

反馈控制闭环直流调速系统的 动态校正

主讲人：巩冰 讲师

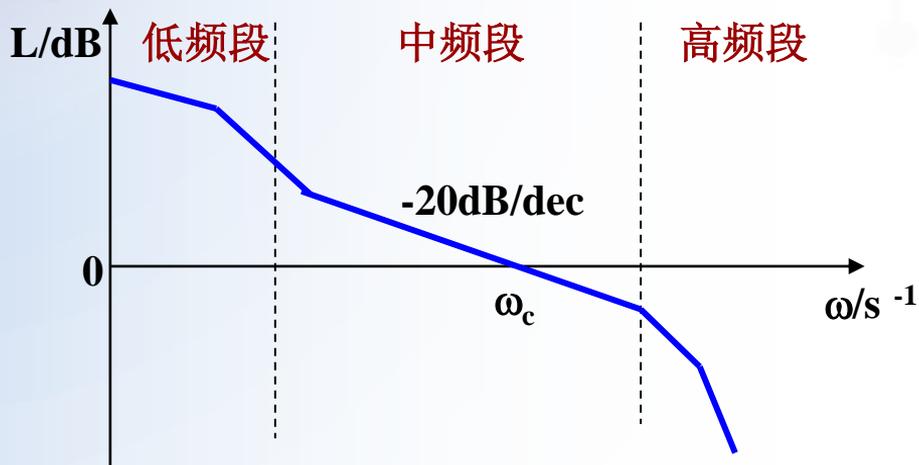
PID调节器

- **PD调节器**：可构成超前校正，能够提高系统的稳定裕度，并获得足够的快速性，但稳态精度可能受到影响；
- **PI调节器**：可构成滞后校正，能够保证稳态精度，但对快速性加以限制来保证系统稳定；
- **PID调节器**：可实现滞后-超前校正，兼具前两者的优点，能够全面提高系统的控制性能，但具体实现与调试复杂。

PID调节器

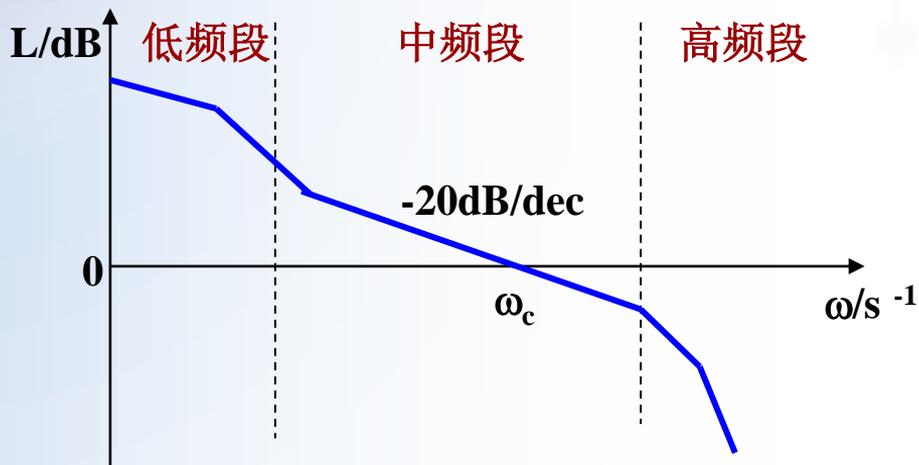
- 一般调速系统要求以动态稳定性和稳态精度为主，对快速性的要求可以低一些，所以主要采用PI调节器；
- 随动系统中，快速性是主要要求，须用PD或PID调节器。

典型伯德图



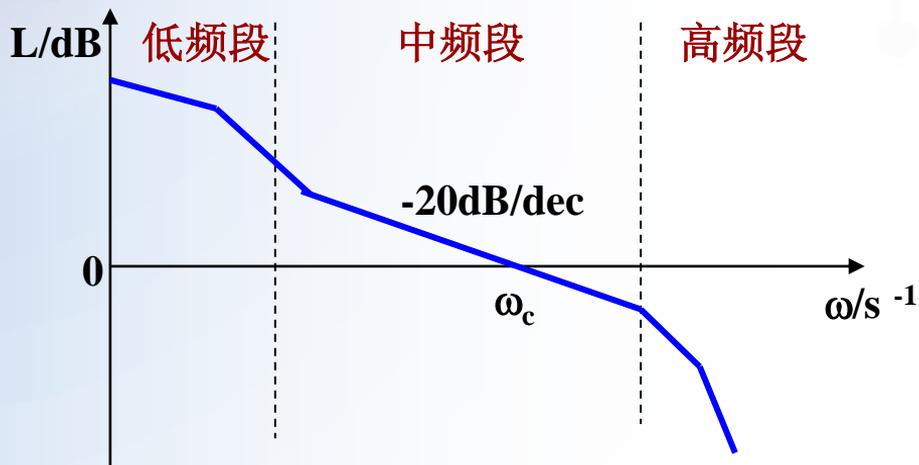
- **低频段:** 通常是指开环对数幅频曲线在第一转折频率以前的区段，由积分环节和开环增益决定。

典型伯德图



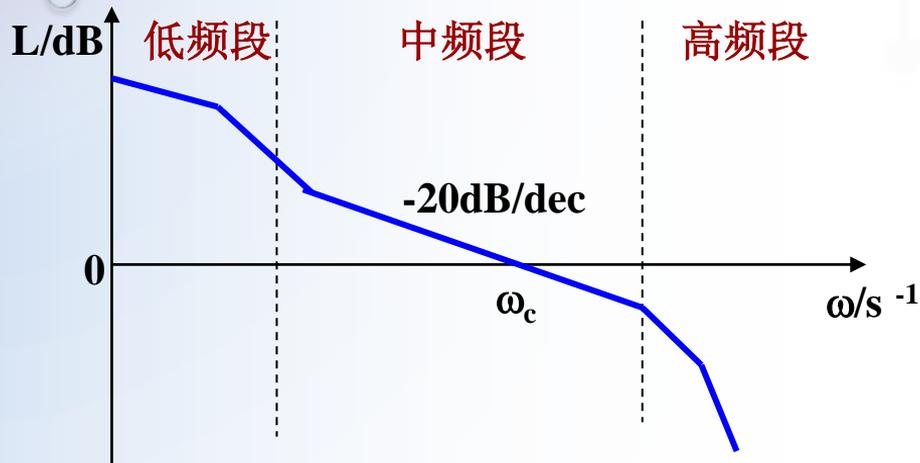
- **中频段：** 在截止频率 ω_c 附近（或0dB附近）的区域。反映闭环系统动态响应的稳定性和快速性。

典型伯德图



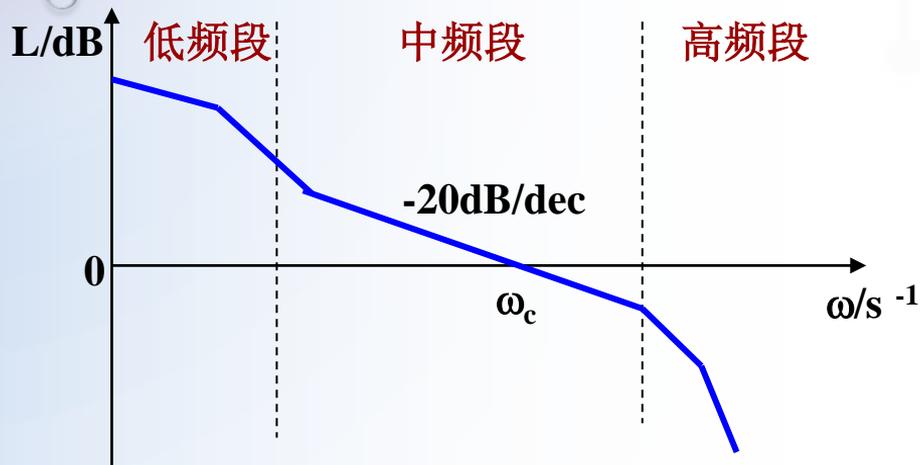
- **高频段**：一般指 $\omega > 10\omega_c$ 的区段。对动态响应影响不大，可近似处理。

伯德图与系统性能的关系



- ◆ **低频段：**斜率陡（对应无差度）、增益高（对应K值），则稳态精度高（静差率、调速范围）；
- ◆ **中频段：**以 -20dB/dec 斜率穿越 0dB 分贝线，且这一斜率有足够的频带宽度，则稳定性好；

伯德图与系统性能的关系



- ◆ **高频段**：衰减快，抗高频噪声干扰能力强；
- ◆ **截止频率**：越高，系统快速性越好，但容易引入高频干扰。

伯德图上衡量的控制系统稳定裕度

➤ 相角裕度 γ

与截止频率对应的开环相频特性的函数值与 -180° 的差值。

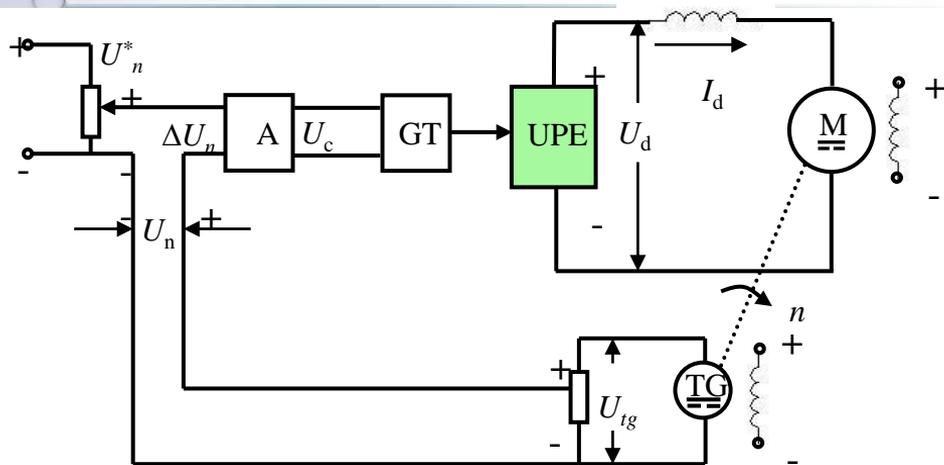
$$\gamma = 30^\circ \sim 60^\circ$$

➤ 增益裕度 GM

与 -180° 对应的开环幅频特性的函数值倒数。

$$GM > 6\text{dB}$$

动态校正实例



如图所示的反馈闭环直流调速系统中，放大器环节 $K_p=21$ ，整流环节 $K_s=44$ ，反馈系数 $\alpha=0.01158\text{V}\cdot\text{min}/\text{r}$ ，电动机电动势系数 $C_e=0.1925\text{V}\cdot\text{min}/\text{r}$ 。已知 $T_s=0.00167\text{s}$ ， $T_l=0.017\text{s}$ ， $T_m=0.075\text{s}$ 。试设计PI调节器，使系统能在保证稳态性能要求下稳定运行。

解：（1）原始系统的开环对数频率特性

$$W(s) = \frac{K}{(T_s s + 1)(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}$$

$$T_m = 0.075s, \quad T_l = 0.017s, \quad T_s = 0.00167s$$

显然， $T_m > 4T_l$ ，则

$$\begin{aligned} T_m T_l s^2 + T_m s + 1 &= 0.001275s^2 + 0.075s + 1 \\ &= (0.049s + 1)(0.026s + 1) \end{aligned}$$

$$K = \frac{K_p K_s \alpha}{C_e} = \frac{21 \times 44 \times 0.01158}{0.1925} = 55.58$$

则原始系统的开环传递函数为

$$W(s) = \frac{55.58}{(0.049s + 1)(0.026s + 1)(0.00167s + 1)}$$

$$W(s) = \frac{55.58}{(0.049s + 1)(0.026s + 1)(0.00167s + 1)}$$

➤ 转折频率

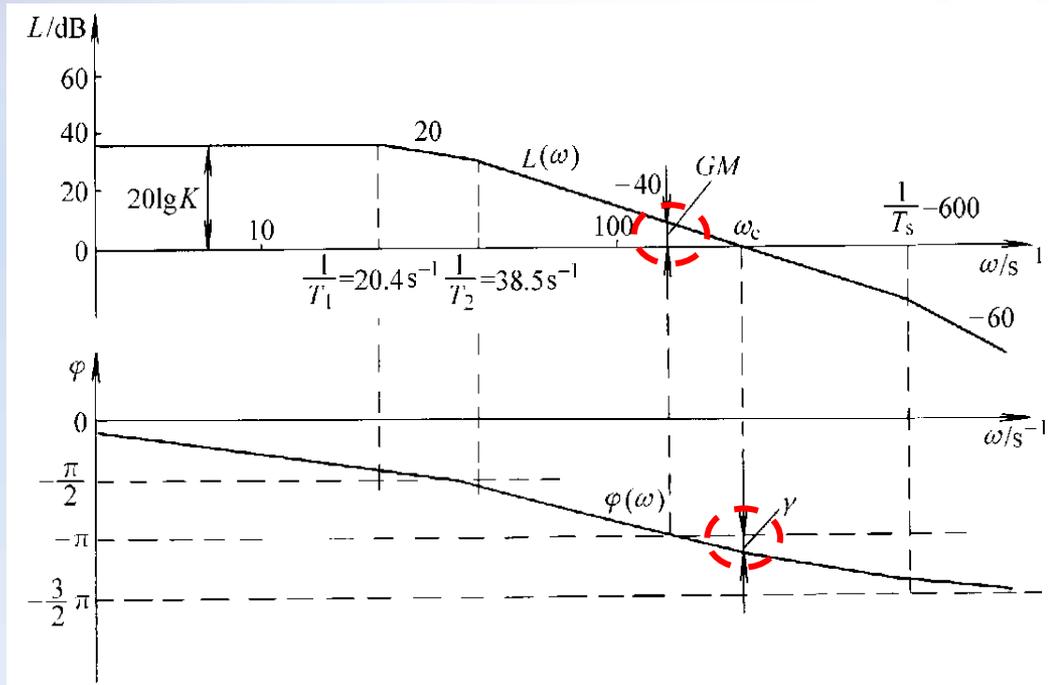
$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = 20.4s^{-1} \quad \omega_2 = \frac{1}{T_2} = 38.5s^{-1}$$

$$\omega_3 = \frac{1}{T_3} = 600s^{-1}$$

➤ 比例环节

$$20\lg K = 20\lg 55.58 = 34.9\text{dB}$$

原始闭环直流调速系统的伯德图

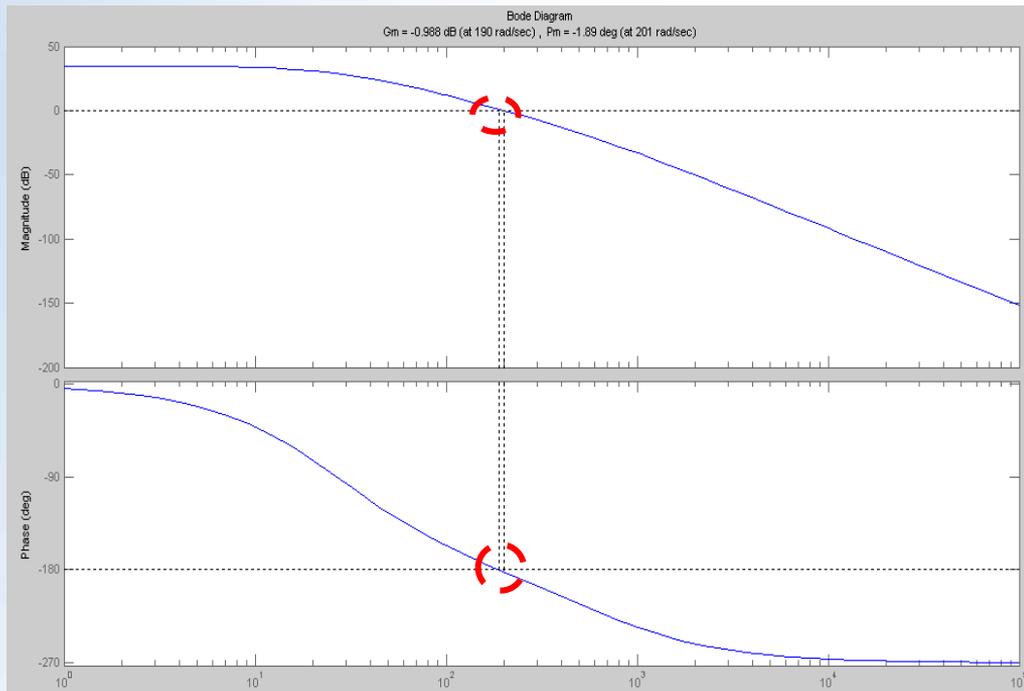


显然：原始系统是不稳定的。

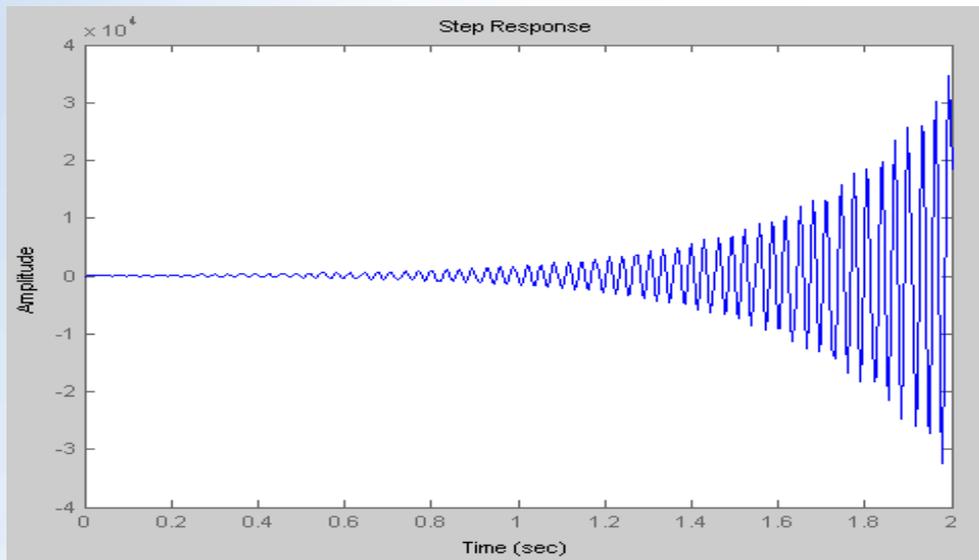
MATLAB下编程实现Bode图的绘制

```
k0=55.58;  
n1=1;  
d1=conv(conv([0.049 1], [0.026 1]), [0.00167 1]);  
[mag, phase, w]=bode(k0, d1);  
figure(1);margin(mag, phase, w);%hold on  
figure(2);s1=tf(k0/0.01158, d1);  
sys=feedback(s1, 0.01158);step(sys, 2)%one-colse one-step  
n2=[0.049 1];  
d2=[0.088 0];  
d3=conv(d1, d2);  
[mag2, phase2, w2]=bode(k0/21*n2, d3);  
figure(3);margin(mag2, phase2, w2);  
figure(4);s2=tf(k0/21/0.01158*n2, d3);  
sys=feedback(s2, 0.01158);step(sys, 2)%one-colse one-step
```

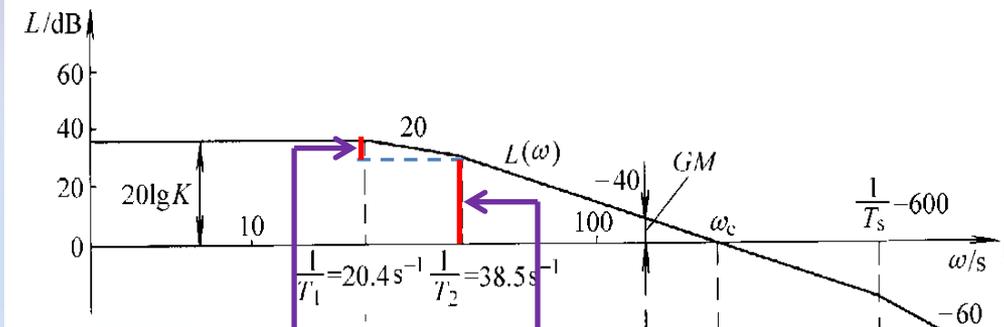
MATLAB下原始系统的Bode图



原始系统的转速仿真曲线



➤ 原始系统的截止频率



$$20 \lg K = 20 \lg \frac{\omega_2}{\omega_1} + 40 \lg \frac{\omega_c}{\omega_2} = 20 \lg \frac{\omega_c^2}{\omega_1 \omega_2}$$

$$\omega_c = \sqrt{K \omega_1 \omega_2}$$

$$\omega_c = \sqrt{55.58 \times 20.4 \times 38.5} = 208.9 \text{ s}^{-1}$$

引入PI调节器进行串联校正

PI调节器的传递函数为：

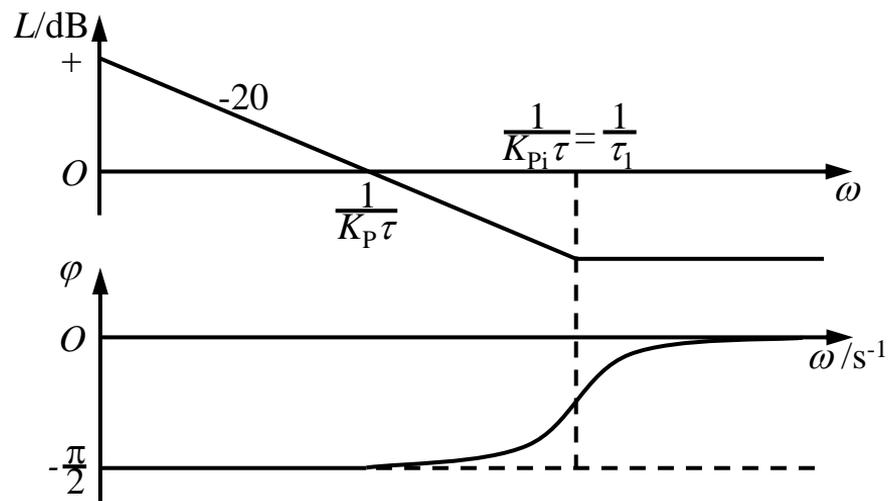
$$W_{pi}(s) = K_{pi} + \frac{1}{\tau s} = \frac{K_{pi}\tau s + 1}{\tau s}$$

考虑到原始系统中已包含了放大系数为 K_p 的比例调节器，现在换成PI调节器，则新添加部分的传递函数应为：

$$\frac{1}{K_p} W_{pi}(s) = \frac{K_{pi}\tau s + 1}{K_p \tau s}$$

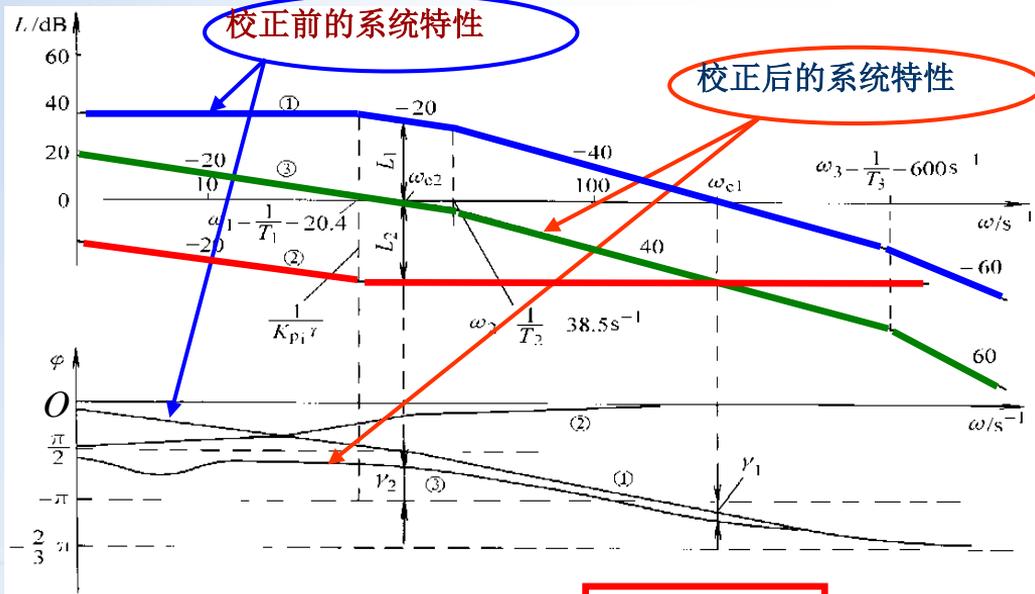
引入PI调节器进行串联校正

$$\frac{1}{K_p} W_{pi}(s) = \frac{K_{pi} \tau s + 1}{K_p \tau s}$$



确定PI调节器的参数： K_{pi} 和 τ

$$\frac{1}{K_p} W_{pi}(s) = \frac{K_{pi} \tau s + 1}{K_p \tau s}$$



$$\textcircled{1} K_{pi} \tau = T_1$$

$$\textcircled{2} \omega_{c2} < \frac{1}{T_2}$$

总结动态校正的计算过程

- (1) 取PI调节器的比例微分环节与原始系统的最大惯性环节对消；
- (2) 选取校正后系统的截止频率 ω_{c2} ；
- (3) 确定对应 ω_{c2} 处原系统应消除的分贝值 L ；
- (4) 计算PI调节器参数。

例题计算

- (1) 取 $K_{pi}\tau = T_1 = 0.049s$;
- (2) 为了使 $\omega_{c2} < 1/T_2 = 38 s^{-1}$, 取 $\omega_{c2} = 30 s^{-1}$;
- (3) 在特性①上查得相应的 $L_1 = 31.5dB$, 因而 $L_2 = -31.5dB$ 。

$$|L_2| = 20 \lg \frac{1}{\frac{K_{pi}\tau}{1}} = 20 \lg \frac{K_p}{K_{pi}} = 31.5dB$$

例题计算

(4) 调节器参数计算

$$\therefore \frac{K_p}{K_{pi}} = 37.58 \quad K_p = 21$$

$$\therefore K_{pi} = 0.559$$

$$\tau = \frac{T_1}{K_{pi}} = \frac{0.049}{0.559} = 0.088s$$

$$W_{pi}(s) = \frac{0.049s + 1}{0.088s}$$

动态校正结论：

➤校正后系统的稳定性指标 γ 和GM都已变成较大的正值，有足够的稳定裕度；

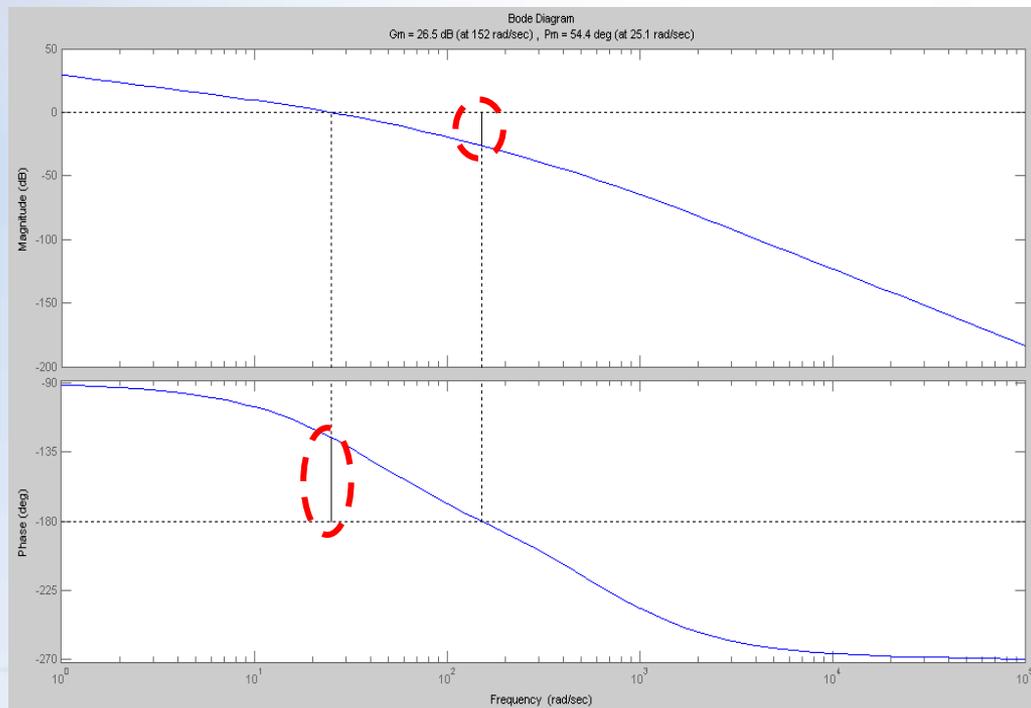
➤而截止频率从 $\omega_{c1} = 208.9 \text{ s}^{-1}$ 降到 $\omega_{c2} = 30 \text{ s}^{-1}$ ，快速性被压低了许多。

显然，牺牲快速性获得稳定性。

MATLAB下编程实现Bode图的绘制

```
k0=55.58;
n1=1;
d1=conv(conv([0.049 1], [0.026 1]), [0.00167 1]);
[mag, phase, w]=bode(k0, d1);
figure(1);margin(mag, phase, w);%hold on
figure(2);s1=tf(k0/0.01158, d1);
sys=feedback(s1, 0.01158);step(sys, 2)%one-colse one-step
n2=[0.049 1];
d2=[0.088 0];
d3=conv(d1, d2);
[mag2, phase2, w2]=bode(k0/21*n2, d3);
figure(3);margin(mag2, phase2, w2);
figure(4);s2=tf(k0/21/0.01158*n2, d3);
sys=feedback(s2, 0.01158);step(sys, 2)%one-colse one-step
```

MATLAB下动态校正后系统的Bode图



动态校正后系统的转速仿真曲线

