

第5章 自动控制系统的校正

5.1 常用校正装置

5.2 串联校正

5.3 反馈校正

5.4 前馈控制的概念

5.5 自动控制系统的一般设计方法



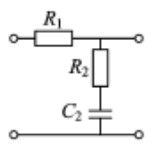
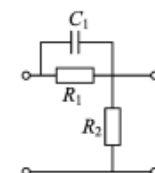
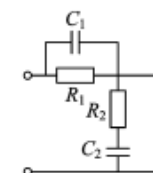
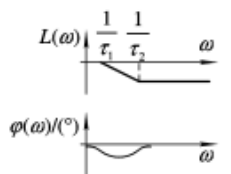
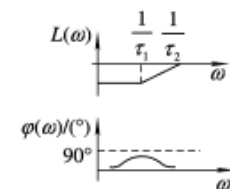
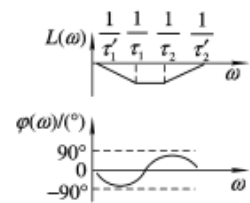
5.1 常用校正装置

5.1.1 无源校正装置


无源校正装置通常是由一些电阻和电容组成的两端口网络。如前所述，根据它们对系统频率特性相位的影响，又可分为相位滞后校正、相位超前校正和相位滞后—超前校正。

表5—1中列出了几种典型的无源校正装置及其传递函数和对数幅频特性（伯德图）。

表5-1 常见无源校正装置

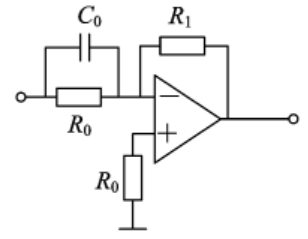
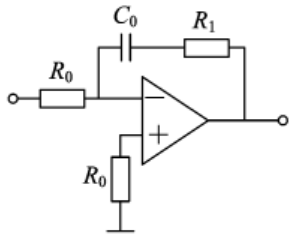
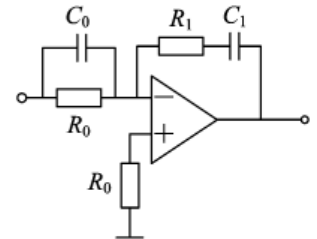
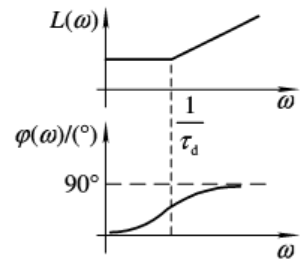
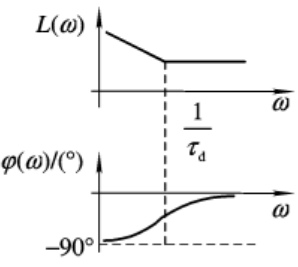
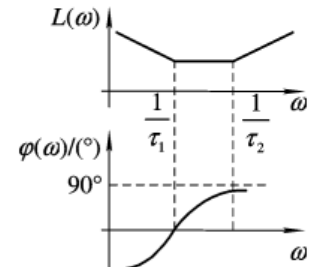
	相位滞后校正装置	相位超前校正装置	相位滞后-超前校正装置
RC 网络			
传递函数	$G_1(s) = \frac{\tau_2 s + 1}{\tau_1 s + 1}$ <p>式中 $\tau_1 = (R_1 + R_2)C_2$ $\tau_2 = R_2 C_2$ $\tau_2 < \tau_1$</p>	$G(s) = \frac{K(\tau_1 s + 1)}{\tau_2 s + 1}$ <p>式中 $K = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ $\tau_1 = R_1 C_1$ $\tau_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_1$ $\tau_1 \geq \tau_2$</p>	$G(s) = \frac{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) + R_1 C_2 s}$ $= \frac{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$ <p>式中 $\tau_1 = R_1 C_1$ $\tau_2 = R_2 C_1$ $\tau_1 < \tau_2$</p>
伯德图			

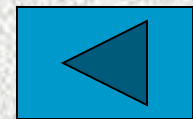
5.1.2 有源校正装置

有源校正装置是由运算放大器组成的调节器。表5-2列出了几种典型的有源校正装置及其传递函数和对数幅频特性（伯德图）。

有源校正装置本身有增益，且输入阻抗高，输出阻抗低。此外，只要改变反馈阻抗，就可以改变校正装置的结构。参数调整也很方便。所以在自动控制系统中多采用有源校正装置。它的缺点是线路较复杂，需另外供给电源（通常需正、负电压源）。

表5-2 常见有源校正装置

	PD 调节器	PI 调节器	PID 调节器
RC 网络			
传递函数	$G_1(s) = -K(\tau_d s + 1)$ <p>式中</p> $K = \frac{R_1}{R_0}$ $\tau_d = R_0 C_0$	$G(s) = \frac{K(\tau_i s + 1)}{\tau_i s}$ <p>式中</p> $K = \frac{R_1}{R_0}$ $\tau_i = R_1 C_1$	$G_1(s) = -\frac{K(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{\tau_1 s}$ <p>式中</p> $K = \frac{R_1}{R_0}$ $\tau_1 = R_1 C_1$ $\tau_2 = R_0 C_0$
伯德图			



5.2 串联校正

串联校正就是将校正装置串联在系统的前向通道中，从而来改变系统的结构，以达到改善系统性能的方法，如图5-1所示。其中 $G_c(s)$ 为串联校正装置的传递函数。

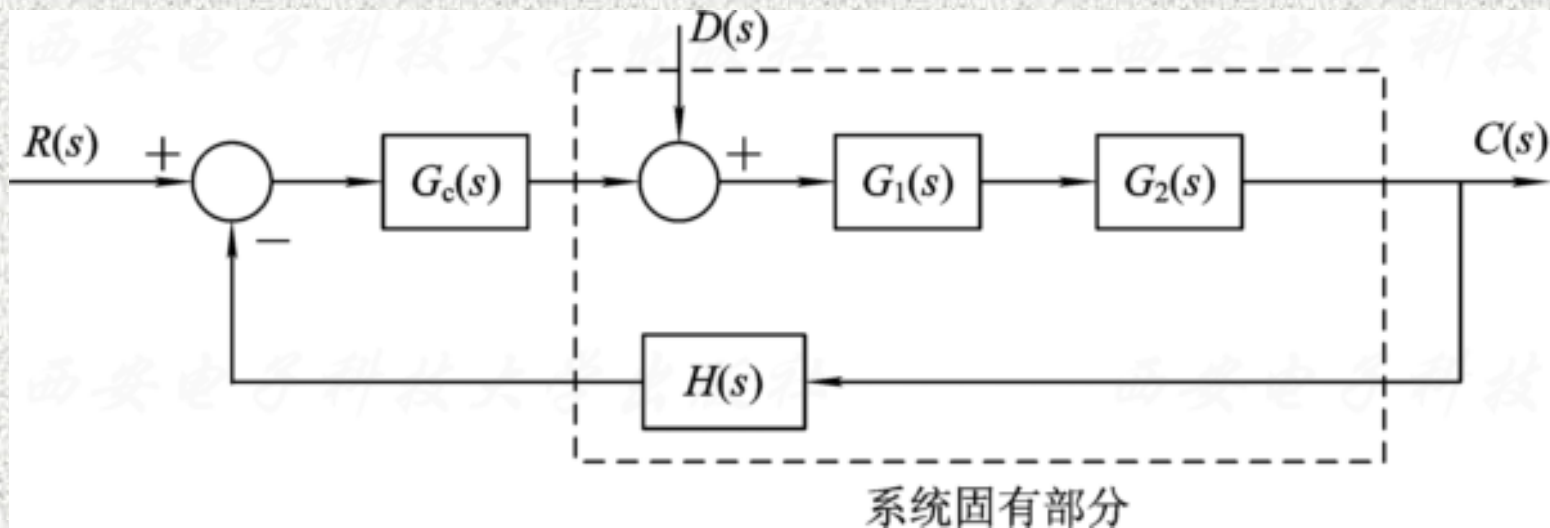


图5-1 自动控制系统的串联校正

5.2.1 串联比例校正

比例校正也称P校正，其装置的传递函数为

$$G_c(s) = K$$

其伯德图如图5-2所示。装置可调参数为 K 。

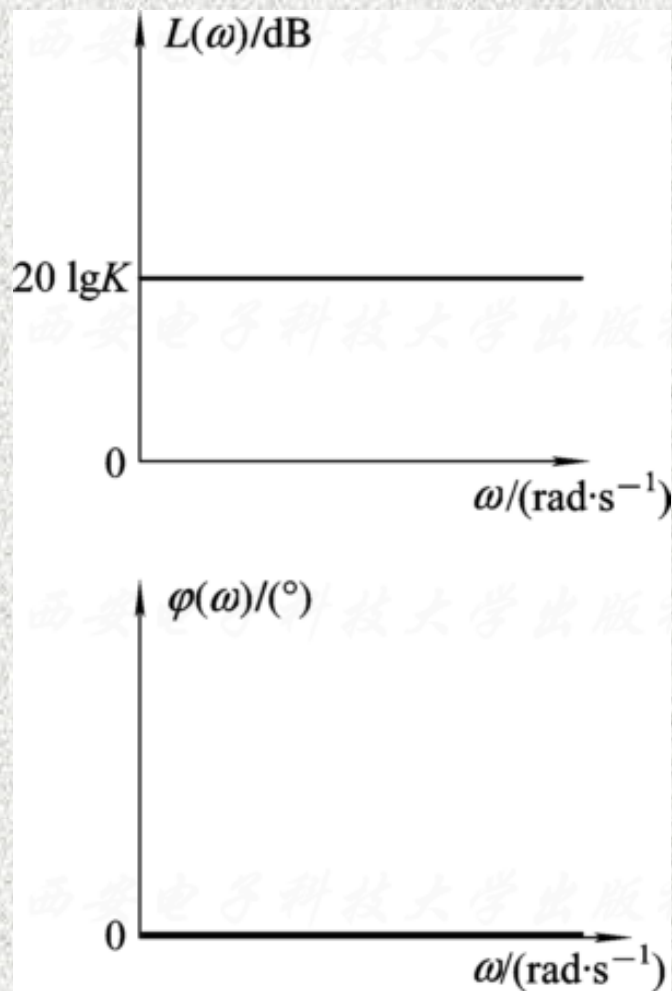



图5-2 比例校正环节的伯德图

由系统的稳定性分析可知，系统开环增益的大小直接影响系统的稳定性，调节比例系数的大小,可在一定的范围内,改善系统的性能指标。降低增益，将使系统的稳定性得到改善，超调量下降，振荡次数减少，但系统的快速性和稳态精度变差。若增加增益，系统性能变化与上述相反。 

调节系统的增益，在系统的相对稳定性、快速性和稳态精度等几个性能之间作某种折衷的选择，以满足（或兼顾）实际系统的要求，这是最常用的调整方法之一。

例1: 某系统的开环传递函数为 $G_1(s) = \frac{35}{s(0.2s+1)(0.01s+1)}$

今采用串联比例调节器对系统进行校正, 试分析比例校正对系统性能的影响。其框图如图5-3所示。

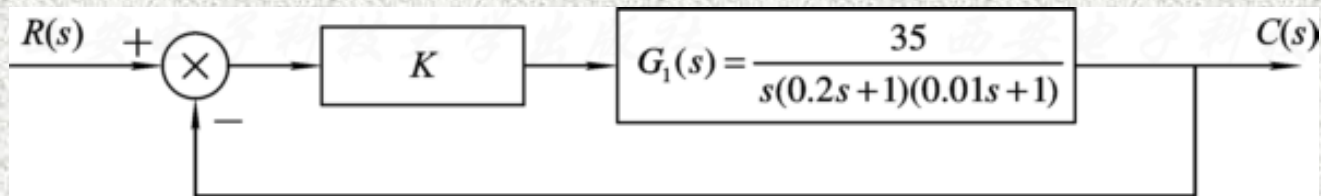


图5-3 具有比例校正的系统框图

解：由以上参数可以画出系统的对数频率特性曲线如图5-4中 I 所示。图中

$$\omega_1 = 1/T_1 = 1/0.2 = 5 \text{ rad/s}$$

$$\omega_2 = 1/T_2 = 1/0.01 = 100 \text{ rad/s}$$

$$L(\omega) |_{\omega=1} = 20 \lg K = 20 \lg 35 = 31 \text{ dB}$$

由图解可求得 $\omega_c = 13.5 \text{ rad/s}$ 。

于是可求得系统相位裕量为

$$\begin{aligned}\gamma &= 180^\circ - 90^\circ - \arctan \omega_c T_1 - \arctan \omega_c T_2 \\ &= 180^\circ - 90^\circ - \arctan 13.5 \times 0.2 - \arctan 13.5 \times 0.01 \\ &= 12.3^\circ\end{aligned}$$

如果采用比例校正，并使 $K_c=0.5$ 。这样系统的开环增益

$$K = K_1 K_c = 35 \times 0.5 = 17.5$$

$$L(\omega) = 20 \lg 17.5 = 25 \text{ dB}$$

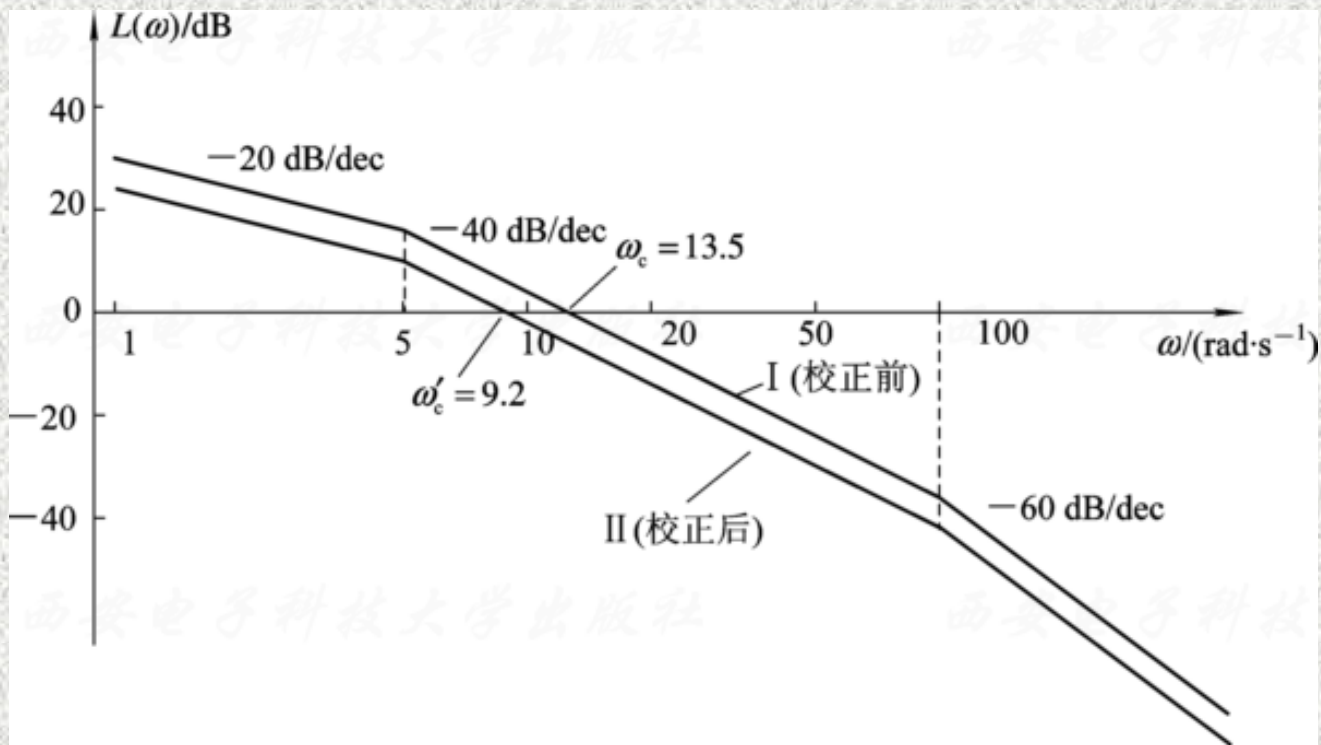


图5-4 串联比例校正环节对系统性能的影响

由校正后的曲线 II 可见，此时 $\omega_c' = 9.2 \text{ rad/s}$ ，于是可得

$$\begin{aligned}\gamma' &= 180^\circ - 90^\circ - \arctan 0.2 \times 9.2 - \arctan 0.01 \times 9.2 \\ &= 23.3^\circ\end{aligned}$$

由上面分析可见，降低增益，将使系统的稳定性得到改善，超调量下降，振荡次数减少，从而使穿越频率 ω_c 降低。这意味着调整时间增加，系统快速性变差，同时系统的稳态精度也变差。

5.2.2 串联比例微分校正

比例微分校正也称PD校正，其装置的传递函数为

$$G_c(s) = K(\tau_d s + 1)$$

其伯德图如图5-5所示。装置可调参数：比例系数 K 、微分时间常数 τ_d 。

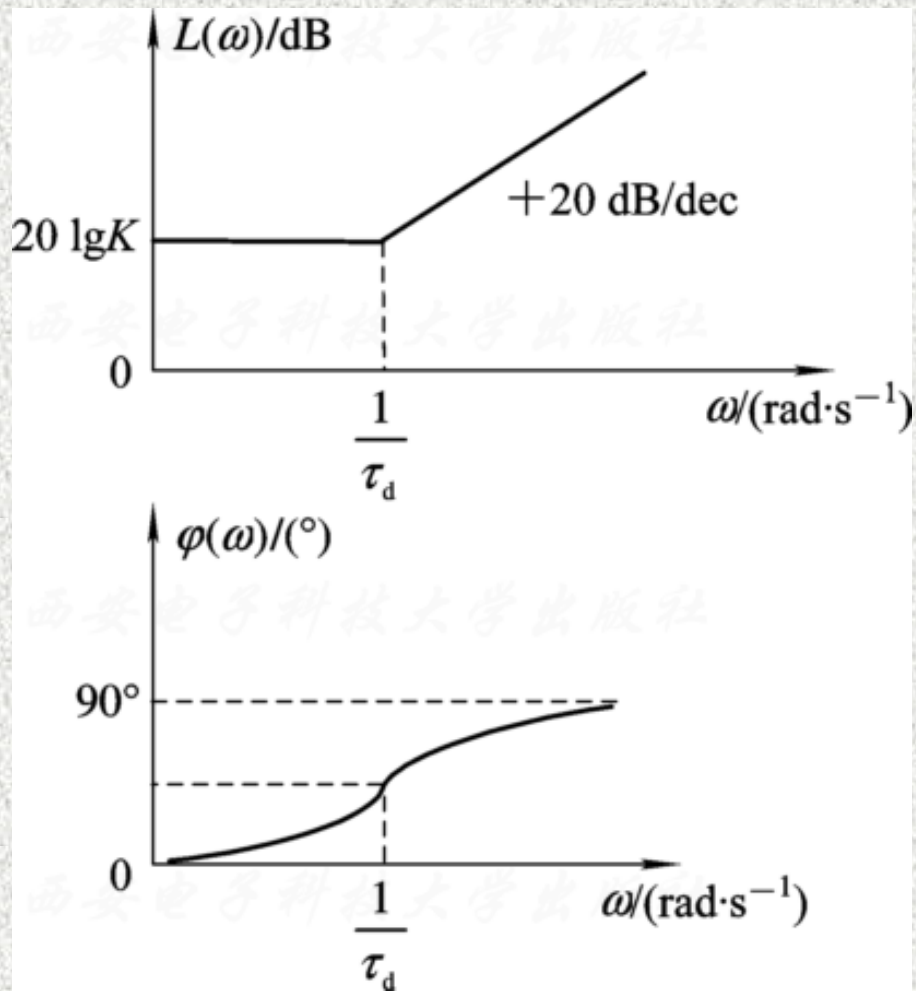


图5-5 比例微分校正环节的伯德图

自动控制系统中一般都包含有惯性环节和积分环节，它们使信号产生时间上的滞后，使系统的快速性变差，也使系统的稳定性变差，甚至造成不稳定。当然有时也可以通过调节增益作某种折衷的选择（如上例作的分析）。但调节增益通常都会带来副作用，而且有时即使大幅度降低增益也不能使系统稳定（如含两个积分环节的系统）。这时若在系统的前向通道串联比例微分环节，可以使系统相位超前，以抵消惯性环节和积分环节使相位滞后而产生的不良后果。 ❁

不难分析：比例微分校正将使系统的稳定性和快速性得到改善，但抗干扰能力明显下降。

例2: 若系统的开环传递函数为 $G_1(s) = \frac{35}{s(0.2s+1)(0.01s+1)}$

今采用串联比例微分调节器对系统进行校正，试分析比例微分校正对系统性能的影响。其框图如图5-6所示。

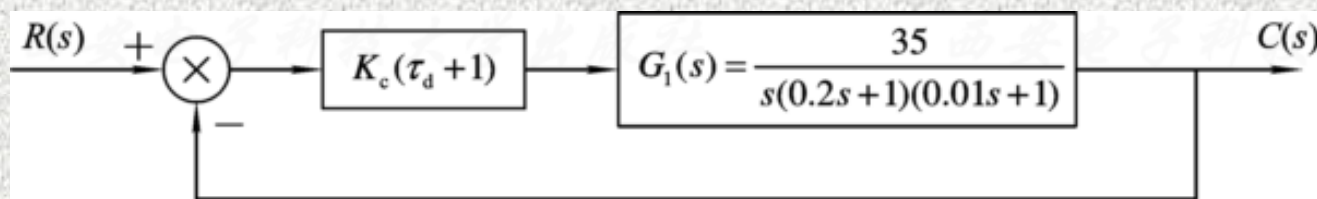


图5-6 具有比例微分校正的系统框图

解： 设校正装置的传递函数为 $G_c(s)=K_c(\tau_d s+1)$ ，为了更清楚地说明相位超前校正对系统性能的影响，取 $K_c=1$ ，微分时间常数取 $\tau_d=0.2s$ ，则系统的开环传递函数变为

$$G(s) = G_c(s)G_1(s) = K_c(\tau_d s + 1) \frac{35}{s(0.2s + 1)(0.01s + 1)} = \frac{35}{s(0.01s + 1)}$$

由此可知，比例微分环节与系统的固有部分的大惯性环节的作用抵消了。这样系统由原来的一个积分和两个惯性环节变成了一个积分和一个惯性环节。它们的对数频率特性曲线如图5-7所示。系统固有部分的对数幅频特性曲线如图5-7中的曲线 I 所示，其中 $\omega_c=13.5 \text{ rad/s}$ ， $\gamma=12.3^\circ$ （由例1知）。校正后系统的对数幅频特性如图5-7中 II 所示。由图可见，此时的 $\omega_c'=35\text{rad/s}$ ，其相位裕量为

$$\gamma' = 180^\circ - 90^\circ - \arctan 0.01 \times 35 = 70.7^\circ$$

比例微分环节起相位超前的作用，可以抵消惯性环节使相位滞后的不良影响，使系统的稳定性显著改善，从而使穿越频率 ω_c 提高，改善了系统的快速性，使调整时间减少。但比例微分校正容易引入高频干扰。

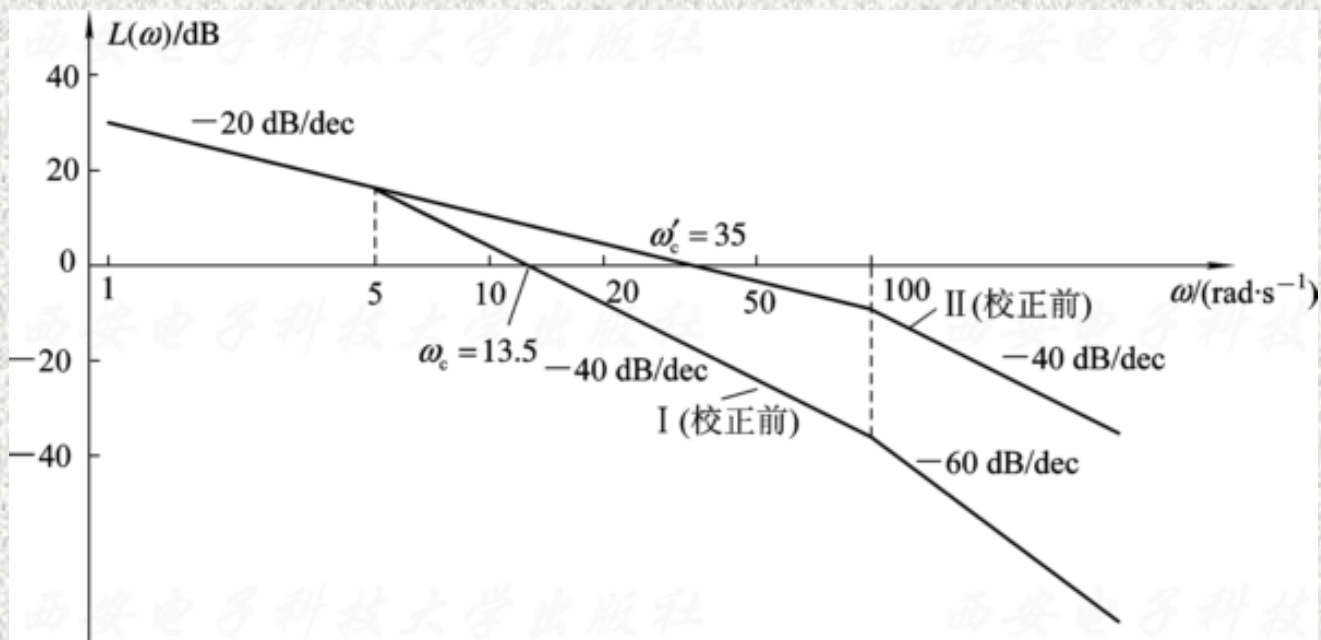


图5-7 比例微分校正对系统性能的影响

5.2.3 串联比例积分校正

比例积分校正也称PI校正，其装置的传递函数为

$$G_c(s) = \frac{K(\tau_i s + 1)}{\tau_i s}$$

其伯德图如图5-8所示。装置可调参数：比例系数 K 、积分时间常数 τ_i 。

由于PI校正可使系统的相位 $\varphi(\omega)$ 后移，所以又称它为相位滞后校正。

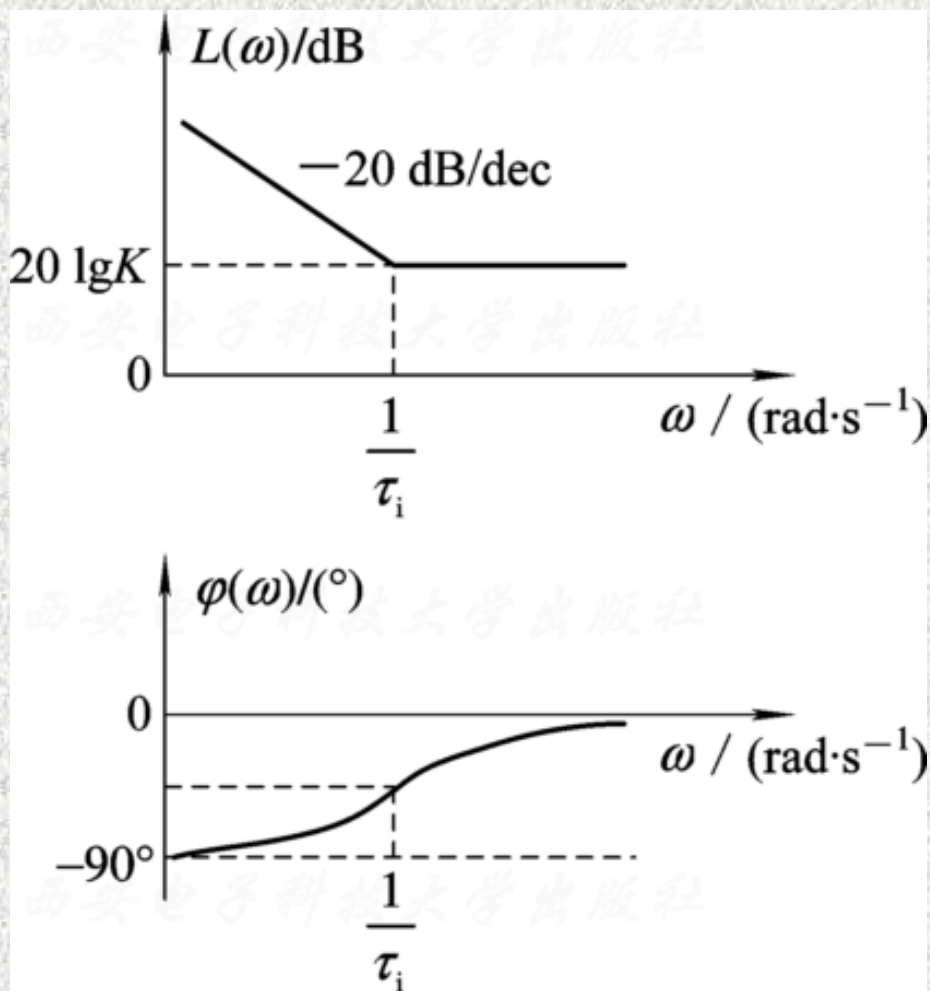



图5-8 比例积分校正环节的伯德图

例3: 若系统的开环传递函数为 $G_1(s) = \frac{10}{(0.5s + 1)(0.01s + 1)}$

今采用串联比例积分调节器对系统进行校正, 试分析比例积分校正对系统性能的影响。其框图如图5-9所示。 

解: 由 $G_1(s) = \frac{10}{(0.5s + 1)(0.01s + 1)}$ 可知, 系统不含有积分环节, 它显然是有静差的系统。如今为实现无静差, 可在系统前向通道中, 串联比例积分调节器, 其传递函数为

$G_c(s) = \frac{K(\tau_i s + 1)}{\tau_i s}$ 。为了使分析简明起见, 今取 $\tau_i = T_1 = 0.5s$, 这样可使校正装置中的比例微分部分与系统固有部分的大惯性环节相抵消。同样为了简明起见, 取 $K=1$, 可画出系统校正前的伯德图如图5-10中曲线 I 所示。由图可见, 校正前, 其穿越频率 $\omega_c = 25 \text{ rad/s}$ 。

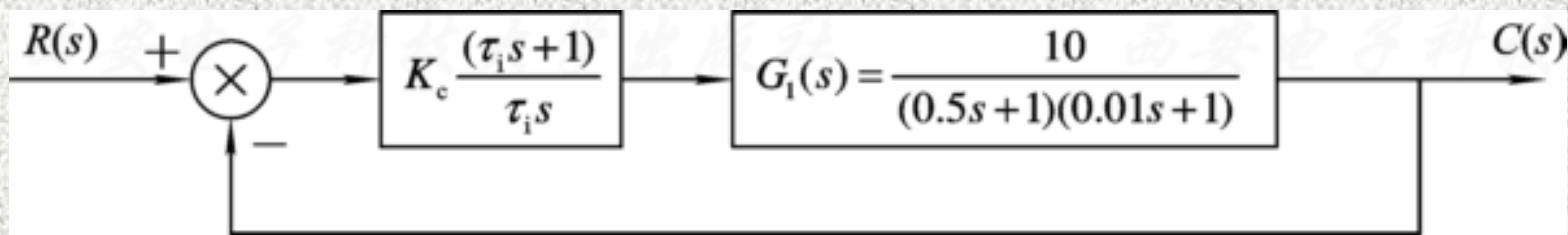


图5-9 具有比例积分校正的系统框图

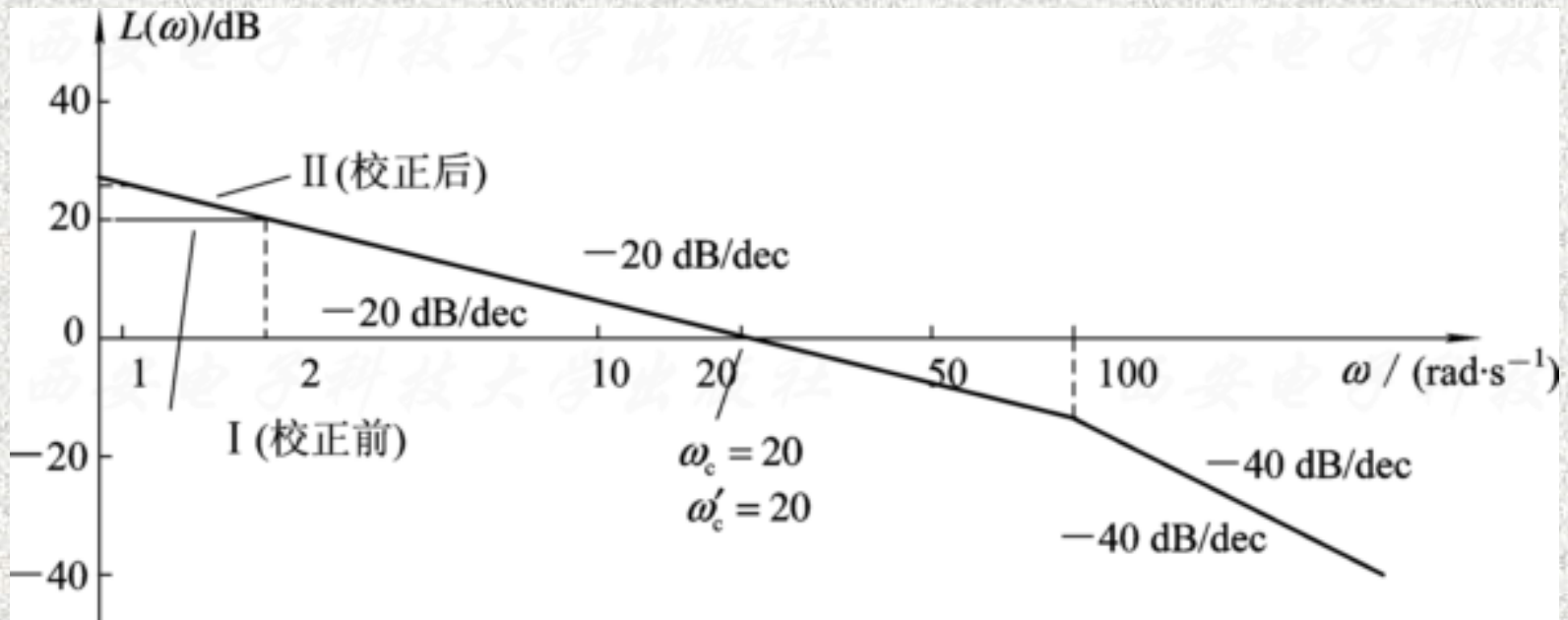


图5-10 比例积分校正对系统性能的影响

系统固有部分的相位裕量为

$$\begin{aligned}\gamma &= 180^\circ - \arctan \omega_c T_1 - \arctan \omega_c T_2 \\ &= 180^\circ - \arctan 25 \times 0.5 - \arctan 25 \times 0.01 \\ &= 80.6^\circ\end{aligned}$$

图5-10中曲线II为校正后的系统的伯德图。由图可见，此时系统已被校正成典型I型系统。即

$$G(s) = G_c(s)G_1(s) = \frac{K(\tau_i s + 1)}{\tau_i s} \frac{10}{(0.5s + 1)(0.01s + 1)} = \frac{K'}{s(T_2 s + 1)}$$

式中： $K' = \frac{10 \cdot K}{\tau_i}$ 。此时的穿越频率为 $\omega_c' = 50 \text{rad/s}$,

其相位裕量为

$$\begin{aligned}\gamma' &= 180^\circ - 90^\circ - \arctan \omega_c' T_2 \\ &= 180^\circ - 90^\circ - \arctan 20 \times 0.01 \\ &= 78.7^\circ\end{aligned}$$

由图5-10可见，在低频段， $L(\omega)$ 的斜率由 0 dB/dec 变为 -20 dB/dec ，系统由0型变为I型，从而实现了无静差。这样，系统稳态误差显著减小，从而改善了系统的稳态性能。在中频段，由于积分环节的影响，系统的相位稳定裕量 γ 变为 γ' 。而 $\gamma' < \gamma$ ，相位裕量减小，系统的超调量增加，降低了系统的稳定性。在高频段，校正前后影响不大。

综上所述，比例积分校正将使系统的稳态性能得到明显改善，但使系统的稳定性变差。

5.2.4 串联比例积分微分校正

比例积分微分校正也称PID校正，其装置的传递函数为

$$G_c(s) = \frac{K(\tau_i s + 1)(\tau_d s + 1)}{\tau_i s}$$

其伯德图如图5-11所示。装置可调参数：比例系数 K 、积分时间常数 τ_i 和微分时间常数 τ_d 。

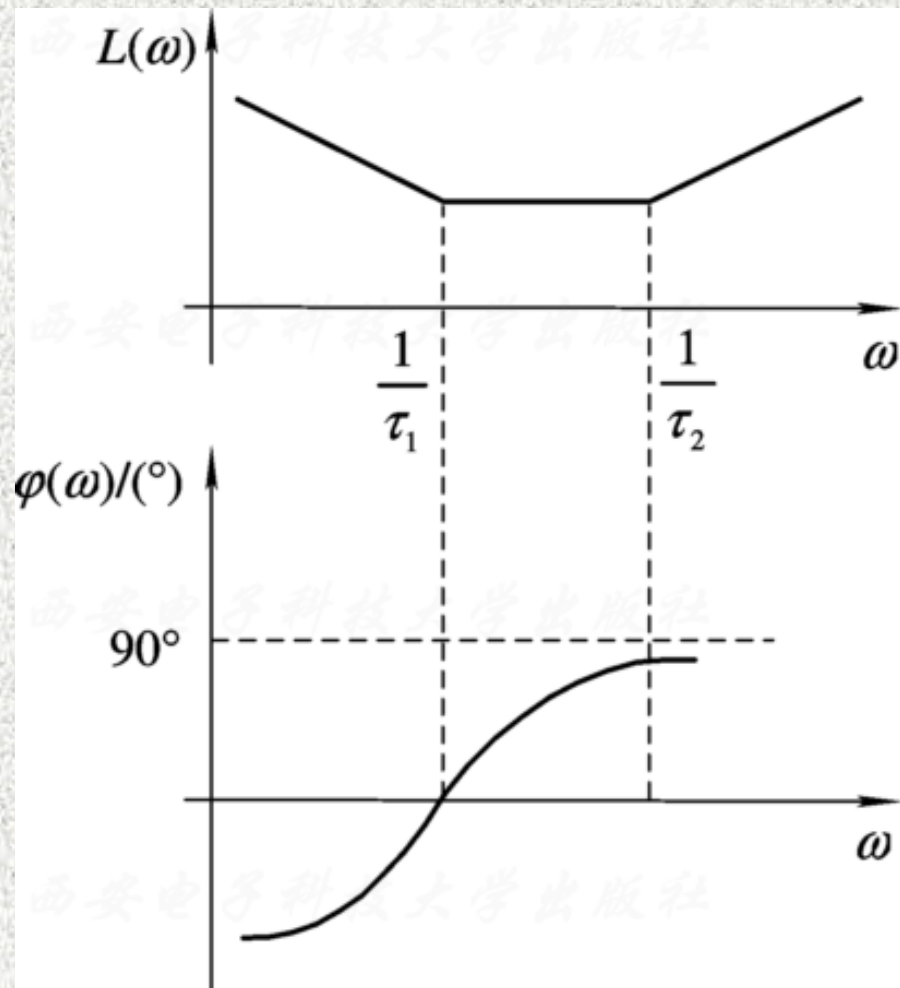


图5-11 比例积分微分环节的伯德图

例4：某自动控制系统的开环传递函数为

$$G_1(s) = \frac{20}{s(0.2s + 1)(0.01s + 1)}$$

，今采用串联PID调节器对系统进行校正，试分析PID校正对系统性能的影响。 

解：该系统的固有传递函数是一个 I 型系统，它对阶跃信号是无差的，但对速度信号是有差的，若要求系统对速度信号也是无差的，则应将系统校正成为 II 型系统。若采用PI调节器校正，则无差度可得到提高，但其稳定性变差，因此很少采用，常用的方法是采用PID校正。

设PID调节器的传递函数为

$$G_c(s) = \frac{K(\tau_i s + 1)(\tau_d s + 1)}{\tau_i s}$$

则校正后系统的开环传递函数为

$$G(s) = G_c(s)G_1(s) = \frac{K(\tau_i s + 1)(\tau_d s + 1)}{\tau_i s} \times \frac{20}{s(0.2s + 1)(0.01s + 1)}$$

若取 $\tau_i=0.2$ ，为使校正后系统有足够的相位裕量，取中频段宽度为 $h=10$ ，则取 $\tau_d=0.1$ ， $K=20$ ，将参数代入后有

$$G(s) = \frac{200(0.1s + 1)}{s^2(0.01s + 1)}$$

系统固有部分的伯德图如图5-12中曲线 I 所示，由图可知 $\omega_c=10$ rad/s。此时系统的相位裕量为

$$\begin{aligned}\gamma &= 180^\circ - 90^\circ - \arctan 10 \times 0.2 - \arctan 10 \times 0.01 \\ &= 20.9^\circ\end{aligned}$$

由上式可知，此系统相位裕量相对较小，稳定性不是很好。采用了PID校正后系统的伯德图为图5-12中曲线 II 所示，由图可见，校正后的 $\omega_c'=20$ rad/s，其相位裕量为

$$\begin{aligned}\gamma' &= 180^\circ - 180^\circ + \arctan 20 \times 0.1 - \arctan 20 \times 0.01 \\ &= 52.13^\circ\end{aligned}$$

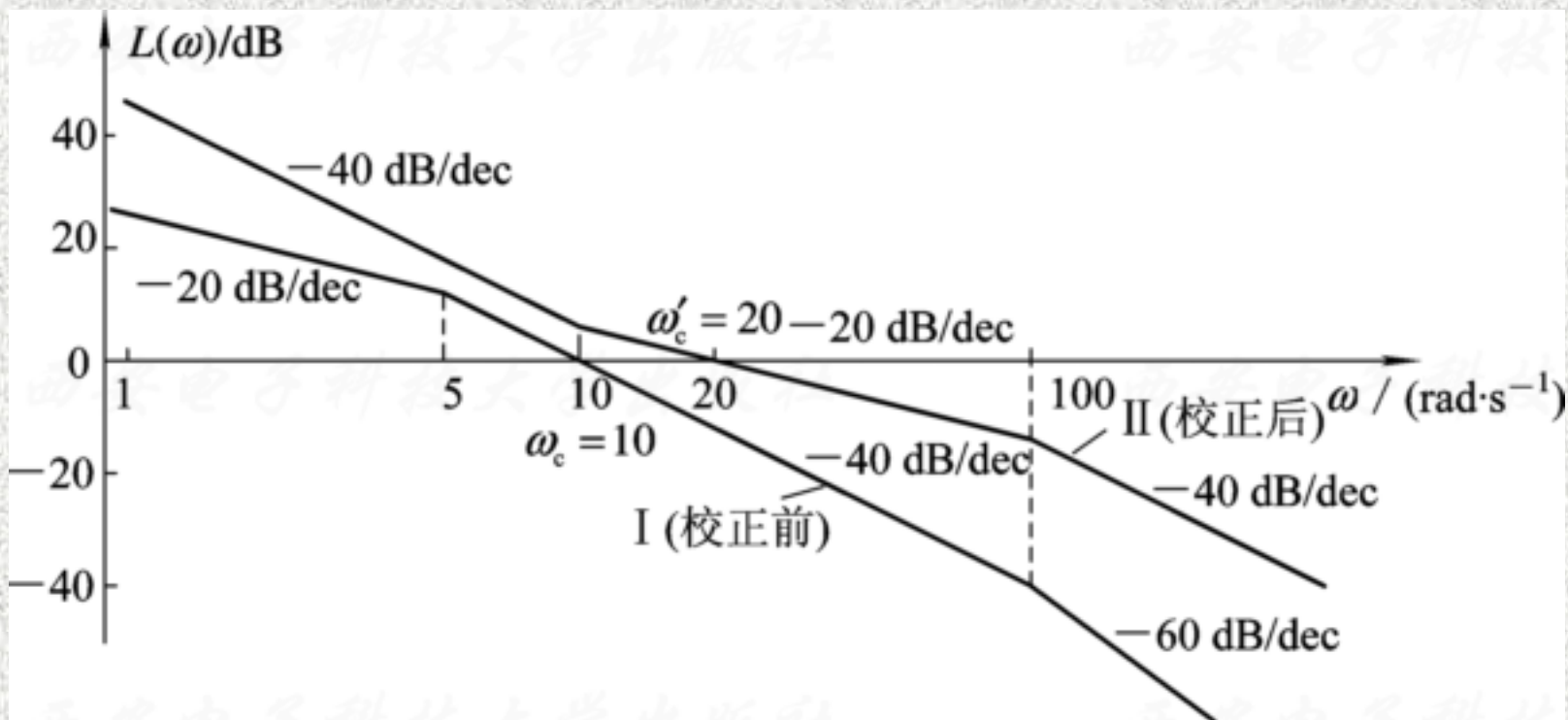





图5-12 比例积分校正对系统性能的影响

由校正后的伯德图可见： 

① 在低频段，由PID调节器积分部分的作用， $L(\omega)$ 的斜率增加了一20dB/dec，系统增加了一阶无静差度，从而显著地改善了系统的稳态性能。 

② 在中频段，由于PID调节器的微分部分的作用，使系统的相位裕量增加，这就意味着超调量减小，振荡次数减少，从而改善了系统的动态性能。 

③ 在高频段，由于PID调节器的微分部分起作用，使高频段增益有所增大，会降低系统的抗干扰能力。但这可通过选择适当的PID调节器来解决，使PID调节器在高频段的斜率为0 dB/dec便可避免这个缺点。

5.2.5 串联校正装置的设计 ψ

利用频率特性设计系统的校正装置是一种比较简单实用的方法，在频域中设计校正装置实质上是一种配置系统滤波特性的方法。设计依据的指标不是时域参量，而是频域参量，如相位裕量、开环对数幅频特性的剪切频率 ω_c 或闭环系统带宽 ω_b ，以及系统的开环增益 K 等。

如果系统暂态性能指标是时域参量，对于二阶系统可通过前面第3章知识予以换算。如果是高阶系统具有一对主导共轭复数极点，这种换算也是近似有效的。🔥

用频率特性法设计校正装置主要是通过伯德图进行的。设计需根据给定的性能指标大致确定所期望的系统开环对数频率特性（即伯德图曲线），期望特性低频段的增益应满足稳态误差的要求，期望特性中频段的斜率（即剪切率）一般应为 -20 dB/dec ，并且具有所要求的剪切频率 ω_c ，期望特性的高频段应尽可能迅速衰减，以抑制噪声的不良影响。

1. 控制系统的静态、动态参数的求取方法

1) 系统的静态误差系数

(1) 静态位置误差系数 K_p :

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s)H(s) = \frac{K}{s^\nu}$$

(2) 静态速度误差系数 K_v :

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 G(s)H(s) = \frac{K}{s^{\nu-2}}$$

(3) 静态加速度误差系数 K_a :

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 G(s)H(s) = \frac{K}{s^{\nu-2}}$$

2) 系统的动态指标估算

(1) 系统的谐振峰值 M_r 与开环相位裕量 γ 之间的关系为

$$M_r = \frac{1}{\sin \gamma}$$

(2) 一般 $1 < M_r < 4$ ，即 $0 \text{ dB} < 20 \lg M_r < 3 \text{ dB}$ ，系统可获得满意的瞬态性能。随着 M_r 的增大，超调量 $\sigma\%$ 也增大，系统的稳定程度下降。工程实践中高阶系统可作如下近似估算，当 $1 < M_r < 1.8$ 时，有

$$\sigma\% = 0.16 + 0.4(M_r - 1) \times 100\%$$

$$t_s = \frac{k\pi}{\omega_c}$$

$$k = 2 + 1.5(M_r - 1) + 2.5(M_r - 1)^2$$

(3) 为了保证系统的稳定性，并具有足够的稳定裕量，要求系统开环对数幅频特性曲线 $L(\omega)$ 在中频段穿越0 dB线时应是 -20 dB/dec的斜率，并希望有较宽的中频段，以保证系统的稳定性，故有

$$h = \frac{\omega_{b2}}{\omega_{b1}}$$

式中， ω_{b1} 为穿越频率 ω_c 前边的转折频率； ω_{b2} 为穿越频率 ω_c 后边的转折频率。

工程上实际使用时常取



$$\omega_{b1} \leq \frac{M_r - 1}{M_r} \cdot \omega_c$$

$$\omega_{b2} \geq \frac{M_r + 1}{M_r} \cdot \omega_c$$

2. 按系统所需要的开环对数幅频特性曲线设计校正装置的步骤

- (1) 画出原系统固有的对数频率特性曲线 $L_1(\omega)$ 。
- (2) 根据实际的控制性能指标确定校正装置类型。
- (3) 按性能指标画出系统期望的开环对数幅频特性曲线。

① 低频段 根据系统要求的稳态精度，合理选择系统开环增益与积分环节的个数，并据此画出低频段对数幅频特性曲线。在原系统已满足稳态精度要求的情况下，应尽量使低频段与原系统重合。


② 中频段 根据系统要求的动态性能指标，确定 ω_c 值，保证中频段过 ω_c 点 -20 dB/dec的斜率有足够的频宽。但是应使各转折频率取值尽可能和原系统接近的转折频率相一致。  

③ 高频段 通常与原来系统的高频段一致。 

(4) 根据上述原则画出希望的对数幅频特性曲线，写出校正后的开环传递函数 $G(s)$ ，并校验校正后的系统的性能指标是否满足要求。若满足要求，则校正装置传递函数为

$$G_c(s) = \frac{G(s)}{G_1(s)}$$

式中， $G(s)$ 为校正后的传递函数；

$G_1(s)$ 为校正前的传递函数。 

例5 已知某自动控制系统的开环传递函数为

$$G(s) = \frac{9}{s(s+1)\left(\frac{1}{60}s+1\right)}$$

系统要求的性能指标为：静态误差系数 $K_v \geq 8$ ，谐振峰值 $M_{\leq} 1.3$

5， $\omega_c \geq 5$ rad/s，试设计合适的串联校正装置 $G_c(s)$ 。 ❀

解：（1）系统固有的对数幅频特性为

$$K=9 \text{ ❀}$$

$$\omega_1=1 \text{ rad/s ❀}$$

$$\omega_2=60 \text{ rad/s}$$

系统的开环对数幅频特性如图5-13中的 I 所示。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/786025130214011001>