

实验十三：

磁悬浮小球频域法校正

实验目的：

1. 掌握频域法分析系统稳定性；
2. 设计串联超前校正环节，仿真并应用于磁悬浮小球系统，使得使小球稳定悬浮于电磁铁下方10mm位置。

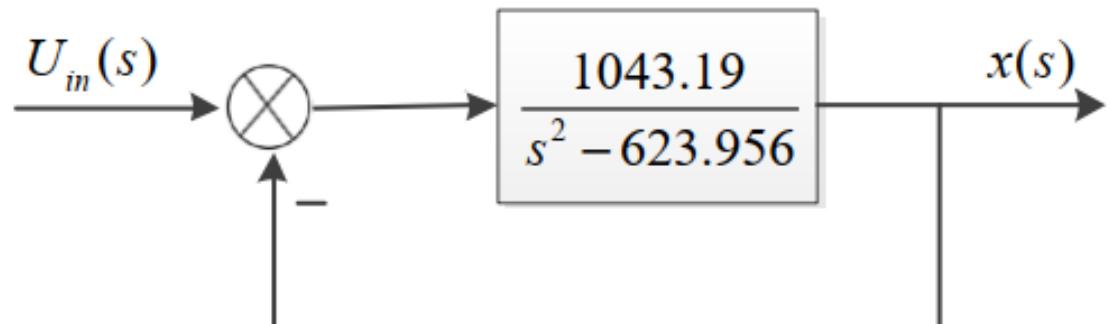
实验任务/要求：

1. 设计串联超前校正控制器 $G_c(s)$ ，使得系统的静态位置误差系数为 5，相角裕度不小于 55° ；
2. 仿真实验，观察在设计的控制器 $G_c(s)$ 作用下，磁悬浮小球系统的性能指标是否满足要求；
3. 应用实验，应用设计的超前校正控制器到实际的磁悬浮小球系统，观察系统性能指标是否满足要求。

实验仪器、设备及材料：

GML2001 磁悬浮系统，计算机，Matlab 平台，
电控箱

实验原理：



GML2001磁悬浮系统

实验步骤：

对任务1：串联超前校正控制器的设计

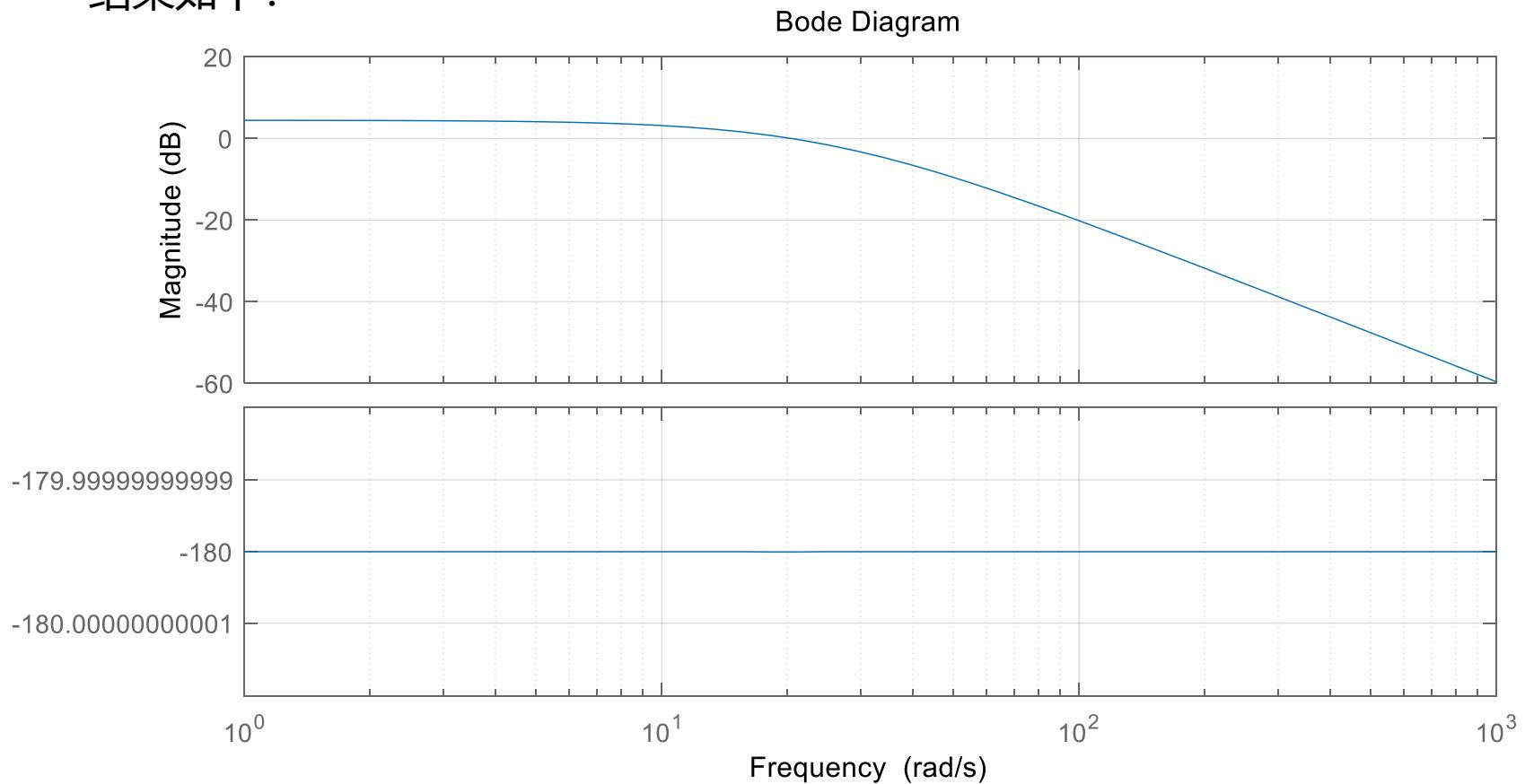
1) 在matlab中新建一个 .m文件， 输入如下代码， 保存并运行。

```
num=[1043.19];
den=[1 0 -623.956];

p=roots(den)

figure();
bode(num,den);
grid;
```

结果如下：



$p =$

24.9791

-24.9791

未校正系统不稳定

需要设计控制器，系统才能稳定

2) 根据系统的 Bode 图, 给系统增加一个超前校正装置。
设超前校正装置为:

$$G_c(s) = K_c \alpha \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} = K_c \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\alpha T}} \quad (\alpha < 1)$$

注: 与自动控制原理书中标准的超前校正装置的形式有差异, 只需将此处的 α 替换成 $1/\alpha$, 即可得到标准形式。

校正后系统的开环传递函数：

$$\begin{aligned} G_c(s)G(s) &= K_c \alpha \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} \cdot \frac{1043.19}{s^2 - 623.956} \\ &= \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} \cdot \frac{K_c \alpha 1043.19}{s^2 - 623.956} = G_{c1}(s)G_1(s) \end{aligned}$$

其中，

$$G_1(s) = \frac{K_c \alpha 1043.19}{s^2 - 623.956} = \frac{K 1043.19}{s^2 - 623.956}$$

$$K = K_c \alpha \quad \text{注：在控制器 } G_c(s) = K_c \alpha \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} \text{ 中，} K_c \alpha$$

是比例环节，不改变被控对象 $G(s)$ 的相角裕度。系统性能的改变完全是由 $\frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1}$ 环节产生。

3) 根据稳态误差要求计算增益 K:

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} |G_c(s)G(s)| = \lim_{s \rightarrow 0} \left| K_c \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\alpha T}} \times \frac{1043.19}{s^2 - 623.956} \right| = 5$$

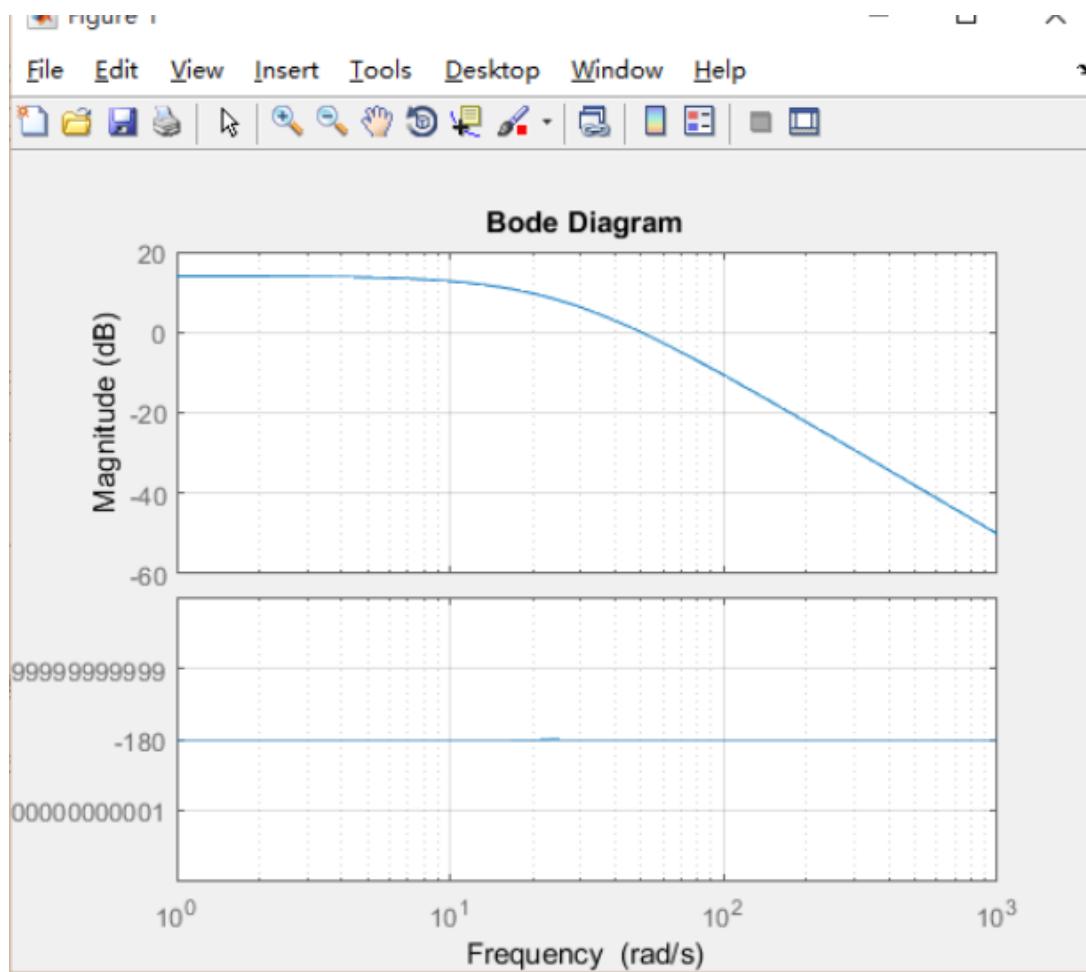
可得

$$K = K_c \alpha = 2.99$$

于是有

$$G_1(s) = KG(s) = \frac{1043.19 \times 2.99}{s^2 - 623.956}$$

4) 画出 $G_1(s)$ 的Bode图



```
num=[1043.19*2.99];  
den=[1 0 -623.956];
```

```
p=roots(den)
```

```
figure();  
bode(num,den);  
grid;
```

注：1) 可观察到， $G_1(s)$ 的相角裕量为 0，根据设计要求，系统的相角裕度至少为 55° ，因此需要增加的相角裕度至少为 55° 。
 2) 校正后系统的开环传递函数为

$$G_{c1}(s)G_1(s) = \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} \cdot G_1(s)$$

系统相角裕度的改变来自于环节 $G_{c1}(s) = \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1}$

3) 增加了校正装置 $G_{c1}(s)$ 后，会使得系统的截至频率右移。对 $G_1(s)$ 而言，当其截至频率右移时，其相位存在滞后，因此在设计时需要考虑对 $G_1(s)$ 的相位滞后增量进行补偿。

4) 在设计超前校正时，环节 $G_{c1}(s) = \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1}$ 在 $w = w_m$ (最大超前角频率) 处，提供的最大相角应大于 55° 。

取 $\varphi(w_m) = 60^\circ$

5) 计算参数 a 、 T

在 $w = w_m$ 处，最大超前角 $\varphi(w_m)$ 只与 α 相关，且

$$\sin\varphi(w_m) = \frac{1-\alpha}{1+\alpha}$$

故

$$\alpha = 0.0718$$

又，校正后系统的开环传递函数为：

$$G_{c1}(s)G_1(s) = \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} \cdot G_1(s)$$

在 $w = w_m$ 处， $\frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1}$ 的模值为：

$$\left| \frac{1+j\omega T}{1+j\omega\alpha T} \right|_{\omega=1/(\sqrt{\alpha}T)} = \left| \frac{1+j\frac{1}{\sqrt{\alpha}}}{1+j\sqrt{\alpha}} \right| = \frac{1}{\sqrt{\alpha}}$$

考虑到超前校正设计时，校正后的截至频率 $\mathbf{w}'_c = \mathbf{w}_m$ ，

如果在 $w = w_m = w'_c$ 处， $\frac{Ts+1}{\alpha Ts+1}$ 的模值为 $1/\sqrt{\alpha}$ ，则在 $w = w_m = w'_c$ 处， $G_1(s)$ 的模值一定要为 $\sqrt{\alpha}$ ，这样才能保证：

$$\left| \frac{Ts+1}{\alpha Ts+1} \cdot G_1(s) \right|_{s=jw'_c} = 1,$$

即：

$$L(w'_c) = 20 \lg \left| \frac{Ts+1}{\alpha Ts+1} \cdot G_1(s) \right| = 0,$$

根据:

$$|G_1(s)|_{s=jw'_c} = \sqrt{\alpha},$$

且

$$\alpha = 0.0718$$

$$G_1(s) = \frac{1043.19 \times 2.99}{s^2 - 623.956}$$

求得:

$$w'_c = w_m = 104.3 \text{ rad/s},$$

由

$$w'_c = \frac{1}{T\sqrt{\alpha}}$$

求得:

$$\frac{1}{T} = 27.96$$

于是校正装置确定为

$$G_c(s) = K_c \frac{s + 27.96}{s + 389.03}$$

$$K_c = \frac{K}{\alpha} = 41.64$$

校正后系统的开环传递函数为：

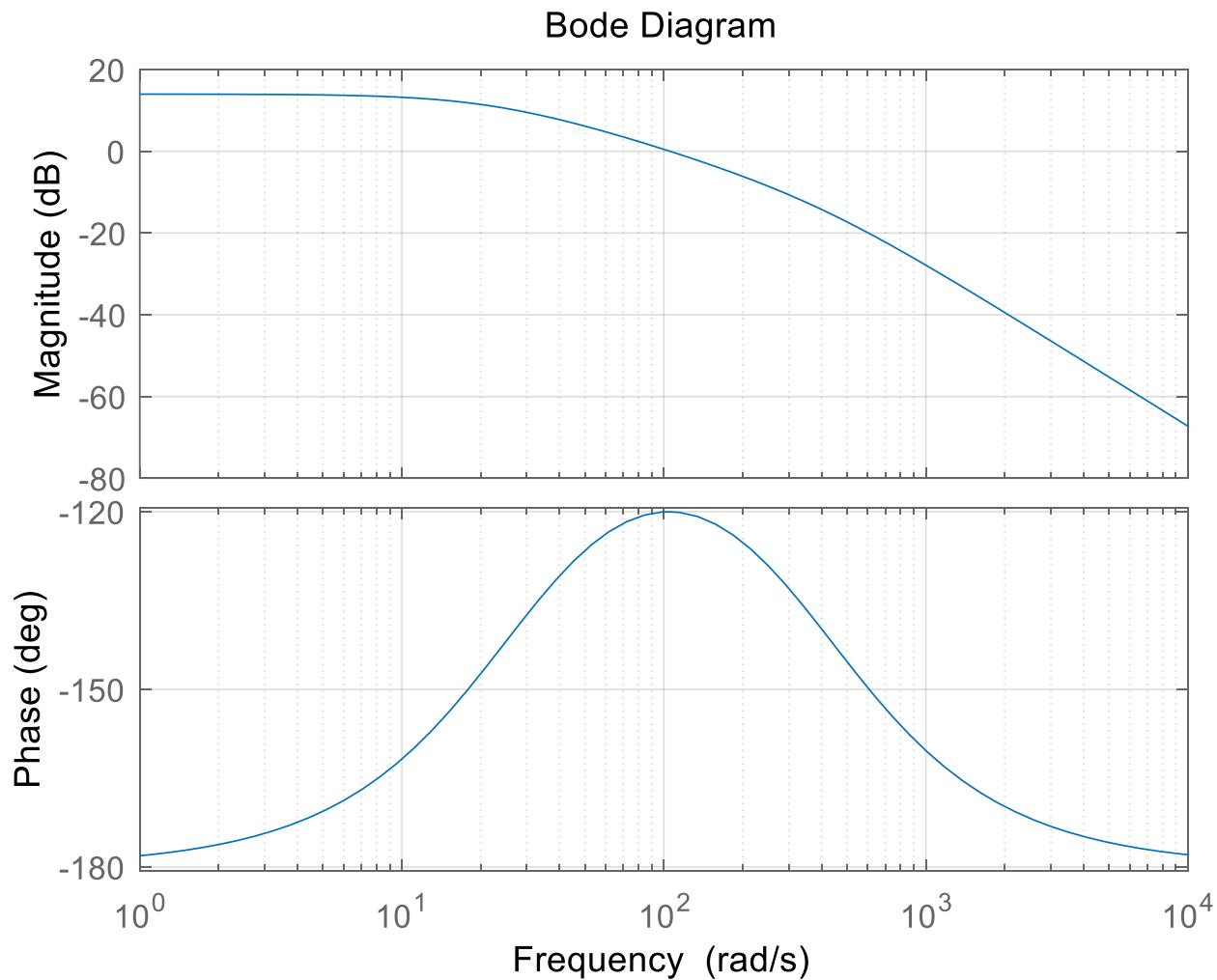
$$G_c(s)G(s) = 41.64 \frac{s + 27.96}{s + 389.03} \cdot \frac{1043.19}{s^2 - 623.956}$$

对任务2：仿真实验

1) 在matlab中新建一个 .m文件， 输入如下代码， 保存并运行。

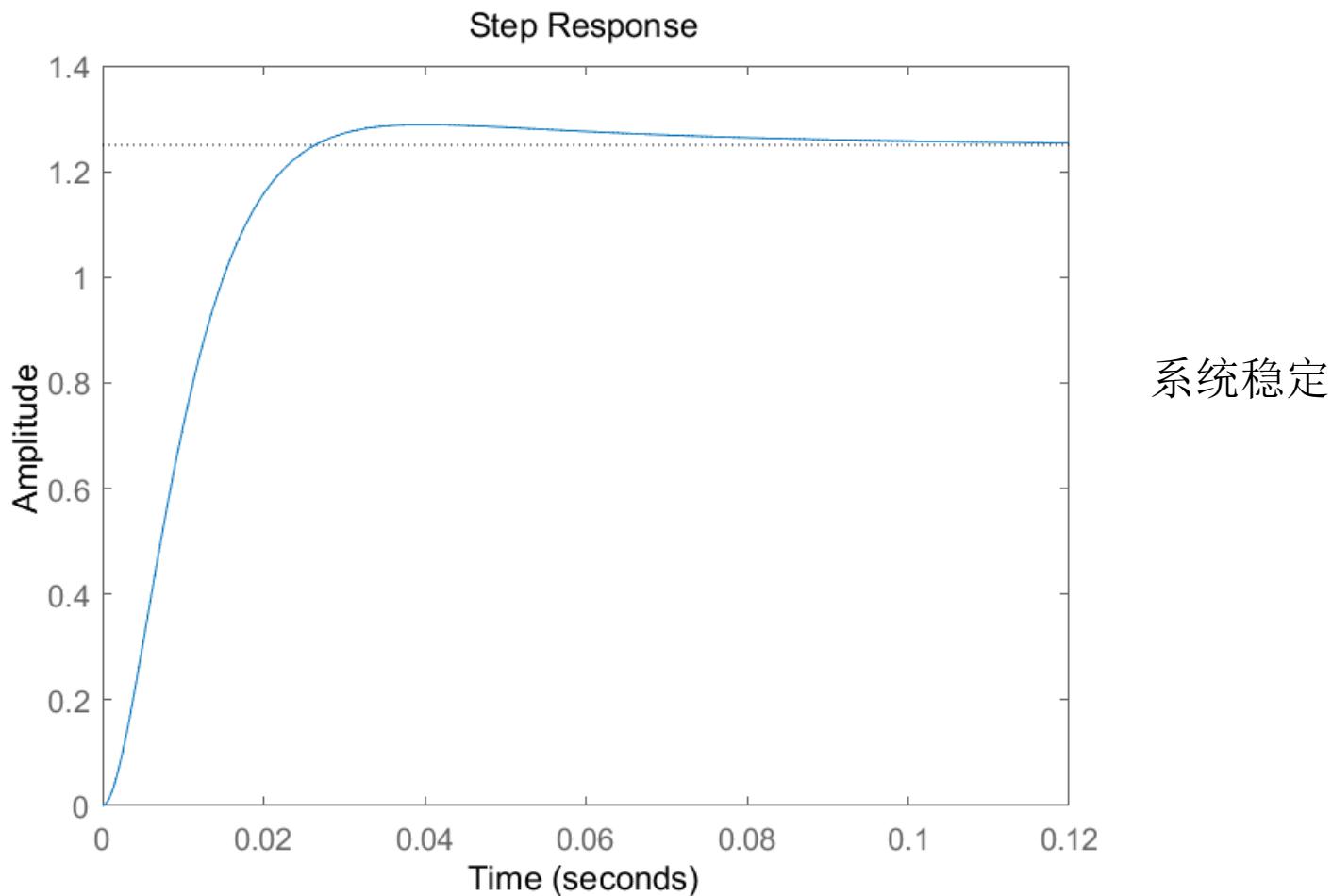
```
k=41.64*1043.19;  
z=[-27.96];  
p=[-389.03, 24.9791,-24.9791];  
G=zpk(z,p,k);  
  
figure();  
bode(G);  
grid;  
  
figure();  
G_closed=feedback(G,1);  
step(G_closed);
```

2) 画出校正后系统的Bode图



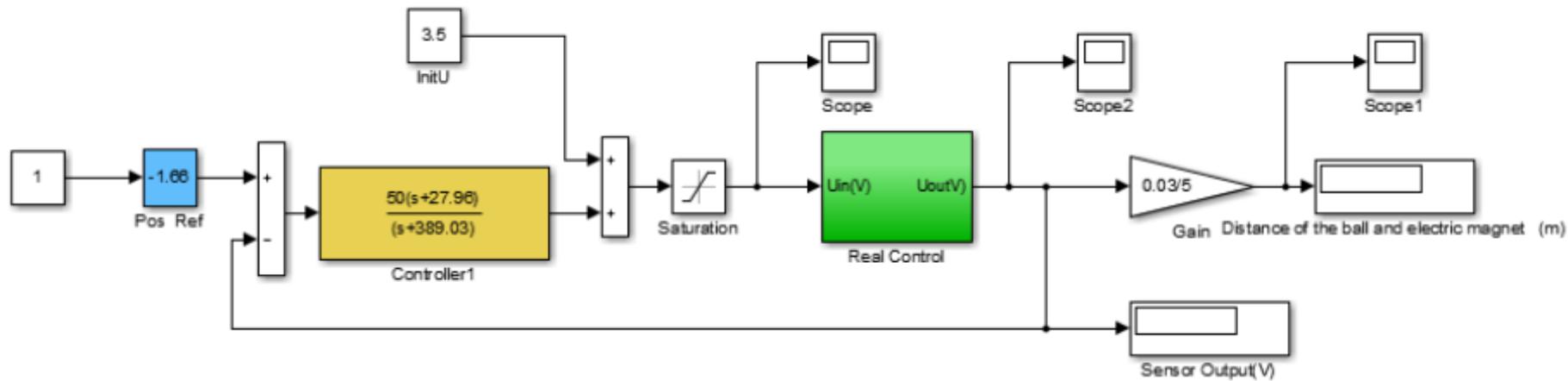
相角裕度满足要求

3) 画出阶跃信号下系统的输出



对任务3：应用设计的控制器到实际的磁悬浮小球系统

1) 在 Matlab 命令行输入 gtbox 后回车，打开 gtbox 工具箱中“MagLev” → “GML2001-1711”→ “Frequency Response” 下的“PL_Control1.slx”



1. Pos Ref 模块：位置转换成模拟电压，厘米转换成伏特；
2. Controller1 模块：频域法控制器；
3. InitU 模块：平衡点的电压；
4. Gain 模块：电压转换成位置，伏特转换成米

2) 点击  运行程序

3) 用手扶起小球， 尝试将小球稳定地悬浮于距离电磁铁约10mm 位置。



注：不要遮挡设备底部激光传感器， 遮挡住了， 程序反馈就错了， 导致磁悬浮失控。



小心小球滑落到地面伤人。

分析在不同 $\varphi(w_m)$ 值选取下（至少3组）系统响应有何变化，截图保存不同参数下系统的响应曲线，并填写下表。

校正器	参数a	参数T	浮球位置
$\varphi(w_m)=65^\circ$			
$\varphi(w_m)=68^\circ$			

实验报告要求：

- 1) 实验目的
- 2) 实验任务/要求
- 3) 实验仪器、设备及材料
- 4) 实验原理
- 5) 实验步骤
- 6) 实验结果及心得