

自动控制理论 B

Matlab 仿真实验报告

实 验 名 称 : 线性系统的频率校正设计

姓 名 : 方尧

学 号 : 190410102

班 级 : 自动化 1 班

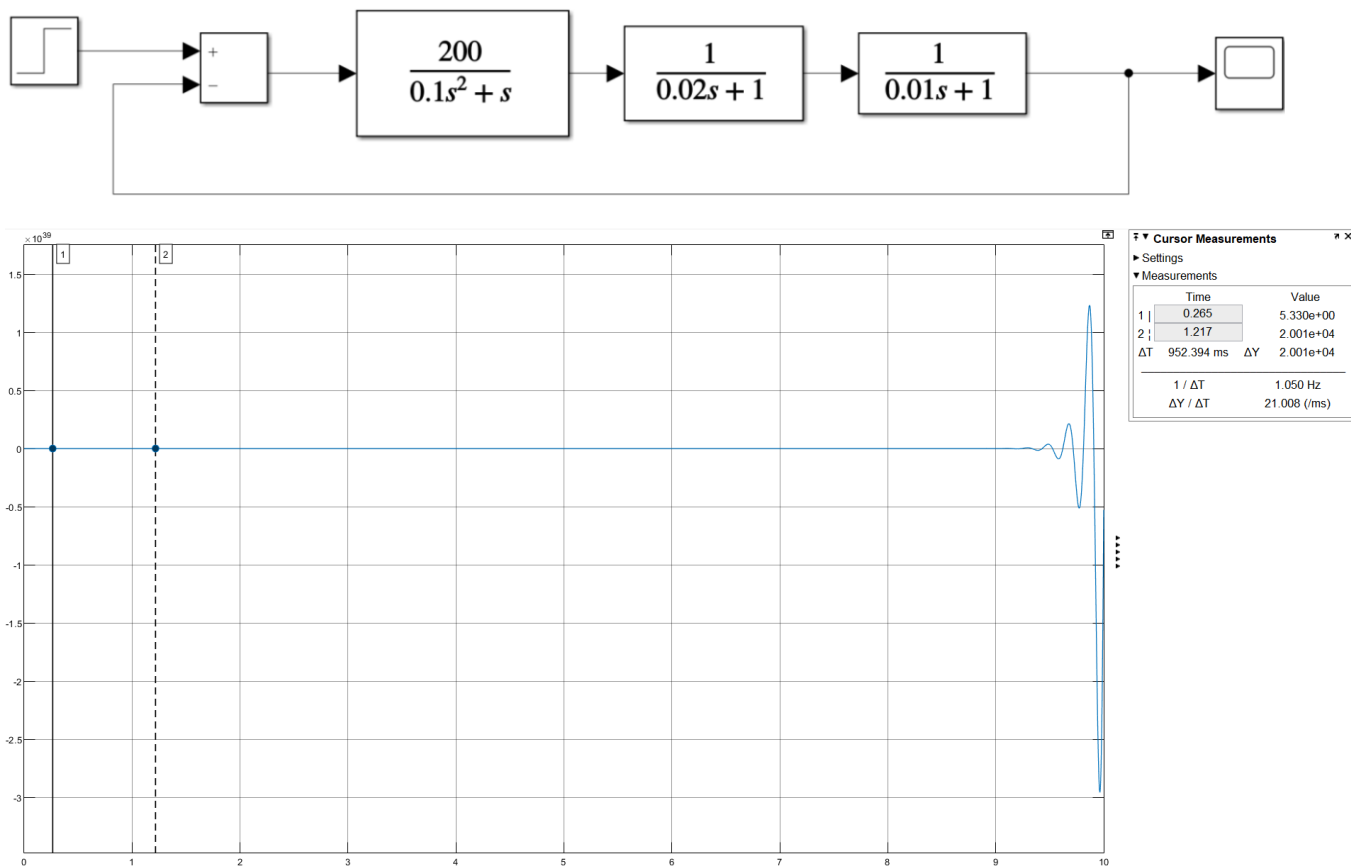
撰 写 日 期 : 2022 年 5 月 9 日星期一

哈尔滨工业大学（深圳）

一、未校正系统的时域指标和频率性能

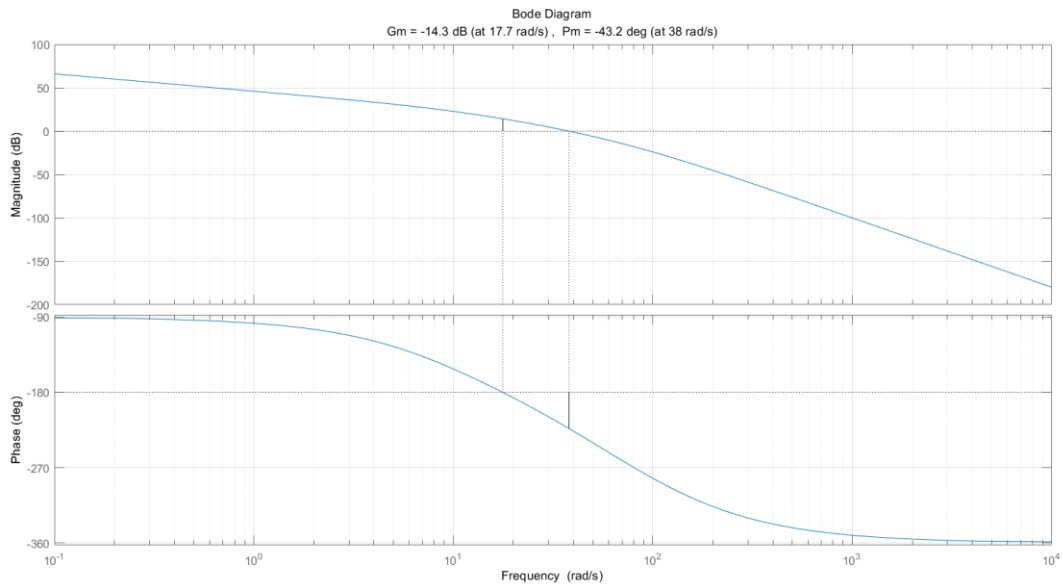
原始系统的 simulink 模型及阶跃响应曲线如下：

(0) 原始系统



从阶跃响应曲线上可以看出，原系统发散，超调 ∞ ，调整时间 ∞ 。

未校正系统 bode 图（源代码见[链接](#)）如下：



由图可以读出，频域指标剪切频率 $\omega_c = 38 \text{ rad/s}$ ，相角裕度 $\gamma = -43.2^\circ$ 。

现讨论时域性能指标转换经验公式的精确程度：

由公式
$$\begin{cases} \sigma_p \% = 0.16 + 0.14(M_r - 1), M_r = 1 / \sin \gamma \\ t_s = \frac{\pi}{\omega_c} [2 + 1.5(M_r - 1) + 2.5(M_r - 1)^2] \end{cases},$$

时域超调 ∞ ，调整时间 ∞ ，可推出 $\sin \gamma = 0, \gamma = 0^\circ / 90^\circ$ ， ω_c 未知。

可见与实际频域指标不符，经验公式使用有使用条件且存在局限性。

二、迟后-超前校正设计步骤

2.0 时域频域指标转化

按要求 $\sigma_p \% = 0.16 + 0.14(M_r - 1) \leq 0.3$ $M_r = \frac{1}{\sin \gamma}$ 得 $\gamma \geq 47.8^\circ$
 $t_s = \frac{\pi}{\omega_c} [2 + 1.5(M_r - 1) + 2.5(M_r - 1)^2] < 0.7$ 得 $\omega_c > 12.71 \text{ rad/s}$
 未校正前 $\frac{200}{\omega_{co} \cdot 0.1 \cdot \omega_{co}} = 1$ 得 $\omega_{co} = 44.72 \text{ rad/s}$
 $\gamma_0 = 180^\circ - 90^\circ - \arctan 0.1 \omega_{co} - \arctan 0.02 \omega_{co} - \arctan 0.01 \omega_{co} = -53.3^\circ$

2.1 迟后优先的串联迟后-超前校正

设计迟后环节, 取 $\omega_c = 8 \text{ rad/s}$

$$20\lg|G_0(j\omega_c)| = 20\lg\beta \quad \text{得 } \beta = 19.22$$

$$\frac{1}{T} = \frac{\omega_c}{10} \quad \text{得 } T = 1.25 \quad \text{迟后环节 } G_{c1}(s) = \frac{1.25s+1}{24s+1}$$

$$\text{校正后 } G_1 = G_0 G_{c1} = \frac{200}{s(0.1s+1)(0.02s+1)(0.01s+1)} \cdot \frac{1.25s+1}{24s+1}$$

$$\text{得 } \omega_{c1} = 8 \text{ rad/s} \quad \gamma_1 = 32.1^\circ$$

现设计超前环节 $\omega_c = 13 \text{ rad/s}$

$$20\lg|G_1(j\omega_c)| = -10\lg\alpha \quad \text{得 } \alpha = 4.53$$

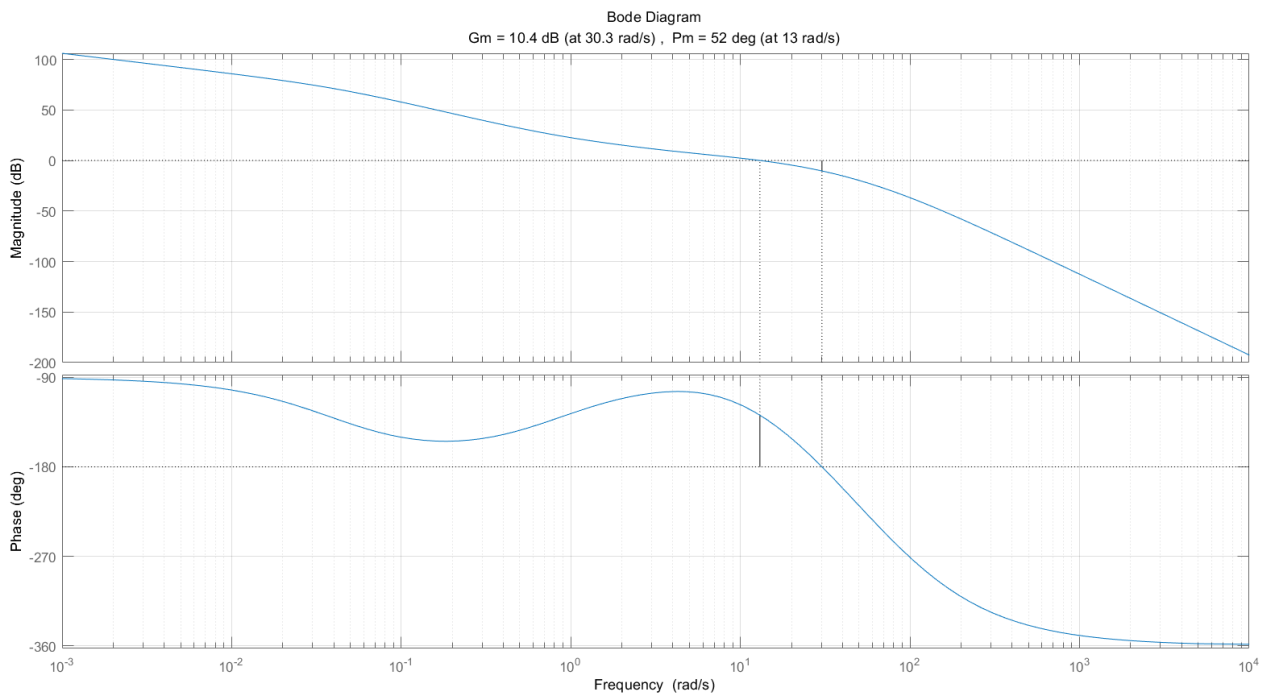
$$T = \frac{1}{\omega_c\alpha} = 0.036 \quad G_{c2}(s) = \frac{0.164s+1}{0.036s+1}$$

$$\text{校正后 } G_2 = G_0 G_{c1} G_{c2} = \frac{200}{s(0.1s+1)(0.02s+1)(0.01s+1)} \cdot \frac{1.25s+1}{24s+1} \cdot \frac{0.164s+1}{0.036s+1}$$

$$\text{得 } \omega_{c2} = 13 \text{ rad/s} \quad \gamma_2 = 52^\circ \quad \text{满足要求}$$

$$G_c(s) = \frac{1.25s+1}{24s+1} \cdot \frac{0.164s+1}{0.036s+1}$$

校正后 bode 图 (源代码见[链接](#)) 如下:



2.2 超前优先的串联迟后-超前校正（迟后环节提高稳态精度）

$$\text{取 } K = 10, G_1(s) = \frac{10}{s(0.1s+1)(0.02s+1)(0.01s+1)}$$

$$\omega_{c1} = 7.78 \text{ rad/s} \quad \gamma_1 = 38.8^\circ$$

现设计超前校正环节

$$\text{取 } \omega_c = 13 \text{ rad/s}$$

$$20 \lg |G_1(j\omega_c)| = -10 \lg \alpha \quad \text{得 } \alpha = 4.935$$

$$T = \frac{1}{\omega_c \sqrt{\alpha}} = 0.0346 \quad \text{超前 } G_{c1} = \frac{0.1709s+1}{0.0346s+1}$$

$$\text{校正后 } G_2(s) = G_1 G_{c1} = \frac{10}{s(0.1s+1)(0.02s+1)(0.01s+1)} \cdot \frac{0.1709s+1}{0.0346s+1}$$

$$\text{得 } \omega_{c2} = 13 \text{ rad/s} \quad \gamma_2 = 57.1^\circ$$

现设计迟后校正环节 取 $\omega_{c3} = 13 \text{ rad/s}$

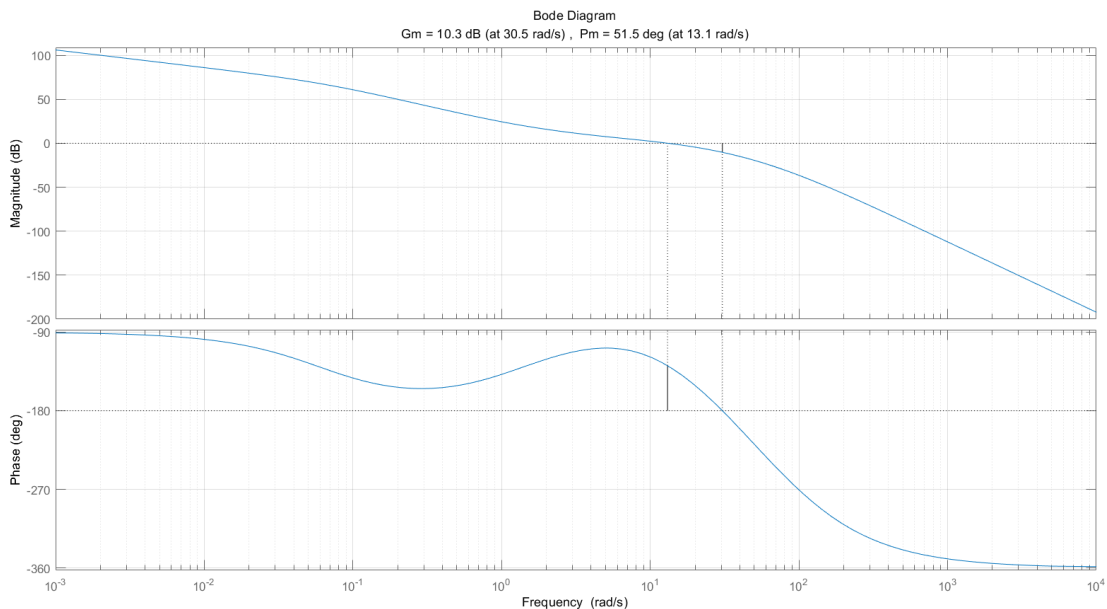
$$\beta = \frac{K}{K_1} = 20 \quad \tau = \frac{\omega_{c3}}{10} = 0.77 \quad \text{迟后 } G_{c2} = 20 \frac{0.77s+1}{15.4s+1}$$

校正后

$$G_3 = \frac{200}{s(0.1s+1)(0.02s+1)(0.01s+1)} \cdot \frac{0.1709s+1}{0.0346s+1} \cdot \frac{0.77s+1}{15.4s+1}$$

$$\omega_c = 13.1 \text{ rad/s} \quad \gamma = 51.5^\circ \quad \text{满足要求}$$

校正后 bode 图如下图（源代码见[链接](#)）：



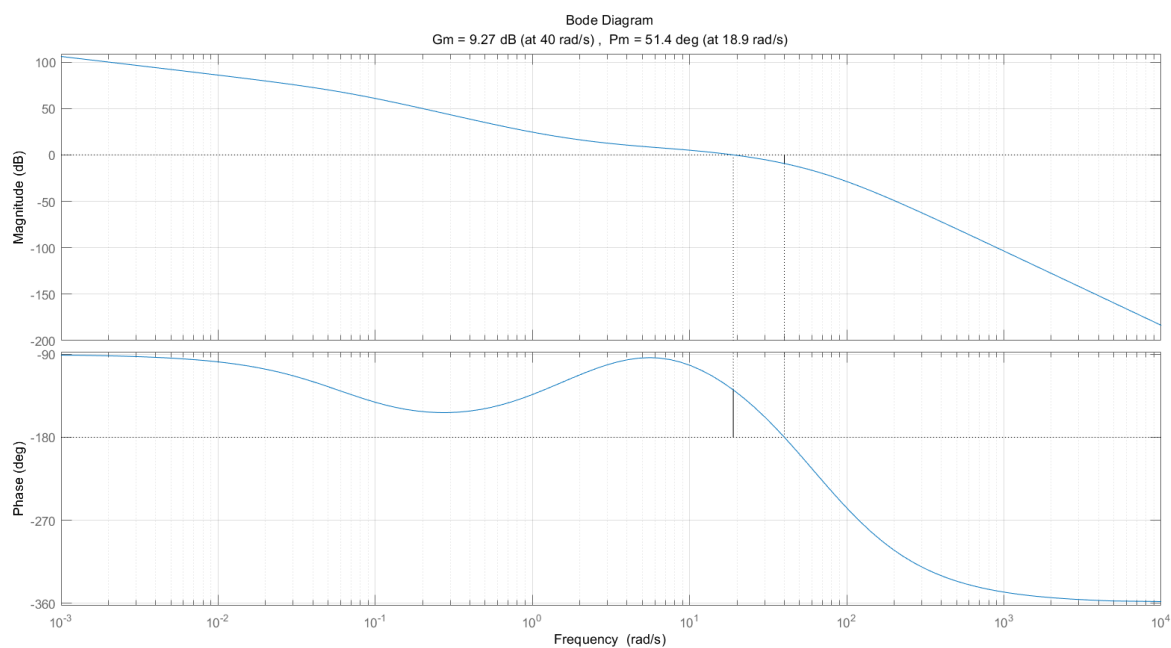
经检验，频域指标满足要求，但时域指标不满足（见 4.2 节），

微调模型，微调为：

$$G_3(s) = G_0(s)G_c(s) = \frac{200}{s(0.1s+1)(0.02s+1)(0.01s+1)} \bullet \frac{0.24s+1}{0.018s+1} \frac{0.77s+1}{15.4s+1}$$

$$G_c(s) = \frac{0.24s+1}{0.018s+1} \frac{0.77s+1}{15.4s+1}, \text{ 满足要求}$$

微调校正模型后 bode 图如下图（源代码见[链接](#)）：



2.3 超前优先的串联迟后-超前校正（迟后环节降低剪切频率）

取 $\omega_c = 14 \text{ rad/s}$ 此时 $\gamma(14) = 11.93^\circ$

$$\varphi_m = \gamma - \gamma(14) + \Delta_1 + \Delta_2 = 47.8^\circ - 11.93^\circ + 6^\circ = 42^\circ$$

$$\alpha = \frac{1 + \sin \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m} = 5$$

$$T = \frac{1}{\omega_c \sqrt{\alpha}} = 0.032 \quad \text{超前} \quad G_{c1}(s) = \frac{0.165s + 1}{0.032s + 1}$$

$$G_1(s) = \frac{200}{s(0.1s + 1)(0.02s + 1)(0.01s + 1)} \cdot \frac{0.165s + 1}{0.032s + 1}$$

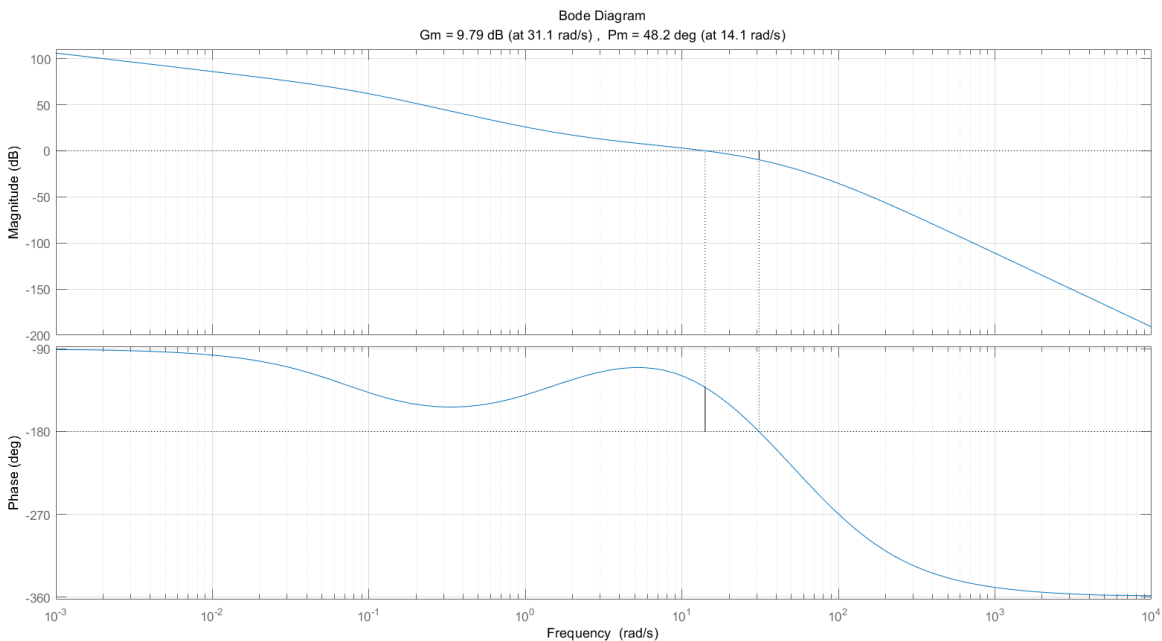
$$20 \lg |G_1(j\omega_c)| = 20 \lg \beta \quad \text{得 } \beta = 17.73$$

$$\frac{1}{T} = \frac{\omega_c}{10} \quad \text{得 } T = 0.714 \quad G_{c2} = \frac{0.714s + 1}{12.66s + 1}$$

$$G_2(s) = \frac{200}{s(0.1s + 1)(0.02s + 1)(0.01s + 1)} \cdot \frac{0.165s + 1}{0.032s + 1} \cdot \frac{0.714s + 1}{12.66s + 1}$$

$$\omega_c = 14.1 \text{ rad/s} \quad \gamma = 48.2^\circ \quad \text{满足要求}$$

校正后 bode 图如下图（源代码见[链接](#)）：



三、期望频率法校正设计步骤

$$M_r = \frac{1}{\sin 47.8^\circ} = 1.35 \quad \text{取 } \omega_c = 13 \text{ rad/s}$$

$$\omega_2 \leq \omega_c \frac{M_r - 1}{M_r} = 3.37 \quad \text{取 } \omega_2 = 3 \text{ rad/s}$$

$$\omega_3 \geq \omega_c \frac{M_r + 1}{M_r} = 22.63 \quad \text{取 } \omega_3 = 50 \text{ rad/s}$$

现计算 ω_1

$$20 \lg 200 - 20 \lg \omega_c - 20 \lg \frac{\omega_c}{\omega_1} + 20 \lg \frac{\omega_c}{\omega_2} = 0 \quad \text{得 } \omega_1 = 0.195$$

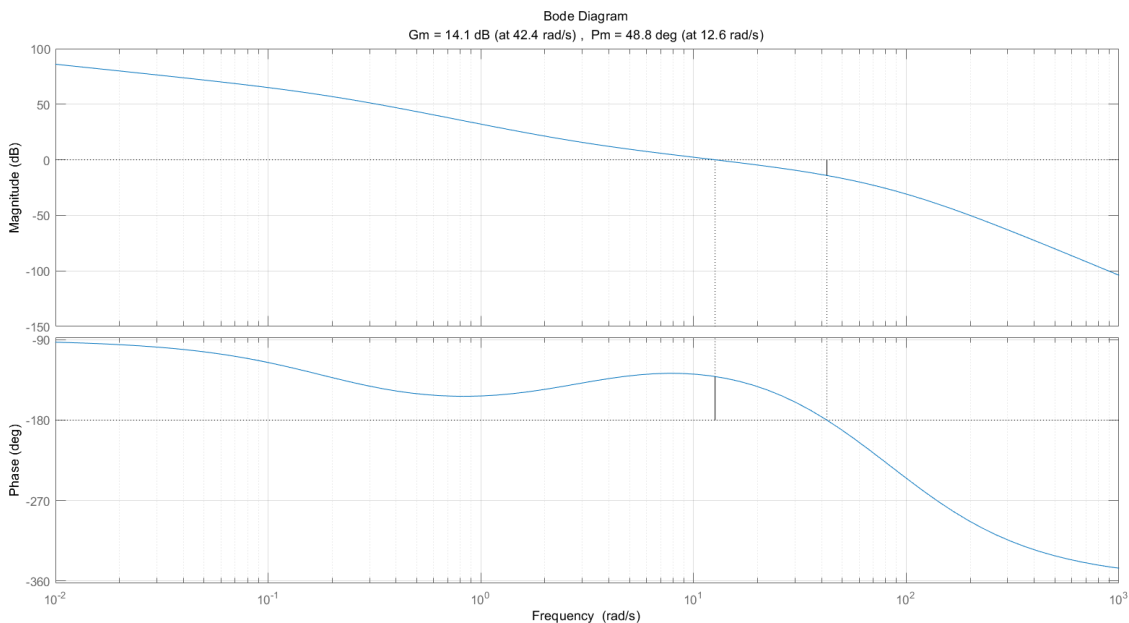
$$\text{取 } \omega_4 = 100 \text{ rad/s} \quad \omega_5 = 100 \text{ rad/s}$$

$$G(s) = \frac{200(0.133s+1)}{s(5.13s+1)(0.02s+1)(0.01s+1)^2}$$

$$G_c(s) = \frac{G(s)}{G_d(s)} = \frac{(0.133s+1)(0.1s+1)}{(0.01s+1)(5.13s+1)}$$

$$\omega_c = 12.6 \text{ rad/s}, \quad \gamma = 48.8^\circ \quad \text{满足要求}$$

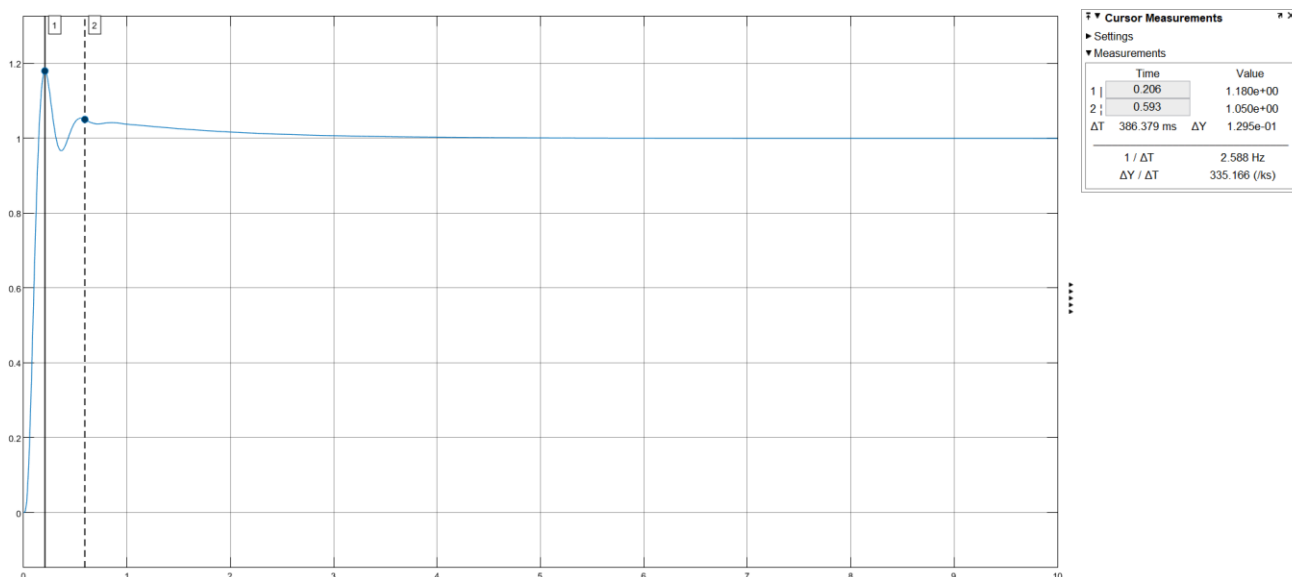
校正后 bode 图如下图（源代码见[链接](#)）：



四、校正后系统的时域指标和频率性能

4.1 迟后优先的串联迟后-超前校正时域阶跃响应

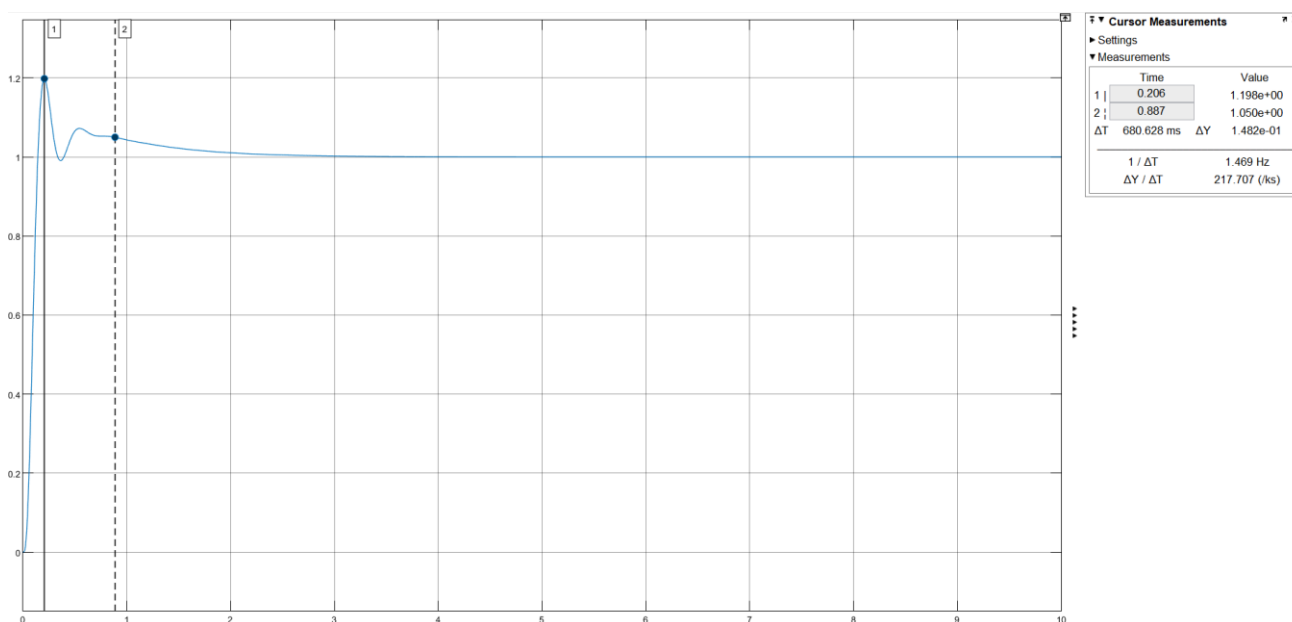
(simulink 模型见[链接](#))



4.2 超前优先的串联迟后-超前校正（迟后环节提高稳态精度）时域阶跃响应

(simulink 模型见[链接](#))

计算得出的校正装置校正后的时域阶跃响应如下，由图可知指标不符合

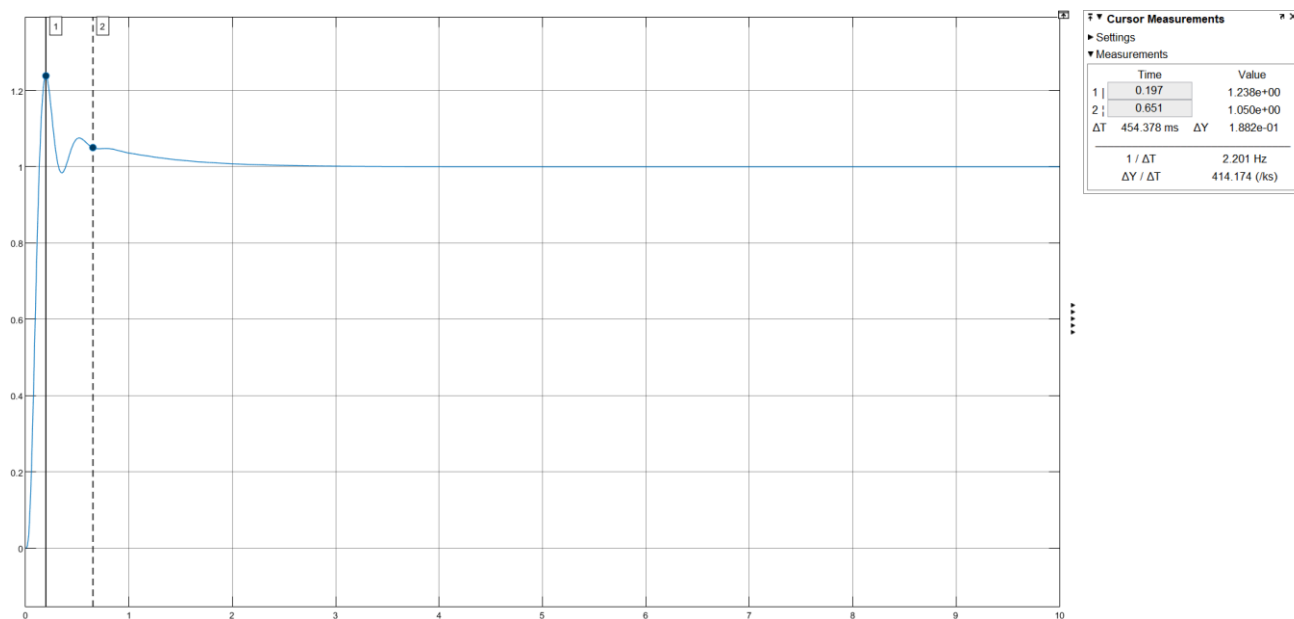


校正装置微调后系统时域阶跃响应如下：



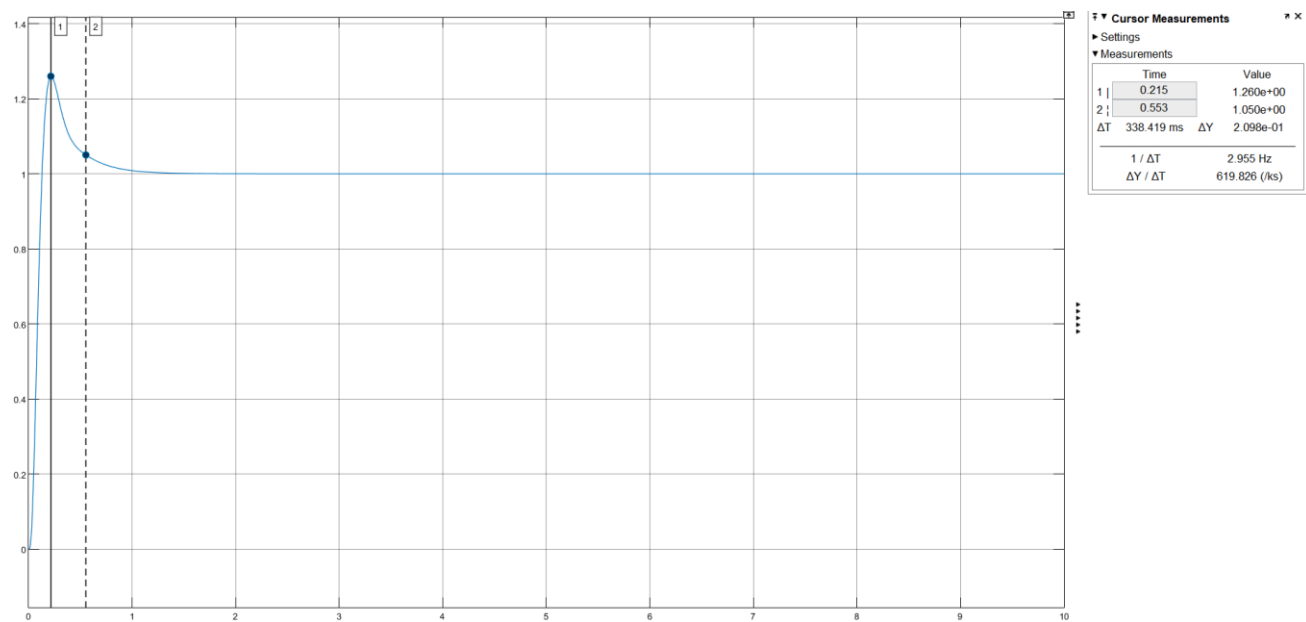
4. 3 超前优先的串联迟后-超前校正（迟后环节降低剪切频率）时域阶跃响应

（simulink 模型见[链接](#)）



4. 4 期望频率法校正时域阶跃响应

(simulink 模型见[链接](#))



4. 5 四种校正方法时域频域性能表

校正方法		目标指标			
		时域		频域	
		超调	调节时间	相角裕度	剪切频率
		$\leq 30\%$	$< 0.7s$	$\geq 47.8^\circ$	相角裕度最小情况下 $> 12.71rad/s$
迟后优先	实际指标	18%	0.596	52	13
	是否满足	满足	满足	满足	满足
超前优先 (1)	微调前	实际指标	19.80%	51.5	13.1
		是否满足	满足	不满足	满足
	微调后	实际指标	16.00%	51.4	18.9
		是否满足	满足	满足	满足
超前优先 (2)	实际指标	23.8	0.651	48.2	14.1
	是否满足	满足	满足	满足	满足
期望频率法	实际指标	26%	0.553	48.8	12.6
	是否满足	满足	满足	满足	满足

由表可知，所有校正方法矫正后系统性能均满足要求，最终都实现了对原系统的性能校正。

附录：源代码及源 simulink 仿真模型

0 未校正系统-绘制 bode 图源代码

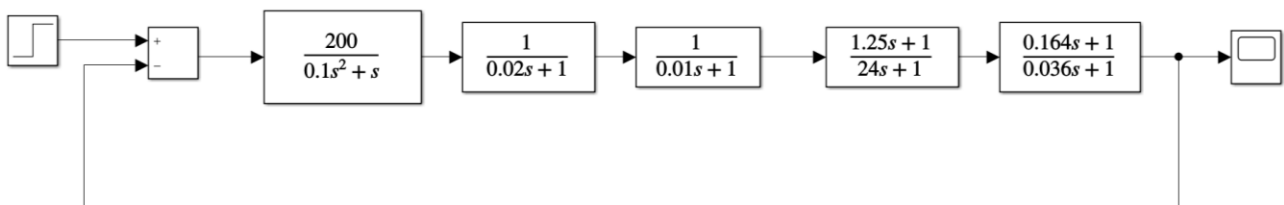
```
close all
num=200;
den=conv([0.1,1,0],[0.02,1]);
den=conv(den,[0.01,1]);
sys=tf(num,den);
figure,margin(sys),grid on
```

1.1 迟后优先-校正后系统绘制 bode 图源代码

```
close all
% (1) 迟后优先
num=200;
den=conv([0.1,1,0],[0.02,1]);
den=conv(den,[0.01,1]);
sys=tf(num,den);
figure,margin(sys),grid on
%加上迟后
sys=sys*tf([1.25,1],[24,1]);
figure,margin(sys),grid on
%加上超前
sys=sys*tf([0.164,1],[0.036,1]);
figure,margin(sys),grid on
```

1.2 迟后优先-校正后系统的阶跃响应 simulink 模型

(1) 迟后优先



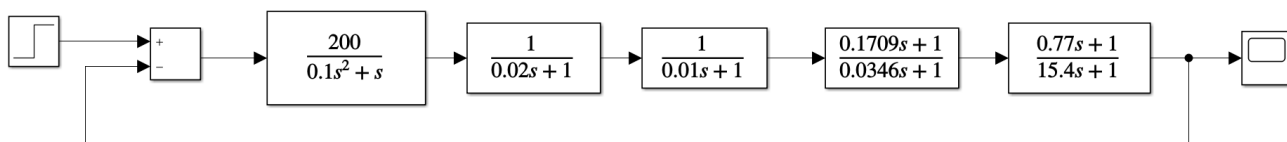
2.1 超前优先（迟后提高稳态精度）-校正后系统绘制 bode 图源代码

```
close all
% (2) 超前优先
num=10;
den=conv([0.1,1,0],[0.02,1]);
den=conv(den,[0.01,1]);
sys=tf(num,den);
figure,margin(sys),grid on
%加上超前
sys=sys*tf([0.1709,1],[0.0346,1]);
figure,margin(sys),grid on
%加上迟后
sys=sys*tf(20*[0.77,1],[15.4,1]);
figure,margin(sys),grid on

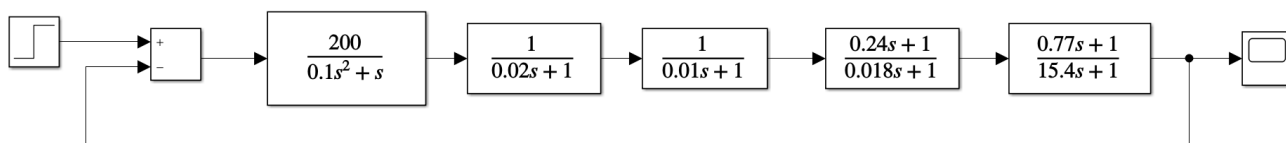
%微调后
num=10;
den=conv([0.1,1,0],[0.02,1]);
den=conv(den,[0.01,1]);
sys=tf(num,den);
sys=sys*tf([0.24,1],[0.018,1]);
sys=sys*tf(20*[0.77,1],[15.4,1]);
figure,margin(sys),grid on
```

2.2 超前优先（迟后提高稳态精度）-校正后系统的阶跃响应 simulink 模型

(2) 超前优先(迟后提高稳态精度)



(2) 超前优先(迟后提高稳态精度)（微调后）

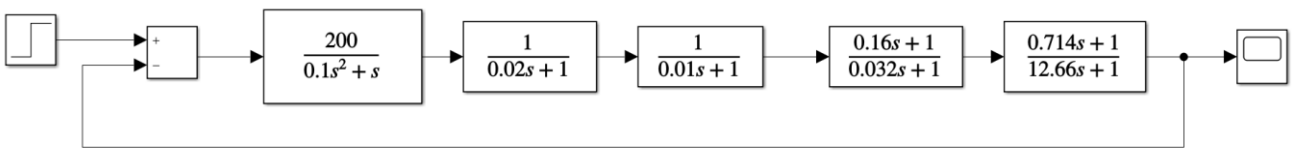


3.1 超前优先（迟后降低剪切频率）-校正后系统绘制 bode 图源代码

```
close all
% (3) 超前优先
num=200;
den=conv([0.1,1,0],[0.02,1]);
den=conv(den,[0.01,1]);
sys=tf(num,den);
figure,margin(sys),grid on
%加上超前
sys=sys*tf([0.16,1],[0.032,1]);
figure,margin(sys),grid on
%加上迟后
sys=sys*tf([0.714,1],[12.66,1]);
figure,margin(sys),grid on
```

3.2 超前优先（迟后降低剪切频率）-校正后系统的阶跃响应 simulink 模型

(3) 超前优先(迟后降低剪切频率)



4.1 期望频率法-校正后系统绘制 bode 图源代码

```
close all
% (4) 期望频率
num=200;
den=conv([0.1,1,0],[0.02,1]);
den=conv(den,[0.01,1]);
sys=tf(num,den);
figure,margin(sys),grid on
%加上期望校正环节
sys=sys*tf([0.33,1],[5.13,1]);
sys=sys*tf([0.1,1],[0.01,1]);
figure,margin(sys),grid on
```

4.2 期望频率法-校正后系统的阶跃响应 simulink 模型

(4) 期望频率

