
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: $i(t) = \frac{dq}{dt}$

$$(a) \quad i(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{60}{4} = 15A \quad (b) \quad i(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{15}{2 \times 60} = 0.125A$$

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 $i(t) = \frac{dq}{dt}$, 所以 $u(t) = \frac{dW}{dq} = \frac{1}{i(t)} \cdot \frac{dW}{dt}$ 。

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

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?

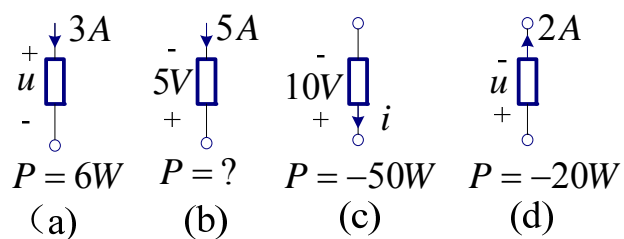
解: ① $t = \frac{1000}{60} = \frac{50}{3}$ 小时

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

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 $p = \frac{W}{t}$, 所以 $t = \frac{W}{p} = \frac{W}{u \cdot i} = \frac{4 \times 10^6}{12 \times 250} = \frac{4}{3} \times 10^3 s$

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

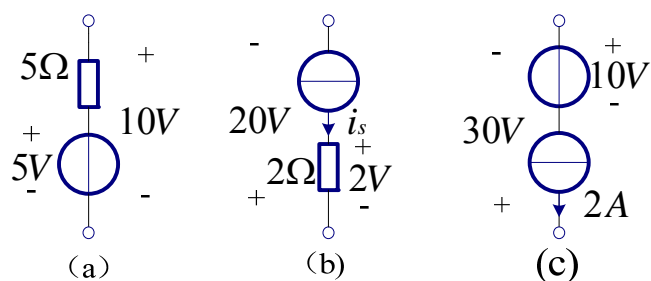
解：(a) $P = ui \Rightarrow u = \frac{P}{i} = \frac{6}{3} = 2\text{V}$

(b) $P = -ui = -25\text{W}$

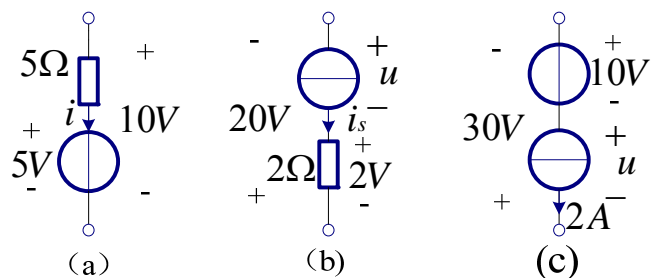
(c) $P = -ui \Rightarrow i = -\frac{P}{u} = -\frac{-50}{10} = 5\text{A}$

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

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： $i = \frac{u_R}{R} = \frac{10-5}{5} = 1\text{A}$ ，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: $i_s = \frac{u_R}{R} = \frac{2}{2} = 1A$ 。

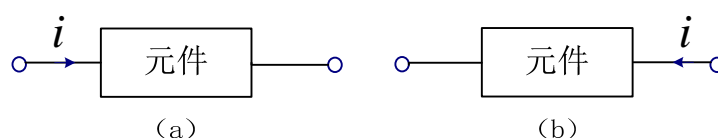
电阻的功率为: $P_R = i^2 R = 2W$

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:

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

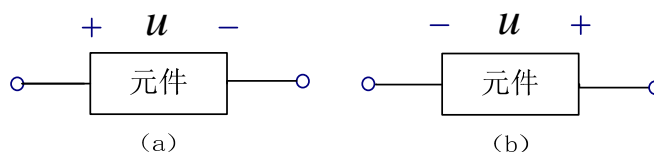
$$\therefore u = -5V$$

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：

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

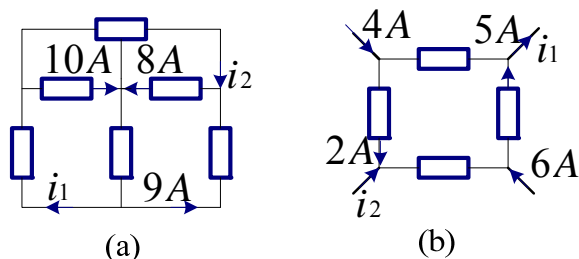
$$\therefore i = 5A$$

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。

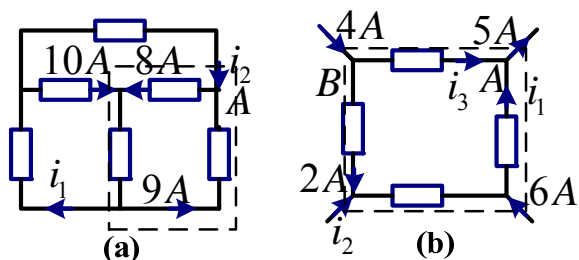
(a) 元件电流的真实方向是由左至右。

(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： $i_2 + 9 = 8 \Rightarrow i_2 = -1A$ ；

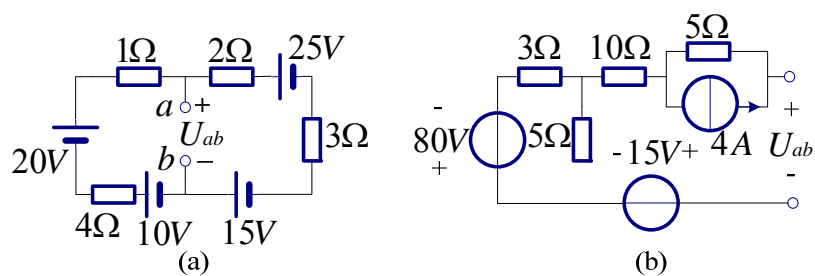
如图，对虚线表示的封闭面列 KCL 方程，有： $i_1 = i_2 + 10 = 9A$

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

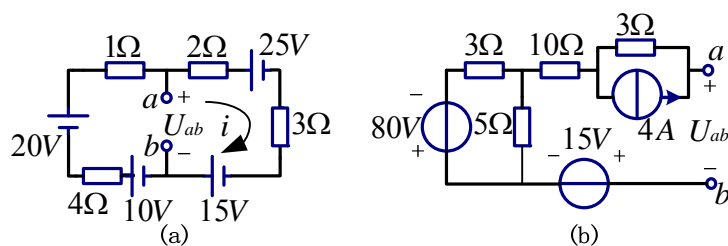
对 A 节点列 KCL 方程，有： $i_3 + i_1 = 5 \Rightarrow i_1 = 3A$

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

1-10 求题图 1-6 所示电路的电压 U_{ab} 。



题图 1-6



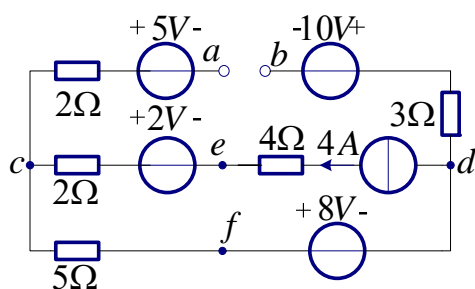
解：(a) 选回路的电流方向为顺时针方向，则有：

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

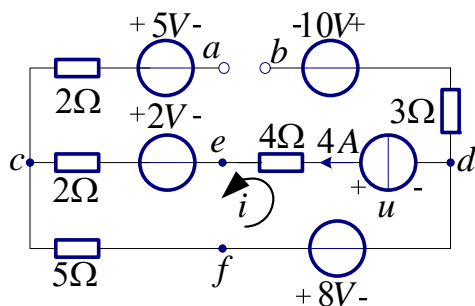
$$U_{ab} = 2i + 25 + 3i - 15 = 20V$$

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

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：

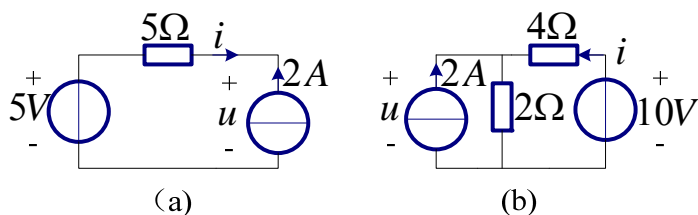
$$-2 + 2i + 5i + 8 - u + 4i = 0 \Rightarrow u = 11i + 6 = 50V$$

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

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

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

1-12 求题图 1-8 中电压 u 和电流 i 的值。



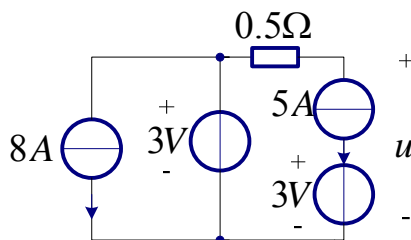
题图 1-8

解：(a) $i = -2A$, $u = -5i + 5 = 15V$

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

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

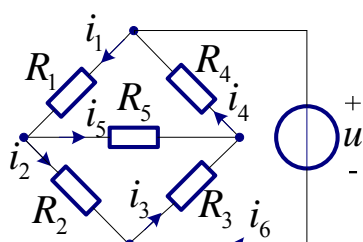
1-13 求题图 1-9 所示电路中的电压 u 。



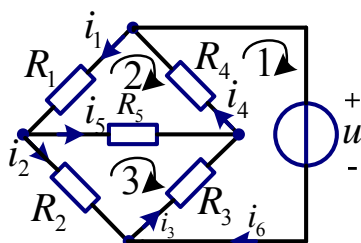
题图 1-9

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:

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

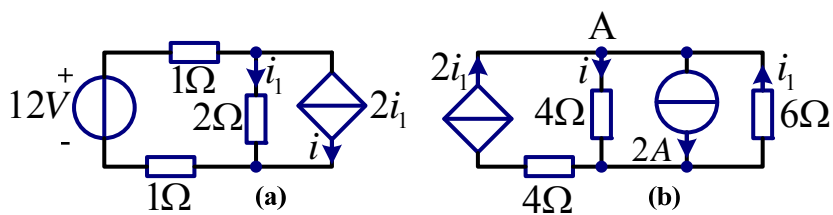
网孔的 KVL 方程为:

$$1\text{网孔: } R_4 i_4 + u + R_3 i_3 = 0;$$

$$2\text{网孔: } -R_4 i_4 - R_5 i_5 - R_1 i_1 = 0;$$

$$3\text{网孔: } R_5 i_5 - R_3 i_3 - R_2 i_2 = 0$$

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 $i = 2i_1 = 3\text{A}$

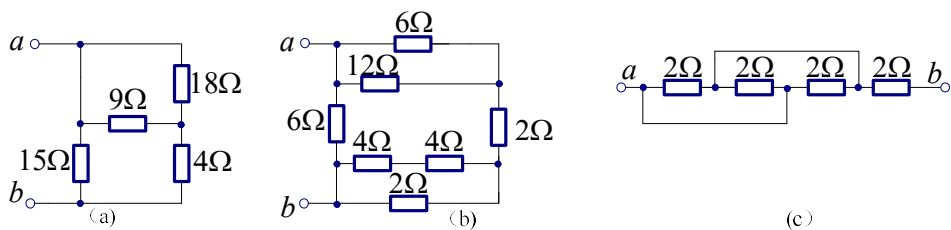
(b) 对 A 节点列写 KCL 方程： $2i_1 + i_1 = i + 2$

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： $i = -\frac{2}{3}\text{A}$

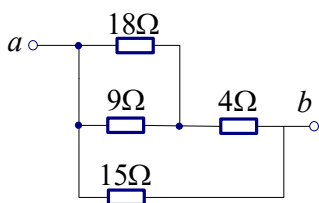
第二章 电阻电路的基本分析方法与定理

2-1 求题图 2-1 所示电路 ab 端的等效电阻。



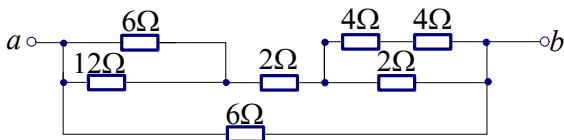
题图 2-1

解: (a)



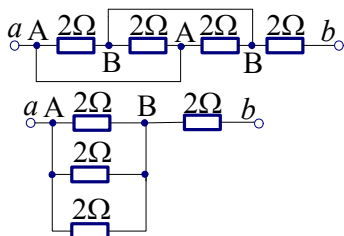
$$\begin{aligned} R_{ab} &= ((18 // 9) + 4) // 15 \\ &= (6 + 4) // 15 \\ &= 6\Omega \end{aligned}$$

(b)



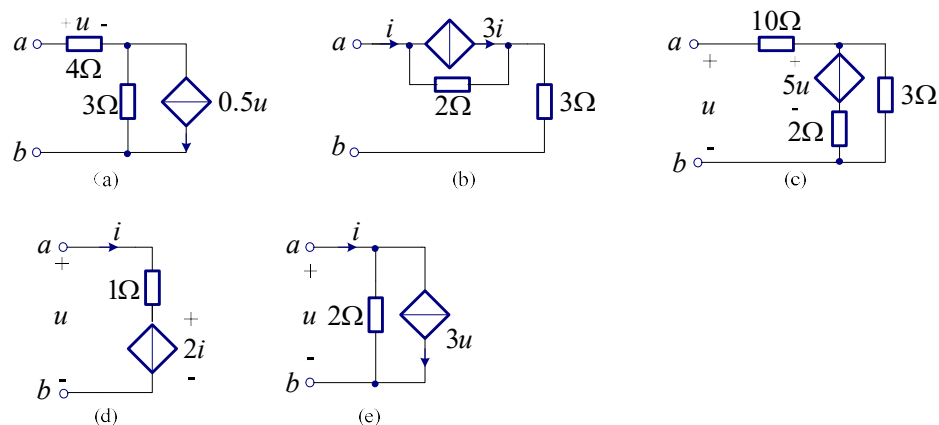
$$\begin{aligned} R_{ab} &= ((6 // 12) + 2 + (4 + 4) // 2) // 6 \\ &= (4 + 2 + 1.6) // 6 \\ &= \frac{7.6 \times 6}{7.6 + 6} \Omega = \frac{57}{17} \Omega \end{aligned}$$

(c)

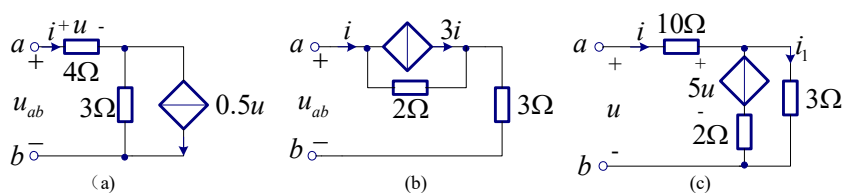


$$R_{ab} = (2 // 2 // 2) + 2 = \frac{2}{3} + 2 = \frac{8}{3} \Omega$$

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： $i = \frac{u_{ab} - u}{3} + 0.5u$ ，又因为 $u = 4i$ ，所以有： $u_{ab} = i$ 。

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

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

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

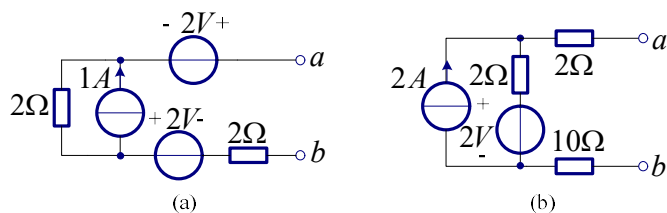
(c) 列 KVL 方程，有： $u = 10i + 3i_1$ ， $u = 10i + 5u + 2(i - i_1)$ ，整理得到： $-10u = 56i$ 。

所以输入电阻 $R_i = \frac{u}{i} = -5.6\Omega$ 。

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

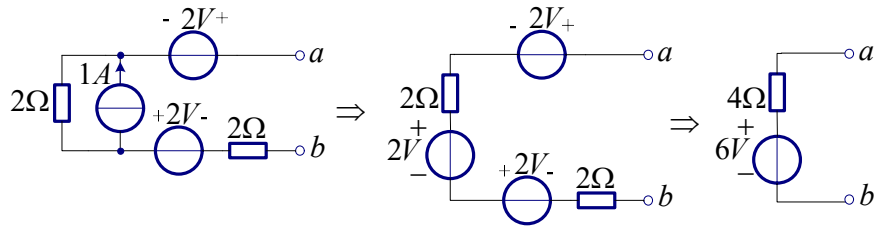
(e) 列 KCL 方程，有： $i = \frac{u}{2} + 3u = \frac{7}{2}u$ 。所以输入电阻 $R_i = \frac{u}{i} = \frac{2}{7}\Omega$ 。

2-3 将题图 2-3 电路化简为最简形式。

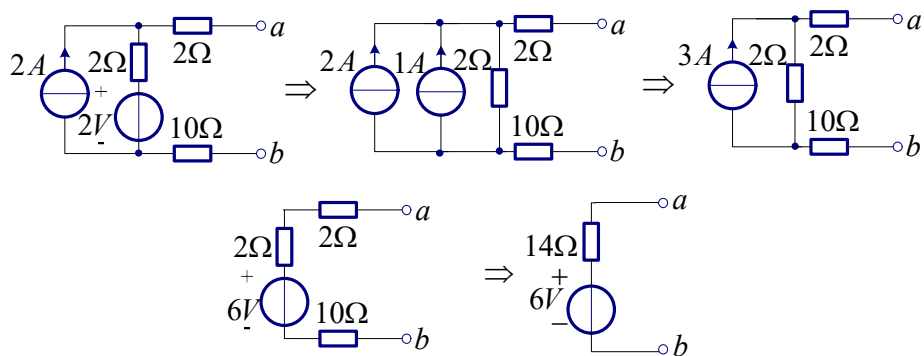


题图 2-3

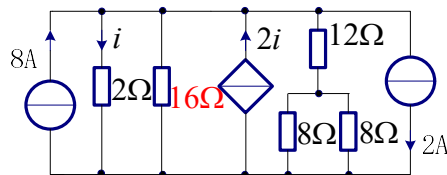
解：(a)



(b)



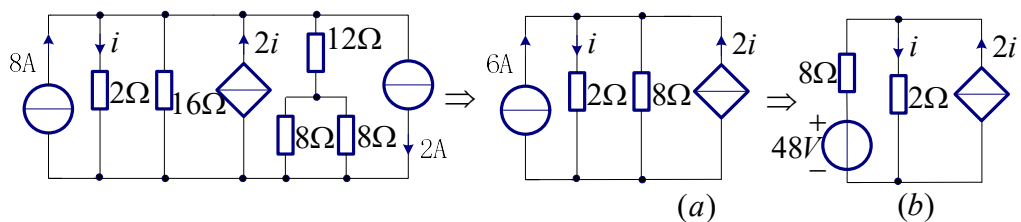
2-4 利用电阻的等效变化和电源的等效变换，求题图 2-4 中的 i 。(建议把题目中的 6 欧姆改为 16 欧姆)



题图 2-4

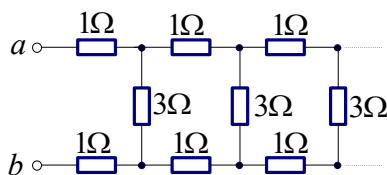
解：由电阻的串并联等效，可以得到 $(8//8+12)//16=16//16=8\Omega$

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。



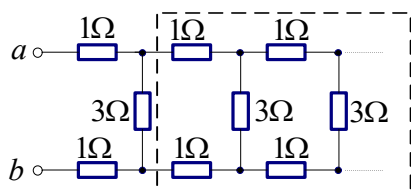
列写 KVL 方程： $48 = 8 \times (i - 2i) + 2 \times i = -6i \Rightarrow i = -8A$

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。

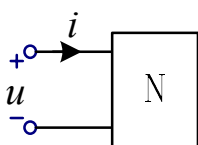


所以有 $R_{ab} = R_{ab} // 3 + 1 + 1 = \frac{3R_{ab}}{3 + R_{ab}} + 2$ ，整理得到：

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

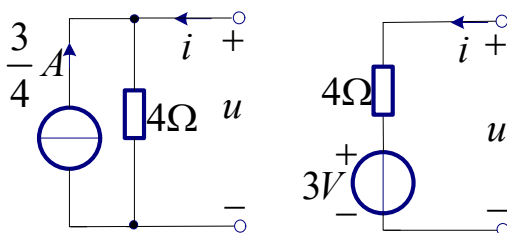
$$R_{ab} = (1 + \sqrt{5})\Omega$$

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。



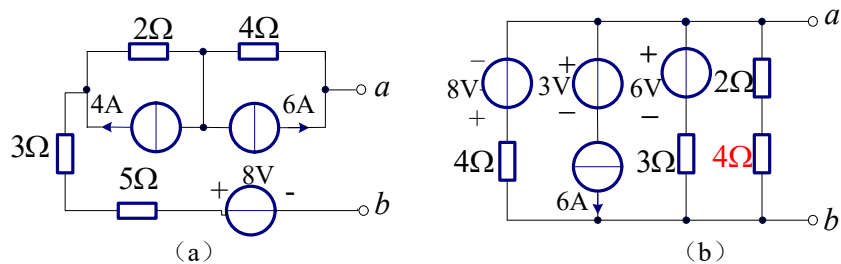
题图 2-6

解：



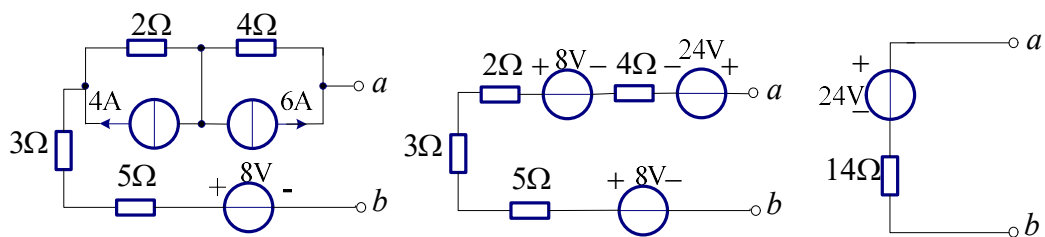
2-7 利用实际电压源与电流源的等效特性，将题图 2-7 化简成简单的电源电

路。(把 b 中的 6 欧姆电阻改成 4 欧姆电阻)

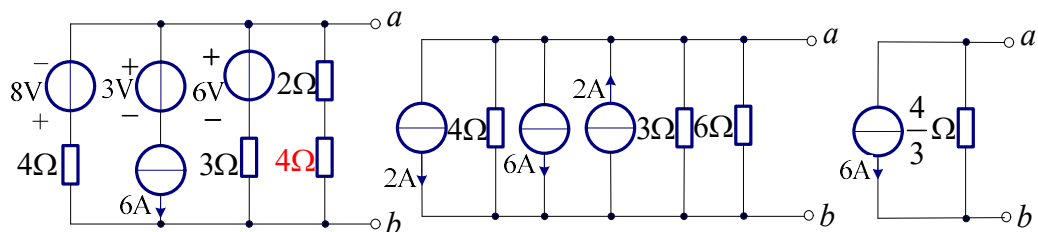


题图 2-7

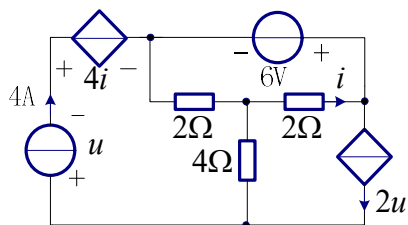
解: (a)



(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。

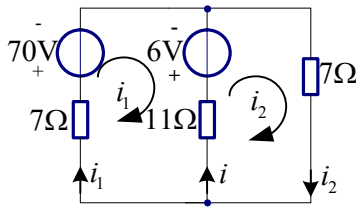


题图 2-8

解:

题图 2-9

解：(a)

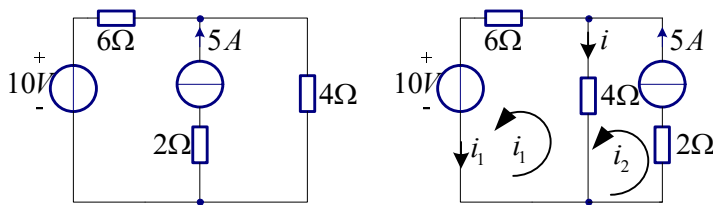


选取网孔电流方向如图所示，则网孔电流方程为：

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

的电流 $i = i_2 - i_1 = 2A$

(b)

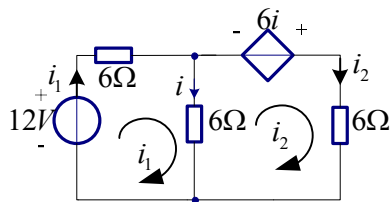


将右边两条之路更换位置，得到上图右边所示。然后选取网孔电流方向如图所示，则网孔电流方程为：

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

$i = i_2 - i_1 = 4A$

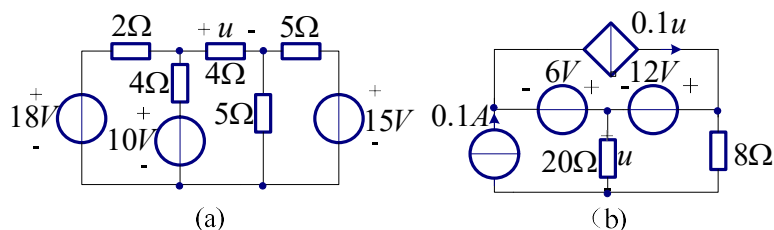
(c)



选取网孔电流方向如图所示，则网孔电流方程为：

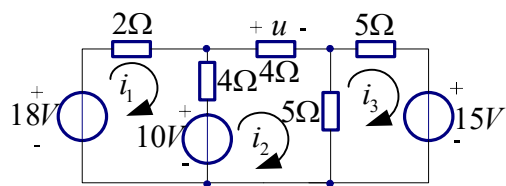
$$\begin{cases} (6+6)i_1 - 6i_2 = 12 \\ -6i_1 + (6+6)i_2 = 6i \\ i = i_1 - i_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_1 = 1.5A \\ i_2 = 1A \\ i = 0.5A \end{cases} \text{ 即求出了三条支路的电流。}$$

2-10 已知电路如题图 2-10 所示，用网孔电流法求电压 u 。



题图 2-10

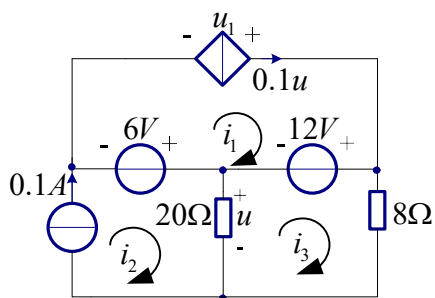
解：(a)



选取网孔电流方向如图所示，则网孔电流方程为：

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

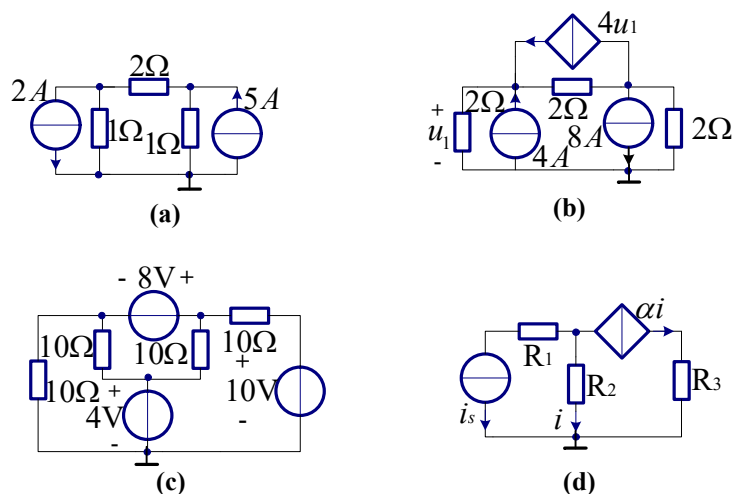
(b)



选取网孔电流方向如图所示，则网孔电流方程为：

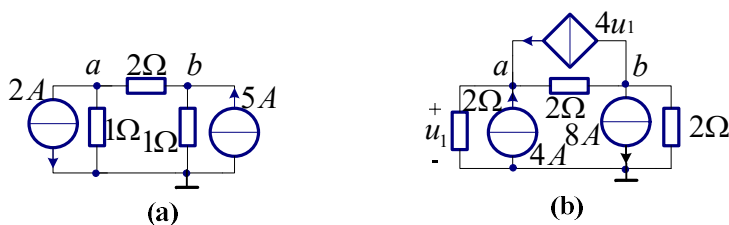
$$\begin{cases} i_1 = 0.1u \\ i_2 = 0.1A \\ -20i_2 + (20+8)i_3 = 12 \\ u = 20(i_2 - i_3) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_1 = -0.8A \\ i_2 = 0.1A \\ i_3 = 0.5A \\ u = -8V \end{cases}, \text{ 则电压 } u = -8V。$$

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

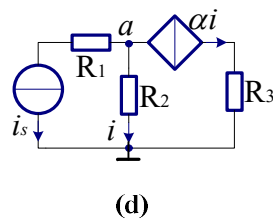
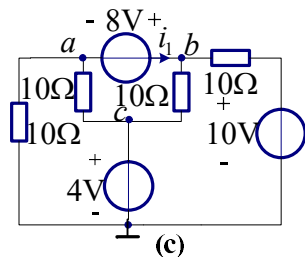
和 u_b 。则节点电压方程为:

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

(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:

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



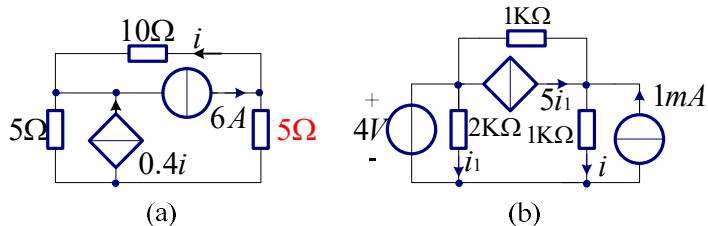
(c) 参考节点是地，节点 a、b、c 对地的电压即为独立的节点电压，设为 u_a 、 u_b 和 u_c 。则节点电压方程为：

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

(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 u_a 。则节点电压方程为：

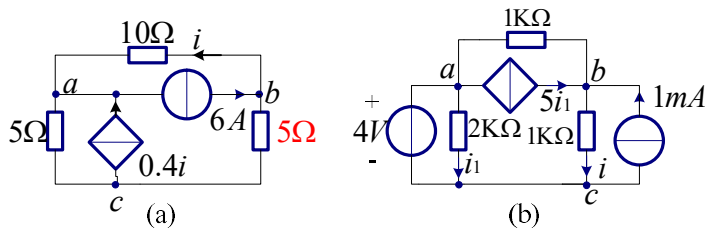
$$\begin{cases} \frac{1}{R_2}u_a = -i_s - \alpha i \\ i = \frac{1}{R_2}u_a \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} u_a = -\frac{R_2 i_s}{\alpha + 1} \\ i = -\frac{i_s}{\alpha + 1} \end{cases}$$

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



题图 2-12

解：



(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 u_a 和 u_b 。则节点电压方程为:

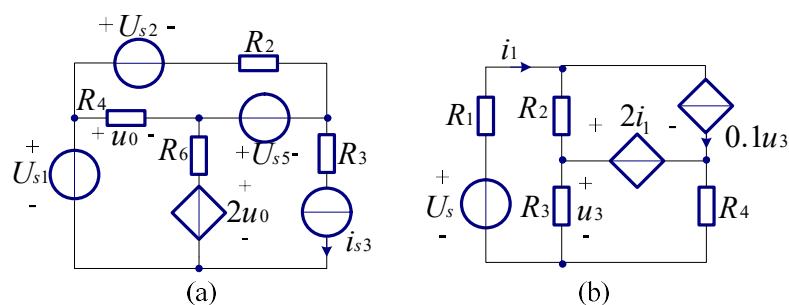
$$\begin{cases} (\frac{1}{5} + \frac{1}{10})u_a - \frac{1}{10}u_b = 0.4i - 6 \\ -\frac{1}{10}u_a + (\frac{1}{5} + \frac{1}{10})u_b = 6 \\ i = \frac{u_b - u_a}{10} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} u_a = -\frac{120}{11}V \\ u_b = \frac{180}{11}V \\ i = \frac{30}{11}A \end{cases}。$$

(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 u_a 和 u_b 。则节点电压方程为:

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

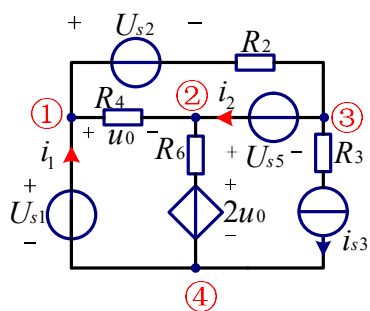
$$\text{所以 } i = \frac{u_b}{1000} = 0.0075A = 7.5mA。$$

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：

$$\left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4}\right)u'_1 + \left(-\frac{1}{R_4}\right)u'_2 + \left(-\frac{1}{R_2}\right)u'_3 = \frac{U_{s2}}{R_2} + i_1$$

$$\left(-\frac{1}{R_4}\right)u'_1 + \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6}\right)u'_2 = \frac{2u_0}{R_6} + i_2$$

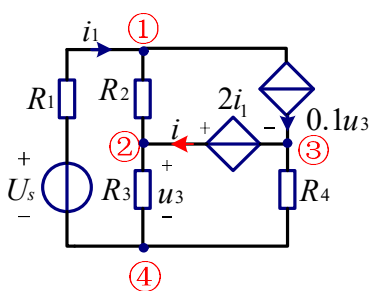
$$\left(-\frac{1}{R_2}\right)u'_1 + \frac{1}{R_2}u'_3 = -\frac{U_{s2}}{R_2} - i_2 - i_{s3}$$

$$u'_1 = U_{s1}$$

$$u'_2 - u'_3 = U_{s5}$$

$$u'_1 - u'_2 = u_0$$

(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：

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)u'_1 + \left(-\frac{1}{R_2}\right)u'_2 = \frac{U_s}{R_1} - 0.1u_3$$

$$\left(-\frac{1}{R_2}\right)u'_1 + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right)u'_2 = i$$

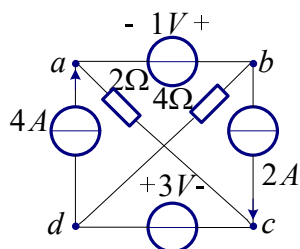
$$\frac{1}{R_4}u'_3 = 0.1u_3 - i$$

$$u'_2 - u'_3 = 2i_1$$

$$\frac{U_s - u'_1}{R_1} = i_1$$

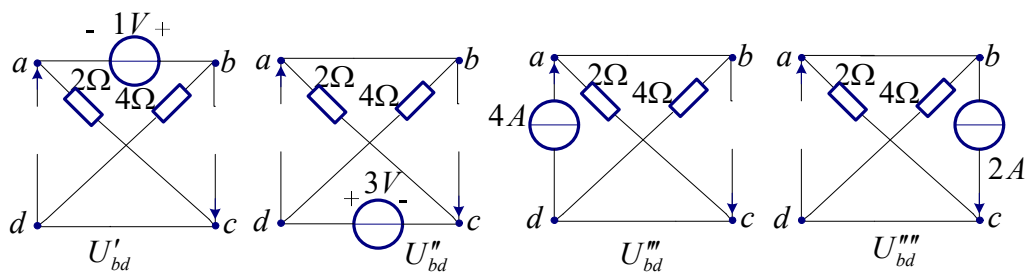
$$u'_2 = u_3$$

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：

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

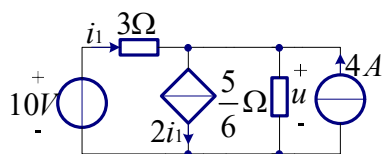
当 2A 电流源单独作用时，如图所示，两电阻并联分流，可得：

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

所以所有独立源共同作用时，有

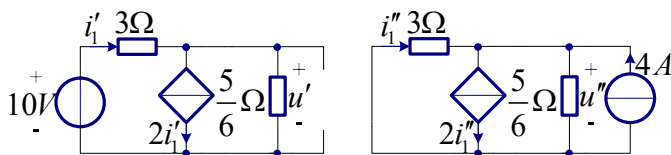
$$U_{bd} = U'_{bd} + U''_{bd} + U'''_{bd} + U''''_{bd} = \frac{2}{3} - 2 + \frac{16}{3} - \frac{8}{3} = \frac{4}{3} V$$

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：

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

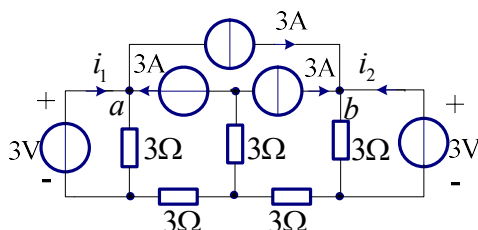
当 4A 电流源单独作用时，如图所示可得：

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

所以所有独立源共同作用时，有：

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

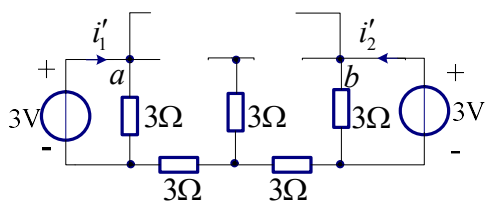
2-16 电路题图 2-16 所示，利用叠加定理求解电路中的 u_{ab} ， i_1 和 i_2 。



题图 2-16

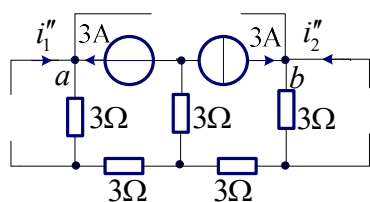
解：由叠加定理，电压/电流可以看作是各独立源单独作用所产生的电压/电流的代数和，如下图所示。

当两个 3V 电压源单独作用时，如图所示可得：



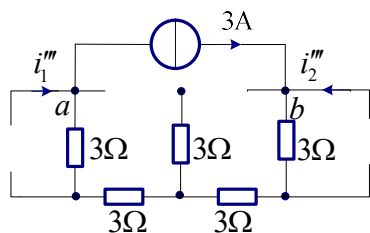
$$i'_1 = \frac{3}{3} = 1A; \quad i'_2 = \frac{3}{3} = 1A; \quad u'_{ab} = 0V$$

当两个并排的 3A 电流源单独作用时，如图所示可得：



$$i''_1 = 0A; \quad i''_2 = 0A; \quad u''_{ab} = 3 \times 3 + 3 \times 3 - 3 \times 3 - 3 \times 3 = 0V$$

当最上面的 3A 电流源单独作用时，如图所示可得：

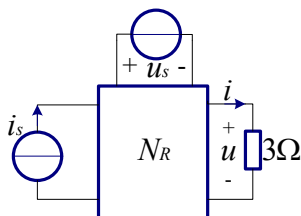


$$i_1''' = 0A; \quad i_2''' = 0A; \quad u_{ab}''' = -3 \times 3 - 3 \times 3 - 3 \times 3 - 3 \times 3 = -36V$$

所以所有独立源共同作用时，有：

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

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

$$\begin{cases} u_x + 2u_y = 3 \times 5 \\ -2u_x + 4u_y = 24 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} u_x = \frac{3}{2}V \\ u_y = \frac{27}{4}V \end{cases}$$

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： $K_1 i_s + K_2 u_s = u$ 。

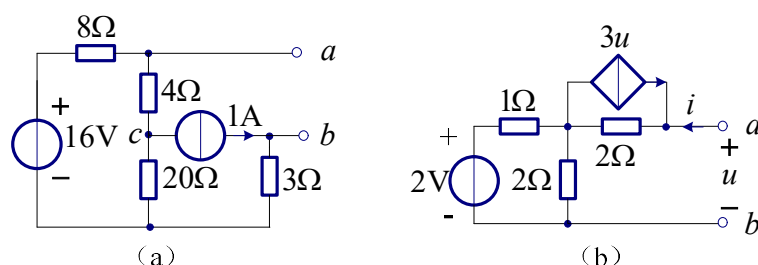
根据题目，可得：

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

所以当 $i_s = 2A, u_s = 6V$ 时, 有:

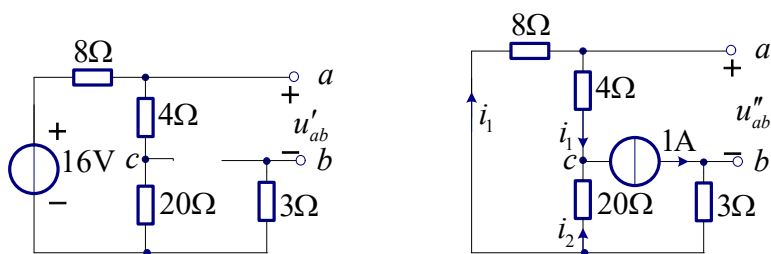
$$u = \frac{3}{2}i_s + \frac{27}{4}u_s = \frac{3}{2} \times 2 + \frac{27}{4} \times 6 = \frac{87}{2}V$$

2-18 求题图 2-18 所示电路的开路电压 u_{ab} 。



题图 2-18

解: (a)



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

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

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

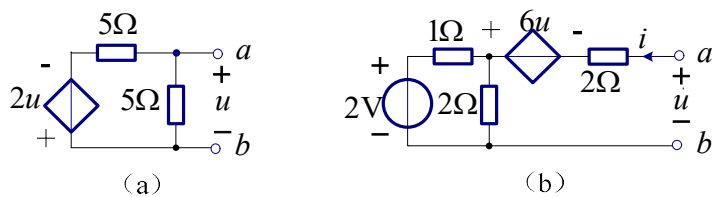
所以独立源共同作用时, 有: $u_{ab} = u'_{ab} + u''_{ab} = 12 - 8 = 4V$

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

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

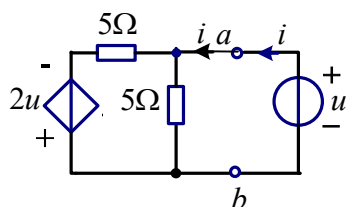
$$u_{ab} = -\frac{4}{15} \text{ V}$$

2-19 求题图 2-19 所示电路的等效内阻 R_{ab} 。



题图 2-19

解：(a) 外加电源法：

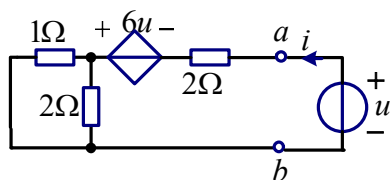


$$\frac{u}{5} + \frac{u - (-2u)}{5} = i$$

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

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

(b) 外加电源法：

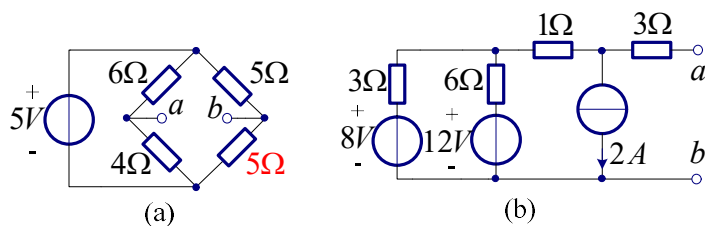


$$u = 2i - 6u + \frac{2 \times 1}{2+1} \times i$$

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

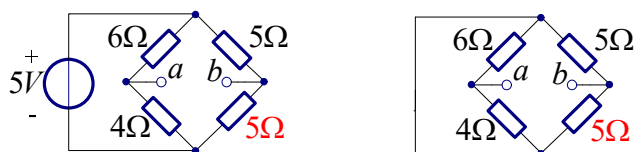
$$R_{ab} = \frac{u}{i} = \frac{8}{21} \Omega$$

2-20 求题图 2-20 所示电路 ab 端的戴维南等效电路。



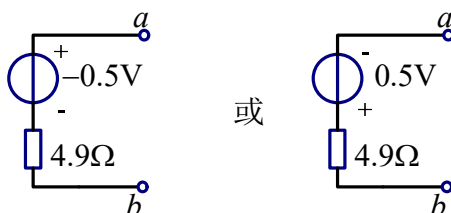
题图 2-20

解: (a)



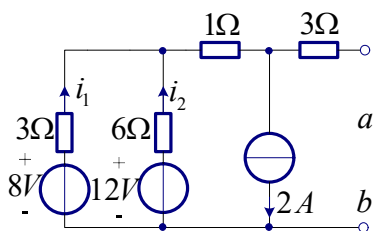
首先求开路电压: $u_{ab} = \frac{4}{4+6} \times 5 - \frac{5}{5+5} \times 5 = -0.5V$

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

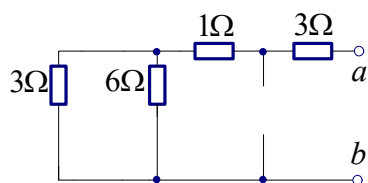


所以戴维南电路为:

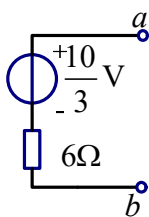
(b) 首先求开路电压:



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

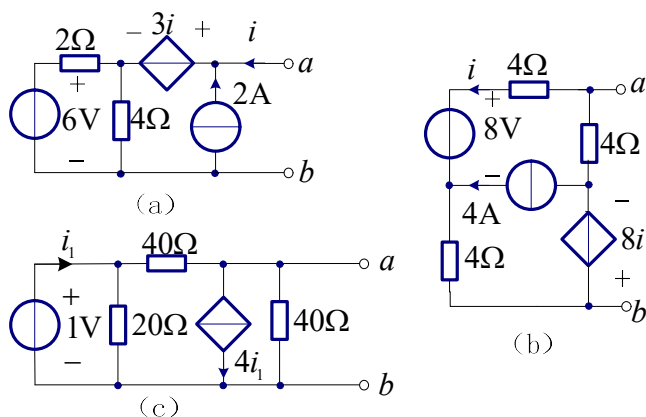


然后求等效电阻： $R_{ab} = \frac{3 \times 6}{3+6} + 1 + 3 = 6\Omega$



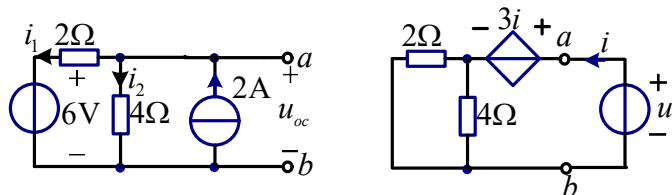
所以戴维南电路为：

2-21 求题图 2-21 所示电路中 ab 端的戴维南等效电路。



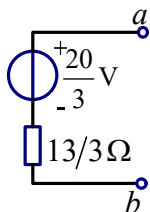
题图 2-21

解：(a) 首先求开路电压



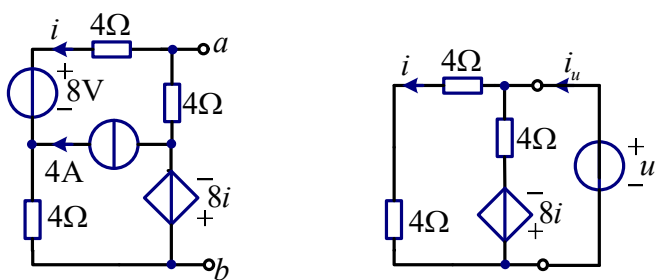
如左图所示： $i_1 + i_2 = 2$, $2i_1 + 6 = 4i_2 \Rightarrow i_2 = \frac{5}{3}A \Rightarrow u_{oc} = 4i_2 = \frac{20}{3}V$

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



所以戴维南等效电路为：

(b) 首先求开路电压



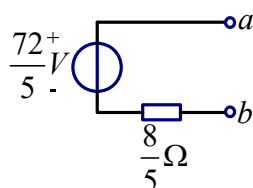
如左图所示: $4i + 4i + 8 + 4 \times (4 + i) + 8i = 0 \Rightarrow i = -\frac{6}{5} \text{ A}$

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

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

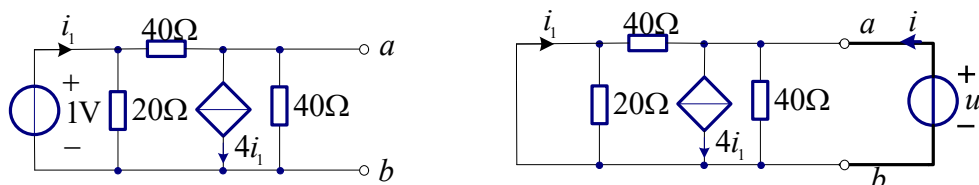
$u = 4 \times (i_u - i) - 8i = 4i_u - 12i = 4i_u - 12 \times \frac{u}{8}$

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



所以戴维南等效电路为:

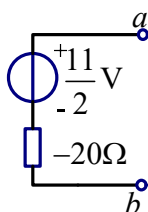
(c) 首先求开路电压



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

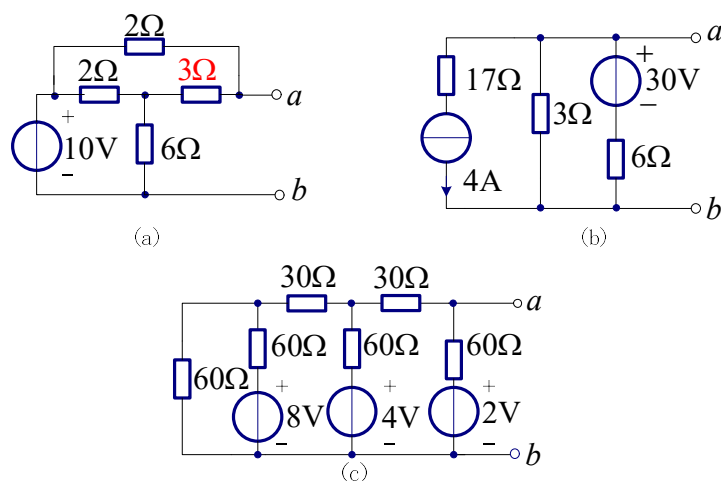
然后求等效电阻, 如右图所示: $u = -40i_1, i - \frac{u}{40} - 4i_1 + i_1 = 0,$

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



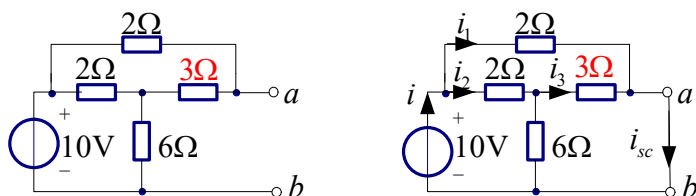
所以戴维南等效电路为:

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

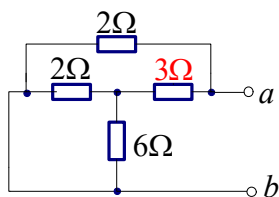
解：(a) 首先求短路电流



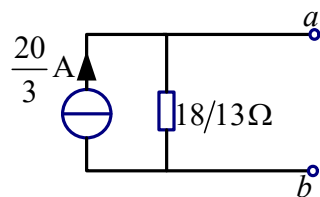
$$\text{如右图所示: } i = \frac{10}{2 // (2 + 3 // 6)} = \frac{15}{2} A$$

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

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

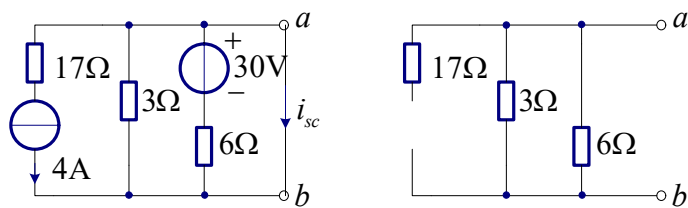


$$\text{然后求等效电阻: } R_{eq} = 2 // (3 + 2 // 6) = \frac{18}{13} \Omega$$



所以诺顿等效电路为:

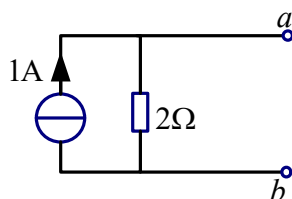
(b)



首先求短路电流，如左图所示：

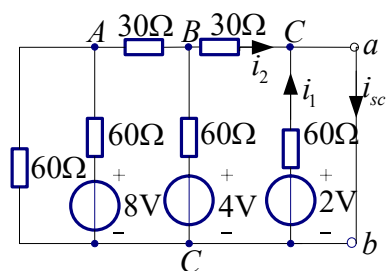
$$i_{sc} = \frac{30}{6} - 4 = 1A$$

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：

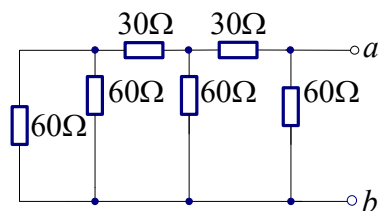
(c)



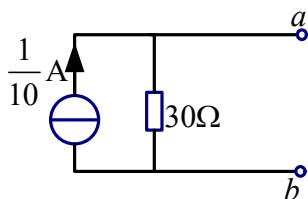
首先求短路电流，如左图所示，有三个节点，设节点 C 为参考节点，节点 A 和 B 的节点电压为 u_A, u_B ，节点电压方程为：：

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

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

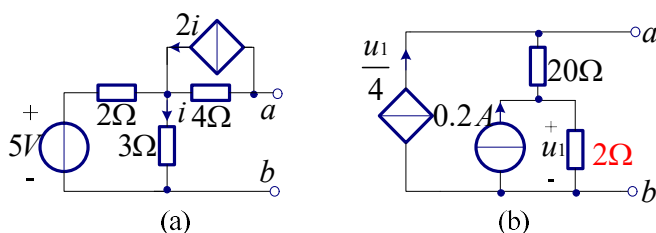


然后求等效电阻，如右图所示： $R_{eq} = (((60 // 60) + 30) // 60 + 30) // 60 = 30\Omega$



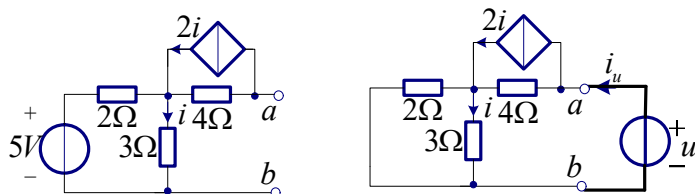
所以诺顿等效电路为：

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} 。



题图 2-23

解：(a) 首先求开路电压

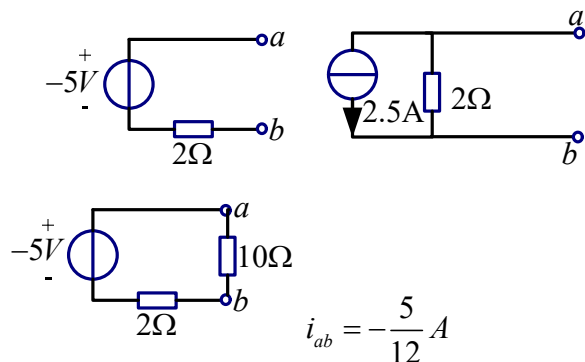


如左图所示： $i = \frac{5}{3+2} = 1A \Rightarrow u_{ab} = -2i \times 4 + 3i = -5V$

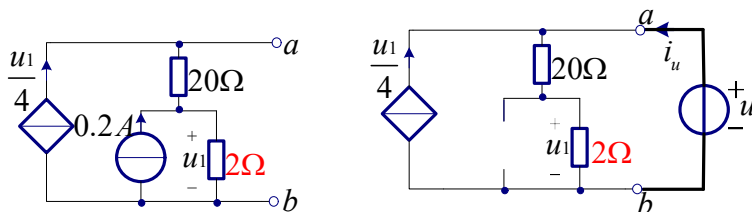
然后求等效电阻，如右图所示：

$$\begin{cases} u = 4 \times (i_u - 2i) + 3i \\ i = \frac{2}{3+2} i_u \end{cases}, \quad u = 2i_u \Rightarrow R_{eq} = \frac{u}{i_u} = 2\Omega$$

所以戴维南等效电路和诺顿等效电路为：



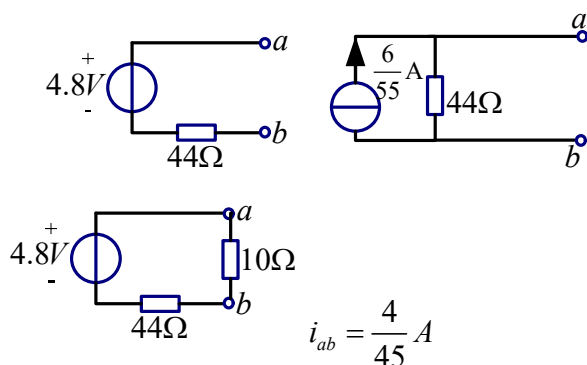
(b) 首先求开路电压



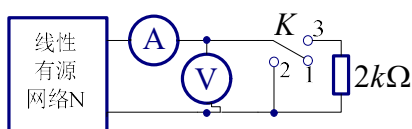
如左图所示: $\frac{u_1}{4} + 0.2 = \frac{u_1}{2}$, $u_1 = 0.8V \Rightarrow u_{ab} = \frac{u_1}{4} \times 20 + u_1 = 6u_1 = 4.8V$

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:



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

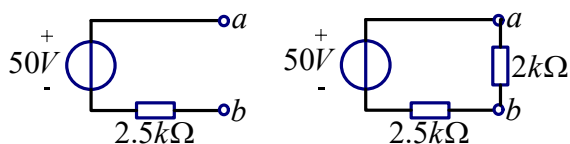
解: 当开关在 1 的位置, 电压表读数为 $50V$, 说明开路电压 $u_{oc} = 50V$

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

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

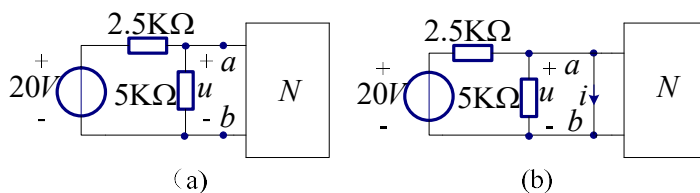
所以戴维南等效电路为:



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

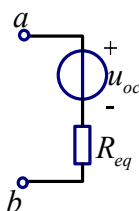
所以 K 若打向位置 3，电压表读数为 $\frac{200}{9} \text{V}$ ，电流表读数为 $\frac{100}{9} \text{mA}$ 。

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

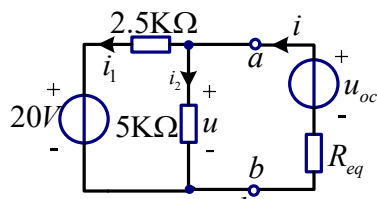


题图 2-25

解：设网络 N 的戴维南等效电路为：



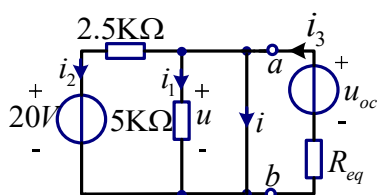
如题图 2-25 (a) 所示电路，电压 $u = 12.5 \text{V}$ ，即：



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

$$\text{所以有: } u_{oc} + 0.5R_{eq} = 12.5$$

当 ab 间短路，如题图 2-25 (b) 所示电流 $i = 10 \text{mA}$ ，即：

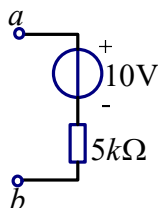


$$i_1 = 0, \quad i_2 = \frac{-20}{2.5} = -8\text{mA}, \quad i_3 = i_1 + i_2 + i = 0 - 8 + 10 = 2\text{mA},$$

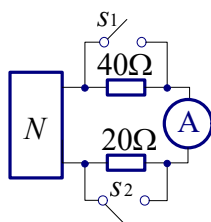
所以有： $u_{oc} - 2R_{eq} = 0$

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

所以网络 N 的戴维南等效电路为：

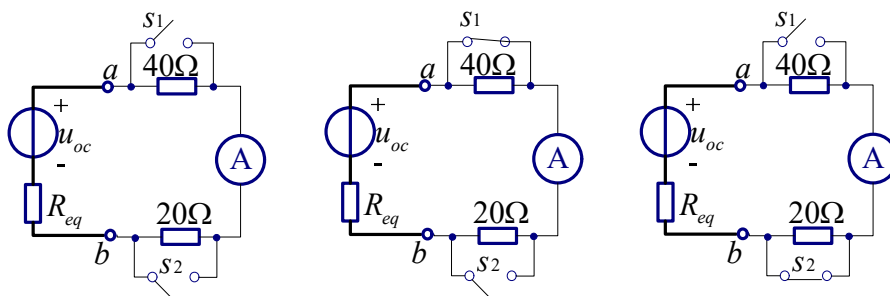
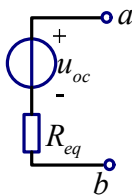


2-26 如题图 2-26 所示，N 为线性含源网络，已知开关 S_1S_2 断开电流表读数为 1.2A ，当 S_1 闭合 S_2 断开，电流表为 3A ，求 S_1 断开 S_2 闭合时电流表读数。



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：

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

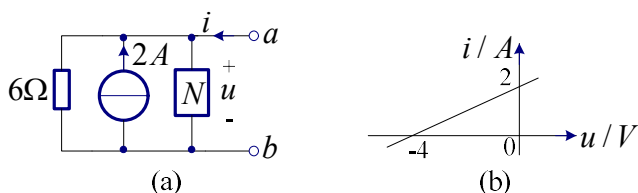
当 S_1 闭合 S_2 断开，电流表为 3A，如上图的中间的图所示，有：

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

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

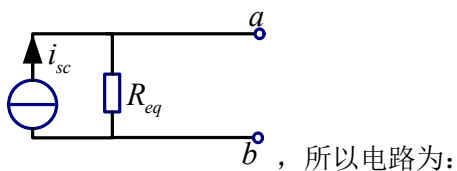
当 S_1 断开 S_2 闭合时，如上图的右图所示，电流表读数为 $\frac{u_{oc}}{R_{eq} + 40} = \frac{12}{7} A$ 。

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。

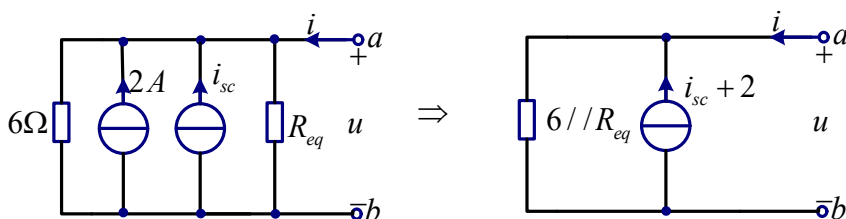


题图 2-27

解： 设网络 N 的诺顿等效电路为：



，所以电路为：

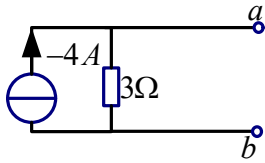


$$\text{所以有： } u = \frac{6R_{eq}}{6 + R_{eq}} \times (i + i_{sc} + 2) = \frac{6R_{eq}}{6 + R_{eq}} \times i + \frac{6R_{eq}}{6 + R_{eq}} \times (i_{sc} + 2)$$

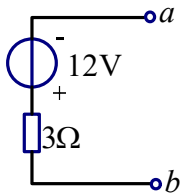
由其 ab 端的 VCR，可以得到： $u = 2i - 4$

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

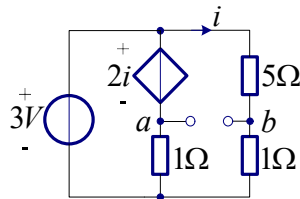
设网络 N 的诺顿等效电路为：



所以网络 N 的戴维南等效电路为：

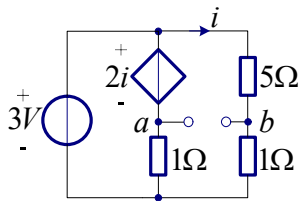


2-28 题图 2-28 所示电路中， ab 之间需接入多大电阻 R ，才能使电阻电流为 ab 的短路电流 i_{ab} 的一半？此时 R 获得多大功率？



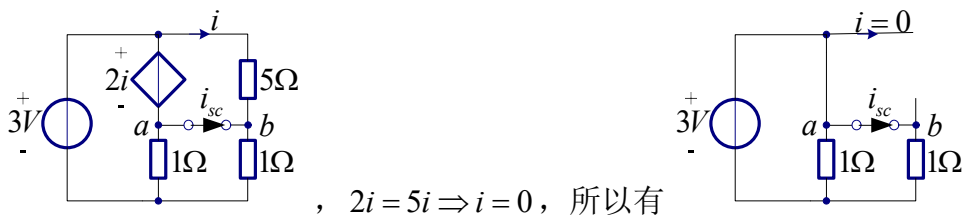
题图 2-28

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：



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

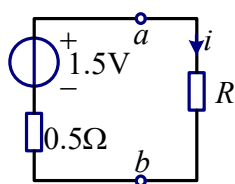
然后求等效电阻，采用短路电流法，如下图所示：



$$, 2i = 5i \Rightarrow i = 0, \text{ 所以有}$$

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

所以本题电路可以等效为：

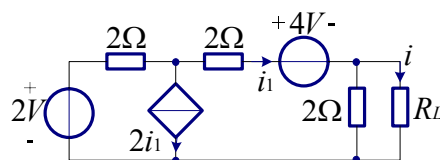


若 R 的电阻电流为 ab 的短路电流 i_{ab} 的一半，即： $i = \frac{1.5}{0.5 + R} = \frac{i_{sc}}{2} = 1.5A$

$$\Rightarrow R = 0.5\Omega$$

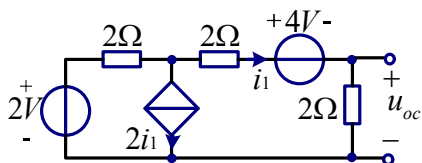
当 $R = R_{eq} = 0.5\Omega$ 时，功率为： $P_{\max} = \frac{u_{oc}^2}{4R_{eq}} = \frac{(1.5)^2}{4 \times 0.5} = \frac{9}{8} W$ 。

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。



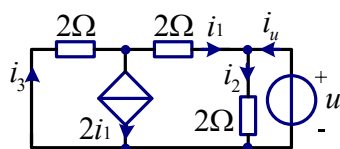
题图 2-29

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：



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

然后求等效电阻，采用外加电源法，如下图所示：

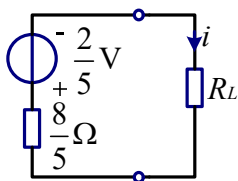


$$i_2 = \frac{u}{2}, \quad i_1 = i_2 - i_u = \frac{u}{2} - i_u, \quad i_3 = 3i_1 = \frac{3u}{2} - 3i_u$$

$$2i_3 + 2i_1 + u = 0, \quad \text{所以有 } 2i_3 + 2i_1 + u = 3u - 6i_u + u - 2i_u + u = 5u - 8i_u = 0,$$

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

所以本题电路可以等效为:

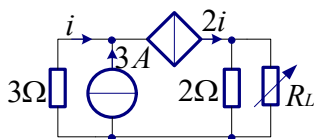


$$R_L = 0 \Rightarrow i = -\frac{2}{5} / \frac{8}{5} = -\frac{1}{4} \text{ A}$$

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

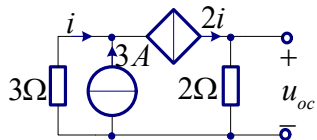
$$\text{当 } R_L = R_{eq} = \frac{8}{5} \Omega \text{ 时可获得最大功率, 此时功率为: } P_{\max} = \frac{u_{oc}^2}{4R_{eq}} = \frac{\left(-\frac{2}{5}\right)^2}{4 \times \frac{8}{5}} = \frac{1}{40} \text{ W}。$$

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?



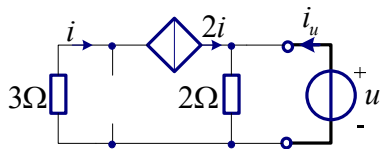
题图 2-30

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:



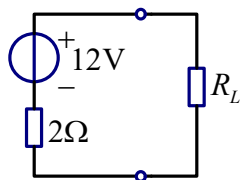
$$i + 3 = 2i \Rightarrow i = 3 \text{ A}, \text{ 所以有 } u_{oc} = 2 \times 2i = 12 \text{ V}。$$

然后求等效电阻, 采用外加电源法, 如下图所示:



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

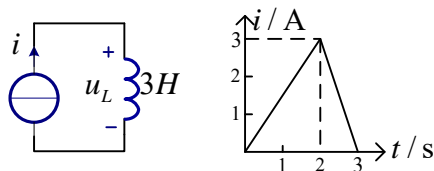
所以本题电路可以等效为:



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

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。

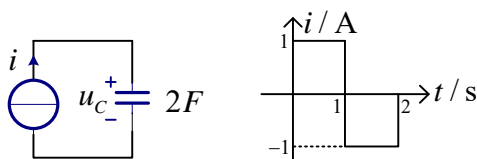


题图 3-1

解：

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

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。

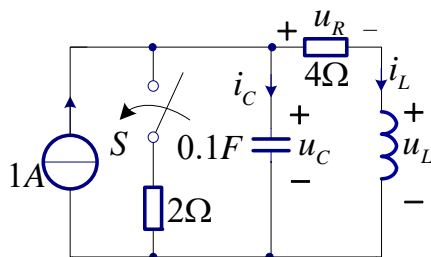


题图 3-2

解：

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

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



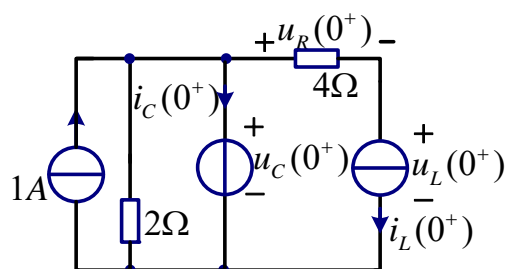
题图 3-3

解： $t=0$ 时，开关闭合。

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

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：

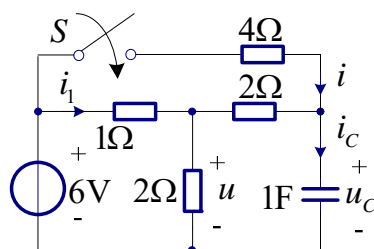


$$u_R(0^+) = 4i_L(0^+) = 4\text{V}$$

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

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

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 $i_1(0^+)$ 。



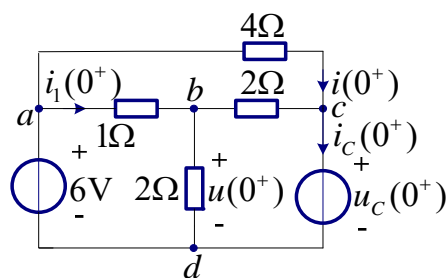
题图 3-4

解： $t=0$ 时，开关 S 闭合。

$t=0^-$ 时开关 S 未闭合，电容开路： $u_C(0^-) = \frac{2}{2+1} \times 6 = 4\text{V}$ 。

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:

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

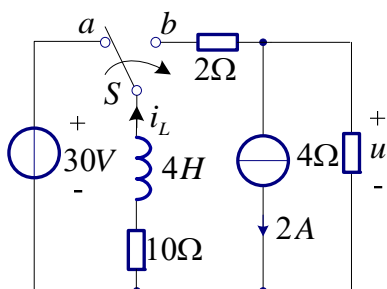
$$-\frac{1}{1} \times u_a(0^+) + \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{1}\right) \times u_b(0^+) - \frac{1}{2} \times u_c(0^+) = 0$$

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

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

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

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 $i_L(0^+)$ 、 $u(0^+)$ 。



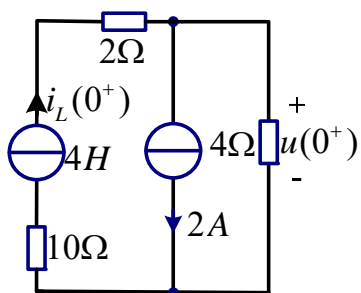
题图 3-5

解: $t=0$ 时, 开关由 a 打向 b 。

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

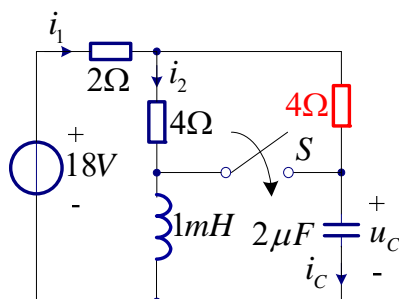
由换路定则, 有: $i_L(0^+) = i_L(0^-) = -3A$ 。

画出开关在 b 后的 0^+ 等效电路, 如下图所示:



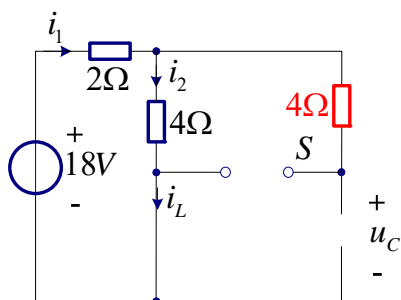
$$u(0^+) = 4 \times (i_L(0^+) - 2) = -20\text{V}$$

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

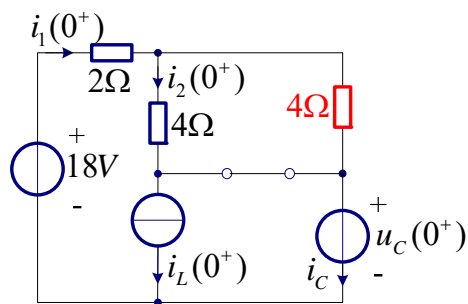
解: $t=0$ 时, 开关闭合。 $t=0^-$ 时开关未闭合, 电感短路, 电容开路:



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

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

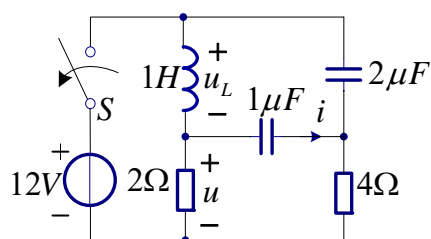
画出开关闭合后的 0^+ 等效电路, 如下图所示:



$$i_1(0^+) = \frac{18 - u_c(0^+)}{2 + 4 // 4} = 1.5 \text{ A} ,$$

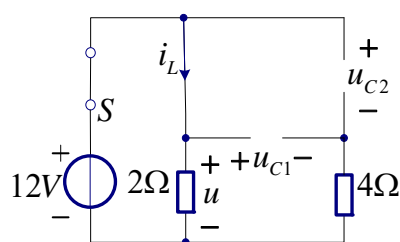
$$i_2(0^+) = \frac{4}{4 + 4} i_1(0^+) = 0.75 \text{ A}$$

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：

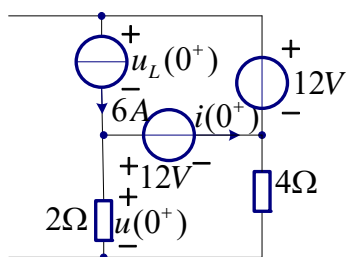


$$u_{C1}(0^-) = u_{C2}(0^-) = 12 \text{ V} , \quad i_L(0^-) = \frac{12}{2} = 6 \text{ A} .$$

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

$$i_L(0^+) = i_L(0^-) = 6 \text{ A} .$$

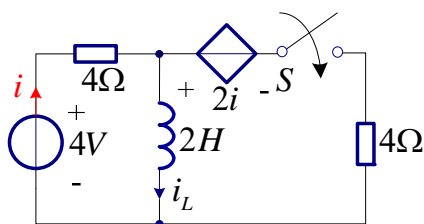
画出开关闭合后的 0^+ 等效电路，如下图所示：



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

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

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
 时间常数 τ 。

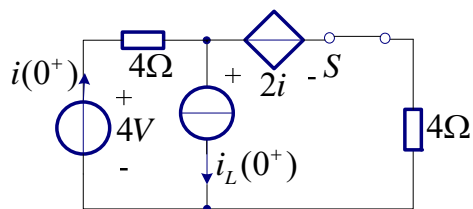


题图 3-8

解: $t=0$ 时, 开关 S 闭合。

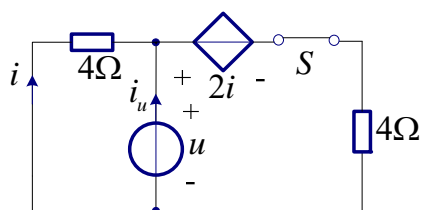
$t=0^-$ 时开关未闭合, 电感短路: $i_L(0^-) = \frac{4}{4} = 1A$ 。

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



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

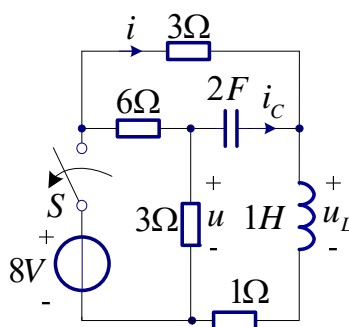
求时间常数:



采用外加电源法求等效电阻：

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

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

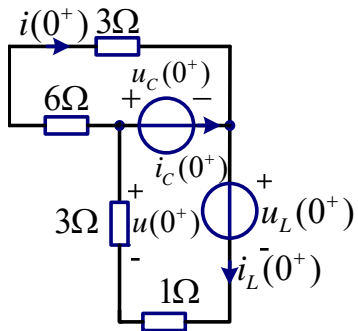
解: $t=0$ 时, 开关闭合。

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

$$i_L(0^-) = 8/(1+3) = 2 \text{ A}。$$

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

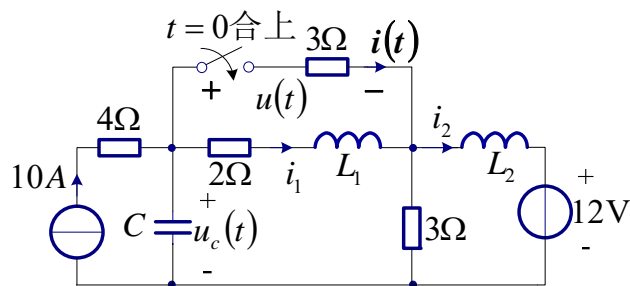
画出开关闭合后的 0^+ 等效电路, 如下图所示:



$$i(0^+) = u_C(0^+) / (3 + 6) = 2/27 \text{ A}, \quad u(0^+) = -3i_L(0^+) = -6 \text{ V}$$

$$i_C(0^+) = i_L(0^+) - i(0^+) = 52/27 \text{ A}, \quad u_L(0^+) = -u_C(0^+) - (3 + 1) \times i_L(0^+) = -26/3 \text{ V}$$

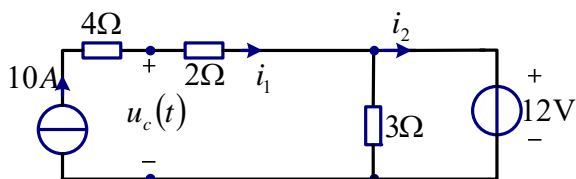
3-10 如题图 3-10 所示电路, $t < 0$ 电路已处于稳态, $t = 0$ 合上开关。试求初始值 $i_2(0^+)$, $u_C(0^+)$ 和 $u(0^+)$ 。



题图 3-10

解: $t = 0$ 时, 开关闭合。

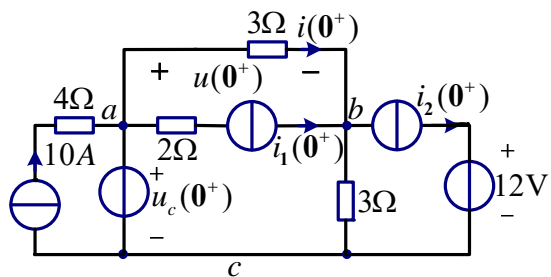
$t = 0^-$ 时开关未闭合, 电感短路, 电容开路:



$$i_1(0^-) = 10 \text{ A}, \quad i_2(0^-) = 10 - 12/3 = 6 \text{ A}, \quad u_C(0^-) = 2 \times 10 + 12 = 32 \text{ V}.$$

由换路定则, 有: $u_C(0^+) = u_C(0^-) = 32 \text{ V}$, $i_1(0^+) = i_1(0^-) = 10 \text{ A}$, $i_2(0^+) = i_2(0^-) = 6 \text{ A}$ 。

画出开关闭合后的 0^+ 等效电路, 如下图所示:

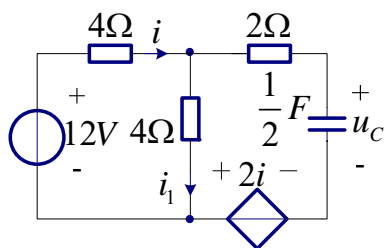


c 为参考节点，a、b 点节点电压为 u_a, u_b ，列写节点电压方程：

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

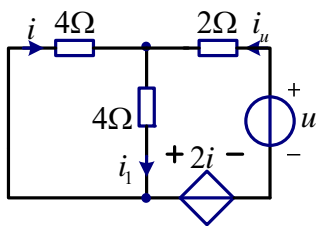
$$u_b = [u_a + 3i_1(0^+) - 3i_2(0^+)]/2 = 22\text{V}, \quad u(0^+) = u_a - u_b = 10\text{V}$$

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。

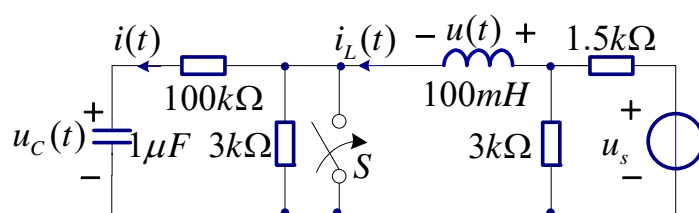


$$i = -i_u/2, \quad u = \left(2 + \frac{4}{2}\right) \times i_u + 2i = 3i_u, \quad R_{eq} = \frac{u}{i_u} = 3\Omega$$

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

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 $u_s = 60\text{V}$ ，

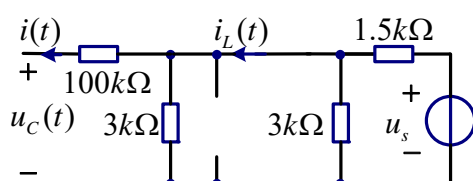
开关闭合后 $u_s = 0V$ ，求 $i_L(0^+)$ ， $u_C(0^+)$ ，并求出 $t \geq 0$ 以后的 $u_C(t)$ 和 $u(t)$ 。



题图 3-12

解： $t=0$ 时，开关闭合。

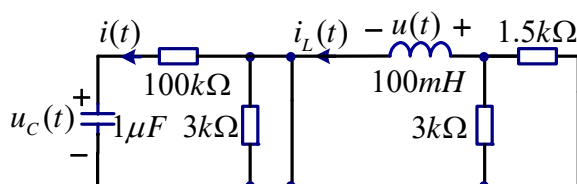
$t=0^-$ 时开关未闭合，电感短路，电容开路：



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

由换路定则，有： $u_C(0^+) = u_C(0^-) = 30V$ ， $i_L(0^+) = i_L(0^-) = 10mA$ 。

开关闭合后电路分为两部分：



$$R_{Ceq} = 100k\Omega, \quad \tau_C = R_{Ceq}C = 100 \times 10^3 \times 10^{-6} = 0.1s$$

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

$t \geq 0$ 时电路没有外加激励，所以为零输入响应。

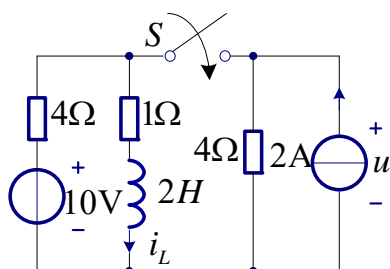
$$u_C(0^+) = 30V, \quad i_L(0^+) = 10mA$$

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

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

$$u(t) = -i_L(t) \times \frac{3 \times 1.5}{3 + 1.5} = -10e^{-10^4t}mA \times 1k\Omega = -10e^{-10^4t}V, \quad t \geq 0^+$$

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 $u(t)$ 。

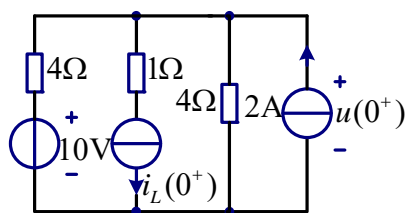


题图 3-13

解: $t=0$ 时, 开关 S 闭合。

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

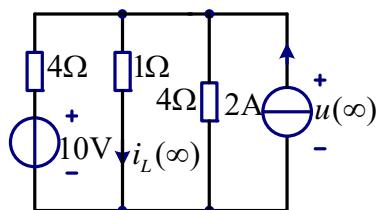
由换路定则, 有: $i_L(0^+) = i_L(0^-) = 2\text{A}$ 。



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

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

画出 ∞ 时刻等效电路。



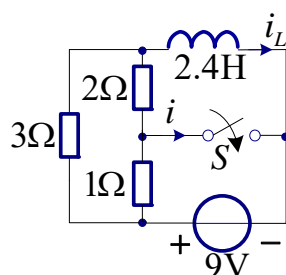
由节点电压法: $(\frac{1}{4} + \frac{1}{4} + 1)u(\infty) = \frac{10}{4} + 2 \Rightarrow u(\infty) = 3\text{V}$

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

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

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

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

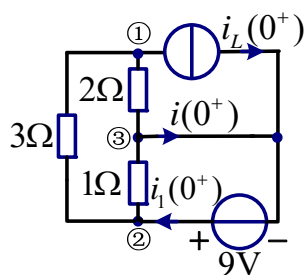


题图 3-14

解: $t=0$ 时, 开关 S 闭合。

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

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



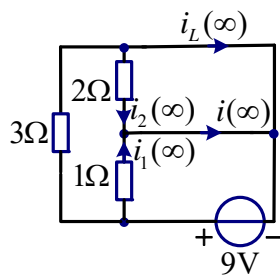
节点电压法, 参考节点③, 节点①②的节点电压分别为 u_1, u_2 , 节点电压方程为:

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

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

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

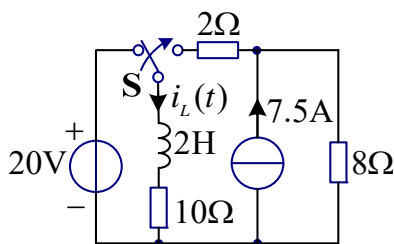
画出 ∞ 时刻等效电路：



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

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

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

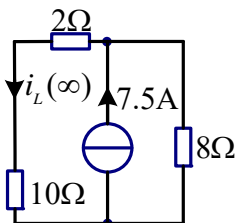
解： $t=0$ 时，开关 S 从 1 打到 2。

$t=0^-$ 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： $R_{eq} = 2 + 8 + 10 = 20\Omega$ ， $\tau = L/R_{eq} = 2/20 = 0.1\text{s}$

画出 ∞ 时刻等效电路：



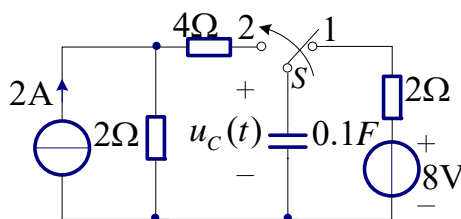
$$i_L(\infty) = \frac{8}{8+12} \times 7.5 = 3\text{A}$$

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

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

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

3-16 题图 3-16 所示电路, $t=0$ 时开关 S 由 1 打向 2, 求 $t \geq 0$ 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

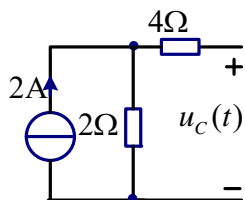
解: $t=0$ 时, 开关 S 从 1 打到 2。

$t=0^-$ 时开关在 1 处, 电容开路: $u_C(0^-) = 8\text{V}$ 。

由换路定则, 有: $u_C(0^+) = u_C(0^-) = 8\text{V}$ 。

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

画出 ∞ 时刻等效电路:



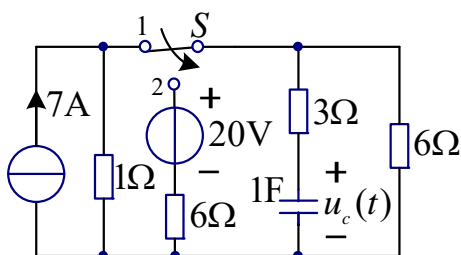
$$u_C(\infty) = 2 \times 2 = 4\text{V}$$

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

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

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

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



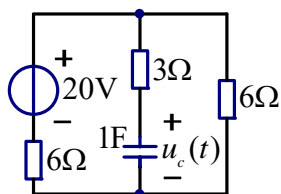
题图 3-17

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: $u_c(0^-) = 7 \times \frac{6 \times 1}{6+1} = 6V$ 。

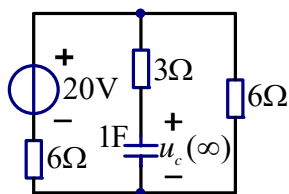
由换路定则, 有: $u_c(0^+) = u_c(0^-) = 6V$

求时间常数:



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

画出 ∞ 时刻等效电路:



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

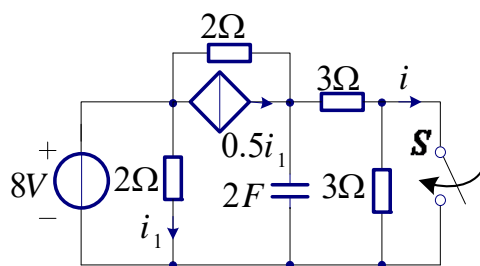
$t \geq 0$ 时, 零输入响应为: $u_{Cz.i.r}(t) = u_c(0^+) e^{-\frac{1}{\tau}t} = 6e^{-\frac{1}{6}t} V, \quad t \geq 0^+$

零状态响应为: $u_{Cz.s.r}(t) = u_c(\infty)(1 - e^{-\frac{1}{\tau}t}) = 10(1 - e^{-\frac{1}{6}t}) V, \quad t \geq 0^+$

全响应为: $u_c(t) = u_{Cz.i.r}(t) + u_{Cz.s.r}(t) = (10 - 4e^{-\frac{1}{6}t}) V, \quad t \geq 0^+$

3-18 根据题图 3-18 所示的电路, $t=0$ 时开关 S 闭合, 求 $t \geq 0$ 以后的电流 $i(t)$ 的

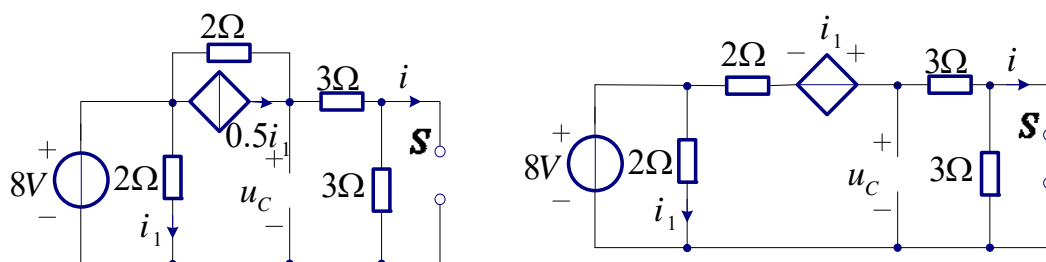
零输入响应与零状态响应。



题图 3-18

解: $t=0$ 时, 开关 S 闭合。

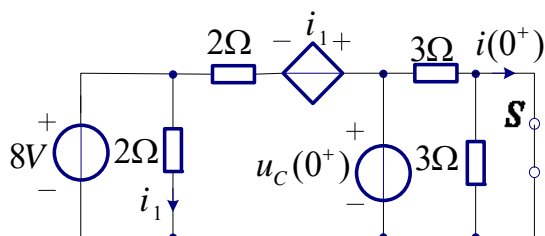
$t=0^-$ 时开关 S 打开, 电容开路:



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

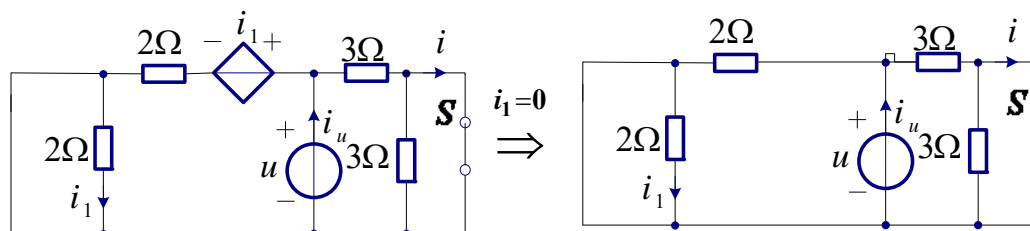
由换路定则, 有: $u_C(0^+) = u_C(0^-) = 9V$ 。

画出开关闭合后的 0^+ 等效电路, 如下图所示:



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

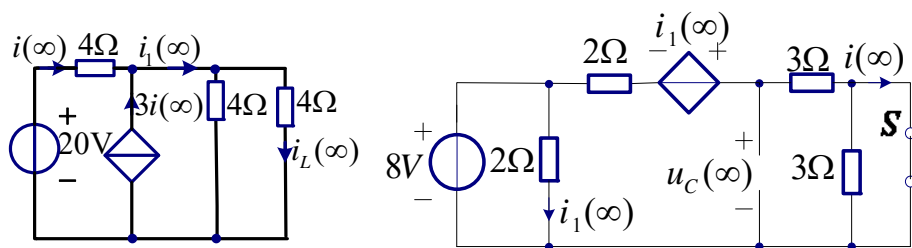
先求等效电阻, 采用外加电源法:



$$R_{eq} = 2 // 3 = \frac{6}{5} \Omega,$$

$$\text{求时间常数: } \tau = R_{eq} C = \frac{12}{5} s$$

画出 ∞ 时刻等效电路:



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

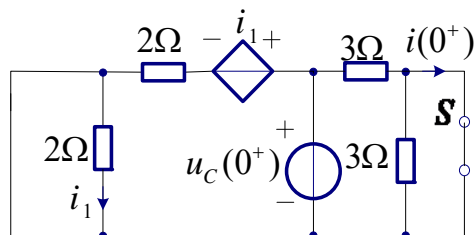
$$t \geq 0 \text{ 时, 全响应为: } i(t) = i(\infty) + [i(0^+) - i(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau}t} = (\frac{12}{5} + \frac{3}{5}e^{-\frac{5}{12}t})A, \quad t \geq 0^+$$

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:



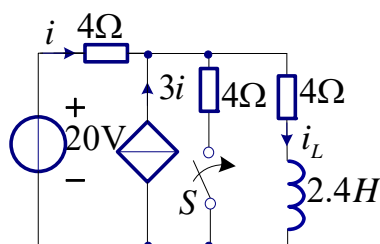
$$i(0^+) = \frac{u_C(0^+)}{3} = 3A$$

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

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

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。



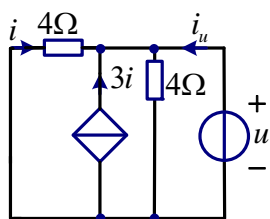
题图 3-19

解： $t=0$ 时，开关 S 闭合。

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

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

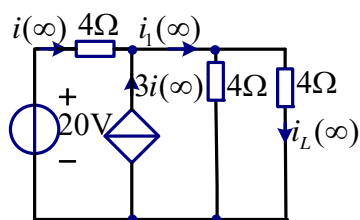
先求等效电阻，采用外加电源法：



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

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

画出 ∞ 时刻等效电路：



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

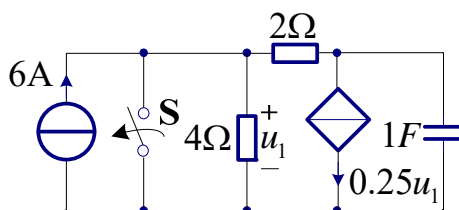
$$i_1(\infty) = \frac{20}{3} \text{A}, \quad i_L(\infty) = \frac{10}{3} \text{A}$$

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

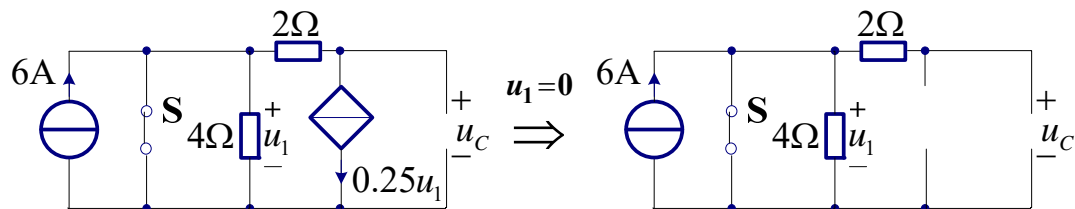
3-20 根据题图 3-20 所示的电路, $t=0$ 时开关 S 断开, 求 $t \geq 0$ 以后的电压 $u_1(t)$ 。



题图 3-20

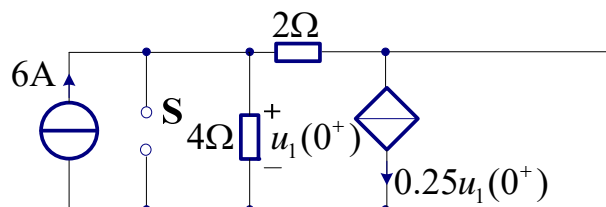
解: $t=0$ 时, 开关 S 断开。

$t=0^-$ 时开关闭合, 电容开路:



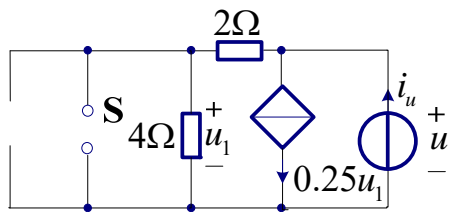
$u_C(0^-) = 0$ 。由换路定则, 有: $u_C(0^+) = u_C(0^-) = 0 \text{ V}$ 。

画 0^+ 时刻等效电路:



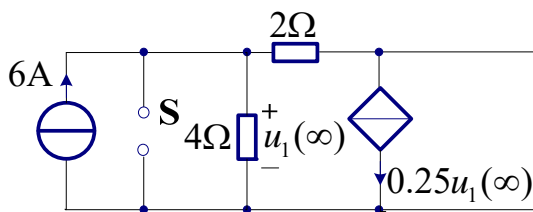
$$6 = \frac{u_1(0^+)}{4} + \frac{u_1(0^+)}{2} \Rightarrow u_1(0^+) = 8 \text{ V}$$

求时间常数:



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

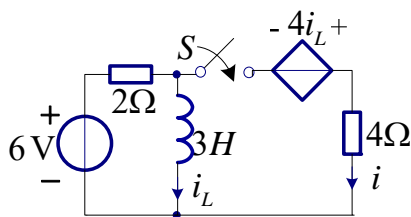
画出 ∞ 时刻等效电路:



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

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

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 $i(t)$ 。



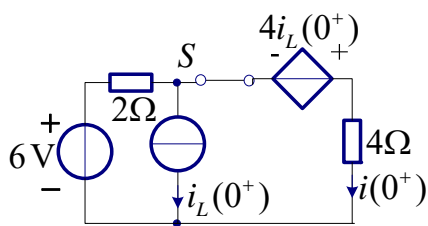
题图 3-21

解: $t=0$ 时, 开关 S 闭合。

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

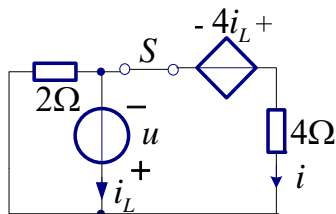
由换路定则, 有: $i_L(0^+) = i_L(0^-) = 3A$ 。

画 0^+ 时刻等效电路:



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

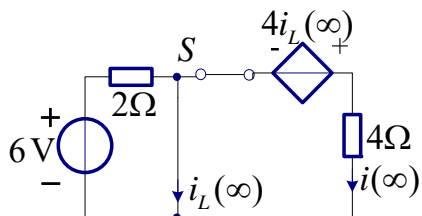
先求等效电阻，采用外加电源法：



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

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

画出 ∞ 时刻等效电路：



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

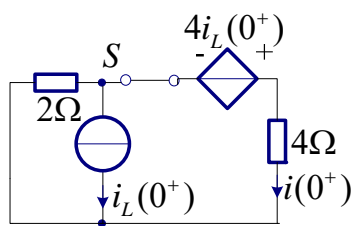
$$t \geq 0 \text{ 时, 全响应为: } i(t) = i(\infty) + [i(0^+) - i(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau}t} = (1.5 + 0.5e^{-\frac{8}{9}t})A, t \geq 0^+$$

下面求零输入响应：

$t=0$ 时，开关 S 闭合。

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

画零输入下的 0^+ 时刻等效电路：

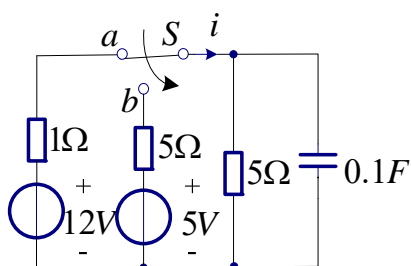


$$2 \times (i_L(0^+) + i(0^+)) - 4i_L(0^+) + 4i(0^+) = 0 \Rightarrow i(0^+) = 1A$$

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

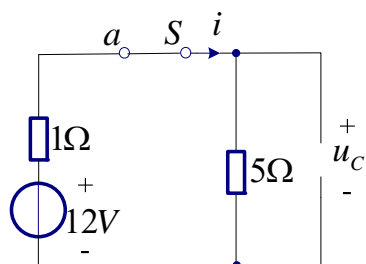
3-22 根据题图 3-22 所示的电路， $t=0$ 时开关 S 由 a 打向 b ，求 $t \geq 0$ 以后电流 $i(t)$ 的零输入响应、零状态响应和完全响应。



题图 3-22

解： $t=0$ 时，开关 S 从 a 打到 b 处。

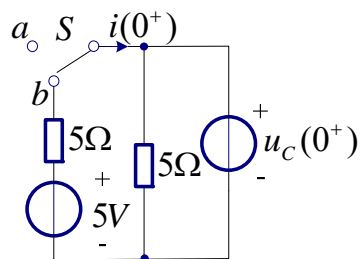
$t=0^-$ 时开关 S 在 a 处，电容开路：



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

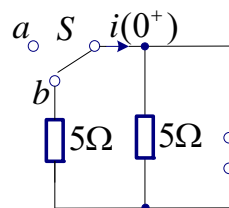
由换路定则，有： $u_C(0^+) = u_C(0^-) = 10V。$

画 0^+ 时刻等效电路:



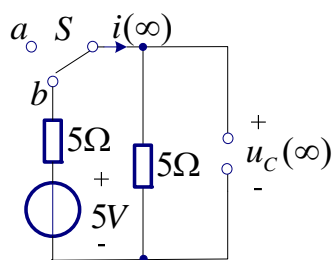
$$-5 + 5i(0^+) + u_C(0^+) = 0 \Rightarrow i(0^+) = -1A$$

求时间常数:



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

画出 ∞ 时刻等效电路:



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

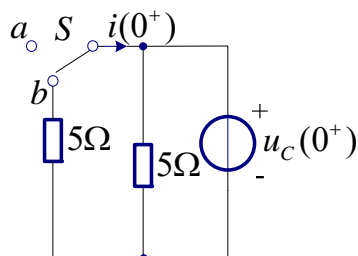
$t \geq 0$ 时, 全响应为: $i(t) = i(\infty) + [i(0^+) - i(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau}t} = (0.5 - 1.5e^{-4t})A, \quad t \geq 0^+$

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:

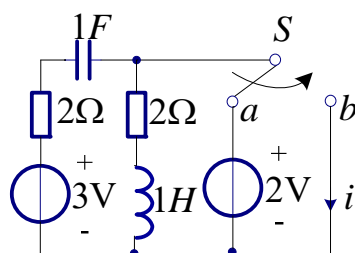


$$5i(0^+) + u_C(0^+) = 0 \Rightarrow i(0^+) = -2A$$

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

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

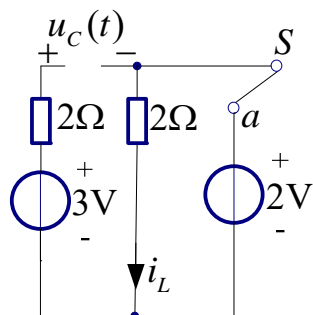
3-23 根据题图 3-23 所示的电路, $t = 0$ 时开关 S 由 a 打向 b , 求 $t \geq 0$ 以后的电流 $i(t)$ 。



题图 3-23

解: $t = 0$ 时, 开关 S 由 a 打到 b 。

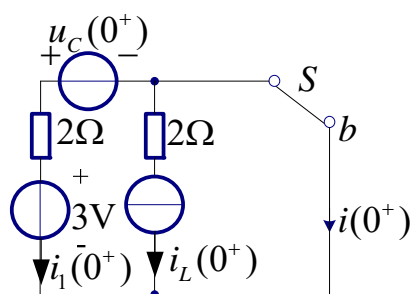
$t = 0^-$ 时开关在 a 处, 电容开路, 电感短路:



$$u_C(0^-) = 3 - 2 = 1\text{V}, \quad i_L(0^-) = \frac{2}{2} = 1\text{A}.$$

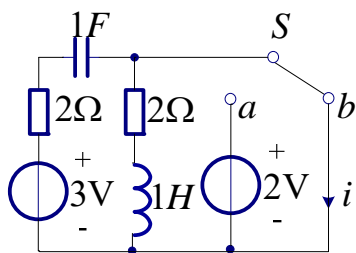
由换路定则, 有: $u_C(0^+) = u_C(0^-) = 1\text{V}$, $i_L(0^+) = i_L(0^-) = 1\text{A}$ 。

画 0^+ 时刻等效电路:



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

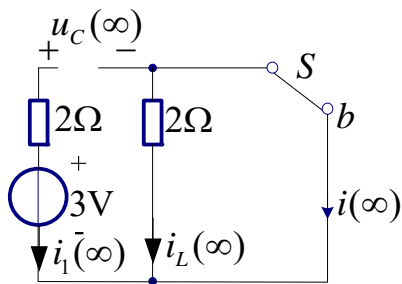
求时间常数:



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

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

画出 ∞ 时刻等效电路:



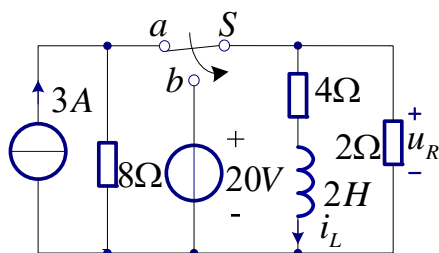
$$i_1(\infty) = 0, \quad i_L(\infty) = 0$$

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

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

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

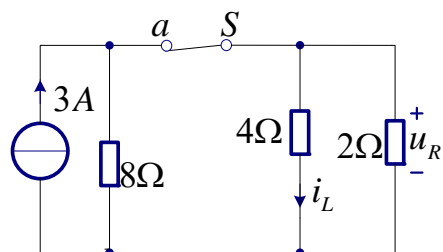
3-24 根据题图 3-24 所示的电路, $t=0$ 时开关 S 由 a 打向 b , 求 $t \geq 0$ 以后的 $i_L(t)$ 和 $u_R(t)$ 。



题图 3-24

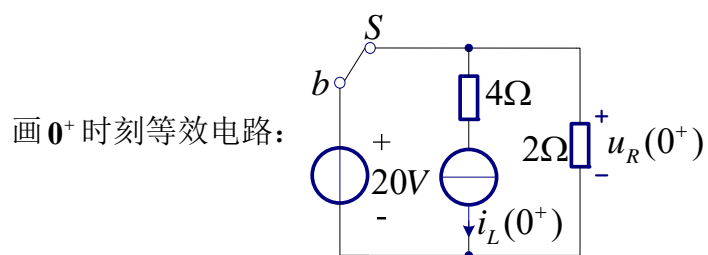
解： $t=0$ 时，开关 S 由 a 打到 b。

$t=0^-$ 时开关在 a 处，电感短路：



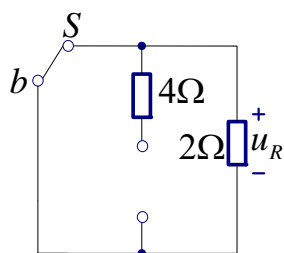
$$i_L(0^-) = \frac{\frac{1}{4}}{\frac{1}{8} + \frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \times 3 = \frac{6}{7} \text{ A}。$$

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

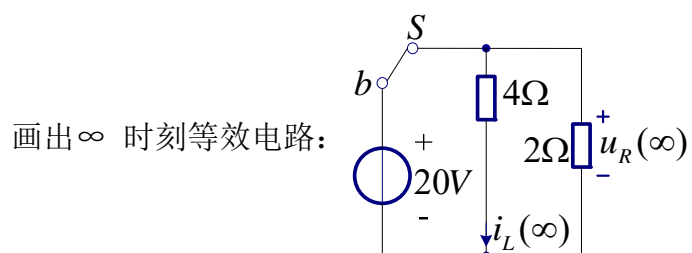


$$u_R(0^+) = 20\text{V}$$

求时间常数：



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

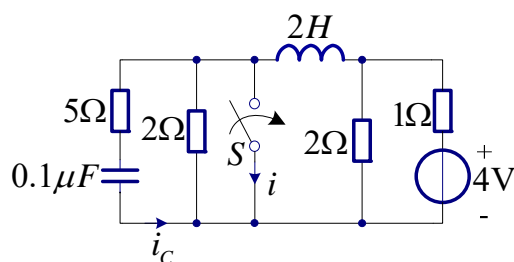


$$i_L(\infty) = \frac{20}{4} = 5A, \quad u_R(\infty) = 20V$$

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

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

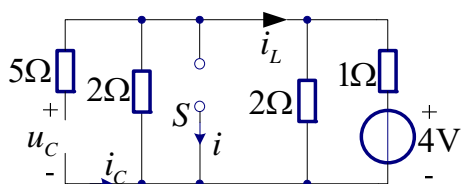
3-25 根据题图 3-25 所示的电路, $t=0$ 时开关 S 闭合, 求 $t \geq 0$ 以后的 $i(t)$ 、 $i_C(t)$ 。



题图 3-25

解: $t=0$ 时, 开关 S 闭合。

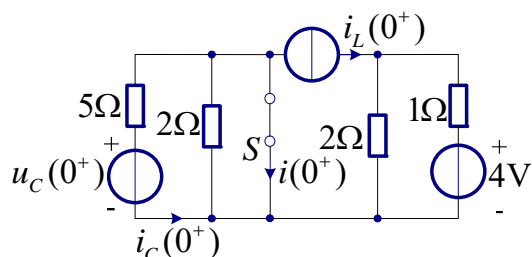
$t=0^-$ 时开关 S 打开, 电容开路, 电感短路:



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

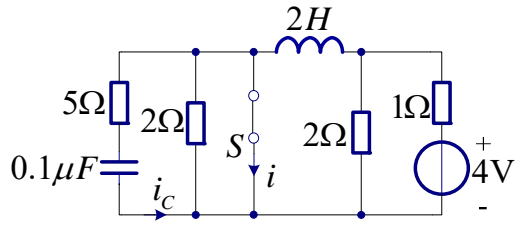
由换路定则, 有: $u_C(0^+) = u_C(0^-) = 2V$, $i_L(0^+) = i_L(0^-) = -1A$ 。

画 0^+ 时刻等效电路:



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

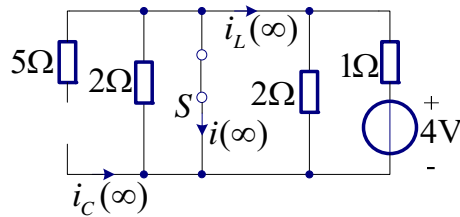
求时间常数:



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

$$R_{Ceq} = 5 \Omega, \quad \tau_C = R_{eq} C = 0.5 \times 10^{-6} s$$

画出 ∞ 时刻等效电路:



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

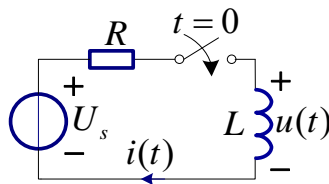
$$i_L(t) = i_L(\infty) + [i_L(0^+) - i_L(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau_L}t} = -4 + (-1 + 4)e^{-\frac{1}{3}t} = (-4 + 3e^{-\frac{1}{3}t})A, \quad t \geq 0^+$$

$$i_C(t) = i_C(\infty) + [i_C(0^+) - i_C(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau_C}t} = -\frac{2}{5}e^{-2 \times 10^6 t}A, \quad t \geq 0^+$$

$$i(t) = i_C(t) + i_L(t) = (-4 + 3e^{-\frac{1}{3}t} - \frac{2}{5}e^{-2 \times 10^6 t})A, \quad t \geq 0^+$$

3-26 若题图 3-26 所示 RL 电路的零状态响应 $i(t) = (10 - 10e^{-200t})A$, $t \geq 0$,

$u(t) = (500e^{-200t})V$, $t \geq 0$, 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: $\tau = L/R$

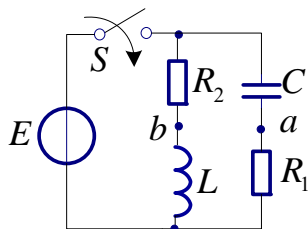
$$\text{电感电流: } i(t) = i(\infty)(1 - e^{-\frac{1}{\tau}t}) = \frac{U_s}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t}) = (10 - 10e^{-200t})A$$

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

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

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

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: $\tau_L = L/R_2$, $\tau_C = R_1 C$

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

$$u_C(t) = u_C(\infty)(1 - e^{-\frac{1}{\tau_C}t}) = E(1 - e^{-\frac{1}{R_1 C}t}), \quad t \geq 0^+$$

$$u_{ab}(t) = -u_C(t) + R_2 i_L(t) = -E(1 - e^{-\frac{1}{R_1 C}t}) + E(1 - e^{-\frac{R_2}{L}t}), \quad t \geq 0^+$$

$$\Rightarrow u_{ab}(t) = E(e^{-\frac{1}{R_1 C}t} - e^{-\frac{R_2}{L}t}), \quad t \geq 0^+$$

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) $i = -10\cos(\omega t - 60^\circ)\text{A}$

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

(3) $u = \cos 2\pi f(t + 0.15T)\text{mV}$

(4) $u = 7.5\cos 2\pi / T(t - 0.15T)\text{V}$

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

$$\dot{I}_m = 10\angle 120^\circ \text{A} \text{ 或 } \dot{I} = 5\sqrt{2}\angle 120^\circ \text{A}$$

有效值 $I = 5\sqrt{2}\text{A}$ ，初相位 $\psi_i = 120^\circ$

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

$$\dot{U}_m = 10\angle 108^\circ \text{V} \text{ 或 } \dot{U} = 5\sqrt{2}\angle 108^\circ \text{A}$$

有效值 $U = 5\sqrt{2}\text{A}$ ，初相位 $\psi_u = 108^\circ$

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

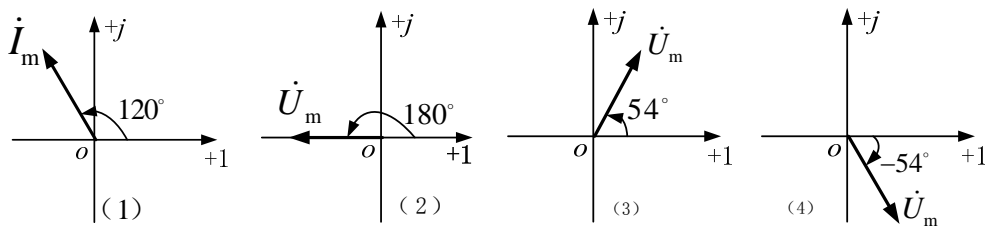
$$\dot{U}_m = 1\angle 54^\circ \text{mV} \text{ 或 } \dot{U} = \frac{\sqrt{2}}{2}\angle 54^\circ \text{mV}$$

有效值 $U = 0.707\text{mV}$ ，初相位 $\psi_u = 54^\circ$

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

$$\dot{U}_m = 7.5\angle -54^\circ \text{V} \text{ 或 } \dot{U} = \frac{7.5}{\sqrt{2}}\angle -54^\circ \text{A}$$

有效值 $U = \frac{7.5}{\sqrt{2}}\text{V}$ ，初相位 $\psi_u = -54^\circ$



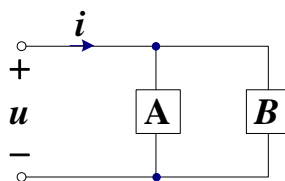
4-2. 已知 $u(t) = 5\cos(\omega t + 60^\circ)V$ ，请写出该电压 $u(t)$ 的相量形式 \dot{U}_m 。

解： $\dot{U}_m = 5\angle 60^\circ V$

4-3. 已知电流 $i(t)$ 的相量形式为 $\dot{I} = 6 + j8 = 10\angle 53.1^\circ$ ，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 $i(t) = 10\sqrt{2}\cos(\omega t + 53.1^\circ)A$

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

因为导纳角为 -45° 电阻，所以是容性导纳。

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

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

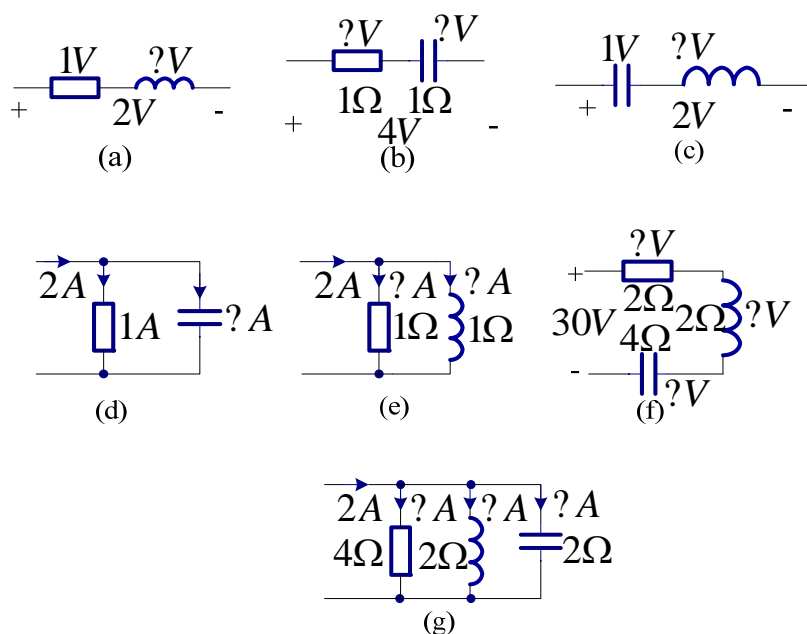
A 为 $\sqrt{2}\Omega$ 电阻，B 为 $0.0707F$ 电容；或 A 为 $0.0707F$ 电容，B 为 $\sqrt{2}\Omega$ 电阻。

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

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

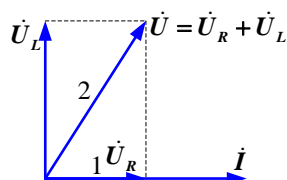
$$\dot{I} = 2\angle \frac{\pi}{3}A$$

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。



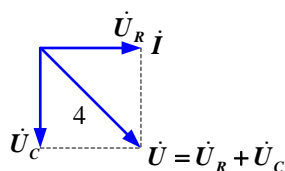
题图 4-2

解：(a) $\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L = RI + j\omega LI$



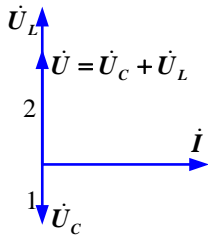
所以有 $U_L = \sqrt{2^2 - 1^2} = \sqrt{3}V$

(b) $\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_C = RI + \frac{1}{j\omega C}I = I - jI$



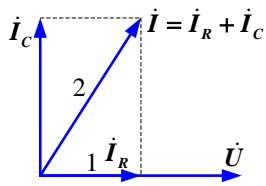
所以有 $U_C = \frac{\sqrt{2}}{2} \times 4 = 2\sqrt{2}V$, $U_R = \frac{\sqrt{2}}{2} \times 4 = 2\sqrt{2}V$

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



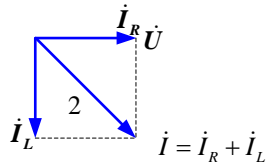
所以有 $U_L = 2 + 1 = 3V$

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



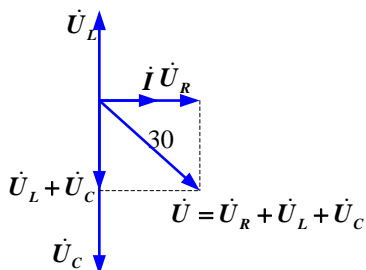
所以有 $I_C = \sqrt{2^2 - 1^2} = \sqrt{3}A$

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



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

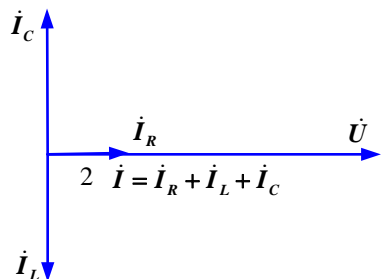
$$(f) \quad \dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = R\dot{I} + j\omega L\dot{I} + \frac{1}{j\omega C}\dot{I} = 2\dot{I} + j2\dot{I} - j4\dot{I}$$



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

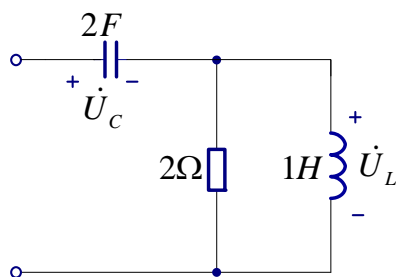
$$U_L = \frac{\sqrt{2}}{2} \times 30 \times 2 = 30\sqrt{2}V$$

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



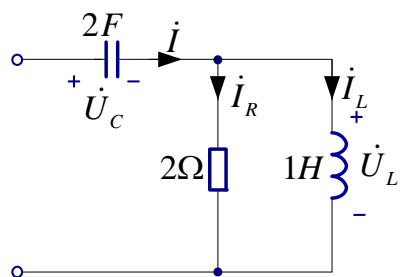
所以有 $I_R = 2A$, $I_C = 4A$, $I_L = 4A$

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



题图 4-3

解:



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

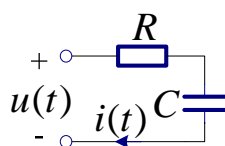
$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L = \frac{\dot{U}_L}{2} - j\frac{\dot{U}_L}{4} = \left(\frac{1}{2} - j\frac{1}{4}\right)\dot{U}_L$$

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

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

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

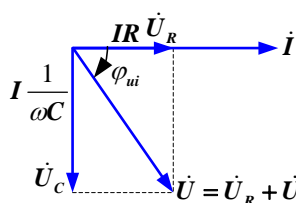
4-8. 题图 4-4 所示电路处于正弦稳态中, 请判断电压 u 与电流 i 的相位超前滞后关系。



题图 4-4

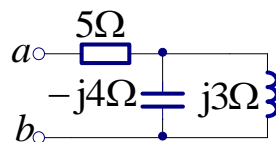
$$\text{解: } \dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_C = R\dot{I} + \frac{1}{j\omega C} \dot{I} = \left(R + \frac{1}{j\omega C} \right) \dot{I} = \left(R - j\frac{1}{\omega C} \right) \dot{I}$$

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



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

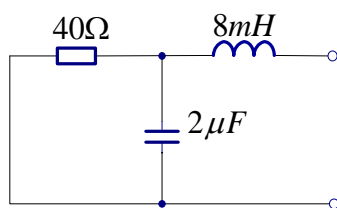
4-9. 题图 4-5 所示电路, 求单口网络的输入阻抗 Z_{ab} 。



题图 4-5

$$\text{解: } Z_{ab} = 5 + \frac{-j3 \times j4}{j3 - j4} = (5 + j12) \Omega$$

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

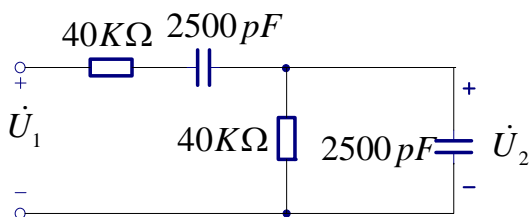


题图 4-6

解: $Z_L = j\omega L = j \times 10^4 \times 8 \times 10^{-3} = j80\Omega$, $Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j \times 10^4 \times 2 \times 10^{-6}} = -j50\Omega$

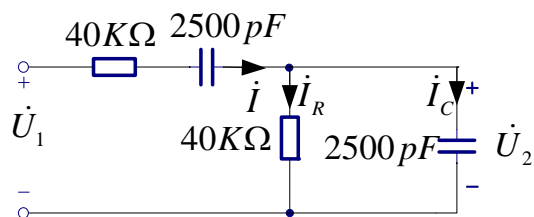
$Z_R = 40\Omega$, 所以有 $Z_{ab} = Z_L + \frac{Z_R Z_C}{Z_R + Z_C} = j80 + \frac{40 \times (-j50)}{40 + (-j50)} = \frac{1}{41}(1000 + j2480)\Omega$

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:



$$i_C = \frac{\dot{U}_2}{1/j\omega C} = j\omega C \dot{U}_2, \quad i_R = \frac{\dot{U}_2}{R}, \quad i = i_R + i_C = \frac{\dot{U}_2}{R} + j\omega C \dot{U}_2 = \left(\frac{1}{R} + j\omega C\right) \dot{U}_2$$

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

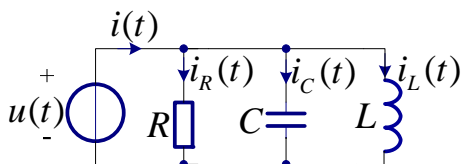
$$\dot{U}_1 = \left[3 + j\omega RC + \frac{1}{j\omega RC}\right] \dot{U}_2 = \left[3 + j\left(\omega RC - \frac{1}{\omega RC}\right)\right] \dot{U}_2$$

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

$$\text{即 } \omega = \frac{1}{RC} = \frac{1}{40 \times 10^3 \times 2500 \times 10^{-12}} = 10^4 \text{ rad/s}$$

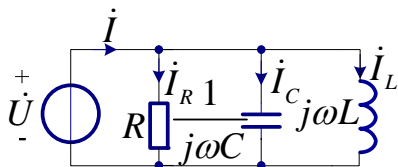
$$\omega = 2\pi f \Rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{10^4}{2\pi} = 1592 \text{ Hz}$$

4-12. 如题图 4-8 所示, 已知 $R=10\Omega, C=20\mu F, L=30\text{mH}$, $u(t)=30\cos(1000t+45^\circ)$ 。求电路中电流 $i(t)$ 。



题图 4-8

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



$$i_R = \frac{\dot{U}}{R}, \quad i_L = \frac{\dot{U}}{j\omega L} = -j \frac{\dot{U}}{\omega L}, \quad i_C = \frac{\dot{U}}{1/j\omega C} = j\omega C \dot{U}$$

$$i = i_R + i_C + i_L = \frac{\dot{U}}{R} + j\omega C \dot{U} - j \frac{\dot{U}}{\omega L} = \left[\frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) \right] \dot{U}$$

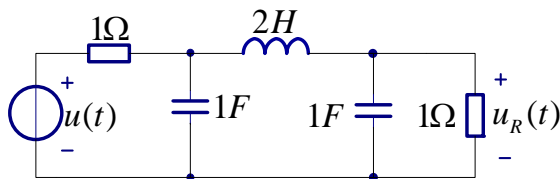
$$R=10\Omega, C=20\mu F, L=30\text{mH}, \quad \omega=1000\text{rad/s}$$

$$i = \left[\frac{1}{10} + j(1000 \times 20 \times 10^{-6} - \frac{1}{1000 \times 30 \times 10^{-3}}) \right] \dot{U} = \left(\frac{1}{10} - j \frac{1}{75} \right) \dot{U}$$

$$i = \left(\frac{1}{10} - j \frac{1}{75} \right) \dot{U} = 0.1 \angle -8^\circ \times 15\sqrt{2} \angle 45^\circ = 1.5\sqrt{2} \angle 37^\circ$$

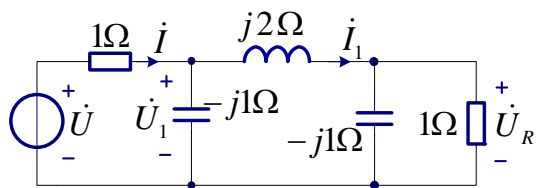
$$i(t) = 1.5\sqrt{2} \times \sqrt{2} \cos(\omega t + 37^\circ) = 3 \cos(\omega t + 37^\circ) \text{ A}$$

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



题图 4-9

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



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

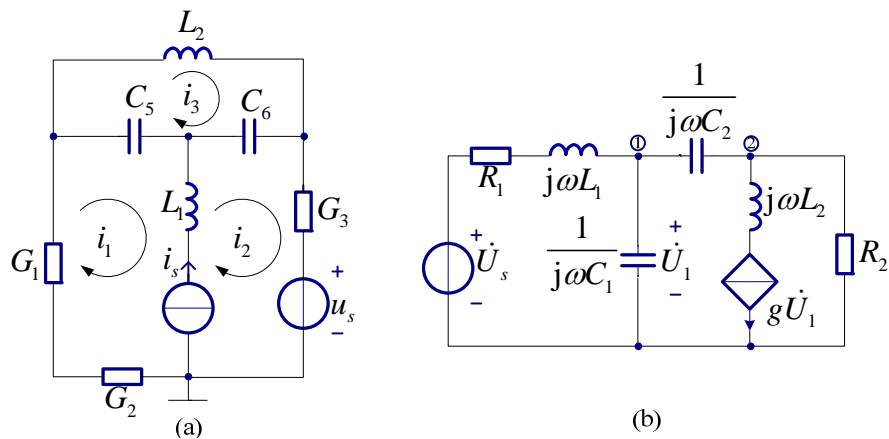
$$\dot{U}_1 = (j2 + \frac{-j1 \times 1}{-j1 + 1}) \dot{I}_1 = (\frac{1}{2} + j\frac{3}{2}) \dot{I}_1 = \frac{\sqrt{10}}{2} \angle 72^\circ \times \dot{I}_1 = \frac{\sqrt{10}}{2} \angle 72^\circ \times 1 \angle 45^\circ = \frac{\sqrt{10}}{2} \angle 117^\circ$$

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

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

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

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。



题图 4-10

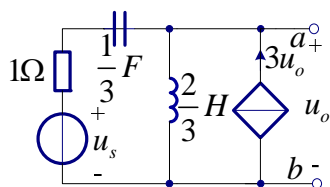
解：(a) 网孔电流方程：

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

(b) 节点电压方程

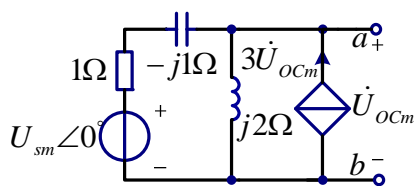
$$\begin{cases} (\frac{1}{R_1 + j\omega L_1} + j\omega C_1 + j\omega C_2)\dot{U}_1 - j\omega C_2\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_s}{R_1 + j\omega L_1} \\ -j\omega C_2\dot{U}_1 + (\frac{1}{R_2} + j\omega C_2)\dot{U}_2 = -g\dot{U}_1 \end{cases}$$

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。



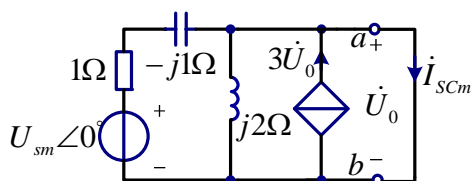
题图 4-11

解：求 \dot{U}_{OCm} 。首先画出相量模型。



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

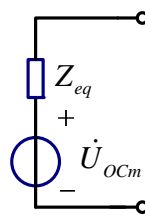
$$\dot{U}_{OCm} = \frac{j2}{-5 - j5} \dot{U}_{sm} = \frac{2 \angle 90^\circ}{5\sqrt{2} \angle -45^\circ} \times U_{sm} \angle 0^\circ = \frac{\sqrt{2} U_{sm}}{5} \angle 135^\circ$$



求等效内阻:

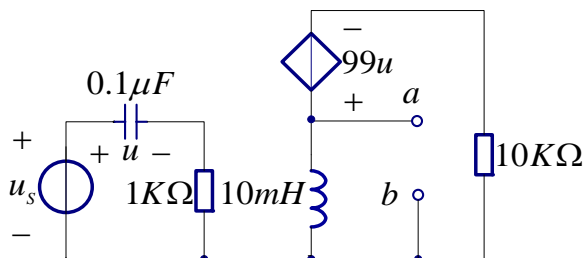
$$\dot{I}_{SCm} = \frac{\dot{U}_{sm}}{1 - j}, \quad \dot{U}_{OCm} = \frac{j2}{-5 - j5} \dot{U}_{sm}$$

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



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:

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

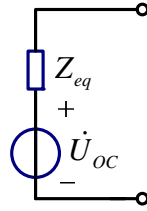
$$j\omega L = j10^4 \times 10 \times 10^{-3} = j100\Omega, \quad \frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{10^4 \times 0.1 \times 10^{-6}} = -j1000\Omega$$

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

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

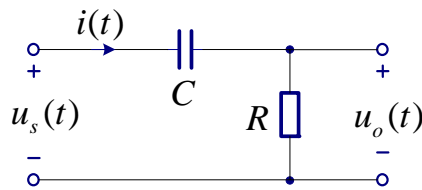
求等效电阻:

$$Z_{eq} = \frac{j100 \times 10000}{j100 + 10000} \approx j100\Omega$$



由此得到戴维南等效电路的相量模型:

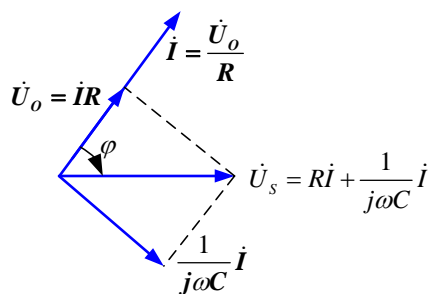
4-17. 已知电路如题图 4-13 所示, 输入电压 $u_s = 2\cos(\omega t)$, 请用相量图表示输入电压 $u_s(t)$ 与输出电压 $u_o(t)$ 之间的相位关系



题图 4-13

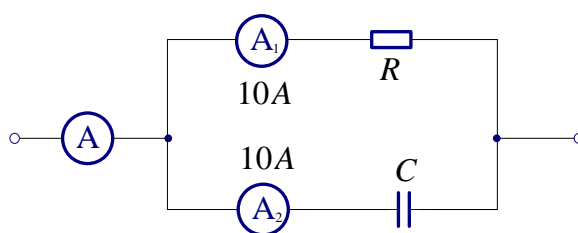
$$\text{解: } i = \frac{\dot{U}_o}{R}, \quad \dot{U}_s = Ri + \frac{1}{j\omega C} i$$

$$\dot{U}_o = iR = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} \dot{U}_s = \frac{R}{R - j\frac{1}{\omega C}} \dot{U}_s$$



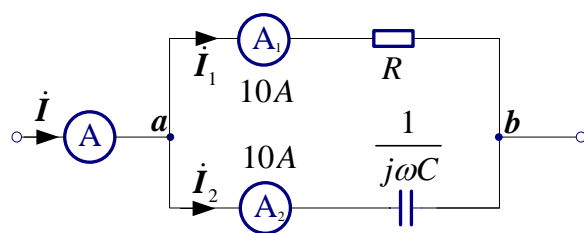
所以电压 \dot{U}_o 超前 \dot{U}_s $\arctan \frac{1}{\omega CR}$

4-18. 已知电路如题图 4-14 所示，求电流表 A 的读数。



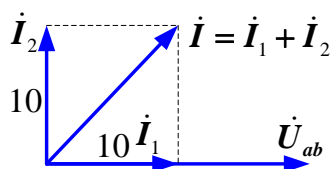
题图 4-14

解：



$$\dot{i}_1 = \frac{\dot{U}_{ab}}{R}, \quad \dot{i}_2 = \frac{\dot{U}_{ab}}{1/j\omega C} = j\omega C \dot{U}_{ab}$$

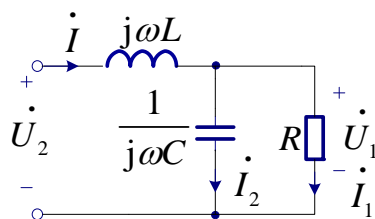
$$\dot{i} = \dot{i}_1 + \dot{i}_2 = \frac{1}{R} \dot{U}_{ab} + j\omega C \dot{U}_{ab}$$



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

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

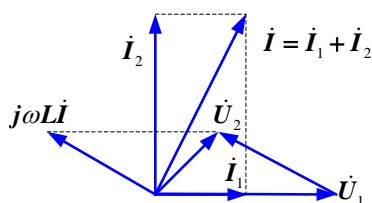
解: $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_1}{R} + \frac{\dot{U}_1}{1/j\omega C} = \frac{\dot{U}_1}{R} + j\omega C \dot{U}_1$

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

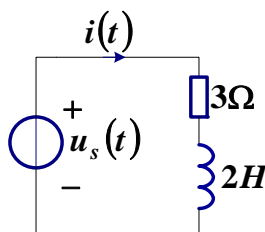
$$\dot{U}_2 = j\omega L \dot{I} + \dot{U}_1 = j\omega L \times \frac{2}{R}\dot{U}_1 \angle 60^\circ + \dot{U}_1 = \frac{2\omega L}{R}\dot{U}_1 \angle 150^\circ + \dot{U}_1$$

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

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



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

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

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

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

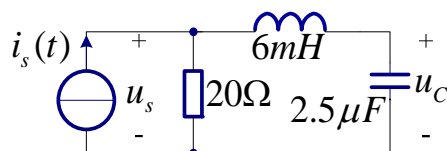
由于 $\int_0^T \cos t \cos 2t dt = 0$, $\int_0^T \sin t \cos 2t dt = 0$, $\int_0^T \cos t \sin 2t dt = 0$, $\int_0^T \sin t \sin 2t dt = 0$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt = \frac{1}{T} \int_0^T 0.277 \cos t \cos(t - 33.7^\circ)dt + \frac{1}{T} \int_0^T 0.2 \cos 2t \cos(2t - 53.1^\circ)dt$$

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

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

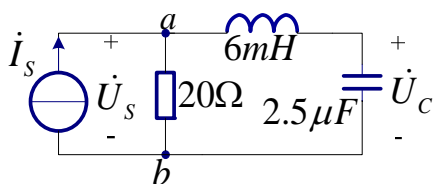
4-21. 电路如题图 4-17 所示, 已知 $i_s(t) = 5 \sin(10^4 t - 20^\circ)A$ 。试求 (1) 电路的输入阻抗 Z_{ab} 并说明电路的性质, (2) \dot{U}_s 及 $u_s(t)$, (3) \dot{U}_C 及 $u_C(t)$, (4) 电路吸收的平均功率 P 。



题图 4-17

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

$$j\omega L = j10^4 \times 6 \times 10^{-3} = j60\Omega, \quad \frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{10^4 \times 2.5 \times 10^{-6}} = -j40\Omega$$



(1) 电路的输入阻抗 $Z_{ab} = \frac{20 \times (j60 - j40)}{20 + (j60 - j40)} = \frac{j20}{1+j} = 10\sqrt{2} \angle 45^\circ \Omega$, 为感性阻抗。

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

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

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

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

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

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

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。

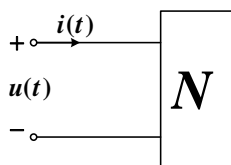
解： $p(t) = UI \cos \varphi_{ui} + UI \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i)$

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

最大瞬时功率 $p_{\max}(t) = 18 W$

最小瞬时功率 $p_{\min}(t) = 2 W$

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 。



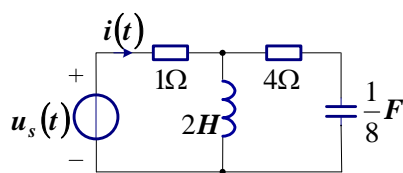
题图 4-18

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

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

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

4-24. 电路题图 4-19 所示, 已知 $u_s(t) = 10\sqrt{2} \cos 2t \text{ V}$, 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: $j\omega L = j4\Omega$, $\frac{1}{j\omega C} = -j4\Omega$

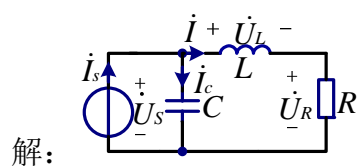
$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{10\angle 0^\circ}{1 + \frac{j4 \times (4 - j4)}{j4 + (4 - j4)}} = \frac{10\angle 0^\circ}{5 + j4} = 1.56\angle -38.66^\circ$$

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

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

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

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 $P = UI \cos \varphi_{ui} = 220I \times 0.6 = 30 \times 10^3 \text{ W}$, 所以 $I = \frac{2500}{11} \text{ A}$

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

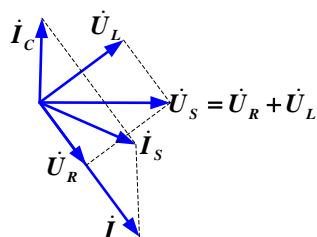
$$\dot{I}_s = \dot{I} + \dot{I}_C = \frac{2500}{11}\angle -53^\circ + 220\omega C\angle 90^\circ = \frac{2500}{11}\cos(-53^\circ) + j\frac{2500}{11}\sin(-53^\circ) + j220\omega C$$

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

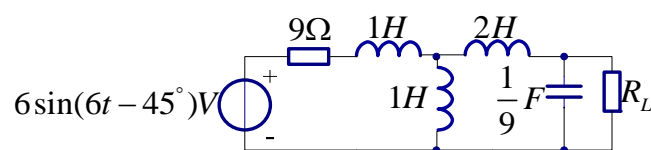
$$\frac{\dot{U}_s}{\dot{I}_s} = \frac{220\angle 0^\circ}{\frac{1500}{11} + j(-\frac{2000}{11} + 220\omega C)} = \frac{U_s}{I_s} \angle \arctan \frac{\frac{2000}{11} - 220\omega C}{\frac{1500}{11}} = \frac{U_s}{I_s} \angle \arctan \frac{100 - 121\omega C}{75}$$

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

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



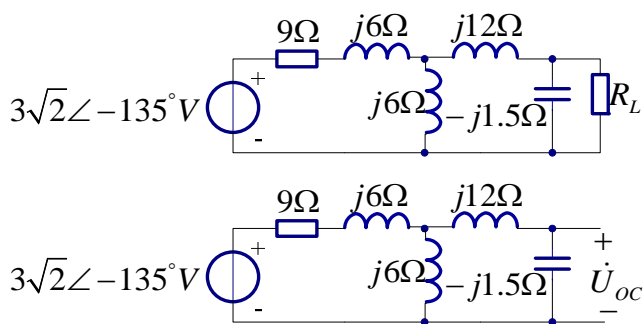
4-26. 已知电路如题图 4-20 所示, 试求电阻 R_L 为多大值能够获取最大功率, 最大功率是多少?



题图 4-20

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

$$j\omega L_1 = j6\Omega, \quad j\omega L_2 = j12\Omega, \quad \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j6 \times \frac{1}{9}} = -j1.5\Omega$$



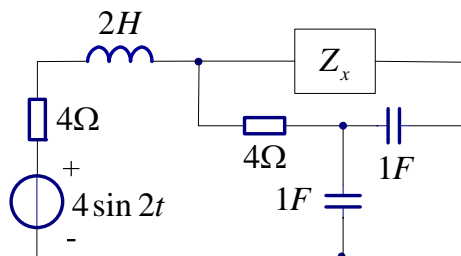
$$\begin{aligned}\dot{U}_{oc} &= \frac{j6 \times (j12 - j1.5)}{9 + j6 + \frac{j6 \times (j12 - j1.5)}{j6 + (j12 - j1.5)}} \times \frac{-j1.5}{j12 - j1.5} \times 3\sqrt{2}\angle -135^\circ = \frac{-j2}{11 + j12} \times \sqrt{2}\angle -135^\circ \\ &= \frac{-j2}{11 + j12} \times \sqrt{2}\angle -135^\circ = 0.12\sqrt{2}\angle 87.5^\circ\end{aligned}$$

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

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

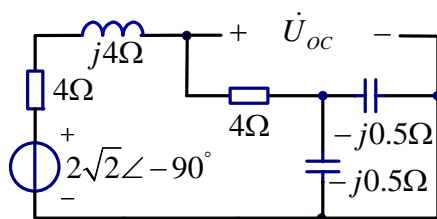
$$P_{L\max} = \frac{U_{oc}^2}{4R_x} = \frac{(0.12\sqrt{2})^2}{4 \times \frac{1}{66.25}} = 0.477W$$

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

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



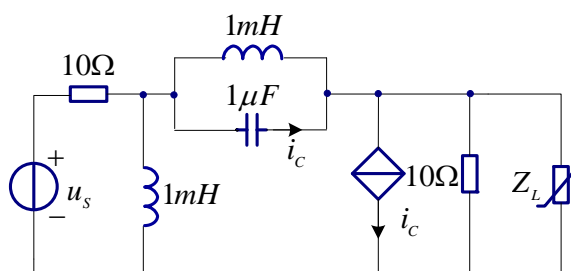
$$\dot{U}_{oc} = \frac{(4 - j0.25) \times 2\sqrt{2} \angle -90^\circ}{4 + j4 + 4 - j0.25} = 1.28 \angle -118.7^\circ \text{ V}$$

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

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

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

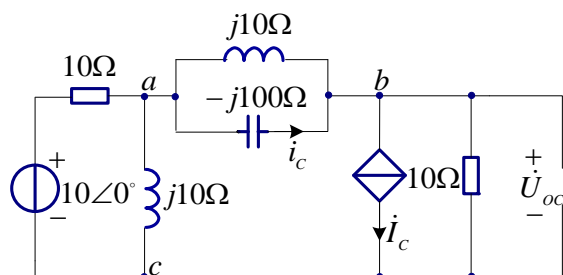
4-28. 题图 4-22 所示电路中， $u_s(t) = 10\sqrt{2} \cos 10^4 t \text{ V}$ ，若负载 Z 的实部和虚部均可调，求负载 Z 获得的最大功率。



题图 4-22

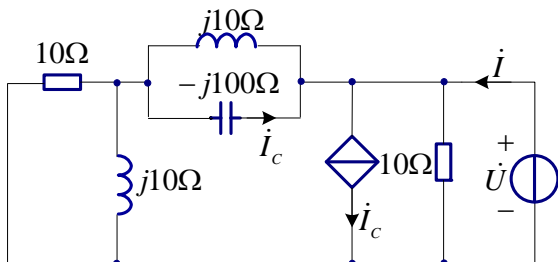
解： $u_s(t) = 10\sqrt{2} \cos 10^4 t \Rightarrow \dot{U}_s = 10 \angle 0^\circ, \omega = 10^4 \text{ rad/s}$

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



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：

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

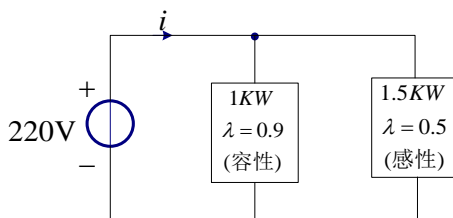


$$\begin{aligned} i &= \frac{\dot{U}}{10} + i_c + \frac{\dot{U}}{\frac{10 \times j10}{10 + j10} + \frac{j10 \times (-j100)}{j10 - j100}} \\ i_c &= -\frac{\dot{U}}{\frac{10 \times j10}{10 + j10} + \frac{j10 \times (-j100)}{j10 - j100}} \times \frac{j10}{j10 - j100} \end{aligned} \Rightarrow Z_{eq} = \frac{\dot{U}}{i} = \frac{190 + j100}{29} \Omega$$

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

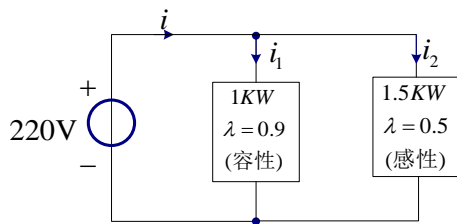
$$P_{L\max} = \frac{U_{oc}^2}{4R_x} = \frac{(\frac{100}{29})^2}{4 \times \frac{190}{29}} = 0.454 \text{ W}$$

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

$$I_1 = \frac{1000}{220 \times 0.9} = 5.05A$$

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

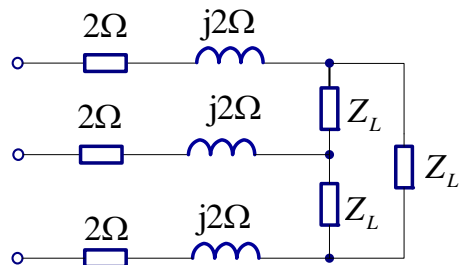
$$I_2 = \frac{1500}{220 \times 0.5} = 13.64A$$

所以 $\dot{I} = 5.05 \angle -25.84^\circ + 13.64 \angle 60^\circ = 11.365 - j9.61 = 14.88 \angle -40.22^\circ A$

$\varphi_{ui} = 40.22^\circ > 0$ (感性)

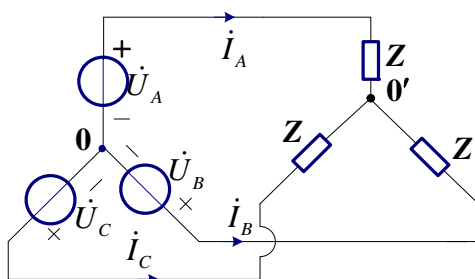
$$\lambda = \cos \varphi_{ui} = \cos 40.22^\circ = 0.764$$

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。



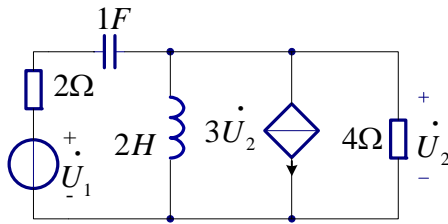
题图 4-24

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 $H(j\omega) = \dot{U}_2 / \dot{U}_1$ 。

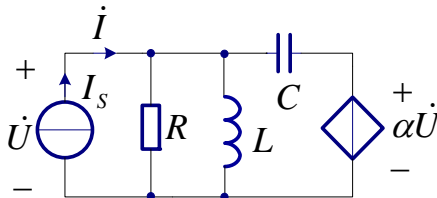


题图 4-26

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

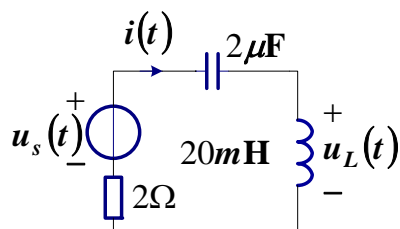
解：求 Z_{ab} ： $\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R} + \frac{\dot{U}}{j\omega L} + \frac{\dot{U} - \alpha\dot{U}}{\frac{1}{j\omega C}} = [\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C(1 - \alpha)]\dot{U}$

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

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 $u_s(t) = 4 \cos \omega t \text{ mV}$, 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: $Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$

该电路的谐振频率为: $\omega L = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{2 \times 10^{-6} \times 20 \times 10^{-3}}} = 5000 \text{ rad/s}$

此时 $Z = R = 2\Omega$, $i(t) = \frac{u_s(t)}{2} = (2 \cos 5000t) \text{ mA}$

$\dot{U}_{Lm} = j\omega L \dot{I}_m = j5000 \times 20 \times 10^{-3} \times 2 \angle 0^\circ = 200 \angle 90^\circ$

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

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反向击穿状态，在这个状态下，电流变化幅度很大，而电压变化幅度很小

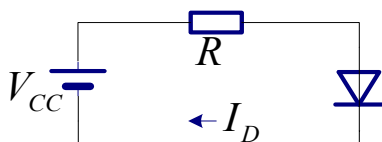
(2) 三极管处于放大状态时，发射结处于正偏，集电结处于反偏。

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。

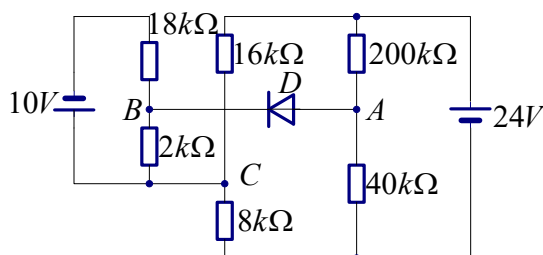
5-8 计算题图 5-2 所示电路中电流 I_D 大小。设二极管 D 有 0.7V 的管压降，图中 $R=1k\Omega$ ，电源电压为 5V。



题图 5-2

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

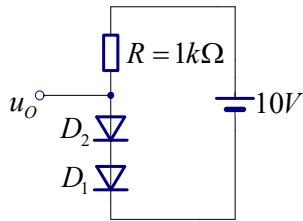
5-9 判断题图 5-3 所示电路中的二极管是导通还是截止，为什么？



题图 5-3

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

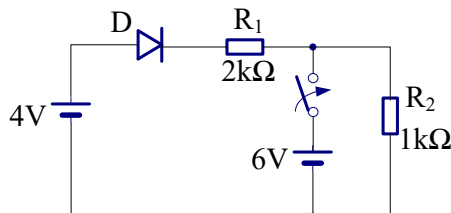


题图 5-5

解：电流 $I = \frac{10 - 2 \times 0.7}{1k\Omega} = 8.6mA$

$u_o = 1.4V$

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？

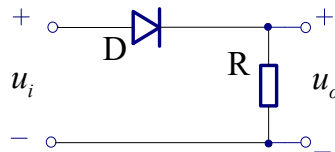


题图 5-6

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

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 。



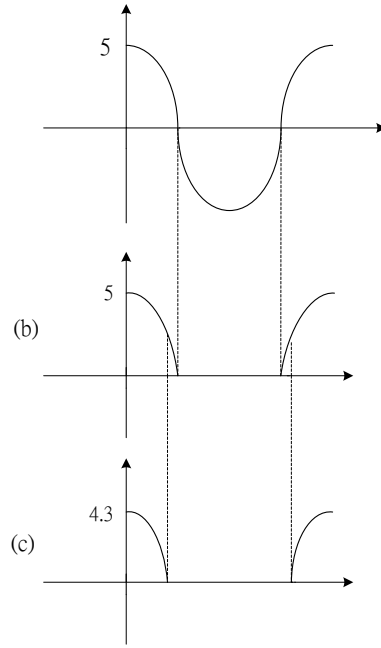
题图 5-7

解：采用理想模型：当 $u_i > 0$ 时，二极管导通， $u_o = u_i$ ；

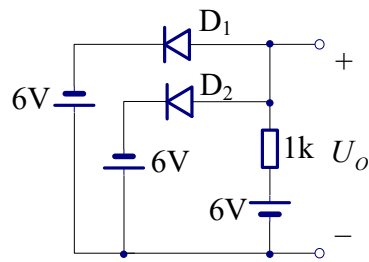
当 $u_i < 0$ 时，二极管截止， $u_o = 0$ ，如图（b）

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

当 $u_i < 0.7V$ 时，二极管截止， $u_o = 0$ ，如图（c）



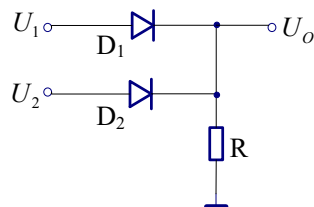
5-15 电路如题图 5-9 所示，采用理想化模型，判断图中的二极管是导通还是截止？并求 U_o 。



题图 5-9

解： D_1 D_2 均导通， $U_o = -6V$ 。

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。



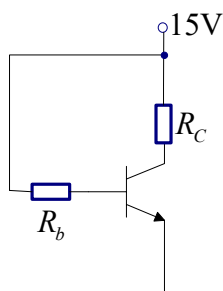
题图 5-10

解： 逻辑或

U_1	U_2	U_o
-------	-------	-------

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。

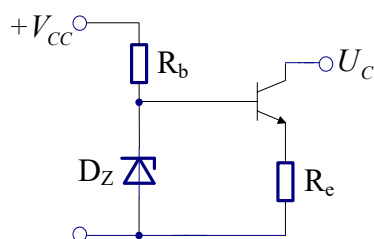


题图 5-15

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

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

5-24 电路如图 5-18 所示，稳压管的稳定电压是 5V，电源电压 $V_{CC}=12V$ ，三极管集电极电压 $U_C=8V$ ，电阻 $R_e=2k\Omega$ ， $R_b=20k\Omega$ ，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

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

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

所以稳压管正常工作，稳压在 5V

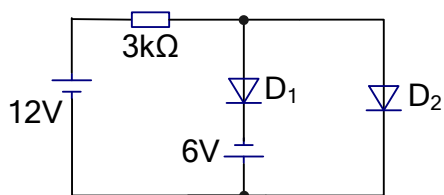
$$I_E = \frac{5-0.7}{R_e} = 2.15mA, U_{CE} = U_C - R_e I_E = 3.7V,$$

即：发射极电流 2.15mA 三极管压降 3.7V

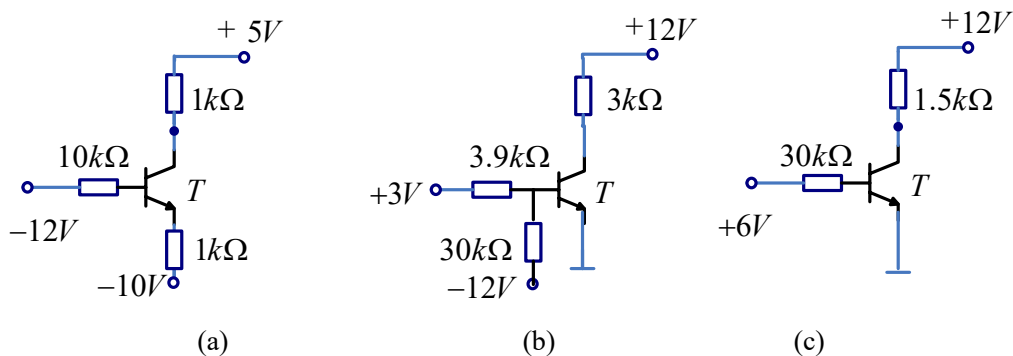
补充 5-1：如图所示电路中两个二极管的状态分别为：(B)

(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极管工作的状态（各三极管 $\beta = 30$ ）：



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 R_c 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($A_u = 1$),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:

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

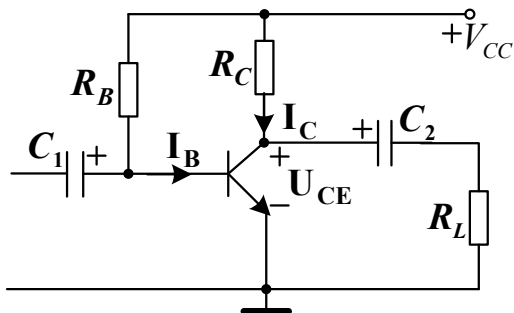
6-2 (a)截止 (b)放大 (c)损坏 (d)饱和

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 R_b 、减小集电极电阻 R_c 、增大 V_{CC})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 R_b ,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 $\beta = 40$, $V_{CC} = 18V$, 试计算静态工作点 I_B , I_C 和 U_{CE} 。

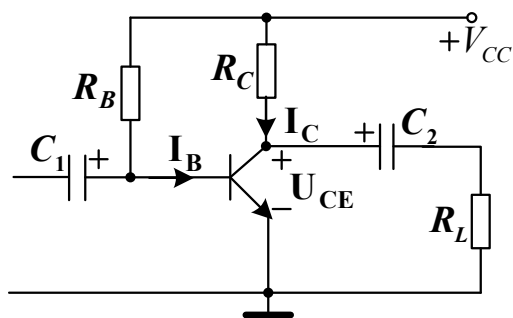


题图 6-5

解:

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

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 。

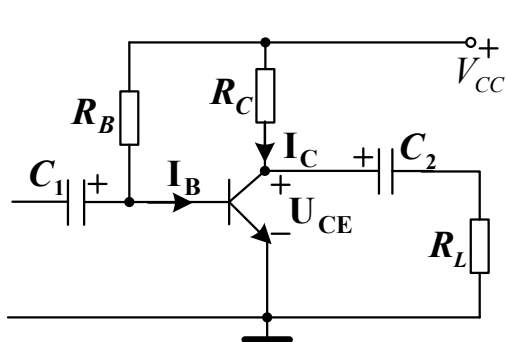


题图 6-6

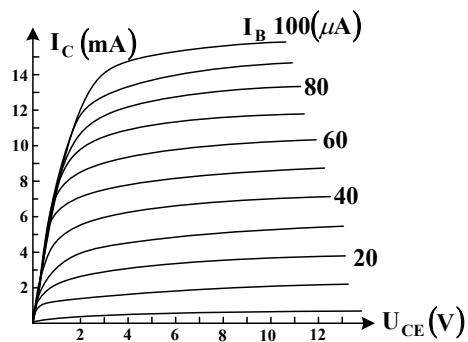
解:

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

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)

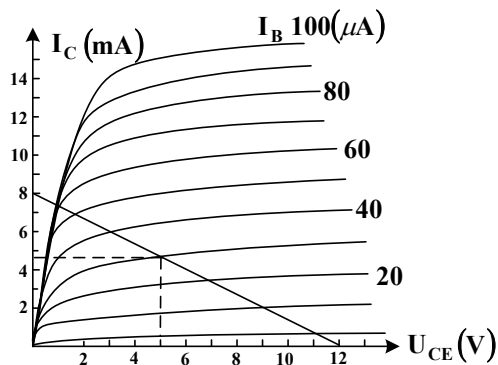


(b)

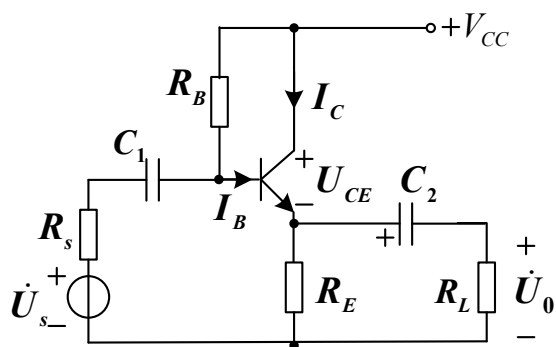
题图 6-7

解:

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

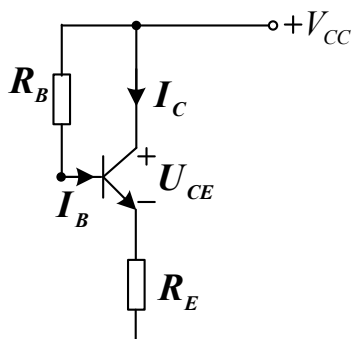


6-8 如题图 6-8 所示电路是射极输出器电路，试画出①直流通路，②交流通路，③微变等效电路。

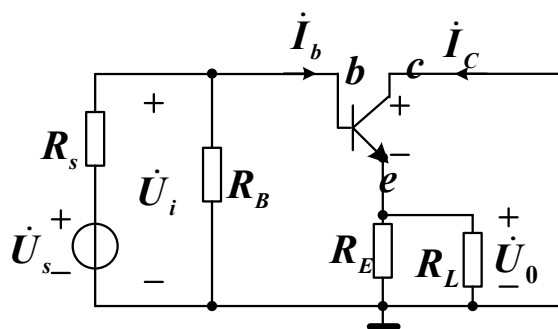


题图 6-8

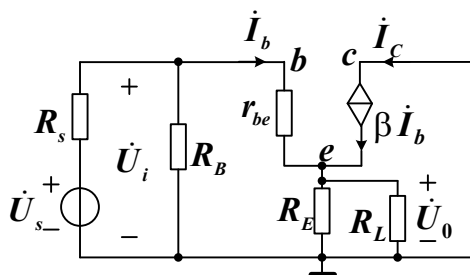
解：



直流通路：

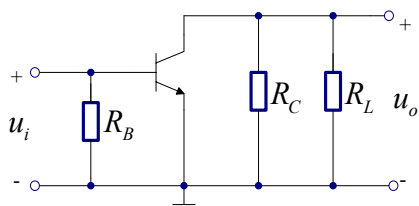


交流通路：



微变等效电路：

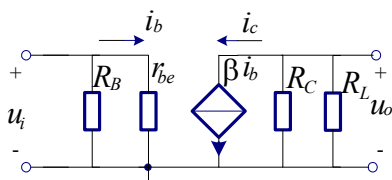
6-9 如题图 6-9 所示电路，为共射放大电路的交流通路，试画出它的微变等效电路。



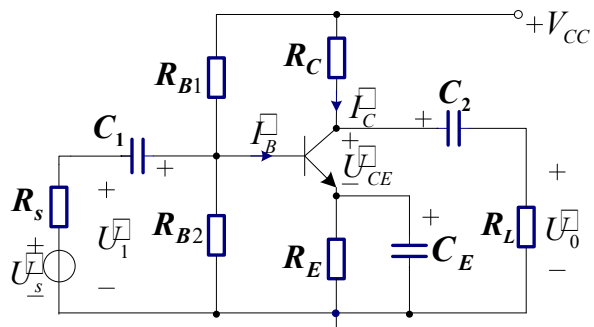
题图 6-9

解：

微变等效电路：

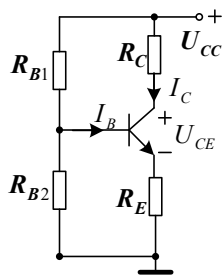


6-11 如题图 6-11 所示电路是共发射极放大电路，试画出①直流通路，②交流通路，③微变等效电路。

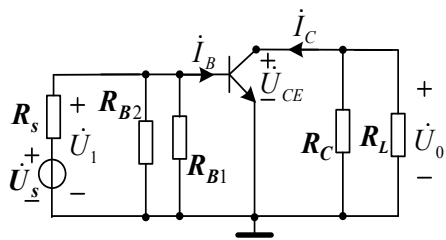


题图 6-11

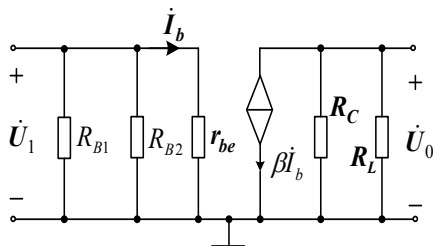
解：



①直流通路



②交流通路

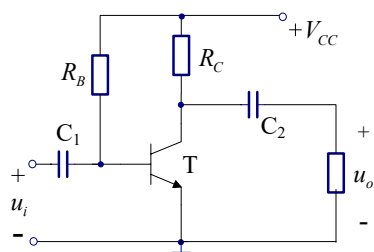


③微变等效电路

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 $\beta=50$ 时，求静态电流 I_B 、 I_C 和管压降 V_{CE} 的值。

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

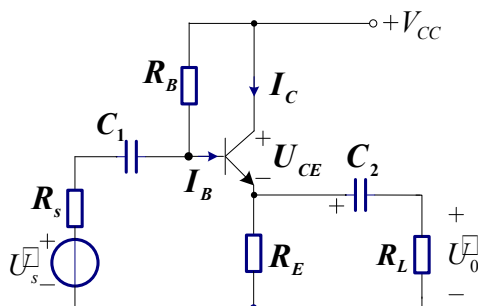


题图 6-12

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

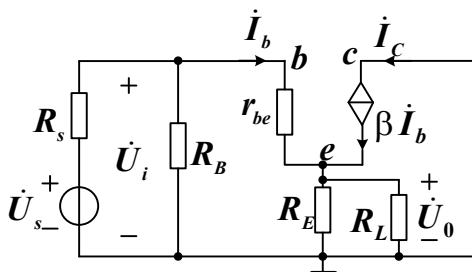
(2) $I_B = \frac{12-0.7}{560} \approx 0.02\text{ mA}$ ， $I_C = 2\text{ mA}$ ， $U_{CE} = 12 - 2 \times 8 = -4\text{ V}$ 此时三极管进入饱和区

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：



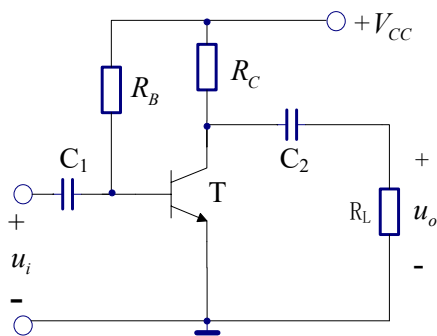
$$\dot{A}_u = 1, \quad r_i = r_{be} + (\beta + 1)(R_E // R_L), \quad r_o = R_E // \frac{r_{be}}{\beta + 1}.$$

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

(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}

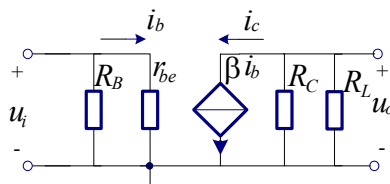


题图 6-17

解:

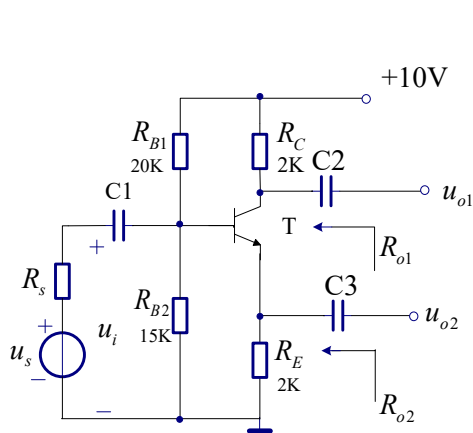
$$(1) I_B = \frac{12 - 0.7}{300} \approx 0.0377\text{ mA}, I_C = 1.883\text{ mA}, U_{CE} = 12 - 1.883 \times 4 = 4.467\text{ V}$$

(2) 微变等效电路:

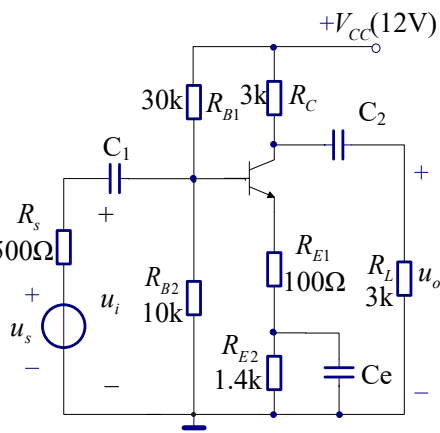


$$\dot{A}_u = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be}} \approx -333, r_i = R_B // r_{be} \approx r_{be} = 300\Omega, r_o = R_C = 4\text{ k}\Omega$$

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



题图 6-22



题图 6-23

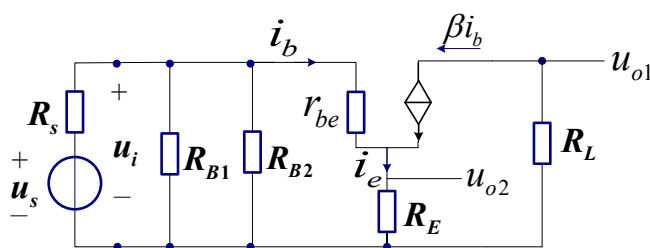
6-22 电路如题图 6-22 所示, $R_s=500\Omega$, 设晶体管的 $\beta=50$, $r_{bb'}=100\Omega$, $V_{BE}=0.7\text{V}$, 试求:

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

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

(2) 画整流微变等效电路。



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

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

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

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

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

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

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

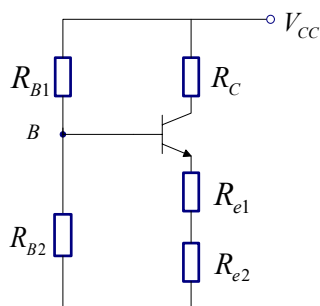
$$u_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot u_s = \frac{7.9}{8.4} u_s$$

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

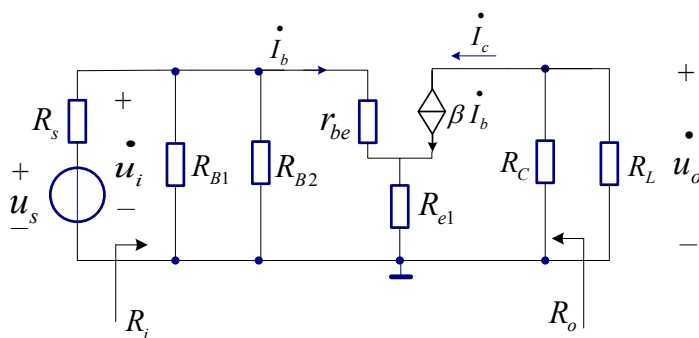
6-23 在题图 6-23 所示电路中三极管 $\beta=50$, $U_{BEQ}=0.7\text{V}$, $r_{bb'}=300\Omega$ 。

- (1) 分析静态工作点;
- (2) 求放大电路的 \dot{A}_{vi} , \dot{A}_{vs} , R_i 和 R_o 。

解:



(b)



(c)

① 直流通路如图(b)所示，则：

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

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

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

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：

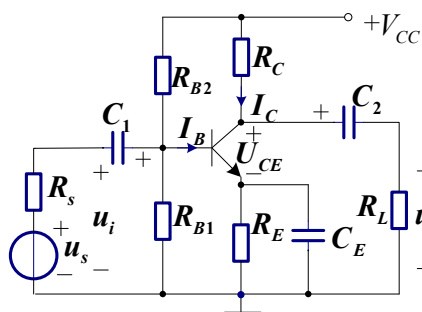
$$\dot{A}_v = \frac{\dot{u}_o}{\dot{u}_i} = - \frac{\beta \dot{I}_b \cdot (R_C // R_L)}{r_{be} \cdot \dot{I}_b + (1 + \beta) \cdot \dot{I}_b \cdot R_{e1}} = - \frac{50 \times 1.5}{1.167 + 51 \times 0.1} = -11.97$$

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

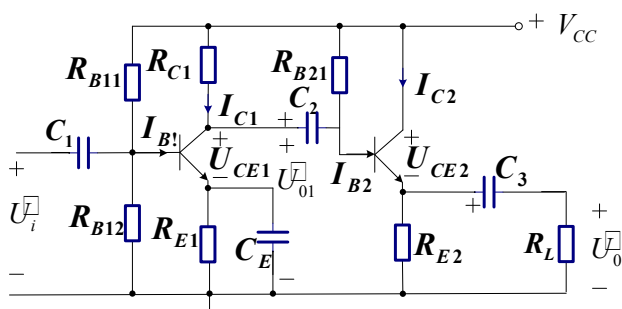
$$\dot{A}_{vs} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \dot{A}_v = \frac{3418}{3418 + 500} \times (-11.97) = -10.44$$

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： $R_o = R_C = 3k\Omega$



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: $R_c = 1.5k\Omega$, $R_{B1} = 20k\Omega$, $R_{B2} = 60k\Omega$, $R_E = 1k\Omega$, $R_L = 2k\Omega$, $V_{CC} = 15V$, $\beta = 40$ 。

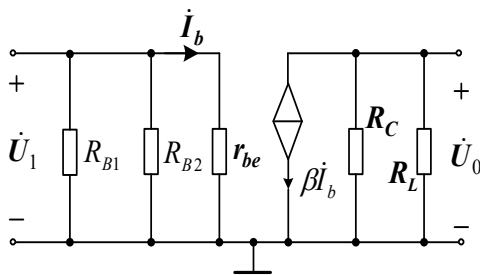
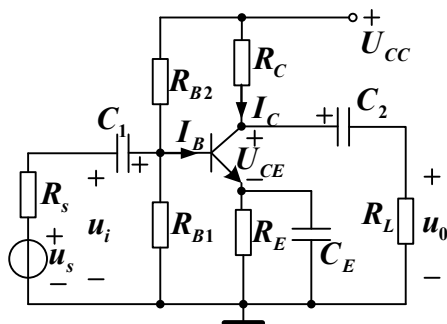
(1) 试计算该放大电路的静态工作点 (I_{BQ} , I_{CQ} , U_{CEQ})。

(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:

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

解:



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

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

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

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

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

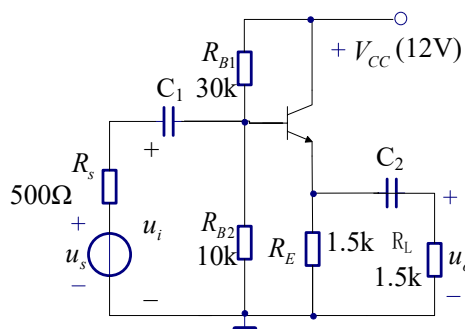
(1) 试计算第一级放大电路的静态工作点 (I_{BQ} , I_{CQ} , U_{CEQ});

(2) 求放大电路的输入电阻, 如果第一级电压放大倍数 $\dot{A}_{u1} = \dot{U}_{o1}/\dot{U}_i = -112.5$; 总电压放大倍数近似等于多少。

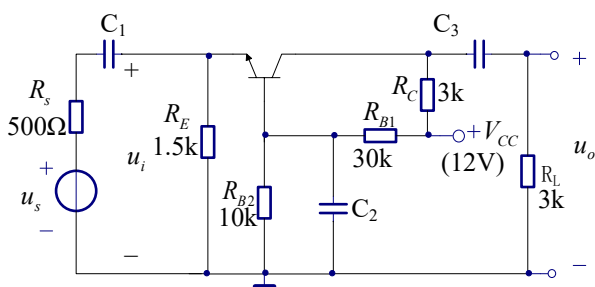
$$\text{解: } ① U_{B1} = 12 \times \frac{20}{20+30} = 4.8V, \quad I_{E1} = I_{C1} = \frac{4.8-0.7}{4} \approx 1mA,$$

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

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



题图 6-26



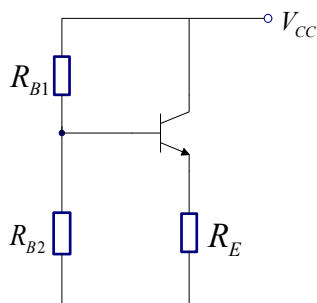
题图 6-27

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

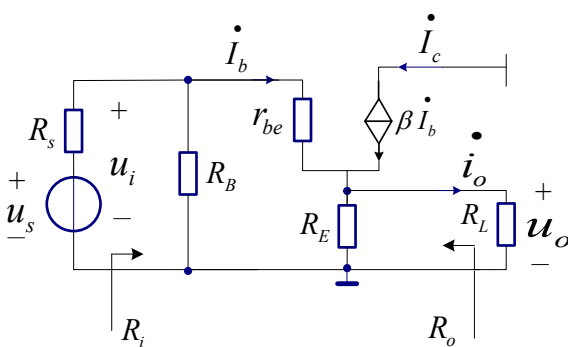
(1) 分析静态工作点;

(2) 求放大电路的 \dot{A}_{vi} , R_i 和 R_o 。

解:

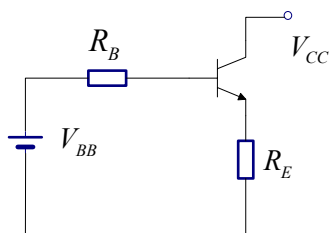


(b)



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

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

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

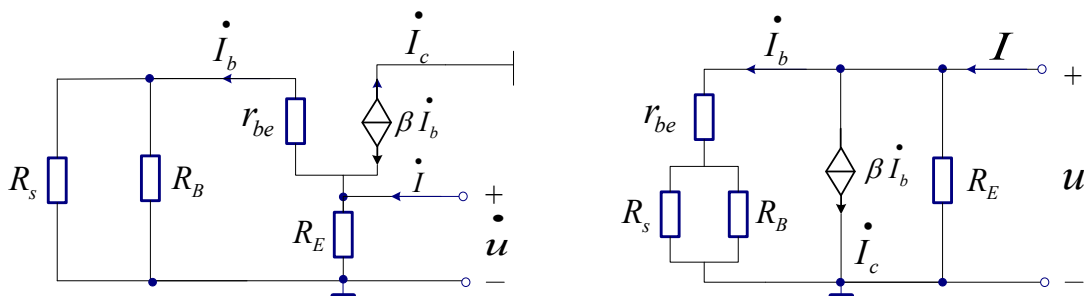
$$\therefore I_{CQ} = \beta \dot{I}_{BQ} = 1.4 \text{ mA}, \quad U_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ} \cdot R_E = 9.9 \text{ V}$$

② 交流微变等效电路如图(c)所示, 可求得:

$$\dot{A}_u = \frac{(1+\beta)\dot{I}_b \cdot (R_E // R_L)}{\dot{I}_b \cdot r_{be} + (1+\beta)\dot{I}_b \cdot (R_E // R_L)} = \frac{51 \times 0.75}{2 + 51 \times 0.75} = 0.95$$

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

外加电源法求 R_o ，有源网络 u_s 置零，电路如图，则有：



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

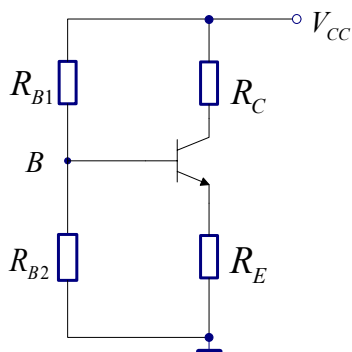
$$\therefore R_o = \frac{u}{I} = R_E // \left[\frac{r_{be} + R_s // R_B}{1+\beta} \right] = 1.5 \text{ k}\Omega // 48.4 \text{ k}\Omega \approx 48.4 \text{ k}\Omega$$

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

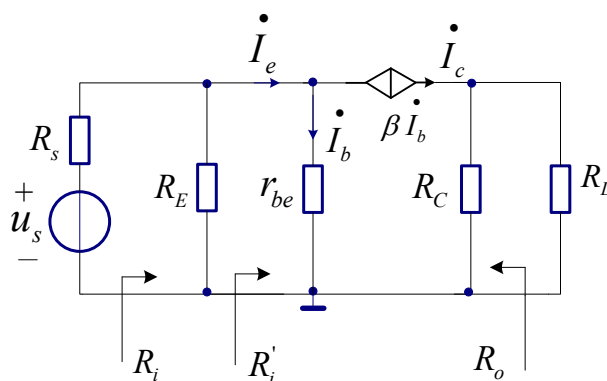
(1) 分析静态工作点；

(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, $U_{BQ} \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC} = 3 \text{ V}$

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

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

②交流微变等效电路如图(c)所示, 可求得:

$$\dot{A}_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{\beta \dot{I}_b \cdot (R_C // R_L)}{\dot{I}_b \cdot r_{be}} = \frac{\beta \cdot (R_C // R_L)}{r_{be}} = \frac{50 \times 1.5}{2} = 37.5$$

$$R'_i = \frac{u'_i}{I_e} = \frac{\dot{I}_b \cdot r_{be}}{(1 + \beta) \cdot \dot{I}_b} = \frac{r_{be}}{1 + \beta} = 39 \Omega$$

$$\therefore R_i = R_E // R'_i \approx 39 \Omega$$

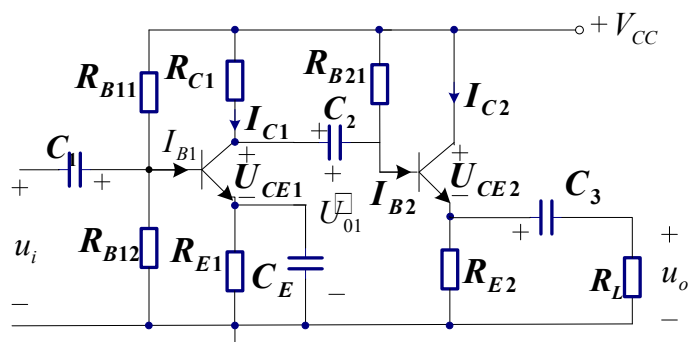
外加电源法求 R_o , 有源网络无源化, 外加电流不能流过受控源, 即开路,

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

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

(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 。



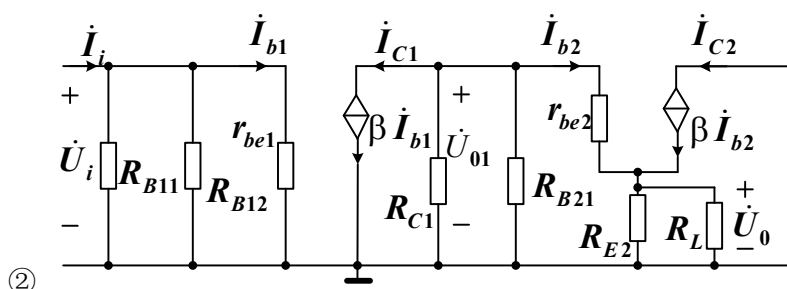
题图 6-28

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

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

$$I_{B2} = \frac{12 - 0.6}{130 + 51 \times 3} \approx 0.04mA \quad I_{C2} = 50 \times 0.04 = 2mA$$

$$U_{CE2} = 12 - 2 \times 3 = 6V$$



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

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

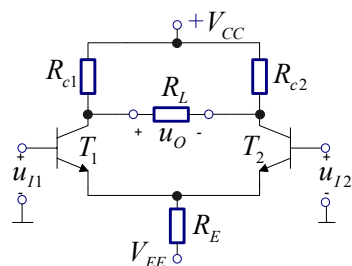
$$\dot{A}_{u1} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta_1 R'_{L1}}{r_{be1}} = -50 \times \frac{3.6}{1.6} = -112.5, \quad \text{总电压放大倍数近似等于 } \dot{A}_{u1}。$$

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

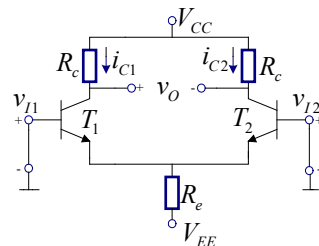
$$r_i = r_{i1} = R_{B11} // R_{B12} // r_{be1} = 30 // 20 // 1.6 \approx 1.4 \text{ k}\Omega,$$

$$r_o = r_{o2} \approx R_{E2} // [(1 + \beta_2)(r_{be2} + R_{C1} // R_{B21})] \approx 0.1 \text{ k}\Omega。$$

6-30 差动放大电路如题图 6-30 所示，已知晶体管的 $\beta = 100$ ， $U_{BEQ} = 0.7 \text{ V}$ ， $R_{C1} = R_{C2} = 5 \text{ k}\Omega$ ， $R_e = 5 \text{ k}\Omega$ ， $R_L = 4 \text{ k}\Omega$ ， $V_{CC} = 6 \text{ V}$ ， $V_{EE} = -6 \text{ V}$ ，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 0.7 V ，则 $V_E = -0.7 \text{ V}$ ，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 $U_C = V_{CC} - I_C R_C$

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：

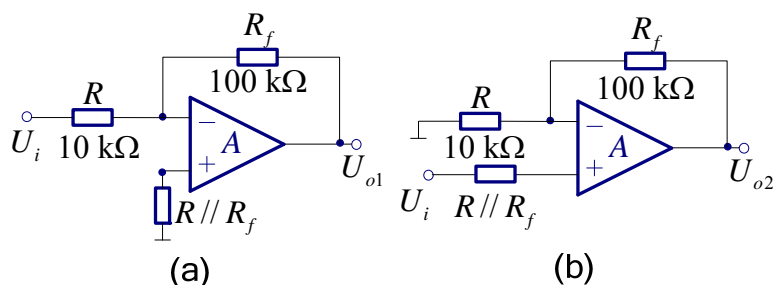
①通用型 ②高阻型 ③高速型 ④低功耗型 ⑤高压型 ⑥大功率型 ⑦高精度型

- (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 $1\mu\text{V}$ 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 $100\text{k}\Omega$ 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 $\pm 80\text{V}$ 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

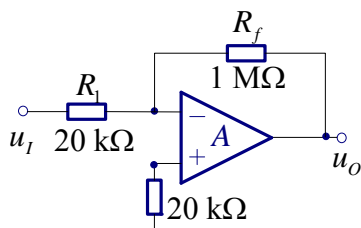
7-12 电路如题图 7-9 所示，集成运放输出电压的最大幅值为 $\pm 14\text{V}$ ，填写下表。



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 $R_i = 20\text{k}\Omega$ ，比例系数为 -50 。

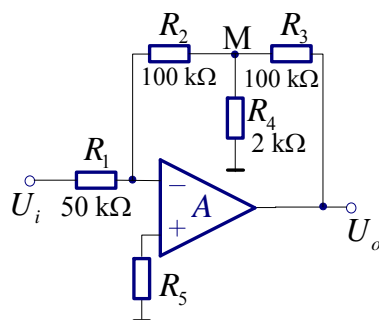


解：比例系数为 -50 ，反相比例电路如图所示，

$$R_i = R_1 = 20k\Omega, \quad u_o = -\frac{R_f}{R_1} \cdot u_i, \quad \text{比例系数 } -\frac{R_f}{R_1} = -50$$

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

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

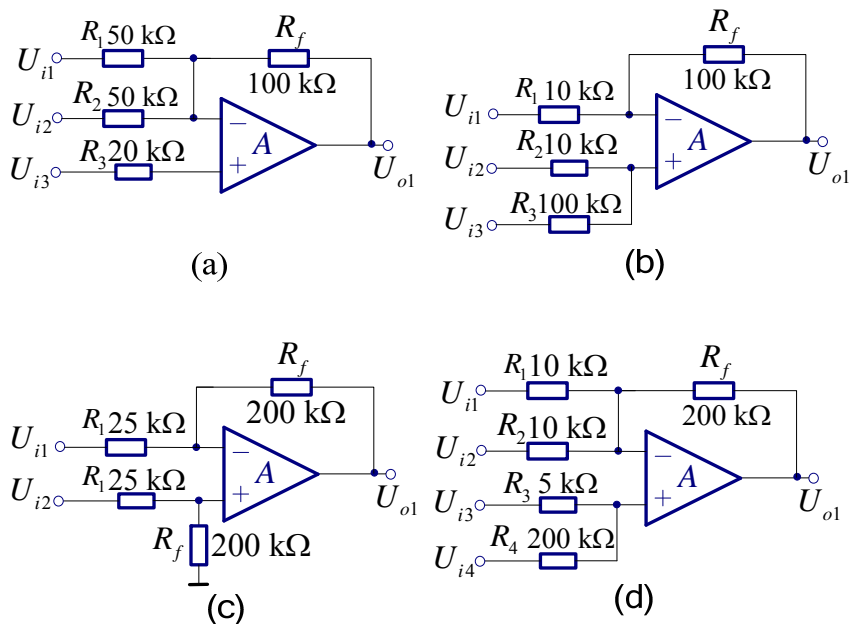
7-15 电路如题图 7-10 所示，集成运放输出电压的最大幅值为 $\pm 14V$ ， u_i 为 $2V$ 的直流信号。

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

$$\therefore u_{o1} = -\frac{R_f}{R_1} u_{i1} - \frac{R_f}{R_2} u_{i2} + \frac{R_f}{R_3} u_{i3} = -2u_{i1} - 2u_{i2} + 5u_{i3}$$

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

$$\therefore u_{o1} = -\frac{R_f}{R_1} u_{i1} + \frac{R_f}{R_2} u_{i2} + \frac{R_f}{R_3} u_{i3} = -10u_{i1} + 10u_{i2} + u_{i3}$$

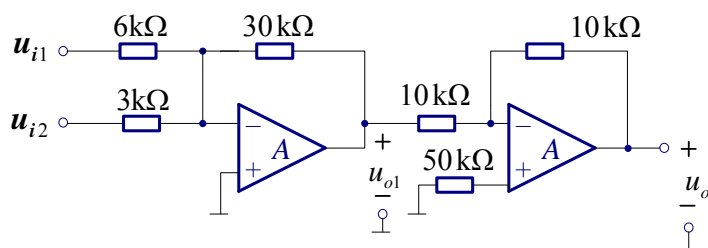
$$(c) \because R_f // R_1 = R_2 // R_f$$

$$\therefore u_{o1} = -\frac{R_f}{R_1} u_{i1} + \frac{R_f}{R_2} u_{i2} = -8u_{i1} + 8u_{i2}$$

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

$$\therefore u_{o1} = -\frac{R_f}{R_1} u_{i1} - \frac{R_f}{R_2} u_{i2} + \frac{R_f}{R_3} u_{i3} + \frac{R_f}{R_4} u_{i4} = -20u_{i1} - 20u_{i2} + 40u_{i3} + u_{i4}$$

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

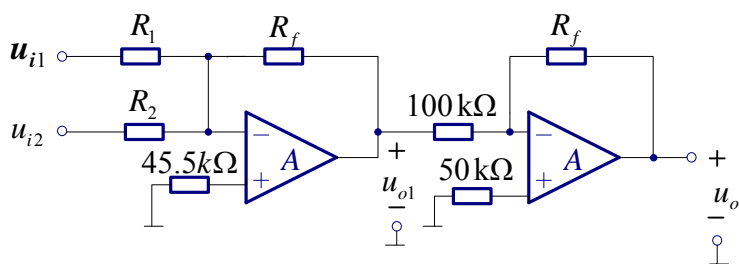
解:

$$u_{o1} = -\frac{30}{6} u_{i1} - \frac{30}{3} u_{i2} = -5u_{i1} - 10u_{i2}$$

$$u_o = -\frac{10}{10} \cdot u_{o1} = -u_{o1}$$

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

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_{o1} , u_o 与 u_{i1} 、 u_{i2} 的关系。



题图 7-16

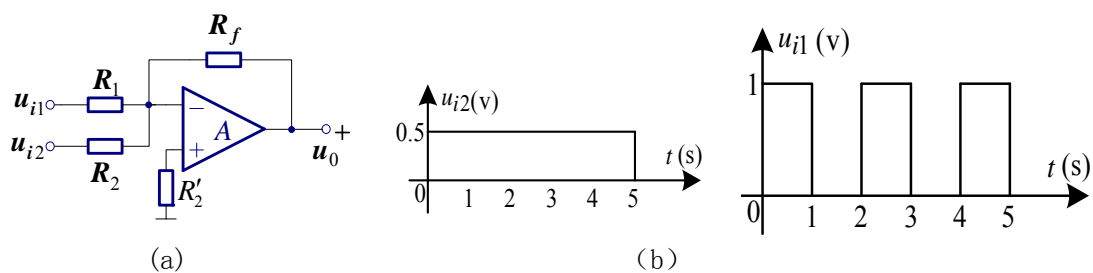
解:

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

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

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

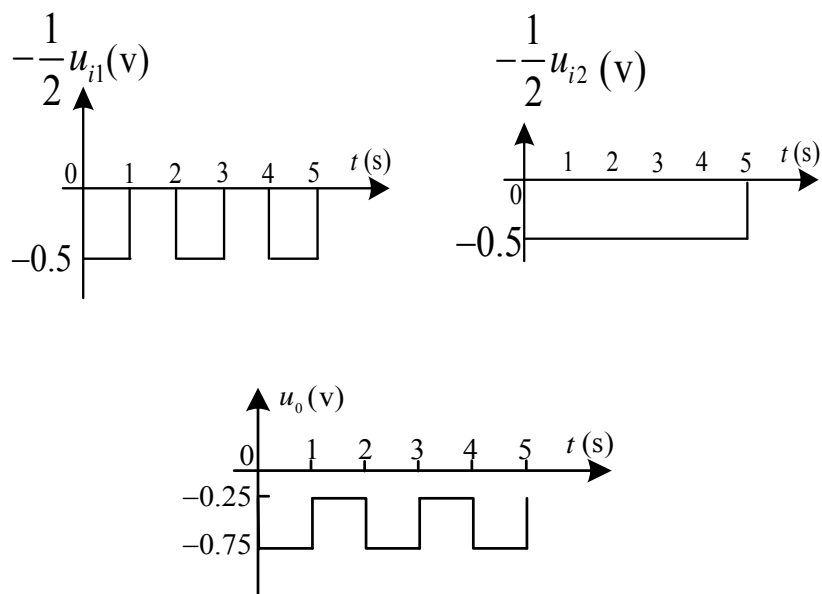
7-23 含理想运算放大器电路如题图 7-17(a)所示, 已知 $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 10\text{k}\Omega$, $R_f = 5\text{k}\Omega$, 写出输出电压 u_0 与输入电压 u_{i1} 和 u_{i2} 的关系式。当输入电压 u_{i1} 和 u_{i2} 的波形分别如题图 9-9 (b)所示, 试在图中画出输出电压 $u_0 \sim t$ 的波形。



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) $A = 1 + \frac{R_4}{R_1}$

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 $A_{uf} = \Delta u_O / \Delta u_I = 1 + \frac{R_2}{R_1}$ 。设 $u_I = 1\text{V}$, 则 $u_O = \underline{11}\text{V}$; 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 $A_u = 2000$ $F = \frac{1}{20}$

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