第一章

习 题

1-1 若某用电设备上通过的电流分别由（a）4 秒内 60 库仑；（b）2 分钟内 15 库仑电荷稳定形成的，求电流大小。

解: $i(t)=\dfrac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}$

（a）$i(t)=\dfrac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}=\dfrac{60}{4}=15A$ （b）$i(t)=\dfrac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}=\dfrac{15}{2\times 60}=0.125A$

1-2 一电灯泡内有$0.5A$电流通过，时间为 4 秒，共产生$240J$的能量，求电灯泡的电压降。

解： 因为$i(t)=\dfrac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}$，所以$u(t)=\dfrac{\mathrm{dW}}{\mathrm{d}q}=\dfrac{1}{i(t)}\cdot\dfrac{\mathrm{dW}}{dt}$。

$$u(t)=\frac{\mathrm{dW}}{\mathrm{d}q}=\frac{1}{i(t)}\cdot\frac{\mathrm{dW}}{dt}=\frac{1}{0.5}\cdot\frac{240}{4}=120V$$

1-3 日常生活中常用的电能衡量单位为度，1 度电=1 千瓦时，求：

①$60W$灯泡消耗 1 度电可持续多长时间？

②$100W$电灯泡 1 小时消耗多少焦耳热量？

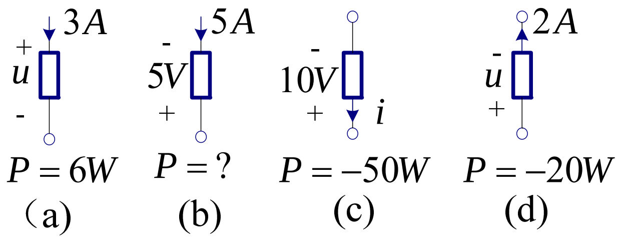
解：① $t=\dfrac{1000}{60}=\dfrac{50}{3}$小时

② 因为$p=\dfrac{W}{t}$，所以$W=p\cdot t=100\times 60\times 60=3.6\times 10^5\mathrm{J}$

1-4 $12V$汽车蓄电池向启动电动机提供$250A$电流，设电池共有4×10^6焦耳化学能，问可以持续多长时间？

解：因为$p=\dfrac{W}{t}$，所以$t=\dfrac{W}{p}=\dfrac{W}{u\cdot i}=\dfrac{4\times 10^6}{12\times 250}=\dfrac{4}{3}\times 10^3\mathrm{s}$

1-5 已知电路某段支路中各电量如题图 1-1 所示，求图中未知电量。



题图 1-1

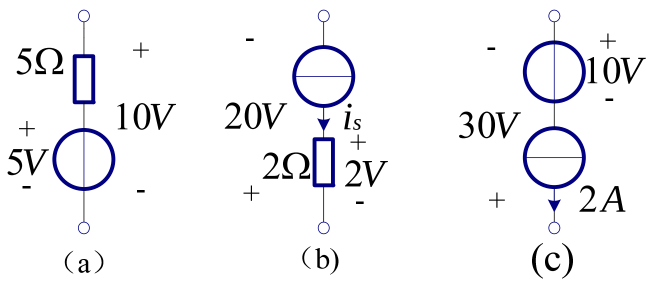
解：（a） $P = ui \quad \Rightarrow \quad u = \dfrac{P}{i} = \dfrac{6}{3} = 2\text{V}$

（b） $P = -ui = -25\text{V}$

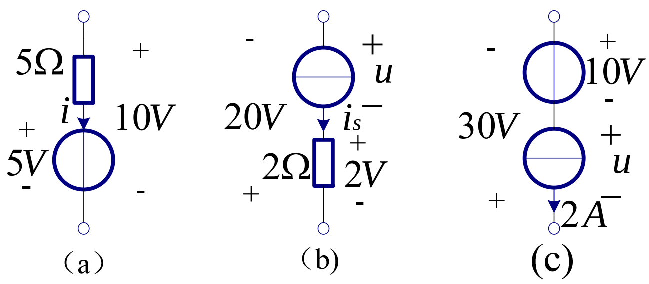
（c） $P = -ui \Rightarrow i = -\dfrac{P}{u} = -\dfrac{-50}{10} = 5\text{A}$

（d） $P = ui \Rightarrow u = \dfrac{P}{i} = \dfrac{-20}{2} = -10\text{V}$

1-6 求题图 1-2 各段电路上各元件的功率。



题图 1-2



解：（a）支路电流为：$i = \dfrac{u_R}{R} = \dfrac{10-5}{5} = 1A$，电流的参考方向如图所示。

电阻的功率为：$P_R = i^2 R = 5W$

电压源的功率为：$P_u = ui = 5W$

（b）支路电流为：$i_s = \frac{u_R}{R} = \frac{2}{2} = 1A$。

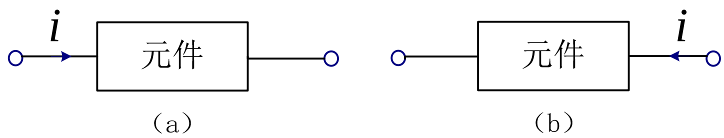
电阻的功率为：$P_R = i^2 R = 2W$

电流源两端电压的参考方如图所示，电流源功率为：$P_i = ui_s = (-20-2)\times 1 = -22W$

（c）电流源两端电压的参考方如图所示，电流源功率为：$P_i = ui_s = (-30-10)\times 2 = -80W$

电压源功率为：$P_u = 10\times 2 = 20W$

1-7 已知题图 1-3 的各支路放出功率 $P = 50W$，电流 $i = 10A$，求元件的电压 u，并标明电压的真实极性。



题图 1-3

解：假定元件的电压与电流是关联参考方向，则元件功率为：

$P = ui = 10u = -50W$

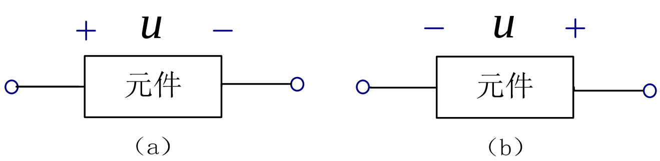
$\therefore u = -5V$

所以元件电压的真实极性是与假定参考方向相反，即与元件的电流是非关联参考方向。

（a）元件电压的真实极性是左负右正。

（b）元件电压的真实极性是左正右负。

1-8 已知题图 1-4 的各支路吸收功率 $P = 80W$，电压 $u = 16V$，求元件的电流 i，并标明支路电流的真实方向。



题图 1-4

解：假定元件的电流与电压是关联参考方向，则元件功率为：

$$P = ui = 16i = 80W$$

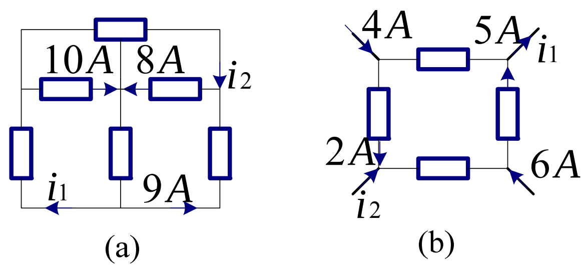
$$\therefore i = 5A$$

所以元件电流的真实方向是与假定参考方向一直，即与元件的电压是非关联参考方向。

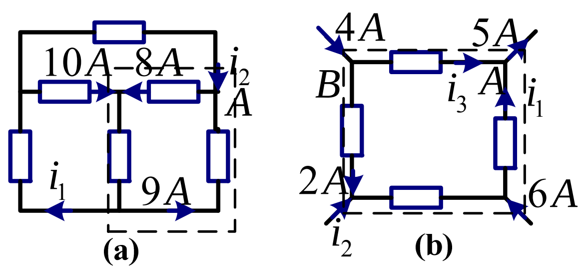
（a）元件电流的真实方向是由左至右。

（b）元件电流的真实方向是由右至左。

1-9 已知某电路如题图 1-5 所示，求电流 i_1 和 i_2。



题图 1-5



解：（a）对 A 节点列 KCL 方程，有：$i_2 + 9 = 8 \;\Rightarrow\; i_2 = -1\text{A}$；

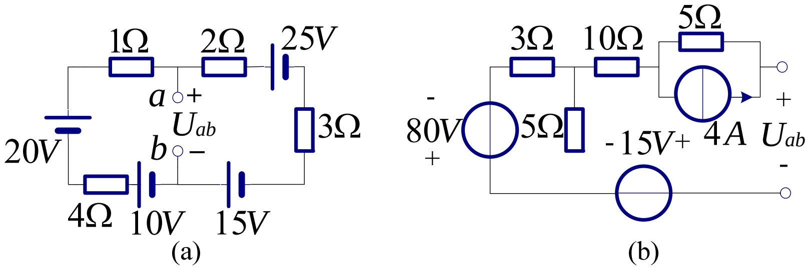
如图，对虚线表示的封闭面列 KCL 方程，有：$i_1 = i_2 + 10 = 9\text{A}$

（b）对 B 节点列 KCL 方程，有：$i_3 + 2 = 4 \;\Rightarrow\; i_3 = 2\text{A}$；

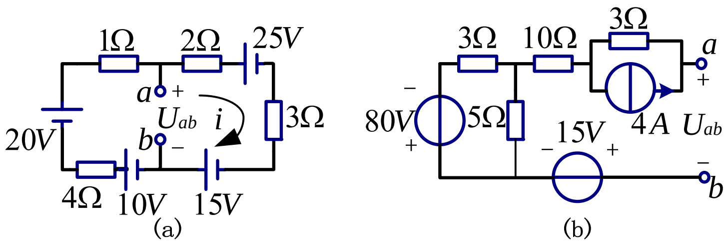
对 A 节点列 KCL 方程，有：$i_3 + i_1 = 5 \;\Rightarrow\; i_1 = 3\text{A}$

如图，对虚线表示的封闭面列 KCL 方程，有：$i_2 + 4 + 6 = 5 \;\Rightarrow\; i_2 = -5\text{A}$

1-10 求题图 1-6 所示电路的电压 U_{ab}。



题图 1-6



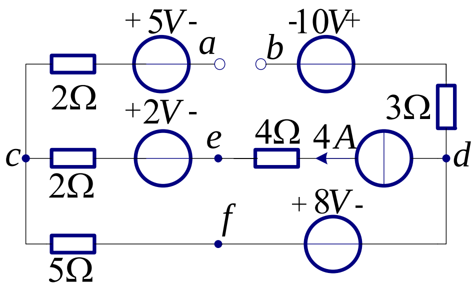
解：（a）选回路的电流方向为顺时针方向，则有：

$$2i+25+3i-15-10+4i-20+i=0 \Rightarrow i=2\text{A}$$

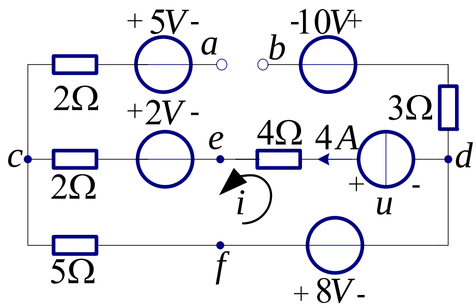
$$U_{ab}=2i+25+3i-15=20\text{V}$$

（b）$$U_{ab}=3\times 4+\frac{5}{5+3}\times(-80)-15=-53\text{V}$$

1-11 求题图 1-7 中的电压 U_{ab}、U_{cd}、U_{ef}。



题图 1-7



解：如图所示，设环路电流为 i，则 $i=4A$

电流源的端电压参考方向如图所示，沿逆时针方向对环路列 KVL 方程，有：

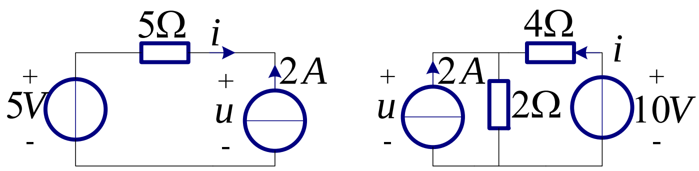
$$-2+2i+5i+8-u+4i=0 \quad\Rightarrow\quad u=11i+6=50V$$

所以 $U_{cd}=-2i+2-4i+u=28V$ 或 $U_{cd}=5i+8=28V$

$$U_{ab}=-5+U_{cd}+10=33V$$

$U_{ef}=-2+2i+5i=26V$ 或 $U_{ef}=-4i+u-8=26V$

1-12 求题图 1-8 中电压 u 和电流 i 的值。



（a）　　　(b)

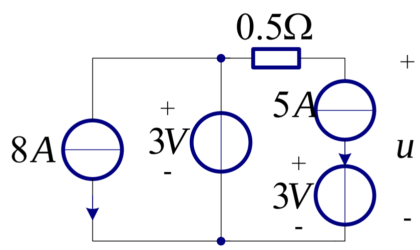
题图 1-8

解：（a） $i=-2\text{A}$, $u=-5i+5=15\text{V}$

（b）对右边的回路，按逆时针方向列写 KVL 方程：$4i+2\times(i+2)-10=0 \Rightarrow i=1\text{A}$,

$$u=2\times(i+2)=6\text{V}$$

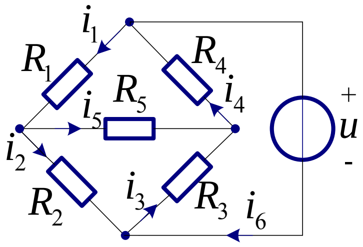
1-13 求题图 1-9 所示电路中的电压 u。



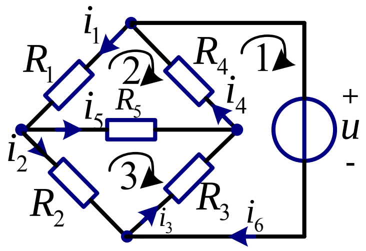
题图 1-9

解：$u=-0.5\times 5+3=0.5\text{V}$

1-14 在题图 1-10 的电路中，有几个节点？几条支路？几个网孔？写出每个节点的 KCL 方程和每个网孔的 KVL 方程。



题图 1-10



解：有四个节点，六个支路，三个网孔，节点的 KCL 方程如下：

$i_4=i_1+i_6$；$i_1=i_2+i_5$；$i_4=i_5+i_3$；$i_3=i_2+i_6$

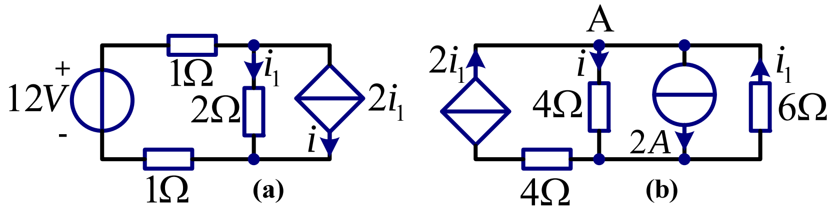
网孔的 KVL 方程为：

1网孔：$R_4i_4+u+R_3i_3=0$；

2网孔：$-R_4i_4-R_5i_5-R_1i_1=0$；

3网孔：$R_5i_5-R_3i_3-R_2i_2=0$

1-15 求题图 1-11 电路中的电流 i 的值。



题图 1-11

解：（a）列写左边回路的 KVL 方程：$(1+1)\times(i_1+2i_1)+2i_1-12=0\Rightarrow i_1=1.5\text{A}$

则 $i=2i_1=3\text{A}$

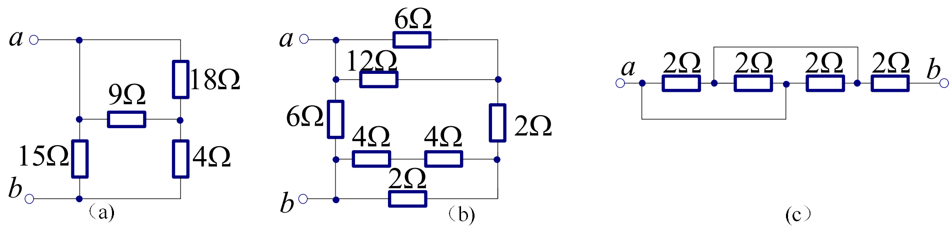
（b）对 A 节点列写 KCL 方程：$2i_1+i_1=i+2$

4 欧姆电阻和 6 欧姆电阻的端电压相同，则 $4i=-6i_1$

将上述两个方程联解，得：$i=-\dfrac{2}{3}\text{A}$

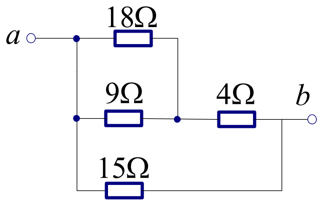
第二章 电阻电路的基本分析方法与定理

2-1 求题图 2-1 所示电路 ab 端的等效电阻。



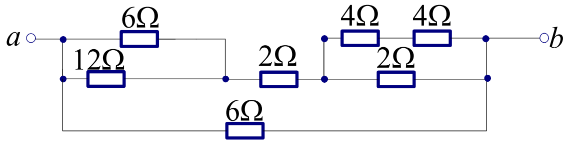
题图 2-1

解：（a）



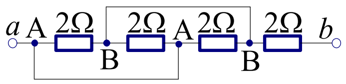
$$
\begin{aligned}
R_{ab} &= ((18//9)+4)//15 \\
&= (6+4)//15 \\
&= 6\Omega
\end{aligned}
$$

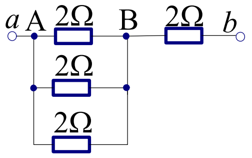
（b）



$$
\begin{aligned}
R_{ab} &= ((6//12)+2+(4+4)//2)//6 \\
&= (4+2+1.6)//6 \\
&= \frac{7.6\times 6}{7.6+6}\Omega = \frac{57}{17}\Omega
\end{aligned}
$$

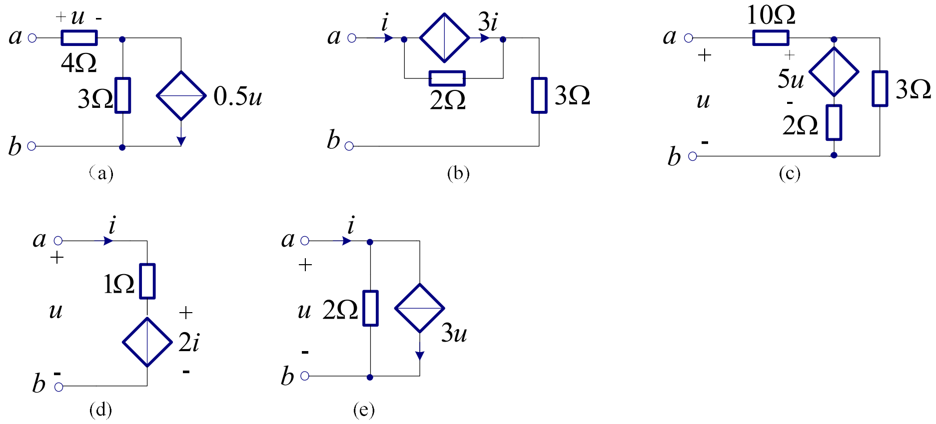
（c）



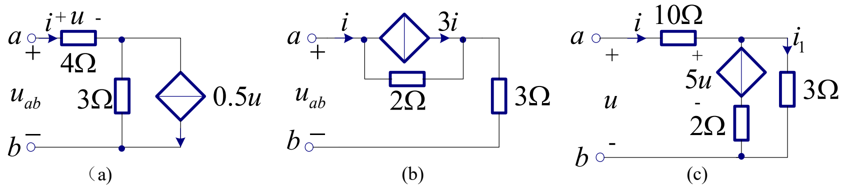


$$R_{ab} = (2//2//2)+2 = \frac{2}{3}+2 = \frac{8}{3}\Omega$$

2-2 求题图 2-2 所示含受控源电路 ab 端的输入电阻。



题图 2-2



解：（a）列 KCL 方程，有：$i=\dfrac{u_{ab}-u}{3}+0.5u$，又因为$u=4i$，所以有：$u_{ab}=i$。

所以输入电阻$R_i=\dfrac{u_{ab}}{i}=1\Omega$。

（b）列 KVL 方程，有：$u_{ab}=2\times(i-3i)+3i=-i$。

所以输入电阻$R_i=\dfrac{u_{ab}}{i}=-1\Omega$。

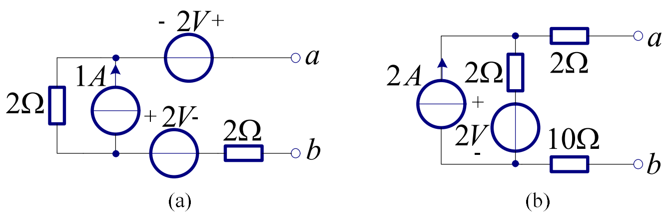
（c）列 KVL 方程，有：$u=10i+3i_1$，$u=10i+5u+2(i-i_1)$，整理得到：$-10u=56i$。

所以输入电阻$R_i=\dfrac{u}{i}=-5.6\Omega$。

（d）列 KVL 方程，有：$u=i+2i=3i$。所以输入电阻$R_i=\dfrac{u}{i}=3\Omega$。

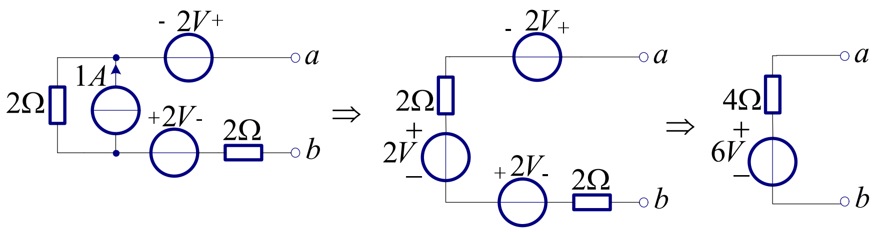
（e）列 KCL 方程，有：$i=\dfrac{u}{2}+3u=\dfrac{7}{2}u$。所以输入电阻$R_i=\dfrac{u}{i}=\dfrac{2}{7}\Omega$。

2-3 将题图 2-3 电路化简为最简形式。

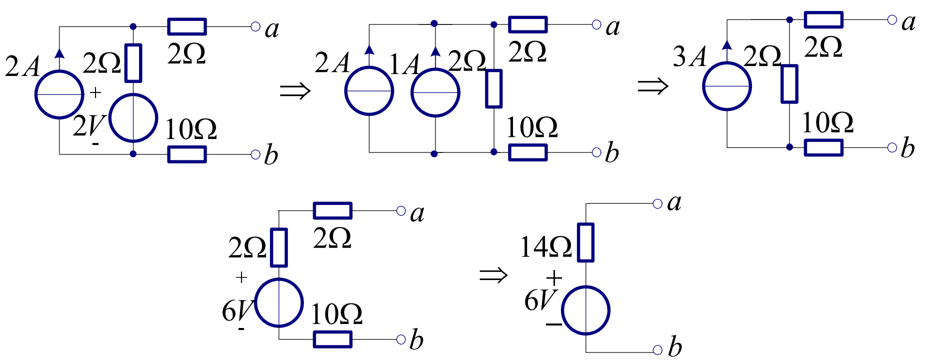


题图 2-3

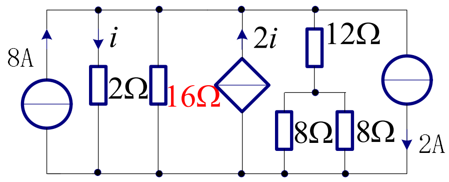
解：（a）



（b）



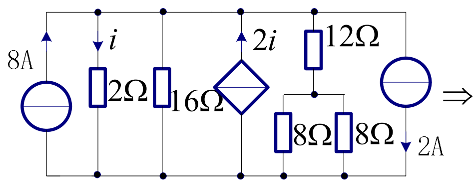
2-4 利用电阻的等效变化和电源的等效变换，求题图 2-4 中的i。（建议把题目中的 6 欧姆改为 16 欧姆）

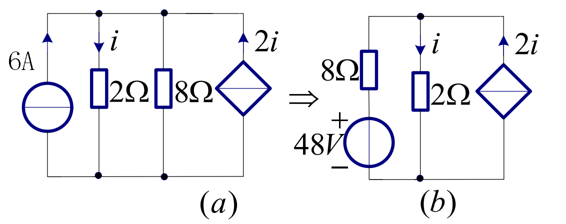


题图 2-4

解：由电阻的串并联等效，可以得到$(8//8+12)//16=16//16=8\Omega$

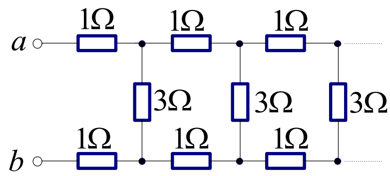
并由电源的等效变换可以得到如图（a）所示的电路图。由实际电流源与实际电压源的等效，可得如图（b）所示的电路图。





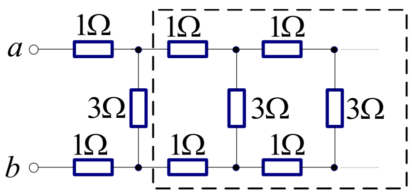
列写 KVL 方程：$48=8\times(i-2i)+2\times i=-6i \quad \Rightarrow \quad i=-8A$

2-5 题图 2-4 电路是一个无限梯形网络，试求出其端口的等效电阻 R_{ab}。



题图 2-5

解：图所示，虚线框所包含的电路，电阻与所求 ab 端电阻相等。

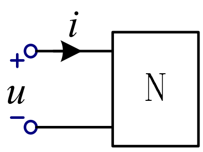


所以有 $R_{ab}=R_{ab}//3+1+1=\dfrac{3R_{ab}}{3+R_{ab}}+2$，整理得到：

$R_{ab}{}^{2}-2R_{ab}-6=0$，$R_{ab}=(1\pm\sqrt{5})\Omega$，考虑电阻为正值，所以有

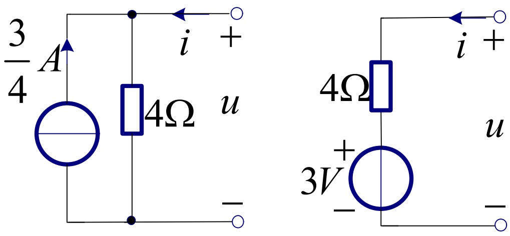
$R_{ab}=(1+\sqrt{5})\Omega$

2-6 已知题图 2-5 所示二端网络的 VCR 为 $u=3+4i$，试画出该网络的最简等效形式。



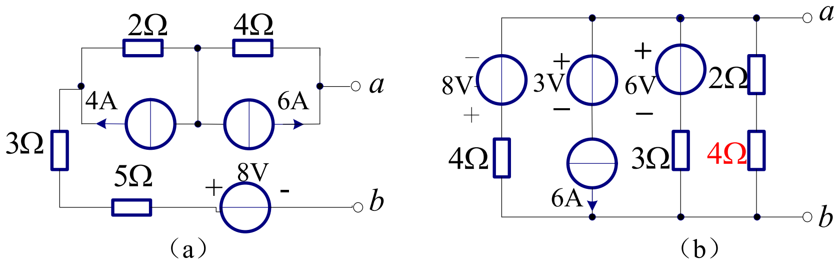
题图 2-6

解：



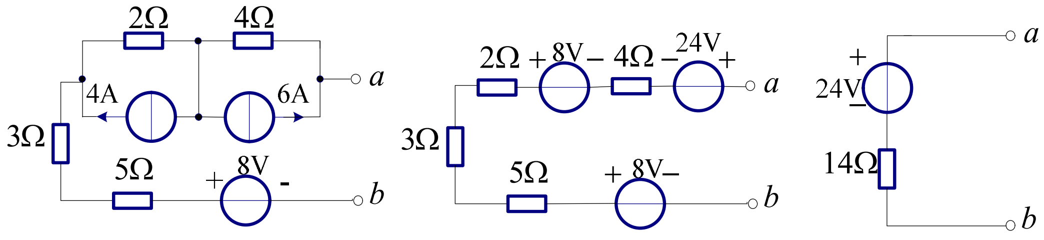
2-7 利用实际电压源与电流源的等效特性，将题图 2-7 化简成简单的电源电

路。（把 b 中的 6 欧姆电阻改成 4 欧姆电阻）

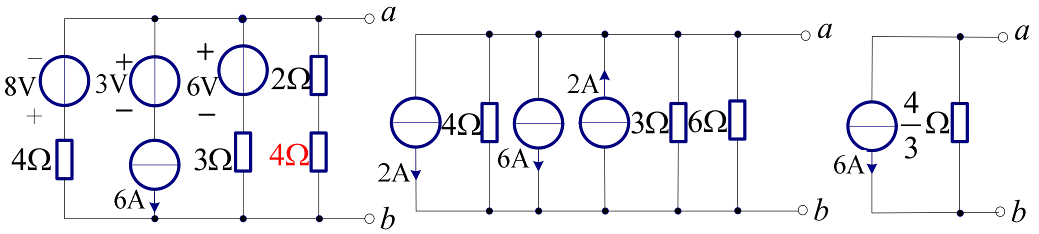


题图 2-7

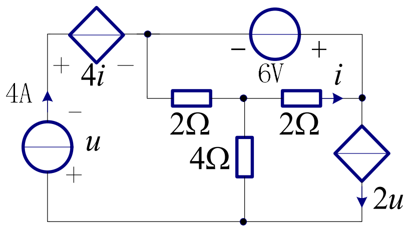
解：（a）



（b）

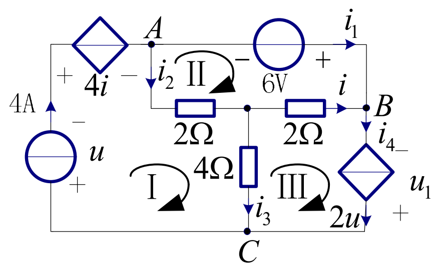


2-8 电路如题图 2-8 所示，列出求解方程的支路电流方程，并计算各支路电流。



题图 2-8

解：



电路具有 4 个节点，6 条支路。首先标出个支路电流及参考方向。由此电路可以列出 3 个独立的节点电流方程和 3 个独立的回路电压方程：

由节点 A 有：$i_1 + i_2 - 4 = 0$

由节点 B 有：$i_4 - i_1 - i = 0$

由节点 C 有：$-i_4 - i_3 + 4 = 0$

按照图中所示列写回路 I 、II 、III的 KVL 方程，有：

回路 I ：$4i + 2i_2 + 4i_3 + u = 0$

回路 II：$-6 - 2i - 2i_2 = 0$

回路III：$2i - u_1 - 4i_3 = 0$

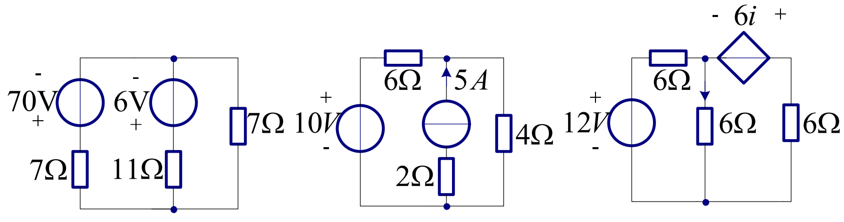
又由于 $i_4 = 2u$

由于有一条支路的电流已知，所以将上述方程组整理可得到：

$$\begin{cases} i_1 + i_2 - 4 = 0 \\ i_4 - i_1 - i = 0 \\ -i_4 - i_3 + 4 = 0 \\ 4i + 2i_2 + 4i_3 + 0.5i_4 = 0 \\ -6 - 2i - 2i_2 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_1 = 4.1A \\ i_2 = -0.1A \\ i_3 = 2.8A \\ i_4 = 1.2A \\ i = -2.9A \end{cases}$$

并可以得到：$u = 0.6V$ ，$u_1 = 17V$ 。

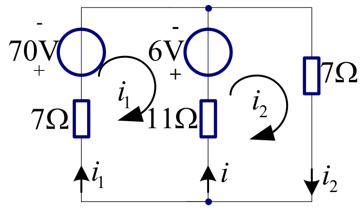
2-9 用网孔电流法求题图 2-9 电路中的每条支路电流。



（a） (b) (c)

题图 2-9

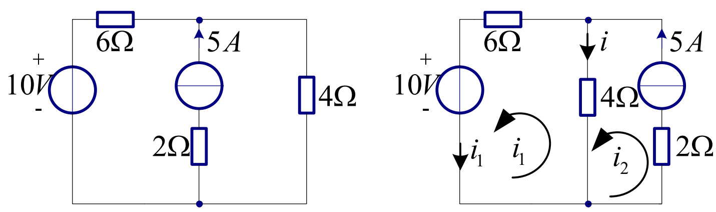
解：（a）



选取网孔电流方向如图所示，则网孔电流方程为：

$$\begin{cases}(7+11)i_1-11i_2=-70+6\\-11i_1+(11+7)i_2=-6\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}i_1=-6A\\i_2=-4A\end{cases}$$ 即求出了两条支路的电流，另一条支路的电流 $i=i_2-i_1=2A$

（b）

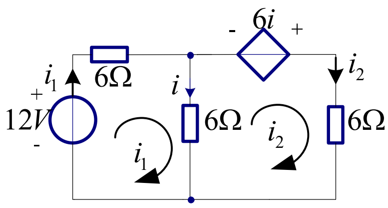


将右边两条之路更换位置，得到上图右边所示。然后选取网孔电流方向如图所示，则网孔电流方程为：

$$\begin{cases}(6+4)i_1-4i_2=-10\\i_2=5A\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}i_1=1A\\i_2=5A\end{cases}$$ 即求出了两条支路的电流，另一条支路的电流

$i=i_2-i_1=4A$

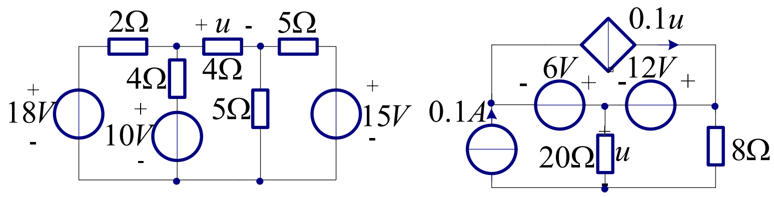
（c）



选取网孔电流方向如图所示，则网孔电流方程为：

$$\begin{cases}(6+6)i_1-6i_2=12\\-6i_1+(6+6)i_2=6i\\i=i_1-i_2\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}i_1=1.5A\\i_2=1A\\i=0.5A\end{cases}$$ 即求出了三条支路的电流。

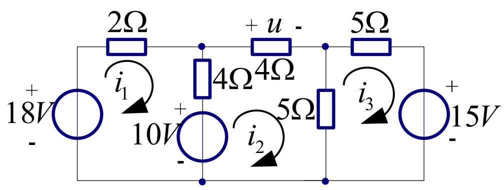
2-10 已知电路如题图 2-10 所示，用网孔电流法求电压 u。



(a) （b）

题图 2-10

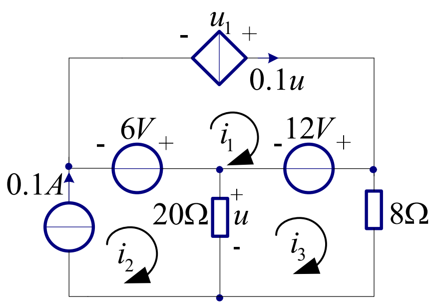
解：（a）



选取网孔电流方向如图所示，则网孔电流方程为：

$$\begin{cases}(2+4)i_1-4i_2=18-10\\-4i_1+(4+4+5)i_2-5i_3=10\\-5i_2+(5+5)i_3=-15\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}i_1=2A\\i_2=1A\\i_3=-1A\end{cases}$$，则电压 $u=4i_2=4V$。

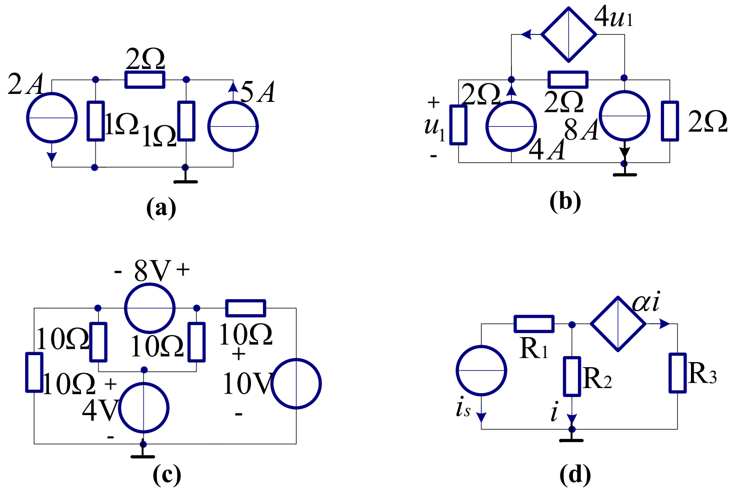
（b）



选取网孔电流方向如图所示，则网孔电流方程为：

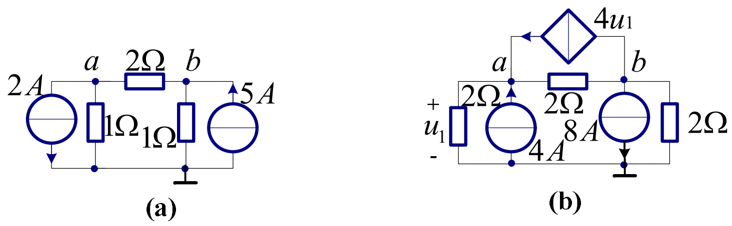
$$\begin{cases}i_1=0.1u\\i_2=0.1A\\-20i_2+(20+8)i_3=12\\u=20\left(i_2-i_3\right)\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}i_1=-0.8A\\i_2=0.1A\\i_3=0.5A\\u=-8V\end{cases}$$，则电压 $u=-8V$。

2-11 用节点电压法求解题图 2-11 各电路的每一条支路电压。



题图 2-11

解：

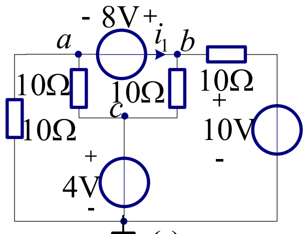


（a）参考节点是地，节点 a、b 对地的电压即为独立的节点电压，设为为u_a和u_b。则节点电压方程为：

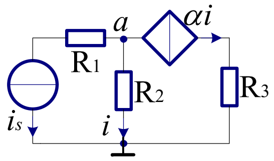
$$\begin{cases}(1+\frac{1}{2})u_a-\frac{1}{2}u_b=-2\\ -\frac{1}{2}u_a+(1+\frac{1}{2})u_b=5\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}u_a=-\frac{1}{4}V\\ u_a=\frac{13}{4}V\end{cases}，\text{则}\,u_{ab}=u_a-u_b=-\frac{7}{2}V\text{。}$$

（b）参考节点是地，节点 a、b 对地的电压即为独立的节点电压，设为为u_a和u_b。则节点电压方程为：

$$\begin{cases}(\frac{1}{2}+\frac{1}{2})u_a-\frac{1}{2}u_b=4u_1+4\\ -\frac{1}{2}u_a+(\frac{1}{2}+\frac{1}{2})u_b=-4u_1-8\\ u_1=u_a\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}u_a=0V\\ u_b=-8V\end{cases}，\text{则}\,u_{ab}=u_a-u_b=8V\text{。}$$



(c)



(d)

（c）参考节点是地，节点 a、b、c 对地的电压即为独立的节点电压，设为为u_a、u_b和u_c。则节点电压方程为：

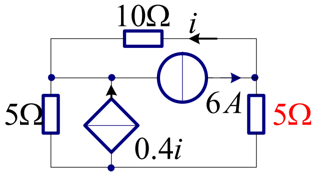
$$\begin{cases}(\frac{1}{10}+\frac{1}{10})u_a-\frac{1}{10}u_c=-i_1\\(\frac{1}{10}+\frac{1}{10})u_b-\frac{1}{10}u_c=i_1+\frac{10}{10}\\u_c=4V\\u_b-u_a=8\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}u_a=\frac{1}{2}V\\u_b=\frac{17}{2}V\\u_c=4V\\i_1=\frac{3}{10}A\end{cases}，\text{则}\begin{cases}u_{ab}=-8V\\u_{ac}=-\frac{7}{2}V\\u_{bc}=\frac{9}{2}V\end{cases}。$$

（d）参考节点是地，节点 a 对地的电压即为独立的节点电压，设为为u_a。

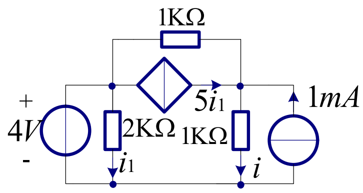
则节点电压方程为：

$$\begin{cases}\frac{1}{R_2}u_a=-i_s-\alpha i\\i=\frac{1}{R_2}u_a\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}u_a=-\frac{R_2 i_s}{\alpha+1}\\i=-\frac{i_s}{\alpha+1}\end{cases}。$$

2-12 用节点电压法求解题图 2-12 中电流i。（修改 13 欧姆电阻为 5 欧姆）



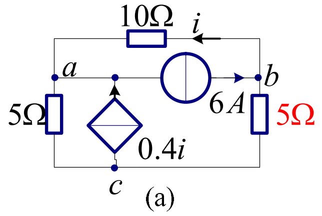
(a)



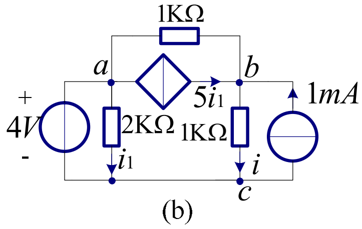
(b)

题图 2-12

解：



(a)



(b)

（a）参考节点是 c，节点 a、b 对节点 c 的电压即为独立的节点电压，设为为u_a和u_b。则节点电压方程为：

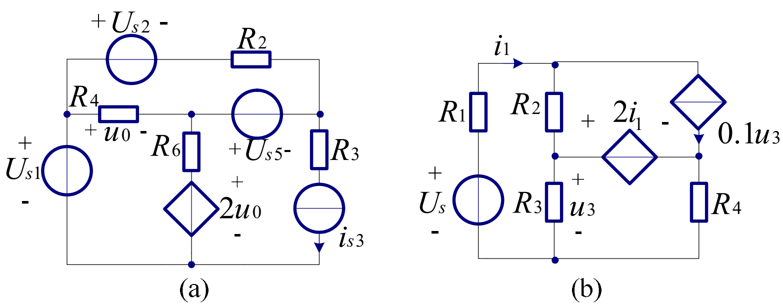
$$\begin{cases}(\frac{1}{5}+\frac{1}{10})u_a-\frac{1}{10}u_b=0.4i-6\\-\frac{1}{10}u_a+(\frac{1}{5}+\frac{1}{10})u_b=6\\i=\frac{u_b-u_a}{10}\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}u_a=-\frac{120}{11}V\\u_b=\frac{180}{11}V\\i=\frac{30}{11}A\end{cases}。$$

（b）参考节点是 c，节点 a、b 对节点 c 的电压即为独立的节点电压，设为为u_a和u_b。则节点电压方程为：

$$\begin{cases}u_a=4V\\-\frac{1}{1000}u_a+(\frac{1}{1000}+\frac{1}{1000})u_b=5i_1+0.001\\i_1=\frac{u_a}{2000}=0.002A\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}u_a=4V\\u_b=7.5V\\i_1=0.002A\end{cases}。$$

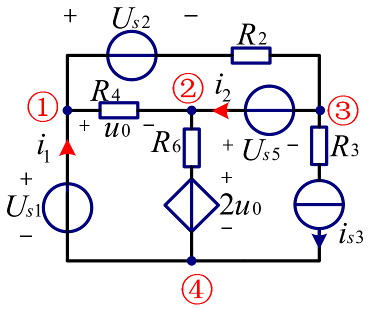
所以$i=\frac{u_b}{1000}=0.0075A=7.5mA$。

2-13 列出题图 2-13 电路的节点电压方程。



题图 2-13

解：（a）



设节点④为参考节点，节点①②③的节点电压为u_1',u_2',u_3'，节点电压方程为：

$$(\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_4})u_1'+(-\frac{1}{R_4})u_2'+(-\frac{1}{R_2})u_3'=\frac{U_{s2}}{R_2}+i_1$$

$$(-\frac{1}{R_4})u_1'+(\frac{1}{R_4}+\frac{1}{R_6})u_2'=\frac{2u_0}{R_6}+i_2$$

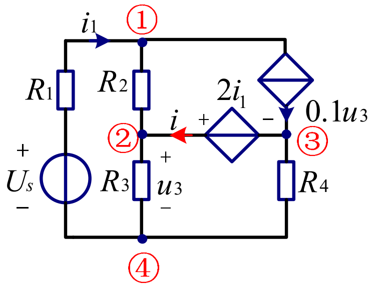
$$(-\frac{1}{R_2})u_1'+\frac{1}{R_2}u_3'=-\frac{U_{s2}}{R_2}-i_2-i_{s3}$$

$$u_1'=U_{s1}$$

$$u_2'-u_3'=U_{s5}$$

$$u_1'-u_2'=u_0$$

（b）



设节点④为参考节点，节点①②③的节点电压为u_1',u_2',u_3'，节点电压方程为：

$$(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2})u_1'+(-\frac{1}{R_2})u_2'=\frac{U_s}{R_1}-0.1u_3$$

$$(-\frac{1}{R_2})u_1'+(\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3})u_2'=i$$

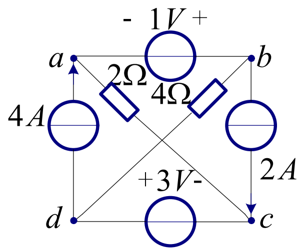
$$\frac{1}{R_4}u_3' = 0.1u_3 - i$$

$$u_2' - u_3' = 2i_1$$

$$\frac{U_s - u_1'}{R_1} = i_1$$

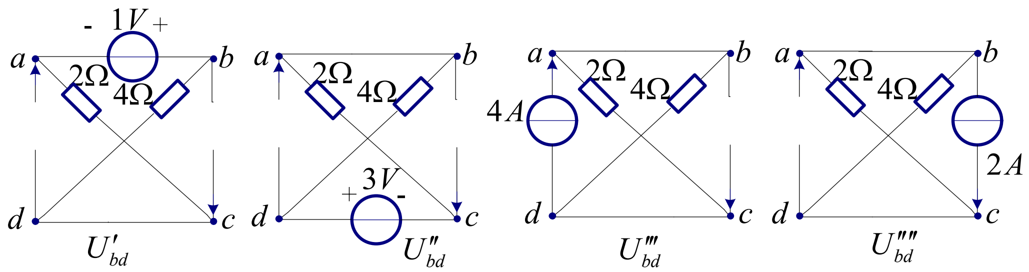
$$u_2' = u_3$$

2-14 利用叠加定理求解电压U_{bd}。电路如题图 2-14 所示



题图 2-14

解：由叠加定理，电压U_{bd}可以看作是各独立源单独作用所产生的电压的代数和，如下图所示。



当 3V 电压源单独作用时，如图所示，两电阻串联分压，可得：

$$U_{bd}' = \frac{4}{4+2} \times 1 = \frac{2}{3}V$$ 。

当 1V 电压源单独作用时，如图所示，两电阻串联分压，可得：

$$U_{bd}'' = -\frac{4}{4+2} \times 3 = -2V$$ 。

当 4A 电流源单独作用时，如图所示，两电阻并联分流，可得：

$$U_{bd}''' = 4\times\frac{2\times4}{2+4} = \frac{16}{3}V$$ 。

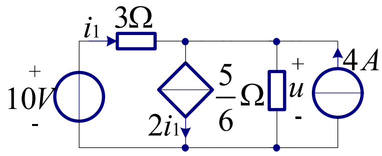
当 2A 电流源单独作用时，如图所示，两电阻并联分流，可得：

$$U_{bd}'''' = -2\times\frac{2\times4}{2+4} = -\frac{8}{3}V$$ 。

所以所有独立源共同作用时，有

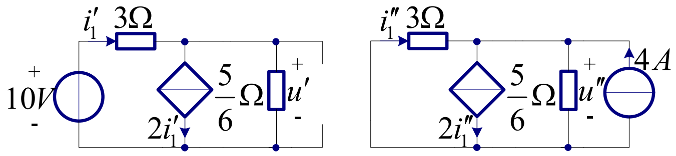
$$U_{bd} = U_{bd}' + U_{bd}'' + U_{bd}''' + U_{bd}'''' = \frac{2}{3} - 2 + \frac{16}{3} - \frac{8}{3} = \frac{4}{3}V$$

2-15 电路如题图 2-15 所示，利用叠加定理求解电压u



题图 2-15

解：由叠加定理，电压u可以看作是各独立源单独作用所产生的电压的代数和，如下图所示。



当 10V 电压源单独作用时，如图所示可得：

$$\begin{cases} i_1' = 2i_1' + \dfrac{u'}{5/6} \\ u' = 10 - 3i_1' \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_1' = \dfrac{60}{13}A \\ u' = -\dfrac{50}{13}V \end{cases}$$

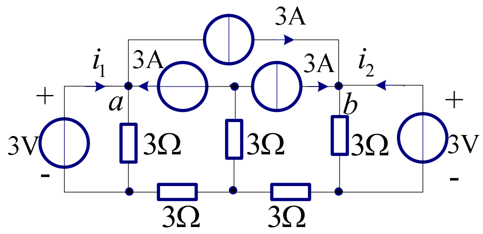
当 4A 电流源单独作用时，如图所示可得：

$$\begin{cases} i_1'' + 4 = 2i_1'' + \dfrac{u''}{5/6} \\ u'' = -3i_1'' \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_1'' = -\dfrac{20}{13}A \\ u'' = \dfrac{60}{13}V \end{cases}$$

所以所有独立源共同作用时，有：

$$u = u' + u'' = -\frac{50}{13} + \frac{60}{13} = \frac{10}{13}V$$ 。

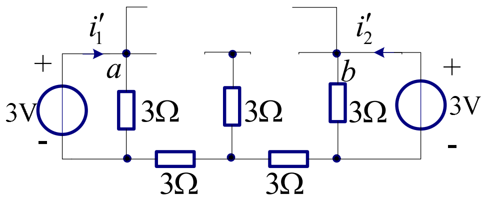
2-16 电路题图 2-16 所示，利用叠加定理求解电路中的u_{ab}， i_1和i_2。



题图 2-16

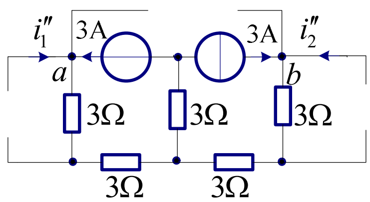
解：由叠加定理，电压/电流可以看作是各独立源单独作用所产生的电压/电流的代数和，如下图所示。

当两个 3V 电压源单独作用时，如图所示可得：



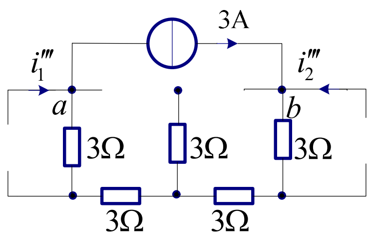
$$i_1' = \frac{3}{3} = 1A;\quad i_2' = \frac{3}{3} = 1A;\quad u_{ab}' = 0V$$

当两个并排的 3A 电流源单独作用时，如图所示可得：



$$i_1'' = 0A;\quad i_2'' = 0A;\quad u_{ab}'' = 3\times3 + 3\times3 - 3\times3 - 3\times3 = 0V$$

当最上面的 3A 电流源单独作用时，如图所示可得：

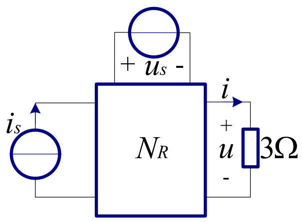


$i_1'''=0A$; $i_2'''=0A$; $u_{ab}'''=-3\times3-3\times3-3\times3-3\times3=-36V$

所以所有独立源共同作用时，有：

$i_1=i_1'+i_1''+i_1'''=1A$; $i_2=i_2'+i_2''+i_2'''=1A$; $u_{ab}=u_{ab}'+u_{ab}''+u_{ab}'''=-36V$

2-17 题图 2-17 所示，网络 N_R 为线性无源电阻网络，当 $i_s=1A,u_s=2V$ 时，$i=5A$；当 $i_s=-2A,u_s=4V$ 时，$u=24V$。试求当 $i_s=2A,u_s=6V$ 时的电压 u。



题图 2-17

解法一：设 $i_s=1A,u_s=0V$ 时，即 $i_s=1A$ 单独作用于网络时，$u=u_x$。

设 $i_s=0A,u_s=1V$ 时，即 $u_s=1V$ 单独作用于网络时，$u=u_y$。

根据题目，可以得到

$$\begin{cases}u_x+2u_y=3\times5\\-2u_x+4u_y=24\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}u_x=\dfrac{3}{2}V\\u_y=\dfrac{27}{4}V\end{cases}$$

所以当 $i_s=2A,u_s=6V$ 时，有：

$$u=2u_x+6u_y=2\times\frac{3}{2}+6\times\frac{27}{4}=\frac{87}{2}V$$

解法二：利用线性电路中响应与激励之间存在着线性关系，设该电路中激励 i_s,u_s 和响应 u 之间存在线性关系：$K_1i_s+K_2u_s=u$。

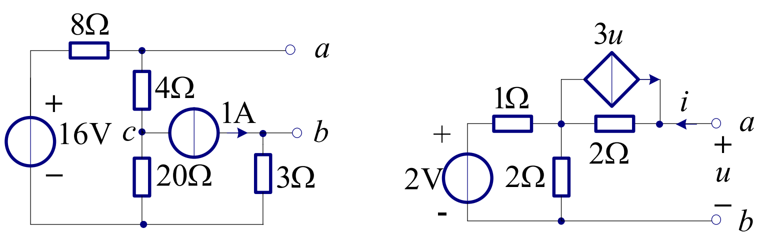
根据题目，可得：

$$\begin{cases} K_1 \times 1 + K_2 \times 2 = 3 \times 5 \\ K_1 \times (-2) + K_2 \times 4 = 24 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} K_1 = \dfrac{3}{2} \\ K_2 = \dfrac{27}{4} \end{cases}$$

所以当$i_s = 2A, u_s = 6V$时，有：

$$u = \frac{3}{2} i_s + \frac{27}{4} u_s = \frac{3}{2} \times 2 + \frac{27}{4} \times 6 = \frac{87}{2} V$$

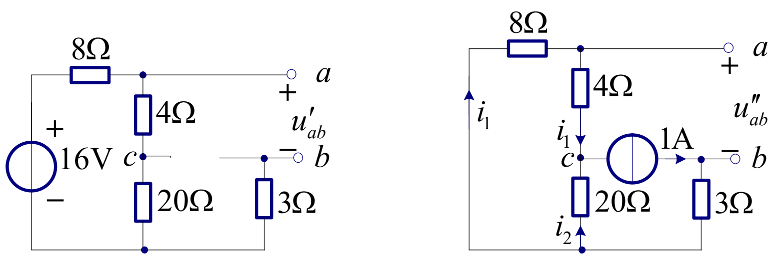
2-18 求题图 2-18 所示电路的开路电压u_{ab}。



（a）　　（b）

题图 2-18

解：（a）



如左图所示，当 16V 电压源单独作用时，$u'_{ab} = \dfrac{4+20}{8+4+20} \times 16 = 12V$。

如右图所示，当 1A 电流源单独作用时，$i_1 = \dfrac{20}{8+4+20} \times 1 = \dfrac{5}{8} A$

$u''_{ab} = -8 i_1 - 3 \times 1 = -8V$。

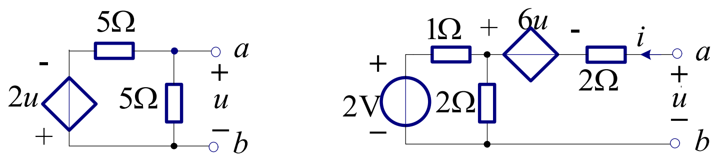
所以独立源共同作用时，有：$u_{ab} = u'_{ab} + u''_{ab} = 12 - 8 = 4V$

（b）$u_{ab} = 3u_{ab} \times 2 + \dfrac{2}{2+1} \times 2$

$$-5u_{ab}=\frac{4}{3}$$

$$u_{ab}=-\frac{4}{15}\text{V}$$

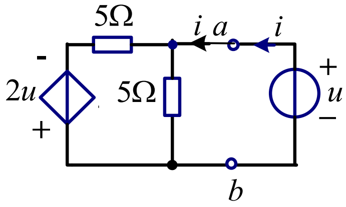
2-19 求题图 2-19 所示电路的等效内阻 R_{ab}。



（a）　　（b）

题图 2-19

解：（a）外加电源法：

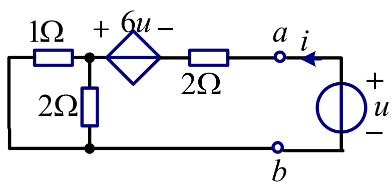


$$\frac{u}{5}+\frac{u-(-2u)}{5}=i$$

$$\frac{4}{5}u=i$$

$$R_{ab}=\frac{u}{i}=\frac{5}{4}\Omega$$

（b）外加电源法：

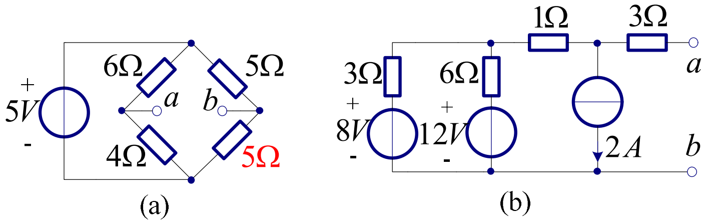


$$u=2i-6u+\frac{2\times1}{2+1}\times i$$

$$7u=\frac{8}{3}i$$

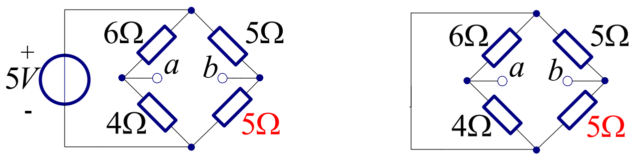
$$R_{ab}=\frac{u}{i}=\frac{8}{21}\Omega$$

2-20 求题图 2-20 所示电路 ab 端的戴维南等效电路。



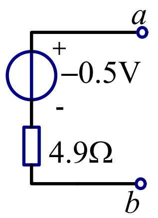
题图 2-20

解：（a）

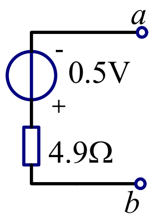


首先求开路电压：$u_{ab}=\dfrac{4}{4+6}\times 5-\dfrac{5}{5+5}\times 5=-0.5V$

然后求等效电阻：$R_{ab}=\dfrac{4\times 6}{4+6}+\dfrac{5\times 5}{5+5}=4.9\Omega$

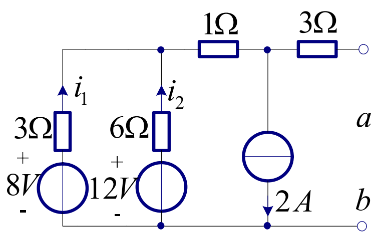


或

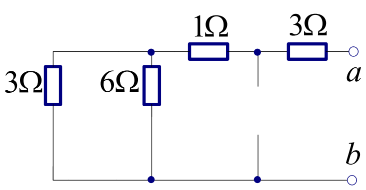


所以戴维南电路为：

（b）首先求开路电压：

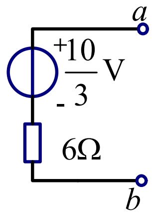


$$\left.\begin{aligned}&i_1+i_2=2\\&-8+3i_1-6i_2+12=0\end{aligned}\right\}\Rightarrow\left\{\begin{aligned}&i_1=\frac{8}{9}A\\&i_2=\frac{10}{9}A\end{aligned}\right.,\quad u_{ab}=-1\times 2-6i_2+12=\frac{10}{3}V$$

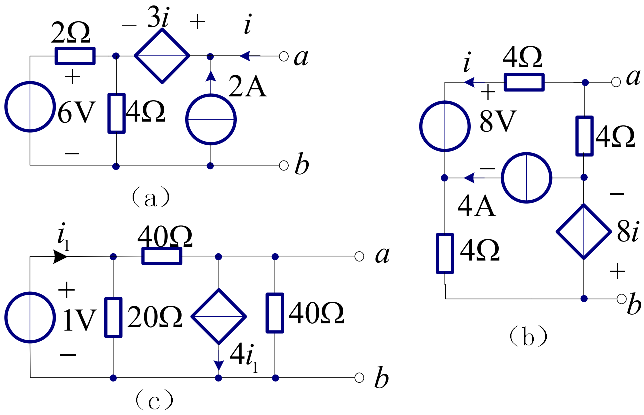


然后求等效电阻：$R_{ab}=\dfrac{3\times 6}{3+6}+1+3=6\Omega$

所以戴维南电路为：

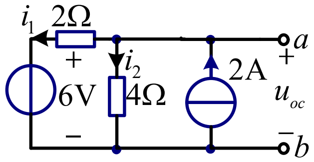


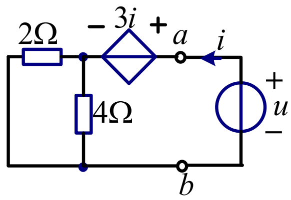
2-21 求题图 2-21 所示电路中 ab 端的戴维南等效电路。



题图 2-21

解：（a）首先求开路电压

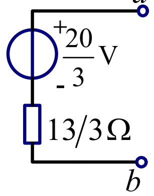




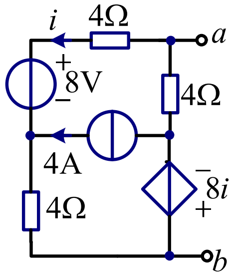
如左图所示：$i_1+i_2=2,\quad 2i_1+6=4i_2 \Rightarrow i_2=\dfrac{5}{3}\text{A} \Rightarrow u_{oc}=4i_2=\dfrac{20}{3}\text{V}$

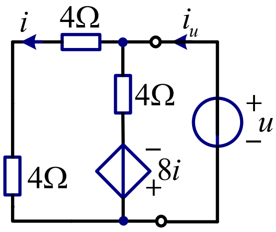
然后求等效电阻，如右图所示：$u=3i+\dfrac{2\times 4}{2+4}\times i=\dfrac{13}{3}i \Rightarrow R_{eq}=\dfrac{u}{i}=\dfrac{13}{3}\Omega$

所以戴维南等效电路为：



（b）首先求开路电压





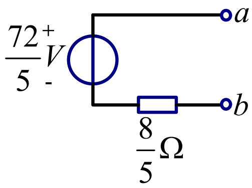
如左图所示：$4i+4i+8+4\times(4+i)+8i=0 \quad \Rightarrow i=-\dfrac{6}{5}\text{A}$

所以$u_{oc}=-4i-8i=\dfrac{72}{5}\text{V}$

然后求等效电阻，如右图所示：$i=\dfrac{u}{4+4}=\dfrac{u}{8}$

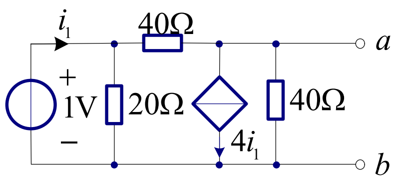
$u=4\times(i_u-i)-8i=4i_u-12i=4i_u-12\times\dfrac{u}{8}$

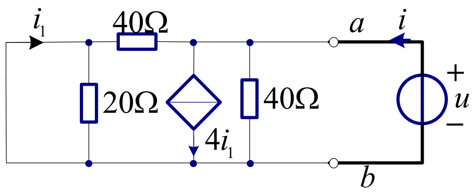
$\dfrac{5}{2}u=4i_u \Rightarrow R_{eq}=\dfrac{u}{i_u}=\dfrac{8}{5}\Omega$



所以戴维南等效电路为：

（c）首先求开路电压

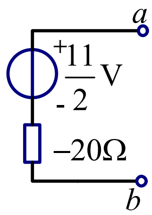




如左图所示：$i_1-\dfrac{1}{20}-4i_1-\dfrac{u_{oc}}{40}=0$，$u_{oc}=1-(i_1-\dfrac{1}{20})\times 40 \quad \Rightarrow u_{oc}=\dfrac{11}{2}\text{V}$

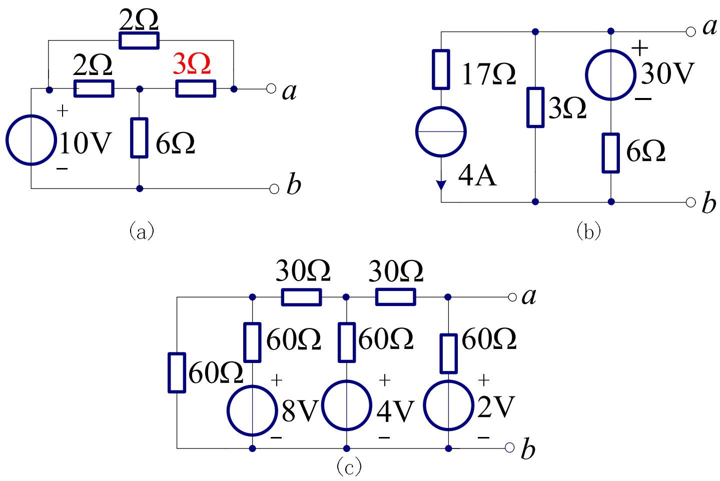
然后求等效电阻，如右图所示：$u=-40i_1$，$\quad i-\dfrac{u}{40}-4i_1+i_1=0$，

$\Rightarrow i+\dfrac{1}{20}u=0$，$\quad \Rightarrow R_{eq}=\dfrac{u}{i}=-20\Omega$



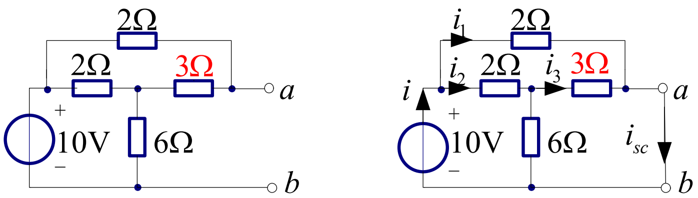
所以戴维南等效电路为：

2-22 求题图 2-22 所示电路中 ab 端的诺顿等效电路。



题图 2-22

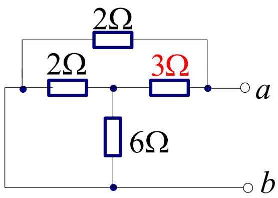
解：（a）首先求短路电流



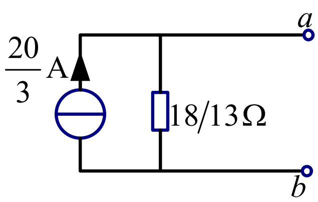
如右图所示：$i = \dfrac{10}{2//(2+3//6)} = \dfrac{15}{2}A$

$$i_1 = \frac{(2+3//6)}{2+(2+3//6)}i = \frac{4}{6}\times\frac{15}{2}A = 5A,\quad i_2 = \frac{2}{2+(2+3//6)}i = \frac{2}{6}\times\frac{15}{2}A = \frac{5}{2}A$$

$$i_3 = \frac{6}{3+6}i_2 = \frac{6}{9}\times\frac{5}{2}A = \frac{5}{3}A,\quad i_{sc} = i_1 + i_3 = \frac{20}{3}A$$

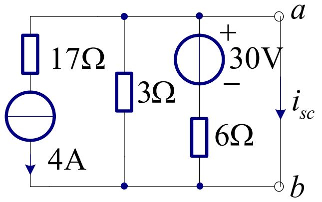


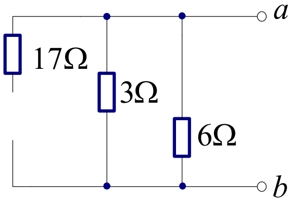
然后求等效电阻：$R_{eq} = 2//(3+2//6) = \dfrac{18}{13}\Omega$



所以诺顿等效电路为：

（b）



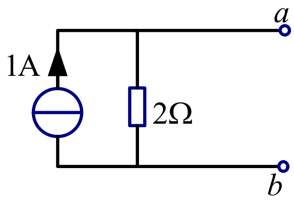


首先求短路电流，如左图所示：

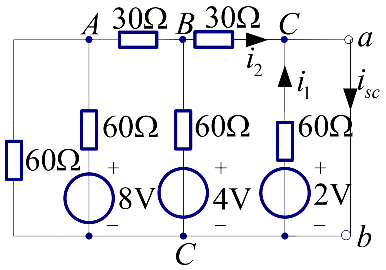
$$i_{sc}=\frac{30}{6}-4=1A$$

然后求等效电阻，如右图所示： $R_{eq}=3//6=2\Omega$

所以诺顿等效电路为：



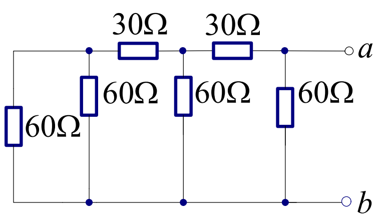
（c）



首先求短路电流，如左图所示，有三个节点，设节点 C 为参考节点，节点 A 和 B 的节点电压为u_A,u_{B3}，节点电压方程为：:

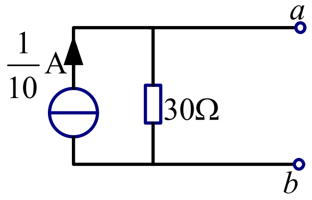
$$\begin{cases}(\frac{1}{60}+\frac{1}{60}+\frac{1}{30})u_A-\frac{1}{30}u_B=\frac{8}{60}\\ -\frac{1}{30}u_A+(\frac{1}{60}+\frac{1}{30}+\frac{1}{30})u_B=\frac{4}{60}\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}u_A=3V\\ u_B=2V\end{cases}，$$

$$\begin{cases}i_2=\frac{1}{30}u_B\\ 60i_1-2=0\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}i_1=\frac{1}{30}A\\ i_2=\frac{1}{15}A\end{cases}，\text{所以有}\ i_{sc}=i_2+i_1=\frac{1}{30}+\frac{1}{15}=\frac{1}{10}A$$

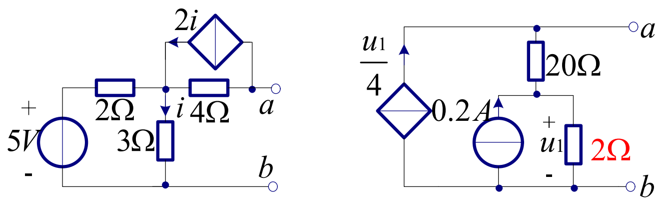


然后求等效电阻，如右图所示： $R_{eq}=(((60//60)+30)//60+30)//60=30\Omega$

所以诺顿等效电路为：



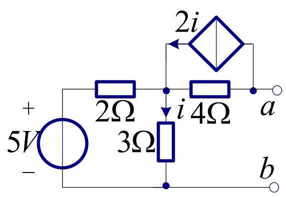
2-23 求题图 2-23 所示电路 ab 端的戴维南和诺顿等效电路，若 ab 端接入 10Ω 电阻，求电流 i_{ab} 。

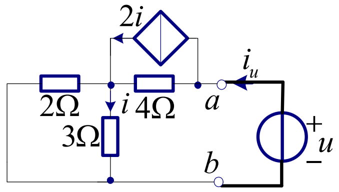


(a) (b)

题图 2-23

解：（a）首先求开路电压

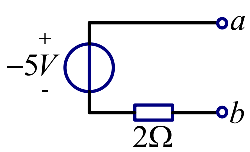


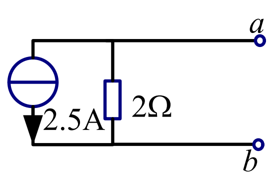


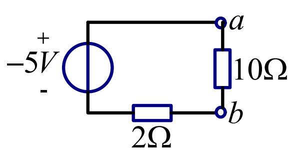
如左图所示： $i=\dfrac{5}{3+2}=1A\ \Rightarrow u_{ab}=-2i\times4+3i=-5V$

然后求等效电阻，如右图所示： $\begin{cases}u=4\times(i_u-2i)+3i\\ i=\dfrac{2}{3+2}i_u\end{cases}$ ， $u=2i_u\Rightarrow R_{eq}=\dfrac{u}{i_u}=2\Omega$

所以戴维南等效电路和诺顿等效电路为：

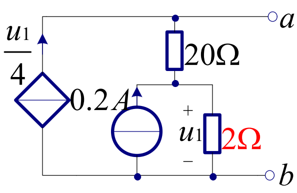


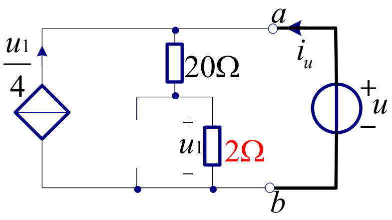




$i_{ab}=-\dfrac{5}{12}A$

（b）首先求开路电压

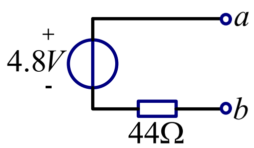


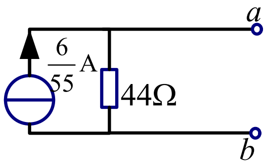


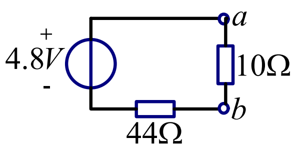
如左图所示：$\frac{u_1}{4}+0.2=\frac{u_1}{2}$， $u_1=0.8V \quad \Rightarrow u_{ab}=\frac{u_1}{4}\times 20+u_1=6u_1=4.8V$

然后求等效电阻，如右图所示：$\begin{cases} u=11u_1 \\ i_u+\frac{u_1}{4}=\frac{u_1}{2} \end{cases}$， $u=44i_u \Rightarrow R_{eq}=\frac{u}{i_u}=44\Omega$

所以戴维南等效电路和诺顿等效电路为：

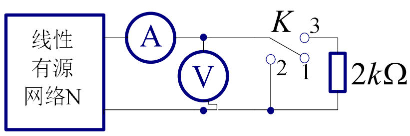






$i_{ab}=\frac{4}{45}A$

2-24 电路如题图 2-24 所示，当开关在 1 的位置，电压表读数为$50V$，K在位置 2，电流表读数为$20mA$，K若打向位置 3，电压表和电流表读数为多少？



题图 2-24

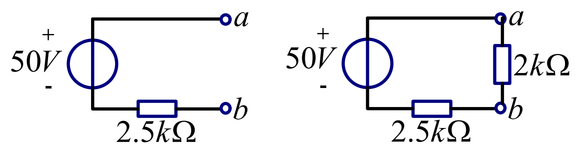
解：当开关在 1 的位置，电压表读数为$50V$，说明开路电压$u_{oc}=50V$

K在位置 2，电流表读数为$20mA$，说明短路电流$i_{sc}=20mA$

则线性由源网络 N 的等效电阻为

$$R_{eq}=\frac{u_{oc}}{i_{sc}}=\frac{50}{0.02}=2.5k\Omega$$

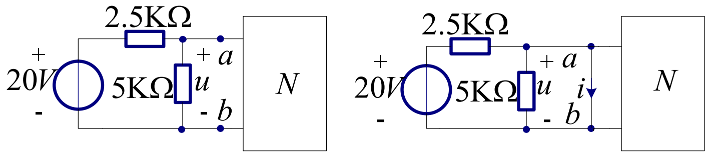
所以戴维南等效电路为：



$$i_{ab}=\frac{50}{2.5+2}mA=\frac{100}{9}mA\ ,\quad u_{ab}=2i_{ab}=\frac{200}{9}V$$

所以K若打向位置 3，电压表读数为$\frac{200}{9}V$，电流表读数为$\frac{100}{9}mA$。

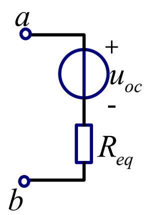
2-25 已知如题图 2-25（a）所示电路中，电压$u=12.5V$；当ab间短路，如题图 2-25（b）所示电流$i=10mA$。求网络 N 的戴维南等效电路。



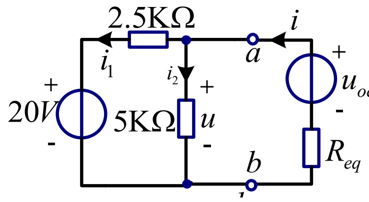
（a）　　　　(b)

题图 2-25

解：设网络 N 的戴维南等效电路为：



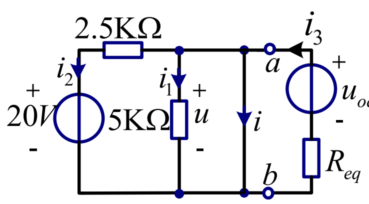
如题图 2-25（a）所示电路，电压$u=12.5V$，即：



$$i_2=\frac{u}{5}=\frac{12.5}{5}=2.5\text{mA}\ ,\quad i_1=\frac{u-20}{2.5}=\frac{12.5-20}{2.5}=-3mA\ ,\quad i=i_1+i_2=-0.5\text{mA}\ ,$$

所以有：$u_{oc}+0.5R_{eq}=12.5$

当ab间短路，如题图 2-25（b）所示电流$i=10mA$，即：

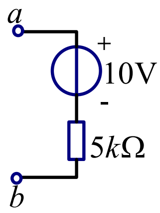


$i_1 = 0$， $i_2 = \dfrac{-20}{2.5} = -8\text{mA}$， $i_3 = i_1 + i_2 + i = 0 - 8 + 10 = 2\text{mA}$，

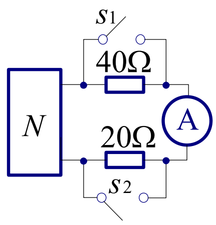
所以有： $u_{oc} - 2R_{eq} = 0$

$$\begin{cases} u_{oc} + 0.5R_{eq} = 12.5 \\ u_{oc} - 2R_{eq} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} u_{oc} = 10V \\ R_{eq} = 5k\Omega \end{cases}$$

所以网络 N 的戴维南等效电路为：

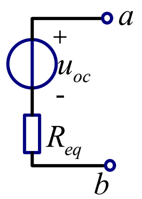


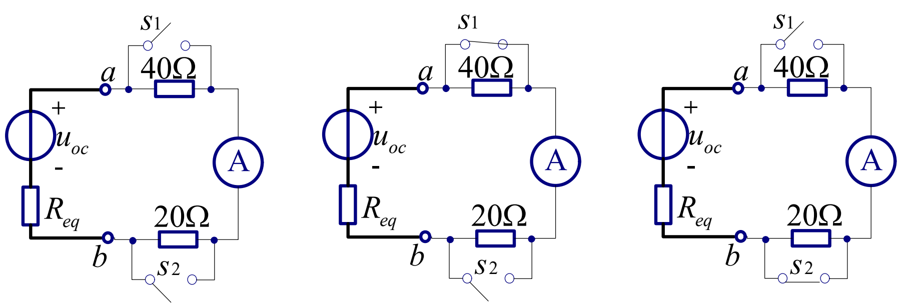
2-26 如题图 2-26 所示，N 为线性含源网络，已知开关 S_1S_2 断开电流表读数为 $1.2A$，当 S_1 闭合 S_2 断开，电流表为 3A，求 S_1 断开 S_2 闭合时电流表读数。



题图 2-26

解：设网络 N 的戴维南等效电路为：





开关 S_1S_2 断开时，电流表读数为 $1.2A$，如上图的左图所示，有：

$$u_{oc}=(R_{eq}+40+20)\times 1.2$$

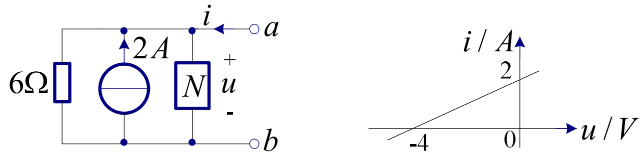
当 S_1 闭合 S_2 断开，电流表为 3A，如上图的中间的图所示，有：

$$u_{oc}=(R_{eq}+20)\times 3$$

所以可以得到： $R_{eq}=\dfrac{20}{3}\Omega$， $u_{oc}=80V$

当 S_1 断开 S_2 闭合时，如上图的右图所示，电流表读数为 $\dfrac{u_{oc}}{R_{eq}+40}=\dfrac{12}{7}A$。

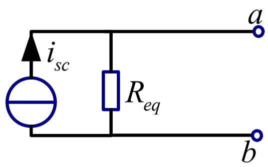
2-27 电路如题图 2-27（a）所示，其 ab 端的 VCR 如图（b）所示，求网络 N 的戴维南等效电路。



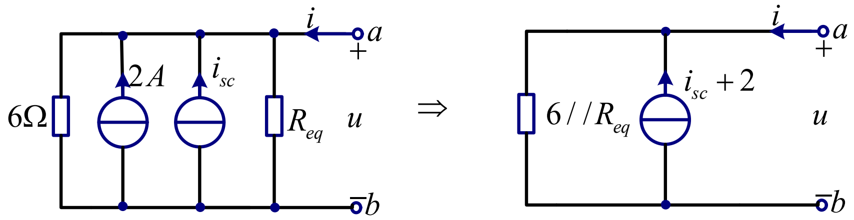
(a) (b)

题图 2-27

解： 设网络 N 的诺顿等效电路为：



，所以电路为：

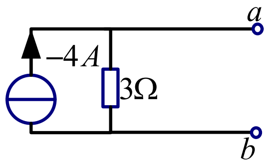


所以有： $u=\dfrac{6R_{eq}}{6+R_{eq}}\times(i+i_{sc}+2)=\dfrac{6R_{eq}}{6+R_{eq}}\times i+\dfrac{6R_{eq}}{6+R_{eq}}\times(i_{sc}+2)$

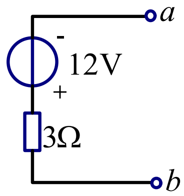
由其 ab 端的 VCR，可以得到： $u=2i-4$

$$\begin{cases}\dfrac{6R_{eq}}{6+R_{eq}}=2\\[2ex]\dfrac{6R_{eq}}{6+R_{eq}}\times(i_{sc}+2)=-4\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}R_{eq}=3\Omega\\ i_{sc}=-4A\end{cases}$$

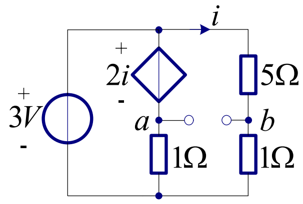
设网络 N 的诺顿等效电路为：



所以网络 N 的戴维南等效电路为：

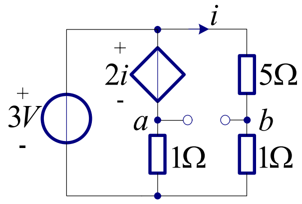


2-28 题图 2-28 所示电路中，ab之间需接入多大电阻R，才能使电阻电流为ab的短路电流i_{ab}的一半？此时R获得多大功率？



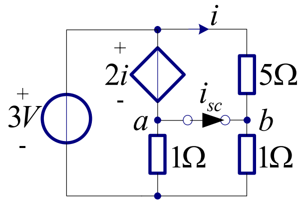
题图 2-28

解：先求 ab 端电路的戴维南等效电路。先求开路电压，如下图所示：

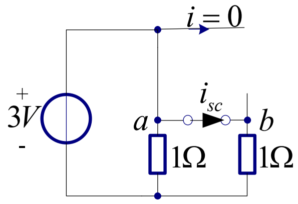


$i=\dfrac{3}{5+1}=0.5A$，所以有$u_{oc}=u_{ab}=-2i+5i=3i=1.5V$。

然后求等效电阻，采用短路电流法，如下图所示：

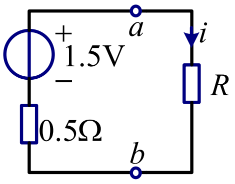


，$2i=5i\Rightarrow i=0$，所以有



$$i_{sc}=\frac{3}{1}=3A\quad\Rightarrow R_{eq}=\frac{u_{oc}}{i_{sc}}=\frac{1.5}{3}=0.5\Omega$$

所以本题电路可以等效为：

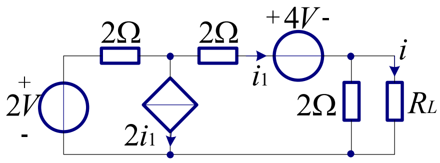


若 R 的电阻电流为 ab 的短路电流 i_{ab} 的一半，即：$i=\dfrac{1.5}{0.5+R}=\dfrac{i_{sc}}{2}=1.5A$

$\Rightarrow R=0.5\Omega$

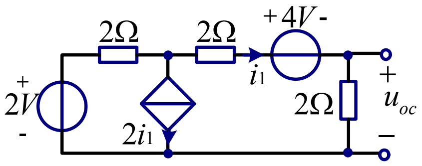
当 $R=R_{eq}=0.5\Omega$ 时，功率为：$P_{\max}=\dfrac{{u_{oc}}^2}{4R_{eq}}=\dfrac{(1.5)^2}{4\times0.5}=\dfrac{9}{8}\mathrm{W}$。

2-29 题图 2-29 所示电路中 $R_L=0,\infty$ 时，分别求电流 i；R_L 为何值时可获得最大功率，此时功率为多少。



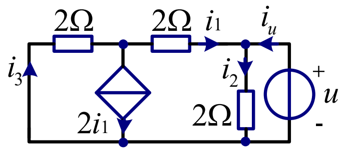
题图 2-29

解：先求除了 R_L 的左边电路的戴维南等效电路。先求开路电压，如下图所示：



$2i_1+4+2i_1+2\times(i_1+2i_1)=2$，$i_1=-\dfrac{1}{5}\mathrm{A}$，所以有 $u_{oc}=2i_1=-\dfrac{2}{5}\mathrm{V}$。

然后求等效电阻，采用外加电源法，如下图所示：

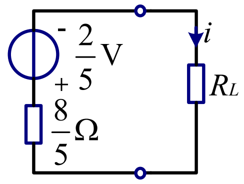


$i_2=\dfrac{u}{2}$，$i_1=i_2-i_u=\dfrac{u}{2}-i_u$，$i_3=3i_1=\dfrac{3u}{2}-3i_u$

$2i_3+2i_1+u=0$，所以有 $2i_3+2i_1+u=3u-6i_u+u-2i_u+u=5u-8i_u=0$，

$$\Rightarrow R_{eq}=\frac{u}{i_u}=\frac{8}{5}\Omega$$

所以本题电路可以等效为：

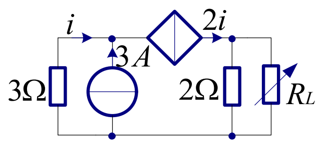


$$R_L=0\Rightarrow i=-\frac{2}{5}\Big/\frac{8}{5}=-\frac{1}{4}\text{A}$$

$$R_L=\infty\Rightarrow i=0$$

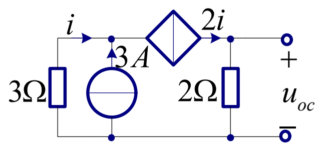
当 $R_L=R_{eq}=\frac{8}{5}\Omega$ 时可获得最大功率，此时功率为：$P_{\max}=\frac{u_{oc}{}^2}{4R_{eq}}=\frac{\left(-\frac{2}{5}\right)^2}{4\times\frac{8}{5}}=\frac{1}{40}\text{W}$ 。

2-30 题图2-30所示电路中，求 $R_L=?$ 时获得最大功率，并求功率值为多少？



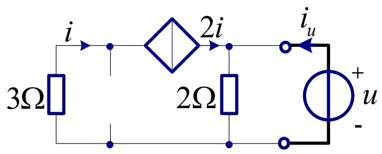
题图 2-30

解：先求除了 R_L 的左边电路的戴维南等效电路。先求开路电压，如下图所示：



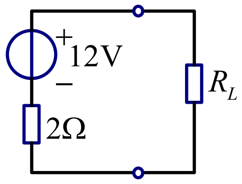
$i+3=2i\Rightarrow i=3A$，所以有 $u_{oc}=2\times 2i=12\text{V}$ 。

然后求等效电阻，采用外加电源法，如下图所示：



$i=2i\Rightarrow i=0$， $\therefore R_{eq}=\frac{u}{i_u}=2\Omega$

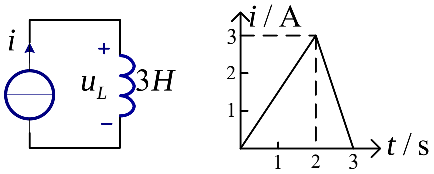
所以本题电路可以等效为：



当$R_L = R_{eq} = 2\Omega$时可获得最大功率，此时功率为：$P_{\max} = \frac{u_{oc}{}^2}{4R_{eq}} = \frac{(12)^2}{4\times 2} = 18\mathrm{W}$。

第三章 动态电路的时域分析

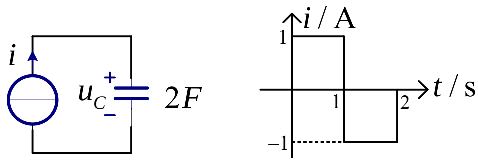
3-1 电路和电流源的波形如题图 3-1 所示，若电感无初始储能，试写出 $u_L(t)$ 的表达式。



题图 3-1

解：
$$i_L(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ 3t/2 & 0\le t<2\\ -3t+9 & 2\le t<3\\ 0 & 3\le t\end{cases},\quad u_L(t)=L\frac{di_L(t)}{dt}=\begin{cases}0 & t<0\\ 9/2 & 0\le t<2\\ -9 & 2\le t<3\\ 0 & 3\le t\end{cases}$$

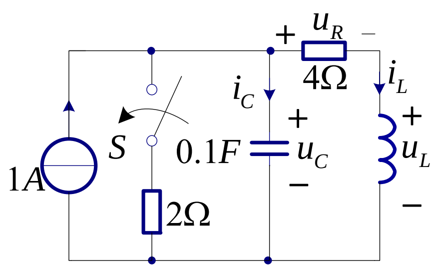
3-2 电路和电流源的波形如题图 3-2 所示，若电容无初始储能，试写出 $u_C(t)$ 的表达式。



题图 3-2

解：
$$i_C(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ 1 & 0\le t<1\\ -1 & 1\le t<2\\ 0 & 2\le t\end{cases},\quad u_C(t)=\frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t}i_L(\tau)d\tau=\begin{cases}0 & t<0\\ t/2 & 0\le t<1\\ 1-t/2 & 1\le t<2\\ 0 & 2\le t\end{cases}$$

3-3 根据题图 3-3 所示的电路，$\boldsymbol{t=0}$ 时开关 S 闭合，求初始值 $\boldsymbol{u_R(0^+)}$、$\boldsymbol{i_c(0^+)}$、$\boldsymbol{i_L(0^+)}$ 及 $\boldsymbol{u_L(0^+)}$。



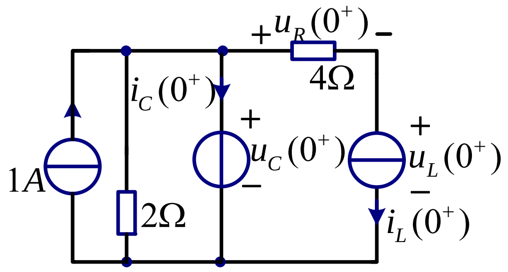
题图 3-3

解：$t=0$时，开关闭合。

$t=0^-$时开关未闭合，电感短路，电容开路：$u_C(0^-)=4\times1=4\text{V}$，$i_L(0^-)=1\text{A}$。

由换路定则，有：$u_C(0^+)=u_C(0^-)=4\text{V}$，$i_L(0^+)=i_L(0^-)=1\text{A}$。

画出开关闭合后的0^+等效电路，如下图所示：

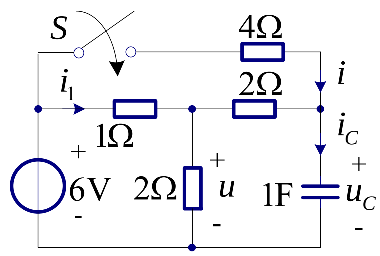


$u_R(0^+)=4i_L(0^+)=4\text{V}$

$i_C(0^+)=1-i_L(0^+)-\dfrac{u_C(0^+)}{2}=-2\text{A}$

$u_L(0^+)=u_C(0^+)-u_R(0^+)=0\text{V}$

3-4　根据题图 3-4 所示的电路，$t=0$时开关 S 闭合，求初始值$i(0^+)$、$u(0^+)$、$i_C(0^+)$及$i_1(0^+)$。



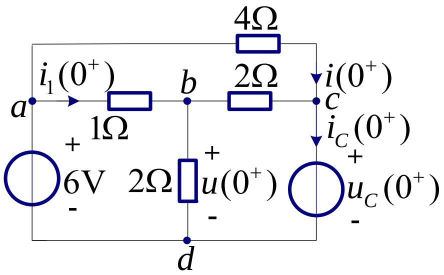
题图 3-4

解：$t=0$时，开关 S 闭合。

$t=0^-$时开关 S 未闭合，电容开路：$u_C(0^-)=\dfrac{2}{2+1}\times6=4\text{V}$。

由换路定则，有：$u_C(0^+)=u_C(0^-)=4\text{V}$。

画出开关闭合后的0^+等效电路，如下图所示：



d 为参考节点，a、b、c 点的节点电压为 u_a, u_b, u_c，列写节点电压方程：

$$u_a(0^+) = 6V\ ,\quad u_c(0^+) = u_C(0^+) = 4V\ ,$$

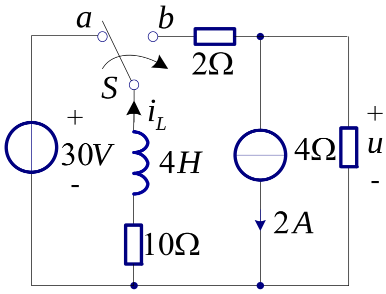
$$-\frac{1}{1}\times u_a(0^+) + (\frac{1}{2}+\frac{1}{2}+\frac{1}{1})\times u_b(0^+) - \frac{1}{2}\times u_c(0^+) = 0$$

$$u_b(0^+) = 4V$$

所以有：$u(0^+) = u_b(0^+) = 4V$，$i_1(0^+) = \dfrac{u_a(0^+) - u_b(0^+)}{1} = 2A$，

$$i(0^+) = \frac{u_a(0^+) - u_c(0^+)}{4} = 0.5A\ ,\quad i_C(0^+) = i(0^+) + \frac{u_b(0^+) - u_c(0^+)}{2} = 0.5A$$

3-5　根据题图 3-5 所示的电路，$t=0$ 时开关 S 由 a 打向 b，求初始值 $i_L(0^+)$、$u(0^+)$。



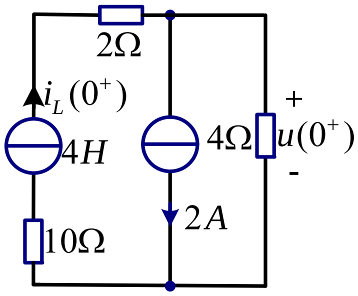
题图 3-5

解：$t=0$ 时，开关由 a 打向 b。

$t=0^-$ 时开关在 a，电感短路：$i_L(0^-) = -30/10 = -3$A 。

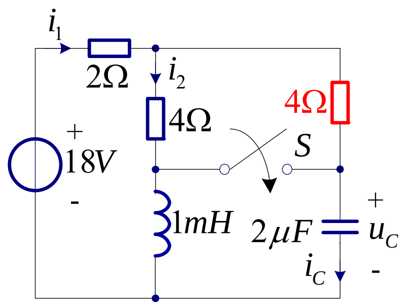
由换路定则，有：$i_L(0^+) = i_L(0^-) = -3$A 。

画出开关在 b 后的 0^+ 等效电路，如下图所示：



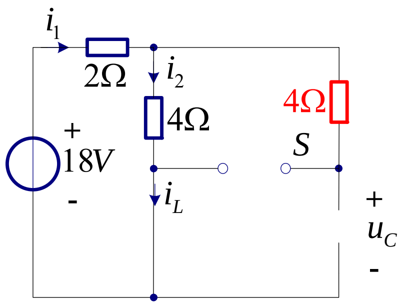
$u(0^+)=4\times(i_L(0^+)-2)=-20\text{V}$

3-6　根据题图 3-6 所示的电路，$t=0$时开关S闭合，求初始值$i_1(0^+)$、$i_2(0^+)$、$u_C(0^+)$。



题图 3-6

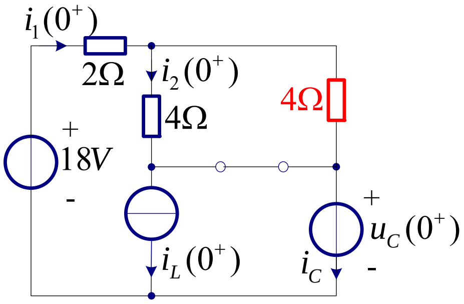
解：$t=0$时，开关闭合。$t=0^-$时开关未闭合，电感短路，电容开路：



$u_C(0^-)=\dfrac{4}{4+2}\times 18=12\text{V}$，$i_L(0^-)=\dfrac{18}{2+4}=3\text{A}$。

由换路定则，有：$u_C(0^+)=u_C(0^-)=12\text{V}$，$i_L(0^+)=i_L(0^-)=3\text{A}$。

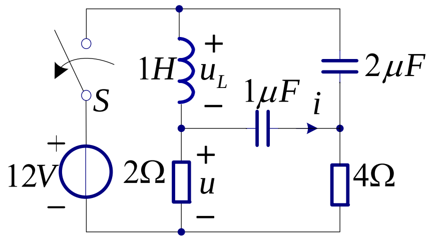
画出开关闭合后的0^+等效电路，如下图所示：



$i_1(0^+)=\dfrac{18-u_C(0^+)}{2+4//4}=1.5A$，

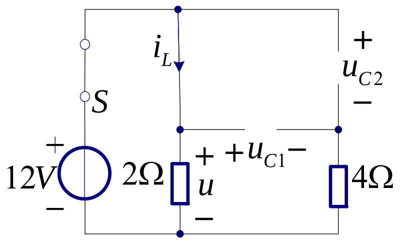
$i_2(0^+)=\dfrac{4}{4+4}i_1(0^+)=0.75\text{A}$

3-7　根据题图 3-7 所示的电路，$t=0$时开关S断开，求初始值$i(0^+)$、$u_L(0^+)$、$u(0^+)$。



题图 3-7

解：$t=0$时，开关断开。$t=0^-$时开关闭合，电感短路，电容开路：

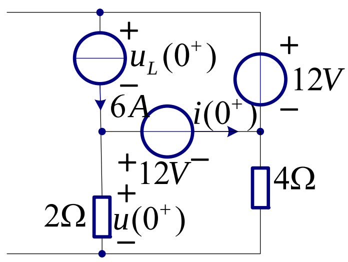


$u_{C1}(0^-)=u_{C2}(0^-)=12\text{V}$，$i_L(0^-)=\dfrac{12}{2}=6\text{A}$。

由换路定则，有：$u_{C1}(0^+)=u_{C1}(0^-)=12\text{V}$，$u_{C2}(0^+)=u_{C2}(0^-)=12\text{V}$，

$i_L(0^+)=i_L(0^-)=6\text{A}$。

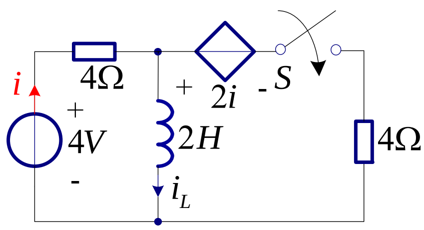
画出开关闭合后的0^+等效电路，如下图所示：



$$u(0^+)=\frac{2u_{C1}(0^+)}{2+4}=4V\text{，}\quad i(0^+)=i_L(0^+)-\frac{u(0^+)}{2}=4\text{A}\text{，}$$

$$u_L(0^+)=u_{C2}(0^+)-u_{C1}(0^+)=0V$$

3-8　根据题图 3-8 所示的电路，$t=0$时开关S闭合，求初始值$i(0^+)$、$i_L(0^+)$和时常数τ。

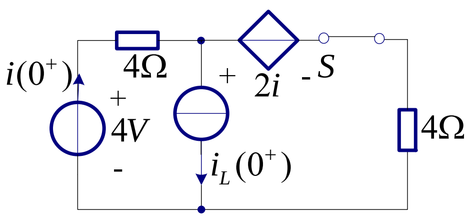


题图 3-8

解：$t=0$时，开关 S 闭合。

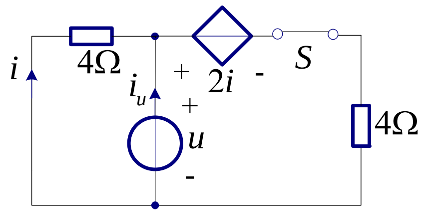
$t=0^-$时开关未闭合，电感短路：$i_L(0^-)=\frac{4}{4}=1\text{A}$。

由换路定则，有：$i_L(0^+)=i_L(0^-)=1\text{A}$。



$$-4+4i(0^+)+2i(0^+)+4\times[i(0^+)-i_L(0^+)]=0\Rightarrow i(0^+)=0.8A$$

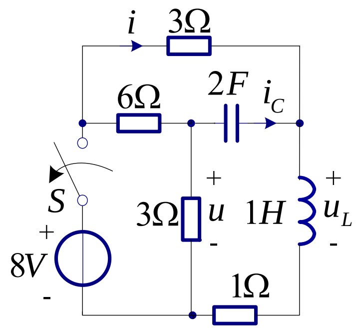
求时间常数：



采用外加电源法求等效电阻：

$$\begin{cases} i+i_u=\dfrac{u-2i}{4} \\ i=-\dfrac{u}{4} \end{cases} \Rightarrow i_u=\frac{5u}{8}，\quad R_{eq}=\frac{u}{i_u}=\frac{8}{5}\Omega，所以时间常数\tau=L/R_{eq}=\frac{5}{4}s$$

3-9　根据题图3-9所示的电路，$t=0$时开关S断开，求初始值$i(0^+)$、$u(0^+)$、$i_C(0^+)$、$u_L(0^+)$。



题图 3-9

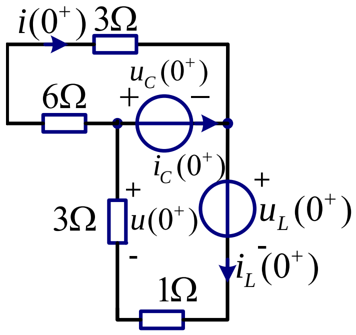
解：$t=0$时，开关闭合。

$t=0^-$时开关未闭合，电感短路，电容开路：$u_C(0^-)=\dfrac{3}{6+3}\times 8-\dfrac{1}{3+1}\times 8=\dfrac{2}{3}\text{V}$，

$i_L(0^-)=8/(1+3)=2\text{A}$。

由换路定则，有：$u_C(0^+)=u_C(0^-)=\dfrac{2}{3}\text{V}$，$i_L(0^+)=i_L(0^-)=2\text{A}$。

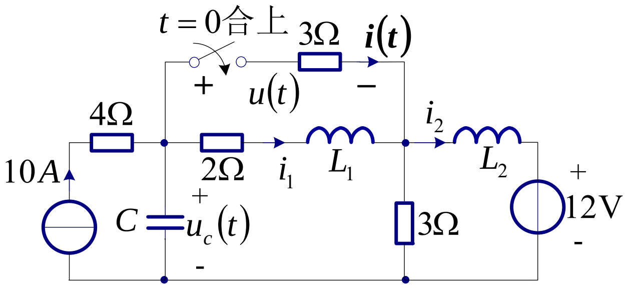
画出开关闭合后的0^+等效电路，如下图所示：



$\boldsymbol{i}(\mathbf{0}^+) = \boldsymbol{u}_C(\mathbf{0}^+)/(\mathbf{3}+\mathbf{6}) = \mathbf{2}/\mathbf{27}\,\mathrm{A}$， $\boldsymbol{u}(\mathbf{0}^+) = -\mathbf{3}\boldsymbol{i}_L(\mathbf{0}^+) = -\mathbf{6}\mathrm{V}$

$\boldsymbol{i}_C(\mathbf{0}^+) = \boldsymbol{i}_L(\mathbf{0}^+) - \boldsymbol{i}(\mathbf{0}^+) = \mathbf{52}/\mathbf{2}\,\mathrm{A}$， $\boldsymbol{u}_L(\mathbf{0}^+) = -\boldsymbol{u}_C(\mathbf{0}^+) - (\mathbf{3}+\mathbf{1})\times \boldsymbol{i}_L(\mathbf{0}^+) = -\mathbf{26}/\mathbf{3}\,\mathrm{V}$

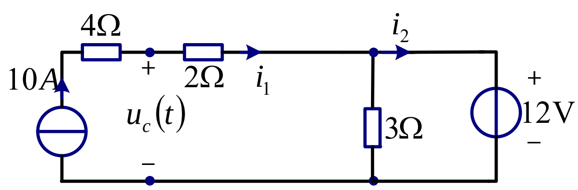
3-10　如题图 3-10 所示电路，$t<0$ 电路已处于稳态，$t=0$ 合上开关。试求初始值 $i_2(0^+)$，$u_C(0^+)$ 和 $u(0^+)$。



题图 3-10

解：$\boldsymbol{t}=\mathbf{0}$ 时，开关闭合。

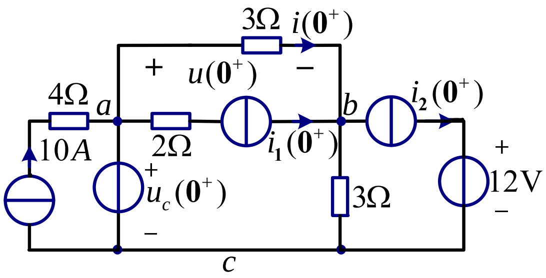
$\boldsymbol{t}=\mathbf{0}^-$ 时开关未闭合，电感短路，电容开路：



$\boldsymbol{i}_1(\mathbf{0}^-) = \mathbf{10}\mathrm{A}$， $\boldsymbol{i}_2(\mathbf{0}^-) = \mathbf{10} - \mathbf{12}/\mathbf{3} = \mathbf{6}\mathrm{A}$， $\boldsymbol{u}_C(\mathbf{0}^-) = \mathbf{2}\times\mathbf{10}+\mathbf{12} = \mathbf{32}\mathrm{A}$ 。

由换路定则，有：$\boldsymbol{u}_C(\mathbf{0}^+) = \boldsymbol{u}_C(\mathbf{0}^-) = \mathbf{32}\mathrm{V}$，$\boldsymbol{i}_1(\mathbf{0}^+) = \boldsymbol{i}_1(\mathbf{0}^-) = \mathbf{10}\mathrm{A}$，$\boldsymbol{i}_2(\mathbf{0}^+) = \boldsymbol{i}_2(\mathbf{0}^-) = \mathbf{6}\mathrm{A}$ 。

画出开关闭合后的 $\mathbf{0}^+$ 等效电路，如下图所示：

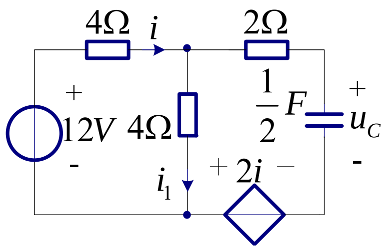


c 为参考节点，a、b 点节点电压为 u_a, u_b，列写节点电压方程：

$u_a = u_C(0^+) = 32\text{V}$， $(\frac{1}{3}+\frac{1}{3})u_b + (-\frac{1}{3})u_a = i_1(0^+) - i_2(0^+)$

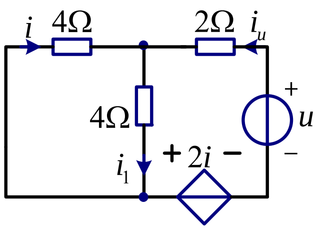
$u_b = [u_a + 3i_1(0^+) - 3i_2(0^+)]/2 = 22\text{V}$， $u(0^+) = u_a - u_b = 10\text{V}$

3-11　根据题图 3-11 所示的电路，求电路时间常数 τ 。



题图 3-11

解：求电路 ab 端的左侧电路的等效电阻，采用外加电源法。

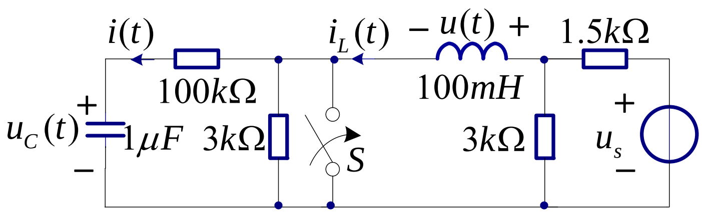


$i = -i_u/2$， $u = (2+\frac{4}{2})\times i_u + 2i = 3i_u$， $R_{eq} = \frac{u}{i_u} = 3\Omega$

$\tau = R_{eq}C = 3\times\frac{1}{2} = \frac{3}{2}s$

3-12　根据题图 3-12 所示的电路， $t=0$ 时开关 S 闭合，开关闭合前 $u_s = 60V$，

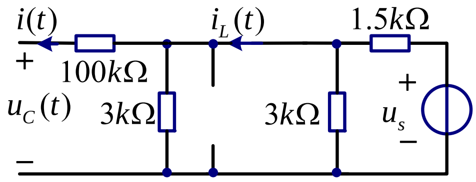
开关闭合后$u_s=0V$，求$i_L(0^+)$，$u_C(0^+)$，并求出$t\ge 0$以后的$u_C(t)$和$u(t)$。



题图 3-12

解：$t=0$时，开关闭合。

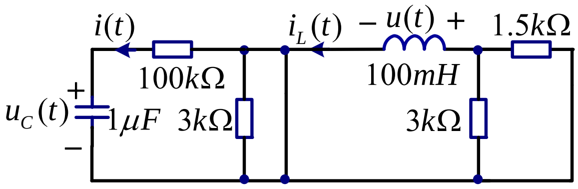
$t=0^-$时开关未闭合，电感短路，电容开路：



$$i_L(0^-)=\frac{60}{1.5+3/2}\times\frac{1}{2}=10m\text{A}\ ,\quad u_C(0^-)=3i_L(0^-)=30\text{V}\ 。$$

由换路定则，有：$u_C(0^+)=u_C(0^-)=30\text{V}$，$i_L(0^+)=i_L(0^-)=10m\text{A}$。

开关闭合后电路分为两部分：



$$R_{Ceq}=100k\Omega\ ,\quad \tau_C=R_{Ceq}C=100\times10^3\times10^{-6}=0.1s$$

$$R_{Leq}=\frac{3\times1.5}{3+1.5}=1k\Omega\ ,\quad \tau_L=\frac{L}{R_{Leq}}=\frac{100\times10^{-3}}{10^3}=10^{-4}s$$

$t\ge 0$时电路没有外加激励，所以为零输入响应。

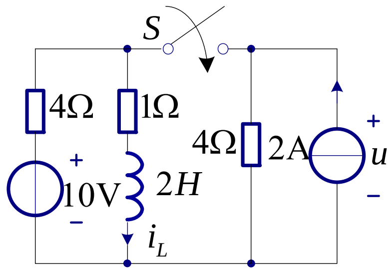
$$u_C(0^+)=30\text{V}\ ,\quad i_L(0^+)=10m\text{A}$$

$$u_C(t)=u_C(0^+)e^{-\frac{t}{\tau_C}}=30e^{-10t}\text{V},\quad t\ge 0^+$$

$$i_L(t)=i_L(0^+)e^{-\frac{t}{\tau_L}}=10e^{-10^4t}\text{mA},\quad t\ge 0^+$$

$$u(t)=-i_L(t)\times\frac{3\times1.5}{3+1.5}=-10e^{-10^4t}\text{mA}\times1\text{k}\Omega=-10e^{-10^4t}\text{V},\quad t\ge 0^+$$

3-13　根据题图 3-13 所示的电路，$t=0$ 时开关 S 闭合，求 $t\geq 0$ 以后的 $i_L(t)$ 和电压 $u(t)$。

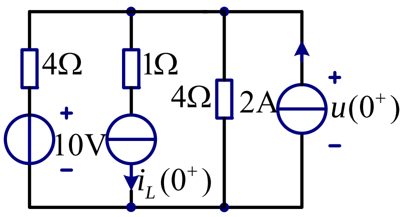


题图 3-13

解：$\boldsymbol{t=0}$ 时，开关 S 闭合。

$\boldsymbol{t=0^-}$ 时开关未闭合，电感短路：$\boldsymbol{i_L(0^-)=\dfrac{10}{4+1}=2}\text{A}$。

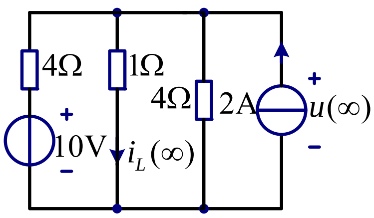
由换路定则，有：$\boldsymbol{i_L(0^+)=i_L(0^-)=2}\text{A}$。



节点电压法：$\boldsymbol{(\dfrac{1}{4}+\dfrac{1}{4})u(0^+)=\dfrac{10}{4}-i_L(0^+)+2\Rightarrow u(0^+)=5}\text{V}$

求时间常数：$\boldsymbol{R_{eq}=4//4+1=3\Omega}$，$\boldsymbol{\tau=L/R_{eq}=\dfrac{2}{3}s}$

画出∞ 时刻等效电路。



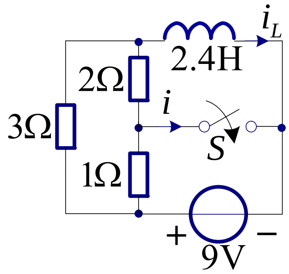
由节点电压法：$\boldsymbol{(\dfrac{1}{4}+\dfrac{1}{4}+1)u(\infty)=\dfrac{10}{4}+2\Rightarrow u(\infty)=3}\text{V}$

$$i_L(\infty)=\frac{u(\infty)}{1}=3\text{A}$$

$$i_L(t)=i_L(\infty)+[i_L(0^+)-i_L(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau}t}=3+[2-3]e^{-\frac{3}{2}t}=(3-e^{-\frac{3}{2}t})\text{A}，\ t\ge 0^+$$

$$u(t)=u(\infty)+[u(0^+)-u(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau}t}=3+[5-3]e^{-\frac{3}{2}t}=(3+2e^{-\frac{3}{2}t})\text{V}，\ t\ge 0^+$$

3-14　根据题图 3-14 所示的电路，$t=0$ 时开关 S 闭合，求 $t\ge 0$ 以后的 $i(t)$。

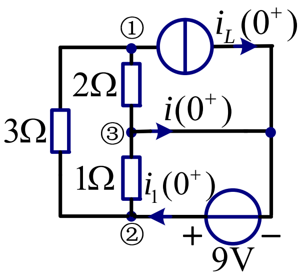


题图 3-14

解：$t=0$ 时，开关 S 闭合。

$t=0^-$ 时开关未闭合，电感短路：$i_L(0^-)=\dfrac{9}{3//(2+1)}=6\text{A}$。

由换路定则，有：$i_L(0^+)=i_L(0^-)=6\text{A}$。



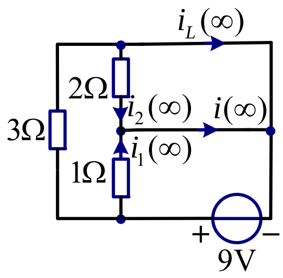
节点电压法，参考节点③，节点①②的节点电压分别为 u_1,u_2，节点电压方程为：

$$(\frac{1}{2}+\frac{1}{3})u_1(0^+)+(-\frac{1}{3})u_2(0^+)=-i_L(0^+)=-6，\ u_2(0^+)=9\text{V}$$

$$\Rightarrow u_1(0^+)=-\frac{18}{5}\text{V}，\ \Rightarrow i(0^+)=\frac{u_1(0^+)}{2}+\frac{u_2(0^+)}{1}=\frac{36}{5}\text{A}$$

求时间常数：$R_{eq}=2//3=\dfrac{6}{5}\Omega$，$\tau=L/R_{eq}=2s$

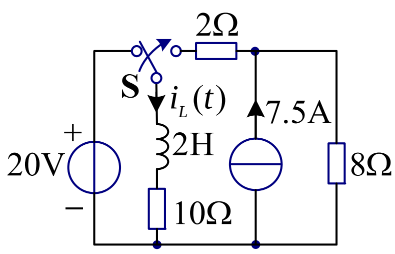
画出∞ 时刻等效电路：



$i_1(\infty)=\dfrac{9}{1}=9\text{A}$， $i_2(\infty)=0\text{A}$， $i(\infty)=i_1(\infty)+i_2(\infty)=9\text{A}$

$i(t)=i(\infty)+[i(0^+)-i(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau}t}=9+(\dfrac{36}{5}-9)e^{-\frac{1}{2}t}=(9-\dfrac{9}{5}e^{-\frac{1}{2}t})\text{A}$，$t\geq 0^+$

3-15　题图 3-15 中所示电路，$t=0$时开关S由 1 打向 2，求$t\geq 0$以后电流$i_L(t)$的全响应，零输入响应，零状态响应。



题图 3-15

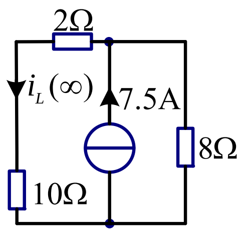
解：$t=0$时，开关 S 从 1 打到 2。

$t=0^-$时开关在 1 处，电感短路：$i_L(0^-)=20/10=2\text{A}$ 。

由换路定则，有：$i_L(0^+)=i_L(0^-)=2\text{A}$ 。

求时间常数：$R_{eq}=2+8+10=20\Omega$， $\tau=L/R_{eq}=2/20=0.1s$

画出∞ 时刻等效电路：



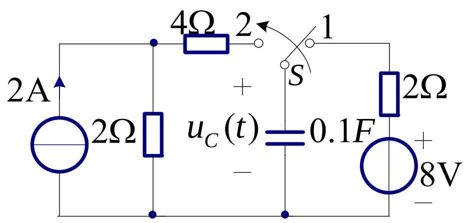
$i_L(\infty)=\dfrac{8}{8+12}\times 7.5=3\text{A}$

t≥0 时，零输入响应为：$i_{Lz.i.r}(t)=i_L(0^+)e^{-\frac{1}{\tau}t}=2e^{-10t}\text{A}$，$t\geq 0^+$

零状态响应为：$i_{Lz.s.r}(t)=i_L(\infty)(1-e^{-\frac{1}{\tau}t})=3(1-e^{-10t})$A，$t\ge 0^+$

全响应为：$i_L(t)=i_{Lz.i.r}(t)+i_{Lz.s.r}(t)=(3-e^{-10t})$A，$t\ge 0^+$

3-16　题图 3-16 所示电路，$t=0$时开关S由 1 打向 2，求$t\ge 0$以后电压$u_C(t)$的全响应，零输入响应，零状态响应。



题图 3-16

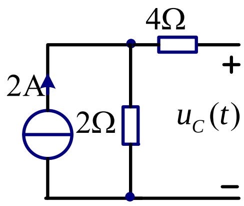
解：$t=0$时，开关 S 从 1 打到 2。

$t=0^-$时开关在 1 处，电容开路：$u_C(0^-)=8$V 。

由换路定则，有：$u_C(0^+)=u_C(0^-)=8$V 。

求时间常数：$R_{eq}=2+4=6\Omega$，$\tau=R_{eq}C=0.6s$

画出∞ 时刻等效电路：



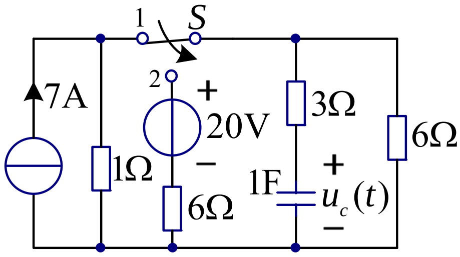
$u_C(\infty)=2\times 2=4$V

t≥0 时，零输入响应为：$u_{Cz.i.r}(t)=u_C(0^+)e^{-\frac{1}{\tau}t}=8e^{-\frac{5}{3}t}$V，$t\ge 0^+$

零状态响应为：$u_{Cz.s.r}(t)=u_C(\infty)(1-e^{-\frac{1}{\tau}t})=4(1-e^{-\frac{5}{3}t})$V，$t\ge 0^+$

全响应为：$u_C(t)=u_{Cz.i.r}(t)+u_{Cz.s.r}(t)=(4+4e^{-\frac{5}{3}t})$V，$t\ge 0^+$

3-17　题图 3-17 所示电路，$t=0$时开关S由 1 打向 2，求$t\ge 0$以后电压$u_C(t)$的全响应，零输入响应，零状态响应。



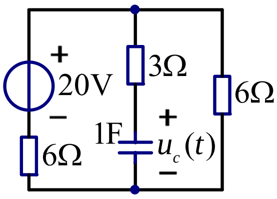
题图 3-17

解：$t=0$时，开关 S 从 1 打到 2。

$t=0^-$时开关 S 在 2 处，电容开路，有：$u_C(0^-)=7\times\frac{6\times1}{6+1}=6\text{V}$。

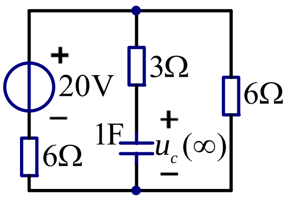
由换路定则，有：$u_C(0^+)=u_C(0^-)=6\text{V}$

求时间常数：



$R_{eq}=3+6//6=6\Omega$，$\tau=R_{eq}C=6s$

画出∞ 时刻等效电路：



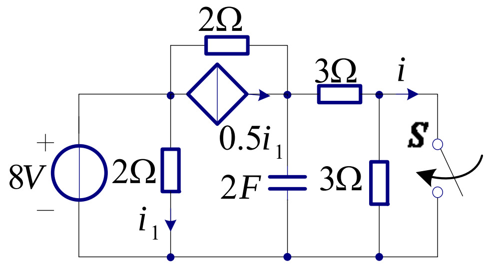
$$u_C(\infty)=20\times\frac{6}{6+6}=10\text{V}$$

t≥0 时，零输入响应为：$u_{Cz.i.r}(t)=u_C(0^+)e^{-\frac{1}{\tau}t}=6e^{-\frac{1}{6}t}\text{V}$，$t\geq0^+$

零状态响应为：$u_{Cz.s.r}(t)=u_C(\infty)(1-e^{-\frac{1}{\tau}t})=10(1-e^{-\frac{1}{6}t})\text{V}$，$t\geq0^+$

全响应为：$u_C(t)=u_{Cz.i.r}(t)+u_{Cz.s.r}(t)=(10-4e^{-\frac{1}{6}t})\text{V}$，$t\geq0^+$

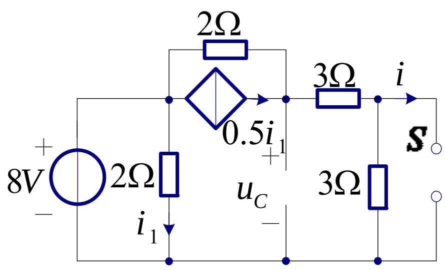
3-18 根据题图 3-18 所示的电路，$t=0$时开关S闭合，求$t\geq0$以后的电流$i(t)$的零输入响应与零状态响应。

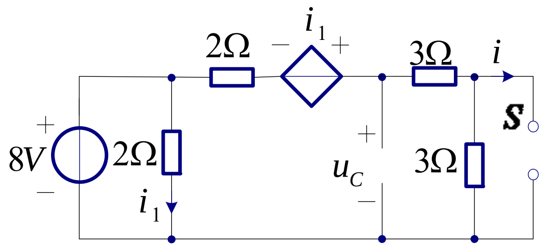


题图 3-18

解：$t=0$时，开关 S 闭合。

$t=0^-$时开关 S 打开，电容开路：

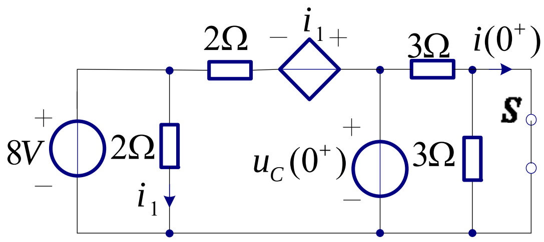




$$i_1(0^-)=\frac{8}{2}=4A\Rightarrow u_C(0^-)=\frac{3+3}{2+3+3}\times[8+i_1(0^-)]=9V\text{ 。}$$

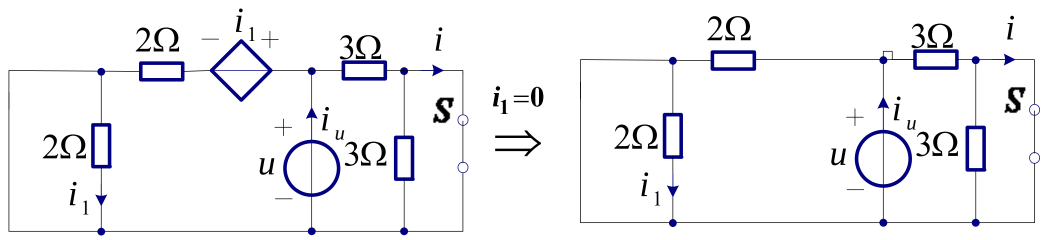
由换路定则，有：$u_C(0^+)=u_C(0^-)=9V$ 。

画出开关闭合后的0^+等效电路，如下图所示：



$$i(0^+)=\frac{u_C(0^+)}{3}=3A$$

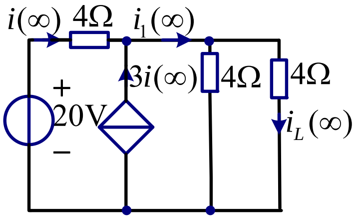
先求等效电阻，采用外加电源法：

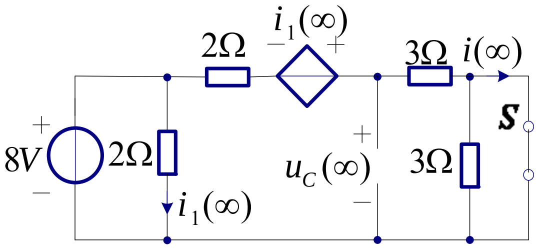


$R_{eq}=2//3=\frac{6}{5}\Omega$，

求时间常数：$\tau=R_{eq}C=\frac{12}{5}s$

画出∞ 时刻等效电路：





$i_1(\infty)=\frac{8}{2}=4A$， $8=2i(\infty)-i_1(\infty)+3i(\infty)$， $i(\infty)=\frac{12}{5}A$

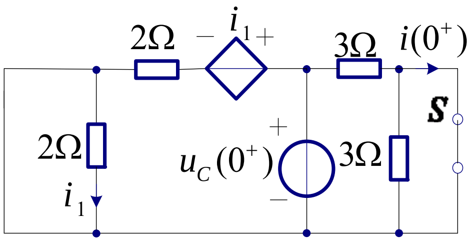
t≥0 时， 全响应为：$i(t)=i(\infty)+[i(0^+)-i(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau}t}=(\frac{12}{5}+\frac{3}{5}e^{-\frac{5}{12}t})$A，$t\geq 0^+$

下面求零输入响应：

$t=0$时，开关 S 闭合。

$t=0^-$时开关 S 打开， $u_C(0^+)=u_C(0^-)=9V$ 。

外加输入为零，画出开关闭合后的0^+等效电路，如下图所示：



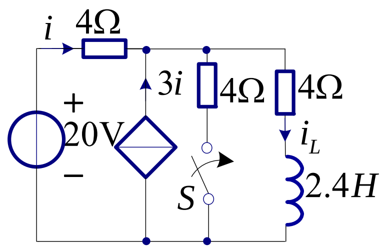
$i(0^+)=\frac{u_C(0^+)}{3}=3A$

t≥0 时，零输入响应为： $i_{z.i.r}(t)=i(0^+)e^{-\frac{1}{\tau}t}=3e^{-\frac{5}{12}t}$A，$t\geq 0^+$

零状态响应为：$i_{z.s.r}(t)=i(t)-i_{z.i.r}(t)=\frac{12}{5}(1-e^{-\frac{5}{12}t})$A，$t\geq 0^+$

3-19　电路如题图 3-19 所示，$t=0$时开关S闭合，求$t\geq 0$以后的电流$i_L(t)$的零

输入响应、零状态响应及完全响应。



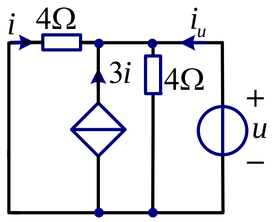
题图 3-19

解：$t=0$ 时，开关 S 闭合。

$t=0^-$ 时开关 S 打开，电感短路：$\begin{cases} i_L(0^-)=i(0^-)+3i(0^-) \\ 20=4i(0^-)+4i_L(0^-) \end{cases} \Rightarrow i_L(0^-)=4\text{A}$ 。

由换路定则，有：$i_L(0^+)=i_L(0^-)=4\text{A}$ 。

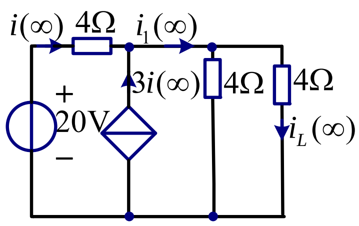
先求等效电阻，采用外加电源法：



$$u=-4i\text{，}\quad i+3i-\frac{u}{4}+i_u=0\text{，}\quad \frac{5u}{4}=i_u\text{，}\quad R_{eq}=4+\frac{u}{i_u}=4+\frac{4}{5}=\frac{24}{5}\Omega\text{，}$$

求时间常数：$\tau=L/R_{eq}=2.4\Big/\frac{24}{5}=0.5s$

画出∞ 时刻等效电路：



$$i_1(\infty)=i(\infty)+3i(\infty)\text{，}\quad 20=4i(\infty)+\frac{4\times4}{4+4}i_1(\infty)=4i(\infty)+2i_1(\infty)$$

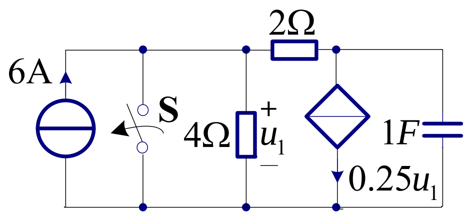
$$i_1(\infty)=\frac{20}{3}\text{A}\text{，}\quad i_L(\infty)=\frac{10}{3}\text{A}$$

t≥0 时，零输入响应为：$i_{Lz.i.r}(t)=i_L(0^+)e^{-\frac{1}{\tau}t}=4e^{-2t}\text{A}$，$t\geq 0^+$

零状态响应为：$i_{Lz.s.r}(t)=i_L(\infty)(1-e^{-\frac{1}{\tau}t})=\frac{10}{3}(1-e^{-2t})\text{A}$，$t\geq 0^+$

全响应为：$i_L(t)=i_{Lz.i.r}(t)+i_{Lz.s.r}(t)=(\frac{10}{3}+\frac{2}{3}e^{-2t})\text{A}$，$t\geq 0^+$

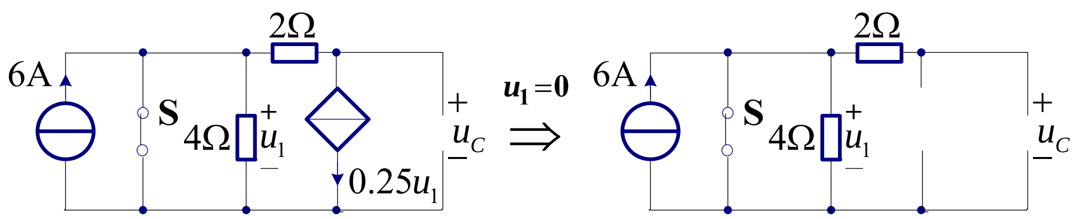
3-20　根据题图 3-20 所示的电路，$t=0$ 时开关 S 断开，求 $t\geq 0$ 以后的电压 $u_1(t)$。



题图 3-20

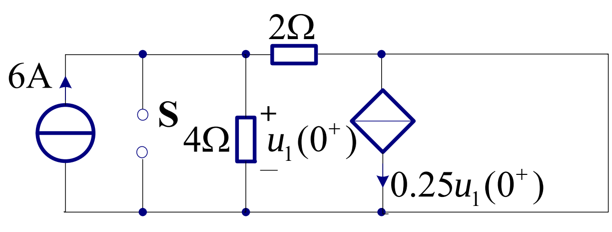
解：$t=0$ 时，开关 S 断开。

$t=0^-$ 时开关闭合，电容开路：



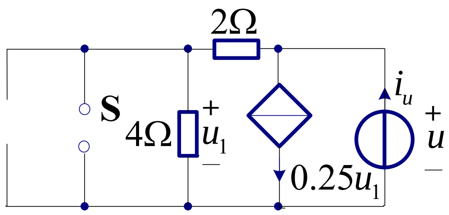
$u_C(0^-)=0$。由换路定则，有：$u_C(0^+)=u_C(0^-)=0V$ 。

画 0^+ 时刻等效电路：



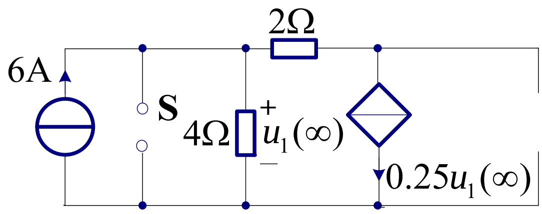
$$6=\frac{u_1(0^+)}{4}+\frac{u_1(0^+)}{2}\Rightarrow u_1(0^+)=8V$$

求时间常数：



$$\begin{cases} u_1 = \dfrac{4u}{4+2} \\ i_u = 0.25u_1 + \dfrac{u_1}{4} \end{cases} \Rightarrow i_u = \frac{u}{3}，\ 所以 R_{eq} = \frac{u}{i_u} = 3\Omega，\ \tau = R_{eq}C = 3s$$

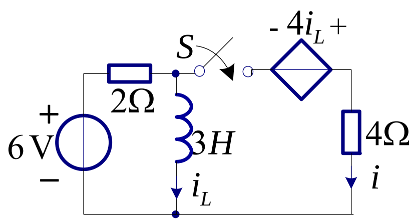
画出∞ 时刻等效电路：



$$6 = \frac{u_1(\infty)}{4} + 0.25u_1(\infty) \Rightarrow u_1(\infty) = 12V$$

$$u_1(t) = u_1(\infty) + [u_1(0^+) - u_1(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau}t} = 12 + (8-12)e^{-\frac{1}{3}t} = (12 - 4e^{-\frac{1}{3}t})\mathrm{A}，\ t \geq 0^+$$

3-21　根据题图 3-21 所示的电路，$t=0$时开关S闭合，求$t \geq 0$以后电流$i(t)$的零输入响应$i_x(t)$、零状态响应$i_f(t)$及完全响应$i(t)$。



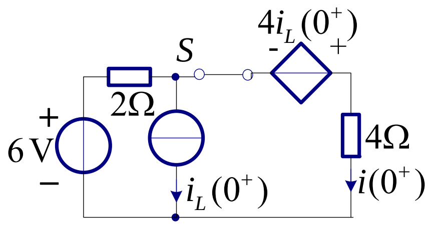
题图 3-21

解：$t=0$时，开关 S 闭合。

$t=0^-$时开关 S 打开，电感短路：$i_L(0^-) = \dfrac{6}{2} = 3\mathrm{A}$。

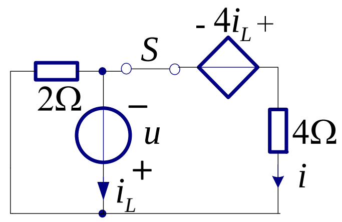
由换路定则，有：$i_L(0^+) = i_L(0^-) = 3\mathrm{A}$。

画 0^+ 时刻等效电路：



$$-6+2\times(i_L(0^+)+i(0^+))-4i_L(0^+)+4i(0^+)=0 \Rightarrow i(0^+)=2A$$

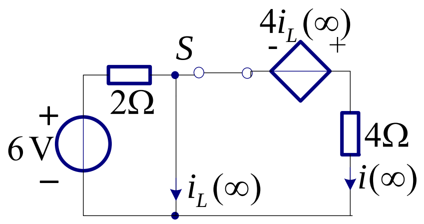
先求等效电阻，采用外加电源法：



$$\begin{cases} u=2(i_L+i) \\ 2\times(i_L+i)-4i_L+4i=0 \end{cases} \Rightarrow u=\frac{8}{3}i_L$$，所以有 $R_{eq}=\frac{u}{i_L}=\frac{8}{3}\Omega$ 。

求时间常数：$\tau=L/R_{eq}=3\Big/\frac{8}{3}=\frac{9}{8}s$

画出∞ 时刻等效电路：



$$\begin{cases} -4i_L(\infty)+4i(\infty)=0 \\ 2\times(i_L(\infty)+i(\infty))=6 \end{cases} \Rightarrow i(\infty)=1.5A$$

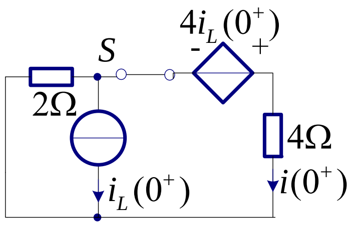
t≥0 时，全响应为：$i(t)=i(\infty)+[i(0^+)-i(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau}t}=(1.5+0.5e^{-\frac{8}{9}t})\text{A}$，$t\geq 0^+$

下面求零输入响应：

$t=0$时，开关 S 闭合。

$t=0^-$时开关 S 打开，$i_L(0^+)=i_L(0^-)=3\text{A}$ 。

画零输入下的0^+时刻等效电路：

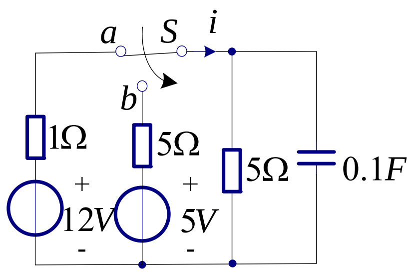


$$2\times(i_L(0^+)+i(0^+))-4i_L(0^+)+4i(0^+)=0\Rightarrow i(0^+)=1A$$

t⩾0 时，零输入响应为：$i_x(t)=i_{z.i.r}(t)=i(0^+)e^{-\frac{1}{\tau}t}=e^{-\frac{8}{9}t}$A，$t\geq 0^+$

零状态响应为：$i_f(t)=i_{z.s.r}(t)=i(t)-i_{z.i.r}(t)=1.5-0.5e^{-\frac{8}{9}t}$A，$t\geq 0^+$

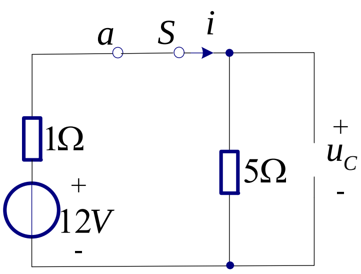
3-22　根据题图 3-22 所示的电路，$t=0$时开关S由a打向b，求$t\geq 0$以后电流$i(t)$的零输入响应、零状态响应和完全响应。



题图 3-22

解：$t=0$时，开关 S 从 a 打到 b 处。

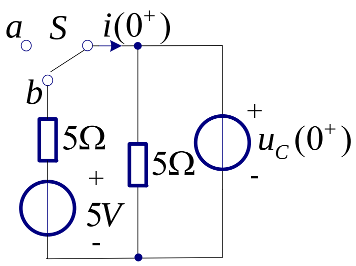
$t=0^-$时开关 S 在 a 处，电容开路：



$$u_C(0^-)=\frac{5}{5+1}\times 12=10V\text{。}$$

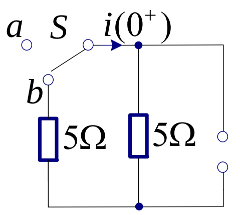
由换路定则，有：$u_C(0^+)=u_C(0^-)=10V$ 。

画 0^+ 时刻等效电路：



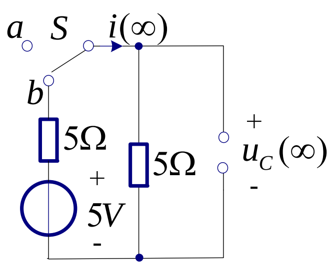
$$-5+5i(0^+)+u_C(0^+)=0 \Rightarrow i(0^+)=-1A$$

求时间常数：



$R_{eq}=5//5=2.5\Omega$， $\tau=R_{eq}C=0.25s$

画出∞ 时刻等效电路：



$$i(\infty)=\frac{5}{5+5}=0.5A$$

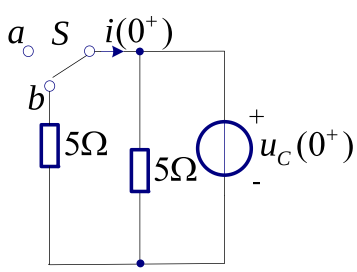
t⩾0 时，全响应为： $i(t)=i(\infty)+[i(0^+)-i(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau}t}=(0.5-1.5e^{-4t})\text{A}$， $t\geq 0^+$

下面求零输入响应：

$t=0$ 时，开关 S 从 a 打到 b 处。

$t=0^-$ 时开关 S 在 a 处， $u_C(0^+)=u_C(0^-)=10V$ 。

画零输入下的 0^+ 时刻等效电路：

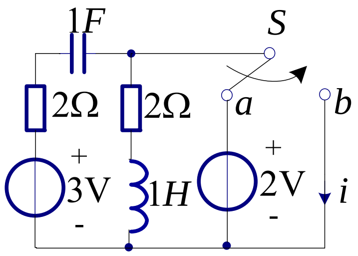


$$5i(0^+)+u_C(0^+)=0 \Rightarrow i(0^+)=-2A$$

t≥0 时，零输入响应为：$\boldsymbol{i}_{z.i.r}(\boldsymbol{t})=\boldsymbol{i}(0^{+})\boldsymbol{e}^{-\frac{1}{\tau}t}=-2\boldsymbol{e}^{-4t}\text{A}$，$\boldsymbol{t}\geq 0^{+}$

零状态响应为：$\boldsymbol{i}_{z.s.r}(\boldsymbol{t})=\boldsymbol{i}(\boldsymbol{t})-\boldsymbol{i}_{z.i.r}(\boldsymbol{t})=(0.5+0.5\boldsymbol{e}^{-4t})\text{A}$，$\boldsymbol{t}\geq 0^{+}$

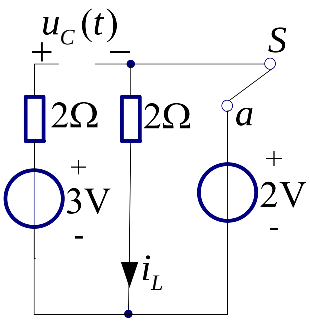
3-23　根据题图 3-23 所示的电路，$t=0$时开关S由a打向b，求$t\geq 0$以后的电流$i(t)$。



题图 3-23

解：$\boldsymbol{t}=\boldsymbol{0}$时，开关 S 由 a 打到 b。

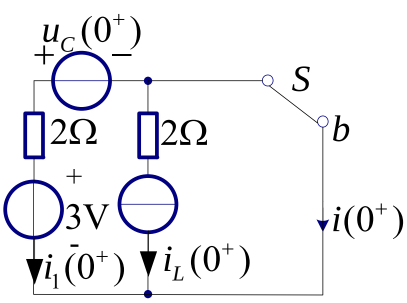
$\boldsymbol{t}=\boldsymbol{0}^{-}$时开关在 a 处，电容开路，电感短路：



$\boldsymbol{u}_C(\boldsymbol{0}^{-})=\boldsymbol{3}-\boldsymbol{2}=\boldsymbol{1V}$，$\boldsymbol{i}_L(\boldsymbol{0}^{-})=\dfrac{\boldsymbol{2}}{\boldsymbol{2}}=\boldsymbol{1A}$。

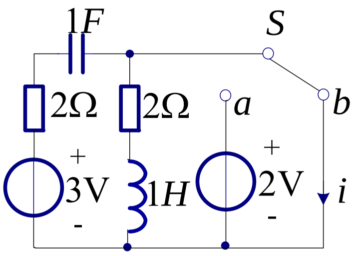
由换路定则，有：$\boldsymbol{u}_C(\boldsymbol{0}^{+})=\boldsymbol{u}_C(\boldsymbol{0}^{-})=\boldsymbol{1V}$，$\boldsymbol{i}_L(\boldsymbol{0}^{+})=\boldsymbol{i}_L(\boldsymbol{0}^{-})=\boldsymbol{1A}$。

画$\boldsymbol{0}^{+}$时刻等效电路：



$-u_C(0^+)+2i_1(0^+)+3=0 \Rightarrow i_1(0^+)=-1$

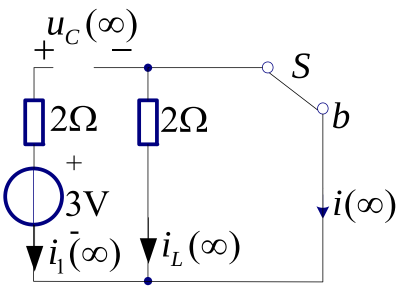
求时间常数：



$R_{Leq}=2\Omega$， $\tau_L=L/R_{Leq}=0.5s$

$R_{Ceq}=2\Omega$， $\tau_C=R_{eq}C=2s$

画出∞ 时刻等效电路：



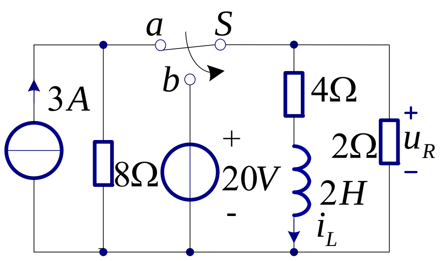
$i_1(\infty)=0$， $i_L(\infty)=0$

$i_L(t)=i_L(\infty)+[i_L(0^+)-i_L(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau_L}t}=e^{-2t}\text{A}$，$t\geq 0^+$

$i_1(t)=i_1(\infty)+[i_1(0^+)-i_1(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau_C}t}=-e^{-\frac{1}{2}t}\text{A}$，$t\geq 0^+$

$i(t)=-i_1(t)-i_L(t)=(e^{-\frac{1}{2}t}-e^{-2t})\text{A}$，$t\geq 0^+$

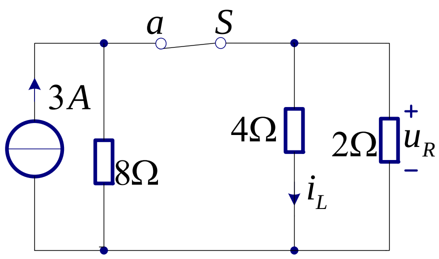
3-24　根据题图 3-24 所示的电路，$t=0$时开关S由a打向b，求$t\geq 0$以后的$i_L(t)$和$u_R(t)$。



题图 3-24

解：$t=0$ 时，开关 S 由 a 打到 b。

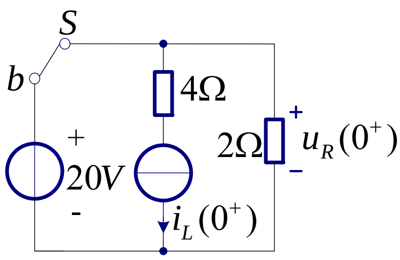
$t=0^-$ 时开关在 a 处，电感短路：



$$i_L(0^-)=\frac{\frac{1}{4}}{\frac{1}{8}+\frac{1}{4}+\frac{1}{2}}\times 3=\frac{6}{7}A\text{。}$$

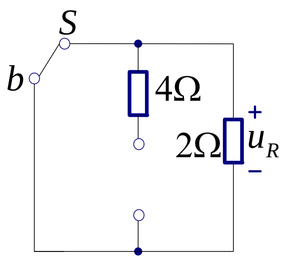
由换路定则，有：$i_L(0^+)=i_L(0^-)=\frac{6}{7}A$。

画 0^+ 时刻等效电路：



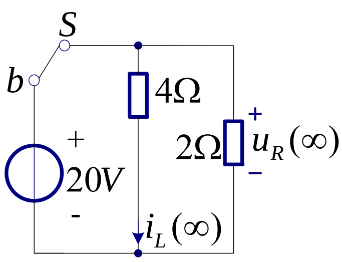
$u_R(0^+)=20V$

求时间常数：



$R_{eq}=4\Omega$， $\tau=L/R_{eq}=0.5s$

画出∞ 时刻等效电路：

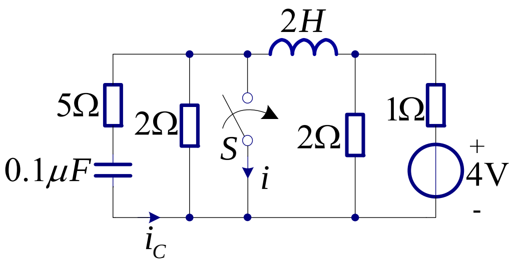


$$i_L(\infty)=\frac{20}{4}=5A，\quad u_R(\infty)=20V$$

$$i_L(t)=i_L(\infty)+[i_L(0^+)-i_L(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau}t}=5+(\frac{6}{7}-5)e^{-2t}=(5-\frac{29}{7}e^{-2t})\text{A}，\ t\geq 0^+$$

$$u_R(t)=u_R(\infty)+[u_R(0^+)-u_R(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau}t}=20+(20-20)e^{-2t}=20\text{V}，\ t\geq 0^+$$

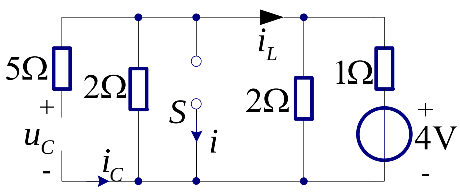
3-25　根据题图 3-25 所示的电路，$t=0$ 时开关 S 闭合，求 $t\geq 0$ 以后的 $i(t)$、$i_C(t)$。



题图 3-25

解：$t=0$ 时，开关 S 闭合。

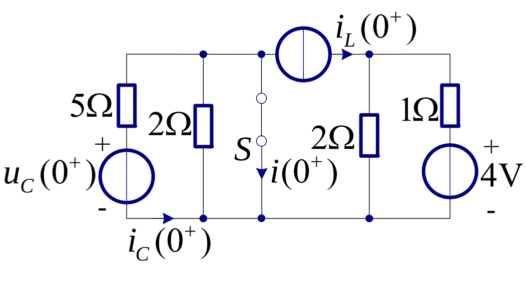
$t=0^-$ 时开关 S 打开，电容开路，电感短路：



$$u_C(0^-)=\frac{2//2}{2//2+1}\times 4=2V，\quad i_L(0^-)=-\frac{2}{2}=-1A。$$

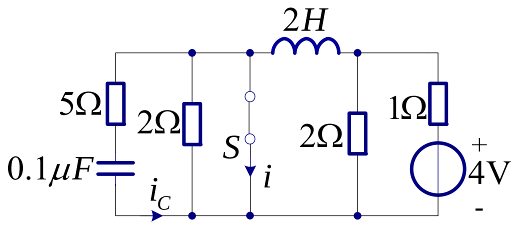
由换路定则，有：$u_C(0^+)=u_C(0^-)=2V$，$i_L(0^+)=i_L(0^-)=-1A$。

画 0^+ 时刻等效电路：



$$5i_C(0^+)+u_C(0^+)=0\Rightarrow i_C(0^+)=-\frac{2}{5}A$$

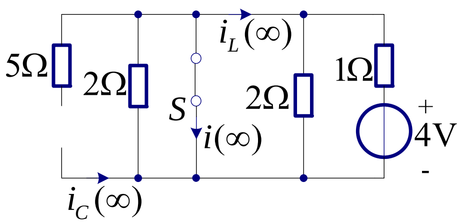
求时间常数：



$R_{Leq}=2//1=\frac{2}{3}\Omega$， $\tau_L=L/R_{Leq}=3s$

$R_{Ceq}=5\Omega$， $\tau_C=R_{eq}C=0.5\times10^{-6}s$

画出∞ 时刻等效电路：



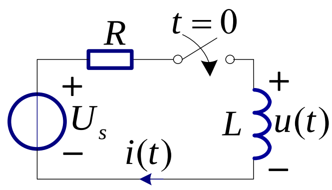
$i_C(\infty)=0$， $i_L(\infty)=-\frac{4}{1}=-4A$

$$i_L(t)=i_L(\infty)+[i_L(0^+)-i_L(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau_L}t}=-4+(-1+4)e^{-\frac{1}{3}t}=(-4+3e^{-\frac{1}{3}t})\text{A}，\ t\geq0^+$$

$$i_C(t)=i_C(\infty)+[i_C(0^+)-i_C(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau_C}t}=-\frac{2}{5}e^{-2\times10^6t}\text{A}，\ t\geq0^+$$

$$i(t)=i_C(t)+i_L(t)=(-4+3e^{-\frac{1}{3}t}-\frac{2}{5}e^{-2\times10^6t})\text{A}，\ t\geq0^+$$

3-26 若题图 3-26 所示 RL 电路的零状态响应 $i(t)=(10-10e^{-200t})A$， $t\geq0$， $u(t)=(500e^{-200t})V$， $t\geq0$，求 U_s， R， L 及时间常数 τ。



题图 3-26

解： $t=0$ 时，开关 S 闭合。

当电路再达稳态时，电感短路，有： $i(\infty)=U_s/R$

时间常数：$\tau = L/R$

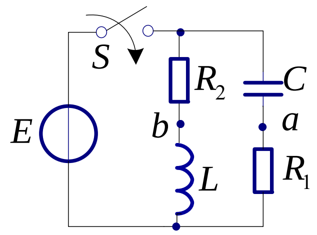
电感电流：$i(t) = i(\infty)(1-e^{-\frac{1}{\tau}t}) = \frac{U_s}{R}(1-e^{-\frac{R}{L}t})=(10-10e^{-200t})A$

电感电压：$u(t) = L\frac{di(t)}{dt} = U_s e^{-\frac{R}{L}t} = (500e^{-200t})V$

所以$U_s = 500$V， $U_s/R = 10 \Rightarrow R = 50\Omega$，

$R/L = 200 \Rightarrow L = 0.25$H， $\tau = L/R = \frac{1}{200}s$

3-27　如题图 3-27 所示电路，$t<0$无初始储能，$t=0$闭合开关，求u_{ab}。



题图 3-27

解：$t<0$时无初始储能。$t=0$时，开关 S 闭合，响应为零状态响应。

当电路再达稳态时，电容开路电感短路，有：$i_L(\infty) = E/R_2$， $u_C(\infty) = E$ 。

时间常数：$\tau_L = L/R_2$， $\tau_C = R_1C$

$i_L(t) = i_L(\infty)(1-e^{-\frac{1}{\tau_L}t}) = \frac{E}{R_2}(1-e^{-\frac{R_2}{L}t})$，$t \geq 0^+$

$u_C(t) = u_C(\infty)(1-e^{-\frac{1}{\tau_C}t}) = E(1-e^{-\frac{1}{R_1C}t})$，$t \geq 0^+$

$u_{ab}(t) = -u_C(t) + R_2 i_L(t) = -E(1-e^{-\frac{1}{R_1C}t})+E(1-e^{-\frac{R_2}{L}t})$，$t \geq 0^+$

$\Rightarrow u_{ab}(t) = E(e^{-\frac{1}{R_1C}t} - e^{-\frac{R_2}{L}t})$，$t \geq 0^+$

第四章 正弦稳态电路的分析

4-1. 写出下列正弦量的相量，列出有效值和初相位，分别画出各自的相量图。

（1）$i=-10\cos(\omega t-60^{\circ})A$

（2）$u=-10\cos 2\pi\times 10^{6}(t-0.2\times 10^{-6})V$

（3）$u=\cos 2\pi f(t+0.15T)mV$

（4）$u=7.5\cos 2\pi/T(t-0.15T)V$

解：（1）$i=-10\cos(\omega t-60^{\circ})A=10\cos(\omega t-60^{\circ}+180^{\circ})A=10\cos(\omega t+120^{\circ})A$

$\dot{\boldsymbol{I}}_{m}=10\angle 120^{\circ}\boldsymbol{A}$ 或 $\dot{\boldsymbol{I}}=5\sqrt{2}\angle 120^{\circ}\boldsymbol{A}$

有效值 $\boldsymbol{I}=5\sqrt{2}\boldsymbol{A}$，初相位 $\boldsymbol{\psi}_{i}=120^{\circ}$

（2）$u=-10\cos 2\pi\times 10^{6}(t-0.2\times 10^{-6})V=10\cos[2\pi\times 10^{6}t-0.4\pi+\pi]V=10\cos[2\pi\times 10^{6}t+0.6\pi]V$

$\dot{\boldsymbol{U}}_{m}=10\angle 108^{\circ}\boldsymbol{V}$ 或 $\dot{\boldsymbol{U}}=5\sqrt{2}\angle 108^{\circ}\boldsymbol{A}$

有效值 $\boldsymbol{U}=5\sqrt{2}\boldsymbol{A}$，初相位 $\boldsymbol{\psi}_{u}=108^{\circ}$

（3）$u=\cos 2\pi f(t+0.15T)mV=\cos[2\pi ft+0.3\pi]mV$

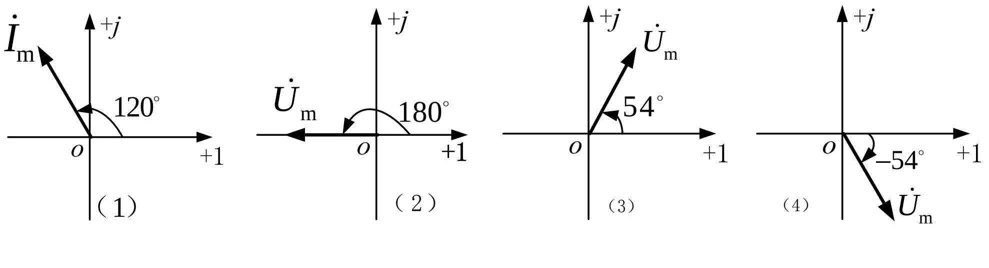
$\dot{\boldsymbol{U}}_{m}=1\angle 54^{\circ}\boldsymbol{mV}$ 或 $\dot{\boldsymbol{U}}=\dfrac{\sqrt{2}}{2}\angle 54^{\circ}\boldsymbol{mV}$

有效值 $\boldsymbol{U}=0.707\boldsymbol{mV}$，初相位 $\boldsymbol{\psi}_{u}=54^{\circ}$

（4）$u=7.5\cos 2\pi/T(t-0.15T)V=7.5\cos[2\pi t/T-0.3\pi)V$

$\dot{\boldsymbol{U}}_{m}=7.5\angle-54^{\circ}\boldsymbol{V}$ 或 $\dot{\boldsymbol{U}}=\dfrac{7.5}{\sqrt{2}}\angle-54^{\circ}\boldsymbol{A}$

有效值 $\boldsymbol{U}=\dfrac{7.5}{\sqrt{2}}\boldsymbol{V}$，初相位 $\boldsymbol{\psi}_{u}=-54^{\circ}$



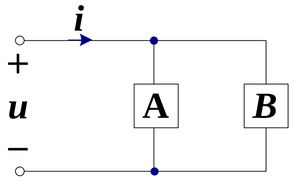
4-2. 已知$u\left(t\right)=5\cos\left(\omega t+60^{\circ}\right)V$，请写出该电压$u\left(t\right)$的相量形式$\dot{U}_m$。

解：$\dot{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{m}}=5\angle 60^{\circ}\boldsymbol{V}$

4-3. 已知电流$i\left(t\right)$的相量形式为$\dot{I}=6+\mathrm{j}8=10\angle 53.1^{\circ}$，请写出电流的时域表达式。

解：$\dot{I}_m=\sqrt{2}\dot{I}=10\sqrt{2}\angle 53.1^{\circ}$，所以$\boldsymbol{i}(\boldsymbol{t})=10\sqrt{2}\cos(\boldsymbol{\omega t}+53.1^{\circ})\boldsymbol{A}$

4-4. 题图 4-1 所示正弦交流电路，已知$u=10\cos(10t+30^{\circ})V$，$i=10\cos(10t+75^{\circ})A$，则图中 A、B 为何元件，其值多少？



题图 4-1

解：$u=10\cos(10t+30^{\circ})V\Rightarrow\dot{U}_m=10\angle 30^{\circ}$

$i=10\cos(10t+75^{\circ})A\Rightarrow\dot{I}_m=10\angle 75^{\circ}$

则导纳$Y=\dfrac{1}{Z}=\dfrac{\dot{I}_m}{\dot{U}_m}=\dfrac{10}{10}\angle(75^{\circ}-30^{\circ})=1\angle 45^{\circ}=\dfrac{\sqrt{2}}{2}+j\dfrac{\sqrt{2}}{2}$

因为导纳角为-45°电阻，所以是容性导纳。

$$Y_R=\frac{1}{R}=\frac{\sqrt{2}}{2}\Rightarrow R=\sqrt{2}\Omega$$

$$Y_C=j\omega C=j\frac{\sqrt{2}}{2},\omega=10\Rightarrow C=\frac{\sqrt{2}}{20}=0.0707F$$

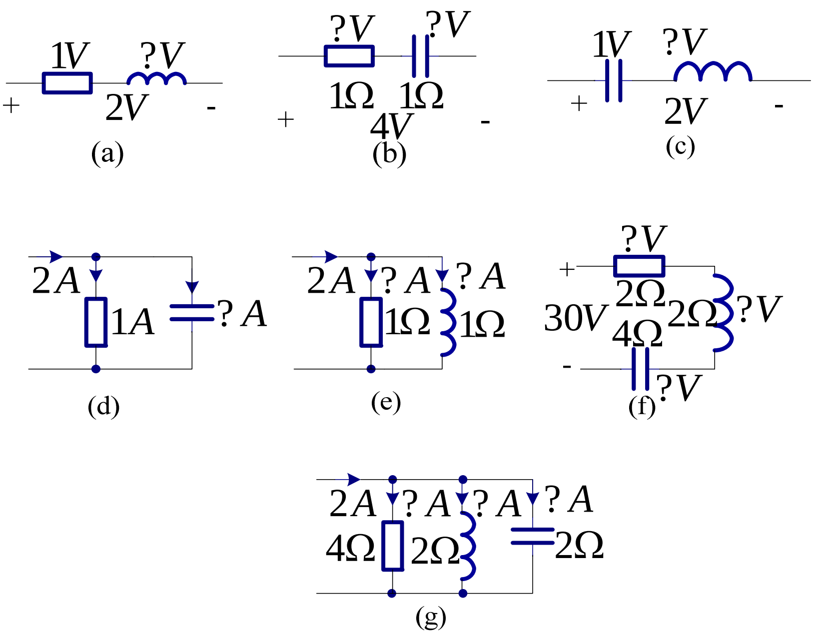
A 为$\sqrt{2}\Omega$电阻，B 为$0.0707\boldsymbol{F}$ 电容；或 A 为$0.0707\boldsymbol{F}$ 电容，B 为$\sqrt{2}\Omega$电阻。

4-5. 已知$i(t)=2\sqrt{2}\sin(\omega t+\dfrac{\pi}{6})A$请写出电流的相量形式$\dot{I}$。

解：$i(t)=2\sqrt{2}\sin(\omega t+\dfrac{\pi}{6})A=2\sqrt{2}\cos(\omega t+\dfrac{\pi}{3})A$

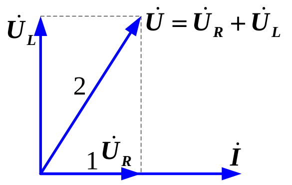
$\dot{\boldsymbol{I}}=2\angle\dfrac{\boldsymbol{\pi}}{3}\boldsymbol{A}$

4-6. 试对题图 4-2 中各个电路的问题做出答案（可借助于相量图），图中给出的电压、电流皆为有效值，待求的也是相应的有效值。



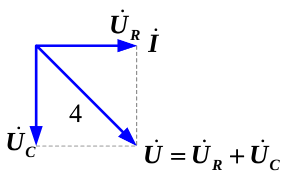
题图 4-2

解：（a）$\dot{U}=\dot{U}_R+\dot{U}_L=R\dot{I}+j\omega L\dot{I}$



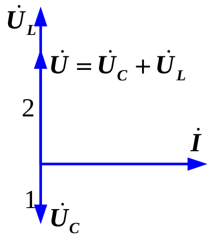
所以有$U_L=\sqrt{2^2-1^2}=\sqrt{3}V$

（b）$\dot{U}=\dot{U}_R+\dot{U}_C=R\dot{I}+\dfrac{1}{j\omega C}\dot{I}=\dot{I}-j\dot{I}$



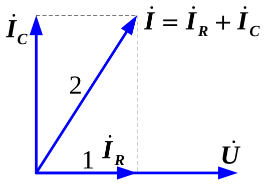
所以有$U_C=\dfrac{\sqrt{2}}{2}\times4=2\sqrt{2}V$， $U_R=\dfrac{\sqrt{2}}{2}\times4=2\sqrt{2}V$

（c）$\dot{U}=\dot{U}_C+\dot{U}_L=\dfrac{1}{j\omega C}\dot{I}+j\omega L\dot{I}$



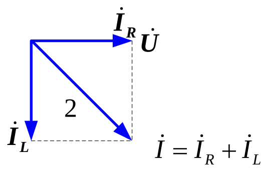
所以有$U_L=2+1=3V$

（d）$\dot{I}=\dot{I}_R+\dot{I}_C=\dfrac{\dot{U}}{R}+\dfrac{\dot{U}}{1/j\omega C}=\dfrac{\dot{U}}{R}+j\omega C\dot{U}$



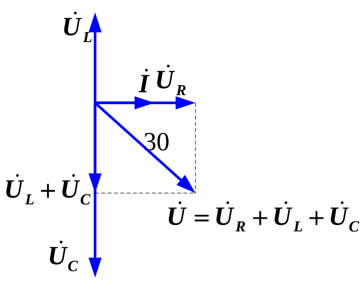
所以有$I_C=\sqrt{2^2-1^2}=\sqrt{3}A$

（e）$\dot{I}=\dot{I}_R+\dot{I}_L=\dfrac{\dot{U}}{R}+\dfrac{\dot{U}}{j\omega L}=\dot{U}-j\dot{U}$



所以有$I_L=\dfrac{\sqrt{2}}{2}\times 2=\sqrt{2}A$，$I_R=\dfrac{\sqrt{2}}{2}\times 2=\sqrt{2}A$

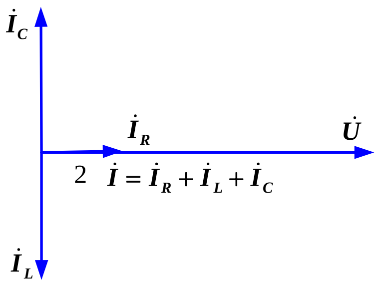
（f）$\dot{U}=\dot{U}_R+\dot{U}_L+\dot{U}_C=R\dot{I}+j\omega L\dot{I}+\dfrac{1}{j\omega C}\dot{I}=2\dot{I}+j2\dot{I}-j4\dot{I}$



所以有$U_R=\dfrac{\sqrt{2}}{2}\times 30=15\sqrt{2}V$，$U_L=\dfrac{\sqrt{2}}{2}\times 30=15\sqrt{2}V$，

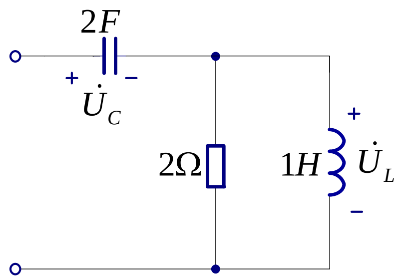
$$U_L = \frac{\sqrt{2}}{2}\times 30\times 2 = 30\sqrt{2}V$$

（g）$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_C + \dot{I}_L = \frac{\dot{U}}{R} + \frac{\dot{U}}{1/j\omega C} + \frac{\dot{U}}{j\omega L} = \frac{\dot{U}}{4} + j\frac{1}{2}\dot{U} - j\frac{\dot{U}}{2}$



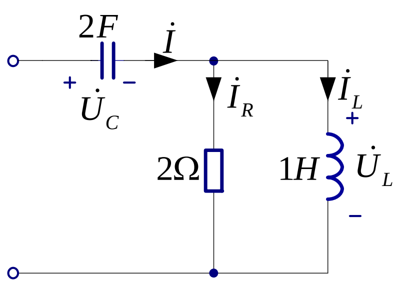
所以有 $I_R = 2A$， $I_C = 4A$， $I_L = 4A$

4-7. 电路如题图 4-3 所示，已知 $\dot{U}_L = 2\angle 0^\circ V$， $\omega = 4rad/s$，求 $\dot{U}_C$ 与 $\dot{U}_L$ 的相位差角。



题图 4-3

解：



$\dot{I}_L = \frac{\dot{U}_L}{j\omega L} = \frac{\dot{U}_L}{j4\times 1} = -j\frac{\dot{U}_L}{4}$， $\dot{I}_R = \frac{\dot{U}_L}{R} = \frac{\dot{U}_L}{2}$

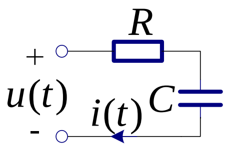
$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L = \frac{\dot{U}_L}{2} - j\frac{\dot{U}_L}{4} = (\frac{1}{2} - j\frac{1}{4})\dot{U}_L$$

$$\dot{U}_C = \frac{1}{j\omega C}\dot{I} = \frac{1}{j4\times 2}\dot{I} = \frac{1}{j8}(\frac{1}{2} - j\frac{1}{4})\dot{U}_L$$

$$\frac{\dot{U}_C}{\dot{U}_L} = \frac{1}{j8}(\frac{1}{2} - j\frac{1}{4}) = \frac{1}{32}(-1 - j2) = \frac{\sqrt{5}}{32}(-\frac{1}{\sqrt{5}} - j\frac{2}{\sqrt{5}}) = \frac{\sqrt{5}}{32}\angle -116.5^\circ$$

$\dot{U}_C$ 与 $\dot{U}_L$ 的相位差角为 -116.5°。

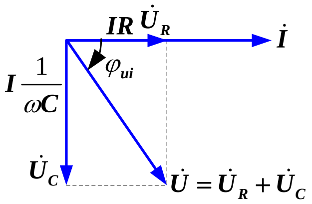
4-8. 题图 4-4 所示电路处于正弦稳态中，请判断电压 u 与电流 i 的相位超前滞后关系。



题图 4-4

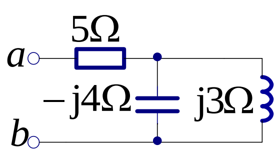
解：$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_C = R\dot{I} + \frac{1}{j\omega C}\dot{I} = (R + \frac{1}{j\omega C})\dot{I} = (R - j\frac{1}{\omega C})\dot{I}$

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R - j\frac{1}{\omega C} = \frac{U}{I}\angle\psi_u - \psi_i = \frac{U}{I}\angle\varphi_{ui}, \quad \varphi_{ui} = \arctan\frac{-1/\omega C}{R} = \arctan\frac{-1}{\omega CR}$$



所以电压 $\dot{U}$ 滞后 $\dot{I}$ $\arctan\frac{1}{\omega CR}$

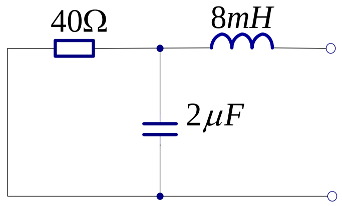
4-9. 题图 4-5 所示电路，求单口网络的输入阻抗 Z_{ab}。



题图 4-5

解：$\boldsymbol{Z_{ab}} = 5 + \frac{-\boldsymbol{j}3\times\boldsymbol{j}4}{\boldsymbol{j}3 - \boldsymbol{j}4} = (5 + \boldsymbol{j}12)\Omega$

4-10. 如题图 4-6 所示，$\omega = 10^4 rad/s$，求单口网络的输入阻抗 Z_{ab}。

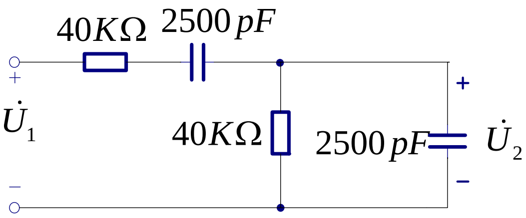


题图 4-6

解：$\boldsymbol{Z}_L = \boldsymbol{j}\omega \boldsymbol{L} = \boldsymbol{j} \times 10^4 \times 8 \times 10^{-3} = \boldsymbol{j}80\Omega$，$\boldsymbol{Z}_C = \dfrac{1}{\boldsymbol{j}\omega \boldsymbol{C}} = \dfrac{1}{\boldsymbol{j} \times 10^4 \times 2 \times 10^{-6}} = -\boldsymbol{j}50\Omega$

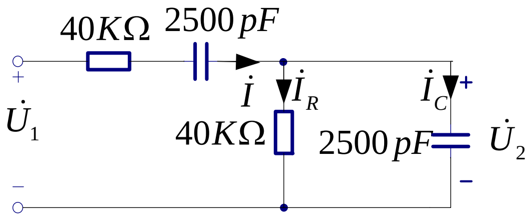
$\boldsymbol{Z}_R = 40\Omega$，所以有 $\boldsymbol{Z}_{ab} = \boldsymbol{Z}_L + \dfrac{\boldsymbol{Z}_R \boldsymbol{Z}_C}{\boldsymbol{Z}_R + \boldsymbol{Z}_C} = \boldsymbol{j}80 + \dfrac{40 \times (-\boldsymbol{j}50)}{40 + (-\boldsymbol{j}50)} = \dfrac{1}{41}(1000 + \boldsymbol{j}2480)\Omega$

4-11. 电路如题图 4-7 所示，求当电压频率 f 为多少时，电压 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 同相。



题图 4-7

解：



$\dot{I}_C = \dfrac{\dot{U}_2}{1/j\omega C} = j\omega C\dot{U}_2$，$\dot{I}_R = \dfrac{\dot{U}_2}{R}$，$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_C = \dfrac{\dot{U}_2}{R} + j\omega C\dot{U}_2 = (\dfrac{1}{R} + j\omega C)\dot{U}_2$

$$\dot{U}_1 = R\dot{I} + \frac{1}{j\omega C}\dot{I} + \dot{U}_2 = [(R + \frac{1}{j\omega C})(\frac{1}{R} + j\omega C) + 1]\dot{U}_2$$

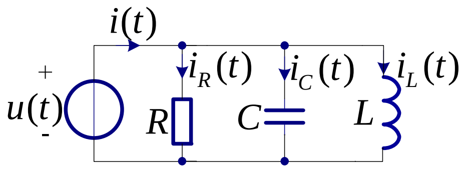
$$\dot{U}_1 = [3 + j\omega RC + \frac{1}{j\omega RC}]\dot{U}_2 = [3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})]\dot{U}_2$$

电压$\dot{U}_1$和$\dot{U}_2$同相，所以有 $\omega RC-\dfrac{1}{\omega RC}=0$

即 $\omega=\dfrac{1}{RC}=\dfrac{1}{40\times10^{3}\times2500\times10^{-12}}=10^{4}rad/s$

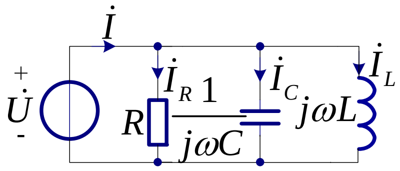
$\omega=2\pi f\Rightarrow f=\dfrac{\omega}{2\pi}=\dfrac{10^{4}}{2\pi}=1592Hz$

4-12. 如 题 图 4-8 所 示 ， 已 知 $R=10\Omega, C=20\mu F, L=30mH$ ，$u(t)=30\cos(1000t+45^{\circ})$。求电路中电流$i(t)$。



题图 4-8

解：$u(t)=30\cos(\omega t+45^{\circ})\Rightarrow\dot{U}=15\sqrt{2}\angle45^{\circ}$



$\dot{I}_R=\dfrac{\dot{U}}{R}$，$\dot{I}_L=\dfrac{\dot{U}}{j\omega L}=-j\dfrac{\dot{U}}{\omega L}$，$\dot{I}_C=\dfrac{\dot{U}}{1/j\omega C}=j\omega C\dot{U}$

$$\dot{I}=\dot{I}_R+\dot{I}_C+\dot{I}_L=\frac{\dot{U}}{R}+j\omega C\dot{U}-j\frac{\dot{U}}{\omega L}=[\frac{1}{R}+j(\omega C-\frac{1}{\omega L})]\dot{U}$$

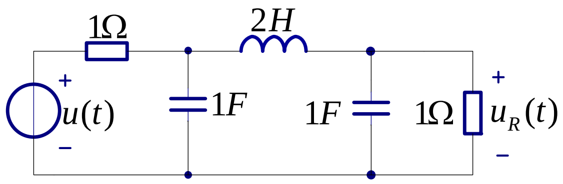
$R=10\Omega, C=20\mu F, L=30mH$，$\omega=1000rad/s$

$$\dot{I}=[\frac{1}{10}+j(1000\times20\times10^{-6}-\frac{1}{1000\times30\times10^{-3}})]\dot{U}=(\frac{1}{10}-j\frac{1}{75})\dot{U}$$

$$\dot{I}=(\frac{1}{10}-j\frac{1}{75})\dot{U}=0.1\angle-8^{\circ}\times15\sqrt{2}\angle45^{\circ}=1.5\sqrt{2}\angle37^{\circ}$$

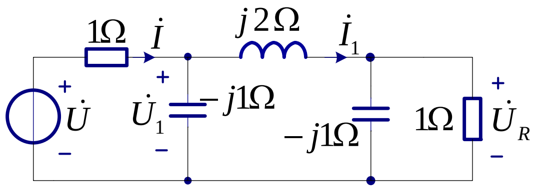
$$i(t)=1.5\sqrt{2}\times\sqrt{2}\cos(\omega t+37^{\circ})=3\cos(\omega t+37^{\circ})A$$

4-13. 电路如题图 4-9 所示，已知$u_R(t)=\cos\omega t\ V$， $\omega=1rad/s$， 求$u(t)$。



题图 4-9

解：$u_R(t)=\cos\omega t \Rightarrow \dot{U}_R=\dfrac{1}{\sqrt{2}}\angle 0^\circ$， $j\omega L=j2\Omega$， $\dfrac{1}{j\omega C}=-j1\Omega$



$$\dot{I}_1=\frac{\dot{U}_R}{\dfrac{-j1\times 1}{-j1+1}}=\dot{U}_R(1+j)=\frac{1}{\sqrt{2}}\angle 0^\circ\times(1+j)=\frac{1}{\sqrt{2}}\angle 0^\circ\times\sqrt{2}\angle 45^\circ=1\angle 45^\circ$$

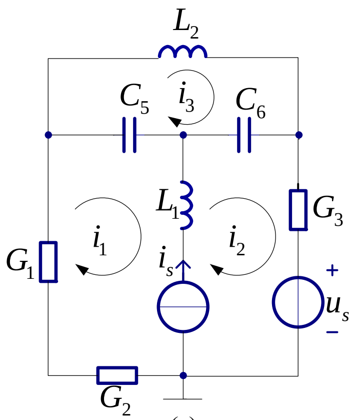
$$\dot{U}_1=(j2+\frac{-j1\times 1}{-j1+1})\dot{I}_1=(\frac{1}{2}+j\frac{3}{2})\dot{I}_1=\frac{\sqrt{10}}{2}\angle 72^\circ\times\dot{I}_1=\frac{\sqrt{10}}{2}\angle 72^\circ\times 1\angle 45^\circ=\frac{\sqrt{10}}{2}\angle 117^\circ$$

$$\dot{I}=\frac{\dot{U}_1}{\dfrac{-j1\times(\frac{1}{2}+j\frac{3}{2})}{-j1+(\frac{1}{2}+j\frac{3}{2})}}=\frac{-j1+(\frac{1}{2}+j\frac{3}{2})}{-j1\times(\frac{1}{2}+j\frac{3}{2})}\dot{U}_1=\frac{1+j}{3-j}\dot{U}_1=\frac{\sqrt{2}\angle 45^\circ}{\sqrt{10}\angle -18^\circ}\times\frac{\sqrt{10}}{2}\angle 117^\circ=\frac{\sqrt{2}}{2}\angle 144^\circ$$

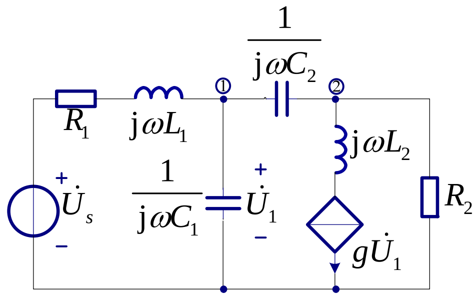
$$\dot{U}=(1+\frac{-j1\times(\frac{1}{2}+j\frac{3}{2})}{-j1+(\frac{1}{2}+j\frac{3}{2})})\dot{I}=(1+\frac{3-j}{1+j})\dot{I}=\frac{4}{1+j}\dot{I}=\frac{4}{\sqrt{2}\angle 45^\circ}\times\frac{\sqrt{2}}{2}\angle 144^\circ=2\angle 99^\circ$$

$$u(t)=2\sqrt{2}\cos(\omega t+99^\circ)V$$

4-14. 正弦稳态电路如题图 4-10（a）、（b）所示，列写图（a）电路的网孔电流方程，图（b）电路的节点电压方程。



(a)



(b)

题图 4-10

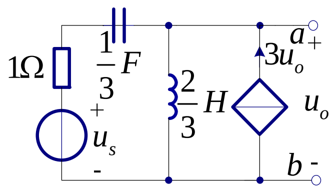
解：（a）网孔电流方程：

$$\begin{cases} (\frac{1}{G_1}+\frac{1}{j\omega C_5}+j\omega L_1+\frac{1}{G_2})\dot{I}_1-j\omega L_1\dot{I}_2-\frac{1}{j\omega C_5}\dot{I}_3=-\dot{U} \\ -j\omega L_1\dot{I}_1+(\frac{1}{G_3}+\frac{1}{j\omega C_6}+j\omega L_1)\dot{I}_2-\frac{1}{j\omega C_6}\dot{I}_3=-\dot{U}_s+\dot{U} \\ -\frac{1}{j\omega C_5}\dot{I}_1-\frac{1}{j\omega C_6}\dot{I}_2+(\frac{1}{j\omega C_5}+\frac{1}{j\omega C_6}+j\omega L_2)\dot{I}_3=0 \\ \dot{I}_2-\dot{I}_1=\dot{I}_s \end{cases}$$

（b）节点电压方程

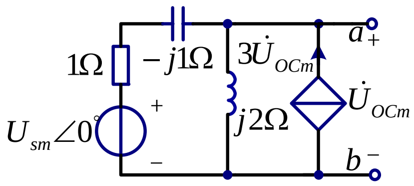
$$\begin{cases} (\frac{1}{R_1+j\omega L_1}+j\omega C_1+j\omega C_2)\dot{U}_1-j\omega C_2\dot{U}_2=\frac{\dot{U}_s}{R_1+j\omega L_1} \\ -j\omega C_2\dot{U}_1+(\frac{1}{R_2}+j\omega C_2)\dot{U}_2=-g\dot{U}_1 \end{cases}$$

4-15. 电路如题图 4-11 所示，已知 $u_s=U_{sm}\cos 3t$ ，求 ab 端的戴维南等效电路。



题图 4-11

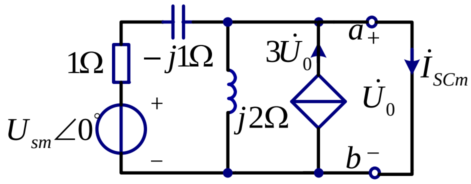
解：求 $\dot{U}_{OCm}$ 。首先画出相量模型。



$$\dot{U}_{OCm} = \left(\frac{\dot{U}_{sm}-\dot{U}_{OCm}}{1-j1} + 3\dot{U}_{OCm}\right)\times j2$$

$$\dot{U}_{OCm} = \frac{j2}{-5-j5}\dot{U}_{sm} = \frac{2\angle 90^\circ}{5\sqrt{2}\angle -45^\circ}\times U_{sm}\angle 0^\circ = \frac{\sqrt{2}U_{sm}}{5}\angle 135^\circ$$

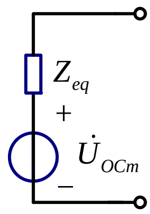
求等效内阻:



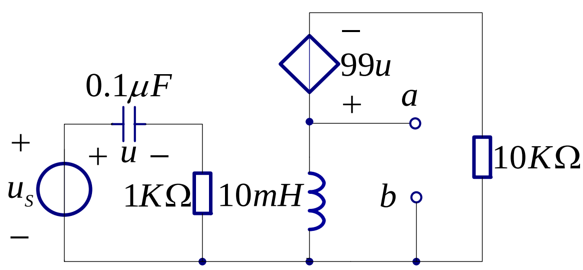
$$\dot{I}_{SCm} = \frac{\dot{U}_{sm}}{1-j},\quad \dot{U}_{OCm} = \frac{j2}{-5-j5}\dot{U}_{sm}$$

所以 $Z_{eq} = \frac{\dot{U}_{SCm}}{\dot{I}_{SCm}} = \frac{j2}{-5-j5}\times(1-j) = -\frac{2}{5}\Omega$

由此得到戴维南等效电路的相量模型：



4-16. 电路如题图 4-12 所示，已知 $u_S = \sqrt{2}\cos 10^4 t$ V。求 a b 端的戴维南等效电路。



题图 4-12

解：求开路电压：

$u_S(t)=\sqrt{2}\cos 10^4 t \Rightarrow \dot{U}_S = 1\angle 0^\circ$， $\omega = 10^4 rad/s$

$j\omega L = j10^4 \times 10 \times 10^{-3} = j100\Omega$， $\dfrac{1}{j\omega C} = -j\dfrac{1}{10^4 \times 0.1 \times 10^{-6}} = -j1000\Omega$

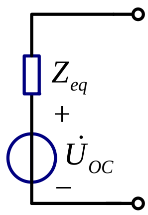
$$\dot{U} = \frac{-j1000}{-j1000+1000}\dot{U}_S = \frac{1000\angle -90^\circ}{1000\sqrt{2}\angle -45^\circ} \times 1\angle 0^\circ = \frac{1}{\sqrt{2}}\angle -45^\circ$$

$$\dot{U}_{OC} = \dot{U}_{ab} = \frac{j100}{j100+10000} \times 99\dot{U} = \frac{100\angle 90^\circ}{10000.5\angle 0.6^\circ} \times 99 \times \frac{1}{\sqrt{2}}\angle -45^\circ \approx \frac{\sqrt{2}}{2}\angle 45^\circ V$$

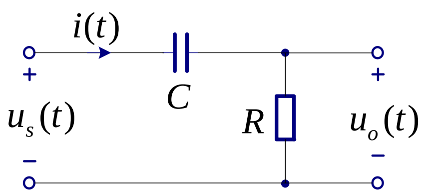
求等效电阻：

$$\boldsymbol{Z_{eq}} = \frac{\boldsymbol{j}100 \times 10000}{\boldsymbol{j}100 + 10000} \approx \boldsymbol{j}100\Omega$$

由此得到戴维南等效电路的相量模型：



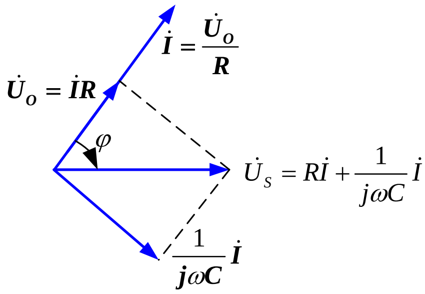
4-17. 已知电路如题图 4-13 所示，输入电压 $u_s = 2\cos(\omega t)$，请用相量图表示输入电压 $u_s(t)$ 与输出电压 $u_o(t)$ 之间的相位关系



题图 4-13

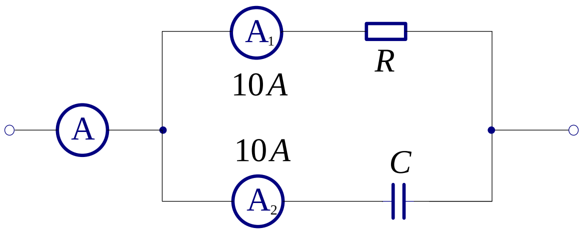
解：$\dot{I} = \dfrac{\dot{U}_O}{R}$， $\dot{U}_S = R\dot{I} + \dfrac{1}{j\omega C}\dot{I}$

$$\dot{U}_O = \dot{I}R = \frac{R}{R+\dfrac{1}{j\omega C}}\dot{U}_S = \frac{R}{R-j\dfrac{1}{\omega C}}\dot{U}_S$$



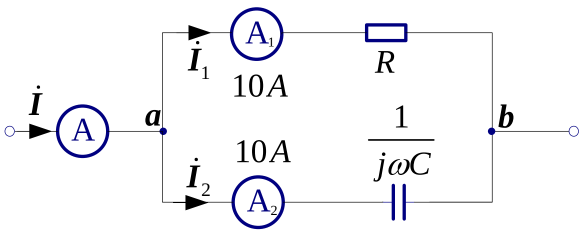
所以电压$\dot{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{O}}$超前$\dot{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{O}}$ $\arctan\dfrac{1}{\boldsymbol{\omega CR}}$

4-18. 已知电路如题图 4-14 所示，求电流表 A 的读数。



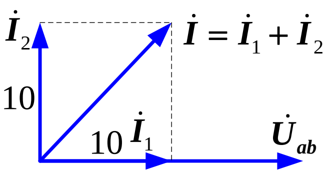
题图 4-14

解：



$\dot{I}_1 = \dfrac{\dot{U}_{ab}}{R}$， $\dot{I}_2 = \dfrac{\dot{U}_{ab}}{1/j\omega C} = j\omega C\dot{U}_{ab}$

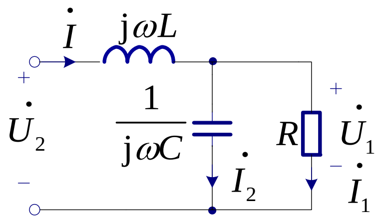
$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \frac{1}{R}\dot{U}_{ab} + j\omega C\dot{U}_{ab}$$



$\therefore \boldsymbol{I} = \sqrt{10^2 + 10^2} = 10\sqrt{2}\boldsymbol{A}$，即电流表 A 的读数为$10\sqrt{2}\boldsymbol{A}$。

4-19. 正弦稳态电路如题图 4-15 所示，$R = 2K\Omega$，$I_2/I_1 = \sqrt{3}$，试求以$\dot{U}_1$作为参

考向量，使$\dot{U}_2$超前$\dot{U}_1$ 45°时的感抗ωL的值。



题图 4-15

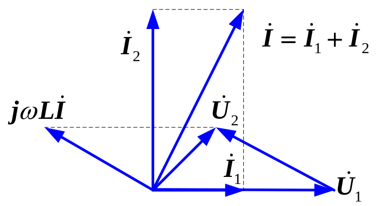
解：$\dot{I}=\dot{I}_1+\dot{I}_2=\dfrac{\dot{U}_1}{R}+\dfrac{\dot{U}_1}{1/j\omega C}=\dfrac{\dot{U}_1}{R}+j\omega C\dot{U}_1$

因为$I_2/I_1=\sqrt{3}$，所以有$\dot{I}=\dot{I}_1+\dot{I}_2=\dfrac{\dot{U}_1}{R}+j\dfrac{\sqrt{3}}{R}\dot{U}_1=\dfrac{2}{R}\dot{U}_1\angle 60^\circ$

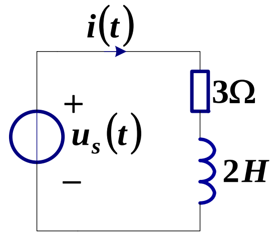
$$\dot{U}_2=j\omega L\dot{I}+\dot{U}_1=j\omega L\times\frac{2}{R}\dot{U}_1\angle 60^\circ+\dot{U}_1=\frac{2\omega L}{R}\dot{U}_1\angle 150^\circ+\dot{U}_1$$

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}=\frac{2\omega L}{R}\angle 150^\circ+1=\frac{2\omega L}{R}(\cos 150^\circ+j\sin 150^\circ)+1=1-\sqrt{3}\frac{\omega L}{R}+j\frac{\omega L}{R}$$

$\dot{U}_2$超前$\dot{U}_1$ 45°时，$1-\sqrt{3}\dfrac{\omega L}{R}=\dfrac{\omega L}{R}$， $\omega L=\dfrac{R}{1+\sqrt{3}}=\dfrac{2}{1+\sqrt{3}}k\Omega$



4-20. 题图 4-16 所示电路中，已知$u_s(t)=\cos t+\cos 2t\ V$，求电流$i(t)$以及电路吸收的功率。



题图 4-16

解：$\dot{I}_m=\dfrac{\dot{U}_{sm}}{R+j\omega L}$

激励为 cost： $\omega=1$， $\dot{I}_m=\dfrac{1\angle 0^\circ}{3+j2}=0.277\angle-33.7^\circ$

激励为 cos2t： $\omega=2$， $\dot{I}_m=\dfrac{1\angle 0^\circ}{3+j4}=0.2\angle 53.1^\circ$

$i(t)=[0.277\cos(t-33.7^\circ)+0.2\cos(2t-53.1^\circ)]A$

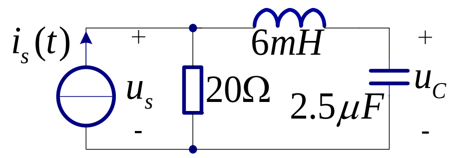
由于 $\int_0^T \cos t\cos 2tdt=0$， $\int_0^T \sin t\cos 2tdt=0$， $\int_0^T \cos t\sin 2tdt=0$， $\int_0^T \sin t\sin 2tdt=0$

$P=\dfrac{1}{T}\int_0^T u(t)i(t)dt=\dfrac{1}{T}\int_0^T 0.277\cos t\cos(t-33.7^\circ)dt+\dfrac{1}{T}\int_0^T 0.\cos 2t\cos(2t-53.1^\circ)dt$

对于单一频率：$P=UI\cos\varphi_{ui}=\dfrac{U_m}{\sqrt{2}}\dfrac{I_m}{\sqrt{2}}\cos\varphi_{ui}$

$$P=\frac{1}{\sqrt{2}}\times\frac{0.277}{\sqrt{2}}\cos 33.7^\circ+\frac{1}{\sqrt{2}}\times\frac{0.2}{\sqrt{2}}\cos 53.1^\circ=0.176W$$

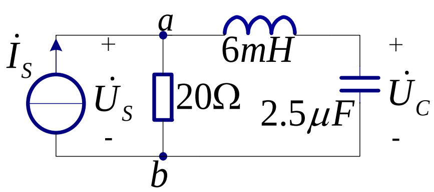
4-21. 电路如题图 4-17 所示，已知 $i_s(t)=5\sin(10^4t-20^\circ)A$。试求（1）电路的输入阻抗 Z_{ab} 并说明电路的性质，（2）$\dot{U}_S$ 及 $u_s(t)$，（3）$\dot{U}_C$ 及 $u_C(t)$，（4）电路吸收的平均功率 P。



题图 4-17

解：$i_s(t)=5\sin(10^4t-20^\circ)A=5\cos(10^4t-110^\circ)A\Rightarrow\dot{I}_S=\dfrac{5}{\sqrt{2}}\angle-110^\circ$，$\omega=10^4rad/s$

$j\omega L=j10^4\times6\times10^{-3}=j60\Omega$，$\dfrac{1}{j\omega C}=-j\dfrac{1}{10^4\times2.5\times10^{-6}}=-j40\Omega$



（1）电路的输入阻抗 $Z_{ab}=\dfrac{20\times(j60-j40)}{20+(j60-j40)}=\dfrac{j20}{1+j}=10\sqrt{2}\angle45^\circ\Omega$，为感性阻抗。

（2）$\dot{U}_S = Z_{ab}\dot{I}_S = 10\sqrt{2}\angle 45^\circ \times \frac{5}{\sqrt{2}}\angle -110^\circ = 50\angle -65^\circ V$

$u_s(t) = 50\sqrt{2}\cos(10^4 t - 65^\circ)V$

（3）$\dot{U}_C = \frac{-j40}{j60 - j40}\dot{U}_S = \frac{-j40}{j20}\dot{U}_S = -2\dot{U}_S = 2\angle 180^\circ \times 50\angle -65^\circ = 100\angle 115^\circ V$

$u_C(t) = 100\sqrt{2}\cos(10^4 t + 115^\circ)V$

（4）$\frac{\dot{U}_S}{\dot{I}_S} = Z_{ab} = 10\sqrt{2}\angle 45^\circ \Rightarrow \varphi_{ui} = 45^\circ$

$$\boldsymbol{P = U_S I_S}\cos\boldsymbol{\varphi_{ui}} = 50\times\frac{5}{\sqrt{2}}\times\cos 45^\circ = 50\times\frac{5}{\sqrt{2}}\times\frac{\sqrt{2}}{2} = 125\boldsymbol{W}$$

4-22. 已知某电路的瞬时功率为 $p = 10 + 8\sin(300t + 45^\circ)W$，求最大瞬时功率、最小瞬时功率和平均功率。

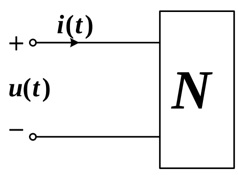
解：$\boldsymbol{p(t) = UI}\cos\boldsymbol{\varphi_{ui} + UI}\cos(2\boldsymbol{\omega t + \psi_u + \psi_i})$

平均功率 $\boldsymbol{P = UI}\cos\boldsymbol{\varphi_{ui}} = 10\boldsymbol{W}$

最大瞬时功率 $\boldsymbol{p}_{\max}(\boldsymbol{t}) = 18\boldsymbol{W}$

最小瞬时功率 $\boldsymbol{p}_{\min}(\boldsymbol{t}) = 2\boldsymbol{W}$

4-23. 题图 4-18 所示二端网络 N，已知 $u(t) = 110\cos(\omega t + 45^\circ)V$，$i(t) = 10\cos(\omega t + 15^\circ)A$，求网络N吸收的平均功率 P，无功功率 Q，视在功率 S 。



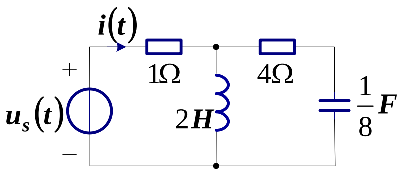
题图 4-18

解：$P = UI\cos\varphi_{ui} = \frac{110}{\sqrt{2}}\frac{10}{\sqrt{2}}\cos 30^\circ = 275\sqrt{3} = 476.3\text{W}$

$$Q = UI\sin\varphi_{ui} = \frac{110}{\sqrt{2}}\frac{10}{\sqrt{2}}\sin 30^{\circ} = 275\text{VAR}$$

$$S = UI = \frac{110}{\sqrt{2}}\frac{10}{\sqrt{2}} = 550\text{VA}$$

4-24. 电路题图 4-19 所示，已知$u_s(t) = 10\sqrt{2}\cos 2t\ V$，试求电流$i(t)$、电源供出的有功功率$P$和无功功率$Q$。



题图 4-19

解：$j\omega L = j4\Omega$，$\dfrac{1}{j\omega C} = -j4\Omega$

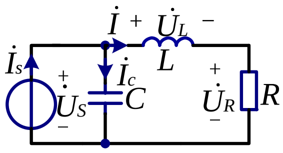
$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{10\angle 0^{\circ}}{1+\dfrac{j4\times(4-j4)}{j4+(4-j4)}} = \frac{10\angle 0^{\circ}}{5+j4} = 1.56\angle -38.66^{\circ}$$

$$i(t) = 1.56\sqrt{2}\cos(2t - 38.66^{\circ})A$$

$$P = UI\cos\varphi_{ui} = 10\times 1.56\cos 38.66^{\circ} = 12.18\text{W}$$

$$Q = UI\sin\varphi_{ui} = 10\times 1.56\sin 38.66^{\circ} = 9.7\text{VAR}$$

4-25. 已知某单口网络当负载功率为 30kW 时，功率因数为 0.6（感性），负载电压为 220V，若使得负载功率因数提高到 0.9，若电源频率为 100Hz，求并联电容为多大？

解：

负载功率为$P = UI\cos\varphi_{ui} = 220I\times 0.6 = 30\times 10^{3}W$，所以$I = \dfrac{2500}{11}A$

设$\dot{U}_S = 220\angle 0^\circ V$，$\dot{I} = \dfrac{2500}{11}\angle -53^\circ A$，$\dot{I}_C = \dfrac{\dot{U}_S}{1/j\omega C} = j\omega C\dot{U}_S = 220\omega C\angle 90^\circ A$

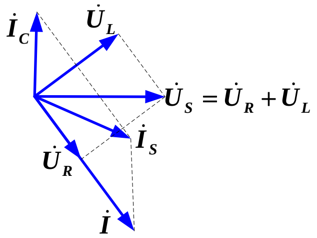
$$\dot{I}_S = \dot{I} + \dot{I}_C = \frac{2500}{11}\angle -53^\circ + 220\omega C\angle 90^\circ = \frac{2500}{11}\cos(-53^\circ) + j\frac{2500}{11}\sin(-53^\circ) + j220\omega C$$

$$\dot{I}_S = \frac{2500}{11}\times 0.6 - j\frac{2500}{11}\times 0.8 + j220\omega C = \frac{1500}{11} + j(-\frac{2000}{11} + 220\omega C)$$

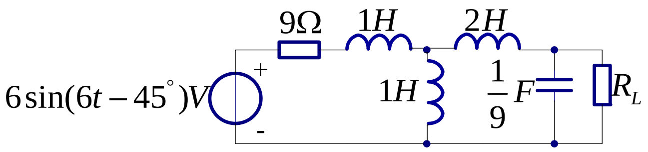
$$\frac{\dot{U}_S}{\dot{I}_S} = \frac{220\angle 0^\circ}{\frac{1500}{11} + j(-\frac{2000}{11} + 220\omega C)} = \frac{U_S}{I_S}\angle \arctan\frac{\frac{2000}{11} - 220\omega C}{\frac{1500}{11}} = \frac{U_S}{I_S}\angle \arctan\frac{100 - 121\omega C}{75}$$

$$\cos[\arctan\frac{100 - 121\omega C}{75}] = 0.9 \Rightarrow \frac{100 - 121\omega C}{75} = \frac{\sqrt{1 - 0.9^2}}{0.9} \Rightarrow \omega C = 0.562$$

$$\omega C = 2\pi fC = 0.562 \Rightarrow C = \frac{0.562}{2\pi f} = \frac{0.562}{2\pi\times 100} = 894\mu F$$



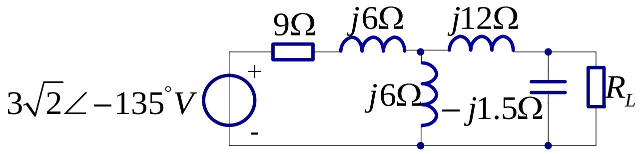
4-26. 已知电路如题图 4-20 所示，试求电阻 R_L 为多大值能够获取最大功率，最大功率是多少？

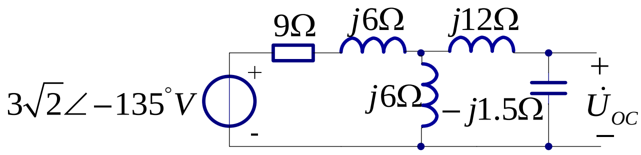


题图 4-20

解：$6\sin(6t - 45^\circ) = 6\cos(6t - 135^\circ) = 3\sqrt{2}\angle -135^\circ, \omega = 6rad/s$，

$j\omega L_1 = j6\Omega$，$j\omega L_1 = j12\Omega$，$\dfrac{1}{j\omega C} = \dfrac{1}{j6\times\frac{1}{9}} = -j1.5\Omega$





$$\dot{U}_{OC}=\frac{\dfrac{j6\times(j12-j1.5)}{j6+(j12-j1.5)}}{9+j6+\dfrac{j6\times(j12-j1.5)}{j6+(j12-j1.5)}}\times\frac{-j1.5}{j12-j1.5}\times3\sqrt{2}\angle-135^{\circ}=\frac{-j2}{11+j12}\times\sqrt{2}\angle-135^{\circ}$$

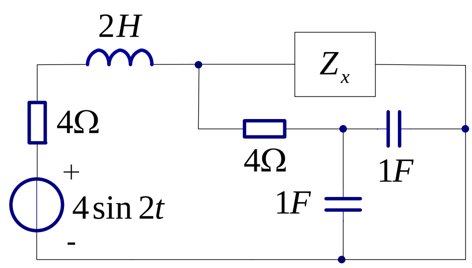
$$=\frac{-j2}{11+j12}\times\sqrt{2}\angle-135^{\circ}=0.12\sqrt{2}\angle87.5^{\circ}$$

$$Z_{eq}=\frac{-j1.5\times(j12+\dfrac{j6\times(9+j6)}{j6+(9+j6)})}{-j1.5+(j12+\dfrac{j6\times(9+j6)}{j6+(9+j6)})}=\frac{1-j109.5}{66.25}\Omega$$

$Z_x=\dfrac{1+j109.5}{66.25}\Omega$时获得最大功率，最大功率为：

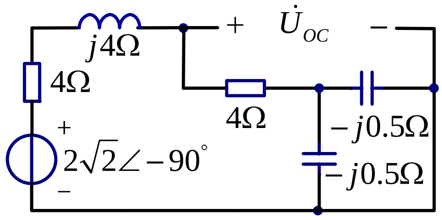
$$P_{L\max}=\frac{U_{OC}^2}{4R_x}=\frac{(0.12\sqrt{2})^2}{4\times\dfrac{1}{66.25}}=0.477W$$

4-27. 电路如题图 4-21 所示，试求负载Z_x为多大值能够获得最大功率，最大功率是多少？



题图 4-21

解： $j\omega L=j4\Omega$， $\dfrac{1}{j\omega C}=-j0.5\Omega$



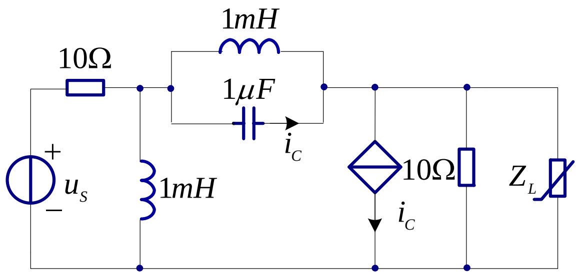
$$\dot U_{OC}=\frac{(4-j0.25)\times 2\sqrt{2}\angle-90^\circ}{4+j4+4-j0.25}=1.28\angle-118.7^\circ V$$

$$Z_{eq}=\frac{(4+j4)\times(4-j0.25)}{4+j4+4-j0.25}=(2.463+j0.72)\Omega$$

$Z_x=(2.463-j0.72)\Omega$时获得最大功率，最大功率为：

$$P_{L\max}=\frac{U_{OC}^2}{4R_x}=\frac{1.28^2}{4\times 2.463}=0.166W$$

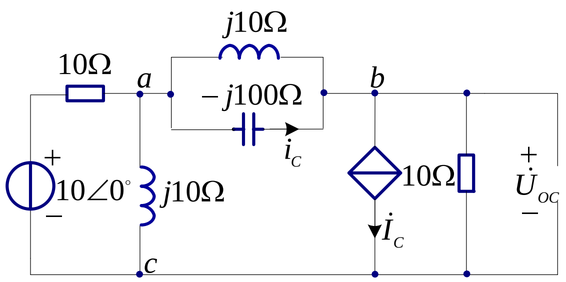
4-28. 题图 4-22 所示电路中，$u_s(t)=10\sqrt{2}\cos 10^4 t\ V$，若负载 Z 的实部和虚部均可调，求负载 Z 获得的最大功率。



题图 4-22

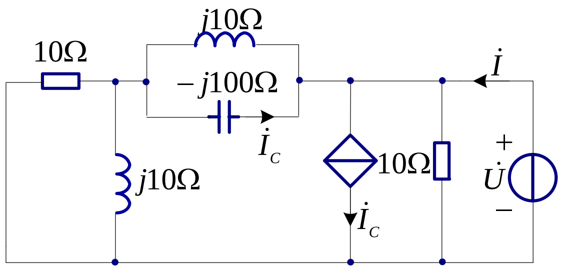
解：$u_s(t)=10\sqrt{2}\cos 10^4 t\Rightarrow \dot U_S=10\angle 0^\circ,\omega=10^4 rad/s$

$$j\omega L=j10^4\times 10^{-3}=j10\Omega，\quad \frac{1}{j10^4\times 10^{-6}}=-j100\Omega$$



设 c 为参考节点，节点 a 和 b 的节点电压为$\dot U_a,\dot U_b$，节点电压方程为：

$$\begin{cases}(\frac{1}{10}+\frac{1}{j10}+\frac{1}{j10}+\frac{1}{-j100})\dot{U}_a-(\frac{1}{j10}+\frac{1}{-j100})\dot{U}_b=\frac{10\angle 0^\circ}{10} \\ -(\frac{1}{j10}+\frac{1}{-j100})\dot{U}_a+(\frac{1}{j10}+\frac{1}{-j100}+\frac{1}{10})\dot{U}_b=-\dot{I}_C \\ \frac{\dot{U}_a-\dot{U}_b}{-j100}=\dot{I}_C\end{cases} \Rightarrow \begin{cases}\dot{U}_{OC}=\dot{U}_b=\frac{100\angle 0^\circ}{29}V \\ \dot{U}_a=\frac{100\sqrt{2}\angle 45^\circ}{29}V\end{cases}$$



$$\dot{I}=\frac{\dot{U}}{10}+\dot{I}_C+\frac{\dot{U}}{\frac{10\times j10}{10+j10}+\frac{j10\times(-j100)}{j10-j100}}$$

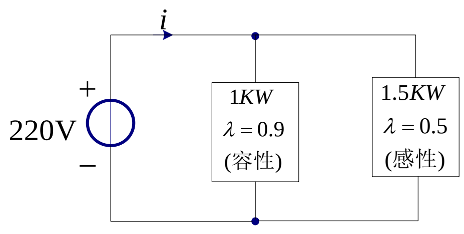
$$\dot{I}_C=-\frac{\dot{U}}{\frac{10\times j10}{10+j10}+\frac{j10\times(-j100)}{j10-j100}}\times\frac{j10}{j10-j100}$$

$$\Rightarrow Z_{eq}=\frac{\dot{U}}{\dot{I}}=\frac{190+j100}{29}\Omega$$

$Z_x=\frac{190-j100}{29}\Omega$时获得最大功率，最大功率为：

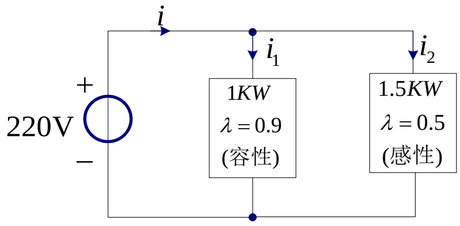
$$P_{L\max}=\frac{U_{OC}^2}{4R_x}=\frac{(\frac{100}{29})^2}{4\times\frac{190}{29}}=0.454W$$

4-29. 电路如题图 4-23 所示，试求电路中输入电流和总功率因数。



题图 4-23

解：



容性：$P=UI\cos\varphi_{ui}=1KW$， $\cos\varphi_{ui}=0.9\Rightarrow\varphi_{ui}=-25.84^{\circ}$

$$I_1=\frac{1000}{220\times0.9}=5.05A$$

感性：$P=UI\cos\varphi_{ui}=1.5KW$， $\cos\varphi_{ui}=0.5\Rightarrow\varphi_{ui}=60^{\circ}$

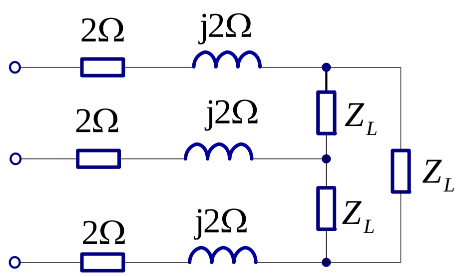
$$I_2=\frac{1500}{220\times0.5}=13.64A$$

所以 $\dot{I}=5.05\angle25.84^{\circ}+13.64\angle-60^{\circ}=11.365-j9.61=14.88\angle-40.22^{\circ}A$

$\varphi_{ui}=40.22^{\circ}>0$（感性）

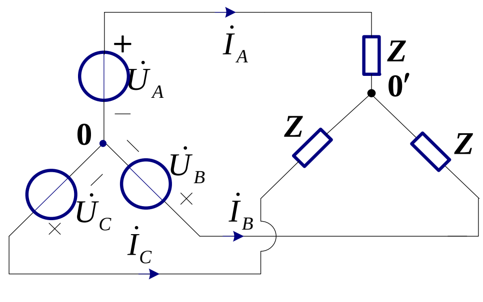
$\lambda=\cos\varphi_{ui}=\cos40.22^{\circ}=0.764$

4-30. 题图 4-24 所示对称三相电路，负载阻抗 $Z_L=(60+j60)\Omega$，负载端的线电压为 $380V$，求电源端线电压。



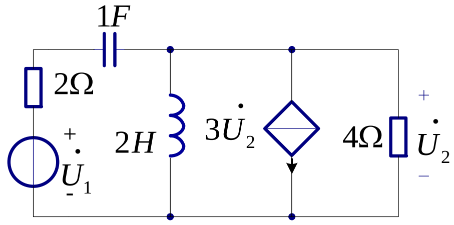
题图 4-24

4-31. 题图 4-25 所示对称三相电路中，已知线电压 $U_c=380V$，负载 $Z=20+j15\Omega$，求线电流 $\dot{I}_A$， $\dot{I}_B$ 和 $\dot{I}_C$ 及负载吸收总功率 $P_{总}$。



题图 4-25

4-32. 求题图 4-26 所示电路的网络系统函数 $H(j\omega)=\dot{U}_2/\dot{U}_1$。

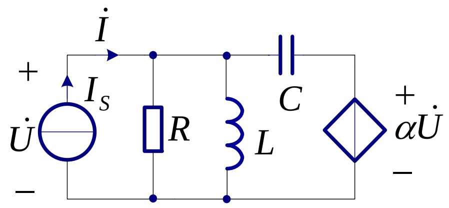


题图 4-26

解：节点电压法：$(\frac{1}{2+\frac{1}{j\omega}}+\frac{1}{j2\omega}+\frac{1}{4})\dot{U}_2=\frac{\dot{U}_1}{2+\frac{1}{j\omega}}-3\dot{U}_2$

$$H(j\omega)=\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}=\frac{1}{2+\frac{1}{j\omega}}\times\frac{1}{(\frac{1}{2+\frac{1}{j\omega}}+\frac{1}{j2\omega}+\frac{1}{4}+3)}=\frac{4\omega^2}{26\omega^2-j17\omega-2}$$

4-33. 如题图 4-27 所示正弦电路，求电路的谐振角频率，设 $\alpha<1$。



题图 4-27

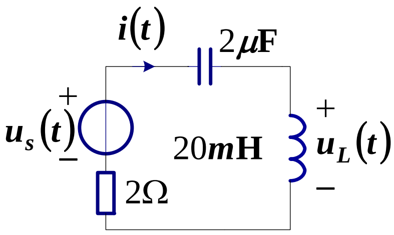
解：求 Z_{ab}： $\dot{I}=\frac{\dot{U}}{R}+\frac{\dot{U}}{j\omega L}+\frac{\dot{U}-\alpha\dot{U}}{\frac{1}{j\omega C}}=[\frac{1}{R}+\frac{1}{j\omega L}+j\omega C(1-\alpha)]\dot{U}$

$$Z_{ab}=\frac{\dot{U}}{\dot{I}}=\frac{1}{\frac{1}{R}+\frac{1}{j\omega L}+j\omega C(1-\alpha)}=\frac{1}{\frac{1}{R}+j[-\frac{1}{\omega L}+\omega C(1-\alpha)]}$$

电路发生谐振，呈纯电阻性：$-\frac{1}{\omega L}+\omega C(1-\alpha)=0$

所以电路的谐振角频率为：$\omega=\frac{1}{\sqrt{LC(1-\alpha)}}$

4-34．如题图 4-28 所示串联电路，已知$u_s(t)=4\cos\omega t\ mV$，求该电路的谐振频率，谐振时的电流$i(t)$和电感电压$u_L(t)$。



题图 4-28

解：$Z=R+j\omega L+\dfrac{1}{j\omega C}$

该电路的谐振频率为：$\omega L=\dfrac{1}{\omega C}\Rightarrow\omega=\dfrac{1}{\sqrt{LC}}=\dfrac{1}{\sqrt{2\times10^{-6}\times20\times10^{-3}}}=5000rad/s$

此时$Z=R=2\Omega$，$i(t)=\dfrac{u_s(t)}{2}=(2\cos5000t)\mathrm{mA}$

$\dot{U}_{Lm}=j\omega L\dot{I}_m=j5000\times20\times10^{-3}\times2\angle0^{\circ}=200\angle90^{\circ}$

$u_L(t)=200\cos(5000t+90^{\circ})\mathrm{mV}$

第五章　基本半导体器件及其电路模型

5-1

（1）稳压管的正常工作在<u>反向击穿</u>状态，在这个状态下，电流变化幅度很<u>大</u>，而电压变化幅度很<u>小</u>

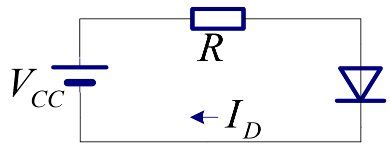
（2）三极管处于放大状态时，发射结处于<u>正</u>偏，集电结处于<u>反</u>偏。

5-7　在什么条件下可以使用三极管低频小信号模型分析电路？

低频：信号频率远小于三极管的工作频率

小信号：输入信号电压幅度的变化使三极管基极电流变化的范围较小，基极电流的变化近似线性，基极电流对应的输出电流处于放大区。

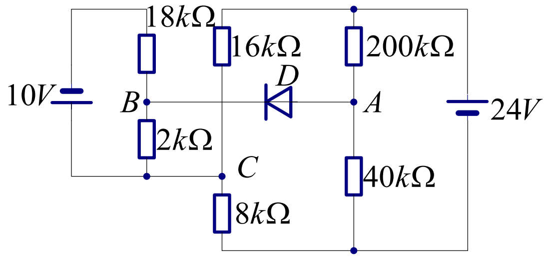
5-8 计算题图 5-2 所示电路中电流 I_D 大小。设二极管 D 有 0.7V 的管压降，图中 R=1kΩ，电源电压为 5V。



题图 5-2

解：　$i_D = \frac{V_{CC} - V_D}{R} = \frac{5 - 0.7}{1k\Omega} = 4.3\ mA$

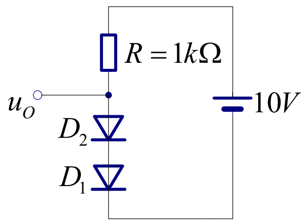
5-9 判断题图 5-3 所示电路中的二极管是导通还是截止，为什么？



题图 5-3

解：未接二极管时，　$V_A = 4\ V$，　$V_C = 8\ V$；　而 $I_{BC} = \frac{10}{20k\Omega} = 0.5mA$，　$V_B = V_C - I_{BC} \cdot 2k\Omega$，所以 $V_B = 7\ V$，　$V_B > V_A$，因此二极管截止。

5-11 设题图 5-5 所示电路中二极管有 0.7V 管压降，利用二极管恒压降模型求电路中电流大小和输出电压 u_o

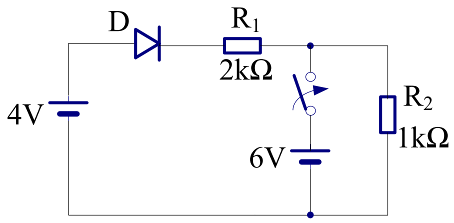


题图 5-5

解：电流 $I=\dfrac{10-2\times0.7}{1k\Omega}=8.6mA$

$u_0=1.4V$

5-12 电路如题图 5-6 所示，二极管 D 为硅管（导通电压降 $V_{th}=0.7V$），采用恒压降模型，估算开关闭合前后 R_2 上的电压降为多少？

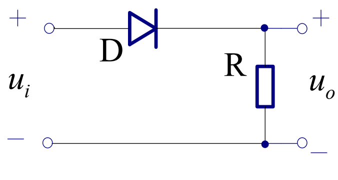


题图 5-6

解：开关闭合前，二极管导通：$u_{R2}=(4-0.7)\cdot\dfrac{R_2}{R_1+R_2}=3.3\times\dfrac{1}{3}=1.1V$

开关闭合后，二极管 D 截止：$u_{R2}=6V$

5-13 电路如题图 5-7 所示，输入电压 $u_i=5\cos(\omega t)V$，二极管 D 为硅管，分别采用理想模型和恒压降模型，求 $R=1k\Omega$ 上的输出电压 u_o。



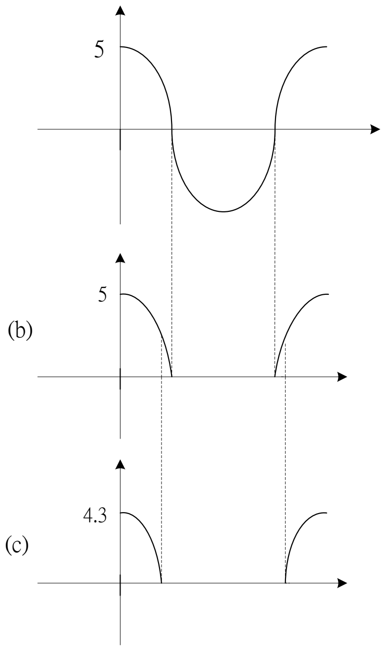
题图 5-7

解：采用理想模型：当 $u_i>0$ 时，二极管导通，$u_o=u_i$；

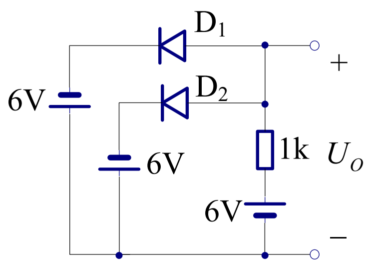
当 $u_i<0$ 时，二极管截止，$u_o=0$，如图（b）

采用恒压降模型：当 $u_i>0.7\ V$ 时，二极管导通，$u_o=u_i-0.7$；

当 $u_i<0.7\ V$ 时，二极管截止，$u_o=0$，如图（c）



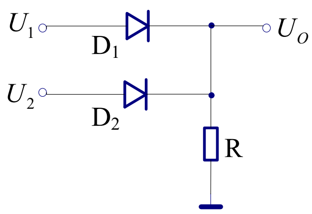
5-15 电路如题图 5-9 所示，采用理想化模型，判断图中的二极管是导通还是截止？并求 U_o



题图 5-9

解： D_1 D_2 均导通， $U_0 = -6V$ 。

5-16 电路题图 5-10 所示，采用理想化模型输入信号 U_1 和 U_2 的值可以为 0V 或 5V，求不同输入时对应的输出。



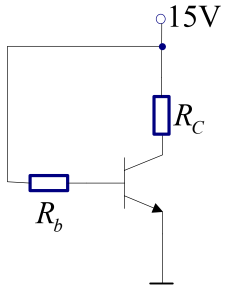
题图 5-10

解：逻辑或

U_1	U_2	U_0

0	0	0
0	5	5
5	0	5
5	5	5

5-21 如题图 5-15 所示电路，电源电压为 15 V，三极管的 $\beta = 100$， $R_b = 1k\Omega$，试选择合适的 R_C 电阻值。

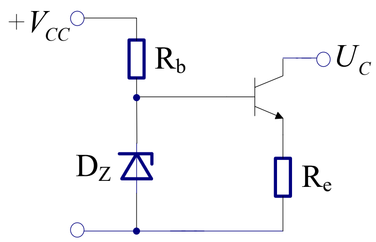


题图 5-15

解：$I_B = \dfrac{15-0.7}{1k\Omega} = 14.3mA$，所以 $I_C \approx 1.4A$

$15 - I_C \cdot R_C \geq 1V$，所以 $R_C \leq \dfrac{14}{1.4} = 10\Omega$

5-24 电路如图 5-18 所示，稳压管的稳定电压是 $5V$，电源电压 $V_{CC} = 12$ V，三极管集电极电压 $U_C = 8$ V，电阻 $R_e = 2$ kΩ， $R_b = 20$ kΩ，试计算发射极电流和三极管的压降。



题图 5-18

解：首先判断稳压管的工作状态，假设无稳压管，计算 U_B

设 $\beta = 100$， $V_{CC} = I_B R_b + 0.7 + I_E R_e = I_B R_b + 0.7 + \beta I_B R_e$， $I_B = \dfrac{12-0.3}{R_b + \beta R_e} \approx \dfrac{11.3}{\beta R_e}$

则 $I_B = 0.05\ mA$， $U_B = V_{CC} - I_B R_b = 12 - \dfrac{11.3 \cdot R_b}{R_b + \beta R_e} = 12 - \dfrac{11.3}{\frac{\beta}{10}+1} = 11V$，

所以稳压管正常工作，稳压在 5V

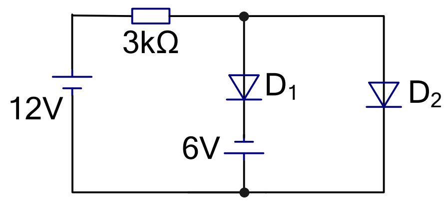
$I_E = \dfrac{5-0.7}{R_e} = 2.15\ mA$， $U_{CE} = U_C - R_e I_E = 3.7\ V$，

即：发射极电流 2.15mA 三极管压降 3.7V

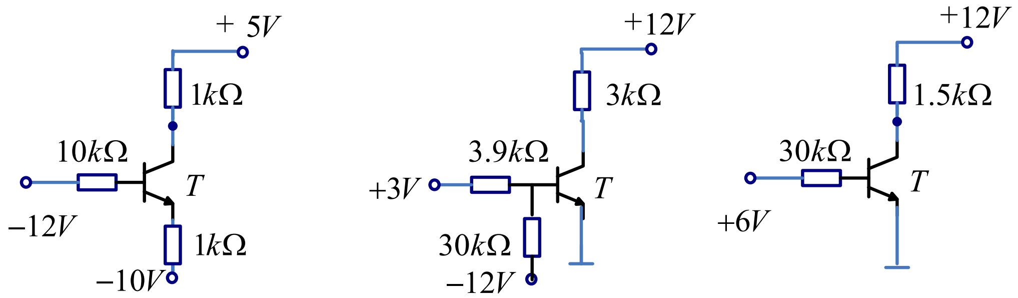
补充 5-1：如图所示电路中两个二极管的状态分别为：**(B)**

(A) D_1 截止，D_2 导通　（B）D_1 导通，D_2 截止

（C）D_1 截止，D_2 截止　（D）D_1 导通，D_2 导通



补充5-2：判断下图所示电路中三级管工作的状态（各三级管 $\beta = 30$）：



(a)　(b)　(c)

解：(a) 截止 (b) 饱和 (c) 放大

（a）截止

（b）$U_B = \frac{15}{30+3.9} \times 30 - 12 = 1.27$，所以发射结正偏

$$I_B = \frac{2.3}{3.9} - \frac{12.7}{30} = 0.5897 - 0.4233 = 0.166mA$$

$$I_C = \beta I_B = 4.99mA$$

$$U_{CE} = 12 - 3 \times 4.99 \approx -3V$$

U_{CE} 不可能为负，所以 $I_C < \beta I_B$，处于饱和状态

（c）$I_B = \frac{5.3}{30} = 0.1767mA$

$$I_C = \beta I_B = 5.3mA$$

$U_{CE} = 12 - 7.95 \approx 4V$，处于放大状态。

第六章 基本放大电路

6-1

(1)在阻容耦合放大电路中，偏置电路的作用是保证放大电路有合适的__静态工作点（或直流工作点）__，集电极电阻 Rc 的作用是__把集电极电流的变化转换为电压的变化__，耦合电容 C 的作用是__隔离直流、导通交流__。

(2)射极输出器的主要特点可归纳为三点：__电压放大倍数接近 1，且输出与输入同相，或($\dot{A}_u = 1$)__，即电压跟随性好；__输入电阻大__，所以常被用在多极放大电路的第一极；__输出电阻小__，所以带负载能力强。

(3)差动放大电路对__共模__信号无放大能力，所以可以抑制__零漂__，对__差模__信号有放大能力，其共模抑制比为__$CMRR = \infty$__。

(4) 放大电路如题图 6-1 所示，填写温度升高后工作点的稳定过程：

$$T\uparrow \rightarrow I_C(\uparrow) \rightarrow U_E(\uparrow) \rightarrow U_{BE}(\downarrow) \rightarrow I_B(\downarrow) \rightarrow I_C(\downarrow)$$

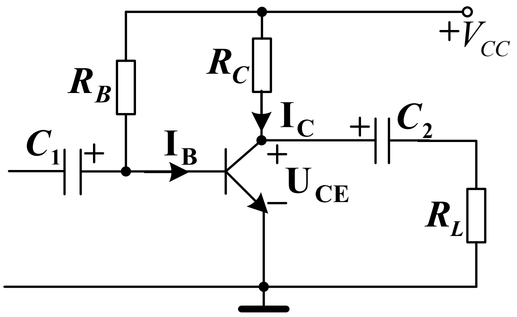
6-2 (a)截止 (b)放大 (c)损坏 (d)饱和

6-3 (a)无 (b)有 (c)无 (d)有

6-4 （1）饱和失真，消除方法：减低静态工作点（增大基极电阻 Rb、减小集电极电阻 Rc、增大 Vcc）或者减小输入电压的幅值

（2）截止失真，消除方法：提高静态工作点（减小基极电阻 Rb，增大 V_{BB}）或者减小输入电压的幅值

6-5 在如题图 6-5 所示共发射极放大电路中，$R_B = 200k\Omega,\ R_C = 2k\Omega$，三极管 $\beta = 40$，$V_{CC} = 18$ V，试计算静态工作点 I_B，I_C 和 U_{CE}。

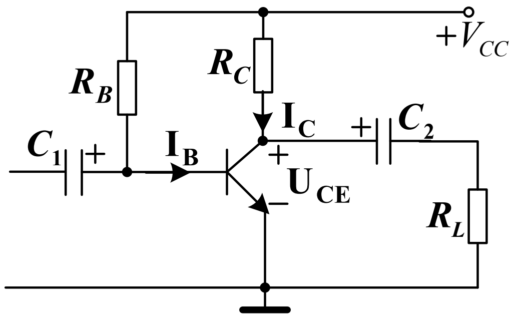


题图 6-5

解：

$$I_B = \frac{18-0.7}{200} = 86.5\mu A,\quad I_c = 3.46mA,\quad U_{CE} = 18 - 3.46\times 2 \approx 11\text{V}$$

6-6 题图 6-6 所示共发射极放大电路工作在放大区，三极管 $\beta = 50$，若 $I_B = 40\mu A$ $R_C = 3k\Omega$，$V_{CC} = 12V$，试计算 I_C，U_{CE} 和 R_B。

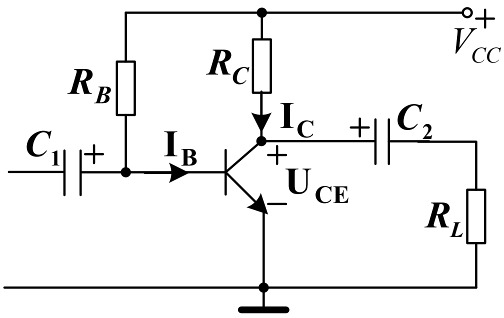


题图 6-6

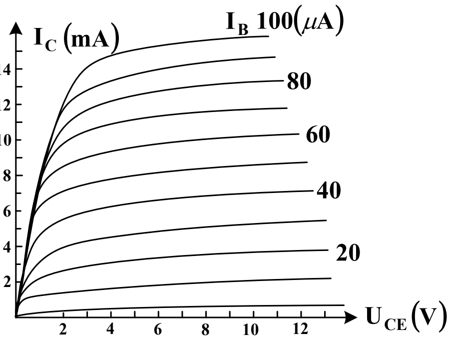
解：

$$I_C = \beta I_B = \mathbf{2}mA \quad U_{cE} = \mathbf{12 - 2 \times 3 = 6}v \qquad R_B = \frac{\mathbf{12 - 0.7}}{\mathbf{40 \times 10^{-6}}} = \mathbf{282.5}k\Omega$$

6-7 题图 6-7（a）所示放大电路中，若选用三极管输出特性曲线如图（b）所示，设电路中电源$V_{CC}=12V$，$R_B=380k\Omega$, $R_C=1.5k\Omega$，试在输出特性曲线上作直流负载线，并从图上求静态工作点 Q(I_B，I_C 和U_{CE})。



(a)

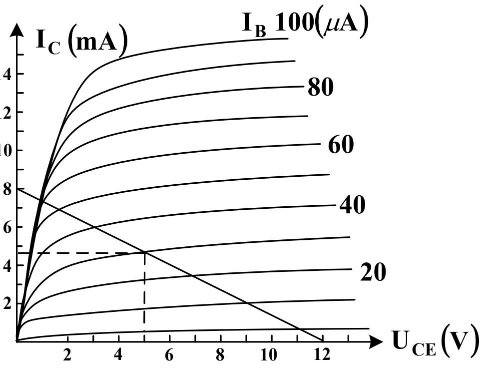


(b)

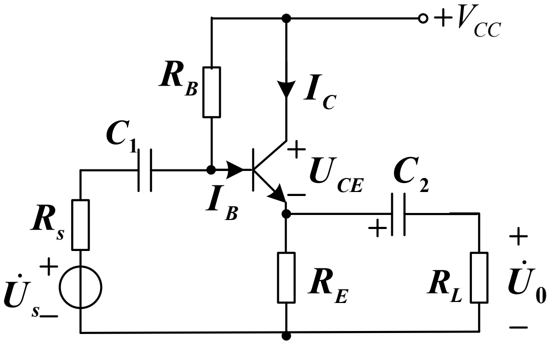
题图 6-7

解：

$$I_B = \frac{12-0.7}{380} = 30\mu A, \quad I_c = 4.7mA, \quad U_{CE} = 5V$$

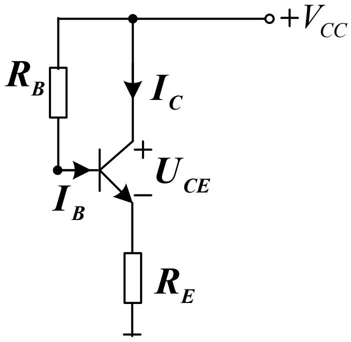


6-8 如题图 6-8 所示电路是射极输出器电路，试画出①直流通路，②交流通路，③微变等效电路。

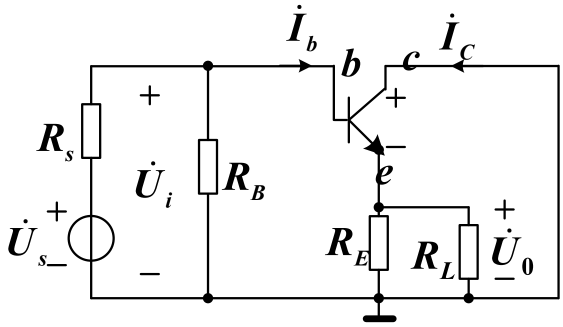


题图 6-8

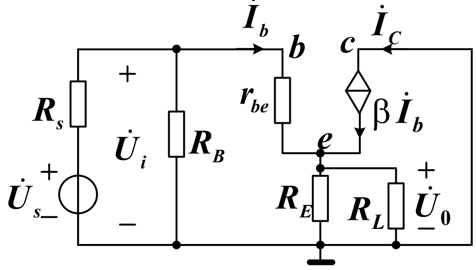
解：



直流通路：

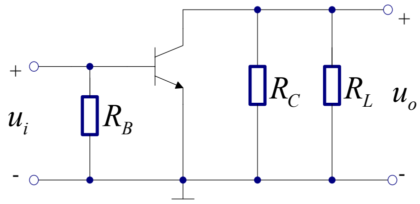


交流通路：



微变等效电路：

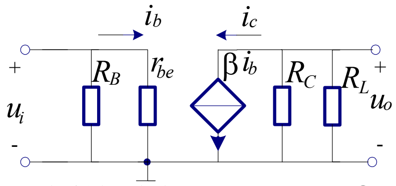
6-9 如题图 6-9 所示电路，为共射放大电路的交流通路，试画出它的微变等效电路。



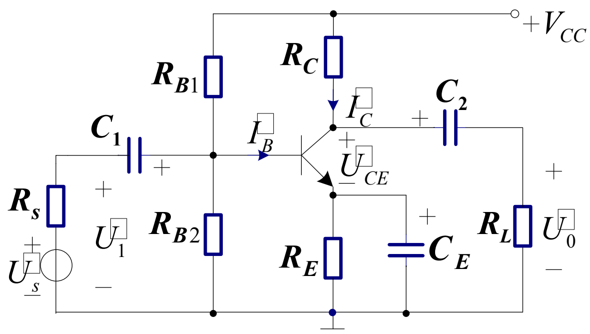
题图 6-9

解：

微变等效电路：

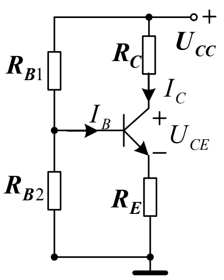


6-11 如题图 6-11 所示电路是共发射极放大电路，试画出①直流通路，②交流通路，③微变等效电路。

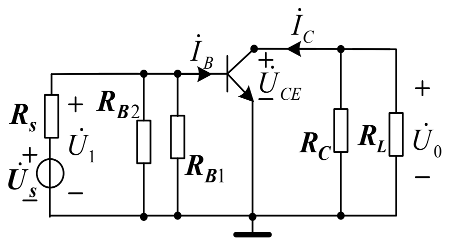


题图 6-11

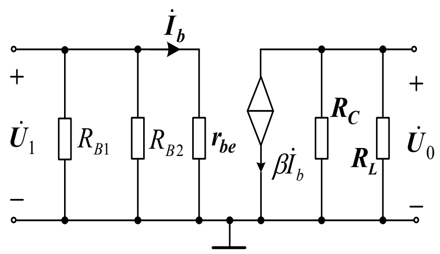
解：



①直流通路



②交流通路

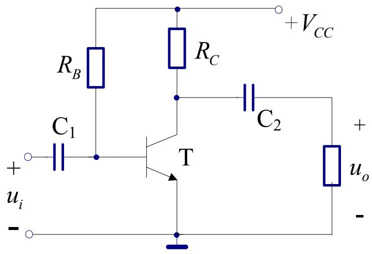


③微变等效电路

6-12 放大电路如题图 6-12 所示，其中 $V_{CC}=12\text{ V}$，$R_B=560\text{ k}\Omega$，$R_C=8\text{k}\Omega$，$V_{BE}=0.7\text{ V}$，饱和压降 $V_{CE(sat)}=0.2\text{ V}$。

（1）当 β=50时，求静态电流 I_B、I_C 和管降 V_{CE} 的值。

（2）当 β=100时，求静态电流 I_B、I_C 和管降 V_{CE} 的值，此时电路能否正常放大？

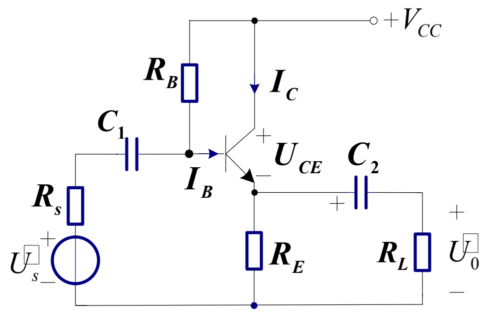


题图 6-12

解：（1）$I_B=\dfrac{12-0.7}{560}\approx 0.02mA,\quad I_c=1mA,\quad U_{CE}=12-1\times 8=4\text{V}$

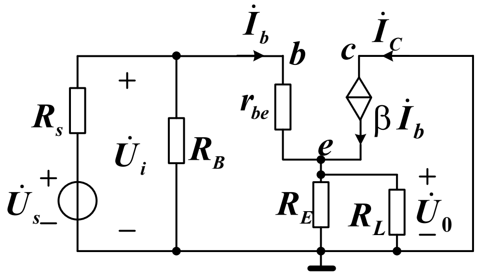
（2）$I_B=\dfrac{12-0.7}{560}\approx 0.02mA,\quad I_c=2mA,\quad U_{CE}=12-2\times 8=-4\text{V}$ 此时三极管进入饱和区

6-16 如题图 6-16 所示，共集电极电路各参数已知，在发射极获得输出电压，试写出电压放大倍数 $\dot{A}_u$,输入电阻 R_I 和输出电阻 R_O。



题图 6-16

解：



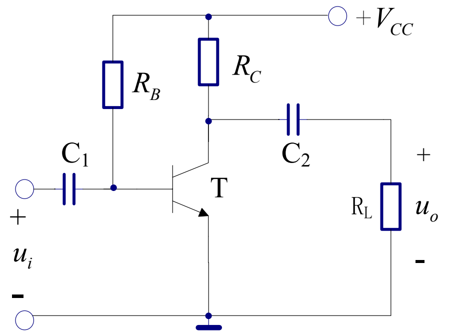
$$\dot{A}_u=1,\quad r_1=r_{be}+(\beta+1)(R_E//R_L),\quad r_0=R_E//\frac{r_{be}}{\beta+1}。$$

6-17 单管放大电路如题图 6-17 所示，$V_{CC}=12\ V$，$R_B=300\ k\Omega$，$R_C=R_L=4k\Omega$，$\beta=50$，$U_{BEQ}=0.7\ V$，$r_{be}=300\Omega$。

（1）估算Q点；

（2）画出交流通路及微变等效电路，计算 $\dot{A}_u$、R_i 和 R_o；

（3）若所加信号源内阻 R_s 为500Ω，计算 $\dot{A}_{us}$

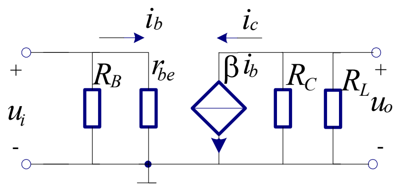


题图 6-17

解：

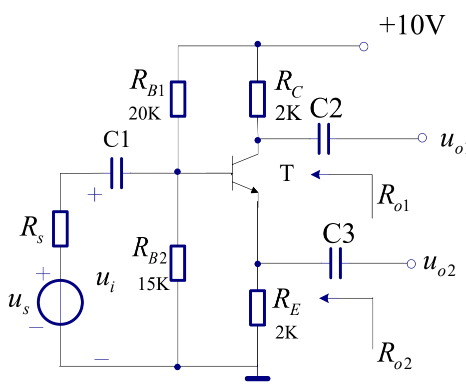
(1) $I_B=\dfrac{12-0.7}{300}\approx 0.0377mA,\quad I_c=1.883mA,\quad U_{CE}=12-1.883\times 4=4.467\text{V}$

(2) 微变等效电路：

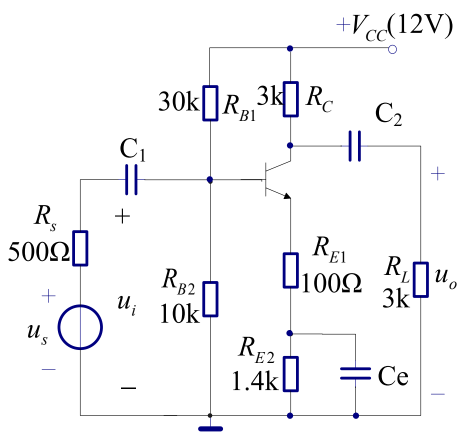


$$\dot{A}_u=-\frac{\beta(R_c//R_L)}{r_{be}}\approx -333,\quad r_i=R_B//r_{be}\approx r_{be}=300\Omega,\quad r_0=R_c=4k\Omega$$

(3) $\dot{A}_{us}=\dot{A}_u\dfrac{r_i}{R_s+r_i}\approx -125$



题图 6-22



题图 6-23

6-22 电路如题图 6-22 所示，R_S=500Ω，设晶体管的 $\beta=50$，$r_{bb'}=100\ \Omega$，$V_{BE}=0.7$ V，试求：

（1）静态工作点；

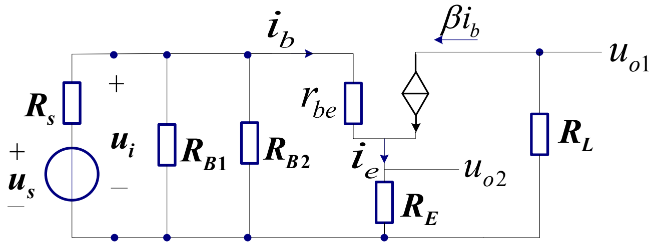
（2）计算不同输出端的 $\dot{A}_{vs1}$ 和 $\dot{A}_{vs2}$；

（3）计算输入电阻 R_i，输出电阻 R_{o1} 和 R_{o2}。

解：（1）$U_B \approx \dfrac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}} \cdot V_{CC} = \dfrac{15}{35} \times 10 \approx 4.3V$，$I_E = \dfrac{U_B - 0.7}{R_E} = \dfrac{3.6}{2k} = 1.8\ mA$

$I_B = \dfrac{I_E}{1+\beta} \approx 0.036mA$，$U_{CE} = 10 - I_C R_C - I_C R_E = 10 - 7.2 = 2.8\ \ V$

（2）画整流微变等效电路。



$$r_{be} = r_b + (1+\beta) \cdot \frac{26mV}{I_E} = 100 + 51 \times 14.4 \approx 840\Omega$$

$$\because u_{o2} = i_e \cdot R_E = (1+\beta) i_b \cdot R_E, \quad u_i = i_b \cdot r_{be} + (1+\beta) i_b \cdot R_E$$

$$\therefore \dot{A}_{v2} = \frac{u_{o2}}{u_i} = \frac{(1+\beta) \cdot R_E}{r_{be} + (1+\beta) \cdot R_E} \approx 1$$

$$\because u_{o1} = -\beta i_b \cdot R_C, \quad u_i = i_b \cdot r_{be} + (1+\beta) i_b \cdot R_E$$

$$\therefore \dot{A}_{v1} = \frac{u_{o1}}{u_i} = \frac{-\beta R_C}{r_{be} + (1+\beta) \cdot R_E} \approx -1$$

（3）$R_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be} + (1+\beta) \cdot R_E \approx 7.9k\Omega$

$$R_{o1} = R_C = 2k\Omega, \quad R_{o2} = R_E // \frac{r_{be} + R_s // R_{B1} // R_{B2}}{1+\beta} \approx 26\Omega$$

$$u_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot u_s = \frac{7.9}{8.4} u_s$$

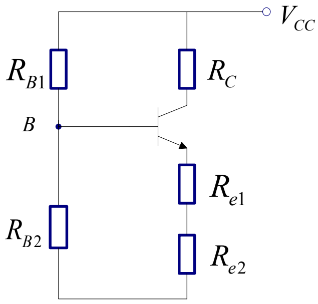
$$\therefore \dot{A}_{vs1} = \frac{u_{o1}}{u_s} = \frac{u_{o1}}{u_i} \cdot \frac{u_i}{u_s} = -0.94, \quad \dot{A}_{vs2} = \frac{u_{o2}}{u_s} = \frac{u_{o2}}{u_i} \cdot \frac{u_i}{u_s} = 0.94$$

6-23 在题图 6-23 所示电路中三极管 $\beta=50$，$U_{BEQ}=0.7$ V，$r_{bb'}=300\ \Omega$。

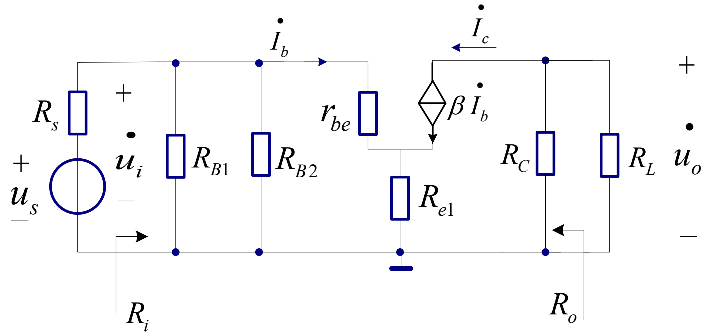
（1）分析静态工作点；

（2）求放大电路的 $\dot{A}_{v_i}$，$\dot{A}_{vs}$，R_i 和 R_o。

解：



（b）



（c）

① 直流通路如图(b)所示，则：

$$U_{BQ} \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}} \cdot V_{CC} = \frac{1}{4} \times 12 = 3V$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_{e1}+R_{e2}} = \frac{2.3}{100+1400} \approx 1.53mA$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1+\beta} \approx 30\mu A\text{，}\quad U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_{e1} + R_{e2}) = 12 - 1.53 \times 4.5 = 5.115V$$

②微变等效电路如图(c)所示，其中：

$$r_{be} = r_{bb'} + (1+\beta) \cdot \frac{V_T}{I_{EQ}} = 300 + 51 \times \frac{26}{1.53} = 1.167k\Omega$$

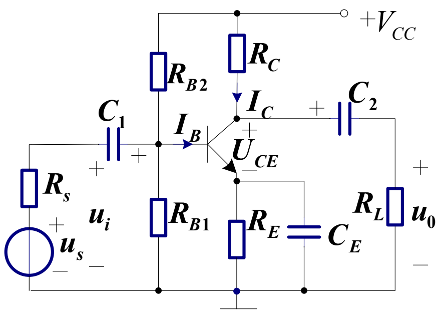
则可以求得：

$$\dot{A}_v = \frac{\dot{u}_o}{\dot{u}_i} = -\frac{\beta \dot{I}_b \cdot (R_C // R_L)}{r_{be} \cdot \dot{I}_b + (1+\beta) \cdot \dot{I}_b \cdot R_{e1}} = -\frac{50 \times 1.5}{1.167 + 51 \times 0.1} = -11.97$$

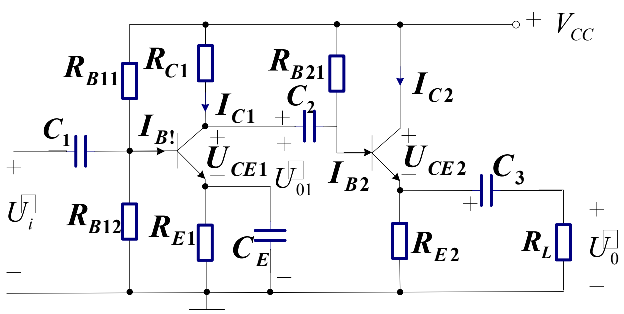
$$R_i = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1+\beta) \cdot R_{e1}] = 3.418k\Omega$$

$$\dot{A}_{vs} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \dot{A}_v = \frac{3418}{3418+500} \times (-11.97) = -10.44$$

用外加电源法求 R_o。有源网络无源化，外加电源的电流不能流过受控源，则受控源 $\dot{I}_C = 0$ 即开路。所以有：$R_o = R_C = 3\ k\Omega$



题图 6-24



题图 6-25

6-24 如题图 6-24 所示，共发射极放大电路中，已知电路中各元件参数： $R_c = 1.5k\Omega,$ $R_{B1} = 20k\Omega,\ R_{B2} = 60k\Omega,\quad R_E = 1k\Omega,\ R_L = 2k\Omega,\quad V_{CC} = 15V, \beta = 40$ 。

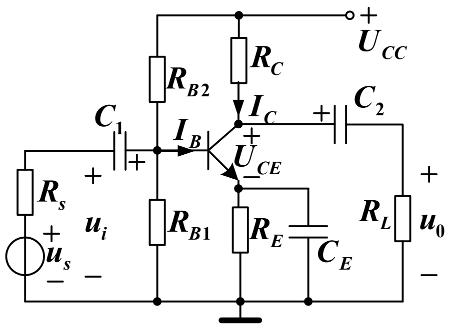
（1）试计算该放大电路的静态工作点（$I_{BQ,}\ I_{CQ},\ U_{CEQ}$）。

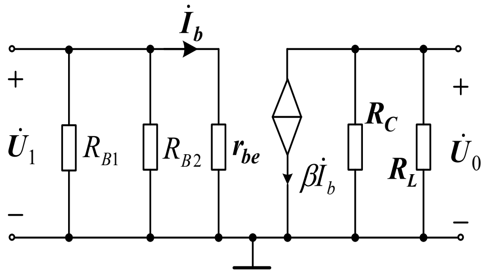
（2）求电压放大倍数 $\dot{A}_v$，输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

（3）说明稳定工作点的过程，即温度：

$$T\uparrow \to I_C(\uparrow) \to U_E(\quad) \to U_{BE}(\quad) \to I_B(\quad) \to I_C(\quad)$$

解：





$$U_B = 15\times\frac{20}{20+60} = 3.75v,\ I_E = I_C = \frac{3.75-0.7}{1} = 3.05mA,\ I_B = \frac{3.05}{40} = 76\mu A,$$

$$U_{CE} = 15 - 3.05\times(1.5+1) = 7.375v$$

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}},\ r_i \approx r_{be},\ r_0 = R_c$$

$$T\uparrow \to I_C(\uparrow) \to U_E(\uparrow) \to U_{BE}(\downarrow) \to I_B(\downarrow) \to I_C(\downarrow)$$

6-25 如题图 6-25 所示两级阻容耦合放大电路中，已知参数： $\beta_1 = \beta_2 = 50$， $R_{B11} = 30k\Omega,\quad R_{B12} = 20k\Omega,\quad R_{C1} = 4k\Omega,\ R_{E1} = 4k\Omega,\quad R_{B21} = 130k\Omega,\quad R_{E2} = 3k\Omega,$ $R_L = 1.5k\Omega,\quad V_{CC} = 12\text{V}$，$V_{BE} = 0.7\text{V}$，$r_{be} = 300\ \Omega$。

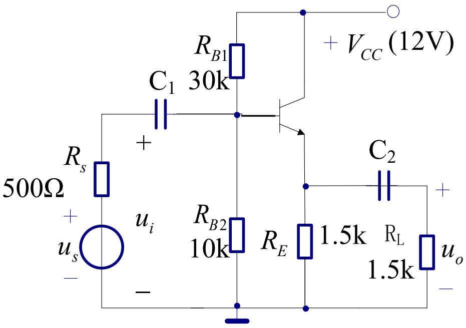
（1）试计算第一级放大电路的静态工作点（$I_{BQ,}\ I_{CQ},\ U_{CEQ}$）；

（2）求放大电路的输入电阻，如果第一级电压放大倍数 $\dot{A}_{u1} = \dot{U}_{01}/\dot{U}_i = -112.5$；总电压放大倍数近似等于多少。

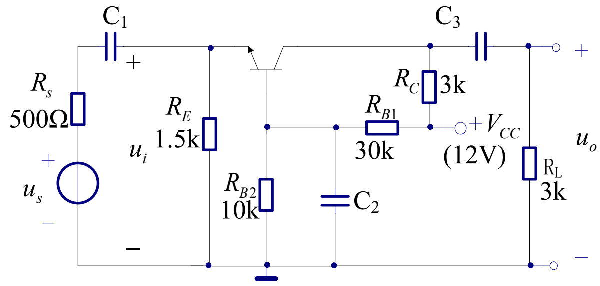
解：① $U_{B1} = 12\times\frac{20}{20+30} = 4.8v,\ \ I_{E1} = I_{C1} = \frac{4.8-0.7}{4} \approx 1mA,$

$I_{B1} = \frac{1}{51} \approx 20\mu A,\qquad\qquad U_{CE1} = 12 - 1.0\times(4+4) = 4V$

② $r_{be1} = 300 + (1+\beta_1)\frac{26}{1} \approx 1.6\,\text{k}\Omega$， 总电压放大倍数近似等于 $\dot{A}_{u1}$。



题图 6-26



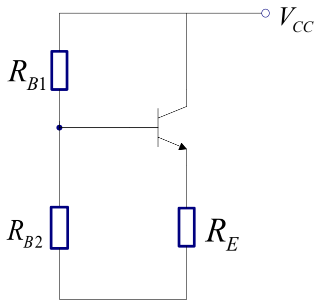
题图 6-27

6-26　在题图 6-26 所示电路中，三极管 $\beta=50$，$U_{BEQ}=0.7$ V，$r_{be}=2$ kΩ。

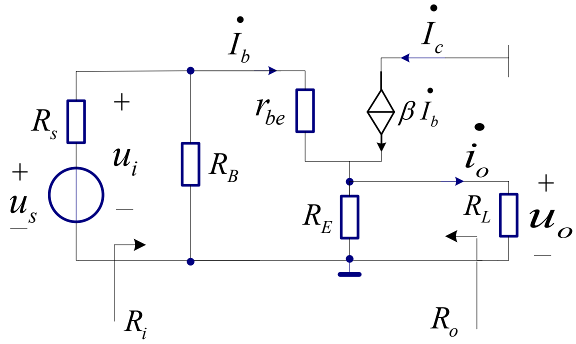
（1）分析静态工作点；

（2）求放大电路的 $\dot{A}_{vi}$， R_i 和 R_o

解：

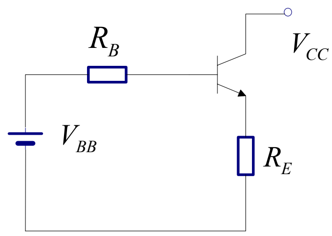


（b）



（c）

① 直流通路如图(b)所示，图中 V_{CC}, R_{B1}, R_{B2} 用戴维宁定理等效如图所示。



其中，$V_{BB}=\dfrac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}\cdot V_{CC}=\dfrac{1}{4}V_{CC}=3V$，$R_B=R_{B1}//R_{B2}=7.5k\Omega$

$V_{BB}=\dot{I}_{BQ}\cdot R_B+U_{BEQ}+(1+\beta)\dot{I}_{BQ}\cdot R_E$ ，

$\therefore \dot{I}_{BQ}=\dfrac{V_{BB}-U_{BEQ}}{R_B+(1+\beta)\cdot R_E}=\dfrac{2.3}{7.5+50\times 1.5}mA\approx 28\mu A$

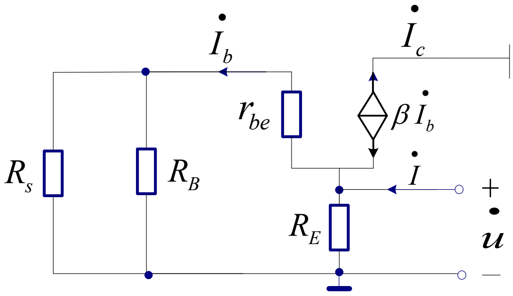
$\therefore I_{CQ}=\beta\dot{I}_{BQ}=1.4mA$， $U_{CEQ}=V_{CC}-I_{EQ}\cdot R_E=9.9V$

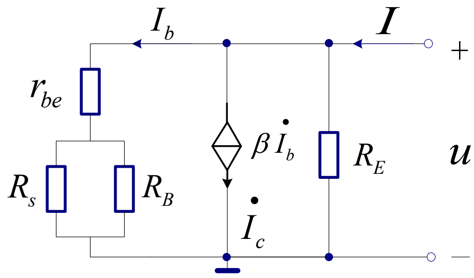
②交流微变等效电路如图(c)所示，可求得：

$$\dot{A}_u = \frac{(1+\beta)\dot{I}_b\cdot(R_E//R_L)}{\dot{I}_b\cdot r_{be}+(1+\beta)\dot{I}_b\cdot(R_E//R_L)} = \frac{51\times0.75}{2+51\times0.75} = 0.95$$

$$R_i = R_B//[r_{be}+(1+\beta)\cdot(R_E//R_L)] \approx 6.32\ k\Omega$$

外加电源法求 R_o，有源网络 u_s 置零，电路如图，则有：





$$\begin{cases} u = \dot{I}_b\cdot(r_{be}+R_s//R_B) \\ I = \dfrac{u}{R_E}+(1+\beta)\cdot\dot{I}_b \end{cases} \Rightarrow I = \frac{u}{R_E}+(1+\beta)\cdot\frac{u}{r_{be}+R_s//R_B}$$

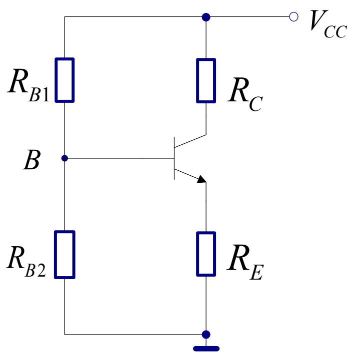
$$\therefore R_o = \frac{u}{I} = R_E//[\frac{r_{be}+R_s//R_B}{1+\beta}] = 1.5k\Omega//48.4k\Omega \approx 48.4k\Omega$$

6-27 在题图 6-27 所示电路中，三极管 $\beta = 50$，$U_{BEQ} = 0.7$ V，$r_{be} = 2$ kΩ。

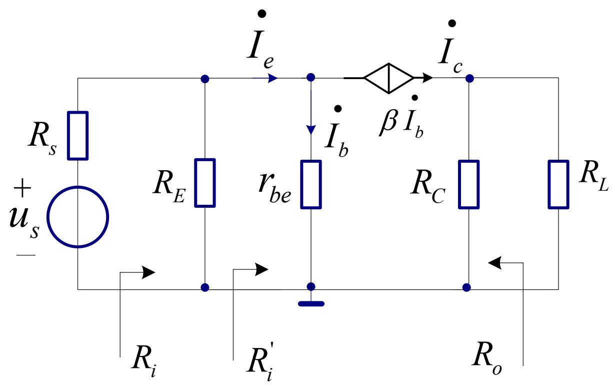
（1）分析静态工作点；

（2）求放大电路的 $\dot{A}_{vi}$， R_i 和 R_o

解：



（b）



（c）

① 直流通路如图(b)所示，$U_{BQ} \approx \dfrac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}\cdot V_{CC} = 3V$

$$\therefore I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_{BQ}-U_{BEQ}}{R_E} \approx 1.53mA，\ I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} \approx 30\mu A$$

$$\therefore U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}(R_C+R_E) = 5.115V$$

②交流微变等效电路如图(c)所示，可求得：

$$\dot{A}_u=\frac{u_o}{u_i}=\frac{\beta\dot{I}_b\cdot(R_C//R_L)}{\dot{I}_b\cdot r_{be}}=\frac{\beta\cdot(R_C//R_L)}{r_{be}}=\frac{50\times1.5}{2}=37.5$$

$$R_i^{'}=\frac{u_i^{'}}{I_e}=\frac{\dot{I}_b\cdot r_{be}}{(1+\beta)\cdot\dot{I}_b}=\frac{r_{be}}{1+\beta}=39\Omega$$

$\therefore R_i=R_E//R_i^{'}\approx39\Omega$

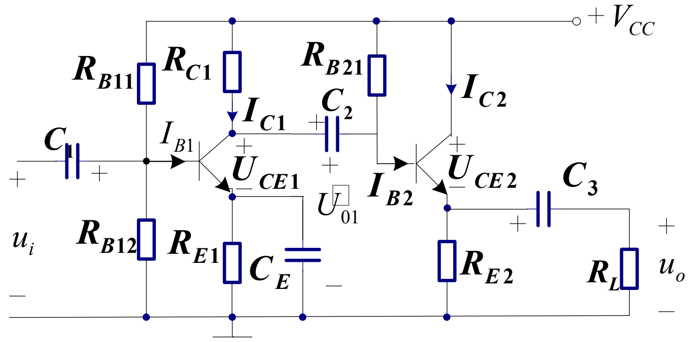
外加电源法求 R_o，有源网络无源化，外加电流不能流过受控源，即开路，

$\therefore R_o=R_C=3k\Omega$

6-28 在题图 6-28 所示两级阻容耦合放大电路中，已知参数：$\beta_1=\beta_2=50$，$R_{B11}=30k\Omega$，$R_{B12}=20k\Omega$，$R_{C1}=4k\Omega$，$R_{E1}=4k\Omega$，$R_{B21}=130k\Omega$，$R_{E2}=3k\Omega$，$R_L=1.5k\Omega$，$V_{CC}=12\text{V}$，$\text{U}_{\text{BEQ}}=0.7\text{ V}$，$r_{be}=300\ \Omega$。

（1）画出全电路的微变等效电路图，并求出晶体管输入电阻 r_{be1}、r_{be2}；

（2））计算多级放大电路的输入电阻 R_i、输出电阻 R_o



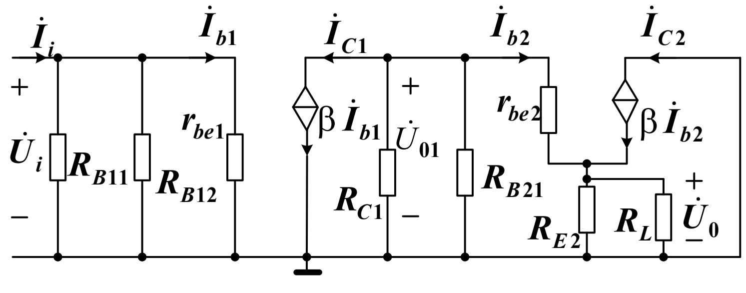
题图 6-28

解：①$U_{B1}=12\times\dfrac{20}{20+30}=4.8v$，　　$I_{E1}=I_{C1}=\dfrac{4.8-0.6}{4}=1.05mA$，

$I_{B1}=\dfrac{1.05}{51}=21\mu A$，　　$U_{CE1}=12-1.05\times(4+4)=3.6v$

$I_{B2}=\dfrac{12-0.6}{130+51\times3}\approx0.04\text{mA}$　　$I_{C2}=50\times0.04=2\text{mA}$

$U_{CE2}=12-2\times3=6v$



②

③ $r_{be1}=300+(1+\beta_1)\dfrac{26}{1.05}\approx 1.6\,\mathrm{k}\Omega$，$r_{be2}=300+(1+\beta_2)\dfrac{26}{2}\approx 1\,\mathrm{k}\Omega$

$R'_{L1}=R_{C1}\,//\,R_{B21}\,//\,[r_{be2}+(1+\beta_2)(R_{E2}\,//\,R_L)]\approx 3.6\,\mathrm{k}\Omega$

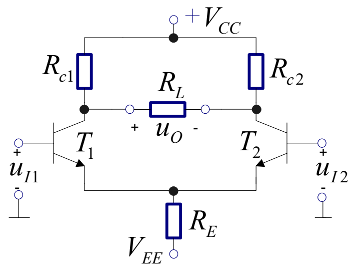
$\dot{A}_{u1}=\dfrac{\dot{U}_{01}}{\dot{U}_i}=-\dfrac{\beta_1 R'_{L1}}{r_{be1}}=-50\times\dfrac{3.6}{1.6}=-112.5$，总电压放大倍数近似等于 $\dot{A}_{u1}$。

③ $r_{be1}=300+(1+\beta_1)\dfrac{26}{1.05}\approx 1.6\,\mathrm{k}\Omega$，$r_{be2}=300+(1+\beta_2)\dfrac{26}{2}\approx 1\,\mathrm{k}\Omega$

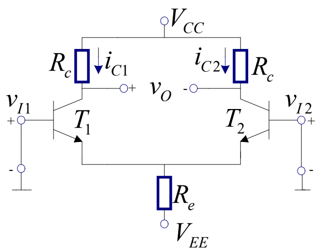
$r_i=r_{i1}=R_{B11}\,//\,R_{B12}\,//\,r_{be1}=30\,//\,20\,//\,1.6\approx 1.4\,\mathrm{k}\Omega$，

$r_0=r_{02}\approx R_{E2}\,//\,[(1+\beta_2)(r_{be2}+R_{C1}\,//\,R_{B21})]\approx 0.1\,\mathrm{k}\Omega$。

6-30 差动放大电路如题图 6-30 所示，已知晶体管的 $\beta=100$，$U_{BEQ}=0.7$ V，$R_{C1}=R_{C2}=5$ kΩ，$R_e=5$ kΩ，$R_L=4$ kΩ，$V_{CC}=6$ V，$V_{EE}=-6$V，计算静态时的 U_{C1}，U_{C2}，I_{C1}，I_{C2}



题图 6-30



直流通路

解：输入信号置零，两个输入端均接地，

$V_{B1}=V_{B2}=0, V_E=0-V_{BE}$，设 $b-e$ 结压降为 $0.7V$，则 $V_E=-0.7V$，所以发射极电阻 R_e 中的电流

$$I_{R_e}=-(0.7+V_{EE})/R_e$$

由于管子参数相同，所以，每一个三极管的发射极电流为

$$I_E=-(0.7+V_{EE})/2R_e=I_{R_e}/2$$

每个三极管的基极电流为: $I_B=I_E/(1+\beta)$

每个三极管的集电极电流为: $I_C\approx I_E=I_{R_e}/2$

集电极电压为 $U_C=V_{CC}-I_CR_C$

第七章 集成运算放大器简介

7-1 根据下列要求，将应优先考虑使用的集成运放填入空内。已知现有集成运放的类型是：

①通用型 ②高阻型 ③高速型 ④低功耗型 ⑤高压型 ⑥大功率型 ⑦高精度型

(1)作低频放大器，应选用 ①通用型 。

(2)作宽频带放大器，应选用 ③高速型 。

(3)作幅值为$1\mu V$以下微弱信号的测量放大器，应选用 ⑦高精度型 。

(4)作内阻为$100k\Omega$信号源的放大器，应选用 ②高阻型 。

(5)负载需$5A$电流驱动的放大器，应选用 ⑥大功率型 。

(6)要求输出电压幅值为$\pm 80V$的放大器，应选用 ⑤高压型 。

(7)宇航仪器中所用的放大器，应选用 ④低功耗型 。

7-11 填空：

(1)______运算电路可实现$A_u > 1$的放大器。

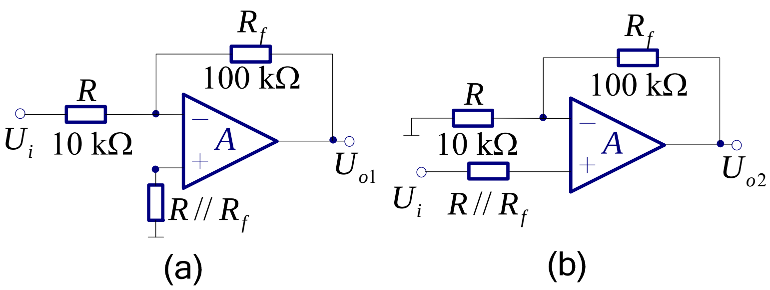
(2)______运算电路可实现$A_u < 0$的放大器。

(3)______运算电路可实现函数$Y = aX_1 + bX_2 + cX_3$，a、b和c均大于零。

(4)______运算电路可实现函数$Y = aX_1 + bX_2 + cX_3$，a、b和c均小于零。

(1) 同相比例 (2) 反相比例 (3) 同相求和 (4) 反相求和

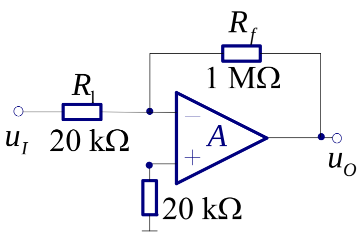
7-12 电路如题图 7-9 所示，集成运放输出电压的最大幅值为$\pm 14V$，填写下表。



题图 7-9

u_I/V	0.1	0.5	1.0	1.5
u_{O1}/V	-1	-5	-10	-14
u_{O2}/V	1.1	5.5	11	14

7-13 设计一个比例运算电路，要求输入电阻$R_i = 20k\Omega$，比例系数为-50。

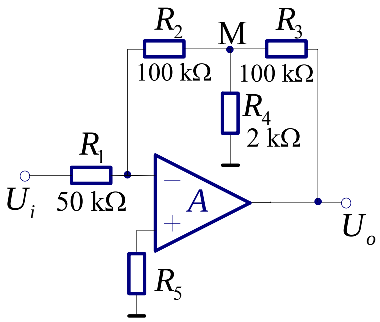


解：比例系数为-50，反响比例电路如图所示，

$R_i = R_1 = 20k\Omega$， $u_0 = -\dfrac{R_f}{R_1} \cdot u_I$， 比例系数 $-\dfrac{R_f}{R_1} = -50$

$\therefore R_f = 1000k\Omega = 1M\Omega$

7-14 电路如题图 7-10 所示，试求其输入电阻以及输入电压 U_i 与输出电压 U_o 的比例系数。



题图 7-10

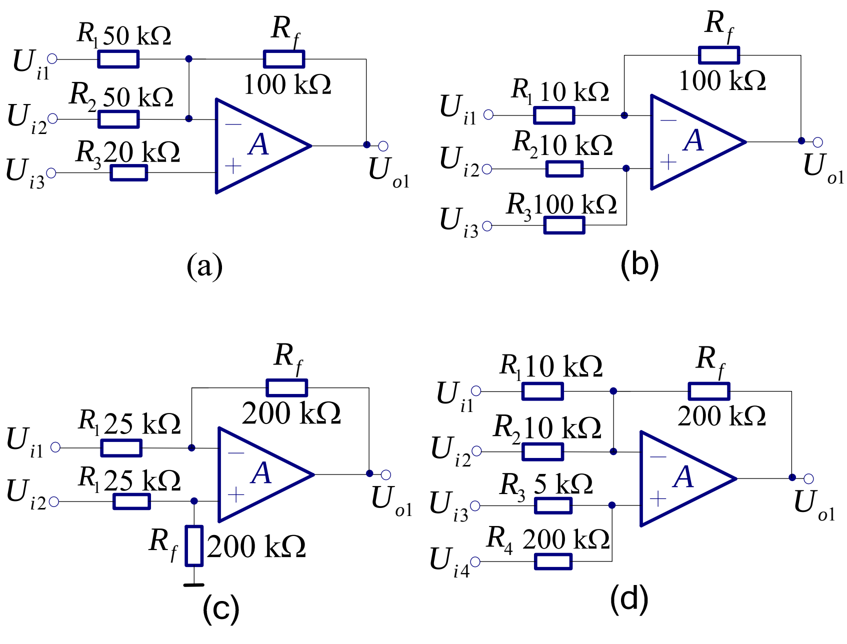
解：输入电阻 $R_I = R_1 = 50\ k\Omega$ 比例系数 104

7-15 电路如题图 7-10 所示，集成运放输出电压的最大幅值为 $\pm 14V$，u_I 为 $2V$ 的直流信号。分别求出下列各种情况下的输出电压。

(1) R_2 短路；(2)R_3 短路；(3)R_4 短路；(4)R_4 断路。

解：（1）-4 （2）-4 （3）-14 （4）-8

7-16 试求题图 7-11 所示各电路输出电压与输入电压的运算关系式。



题图 7-11

解： (a) $\because R_1 // R_2 // R_f = R_3$

$$\therefore u_{01} = -\frac{R_f}{R_1}u_{i1} - \frac{R_f}{R_2}u_{i2} + \frac{R_f}{R_3}u_{i3} = -2u_{i1} - 2u_{i2} + 5u_{i3}$$

(b) $\because R_1//R_f = R_2//R_3$

$$\therefore u_{01} = -\frac{R_f}{R_1}u_{i1} + \frac{R_f}{R_2}u_{i2} + \frac{R_f}{R_3}u_{i3} = -10u_{i1} + 10u_{i2} + u_{i3}$$

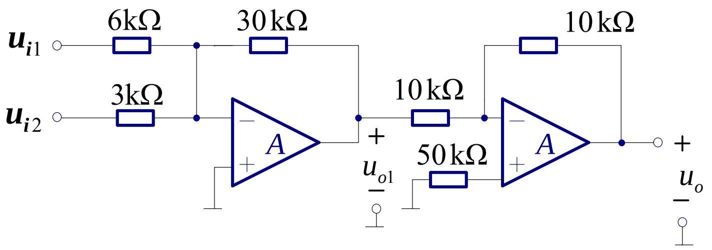
(c) $\because R_f//R_1 = R_2//R_f$

$$\therefore u_{01} = -\frac{R_f}{R_1}u_{i1} + \frac{R_f}{R_2}u_{i2} = -8u_{i1} + 8u_{i2}$$

(d) $\because R_1//R_2//R_f = R_3//R_4$

$$\therefore u_{01} = -\frac{R_f}{R_1}u_{i1} - \frac{R_f}{R_2}u_{i2} + \frac{R_f}{R_3}u_{i3} + \frac{R_f}{R_4}u_{i4} = -20u_{i1} - 20u_{i2} + 40u_{i3} + u_{i4}$$

7-21 含理想运算放大器电路如题图 7-15 所示,已知输入电压u_{i1}和u_{i2},试求输出电压与输入电压的关系式。



题图 7-15

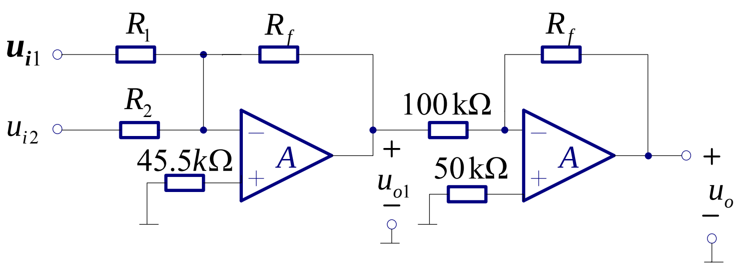
解:

$$u_{01} = -\frac{30}{6}u_{i1} - \frac{30}{3}u_{i2} = -5u_{i1} - 10u_{i2}$$

$$u_0 = -\frac{10}{10}\cdot u_{01} = -u_{01}$$

$$\therefore u_0 = 5u_{i1} + 10u_{i2}$$

7-22 含理想运算放大器电路如题图 7-16 所示,已知 $R_1 = R_f = 100k\Omega,\ R_2 = 500k\Omega,$ 输入电压u_{i1}和u_{i2},求u_{01}, u_0与u_{i1}、u_{i2}的关系。



题图 7-16

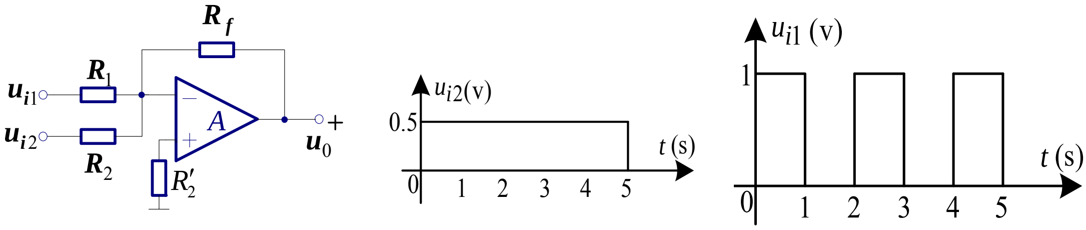
解:

$$u_{01}=-\frac{R_f}{R_1}\cdot u_{i1}-\frac{R_f}{R_2}\cdot u_{i2}=-u_{i1}-\frac{1}{5}u_{i2}$$

$$u_0=-\frac{R_f}{100}\cdot u_{01}=-u_{01}$$

$$\therefore u_0=u_{i1}+\frac{1}{5}u_{i2}$$

7-23 含理想运算放大器电路如题图 7-17(a)所示,已知 $R_1=10\text{k}\Omega$, $R_2=10\text{k}\Omega$，$R_f=5\text{k}\Omega$, 写出输出电压 u_0 与输入电压 u_{i1}和u_{i2} 的关系式。当输入电压 u_{i1}和u_{i2} 的波形分别如题图 9-9 (b)所示，试在图中画出输出电压 u_0 ~t 的波形。

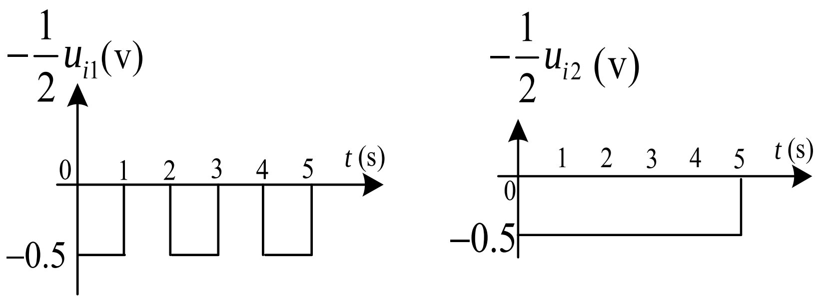


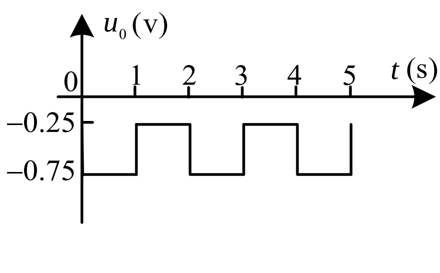
(a) (b)

题图 7-17

解：

$$u_0=-\frac{R_f}{R_1}\cdot u_{i1}-\frac{R_f}{R_2}\cdot u_{i2}=-\frac{1}{2}u_{i1}-\frac{1}{2}u_{i2}$$





第八章 负反馈放大器

8-1

(1) B B

(2) D

(3) C

(4) C

(5) A B B A B

(6) A B C D B A

8-2

(1) 在某放大电路中加上串联电压负反馈以后，对其工作性能的影响为：降低放大器的放大倍数、放大倍数稳定、非线性失真减小、通频带展宽、输入电阻增大、输出电阻减小。

(2) 负反馈使放大电路的放大倍数 下降 ，但提高了放大倍数的 稳定性 ，串联负反馈使输入电阻 提高了 ，电压负反馈使输出电阻 降低了 。

(3) 在引入深度负反馈条件下，运算放大器的闭环电压放大倍数仅与 外接电阻（或反馈系数） 有关，而与 运放组件本身参数（或开环放大倍数） 无关

(4) 在放大器输出端获取反馈信号的方式可分为 电压 和 电流 ，从反馈电路与放大电路在输入端的连接方式来分可分为 串联 和 并联

（5）放大器产生自激振荡的条件是 $\dot{A}\dot{F}=-1$ ，即振幅平衡条件 $|\dot{A}\dot{F}|=1$ ，相位平衡条件 $\varphi=(2n+1)\pi$ 度。振荡器要产生单一频率的正弦波振荡除了以上条件之外，还必须有一个 选频 网络才能实现。通常要求振荡电路接成正反馈，电路又引入了负反馈是为了 改善放大器性能

（6）正弦波振荡器应由 4 个电路环节构成: 放大电路 ； 正反馈电路 ； 选频电路 ；稳幅电路 。

（7）自激振荡的幅度条件是 $|\dot{A}\dot{F}|=1$ ，相位条件是 $\varphi_A+\varphi_F=(2n+1)\pi$ 。

8-3 (a)直流负反馈 (电压串联负反馈) (b)正反馈

(c)直流负反馈（电压并联负反馈）

(d) 既有交流负反馈也有直流负反馈（电流并联）

(e)交流负反馈（电压串联负反馈）

(f)既有交流负反馈也有直流负反馈（电压串联负反馈）

(g) 既有交流负反馈也有直流负反馈（电压串联负反馈）

8-5 (d)电流并联负反馈 (e)电压串联负反馈 (f)电压串联负反馈 (g)电压串联负反馈

8-6 (a)电压并联负反馈 (d)电压并联负反馈

8-8 (a) $A\approx R_f$ (b) $A=1+\dfrac{R_4}{R_1}$

8-9 接与 B 端子连接，属于电压串联负反馈

8-11 电路引入了__电压串联_____(填入反馈组态)交流负反馈，电路的输入电阻趋近于无穷大，电压放大倍数 $A_{uf}=\Delta u_O/\Delta u_I=1+\dfrac{R_2}{R_1}$。设 $u_I=1$V，则 $u_O=$__11_V；若 R_1 开路，则 u_O 变为___1___V；若 R_1 短路，则 u_O 变为___14___V；若 R_2 开路，则 u_O 变为__14____V；若 R_2 短路，则 u_O 变为__1___V。

8-12 (1) 500 (2) 0.1%

8-13 $A_u=2000 \quad F=\dfrac{1}{20}$

8-14 (1)电压并联负反馈 (2)电流串联负反馈 (3)电压串联负反馈 (4)电流并联负反馈

补充：
要得到一个由电压控制的电流源，应选___电流串联_____反馈放大电路；
要得到一个有电流控制的电压源，应选___电压并联_____反馈放大电路；
如果信号源内阻很大，为提高反馈效果，应采用__并联___负反馈；
如果信号源内阻很小，为提高反馈效果，应采用__串联___负反馈