

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：吴俊达

学号：210320621

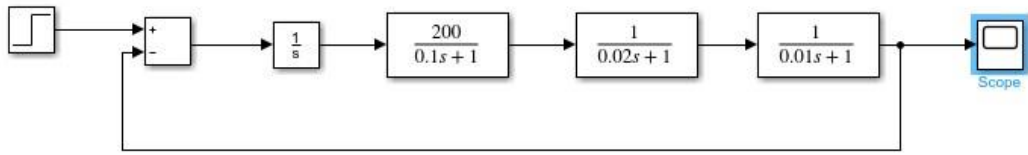
班级：21 级自动化 6 班

撰写日期：2024. 4. 28

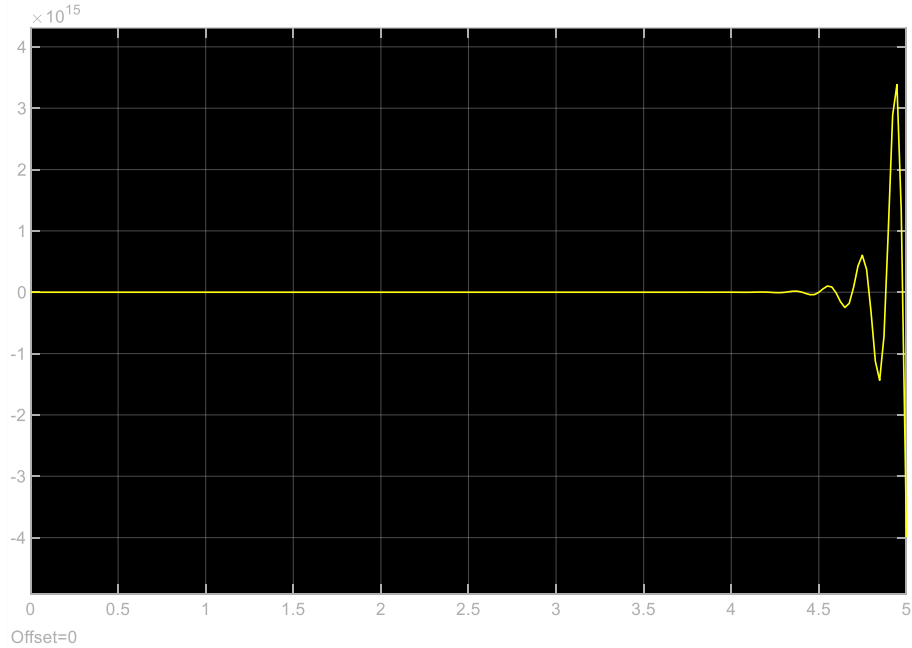
哈尔滨工业大学（深圳）

一、未校正系统的时域指标和频率性能

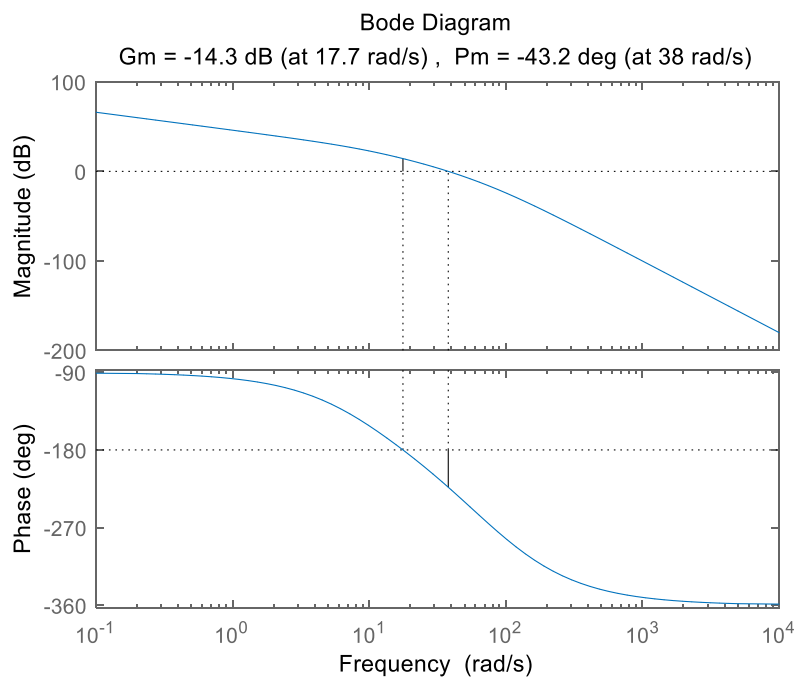
对原始系统搭建 Simulink 仿真框图如下：



阶跃响应曲线：（自 $T=1s$ 开始加入阶跃信号）



可见原系统的阶跃响应是发散的，超调为无穷大，调整时间也为无穷大。
未校正系统的 Bode 图：



绘制上图所用代码为:

```
den = conv(conv(conv([0.02,1],[0.1,1]),[1,0]),[0.01,1]);  
num = 200;  
H = tf(num,den);% 生成传递函数  
figure(1);  
margin(H);
```

可得系统的剪切频率为 38rad/s，相角裕度为 -43.2° ；相位穿越频率 17.7rad/s，幅值裕度 -14.3dB。

二、迟后-超前校正设计步骤

首先将时域性能指标转化为开环频域性能指标。根据经验公式

$$\sigma_p = 0.16 + 0.4(M_r - 1)$$

得 $M_r = \frac{1}{\sin \gamma} \leq 1.35$, 因此 $\gamma > 47.8^\circ$ 。又根据经验公式

$$t_s = \frac{\pi}{\omega_c} (2 + 1.5(M_r - 1) + 2.5(M_r - 1)^2)$$

得 $\omega_c \geq \frac{\pi(2+1.5 \times 0.35+2.5 \times 0.35^2)}{0.7} = 12.7 \text{rad/s}$, 为留有余量, 取 $\omega_c \geq 14 \text{rad/s}$ 。

下面计算原系统的剪切频率和相位裕度。之前已计算过, 原系统剪切频率 $\omega_c = 38 \text{rad/s}$, 相位裕度为 $\gamma_0 = -43.20^\circ$, 小于所要求的相位裕度, 且差距非常大, 超过 100° , 拟采用串联迟后-超前校正。

方法一：迟后校正环节优先的迟后-超前校正设计。

考虑到超前校正环节会增大剪切频率, 故将第一次校正后的期望剪切频率取为 8rad/s 。

使用剪切频率优先方法设计迟后校正环节。在所设计的频率 $\omega_{c1} = 8 \text{rad/s}$ 处, 由 Bode 图得, 未校正系统的幅值为 $20 \lg |G_0(j\omega_{c1})| = 25.67 \text{dB}$, 该幅值应由迟后校正环节拉回至 0dB 线, 因此 $20 \lg \beta = 25.67$, 得 $\beta = 19.22$ 。

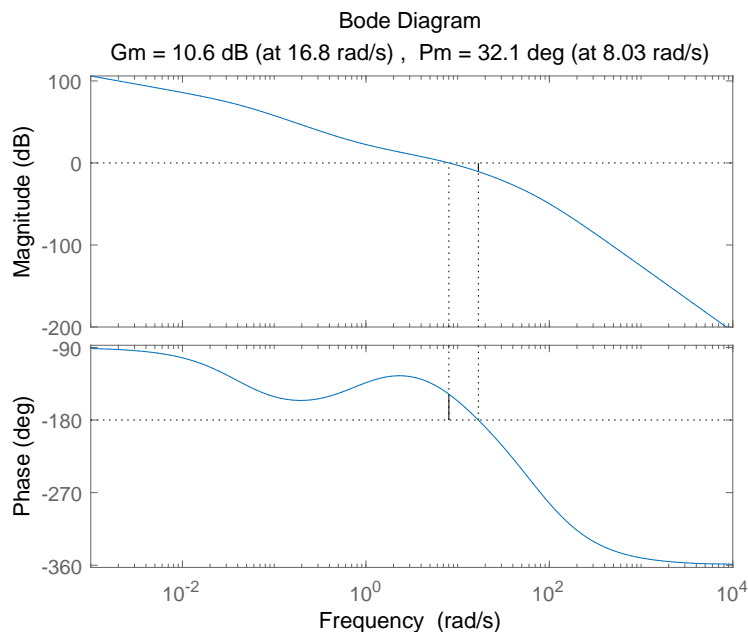
取 $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{10}\omega_c$, 得 $\tau = 1.25$, 则 $\beta\tau = 24.02$, 则迟后校正环节的传递函数为

$$G_{c1}(s) = \frac{1.25s + 1}{24.02s + 1}$$

检验系统性能指标: 校正后系统的传递函数为

$$G_1(s) = G_0(s)G_{c1}(s) = \frac{200(1.25s + 1)}{s(24.02s + 1)(0.01s + 1)(0.1s + 1)(0.02s + 1)}$$

绘制出系统精确 Bode 图如下:



从图中得出系统剪切频率 $\omega_{c1} = 8.03\text{rad/s}$ ，相位裕度为 $\gamma_1 = 32.1^\circ$ 。

接下来设计超前校正环节，采用相角裕度优先设计方法。考虑原系统在所需剪切频率下界处的相位储备。由 Bode 图得， $\gamma(\omega_{cL}) = 8.8^\circ$ ，则串联超前校正环节应提供的最大超前角

$$\varphi_m = \gamma - \gamma(\omega_{cL}) + \Delta = 48^\circ$$

其中取 $\Delta = 9^\circ$ 。由此得

$$\alpha = \frac{1 + \sin \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m} = 6.79$$

由 $-20\lg |G_0(j\omega_c)| = 10\lg \alpha$ ，在 Bode 图上找出对应频率点，得 $\omega_c = 14.58\text{rad/s}$ ，初步满足要求。

因此将超前校正环节提供最大超前角的频率与期望剪切频率对正，得

$$T = \frac{1}{14.58\sqrt{6.79}} = 0.0263$$

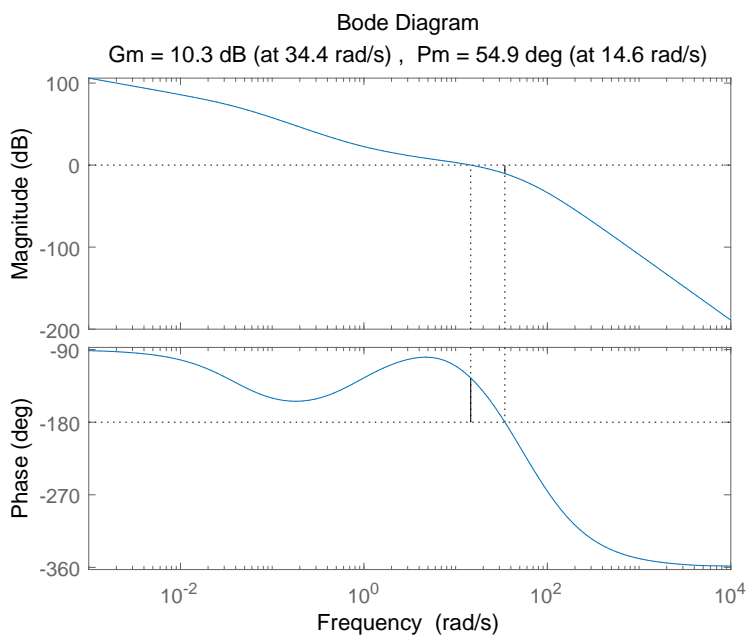
因此校正环节传递函数是

$$G_c(s) = \frac{0.179s + 1}{0.0263s + 1}$$

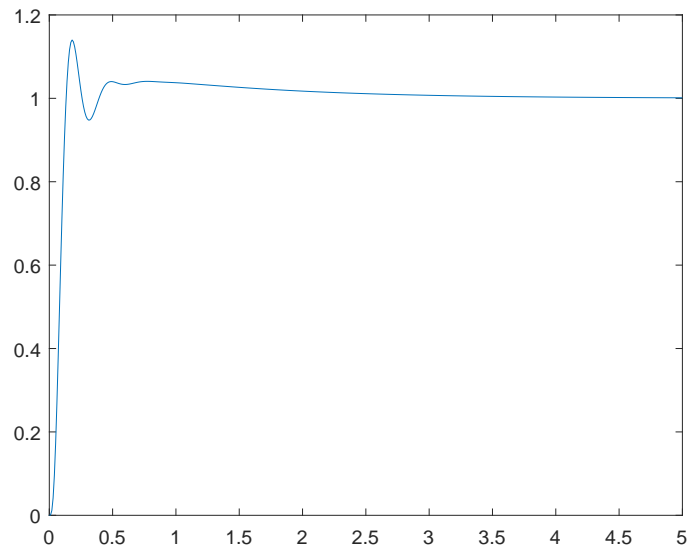
校正后系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{200(1.25s + 1)(0.179s + 1)}{s(24.02s + 1)(0.01s + 1)(0.1s + 1)(0.02s + 1)(0.0263s + 1)}$$

检验校正后系统的性能指标。利用 MATLAB 绘制出精确 Bode 图。利用精确幅频特性计算出：系统的剪切频率为 14.6rad/s ，相位裕度为 54.9° 。



再绘制出单位阶跃响应。



可计算得，超调量约为 13.98%，调整时间（5%）约为 0.32s，满足设计要求。
所用完整源代码如下：

```

1  lagfreq = 8; % 迟后校正目标频率为 8
2  den = conv(conv(conv([0.02,1],[0.1,1]),[1,0]),[0.01,1]);
3  num = 200;
4  H = tf(num,den);% 生成传递函数
5  mag = bode(H,lagfreq);
6  disp(20*log10(mag));
7
8  % 计算迟后校正环节时间常数
9  Time_const = 10/lagfreq;
10 Time_const = round(Time_const, 2);% 取二位小数
11 betaTime = round(Time_const * mag,2);
12 disp(Time_const);
13 disp(betaTime);
14
15 den1 = [betaTime,1];
16 den2 = conv(conv(conv([0.02,1],[0.1,1]),[1,0]),[0.01,1]);
17 num = 200*[Time_const,1];
18 H1 = tf(num,conv(den1,den2)); % 第 1 次校正后传递函数
19 figure(1);
20 margin(H1);
21
22 [~,Phasedeg] = bode(H1,14);
23 disp(180+Phasedeg); % 计算剪切频率下界处的相位储备
24
25 % 度数取整
26 expectDegree = 48;
27 alpha = (1+sind(48))/(1-sind(48));
28 disp(alpha); % 计算 alpha
29
30 % 计算某频率点处的幅值，需要和 -10lg(alpha) 接近
31 for omega=5:0.01:30
32     mag = bode(H1,omega);

```

```

33     if abs(20*log10(mag)+10*log10(alpha)) <=0.01
34         disp(omega);
35         break
36     end
37 end
38
39 % 计算超前校正环节时间常数
40 Time_const_2 = round(1/sqrt(alpha)/omega,3,'significant');
41 alphaTime = round(1/sqrt(alpha)/omega * alpha,3,'significant');
42 disp(Time_const_2);
43 disp(alphaTime);
44
45 den1 = conv([betaTime,1],[Time_const_2,1]);
46 den2 = conv(conv(conv([0.02,1],[0.1,1]),[1,0]),[0.01,1]);
47 num = 200*conv([Time_const,1],[alphaTime,1]);
48 H2 = tf(num,conv(den1,den2));% 第 2 次校正后传递函数
49 figure(2);
50 margin(H2);
51 figure(3);
52 [res,T] = step(feedback(H2,1),0:0.01:5);
53 plot(T,res,'-');
54
55 n=length(T);
56 max_indicator = 0;
57 for i=2:1:n-1
58     if res (i) >= max_indicator
59         Tp = T(i);
60         max_indicator = res (i);
61     end
62 end
63 sigma = max_indicator-1
64
65 for i=n:-1:1
66     if res (i)>=1.05 | res(i)<=0.95
67         Ts = T(i)
68     break
69 end
70 end

```

方法二：超前校正环节优先的迟后-超前校正设计①。

将开环增益降低为 $K_1 = 10$ 后的系统为

$$G_{01}(s) = \frac{10}{s(0.01s + 1)(0.1s + 1)(0.02s + 1)}$$

利用 Bode 图计算得该系统的剪切频率为 $\omega_{c01} = 7.78\text{rad/s}$ ，小于所要求的剪切频率。相位裕度为 38.84° ，不足设计要求。

先采用相位裕度优先超前校正设计。 $G_{01}(s)$ 和 $G_0(s)$ 在所要求的剪切频率下界处相位储备相等，即 $\gamma_{01}(14) = 11.93^\circ$ 。考虑到校正环节对目标剪切频率的影响，取附加相角 $\Delta_1 = 8.13^\circ$ ；又考虑到迟后环节的相位延迟，取附加相角 $\Delta_2 = 6^\circ$ 。于是超前环节应提供的超前相角

$$\varphi_m = \gamma - \gamma_{01}(14) + \Delta_1 + \Delta_2 = 50^\circ$$

则

$$\alpha = \frac{1 + \sin \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m} = 7.55$$

在校正后系统的剪切频率 ω_c 处，原系统的幅值应由超前环节拉回 0dB 线。因此应有

$$20 \lg |G_{01}(j\omega_c)| = -10 \lg \alpha$$

由 Bode 图得 $\omega_c = 14.68\text{rad/s}$ ，满足设计要求。

将超前校正环节提供最大超前角的频率与期望剪切频率对正，则超前环节的时间常数为

$$T = \frac{1}{14.68 \times \sqrt{7.55}} = 0.0248$$

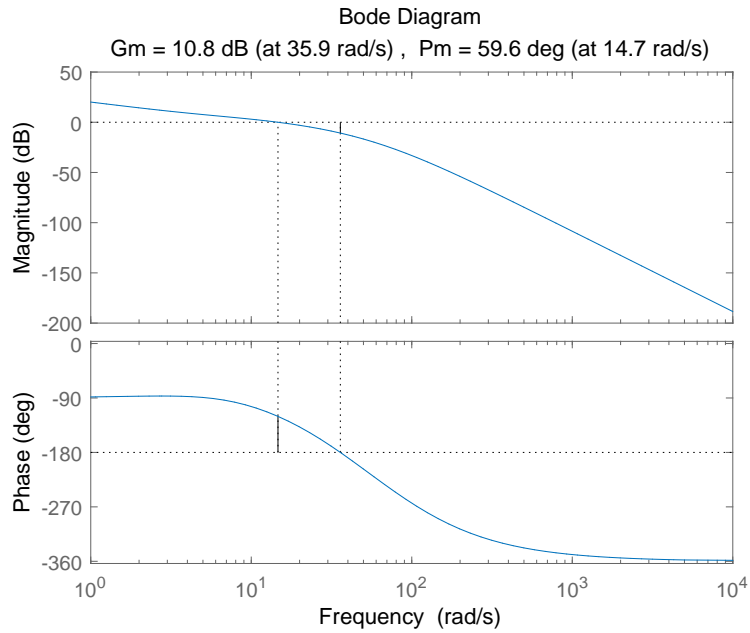
则超前校正环节的传递函数是

$$G_{c1}(s) = \frac{0.187s + 1}{0.0248s + 1}$$

经过超前校正后的系统是

$$G_1(s) = \frac{10(0.187s + 1)}{s(0.01s + 1)(0.1s + 1)(0.02s + 1)(0.0248s + 1)}$$

利用精确幅频特性计算得，剪切频率为 14.7rad/s ，相位裕度是 59.6° ，满足设计要求。



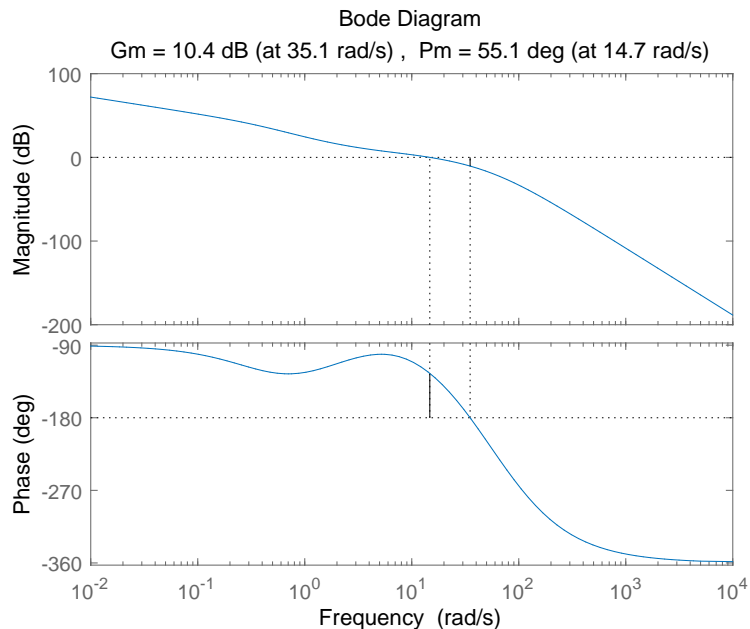
接下来利用迟后校正环节提高系统的稳态精度。将系统的开环增益增加至 40，经过上一步校正后系统的开环增益是 10，因此迟后校正环节的参数 $\beta = 4$ 。取 $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{10}\omega_c$ ，得 $\tau = 0.682$ ，于是迟后校正环节的传递函数是

$$G_{c2}(s) = 4 \frac{0.682s + 1}{2.727s + 1}$$

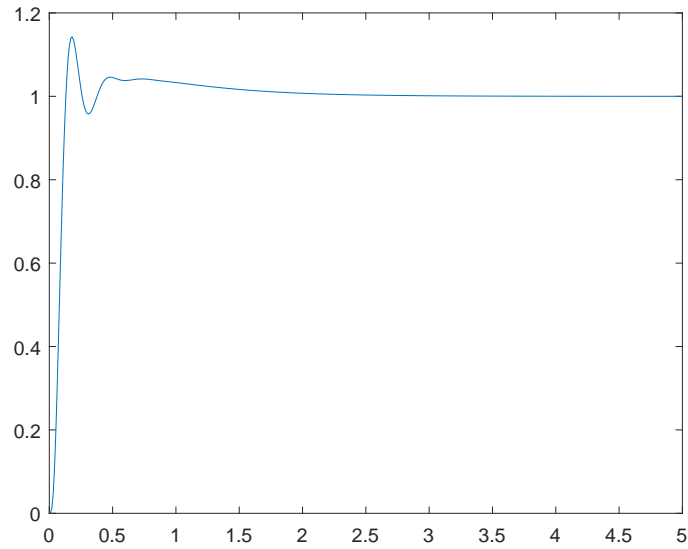
因此，校正后系统的传递函数是

$$G(s) = \frac{40(0.187s + 1)(0.682s + 1)}{s(0.2s + 1)(0.01s + 1)(0.1s + 1)(0.0248s + 1)(2.727s + 1)}$$

利用精确幅频特性计算得，剪切频率为 14.7rad/s，相位裕度是 55.1°，初步满足设计要求。



再绘制出单位阶跃响应并计算得，超调量约为 14.25%，调整时间（5%）约为 0.23s，满足设计要求。



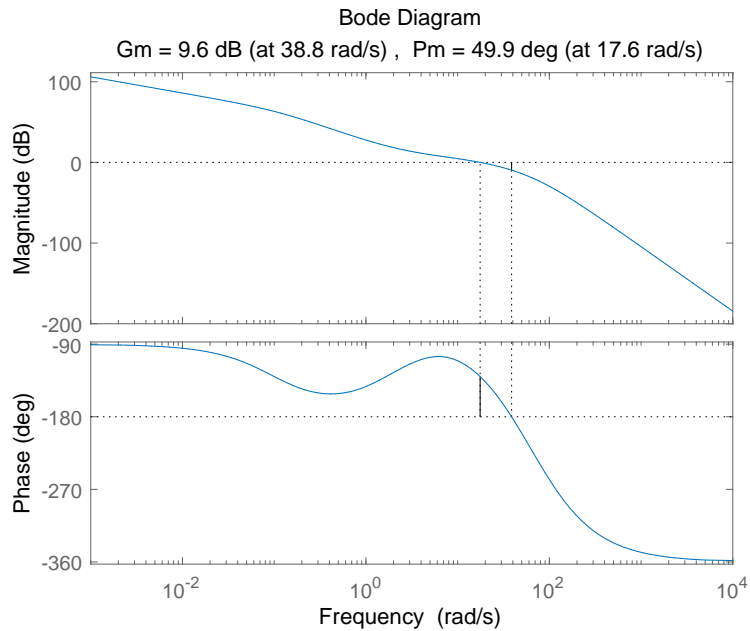
若欲使开环增益与原系统相同，类似上面步骤设计迟后校正环节，经检验得调节时间不符合要求，则需返回修改第一步中的剪切频率，修改为 16rad/s，并调整降低后的增益为 12（原增益 10 不能满足该剪切频率要求）。类似上述步骤设计得

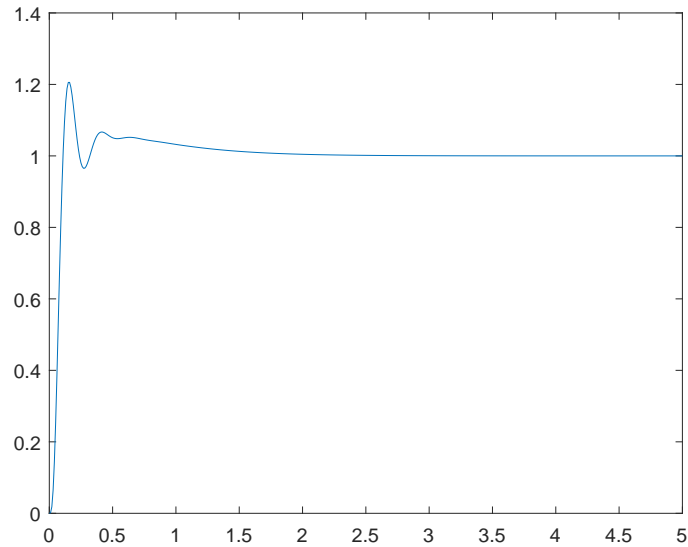
$$G_{c1}(s) = \frac{0.181s + 1}{0.0180s + 1}$$

$$G_{c2}(s) = 16.67 \frac{0.570s + 1}{9.508s + 1}$$

$$G(s) = \frac{200(0.181s + 1)(0.570s + 1)}{s(0.2s + 1)(0.01s + 1)(0.1s + 1)(0.0180s + 1)(9.508s + 1)}$$

剪切频率为 17.6rad/s，相位裕度是 49.9°，超调量约为 20.57%，调整时间（5%）约为 0.68s，满足设计要求。





所用完整源代码如下：

```

1  decreaseGain = 10;
2  den1 = [0,1];
3  den2 = conv(conv(conv([0.02,1],[0.1,1]),[1,0]),[0.01,1]);
4  num = decreaseGain;
5  H = tf(num,conv(den1,den2));% 生成传递函数
6  [Gm,Pm,Wcg,Wcp] = margin(H);%Gm 幅值裕度 Pm 相角裕度 Wcg 穿越频率 Wcp 剪切频率
7  disp(Wcp);
8  disp(Pm);
9
10 [-,phasedeg]=bode(H,14);
11 Storage = 180+phasedeg;% 计算系统在期望剪切频率下界处的相位储备
12 disp(Storage);
13
14 Phase_new = 50;
15 alpha = (1+sind(Phase_new))/(1-sind(Phase_new));
16 disp(alpha); % 计算 alpha
17
18 % 计算某频率点处的幅值，需要和-10lg(alpha) 接近
19 for omega=5:0.01:30
20     mag = bode(H,omega);
21     if abs(20*log10(mag)+10*log10(alpha)) <=0.01
22         disp(omega);
23         break
24     end
25 end
26
27 % 计算超前校正环节时间常数
28 Time_const = 1/sqrt(alpha)/omega;
29 alphaTime = round(Time_const * alpha,3,'significant');
30 Time_const = round(Time_const,3,'significant');
31 disp(Time_const);
32 disp(alphaTime);
33

```

```

34 figure(1);
35 den1 = [Time_const,1];
36 den2 = conv(conv(conv([0.02,1],[0.1,1]),[1,0]),[0.01,1]);
37 num = decreaseGain*[alphaTime,1];
38 H1 = tf(num,conv(den1,den2));% 第一次校正后传递函数
39 margin(H1);
40 [~,~,~,Wcp] = margin(H1);
41
42 % 计算迟后校正环节时间常数
43 Gain = 40;
44 Time_const_2 = 10/Wcp;
45 mag = Gain/decreaseGain;
46 betaTime = round(Time_const_2 * mag,3);
47 Time_const_2 = round(Time_const_2,3);
48 disp(Time_const_2);
49 disp(betaTime);
50
51 den1 = conv([betaTime,1],[Time_const,1]);
52 den2 = conv(conv(conv([0.02,1],[0.1,1]),[1,0]),[0.01,1]);
53 num = Gain*conv([alphaTime,1],[Time_const_2,1]);
54 H2 = tf(num,conv(den1,den2));% 第 2 次校正后传递函数
55 figure(2);
56 margin(H2);
57 figure(3);
58 [res,T] = step(feedback(H2,1),0:0.01:5);
59 plot(T,res,'-');
60
61 n=length(T);
62 max_indicator = 0;
63 for i=2:1:n-1
64 if res (i) >= max_indicator
65 Tp = T(i);
66 max_indicator = res (i);
67 end
68 end
69 sigma = max_indicator-1
70
71 for i=n:-1:1
72 if res (i)>=1.05 | res(i)<=0.95
73 Ts = T(i)
74 break
75 end
76 end

```

方法三：超前校正环节优先的迟后-超前校正设计②。

首先，利用超前环节提高所需剪切频率点的相位裕度。类似上一种方法，取超前相角为 $\varphi_m = 43^\circ$ （此时 $\Delta_1 = 1.13^\circ$ 。此种方法的余量可取小些），则 $\alpha = 5.289$ 。之后，将超前校正环节提供最大超前角的频率与期望剪切频率对正，则超前环节的时间常数为

$$T = \frac{1}{14 \times \sqrt{5.289}} = 0.0310$$

则超前校正环节的传递函数是

$$G_{c1}(s) = \frac{0.164s + 1}{0.0310s + 1}$$

经过超前校正后的系统是

$$G_1(s) = \frac{200(0.164s + 1)}{s(0.01s + 1)(0.1s + 1)(0.02s + 1)(0.0310s + 1)}$$

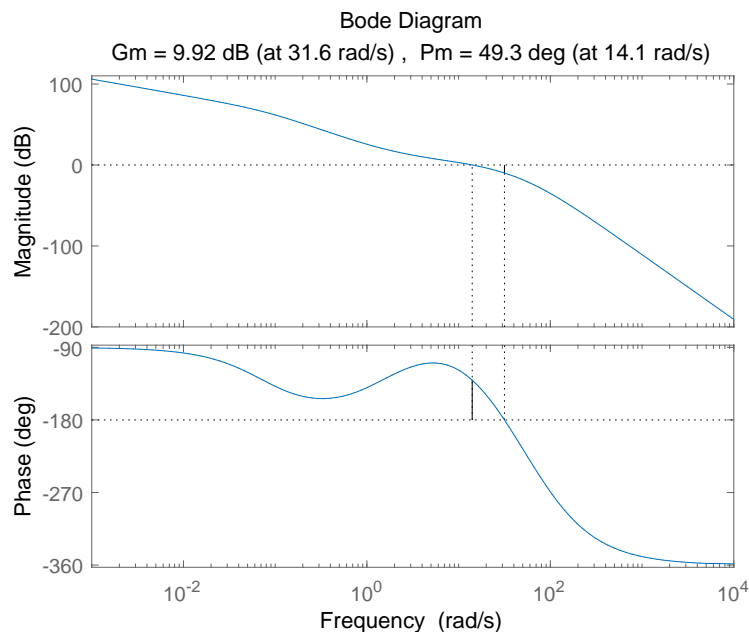
其在预期的剪切频率处的幅值是 $|G_1(j14)| = 18.192$ ，该幅值应由迟后校正环节拉回至 0dB 线，因此 $\beta = 18.192$ 。取 $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{10}\omega_c$ ，得 $\tau = 0.714$ ，于是迟后校正环节的传递函数是

$$G_{c2}(s) = \frac{0.714s + 1}{12.994s + 1}$$

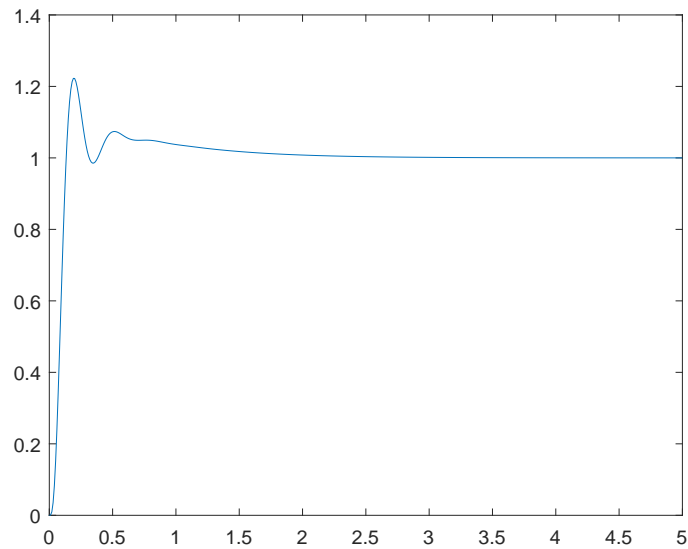
因此，校正后系统的传递函数是

$$G(s) = \frac{200(0.164s + 1)(0.714s + 1)}{s(0.01s + 1)(0.1s + 1)(0.02s + 1)(0.0310s + 1)(12.994s + 1)}$$

精确 Bode 图如下。利用精确幅频特性计算得，剪切频率为 14.1rad/s，相位裕度是 49.3°。



根据阶跃响应计算出，超调量 22.24%，调整时间（5%）约为 0.66s，满足设计要求。



所用完整源代码如下：

```

1   Expectomega = 14;
2   den1 = [0,1];
3   den2 = conv(conv(conv([0.02,1],[0.1,1]),[1,0]),[0.01,1]);
4   num = 10;
5   H = tf(num,conv(den1,den2));% 生成传递函数
6   [Gm,Pm,Wcg,Wcp] = margin(H);%Gm 幅值裕度 Pm 相角裕度 Wcg 穿越频率 Wcp 剪切频率
7   disp(Wcp);
8   disp(Pm);
9
10  [~,phasedeg]=bode(H,Expectomega);
11  Storage = 180+phasedeg;% 相位储备
12  disp(Storage);
13
14  Phase_new = 43;
15  alpha = (1+sind(Phase_new))/(1-sind(Phase_new));
16  disp(alpha); % 计算 alpha
17
18  % 计算超前校正环节时间常数
19  Time_const = 1/sqrt(alpha)/Expectomega;
20  Time_const = round(Time_const, 3); % 保留小数点后 3 位
21  disp(Time_const);
22  alphaTime = round(1/sqrt(alpha)/Expectomega * alpha, 3); % 保留小数点后 3 位
23  disp(alphaTime);
24
25  den1 = [Time_const,1];
26  den2 = conv(conv(conv([0.02,1],[0.1,1]),[1,0]),[0.01,1]);
27  num = 200*[alphaTime,1];
28  H1 = tf(num,conv(den1,den2));% 第 1 次校正后传递函数
29  [beta,Phasedeg] = bode(H1,Expectomega);
30  disp(20*log10(beta));
31
32  % 计算迟后校正环节参数
33  disp(beta);

```

```

34 Time_const_2 = round(10/Expectomega, 3);
35 betaTime = round(10/Expectomega* beta, 3); % 保留小数点后 3 位
36 disp(Time_const_2);
37 disp(betaTime);
38
39 den1 = conv([Time_const,1],[betaTime,1]);
40 den2 = conv(conv(conv([0.02,1],[0.1,1]),[1,0]),[0.01,1]);
41 num = 200*conv([alphaTime,1],[Time_const_2,1]);
42 H2 = tf(num,conv(den1,den2));% 校正后传递函数
43 figure(1);
44 margin(H2);
45 figure(2);
46 [res,T] = step(feedback(H2,1),0:0.01:5);
47 plot(T,res,'-');
48
49 % 计算超调量
50 n=length(T);
51 max_indicator = 0;
52 for i=2:1:n-1
53     if res (i) >= max_indicator
54         Tp = T(i);
55         max_indicator = res (i);
56     end
57 end
58 sigma = max_indicator-1
59
60 % 计算 5% 调整时间
61 for i=n:-1:1
62     if res (i)>=1.05 | res(i)<=0.95
63         Ts = T(i)
64         break
65     end
66 end

```

三、期望频率特性法设计步骤

取期望的剪切频率为 15rad/s 。根据相角裕度要求，取

$$h = \frac{1 + \sin 48^\circ}{1 - \sin 48^\circ} = 6.79$$

利用对称最佳方法确定中频段，则

$$\omega_2 \leq 15/\sqrt{6.79} = 5.76\text{rad/s}, \quad \omega_3 \geq 15\sqrt{6.79} = 39.09\text{rad/s}$$

取 $\omega_2 = 4\text{rad/s}$, $\omega_3 = 50\text{rad/s}$, 中频段斜率取 -20dB/dec , 其中中频段频率上界利用原系统的转折频率。另外, 消去原有的转折频率 10rad/s 。

下面, 确定中频段与低频段衔接段的下限频率 ω_1 : 中频段的对数幅频特性是

$$20 \lg 200 - 20 \lg \omega - 20 \lg(\omega/\omega_1) + 20 \lg(\omega/\omega_2)$$

因为中频段过剪切频率点, 所以上式在剪切频率处应等于 0。则

$$\frac{200\omega_1}{\omega_2\omega_c} = 1$$

因此 $\omega_1 = 0.32\text{rad/s}$ 。

在高频段再加入一个转折频率 200rad/s , 以使高频段斜率更负, 抑制干扰能力更强, 也使传递函数在物理上可实现。于是校正环节传递函数是

$$G_c(s) = \frac{(0.25s + 1)(0.1s + 1)}{(3.125s + 1)(0.005s + 1)}$$

因此, 校正后系统的传递函数是

$$G(s) = \frac{200(0.25s + 1)}{s(0.01s + 1)(3.125s + 1)(0.005s + 1)(0.02s + 1)}$$

利用精确幅频特性计算得, 剪切频率为 15.5rad/s , 相位裕度是 46.2° , 不满足设计要求, 返回修改中频段剪切频率下界。(事实上, 绘制出阶跃响应, 发现超调量为 29.41% , 调整时间 0.4s , 已满足要求, 但仍继续设计)

增大中频段宽度, 取 $\omega_2 = 2\text{rad/s}$, $\omega_3 = 50\text{rad/s}$, 中频段斜率取 -20dB/dec , 其中中频段频率上界利用原系统的转折频率。另外, 消去原有的转折频率 10rad/s 。

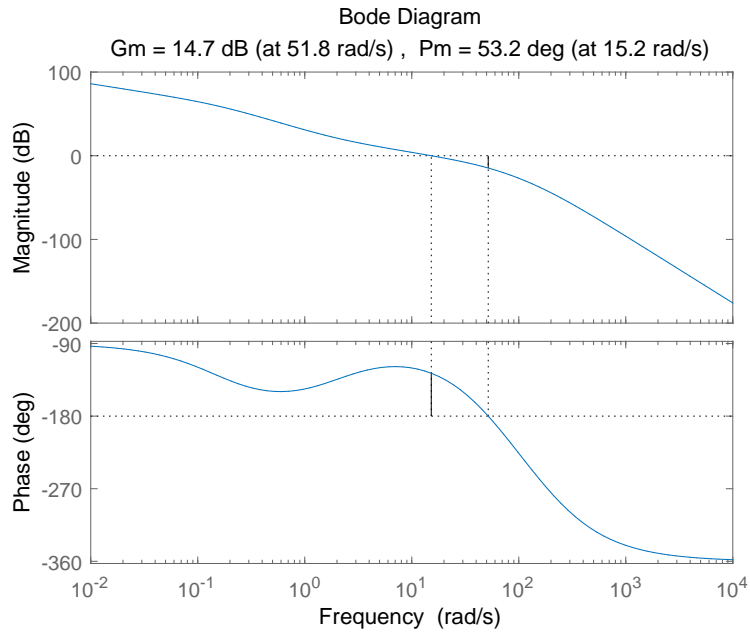
类似上述方法确定中频段与低频段衔接段的下限频率 $\omega_1 = 0.16\text{rad/s}$, 同样在高频段再加入一个转折频率 200rad/s , 于是校正环节传递函数是

$$G_c(s) = \frac{(0.5s + 1)(0.1s + 1)}{(6.25s + 1)(0.005s + 1)}$$

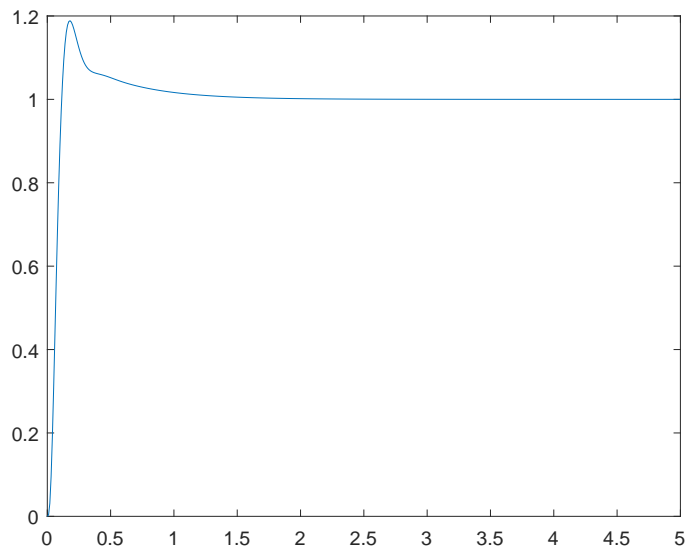
因此, 校正后系统的传递函数是

$$G(s) = \frac{200(0.5s + 1)}{s(0.01s + 1)(6.25s + 1)(0.005s + 1)(0.02s + 1)}$$

精确 Bode 图如下, 利用精确幅频特性计算得, 剪切频率为 15.2rad/s , 相位裕度是 53.2° 。



绘制出单位阶跃响应如下。根据阶跃响应计算出，超调量 18.86%，调整时间（5%）约为 0.51s，满足设计要求。



另注：若确定中频段时利用剪切频率错位方法，则 $\omega_2 \leq 15 \times \frac{2}{6.79+1} = 3.85\text{rad/s}$ ， $\omega_3 \geq 15 \times \frac{2 \times 6.79}{6.79+1} = 26.15\text{rad/s}$ ；若利用最小峰值法，则取 $M_r = 1.3$ ，求得 $\omega_2 \leq 15 \times \frac{0.3}{1.3} = 3.46\text{rad/s}$ ， $\omega_3 \geq 15 \times \frac{2.3}{1.3} = 26.54\text{rad/s}$ 。则直接选用上述第二种频率即可很好地满足要求。此种设计方法中 MATLAB 仅用于检验，故源代码不再列出。

四、校正后系统的时域指标和频域性能

如下表所示。表中所有调整时间均为 5% 调整时间。超前环节优先的迟后-超前校正设计了两个系统，分别是增益为 40 和 200（与原系统相同）的情形。

| 校正方式 | 传递函数 | 频域性能指标 | 时域性能指标 |
|-----------------|---|--|---|
| 无校正 | $\frac{200}{s(0.01s+1)(0.1s+1)(0.02s+1)}$ | $\omega_c = 38\text{rad/s}, \gamma = -43.2^\circ$ | 阶跃响应发散, $\sigma = \infty, t_s = \infty$ |
| 迟后环节优先的迟后-超前校正 | $\frac{200(1.25s+1)(0.179s+1)}{s(24.02s+1)(0.01s+1)(0.1s+1)(0.02s+1)(0.0263s+1)}$ | $\omega_c = 14.6\text{rad/s}, \gamma = 54.9^\circ$ | $\sigma = 13.98\%, t_s = 0.32\text{s}$ |
| 超前环节优先的迟后-超前校正① | $\frac{40(0.187s+1)(0.682s+1)}{s(0.2s+1)(0.01s+1)(0.1s+1)(0.0248s+1)(2.727s+1)}$ | $\omega_c = 14.7\text{rad/s}, \gamma = 55.1^\circ$ | $\sigma = 14.25\%, t_s = 0.23\text{s}$ |
| 超前环节优先的迟后-超前校正① | $\frac{200(0.181s+1)(0.570s+1)}{s(0.2s+1)(0.01s+1)(0.1s+1)(0.0180s+1)(9.508s+1)}$ | $\omega_c = 17.6\text{rad/s}, \gamma = 49.9^\circ$ | $\sigma = 20.57\%, t_s = 0.68\text{s}$ |
| 超前环节优先的迟后-超前校正② | $\frac{200(0.164s+1)(0.714s+1)}{s(0.01s+1)(0.1s+1)(0.02s+1)(0.0310s+1)(12.994s+1)}$ | $\omega_c = 14.1\text{rad/s}, \gamma = 49.3^\circ$ | $\sigma = 22.24\%, t_s = 0.66\text{s}$ |
| 期望频率特性法 | $\frac{200(0.5s+1)}{s(0.01s+1)(6.25s+1)(0.005s+1)(0.02s+1)}$ | $\omega_c = 15.2\text{rad/s}, \gamma = 53.2^\circ$ | $\sigma = 18.86\%, t_s = 0.51\text{s}$ |

对比利用经验公式计算的时域指标和实际时域指标：

| 校正方式 | 频域性能指标 | 利用经验公式计算的时域性能指标 | 时域性能指标 |
|-----------------|--|---|---|
| 无校正 | $\omega_c = 38\text{rad/s}, \gamma = -43.2^\circ$ | 不在经验公式适用范围内 | 阶跃响应发散, $\sigma = \infty, t_s = \infty$ |
| 迟后环节优先的迟后-超前校正 | $\omega_c = 14.6\text{rad/s}, \gamma = 54.9^\circ$ | $\sigma = 24.89\%, t_s = 0.529\text{s}$ | $\sigma = 13.98\%, t_s = 0.32\text{s}$ |
| 超前环节优先的迟后-超前校正① | $\omega_c = 14.7\text{rad/s}, \gamma = 55.1^\circ$ | $\sigma = 24.77\%, t_s = 0.523\text{s}$ | $\sigma = 14.25\%, t_s = 0.23\text{s}$ |
| 超前环节优先的迟后-超前校正① | $\omega_c = 17.6\text{rad/s}, \gamma = 49.9^\circ$ | $\sigma = 28.29\%, t_s = 0.481\text{s}$ | $\sigma = 20.57\%, t_s = 0.68\text{s}$ |
| 超前环节优先的迟后-超前校正② | $\omega_c = 14.1\text{rad/s}, \gamma = 49.3^\circ$ | $\sigma = 28.76\%, t_s = 0.609\text{s}$ | $\sigma = 22.24\%, t_s = 0.66\text{s}$ |
| 期望频率特性法 | $\omega_c = 15.2\text{rad/s}, \gamma = 53.2^\circ$ | $\sigma = 25.95\%, t_s = 0.522\text{s}$ | $\sigma = 18.86\%, t_s = 0.51\text{s}$ |

经验公式与实际指标有较大差别，但仍有指导意义。