

实验三 线性系统串联校正设计预习

一、MATLAB 绘制频域特性

1. 绘制 Bode 图

频域分析将传递函数的 s 用 $j\omega$ 替代 (j 是虚数单位, ω 是角频率), Bode 图是根据 ω 变化的幅频特性和相频特性曲线。

命令格式:

```
bode(G,w) %绘制传递函数为 G,角频率为 w 的 Bode 图  
[mag,pha]=bode(G,w) %w 为角频率,mag 为对应的幅值,pha 为相角  
[mag,pha,w]=bode(G) %从 Bode 图中获得幅值、相角及角频率向量
```

【例 2-5-1】 根据给定传递函数 $G(s) = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 2s}$ 绘制系统 Bode 图。

命令程序:

```
num=1; den=[1,3,2,0];  
G=tf(num,den)  
bode(G)
```

结果如图 2.5.1 所示。

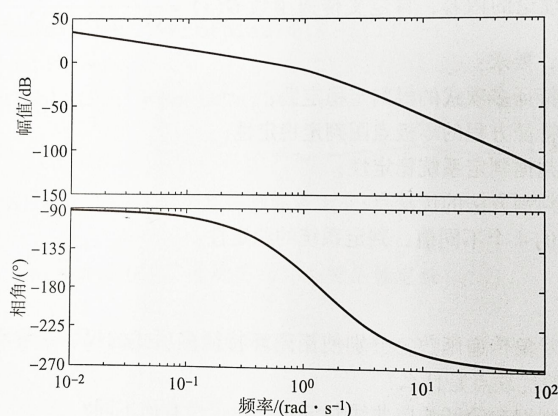


图 2.5.1 连续系统的 Bode 图

也可以使用 `semilogx` 命令绘制对数幅频和相频特性。绘图结果与图 2.5.1 相同。

```
w=logspace(-2,2); %定义角频率范围  
[mag,pha]=bode(num,den,w); %获得幅值和相位值  
subplot(2,1,1);semilogx(w,20*log10(mag))  
subplot(2,1,2);semilogx(w,pha)
```

2. 根据 Bode 图获取幅值裕度和相角裕度

命令格式:

```
margin(G) %绘制传递函数 G 的 Bode 图并获取幅值裕度和相角裕度
```

`[Gm, Pm, Wcg, Wcp] = margin(G)` %由传递函数 G 获取幅值裕度和相角裕度

说明: G_m 为幅值裕度, W_{cg} 为幅值裕度对应的频率; P_m 为相角裕度, W_{cp} 为相角裕度对应的频率 (穿越频率)。如果 W_{cg} 或 W_{cp} 结果为 NaN 或 Inf, 则对应的 G_m 或 P_m 为无穷大。

【例 2-5-2】 绘制【例 2-5-1】所示的传递函数 Bode 图并获取幅值裕度和相角裕度。

命令程序:

```
num = 1;
```

```
den = [1, 3, 2, 0];
```

```
G = tf(num, den);
```

```
margin(G)
```

```
[Gm, Pm, Wcg, Wcp] = margin(G)
```

结果为:

```
Gm = 6.0000
```

```
Pm = 53.4109
```

```
Wcg = 1.4142
```

```
Wcp = 0.4457
```

结果如图 2.5.2 所示。

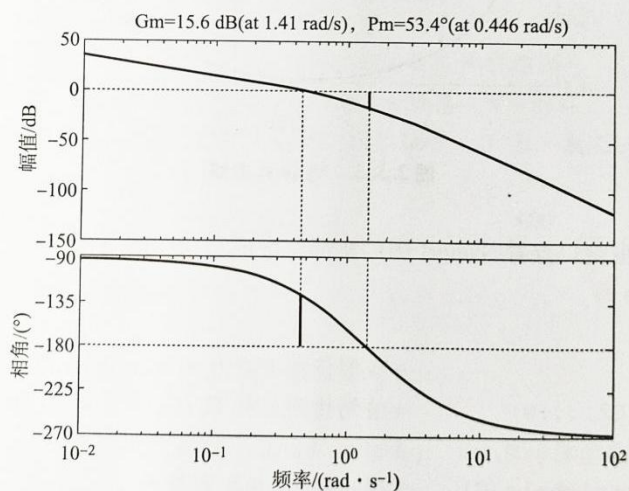


图 2.5.2 带幅值裕度和相位裕度的 Bode 图

二、频域法超前与滞后校正设计方法

1. 超前校正设计方法

- (1) 根据未校正系统的 Bode 图, 计算出稳定裕度 PM_k 。
- (2) 由校正后的相位 PM_d 和补偿计算参数 ϕ_m , 即 $\phi_m = PM_d - PM_k + (5 \sim 10)^\circ$ 。
- (3) 由公式 $\alpha = \frac{1 + \sin\phi_m}{1 - \sin\phi_m}$ 计算 α 。
- (4) 由 α 值确定校正后的系统的剪切频率 ω_m , 即 $L(\omega) = -10\lg\alpha$ (dB)。
- (5) 根据 ω_m 计算校正器的零极点的转折频率 T 。
- (6) 由 α 值和 T 值计算校正超前校正环节的传递函数 $G_c = \frac{1 + \alpha Ts}{1 + Ts}$ 。

2. 滞后校正设计方法

- (1) 由给定的相位裕度 PM_d , 确定校正后系统的剪切频率 ω_{gc} , 即 $\phi(\omega_{gc}) = -180^\circ + PM_d + (5^\circ \sim 10^\circ)$ 。
- (2) 根据 ω_{gc} 计算校正器的零极点的转折频率 ω_{c1} 。
- (3) 由 ω_{c1} 和幅值的分贝数确定 β , 即 $-20\lg\beta = L(\omega_{gc})$ 。
- (4) 为了避免最大滞后角发生在已校正系统开环截止频率附近, 通常使网络的交接频率 ω_1 远小于剪切频率, 一般取 $0.1\omega_{gc}$ 。
- (5) 由交接频率 ω_1 和网络 β 确定 T , 即 $T = 1/(\beta * \omega_1)$ 。
- (6) 由 T 和 β 确定校正传递函数: $G_c = \frac{1 + Ts}{1 + \beta Ts}$ 。

【例 2-7-1】 已知单位负反馈系统被控对象框图如图 2.7.1 所示。

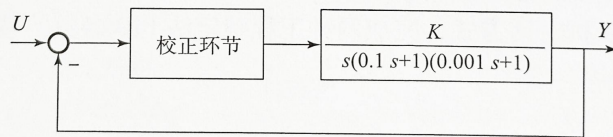


图 2.7.1 超前校正网络框图

设计校正环节传递函数, 使之满足相位裕度在 53° , 要求:

- (1) 取 $K \geq 1\,000$ 时设计校正环节并输出校正参数。

- (2) 画出校正前后的 Bode 图。
 (3) 验证校正后是否满足了给定要求。
 (4) 绘制校正前后的阶跃响应曲线并进行对比。

命令程序:

```
K=1000; num=1;den=conv(conv([1 0],[0.1 1]),[0.001 1]);
Gp=tf(K*num,den);G1=feedback(Gp,1);
[Gm,Pm,Wcg,Wcp]=margin(Gp);margin(Gp);fm=53-Pm+8;
a=(1-sin(fm*pi/180))/(1+sin(fm*pi/180));
[mag,pha,w]=bode(Gp);Lg=-10*log10(1/a);
wmax=w(find(20*log10(mag(:))<=Lg));wmax1=min(wmax);
wmin=w(find(20*log10(mag(:))>=Lg));wmin1=max(wmin);
wm=(wmax1+wmin1)/2;T=1/(wm*sqrt(a));Tl=a*T;
Gc=tf([T,1],[Tl,1]);G=Gc*Gp;G2=feedback(G,1);
[Gm,Pm,Wcg,Wcp]=margin(G);
if Pm>=53;disp(['设计后相位裕量是:',num2str(Pm),' 相位裕量满足了设计要求'])
else
disp(['设计后相位裕量是:',num2str(Pm),' 相位裕量不满足设计要求'])
end;bode(Gp,G);grid on;figure(2);margin(Gp);
figure(3);margin(G);figure(4);step(G1);
figure(5);step(G2);
```

结果:

Gc=0.01983 s+1

 0.001238 s+1

Continuous-time transfer function.

设计后相位裕量是:53.8191

相位裕量满足了设计要求

校正前后的 Bode 图如图 2.7.2 所示。

校正前后的幅值裕度、相位裕度及剪切频率的 Bode 图如图 2.7.3 所示。

校正前后闭环系统的阶跃响应曲线如图 2.7.4 所示。

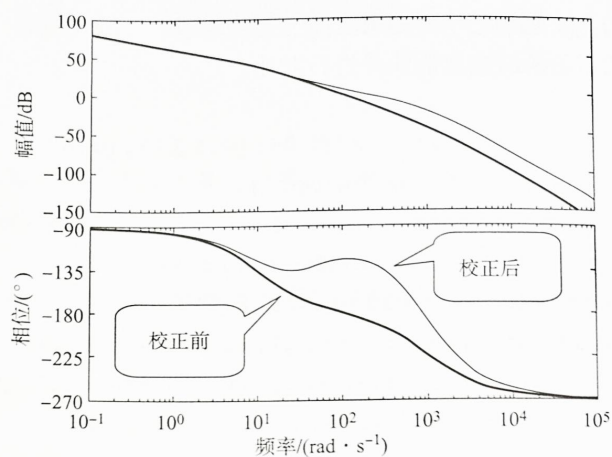


图 2.7.2 超前校正前后 Bode 图

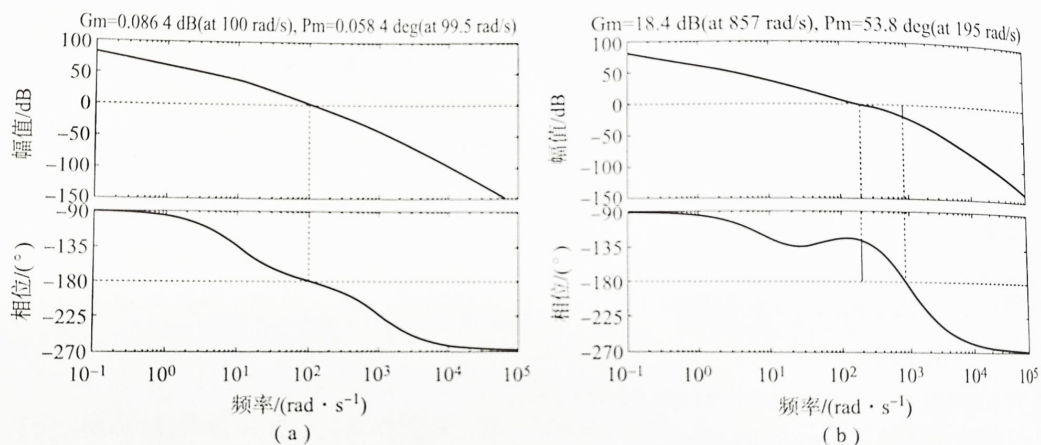


图 2.7.3 校正前后的幅值裕度、相位裕度及剪切频率 Bode 图

(a) 校正前参数; (b) 校正后参数

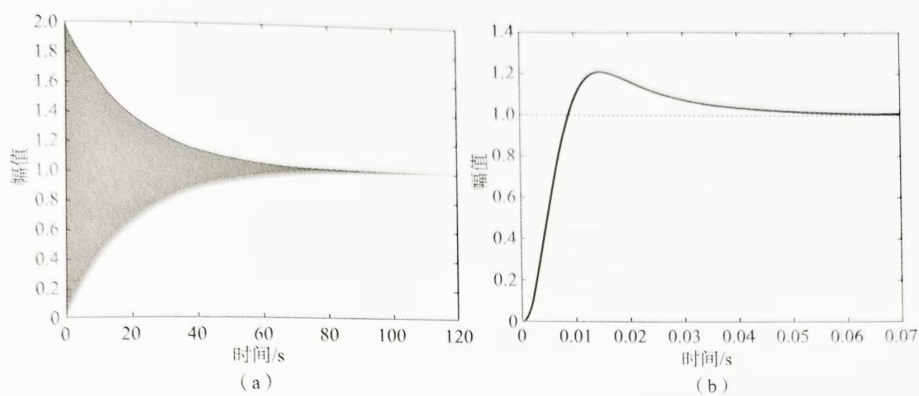


图 2.7.4 校正前后的阶跃响应曲线

(a) 校正前阶跃响应曲线; (b) 校正后阶跃响应曲线

三、基于 SIMULINK 串联超前、滞后校正仿真

步骤：

(1) 在 MATLAB 命令窗口中键入 “Simulink” 或在工具栏中单击 “Simulink” 按钮，打开仿真起始窗口页 “Simulink Start Page”，选择 “Blank Model” 打开空白模型，建立新的仿真模型对象，如图 3.1.1 所示。

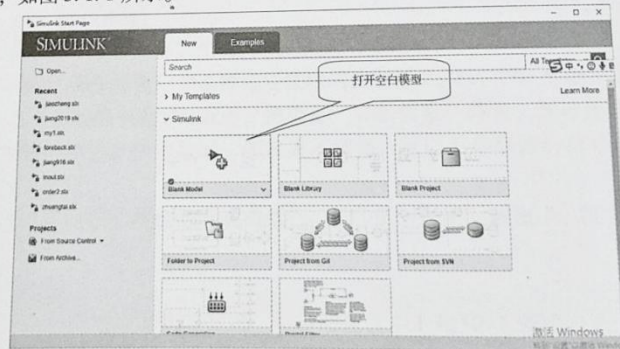


图 3.1.1 打开空白模型窗口建立新仿真

(2) 在空白的仿真模型窗口工具栏上，单击模型库按钮，即可打开系统中预置的图形库，如图 3.1.2 所示。

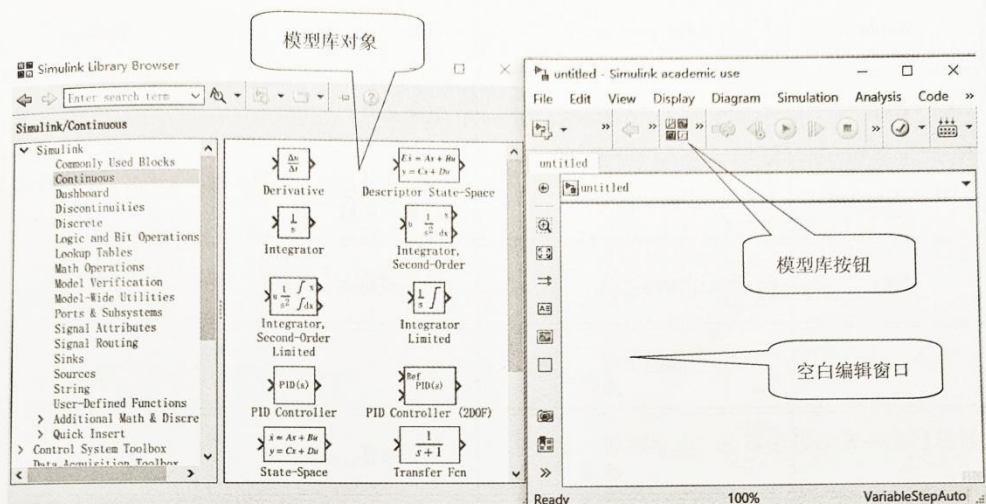


图 3.1.2 模型库及编辑模型窗口

(3) 按照需求拖动左侧模块到右侧编辑窗口，即可搭建仿真模型，如图 3.1.3 所示。

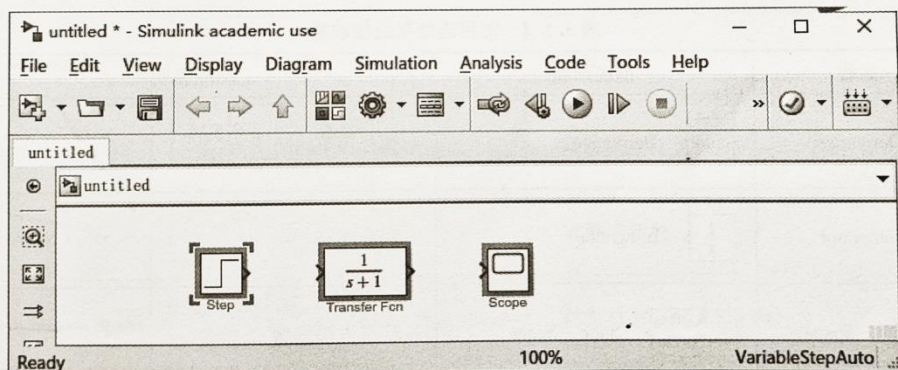



图 3.1.3 拖动仿真模块到窗口中








2. 仿真库基本模块

(1) 数学模块库 (Math Operations) 如表 3.1.1 所示。

表 3.1.1 常用数学模块库







名称	模块形状	功能说明
Add	 Add	加法

续表

名称	模块形状	功能说明
Divide	 Divide	除法
Gain	 Gain	比例运算
Math Function	 Math Function	包括指数函数、对数函数、求平方、开根号等常用数学函数
Sign	 Sign	符号函数
	 Subtract	减法
	 Sum	求和运算
Sum of Elements	 Sum of Elements	元素和运算

(2) 连续系统模块库 (Continuous) 如表 3.1.2 所示。

表 3.1.2 常用连续系统模块库

名称	模块形状	功能说明
Derivative	 Derivative	微分环节
Integrator	 Integrator	积分环节
State - Space	 State - Space	状态方程模型
Transfer Fcn	 Transfer Fcn	传递函数模型
Transport Delay	 Transport Delay	把输入信号按给定的时间做延时
Zero - Pole	 Zero - Pole	零 - 极点增益模型

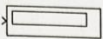

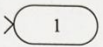



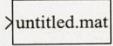
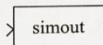

(5) 输入信号源模块库 (Sources) 如表 3.1.5 所示。

表 3.1.5 常用输入信号源模块库

名称	模块形状	功能说明
Sine Wave	 Sine Wave	正弦波信号
Chirp Signal	 Chirp Signal	产生一个频率不断增大的正弦波
Clock	 Clock	显示和提供仿真时间
Constant	 Constant	常数信号, 可设置数值
Step	 Step	阶跃信号
From File (.mat)	 From File	从数据文件获取数据
In1	 In1	输入信号
Pulse Generator	 Pulse Generator	脉冲发生器
Ramp	 Ramp	斜坡输入
Random Number	 Random Number	产生正态分布的随机数
Signal Generator	 Signal Generator	信号发生器, 可产生正弦、方波、锯齿波及随意波






(6) 接收模块库 (Sinks) 如表 3.1.6 所示。

表 3.1.6 常用接收模块库

名称	模块形状	功能说明
Display	 Display	数字显示器
Floating Scope	 Floating Scope	悬浮示波器
Out 1	 Out 1	输出端口
Scope	 Scope	示波器
Stop Simulation	 Stop Simulation	仿真停止
Terminator	 Terminator	连接到没有连接到的输出端
To File (.mat)	 To File	将输出数据写入数据文件保护
To Workspace	 To Workspace	将输出数据写入 MATLAB 的工作空间
XY Graph	 XY Graph	显示二维图形

(7) 通用模块库 (Commonly Used Blocks) 如表 3.1.7 所示。

表 3.1.7 通用模块库

名称	模块形状	功能说明
Bus Creator	 Bus Creator	创建信号总线库
Bus Selector	 Bus Selector	总线选择模块
Mux	 Mux	多路信号集成一路
Demux	 Demux	一路信号分解成多路
Logical Operator	 Logical Operator	逻辑“与”操作

3. 模块的参数和属性设置

例如：

(1) 数学模块库 (Math Operations) 中比例运算 “Gain” 的设置。

单击左窗格 “Math Operations” 库，拖动数学模块库比例运算 (Gain) 模块到编辑窗口，双击打开设置对话框，添加传递函数的分子和分母，如图 3.1.4 所示。

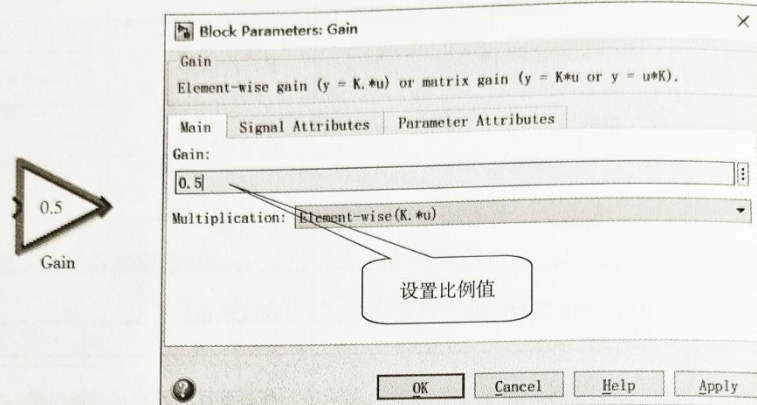


图 3.1.4 比例运算参数设置对话框

(2) 数学模块库 (Math Operations) 中求和 “Sum” 的设置。单击左窗格 “Math Operations” 库，拖动数学模块库求和运算 (Sum) 模块，双击打开设置对话框，默认是求和运算，也可修改为相减运算，如图 3.1.5 所示。

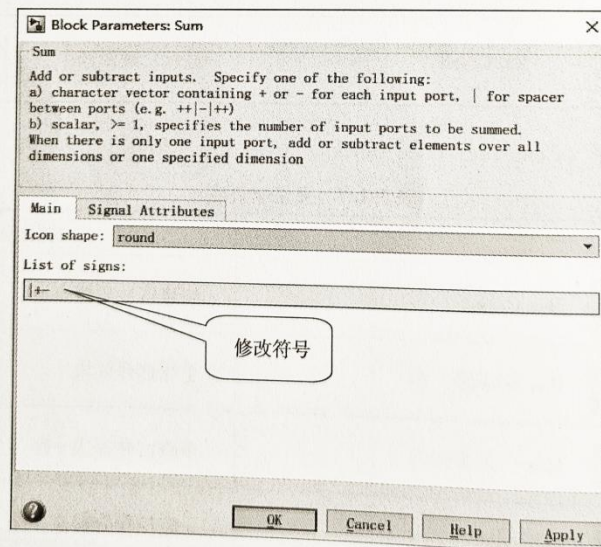


图 3.1.5 求和运算参数设置对话框

(3) 输入信号源模块库 (Sources) 中阶跃输入信号 “Step” 的设置。拖动输入信号源中的阶跃信号 (Step) 模块，单击打开参数对话框如图 3.1.6 所示。其中，Step time 为阶跃

(5) 接收模块库 (Sinks) 中示波器 “Scope” 的设置。拖动接收模块库的示波器模块 (Scope)，双击该示波器，在显示窗口中选择 “View” 即可设置背景、前景坐标轴线颜色、线型，如图 3.1.8 所示。

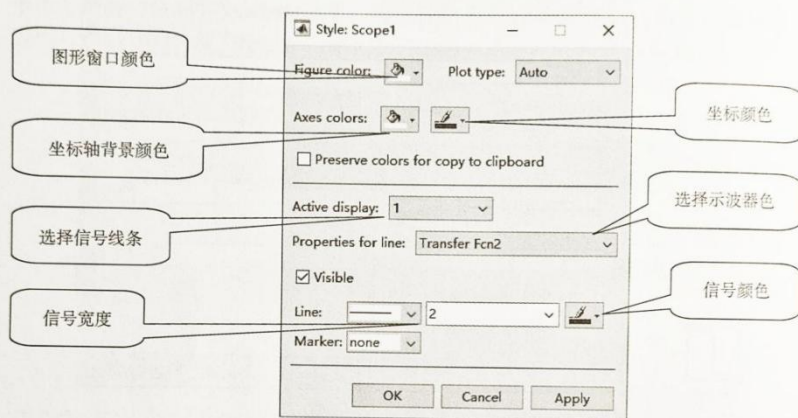


图 3.1.8 设置显示器

(6) 若要使用示波器显示多条曲线，可右击示波器，在弹出的快捷菜单中选择输入 “Number of Input Ports”，再单击 “Signals & Ports”，选择信号的显示个数，如图 3.1.9 所示。

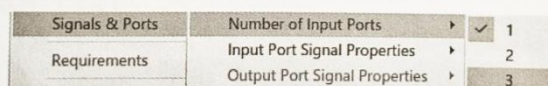


图 3.1.9 示波器显示多个信号设置

(7) 若搭建一个简单仿真系统，将输入信号、连续系统和接收模块连接在一起即可。方法是：单击工具栏的 “Start simulation” 按钮或快捷键 Ctrl + T，即可开始仿真；双击示波器，即可观测输出曲线；单击示波器的比例尺，可测量图形信号中黑点的数据，如图 3.1.10 所示。

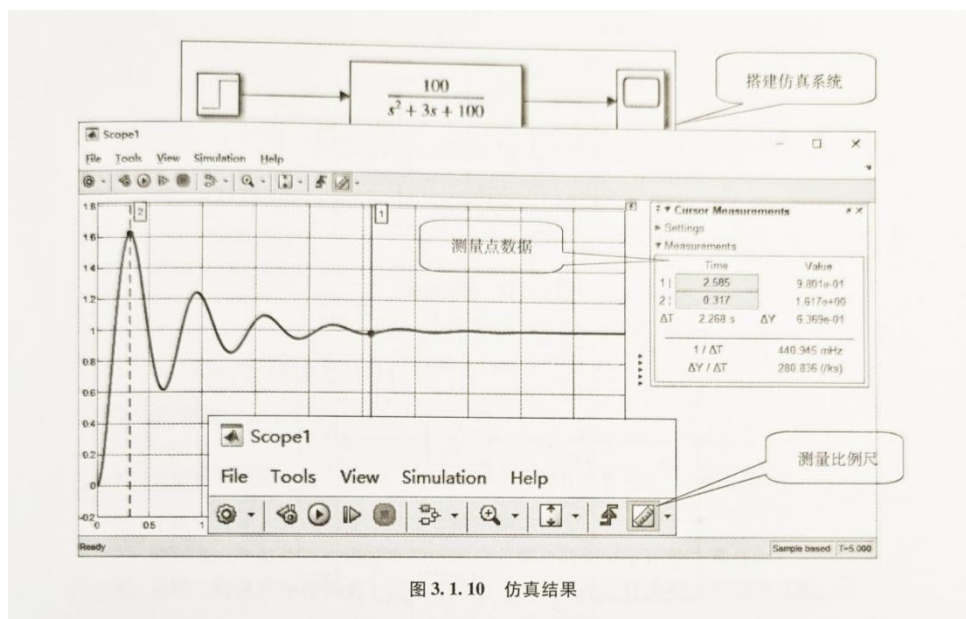


图 3.1.10 仿真结果