自动控制原理（非自动化类）习题答案

第一章　习题

1-1（略）

1-2（略）

1-3 解：

受控对象：水箱液面。

被控量：水箱的实际水位 h_c

执行元件：通过电机控制进水阀门开度，控制进水流量。

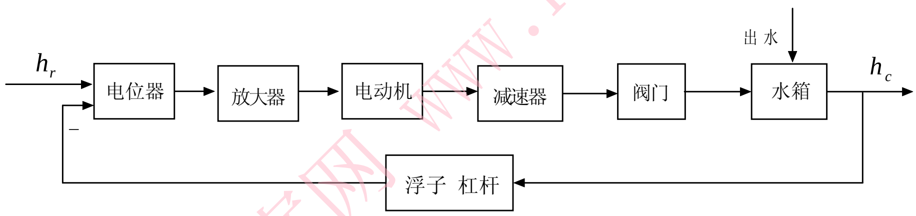
测量元件：浮子，杠杆。

比较计算元件：电位器。

放大元件：放大器。

工作原理：系统的被控对象为水箱。被控量为水箱的实际水位 h_c。给定值为希望水位 h_r（与电位器设定电压 u_r 相对应，此时电位器电刷位于中点位置）。

当 $h_c = h_r$ 时，电位器电刷位于中点位置，电动机不工作。一但 $h_c \neq h_r$ 时，浮子位置相应升高（或降低），通过杠杆作用使电位器电刷从中点位置下移（或上移），从而给电动机提供一定的工作电压，驱动电动机通过减速器使阀门的开度减小（或增大），以使水箱水位达到希望值 h_r。



水位自动控制系统的职能方框图

1-4 解：

受控对象：门。

受控量：门的位置

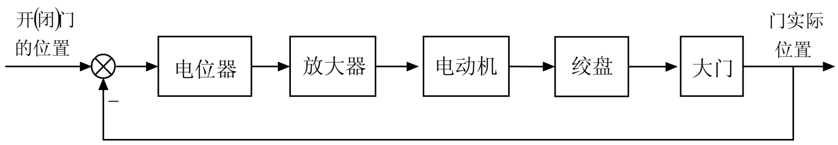
执行元件：电动机，绞盘。

测量比较元件：电位计

放大元件：放大器。

工作原理：系统的被控对象为大门。被控量为大门的实际位置。输入量为希望的大门位置。

当合上开门开关时，桥式电位器测量电路产生偏差电压，经放大器放大后，驱动电动机带动绞盘转动，使大门向上提起。同时，与大门连在一起的电位器电刷上移，直到桥式电位器达到平衡，电动机停转，开门开关自动断开。反之，当合上关门开关时，电动机带动绞盘反转，使大门关闭。



仓库大门自动控制开（闭）的职能方框图

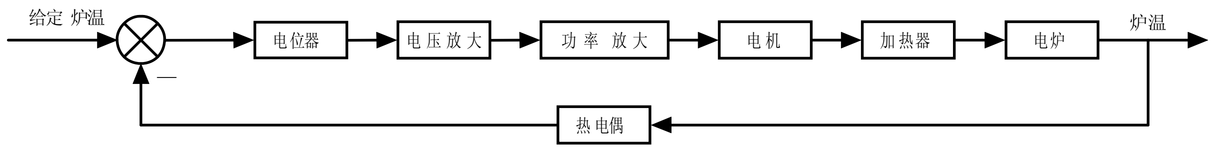
1-5 解：

系统的输出量：电炉炉温

给定输入量：加热器电压

被控对象：电炉

放大元件：电压放大器，功率放大器，减速器
比较元件：电位计
测量元件：热电偶
职能方框图：

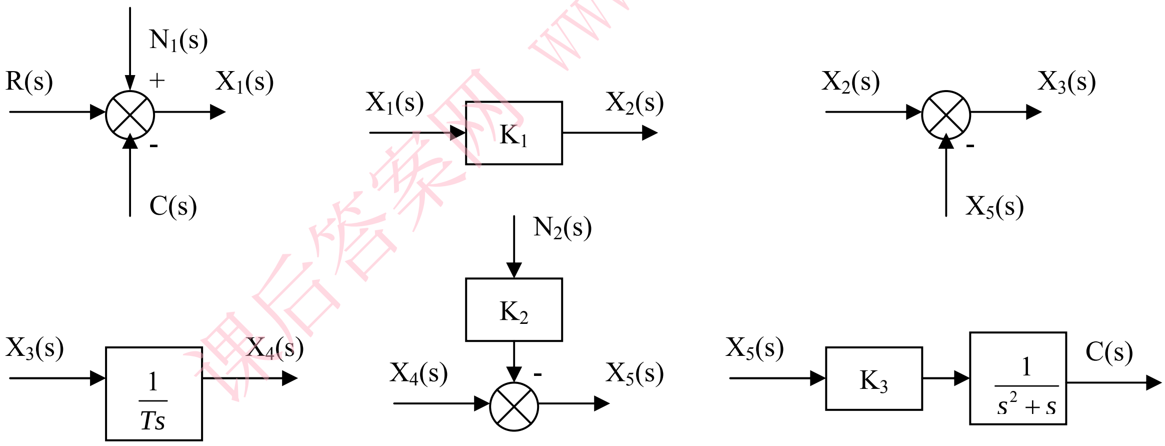


第二章　习题

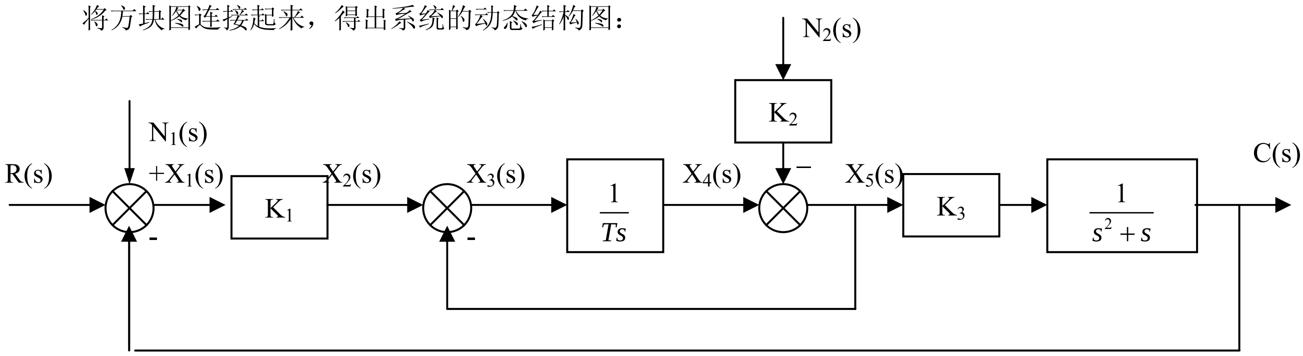
2-1 解：对微分方程做拉氏变换：

$$
\begin{cases}
X_1(s) = R(s) - C(s) + N_1(s) \\
X_2(s) = K_1 X_1(s) \\
X_3(s) = X_2(s) - X_5(s) \\
TsX_4(s) = X_3(s) \\
X_5(s) = X_4(s) - K_2 N_2(s) \\
K_3 X_5(s) = s^2 C(s) + sC(s)
\end{cases}
$$

绘制上式各子方程的方块图如下图所示：



将方块图连接起来，得出系统的动态结构图：



$$C(s)/R(s) = \frac{K_1 K_3}{Ts^3 + (T+1)s^2 + s + K_1 K_3},$$

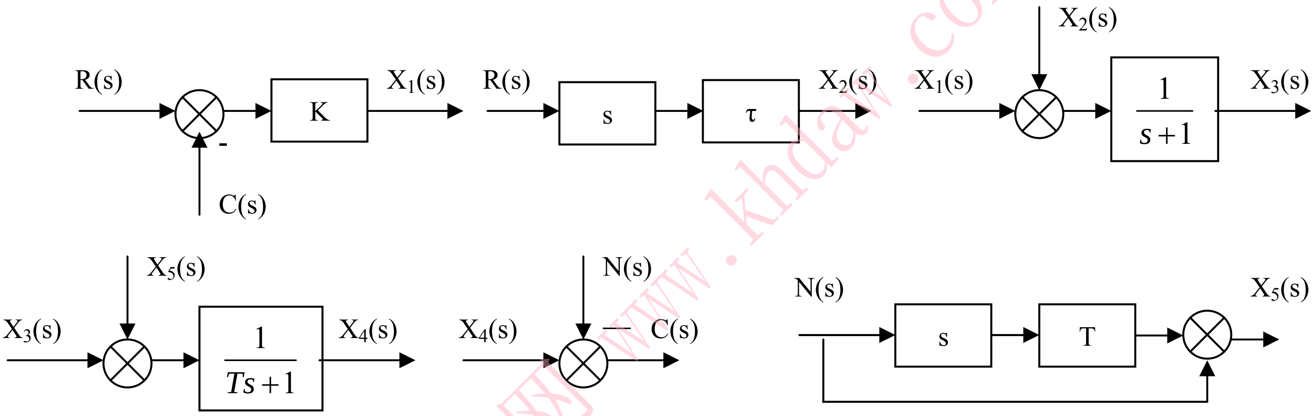
$$C(s)/N_1(s)=C(s)/R(s),$$

$$C(s)/N_2(s)=-\frac{K_2K_3Ts}{Ts^3+(T+1)s^2+s+K_1K_3}$$

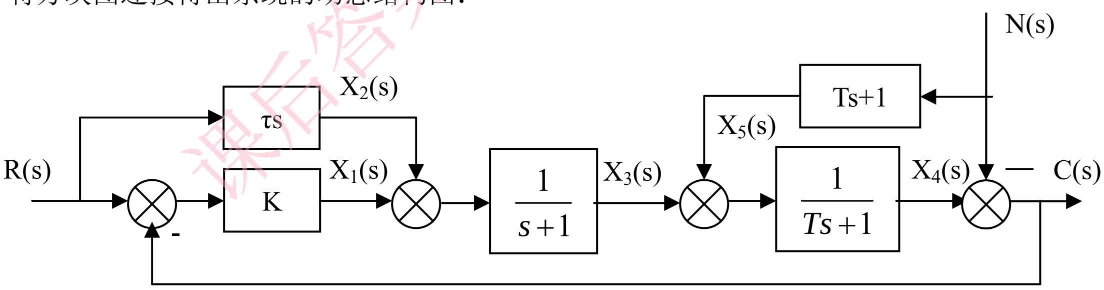
2-2 解：对微分方程做拉氏变换

$$\begin{cases}X_1(s)=K[R(s)-C(s)]\\X_2(s)=\tau sR(s)\\(s+1)X_3(s)=X_1(s)+X_2(s)\\(Ts+1)X_4(s)=X_3(s)+X_5(s)\\C(s)=X_4(s)-N(s)\\X_5(s)=(Ts+1)N(s)\end{cases}$$

绘制上式各子方程的方块如下图：



将方块图连接得出系统的动态结构图：



$$C(s)\Big/R(s)=\frac{\dfrac{K}{(s+1)(Ts+1)}+\dfrac{\tau s}{(s+1)(Ts+1)}}{1+\dfrac{k}{(s+1)(Ts+1)}}=\frac{K+\tau s}{Ts^2+(T+1)s+(K+1)}$$

$$C(s)\Big/N(s)=0$$

2-3 解：（过程略）

(a) $\dfrac{C(s)}{R(s)}=\dfrac{1}{ms^2+fs+K}$ (b) $\dfrac{C(s)}{R(s)}=\dfrac{G_1+G_2}{1+G_1G_3-G_1G_4+G_2G_3-G_2G_4}$

(c) $\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{G_2+G_1G_2}{1+G_1+G_2G_1}$ (d) $\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{G_1-G_2}{1-G_2G_3}$

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

2-4 解 ：（1）求 C/R，令 N=0

$$G(s)=\frac{K_1K_2K_3}{s(Ts+1)}$$

$$C(s)/R(s)=\frac{G(s)}{1+G(s)}=\frac{K_1K_2K_3}{Ts^2+s+K_1K_2K_3}$$

求 C/N，令 R=0，向后移动单位反馈的比较点

$$C(s)/N(s)=(K_n-G_nK_1\frac{K_2}{s})\frac{\frac{K_3}{Ts+1}}{1+\frac{K_3}{Ts+1}K_1\frac{K_2}{s}}=\frac{K_nK_3s-K_1K_2K_3G_n}{Ts^2+s+K_1K_2K_3}$$

（2）要消除干扰对系统的影响

$$C(s)/N(s)=\frac{K_nK_3s-K_1K_2K_3G_n}{Ts^2+s+K_1K_2K_3}=0$$

$$G_n(s)=\frac{K_ns}{K_1K_2}$$

2-5 解：（a）

（1）系统的反馈回路有三个，所以有

$$\sum_{a=1}^{3}L_a=L_1+L_2+L_3=-G_1G_2G_5-G_2G_3G_4+G_4G_2G_5$$

三个回路两两接触，可得 $\Delta=1-\sum L_a=1+G_1G_2G_5+G_2G_3G_4-G_4G_2G_5$

（2）有两条前向通道，且与两条回路均有接触，所以

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

（3）闭环传递函数 C/R 为

$$\frac{C}{R}=\frac{G_1G_2G_3+1}{1+G_1G_2G_5+G_2G_3G_4-G_4G_2G_5}$$

（b）

（1）系统的反馈回路有三个，所以有

$$\sum_{a=1}^{3}L_a=L_1+L_2+L_3=-G_1G_2-G_1-G_1$$

三个回路均接触，可得 $\Delta=1-\sum L_a=1+G_1G_2+2G_1$

（2）有四条前向通道，且与三条回路均有接触，所以

$$P_1 = G_1G_2, \Delta_1 = 1$$
$$P_2 = G_1, \Delta_2 = 1$$
$$P_3 = G_2, \Delta_3 = 1$$
$$P_4 = -G_1, \Delta_4 = 1$$

（3）闭环传递函数 C/R 为

$$\frac{C}{R} = \frac{G_1G_2 + G_1 + G_2 - G_1}{1 + G_1G_2 + 2G_1} = \frac{G_1G_2 + G_2}{1 + G_1G_2 + 2G_1}$$

2-6 解：用梅逊公式求，有两个回路，且接触，可得 $\Delta = 1 - \sum L_a = 1 + G_1G_2G_3 + G_2$，可得

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1G_2G_3 + G_2G_3}{1 + G_1G_2G_3 + G_2} \qquad \frac{C(s)}{N_1(s)} = C(s)/R(s)$$

$$\frac{C(s)}{N_2(s)} = \frac{(1+G_2)G_3}{1 + G_1G_2G_3 + G_2} \qquad \frac{C(s)}{N_3(s)} = \frac{-1\times(1 + G_1G_2G_3 + G_2)}{1 + G_1G_2G_3 + G_2} = -1$$

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1 + G_2 - G_2G_3}{1 + G_1G_2G_3 + G_2} \qquad \frac{E(s)}{N_1(s)} = -\frac{C(s)}{N_1(s)} = \frac{-G_2G_3 - G_1G_2G_3}{1 + G_1G_2G_3 + G_2}$$

$$\frac{E(s)}{N_2(s)} = -\frac{C(s)}{N_2(s)} = \frac{-(1+G_2)G_3}{1 + G_1G_2G_3 + G_2} \qquad \frac{E(s)}{N_3(s)} = -\frac{C(s)}{N_3(s)} = 1$$

第三章 习题

3-1 解：（原书改为 $G(s) = \dfrac{10}{0.2s + 1}$）

采用 K_0, K_H 负反馈方法的闭环传递函数为

$$\phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = K_0 \frac{G(s)}{1 + G(s)K_H} = \frac{\dfrac{10K_0}{1 + 10K_H}}{\dfrac{0.2}{1 + 10K_H}s + 1}$$

要使过渡时间减小到原来的 0.1 倍，要保证总的放大系数不变，则：（原放大系数为 10，时间常数为 0.2）

$$\begin{cases} \dfrac{10K_0}{1 + 10K_H} = 10 \\ 1 + 10K_H = 10 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} K_0 = 10 \\ K_H = 0.9 \end{cases}$$

3-2 解：系统为欠阻尼二阶系统（书上改为“单位负反馈……”，“已知系统开环传递函数”）

$$\sigma\% = e^{-\pi\xi/\sqrt{1-\xi^2}} \times 100\% = \frac{1.3 - 1}{1} \times 100\%$$

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n\sqrt{1-\xi^2}} = 0.1$$

解得：

$$\omega_n = 33.71$$
$$\xi = 0.358$$

所以，开环传递函数为：

$$G(s) = \frac{1136}{s(s+24.1)} = \frac{47.1}{s(0.041s+1)}$$

3-3 解：（1） $K = 10s^{-1}$ 时：

$$G(s) = \frac{100}{s^2 + 10s}$$
$$\omega_n^2 = 100$$
$$2\xi\omega_n = 10$$

解得：$\omega_n = 10$, $\xi = 0.5$, $\sigma\% = 16.3\%$, $\mathrm{t_p} = 0.363$

（2） $K = 20s^{-1}$ 时：

$$G(s) = \frac{200}{s^2 + 10s}$$
$$\omega_n^2 = 200$$
$$2\xi\omega_n = 10$$

解得：$\omega_n = 14.14$, $\xi = 0.354$, $\sigma\% = 30\%$, $\mathrm{t_p} = 0.238$

结论，K 增大，超调增加，峰值时间减小。

3-4 解：（1）

a. $\xi = 0.1, \omega_n = 5s^{-1}$ 时，

$$\sigma\% = e^{-\pi\xi/\sqrt{1-\xi^2}} \times 100\% = 72.8\%$$
$$t_s = \frac{3.5}{\xi\omega_n} = 7s$$

b. $\xi = 0.1, \omega_n = 10s^{-1}$ 时，

$$\sigma\% = e^{-\pi\xi/\sqrt{1-\xi^2}} \times 100\% = 72.8\%$$
$$t_s = \frac{3.5}{\xi\omega_n} = 3.5s$$

c. $\xi = 0.1, \omega_n = 1s^{-1}$ 时，

$$\sigma\% = e^{-\pi\xi/\sqrt{1-\xi^2}} \times 100\% = 72.8\%$$

$$t_s = \frac{3.5}{\xi\omega_n} = 35s$$

(2) $\xi = 0.5, \omega_n = 5s^{-1}$ 时，

$$\sigma\% = e^{-\pi\xi/\sqrt{1-\xi^2}} \times 100\% = 16.3\%$$

$$t_s = \frac{3.5}{\xi\omega_n} = 1.4s$$

(3) 讨论系统参数：ξ 不变，$\sigma\%$ 不变；ξ 不变，ω_n 增加，则 t_s 减小；ω_n 不变，ξ 增加，

则 $\sigma\%$ 减小，t_s 减小

3-5 解：（1）

（a）用劳思判据

$$\begin{array}{lll} s^3 & 1 & 9 \\ s^2 & 20 & 100 \\ s^1 & 4 & 0 \\ s^0 & 100 & \end{array}$$

系统稳定。

（b）用古尔维茨判据

$$D_1 = 20, D_2 = \begin{vmatrix} 20 & 100 \\ 1 & 9 \end{vmatrix} = 80$$

$$D_3 = \begin{vmatrix} 20 & 100 & 0 \\ 1 & 9 & 0 \\ 0 & 20 & 100 \end{vmatrix} = 8000$$

系统稳定。

（2）

（a）用劳思判据

$$\begin{array}{llll} s^4 & 3 & 5 & 2 \\ s^3 & 10 & 1 & 0 \\ s^2 & 4.7 & 2 & \\ s^1 & -3.2553 & 0 & \\ s^0 & 2 & & \end{array}$$

系统不稳定。

（b）用古尔维茨判据

$$D_1=10, D_2=\begin{vmatrix}10 & 1\\ 3 & 5\end{vmatrix}=47, D_3=\begin{vmatrix}10 & 1 & 0\\ 3 & 5 & 2\\ 0 & 10 & 1\end{vmatrix}=-153$$

$$D_4=\begin{vmatrix}10 & 1 & 0 & 0\\ 3 & 5 & 2 & 0\\ 0 & 10 & 1 & 0\\ 0 & 3 & 5 & 2\end{vmatrix}=-306$$

（其实 D_4 不必计算，因为 $D_3<0$）

系统不稳定。

3-6 解：（1）系统闭环特征方程为

$$0.2S^3+0.8S^2-s+K=0$$

劳思表

$$\begin{array}{lll} s^3 & 0.2 & -1 \\ s^2 & 0.8 & K \\ s^1 & -\dfrac{K}{4}-1 & \\ s^0 & K & \end{array}$$

若系统稳定，则：$-\dfrac{K}{4}-1>0, K>0$。无解

（2）系统闭环特征方程为

$$0.2S^3+0.8S^2+(K-1)s+K=0$$

劳思表

$$\begin{array}{lll} s^3 & 0.2 & K-1 \\ s^2 & 0.8 & K \\ s^1 & \dfrac{3}{4}K-1 & \\ s^0 & K & \end{array}$$

若系统稳定，则：$\dfrac{3}{4}K-1>0, K>0$

解得 $K>\dfrac{4}{3}$

3-7 解：

(a) 系统传递函数：$\dfrac{10(s+1)}{s^3+21s^2+10s+10}$

劳斯表：

$$\begin{array}{ccc} s^3 & 1 & 10 \\ s^2 & 21 & 10 \\ s^1 & 200/21 & 0 \\ s^0 & 10 & 0 \end{array}$$

系统稳定。

(b) 系统传递函数：$\dfrac{10}{s^2+101s+10}$

劳思表：

$$\begin{array}{ccc} s^2 & 1 & 10 \\ s^1 & 101 & 0 \\ s^0 & 10 & \end{array}$$

系统稳定。

3-8 解：系统闭环特征方程为：

$$0.01s^3+2\xi s^2+s+K=0$$

劳思表：

$$\begin{array}{ccc} s^3 & 0.01 & 1 \\ s^2 & 2\xi & K \\ s^1 & \dfrac{2\xi-0.01K}{2\xi} & \\ s^0 & K & \end{array}$$

当 $2\xi>0, \dfrac{2\xi-0.01K}{2\xi}>0, K>0$ 时系统稳定

稳定域为：$\xi>0, 0<K<200\xi$

3-9 解：（1）

解法一、因为 $\upsilon=1$，属于 I 型无差系统，开环增益 $K=10$，故当 $r(t)=1(t)$ 时，$e_{ss}=0$；

当 $r(t)=t\times 1(t)$ 时，$e_{ss}=\dfrac{1}{K}=0.1$；当 $r(t)=t^2\times 1(t)$ 时，$e_{ss}=\infty$。

解法二、系统的闭环特征方程为：

$$0.05s^3+0.6s^2+s+10=0$$

劳思表：

$$\begin{array}{ccc} s^3 & 0.05 & 1 \\ s^2 & 0.6 & 10 \\ s^1 & \dfrac{1}{6} & \\ s^0 & 10 & \end{array}$$

系统稳定。

$$E_s=\phi_{E\cdot R}(s)R(s)=\frac{1}{1+G(s)}R(s)$$

当输入$r(t)=1(t)$时， $R(s)=\frac{1}{s},e_{ss}=\lim_{s\to 0}sE_s=\lim_{s\to 0}s\frac{1}{1+\frac{10}{s(0.1s+1)(0.5s+1)}}\frac{1}{s}=0$

输入$r(t)=t\times 1(t)$时， $R(s)=\frac{1}{s^2},e_{ss}=\lim_{s\to 0}sE_s=\lim_{s\to 0}s\frac{1}{1+\frac{10}{s(0.1s+1)(0.5s+1)}}\frac{1}{s^2}=0.1$

输入$r(t)=t^2\times 1(t)$时， $R(s)=\frac{2}{s^3},e_{ss}=\lim_{s\to 0}sE_s=\lim_{s\to 0}s\frac{1}{1+\frac{10}{s(0.1s+1)(0.5s+1)}}\frac{1}{s^3}=\infty$

（2）

解法一、因为$\upsilon=1$，属于Ⅰ型无差系统，开环增益$K=\frac{7}{8}$，故当$r(t)=1(t)$时，$e_{ss}=0$；当$r(t)=t\times 1(t)$时，$e_{ss}=\frac{1}{K}=\frac{8}{7}=1.14$；当$r(t)=t^2\times 1(t)$时，$e_{ss}=\infty$。

解法二、系统的闭环特征方程为：

$$s^4+6s^3+10s^2+15s+7=0$$

劳思表：

s^4	1	10	7
s^3	6	15	0
s^2	7.5	7	
s^1	9.4		
s^0	7		

系统稳定。

$$E_s=\phi_{E\cdot R}(s)R(s)=\frac{1}{1+G(s)}R(s)$$

当输入$r(t)=1(t)$时， $R(s)=\frac{1}{s},e_{ss}=\lim_{s\to 0}sE_s=\lim_{s\to 0}s\frac{1}{1+\frac{7(s+1)}{s(s+4)(s^2+2s+2)}}\frac{1}{s}=0$

输入$r(t)=t\times 1(t)$时， $R(s)=\frac{1}{s^2},e_{ss}=\lim_{s\to 0}sE_s=\lim_{s\to 0}s\frac{1}{1+\frac{7(s+1)}{s(s+4)(s^2+2s+2)}}\frac{1}{s^2}=8/7$

输入$r(t)=t^2\times 1(t)$时，$R(s)=\dfrac{2}{s^3}, e_{ss}=\lim\limits_{s\to 0} sE_s=\lim\limits_{s\to 0} s\dfrac{1}{1+\dfrac{7(s+1)}{s(s+4)(s^2+2s+2)}}\dfrac{1}{s^3}=\infty$

（3）

解法一、因为$\upsilon=2$，属于II型无差系统，开环增益$K=8$，故当$r(t)=1(t)$时，$e_{ss}=0$；

当$r(t)=t\times 1(t)$时，$e_{ss}=0$；当$r(t)=t^2\times 1(t)$时，$e_{ss}=\dfrac{2}{K}=0.25$。

解法二、系统的闭环特征方程为：

$$0.1s^3+s^2+4s+8=0$$

劳思表：

$$\begin{array}{lll} s^3 & 0.1 & 4 \\ s^2 & 1 & 8 \\ s^1 & 3.2 & \\ s^0 & 8 & \end{array}$$

系统稳定。

$$E_s=\phi_{E\cdot R}(s)R(s)=\frac{1}{1+G(s)}R(s)$$

当输入$r(t)=1(t)$时，$R(s)=\dfrac{1}{s}, e_{ss}=\lim\limits_{s\to 0} sE_s=\lim\limits_{s\to 0} s\dfrac{1}{1+\dfrac{8(0.5s+1)}{s^2(0.1s+1)}}\dfrac{1}{s}=0$

输入$r(t)=t\times 1(t)$时，$R(s)=\dfrac{1}{s^2}, e_{ss}=\lim\limits_{s\to 0} sE_s=\lim\limits_{s\to 0} s\dfrac{1}{1+\dfrac{8(0.5s+1)}{s^2(0.1s+1)}}\dfrac{1}{s^2}=0$

输入$r(t)=t^2\times 1(t)$时，$R(s)=\dfrac{2}{s^3}, e_{ss}=\lim\limits_{s\to 0} sE_s=\lim\limits_{s\to 0} s\dfrac{1}{1+\dfrac{8(0.5s+1)}{s^2(0.1s+1)}}\dfrac{2}{s^3}=0.25$

3-10 解：系统传递函数为$\dfrac{C(s)}{R(s)}=G(s)=\dfrac{1}{Ts+1}$为一阶惯性环节

调节时间$t_s=4T=1\min, T=0.25\min$

输入$r(t)=10t, R(s)=\dfrac{10}{s^2}$

稳态误差：
$$E(s)=R(s)-C(s)=\frac{10}{s^2}-\frac{10}{s^2(0.25s+1)}$$
$$e_{ss}=\lim_{s\to 0}sE(s)=2.5(C^\circ)$$

3-11 解：用梅森公式：

$$\phi_{E\cdot R}=\frac{E(s)}{R(s)}=\frac{1}{1+\dfrac{2.5K}{(0.05s+1)(s+5)}}$$

$$\phi_{E\cdot N}=\frac{E(s)}{N(s)}=\frac{-\dfrac{2.5}{s+5}}{1+\dfrac{2.5K}{(0.05s+1)(s+5)}}$$

$$E(s)=\frac{(0.05s+1)(s+5)-2.5(0.05s+1)}{(0.05s+1)(s+5)+2.5K}\frac{1}{s}$$

输入 $R(s)=\dfrac{1}{s},N(s)=\dfrac{1}{s}$

（1）当 K=40 时

$$e_{ss}=\lim_{s\to 0}sE(s)=\lim_{s\to 0}s\frac{(0.05s+1)(s+5)-2.5(0.05s+1)}{(0.05s+1)(s+5)+2.5K}\frac{1}{s}=\frac{2.5}{5+2.5K}=0.0238$$

（2）当 K=20 时

$e_{ss}=\lim\limits_{s\to 0}sE(s)=\dfrac{2.5}{5+2.5K}=0.0455$。比较说明，K 越大，稳态误差越小。

（3）在扰动点前的前向通道中引入积分环节 1/s，

$$\phi_{E\cdot R}=\frac{E(s)}{R(s)}=\frac{1}{1+\dfrac{2.5K}{s(0.05s+1)(s+5)}}=\frac{s(0.05s+1)(s+5)}{s(0.05s+1)(s+5)+2.5K}$$

$$\phi_{E\cdot N}=\frac{E(s)}{N(s)}=\frac{-\dfrac{2.5}{s+5}}{1+\dfrac{2.5K}{s(0.05s+1)(s+5)}}=\frac{-2.5(0.05s+1)s}{s(0.05s+1)(s+5)+2.5K}$$

$$E(s)=\frac{s(0.05s+1)(s+5)-2.5s(0.05s+1)}{s(0.05s+1)(s+5)+2.5K}\frac{1}{s}=\frac{(0.05s+1)(s+5)-2.5(0.05s+1)}{s(0.05s+1)(s+5)+2.5K}$$

所以对输入响应的误差，$e_{ss}=\lim\limits_{s\to 0}sE(s)=0$。

在扰动点之后引入积分环节 1/s，

$$\phi_{E\cdot R}=\frac{E(s)}{R(s)}=\frac{1}{1+\dfrac{2.5K}{(0.05s+1)(s+5)s}}=\frac{s(0.05s+1)(s+5)}{s(0.05s+1)(s+5)+2.5K}$$

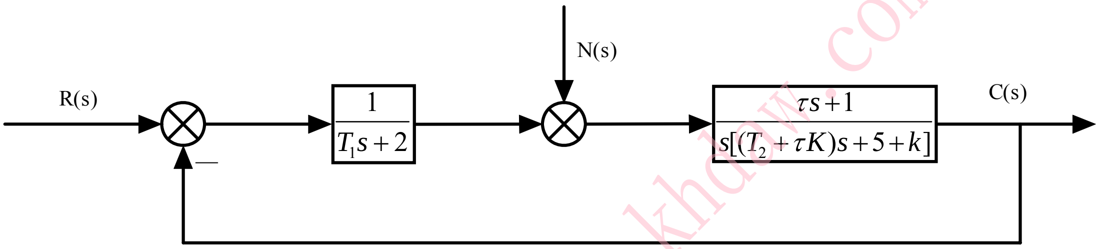
$$\phi_{E\cdot N}=\frac{E(s)}{N(s)}=\frac{-\dfrac{2.5}{s+5}}{1+\dfrac{2.5K}{(0.05s+1)(s+5)s}}\frac{1}{s}=\frac{-2.5(0.05s+1)}{s(0.05s+1)(s+5)+2.5K}$$

$$E(s)=R(s)\phi_{E\cdot R}+N(s)\phi_{E\cdot N}=\frac{(0.05s+1)(s^2+5s-2.5)}{s(0.05s+1)(s+5)+2.5K}\frac{1}{s}$$

所以对输入响应的误差，$e_{ss}=\lim\limits_{s\to 0}sE(s)=-\dfrac{1}{K}$。

3-12 解：

解法一、原系统结构图变换为



系统开环$\upsilon=1$，故对 R 为 I 型，干扰 N 作用点之前无积分环节，系统对 N 为 0 型

解法二、用梅森公式

$$\phi_{E\cdot R}=\frac{E(s)}{R(s)}=\frac{1}{1+\dfrac{1}{T_1s+2}\times\dfrac{(\tau s+1)}{(T_2s^2+K\tau s^2+Ks+5s)}}=\frac{s(T_1s+2)(T_2s+K\tau s+K+5)}{s(T_1s+2)(T_2s+K\tau s+K+5)+(\tau s+1)}$$

$$\phi_{E\cdot N}=\frac{E(s)}{N(s)}=\frac{-\dfrac{(\tau s+1)}{s(T_2s+5)+Ks(\tau s+1)}}{1+\dfrac{1}{T_1s+2}\times\dfrac{(\tau s+1)}{(T_2s^2+K\tau s^2+Ks+5s)}}=\frac{-(\tau s+1)(T_2s+2)}{s(T_1s+2)(T_2s+K\tau s+K+5)+(\tau s+1)}$$

令 $R(s)=\dfrac{1}{s},N(s)=\dfrac{1}{s}$

$$e_{ssr}=\lim_{s\to 0}s\phi_{E\cdot R}\frac{1}{s}=0\,,\quad e_{ssn}=\lim_{s\to 0}s\phi_{E\cdot N}\frac{1}{s}=-2$$

令 $R(s)=\dfrac{1}{s^2},N(s)=\dfrac{1}{s^2}$

$$e_{ssr}=\lim_{s\to 0}s\phi_{E\cdot R}\frac{1}{s^2}=2(K+5)\,,\quad e_{ssn}=\lim_{s\to 0}s\phi_{E\cdot N}\frac{1}{s^2}=-\infty$$

令 $R(s)=\dfrac{1}{s^3},N(s)=\dfrac{1}{s^3}$

$$e_{ssr}=\lim_{s\to 0}s\phi_{E\cdot R}\frac{1}{s^3}=\infty\,,\quad e_{ssn}=\lim_{s\to 0}s\phi_{E\cdot N}\frac{1}{s^3}=-\infty$$

系统对 r(t)为 I 型，对 n(t)为 0 型。

3-13：

(a) 解法一、解得，$\phi_{C\bullet R}=\dfrac{C(s)}{R(s)}=\dfrac{s+1}{s(s+1)+1}$，$\phi_{C\bullet N}=\dfrac{C(s)}{N(s)}=\dfrac{s(s+1)}{s(s+1)+1}$

$E(s)=R(s)-C(s)=R(s)-(R(s)\bullet\phi_{C\bullet R}+N(s)\bullet\phi_{C\bullet N})$

输入 $R(s)=\dfrac{1}{s^2},N(s)=\dfrac{1}{s}$，所以 $e_{ss}=\lim\limits_{s\to 0}sE(s)=0$

解法二、$\dfrac{C(s)}{R(s)}=\dfrac{s+1}{s^2+s+1}$，因为分子分母后两项系数对应相等，故系统为 II 无差，在 $r(t)=t\times 1(t)$ 时，$e_{ssr}=0$，又在 n(t)作用点以前原系统串联了一个积分环节，故对阶跃干扰信号 $e_{ssn}=0$，从而有 $e_{ss}=e_{ssr}+e_{ssn}=0$。

（b）系统开环 $\upsilon=1$，为 I 型系统，故 $e_{ssr}=0$；又 $E_n(s)=N(s)\bullet\phi_{C\bullet N}=\dfrac{0.1}{s}\bullet\dfrac{200}{0.5s^2+s+200}$

根据定义 $e=r-c$，$e_{ss}=e_{ssr}+e_{ssn}=e_{ssn}=\lim\limits_{s\to 0}sE_n(s)=-0.1$。

3-14 解：开环传递函数为

$G(s)=\dfrac{\omega_n^2}{s^2+2\xi\omega_n s}$，误差传递函数 $E_s=\phi_{E\bullet R}(s)R(s)=\dfrac{1}{1+G(s)}R(s)$

（1）输入 $r(t)=1(t),R(s)=\dfrac{1}{s}$

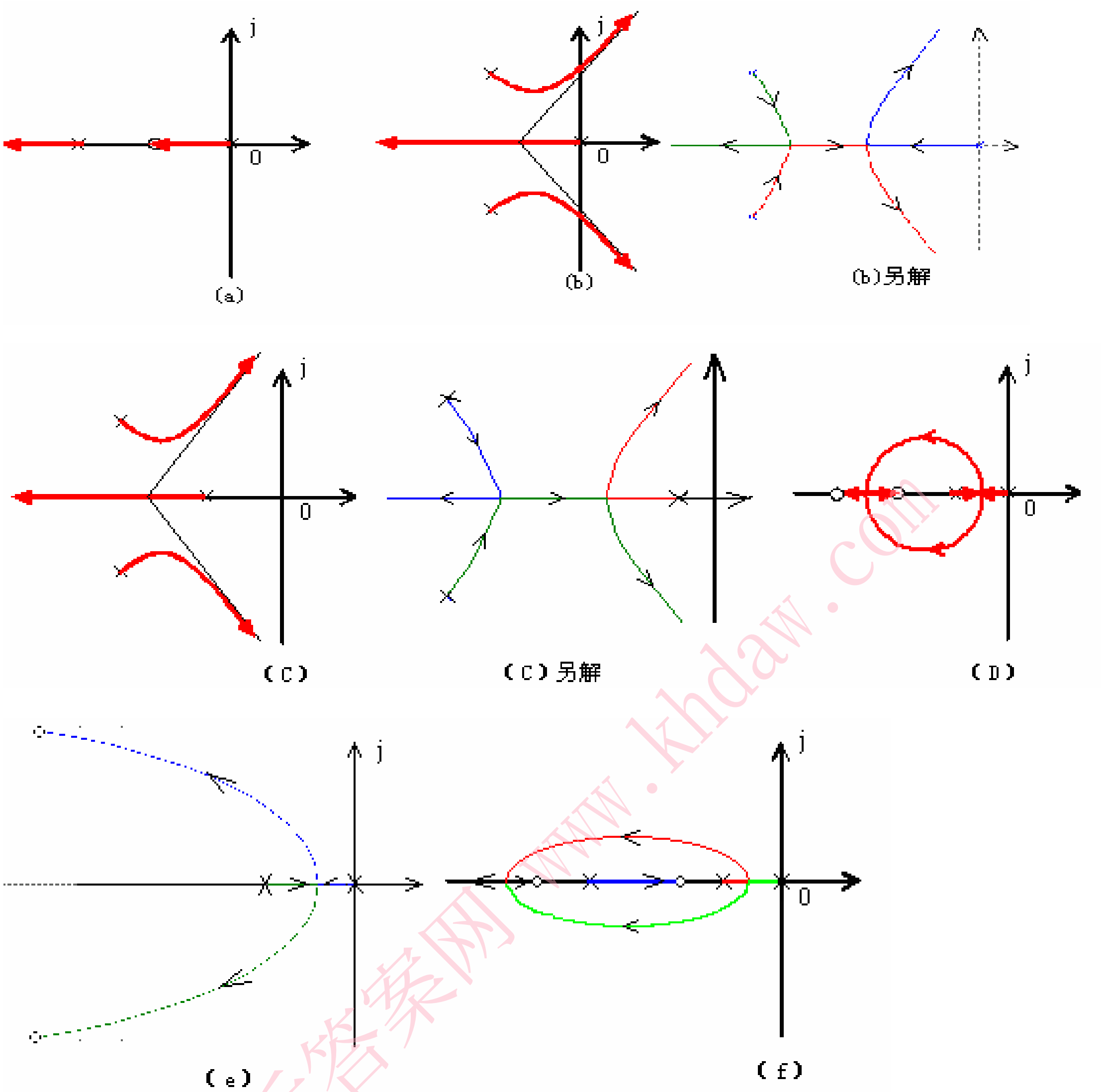
$$e_{ss}=\lim_{s\to 0}sE_sR(s)=\lim_{s\to 0}s\frac{1}{1+\dfrac{\omega_n^2}{s^2+2\xi\omega_n s}}\frac{1}{s}=0$$

(2) 输入 $r(t)=1(t),R(s)=\dfrac{1}{s^2}$

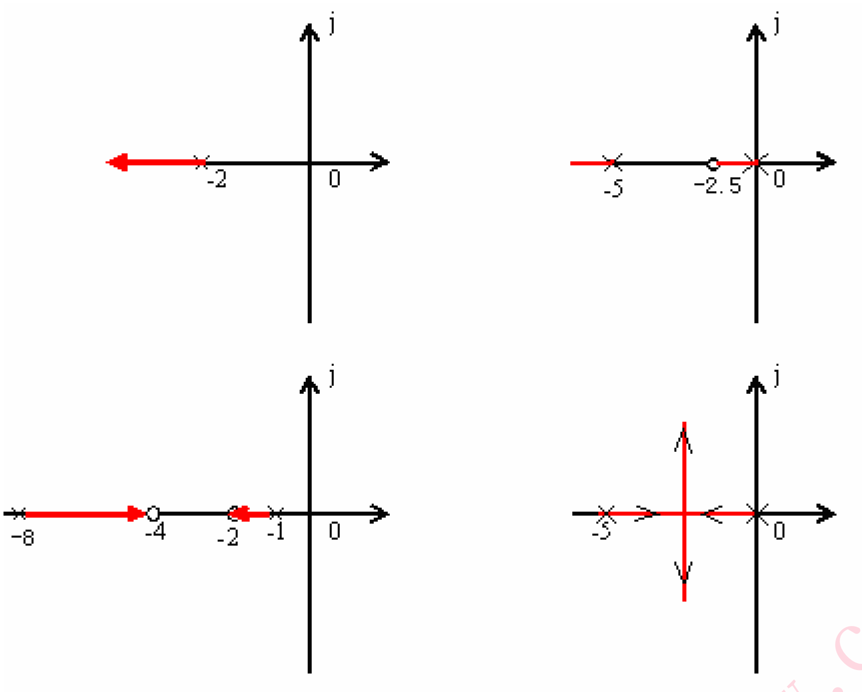
$$e_{ss}=\lim_{s\to 0}sE_sR(s)=\lim_{s\to 0}s\frac{1}{1+\dfrac{\omega_n^2}{s^2+2\xi\omega_n s}}\frac{1}{s^2}=\frac{2\xi}{\omega_n}$$

第四章　习题

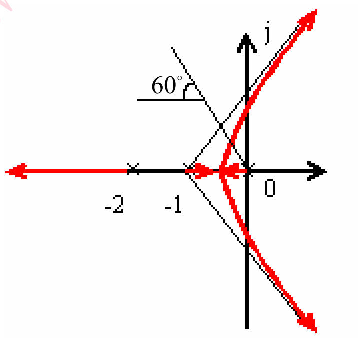
4-1 解：



4-2 解：



4-3 解：根轨迹如图



极点 $P_1=0, P_2=-1, P_3=-2$，共有三条渐近线

渐近线交点为 $\sigma_a=\frac{1}{3}(0-1-2)=-1$

3 条渐近线与实轴夹角

$$\varphi_\alpha=\frac{(2k+1)\pi}{3}=\begin{cases}\frac{\pi}{3} & (k=0)\\ \pi & (k=1)\\ -\frac{\pi}{3} & (k=-1)\end{cases}$$ ，分离点坐标 $s=\frac{\sqrt{3}}{3}-1$，

分离角为 $\pm\frac{\pi}{2}$

与虚轴交点：

$1+GH=s(s+1)(0.5s+1)+K=0.5s^3+1.5s^2+s+K$

$\therefore 0.5(j\omega)^3+1.5(j\omega)^2+j\omega+K=0$

$\omega=\pm\sqrt{2}, K=3$

当 0<K<3 时系统稳定，$K_d=\left|\frac{\sqrt{3}}{3}-1\right|\left|\frac{\sqrt{3}}{3}-1+1\right|\left|(\frac{\sqrt{3}}{3}-1)\times\frac{1}{2}+1\right|=\frac{\sqrt{3}}{9}$

所以，无超调时 K 的取值范围为 $0<K\le\frac{\sqrt{3}}{9}=0.1925$。

作图测得 $\xi=0.5$ 的阻尼线与根轨迹交点 $s_{1,2}=-0.33\pm j0.58$，根据‘根之和’法则，

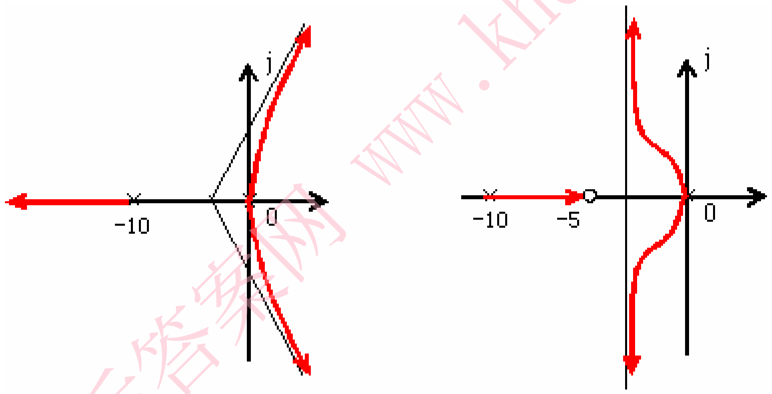
$s_1+s_2+s_3=p_1+p_2+p_3$，求得 $s_3=-2.34$。s_3 对虚轴的距离是 $s_{1,2}$ 的 7 倍，故认为 $s_{1,2}$ 是主导极点，系统近似为二阶，即 $\phi(s)=\dfrac{s_1 s_2}{(s-s_1)(s-s2)}=\dfrac{0.445}{s^2+0.667s+0.445}$，从而得到 $\xi=0.5$，$\omega_n=0.667$，其阶跃响应下的性能指标为 $\sigma\%=16.3\%$，$t_s=\dfrac{3.5}{\xi\omega_n}=10.5s^{-1}$。

4-4 解：（1）$s_1=-\dfrac{1}{0.67}=-1.5$，$s_{2,3}=-4\pm j9.2$，主导极点为 s_1，系统看成一阶系统。

即 $\phi(s)=\dfrac{1}{0.67s+1},\therefore t_s=3T=2s,\sigma\%=0$

（2）由于极点为 $s_1=-\dfrac{1}{0.67}$ 与零点 $z_{\varphi1}=-\dfrac{1}{0.59}$ 构成偶极子，所以主导极点为 s_2，s_3，即系统可以看作 $\phi(s)=\dfrac{1}{0.01s^2+0.08s+1}$，$\omega_n=10$，$\xi=0.4$，$\therefore t_s=\dfrac{3.5}{\xi\omega_n}=0.88s$，$\sigma\%=25\%$

4-5 解：（题目改为‘单位*负*反馈’）



由根轨迹可以看出适当增加零点可以改善系统稳定性，使本来不稳定的系统变得稳定。

第五章习题答案

5-1 解： $\varphi_0 = -\arctan\omega T = -\arctan 2\pi f \times T = -\arctan 2\pi\times 10\times 0.01 = -32.14^\circ$，相位差超过$10^\circ$，所以不满足要求。

5-2 解：$\omega = 2\pi f = 2\pi\times 5 = 10\pi$， $|G(10\pi j)| = \dfrac{3.54}{5} = 0.708, \angle G(10\pi j) = -90^\circ$

设$G(s) = \dfrac{1}{LCs^2 + RCs + 1}$

$$G(10\pi j) = \frac{1}{1-100\pi^2 L\times 10^{-6} + 10\pi\times 10^{-6} Rj},$$

$$\therefore L = \frac{1}{100\pi^2\times 10^{-6}} = \frac{10^4}{\pi^2} \approx 1013(H)$$

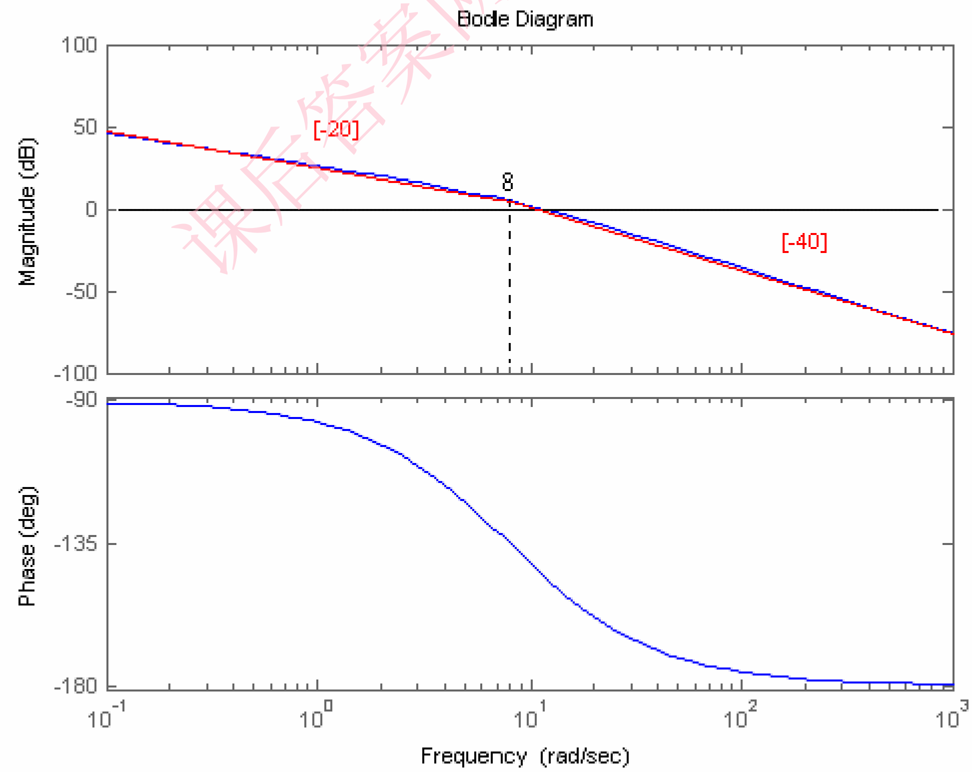
$$\left|\frac{1}{10\pi\times 10^{-6} R}\right| = 0.708$$

$$\therefore R = 44959(\Omega)$$

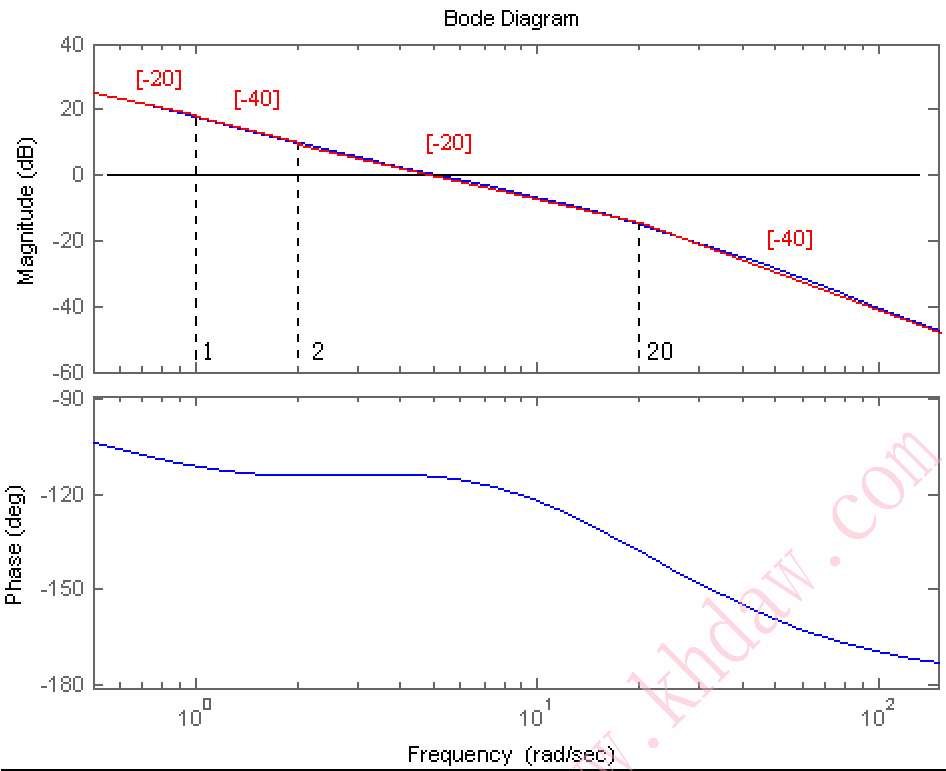
$$\therefore G(s) = \frac{986.96}{s^2 + 44.37s + 986.96}$$

5-3 解：

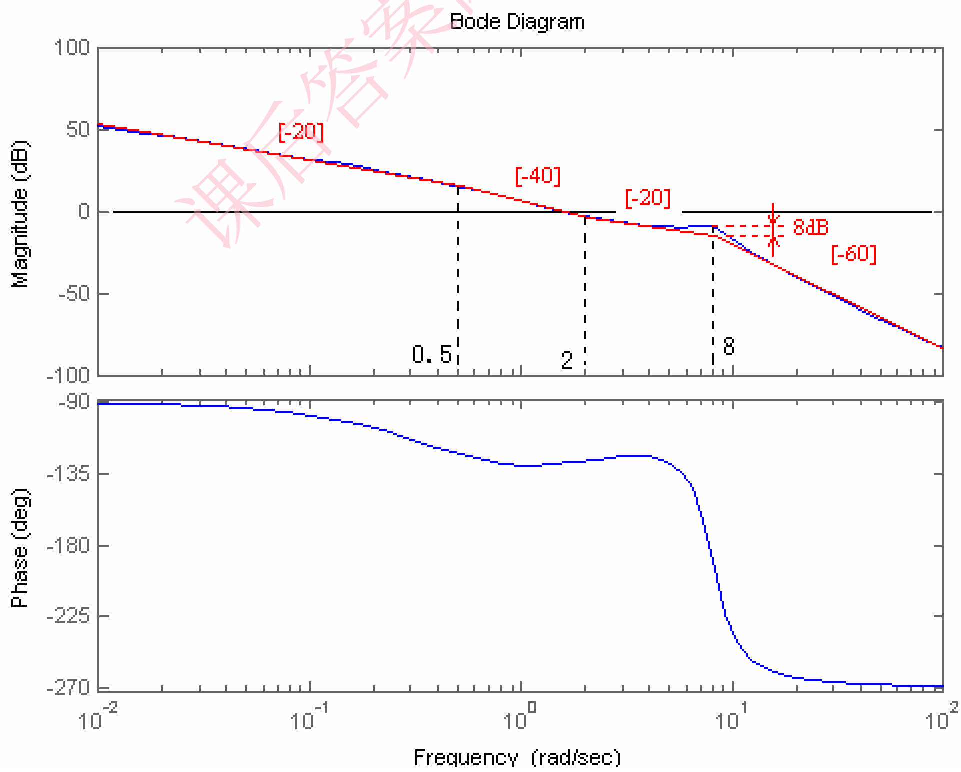
（1）$G(s) = \dfrac{160}{s(s+8)}$



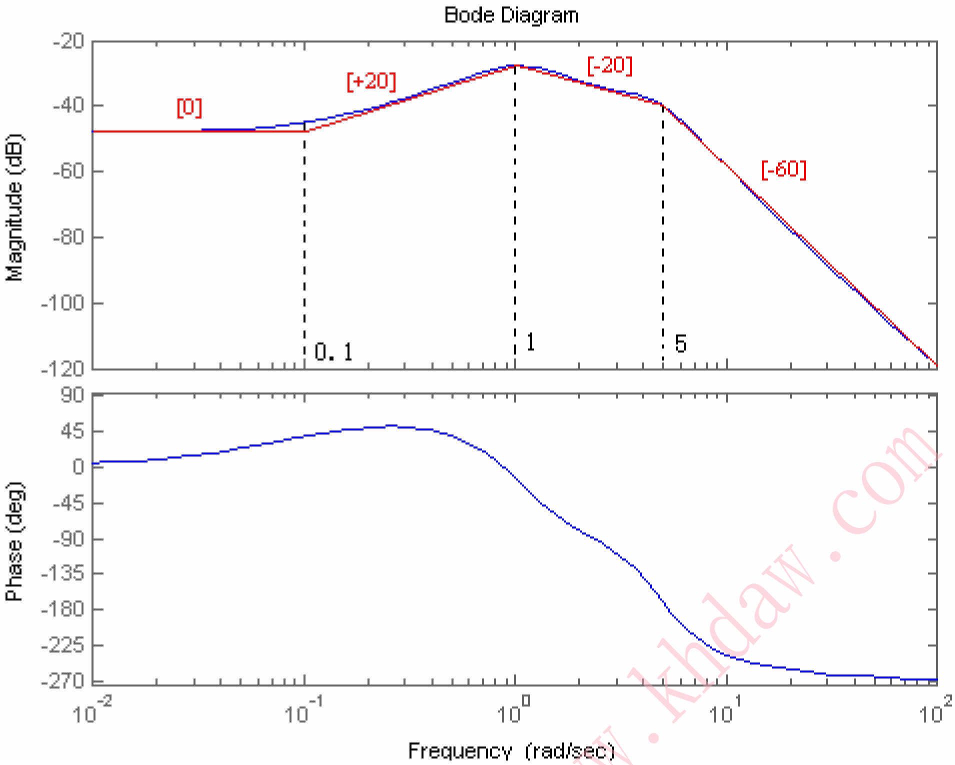
(2) $G(s)=\dfrac{100(s+2)}{s(s+1)(s+20)}$



(3) $G(s)=\dfrac{64(s+2)}{s(s+0.5)(s^2+3.2s+64)}$



（4）$G(s)=\dfrac{s(s+0.1)}{s(s^2+s+1)(s^2+4s+25)}$



5-4 解：

（a）$G(s)=\dfrac{K}{Ts+1}$　由一个放大环节、一个惯性环节组成

$20\lg K=20, K=10$；$\omega_1=\dfrac{1}{T}=10\Rightarrow T=0.1$

$\therefore G(s)=\dfrac{10}{0.1s+1}$

（b）$G(s)=\dfrac{K}{s(Ts+1)}$　由一个放大环节、一个积分环节、一个惯性环节组成

$\omega_1=\dfrac{1}{T}=80\Rightarrow T=\dfrac{1}{80}$，穿越频率 $\omega_c=40$，$L(\omega_c)=20\lg K-20\lg\omega_c=0$，

$\therefore K=40$

$\therefore G(s)=\dfrac{40}{s(\dfrac{1}{80}s+1)}$

（c）$G(s)=\dfrac{K}{s(\dfrac{1}{\omega_n^2}s^2+2\dfrac{\xi}{\omega_n}s+1)}$　由一个放大环节、一个积分环节、一个振荡环节组成

$L(\omega_k)=20\lg K-20\lg\omega_k=0$，$K=\omega_k=100$，由图可知 $\omega_r=45.3$，

$20\lg\dfrac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}}=4.85$，$\omega_n=\dfrac{\omega_r}{\sqrt{1-2\xi^2}}$，得到$\omega_n\approx 50$，$\xi=0.3$（0.954 舍去）。

$$\therefore G(s)=\frac{2.5\times10^3\times100}{s(s^2+30s+2.5\times10^3)}$$

（d）$G(s)=\dfrac{K(\tau s+1)}{s^2(Ts+1)^2}$ 由一个放大环节、一个微分环节、两个积分环节、两个惯性环节组成

$\omega_1=0.1$ 得 $\tau=10$；　$\omega_2=1$ 得 $T=1$

$L(\omega_c)=20\lg K+20\lg10-20\lg(\omega_c^2+1)=0$，　$\therefore K=0.2$，$\therefore G(s)=\dfrac{0.2(10s+1)}{s^2(s+1)^2}$

（或者采用精确表示：$L(\omega_c)=20\lg K+20\lg\sqrt{10^2+1}-20\lg1^2-20\lg(1+1)=0$，$K=\dfrac{2}{\sqrt{101}}\approx0.1990$，$\therefore G(s)=\dfrac{0.1990(10s+1)}{s^2(s+1)^2}$）

（e）$G(s)=\dfrac{K(\tau s+1)}{s(\frac{1}{\omega_n^2}s^2+2\frac{\xi}{\omega_n}s+1)}$

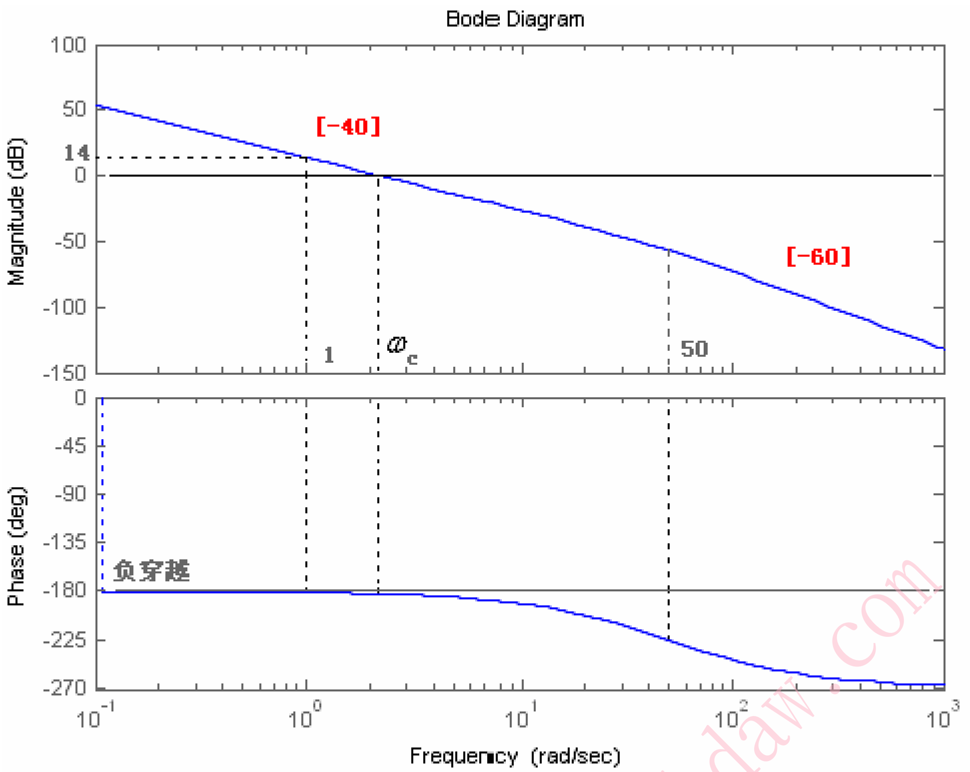
$\omega_1=1\Rightarrow\tau=1$，　$\omega_2=2\Rightarrow\omega_n=2$，　$20\lg\dfrac{1}{2\xi}=8\Rightarrow\xi=0.2$，　在 $\omega_1=1$ 处，$L=20\lg K=20$，$\therefore K=10$

$$\therefore G(s)=\frac{10(s+1)}{s(0.25s^2+0.2s+1)}$$

5-5 解：

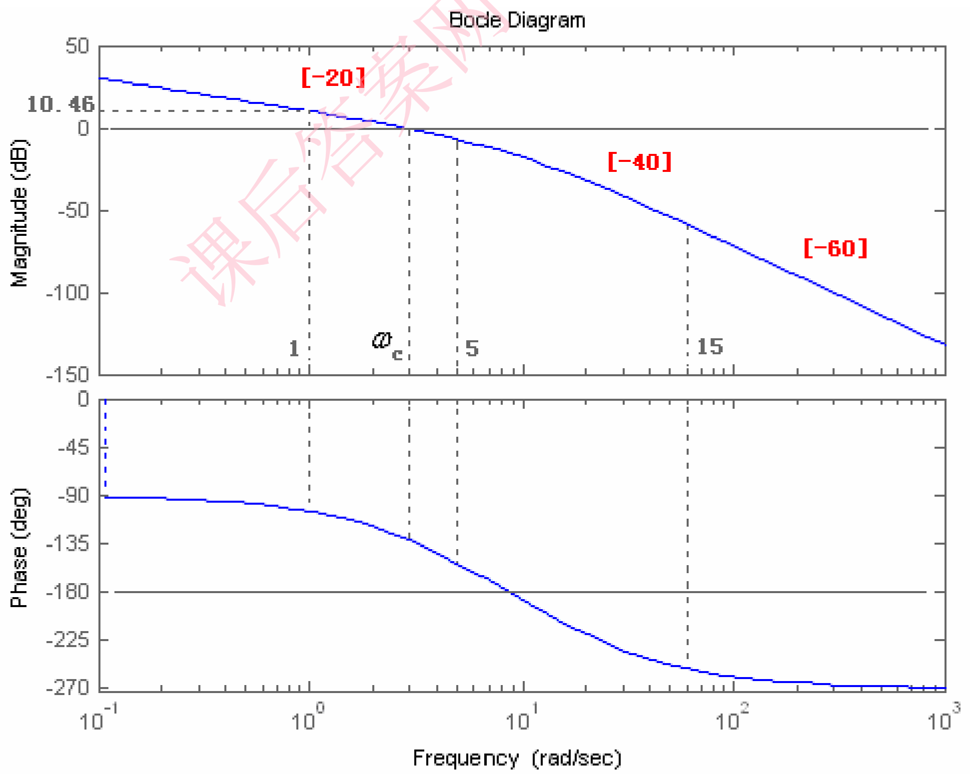
（1）$G(s)=\dfrac{250}{s^2(s+50)}=\dfrac{5}{s^2(\frac{1}{50}s+1)}$，　$20\lg K=14$

伯德图：



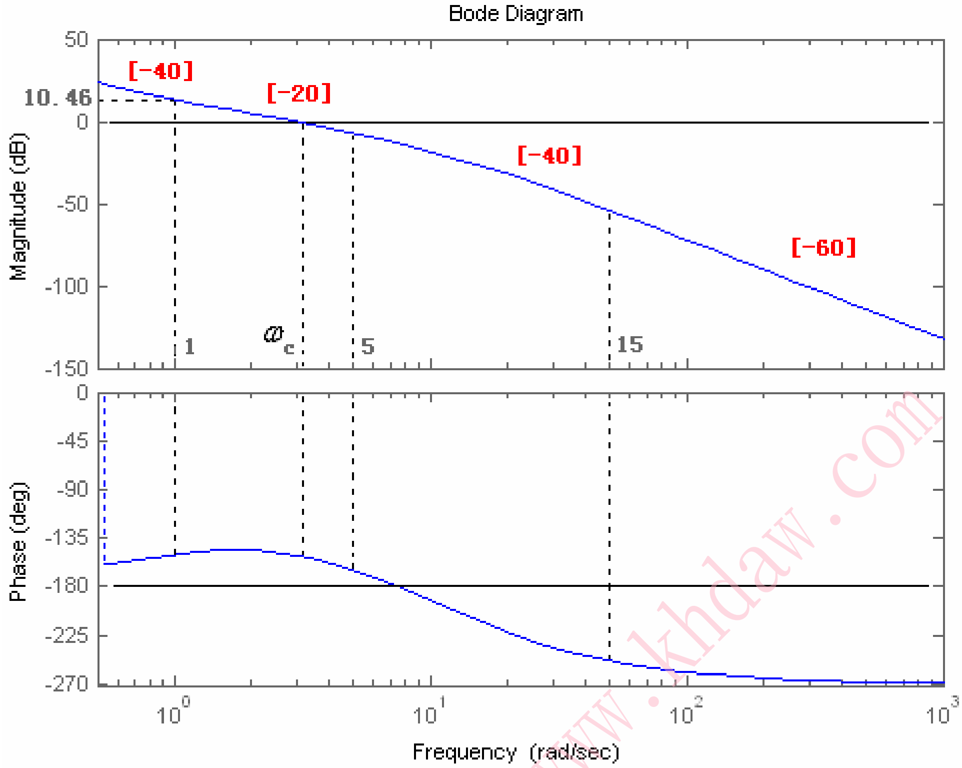
有一次负穿越，$P=0$，$Z=P-2N=2$　故不稳定

（2）$G(s)=\dfrac{250}{s(s+5)(s+15)}=\dfrac{\frac{10}{3}}{s(\frac{1}{5}s+1)(\frac{1}{15}s+1)}$，$20\lg K=10.46$



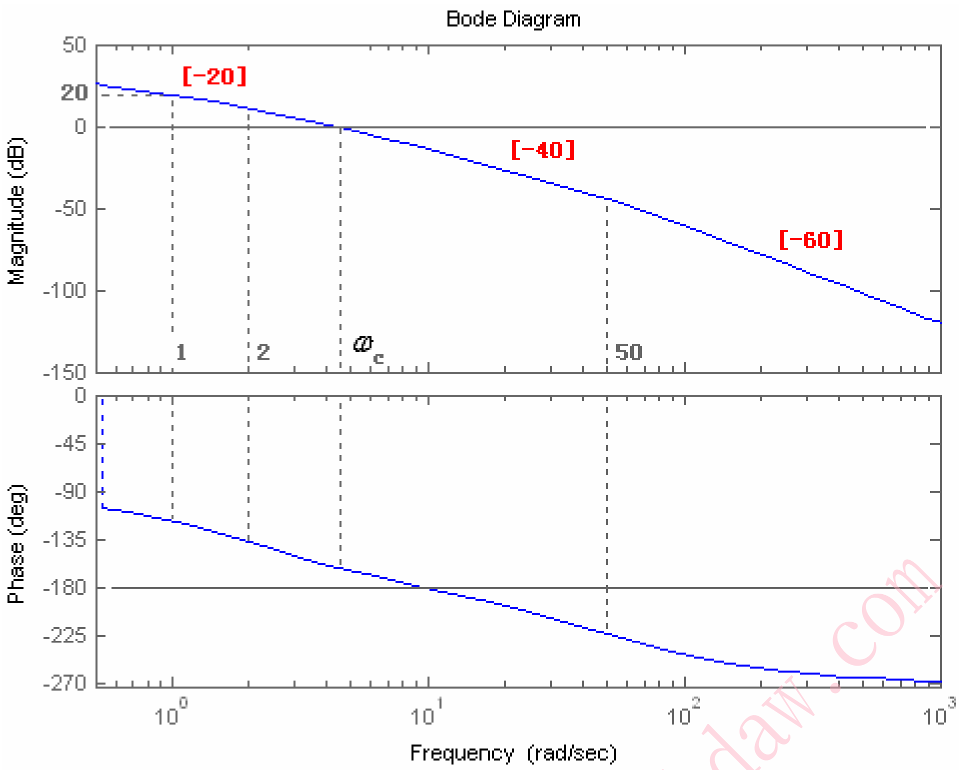
$P=0,N=0$ 无穿越，故 $Z=P-2N=0$ 稳定

（3） $G(s)=\dfrac{250(s+1)}{s^2(s+5)(s+15)}=\dfrac{\frac{10}{3}(s+1)}{s^2(\frac{1}{5}s+1)(\frac{1}{15}s+1)}$， $20\lg K=10.46$



$P=0, N=0$ 无穿越，故 $Z=P-2N=0$ 稳定

5-6 解： $G(s)=\dfrac{10}{s(0.5s+1)(0.02s+1)}$， $\omega_1=2,\omega_2=50,20\lg K=20$



$20\lg K - 20\lg\omega_c - 20\lg(0.5\omega_c) = 0$，得 $\omega_c \approx \sqrt{20} = 2\sqrt{5} \approx 4.47$ (精确解 4.2460)；

$$-(90^\circ + arctg(0.5\omega_g) + arctg(0.02\omega_g)) = -180^\circ$$

得 $0.5\omega_g \bullet 0.02\omega_g = 1 \Rightarrow \omega_g = \dfrac{1}{\sqrt{0.01}} = 10$

$$\gamma = 180^\circ - arctg(0.5\omega_c) - arctg(0.02\omega_c) - 90^\circ = 180^\circ - 66^\circ - 5^\circ - 90^\circ = 19^\circ$$

$$L_h = -20\lg\left|G(j\omega_g)\right| = -20\lg\left|\frac{10}{10(5j+1)(0.2j+1)}\right| \approx 20\lg 5 = 13.98 \text{ dB}$$

5-7 解：$G(s) = \dfrac{K}{s(0.01s^2 + 0.01s + 1)}$

$$\omega_n = 10, \xi = 0.05$$

求 ω_g，$-90^\circ - \arctan\dfrac{2\xi\dfrac{\omega_g}{\omega_n}}{1-\left(\dfrac{\omega_g}{\omega_n}\right)^2} = -180^\circ$，得 $\omega_g = 10$

$$L_h = -20\lg\left|G(j\omega_g)\right| = 20$$

$$\frac{K}{\omega_g\sqrt{(0.01\times\omega_g)^2+(1-0.01{\omega_g}^2)^2}}=0.1，得 K=0.1\Rightarrow\omega_c=0.1$$

$$\therefore G(s)=\frac{0.1}{s(0.01s^2+0.01s+1)}$$

因为 $\omega_c=0.1$， $\gamma=180^\circ-90^\circ-arctg\dfrac{0.01\times0.1}{1-\left(\dfrac{0.1}{10}\right)^2}\approx90^\circ$

5-8 解： $G(s)=\dfrac{K(\tau_2 s+1)}{s(T_1 s+1)(T_3 s+1)}$

（1） $\dfrac{1}{\tau_2}=0.2,\dfrac{1}{T_1}=0.1,\dfrac{1}{T_3}=4$

得 $\tau_2=5,T_1=10,T_3=0.25$

$\omega_{c1}=1\Rightarrow\dfrac{K\times5}{1\times10\times1}=1\Rightarrow K=2$

$$\therefore G(s)=\frac{2(5s+1)}{s(10s+1)(0.25s+1)}$$

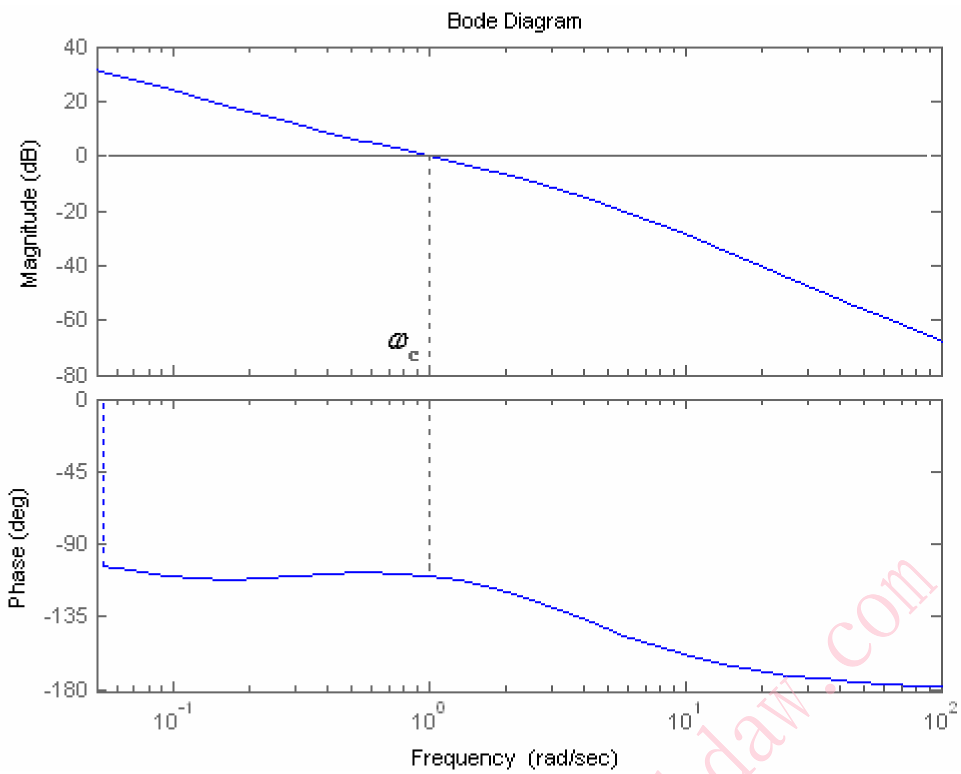
$$\gamma_1=180^\circ+\angle G(j\omega_{c1})$$

$$=180^\circ-90^\circ+tg^{-1}(5\omega_{c1})-tg^{-1}(10\omega_{c1})-tg^{-1}(0.25\omega_{c1})$$

$$=180^\circ-90^\circ+78.69^\circ-84.29^\circ-14.04^\circ$$

$$=70.36^\circ$$

（2）



$P=0, N=0$（无穿越）$Z=P-2N=0$（稳定）

（3）右移 10 倍频程，则 $T_1=1, \tau_2=0.5, T_3=0.025$

$$G(s)=\frac{K^{'}(0.5s+1)}{s(s+1)(0.025s+1)}$$

$$\omega_{c2}=10=10\omega_{c1} \Rightarrow \frac{K^{'}\times 0.5\times 10}{10\times 10}=1$$

$$\Rightarrow K^{'}=20$$

$$\therefore G(s)=\frac{20(0.5s+1)}{s(s+1)(0.025s+1)}$$

$$\gamma_2=180^{\circ}+\angle G(j\omega_{c2})$$

$$=180^{\circ}-90^{\circ}+tg^{-1}(0.5\omega_{c2})-tg^{-1}(\omega_{c2})-tg^{-1}(0.025\omega_{c2})$$

$$=180^{\circ}-90^{\circ}+tg^{-1}(5\omega_{c1})-tg^{-1}(10\omega_{c1})-tg^{-1}(0.25\omega_{c1})$$

$$=\gamma_1$$

系统稳定性不变

由$\sigma\% = \left[0.16 + 0.4\left(\frac{1}{\sin\gamma} - 1\right)\right] \times 100\%$　　　　（P190　5-16　5-17　5-18 式）

$t_s = \frac{k\pi}{\omega_c}$，得$\sigma_1\% = \sigma_2\%$，$t_{s1} = 0.1t_{s2}$

即系统超调量不变，调节时间缩短。

5-9 解：$\because G_1(s) = \frac{10(s+1)}{8s+1}, G_2(s) = \frac{4.8}{s(0.05s+1)}$

$\therefore$ 系统开环传函，$G(s) = \frac{48(s+1)}{s(8s+1)(0.05s+1)}$

$$\frac{48\sqrt{\omega_c^2+1}}{\omega_c\sqrt{64\omega_c^2+1}\sqrt{(0.05\omega_c)^2+1}} = 1 \Rightarrow \omega_c \approx 6$$

$$\therefore \gamma = 180^\circ + arctg(\omega_c) - 90^\circ - arctg(8\omega_c) - arctg(0.05\omega_c)$$

$$= 180^\circ + 80.54^\circ - 90^\circ - 88.81^\circ - 16.7^\circ$$

$$= 65.03^\circ$$

$$M_r = \frac{1}{\sin\gamma} = \frac{1}{\sin 65.03^\circ} \approx 1.1032$$

$$\sigma\% = [0.16 + 0.4(1.1032 - 1)] \times 100\% \approx 20\%$$

$$k = 2 + 1.5(M_r - 1) + 2.5(M_r - 1)^2 \approx 2.1813$$

$$t_s = \frac{2.1813\pi}{\omega_c} \approx 1.14$$

第六章习题答案

6-1　解法一：(串联超前校正)

(1) 原系统开环传递函数$G(s) = \frac{200}{s(0.1s+1)}$，计算得到$\omega_c = 44s^{-1} < 50s^{-1}$，$\gamma = 13^\circ < 45^\circ$，不能满足要求。

(2) 为了将系统相角裕度提高到45°，使用超前校正网络$G_c(s) = \frac{\alpha\tau s+1}{\tau s+1}$，所需超前相角至少为$45^\circ - 13^\circ = 32^\circ$，引入超前网络后，新的截止频率会增大，从而存在相角裕度损失，因

此设超前相角为40°，对应$\sin\varphi_m=\dfrac{\alpha-1}{\alpha+1}$，得到$\alpha=4.6$，由$10\log\alpha\approx 6.6dB$，确定 G(s)幅值为-6.6dB 的频率$\omega_m=65s^{-1}>50s^{-1}$，从而得到$\tau=\dfrac{1}{\omega_m\sqrt{\alpha}}=0.0072$，设计校正网络传递函数$G_c(s)=\dfrac{0.0331s+1}{0.0072s+1}$。

(3) 校正后的系统为$G(s)=G_c(s)G_0(s)=\dfrac{200(0.0331s+1)}{s(0.1s+1)(0.0072s+1)}$，验证得，截止频率$\omega_{\mathrm{c}}=65\mathrm{s}^{-1}$，相角裕度$\gamma=49^\circ$，满足设计要求。

解法二：

(1) 同上

(2) 按照最佳二阶系统模型设计：

要求$\omega_c\geq 50s^{-1}$，取$K=\omega_c=60$，则$T=\dfrac{1}{2K}=0.0083$

此时$\gamma=65.5^\circ$，所以校正后系统开环传递函数$G(s)G_c(s)=\dfrac{60}{s(0.0083s+1)}$

$$G_c(s)=\frac{60}{s(0.0083s+1)}\Big/G(s)=\frac{3}{10}\bullet\frac{0.1s+1}{0.0083s+1}$$

(3) 验证， $\gamma=65.5^\circ,\omega_c\approx 54.3$满足设计要求。

6-2 解：

(a) $G_0(s)=\dfrac{20}{s(0.1s+1)}$，$G_c(s)=\dfrac{s+1}{10s+1}$

$G(s)=G_0(s)G_c(s)=\dfrac{20(s+1)}{s(0.1s+1)(10s+1)}$ 为串联滞后校正

校正后优点：1. 稳定性增强

2. 平稳性变好

3. 提高抗高频干扰能力

缺点：由于穿越频率降低，系统快速性变差

(b) $G_0(s)=\dfrac{20}{s(0.1s+1)}$，$G_c(s)=\dfrac{0.1s+1}{0.01s+1}$

$G(s)=G_0(s)G_c(s)=\dfrac{20}{s(0.01s+1)}$ 为串联超前校正

校正后优点：1. 稳定性增强

2. 平稳性变好

3. 穿越频率提高，快速性变好

缺点：抗干扰能力减弱

6-3

(1) $G_0(s)=\dfrac{16}{s(s+8)}=\dfrac{2}{s(0.125s+1)}$，得到$K_1=2$，$T_1=0.125$，

$2\xi\omega_n=8,\omega_n^2=16,$ 故 $\omega_n=4,\xi=1$，$t_s=\dfrac{3.5}{\xi\omega_n}=0.875,$

$e_{ss}=\dfrac{1}{k_1}=0.5$，可见，$\sigma\%$满足设计要求，但$t_s$与$e_{ss}$不符合设计要求。

(2) 根据精度要求$e_{ss}\le 0.02$，$K_v\ge\dfrac{1}{0.02}$，取$K_v=50$，由$K_v=K_cK_1$，得到$K_c=25$；又

$T=\dfrac{1}{2K_v}=0.01$，，故$G(s)=G_c(s)G_0(s)=\dfrac{50}{s(0.01s+1)}$，

校正元件传递函数$G_c(s)=G(S)/G_0(s)=\dfrac{25(0.125s+1)}{0.01s+1}$

(3) 验算指标$\sigma\%=4.3\%<5\%$， $t_s=4.3T=0.043s<1s$，各项指标均满足性能要求。

（若不满足要求，可增加K_v再做调整，直到达到性能指标要求。）

6-4

(1) 若闭环回路部分具有过阻尼性质，则闭环极点应在负实轴上面，即闭环极点为负实数。

该部分开环传递函数为$G_1(s)G_2(s)=\dfrac{10K}{s(0.1s+1)(0.5s+1)}$，三个开环极点分别为 0，-2，-10，

计算分离点 $\dfrac{1}{s_d}+\dfrac{1}{s_d+2}+\dfrac{1}{s_d+10}=0$ ，得到 $s_d=-0.9449$ ， $K_d=0.0451$ ，故当

$0<K\le 0.0451$时，闭环回路部分具有过阻尼性质。

(2) 系统闭环传递函数为$\Phi(s)=\dfrac{10K(1+G_c(s))}{s(0.5s+1)(0.1s+1)+10K}$，若系统具有 II 阶精度，则

$10K(1+G_c)=s+10K$，得到$G_c(s)=\dfrac{s}{10K}$，$(0<K\le 0.045)$。

6-5

（参见P_{232}，例 6-7，具体设计步骤依照P_{230}）

(1) 建立理想的校正后四阶开环模型：

$$G(s)=\frac{K_v(\frac{1}{\omega_2}s+1)}{s(\frac{1}{\omega_1}s+1)(\frac{1}{\omega_3}s+1)(\frac{1}{\omega_4}s+1)}$$

希望$\omega_1<\omega_2<\omega_3<\omega_4$。根据设计要求$\omega_b\ge 13s^{-1}$，一般有$\omega_c\approx\omega_b$，（见$P_{192}$公式 5-22）为了保证系统有良好的快速性，取$\omega_c=16s^{-1}$；照顾系统的固有特性，简化校正装置，取

$\omega_1=\frac{1}{0.2}=5s^{-1}$；由$\frac{K_v\frac{\omega_c}{\omega_2}}{\omega_c\frac{\omega_c}{\omega_1}}=1$得到$\omega_2=\frac{K_v\omega_1}{\omega_c}=6.25s^{-1}$；为保证中频段具有足够的宽度以及$\gamma\ge 55^{\circ}$，查表得$l=16$，则$\omega_3=l\omega_2=100s^{-1}$；考虑系统的抗干扰性与校正装置的可实现性，取$\omega_4=150s^{-1}$。

(2) 建立系统的理想开环模型为$G(s)=\frac{20(0.16s+1)}{s(0.2s+1)(0.01s+1)(0.0067s+1)}$，检验其性能指标: $K_v=20s^{-1}$，$\omega_c=16.1s^{-1}$时，$\gamma=70.7^{\circ}>55^{\circ}$，以及$\omega_b\approx\omega_c=16.1s^{-1}>13s^{-1}$ 。故各项指标均满足设计要求。

(3) 由$G(s)=G_c(s)G_0(s)$确定校正装置为$G_c(s)=\frac{20}{K}\frac{(0.16s+1)(0.1s+1)}{(0.01s+1)(0.0067s+1)}$。

6-6

校正后系统开环传递函数：$\frac{G_0(s)}{1+G_0(s)K_cs}=\frac{14.4}{0.1s^2+(1+14.4K_c)s}=\frac{144}{s^2+10(1+14.4K_c)s}$

$\omega_n^2=144$，$\omega_n=12$

$2\xi\omega_n=10(1+14.4K_c)$，要求$\xi=0.707$，$K_c=0.0484$

6-7

(1) 两个回路$L_1=-\frac{K_1K_2}{s}$，$L_2=-\frac{K_1}{s^2}$，$\Delta=1-L_1-L_2=1+\frac{K_1K_2}{s}+\frac{K_1}{s^2}$

两条前向通道$P_1=1$，$P_2=-\frac{G_c(s)}{s^2}$，$\Delta_1=1+\frac{K_1K_2}{s}$，$\Delta_2=1$

求得干扰信号的传递函数 $\dfrac{C(s)}{N(s)}=\dfrac{P_1\Delta_1+P_2\Delta_2}{\Delta}=\dfrac{(1+\dfrac{k_1k_2}{s})-\dfrac{G_c}{s^2}}{1+\dfrac{k_1k_2}{s}+\dfrac{k_1}{s^2}}$，令其为零，得到 $G_c=s(s+k_1k_2)$

(2) 求得系统传递函数 $\dfrac{C(s)}{R(s)}=\dfrac{k_1}{s^2+k_1k_2s+k_1}$，则有 $\begin{cases}k_1k_2=2\xi\omega_n\\ k_1=\omega_n^2\end{cases}$，若具有最佳阻尼比，$\xi=0.707$，得到 $k_2=\sqrt{2/k_1}$。