

## 习题 1

**1.1** 高压一般指万伏以上的电压。冬天时人体和毛衣摩擦的静电有几万伏，但电不死人，因为放电时间极短，只感觉到丝丝疼痛，没有电流流过心脏。当电流大于 50mA 时，电流流过心脏，人体就有生命危险，将出现呼吸麻痹，心房开始震颤、强烈灼痛，手的肌肉痉挛，呼吸困难等症状。图 1.1 为电热水器安全工作原理，一般情况下，人体电阻约为  $0.5\text{ K}\Omega$ ，潮湿条件下的人体电阻约为干燥条件下人体电阻的  $1/2$ 。当无地线或地线失效时，防电墙相当于在电热水器和人体之间加了一个大电阻  $R$ ，试问  $R$  的最小值是多少？若没有防电墙，当无地线或地线失效时，人体流过电流是多少？百度了解对人体有什么危害？

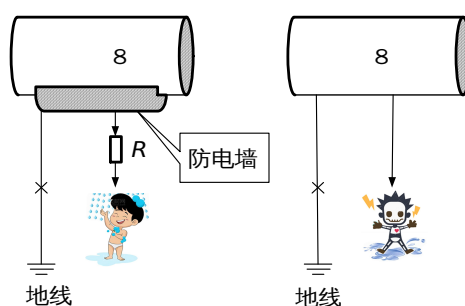


图 1.1 习题 1.1 电路

**1.1 解：** (1)  $U = I \times (R_{\min} + 500/2) \Rightarrow 220 = 0.05 \times (R_{\min} + 500/2)$  ,  $R_{\min} = 4150(\Omega)$

(2)  $U = I \times 500/2 \Rightarrow 220 = I \times 500/2$  ,  $I = 0.88(\text{A})$

**1.2** 求图 1.2 中各元件的功率，并指出每个元件起电源作用还是负载作用，并计算所有支路的吸收功率之和。

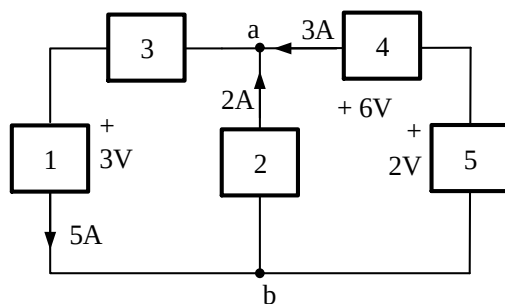


图 1.2 习题 1.2 电路

**1.2 解：**  $P_1 = UI = 3 \times 5 = 15 \text{ (W)}$  (吸收),  $P_2 = -UI = -2 \times 4 = -8 \text{ (W)}$  (产

生),  $P_3 = UI = 1 \times 5 = 5 \text{ (W)}$  (吸收),  $P_4 = -UI = -6 \times 3 = -18 \text{ (W)}$  (产生),

$P_5 = -UI = -(-2) \times 3 = 6 \text{ (W)}$  (吸收)。元件 1、3、5 是负载，元件 2 和 4 是电源。

$P_{\text{吸收}} = P + P_3 + P_5 = 15 + 5 + 6 = 26 \text{ (W)}$ 。

**1.3** 汽车发动机电压一般应为 13.4V~14.8V，低于 13.4V 时可能无法对电瓶进行充电，

当电压大于 14.8V 时可能会损坏电瓶，汽车在不启动发动机的情况下电瓶的电压为

12.2V~12.8V。如果低于 11.6V 时就比较难启动汽车。如图 1.3 所示，设汽车发动机电

压  $U_S = 14 \text{ V}$ 。开始对汽车电瓶(蓄电池)充电，内阻  $R_S = 0.02 \Omega$ ，蓄电池的电压  $U_O = 12 \text{ V}$ ，

内阻  $R_O = 0.02 \Omega$ ，用于调节电路电流的可调电阻  $R_p = 0 \sim 1 \Omega$ ，若电路中电流  $I = 8 \text{ A}$ ，求发

电机的功率  $P_1$  和蓄电池的功率  $P_2$ ，说明是产生还是吸收功率，说明蓄电池工作状态？百度

了解蓄电池工作状态。

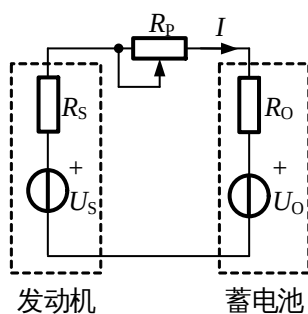


图 1.3 习题 1.3 电路

**1.3 解：**  $P_1 = -U_S I = -14 \times 8 = -112(\text{W})$  (产生)， $P_2 = U_O I = 12 \times 8 = 96(\text{W})$  (吸收)，蓄电池工作在充电状态。

**1.4** 手机充电器原理图如图 1.4 所示，手机等效于待充电的电压源，充电器等效于电流源，两电阻均为限流电阻，求电流  $I$ 、电压  $U$  及电压源和电流源的功率。

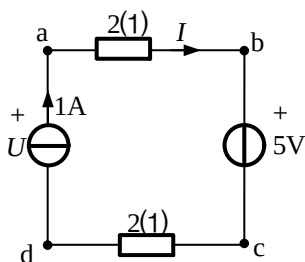


图 1.14 习题 1.14 电路

**1.4 解：**  $I = 1(\text{A})$ ， $U = 2 \times I + 5 + 2 \times I = 9(\text{V})$ ， $P_{5V} = 5 \times I = 5(\text{W})$ ， $P_{1A} = -UI = -9 \times 1 = -9(\text{W})$ 。

**1.5** 求图 1.5 所示电路中 a 点的电位，并计算各电阻所消耗的功率。

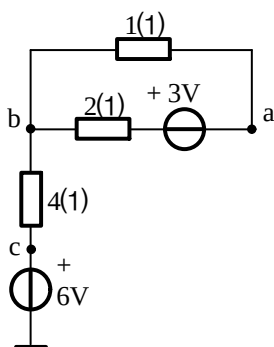


图 1.5 习题 1.5 电路

**1.5 解：**注意 bc 之间电阻无电流。  $I = \frac{3}{1+2} = 1(\text{A})$ ，  $V_a = U_{ab} + U_{bc} + V_c = -1 \times 1 + 0 + 6 = 5(\text{V})$ ，

$P_{\Omega} = UI = 1 \times 1 = 1(\text{W})$ ，  $P_{2\Omega} = UI = 2 \times 1 = 2(\text{W})$ ，  $P_{\Omega} = 0(\text{W})$ 。

**1.6** 试求图 1.6 所示电路的 a 点电位和 b 点电位。

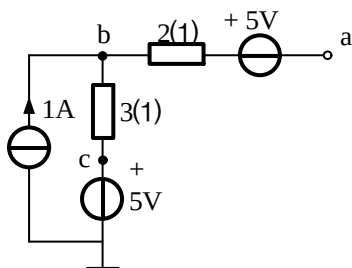


图 1.6 习题 1.6 电路

**1.6 解：**注意 ab 支路无电流。  $V_c = 5(\text{V})$ ，  $V_b = U_{bc} + V_c = 1 \times 3 + 5 = 8(\text{V})$ ，

$V_a = U_{ab} + V_b = -5 + 8 = 3(\text{V})$ 。

**1.7** 求图 1.7 中的  $I$ 。

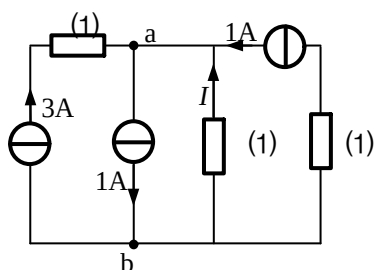


图 1.7 习题 1.7 电路

**1.7 解：** 设输入为正，对于节点 a， $\sum I_a = 0$ ， $3 - 1 + I + 1 = 0$ ， $I = -2(\text{A})$ 。

**1.8** 某信号发生器内的衰减网络如图 1.8 所示。在 a、e 端输入电压  $U$ ，输出电压  $U_{be}$ 、 $U_{ce}$ 、 $U_{de}$ 。试求各级输出电压的衰减比例，即  $U_{be}:U$ 、 $U_{ce}:U$ 、 $U_{de}:U$ 。

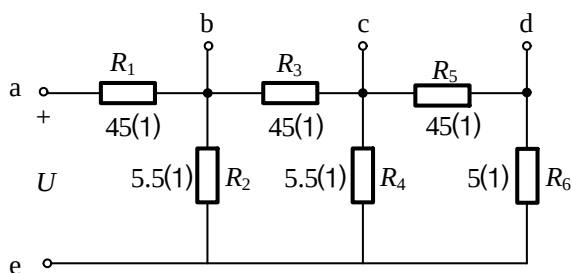


图 1.8 习题 1.8 电路

**1.8 解：** (1) 由  $R_6$  组成的网络等效电阻  $R_{de} = R_6 = 5(\Omega)$ ，由  $R_4$ 、 $R_5$  和  $R_6$  组成网络的等效

电阻  $R_{ce} = \frac{R_4 \times (R_5 + R_6)}{R_4 + (R_5 + R_6)} = 4.955 \approx 5(\Omega)$ ，由  $R_2 \sim R_6$  组成网络的等效电阻

$$R_{be} = \frac{R_2 \times (R_3 + R_{ce})}{R_2 + (R_3 + R_{ce})} = 4.955 \approx 5(\Omega)。$$

$$(2) \text{ be 端电压 } U_{be} = U \frac{R_{be}}{R_1 + R_{be}} = \frac{1}{10}U, \text{ ce 端电压 } U_{ce} = U_{be} \frac{R_{ce}}{R_3 + R_{ce}} = \frac{1}{100}U, \text{ de}$$

$$\text{端电压 } U_{\text{de}} = U_{\text{ce}} \frac{R_6}{R_5 + R_6} = \frac{1}{1000} U。$$

(3) 根据以上计算可得, 此电路具有  $U_{\text{be}}:U=1:10$ 、 $U_{\text{ce}}:U=1:100$ 、 $U_{\text{de}}:U=1:1000$  三级衰减比例输出的网络。

**1.9** 电路如图 1.9 所示, 求电阻  $R$ 。

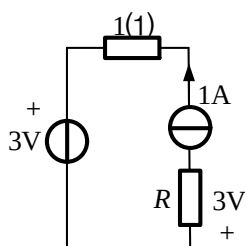


图 1.9 习题 1.9 电路

**1.9 解:** 根据欧姆定律  $R = \frac{U}{I} = \frac{3}{1} = 3(\Omega)$ 。

**1.10** 收音机音量调节采用分压器实现, 电路如图 1.10 所示。现用分压器获得各段电压 (对地电压) 分别为 18V、12V、8V 和 4V, 各段负载所需电流如图 1.10 所示, 试求各段电阻的阻值。

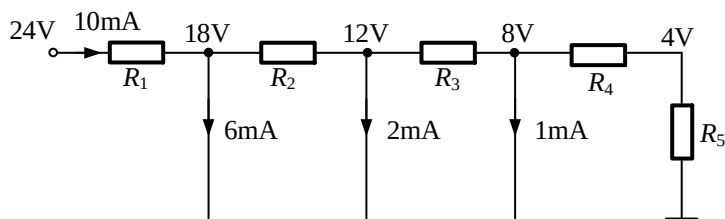


图 1.10 习题 1.10 电路

**1.10 解:**  $R_1 = \frac{24-18}{10 \times 10^{-3}} = 0.6(\text{K}\Omega)$ ,  $R_2 = \frac{18-12}{(10-6) \times 10^{-3}} = 1.5(\text{K}\Omega)$ ,

$R_3 = \frac{12-8}{(10-6-2) \times 10^{-3}} = 2(\text{K}\Omega)$ ,  $R_4 = \frac{8-4}{(10-6-2-1) \times 10^{-3}} = 4(\text{K}\Omega)$ ,

$$R_5 = \frac{4}{(10-6-2-1) \times 10^3} = 4(\text{K}\Omega)。$$

**1.11** 电路如图 1.11 示，若要使  $I_X=6\text{A}$ ，问  $I_S$  应取何值？（试用电源等效法求解）

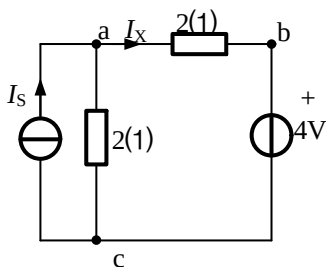
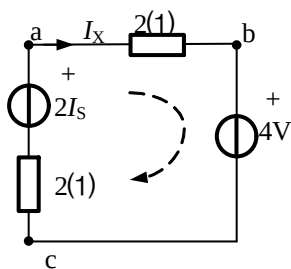


图 1.11 习题 1.11 电路

**1.11 解：**  $I_S$  电流源并联  $2\Omega$ 电阻等效为  $2I_S$  电压源串联  $2\Omega$ 电阻，电路图如下：



根据基尔霍夫电压定律，以顺时针为正， $\sum U = -2I_S + 2I_X + 4 + 2I_X = 0$ ，当  $I_X=6(\text{A})$ ，则

$$I_S=14(\text{A})$$

**1.12** 试用电源等效法图 1.12 中的电压  $U$ 。

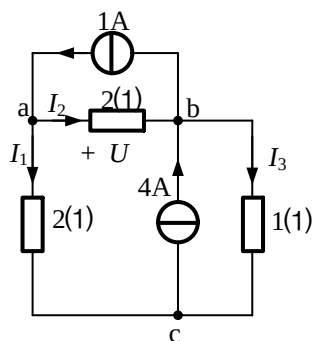
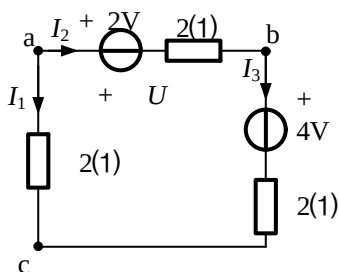


图 1.12 习题 1.12 电路

**1.12 解：** 1A 电流源并联 2Ω电阻等效为 2V 电压源串联 2Ω电阻，4A 电流源并联 1Ω电阻等效为 4V 电压源串联 1Ω电阻，如图所示。注意  $U$  等效后等于  $U_{ab}$ ，不是等效后 1Ω电阻的电压。



根据基尔霍夫电压定律，以顺时针为正， $I_{ab} = -\frac{6}{5}(\text{A})$ ， $U = U_{ab} = 2 + 2 \times \left(-\frac{6}{5}\right) = -\frac{2}{5}(\text{V})$ 。

**1.13** 用支路电流法求图 1.13 中各支路电流。



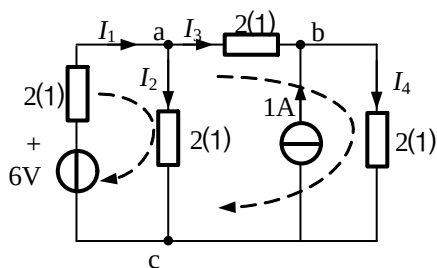


图 1.13 习题 1.13 电路

**1.13 解：**对于节点 a， $\sum I_a = 0$ ， $I_1 - I_2 - I_3 = 0$ 。

对于节点 b， $\sum I_b = 0$ ， $I_3 - I_4 + 1 = 0$ 。

对于回路 1， $\sum U = 0$ ， $2I_2 + 2I_1 - 6 = 0$ 。

对于回路 2， $\sum U = 0$ ， $2I_4 + 2I_3 - 2I_2 = 0$ 。

求得  $I_1 = 1.6(\text{A})$ ， $I_2 = 1.4(\text{A})$ ， $I_3 = 0.2(\text{A})$ ， $I_4 = 1.2(\text{A})$ 。

**1.14** 用支路电流法求图 1.14 中电压  $U$ 。

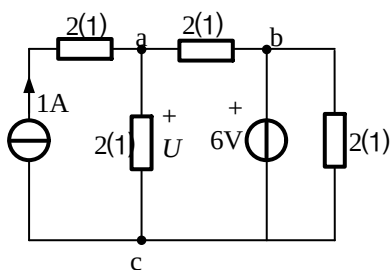
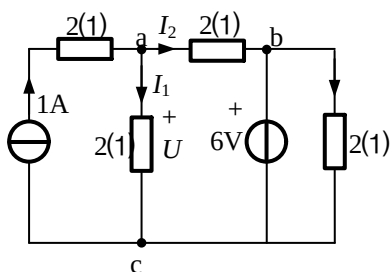


图 1.14 习题 1.14 电路

**1.14 解：**设支路电流方向如图所示。



对于节点 a,  $\sum I_a = 0$  ,  $-I_1 - I_2 + 1 = 0$ 。由于  $U_{bc} = U_{ba} + U_{ac} = 6(\text{V})$  , 所以  $2I_1 - 2I_2 = 6$ 。

求得  $I_1 = 2(\text{A})$  ,  $I_2 = -1(\text{A})$  ,  $U = I_1 \times 2 = 4(\text{V})$ 。

**1.15** 用节点电位法求图 1.14 中电压  $U$ 。

**1.15 解:** 对于节点 a  $\sum I_a = 0$  , 节点 b 的电位  $V_b = 6(\text{V})$  ,  $\frac{V_a}{2} + \frac{V_a - 6}{2} - 1 = 0$  , 所以  $V_a = 4(\text{V})$  ,  $U = 4(\text{V})$ 。

**1.16** 4 位数模转换解码网络如图 1.15 所示。该电路输入的二进制最多可以为 4 位数, 即 4 通道, 开关  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  接通电压源时分别与 4 位数的第一、第二、第三、第四数对应, 二进制分别为  $2^0$ 、 $2^1$ 、 $2^2$ 、 $2^3$ 。当二进制的某位为“1”时, 对应点开关就接通电压源  $U_S$ ; 当二进制的某位为“0”时, 对应的开关就接地, 这样就完成了将数字信号转换为模拟信号。设  $U_S = 15\text{V}$  , 试输入“1100”(依次为二进制的第四位第三位第二位第一位, 对应十进制“12”), 试用节点电位法求输出电压  $U_O$ 。

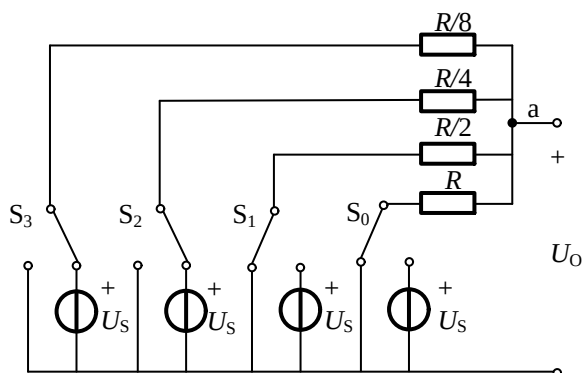


图 1.15 习题 1.16 电路

**1.16 解：** 用  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  表示输入，对于节点 a， $\sum I_a = 0$ ，

$$\frac{S_3 U_S - U_O}{R/8} + \frac{S_2 U_S - U_O}{R/4} + \frac{S_1 U_S - U_O}{R/2} + \frac{S_0 U_S - U_O}{R} = 0,$$

$$U_O = \frac{S_3 U_S \times \frac{8}{R} + S_2 U_S \times \frac{4}{R} + S_1 U_S \times \frac{2}{R} + S_0 U_S \times \frac{1}{R}}{15/R} = \frac{S_3 \times 2^3 + S_2 \times 2^2 + S_1 \times 2^1 + S_0 \times 2^0}{15} U_S$$

当  $U_S = 15\text{V}$  时，输入数字量“1100”（对应模拟量十进制“12”），此时

$$U_O = \frac{1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 0 \times 2^0}{15} U_S = 12(\text{V}), \text{ 表明该电路完成了数模转换。}$$

**1.17** 图 1.16 为模拟计算机加法电路， $U_{S1}$ 、 $U_{S2}$ 、 $U_{S3}$  代表相加数，用叠加原理法证明

输出电压  $U_O$  与加数之和成正比。试设计一个模拟计算机减法电路。

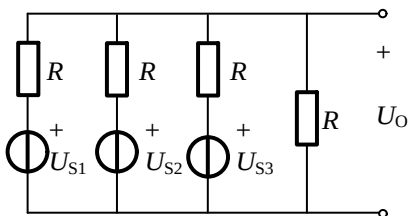


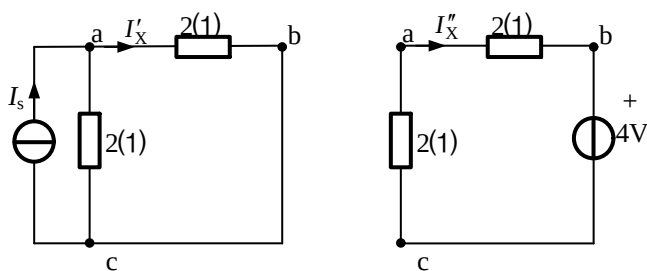
图 1.16 习题 1.17 电路

1.17 解:  $U'_O = U_{S1} \frac{\frac{R}{3}}{R + \frac{R}{3}} = \frac{U_{S1}}{4}$ ,  $U''_O = U_{S2} \frac{\frac{R}{3}}{R + \frac{R}{3}} = \frac{U_{S2}}{4}$ ,  $U'''_O = U_{S3} \frac{\frac{R}{3}}{R + \frac{R}{3}} = \frac{U_{S3}}{4}$ ,

$$U_O = U'_O + U''_O + U'''_O = \frac{1}{4}(U_{S1} + U_{S2} + U_{S2})$$

1.18 试用叠加原理法求图 1.11 中的电流  $I_S$ 。

1.18 解: 当电流源  $I_S$  工作时, 4V 的电压源短路,  $I'_X = I_S \frac{2}{2+2} = \frac{1}{2}I_S$ , 4V 的电压源工作时, 电流源  $I_S$  开路,  $I''_X = -\frac{4}{2+2} = -1(\text{A})$ ,  $I_X = I'_X + I''_X = 6(\text{A})$ ,  $I_S = 14(\text{A})$ 。



1.19 惠斯登电桥电路图如图 1.17 所示, 又称单臂电桥, 是一种可以精确测量电阻的仪器。四个电阻叫做电桥的四个臂, cd 中间为检流计, 用以检查它所在的支路有无电流。

惠斯登电桥电路结构简单, 准确度和灵敏度比较高, 在医学诊断和检测仪器中有广泛的应用。设电流源大小如图所示, 试求图中的支路电流  $I_X$  (任选一种电路分析法)。

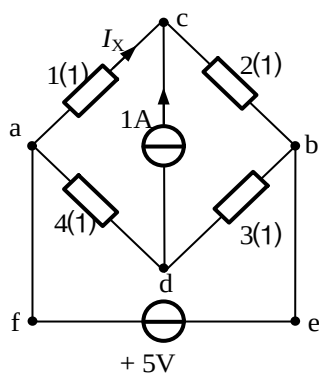


图 1.17 习题 1.19 电路

**1.19 解：**对于节点 c， $\sum I_c = 0$ ， $I_x + 1 + I_{bc} = 0$ 。

$\sum U_{acbefa} = 0$ ， $I_x - 2I_{bc} - 5 = 0$ ，所以  $I_x = 1(\text{A})$ 。

**1.20** 试求图 1.18 中的电压  $U_x$ （任选一种电路分析法）

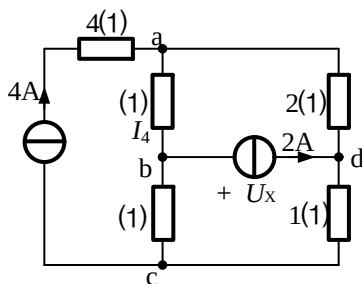
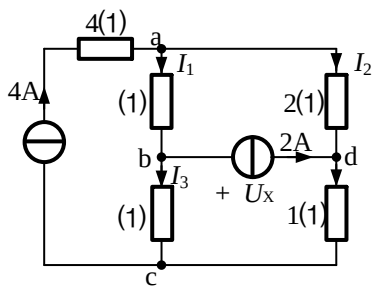


图 1.18 习题 1.20 电路

**1.20 解：**支路电流如图所示，对于节点 a， $\sum I_a = 0$ ， $-4 + I_1 + I_2 = 0$ 。

对于节点 b， $\sum I_b = 0$ ， $-I_1 + I_3 + 2 = 0$ 。

对于节点 d， $\sum I_d = 0$ ， $-I_2 + I_4 - 2 = 0$ 。



$$\sum U_{\text{adcba}} = 0, \quad -I_1 + 2I_2 + I_4 - 2I_3 = 0$$

$$I_1 = 3(\text{A}), \quad I_2 = 1(\text{A}), \quad I_3 = 1(\text{A}), \quad I_4 = 3(\text{A}).$$

$$U_X = U_{\text{bd}} = -U_{\text{ab}} + U_{\text{ad}} = -3 \times 1 + 1 \times 2 = -1(\text{V}).$$

**1.21** 戴维南定理求图 1.19 所示电路的电压  $U$ 。

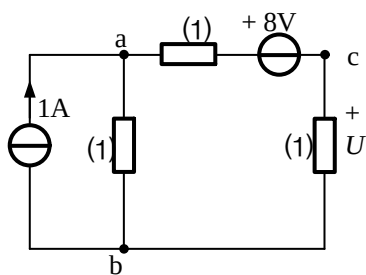
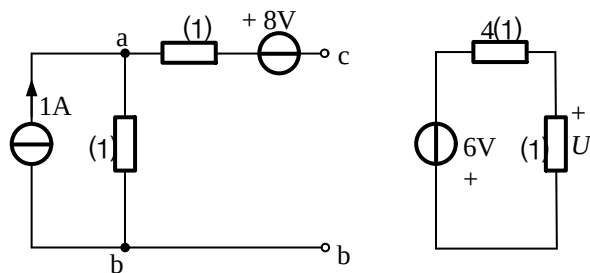


图 1.19 习题 1.21 电路

**1.21 解：**断开 cd，如图所示。



$U_{cb} = U_{ca} + U_{ab} = -8 + 2 \times 1 = -6(\text{V})$ ,  $R_{cd} = 2 + 2 = 4(\Omega)$ , 戴维南等效电路如图所示,

$$U = -6 \times \frac{2}{4+2} = -2(\text{V}).$$

**1.22** 电路如图 1.20 所示, 试用诺顿定理求支路 ab 间  $2\Omega$  电阻上的电压  $U$ 。

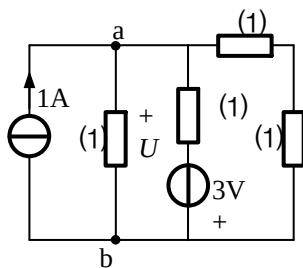
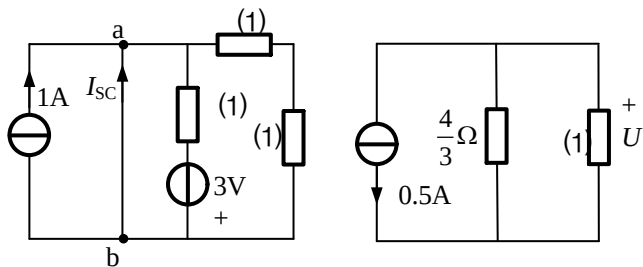


图 1.20 习题 1.22 电路

**1.22 解:** 将支路 ab 间  $2\Omega$  电阻短路, 如图所示。

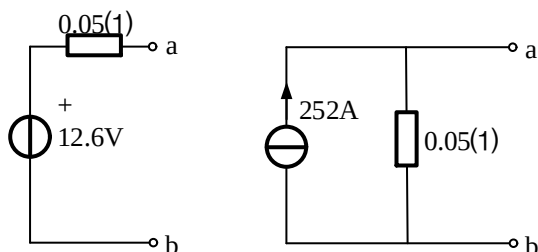


根据叠加原理  $I_{SC} = -1 + 1.5 = 0.5(\text{A})$ ,  $R_{ab} = \frac{2 \times (2 + 2)}{2 + 2 + 2} = \frac{4}{3}(\Omega)$ , 戴维南等效电路如图所示,

$$U = -0.5 \times \frac{\frac{4}{3} \times 2}{\frac{4}{3} + 2} = -0.4(\text{V})。$$

**1.23** 当汽车电池与汽车收音机连接时, 提供 12.5V 电压, 收音机等效为  $6.25\Omega$  电阻; 当该汽车电池与一组前灯连接时, 提供 11.7V 电压, 前灯等效为  $0.65\Omega$  电阻。画出汽车电池的戴维南和诺顿等效电路。

**1.23 解:** 汽车电池与汽车收音机连接时, 提供 12.5V 电压, 收音机等效为  $6.25\Omega$  电阻, 戴维南等效电路  $U_S = 12.5 + \frac{12.5}{6.25} R_O$ ; 汽车电池与一组前灯连接时, 提供 11.7V 电压, 前灯等效为  $0.65\Omega$  电阻, 戴维南等效电路  $U_S = 11.7 + \frac{11.7}{0.65} R_O$ , 求得  $U_S = 12.6(\text{V})$ ,  $R_O = 0.05(\Omega)$ 。





## 习题 2

**2.1** 已知显像管行偏转线圈的周期性扫描电流如图 2.1 所示, 线圈电感为  $0.01\text{H}$  (线圈电阻忽略不计), 试求电感线圈所加电压波形。

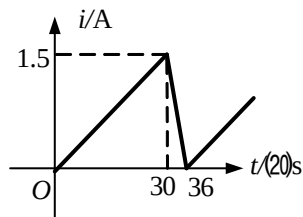
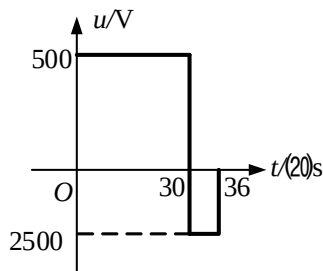


图 2.1 习题 2.1 电路

**2.1 解:** 根据图 2.1, 可写出  $i(t)$  的表达式  $i(t) = \begin{cases} \frac{1.5}{30} \times 10^6 t & 0 \leq t < 30 \\ 2.5 \times 10^5 (36 \times 10^{-6} - t) & 30 \leq t < 36 \end{cases}$

根据电感元件  $u_L = L \times \frac{di_L(t)}{dt}$  的微分关系, 得出电压的函数表达式为

$u_L = 0.01 \times \frac{di_L(t)}{dt} = \begin{cases} 500 & 0 \leq t < 30 \\ -2.5 \times 10^3 & 30 \leq t < 36 \end{cases}$ ,  $u_L(t)$  的波形如图, 说明电感的电压是时间的间断函数。



**2.2** 已知电容上的电压波形如图 2.2 所示, 电容为  $4\mu\text{F}$ , 试求  $i(t)$ , 并画出波形。

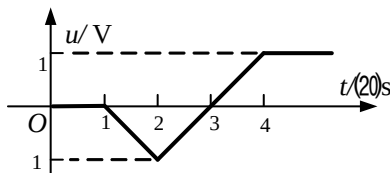
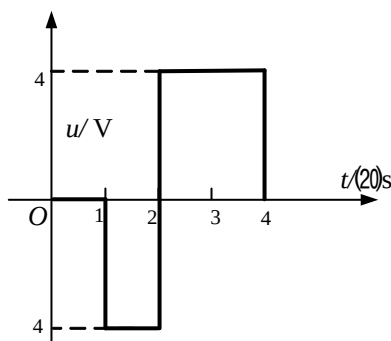


图 2.2 习题 2.2 电路

2.2 解：根据图 2.2，可写出  $u(t)$  的表达式  $u(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 1 \\ 1-t & 1 \leq t < 2 \\ t-3 & 2 \leq t < 4 \\ 1 & 4 \leq t \end{cases}$

根据电容元件  $i_C = C \times \frac{du_C(t)}{dt}$  的微分关系，得出电流的函数表达式为  $i_C(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 1 \\ -4 & 1 \leq t < 2 \\ 4 & 2 \leq t < 4 \\ 0 & 4 \leq t \end{cases}$ ,

$i_C(t)$  的波形如图，说明电容的电压是时间的间断函数。



2.3 电路如图 2.3 所示，当开关闭合时，试分析电路中三个灯泡的变化过程。

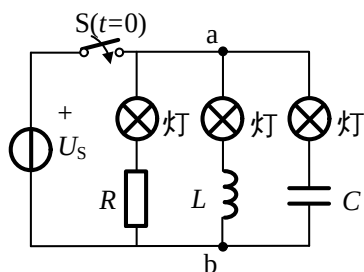


图 2.3 习题 2.3 电路

2.3 解：开关闭合瞬间，与电阻串联的灯泡立即亮，与电容串联的灯泡亮一下又灭，与电感串联的灯泡缓慢发亮，且最终亮度与电阻灯泡相同。与电容串联的灯泡亮一下又灭的原因是闭合瞬间电容电压为 0，电容相当于短路，所以亮一下，又灭是因为电容隔直通交。

2.4 电路如图 2.4 所示，开关 S 在  $t=0$  时由“1”搬向“2”，已知开关 S 在“1”时电路已处于稳定。求

- (1)  $u_C(0_-)$ 、 $i_C(0_-)$  和  $u_C(0_+)$ 、 $i_C(0_+)$  各是多少？
- (2)  $u_L(0_-)$ 、 $i_L(0_-)$  和  $u_L(0_+)$ 、 $i_L(0_+)$  各是多少？

(3)  $u_R(0_-)$ 、 $i_R(0_-)$ 和 $u_R(0_+)$ 、 $i_R(0_+)$ 各是多少？

(4) 总结换路时哪些初始值跃变？哪些不跃变？

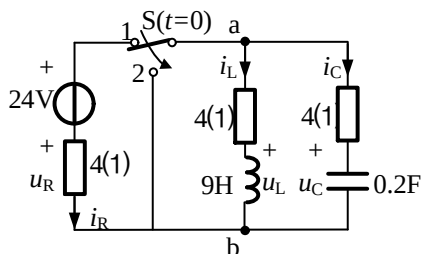


图 2.4 习题 2.4 电路

**2.4 解：** (1)  $u_C(0_-)=12(\text{V})$ 、 $i_C(0_-)=0(\text{A})$ 、 $u_C(0_+)=12(\text{V})$ 、 $i_C(0_+)=-3(\text{A})$ ；

(2)  $u_L(0_-)=0(\text{V})$ 、 $i_L(0_-)=3(\text{A})$ 、 $u_L(0_+)=12(\text{V})$ 、 $i_L(0_+)=3(\text{A})$ ；

(3)  $u_R(0_-)=12(\text{V})$ 、 $i_R(0_-)=3(\text{A})$ 、 $u_R(0_+)=0(\text{V})$ 、 $i_R(0_+)=0(\text{A})$ ；

(4) 容压感流不变。

**2.5** 如图 2.5 所示电路中，在  $t=0$  时开关  $S$  由在位置“1”转到“2”的位置动作，试求  $t=0_+$  时刻  $u(0_+)$  和  $i(0_+)$  的值。

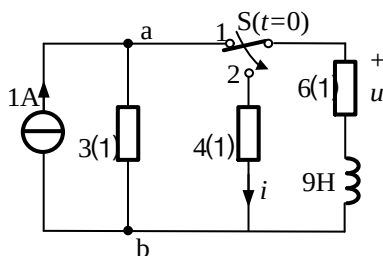


图 2.5 习题 2.5 电路

**2.5 解：** 当开关在 1 处时，电感电流  $i_L(0_-)=\frac{3}{3+6}=\frac{1}{3}(\text{A})$ ；当开关在 2 处时，用电流为

电感电流  $i_L(0_-)=\frac{1}{3}(\text{A})$  的电流源替换电感，得到换路后瞬间  $t=0_+$  时刻等效电路。

$u(0_+)=\frac{1}{3}\times 6=2(\text{V})$ ， $i(0_+)=-\frac{1}{3}(\text{A})$ 。

**2.6** 继电器控制电路如图 2.6 所示，电路中电感为继电器驱动线圈。在开关闭合前，电路

已处于稳态， $t=0$  时开关  $S$  闭合。(1) 求开关  $S$  闭合后电感电流  $i_L(t)$  和电压  $u_L(t)$ ；(2)

指出是什么响应；(3) 简略画出电感电压  $u_L(t)$  及电流  $i_L(t)$  的波形图。

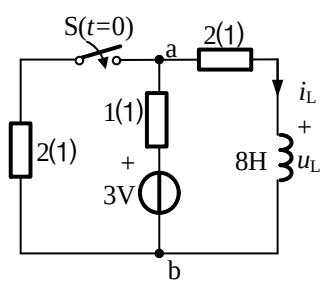


图 2.6 习题 2.6 电路

**2.6 解:** (1)根据换路定则,  $i_L(0_-)=i_L(0_+)=1(A)$ 。开关闭合后, 电感参与放电,  $i_L(\infty)=\frac{3}{4}(A)$ ,

$$R_O=2+\frac{1\times 2}{1+2}=\frac{8}{3}(\Omega), \quad \tau=\frac{L}{R_O}=3(s) \quad ,$$

$$i_L(t)=\frac{3}{4}+\left(1-\frac{3}{4}\right)e^{-\frac{t}{3}}=\frac{3}{4}+\frac{1}{4}e^{-\frac{t}{3}} \quad t>0 \quad ; u_L(t)=L\frac{di_L(t)}{dt}=-\frac{2}{3}e^{-\frac{t}{3}} \quad t>0$$

(2) RL 完全响应。

**2.7** 一个简化的闪光灯电路如图 2.7 所示, 由一个直流电压源  $U_S$  、一个限流电阻  $R$ 、闪光灯的等效电阻  $R_L$  和一个与闪光灯并联的电容  $C$  组成。开关  $S$  处于位置 1 时, 电容充满电。当开关  $S$  由位置 1 切换到位置 2 时, 闪光灯开始工作, 等效电阻  $R_L$  阻值小, 使电容在很短时间内放电结束, 从而达到闪光效果。设闪光灯截止电压为 20V, 试求闪光灯闪光时间, 并判断是什么响应? 百度了解闪光对人眼的危害。

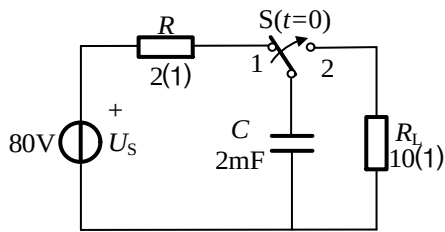


图 2.7 习题 2.7 电路

**2.7 解：**这是零输入响应，闪光灯放电。根据三要素公式，

$$u_C(t) = u_C(\infty) + (u_C(0_+) - u_C(\infty))e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad u_C(\infty) = 0(\text{V}), \quad u_C(0_+) = 80(\text{V}), \quad u_C(t) = 20(\text{V}),$$

$$\tau = RC = 10 \times 2 \times 10^{-3} = 0.02(\text{s}), \quad \text{由 } 20 = 80e^{-50t} \text{ 得 } t = 0.028(\text{s})$$

**2.8** 在如图 2.8 所示电路中，开关 S 在位置“1”时已达稳态，在  $t=0$  时开关 S 转到“2”的位置，(1) 求  $t > 0$  时的电容电压  $u_C(t)$  及  $i_C(t)$ ；(2) 指出是什么响应；(3) 将  $u_C(t)$  表示成零输入响应和零状态响应；(4) 将  $u_C(t)$  表示成暂态响应和稳态响应。

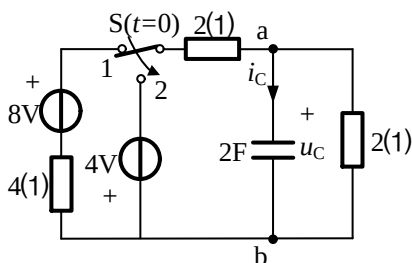


图 2.8 习题 2.8 电路

**2.8 解：**(1) 根据换路定则， $u_C(0_+) = u_C(0_-) = 2(\text{V})$ ， $R_0 = \frac{2 \times 2}{2 + 2} = 1(\Omega)$ ， $\tau = RC = 2 \times 1 = 2(\text{s})$ ，

$$u_C(\infty) = -2(\text{V}), \quad u_C(t) = u_C(\infty) + (u_C(0_+) - u_C(\infty))e^{-\frac{t}{\tau}} = -2 + 4e^{-\frac{t}{2}} \quad t > 0,$$

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} = -4e^{-0.5t} \quad t > 0;$$

(2) RC 完全响应；

$$(3) \quad u_C(t) = \underbrace{2e^{-0.5t}}_{\text{零输入响应}} + \underbrace{(-2 - 2e^{-0.5t})}_{\text{零状态响应}} \quad t > 0$$

$$(4) \quad u_C(t) = \underbrace{-2}_{\text{稳态响应}} + \underbrace{(4e^{-0.5t})}_{\text{暂态响应}} \quad t > 0。$$

**2.9** 换路前如图 2.9 所示电路已处于稳态  $i_L(0_-)=1(\text{A})$ ， $t=0$  时开关 S 闭合。(1) 求换路后的  $i_L(t)$  及  $u_L(t)$ ；(2) 指出是什么响应；(3) 简略画出电感电压  $u_L(t)$  及电流  $i_L(t)$  的波形图。

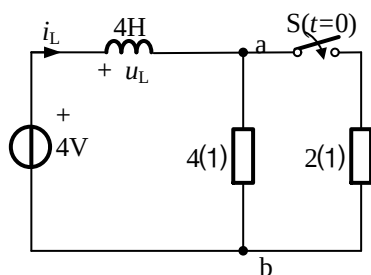
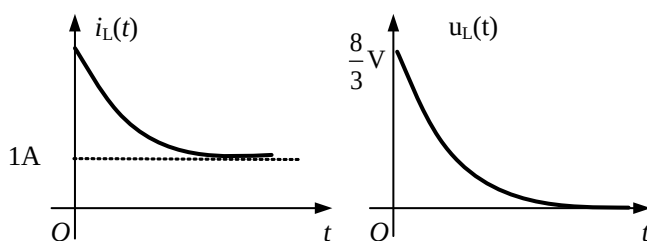


图 2.9 习题 2.9 电路

**2.9 解：** (1) 根据换路定则， $i_L(0_-)=i_L(0_+)=1(\text{A})$ ， $i_L(\infty)=\frac{4}{\frac{4 \times 2}{4+2}}=3(\text{A})$ ， $R_O=\frac{4 \times 2}{4+2}=\frac{4}{3}(\Omega)$ ，

$$\tau=\frac{L}{R_O}=3(\text{s}), \quad i_L(t)=3+(1-3)e^{-\frac{t}{3}}=3-2e^{-\frac{t}{3}} \quad t>0; \quad u_L(t)=L\frac{di_L(t)}{dt}=\frac{8}{3}e^{-\frac{t}{3}} \quad t>0 \quad (2) \text{ RL}$$

完全响应。



**2.10** 换路前如图 2.10 所示电路已处于稳态， $t=0$  时开关闭合。(1) 求换路后电容电压  $u_C(t)$  及电流  $i_C(t)$ ；(2) 指出是什么响应；(3) 简略画出电容电压  $u_C(t)$  及电流  $i_C(t)$  的波形图。

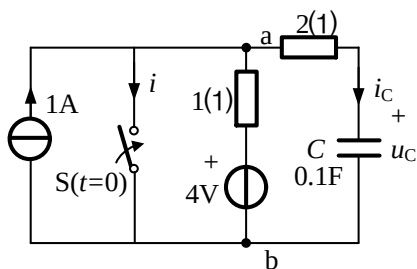


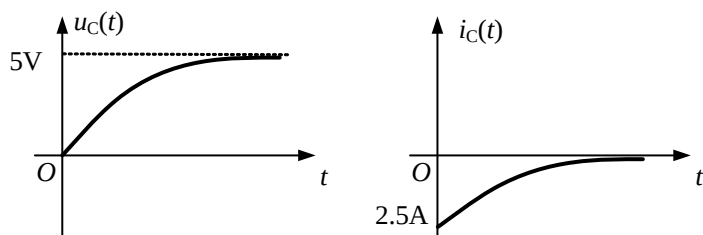
图 2.10 习题 2.10 电路

**2.10 解：** (1) 根据换路定则， $u_C(0_+) = u_C(0_-) = 5(\text{V})$ ， $u_C = 0(\text{V})$ ， $R_O = 2(\Omega)$ ，

$$\tau = RC = 2 \cdot 1 = 2(\text{s})，u_C(\infty) = 0(\text{V})，u_C(t) = u_C(\infty) + (u_C(0_+) - u_C(\infty))e^{-\frac{t}{\tau}} = 5e^{-5t} \quad t > 0，$$

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} = -2.5e^{-5t} \quad t > 0$$

(2) RC 零输入响应。



**2.11** 换路前如图 2.11 所示电路已处于稳态， $t=0$  时开关 S 打开。(1) 求换路后的  $i_L(t)$  及  $u_L(t)$ ；(2) 指出是什么响应；(3) 简略画出电感电压  $u_L(t)$  及电流  $i_L(t)$  的波形图。

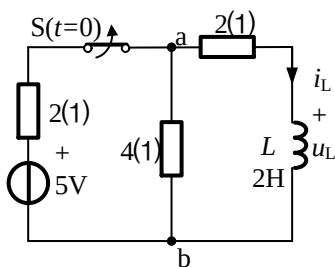
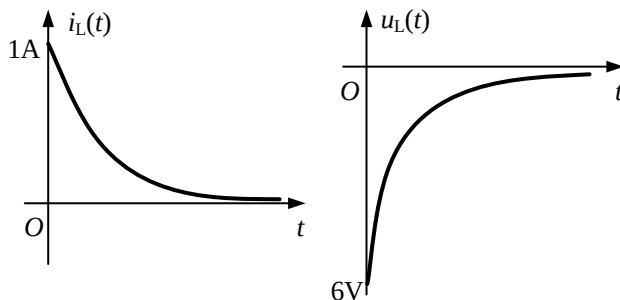


图 2.11 习题 2.11 电路

**2.11 解:** (1) 根据换路定则,  $i_L(0_-)=i_L(0_+)=1(\text{A})$ ,  $i_L(\infty)=0(\text{A})$ ,  $R_O=2+4=6(\Omega)$ ,  $\tau=\frac{L}{R_O}=\frac{1}{3}(\text{s})$ ,

$$i_L(t)=0+(1-0)e^{-3t}=e^{-3t} \quad t>0, \quad u_L(t)=L\frac{di_L(t)}{dt}=-6e^{-3t} \quad t>0;$$

(2) RL 零输入响应。



**2.12** 开关 S 闭合前如图 2.12 所示, 电路已稳定且电容未储能,  $t=0$  时开关闭合, 求 (1)  $i_C(t)$  和  $u_C(t)$ ; (2) 指出是什么响应; (3) 简略画出电容电压  $u_C(t)$  及电流  $i_C(t)$  的波形图。

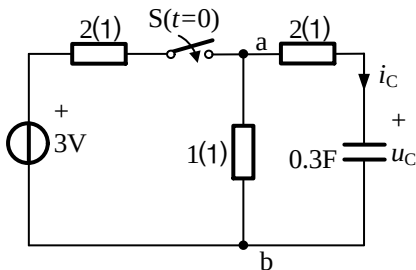


图 2.12 习题 2.12 电路

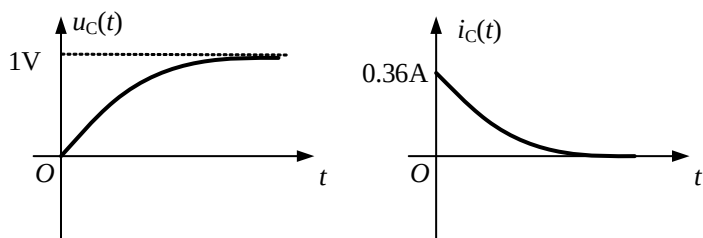
**2.12 解:** (1) 根据换路定则,  $u_C(0_+)=u_C(0_-)=0(\text{V})$ ,  $u_C(\infty)=1(\text{V})$ ,  $R_O=2+\frac{1\times 2}{1+2}=\frac{8}{3}(\Omega)$ ,

$$\tau=RC=0.3\times\frac{8}{3}=0.8(\text{s}), \quad u_C(t)=u_C(\infty)+(u_C(0_+)-u_C(\infty))e^{-\frac{t}{\tau}}=1-e^{-1.2t} \quad t>0,$$

$$i_C(t)=C\frac{du_C(t)}{dt}=0.36e^{-1.2t} \quad t>0;$$

(2) RC 零状态响应;





**2.13** 开关在  $t=0$  时关闭, (1) 求如图 2.13 所示电路的  $i_L(t)$ ; (2) 指出是什么响应; (3) 简略画出电感电流  $i_L(t)$  及电压  $u_L(t)$  的波形图。

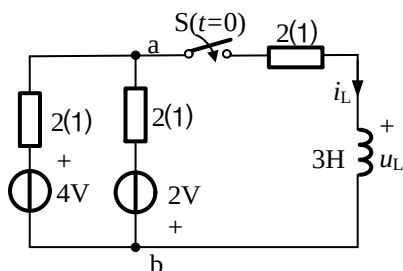
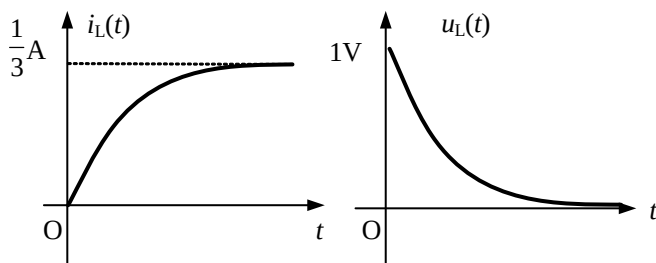


图 2.13 习题 2.13 电路

**2.13 解:** (1) 根据换路定则,  $i_L(0_-)=i_L(0_+)=0(\text{A})$ ,  $i_L(\infty)=\frac{1}{3}(\text{A})$ ,  $R_0 = 2 + \frac{2 \times 2}{2+2} = 3(\Omega)$ ,

$$\tau = \frac{L}{R_0} = 1(\text{s}), \quad i_L(t) = \frac{1}{3} + \left(0 - \frac{1}{3}\right)e^{-t} = \frac{1}{3} - \frac{1}{3}e^{-t} \quad t > 0, \quad u_L(t) = e^{-t} \quad t > 0;$$

(2) RL 零状态响应;



**2.14** 换路前如图 2.14 电路已处于稳定且电容未储能,  $t=0$  时开关闭合。求换路后电容电压  $u_C(t)$  和电流  $i$ , 并指出是什么响应。

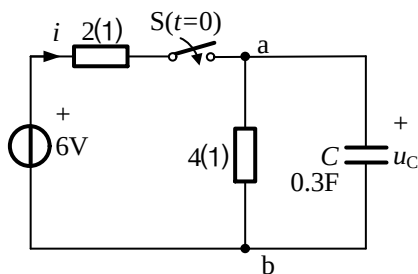


图 2.14 习题 2.14 电路

**2.14 解：**(1) 据换路定则， $u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0(\text{V})$ ， $u_C(\infty) = 4(\text{V})$ ， $R_O = \frac{4 \times 2}{4+2} = \frac{4}{3}(\Omega)$ ，

$$\tau = RC = 0.3 \times \frac{4}{3} = 0.4(\text{s}), \quad u_C(t) = u_C(\infty) + (u_C(0_+) - u_C(\infty))e^{-\frac{t}{\tau}} = 4 - 4e^{-2.5t} \quad t > 0,$$

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} = 3e^{-2.5t} \quad t > 0;$$

(2) RC 零状态响应;

**2.15** 目前电路处于稳态，如图 2.15 所示， $i_L(0_-) = 0.2\text{A}$ ，在  $t=0$  时开关 S 闭合。(1)

求换路后电感电流  $i_L(t)$  和电感电压  $u_L(t)$ ，并指出是什么响应；(2) 将  $i_L(t)$  表示成零输

入响应和零状态响应；(3) 将  $i_L(t)$  表示成暂态响应和稳态响应。

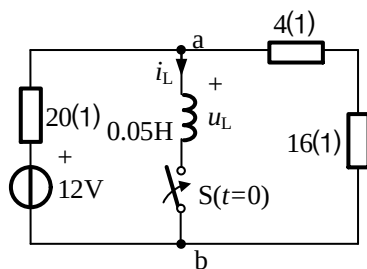


图 2.15 习题 2.15 电路

**2.15 解：**(1) 根据换路定则， $i_L(0_-) = i_L(0_+) = 0.2(\text{A})$ ， $i_L(\infty) = \frac{12}{20 \times 10^3} = 0.6(\text{mA})$ ，

$$R_O = \frac{20 \times (4+16)}{20+(4+16)} = 10(\Omega), \quad \tau = \frac{L}{R_O} = 0.005(s),$$

$$i_L(t) = 0.6 + (0.2 - 0.6)e^{-200t} = 0.6 - 0.4e^{-200t} \quad t > 0, \quad u_L(t) = 4e^{-200t} \quad t > 0; \text{ RL 完全响应;}$$

$$(2) \quad i_L(t) = \underbrace{(0.2e^{-200t})}_{\text{零输入响应}} + \underbrace{(0.6 - 0.6e^{-200t})}_{\text{零状态响应}} \quad t > 0;$$

$$(3) \quad i_L(t) = \underbrace{0.6}_{\text{稳态响应}} + \underbrace{(-0.4e^{-200t})}_{\text{暂态响应}} \quad t > 0。$$

**2.16** 电路如图 2.16 所示, 在  $t=0$  时开关 S 打开, 求  $t > 0$  的电容电压  $u_C(t)$  和电流  $i$ , 并指出是什么响应。

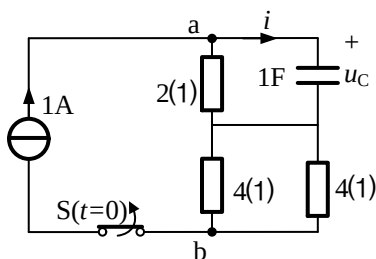


图 2.16 习题 2.16 电路

**2.16 解:** (1) 据换路定则,  $u_C(0_+) = u_C(0_-) = 2(V)$ ,  $u_C(\infty) = 0(V)$ ,  $R_O = 2(\Omega)$ ,  $\tau = RC = 2(s)$ ,

$$u_C(t) = 0 + (2 - 0)e^{-\frac{t}{2}} = 2e^{-0.5t} \quad t > 0, \quad i(t) = -C \frac{du_C(t)}{dt} = 0.5e^{-0.5t} \quad t > 0;$$

(2) RC 零输入响应;

**2.17** 电路如图 2.17 所示, 在  $t=0$  时开关 S 闭合, 求换路后电感电流  $i_L(t)$  和电感电压  $u_L(t)$ , 并指出是什么响应。

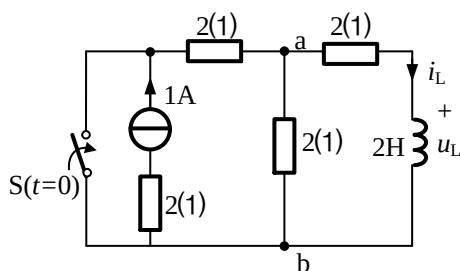


图 2.17 习题 2.17 电路

**2.17 解：** (1) 根据换路定则， $i_L(0_-)=i_L(0_+)=0(\text{A})$ ， $i_L(\infty)=0.5(\text{A})$ ， $R_O=2+2=4(\Omega)$ ， $\tau=\frac{L}{R_O}=0.5(\text{s})$ ， $i_L(t)=0.5+(0-0.5)e^{-2t}=0.5-0.5e^{-2t} \quad t>0$ ， $u_L(t)=2e^{-2t} \quad t>0$ ； (2) RL 零状态响应；

**2.18** 彩色电视屏幕和示波器上的阴极射线显像管上的图像，是由光组成的栅格拼凑成的。

而栅格的不同色调和亮度的形成过程中，锯齿波起了重要的控制作用。锯齿波是利用电容器的充电与放电作用产生，电路如图 2.18 所示。开关 S 打开时，电容电压  $u_C$  上升到 6V 时，开关 S 闭合，电容对电阻  $R_L$  放电。电容电压  $u_C$  下降到接近 0 时，开关 S 又打开，电容 C 又被充电，电容电压  $u_C$  上升到 6V 时，开关 S 又闭合，如此周期性进行。试分析电容电压  $u_C$  大小，并画出电容电压  $u_C$  随时间变化的曲线。

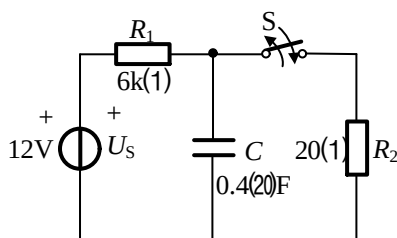
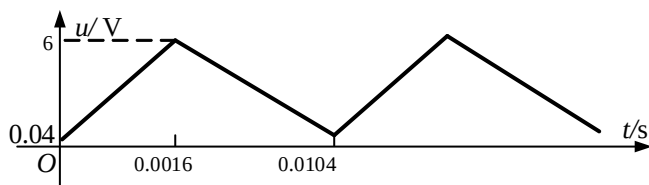


图 2.18 习题 2.18 电路

**2.18 解：**  $\tau=RC=6\times10^3\times0.4\times10^{-6}=2.4\times10^{-3}(\text{s})$ ，开关闭合时， $u_{C1}(\infty)=20\frac{12}{6000+20}=0.04(\text{V})$ ，电容放电，所需时间  $u_{C1}(\infty)=0=0.04+(6-0.04)e^{-\frac{t_1}{2.4\times10^{-3}}}$ ，

$t_1 = 0.012(\text{s})$ ；开关打开时，电容充电到 6V， $u_{C2}(\infty) = 6 = 12 + (0.04 - 12)e^{-\frac{t_2}{2.4 \times 10^{-3}}}$ ，所需时间  $t_2 = 0.0016(\text{s})$ 。

$$u_L(t) = \begin{cases} 12 - 11.96e^{-\frac{t}{2400}} & 0 \leq t \leq 0.0016\text{s} \\ 0.04 + 5.96e^{-\frac{t}{2400}} & 0.0016 \leq t \leq 0.012\text{s} \end{cases}$$



### 习题 3

**3.1** 已知正弦电流瞬时值  $i = 5\sqrt{2} \sin(314t - 30^\circ) \text{ A}$ ，求出有效值、频率、周期和初相，并画波形图。

**3.1 解：**  $I = 5 \text{ (A)}$ ， $f = 50 \text{ (Hz)}$ ， $T = 0.02 \text{ (s)}$ ， $\theta_i = -30^\circ$ 。

**3.2** 正弦电流  $i$  的波形如图 3.1 所示，写出瞬时值表达式。

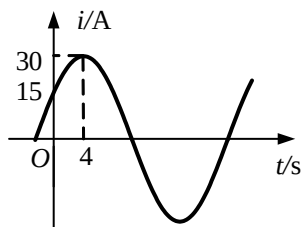
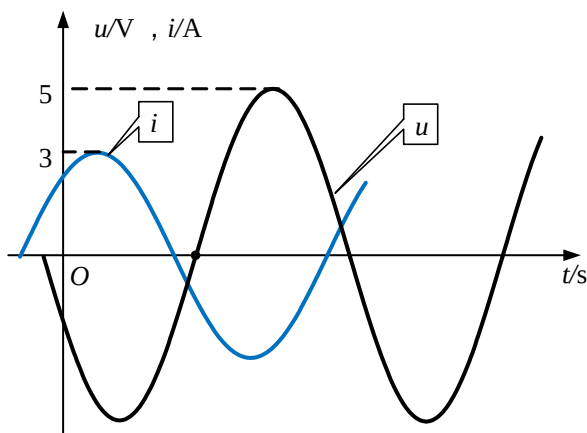


图 3.1 习题 3.2 波形

**3.2 解：**  $i = 30 \sin(15t + 30^\circ) \text{ (A)}$

**3.3** 正弦电压瞬时值  $u = 3\sqrt{2} \cos(4t + 45^\circ) \text{ V}$ ，正弦电流瞬时值  $i = 5\sqrt{2} \sin(4t - 30^\circ) \text{ A}$ 。求相位差，画波形图，说明超前滞后关系。

**3.3 解：**  $\varphi = \theta_u - \theta_i = 135^\circ - (-30^\circ) = 165^\circ$  电压  $u$  超前电流  $i$   $165^\circ$ 。



**3.4** 电路如图 3.2 所示， $u = 10 \cos(\omega t + 20^\circ) \text{ V}$ ， $i_1 = 2 \cos(\omega t + 110^\circ) \text{ A}$ ， $i_2 = -4 \cos(\omega t + 100^\circ) \text{ A}$ 。试写出电压和各电流的有效值、初相位，求电压和各电流的相位差，并说明超前滞后关系。

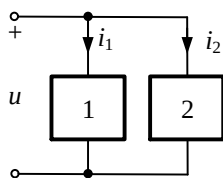


图 3.2 习题 3.4

**3.4 解:**  $U = 5\sqrt{2} \text{ (V)}$ ,  $I_1 = \sqrt{2} \text{ (A)}$ ,  $I_2 = 2\sqrt{2} \text{ (A)}$ ,  $\theta_u = 110^\circ$ ,  $\theta_{i_1} = -160^\circ$ ,  $\theta_{i_2} = 10^\circ$ , 电压  $u$  滞后电流  $i_1$   $90^\circ$ , 电压  $u$  超前电流  $i_2$   $100^\circ$ 。

**3.5** 正弦电压和电流分别为

(1)  $u_1 = 3\sqrt{2} \cos(4t + 60^\circ) \text{ V}$

(2)  $u_2 = 5 \sin(4t - 30^\circ) \text{ V}$

(3)  $i_1 = 5\sqrt{2} \sin(2t - 45^\circ) \text{ A}$

(4)  $i_2 = 5 \cos(2t + 45^\circ) \text{ A}$

写出有效值相量表示, 并画出相量图。

**3.5 解:** (1)  $\dot{U}_1 = 3\angle 150^\circ \text{ (V)}$ ; (2)  $\dot{U}_2 = \frac{5\sqrt{2}}{2} \angle -30^\circ \text{ (V)}$ ; (3)  $\dot{I}_1 = 5\angle -45^\circ \text{ (A)}$ ; (4)  $\dot{I}_1 = \frac{5\sqrt{2}}{2} \angle 135^\circ \text{ (A)}$ 。

**3.6** 设以下复数代表有效值相量, 试求其对应的正弦量。

(1)  $(3 - j4) \text{ V}$

(2)  $(-j4) \text{ A}$

(3)  $(220\angle 30^\circ) \text{ V}$

(4)  $(2\sqrt{2}\angle -30^\circ) \text{ A}$

**3.6 解:** (1)  $u = 5 \sin(\omega t - 53^\circ) \text{ (V)}$ ;

(2)  $i = 4 \sin(\omega t - 90^\circ) \text{ (A)}$ ;

(3)  $u = 220 \sin(\omega t + 30^\circ) \text{ (V)}$ ;

(4)  $i = 4 \sin(\omega t - 30^\circ) \text{ (A)}$ 。

**3.7** 电路如图 3.3 所示, 已知  $i_1 = 5\sqrt{2} \sin(2t - 45^\circ) \text{ A}$ ,  $i_2 = 5 \cos(2t + 90^\circ) \text{ A}$ , 求  $i_s$ 。

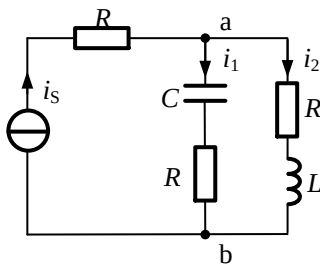


图 3.3 习题 3.7

3.7 解:  $\dot{I}_1 = 5\angle -45^\circ(\text{A})$  ,  $\dot{I}_2 = \frac{5\sqrt{2}}{2}\angle 180^\circ(\text{A})$  ,

$$\dot{I}_S = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 5\angle -45^\circ + \frac{5\sqrt{2}}{2}\angle 180^\circ = \frac{5\sqrt{2}}{2}\angle -90^\circ(\text{A}) , \quad i_S = 5\sin(2t - 90^\circ)(\text{A}) .$$

3.8 图 3.4 中, 已知  $u_{ab} = 3\sqrt{2}\cos(4t + 45^\circ)\text{V}$  ,  $u_{bc} = 4\sin(4t - 90^\circ)\text{V}$  , 求  $u_S$ 。

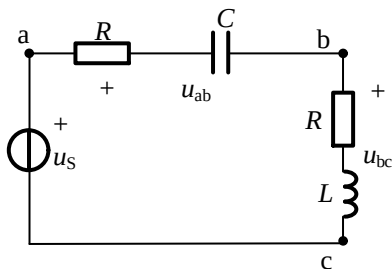


图 3.4 习题 3.8 电路

3.8 解:  $\dot{U}_{ab} = 3\angle 135^\circ(\text{V})$  ,  $\dot{U}_{bc} = 2\sqrt{2}\angle -90^\circ(\text{V})$  ,  $\dot{U}_S = \dot{U}_{ab} + \dot{U}_{bc} = \frac{3\sqrt{2}}{2} - j\frac{\sqrt{2}}{2} = \sqrt{5}\angle -18.3^\circ(\text{V})$  ,  
 $u_S = \sqrt{10}\sin(4t - 18.43^\circ)(\text{V})$ 。

3.9 电动机是把电能转换成机械能的一种设备。电风扇调速器是在电扇电动机中串联一个电感线圈来降低电动机两端的电压, 从而达到调速的目的, 等效电路如图 3.5 所示, 电扇电动机电阻  $R=163\Omega$  , 感抗  $X_{L_1}=252\Omega$  , 电源电压为工频  $\dot{U}_S=220\angle 0^\circ\text{V}$  , 要使电动机电压降为 180V, 试求串联的电感  $L_2$  多大? 若线圈换成电阻来降压, 电阻  $R_2$  应为多少? 从功率角度比较两种办法的优缺点。工频是指电气设备采用的额定频率, 中国为 50Hz。

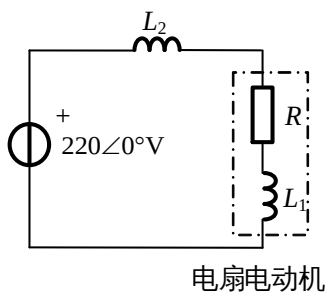


图 3.5 习题 3.9 电路

3.9 解:  $Z = R + jX_L$  ,  $I = \frac{U}{|Z|} = \frac{180}{\sqrt{163^2 + 252^2}} = 0.5(\text{A})$  ,

电机电阻和电感上的电压为  $U_R = 0.5 \times 163 = 81.5(\text{V})$  ,  $U_{L1} = 0.5 \times 253 = 126(\text{V})$  ,



串联电感  $L_2$  的电压  $U_{L_2} = \sqrt{220^2 - 81.5^2} - 126 = 78.3(\text{V})$ ，串联电感  $L_2$  的电感量

$$L_2 = \frac{U_{L_2}}{\omega I} = \frac{78.3}{3.14 \times 0.5} = 0.5(\text{H})。$$

若用电阻  $R_2$  代替，则串联电阻端电压  $U_{R_2} = \sqrt{220^2 - 126^2} - 81.5 = 98.8(\text{V})$ ，串联电阻

$$R_2 = \frac{U_{R_2}}{I} = 197.6(\Omega)。$$

比较两种方法，串联电阻的阻值大于电动机阻值，因此需多消耗功率

$$\Delta P = 0.5^2 \times 197.6 = 49.4(\text{W})，这部分能量是要计入用户电表的，而串联的电感不需要消$$

耗多少功率，所以，对用户来讲，用串联电感的方法降低电压比较合适。

**3.10** 日光灯其实是一个 RL 电路。当日光灯正常工作时，等效于一个电感  $L$ （镇流器）

和电阻  $R$ （灯管）的串联电路（忽略镇流器的电阻），如图 3.6 所示。设已知 ab 之间电压

工频  $U=220\text{V}$ ，电流  $I=0.4\text{A}$ ，日光灯的功率为  $P=40\text{W}$ ，试求镇流器的电感  $L$  大小。

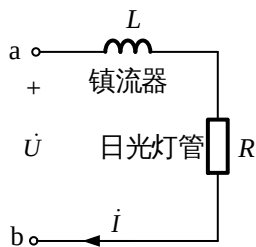


图 3.6 习题 3.10 电路

**3.10 解：**由于镇流器  $L$  的电阻可以忽略，消耗功率约为 0， $P = P_R = U_R I_R$ ， $U_R = 100\text{V}$ ，

$$U_L = \sqrt{U^2 - U_R^2} = 195.96 \approx 196\text{V}，镇流器 L 的电感量  $L = \frac{U_L}{\omega I} = \frac{196}{3.14 \times 0.4} = 1.56\text{H}。$$$

**3.11** 由 R 和 C 组成移相电路如图 3.7 所示。如果输入电压  $u_1 = \sqrt{2} \sin 2t(\text{V})$ ，欲使输出电压

$u_2$  在相位上前移  $60^\circ$ ，应该选择多大的电阻  $R$ ？此时输出电压的有效值  $U_2$  等于多少？

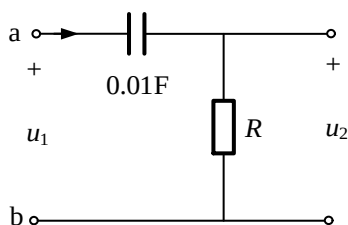


图 3.7 习题 3.11 电路

**3.11 解：方法一：**容抗  $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \times 0.01} = 50(\Omega)$ ， $Z = R - j50(\Omega)$ ， $\frac{\dot{U}_1}{Z} R = \frac{1 \angle 0^\circ}{R - j50} R = \dot{U}_2$   
 $\theta_u = 60^\circ = \arctan \frac{50}{R}$ ， $R = 29(\Omega)$ ， $\dot{U}_1 = 1 \angle 0^\circ$ ， $\dot{U}_2 = \dot{I} R = \frac{\dot{U}_1}{Z} R = \frac{\dot{U}_1}{R - j50} R$ ，  
 $\dot{U}_2 = \frac{1 \angle 0^\circ \times 29}{58 \angle -60^\circ} = 0.5 \angle -60^\circ$ ， $U_2 = 0.5(\text{V})$ 。

**方法二：**根据 RC 高通滤波电路的相频特性  $\varphi = \arctan \left( \frac{f_L}{f} \right) = 60^\circ$ ， $f_L = \frac{1}{2\pi RC}$ ， $f = \frac{\omega}{2\pi}$ ， $R = 29(\Omega)$ ，  
 $\dot{U}_1 = 1 \angle 0^\circ$ ， $\dot{U}_2 = \dot{I} R = \frac{\dot{U}_1}{Z} R = \frac{\dot{U}_1}{R - j50} R$ ， $\dot{U}_2 = \frac{1 \angle 0^\circ \times 29}{58 \angle -60^\circ} = 0.5 \angle -60^\circ$ ， $U_2 = 0.5(\text{V})$ 。

**3.12** 已知电路中各电流表读数如图 3.8 所示，电流表  $A_2$  未知，电源  $\omega = 2 \text{ rad/s}$ ，求电容的  $C$  值。

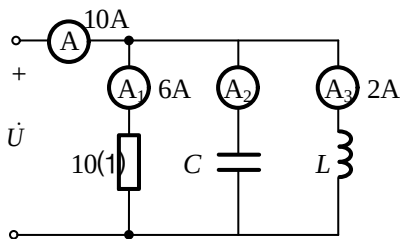


图 3.8 习题 3.12 电路

**3.12 解：** $\dot{I}_R = 6 \angle 0^\circ(\text{A})$ ， $\dot{I}_C = I_C \angle 90^\circ(\text{A})$ ， $\dot{I}_L = 2 \angle -90^\circ(\text{A})$ ， $I = 10 = \sqrt{6^2 + (I_C - 2)^2}$ ，

$$I_C = 10(\text{A})，\dot{U} = 60 \angle 0^\circ(\text{V})，C = \frac{\dot{I}_C}{j\omega \dot{U}} = \frac{10 \angle 90^\circ}{j2 \times 60} = 0.083 \approx 0.08(\text{F})。$$

**3.13** 求图 3.9 中电流表和电压表的读数。

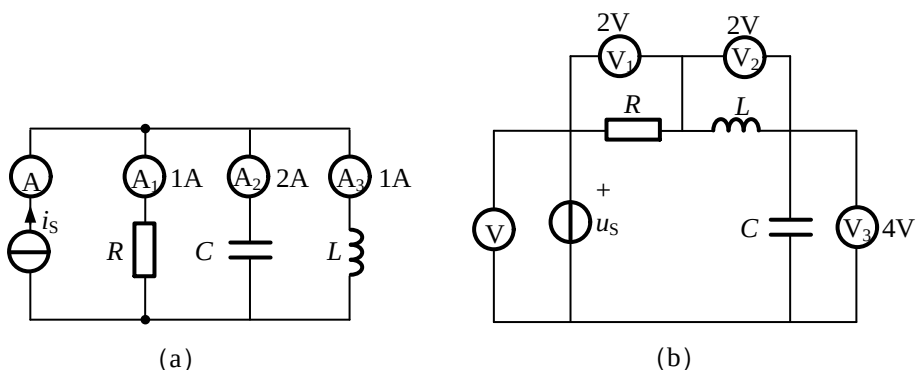


图 3.9 习题 3.13 电路

**3.13 解:** (a)  $\dot{I}_R = 1\angle 0^\circ(\text{A})$  ,  $\dot{I}_C = 2\angle 90^\circ(\text{A})$  ,  $\dot{I}_L = 1\angle -90^\circ(\text{A})$  ,

$\dot{I}_S = \dot{I}_R + \dot{I}_C + \dot{I}_L = 1 + j = \sqrt{2}\angle 45^\circ(\text{A})$  , 表 A 的读数为

$$|\dot{I}_S| = |1\angle 0^\circ + 2\angle 90^\circ + 1\angle -90^\circ| = \sqrt{2} = 1.414(\text{A}) ;$$

(b)  $\dot{U}_R = 2\angle 0^\circ(\text{V})$  ,  $\dot{U}_L = 2\angle 90^\circ(\text{V})$  ,  $\dot{U}_C = 4\angle -90^\circ(\text{V})$  ,

$$\dot{U}_S = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = 2 - 2j = 2\sqrt{2}\angle -45^\circ(\text{V}) ,$$

表 V 的读数为  $|\dot{U}_S| = |2\angle 0^\circ + 2\angle 90^\circ + 4\angle -90^\circ| = \sqrt{8} = 2.828(\text{V})$ 。

**3.14** 已知电路中各电压表读数如图 3.10 所示,  $f = 50 \text{ Hz}$  , 求电阻的  $R$  值和电感的  $L$  值。

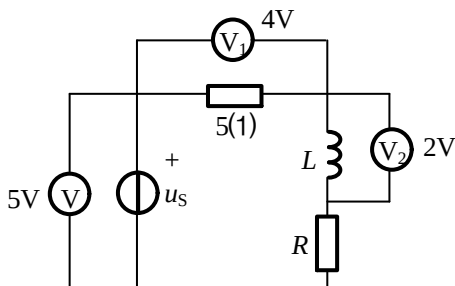


图 3.10 习题 3.14 电路

**3.14 解:**  $U_1 = 4(\text{V})$  ,  $U_S = 5(\text{V})$  ,  $U_L = 2(\text{V})$  ,  $U_S = \sqrt{U_1^2 + U_L^2 + U_R^2}$  ,  $U_R = \sqrt{5} \approx 2.24(\text{V})$  ,

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_1}{5} = \frac{4\angle 0^\circ}{5} = 0.8\angle 0^\circ(\text{A}) , \quad R = \frac{\dot{U}_R}{\dot{I}} = \frac{2.24\angle 0^\circ}{0.8\angle 0^\circ} = 2.8(\Omega) ,$$

$$L = \frac{\dot{U}_L}{j2\pi f \dot{I}} = \frac{2\angle 90^\circ}{j2 \times 3.14 \times 50} = 0.006(\text{H})。$$

**3.15** 求图 3.11 所示电路 ab 端的等效阻抗  $Z$  及导纳  $Y$ 。

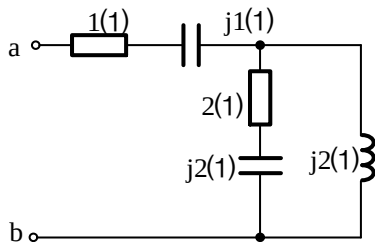


图 3.11 习题 3.15 电路图

**3.15 解：**  $Z = 1 + (-j1) + \frac{(2 - j2) \times j2}{(2 - j2) + j2} = (3 + j)(\Omega)$ ， $Y = \frac{1}{Z} = (0.3 - j0.1)(\text{S})$ 。

**3.16** 在电源相同， $R = X_C = X_L$  的情况下，如图 3.12 示电路中，哪个图中的灯泡最亮？

哪个图中的灯泡最暗？

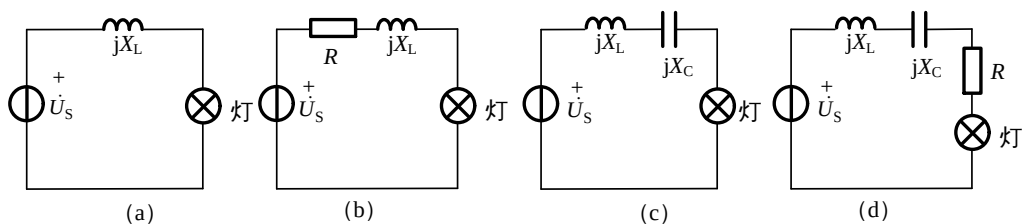


图 3.12 习题 3.16 电路图

**3.16 解：** (c)图灯最亮，(b)图灯最暗。因为(a)  $|Z| = X_L$ ；(b)  $|Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2}$  值最大，灯泡最暗；(c)  $|Z| = X_L - X_C$  值最小，灯泡最亮；(d)  $|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ ； $\dot{U}_S$

**3.17** 如图 3.13 所示，已知  $u_S = 4\sqrt{2}\sin 100t \text{ V}$ ， $i_S = 4\sqrt{2}\sin 100t \text{ A}$ ，试求  $i$ 。

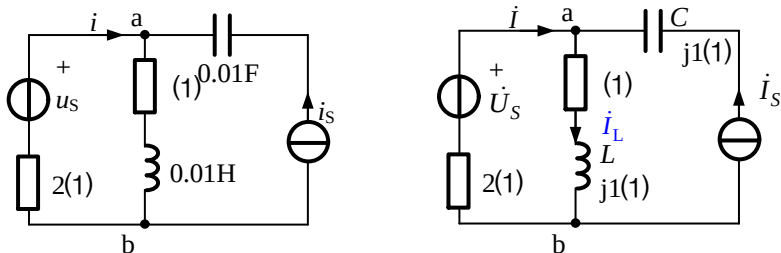


图 3.13 习题 3.17 电路图

**3.17 解:**  $\dot{U}_S = 4\angle 0^\circ (\text{V})$ ,  $\dot{I}_S = 4\angle 0^\circ (\text{A})$ , 对于节点 a,  $\sum \dot{I}_a = 0$ ,  $\dot{I} = -\dot{I}_S + \dot{I}_L$ , 回路  $\sum \dot{U}_{ab} = 0$ ,  $\dot{U}_S = \dot{I}_L + j\dot{I}_L + 2\dot{I}$ ,  $\dot{I} = \frac{-j4}{3+j} = -0.4 - j1.2 = 1.26\angle -108.43^\circ (\text{A})$ 。

**3.18** 已知  $u_S = 2\sqrt{2}\sin 100t \text{ V}$ , 试求图 3.14 中的电压  $u$ 。

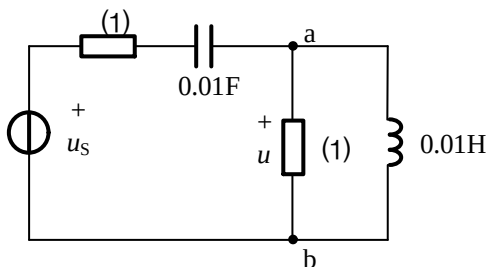


图 3.14 习题 3.18 电路图

**3.18 解:**  $\dot{U}_S = 2\angle 0^\circ (\text{V})$ ,  $Z = 1 + (-j1) + \frac{1 \times j1}{1 + j1} = \left(\frac{3-j}{2}\right) (\Omega)$ ,  $\dot{U} = \frac{\dot{U}_S}{Z} \times \frac{j}{1+j} = \frac{2}{5} + j\frac{4}{5} = \frac{\sqrt{20}}{5} \angle 63.4^\circ (\text{V})$ ,  $u = \frac{\sqrt{40}}{5} \sin(100t + 63.4^\circ) (\text{V})$ 。

**3.19** 求图 3.15 所示电路的各支路电流  $\dot{I}$ ,  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$ 。

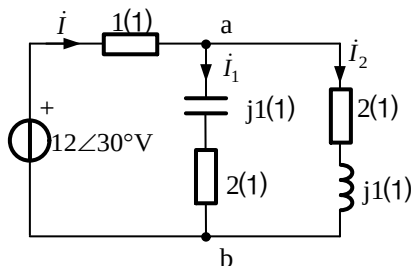


图 3.15 习题 3.19 电路图

**3.19 解:**  $Z = 1 + \frac{(2-j1) \times (2+j1)}{(2-j1) + (2+j1)} = \frac{9}{4} (\Omega)$ ,  $\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{16}{3} \angle 30^\circ (\text{A})$ ,  $\dot{I}_1 = \frac{(2+j1)}{(2-j1) + (2+j1)} \dot{I} = \frac{\sqrt{5}}{4} \angle 26.56^\circ \times \frac{16}{3} \angle 30^\circ = \frac{4\sqrt{5}}{3} \angle 56.56^\circ (\text{A})$ ,  $\dot{I}_2 = \frac{(2-j1)}{(2-j1) + (2+j1)} \dot{I} = \frac{\sqrt{5}}{4} \angle -26.56^\circ \times \frac{16}{3} \angle 30^\circ = \frac{4\sqrt{5}}{3} \angle 3.44^\circ (\text{A})$ 。

**3.20** 已知图 3.16 中的  $u_S = 4\angle -90^\circ \text{ V}$ ,  $\omega = 100 \text{ rad/s}$ , 求  $\dot{U}_C$ 、 $\dot{U}_R$  及  $\dot{U}_L$ , 并画相量图。

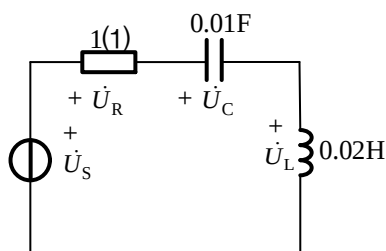
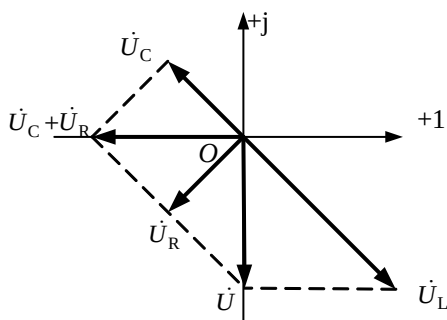


图 3.16 习题 3.20 电路图

**3.20 解:**  $\dot{U}_S = 4\angle -90^\circ (\text{V})$ ,  $Z = 1 - j1 + j2 = (1 + j)(\Omega)$ ,  $\dot{I} = \frac{\dot{U}_S}{Z} = \frac{4\angle -90^\circ}{1 + j} = -2 - 2j$ ,  
 $\dot{U}_R = \dot{I}R = -2 - j2 = 2.83\angle -171.83^\circ (\text{V})$ ,  $\dot{U}_L = jX_L \times \dot{I} = 4 - j4 = 5.66\angle -45^\circ (\text{V})$ ,  
 $\dot{U}_C = -jX_C \times \dot{I} = -2 + j2 = 2.83\angle 135^\circ (\text{V})$ 。



**3.21** 已知  $u_{S1} = 4\sqrt{2}\sin 5t \text{ V}$ ,  $u_{S2} = 2\sqrt{2}\sin 5t \text{ V}$ , 试求图 3.17 中的电流  $i$ 。

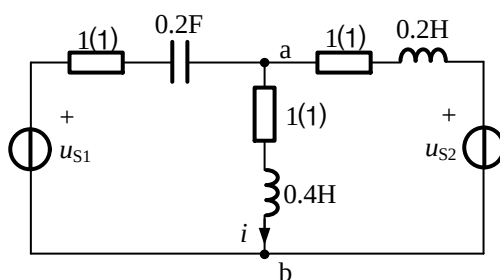
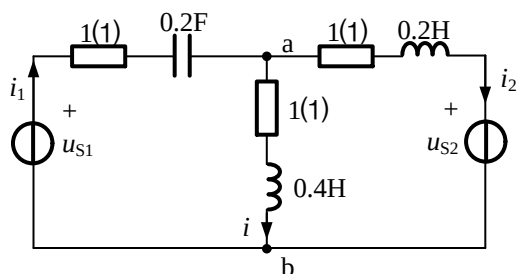


图 3.17 习题 3.21 电路图

**3.21 解:**  $\dot{U}_{S1} = 4\angle 0^\circ (\text{V})$ ,  $\dot{U}_{S2} = 2\angle 0^\circ (\text{V})$ , 对于节点 a,  $\sum \dot{I}_a = 0$ ,  $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$ , 回路

$\dot{U}_{S1} = \dot{I}_1 \times (1 - j) + \dot{I} \times (1 + j2)$ , 回路  $\dot{U}_{S2} = \dot{I}_2 \times (1 + j) + \dot{I} \times (1 + j2)$ , 得出

$$i = 1 - j\frac{1}{2} = \frac{\sqrt{5}}{2} \angle -26.56^\circ (\text{A})$$



$$i = \frac{\sqrt{10}}{2} \sin(5t - 26.56^\circ) (\text{A}).$$

**3.22** 试求图 3.18 中的电压  $\dot{U}$ 。

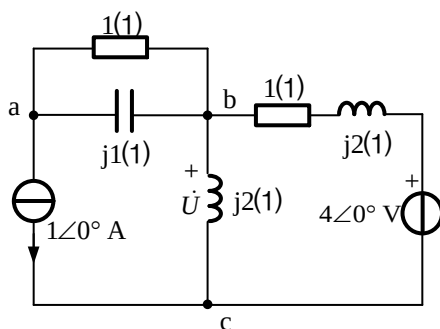
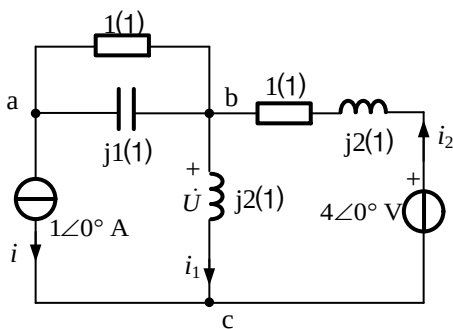


图 3.18 习题 3.22 电路图

**3.22 解：**对于节点  $c$ ， $\sum \dot{I}_c = 0$ ， $\dot{I}_2 = \dot{I}_1 + \dot{I}$ ，对于回路  $4\angle 0^\circ = \dot{I}_2 \times (1 + j2) + \dot{I}_1 \times (j2)$ ， $\dot{I}_1 = \frac{3 - j2}{1 + j4}$ ，

$$\dot{U} = \frac{3 - j2}{1 + j4} \times j2 = 1.75 \angle -19.65^\circ (\text{V}).$$



## 习题 4

4.1 音频放大器的电压转换电路如图 4.1 所示。设输入电压为 6V，二极管导通电压  $U_{D(on)}$  约为 0.7V，试分别估算开关 S 断开和闭合时所得到的转换输出电压  $U_o$  的数值。

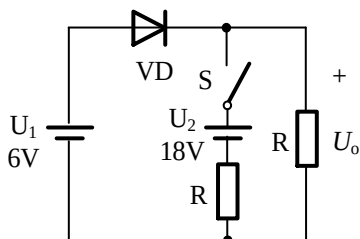
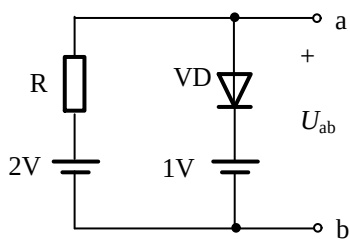


图 习题 电路图

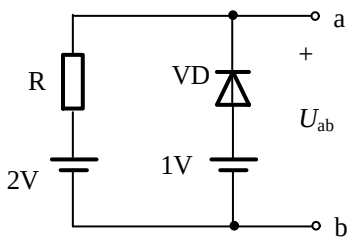
4.1 解：S 断开：断开 VD， $U_D = 6V$ 。所以 VD 导通， $U_o = 6 - 0.7 = 5.3V$

S 闭合：断开 VD， $U_D = 6 - \frac{R}{R+R} \times 18 = -3(V)$ ，所以 VD 截止， $U_o = \frac{R}{R+R} \times 18 = 9(V)$

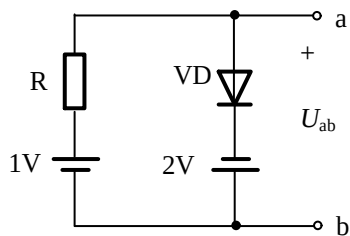
4.2 电子照明设备的电压转换电路如图 4.2 所示。试分析判断图 4.2 所示各电路中二极管是导通还是截止，并计算转换电路的输出电压  $U_{ab}$ ，设图中的二极管都是理想的。



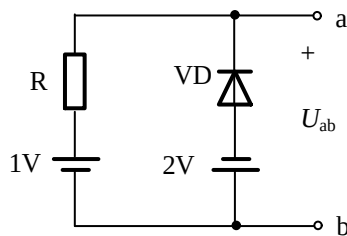
C



D



E



F

图 题 的电路图



4.2 解: (a) VD 导通,  $U_{ab} = 1(\text{V})$  (b) VD 截止,  $U_{ab} = 2(\text{V})$

(c) VD 导通,  $U_{ab} = -2(\text{V})$  (d) VD 截止,  $U_{ab} = 1(\text{V})$

4.3 发光二极管与普通二极管一样是由一个 PN 结组成, 具有单向导电性。发光二极管通过电子与空穴复合释放能量发光, 它在照明领域应用广泛。设 VD 为发光二极管, 开启电压为  $0.7\text{V}$ 。某电子设备的指示灯电路如图 4.3 所示。求电路的输出电压  $U_{ab}$ 。

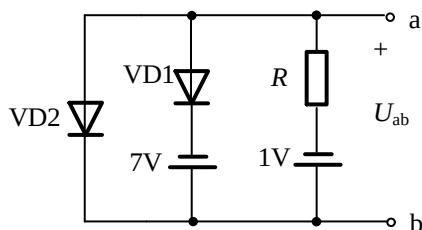


图4.3 题4.3的电路图

4.3 解: VD1 导通, VD2 不导通。  $U_{ab} = -6.3(\text{V})$

4.4 二极管两端加正向电压使其导通后, 其正向压降基本保持不变。因此二极管在电路中可以作为限幅元件, 将信号的幅度限制在一定的范围内。在图 4.4 所示的电路均为电压限幅电路。设二极管为理想的, 输入电压为正弦交流电压  $u_i = 20\sin \omega t \text{V}$ , 试分别画出输出电压  $u_o$  的波形, 并标出幅值。

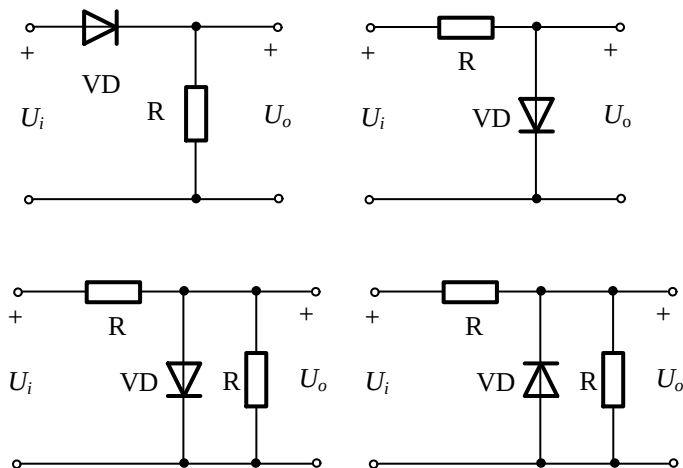
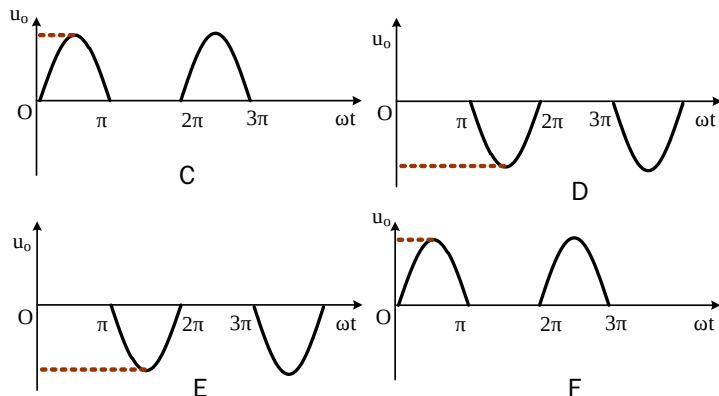


图4.4 习题4.4电路图

4.4 解: (a) 正半波, VD 导通,  $u_o = u_i$ , 负半波, VD 截止,  $u_o = 0$   
 (b) 正半波, VD 导通,  $u_o = 0$ , 负半波, VD 截止,  $u_o = u_i$   
 (c) 正半波, VD 导通,  $u_o = 0$ , 负半波, VD 截止,  $u_o = 0.5u_i$

(d) 正半波, VD 截止,  $u_o = 0.5u_i$ , 负半波, VD 导通,  $u_o = 0$



4.5 二极管两端加正向电压使其导通后, 其正向压降基本保持不变, 因此二极管在电路中可以作为限幅元件, 将信号的幅度限制在一定的范围内。图 4.5 所示电路均为电压限幅电路。设二极管为理想的, 输入电压为正弦交流电压  $u_i = 9\sin\omega t\text{V}$ , 试分别画出输出电压  $u_o$  的波形, 并标出幅值。

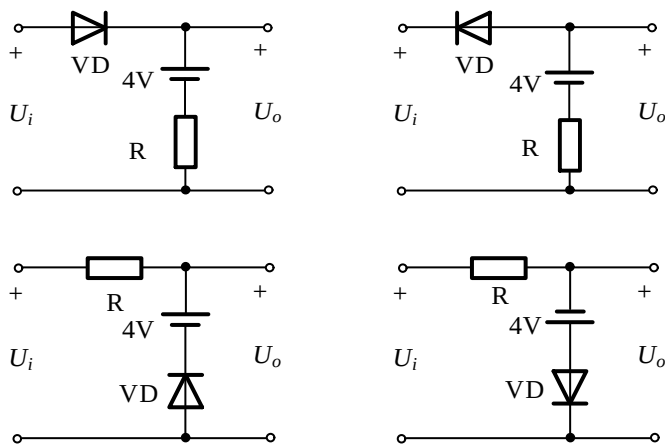


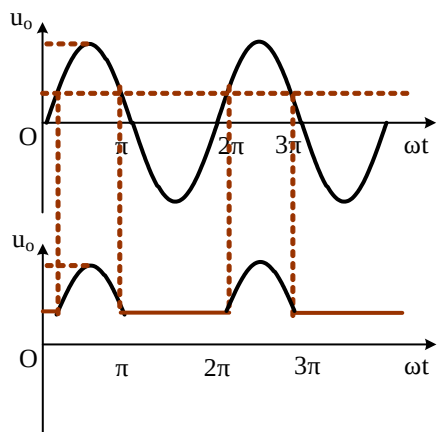
图 4.5 习题 4.5 电路图

4.5 解: (a) 断开 VD,  $u_D = u_i - 4 \begin{cases} > 0, \text{VD 导通}, u_i > 4\text{V}, u_o = u_i \\ < 0, \text{VD 截止}, u_i < 4\text{V}, u_o = 4\text{V} \end{cases}$

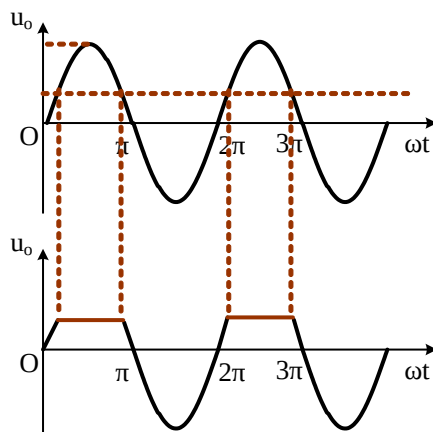
(b) 断开 VD,  $u_D = 4 - u_i \begin{cases} > 0, \text{VD 导通}, u_i < 4\text{V}, u_o = u_i \\ < 0, \text{VD 截止}, u_i > 4\text{V}, u_o = 4\text{V} \end{cases}$

(c) 断开 VD,  $u_D = 4 - u_i \begin{cases} > 0, \text{VD 导通}, u_i < 4\text{V}, u_o = 4\text{V} \\ < 0, \text{VD 截止}, u_i > 4\text{V}, u_o = u_i \end{cases}$

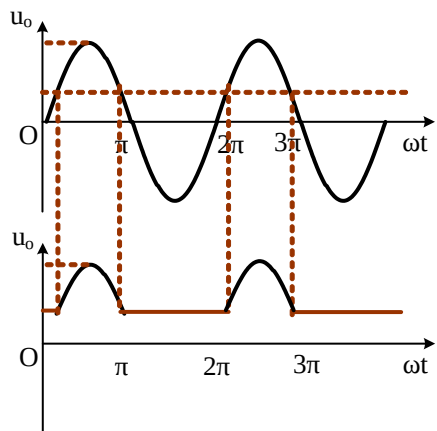
(d) 断开 VD,  $u_D = 4 + u_i$   $\begin{cases} > 0, \text{VD 导通}, u_i > -4\text{V}, u_o = -4\text{V} \\ < 0, \text{VD 截止}, u_i < -4\text{V}, u_o = u_i \end{cases}$



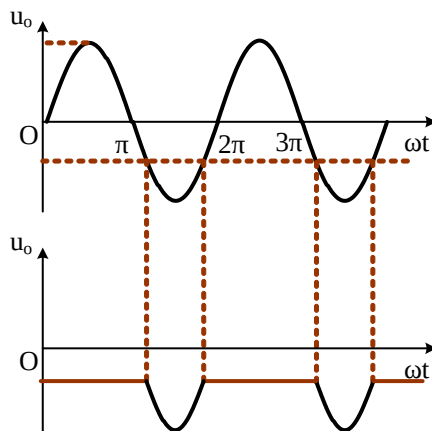
C



D



E



F

4.6 二极管的双向电压限幅电路如图 4.6 所示。设二极管为理想的，输入正弦电压  $u_i = 5\sin\omega t\text{V}$ ，试画出输出电压  $u_o$  的波形。

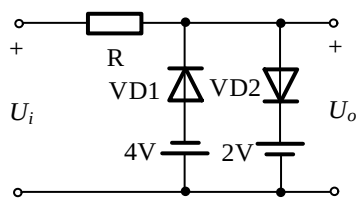
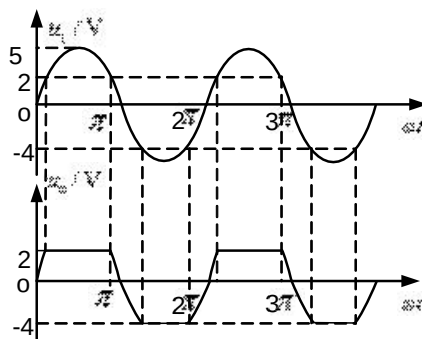


图4.6 习题4.6电路图

4.6 解：断开 VD<sub>1</sub> VD<sub>2</sub>,  $u_{D1} = 4 - u_i, u_{D2} = u_i - 2$

所以  $u_i > 2V$  时,  $u_{D1} < 0$ ,  $u_{D2} > 0$   $VD_1$  截止,  $VD_2$  导通,  $u_o = 2V$   
 $-4V < u_i < 2V$  时,  $u_{D1} < 0$ ,  $u_{D2} < 0$   $VD_1$ 、 $VD_2$  均截止,  $u_o = u_i$   
 $u_i < -4V$  时,  $u_{D1} > 0$ ,  $u_{D2} < 0$   $VD_1$  导通,  $VD_2$  截止,  $u_o = -4V$



4.7 由于二极管具有单向导电性, 其在正向电压作用下电阻很小, 相当于通路, 类似于开关打开状态; 而在反向电压作用下电阻很大, 相当于断路, 类似于开关闭合状态。二极管具有的这种开关特性, 使得其可以组成各种逻辑电路, 如高、低电平选择器等。图 4.7 所示电路中, 设二极管是理想的。利用二极管的开关特性, 求图中标记的电压和电流值。

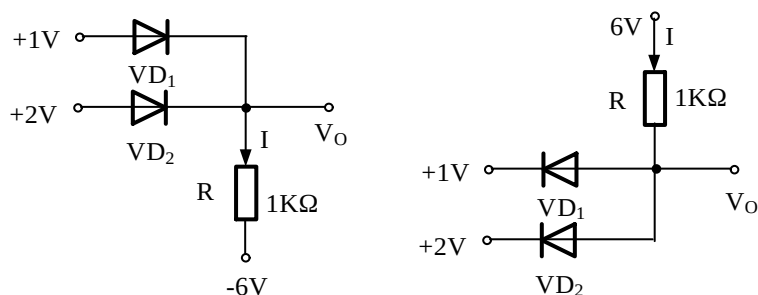


图4.7 习题4.7电路图

**4.7 解:** (a) 高电平选择电路,  $VD_1$  截止,  $VD_2$  导通,

$$V_o = 2V, I = \frac{V_o - (-6)}{R} = \frac{2 - (-6)}{1} = 8mA$$

(b) 低电平选择电路,  $VD_1$  导通,  $VD_2$  截止,

$$V_o = 1V, I = \frac{6 - V_o}{R} = \frac{6 - 1}{1} = 5mA$$

4.8 电饭锅的控制电路在汤煮沸后，接通半波整流电路，降低电功率以维持汤的沸腾。其半波整流电路如图 4.8 所示。已知  $R=100\Omega$ ，输出电压平均值  $U_{O(AV)}=10V$ 。求：(1) 输入电压的有效值。(2) 设电网电压波动范围为  $\pm 10\%$ 。选择二极管的主要参数：最大整流平均电流  $I_F$  和最高反向工作电压  $U_R$ 。

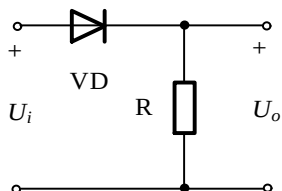


图 4.8 习题 4.8 电路图

4.8 解：半波整流，

$$U_I = \frac{U_{O(AV)}}{0.45} = 22.22(V), \quad I_{O(AV)} = \frac{U_{O(AV)}}{R} = 100(mA)$$

$$I_D = I_{O(AV)} = 100(mA), \quad I_F = 1.1I_D = 110(mA)$$

$$U_R = 1.1 \times \sqrt{2}U_I = 34.6(V)$$

4.9 电饭锅的煮饭控制电路通过全波整流电路接入电网。其全波整流电路如图 4.9 所示。已知输入电压  $u_i = 10 \sin \omega t V$ ， $R_L = 100\Omega$ ，二极管为理想二极管。求：(1) 输出电压的平均值  $U_{O(AV)}$ ；(2) 输出电流的平均值  $I_{O(AV)}$ ；(3) 二极管的最大整流平均电流  $I_F$  和最高反向工作电压  $U_R$ 。

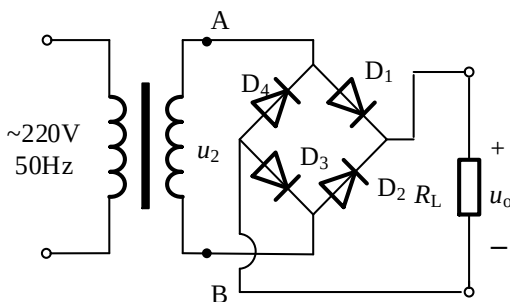


图 4.9 习题 4.9 电路图

4.9 解：全波整流，

$$U_{O(AV)} = 0.9U_i = 0.9 \times \frac{100}{\sqrt{2}} = 63.6(V), \quad I_{O(AV)} = \frac{U_{O(AV)}}{R_L} = 63.6(mA)$$

$$I_F = I_{D(AV)} = \frac{1}{2} I_{Q(AV)} = 31.82(\text{mA})$$

$$U_R = \sqrt{2} U_I = 10(\text{V})$$

4.10 稳压二极管利用的是二极管的反向工作特性，保持二极管两端电压大小基本不变。利用二极管的稳压特性构成的电压过压保护电路如图 4.10 所示。已知稳压管的稳压值  $U_Z = 5\text{V}$ ，稳定电流的最小值  $I_{Z\min} = 5\text{mA}$ ，负载上所能承受的电压不能超过  $5\text{V}$ 。求图 4.10 所示电路中  $U_{O1}$  和  $U_{O2}$ ，试分析这两个电路中的稳压管是否起到了过压保护的作用。

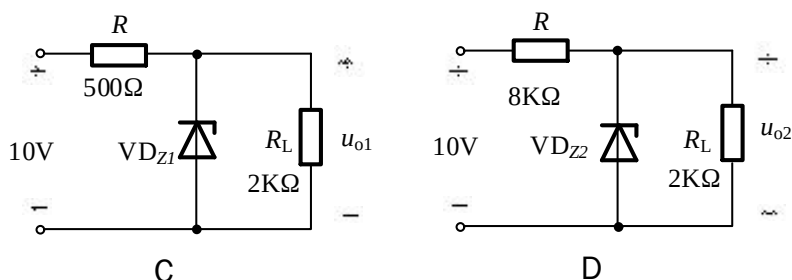


图4.10 习题4.10电路图

4.10 解：(a) 断开  $D_Z$ ， $U_{DZ} = \frac{R_L}{R + R_L} \times 10 = 8(\text{V}) > U_Z$

假设  $D_Z$  稳压， $I_Z = \frac{10 - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_L} = 10 - 2.5 = 7.5(\text{mA}) > I_{Z\min}$ ，所以  $D_Z$  处于稳压状态，

$$U_{O1} = 5(\text{V})$$

(b)) 断开  $D_Z$ ， $U_{DZ} = \frac{R_L}{R + R_L} \times 10 = 2(\text{V}) < U_Z$

所以  $D_Z$  处于截止状态， $U_{O2} = 2(\text{V})$

4.11 利用两个稳压值不同的稳压管构成的直流电稳压电路如图 4.11 所示。其中，稳压管  $VD_{Z1}$  的稳定电压值为  $5\text{V}$ ，稳压管  $VD_{Z2}$  的稳定电压值为  $10\text{V}$ ，稳压管正向导通电压为  $0.7\text{V}$ ，最小稳定电流为  $5\text{mA}$ 。判断  $VD_{Z1}$  和  $VD_{Z2}$  的工作状态并求各个电路的输出电压  $U_{ab}$ 。

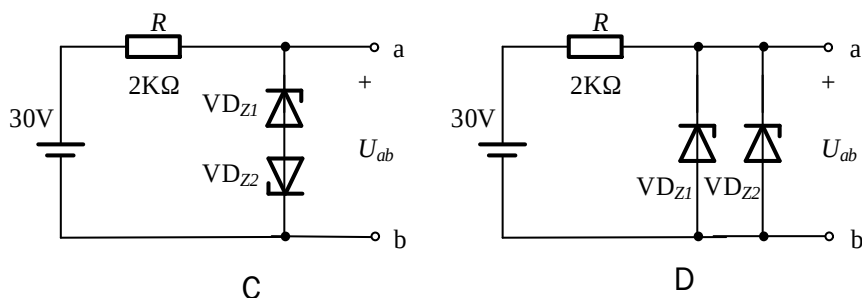


图4.11 习题4.11电路图

4.11 解：(a) 假设  $VD_{z1}$  处于反向击穿状态， $VD_{z2}$  正向导通，

$$I_Z = \frac{30 - 5.7}{2} = 12.15(\text{mA}) > 5(\text{mA})$$

所以  $VD_{z1}$  处于稳压状态， $VD_{z2}$  处于正向导通状态  $U_{ab} = 5.7(\text{V})$

(b) 假设  $VD_{z1}$  处于反向击穿状态， $VD_{z2}$  处于反向截止  $I_Z = \frac{30 - 5}{2} = 12.5(\text{mA}) > 5(\text{mA})$

所以  $VD_{z1}$  处于稳压状态， $VD_{z2}$  处于反向截止状态  $U_{ab} = 5(\text{V})$

4.12 稳压二极管利用的是二极管的反向工作特性，保持二极管两端电压大小基本不变。利用二极管的稳压特性构成的电压过压保护电路如图 4.12 所示。稳压二极管的特性为：稳压电压  $U_z = 6\text{V}$ ， $I_{z\max} = 10\text{mA}$ ， $I_{z\min} = 0.2\text{mA}$ ，直流输入电压  $U_1 = 10\text{V}$ ，其不稳定量  $\Delta U_1 = \pm 1\text{V}$ ， $I_L = 0 \sim 5\text{mA}$ 。试求：

- (1) 直流输出电压  $U_O$ ；
- (2) 稳压管安全工作时，限流电阻  $R$  的最小值；
- (3) 稳压管稳定工作时，限流电阻  $R$  的最大值。

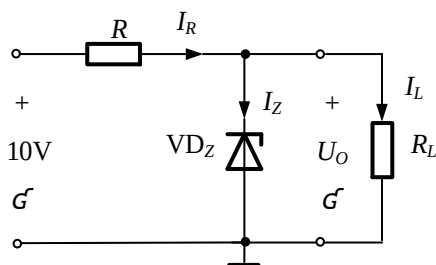


图4.12 习题4.12电路图

4.12 解：(1) 直流输出电压  $U_O$  等于稳压管的稳压电压，即  $U_O = U_z = 6\text{V}$ 。

(2)  $R_{\min}$

当  $U_I$  最大,  $R_L$  开路时, 通过  $R$  的电流, 即通过稳压管的电流为最大。因此, 为保证稳压管安全工作,  $I_z \leq I_{z\max}$ , 由此可求得限流电阻的最小值为

$$R_{\min} = \frac{U_{I\max} - U_z}{I_{z\max} + I_{L\min}} = \frac{11V - 6V}{10mA} = 500\Omega$$

(3)  $R_{\max}$

当  $U_I$  最小,  $R_L$  最小时, 流入稳压管的电流为最小; 为保证稳压管稳定工作, 要求  $I_z \geq I_{z\min}$ 。由可此得:

$$R_{\max} = \frac{U_{I\min} - U_z}{(I_{L\max} + I_{z\min})} = \frac{9V - 6V}{5mA + 0.2mA} = 577\Omega$$

综合以上分析, 可选取限流电阻  $R=500\Omega \sim 577\Omega$ 。

## 习 题 5

5.1 工作在放大区的三极管的放大倍数及电极电流如图 5.1 所示。根据图中所给条件确定图中三极管其他两个电极的电流值。

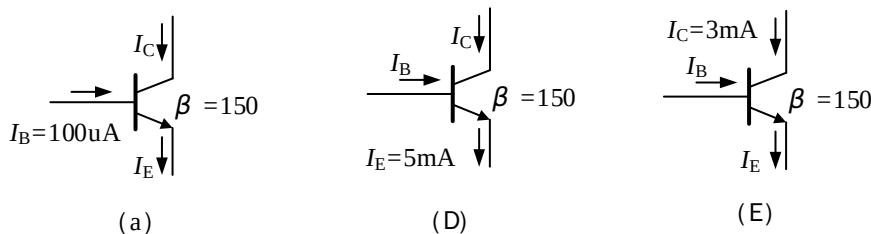


图5.1 习题5.1图

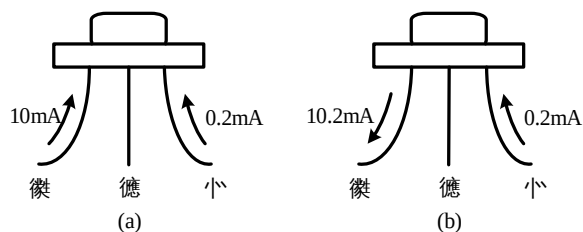
5.1 解: (a)  $I_C = \beta I_B = 150 \times 0.1 = 15(mA)$   $I_E = I_B + I_C = 15.1(mA)$

(b)  $I_B = I_E / (1 + \beta) = 5 / (1 + 150) = 33.1(\mu A)$   $I_C = I_E - I_B = 33.1(mA)$

(c)  $I_B = I_C / \beta = 3 / 150 = 20(\mu A)$   $I_E = I_B + I_C = 3.02(mA)$

5.2 处于放大工作状态的三极管, 其中两个管脚的电流大小及方向如图所示。求第三个管脚的电流大小及方向。判断三极管的类型、放大倍数以及三个管脚分别为什么电极。





5.2 解: (a) ①-c ②-e ③-b NPN  $I_E = I_B + I_C = 10 + 0.2 = 10.2(\text{mA})$   $\beta = 10/0.2 = 50$

(b) ①-e ②-c ③-b NPN  $I_C = I_E - I_B = 10.2 - 0.2 = 10(\text{mA})$   $\beta = 10/0.2 = 50$

5.3 三极管放大电路如图 5.3 所示。三极管的集电极接单刀三掷开关。电路中开关 S 掷于 1 号位时，集电极接直流电源  $+V_{CC}$ 。电路中开关 S 掷于 2 号位时，集电极接地。电路中开关 S 掷于 3 号位时，集电极悬空。比较基极电流  $I_B$  的大小并给出原因。

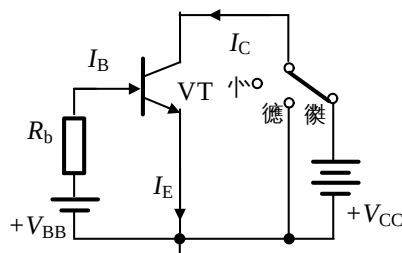


图5.3 习题5.3图

5.3 解: 在①时，发射极导通，集电结反偏，集电结收集电子，所以  $I_B$  电流下降，此时电流最小。

在②时，三极管相当于两个并联的二极管，此时  $I_B$  等于两个二极管导通电流之和，所以此时的电流最大。

在③时，发射极相当于一个二极管导通，此时  $I_B$  就等于此导通电流。

5.4 处于放大工作状态的三极管各极直流电位如图 5.4 所示，判断三极管的类型（NPN 或 PNP）及三个电极，并分别说明它们是硅管还是锗管。

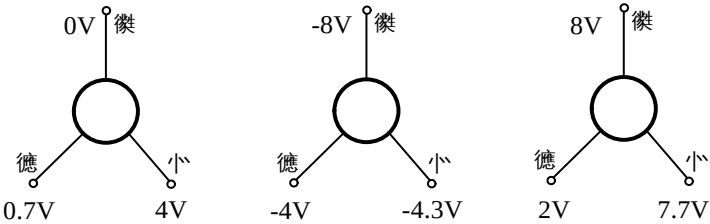


图 5.4 习题 5.4 图

5.4 解：(a) ①-e ②-b ③-c 硅 NPN,                    (b) ①-c ②-e ③-b 锗 PNP  
(c) ①-e ②-c ③-b 锗 PNP

5.5 三极管的各极对地电位如图 5.5 所示，判断这些三极管的工作状态（饱和、放大、截止或已损坏）。

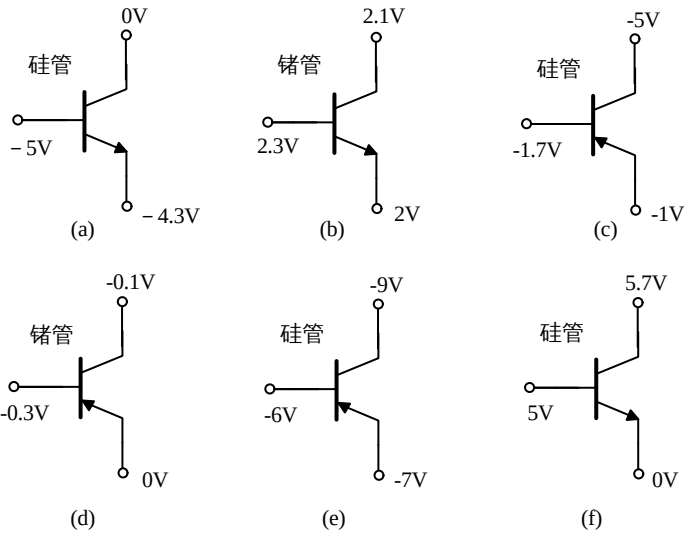


图5.5 习题5.5图

5.5 解：(a) 截止 (b) 饱和 (c) 放大 (d) 饱和 (e) 截止 (f) 损坏

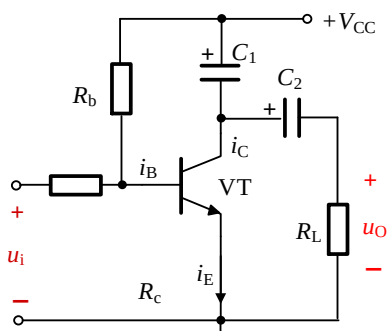
5.6 设三极管的极限参数为  $I_{CM} = 10\text{mA}$ 、 $P_{CM} = 100\text{mW}$ 、 $U_{(BR)CEO} = 7.5\text{V}$ 。在扩音器放大电路中，若此三极管的工作电流  $I_C = 5\text{mA}$ ，求此时三极管工作电压  $U_{CE}$  的极限值。若扩音器的工作电压  $U_{CE} = 6\text{V}$ ，求三极管工作电流  $I_C$  的极限值。

5.6 解：  $U_{CE} = \min\{U_{(BR)CEO}, \frac{P_{CM}}{I_C}\} = \min\{7.5, \frac{100}{5}\} = 7.5\text{V}$

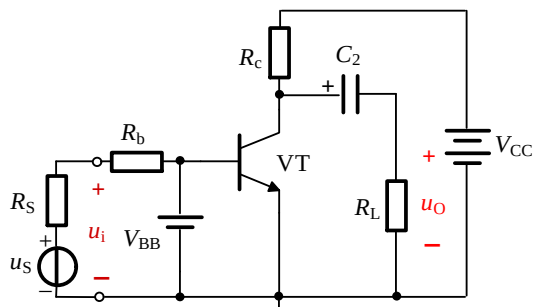
$$I_C = \min\{I_{CM}, \frac{P_{CM}}{U_{CE}}\} = \min\{10, \frac{100}{6}\} = 16.67(\text{mA})$$

5.7 图 5.6 为某同学为电子产品设计的放大电路。设电容的容抗可以忽略。下列电路是否能

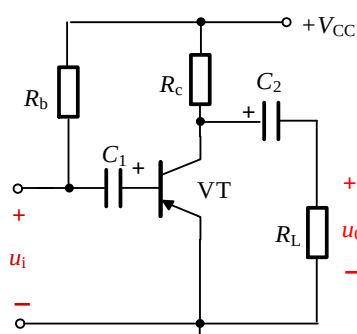
对正弦信号进行放大？如果不能放大正弦信号，说明理由并修正错误。



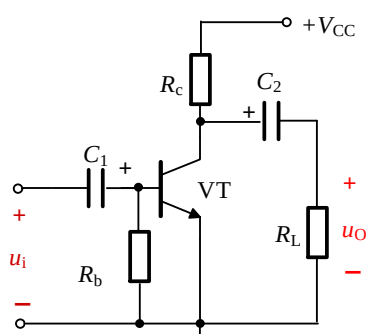
(a)



(D)



(E)



(F)

图5.6 习题5.7电路图

5.7 解：(a) 无放大作用。电容  $C$  隔直流，通交流。集电结反偏不成立。应将电容  $C$  改为阻值合适的电阻。

(b) 无放大作用。交流输入信号通过  $V_{BB}$  直接接地，无法加到三极管上。应在此支路串联一阻值合适的电阻。

(c) 无放大作用。PNP 三极管要求  $V_C < V_B < V_E$ ， $V_{CC}$  为正电源，不满足放大条件。同时电容  $C$  隔直流，通交流，使得发射结正偏不成立。 $V_{CC}$  应该取负电源，同时将电容  $C$  取消。

(d) 无放大作用。发射极正偏不成立。将电阻  $R_b$  接地那一端改为接到  $V_{CC}$ 。

5.8 语音放大电路如图 5.7 所示。求语音放大电路的静态工作点。

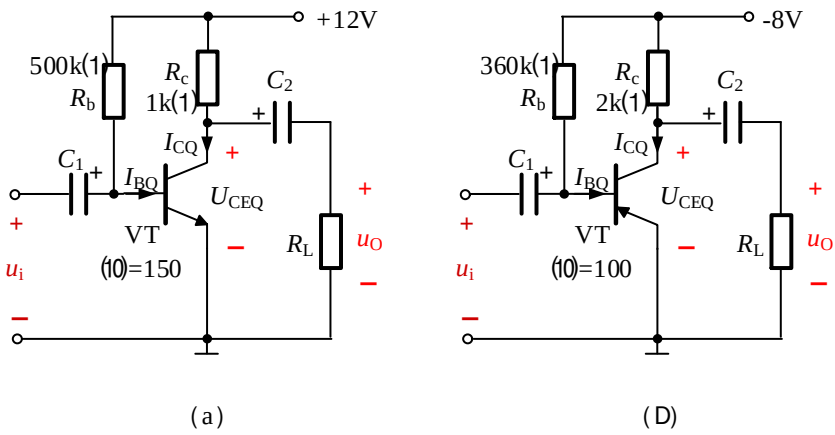


图5.7 习题5.8电路图

5.8 解：

(a) 
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BE(on)}}{R_b} = \frac{12 - 0.7}{500} \approx 22.6(\mu A)$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 3.39(mA)$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C = 12 - 3.39 \times 1 = 8.61(V)$$

(b) 
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} + U_{BE(on)}}{R_b} = \frac{-8 + 0.7}{360} \approx -20.3(\mu A)$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = -2.03(mA)$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C = -8 - (-2.03 \times 2) = -3.94(V)$$

5.9 在图 5.7(a) 所示语音放大电路中,假设电路其它参数不变,(1) 增大  $R_b$ ;(2) 增大  $V_{CC}$ ;

(3) 增大 $\beta$ 。试说明放大电路的  $I_{BQ}$ 、 $I_{CQ}$  和  $U_{CEQ}$  将增大、减小还是基本不变。

5.9 解：

	$R_b \uparrow$	$V_{CC} \uparrow$	$\beta \uparrow$
--	----------------	-------------------	------------------

$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BE(on)}}{R_b}$	↓	↑	不变
$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$	↓	↑	↑
$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C$ $= V_{CC} - \beta \cdot \frac{V_{CC} - U_{BE(on)}}{R_b} R_C$	↑	↑	↓

5.10 扩音器内部的三极管放大电路的直流通路如图 5.8 所示，判断它的静态工作点位于哪个区（放大区、饱和区、截止区）。设三极管均为硅管。

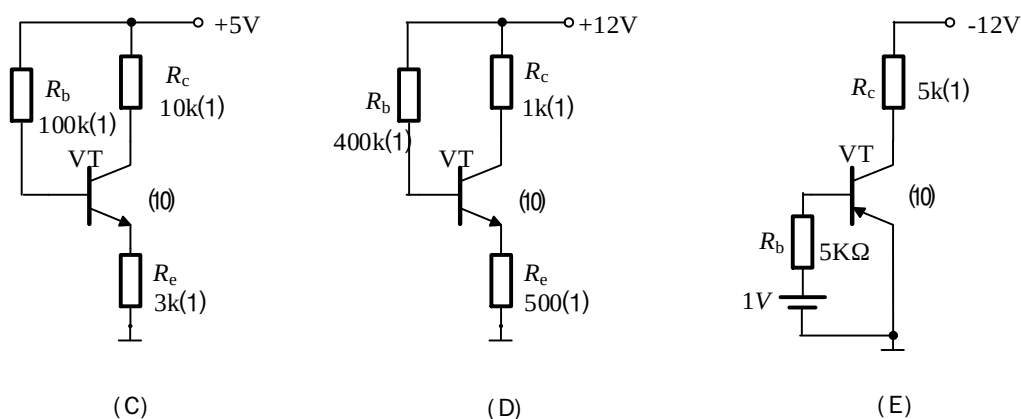


图5.8 习题5.10电路图

5.10 解：(a) 发射结正偏导通， $I_{BQ} = \frac{5 - 0.7}{100 + 201 \times 3} = 6.6(\mu A)$

假设处于放大区

$$I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ} = 1.31(\text{mA}), \quad U_{CEQ} = 5 - I_{CQ}(R_C + R_E) = -12.03(\text{V})$$

∴ 假设错误，三极管处于饱和区。

$$(b) \text{ 发射结正偏导通, } I_{BQ} = \frac{12 - 0.7}{400 + 101 \times 0.5} = 25.1(\mu A)$$

假设处于放大区，  $I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 2.51(\text{mA})$

$U_{CEQ} = 12 - 2.51 \times (1 + 0.5) = 8.24(\text{V})$ ，  $\therefore$  假设成立，三极管处于放大区。

(c) 发射结反偏截止，所以三极管处于截止区。

5.11 图 5.9 为用于家电产品的放大电路。画出图 5.9 所示电路的直流通路和微变等效电路，并注意标出电压、电流的参考方向。设所有电容对交流信号均可视为短路。

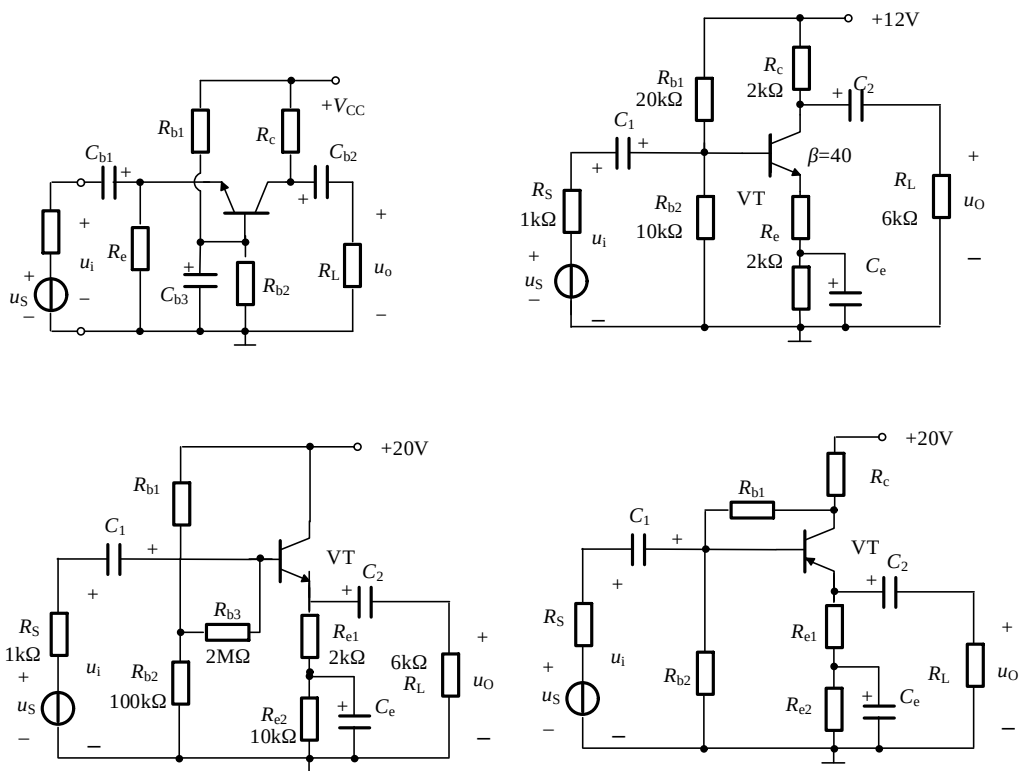
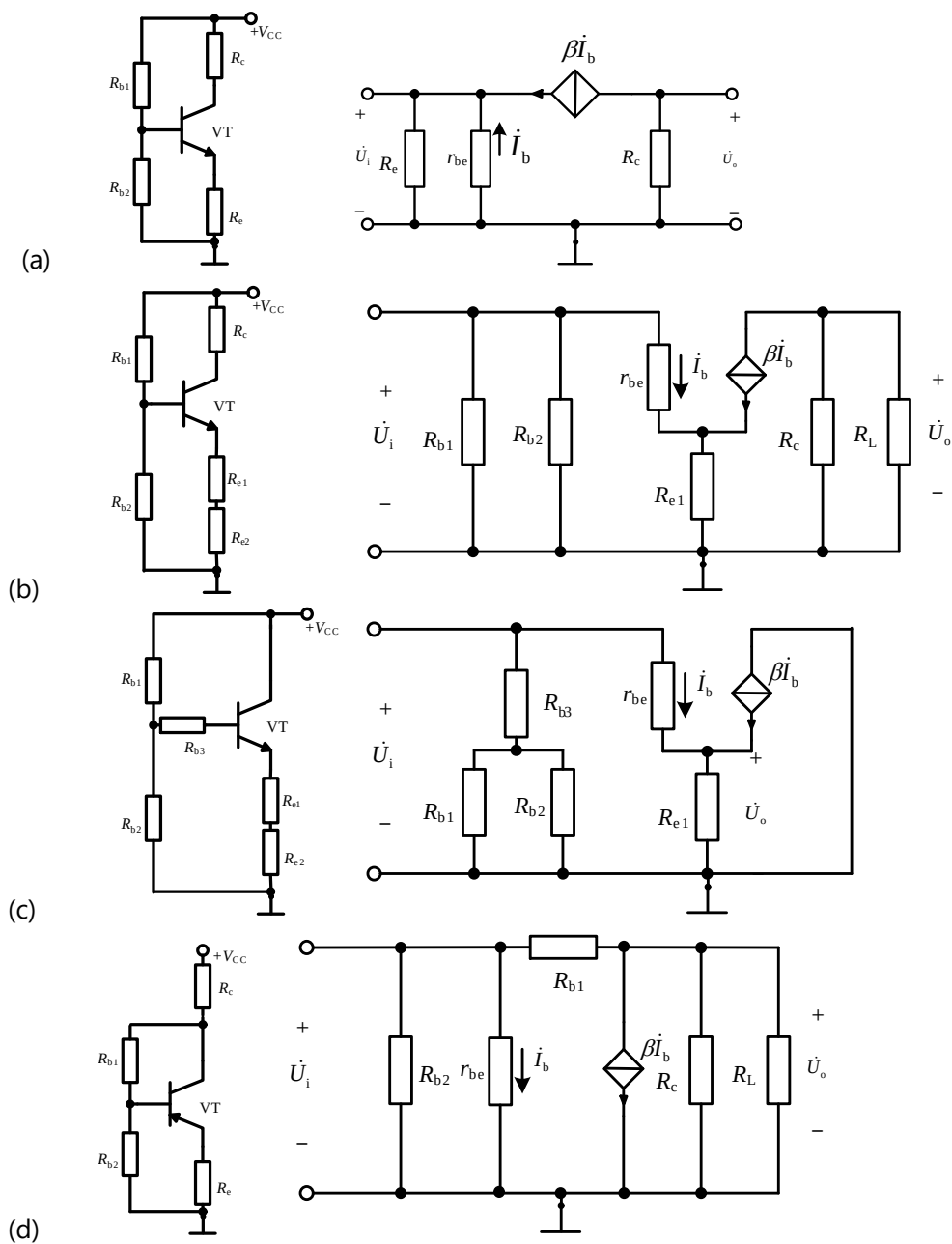


图 5.9 习题 5.11 电路图

5.11 解：



5.12 功率放大器的中间级放大电路如图 5.10 所示。设所有电容对交流均视为短路，

$U_{BEQ} = 0.7V$ ， $\beta = 40$ 。(1) 计算静态工作点  $Q$  的数值；(2) 画出小信号等效电路；

(3) 求电路的输入电阻  $R_i$ 、输出电阻  $R_o$ 、电压放大倍数  $\dot{A}_u$ ；



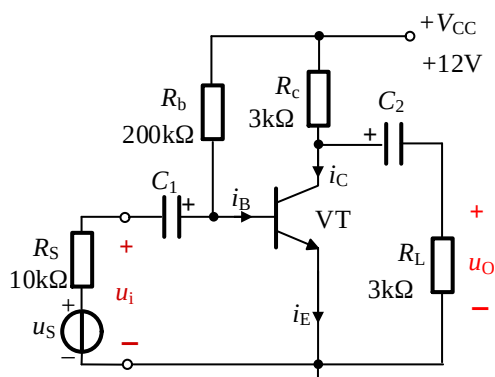
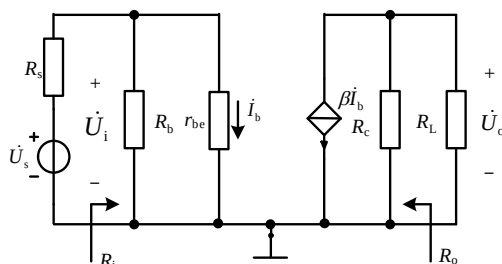


图 5.10 习题 5.12 电路图

5.12 解: (1)  $I_{BQ} = \frac{12 - 0.7}{200} = 56.5(\mu A)$   $I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ} = 2.26(mA)$

$$U_{CEQ} = 12 - 2.26 \times 3 = 5.22(V)$$

$$(2) r_{be} = 300 + 41 \times \frac{26}{2.26} = 0.77(k\Omega)$$



$$(3) R_i = R_b // r_{be} \approx r_{be} = 0.77(k\Omega) \quad R_o = R_c = 3(k\Omega)$$

$$(4) \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b R_c // R_L}{\dot{I}_b r_{be}} = -\frac{\beta \cdot R_L'}{r_{be}} = -\frac{40 \times 3 // 3}{0.77} = -77.92$$

5.13 可以抑制温度漂移的音频放大电路中间级放大电路如图 5.11 所示。设所有电容对交流均视为短路,  $U_{BEQ} = 0.7V$ ,  $\beta = 100$ 。  $U_{CES} = 0.5V$ 。(1) 估算电路的静态工作点; (2) 求电路的输入电阻  $R_i$  和输出电阻  $R_o$ ; (3) 求电路的电压放大倍数  $\dot{A}_u$ 。

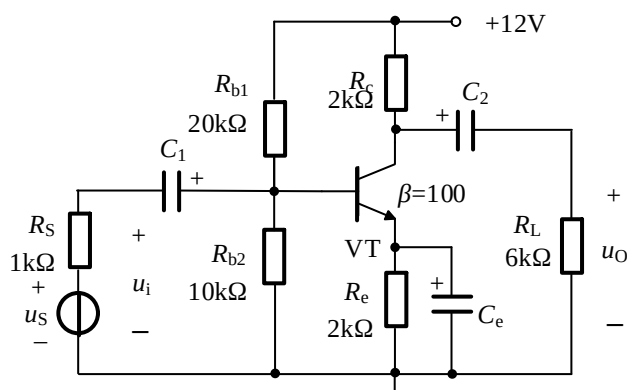


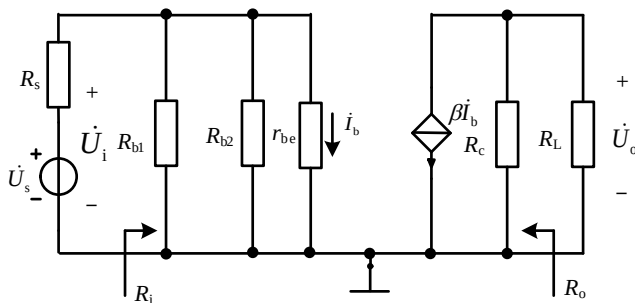
图 5.11 习题 5.13 电路图

解: (1)  $V_{BQ} = \frac{10}{10 + 20} \times 12 = 4(\text{V})$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{4 - 0.7}{2} = 1.65(\text{mA})$$

$$U_{CEQ} = 12 - 1.65 \times (2 + 2) = 5.4(\text{V})$$

(2)  $r_{be} = 300 + 101 \times \frac{26}{1.65} = 1.89(\text{k}\Omega)$



$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // r_{be} = 1.47(\text{k}\Omega)$$

$$R_o = R_c = 2(\text{k}\Omega)$$

(3)  $\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b R_c // R_L}{\dot{I}_b r_{be}} = -\frac{\beta \cdot R_L'}{r_{be}} = -\frac{100 \times 2 // 6}{1.89} = -79.37$

5.14 具有稳定工作点的音频放大电路中间级放大电路如图 5.12 所示, 设所有电容对交流均视为短路。已知  $U_{BEQ} = 0.7\text{V}$ ,  $\beta = 80$ 。(1) 估算静态工作点; (2) 画出小信号等效电

路图；(3) 求放大电路输入电阻  $R_i$  和输出电阻  $R_o$ ；(4) 计算交流电压放大倍数  $\dot{A}_u$ 。

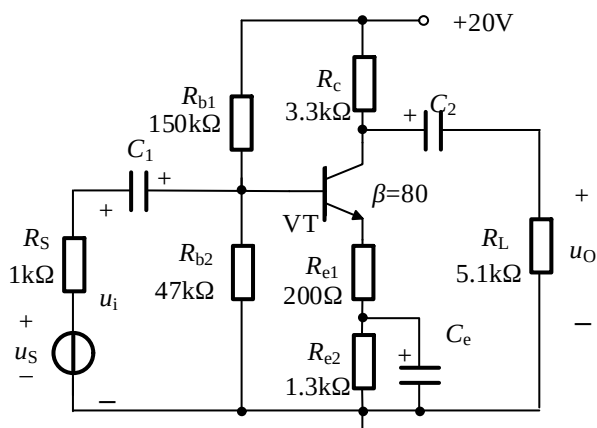


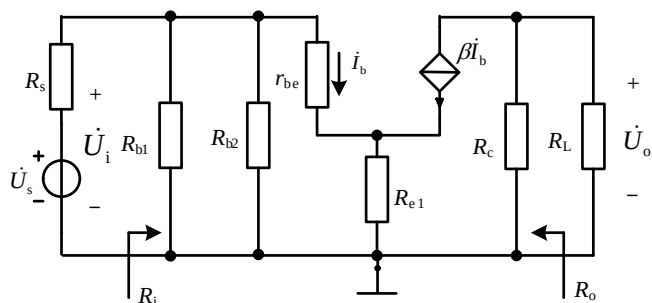
图5.12 习题5.14电路图

解: (1)  $V_{BQ} = \frac{47}{47 + 150} \times 20 = 4.77(\text{V})$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{4.77 - 0.7}{1.3 + 0.2} = 2.71(\text{mA})$$

$$U_{CEQ} = 20 - 2.71 \times (3.3 + 1.3 + 0.2) = 7(\text{V})$$

(2)  $r_{be} = 300 + 81 \times \frac{26}{2.71} = 1.08(\text{k}\Omega)$

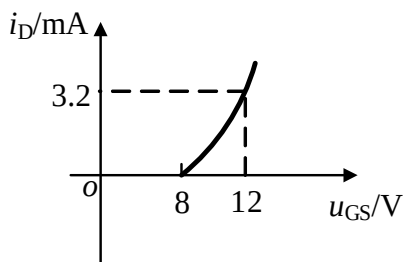


(3)  $R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_{e1}] = 11.65(\text{k}\Omega)$        $R_o = R_c = 3.3(\text{k}\Omega)$

(4)  $\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b R_c // R_L}{\dot{I}_b [r_{be} + (1 + \beta)R_{e1}]} = -\frac{\beta \cdot R_L'}{r_{be} + (1 + \beta)R_{e1}} = -\frac{80 \times 3.3 // 5.1}{1.08 + 81 \times 0.2} = -9.26$

5.15 画出  $U_T = 8\text{V}$ ,  $K = 0.2\text{mA/V}^2$  的 MOSFET 场效应管的转移特性曲线。

解:



5.16 音频放大器电路如图 5.15 所示, MOSFET 的  $U_{th} = 2\text{V}$ ,  $K_n = 50\text{mA/V}^2$ , 确定电路 Q 点的  $I_{DQ}$  和  $U_{DSQ}$  值。

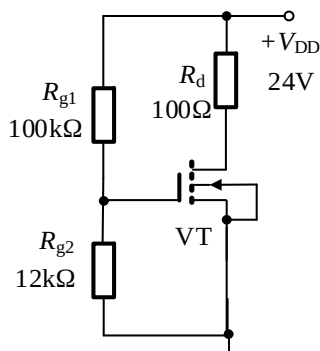


图 5.13 习题 5.16 电路图

解:

$$U_{GSQ} = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} \times V_{DD} = \frac{12}{100 + 12} \times 24 = 2.57\text{V}$$

$$I_{DQ} = K_n (U_{GSQ} - U_{th})^2 = 50 \times (2.57 - 2)^2 = 28.57(\text{mA})$$

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_d = 24 - 28.57 \times 0.1 = 21.14(\text{V})$$

5.17 音频放大器电路如图 5.14 所示。此时场效应管工作于放大状态,  $r_{ds}$  忽略不计, 电容对交流视为短路。跨导为  $g_m = 1\text{ms}$ 。(1) 画出电路的交流小信号等效电路;(2) 求输入电阻  $R_i$  和输出电阻  $R_o$ ;(3) 求电压放大倍数  $\dot{A}_u$  和源电压放大倍数  $\dot{A}_{us}$ 。

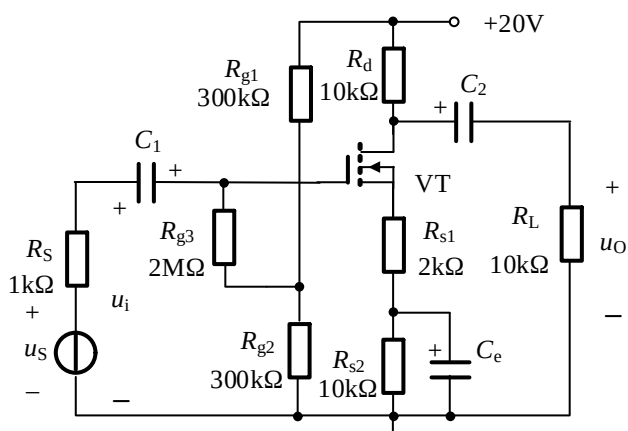
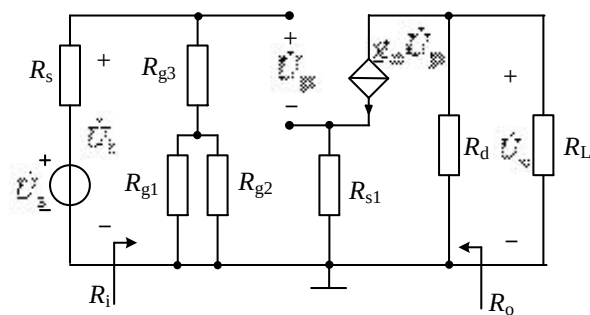


图 5.14 习题 5.17 电路图

解:



$$(2) R_i = R_{g3} + R_{g2} // R_{g1} = 2 + 0.3 // 0.3 = 2.15 (\text{M}\Omega)$$

$$R_o = R_d = 10\text{k}\Omega$$

$$(3) \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-g_m (R_d // R_L)}{1 + g_m R_{s1}} = -\frac{1 \times 5}{1 + 1 \times 2} = -1.67$$

$$\dot{A}_{us} = \frac{R_i}{R_i + R_S} \dot{A}_u = -\frac{2.15}{2.15 + 0.001} \times 1.67 \approx -1.67$$

## 习题 6

6.1 通用型集成运放一般由几部分电路组成，每一部分常采用哪种基本电路？通常对各部门性能要求是什么？

6.1 解：通用型集成运放由输入级、中间级、输出级和偏置电路等四个部分组成。

通常，输入级为差分放大电路，中间级为共射放大电路，输出级为互补电路，偏置电路为电流源电路。

对输入级的要求：输入电阻大，温漂小，放大倍数尽可能大。

对中间级的要求：放大倍数大，一切措施几乎都是为了增大放大倍数。

对输出级的要求：带负载能力强，最大不失真输出电压尽可能大。

对偏置电路的要求：提供的静态电流稳定。

6.2 什么是零点漂移？产生零点漂移的主要原因是什么？

6.2 解：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对后面的各级静态工作点造成影响，因为各级的放大作用，使得输入电压为零而输出电压的变化不为零的现象称为零点漂移现象。在放大电路中，任何元件参数的变化，如电源电压的波动、元件的老化、半导体元件参数随温度变化而产生的变化，都将产生输出电压的漂移。

6.3 一个双端输入，双端输出的差动放大电路，两边的输入电压分别为  $u_{i1} = 5.0005\text{V}$ ， $u_{i2} = 4.9995\text{V}$ 。

(1) 求差模输入信号电压  $u_{id}$  和共模输入电压  $u_{ic}$ ；

(2) 设差模电压增益  $A_d$  为 80dB，求当共模抑制比  $K_{CMR}$  为无穷大和 100dB 时的输出电压  $u_o$  各为多大？

6.3 解：(1)  $u_{id} = (5.0005 - 4.9995)\text{V}$      $u_{ic} = (5.0005 + 4.9995)/2\text{V}$

(2) 共模抑制比  $K_{CMR}$  为无穷大时

$$80/20=4 \quad A_d = 10^4$$

$$u_o = (5.0005 - 4.9995) \times 10000 \text{ (V)}$$

共模抑制比  $K_{CMR}$  为 100dB, 共模增益为: 0.1

$$u_o = (5.0005 - 4.9995) \times 10000 + (5.0005 + 4.9995) / 2 \times 0.1 \text{ (V)}$$

6.4 某集成运放输入端差分放大电路如图 6.1 所示, 设电路参数理想对称, 三极管的  $\beta = 100$ ,  $r_{bb'} = 100\Omega$ ,  $U_{BEQ} \approx 0.7V$ , 其他电路元件参数:  $R_w = 100K\Omega$ ,  $R_c = 10K\Omega$ ,  $R_e = 5.1K\Omega$ ,  $V_{CC} = 12V$ ,  $-V_{EE} = -6V$ 。试:

(1) 计算  $R_w$  滑动在中点时  $VT_1$  管和  $VT_2$  管的发射极静态电流  $I_{EQ1}$  和  $I_{EQ2}$ , 以及动态参数  $A_d$  和  $R_i$ ; (2) 分析若  $R_w$  滑动在右边时各参数将发生何种变化。

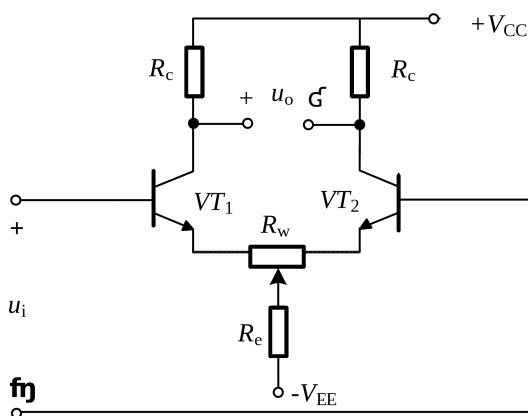


图6.1 习题6.4电路图

6.4 解:  $R_w$  滑动端在中点时  $T_1$  管和  $T_2$  管的发射极静态电流分析如下:

$$U_{BEQ} + I_{EQ} \cdot \frac{R_w}{2} + 2I_{EQ} R_e = V_{EE}$$

$$I_{EQ} = \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{\frac{R_w}{2} + 2R_e} \approx 0.517\text{mA}$$

$A_d$  和  $R_i$  分析如下:

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_{EQ}} \approx 5.18\text{k}\Omega$$

$$A_d = - \frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_w}{2}} \approx -97$$

$$R_i = 2r_{be} + (1 + \beta)R_w \approx 20.5\text{k}\Omega$$

(2)  $R_w$  的滑动端在最右端时

$$\Delta u_{C1} = - \frac{\beta (R_c + R_w)}{2r_{be}} \cdot \Delta u_I \quad \Delta u_{C2} = + \frac{\beta R_c}{2r_{be}} \cdot \Delta u_I$$

$$\Delta u_O = \Delta u_{C1} - \Delta u_{C2} = - \frac{\beta (R_c + \frac{R_w}{2})}{r_{be}} \cdot \Delta u_I$$

所以  $A_d$  的表达式为

$$A_d = \frac{\Delta u_O}{\Delta u_I} = - \frac{\beta (R_c + \frac{R_w}{2})}{r_{be}}$$

比较结果可知,两种情况下的  $A_d$  完全相等;但第二种情况下的  $|\Delta u_{C1}| > |\Delta u_{C2}|$ 。

6.5 利用差分电路可以将差分输入转换为带可调增益的单端输出,实现比单端输入更优越

的性能改进,电路如图 6.2 所示,已知  $R_{c2} = R_L = 10\text{k}\Omega$ ,  $R_e = 5.1\text{k}\Omega$ ,  $R_{b1} = R_{b2} =$

$2\text{k}\Omega$ ,  $V_{CC} = 24\text{V}$ ,  $-V_{EE} = -12\text{V}$ , 两个三极管的  $\beta$  相等均为 60,  $r_{be}$  均为  $1\text{k}\Omega$ ,

试:

(1) 求差模电压放大倍数、差模输入电阻和输出电阻;

(2) 求电路的共模抑制比。



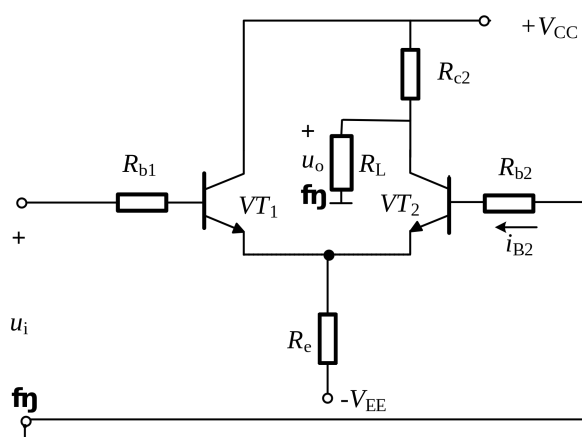


图6.2 习题6.5电路图

6.5 解: (1) 差模电压放大倍数  $A_d = \frac{\beta(R_{c2} // R_L)}{R_{b1} + r_{be1} + R_{b2} + r_{be2}} = 50$

$$R_{id} = R_{b1} + r_{be1} + R_{b2} + r_{be2} = 6K\Omega$$

$$R_o = R_{c2} = 10K\Omega$$

(2) 共模放大倍数  $A_c = -\frac{\beta(R_{c2} // R_L)}{R_{b2} + r_{be2} + 2(1+\beta)R_e}$ , 故电路的共模抑制比  $K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = 104.2$

6.6 某恒流源差分放大电路如图 6.3 所示,  $R_c = 10K\Omega$ ,  $R_b = 2K\Omega$ , 两个三极管的  $\beta$  相等均为 60,  $r_{be}$  均为  $1K\Omega$ , 试问: 若输入直流信号  $u_{i1} = 30mV$ ,  $u_{i2} = 20mV$ , 则电路的共模输入电压、差模输入电压及输出动态电压各是多少?

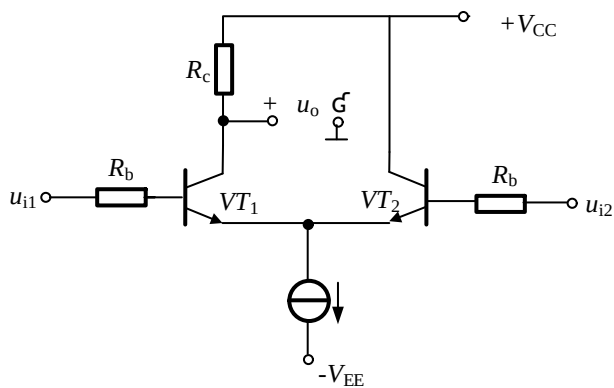


图 习题 电路图

6.6 解：共模输入信号  $u_{ic} = 1/2 (u_{i1} + u_{i2}) = 25\text{mV}$

差模输入信号  $u_{id} = u_{i1} - u_{i2} = 10\text{mV} = 0.01\text{V}$

该电路是单端输入的差分放大电路。

$$A_F = \frac{\beta R_E}{R_D + r_{DG}}$$

则输出动态电压为  $-100 \times 0.01 = -1\text{V}$

6.7 在图 6.4 所示电路中, 已知  $V_{CC} = 12\text{V}$ ,  $-V_{EE} = -6\text{V}$ , 恒流源电路  $I = 1\text{mA}$ ,  $R_{b1} = R_{b2} = 1\text{k}\Omega$ ,  $R_{c1} = R_{c2} = 10\text{k}\Omega$ , 两个三极管的  $\beta$  相等均为 100,  $r_{be}$  均为  $2\text{k}\Omega$ , 试求:

- (1) 电路静态时  $VT_1$  管和  $VT_2$  管的集电极电位;
- (2) 电路的差模放大倍数、共模放大倍数、输入电阻和输出电阻。

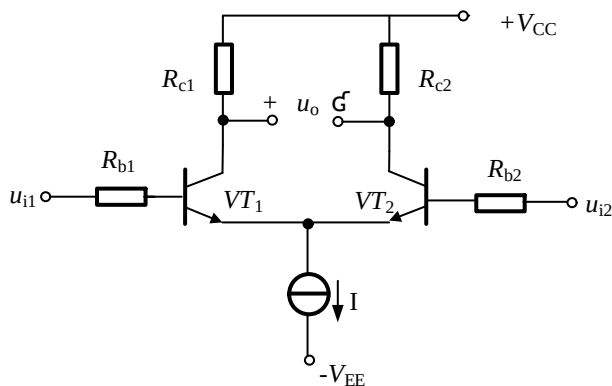


图 习题 电路图

6.7 解：7V; -333; 0; 6 k $\Omega$ ; 20 k $\Omega$ 。

6.8 电路如图 6.5 所示, 已知三极管的  $\beta$  相等均为 100, 各三极管的  $U_{BEQ} \approx 0.7\text{V}$ ,  $R = 134\text{k}\Omega$ ,  $V_{CC} = 15\text{V}$ , 试求  $I_O$  的值。

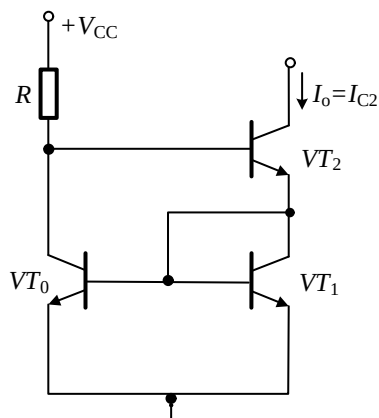


图 习题 电路图

6.8 解：分析估算如下：

$$I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE2} - U_{BE1}}{R} = 100 \mu A$$

$$I_{C0} = I_{C1} = I_C$$

$$I_{E2} = I_{E1}$$

$$I_R = I_{C0} + I_{B2} = I_{C0} + I_{B1} = I_C + \frac{I_C}{\beta}$$

$$I_C = \frac{\beta}{1 + \beta} \cdot I_R \approx I_R = 100 \mu A$$

6.9 具有电流源的差分电路如图 6.6 所示，已知  $U_{BEQ} \approx 0.7V$ ， $\beta = 100$ ， $r_{bb'} = 200\Omega$ ， $R_{c1} = R_{c2} = 12K\Omega$ ， $R_1 = R_2 = 1K\Omega$ ， $R = 4.3K\Omega$ ，试求：

- (1)  $VT_1$ 和  $VT_2$ 静态工作点  $I_{CQ}$ 、 $U_{CQ}$ ；
- (2) 差模电压放大倍数；
- (3) 差模输入电阻和输出电阻。

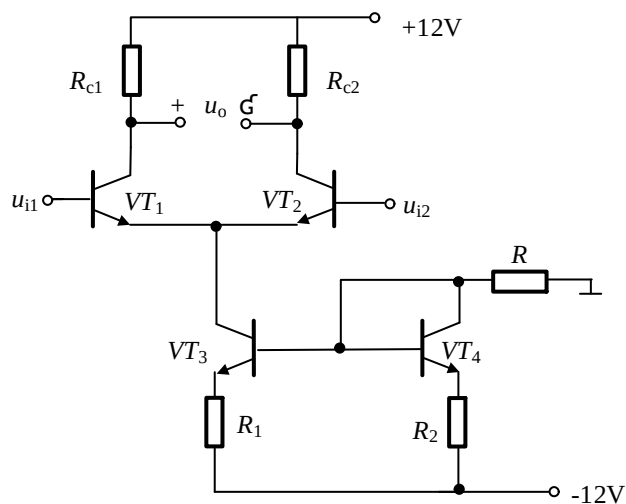


图 习题 电路图

6.9 解: (1)  $I_{CQ1}=0.5\text{mA}$  ,  $U_{CEQ1}=6\text{V}$ 。

6.10 多路电流源电路如图 6.7 所示, 已知所有三极管的特性均相同,  $U_{BE} \approx 0.7\text{V}$ ,

$R=134\text{K}\Omega$ 。试求  $I_{C2}$ 、 $I_{C3}$  各为多少。

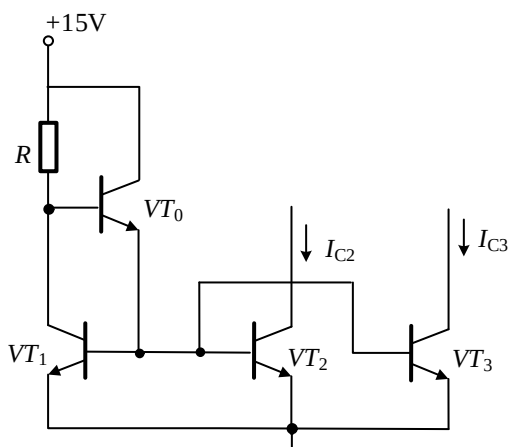


图 习题 电路图

6.10 解: 因为  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  的特性均相同, 且  $U_{BE}$  均相同, 所以它们的基极、集电极电流均相等, 设集电极电流为  $I_C$ 。先求出  $R$  中电流, 再求解  $I_{C2}$ 、 $I_{C3}$ 。

$$I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE4} - U_{BE0}}{R} = 100 \mu A$$

$$I_R = I_{\%} + I_{\$} = I_{\%} + \frac{I_{\$}}{\beta} = I_{\%} + \frac{I_{\%}}{\beta + 1}$$

$$I_{\%} = \frac{\beta + 1}{\beta + 1 + 1} \cdot I_R$$

当  $\beta (1 + \beta) \gg 1$  时

$$I_{\%} = I_{\$} \approx I_R = 100 \mu A$$

6.11 OCL 电路如图 6.8 所示，分析电路：

(1)  $VD_1$ 、 $VD_2$  两个二极管可否反接于电路中？

(2)  $VT_1$  和  $VT_2$  两三极管工作在何种状态？

(3) 若  $VT_1$  和  $VT_2$  的饱和压降  $U_{CES1} = U_{CES2} = 2V$ ， $R_L = 8\Omega$ ，求该电路的最大不失真功率

$P_{om}$ 。

(4) 若电源提供的总功率  $P_E = 16.3W$ ，求各管的最大管耗  $P_1$ ， $P_2$

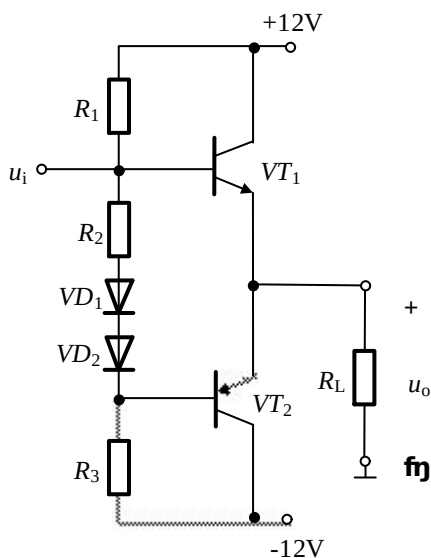


图 习题 电路图

6.11 解：(1) 不可以，否则  $V_1$  和  $V_2$  间直流开路，电路不能工作；

(2)  $V_1$  和  $V_2$  共集电极组态；

(3)  $P_{om} \approx 6.7W$ ；(4)  $P_{V1} = P_{V2} = 3.3W$ 。

6.12 电路如图 6.9 所示， $R_L = 4\Omega$ ，两管的饱和管压降都是 2V，输入电压足够大，试分析：

(1) 该电路的最大不失真功率  $P_{om}$ ；

(2) 三极管的最大功耗是多少；

(3) 为使输出功率达到最大，输入电压的有效值约为多少？

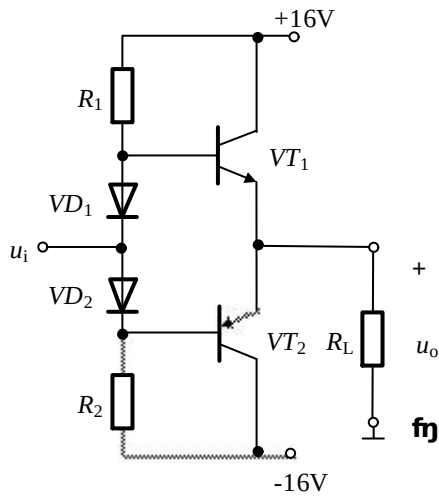


图 习题 电路图

6.12 解：(1)  $P_{om} = \frac{(V_{CC} - |U_{CES}|)}{2R_L} = 24.5W$

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{CC} - |U_{CES}|}{V_{CC}} \approx 69.8\%$$

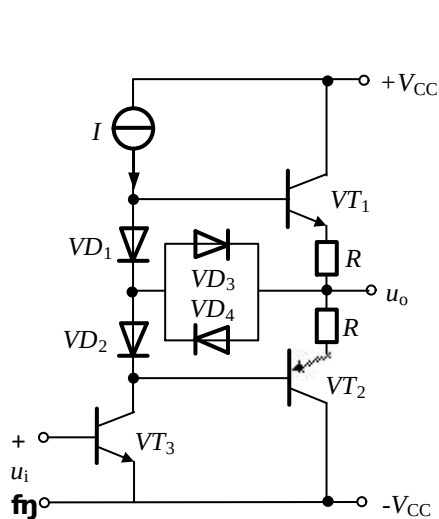
(2) 三极管的最大功耗

$$P_{Tmax} \approx 0.2P_{oM} = \frac{0.2 \times V_{CC}^2}{2R_L} = 6.4W$$

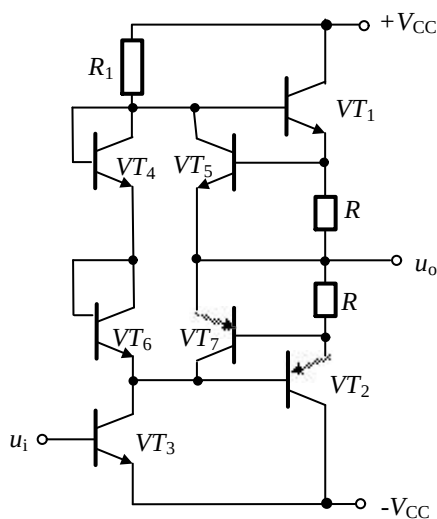
(3) 输出功率为  $P_{om}$  时的输入电压有效值

$$U_i \approx \frac{U_{om}}{\sqrt{2}} \approx \frac{V_{CC} - |U_{CES}|}{\sqrt{2}} \approx 9.9V$$

6.13 比较图 6.10 所示两个电路，分别说明它的是如何消交越失真和如何实现过流保护的。



(a)



(D)

图 习题 电路图

**6.13 解：**在图 (a) 所示电路中， $VD_1$ 、 $VD_2$  使  $VT_1$ 、 $VT_2$  微导通，可消除交越失真。 $R$  为电流采样电阻， $VD_3$  对  $VT_1$  起过流保护。当  $VT_1$  导通时， $u_{D3} = u_{BE1} + i_O R - u_{D1}$ ，未过流时  $i_O R$  较小，因  $u_{D3}$  小于开启电压使  $VD_3$  截止；过流时因  $u_{D3}$  大于开启电压使  $VD_3$  导通，为  $VT_1$  基极分流。 $VD_4$  对  $VT_2$  起过流保护，原因与上述相同。

在图 (b) 所示电路中， $VT_4$ 、 $VT_6$  使  $VT_1$ 、 $VT_2$  微导通，可消除交越失真。 $R$  为电流采样电阻， $VT_5$  对  $VT_1$  起过流保护。当  $VT_1$  导通时， $u_{BE5} = i_O R$ ，未过流时  $i_O R$  较小，因  $u_{BE5}$  小于开启电压使  $VT_5$  截止；过流时因  $u_{BE5}$  大于开启电压使  $VT_5$  导通，为  $VT_1$  基极分流。 $VT_7$  对  $VT_2$  起过流保护，原因与上述相同。

6.14 集成运算放大器工作在线性区和非线性区各有什么特点。

**6.14 解：**集成运算放大器工作在线性区时的特点满足虚短和虚断。

集成运算放大器工作在非线性区时也有两个特点：一是输出仅有高、低两种电平；二是满足虚断但不满足虚短。

6.15 当在放大电路的输入端接入信号源电压  $u_s = 15\text{mV}$ ，信号源电阻  $R_s = 1\text{K}\Omega$  时，测得电



路的输入端的电压为  $u_i = 10\text{mV}$ ，求放大电路的输入电阻  $R_i$ 。

6.15 解：  $U_i = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot U_s$

$$\therefore R_i = \left( \frac{U_i}{U_s - U_i} \right) R_s = 2\text{K}\Omega$$

6.16 电路如图 6.11 所示，试说明各三极管的作用。

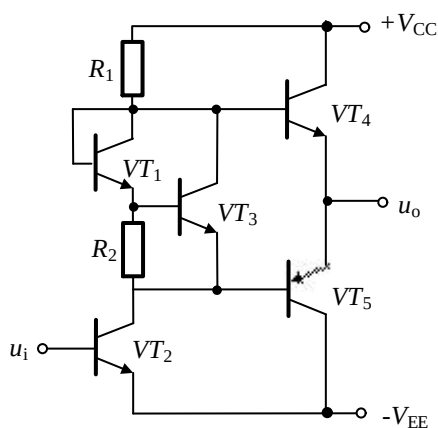


图6.11 习题6.16电路图

6.16 解：  $VT_2$  为共射放大电路的放大管；  $VT_4$  和  $VT_5$  组成互补输出级；  $VT_1$ 、

$VT_3$ 、  $R_2$  组成偏置电路，用于消除交越失真。

6.17 图 6.12 所示简化的高精度运放电路原理图，试分析：

- (1) 两个输入端中哪个是同相输入端，哪个是反相输入端；
- (2)  $VT_1$  和  $VT_2$  的作用；
- (3) 电流源  $I_3$  的作用；
- (4)  $VD_1$  和  $VD_2$  的作用。

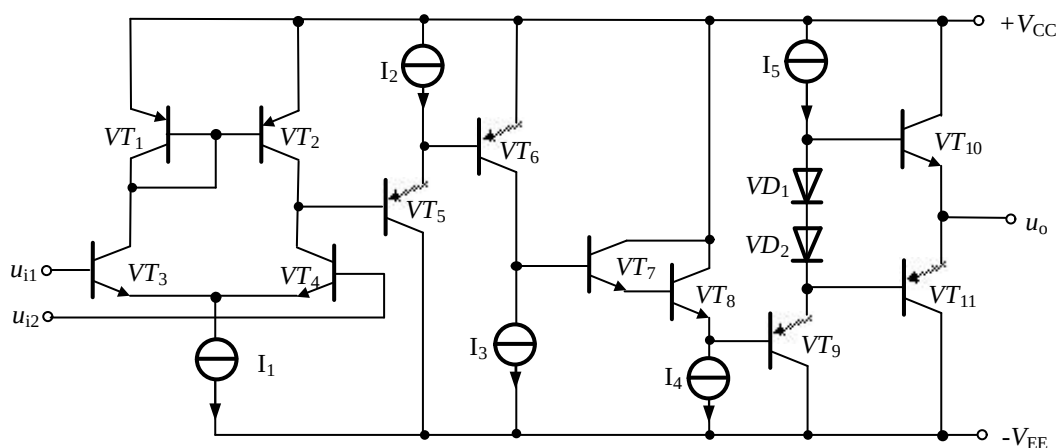


图6.12 习题6.17电路图

6.17 解：（1） $u_{i1}$  为反相输入端， $u_{i2}$  为同相输入端；

（2） $VT_1$ 和 $VT_2$ 为 $VT_3$ 和 $VT_4$ 管的有源负载，将 $VT_3$ 管集电极电流变化量转换到输出，使单端输出差分放大电路的差模放大倍数近似等于双端输出时的放大倍数；

（3）为 $VT_6$ 设置静态电流，且为 $VT_6$ 的集电极有源负载，增大共射放大电路的放大能力；

（4）消除交越失真。

## 习题 7

7.1 什么是放大电路的反馈？放大电路的反馈包括几种基本类型？

**7.1 解：**在放大电路中，将输出回路的输出量（输出电压或电流）通过一定形式的电路网络，部分或全部馈送到输入回路中，并能够影响其输入量（输入电压或电流），这种电压或电流的回送过程称为反馈。

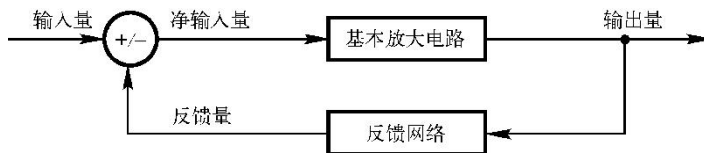
反馈可分为 4 种基本类型：电压串联负反馈、电压并联负反馈、电流串联负反馈和电流并联负反馈。

7.2 引入何种类型的反馈，可以稳定信号源内阻很小的放大电路的输出电压？引入何种类型的反馈，可减小从电压信号源索取的电流并增加带负载的能力？

**7.2 解：**应该引入电压串联负反馈；引入电压串联负反馈

7.3 试用方框图说明负反馈放大电路各组成部分的关系。

**7.3 解：**根据反馈放大器各部分电路的主要功能，可将其分为基本放大电路和反馈网络两部分，如图所示。



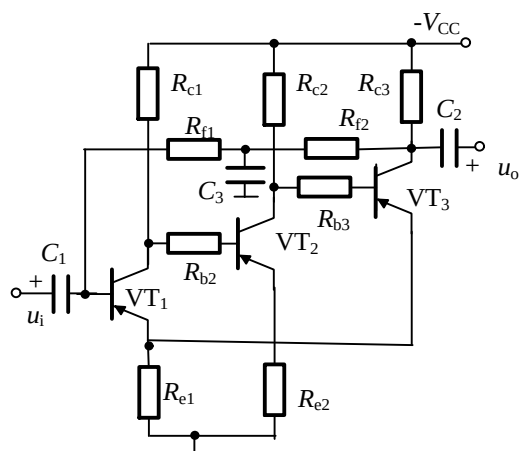
7.4 何种类型的负反馈，可以得到一个电流控制的电流源？

7.4 解：引入电流并联负反馈

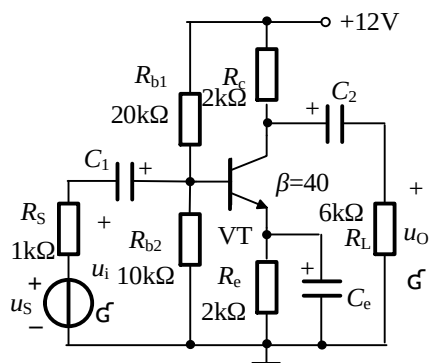
7.5 各类带反馈的实用放大电路如图 7.1 所示。请指出图 7.1 所示的各电路中的反

馈网络。设所有电容对交流信号可视为短路。判断反馈网络引入的是正反馈还是负反馈？

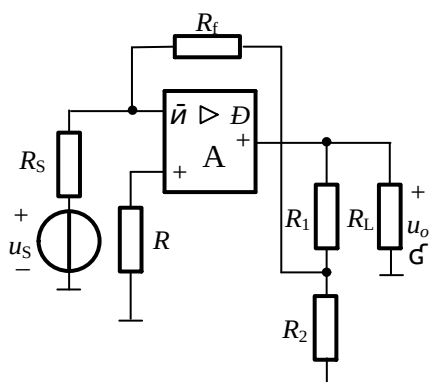
是直流反馈还是交流反馈？



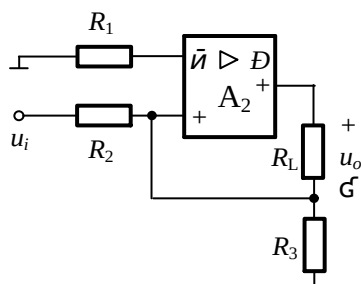
(a)



(D)



(E)



(F)

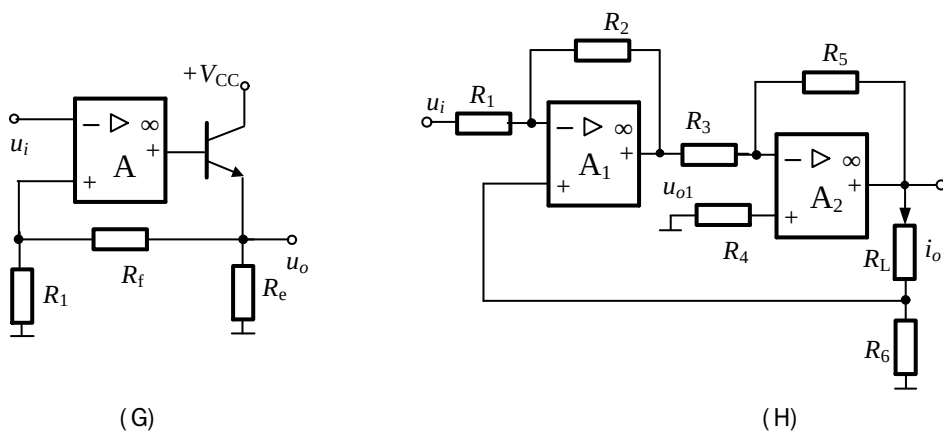


图7.1 习题7.5电路图

7.5 解: (a)  $R_{f1}$ 、 $R_{f2}$ 、 $C$ , 直流负反馈

(b)  $R_e$ 、 $C_e$ , 直流负反馈

(c)  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_f$ 交、直流负反馈

(d)  $R_3$ 交、直流负反馈

(e)  $R_1$ 、 $R_f$ 交、直流正反馈

(f)  $R_2$ 、 $R_5$ 本级的交、直流负反馈;  $R_6$ 级间交、直流负反馈

7.6 试判断图 7.1 所示电路的级间交流反馈的组态。

7.6 解: (a)  $R_{e1}$  级间交流电流串联负反馈;

(b) 无交流负反馈;

(c)  $R_2$ 、 $R_f$ 交流电压并联负反馈;

(d)  $R_3$ 交流电流并联负反馈;

(e)  $R_1$ 、 $R_f$ 交流电压串联正反馈;

(f)  $R_6$  级间交流电流串联负反馈;

7.7 汽车电子线路中的反馈放大电路的方框图如图 7.2 所示, 已知其开环电压增益  $\dot{A}_u = 4000$ , 反馈系数  $\dot{F}_u = 0.098$ 。若输出电压  $\dot{X}_o = 4\text{V}$ , 求输入电压  $\dot{X}_i$ 、反馈电压  $\dot{X}_f$  及净输入电压  $\dot{X}_{id}$  的值。

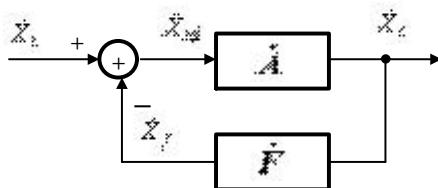


图 7.2 习题 7.7 电路图

7.7 解:  $\dot{U}_f = \dot{F}_u \times \dot{U}_o = 0.098 \times 4 = 0.392(\text{V})$ ;

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}_u}{1 + \dot{A}_u \dot{F}_u} = \frac{4000}{1 + 4000 \times 0.098} = 10.18, \quad \dot{U}_i = \frac{\dot{U}_o}{\dot{A}_f} = \frac{4}{10.18} = 0.393(\text{V}),$$

$$\dot{U}_{id} = \dot{U}_i - \dot{U}_f = 0.393 - 0.392 = 0.001(\text{V})$$

7.8 一个放大电路的开环增益为  $A_{uo} = 10^4$ , 当它连接成负反馈放大电路时, 其闭环电压增益为  $A_{uf} = 50$ , 若  $A_{uo}$  变化 10%, 问  $A_{uf}$  变化多少?

7.8 解:  $\frac{1}{1 + A_{uo} F_u} = \frac{A_{uf}}{A_{uo}} = 0.005,$

$$\frac{dA_{uf}}{A_{uf}} = \frac{1}{1 + A_{uo} F_u} \cdot \frac{dA_{uo}}{A_{uo}} = 0.005 \times 10\% = 0.05\%$$

7.9 受输入电压控制的基本电压放大器如图 7.3 所示, 设  $U_i = 200\text{mV}$ ,  $U_f = 190\text{mV}$ ,  $U_o = 20\text{V}$ 。计算放大倍数  $A$  和反馈系统  $F$ 。

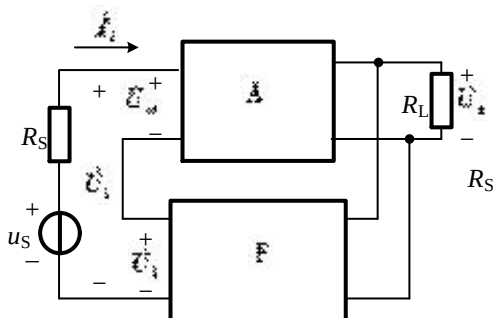


图 7.3 习题 7.9 电路图

7.9 解:  $F = \frac{U_f}{U_o} = 9.5 \times 10^{-3}$ ,  $A = \frac{U_o}{U_{id}} = \frac{U_o}{U_i - U_f} = \frac{20}{0.2 - 0.19} = 2 \times 10^3$

7.10 受输入电压控制的电压—电流转换器如图 7.4 所示, 设  $U_i = 200\text{mV}$ ,  $U_f = 190\text{mV}$ ,  $I_o = 20\text{mA}$ 。计算放大倍数  $A$  和反馈系统  $F$ 。

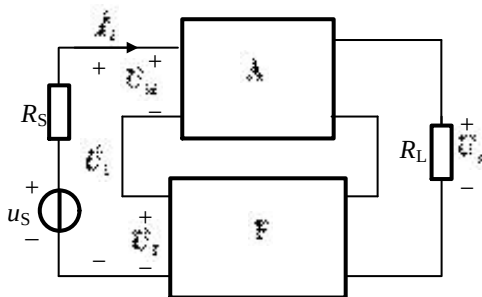


图 7.4 习题 7.10 电路图

7.10 解:  $F = \frac{U_f}{I_o} = 9.5\Omega$ ,  $A = \frac{I_o}{U_{id}} = \frac{I_o}{U_i - U_f} = \frac{20}{200 - 190} = 2$

7.11 伺服电机控制电路中的电压反馈放大器采用一个**增益为 100**, 输出电阻为  $1\text{K}\Omega$  的基本放大器。反馈放大器的闭环输出电阻为  $200\Omega$ 。请问其闭环增益是多少?

7.11 解:  $1 + AF = \frac{R_o}{R_{of}} = \frac{1000}{200} = 5$ ,  $A_f = \frac{A}{1 + AF} = \frac{100}{5} = 20$

7.12 电压串联负反馈放大器采用**一个增益 2000**, 输入与输出电阻均为  $1\text{K}\Omega$  的基本放大器。反馈系数  $F = 0.1$ 。求闭环放大器的增益  $A_{uf}$ 、输入电阻  $R_{if}$  和输出电阻  $R_{of}$ 。

7.12 解:  $A_{uf} = \frac{A}{1 + AF} = \frac{2000}{1 + 2000 \times 0.1} = 9.95$ ,

$R_{if} = R_i(1 + AF) = 1(1 + 2000 \times 0.1) = 201\text{K}\Omega$ ,

$$R_{of} = \frac{R_O}{(1+AF)} = \frac{1000}{1+2000 \times 0.1} = 4.97\Omega$$

7.13 音频放大器多级放大电路中，如果要求（1）电路参数变化时， $u_o$  变化不大，并希望有较小的输入电阻  $R_{if}$ ，应当引入何种级间反馈？（2）当负载变化时， $i_o$  变化不大，并希望放大器有较大的输入电阻  $R_{if}$ ，应当引入何种级间反馈？

**7.13 解：**（1）引入电压并联负反馈

（2）引入电流串联负反馈

7.14 实用信号放大器电路如图 7.5 所示。电路为何种反馈组态，有何特点？求  $I_o$

表达式。

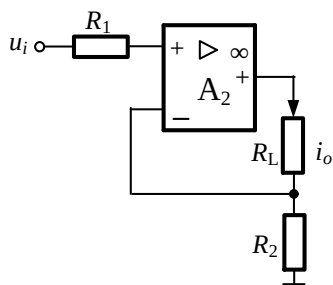


图 7.5 习题 7.14 电路图

**7.14 解：** 电流串联负反馈；  $I_o = \frac{U_s}{R}$

电流反馈会稳定输出电流，增大输出电阻；串联反馈使输入电阻增大，该电路将输入电压转换为稳定的输出电流，是一个压控的电流源。

7.15 在图 7.1(a)、(c)所示各电路中，在深度负反馈的条件下，试近似计算它的闭环增益和闭环电压增益。

**7.15 解：** 该电路是电流串联负反馈，根据深度负反馈条件有

$$\dot{U}_f \approx \dot{U}_i, \text{ 而 } \dot{U}_f = \dot{I}_{e1} R_{e1} = \dot{I}_o R_{e1},$$

$$\text{所以 } \dot{A}_{Gf} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{R_{e1}}; \text{ 而 } \dot{U}_o = -\dot{I}_o (R_{c3} // R_{t2}),$$



$$\text{所以 } \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = \frac{-\dot{I}_o(R_{c3} // R_{f2})}{\dot{I}_o R_{e1}} = -\frac{(R_{c3} // R_{f2})}{R_{e1}}。$$

(c)该电路是电压并联负反馈；根据深度负反馈条件有  $\dot{I}_i \approx \dot{I}_f$ ，

$$\text{而 } \dot{I}_f = -\frac{\dot{U}_o}{R_1 + R_2 // R_f} \cdot \frac{R_2}{(R_2 + R_f)},$$

$$\text{所以 } \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_f} = -\frac{R_1 + R_2 // R_f}{R_2} \cdot (R_2 + R_f)；$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i R_s} = -\frac{R_1 + R_2 // R_f}{R_2 R_s} \cdot (R_2 + R_f)$$

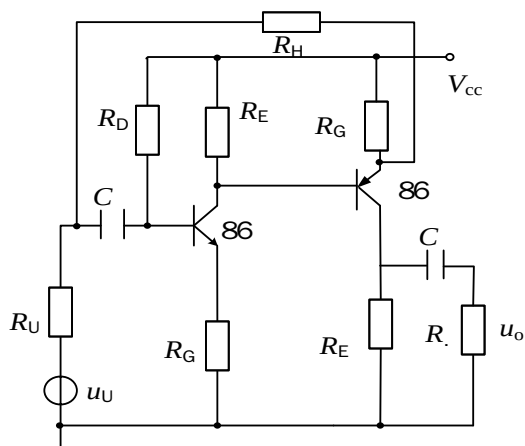
7.16 音频放大器反馈放大电路如图 7.6 所示，（1）指明级间反馈元件，并判别反馈类型和性质；（2）若电路满足深度负反馈的条件，求其电压放大倍  $\dot{A}_{uf}$  的表达式；（3）若要求放大电路有稳定的输出电流，问如何改接  $R_f$ 。请在电路图中画出改接的反馈路径，并说明反馈类型。

**7.16 解：**（（1）  $R_f$ 、 $R_{e1}$ ，电压串联负反馈；

（2）因为是串联负反馈，根据深度负反馈条件有  $\dot{U}_f \approx \dot{U}_i$ ，而  $\dot{U}_f = \frac{R_{e1}}{R_f + R_{e1}} \dot{U}_o$

$$\text{所以 } \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = 1 + \frac{R_f}{R_{e1}}；$$

（3）电流并联负反馈



7.17 音频放大器的核心部件反馈放大电路如图 7.8 所示, 各电容对交流呈短路, 已知  $R_{e1} = 750\Omega$ ,  $R_{e2} = 1k\Omega$ ,  $R_S = 1k\Omega$ ,  $R_{c2} = 4k\Omega$ ,  $R_L = 1k\Omega$ ,  $R_f = 10k\Omega$ ,  $R_{b1}$  和  $R_{b2}$  忽略不计。(1) 指明级间反馈元件, 并判别反馈类型; (2) 若电路满足深度负反馈的条件, 求其源电压增益  $A_{ufs}$ 。

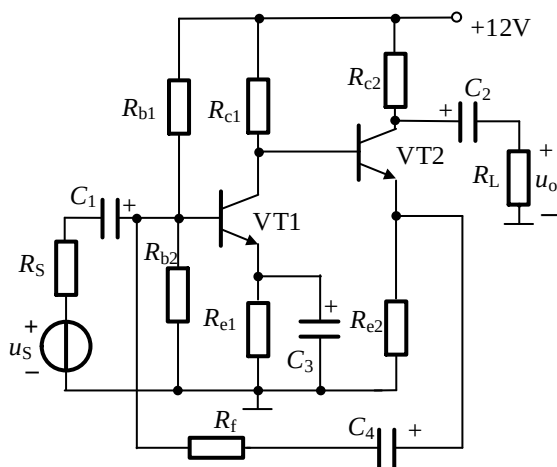


图 7.7 习题 7.17 电路图

**7.17 解:** (1) 反馈元件为  $R_f$ ,  $C4$ , 是交流电流并联负反馈;

(2) 根据深度负反馈条件, 可得  $\dot{I}_f \approx \dot{I}_i$ , 而反馈支路  $R_f$ 、 $R_{e2}$  对输出电流分流, 所以  $\dot{I}_f = -\frac{R_{e2}}{R_f + R_{e2}} \dot{I}_o$ , 而  $\dot{U}_o = -\dot{I}_o R'_L$ ,  $R'_L = R_{c2} // R_L$ ,  $\dot{U}_S = \dot{I}_i R_S$ , 所以

$$A_{\text{ufs}} = \frac{\dot{U}_{\text{o}}}{\dot{U}_{\text{S}}} = \frac{-\dot{I}_{\text{o}} R'_{\text{L}}}{\dot{I}_{\text{i}} R_{\text{S}}} = \frac{\dot{I}_{\text{f}} R'_{\text{L}}}{\dot{I}_{\text{i}} R_{\text{S}}} \cdot \frac{R_{\text{f}} + R_{\text{e2}}}{R_{\text{e2}}}$$

$$\approx \frac{\dot{I}_{\text{i}} R'_{\text{L}}}{\dot{I}_{\text{i}} R_{\text{S}}} \cdot \frac{R_{\text{f}} + R_{\text{e2}}}{R_{\text{e2}}} = \frac{(R_{\text{L}} // R_{\text{c2}})}{R_{\text{S}}} \cdot \frac{R_{\text{f}} + R_{\text{e2}}}{R_{\text{e2}}} = 8.8$$

## 习题 8

8.1 信号运算电路如图 8.1 所示，设集成运放均为理想的，求输出电压与各输入电压的运算关系式。

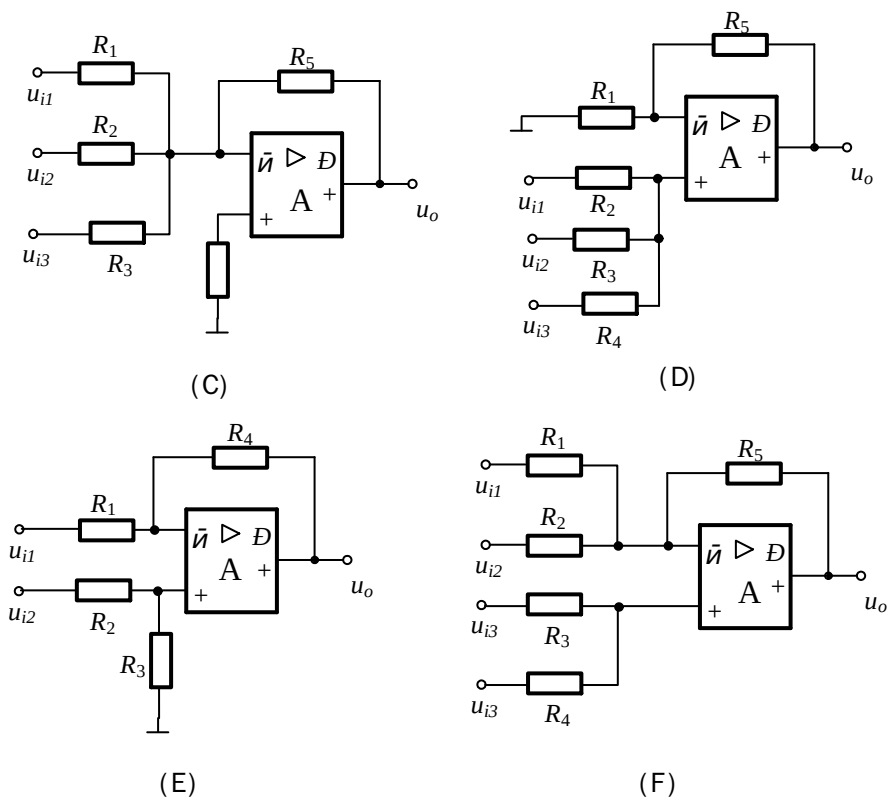


图8.1 习题8.1电路图

8.1 解：(a)  $u_o = -\frac{R_5}{R_1}u_{i1} - \frac{R_5}{R_2}u_{i2} - \frac{R_5}{R_3}u_{i3}$ ；

(b)  $u_o = (1 + \frac{R_5}{R_1})(\frac{R_3//R_4}{R_2+R_3//R_4}u_{i1} + \frac{R_2//R_4}{R_3+R_2//R_4}u_{i2} + \frac{R_3//R_2}{R_4+R_3//R_2}u_{i3})$ ；

(c)  $u_o = -\frac{R_4}{R_1}u_{i1} + (1 + \frac{R_4}{R_1})\frac{R_3}{R_3+R_2}u_{i2}$ ；

(d)  $u_o = -\frac{R_5}{R_1}u_{i1} - \frac{R_5}{R_2}u_{i2} + (1 + \frac{R_5}{R_1//R_2})(\frac{R_4}{R_3+R_4}u_{i3} + \frac{R_3}{R_3+R_4}u_{i4})$

8.2 某音响放大器电路具有话筒放大及卡拉 OK 伴唱功能，此部分功能电路如图 8.2 所示，

设集成运放均为理想的，试求输出电压  $u_o$  的表达式。

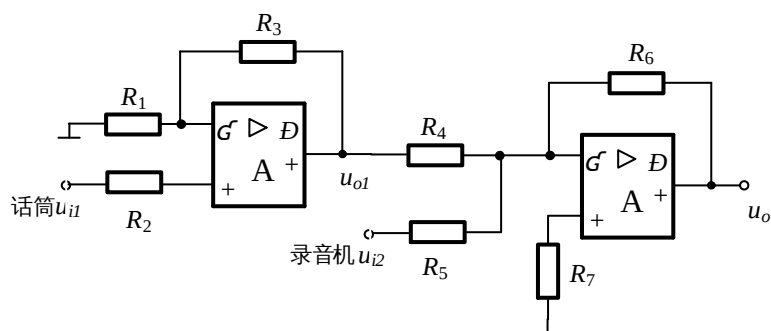


图8.2 习题8.2电路图

8.2 解: 
$$u_o = -\frac{R_6}{R_4} u_{o1} - \frac{R_6}{R_5} u_{i2} = -\left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right) \frac{R_6}{R_4} u_{i1} - \frac{R_6}{R_5} u_{i2}$$

8.3 信号运算电路如图 8.3 所示，假设集成运放是理想的：(1)说明集成运放 A1、A2 各构成何种基本运算电路；(2)写出输出电压  $u_o$  的表达式。

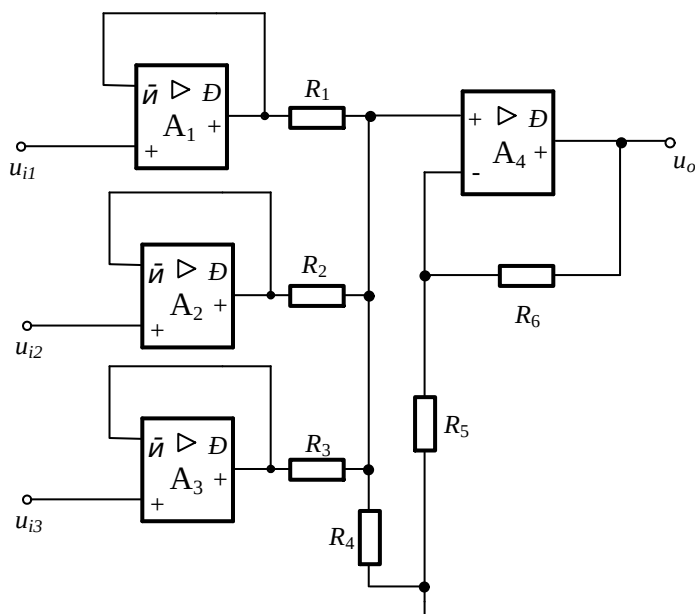


图8.3 习题8.3电路图

8.3 解: A1~A3 构成电压跟随器, A4 构成同相求和运算电路。

$$u_o = \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right) \left( \frac{R_2 // R_3 // R_4}{R_1 + R_2 // R_3 // R_4} u_{i1} + \frac{R_1 // R_3 // R_4}{R_2 + R_1 // R_3 // R_4} u_{i2} + \frac{R_1 // R_2 // R_4}{R_3 + R_1 // R_2 // R_4} u_{i3} \right)$$

8.4 信号运算电路如图 8.4 所示, 集成运放为理想的, 试求输出电压  $u_o$  的表达式。

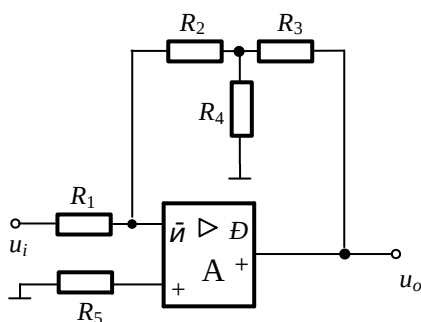


图8.4 习题8.4电路图

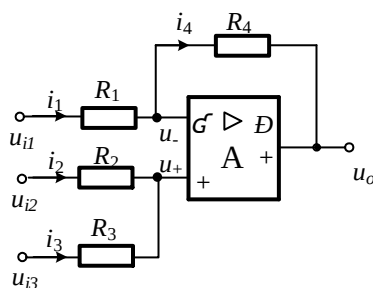
8.4 解:  $\frac{u_i}{R_1} = - \frac{u_o}{R_3 + R_2 // R_4} \cdot \frac{R_4}{R_2 + R_4}$

$$\text{整理得 } u_o = -\frac{R_2 + R_3 + R_2 R_3 / R_4}{R_1} u_i$$

8.5 采用一片集成运放设计一个运算电路，要求关系式为  $u_o = -5u_{i1} + 5u_{i2} + u_{i3}$ ，并且要求电路中最大的阻值不超过  $100\text{k}\Omega$ ，试画出电路图，计算各阻值。

**8.5 解：**利用单运放设计，分析表达式，可将  $U_{i1}$  从反相输入端输入， $U_{i2}$ 、 $U_{i3}$  从同相输入端输入，电路如图所示，输入输出关系为： $u_o = -\frac{R_4}{R_1} u_{i1} + (1 + \frac{R_4}{R_1}) [(\frac{R_3}{R_2 + R_3}) u_{i2} + (\frac{R_2}{R_2 + R_3}) u_{i3}]$

可取  $R_4 = 100\text{k}\Omega$ ，则  $R_1 = 20\text{k}\Omega$ ， $R_2 = 20\text{k}\Omega$ ， $R_3 = 100\text{k}\Omega$ 。



习题 设计电路图

8.6 信号运算电路如图 8.5 (a) 所示，集成运放为理想的， $R_1 = 100\text{k}\Omega$ ， $C_f = 0.1\mu\text{F}$ ，已知集成运放的输入电压波形如图 (b) 所示，电容初始电压为零，试分析输出电压并画出波形。

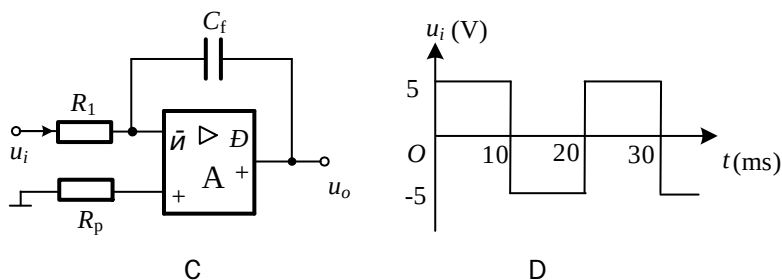
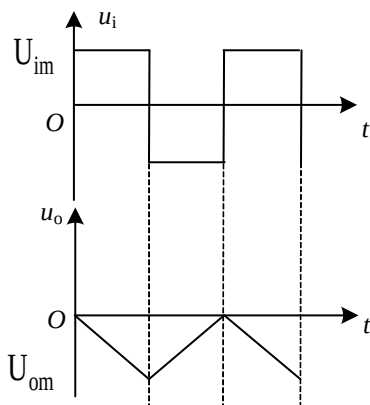


图8.5 习题8.6电路图

8.6 解:  $u_o = -\frac{1}{R_1 C_f} \int u_i dt = -100 \int u_i dt, \because U_{im} = 5V, T=20ms=0.02s$

$\therefore U_{om} = 5V$



习题 波形图

8.7 信号运算电路如图 8.6 所示, 设集成运放均为理想的, 电容的初始电压  $u_c(0)=0$ , 试分析输出电压  $u_o$  与各输入电压之间的关系式, 且写出当  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$  时化简的输出电压  $u_o$  的表达式。

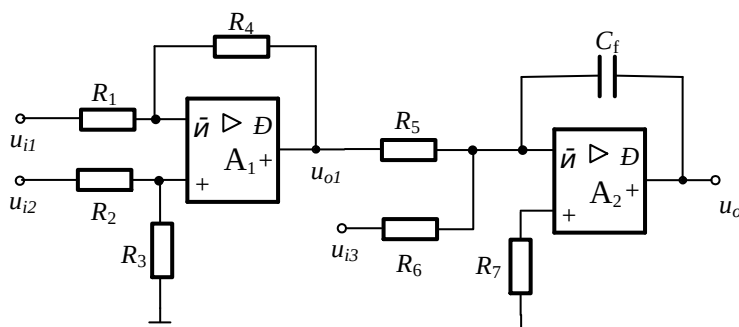


图8.6 习题8.7电路图

8.7 解:  $u_{o1} = -\frac{R_4}{R_1} U_{i1} + (1 + \frac{R_4}{R_1}) (\frac{R_3}{R_2+R_3}) u_{i2}$   
 $u_o = -\frac{1}{R_5 C_f} \int u_{o1} dt - \frac{1}{R_6 C_f} \int u_{i3} dt$   
 当  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$  时

$$u_o = -\frac{1}{RC_f} \int (u_{i1} - u_{i2} - u_{i3}) dt$$



8.8 如图 8.7 所示的电路是一个由理想运放组成的 PID 调节器，试分析该调节器的控制规律，即输出电压与输入电压之间的关系式。

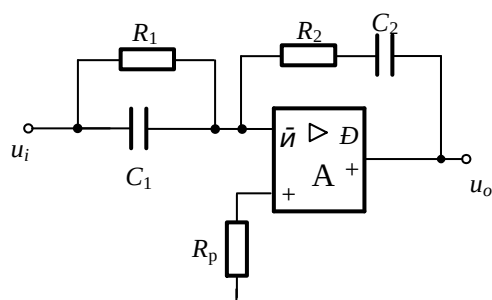


图8.7 习题8.8电路图

8.8 解：  $u_o = - \left( iR + \frac{1}{C_2} \int i dt \right)$ ,  $i = C_1 \frac{du_i}{dt} + \frac{u_i}{R_1}$

8.9 在下列各种情况下，应分别采用哪种类型（低通、高通、带通、带阻）的滤波器。

- (1) 抑制 50Hz 交流电源的干扰；
- (2) 处理具有 1Hz 固定频率的有用信号；
- (3) 从输入信号中取出低于 2kHz 的信号；
- (4) 抑制频率为 100kHz 以上的高频干扰；
- (5) 抑制频率为 5kHz 以下的低频干扰。

8.9 解：(1) 带阻；

(2) 带通；

(3) 低通；

(4) 低通；

(5) 高通。

8.10 分析图 8.8 所示滤波电路，其中元件参数满足  $R_1 C_1 > R_2 C_2$ ，该电路属于哪种类型的滤波电路，是几阶的？

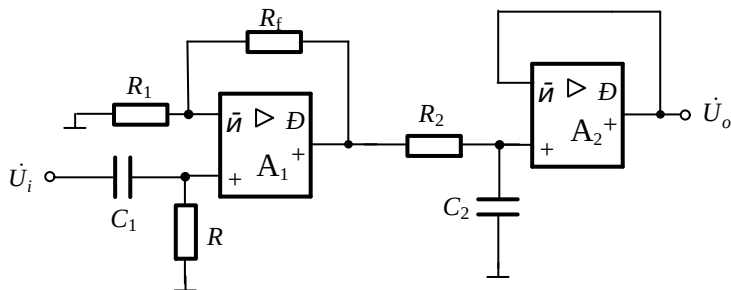


图8.8 习题8.10电路图

8.10 解：二阶带通滤波电路。

8.11 图 8.9 所示电路中集成运放都是理想的，分析各电路的传递函数，并说明是什么类型的滤波电路。

8.11 解：(a) 为低通滤波器， $\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$

(b) 为高通滤波器  $\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$

8.12 已知图 8.9 所示电路的通带截止频率分别为 50Hz 和 100KHz。试用它们构成一个带通滤波器，并画出幅频特性。

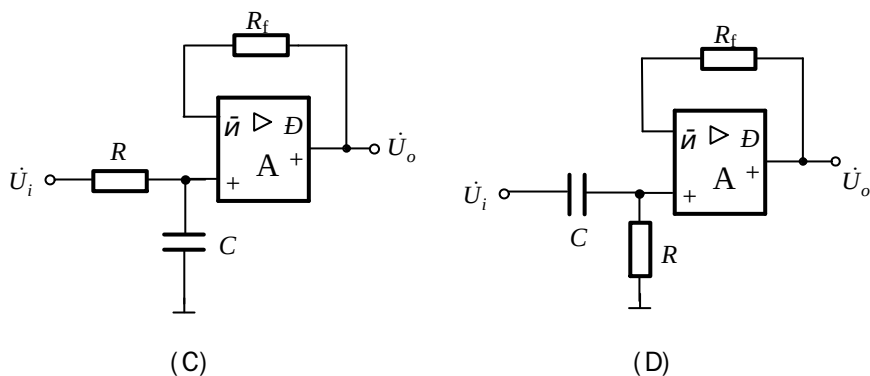
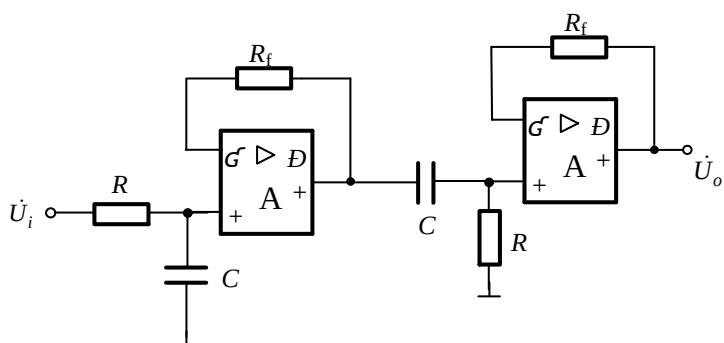


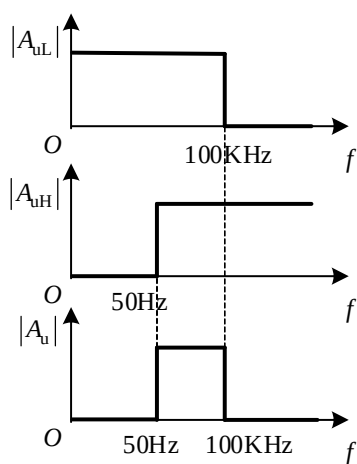
图8.9 习题8.11电路图

8.12 解：因为图 8.9 所示电路(a)为低通滤波电路，(b)为高通滤波电路，并且满足  $f_H >$

$f_L$ ，串联可得带通滤波器电路如图所示，并画其理想幅频特性图如图。



习题8.12串联带通滤波电路图



习题8.12串联带通理想幅频特性图

8.13 某实用滤波电路如图 8.10 所示，试通过分析电路的传递函数说明该滤波电路属于哪种类型的滤波电路，是几阶的？

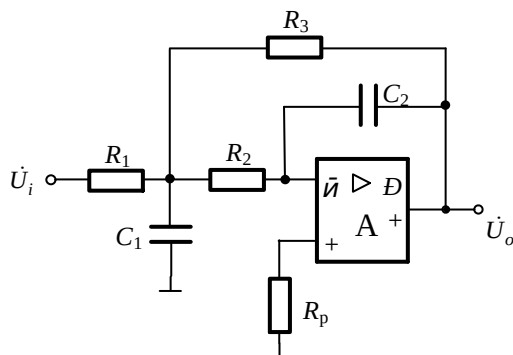
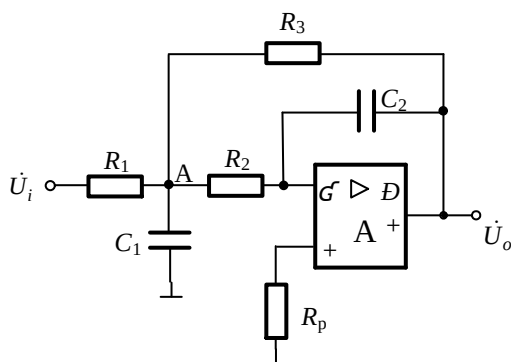


图8.10 习题8.13电路图

8.13 解：传递函数分析如下：

定义节点 A 如下图



习题8.13电路图

A 点电位记为  $\dot{U}_A$ ，列写 A 点 KCL 方程式：

$$\frac{U_A(j\omega) - U_i(j\omega)}{R_1} + \frac{U_A(j\omega)}{\frac{1}{j\omega C_1}} + \frac{U_A(j\omega) - U_o(j\omega)}{R_3} + \frac{U_A(j\omega)}{R_2} = 0$$

利用虚断，又有  $\frac{U_A(j\omega)}{R_2} = -\frac{U_o(j\omega)}{\frac{1}{j\omega C_2}}$

通过整理两式消去中间变量  $U_A(j\omega)$ ，可得电路的电压放大倍数（传递函数）：

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

又  $\omega = 2\pi f$ ，分析传递函数满足  $f \uparrow$  时  $\dot{A}_u \downarrow$ ，电路是低通滤波电路，传递函数分母中  $f$  的最高次幂即为滤波电路的阶数，故该电路是二阶低通滤波电路。

8.14 某实用滤波电路如图 8.11 所示，试通过分析电路的传递函数说明该滤波电路属于哪种类型的滤波电路，是几阶的？

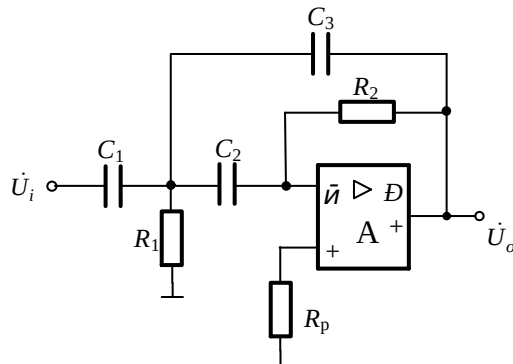
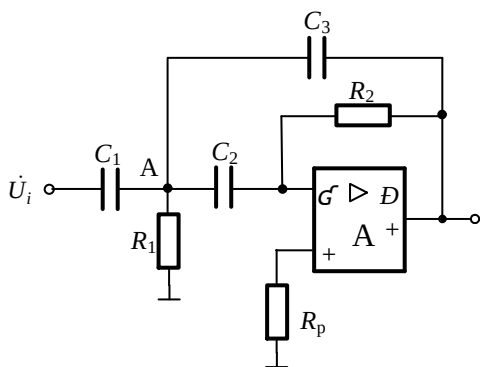


图8.11 习题8.14电路图

8.14 解：传递函数分析如下：

定义节点 A 如下图



习题8.14电路图

A 点电位记为  $\dot{U}_A$ ，列写 A 点 KCL 方程式：

$$\frac{U_A(j\omega) - U_i(j\omega)}{\frac{1}{j\omega C_1}} + \frac{U_A(j\omega)}{R_1} + \frac{U_A(j\omega) - U_o(j\omega)}{\frac{1}{j\omega C_3}} + \frac{U_A(j\omega)}{\frac{1}{j\omega C_2}} = 0$$

利用虚断，又有  $\frac{U_A(j\omega)}{\frac{1}{j\omega C_2}} = -\frac{U_o(j\omega)}{R_2}$

通过整理两式消去中间变量  $U_A(j\omega)$ ，可得电路的电压放大倍数（传递函数）：

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

又  $\omega = 2\pi f$ ，分析传递函数满足  $f \uparrow$  时  $\dot{A}_u \uparrow$ ，电路是高通滤波电路，传递函数分母中  $f$  的最高次幂即为滤波电路的阶数，故该电路是二阶高通滤波电路。

8.15 某电压比较器电路如图 8.12 所示，设集成运放为理想的， $U_{REF} = 3V$ ， $U_Z = 6V$  试：

- (1) 求出阈值电压  $U_Z$ ，并画出电压传输特性图；
- (2) 当输入电压为  $5\sin\omega t$  时，画出对应的电压输出波形。

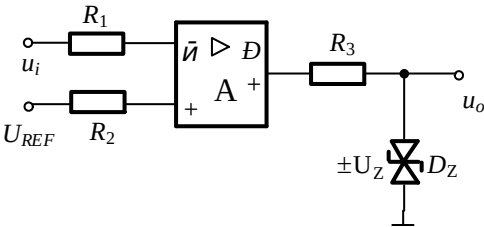
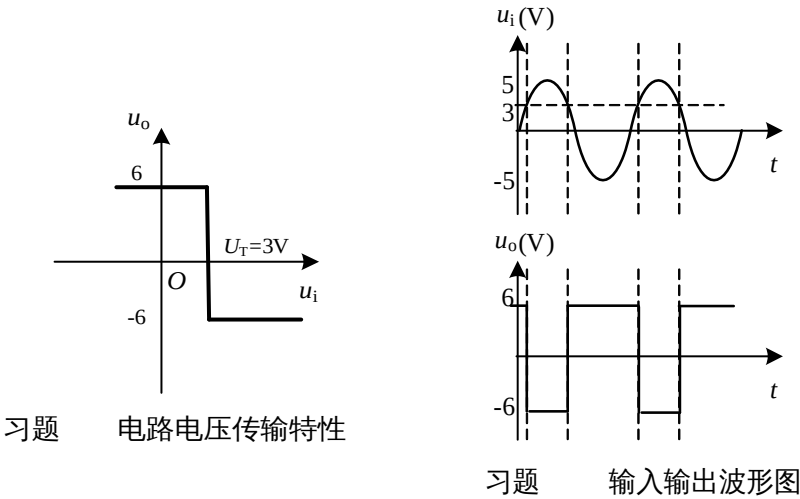
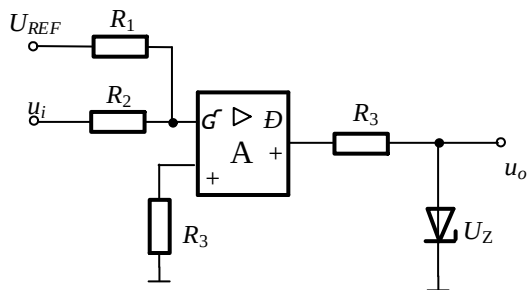


图8.12 习题8.15电路图

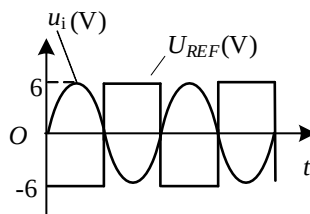
**8.15 解：** 阈值电压  $U_T = 3V$ ，输入电压由小增大过阈值电压时，输出由高电平跃变为低电平，电压传输特性及输出电压波形如下图所示。



8.16 某电压比较器电路如图 8.13 (a) 所示，设集成运放为理想的，稳压管的正向导通电压  $U_D = 0.7V$ ， $U_Z = 5V$ ， $R_1 = 15K\Omega$ ， $R_2 = 10K\Omega$ ，试分析输入电压及参考电压如图 (b) 时对应的阈值电压  $U_Z$ ，并画出电压传输特性图及输出电压的波形。



C 电路图



D 输入及参考电压

图8.13 习题8.16电路图

8.16 解：求阈值电压

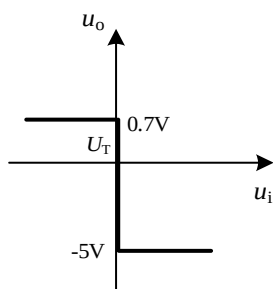
在反相输入端根据“虚断”特点，利用叠加原理可得

$$u_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_i + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{REF}$$

理想情况下，输出电压发生跳变时对应的  $u_+ = u_-$  时的  $u_i$  取值即为阈值电压，有  $u_- =$

0 代入上式整理可得阈值电压为  $U_T = -\frac{R_2}{R_1} U_{REF} = -\frac{2}{3} U_{REF}$

输入电压小于阈值电压时，输出高电平，稳压管正向导通，输出电压为 0.7V；当输入电压由小增大过阈值电压时，输出跃变为低电平，稳压管工作在稳压状态，输出电压为 -5V。电压传输特性如下图所示。

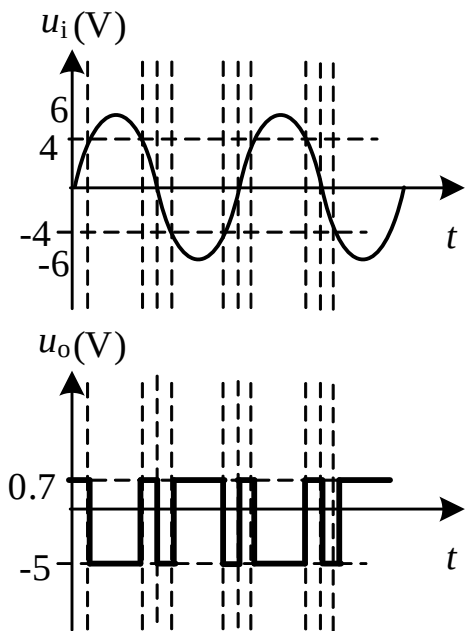


习题 电路电压传输特性

当  $u_i > 0V$  时， $U_{REF} = -6V$ ， $U_T = 4V$ ； $u_i > 4$  时对应的输出电压  $u_o = -5V$ ，否则  $0 < u_i < 4$  时输出电压为 0.7V

当  $u_i < 0V$  时， $U_{REF} = +6V$ ， $U_T = -4V$ ；即  $0 > u_i > -4$  时对应的输出电压  $u_o = -$

5V，否则 $u_i < -4V$ 时输出电压为 0.7V



习题     输入输出波形图

8.17 某电压比较器电路如图 8.14 所示，设集成运放为理想的， $U_{REF} = 3V$ ， $U_Z = 6V$ ， $R_1 = R_2 = 10K\Omega$ ， $R_3 = 20K\Omega$ ，试求出阈值电压  $U_Z$ ，并画出电压传输特性图；

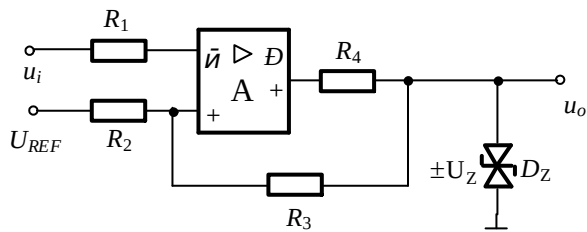


图8.14 习题8.17电路图

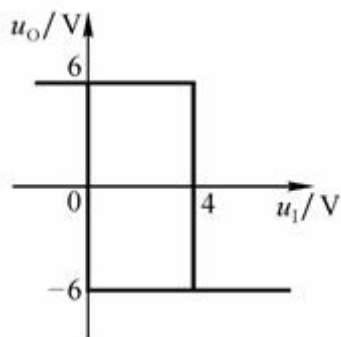
8.17 解： 所示电路为反相输入的滞回比较器， $u_o = \pm U_Z = \pm 6V$ 。令

$$u_2 = \frac{R}{R + R} \cdot u_1 + \frac{R}{R + R} \cdot U_{4'} = u_o = u_+$$

求出阈值电压             $U_{T1} = 0V$      $U_{T2} = 4V$

其电压传输特性如下图所示。





8.18 试分析图 8.15 所示某电压比较器电路的电压传输特性。

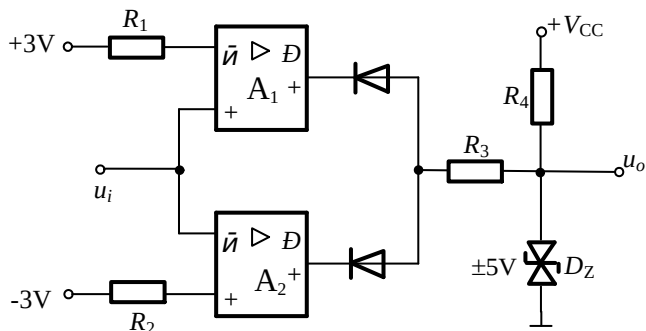
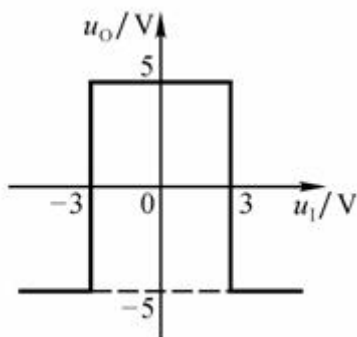


图8.15 习题8.18电路图

8.18 解：所示电路为窗口比较器， $u_o = \pm U_Z = \pm 5V$ ， $\pm U_T = \pm 3V$ ，其电压传输特性如下图所示。



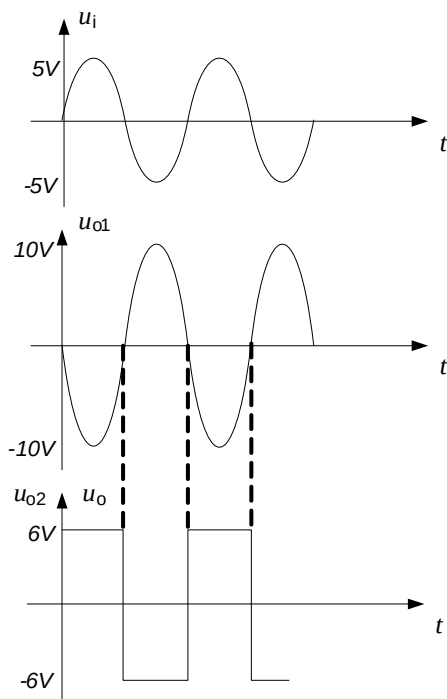
8.19 某信号变换放大电路如图 8.16 所示，已知集成运放为理想的，其最大输出电压  $\pm U_{oM} = \pm 15V$ ， $U_Z = 6V$ ， $R_1 = R_2 = R_3 = 10K\Omega$ ， $R_f = 20K\Omega$ ，试分析：

(1)  $A_1$ 、 $A_2$ 、和  $A_3$  各构成何种基本电路；

(2) 若  $u_i = 5\sin\omega t$  (V)，试画出与之对应的  $u_{o1}$ 、 $u_{o2}$  和  $u_o$  的波形。

8.19 解：(1)  $A_1$  反相比例放大电路， $A_2$  简单电压比较器， $A_3$  电压跟随器

(2)



各点电压输出波形图

## 习题 9

9.1 产生正弦波振荡的条件是什么？它与负反馈的放大电路的自激振荡条件是否相同，为什么？

9.1 答：产生正弦波振荡的条件是幅值平衡条件， $|\dot{A}\dot{F}| = 1$ ，和相位平衡条件， $\varphi_A + \varphi_F = 2n\pi$ 。（ $n$  为整数）与负反馈放大电路的自激振荡条件不相同。

负反馈自激振荡条件中： $\varphi_A + \varphi_F = (2n+1)\pi$  （ $n$  为整数）

9.2 正弦波振荡电路由哪几个部分组成？如果没有选频网络，输出信号将有什么特点？

9.2 解：由放大电路选频网络，正反馈网络，稳幅环节组成。当无选频网络时，输出信号将包含多个频率成份（即高次谐波）。

9.3 根据选频网络的不同，正弦波振荡器可分为哪几类？各有什么特点？

9.3 解：正弦波振荡电路可分为 RC 正弦波振荡器，LC 正弦波振荡器和石英晶体振荡器。

RC 正弦波振荡器通常产生低频正弦信号，LC 正弦波振荡器常用来产生高频正弦信号，石英晶体振荡器产生的正弦波频率稳定性很高。

9.4 某正弦波振荡电路如图 9.1 所示。

- （1）说明电路是哪种正弦波振荡电路。
- （2）若  $R_1$  短路，则电路将产生什么现象？
- （3）若  $R_1$  断路，则电路将产生什么现象？
- （4）若  $R_f$  短路，则电路将产生什么现象？
- （5）若  $R_f$  断路，则电路将产生什么现象？

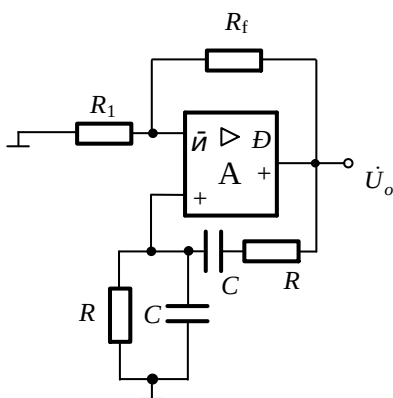


图9.1 习题9.4电路图

9.4 解：（1）上“-”下“+” （2）输出严重失真，几乎为方波。  
（3）输出为零。（4）输出为零。 （5）输出严重失真，几乎为方波。

9.5 某正弦波振荡电路如图 9.2 所示，稳压管起稳幅作用，其稳定电压  $\pm U_Z = \pm 6V$ 。

$C=1\mu F$ ， $R=16K\Omega$  试估算：（1）输出电压不失真情况下的有效值；（2）振荡频率。

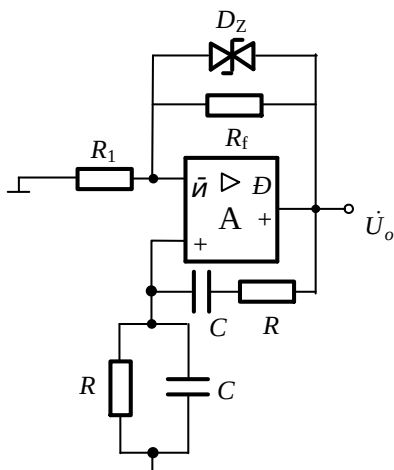


图9.2 习题9.5电路图

9.5 解：（1）输出电压不失真情况下的峰值是稳压管的稳定电压，故其有效值

$$U_o = \frac{1.5U_z}{\sqrt{2}} \approx 6.36V$$

(2) 电路的振荡频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \approx 9.95Hz$$

9.6 初步设计振荡电路如图 9.3 所示，试用相位平衡条件判断是否会产生振荡，若不会请修改。

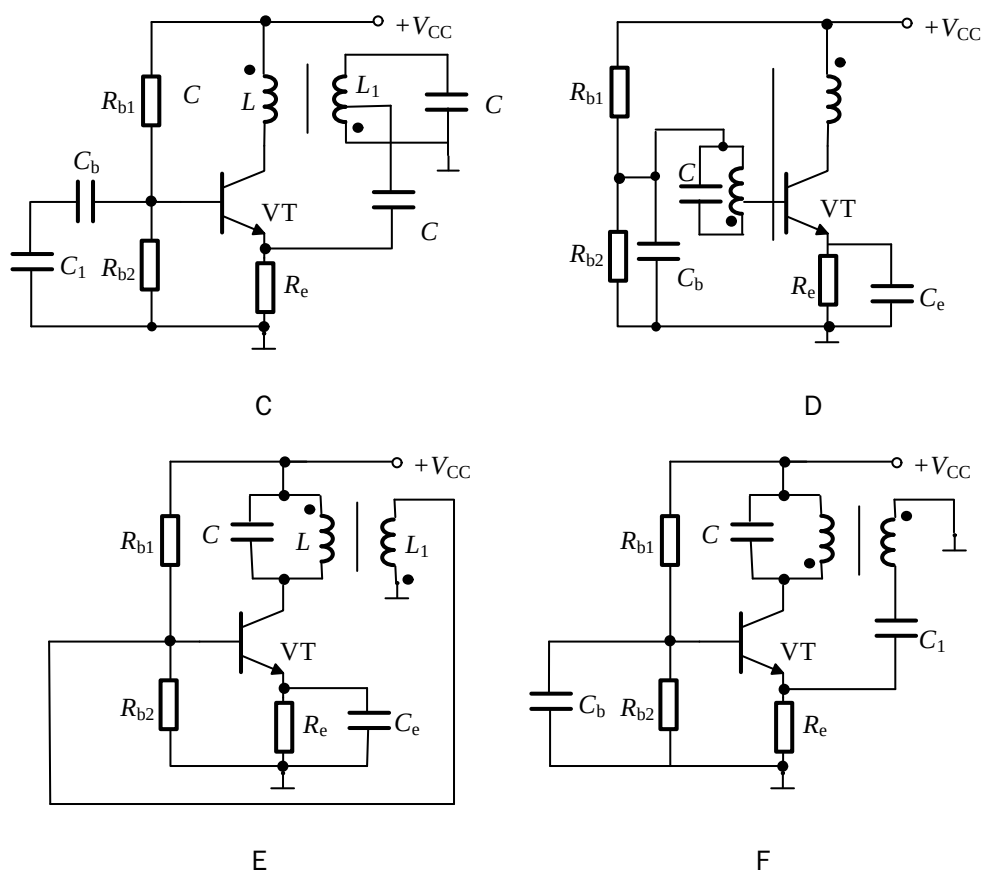


图9.3习题9.6电路图

9.6 解：(1) 可能；

(2) 可能;

(3) 电感与基极之间的连线应串入隔直电容; 同名端错误;

(4) 同名端错误。

9.7 石英晶体振荡电路如图 9.4 所示。试用相位平衡条件判断电路是否能振荡, 并说明石英晶体在电路中的作用。

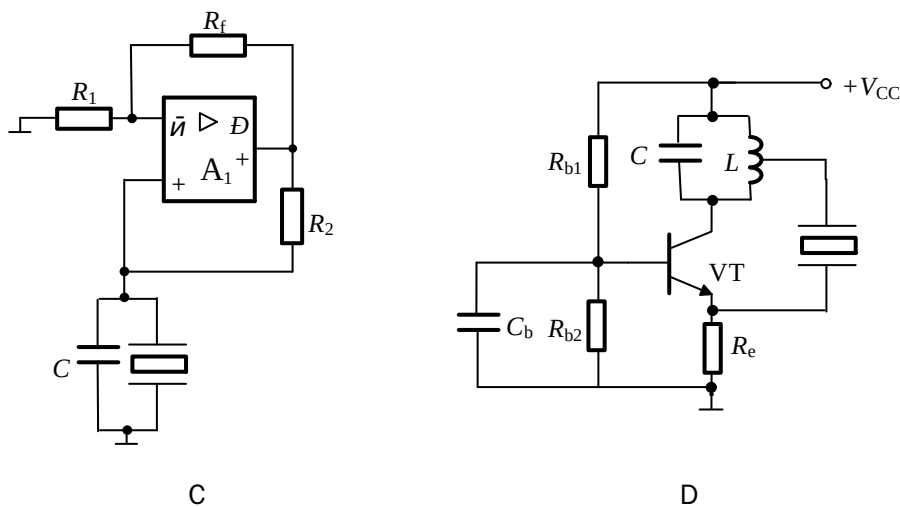


图9.4 习题9.7电路图

**9.7 解:** (a) 可能振荡, 石英晶体作等效电感, 电路为并联型石英晶体振荡器。

(b) 可能振荡, 石英晶体等效为短路线, 电路为串联型石英晶体振荡器

9.8 某方波发生器电路如图 9.5 所示, 已知 A 为理想运放, 其输出电压的最大值为  $\pm 15V$ ,

$R_f = 10k\Omega$ ,  $R_1 = R_2 = 50k\Omega$ ,  $C = 0.1\mu F$ 。

(1) 画出输出电压和电容两端电压的波形;

(2) 写出振荡周期  $T$  的表达式, 并计算出数值。

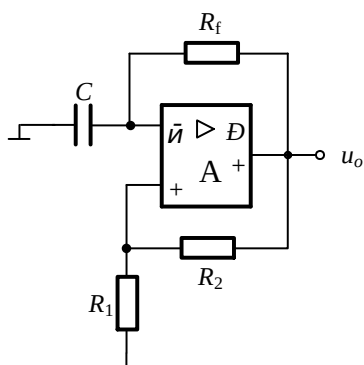
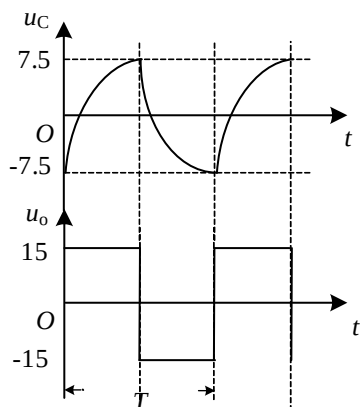


图9.5 习题9.8电路图

9.8 解：（1）滞回比较器的阈值电压

$$\pm U_T = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_o = \pm 7.5V$$

$$(2) T = 2RC \ln \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) \approx 22ms$$



习题 波形图

9.9 某方波发生器电路如图 9.6 所示，已知 A 为理想运放，其输出电压的最大值为  $\pm 12V$ ， $R = 10k\Omega$ ， $R_1 = 50k\Omega$ ， $R_2 = 100k\Omega$ ， $R_3 = 500\Omega$ ， $\pm U_Z = \pm 6V$ ， $C = 0.1\mu F$ 。

（1）画出输出电压和电容两端电压的波形；

（2）写出振荡周期 T 的表达式，并计算出数值。

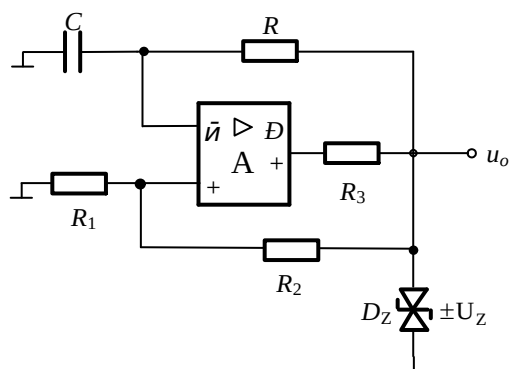
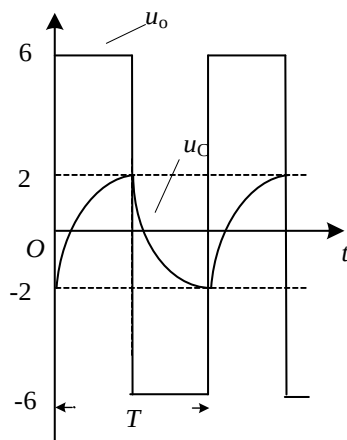


图9.6习题9.9电路图

9.9 解：（1）滞回比较器的阈值电压

$$\pm U_T = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_o = \pm 2V$$

$$(2) T = 2RC \ln \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) \approx 1.39ms$$



习题 波形图

9.10 某波形变换电路如图 9.7 所示，已知集成运放为理想的， $R_1 = 20k\Omega$ ， $R_2 = 20k\Omega$ ， $R_3 = 500\Omega$ ， $R_4 = 50k\Omega$ ， $\pm U_Z = \pm 8V$ ， $C = 0.01\mu F$ 。

（1）分别说明  $A_1$  和  $A_2$  各构成哪种基本电路；

（2）求出  $u_{O1}$  与  $u_O$  的关系曲线  $u_{O1} = f(u_O)$ ；



(3) 求出  $u_o$  与  $u_{o1}$  的运算关系式  $u_o = f(u_{o1})$ ;

(4) 定性画出  $u_{o1}$  与  $u_o$  的波形;

(5) 说明若要提高振荡频率, 则可以改变哪些电路参数, 如何改变?

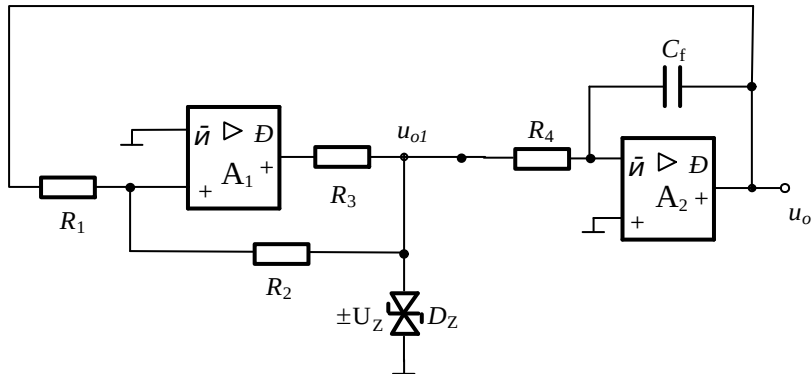
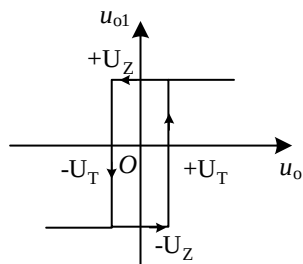


图9.7 习题9.10电路图

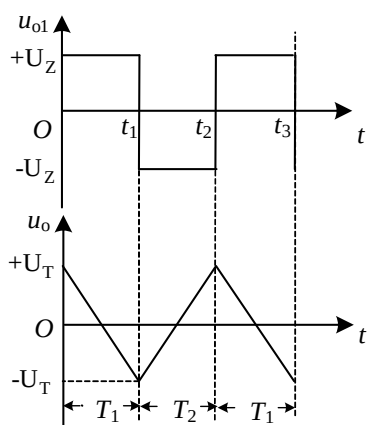


习题 电压传输特性

9.10 解: (1)  $A_1$  迟滞电压比较器,  $A_2$  反相积分电路

(2)

$$(3) u_o = -\frac{1}{R_4 C_f} \int u_i dt$$



(4) 习题 波形图

(5) 振荡频率与电路的时间常数  $R_4 C_f$  以及  $R_2/R_1$  有关, 实际应用中, 通过调整  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_4$  的阻值和  $C_f$  的容量来改变振荡频率, 若要提高振荡频率, 可通过增大  $R_2$  或减小  $R_1$ 、 $R_4$ 、 $C_f$  来实现。

9.11 某波形变换电路如图 9.8 所示, 已知二极管和运放都是理想的: (1)  $A_1$ 、 $A_2$  各组成什么电路? (2) 写出电路周期  $T$  的表达式。

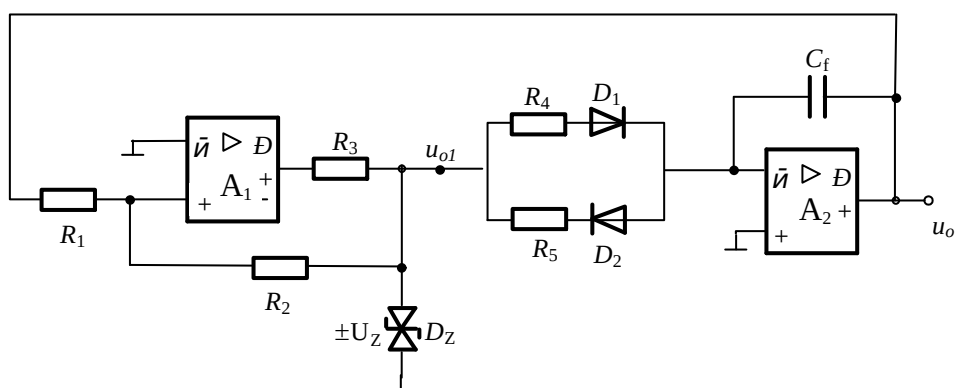


图9.8 习题9.11电路图

9.11 解:  $A_1$  迟滞电压比较器,  $A_2$  反相积分电路

$$u_{1+} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_{o1} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_o$$

$$u_{1+} = u_{1-} = 0, \quad u_{o1} = \pm U_Z$$

$$\text{则门限电压 } U_{TH} = \pm \frac{R_1}{R_2} U_Z$$

当  $u_{o1} = +U_Z$  时,  $VD_1$  导通, 积分常数为  $R_4C$ ,  $u_o$  下降, 当  $u_o$  下降到

$$U_{TH2} = -\frac{R_1}{R_2} U_Z \text{ 时, } u_{o1} \text{ 跳变到 } -U_Z, \text{, 此时, } VD_2 \text{ 导通积分常数为 } R_5C, u_o \text{ 上升,}$$

当  $u_o$  上升到  $U_{TH1} = +\frac{R_1}{R_2} U_Z$  时,  $u_{o1}$  跳变到  $+U_Z$ , 可得下图。

由图可见, 在  $T_1$  期间:

$$U_{TH} = -\frac{1}{RC} \int^T -U_Z dt + U_{TH} = \frac{U_Z}{RC} T + U_{TH}$$

$$\therefore T = \frac{RRC}{R}$$

同理, 可得  $T = \frac{RRC}{R},$

$$T = T_1 + T_2 \quad f = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_1 + T_2} = \frac{R}{RC(R_1 + R_2)}$$

