第一章 引论

1-1

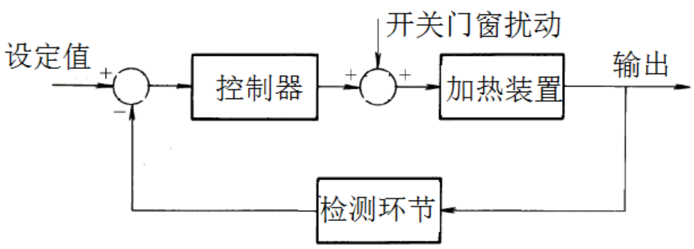
解：普通洗衣洗衣机、电饭锅使用为开环控制。开环控制用于对精度要求不高的设备，设计简单、由于无需输出检测反馈环节，价格相对低廉，稳定性好。智能空调为闭环控制，控制精度相对较高，增加了检测环节，价格相对较高，控制算法相对复杂。

1-2

解：通过旋钮设定的期望温度为系统的参考输入，输出为运行中系统的实际温度。

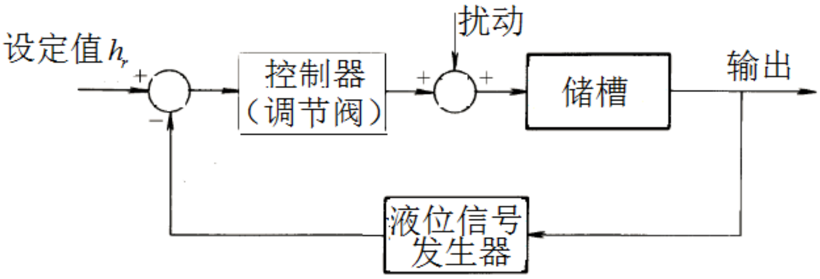
1-3

解：室温控制系统组成：设定值、控制器（加热装置）、反馈检测环节组成，依据成本，可开环控制依据人体感觉进行手动调整，也可闭环控制，通过测温检测元件反馈室内温度由控制器依据温差进行调节。以下仅给出该控制系统的闭环框图。



1-4

解



第二章 线性系统的数学模型

2-1

解：

（1）$\dfrac{C(s)}{R(s)}=\dfrac{2s+3}{s^3+5s^2+4s+1}$

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

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

2-2

解：输入脉冲响应 $R(s)=1$ 则

（1）$C(s)=\dfrac{s+2}{(s+3)(s+1)}=\dfrac{0.5}{s+1}+\dfrac{0.5}{s+3}\quad\Rightarrow c(t)=0.5e^{-t}+0.5e^{-3t}$

（2）$C(s)=\dfrac{1}{(s+1)^2+1}\Rightarrow c(t)=e^{-t}\sin t$

输入脉冲响应 $R(s)=\dfrac{1}{s}$ 则

（1）$C(s)=\dfrac{s+2}{(s+3)(s+1)s}=\dfrac{2/3}{s}-\dfrac{0.5}{s+1}-\dfrac{1/6}{s+3}\Rightarrow h(t)=\dfrac{2}{3}-\dfrac{1}{2}e^{-t}-\dfrac{1}{6}e^{-3t}$

（2）$C(s)=\dfrac{1}{((s+1)^2+1)s}=\dfrac{0.5}{s}-0.5\dfrac{s+2}{s^2+2s+2}=0.5(\dfrac{1}{s}-\dfrac{s+1}{s^2+2s+2}-\dfrac{1}{s^2+2s+2})$

$\Rightarrow h(t)=\dfrac{1}{2}-\dfrac{1}{2}e^{-t}\cos t-\dfrac{1}{2}e^{-t}\sin t$

2-3

解：

（1）系统的零点为-2、极点为-1、-3.

（2）系统的零点为 0，极点为-1+j，-1-j

2-4

解：$\dfrac{C(s)}{R(s)}=\dfrac{\dfrac{1}{s}-2\dfrac{1}{s+2}+\dfrac{1}{s+1}}{\dfrac{1}{s}}=\dfrac{3s+2}{(s+2)(s+1)}$

2-5

解：

a) $C\dfrac{d(U_i-U_o)}{dt}+\dfrac{U_i-U_o}{R_1}=\dfrac{U_o}{R_2}$， $\dfrac{U_o}{U_i}=\dfrac{Cs+\dfrac{1}{R_1}}{\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2}+Cs}=\dfrac{R_2}{R_1+R_2}\cdot\dfrac{R_1Cs+1}{\dfrac{R_1\cdot R_2}{R_1+R_2}Cs+1}$

（比例，惯性、一阶比例微分）

b) 设流过C_1、C_2的电流分别为i_1、i_2（中间变量，最后要消去），则有：

$$\begin{cases}U_i(s)=\dfrac{1}{C_1s}I_1(s)+R_1[I_1(s)+I_2(s)]\\ U_o(s)=\dfrac{1}{C_2s}I_2(s)\end{cases}$$

由电容C_1上的电压等于R_2 C_2串联电压有：$\dfrac{1}{C_1s}I_1(s)=(R_2+\dfrac{1}{C_2s})I_2(s)$

$$\Rightarrow\ \frac{U_o(s)}{U_i(s)}=\frac{\dfrac{1}{C_2s}}{R_1+C_1s\left(\dfrac{1}{C_1s}+R_1\right)\left(\dfrac{1}{C_2s}+R_2\right)}=\frac{1}{R_1R_2C_1C_2s^2+(R_1C_1+R_1C_2+R_2C_2)s+1}$$

2-6

解：依据模电中的虚短与虚断的概念有：

1） $u_i=RC\dfrac{d(u_o-u_i)}{dt}\quad\Rightarrow\quad\dfrac{U_o(s)}{U_i(s)}=\dfrac{RCs+1}{RCs}$

2) $C\dfrac{du_c}{dt}-\dfrac{u_i-u_c}{R/2}+\dfrac{-u_c}{R/2}=0,\dfrac{u_c}{R/2}+\dfrac{u_0}{R_1}=0$

$$\frac{CR}{2R_1}\cdot\frac{du_0}{dt}+\frac{2}{R}u_i+\frac{2}{R_1}u_0=0\Rightarrow\ \frac{U_o(s)}{U_i(s)}=-\frac{R_1}{R}\cdot\frac{1}{\dfrac{R}{4}Cs+1}$$

3） $C\dfrac{du_c}{dt}+\dfrac{u_c-u_0}{R_1/2}+\dfrac{u_c}{R_1/2}=0$， $\dfrac{u_i}{R}=-\dfrac{u_c}{R_1/2}$，消掉中间变量有：

$$\frac{CR_1}{2R}\cdot\frac{du_i}{dt}+\frac{2u_0}{R_1}+\frac{2u_i}{R}=0\Rightarrow\ \frac{U_o(s)}{U_i(s)}=-\frac{R_1}{R}\left(\frac{R_1}{4}Cs+1\right)$$

2-7

解：依据电机拖动课程知识，设激磁磁通$\phi = K_f i_f$恒定，则有

$$\frac{\Theta(s)}{U_a(s)} = \frac{C_m \phi}{s\left[L_a J s^2 + (L_a f + R_a J)s + R_a f + \frac{60}{2\pi} C_e \phi C_m \phi\right]}$$

2-9

解：依据高等数学中的泰勒公式，有

$i_d = -2.19\times10^{-3} + 0.084(u_d - 0.2) \Rightarrow \Delta i = k\Delta u$ ，即$i_d - 2.19\times10^{-3} = 0.084(u_d - 0.2)$。

2-10

解：依据牛顿力学公式

对质量块m_1 ： $m_1 \frac{d^2 y_1}{dt} = F(t) + k_2(y_2 - y_1) - f - k_1 y_1$

对质量块m_2 ： $m_2 \frac{d^2 y_2}{dt} = k_2(y_2 - y_1)$

二阶系统，相似系统为 RLC 串联电路。

2-11

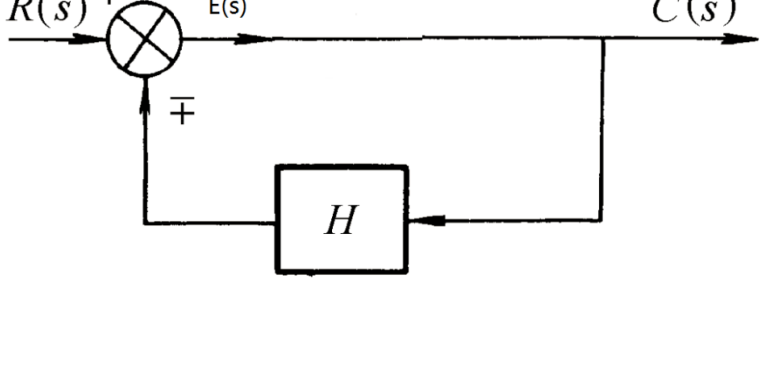
解：有物理定律，借鉴电容性质有：$C\frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta_i - \theta}{R} \Rightarrow \frac{\Theta(s)}{\Theta_i(s)} = \frac{1}{RCs+1}$

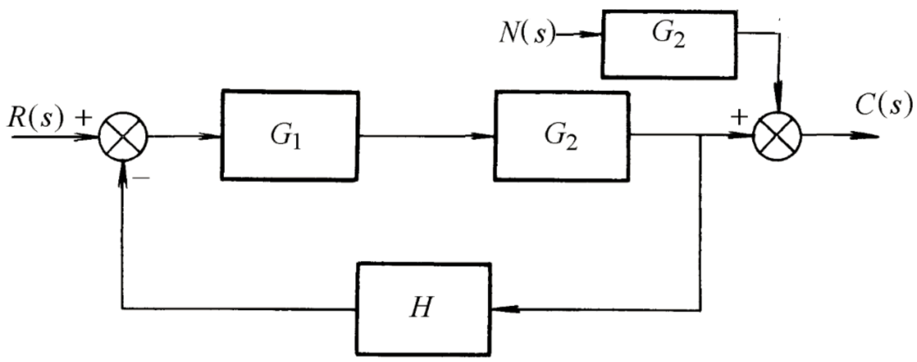
2-12

解：1）不影响 2）影响 3）影响

2-13

解：





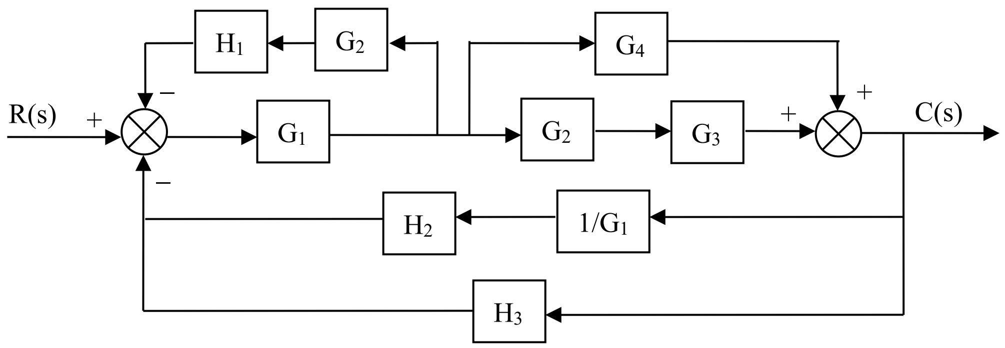
2-14

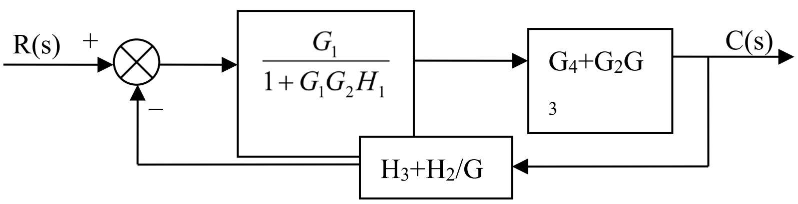
解：a）依据梅逊公式，系统的前向通路有 2 条，其传输为：$P_1 = G_1(s)G_3(s), P_2 = G_2(s)G_3(s)$

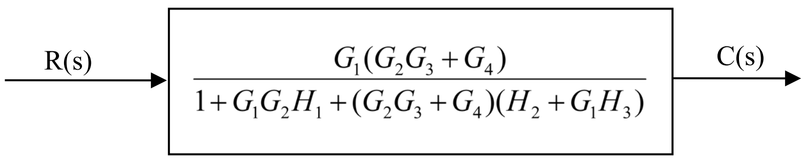
此系统有一个回路，其传输之和为$\sum L_1 = G_3(s)H_1(s) + G_1(s)G_3(s)$ ，这三个回环相互之间都有公共节点，故不存在互不接触的回环。于是特征式为$\Delta = 1 - \sum L_1$,由于两个回环均与前向通道P_1接触，故其余子式为$\Delta_1 = 1$。

可以求得系统的传递函数为：$\dfrac{C(s)}{R(s)} = \dfrac{G_3(s)(G_1(s) + G_2(s))}{1 + G_3(s)(G_1(s) + H_1(s))}$

b）



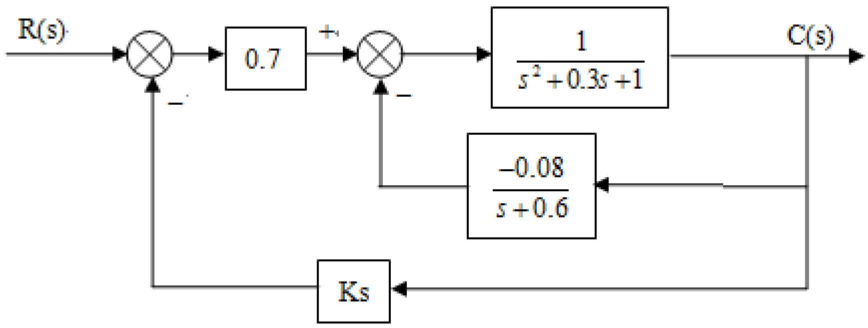




可以求得系统的传递函数为：$\dfrac{C(s)}{R(s)} = \dfrac{G_1(G_2G_3 + G_4)}{1 + G_1G_2H_1 + (G_2G_3 + G_4)(H_2 + G_1G_3)}$

2-15

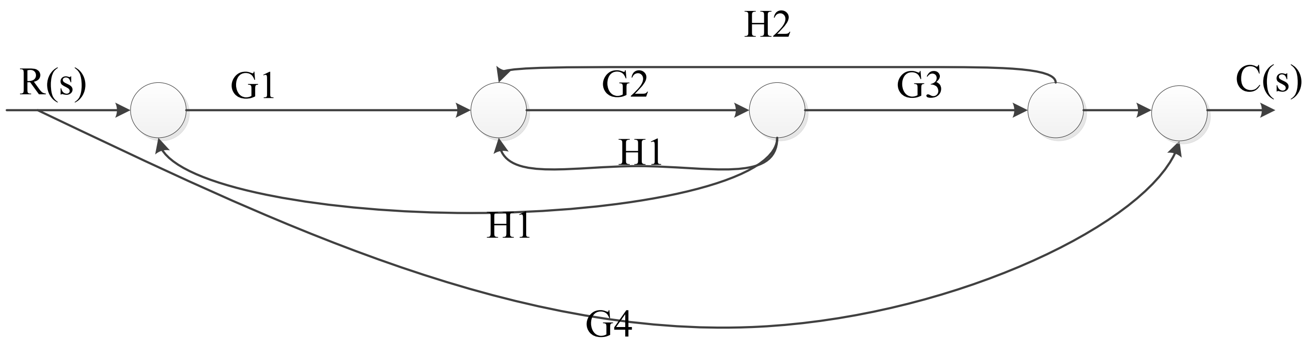
解：反复应用串、并、反馈链接进行化简，有：



$$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{0.7s+0.42}{s^{3}+(0.9+0.7k)s^{2}+(1.18+0.42k)s+0.52}$$

2-16

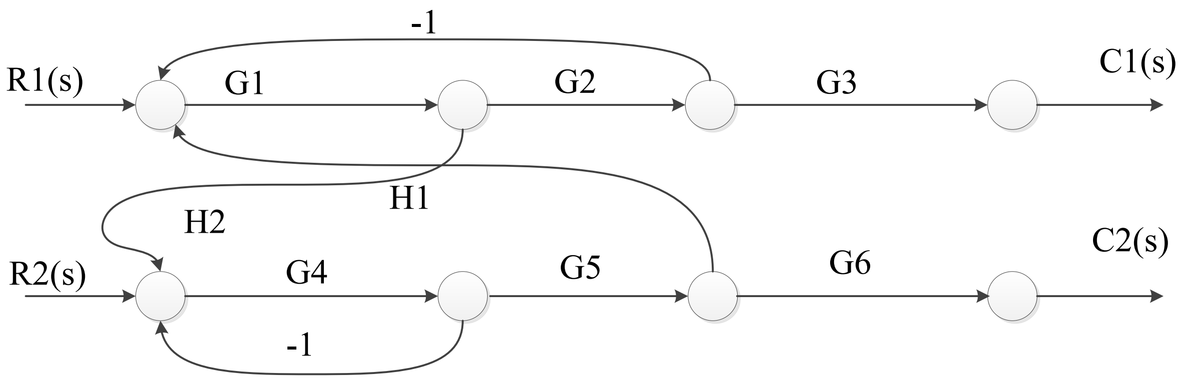
解：据此，利用梅逊公式



$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{G_1G_2G_3}{1+G_2H_1-G_1G_2H_1+G_2G_3H_2}+G_4$（将并联前向通路$G_4$移除，则 1 前向通路，3 回环且两两都接触。）

2-17

解：据此，利用梅逊公式



$$\frac{C_1(s)}{R(s)}=\frac{G_1G_2G_3}{1+G_1G_2+G_4-G_1G_2G_4G_5H_1H_2}$$

（1 前向通路，2 回环，1 个两两不接触回环）

$$\frac{C_2(s)}{R(s)}=\frac{G_1G_2G_4G_5G_6H_2}{1+G_1G_2+G_4-G_1G_2G_4G_5H_1H_2}$$

2-18

解：a）系统只有一个回环：$\sum L_1 = cdh$，

有四条前向通道，分别为：$P_1 = abcdef$，$P_2 = abcdi$，$P_3 = agdef$，$P_4 = agdi$，

相应的，有：$\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = \Delta_4 = 1$

则 $\dfrac{C(s)}{R(s)} = \dfrac{1}{\Delta}\sum_{k=1}^{n} P_k\Delta_k = \dfrac{abcdef + abcdi + agdef + agdi}{1 - cdh}$

B）系统共有三个回环，因此，$\sum L_1 = -\dfrac{1}{R_1C_1s} - \dfrac{1}{R_2C_2s} - \dfrac{1}{R_1C_2s}$，

两个互不接触的回环只有一组，因此，$\sum L_2 = -\dfrac{1}{R_1C_1s}\cdot\left(-\dfrac{1}{R_2C_2s}\right) = \dfrac{1}{R_1R_2C_1C_2s^2}$

有一条前向通道：$P_1 = 1\cdot\dfrac{1}{sC_1}\cdot\dfrac{1}{R_1}\cdot 1\cdot\dfrac{1}{sC_2} = \dfrac{1}{R_1C_1C_2s^2}$，并且有 $\Delta_1 = 1$，则

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 - \sum L_1 + \sum L_2}\cdot P_1\Delta_1 = \frac{R_2}{R_1R_2C_1C_2s^2 + (R_1C_1 + R_2C_1 + R_2C_2)s + 1}$$

2-19

解：此系统为一个多输入单输出的系统，由于是线性系统满足叠加定理，则

$$C(s) = C_1(s) + C_2(s) + C_3(s) + C_4(s) = \frac{G_1G_2R(s) + G_2D_1(s) - G_2D_2(s) - G_1G_2H_1D_3(s)}{1 + G_2H_2 + G_1G_2H_1}$$

2-20

解：当输入为 $R(s)$ 时，前向通路 2 条 $P_1 = bcde, P_2 = ade$，回环有 4 个且接触则

$\sum L_1 = -cf - eg - bcdeh - adeh$ $\quad\Delta_1 = 1$

则 $\dfrac{C(s)}{R(s)} = \dfrac{ade + bcde}{1 + cf + eg + bcdeh + adeh}$

当输入为 $N(s)$ 时,仅前向通路变为 1 条 $P_1 = e$，则 $\dfrac{C(s)}{N(s)} = \dfrac{e}{1 + cf + eg + bcdeh + adeh}$

2-21

证明：a）与 b）前向通路相同为 $P_1 = abc$，三个回环相同，分别为 ad, be, cf 但是 a）有 3 个两两不接触回环 b）只有一个，且 a）还有一个三三不接触回环。故这两个系统不等

价。

2-22

解：

（1）依据 2-14 结果，可直接求得

$$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{10(s+8)}{s^2+16s+50}$$

（2）$R(s)=0$，相当于前馈环节没有输入信号，则

$$\frac{C(s)}{N(s)}=\frac{1}{1+\frac{5s}{s(s+1)}+\frac{10(s+5)}{s(s+1)}}=\frac{s(s+1)}{s^2+16s+5}$$

第三章 线性系统的时域分析

3-1

解：注意利用单位斜坡响应与单位阶跃响应之间的微积分关系，且对于典型二阶系统，其特征值的表达式为 $-\xi\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\xi^2-1}$

1）欠阻尼，则特征根为 $-\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2}$ 是一对具有负实部的复根。

$$c(t)=t-\frac{2\zeta}{\omega_n}-\frac{2\zeta}{\omega_n}e^{-\zeta\omega_n t}\cos\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t+\frac{1-2\zeta^2}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n}e^{-\zeta\omega_n t}\sin\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t$$

$$=t-\frac{2\zeta}{\omega_n}+\frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n}e^{-\zeta\omega_n t}\sin\left(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t-arctg\frac{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}}{1-2\zeta^2}\right)$$

2）临界阻尼，特征根为两个相等的负实根 $-\omega_n$。

$$c(t)=t-\frac{2}{\omega_n}+\frac{2}{\omega_n}e^{-\omega_n t}\left(1+\frac{\omega_n}{2}t\right)$$

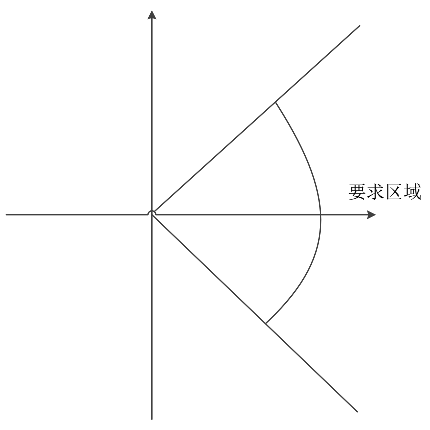
3）过阻尼，两个不相等的负实根 $s_1=-\left(\zeta-\sqrt{\zeta^2-1}\right)\omega_n, s_2=-\left(\zeta+\sqrt{\zeta^2-1}\right)\omega_n$

$$c(t)=t-\frac{2\zeta}{\omega_n}+\frac{1}{2\sqrt{\zeta^2-1}\omega_n}\left[\frac{e^{-\left(\zeta-\sqrt{\zeta^2-1}\right)\omega_n t}}{\left(\zeta-\sqrt{\zeta^2-1}\right)^2}-\frac{e^{-\left(\zeta+\sqrt{\zeta^2-1}\right)\omega_n t}}{\left(\zeta+\sqrt{\zeta^2-1}\right)^2}\right]$$

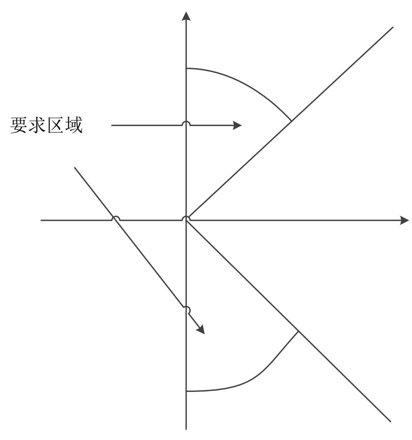
3-2

解：

（1）



（3）



3-3

解：系统的传递函数为：$\dfrac{C(s)}{R(s)}=\dfrac{K}{\tau s^2+s+K}$ 这是一个典型的二阶系统。

1） $\omega_n = 2.12 rad/s, \zeta = 0.24$ 则， $M_p = 46.6\%, t_s = 7.86s(\pm 2\%)$

2） $\omega_n = 1 rad/s, \zeta = 0.5$ 则， $M_p = 16.3\%, t_s = 8s(\pm 2\%)$

3） $\omega_n = 0.4 rad/s, \zeta = 1.25$，过阻尼，无超调量， $t_s = 15s$。

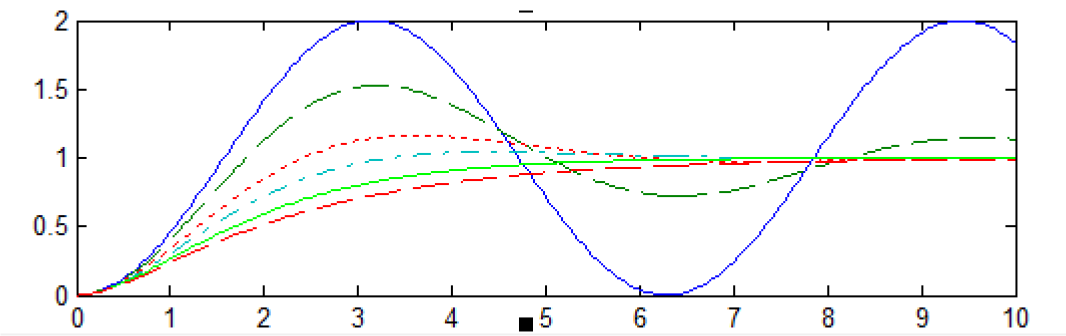
3-4

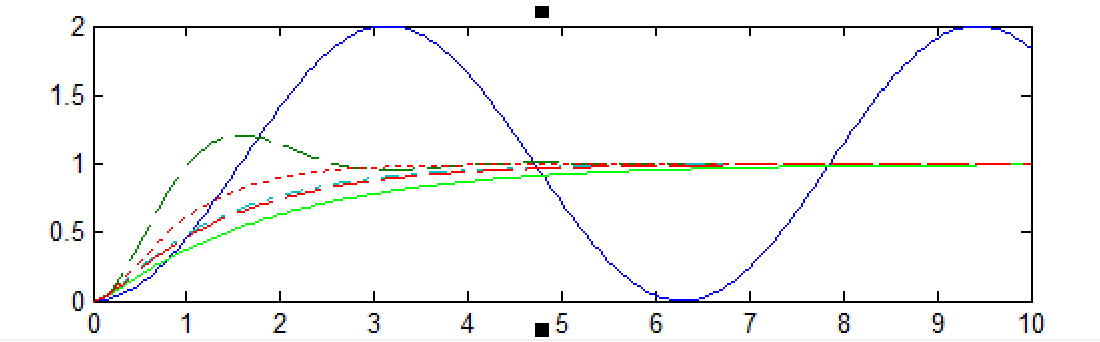
解： $M_p = \exp(-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}) = 0.96 \quad \Rightarrow \quad \zeta = 0.6$

$$t_p = \pi / (\sqrt{1-\xi^2}\pi) = \frac{\pi}{\omega_d} = 0.2 \quad \Rightarrow \quad \omega_n = 19.6 rad/s$$

3-5

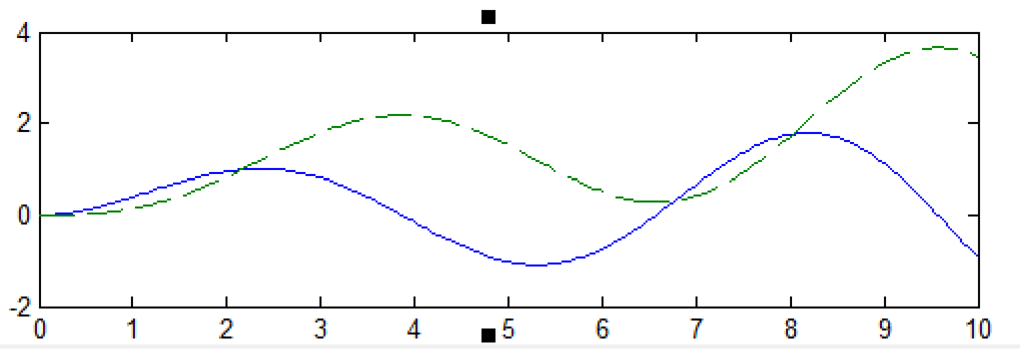
解：





3-6

解



:

3-7

解：

针对二阶系统，依据已知条件可知 $\omega_d = 1.6 = \omega_n\sqrt{1-\xi^2}$ ， $\xi\omega_n = 1.2$

$\Rightarrow \xi = 0.6, \omega_n = 2$ 则，有 $t_p = \dfrac{\pi}{\omega_d} = 1.9625$ ， $M_p = \exp(-\dfrac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}) =$ 0.0949=9.49% ，

$t_s = \dfrac{3-4}{\xi\omega_n} = 2.5 \sim 3.33$ ， $\dfrac{C(s)}{R(s)} = \dfrac{4}{s^2+2.4s+4}$

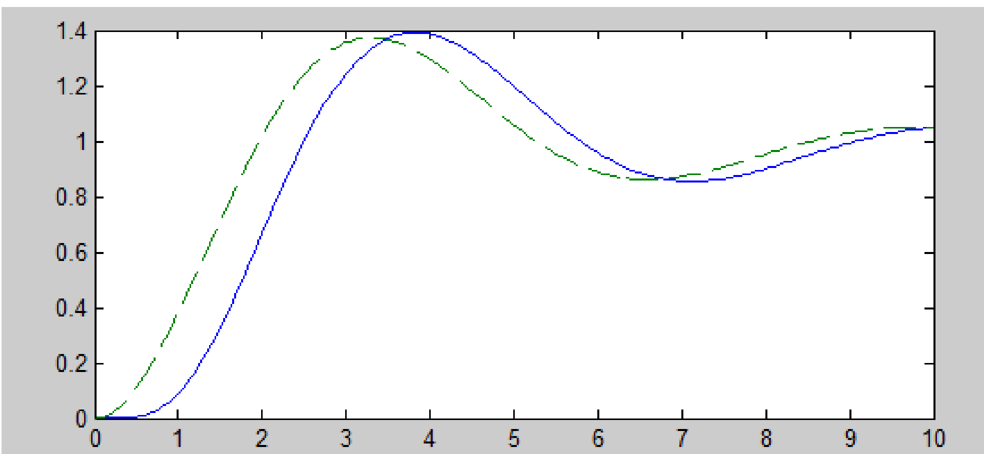
3-8

解：

（1） $g(t) = -12e^{-60t} + 12^{-10t}$ （2） $\dfrac{C(s)}{R(s)} = \dfrac{\frac{6}{25}}{(s+60)(s+10)} = \dfrac{6}{25}\cdot\dfrac{1}{s^2+70s+600}$,

可知系统的 $\omega_n = \sqrt{600} = 24.4949$ ， $\xi = \dfrac{2\xi\omega_n}{2\omega_n} = \dfrac{70}{2*24.49} = 1.4$

3-9



原系统与基于主导极点的降阶系统单位阶跃响应近似一致。

3-10

（1）
$$\begin{array}{lccc} s^4 & 1 & 8 & 3 \\ s^3 & 2 & 4 & \\ s & 6 & 3 & \\ s^0 & 1 & & \end{array}$$
可知系统为稳定

（3）
$$\begin{array}{lccc} s^5 & 1 & 3 & 16 \\ s^4 & 1 & 9 & 10 \\ s^3 & -1 & -1 & \\ s^2 & 8 & 10 & \\ s & 2 & & \\ s^0 & 1 & & \end{array}$$
第一列变号 2 次，可知系统为稳定

（4）
$$\begin{array}{lcccc} s^6 & 1 & 5 & 8 & 4 \\ s^5 & 3 & 9 & 6 & \\ s^4 & 1 & 3 & 2 & \\ s^3 & & & & \end{array} \quad \Rightarrow A(s) = 2s^4 + 6s^2 + 4$$

可求得系统的两对共轭虚数极点

$s_{1,2} = \pm j; s_{3,4} = \pm j\sqrt{2}$。临界稳定的系统在实际中是无法使用的.

3-11

解：

1）
$$\begin{array}{lcc} s^2 & 0.1 & 1+K \\ s & 1.1 & \\ s^0 & 1+K & \end{array}$$
K>0 时,系统稳定

2）
$$\begin{array}{lcc} s^3 & 0.1 & 0 \\ s^2 & 1 & K \\ s & 0 & K \\ s^0 & -K & \end{array}$$
K>0 时,系统不稳定

3）
$$\begin{array}{lcc} s^3 & 0.5 & 1 \\ s^2 & 1.5 & K \\ s & \dfrac{1.5-0.5K}{1.5} & \\ s^0 & K & \end{array}$$
0<K<3 时，系统稳定

3-12

解：