

自动控制综合实验1

(PART1-MATLAB仿真)

第1章 MATLAB与Simulink入门基础

第2章 基于MATLAB/Simulink建立控制系统数学模型

第3章 基于MATLAB控制系统的时域分析法

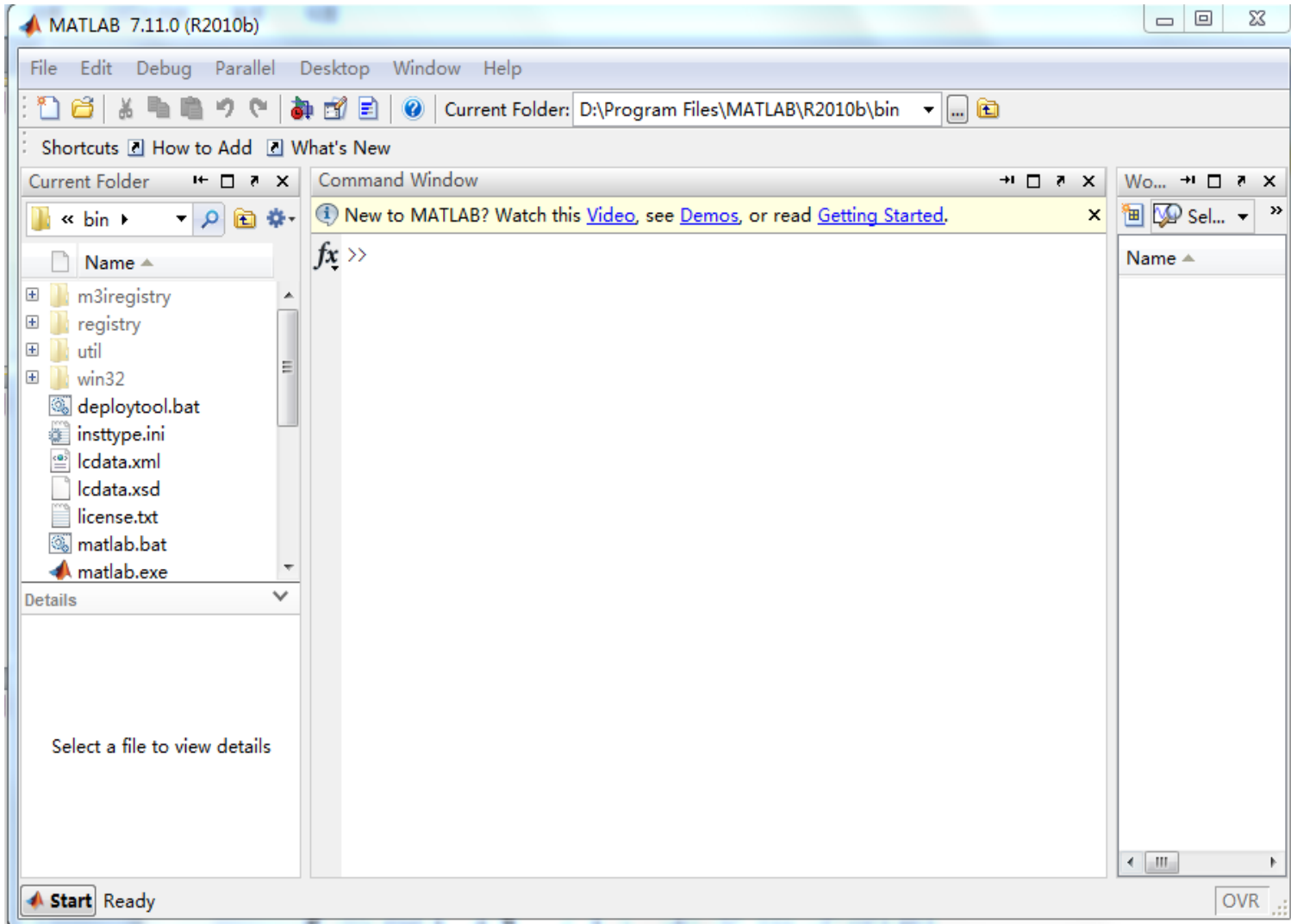
第4章 基于MATLAB控制系统的根轨迹分析法

第5章 基于MATLAB控制系统的频域分析法

第6章 基于MATLAB控制系统频率法串联校正设计

第1章 MATLAB与Simulink入门基础

1.1 控制系统MATLAB（R2010b）环境简述



主 页 绘图 应用程序

新建脚本 新建 打开 查找文件 比较 导入数据 保存工作区 新建变量 打开变量 清除工作区 分析代码 运行并计时 清除命令 Simulink 库 布局 预设 设置路径 附加功能 帮助 社区 请求支持

文件 变量 代码 SIMULINK 环境 资源

搜索文档

当前文件夹 名称 ▲

- +
- m3iregistry
- +
- registry
- +
- util
- +
- win32
- deploytool.bat
- lcdata.xml
- lcdata.xsd
- lcdata_utf8.xml
- matlab.exe
- mbuild.bat
- mcc.bat
- MemShieldStarter.bat
- mex.bat
- mex.pl
- mexext.bat
- mexsetup.pm
- mexutils.pm
- msvc_modules_installer.pm

matlab.exe (应用程序)

未提供任何详细信息

命令行窗口

fx >>

工作区

名称 ▲	值
------	---

就绪

1.1.1 MATLAB命令窗口的快捷键及其功能

快捷键	对应按键	功能
Ctrl+P	↑	光标上移一行
Ctrl+H	Backspace	删除光标前一个字符
Ctrl+N	↓	光标下移一行
Ctrl+D	Del	删除光标后一个字符
Ctrl+B	←	光标左移一个字符
Ctrl+E	End	光标移到行尾
Ctrl+F	→	光标右移一个字符
Ctrl+U	Esc	删除一行
Ctrl+R	Ctrl+→	光标右移一个单词
Ctrl+A	Home	光标移到行首
Ctrl+L	Ctrl+←	光标左移一个单词
Ctrl+K		从光标处删除到行尾

1.1.2 MATLAB的帮助系统

1. 使用联机帮助窗口
2. 使用帮助命令**help**，查找已知命令的使用方法。
3. 使用**lookfor**命令，通过一般关键词找到命令和帮助标题。
4. 演示帮助：在命令窗口执行**demos**命令

1.1.3 MATLAB基本运算

1. 基本运算中的符号

符号	含义
:	表示间隔
()	在算术表达式中先后次序
;	用于分隔行
[]	用于构成向量和矩阵
,	用于分隔列
{}	用于构成单元数组

2. 数学表达式输入格式:

- (1) 表达式必须在**同一行内**书写。
- (2) 数值与变量或变量与变量**相乘都不能连写**，必须用乘号“*”。
- (3) 分式的书写要求**分子、分母**最好分别用**小括号**限定。
- (4) 当MATLAB**函数嵌套**调用时，使用**多重小括号**限定。
- (5) 求**幂运算**的指数两侧最好用小括号限定，自然常数e的指数运算书写为**exp()**。
- (6) MATLAB的符号运算中，求**e为底的自然对数**，其函数书写形式为**log()**。
- (7) MATLAB中特殊变量的含义：“**pi**”表示圆周率 π ；“**i**”或“**j**”表示**虚数单位**；“**inf**”或“**INF**”表示**无穷大**；**NaN**表示**0/0不定式**。

【例1-1】 $y = \frac{1}{a \cdot \ln(1-x-a) + 2a}$

```
>>y='1/(a*log(1-x-a)+2*a)'
```

```
y =  
1/(a*log(1-x-a)+2*a)
```

【例1-2】 建立矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 7 & 8 & 9 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 7 \\ 8 \\ 9 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 3 & 5 & 8 \\ 10 & 12 & 15 \end{bmatrix}$$

```
>> A=[7,8,9]
```

```
>> B=[7;8;9]
```

```
>> C=[1,1,2;3,5,8;10 12 15]
```

```
>> A=[7 8 9]
```

```
A =  
  
7 8 9
```

```
B =  
  
7  
8  
9
```

```
C =  
  
1 1 2  
3 5 8  
10 12 15
```

3.常用的多项式运算函数及功能说明

函 数	功 能
Conv	多项式乘法（卷积）
Poly	由根求多项式
Deconv	多项式除法（解卷）
Roots	多项式求根
Polyval	多项式求值
Polyfit	多项式曲线拟合

【例1-3】求多项式的展开式。

$$D(s) = (5s^2 + 3)(s + 1)(s - 2)$$

```
>> D=conv(conv([5,0,3],[1,1]),[1,-2])
```

D =

5 -5 -7 -3 -6

Conv()函数只能用于两个多项式相乘；多于两个必须嵌套使用

【例1-4】求多项式的根。

$$P(x) = 2x^4 - 5x^3 + 6x^2 - x + 9$$

```
>> P=[2,-5,6,-1,9];
```

```
>> x=roots(P)
```

x =

1.6024 + 1.2709i
1.6024 - 1.2709i
-0.3524 + 0.9755i
-0.3524 - 0.9755i

1.1.4 MATLAB常用图形编辑

1. 基本二维曲线绘图命令是plot ()。

调用格式: **plot (x1, y1, 'option1', x2, y2, 'option2',...)**

2. 常用选项控制字符option说明

色彩字符	指定色彩	绘图字符	指定绘图形式
Y	黄	.	小黑点 (标数据用)
M	洋红	o	小圈号 (标数据用)
C	青	×	叉号 (标数据用)
R	红	+	十字号 (标数据用)
G	绿	*	星号 (标数据用)
B	蓝	—	实连线
W	白	:	虚点连线
K	黑	--	双划连线

3. 图形控制函数

axis ([xmin, xmax, ymin, ymax]) : 设定坐标轴的范围。

title (‘字符串’) : 在所画图形的最上端标注图形标题。

xlabel (‘字符串’)、**ylabel (‘字符串’)** : 设置x, y 坐标轴的名称。

grid 增加网格

4.多次重叠绘制图形

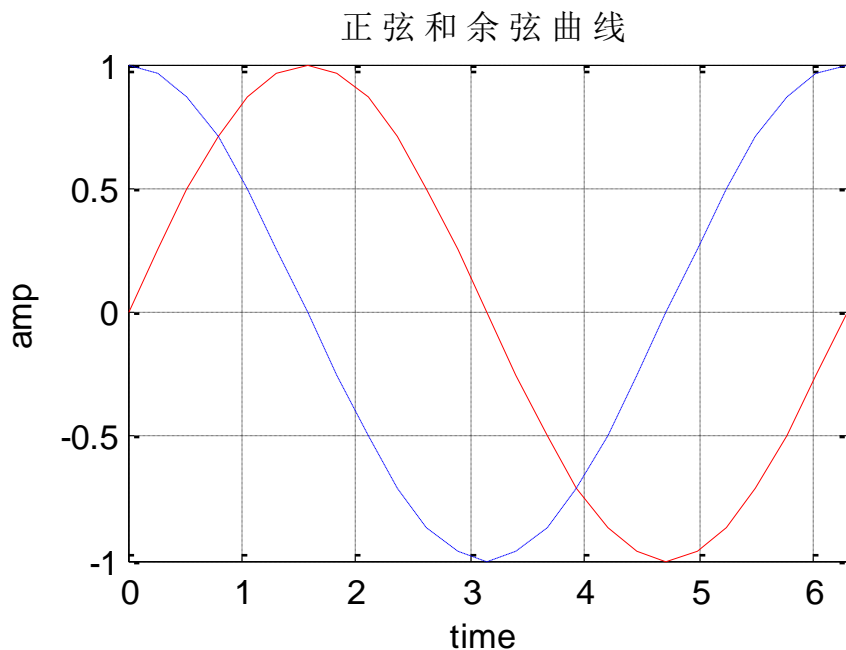
hold on 使当前轴与图形保持不变，再重叠绘制一条或多条新的曲线。

hold off 使当前轴与图形不再具备被刷新功能。

hold 当前图形是否具备被刷新功能的双向切换开关

【例1-5】绘制红色的正弦曲线（实线）和蓝色的余弦曲线（虚线），X轴是时间轴，用“time”标注，范围是 $(0, 2\pi)$ ；Y轴是幅值轴，用“amp”标注，范围是 $(-1, 1)$ ；图形标题用“正弦和余弦曲线”说明，并显示网格。

```
%This is a graph program. graph1.m  
t = 0 : pi / 12 : 2*pi ;  
y1 = sin (t) ; y2 = cos(t) ;  
plot ( t , y1 , 'r-', t , y2 , 'b--' ) ;  
axis ([0 , 2*pi , -1 , +1]) ;  
xlabel ('time') ; ylabel ('amp') ;  
title ('正弦和余弦曲线')  
grid  
%This is the end.
```

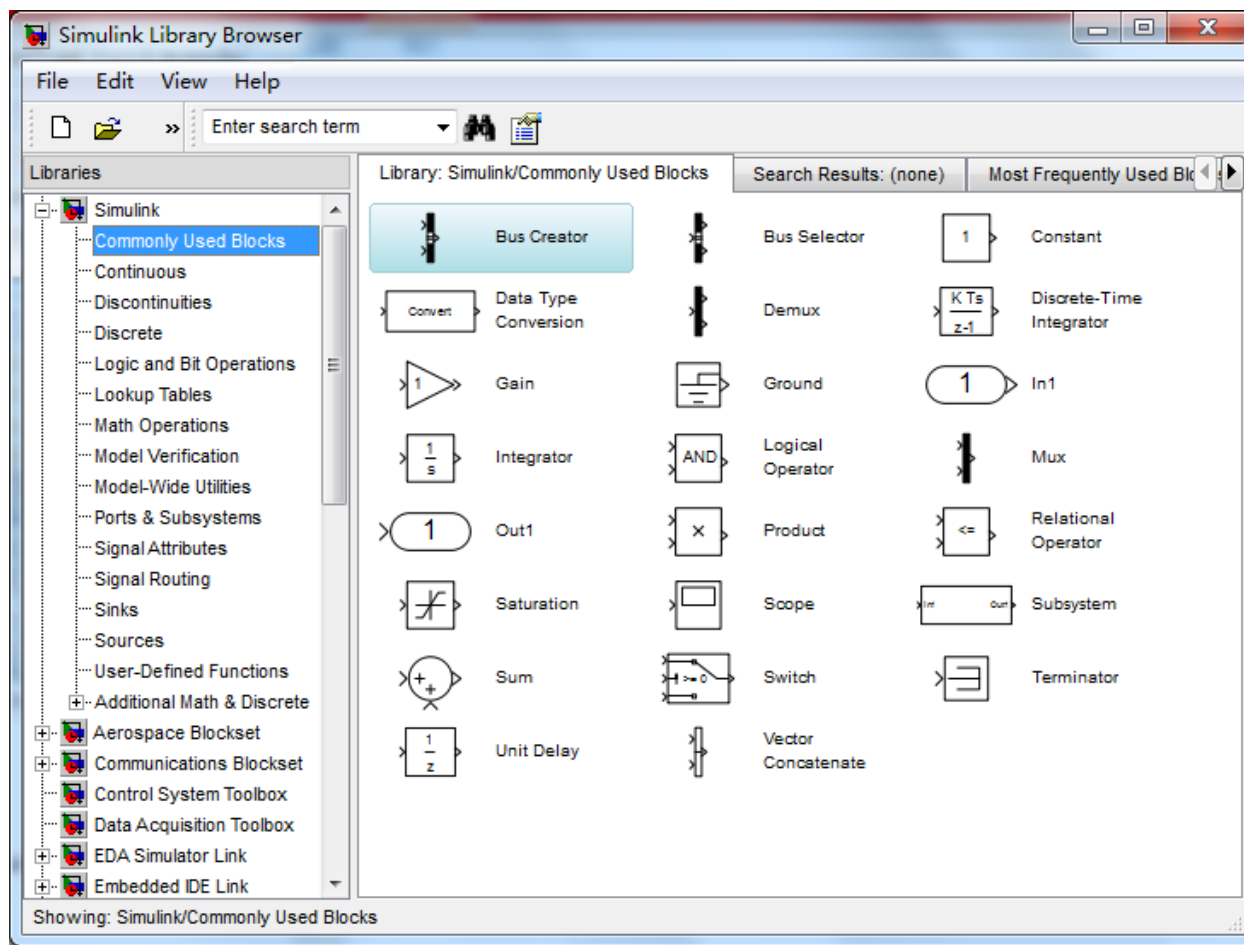


1.2 Simulink 6.1 仿真工具简述

1.2.1 Simulink 的启动：工具栏上单击 按钮

Simulink

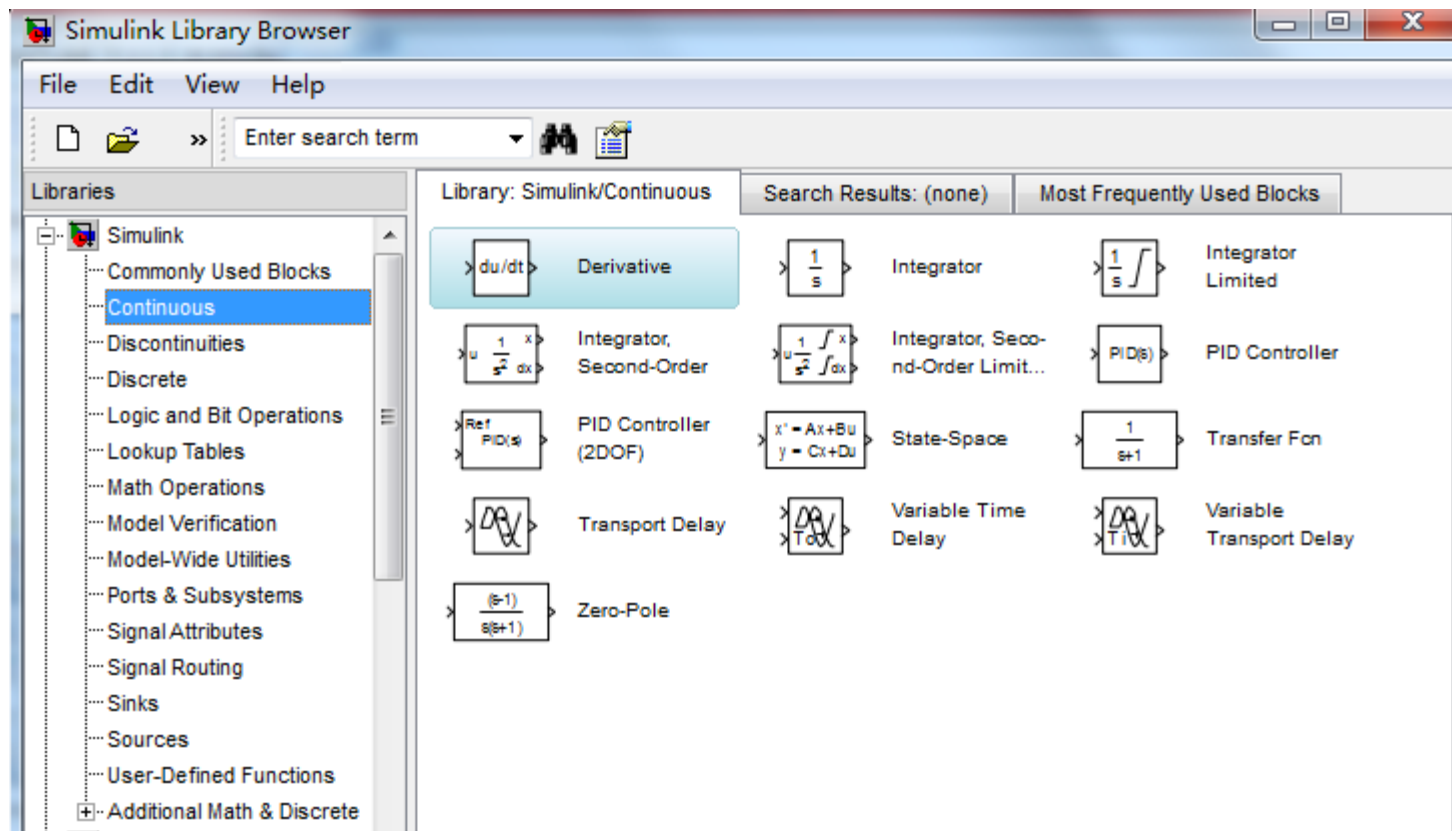
建模直接
绘制控制
系统的动
态模型结
构。



1.2.2 Simulink模块功能介绍

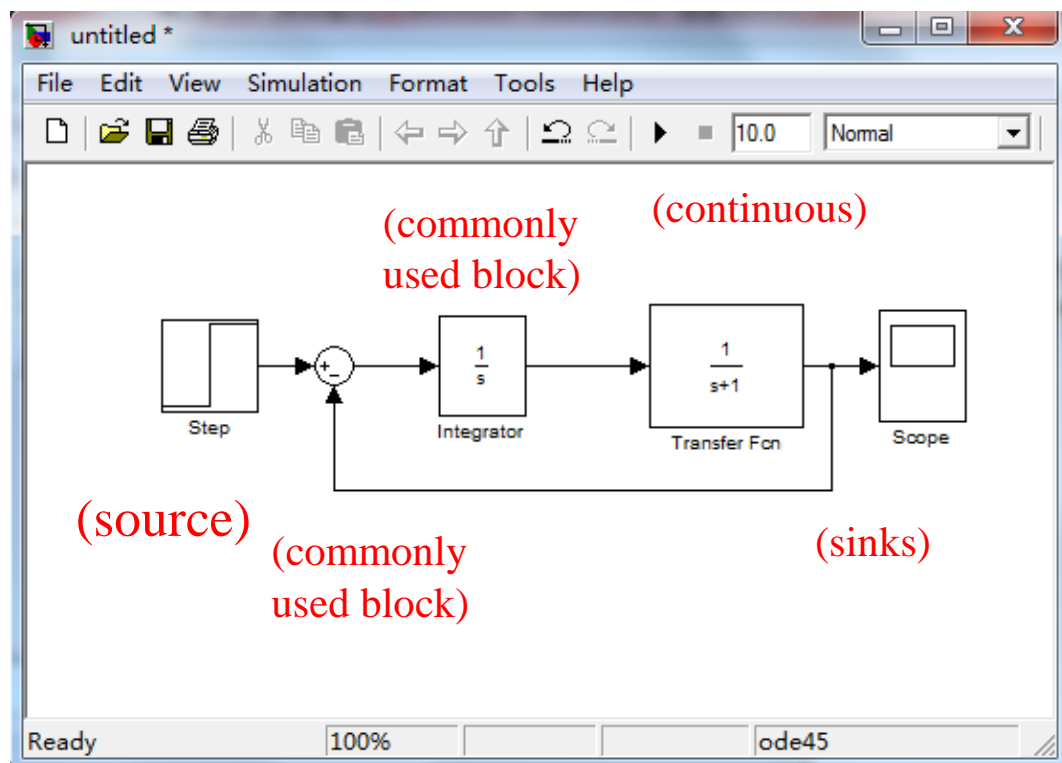
1. Commonly used blocks: 通用用户模块组

2. Continuous: 连续模块组



1.2.3使用 Simulink建立系统模型

在模块库中选择所需的基本模块，不断复制(按住拖动)到模型窗口中，再用simulink的特殊连线法把多个基本模块连成系统。



信号线是带箭头的，只能从一个模块的输出端口连接到另一个模块输入端口：按住拖动

信号线分支：ctrl键；或鼠标右键拖动

第2章基于MATLAB/Simulink建立控制系统数学模型

控制系统常用的数学模型有四种：传递函数模型（tf对象）、零极点增益模型（zpk对象）、结构框图模型和状态空间模型（ss对象）。经典控制理论中数学模型一般使用前三种模型，状态空间模型属于现代控制理论范畴。

2.1 传递函数模型（也称为多项式模型）的建立

$$G(s) = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n} = \frac{num(s)}{den(s)}, \quad n \geq m$$

MATLAB中用分子、分母多项式系数按s的降幂次序构成两个向量：
 $num = [b_0, b_1, \dots, b_m]$ ， $den = [a_0, a_1, \dots, a_n]$ 。

函数**tf()**：建立控制系统的传递函数模型，

函数**printsys()**：输出控制系统的函数，

调用格式：**sys = tf(num, den)** 和 **printsys(num, den)**

【例2-1】建立系统传递函数 $G(s) = \frac{s+3}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1}$

```
>> num=[1,3]; den=[1,2,2,1];printsys(num,den)
```

num/den =

$$\frac{s + 3}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1}$$

【作业2-1】建立系统传递函数的多项式模型

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

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

2.2 零极点增益模型（zpk对象）的建立

$$G(s) = \frac{K(s + z_1)(s + z_2) \cdots (s + z_m)}{(s + p_1)(s + p_2) \cdots (s + p_n)}$$

K 为系统根轨迹增益，

z_1, z_2, \dots, z_m 为系统零点，

p_1, p_2, \dots, p_n 为系统极点。

在MATLAB中，用向量 z, p, k 构成矢量组 $[z, p, k]$ 表示系统。
即 $z = [z_1, z_2, \dots, z_m]$ ， $p = [p_1, p_2, \dots, p_n]$ ， $k = [k]$

函数zpk ()： 建立系统的零极点增益模型，
函数调用格式为：**sys = zpk (z, p, k)**

【例2-3】已知系统传递函数

$$G(s) = \frac{10(s+5)}{(s+0.5)(s+2)(s+3)}$$

【作业2-2】建立控制系统的零极点模型：

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

```
>> k=10;  
>> z=[-5];  
>> p=[-0.5, -2, -3];  
>> Gs=zpk(z, p, k)
```

Zero/pole/gain:

10 (s+5)

(s+0.5) (s+2) (s+3)

3、控制系统模型间的相互转换

[num , den] = zp2tf (z, p, k)

零极点模型转换为多项式模型

[z , p , k] = tf2zp (num, den)

多项式模型转化为零极点模型

【例2-4】 已知系统传递函数 $G(s)$ ，求其等效的零极点模型。

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

```
>> num=[1, 5, 6];den=[1, 2, 1, 0];
[z, p, k]=tf2zp(num, den);
>> Gs=zpk(z, p, k)
```

```
Zero/pole/gain:|
(s+3) (s+2)
-----
s (s+1)^2
```

【作业2-3】 建立控制系统的多项式模型。

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

4、控制系统反馈连接之后的等效传递函数

两个环节反馈连接后，其等效传递函数可用`feedback()`函数求得。`feedback()`函数调用格式为：

`sys = feedback(sys1, sys2, sign)`

其中`sign`是反馈极性，`sign`缺省时，默认为负反馈，`sign=-1`；正反馈时，`sign=1`；单位反馈时，`sys2=1`，且不能省略。

`series()`函数：实现两个模型的串联；多于两个必须嵌套使用

`parallel()`函数：实现两个模型的并联；多于两个必须嵌套使用

【例2-5】已知系统前向通道的传递函数 $G(s) = \frac{2s^2 + 5s + 1}{s^2 + 2s + 3}$

反馈通道的传递函数 $H(s) = \frac{5(s+2)}{s+10}$ 。求负反馈闭环传递函数。

```
>> numg=[2, 5, 1];deng=[1, 2, 3];  
numh=[5, 10];denh=[1, 10];  
[num, den]=feedback(numg, deng, numh, denh);  
printsys(num, den)
```

num/den =

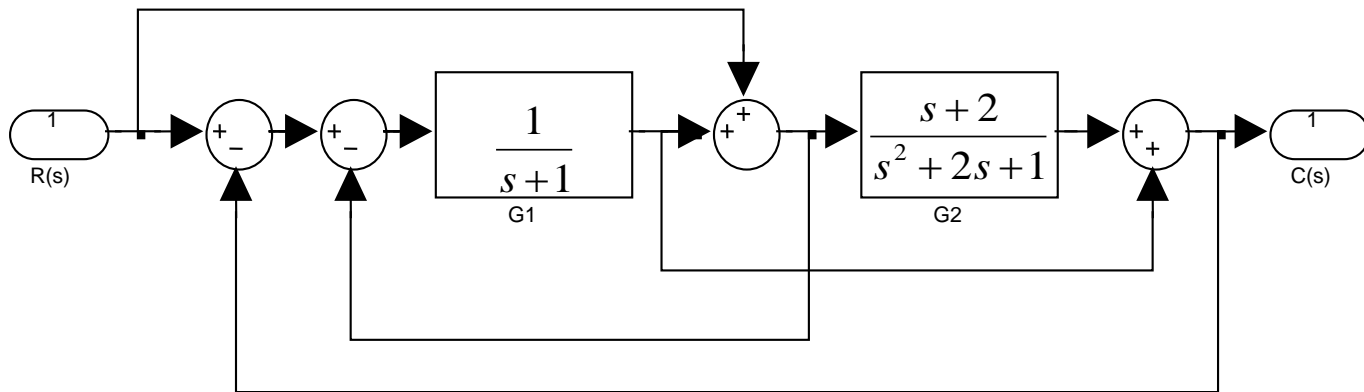
$$\frac{2s^3 + 25s^2 + 51s + 10}{11s^3 + 57s^2 + 78s + 40}$$

【作业2-4】已知系统前向通道的传递函数 $G(s) = \frac{2s+1}{s^2 + 2s + 3}$

求它的单位负反馈闭环传递函数。

5、用系统Simulink模型结构图化简控制系统模型

【作业2-5】已知系统结构图：



(1) 使用 Simulink建立系统模型

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

(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

第3章 基于MATLAB控制系统的时域分析法

3.1 基于MATLAB控制系统单位阶跃响应分析

一、实验目的

1. 学会使用**MATLAB**编程绘制控制系统的单位阶跃响应曲线。
2. 研究二阶控制系统中， ω_n 对系统阶跃响应的影响。
3. 掌握准确读取动态特性指标的方法。
4. 分析二阶系统闭环极点和闭环零点对系统动态性能的影响。
5. 研究三阶系统单位阶跃响应及其动态性能指标与其闭环极点的关系。
6. 研究闭环极点和闭环零点对高阶系统动态性能的影响。
7. 了解高阶系统中主导极点与偶极子的作用。

二、实验内容

1. 求系统的特征根

若已知系统的**特征多项式** $D(s)$ ，利用**roots()**函数可以求其特征根。若已知系统的**传递函数**，利用**eig()**函数可以直接求出系统的特征根。

2. 求系统的闭环根、 ξ 和 ω_n

函数damp()可以计算出系统的闭环根， ξ 和 ω_n 。

3. 求系统的单位阶跃响应

step()函数可以计算连续系统单位阶跃响应：

step(sys) 或 **step(sys, t)** 或 **step(num, den)**

函数在当前图形窗口中直接绘制出系统的单位阶跃响应曲线，对象sys可以由**tf()**，**zpk()**函数中任何一个建立的系统模型。第二种格式中t可以指定一个仿真终止时间，也可以设置为一个时间矢量（如 $t=0:dt:T_{final}$ ，即dt是步长， T_{final} 是终止时刻）。

【例3-1】若已知单位负反馈前向通道的传递函数为：

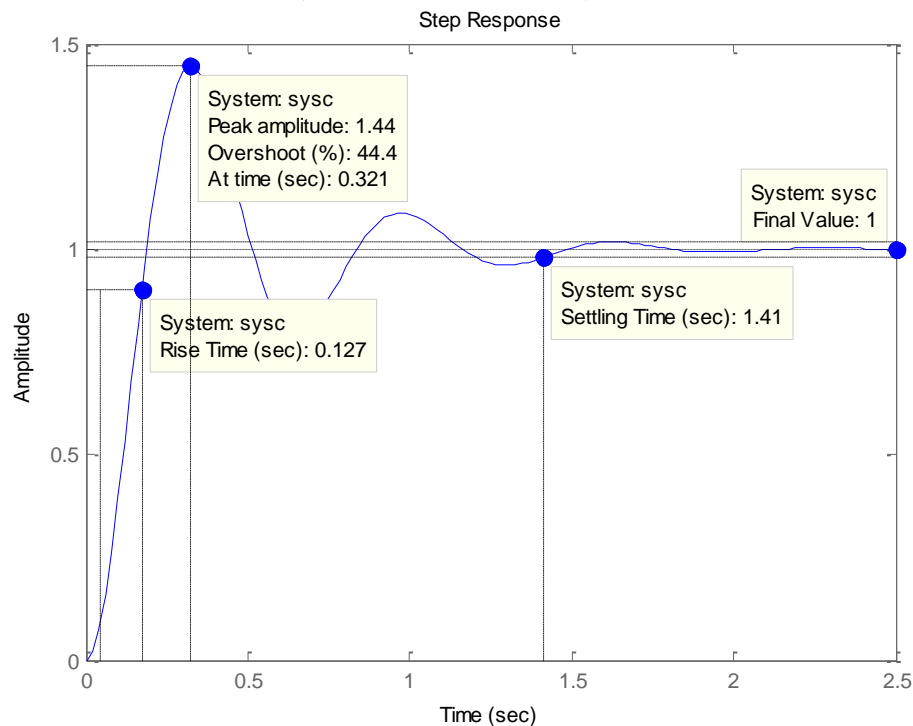
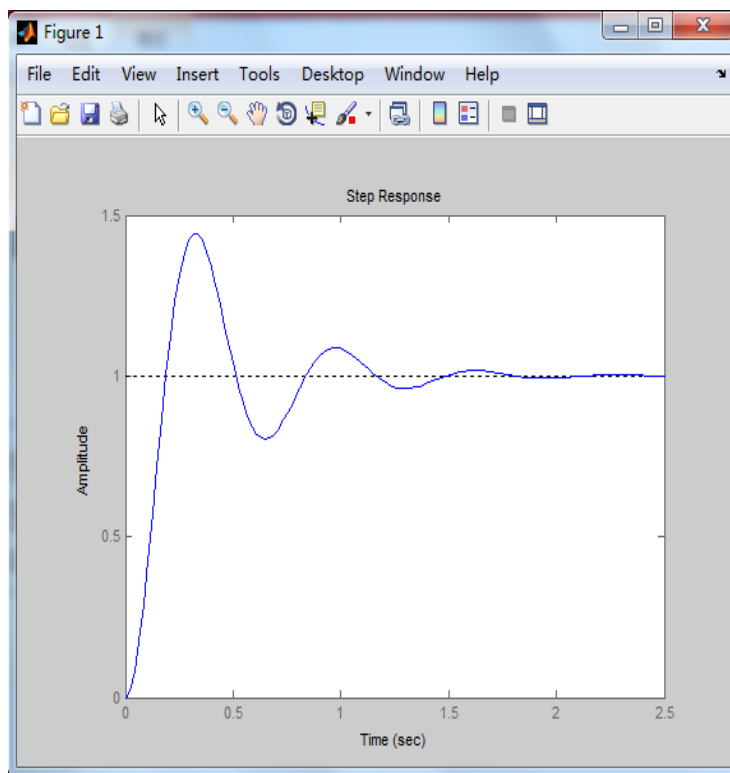
$$G(s) = \frac{100}{s^2 + 5s}$$

试作出其单位阶跃响应曲线，准确读出其动态性能指标，并记录数据。

```
sys = tf(100, [1 5 0]);  
sysc = feedback(sys, 1);  
step(sysc)
```

在曲线中空白区域，单击鼠标右键，在快捷菜单中选择“characteristics”，包含：

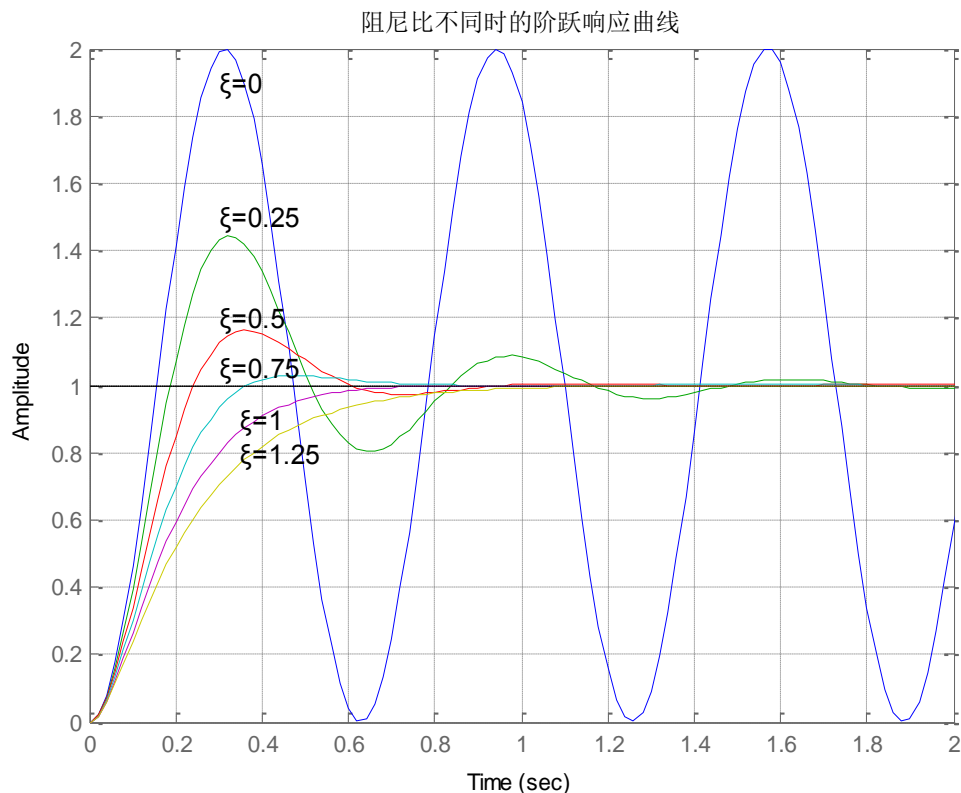
Peak response (峰值); settling time (调节时间); Rise time(上升时间); steady state(稳态值); 在相应位置出现相应点，用鼠标单击后，相应性能值就显示出来



4. 分析 ω_n 不变时，改变阻尼比，观察闭环极点的变化及其阶跃响应的变化。

【例3-2】当 $\xi = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25$ 时，求例3-1系统的闭环极点、自然振荡频率及阶跃响应曲线。

```
>> num = 100 ; i = 0 ;  
for sigma = 0 : 0.25 : 1.25  
    den = [1 2*sigma*10 100] ;  
    damp (den)  
    sys = tf (num , den) ;  
    i = i+1 ;  
    step (sys , 2)  
    hold on  
end  
grid  
hold off  
title ( ' 阻尼比不同时的阶跃响应曲线' )  
lab1 = '  $\xi = 0$ ' ; text (0.3, 1.9, lab1),  
lab2 = '  $\xi = 0.25$ ' ; text (0.3, 1.5, lab2),  
lab3 = '  $\xi = 0.5$ ' ; text (0.3, 1.2, lab3),  
lab4 = '  $\xi = 0.75$ ' ; text (0.3, 1.05, lab4),  
lab5 = '  $\xi = 1$ ' ; text (0.35, 0.9, lab5),  
lab6 = '  $\xi = 1.25$ ' ; text (0.35, 0.8, lab6)
```

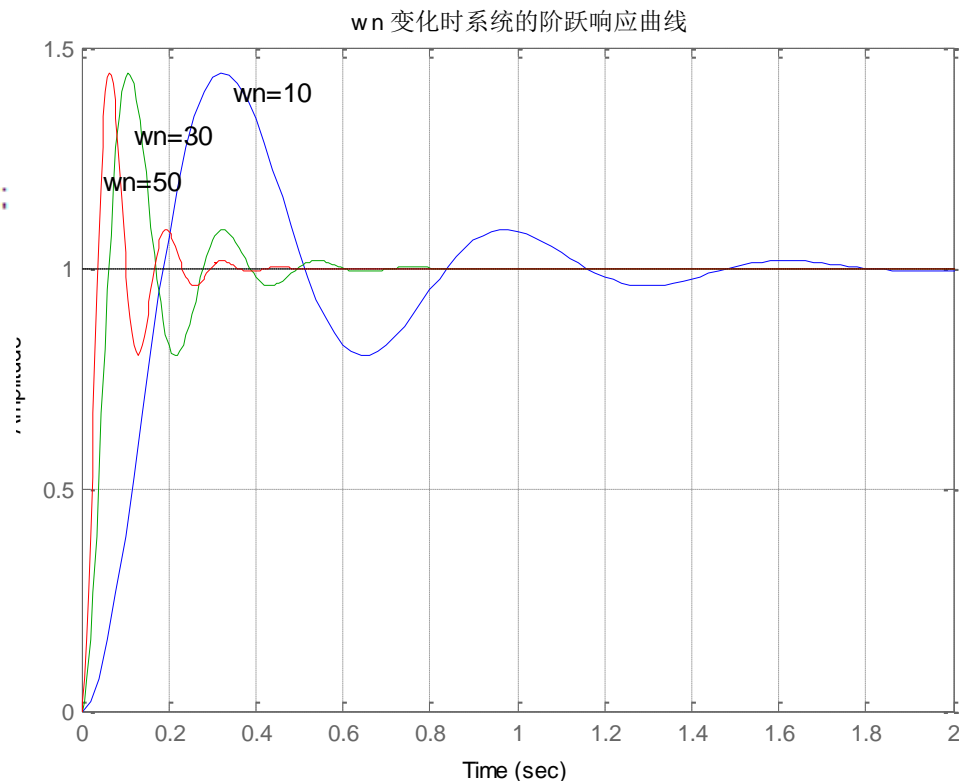


【分析】可见当 ω_n 一定时，系统随着阻尼比的增大，闭环极点的实部在s左半平面的位置更加远离原点，虚部减小到0，超调量减小，调节时间缩短，稳定性更好。

5. 保持 $\xi = 0.25$ 不变，分析 ω_n 变化时，闭环极点对系统单位阶跃响应的影响。

【例3-3】当 $\omega_n = 10, 30, 50$ 时，求系统的阶跃响应曲线。

```
>> sigma = 0.25 ; i=0 ;  
for wn = 10 : 20 : 50  
    num = wn ^2 ; den = [1, 2*sigma*wn , wn ^2] ;  
    sys = tf (num , den) ;  
    i=i+1 ;  
    step (sys , 2)  
    hold on , grid  
end  
hold off  
title (' wn 变化时系统的阶跃响应曲线')  
lab1 = 'wn = 10' ; text (0.35, 1.4, lab1),  
lab2 = 'wn = 30' ; text (0.12, 1.3, lab2),  
lab3 = 'wn = 50' ; text (0.05, 1.2, lab3)
```



【分析】可见，当 ξ 一定时，随着 ω_n 增大，系统响应加速，振荡频率增大，系统调整时间缩短，但是超调量没变化。

6. 分析系统零极点对系统阶跃响应的影响。

【作业3-1】试作出以下系统的阶跃响应，并与原系统

$G(s) = \frac{10}{s^2 + 2s + 10}$ 的阶跃响应曲线进行比较，作出实验结果分析。

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

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

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

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

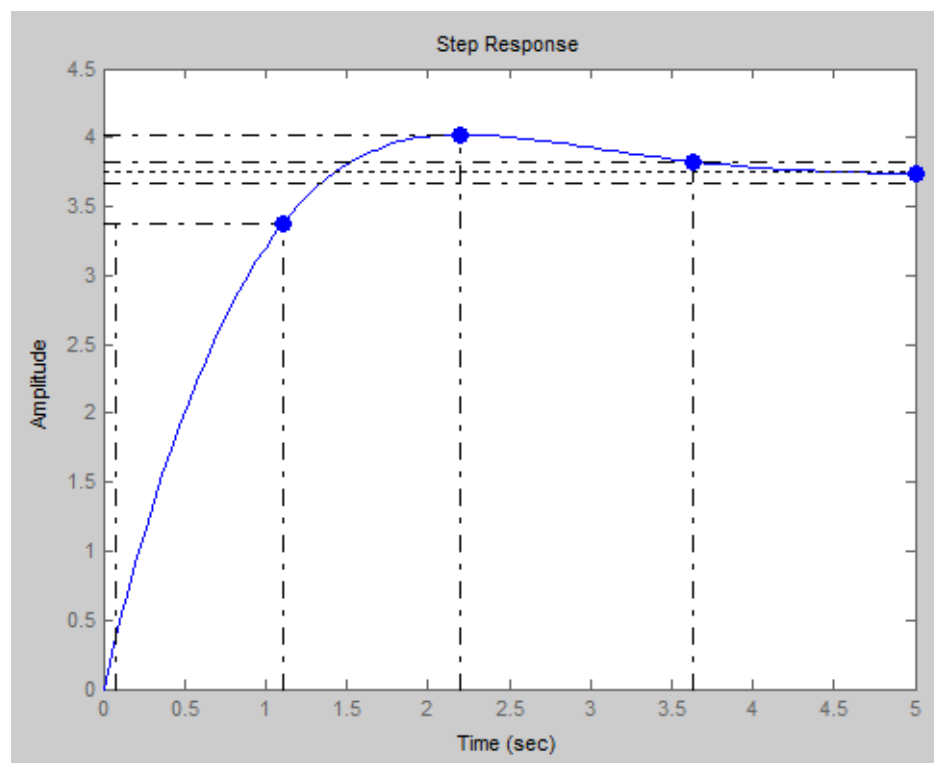
7. 三阶系统的单位阶跃响应分析

【例3-4】已知三阶系统闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{5(s+2)(s+3)}{(s+4)(s^2+2s+2)}$$

编写MATLAB程序，求取系统闭环极点及其单位阶跃响应，读取动态性能指标。

```
>> num1 = conv ([0 5], conv ([1 2], [1 3])) ;  
den1 = conv ([1 4], [1 2 2]) ;  
roots (den1)  
[z, p, k] = tf2zp (num1, den1)  
step (num1, den1)
```



8. 高阶系统的单位阶跃响应分析

【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。

(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及作用

(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？

(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

(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

3.2 基于Simulink控制系统稳态误差分析

一、实验目的

- (1) 掌握使用Simulink仿真环境进行控制系统稳态误差分析的方法。
- (2) 了解稳态误差分析的前提条件是系统处于稳定状态。
- (3) 研究系统在不同典型输入信号作用下，稳态误差的变化。
- (4) 分析系统在扰动输入作用下的稳态误差。
- (5) 分析系统型次及开环增益对稳态误差的影响。

二、实验内容

1. 研究系统在不同典型输入信号作用下，稳态误差的变化。

【例3-5】已知一个单位负反馈系统开环传递函数为

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

分别作出 $K=1$ 和 $K=10$ 时，系统单位阶跃响应曲线并求单位阶跃响应稳态误差。

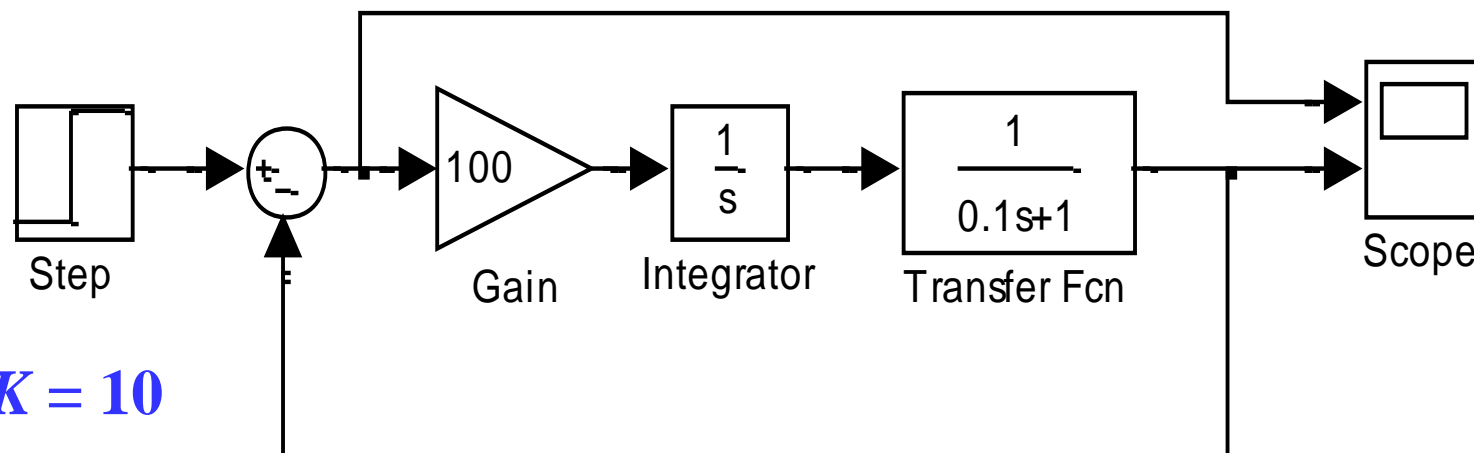
【解】首先对闭环系统判稳。

```
>> n1=100;d1=conv([1,0],[0.1,1]);G=tf(n1,d1);  
>> sys=feedback(G,1);roots(sys.den{1})
```

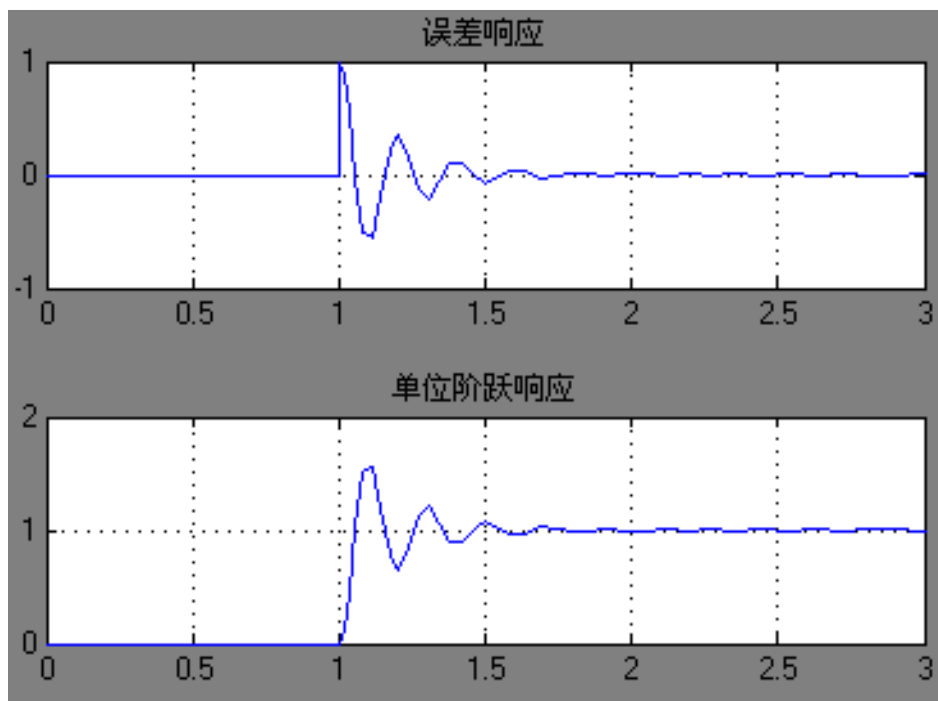
$K=10$ 时的判稳程序。实际上是求闭环系统的特征根

```
ans =  
-5.0000 +31.2250i  
-5.0000 -31.2250i
```

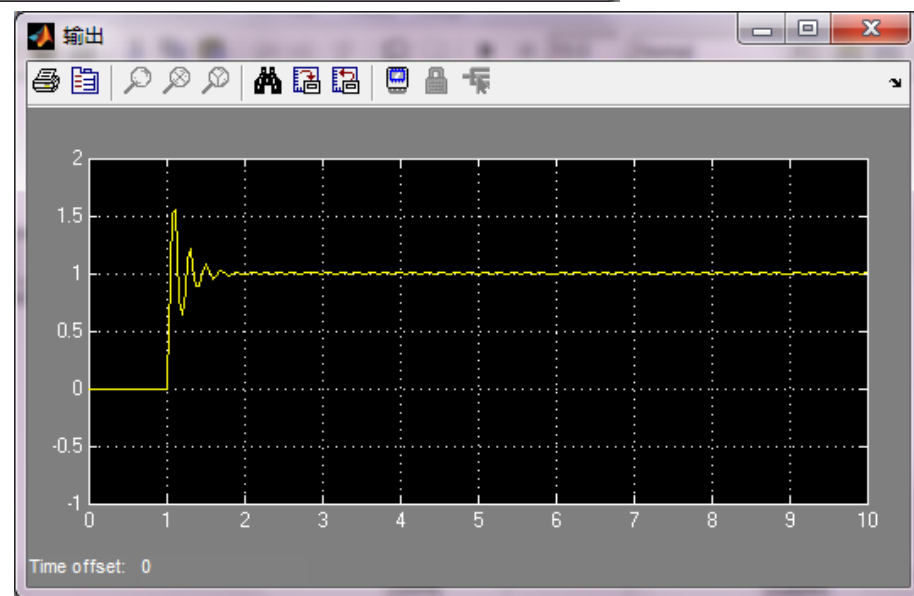
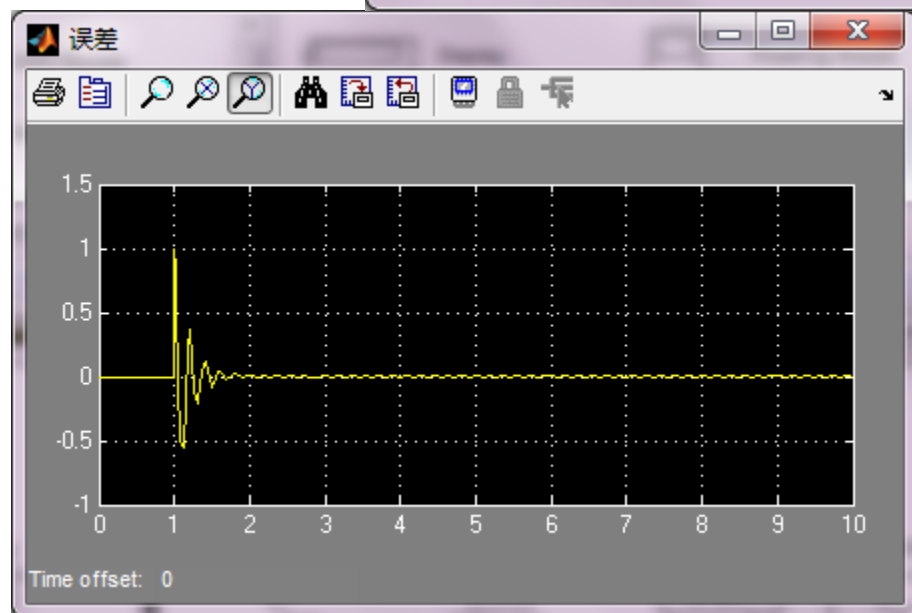
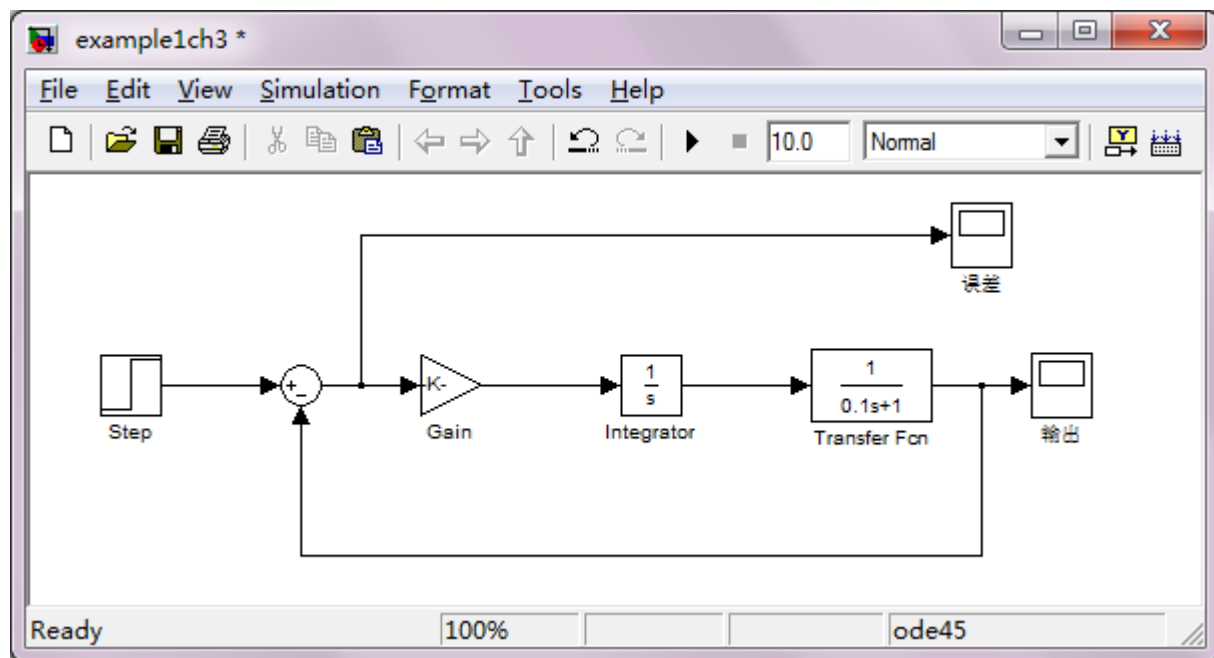
然后在Simulink环境下，建立系统数学模型。设置仿真参数并运行，观察示波器Scope中系统的单位阶跃响应曲线，并读出单位阶跃响应稳态误差。



$K = 10$



【分析】实验曲线表明，**I 型**单位反馈系统在**单位阶跃输入**作用下，**稳态误差 $e_{ssr} = 0$** ，即 I 型单位反馈系统稳态时**能完全跟踪阶跃输入**，是一阶**无静差**系统。

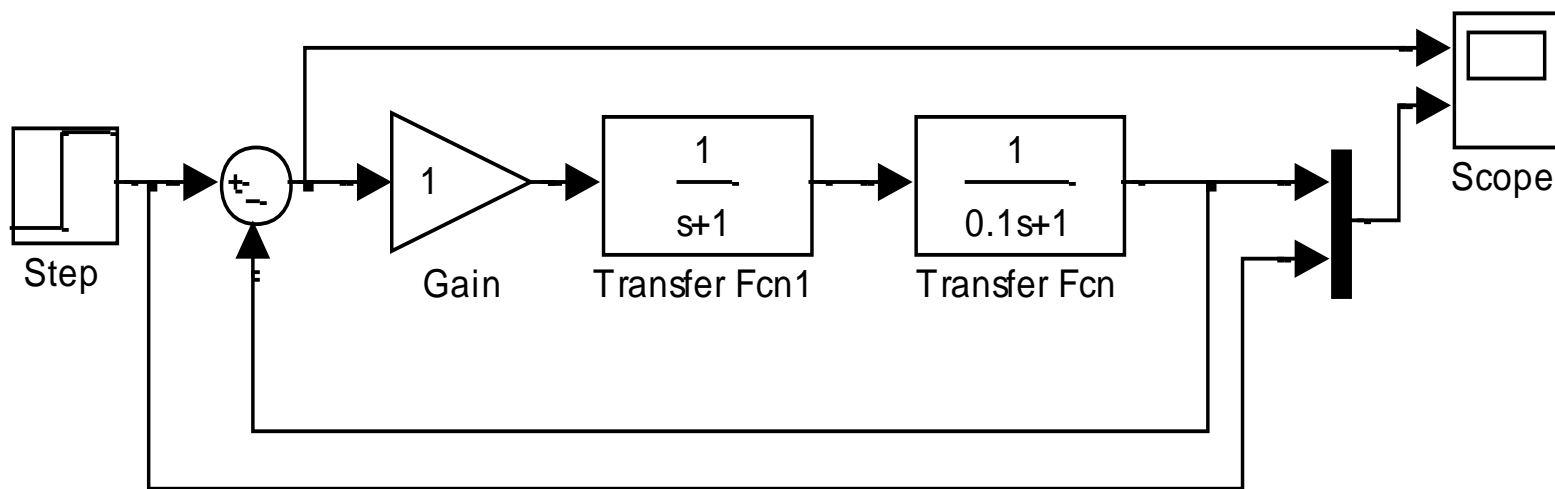


【作业3-3】将范例3-5系统的单位阶跃输入信号 改换成单位斜坡输入信号，重新仿真运行，分别观察 $K = 0.1$ 和 $K = 1$ 时，系统单位斜坡响应曲线并求单位斜坡响应稳态误差。并对实验结果曲线进行分析。

2. 研究系统型次不同，稳态误差的变化。

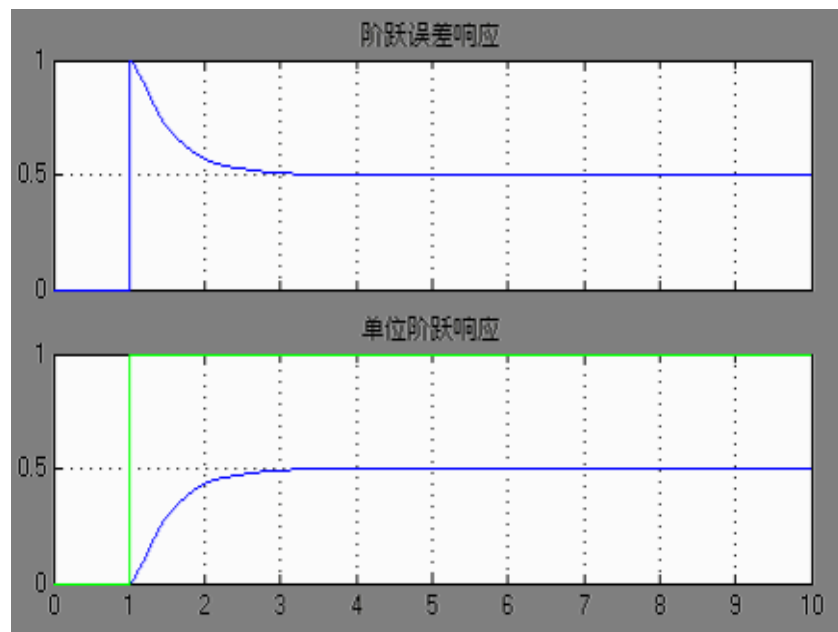
1) 0型系统在典型输入信号作用下的稳态误差

【例3-6】将范例3-5中系统的积分环节改换成一个惯性环节，开环增益改为1，系统变成0型系统。结构图如下图所示

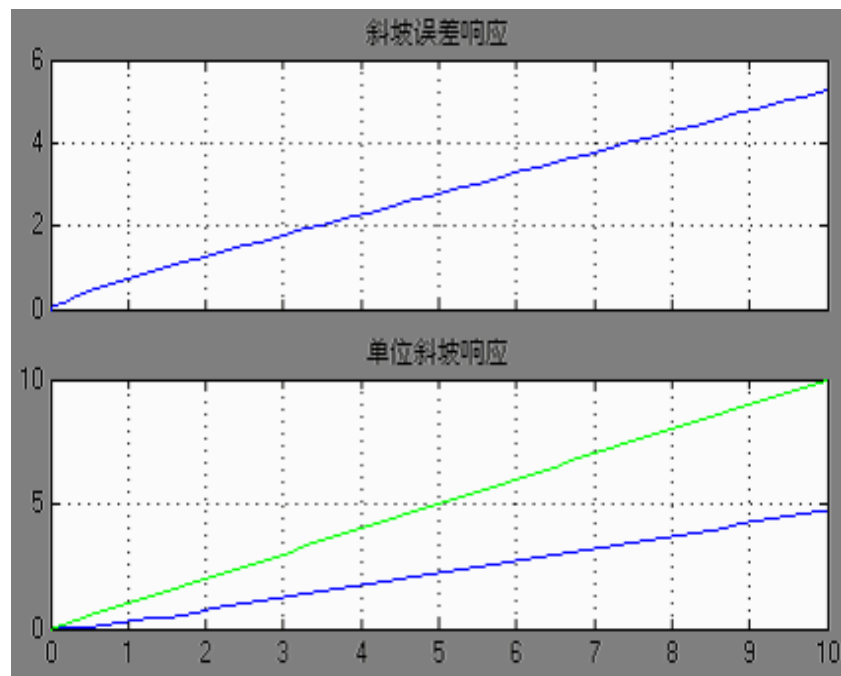


在输入端分别给定单位阶跃信号和单位斜坡信号，重新仿真运行，在示波器scope中观察系统响应曲线，并读出稳态误差

0型控制系统单位阶跃响应稳态误差曲线



0型控制系统单位斜坡响应稳态误差曲线



【分析】0型系统在单位阶跃输入作用下，系统稳态时能跟踪阶跃输入，但存在一个稳态位置误差， $e_{ssr} = 0.5$ 。

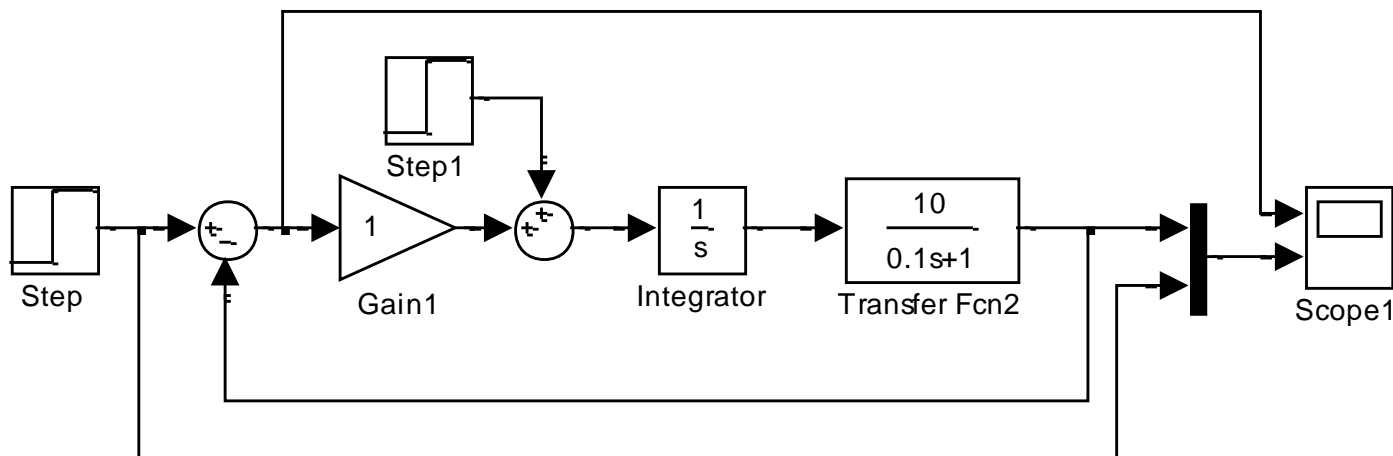
0型系统在单位斜坡输入作用下，系统不能跟踪斜坡输入，随着时间的增加，误差越来越大。

2) II型系统在典型输入信号作用下的稳态误差

【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。

3. 分析系统在扰动输入作用下的稳态误差。

【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 $e(t) = r(t) - c(t)$ ，求系统总的稳态误差。



第4章基于MATLAB控制系统的根轨迹法

4.1 基于MATLAB控制系统的根轨迹及其性能分析

一、实验目的

1. 掌握使用MATLAB绘制控制系统零极点图和根轨迹图的方法。
2. 学会分析控制系统根轨迹的一般规律。
3. 利用根轨迹图进行系统性能分析。
4. 研究闭环零、极点对系统性能的影响。

二、实验原理

1. 根轨迹与稳定性

当系统开环增益从0变化 ∞ 时，若根轨迹不会越过虚轴进入 s 右半平面，那么系统对所有的 K 值都是稳定的；若根轨迹越过虚轴进入 s 右半平面，那么根轨迹与虚轴交点处的 K 值，就是临界开环增益。应用根轨迹法，可以迅速确定系统在某一开环增益或某一参数下的闭环零、极点位置，从而得到相应的闭环传递函数。

2、根轨迹与系统性能的定性分析

- 1) 稳定性。如果闭环极点全部位于 s 左半平面，则系统一定是稳定的，即稳定性只与闭环极点的位置有关，而与闭环零点位置无关。
- 2) 运动形式。如果闭环系统无零点，且闭环极点为实数极点，则时间响应一定是单调的；如果闭环极点均为复数极点，则时间响应一般是振荡的。
- 3) 超调量。超调量主要取决于闭环复数主导极点的衰减率，并与其它闭环零、极点接近坐标原点的程度有关。
- 4) 调节时间。调节时间主要取决于最靠近虚轴的闭环复数极点的实部绝对值；如果实数极点距虚轴最近，并且它附近没有实数零点，则调节时间主要取决于该实数极点的模值。
- 5) 实数零、极点影响。零点减小闭环系统的阻尼，从而使系统的峰值时间提前，超调量增大；极点增大闭环系统的阻尼，使系统的峰值时间滞后，超调量减小。而且这种影响将其接近坐标原点的程度而加强。

三、实验内容

1. 绘制系统的零极点图

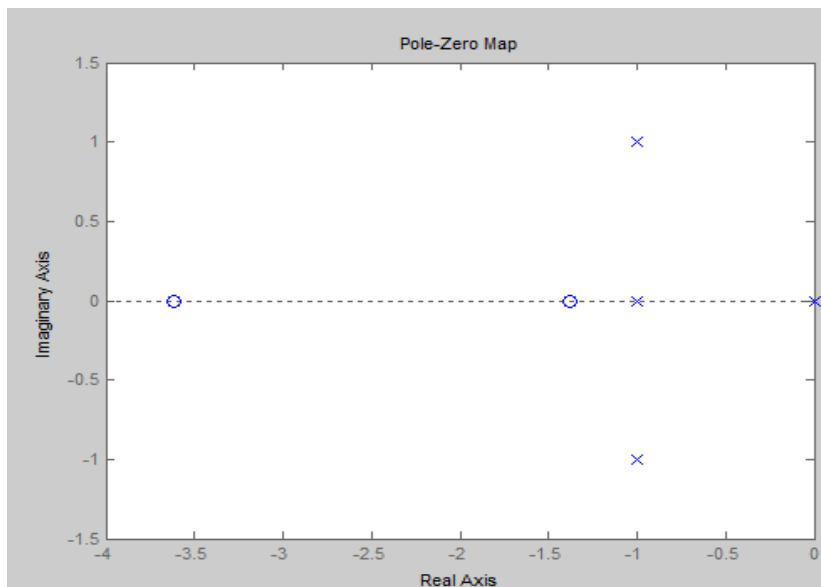
MATLAB提供pzmap() 函数来绘制系统的零极点分布图，其调用格式为：

pzmap (num , den) 或 [p , z] = pzmap (num , den)

直接在s复平面上绘制系统对应的零极点位置，极点用“×”表示，零点用“○”表示。

【例4-1】已知系统的开环传递函数，
$$G(s)H(s) = \frac{s^2 + 5s + 5}{s(s+1)(s^2 + 2s + 2)}$$
绘制系统的零极点图

```
>> num=[1,5,5];den=conv(conv([1,0],[1,1]),[1,2,2]);  
>> pzmap(num,den)
```



2. 绘制控制系统的根轨迹图并分析根轨迹的一般规律

MATLAB提供`rlocus()`函数来绘制系统的根轨迹图，其调用格式为：

`rlocus (num , den)`

% 直接在 s 复平面上绘制系统的根轨迹图。

`[k, r] = rlocfind (num, den)`

% 在作好的根轨迹图上，确定被选的闭环极点位置的增益值 k 和此时闭环极点 r （向量）的值。

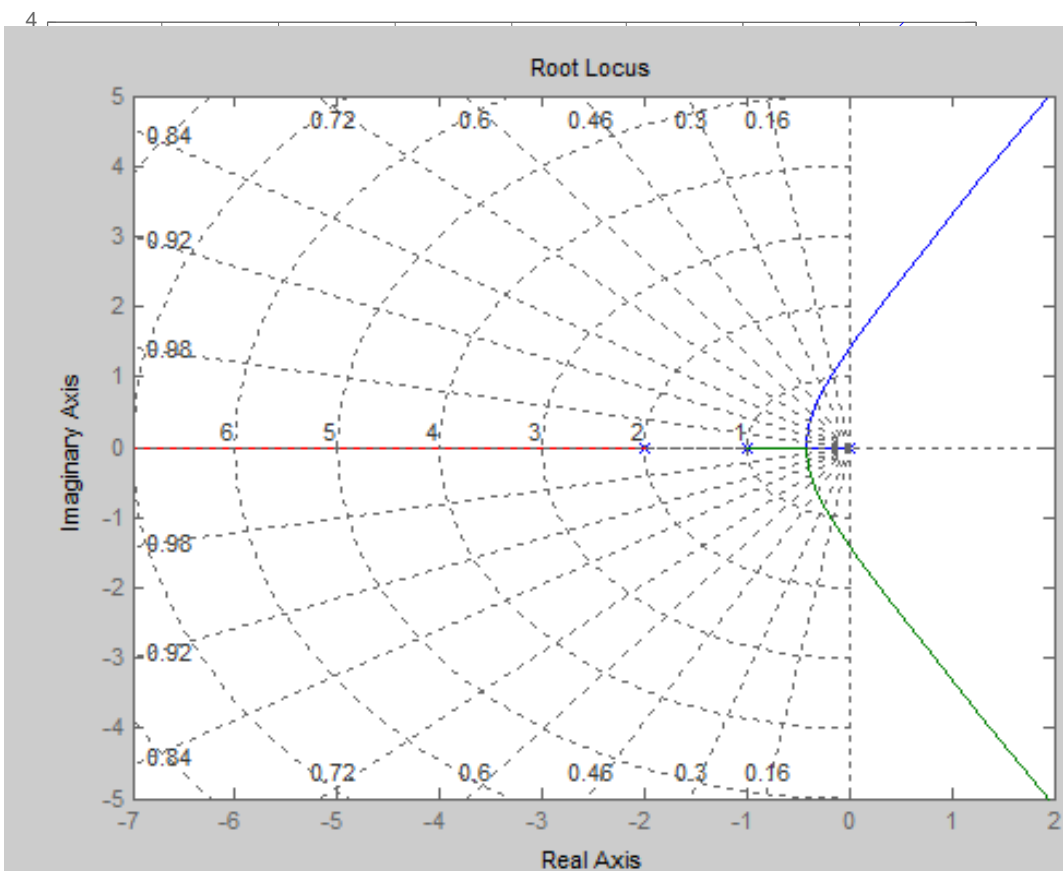
在作出根轨迹图后，再执行该命令，命令窗口出现提示语，“Select a point in the graphics windows”，此时请将鼠标移至根轨迹图并选定位置，单击左键确定，出现“+”标记，在MATLAB窗口上即得到该点的根轨迹开环增益 k 值和对应的所有闭环根 r （列向量）。

【例4-2】若已知单位负反馈系统的开环传递函数，

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

绘制控制系统的根轨迹图，并分析根轨迹的一般规律。

```
>> num=[1,5,5];den=conv(conv([1,0],[1,1]),[1,2,2]);  
>> pzmap(num,den)  
>> k = 1 ; z = [ ] ; p = [0 -1 -2] ;  
[num, den] = zp2tf(z, p, k) ;  
rlocus(num, den), sgrid
```



3. 根据控制系统的根轨迹，分析控制系统的性能。

【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 t_s
$\xi=0$					
$\xi=0.25$					
$\xi=0.7$					
$\xi=1$					
		0.2			

4.2 开环零极点对系统根轨迹的影响

一、实验目的

利用根轨迹进行分析，增加零点、极点对控制系统的影响，并用时域响应来验证设计的正确性。

二、实验内容

1、增加极点对控制系统的影响

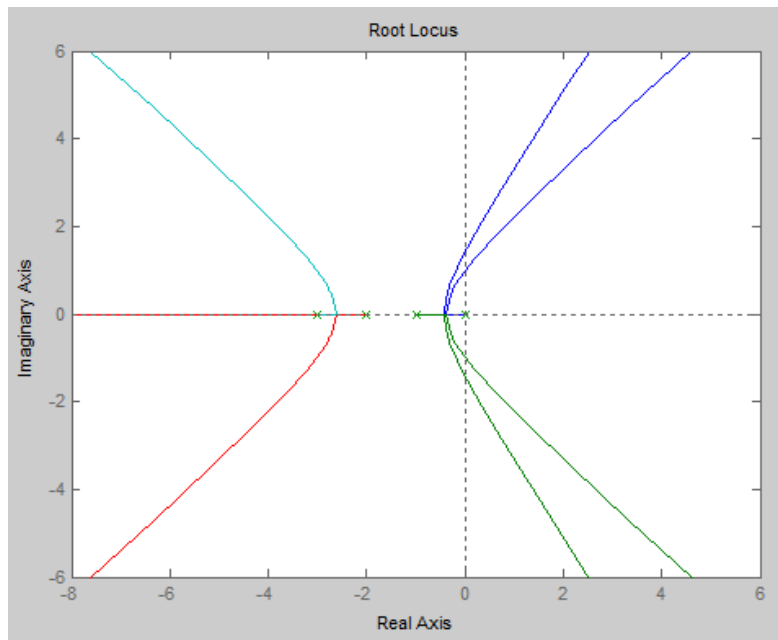
一般情况下，增加开环系统的极点，使系统根轨迹向 s 右半平面移动，或者说极点有排斥根轨迹的能力，从而降低控制系统稳定性，增加系统响应的调节时间。

【范例4-3】 已知开环系统传递函数， $G(s) = \frac{K}{s(s+1)(s+2)}$

比较增加一个开环极点 $s = -3$ 后， $G_1(s) = \frac{K}{s(s+1)(s+2)(s+3)}$

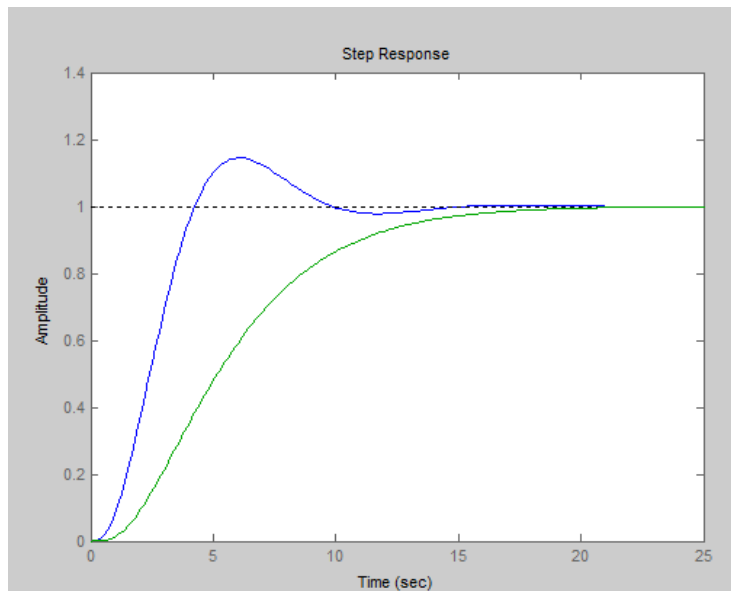
观察根轨迹及其闭环单位阶跃响应的变化。

```
>> k = 1 ; z = [ ] ; p = [0 -1 -2] ; G = zpk (z , p , k ) ; rlocus (G) ; hold on,  
k = 1 ; z = [ ] ; p = [0 -1 -2 -3] ; G1 = zpk (z , p , k ) ; rlocus (G1) ; hold off  
figure (2) ; sys = feedback (G , 1) ; step (sys) ; hold on ,  
sys1 = feedback (G1 , 1) ; step (sys1) ; hold off
```



【分析】从根轨迹图中可以看出，增加极点后，根轨迹的渐近线与实轴的交角变小，与实轴的分离点也向右平面移动，相同阻尼情况下，振荡频率降低。

增加极点后，系统响应减缓，阻尼比增大，过渡过程延长，调节时间增加，系统稳定性降低。



实际校正中使用的比例积分控制器和串联滞后校正就增加了开环极点，但静态性能得到了提高。

2、增加零点对控制系统的影响

一般情况下，增加开环系统的零点，使系统根轨迹向 s 左半平面移动，或者说零点有吸引根轨迹的能力，从而提高控制系统稳定性，减小系统响应的调节时间。

【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。

4.3 基于SISO设计工具的系统根轨迹设计

一、实验目的

1. 熟练使用根轨迹设计工具SISO。
2. 掌握用根轨迹法进行系统校正过程中，补偿增益和附加实数（或复数）零极点之间匹配的规律。
3. 利用根轨迹进行分析，并用时域响应来验证设计的正确性。

二、实验原理

当开环极点位置不变，在系统中附加开环负实数零点时，可使系统根轨迹向 s 左半平面方向弯曲，或者说，附加开环负实数零点，可使系统根轨迹图发生趋向附加零点方向的变形，而且这种影响将随开环零点接近坐标原点的程度而加强。

如果附加零点不是负实数零点，而是有负实部的共轭零点，那么它们的作用与负实数零点的作用完全相同。因此，在 s 左半平面内的适当位置上附加开环零点，可以显著改善系统的稳定性。

增加开环零点也就是增加了闭环零点，闭环零点对系统动态性能的影响，相当于减小闭环系统的阻尼，从而使系统的过渡过程有出现超调的趋势，系统的峰值时间提前，而且这种影响将随闭环零点接近坐标原点的程度而加强。

当开环零点过分接近坐标原点时，有可能使系统振荡。所以，只有当附加零点相对于原有开环极点的位置选配得当，才能使系统的稳态性能和动态性能同时得到显著改善。

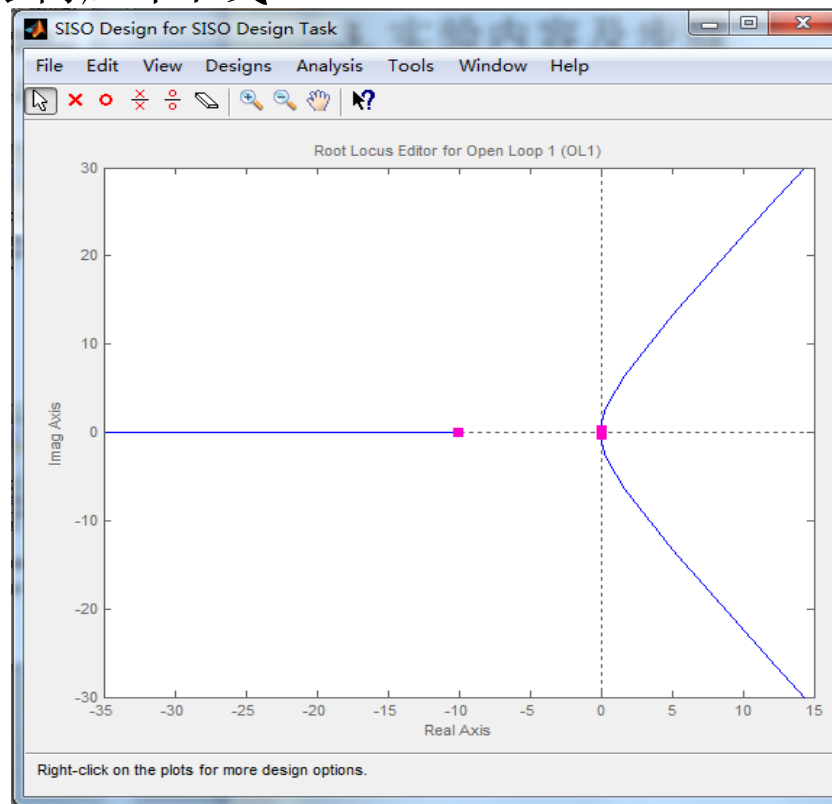
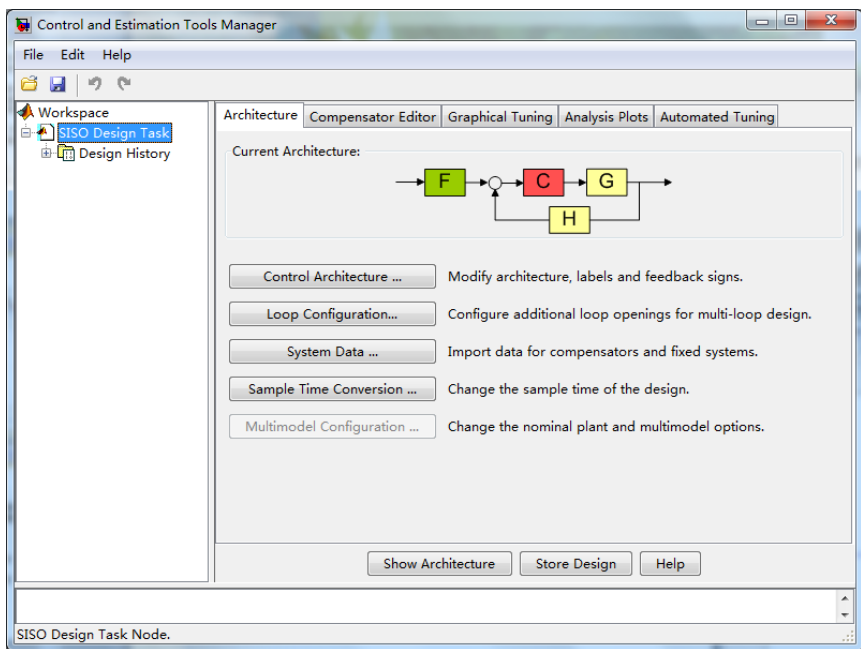
在MATLAB命令窗口中输入命令 **【rltool】**，然后回车，或者输入 **【rltool (sys)】** 函数命令，就可打开系统根轨迹的图形界面。

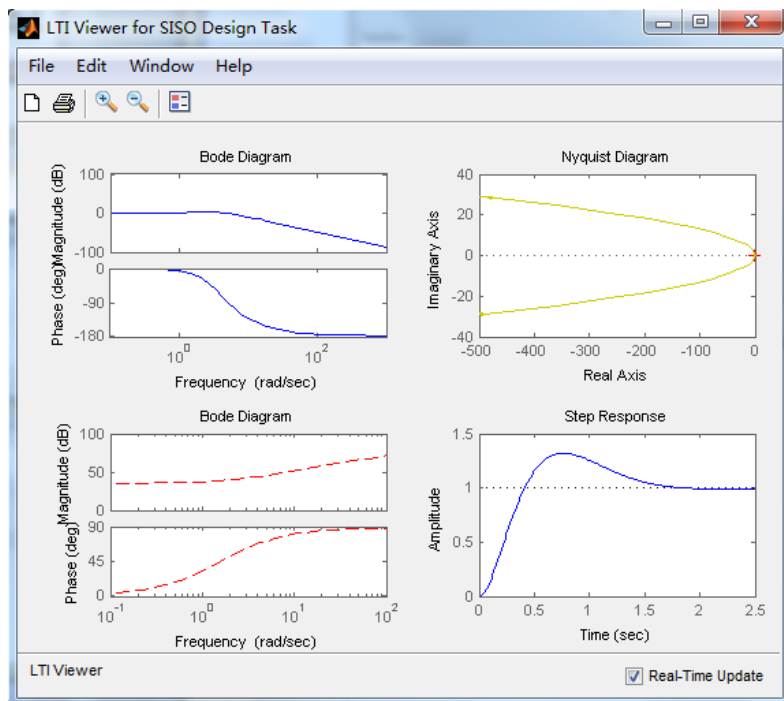
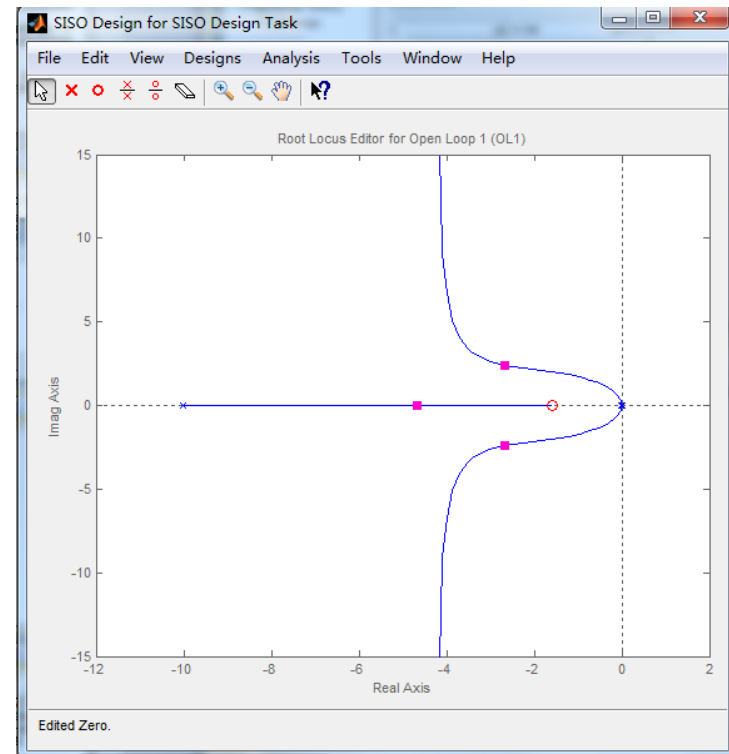
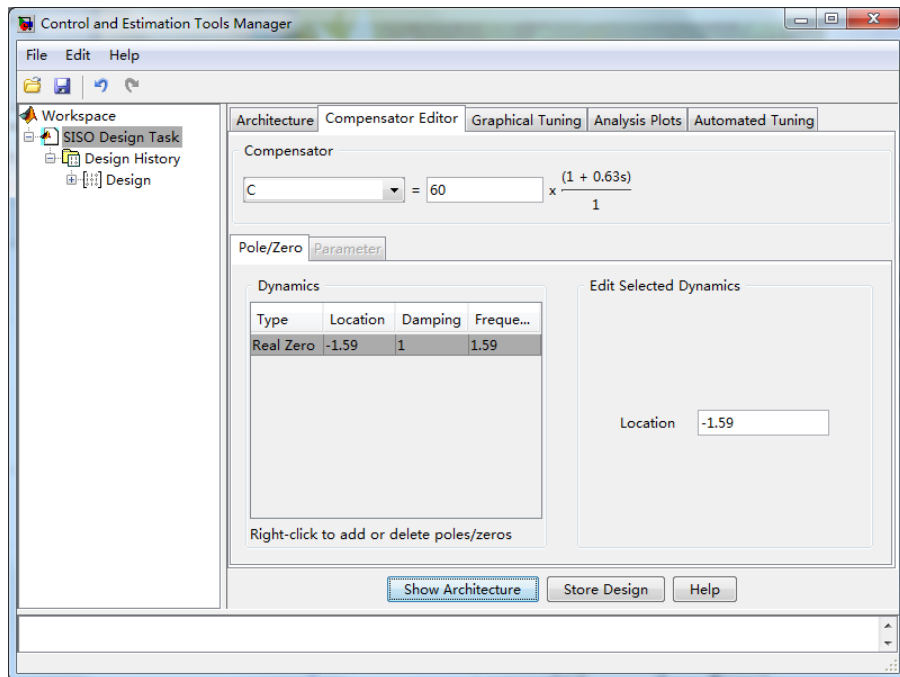
三、实验内容及步骤

【例4-4】已知系统开环传递函数 $G(s) = \frac{1}{s^2(s+10)}$

试用根轨迹设计器对系统进行补偿设计，使系统单位阶跃给定响应一次超调后就衰减；并在根轨迹设计器中观察根轨迹图与Bode图，以及系统阶跃响应曲线。

```
>> n1 = 1 ; d1 = conv ( conv ( [ 1 0 ], [ 1 0 ] ), [ 1 10 ] ) ;  
sys = tf ( n1 , d1 ) ;  
rltool ( sys )
```





Step1:编写Matlab程序，调用rltool()

Step2: 在根轨迹补偿校正器编辑器中，设计相应的增益和零极点

Step3: 在新根轨迹图的主菜单中选择"analysis"下的各命令，观察相应的曲线

设计步骤:

- 1) 建立未校正系统传递函数，打开根轨迹设计工具。
- 2) 设置校正约束条件。
- 3) 设置补偿器传递函数的形式。
- 4) 添加补偿器的零极点。
- 5) 使根轨迹通过等频率线与等阻尼比线的交点，即使系统的根轨迹通过期望的系统闭环主导极点。
- 6) 设置补偿器增益，满足系统稳定裕度的要求。
- 7) 检查校正后系统其它性能指标。

【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 $\sigma\% < 15\%$ ， $t_s < 1.5s$ 。

【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。

第5章 线性系统的频域分析法

5.1 基于MATLAB控制系统的Nyquist图及其稳定性分析

一、实验目的

1. 熟练掌握使用MATLAB命令绘制控制系统Nyquist图的方法。
2. 能够分析控制系统Nyquist图的基本规律。
3. 加深理解控制系统乃奎斯特稳定性判据的实际应用。
4. 学会利用奈氏图设计控制系统。

二、实验原理

奈奎斯特稳定性判据（又称奈氏判据）利用系统开环频率特性来判断闭环系统稳定性的一个判据，便于研究当系统结构参数改变时对系统稳定性的影响。

绘制 ω 由0变到 $+\infty$ 时的开环系统 $G(j\omega)$ 的奈氏曲线，并确定其顺时针包围 $(-1, j0)$ 点的圈数 N 。已知系统开环右极点数为 P ，则系统闭环右极点个数为 $Z = P + 2N$

若 $Z=0$ ，则开环系统 $G(j\omega)$ 对应的闭环系统是稳定的，否则是不稳定的。当 $G(j\omega)$ 奈氏曲线通过 $(-1, j0)$ 点时,表明在 s 平面虚轴上有闭环极点，系统处于临界稳定状态，属于不稳定。

- 1) 对于开环稳定的系统，闭环系统稳定的充分必要条件是：开环系统的奈氏曲线不包围 $(-1, j0)$ 点。反之，则闭环系统是不稳定的。
- 2) 对于开环不稳定的系统，有 P 个开环极点位于右半平面，则闭环系统稳定的充分必要条件是：当 ω 从0变到 $+\infty$ 时，开环系统的奈氏曲线逆时针包围 $(-1, j0)$ 点 P 次。

三、实验内容

1. 绘制控制系统Nyquist图

给定系统开环传递函数的分子系数多项式num和分母系数多项式den，在MATLAB软件中**nyquist()**函数用来绘制系统的奈氏曲线，函数调用格式有三种。

格式一：nyquist(num, den)

作Nyquist图，角频率向量的范围自动设定，默认 ω 的范围为 $(-\infty, +\infty)$ 。

格式二：nyquist(num, den, w)

作开环系统的奈氏曲线，角频率向量 ω 的范围可以人工给定。 ω 为对数等分，用对数等分函数logspace()完成，其调用格式为：**logspace(d1, d2, n)**，表示将变量 ω 作对数等分，命令中d1, d2为 $10^{d1} \sim 10^{d2}$ 之间的变量范围，n为等分点数。

格式三：[re, im, w] = nyquist(num, den)

返回变量格式不作曲线，其中re为频率响应的实部，im为频率响应的虚部，w是频率点。

【例5-1】系统开环传递函数：
绘制其Nyquist图。

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

```
>> num = 10 ; den = [1 2 10] ;
```

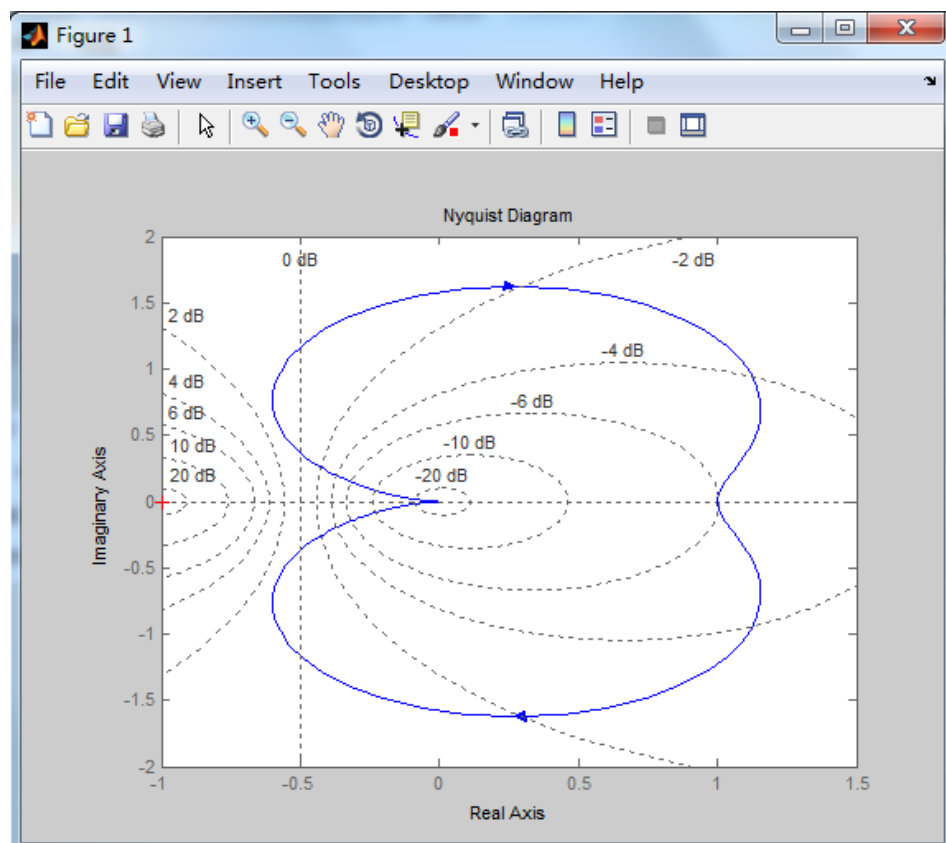
```
w = 0:0.1:100 ;
```

% 给定角频率变量

```
axis ([-1, 1.5, -2, 2]) ;
```

% 改变坐标显示范围

```
nyquist (num, den, w)
```



2、根据奈氏曲线判定系统的稳定性

【例5-2】已知控制系统的开环传递函数为：

$$G(s)H(s) = \frac{0.5}{s^3 + 2s^2 + s + 0.5}$$

绘制Nyquist图，判定系统的稳定性。

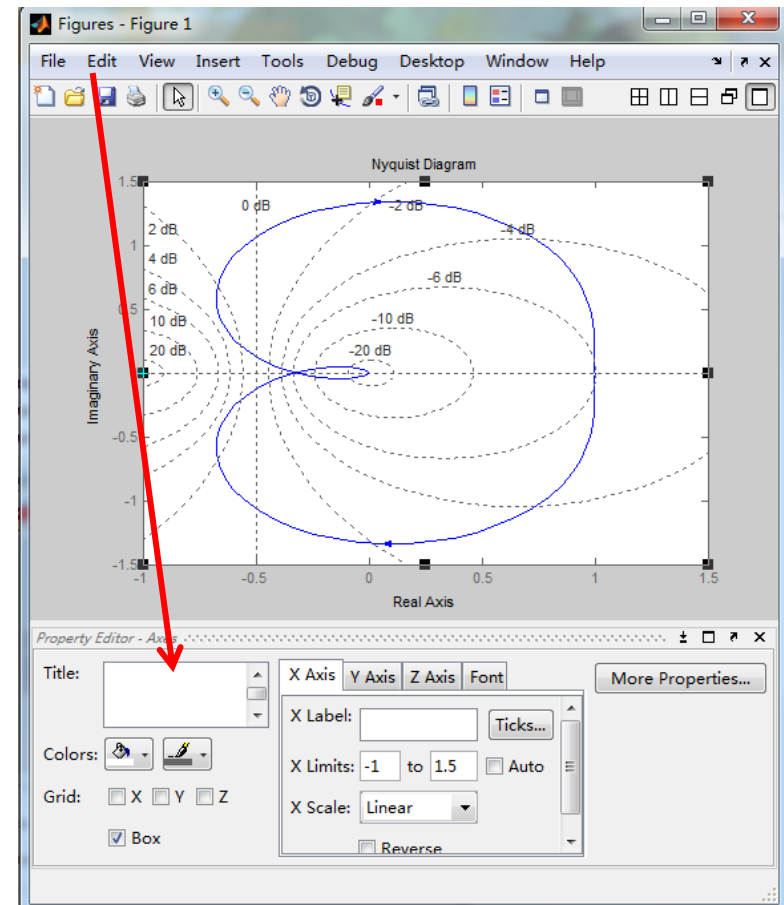
用nyquist()函数绘制奈氏图

```
>> num = 0.5 ; den = [1 2 1 0.5] ;  
figure(1) ;  
nyquist(num, den)
```

通过roots()函数求得开环极点：

```
>> roots(den)  
  
ans =  
  
-1.5652  
-0.2174 + 0.5217i
```

【分析】由于系统奈氏曲线没有包围且远离 $(-1, j0)$ 点，且 $p=0$ ，因此系统闭环稳定。



【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。

5.2 基于MATLAB控制系统的伯德图及其频域分析

一、实验目的

1. 熟练掌握运用MATLAB命令绘制控制系统伯德图的方法。
2. 了解系统伯德图的一般规律及其频域指标的获取方法。
3. 熟练掌握运用伯德图分析控制系统稳定性的方法。

二、实验原理

1. 对数频率稳定性判据

闭环系统稳定的充分必要条件是当 ω 从0变化到 $+\infty$ 时，在开环系统对数幅频特性曲线 $L(\omega) > 0\text{dB}$ 的频率范围内，相频特性 $\varphi(\omega)$ 穿越 -180° 的相位线的次数 $2N=P$ 。其中 $N=N_+-N_-$ ， N_+ 为正穿越次数， N_- 为负穿越次数， P 为开环传递函数的正实部极点数。

2. 相角裕度 γ

对于闭环稳定系统，如果开环相频特性再滞后 γ 度，则系统将变为临界稳定。当 $\gamma > 0$ 时，相角裕度为正，闭环系统稳定。当 $\gamma = 0$ 时，表示奈氏曲线恰好通过点，系统处于临界稳定状态。当 $\gamma < 0$ 时，相角裕度为负，闭环系统不稳定。

3. 幅值裕度 hg (dB)

对于闭环稳定系统，如果系统开环幅频特性再增大 hg 倍，则系统将变为临界稳定状态。当 hg (dB) > 0 时，闭环系统稳定。当 hg (dB) $= 0$ 时，系统处于临界稳定状态。当 hg (dB) < 0 ，闭环系统不稳定。

三、实验内容

1. 绘制控制系统的伯德图

格式一： `bode (num, den)` : 在当前图形窗口中直接绘制系统的Bode图，角频率向量 ω 的范围自动设定。

格式二： `bode (num , den , ω)` : 用于绘制的系统Bode图， ω 为输入给定角频率，用来定义绘制Bode图时的频率范围或者频率点。 ω 为对数等分，用对数等分函数`logspace ()`完成，其调用格式为：

`logspace (d1, d2, n)`，表示将变量 ω 作对数等分，命令中 $d1$ ， $d2$ 为 $10^{d1} \sim 10^{d2}$ 之间的变量范围， n 为等分点数。

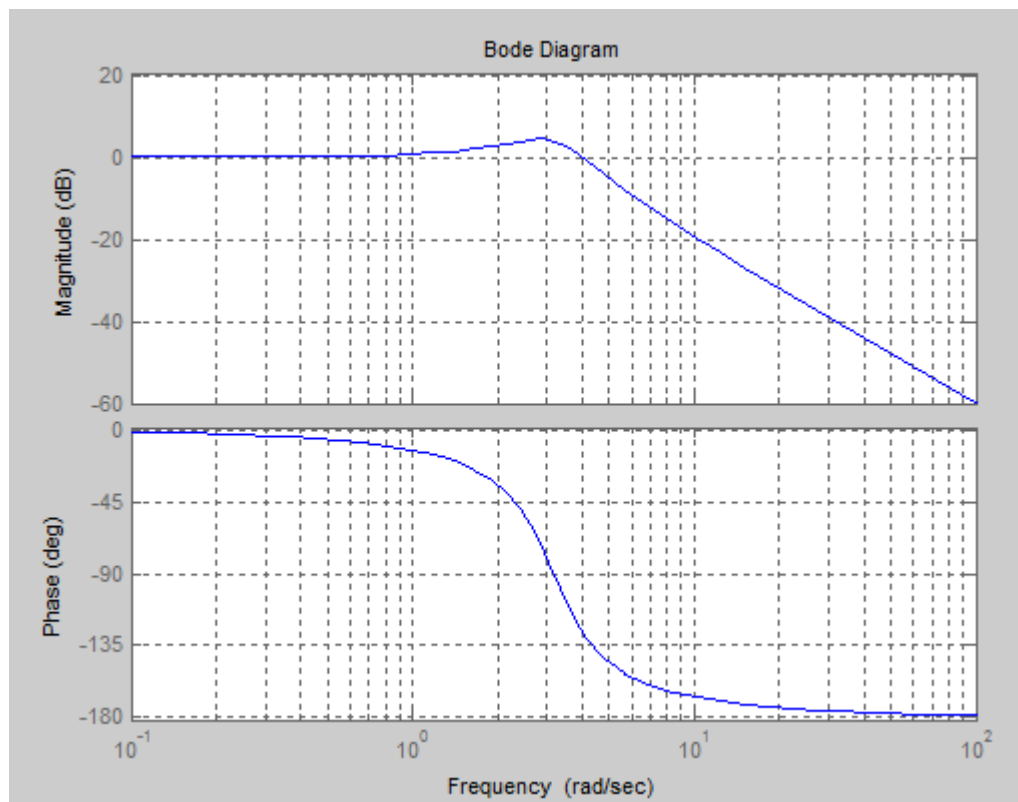
格式三： `[mag , phase , ω] = bode (mun , den)`

返回变量格式不作图，计算系统Bode图的输出数据，输出变量`mag`是系统Bode图的幅值向量，注意此幅值不是分贝值，须用`magdb=20*log (mag)`转换；`phase`为Bode图的幅角向量，单位为 $(^\circ)$ ； ω 是系统Bode图的频率向量，单位是rad/s。

【例5-3】 已知控制系统开环传递函数：

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

绘制其Bode图并确定谐振峰值 M_r 和谐振频率 ω_r 。



```
>> num = [10] ; den = [1 2 10] ;  
bode (num, den)  
  
>> [m, p, w] = bode(num, den);  
>> mr = max(m)  
  
mr =  
  
1.6667  
  
>> wr = spline(m, w, mr)  
  
wr =  
  
2.8284
```

插值函数spline(m, w, mr)
求谐振频率

2.计算系统的稳定裕度，包括幅值裕度 G_m 和相位裕度 P_m 。
函数**margin**（）可以从系统频率响应中计算系统的稳定裕度及其对应的频率。

格式一：margin（num，den）

给定开环系统的数学模型，作Bode图，并在图上方标注幅值裕度 G_m 和对应频率 ω_g ，相位裕度 P_m 和对应的频率 ω_c 。

格式二：[Gm，Pm， ω_g ， ω_c] = margin（num，den）

返回变量格式，不作图。

格式三：[Gm，Pm， ω_g ， ω_c] = margin（m，p，w）

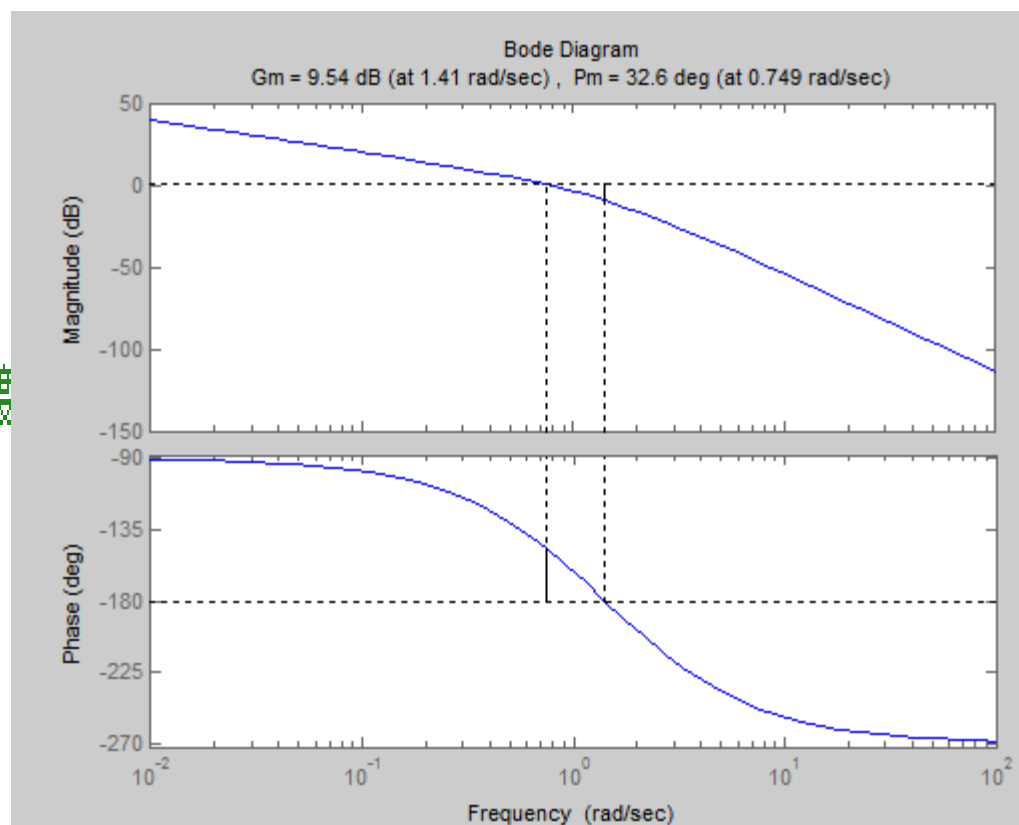
给定频率特性的参数向量：幅值m、相位p和频率 ω ，由插值法计算 G_m 及 ω_g 、 P_m 及 ω_c 。

【例5-4】 已知单位负反馈系统的开环传递函数

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

绘制其Bode图并求系统的稳定裕度。

```
>> k = 2; z = [ ]; p = [0 -1 -2];  
[num, den] = zp2tf(z, p, k);  
margin(num, den)  
[Gm1, Pm1, wg1, wc1] = margin(num, den) % 格式二求出系统稳定裕度  
[m, p, w] = bode(num, den);  
[Gm2, Pm2, wg2, wc2] = margin(m, p, w) % 格式三求出系统稳定裕度
```



3. 系统对数频率稳定性分析

【例5-5】系统开环传递函数，

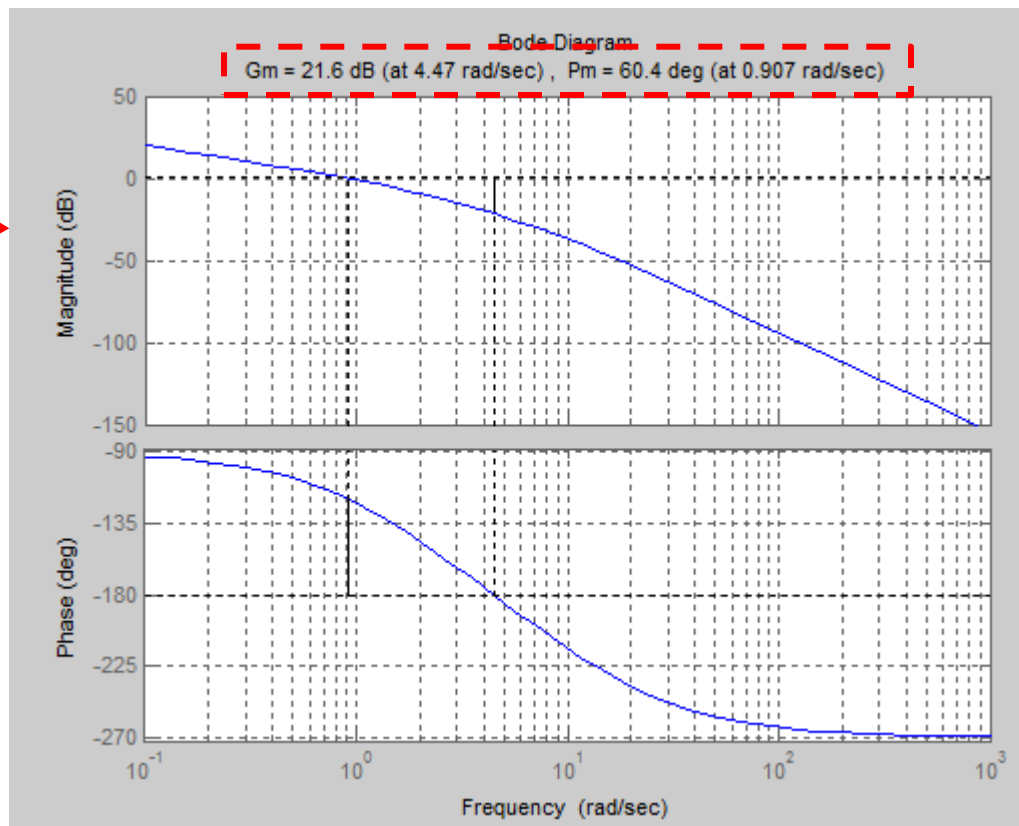
$$G(s) = \frac{k}{s(0.5s + 1)(0.1s + 1)}$$

试分析系统的稳定性。

解：k=1时

```
>> num = 1; d1 = [1 0]; d2 = [0.5 1]; d3 = [0.1 1];  
den = conv(d1, conv(d2, d3));  
margin(num, den)
```

系统是稳定的



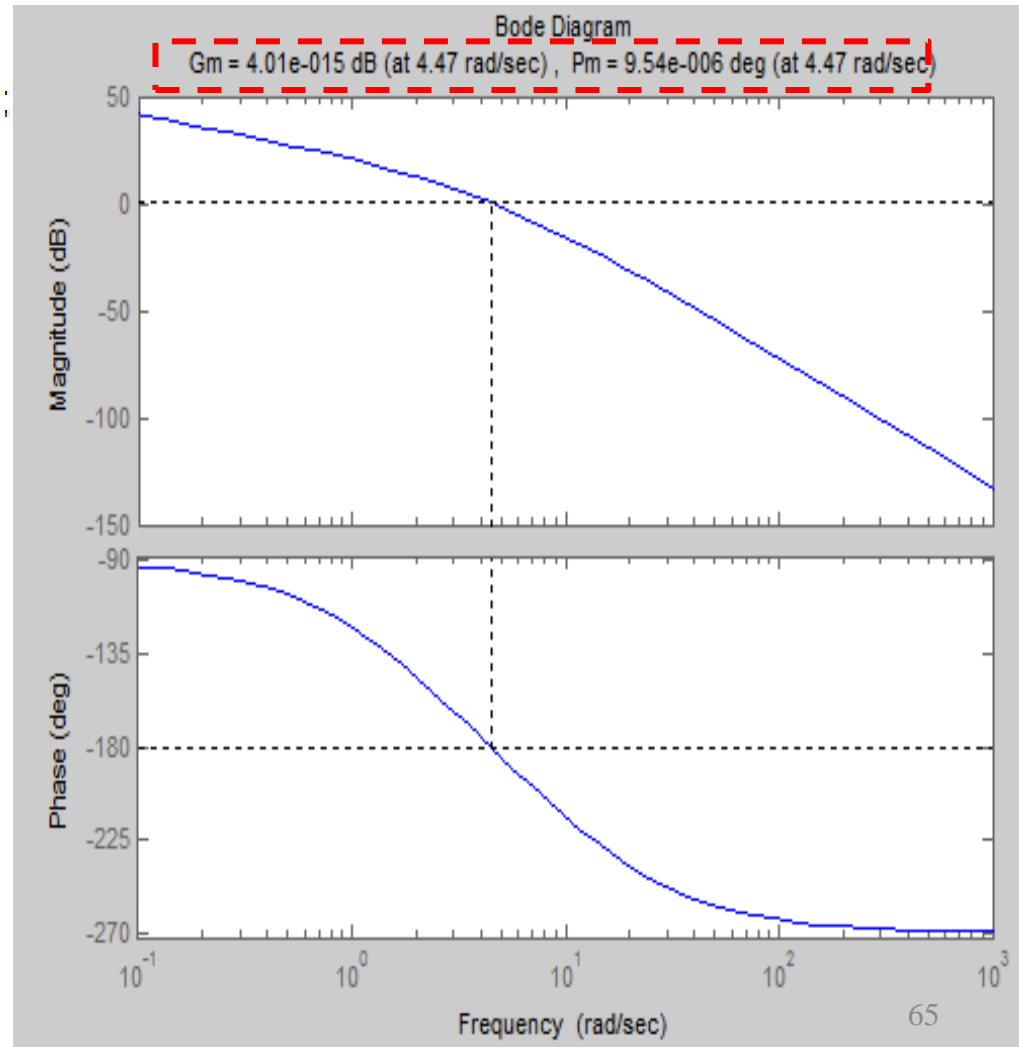
k=1时系统的bode图

系统临界稳定时的k值:

```
>> num1 = 1; d1 = [1 0]; d2 = [0.5 1]; d3 = [0.1 1];  
den = conv (d1, conv (d2, d3 ));  
[m , p , w] = bode (num , den) ;  
wi = spline (p , w , -180) ;  
mi = spline (w , m , wi) ;  
k=1/mi  
num2=k;  
margin (num2, den)
```

k =

12.0000



【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。

【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。（3）确定使系统获得最大相位裕度的增益 k 值

第6章 基于MATLAB控制系统频率法串联校正设计

6.1 基于MATLAB控制系统频率法串联超前校正设计

一、实验目的

1. 对给定系统设计满足频域性能指标的串联校正装置。
2. 掌握频率法串联有源和无源超前校正网络的设计方法。
3. 掌握串联校正环节对系统稳定性及过渡过程的影响。

二、串联超前校正设计过程

1. 原理

用频率法对系统进行超前校正的基本原理，是利用超前校正网络的相位超前特性来增大系统的相位裕量，以达到改善系统瞬态响应的目标。为此，要求校正网络最大的相位超前角出现在系统的截止频率（剪切频率）处。

2. 串联超前校正的特点

主要对未校正系统中频段进行校正，使校正后中频段幅值的斜率为 -20dB/dec ，且有足够大的相位裕度；超前校正会使系统瞬态响应的速度变快，校正后系统的截止频率增大。这表明校正后，系统的频带变宽，瞬态响应速度变快，相当于微分效应；但系统抗高频噪声的能力变差。

3. 用频率法对系统进行串联超前校正的一般步骤

- 1) 根据稳态误差的要求，确定开环增益 K 。
- 2) 根据所确定的开环增益 K ，画出未校正系统的波特图，计算未校正系统的相位裕度。
- 3) 计算超前网络参数 a 和 T 。
- 4) 确定校正网络的转折频率。
- 5) 画出校正后系统的波特图，验证已校正系统的相位裕度。
- 6) 将原有开环增益增加一倍，补偿超前网络产生的幅值衰减，确定校正网络组件的参数。

三、实验内容

【例6-1】已知单位负反馈系统的开环传递函数为：

$$G_0(s) = \frac{K_0}{s(0.1s + 1)(0.001s + 1)}$$

试用频率法设计串联有源超前校正装置，使系统的相位裕度 $\gamma > 45^\circ$ ；静态速度误差系数 $K_v = 100s^{-1}$ 。

解：（1） $k_0 = 1000$ ；（2）绘制未校正系统的bode图，并计算 γ_0 和 h_{g0} ：
`bode (num, den)`；`margin (num, den)`

（3）设计串联超前校正装置，确定校正装置提供的相位超前量
 $\varphi_m = \gamma - \gamma_0 + \Delta = 45 - \gamma_0 + (5 \sim 10)^\circ$

（4）确定校正网络的转折频率 ω_1 和 ω_2 ：

$$a = \frac{1 + \sin \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m} \Rightarrow 10 \lg a = L_0(\omega_m) \Rightarrow \omega_m \quad \omega_1 = \frac{\omega_m}{\sqrt{a}}, \quad \omega_2 = \sqrt{a} \omega_m$$

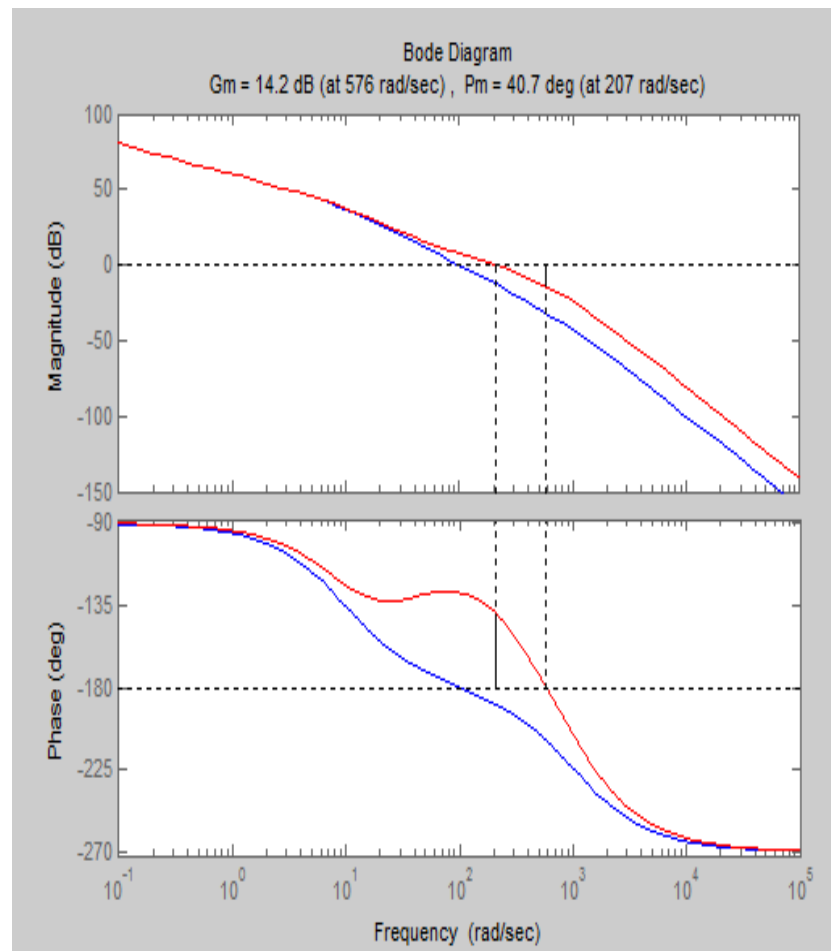
（5）确定校正器的传递函数

$$G_c = \frac{\frac{s}{\omega_1} + 1}{\frac{s}{\omega_2} + 1}$$

```

>> num = 1000 ; den = conv ([1, 0], conv ([0.1, 1], [0.001, 1])) ;
G0 = tf (num , den) ; %未校正系统的开环传递函数
[Gm, Pm, Wcg, Wcp] = margin (G0) ; %未校正系统的频域性能指标
w = 0.1 : 0.1 : 10000 ; %确定频率采样的间隔值
[mag , phase] = bode (G0, w) ;
magdb = 20*log(mag) ; %计算对数幅频响应值
phim1 = 45 ; deta = 8 ; phim = phim1-Pm+deta ; %确定相位超前角
bita = (1-sin (phim*pi/180)) / (1+sin (phim*pi/180)) ; %确定 值
n = find (magdb+10*log10 (1/bita) <= 0.0001) ;
%find ( ) 函数找出满足该式的magdb向量所有下标值
wc = n (1) ; %取第1项为wc是为了最大限度利用超前相位里
w1 = (wc/10)*sqrt (bita) ;
w2 = (wc/10) / sqrt (bita) ; %确定校正装置的两个转折频率
numc = [1/w1, 1] ; denc = [1/w2, 1] ; %令k=1, 确定校正装置的传递函数
Gc = tf (numc, denc) ;
G = Gc*G0 ; %校正后系统的开环传递函数
[Gmc , Pmc , Wcgc , Wcpc] = margin (G) ; %校正前后系统的频域性能指标
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I和 值:' ) , I = 1/w1 ; [I , bita] ,
bode (G0 , G) ; % 绘制校正前和校正后的Bode图
hold on , margin (G) %在同一窗口显示校正后的频域指标

```



校正前（蓝色）和校正后（红色）系统的bode图

【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 $>10\text{dB}$

$$\text{参考答案 } G_c(s) = \frac{0.22541s+1}{0.053537s+1} \quad G(s) = \frac{9.0165s+40}{0.053537s^3+1.1071s^2+2s}$$

6.2 基于MATLAB控制系统频率法串联滞后校正设计

一、实验目的

1. 对给定系统设计满足频域或时域指标的串联滞后校正装置。
2. 掌握频率法设计串联滞后校正的方法。
3. 掌握串联滞后校正对系统稳定性和过渡过程的影响。

二、串联滞后校正设计方法

1. 原理和特点

滞后校正网络具有低通滤波器的特性，会使系统开环频率特性的中频和高频段增益降低和截止频率减小，从而有可能使系统获得足够大的相位裕度，它不影响频率特性的低频段。但是校正后系统的截止频率会减小，瞬态响应的速度要变慢。

2. 串联滞后校正网络的设计步骤

- 1) 根据稳态性能要求, 确定开环增益 K ;
- 2) 利用已确定的开环增益, 画出未校正系统对数频率特性曲线, 确定未校正系统的截止频率 ω_{c0} 、相位裕度 γ_0 和幅值裕度 h_{g0} ;
- 3) 根据相位裕度要求, 在未校正系统的相频特性曲线 $\varphi_0(\omega)$ 上找出这样一个频率 ω_c , 使得相位 φ 满足:

$$\varphi_0(\omega_c) = -180^\circ + \gamma + \Delta \quad (\text{补偿量 } \Delta = 5^\circ - 15^\circ)$$

并将 ω_c 选择为校正后系统的截止频率;

- 4) 确定未校正系统在新截止频率 ω_c 处的幅值 $L_0(\omega_c)$, 并使 $L_0(\omega_c) = -20\lg b$, 从而确定 b 的值。
- 5) 确定校正网络的转折频率 ω_1 和 ω_2 , 及传递函数

$$\omega_2 = 0.1\omega_c, \omega_1 = b\omega_2 \quad G_c = \frac{\frac{s}{\omega_2} + 1}{\frac{s}{\omega_1} + 1}$$

- 6) 验算已校正系统的相位裕度和幅值裕度。

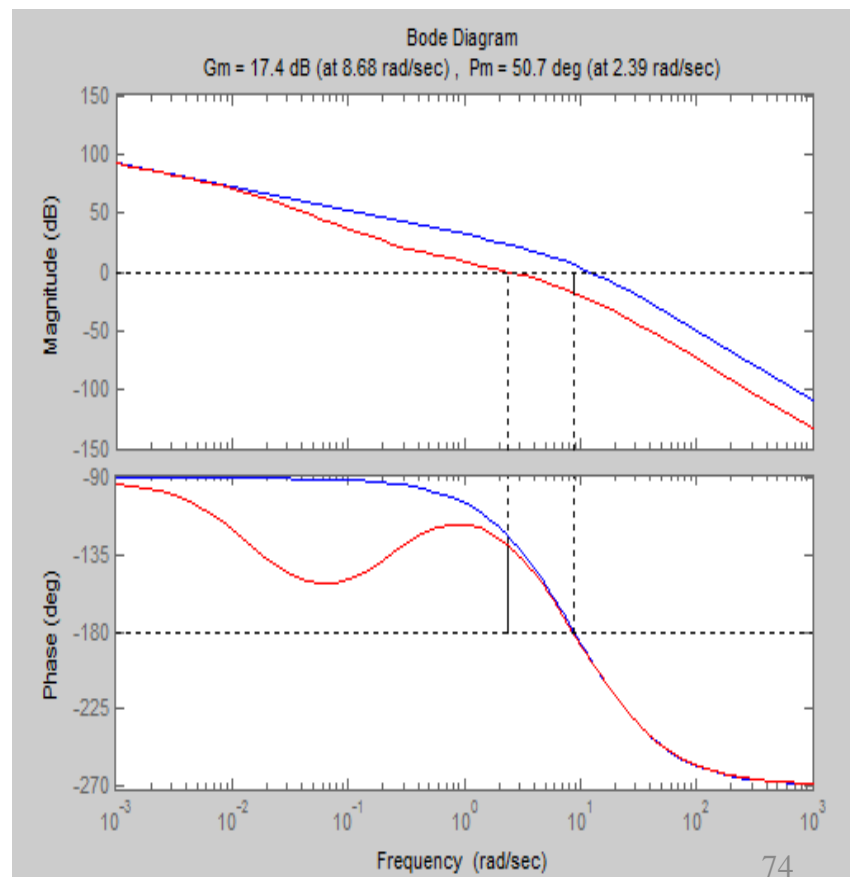
3. 实验内容

【例6-2】已知单位负反馈系统的开环传递函数为

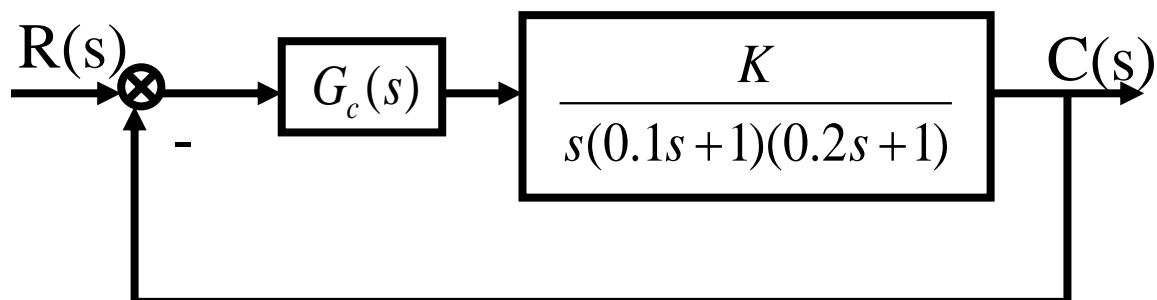
$$G_0(s) = \frac{K}{s(0.0625s + 1)(0.2s + 1)}$$

设计要求该系统的相角裕度满足 $\gamma > 50^\circ$ ，幅值裕量 $hg \geq 17\text{dB}$ ，静态速度误差系数 $k_v = 40$ 。求串联滞后校正装置的传递函数 $G_c(s)$ 。

```
>> num = 40 ; den = conv ([1, 0], [0.0625, 1]) ; den = conv (den, [0.2, 1]) ;  
G0 = tf (num, den) ; margin (G0) ;  
gamma0 = 50 ; delta = 6 ; gamma = gamma0 + delta ;  
w = 0.01 : 0.01 : 1000 ; [mag, phase] = bode (G0, w) ;  
n = find (180 + phase - gamma <= 0.1) ; wgamma = n(1) / 100 ;  
[mag, phase] = bode (G0 , 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)  
G = G0*Gc  
bode (G0, G) , hold on , margin (G) , beta
```



【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 $hg>10\text{dB}$ ，截止频率 $\omega_c>2.3\text{rad/s}$

实验报告要求

1. 完成实验内容中的各作业题，编写程序，记录相关数据和响应曲线，并分析，得出结论。
2. 实验报告内容完整，包含作业题目，matlab程序，仿真结果及曲线，实验分析，实验结论，实验体会。
3. 实验报告可以打印，但格式符合基本规范，除仿真曲线可以用图片格式，其他内容不得采用截图格式。如采用“插入对象中的microsoft 公式3.0 ”书写公式。
4. 一人一份报告