



第六章 控制系统的校正

6.1 控制系统的设计与校正问题

6.2 基本控制规律

6.3 串联校正

6.4 反馈(并联)校正

6.5 复合校正



6.3 串联校正

一、串联校正装置分类

1. 无源校正网络：阻容元件

优点：校正元件的特性比较稳定。

缺点：由于输出阻抗较高而输入阻抗较低，需要另加放大器并进行隔离；

没有放大增益，只有衰减。

2. 有源校正网络：阻容电路+线性集成运算放大器

优点：带有放大器，增益可调，使用方便灵活。

缺点：特性容易漂移。

附录 常见的无源及有源校正网络

附表1 无源校正网络

电路图	传递函数	对数幅频特性(分段直线表示)
	$G(s) = \alpha \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1}$ $T = R_1 C \quad \alpha = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$	
	$G(s) = \alpha_1 \frac{Ts + 1}{\alpha_2 Ts + 1}$ $\alpha_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \quad T = R_1 C$ $\alpha_2 = \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$	
	$G(s) = \frac{\alpha Ts + 1}{Ts + 1}$ $T = (R_1 + R_2)C \quad \alpha = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$	
	$G(s) = \alpha \frac{\tau s + 1}{Ts + 1}$ $T = (R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3})C$ $\tau = R_2 C \quad \alpha = R_3 / (R_1 + R_3)$	
	$G(s) = \frac{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2 + T_{1,2})s + 1}$ $T_1 = R_1 C_1 \quad T_2 = R_2 C_2$ $T_{1,2} = R_1 C_2$	
	$G(s) = \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{T_1 (T_2 + T_{3,2}) s^2 + (T_1 + T_2 + T_{1,2} + T_{3,2})s + 1}$ $T_1 = R_1 C_1 \quad T_2 = R_2 C_2$ $T_{1,2} = R_1 C_2 \quad T_{3,2} = R_3 C_2$	

附表2 由运算放大器组成的有源校正网络

电路图	传递函数	对数幅频特性(分段直线表示)
	$G(s) = -\frac{K}{Ts + 1}$ $T = R_2 C \quad K = \frac{R_2}{R_1}$	
	$G(s) = -\frac{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{Ts + 1}$ $\tau_1 = R_1 C_1 \quad \tau_2 = R_2 C_2$ $T = R_1 C_2$	
	$G(s) = -\frac{\tau s + 1}{Ts}$ $\tau = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C \quad T = \frac{R_1 R_3}{R_2 + R_3} C$	
	$G(s) = -K(\tau s + 1)$ $\tau = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C$ $K = \frac{R_2 + R_3}{R_1}$	
	$G(s) = -\frac{K(\tau s + 1)}{Ts + 1}$ $K = \frac{R_2 + R_3}{R_1} \quad T = R_4 C$ $\tau = (\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + R_4) C$	
	$G(s) = -\frac{K(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$ $K = \frac{R_4 + R_5}{R_1 + R_2}$ $\tau_1 = \frac{R_4 R_5}{R_1 + R_2} C_1, \quad \tau_2 = R_2 C_2$ $T_1 = R_5 C_1, \quad T_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_2$	



6.3 串联校正

常用串联校正网络的传递函数可表示为：

$$G_c(s) = K \frac{\prod_{j=1}^m (s - z_j)}{\prod_{i=1}^n (s - p_i)}$$

校正网络为1阶时：

$$G_c(s) = \frac{K(s - z)}{(s - p)}$$

$|z| < |p|$
时，相角超前系统，反之，相位滞后系统。



6.3 串联校正

根据校正装置的**特性**，校正装置可分为超前校正装置、滞后校正装置和滞后-超前校正装置。

(1)超前校正装置

校正装置输出信号在相位上超前于输入信号，即校正装置具有正的相角特性，这种校正装置称为**超前校正装置**，对系统的校正称为超前校正。

超前校正的主要作用是在中频段产生足够大的超前相角，以补偿原系统过大的滞后相角。超前网络的参数应根据相角补偿条件和稳态性能的要求来确定。



6.3 串联校正

(2) 滞后校正装置

校正装置输出信号在相位上落后于输入信号，即校正装置具有负的相角特性，这种校正装置称为滞后校正装置，对系统的校正称为滞后校正。

(3) 滞后-超前校正装置

若校正装置在某一频率范围内具有负的相角特性，而在另一频率范围内却具有正的相角特性，这种校正装置称滞后-超前校正装置，对系统的校正称为滞后-超前校正。



6.3 串联校正

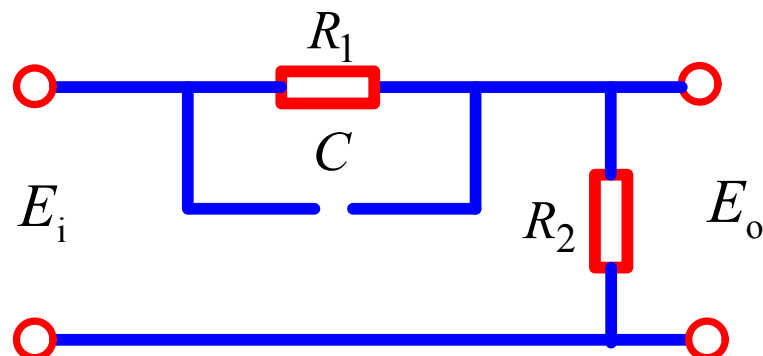
一、超前校正网络

1.超前校正的传递函数：

$$G(s) = \frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{1}{\alpha} \frac{\alpha Ts + 1}{Ts + 1}$$

其中, $T = \frac{R_1 R_2 C}{R_1 + R_2}$, $\alpha = \frac{R_1 + R_2}{R_2} > 1$

$$G_c(s) = \alpha G(s) = \frac{\alpha Ts + 1}{Ts + 1}$$



无源超前校正网络

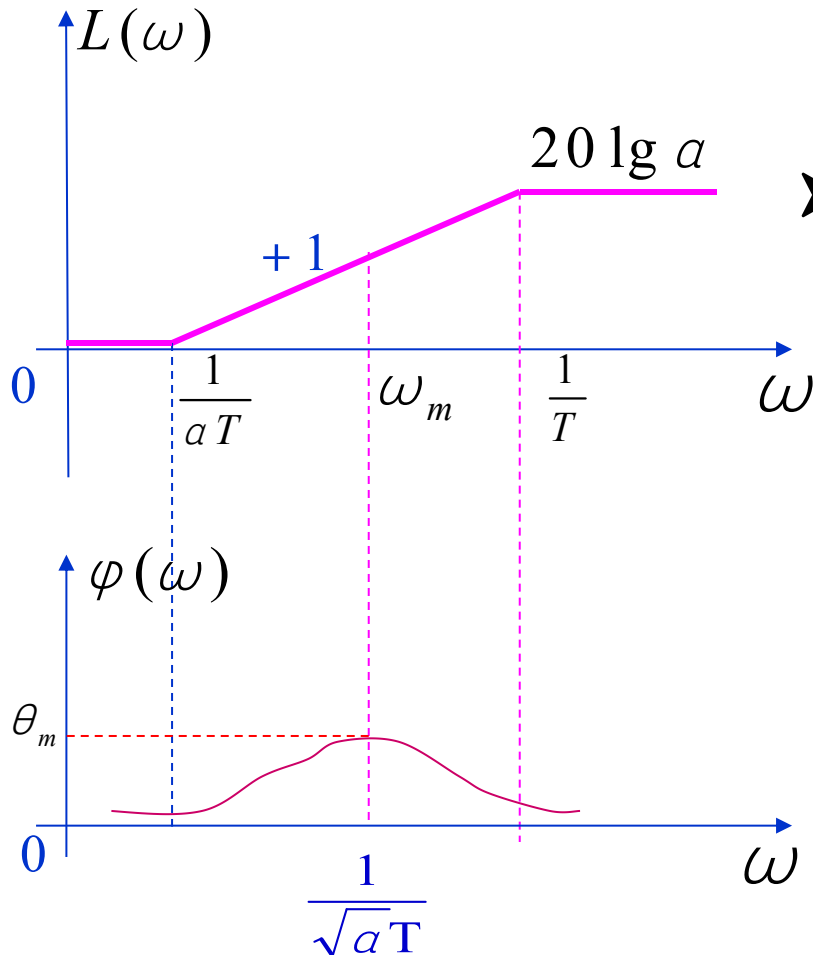
► 整个系统的开环增益下降 α 倍。→为满足稳态精度的要求，必须提高放大器的增益予以补偿。



6.3 串联校正

2.超前校正的频率特性

$$G_c(j\omega) = \frac{1 + ja\omega T}{1 + j\omega T}$$



$$\varphi(\omega) = \arctan(aT\omega) - \arctan(T\omega) > 0$$

►超前校正装置在整个频率范围内都产生相位超前。→**相位超前校正**。

最大相移点: $\frac{d\varphi}{d\omega} = 0$

$$\Rightarrow \omega_m = \frac{1}{\sqrt{a}T}, a > 1$$

最大超前角: $\varphi_m = \arcsin \frac{a-1}{a+1}$

$$a = \frac{1 + \sin \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m}$$



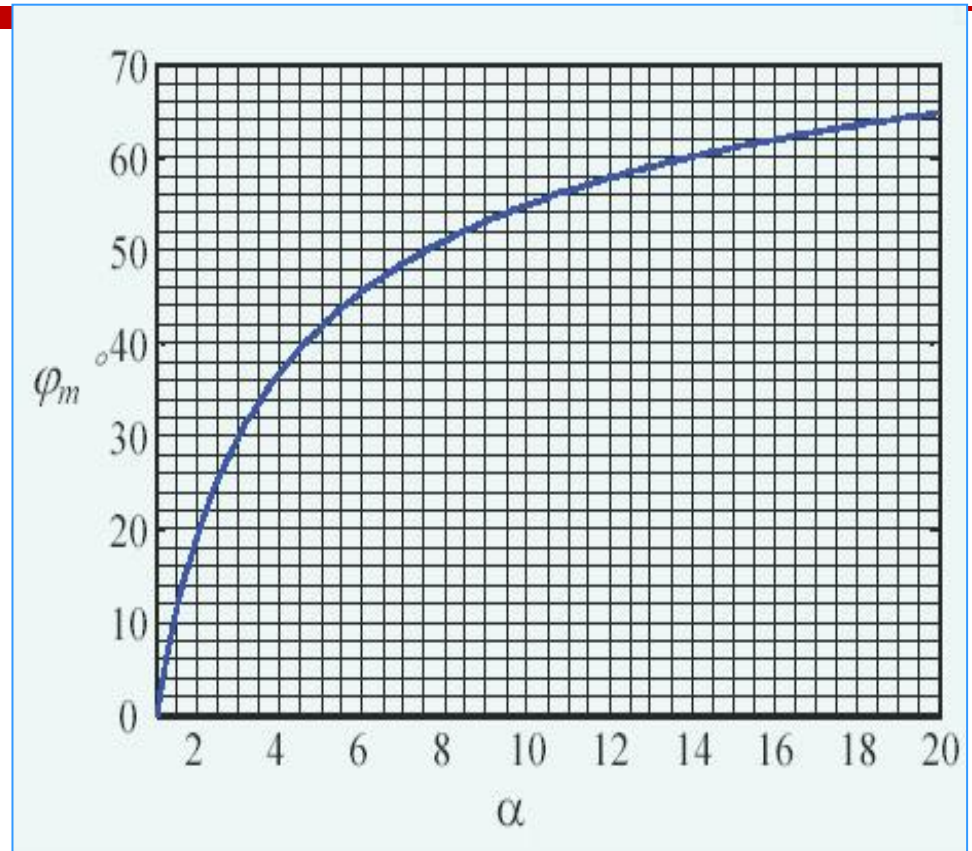
6.3 串联校正

$$\varphi_m = \arcsin \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1}$$

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

► $\alpha \uparrow \rightarrow \varphi_m \uparrow$

$\alpha = 20$ 时, $\varphi_m \cong 65^\circ$



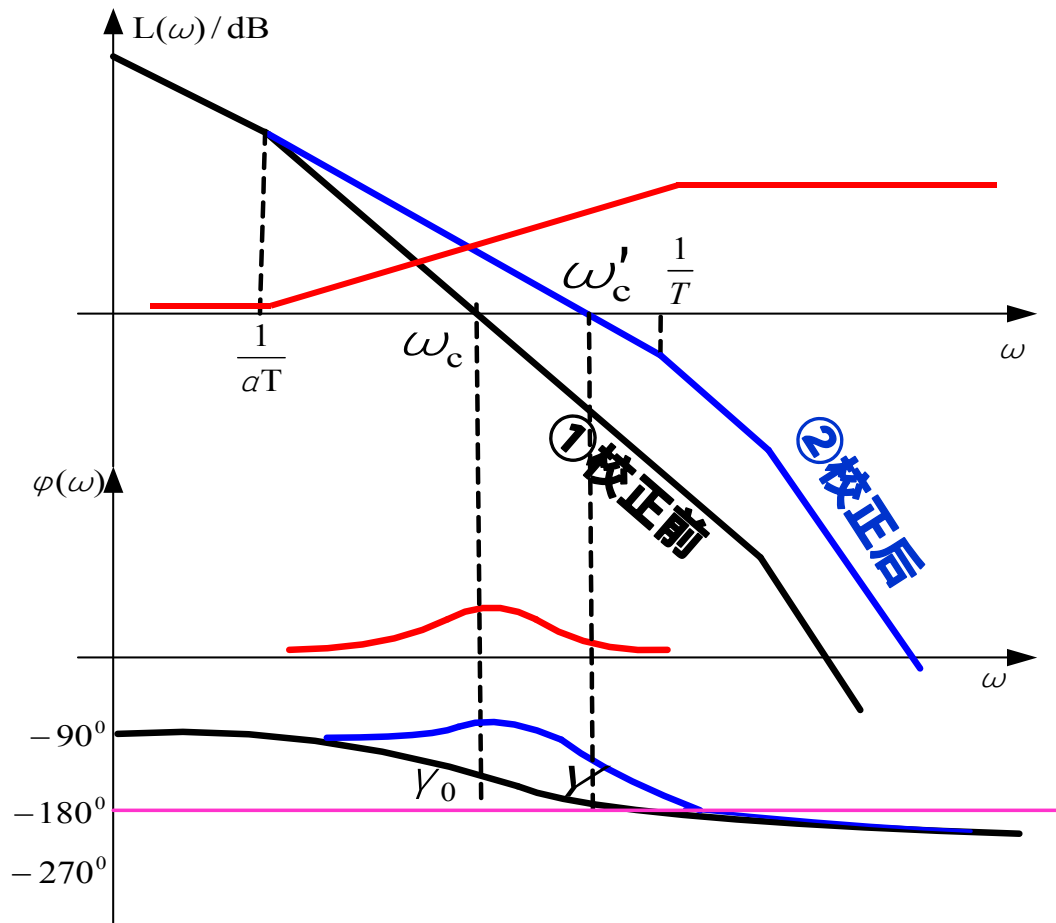
► 为保持较高的系统信噪比, 通常选择 $\alpha = 10$ (此时 $\varphi_m = 55^\circ$)。

► 超前网络具有高通滤波特性, α 值过大对抑制系统高频噪声不利。



6.3 串联校正

3.超前校正网络的作用原理（放在中频段）



在 $1/T$ 和 $1/\alpha T$ 间引入相位超前校正，使中频段斜率减小。

相位超前 $\uparrow \rightarrow$ 交接频率 \uparrow

系统带宽 \uparrow

动态性能 \uparrow

稳定裕度 \uparrow

抗噪性 \downarrow

不影响低频段频率特性，保证了高精度。



6.3 串联校正

4. Bode图法设计超前校正网络

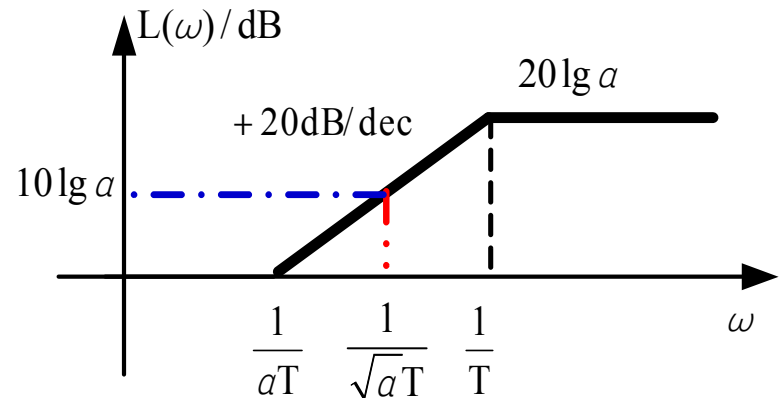
- (1) 绘制未校正系统的伯德图，计算相角裕度，判定是否需要引入合适的超前校正网络 $G_c(s)$ ；

$$G_c(j\omega) = K_1 \frac{(1 + ja\omega T)}{(1 + j\omega T)}$$

- (2) 确定所需的最大超前相角 φ_m ；

(3) 计算 $\alpha = \frac{1 + \sin(\varphi_m)}{1 - \sin(\varphi_m)}$ ；

- (4) 当 $\omega_c = \omega_m$ 时，超前校正网络能提供 $10\lg \alpha$ (dB)的幅值增量，计算 $10\lg \alpha$ 。因此，经过校正后，原有幅值增益为 **$-10\lg \alpha$** 的点将变成新的与0dB线的交点，对应频率就是新的交接频率 $\omega'_c = \omega_m$ ；





6.3 串联校正

- (5) 计算极点频率 $|p| = \frac{1}{T} = \sqrt{\alpha}\omega_m$ 和零点频率 $|z| = \frac{|p|}{\alpha} = \frac{\omega_m}{\sqrt{\alpha}}$;
- (6) 确定系统的增益, 以保证系统的稳态精度, 抵消由超前校正网络带来的衰减 $1/\alpha$;
- (7) 验证结果。



6.3 串联校正

例1 二阶单位负反馈控制系统，开环传递函数为

$$G(s) = \frac{K}{s(0.5s + 1)}$$

设计超前校正装置。给定的设计要求为：系统的相角裕度不小于 40° ，系统斜坡响应的稳态误差为5%。

解： $G(s) = \frac{K}{s(0.5s + 1)}$ I型系统 $K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s) = K \Rightarrow e_{ss} = \frac{1}{K_v}$

由题意知系统斜坡响应的稳态误差为5%，则系统的静态速度误差系数应该为 $K_v=20$ 。

由此可知未校正系统的开环频率特性函数为：

$$G(j\omega) = \frac{K_v}{j\omega(0.5j\omega + 1)} = \frac{20}{j\omega(0.5j\omega + 1)}$$



6.3 串联校正

(1) 判定是否需要引入合适的超前校正网络 $G_c(s)$

$$G(j\omega) = \frac{K_v}{j\omega(0.5j\omega + 1)} = \frac{20}{j\omega(0.5j\omega + 1)}$$

$$\begin{aligned} L(\omega) &= 20\lg 20 - 20\lg \omega - 20\lg \sqrt{1 + (0.5\omega)^2} \\ &= \begin{cases} 20\lg 20 - 20\lg \omega & \omega < 2 \\ 20\lg 20 - 20\lg \omega - 20\lg(0.5\omega) & \omega \geq 2 \end{cases} \end{aligned}$$

$$L(\omega) = 0 \quad \longrightarrow \quad \omega_c = \sqrt{40} = 6.33 \text{ rad/s}$$

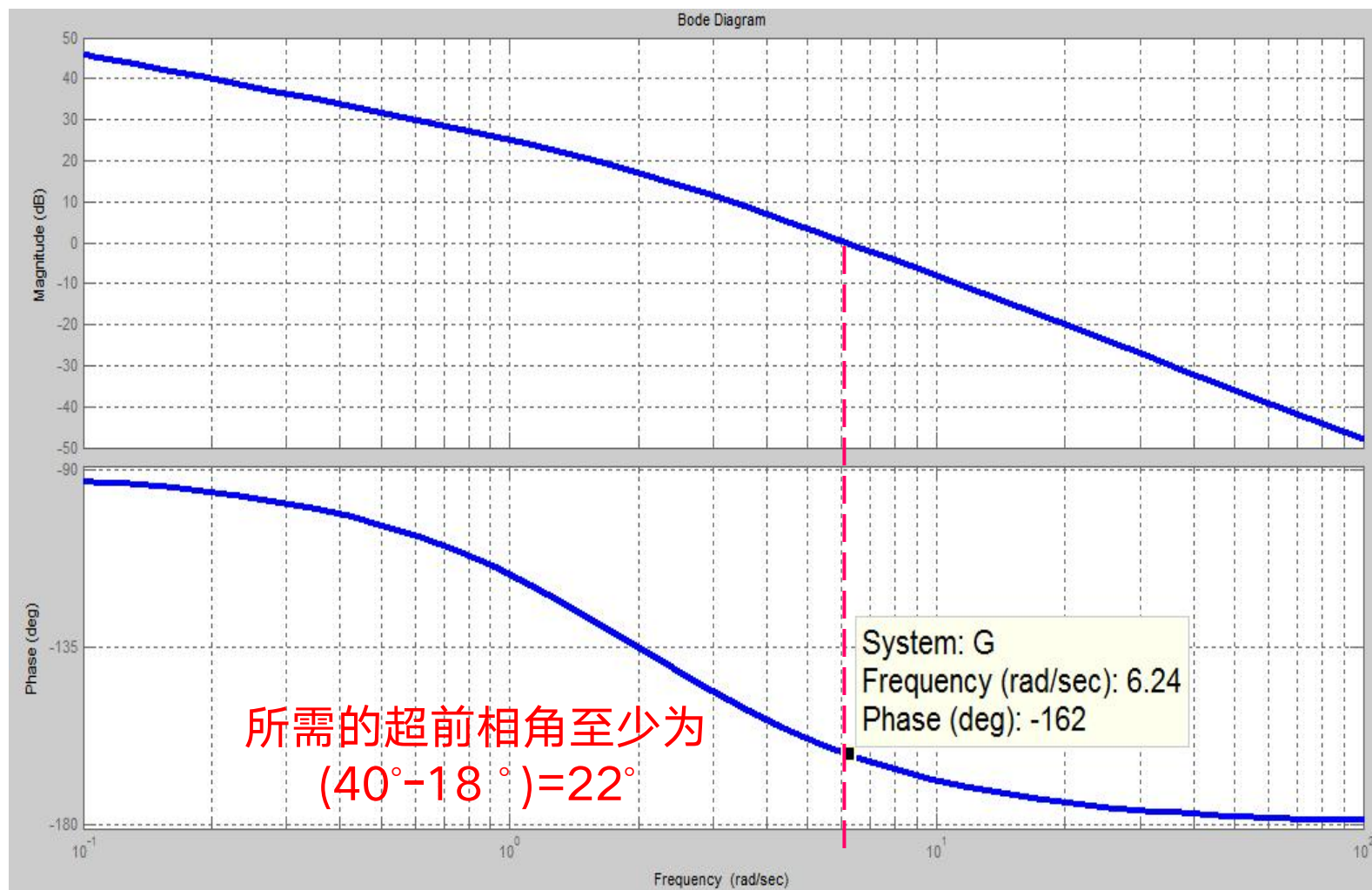
$$\begin{aligned} \gamma &= 180^\circ + \varphi(\omega_c) \\ &= 180^\circ - 90^\circ - \arctan(0.5\omega_c) = 18^\circ < 40^\circ \end{aligned}$$

需要校正



6.3 串联校正

在Bode图上判断是否需要校正：





6.3 串联校正

$$\begin{aligned}\gamma &= 180^\circ + \varphi(\omega_c) \\ &= 180^\circ - 90^\circ - \arctan(0.5\omega_c) = 18^\circ < 40^\circ\end{aligned}$$

(2) 计算所需的相角超前最大值 φ_m

所需的超前相角至少为 $(40^\circ - 18^\circ) = 22^\circ$ ，引入超前校正网络后，穿越频率 ω_c 会增大，存在一定的相位裕度损失，留 8° 的损失角，设超前相角为 $\varphi_m = 30^\circ$ 。

$$\sin \varphi_m = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} = \sin 30^\circ = 0.5$$

(3) 计算 α

$$\Rightarrow \alpha = \frac{1 + \sin(\varphi_m)}{1 - \sin(\varphi_m)} = 3$$



6.3 串联校正

(4) 计算新的穿越频率 ω_c

$$10\lg a = 4.8 \text{ dB}$$

在 $G(s)$ 的**伯德图**上确定与-4.8dB对应的频率，即确定**新的穿越频率** ω_c 和校正网络的**最大超前角频率** ω_m 。

$$G(j\omega) = \frac{K_v}{j\omega(0.5j\omega + 1)} = \frac{20}{j\omega(0.5j\omega + 1)}$$

$$\begin{aligned} L(\omega) &= 20\lg 20 - 20\lg \omega - 20\lg \sqrt{1 + (0.5\omega)^2} \\ &= \begin{cases} 20\lg 20 - 20\lg \omega & \omega < 2 \\ 20\lg 20 - 20\lg \omega - 20\lg(0.5\omega) & \omega \geq 2 \end{cases} \end{aligned}$$

$$L(\omega) = -4.8 \quad \Rightarrow \quad \omega_m = \omega_c = 8.34 \text{ rad/s}$$



6.3 串联校正

(5) 计算极点频率 $|p| = \frac{1}{T} = \sqrt{\alpha}\omega_m$ 和零点频率 $|z| = \frac{|p|}{\alpha} = \frac{\omega_m}{\sqrt{\alpha}}$;

$$|p| = \frac{1}{T} = \sqrt{\alpha}\omega_m = 14.4$$

$$|z| = \frac{|p|}{\alpha} = \frac{\omega_m}{\sqrt{\alpha}} = 4.8$$



6.3 串联校正

(6) 计算超前校正网络的系统传递函数

根据计算的超前校正网络的零极点写出系统传递函数：

$$G_c'(s) = \frac{1}{3} \frac{1 + \frac{s}{4.8}}{1 + \frac{s}{14.4}}$$

为保证接入超前校正网络后系统稳态精度不下降，必须对超前校正网络进行增益补偿，校正网络系统传递函数 $G_c(s)$ 为：

$$G_c(s) = 3G_c'(s)$$



6.3 串联校正

(7) 验证结果

校正后的系统传递函数 $G(s)$ 为：

$$G(s) = G_c(s)G_0(s) = \frac{20\left(1 + \frac{s}{4.8}\right)}{s(0.5s + 1)\left(1 + \frac{s}{14.4}\right)}$$

满足校
正要求

由前面计算已知新的穿越频率：

$$\gamma = 180^\circ + \varphi(\omega_c) \big|_{\omega_c=8.34}$$

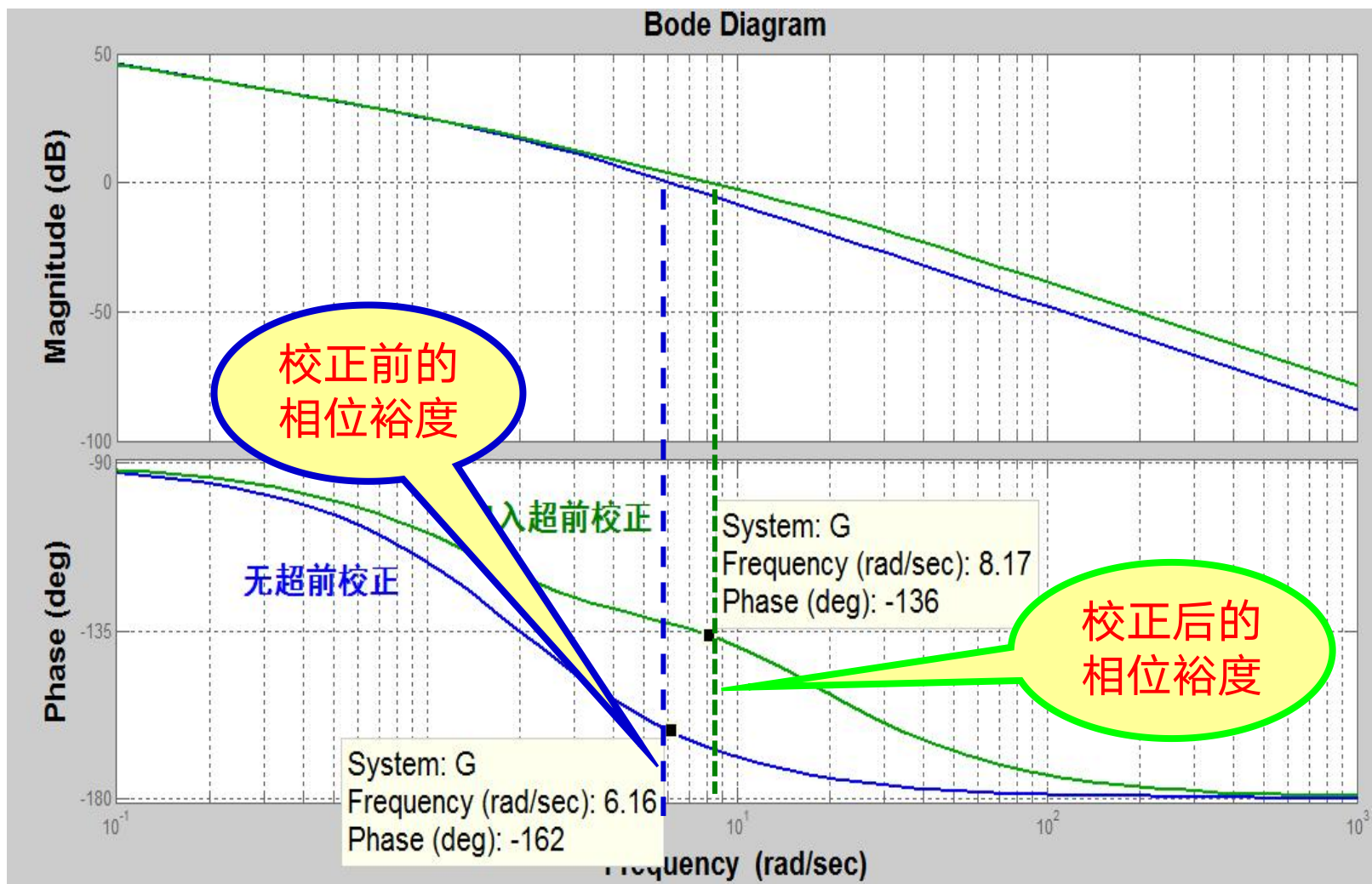
$$= 180^\circ + \arctan\left(\frac{\omega_c}{4.8}\right) - 90^\circ - \arctan(0.5\omega_c) - \arctan\left(\frac{\omega_c}{14.4}\right)$$

$$= 43.5^\circ > 40^\circ$$



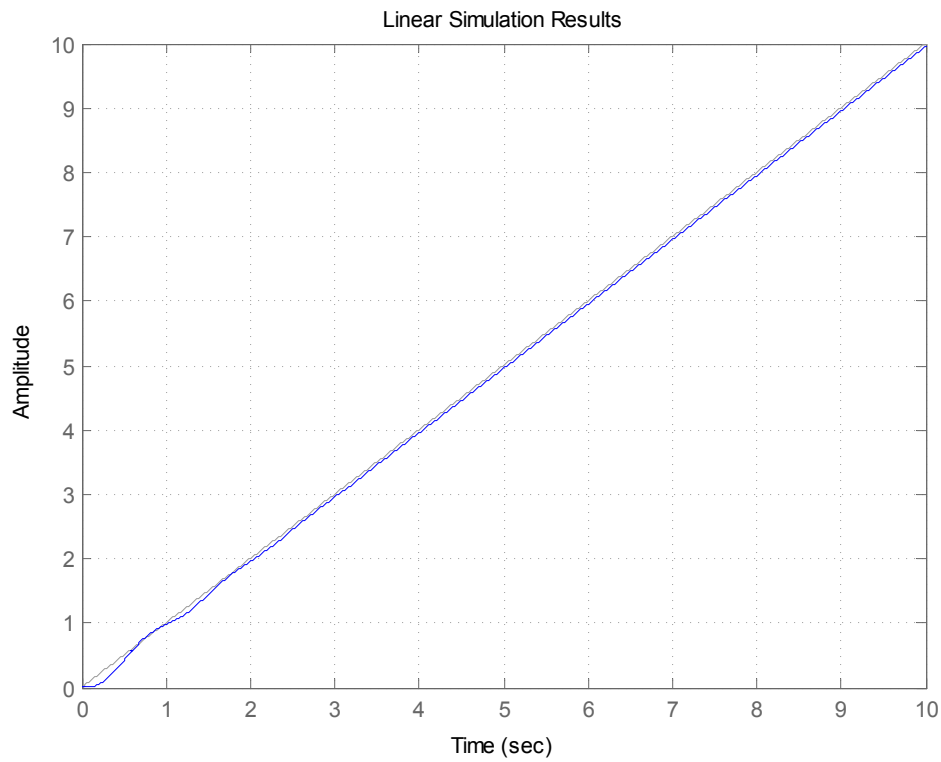
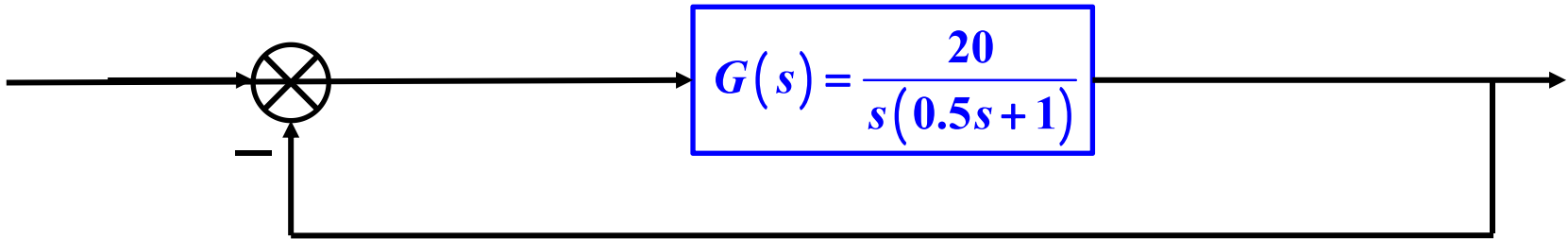
6.3 串联校正

在Bode图上判断校正是否符合要求。



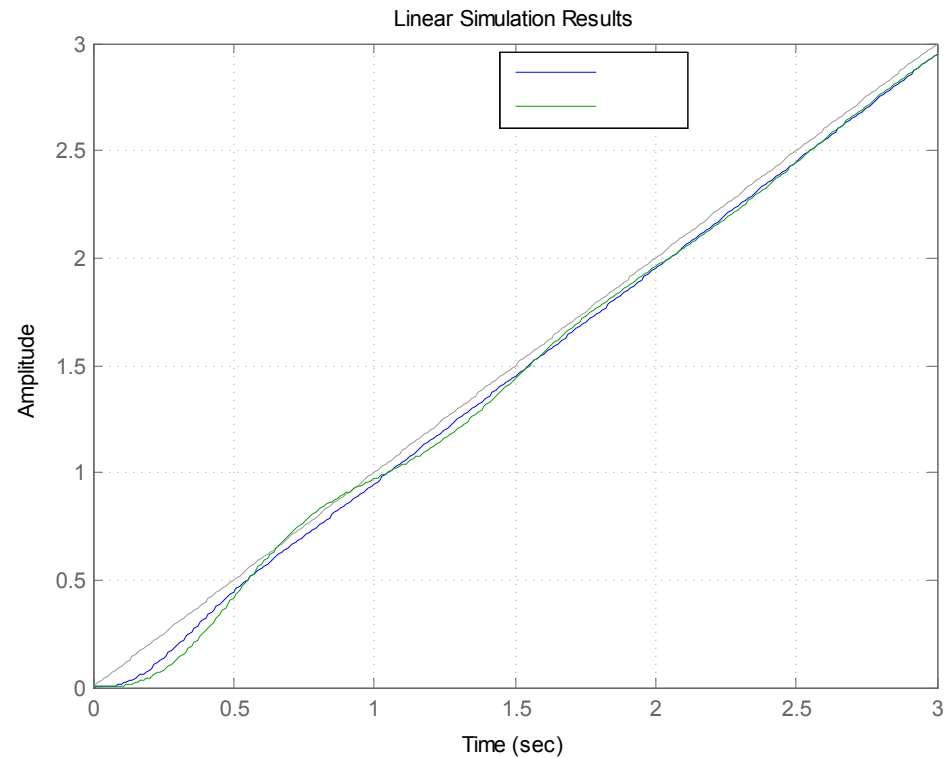
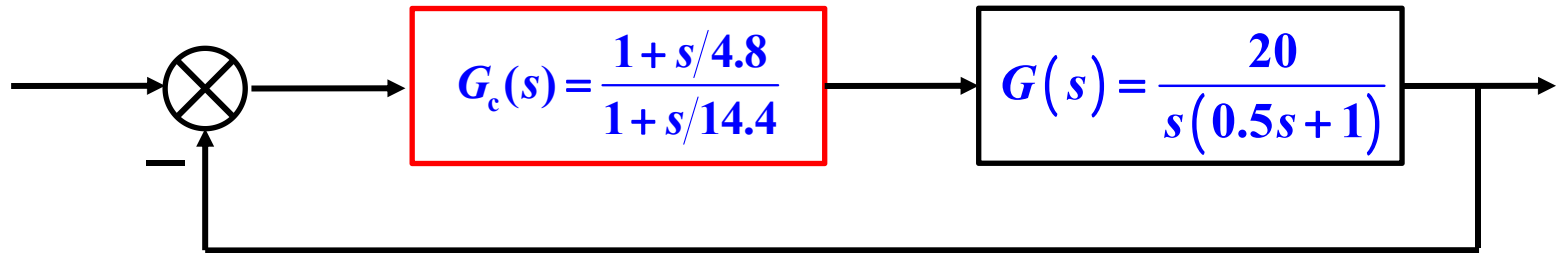


6.3 串联校正





6.3 串联校正





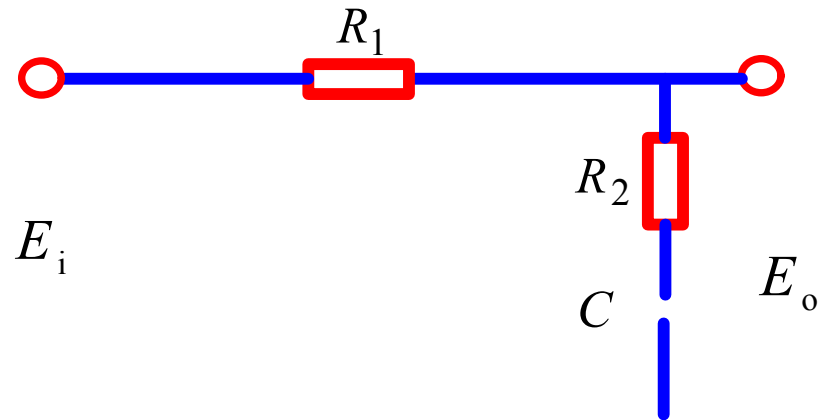
6.3 串联校正

二、滞后校正网络

1. 滞后校正的传递函数

$$G_c(s) = \frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{Ts + 1}{\beta Ts + 1}$$

其中, $T = R_2C, \beta = \frac{R_1 + R_2}{R_2} > 1$



无源滞后校正网络

$$G_c(s) = \frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{R_2 + \frac{1}{sC}}{R_1 + R_2 + \frac{1}{sC}} = \frac{Ts + 1}{\beta Ts + 1}$$



6.3 串联校正

2. 滞后校正的频率特性

$$G_c(j\omega) = \frac{1 + j\omega T}{1 + j\beta\omega T}$$

$$\varphi(\omega) = \arctan(T\omega) - \arctan(\beta T\omega) < 0$$

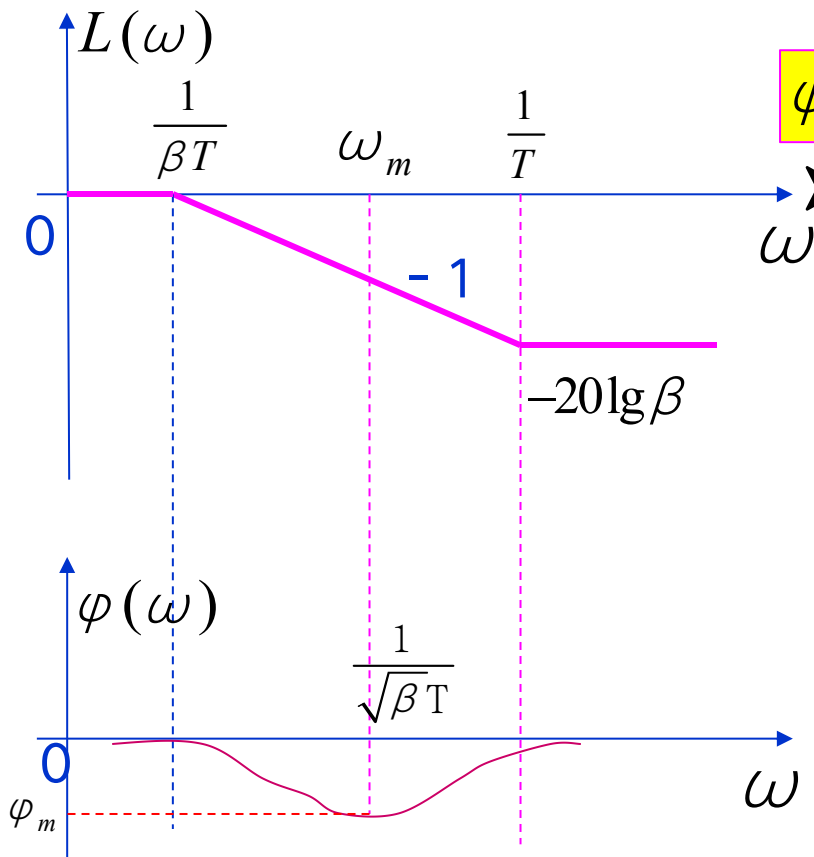
➤ 滞后校正装置在整个频率范围内都产生相位滞后。→ **相位滞后校正**。

最大相移点： $\frac{d\varphi}{d\omega} = 0$

$$\Rightarrow \omega_m = \frac{1}{\sqrt{\beta}T}, \beta > 1$$

最大滞后角： $\varphi_m = \arcsin \frac{1 - \beta}{1 + \beta}$

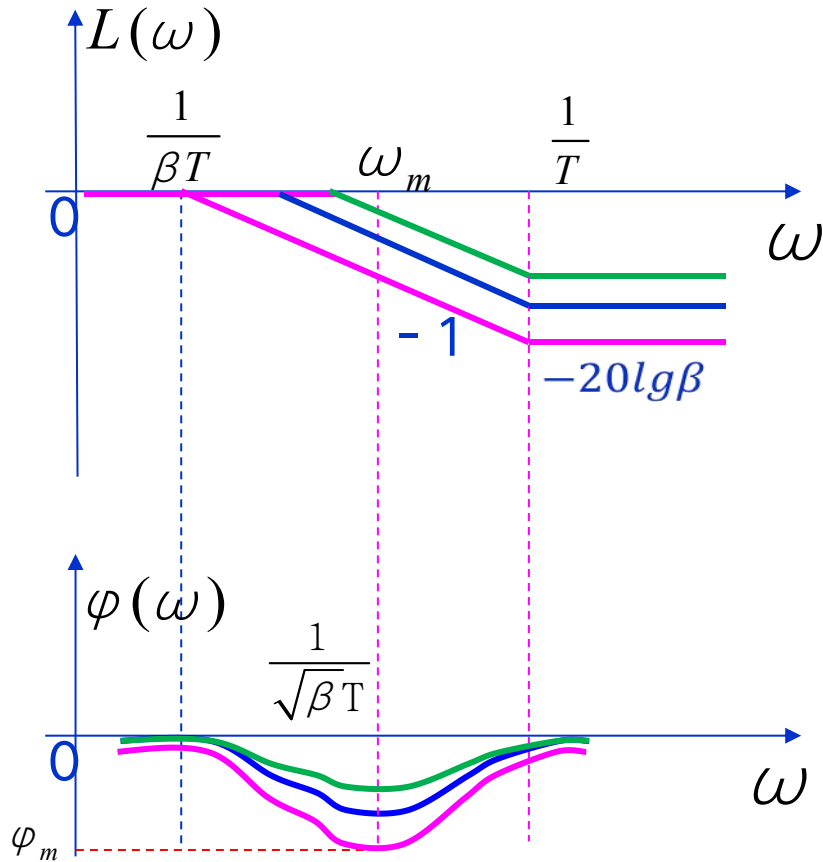
$$\beta = \frac{1 - \sin \varphi_m}{1 + \sin \varphi_m}$$





6.3 串联校正

3. 滞后校正装置的特性



$$\varphi_m = \arcsin \frac{1 - \beta}{1 + \beta}$$

$$\beta = \frac{1 - \sin \varphi_m}{1 + \sin \varphi_m}$$

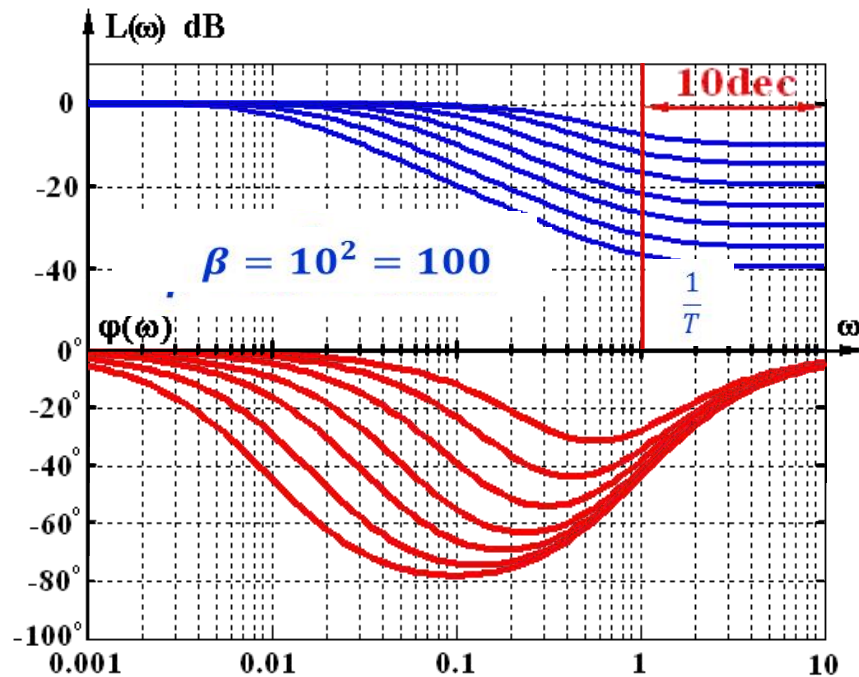
► 开环对数频率特性的
中频部分增益↓
交界频率↓
稳定裕量↓

► 开环对数频率特性的
高频部分增益↓
稳态精度↑



6.3 串联校正

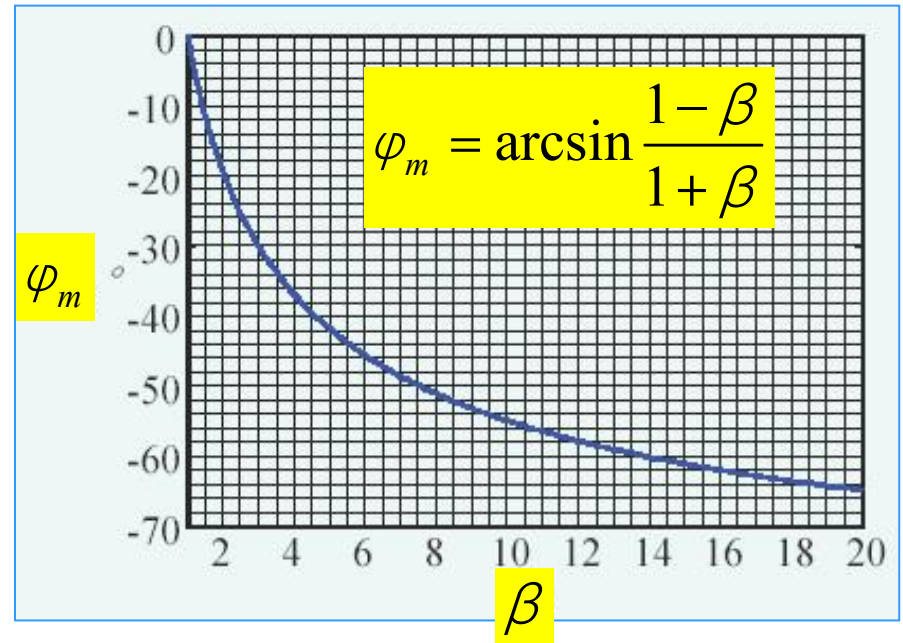
- ▶ 滞后校正装置实质上是一个**低通滤波器**，它对低频信号基本上无衰减作用，但能削弱高频噪声。
- ▶ β 越大，抑制噪声能力越强。





6.3 串联校正

- ▶ β 越大，**相位滞后**越严重。
- ▶ 应尽量使产生最大滞后相角的频率 ω_m **远离**校正后系统的幅值穿越频率 ω_c ，否则会对系统的动态性能产生不利影响。



▶ 通常选择 $\beta = 10$ ，（此时 $\varphi_m = -55^\circ$ ）。



6.3 串联校正

4. 滞后校正网络的作用原理（放在低频段）

► 对于稳定的系统

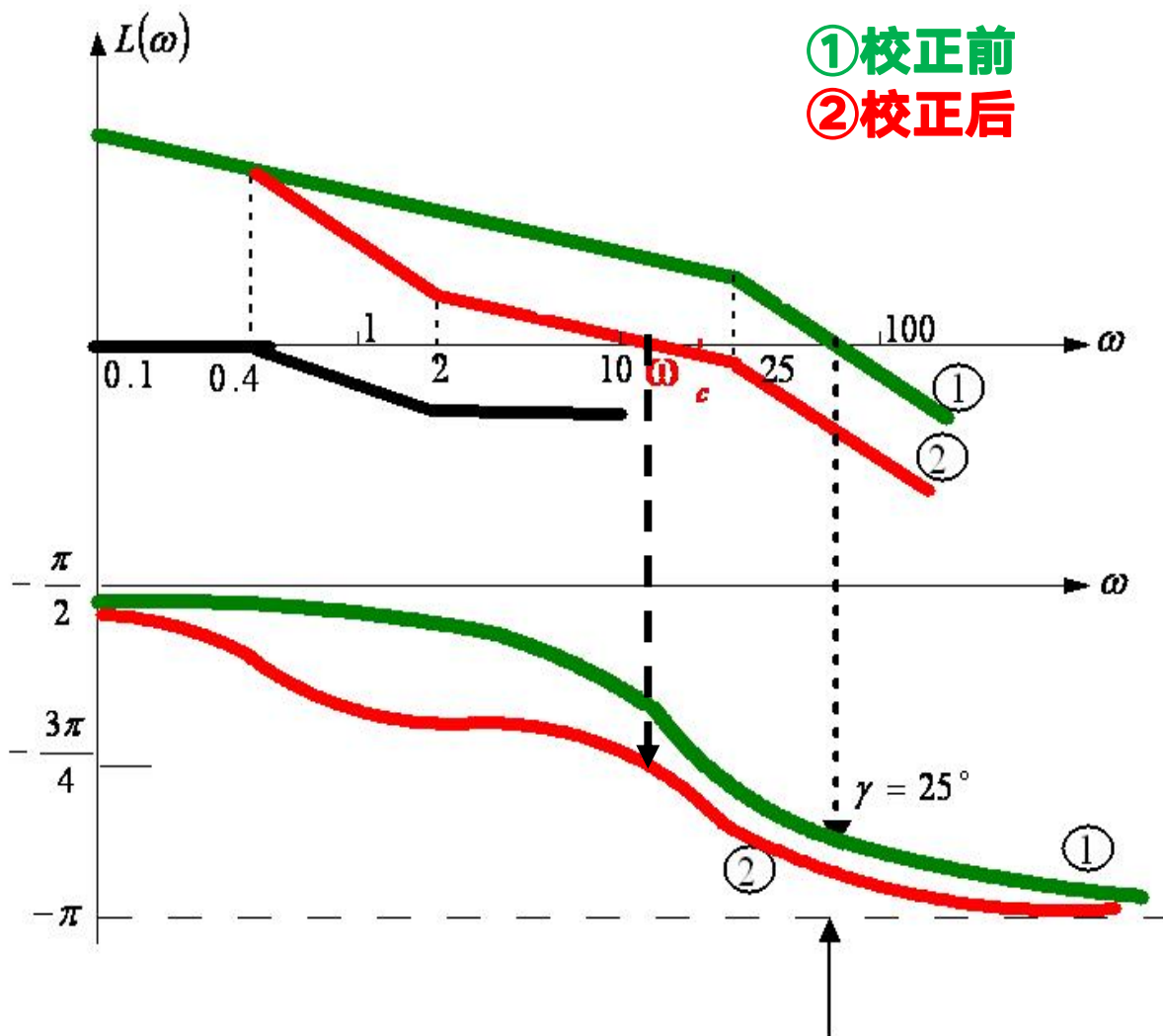
- 利用其高频衰减特性，降低中、高频段增益，提高系统的抗干扰能力；
- 不影响稳态准确度；
- $1/\beta T$ 和 $1/T$ 向左远离 ω_c ，使 ω_c 附近的相位不受滞后环节的影响。

► 对于不稳定的系统

- 增益降低使得 ω_c 减小，从而增大相角裕度，改善稳定性。

副作用：

降低了系统的快速性。





6.3 串联校正

5.用伯德图设计滞后校正网络

- (1) 根据稳态误差的设计要求，确定原系统的增益 K ，画出伯德图；
- (2) 计算原系统的相角裕度，如不满足要求，则进行下面的设计步骤；
- (3) 计算能满足相角裕度设计要求的交接频率 ω_c' 。计算期望交接频率时，考虑滞后校正网络引起的附加滞后相角。**工程上该滞后相角的预留值取 5° 。**
- (4) 配置零点 $\omega_z=1/T$ 。该零点频率一般比**预期交接频率**小10倍频程；



6.3 串联校正

- (5) 根据 ω_c' 和原系统对数幅频特性曲线，确定增益衰减；
- (6) 在 ω_c' 处，滞后校正网络产生的增益衰减为 $-20\lg\beta$ 。由此确定 β 值；
- (7) 计算极点 $\omega_p = 1 / \beta T = \omega_z / \beta$ ；
- (8) 验证结果。



6.3 串联校正

例2 二阶单位负反馈控制系统，开环传递函数为

$$G(s) = \frac{K}{s(0.5s + 1)}$$

设计滞后校正装置，给定的设计要求为：系统的相角裕度不小于 45° ，系统斜坡响应的稳态误差为5%。

解： $G(s) = \frac{K}{s(0.5s + 1)}$ **I型系统** $K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s) = K \Rightarrow e_{ss} = \frac{1}{K_v}$

由题意知系统斜坡响应的稳态误差为5%，则系统的静态速度误差系数应该为 $K_v=20$ 。

由此可知未校正系统的开环频率特性函数为：

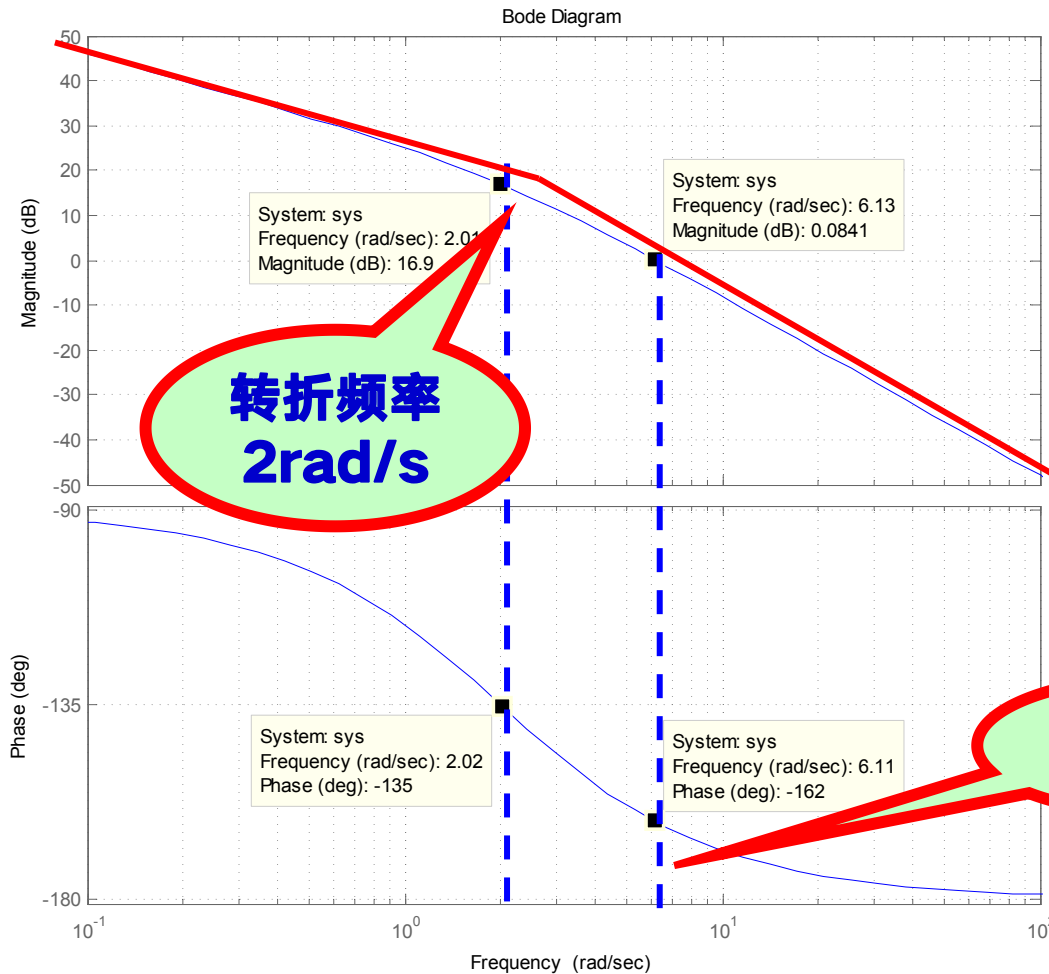
$$G(j\omega) = \frac{K_v}{j\omega(0.5j\omega + 1)} = \frac{20}{j\omega(0.5j\omega + 1)}$$



6.3 串联校正

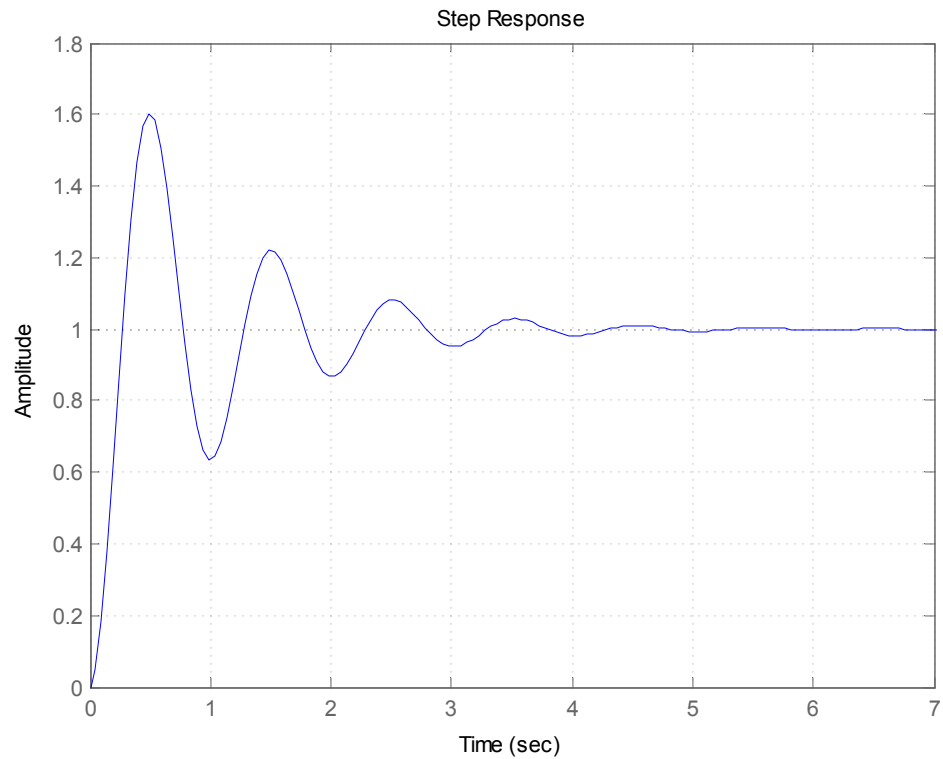
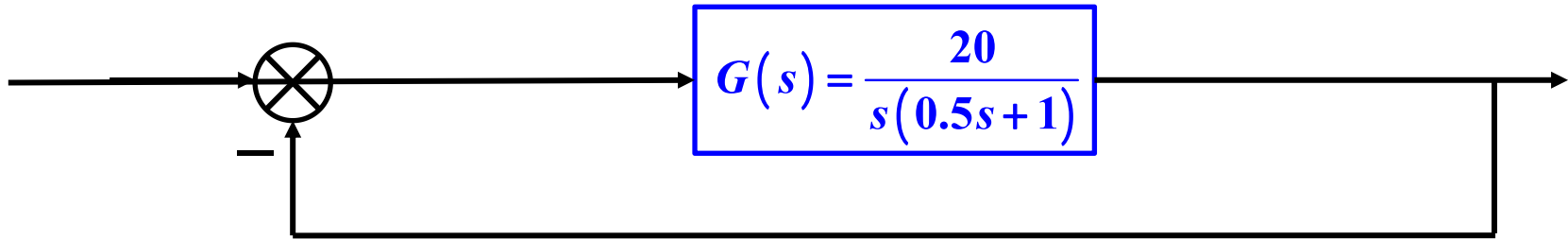
(1) (2) (3) 同超前校正网络

$$G(j\omega) = \frac{20}{j\omega(0.5j\omega + 1)}$$



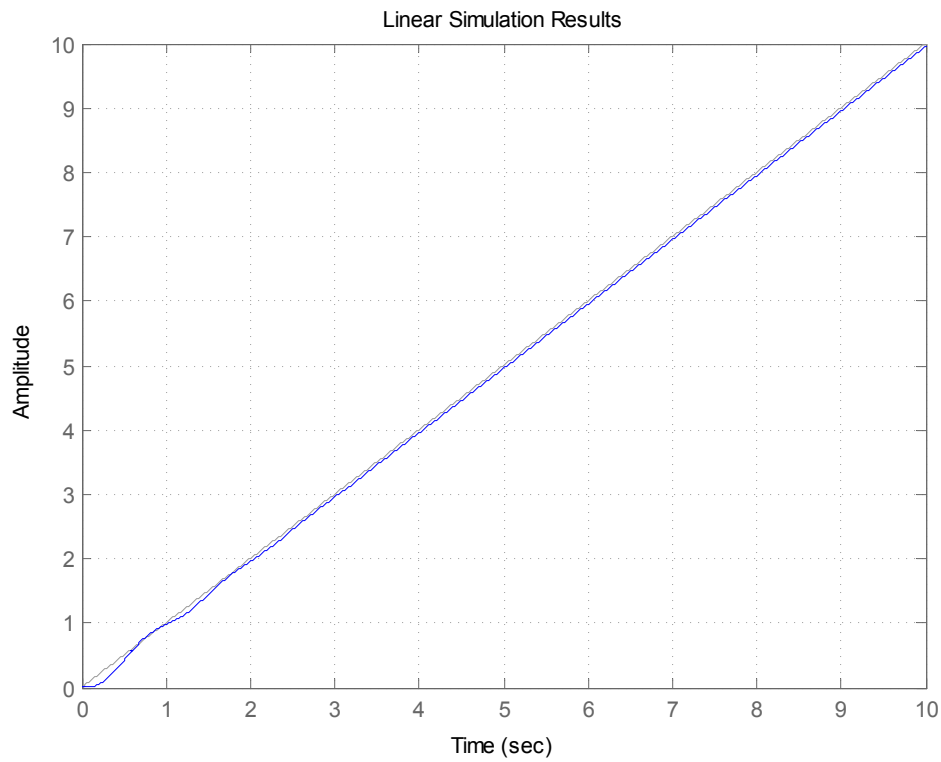
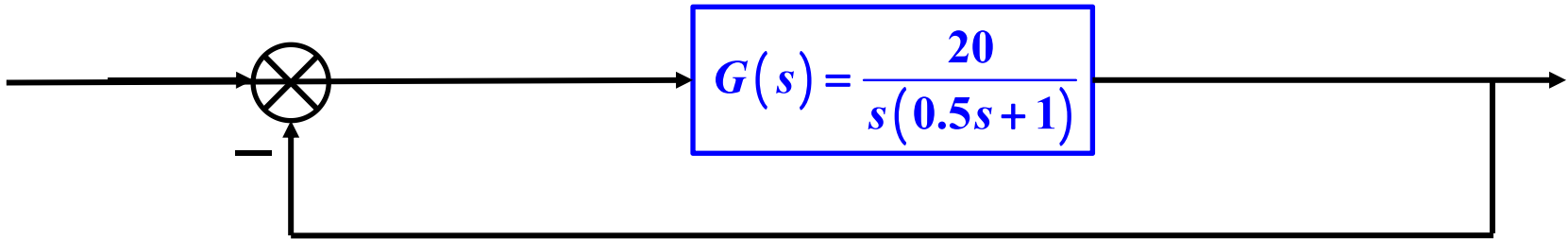


6.3 串联校正





6.3 串联校正





6.3 串联校正

分析：由于所引入的是滞后校正（典型的如PI控制器），为避免影响系统中频段的性能，滞后校正网络的作用在低频段引入，对本系统即**转折频率2rad/s**之前。

在频率 $\omega = 2 \text{ rad/s}$ 处，幅频20dB，相角恰好 -135° ，考虑 5° 附加相角滞后，则确定预定交接频率为相角 -130° 处对应的频率。

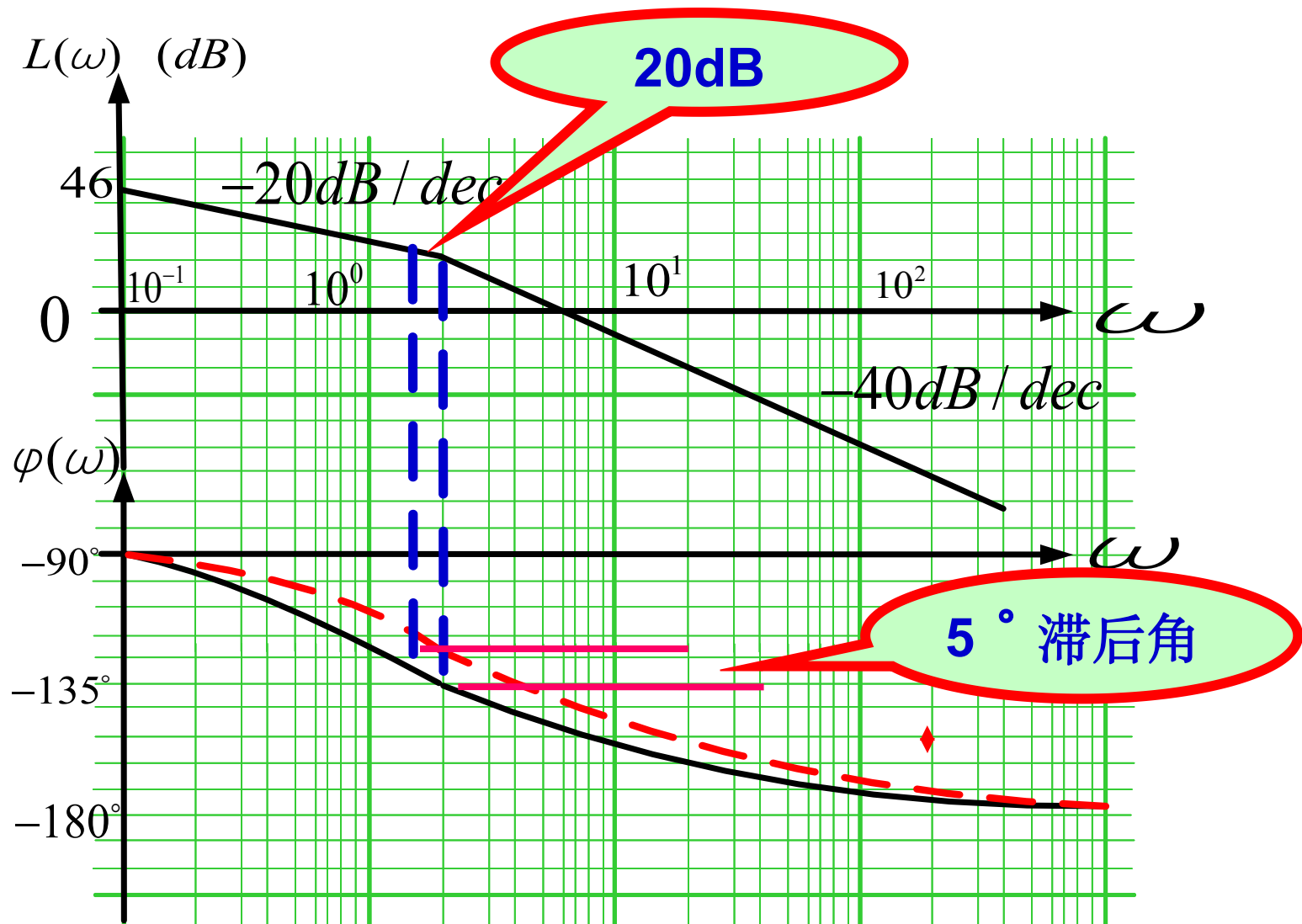
$$\varphi(\omega'_c) = -90^\circ - \arctan(-0.5\omega'_c) = -130^\circ$$

$$\Rightarrow \omega'_c \approx 1.5 \text{ rad / s}$$

$$L(\omega'_c) = 20 \text{ dB}$$



6.3 串联校正





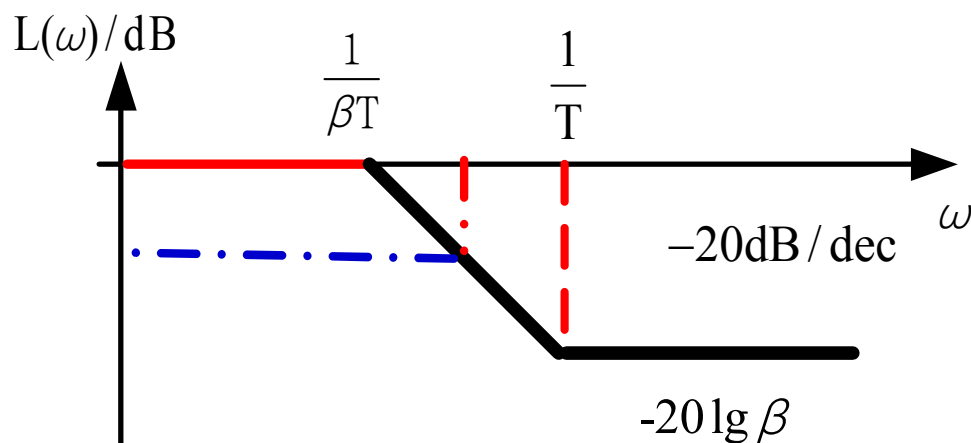
6.3 串联校正

(4) 确定 β

校正后预定交接频率即为新的穿越频率，而校正网络在新的穿越频率增益为 $-20\lg\beta$ ，即：

$$L(\omega_c') - 20\lg\beta = 20 - 20\lg\beta = 0 \Rightarrow \beta = 10$$

滞后校正网络的零点大于极点，一般取预定交接频率的十分之一。



$$\frac{1}{T} = 0.15$$

$$\frac{1}{\beta T} = 0.015$$



6.3 串联校正

(5) 计算校正网络传函

根据计算的滞后校正网络的传递函数：

$$G_c(s) = \frac{1 + \frac{s}{0.15}}{1 + \frac{s}{0.015}} = \frac{1 + 6.67s}{1 + 66.7s}$$

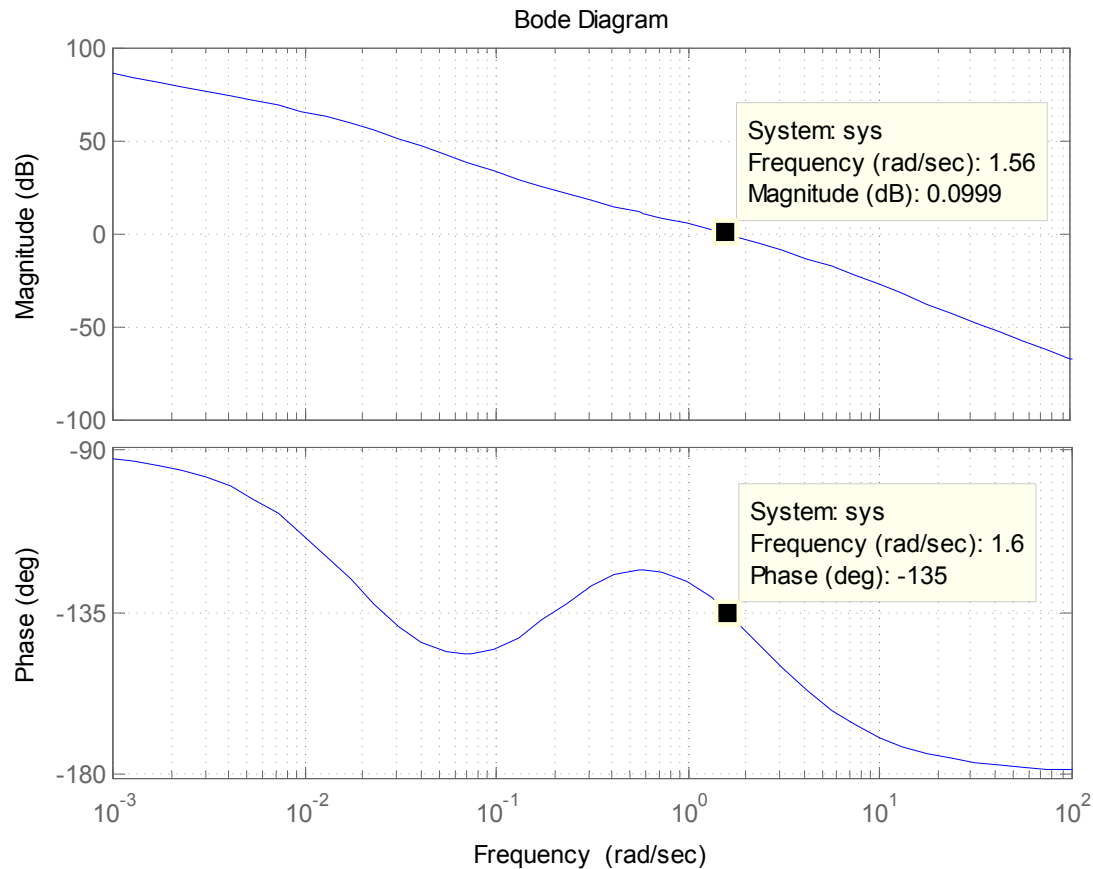
(7) 验证结果

$$\begin{aligned}\gamma &= 180^\circ + \varphi(\omega_c) \big|_{\omega_c=1.5} \\ &= 180^\circ + \arctan\left(\frac{\omega_c}{0.15}\right) - 90^\circ - \arctan(0.5\omega_c) - \arctan\left(\frac{\omega_c}{0.015}\right) \\ &= 48.1^\circ > 45^\circ\end{aligned}$$



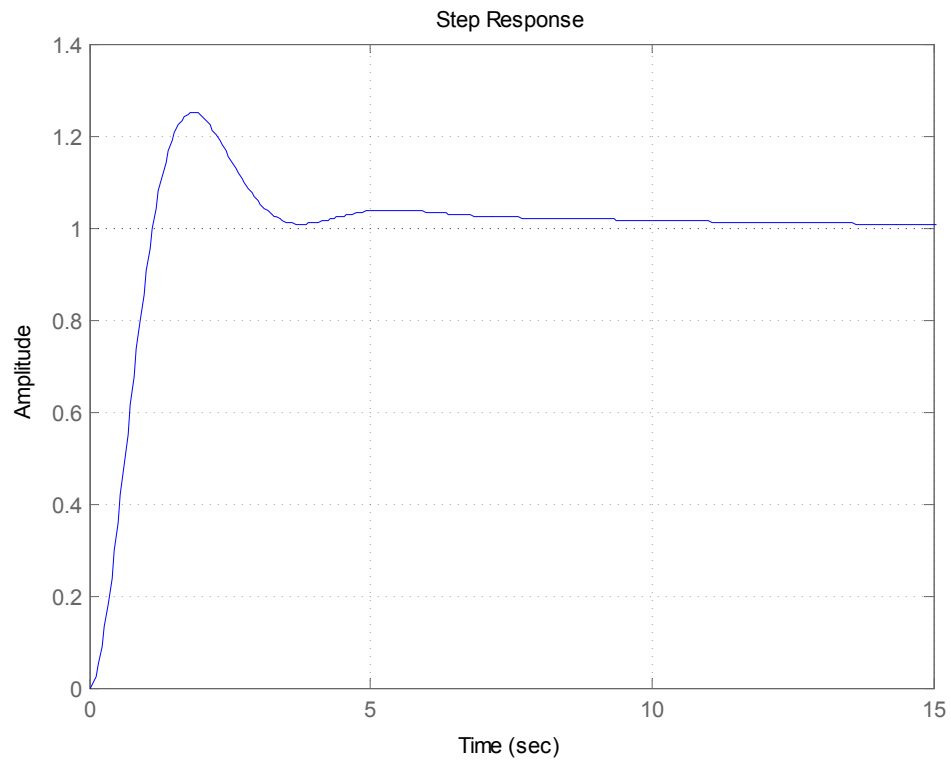
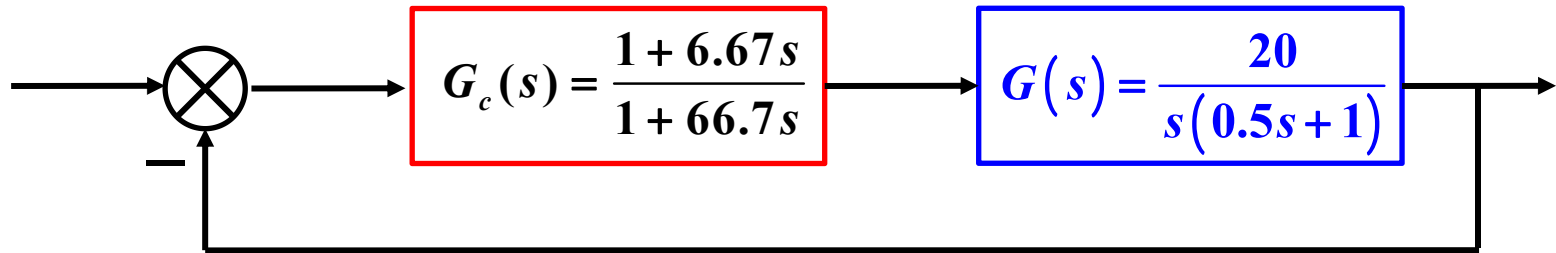
6.3 串联校正

$$G(j\omega)G_c(s) = \frac{20(1 + 6.67s)}{j\omega(0.5j\omega + 1)(1 + 66.7s)}$$



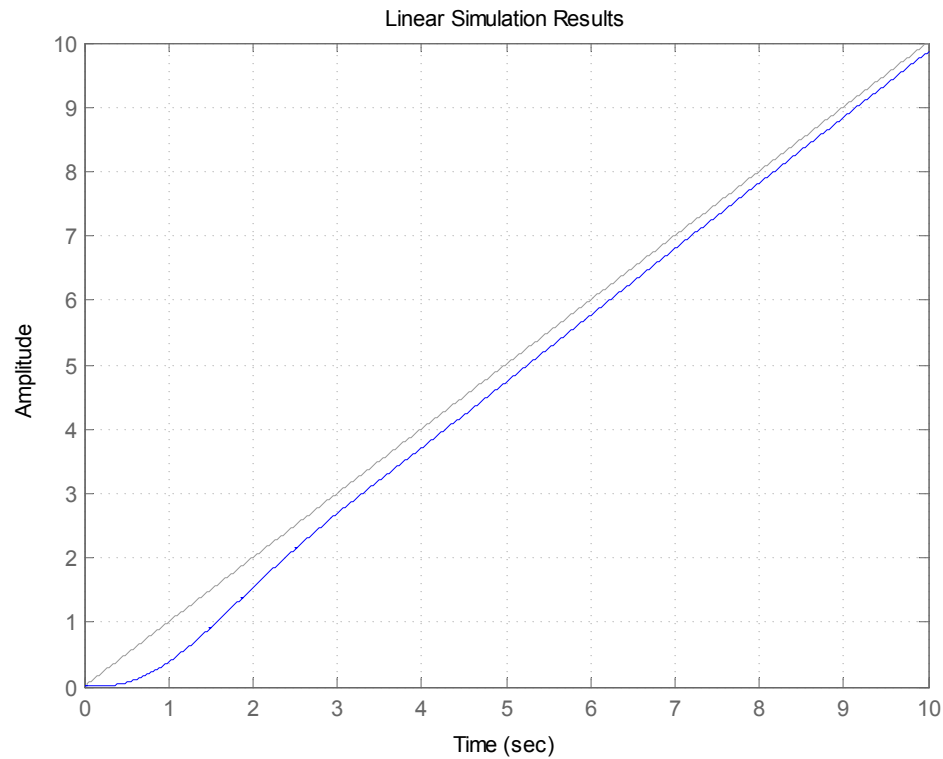
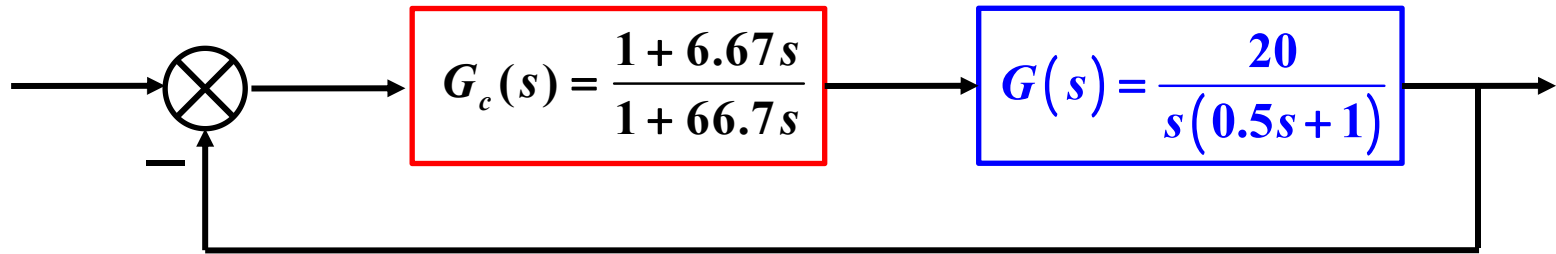


6.3 串联校正



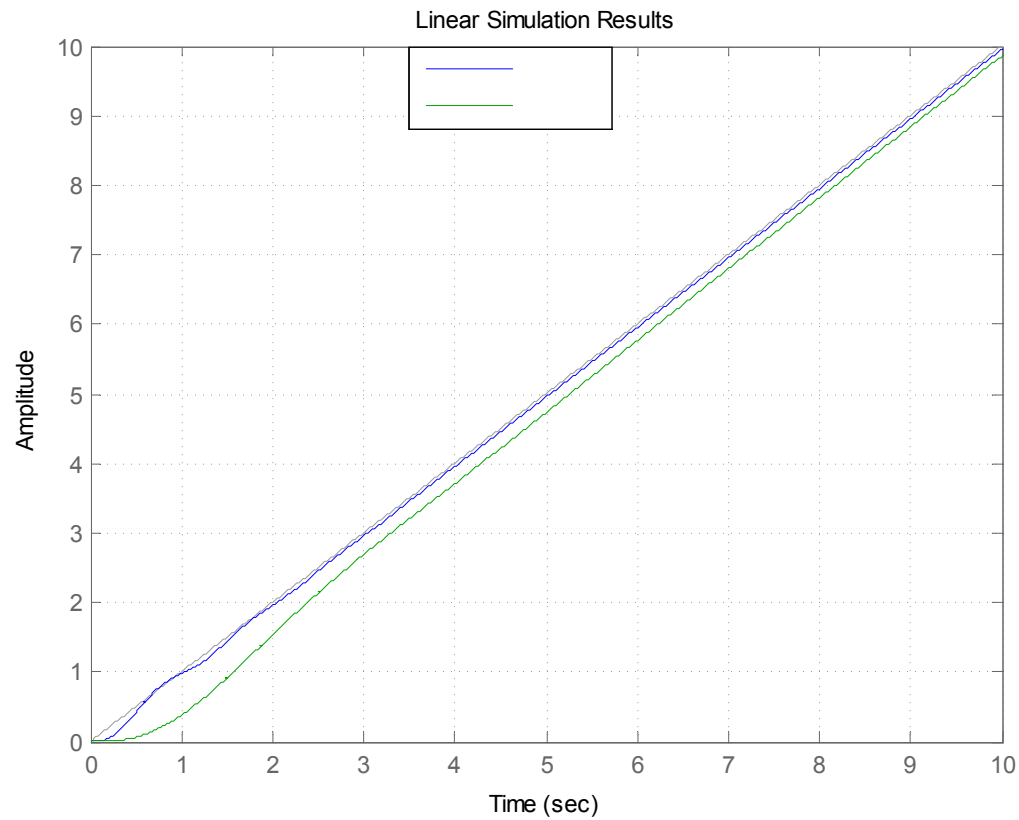
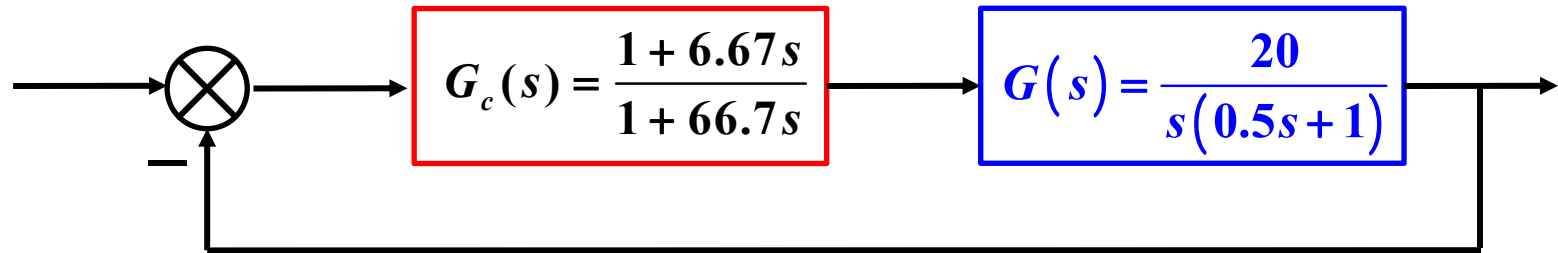


6.3 串联校正





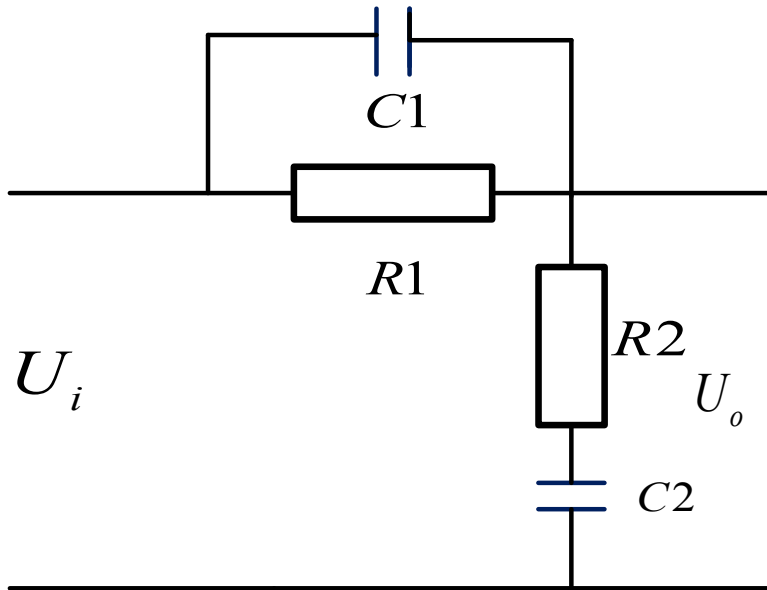
6.3 串联校正





6.3 串联校正

三、滞后超前校正网络



$$G_c(s) = \frac{T_2 s + 1}{\beta T_2 s + 1} \cdot \frac{a T_1 s + 1}{T_1 s + 1}$$

$$\beta \geq a > 1, T_2 > a T_1$$

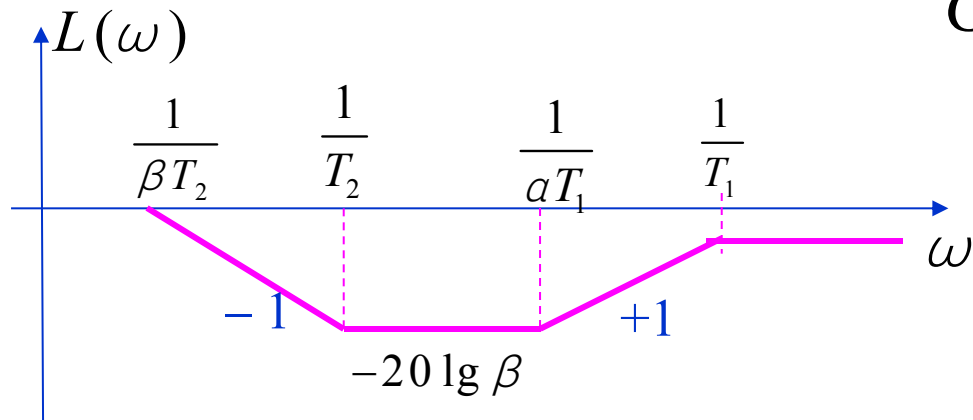
作用:

超前: 增加相角裕量, 提高系统的稳定性 (动);

滞后: 增加中高频衰减特性, 不影响低频段幅值 (静)。

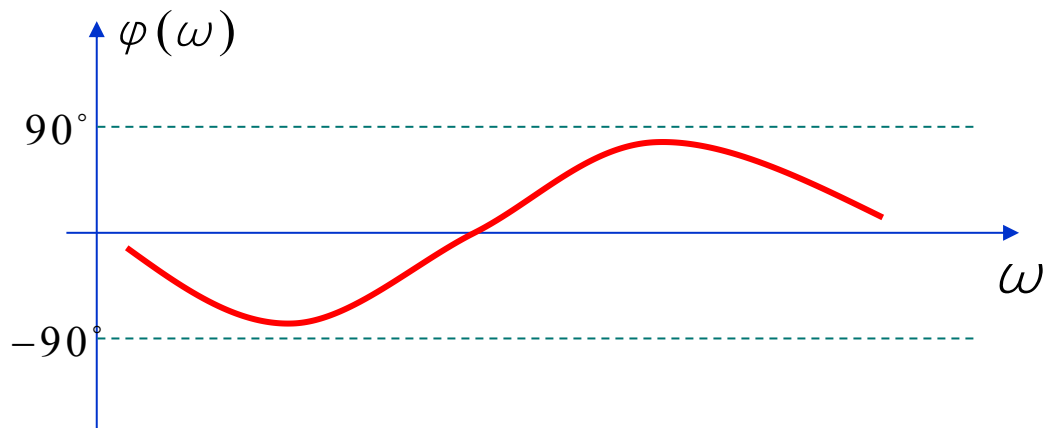


6.3 串联校正



$$G_c(s) = \frac{T_2 s + 1}{\beta T_2 s + 1} \cdot \frac{a T_1 s + 1}{T_1 s + 1}$$

$$\beta \geq a > 1, T_2 > a T_1$$



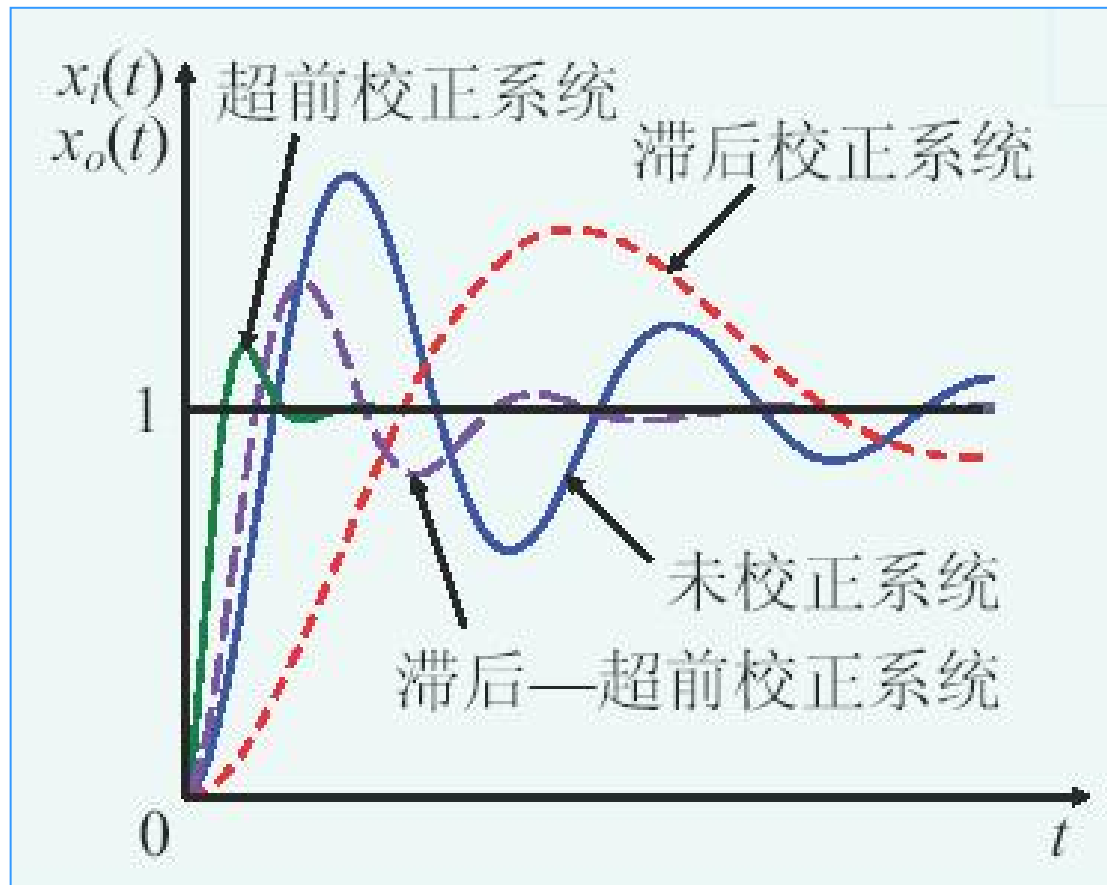
作用:

超前: 增加相角裕量, 提高系统的稳定性 (动);

滞后: 增加中高频衰减特性, 不影响低频段幅值 (静)。



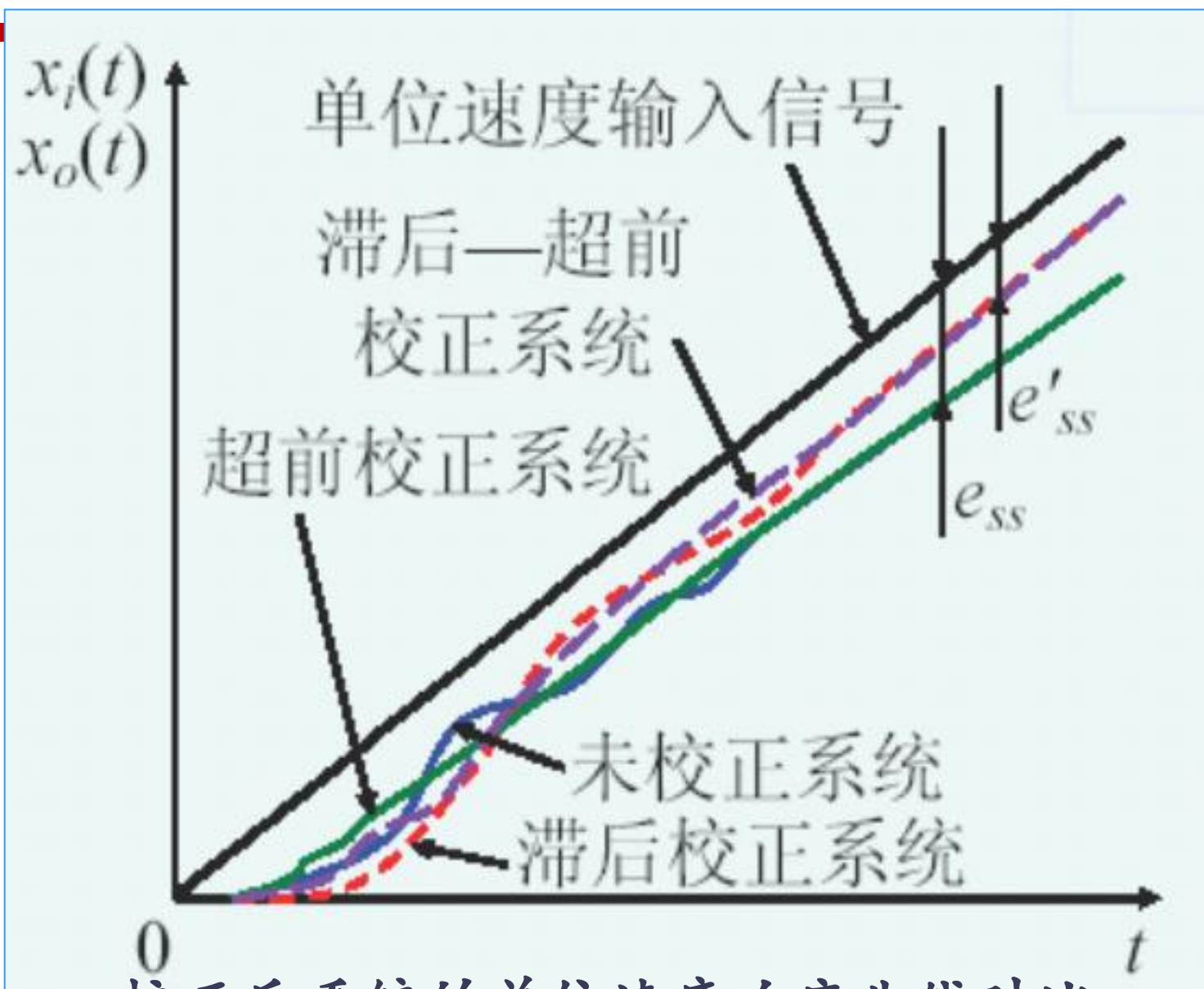
6.3 串联校正



校正后系统的单位阶跃响应曲线对比



6.3 串联校正



校正后系统的单位速度响应曲线对比



6.3 串联校正

例3 设未校正系统的开环传递函数为

$$G_0(s) = \frac{K}{s(0.5s + 1)(0.167s + 1)}$$

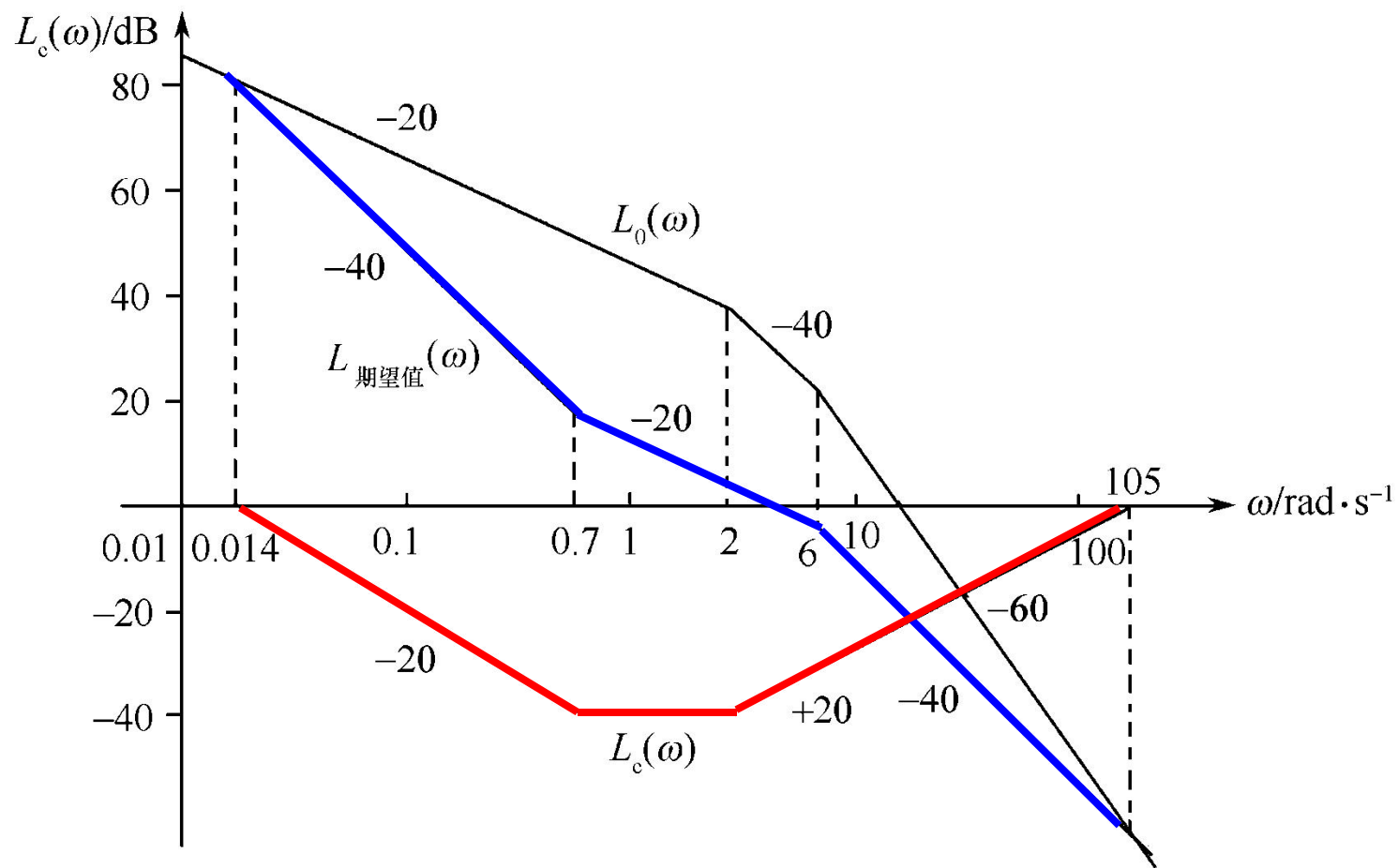
试设计串联校正装置，使系统满足

$$\gamma \geq 40^\circ, \quad K_v \geq 180 s^{-1}, \quad 3 < \omega_c < 5 s^{-1}。$$

解 作出 $K=K_v = 180 s^{-1}$ 时未校正系统Bode图中的对数幅频特性，如图所示。



6.3 串联校正





6.3 串联校正

未校正系统的开环剪切频率 $\omega_{c0} = 12.9 \text{ s}^{-1}$;

对应的相角裕量 $\gamma_0 = -56.35^\circ$;

需进行串联校正，确定按期望特性来设计串联校正装置。

确定系统期望的对数幅频特性如下：

- **低频段**，根据稳态精度要求，开环增益不低于180与未校正系统重合；
- **中频段**，根据 $3 < \omega_c < 5 \text{ s}^{-1}$ ，及 $\gamma \geq 40^\circ$ 要求，选取 $\omega_c = 3.5 \text{ s}^{-1}$ 且中频段斜率为 -20 dB/dec ，并且具有适当宽度；



6.3 串联校正

□ **连接段**，低频向中频段过渡段的斜率选择为 $-40dB/dec$ ，且第二个转折频率不易接近剪切频率，通常选择

$$\omega_2 = \frac{\omega_c}{2} \sim \frac{\omega_c}{10}$$

本例选择

$$\omega_2 = \frac{\omega_c}{5} = 0.7s^{-1}$$

为使校正装置简单，低频段与连接段的转折频率直接选择二者的交点频率 $\omega_1 = 0.014 s^{-1}$



6.3 串联校正

□ **高频段**，对高频段无过高要求，通常高频段与未校正特性近似即可，但同时应保证中频的宽度和校正装置简单，在此选择中频向高频过渡的第一个转折频率 $\omega_3 = 6 \text{ s}^{-1}$ ，第二个转折频率为过渡段与未校正特性的交点 $\omega_4 = 105 \text{ s}^{-1}$ 。

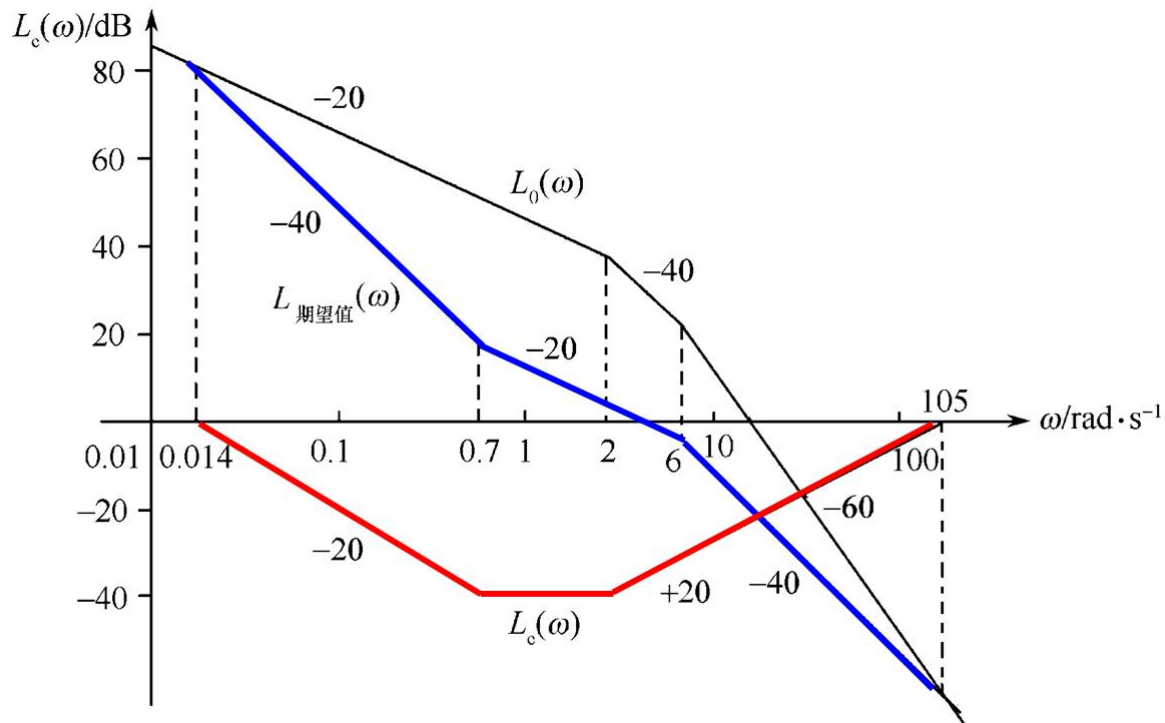
□ **期望的对数幅频特性**如图中 $L_{\text{期}}(\omega)$ 。

□ **根据串联校正特点**

$$L_c(\omega) = L_{\text{期}}(\omega) - L_0(\omega)$$



6.3 串联校正



求出校正装置的的对数幅频特性，如图中 $L_c(\omega)$ 所示，由 $L_c(\omega)$ 写出校正装置的传递函数

$$G_c(s) = \frac{(1.43s + 1)(0.5s + 1)}{(71.4s + 1)(0.0095s + 1)}$$



6.3 串联校正

检验校正后系统的相角裕量

$$\begin{aligned}\gamma &= 180^\circ - 90^\circ + \arctan 1.43\omega_c - \arctan 71.4\omega_c \\ &\quad - \arctan 0.167\omega_c - \arctan 0.0095\omega_c \\ &= 46.8^\circ\end{aligned}$$

满足性能指标要求。



6.3 串联校正

例4 待校正系统开环传递函数为

$$G_o(s) = \frac{K_v}{s \left(\frac{1}{6}s + 1 \right) \left(\frac{1}{2}s + 1 \right)}$$

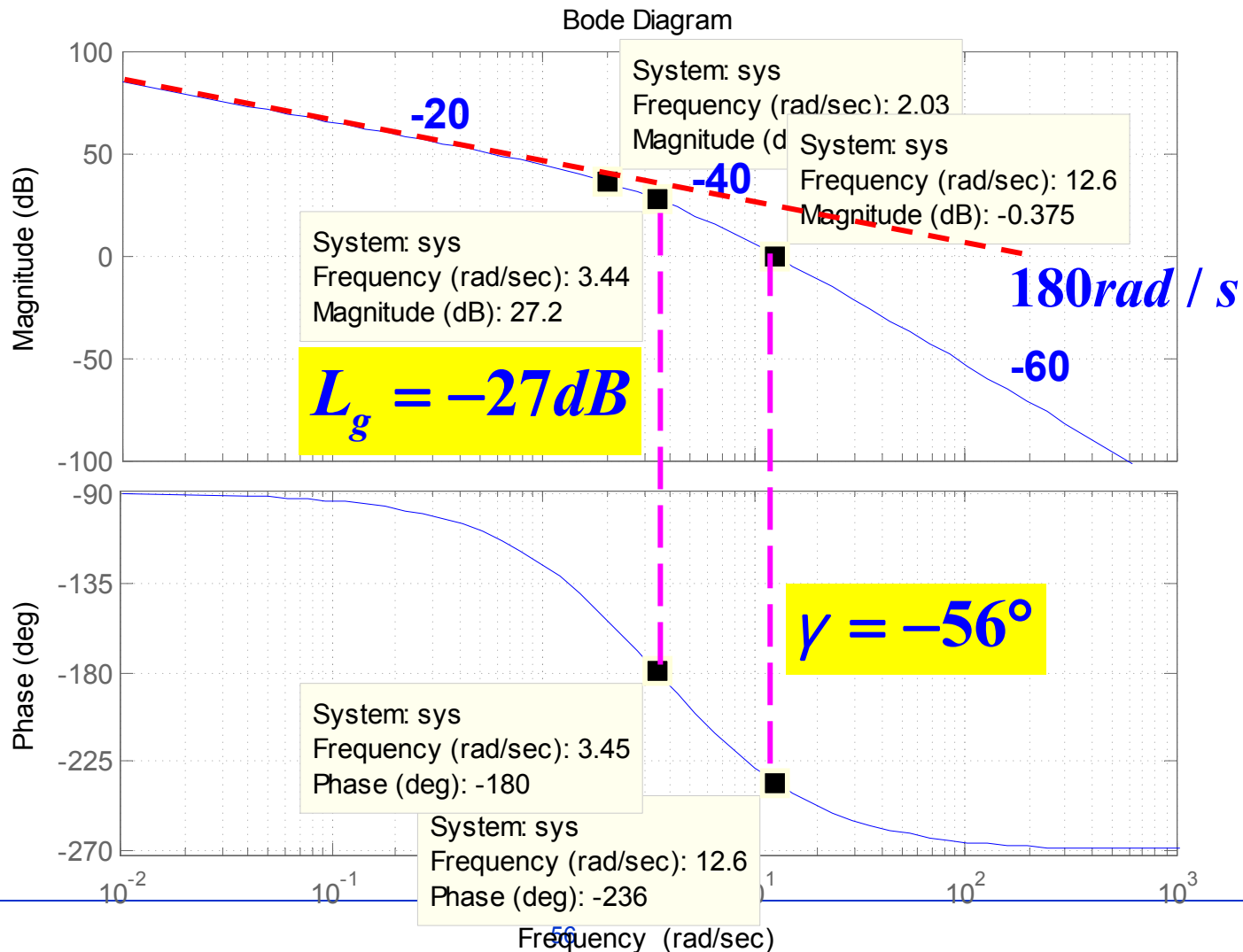
设计滞后校正装置，给定的设计要求为：

- (1) 在最大指令速度为 $180^\circ/\text{s}$ 时，位置滞后误差不超过 1° 。
- (2) 系统的相角裕度不小于 $45^\circ \pm 3^\circ$ ；
- (3) 幅值裕度不低于 10dB；
- (4) 动态调节时间不超过 3s。



6.3 串联校正

解：由题意，确定开环增益： $K = K_v = 180s^{-1}$





6.3 串联校正

详细过程见胡寿松教材P253



第六章 控制系统的校正

Thank You !