=10e^{-10t}\text{A}$$

则解得
$$u(t)=u_2(t)+u_3'(t)=\begin{cases}\left[10\left(1-e^{-0.1t}\right)+10e^{-10t}\right]\text{V} & 0<t<6.931s\\ \left[10-5e^{-0.05(t-6.933)}+10e^{-10t}\right]\text{V} & t>6.931s\end{cases}$$

题 24-解析：



(a)



(b)

将网络左边的方框部分等效简化成100Ω电阻与$0.5u_S(t)$串联的戴维南支路。则

①$0<t<2s$时，二极管D导通，电容C_1与C_2并联

其零状态响应
$$u_{C1}(t)=u_{C2}(t)=\left(1-e^{-0.5t}\right)\text{V}$$

②$2s<t<4s$时，电容C_1被反向充电，二极管D截止，此时

$u_{C1}(t)\big|_{t=2^-}=u_{C1}(t)\big|_{t=2^+}=\left(1-e^{-1}\right)\text{V}=0.6321\text{V}=u_{C2}(t)\big|_{t=2^+}$，则有

$$u_{C1}(t)=\left[-2+2.6321e^{-(t-2)}\right]\text{V}，\ u_{C2}(t)=0.6321\text{V}\text{不变。}$$

③$t>4s$后，电容C_1再次被充电，开始二极管D仍截止，此时

$$u_{C1}(t)\big|_{t=4^-}=u_{C1}(t)\big|_{t=4^+}=\left(-2+2.6321e^{-2}\right)\text{V}=-1.6438\text{V}$$

于是$u_{C1}(t)=\left[2-3.6438e^{-(t-4)}\right]\text{V}$，之后电容$C_1$的电压逐步上升，当它上升到0.6321V时。二极管D再次导通，由$u_{C1}(t)=\left[2-3.6438e^{-(t-4)}\right]\text{V}=0.6321\text{V}$，可求得$t=4.980s$。即$t=4.980s$时，电容$C_1$的电压被正向充电到0.6321V

④$4.980s<t<8s$时，二极管D再次导通，这两个电容器相当于初始状态同为0.6321V的非零态电容器的并联，故有

$$u_{C1}(t)=u_{C2}(t)=\left[2-1.3679e^{-0.5(t-4.980)}\right]\text{V}$$

⑤$t>8s$后，电容C_1通过两个并联的100Ω电阻放电，二极管D再次被截止，此时

$$u_{C1}(t)\big|_{t=8^-}=u_{C2}(t)_{t=8^+}=1.6978\text{V}=u_{C1}(t)\big|_{t=8^+}$$

$$u_{C1}(t)=1.6978e^{-(t-8)}\text{V}，\ u_{C2}(t)=1.6978\text{V}\text{不变。}$$

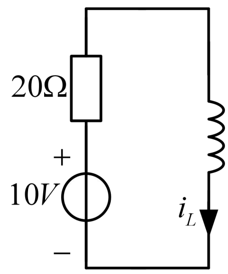
综合上述结果，其解答为

$$u_{C1}(t)=\begin{cases}\left(1-e^{-0.5t}\right)\text{V} & (0\le t<2s)\\ \left[-2+2.6321e^{-(t-2)}\right]\text{V} & (2s\le t<4s)\\ \left[2-3.6438e^{-(t-4)}\right]\text{V} & (4s\le t<4.980s)\\ \left[2-1.3679e^{-0.5(t-4.980)}\right]\text{V} & (4.980s\le t<8s)\\ 1.6978e^{-(t-8)}\text{V} & (t\ge 8s)\end{cases}$$

$$u_{C2}(t)=\begin{cases}\left(1-e^{-0.5t}\right)\text{V} & (0\le t<2s)\\ 0.6321\text{V} & (2s\le t<4.980s)\\ \left[2-1.3679e^{-0.5(t-4.980)}\right]\text{V} & (4.980s\le t<8s)\\ 1.6978\text{V} & t\ge 8s\end{cases}$$

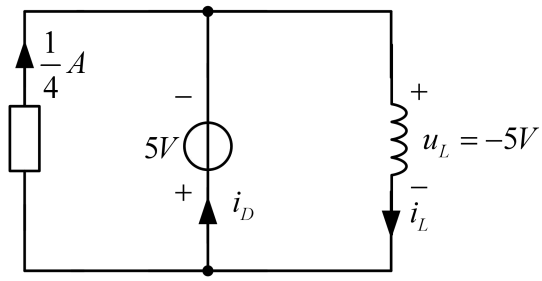
题 25-解析：

$t<0$，作出等效电路如下图所示



电感电流初值　　$i_L(0_-)=\frac{1}{2}A=i_L(0_+)$

$0<t<t_0$



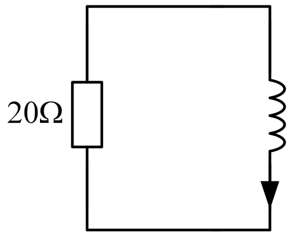
电感电流　　$i_L(t)=i_L(0_+)+100\int_0^t -5dt\Rightarrow i_L(t)=\frac{1}{2}-500tA$

其中　　$i_D(t)=i_L-\frac{1}{4}=\frac{1}{4}-500tA$

令　　$i_D(t_0)=0\Rightarrow t_0=\frac{1}{2000}s$

其中　　$i_L\left(\frac{1}{2000}\right)=\frac{1}{4}A$

$t>t_0=\frac{1}{2000}s$ 时，D_Z 截止：



电感电流 $$i_L\left(\frac{1}{2000}\right)=\frac{1}{4}A$$

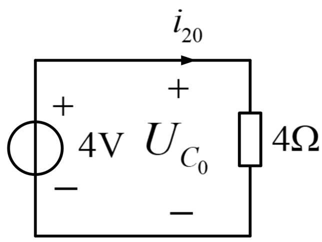
时间常数 $$\tau=\frac{1\times10^{-2}}{20}\Rightarrow\frac{1}{\tau}=2000$$

则 $$i_L(t)=\frac{1}{4}e^{-2000\left(t-\frac{1}{2000}\right)}$$

综上 $$i_L(t)=\begin{cases}\frac{1}{2}-500t,\ 0<t<\frac{1}{2000}s\\ \frac{1}{4}e^{-2000\left(t-\frac{1}{2000}\right)},\ t\geq\frac{1}{2000}s\end{cases}$$

题 26-解析：

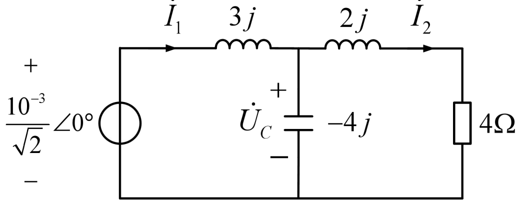
直流作用下：【电气考研课程联系水木珞研电路哥微信 dianluge1，电路哥 QQ：465256747】



非线性电容 $$U_{C0}=4\mathbf{V}\qquad C_d=\frac{dq}{du_C}\Big|_{U_C=U_{C0}}=\frac{1}{4}\mathbf{F}$$

非线性电感 $$i_{20}=\frac{4V}{4\Omega}=1\mathbf{A}\qquad L_d=\frac{d\varphi_2}{di_2}\Big|_{i_2=i_{20}}=2\mathbf{H}$$

小信号作用下，作出等效电路如下图所示



电流 1 $$\dot{I}_1=\frac{\frac{10^{-3}}{\sqrt{2}}\angle0°}{3j+-4j//(4+2j)}=0.217\times10^{-3}\angle-10.62°\mathbf{A}$$

电流 2 $$\dot{I}_2=\dot{I}_1\cdot\frac{-4j}{(4+2j)-4j}=0.194\angle-74°m\mathbf{A}$$

电容电压 $$\dot{U}_C=\dot{I}_2\cdot(4+2j)=0.869\angle-47.5°m\mathbf{V}$$

故解得

$$u_C(t) = 4 + 1.23 \times 10^{-3} \sin(t - 47.5°)\,\mathbf{V}，\quad i_2(t) = 1 + 0.274 \times 10^{-3} \sin(t - 74°)\,\mathbf{A}$$