

自动控制实践B——2022年春季学期

第六章 伺服系统的设计（2）

授课教师：董广忠（Assoc. Prof.）

哈尔滨工业大学（深圳），HITsz
机电工程与自动化学院 SMEA





课程安排

1

伺服系统的数学模型

2

I型系统

1

II型系统

2

伺服系统的校正



6.2 I型系统



6.2.1

基本I型系统

6.2.2

改进I型系统





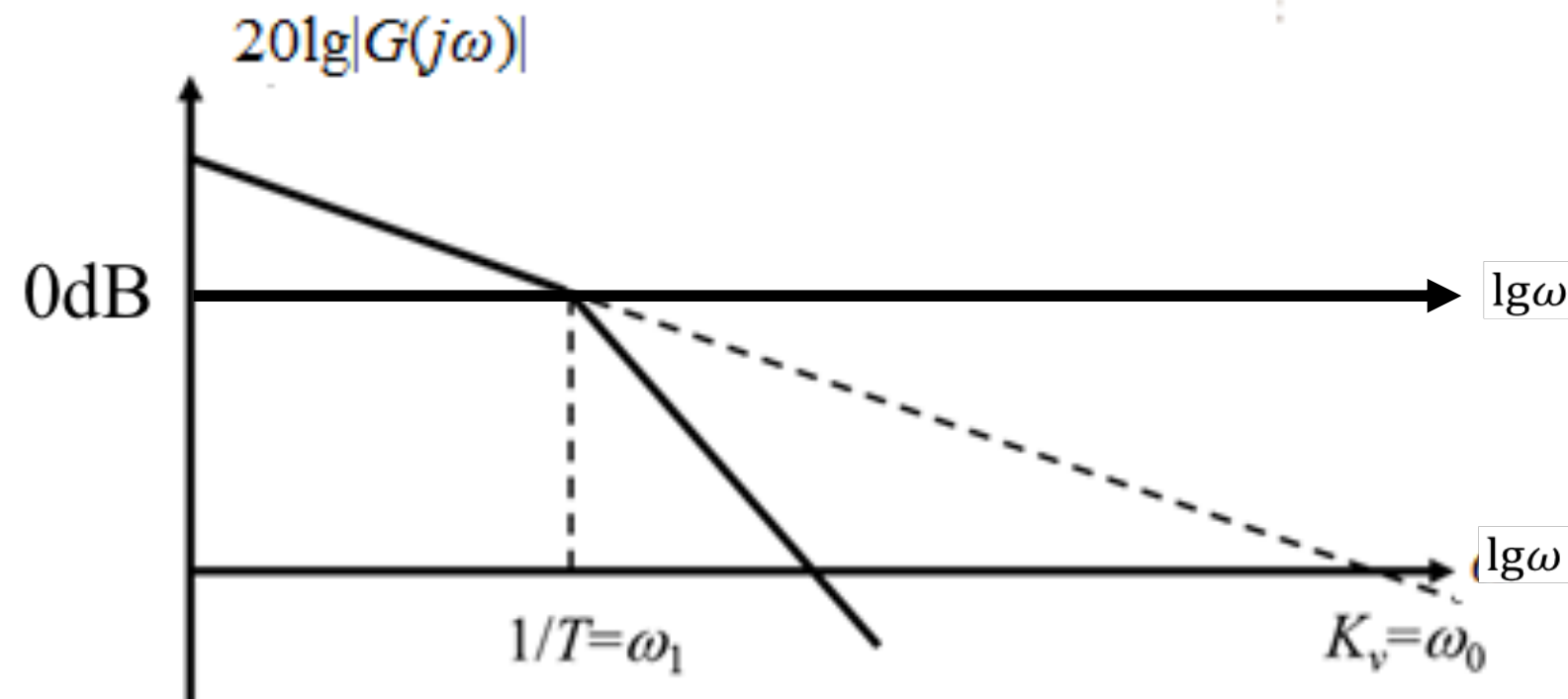
◆ 基本I型系统

其开环频率特性为 $G(s) = \frac{K_v}{s(Ts + 1)}$

$$K = K_v \cdot T$$



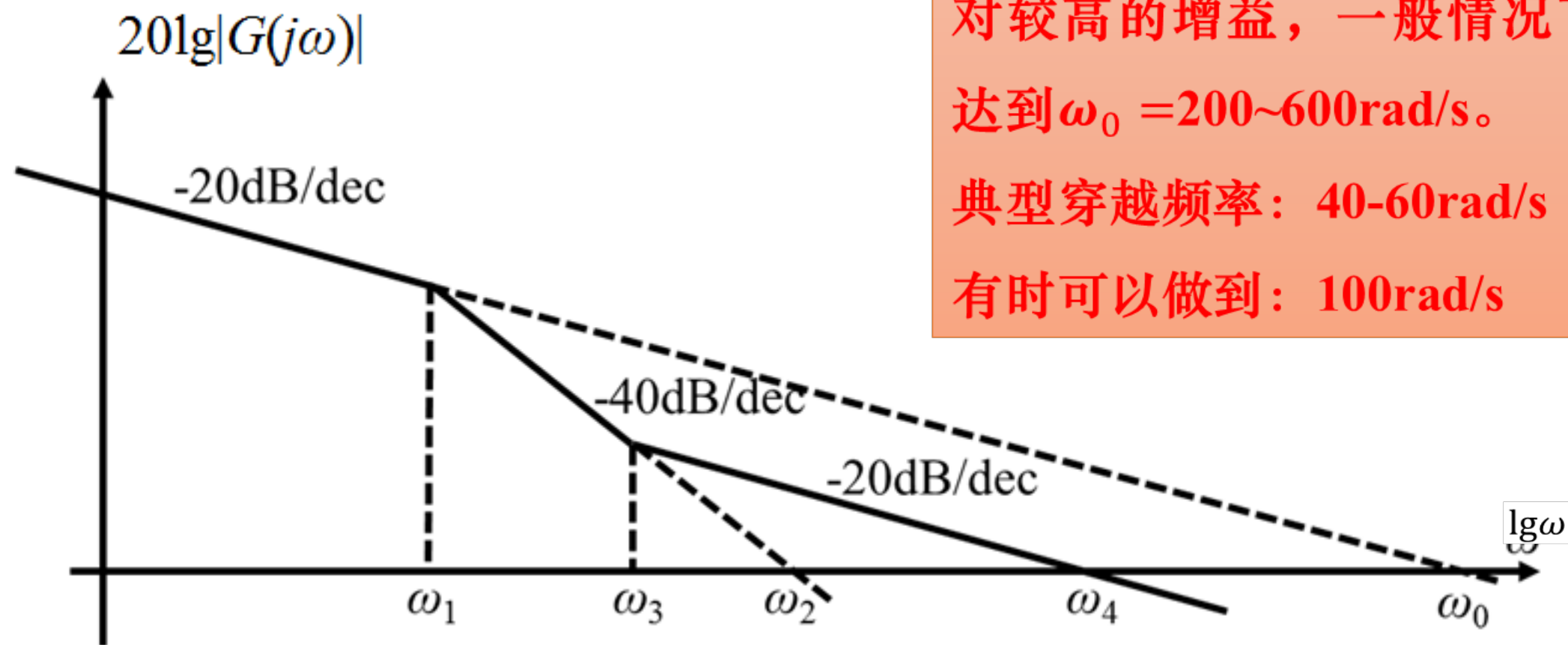
$$K = 1$$



局限性：带宽最大为 K_v ，低频增益受限！

大部分I型系统都是属于改进I型系统。

◆ 改进I型系统



同样的带宽下，可得到相对较高的增益，一般情况下可达到 $\omega_0 = 200 \sim 600 \text{ rad/s}$ 。

典型穿越频率：40-60rad/s

有时可以做到：100rad/s

频率特性由三段构成：-20，-40，-20 (dB/dec)

优越性：带宽与增益分开！



◆ 改进I型系统

系统的形式已确定，限制因素是明确的：

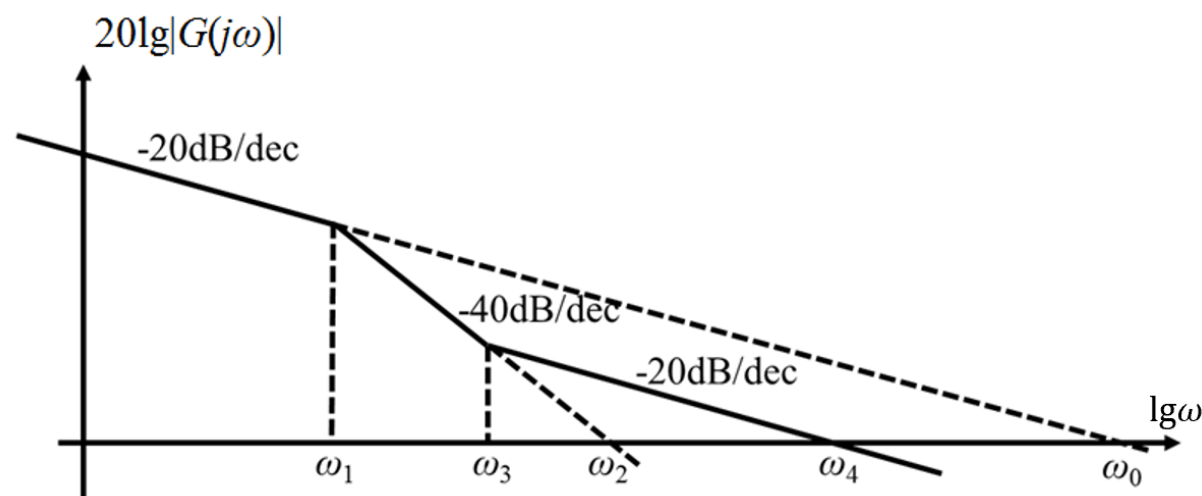
带宽 ω_4 ：不确定性的限制

低频特性：性能限制

设计问题：

1、转折点 ω_1 、 ω_3 的确定

2、带宽 ω_4 的设计



具体设计中，需要考虑
实际被控对象的特点来确定
期望特性！





教材： P38

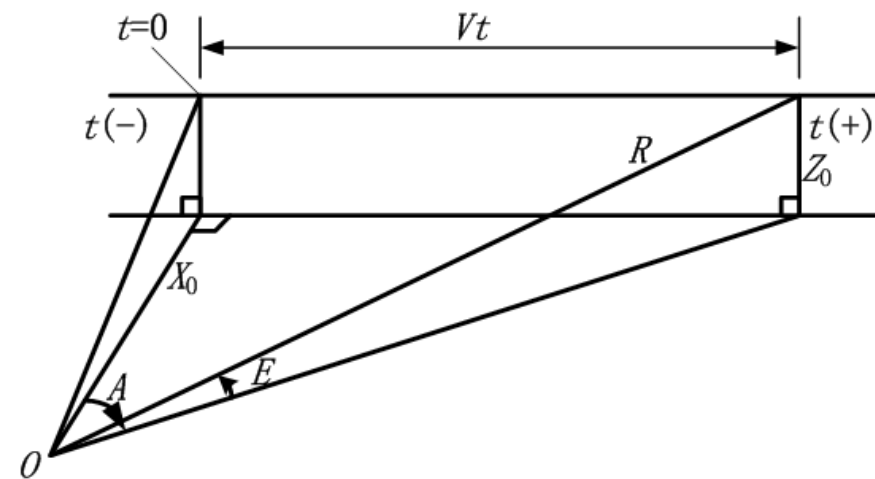
Step 1: 设计指标确认

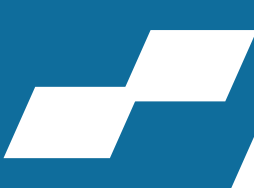
飞行目标：等速等高直线飞行的飞机，飞行速度 $V=250\text{m/s}$,

最短飞行距离 $X_0=500\text{m}$;

跟踪精度：方位角，跟踪误差 $<0.001\text{rad}$ 。

精度要求较高，但功率小（22W），
所以要求结构尽量简单。





◆ 例3：小功率随动系统。

Step 2：输入信号分析

飞行目标：等速等高直线飞行的飞机，飞行速度 $V=250\text{m/s}$,

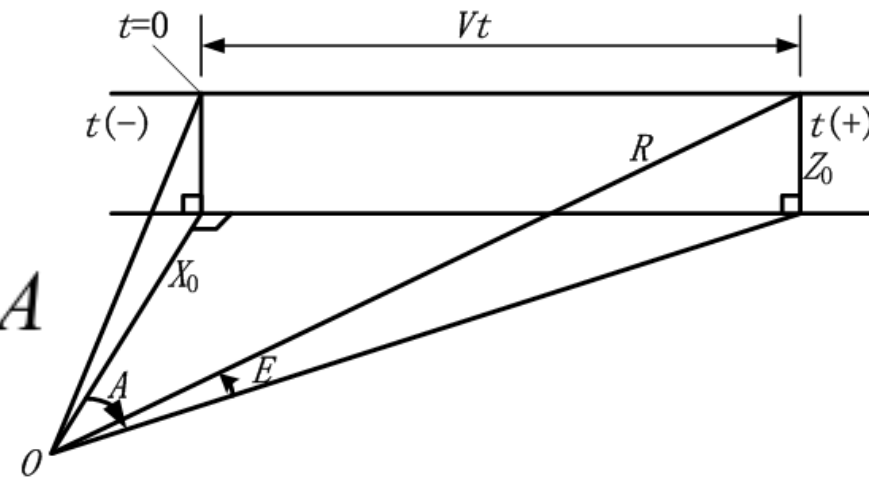


最短飞行距离 $X_0=500\text{m}$;

方位角： $A = \arctan \frac{Vt}{X_0} = \arctan(at)$ $a = \frac{V}{X_0} = 0.5\text{s}^{-1}$

方位角速度： $\frac{dA}{dt} = a \cos^2 A$

方位角加速度： $\frac{d^2 A}{dt^2} = -a^2 \sin(2A) \cos^2 A$





◆ 例3：小功率随动系统。

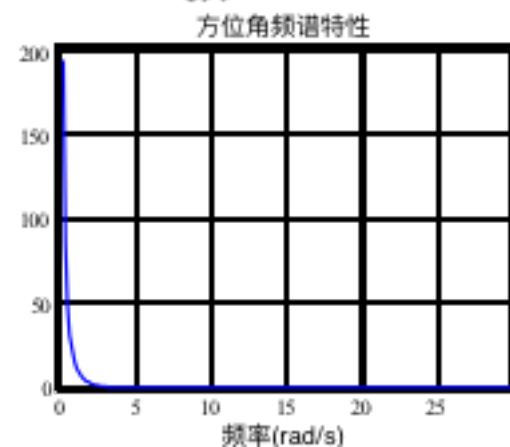
Step 2：输入信号分析

方位角： $A = \arctan \frac{Vt}{X_0} = \arctan(at) \quad a = \frac{V}{X_0} = 0.5\text{s}^{-1}$

方位角速度： $\frac{dA}{dt} = a \cos^2 A \quad \longrightarrow \quad \dot{\theta}_{\max} = a = 0.5\text{rad/s}$

方位角加速度： $\frac{d^2 A}{dt^2} = -a^2 \sin(2A) \cos^2 A \quad \longrightarrow \quad \ddot{\theta}_{\max} = 0.65a^2$

频谱分析：



方位角的频谱宽度为1.57rad/s。

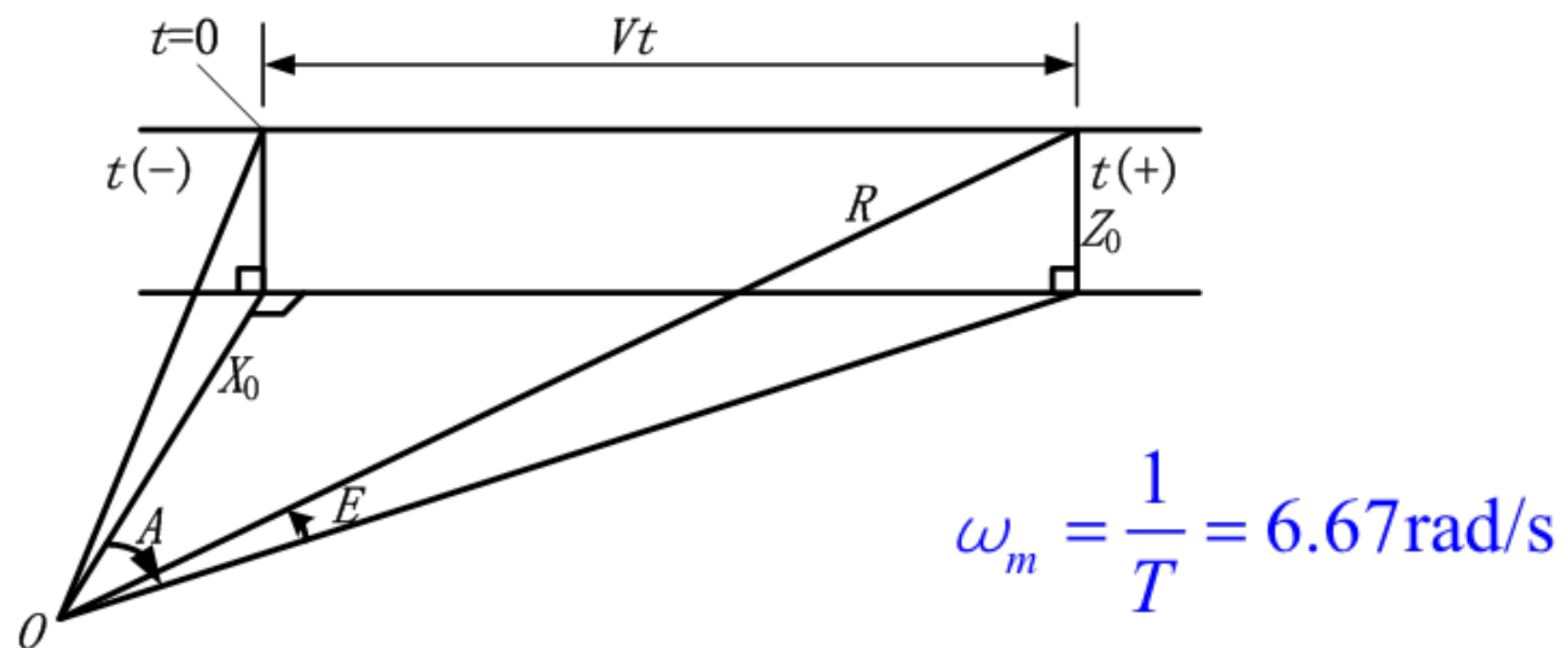




◆ 例3：小功率随动系统。

Step 3：部件选择

小功率随动系统——电机功率22W，电机时间常数 $T=0.15\text{s}$ 。





6.2.2 改进I型系统



◆ 例3：小功率随动系统。

Step 4：跟踪精度分析

跟踪精度要求：误差 $<0.001\text{rad}$

隐含信息：在输入信号有效频带内，跟踪误差不大于 0.001rad 。

伺服系统对象模型 \longrightarrow I型系统

$$G(s) = \frac{k}{s(Ts + 1)}, \quad T = 0.15\text{s}$$

$$e(t) = \frac{1}{\omega_0} \dot{\theta}(t)$$

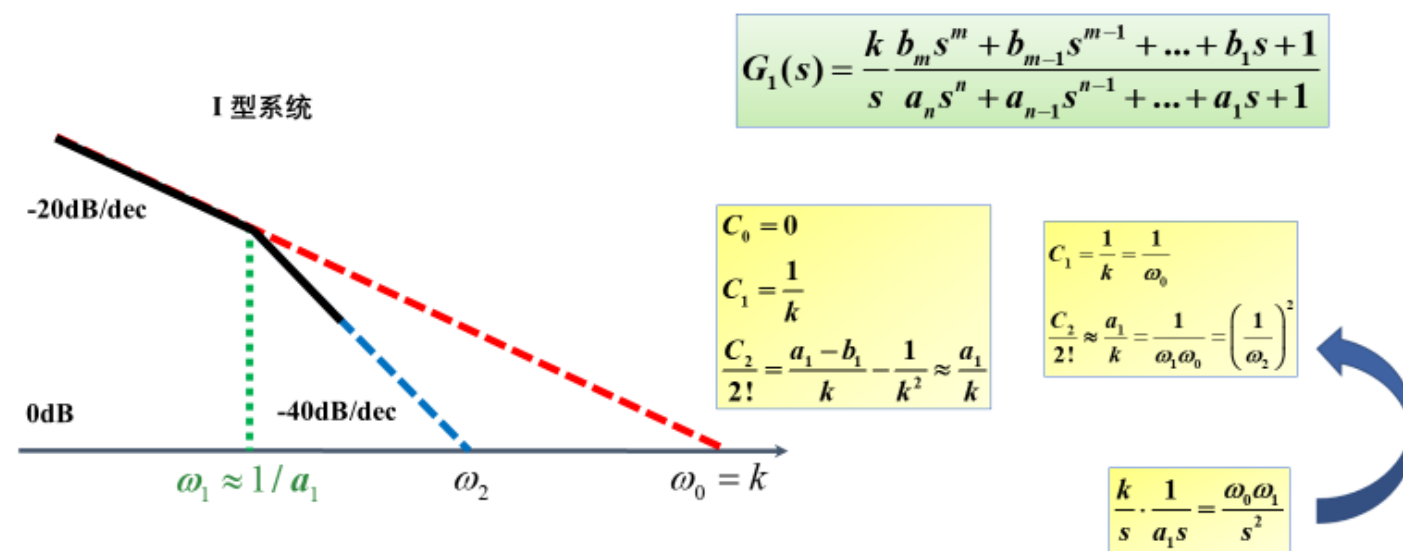
$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = C_0 r(t) + C_1 \frac{dr(t)}{dt} + \frac{C_2}{2!} \frac{d^2 r(t)}{dt^2} + \dots$$

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0} \quad \frac{C_2}{2!} = \left(\frac{1}{\omega_2} \right)^2 = \frac{1}{\omega_0 \omega_1}$$



3.1.2 误差系数

三、动态误差系数——图解法（I型系统）



机电工程与自动化学院
School of Mechanical Engineering and Automation

第三章 控制系统的输入条件分析——误差系数

12





6.2.2 改进I型系统

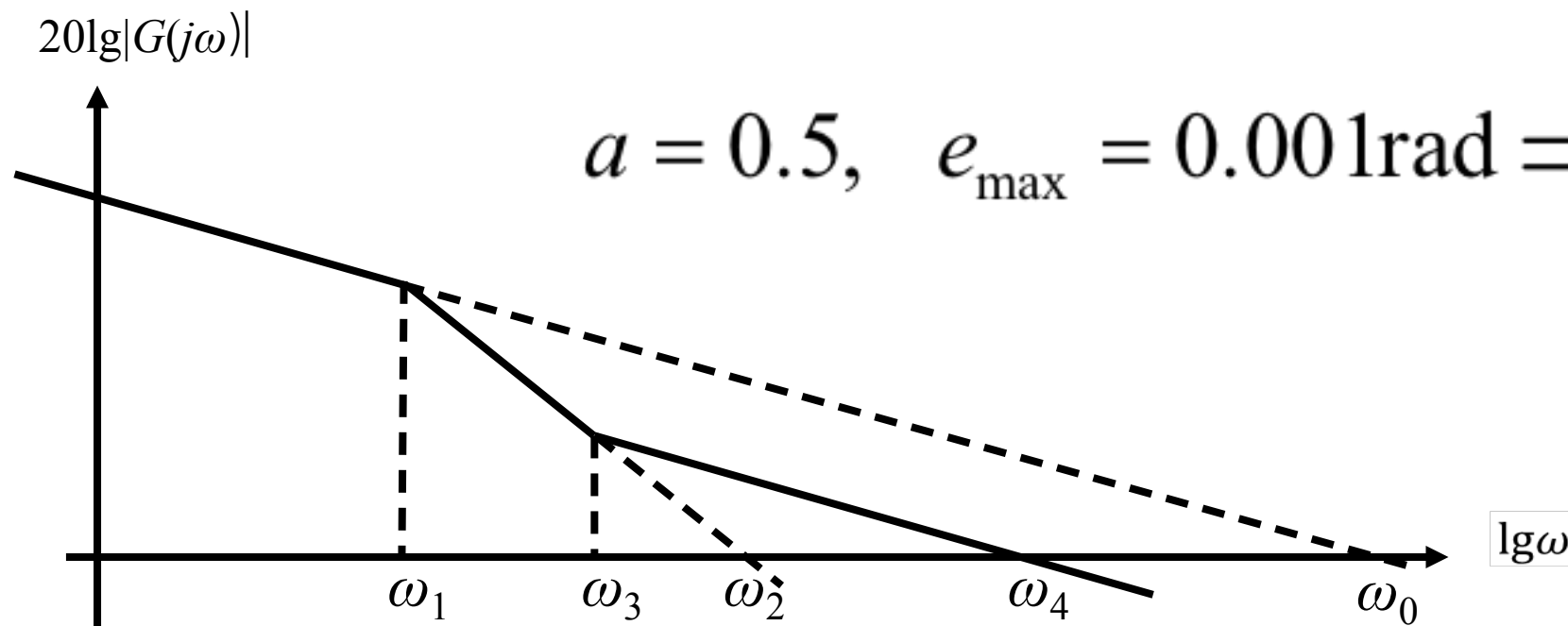


◆ 例3：小功率随动系统。

$$\dot{\theta}_{\max} = a = 0.5 \text{rad/s}$$

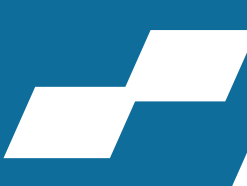
Step 4：跟踪精度分析

$$e(t) = \frac{1}{\omega_0} \dot{\theta}(t) \xrightarrow[\text{I型系统}]{\dot{\theta}_{\max}} e_{\max} = \frac{\dot{\theta}_{\max}}{\omega_0} \Rightarrow \omega_0 \geq \frac{\dot{\theta}_{\max}}{e_{\max}}$$



根据跟踪指标
要求确定系统的低
频增益！



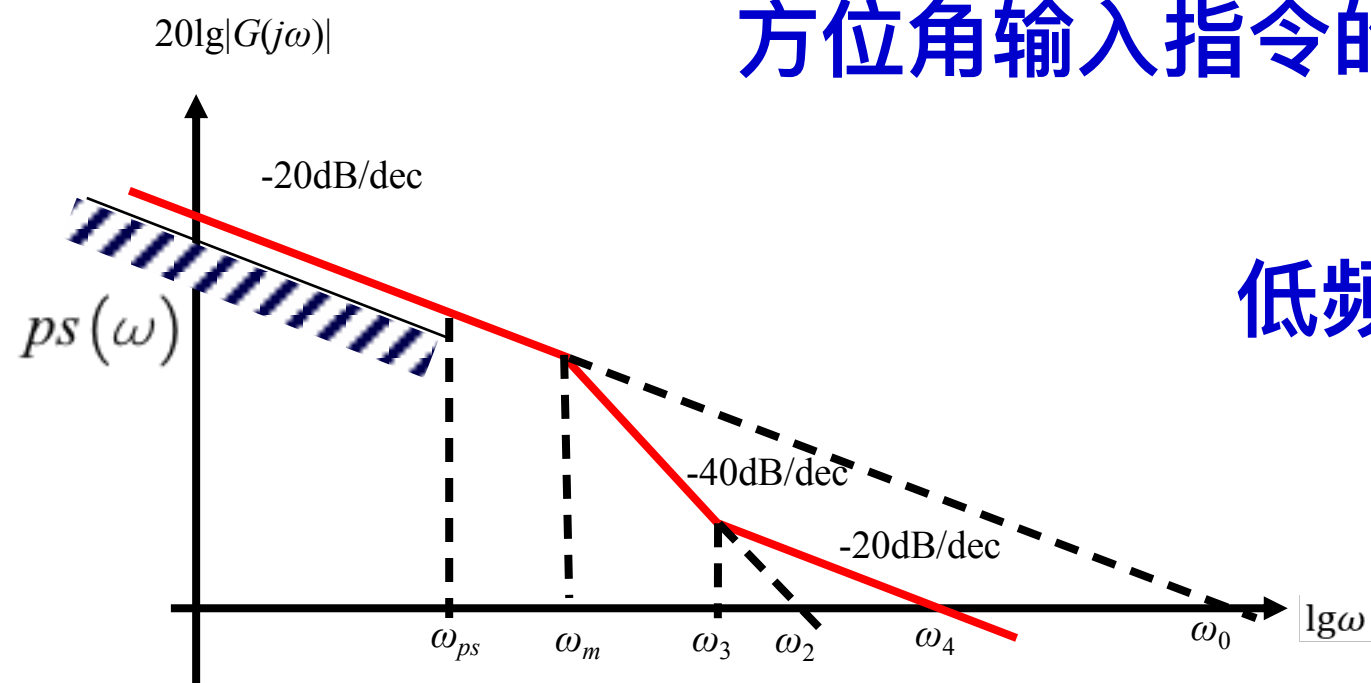


◆ 例3：小功率随动系统。

Step 5：性能界函数的确定

$$\omega_0 \geq 500\text{rad/s}$$

方位角输入指令的频谱宽度为1.57rad/s



低频段： $|G(j\omega)| > \left| \frac{500}{\omega} \right|$



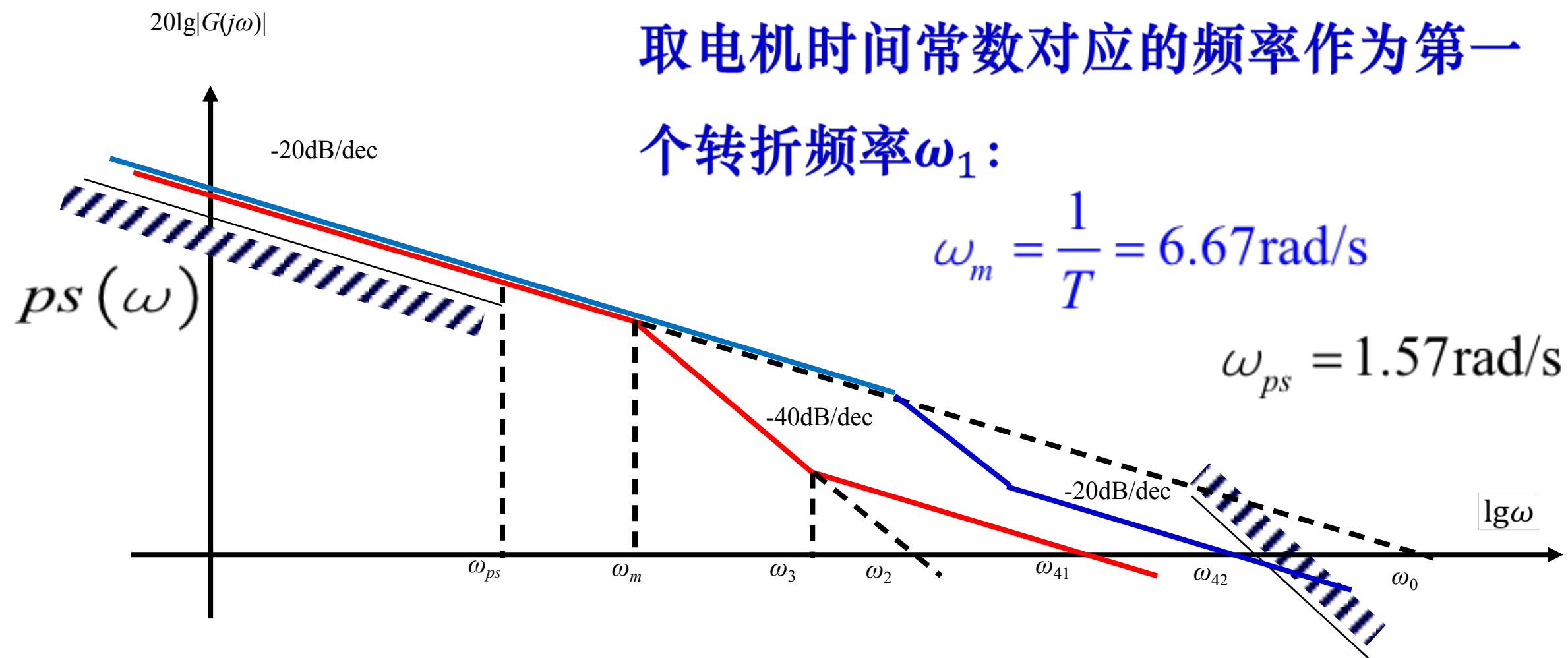
$$ps(\omega) = \left| \frac{500}{\omega} \right|$$

$$\omega_{ps} = 1.57\text{rad/s}$$



◆ 例3：小功率随动系统。

Step 6：转折频率的确定



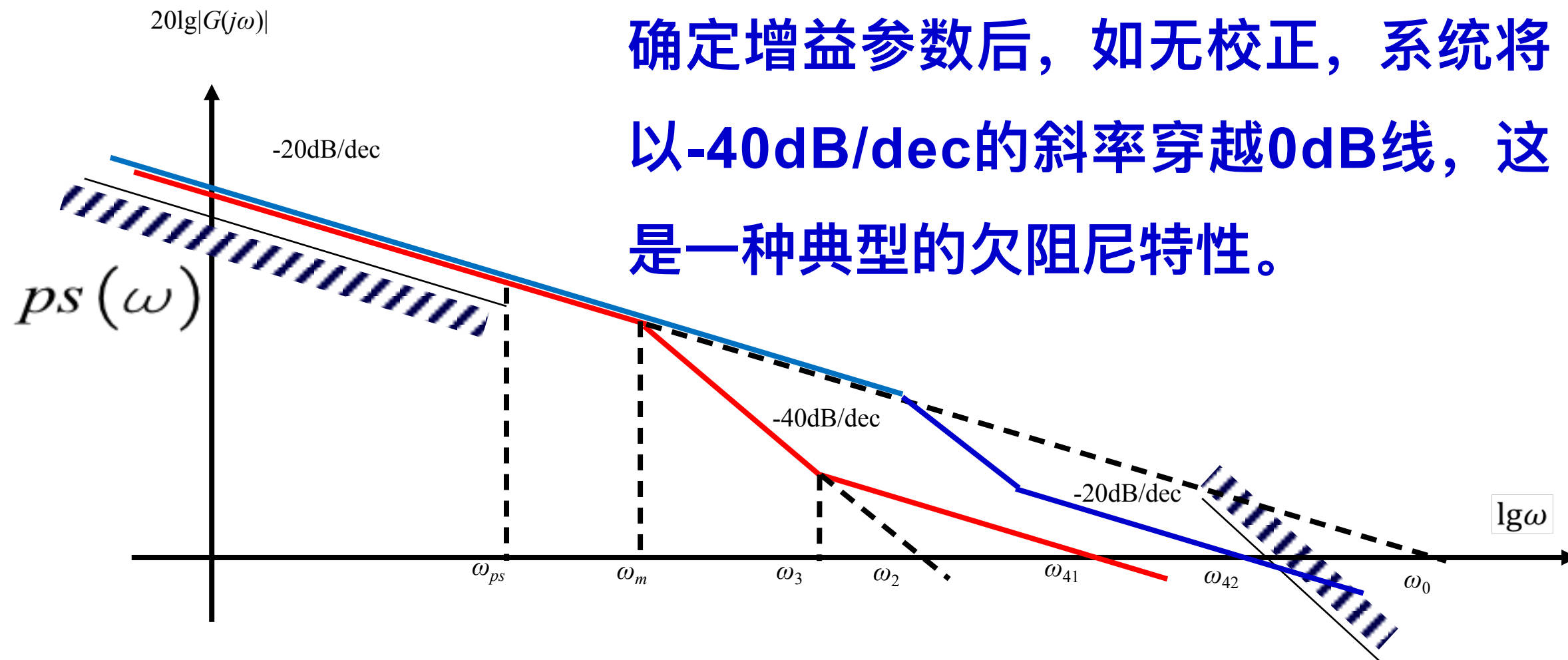


6.2.2 改进I型系统



◆ **例3：小功率随动系统。** 增加超前校正，引入第二个转折频率，系统变为改进I型系统！

Step 6：转折频率的确定





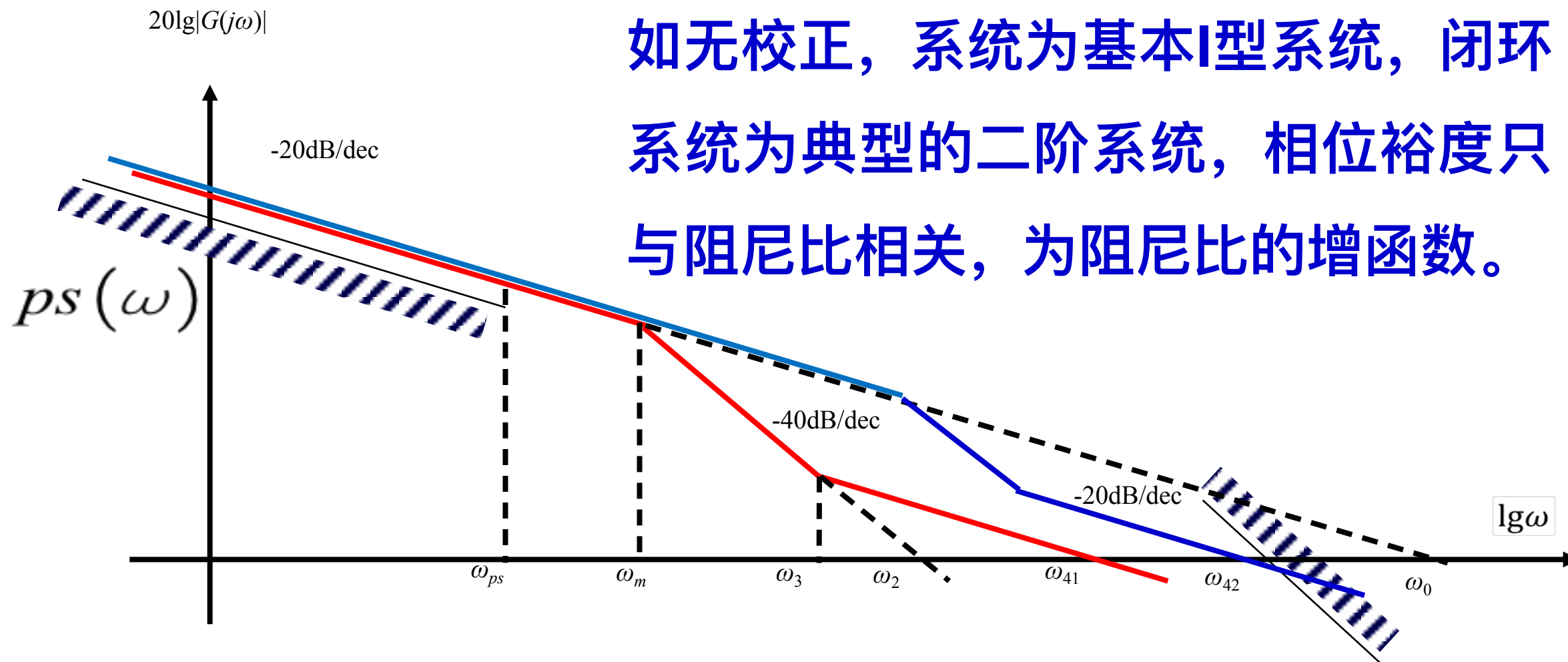
6.2.2 改进I型系统



◆ **例3：小功率随动系统。** 增加超前校正，引入第二个转折频率，系统变为改进I型系统！

Step 6：转折频率的确定

如无校正，系统为基本I型系统，闭环系统为典型的二阶系统，相位裕度只与阻尼比相关，为阻尼比的增函数。





6.2.2 改进I型系统

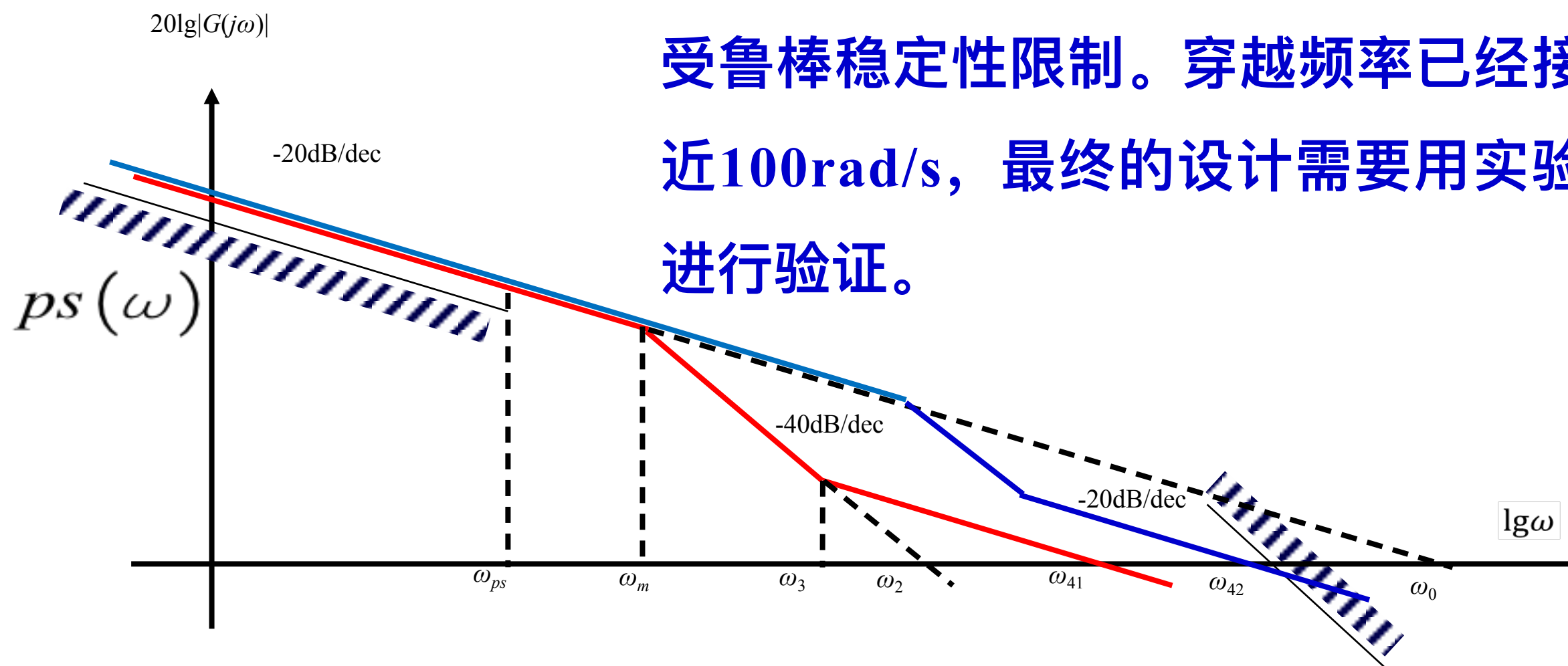


◆ 例3：小功率随动系统。

Step 6：转折频率的确定

第二个转折点与穿越频率的确定

受鲁棒稳定性限制。穿越频率已经接近100rad/s，最终的设计需要用实验进行验证。





◆ 例4：舰用随动系统的设计。

舰用仪器的角度复现系统，用于传递舰船的摇摆角。

- 设计要求：满足复现精度要求，0.001rad
- 典型输入信号：正弦，最大角度20°，周期为10s
- 输出轴摩擦力矩：1200g·cm

摇摆频率：

$$\omega_k = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{10s} = 0.628\text{rad/s}$$





6.2.2 改进I型系统



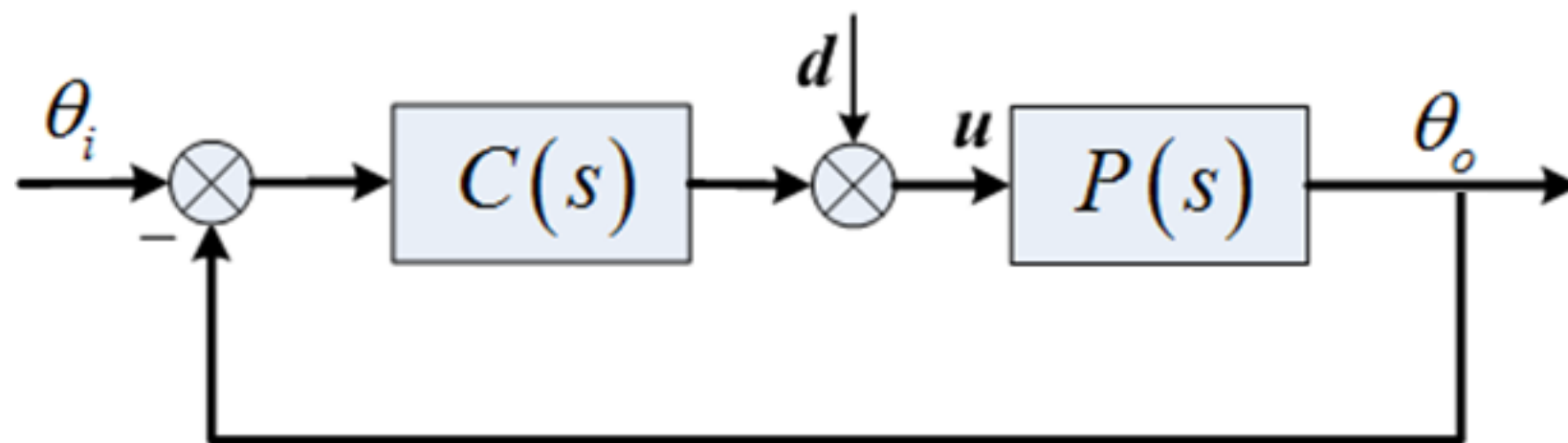
◆ 例4：舰用随动系统的设计。

典型输入信号：正弦， $\theta_{\max} = 20^\circ$ $T = 10\text{s}$

输出轴摩擦转矩： $M_f = 1200\text{g} \cdot \text{cm}$

复现精度：0.001rad

$$e = \frac{1}{1 + P(s)C(s)}\theta_i + \frac{-P(s)}{1 + P(s)C(s)}d$$





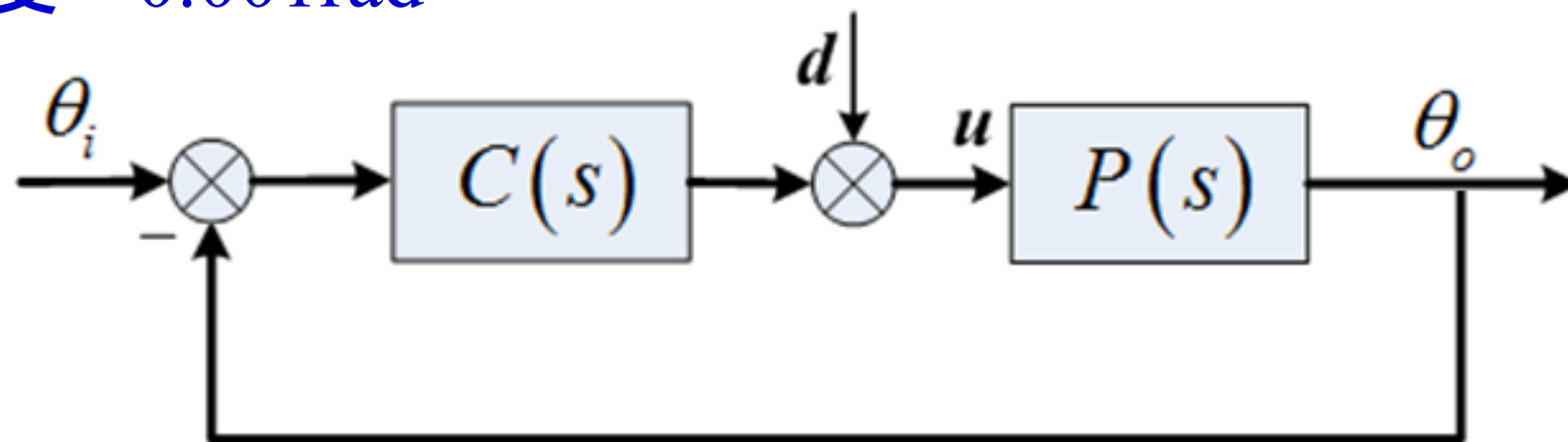
◆ 例4：舰用随动系统的设计。

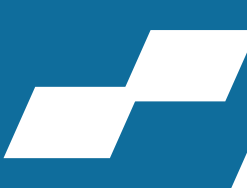
Step 1：精度分配

跟踪误差包括两部分：指令输入和摩擦干扰输入分别引起跟踪误差，需要设计者进行误差分配（精度分配），如**平均分配**。

$$e = \frac{1}{1 + P(s)C(s)}\theta_i + \frac{-P(s)}{1 + P(s)C(s)}d$$

复现精度：0.001rad





◆ 例4：舰用随动系统的设计。

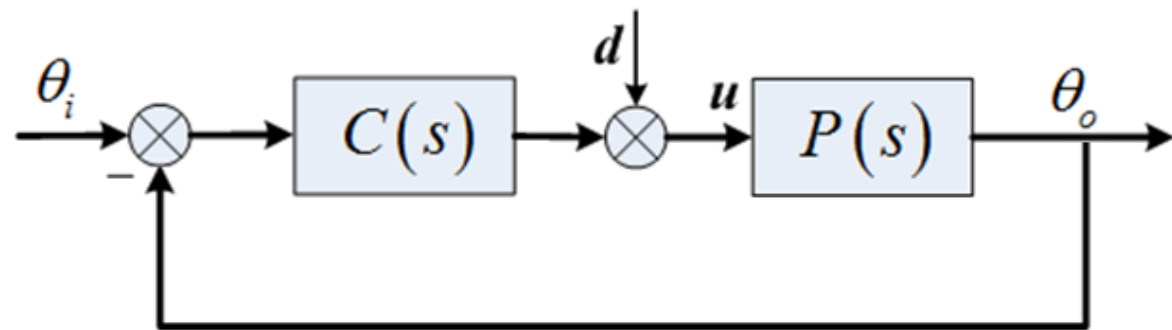
Step 2：转折点和低频增益的确定

首先针对此类系统推导两个基本公式：

转折频率点公式和指令跟踪误差公式

((1))转折频率点公式：仅考虑指令跟踪时，跟踪精度对增益要求

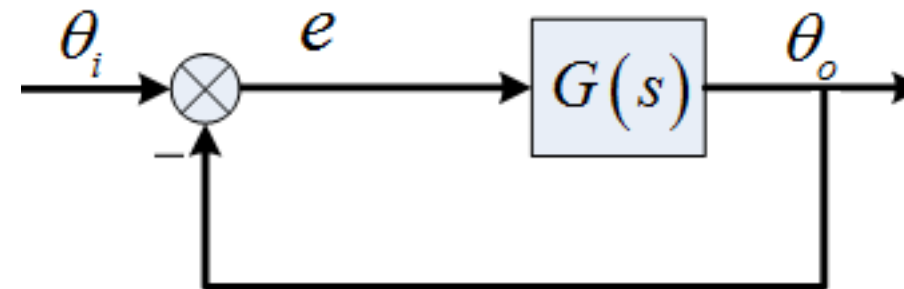
开环传递函数 $G(s)$ 满足 $|G(j\omega)| = \frac{\theta_o}{e} \approx \frac{\theta_i}{e}$



$$\theta_i = \theta_{\max} \sin(\omega_k t)$$

$$e(t) = e_{\max} \sin(\omega_k t + \varphi_k)$$

◆ 例4：舰用随动系统的设计。

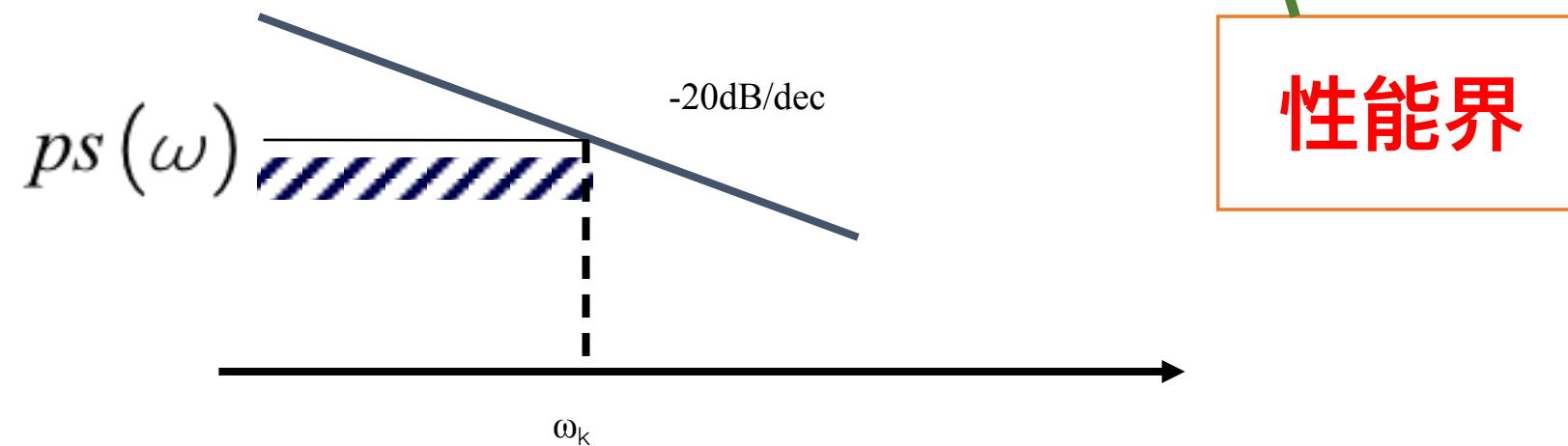


((1))转折频率点公式：

$$|G(j\omega)| = \frac{\theta_o}{e} \approx \frac{\theta_i}{e} \Rightarrow |G(j\omega)| \geq \frac{\theta_{\max}}{e_{\max}} \Rightarrow ps(\omega) = \frac{\theta_{\max}}{e_{\max}}$$

摇摆频率处：

$$\omega_k = 0.628 \text{ rad/s}$$

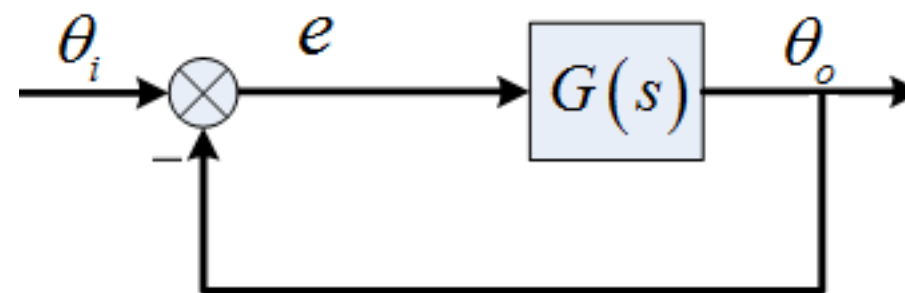




6.2.2 改进I型系统



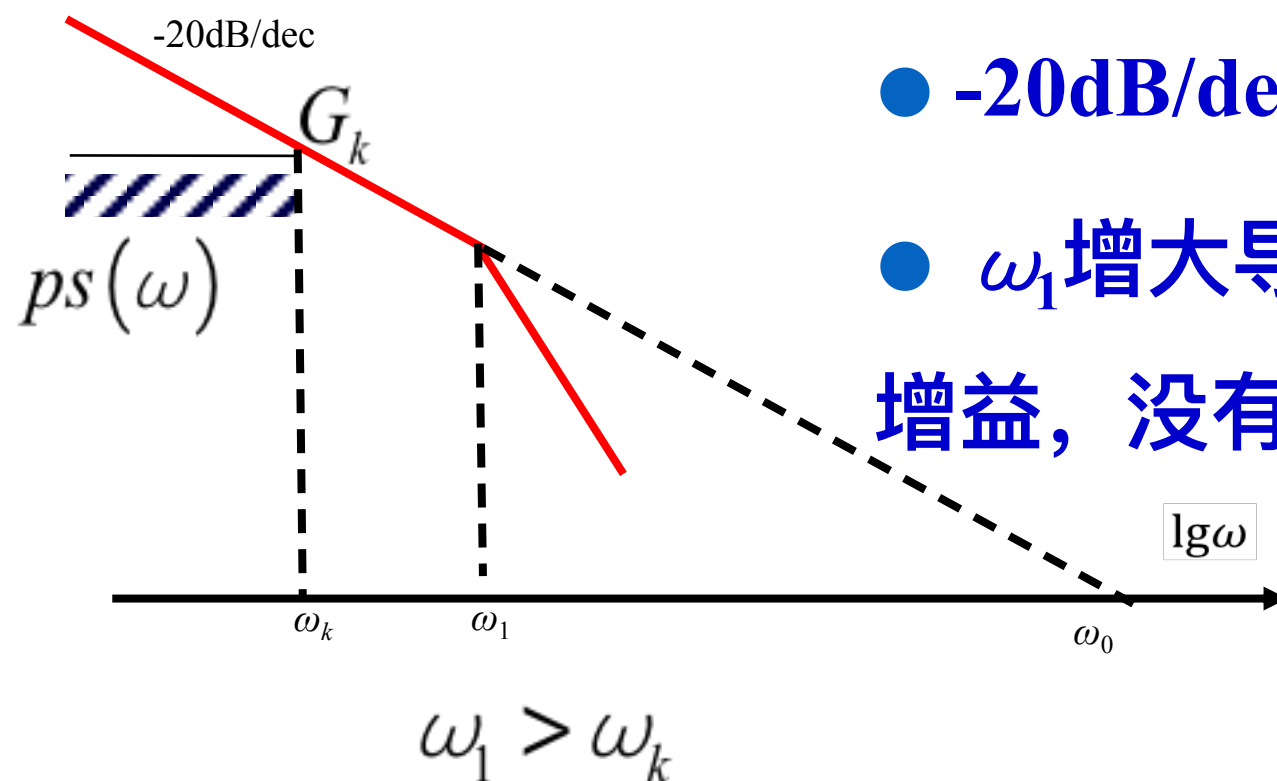
◆ 例4：舰用随动系统的设计。



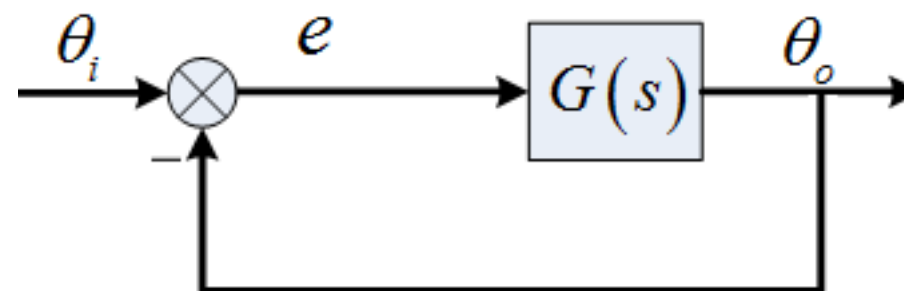
((1))转折频率点公式：

$$\omega_1 > \omega_k$$

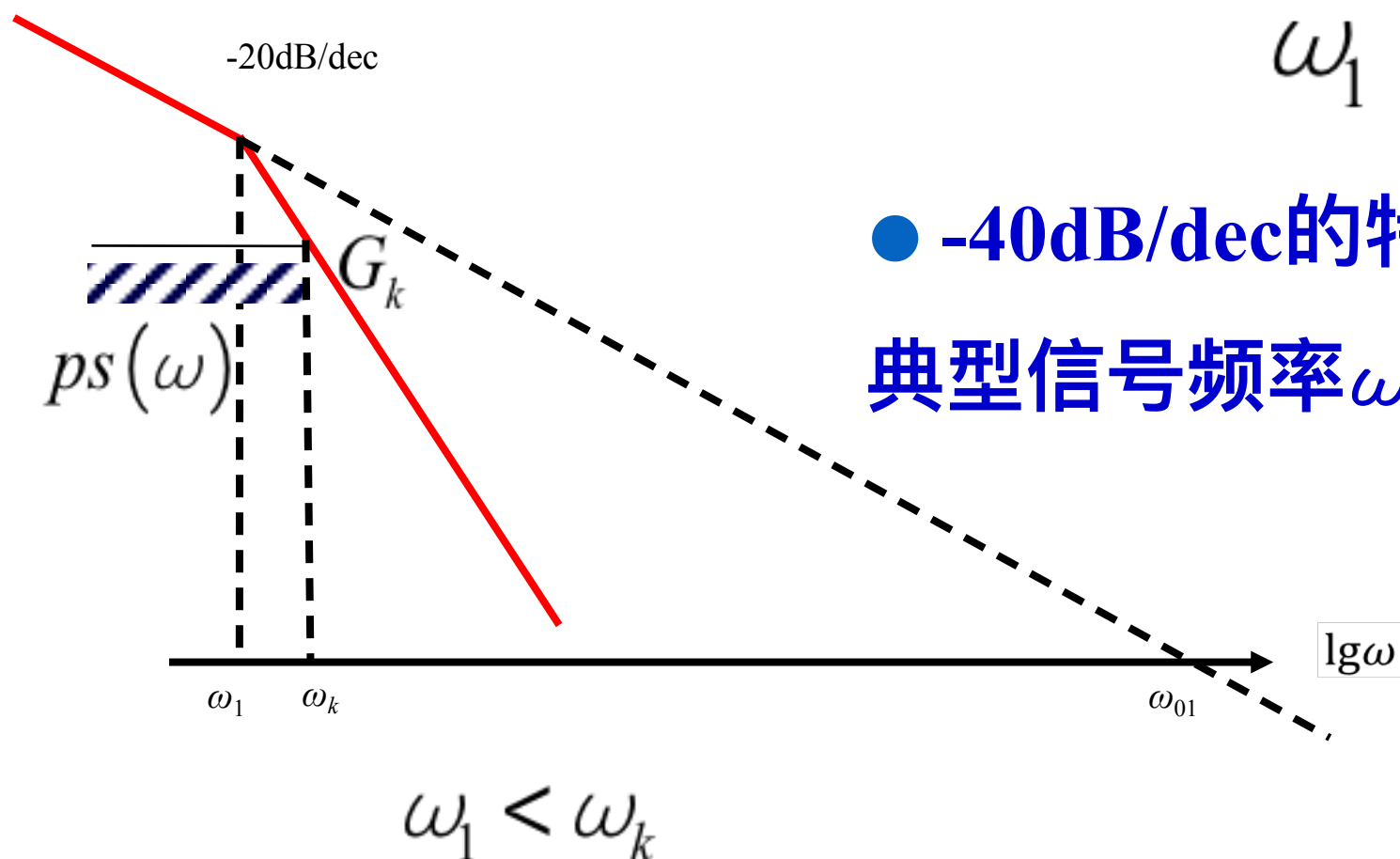
- -20dB/dec的特性穿过 G_k ， ω_0 由此确定；
- ω_1 增大导致带宽增大，但并未提高低频增益，没有改善跟踪精度，故希望减小 ω_1 ；



◆ 例4：舰用随动系统的设计。



((1))转折频率点公式：



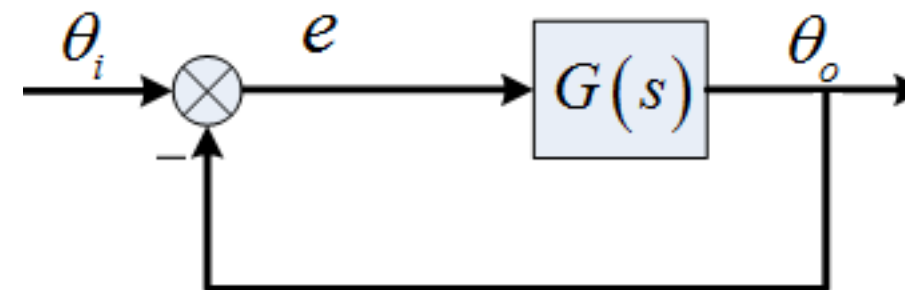
● -40dB/dec的特性穿过 G_k , $\omega_{01} > \omega_0$, 在典型信号频率 ω_k 性能相同而增益提高；



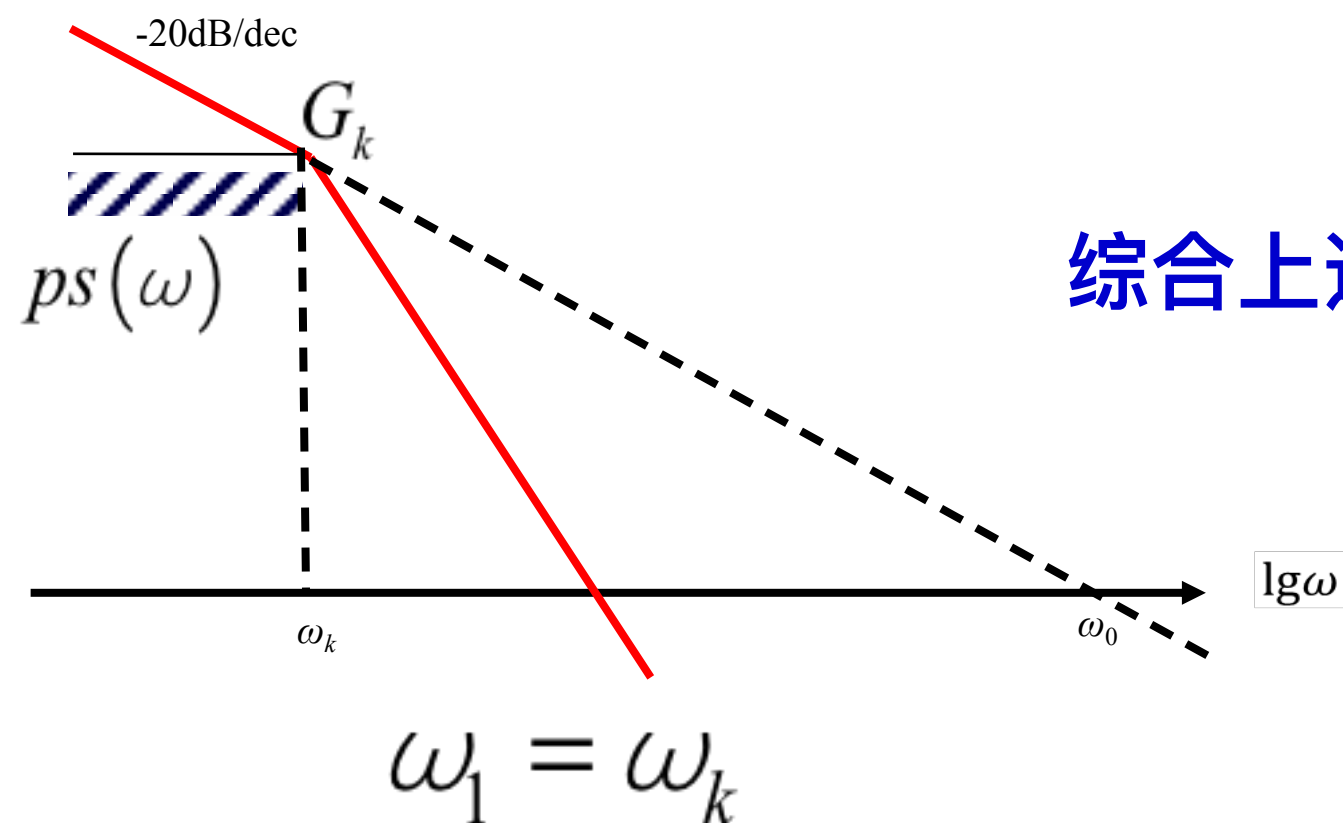
6.2.2 改进I型系统



◆ 例4：舰用随动系统的设计。



((1))转折频率点公式：



综合上述两种情况——

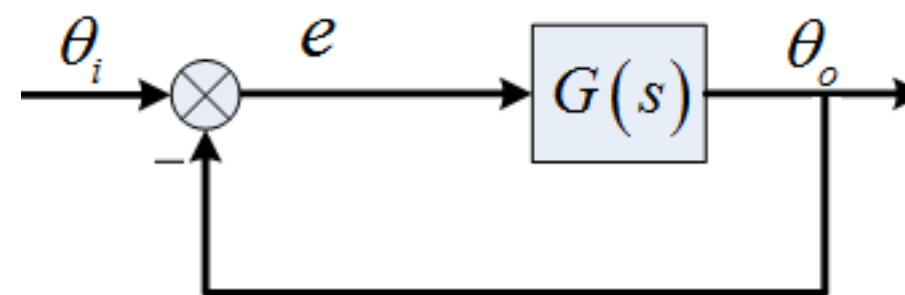
$$\omega_1 = \omega_k$$



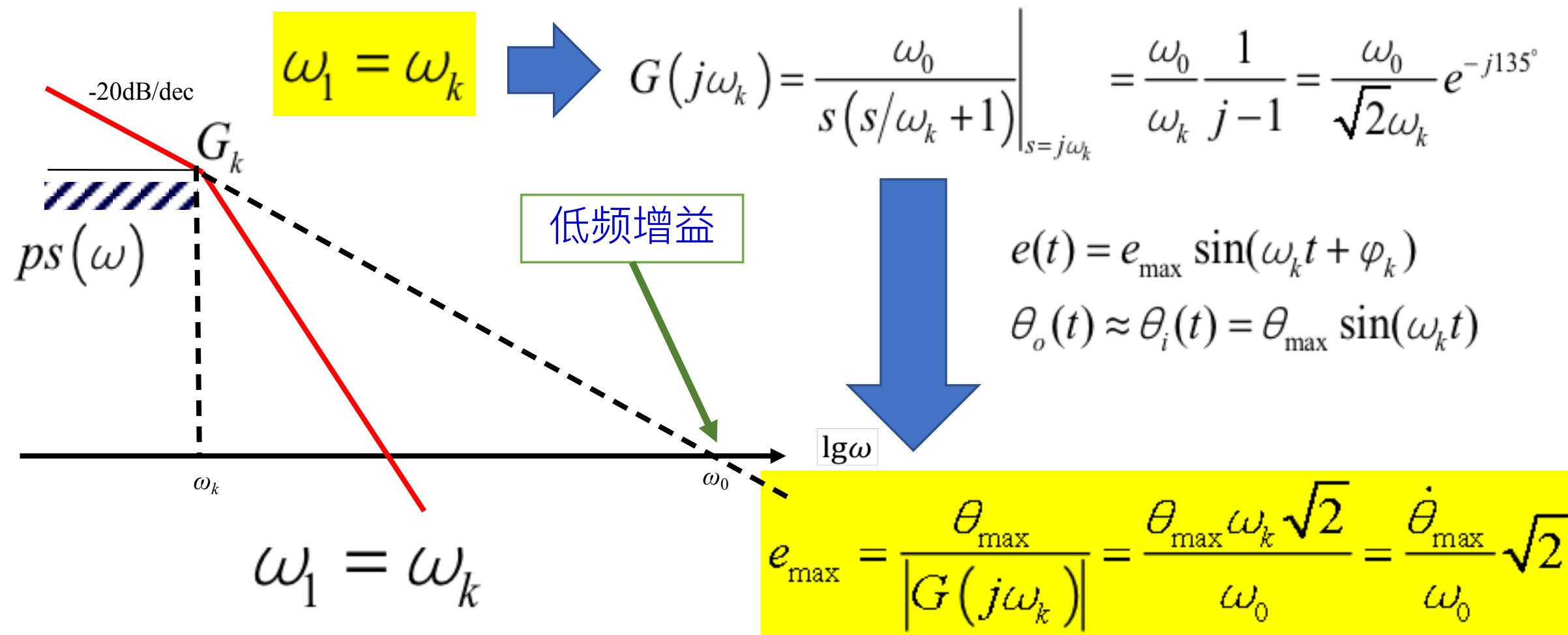
6.2.2 改进I型系统



◆ 例4：舰用随动系统的设计。



((2))跟踪误差公式：



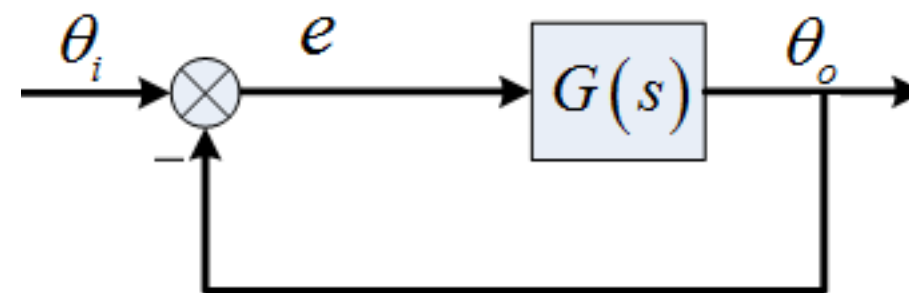


6.2.2 改进I型系统



◆ 例4：舰用随动系统的设计。

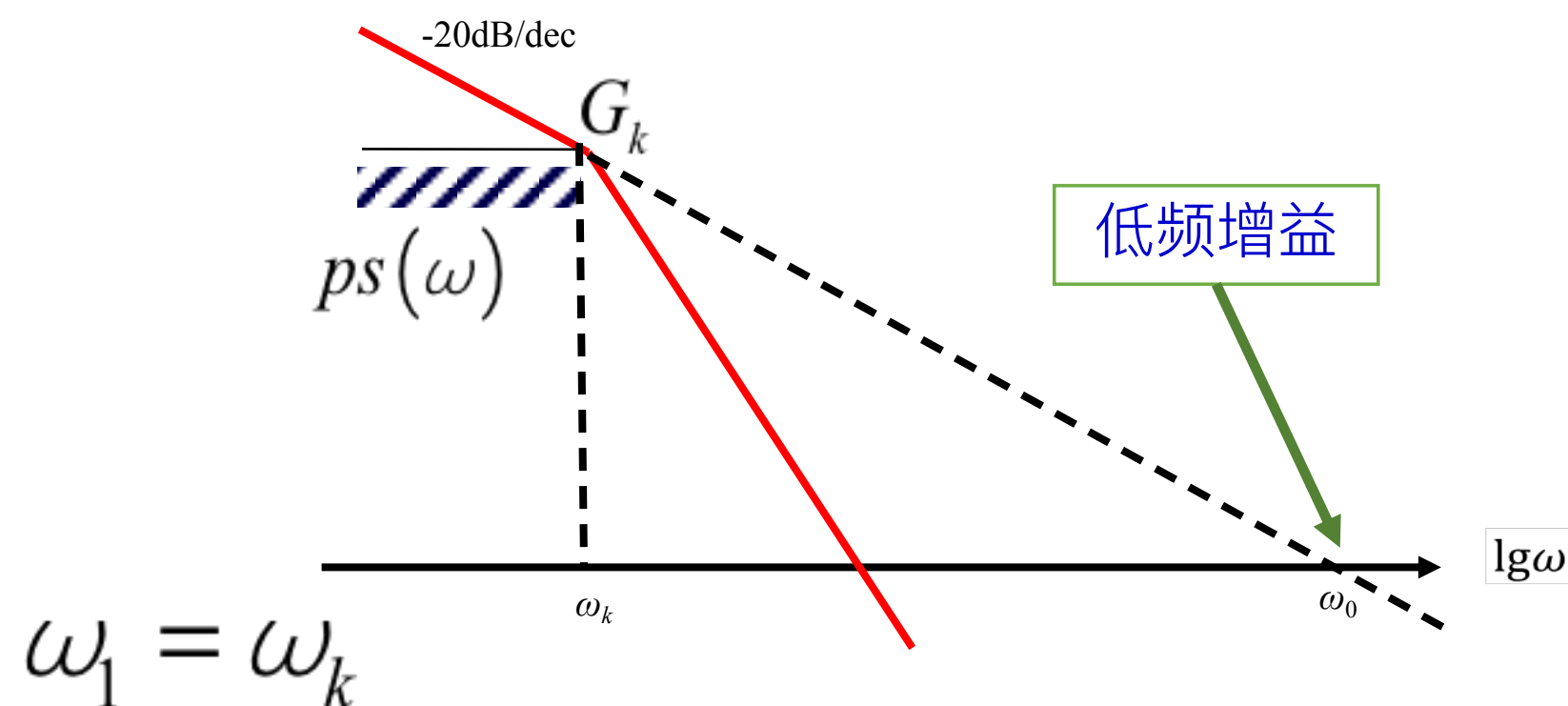
转折频率和跟踪误差公式小结：



此类系统常用公式——

$$\omega_1 = \omega_k$$

$$e_{\max} = \frac{\dot{\theta}_{\max}}{\omega_0} \sqrt{2}$$



由这两个公式，
可以容易很地将主
要参数 ω_0 和 ω_1 确定
下来，也就确定了
期望系统特性的基
本形状。

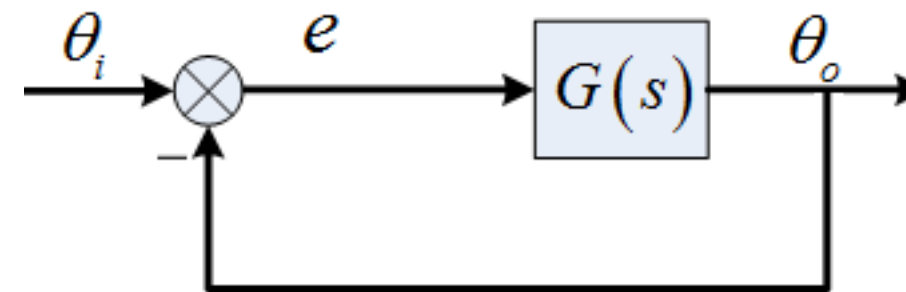




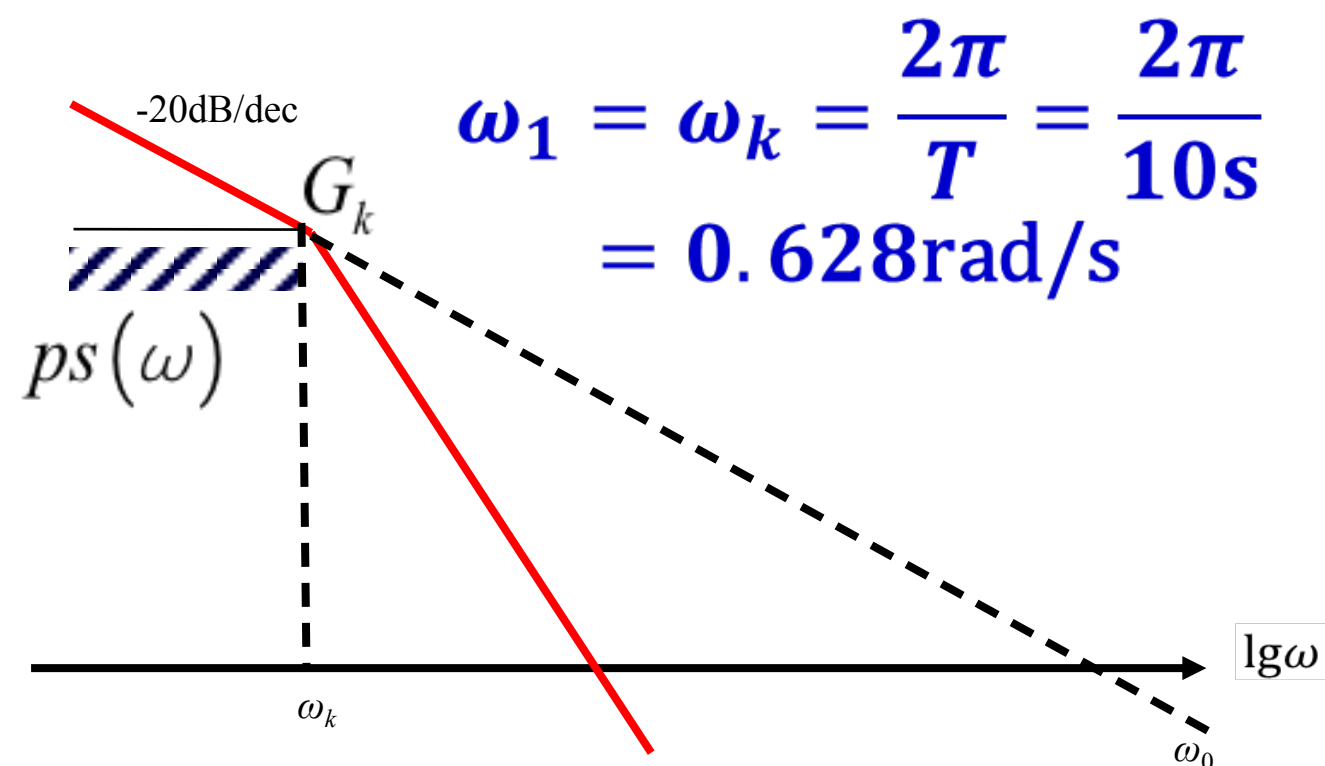
6.2.2 改进I型系统



◆ 例4：舰用随动系统的设计。



((2))跟踪误差公式：



$$\omega_1 = \omega_k$$

$$\omega_1 = \omega_k = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{10s} = 0.628\text{rad/s}$$

分配给输入信号的误差：

$$\frac{1}{2}e_{\max} = \frac{\dot{\theta}_{\max}}{\omega_0}\sqrt{2}$$



$$\omega_0 = 2\sqrt{2} \frac{\dot{\theta}_{\max}}{e_{\max}} = 2\sqrt{2} \frac{20^\circ / 57.3 \times 0.628\text{rad/s}}{0.001\text{rad}} = 620\text{rad/s}$$





6.2.2 改进I型系统

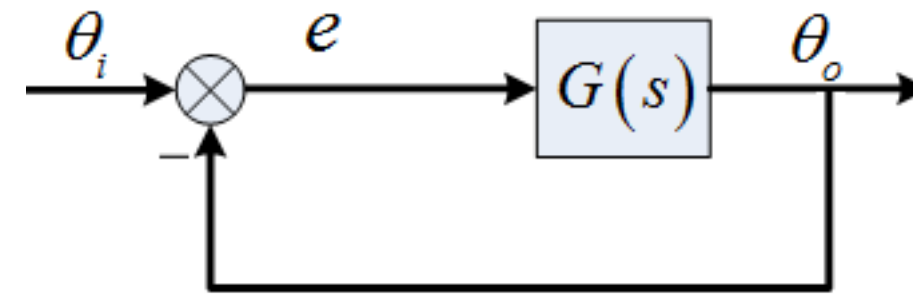


◆ 例4：舰用随动系统的设计。

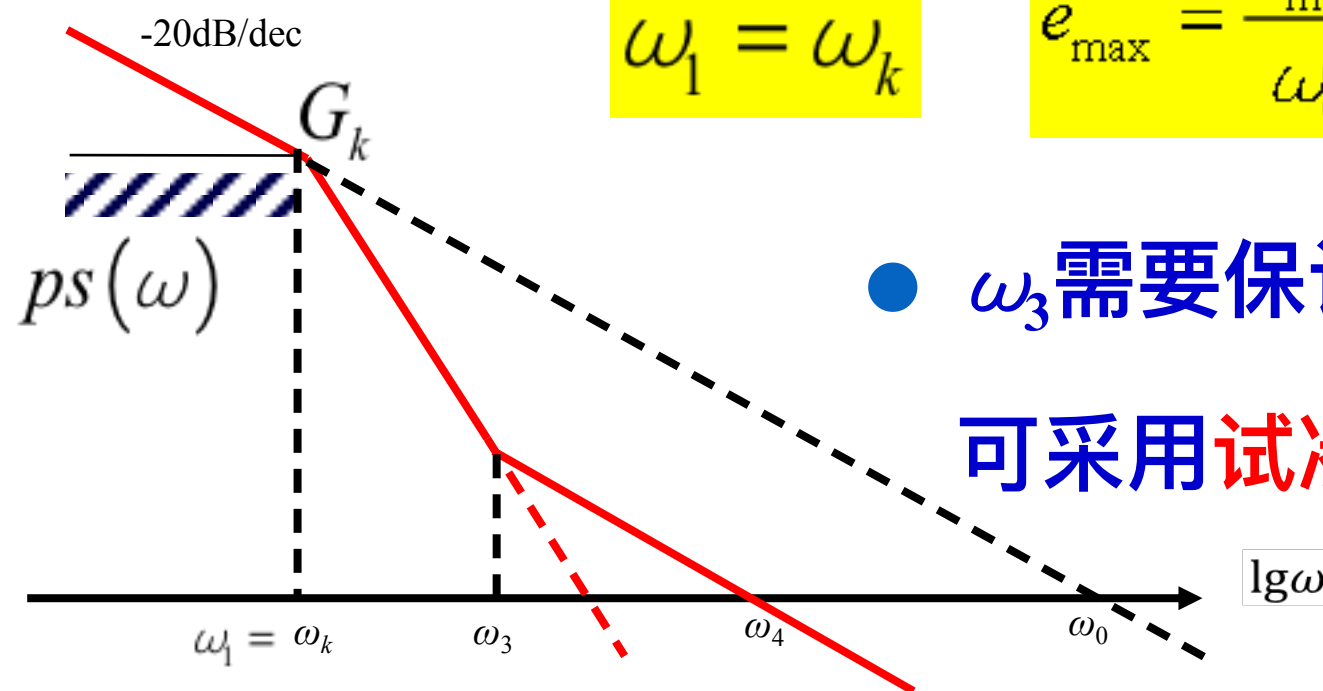
Step 3：穿越频率的确定

典型输入信号：正弦， $\theta_{\max} = 20^\circ$ $T = 10\text{s}$

复现精度：0.001rad



主要参数 ω_0 和 ω_1 确定后，余下的问题就是确定转折频率 ω_3 。



$$\omega_1 = \omega_k$$

$$e_{\max} = \frac{\dot{\theta}_{\max}}{\omega_0} \sqrt{2}$$

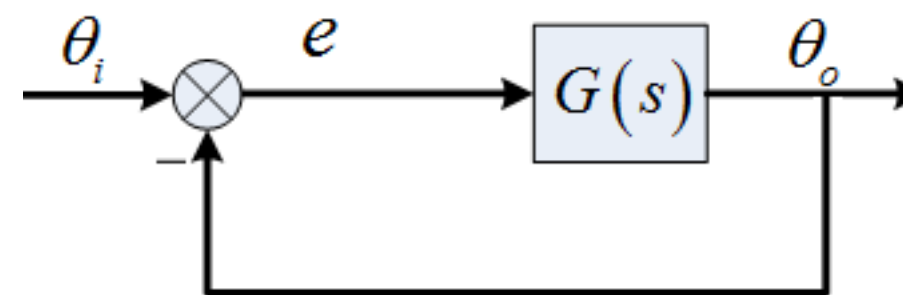
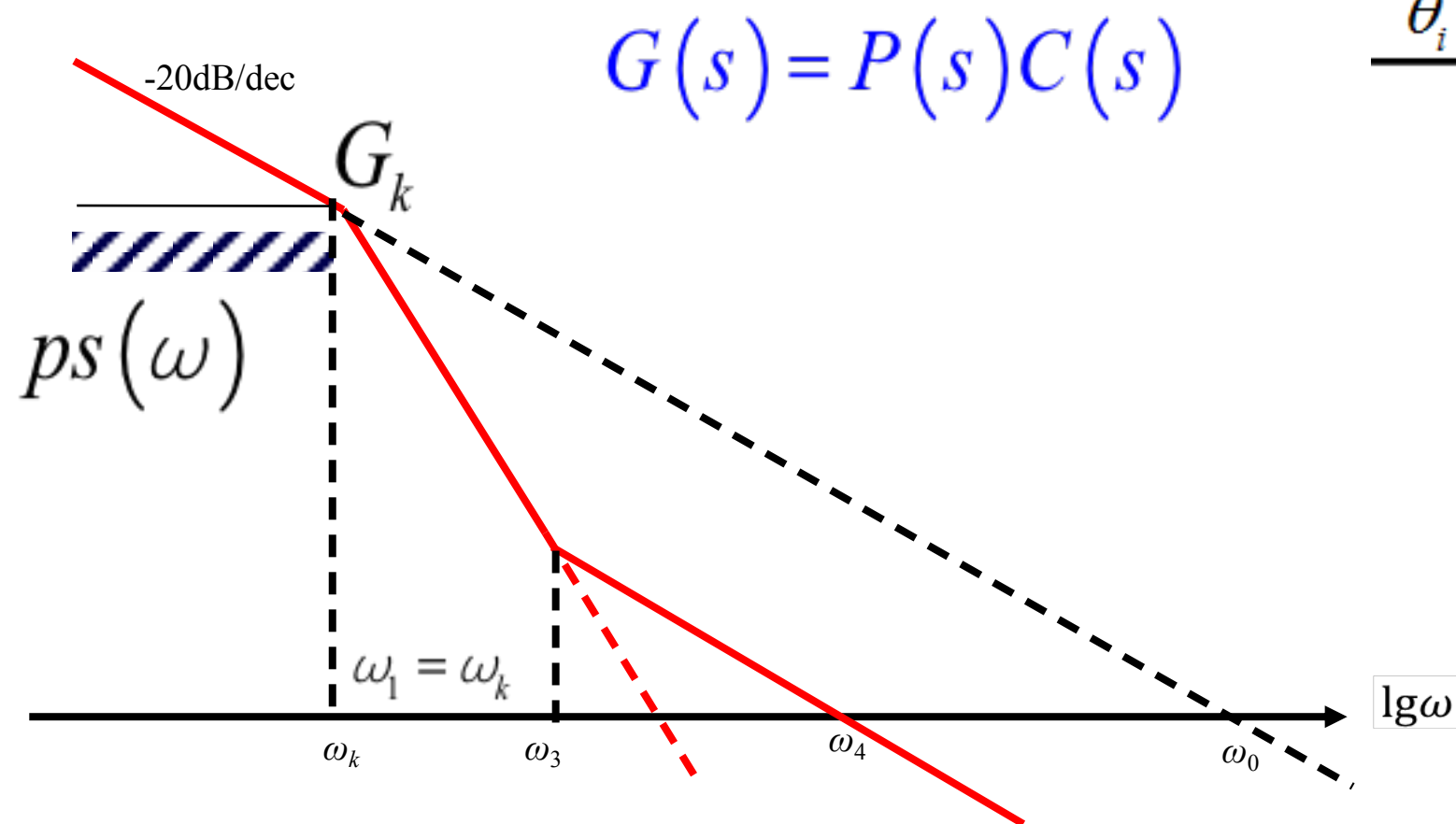
- ω_3 需要保证 ω_4 处具有足够的相角裕度

可采用试凑法 $\Rightarrow \omega_3 = 10\text{rad/s}$



◆ 例4：舰用随动系统的设计。

Step 4：根据期望频率特性和被控对象特性，求解控制器



得到了期望的频率特性后，和具有同样增益 ω_0 的未校正的对象特性相比较，就可得到所需要的串联校正的特性。

◆ 例4：舰用随动系统的设计。

Step 4：根据期望频率特性和被控对象特性，求解控制器

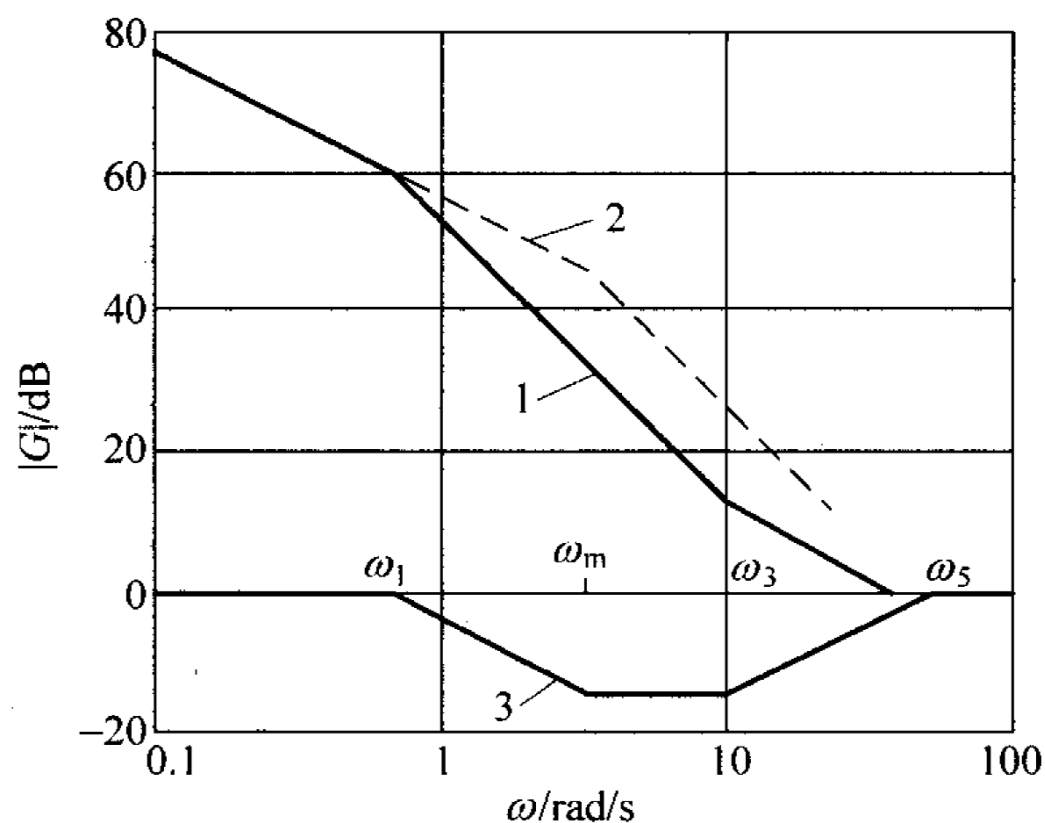
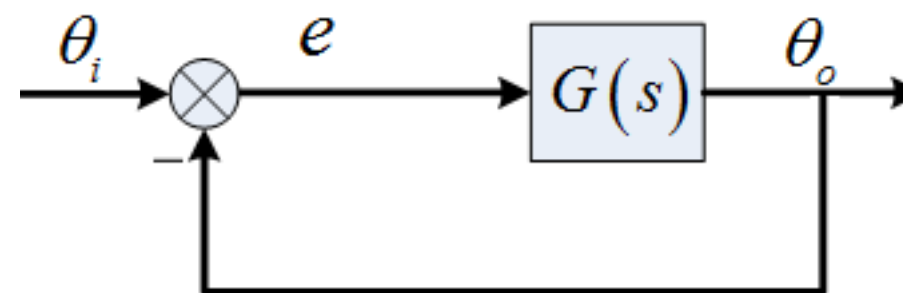
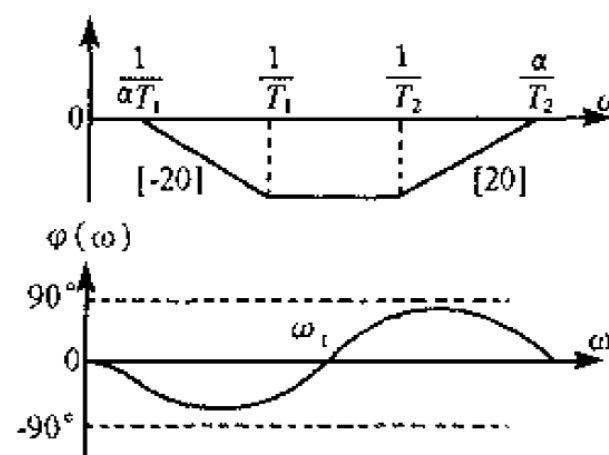


图 7-13 串联校正的求取



$$G(s) = \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{(\alpha T_1 s + 1)[(T_2/\alpha)s + 1]} P(s) C(s)$$



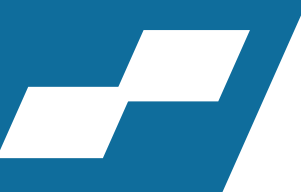
串联校正环节

滞后超前校正

(积分微分校正)



6.2.2 改进I型系统



◆ 例5：火炮方位角随动系统的设计。

$$1\text{mil} = 0.06^\circ$$

火炮随动于指挥仪的输出信号。

跟踪误差：

$$\dot{\theta} = 24^\circ/\text{s} \quad e(t) \leq 2\text{mil}$$

技术要求：

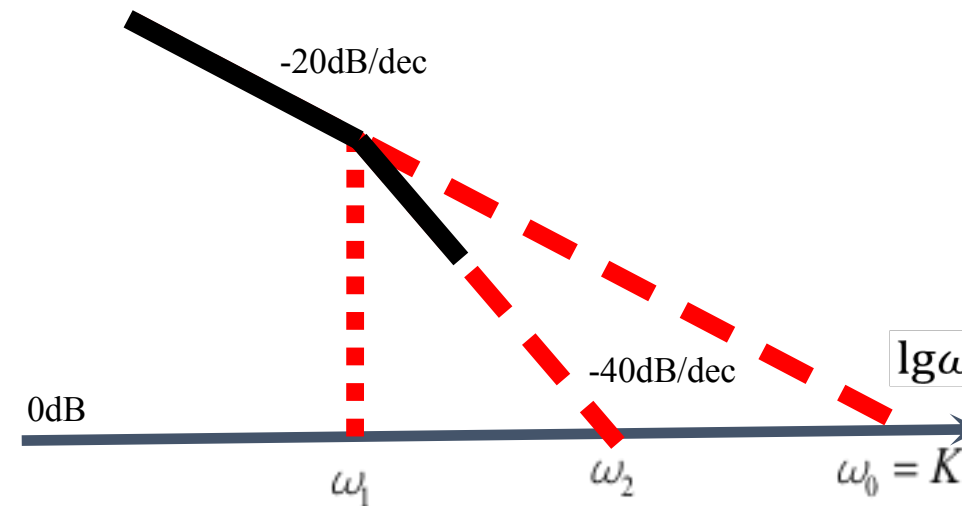
$$\ddot{\theta} = 5^\circ/\text{s}^2 \quad e_a(t) \leq 4\text{mil}$$

Step 1：转折点的确定

$$C_1 = \frac{0.12^\circ}{24^\circ/\text{s}} = \frac{1}{200} \quad \frac{1}{2!}C_2 = \frac{0.24^\circ}{5^\circ/\text{s}^2} = \frac{1}{21}$$

$$\omega_0 = 200$$

$$\omega_1 \approx 0.1$$



I 型系统

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = C_0 r(t) + C_1 \frac{dr(t)}{dt} + \frac{C_2}{2!} \frac{d^2 r(t)}{dt^2} + \dots$$

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0} \quad \frac{C_2}{2!} = \left(\frac{1}{\omega_2} \right)^2 = \frac{1}{\omega_0 \omega_1}$$





6.2.2 改进I型系统



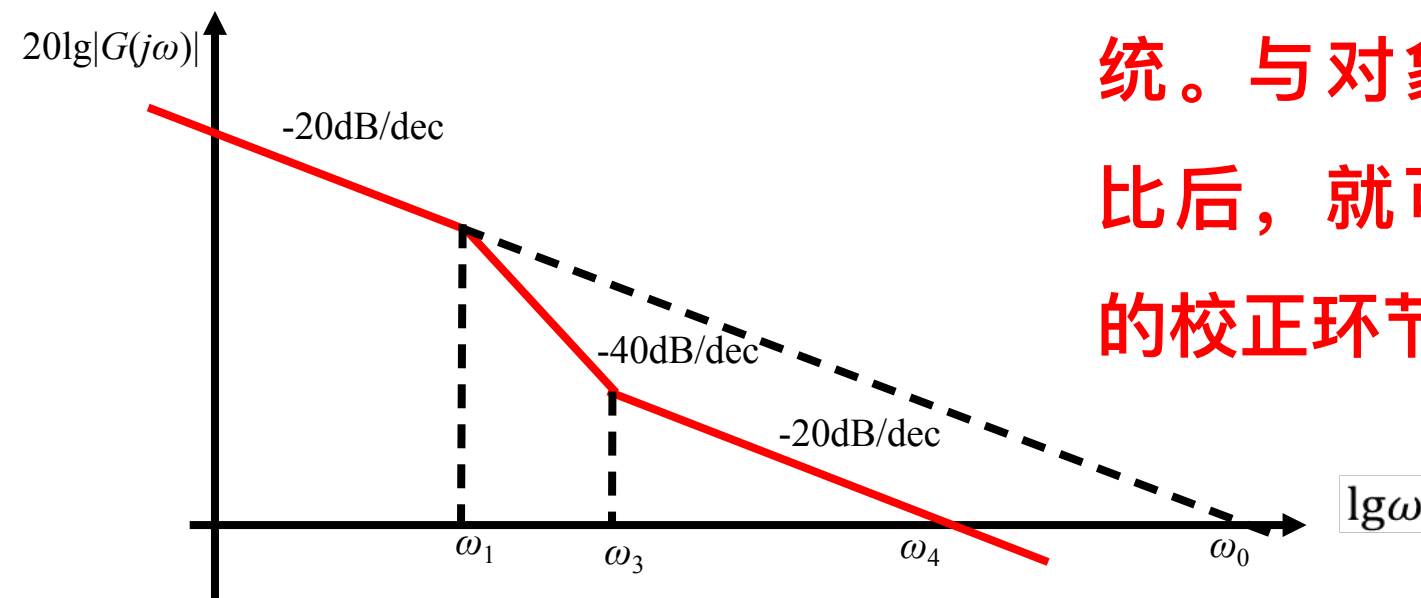
◆ 例5：火炮方位角随动系统的设计。

$$\omega_0 = 200\text{rad/s} \quad \omega_1 = 0.1\text{rad/s}$$

根据相对稳定性，初步确定 $\omega_3 = 3.3\text{rad/s}$

Step 2：绘制开环期望频率特性

确定了这些参数后就得到了系统的期望频率特性，为一改进I型系统。与对象实际特性对比后，就可以得到相应的校正环节。



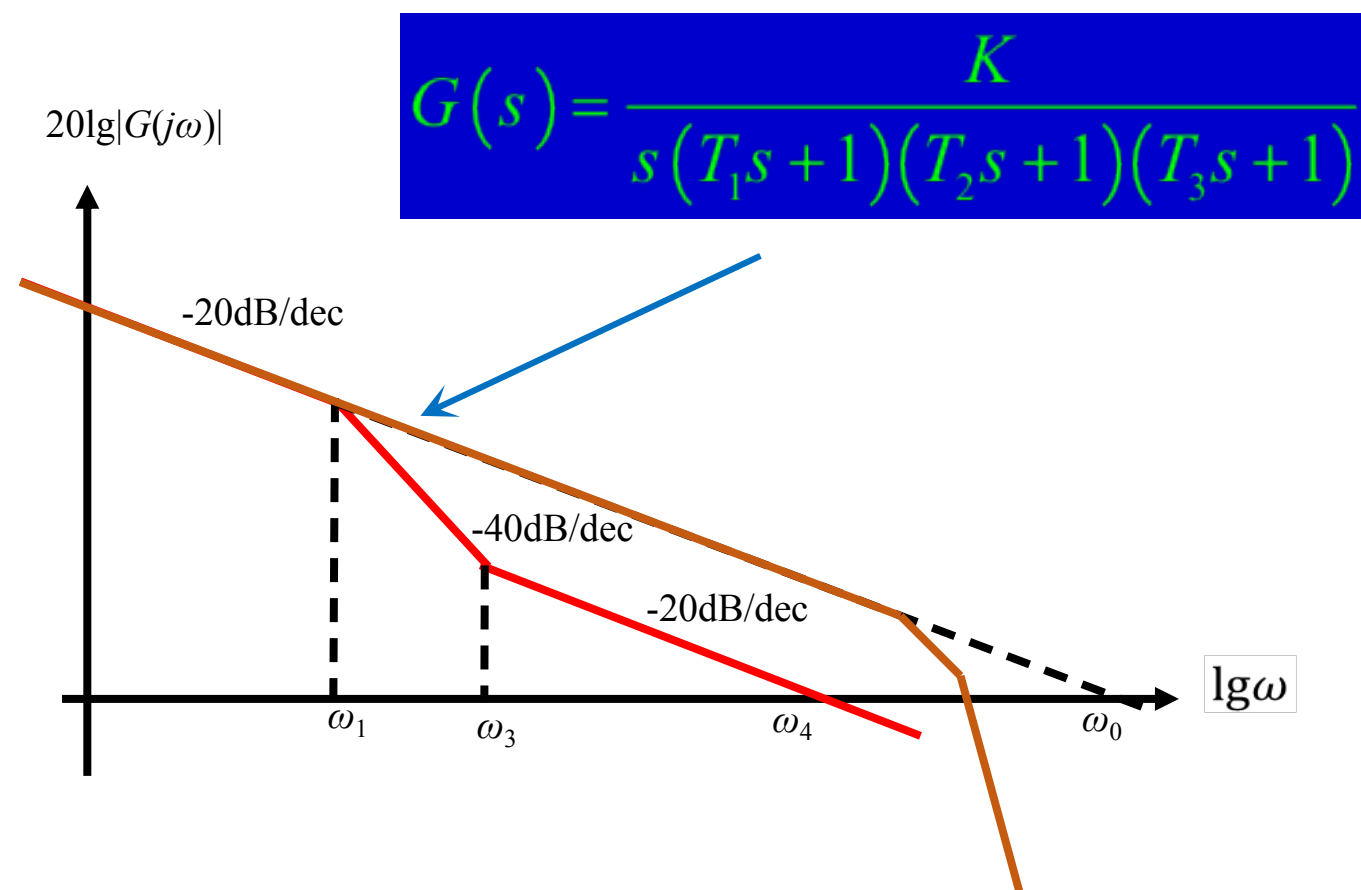


6.2.2 改进I型系统



◆ 例5：火炮方位角随动系统的设计。

由期望频率特性和被控对象频率特性，求解控制器：



直流电机时间常数、
电机放大器时间常
数、控制绕组时间
常数分别为：

$$T_1 = 0.6s$$

$$T_2 = 0.1s$$

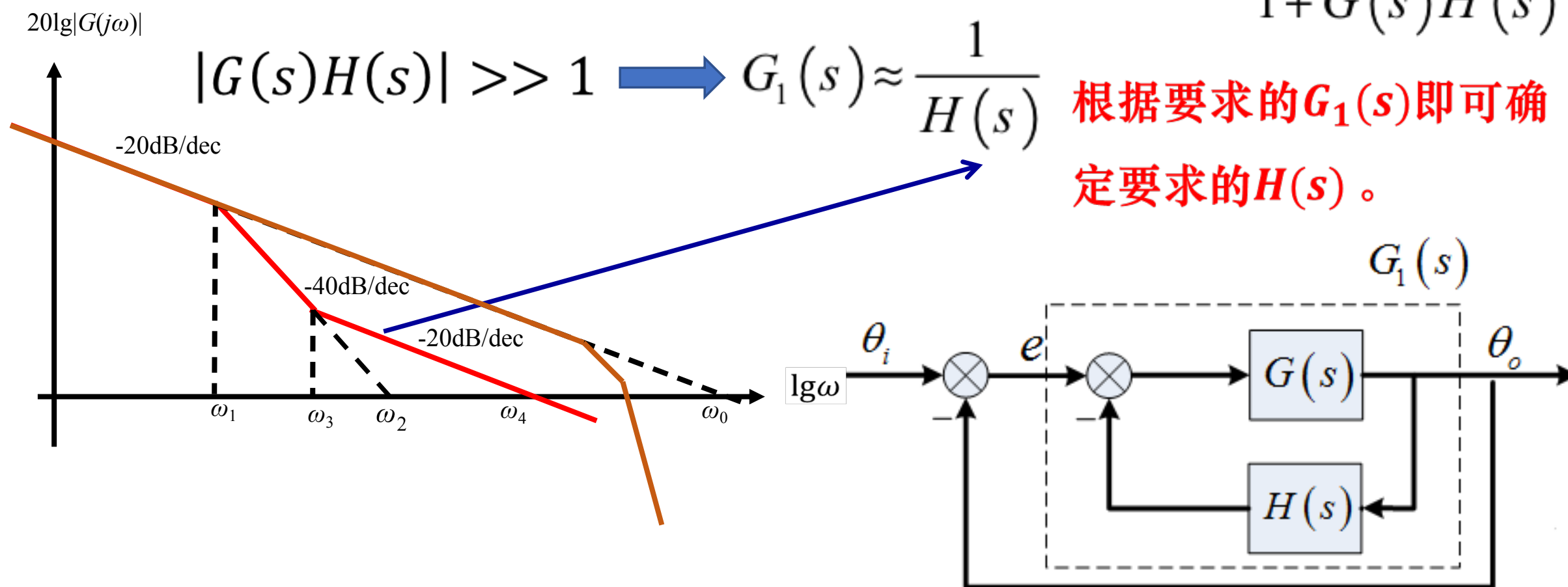
$$T_3 = 0.03s$$



◆ 例5：火炮方位角随动系统的设计。

由期望频率特性和被控对象频率特性，求解控制器：

采用反馈校正。校正后开环传递函数： $G_1(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$





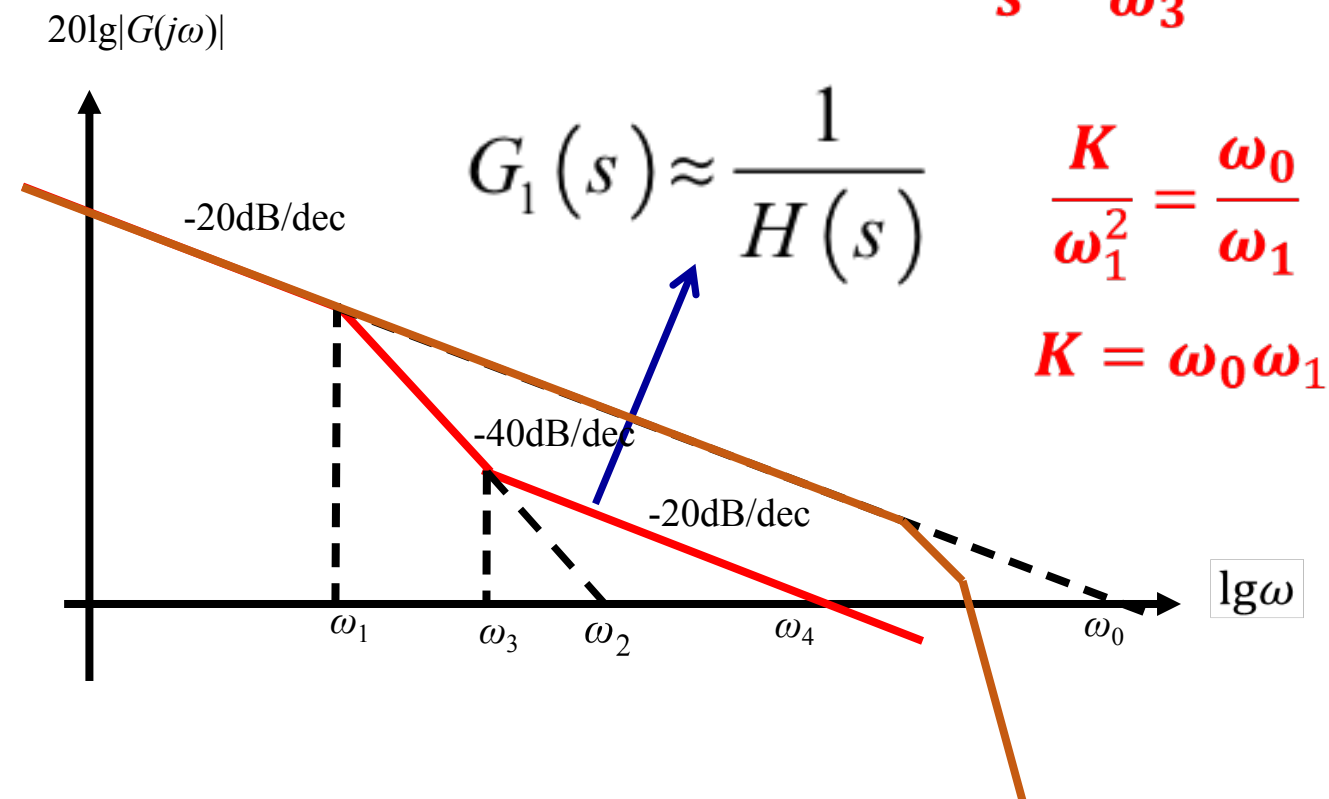
6.2.2 改进I型系统



◆ 例5：火炮方位角随动系统的设计。

由期望频率特性和被控对象频率特性，求解控制器：

中频段： $G_1(s) = \frac{K}{s^2} \left(\frac{s}{\omega_3} + 1 \right)$



$$G_1(s) \approx \frac{1}{H(s)}$$

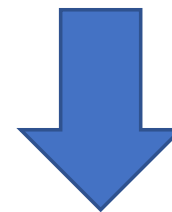
$$\frac{K}{\omega_1^2} = \frac{\omega_0}{\omega_1}$$

$$K = \omega_0 \omega_1$$

$$\omega_2^2 = \omega_0 \omega_1$$

$$G_1(s) = \frac{\omega_0}{s} \cdot \frac{\omega_1}{s} \cdot \left(\frac{s}{\omega_3} + 1 \right)$$

$$= \omega_2^2 \frac{s/\omega_3 + 1}{s^2}$$



$$H(s) = \frac{1}{\omega_2^2} \frac{s^2}{s/\omega_3 + 1}$$





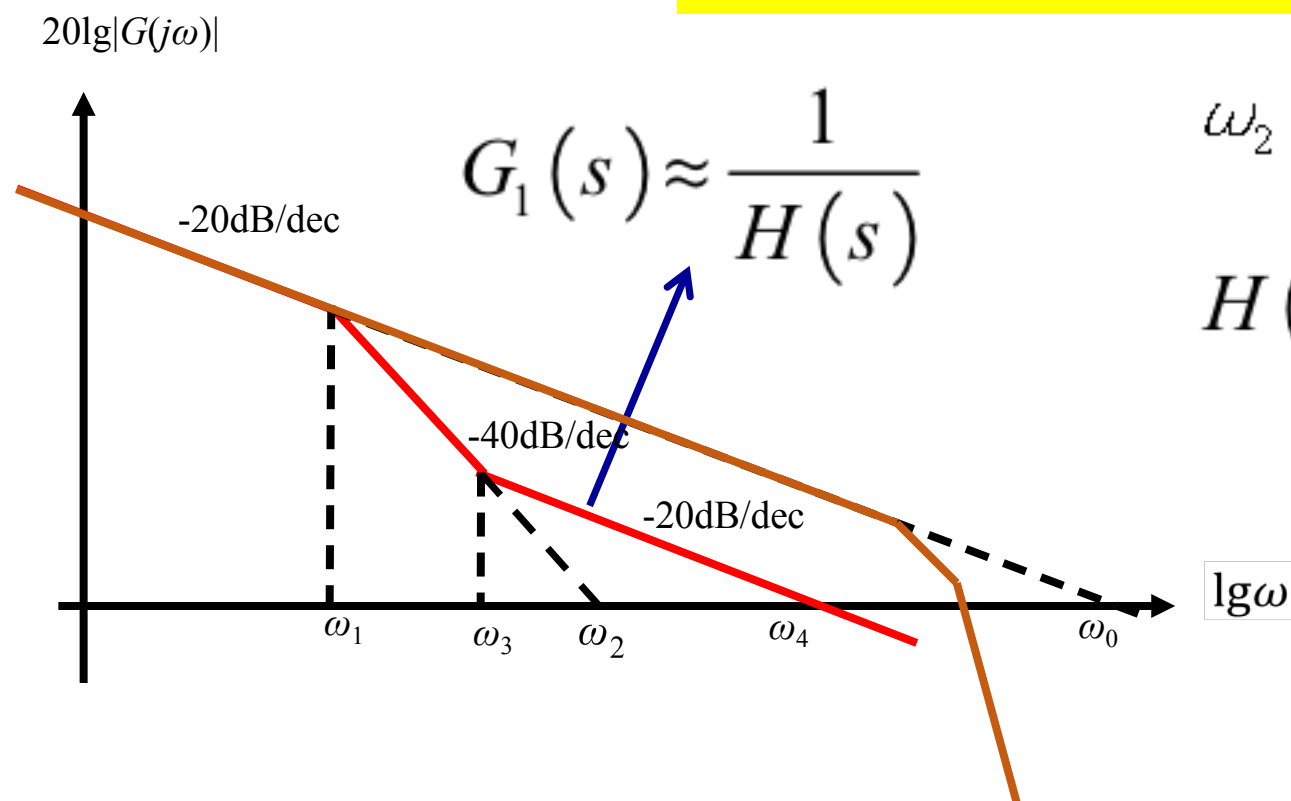
6.2.2 改进I型系统



◆ 例5：火炮方位角随动系统的设计。

由期望频率特性和被控对象频率特性，求解控制器：

中频段： $\omega_0 = 200\text{rad/s}$ $\omega_1 = 0.1\text{rad/s}$ $\omega_3 = 3.3\text{rad/s}$



$$\omega_2 = \sqrt{\omega_0 \omega_1} = \sqrt{20}\text{rad/s}$$

$$H(s) = \frac{1}{\omega_2^2} \frac{s^2}{s/\omega_3 + 1} = \frac{1}{20} \frac{s^2}{0.3s + 1}$$

反馈校正需要求取输出量的二阶导数，具体实现时取测速发电机的输出再经一微分线路。

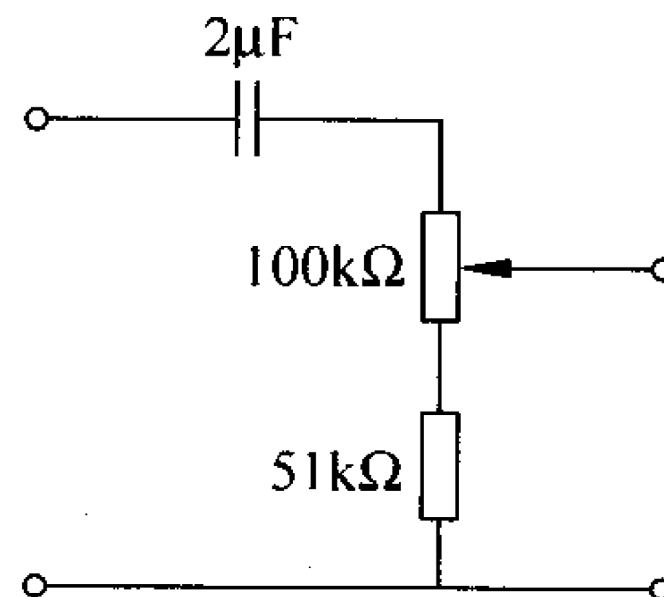
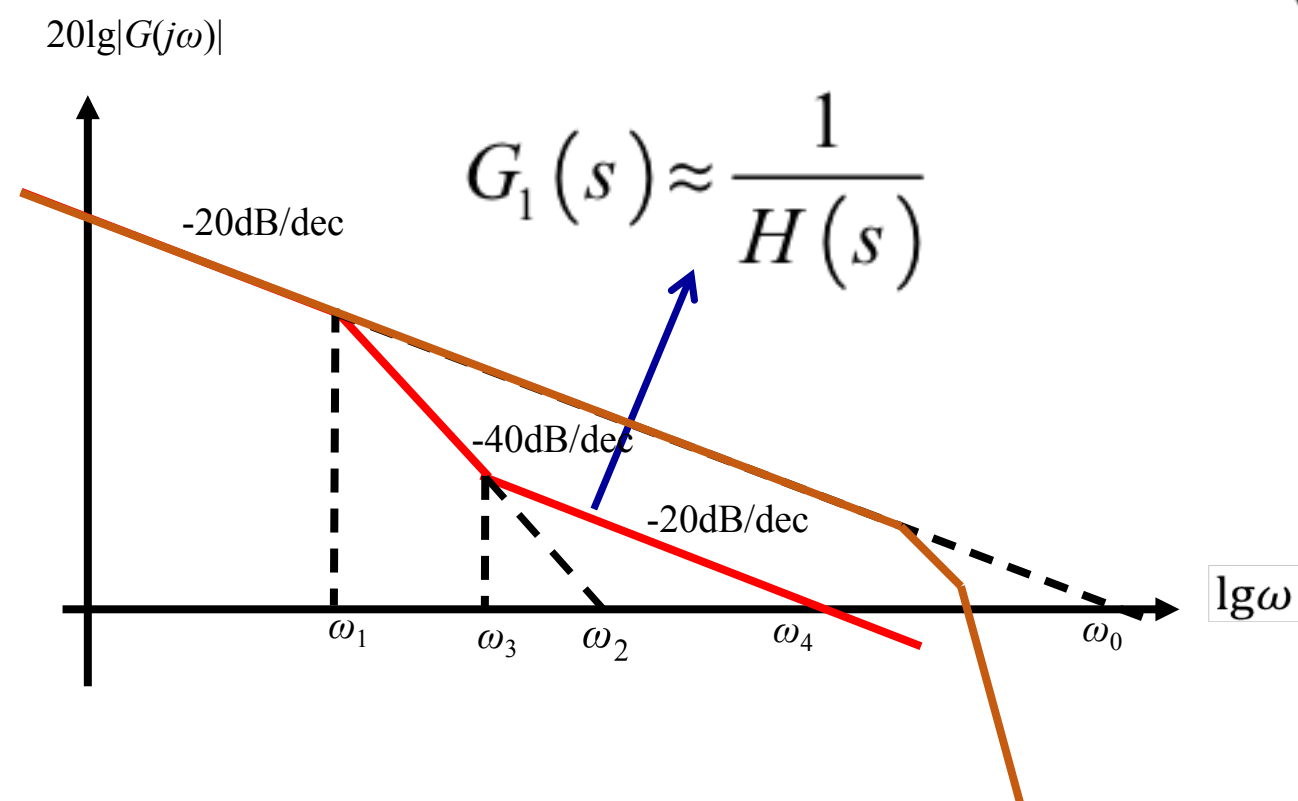


◆ 例5：火炮方位角随动系统的设计。

由期望频率特性和被控对象频率特性，求解控制器：

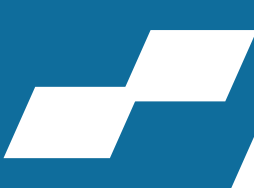
中频段：

$$H(s) = \frac{1}{\omega_2^2} \frac{s^2}{s/\omega_3 + 1} = \frac{1}{20} \frac{s^2}{0.3s + 1}$$





6.2.2 改进I型系统



◆ 例5：火炮方位角随动系统的设计。

由期望频率特性和被控对象频率特性，求解控制器：

中频段：

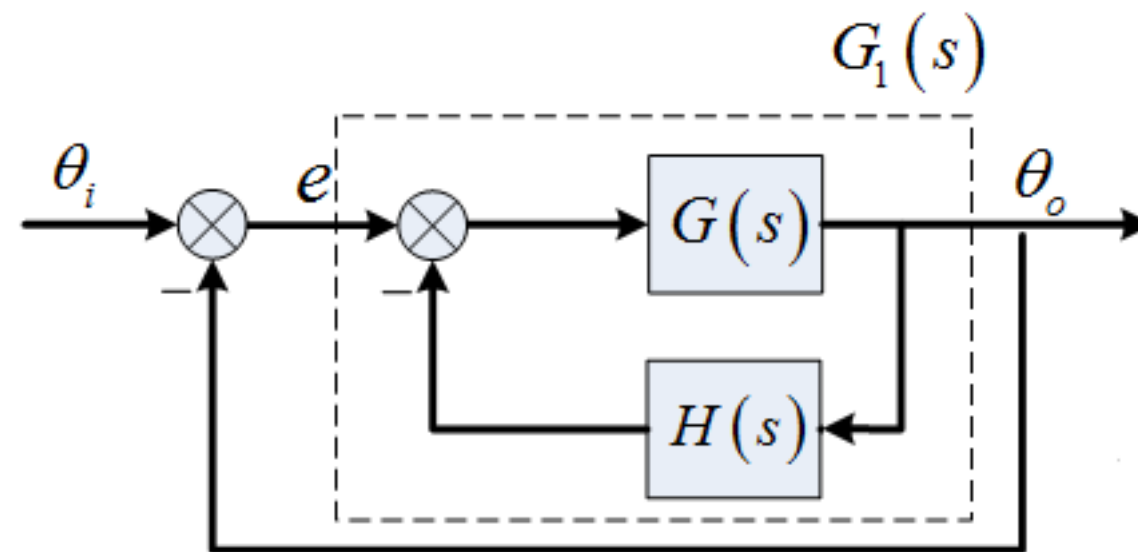
稳定性问题

反馈校正的引入，带来了稳定性问题，实际上还需要加速度信号。

$$H(s) = \frac{1}{20} \frac{1 + \tau s}{0.3s + 1} s^2$$

$$H(s) = \frac{1}{\omega_2^2} \frac{s^2}{s/\omega_3 + 1} = \frac{1}{20} \frac{s^2}{0.3s + 1}$$

$$G(s) = \frac{K}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)}$$



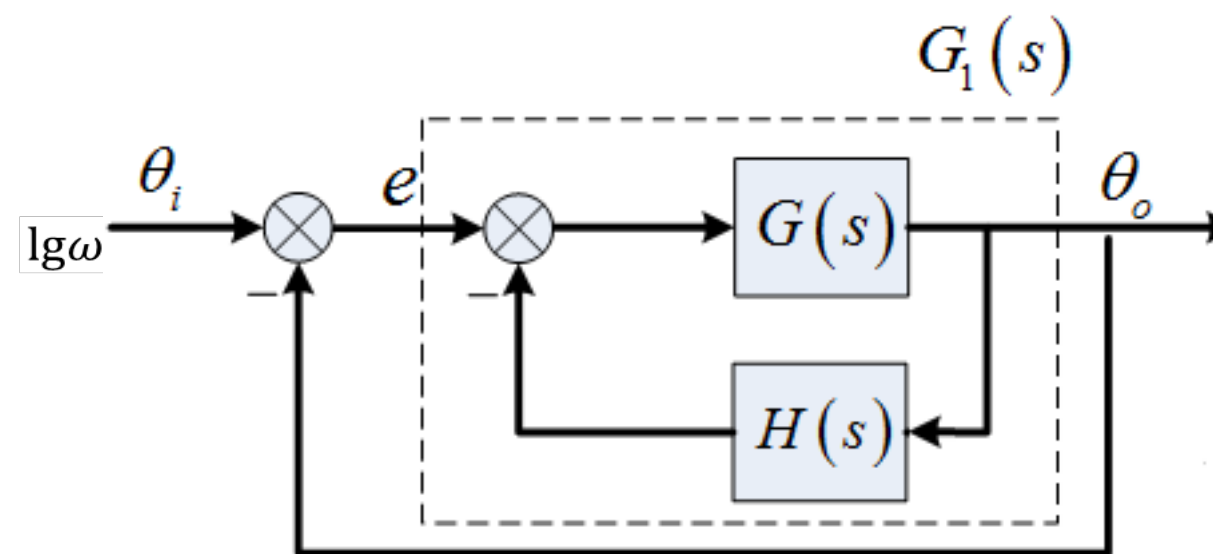
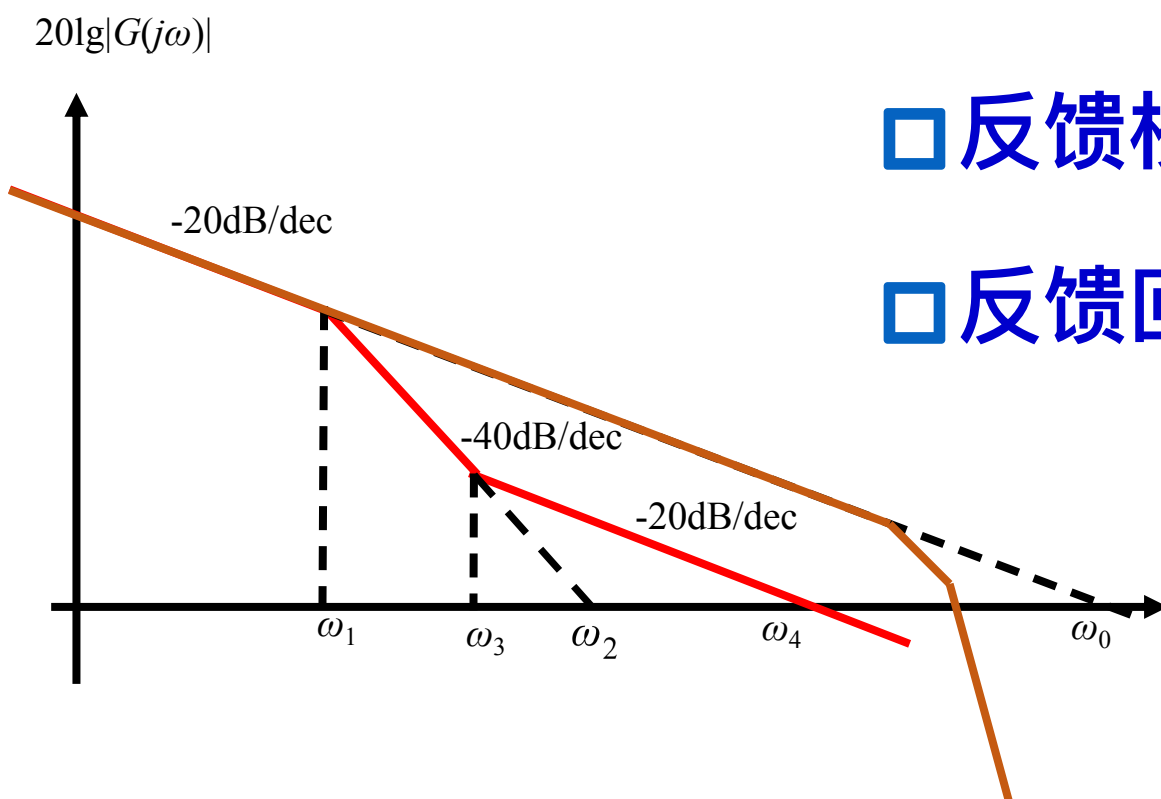
◆ 例5：火炮方位角随动系统的设计。

小结：反馈校正的特点

$$H(s) = \frac{1}{\omega_2^2} \frac{s^2}{s/\omega_3 + 1}$$

□ 反馈校正需要输出量的二阶导数；

□ 反馈回路带来了稳定性问题。





6.2.2 改进I型系统



◆ 例5：火炮方位角随动系统的设计。

$$1\text{mil} = 0.06^\circ$$

跟踪误差测试：

技术要求：

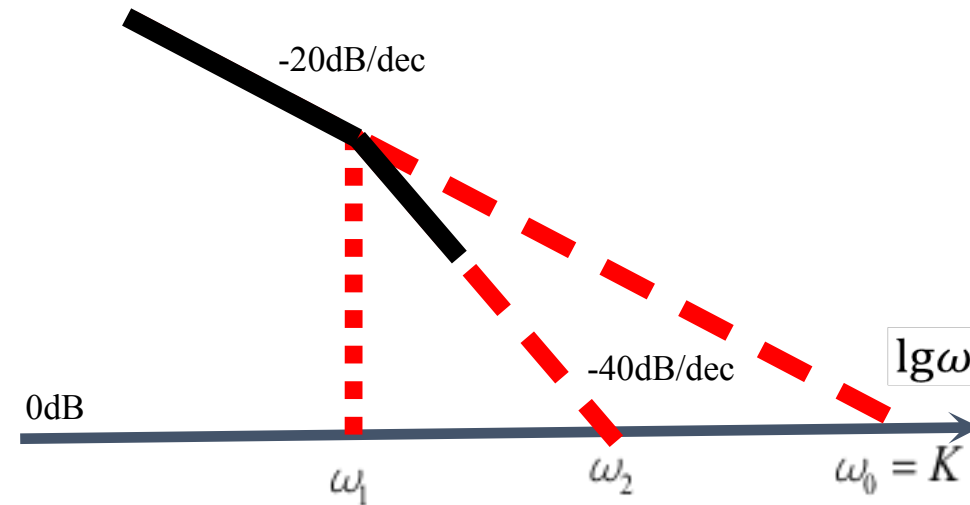
$$\dot{\theta} = 24^\circ/\text{s} \quad e(t) \leq 2\text{mil}$$

$$\ddot{\theta} = 5^\circ/\text{s}^2 \quad e_a(t) \leq 4\text{mil}$$

测试信号：

跟踪误差或误差系数调试时一般采用正弦信号，最大速度和最大加速度分别单独出现。

$$\dot{\theta}_{\max} = 24^\circ/\text{s} \quad \ddot{\theta}_{\max} = 5^\circ/\text{s}^2$$



I 型系统

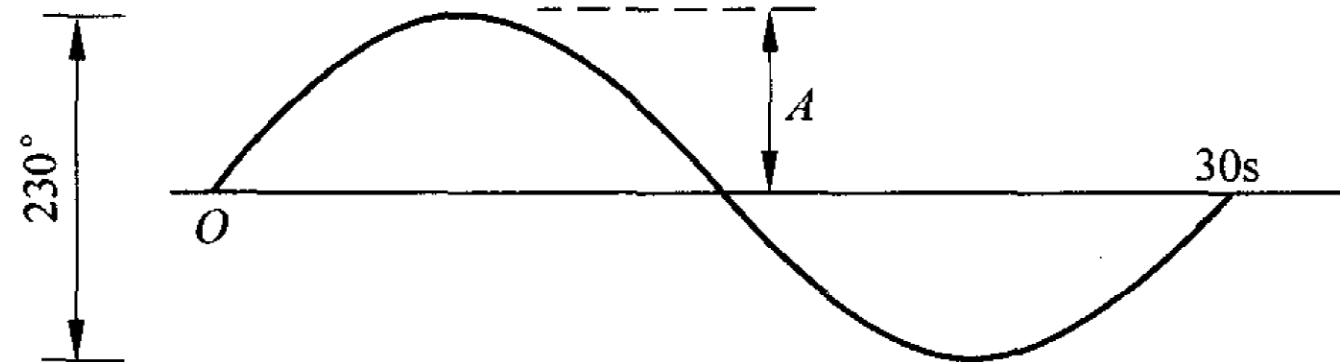


图 7-19 正弦测试信号





课程安排

1

伺服系统的数学模型

2

I型系统

1

II型系统

2

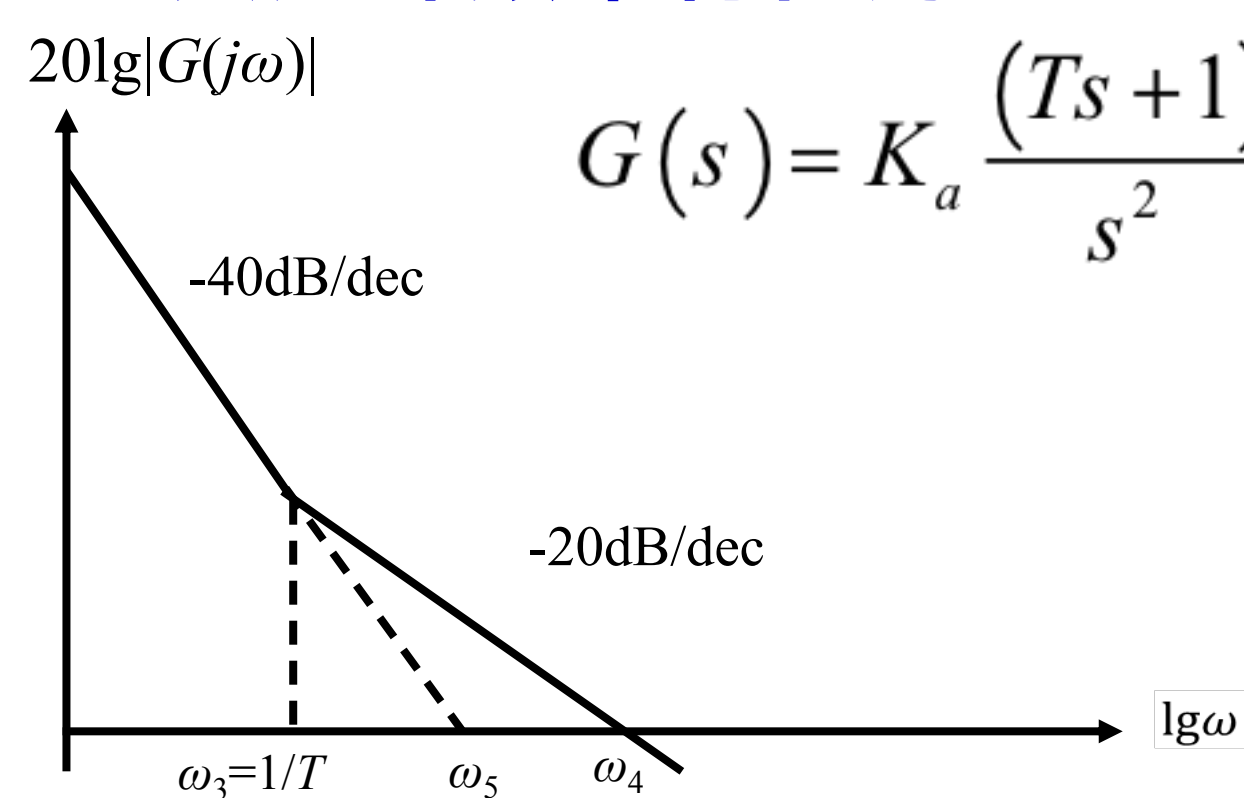
伺服系统的校正



◆ 基本II型系统

基本II型系统是指只有一个转折频率的系统。

其开环频率特性为



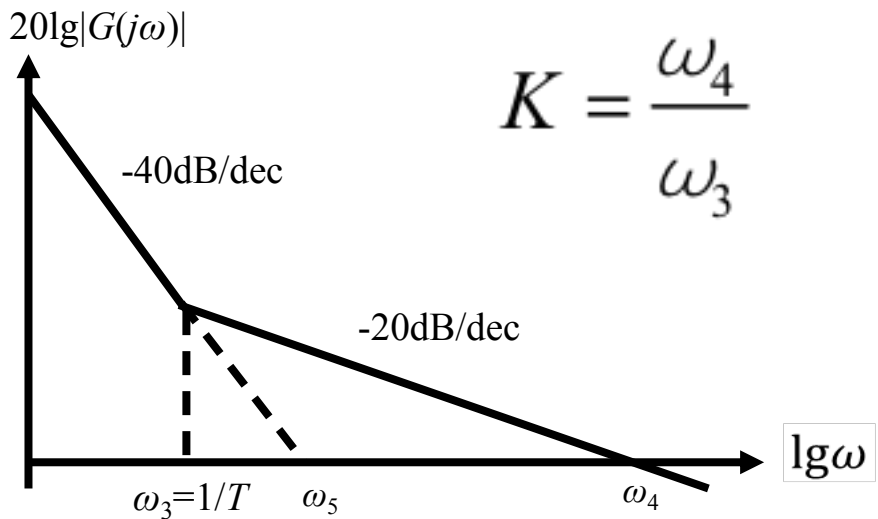
$$G(s) = K_a \frac{(Ts + 1)}{s^2} \quad \begin{matrix} \Omega = \omega T \\ = \omega / \omega_3 \end{matrix} \Rightarrow G(j\Omega) = K \frac{1 + j\Omega}{(j\Omega)^2}$$
$$K_a = \omega_5^2 = \frac{1}{T} \omega_4 = \omega_3 \omega_4$$

$$K = K_a T^2 = \omega_4 T = \frac{\omega_4}{\omega_3}$$



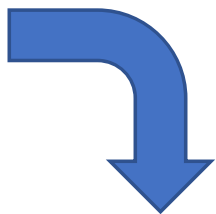
◆ 基本II型系统

闭环频率特性:



$$G_c(j\Omega) = \frac{G(j\Omega)}{1 + G(j\Omega)} = \frac{K(j\Omega + 1)}{(j\Omega)^2 + K(j\Omega) + K}$$

$K=\omega_4/\omega_3$	1	2
单位阶跃输入下输出的峰值	1.3	1.22
阻尼比 $\zeta = \frac{\sqrt{K}}{2}$	0.5	0.707



$$1 \leq K \leq 2$$

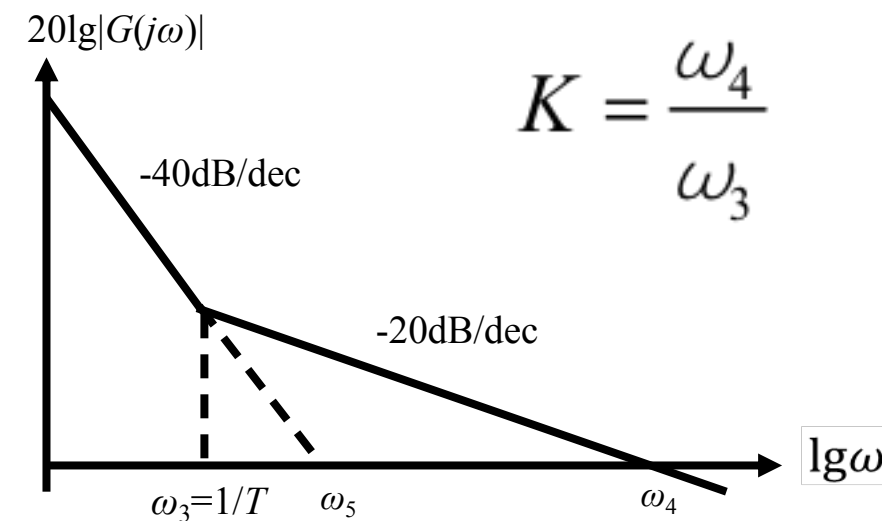


6.3 II型系统



◆ 基本II型系统

闭环频率特性:



$$G_c(j\Omega) = \frac{G(j\Omega)}{1 + G(j\Omega)} = \frac{K(j\Omega + 1)}{(j\Omega)^2 + K(j\Omega) + K}$$

等效噪声带宽:

当 $K=1$ 时系统的等效噪声带宽最小，当 $K=2$ 时，系统的等效噪声增大到1.06倍，增加并不多。

基于稳定性和噪声两方面的分析，一般取:

$$1 \leq K \leq 2$$



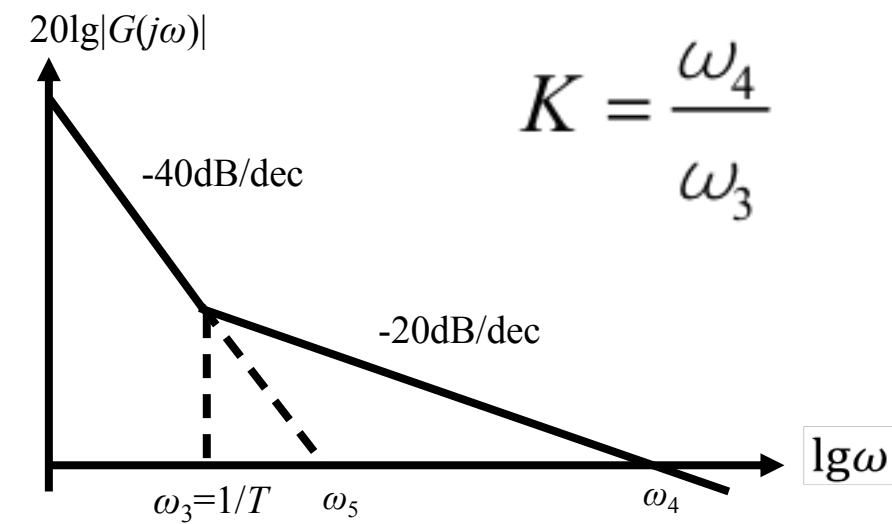


6.3 II型系统



◆ 基本II型系统

带宽的确定:



参数 K 是增益的相对值，带宽 ω_4 的具体数值，需要根据跟踪误差的要求来确定。由要求的误差指标，根据

$$e(t) \approx \frac{\ddot{r}}{K_a} = \frac{\ddot{r}}{\omega_3 \omega_4}$$

确定 K_a ，进而根据 K 的取值，确定带宽。

总结： 用-20dB延长线求 C_1 ，用-40dB延长线求 C_2 。

$$1 \leq K \leq 2$$





◆ 基本II型系统

应用场合:

- 高精度、重载;
- 高性能、低带宽 (大型系统)

由于一些重型设备的带宽受到限制, 当精度要求高时需要选用II型系统。

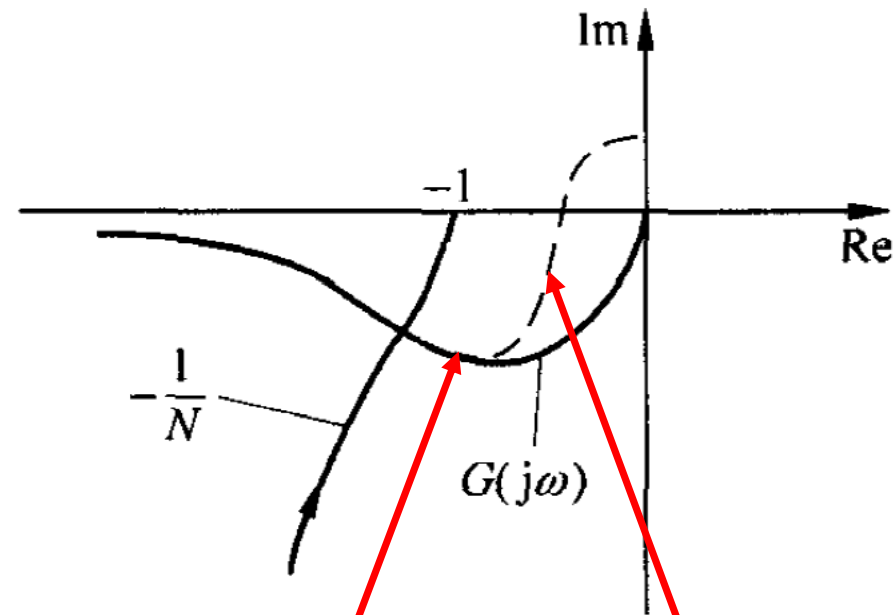
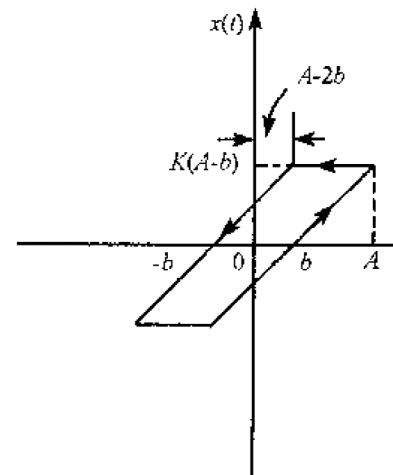
选型 (I型、II型等) 的真正依据是生产实际, 视实际系统能做到的带宽而定。



◆ 基本II型系统

齿隙自振荡:

齿隙特性描述函数的负倒特性位于第三象限，而II型系统的频率特性恰好位于第三象限，两者必然相交。因此，若机械传动中存在齿隙，则这类系统从理论上来说就存在自振荡。



标称特性

实际特性

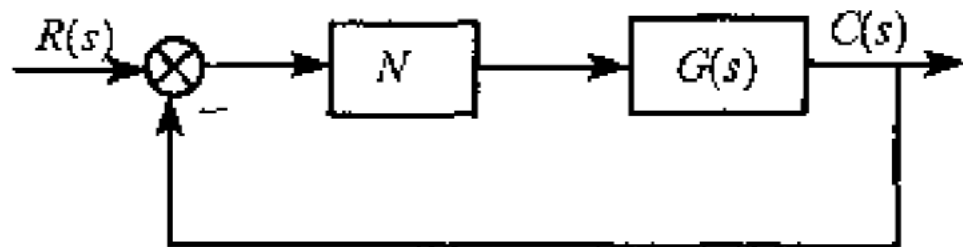
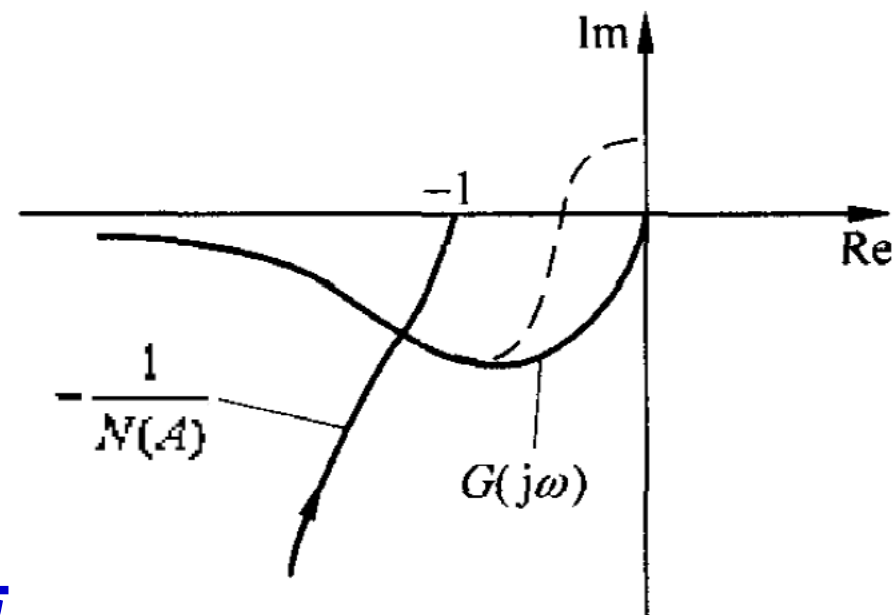
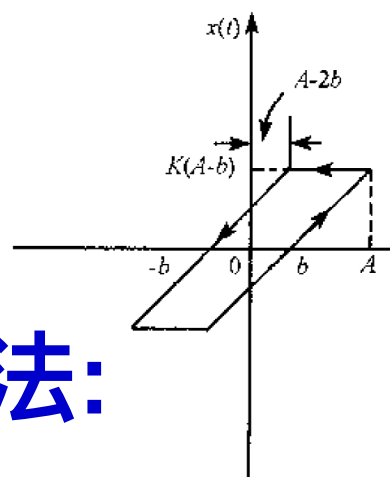
(含高频特性)

◆ 基本II型系统

齿隙自振荡的解决方法:

◆ 设计上限制自振荡的幅值

如：保证自振荡的幅值小于1密位。



$$\frac{C(j\omega)}{R(j\omega)} = \frac{NG(j\omega)}{1 + NG(j\omega)}$$

$$1 + NG(j\omega) = 0$$

$$G(j\omega) = -\frac{1}{N}$$

◆ 基本II型系统

齿隙自振荡的解决方法:

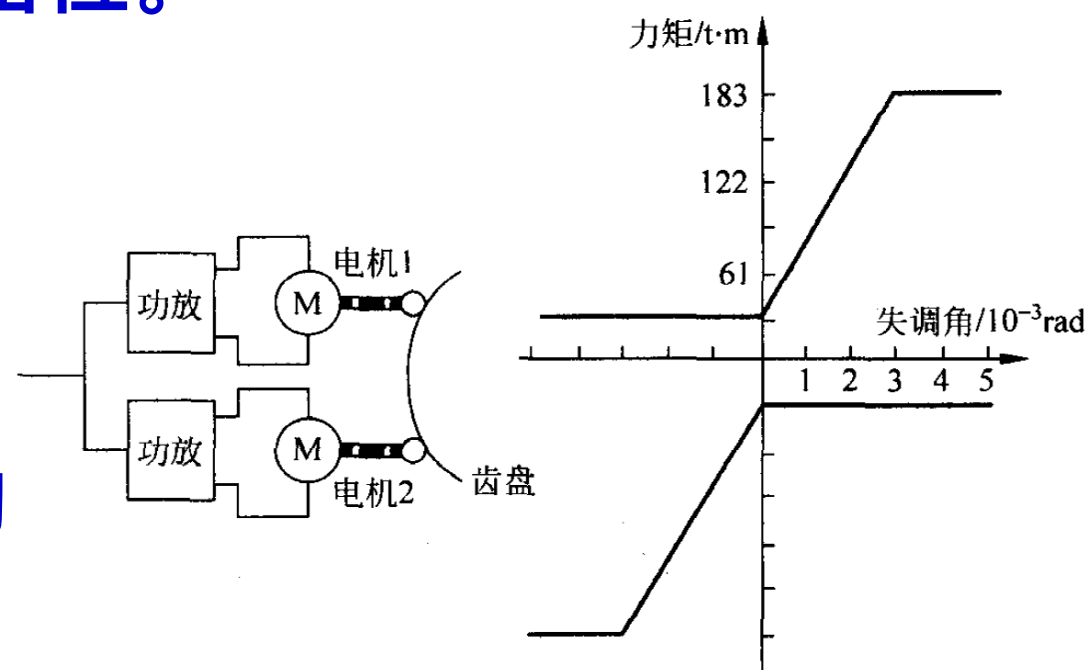
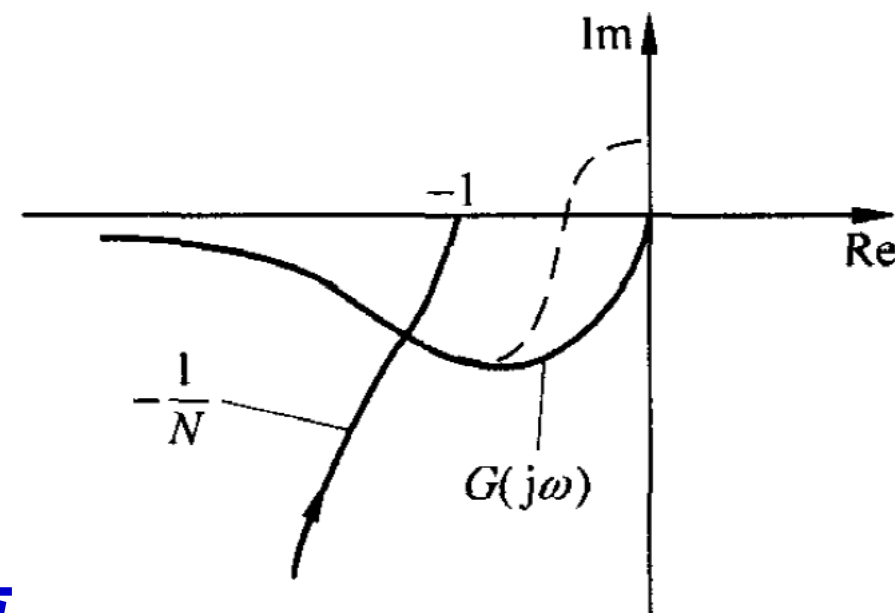
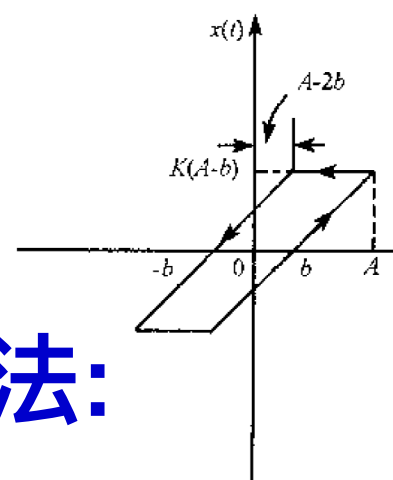
◆ 设计上限制自振荡的幅值

如：保证自振荡的幅值小于1密位。

◆ 采取措施消除齿隙影响

采用两个电机拖动。

◆ 采用力矩电机，取消齿轮传动





课程安排

1

伺服系统的数学模型

2

I型系统

1

II型系统

2

伺服系统的校正

◆ 伺服系统设计思想

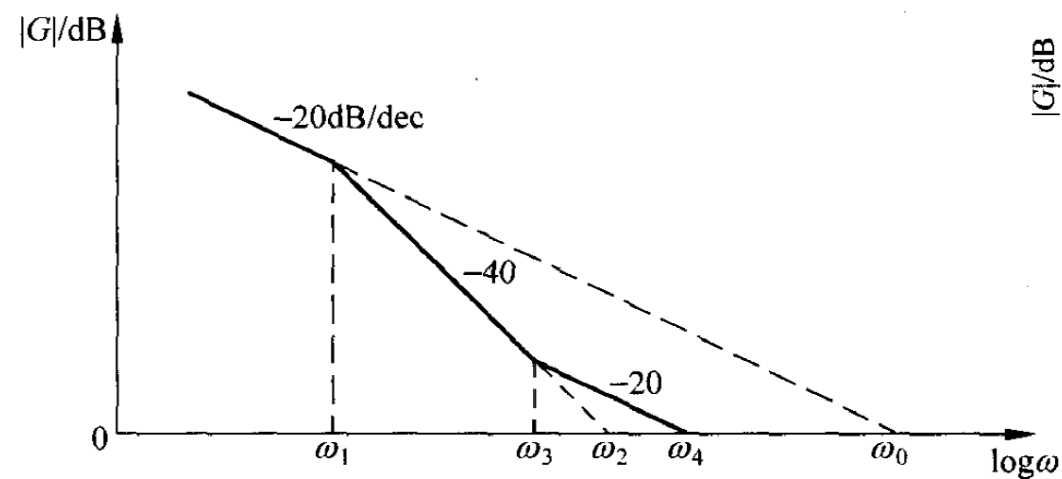


图 7-9 改进 I 型系统的特性

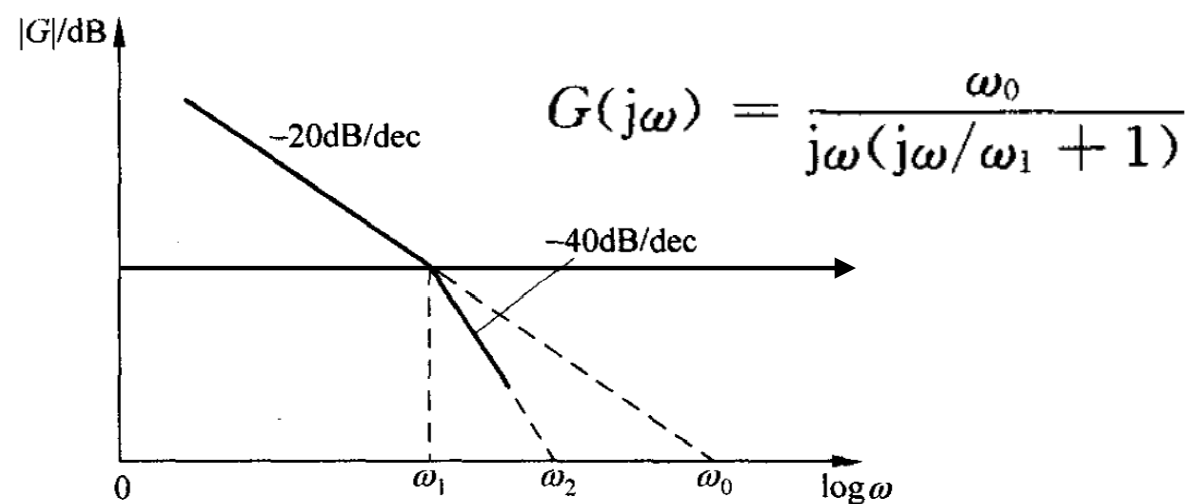
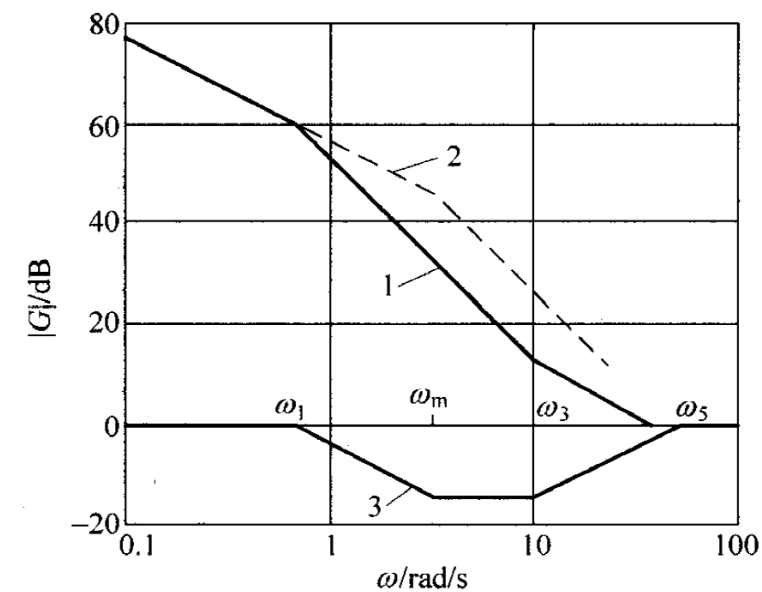


图 7-3 基本 I 型系统的特性

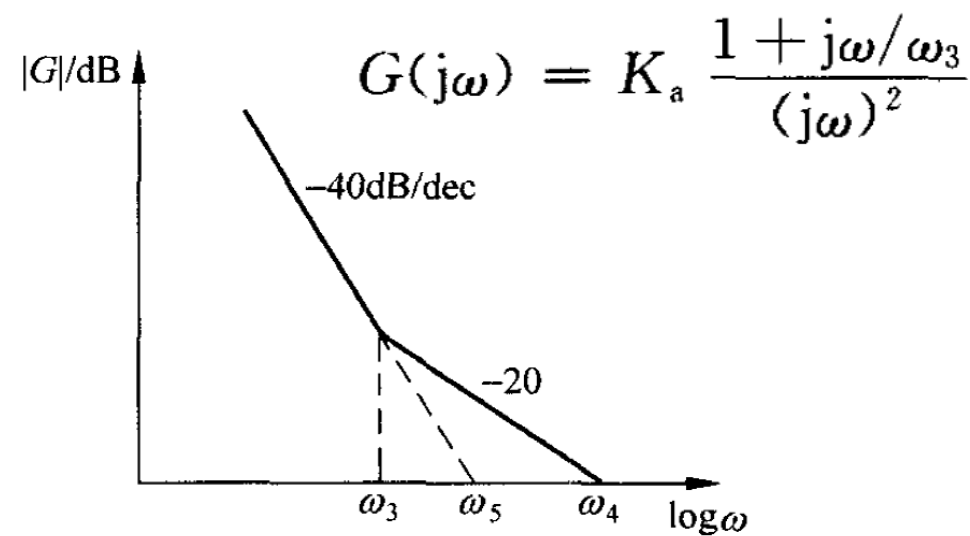


图 7-20 基本 II 型系统特性



◆ 伺服系统设计思想

这些特性只代表了系统的低频数学模型，即只描述了系统0dB线以上部分的特性。实际系统在0dB以下的特性可能还是很复杂的。

这里的设计思想是将系统各部件的动特性安排到0dB线以下。

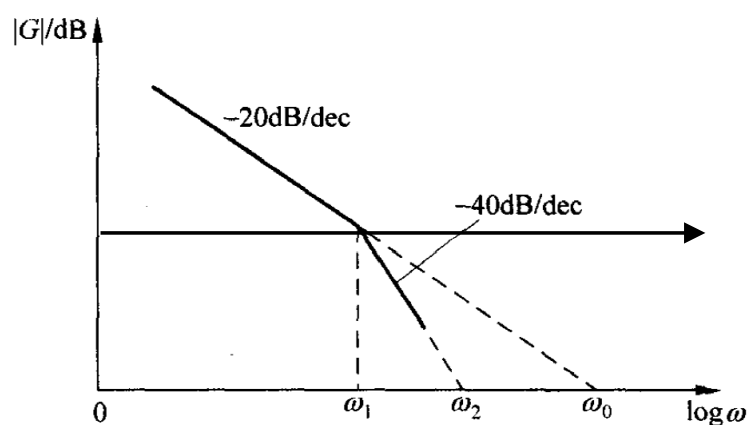


图 7-3 基本 I 型系统的特性

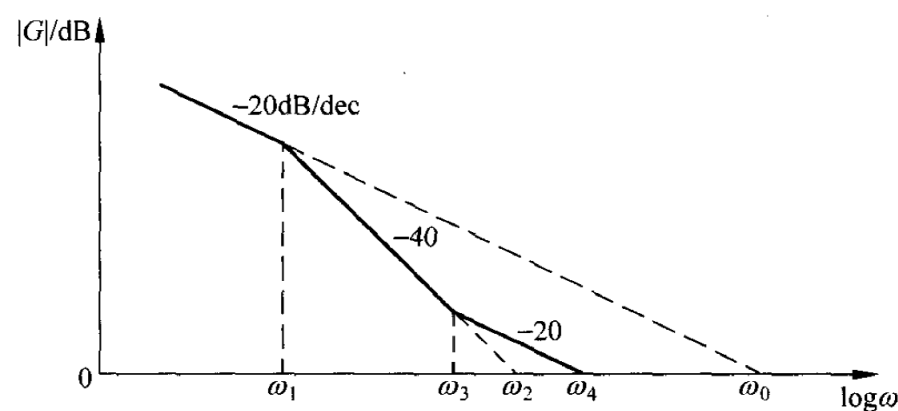


图 7-9 改进 I 型系统的特性

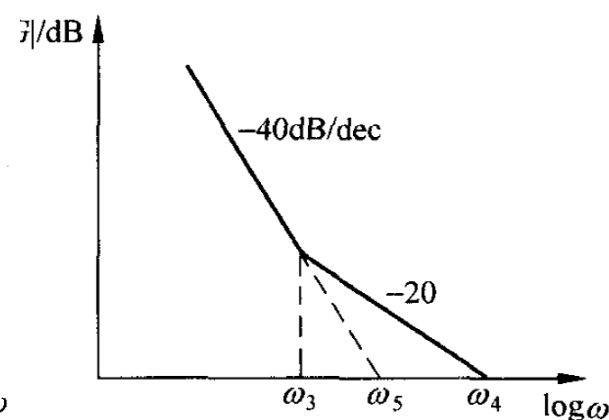


图 7-20 基本 II 型系统特性



◆ 伺服系统设计思想

就是将系统的带宽（穿越频率）设计在各部件动特性起作用的频段之前，然后按照前面给出的设计准则来进行设计。

按照这样的设计思想，系统既容易设计，也容易进行调试。

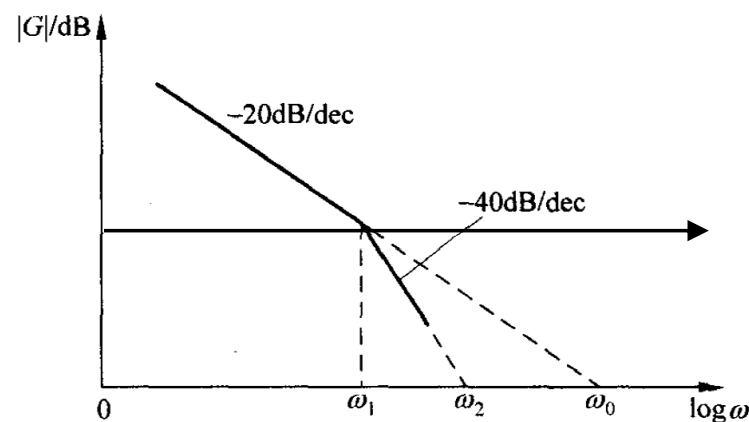


图 7-3 基本 I 型系统的特性

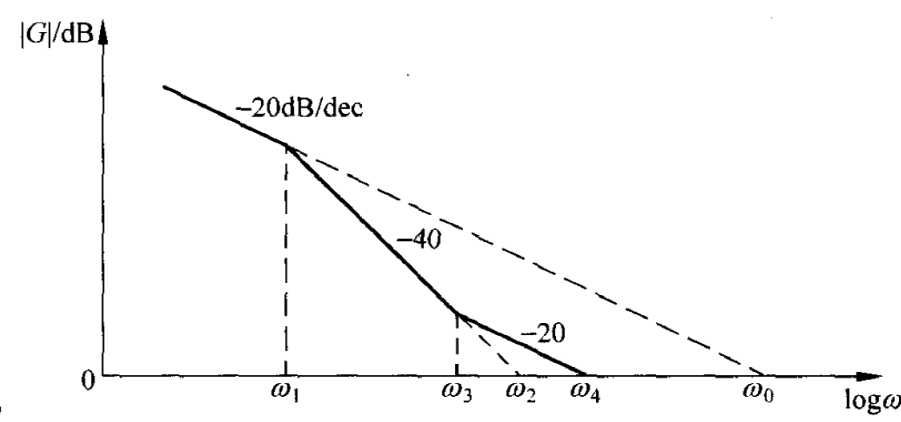


图 7-9 改进 I 型系统的特性

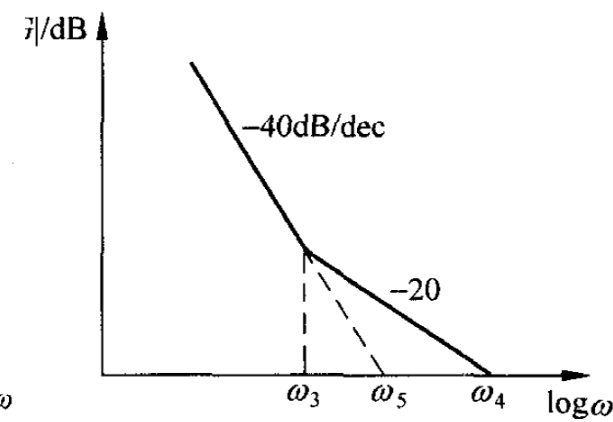


图 7-20 基本 II 型系统特性



6.4 伺服系统的校正



◆ 伺服系统设计思想

I型和II型系统的特性是最基本的特性，实际系统一般需要通过校正才能具有这种期望特性。

校正的概念是伺服系统特有的。设计时需要满足增益要求，但确定了系统增益，可能无法保证系统的稳定性。需要对系统的特性进行校正。

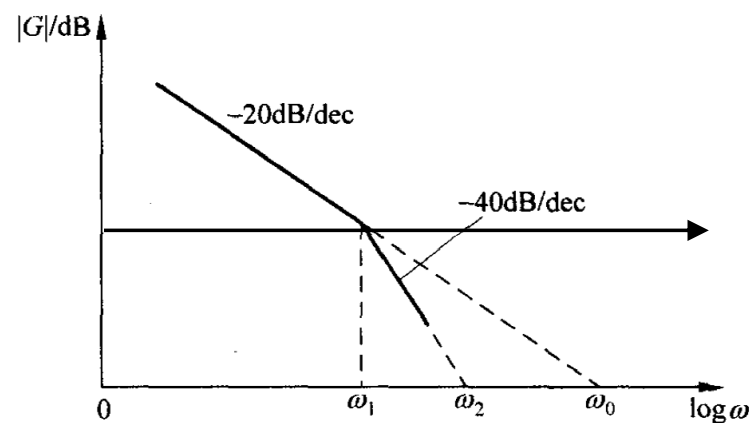


图 7-3 基本 I 型系统的特性

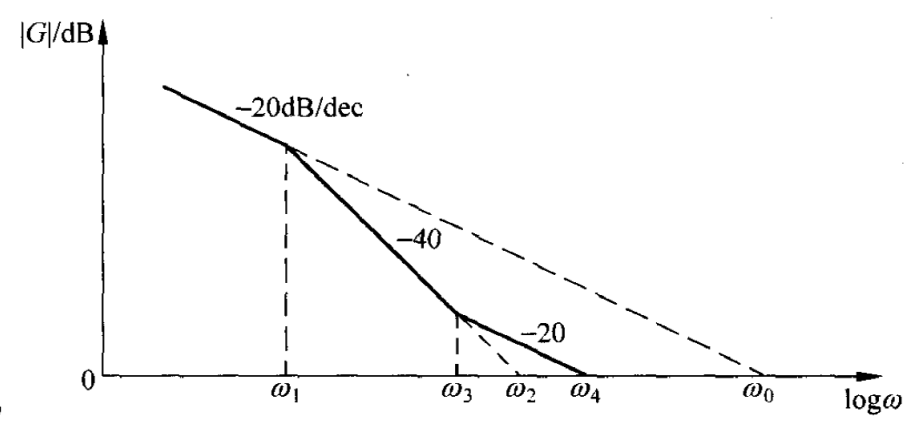


图 7-9 改进 I 型系统的特性

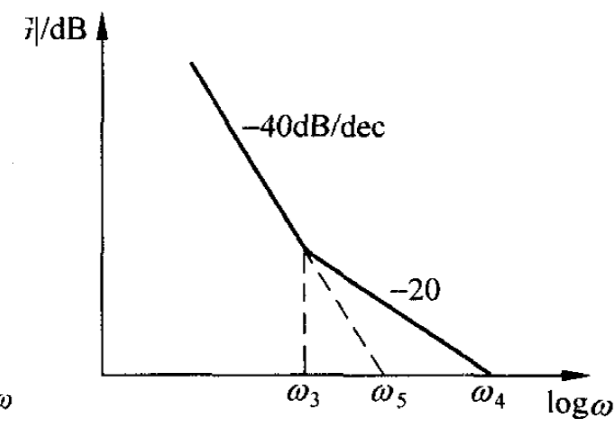
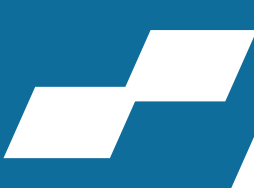


图 7-20 基本 II 型系统特性





◆ 相位滞后校正——串联校正

$$D(s) = \frac{1 + Ts}{1 + aTs}, \quad a > 1$$

□ 利用它的高频衰减特性来压低系统的带宽；

□ 在保持带宽不变的情况下提高系统的增益。

● 大信号输入条件下，由于元件饱和引起等效增益下降，引起性能下降，甚至系统就变为不稳定——条件稳定系统。

条件稳定：增益只能在某一范围内才能保证稳定性。





6.4 伺服系统的校正

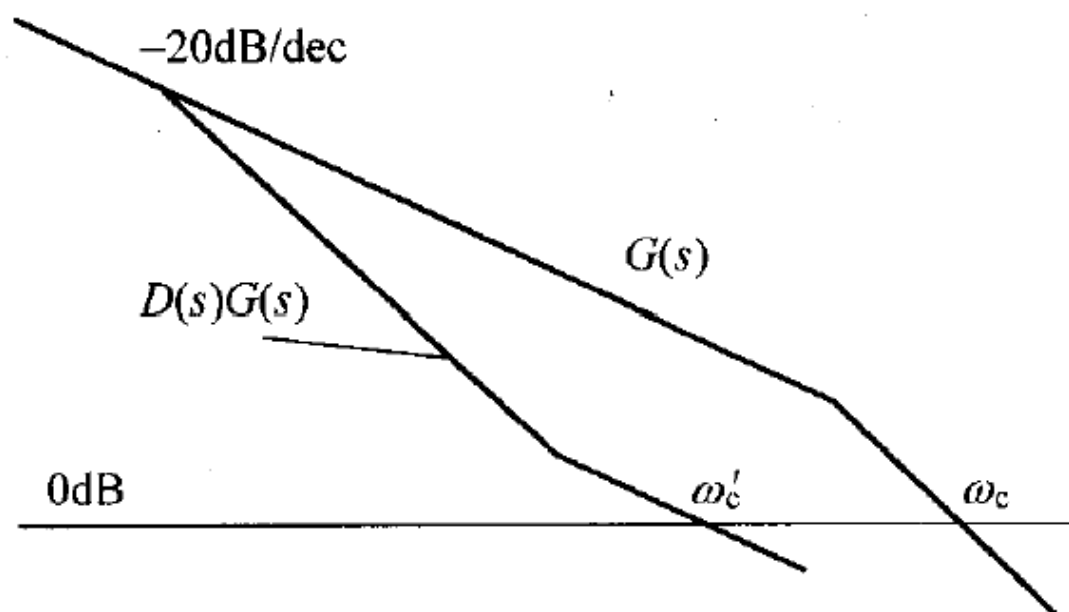
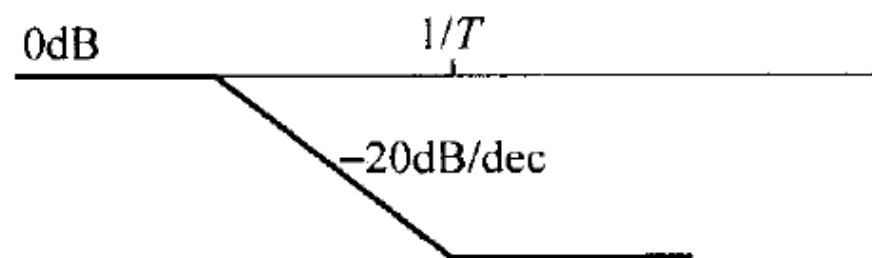


◆ 相位滞后校正——串联校正

$$D(s) = \frac{1 + Ts}{1 + aTs}, \quad a > 1$$

□ 利用它的高频衰减特性来压低系统的带宽；

被控对象的增益已满足设计要求，但带宽较宽。校正后，带宽降低，相位裕度也有相应提高。





6.4 伺服系统的校正



◆ 相位滞后校正——串联校正

$$D(s) = \frac{1 + Ts}{1 + aTs}, \quad a > 1$$

□ 在保持带宽不变的情况下提高系统的增益。

设一II型系统的带宽不能超过

35rad/s, 增益为 $50000s^{-2}$:

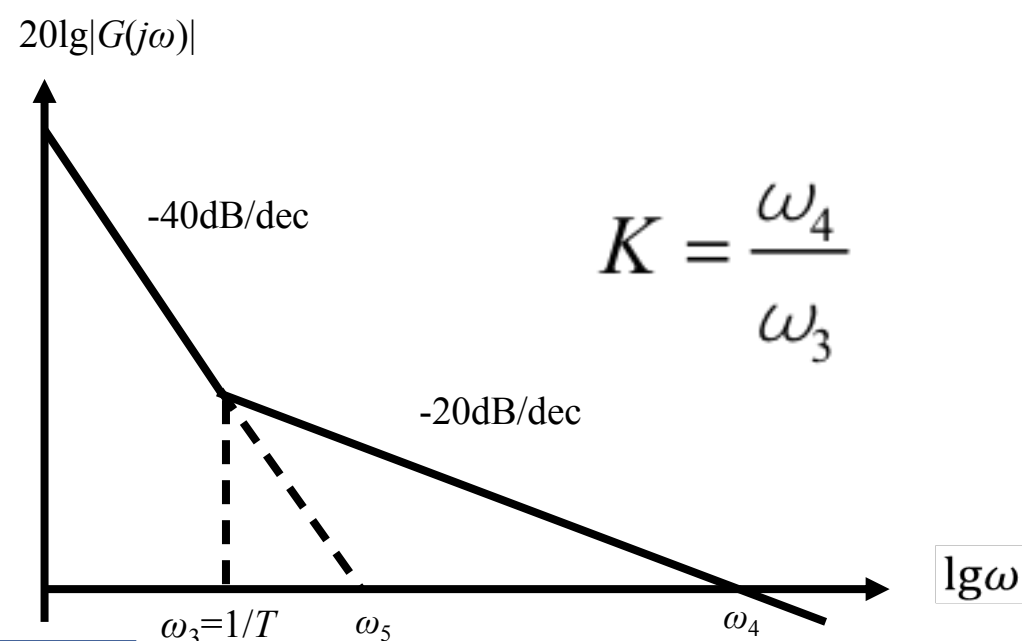
$$\omega_4 = 35\text{rad/s} \quad K = 2$$

$$\omega_3 = \omega_4/2$$

$$K_a = \omega_4 \omega_3 = 612.5s^{-2}$$

↓
 $\alpha = 100$

带宽确定后增益
所能达到的极限。



$$1 < K \leq 2$$



◆ 相位滞后校正——串联校正

$$D(s) = \frac{1 + Ts}{1 + aTs}, \quad a > 1$$

- 大信号输入条件下，由于元件饱和引起等效增益下降，系统就变为不稳定——条件稳定系统。

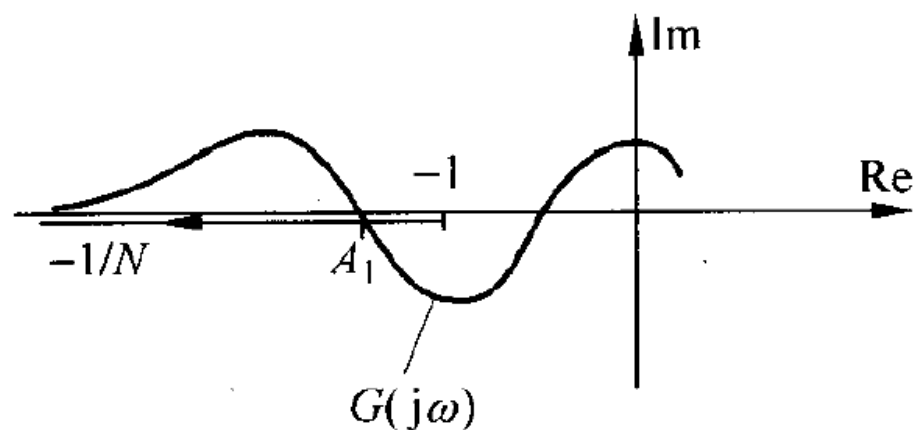


图 7-29 滞后校正导致条件稳定性

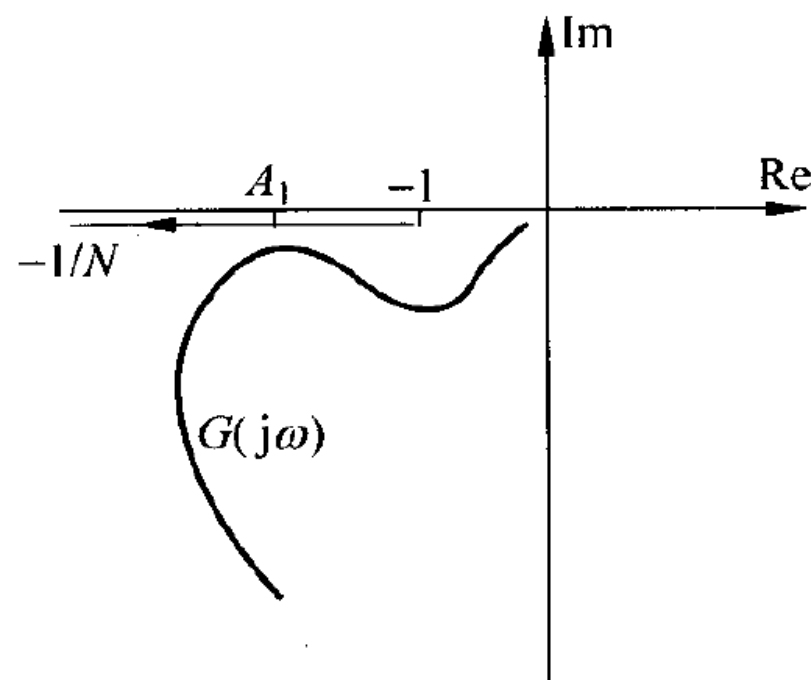


图 7-30 滞后校正影响大信号下的性能

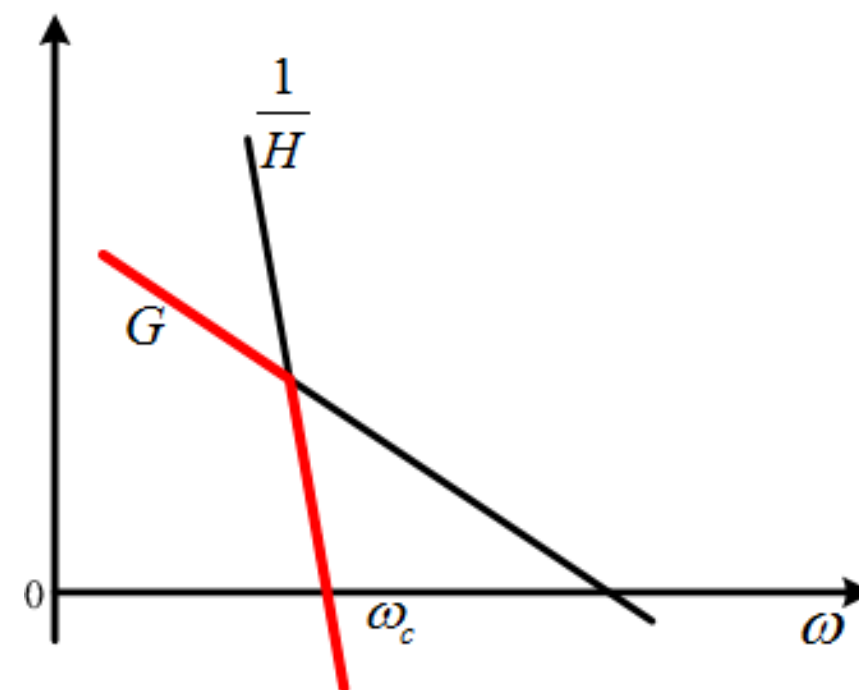
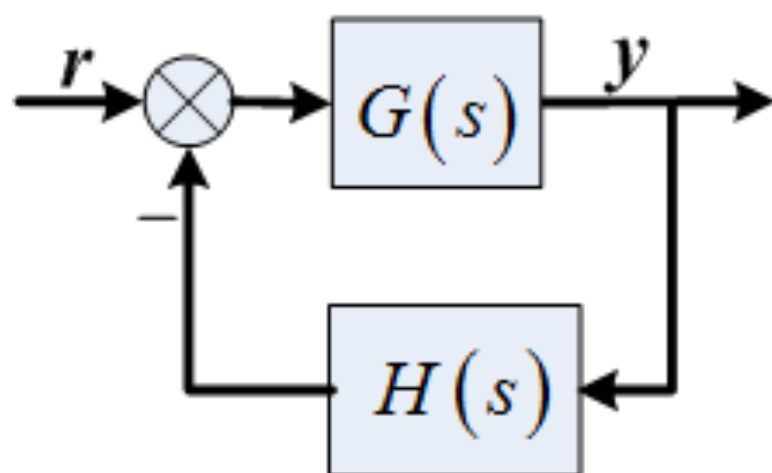


6.4 伺服系统的校正



◆ 反馈校正——并联校正

□ 反馈校正可以取代系统局部结构。



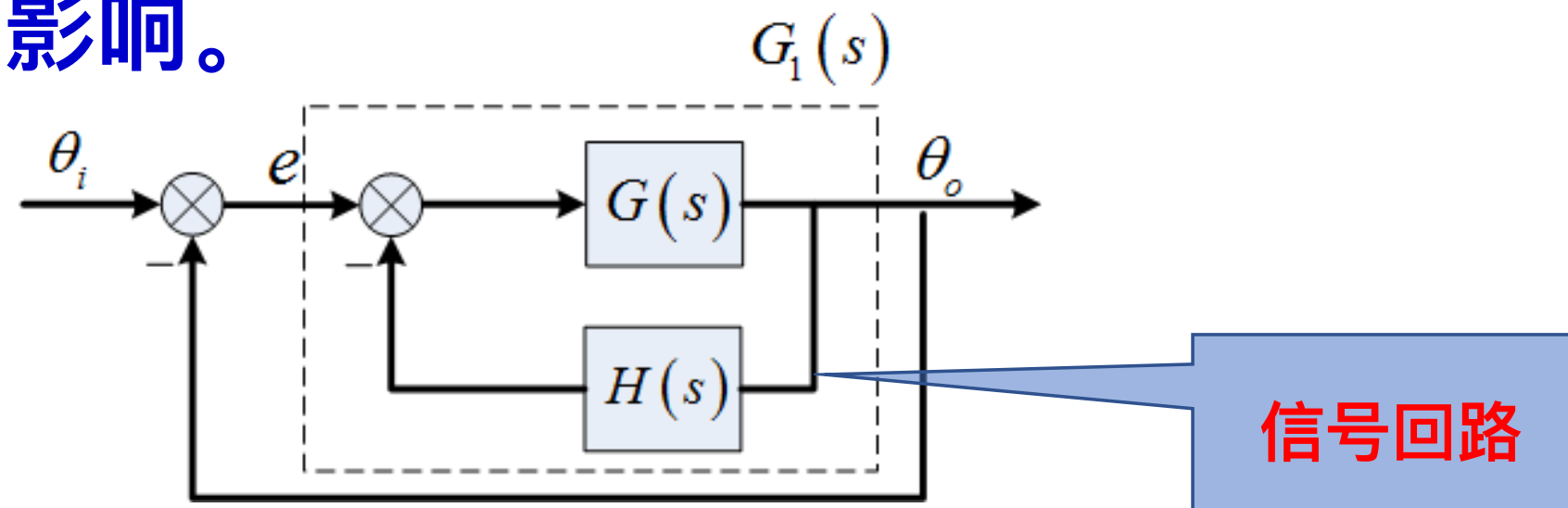
$$T(s) = \frac{G}{1 + GH} = \begin{cases} \frac{1}{H}, & |GH| \gg 1, \text{ 即 } |G| \gg \left| \frac{1}{H} \right| \\ G, & |GH| \ll 1, \text{ 即 } |G| \ll \left| \frac{1}{H} \right| \end{cases}$$



◆ 反馈校正——并联校正

总结前面例子中的反馈校正：

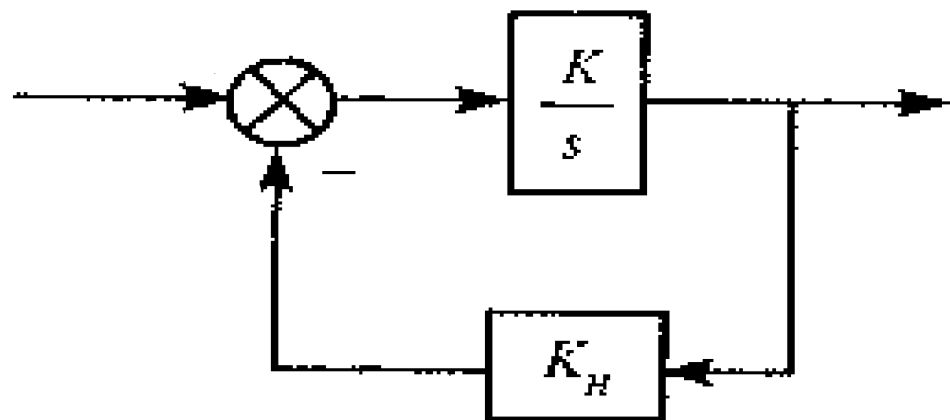
- 与相位滞后校正实质上相同，可压低系统带宽；
- 反馈校正特性可降低对参数的敏感性，且不会受到负载的影响。





◆ 反馈校正的其他作用：

□ 位置反馈可以将积分环节变为惯性环节，改善系统的稳定性；



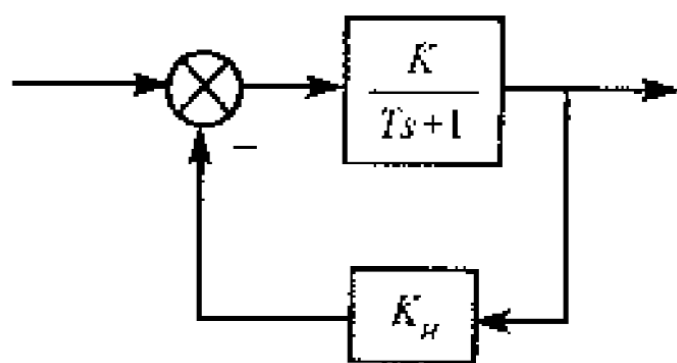
$$G(s) = \frac{\frac{1}{K_H}}{\frac{s}{KK_H} + 1}$$



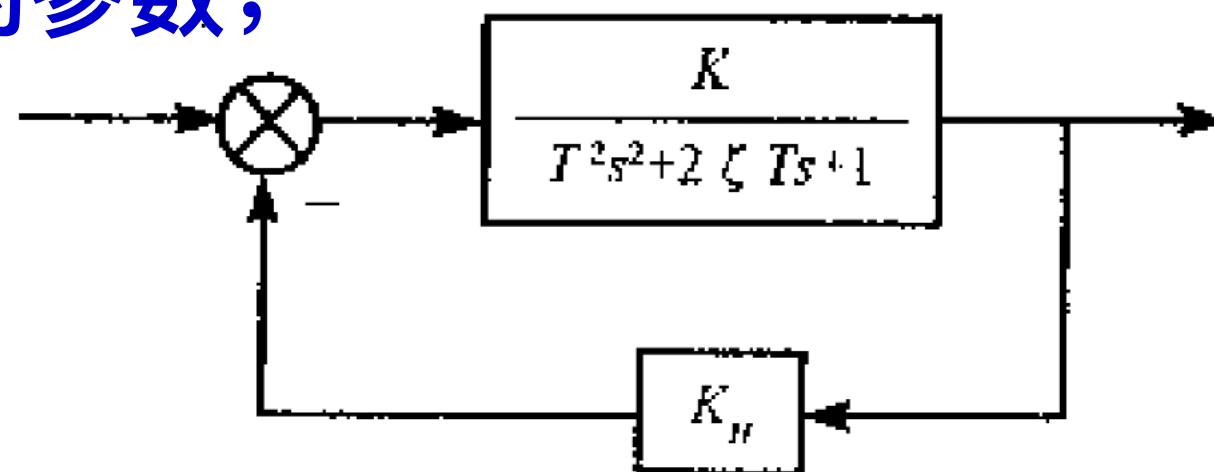


◆ 反馈校正的其他作用：

□ 位置反馈可以在保证惯性环节和振荡环节结构的前提下调整环节的参数；



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



$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{\frac{K}{KK_H + 1}}{\frac{T^2}{1 + KK_H}s^2 + \frac{2T\zeta}{1 + KK_H}s + 1} \\ &= \frac{\frac{K}{1 + KK_H}}{\left(\frac{T}{\sqrt{1 + KK_H}}\right)^2 s^2 + \frac{2T}{\sqrt{1 + KK_H}} \cdot \frac{\zeta}{\sqrt{1 + KK_H}} s + 1} \end{aligned}$$



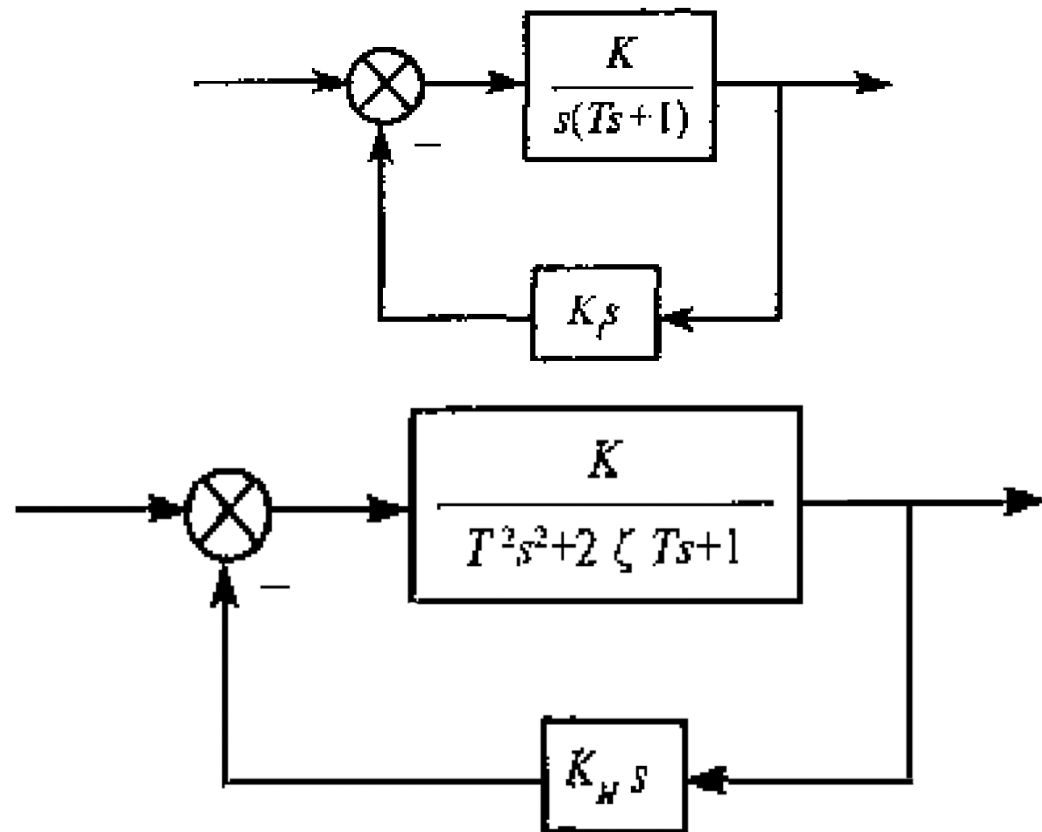


6.4 伺服系统的校正



◆ 反馈校正的其他作用：

□ 速度反馈可以在不改变前向环节结构的前提下调整环节的参数，如增加阻尼比，改善动态特性；



$$G(s) = \frac{K}{1 + KK_f} \cdot \frac{1}{s \left(\frac{T}{1 + KK_f} s + 1 \right)}$$

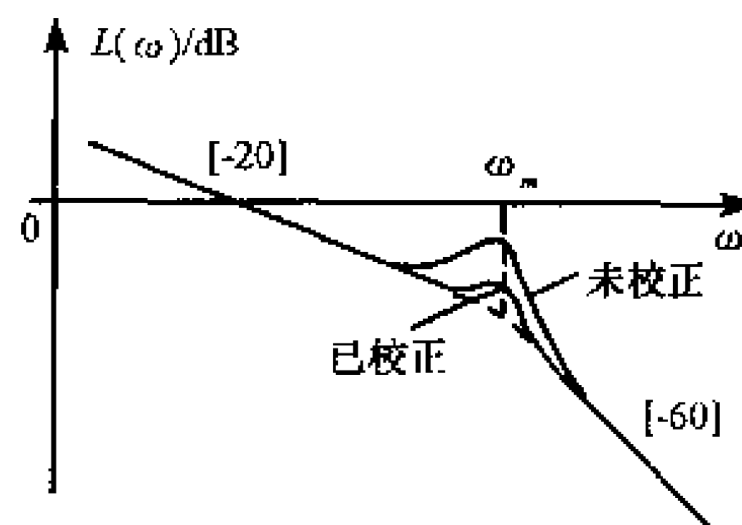
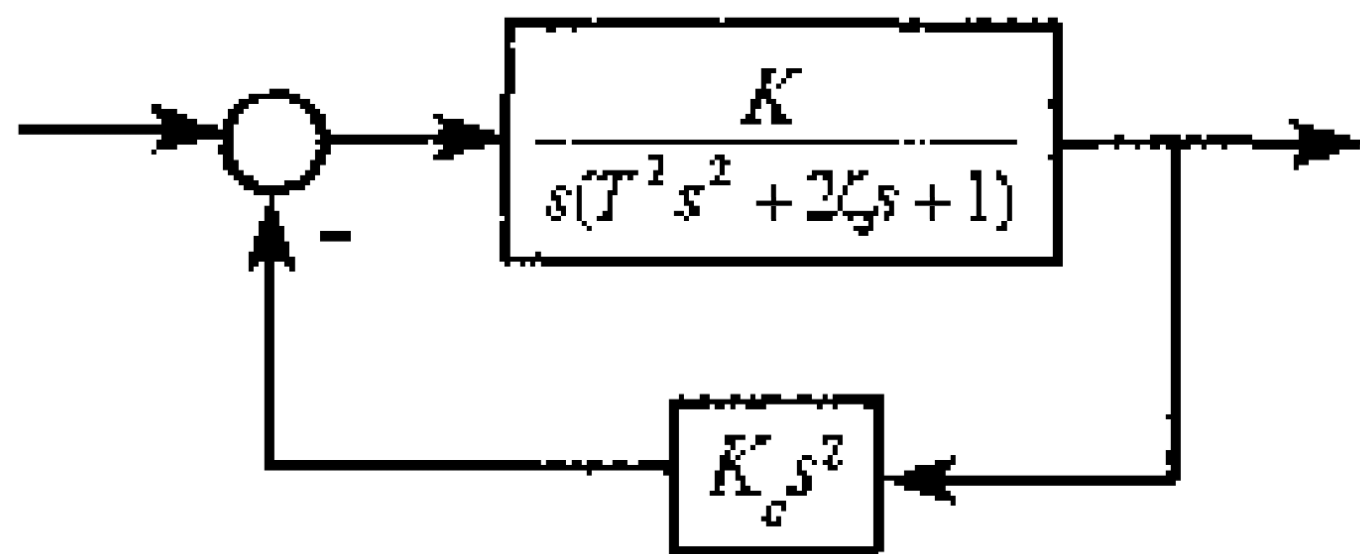
$$G(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + (2 \zeta T + KK_h) s + 1}$$



◆ 反馈校正的其他作用：

□ 在飞行器控制中还常采用加速度；

$$G_0(s) = \frac{K}{s(T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1)}$$

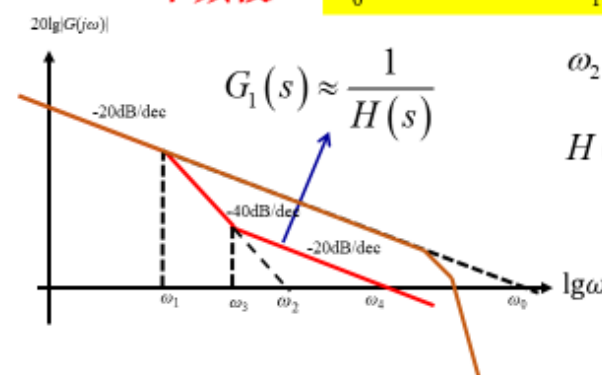


6.2.2 改进I型系统

◆ 例5：火炮方位角随动系统的设计。

由期望频率特性和被控对象频率特性，求解控制器：

中频段： $\omega_0 = 200\text{rad/s}$ $\omega_1 = 0.1\text{rad/s}$ $\omega_3 = 3.3\text{rad/s}$



$$\omega_2 = \sqrt{\omega_0 \omega_1} = \sqrt{20}\text{rad/s}$$

$$H(s) = \frac{1}{\omega_2^2} \frac{s^2}{s/\omega_3 + 1} = \frac{1}{20} \frac{s^2}{0.3s + 1}$$

反馈校正需要取输出量的二阶导数，具体实现时取测速发电机的输出再经一微分线路。



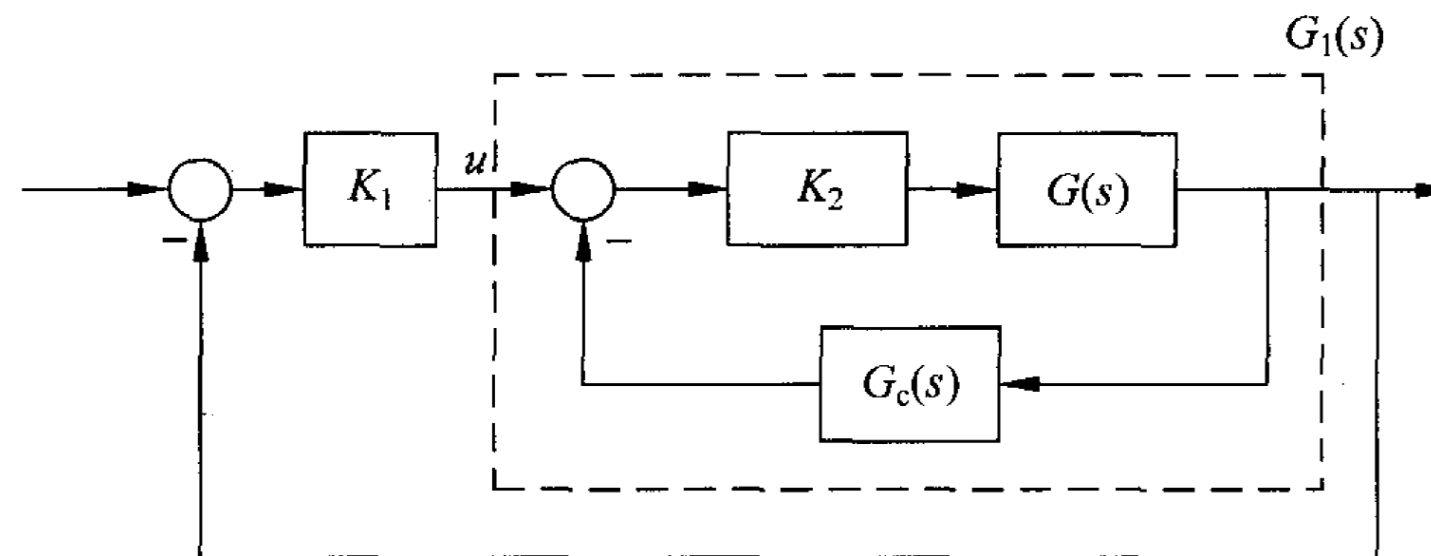
6.4 伺服系统的校正



◆ 反馈校正的其他作用：

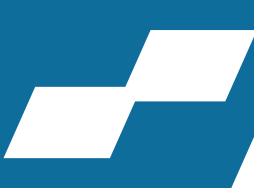
□ 采用反馈降低噪声的影响。

被控对象一般具有低通特性，输出端信号的信噪比高于输入端信号的信噪比。当控制输入信号的噪声很强时，串联超前补偿会使干扰加剧，甚至引起饱和现象的发生，而采用反馈校正可以在一定程度上克服。





6.4 伺服系统的校正



1. 伺服系统又称随动系统，需要跟踪参考输入信号，有跟踪误差要求。
2. 伺服系统中都存在机械运动，模型中都包含积分环节。
3. 典型的伺服系统包括基本I型系统、改进I型系统、基本II型系统，各具有参数选取原则。
4. 伺服系统对增益的数值有确定的要求，当增益与带宽、稳定裕度等指标存在矛盾时，需要进行校正。
5. 典型的校正环节包括超前校正、滞后校正、滞后超前校正、反馈校正。





Thanks for your attention!
