

目 录

Part1 基于 MATLAB/Simulink 的软件仿真实验	1
第 2 章 基于 MATLAB/Simulink 建立控制系统数学模型	1
第 3 章 基于 MATLAB 控制系统的时域分析法	3
第 4 章 基于 MATLAB 控制系统的根轨迹法	16
第 5 章 线性系统的频域分析法	29
第 6 章 基于 MATLAB 控制系统频率法串联校正设计	32
Part2 基于 EL-AT-III 型自动控制实验系统的硬件模拟实验	36
实验一 典型环节及其阶跃响应	36
实验二 二阶系统阶跃响应	43
实验三 控制系统的稳定性分析	48
实验四 系统频率特性测量	51
实验五 连续系统串联校正	56

Part1 基于 MATLAB/Simulink 的软件仿真实验

第 2 章 基于 MATLAB/Simulink 建立控制系统数学模型

【作业 2-1】建立系统传递函数的多项式模型

$$G_1(s) = \frac{5(s+2)^2(s^2+6s+7)}{s(s+1)^3(s^3+2s+1)}$$

$$G_2(s) = \frac{5}{s(s+1)(s^2+4s+4)}$$

MATLAB 代码:

```
>>num1=5*conv(conv([1,2],[1,2]),[1,6,7]);  
den1=conv(conv(conv(conv([1,0],[1,1]),[1,1]),[1,1]),[1,0,2,1]);  
den2=conv(conv([1,0],[1,1]),[1,4,4]);  
g1=tf(num1,den1)  
g2=tf(5,den2)
```

输出结果:

```
      5 s^4 + 50 s^3 + 175 s^2 + 260 s + 140  
g1 = -----  
      s^7 + 3 s^6 + 5 s^5 + 8 s^4 + 9 s^3 + 5 s^2 + s  
Continuous-time transfer function.  
              5
```

```
g2 = -----  
      s^4 + 5 s^3 + 8 s^2 + 4 s  
Continuous-time transfer function.
```

【作业 2-2】建立控制系统的零极点模型:

$$G(s) = \frac{8(s+1-j)(s+1+j)}{s^2(s+5)(s+6)(s^2+1)}$$

MATLAB 代码:

```
>>k=8;  
z=[1j-1,-1j-1];  
p=[0,0,-5,-6,-1j,1j];  
G=zpk(z,p,k)
```

输出结果:

```
      8 (s^2 + 2s + 2)  
G = -----  
      s^2 (s+5) (s+6) (s^2 + 1)  
Continuous-time zero/pole/gain model.
```

【作业 2-3】建立控制系统的多项式模型。

$$G(s) = \frac{8(s+1)(s+2)}{s(s+5)(s+6)(s+3)}$$

MATLAB 代码:

```
>>k=8;
z=[-1,-2];
p=[0 -5 -6 -3];
[num,den]=zp2tf(z(:),p(:),k);
g=tf(num,den)
```

输出结果:

```
      8 s^2 + 24 s + 16
g =  -----
      s^4 + 14 s^3 + 63 s^2 + 90 s
Continuous-time transfer function.
```

【2-4】已知系统前向通道的传递函数

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

求它的单位负反馈传递函数。

MATLAB 代码:

```
>>num0=[2,1];
den0=[1,2,3];
[num,den]=feedback(num0,den0,1,1);
g=tf(num,den)
```

输出结果:

```
g =
      2 s + 1
-----
      s^2 + 4 s + 4
Continuous-time transfer function.
```

【作业 2-5】已知系统结构图:

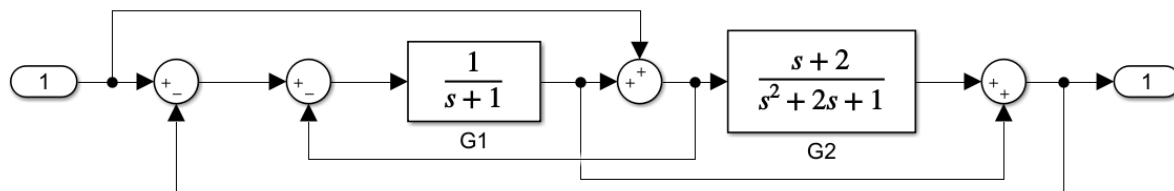


图 1 Simulink 建立系统模型

(1) 使用 Simulink 建立系统模型

Simulink 建立模型结果截图如图 1 所示。

(2) 在 matlab 中用梅森公式求系统的传递函数。提示使用 factor()函数

答:

factor()函数可对括号内公式因式分解。图中系统用梅森公式进行分析: 共有 5 个回路, $\Delta=1+2*g1+g1*g2$, 两条前向通路, $p1=g2, \Delta1=1, p2=g1*g2, \Delta2=1$, 故根据梅森增益公式, $g=(g1g2+g2)/(1+2*g1+g1*g2)$, 利用 factor()函数进行化简。

MATLAB 代码:

```
>>syms s
g1=1/s+1;
g2=(s+2)/(s^2+2*s+1);
g=factor(((g1+1)*g2)/(1+2*g1+g1*g2))
```

输出结果:

```
g=[ 2*s + 1, s + 2, 1/(s + 1), 1/(3*s^2 + 6*s + 4)]
```

(3) 在 matlab 中用结构图化简法求系统的传递函数。提示使用 linmod()函数

答:

linmod()函数用于将 simulink 中模型进行线性化。

MATLAB 代码:

```
>>[num,den]=linmod('t2_5_1')
printsys(num,den,'s')
```

输出结果:

```
num = 0      1      4      4
den = 1.0000    5.0000    8.0000    5.0000
      s^2 + 4 s + 4
num/den = -----
      s^3 + 5 s^2 + 8 s + 5
```

第 3 章 基于 MATLAB 控制系统的时域分析法

【作业 3-1】试做出以下系统的阶跃响应, 并于原系统 $G(s) = \frac{10}{s^2 + 2s + 10}$ 的阶跃

响应曲线进行比较, 做出实验结果分析。

(1) 系统有零点情况: $z=-5$ $G_1(s) = \frac{2s+1}{s^2 + 2s + 10}$

MATLAB 代码:

```
>>G=tf(10,[1,2,10]);
G1=tf([2,1],[1,2,10]);
G2=tf([1,0.5],[1,2,10]);
G3=tf([1,0.5,0],[1,2,10]);
G4=tf(1,[1,2,10]);
step(G)
hold on
step(G1)
```

```

hold on
text(1.5,1.2,'G')
text(1.1,1.45,'G1')
grid on

```

输出结果如图 2:

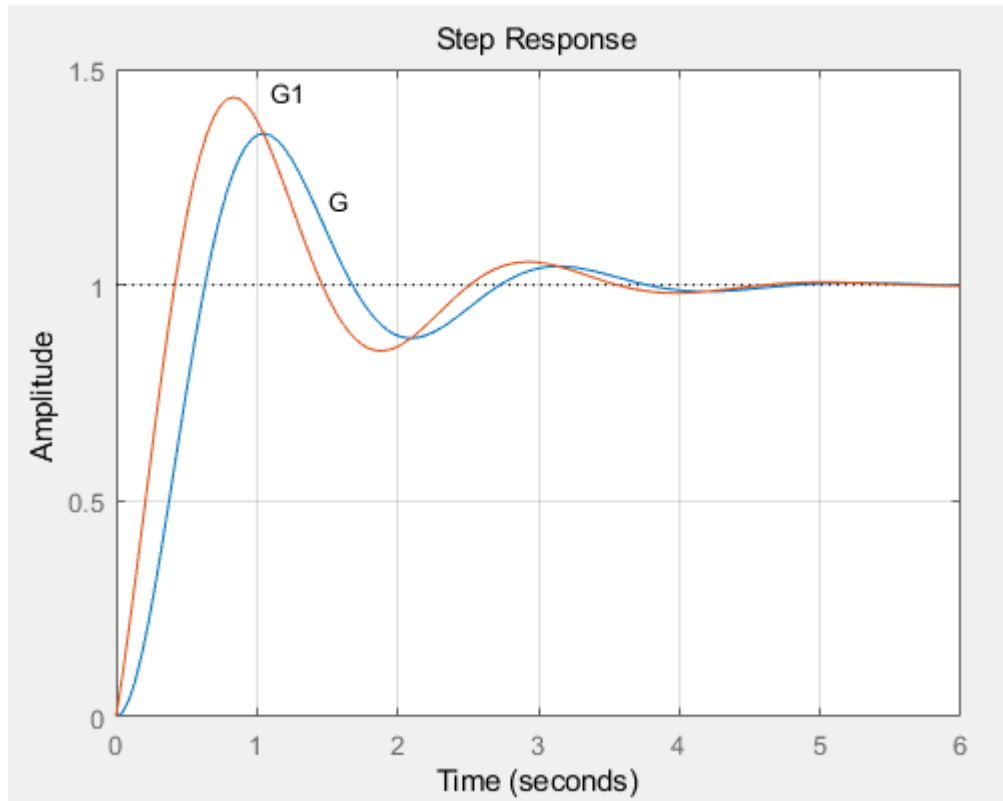


图 2 作业 3-1(1)输出结果

分析:

系统增加一个零点时, 超调量增加, 不产生稳态误差

(2) 分子与分母多项式阶数相同: $n=m=2$ $G_2(s) = \frac{s^2 + 0.5s + 10}{s^2 + 2s + 10}$

MATLAB 代码:

```

>>G=tf(10,[1,2,10]);
G1=tf([2,10],[1,2,10]);
G2=tf([1,0.5,10],[1,2,10]);
G3=tf([1,0.5,0],[1,2,10]);
G4=tf(1,[1,2,10]);
step(G)
hold on
step(G2)
hold on
text(0.5,1.2,'G')
text(1,0.9,'G2')
grid on

```

输出结果如图 3 所示：

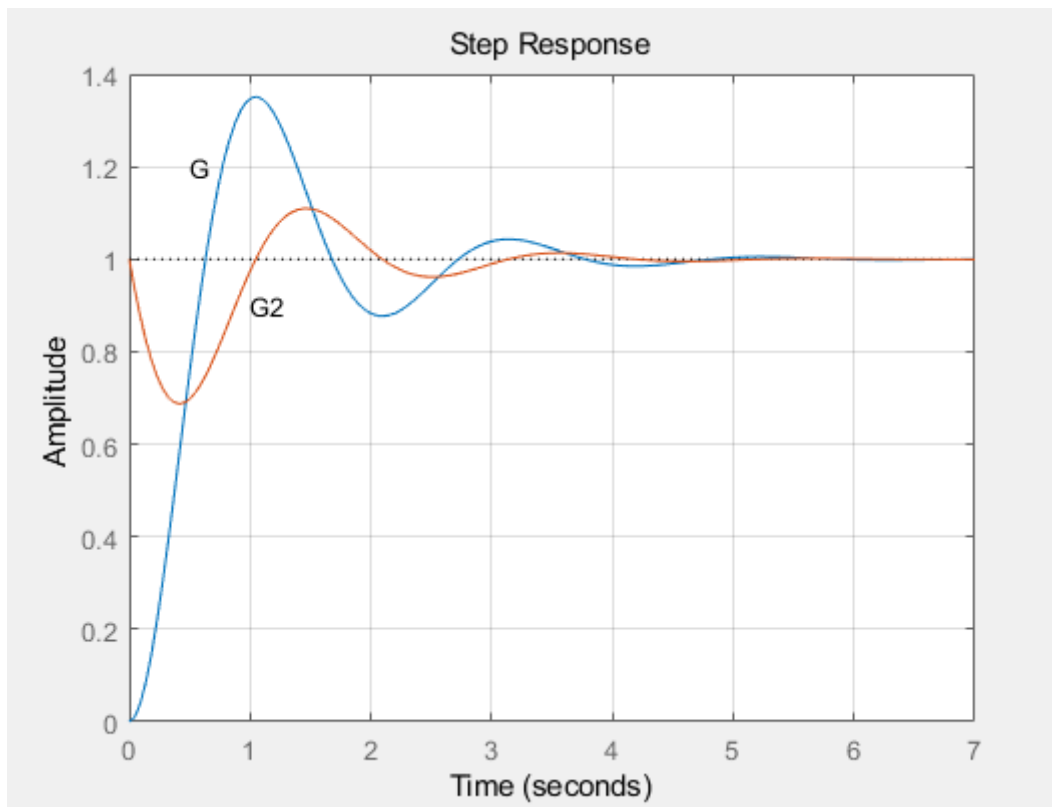


图 3 作业 3-1(2)输出结果

分析：

分子与分母多项式阶数相等时，超调量减小，调节时间增大，无稳态误差。

(3) 分子多项式零次项系数为 0 $G_3(s) = \frac{s^2 + 0.5s}{s^2 + 2s + 10}$

MATLAB 代码：

```
>>G=tf(10,[1,2,10]);
G1=tf([2,10],[1,2,10]);
G2=tf([1,0.5,10],[1,2,10]);
G3=tf([1,0.5,0],[1,2,10]);
G4=tf(1,[1,2,10]);
step(G)
hold on
step(G3)
hold on
text(0.5,1.2,'G')
text(0.6,0,'G3')
grid on
```

输出结果如图 4 所示：

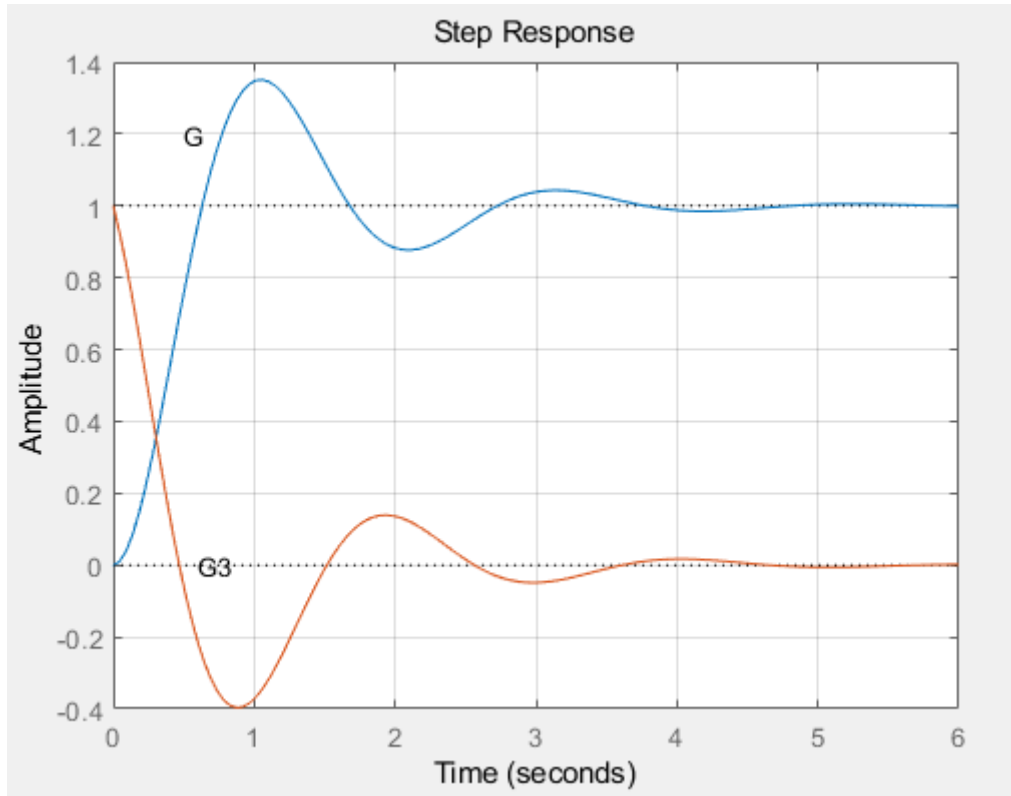


图 4 作业 3-1(3)输出结果

分析:

分子多项式零次项系数为 0 时，稳态误差为 1。

(4) 原系统的微分相应，微分系数为 1/10 $G_4(s) = \frac{s}{s^2 + 2s + 10}$

MATLAB 代码:

```
>>G=tf(10,[1,2,10]);
    G1=tf([2,10],[1,2,10]);
    G2=tf([1,0.5,10],[1,2,10]);
    G3=tf([1,0.5,0],[1,2,10]);
    G4=tf(1,[1,2,10]);
    step(G)
    hold on
    step(G4)
    hold on
    text(0.5,1.2,'G')
    text(0.6,0.15,'G4')
    grid on
```

输出结果如图 5 所示:

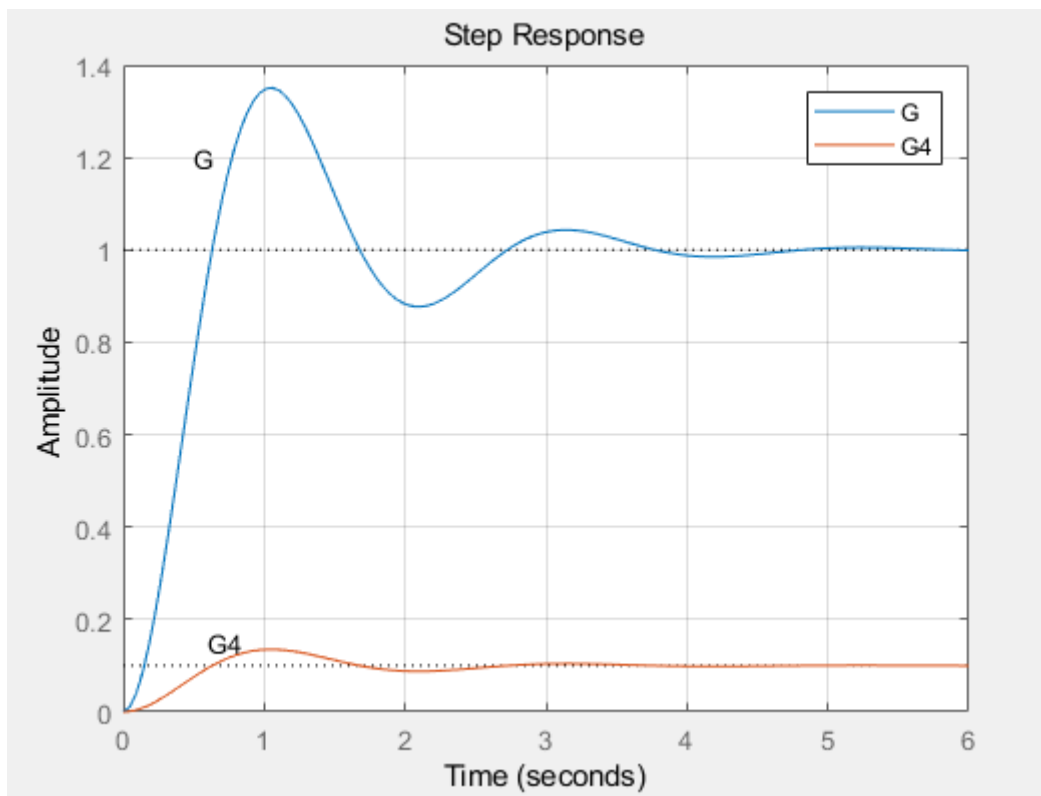


图 5 作业 3-1(4)输出结果

分析：

微分系数为 1/10 时，稳态误差为 1，调节时间也变长。

故：分析系统零极点对系统阶跃响应的影响。

如果闭环零点距虚轴较近，将使调节时间增大。闭环零点减小后，相当于减小系统阻尼，使系统响应速度加快，峰值时间减小，调节时间缩短，超调量增大，并且这种作用将随闭环零点接近虚轴加剧。

如果闭环极点远离虚轴，则相应的瞬态分量就衰减得快，系统的调节时间也就较短。

如果闭环极点接近虚轴，相当于在增大系统阻尼，系统响应速度变缓，超调量减小，调节时间延长，并且这种作用将随闭环极点接近虚轴而加剧。

【作业 3-2】已知控制系统的闭环传递函数

$$\phi_1(s) = \frac{1.05(0.4762s + 1)}{(0.125s + 1)(0.5s + 1)(s^2 + s + 1)}$$

(1) 用 MATLAB 软件分析该系统的单位阶跃响应及其动态性能指标

MATLAB 代码：

```
>>num=1.05*[0.4762 1];
den=conv([0.125 1],conv([0.5 1],[1,1,1]));
g=tf(num,den);
step(g)
hold on
```

输出结果如图 6 所示：

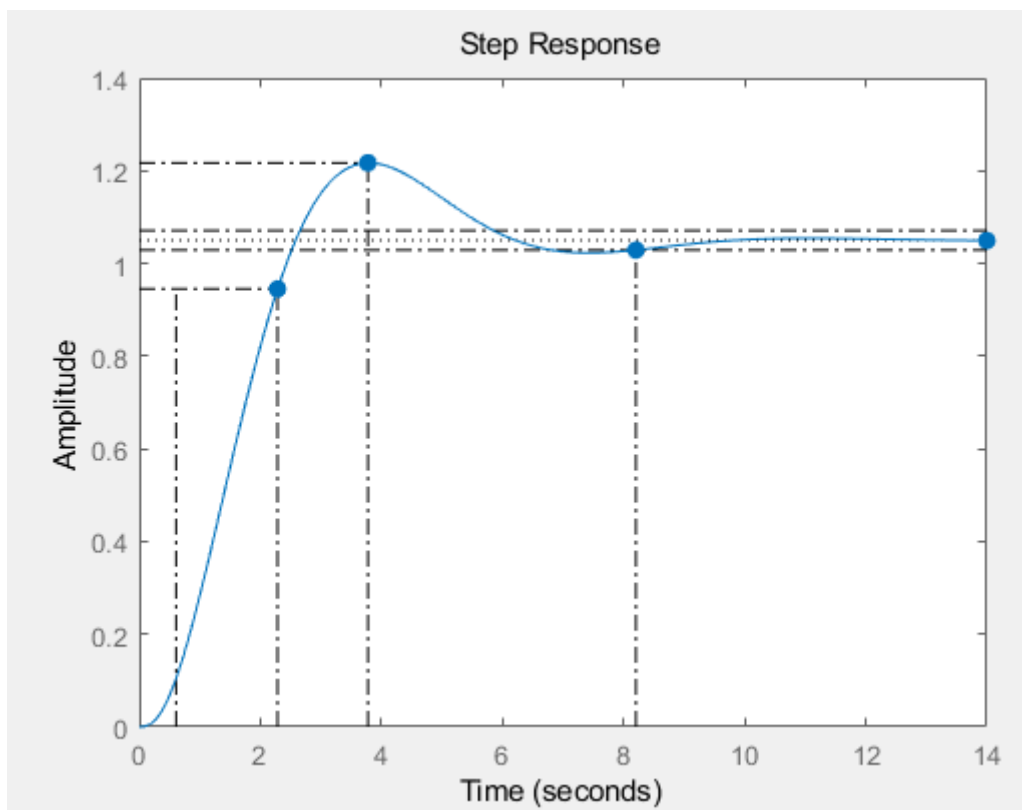


图 6 作业 3-2(1)输出结果

表 1 作业 3-2(1)系统动态性能指标

t_r	t_s	t_p	$\sigma\%$
1.68s	8.2s	3.78s	15.9%

(2) 将该系统的阶跃响应与二阶系统 $\phi_2(s) = \frac{1.05}{s^2 + s + 1}$ 的单位阶跃响应比较分析

闭环系统主导极点的特点和作用

MATLAB 代码:

```
>>num=1.05*[0.4762 1];
den=conv([0.125 1],conv([0.5 1],[1,1,1]));
g=tf(num,den);
g2=tf(1.05,[1,1,1]);
step(g)
hold on
step(g2)
text(2.6,0.9,'Φ1')
text(0.6,0.6,'Φ2')
hold on
```

输出结果如图 7 所示:

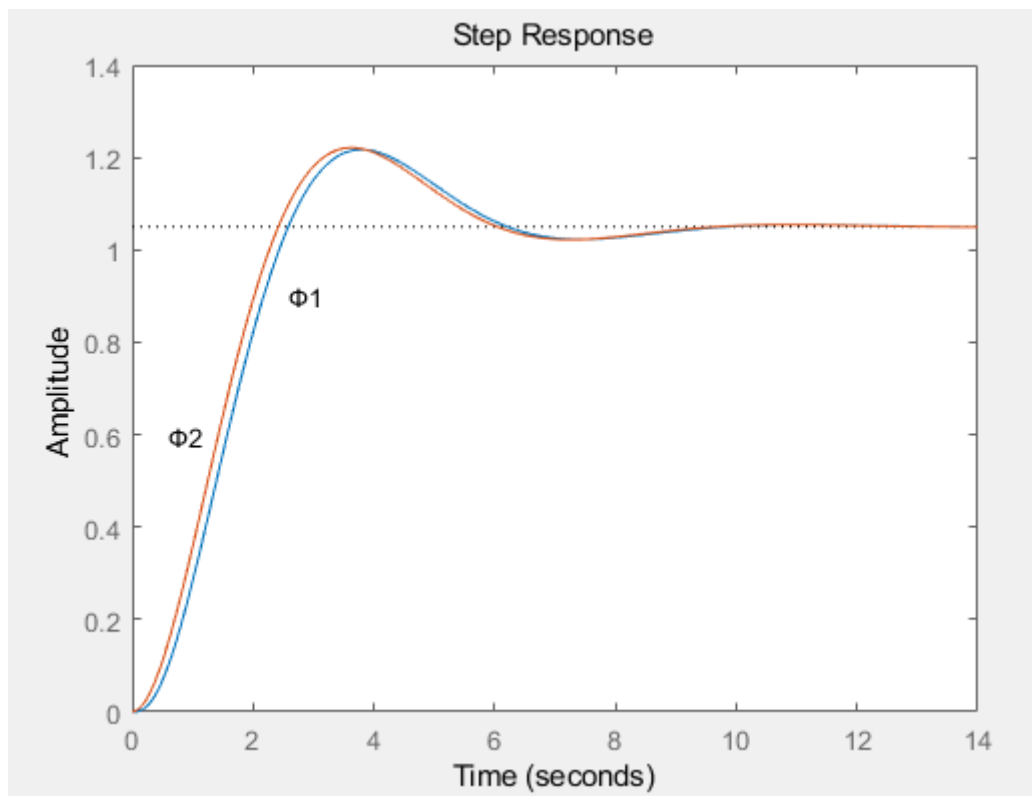


图 7 作业 3-2(2)输出结果

分析：闭环系统主导极点的特点及作用。

所谓主导极点是指在系统所有的闭环极点中，距离虚轴最近且周围无闭环零点的极点，而其余极点又远离虚轴，那么距虚轴最近的极点所对应的响应分量在系统响应中起主导作用。

如果闭环主导极点远离虚轴，则相应的瞬态分量就衰减得快，系统的调节时间也就较短。

如果将闭环主导极点接近虚轴，这相当于在增大系统阻尼，使系统响应速度变缓，超调量减小，调节时间延长，并且这种作用将随闭环极点接近虚轴而加剧。

(3) 比较系统 $\phi_3(s) = \frac{1.05}{(0.125s+1)(0.5s+1)(s^2+s+1)}$ 和 $\phi_4(s) = \frac{1.05(s+1)}{(0.125s+1)(0.5s+1)(s^2+s+1)}$ 的单位

阶跃响应及其动态性能指标，观察闭环零点对系统动态性能产生的影响有哪些？

MATLAB 代码：

```
den1=conv(conv([0.125,1],[0.5,1]),[1,1,1]);
g1=tf(1.05,den1);
g2=tf(1.05*[1,1],den1);
step(g1)
hold on
step(g2)
hold on
text(1.2,1.05,'Φ4')
text(3,0.9,'Φ3')
```

输出结果如图 8 所示：

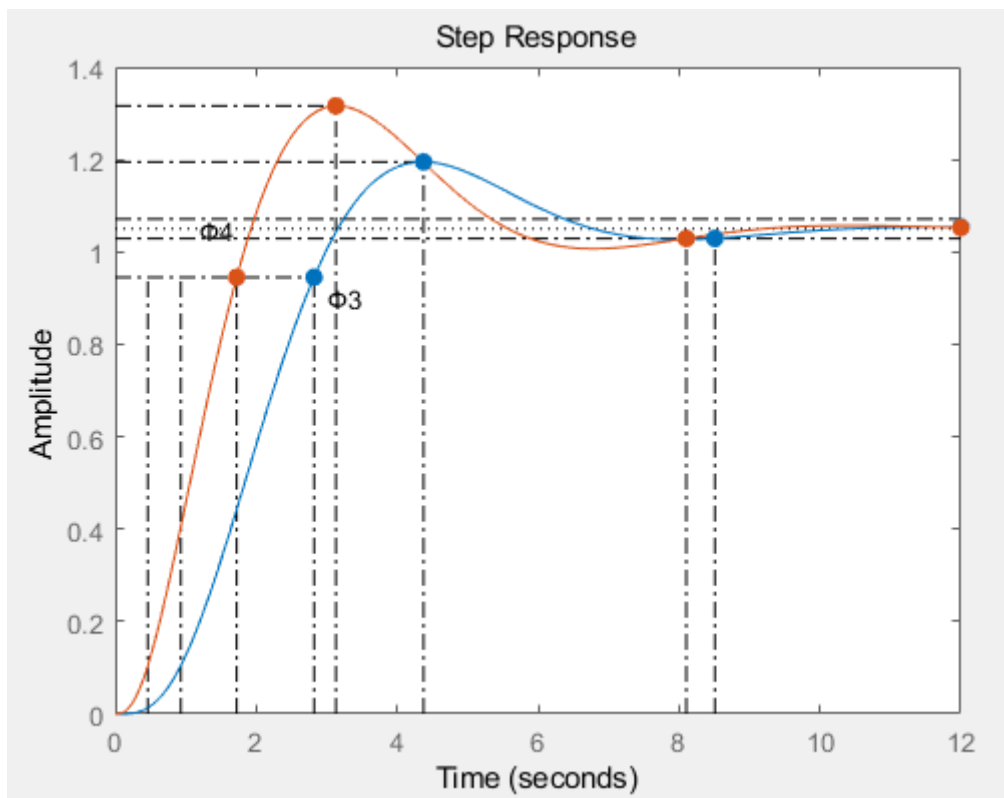


图 8 作业 3-2(3)输出结果

分析：闭环零点对系统动态性能产生的影响。

增加了闭环零点的系统比无闭环零点的系统减小峰值时间，使系统响应速度加快，超调量增大。这表明闭环零点会减小系统阻尼，且这种作用会随闭环零点接近虚轴而加剧。表 2 作业 3-2(3) Φ_3 动态性能指标

t_r	t_p	t_s	$\sigma\%$
1.89s	4.37s	8.51s	13.8%

表 3 作业 3-2(3) Φ_4 动态性能指标

t_r	t_p	t_s	$\sigma\%$
1.26s	3.13s	8.1s	25.3%

(4) 比较系统 $\phi_1(s) = \frac{1.05(0.4762s+1)}{(0.125s+1)(0.5s+1)(s^2+s+1)}$ 和 $\phi_5(s) = \frac{1.05(0.4762s+1)}{(0.5s+1)(s^2+s+1)}$ 的单位

阶跃响应及其动态性能指标，分析非主导极点对系统动态性能的影响及作用
MATLAB 代码：

```
>>num=1.05*[0.4762,1];
den2=conv([1,1,1],[0.5,1]);
den1=conv(den2,[0.125,1]);
g1=tf(num,den1);
g2=tf(num,den2);
step(g1)
hold on
step(g2)
hold on
text(2.6,0.9,'Φ1')
```

text(0.6,0.6,'Φ5')
输出结果如图 9 所示：

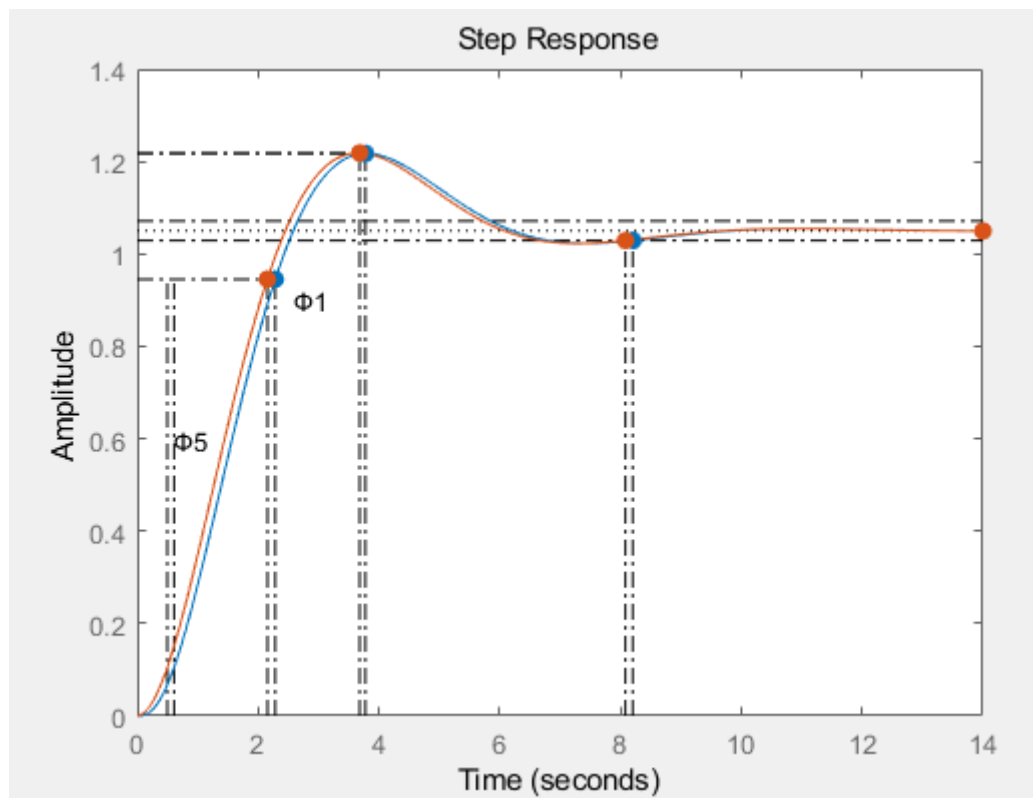


图 9 作业 3-2(4)输出结果

分析：非主导极点对系统动态性能的影响及作用。

非主导极点会增大系统峰值时间，使系统响应速度变缓，超调量增大，这表明闭环非主导极点可以增大系统阻尼，且这种作用随闭环极点接近虚轴而加剧。

表 4 作业 3-2(4) Φ_1 动态性能指标

t_r	t_p	t_s	$\sigma\%$
1.68s	3.78s	8.2s	15.9%

表 5 作业 3-2(4) Φ_5 动态性能指标

t_r	t_p	t_s	$\sigma\%$
1.66s	3.68s	8.08s	16%

(5) 比较系统 $\phi_5(s) = \frac{1.05(0.4762s+1)}{(0.5s+1)(s^2+s+1)}$ 和 $\phi_2(s) = \frac{1.05}{s^2+s+1}$ 的动态性能指标，分

析偶极子对系统动态性能的影响及作用

MATLAB 代码：

```
>>den1=conv([1,1,1],[0.5,1]);
g1=tf(1.05*[0.4762,1],den1);
g2=tf(1.05,[1,1,1]);
step(g1)
hold on
step(g2)
hold on
```

输出结果如图 10 所示：

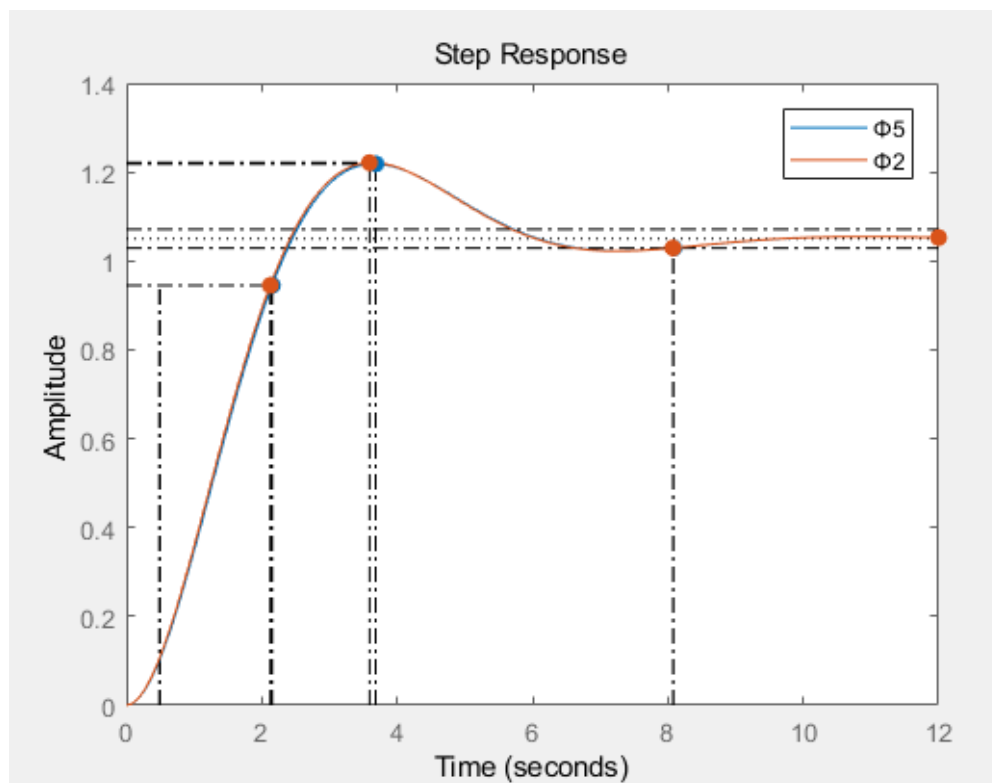


图 10 作业 3-2(5)输出结果

分析：偶极子对系统动态性能的影响及作用

由表 6、7 可知，当偶极子远离虚轴时，其对系统的影响可以忽略，但是当偶极子离虚轴很近的时候，其对系统的影响非常大。系统增加偶极子时，上升时间和峰值时间几乎没有变化，但是超调量会增大。

表 6 作业 3-2(5) Φ_2 动态性能指标

t_r	t_p	t_s	$\sigma\%$
1.64s	3.59s	8.08s	16.3%

表 7 作业 3-2(5) Φ_5 动态性能指标

t_r	t_p	t_s	$\sigma\%$
1.66s	3.68s	8.08s	16%

【作业 3-3】将范例 3-5 系统的单位阶跃响应输入信号改换成单位斜坡输入信号，重新仿真运行，分别观察 $K=0.1$ 和 $K=1$ 时，系统单位斜坡响应曲线并求单位斜坡响应稳态误差。并对实验结果曲线进行分析。

答：

当 $K=0.1$ 时，Simulink 模型如图 11 所示：

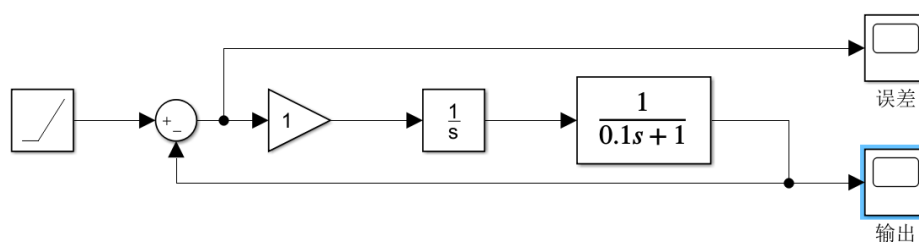


图 11 作业 3-3 $K=0.1$ 时 Simulink 模型图

误差信号曲线如图 12 所示：

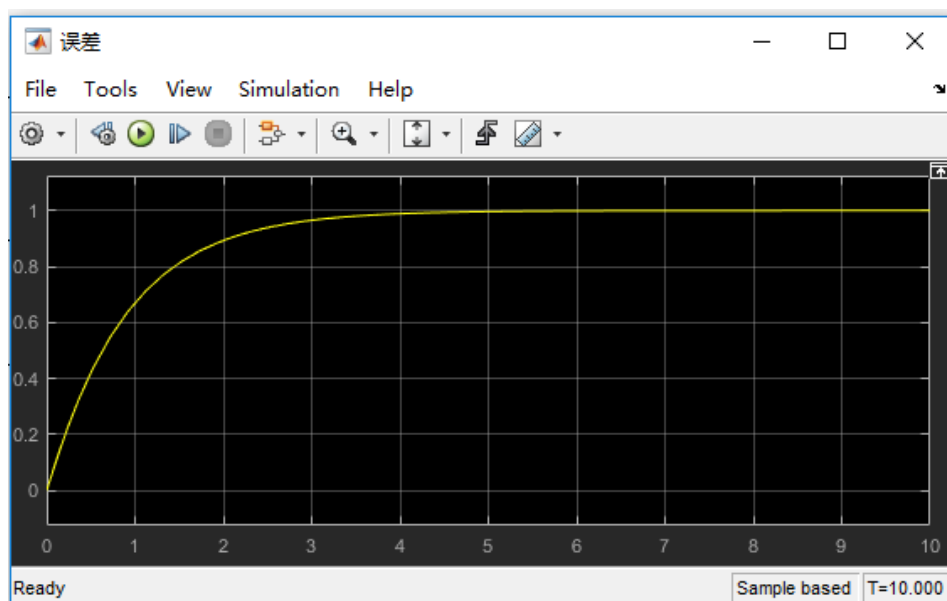


图 12 作业 3-3 K=0.1 时误差信号曲线图

输出信号曲线如图 13 所示：

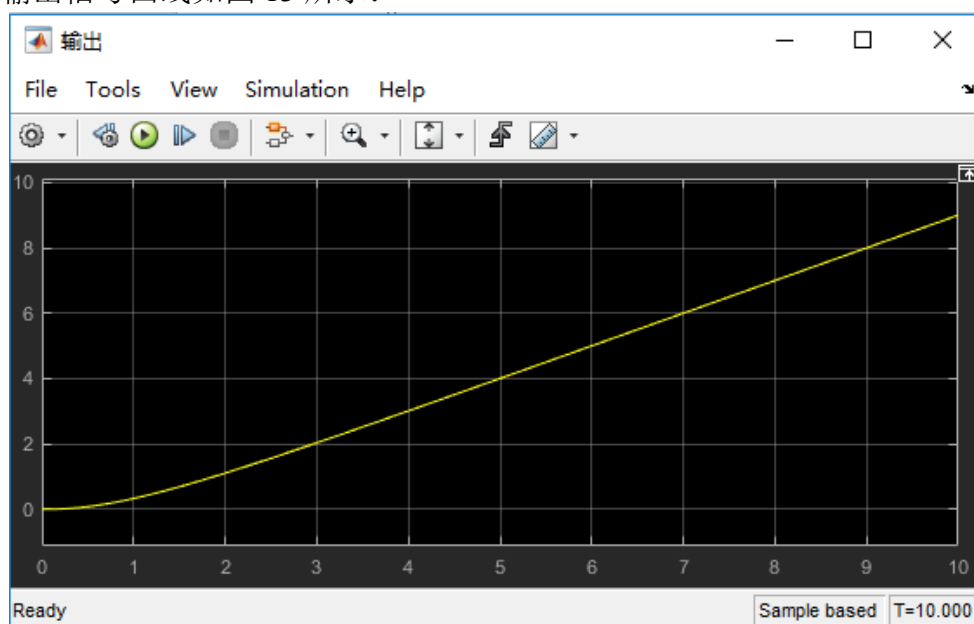


图 13 作业 3-3 K=0.1 时输出信号曲线图

当 K=1 时，Simulink 模型如图 14 所示：

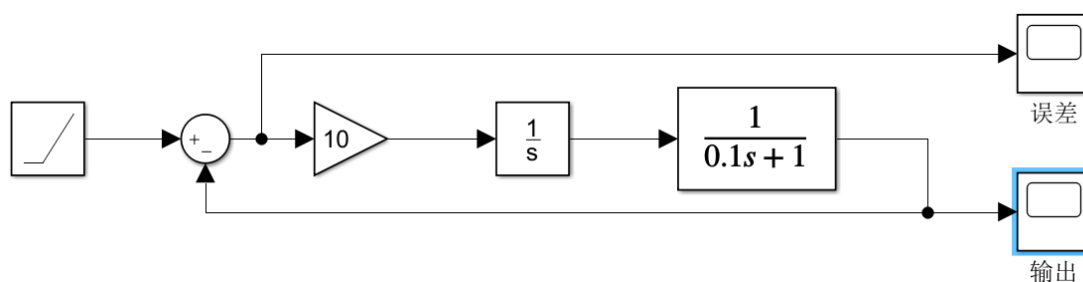


图 14 作业 3-3 K=1 时 Simulink 模型图

误差信号曲线如图 15 所示：

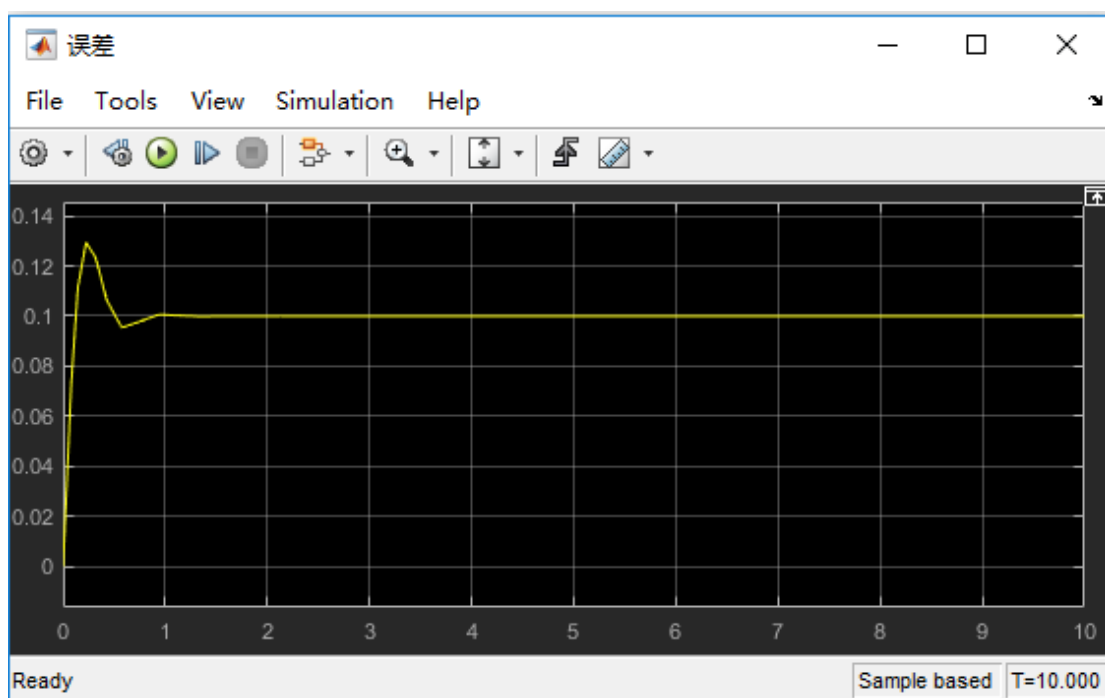


图 15 作业 3-3 K=1 时误差信号曲线图

输出信号曲线如图 16 所示：

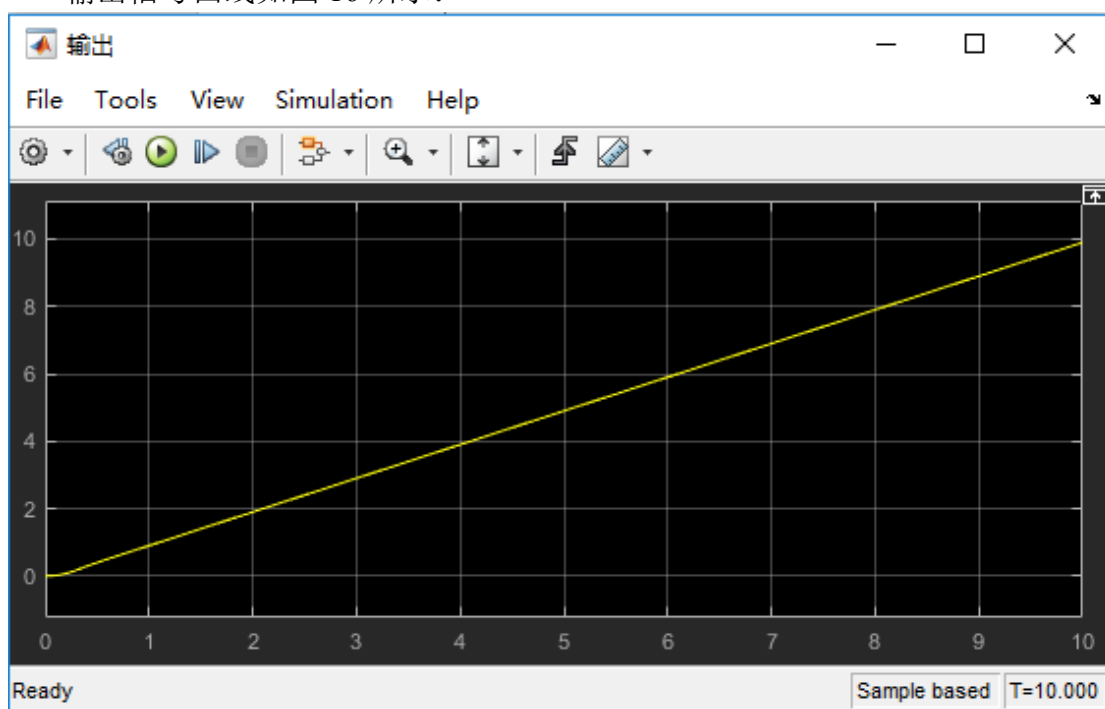


图 16 作业 3-3 K=1 时输出信号曲线图

分析：

实验曲线表明，在单位斜坡输入作用下，I 型系统能跟踪斜坡输入，并存在一个稳态跟踪误差，随着时间的增加，其值趋近于时间常数 T，而且随着系统开环增益的增加，稳态误差减小，故可以通过增大系统开环增益来减小稳态误差。

【作业 3-4】将范例 3-5 中系统的开环增益改为 1，在其前向通道中再增加一个积分环节，系统变成II型系统。在输入端给定单位斜坡信号，重新仿真运行，在示波器 scope 中观察系统响应曲线。并对曲线结果进行分析。

答：

Simulink 建立模型如图 17 所示：

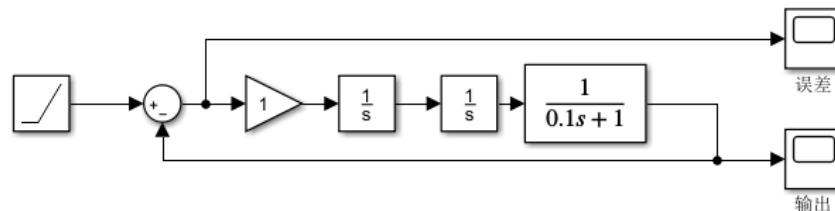


图 17 作业 3-4 Simulink 模型图

误差信号曲线如图 18 所示：

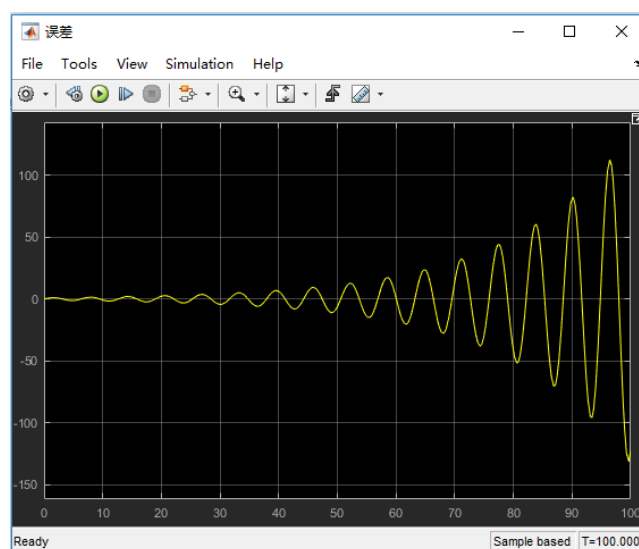


图 18 作业 3-4 误差信号曲线图

输出波形曲线如图 19 所示：

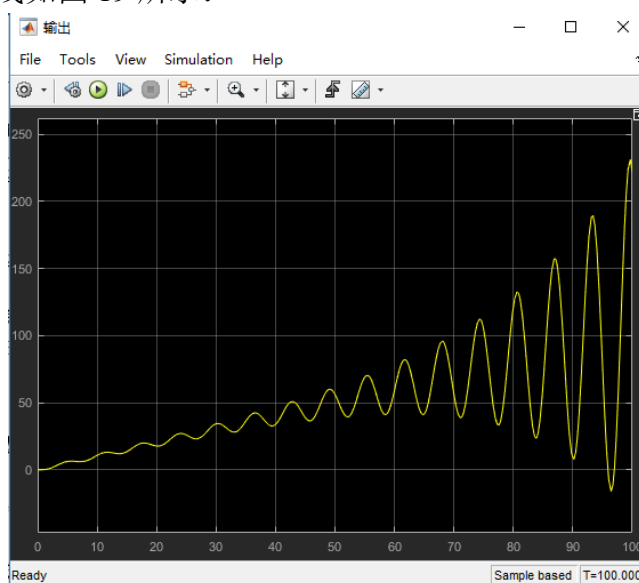


图 19 作业 3-4 输出波形曲线图

分析：

该 II 型系统在单位斜坡输入下的稳态误差为无穷大。

【作业 3-5】在 **simulink** 中建立如下系统，若输入信号 $r(t)=1(t)$ ，扰动信号 $n(t)=0.1*1(t)$ ，令 $e(t)=r(t)-c(t)$ ，求系统的总的稳态误差。

答：

Simulink 建立系统模型如图 20 所示：

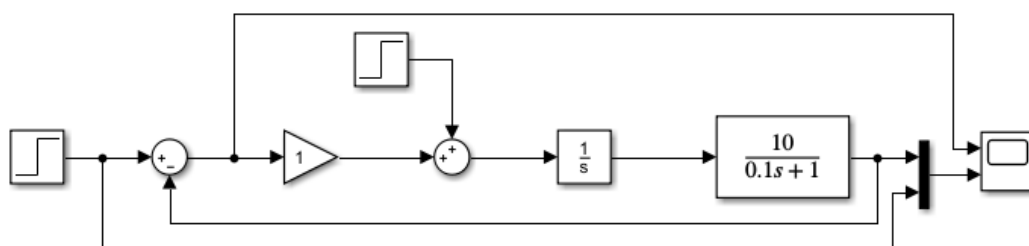


图 20 作业 3-5 Simulink 模型图

系统的输入误差输出对比波形图如图 21 所示：

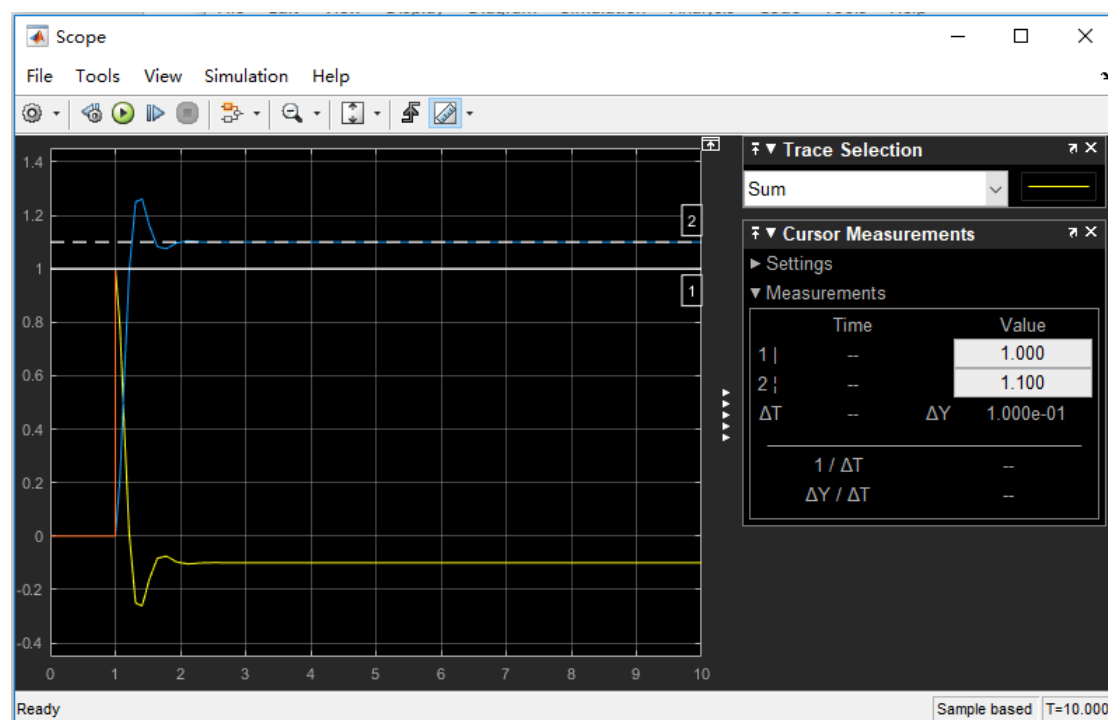


图 21 作业 3-5 输入误差输出对比波形图

由图 21 可知，系统总的稳态误差为-0.1。

第 4 章 基于 MATLAB 控制系统的根轨迹法

【作业 4-1】在例 4-2 中控制系统的根轨迹上分区段取点，构造闭环系统传递函

数，分别绘制其对应系统的阶跃响应曲线，并比较分析；及将数据填入实验数据记录表中。

阻尼比	闭环极点 p	开环增益 k	自然频率 ω_n	超调量 $\sigma\%$	调节时间 ts
$\xi=0$	-2.9990+0.0000i 0.0000+1.4131i 0.0000-1.4131i	6.3095	1.5		
$\xi=0.25$	-2.5263+0.0000i -0.2368+0.8645i -0.2368-0.8645i	2.0297	0.939	39.5%	16
$\xi=0.7$	-2.3010+0.0000i -0.3495+0.5192i -0.3495-0.5192i	0.9012	0.666	11.5%	9.82
$\xi=1$	-2.1547 -0.4242 -0.4211	0.3849	0.424	0%	14.3
		0.2			

$\xi=0$ 时，根轨迹图如图 22 所示：

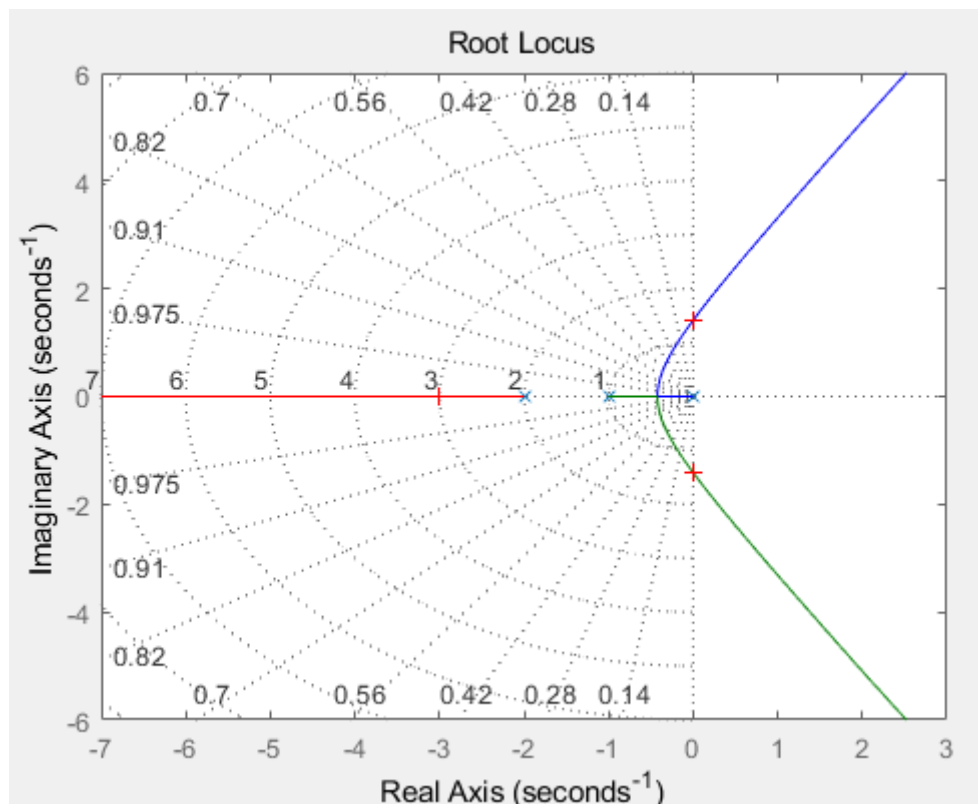


图 22 作业 4-1 $\xi=0$ 时根轨迹图

对应的阶跃响应曲线如图 23 所示：

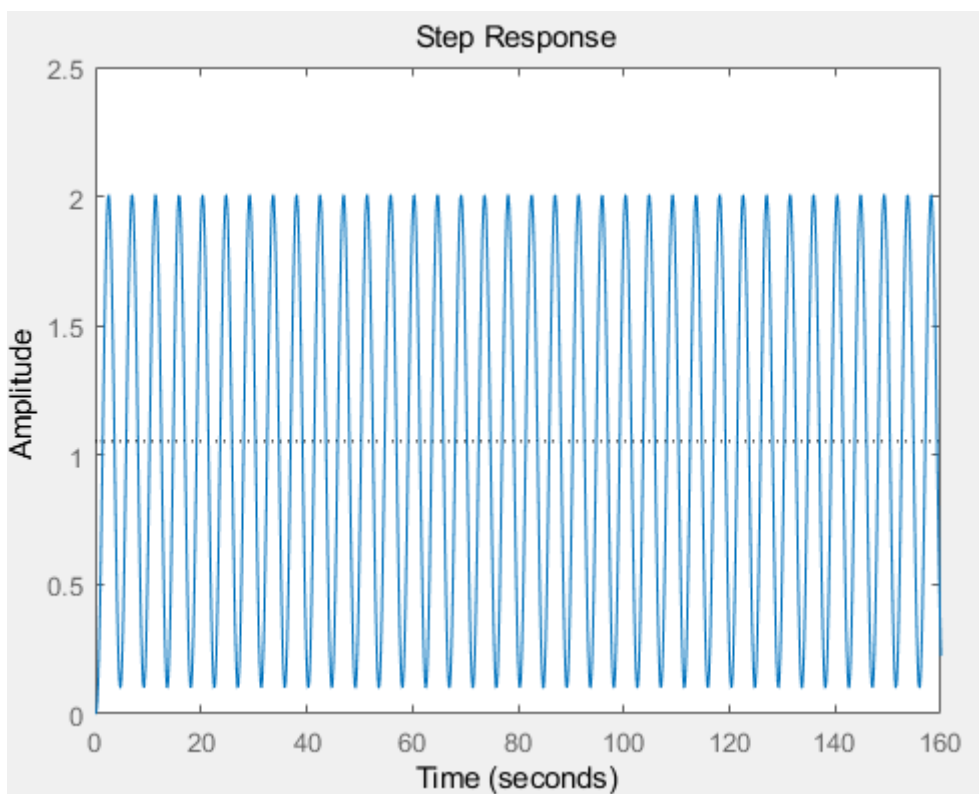


图 23 作业 4-1 $\xi=0$ 时阶跃响应曲线

$\xi=0.25$ 时，根轨迹图如图 24 所示：

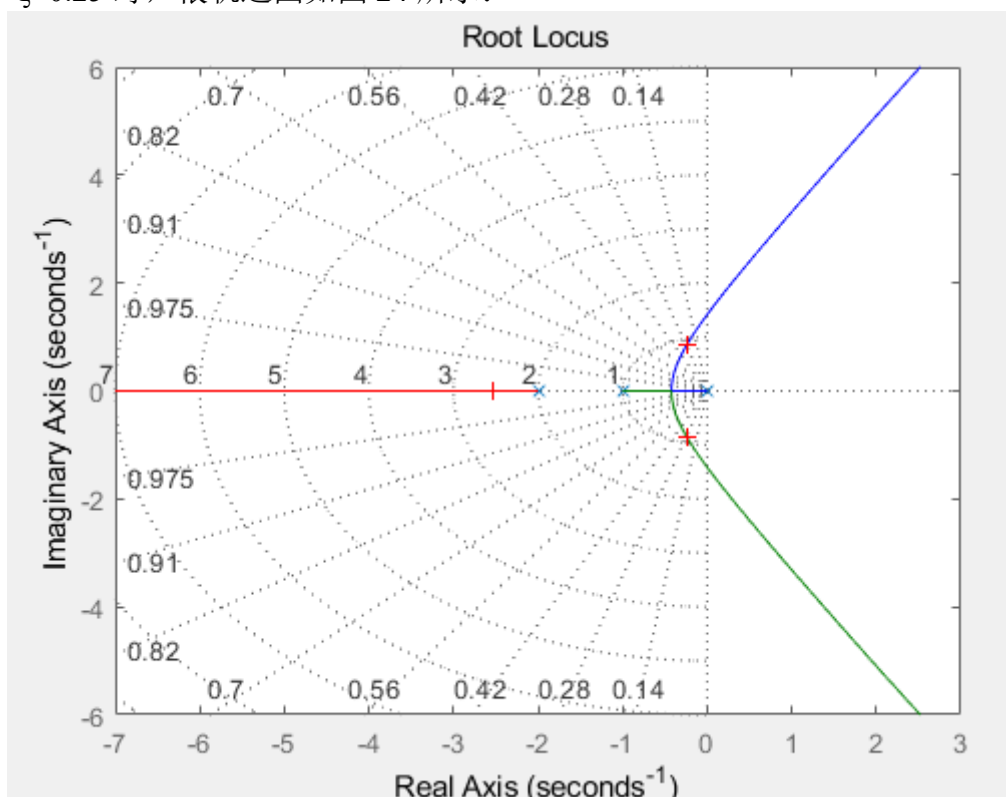


图 24 作业 4-1 $\xi=0.25$ 时根轨迹图

对应系统的阶跃响应曲线如图 25 所示：

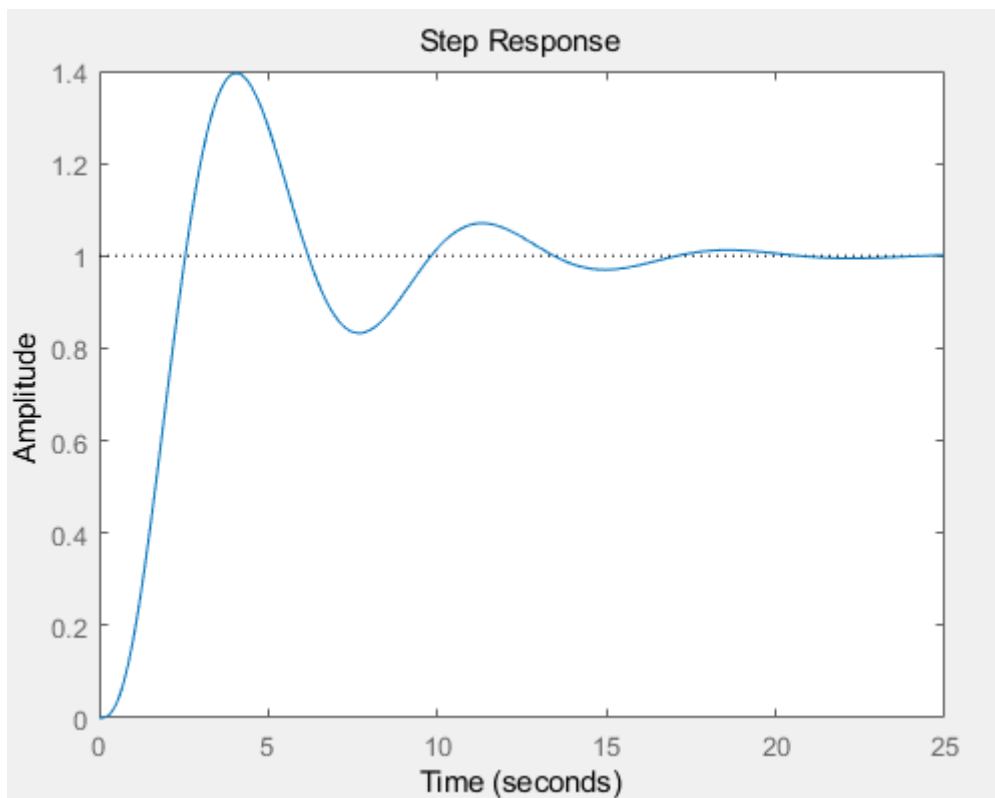


图 25 作业 4-1 $\xi=0.25$ 时阶跃响应曲线

$\xi=0.7$ 时，根轨迹图如图 26 所示：

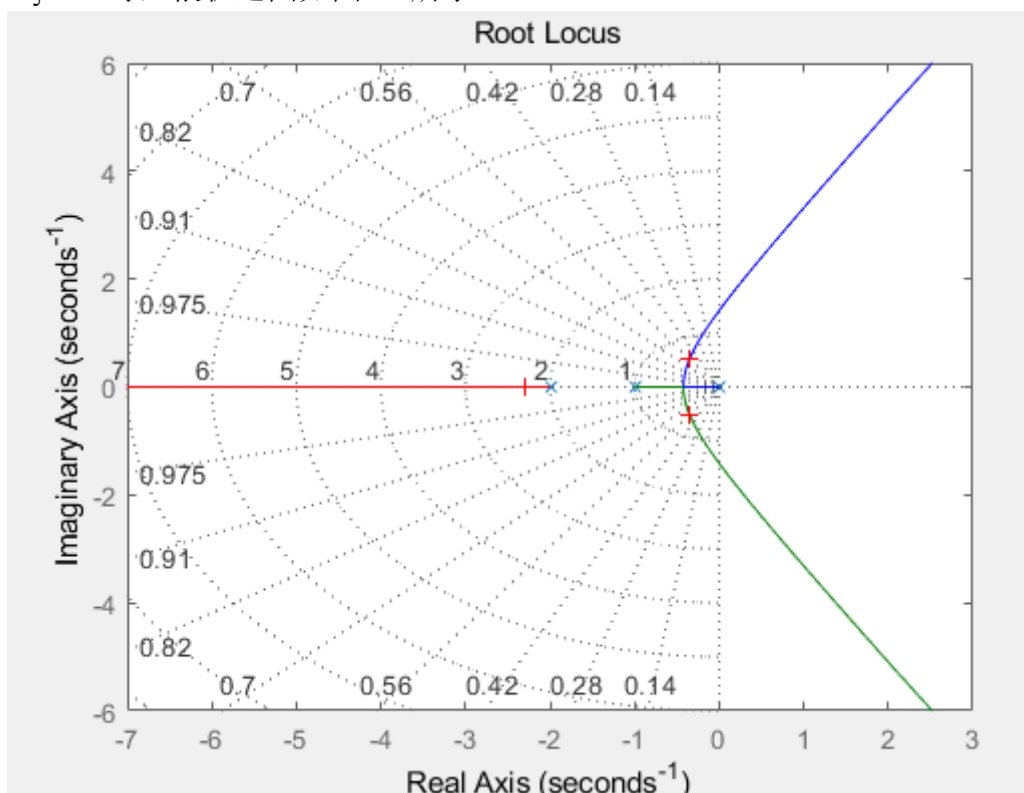


图 26 作业 4-1 $\xi=0.7$ 时根轨迹图

对应系统的阶跃响应曲线如图 27 所示：

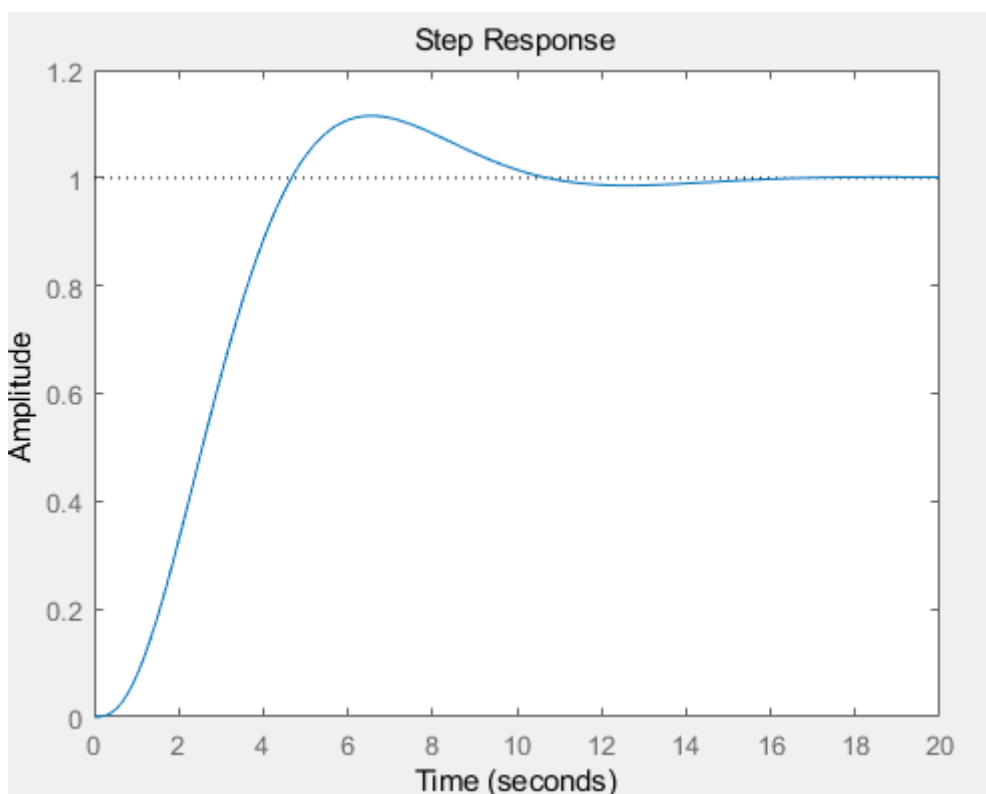


图 27 作业 4-1 $\xi=0.7$ 时阶跃响应曲线

$\xi=1$ 时，根轨迹图如图 28 所示：

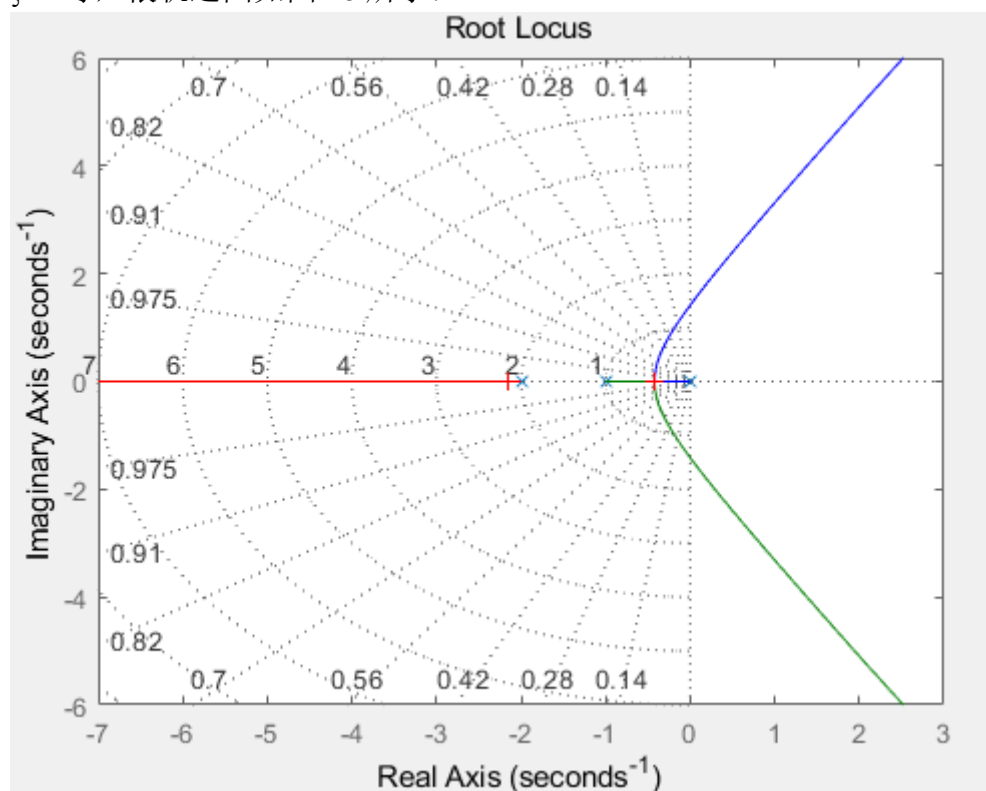


图 28 作业 4-1 $\xi=1$ 时根轨迹图

对应系统的阶跃响应曲线如图 29 所示：

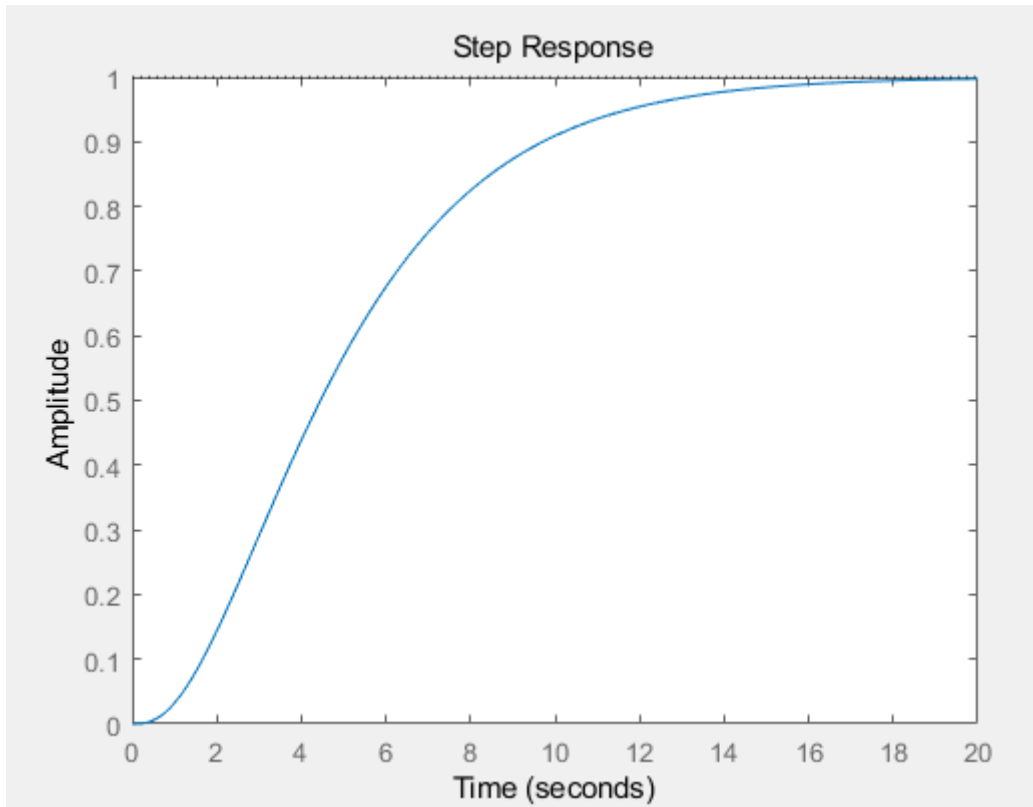


图 29 作业 4-1 $\xi=1$ 时阶跃响应曲线

$K=0.2$ 时，根轨迹图如图 30 所示：

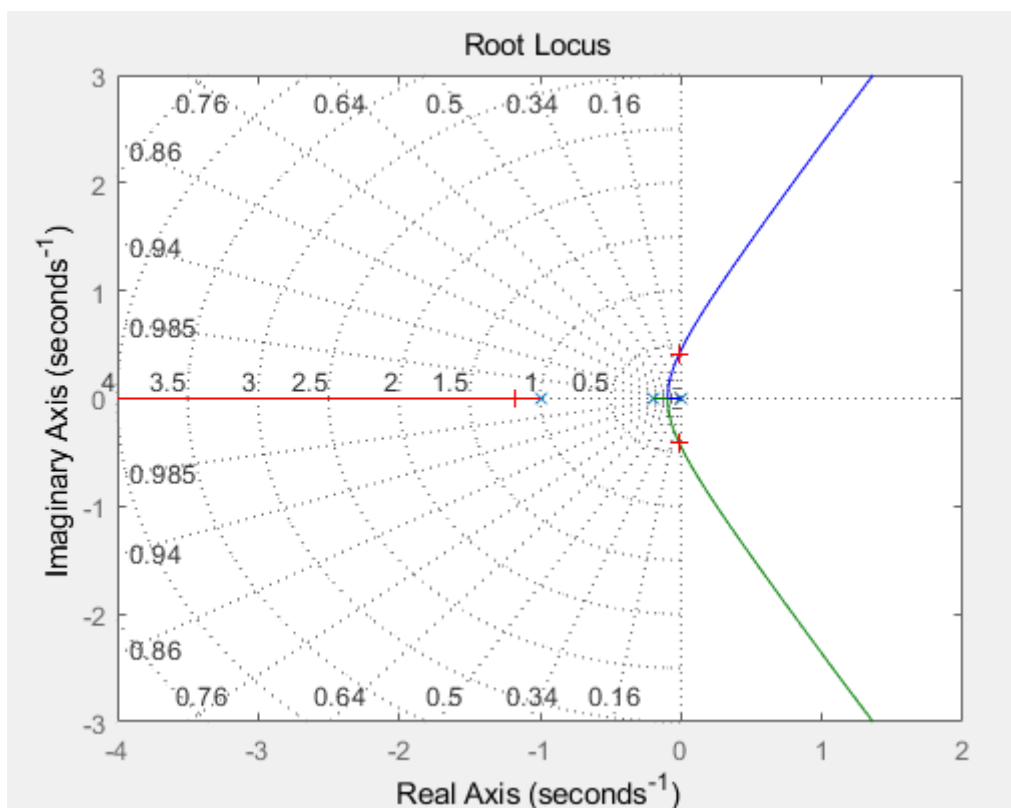


图 30 作业 4-1 $K=0.2$ 时根轨迹图

对应系统的阶跃响应曲线如图 31 所示：

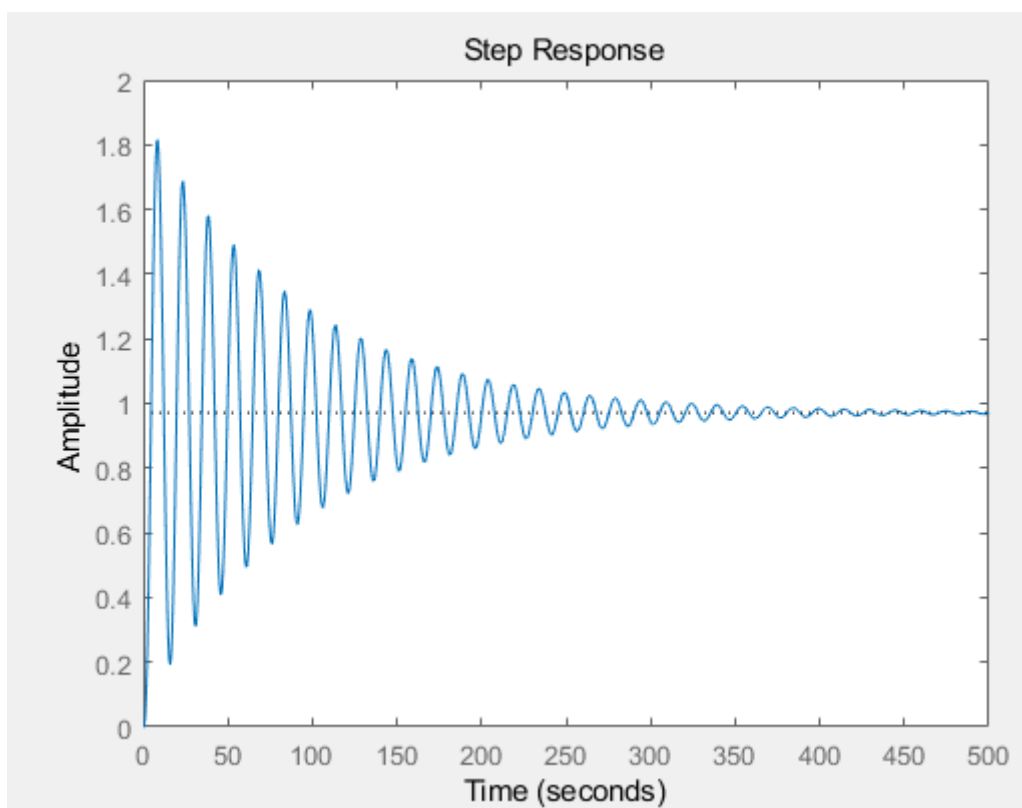


图 31 作业 4-1 $K=0.2$ 时阶跃响应曲线

【作业 4-2】已知开环系统传递函数 $G(s) = \frac{K}{s(s+1)}$ 比较增加一个开环极点 $s = -2$

后， $G_1(s) = \frac{K(s+2)}{s(s+1)}$ ，观察根轨迹及其闭环单位阶跃响应的变化。

MATLAB 代码：

```
>>k=1;
z=[];
p=[0 -1];
G=zpk(z,p,k);
rlocus(G);
hold on
k=1;
z=[-2];
p=[0 -1];
G1=zpk(z,p,k);
figure(3);
rlocus(G1);
hold off
figure(2);
sys=feedback(G,1);
```

```

step(sys);
hold on
sys1=feedback(G1,1);
step(sys1);
hold off

```

输出结果：
 $G(s)$ 根轨迹曲线如图 32 所示：

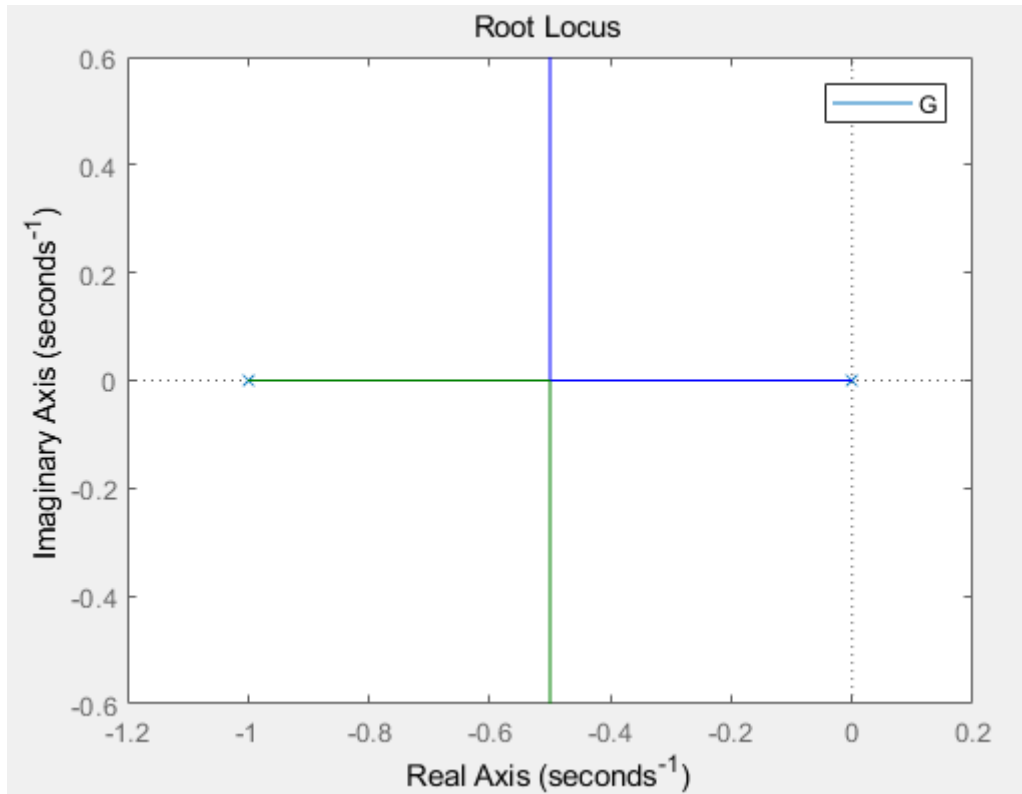


图 32 作业 4-2 $G(s)$ 根轨迹曲线

$G_1(s)$ 根轨迹曲线如图 33 所示：

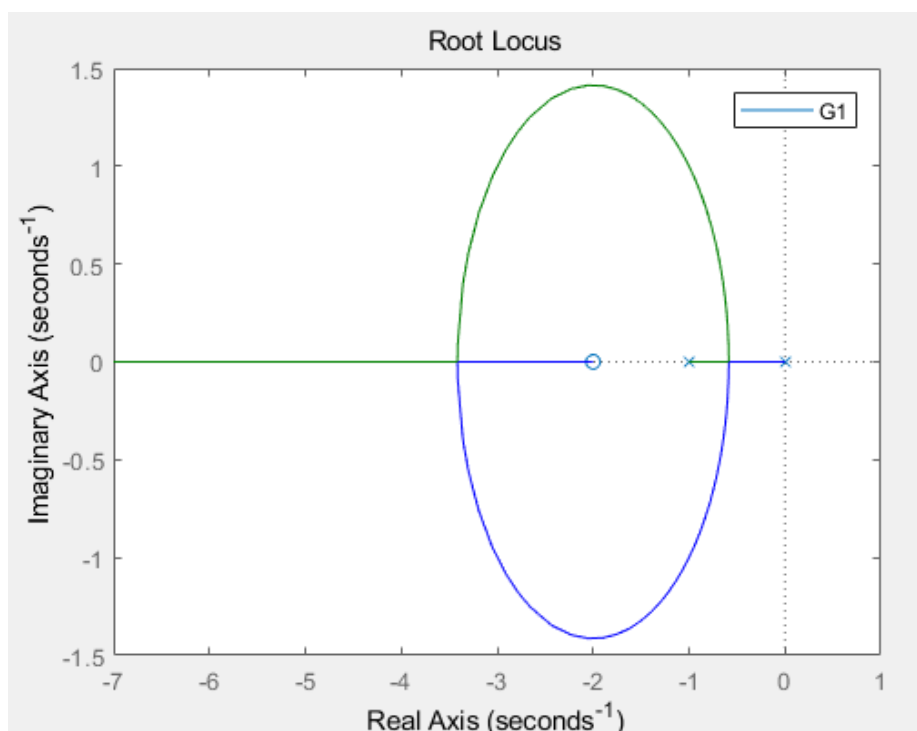


图 33 作业 4-2 $G_1(s)$ 根轨迹曲线

$G(s)$ 和 $G_1(s)$ 阶跃响应曲线如图 34 所示:

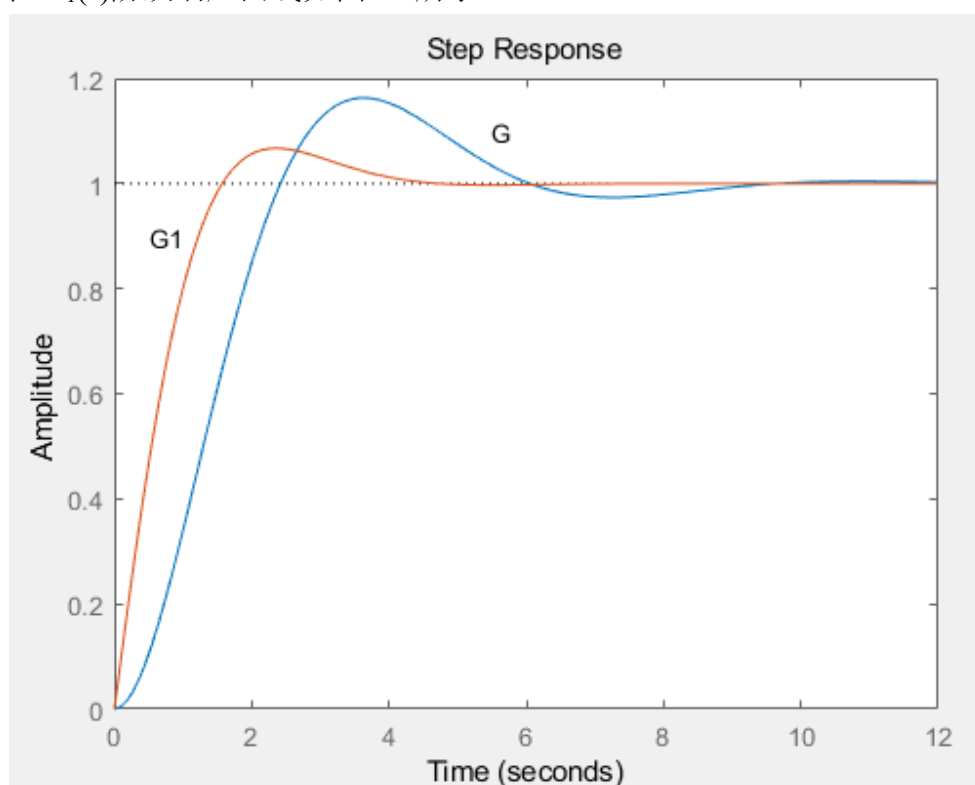


图 34 作业 4-2 $G(s)$ 和 $G_1(s)$ 根轨迹曲线

分析:

增加一个开环零点之后,系统的根轨迹发生了变化,单位阶跃响应的超调量减小,上升时间减小,调节时间减小,稳态误差不变,优化了系统性能。

【作业 4-3】已知系统开环传递函数

$$G(s) = \frac{10}{0.5s^2 + s}$$

要求用根轨迹法设计超前校正装置 G_{C1} ，要求 $K_v > 20$ ，希望该单位负反馈系统的时域性能指标 $\sigma\% > 15\%$ ， $t_s < 1.5s$ 。

MATLAB 代码：

```
>>s=tf('s');  
G=10/(0.5*s^2+s);  
Gc=feedback(G,1);  
roots(Gc.den{1});  
figure  
step(Gc)  
rltool(Gc)  
调用运行 rltool()。
```

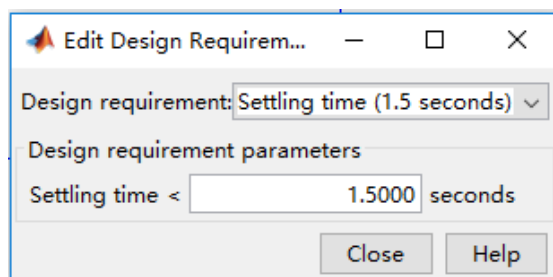


图 35 按题目要求设计参数

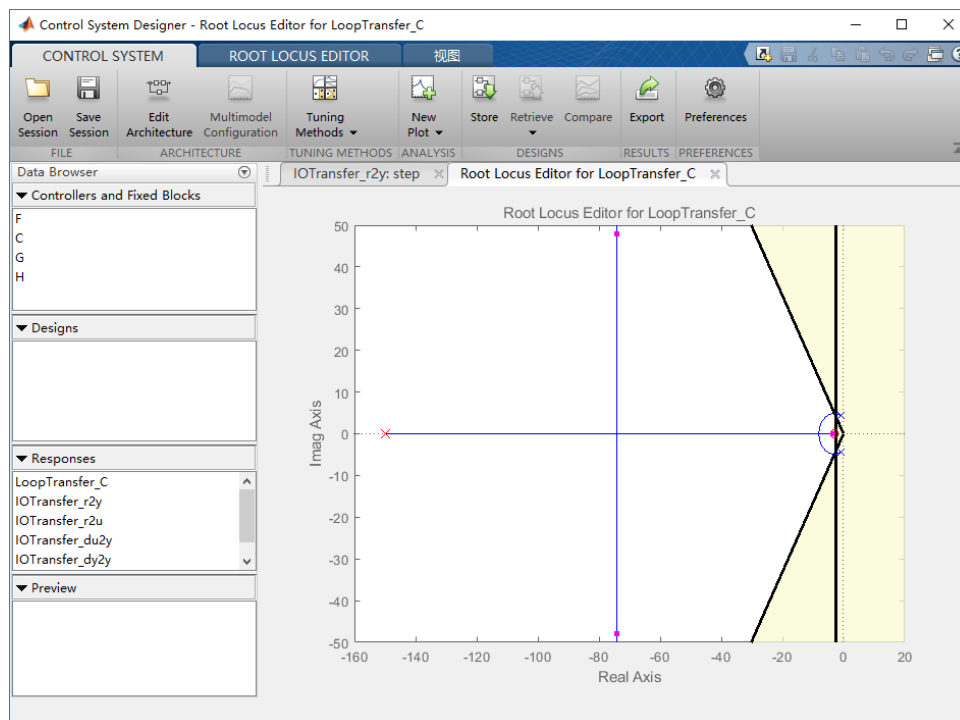


图 36 零极点位置图

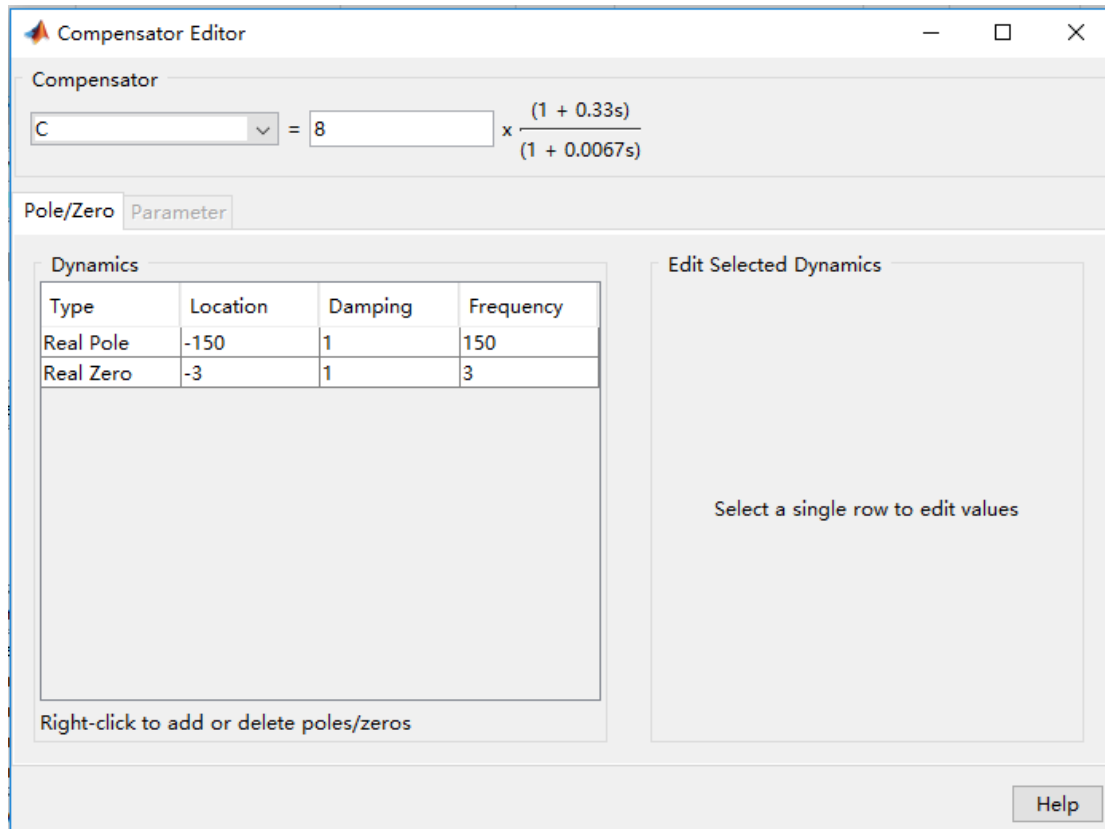


图 37 零极点参数设置

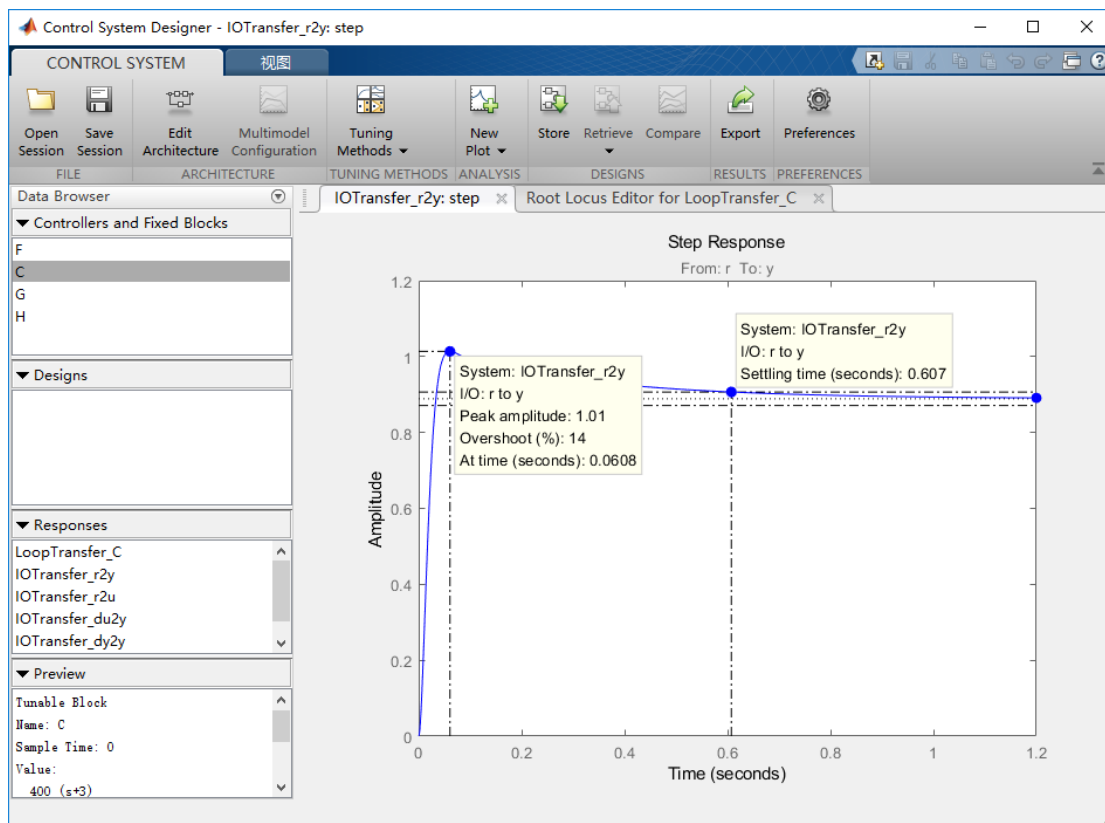


图 38 阶跃响应满足题目要求

【作业 4-5】已知单位负反馈系统开环传递函数

$$G(s) = \frac{400}{s(s^2 + 30s + 200)}$$

用根轨迹法设计超前校正补偿器，使阻尼比为 0.5，自然频率为 13.5 rad/s。

MATLAB 代码：

```
>>s=tf('s');  
G=400/(s*(s^2+30*s+200));  
Gc=feedback(G,1);  
roots(Gc.den{1});  
figure  
step(Gc)  
rltool(G)
```

调用运行 rltool()。

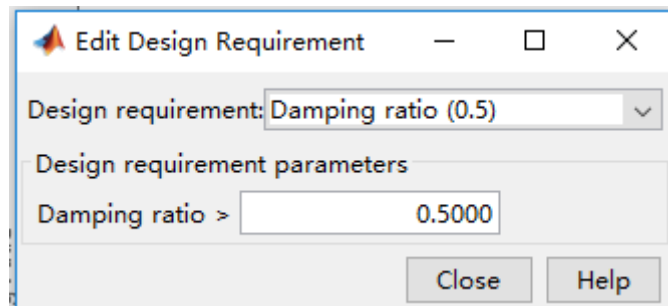


图 39 按题目要求设计参数

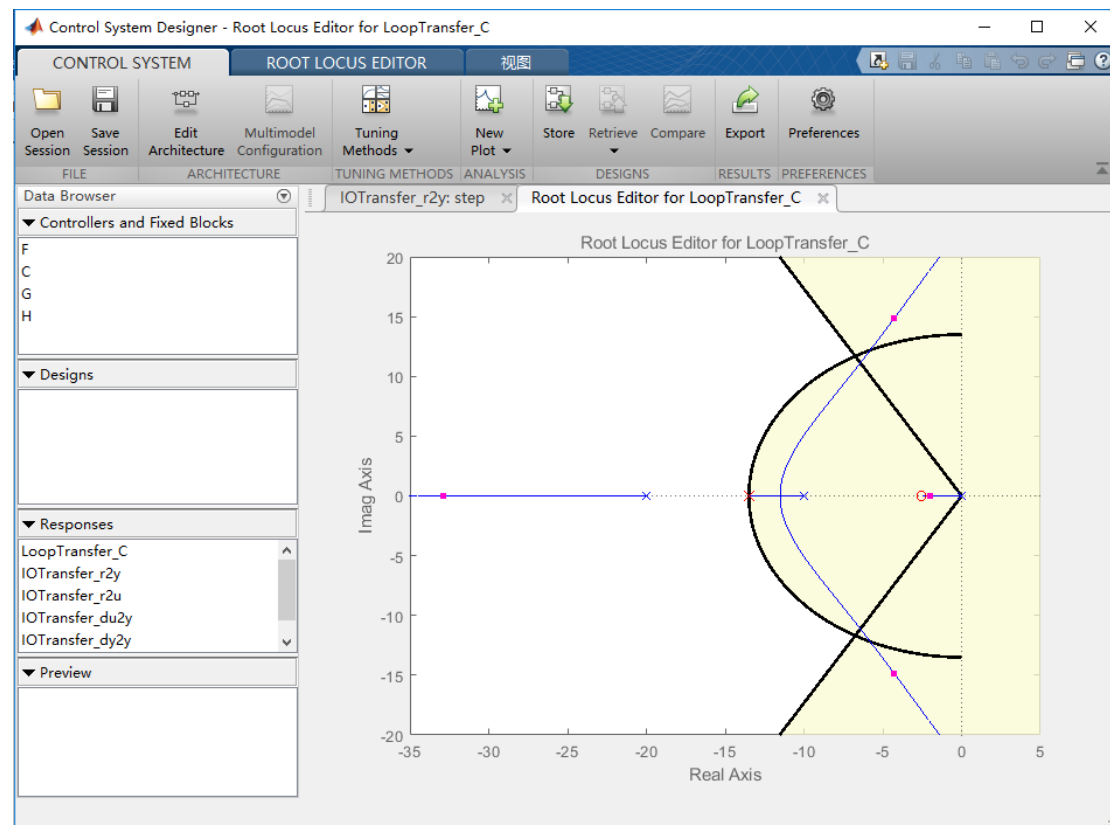


图 40 零极点位置图

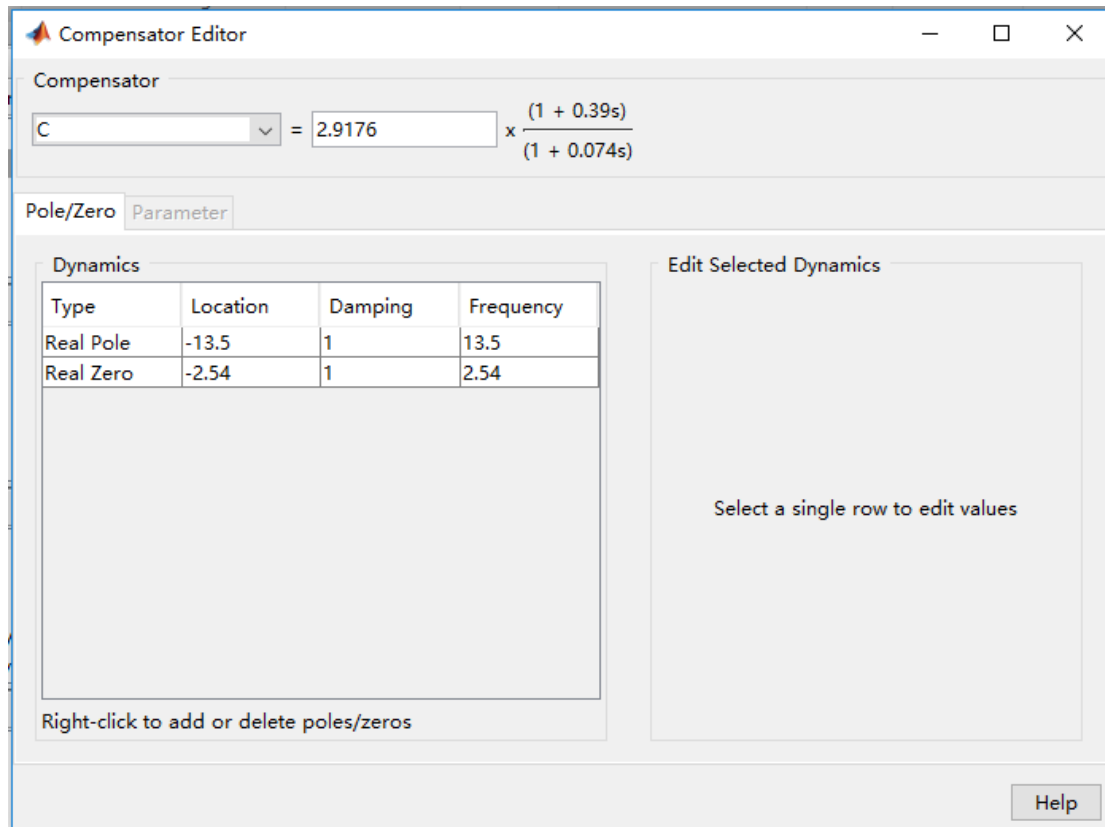


图 41 零极点参数设置

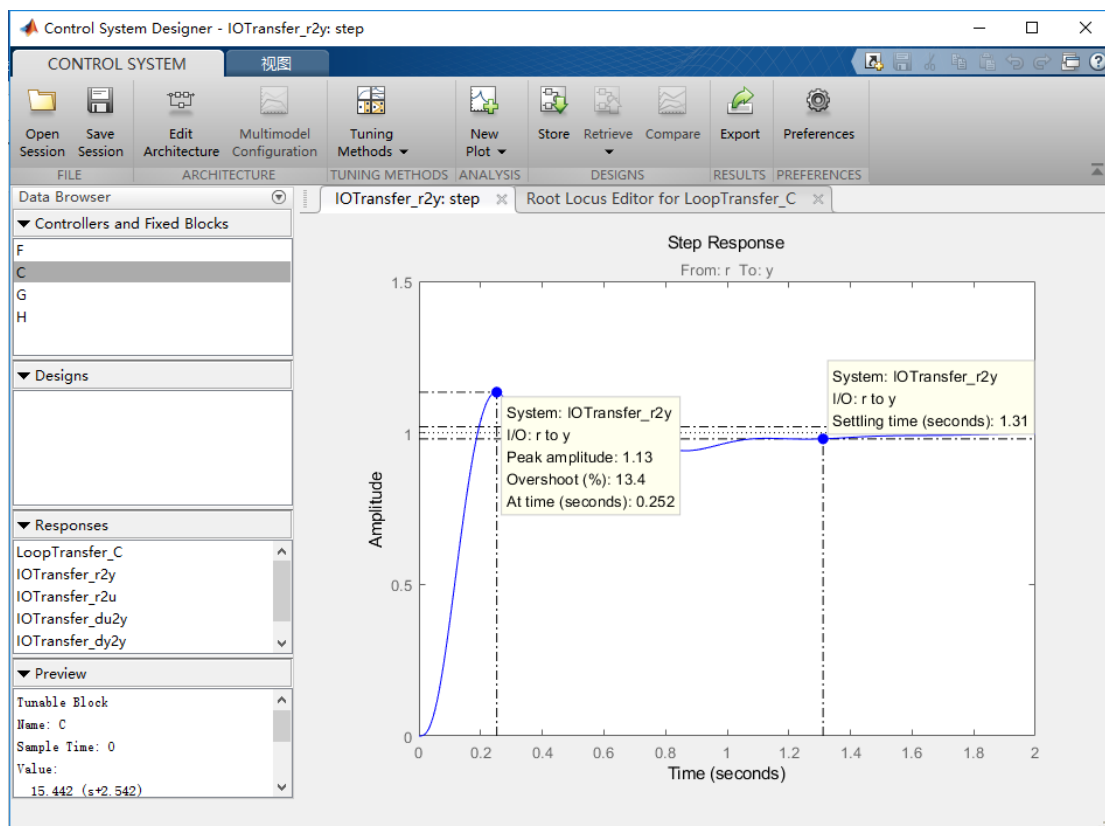


图 42 阶跃响应满足题目要求

第 5 章 线性系统的频域分析法

【作业 5-1】已知控制系统的开环传递函数为：

$$G(s)H(s) = \frac{4s+1}{s^2(s+1)(2s+1)}$$

绘制 Nyquist 图，判定系统的稳定性。

MATLAB 代码：

```
>>s=tf('s');  
G=(4*s+1)/(s^2*(s+1)*(2*s+1));  
Gc=feedback(G,1);  
figure(1)  
nyquist(G)  
roots(Gc.den{1})
```

输出结果：

```
ans =  
-1.7670 + 0.0000i  
0.2615 + 1.0184i  
0.2615 - 1.0184i  
-0.2559 + 0.0000i
```

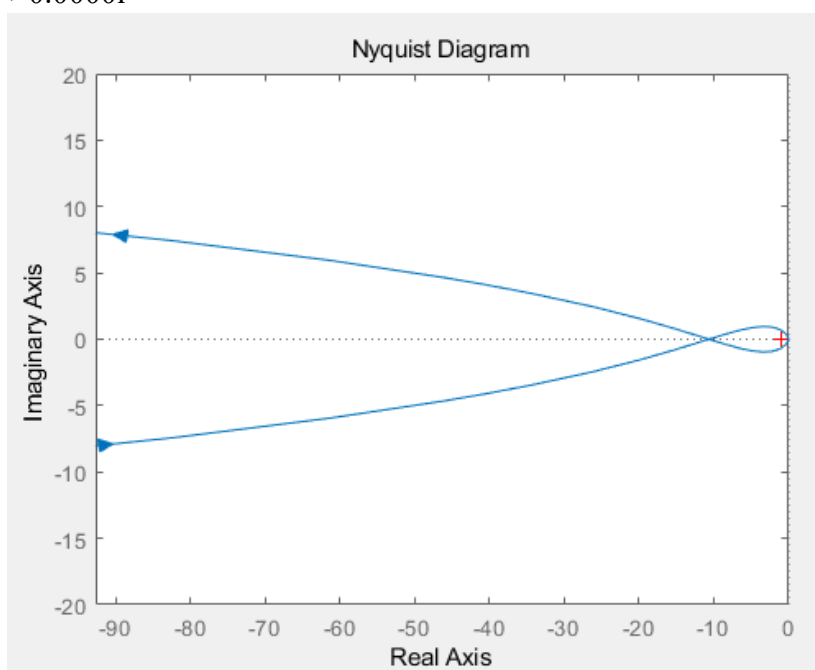


图 43 系统的奈奎斯特图

分析：

因为系统的奈奎斯特图从下至上经过 $(-1, j0)$ 点左侧 1 次，且不止于实轴，从上至下经过 $(-1, j0)$ 点左侧 1 次，且不止于实轴。因此 $n=1-1=0$ ，且系统不存在具有正实部的极点，即 $P=0$ ，故系统稳定。

【作业 5-2】某单位负反馈系统的开环传递函数为：

$$G(s) = \frac{31.6}{s(0.01s+1)(0.1s+1)}$$

求：(1)绘制开环系统的 Bode 图， (2)计算系统的相位裕度 γ 和幅值裕度 h ，并确定系统的稳定性。

MATLAB 代码：

```
>>s=tf('s');
G=31.6/(s*(0.01*s+1)*(0.1*s+1));
margin(G)
[Gm1,Pm1,wg1,wcl]=margin(G)
%Gc=feedback(G,1);
%step(Gc)
```

输出结果：

```
Gm1 =
    3.4810
Pm1 =
    22.2599
wg1 =
    31.6228
wcl =
    16.3053
```

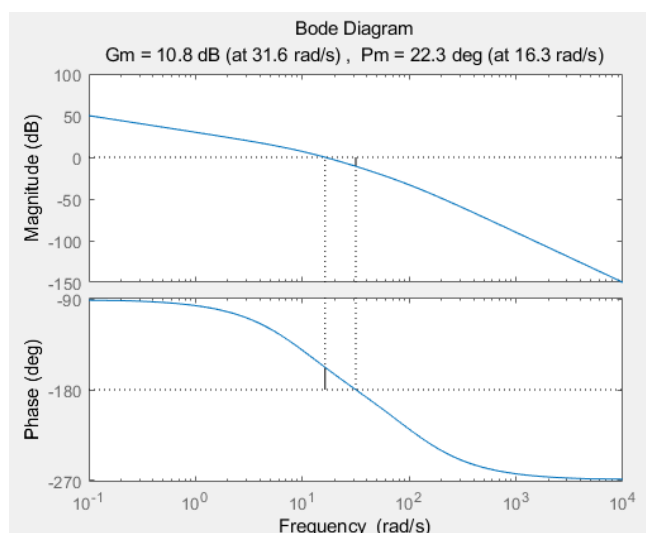


图 44 开环系统的 Bode 图

分析：

相位裕度 $\gamma=22.3^\circ$ 幅值裕度 $h=10.8\text{dB}$ 。在伯德图上 $La(\omega)>0\text{dB}$ 部分，对应 $\phi(\omega)$ 部分没有穿越直线 $\phi(\omega)=-180^\circ$ ，故 $n=0$ ，且该系统没有含正实部的极点，即 $P=0$ ，该系统稳定。

【作业 5-3】某单位负反馈系统的开环传递函数为：

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

求：(1) 绘制 $k=1$ 时开环系统的 bode 图。(2) 应用频域稳定判据确定系统的稳定性。

MATLAB 代码：

```
>>s=tf('s');  
G=(s+1)/(s^2*(0.1*s+1));  
margin(G)  
[Gm1,Pm1,wg1,wc1]=margin(G)
```

输出结果：

```
Gm1 =  
    0  
Pm1 =  
  44.4594  
wg1 =  
    0  
wc1 =  
  1.2647
```

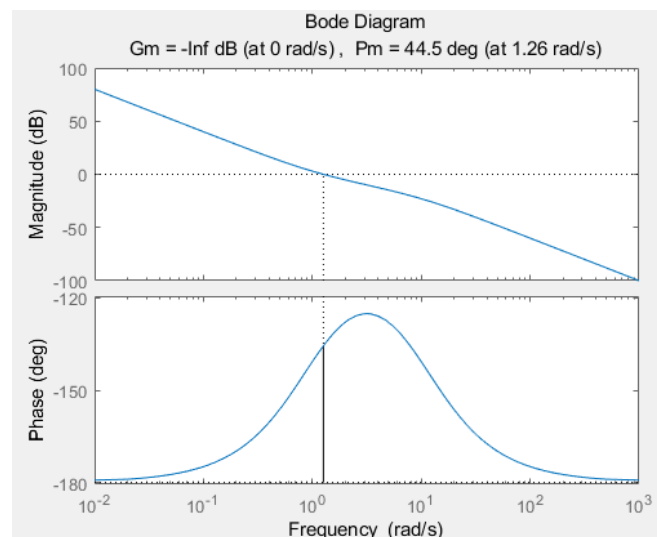


图 45 开环系统的 Bode 图

分析：

幅值裕度为 0，相角裕度大于 0。在伯德图上 $L_a(\omega) > 0\text{dB}$ 部分，对应 $\varphi(\omega)$ 部分没有穿越直线 $\varphi(\omega) = -180^\circ$ ，故 $n=0$ ，且该系统没有含正实部的极点，即 $P=0$ ，则系统稳定。

(3) 确定使系统获得最大相位裕度的增益 k 值

由几何对称性可得，系统获得最大相位增益时， $K=3.16$ （在最高值取得）

MATLAB 代码：

```
>>num=[1 1];  
den=[0.1 1 0 0];  
[n,p,v]=bode(num,den);  
vi=3.16;  
ni=spline(v,n,vi);  
k=1/ni  
num2=k;
```



```
margin(num2,den)
```

输出结果：

k =

3.1596

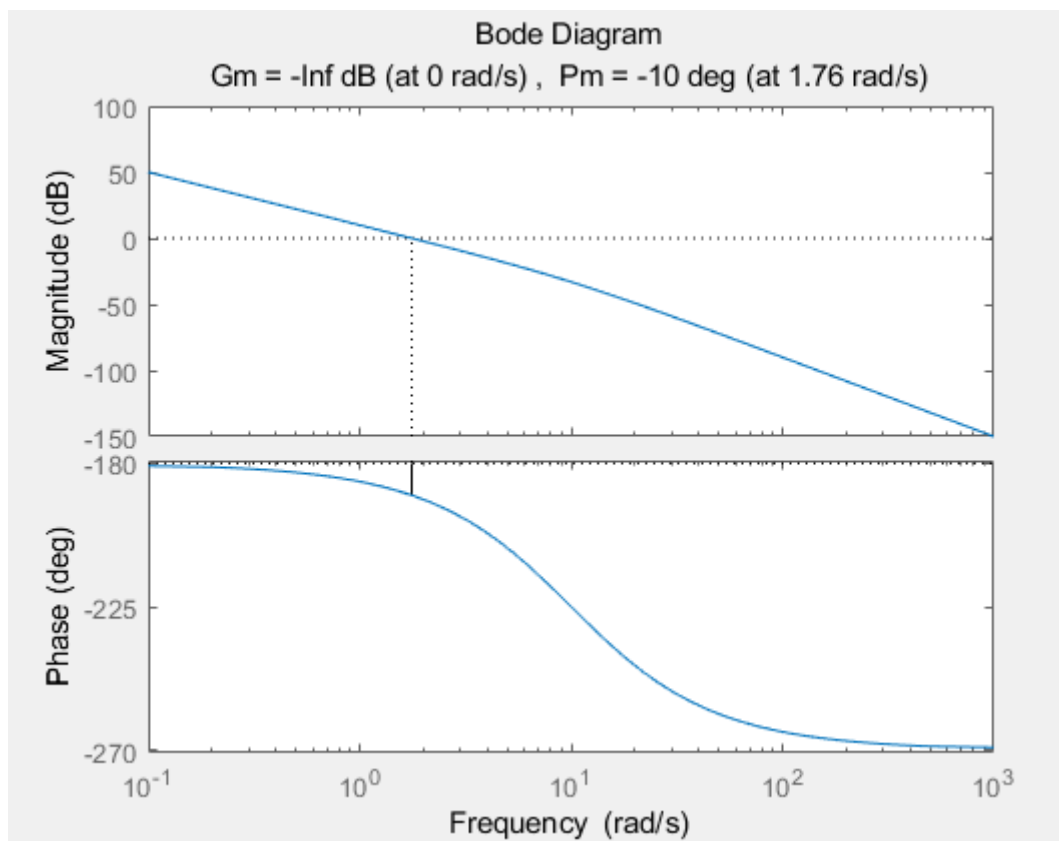


图 46 开环系统的 Bode 图

第 6 章 基于 MATLAB 控制系统频率法串联校正设计

【作业 6-1】单位负反馈系统被控制对象的传递函数为：

$$G_0(s) = \frac{K_0}{s(s+2)}$$

设计串联有源超前校正装置的传递函数 $G_c(s)$, 使系统的静态速度误差系数 $k_v=20$, 相位裕度 $\gamma > 35^\circ$, 增益裕度 $> 10\text{dB}$

MATLAB 代码：

```
>> num=20;  
den=conv([1,0],[0.5,1]);  
G0=tf(num,den);  
[Gm,Pm,Wcg,Wcp]=margin(G0);  
w=0:0.1:10000;  
[mag,phase]=bode(G0,w);  
magdb=20*log(mag);
```

```

phiml=35;
deta=8;
phim=phiml-Pm+deta;
bita=(1-sin(phim*pi/180))/(1+sin(phim*pi/180));
n=find(magdb+10*log10(1/bita)<=0.0001);
wc=n(1);
w1=(wc/10)*sqrt(bita);
w2=(wc/10)/sqrt(bita);
numc=[1/w1,1];
denc=[1/w2,1];
Gc=tf(numc,denc);
G=Gc*G0;
[Gmc,Pmc,Wcgc,Wcpc]=margin(G);
GmcdB=20*log10(Gmc);
disp('校正装置传递函数和校正后系统开环传递函数'),Gc,G,
disp('校正后系统的频域性能指标'),[GmcdB,Pmc,Wcpc],
disp('校正装置的参数 T 和 a 值:'),T=1/w1;
[T,bita],
bode(G0,G);
hold on,margin(G)

```

输出结果：

校正装置传递函数和校正后系统开环传递函数

Gc =

$$0.2244 s + 1$$

$$0.09095 s + 1$$

Continuous-time transfer function.

G =

$$4.488 s + 20$$

$$0.04547 s^3 + 0.5909 s^2 + s$$

Continuous-time transfer function.

校正后系统的频域性能指标

ans =

Inf 38.7968 8.0394

校正装置的参数 T 和 a 值:

ans =

0.2244 0.4053

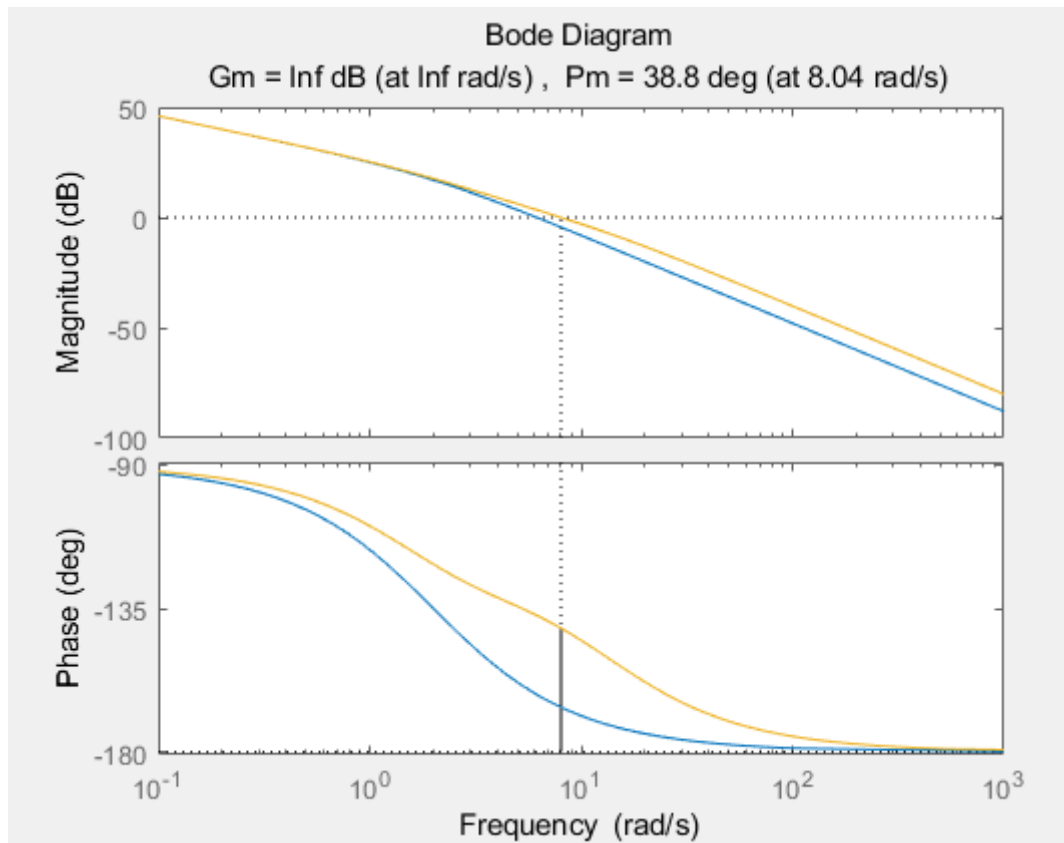
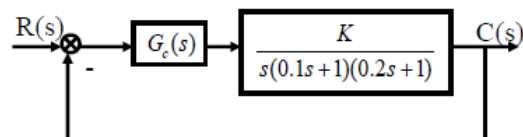


图 47 校正前后系统的 Bode 图

【作业6-2】单位负反馈系统的结构图如下图所示：



设计串联有源超前校正装置的传递函数 $G_c(s)$, 使系统的静态速度误差系数 $k_v=30$, 相位裕度 $\gamma>40^\circ$, 增益裕度 $h_g>10\text{dB}$, 截止频率 $\omega_c>2.3\text{rad/s}$

MATLAB 代码

```
>>num=30 ;
den= conv ([1, 0], [0.1, 1]) ;
den= conv (den, [0.2, 1]) ;
GO= tf (num, den) ;
margin (GO)
gamma0= 40 ; delta= 6 ;
ganna= gamma0 + delta ;
w= 0.01 : 0.01 : 1000;
[mag, phase]= bode (GO, w) ;
n= find (180 + phase - ganna<=0.1);
wgamma= n(1)/100
[mag, phase] = bode (GO , wgamma) ;
Lhc = -20*log10(mag) ;
```

```

beta= 10^(Lhc/20);
w2 = wgamma/ 10;
w1 = beta*w2;
numc = [1/w2, 1];
denc= [1/w1, 1];
Gc= tf (numc, denc);
Gc
G=GO*Gc;
bode (GO, G) , hold on, margin (G) , beta
G
输出结果:
wgamma =
    2.7300
Gc =
    3.663 s + 1
    -----
    34.08 s + 1
Continuous-time transfer function.
beta =
    0.1075
G =
    109.9 s + 30
    -----
    0.6816 s^4 + 10.24 s^3 + 34.38 s^2 + s
Continuous-time transfer function.

```

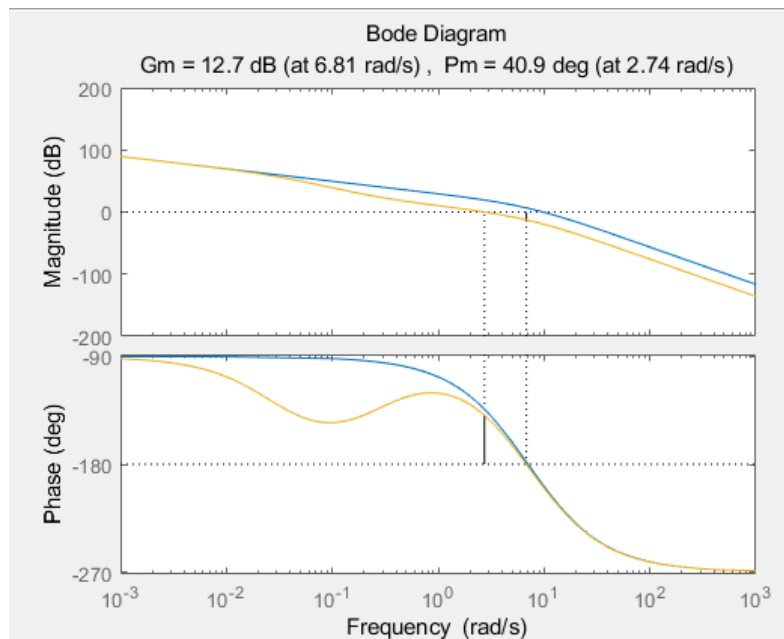


图 48 校正前后系统的 Bode 图

Part2 基于 EL-AT-III 型自动控制实验系统的硬件模拟实验

实验一 典型环节及其阶跃响应

一、实验目的

掌握控制模拟实验的基本原理和一般方法；掌握控制系统时域性能指标的测量方法。

二、实验原理

1. 模拟实验的基本原理：

控制系统模拟实验采用复合网络法来模拟各种典型环节，即利用运算放大器不同的输入网络和反馈网络模拟各种典型环节，然后按照给定系统的结构图将这些模拟环节连接起来，便得到了相应的模拟系统。再将输入信号加到模拟系统的输入端，并利用计算机等测量仪器，测量系统的输出，便可得到系统的动态响应曲线及性能指标。若改变系统的参数，还可进一步分析研究参数对系统性能的影响。

2. 时域性能指标的测量方法：

超调量 $\sigma\%$ ：

用软件上的游标测量响应曲线上的最大值和稳态值，代入下式算出超调量：

$$\sigma\% = \frac{Y_{\max} - Y_{\infty}}{Y_{\infty}} \times 100\%$$

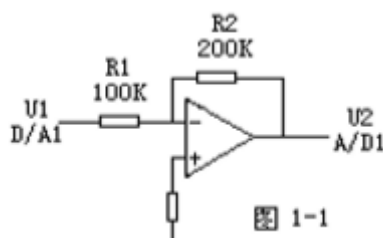
峰值时间 T_p 与调节时间 T_s ：

利用软件的游标测量水平方向上从零到达最大值与从零到达 95% 稳态值所需的时间值，便可得到 T_p 与 T_s 。

三、实验内容

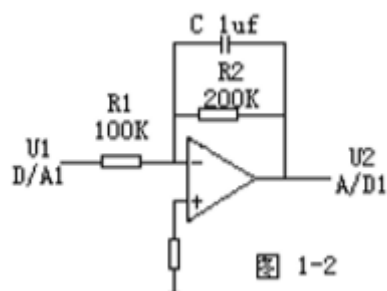
构成下述典型一阶系统的模拟电路，并测量其阶跃响应：

1. 比例环节的模拟电路及其传递函数如图 1-1。



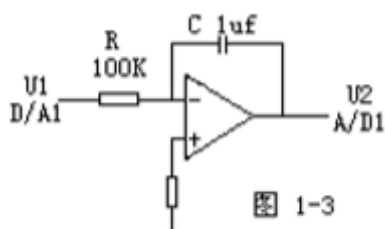
$$G(s) = -\frac{R_2}{R_1}$$

2. 惯性环节的模拟电路及其传递函数如图 1-2。



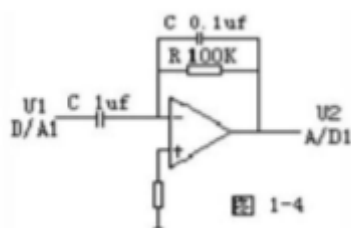
$$G(s) = -\frac{R_2}{R_1 + R_1 R_2 C s}$$

3. 积分环节的模拟电路及传递函数如图 1-3。



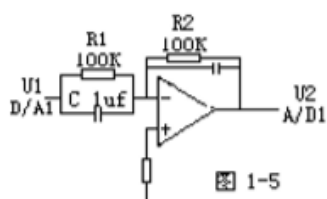
$$G(s) = \frac{1}{RCs}$$

4. 微分环节的模拟电路及传递函数如图 1-4。



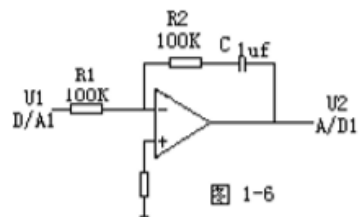
$$G(s) = -RCs$$

5. 比例+微分环节的模拟电路及传递函数如图 1-5 (未标明的 C=0.1uF)。



$$G(s) = - \frac{R_2(R_1Cs + 1)}{R_1}$$

6.比例+积分环节的模拟电路及传递函数如图 1-6。



$$G(s) = \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{R_1Cs}$$

四、实验结果分析

1. 由阶跃响应曲线计算惯性环节、积分环节的传递函数

$R1=R2=100K, C=1\mu f, K=1, T=0.1s$ 时

$$G(s) = \frac{1}{0.076s + 1}$$

$R1=100K, R2=200K, C=1\mu f, K=2, T=0.2s$ 时

$$G(s) = \frac{2}{0.1666s + 1}$$

2. 将实验中测得的曲线、数据及理论计算值，整理列表。

参数	阶跃响应曲线	T_s (ms)		
			理论值	实测值
$R1=R2=100K$ $C=1\mu f$ $K=1$ $T=0.1S$	见图 49	比例环节	0	0
	见图 50	惯性环节	300	372
	见图 51	积分环节	不存在	93
	见图 52	微分环节	0	40
	见图 53	比例+微分环节	0	51
	见图 54	比例+积分环节	500	837
$R1=100K$ $R2=200K$ $C=1\mu f$ $K=2$ $T=0.2S$	见图 55	比例环节	0	0
	见图 56	惯性环节	600	372
	见图 57	积分环节	不存在	0
	见图 58	微分环节	0	78
	见图 59	比例+微分环节	0	83
	见图 60	比例+积分环节	420	457

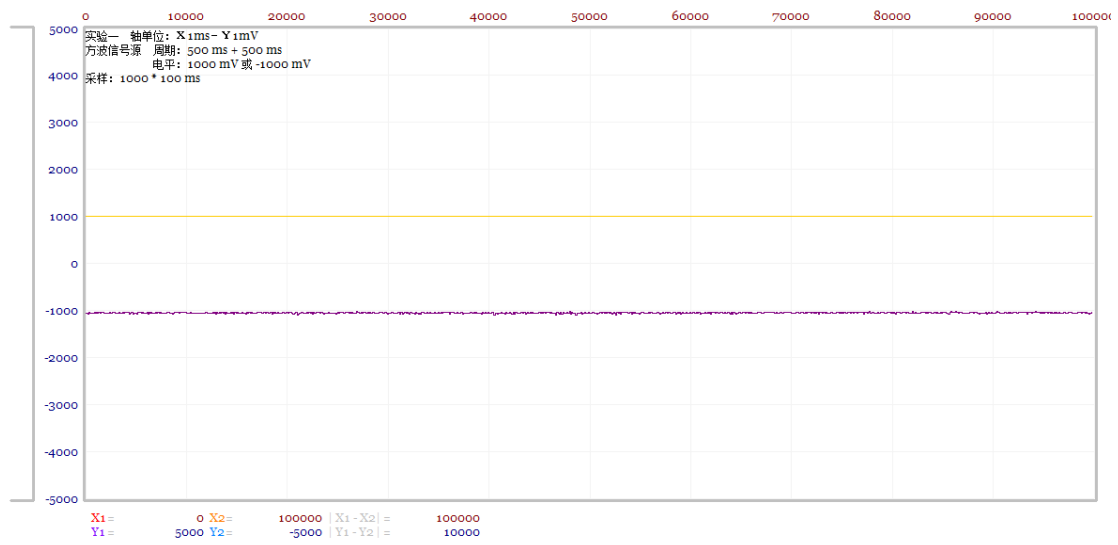


图 49

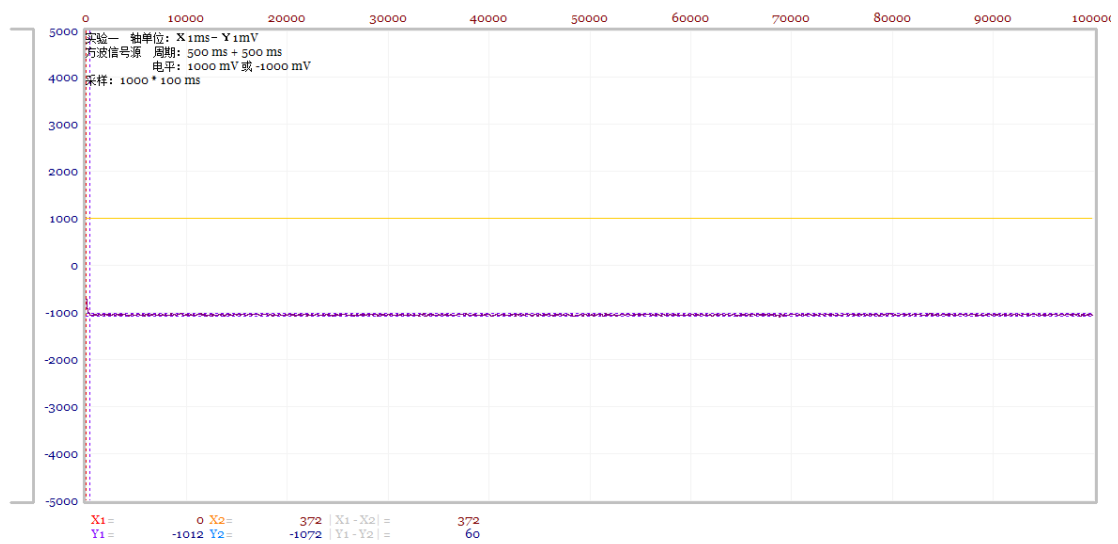


图 50



图 51



图 52



图 53



图 54

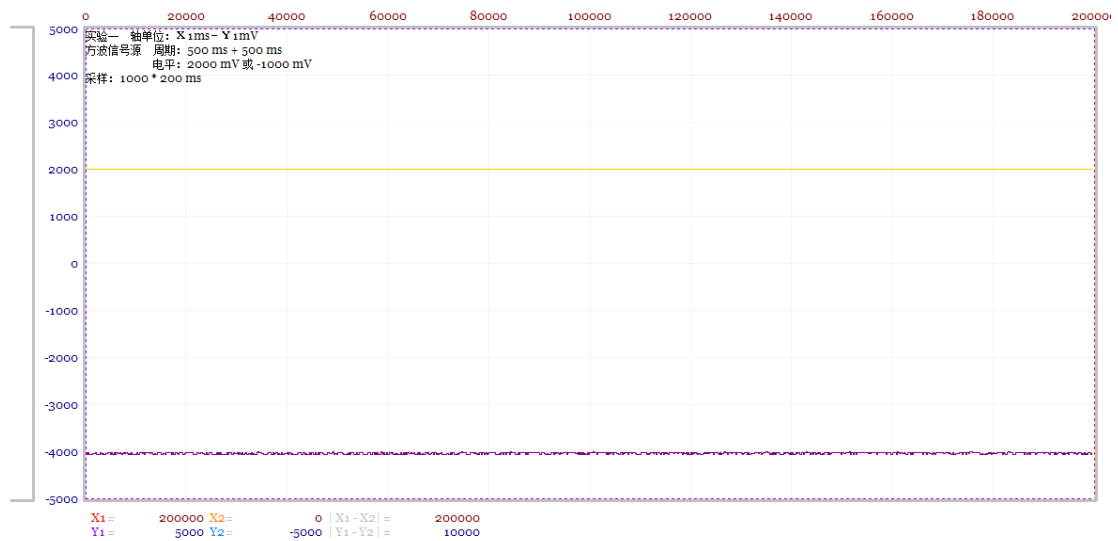


图 55

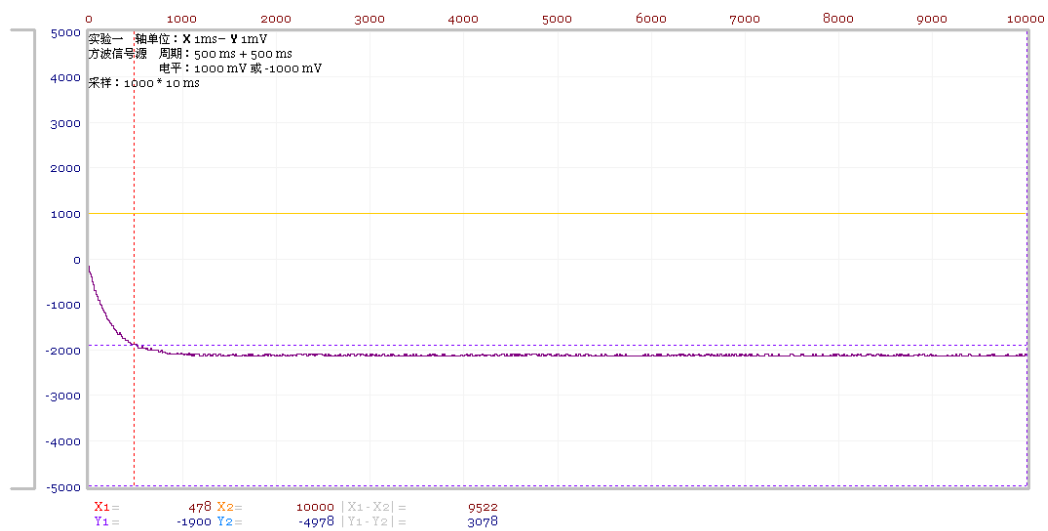


图 56



图 57

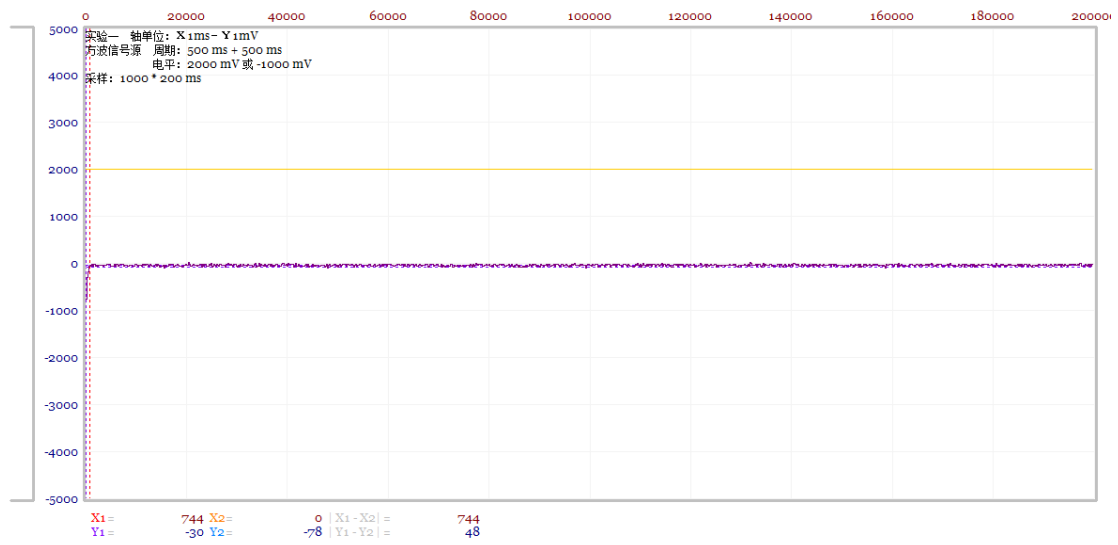


图 58

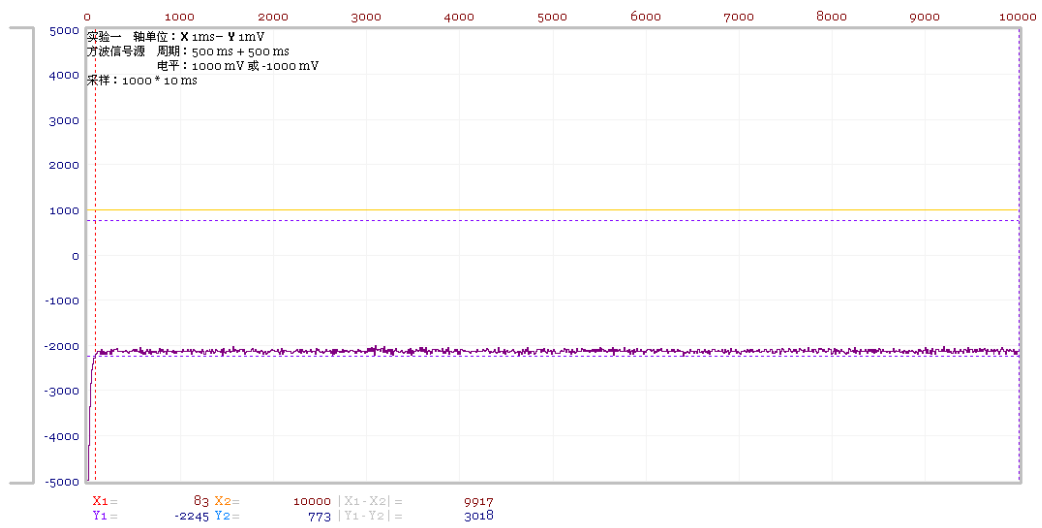


图 59



图 60

五、总结

通过这次实验，我掌握了自动控制模拟实验的基本原理和一般方法，也深入地了解控制系统时域性能指标的测量方法。同时，体会到各种典型信号的单位阶跃响应不只是理论知识，在实际的实验中，各种原因可能会影响到系统的稳定性和输出值，从而导致各种各样的误差，影响实验结果，就算终值基本达到预期目标，实际测量中也会有各种误差影响导致 T_s 的实测值和理论值有一定差距。

实验二 二阶系统阶跃响应

一、实验目的

研究二阶系统的特征参数，阻尼比 和无阻尼自然频率 对系统动态性能的影响。定量分析 和 与最大超调量 和调节时间 之间的关系；进一步学习实验系统的使用方法；学会根据系统阶跃响应曲线确定传递函数。

二、实验原理

1. 模拟实验的基本原理

控制系统模拟实验采用复合网络法来模拟各种典型环节，即利用运算放大器不同的输入网络和反馈网络模拟各种典型环节，然后按照给定系统的结构图将这些模拟环节连接起来，便得到了相应的模拟系统。再将输入信号加到模拟系统的输入端，并利用计算机等测量仪器，测量系统的输出，便可得到系统的动态响应曲线及性能指标。若改变系统的参数，还可进一步分析研究参数对系统性能的影响。

2. 时域性能指标的测量方法：

超调量 $\sigma\%$ ：

用软件上的游标测量响应曲线上的最大值和稳态值，代入下式算出超调量：

$$\sigma\% = \frac{Y_{\max} - Y_{\infty}}{Y_{\infty}} \times 100\%$$

峰值时间 T_p 与调节时间 T_s ：

利用软件的游标测量水平方向上从零到达最大值与从零到达 95% 稳态值所需的时间值，便可得到 T_p 与 T_s 。

三、实验内容

典型二阶系统的闭环传递函数为：

$$\varphi(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

其中 ξ 和 ω_n 对系统的动态品质有决定的影响。

构成图 2-1 典型二阶系统的模拟电路，并测量其阶跃响应：

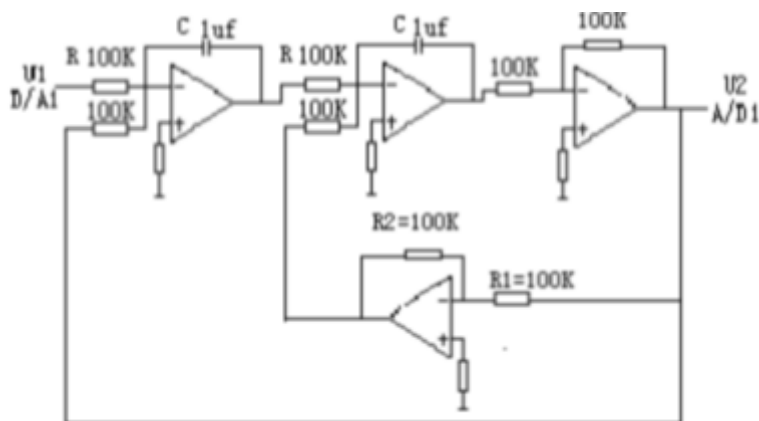


图 2-1 二阶系统模拟电路图

电路的结构图如图 2-2:

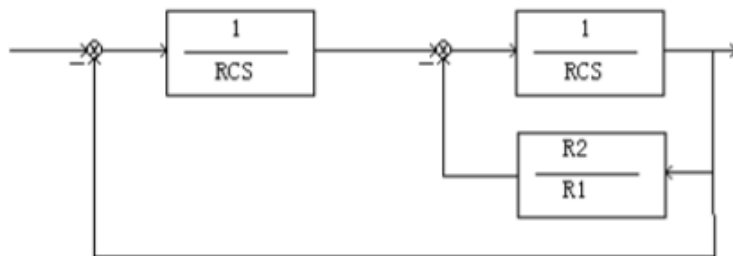


图 2-2 二阶系统结构图

系统闭环传递函数为:

$$\varphi(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{1/T^2}{s^2 + (K/T)s + 1/T^2} \quad (2)$$

式中 $T = RC$, $K = \frac{R_2}{R_1}$

比较 (1)、(2) 二式, 可得:

$$\omega_n = \frac{1}{T} = \frac{1}{RC}$$

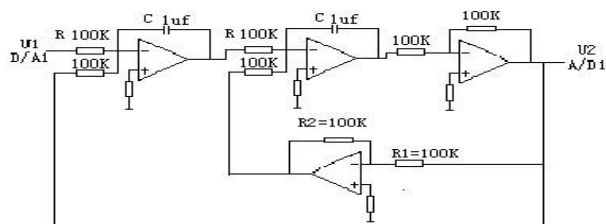
$$\xi = \frac{K}{2} = \frac{R_2}{2R_1}$$

由 (3) 式可知, 改变比值 $\frac{R_2}{R_1}$, 可以改变二阶系统的阻尼比。改变 RC 值可以改变 无阻尼自然频率 ω_n 。

今取 $R_1=200K$, $R_2=100K$ 和 $200K$, 可得实验所需的阻尼比。电阻 R 取 $100K$, 电容 C 分别取 $1\mu f$ 和 $0.1\mu f$, 可得两个无阻尼自然频率 ω_n 。

四、实验结果分析

1. 画出二阶系统的模拟电路图，讨论典型二阶系统性能指标与 ζ , ω_n 的关系。



二阶系统性能指标与 ζ , ω_n 的关系：

(1)延迟时间 t_d : 增大 ω_n 或减小 ζ , 都可以减少 t_d 。当阻尼比不变时, 闭环极点距 s 平面的坐标原点越远, 系统的延迟时间越短; 而当无阻尼自然频率不变时, 闭环极点距 s 平面虚轴越近, 系统的延迟时间越短。

(2)上升时间 t_r : 当 ζ 一定时, 增大 ω_n ; 当 ω_n 一定时, 减小 ζ , 都可以减小上升时间。

(3)峰值时间 t_p : $t_p = \pi/\omega$, 峰值时间和有阻尼振荡频率成反比。

(4)最大超调量: $\sigma\% = e^{-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \times 100\%$ 随着阻尼比的增大, 最大超调量单调的减小。

(5)调节时间 t_s : $t_s = \frac{4.4}{\zeta\omega_n}$, 调节时间和闭环极点的实部数值成反比, 闭环极点的

实部数值越大, 即极点离虚轴的距离越远, 系统的调节时间越短。

2. 把不同 ζ 和 ω_n 条件下测量的 $\sigma\%$ 和 t_s 值列表, 根据测量结果得出相应结论。

		$\sigma\%$	$t_p(\text{ms})$	$t_s(\text{ms})$	阶跃响应曲线
$R=100\text{K}$ $C=1\mu\text{f}$ $\omega_n=10\text{rad/s}$	$R_1=100\text{K}$ $R_2=0\text{K}$ $\zeta=0$	等幅振荡	/	/	见图 61
	$R_1=100\text{K}$ $R_2=50\text{K}$ $\zeta=0.25$	40.36%	308	1191	见图 62
	$R_1=100\text{K}$ $R_2=100\text{K}$ $\zeta=0.5$	16.1%	223	415	见图 63
	$R_1=100\text{K}$ $R_2=200\text{K}$ $\zeta=1$	无超调	/	409	见图 64
$R_1=100\text{K}$ $C_1=C_2=0.1\mu\text{f}$ $\omega_n=100\text{rad/s}$	$R_1=100\text{K}$ $R_2=200\text{K}$ $\zeta=0.5$	11.86%	18	27	见图 65
	$R_1=100\text{K}$ $R_2=200\text{K}$ $\zeta=1$	无超调	/	27	见图 66

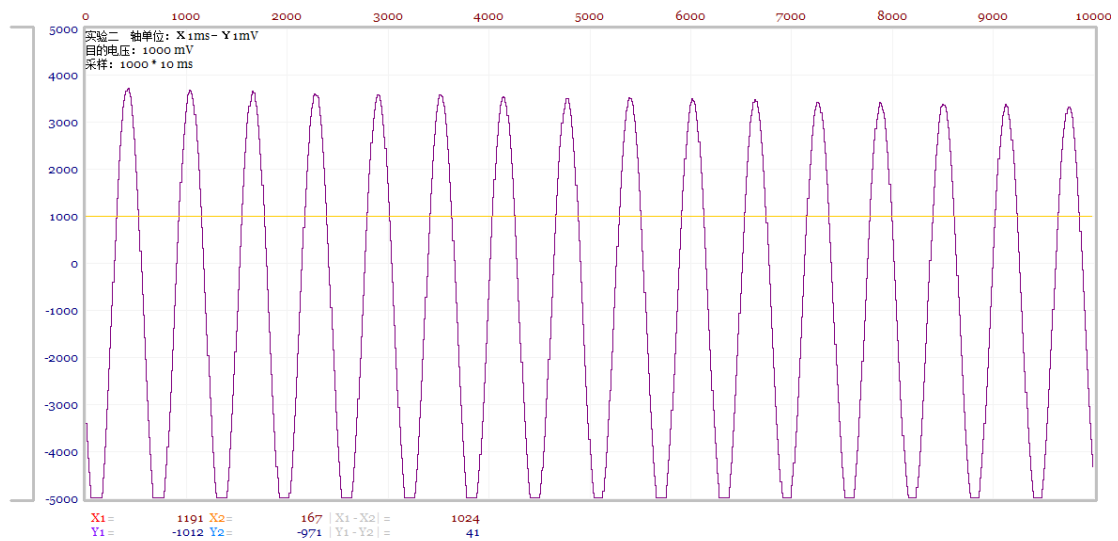


图 61



图 62

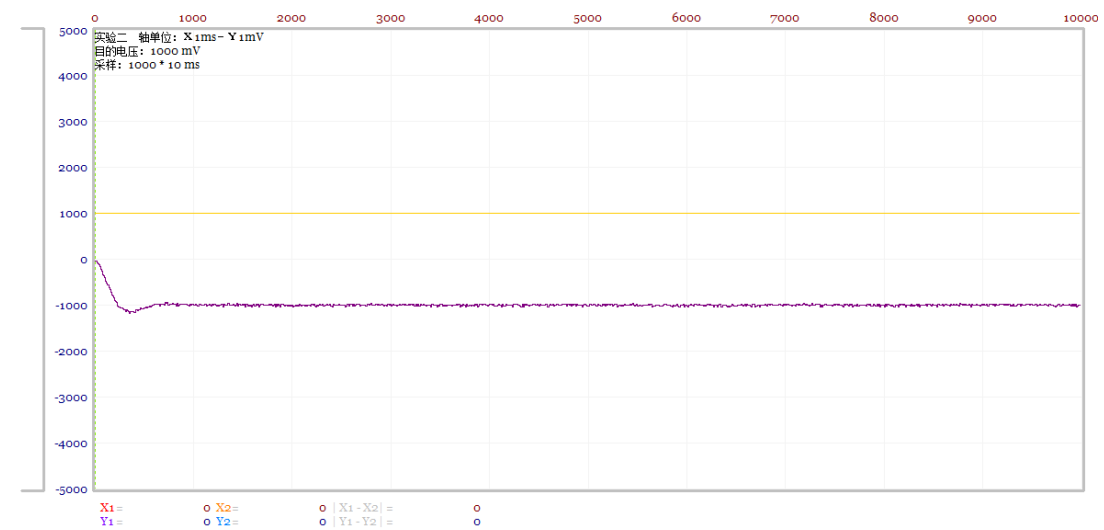


图 63



图 64



图 65



图 66

分析：

根据测量结果可知， ζ 越大，系统超调量越小， t_s 也越小，快速性能越好； ω_n 对系统超调量无影响，只影响 t_s ， ω_n 越大， t_s 越小。

3. 画出系统响应曲线，再由 t_s 和 $\sigma\%$ 计算出传递函数，并与由模拟电路计算的传递函数相比较。

以 $R_1=100K$, $R_2=100K$, $\zeta=0.5$ 为例，根据测量的超调量和 t_s 可计算出 $\zeta=0.53$ ， $\omega_n=9.9$ ，其传递函数为 $G(s) = \frac{98}{s^2 + 10.5s + 98}$ ，与理论传递函数大致一样。

五、总结

此次实验研究了二阶系统的特征参数，阻尼比和无阻尼自然频率对系统动态性能的影响。进一步学习了实验系统的使用方法，同时也学会了根据系统阶跃响应曲线确定传递函数。

实验三 控制系统的稳定性分析

一、实验目的

观察系统的不稳定现象；研究系统开环增益和时间常数对稳定性的影响。

二、实验内容

系统模拟电路图如图 3-1。

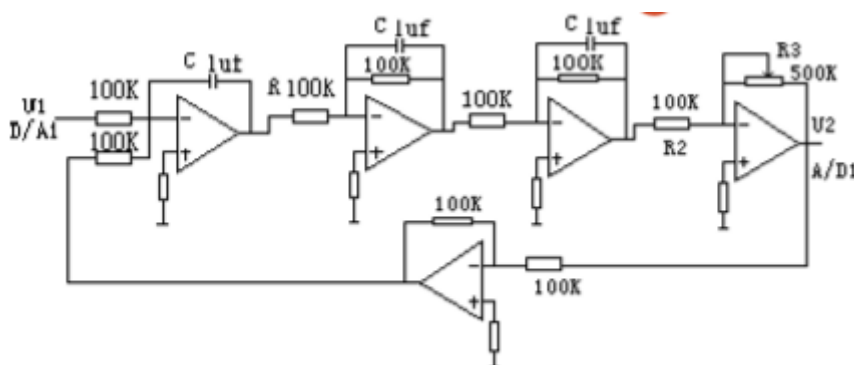


图 3-1 系统模拟电路图

其开环传递函数为：

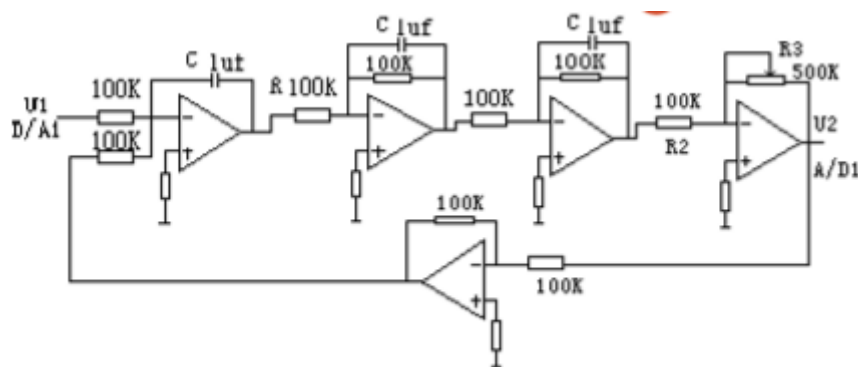
$$G(s) = \frac{10K_1}{s(0.1s + 1)(Ts + 1)} = \frac{K}{s(0.1s + 1)(Ts + 1)}$$

式中 $K = \frac{R_3}{R_2}$ ， $R_2 = 100K\Omega$ ， $R_3 = 0 \sim 500K$ ； $T = RC$ ， $R = 100K\Omega$ ，

$C = 1\mu f$ 或 $C = 0.1\mu f$ 两种情况。

三、实验结果分析

1. 画出步骤 5 的模拟电路图。



2.

参数		系统响应曲线
$R_2=100K\Omega$ $R=100K\Omega$ $C=1\mu f$ $T=0.1S$	$R_3=50K$ $K_1=0.5$ $K=5$	见图 67
	$R_3=100K$ $K_1=1$ $K=10$	见图 68
	$R_3=200K$ $K_1=2$ $K=20$	见图 69
$R_2=100K\Omega$ $R=100K\Omega$ $C=0.1\mu f$ $T=0.01S$	$R_3=50K$ $K_1=0.5$ $K=5$	见图 70
	$R_3=100K$ $K_1=1$ $K=10$	见图 71
	$R_3=200K$ $K_1=2$ $K=20$	见图 72



图 67

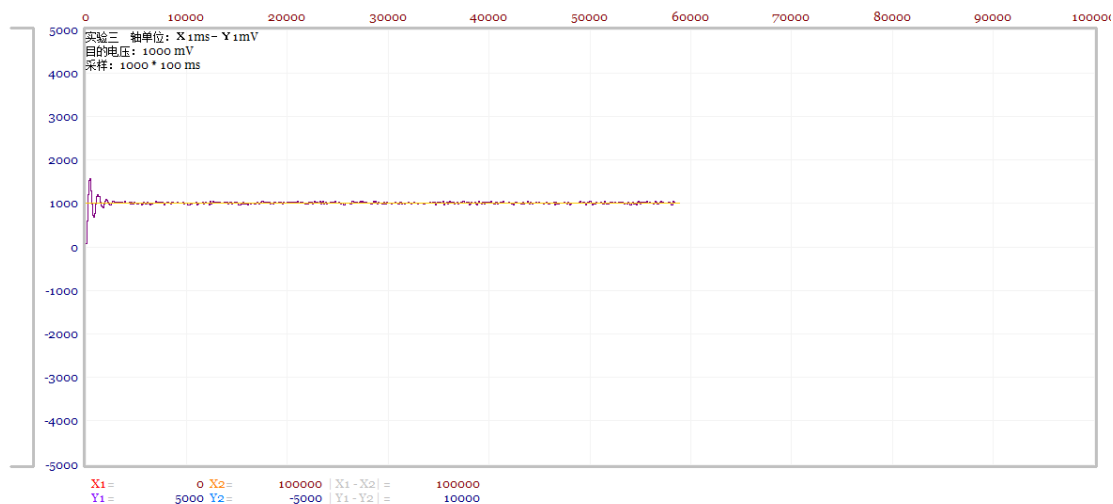


图 68

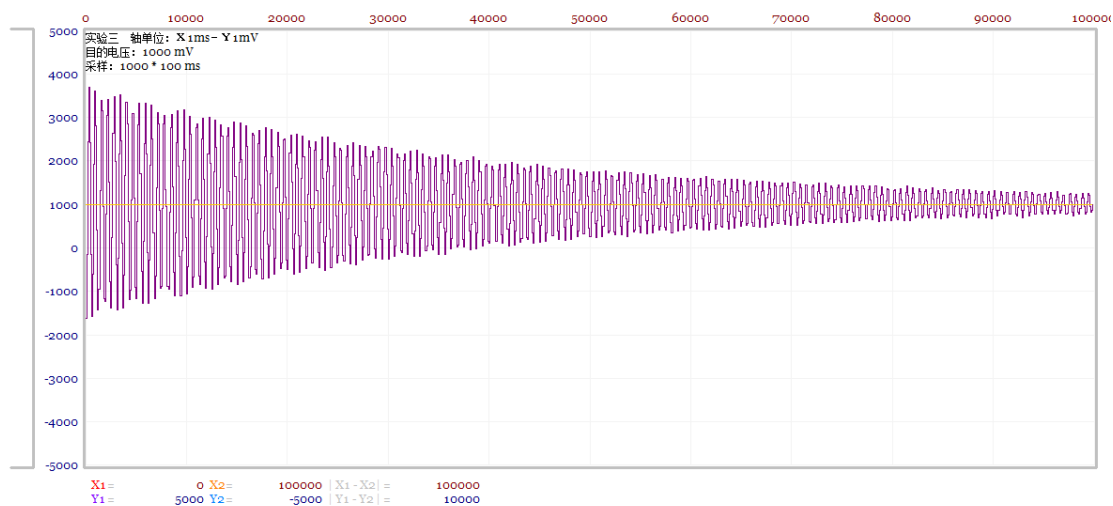


图 69



图 70



图 71

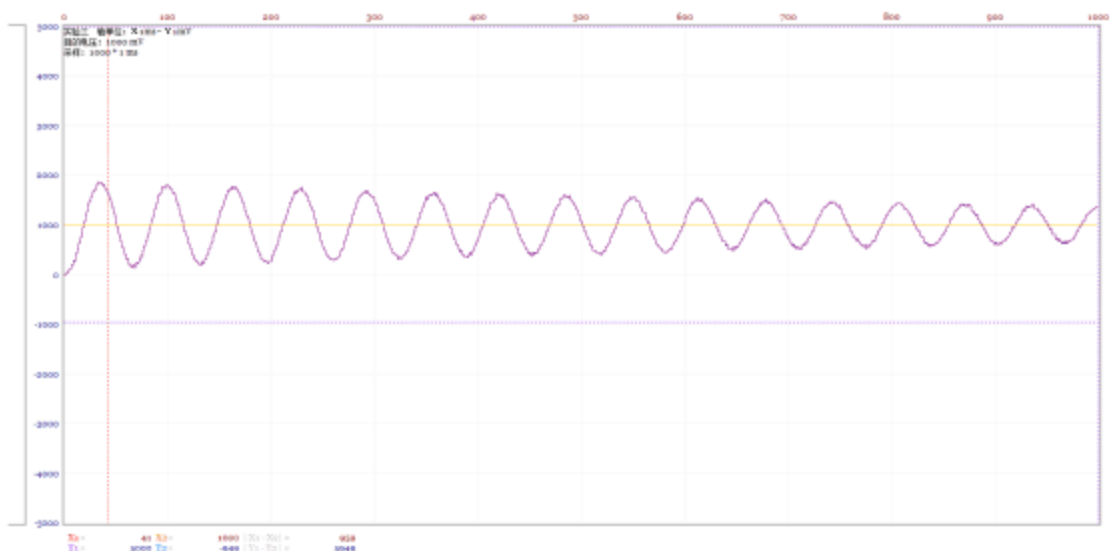


图 72

四、总结

此次实验观察了系统的不稳定现象，并研究了系统开环增益和时间常数对稳定性的影响。加深了对课堂学习内容的理解，同时加强了自己的动手能力和耐心。

实验四 系统频率特性测量

一、实验目的

加深了解系统及元件频率特性的物理概念；掌握系统及元件频率特性的测量方法；掌握利用“李沙育图形法”测量系统频率特性的方法。

二、实验原理

频率特性的测量方法：

1. 将正弦信号发生器、被测系统和数据采集卡按图 4-1 连接起来。

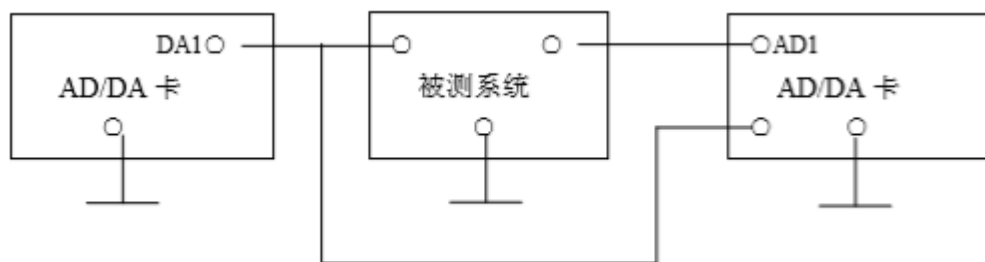


图 4-1 频率特性测试电路

2. 通过 AD/DA 卡产生不同频率和幅值的正弦信号，并输入到被测系统中。
3. AD/DA 卡采集被测系统的输出信号，并显示在计算机屏幕上。通过比较输入信号和输出信号的不同，可以得到系统的频率响应特性。

三、实验内容

1. 模拟电路图及系统结构图分别如图 4-2 和图 4-3。

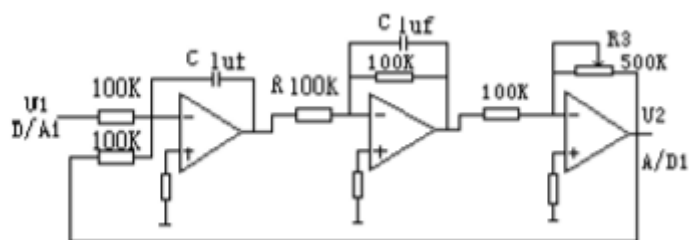


图 4-2 系统模拟电路图



图 4-3 系统结构图

2. 系统传递函数取 $R_3 = 500K\Omega$ ，则系统传递函数为：

$$G(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{500}{s^2 + 10s + 500}$$

若输入信号，则在稳态时 $U_1(t) = U_2 \sin(\omega t + \psi)$ ，其输出信号为

$$U_2(t) = U_2 \sin(\omega t + \psi)$$

改变输入信号角频率 ω 值，便可测得 $\frac{U_2}{U_1}$ 和 ψ 随 ω 变化的数值，这个变化规律就是系统的幅频特性和相频特性

四、实验结果分析

1. 画出被测系统的结构和模拟电路图。

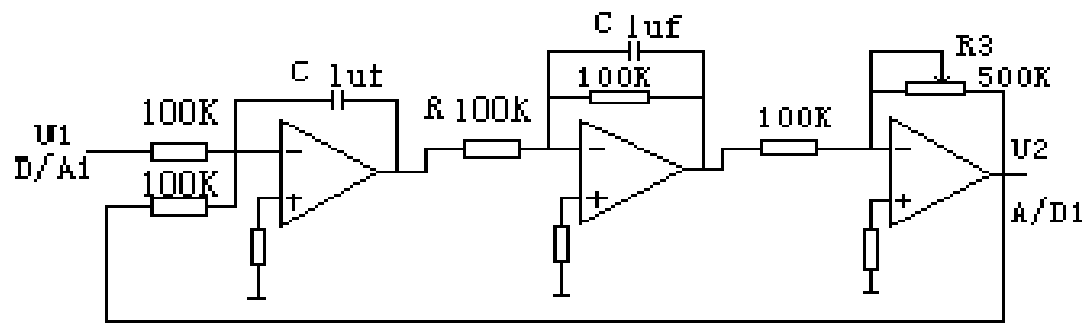


图 73

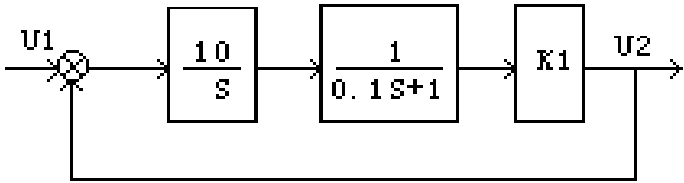


图 74

2. 画出被测系统的开环 $L(\omega)$ 曲线与 $\varphi(\omega)$ 曲线。

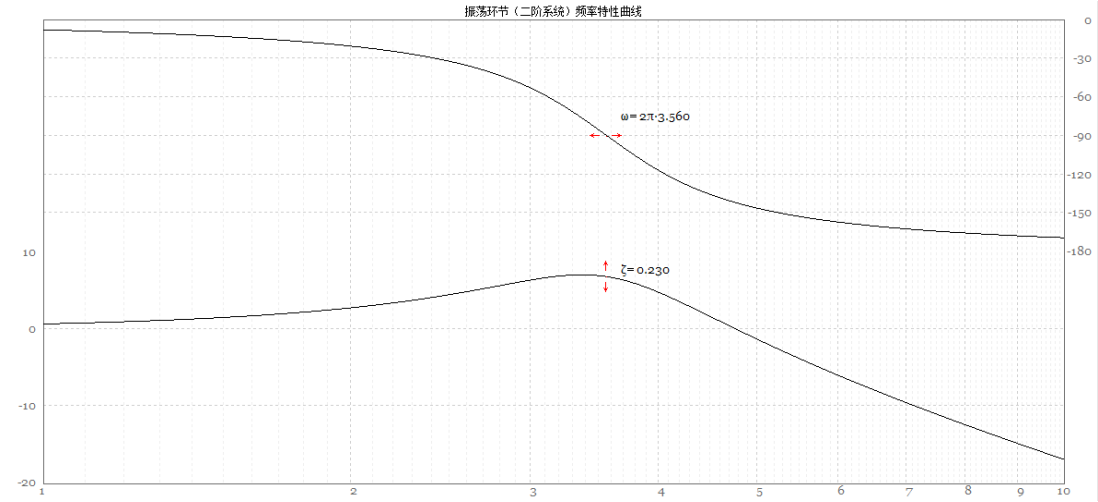


图 75

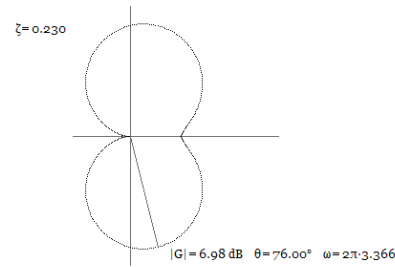


图 76

3. 整理表中的实验数据，并算出理论值和实测值。

F(Hz)	$\omega(\text{rad/s})$	理论值		实测值					
		$L(\omega)$	$\Phi(\omega)$	2Xm	2y0	2ym	$L(\omega)$	$\Phi(\omega)$	李沙育图
1	6.28	1.076	-7.77°	2013	303	2164	1.058	-7.6°	见图 77
2	12.56	1.372	-20.17°	1991	1169	2749	1.359	-21.2°	见图 78
3.6	22.608	2.208	87.05°	1991	4459	4502	2.038	87.8°	见图 79
5	31.4	0.863	32.83°	1991	823	1818	0.885	35.2°	见图 80
10	62.8	0.143	10.33°	1991	65	303	0.236	9.3°	见图 81



图 77



图 78

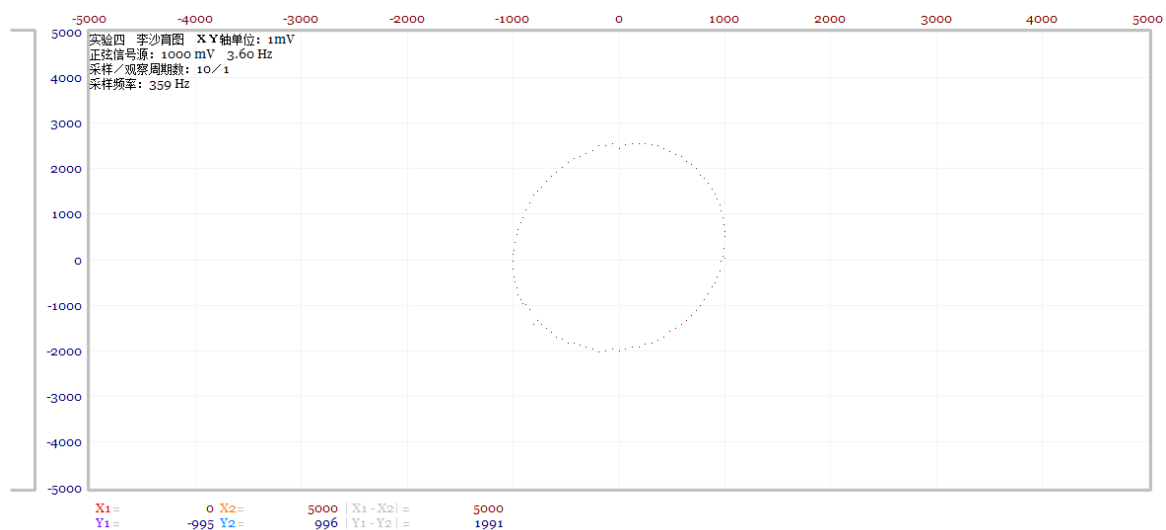


图 79



图 80

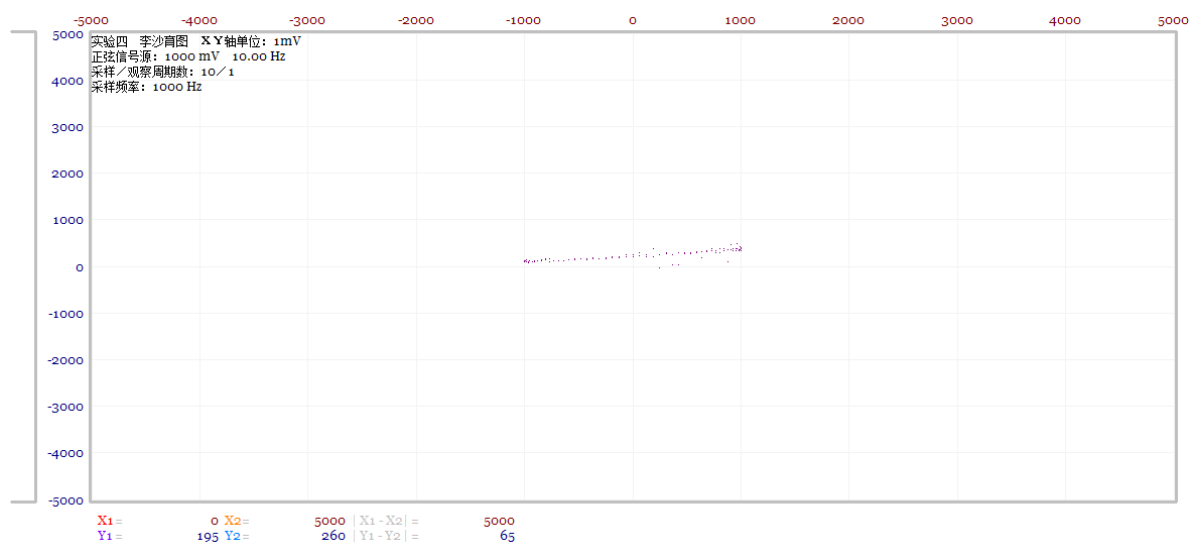


图 81

3. 讨论李沙育图形法测量频率特性的精度。

用李沙育图形法测量频率特性的精度较高，但是实际测量结果和理论结果还是有一定得差距，分析可知这些误差主要来自于从“李沙育图形”上读取数据时存在的误差，也可能是计算机精度和电路连接不稳定导致得误差。

五、总结

通过这次实验，我更加深入的了解了频率特性的测试方法和过程模型的原理。但是本次实验数据很难测量准确，而且李沙育图形会随着时间的改变，希望教学系统能在读取数据这方面有所改进。

实验五 连续系统串联校正

一、实验目的

加深理解串联校正装置对系统动态性能的校正作用；对给定系统进行串联校正设计，并通过模拟实验检验设计的正确性。

二、实验内容

1. 串联超前校正

(1) 系统模拟电路图如图 5-1，图中开关 S 断开对应未校情况，接通对应超前校正。

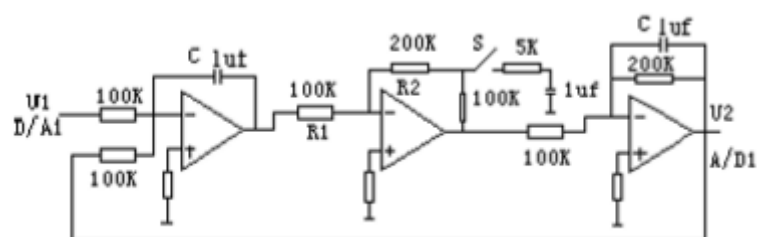


图 5-1 超前校正电路图

(2) 系统结构图如图 5-2。

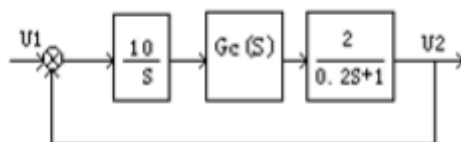


图 5-2 超前校正系统结构图

图中 $G_{c1}(s) = 2$ ，

$$G_{c2}(s) = \frac{2(0.055s + 1)}{0.005s + 1}$$

2. 串联滞后校正

(1) 模拟电路图如图 5-3，开关 s 断开对应未校状态，接通对应滞后校正。

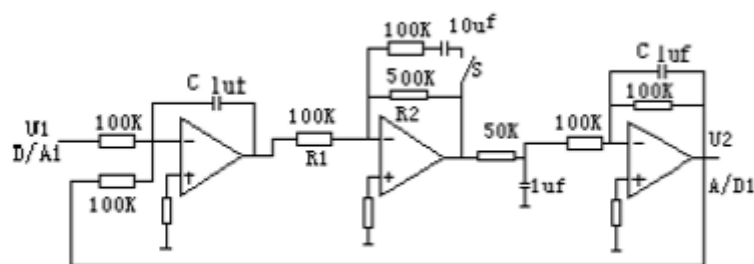


图 5-3 滞后校正模拟电路图

(2) 系统结构图示如图 5-4



图 5-4 滞后校正系统结构图

图中 $G_{c1}(s) = 10$,

$$G_{c2}(s) = \frac{10(s+1)}{11s+1}$$

3. 串联超前一滞后校正

(1) 模拟电路图如图 5-5，双刀开关断开对应未校状态，接通对应超前一滞后校正。

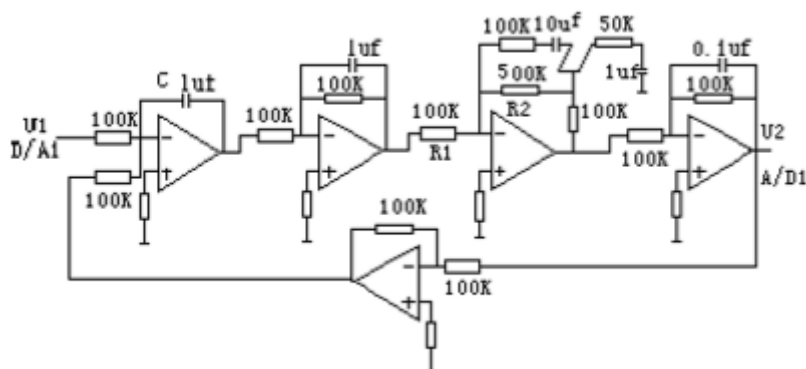


图 5-5 超前-滞后校正模拟电路图

(2) 系统结构图示如图 5-6。

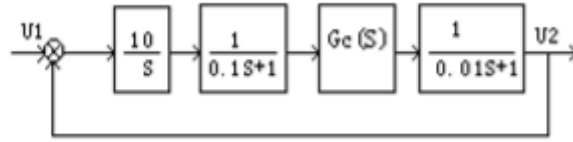


图 5-6 超前-滞后校正系统结构图

图中 $G_{c1}(s) = 6$,

$$G_{c2}(s) = \frac{6(1.2s + 1)(0.15s + 1)}{(6s + 1)(0.05s + 1)}$$

三、实验结果分析

1. 计算串联校正装置的传递函数 $G_c(s)$ 和校正网络参数。

(1) 串联超前校正

$$G_{c1}(s) = 2$$

$$G_{c2}(s) = \frac{2(0.055s + 1)}{0.005s + 1}$$

故串联超前校正的传递函数为: $G_c(s) = \frac{G_{c2}(s)}{G_{c1}(s)} = \frac{0.055s + 1}{0.005s + 1}$

由串联超前校正标准传递函数 $\alpha G_c(s) = \frac{\alpha Ts + 1}{Ts + 1}$ 可得: $T=0.005$, $\alpha=11$

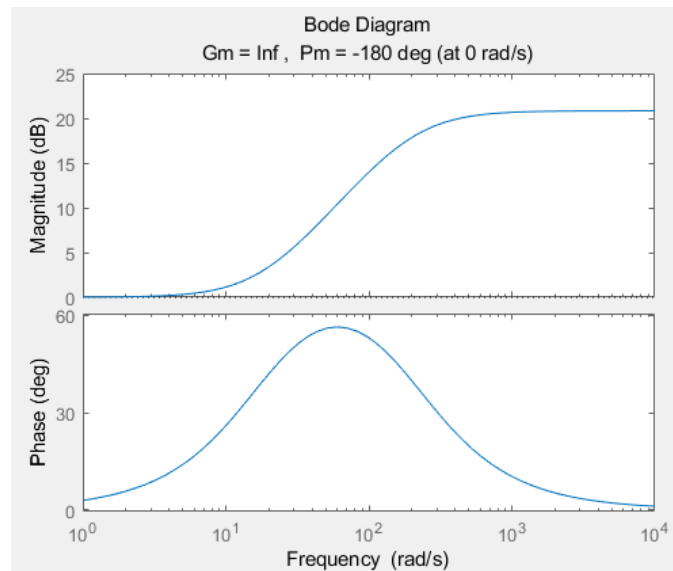


图 82

(2) 串联滞后校正

$$G_{c1}(s) = 10,$$

$$G_{c2}(s) = \frac{10(s + 1)}{11s + 1}$$

故串联滞后校正的传递函数为： $G_c(s) = \frac{G_{c2}(s)}{G_{c1}(s)} = \frac{s+1}{11s+1}$

由串联滞后校正标准传递函数 $\alpha G_c(s) = \frac{bTs+1}{Ts+1}$ 可得： $T=11$ ， $b=1/11$

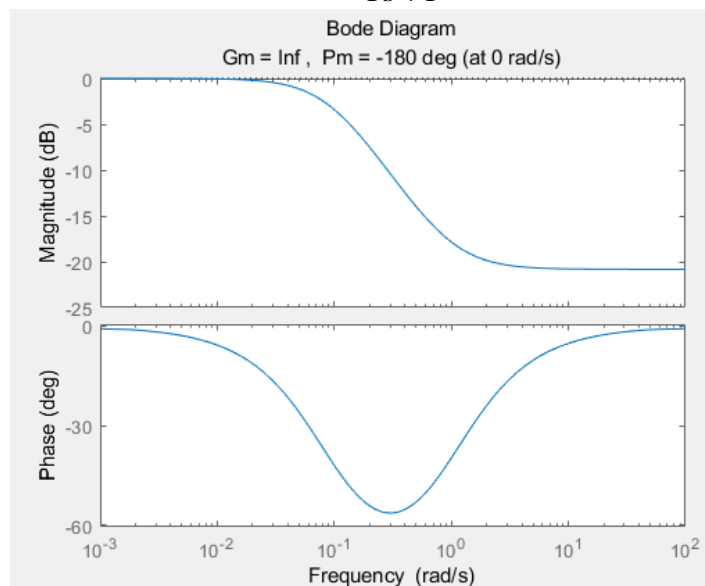


图 83

(3) 串联超前一滞后校正

$$G_{c1}(s) = 6,$$

$$G_{c2}(s) = \frac{6(1.2s+1)(0.15s+1)}{(6s+1)(0.05s+1)}$$

故串联超前一滞后校正的传递函数为： $G_c(s) = \frac{G_{c2}(s)}{G_{c1}(s)} = \frac{(1.2s+1)(0.15s+1)}{(6s+1)(0.05s+1)}$

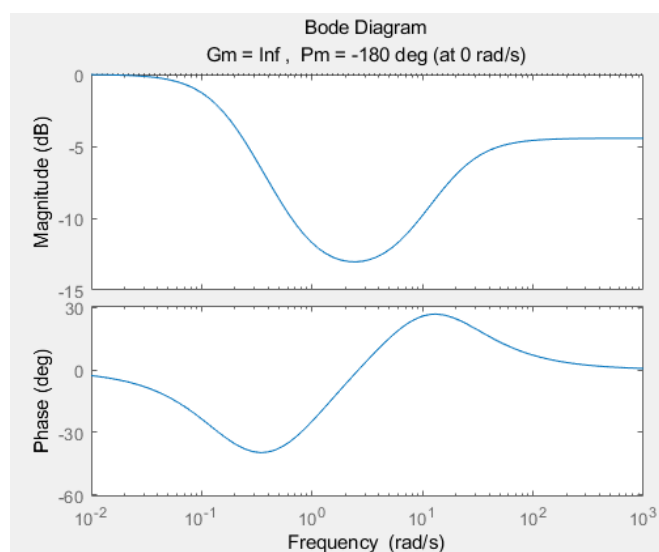


图 84

2. 画出校正后系统的对数坐标图，并求出校正后系统的 ω_c' 及 ν'

(1) 串联超前校正

利用 MATLAB 算的校正后系统开环传递函数为

$$G_c(s) = \frac{2.2s + 40}{0.001s^3 + 0.205s^2 + s}$$

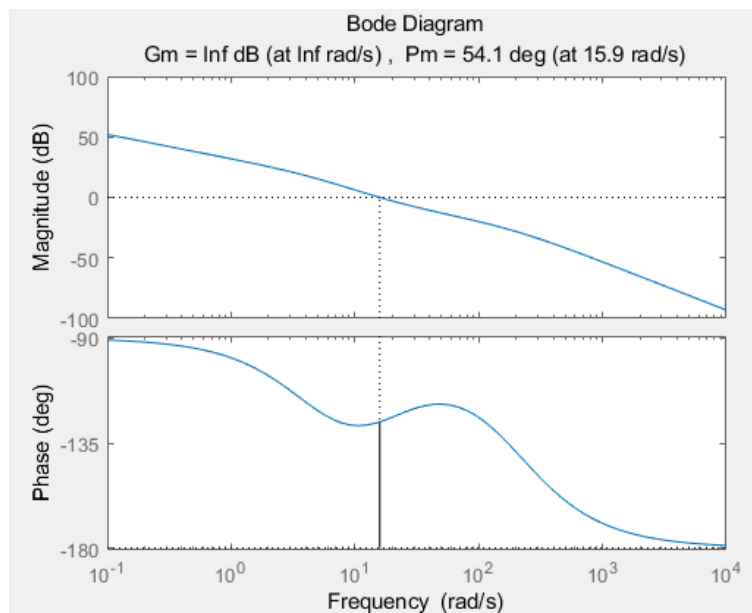


图 85

剪切频率: $\omega_c' = 15.9 \text{ rad/s}$, 相角裕度: $\nu' = 54.1^\circ$ 。

(2) 串联滞后校正

利用 MATLAB 算的校正后系统开环传递函数为

$$G_c(s) = \frac{100s + 100}{0.055s^4 + 1.655s^3 + 11.15s^2 + s}$$

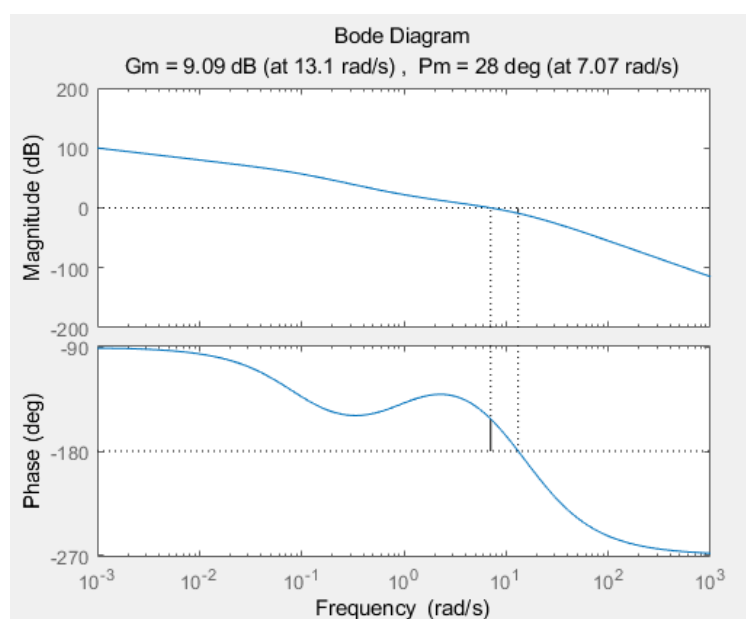


图 86

剪切频率： $\omega_c'=7.07\text{rad/s}$ ，相角裕度为： $\nu'=28^\circ$

(3)串联超前-滞后校正

利用 MATLAB 算的校正后系统开环传递函数为

$$G_c(s) = \frac{10.8s^2 + 81s + 60}{0.0003s^5 + 0.03905s^4 + 0.9665s^3 + 6.16s^2 + s}$$

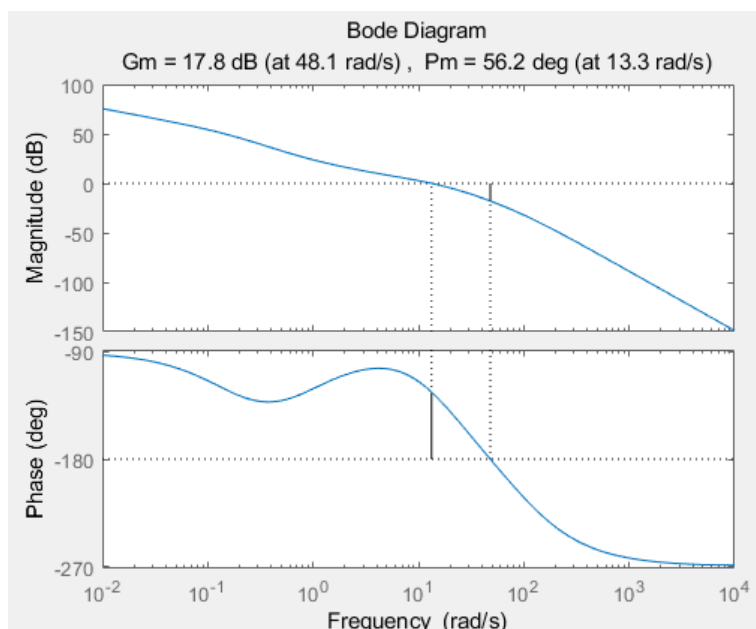


图 87

剪切频率： $\omega_c'=13.3\text{rad/s}$ ，相角裕度为： $\nu'=56.2^\circ$

3. 比较校正前后系统的阶跃响应曲线及性能指标，说明校正装置的作用。

(1)串联超前校正

超前校正系统 指标	校正前	校正后
阶跃响应曲线	见图 88	见图 89
$\sigma \%$	6.23%	1.47%
$T_p(\text{秒})$	0.167	0.111
$T_s(\text{秒})$	1.070	0.223

超调量 $\sigma\%$ 减小，调节时间 t_s 减小，相角裕度增大。可见超前校正利用其相角超前特性，当其串入系统后，可使开环系统截止频率增大，从而闭环系统带宽也增大，使响应速度加快

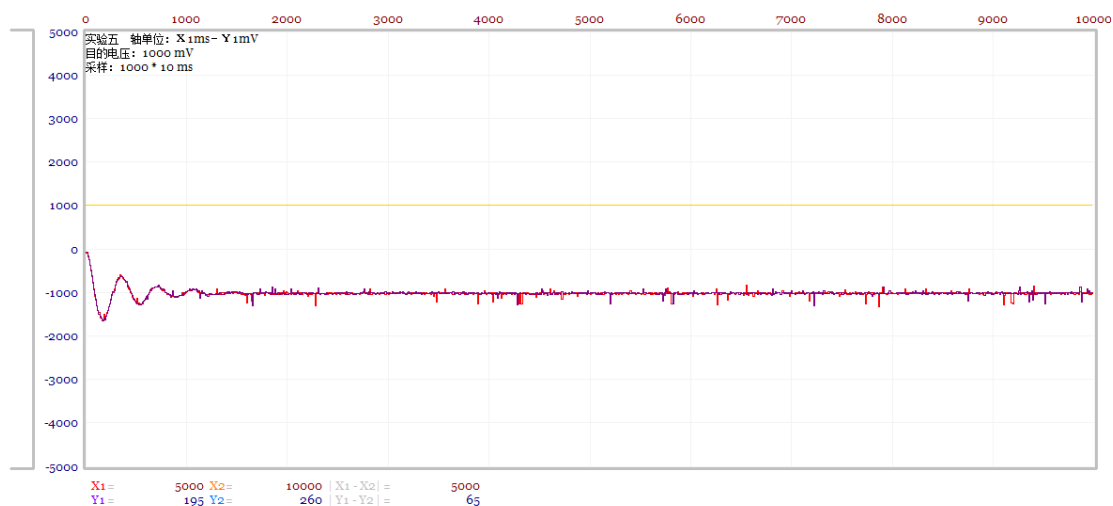


图 88

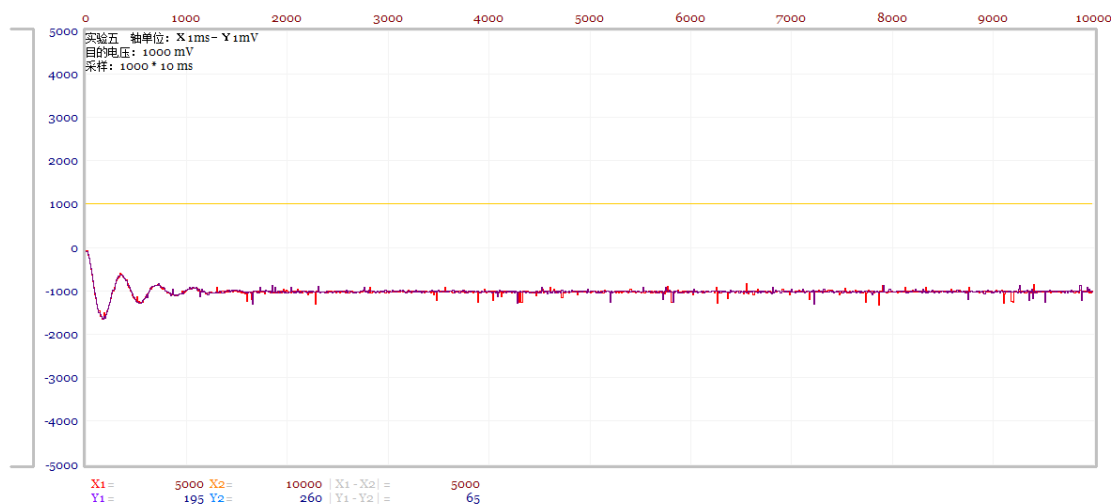


图 89

(2)串联滞后校正

指标 \ 滞后校正系统	校正前	校正后
阶跃响应曲线	见图 90	见图 91
$\sigma \%$	4.71%	2.33%
T_p (秒)	0.130	0.391
T_s (秒)	0.540	0.810

超调量 $\sigma\%$ 减小，调节时间 t_s 减小，相角裕度增大。可见串联滞后校正利用其高频幅值衰减特性，当其串入系统后，既能提高系统稳态精度，又基本不改变系统动态性能。

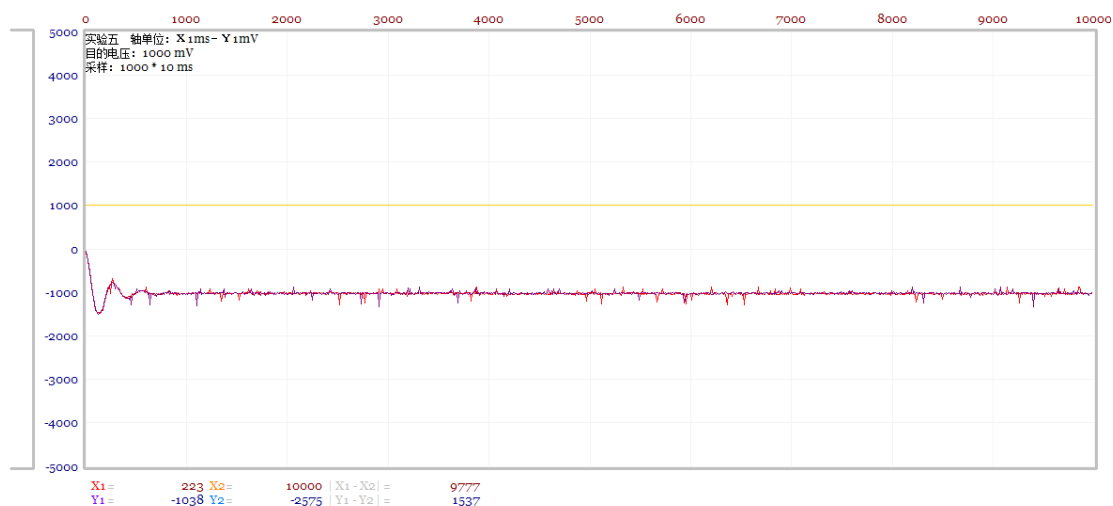


图 90

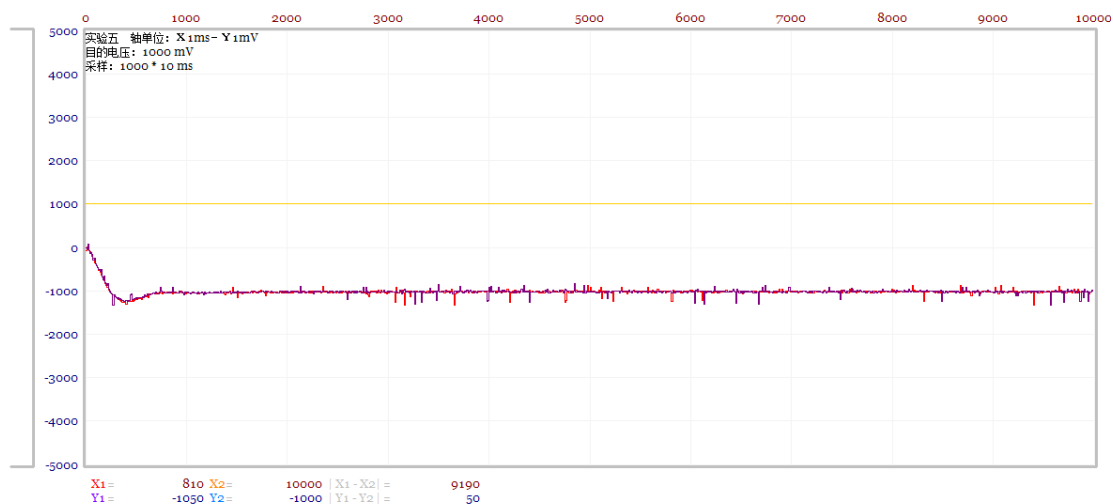


图 91

(3)串联超前-滞后校正

超前-滞后校正系统 指标	校正前	校正后
阶跃响应曲线	见图 92	见图 93
$\sigma \%$	7.97%	3.42%
$T_p(\text{秒})$	0.130	0.202
$T_s(\text{秒})$	1.499	0.329

超调量 $\sigma\%$ 减小, 调节时间 t_s 减小, 相角裕度增大。可见串联超前-滞后校正兼有滞后校正和超前校正的优点, 它利用超前部分来增大系统的相角裕度, 同时利用滞后部分来改善系统的稳态性能, 校正后系统响应速度较快, 超调量较小, 抑制高频噪声的性能也较好。

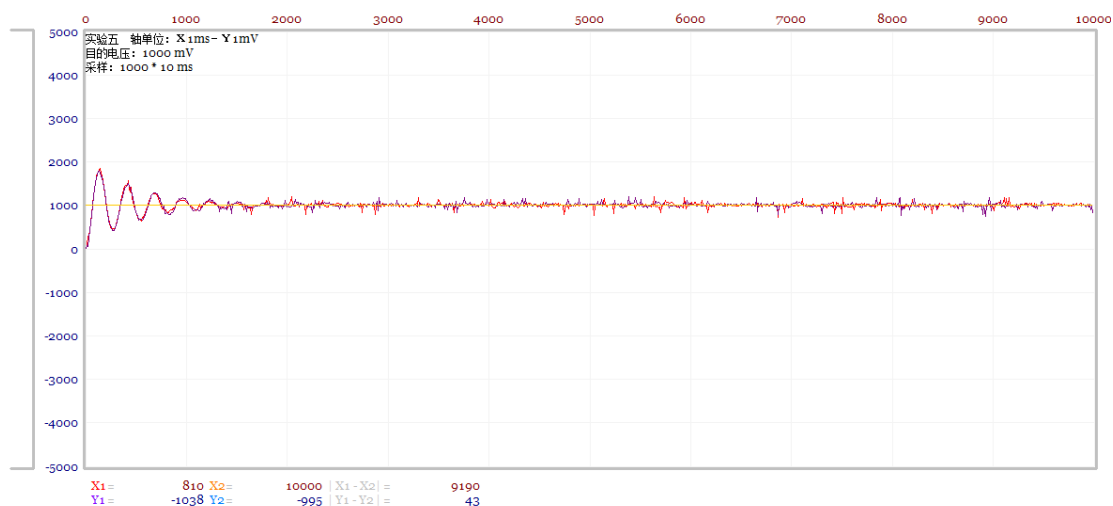


图 92

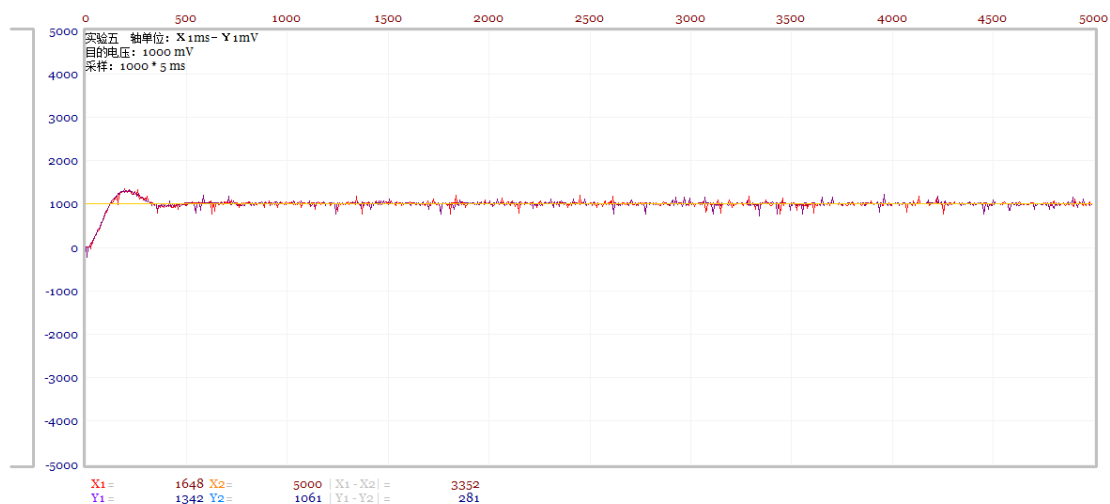


图 93

四、总结

此次实验对校正系统进行了模拟与测量,加深理解了各校正装置对系统动态性能的校正作用。通过模拟实验检验了设计的正确性,并锻炼了自己的动手能力,培养了自己的耐心。