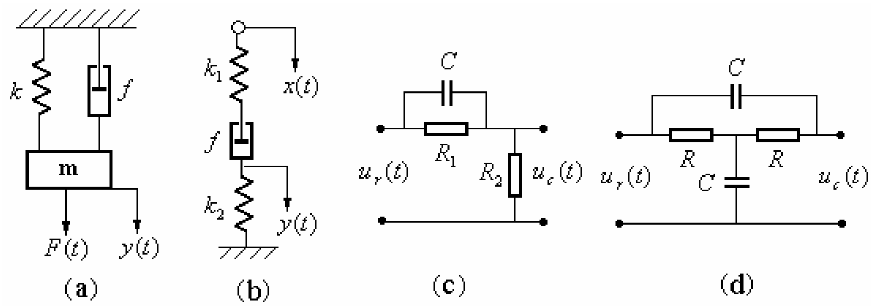
# 第二章习题及答案

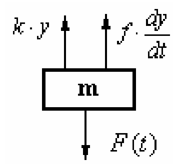
2-1　试建立题2-1图所示各系统的微分方程［其中外力$F(t)$，位移$x(t)$和电压$u_r(t)$为输入量；位移$y(t)$和电压$u_c(t)$为输出量；$k$（弹性系数），$f$（阻尼系数），$R$（电阻），$C$（电容）和$m$（质量）均为常数］。




题2-1图 系统原理图

解

（a）以平衡状态为基点，对质块$m$进行受力分析（不再考虑重力影响），如图解2-1(a)所示。根据牛顿定理可写出




图解2-1(a)

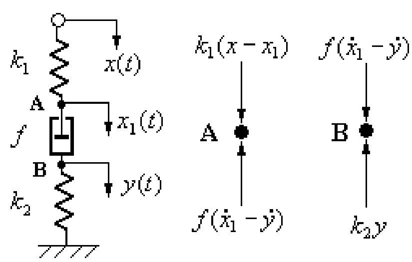
$$F(t)-ky(t)-f\frac{dy}{dt}=m\frac{d^2y}{dt^2}$$

整理得

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2}+\frac{f}{m}\frac{dy(t)}{dt}+\frac{k}{m}y(t)=\frac{1}{m}F(t)$$

（b）如图解2-1(b)所示，取A,B两点分别进行受力分析。对A点有

$$k_1(x-x_1)=f(\frac{dx_1}{dt}-\frac{dy}{dt}) \qquad (1)$$




图解2-1(b)

对B点有

$$f(\frac{dx_1}{dt}-\frac{dy}{dt})=k_2y \qquad (2)$$

联立式（1）、（2）可得：

$$\frac{dy}{dt}+\frac{k_1k_2}{f(k_1+k_2)}y=\frac{k_1}{k_1+k_2}\frac{dx}{dt}$$

(c) 应用复数阻抗概念可写出

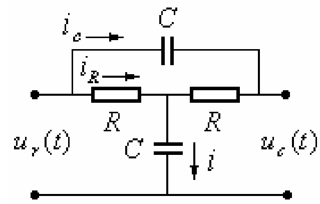
$$U_r(s)=\frac{R_1\frac{1}{cs}}{R_1+\frac{1}{cs}}I(s)+U_c(s) \qquad (3)$$

$$I(s)=\frac{Uc(s)}{R_2} \tag{4}$$

联立式（3）、（4），可解得： $\dfrac{U_c(s)}{U_r(s)}=\dfrac{R_2(1+R_1Cs)}{R_1+R_2+R_1R_2Cs}$

微分方程为: $\dfrac{du_c}{dt}+\dfrac{R_1+R_2}{CR_1R_2}u_c=\dfrac{du_r}{dt}+\dfrac{1}{CR_1}u_r$

(d) 由图解2-1（d）可写出



图解2-1(d)

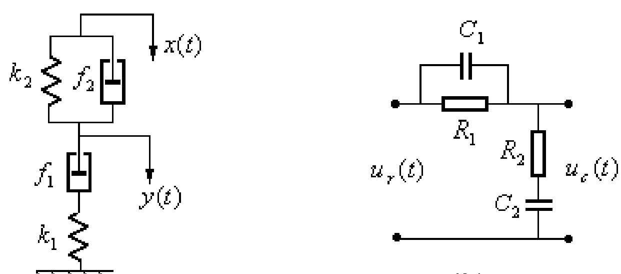
$$\begin{cases} U_r(s)=RI_R(s)+\left[I_R(s)+I_c(s)\right]\dfrac{1}{Cs} & (5)\\ I_c(s)\dfrac{1}{Cs}=RI_R(s)-RI_c(s) & (6)\\ U_c(s)=I_c(s)R+\left[I_R(s)+I_c(s)\right]\dfrac{1}{Cs} & (7)\end{cases}$$

联立式（5）、（6）、（7），消去中间变量$I_C(s)$和$I_R(s)$，可得：

$$\frac{U_c(s)}{U_r(s)}=\frac{R^2C^2s^2+2RCs+1}{R^2C^2s^2+3RCs+1}$$

微分方程为 $\dfrac{du_c^2}{dt^2}+\dfrac{3}{CR}\dfrac{du_c}{dt}+\dfrac{1}{C^2R^2}u_c=\dfrac{du_r^2}{dt^2}+\dfrac{2}{CR}\dfrac{du_r}{dt}+\dfrac{1}{C^2R^2}u_r$

**2-2** 试证明题2-2图中所示的力学系统(a)和电路系统(b)是相似系统（即有相同形式的数学模型）。

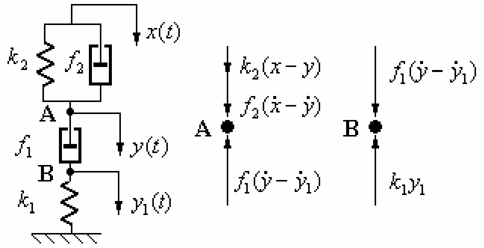


(a) (b)

题2-2图 系统原理图

**解**

(a) 取A、B两点分别进行受力分析，如图解2-2(a)所示。对A点有



图解2-2(a)

$$k_2(x-y)+f_2(\dot{x}-\dot{y})=f_1(\dot{y}-\dot{y}_1) \tag{1}$$

对B点有

$$f_1(\dot{y}-\dot{y}_1)=k_1y_1 \tag{2}$$

对式（1）、（2）分别取拉氏变换，消去中间变量 $y_1$，整理后得

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\frac{f_1 f_2}{k_1 k_2}s^2 + (\frac{f_1}{k_1}+\frac{f_2}{k_2})s+1}{\frac{f_1 f_2}{k_1 k_2}s^2 + (\frac{f_1}{k_1}+\frac{f_2}{k_2}+\frac{f_1}{k_2})s+1}$$

(b) 由图可写出

$$\frac{U_c(s)}{R_2+\frac{1}{C_2 s}} = \frac{U_r(s)}{R_2+\frac{1}{C_1 s}+\frac{R_1\cdot\frac{1}{C_1 s}}{R_1+\frac{1}{C_1 s}}}$$

整理得

$$\frac{U_c(s)}{U_r(s)} = \frac{R_1R_2C_1C_2s^2+(R_1C_1+R_2C_2)s+1}{R_1R_2C_1C_2s^2+(R_1C_1+R_2C_2+R_1C_2)s+1}$$

2-3　假设某容器的液位高度 $h$ 与液体流入量 $Q_r$ 满足方程 $\frac{dh}{dt}+\frac{\alpha}{S}\sqrt{h}=\frac{1}{S}Q_r$，式中 $S$ 为液位容器的横截面积，$\alpha$ 为常数。若 $h$ 与 $Q_r$ 在其工作点 $(Q_{r0},h_0)$ 附近做微量变化，试导出 $\Delta h$ 关于 $\Delta Q_r$ 的线性化方程。

**解**　将 $\sqrt{h}$ 在 $h_0$ 处展开为泰勒级数并取一次近似

$$\sqrt{h}=\sqrt{h_0}+\frac{d\sqrt{h}}{dt}|_{h_0}\cdot\Delta h=\sqrt{h_0}+\frac{1}{2\sqrt{h_0}}\cdot\Delta h \qquad (1)$$

代入原方程可得

$$\frac{d(h_0+\Delta h)}{dt}+\frac{\alpha}{S}(\sqrt{h_0}+\frac{1}{2\sqrt{h_0}}\cdot\Delta h)=\frac{1}{S}(Q_{r0}+\Delta Q_r) \qquad (2)$$

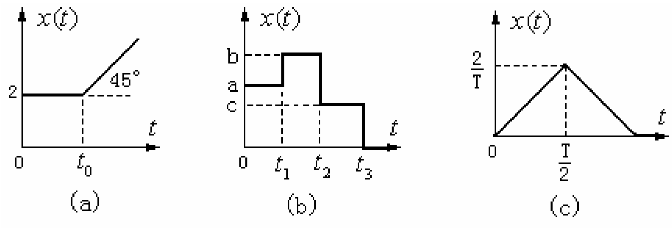
在平衡工作点处系统满足

$$\frac{dh_0}{dt}+\alpha\sqrt{h_0}=Q_{r0} \qquad (3)$$

式（2），（3）相减可得 $\Delta h$ 的线性化方程

$$S\frac{d\Delta h}{dt}+\frac{\alpha}{2\sqrt{h_0}}\Delta h=\Delta Q_r$$

2-4　试求题2-3图所示各信号 $x(t)$ 的象函数 $X(s)$。



题2-3图 信号图

解

（a） $\because \quad x(t) = 2 + (t - t_0)$

$$\therefore X(s) = \frac{2}{s} + \frac{1}{s^2} e^{-t_0 s}$$

（b） $\because \quad x(t) = a + (b-a)(t-t_1) - (b-c)(t-t_2) - c(t-t_3)$

$$\therefore \quad X(s) = \frac{1}{s}[a + (b-a)e^{-t_1 s} - (b-c)e^{-t_2 s} - ce^{-t_3 s}]$$

（c） $\because \quad x(t) = \frac{4}{T^2} t - \frac{4}{T^2}(t - \frac{T}{2}) - \frac{4}{T^2}(t - \frac{T}{2}) + \frac{4}{T^2}(t - T)$

$$\therefore \quad X(s) = \frac{4}{T^2 s^2}(1 - 2e^{\frac{-T}{2}s} + e^{-Ts})$$

2-5 求下列各拉氏变换式的原函数。

(1) $X(s) = \frac{e^{-s}}{s-1}$

(2) $X(s) = \frac{1}{s(s+2)^3(s+3)}$

(3) $X(s) = \frac{s+1}{s(s^2+2s+2)}$

解

(1) $x(t) = e^{t-1}$

(2) 原式 $= \frac{-1}{2(s+2)^3} + \frac{1}{4(s+2)^2} - \frac{3}{8(s+2)} + \frac{1}{24s} + \frac{1}{3(s+3)}$

$$\therefore x（t）= \frac{-t^2}{4}e^{-2t} + \frac{t}{4}e^{-2t} - \frac{3}{8}e^{-2t} + \frac{1}{3}e^{-3t} + \frac{1}{24}$$

(3) 原式 $= \frac{1}{2s} - \frac{\frac{1}{2}s}{s^2+2s+2} = \frac{1}{2s} - \frac{1}{2}\cdot\frac{s+1}{(s+1)^2+1} + \frac{1}{2}\cdot\frac{1}{(s+1)^2+1}$

$$\therefore x(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}e^{-t}(\sin t - \cos t)$$

2-6　已知在零初始条件下，系统的单位阶跃响应为 $c(t)=1-2e^{-2t}+e^{-t}$，试求系统的传递函数和脉冲响应。

解　单位阶跃输入时，有 $R(s)=\dfrac{1}{s}$，依题意

$$C(s)=\frac{1}{s}-\frac{2}{s+2}+\frac{1}{s+1}=\frac{3s+2}{(s+1)(s+2)}\cdot\frac{1}{s}$$

$$\therefore\quad G(s)=\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{3s+2}{(s+1)(s+2)}$$

$$k(t)=L^{-1}\left[G(s)\right]=L^{-1}\left[\frac{-1}{s+1}+\frac{4}{s+2}\right]=4e^{-2t}-e^{-t}$$

2-7　已知系统传递函数 $\dfrac{C(s)}{R(s)}=\dfrac{2}{s^2+3s+2}$，且初始条件为 $c(0)=-1$，$\dot{c}(0)=0$，试求系统在输入 $r(t)=1(t)$ 作用下的输出 $c(t)$。

解　系统的微分方程为

$$\frac{d^2c(t)}{dt^2}+3\frac{dc(t)}{dt}+2c(t)=2r(t) \qquad (1)$$

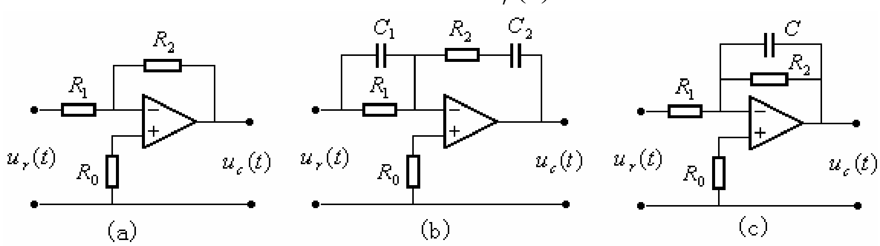
考虑初始条件，对式（1）进行拉氏变换，得

$$s^2C(s)+s+3sC(s)+3+2C(s)=\frac{2}{s} \qquad (2)$$

$$C(s)=-\frac{s^2+3s-2}{s(s^2+3s+2)}=\frac{1}{s}-\frac{4}{s+1}+\frac{2}{s+2}$$

$$\therefore\qquad c(t)=1-4e^{-t}+2e^{-2t}$$

2-8　求题2-8图所示各有源网络的传递函数 $\dfrac{U_c(s)}{U_r(s)}$。




题2-8图 有源网络

解

（a）根据运算放大器 “虚地”概念，可写出

$$\frac{U_c(s)}{U_r(s)}=-\frac{R_2}{R_1}$$

(b)
$$\frac{U_c(s)}{U_r(s)}=-\frac{R_2+\dfrac{1}{C_2s}}{\dfrac{R_1\cdot\dfrac{1}{C_1s}}{R_1+\dfrac{1}{C_1s}}}=-\frac{(1+R_1C_1s)(1+R_2C_2s)}{R_1C_1C_2s^2}$$

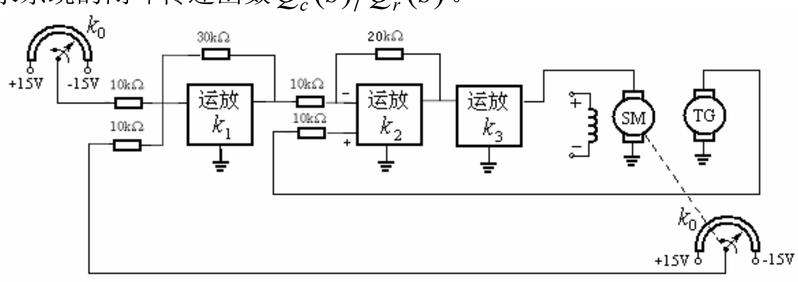
(c)
$$\frac{U_c(s)}{U_r(s)}=-\frac{\dfrac{R_2\cdot\dfrac{1}{Cs}}{R_2+\dfrac{1}{Cs}}}{R_1}=-\frac{R_2}{R_1(1+R_2Cs)}$$

**2-9** 某位置随动系统原理框图如题2-9图所示，已知电位器最大工作角度$Q_m=330^0$，功率放大器放大系数为$k_3$。

（1） 分别求出电位器的传递函数$k_0$，第一级和第二级放大器的放大系数$k_1$，$k_2$；

（2） 画出系统的结构图；

（3） 求系统的闭环传递函数$Q_c(s)/Q_r(s)$。




题2-9图 系统原理框图

**解**

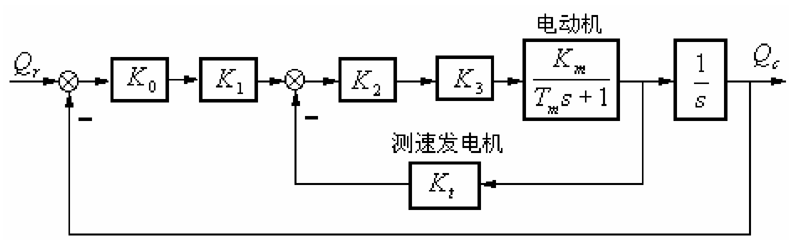
(1) 电位器的传递函数

$$K_0=\frac{E}{Q_m}=\frac{30}{330^0\times\dfrac{\pi}{180^0}}=\frac{180^0}{11\pi}$$

根据运算放大器的特性，可分别写出两级放大器的放大系数为

$$K_1=-\frac{30\times10^3}{10\times10^3}=-3,\qquad K_2=-\frac{20\times10^3}{10\times10^3}=-2$$

(2) 可画出系统结构如图解2-9所示：

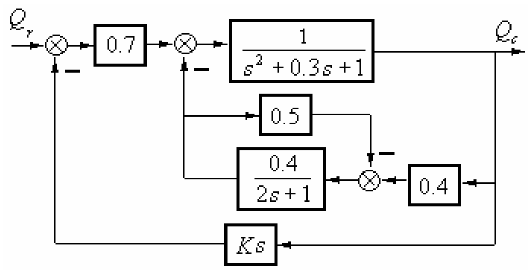


图解2-9 系统结构图

(3) $$\frac{Q_c(s)}{Q_r(s)}=\frac{\dfrac{K_0K_1K_2K_3K_m}{s(T_m s+1)}}{1+\dfrac{K_2K_3K_mK_t}{T_m s+1}+\dfrac{K_0K_1K_2K_3K_m}{s(T_m s+1)}}$$

$$=\frac{1}{\dfrac{T_m}{K_0K_1K_2K_3K_m}s^2+\dfrac{1+K_2K_3K_mK_t}{K_0K_1K_2K_3K_m}s+1}$$

2-10 飞机俯仰角控制系统结构图如题2-10图所示，试求闭环传递函数$Q_c(s)/Q_r(s)$。



题2-10图 飞机俯仰角控制系统结构图

解 经结构图等效变换可得闭环系统的传递函数

$$\frac{Q_c(s)}{Q_r(s)}=\frac{0.7(s+0.6)}{s^3+(0.9+0.7K)s^2+(1.18+0.42K)s+0.68}$$

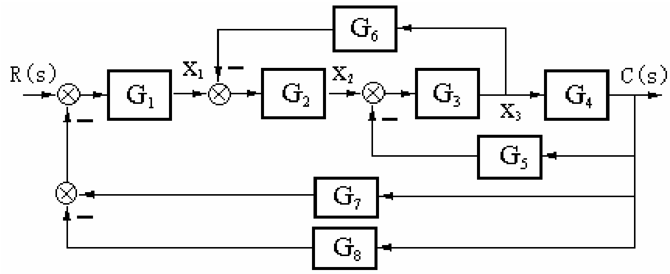
2-11 已知系统方程组如下，试绘制系统结构图，并求闭环传递函数$\dfrac{C(s)}{R(s)}$。

$$\begin{cases} X_1(s)=G_1(s)R(s)-G_1(s)[G_7(s)-G_8(s)]C(s) \\ X_2(s)=G_2(s)[X_1(s)-G_6(s)X_3(s)] \\ X_3(s)=[X_2(s)-C(s)G_5(s)]G_3(s) \\ C(s)\ =G_4(s)X_3(s) \end{cases}$$

解 系统结构图如图解2-11所示。

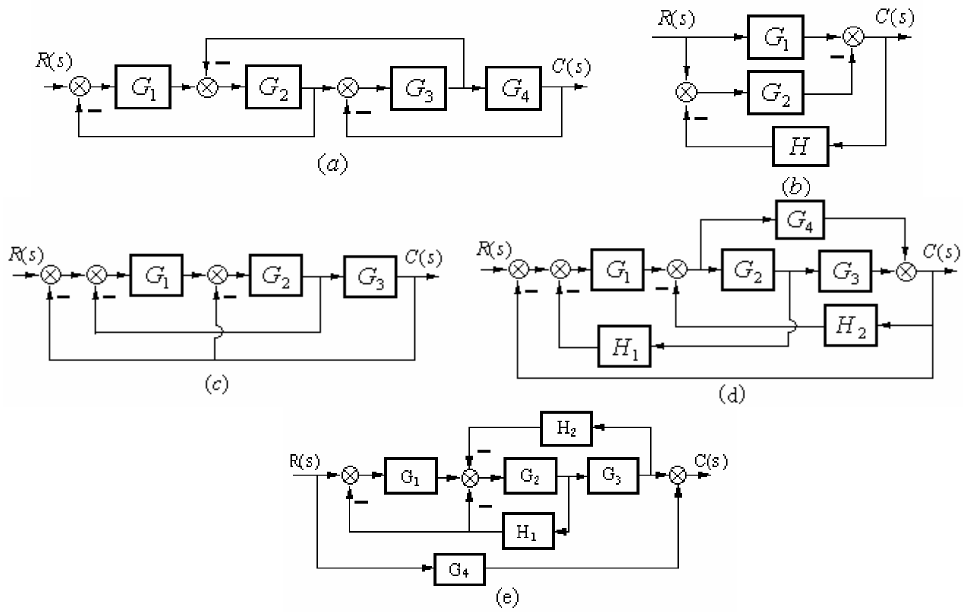
利用结构图等效化简或梅逊增益公式可求出系统的闭环传递函数为

$$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{G_1G_2G_3G_4}{1+G_2G_3G_6+G_3G_4G_5+G_1G_2G_3G_4G_7-G_1G_2G_3G_4G_8}$$



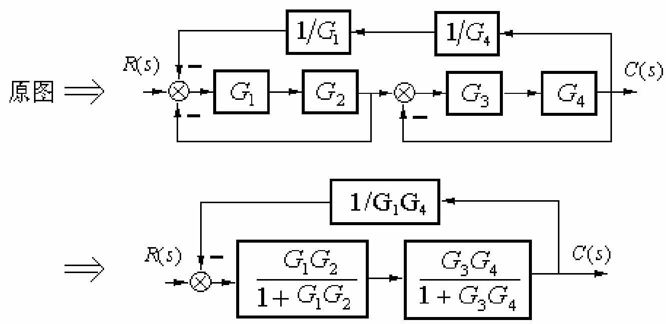

图解2-11 系统结构图

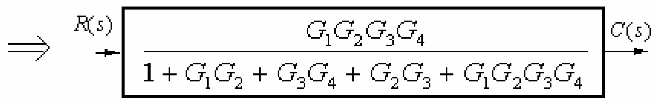
2-12 试用结构图等效化简求题2-12图所示各系统的传递函数$\dfrac{C(s)}{R(s)}$。




题 2-12 图

解 （a）

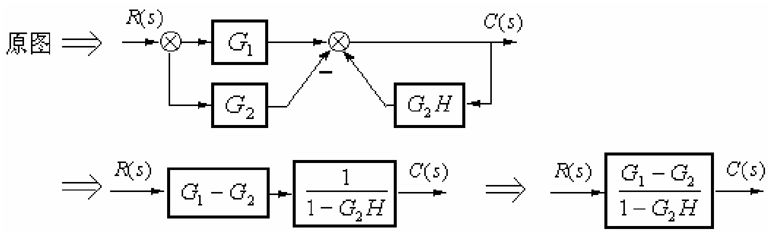





图解 2-12(a)

所以： $$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{G_1G_2G_3G_4}{1+G_1G_2+G_3G_4+G_2G_3+G_1G_2G_3G_4}$$

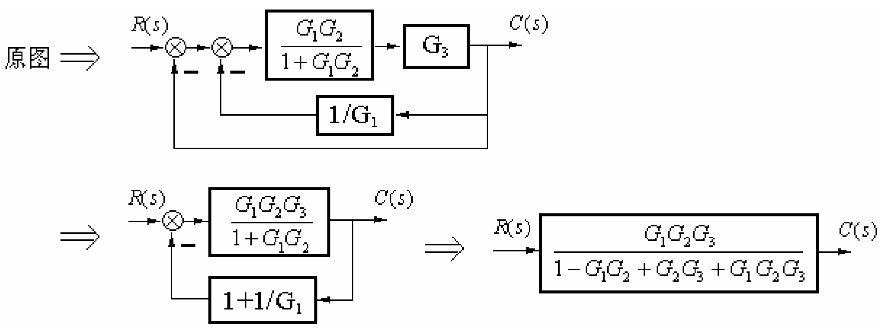
（b）




图解 2-12(b)

所以： $$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{G_1-G_2}{1-G_2H}$$

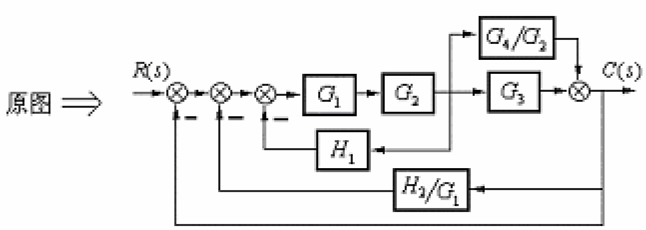
（c）

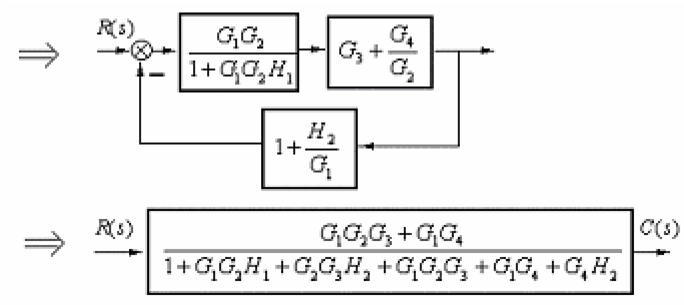



图解 2-12（c）

所以： $$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{G_1G_2G_3}{1+G_1G_2+G_2G_3+G_1\,G_2G_3}$$

（d）

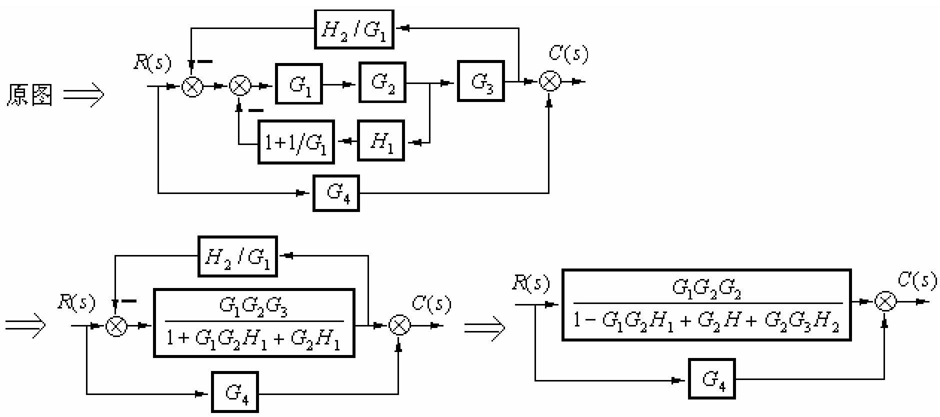





图解2-12（d）

所以：
$$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{G_1G_2G_3+G_1G_4}{1+G_1G_2H_1+G_2G_3H_2+G_1G_2G_3+G_1G_4+G_4H_2}$$

（e）



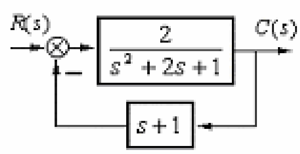

图解2-12(e)

所以：
$$\frac{C(s)}{R(s)}=G_4+\frac{G_1G_2G_3}{1+G_1G_2H_1+G_2H_1+G_2G_3H_2}$$

2-13 已知控制系统结构图如题2-13图所示，求输入$r(t)=3\cdot 1(t)$时系统的输出$c(t)$。

**解** 由图可得

$$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{\dfrac{2}{s^2+2s+1}}{1+\dfrac{2}{s^2+2s+1}(s+1)}=\frac{2}{(s+1)(S+3)}$$



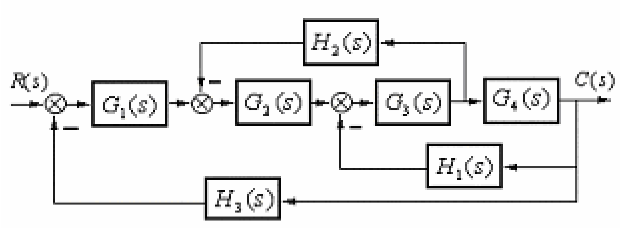

题 2-13 图

又有
$$R(s)=\frac{3}{s}$$

则 $$C(s)=\frac{2}{(s+1)(S+3)}\cdot\frac{3}{s}=\frac{2}{s}-\frac{3}{s+1}+\frac{1}{s+3}$$

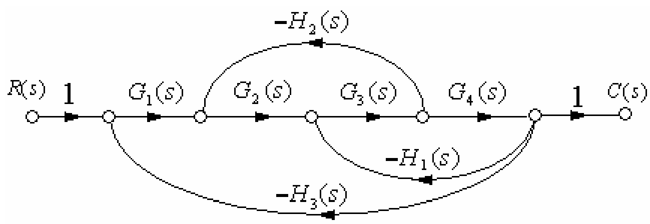
即 $$c(t)=L^{-1}\left[\frac{2}{s}-\frac{3}{s+1}+\frac{1}{s+3}\right]=2-3e^{-t}+e^{-3t}$$

2-14 试绘制题2－14图所示系统的信号流图。



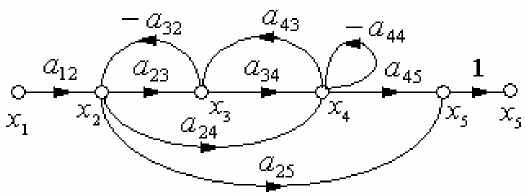
题2-14图

解



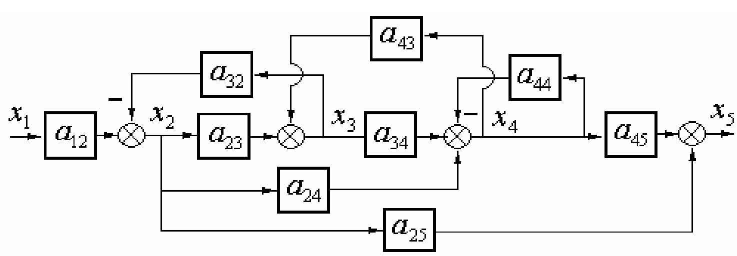
图解2-14

2-15 试绘制题2-15图所示信号流图对应的系统结构图。



题2-15图

解



图解2-15

2-16 试用梅逊增益公式求2-12题中各结构图对应的闭环传递函数。

**解** （a）图中有1条前向通路，3个回路，有1对互不接触回路

$P_1 = G_1G_2G_3G_4$， $\Delta_1 = 1$， $L_1 = -G_1G_2$，

$L_2 = -G_3G_4$， $L_3 = -G_2G_3$， $\Delta = 1-(L_1+L_2+L_3)+L_1L_2$，

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{P_1\Delta_1}{\Delta} = \frac{G_1G_2G_3G_4}{1+G_1G_2+G_3G_4+G_2G_3+G_1G_2G_3G_4}$$

（b）图中有2条前向通路，1个回路

$P_1 = G_1$， $\Delta_1 = 1$， $P_2 = -G_2$， $\Delta_2 = 1$， $L_1 = G_2H$，

$\Delta = 1 - L_1$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{P_1\Delta_1 + P_2\Delta_2}{\Delta} = \frac{G_1 - G_2}{1 - G_2H}$$

（c）图中有1条前向通路，3个回路

$P_1 = G_1G_2G_3$， $\Delta_1 = 1$， $L_1 = -G_1G_2$，

$L_2 = -G_2G_3$， $L_3 = -G_1G_2G_3$， $\Delta = 1-(L_1+L_2+L_3)$，

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{P_1\Delta_1}{\Delta} = \frac{G_1G_2G_3}{1+G_1G_2+G_2G_3+G_1G_2G_3}$$

（d）图中有2条前向通路，5个回路

$P_1 = G_1G_2G_3$， $\Delta_1 = 1$， $P_2 = G_1G_4$， $\Delta_2 = 1$，

$L_1 = -G_1G_2H_1$， $L_2 = -G_2G_3H_2$， $L_3 = -G_1G_2G_3$， $L_4 = -G_1G_4$，

$L_5 = -G_4H_2$， $\Delta = 1-(L_1+L_2+L_3+L_4+L_5)$，

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{P_1\Delta_1 + P_2\Delta_2}{\Delta} = \frac{G_1G_2G_3 + G_1G_4}{1+G_1G_2H_1+G_2G_3H_2+G_1G_2G_3+G_1G_4+G_4H_2}$$

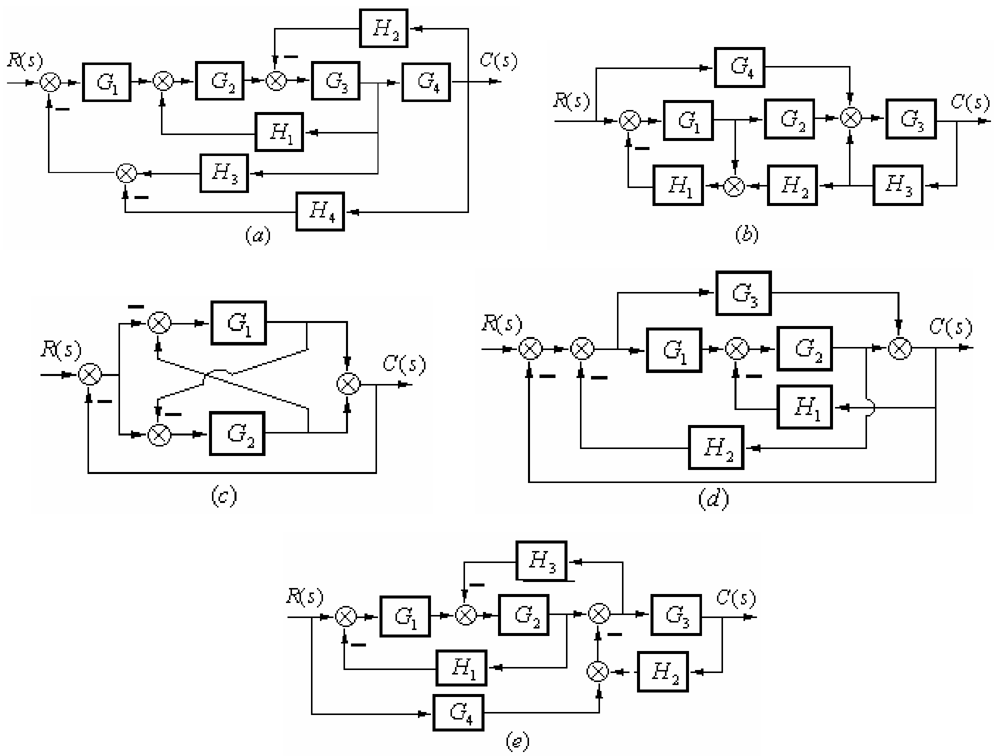
（e）图中有2条前向通路，3个回路

$P_1 = G_1G_2G_3$， $\Delta_1 = 1$， $P_2 = G_4$， $\Delta_2 = \Delta$，

$L_1 = -G_1G_2H_1$， $L_2 = -G_2H_1$， $L_3 = -G_2G_3H_2$， $\Delta = 1-(L_1+L_2+L_3)$，

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{P_1\Delta_1 + P_2\Delta}{\Delta} = P_2 + \frac{P_1\Delta_1}{\Delta} = G_4 + \frac{G_1G_2G_3}{1+G_1G_2H_1+G_2H_1+G_2G_3H_2}$$

2-17 试用梅逊增益公式求题2-17图中各系统的闭环传递函数。




题 2-17 图

**解** （a）图中有1条前向通路，4个回路

$$P_1 = G_1G_2G_3G_4, \qquad \Delta_1 = 1$$

$$L_1 = G_2G_3H_1 \qquad L_2 = -G_1G_2G_3H_3, \qquad L_3 = G_1G_2G_3G_4H_4,$$

$$L_4 = -G_3G_4H_2, \qquad \Delta = 1-(L_1+L_2+L_3+L_4)$$

则有 $$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{P_1\Delta_1}{\Delta} = \frac{G_1G_2G_3G_4}{1-G_2G_3H_1+G_1G_2G_3H_3-G_1G_2G_3G_4H_4+G_3G_4H_2}$$

（b）图中有2条前向通路，3个回路，有1对互不接触回路

$$P_1 = G_1G_2G_3, \quad \Delta_1 = 1, \quad P_2 = G_3G_4, \quad \Delta_2 = 1-L_1 = 1+G_1H_1,$$

$$L_1 = -G_1H_1, \quad L_2 = G_3H_3, \quad L_3 = -G_1G_2G_3H_1H_2H_3,$$

$$\Delta = 1-(L_1+L_2+L_3)+L_1L_2,$$

则有 $$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{P_1\Delta_1+P_2\Delta_2}{\Delta} = \frac{G_1G_2G_3+G_3G_4(1+G_1H_1)}{1+G_1H_1-G_3H_3+G_1G_2G_3H_1H_2H_3-G_1H_1G_3H_3}$$

（c）图中有4条前向通路，5个回路

$P_1=-G_1$， $P_2=G_1G_2$， $P_3=G_2$， $P_4=G_2G_1$，

$L_1=G_1$， $L_2=-G_1G_2$， $L_3=-G_2$， $L_4=-G_2G_1$， $L_5=-G_1G_2$，

$\Delta_1=\Delta_2=\Delta_3=\Delta_4=1$， $\Delta=1-(L_1+L_2+L_3+L_4)$，

则有 $$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{P_1\Delta_1+P_2\Delta_2+P_3\Delta_3+P_4\Delta_4}{\Delta}$$

$$=\frac{-G_1+G_1G_2+G_2+G_2G_1}{1-G_1+G_1G_2+G_2+G_2G_1+G_1G_2}=\frac{2G_1G_2-G_1+G_2}{1-G_1+G_2+3G_1G_2}$$

（d）图中有2条前向通路，5个回路

$P_1=G_1G_2$， $\Delta_1=1$， $P_2=G_3$， $\Delta_2=1$，

$L_1=-G_2H_1$， $L_2=-G_1G_2H_2$， $L_3=-G_1G_2$， $L_4=-G_3$， $L_5=G_3H_1G_2H_2$，
$\Delta=1-(L_1+L_2+L_3+L_4+L_5)$，

则有 $$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{P_1\Delta_1+P_2\Delta_2}{\Delta}$$

$$=\frac{G_1G_2+G_3}{1+G_2H_1+G_1G_2H_2+G_1G_2+G_3-G_3H_1G_2H_2}$$

（e）图中有2条前向通路，3个回路，有1对互不接触回路

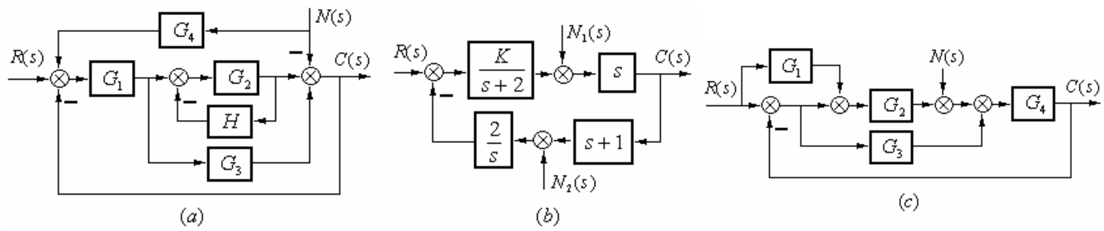
$P_1=G_1G_2G_3$， $\Delta_1=1$， $P_2=-G_4G_3$， $\Delta_2=1-L_1$，

$L_1=-G_1G_2H_1$， $L_2=-G_3H_2$， $L_3=-G_2H_3$，

$\Delta=1-(L_1+L_2+L_3)+L_1L_2$，

则有 $$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{P_1\Delta_1+P_2\Delta_2}{\Delta}=\frac{G_1G_2G_3-G_4G_3(1+G_1G_2H_1)}{1+G_1G_2H_1+G_3H_2+G_2H_3+G_1G_2G_3H_1H_2}$$

2-18 已知系统的结构图如题2-18图所示，图中$R(s)$为输入信号，$N(s)$为干扰信号，试求传递函数$\dfrac{C(s)}{R(s)}$，$\dfrac{C(s)}{N(s)}$。



题 2-18 图

**解**（a）令 $N(s)=0$，求 $\dfrac{C(s)}{R(s)}$。图中有2条前向通路, 3个回路，有1对互不接触回路。

$P_1=G_1G_2$， $\Delta_1=1$， $P_2=G_1G_3$， $\Delta_2=1-L_1=1+G_2H$，

$L_1=-G_2H$， $L_2=-G_1G_2$， $L_3=-G_1G_3$，

$\Delta=1-(L_1+L_2+L_3)+L_1L_3$，

则有 $$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{P_1\Delta_1+P_2\Delta_2}{\Delta}=\frac{G_1G_2+G_1G_3(1+G_2H)}{1+G_2H+G_1G_2+G_1G_3+G_1G_2G_3H}$$

令 $R(s)=0$，求 $\dfrac{C(s)}{N(s)}$。有3条前向通路，回路不变。

$P_1=-1$， $\Delta_1=1-L_1$， $P_2=G_4G_1G_2$， $\Delta_2=1$，

$P_3=G_4G_1G_3$， $\Delta_3=1-L_1$，

$\Delta=1-(L_1+L_2+L_3)+L_1L_3$，

则有 $$\frac{C(s)}{N(s)}=\frac{P_1\Delta_1+P_2\Delta_2+P_3\Delta_3}{\Delta}=\frac{-1-G_2H+G_4G_1G_2+G_4G_1G_3(1+G_2H)}{1+G_2H+G_1G_2+G_1G_3+G_1G_2G_3H}$$

（b）令 $N_1(s)=0$， $N_2(s)=0$，求 $\dfrac{C(s)}{R(s)}$。图中有1条前向通路，1个回路。

$$P_1=\frac{Ks}{s+2},\quad \Delta_1=1,\quad L_1=-\frac{2K(s+1)}{s+2},\quad \Delta=1-L_1,$$

则有 $$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{P_1\Delta_1}{\Delta}=\frac{Ks}{(2K+1)s+2(K+1)}$$

令 $R(s)=0$， $N_2(s)=0$，求 $\dfrac{C(s)}{N_1(s)}$。图中有1条前向通路，回路不变。

$P_1=s$， $\Delta_1=1$，

则有 $$\frac{C(s)}{N_1(s)}=\frac{P_1\Delta_1}{\Delta}=\frac{s(s+2)}{(2K+1)s+2(K+1)}$$

令 $R(s)=0$，$N_1(s)=0$，求 $\dfrac{C(s)}{N_2(s)}$。图中有1条前向通路，回路不变。

$$P_1=-\frac{2K}{s+2},\quad \Delta_1=1,$$

则有 $$\frac{C(s)}{N_2(s)}=\frac{P_1\Delta_1}{\Delta}=\frac{-2K}{(2K+1)s+2(K+1)}$$

（c）令 $N(s)=0$，求 $\dfrac{C(s)}{R(s)}$。图中有3条前向通路，2个回路。

$$P_1=G_2G_4,\quad \Delta_1=1,\quad P_2=G_3G_4,\quad \Delta_2=1,\quad P_3=G_1G_2G_4,\quad \Delta_3=1,$$

$$L_1=-G_2G_4,\quad L_2=-G_3G_4,\quad \Delta=1-(L_1+L_2),$$

则有 $$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{P_1\Delta_1+P_2\Delta_2+P_3\Delta_3}{\Delta}=\frac{G_2G_4+G_3G_4+G_1G_2G_4}{1+G_2G_4+G_3G_4}$$

令 $R(s)=0$，求 $\dfrac{C(s)}{N(s)}$。有1条前向通路，回路不变。

$$P_1=G_4,\qquad \Delta_1=1,$$

则有 $$\frac{C(s)}{N(s)}=\frac{P_1\Delta_1}{\Delta}=\frac{G_4}{1+G_2G_4+G_3G_4}$$