



# 自动控制原理实验教程 MATLAB仿真



# 第1章 MATLAB7.1与Simulink6.1入门基础

## 1.1 自动控制系统仿真介绍

### 一、优点

- (1) 仿真对象是物理系统的数学模型，而不是实物系统本身，因此研究成本低。
- (2) 仿真方法灵活多样，易于实现。
- (3) 通过仿真研究可以得到大量的、充分的数据和曲线，便于分析。
- (4) 虚拟现实技术可以缩短开发周期。

## 二、内容


控制系统仿真实验主要从各个角度对控制系统进行全面分析，并对系统进行校正及设计控制器，改善闭环系统的性能。内容包括：

- 控制系统的建模与模型间的相互转换
- 控制系统稳定性分析
- 线性系统时域分析
- 根轨迹分析
- 频域分析及非线性系统分析等

## 三、工具

研究MATLAB语言，请参考其他相关的书籍或浏览国内各大高校的关于MATLAB方面的BBS网站。http://

[www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)，[http:// www.mathtools.net](http://www.mathtools.net)，[http:// mathworks.netsh.net](http://mathworks.netsh.net)，[http:// www.math-world.com](http://www.math-world.com)。



Name ▲

A screenshot of a Windows Explorer window showing the contents of the 'C:\Program Files\MathWorks\MATLAB\bin' directory. The files listed are: m3registry, registry, util, win32, deploytool.bat, inststyp.ini, lcldata.xml, lcldata.xsd, license.txt, matlab.bat, and matlab.exe.

Select a file to view details

## 1.2 控制系统MATLAB7.1环境简述

### 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 |



## 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



### 1.2.3 MATLAB基本运算

#### MATLAB基本运算中符号特殊含义说明

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



MATLAB的数学表达式输入格式注意以下几方面：

- (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，中间必须用乘号“\*”。
- (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 $\pi$ ；“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。



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

【范例1-2】 (1) 建立矩阵

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

逗号或空格：分隔列

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

```
A =
```

```
7      8      9
```

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

```
A =
```

```
7      8      9
```

分号：分隔行

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

```
B =
```

```
7
```

```
8
```

```
9
```

```
>> y=(1)/(a*log(1-x-a)+2*a)
??? Undefined function or variable 'a'.
```

```
>> y=(1)/(2*log(1-x-2)+2*2)
??? Undefined function or variable 'x'.
```

```
>> y=1/(2*log(1-x-2)+2*2)
??? Undefined function or variable 'x'.
```

```
>> y=1/(2*log(1-0.5-2)+2*2)
```

```
y =
```

```
0.0768 - 0.1003i
```

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

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

```
C =
```

```
1      1      2
```

```
3      5      8
```

```
10     12     15
```

## 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   |

【范例1-3】求多项式的展开式。

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

【范例1-4】（1）求多项式的根。

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

```
>> D=conv([5 0 3],conv([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

```
>> 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
```

## 1.2.4 MATLAB常用图形编辑

基本二维曲线绘图命令是plot ( )。

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

### 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   | 。    | 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       |

## 1. 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。

## 2. 使用多窗口绘制图形

**figure ( N )** 命令功能是创建编号为N的新窗口，等待绘制图形。

## 3. 图形窗口的分割

**subplot ( )**，在一个图形窗口显示多幅图形，把图形窗口分割成m行与n列的子窗口，并选定第i个窗口为当前窗口。

命令调用格式 **subplot ( m, n, i )**

## 4. 图形控制函数

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

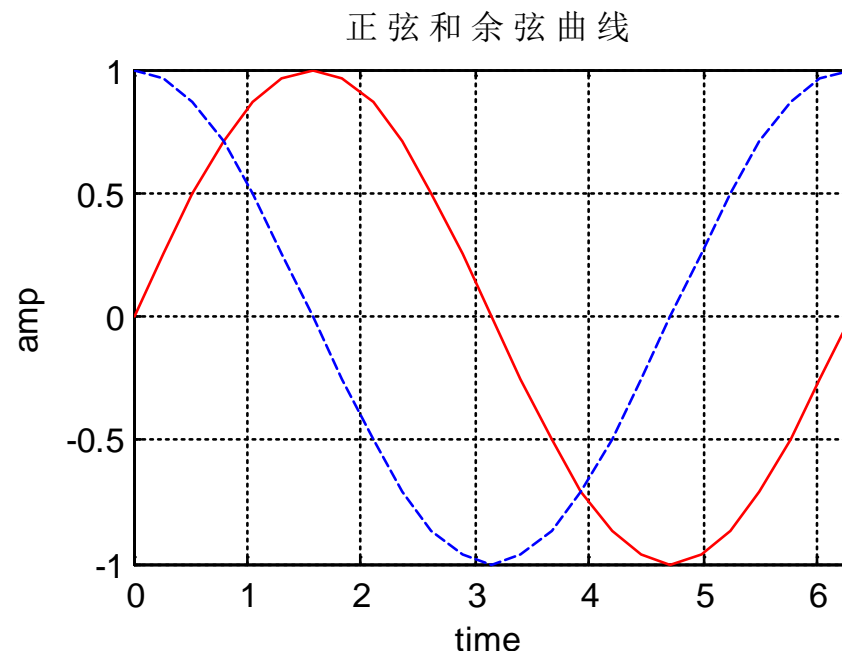
**title (‘字符串’ )** 在所画图形的最上端标注图形标题。

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

**grid** 增加网格。

【范例1-8】 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.
```

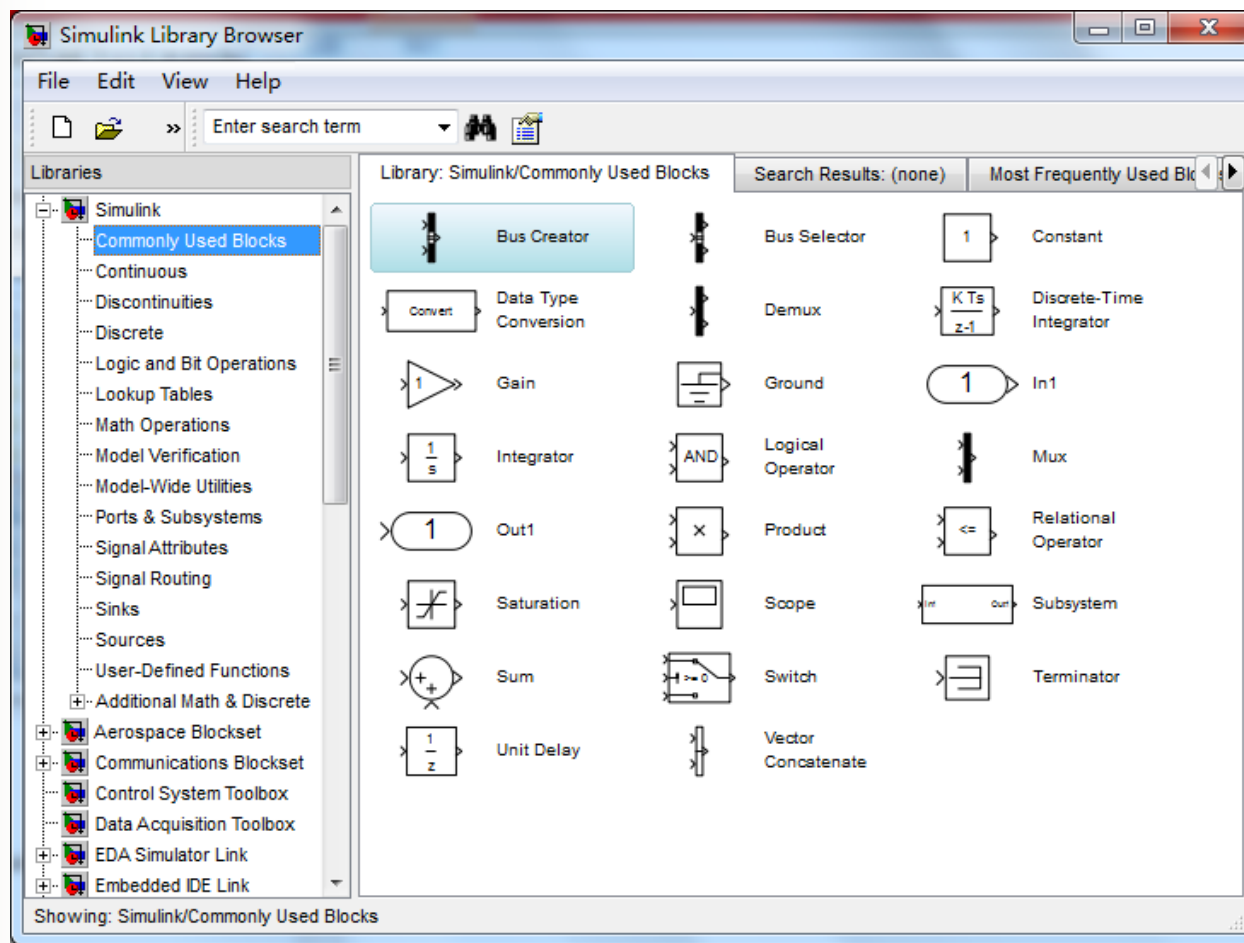




## 1.3 Simulink 6.1 仿真工具简述

Simulink 建模直接绘制控制系统的动态模型结构。

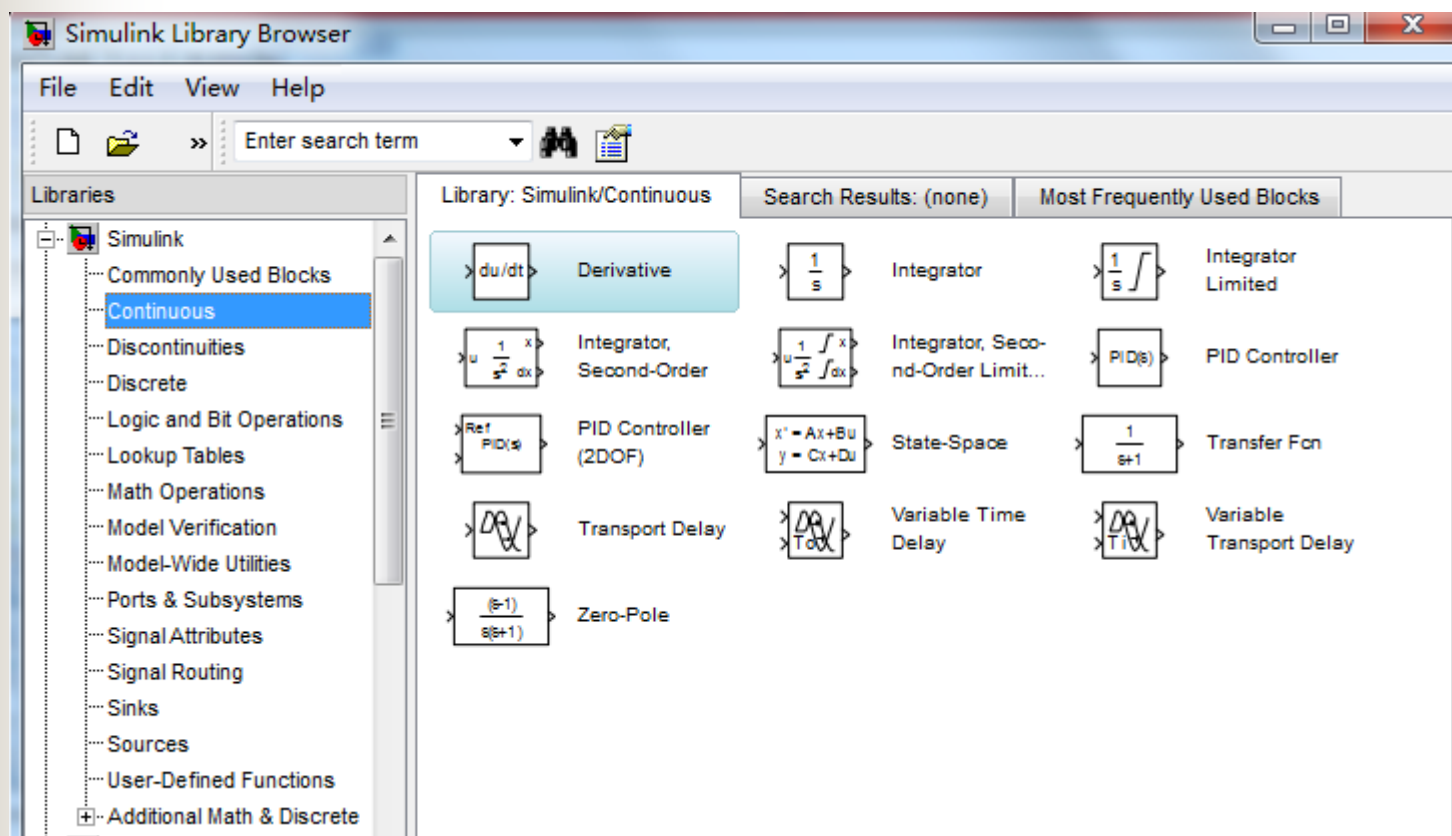
1.3.1 Simulink 的启动：工具栏上单击  按钮



## 1.3.2 Simulink模块功能介绍

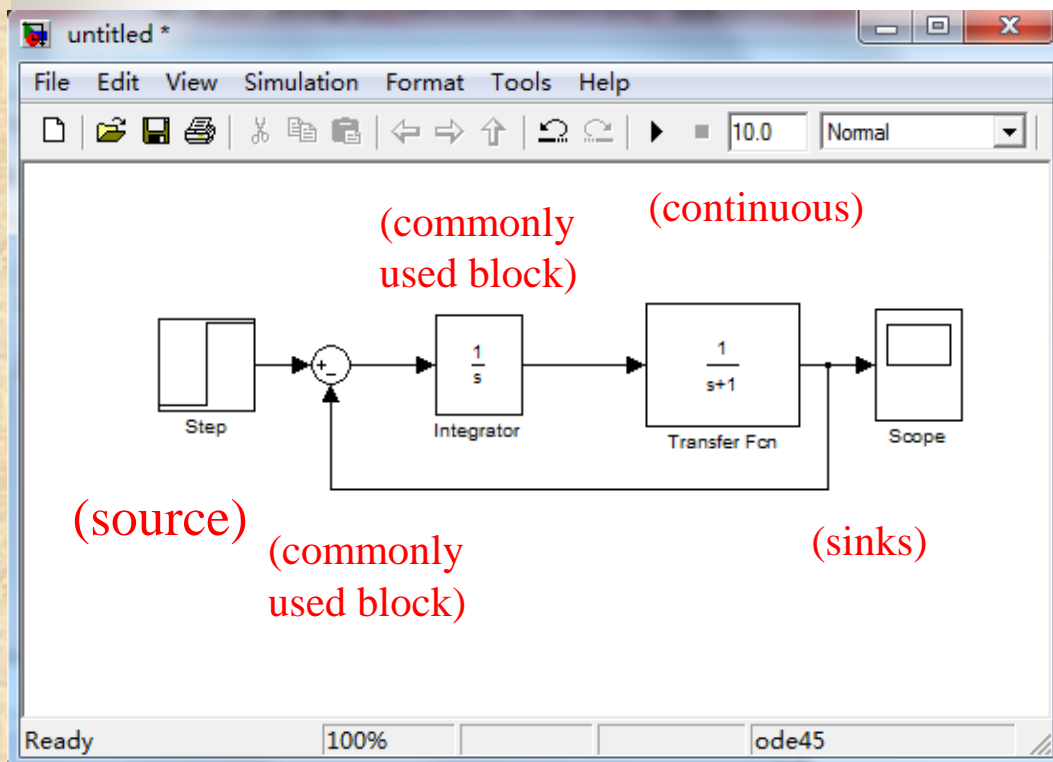
1. Commonly used blocks: 通用用户模块组

2. Continuous: 连续模块组



### 1.3.3 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

### 一、目的

- (1) 熟悉MATLAB实验环境，掌握MATLAB命令窗口的基本操作。
- (2) 掌握MATLAB建立控制系统数学模型的命令及模型相互转换的方法。
- (3) 掌握使用MATLAB命令化简模型基本连接的方法。
- (4) 学会使用Simulink模型结构图化简复杂控制系统模型的方法。

## 二、控制系统模型的建立

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。

### 1、传递函数模型（也称为多项式模型）

连续系统的传递函数模型为：

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

在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 = [ b0 , b1 , ..., bm ] , den = [ a0 , a1 , ..., an ]。**



用函数**tf ( )**来建立控制系统的传递函数模型，  
用函数**printsys ( )**来输出控制系统的函数，  
其命令调用格式为：

**sys = tf ( num , den ) 和 printsys ( num , den )**

*Tips:* 对于已知的多项式模型传递函数，其分子、分母多项式系数两个向量可分别用**sys.num{1}**与**sys.den{1}**命令求出。

【范例2-1】已知系统传递函数

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

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

num/den =

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

## 【范例2-2】 已知系统传递函数

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

```
>> num=5*conv(conv([1, 2], [1, 2]), [1, 6, 7]);  
>> den=conv(conv(conv([1, 0], [1, 1]), conv([1, 1], [1, 1])), [1, 0, 2, 1]);  
>> Gs=tf(num, den)
```

Transfer function:

$$5 s^4 + 50 s^3 + 175 s^2 + 260 s + 140$$

---

$$s^7 + 3 s^6 + 5 s^5 + 8 s^4 + 9 s^3 + 5 s^2 + s$$

## 【自我实践2-1】 建立控制系统的传递函数模型

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

## 2、零极点增益模型

零极点模型是分别对原传递函数的分子、分母进行因式分解，以获得系统的零点和极点的表示形式。

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

$K$ 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 $z = [z_1, z_2, \dots, z_m]$ ， $p = [p_1, p_2, \dots, p_n]$ ， $k = [k]$

用函数命令`zpk()`来建立系统的零极点增益模型，其函数调用格式为：

**`sys = zpk(z, p, k)`**

【范例2-3】 已知系统传递函数

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

```
>> 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)
```

【自我实践2-2】 建立控制系统的零极点模型：

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

### 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

【范例2-4】 已知系统传递函数，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
```

【自我实践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。

则**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：只能实现两个模型的串联；多于两个必须嵌套使用

**parallel( )**函数：只能实现两个模型的并联；多于两个必须嵌套使用

【范例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 =

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

【自我实践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。



## 第3章 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， $\omega_n$ 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. 求该系统的特征根

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、和 $\omega_n$

**函数damp()**可以计算出系统的闭环根， $\xi$ 和 $\omega_n$ 。

### 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）。



### 【范例3-1】若已知单位负反馈前向通道的传递函数为：

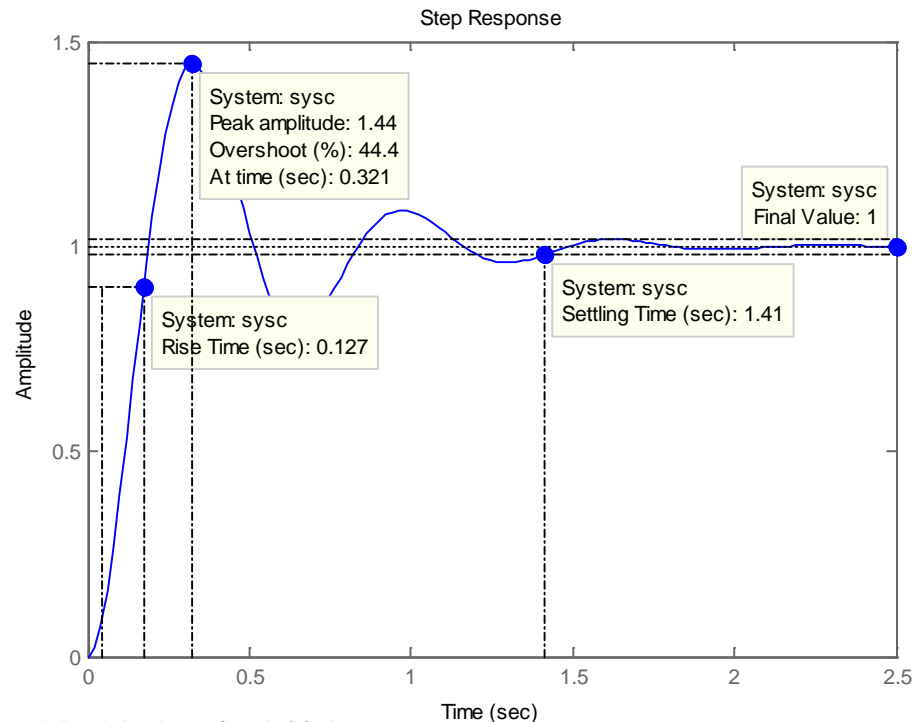
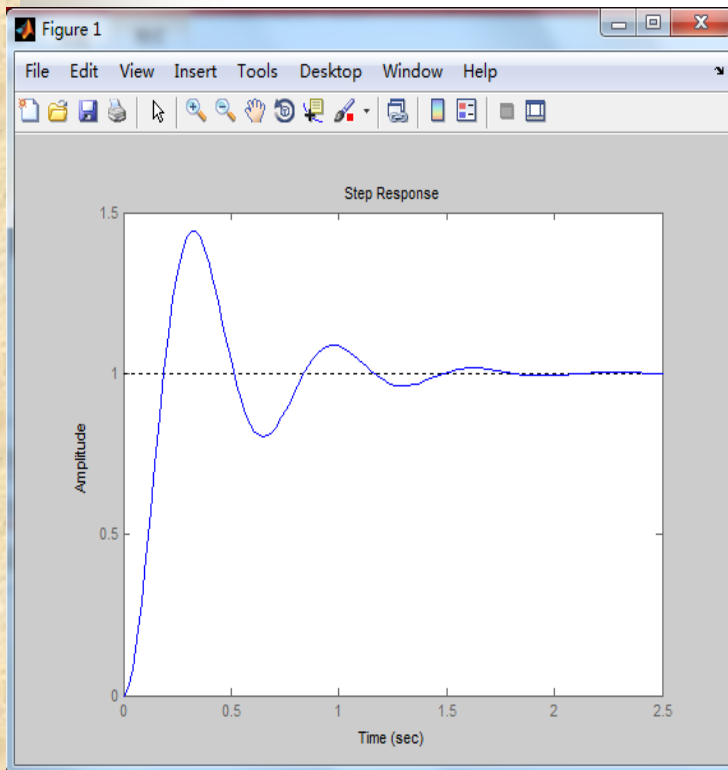
$$G(s) = \frac{100}{s^2 + 5s}$$

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 $\omega_n$ 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。

【范例3-2】当 $\xi = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25$ 时，求对应系统的闭环极点、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)
```

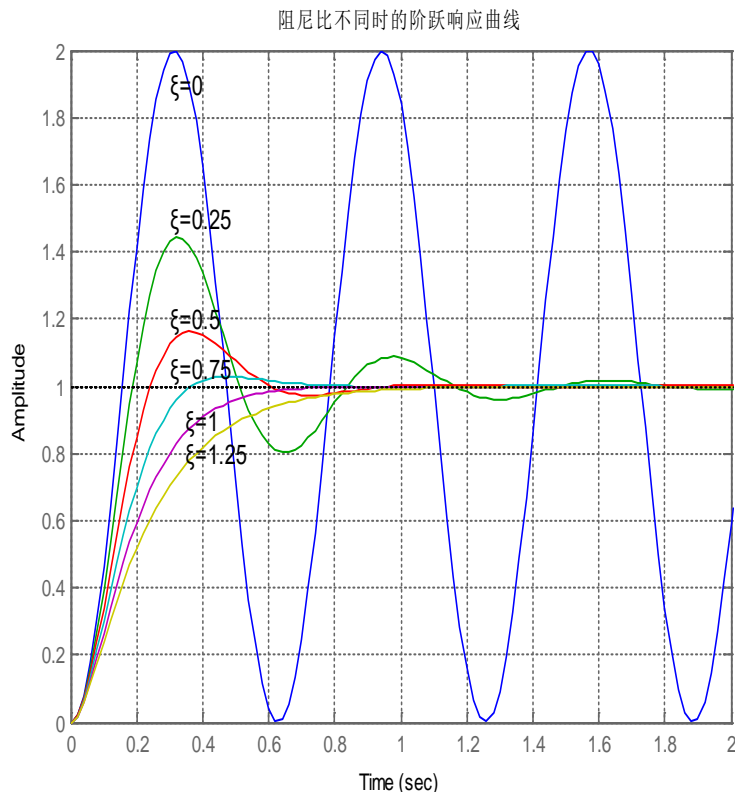
| Eigenvalue             | Damping   | Freq. (rad/s) |
|------------------------|-----------|---------------|
| 0.00e+000 + 1.00e+001i | 0.00e+000 | 1.00e+001     |
| 0.00e+000 - 1.00e+001i | 0.00e+000 | 1.00e+001     |

| Eigenvalue              | Damping   | Freq. (rad/s) |
|-------------------------|-----------|---------------|
| -2.50e+000 + 9.68e+000i | 2.50e-001 | 1.00e+001     |
| -2.50e+000 - 9.68e+000i | 2.50e-001 | 1.00e+001     |

| Eigenvalue              | Damping   | Freq. (rad/s) |
|-------------------------|-----------|---------------|
| -5.00e+000 + 8.66e+000i | 5.00e-001 | 1.00e+001     |
| -5.00e+000 - 8.66e+000i | 5.00e-001 | 1.00e+001     |

| Eigenvalue              | Damping   | Freq. (rad/s) |
|-------------------------|-----------|---------------|
| -7.50e+000 + 6.61e+000i | 7.50e-001 | 1.00e+001     |
| -7.50e+000 - 6.61e+000i | 7.50e-001 | 1.00e+001     |

| Eigenvalue | Damping   | Freq. (rad/s) |
|------------|-----------|---------------|
| -1.00e+001 | 1.00e+000 | 1.00e+001     |
| -1.00e+001 | 1.00e+000 | 1.00e+001     |

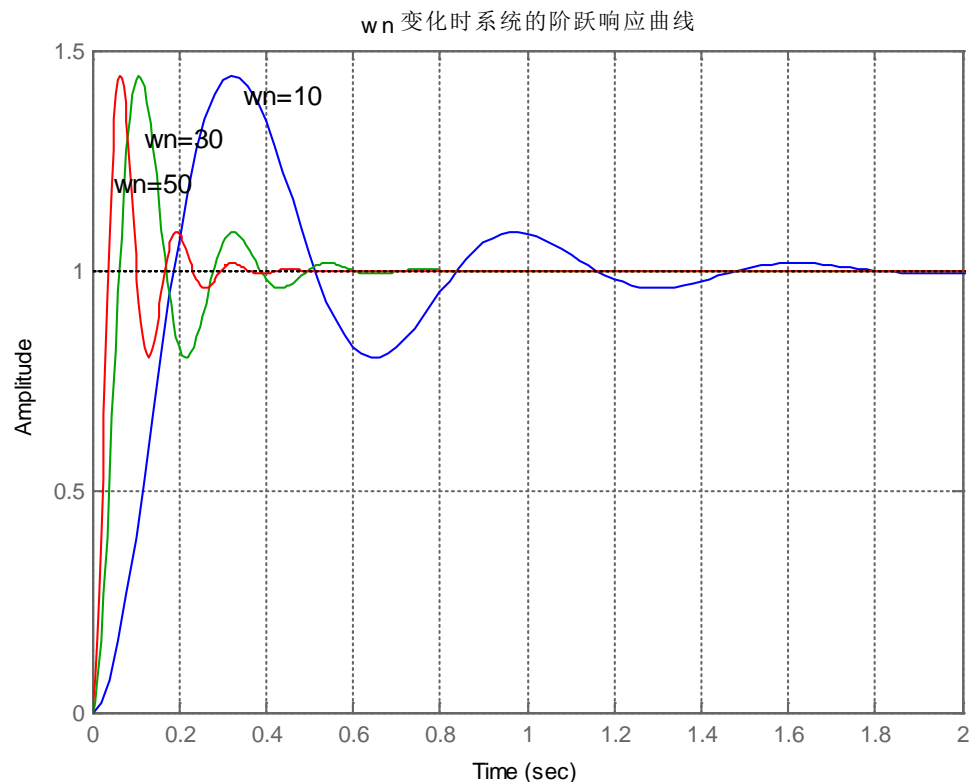


【分析】可见当 $\omega_n$ 一定时，系统随着阻尼比的增大，闭环极点的实部在s左半平面的位置更加远离原点，虚部减小到0，超调量减小，调节时间缩短，稳定性更好。

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

【范例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 $\xi$ 一定时，随着 $\omega_n$ 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。

【自我实践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

- 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。

【范例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。

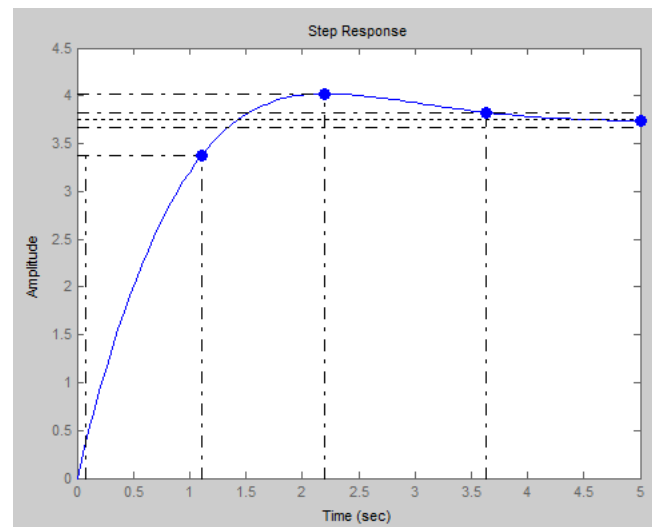
```
>> num1 = conv ([0 5], conv ([1 2], [1 3])) ;  
den1 = conv ([1 4], [1 2 2]) ;  
roots (den1)  
[z, p, k] = tf2zp (num1, den1)  
step (num1, den1)
```

```
ans =  
-4.0000  
-1.0000 + 1.0000i  
-1.0000 - 1.0000i
```

```
z =  
  
-3.0000  
-2.0000
```

```
p =  
  
-4.0000  
-1.0000 + 1.0000i  
-1.0000 - 1.0000i
```

```
k =  
  
5
```

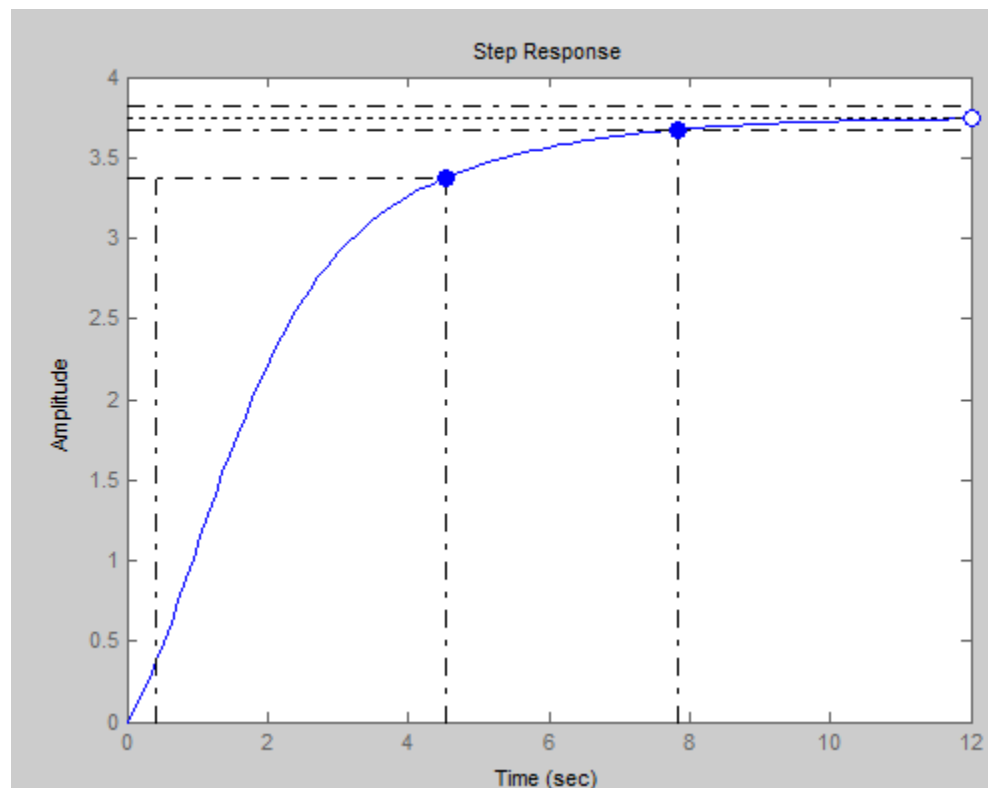


【范例3-5】改变系统闭环极点的位置，

$$\Phi(s) = \frac{0.625(s+2)(s+3)}{(s+0.5)(s^2+2s+2)}$$

将原极点 $s = -4$ 改成 $s = -0.5$ ，使闭环极点靠近虚轴，观察单位阶跃响应和动态性能指标变化。

```
>> num2 = conv (0.625, conv ([1 2], [1 3]));  
den2 = conv ([1 0.5], [1 2 2]);  
step (num2, den2)
```



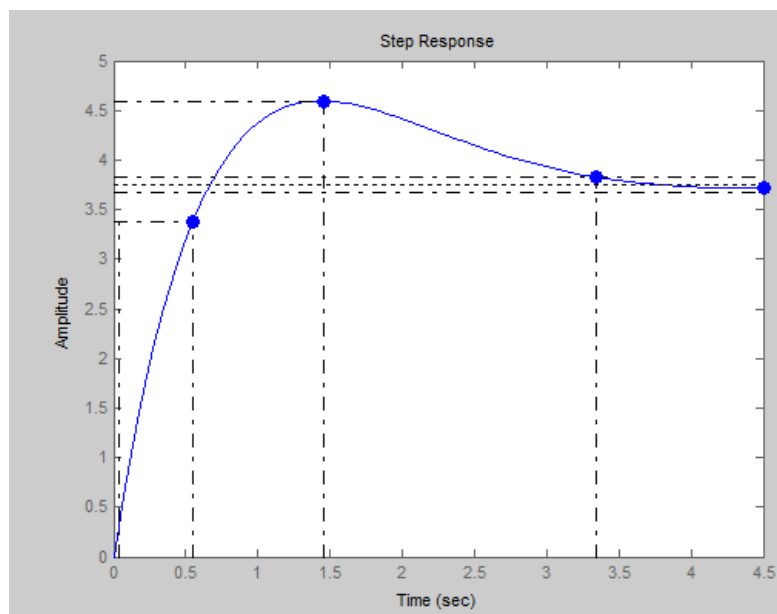


【范例3-6】改变系统闭环零点的位置，

$$\Phi(s) = \frac{10(s+1)(s+3)}{(s+4)(s^2+2s+2)}$$

将原零点 $s = -2$ 改成 $s = -1$ ，观察单位阶跃响应及其动态性能指标的变化。

```
>> num3 = conv (10, conv ([1 1], [1 3])); den1 = conv ([1 4], [1 2 2]) ;  
step (num3, den1)
```





【分析】根据以上三个实验可以得出结论：

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**。

但是如果将**闭环极点接近虚轴**，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。

而**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。

## 8、高阶系统的单位阶跃响应分析

【自我实践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  $\Phi_6(s) = \frac{1.05}{s^2 + s + 1}$  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



## 9. 实验报告要求

- (1) 完成实验内容中的实验，编写程序，记录相关数据和响应曲线，并分析，得出结论。
- (2) 总结阻尼比和固有频率对系统阶跃响应影响的规律。
- (3) 总结闭环零极点对系统阶跃响应影响的规律。
- (4) 总结非主导极点对系统动态性能的影响及作用。
- (5) 总结偶极子对系统动态性能的影响及作用。





## 第4章 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。

【范例4-1】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。

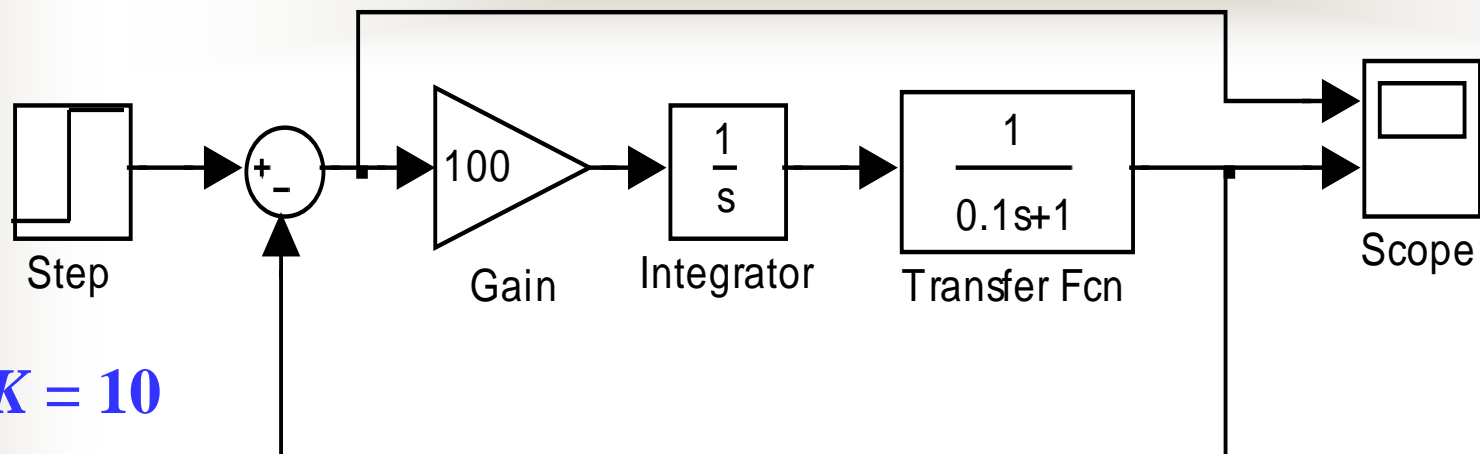
【解】首先对闭环系统判稳。

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

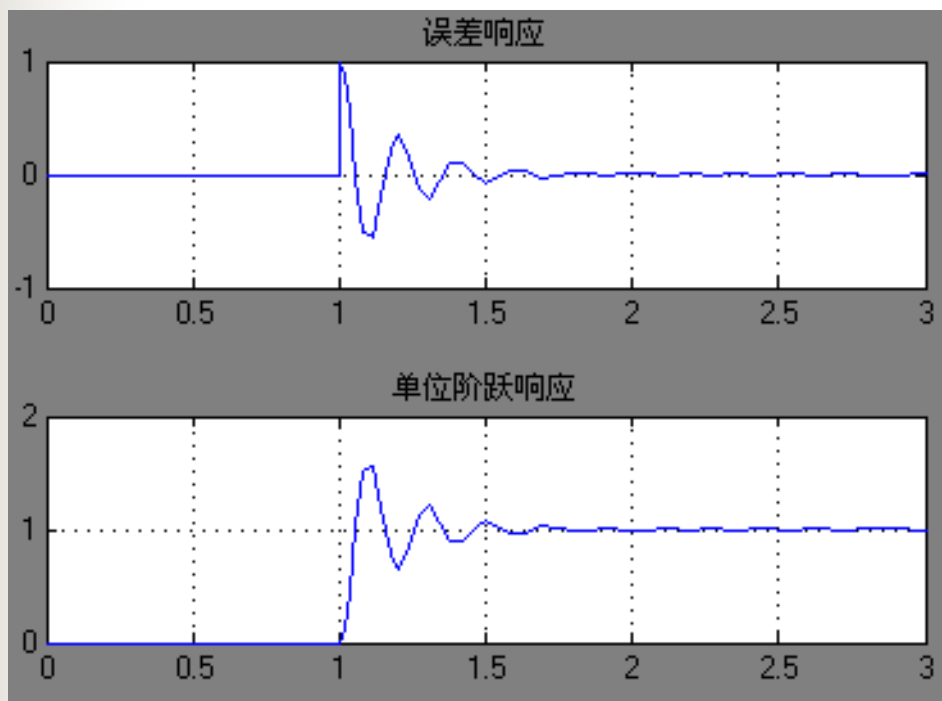
$K=10$ 时的判稳程序。实际上是求  
闭环系统的特征根

```
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。



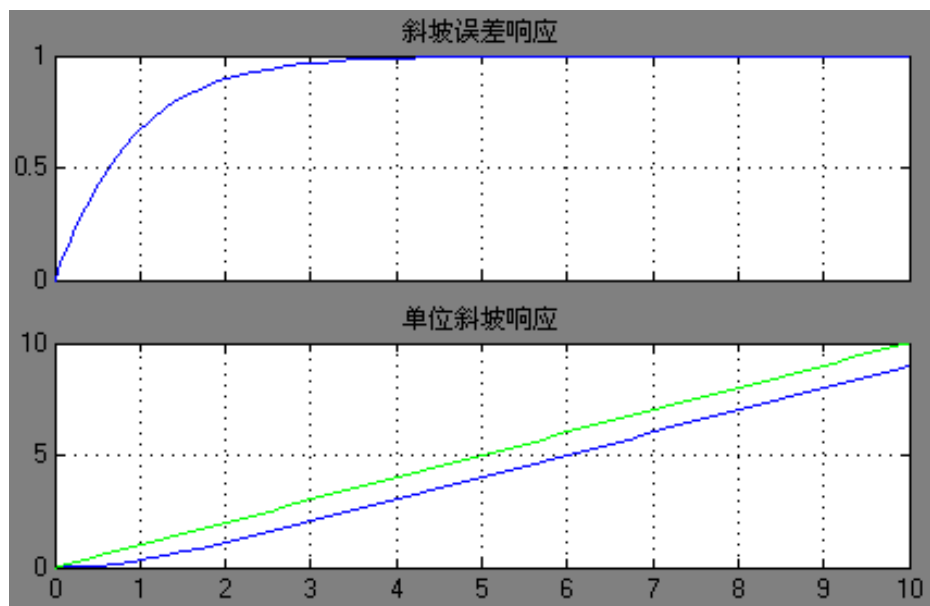
$K = 10$



【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 $essr = 0$** ，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。

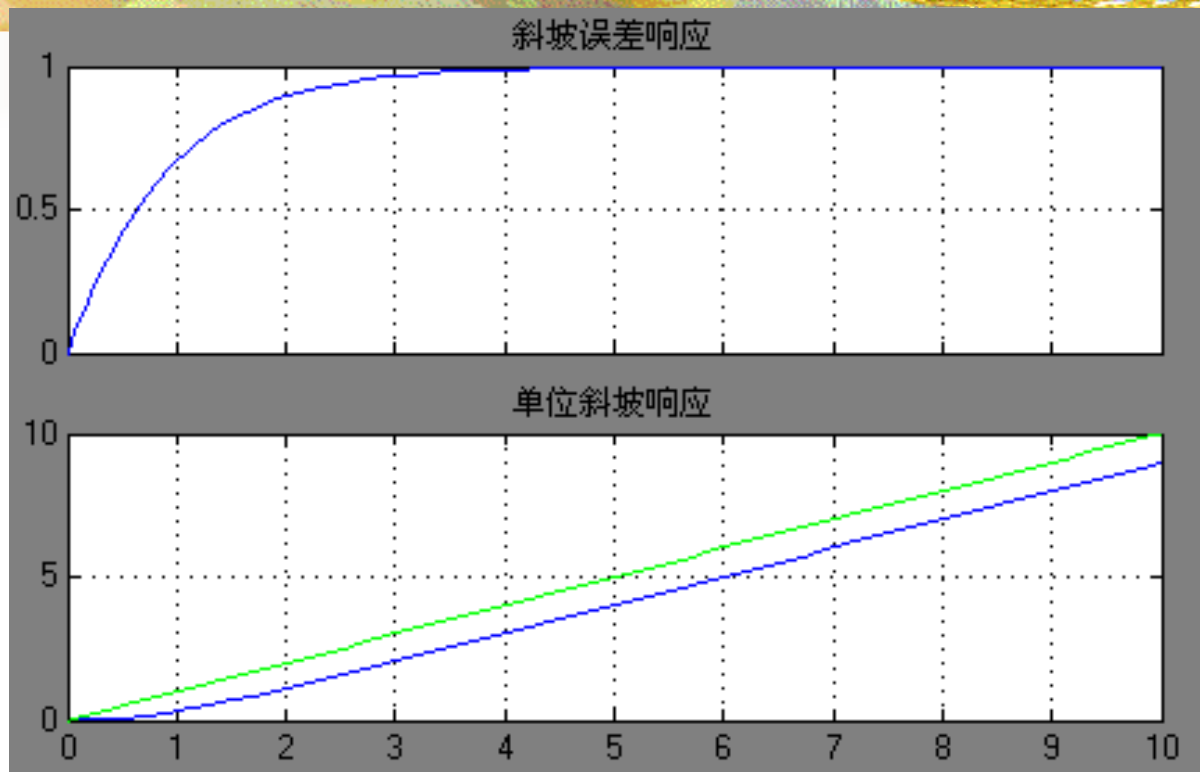
【范例4-2】仍然上述系统，将单位阶跃输入信号step 改换成单位斜坡输入信号ramp，重新仿真运行，分别观察 $K = 0.1$ 和 $K = 1$ 时，系统单位斜坡响应曲线并求单位斜坡响应稳态误差。

$K = 0.1$



【分析】实验曲线表明，**I型**单位反馈系统在**单位斜坡输入**作用下，I型系统稳态时**能跟踪斜坡输入**，但**存在一个稳态位置误差**， $essr = 1$ ，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。

$K = 0.1$



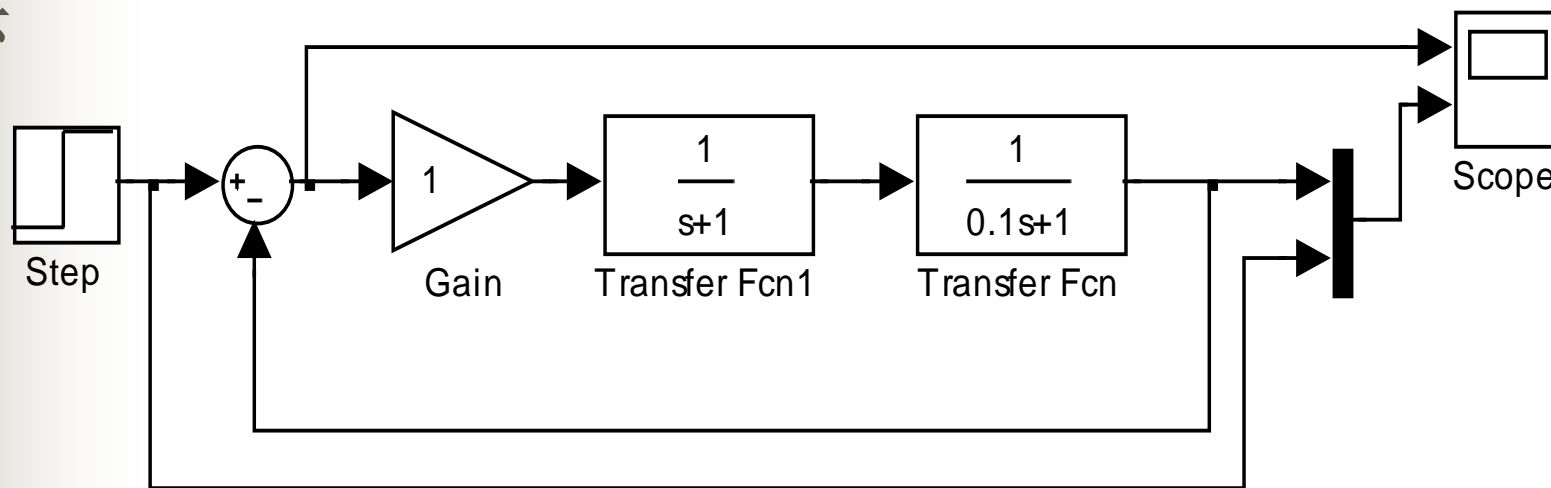
【分析】实验曲线表明，**I型**单位反馈系统在**单位斜坡**输入作用下，I型系统稳态时**能跟踪斜坡输入**，但存在一个**稳态位置误差**， $e_{ssr} = 1$ ，而且随着系统**开环增益**的增加，**稳态误差减小**，故可以通过增大系统开环增益来减小稳态误差。



## 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

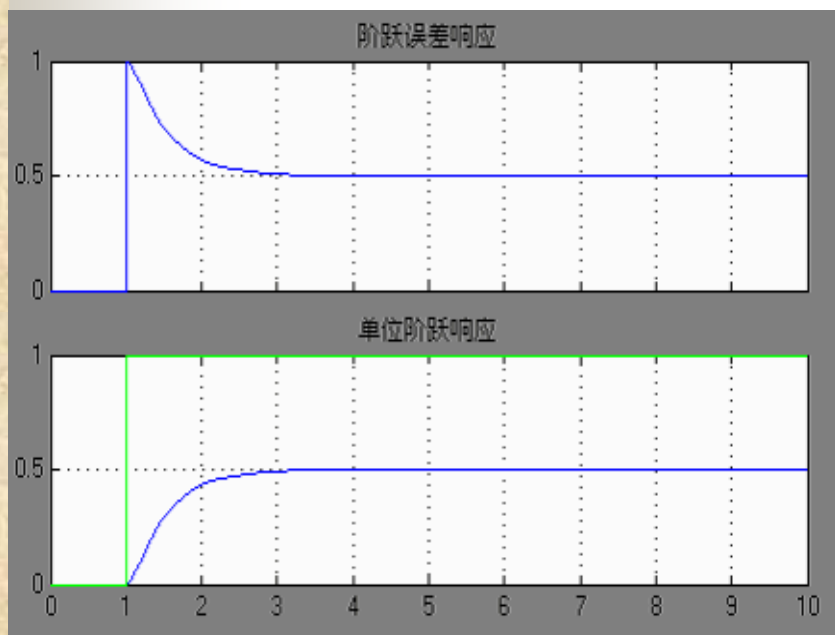
【范例4-3】将实验内容（1）中的积分环节改换为一个惯性环节，开环增益改为1，系统变成0型系统。结构图如下图所示



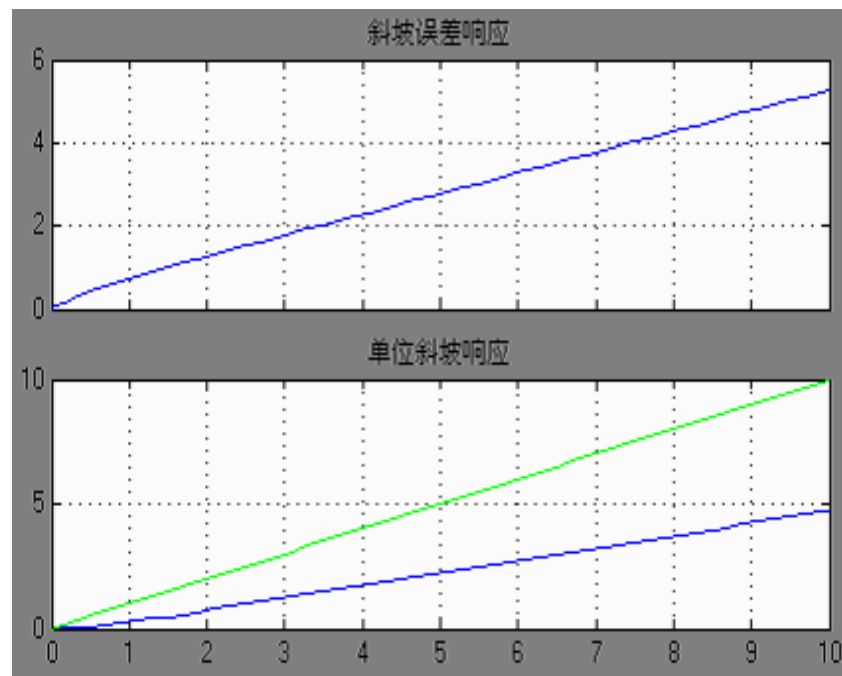
在输入端分别给定单位阶跃信号和单位斜坡信号，重新仿真运行，在示波器scope中观察系统响应曲线，并读出稳态误差



## 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**， $essr = 0.5$ 。

**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**。

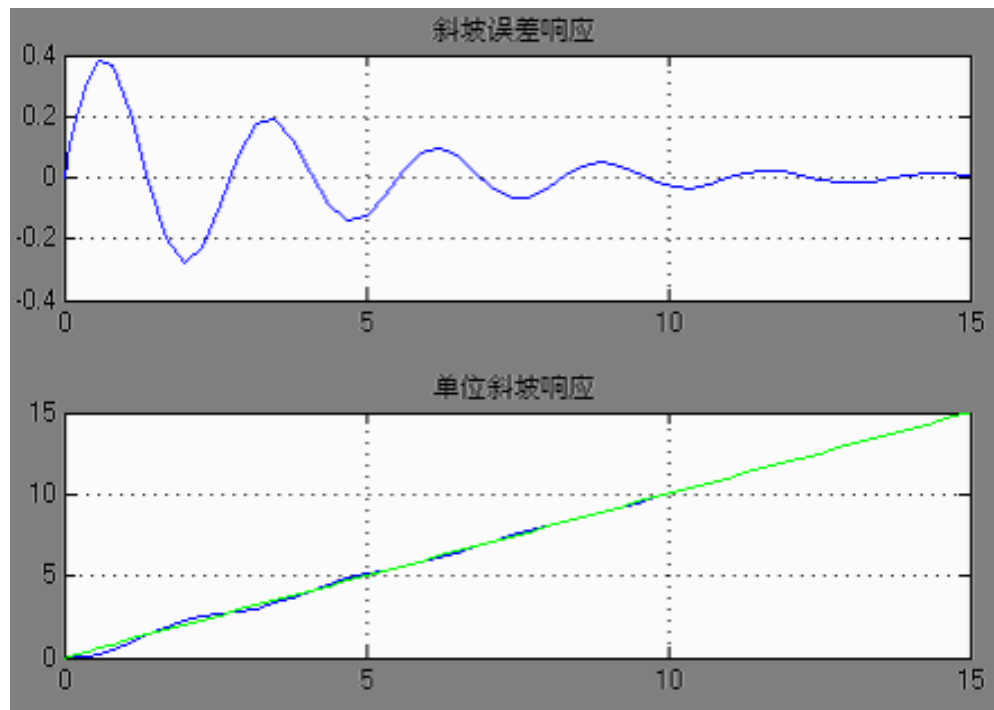
## 2) II型系统在典型输入信号作用下的稳态误差

【范例4-4】将实验内容（1）中开环增益改为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。

可以发现实验曲线呈发散状，原因是系统本身是不稳定系统，分析稳态误差无意义。

因此可以通过增加开环零点使系统稳定，在系统的前向通道中增加微分环节。注意此时开环零点的位置与系统的开环极点的位置密切相关，如在系统的前向通道中增加微分环节（ $s+5$ ）使系统稳定。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。

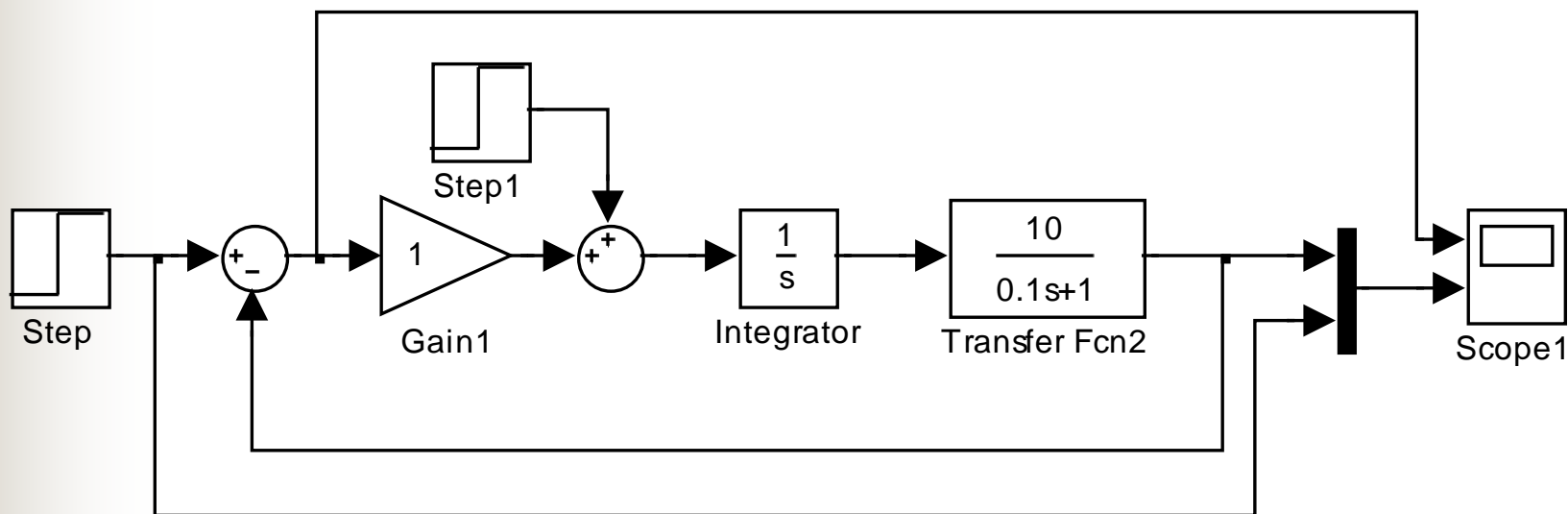
## II型控制系统单位斜坡响应稳态误差曲线

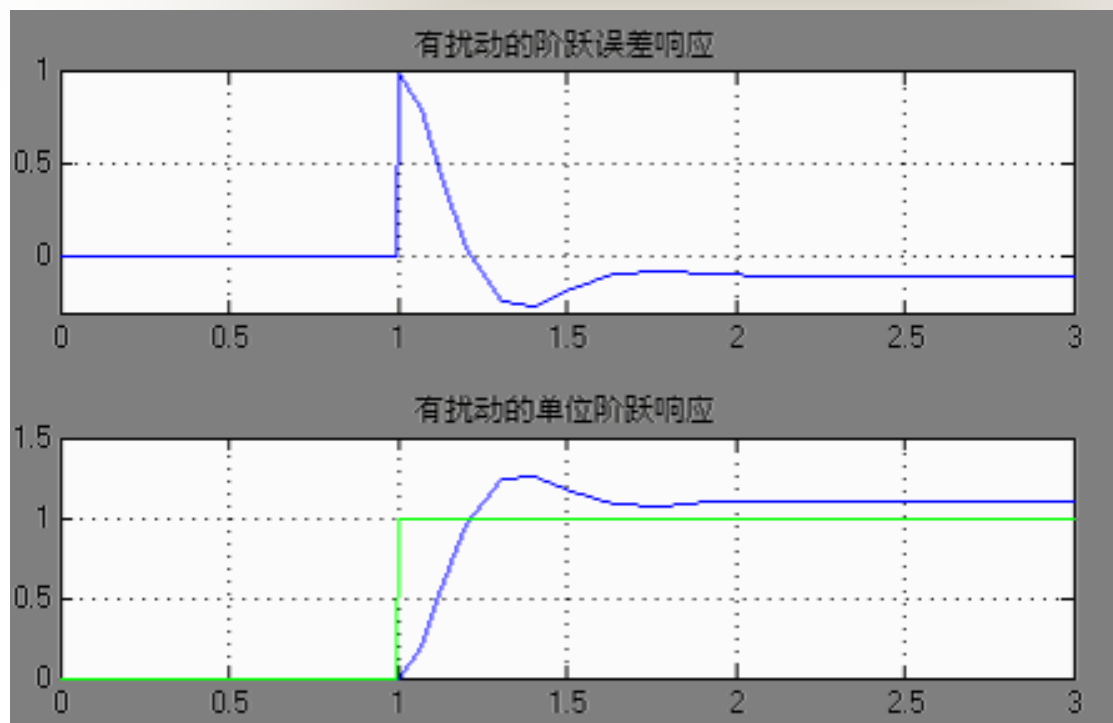


【分析】**II型**单位反馈系统在**单位斜坡输入**作用下，系统能**完全跟踪斜坡输入**，不存在稳态误差， $e_{ssr} = 0$ 。因此，系统型次越高，系统对斜坡输入的稳态误差越小，故可以通过提高系统的型次达到降低稳态误差的效果。

### 3、分析系统在扰动输入作用下的稳态误差。

【范例4-5】已知系统，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。





实验结果为：  $essr = 0$  ，  $essn = -0.1$   
那么系统总的稳态误差  $ess = essr + essn = -0.1$





## 4. 实验能力要求

- (1) 熟练运用Simulink构造系统结构图。
- (2) 根据实验分析要求，能正确设置各模块参数，实现观测效果。
- (3) 了解稳态误差分析的前提条件是系统处于稳定状态，对于不稳定系统，能够采取相应措施将系统校正成为稳定系统。
- (4) 系统在不同典型输入信号作用下，稳态误差变化的规律。
- (5) 掌握系统开环增益变化对稳态误差的影响。
- (6) 分析系统在扰动输入作用下的稳态误差。

## 5. 实验报告要求

- (1) 完成实验内容中的实验，编写程序，记录相关数据和响应曲线，并分析，得出结论。
- (2) 总结系统型次、输入信号和开环增益对系统稳态误差的作用。
- (3) 总结扰动输入对系统稳态误差的作用

# 第5章 线性系统的根轨迹法

## 5.1 基于MATLAB控制系统的根轨迹及其性能分析

### 一. 实验目的

- (1) 熟练掌握使用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

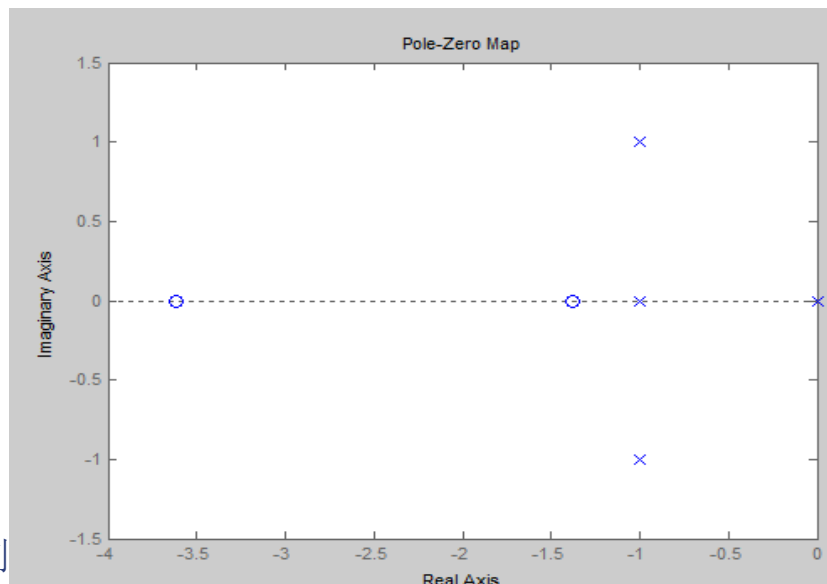
MATLAB提供pzmap( ) 函数来绘制系统的零极点分布图，其调用格式为：

**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。

【范例5-1】 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）。



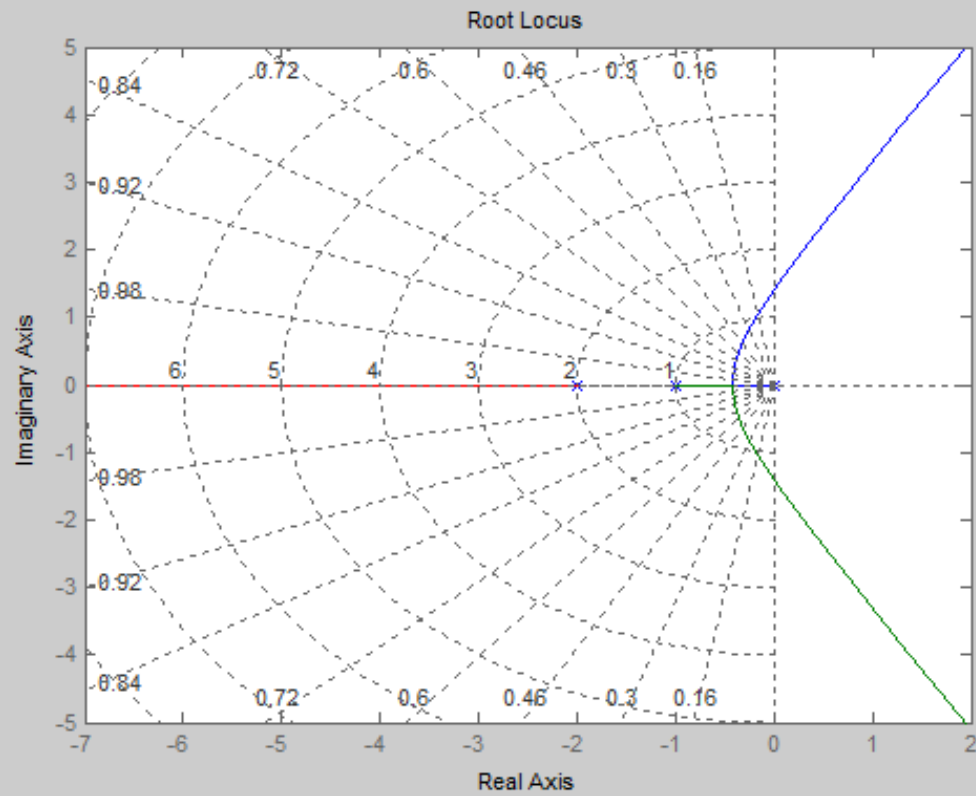
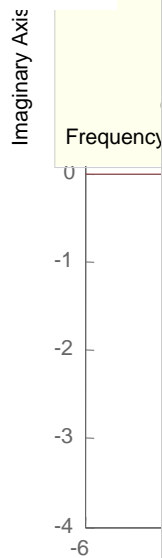
【范例5-2】若已知系统开环传递函数， $G(s)H(s) = \frac{k}{s(s+1)(s+2)}$

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
```

Root Locus

System: sys  
Gain: 5.92  
Pole: -0.00184 + 1.41i  
Damping: 0.00131



(3) 根据控制系统的根轨迹，分析控制系统的性能。

**【自我实践5-1】**在实验内容（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。将数据填入实验数据记录表4-1中。

| 阻尼比        | 闭环极点 $p$ | 开环增益 $K$ | 自然频率 $\omega_n$ | 超调量 $\sigma\%$ | 调节时间 $t_s$ |
|------------|----------|----------|-----------------|----------------|------------|
| $\xi=0$    |          |          |                 |                |            |
| $\xi=0.25$ |          |          |                 |                |            |
| $\xi=0.7$  |          |          |                 |                |            |
| $\xi=1$    |          |          |                 |                |            |
| $\xi=1.2$  |          |          |                 |                |            |



#### 4. 实验能力要求

**(1) 熟练掌握使用MATLAB绘制控制系统零极点图和根轨迹图的方法。**

**(2) 通过根轨迹图能够确定有用的参数，比如：分离点坐标及相应参数、临界开环增益点及相应参数、任意一点对应的开环增益 $K$ 值和闭环极点 $\rho$ 向量。**

**(3) 利用根轨迹图进行系统性能分析，以阻尼比为依据分区段比较不同闭环极点对应系统性能的变化。能够确定系统稳定的开环增益范围。**

**(4) 了解闭环零、极点对系统性能的影响。**

## 5.2 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。



## 5.2 基于SISO设计工具的系统根轨迹设计

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。



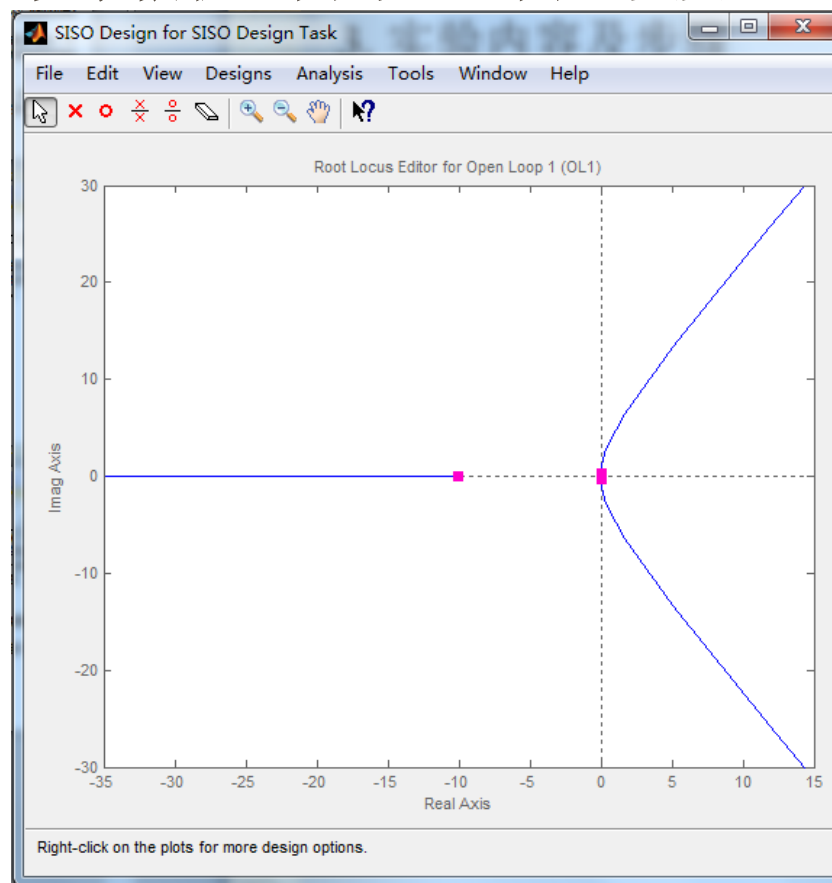
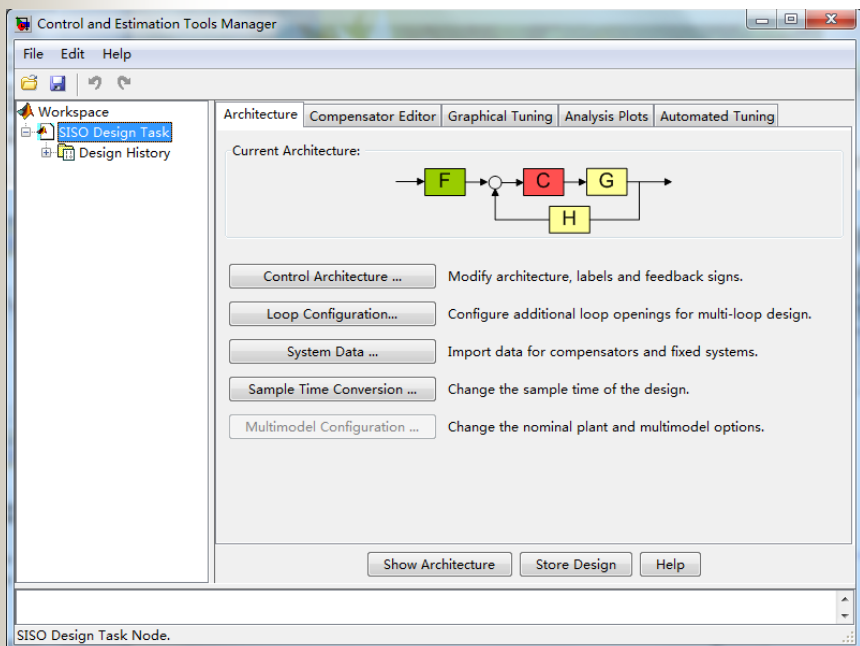
### 三. 实验内容及步骤

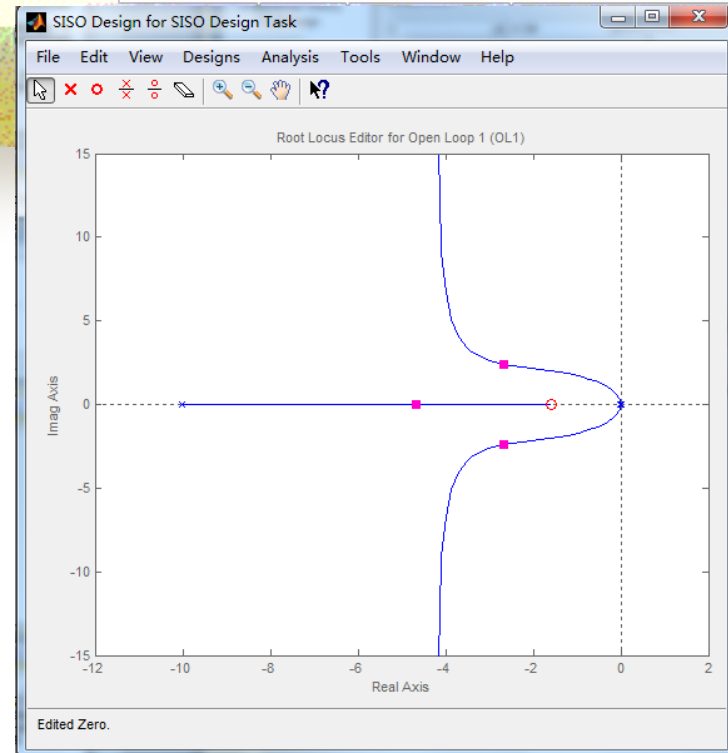
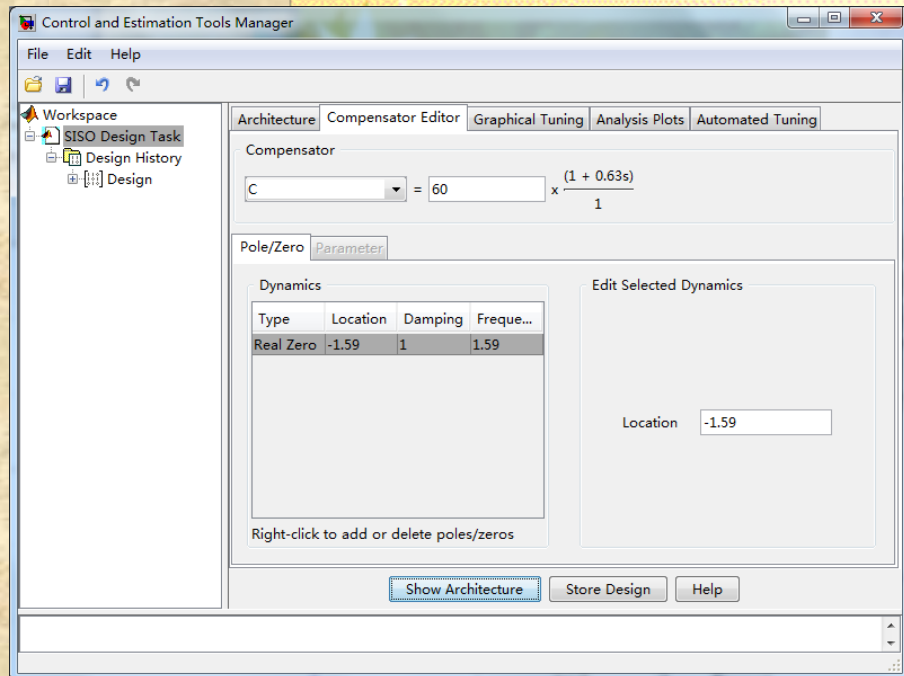
【范例5-4】已知系统开环传递函数

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

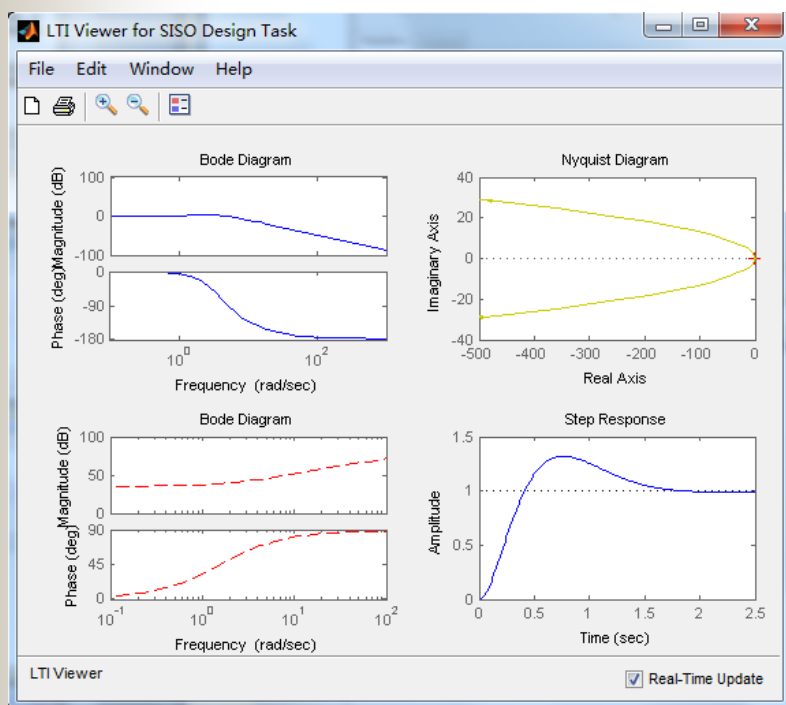
试用根轨迹设计器对系统进行补偿设计，使系统单位阶跃给定响应一次超调后就衰减；并在根轨迹设计器中观察根轨迹图与Bode图，以及系统阶跃给定响应曲线。

```
>> 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

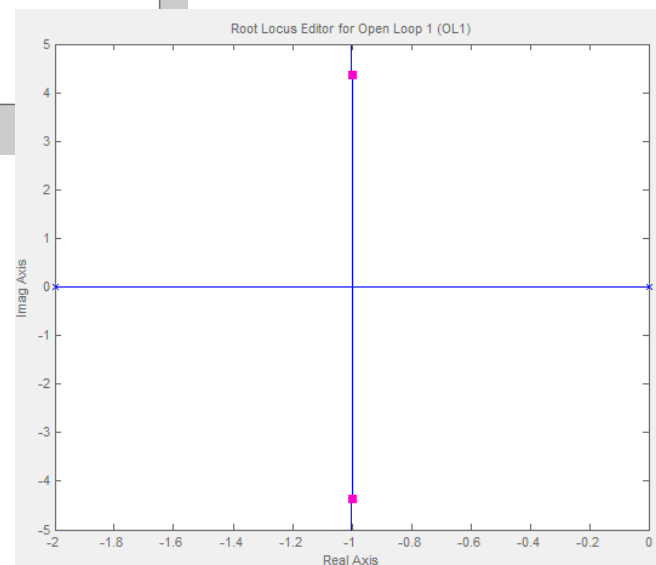
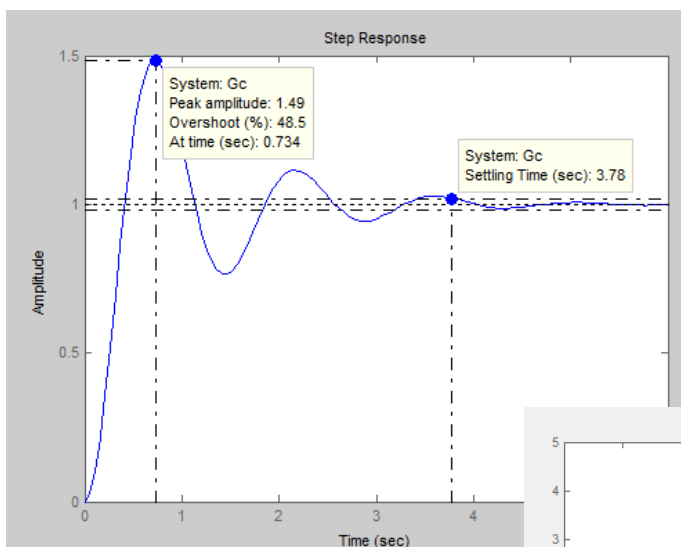


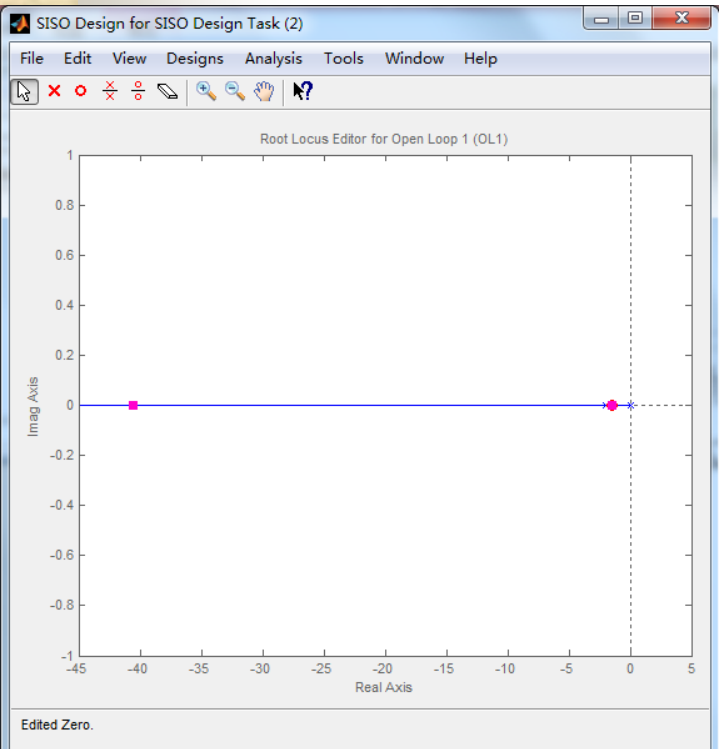
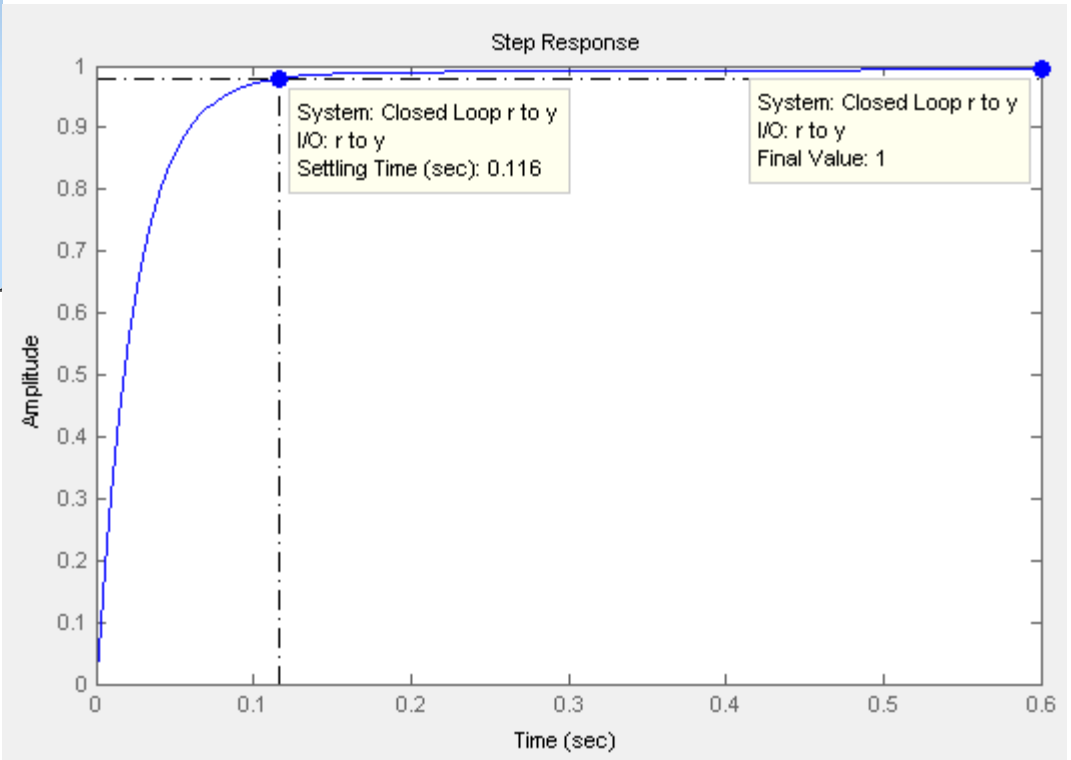
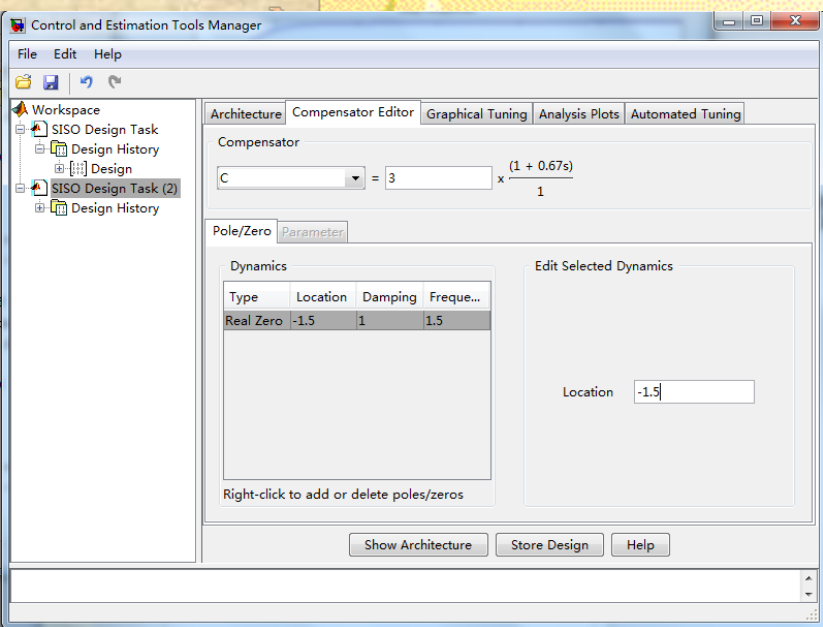
【范例5-5】已知系统开环传递函数  $G(s) = \frac{10}{0.5s^2 + s}$

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 $\sigma\% < 15\%$ ， $t_s < 1.5s$ 。

step1

```
>> s = tf ( 's' ) ; G = 10 / ( 0.5*s^2+s);  
Gc = feedback (G, 1);  
roots (Gc.den{1} )  
step (Gc)  
rltool (G)  
  
ans =  
  
-1.0000 + 4.3589i  
-1.0000 - 4.3589i
```





## 5.3 基于MATLAB控制系统根轨迹主导极点法校正设计

### 一. 实验目的

- (1) 掌握用根轨迹法进行系统串联超前校正和滞后校正设计方法。
- (2) 掌握用根轨迹法进行系统校正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，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。
- (4) 掌握利用主导极点校正系统和零极点对消的校正技术。

### 二. 实验原理

主导极点对整个时间响应起主要作用，只有既接近虚轴，又不十分接近闭环零点的闭环极点，才能成为主导极点。如果闭环零、极点相距很近，而且闭环零、极点的距离比它们本身的模值小一个数量级，这样的闭环零、极点常称为偶极子。只要偶极子不十分接近坐标原点，它们对系统动态性能的影响就甚微，可以忽略它们的存在，它们不影响主导极点的地位。





## 主导极点法：

在全部闭环极点中，选留最靠近虚轴而又不十分靠近闭环零点的一个或几个闭环极点作为主导极点，略去不十分接近原点的偶极子，以及比主导极点距虚轴远6倍以上（在许多实际运用中，常取2~3倍）的闭环零、极点。选留的主导零点数不要超过主导极点数。

主导极点法常用于估算高阶系统的性能。用主导极点代替全部闭环极点绘制系统时间响应曲线时，形状误差仅出现在曲线的起始段，而主要决定性能指标的曲线中、后段，其形状基本不变。

闭环实数主导极点对系统性能的影响是：相当于增大系统地阻尼，使峰值时间迟后，超调量下降。如果实数极点比共轭复数极点更接近坐标原点，动态过程可以变成非振荡过程。

### 三. 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5-6】已知开环系统传递函数，

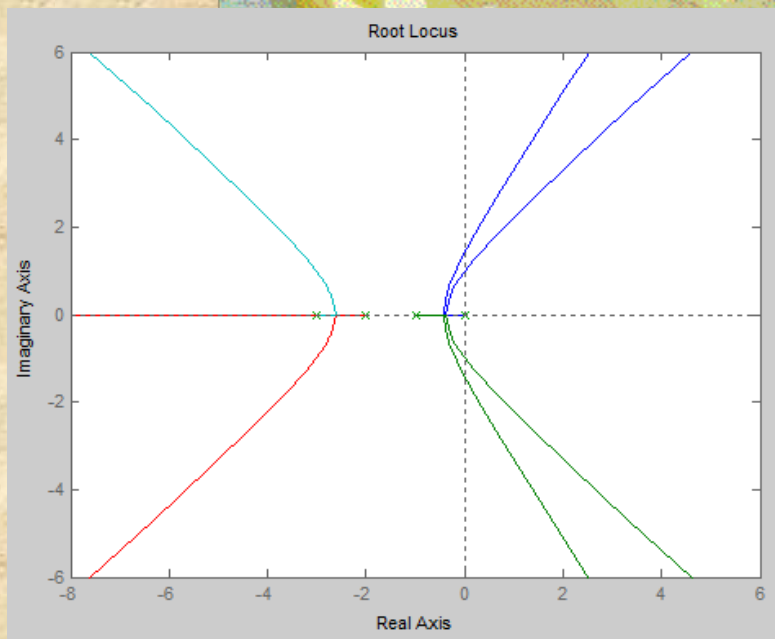
$$G(s) = \frac{K}{s(s+1)(s+2)}$$

比较增加一个开环极点 $s = -3$ 后，

$$G_1(s) = \frac{K}{s(s+1)(s+2)(s+3)}$$

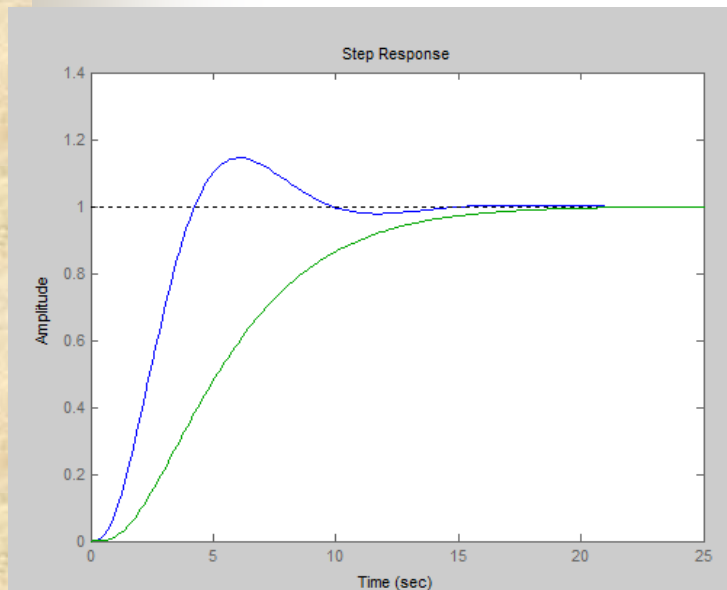
观察根轨迹及其闭环单位阶跃响应的变化。

```
>> 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。

【范例5-7】已知开环系统传递函数，

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

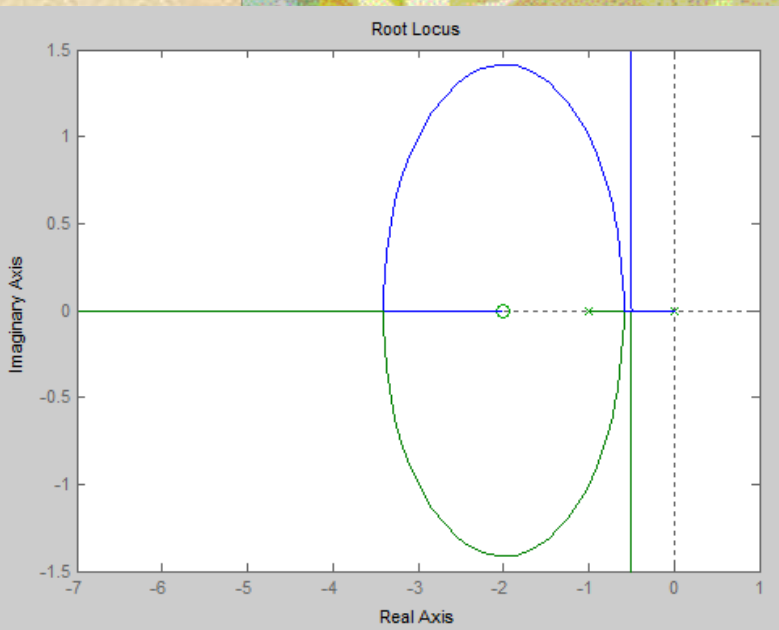
比较增加一个开环极点  $s = -2$  后，

$$G_1(s) = \frac{K(s+2)}{s(s+1)}$$

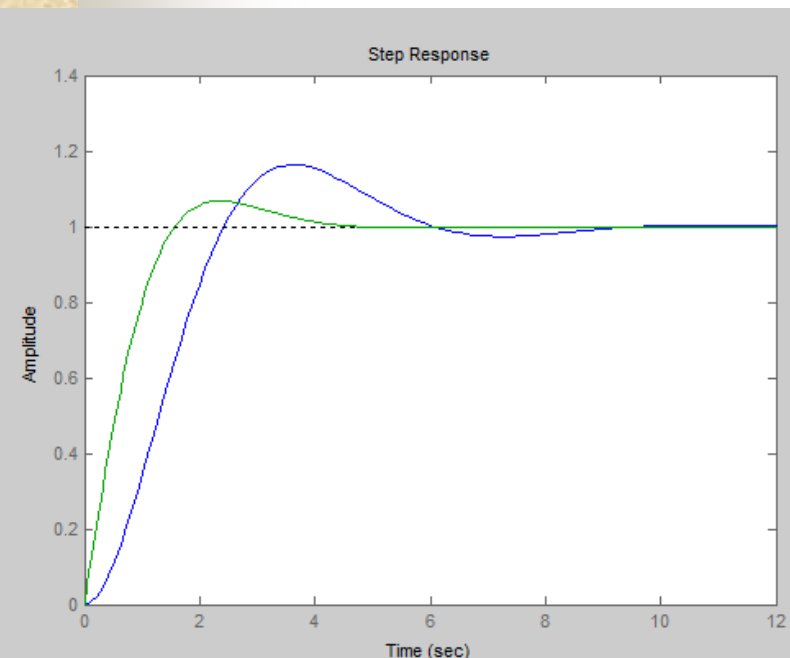
观察根轨迹及其闭环单位阶跃响应的变化。

```
>> k = 1 ; z = [ ] ; p = [0 -1] ; G = zpkm(z , p , k) ; rlocus (G) ; hold on,  
k = 1 ; z = [-2 ] ; p = [0 -1] ; G1 = zpkm(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，原系统随 $K$ 的增加，稳定性变差，增加零点后，根轨迹由原来的垂直线变为圆，不管 $K$  ( $K > 0$ ) 如何变化，系统总是稳定的，因此，增加开环零点，系统稳定性提高。



【分析】从闭环单位阶跃响应图中可以看出，增加零点后，系统响应加快，阻尼比减小，调节时间减少，系统的稳定性提高。实际校正中使用的比例微分控制器和串联超前校正就是增加了开环零点，改善系统动态性能。



### 3、根轨迹法利用主导极点校正系统

【范例5-8】已知单位负反馈系统开环传递函数，

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

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。

【解】使用根轨迹设计工具，选择超前校正装置的零极点，使系统的根轨迹通过期望的系统闭环主导极点。由于期望的系统闭环主导极点为：

$$s = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2}$$

主导极点由系统的阻尼比和自然频率决定，因此在判断系统的根轨迹是否通过了期望的系统闭环主导极点时，实质上是判断根轨迹通过等频率线与等阻尼比线的交点。



## 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。



### 3. 实验能力要求

- (1) 学会使用根轨迹设计工具校验系统的动态性能和稳态性能。
- (2) 掌握超前校正、滞后校正及超前-滞后校正的原理，合理地添加零极点。
- (3) 掌握根轨迹主导极点法校正系统的方法。
- (4) 熟练运用各种性能响应图，提高分析系统各项性能指标的能力。

# 第6章 线性系统的频域分析法

## 6.1 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）

反馈控制系统稳定的充分必要条件是当 $\omega$ 从 $0$ 变到 $+\infty$ 时，开环系统的奈氏曲线不穿过点 $(-1, j0)$ 且逆时针包围临界点 $(-1, j0)$ 的圈数 $R$ 等于开环传递函数的正实部极点数。





奈奎斯特稳定性判据是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。

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：当从变到时，开环系统的奈氏曲线逆时针包围点次。



### 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，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 $\omega$ 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 $\omega$ 的范围可以人工给定。 $\omega$ 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 $\omega$ 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)`**

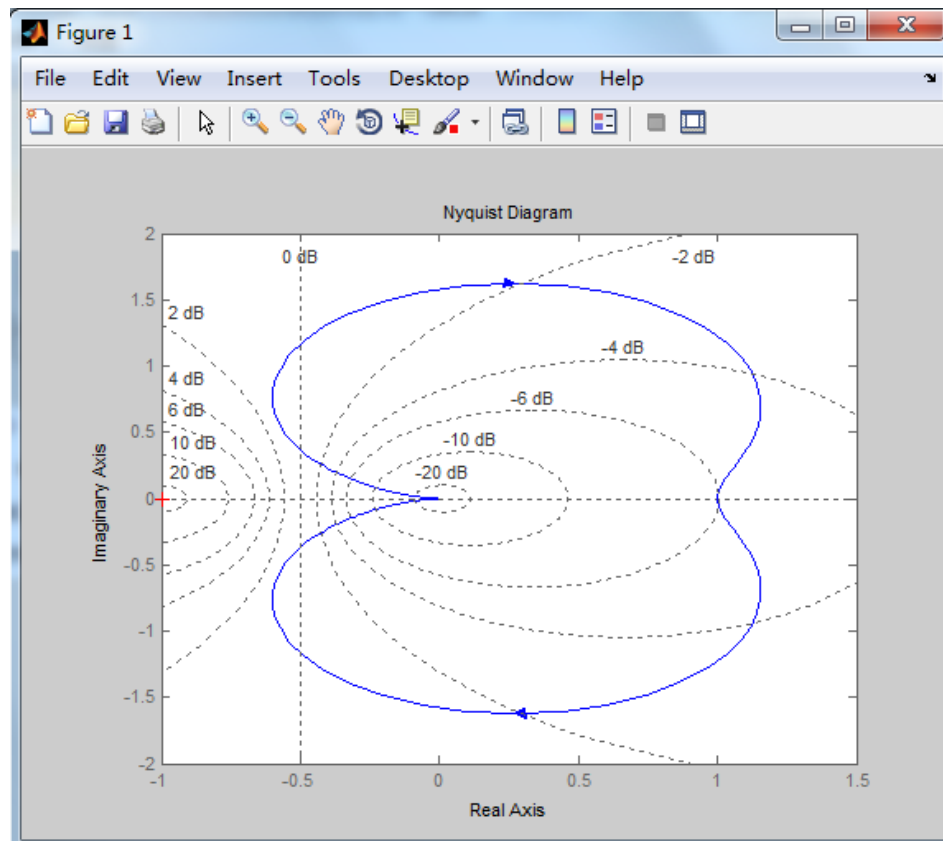
返回变量格式不作曲线，其中re为频率响应的实部，im为频率响应的虚部，w是频率点。

【范例6-1】系统开环传递函数， $G(s) = \frac{10}{s^2 + 2s + 10}$   
绘制其Nyquist图。

```
>> num = 10 ; den = [1 2 10] ;  
w = 0:0.1:100 ;  
axis ([-1 , 1.5 , -2 , 2]) ;  
nyquist (num , den , w)
```

% 给定角频率变量

% 改变坐标显示范围



## 2、根据奈氏曲线判定系统的稳定性

【范例6-2】已知  $G(s)H(s) = \frac{0.5}{s^3 + 2s^2 + s + 0.5}$

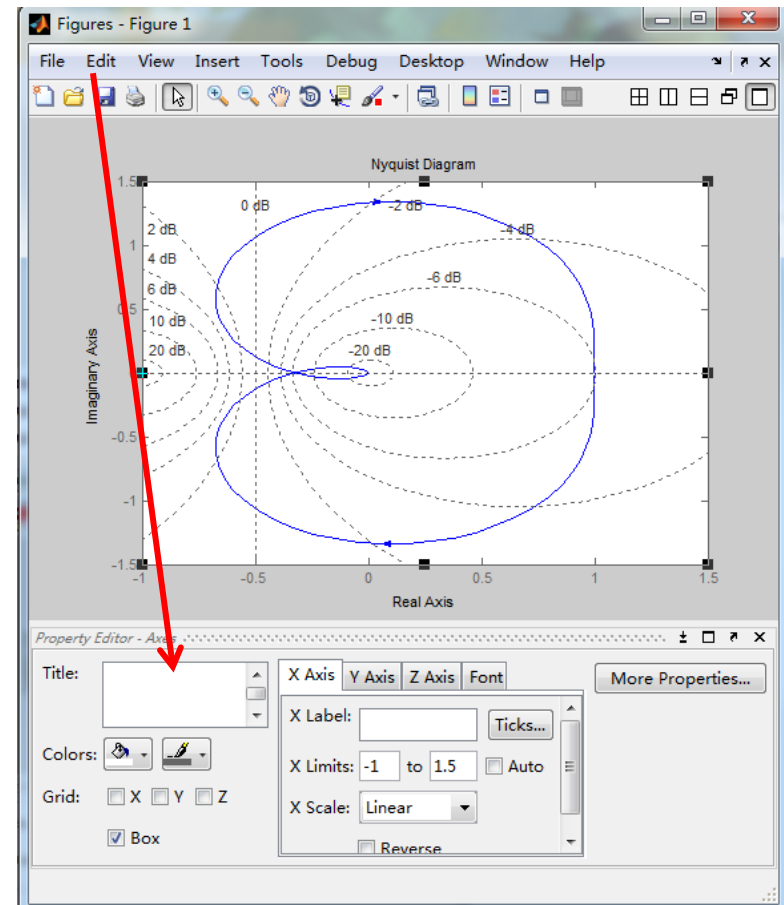
绘制Nyquist图，判定系统的稳定性。

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

通过求其特征方程的根`roots()`函数求得

```
>> 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。



#### 四. 实验能力要求

- (1) 熟练使用MATLAB绘制控制系统Nyquist曲线的方法，掌握函数nyquist ( )的三种调用格式，并灵活运用。
- (2) 学会处理奈氏图形，使曲线完全显示 $\omega$ 从 $-\infty$ 变化至 $+\infty$ 的形状。
- (3) 熟练应用奈氏稳定判据，根据Nyquist图分析控制系统的稳定性。
- (4) 改变系统开环增益或零极点，观察系统Nyquist图发生的变化以及系统稳定性的影响。



## 6.2 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

对数频率稳定性判据的内容为：

闭环系统稳定的充分必要条件是当从零变化到 $+\infty$ 时，在开环系统对数幅频特性曲线 $L(\omega)>0\text{dB}$ 的频段内，相频特性 $\varphi(\omega)$ 穿越 $(2k+1)\pi$ 的次数 $2N$ 为 $P$ 。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。



## 1) 相角裕度

对于闭环稳定系统，如果开环相频特性再滞后  $\gamma$  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。

## 2) 幅值裕度

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

### 三. 实验内容

#### 1、绘制连续系统的伯德图

##### 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 $\omega$ 的范围自动设定。

##### 格式二： **bode (num , den , $\omega$ )**

用于绘制的系统Bode图， $\omega$ 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。 $\omega$ 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 $\omega$ 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 , $\omega$ ] = 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 $\text{magdb}=20*\log(\text{mag})$ 转换；phase为Bode图的幅角向量，单位为 $(^\circ)$ ； $\omega$ 是系统Bode图的频率向量，单位是rad/s。

【范例6-3】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 $\omega_r$ 。

```
>> num = [10] ; den = [1 2 10] ;  
bode (num, den)
```

```
>> [m, p, w] = bode(num, den) ;  
>> mr = max(m)
```

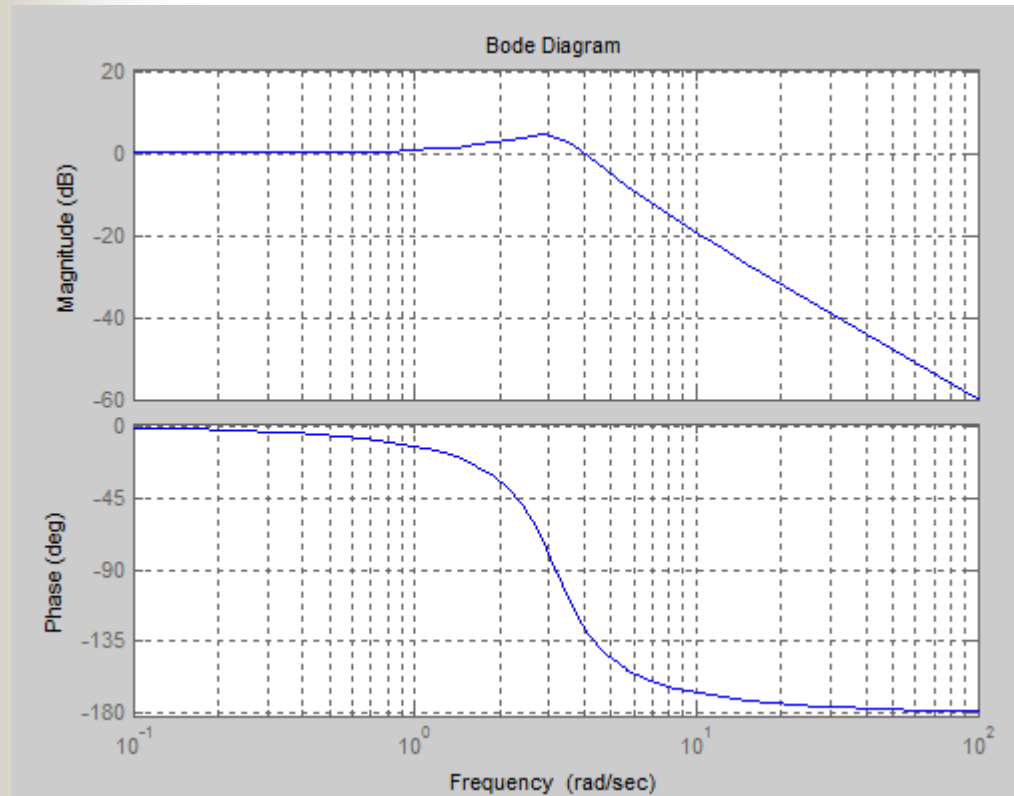
```
mr =
```

```
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 $\omega_g$ ，相位裕度 $P_m$ 和对应的频率 $\omega_c$ 。

**格式二：[Gm , Pm ,  $\omega_g$  ,  $\omega_c$ ] = margin（num , den）**

返回变量格式，不作图。

**格式三：[Gm , Pm ,  $\omega_g$  ,  $\omega_c$ ] = margin（m , p , w）**

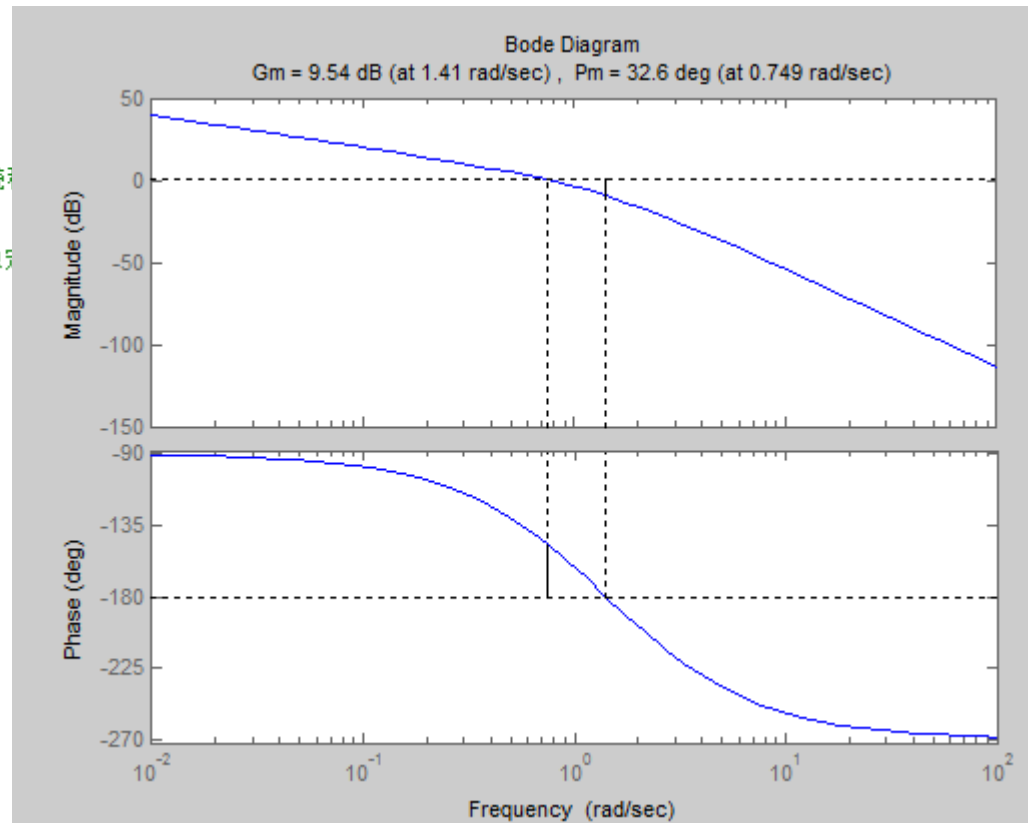
给定频率特性的参数向量：幅值 $m$ 、相位 $p$ 和频率 $\omega$ ，由插值法计算 $G_m$ 及 $\omega_g$ 、 $P_m$ 及 $\omega_c$ 。



【范例6-4】已知单位负反馈系统的开环传递函数 $G(s) = \frac{2}{s(s+1)(s+2)}$ 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
[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
```

|         |         |
|---------|---------|
| Gm1 =   | Gm2 =   |
| 3.0000  | 3.0000  |
| Pm1 =   | Pm2 =   |
| 32.6133 | 32.6138 |
| wg1 =   | wg2 =   |
| 1.4142  | 1.4142  |
| wc1 =   | wc2 =   |
| 0.7494  | 0.7492  |





## 【自我实践6-1】某单位负反馈系统的开环传递函数

$$G(s) = \frac{k}{s(s+1)(s+2)} \quad \text{求(1) 当} k=4 \text{时, 计算系统的增益裕度,}$$

相位裕度, 在Bode图上标注低频段斜率, 高频段斜率及低频段、高频段的渐近相位角。(2) 如果希望增益裕度为16dB, 求出响应的k值, 并验证

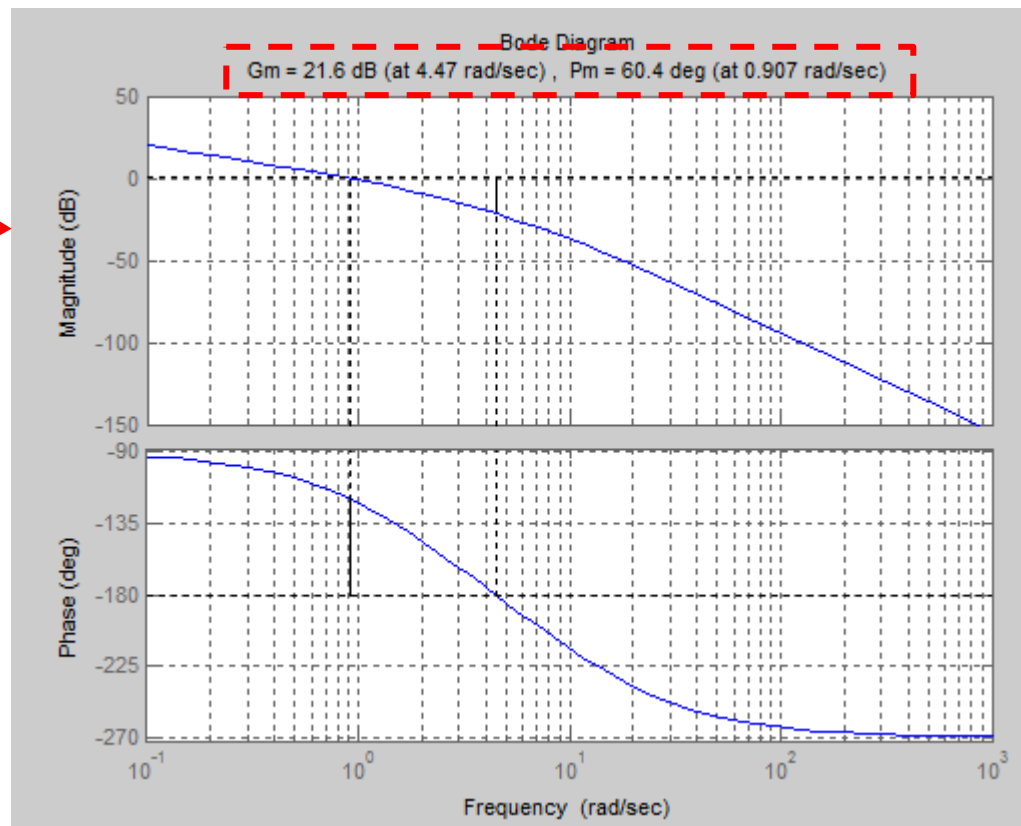
### 3、系统对数频率稳定性分析

【范例6-5】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。

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

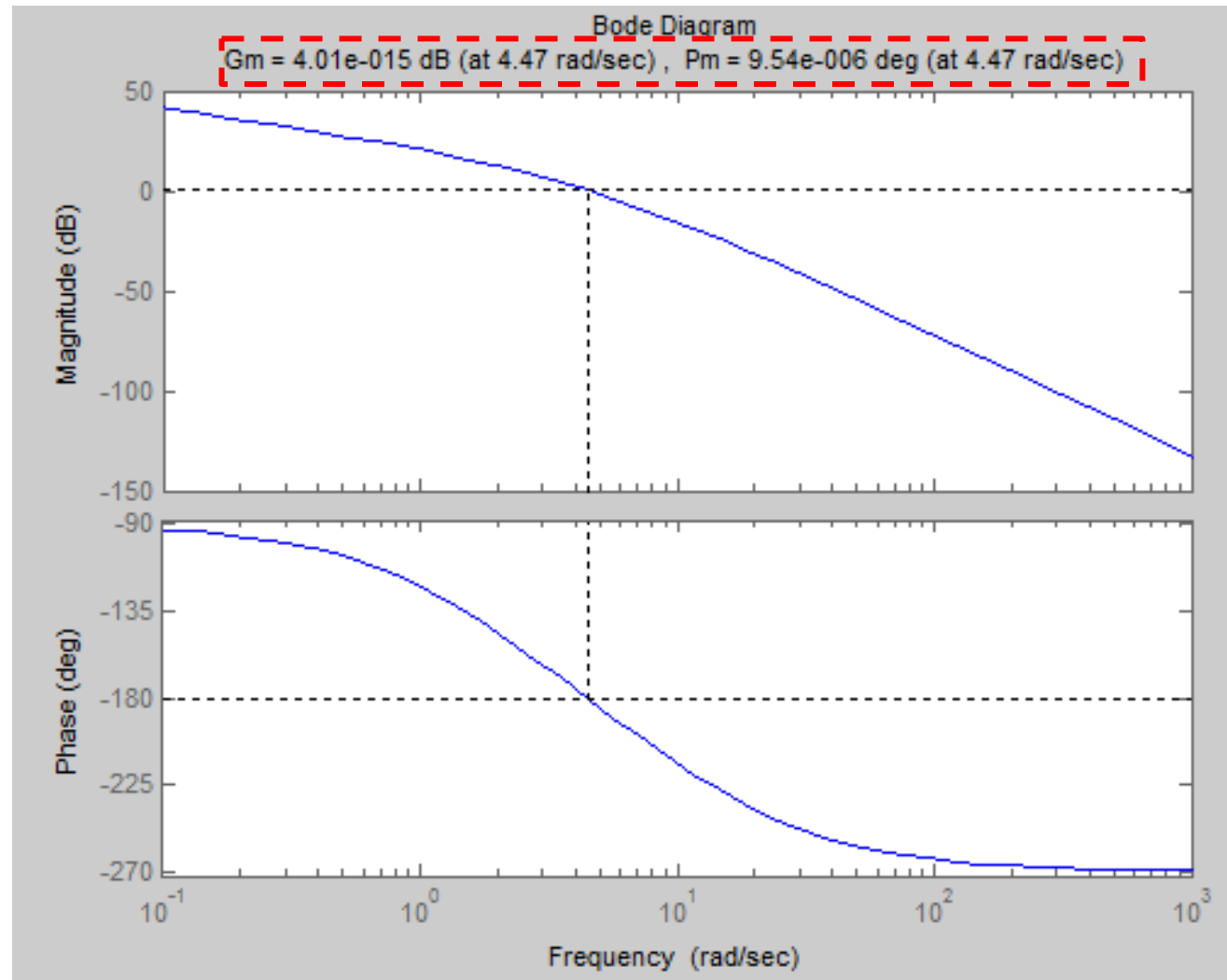


k=1时系统的bode图

```
>> 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



### 【自我实践6-2】某单位负反馈系统的开环传递函数

$G(s) = \frac{31.6}{s(0.01s + 1)(0.1s + 1)}$  求(1)绘制Bode图，在幅频特性曲线上标出低频段斜率、高频段斜率、开环截止频率和中频段穿越频率；在幅频特性曲线标出：低频段渐近相位角、高频段渐近相位角和-180°线的穿越频率。(2)计算系统的相位裕度 $\gamma$ 和幅值裕度 $h$ ，并确定系统的稳定性

### 【自我实践6-3】某单位负反馈系统的开环传递函数

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

令 $k=1$ 作bode图，应用频域稳定判据确定系统的稳定性，并确定使系统获得最大相位裕度的增益 $k$ 值



## 第7章 基于MATLAB控制系统频率法串联校正设计

### 7.1 基于MATLAB控制系统频率法串联超前校正设计

#### 1. 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。

#### 2. 实验原理

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。





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 $-20\text{dB/dec}$ ，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为：

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。

### 3. 实验内容

#### (1) 频率法有源超前校正装置设计

【范例7-1】已知单位负反馈系统被控制对象的传递函数为：

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

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

$$\gamma \geq 45^\circ \quad K_v = 1000s^{-1}$$

(1)  $k_0=1000$

(2) 绘制未校正系统的bode图

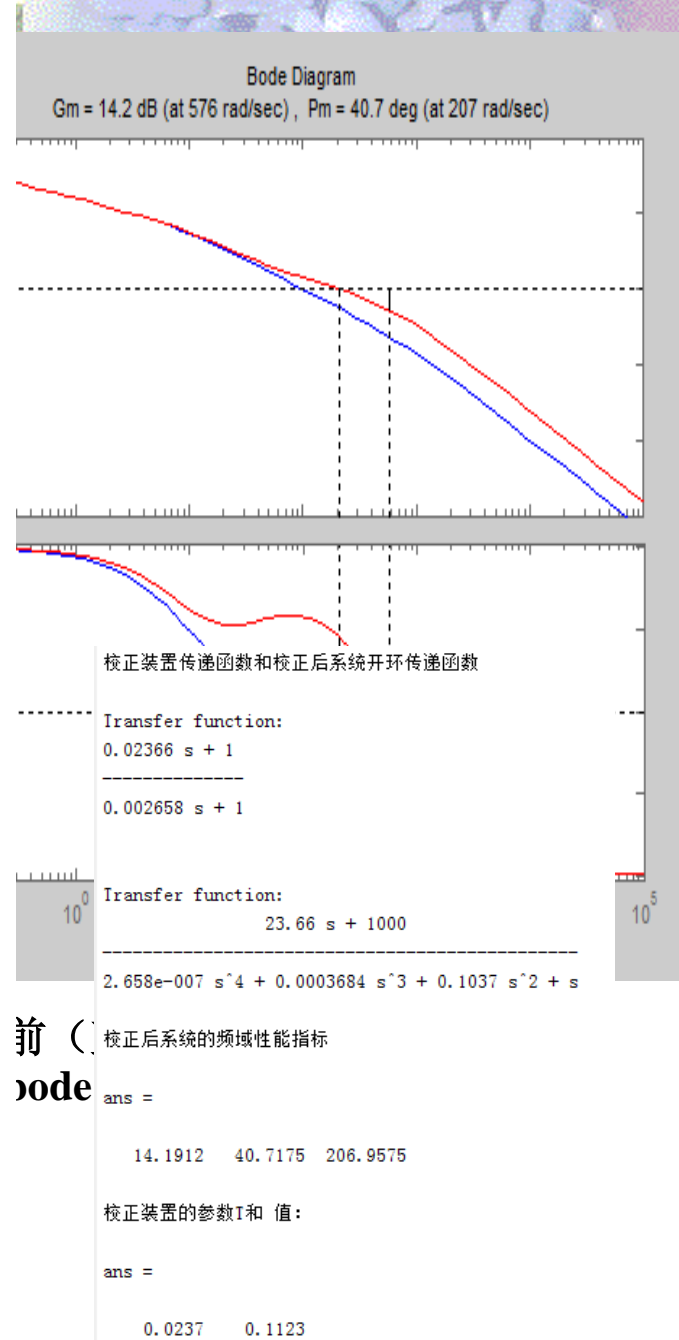
(3) 设计串联超前校正装置，确定校正装置提供的相位超前量  $\varphi_m$

(4) 确定校正网络的转折频率 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ ，然后确定校正器的传递函数

```

>> 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量
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

```



前 ( )  
bode

【自我实践7-1】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 $>10\text{dB}$

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



## (2) 频率法无源超前校正装置设计

【范例7-2】已知单位负反馈传递函数  $G_o(s) = \frac{K}{s^2(0.2s + 1)}$

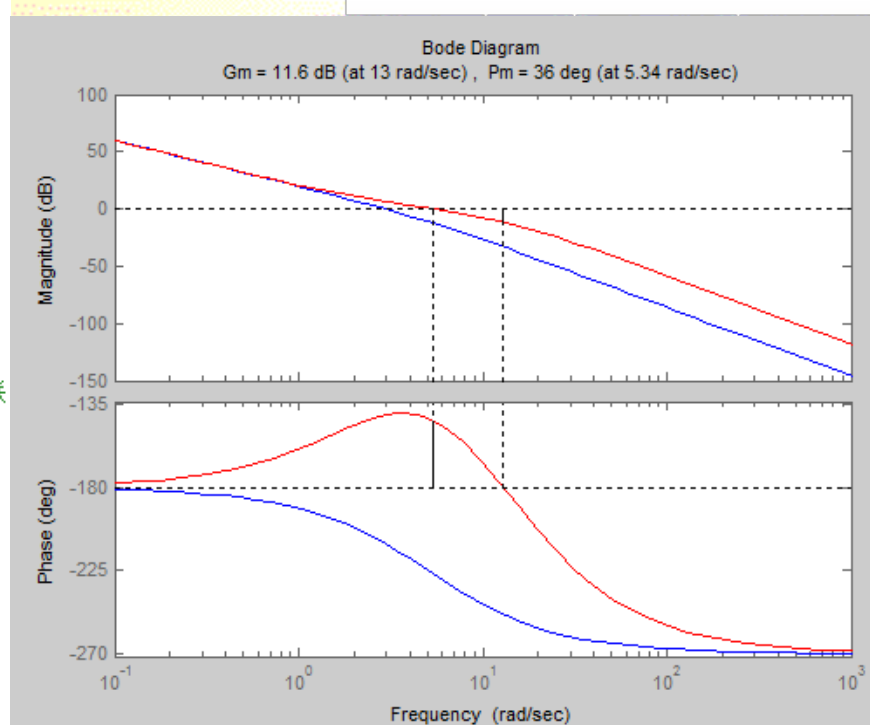
试设计无源串联超前校正网络的传递函数，使系统的静态加速度误差系数  $k_a=20$ ，相角裕度  $\gamma>35^\circ$ 。

- (1)  $k_a=10$
- (2) 绘制未校正系统的bode图, ( $\gamma=-30.5^\circ$ , 不稳定)
- (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  $\varphi_m$  ( $84^\circ$ , 采用两级超前校正网络实现, 每一级为  $42^\circ$ )
- (4) 确定校正网络的转折频率  $\omega_1$  和  $\omega_2$ , 然后确定校正器的传递函数

```

>> num = 10 ; den = [0.2, 1, 0, 0] ; G0 = tf (num , den) ;
[Gm , Pm , Wcg , Wcp] = margin (G0) ;
w = 0.1 : 1 : 10000 ; [mag , phase] = bode (G0, w) ;
magdb = 20*log10(mag) ;
phim1 = 35 ; deta = 18 ; phim = (phim1-Pm+deta)/2 ;
alpha = (1+sin(phim*pi/180)) / (1-sin(phim*pi/180)) ;
n = find (magdb+10*log10(alpha) <= 0.0001) ;
wc = n (1)+0.1 ;
w1 = wc / sqrt (alpha) ; w2 = sqrt (alpha)*wc ;
numc = (1/alpha)*[1/w1, 1] ; denc= [1/w2, 1];
Gc1=tf (numc, denc) ; Gc = Gc1*Gc1 ; %Gc1是1个校正网络, Gc是2个串联
G = (alpha)^2*Gc*G0 ;
% G是校正后的开环传递函数, 是校正网络需要增加的放大倍数。
disp (' 显示单级校正网络传递函数, 2级串联校正网络传递函数及 , I值'),
I = 1/w2 ; Gc1 , Gc , [alpha , I] ,
bode (G0, G) ; hold on , margin (G) , figure (2) ;
sys0 = feedback (G0 , 1) ; step(sys0); hold on ,
sys = feedback (G , 1) ; step(sys)

```



校正前（蓝色）和校正后（红色）  
系统的Bode图

Warning: The closed-loop system is unstable.

> In [warning at 26](#)

In [DynamicSystem.margin at 60](#)

显示单级校正网络传递函数, 2级串联校正网络传递函数及 , I值

Transfer function:

0.07348 s + 0.2009

-----

0.07348 s + 1

Transfer function:

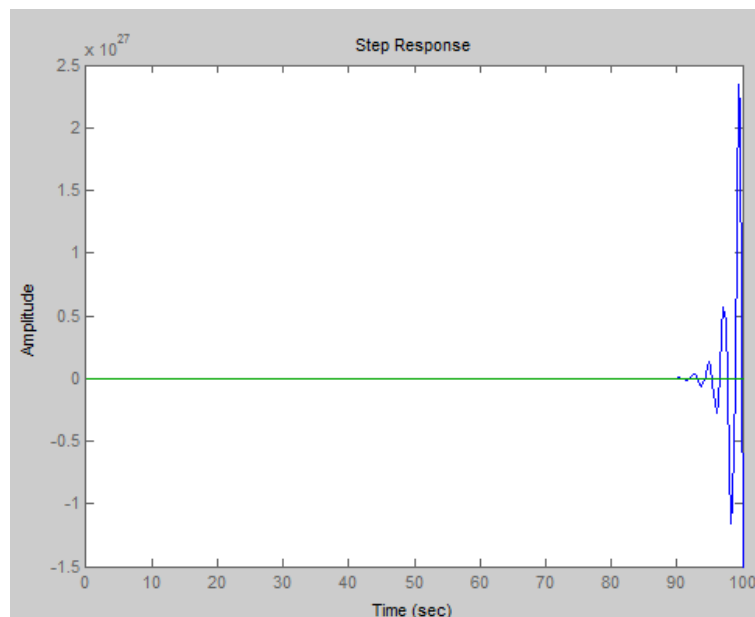
0.0054 s^2 + 0.02953 s + 0.04037

-----

0.0054 s^2 + 0.147 s + 1

ans =

4.9768 0.0735



校正前（蓝色）  
和校正后（绿色）系统的单位阶跃响应



#### 4. 实验能力要求

- (1) 熟练掌握频率法设计控制系统串联有源和无源超前校正网络的方法。
- (2) 熟练使用MATLAB编程完成控制系统串联超前校正设计，掌握函数find ( )的作用，并灵活运用。
- (3) 比较分析控制系统校正前后的各项性能指标，明确串联超前校正的作用。
- (4) 了解串联超前校正环节对系统稳定性及过渡过程的影响。




## 7.2 基于MATLAB控制系统频率法串联滞后校正设计

### 1. 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。

### 2. 实验原理

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。



(3) 单位反馈最小相位系统频率法设计串联滞后校正网络的步骤如下：

- 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、相位裕度和幅值裕度；
- 3) 选择不同的  $\omega_c''$ ，计算或查出不同的  $\gamma$  值，在波特图上绘制  $\gamma(\omega_c'')$  曲线；
- 4) 根据相位裕度要求，选择已校正系统的截止频率；
- 5) 确定滞后网络参数 $b$ 和 $T$ ；
- 6) 验算已校正系统的相位裕度和幅值裕度。



### 3. 实验内容

【范例7-3】已知单位负反馈系统  $G_0(s) = \frac{K}{s(0.0625s + 1)(0.2s + 1)}$

设计要求该系统的相角裕度满足  $\gamma \geq 50^\circ$ ，幅值裕度  $h \geq 17dB$ ，静态速度误差  $K_v = 40s^{-1}$ 。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
```

Transfer function:

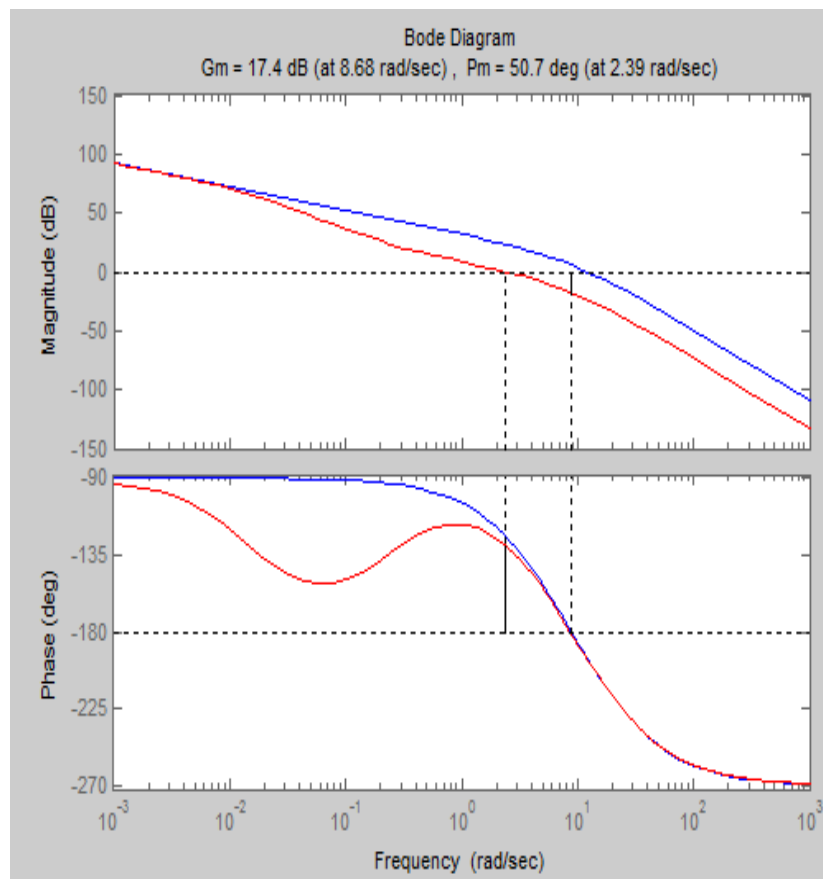
4.202 s + 1

-----  
63.07 s + 1

Transfer function:

168.1 s + 40

-----  
0.7883 s^4 + 16.57 s^3 + 63.33 s^2 + s





#### 4. 实验能力要求

(1) 熟练掌握频率法设计控制系统串联有源和无源滞后校正网络的方法。

(2) 熟练使用MATLAB编程完成系统串联滞后校正设计，明确滞后校正的效果。



## 7.3 基于MATLAB控制系统频率法串联滞后-超前校正设计

### 1. 实验目的

- (1) 掌握串联滞后-超前校正装置的作用和用途。
- (2) 掌握频率法串联滞后-超前校正设计的方法。
- (3) 熟练运用MATLAB求解校正装置传递函数的程序设计。

### 2. 实验原理

利用校正装置的超前部分来增大系统的相位裕度，以改善其动态性能；利用它的滞后部分来改善系统的静态性能，两者分工明确，相辅相成。这种校正方法兼有滞后校正和超前校正的优点，即已校正系统响应速度快，超调量小，抑制高频噪声的性能也较好。



串联滞后-超前校正的设计步骤如下：

- 1) 根据稳态性能要求，确定开环增益 $K$ 。
- 2) 绘制未校正系统的对数幅频特性，求出未校正系统的截止频率、相位裕度及幅值裕度等。
- 3) 在未校正系统对数幅频特性上，选择斜率从 $-20\text{dB/dec}$ 变为 $-40\text{dB/dec}$ 的转折频率处作为校正网络超前部分的转折频率。
- 4) 根据响应速度要求，选择系统的截止频率和校正网络的衰减因子。
- 5) 根据相角裕度要求，估算校正网络滞后部分的转折频率。
- 6) 校验已校正系统开环系统的各项性能指标。



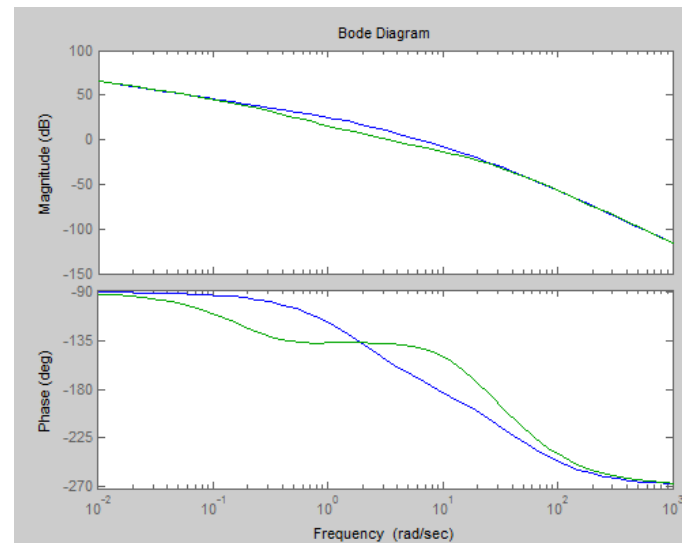
### 3. 实验内容

【范例7-4】已知一个控制系统的开环传递函数为

$$G_0(s) = \frac{1600}{s(s+2)(s+40)}$$

设计要求控制系统的相角裕度  $\gamma' \geq 40^\circ$ ，求串联超前—滞后装置的传递函数。

```
>> num = 1600 ; den = conv ([1, 0], conv ([1, 2], [1, 40])) ; G0 = tf (num, den) ;  
[kg, gamma, wg, wc] = margin (G0) ; kgdB = 20*log10 (kg) ;  
w = 0.001 : 0.001 : 100 ;  
[mag, phase] = bode (G0, w) ;  
disp ('未校正系统的参数: 20lgkg, , ') ; [kgdB, wc, gamma] ,  
gamma1 = 40 ; delta = 6 ; phim = gamma1 - gamma + delta ; %确定  
alpha = (1+sin(phim*pi/180)) / (1- sin(phim*pi/180)) ; %确定 值  
magdb = 20*log10(mag) ;  
n = find (magdb+10*log10(alpha) <= 0.0001) ; %找出magdb向量的所有下标值  
wc = n (1) ; wcc = wc / 1000 ; % 的值与 相差1000倍  
w3 = wcc / sqrt (alpha) ; w4 = sqrt (alpha)*wcc ;  
numc1 = [1/w3, 1] ; denc1 = [1/w4, 1] ; %确定超前校正部分的传递函数  
Gc1 = tf (numc1, denc1) ;  
w1 = wcc / 10 ; w2 = w1/alpha ; %取 ,  
numc2 = [1/w1, 1] ; denc2 = [1/w2, 1] ;  
Gc2 = tf (numc2, denc2) ; %确定滞后校正部分的传递函数  
Gc = Gc1*Gc2 ; %确定串联超前-滞后校正网络的传递函数  
G = Gc*G0 ; %校正后系统的开环传递函数  
[Gmc, Pmc, Wcgc, Wcpc] = margin (G) ; GmcdB = 20*log10 (Gmc) ;  
disp ('超前校正部分的传递函数'), Gc1,  
disp ('滞后校正部分的传递函数'), Gc2,  
disp ('串联超前-滞后校正网络的传递函数'), Gc,  
disp ('校正后系统的开环传递函数'), G,  
disp ('校正后系统的性能参数: 及 值'), [GmcdB, Wcpc, Pmc, alpha],  
bode (G0, G)
```





未校正系统的参数：201gkg, ,

ans =

6.4444      6.1310      9.3528

超前校正部分的传递函数

Transfer function:

0.2286 s + 1

-----  
0.0577 s + 1

滞后校正部分的传递函数

Transfer function:

1.148 s + 1

-----  
4.549 s + 1

串联超前-滞后校正网络的传递函数

Transfer function:

0.2625 s^2 + 1.377 s + 1

-----  
0.2625 s^2 + 4.607 s + 1

校正后系统的开环传递函数

Transfer function:

420 s^2 + 2203 s + 1600

-----  
0.2625 s^5 + 15.63 s^4 + 215.5 s^3 + 410.5 s^2 + 80 s

校正后系统的性能参数： 及 值

ans =

25.3759      3.3078      41.7700      3.9614

## 4. 实验能力要求

- (1) 熟练掌握频率法设计控制系统串联超前-滞后校正网络的方法。
- (2) 熟练使用MATLAB编程完成系统串联超前-滞后校正设计。
- (3) 比较串联超前校正、串联滞后校正及串联超前-滞后校正的效果，要求分别从时域和频域两个方面论证它们的优缺点。