北京郵電大學

自动控制综合实验（1）

实验报告

姓名：张晓媛
学院：自动化学院
专业：自动化专业
班级：2016211404
学号：2016211780
班内序号：22
指导教师：林雪燕
成绩：___________

2019 年 1 月 8 日

目　录

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：

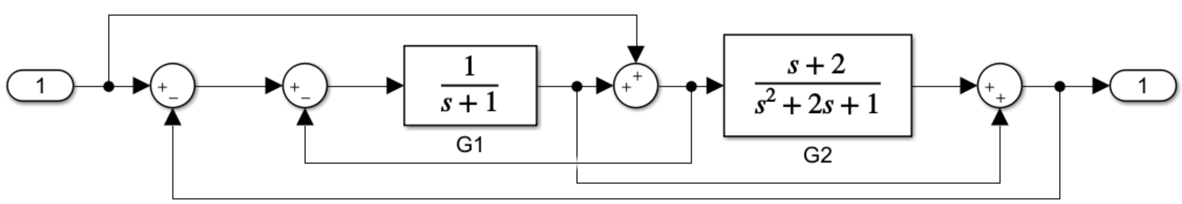


图 1 Simulink 建立系统模型

（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，Δ=1+2*g1+g1*g2，两条前向通路，p1=g2,Δ1=1,p2=g1*g2,Δ2=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 $G(s)=\dfrac{10}{s^2+2s+10}$ **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 $G_1(s)=\dfrac{2s+1}{s^2+2s+10}$

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(G1)
```

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

输出结果如图 2：

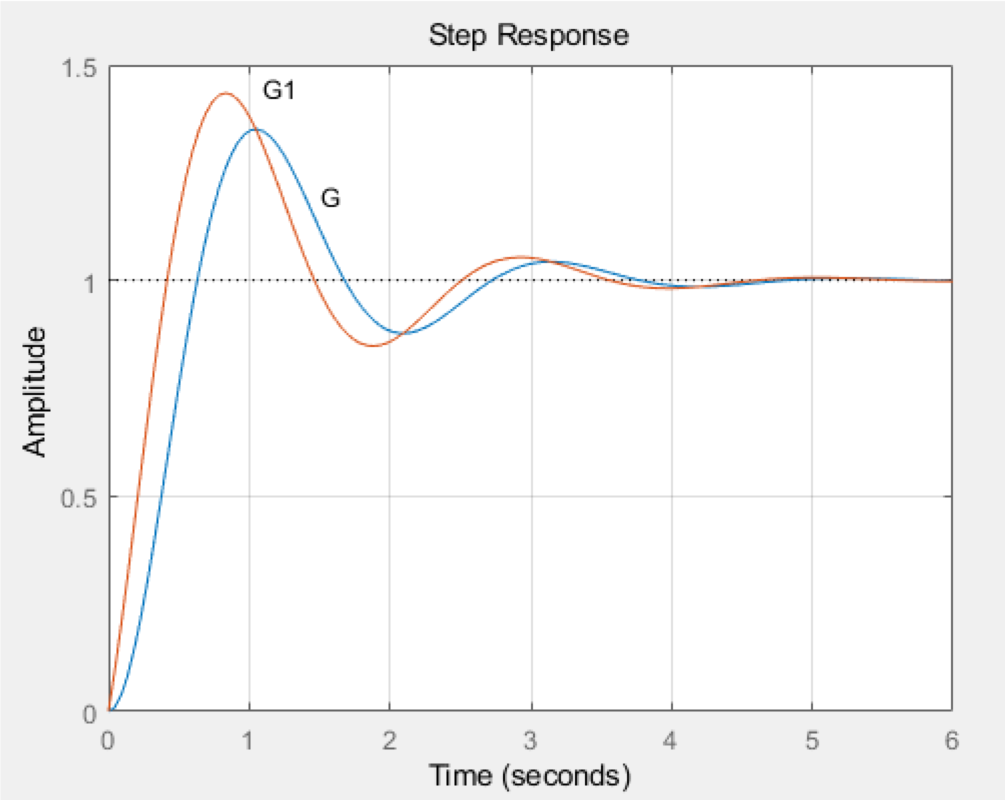


图 2 作业 3-1(1)输出结果

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 $G_2(s)=\dfrac{s^2+0.5s+10}{s^2+2s+10}$

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：

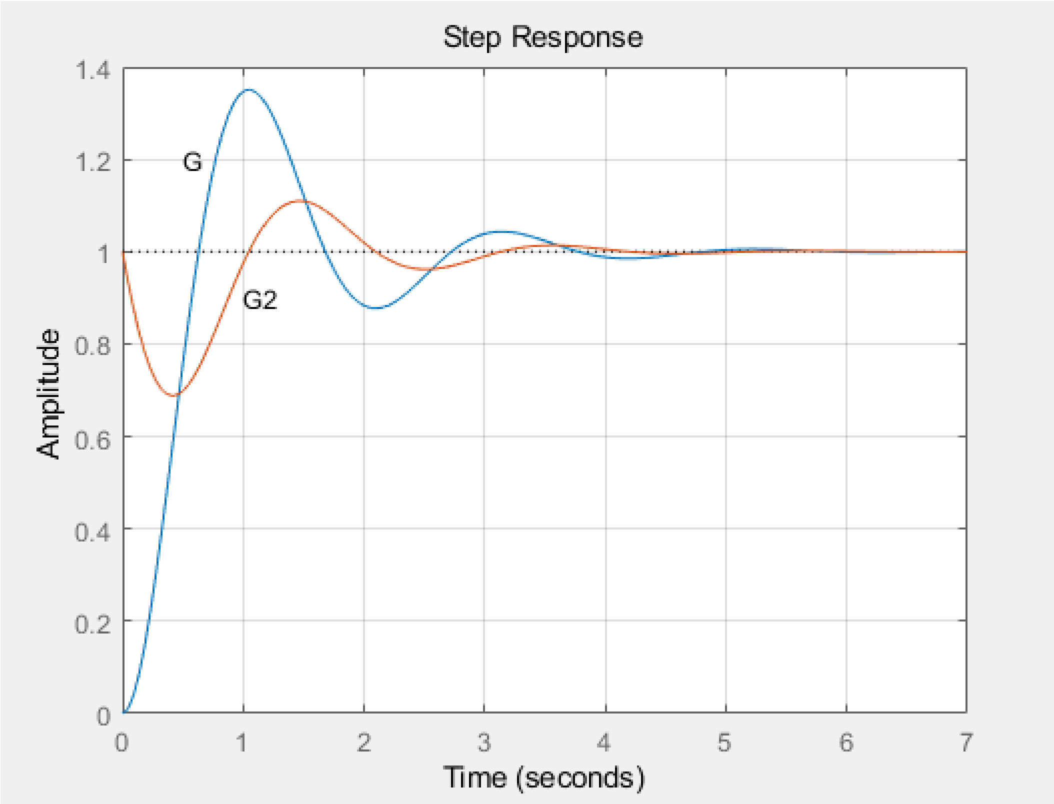


图 3 作业 3-1(2)输出结果

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 $G_3(s)=\dfrac{s^2+0.5s}{s^2+2s+10}$

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：

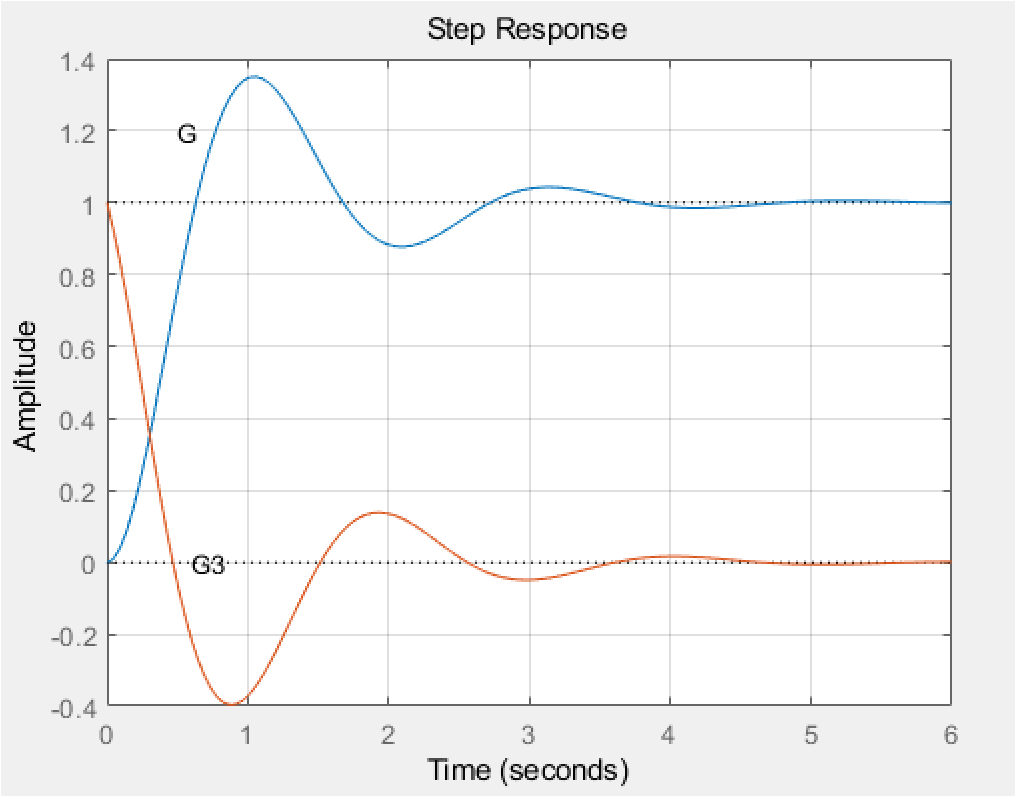


图 4 作业 3-1(3)输出结果

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 $G_4(s)=\dfrac{s}{s^2+2s+10}$

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：

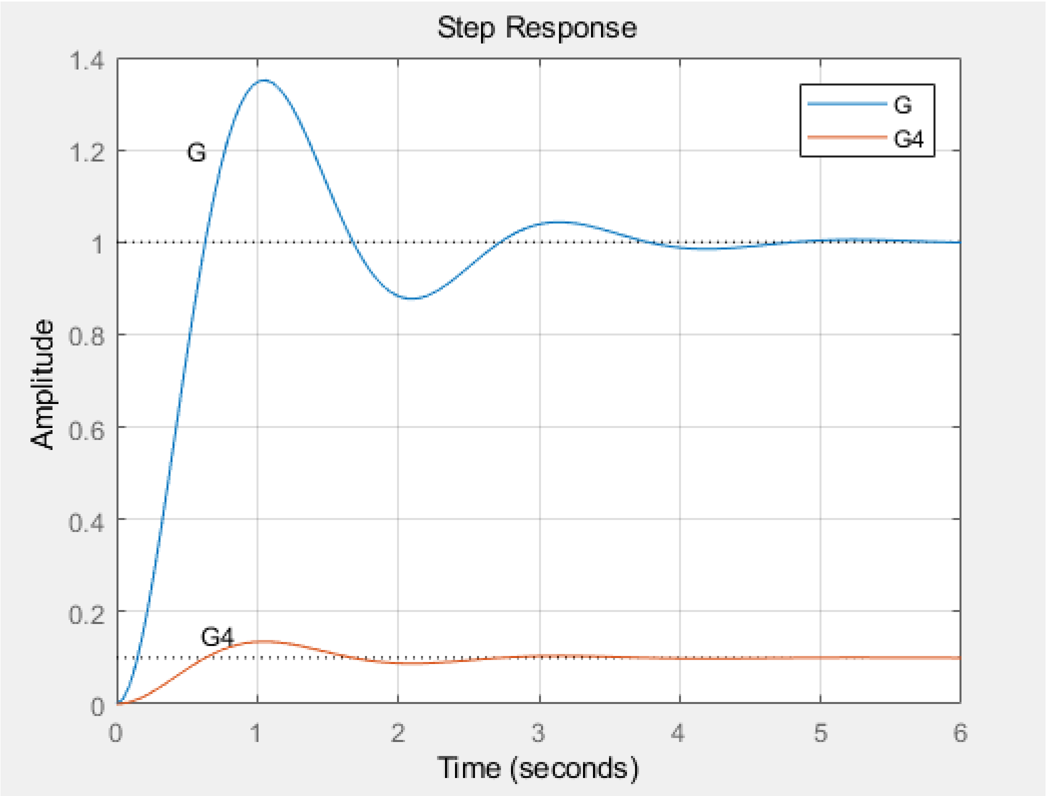


图 5 作业 3-1(4)输出结果

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：

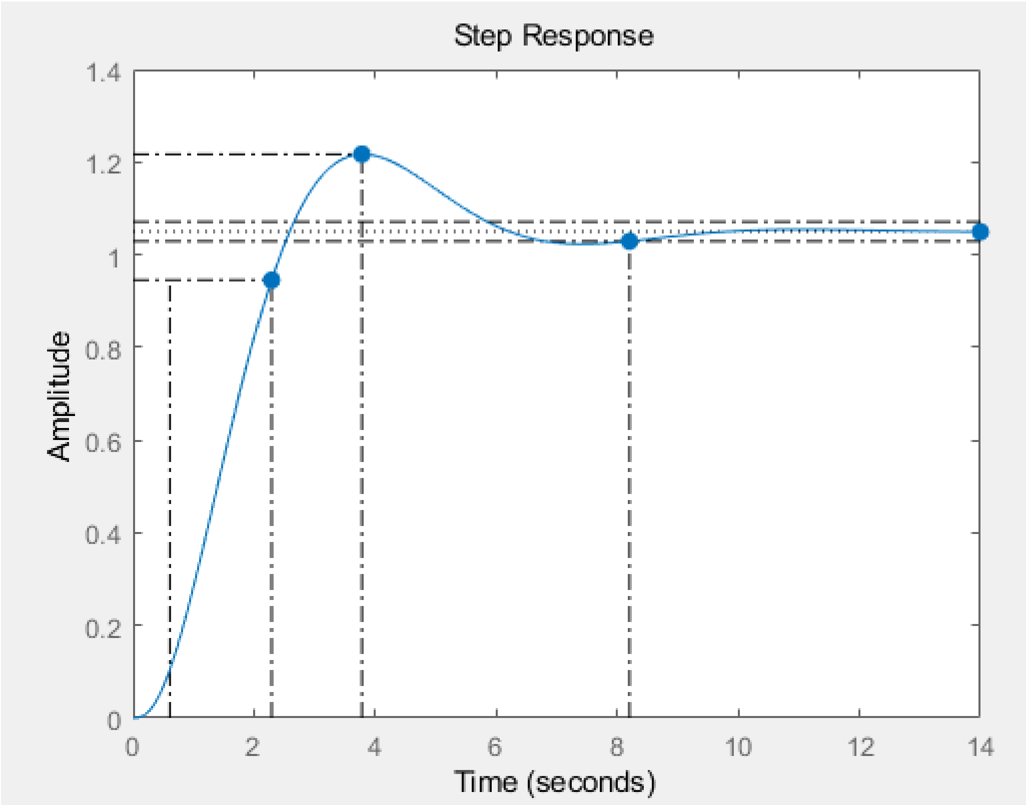


图 6 作业 3-2(1)输出结果

表 1 作业 3-2(1)系统动态性能指标

t_r	t_s	t_p	σ%
1.68s	8.2s	3.78s	15.9%

（2）将该系统的阶跃响应与二阶系统 $\phi_2(s)=\dfrac{1.05}{s^2+s+1}$ **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：

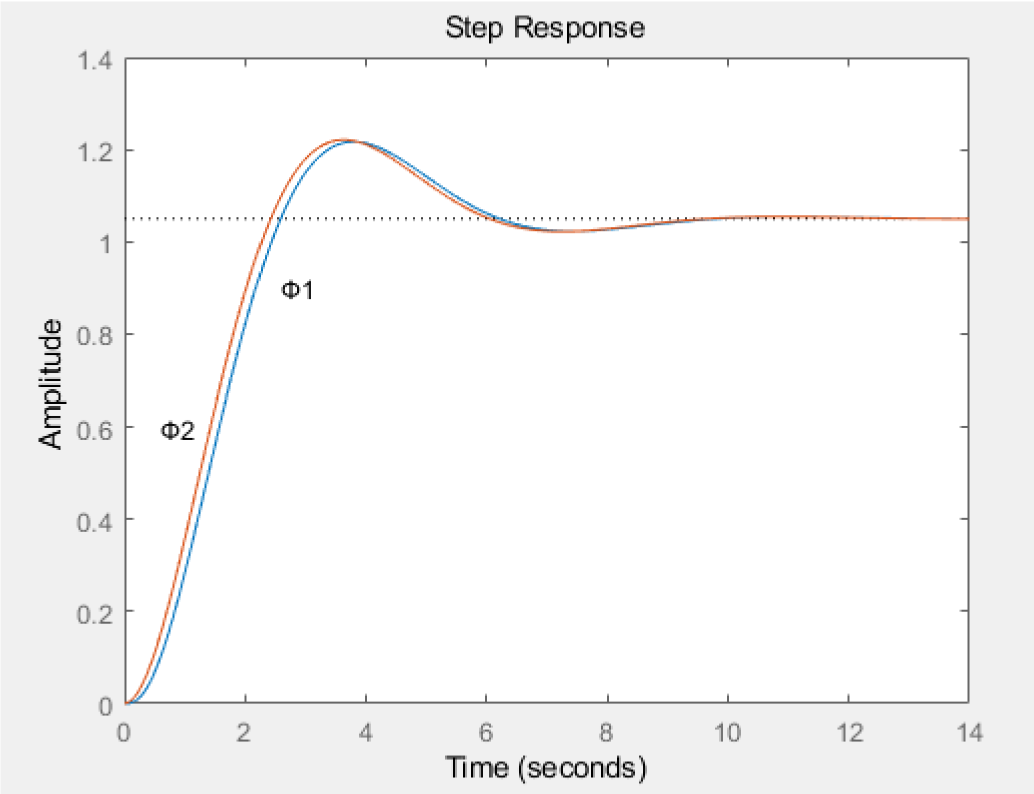


图 7 作业 3-2(2)输出结果

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 $\phi_3(s)=\dfrac{1.05}{(0.125s+1)(0.5s+1)(s^2+s+1)}$ **和** $\phi_4(s)=\dfrac{1.05(s+1)}{(0.125s+1)(0.5s+1)(s^2+s+1)}$ **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：

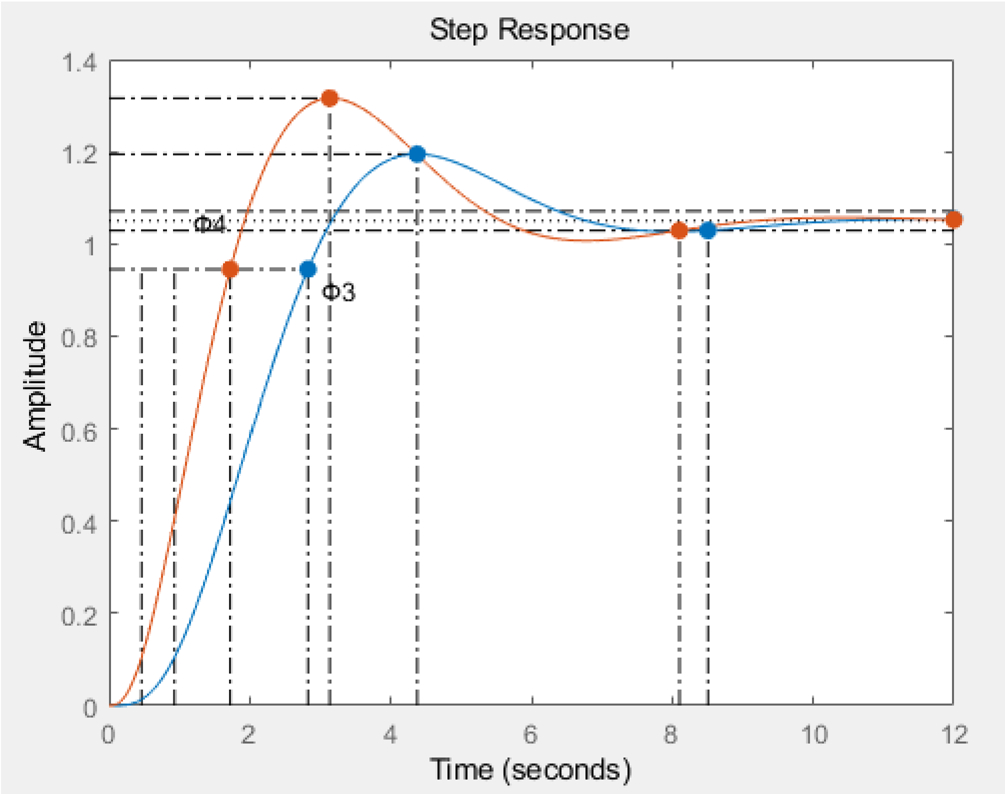


图 8 作业 3-2(3)输出结果

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	tp	ts	σ%
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	tp	ts	σ%
1.26s	3.13s	8.1s	25.3%

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

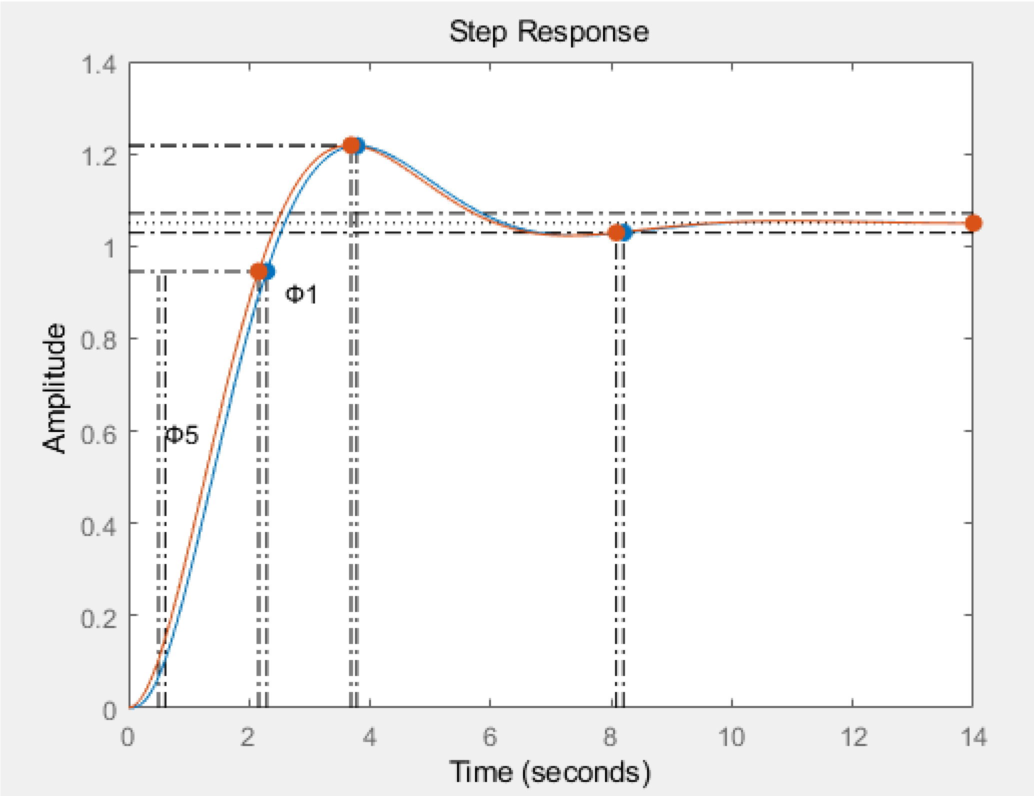


图 9 作业 3-2(4)输出结果

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	tp	ts	σ%
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	tp	ts	σ%
1.66s	3.68s	8.08s	16%

（5）比较系统 $\phi_5(s)=\dfrac{1.05(0.4762s+1)}{(0.5s+1)(s^2+s+1)}$ 和 $\phi_2(s)=\dfrac{1.05}{s^2+s+1}$ 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：

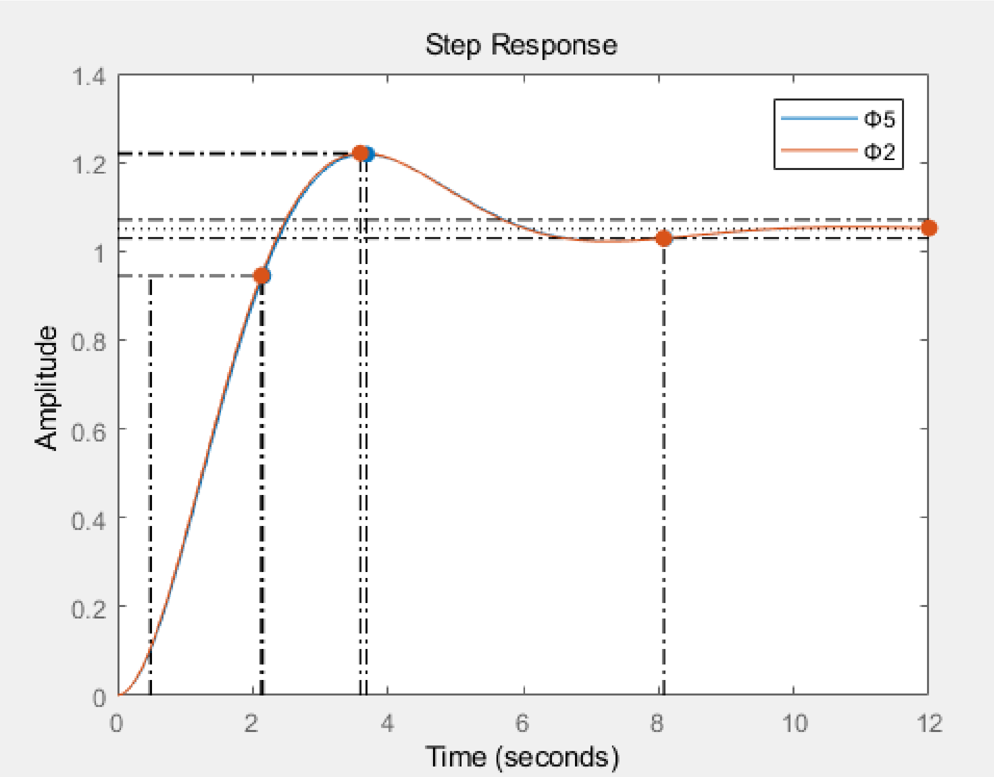


图 10 作业 3-2(5)输出结果

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	tp	ts	σ%
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	tp	ts	σ%
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：

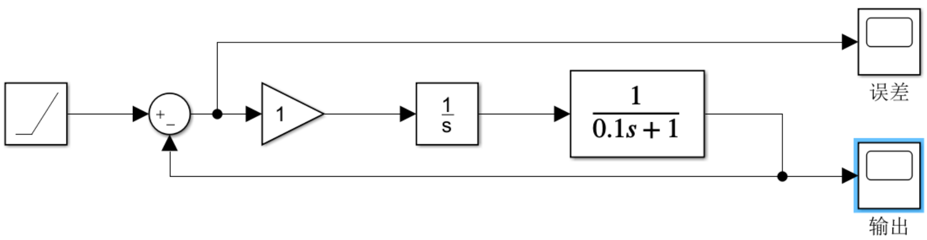


图 11 作业 3-3 K=0.1 时 Simulink 模型图

误差信号曲线如图 12 所示：

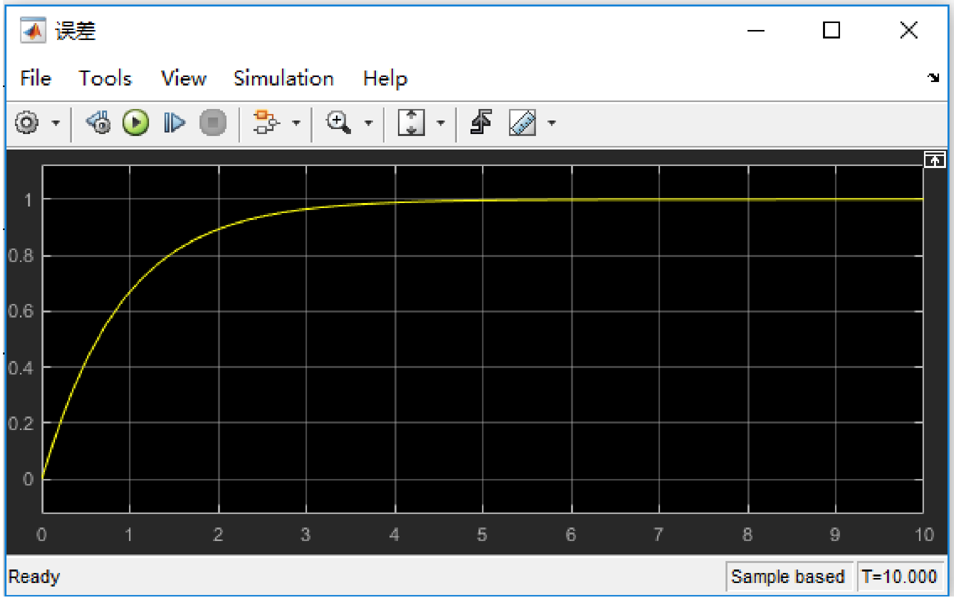


图 12 作业 3-3 K=0.1 时误差信号曲线图

输出信号曲线如图 13 所示：

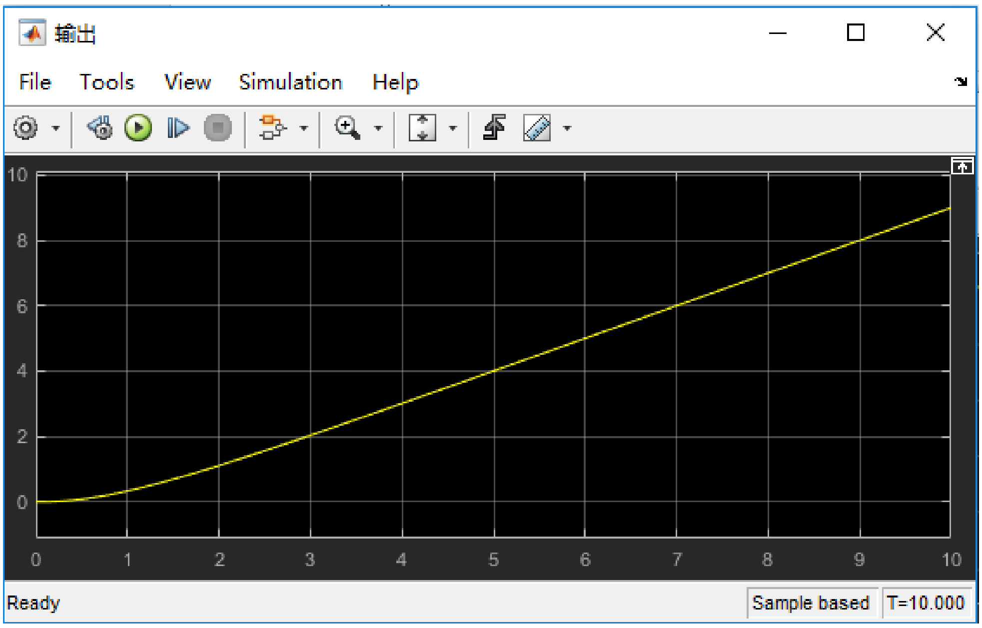


图 13 作业 3-3 K=0.1 时输出信号曲线图

当 K=1 时，Simulink 模型如图 14 所示：

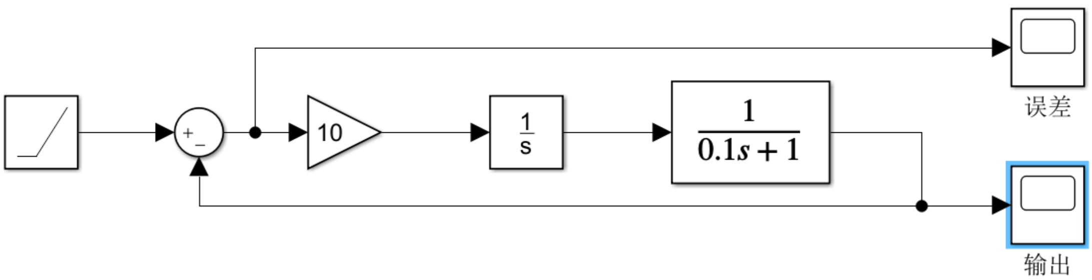


图 14 作业 3-3 K=1 时 Simulink 模型图

误差信号曲线如图 15 所示：

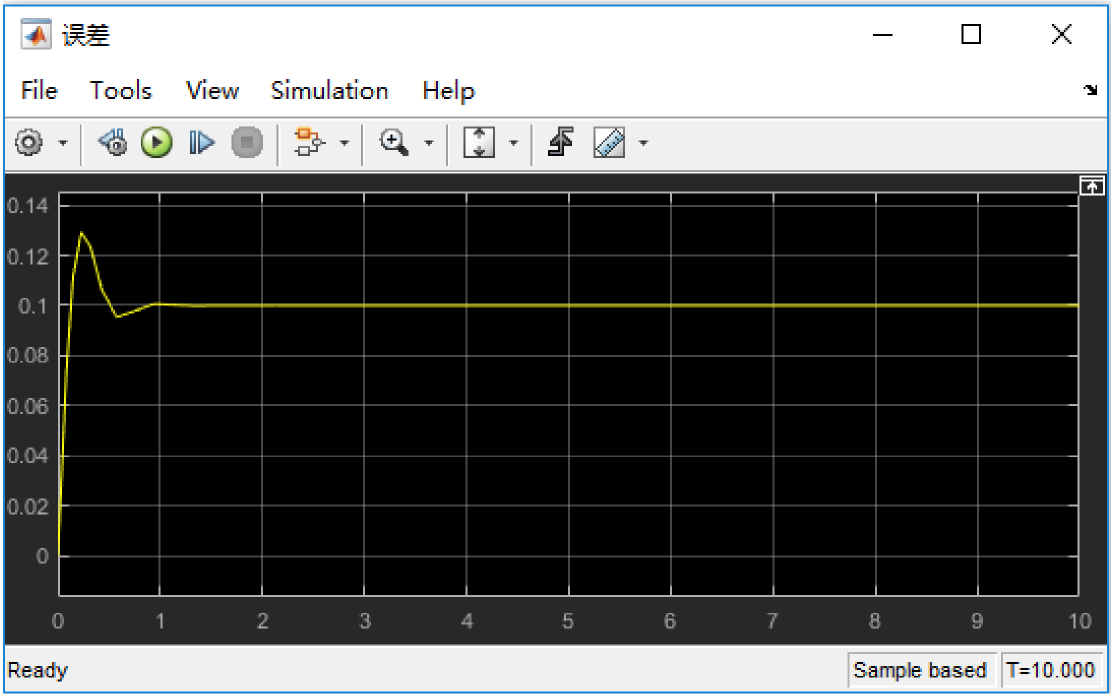


图 15 作业 3-3 K=1 时误差信号曲线图

输出信号曲线如图 16 所示：

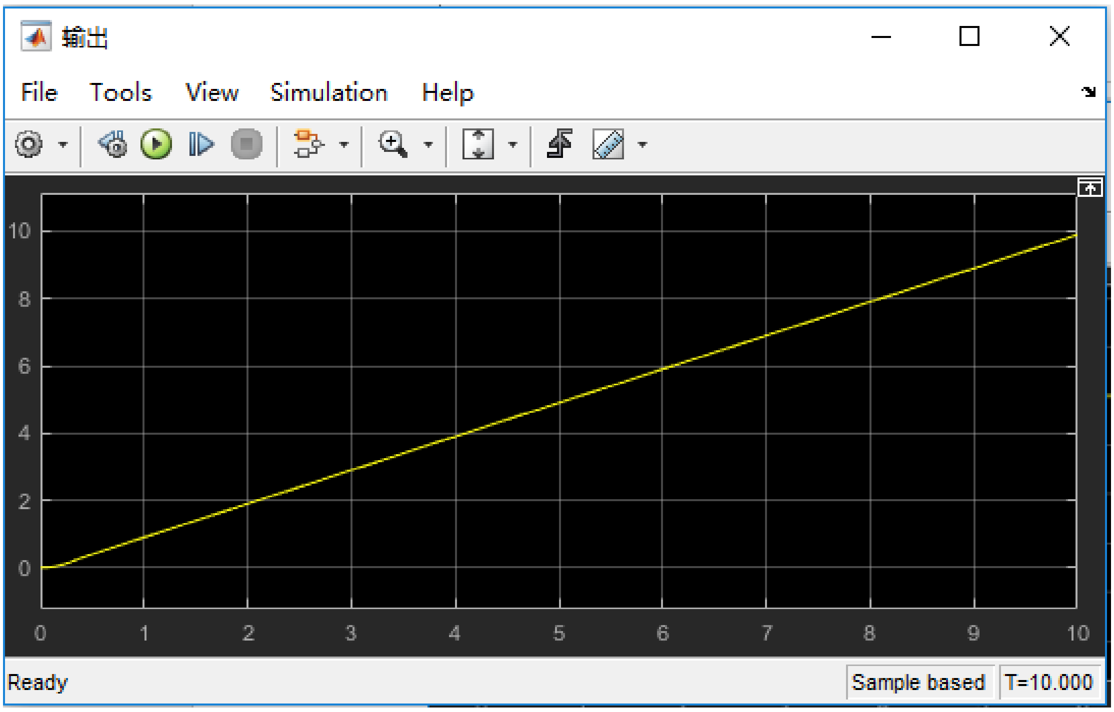


图 16 作业 3-3 K=1 时输出信号曲线图

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：

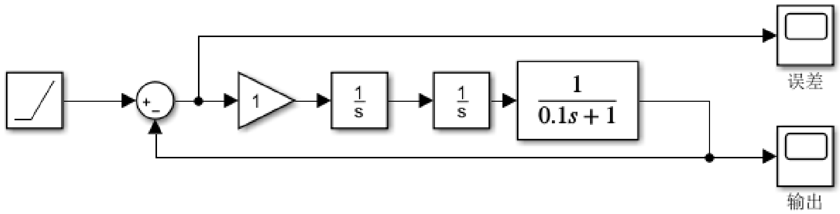


图 17 作业 3-4 Simulink 模型图

误差信号曲线如图 18 所示：

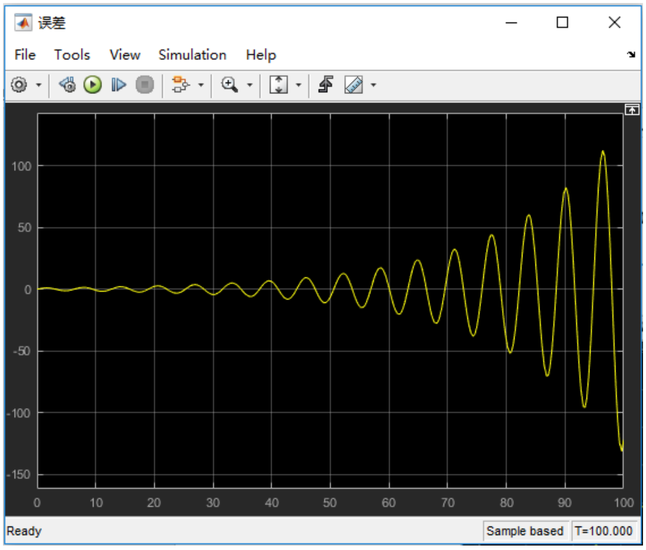


图 18 作业 3-4 误差信号曲线图

输出波形曲线如图 19 所示：

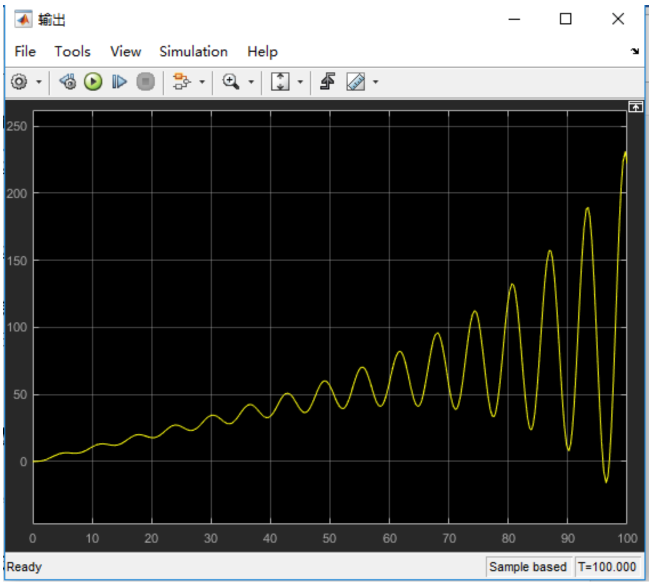


图 19 作业 3-4 输出波形曲线图

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：

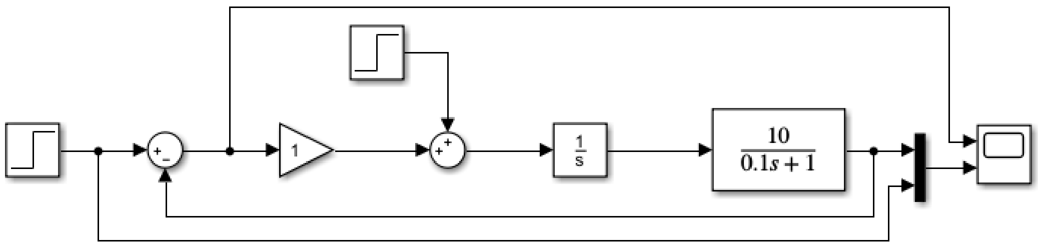


图 20 作业 3-5 Simulink 模型图

系统的输入误差输出对比波形图如图 21 所示：

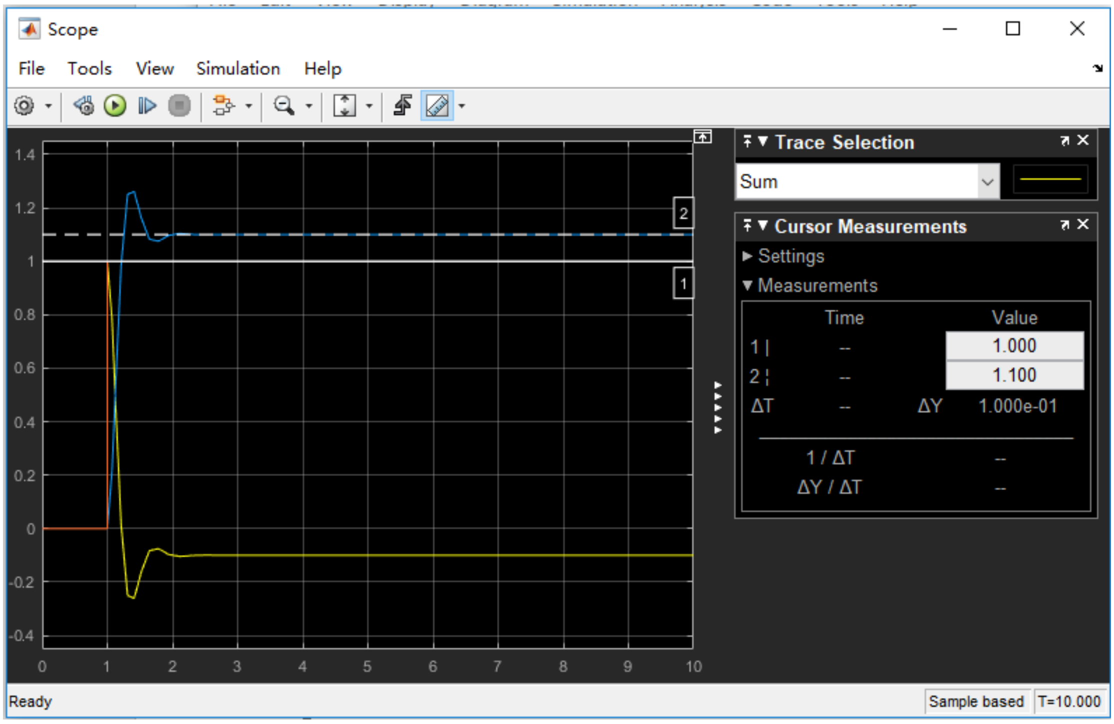


图 21 作业 3-5 输入误差输出对比波形图

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 wn	超调量 σ%	调节时间 ts
ξ=0	-2.9990+0.0000i 0.0000+1.4131i 0.0000-1.4131i	6.3095	1.5		
ξ=0.25	-2.5263+0.0000i -0.2368+0.8645i -0.2368-0.8645i	2.0297	0.939	39.5%	16
ξ=0.7	-2.3010+0.0000i -0.3495+0.5192i -0.3495-0.5192i	0.9012	0.666	11.5%	9.82
ξ=1	-2.1547 -0.4242 -0.4211	0.3849	0.424	0%	14.3
		0.2			

ξ=0 时，根轨迹图如图 22 所示：

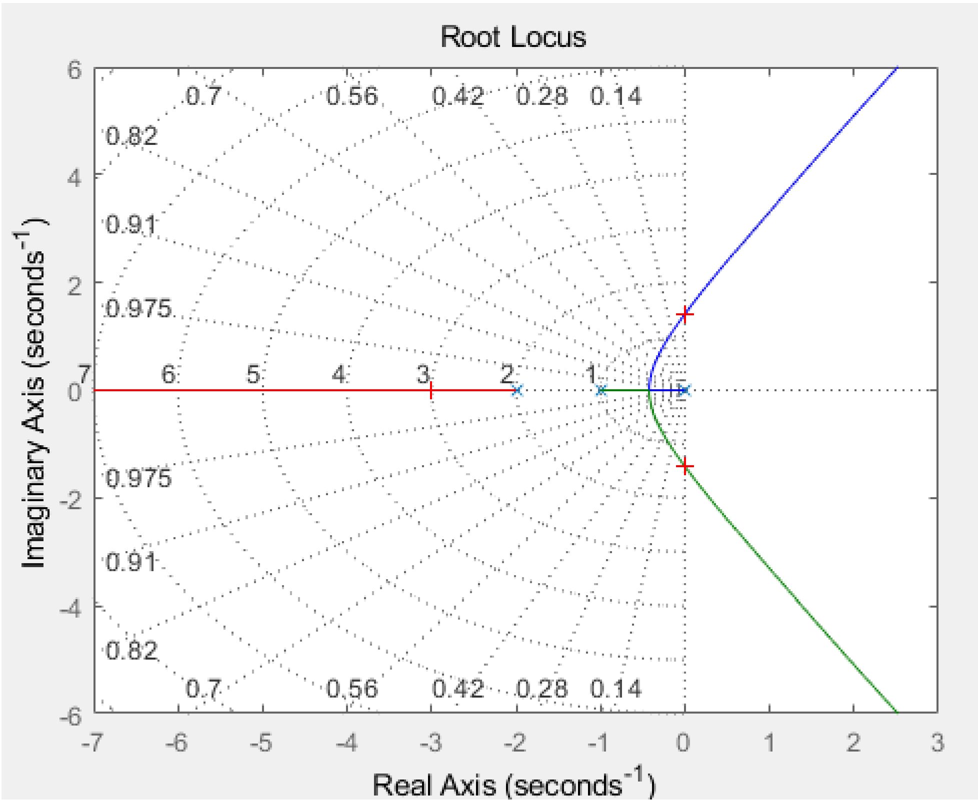


图 22 作业 4-1 ξ=0 时根轨迹图

对应的阶跃响应曲线如图 23 所示：

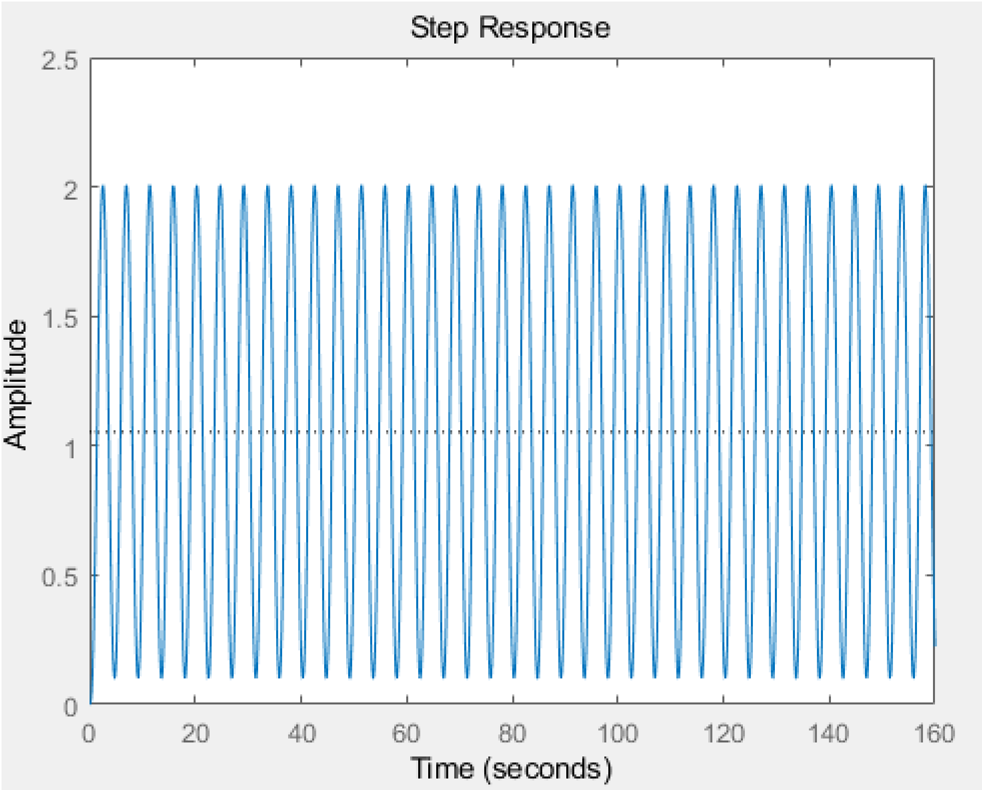


图 23 作业 4-1 ξ=0 时阶跃响应曲线

ξ=0.25 时，根轨迹图如图 24 所示：

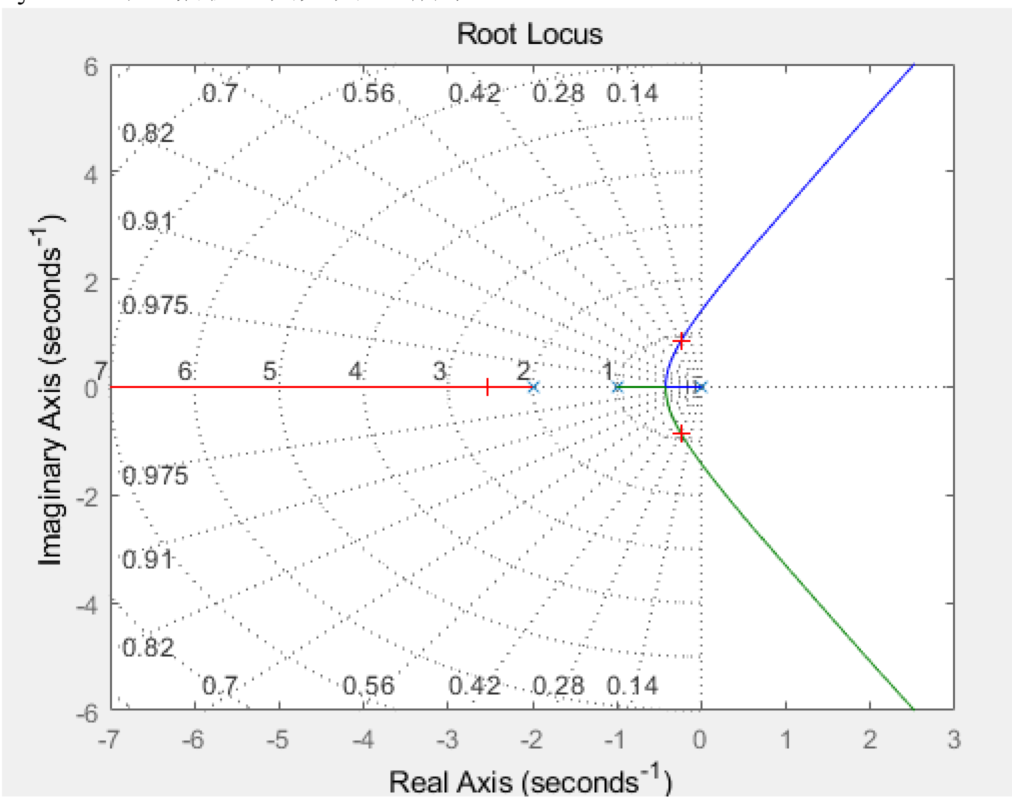


图 24 作业 4-1 ξ=0.25 时根轨迹图

对应系统的阶跃响应曲线如图 25 所示：

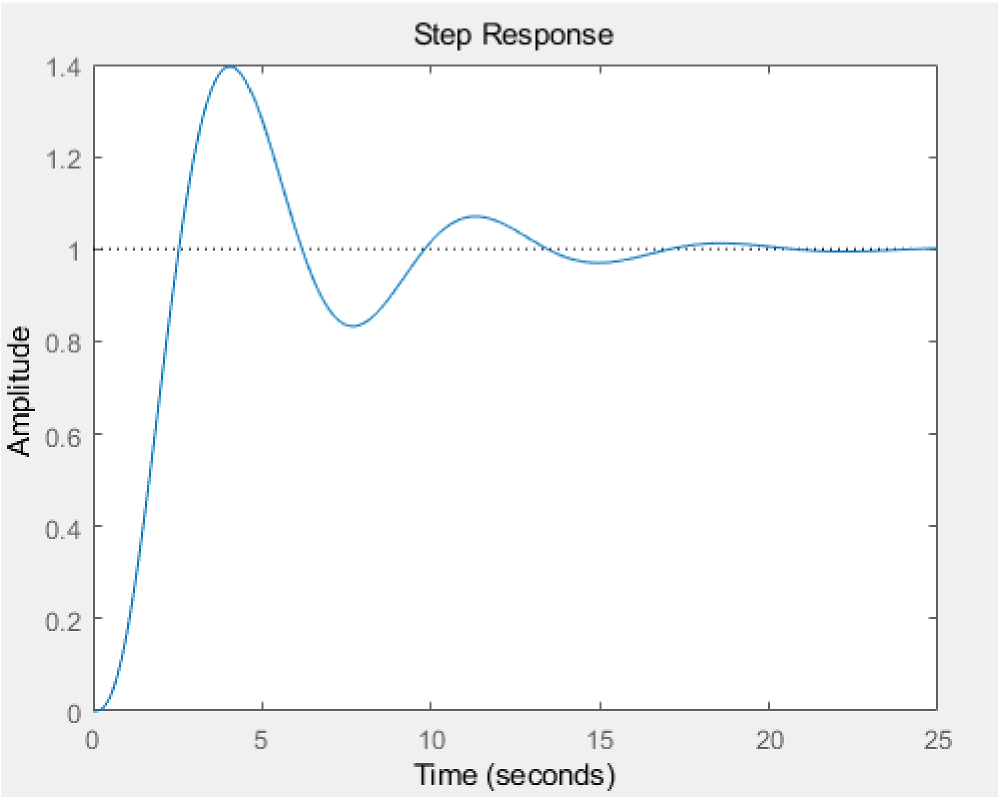


图 25 作业 4-1 ξ =0.25 时阶跃响应曲线

ξ=0.7 时，根轨迹图如图 26 所示：

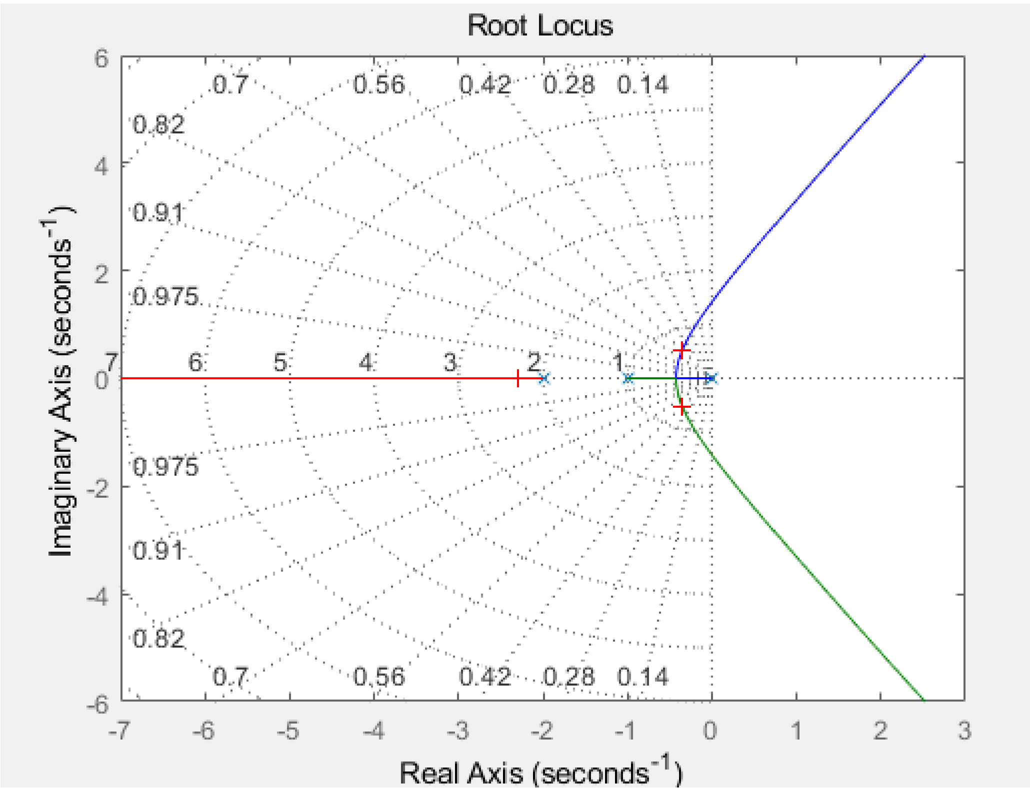


图 26 作业 4-1 ξ =0.7 时根轨迹图

对应系统的阶跃响应曲线如图 27 所示：

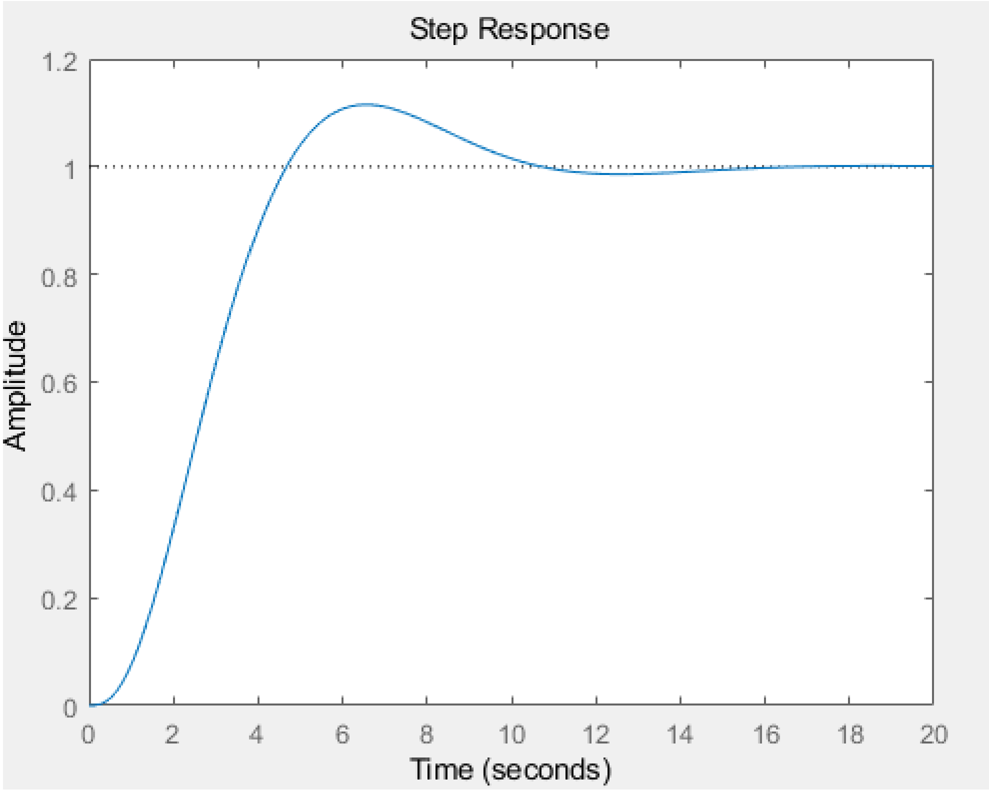


图 27 作业 4-1 ξ=0.7 时阶跃响应曲线

ξ=1 时，根轨迹图如图 28 所示：

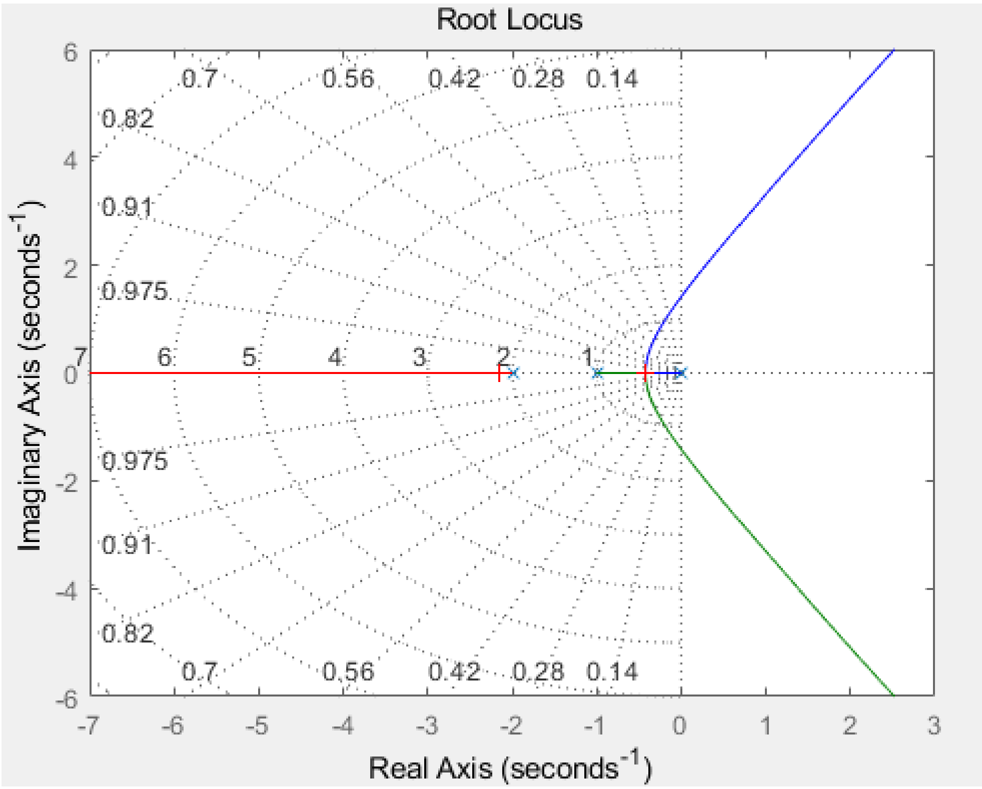


图 28 作业 4-1 ξ=1 时根轨迹图

对应系统的阶跃响应曲线如图 29 所示：

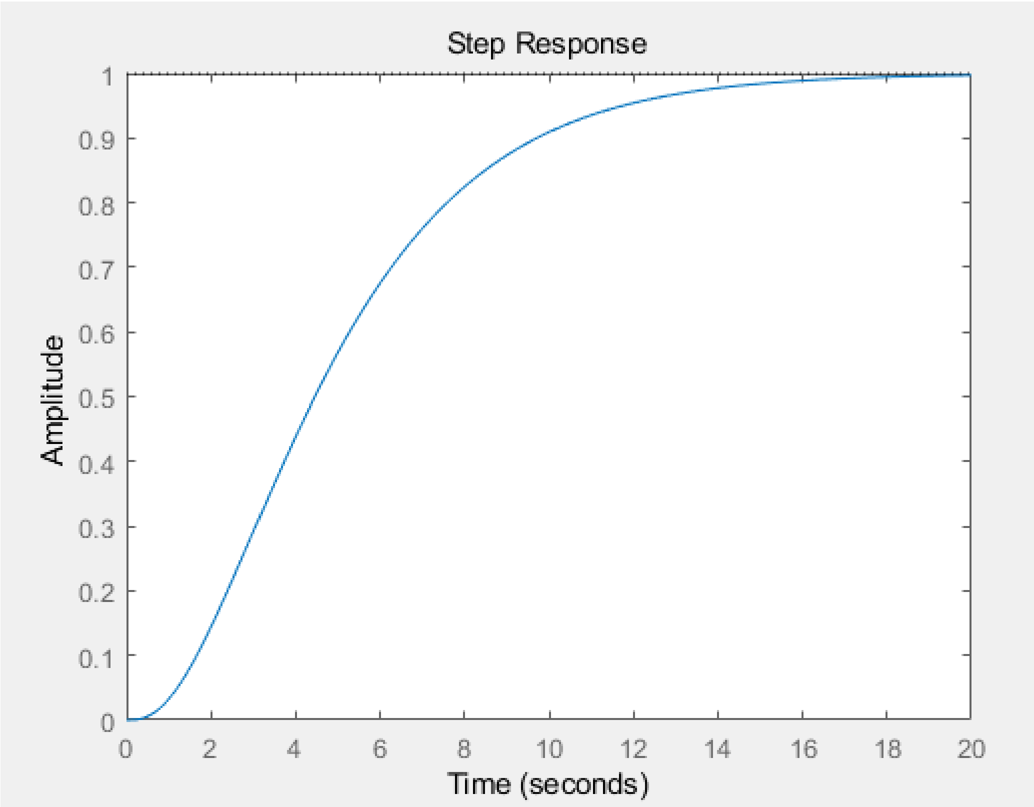


图 29 作业 4-1 ξ=1 时阶跃响应曲线

K=0.2 时，根轨迹图如图 30 所示：

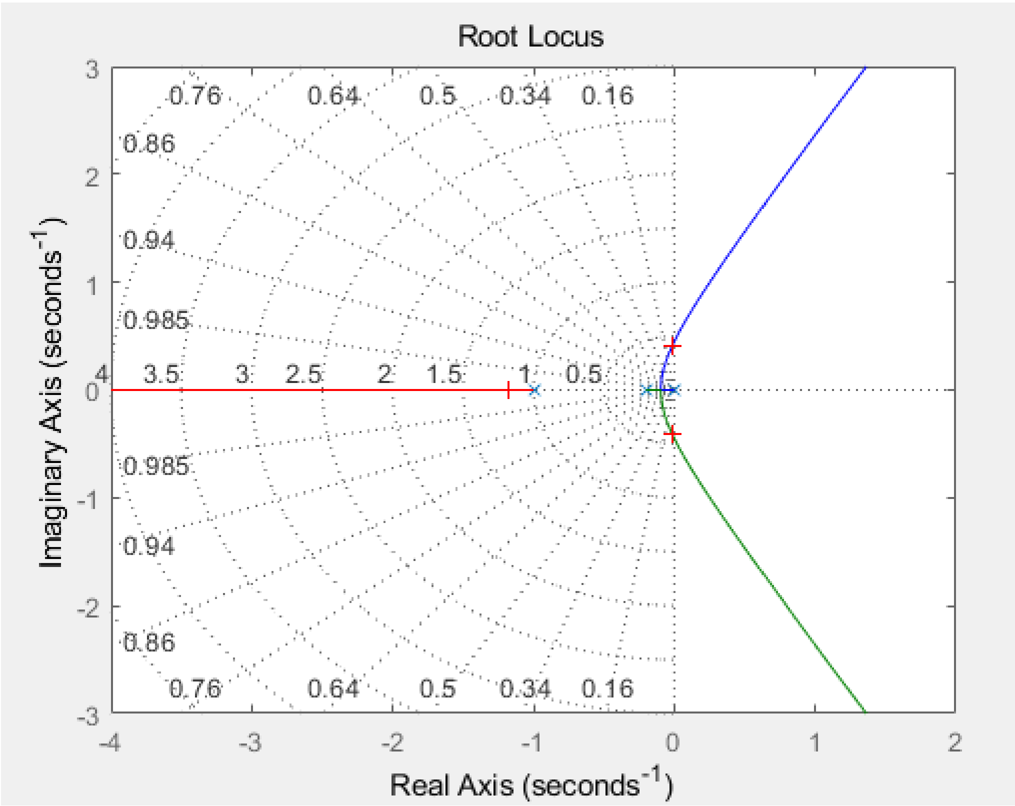


图 30 作业 4-1 K=0.2 时根轨迹图

对应系统的阶跃响应曲线如图 31 所示：

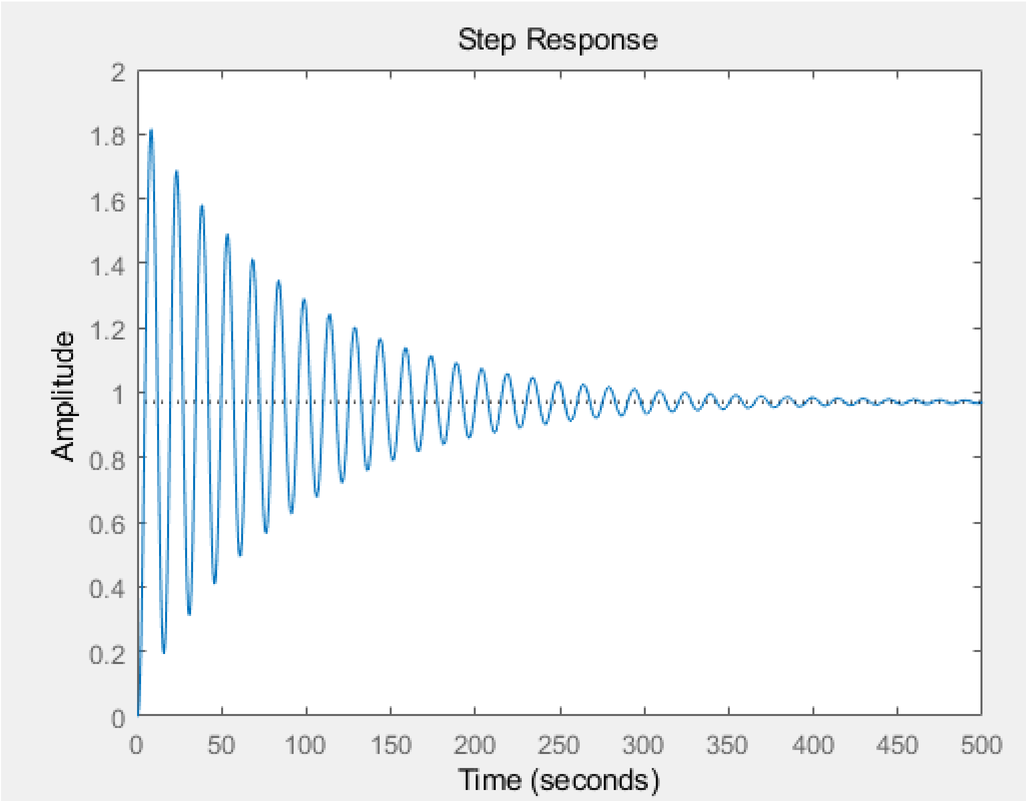


图 31 作业 4-1 K=0.2 时阶跃响应曲线

【作业 4-2】已知开环系统传递函数 $G(s)=\dfrac{K}{s(s+1)}$ **比较增加一个开环几点** $s=-2$ **后，** $G_1(s)=\dfrac{K(s+2)}{s(s+1)}$**，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：

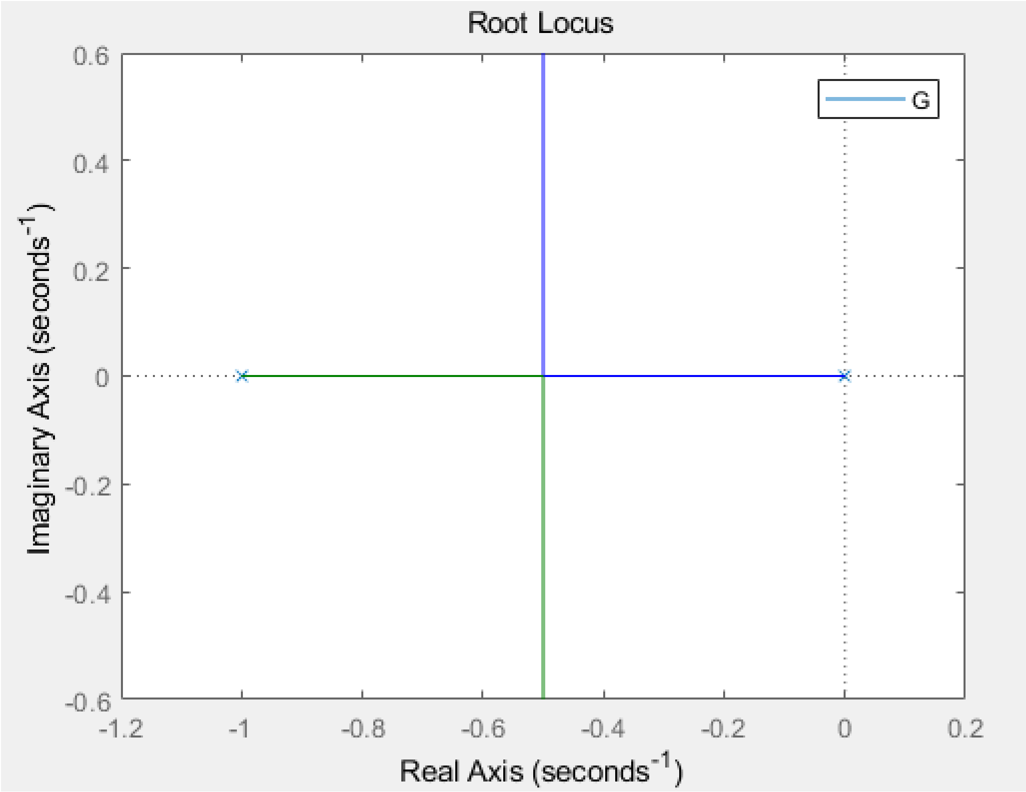


图 32 作业 4-2 G(s)根轨迹曲线

$G_1(s)$ 根轨迹曲线如图 33 所示：

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。

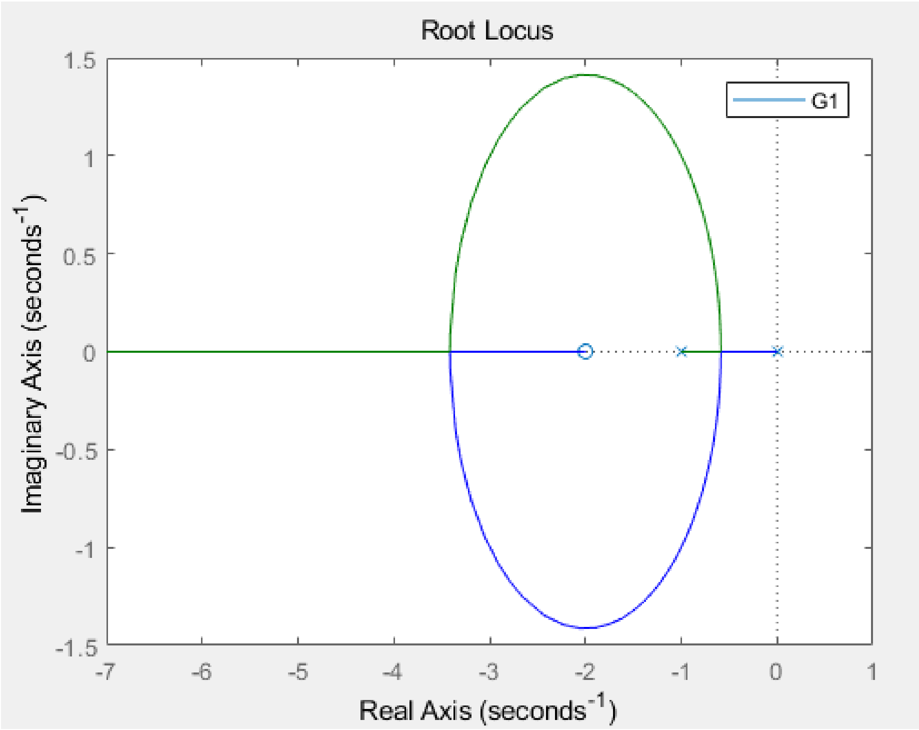


图 33 作业 4-2 $G_1(s)$根轨迹曲线

G(s)和 $G_1(s)$阶跃响应曲线如图 34 所示：

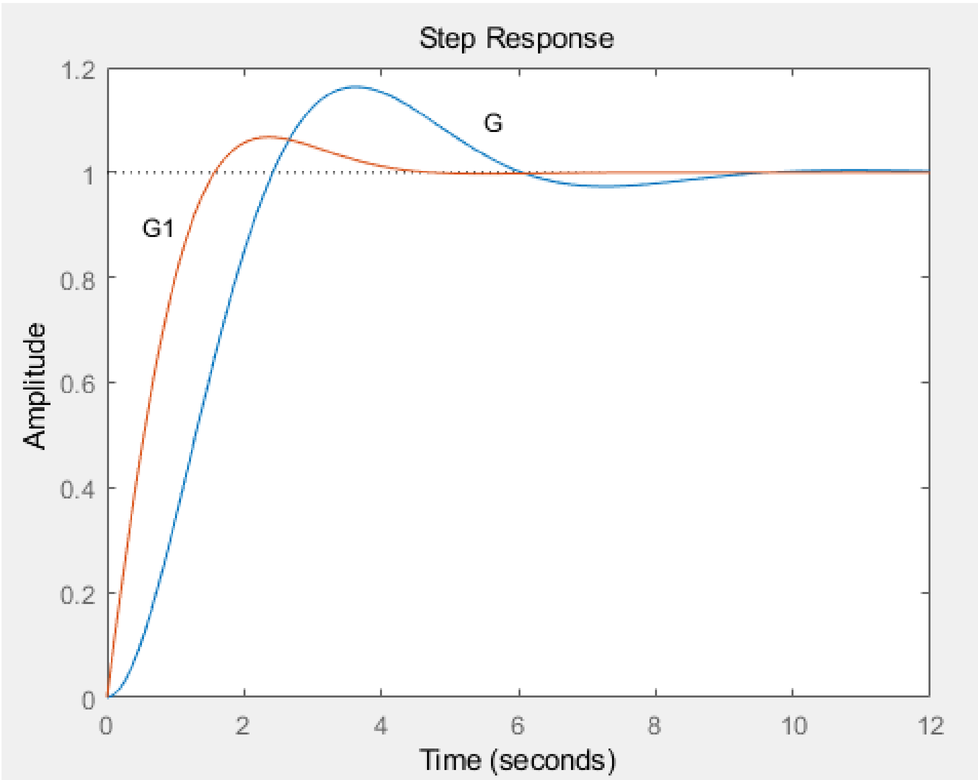


图 34 作业 4-2 G(s)和 $G_1(s)$根轨迹曲线

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()。

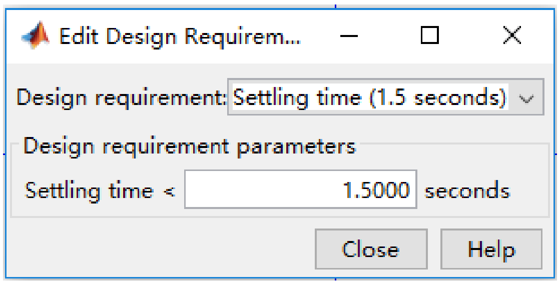


图 35 按题目要求设计参数

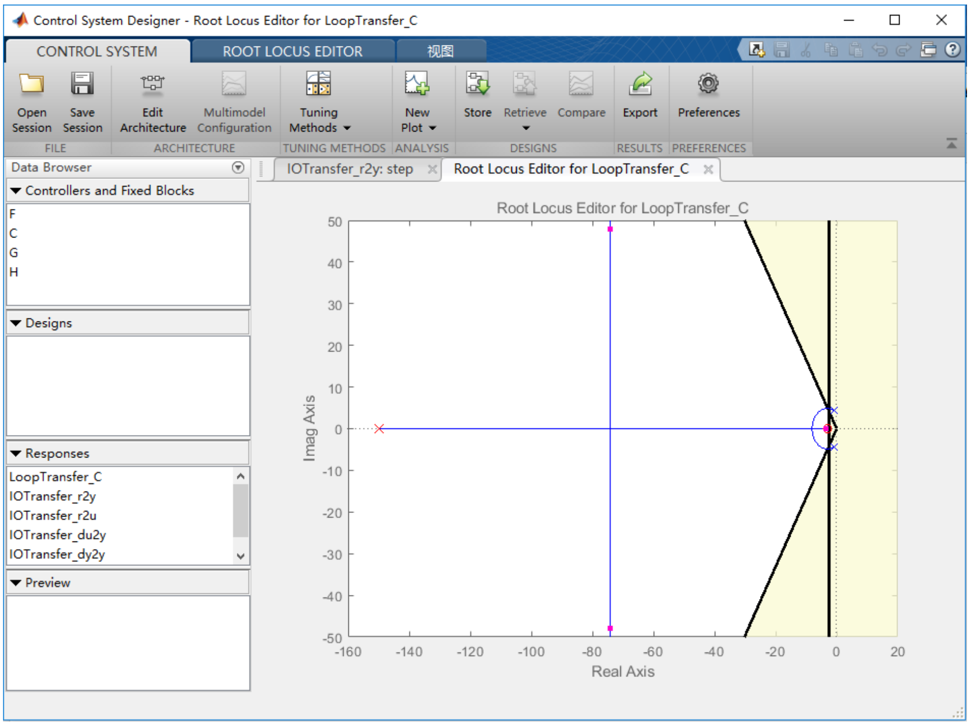


图 36 零极点位置图

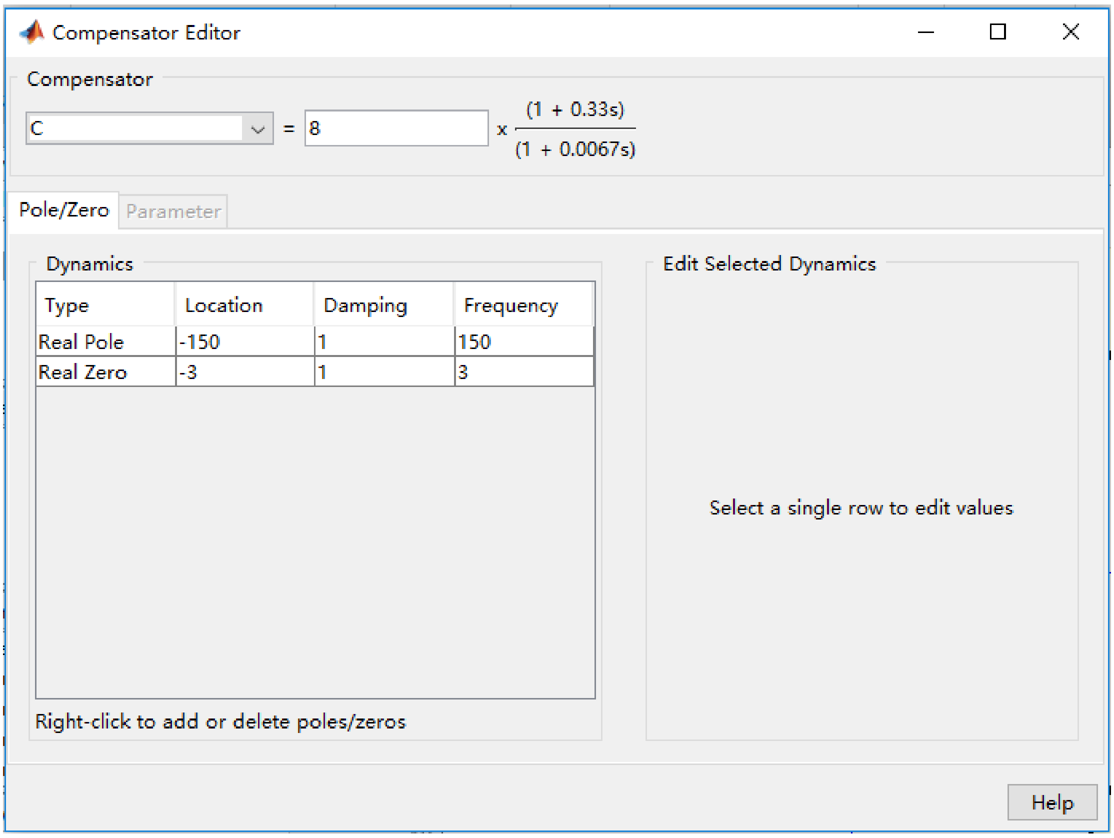


图 37 零极点参数设置

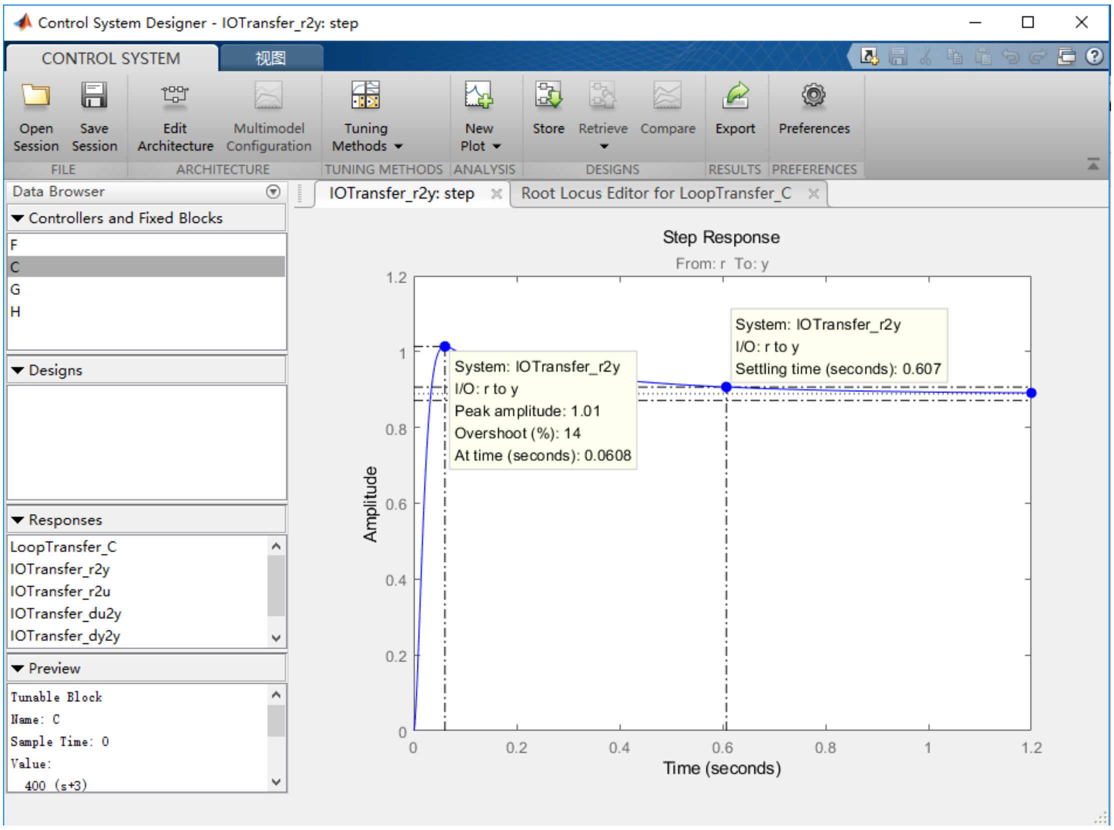


图 38 阶跃响应满足题目要求

【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()。

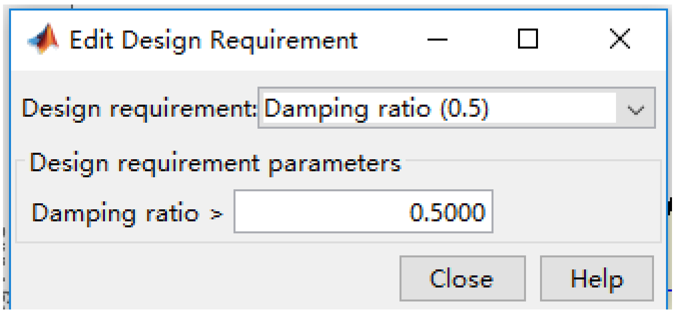


图 39 按题目要求设计参数

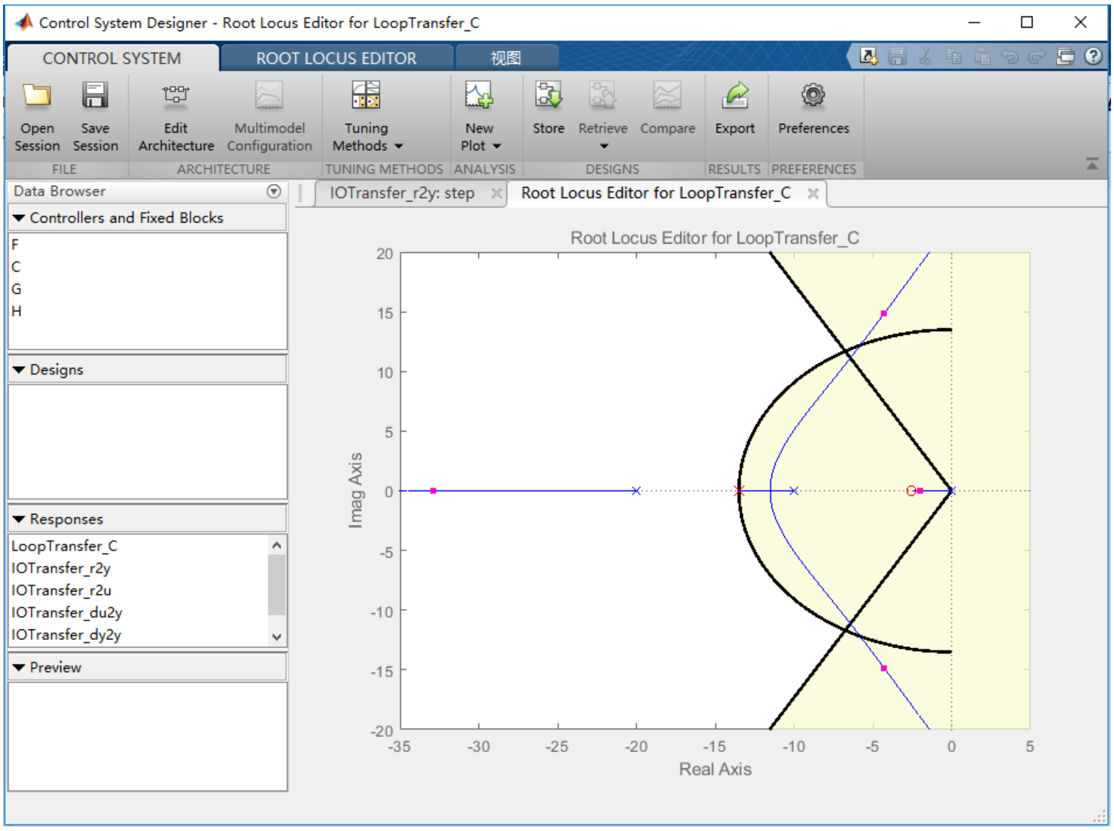


图 40 零极点位置图

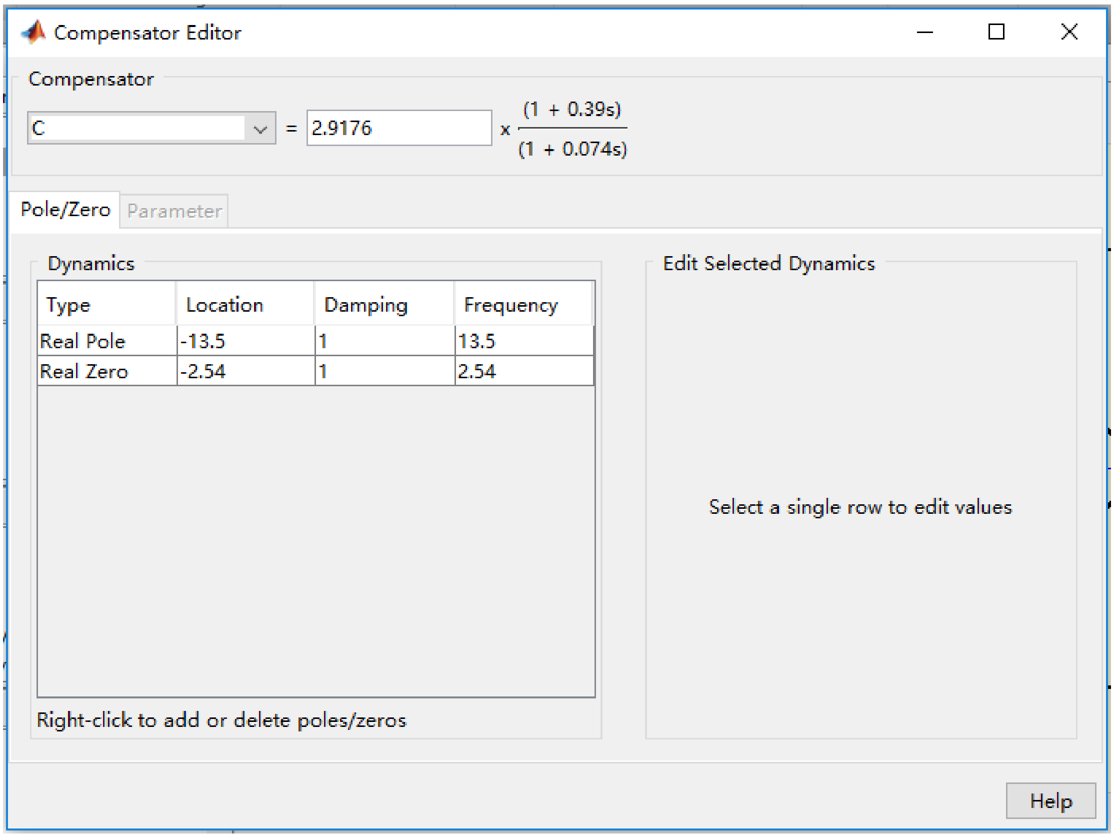


图 41 零极点参数设置

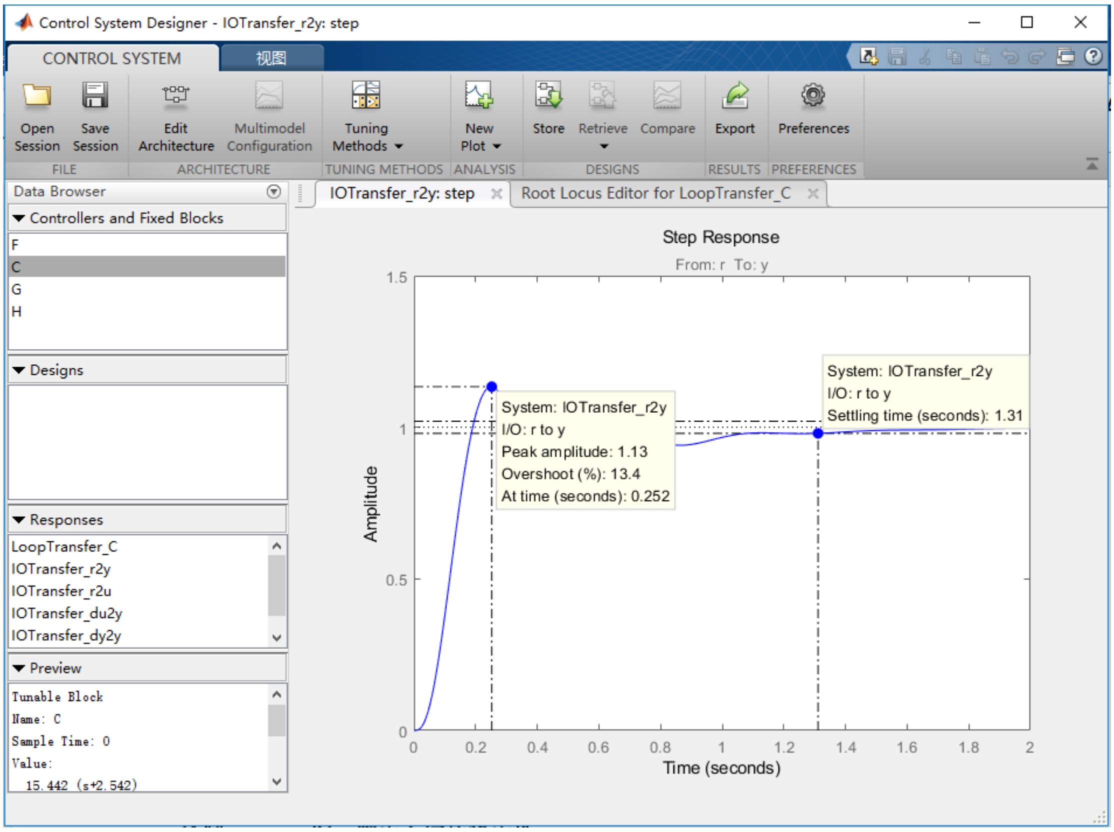


图 42 阶跃响应满足题目要求

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
```

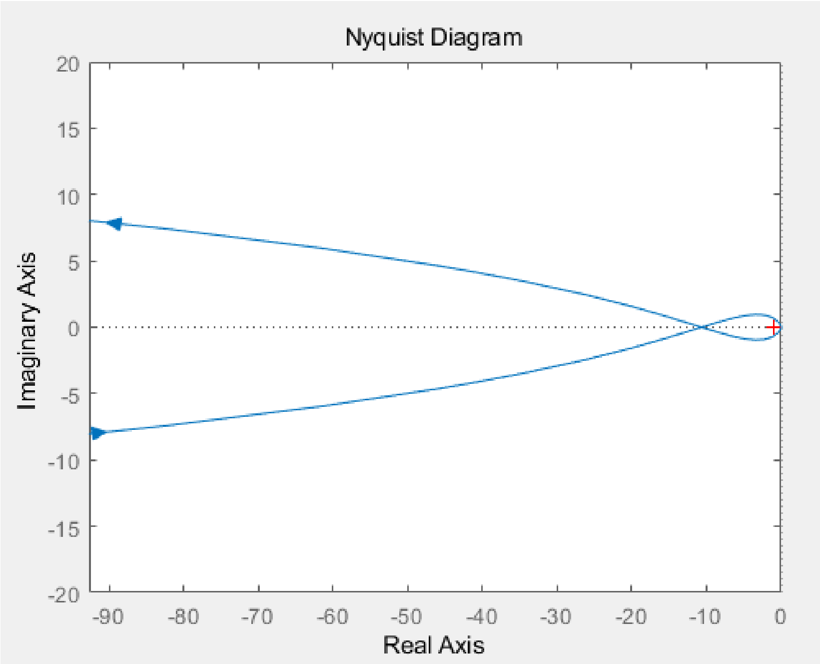


图 43 系统的奈奎斯特图

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,wc1]=margin(G)
  %Gc=feedback(G,1);
  %step(Gc)
```

输出结果：

```
Gm1 =
     3.4810
Pm1 =
    22.2599
wg1 =
    31.6228
wc1 =
    16.3053
```

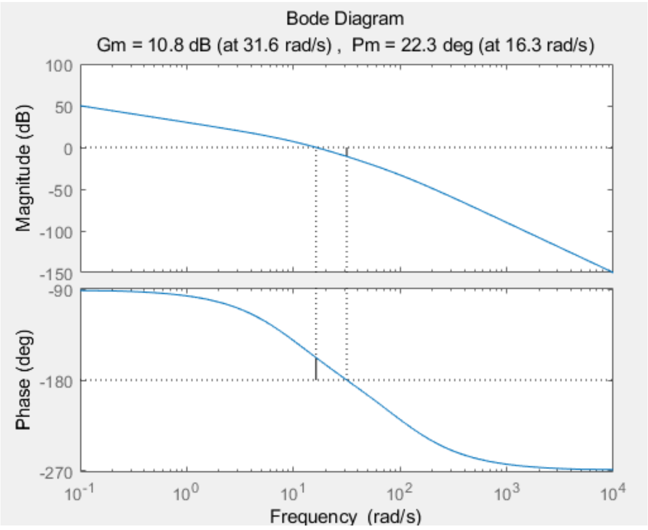


图 44 开环系统的 Bode 图

分析：

相位裕度 γ=22.3° 幅值裕度 h=10.8dB。在伯德图上 La(ω)>0dB 部分，对应 φ(ω)部分没有穿越直线 φ(ω)=-180°，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
```

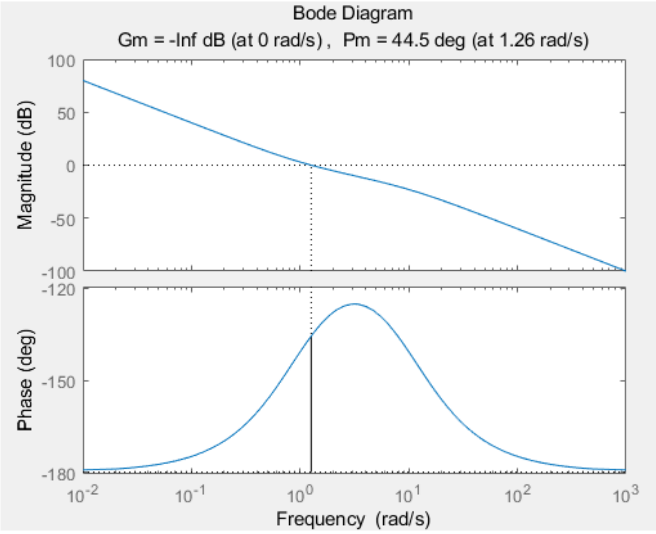


图 45 开环系统的 Bode 图

分析：

幅值裕度为 0，相角裕度大于 0。在伯德图上 La(ω)>0dB 部分，对应 φ(ω)部分没有穿越直线 φ(ω)=-180°，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
```

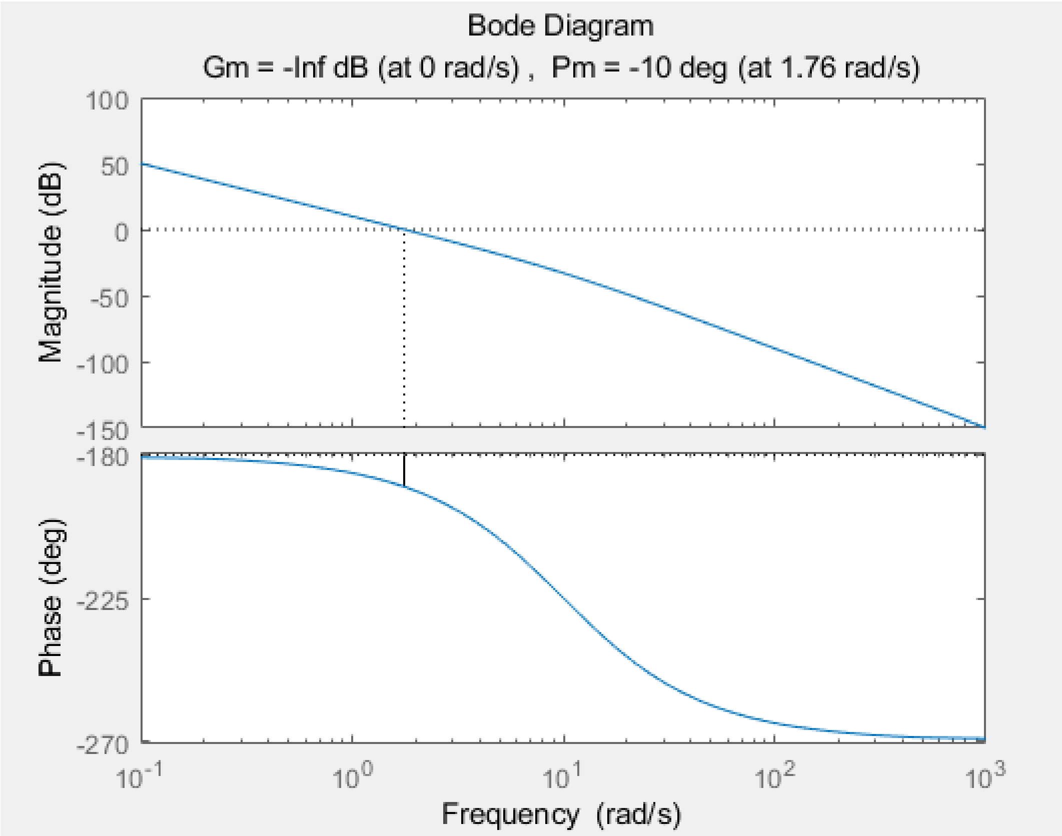


图 46 开环系统的 Bode 图

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 γ >35°，增益裕度>10dB

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
```

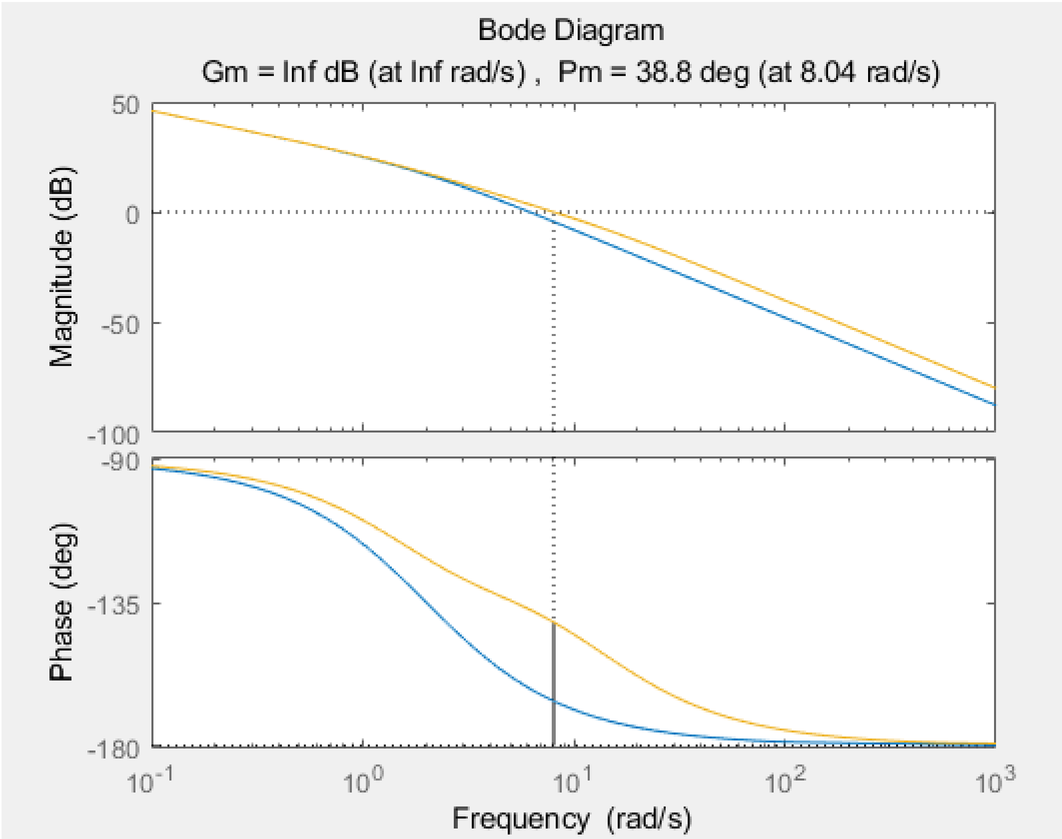
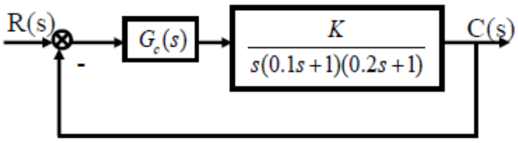


图 47 校正前后系统的 Bode 图

【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 γ>40°，增益裕度 h_g>10dB，截止频率 ω_c>2.3rad/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.
```

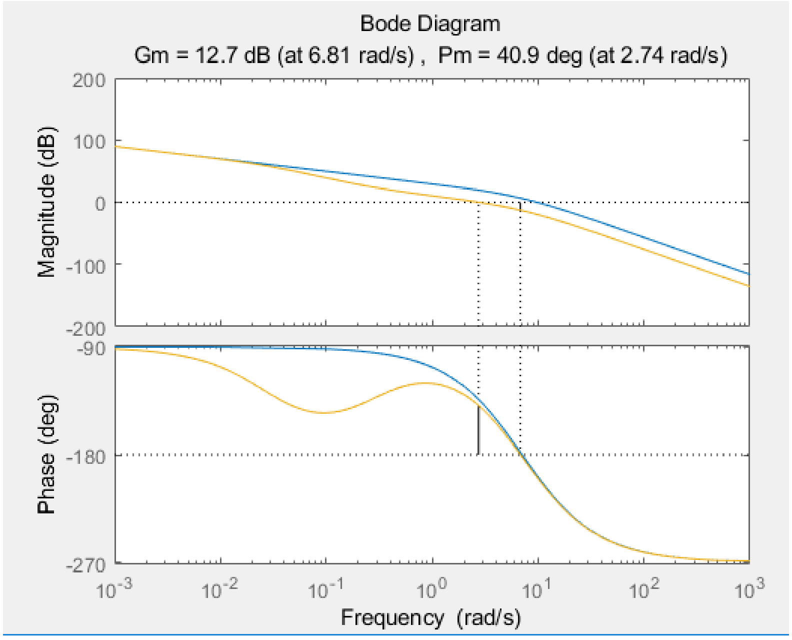


图 48 校正前后系统的 Bode 图

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。

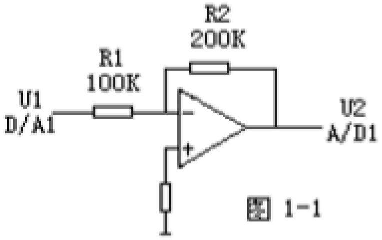


图 1-1

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

2. 惯性环节的模拟电路及其传递函数如图 1-2。

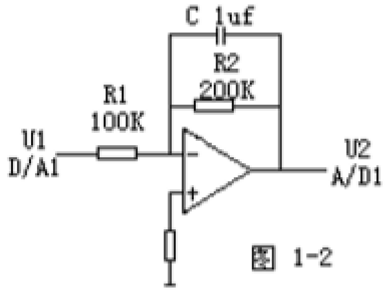


图 1-2

$$G(s) = -\frac{R_2}{R_1 + R_1R_2Cs}$$

3. 积分环节的模拟电路及传递函数如图 1-3。

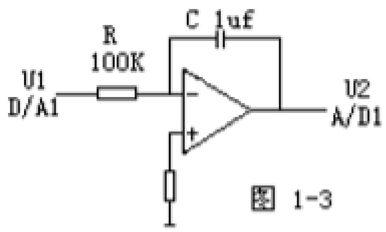


图 1-3

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

4. 微分环节的模拟电路及传递函数如图 1-4。

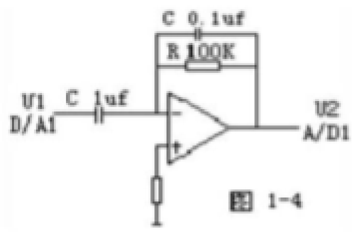


图 1-4

$$G(s) = -RCs$$

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）。

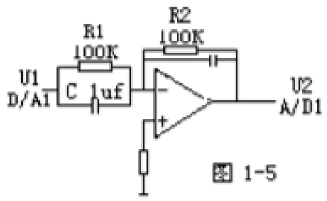


图 1-5

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

6.比例+积分环节的模拟电路及传递函数如图 1-6。

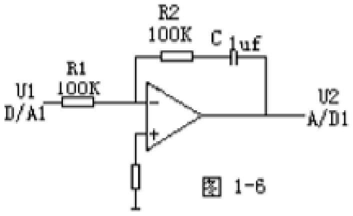


图 1-6

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

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=1uf，K=1，T=0.1s 时

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

R1=100K，R2=200K, C=1uf，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=1uf 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=1uf 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

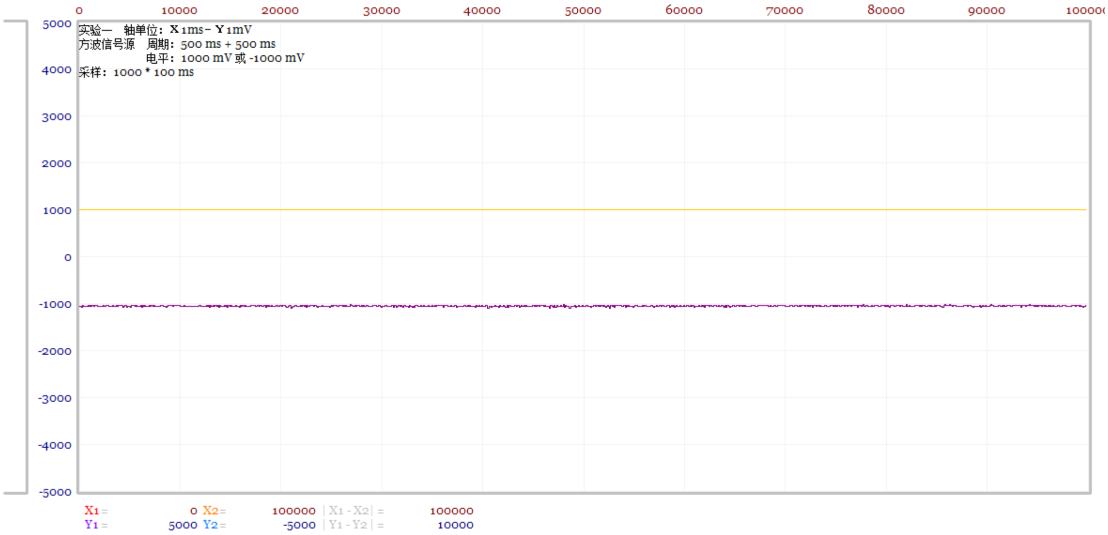

实验一 轴单位：X 1ms- Y 1mV
方波信号源 周期：500 ms + 500 ms
电平：1000 mV 或 -1000 mV
采样：1000 * 100 ms
X1 = 0 X2 = 100000 |X1 - X2| = 100000
Y1 = 5000 Y2 = -5000 |Y1 - Y2| = 10000

图 49

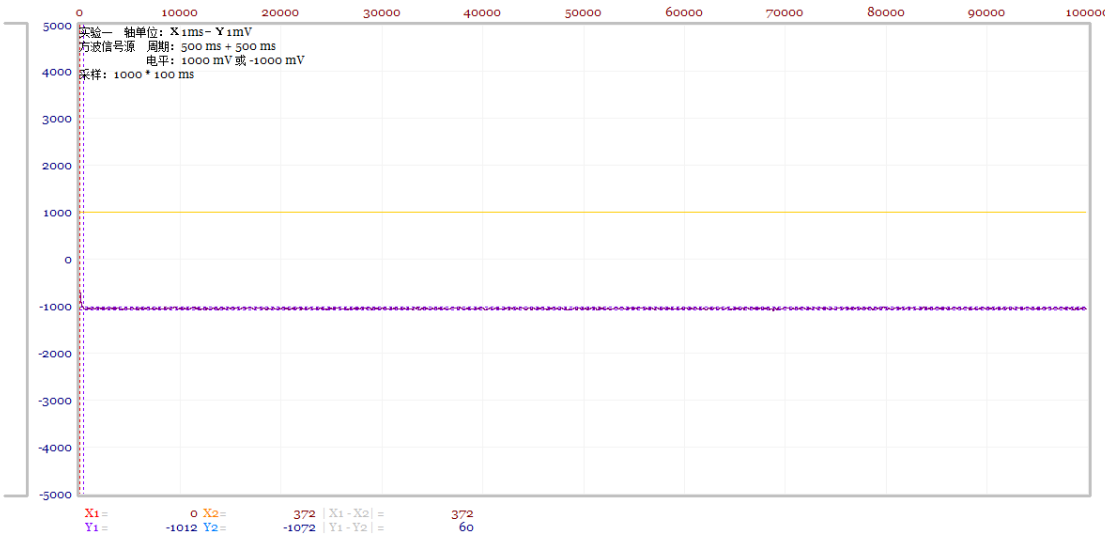

实验一 轴单位：X 1ms- Y 1mV
方波信号源 周期：500 ms + 500 ms
电平：1000 mV 或 -1000 mV
采样：1000 * 100 ms
X1 = 0 X2 = 372 |X1 - X2| = 372
Y1 = -1012 Y2 = -1072 |Y1 - Y2| = 60

图 50


实验一 轴单位：X 1ms- Y 1mV
方波信号源 周期：500 ms + 500 ms
电平：1000 mV 或 -1000 mV
采样：1000 * 100 ms
X1 = 0 X2 = 93 |X1 - X2| = 93
Y1 = -5000 Y2 = -4750 |Y1 - Y2| = 250

图 51


实验一 轴单位：X 1ms– Y 1mV
方波信号源 周期：500 ms + 500 ms
电平：1000 mV 或 -1000 mV
采样：1000 * 10 ms
X1 = 904 X2 = 10000 |X1 - X2| = 9096
Y1 = -4550 Y2 = -4978 |Y1 - Y2| = 428

图 52

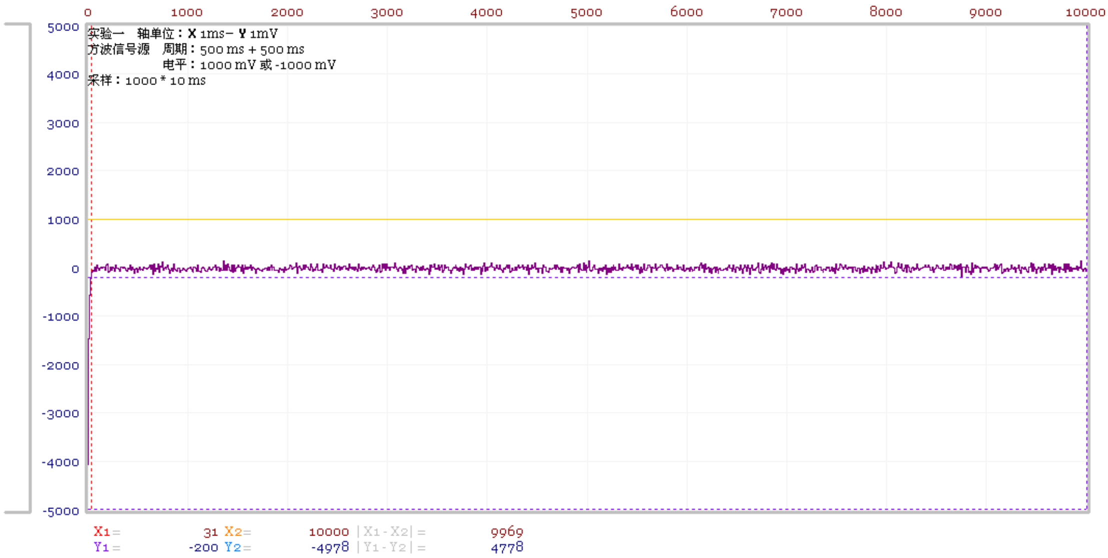

实验一 轴单位：X 1ms– Y 1mV
方波信号源 周期：500 ms + 500 ms
电平：1000 mV 或 -1000 mV
采样：1000 * 10 ms
X1 = 31 X2 = 10000 |X1 - X2| = 9969
Y1 = -200 Y2 = -4978 |Y1 - Y2| = 4778

图 53


实验一 轴单位：X 1ms– Y 1mV
方波信号源 周期：500 ms + 500 ms
电平：1000 mV 或 -1000 mV
采样：1000 * 100 ms
X1 = 837 X2 = 0 |X1 - X2| = 837
Y1 = 0 Y2 = -4750 |Y1 - Y2| = 4750

图 54

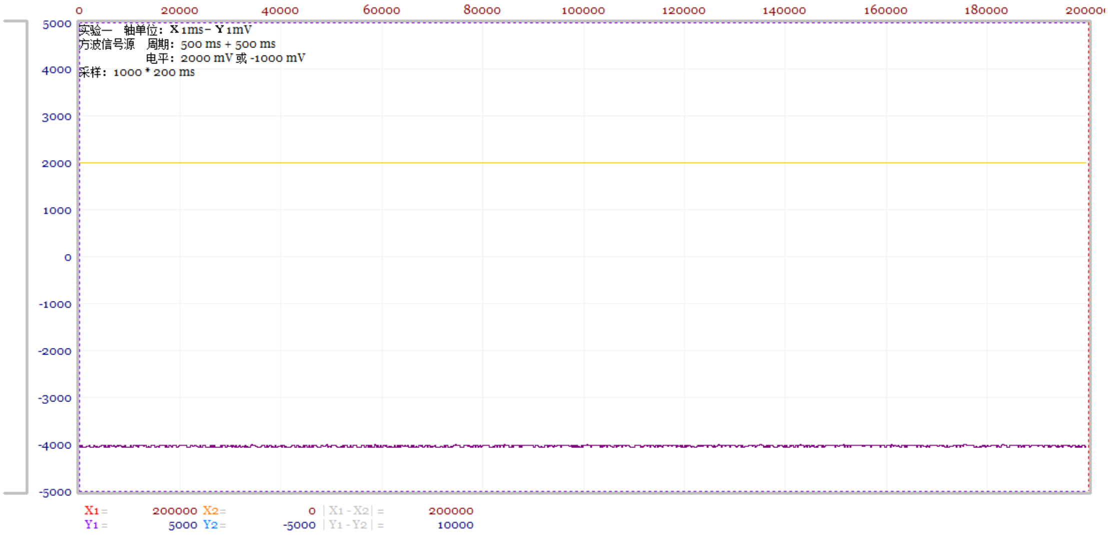

实验一 轴单位：X 1ms– Y 1mV
方波信号源 周期：500 ms + 500 ms
电平：2000 mV 或 -1000 mV
采样：1000 * 200 ms
X1 = 200000 X2 = 0 |X1 - X2| = 200000
Y1 = 5000 Y2 = -5000 |Y1 - Y2| = 10000

图 55


实验一 轴单位：X 1ms– Y 1mV
方波信号源 周期：500 ms + 500 ms
电平：1000 mV 或 -1000 mV
采样：1000 * 10 ms
X1 = 478 X2 = 10000 |X1 - X2| = 9522
Y1 = -1900 Y2 = -4978 |Y1 - Y2| = 3078

图 56

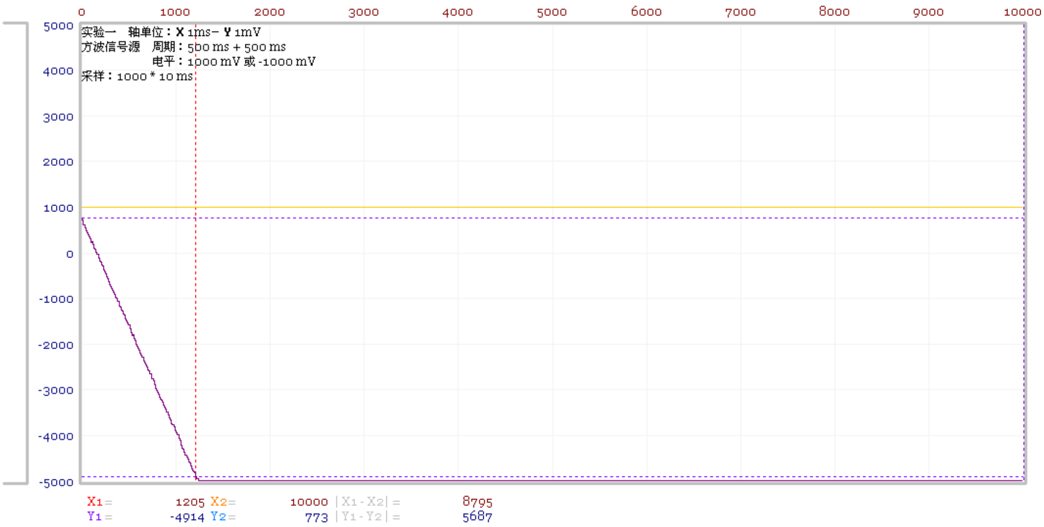

实验一 轴单位：X 1ms– Y 1mV
方波信号源 周期：500 ms + 500 ms
电平：1000 mV 或 -1000 mV
采样：1000 * 10 ms
X1 = 1205 X2 = 10000 |X1 - X2| = 8795
Y1 = -4914 Y2 = 773 |Y1 - Y2| = 5687

图 57

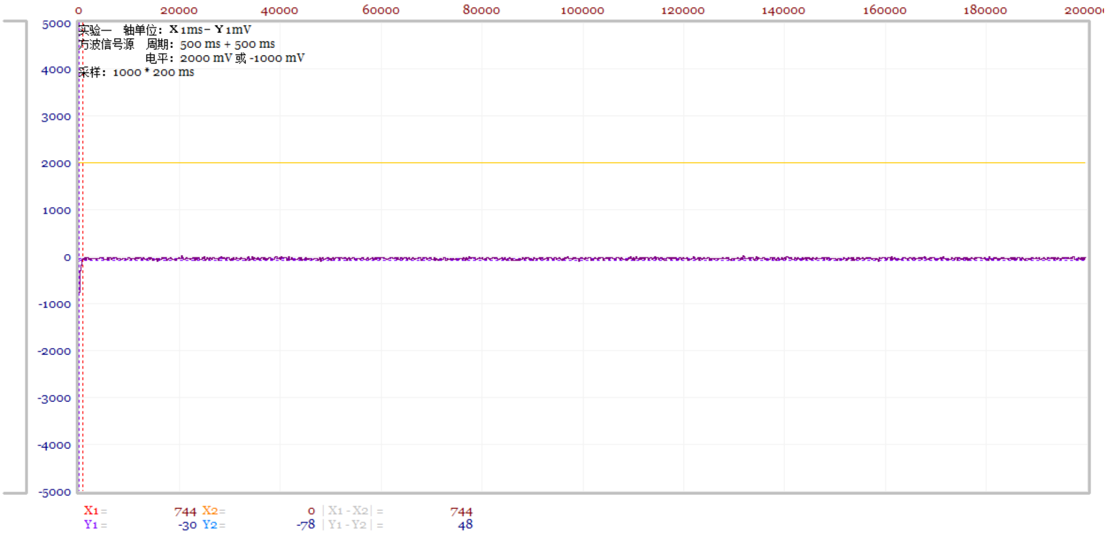

实验一　轴单位：X 1ms－ Y 1mV
方波信号源　周期：500 ms + 500 ms
电平：2000 mV 或 -1000 mV
采样：1000 * 200 ms
X1 = 744 X2 = 0 |X1 - X2| = 744
Y1 = -30 Y2 = -78 |Y1 - Y2| = 48

图 58

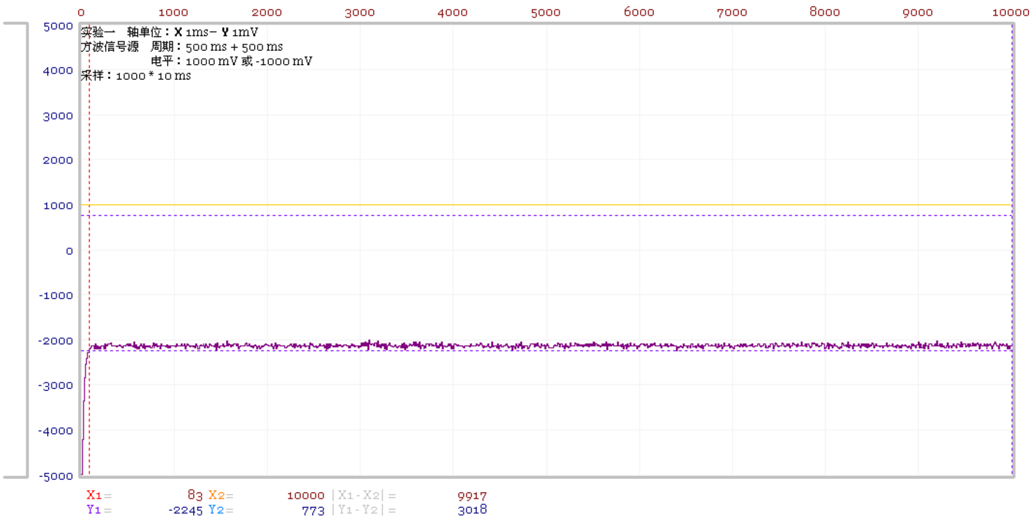

实验一　轴单位：X 1ms－ Y 1mV
方波信号源　周期：500 ms + 500 ms
电平：1000 mV 或 -1000 mV
采样：1000 * 10 ms
X1 = 83 X2 = 10000 |X1 - X2| = 9917
Y1 = -2245 Y2 = 773 |Y1 - Y2| = 3018

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，也深入地了解到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 Ts 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：

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

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：

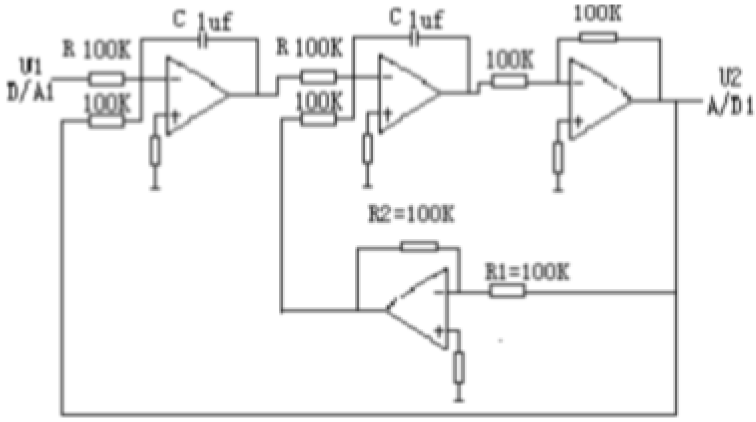


图 2-1 二阶系统模拟电路图

电路的结构图如图 2-2：

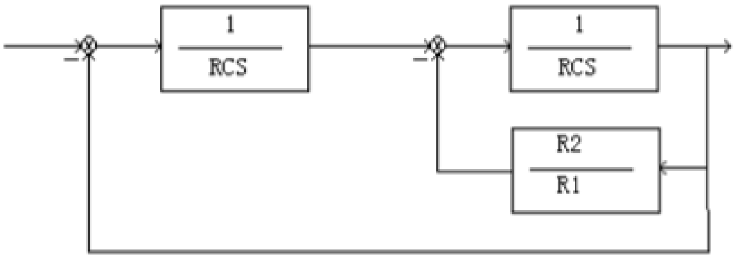


图 2-2 二阶系统结构图

系统闭环传递函数为：

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

式中 $T=RC$，$K=\frac{R_2}{R_1}$

比较（1)、（2）二式，可得：

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

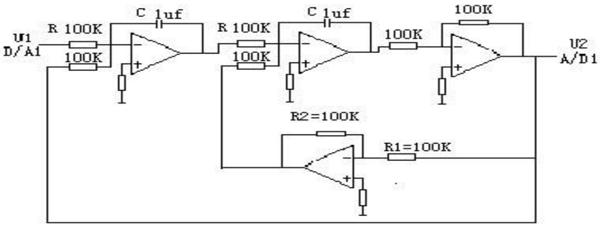
$$\xi=\frac{K}{2}=\frac{R_2}{2R_1}$$

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：$t_s = \dfrac{4.4}{\zeta w_n}$，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 σ%和 t_s 值列表，根据测量结果得出相应结论。

		σ%	t_p(ms)	t_s(ms)	阶跃响应曲线
R=100K C=1μf ω_n=10rad/s	R_1=100K R_2=0K ζ=0	等幅振荡	/	/	见图 61
	R_1=100K R_2=50K ζ=0.25	40.36%	308	1191	见图 62
	R_1=100K R_2=100K ζ=0.5	16.1%	223	415	见图 63
	R_1=100K R_2=200K ζ=1	无超调	/	409	见图 64
R_1=100K C_1=C_2=0.1μf ω_n=100rad/s	R_1=100K R_2=200K ζ=0.5	11.86%	18	27	见图 65
	R_1=100K R_2=200K ζ=1	无超调	/	27	见图 66

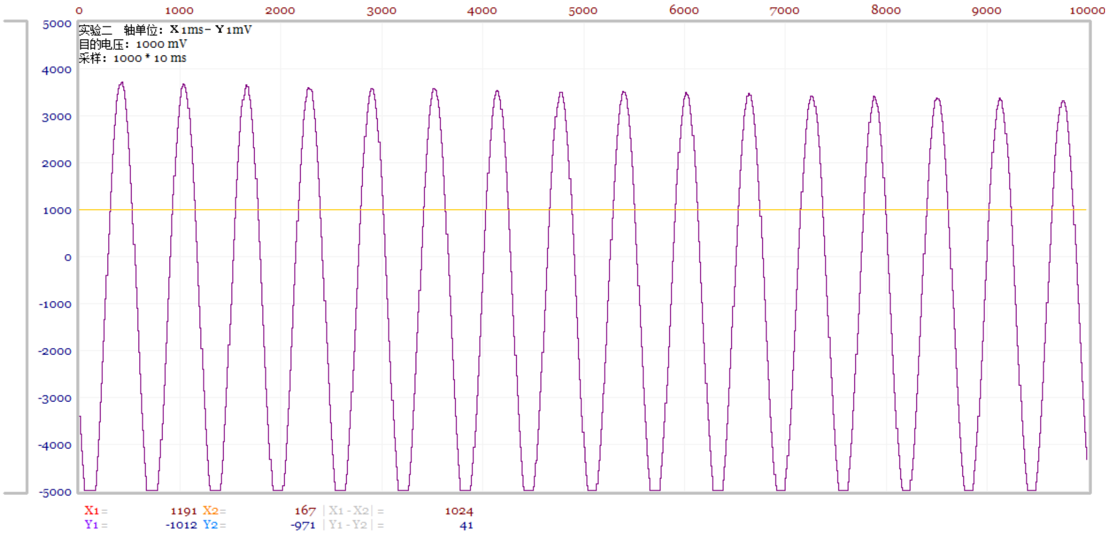

实验二 轴单位：X 1ms- Y 1mV
目的电压：1000 mV
采样：1000 * 10 ms
X1 = 1191 X2 = 167 |X1 - X2| = 1024
Y1 = -1012 Y2 = -971 |Y1 - Y2| = 41

图 61

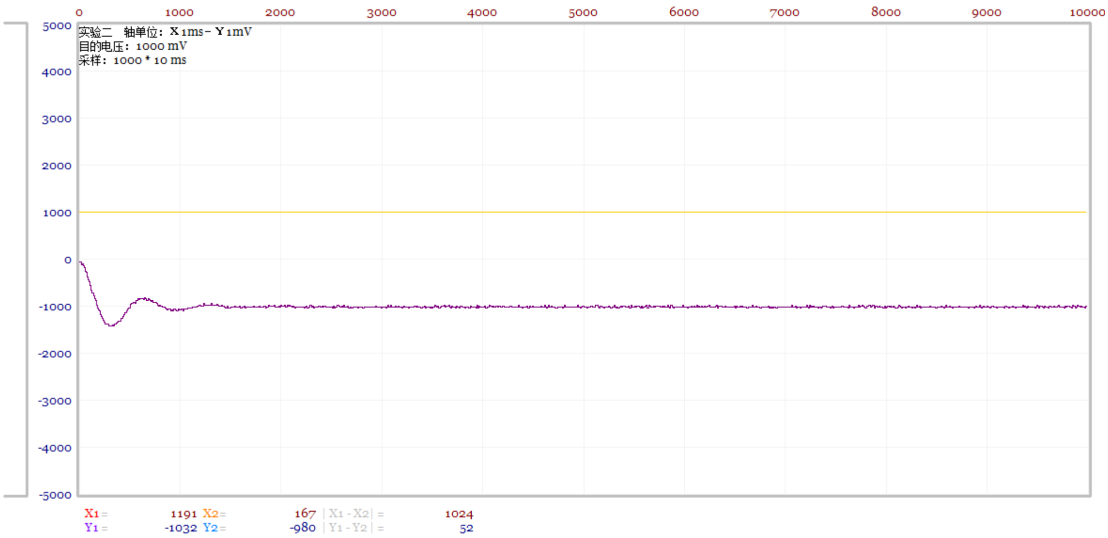

实验二 轴单位：X 1ms- Y 1mV
目的电压：1000 mV
采样：1000 * 10 ms
X1 = 1191 X2 = 167 |X1 - X2| = 1024
Y1 = -1032 Y2 = -980 |Y1 - Y2| = 52

图 62

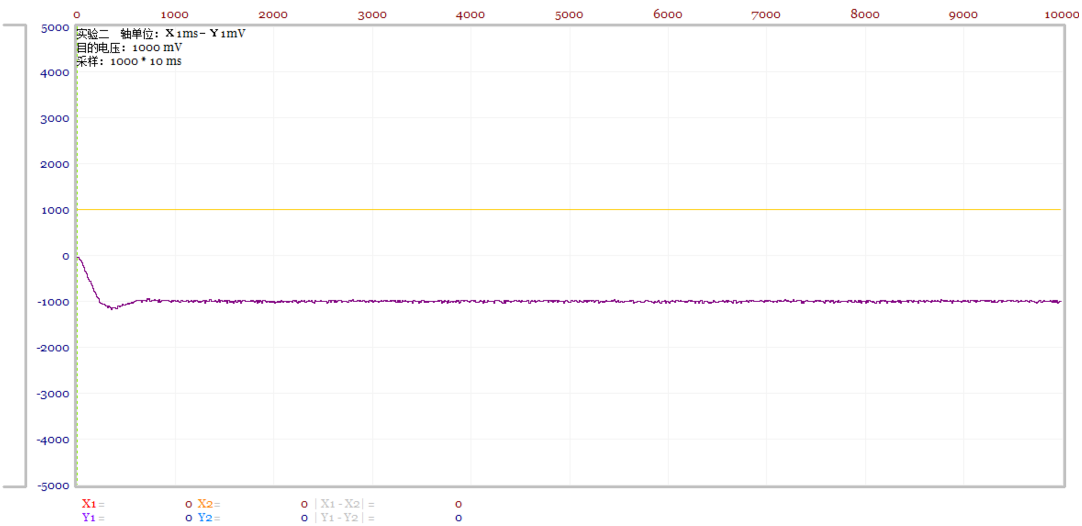

实验二 轴单位：X 1ms- Y 1mV
目的电压：1000 mV
采样：1000 * 10 ms
X1 = 0 X2 = 0 |X1 - X2| = 0
Y1 = 0 Y2 = 0 |Y1 - Y2| = 0

图 63


实验二 轴单位：X 1ms- Y 1mV
目的电压：1000 mV
采样：1000 * 10 ms
X1 = 614 X2 = 409 |X1 - X2| = 205
Y1 = -941 Y2 = -991 |Y1 - Y2| = 50

图 64

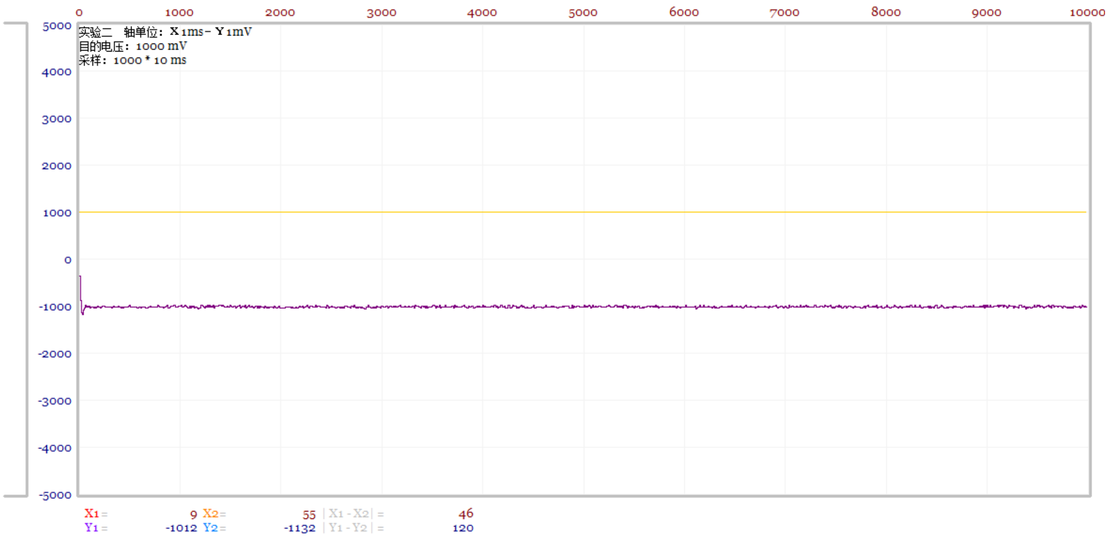

实验二 轴单位：X 1ms- Y 1mV
目的电压：1000 mV
采样：1000 * 10 ms
X1 = 9 X2 = 55 |X1 - X2| = 46
Y1 = -1012 Y2 = -1132 |Y1 - Y2| = 120

图 65

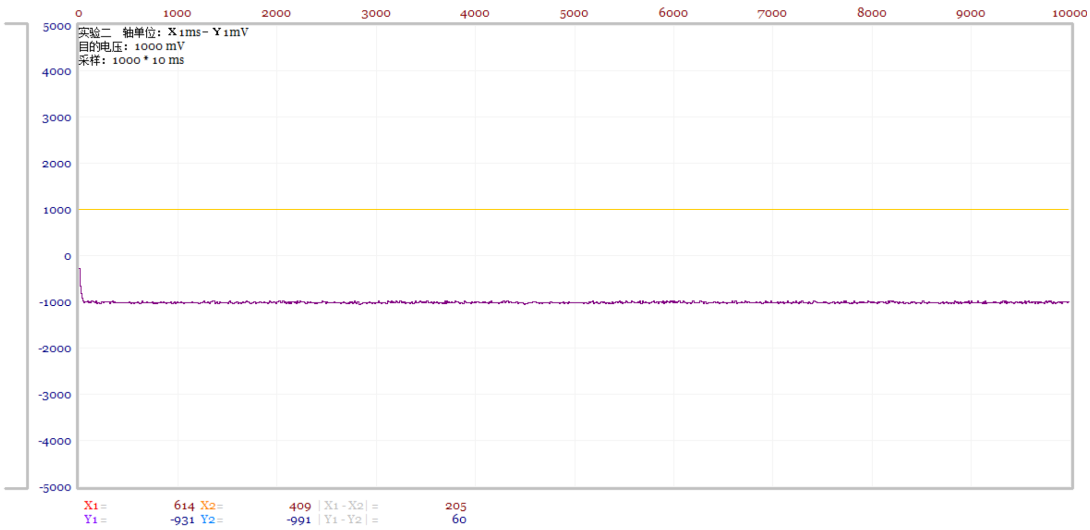

实验二 轴单位：X 1ms- Y 1mV
目的电压：1000 mV
采样：1000 * 10 ms
X1 = 614 X2 = 409 |X1 - X2| = 205
Y1 = -931 Y2 = -991 |Y1 - Y2| = 60

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，ζ=0.5 为例，根据测量的超调量和 t_s 可计算出 ζ=0.53，ω_n=9.9，其传递函数为 $G(s)=\dfrac{98}{s^2+10.5s+98}$，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。

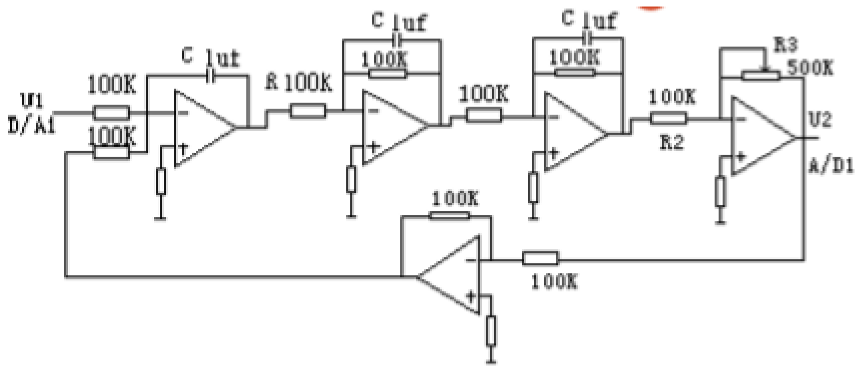


图 3-1 系统模拟电路图

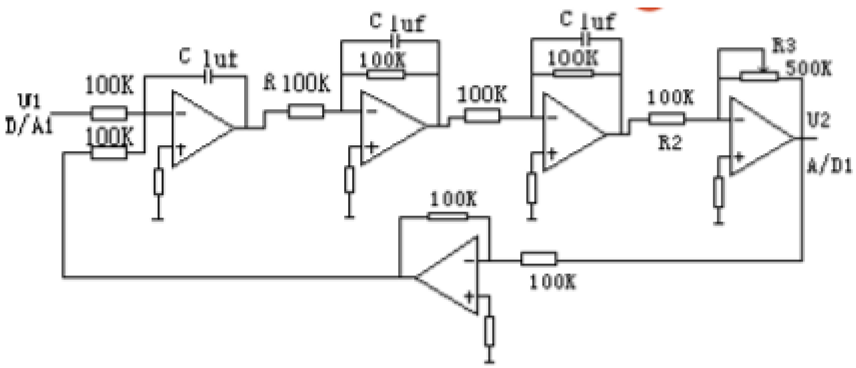
其开环传递函数为：

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

式中 $K=\dfrac{R_3}{R_2}$，$R_2=100K\Omega$，$R_3=0\sim500K$；$T=RC$，$R=100K\Omega$，$C=1\mu f$ 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=100KΩ R=100KΩ C=1μf 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=100KΩ R=100KΩ C=0.1μf 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


实验三 轴单位：X 1ms- Y 1mV
目的电压：1000 mV
采样：1000 * 100 ms

图 68

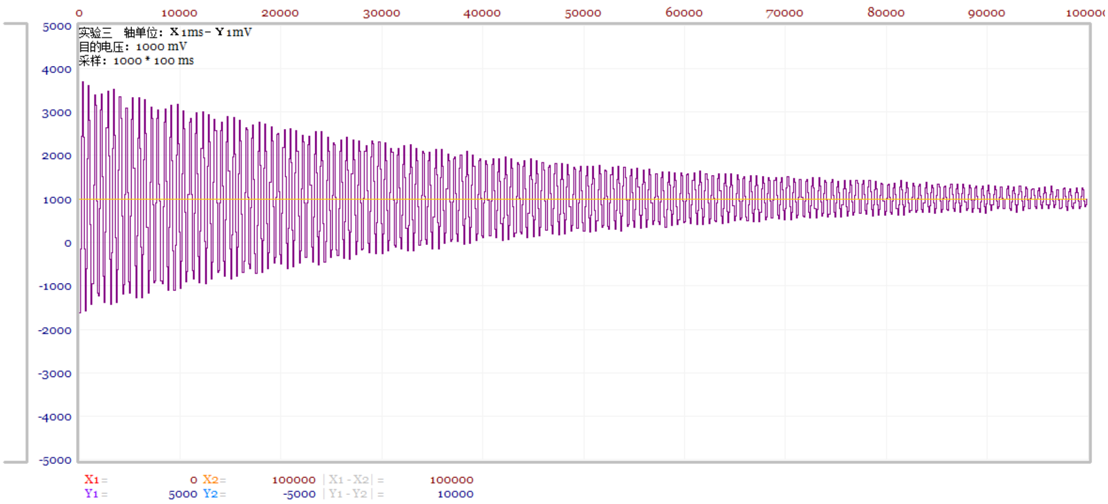

实验三 轴单位：X 1ms- Y 1mV
目的电压：1000 mV
采样：1000 * 100 ms

图 69


实验三 轴单位：X 1ms- Y 1mV
目的电压：1000 mV
采样：1000 * 10 ms

图 70

图 71

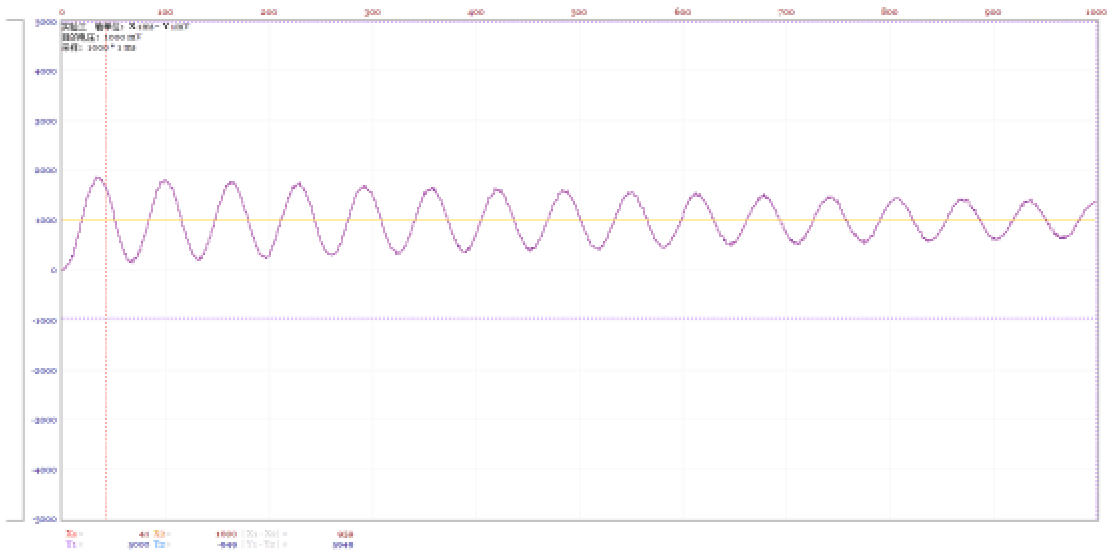


图 72

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。

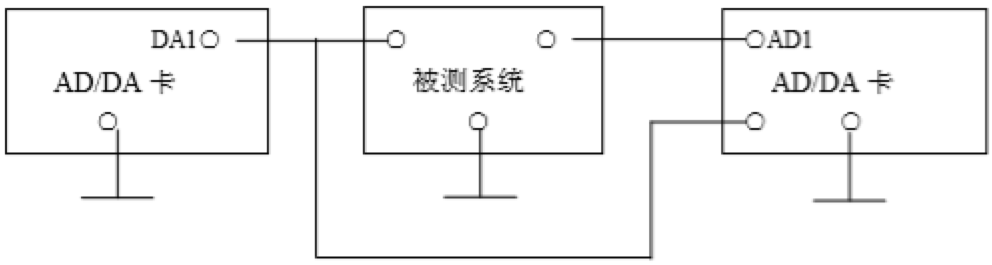


图 4-1 频率特性测试电路

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。

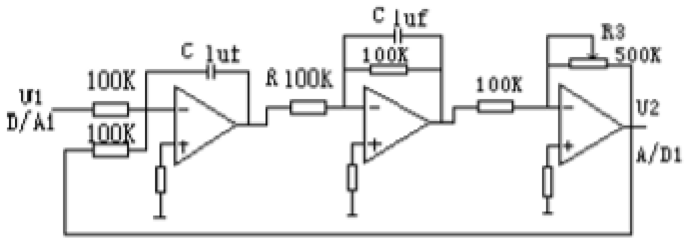


图 4-2 系统模拟电路图

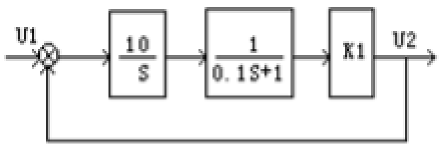


图 4-3 系统结构图

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

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

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。

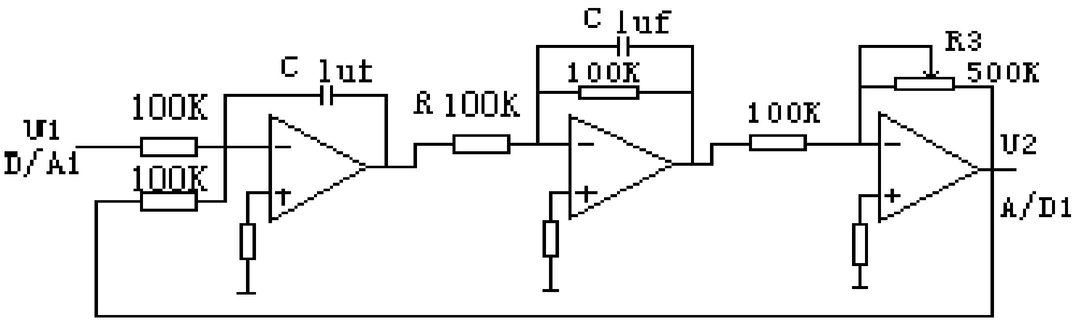


图 73

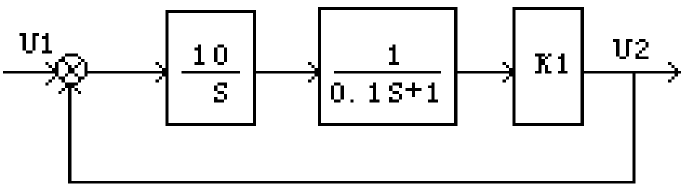


图 74

2. 画出被测系统的开环L(ω)曲线与φ(ω)曲线。

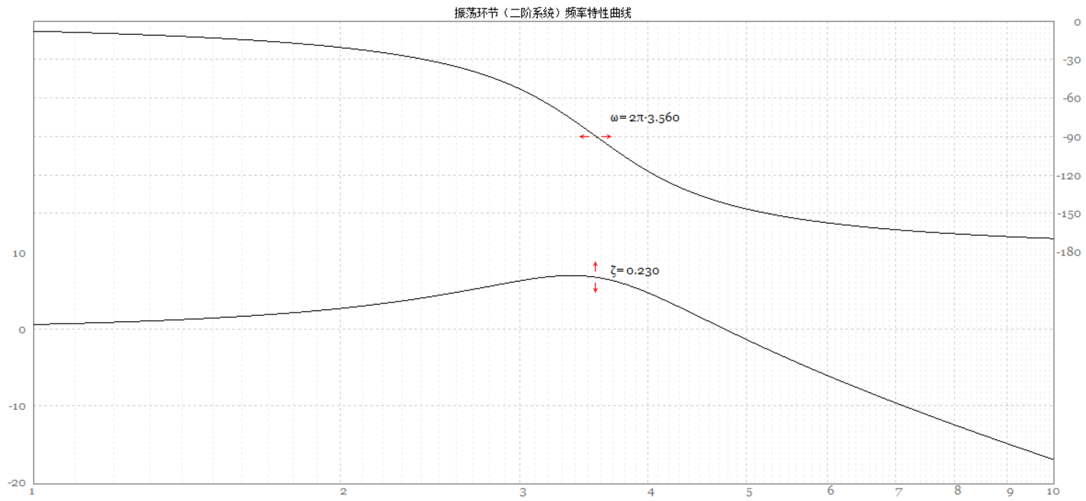


图 75

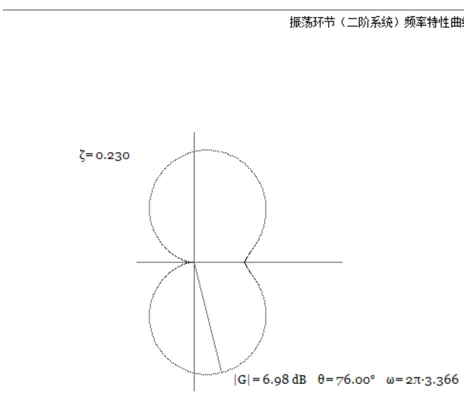


图 76

3. 整理表中的实验数据，并算出理论值和实测值。

F(Hz)	ω(rad/s)	理论值		实测值					
		L(ω)	Φ(ω)	2Xm	2y0	2ym	L(ω)	Φ(ω)	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

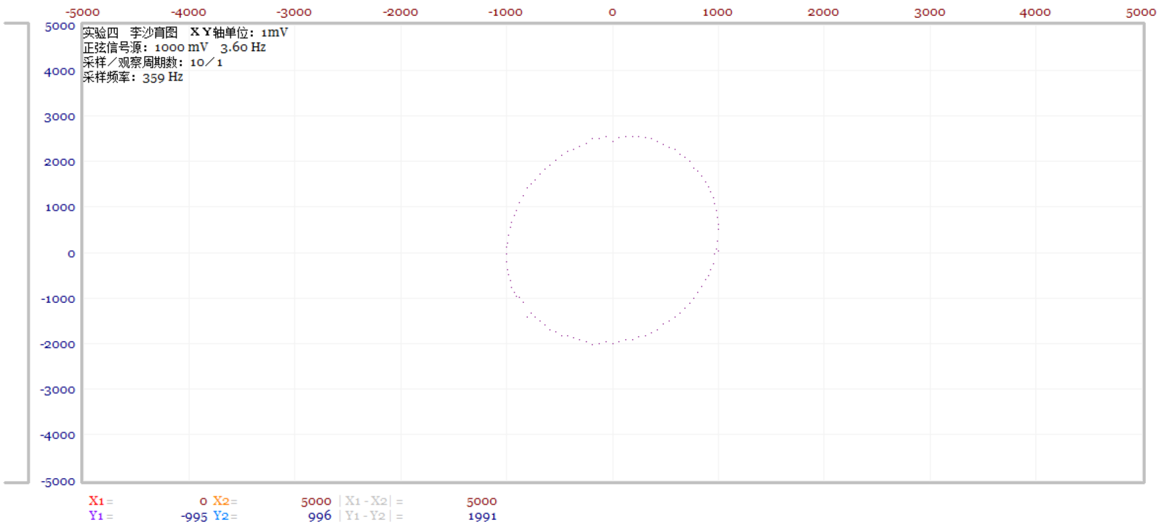

实验四 李沙育图 XY轴单位：1mV
正弦信号源：1000 mV 3.60 Hz
采样／观察周期数：10／1
采样频率：359 Hz
X1 = 0 X2 = 5000 |X1 - X2| = 5000
Y1 = -995 Y2 = 996 |Y1 - Y2| = 1991

图 79


实验四 李沙育图 XY轴单位：1mV
正弦信号源：1000 mV 5.00 Hz
采样／观察周期数：10／1
采样频率：500 Hz
X1 = 0 X2 = 5000 |X1 - X2| = 5000
Y1 = -1948 Y2 = 2511 |Y1 - Y2| = 4459

图 80

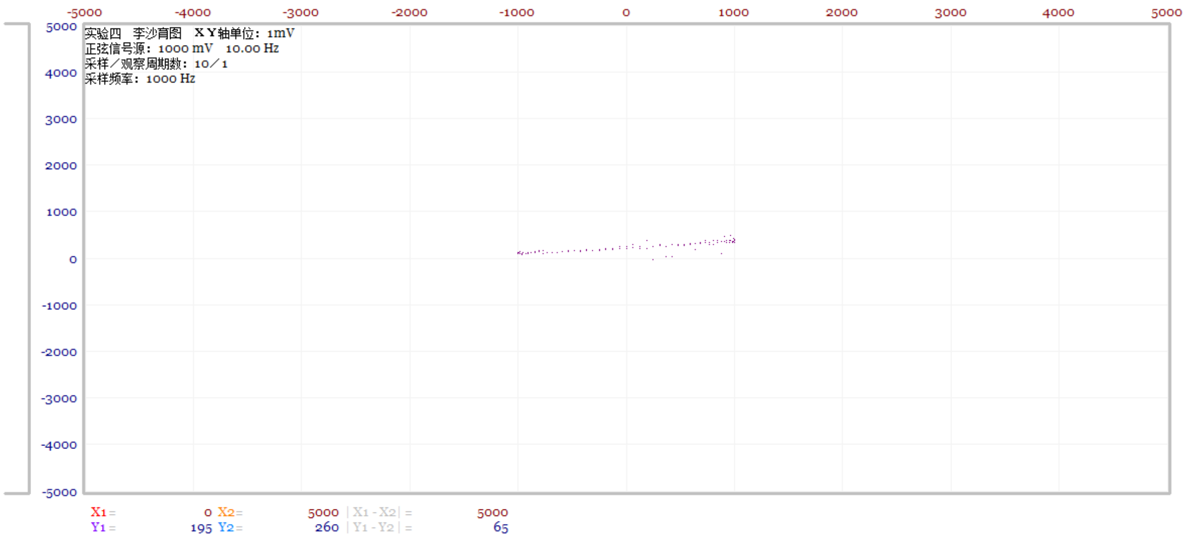

实验四 李沙育图 XY轴单位：1mV
正弦信号源：1000 mV 10.00 Hz
采样／观察周期数：10／1
采样频率：1000 Hz
X1 = 0 X2 = 5000 |X1 - X2| = 5000
Y1 = 195 Y2 = 260 |Y1 - Y2| = 65

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而改变，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。

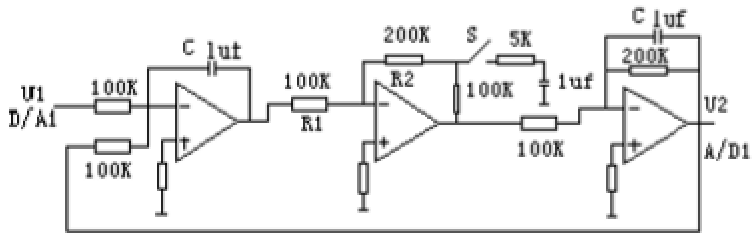


图 5-1 超前校正电路图

（2）系统结构图如图 5-2。

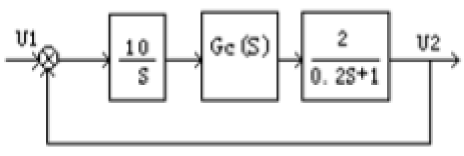


图 5-2 超前校正系统结构图

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。

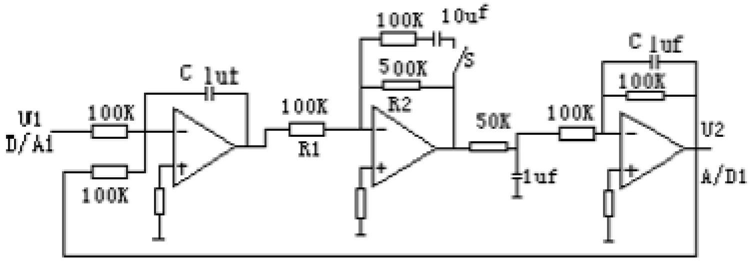


图 5-3 滞后校正模拟电路图

（2）系统结构图示如图 5-4

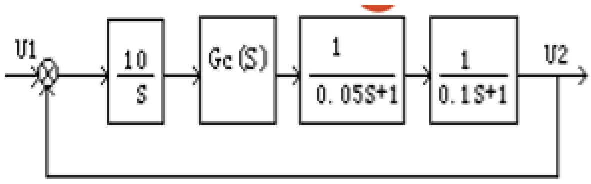


图 5-4 滞后校正系统结构图

图中$G_{c1}(s) = 10$，

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

3．串联超前—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—滞后校正。

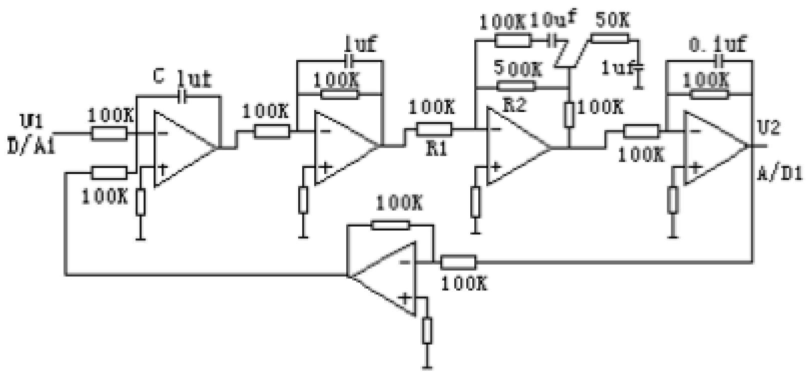


图 5-5 超前-滞后校正模拟电路图

（2） 系统结构图示如图 5-6。

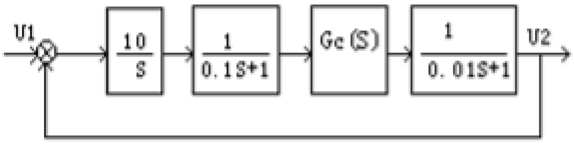


图 5-6 超前-滞后校正系统结构图

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 Gc（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，α=11

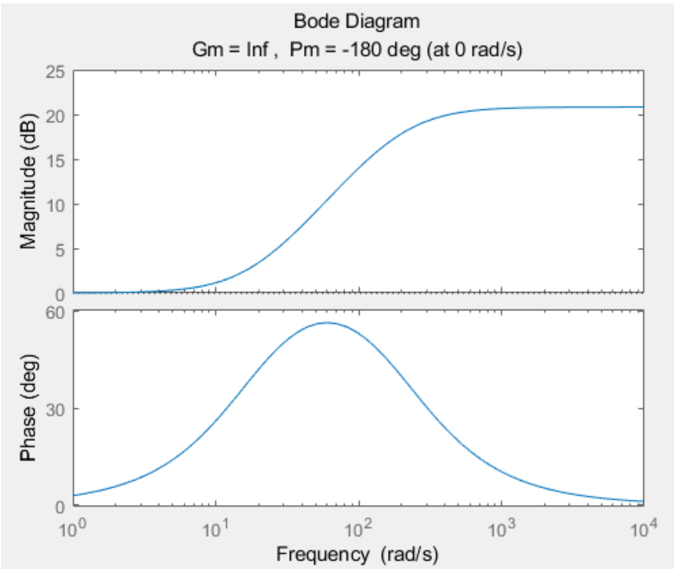


图 82

(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：$G_c(s) = \dfrac{G_{c2}(s)}{G_{c1}(s)} = \dfrac{s+1}{11s+1}$

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

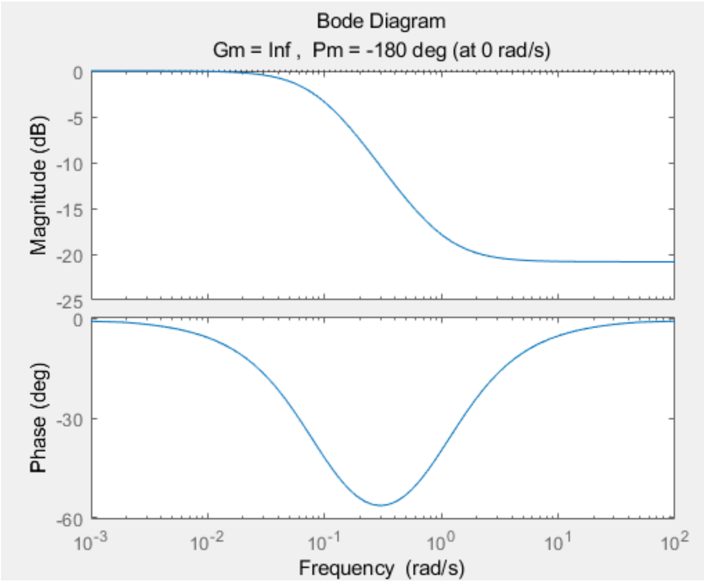


图 83

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

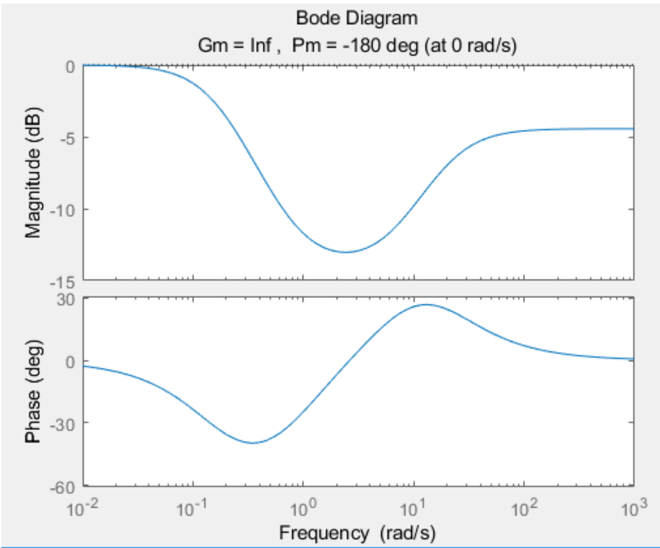


图 84

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

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

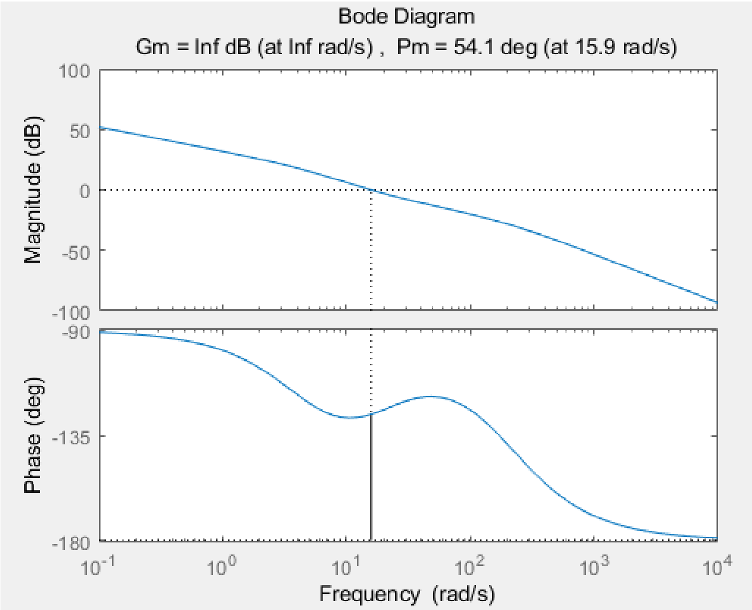


图 85

剪切频率：ω_c'=15.9rad/s，相角裕度：ν'=54.1°。

(2)串联滞后校正

利用 MATLAB 算的校正后系统开环传递函数为

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

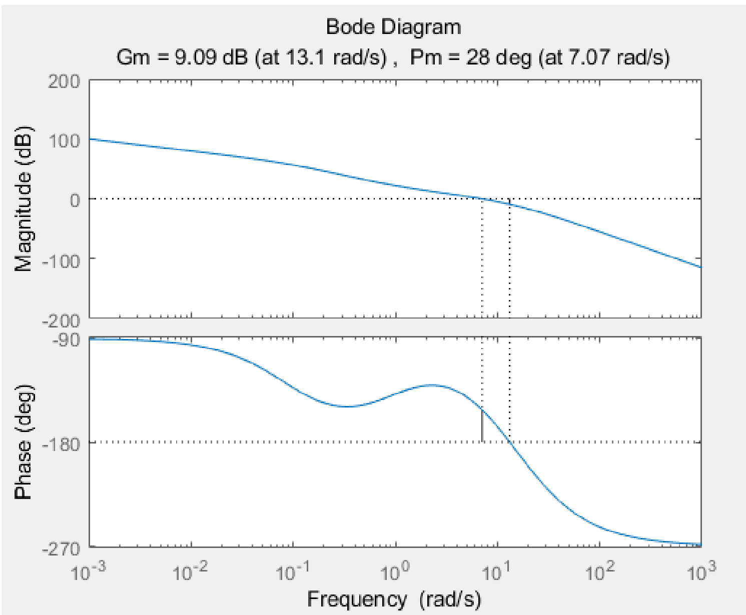


图 86

剪切频率：ω_c'=7.07rad/s，相角裕度为：ν'=28°

(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

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

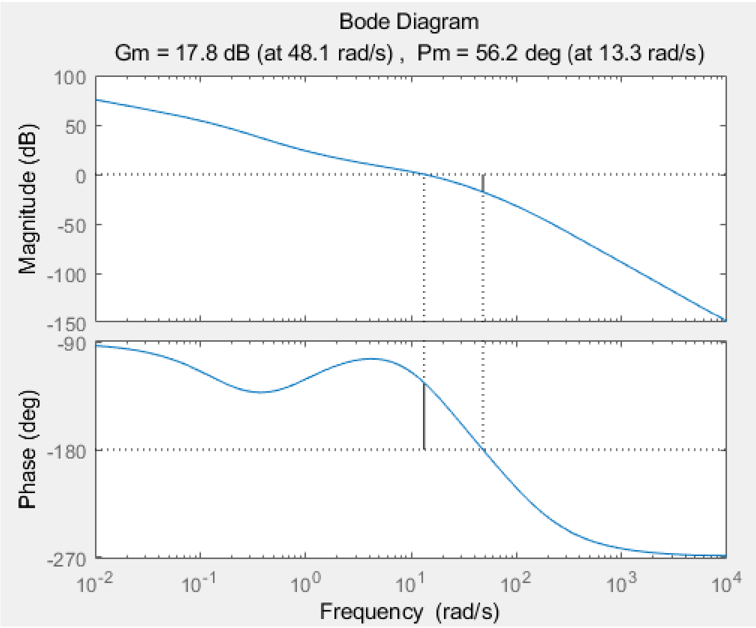


图 87

剪切频率：ω_c'=13.3rad/s，相角裕度为：ν'=56.2°

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
σ %	6.23%	1.47%
Tp(秒)	0.167	0.111
Ts(秒)	1.070	0.223

超调量 σ%减小，调节时间 ts 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

滞后校正系统 / 指标	校正前	校正后
阶跃响应曲线	见图 90	见图 91
σ %	4.71%	2.33%
Tp(秒)	0.130	0.391
Ts(秒)	0.540	0.810

超调量 σ%减小，调节时间 ts 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。

超前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 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
σ %	7.97%	3.42%
Tp(秒)	0.130	0.202
Ts(秒)	1.499	0.329

超调量 σ%减小，调节时间 ts 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。

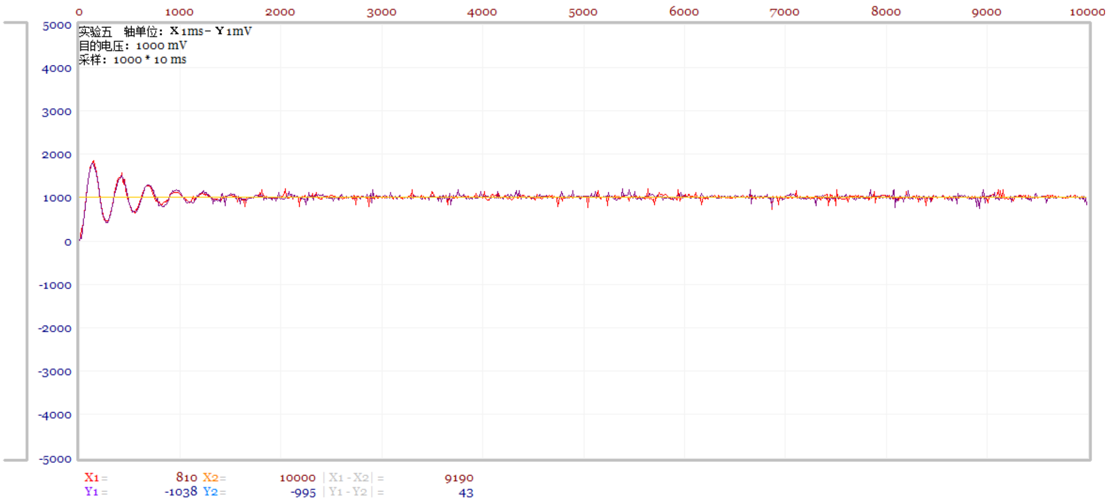


图 92

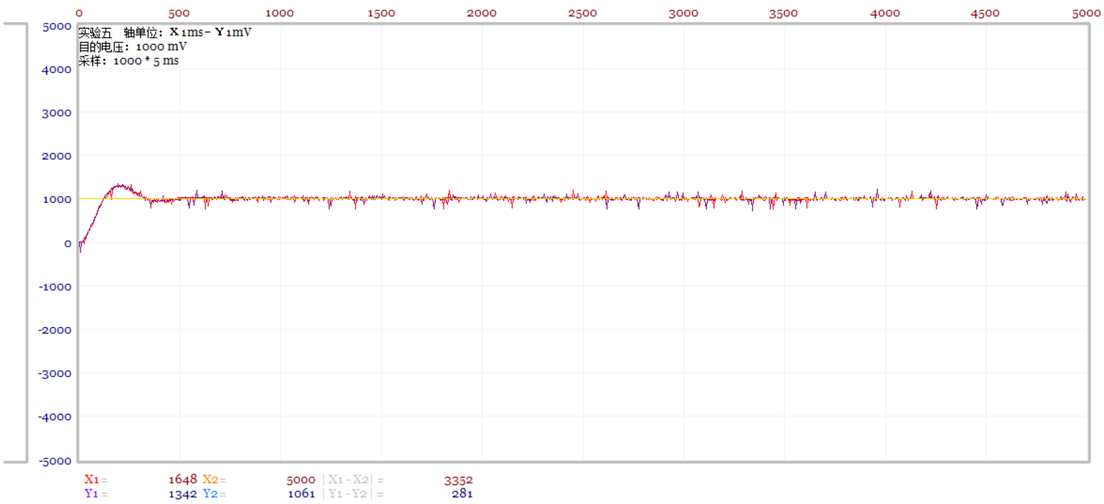


图 93

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。