

通过超前校正分析可知：

- 1) 提高了控制系统的相对稳定性和平稳性—— $16.12^0 \rightarrow 42.4^0$   
使系统的稳定裕量增加，超调量下降。
- 2) 加快了控制系统的反应速度——过渡过程时间减小。由于串联超前校正的存在，使校正后系统的 $\omega_c$ 变大了，会使系统响应速度变快。
- 3) 系统的抗干扰能力下降了一 高频段抬高了。
- 4) 控制系统的稳态性能是通过步骤(1)中改变原校正系统的开环增益来保证的。

### 应用超前校正的几个限制条件:

- 1、如果 $\gamma_0 < \gamma_{\text{要}}$ ,  $\omega_{c0} < \omega_c$  = 希望的 $\omega_c$ , 可以采用超前校正
- 2、原系统稳定; (否则需要的超前相角大, 噪声对系统干扰严重, 甚至可以导致系统不稳定)
- 3、原系统在剪切频率附近相角迅速减小的系统不适用该校正方法

## 二、串联相位滞后校正

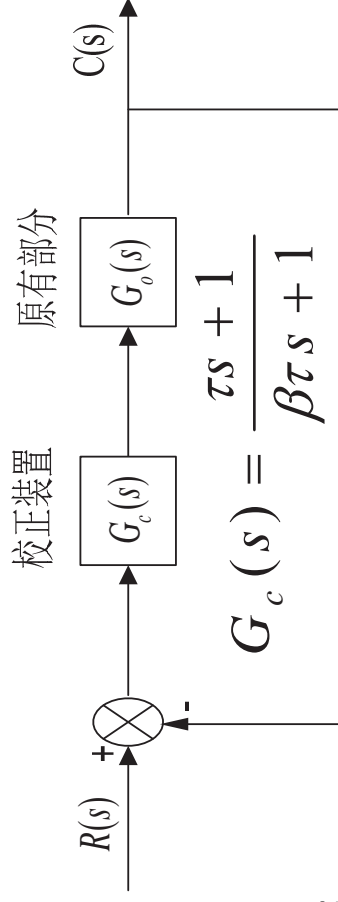
$$G(s) = G_o(s) \bullet G_c(s)$$

采用串联滞后校正有两种作用：

1. 提高低频段增益，减小系统的稳态误差。
2. 利用滞后校正装置的高频衰减特性，降低系统的剪切频率，提高系统的相角裕量，以改善稳定性和某些暂态性能。

都应避免使最大滞后角发生在系统的剪切频率附近。

为了使这个滞后角尽可能地小，理论上总希望  $G_c(s)$  两个转折频率  $\omega_1, \omega_2$  比  $G(s)$  的  $\omega_c$  越小越好，但考虑物理实现上的可行性，一般取



$$\omega_2 = \frac{1}{\tau} = \left( \frac{1}{2} \sim \frac{1}{10} \right) \omega_c$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\beta \tau} = \frac{1}{\beta} \omega_2$$

### 设计滞后校正装置的步骤(1)-(7)

原系统频率特性+校正装置频率特性=期望频率特性

$$G_0(j\omega) \quad G_c(j\omega) \quad G(j\omega)$$

(1)-(2)确定原系统 **$G_0(s)$** 频率特性(Bode图)

(3)-(5)按**性能指标**确定滞后校正装置中的参数

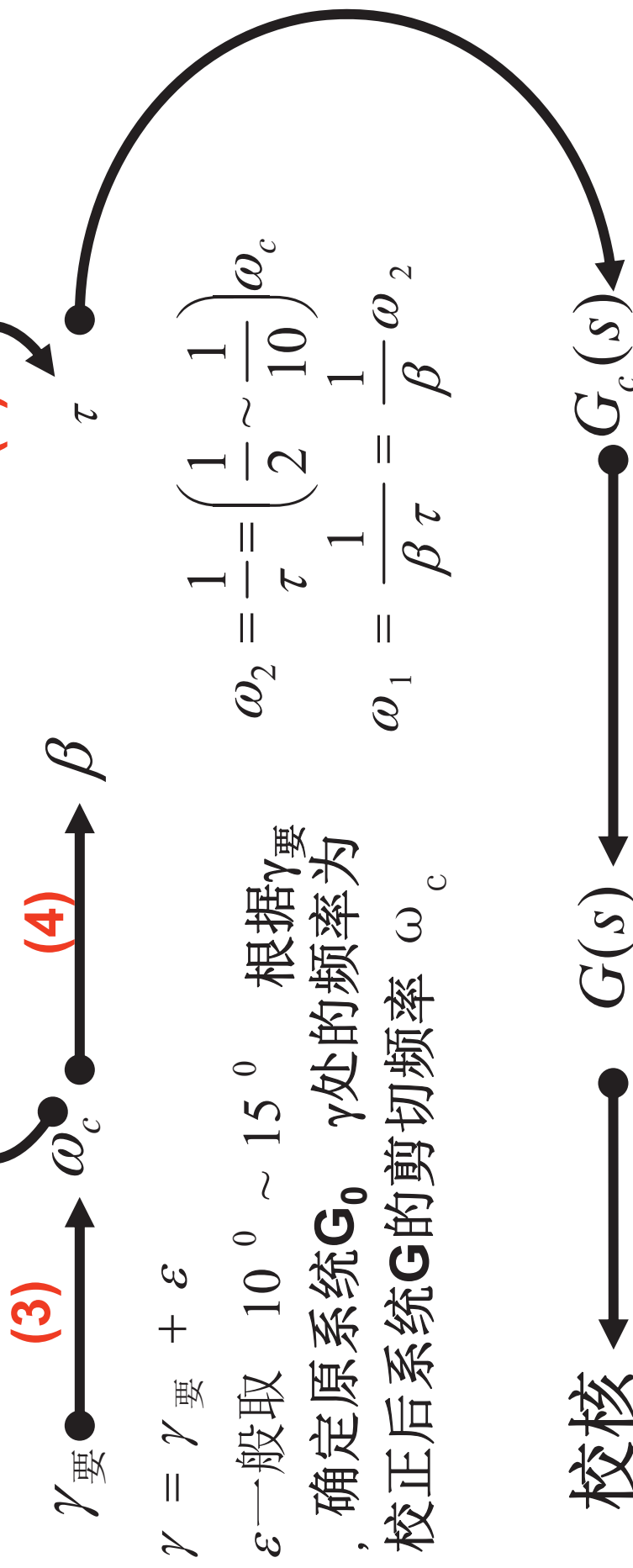
$$G_c(s) = \frac{\tau s + 1}{\beta \tau s + 1}$$
$$\omega_2 = \frac{1}{\tau} = \left( \frac{1}{2} \sim \frac{1}{10} \right) \omega_c$$
$$\omega_1 = \frac{1}{\beta \tau} = \frac{1}{\beta} \omega_2$$

(6)-(7)确定校正后 **$G(s)$** “期望”频率**Bode**图，并检验其是否满足性能要求。

## §6-5 频率法串联校正的设计

67

(3)–(5) 步骤:



校核

$$G(s) \longleftrightarrow G(s) \longleftrightarrow G_c(s)$$

$$G(s) = G_o(s) \bullet G_c(s)$$

$$G_c(s) = \frac{\tau s + 1}{\beta \tau s + 1} \quad \beta > 1$$

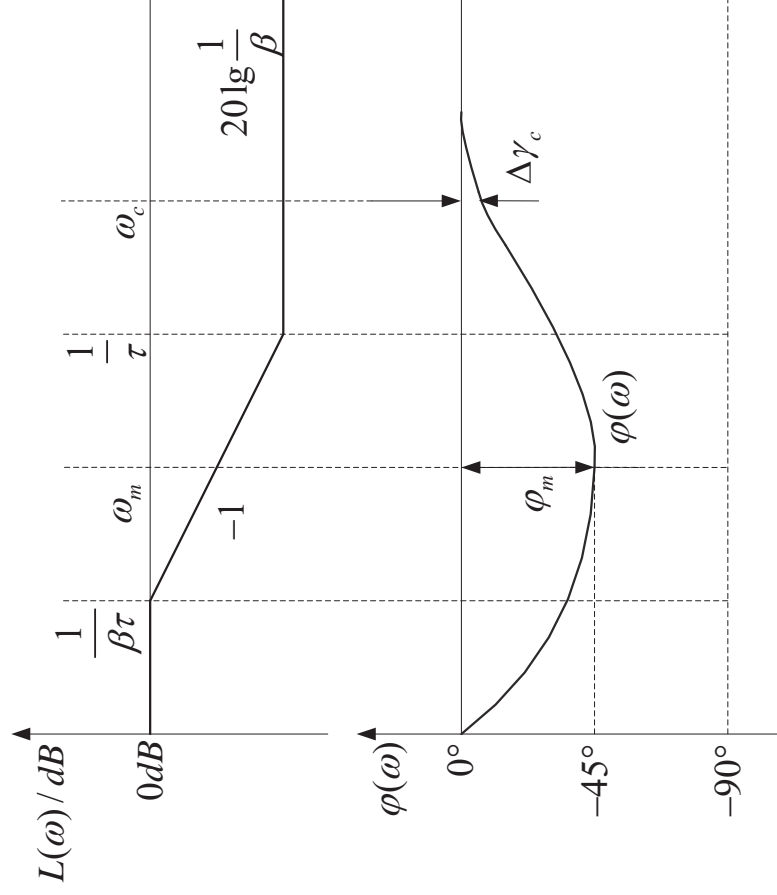
$$G_c(s) = \frac{\tau s + 1}{\beta \tau s + 1}$$

$$G(s) = G_o(s) \bullet G_c(s)$$

在应用时， $\omega_m$  《  $\omega_c$

$$20\lg|G(j\omega_c)| = 20\lg[|G_o(j\omega_c) \cdot G_c(j\omega_c)|] = 0$$

$$20\lg|G_o(j\omega_c)| + 20\lg|G_c(j\omega_c)| = 0$$



$$\begin{aligned} 20\lg|G_o(j\omega_c)| &= -20\lg|G_c(j\omega_c)| \\ &= -20\lg(1/\beta) = 20\lg\beta \end{aligned}$$

利用迟后校正装置的高频  
衰减特性

例：设单位反馈系统的开环传递函数为

$$G_0(s) = \frac{K}{s(s+1)(0.25s+1)}$$

设计串联滞后校正装置

要求校正后，稳态速度误差系数 $K_v=5$ ， $\gamma \geq 40^\circ$ ， $\omega_c \geq 0.5s^{-1}$

解：（1）根据稳态误差要求，确定开环增益 $K$

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG_0(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sK}{s(s+1)(0.25s+1)} = K$$

即  $K=5$

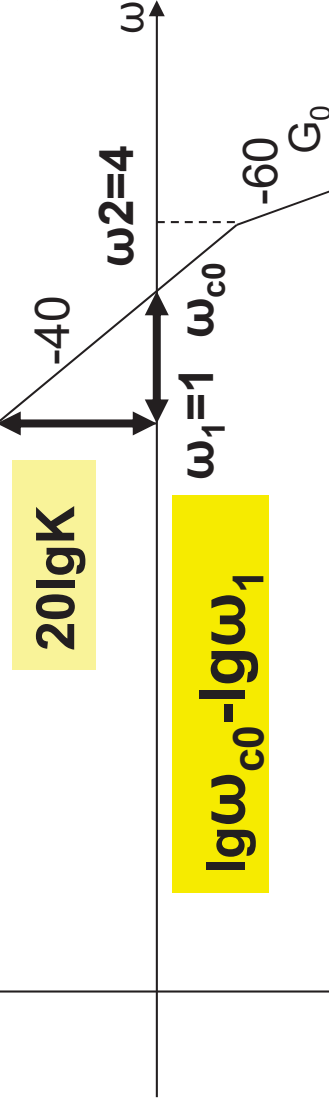
原系统的频率特性

$$G_0(s) = \frac{5}{j\omega(j\omega+1)(0.25j\omega+1)}$$

$$G_0(s) = \frac{5}{j\omega(j\omega + 1)(0.25j\omega + 1)}$$

(2) 作出原系统Bode图，  
求出原系统  $\omega_{c0}$  和  $\gamma_0$

$$\frac{20 \lg K}{\lg \omega_{c0} - \lg \omega_1} = 40$$



$$\omega_{c0} = K^{1/2} \omega_1 = 2.24$$

$$\gamma_0 = 180^\circ + (-90^\circ - \arctg \omega_{c0} - \arctg 0.25 \omega_{c0}) = -5.1^\circ$$

可见原系统  $G_0$  不稳定

如果  $\gamma_0 < \text{希望的} \gamma_{\text{要}}$ ， $\omega_{c0} > \text{希望的} \omega_c$ ，可以采用滞后校正。



$$G_0(s) = \frac{5}{j\omega(j\omega + 1)(0.25j\omega + 1)}$$

(3) 选定原系统  $G_0(s)$   $\gamma$  处的频率为校正后系统的剪切频率  $\omega_c$ , 根据  $\gamma_{\text{要}}$ , 估算原系统需产生的  $\gamma$ , 确定剪切频率  $\omega_c$

$$\gamma = \gamma_{\text{要}} + \varepsilon = 40^\circ + 15^\circ = 55^\circ$$

其中  $\varepsilon = 10^\circ - 15^\circ$ 。

$$\gamma = 180^\circ + \varphi(\omega_c) = 180^\circ + (-90^\circ - \arctg 0.25\omega_c) = 55^\circ$$

$$\arctg \omega_c + \arctg 0.25\omega_c = 35^\circ \quad \arctg \frac{(1 + 0.25)\omega_c}{1 - 0.25\omega_c^2} = 35^\circ \quad \omega_c = 0.52 \text{ s}^{-1}$$

$$\arctg x \pm \arctg y = \arctg \frac{(x \pm y)}{(1 \mp xy)}$$

满足  $\omega_c \geq 0.5 \text{ s}^{-1}$  性能要求



(5) 确定滞后转折频率其校正装置

$$\omega_2 = \frac{1}{\tau} = \left( \frac{1}{2} \sim \frac{1}{10} \right) \omega_c \longrightarrow \omega_2 = \frac{1}{\tau} = \frac{\omega_c}{4} = 0.13 \quad \tau \approx 7.7$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\beta \tau} = \frac{1}{\beta} \omega_2 \longrightarrow \omega_1 = 0.013 \quad \beta \tau = 77$$

$$G_c(s) = \frac{\tau s + 1}{\beta \tau s + 1} = \frac{7.7s + 1}{77s + 1}$$

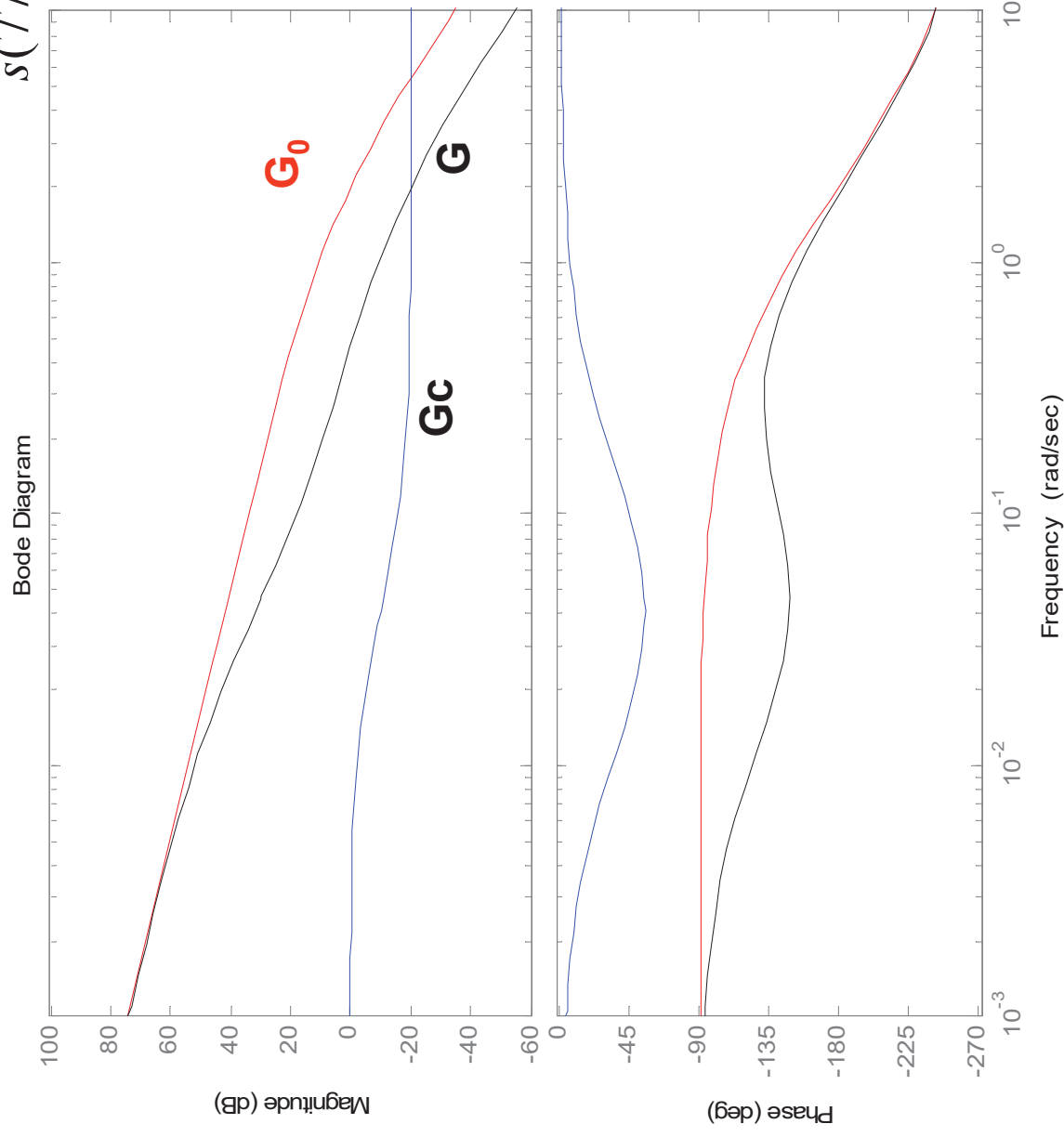
(6) 得校正后系统的开环传递函数

$$G(s) = G_c(s)G_0(s) = \frac{5(7.7s + 1)}{s(77s + 1)(s + 1)(0.25s + 1)}$$

## s6-5 频率法串联校正的设计

74

$$G(j\omega) = \frac{5(7.7j\omega + 1)}{s(77j\omega + 1)(j\omega + 1)(0.25j\omega + 1)}$$



(7) 作出校正后  
Bode图，验证 $\gamma$ 、 $\omega_c$ 进行校验

$$\begin{aligned}\gamma &= 180^\circ + \varphi(\omega_c) \\ &= 42.5^\circ > 40^\circ\end{aligned}$$

$$\omega_c = 0.52 > 0.5 \text{ s}^{-1}$$

通过滞后校正分析可知：

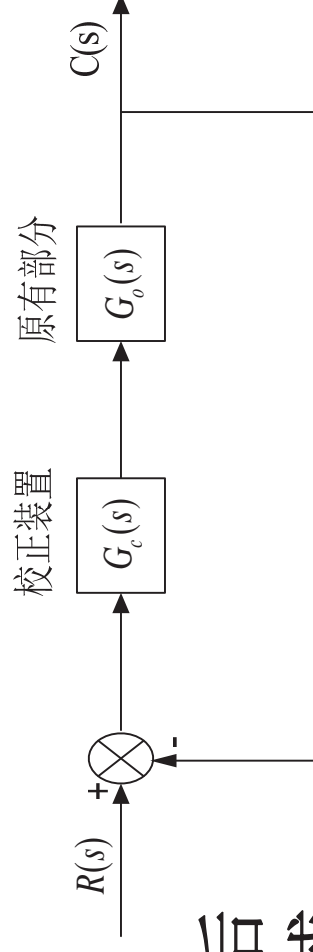
- 1) 改善了系统的稳定性和平稳性。降低系统的剪切频率，提高系统的相角裕量，保证了系统的稳定性和平稳性。
- 2) 响应速度变慢。滞后校正装置使系统的剪切频率降低，导致动态响应时间增大
- 3) 提高了系统的抗干扰能力 —— 高频段下降了。
- 4) 控制系统的稳态性能是通过步骤(1)中改变原校正系统的开环增益来保证的。

原系统相角裕量不够且响应速度很快时（如果 $\gamma < \gamma_{\text{要}}$ ， $\omega_{c0} > \omega_{c\text{要}}$ ），可以采用滞后校正来改善系统的某些性能。

注：原系统可以不稳定

$$G(s) = G_o(s) \bullet G_c(s)$$

单纯采用超前校正或滞后校正只能改善系统暂态或稳态一个方面

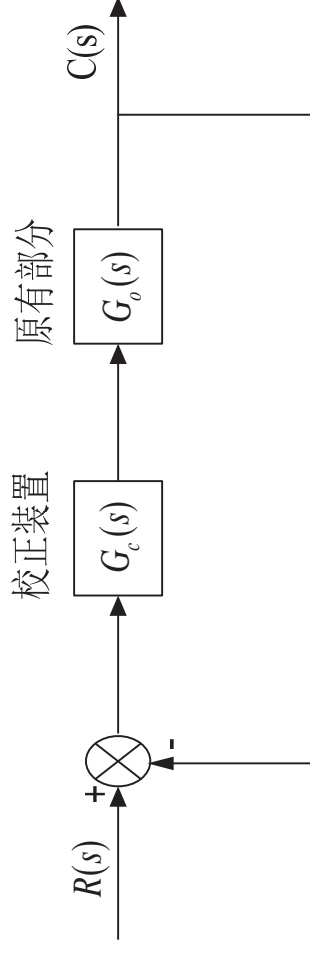


### 三、串联相位滞后 - 超前校正

若原系统不稳定，并且对校正后系统的稳态和暂态都有较高要求时，宜于采用串联滞后—超前校正装置：

- 1) 利用超前部分改善系统的暂态性能；
- 2) 利用滞后部分改善系统的稳态精度。

$$G(s) = G_o(s) \bullet G_c(s)$$



\* 设计滞后—超前校正装置这种方法的可归结为:

期望频率特性 - 原系统频率特性 = 校正装置频率特性

$$G(j\omega)$$

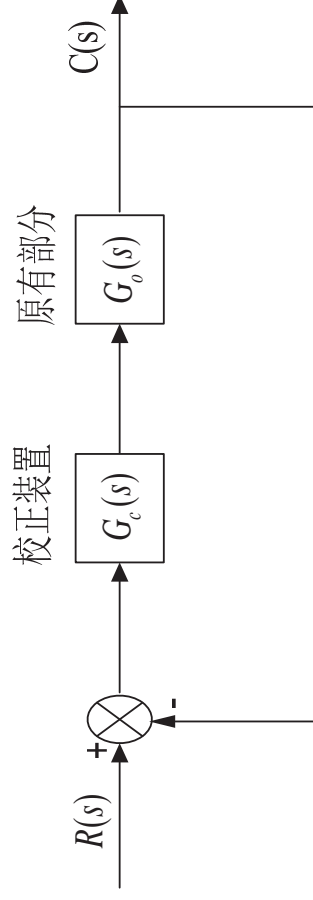
$$G_o(j\omega)$$

$$G_c(j\omega)$$

1) 根据系统性能指标的要求，求出满足性能的系统开环频率特性，即期望频率特性  $G(j\omega)$ 。

2) 将期望频率特性  $G(j\omega)$  与原系统频率特性  $G_o(j\omega)$  相比较，确定校正装置的频率特性  $G_c(j\omega)$ 。

$$G(s) = G_o(s) \bullet G_c(s)$$



$$20 \lg |G(j\omega)| = 20 \lg |G_o(j\omega) \cdot G_c(j\omega)|$$

$$L(\omega) = 20 \lg |G_o(j\omega)| + 20 \lg |G_c(j\omega)| = L_o(\omega) + L_c(\omega)$$

**设计步骤:** (1) 确定原系统**G<sub>0</sub>(s)**开环增益**K**，并绘制其**Bode图** **L<sub>0</sub>(ω)**，并求原系统的剪切频率和相角裕度

(2) 依据性能指标和三频段概念，绘制系统**G(s)**的期望频率特性**Bode图** **L(ω)**

(3) 由**L<sub>c</sub>(ω)=L(ω)- L<sub>0</sub>(ω)**，确定校正装置的传递函数 **G<sub>c</sub>(s)**

(4) 确定校正后系统的传递函数**G(s)=G<sub>0</sub>(s)G<sub>c</sub>(s)**，并检验系统是否满足性能要求。



## §6-5 频率法串联校正的设计

79

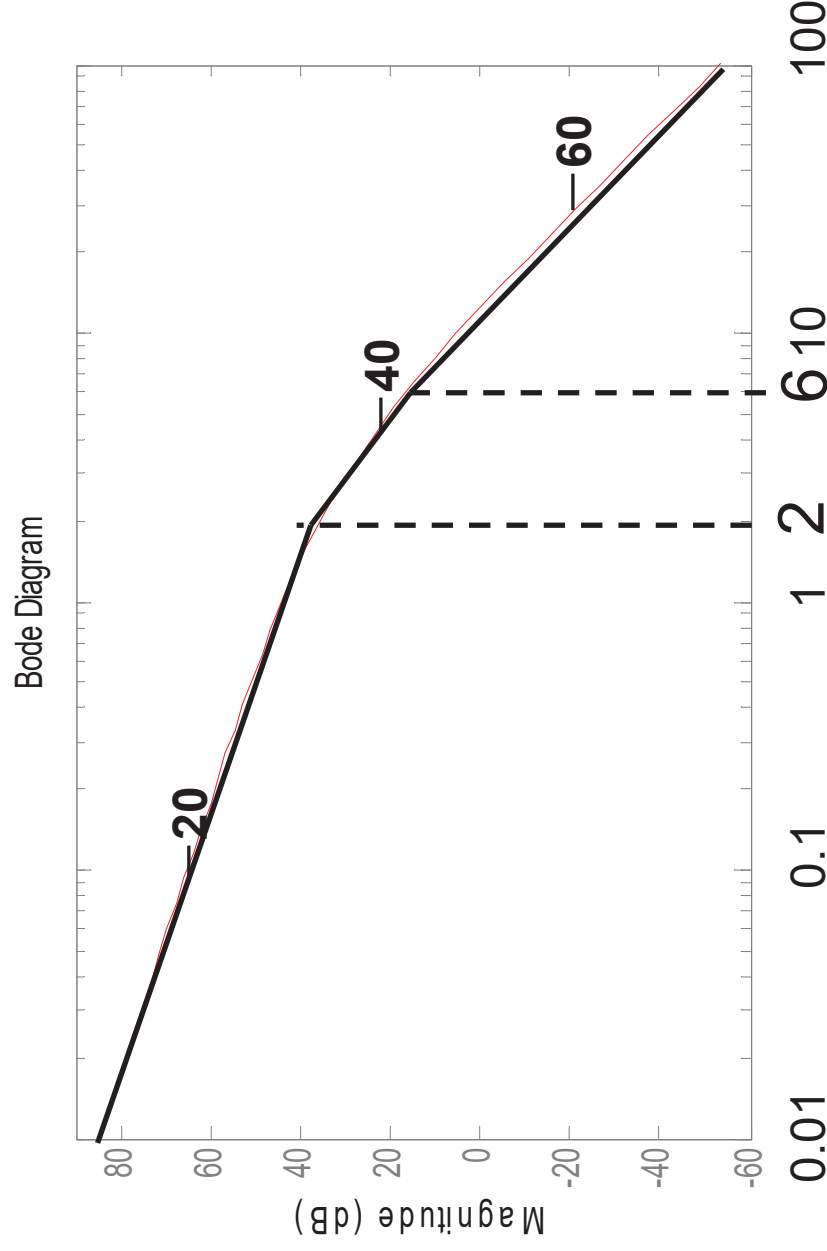
例：设单位反馈系统的开环传递函数为

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

设计串联滞后—超前  
校正装置

使系统满足下列性能指标： $K \geq 180$ ， $\gamma > 40^\circ$ ， $3s^{-1} < \omega_c < 5s^{-1}$

解：（1）绘制  
原系统在开环  
增益 $K=180$ 时  
的bode图

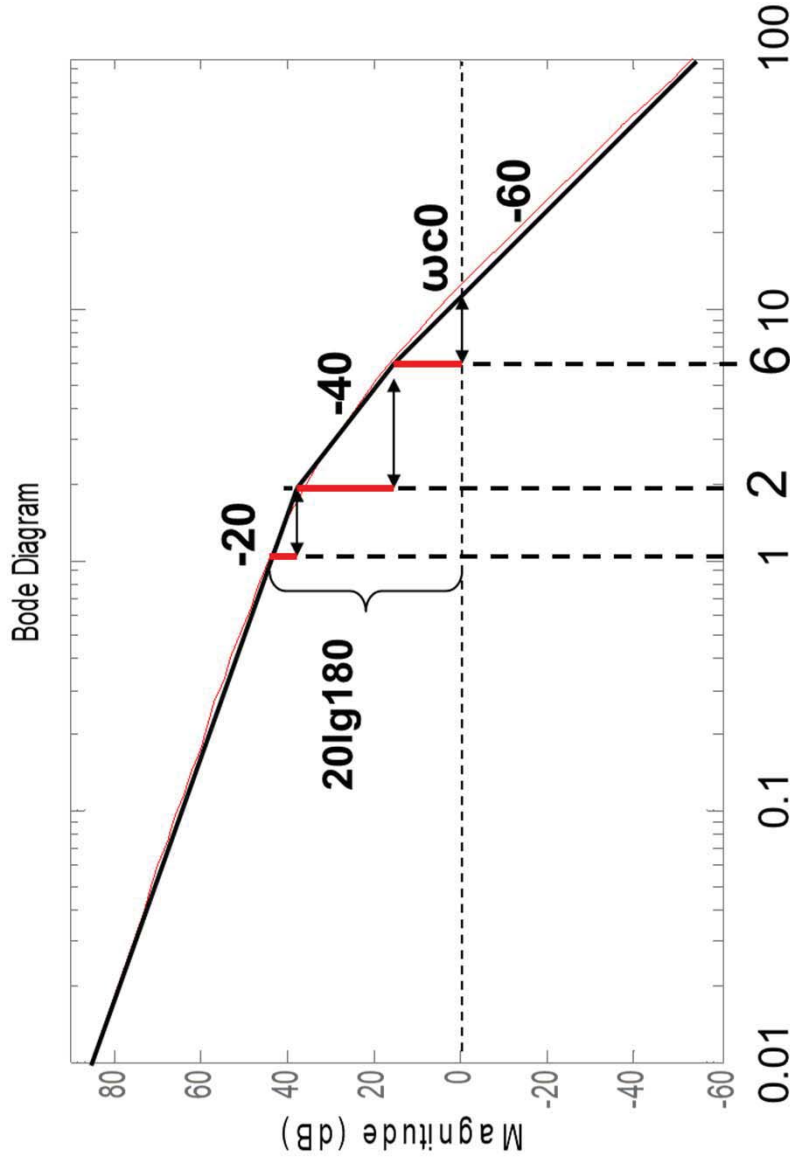


$$G_0(s) = \frac{K}{s(0.5s+1)(0.167s+1)} \quad 20\lg\frac{2}{1} + 40\lg\frac{6}{2} + 60\lg\frac{\omega_{c0}}{6} = 20\lg 180$$

原系统的相角裕度为  $\omega_{c0} = 12.9 \text{ rad/s}$

$$\gamma_0 = 180^\circ - 90^\circ - \arctan 0.167\omega_{c0} - \arctan 0.5\omega_{c0} = -55.3^\circ$$

表明原系统不稳定。

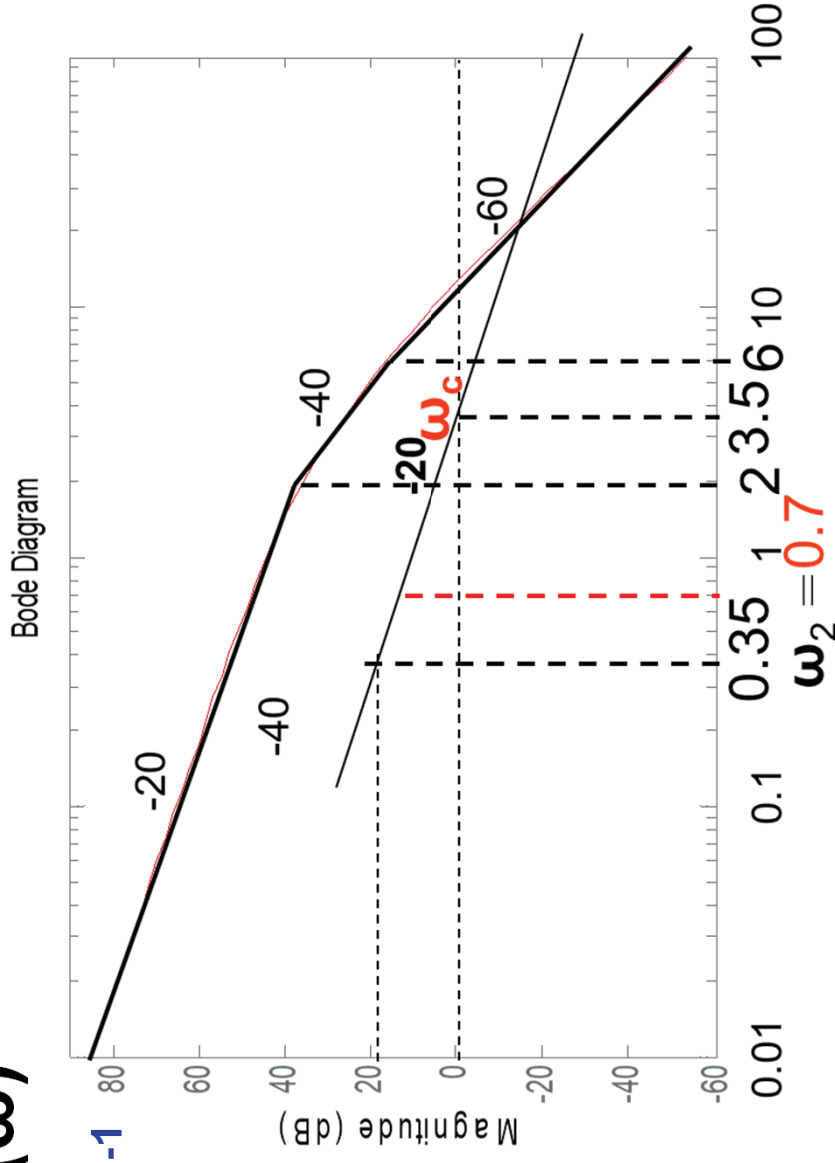


(2) 依据性能指标和三频段概念，绘制系统 **$G(s)$** 的期望频率特性**Bode图  $L(\omega)$**

**A.  $\gamma > 40^\circ$ ,  $3 \text{ s}^{-1} < \omega_c < 5 \text{ s}^{-1}$**   
期望特性的中频段:

选 $\omega_c = 3.5$ , 过 $\omega_c$   
作斜率为 $-20\text{dB}$   
/dec的直线

中频段的第一转折频率 $\omega_2$ 距 $\omega_c$ 不宜太近，否则难于保证系统相角裕度的要求。



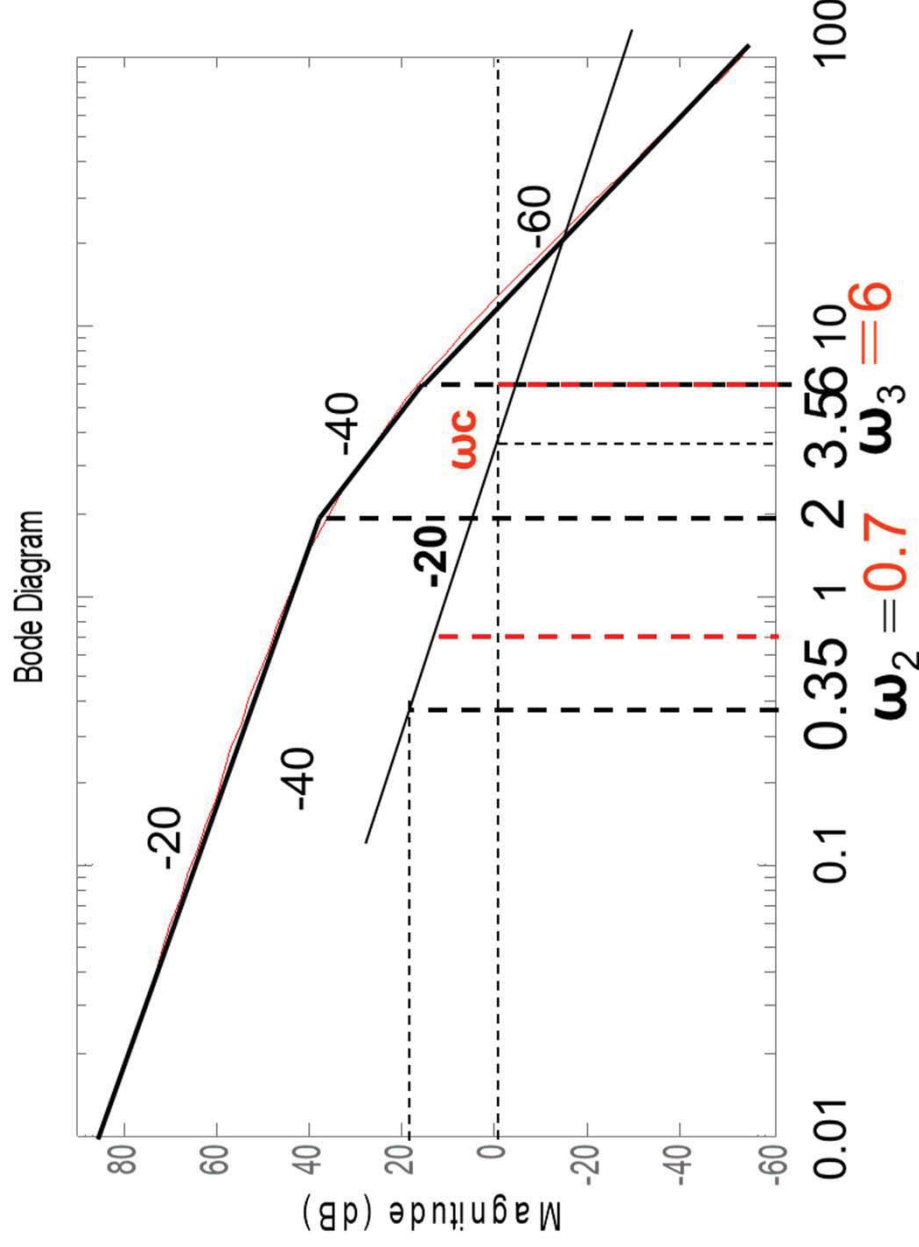
$$\omega_2 = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{1}{10}\right)\omega_c \quad \omega_2 = \frac{\omega_c}{5} = 0.7 \text{ s}^{-1}$$

## §6-5 频率法串联校正的设计

82

期望特性中频段的第二转折频率 $\omega_3$ 距 $\omega_c$ 也不宜过近，否则也影响到系统的相角裕度。

考虑到原系统有一个转折频率为 $6\text{rad/s}$ 的惯性环节，为使校正装置尽可能易于实现，将 $\omega_3$ 选为 $6\text{rad/s}$ 。



## §6-5 频率法串联校正的设计

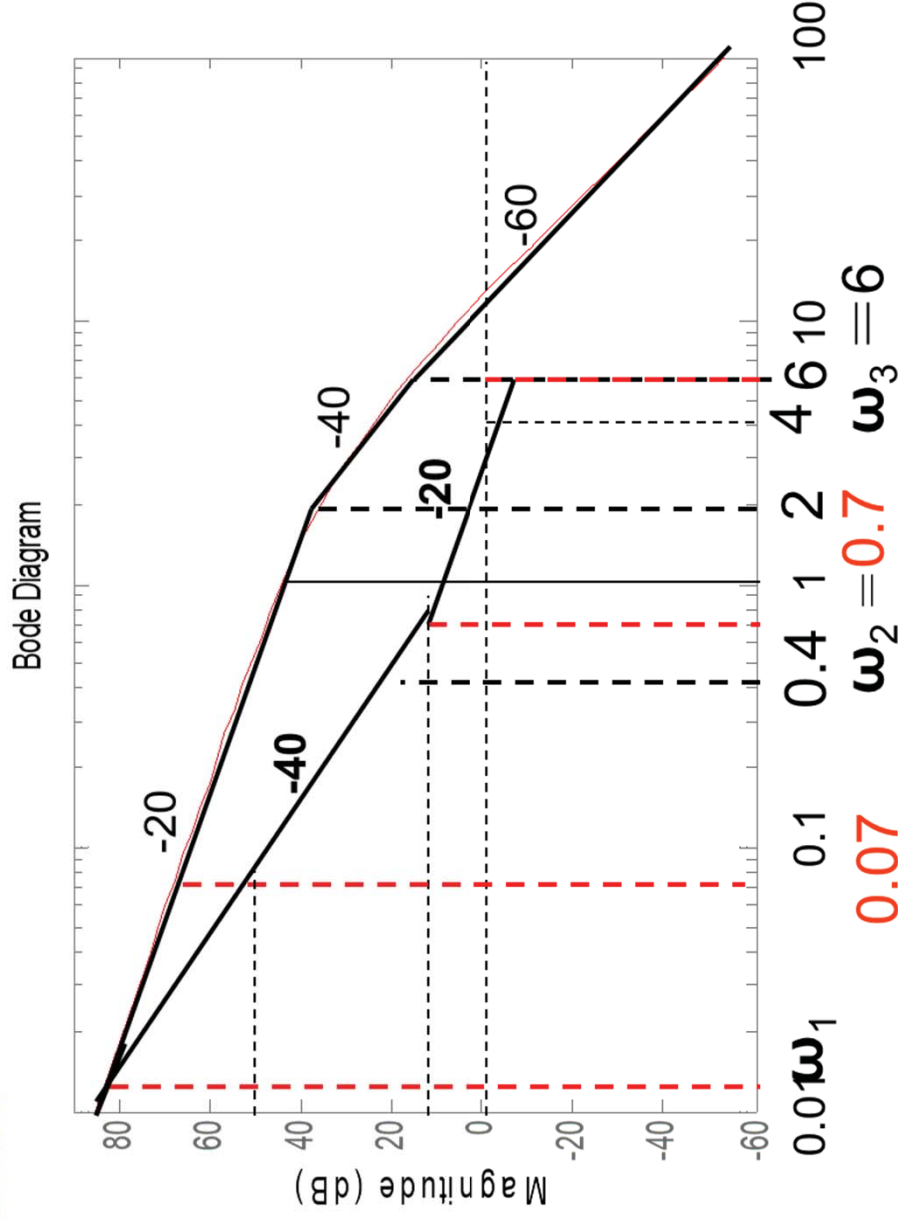
83

### B. $K \geq 180$ 期望特性低频段

为使校正后系统的  
开环增益不低于  
**180**，期望特性的  
低频段应与原系统  
特性一致

### C. 低-中之间期望特性

为**-40 dB/dec**的直线



转折频率 $\omega_1$ 需要计算

## s6-5 频率法串联校正的设计

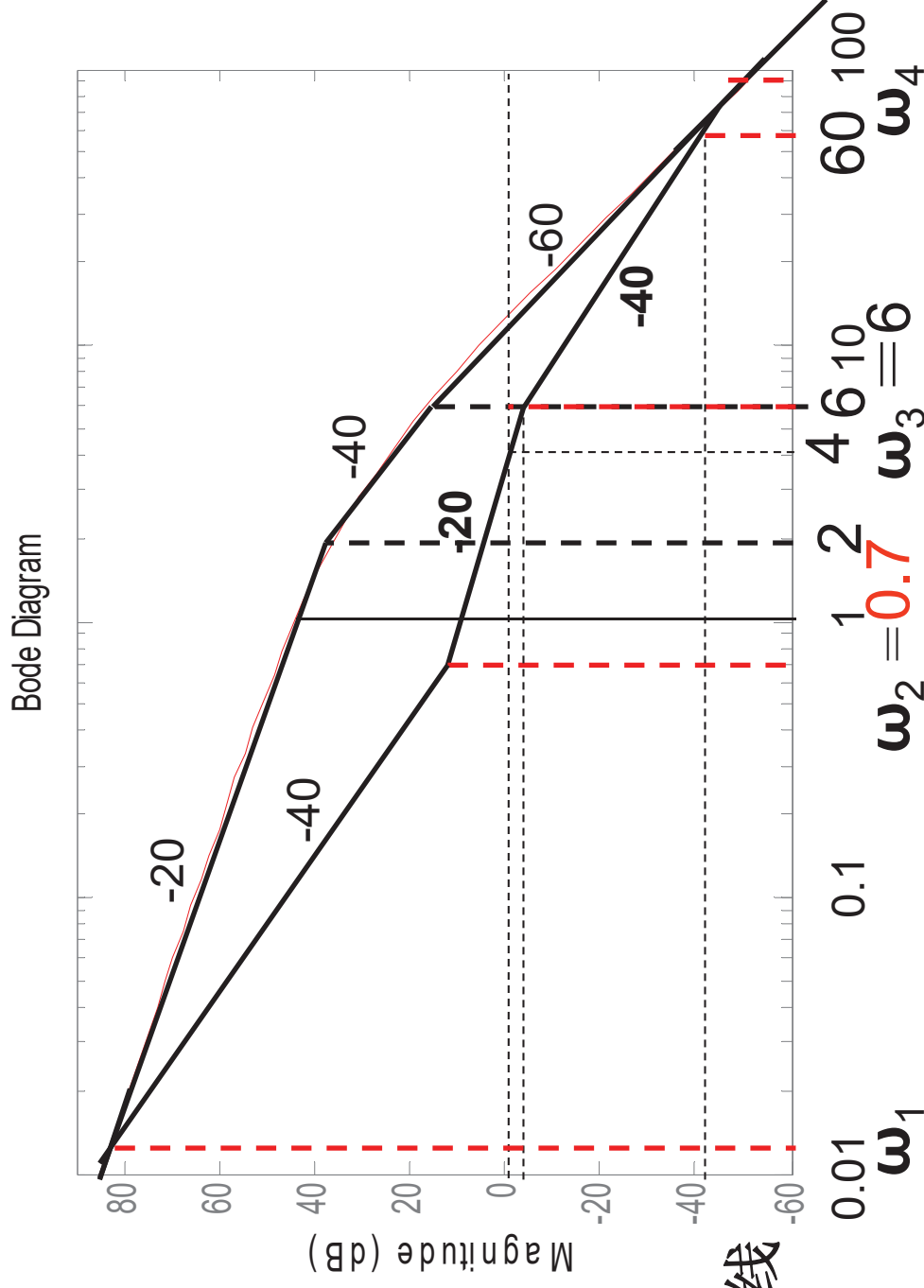
84

### D. 高频段的期望特性

为使校正装置不至于复杂，期望特性的高频段与原系统的特性一致。

### E. 中一高频段的期望特性

为-40 dB/dec的直线



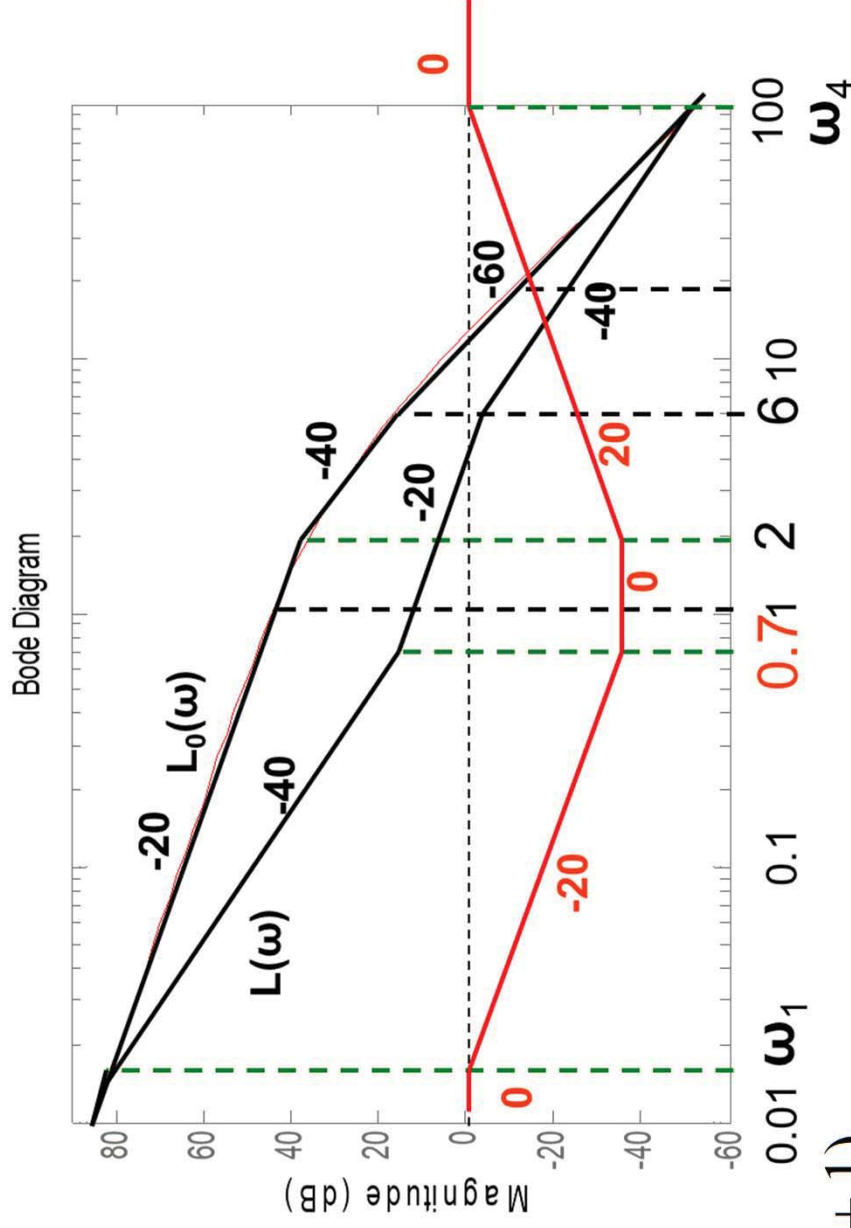
转折频率 $\omega_4$ 需要计算

(3) 由 $L_c(\omega)=L(\omega)-L_0(\omega)$ ，确定校正装置的传递函数  $G_c(s)$

$L_c(\omega)$  如图所示

表明需采用串联相位滞后-超前校正装置。对照图知，其传递函数为

$$G_c(s) = \frac{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{(\beta \tau_1 s + 1)(\frac{\tau_2}{\beta} s + 1)}$$



## §6-5 频率法串联校正的设计

86

$$\frac{1}{\tau_1} = 0.7$$

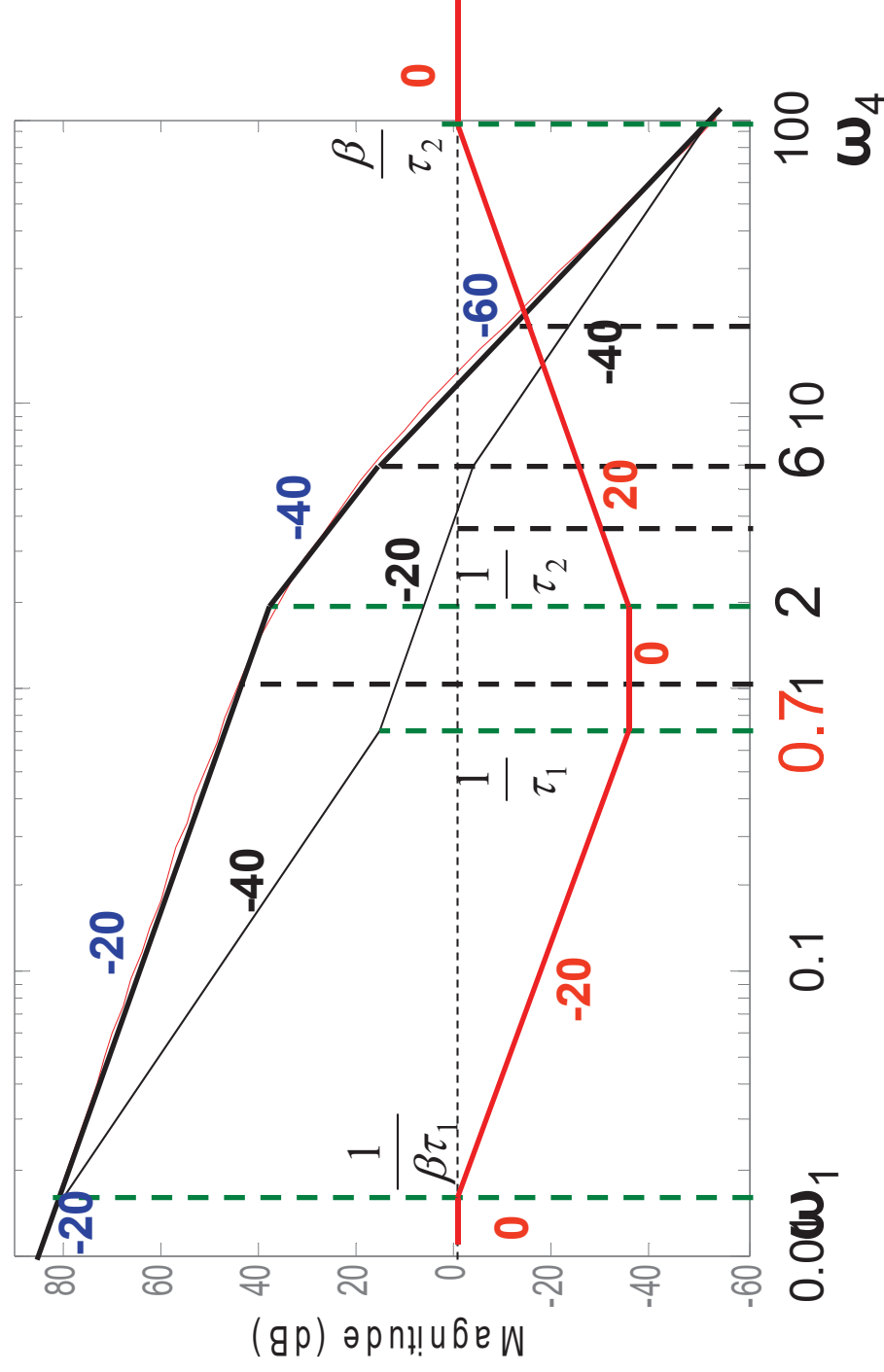
$$\tau_1 \approx 1.43$$

$$\frac{1}{\tau_2} = 2$$

$$\tau_2 \approx 0.5$$

$$G_c(s) = \frac{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{\beta}$$

Bode Diagram





## §6-5 频率法串联校正的设计

87

$$G_c(s) = \frac{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{(\beta \tau_1 s + 1)(\frac{\tau_2}{\beta} s + 1)}$$

$$h3 = h2 + 20 \lg 180 = 20 \lg \frac{180}{0.7} = 48.2 \text{ dB}$$

$$h1 = 20 \lg \frac{3.5}{0.7} = 14 \text{ dB} \quad h2 = 20 \lg \frac{1}{0.7}$$

$$L_c(\omega) = L(\omega) - L_0(\omega)$$

$$L_c(0.7) = L(0.7) - L_0(0.7)$$

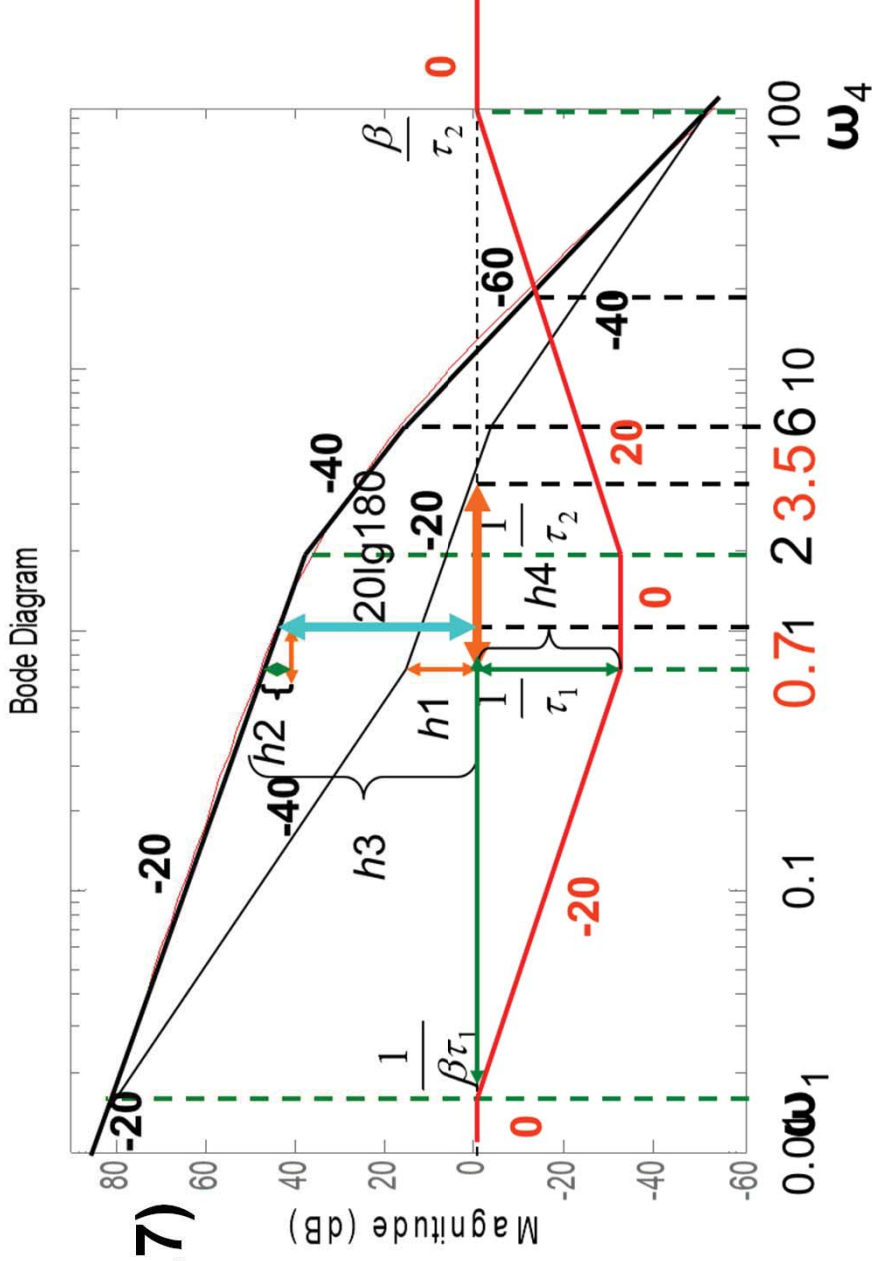
$$= h1 - h3 = 14 - 48.2$$

$$= -34.2 \text{ dB} = h4$$

$$\frac{34.2}{\lg \frac{1}{\tau_1} - \lg \frac{1}{\beta \tau_1}} = 20$$

$$\rightarrow 20 \lg \beta = 34.2$$

$$\rightarrow \beta = 51.3$$



因此，串联滞后-超前校正装置的传递函数为

$$G_c(s) = \frac{(1.43s + 1)(0.5s + 1)}{(73.3s + 1)(0.0097s + 1)}$$

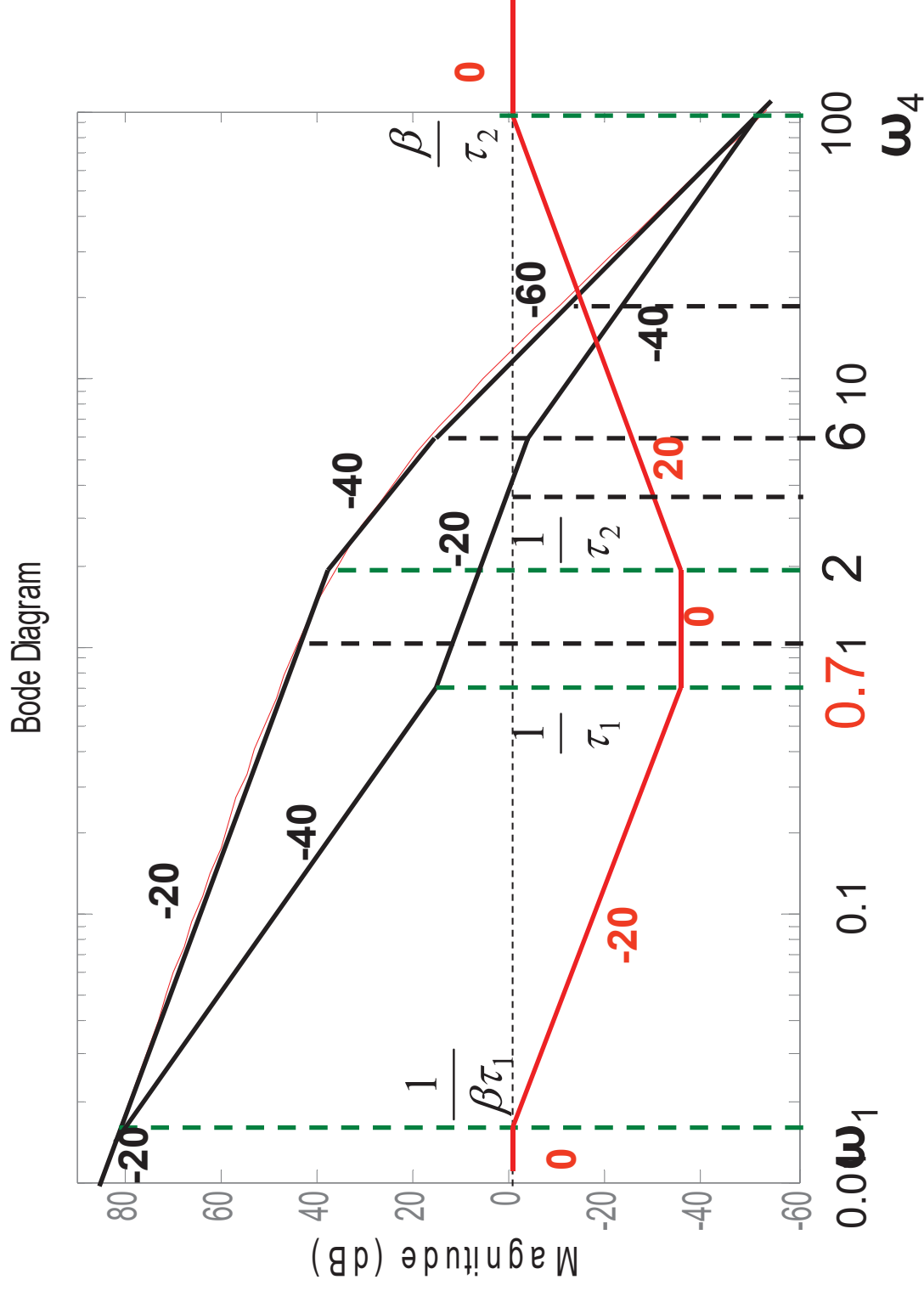
校正后系统的开环传递函数为

$$G(s) = G_c(s)G_0(s) = \frac{180(1.43s + 1)}{s(73.3s + 1)(0.167s + 1)(0.0097s + 1)}$$

校验系统相角裕度

$$\begin{aligned}\gamma &= 180^\circ - 90^\circ - \arctan 73.3\omega_c + \arctan 1.43\omega_c \\ &\quad - \arctan 0.167\omega_c - \arctan 0.0097\omega_c = 46.7^\circ\end{aligned}$$

系统满足下列性能指标:  $K \geq 180$ ,  $\gamma > 40^\circ$ ,  $3s^{-1} < \omega_c < 5s^{-1}$



通过分析可知：

- 1) 改善了系统的稳定性和平稳性。降低系统的剪切频率，提高系统的相角裕量，保证了系统的稳定性和平稳性。
- 2) 响应速度变慢。校正装置使系统的剪切频率降低，导致动态响应时间增大
- 3) 系统的抗干扰能力不变
- 4) 控制系统的稳态性能是通过步骤(1)中改变原校正系统的开环增益来保证的。