习题一

1-1 导线中的电流为 10A，20s 内有多少电子通过导线的某一横截面？

解：根据电流强度的定义 $i=\dfrac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}$，已知 I=10A，$\triangle t$=20s，

所以：$\triangle q=i\triangle t$=10*20=200 (C)，即在 20 秒内有 200 库仑的电子通过导线某一截面。

1-2 一个继电器的线圈，电阻为 48Ω，当电流为 0.18A 时才能动作，问线圈两端应施加多大的电压？

答：根据欧姆定律可得：$U=IR$=0.18*48=8.64V

1-3 一个 1000W 的电炉，接在 220V 电源使用时，流过的电流有多大？

答：由电路的功率计算公式可知：$P=UI$，所以 $I=\dfrac{P}{U}=\dfrac{1000}{220}=4.55\mathrm{A}$

1-4 某电流表的量程为 10mA．当某电阻两端的电压为 8V 时，通过的电流为 2mA．如果给这个电阻两端加上 50V 的电压，能否用这个电流表测量通过这个电阻的电流？

解：根据电阻两端压降和流过电阻中的电流，由欧姆定理可以确定电阻的值为：

$$R=\frac{U}{I}=\frac{8}{2\times10^{-3}}=4\,(\mathrm{k\Omega})$$

如果给电阻上加 50V 的电压，流过电阻的电流为：

$$I=\frac{U}{R}=\frac{50}{4\times10^{3}}=12.5\,(\mathrm{mA})$$

电流表的量程为 10mA，也就是允许通过的最大电流为 10mA，显然不能使用该电流表测量通过流过该电阻的电流。

1-5 在电路中已经定义了电流、电压的实际方向，为什么还要引入参考方向？参考方向与实际方向有何区别和联系？

答：在求解电路参数时，对于稍微复杂的电路，必须列方程求解，列出方程又必须知道电流、电压的方向，为此，引入电流、电压参考方向，根据参考方向列出电路方程，利用方程求出电路参数，若结果为负，表明实际的方向与参考方向相反，若结果为正，表明参考方向就是实际方向。

1-6 如何计算元件的吸收功率？如何从计算结果判断该元件为有源元件或无源元件？

答：在关联参考方向下：$P=UI$；在非关联参考方向下：$P=-UI$。在此前提下，当 P>0 时为吸收功率。若 P<0 为有源元件，否则为无源元件。

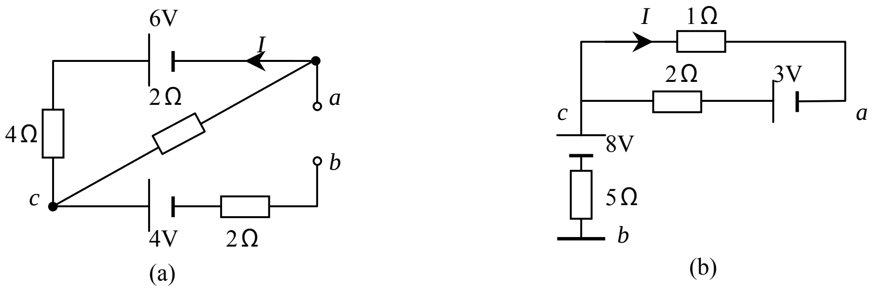
1-7 标有 10kΩ（称为标称值）、1/4W（额定功率）的金属膜电阻，若使用在直流电路中，试问其工作电流和电压不能超过多大数值？

答：因为功率 $P=\dfrac{U^2}{R}=I^2R$

工作电流：$I<\sqrt{\dfrac{P}{R}}=\sqrt{\dfrac{0.25}{10000}}=0.005A=5\mathrm{mA}$；

工作电压：$U<\sqrt{PR}=\sqrt{0.25\times10000}=50\mathrm{V}$

1-8 求题图 1-1(a)、(b)电路得 U_{ab}。



题图 1-1 习题 1-8 电路图

解：(1) 图(a)，由 a 到 b 的电压降 $U_{ab}=U_{ac}+U_{cb}$，假定电流方向如图所示，沿 a—电池—c—a 回路逆时针方向绕行一周，电压方程式为：

$-6+4I+2I=0$　　　　即得：I=1A

则 $U_{ac}=2(-I)=-2V$　　（或者 $U_{ac}=-6+4I=-2V$）

对于 cb 支路：因为构不成回路，所以电流为零。故：U_{cb}=4V　#

所以：$U_{ab}=U_{ac}+U_{cb}=-2+4=2V$#

(2) 图(b)，由 a 到 b 的电压降 $U_{ab}=U_{ac}+U_{cb}$，假定电流方向如图所示，与(a)同理在回路中列出电压方程为：

$-3+1I+2I=0$　　　　即得：I=1A

则 $U_{ac}=1(-I)=-1V$　　（或者 $U_{ac}=-3+2I=-1V$）

对于 cb 支路：因为构不成回路，所以电流为零。故：U_{cb}=8V

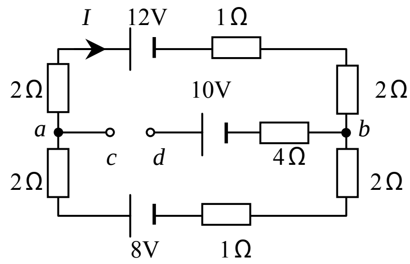
所以：$U_{ab}=U_{ac}+U_{cb}=-1+8=7V$　#

1-9　电路如题图 1-2 所示，求

(1) 列出电路得基尔霍夫电压定律方程；

(2) 求出电流

(3) 求 U_{ab} 及 U_{cd}



题图 1-2　习题 1-9 电路图

解：(1) 假设电流的参考方向如图所示，对于 db 支路，因为不构成回路，支路电流等于零，U_{db}=10V

由 a 点出发按顺时针方向绕行一周的 KVL 电压方程式为：$2I+12+1I+2I+2I+1I-8+2I=0$

得：$10I+4=0$　#

(2) 求电流。由上面得回路电压方程式得：

$$I=-\frac{4}{10}=-0.4(\mathrm{A})\quad \#$$

负号表示电流的实际方向与参考方向相反。

(3) 求 U_{ab} 及 U_{cd}。

$U_{ab}=2I+12+1I+2I=5I+12=5\times(-0.4)+12=10(V)$　#

又∵　$U_{ab}=U_{cd}+10$　　　∴　$U_{cd}=U_{ab}-10=0$　#

1-8　电路如题图 1-3 所示，已知下列各电压：U_1=10V，U_2=5V，U_4=-3V，U_6=2V，U_7=-3V 以及 U_{12}=8V，其他各支路得电压是否都能确定？试尽可能多地确定各未知电压。

解：需要求的电压有 U_3、U_5、U_8、U_9、U_{10}、U_{11}。根据 KVL，列出各回路的电压方程：

沿 5—7—6 回路：$-U_5-U_6+U_7=0$　　$-U_5-2-3=0$　　得：U_5=-5(V)　#

沿 5—2—11—1 回路：$U_5+U_2+U_{11}-U_1=0$　　代入数据后得：U_{11}=10(V)　#

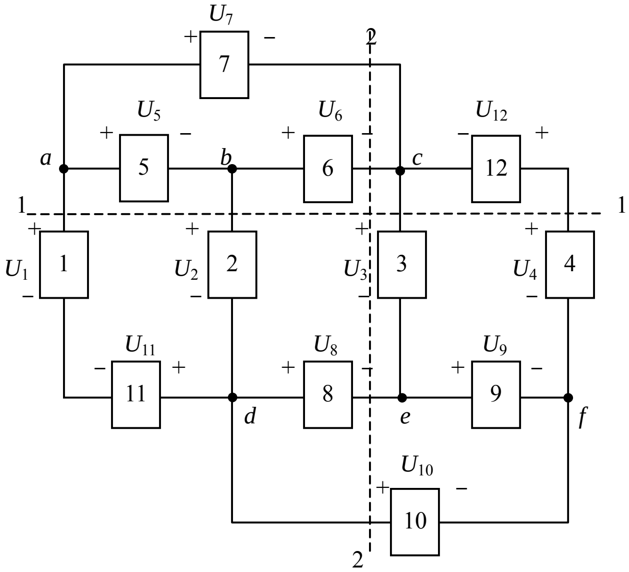
沿 2—6—12—4—10 回路：$-U_2+U_6-U_{12}+U_4-U_{10}=0$　　代入数据后得：U_{10}=-14(V)　#

沿 2—6—3—8 回路：$-U_2+U_6+U_3-U_8=0$　　代入数据后得：U_3-U_8=3(V)

沿 1—7—3—8—11 回路：$-U_1+U_7+U_3-U_8+U_{11}=0$　　代入数据后得：$U_3-U_8=3(\mathrm{V})$

沿 12—4—9—3 回路：$-U_{12}+U_4-U_9-U_3=0$　　代入数据后得：$U_3+U_9=11(\mathrm{V})$

根据后 3 个方程无法求出其余的 3 个电压，并且在后 3 个方程中有两个方程是相同的，因此只有两个独立方程，用两个方程解出 3 个未知量有无穷解。



题图 1-3　习题 1-10、1-11 图

1-10　电路如题图 1-3 所示，采用关联得参考方向，且已知下列各支路电流：$I_1=2\mathrm{A}$，$I_4=5\mathrm{A}$，$I_7=-5\mathrm{A}$ 以及 $I_{10}=-3\mathrm{A}$。其他各支路电流是否都能确定？试尽可能多地确定各未知电流。

解：各支路电流采用关联参考方向，因此不在图中标出电流方向。除已知电流之外，还需求解 6 个未知电流。在图中标出节点 a、b、c、d、e、f。

对 f 节点：$-I_9-I_{10}-I_4=0$　代入数据得：$I_9=-2(\mathrm{A})$　　#

对 a 节点：$I_1+I_5+I_7=0$　代入数据得：$I_5=3(\mathrm{A})$　　#

对其余的 4 个节点列出节点方程，必然有一个方程不独立，即 3 个独立方程要解出 4 个未知量，其有无穷多解。

1-11　电路如题图 1-3 所示，采用关联得参考方向，试证明

$I_1+I_2+I_3+I_4=0$

$I_7+I_6+I_8+I_{10}=0$

解：运用 KCL 定律

a 节点：$I_1+I_5+I_7=0$　　①

b 节点：$-I_5+I_2+I_6=0$　　②

c 节点：$-I_7-I_6+I_3+I_4=0$　　③

①+②+③得：$I_1+I_5+I_7-I_5+I_2+I_6-I_7-I_6+I_3+I_4=0$

∴　$I_1+I_2+I_3+I_4=0$

或者：用沿 1—1 截面 $\Sigma I=0$，也可证得：$I_1+I_2+I_3+I_4=0$

c 节点：$-I_7-I_6+I_3+I_4=0$　　④

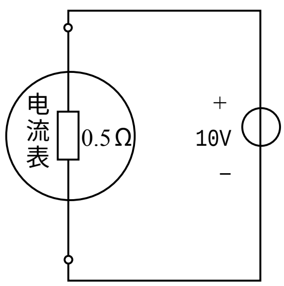
e 节点：$-I_3-I_8+I_9=0$　　⑤

f 节点：$-I_9-I_4-I_{10}=0$　　⑥

④+⑤+⑥得：$-I_7-I_6+I_3+I_4-I_3-I_8-I_4-I_{10}=0$

∴　$I_6+I_7+I_8+I_{10}=0$

或者：用沿 2—2 截面 $\Sigma I=0$，也可证得：$I_6+I_7+I_8+I_{10}=0$



1-12　220V、40W 的灯泡显然比 2.5V、0.3A 的小电珠亮的多。求 40W 灯泡额定电流和小电珠的额定功率。我们能不能说瓦数大的灯泡，所以它的额定电流也大？

答：40W 的灯泡的额定电流为：$I=\dfrac{P}{U}=\dfrac{40}{220}=0.182\mathrm{A}$

小电珠的额定功率为：$P=UI=2.5\times0.3=0.75\mathrm{W}$

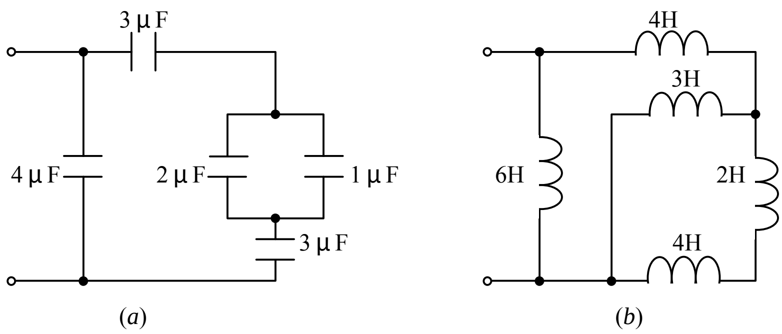
显然小电珠的瓦数为 0.75W，灯泡的瓦数为 40W，灯泡的瓦数大于小电珠，但灯泡的

额定电流为 0.182A，而小电珠的额定电流为 0.3A，所以不能说瓦数大的灯泡的额定电流一定大。

1-13　今将内阻为 0.5Ω，量程为 1A 的电流表误接到电源上，若电源电压为 10V，试问电流表将通过多大的电流？将发生什么后果？

答：电流表是串接在被测电路中，内阻为 0.5Ω 量程为 1A 的电流表表示，当流过 0.5Ω 电阻中的电流不同，电流表的偏转也不同，但当电流达到 1A 时，电流表的指针偏到最大值，若电流再增大就会造成指针偏转过大将指针打歪，甚至造成电流表的烧坏。若将电流表误接到 10V 电源就等效如图所示情况，可知流过电流表的电流为 10/0.5=20A，电流表必烧坏无疑。

1-14　试求题图 1-4 中的等效电容、等效电感。



题图 1-4　习题 1-14 电路图

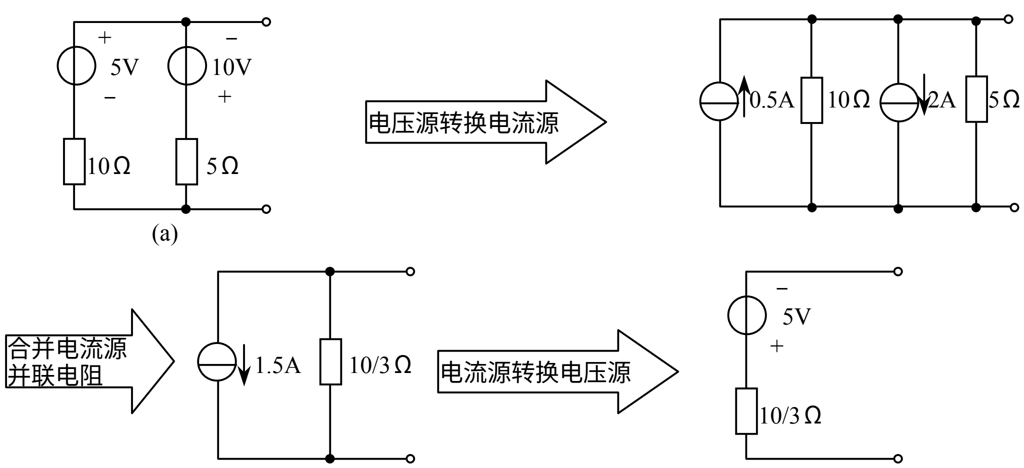
解：

图(*a*)的等效电容为： $C = 4 + \dfrac{1}{\dfrac{1}{3} + \dfrac{1}{2+1} + \dfrac{1}{3}} = 5\mu F$ #

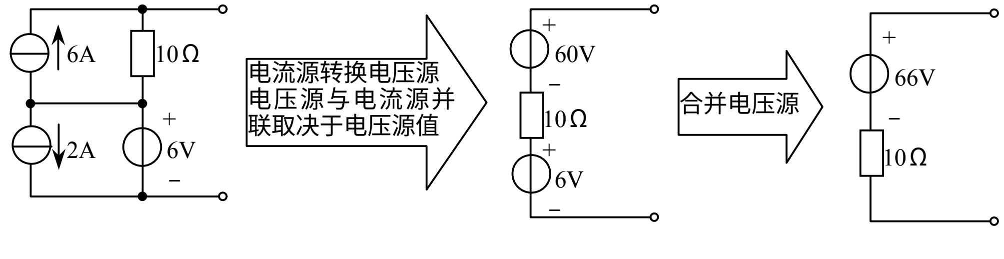
图(b)的等效电感为：$L = \dfrac{1}{\dfrac{1}{6} + \dfrac{1}{\dfrac{3\times 6}{3+6} + 4}} = 3H$ #

1-15　将题图 1-5 所示的各电路化为一个电压源与一个电阻串联的组合。

解：1-5(a)的解如下图所示：

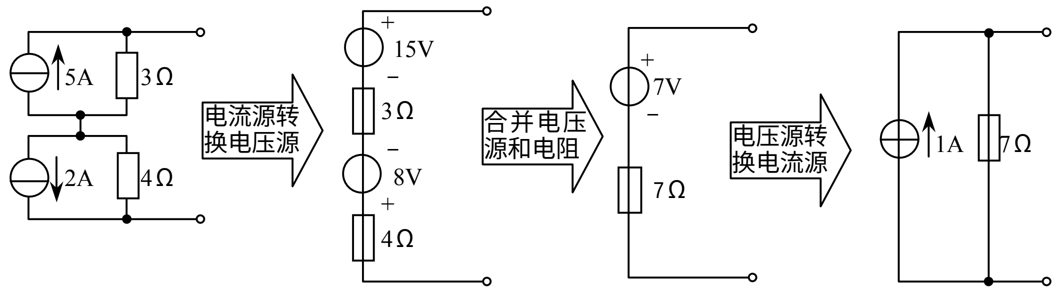


图(b)的解法如下图所示：

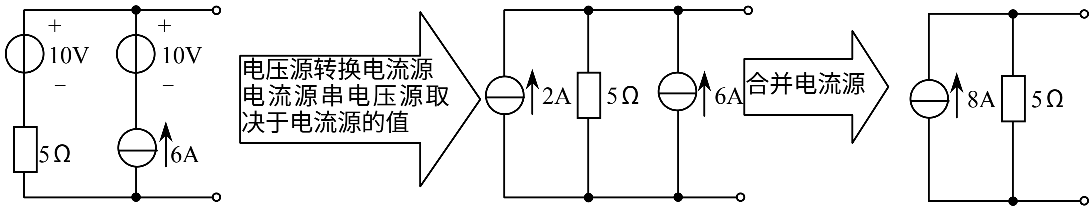


1-16　将题图 1-6 所示的各电路化为一个电流源与一个电阻并联的组合。

解：1-6(a)的解法如下图所示：



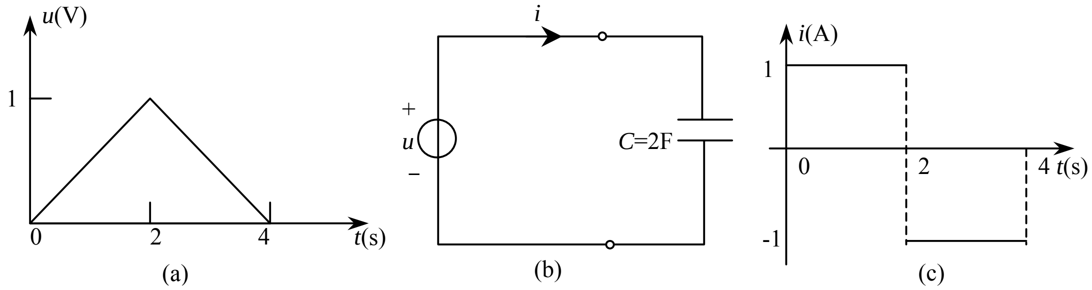
图(b)的解法如下图所示：



1-17　为什么电容器两极板得到的电量恰好相等？如果两极板大小不同，这个结论正确吗？

答：在给电容器充电或放电时，回路中形成电流，电流是电荷的定向流动，且回路中的电流是相等的。如充电时，流入极板一极的电荷多少，必然从另一极流出多少电荷，所以两极板的电荷量相等、极性相反。既是两极板大小不同，结论也是相同的。

1-18　电压如题图 1-7(a)所示，施加于电容 *C* 如题图 1-7(b)所示，试求 *i*(*t*)，并绘出波形图。



题图 1-7　习题 1-18 图

解：为求 *i*(t)，先由图(a)列出 *u*(t)的函数关系为：

$$\begin{cases} u(t) = 0.5t(\text{V}) & 0 \le t \le 2 \\ u(t) = -0.5t + 2(\text{V}) & 2 \le t \le 4 \end{cases}$$

根据 *i*(t)与 *u*(t)之间的微分关系，可以求得 *i*(t)为：

$$\begin{cases} i(t) = c\dfrac{du}{dt} = 2 \times \dfrac{d(0.5t)}{dt} = 1(\text{A}) & 0 \le t \le 2 \\ i(t) = c\dfrac{du}{dt} = 2 \times \dfrac{d(-0.5t+2)}{dt} = -1(\text{A}) & 2 \le t \le 4 \end{cases}$$

所求的电流波形如图(c)所示。

习题二

2-1　求题图 2-1(a)中得 U_{ab} 以及题图 2-1(b)中得 U_{ab} 及 U_{bc}。

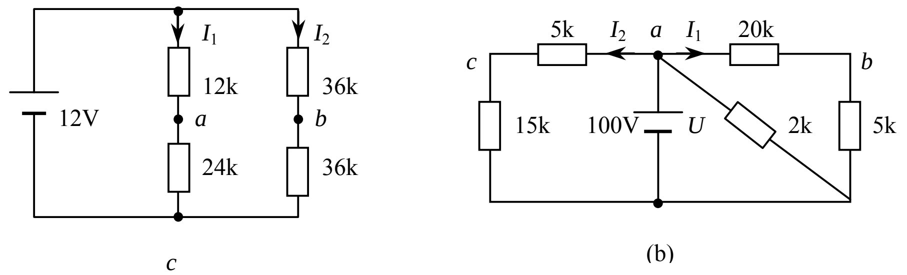
解：(1) 图 (a)：

$$I_1=\frac{U}{12K+24K}=\frac{12}{36K}=\frac{1}{3}(\text{mA})$$

$$I_2=\frac{U}{36K+36K}=\frac{12}{72K}=\frac{1}{6}(\text{mA})$$

∴

$$U_{ab}=U_{ac}+U_{cb}=I_1\times 24K-I_2\times 36K=\frac{1}{3}\times 10^{-3}\times 24\times 10^{3}-\frac{1}{6}\times 10^{-3}\times 36\times 10^{3}=2(\text{V})$$



题图 2-1　习题 2-1 电路图

(2)图(b)：

$$I_1=\frac{U}{R}=\frac{100}{20K+5K}=4(\text{mA})$$

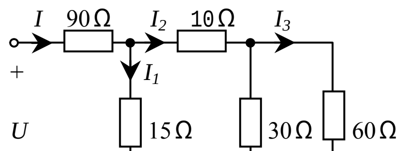
$$U_{ab}=I_1\times 20K=4\times 10^{-3}\times 20\times 10^{3}=80(\text{V})$$

$$I_2=\frac{U}{5K+15K}=\frac{100}{20K}=5(\text{mA})$$

$$U_{ac}=I_2\times 5K=5\times 10^{-3}\times 5\times 10^{3}=25(\text{V})$$

$$U_{bc}=U_{ba}+U_{ac}=-U_{ab}+U_{ac}=-80+25=-55(\text{V})$$

2-2　电路如题图 2-2 所示，已知 30Ω电阻中的电流 I_4=0.2A，试求此电路的总电压 U 及总电流 I。



题图 2-2　习题 2-2 电路图

解：已知 I_4，所以 30Ω上的电压为：

$U_4=I_4R=0.2\times 30=6$(V)

60Ω中的电流为：$I_3=\frac{6}{60}=0.1(\text{A})$

$I_2=I_3+I_4=0.1+0.2=0.3$(A)

10Ω上的电压降为：$I_2\times 10=0.3\times 10=3(\text{V})$

15Ω上的电压降为：$U_4+3=6+3=9$(V)

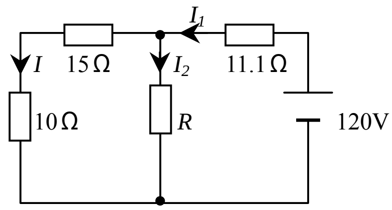
15Ω中流过的电流为：$I_1=\frac{9}{15}=0.6(\text{A})$

所以　$I=I_1+I_2=0.6+0.3=0.9$(A)

90Ω上的电压降为：0.9×90=81(V)

U=81+9=90(V)

2-3　电路如题图 2-3 所示，若 10Ω两端得电压为 24V，求 R=?



题图 2-3　习题 2-3 电路图

解：已知 10Ω两端的电压为 24V

∴　10Ω中的电流为

$$I=\frac{U}{10}=\frac{24}{10}=2.4(\mathrm{A})$$

15Ω上的电压为：2.4×15=36(V)

R 上的电压为：24+36=60(V)

11.1Ω上的电压为：120-60=60(V)

11.1Ω中流过的电流为：$I_1=\dfrac{60}{11.1}=5.4(\mathrm{A})$

流过 R 中的电流为：$I_2=I_1-I=5.4-2.4=3(\mathrm{A})$

故电阻为：$R=\dfrac{60}{3}=20\Omega$

2-4　电路如题图 2-4 所示，已知灯泡额定电压及电流分别是 12V 及 0.3A，问电源电压应多大，才能使灯泡工作在额定值。

解：灯泡的额定电压=12V

∴　20Ω上的电压=12V

20Ω中流过的电流：$I_1=\dfrac{12}{20}=0.6(\mathrm{A})$

灯泡的额定电流=0.3A

∴　10Ω中的电流：$I_2=I_1+0.3=0.6+0.3=0.9(\mathrm{A})$

10Ω上的电压为：$I_2\times10=0.9\times10=9(\mathrm{V})$

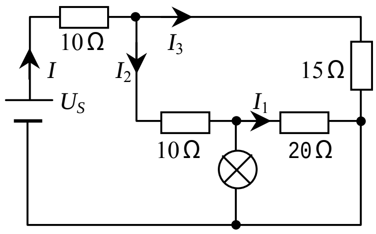
∴　$U_{ab}=9+12=21(\mathrm{V})$

15Ω中流过的电流：$I_3=\dfrac{U_{ab}}{15}=\dfrac{21}{15}=1.4(\mathrm{A})$

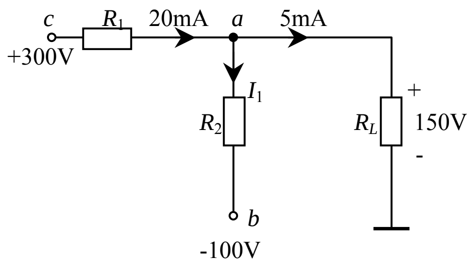
$I=I_2+I_3=0.9+1.4=2.3(\mathrm{A})$

10Ω上的电压为：$I\times10=2.3\times10=23(\mathrm{V})$

∴　$U_s=23+U_{ab}=23+21=44(\mathrm{V})$



题图 2-4　习题 2-4 电路图



题图 2-5　习题 2-5 电路图

2-5　电路如题图 2-5 所示，求 R_1、R_2。

解：a 节点：$-20+5+I_1=0$

∴　I_1=15mA

a 点电位：$U_a=150(\mathrm{V})$

$U_{ab}=U_a-U_b=150-(-100)=250(\mathrm{V})$

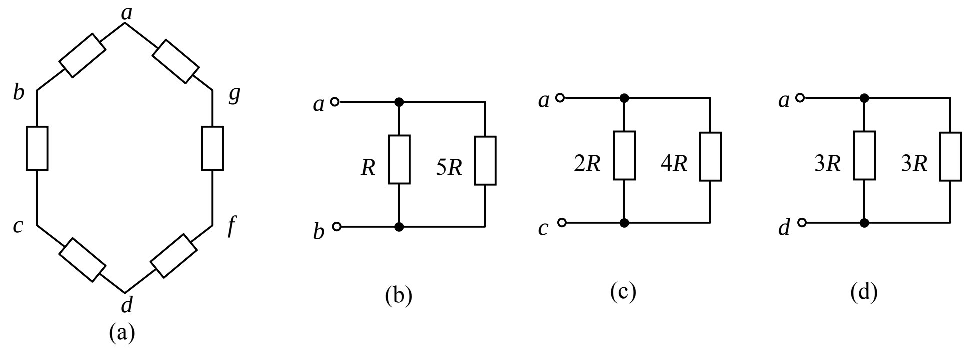
$$\therefore\quad R_2=\frac{U_{ab}}{I_1}=\frac{250}{15\times10^{-3}}=16.7(\mathrm{K}\Omega)$$

$U_{ca}=U_c-U_a=300-150=150(\mathrm{V})$

$$R_1=\frac{U_{ca}}{20mA}=\frac{150}{20\times10^{-3}}=7.5(\mathrm{K\Omega})$$

2-6 六个相等电阻 R，各等于 20Ω，构成一个闭合回路（题图 2-6 所示）。若将一外电源依次作用 a 和 b，a 和 c，a 和 d 之间，求在各种情况下的等效电阻。

解：(1) 求 ab 之间的等效电阻。电路可画成图(b)，ab 之间的等效电阻为：



题图 2-6 习题 2-7 电路图

$$R_{ab}=R\,//\,5R=\frac{R\times5R}{R+5R}=\frac{5}{6}R=\frac{5}{6}\times20=16.7(\Omega)$$

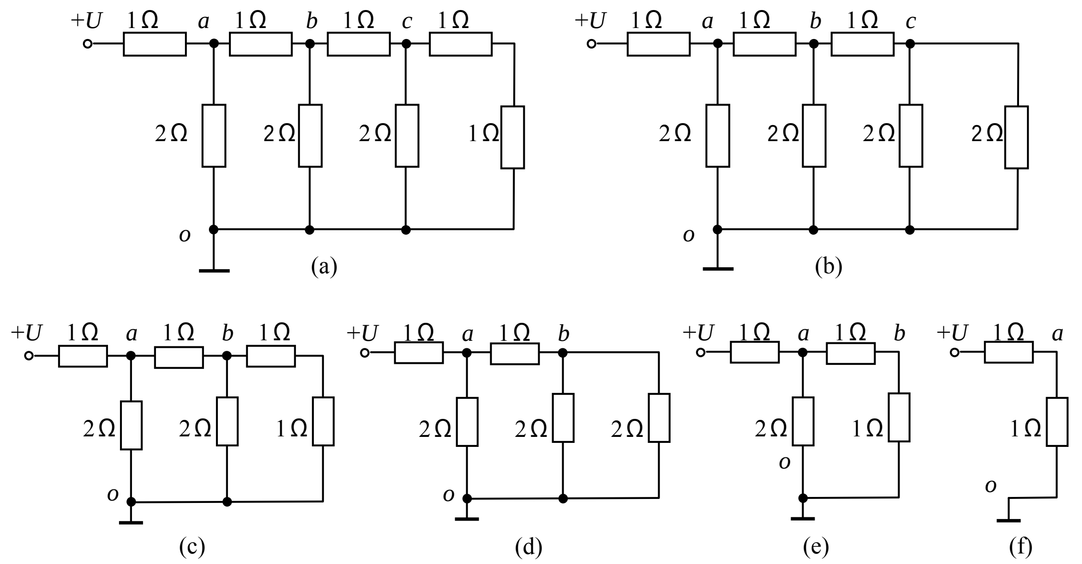
(2) 求 ac 之间的等效电阻。电路可改画成图(c)，ac 之间的等效电阻为：

$$R_{ac}=2R\,//\,4R=\frac{2R\times4R}{2R+4R}=\frac{8}{6}R=\frac{8}{6}\times20=26.7(\Omega)$$

(3)求 ad 之间的等效电阻。电路可改画成图(d)

$$R_{ad}=3R\,//\,3R=\frac{3R\times3R}{3R+3R}=\frac{3}{2}R=\frac{3}{2}\times20=30(\Omega)$$

2-7 如题图 2-7 所示梯形网络，若输入电压为 U，求 U_a、U_b、U_c 和 U_d。



解：运用等效电阻的概念，电路逐步化简为图(f)单一回路：

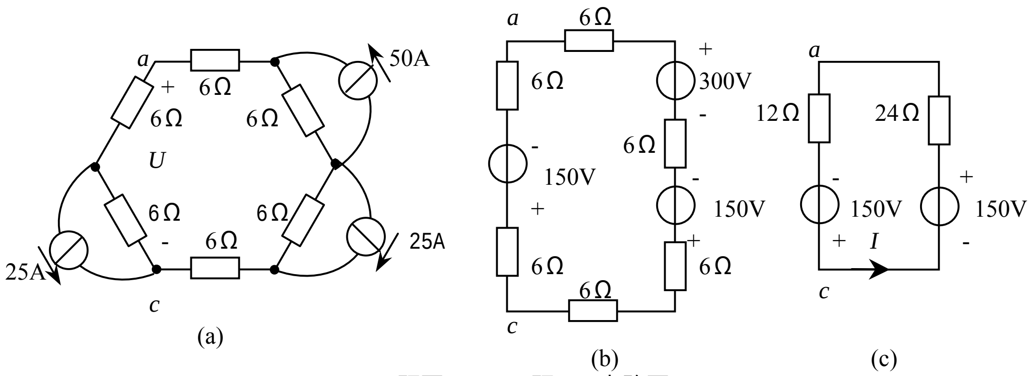
图（f）中： $U_a=\dfrac{1}{2}U$

图（e）中： $U_b=\dfrac{1}{2}U_a=\dfrac{1}{4}U$

图（c）中： $U_c=\frac{1}{2}U_b=\frac{1}{8}U$

图（a）中： $U_d=\frac{1}{2}U_c=\frac{1}{16}U$

2-8 求题图 2-8 电路中的 U。



题图 2-8 习题 2-8 电路图

解：化三个电流源为电压源，得图(b)，再合并电压源如图(c)，其中：

$U_{s1}=50\times6=300(V)$ $R_{s1}=6(\Omega)$

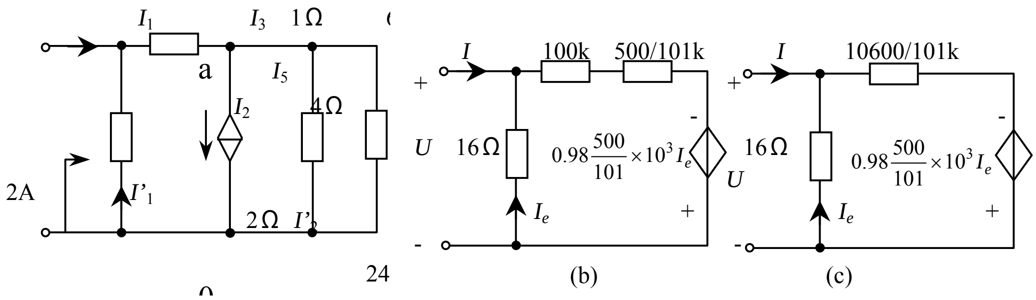
$U_{s2}=25\times6=150(V)$ $R_{s1}=6(\Omega)$

$U_{s2}=25\times6=150(V)$ $R_{s2}=6(\Omega)$

电路的总电流 $I=\frac{150+150}{12+24}=\frac{75}{9}(\mathrm{A})$

$\therefore\quad U=U_{ac}=I\times12-150=\frac{75}{9}\times12-150=-50(\mathrm{V})$

2-9 求题图 2-9 电路的输入电阻 R_i。为什么 R_i 比 16Ω 还大？



题图 2-9 习题 2-9 电路图

（1）求 R_i，即求 U 和 I 的关系，运用电源等效互换逐步化简(a)：

500k 电阻与 5k 电阻并联：$500//5=\frac{500\times5}{500+5}=\frac{500}{101}\mathrm{k}$

把 $0.98I_e$ 受控电流源化为受控电压源：

$U_s=0.98I_e\times\frac{500}{101}\times10^3$ $R_s=\frac{500}{101}\times10^3\Omega$ 得图(b)

合并 100k 与 $\frac{500}{101}$k 串联电阻得：$100+\frac{500}{101}=\frac{10600}{101}\times10^3$ 得图(c)

16Ω 上的压降为：$U=-I_e\times16$ $I_e=-\frac{U}{16}$

两支路并联，另一支路上的压降为：

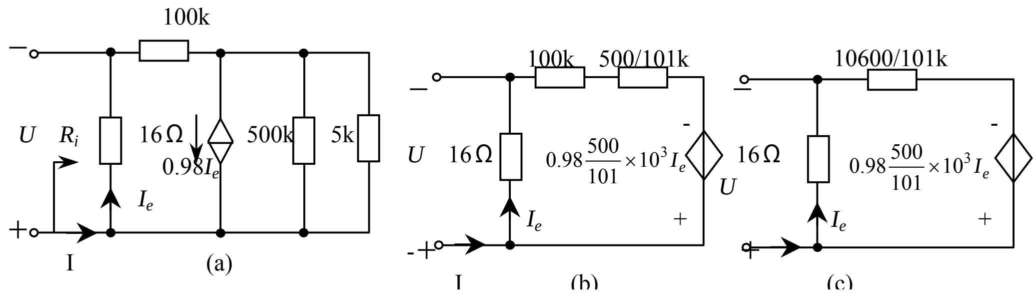
$$U=\frac{10600}{101}\times10^{3}(I+I_e)-0.98\times\frac{500}{101}\times10^{3}I_e=\frac{10600}{101}\times10^{3}(I-\frac{U}{16})-0.98\times\frac{500}{101}\times10^{3}\left(-\frac{U}{16}\right)$$

$$=\frac{10600\times10^{3}}{101}I-\frac{10110\times10^{3}}{101\times16}U\approx\frac{10600\times10^{3}}{101}I-\frac{10^{5}}{16}U$$

合并方程两边的 U，则得：

$$R_i=\frac{U}{I}=\frac{106}{101}\times16=16.79(\Omega)$$

＃另一种解法：



题图 2-9 习题 2-9 电路图

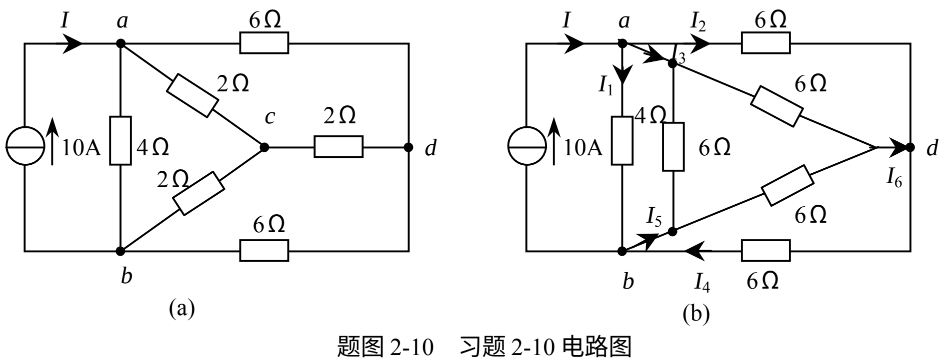
$$I=I_e+\frac{U-4851I_e}{104950}$$

$$I_e=\frac{U}{16}$$

$$I=\frac{6257U}{104950}$$

$$R_i=\frac{U}{I}=16.77\Omega$$

2-10 电路如图 2-10 所示，（1）求电阻 R_{ab}；（2）求各支路电流以及 U_{ab}、U_{ad}和 U_{ac}。



题图 2-10 习题 2-10 电路图

解：将 a—d—bY 形网络变换为△网络

$$R_{12}=R_{23}=R_{31}=\frac{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}{R_1}=\frac{2\times2+2\times2+2\times2}{2}=6(\Omega)$$

电路变成图(b)

（1） $R_{ab}=4//6//[(6//6)+(6//6)]=4//6//6=4//3=\frac{4\times3}{4+3}=\frac{12}{7}(\Omega)$

（2） 各支路的电流及 U_{ab}、U_{ad} 和 U_{ac}

$U_{ab}=I\times R_{ab}=10\times\frac{12}{7}=\frac{120}{7}(\mathrm{V})$

$U_{ad}=\frac{1}{2}U_{ab}=\frac{60}{7}(\mathrm{V})$ （电路的对称性）

ab 支路中电流：$I_1=\frac{U_{ab}}{4}=\frac{120/7}{4}=\frac{30}{7}(\mathrm{A})$

ad 支路中电流：$I_2=\frac{U_{ad}}{6}=\frac{60/7}{6}=\frac{10}{7}(\mathrm{A})$

$I_4=I_2=\frac{10}{7}(\mathrm{A})$

ac 支路中电流：$I_3=I-I_1-I_2=10-\frac{30}{7}-\frac{10}{7}=\frac{30}{7}(\mathrm{A})$

bc 支路中电流： $I_5=I_4+I_1-I=\frac{10}{7}+\frac{30}{7}-\frac{70}{7}=-\frac{30}{7}(\mathrm{A})$

cd 支路中电流： $I_6=0$

$U_{ac}=I_3\times2=\frac{30}{7}\times2=\frac{60}{7}(\mathrm{V})$

或者 $U_{ac}=\frac{1}{2}U_{ab}=\frac{60}{7}(\mathrm{V})$

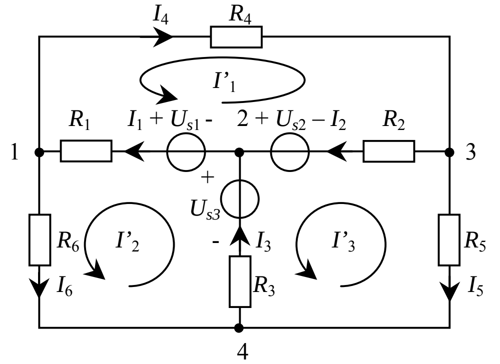
2-11 试为题图 2-11 所示的电路，写出

（1） 电流定律独立方程（支路电流为未知量）；

（2） 电压定律独立方程（支路电流为未知量）；

（3） 网孔方程；

（4） 节点方程（参考节点任选）。



题图 2-11 习题 2-11 电路图

解：（1）电流定律独立方程为

节点 1：$-I_1+I_4+I_6=0$

节点 2：$I_1-I_2-I_3=0$

节点 3：$I_2-I_4+I_5=0$

（2）电压定律独立方程为

回路 1321：$I_4R_4+I_2R_2+I_1R_1-U_{s1}-U_{s2}=0$

回路 1421：$I_6R_6+I_3R_3+I_1R_1-U_{s1}-U_{s3}=0$

回路 3423：$I_5R_5+I_3R_3-I_2R_2+U_{s2}-U_{s3}=0$

（3）设网孔电流为 I'_1、I'_2、I'_3 如图所示，则网孔方程为：

$(R_1+R_2+R_3)I'_1-R_1I'_2-R_2I'_3=-U_{s1}-U_{s2}$

$-R_1I'_2+(R_1+R_3+R_6)I'_1-R_3I'_3=U_{s1}+U_{s3}$

$-R_2I'_1-R_3I'_2+(R_2+R_3+R_5)I'_3=U_{s2}-U_{s3}$

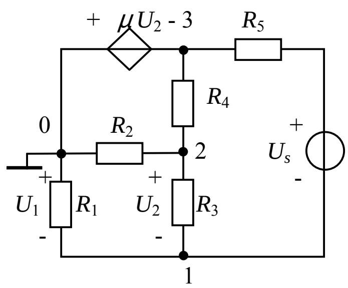
(4)选节点 2 为参考节点，则节点方程为：

节点 1：$\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_4}+\frac{1}{R_6}\right)U_1-\frac{1}{R_4}U_3-\frac{1}{R_6}U_4=\frac{U_{s1}}{R_1}$

节点 3：$-\frac{1}{R_4}U_1+\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_4}+\frac{1}{R_6}\right)U_3-\frac{1}{R_5}U_4=-\frac{U_{s2}}{R_2}$

节点 4：$-\frac{1}{R_6}U_1-\frac{1}{R_5}U_3+\left(\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_5}+\frac{1}{R_6}\right)U_4=-\frac{U_{s3}}{R_3}$

2-12　题图 2-12 所示电路中，U_s=5V、R_1=R_2=R_4=R_5=1Ω、R_3=2Ω、μ=2，试求电压 U_1。



题图 2-12　习题 2-12 电路图

解：此电路共有 4 个节点，选 0 为参考节点，设节点 1、2、3 的电位分别为：U_{10}、U_{20}、U_{30}，由图可见

$U_{30}=-\mu U_2$

而　　$U_2=U_{20}-U_{10}$

所以对于节点 3 可得方程：$U_{30}=-\mu(U_{20}-U_{10})$

节点 1、2 的方程为：

节点 1：$\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_5}\right)U_{10}-\frac{1}{R_3}U_{20}-\frac{1}{R_5}U_{30}=-\frac{U_s}{R_5}$

节点 2：$-\frac{1}{R_3}U_{10}+\left(\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}\right)U_{20}-\frac{1}{R_4}U_{30}=0$

将已知数据代入上面几式，并整理得：

$$\begin{cases}2U_{10}-2U_{20}-U_{30}=0\\ \frac{5}{2}U_{10}-\frac{1}{2}U_{20}-U_{30}=-5\\ -\frac{1}{2}U_{10}+\frac{5}{2}U_{20}-U_{30}=0\end{cases}$$

因为 U_1=-U_{10}，因此仅解此方程组中的 U_{10} 即可

$$U_{10}=\frac{\begin{vmatrix}0 & -2 & -1\\ -5 & -\frac{1}{2} & -1\\ 0 & \frac{5}{2} & -1\end{vmatrix}}{\begin{vmatrix}2 & -2 & -1\\ \frac{5}{2} & -\frac{1}{2} & -1\\ -\frac{1}{2} & \frac{5}{2} & -1\end{vmatrix}}=\frac{22.5}{-6}=-3.75(\mathrm{V})$$

故　U_1=-U_{10}=3.75(V)

解法二：采用网孔法

$$\begin{cases}(R_2+R_4)I_1-R_2I_2-R_4I_3=\mu(I_3-I_2)R_3\\ -R_2I_1+(R_1+R_2+R_3)I_2-R_3I_3=0\\ -R_4I_1-R_3I_2+(R_3+R_4+R_5)I_3=5\end{cases}$$

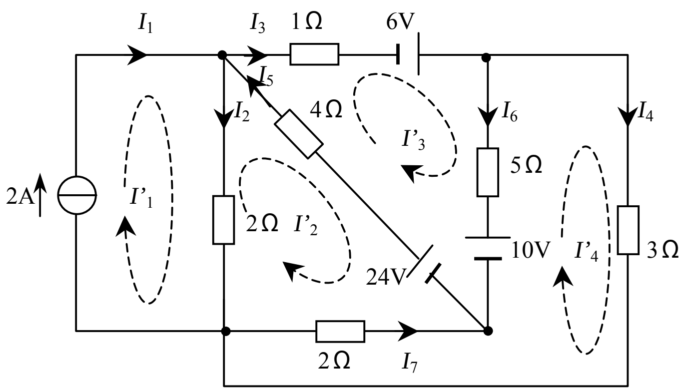
$$\begin{cases}2I_1+3I_2-5I_3=0\\ -I_1+4I_2-2I_3=0\\ -I_1-2I_2+4I_3=5\end{cases}$$

$$I_2=\frac{\begin{vmatrix}2&0&-5\\-1&0&-2\\-1&5&4\end{vmatrix}}{\begin{vmatrix}2&3&-5\\-1&4&-2\\-1&-2&4\end{vmatrix}}=\frac{25+20}{32-10+6-(8-12+20)}=\frac{45}{12}=3.75(A)$$

$$U_1=3.75V$$

2-13　题图 2-13 所示电路，求各支路电流。

解：由于本题仍为平面电路，所以可用网孔电流法求解，将原电路改画为如图所示。设网孔电流 I'_1、I'_2、I'_3、I'_4 如图所示，（注意，也可以将 2A 的电流源与 2Ω 电阻的并联，先进行电源转换，这样可以减少一个求解变量，即只有 3 个网孔，通过解 3 个网孔方程即可）显然有：



题图 2-13　习题 2-13 电路图

I'_1=2A

其余的网孔电流方程为：

$-2I'_1+(2+4+2)I'_2-4I'_3-2I'_4=-24$

$-4I'_2+(1+5+4)I'_3-5I'_4=24+6-10$

$-2I'_2-5I'_3+(2+5+3)I'_4=10$

整理得：

$$\begin{cases}4I'_2-2I'_3-I'_4=-10\\ -4I'_2+10I'_3-5I'_4=20\\ -2I'_2-5I'_3+10I'_4=10\end{cases}$$

解此方程组得（可用行列式，也可用消元法）：

$$I'_2=-\frac{5}{16}(A)\qquad I'_3=\frac{25}{8}(A)\qquad I'_4=\frac{5}{2}(A)$$

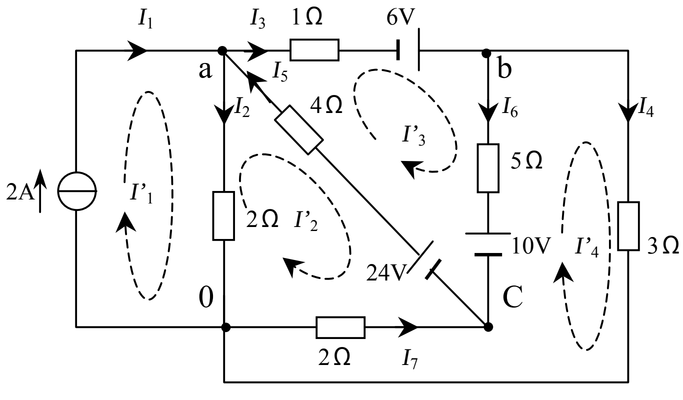
设各支路电流及方向如图所示，则：

$I_1 = I_1^{'} = 2(A)$ $\quad I_2 = I_1^{'} - I_2^{'} \approx 2.31(A)$ $\quad I_3 = I_3^{'} = 3.125(A)$

$I_4 = I_4^{'} = 2.5(A)$ $\quad I_5 = I_3^{'} - I_2^{'} \approx 3.44(A)$ $\quad I_6 = I_3^{'} - I_4^{'} = 0.625(A)$

$I_7 = I_4^{'} - I_2^{'} \approx 2.81(A)$

解法二：采用节点法



题图 2-13 习题 2-13 电路图

$$\begin{cases} (\frac{1}{2}+\frac{1}{4}+1)U_a - U_b - \frac{1}{4}U_c = 2+\frac{24}{4}-6 \\ -U_a + (1+\frac{1}{3}+\frac{1}{5})U_b - \frac{1}{5}U_c = 6+2 \\ -\frac{1}{4}U_a - \frac{1}{5}U_b - (\frac{1}{5}+\frac{1}{4}+\frac{1}{2})U_c = -6-2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 7U_a - 4U_b - U_c = 8 \\ -15U_a + 23U_b - 3U_c = 120 \\ -5U_a - 4U_b + 19U_c = -160 \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_a = \frac{7400}{1600} = 4.625 \\ U_b = 7.5 \\ U_c = -5.625 \end{cases}$$

$$I_1 = 2.313(A)$$

$$I_2 = \frac{4.625-(24-5.625)}{4} = -3.44(A)$$

$$I_3 = \frac{4.625-(-6+7.5)}{1} = -3.125(A)$$

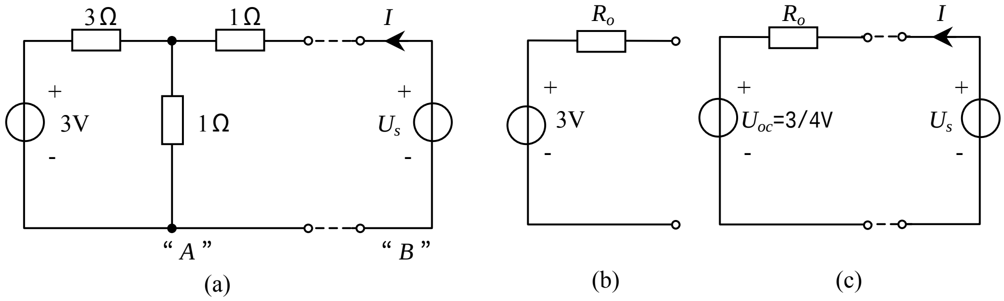
$$I_4 = \frac{75}{3} = 2.5(A)$$

$$I_5 = \frac{-5.625+10-7.5}{5} = -0.625(A)$$

$$I_6 = \frac{-5.625}{2} = -2.813(A)$$

习题三

3-1 网络“A”与“B”联接如题图 3-1 所示，求使 I 为零得 U_s 值。

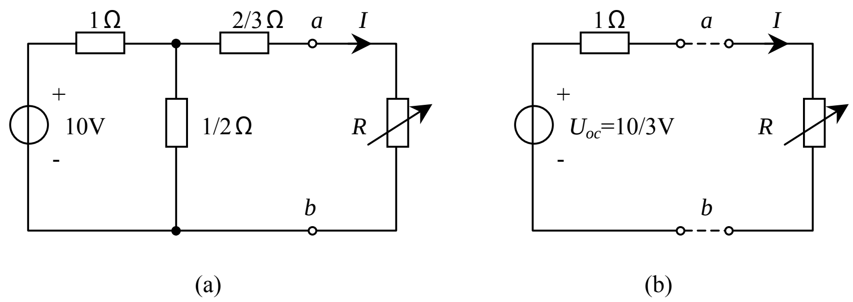


题图 3-1 习题 3-1 电路图

解：根据戴维南定理可知，图(a)中的网络“A”可以等效为图(b)电路，其中等效电源为：$U_{oc}=\dfrac{3}{3+1}\times 1=\dfrac{3}{4}(\mathrm{V})$，当该等效电路与“$B$”网络联接时，（如图(c)所示），只要 $U_s=U_{oc}=\dfrac{3}{4}(\mathrm{V})$，电流 I 恒等于零。（注意根据此题意，无需求出 R_o）

3-2 （1）题图 3-2(a)电路中 R 是可变的，问电流 I 的可能最大值及最小值各为多少？

（2）问 R 为何值时，R 的功率为最大？



题图 3-2 习题 3-2 电路图

解：（1）由图(a)可知：当 $R=\infty$时，$I=0$，为最小

当 $R=0$ 时，I 为最大，其值为：

$$I=\frac{10}{1+\frac{1}{2}//\frac{2}{3}}\times\frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{2}+\frac{2}{3}}=\frac{10}{3}(\mathrm{A})$$

（2）由图(a)可算得 a、b 端左边部分的开路电压为：

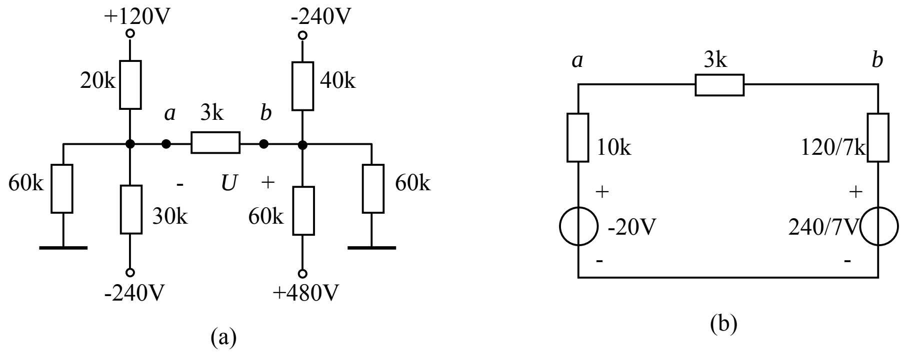
$$U_{oc}=\frac{10}{1+\frac{1}{2}}\times\frac{1}{2}=\frac{10}{3}(\mathrm{V})$$

其等效电阻为：$R_o=\dfrac{2}{3}+\dfrac{1\times\frac{1}{2}}{1+\frac{1}{2}}=1(\Omega)$

根据戴维南定理图(a)可以简化为图(b)电路，由图(b)电路可知，当 $R=R_o=1\,\Omega$时，可获得最大功率。

3-3 求题图 3-3 电路中 3k 电阻上的电压（提示：3k 两边分别化为戴维南等效电路）。

解：为求 3k 电阻上电压 U，先将图(a)中 3k 电阻两边电路均用戴维南等效电路代替。



题图 3-3 习题 3-3 电路图

对于左边电路由弥尔曼定理有：

$$U_{oc1}=\frac{\frac{120}{20}-\frac{240}{30}}{\frac{1}{20}+\frac{1}{60}+\frac{1}{30}}=-20(\text{V}) \qquad R_{o1}=20/\!/30/\!/60=10(\text{k}\Omega)$$

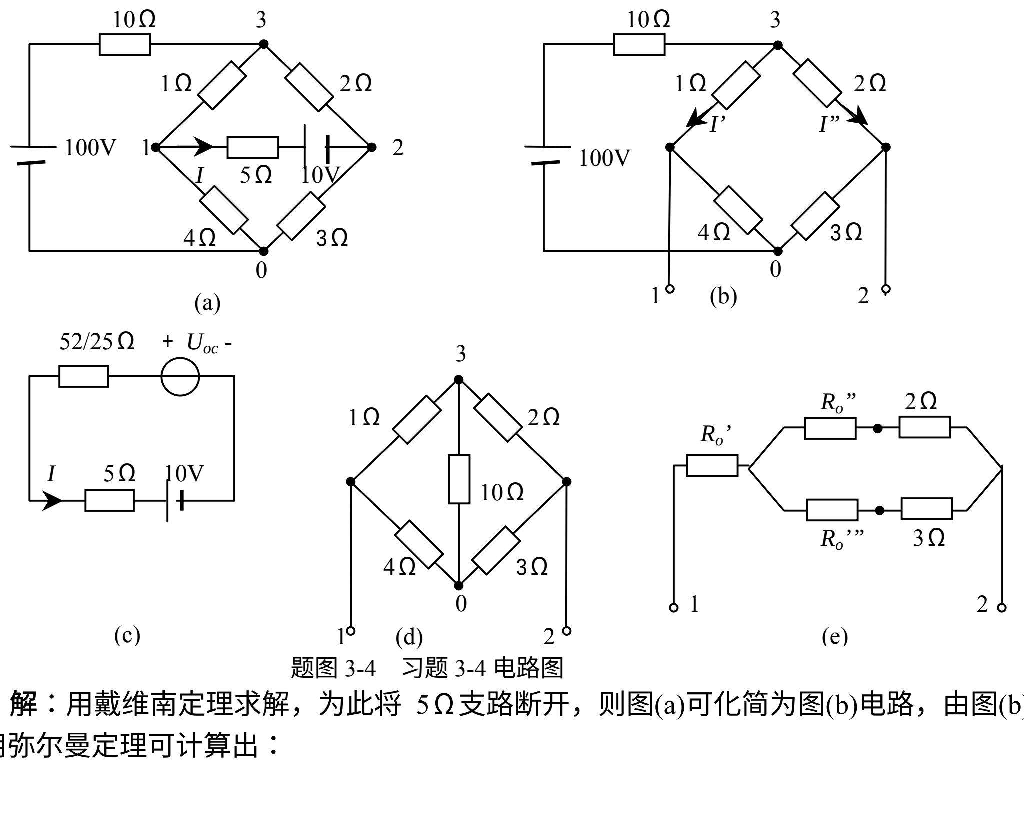
对于右边电路由弥尔曼定理有：

$$U_{oc2}=\frac{\frac{480}{60}-\frac{240}{40}}{\frac{1}{60}+\frac{1}{60}+\frac{1}{40}}=\frac{240}{7}(\text{V}) \qquad R_{o2}=60/\!/60/\!/40=\frac{120}{7}(\text{k}\Omega)$$

所以图(a)可以简化为图(b)电路，由图(b)很容易求得：

$$U=\frac{\frac{240}{7}+20}{3+10+\frac{120}{7}}\times 3=\frac{380\times 3}{211}\approx 5.4(\text{V})$$

3-4 试求题图 3-4 所示的桥式电路中，流过 5Ω 电阻的电流。



题图 3-4 习题 3-4 电路图

解：用戴维南定理求解，为此将 5Ω 支路断开，则图(a)可化简为图(b)电路，由图(b)，利用弥尔曼定理可计算出：

$$U_{30}=\frac{\frac{100}{10}}{\frac{1}{10}+\frac{1}{1+4}+\frac{1}{2+3}}=20(\mathrm{V})$$

$$I^{'}=I^{''}=\frac{U_{30}}{1+4}=\frac{U_{30}}{2+3}=\frac{20}{5}=4(\mathrm{A})$$

所以图(a)中 5Ω支路断开后 1、2 端的开路电压为：

$$U_{oc}=U_{12}=-I^{'}\times 1+2\times I^{''}=-4+8=4\mathrm{V}$$

再求由 1、2 端看进的等效电阻 R_o，为此将图(b)按要求化简为图(d)电路，并进一步利用 Y—△变换把图(d)化简为图(e)电路，其中：

$$R_o^{'}=\frac{1\times 4}{1+4+10}=\frac{4}{15}(\Omega)\qquad R_o^{''}=\frac{1\times 10}{1+4+10}=\frac{2}{3}(\Omega)\qquad R_o^{'''}=\frac{4\times 10}{1+4+10}=\frac{8}{3}(\Omega)$$

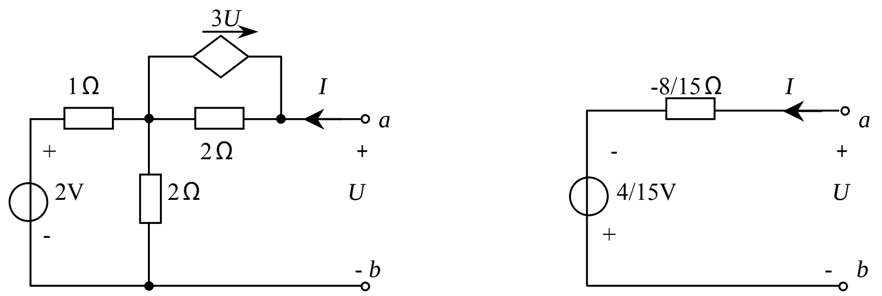
由图(e)的电路可求得：

$$R_o=R_o^{'}+(R_o^{''}+2)//(R_o^{'''}+3)=\frac{4}{15}+\frac{(\frac{2}{3}+2)(\frac{8}{3}+3)}{(\frac{2}{3}+2)+(\frac{8}{3}+3)}=\frac{52}{25}(\Omega)$$

所以图(a)可以化简为图(c)所示的戴维南等效电路，由图(c)可求得：

$$I=\frac{-(10-4)}{\frac{52}{25}+5}=-0.85(\mathrm{A})$$

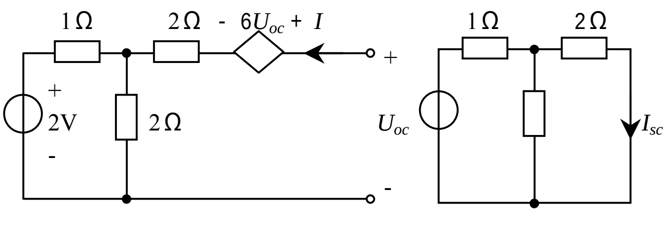
3-5 试推导出题图 3-5(a)所示电路的戴维南等效电路如图 3-5(b)所示。写出推导过程。



(a) (b)

题图 3-5 习题 3-5 电路图

解：首先求图(a)中 a、b 端的开路电压 U_{oc}，为此可将图(a)化简为下图(c)电路，并注意到 $3U$ 是一受控源，它是受 U_{ab} 的控制，即待求的开路电压 U_{oc}，由图(c)可得



(c) (d)

$$U_{oc}=6U_{oc}+\frac{2}{1+2}\times 2=6U_{oc}+\frac{4}{3}$$

解出：$U_{oc}=-\frac{4}{15}(\mathrm{V})$

再求 R_o。为此将图(a)化简为图(d)电路，其中受控源 $3U$ 的处理是：由于将 a、b 短路，因此，此时的 U=0，故 $3U$ 为零，即受控电流源的电流为零。由图(d)可得 a、b 端短路电流

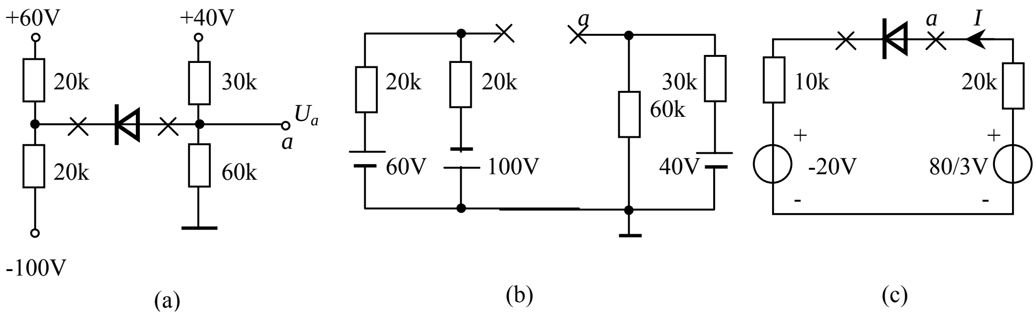
为：(对于含受控源的电路分析时，若要求解戴维南等效电路的等效电阻要特别注意，不能将所有电源置零求其等效电阻，只能是：(一) 将原电路中的所有电源置零，然后外接电源 U，然后求出流入网络电流 I，则等效电阻为 $R_o=\dfrac{U}{I}$。(二) 求出短路电流 I_{sc}，其等效电阻为 $R_o=\dfrac{U_{oc}}{I_{sc}}$。在具体求解过程中要视具体情况来决定采用哪种方法更简便，本题中由于控制量正好是开路电压，因此短路以后就受控源为零，因此此方法略简。一般情况下，由于网络中有多个电源，所以采用方法（一）会简单点。)

$$I_{sc}=\frac{2}{1+2/\!/2}\times\frac{1}{2}=\frac{1}{2}(\mathrm{A})$$

所以： $$R_o=\frac{U_{oc}}{I_{sc}}=\frac{-\frac{4}{15}}{\frac{1}{2}}=-\frac{8}{15}(\Omega)$$

根据以上计算可以将图(a)的电路化简为图(b)的戴维南等效电路。

3-6 求题图 3-6 所示电路的 U_a。



题图 3-6 习题 3-6 电路图

解：将二极管支路从“ × ”处断开，求二极管两边电路的戴维南等效电路。(目的是确定二极管是否导通，若二极管处于导通状态，可直接将电路连通，视二极管不存在，若二极管截止，则左半部分电路对 U_a 没有影响)

由图(b)可以求得左、右网络的：

$$U_{oc1}=\frac{60+100}{20+20}\times 20-100=-20(\mathrm{V})$$
$$R_{o1}=20/\!/20=10(k\Omega)$$

$$U_{oc2}=\frac{40}{60+30}\times 60=\frac{80}{3}(\mathrm{V})$$
$$R_{o2}=60/\!/30=20(\mathrm{k}\Omega)$$

所以图(a)可以简化为图(c)电路，由图(c)电路很容易断定二极管是处在导通状态，故：

$$U_a=\frac{\frac{80}{3}+20}{10+20}\times 20+\frac{80}{3}\approx -4.4(\mathrm{V})$$

3-7 求题图 3-7 所示电路的电压 U_{ab}。

解：应用叠加定理，电压源单独作用，电流源开路时，对节点 1 应用弥尔曼定理，得：

$$(1+\frac{1}{3}+\frac{1}{2+1})U_1'=\frac{5\sin t}{1}$$

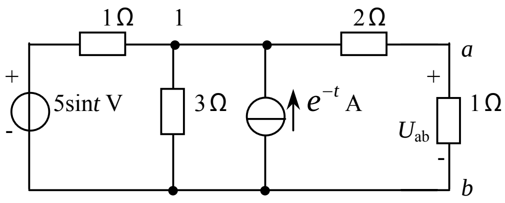
解得：

U_1'=3sin$t$ V

所以有：

$$U'_{ab}=\frac{U'_1}{2+1}\times 1=\sin t\ \text{V}$$

电压源短路，电流源单独作用时，对节点1应用弥尔曼定理，得：



题图 3-7　习题 3-7 电路图

$$(1+\frac{1}{3}+\frac{1}{2+1})U''_1=e^{-t}$$

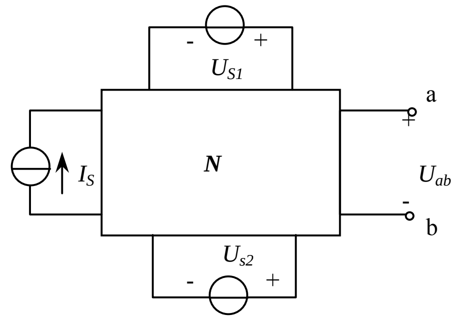
解得：

$$U''_1=\frac{3}{5}e^{-t}\ \text{V}，所以，U''_{ab}=\frac{U''_1}{2+1}\times 1=0.2e^{-t}\ \text{V}$$

由叠加定理得：

$$U_{ab}=U'_{ab}+U''_{ab}=\sin t+0.2e^{-t}\ \text{V}$$

3-8　如题图 3-8 所示电路图，当电压源 U_{S2} 不变，电流源 I_S 和电压源 U_{S1} 反向时，电压 U_{ab} 是原来的 0.5 倍；当电压源 U_{S1} 不变，电流源 I_S 和电压源 U_{S2} 反向时，电压 U_{ab} 是原来的 0.3 倍。问：当 U_{S1} 和 U_{S2} 均不变，仅 I_S 反向，电压 U_{ab} 为原来的几倍？



题图 3-8　习题 3-8 电路图

解：根据叠加定理，设：

$U_{ab}=K_1I_S+K_2U_{S1}+K_3U_{S2}$　　①

式中 K_1、K_2 和 K_3 为未知的比例常数，将已知条件代入上式，得：

$0.5U_{ab}=-K_1I_S-K_2U_{S1}+K_3U_{S2}$　　②

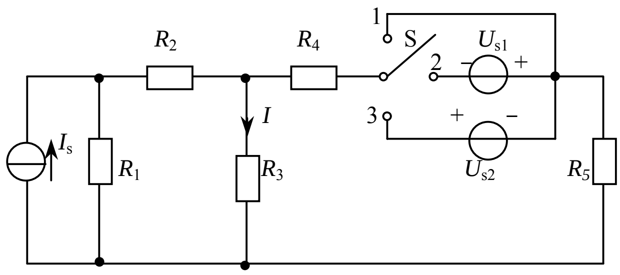
$0.3U_{ab}=-K_1I_S+K_2U_{S1}-K_3U_{S2}$　　③

将①、②和③式相加，得：

$1.8U_{ab}=-K_1I_S+K_2U_{S1}+K_3U_{S2}$

即当 U_{S1} 和 U_{S2} 均不变，仅 I_S 反向，电压 U_{ab} 为原来的 1.8 倍。

3-9　如题图 3-9 所示电路图，U_{S1}=10V，U_{S2}=15V，当开关 S 在位置 1 时，电流 I=40mA；当开关 S 合向位置 2 时，电流 I=-60mA，如果把开关 S 合向位置 3，电流 I 为多少？



题图 3-9　习题 3-9 电路图

解：根据叠加定理，设：

$$I=K_1I_S+K_2U_s$$

当开关 S 在位置 1 时，相当于 U_S=0，当开关 S 在位置 2 时，相当于 U_S=U_{S1}，当开关 S 在位置 3 时，相当于 U_S=-U_{S2}，把上述条件代入方程式中，得：

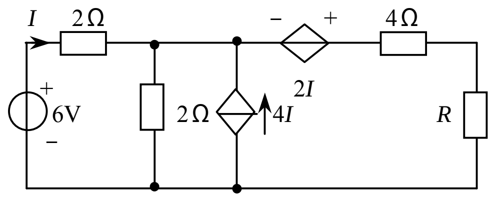
$$40=K_1I_S$$

$$-60=K_1I_S+K_2U_{S1}=40+K_2\times 10$$

解得：K_2=-10，所以当开关 S 在位置 3 时，有：

$$I=K_1I_S+K_2U_S=40+(-10)\times(-15)=190\ \text{mA}$$

3-10　题图 3-10 所示电路图中电阻 R 可变，试问 R 为何值时可吸收最大功率？求此功



题图 3-10　习题 3-10 电路图

率。

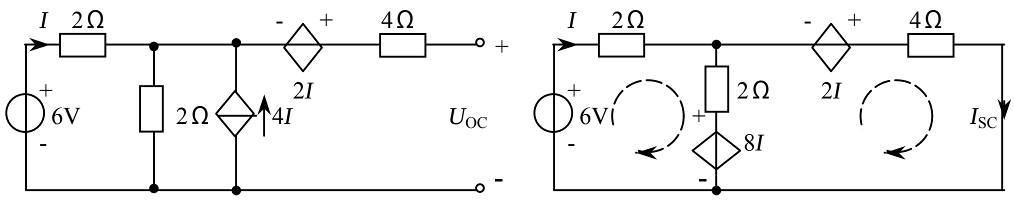
解：首先求 R 以左部分的戴维南等效电路。断开 R 求开路电压 U_{OC}，如图(a)所示，由 KVL 可得：

$$6 = 2\times I + 2\times(I+4I)$$

解得：

$$I\text{=0.5A}$$

所以，开路电压为：$U_{OC}=2(I+4I)+2I=6\text{V}$



(a) (b)

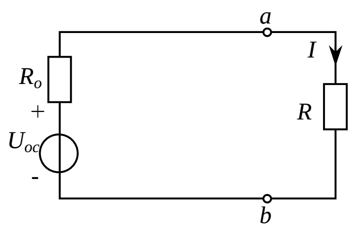
再求短路电流 I_{SC}，把受控电流源和电阻并联电路转化为受控电压源和电阻串联电路，如图(b)所示，用网孔法求解 I_{SC}，可设网孔电流分别为 I 和 I_{SC}，得：

$$(2+2)I-2I_{SC}=6-8I$$

$$-2I+(2+4)I_{SC}=2I+8I$$

解得：

$$I_{SC}\text{=1.5A}$$



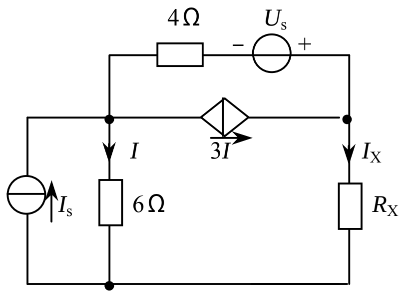
(c)

故戴维南等效电阻为：$R_0= U_{OC} / I_{SC} =4\Omega$，得到如图(c)所示的戴维南等效电路

根据负载最大功率条件，当 R=R_0 时可吸收最大功率，该功率为：

$$P=\frac{U_{OC}^2}{4R_0}=\frac{36}{16}=2.25\ \text{W}$$

3-11　如题图 3-11 所示电路，已知当 R_X=8Ω时，电流 I_X=1A。求当 R_X 为何值时，I_X=0.5A。



题图 3-11　习题 3-11 电路图

解：原电路的戴维南等效电路如图(a)所示。

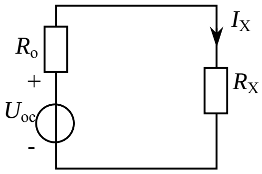
为了求解等效电阻 R_0，原电路独立电源置零，原电阻 R_X 换为电源 U_0，产生的电流为 I_0，如图(b)所示，由图可知 I_0=I。由 KVL，有：

$$4\times(3I+I)+6\times I=U_0$$

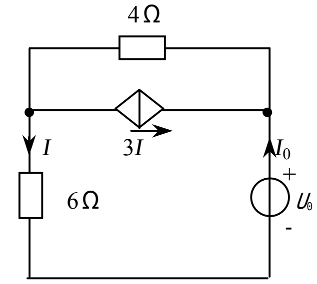
所以，$R_0=\dfrac{U_0}{I_0}=\dfrac{U_0}{I}=22\ \Omega$

再由已知条件，得到：

$$I_X=\frac{U_{OC}}{R_0+R_X}=\frac{U_{OC}}{22+8}=1$$



(a)



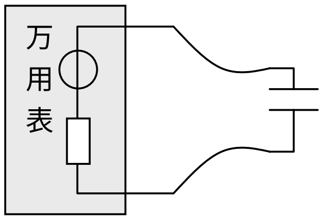
(b)

所以，$U_{OC}=30\text{ V}$。要使 I_X=0.5A，则：

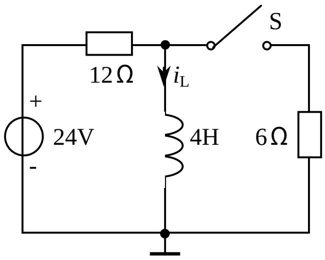
$$R_X=\frac{U_{OC}}{I_X}-R_0=38\ \Omega$$

习题四

4-1 （提示）万用表的电阻档相当于一个电压源串电阻形式，万用表指针的摆动幅度与其电流成正比，可根据一阶动态电路的分析理论来解释现象，并可确定电容的情况。参见图。



4-2 电路如题图 4-1 所示，电源电压为 24V，且电路原已达稳态，t=0 时合上开关 S，则电感电流 $i_L(t)$=_________A。



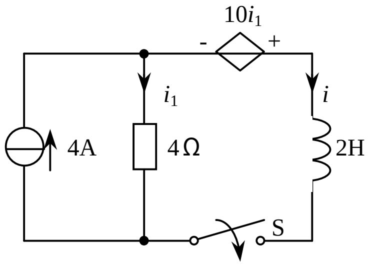
题图 4-1 习题 4-2 电路

解：由于电路原已达稳态，电感两端电压为 0，合上开关 S 后，加在 6Ω 电阻两端电压也为 0，该电阻中电流为 0，电路直接进入稳态，故电感电流为合上开关 S 前的稳态电流，即：$i_L(t)$=24V/12Ω=2A。

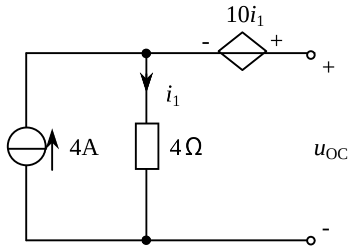
用三要素公式可以得到同样的结果，电感电流初始值 $i_L(0+)$=2A，稳态值 $i_L(\infty)$=2A，时间常数 τ =L/R=4/(12//6)=1s，所以：

$$i_L(t)=i_L(\infty)+[i_L(0+)-i_L(\infty)]\cdot e^{-\frac{t}{\tau}}=2\text{A}。$$

4-3 电路如题图 4-2 所示，在 t=0 时开关闭合，闭合前电路已达稳态，求 $t\geq 0$ 时的电流 $i(t)$。



题图 4-2 习题 4-3 电路



断开电感电路图

解：由题意可知：$i(0_+)=i(0_-)=0$，$t\to\infty$，电感可看做短路，由 KVL 得：

$$10i_1+4i_1=0$$

得到稳态时电流：i_1=0A。所以，电感稳态电流 $i(\infty)$=4A。

把电感断开，如图所示，可得开路电压：

$$u_{OC}=10i_1+4i_1=14i_1=56\,\text{V}$$

短路电流等于 $i(\infty)$，所以戴维南等效电阻为：

$$R_0=\frac{u_{OC}}{i_{SC}}=\frac{u_{OC}}{i(\infty)}=\frac{56}{4}=14\,\Omega$$

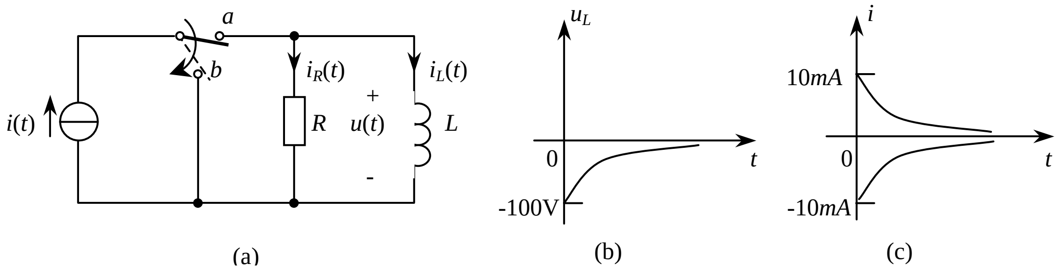
故原电路时间常数为：

$$\tau = \frac{L}{R_0} = \frac{1}{7}\,\mathrm{s}$$

利用三要素公式，可得：

$$i(t) = 4 + (0-4)e^{-7t} = 4(1-e^{-7t})\,\mathrm{A}$$

4-4　电路如题图 4-3 所示，$i(t)$=10mA、R=10kΩ、L=1mH。开关接在 a 端为时已久，在 t=0 时开关由 a 端投向 b 端，求 t≥0 时，$u(t)$、$i_R(t)$和 $i_L(t)$，并绘出波形图。



题图 4-3　习题 4-4 电路及波形图

解：本题是求零输入响应，即在开关处于 a 时，主要是电感储能，当开关投向 b 后，讨论由电感的储能所引起的响应。所以对图(a)t≥0 时的电路可列出

$$L\frac{di_L}{dt} + Ri_L = 0 \qquad t \ge 0$$

及　$i_L(0)=i(t)=10(mA)$

其解为：$i_L(t) = 10e^{-\frac{t}{\tau}} = 10e^{-10^7 t}(mA) \qquad t \ge 0$

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{10^{-3}}{10\times10^3} = 10^{-7}S$$

则

$$u_L(t) = L\frac{di_L}{dt} = Li_L(0)(-\frac{1}{\tau})e^{-\frac{t}{\tau}} = Li_L(0)(-\frac{R}{L})e^{-\frac{t}{\tau}}$$
$$= -10\times10^{-3}\times10\times10^3 e^{-10^7 t} = -100e^{-10^7 t}(V) \qquad t \ge 0$$

而　$i_R(t) = -i_L(t) = -10e^{-10^7 t}(mA) \qquad t \ge 0$

其波形图见图(b)、图(c)所示。

4-5　电路如题图 4-4 所示，开关接在 a 端为时已久，在 t=0 时开关投向 b 端，求 3Ω 电阻中的电流。

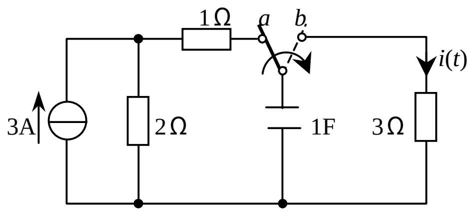
解：因为　$u_c(0) = 3\times2 = 6(V)$

（注意：当稳态以后电容为开路，所以流过 1Ω 和电容串联支路的电流为零，因此电容两端的电压就是并联支路 2Ω 支路两端的电压）

当开关投向 b 时电流的初始值为

$$i(0) = \frac{u_c(0)}{R} = \frac{6}{3} = 2(A)$$

$$i(\infty) = 0, \qquad \tau = RC = 3\times1 = 3S$$



题图 4-4　习题 4-5 电路

故根据三要素法得： $i(t)=2e^{-\frac{1}{3}t}(A) \qquad t\geq 0$

4-6　电路如题图 4-5 所示，开关在 $t<0$ 时一直打开，在 $t=0$ 时突然闭合。求 $u(t)$的零输入响应和零状态响应。

解：因为 $u(t)=u_c(t)$，所以求出 $u_c(t)$即可。

方法一：直接用三要素法：（注意，使用三要素法的初始值和稳态值只能是电容电压和电感电流，因为电容电压和电感电流不能发生跳变，是连续的。开关闭合以后，时间常数由两个电阻并联后，再与电容构成 RC 电路）

$$\tau=R_0C=(2//1)\times 3=2S$$

$$u_c(0)=1\times 2=2(V)$$

$$u_c(\infty)=1\times(1//2)=\frac{2}{3}(V)$$

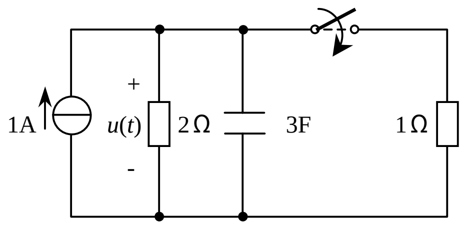
所以

$$\begin{aligned} u_c(t)&=u_c(\infty)+(u_c(0)-u_c(\infty))e^{-\frac{t}{\tau}}\\ &=\frac{2}{3}+(2-\frac{2}{3})e^{-0.5t}\\ &=\underbrace{2e^{-0.5t}}_{\text{零输入响应}}+\underbrace{\frac{2}{3}(1-e^{-0.5t})}_{\text{零状态响应}} \qquad t\geq 0 \end{aligned}$$

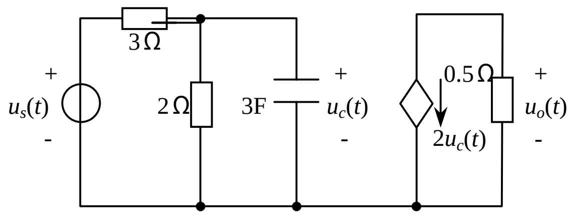
方法二：分别求出零输入响应和零状态响应（可以直接解微分方程，也可以直接利用结论）

零输入响应：$u_c^{'}=U_0e^{-\frac{t}{\tau}}=1\times 2e^{-0.5t}(V)=2e^{-0.5t} \qquad t\geq 0$

零状态响应：$u_c^{''}=RI_s(1-e^{-\frac{t}{\tau}})=\frac{2\times 1}{2+1}\times 1(1-e^{-0.5t})=\frac{2}{3}(1-e^{-0.5t})(V) \qquad t\geq 0$



题图 4-5　习题 4-6 电路



题图 4-6　习题 4-7 电路

4-7　电路如题图 4-6 所示，已知

$$u_s(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ 1 & t\geq 0\end{cases}$$

且 $u_c(0)$=5V。求输出电压 $u_o(t)$的零输入响应和零状态响应。

解：思路：若要求解 $u_o(t)$，由图的右半部分可知 $u_o(t)=-0.5\times 2u_c(t)$，所以只要知道 $u_c(t)$即可，要求解 $u_c(t)$可从图的左半部分求得。

$t\geq 0$ 时电路的时间常数为：

$$\tau=R_0C=(3//2)\times 3=\frac{18}{5}S$$

求 $u_c(t)$的零输入响应：$u_c(0_+)= u_c(0_-)=5$V

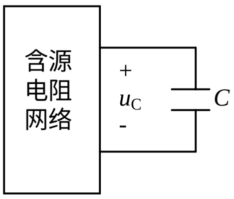
所以 $u_c^{'}(t)=5e^{-\frac{t}{\tau}}=5e^{-\frac{5}{18}t}(V) \qquad t\geq 0$

$u_o(t)$的零输入响应：$u_o^{'}(t)=-2u_c^{'}(t)\times 0.5=-5e^{-\frac{5}{18}t} \qquad t\geq 0$

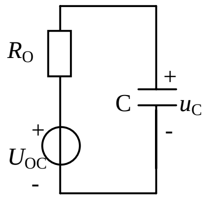
求 $u_c(t)$的零状态响应：$u_c^{''}(t)=\frac{2}{2+3}\times 1\times(1-e^{-\frac{5}{18}t})=\frac{2}{5}(1-e^{-\frac{5}{18}t})(V) \qquad t\geq 0$

$u_o(t)$的零状态响应：$u_o^{''}=-2u_c^{''}(t)\times 0.5=-\frac{2}{5}(1-e^{-\frac{5}{18}t})(V) \qquad t\geq 0$

4-8 电路如题图 4-7 所示，电容 C=0.2F 时零状态响应 $u_C(t)=20(1-e^{-0.5t})$ V。现若 C=0.05F，且 $u_C(0_-)$=5V，其他条件不变，求 t≥0 时的全响应 $u_C(t)$。



题图 4-7 习题 4-8 电路



戴维南等效电路图

解：原电路的戴维南等效电路如图所示。首先确定等效电路参数，由图可知电容 C 电压的零状态响应为：

$$u_C(t)=U_{OC}(1-e^{-\frac{t}{\tau}})\text{ V}$$

根据已知条件，得：U_{OC}=20V， τ =2s。因为 τ =R_0C，所以 R_0=2/0.2=10Ω

当电容 C=0.05F 时，时间常数 τ =10×0.05=0.5s。电容电压初始值为 $u_C(0_+)$=5V，稳态值为 $u_C(\infty)$=20V，由三要素公式，可以得到全响应：

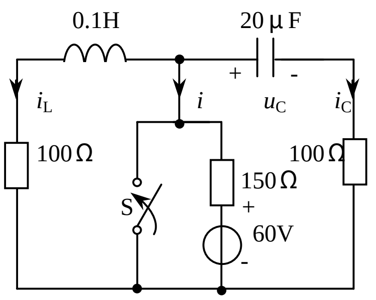
$$u_C(t)=u_C(\infty)+[u_C(0_+)-u_C(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}=20-15e^{-2t}\text{ V}$$

4-9 如题图 4-8 所示电路中，t=0 时开关 S 闭合，在开关闭合前电路已处于稳态，求电流 $i(t)$。

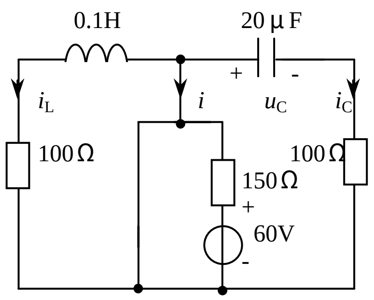
解：开关闭合前电路已处于稳态，电感相当于短路，电容相当于开路，于是可以得到电容和电感的初始条件：

$$i_L(0_+)=i_L(0_-)=60/(100+150)=0.24\text{ A}$$

$$u_C(0_+)=100\times i_L(0_-)=100\times 0.24=24\text{ V}$$



题图 4-8　习题 4-9 电路



题图 4-8　开关闭合后电路

开关闭合后电路如图所示，短路线把电路分成了三个相互独立的回路。由 R、L 串联回路，可得：

$$i_L(t)=i_L(0_+)e^{-\frac{t}{\tau}}=0.24e^{-\frac{100}{0.1}t}=0.24e^{-1000t}\ \mathrm{A}$$

由 R、C 串联回路可得：

$$u_C(t)=u_C(0_+)e^{-\frac{t}{RC}}=24e^{-500t}\ \mathrm{V}$$

所以，电容电流为：

$$i_C(t)=C\frac{du_C}{dt}=-0.24e^{-500t}\ \mathrm{A}$$

根据 KCL，所求的电流为：

$$i(t)=-[i_L(t)+i_C(t)]=0.24(e^{-500t}-e^{-1000t})\ \mathrm{A}$$

4-10　电路如题图 4-9 所示，开关在 t=0 时打开，打开前电路已处于稳态，求 $u_c(t)$、$i_L(t)$。

解：开关打开前电路处于稳态，有：

$$i_L(0\_)=\frac{150}{(1+4)\times10^3}=0.03(A)$$

$$u_c(0\_)=\frac{4}{1+4}\times150=120(V)$$

当 t=0 时，开关打开，由于电感电流、电容电压均不跃变，有：

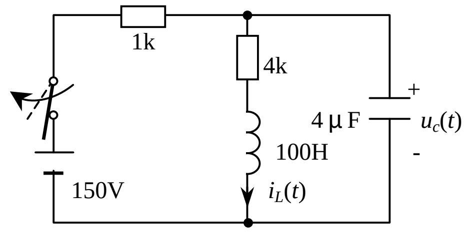
$$i_L(0_+)=i_L(0_-)=0.03(A)$$

$$u_c(0_+)=u_c(0_-)=120(V)$$

当 t≥0 时，根据基尔霍夫定律有

$$Ri_L+L\frac{di_L}{dt}-u_c=0$$

而　$i_L=-C\dfrac{du_c}{dt}$



题图 4-9　习题 4-10 电路

代入上式并整理得：

$$LC\frac{d\ \ u_c}{dt^2}+RC\frac{du_c}{dt}+u_c=0$$

此微分方程的特征方程是：$LCr^2+RCr+1=0$

由于 $\left(\dfrac{R}{2L}\right)^2-\dfrac{1}{LC}=400-2500<0$　所以是属于二阶电路的振荡情况

衰减系数为：$\alpha = \dfrac{R}{2L} = \dfrac{4\times10^3}{2\times100} = 20$

电路的谐振角频率：$\omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{LC}} = \dfrac{1}{\sqrt{100\times4\times10^{-6}}} = 50$

衰减振荡角频率：$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = \sqrt{50^2 - 20^2} = 10\sqrt{21}$

又因为：$\theta = \arcsin\dfrac{\alpha}{\omega_0} = \arcsin\dfrac{20}{50} = \arcsin\dfrac{2}{5}$

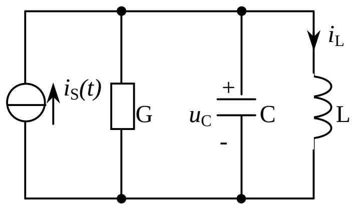
$$\begin{aligned}
u_c(t) &= u_c(0)\frac{\omega_0}{\omega_d}e^{-\alpha t}\cos(\omega_d t-\theta)+\frac{i_L(0)}{\omega_d C}\sin\omega_d t \\
&= 120\times\frac{50}{10\sqrt{21}}e^{-20t}\cos(10\sqrt{21}t-\arcsin\frac{2}{5})+\frac{-0.03}{10\sqrt{21}\times4\times10^{-6}}e^{-20t}\sin(10\sqrt{21}t) \\
&= \frac{600}{\sqrt{21}}e^{-20t}\cos(10\sqrt{21}t-\arcsin\frac{2}{5})-\frac{750}{\sqrt{21}}e^{-20t}\sin(10\sqrt{21}t)
\end{aligned}$$

$$i_L(t) = -C\frac{du_c}{dt}$$

4-11 题图 4-10 所示电路中，已知：

$$i_s(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ 1 & t\geq 0\end{cases}$$

电导 G=5S，电感 L=0.25H，电容 C=1F，求电流 $i_L(t)$。



题图 4-10 习题 4-11 电路

解：电路的初始值为：

$u_C(0_+) = 0\,\text{V}$，$i_L(0_+) = 0\,\text{A}$

t≥0 后，电路的方程为：

$$LC\frac{d^2 i_L}{dt^2}+GL\frac{di_L}{dt}+i_L = 1$$

特征方程为：$0.25s^2+1.25s+1=0$，特征根为：s_1=-1，s_2=-4

微分方程的通解为：

$$i_L(t) = k_1e^{-t}+k_2e^{-4t}+1$$

代入初始条件 $i_L(0_+)=0$ 以及 $u_C(0_+)=u_L(0_+)=L\dfrac{di_L}{dt}=0$，得：

$$\begin{cases}k_1+k_2+1=0\\ k_1+4k_2=0\end{cases}$$

解得：$k_1 = -\dfrac{4}{3}$，$k_2 = \dfrac{1}{3}$

所以，电流为：

$$i_L(t) = 1-\frac{4}{3}e^{-t}+\frac{1}{3}e^{-4t}\,\text{A}$$

习题五

5-1　若$i_1(t)=\cos\omega t\ A$，$i_2(t)=\sqrt{3}\sin\omega t\ A$，求$i_1(t)+i_2(t)$。

解：设 $i(t)=i_1(t)+i_2(t)$，各电流均为同频率的正弦波，以相量表示后得：

$$\dot{I}=\dot{I}_1+\dot{I}_2$$

根据已知条件有：$\dot{I}_1=1\angle 0^\circ=1$　　　$\dot{I}_2=\sqrt{3}\angle 90^\circ=j\sqrt{3}$

所以，$\dot{I}=1+j\sqrt{3}=2\angle 60^\circ$

与相量$\dot{I}$相对应的正弦电流 $i(t)$为：

$$i(t)=i_1(t)+i_2(t)=2\cos(\omega t+60^\circ)\quad(\mathrm{A})$$

（注：所谓正弦量既可以是正弦也可以是余弦，仅差 90^0 相位差，所以此处将其化为余弦，主要就是让同学们了解：正弦量不单单是正弦，也可以是余弦。）

5-2　已知$u_{ab}=100\cos(314t+30^\circ)\ \mathrm{V}$，$u_{bc}=100\sin(314t+60^\circ)\ \mathrm{V}$，在用相量法求 u_{ac}时，下列四种算法得答案哪些是正确的？不正确的，错在何处？

方法一：

$$\dot{U}_{ab}=86.6+j50$$
$$\dot{U}_{bc}=86.6-j50$$
$$\dot{U}_{ab}+\dot{U}_{bc}=173.2+j0$$
$$u_{ac}=173.2\cos 314t\ \mathrm{V}$$

方法二：

$$\dot{U}_{ab}=86.6+j50$$
$$\dot{U}_{bc}=50+j86.6$$
$$\dot{U}_{ab}+\dot{U}_{bc}=136.6+j136.6$$
$$u_{ac}=193.4\cos(314t+45^\circ)\ \mathrm{V}$$

方法三：

$$\dot{U}_{ab}=-50+j86.6$$
$$\dot{U}_{bc}=50+j86.6$$
$$\dot{U}_{ab}+\dot{U}_{bc}=0+j173.2$$
$$u_{ac}=173.2\sin(314t+90^\circ)\ \mathrm{V}$$

方法四：

$$\dot{U}_{ab}=-50+j86.6$$
$$\dot{U}_{bc}=86.6-j50$$
$$\dot{U}_{ab}+\dot{U}_{bc}=36.6+j36.6$$
$$u_{ac}=51.7\sin(314t+45^\circ)\ \mathrm{V}$$

解：方法（一）、（三）是正确的，方法（二）、（四）是错误的，它们的错误在于：在同一问题中采用了两种不同的标准来表示正弦量，方法（二）中，$\dot{U}_{ab}$是用$1\angle 0^\circ$代表$\cos\omega t$写出的，而$\dot{U}_{bc}$则是用$1\angle 0^\circ$代表$\sin\omega t$写出的，其结果显然是不正确的。方法（四）中，$\dot{U}_{ab}$是用$1\angle 0^\circ$代表$\sin\omega t$写出的，$\dot{U}_{bc}$则是用$1\angle 0^\circ$代表$\cos\omega t$写出的，其结果仍然是不正确的。因此在分析正弦稳态电路时，虽然既可以用正弦表示也可以用余弦表示，但在分析题是只能选其中一种，不可混用，否则导致错误。

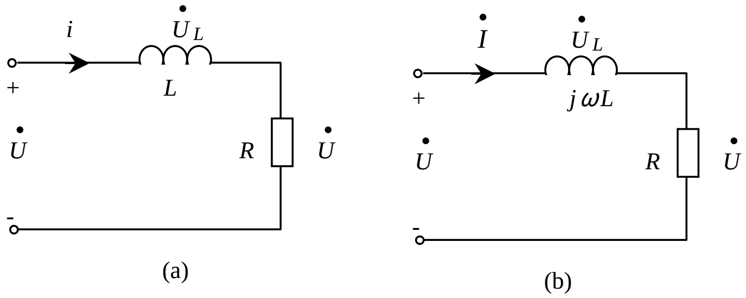
5-3　（1）指出题图 5-1 所示相量模型是否有错？

（2）指出下列各式是否有错？

$$\dot{I}=\frac{\dot{U}}{R+\omega L}\ ;\quad I_m=\frac{U_m}{R+\omega L}\ ;\quad \dot{U}_L=\dot{U}\frac{j\omega L}{R+j\omega L}\ ;\quad \dot{U}_R=\dot{U}\frac{R}{R+\omega L}$$

$$\dot{U}=\dot{U}_L+\dot{U}_R\ ;\quad u=u_L+u_R\ ;\quad U_m=U_{Lm}+U_{rm}$$

解：(1）题图 5-1(a)所示的相量模型有错误，因为电流应用相量表示，电感需用感抗表示，故应改为题图 5-1(b)所示的相量模型。



题图 5-1 习题 5-3 电路相量图

（2）式 $\dot{U}_L=\dot{U}\frac{j\omega L}{R+j\omega L}$；$\dot{U}=\dot{U}_L+\dot{U}_R$；$u=u_L+u_R$ 是正确的，其余各式均有错。

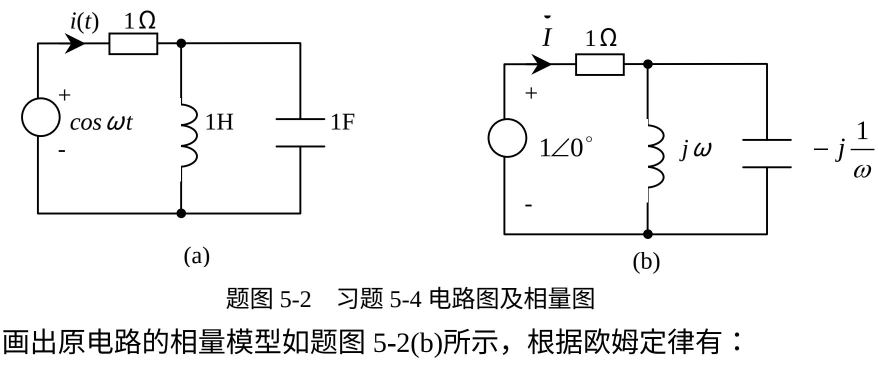
式 $\dot{I}=\frac{\dot{U}}{R+\omega L}$ 应改为 $\dot{I}=\frac{\dot{U}}{R+j\omega L}$（欧姆定理在正弦稳态电路中的形式）

式 $I_m=\frac{U_m}{R+\omega L}$ 应改为 $I_m=\frac{U_m}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}}$（计算电流的模的方法）

式 $\dot{U}_R=\dot{U}\frac{R}{R+\omega L}$ 应改为 $\dot{U}_R=\dot{U}\frac{R}{R+j\omega L}$

式 $U_m=U_{Lm}+U_{rm}$ 是不正确的，改为 $\dot{U}_m=\dot{U}_{Lm}+\dot{U}_{rm}$，即用最大值相量表示也是正确的。

5-4 电路如题图 5-2(a)所示，问频率 ω 为多大时，稳态电流 $i(t)$ 为零？



题图 5-2 习题 5-4 电路图及相量图

解：画出原电路的相量模型如题图 5-2(b)所示，根据欧姆定律有：

$$\dot{I}=\frac{1\angle 0^\circ}{1+\dfrac{j\omega(-j\frac{1}{\omega})}{j\omega-j\frac{1}{\omega}}}=\frac{\omega^2-1}{\omega^2-1-j\omega}=\frac{(\omega^2-1)(\omega^2-1+j\omega)}{(\omega^2-1)^2+\omega^2}=\frac{(\omega^2-1)^2+j\omega(\omega^2-1)}{(\omega^2-1)^2+\omega^2}$$

令$\dot{I}=0$，则有$\begin{cases}(\omega^2-1)^2=0 & \text{(实部)}\\ \omega(\omega^2-1)=0 & \text{(虚部)}\end{cases}$

解之得：ω=±1 时，实部和虚部均为 0，舍去负值后得 ω=1

故当 ω=1rad/s 时，LC 并联电路发生谐振，其阻抗为无穷大，此时的电路相当于开路，故稳态电流为零。

5-5　若某电路的阻抗为 Z=3+j4，则导纳$Y=\frac{1}{3}+j\frac{1}{4}$。对吗？为什么？

解：这是不对的。

因为导纳 Y 定义为：$Y=\frac{1}{Z}$，而$Y=G+jB,\quad Z=R+jZ$

故有：$Y=G+jB=\frac{1}{R+jX}=\frac{R}{R^2+X^2}-j\frac{X}{R^2+X^2}$

于是得：$\begin{cases}G=\frac{R}{R^2+X^2}\neq\frac{1}{R}\\ B=\frac{-X}{R^2+X^2}\neq\frac{1}{X}\end{cases}$

因此，$Y=\frac{3}{3^2+4^2}-j\frac{4}{3^2+4^2}=\frac{3}{25}-j\frac{4}{25}$

5-6　在某一频率时，测得若干线性时不变无源电路的阻抗如下：

RC 电路：　Z=5+j2

RL 电路：　Z=5-j7

RLC 电路：　Z=2-j3

LC 电路：　Z=2+j3

这些结果合理吗？为什么？

解：(1) 此结果不合理。因为 RC 电路阻抗 Z 的虚部应为负值。

(2) 此结果不合理。因为 RL 电路阻抗 Z 的虚部应为正值。

(3) 此结果合理。

(4) 此结果不合理。因为 LC 电路阻抗 Z 的实部应为零。

5-7　指出并改正下列表达式中的错误

答：(1)　$i(t)=2\sin(\omega t-15^\circ)=2e^{-j15^\circ}\,\text{A}$

因为 $i(t)$是瞬态表示，它与相量是对应关系而不是相等关系，即$i(t)=2\sin(\omega t-15^\circ)$，

$\leftrightarrow\dot{I}=2e^{-j15^\circ}$。若用等式表示，则应写为$i(t)=2\sin(\omega t-15^\circ)=\text{IM}\left[2e^{j(\omega t-15^\circ)}\right]$

(2)　$\dot{U}=5\angle 90^\circ=5\sqrt{2}\sin(\omega t+90^\circ)\text{V}$

同（1）相量形式与瞬态表示不是相等关系而是对应关系。

(3)　$i(t)=2\cos(\omega t-15^\circ)=2\angle -15^\circ\,\text{A}$

同（1）　$i(t)=2\cos(\omega t-15^\circ)=2\sin(\omega t+75^\circ)\text{A}$

(4)　$U=220\angle 38^\circ\,\text{V}$

U 应该是相量形式，而不是有效值。即$\dot{U}=220\angle 38^\circ\,\text{V}$

5-8　试求下列正弦信号的振幅、频率和初相角，并画出其波形图

解：(1)　$u(t)$=10sin314tV

U_m=10V， ω=314， ω=2πf，f=ω/2π=314/2π=50Hz， θ_u=0

（2）$u(t)$=5sin(100t+30°)V

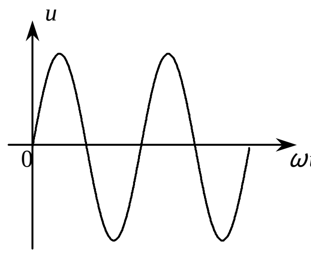
U_m=5V， ω=100， ω=2πf，f=ω/2π=100/2π=15.92Hz， θ_u=30

（3）$u(t)$=4cos(2t-120°)V

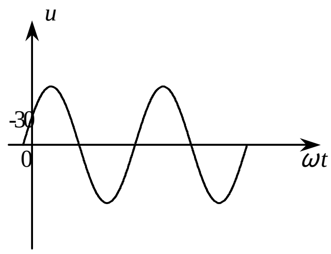
U_m=4V， ω=2， ω=2πf，f=ω/2π=2/2π=0.32Hz， θ_u=-120+90=-30

（4）$u(t)=8\sqrt{2}\sin(2t-45^\circ)$

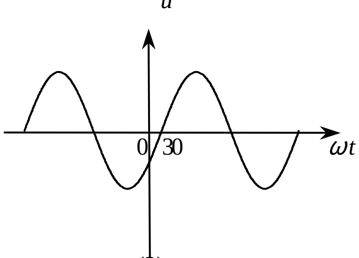
U_m=11.31V， ω=2， ω=2πf，f=ω/2π=2/2π=0.32Hz， θ_u=-45



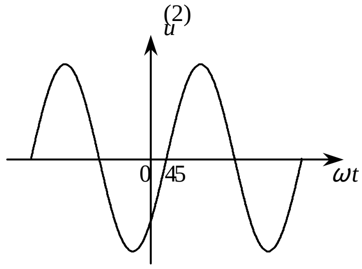
(1)



(2)



(3)



(4)

5-9　写出下列相量所表示的正弦信号的瞬时表达式（设角频率均为 ω）

答：(1) $\dot{I}_{1m}=(8+j12)\text{A}$

因为：$\dot{I}_{1m}=(8+j12)=14.42\angle 56.31^\circ\ \text{A}$

则：$i_1(t)=14.42\sin(\omega t+56.31^\circ)\text{A}$

（2）$\dot{I}_2=11.18\angle -26.6^\circ\ \text{A}$

则：$i_2(t)=\sqrt{2}11.18\sin(\omega t-26.6^\circ)=15.81\sin(\omega t-26.6^\circ)\text{A}$

（3）$\dot{U}_{1m}=(-6+j8)\text{V}$

因为：$\dot{U}_{1m}=(-6+j8)=10\angle 126.87^\circ\ \text{V}$

则：$u_1(t)=10\sin(\omega t+126.87^\circ)\text{V}$

（4）$\dot{U}_2=15\angle -38^\circ\ \text{V}$

则：$u_2(t)=\sqrt{2}15\sin(\omega t-38^\circ)\text{V}=21.21\sin(\omega t-38^\circ)\text{V}$

5-10　电路如题图 5-3(a)所示。

已知 $u_c(t)=cos2t$ V，试求电源电压 $u_s(t)$。分别绘出题图中所标出的所有电压和和所标出的所有电流的相量图。

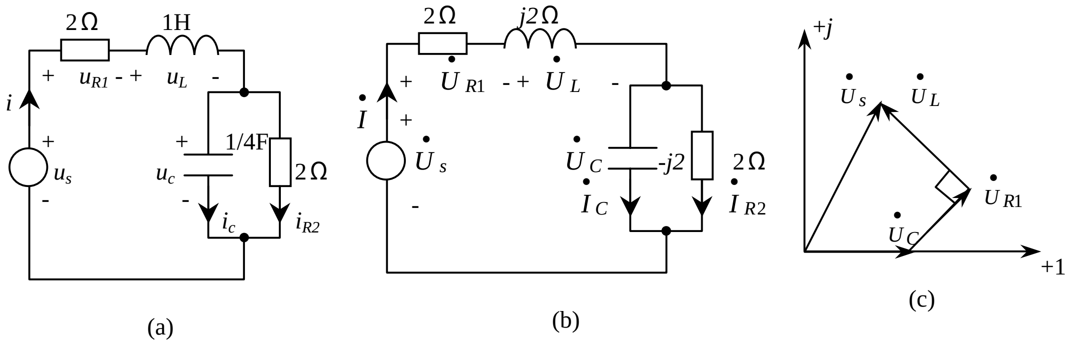
解：做原电路的相量模型，如题图 5-3(b)所示。

已知：$\dot{U}_C=1\angle 0^\circ\ \text{V}$，根据分压公式得：

$$\dot{U}_C=\frac{\frac{-j2\times2}{2-j2}}{2+j2+\frac{-j2\times2}{2-j2}}\dot{U}_s=\frac{1-j}{2+j2+1-j}\dot{U}_s=0.447\angle-63.4^\circ\times\dot{U}_s$$

则 $\dot{U}_s=\dfrac{\dot{U}_C}{0.447\angle-63.4^\circ}=2.24\angle63.4^\circ\ \mathrm{V}$

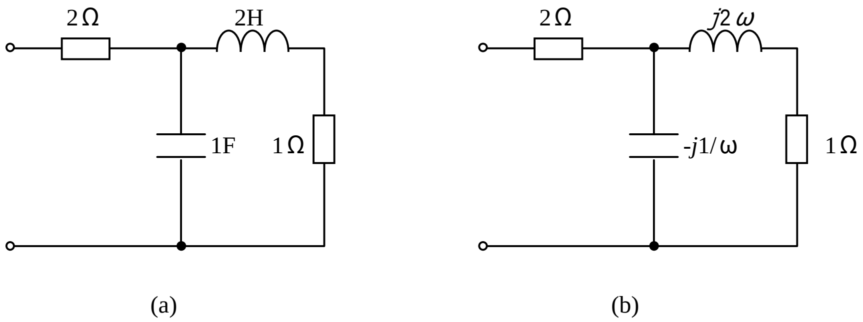
故 $u_s(t)=2.24\cos(2t+63.4^\circ)\mathrm{V}$



题图 5-3　习题 5-10 电路图和相量模型

相量图题图 5-3(c)所示。

5-11　电路如题图 5-4(a)所示，写出输入阻抗与角频率 ω 的关系式，当 ω=0 时，输入阻抗是多少？



题图 5-4　习题 5-10 电路图及相量模

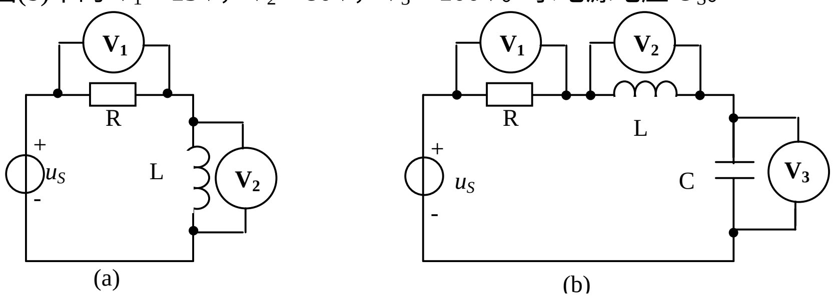
解：原电路的相量模型如题图 5-4(b)所示，输入阻抗为

$$Z=2+\frac{(1+j2\omega)(-j\frac{1}{\omega})}{1+j2\omega-j\frac{1}{\omega}}=2+\frac{2\omega-j}{\omega+j(2\omega^2-1)}\times\frac{\omega-j(2\omega^2-1)}{\omega-j(2\omega^2-1)}=2+\frac{1+j(-4\omega^3+\omega)}{\omega^2+(2\omega^2-1)^2}$$

$$=\frac{8\omega^4-6\omega_2+3+j(-4\omega^3+\omega)}{4\omega^4-3\omega^2+1}\Omega$$

当 ω=0 时，Z=3Ω

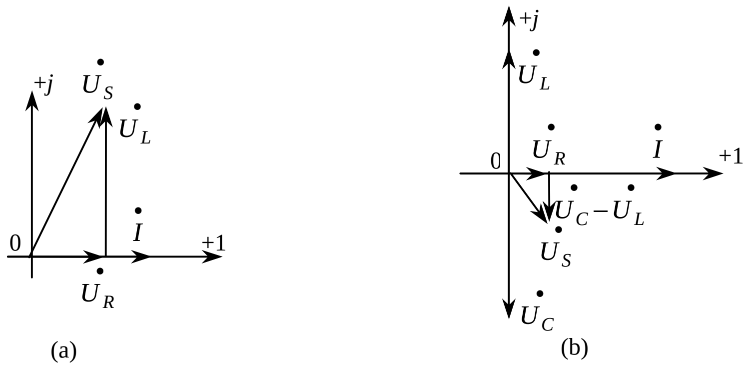
5-12 电路如题图 5-5 所示，电压源均为正弦电压，已知图(a)中电压表读数为 V_1：30V，V_2：60V；图(b)中的 V_1：15V，V_2：80V，V_3：100V。求电源电压 U_S。



题图 5-5 习题 5-12 电路图

解：电压表的读数为正弦电压的有效值。

用相量图求解，设电流为 $\dot{I}=I\angle 0^\circ$，电阻电压与电流同相，电感电压超前电流 90°，电容电压滞后电流 90°，可以画出各元件电压相量如下图所示：



从图(a)中可以得到：

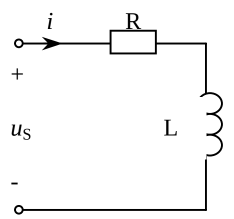
$$U_S=\sqrt{U_R^2+U_L^2}=\sqrt{30^2+60^2}=67.08\text{V}$$

从图(b)中可以得到：

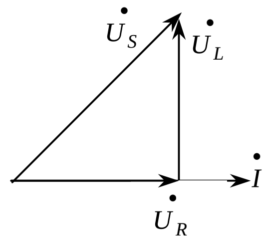
$$U_S=\sqrt{U_R^2+(U_C-U_L)^2}=\sqrt{15^2+(100-80)^2}=25\text{V}$$

显然，如果电流初相角为任意角度，即 $\dot{I}=I\angle\varphi_i$，所得结论相同。

5-13 电感线圈可等效成一个电阻和一个电感的串联电路，为了测量电阻和电感值，首先在端口加 30V 直流电压，如题图 5-6 所示，测得电流为 1A；再加 f=50Hz，有效值为 90V 的正弦电压，测得电流有效值为 1.8A。求 R 和 L 的值。



题图 5-6 习题 5-13 电路图



题图 5-6 相量图

解：当加 30V 直流电压时，电感 L 可看作短路，则电阻

$$R=\frac{u_S}{i}=\frac{30}{1}=30\Omega$$

加正弦电压时，设电流为$\dot{I}=I\angle\varphi_i$，根据相量法，可以画出相量图如图所示：

其中$\dot{U}_R=R\dot{I}$，$\dot{U}_L=jX_L\dot{I}$，$\dot{U}_S=\dot{U}_R+\dot{U}_L$，所以，

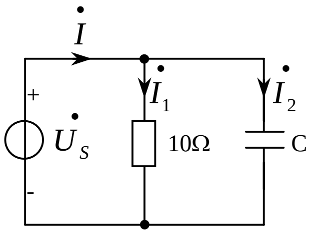
$$U_S^2=U_R^2+U_L^2=R^2I^2+X_L^2I^2=(R^2+X_L^2)I^2$$

得：$X_L=\sqrt{\frac{U_S^2}{I^2}-R^2}=\sqrt{(\frac{90}{1.8})^2-30^2}=40\Omega$

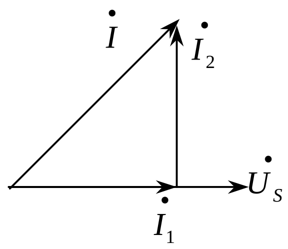
再由 $X_L=\omega L$，得：

$$L=\frac{X_L}{\omega}=\frac{X_L}{2\pi f}=\frac{40}{100\pi}=0.127\text{ H}$$

5-14 电路如题图 5-7 所示，已知电源电压为正弦电压，电流 $I_1=I_2=10$A，试求$\dot{I}$和$\dot{U}_S$，设$\dot{U}_S$的初相角为零。



题图 5-7 习题 5-14 电路图



题图 5-7 相量图

解：以$\dot{U}_S$为参考相量，可以画出各电流相量如图所示。

由图可知：

$$I=\sqrt{I_1^2+I_2^2}=10\sqrt{2}\text{ A}$$

$\varphi_i=45°$

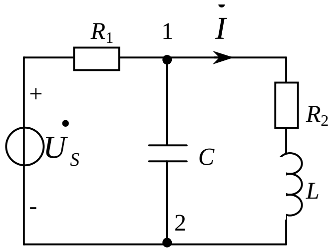
$U_S=RI_1=100$V

故$\dot{U}_S$和$\dot{I}$分别为：

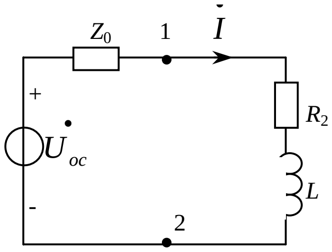
$$\dot{U}_S=100\angle 0^\circ\text{ V}$$

$$\dot{I}=10\sqrt{2}\angle 45^\circ\text{ A}$$

5-15 电路如题图 5-8 所示，已知 $R_1=1\Omega$，$C=10^3\mu$F，$R_2=0.5\Omega$，$\omega=1000$rad/s，$\dot{U}_S=U_S\angle 0^\circ$ V。求当电流有效值 I 最大时，电感 L 为何值？



题图 5-8 习题 5-15 电路图



题图 5-8 戴维南等效电路图

解：应用戴维南定理求解，先把 R_2 和 L 断开，求 1 和 2 端开路电压。根据分压公式，得：

$$\dot{U}_{OC}=\frac{jX_C}{R_1+jX_C}\dot{U}_S$$

其中 $jX_C=-j\frac{1}{\omega C}=-j1\Omega$，所以

$$\dot{U}_{OC}=\frac{-j}{1-j}U_S\angle 0^\circ=\frac{U_S}{\sqrt{2}}\angle -45^\circ\ \mathrm{V}$$

再求等效阻抗：

$$Z_0=\frac{R_1(jX_C)}{R_1+jX_C}=\frac{-j}{1-j}=(0.5-0.5j)\Omega$$

可以画出戴维南等效电路如图所示。从图中可知：

$$\dot{I}=\frac{\dot{U}_{OC}}{Z_0+R_2+j\omega L}=\frac{\frac{U_S}{\sqrt{2}}\angle -45^\circ}{0.5-0.5j+0.5+j\omega L}=\frac{\frac{U_S}{\sqrt{2}}\angle -45^\circ}{1+j(\omega L-0.5)}\ \mathrm{A}$$

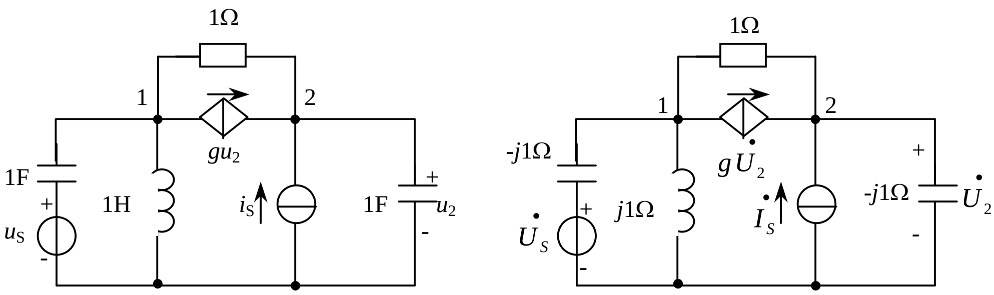
电流有效值为：

$$I=\frac{\frac{U_S}{\sqrt{2}}}{\sqrt{1+(\omega L-0.5)^2}}\ \mathrm{A}$$

若 I 取得最大值，上式分母应最小，即 ωL-0.5=0，所以，电感量 L 为：

$$L=\frac{0.5}{\omega}=0.5\ \mathrm{mH}$$

5-16　在题图 5-9 所示电路中，已知 g=1S，$u_S=10\sqrt{2}\sin t\ \mathrm{V}$，$i_S=10\sqrt{2}\cos t\ \mathrm{A}$。求受控电流源两端电压 u_{12}。



题图 5-9　习题 5-16 电路图　　题图 5-9 相量模型

解：原电路的相量模型如右图所示，其中：

$$\dot{U}_S=10\angle 0^\circ=10\ \mathrm{V}$$

$\dot{I}_S=10\angle 90^\circ=j10\ \mathrm{A}$，因为：$i_S=10\sqrt{2}\cos t=10\sqrt{2}\sin(t+90^\circ)\ \mathrm{A}$

这里采用有效值相量。对节点 1、2 应用节点法，得：

$$\left(\frac{1}{-j}+\frac{1}{j}+\frac{1}{1}\right)\dot{U}_1+\left(\frac{1}{-1}\right)\dot{U}_2=\frac{\dot{U}_S}{-j}-g\dot{U}_2$$

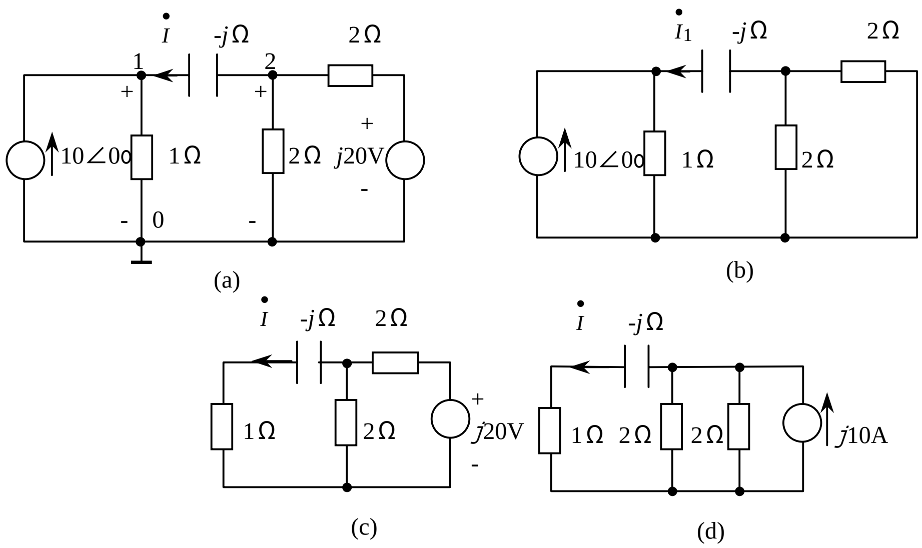
$$\left(\frac{1}{-1}\right)\dot{U}_1+\left(\frac{1}{-j}+\frac{1}{1}\right)\dot{U}_2=\dot{I}_S+g\dot{U}_2$$

解得：$\dot{U}_1=j\dot{U}_S$ ，$\dot{U}_2=\dot{U}_S-j\dot{I}_S$

所以，$\dot{U}_{12}=\dot{U}_1-\dot{U}_2=(-1+j)\dot{U}_S+j\dot{I}_S=-20+j10=10\sqrt{5}\angle 153.4^\circ\ \mathrm{V}$

故：$u_{12}=10\sqrt{10}\sin(t+153.4^\circ)\ \mathrm{V}$

5-17 电路相量模型如题图 5-10(a)所示。试用①节点分析法求流过电容的电流；②用叠加定理求流过电容的电流。



题图 5-10 习题 5-17 电路相量模

解：(1) 以节点 0 为参考点，设节点 1、2 的电位相量为$\dot{U}_1$及$\dot{U}_2$，则节点方程为

$$\begin{cases}(1+j)\dot{U}_1-j\dot{U}_2=10\\-j\dot{U}_1+\left(\frac{1}{2}+\frac{1}{2}+j\right)\dot{U}_2=\frac{1}{2}\times j20\end{cases}$$

化简得$\begin{cases}(1+j)\dot{U}_1-j\dot{U}_2=10\\-j\dot{U}_1+(1+j)\dot{U}_2=j10\end{cases}$

解之得：$\dot{U}_1=4+j2\,(V)$，$\dot{U}_2=6+j8\,(\mathrm{V})$

设流过电容的电流为$\dot{I}$（方向题图 5-10(a)所示），则

$$\dot{I}=j(\dot{U}_2-\dot{U}_1)=j(6+j8-4-j2)=-6+j2=6.32\angle 161.6^\circ\,(\mathrm{A})$$

(2) 根据叠加定理，流过电容的电流$\dot{I}$可看作是电流源和电压源分别单独作用所产生电流的代数和。

电流源单独作用时，见题图 5-10(b)，根据分流关系可得

$$\dot{I}_1=-\frac{1}{1+\left(\frac{2\times 2}{2+2}-j\right)}\times 10\angle 0^\circ=\frac{-10}{2-j}=-4-j2(\text{A})$$

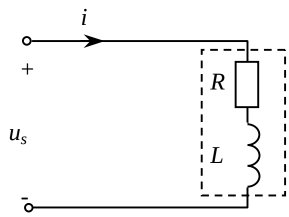
电压源单独作用时，电路如题图 5-10(c)，将电压源与电阻串联电路等效为电流源与电阻并联的电路，如题图 5-10(d)所示，根据分流关系可得

$$\dot{I}_2=\frac{\frac{2\times 2}{2+2}}{\frac{2\times 2}{2+2}+(1-j)}\times j10=\frac{j10}{2-j}=-2+j4(\text{A})$$

流过电容的总电流为

$$\dot{I}=\dot{I}_1+\dot{I}_2=-4-j2-2+j4=-6+j2=6.32\angle 161.6^\circ(\text{A})$$

5-18 题图 5-11 中虚线框部分为日光灯等效电路，其中 R 为日光灯等效电阻，L 为铁芯电感，称为镇流器。已知 $\dot{U}_s$=220V，f=50Hz，日光灯功率为 40W 额定电流为 0.4A，试求电阻 R 和电感 L。



题图 5-11 习题 5-18 电路图

解：设电压的初相为零，即 $\dot{U}_s$=220∠0°，则电流相量为 $\dot{I}$=0.4∠θ_i

$$P=\dot{U}\dot{I}=220\angle 0^\circ\times 0.4\angle\theta_i=88\angle\theta_i$$

因为 P=40W，且感性元件电流滞后电压，所以 $\theta_i=\arccos\frac{40}{88}=-62.96^\circ$

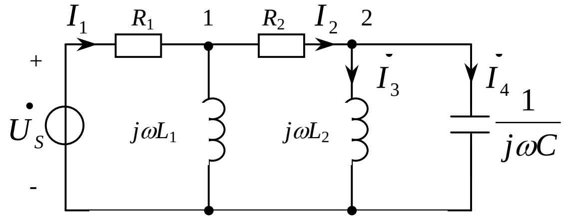
又因为 $Z=\frac{\dot{U}}{\dot{I}}=\frac{220\angle 0^\circ}{0.4\angle -62.96^\circ}=550\angle 62.96=250+j489.9$

所以 R=250Ω，ωL=489.9

因为 f=50Hz，所以 $\omega=2\pi f$=314

故 $L=\frac{489.9}{314}=1.56\text{H}$

5-19 题图 5-12 电路中，R_1=100Ω，L_1=1H，R_2=200Ω，L_2=1H，正弦电源电压为 $\dot{U}_S=100\sqrt{2}\angle 0^\circ$ V，角频率ω=100rad/s，电流有效值 I_2=0，求其它各支路电流。



题图 5-12 习题 5-19 电路图

解：首先计算感抗：

$$jX_{L_1}=j\omega L_1=j100\Omega,\quad jX_{L_2}=j\omega L_2=j100\Omega$$

由于 I_2=0，所以节点 1 和 2 等电位，故有：

$$\dot{I}_1=\frac{\dot{U}_S}{R_1+jX_{L_1}}=\frac{100\sqrt{2}\angle 0^\circ}{100+j100}=1\angle-45^\circ\ \text{A}$$

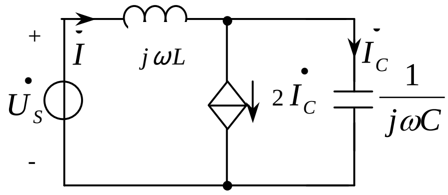
$$\dot{U}_{L_1}=\dot{U}_{L_2}=jX_{L_1}\dot{I}_1=j100\times 1\angle-45^\circ=100\angle 45^\circ\ \text{V}$$

$$\dot{I}_3=\frac{\dot{U}_{L_2}}{jX_{L_2}}=\frac{100\angle 45^\circ}{100\angle 90^\circ}=1\angle-45^\circ\ \text{A}$$

由 $\dot{I}_3+\dot{I}_4=0$ 得：$\dot{I}_4=-\dot{I}_3=-1\angle-45^\circ$ A。

本题中 L_2 和 C 的并联支路实际发生了并联谐振，即 $\omega=\dfrac{1}{\sqrt{L_2C}}$，该支路入端阻抗为∞，因此 I_2=0，可以看作开路，但 I_3 和 I_4 不等于零，它们振幅相同，相位相差 180°，L_2 和 C 构成的回路中呈现电磁振荡。

5-20　求题图 5-13 电路的谐振角频率。



题图 5-13　习题 5-20 电路图

解：由 KCL 得：

$$\dot{I}=\dot{I}_C+2\dot{I}_C=3\dot{I}_C$$

由 KVL 得：

$$\dot{U}_S=j\omega L\dot{I}+\frac{1}{j\omega C}\dot{I}_C=j(3\omega L-\frac{1}{\omega C})\dot{I}_C$$

电路的入端阻抗为：

$$Z=\frac{\dot{U}_S}{\dot{I}}=j\frac{3\omega L-\frac{1}{\omega C}}{3}$$

显然当电路谐振时，应满足 $\dot{U}_S$ 、$\dot{I}$ 同相位，即 Z=0，故有：

$$3\omega L-\frac{1}{\omega C}=0$$

$$\omega=\frac{1}{\sqrt{3LC}}$$

习题六

6-1 (1) A; (2) C; (3) B; (4) C; (5) A

6-2 怎样用万用表判断二极管的极性与好坏？

答：用数字万用表可将表的选择开关转换到“—▶|—”，黑表笔插入 COM，红表笔插入 V/Ω（红笔的极性为“＋”），将表笔连接在二极管，其读数为二极管正向压降的近似值。

用模拟万用表测量二极管时，万用表内的电池正极与黑色表笔相连；负极与红表笔相连。测试二极管时，将万用表拨至 $R\times 1\text{k}$ 档，将两表笔连接在二极管两端，然后再调换方向，若一个是高阻，一个是低阻，则证明二极管是好的。当确定了二极管是好的以后就非常容易确定极性，在低阻时，与黑表笔连接的就是二极管正极。

6-3 什么是 PN 结的击穿现象，击穿有哪两种。击穿是否意味着 PN 结坏了？为什么？

答：当 PN 结加反向电压（P 极接电源负极，N 极接电源正极）超过一定的时候，反向电流突然急剧增加，这种现象叫做 PN 结的反向击穿。击穿分为齐纳击穿和雪崩击穿两种，齐纳击穿是由于 PN 结中的掺杂浓度过高引起的，而雪崩击穿则是由于强电场引起的。PN 结的击穿并不意味着 PN 结坏了，只要能够控制流过 PN 结的电流在 PN 结的允许范围内，不会使 PN 结过热而烧坏，则 PN 结的性能是可以恢复正常的，稳压二极管正式利用了二极管的反向特性，才能保证输出电压的稳定。

6-4 理想二极管组成电路如题图 6-1 所示，试确定各电路的输出电压 u_o。

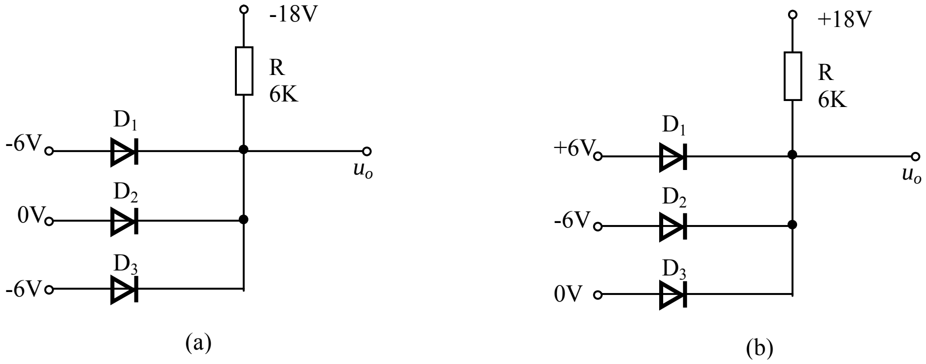


图 6-1 习题 6-4 电路图

解：理想二极管的特性是：当二极管两端加正向电压，二极管导通，否则二极管截止。分析含有二极管电路的方法是：假定二极管是开路，然后确定二极管两端的电位，若二极管的阳极电位高于阴极电位，则二极管导通，否则截止。

对于图(a)假定 D_1、D_2、D_3 截止，输出端的电位为-18V，而 D_1、D_2、D_3 的阳极电位分别是-6V、0V、-6V，因此，理论上 D_1、D_2、D_3 都能导通，假定 D_1 导通，则输出点的电位为-6V，由于该点电位也是 D_2 的阴极电位，因此 D_2 会导通，一旦 D_2 导通，u_O 点的电位就为 0V，因此，D_1、D_3 的阴极电位为 0V，而阳极端为-6V，这样 D_1、D_3 必定截止，所以输出电压 u_o=0V（这就是脉冲数字电路中的或门，0V 为高电平，-6V 为低电平，只要输入端有一个高电平，输出就为高电平）。

对于图(b)依同样的道理可知：D_1、D_2、D_3 的阳极电位都低于+18V，所以三个二极管均截止，流过 R 的电流为 0，故输出电位 u_o=18V

试分析图(b)中的三个二极管极性都反过来，输出电压 u_o=？

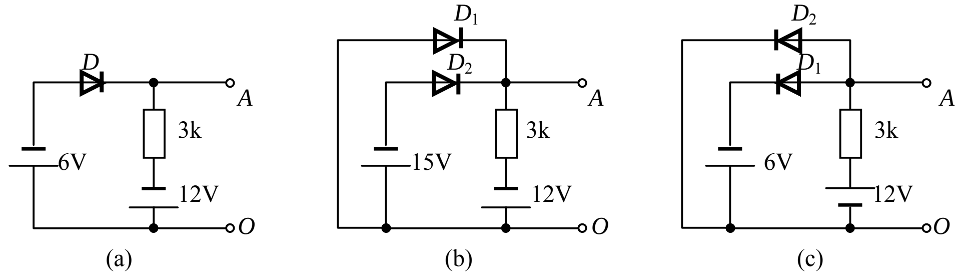
6-5 现有两只稳压二极管，它们的稳定电压分别为 5V 和 9V，正向导通电压为 0.7V。试问，若将它们串联相接，则可以得到几种稳压值，各为多少？

答：有四种不同的稳压值，分别是：14V、5.7V、9.7V、1.4V

6-6 二极管电路如题图 6-2 所示，判断图中的二极管是导通还是截止，并求出 AO 两端的电压 U_{AO}。

解：对于图(a)，在闭合回路中 12V 电源大于 6V 电源，故在二极管 D 的两端加了正向电压，二极管导通，由于是理想二极管，二极管的管压降为 0，所以 U_{AO}= -6V；

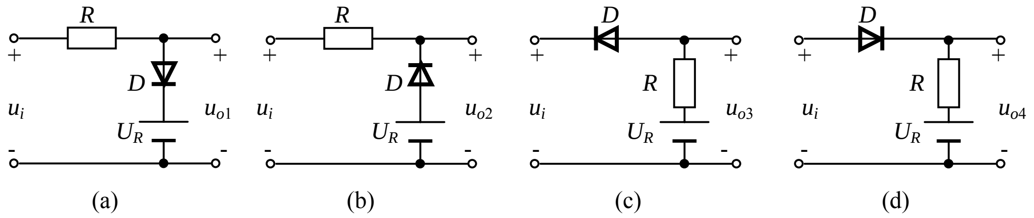
对于图(b)，假定 D_1、D_2 截止，A 点电位是-12V，D_1 的阳极电位是 0V，D_2 的阳极电位是-15V，所以 D_1 两端加正向电压导通，D_2 加反向电压截止，因此，U_{AO}=0V



题图 6-2　习题 6-6 电路图

对于图(c)，同样假定 D_1、D_2 截止，A 点电位是 12V，D_1 的阴极电位是-6V，D_2 的阴极电位是 0V，两个二极管都具备导通条件，但一旦 D_1 导通，A 点的电位就为-6V，D_2 两端加反向电压，故 D_2 必截止，所以输出 U_{AO}= -6V（也可以假定 D_2 导通，则 A 点电位为 0V，而 D_1 仍是正向偏置，所以 D_1 必然导通，一旦 D_1 导通，U_{AO}= -6V）。

6-7　二极管电路如题图 6-3 所示。输入波形 $u_i=U_{im}\sin\omega t$，$U_{im}>U_R$，二极管的导通电压降可忽略，试画出输出电压 u_{o1}~u_{o4} 的波形图。



题图 6-3　习题 6-7 电路图

解：由于 $u_i=U_{im}\sin\omega t$，且 $U_{im}>U_R$，则有：

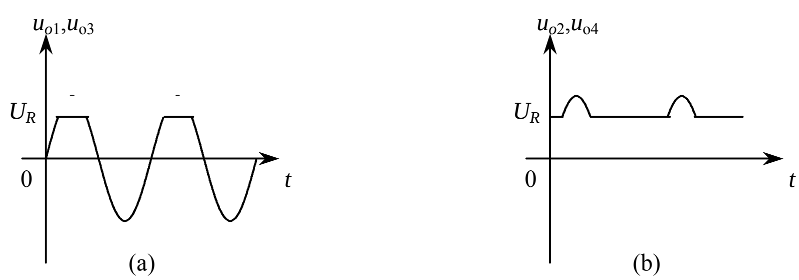
图(a)当 $u_i<U_R$ 时，二极管截止，输出为 u_i，当 $u_i>U_R$ 时，二极管 D 导通，输出为 U_R；

图(b)当 $u_i<U_R$ 时，二极管导通，输出为 U_{Ri}，当 $u_i>U_R$ 时，二极管 D 截止，输出为 u_i；

图(c)当 $u_i<U_R$ 时，二极管导通，输出为 u_i，当 $u_i>U_R$ 时，二极管 D 截止，输出为 U_R；

图(d)当 $u_i<U_R$ 时，二极管截止，输出为 U_R，当 $u_i>U_R$ 时，二极管 D 导通，输出为 u_i。

其波形如下图所示。其中下图(a)是上图(a)、(c)的波形图；图(b)是上图(b)、(d)的波形图。



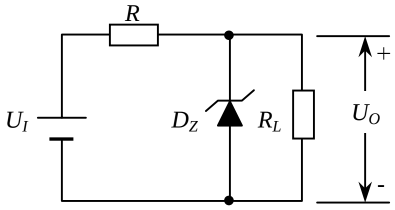
6-8　利用稳压二极管组成的简单稳压电路如题图 6-4 所示。R 为限流电阻，试定性说明 R_L 变动或 U_I 变动时，U_O 基本恒定的理由。

答：由于稳压管工作在反向击穿状态，由反向击穿特性知，当 D_Z 两端电压有微小变化，必然引起 D_Z 中电流很大变化。

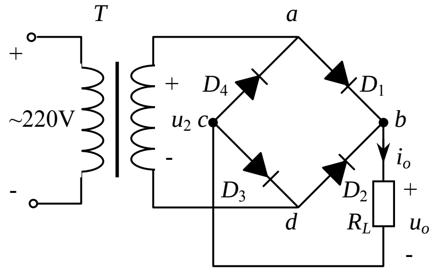
例如：当 R_L 变小时→U_O 减小→D_Z 两端电压减小→流过 D_Z 的电流减小→流过 R 的电流

减小→在 R 上的压降减小→U_O 上升。R_L 变大可以做同样的分析。

当 U_I 变大时→流过 D_Z 中的电流急剧增加→流过电阻 R 中的电流急剧增加→在 R 上的压降急剧增加→U_O 维持不变。



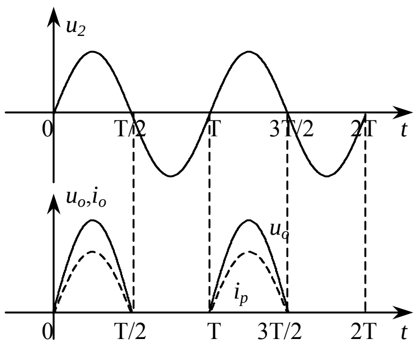
题图 6-4 习题 6-8 电路图



题图 6-5 习题 6-9 电路图

6-9 单相桥式整流电路如题图 6-5 所示。试说明当某只二极管断路时的工作情况，并画出负载电压波形。

解：假设 D_4 断路，当 u_2 的正半周时，D_1、D_3 导通，负载上有电流流过；当 u_2 的负半周时，由于 D_4 断路，在负载中无电流流过，这一桥式电路在一个二极管断路的情况下实际上是一个半波整流电路。其波形图如图所示。



波形图

6-10 为了使三极管能有效地起放大作用，对三极管的发射区掺杂浓度有什么要求、基区宽度有什么要求、集电结面积比发射结面积大小有何要求。其理由是什么？如果将三极管的集电极和发射极对调使用（即三极管反接），能否起放大作用。

答：为了使三极管能有效地起放大作用，要求三极管的发射区掺杂浓度<u> 高 </u>；基区宽度<u> 薄 </u>；集电结结面积比发射结面积<u> 大 </u>。

其理由是，由于发射极的掺杂浓度高，所以在发射结的正向偏置的作用下，会有大量的载流子漂移到基区；漂移到基区的载流子积聚在发射结附近，而在集电结附近载流子浓度几乎为 0（集电结反向偏置的缘故），由于浓度差异，积聚在发射结附近的电子会向集电结扩散，只有基区宽度很薄，才能保证向集电结扩散过程中只有很少一部分与基区的空穴复合，大多数载流子可以扩散到集电结附近；又因为集电区面积比较大，所以在集电结反向偏置下，就可以尽可能多的收集扩散到集电结附近的多数载流子。

如果集电极和发射极对调，是不能起到放大作用的。因为集电极的掺杂浓度低，即使在集电结正向偏置的作用下，也没有足够多的载流子漂移到基区，且由于发射区的面积不够大，也不能将接近发射极的载流子大量的收集到发射极。

6-11 工作在放大区的某个三极管，当 I_B 从 20μA 增大到 40μA 时，I_C 从 1mA 变成 2mA。它的β值约为多少？

解：根据动态放大倍数的定义得：$\beta = \dfrac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \dfrac{2000-1000}{40-20} = \dfrac{1000}{20} = 50$

6-12 工作在放大状态的三极管，流过发射结的电流主要是什么？流过集电结的电流主要是什么？

答：工作在放大状态的三极管，流过发射结的电流主要是<u> 扩散电流 </u>，流过集电结的电流主要是<u> 漂移电流 </u>。

6-13 某三极管，其α=0.98，当发射极电流为 2mA 时，基极电流是多少？该管的β多

大？另一只三极管，其β=100。当发射极电流为 5mA 时，基极电流是多少？该管的α多大？

解：根据α定义 $\alpha=\dfrac{\Delta I_C}{\Delta I_E}\approx\bar{\alpha}\approx\dfrac{I_C}{I_E}$，

所以 $I_C\approx\alpha I_E=0.98\times2\text{mA}=1.96\text{mA}$ $I_B=I_E-I_c=2-1.96=0.04\text{mA}=40\mu\text{A}$

$\beta=\dfrac{I_C}{I_B}=\dfrac{1.96}{0.04}=49$

由于 $\beta=\dfrac{I_C}{I_B}=100$，所以 $I_B=\dfrac{I_C}{\beta}=\dfrac{5}{100}=0.05\text{mA}=50\mu\text{A}$

$\alpha=\dfrac{I_C}{I_E}=\dfrac{I_C}{I_C+I_E}=\dfrac{5}{5+0.05}=0.99$

6-14 放大电路中，测得几个三极管的三个电极电位 U_1、U_2、U_3 分别为下列各组数值，判断它们是 NPN 型还是 PNP 型？是硅管还是锗管？确定 e、b、c。

（1）U_1=3.3V，U_2=2.6V，U_3=15V

（2）U_1=3.2V，U_2=3V，U_3=15V

（3）U_1=6.5V，U_2=14.3V，U_3=15V

（4）U_1=8V，U_2=14.8V，U_3=15V

答：先确定是硅管还是锗管。由于硅管的结电压降一般为 0.6~0.8V，锗管的结电压降约为 0.1~0.3V，所以(1) (3.3-2.6=0.7V)、(3) (15-14.3=0.7V)为硅管，(2) (3.2-3=0.2V)、(4) (15-14.8=0.2V)为锗管。

然后确定是 NPN 还是 PNP 管。对于 NPN 管，基极电位高于发射极电位（发射极正向偏置），而集电极的电位高于基极（集电极反向偏置）。对于 PNP 管，发射极电位高于基极电位（发射结正向偏置），基极电位高于集电极电位（集电结反向偏置），所以（1）、（2）是 NPN 管；(3)、（4）是 PNP 管

因此：（1）是 NPN 硅三极管；3.3V—b 极，2.6V—e 极，15V—c 极

（2）是 NPN 锗三极管；3.2V—b 极，3V—e 极，15—c 极

（3）是 PNP 硅三极管；6.5V—c 极，14.3V—b 极，15V—e 极

（4）是 PNP 锗三极管；8V—c 极，14.8V—b 极，15V—e 极

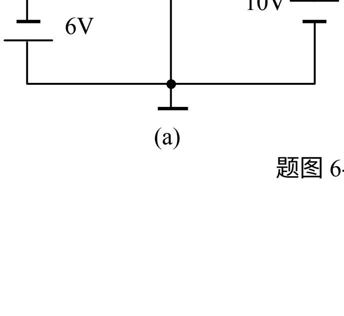
6-15 电路如题图 6-2 所示，已知三极管为硅管，U_{BE}=0.7V，β=50，I_{CBO} 忽略不计，若希望 I_C=2mA，试求（a）图的 R_e 和(b)图的 R_b 值，并将两者比较。

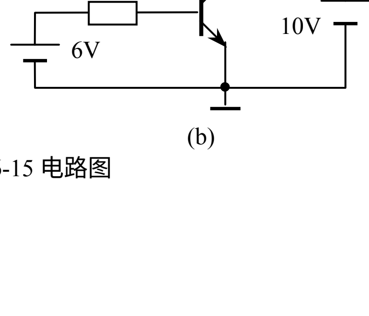
解：对于图(a)，在输入回路中（图中左边回路），R_e 两端的电压降为 6-0.7V，所以

$I_E=\dfrac{6-0.7}{R_e}=\dfrac{5.3}{R_e}$ $I_B=\dfrac{I_E}{1+\beta}$ $I_C=\beta I_B$，

故 $R_e=\dfrac{5.3}{(1+\beta)I_B}=\dfrac{5.3}{(1+\beta)\dfrac{I_C}{\beta}}=\dfrac{5.3}{51\times\dfrac{2}{50}}=\dfrac{5.3\times50}{51\times2}=2.598\text{k}\Omega$

对于图(b)，$I_B=\dfrac{6-0.7}{R_b}$ $I_B=\dfrac{I_C}{\beta}$，所以 $R_b=\dfrac{5.3\times\beta}{I_C}=\dfrac{5.3\times50}{2}=132.5\text{k}\Omega$





题图 6-6 习题 6-15 电路图

习题七

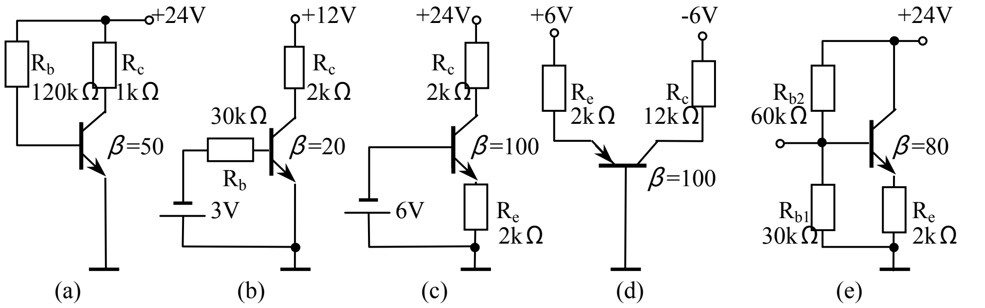
7-1　什么是静态工作点？如何设置静态工作点？若静态工作点设置不当会出现什么问题？估算静态工作点时，应根据放大电路的直流通路还是交流通路？

答：所谓静态工作点就是无输入信号时，电路所处的工作状态。这些直流电流、电压的数值在三极管特性曲线上表示为一个确定的点，设置静态工作点的目的就是要保证在被放大的交流信号加入电路时，不论是正半周还是负半周都能满足发射结正向偏置，集电结反向偏置的三极管放大状态。

可以通过改变电路参数来改变静态工作点，这就可以设置静态工作点。

若静态工作点设置的不合适，在对交流信号放大时就可能会出现饱和失真（静态工作点偏高）或截止失真（静态工作点偏低）。

估算静态工作点是根据放大电路的直流通路。



题图 7-1　习题 7-2 电路图

7-2　试求题图 7-1 各电路的静态工作点。设图中的所有三极管都是硅管。

解：图(a)静态工作点

$$I_b = \frac{24-0.7}{120\times10^3} \approx 0.194\text{mA} = 194\mu\text{A} \qquad I_c = \beta I_b = 50\times0.194 = 9.7(\text{mA})$$

$$U_{ce} = U_{cc} - I_c R_c = 24 - 9.7\times10^{-3}\times1\times10^3 = 14.3(\text{V})$$

图(b)和图(c)的发射结反向偏置，三极管截止，所以 $I_b=0$，$I_c=\beta I_b\approx0$，三极管工作在截止区，$U_{ce}\approx U_{cc}$。

图(d)的静态工作点

$$I_e = \frac{6-0.7}{2\times10^3} = 2.65\text{mA} \qquad I_b = \frac{I_e}{\beta+1} \approx 0.026\text{mA} = 26\mu\text{A} \qquad I_c \approx I_e = 2.65\text{mA}$$

$$U_{ce} \approx -[6-(-6)-I_c(R_c+R_e)] = -[12-2.65\times10^{-3}\times(12+2)\times10^3] = -(12-37.1)$$

依此 I_c 电流，在电阻上的压降高于电源电压，这是不可能的，由此可知电流 I_c 一定要小于此值，而根据三极管工作放大区有 $I_c=\beta I_b$，现在 $I_c<\beta I_b$，所以三极管工作在饱和状态。

图(e)的静态工作点

$$U_B = \frac{24}{(30+60)\times10^3}\times3\times10^3 = 8(\text{V}) \qquad I_e = \frac{8-0.7}{2\times10^3} = 3.85(\text{mA}) \qquad I_c \approx I_e$$

$$I_b = \frac{I_e}{\beta+1} = \frac{3.85}{80+1} = 0.0475(\text{mA}) \qquad U_{ce} = U_{cc} - I_e R_e = 24 - 3.85\times10^3\times2\times10^{-3} = 16.3(\text{V})$$

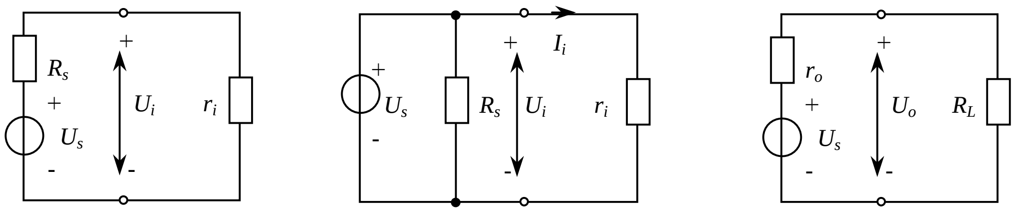
7-3　放大电路的输入电阻与输出电阻的含义是什么？为什么说放大电路的输入电阻可以用来表示放大电路对信号源电压的衰减程度？放大电路的输出电阻可以用来表示放大电路带负载的能力？

答：输入电阻就是将放大电路看为一个四端元件，从输入端看入的等效电阻。即输入端的电压与输入端的电流之比。输出电阻也是将放大电路看作一个四端元件，从输出端看的等效电阻。即戴维南等效电路的内阻。

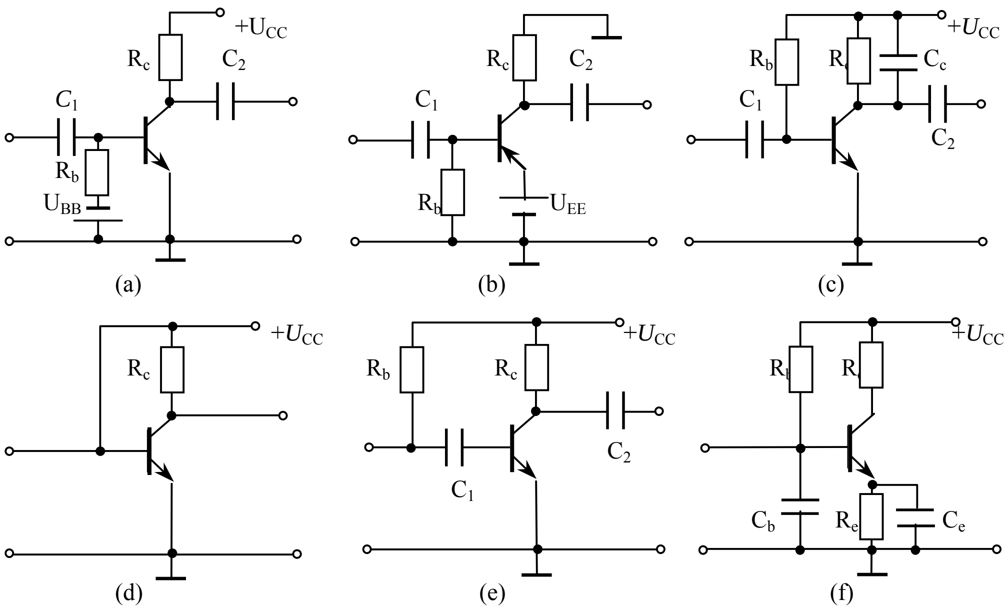
因为信号源为放大电路提供输入信号，由于信号源内阻的存在，因此当提供给放大电路的信号源是电压源串电阻的形式时，输入电阻越大，则放大电路对信号源的衰减越小；若信号源是电流源与电阻并联，则输入电阻越小，放大电路对信号源的衰减越小。

放大电路我们可以根据戴维南等效电路将其化简为一个电压源与电阻的串联形式，输出电阻可以看作一个电源的内阻，因此，输出电阻越小，放大电路的带负载能力越强。

请参看下图，可以增强对上面文字描述的理解。



7-4　放大电路组成的原则有哪些？利用这些原则分析题图 7-2 各电路能否正常放大，并说明理由。



题图 7-2　习题 7-4 电路图

解：组成放大电路的原则是：

（1）　发射结正向偏置，集电结反向偏置。

（2）　能将被放大的交流信号加在发射结，且能正常将交流放大信号输出。

(a)满足集电结反向偏置，但是不满足发射结正向偏置，所以该电路无放大作用。

(b)该电路可以正常对信号放大。因为电路满足发射结正向偏置，集电结反向偏置（注意：基极电位为 U_{EE}-U_{BE}，因为三极管是 PNP，所以集电极电位为 0，小于基极电位，故保证了集电极反向偏置）。

(c)该电路静态满足发射结正向偏置、集电结反向偏置，静态工作点设置正确，但是由于电容 C_c 在动态情况下将 R_c 短路，因此，动态放大信号无法从集电极取出，故也无放大作用（因为 R_c 与负载并联，若 R_c 短路，则负载电阻 R'_L 也为 0）。

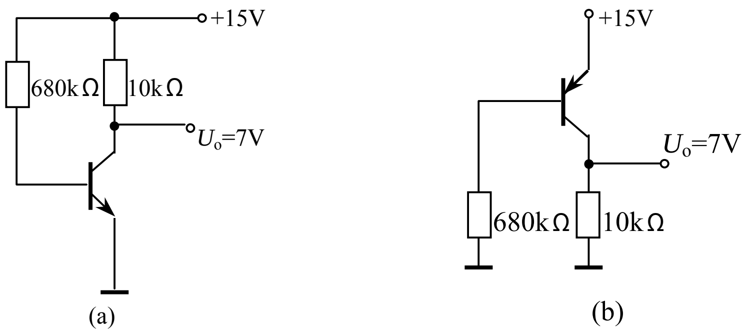
(d)尽管该电路具备了发射结正向偏置，集电结反向偏置，但由于基极没有限流电阻，

所以基极电流很大，导致放大电路工作在饱和区，所以也不能正常放大信号（导致饱和失真）。

(e)耦合电容具有隔直作用，所以 C_1 将加在发射结的正向偏置隔离，即 $I_B=0$，静态工作点在截止区，不能对信号进行正常放大（导致截止失真）。

(f)该电路的静态工作点设置既满足了发射结正向偏置，集电结反向偏置，但是由于 C_b 对于交流信号可以看作短路，所以该电路尽管静态工作点具备了放大功能，但是，交流输入信号无法加入放大电路，所以该电路也没有放大功能。

7-5　求题图 7-3 所示电路中晶体管的 β 值。晶体管的结电压为 0.7V。



题图 7-3　习题 7-5 电路

解：对于图(a)。因为 $U_o=U_{cc}-I_cR_c$　　$I_b=\dfrac{U_{cc}-0.7}{R_b}$

所以：$I_b=\dfrac{15-0.7}{680\times10^3}=21\times10^{-6}\ (\text{A})=21\,(\mu\text{A})$

$$I_c=\frac{15-7}{10\times10^3}=0.8\times10^{-3}\ (\text{A})=0.8\,(\text{mA})$$

$$\beta=\frac{I_c}{I_b}=\frac{0.8\times10^{-3}}{21\times10^{-6}}=38$$

对于图(b)。

$$I_b=\frac{15-0.7}{680\times10^3}=21\times10^{-6}\ (\text{A})$$

$$I_c=\frac{7}{10\times10^3}=0.7\times10^{-3}\ (\text{A})$$

$$\beta=\frac{I_c}{I_b}=\frac{0.7\times10^{-3}}{21\times10^{-6}}=33$$

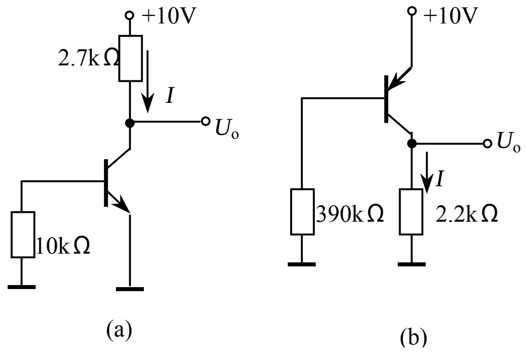
7-6　求题图 7-4 所示电路中的 I 和 U_o。其中晶体管的结压降为 0.7V、β=100。

解：对于图(a)，由于晶体管的基极接地，所以 $I_b=0$，因此 $I_c=0$

所以：

$I=I_c=0$，$U_o=10-I\times2.7\times10^3=10\,(\text{V})$

对于图(b)，



题图 7-4　习题 7-6 电路

$$I_b = \frac{10-0.7}{390\times10^3} = 23.8\times10^{-6}\ (\text{A})$$

所以：

$$I = I_c = \beta I_b = 100\times23.8\times10^{-6} = 2.38\times10^{-3}\,(\text{A})$$

$$U_o = 2.2\times10^3\times2.38\times10^{-3} = 5.24\,(\text{V})$$

7-7　在放大电路中为什么经常用电容隔离信号源和负载？对于直流信号进行放大时这两个电容还需要吗？请予以说明。

答：因为电容对于直流信号而言相当于开路，对于频率较高的交流信号，由于阻抗较小，相当于短路。在设计晶体管放大电路时，为了使晶体管工作在放大区，必须设置合适的静态工作点，利用电容对直流信号开路特性可以保证静态工作点不受信号源和负载的影响，同时由因为电容对于频率较高的电流信号近似短路，所以对交流信号的衰减很小。对于直流信号进行放大时就不能使用电容隔离，如果加入隔离电容就无法将直流信号加到放大电路上，起不到放大作用。运算放大器采用的是直接耦合方式，所以运算放大器既可以对直流信号进行放大，也可以对交流信号进行放大。

7-8　简单地描述求放大电路输出电阻分析过程。

答：在对放大电路进行分析时，放大电路的输出电阻是放大电路的一个重要的性能指标。在分析放大电路输出电阻时，可利用戴维难南等效电路，把放大电路看作一个电压源串电阻的形式，其中的电阻就是放大电路的输出电阻，因此求放大电路的输出电阻就是求戴维南等效电路内阻的方法，由于晶体管的交流分析是采用微变等效电路，晶体管可以等效为一个受控源，因此求等效电阻的方法为：

(1)求出开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc}。然后计算等效电阻 $r_o=U_{oc}/I_{sc}$；

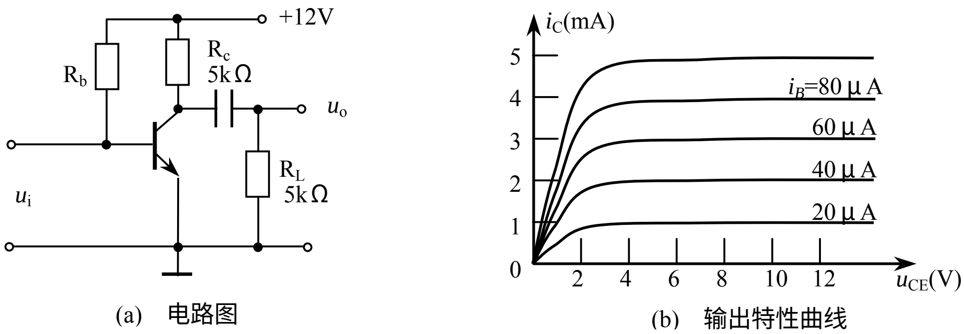
(2)将信号源短路，外加电源 U，则输出电阻为 r_o=U/I。

7-9　电路如题图 7-3(a)所示，三极管的输出特性曲线如题图 7-3(b)所示：

（1）作出直流负载线；

（2）确定 R_b 分别为 10MΩ、560kΩ和 150kΩ时的 I_{CQ}、U_{CEQ}；

（3）当 R_b=560kΩ,R_c 改为 20kΩ，Q 点将发生什么样的变化？三极管工作状态有无变化？



题图 7-5　习题 7-9 电路与特性曲线

解：(1)直流负载线方程为：$U_{ce} = 12 - 5I_c$，直流负载线见图。

(2)由图(b)可知，I_b=40μA　　I_C=2mA。所以 $\beta = \frac{I_c}{I_b} = \frac{2000}{40} = 50$

当 R_b=10MΩ

$$I_b = \frac{12-0.7}{10\times10^6} = 1.13\mu A \qquad I_{CQ} = \beta I_b = 50\times1.13\mu A = 56.5\mu A$$

$$U_{CEQ} = 12 - I_{CQ}R_c = 12 - 56.5\times10^{-6}\times5\times10^3 = 11.7(V)$$

此时直流工作点位于截止区（参见图）。

当 R_b=560kΩ

$$I_b = \frac{12-0.7}{560\times10^3} = 20(\mu A) \qquad I_{CQ} = \beta I_b = 50\times20\mu A = 1000\mu A = 1mA$$

$$U_{CEQ} = 12 - I_{CQ}R_c = 12 - 1\times10^{-3}\times5\times10^3 = 7(V)$$

此时工作点在放大区（参见图）。

当 R_b=150kΩ

$$I_b = \frac{12-0.7}{150\times10^3} = 75(\mu A) \qquad I_{CQ} = \beta I_b = 50\times75\mu A = 3.77mA$$

$$U_{CEQ} = 12 - I_{CQ}R_c = 12 - 3.77\times10^{-3}\times5\times10^3 = (12-18.85)(V)$$

因为 U_{ce} 不可能为负，因此，此种情况意味着 $I_c \neq \beta I_b$，即当 I_b 达到一定程度，I_c 已达到饱和（发射极发射的电子已全部被集电极收集，再增加 I_b 将不会引起 I_c 增加），在三极管处于饱和状态时，U_{ce}≈0，三极管工作在饱和区（参见图）。

(3) 当 R_b=560kΩ, R_c 改为 20kΩ时，

$$I_b = \frac{12-0.7}{560\times10^3} = 20(\mu A) \qquad I_{CQ} = \beta I_b = 50\times20\mu A = 1000\mu A = 1mA$$

$$U_{CEQ} = 12 - I_{CQ}R_c = 12 - 1\times10^{-3}\times20\times10^3 = 12-20$$

由此可知，静态工作点移到饱和区。直流负载线如图（粗线）所示。

7-10　电路如题图 7-4 所示，设耦合电容的容量均足够大，对交流信号可视为短路，R_b=300kΩ，R_c=2.5kΩ，U_{BE}=0.7V，β=100，r'_{bb}=300Ω。

（1）试计算该电路的放大倍数 A_u，r_i，r_o

（2）若将输入信号的幅值逐渐增大，在示波器上观察输出波形时，将首先出现哪一种失真？

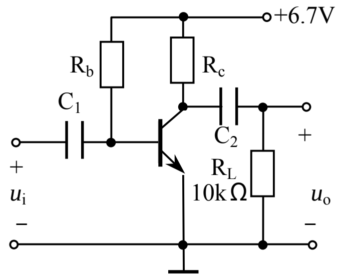
（3）若将电阻调整合适的话，在输出端用电压表测出的最大不失真电压的有效值是多少？

解：(1) 计算该电路的放大倍数 A_u，r_i，r_o

先求静态工作点

$$I_b = \frac{6.7-0.7}{300\times10^3} = 20(\mu A) \qquad I_c = \beta I_b = 2(mA)$$

$$I_e = I_b + I_c = 2.02(mA)$$



题图 7-6　习题 7-10 电路图

$$U_{ce} = U_{cc} - I_cR_c = 6.7 - 2.5\times10^3\times2\times10^{-3} = 1.7(V)$$

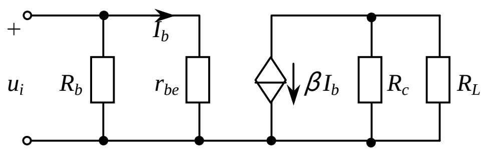
$$r_{be} = r_{bb}^{'} + (1+\beta)\frac{26mV}{I_e mA} = 300 + 101\times\frac{26}{2.02} = 1.6(k\Omega)$$

下面先画出交流通路，然后依据交流通路计算动态参数

$$A_u = -\frac{\beta R_L'}{r_{be}} = -\frac{100\times\frac{10\times 2.5}{10+2.5}}{1.6} = -125$$

$$r_i = R_b // r_{be} = \frac{300\times 1.6}{300+1.6} = 1.59(\text{k}\Omega)$$

$$r_o = R_c = 2.5\text{k}\Omega$$



上述电路的交流通路

(2)由方程及 I_c 的静态工作点知：

$$U_{ce} = U_{cc} - I_c R_c = 6.7 - 2.5 I_c = 6.7 - 2.5\times 10^3 \times 2\times 10^{-3} = 1.7(\text{V})$$

所以，若将输入信号的幅值逐渐增大，在示波器上观察输出波形时，首先会出现饱和失真(因为，静态工作点偏高，接近饱和区)。

（3）若将电阻调整合适的话，在输出端用电压表测出的最大不失真电压的有效值是应该是（大约）：

$$U = \frac{6.7/2}{\sqrt{2}} = \frac{3.35}{\sqrt{2}} = 2.37\ (\text{V})$$

即静态工作点正好设置在 U_{ce} 的中点，它输出波形的最大幅值大约如上。

7-11　题图 7-7 是一个共发射极放大电路，

(1)画出它的直流通路并求 I_{EQ}，然后求 r_{be}，设 U_{BE}=0.7V，β=100，r'_{bb}=300Ω。

(2)计算 A_u，r_i，r_o 的值。

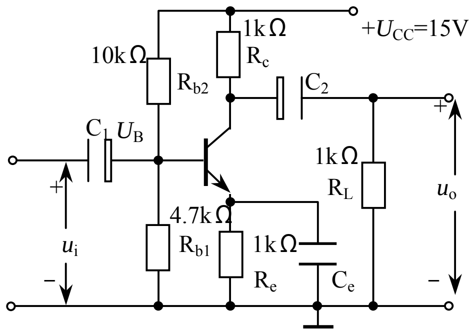


图 7-7　题 7-11 电路图

解：(1)先画出直流通道，然后根据直流通道求出 I_{EQ}，并根据 I_{EQ} 求出 r_{be}。

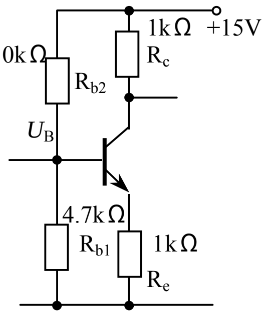
已知 U_{BE}=0.7V，β=100，r'_{bb}=300Ω

这是一个静态工作点稳定电路。

$$U_B \approx \frac{U_{cc}}{R_{b1}+R_{b2}} R_{b1} = \frac{15\times 4.7\times 10^3}{10\times 10^3 + 4.7\times 10^3} = 4.8\ (\text{V})$$

$$I_E = \frac{U_B - 0.7}{R_e} = \frac{4.8-0.7}{1\times 10^3} = 4.1\ (\text{mA})$$

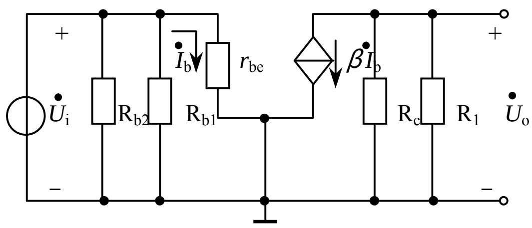
$$r_{be} = r'_{bb} + (1+\beta)\frac{26}{I_E} = 300 + 101\times\frac{26}{4.1} \approx 940\ (\Omega)$$



直流通道

(2)计算 A_u，r_i，r_o 的值。先画出微变等效电路，然后根据电路计算。

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b R_L'}{\dot{I}_b r_{be}} = \frac{-100\times\frac{1000}{2}}{940} = -53$$



习题 7-11 的微变等效电路

$$r_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be} = \frac{1}{\frac{1}{10000}+\frac{1}{4700}+\frac{1}{940}} \approx 726\,(\Omega)$$

输出电阻将输入信号短路，负载 R_L 处外加电压源 U 可知：$I_b=0$，所以：

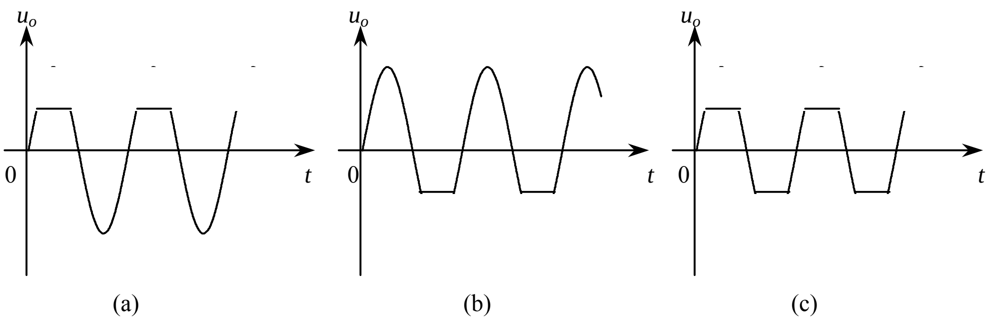
$r_o=R_c=1\,(\text{k}\Omega)$

7-12　共集电极放大电路有哪些特点？共基极放大电路有何特点？试将三种组态放大电路的性能进行比较，说明各电路的适合场合。

答：共集电极放大电路的电压放大倍数近似为 1，且输入与输出电压同相，即输出电压近似为输入电压，故，共集电极电路又称为射极跟随器，但对电流具有放大作用，更重要的是它使得输入电阻增大，输出电阻减小，这一特点对改善放大电路的输入、输出特性很重要，因此，功集电极放大电路常用作为多级放大电路的中间级、输入级或输出级。

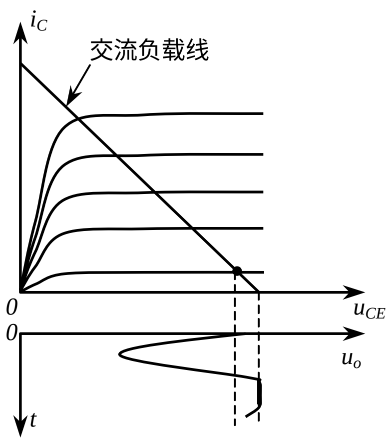
共集电极放大电路的特点与性能与在上面描述，共发射极与共基极放大电路对电压都具有放大作用，且在电路参数一致的情况下，放大倍数也相等，但共发射极电路输入与输出反相，而共基极放大电路的输入与输出则同相，另一个不同点是：共基极放大电路的输入电阻比共发射极的小，输出电阻反而大。所以，共发射极电路使用广泛，而共基极放大电路适合输入信号是恒流源或作为恒流源输出时的场合。

7-13　用示波器分别测得某 NPN 型管的共射极基本放大电路的三种不正常输出电压波形如图 7-5 所示。试分析各属于何种失真？如何调整电路参数来消除失真？



题图 7-5　习题 7-13 的电压波形

答：图(a)的输出波形说明输出电压的正半周导致失真，其原因是静态工作点偏低所导致，所引起的失真是截止失真，解决办法是将静态工作点上移，即将基极的直流电流调大即可。



图(b)与图(a)恰好相反，是由于静态工作点偏高引起的饱和失真，故解决办法是减小基极的静态电流，使静态工作点下移。

图(c)中输出电压的正、负半周都出现失真，说明输入信号过大导致输出幅度过大而引起得失真，若无法减小输入信号得情况下，只能调整放大电路的放大倍数，减小放大倍数可以是更换放大倍数较小的三极管或调整负载电阻（如 R_c）等手段

习题八

8-1　什么是反馈？如何判断反馈的极性？

答：电路加入反馈以后，反馈信号削弱原来输入信号，使放大倍数下降的反馈称为负反馈。判断负反馈多采用瞬时极性法，即将反馈网络与放大电路断开，然后假定输入有一个增量变化，再看反馈信号的变化是导致净输入增加还是减小，若使得净输入减小就是负反馈，否则是正反馈。

8-2　如何判断电压反馈和电流反馈？如何判断串联反馈和并联反馈？

答：判断电压反馈还是电流反馈是从输出端去看，若反馈与输出位于三极管的同一个极是电压反馈，否则是电流反馈。

判断串联、并联反馈是从输入端来看，若反馈信号是以电压形式串联在输入回路中，并且与输入信号叠加在一起决定净输入，则是串联反馈；并联反馈则是并接在输入回路中，且是以电流的形式与输入信号进行叠加以决定净输入的大小。

8-3　为了使反馈效果好，对信号源内阻 R_s 和负载电阻 R_L 有何要求？

答：为了使反馈得效果更好对信号源的内阻 R_s 的要求是越小越好，而对 R_L 的要求则是越大越好。

8-4　对下面的要求，如何引入反馈

（1）要求稳定静态工作点；

（2）要求输出电流基本不变，且输入电阻提高；

（3）要求电路的输入端向信号源索取的电流较小；

（4）要求降低输出电阻；

（5）要求增大输入电阻。

答：（1）要稳定静态工作点，必须引入直流负反馈；

（2）要求输出电流基本不变，且输入电阻提高，应该引入电流串联负反馈；

（3）要求电路的输入端向信号源索取的电流较小就应该使输入电阻增大，增大输入电阻的方法是引入串联负反馈；

（4）要求降低输出电阻应该引入的反馈是电压负反馈；

（5）要求增大输入电阻可以通过引入串联负反馈来实现。

8-5　电路如题图 8-1 所示。判断电路引入了什么性质的反馈（包括局部反馈和级间反馈：正、负、电流、电压、串联、并联、直流、交流）。

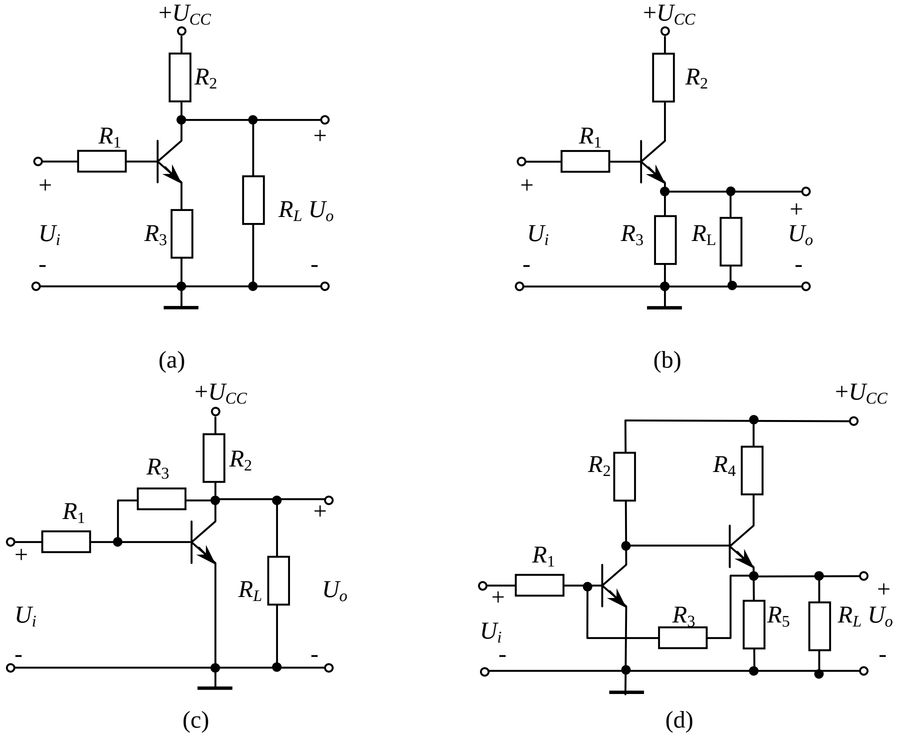
答：对于图(a)，R_3 将输出电流采样，以电压的形式反馈到输入回路中，且不仅对直流进行反馈也对交流进行反馈，并根据瞬时极性法可以知道是负反馈，故该电路是一直流/交流、电流、串联负反馈。

对于图(b)，R_3 是将输出电压反馈到输入回路中，并可判断是负反馈，由此可知，该电路是一直流/交流、电压、串联负反馈。

对于图(c)，R_3 是反馈电阻，它采样的是输出电压，以并联的方式接入输入回路中，并且也是对直流/交流都起到反馈作用，所以该电路是直流/交流、电压、并联负反馈。

对于图(d)，根据瞬时极性法知，当 u_i 有一个增加时，u_o 减少，由于 $I_b=I_i-I_f$，u_o 的减小将会导致 I_f 的增大，反馈使得净输入 I_b 减小，所以是负反馈；又因为输出端与反馈端都连接在第二级发射极，所以是电压反馈，将反馈信号并联在电路的输入端。由此可知该反馈网络是一个直流/交流、电压、并联负反馈。

特别说明一点是，R_3 是级间反馈，而 R_5 是本级内的反馈，它在级内产生一个直流/交流、电压、串联负反馈。



题图 8-1　习题 8-5 电路图

8-6　有一反馈电路开环放大倍数 $A=10^5$，反馈网络的反馈系数为 $F=0.1$，反馈组态为电压并联负反馈，试计算：

（1）引入反馈后，输入电阻和输出电阻如何变化？变化了多少？

（2）闭环放大倍数稳定性提高了多少倍？若 $\frac{dA}{A}$ 为 25%，问 $\frac{dA_f}{A_f}$ 为多少？

解：(1) 由于并联负反馈会使输入电阻减小，其反馈后的电阻值 r_{if} 与无反馈时的电阻 r_i 关系是：

$$r_{if}=\frac{r_i}{1+FA}=r_i\frac{1}{1+10^5\times 0.1}\approx r_i 10^{-4}$$

故输入电阻减小，且是无反馈时电阻值的万分之一。

电压反馈使输出电阻减小，其关系如下：

$$r_{of}=\frac{r_o}{1+FA}=r_o\frac{1}{1+10^5\times 0.1}\approx r_o 10^{-4}$$

故输出电阻减小，且是无反馈时电阻值的万分之一。

（2）闭环时的放大倍数为

$A_{rf}=\frac{A_r}{1+FA}=A_r\frac{1}{1+10^5\times 0.1}\approx A_r 10^{-4}$，放大倍数的稳定性提高了 10^4 倍。

因为 $\frac{dA_f}{A_f}=\frac{1}{1+AF}\frac{dA}{A}$，所以若 $\frac{dA}{A}$ 为 25%

则 $\frac{dA_f}{A_f}=\frac{1}{1+10^5\times 0.1}\times 0.25\approx 0.0025\%$

8-7　为什么在串联反馈中希望信号源内阻越小越好，而在并联反馈中希望信号源内阻越大越好？

答：由于在串联负反馈中，净输入信号是电压，且使得输入电阻增大，因此信号源的内阻越小，在输入端的有效输入（在放大电路的分压）就越大，而在并联负反馈中，净输入信号是电流，并且并联负反馈使得输入电阻减小，所以信号源的内阻越大，在信号源内电阻的分流越小，有效输入信号越大。

8-8　在深度负反馈条件下，闭环增益 $A_f=1/F$，A_f 的大小只取决于反馈网络的参数，而与晶体管的参数无关，因此，凡深度负反馈电路都可以随便选择晶体管，你认为这种说法对吗？为什么？

答：这种说法不对。因为 $A_f=\dfrac{A}{1+AF}$，只有在 $AF>>1$ 时才有 $A_f\approx\dfrac{A}{AF}=\dfrac{1}{F}$，一般 F 的值比较小（$F\leq1$），所以要满足 $AF>>1$，必须使开路放大倍数 A 很大，而开环放大倍数取决于三极管的放大倍数，所以深度负反馈电路的闭环放大倍数表面上看与 A 无关，但实质是以开环放大倍数很大的情况下得到的结论，因此不能说随便可以选择晶体管，而且必须保证有足够大的开环放大倍数才能使深度负反馈的公式得以成立。

习题九

9-1　集成运放电路与分立元件放大电路相比有哪些突出优点？

答：集成运放与分立元件放大电路相比有很多优点，其突出优点是：

（1）在集成电路中，制造有源器件（晶体三极管、场效应管等）比制造大电阻占用的面积小，且工艺上也不会增加麻烦，因此，集成电路中大量使用有源器件组成的有源负载，以获得大电阻，提高放大电路的放大倍数；将其组成电流源，以获得稳定的偏置电流。所以一般集成运放的放大倍数与分立元件的放大倍数相比大得多。

（2）由于集成电路中所有元件同处于一块硅片上，相互距离非常近，且在同一工艺条件下制造，因此，尽管各元件参数的绝对精度差，但它们的相对精度好，故对称性能好，特别适宜制作对称性要求高的电路，如差动电路、镜像电流源等。

（3）集成运算放大电路中，采用复合管的接法以改进单管性能。

9-2　什么是零点漂移？产生零点漂移的主要原因是什么？差动放大电路为什么能抑制零点漂移？

答：由于集成运放的级间采用直接耦合方式，各级的静态工作点相互影响，前一级的静态工作点的变化将会影响到后面各级的静态工作点，由于各级的放大作用，第一级的微弱信号变化，经多级放大后在输出端也会产生很大变化。当输入电压为零时，输出电压偏离零值的变化称为“零点漂移”。产生“零点漂移”的原因主要是因为晶体三极管的参数受温度的影响。差动电路是采用两个参数完全对称的电路，两个管子的温度特性也完全对称，所以当输入电压为零时，两个管子集电极电位是相等的，差动电路能够抑制“零点漂移”。

9-3　在 A、B 两个直接耦合放大电路中，A 放大电路的电压放大倍数为 100，当温度由 20℃变到 30℃时，输出电压漂移了 2V；B 放大电路的电压放大倍数为 1000，当温度从 20℃变到 30℃时，输出电压漂移 10V。试问哪一个放大电路的零漂小？为什么？

答：要判断哪个电路零漂大，一般是将它折合到输入端，由于两个电路温度都是由 20℃变到 30℃，所以 A 电路 2V/100=20mV，B 电路为 10V/1000=10mV，所以 B 电路零漂小。

9-4　何谓差模信号？何谓共模信号？若在差动放大电路的一个输入端上加上信号 U_{i1}=4mV，而在另一个输入端加入信号 U_{i2}，当 U_{i2} 分别为

（1）U_{i2}=4mV；

（2）U_{i2}=-4mV；

（3）U_{i2}=-6mV；

（4）U_{i2}=6mV；

时，分别求出上述四种情况的差模信号 U_{id} 和共模信号 U_{ic} 的数值。

答：所谓差模信号是指在差动放大电路两个输入端分别加入幅度相等而极性相反的信号。共模信号则是在差动放大电路的输入端接入幅度相等、极性相同的信号。

$U_{id}=U_{i1}-U_{i2}$　　　　$U_{ic}=\dfrac{U_{i1}+U_{i2}}{2}$

（1）U_{id}=4-4=0　　　　U_{ic}=(4+4)/2=4mV

（2）U_{id}=4-(-4)=8mV　　　　U_{ic}=(4+(-4)/2=0

（3）U_{id}=4-(-6)=10mV　　　　U_{ic}=(4+(-6)/2=-1mV

（4）U_{id}=4-6=-2mV　　　　U_{ic}=(4+6)/2=5mV

9-5　长尾式差动放大电路中 R_e 的作用是什么？它对共模输入信号和差模输入信号有何影响。

答：对共模电路的影响。对于双端输出电路而言，由于电路对称，其共模输出电压为零。但当单端输出时，由于 R_e 引入了很强的负反馈，将对零漂起到抑制作用。所以 R_e 接入

使得共模放大倍数下降很多，但对零漂有很强的抑制作用。

对于差模电路而言。流过 R_e 的电流大小相同、方向相反，在 R_e 上的压降为零，相当与“ 虚地 ”，所以对差模信号不产生任何影响

所以，R_e 引入的引入是抑制零漂。

9-6　恒流源式差动放大电路为什么能提高对共模信号的抑制能力？

答：由于引入 R_e 对共模信号有抑制能力，R_e 越大，抑制能力越强，用恒流源代替 R_e，由于恒流源后，它的直流电阻很小，而交流电阻很大，既无需提高 U_{EE} 的值，有能保证交流电阻很大，对共模信号有较强的抑制能力。

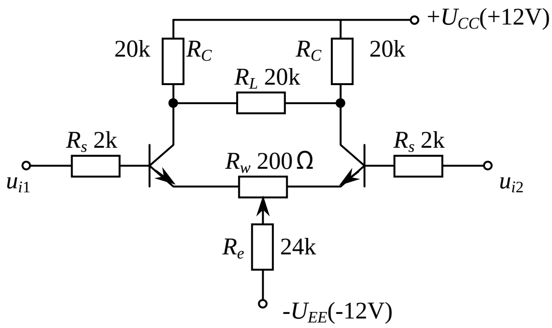
9-7　差动放大电路如题图 9-1 所示，晶体管的参数 $\beta_1=\beta_2=50$，$r'_{bb1}=r'_{bb2}=300\Omega$，其他电路参数如图中所示。试求：

（1）静态工作点；

（2）差模电压放大倍数和共模电压放大倍数；

（3）共模抑制比；

（4）差模输入电阻和输出电阻。



题图 9-1　习题 9-7 电路

解：(1) 静态工作点

静态时，输入短路，流过 R_e 的电流为 I_{E1} 和 I_{E2} 之和，且电路对称，故 $I_{E1}=I_{E2}=I_E$，

因为：$U_{EE}-U_{BE}=I_BR_s+I_E(R_w/2)+2I_ER_e$

又 $$I_B=\frac{I_E}{1+\beta}$$

所以 $$I_E=\frac{U_{EE}-U_{BE}}{2R_e+\frac{R_w}{2}+\frac{R_s}{1+\beta}}=\frac{12-0.7}{2\times 24000+50+40}\approx 0.23mA$$

（2）差模电压放大倍数和共模电压放大倍数

由于对于差模电压放大倍数 R_e 不产生任何影响，故双端输出的差模放大倍数为：

$R'_L=R_c//(R_L/2)=20/3\text{k}$

$$A_{ud}=-\frac{\beta R_L^{'}}{R_s+r_{be}}=-\frac{50\times\frac{20}{3}\times 10^3}{2000+300}\approx -145$$

双端输出的共模电压放大倍数，由于电路对称，故输出电压为 0，所以，放大倍数为零。

单端输出的共模电压放大倍数为：

$$A_{uc}=-\frac{\beta R_L^{'}}{R_s+r_{be}+(1+\beta)\frac{R_w}{2}+(1+\beta)2R_e}=-\frac{50\times\frac{20}{3}\times 10^3}{2000+300+51\times 100+51\times 48000}\approx -0.14$$

（3）共模抑制比

$$CMRR=\left|\frac{A_{ud}}{A_{uc}}\right|=\left|\frac{145}{0.14}\right|\approx 10000$$

（4）差模输入电阻和输出电阻

$$r_{id}=2\left[R_s+r_{be}+(1+\beta)\frac{R_w}{2}\right]=2\times\left[2000+300+51\times100\right]=14.8k$$

$$r_{od}=2R_c=2\times20=40k$$

9-8 集成运放的理想条件是什么？工作在线性区的理想运放有哪两个重要特点？工作在非线性区时又有什么不同？

答：集成运放的理想条件有很多，但重要的有以下几点：

（1）开环差模电压放大倍数 $A_{od}\to\infty$

（2）差模输入电阻 $r_{id}\to\infty$

（3）输出电阻 $r_o\to0$

（4）共模抑制比 CMRR→∞

（5）失调电压、失调电流及它们的温漂均为零

工作在线性区的理想运放的两个重要特点是：

（1）因为 $A_{od}\to\infty$，所以 $u_+-u_-=u_o/A_{od}\to0$，将这种现象称为输入端“虚短路”。

（2）因为输入电阻 $r_{id}\to\infty$，所以 i=0。将这种现象称为输入端“虚断路”

工作在非线性区时也有两个重要特点：

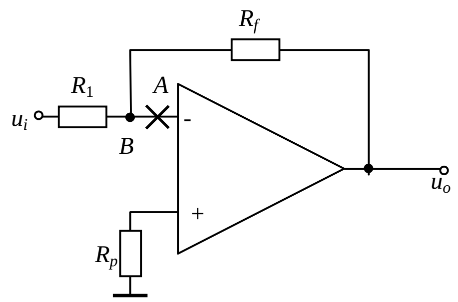
（1）输出电压只有两种可能取值

$u_+>u_-$时，$u_o=U_{o+}$

$u_+<u_-$时，$u_o=U_{o-}$

（2）输入电流为零，即 i=0

9-9 电路如题图 9-2 所示。集成运放电路输入点 B 的电压近似为零，那么将 B 点接地，输入输出关系是否仍然成立？既然运放输入电流趋于零，是否可将 A 点断开，此时放大器能工作吗？为什么？



题图 9-2 习题 9-9 电路图

答：B 点的电位近似为零，我们在分析放大电路时可以将其看为“虚地”，这是由于运放放大倍数很大的缘故，很小的输入就可以引起较大的输出。但一旦将它接地，输入就为 0，所以输出电压 u_o=0，B 点电位为 0，输出电位为 0，故流过 R_f 的电流为 0，所以输入和输出的关系就不成立。同理，尽管 A 点的电流近似为 0，但一旦断开，就相当于负端输入悬空，由于正端输入接地，所以放大器无输入信号，因此放大器在无输入信号的情况下输出电压必然也为 0，此时放大器不能正常工作。

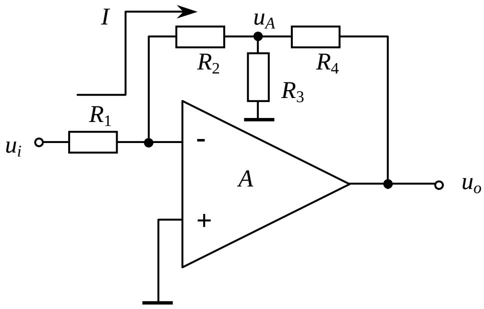
9-10 假设题图 9-3 所示电路中的集成运放是理想的，试求该电路的电压传输函数关系式。

解：要求电路的传输函数就是确定输出电压与输入电压之间的关系。由图可知：

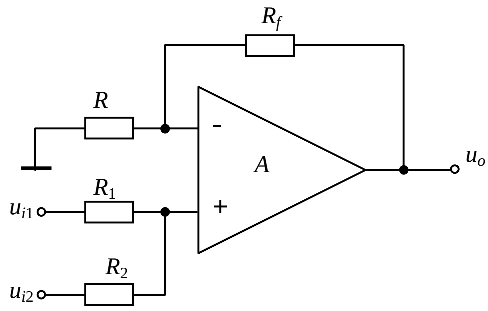
假定流过 R_1 的电流为 I，则 $u_i=IR_1$

$$u_A=-IR_2=-\frac{u_i}{R_1}R_2$$

$$u_o = -(I - \frac{u_A}{R_3})R_4 + u_A = -(\frac{u_i}{R_1} + \frac{u_i R_2}{R_1})R_4 - \frac{u_i R_2}{R_1} = -(\frac{R_4 + R_2 - R_2 R_4}{R_1})u_i$$



题图 9-3 习题 9-10 电路图



题图 9-4 习题 9-11 电路图

9-11 题图 9-4 为同相加法器，试证明：

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right)\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}u_{i1} + \frac{R_1}{R_1 + R_2}u_{i2}\right)$$

证明：$u_- = \frac{u_o}{R_f + R}R = u_+$（先计算出 u_-，又因为虚地概念，所以 $u_- = u_+$）

$$\frac{u_{i1} - u_+}{R_1} + \frac{u_{i2} - u_+}{R_2} = 0$$ （r_i=∞，所以 i=0）

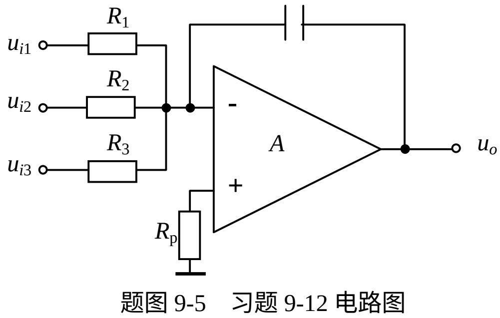
故：$\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} = (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})u_+ = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}(\frac{u_o}{R_f + R})R$

$u_o = (1 + \frac{R_f}{R})(\frac{R_2}{R_1 + R_2}u_{i1} + \frac{R_1}{R_1 + R_2}u_{i2})$ 证毕。

9-12 试求题图 9-5 所示电路的电压传输关系式。

解：$i == \frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3}$

$$u_o = -u_c = -\frac{1}{C}\int i dt = -\frac{1}{C}\int\left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3}\right)dt$$



题图 9-5 习题 9-12 电路图

习题十

10-1 在数字系统中，为什么要采用二进制？如何用二—十进制表示十进制数？

答：在数字系统中采用二进制数有许多优点，其主要优点有：①对元件参数的要求较低；②不仅具备算术运算功能，而且具备逻辑运算功能；③抗干扰能力强、精度高；④便于长期保存信息；⑤安全、可靠；⑥通用性强。

通过二进制的编码来表示十进制数，这种编码称为 BCD 码，BCD 的编码方式有很多种，最容易理解、最直观的编码是“ 8421 ”码，这是一种有权码，常用的 BCD 有权码还有“ 2421 码等，除此之外，在 BCD 码中还有无权码。如格雷码、余 3 码等。

10-2 什么叫编码？用二进制编码与二进制数有何区别？

答：由于数字系统中用 0、1 两个数表示所有的信息，对于数字信息可以直接用二进制数表示，但是对于一些图形、符号、文字等信息，要用 0、1 来表示，就必须按照 0、1 的一定规则组合来代表。这种按照一定规则组合的代码，并赋予一定含义就称为编码。

二进制编码赋予了不同的含义（或代表图形、符号、文字、颜色等），而二进制数就是一个具体的数值，它代表了数值的大小和正负。

10-3 将下列二进制数转换成十进制数：

① 11000101 ② 10100110.1001 ③ 111111 ④110011001100

解：①$(11000101)_B=(2^7+2^6+2^2+1)_D=(128+64+4+1)_D=(197)_D$

②$(10100110.1001)_B=(2^7+2^5+2^2+2^1+2^{-1}+2^{-4})_D=(166.5625)_D$

③$(111111)_B=(2^6-1)_D=(63)_D$

④$(110011001100)_B=(2^{11}+2^{10}+2^7+2^6+2^3+2^2)_D=(3276)_D$

10-4 将下列十进制数转换成二进制数、八进制数、十六进制数：

① 57 ② 18.34 ③ 46.75 ④0.904

解：①$(57)_D=(111001)_B=(71)_O=(39)_H$

②$(18.34)_D\approx(10010.0101)_B=(22.24)_O=(12.5)_H$

③$(46.75)_D=(101110.11)_B=(56.6)_O=(46.C)_H$

④$(0.904)_D\approx(0.11100111)_B=(0.716)_O=(E7)_H$

10-5 把下列十六进制数转化成二进制数、八进制数、十进制数：

① $(78.8)_H$ ② $(4A8.E7)_H$ ③ $(3AB6)_H$ ④ $(0.42)_H$

解：①$(78.8)_H=(1111000.1)_B=(170.4)_O=(120.5)_D$

②$(4A8.E7)_H=(10010101000.11100111)_B=(2250.716)_O\approx(1192.902)_D$

③$(3AB6)_H=(11101010110110)_B=(35266)_O=(15030)_D$

④$(0.42)_H=(0.01000010)_B=(0.204)_O\approx(0.2578)_D$

10-6 什么是模 2 加？它与逻辑代数加法有何区别？

答：模 2 加就是一位二进制加法的运算规则（不考虑进位）、而逻辑代数的加是逻辑关系的一种表述。。它们的规则分别如下：

模 2 加：$0\oplus0=0$ $1\oplus0=1$ $0\oplus1=1$ $1\oplus1=0$

逻辑加：$0+0=0$ $1+0=1$ $0+1=1$ $1+1=1$

10-7 将下列十进制数用 8421BCD 码表示。

① $(37.86)_D$ ② $(605.01)_D$

解：①$(37.86)_D=(0011\ 0111.\ 1000\ 0110)_{8421BCD}$

②$(605.01)_D=(0110\ 0000\ 0101.\ 0000\ 0001)_{8421BCD}$

10-8 列出下述问题的真值表，并写出逻辑表达式

①有 A、B、C 三个输入信号，如果三个输入信号均为 0 或其中一个为 1 时，输出信号 Y=1，其余情况下，输出 Y=0；

②有 A、B、C 三个输入信号，当三个输入信号出现奇数个 1 时，输出为 1，其余情况下输出为 0（这是奇校验的校验位生成器）；

③有三个温度探测器，当某个温度探测器的温度超过 60°C时，输出信号为 1，否则输出信号为 0。当有两个或两个以上的温度探测器的输出信号为 1 时，总控制器输出信号为 1，自动控制调控设备使温度降低到 60°C以下。试写出总控制器的真值表和逻辑表达式。

解：①其真值表见表一，逻辑表达式为：

$$Y=\overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C}+\overline{A}\,\overline{B}C+\overline{A}B\overline{C}+A\overline{B}\,\overline{C}$$

表一

A	B	C	Y
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	0

表二

A	B	C	Y
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

表三

A	B	C	Y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

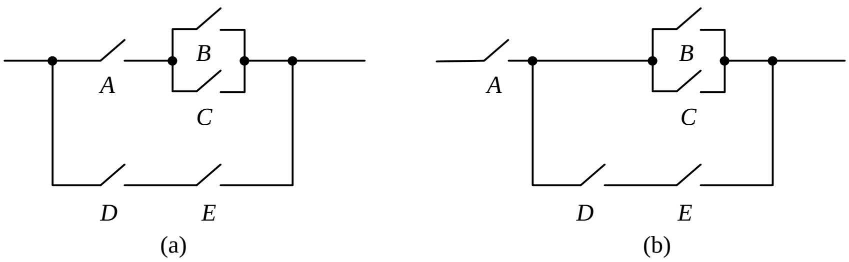
②其真值表见表二，逻辑表达式为：

$$Y=\overline{A}\,\overline{B}C+\overline{A}B\overline{C}+A\overline{B}\,\overline{C}+ABC$$

③设 A、B、C 分别代替三个温度探测器，当探测器的温度过高（>60^0C）时，探测器输出信号为高电平（=1），否则输出信号为低电平（=0）；一旦总控制器检测到两个或两个以上的探测器都输出高电平时，意味着设备运行温度过高，因此总控制设备输出高电平信号，以便启动制冷设备降温。其真值表见表三，逻辑表达式为：

$$Y=\overline{A}BC+A\overline{B}C+AB\overline{C}+ABC$$

10-9　在题图 10-1 所示的开关电路中，写出描述电路接通与各开关之间的关系的逻辑表达式。



题图 10-1　习题 10-9 图

解：设 F 为开关电路的输出，当 F=1 时表示开关接通，否则是没有接通，则

对于图(a)　$F=A(B+C)+DE=AB+AC+DE$

对于图(b)　$F=A(B+C+DE)=AB+AC+ADE$

10-10　根据下列文字叙述建立真值表。

（1）F（A，B，C）为三变量的逻辑函数，当变量组合值中出现偶数个“ 1 ”时，F=1，否则 F=0。

（2）在一个三输入电路中，当三个输入端的信号完全一致时，输出为“1”，在其他输入情况下，输出为“0”。

表一

A	B	C	F
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

表二

A	B	C	F
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

解：依题意，（1）、（2）的真值表分别如下表一和表二：

10-11　证明下列等式

① $AB+\bar{A}C+\bar{B}C=AB+C$

② $BC+D+\bar{D}(\bar{B}+\bar{C})(AD+B)=B+D$

③ $ABC+\bar{A}\,\bar{B}\,\bar{C}=\overline{A\bar{B}+B\bar{C}+C\bar{A}}$

④ $A\bar{B}+B\bar{C}+C\bar{A}=\bar{A}B+\bar{B}C+\bar{C}A$

⑤ $\bar{M}CD+M\bar{C}\bar{D}=(M\oplus C)(M\oplus D)$

证：此类证明题，一般是从项数较多的一边逐步化简多项数较少的一边

①等式左边$=AB+(\bar{A}+\bar{B})C=AB+\overline{AB}C\overset{\text{分配律}}{=}(AB+\overline{AB})(AB+C)=AB+C$=等式右边

或：等式左边$=AB+\bar{A}C+BC+\bar{B}C=AB+(\bar{A}+B+\bar{B})C=AB+C$=等式右边

②左边$=BC+D+\overline{BC+D}(AD+B)=BC+D+AD+B=B(C+1)+D(A+1)=B+D$

③等式右边$=(\bar{A}+B)(\bar{B}+C)(\bar{C}+A)=ABC+\bar{A}\bar{B}\bar{C}$

④等式左边$=A\bar{B}(C+\bar{C})+B\bar{C}(A+\bar{A})+C\bar{A}(B+\bar{B})$

$=A\bar{B}C+A\bar{B}\bar{C}+AB\bar{C}+\bar{A}B\bar{C}+\bar{A}BC+\bar{A}\bar{B}C$

$=\bar{A}B(C+\bar{C})+\bar{B}C(A+\bar{A})+\bar{C}A(B+\bar{B})=\bar{A}B+\bar{B}C+\bar{C}A$=等式右边

⑤等式右边$=(\bar{M}C+\bar{C}M)(\bar{M}D+\bar{D}M)=\bar{M}CD+M\bar{C}\bar{D}$=等式左边

10-12　用代数法化简下列各式

① $F=\overline{\bar{A}BC}(B+\bar{C})$

② $F=A+ABC+\overline{ABC}+CB+C\bar{B}$

③ $F=\overline{\overline{(\bar{A}+B)}+\overline{(A+\bar{B})}+\overline{(\bar{A}B)}\,\overline{(A\bar{B})}}$

④ $F=\overline{\overline{A\bar{B}+ABC}+A(B+A\bar{B})}$

解：① $F=(A+\bar{B}+\bar{C})(B+\bar{C})=AB+A\bar{C}+\bar{B}\bar{C}+B\bar{C}=AB+A\bar{C}+\bar{C}=AB+\bar{C}$

② $F = A + (ABC + \overline{ABC}) + C(B + \bar{B}) = A + 1 + C = 1$

③ $F = \overline{A\bar{B} + \bar{A}B + (A + \bar{B})(\bar{A} + B)} = \overline{A\bar{B} + \bar{A}B + AB + \bar{A}\bar{B}} = \overline{A(B + \bar{B}) + \bar{A}(B + \bar{B})} = \bar{1} = 0$

④ $$\begin{aligned} F &= \overline{(\bar{A} + B)(\bar{A} + \bar{B} + \bar{C}) + A(B + \bar{B})} = \overline{\bar{A} + \bar{A}\bar{B} + \bar{A}\bar{C} + \bar{A}B + B\bar{C} + A} \\ &= \overline{A + \bar{A} + \bar{A}(B + \bar{B}) + (\bar{A} + B)\bar{C}} = \overline{1 + \bar{A} + (\bar{A} + B)\bar{C}} = \bar{1} = 0 \end{aligned}$$

10-13　用卡诺图法化简下列各式

① $F = \bar{A}\bar{B}C + \bar{A}BC + AB\bar{C} + ABC$

② $F = A(\bar{A}C + BD) + B(C + DE) + B\bar{C}$

③ $F = (\bar{A} + \bar{B} + \bar{C})(B + \bar{B}C + \bar{C})(\bar{D} + DE + \bar{E})$

④ $F = (A \oplus B)C + ABC + \bar{A}BC$

⑤ $F(a,b,c,d) = \sum m(4,5,6,8,9,10,13,14,15)$

解：其卡诺图如下，化简后的函数为：

① $F = \bar{A}C + AB$

② $F = B$

③ $F = \overline{ABC}$

④ $F = AC + BC$

⑤ $F = \bar{A}B\bar{C} + ABD + A\bar{B}\bar{C} + \bar{B}C\bar{D} + AC\bar{D}$

A \ BC	00	01	11	10
0		1	1	
1			1	1

①

AB \ CDE	000	001	011	010	110	111	101	100
00								
01	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1
10								

②

A \ BC	00	01	11	10
0			1	
1		1	1	

④

AB \ CDE	000	001	011	010	110	111	101	100
00								
01								
11					0	0	0	0
10								

③

AB \ CD	00	01	11	10
00				
01	1	1		1
11		1	1	1
10	1	1		1

⑤

习题十一

11-1　二极管为什么能起开关作用？二极管的瞬态开关特性各用哪些参数描述？

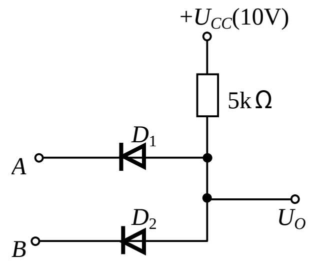
答：因为二极管具有单向导电性，当二极管加正向电压时，二极管导通，反之二极管截止，二极管的这一特性可以起到开关作用；常用来描述二极管的瞬态开关特性的参数有：存储时间 t_s(*s—store*)、下降时间 t_f(*f—fall*)以及上升时间 t_r(*r—rise*)。一般将存储时间和下降时间所用时间之和称为反向恢复时间 t_{rr}(*rr—reverse restore*)，由于上升时间比反向恢复时间短的多，一般在考虑二极管瞬态开关特性时，重点关心反向恢复时间对开关特性的影响。

11-2　二极管门电路如题图 11-1 所示。已知二极管 D_1、D_2 导通压降为 0.7V，试回答下列问题：

（1）A 接 10V，B 接 0.3V。输出 U_O 为多少伏？

（2）A、B 都接 10V。输出 U_O 为多少伏？

（3）A 接 0.3V，B 悬空。测 U_O 为多少伏？



题图 11-1　习题 11-2 电路图

答：设二极管管压降 U_D=0.7V

（1）A 接 10V，B 接 0.3V。二极管 D_2 导通，输出 U_O 为 U_B+U_D=0.3+0.7=1V

（2）A、B 都接 10V。两个二极管均截止，输出 U_O 为 10V

（3）A 接 0.3V，B 悬空。D_1 导通，D_2 截止，输出 U_O 为 1V

11-3　晶体三极管工作在饱和区、放大区、截止区各有什么特点？

答：晶体三极管工作在饱和区、放大区、截止区的特点分别是：$I_B>>\beta I_C$、$I_B=\beta I_C$、$I_B\neq 0$，$I_C\approx 0$。对于数字电路，由于在大信号的作用下，要求晶体三极管是工作在截止和饱和区，而对于模拟放大电路，三极管则工作在放大区，若工作在饱和区和截止区将会产生放大波形的失真。

11-4　高速 TTL“与非”门电路如何改进的？简述浅饱和电路工作原理。

答：为了提高 TTL“与非”门的速度，有很多方法，最常用的方法是浅饱和的 TTL 电路和在电路中加入肖特基二极管的肖特基 TTL 电路。浅饱和电路的工作原理是：由于 TTL“与非”门电路的输出管 T_5 一般设计工作在深饱和状态，则在输出由低电平转换为高电平时，T_5 从深饱和状态转换到截止状态所需的存储时间就很长，限制了 TTL 电路的工作速度，所以浅饱和电路的目的就是在“与非”门由截止转为饱和时，有比较大的电流，使 T_5 迅速由截止转为饱和，一旦达到饱和以后，T_6 组成的电路就会有一个分流，降低 T_5 的饱和程度，当需要 T_5 由饱和转为截止时，由于 T_5 的饱和程度较浅，就很容易从饱和转为截止，从而提高了 TTL 电路的速度。

11-5　TTL“与非”门如有多余输入端能不能将它接地？为什么？TTL“或非”门如有多余端能不能将它接 U_{CC} 或悬空？为什么？

答：对于 TTL“与非”门电路，一旦将多余端接地，多发射极的三极管就会处于饱和导通状态，从而使得输出始终是高电平，至于其他输入端的状态不会对输出产生任何影响，从而破坏了“与非”门的逻辑功能。对于“与非”门的多余输入端一般是接高电平或者将多余输入端一同接一个输入信号；同理，TTL“或非”门的多余端不能接电源或悬空（由于对于悬空的二极管一般不会导通，也类似接了一个高电平，习题 11-2 就是说明次问题），否则

将破坏“或非”门的逻辑功能。对于“或非”门的多余输入端一般接地或者将多余输入端同接一个输入信号。

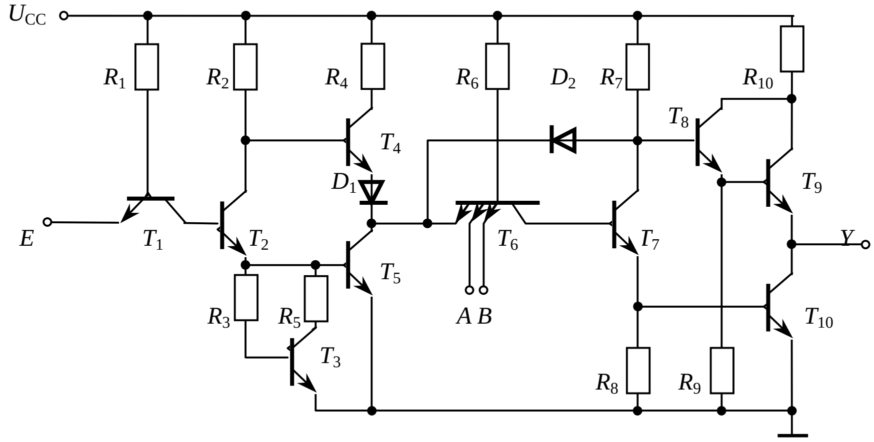
11-6　TTL 门电路的传输特性曲线上可反映出它哪些主要参数？

TTL 门电路的特性曲线反映的是随输入电平的改变输出电平的变化关系规律，我们可以从传输特性曲线上很容易的确定输入电平在什么范围内，输出确保为高电平，又在什么范围内输出确保为低电平，从而可以确定门电路的两个重要参数关门电平（确保输出高电平时的输入电平）U_{off}和开门电平（确保输出低电平时的输入电平）U_{on}。以及输入低电平时的允许范围—低电平噪声容限 U_{NL} 和输入高电平时的噪声容限 U_{NH}。

11-7　OC 门、三态门有什么主要特点？它们各自有什么重要应用？

答：OC 门是集电极开路的 TTL 门。它主要是为了避免用普通的门电路实现“线与”功能时，若一个门输出高电平，另一个门输出为低电平，则将会在门电路的输出端的三极管中产生一个很大的电流，从而导致门电路损坏的情况；三态门则是有三种输出状态，除普通门电路所有的高电平输出和低电平输出的情况外，还有一种高阻状态，目的是在门电路不工作时，将门电路置于高阻状态，以免门电路对逻辑电路中其它门电路的影响。特别是在与计算机总线相连的门电路，在该门电路不与计算机交换信息时，尽量与总线断开，以免造成总线负载过重，从而导致逻辑错误。

11-8　题图 11-2 所示为一个三态逻辑 TTL 电路，这个电路除了输出高电平、低电平信号外，还有第三个状态—禁止态（高阻抗）。试分析说明该电路具有什么逻辑功能。

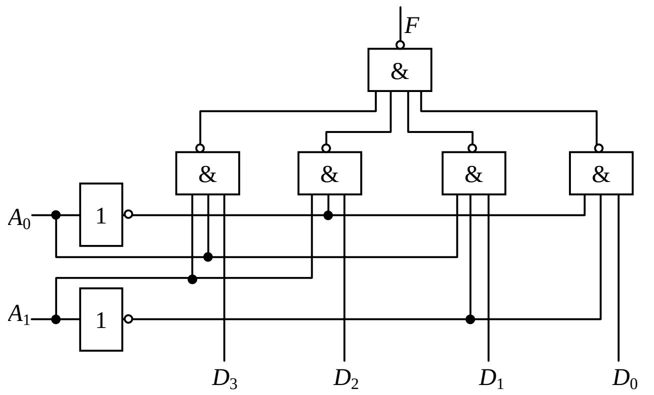


题图 11-2　习题 11-8 电路图

答：在该电路中有一个使能端 E，当 E=1 时，T_1 截止→T_2、T_5 饱和导通，多发射极三极管的一个输入端为低电平→T_6 饱和导通、二极管 D_2 导通→T_7、T_8 的基极都为低电平而截止，输出端 Y 是高阻状态；当使能端 E=0 时→T_1 饱和导通→T_2 截止→T_4、T_5 截止→多发射极三极管的一端悬空，另两个输入端决定了门电路的输出（二输入的与非门）。

习题十二

12-1　写出题图 12-1 所示逻辑电路输出 F 的逻辑表达式，并说明其逻辑功能。



题图 12-1　习题 12-1 电路图

解：由电路可直接写出输出的表达式为：

$$F=\overline{\overline{\bar{A}_1\bar{A}_0D_0}\bullet\overline{\bar{A}_1A_0D_1}\bullet\overline{A_1\bar{A}_0D_2}\bullet\overline{A_1A_0D_3}}=\bar{A}_1\bar{A}_0D_0+\bar{A}_1A_0D_1+A_1\bar{A}_0D_2+A_1A_0D_3$$

由逻辑表达式可以看出：

当 A_1A_0=00　　F=D_0

　A_1A_0=01　　F=D_1

　A_1A_0=10　　F=D_2

　A_1A_0=11　　F=D_3

这个电路的逻辑功能是，给定地址 A_1A_0 以后，将该地址对应的数据传输到输出端 F。

12-2　组合逻辑电路如题图 12-2 所示。

（1）写出函数 F 的表达式；

（2）将函数 F 化为最简“与或”式，并用“与非”门实现电路；

（3）若改用“或非”门实现，试写出相应的表达式。

解：（1）逻辑表达式为：$F=\overline{A\bar{B}\bar{C}D+\overline{\overline{\bar{B}\bar{D}}\,\overline{\bar{A}C}}}$

（2）化简逻辑式

$$\begin{aligned}F&=\overline{A\bar{B}\bar{C}D}\bullet(\bar{B}\bar{D}+\bar{A}C)=(\bar{A}+B+C+\bar{D})(\bar{B}\bar{D}+\bar{A}C)\\&=\bar{A}\bar{B}\bar{D}+\bar{A}C+\bar{A}BC+\bar{B}C\bar{D}+\bar{A}C+\bar{B}\bar{D}+\bar{A}C\bar{D}\\&=\bar{B}\bar{D}(\bar{A}+C+1)+\bar{A}C(1+B+\bar{D})\\&=\bar{B}\bar{D}+\bar{A}C\end{aligned}$$

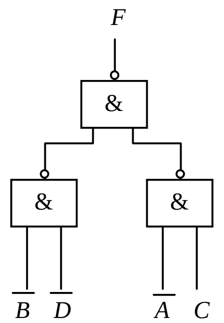
这是最简“与或”表达式，用“与非”门实现电路见题解图 12-2-1，其表达式为：

$$F=\overline{\overline{\bar{B}\bar{D}}\bullet\overline{\bar{A}C}}$$

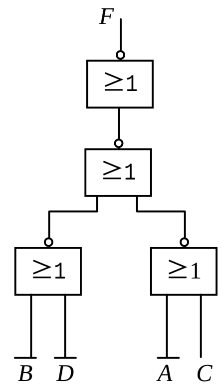
（3）若用“或非”门实现电路见题解图 12-2-2，其表达式为：

$$F=\overline{B+D}+\overline{A+\bar{C}}=\overline{\overline{\overline{B+D}+\overline{A+\bar{C}}}}$$

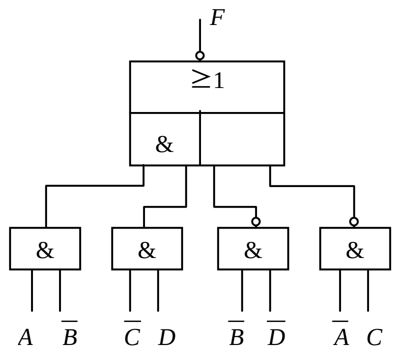
由图可见，对于同一逻辑函数采用不同的门电路实现，所使用的门电路的个数不同，组合电路的速度也有差异，因此，在设计组合逻辑电路时，应根据具体不同情况，选用不同的门电路可使电路的复杂程度不同。



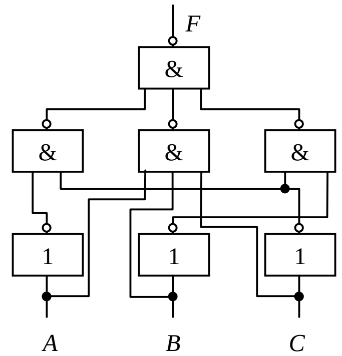
题解图 12-2-1



题解图 12-2-2



题图 12-2　习题 12-2 电路图



题图 12-3　习题 12-3 电路图

12-3　组合逻辑电路如题图 12-3 所示。分析电路功能，写出函数 F 的逻辑表达式。将分析的结果，列成真值表的形式。

A	B	C	F
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

解：对于图 12-3 电路可以写出逻辑函数表达式为：

$$F=\overline{\overline{\overline{A}\,\overline{C}}\bullet\overline{ABC}\bullet\overline{\overline{B}\,\overline{C}}}$$
$$=\overline{A}\,\overline{C}+ABC+\overline{B}\,\overline{C}$$
$$=\overline{AB}\,\overline{C}+ABC$$
$$=(AB)\odot C$$

真值表如右图所示，由真值表可以看出，该电路是实现 AB 与 C 的“同或”，及当 AB 与 C 的值相同时，电路输出为“1”，否则输出为“0”。

12-4　在有原变量输入、又有反变量输入的条件下，用“与非”门设计实现下列逻辑函数的组合逻辑电路：

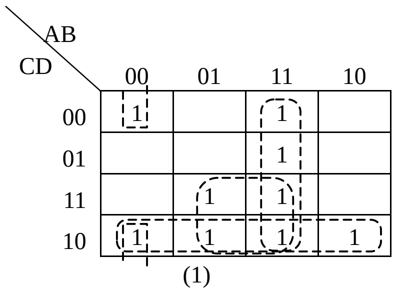
（1）$F(A,B,C,D)=\Sigma m(0,2,6,7,10,12,13,14,15)$

（2）$F(A,B,C,D)=\Sigma m(0,1,3,4,6,7,10,12,13,14,15)$

（3）$F(A,B,C,D)=\Sigma m(0,2,3,4,5,6,7,12,14,15)$

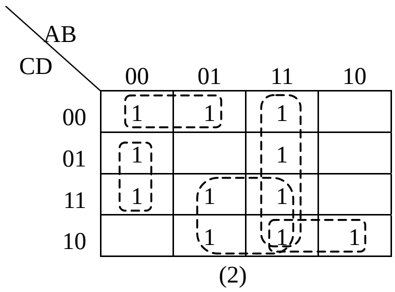
（4）$$\begin{cases}F_1(A,B,C,D)=\sum m(2,4,5,6,7,10,13,14,15)\\ F_2(A,B,C,D)=\sum m(2,5,8,9,10,11,12,13,14,15)\end{cases}$$

解：将以上的逻辑函数填入卡诺图，用卡诺图法将将逻辑函数化简为最简的“与或”表达式，再根据最简的“与或”表达式用“与非”门实现该逻辑函数。



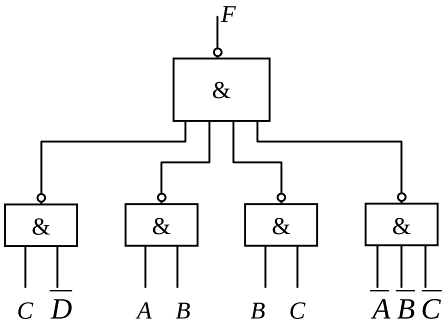
(1)

$$F = C\bar{D} + AB + BC + \bar{A}\bar{B}\bar{D}$$

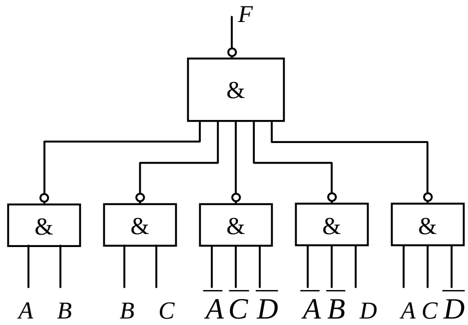


(2)

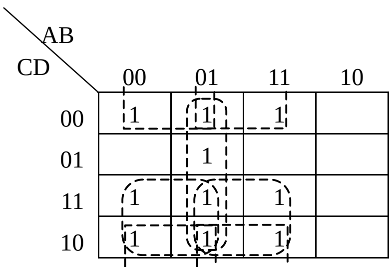
$$F = AB + BC + \bar{A}\bar{C}\bar{D} + \bar{A}\bar{B}D + AC\bar{D}$$



(1)

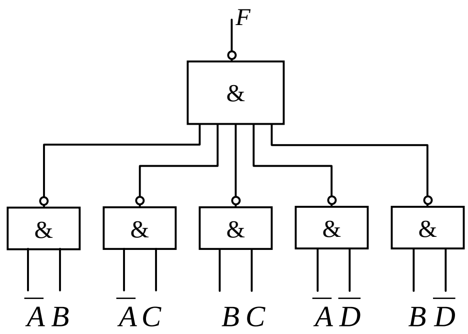


(2)



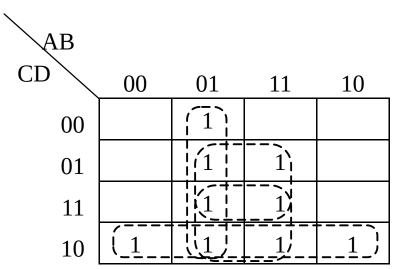
(3)

$$F = \bar{A}B + \bar{A}C + BC + \bar{A}\bar{D} + B\bar{D}$$



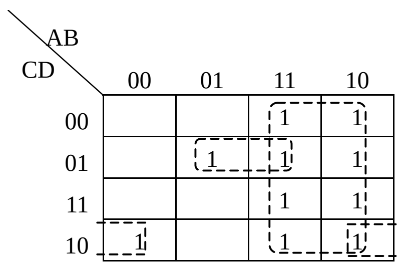
(3)

由于（4）是双输出函数，为了使得两个输出函数尽可能共享部分项，F_1 我们不用最简式，而是尽可能和 F_2 相同的项化简，故将（4）-1 的卡诺图重新化简，如图（4）-1 附所示：



(4)-1

$$F_1 = C\bar{D} + \bar{A}B + BD + BC$$



(4)-2

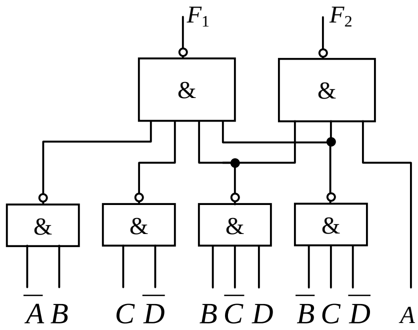
$$F_2 = A + B\bar{C}D + \bar{B}C\bar{D}$$

经过重新对卡诺图化简，这样实现的电路如图（4）所示，该电路要比不经过重新化简的电路而言来说，要简单的多。对于多输出电路的化简，一定要考虑如何共享门电路，使门电路的个数最少是组合逻辑电路设计中的一个关键问题，化简时要特别注意。

CD \ AB	00	01	11	10
00		1		
01		1	1	
11		1	1	
10	1	1	1	1

(4)-1 附

$$F_1 = \bar{A}B + C\bar{D} + B\bar{C}D + \bar{B}C\bar{D}$$



(4)

12-5　在有原变量输入、又有反变量输入的条件下，用“或非”门设计实现下列逻辑函数的组合逻辑电路：

（1）F（A，B，C）$=\Sigma m(0,1,2,4,5)$

（2）F（A，B，C，D）$=\Sigma m(0,1,2,4,6,10,14,15)$

解：真值表和化简函数如下图所示。

C \ AB	00	01	11	10
0			0	
1		0	0	

(1)

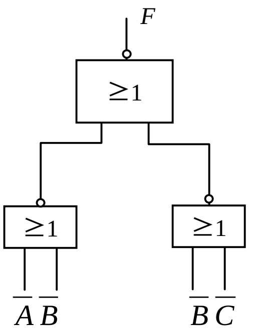
$$F = \overline{AB+BC} = \left(\bar{A}+\bar{B}\right)\left(\bar{B}+\bar{C}\right) = \overline{\overline{\left(\bar{A}+\bar{B}\right)}+\overline{\left(\bar{B}+\bar{C}\right)}}$$

CD \ AB	00	01	11	10
00			0	0
01		0	0	0
11	0	0		0
10				

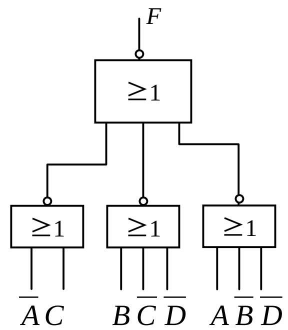
(2)

$$F = \left(\bar{A}+C\right)\left(B+\bar{C}+\bar{D}\right)\left(A+\bar{B}+\bar{D}\right) = \overline{\overline{\left(\bar{A}+C\right)}+\overline{\left(B+\bar{C}+\bar{D}\right)}+\overline{\left(A+\bar{B}+\bar{D}\right)}}$$

根据以上化简的函数用“或非”门实现，其电路如下：



(1)



(2)

12-6　在只有原变量输入、没有反变量输入的条件下，用“与非”门设计实现下列逻辑函数的组合逻辑电路：

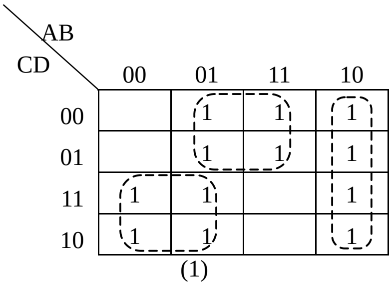
（1）$F = A\bar{B} + A\bar{C}D + \bar{A}C + B\bar{C}$

（2）F（A，B，C，D）$=\Sigma m(1,5,6,7,12,13,14)$

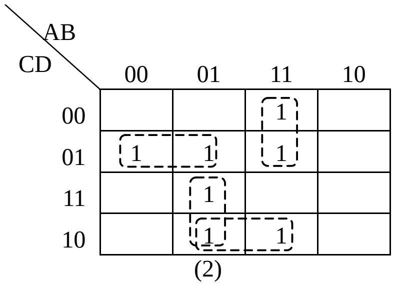
解：根据题意要求，输入变量只有原变量而没有反变量，且用“与非”门来实现。故对原逻辑函数化简。

（1）　将逻辑函数填入卡诺图，对卡诺图进行化简

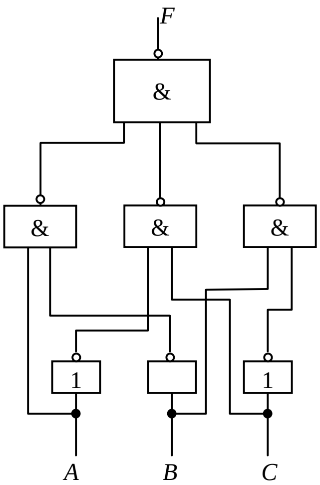
（2）　将逻辑函数的最小项填入卡诺图，并对卡诺图进行化简



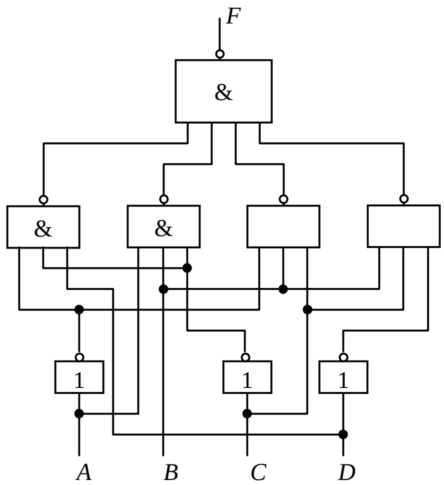
$F = A\bar{B} + \bar{A}C + B\bar{C}$



$F = \bar{A}\bar{C}D + AB\bar{C} + \bar{A}BC + BC\bar{D}$



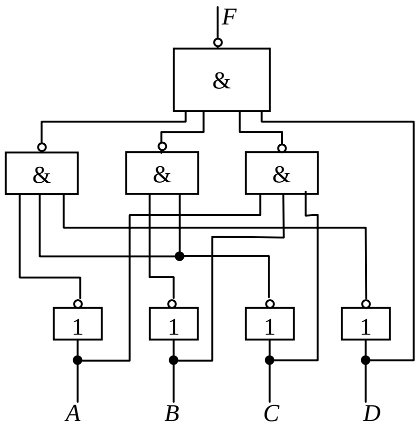
(1)



(2)

12-7　试设计一个 8421BCD 码校验电路。要求当输入量 $DCBA \leq 2$，或 ≥ 7 时，电路输出 F 为高电平，否则为低电平。用“与非”门设计实现该电路，写出 F 表达式。

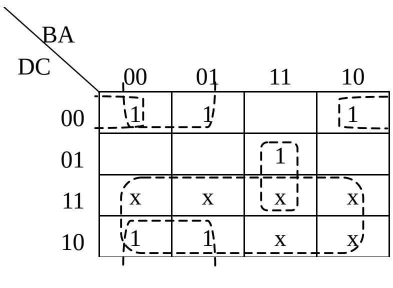
解：根据题意可得真值表如图所示。根据真值表的值，将其填入卡诺图，然后对卡诺图进行化简，得出逻辑函数，最后根据逻辑函数画出逻辑电路图。填卡诺图时注意，由于该电路存在无关项，把无关项也填进去，有利于函数的化简，可以使电路大大简化。



功能真值表

D	*C*	*B*	*A*	*F*
0	0	0	0	1
0	0	0	1	1
0	0	1	0	1
0	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	1
1	0	0	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	无关项
1	0	1	1	
1	1	0	0	
1	1	0	1	
1	1	1	0	
1	1	1	1	

$F = D + \bar{B}\bar{C} + \bar{A}\bar{C}\bar{D} + ABC$



12-8 试用一个两位二进制数比较电路，实现两个两位二进制数 A_1A_0，B_1B_0 的比较逻辑功能。当 $A>B$ 时，$F_1=1$；$A=B$ 时，$F_2=1$；$A<B$ 时，$F_3=1$。

解：其真值表见下表，根据真值表画出其卡诺图如右下图所示，每个卡诺图得到一个逻辑函数，对逻辑函数整理可的设计电路图。

真值表一

A_1	A_0	B_1	B_0	F_1	F_2	F_3
0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	1	0	0	1
0	0	1	0	0	0	1
0	0	1	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0	0
0	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	0	0	1
0	1	1	1	0	0	1
1	0	0	0	1	0	0
1	0	0	1	1	0	0
1	0	1	0	0	1	0
1	0	1	1	0	0	1
1	1	0	0	1	0	0
1	1	0	1	1	0	0
1	1	1	0	1	0	0
1	1	1	1	0	1	0

B_1B_0 \ A_1A_0	00	01	11	10
00	0	1	1	1
01	0	0	1	1
11	0	0	0	0
10	0	0	1	0

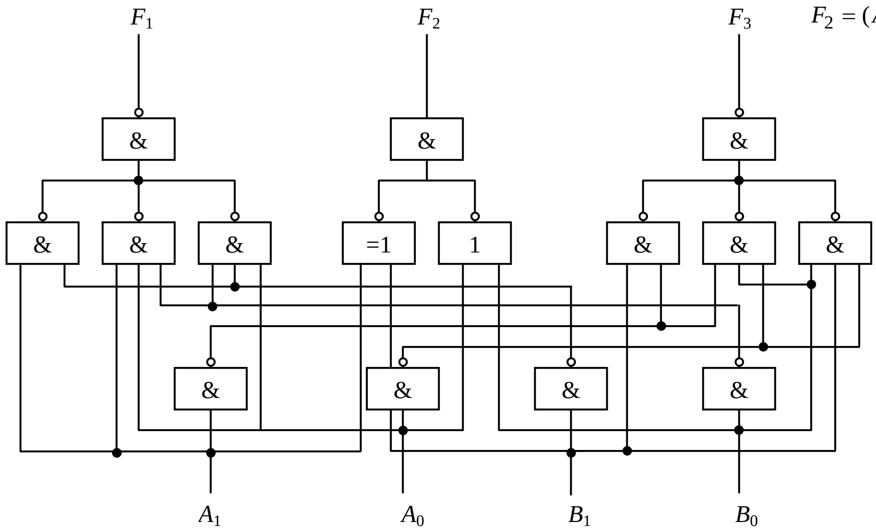
$$F_1 = A_1\overline{B_1} + A_0\overline{B_1}\,\overline{B_0} + A_1A_0\overline{B_0}$$

B_1B_0 \ A_1A_0	00	01	11	10
00	0	0	0	0
01	1	0	0	0
11	1	1	0	1
10	1	1	0	0

$$F_3 = B_1\overline{A_1} + B_0\overline{A_1}\,\overline{A_0} + B_1B_0\overline{A_0}$$

B_1B_0 \ A_1A_0	00	01	11	10
00	1	0	0	0
01	0	1	0	0
11	0	0	1	0
10	0	0	0	1

$$F_2 = (A_1 \odot B_1)(A_0 \odot B_0)$$



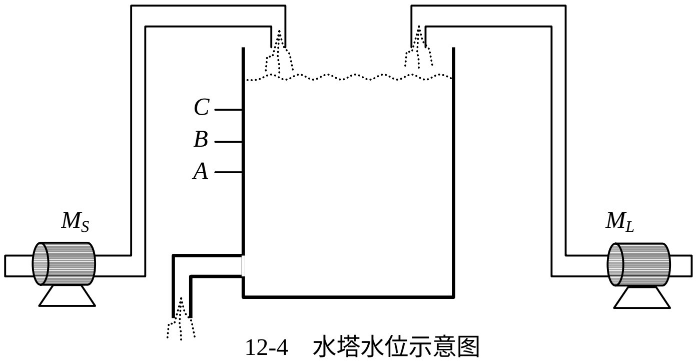
12-9 有一水塔，由两台一大一小的电动机 M_S 和 M_L 驱动水泵向水塔注水，当水塔的水位在 C 以上时，不给水塔注水，当水位降到 C 点，由小电动机 M_S 单独驱动，水位降到 B 点时，由大电动机 M_L 单独驱动给水塔注水，降到 A 点时，则两个电动机同时驱动，如题图 12-4 所示。试设计一个控制电动机工作的逻辑电路。

解：设水位 C、B、A 为逻辑变量，则水位低于 C、B、A 时用 1 表示，否则用 0 表示，电动机 M_S 和 M_L 运行状况作为输出逻辑函数，M_S 和 M_L 工作时用 1 表示，不工作时用 0 表

示。

分析逻辑函数与变量之间关系可列出如图所示的真值表。

根据真值表写出逻辑表达式，然后利用代数法或卡诺图对逻辑表达式进行化简，由于该逻辑表达式比较简单，可以直接写出。最后根据化简的逻辑表达式用门电路实现逻辑电路。



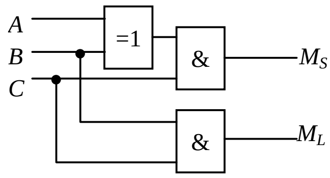
12-4　水塔水位示意图

$$M_S = \overline{A}\,\overline{B}C + ABC = (A \odot B)C$$

$$M_L = \overline{A}BC + ABC = (\overline{A} + A)BC = BC$$

水泵运行真值表

A	B	C	M_S	M_L
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	1	0	1
1	1	1	1	1



12-10　飞机在下列条件下不允许发动：门关上但座位皮带未束紧；束紧了座位皮带但是制动闸没有松开；松开了制动闸但门未关上。但是在维修飞机时发动，则不受上述限制。试写出飞机发动的逻辑表达式，并用“与非“门实现。

解：设关门、束紧皮带、制动、维修为逻辑变量 A、B、C、D，逻辑函数输出为 F。

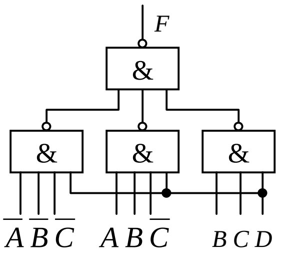
关门为 1，没关门为 0；束紧皮带为 1、没束紧皮带为 0；没制动为 1、制动为 0；没维修为 1。维修为 0。可发动飞机为 1，不可以发动飞机为 0。

可以想象，只有当门关好、皮带束紧、制动松开，飞机才允许发动，但本题只考虑两两的制约关系，所以应根据题意列出真值表。

飞机发动条件真值表

A	B	C	D	F
x	x	x	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	1	1
1	0	0	1	0
1	0	1	1	0
1	1	0	1	1
1	1	1	1	1

$$\begin{aligned} F &= \left(\overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C} + \overline{A}BC + AB\overline{C} + ABC\right)D \\ &= \overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C}D + AB\overline{C}D + BCD \end{aligned}$$



12-11　TTL“或非“门组成题图 12-5 所示电路。

（1）分析电路在什么时刻可能出现冒险现象？

（2）用增加冗余项的方法来消除冒险，电路应该怎样修改？

解：（1）由逻辑电路可得 $F = \overline{\overline{A+B} + \overline{B+C} + \overline{\overline{B}+D}} = \overline{\overline{A}\,\overline{B} + \overline{B}\,\overline{C} + B\overline{D}}$

由表达式可知，当 A=0，D=0 和 C=0，D=0 时出现 $B+\overline{B}$ 的形式，所以电路可能出现冒险现象。

（2）用增加冗余项消除冒险，就是利用逻辑函数等价的概念。即用一个表达式不同但

等价的逻辑函数代替原逻辑表达式，以便消除冒险组合。

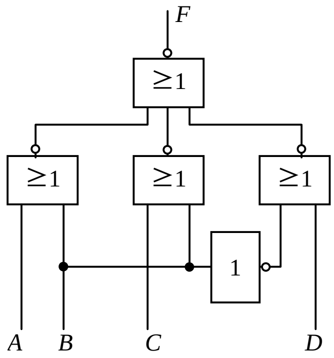
本题中，利用公式 $F=AB+\overline{A}C=AB+\overline{A}C+BC$ 可对上述逻辑函数进行如下变形：

$B\overline{D}+\overline{B}\,\overline{C}=B\overline{D}+\overline{B}\,\overline{C}+\overline{D}\,\overline{C}$ $\qquad$ $B\overline{D}+\overline{B}\,\overline{A}=B\overline{D}+\overline{B}\,\overline{A}+\overline{D}\,\overline{A}$

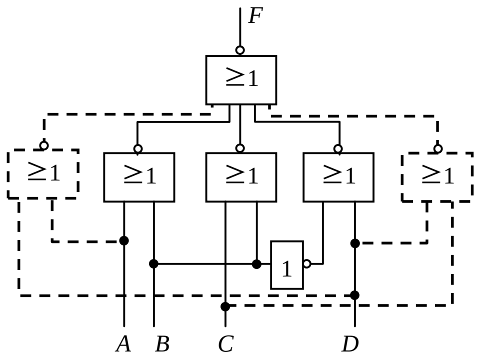
显然，在这两种等价变换增加了两个冗余项 $\overline{D}\,\overline{C}$、$\overline{D}\,\overline{A}$，而这正好是 A=0，D=0 和 C=0，D=0 出现冒险的情况，因此，增加这两个冗余项之后，可以消除冒险现象。故将原函数表达式可以改为如下形式可以消除冒险：

$$F=\overline{\overline{A}\,\overline{B}+\overline{B}\,\overline{C}+B\overline{D}+\overline{D}\,\overline{C}+\overline{A}\,\overline{D}}=(A+B)(B+C)(\overline{B}+D)(D+C)(A+D)$$

所以可将原电路改为如图所示形式即可。



题图 12-5　习题 12-11 电路图



习题 12-11 改画电路图

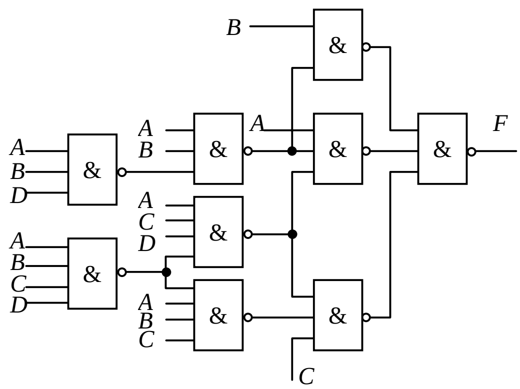
12-12　组合逻辑电路如题图 12-6 所示。

（1）分析图示电路，写出函数 F 的逻辑表达式，用 Σm 形式表示；

（2）若允许电路的输入变量有原变量和反变量的形式，将电路改用最少数目的“与非”门实现；

（3）检查上述（2）实现的电路是否存在竞争—冒险现象？若存在，则可能在什么时刻出现冒险现象？

（4）试用增加冗余项的方法消除冒险（写出函数表达式即可）。



题图 12-6　习题 12-12 电路图

解：(1) 根据图示的组合逻辑电路，写出其函数表达式。为了表达式简单，在图中设中间变量 F_1、F_2、F_3，则 $F=\overline{F_1F_2F_3}$

$$F_1=\overline{B\bullet\overline{AB\overline{ABD}}}=\overline{B}+AB\overline{ABD}=\overline{B}+AB(\overline{AB}+\overline{D})=\overline{B}+AB\overline{D}$$

$$F_2=\overline{A\bullet\overline{AB\overline{ABD}}\bullet\overline{ACD\overline{ABCD}}}=\overline{A}+AB\overline{ABD}+ACD\overline{ABCD}=\overline{A}+AB\overline{D}+ACD\overline{B}$$

$$F_3=\overline{C\bullet\overline{ABC\overline{ABCD}}\bullet\overline{ACD\overline{ABCD}}}=\overline{C}+ABC\overline{ABCD}+ACD\overline{ABCD}=\overline{C}+ABC\overline{D}+ACD\overline{B}$$

$$
\begin{aligned}
F &= \overline{\left(\overline{B} + AB\overline{D}\right)\bullet\left(\overline{A} + AB\overline{D} + A\overline{B}CD\right)\bullet\left(\overline{C} + ABC\overline{D} + A\overline{B}CD\right)} \\
&= \overline{\overline{B} + AB\overline{D}} + \overline{\overline{A} + AB\overline{D} + A\overline{B}CD} + \overline{\overline{C} + ABC\overline{D} + A\overline{B}CD} \\
&= B \bullet \overline{AB\overline{D}} + A \bullet \overline{AB\overline{D}} \bullet \overline{A\overline{B}CD} + C \bullet \overline{ABC\overline{D}} \bullet \overline{A\overline{B}CD} \\
&= \overline{A}B + BD + A\overline{B}\overline{C} + A\overline{B}\overline{D} + ABD + A\overline{C}D + \overline{A}C + \overline{A}BC + \overline{A}C\overline{D} + \overline{A}\overline{B}C + \overline{B}C\overline{D} + \overline{A}CD + BCD \\
&= \overline{A}B(1 + C) + BD(1 + A + C) + \overline{A}C(1 + \overline{D} + D) + A\overline{B}\overline{C} + A\overline{B}\overline{D} + A\overline{C}D + \overline{A}\overline{B}C + \overline{B}C\overline{D} \\
&= \overline{A}B + BD + \overline{A}C + A\overline{B}\overline{C} + A\overline{B}D + A\overline{C}D + \overline{A}\overline{B}C + \overline{B}C\overline{D}
\end{aligned}
$$

将函数填入卡诺图如图所示。得：

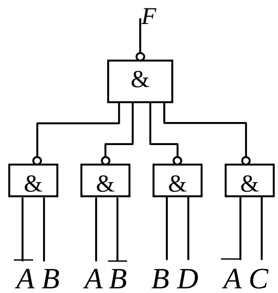
$$F(A,B,C,D) = \sum m(2,3,4,5,6,7,,8,9,10,11,,14,15)$$

CD \ AB	00	01	11	10
00		1		1
01		1	1	1
11	1	1	1	1
10	1	1		1

CD \ AB	00	01	11	10
00		1		1
01		1	1	1
11	1	1	1	1
10	1	1		1

（2）对卡诺图进行化简，卡诺圈如图所示，得到最简“ 与或 ”表达式如下

$$F = \overline{A}B + A\overline{B} + BD + \overline{A}C$$



根据该逻辑函数可用门最简“ 与非 ”门电路实现该逻辑电路如图所示。

（3）现在来看该电路是否存在竞争—冒险现象。因为输入变量中存在 A、$\overline{A}$；B、$\overline{B}$，所以当 B=0，C=1 时，出现 $F = A + \overline{A}$ 的形式，当 A=1，D=1 时，出现 $F = B + \overline{B}$ 的形式，故当出现这两种情况时，有可能出现竞争—冒险现象。

（4）要消除竞争—冒险现象，同前一题，增加冗余项来消除。故得逻辑表达式如下：

$$F = \overline{A}B + A\overline{B} + BD + \overline{A}C + \overline{B}C + AD$$

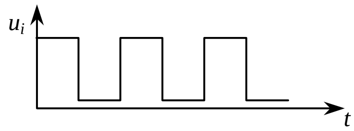
增加了这两项后就可以消除电路中的竞争—冒险现象。

习题十三

13-1　输入信号 u_i 如题图 13-1 所示。试画出在该输入信号 u_i 作用下，由“与非”门组成的基本 RS 触发器 Q 端的波形：

（1）u_i 加于 $\overline{S}$ 端，且 $\overline{R}$=1，初始状态 Q=0；

（2）u_i 加于 $\overline{R}$ 端，且 $\overline{S}$=1，初始状态 $\overline{Q}$=1。

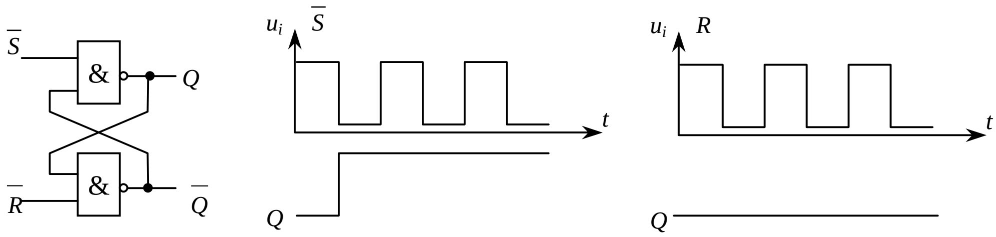


题图 13-1　习题 13-1 输入波形图

解：先将由“与非”门组成的基本 RS 触发器的电路画出来。

（1）根据该电路的逻辑功能，分析当 u_i 加于 $\overline{S}$ 端，且 $\overline{R}$=1，初始状态 Q=0 时，Q 端的波形图。

（2）根据该电路的逻辑功能，分析当 u_i 加于 $\overline{R}$ 端，且 $\overline{S}$=1，初始状态 $\overline{Q}$=1 时，Q 端的波形图。



(1)　(2)

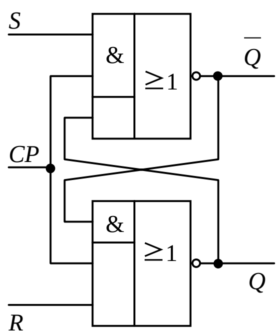
13-2　题图 13-2 所示为两个“与或非”门构成的基本触发器，试写出其状态方程、真值表及状态转移图。

解：该电路是由“与或非”组成的基本 RS 同步触发器。下面我们写出该电路的状态方程、真值表及状态转移图。(注意：该题不能直接从逻辑电路来写输出表达式，原因是 R=1，S=1 是禁止状态，应不包含在表达式中)

先根据电路写出状态转移真值表。由逻辑电路可知，当 CP 到来时，触发器的输出为（如右图所示）：

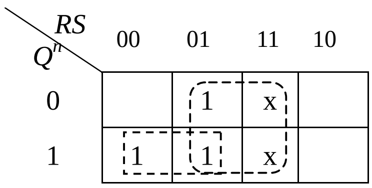
状态转移真值表

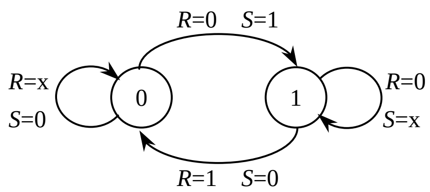
输入信号		现态	次态
R	S	Q^n	Q^{n+1}
0	0	0	Q^n
0	0	1	
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	不确定
1	1	1	



题图 13-2　习题 13-2 电路

根据状态转移真值表作卡诺图，以 R、S、Q^n 为输入量，Q^{n+1} 为输出量，则可得到状态方程为：

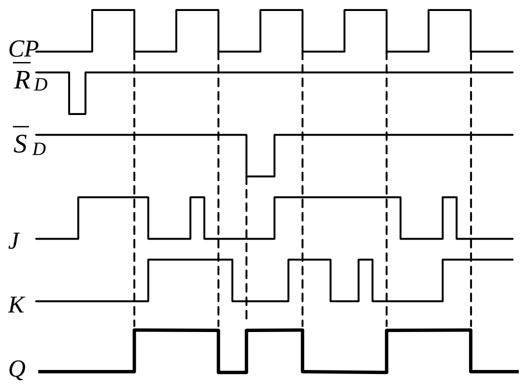




$$\begin{cases} Q^{n+1} = S + \overline{R}Q^n \\ RS = 0 \end{cases}$$

13-3　主从 *JK* 触发器的输入端波形如题图 13-3 所示，试画出输出端的波形。

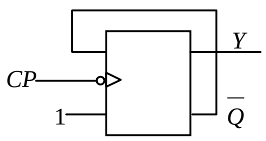
解：*JK* 触发器是在 *CP* 的下降沿将主触发器的状态送入从触发器，所以 *JK* 触发器是下降沿触发的触发器；此外，*JK* 触发器的功能是：$J=K=0$ 时，触发器状态不变；$J=K=1$ 时，触发器翻转；$J=0$，$K=1$ 时，触发器置 0；$J=1$，$K=0$ 时，触发器置 1。根据 *JK* 触发器以上两方面的特点，并注意清零端 $\overline{R}_D$ 和置 1 端 $\overline{S}_D$ 对触发器波形的影响，就可以画出输出端的波形图如图所示。



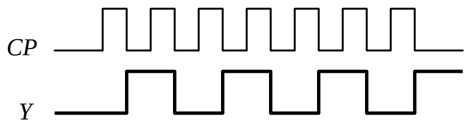
题图 13-3　习题 13-3 波形图

13-4　电路如题图 13-4 所示。是否是由 *JK* 触发器组成的二分频电路？请通过画出输出脉冲 *Y* 与输入脉冲 *CP* 的波形图说明什么是二分频。

解：将 $J=\overline{Q}^n$，$K=1$ 代入 *JK* 触发器的状态方程 $Q^{n+1}=J\overline{Q}^n+\overline{K}Q^n$ 得，$Q^{n+1}=\overline{Q}^n$，由此可知，在 *CP* 脉冲下降沿到来时，触发器翻转一次，输出波形 *Y* 如图所示。由图可知，*Y* 的频率是 *CP* 二分之一，故，输出波形 *Y* 是输入脉冲 *CP* 的二分频。该图是假设初始状态为 $Y=0$ 作出的，$Y=1$ 也可以得出同样的结论。

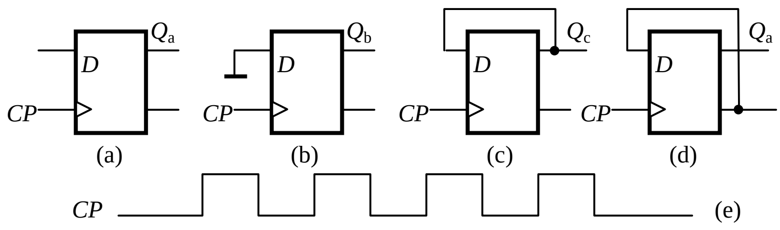


题图 13-4 习题 13-4 电路



习题 13-4 波形图

13-5　维持阻塞 *D* 触发器接成图题 13-5(a)、(b)、(c)、(d)所示形式，设触发器的初始状态为 0，试根据图(e)所示的 CP 波形画出 $Q_a, Q_b, Q_c Q_d$ 的波形。



题图 13-5　习题 13-5 电路与 CP 波形

解：维持阻塞 *D* 触发器是上升沿触发。

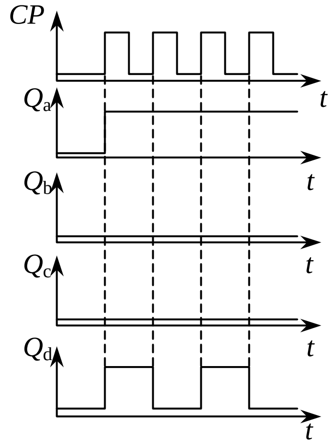
图(a)*D* 悬空，相当于 $D=1$

图(b)$D=0$

图(c)$D=Q_c$

图(d) $D=\overline{Q_d}$

波形图如右图所示。



13-6　设计一个四人抢答逻辑电路，具体要求如下：

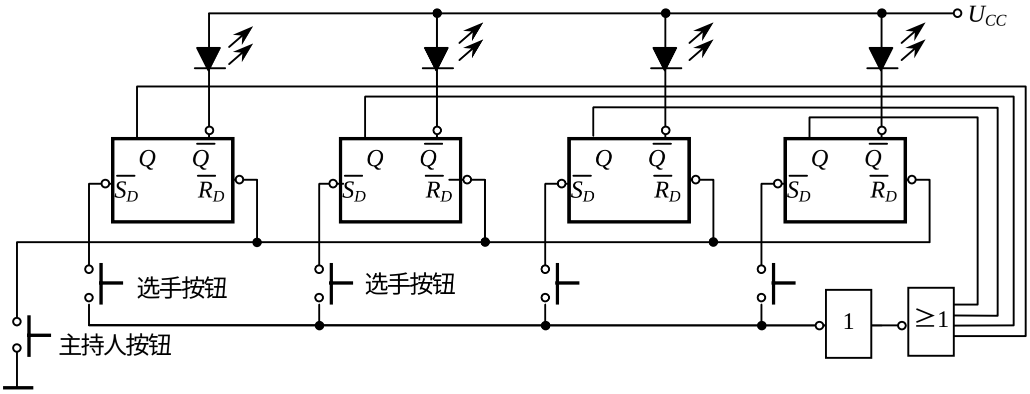
（1）每个参赛者控制一个按钮，用按动按钮发出抢答信号。

（2）竞赛主持人另有一个按钮，用于将电路复位。

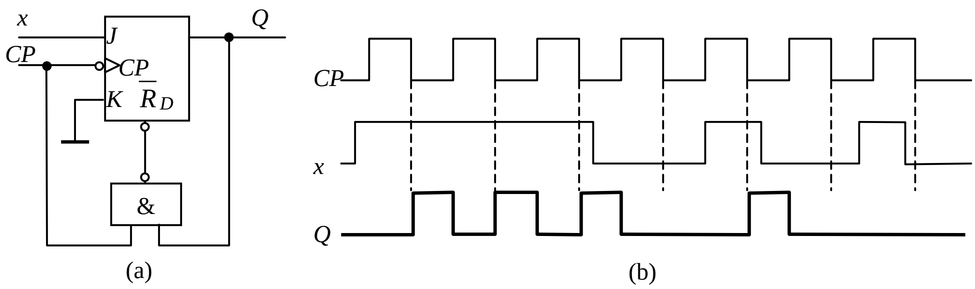
（3）竞赛开始后，先按动按钮者将对应的一个发光二极管点亮，此后其他 3 人再按动按钮对电路不起作用。

解：此题是利用触发器设计一个具有一定实用性的电路。首先为了简化设计，充分利用触发器的直接置“ 0 ”端和触发器的直接置“ 1 ”端，如果采用时钟触发，还要设计脉冲生成电路，这样电路的将会复杂的多。

根据设计要求和以上设计思路，一个参赛者的状态用一个触发器来描述，参赛者的按钮直接联接在置“ 1 ”端，当参赛者按下按钮后，就将触发器置“ 1 ”，同时将其他参赛者的按钮封锁。一道题完后，主持人将所有触发器复“ 0 ”，又可以进行下一轮抢答。根据这个要求，电路设计如下：



13-7　电路如题图 13-6(a)所示，若已知 CP 和 x 的波形如题图 13-6(b)所示。设触发器的初始状态为 Q=0，试画出 Q 端的波形图。



题图 13-6　习题 13-7 电路与输入波形图

解：将 J=x，K=0 代入 JK 触发器的状态方程 $Q^{n+1}=J\overline{Q}^n+\overline{K}Q^n$ 得，$Q^{n+1}=x\overline{Q}^n+Q^n$，另外，$\overline{R}_D=\overline{CP\bullet Q}$ 可知，当 Q=1 时，若有 CP 脉冲，则对触发器清零。考虑到触发器的初始状态 Q=0，由此可作出 Q 端的波形图如图所示。

习题十四

14-1　试说明时序逻辑电路有什么特点？它和组合逻辑电路的主要区别在什么地方？

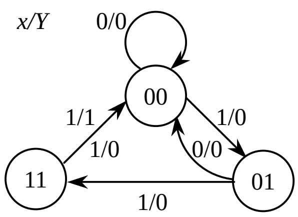
答：时序逻辑电路的特点是电路在某一时刻稳定输出不仅取决于该时刻的输入，而且还依赖于该电路过去的状态，换句话说，该电路具有记忆功能。它与组合逻辑电路的主要区别在于时序电路的记忆功能。时序电路通常是由组合逻辑电路和记忆电路两部分组成。

14-2　有一个专用通讯系统（同步时序电路），若在输入线 x 上连续出现三个“1”信号，则在输出线 Y 上出现一个“1”信号予以标记，对于其它输入序列，输出均为“0”，作状态图和状态转移真值表。

解：该电路要求设计同步时序逻辑电路，所以状态的改变是在同步时钟脉冲的作用下进行状态转换。

功能要求：在输入端连续输入三个“1”信号时，输出端输出“1”，否则输出端输出“0”。对功能进行描述为：假设初始状态为 00，当接到输入信号为“1”时，用状态 01 表示已经输入一个“1”的状态 01，否则，回到初始状态 00；若在 01 状态又接到一个“1”信号，将该状态记为 11，状态 11 说明已经连续收到两个“1”；在 11 状态，无论下一个输入是“1”还是“0”，都回到 00 状态，只是在接收到“1”时（说明连续收到三个“1”，然后将状态置于初始状态，准备对下一次检测作好准备）输出“1”，否则输出“0”。因此，至少需要三个状态来描述功能要求（由此可知，需要两个触发器来描述三个不同状态）。

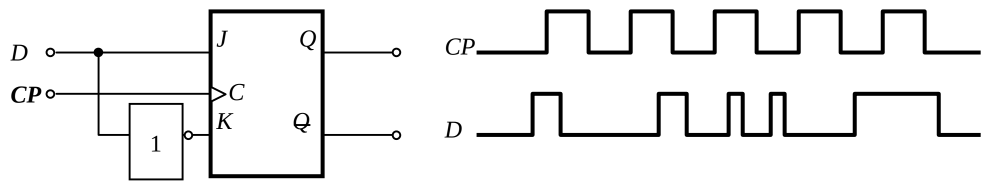
根据以上要求，可以作出电路的状态图如下：



状态转移真值表

现态 $Q_2^nQ_1^n$		次态/输出($Q_2^{n+1}Q_1^{n+1}/Y$) x=0	x=1
0	0	00/0	01/0
0	1	00/0	10/0
1	1	00/0	00/1
1	0	偏离状态	

14-3　分析题图 14-1 所示时序电路的逻辑功能，并给出时序图。

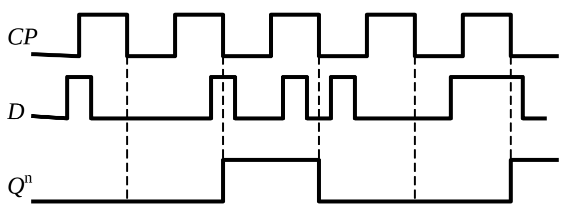


题图 14-1 习题 14-3 电路图

解：该题是将JK 触发器转换为 D 触发器，根据 D 触发器的状态方程得：

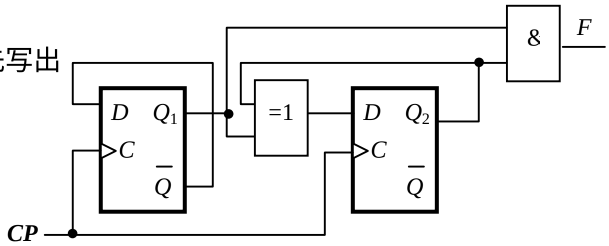
$$Q^{n+1} = J\overline{Q}^n + \overline{K}Q^n = D\overline{Q}^n + \overline{\overline{D}}Q^n = D$$

其次注意到 JK 触发器是下降沿触发，所以时序图如图所示。



习题 14-3 的时序图

14-4　分析题图 14-2 所示的同步时序逻辑电路，作出状态图和状态表，并说明该电路的逻辑功能。



题图 14-2 习题 14-4 电路图

解：根据时序电路的分析步骤，先写出

(1)驱动方程：

$$D_1 = \overline{Q}_1$$
$$D_2 = Q_1 \oplus Q_2$$

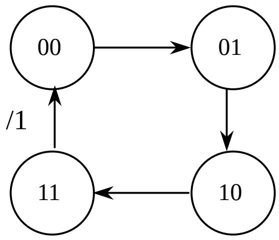
(2)输出方程：

$$F = Q_1 Q_2$$

(3)状态方程：

$$Q_1^{n+1} = D_1 = \overline{Q}_1^n$$
$$Q_2^{n+1} = D_2 = Q_1^n \oplus Q_2^n$$

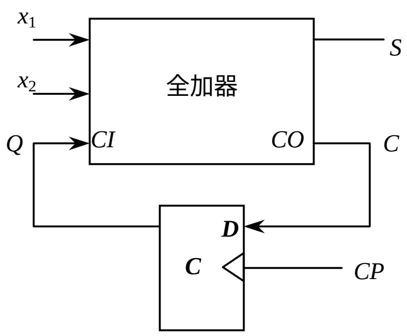
现态		次态		输出
$Q_1{}^n$	$Q_2{}^n$	$Q_2{}^{n+1}$	$Q_1{}^{n+1}$	F
0	0	0	1	0
0	1	1	0	0
1	0	1	1	0
1	1	0	0	1



功能描述：该电路为四进制加一计数器，其中输出 F 为进位位。

14-5　题图 14-3 为一个串行加法器逻辑框图，试作出其状态图和状态表。

解：由于全加器输是组合电路，全加器的进位输出端通过触发器将其反馈到全加器的进位输入端，其中 x_1、x_2 为两个加数，全加器是将 x_1、x_2 和进位输入端进行相加，将和从 S 端输出。由于该电路只有一个触发器，故有两个状态图，下面对该时序电路进行分析：



题图 14-3　习题 14-5 电路图

（1）驱动方程：$D = CO = x_1 x_2 + x_1 CI + x_2 CI$

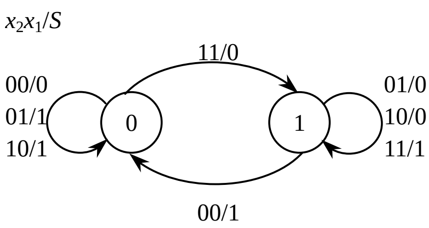
输出方程：$S = x_1 \oplus x_2 \oplus CI$

（2）状态方程：$Q^{n+1} = x_1 x_2 + x_1 Q^n + x_2 Q^n$

（3）根据状态方程、输出方程列出状态转移表、并画出状态转移图。

状态转移真值表

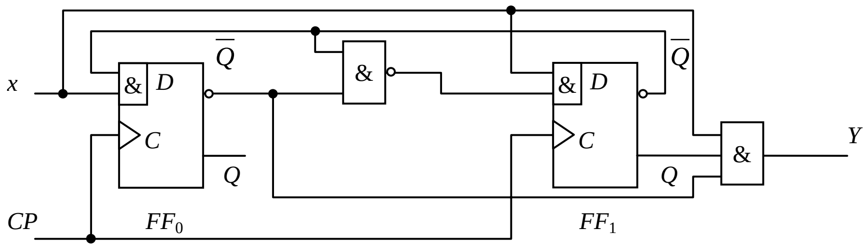
现态			次态	输出
x_2	x_1	Q^n	Q^{n+1}	S
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1



电路的状态图

功能说明：当状态处在“ 0 ”时，若 x_2、x_1 不同，则状态不变，输出为“ 1 ”; 当状态处在“ 1 ”时，若 x_2、x_1 不同，则状态不变，输出为“ 0 ”; 若在状态处“ 0 ”时，当 x_2、x_1 为 11，则转到状态“ 1 ”，且输出为 0，当 x_2、x_1 为 00，则状态不变，输出仍为 0；若在状态处“ 1 ”时，当 x_2、x_1 为 00 时，则转到状态“ 0 ”，且输出为“ 1 ”，当 x_2、x_1 为 11，则状态不变，且输出为 1；

14-6 试分析题图 14-4 所示时序电路的逻辑功能，写出电路的激励方程、状态转移方程和输出方程，画出状态转移图，说明电路是否具有自启动特性。



题图 14-4 习题 14-6 电路图

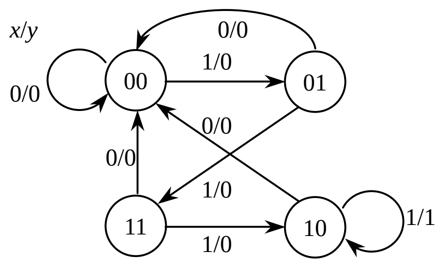
解：(1) 激励方程：
$$D_0 = x\overline{Q}_1$$
$$D_1 = \overline{\overline{Q}_0\,\overline{Q}_1} \bullet x$$

输出函数：$Y = \overline{Q}_0 Q_1 x$

(2) 状态方程：
$$Q_0^{n+1} = x\overline{Q}_1^n$$
$$Q_1^{n+1} = (Q_0 + Q_1)x = Q_0 x + Q_1 x$$

状态转移真值表

现态 $Q_1^n Q_0^n$		次态/输出($Q_1^{n+1}Q_0^{n+1}/Y$) x=0	x=1
0	0	00/0	01/0
0	1	00/0	11/0
1	0	00/0	10/1
1	1	00/0	10/0



功能说明：该电路从 00 状态开始→当收到一个“ 1 ”转到状态 01→再收到 1 转到 11 状态→又收到“ 1 ”后转到 10 状态，在 10 状态若每收到一个“ 1 ”就输出一个“ 1 ”，收到“ 0 ”就回到初始状态。所以该电路是检测连续收到四个“ 1 ”的检测电路。该电路可以自启动，即无论在什么状态，只要收到“ 0 ”就回到 00 状态。

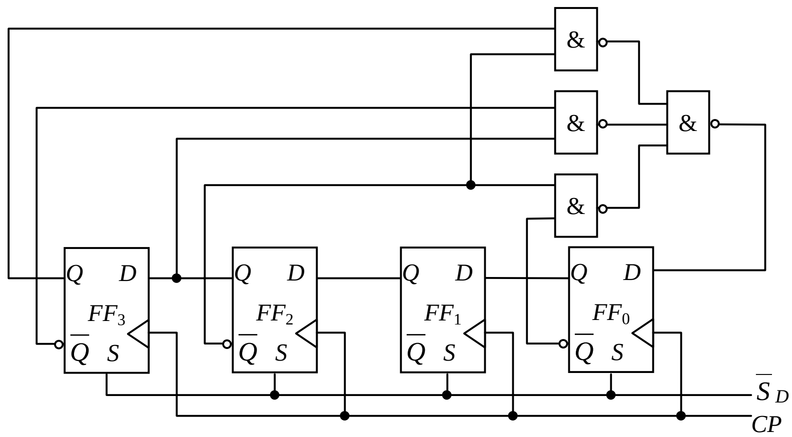
14-7 试分析题图 14-5 所示时序电路，画出状态转移图，并说明该电路的逻辑功能。

解：该电路是同步时序逻辑电路，$\overline{S}_D$ 是给触发器置“ 1 ”端，由电路可知，触发器 FF_0 的 Q 端接到 FF_1 的 D 端，依次类推，所以在时钟脉冲的作用下，实现左移功能。

下面求驱动方程：

$$\begin{cases} D_0 = \overline{\overline{Q_3^n\overline{Q}_2^n} \bullet \overline{\overline{Q}_3^n Q_2^n} \bullet \overline{\overline{Q}_2^n\overline{Q}_0^n}} = Q_3^n\overline{Q}_2^n + \overline{Q}_3^n Q_2^n + \overline{Q}_2^n\overline{Q}_0^n = Q_3^n \oplus Q_2^n + \overline{Q}_2^n\overline{Q}_0^n \\ D_1 = Q_0^n \\ D_2 = Q_1^n \\ D_3 = Q_2^n \end{cases}$$

根据驱动方程和 D 触发器的状态方程，可以求出时序电路的状态转移方程。这里需说

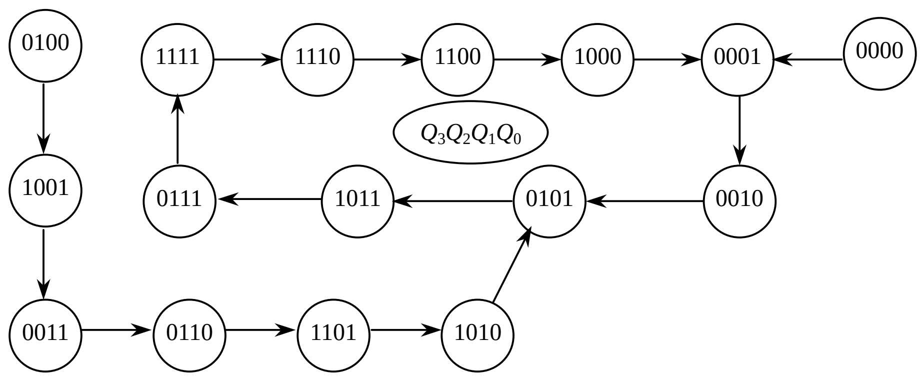


题图 14-5　习题 14-7 电路图

明的一点是，状态转移是发生在 CP 的上升沿（D 触发器本身决定）。

时序逻辑电路状态转移表

计数脉冲序号 CP	现态				次态			
	Q_3^n	Q_2^n	Q_1^n	Q_0^n	Q_3^{n+1}	Q_2^{n+1}	Q_1^{n+1}	Q_0^{n+1}
0	1	1	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	0	1	1	0	0
2	1	1	0	0	1	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0	1
4	0	0	0	1	0	0	1	0
5	0	0	1	0	0	1	0	1
6	0	1	0	1	1	0	1	1
7	1	0	1	1	0	1	1	1
8	0	1	1	1	1	1	1	1
偏离状态	0	0	0	0	0	0	0	1
	0	0	1	1	0	1	1	0
	0	1	0	0	1	0	0	1
	0	1	1	0	1	1	0	1
	1	0	0	1	0	0	1	1
	1	0	1	0	0	1	0	1
	1	1	0	1	1	0	1	0



$$
\begin{cases}
Q_0^{n+1} = (Q_3^n \oplus Q_2^n + \overline{Q}_2^n \overline{Q}_0^n) \bullet CP \uparrow \\
Q_1^{n+1} = Q_0^n \bullet CP \uparrow \\
Q_2^{n+1} = Q_1^n \bullet CP \uparrow \\
Q_3^n = Q_2^n \bullet CP \uparrow
\end{cases}
$$

逻辑功能说明：该电路可以自启动，一旦启动以后，在 9 种不同状态进行循环，可以作为模 9 计数器使用。

14-8　设计一个脉冲异步时序电路，使之满足下述要求：

（1）该电路有一个脉冲输入端 P，两个电平输出端 Y_1、Y_2；

（2）该电路要作为计数器使用：当 P=1 时，其计数序列为 Y_1Y_2=00，01，11，10，00，…；当 P=0 时，其状态不变。要求用 JK 触发器作为存贮元件。

14-9 设计一个自动售货机控制电路。售货机中有两种商品，其中一种商品的价格为一元五角，另一种商品的价格是两元。售货机每次只允许投入一枚五角或一元的硬币，当用户选择好商品后，根据用户所选商品和投币情况，控制电路应完成的功能是：若用户选择两元的商品，当用户投足两元(五角或一元)时，对应商品输出；当用户选择一元五角的商品时，若用户投入两枚一元的硬币，应找回五角并输出商品，若正好投入一元五角，只输出商品。(提示：假定电路中已有检测电路，可以识别一元和五角；电路应有两个控制端，两种商品选择输入；电路有两个输入端，五角、一元投币输入，；电路有两个输出，商品输出和找零输出)