

第 6 章 伺服系统的设计 (2)

——2023年春季学期

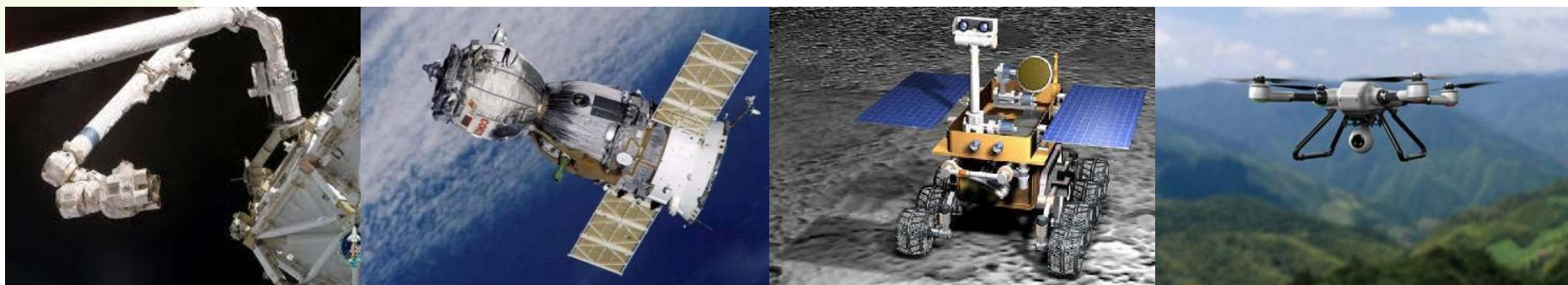
授课教师： 马 杰 (控制与仿真中心)
霍 鑫 (控制与仿真中心)
马克茂 (控制与仿真中心)
陈松林 (控制与仿真中心)



回顾篇

伺服系统的定义

伺服系统是用来控制被控对象的某种状态，使其能自动地、连续地、精确地复现输入信号的变化规律的控制系统。



对伺服系统的基本要求有**稳定性、精准性和快速性**。

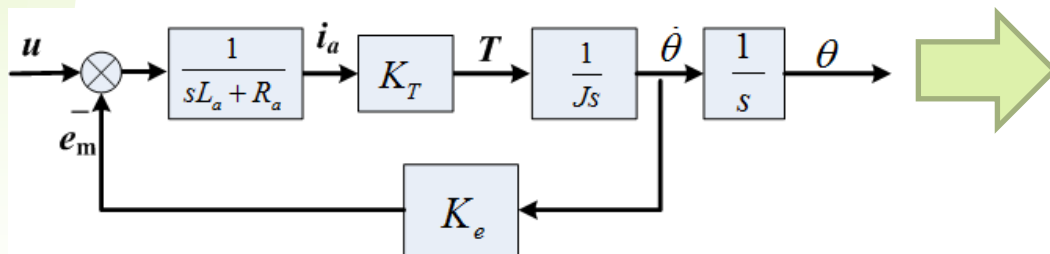


回顾篇

电机位置伺服系统的模型特点

电压源控制下电机的传递函数有一个积分环节，电流源控制下的电机的传递函数中有两个积分环节。这就是伺服系统的特点——位置伺服系统的数学模型一定有积分环节。

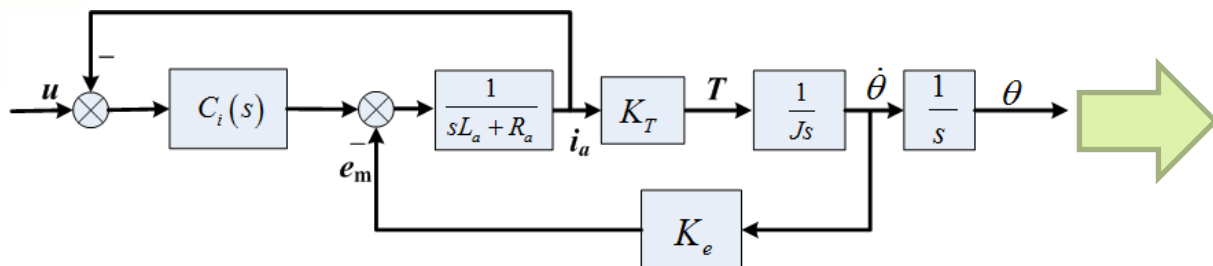
电压源



$$\frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)}$$

$$\frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)(T_e s + 1)}$$

电流源



$$\frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{K_T}{J s^2}$$

$$\frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{K_T / B}{s(\tau_m s + 1)}$$



回顾篇

基本I型系统

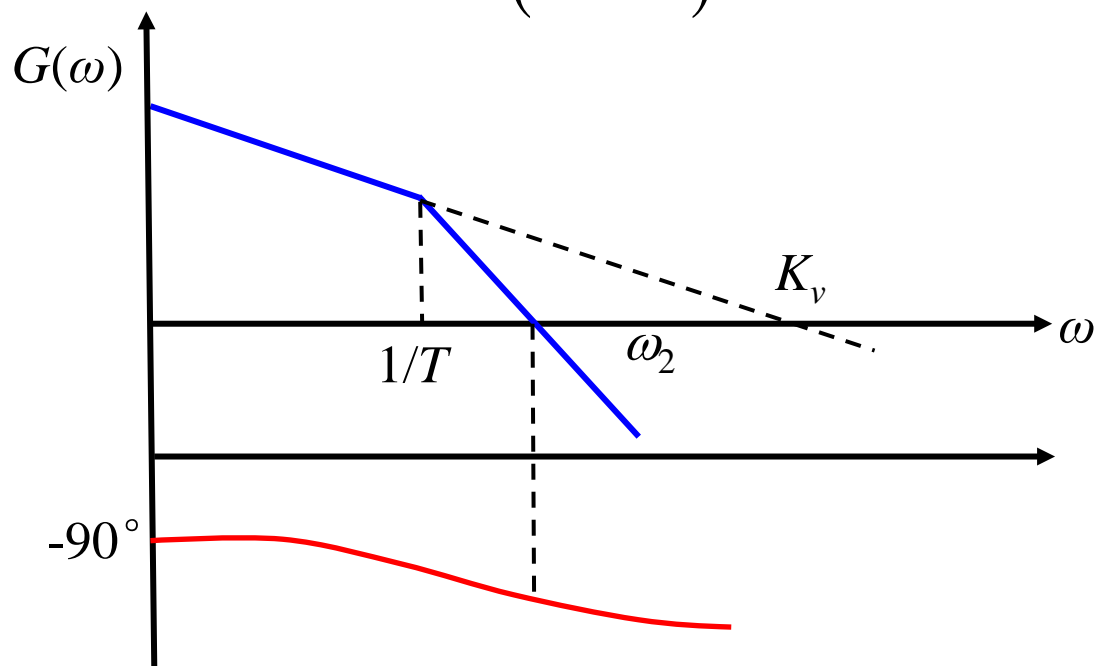
其开环频率特性为

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

$$K = K_v \cdot T$$



$$K = 1$$



局限性：有时带宽和增益不能兼顾！

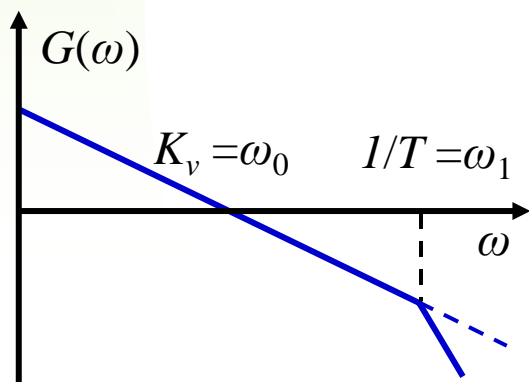


回顾篇

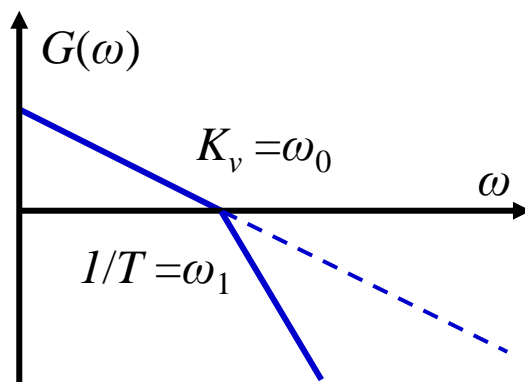
基本I型系统性能关系

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

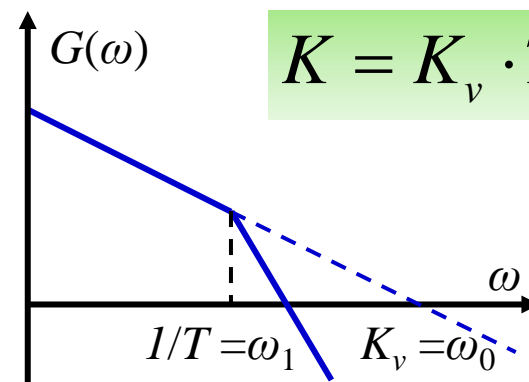
K	0.5	1	2
单位阶跃输入下输出的峰值	1.05	1.15	1.3
阻尼比 $1/2\sqrt{K}$	0.707	0.5	0.35
相位裕度	66°	52°	39°
闭环谐振峰值 M_p	≤ 1	1.15	1.5
闭环等效噪声带宽	$K_v\pi/2$	$K_v\pi/2$	$K_v\pi/2$



$K = 0.5$



$K = 1$

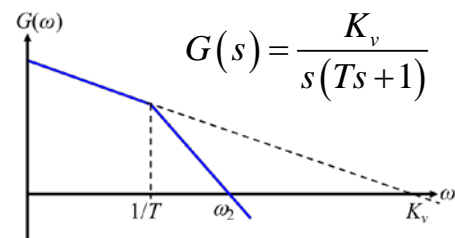


$K = 2$

$$K = K_v \cdot T$$



关于基本 I 型系统的总结



- **来源**：多数电机伺服系统本身就为I型，有些则是专门设计；
- **特点**：系统性能由一个等效参数 K 决定，通常只有 K_v 是可以设计的参数， T 为系统固有的参数；
- **优点**：通常只要 $K=1$ 时对应的增益 K_v 满足精度要求，设计就完成了；
- **不足**：精度要求较高时，增益和带宽设计存在矛盾，仅增大 K_v 则相位裕度无法保证，仅改变 T 则精度无法提升；
- **方法**：如果给定系统只有纯积分，则可以加上**惯性环节**，两个参数都可以设计；若原有系统 T 较小，而系统带宽要求较低，则可以采用惯性环节将低频特性校正为基本I型系统，此时可忽略 T 的影响；如果原有系统 T 比较大，带宽低、而系统精度要求较高，则必须通过校正来提高增益；



拓展篇

反馈的力量（续²）——学习中的反馈（与自己，同别人）

课上笔记：记住PPT的页号，看看有多少页不明白；

课上答题：跟老师最终给的答案和解释对比，看看自己是否真正理解了；

课后总结：看自己能否用自己的语言和方式把知识要点梳理出来；

课后作业：对比自己和助教讲解的差异；

多问老师：把困惑或想法告诉老师，从老师的反馈判断学习效果；

社群交流：三五个同学建个群，讨论一下问题；

时间统计：统计每天花在一门课上的时间，间接判断学习效果；

手机统计：看你用手机和各个APP的使用统计时间和频率（抗干扰能力）；

设立标准：是否预习，是否复习，是否完成作业，是否经常能想起目标；

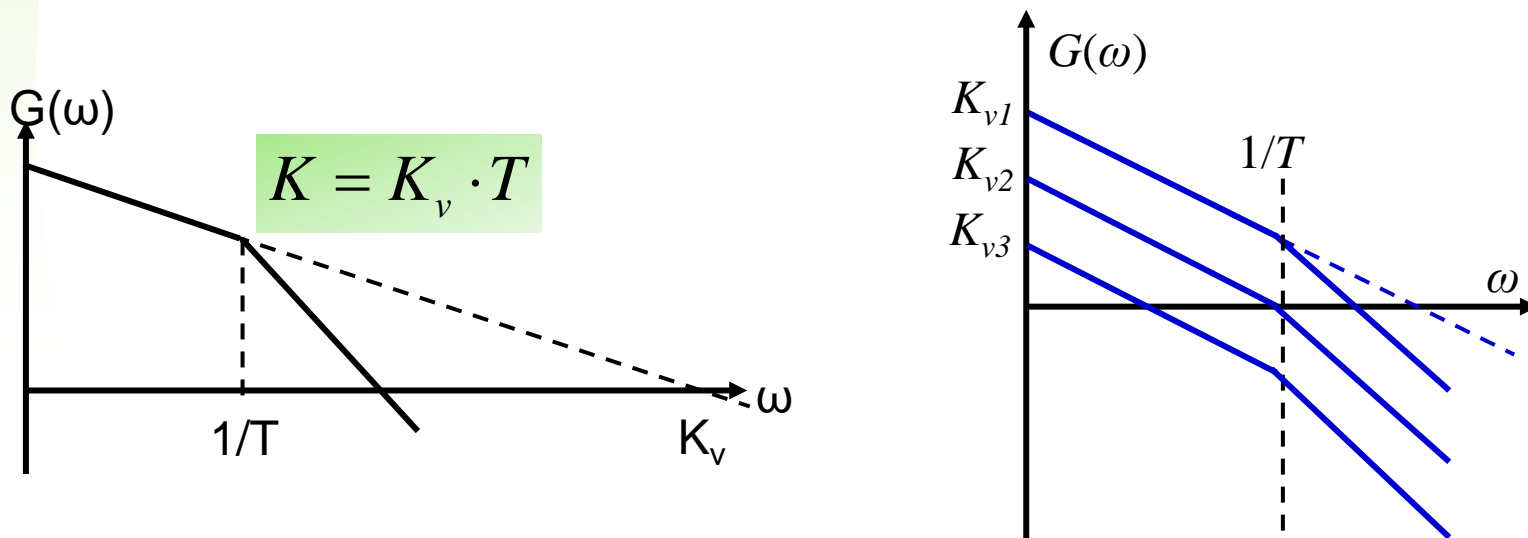
为了获得有效反馈，你得花时间，花精力，甚至花脸面（要改变，付成本）



6.2.1 基本I型系统

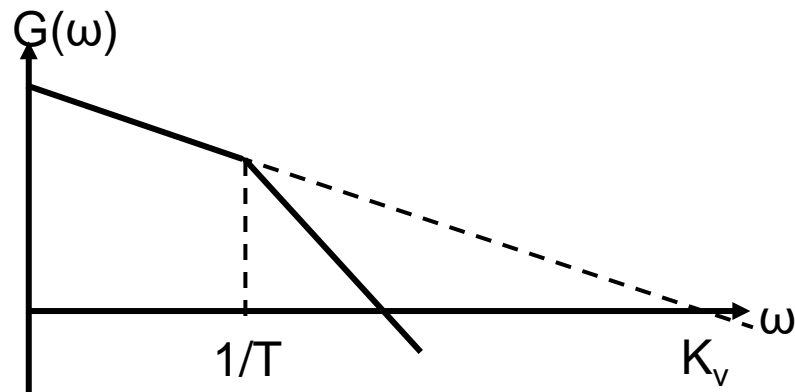
基本形式 | 性能关系 | 示例分析 | 总结

由于基本I型系统的结构形式限制，对于指标要求较高的系统，往往不能同时满足跟踪精度和稳定裕度要求。





如何提升基本 I 型性能?



正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂



学习目标

本节课需要掌握的知识要点

- 掌握改进 I 型伺服系统的设计要点（期望特性）；
- 掌握不同指标下伺服系统的设计方法；
- 掌握串联校正和反馈校正两种方法的特点



6.2 I型系统

6.2.1 基本 I 型系统

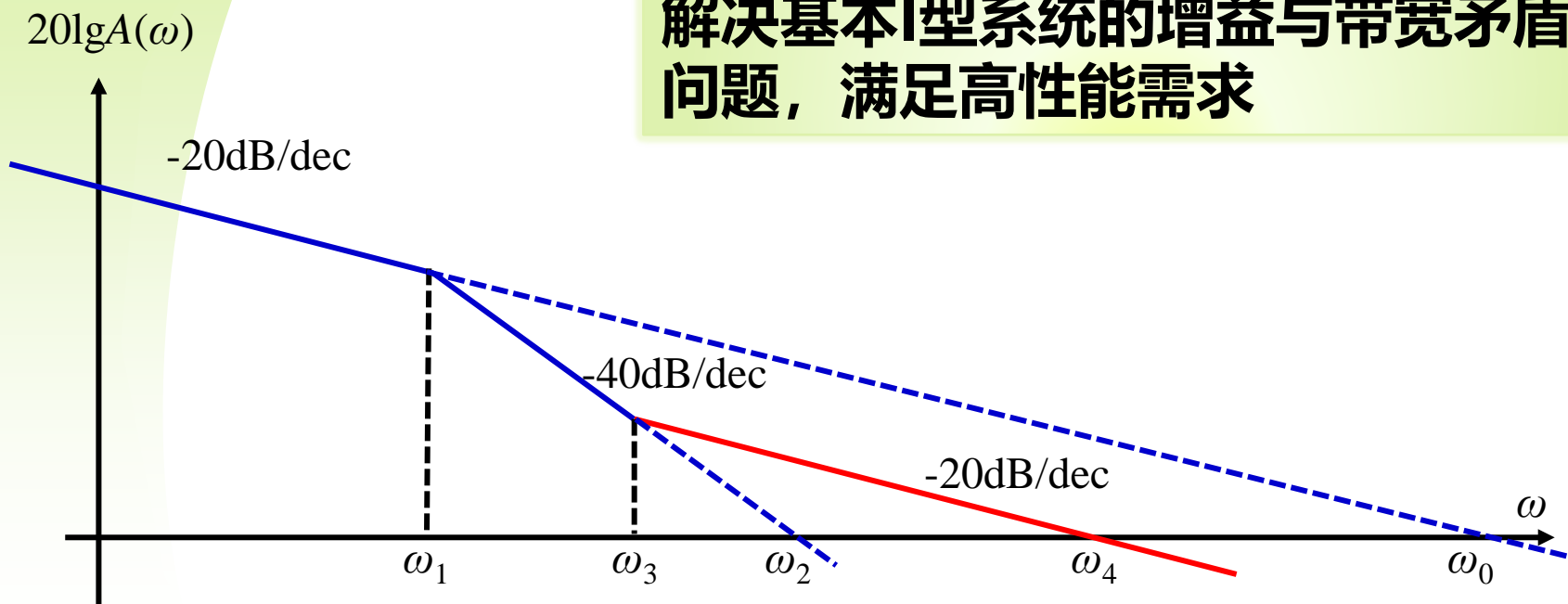
6.2.2 改进 I 型系统



6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

解决基本I型系统的增益与带宽矛盾问题，满足高性能需求



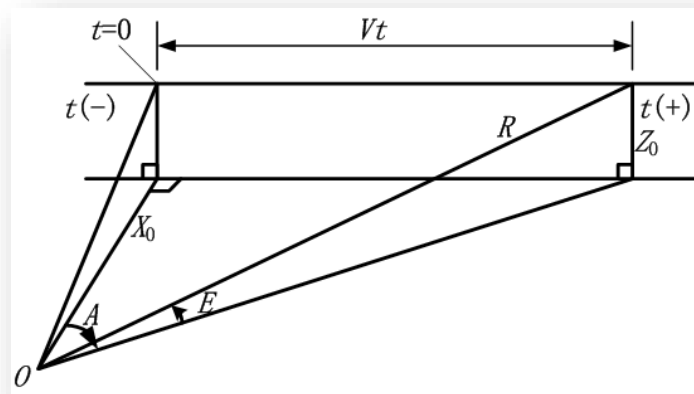
优越性：带宽与增益分开设计



6.2.2 改进I型系统

教材p38

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统



Step 1: 设计指标确认 (工况和指标)

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：典型指令输入下，误差小于 0.001rad



下一步应该做什么？

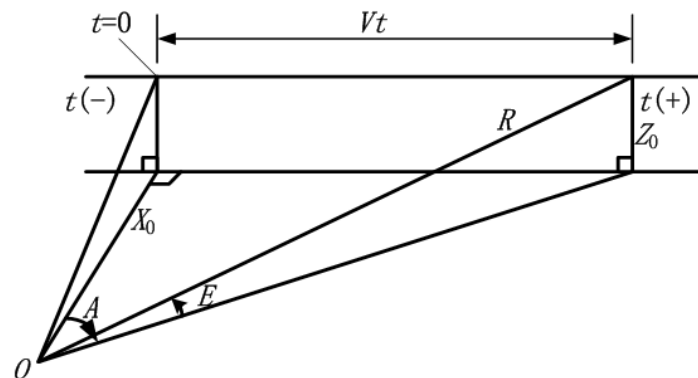
正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂



改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

Step 2: 输入信号分析 (工况)

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: $A = \arctan \frac{Vt}{X_0} = \arctan(at) \quad a = \frac{V}{X_0}$

$$\frac{dA}{dt} = a \cos^2 A \qquad \frac{d^2 A}{dt^2} = -a^2 \sin(2A) \cos^2 A$$

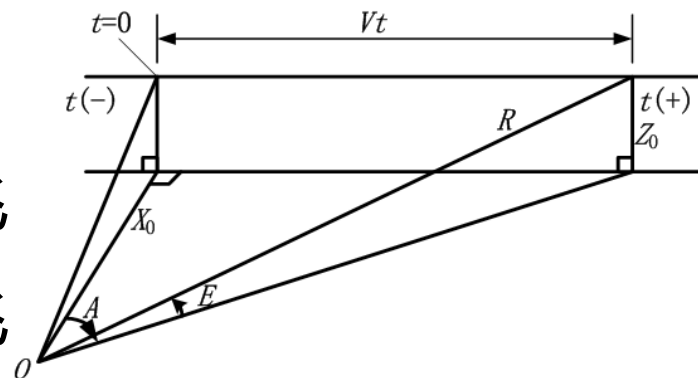


6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

Step 2: 输入信号分析 (工况)

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： $A = \arctan \frac{Vt}{X_0} = \arctan(at)$

角速度： $\frac{dA}{dt} = a \cos^2 A$

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

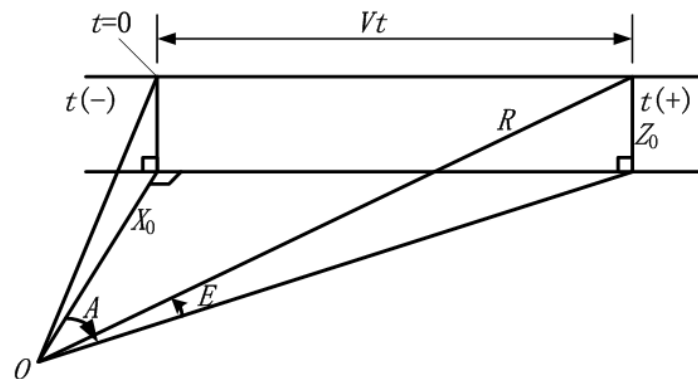


改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

Step 3: 部件选择及系统建模

小功率随动系统——电机功率

22W, 电机时间常数 $T=0.15\text{s}$



被控对象传递函数:

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



6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

Step 4: 跟踪精度分析

隐含信息——在输入信号有效频带
1.57rad/s 内，跟踪误差不大于
0.001rad

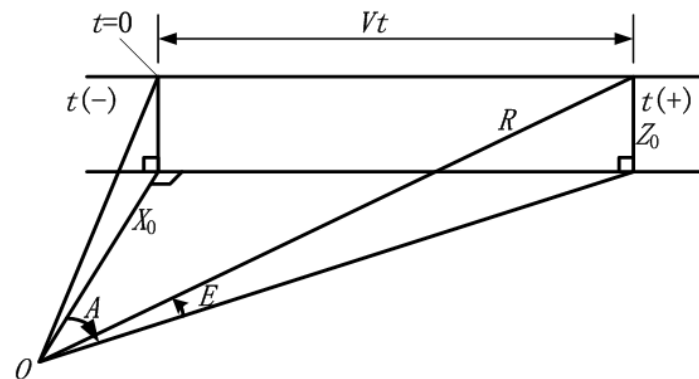
$$G(s) = \frac{K_v}{s(Ts + 1)}$$

$$G(s) = \frac{\omega_0}{s(s/\omega_1 + 1)}$$

I型系统



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



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

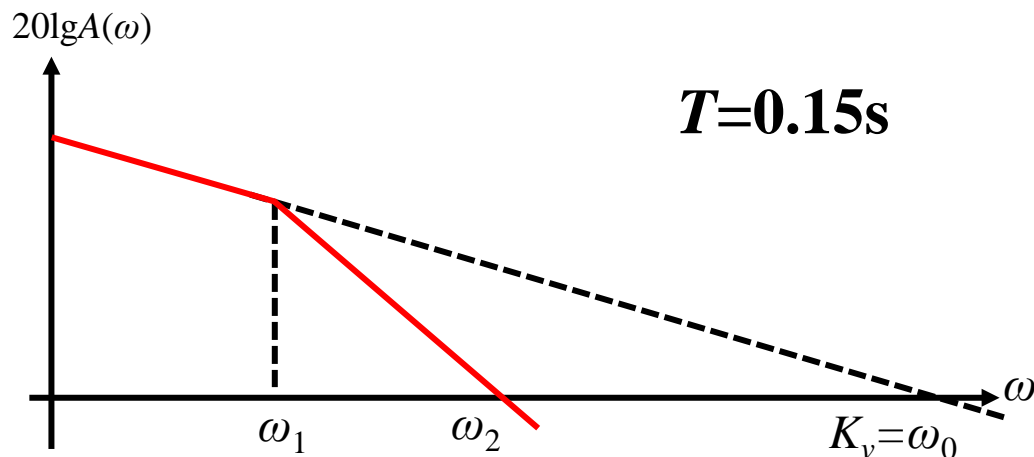


6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

Step 4: 跟踪精度分析

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



$$e(t) = \frac{1}{\omega_0} \dot{\theta}(t) \Rightarrow e_{\max} = \frac{\dot{\theta}_{\max}}{\omega_0} \Rightarrow \omega_0 \geq \frac{\dot{\theta}_{\max}}{e_{\max}}$$

$$\dot{\theta}_{\max} = a = 0.5$$

$$e_{\max} = 0.001\text{rad}$$

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



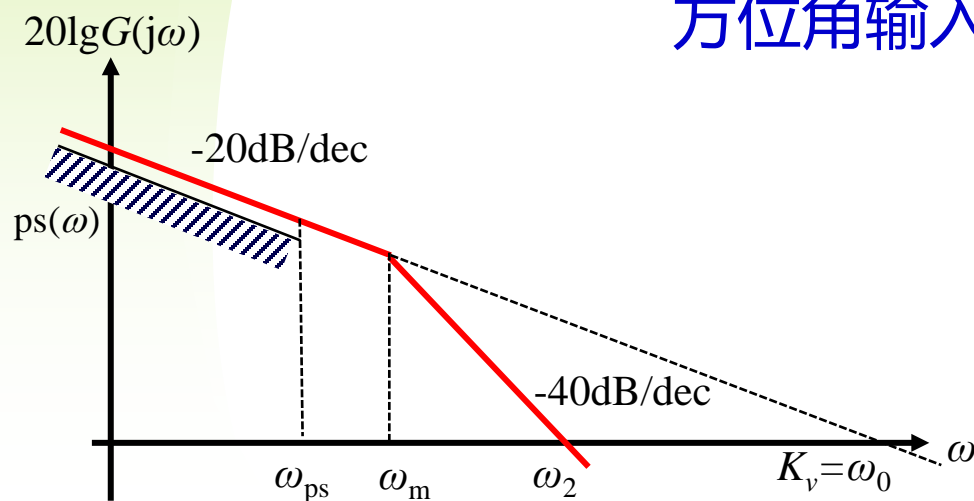
6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

Step 5: 性能界函数的确定

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

方位角输入指令的频谱宽度为1.57rad/s



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



$$ps(\omega) = \left| \frac{500}{\omega} \right| \quad \omega_{ps} = 1.57 \text{ rad/s}$$



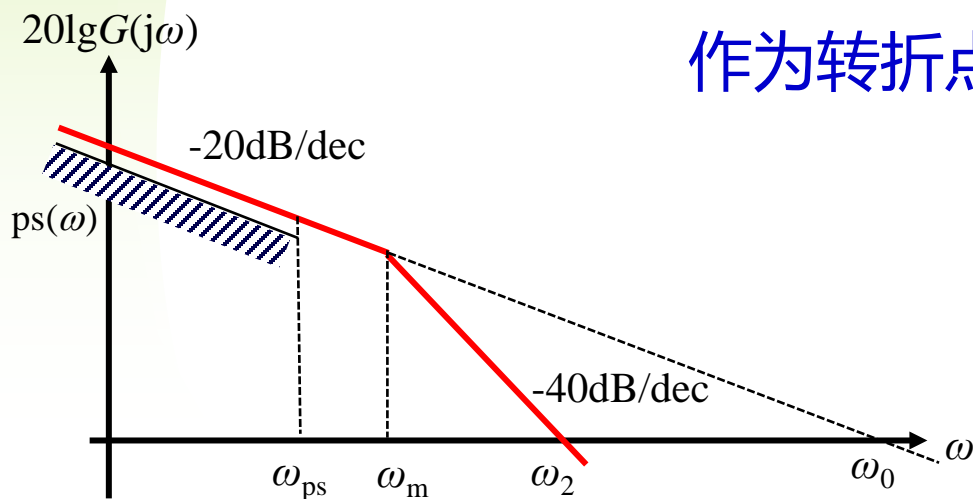
6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

Step 6: 转折频率的确定

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

以电机的时间常数0.15s对应的频率
作为转折点，选取第一个转折频率：



$$\omega_m = \frac{1}{T} = 6.67 \text{ rad/s}$$

$$\omega_m > \omega_{ps}$$

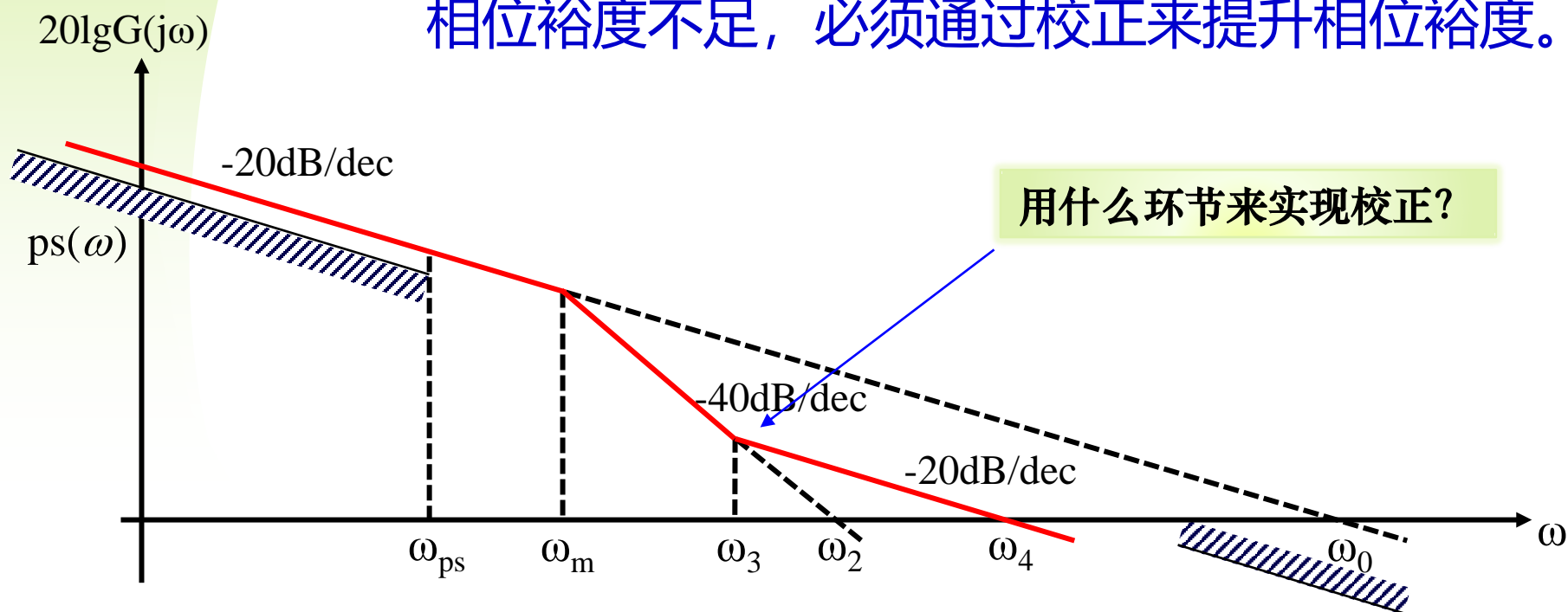


6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

Step 6: 转折频率的确定

相位裕度不足，必须通过校正来提升相位裕度。

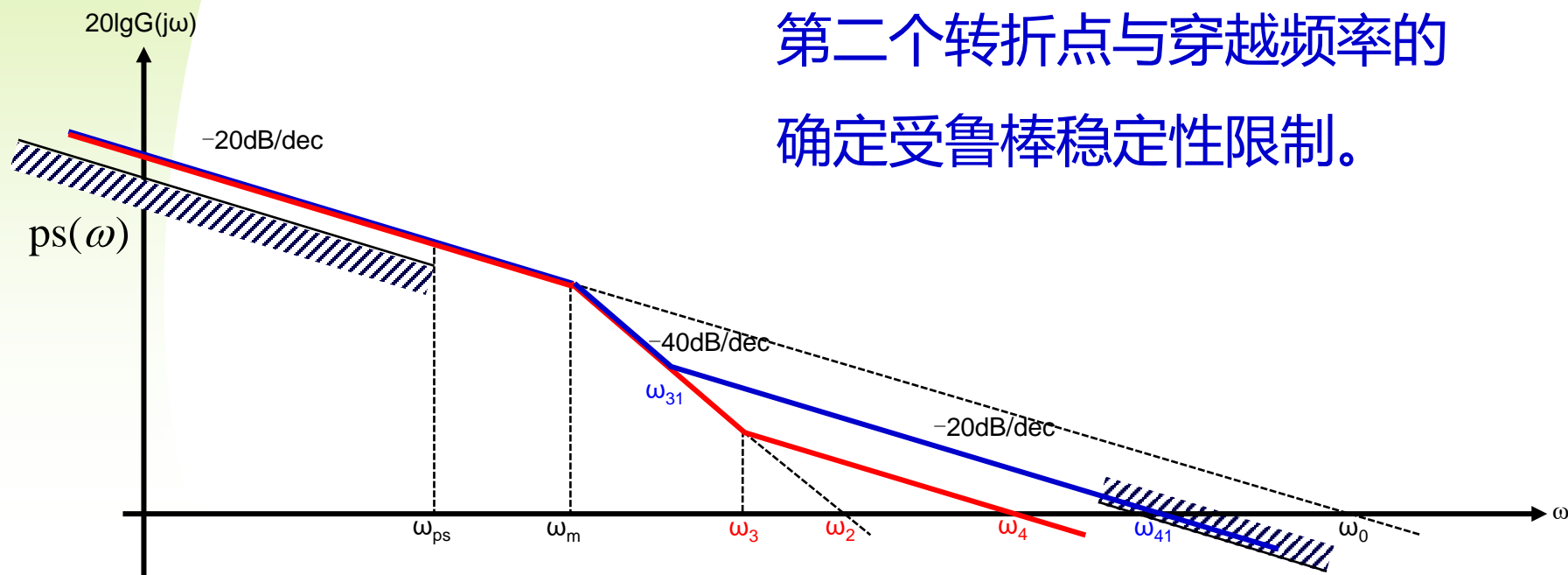




6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

Step 6: 转折频率的确定





6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

例4. 舰载随动系统

舰用仪器的角度复现系统，
用于解耦舰船的摇摆运动。



□ 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

□ 设计要求：满足复现精度要求：0.001rad

工况

指标



针对正弦输入下的时域指标，应该如何设计？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂



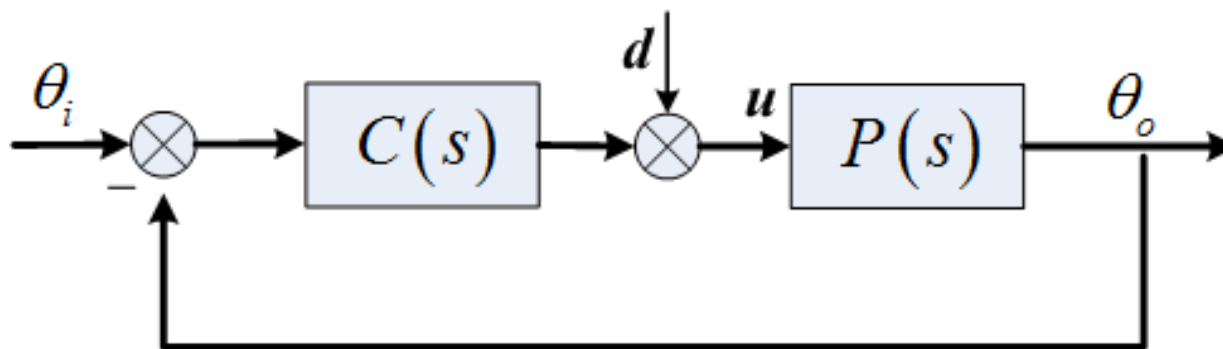
6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

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

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

复现精度: 0.001rad





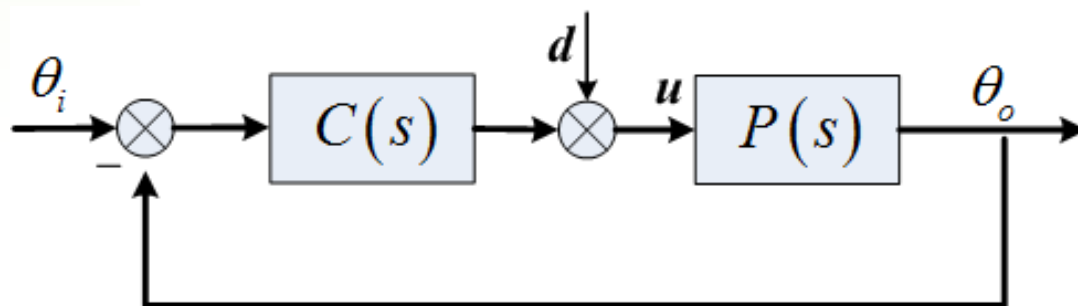
6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

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。

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



- 跟踪指令误差：
0.0005rad,
- 扰动引起误差：
0.0005rad



6.2.2 改进I型系统

近似

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

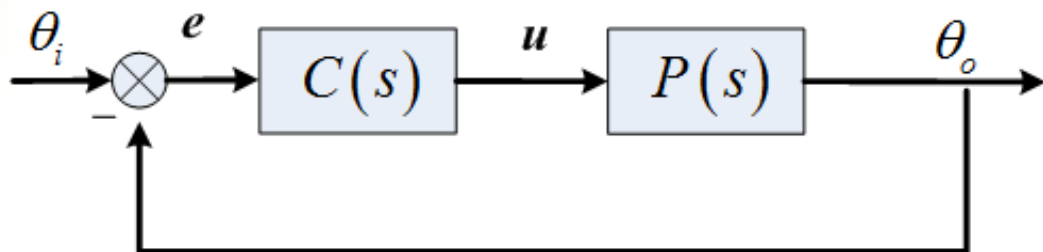
Step 2: 转折点和低频增益的确定

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 $|G(j\omega)| = \frac{\theta_o}{e} \approx \frac{\theta_i}{e}$

简化的目的?



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

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



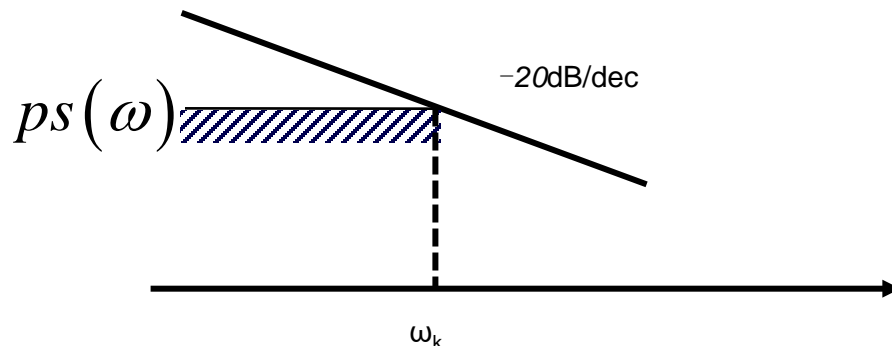
6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

(1) 转折频率点公式:

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

如果第一个转折频率可以设计, 应该如何选取?

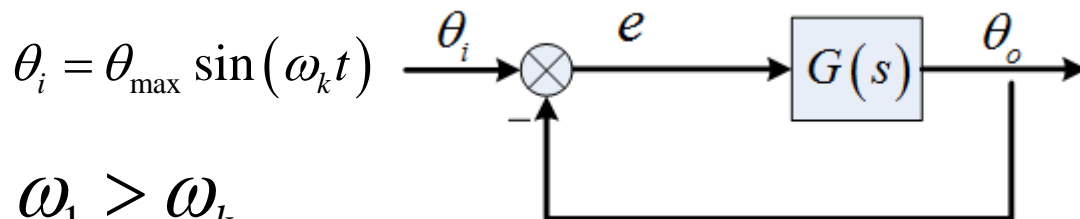


性能界

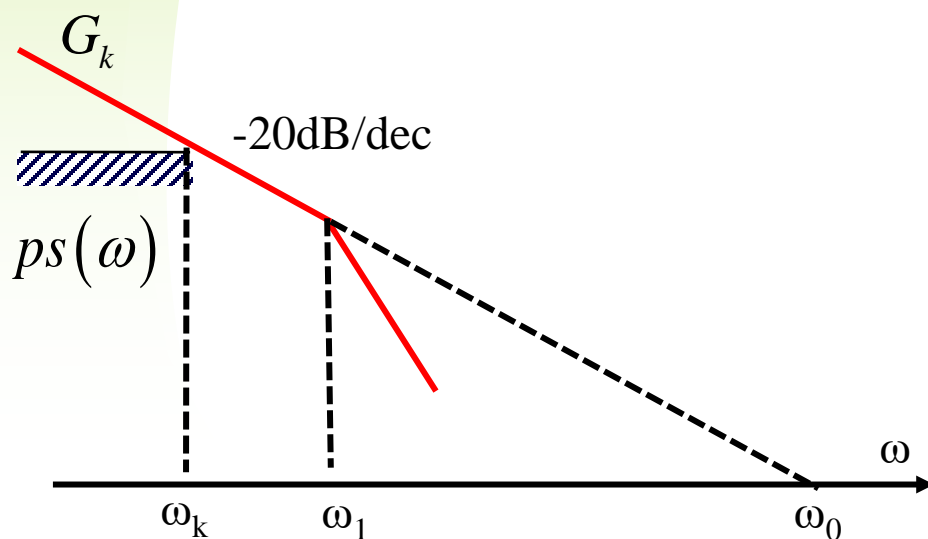


6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统



(1) 转折频率点公式: $\omega_1 > \omega_k$



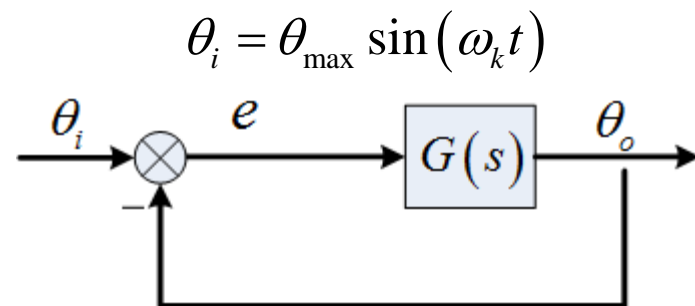
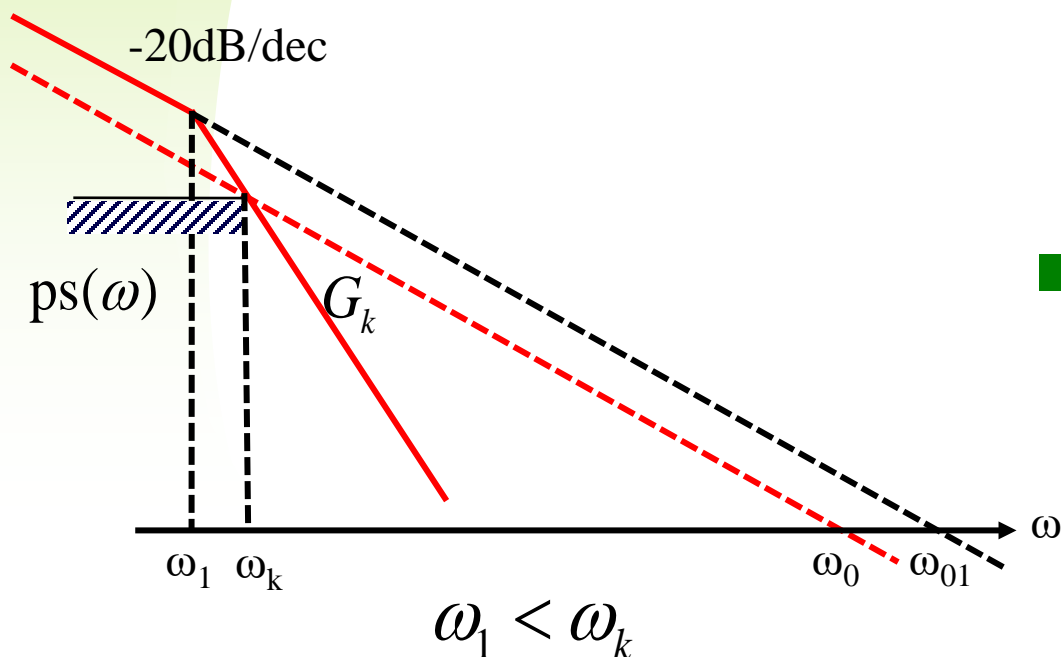
- -20dB/dec 的特性穿过 G_k , ω_0 由此确定;
- ω_1 的增大并未提高低频增益, 没有改善跟踪精度, 故希望减小 ω_1 ;



6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

(1) 转折频率点公式: $\omega_1 < \omega_k$



■ -40dB/dec的特性穿过 G_k ,

$\omega_{01} > \omega_0$ 增益要求提高;

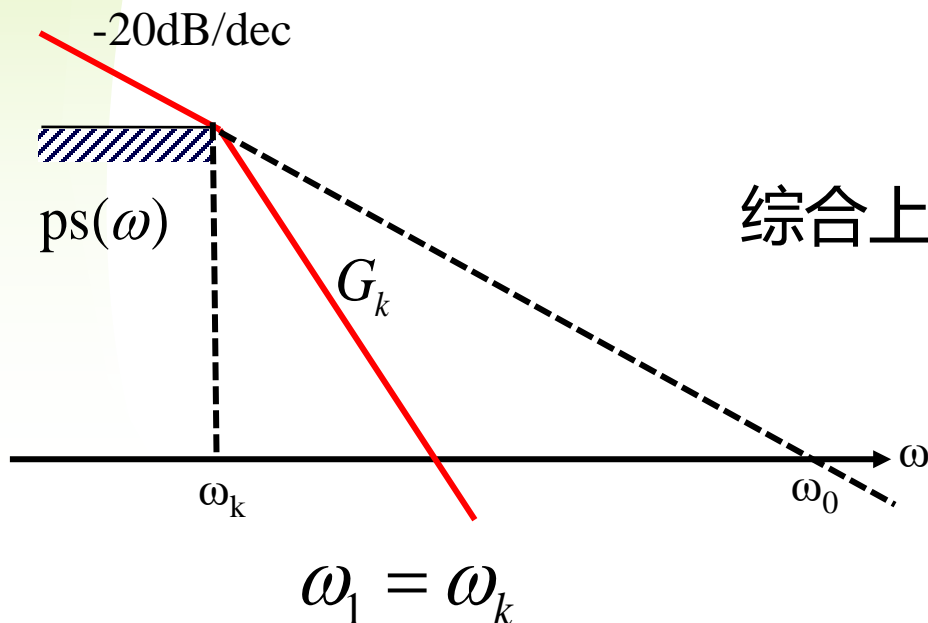


6.2.2 改进I型系统

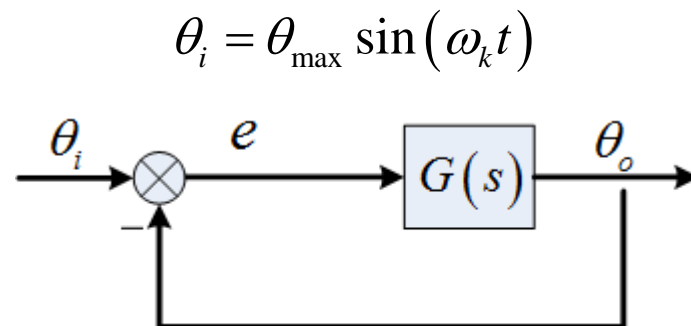
优化

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

(1) 转折频率点公式:



综合上述两种情况—— $\omega_1 = \omega_k$



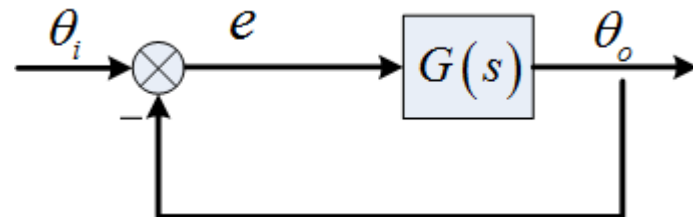


6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

(2) 跟踪误差公式:

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



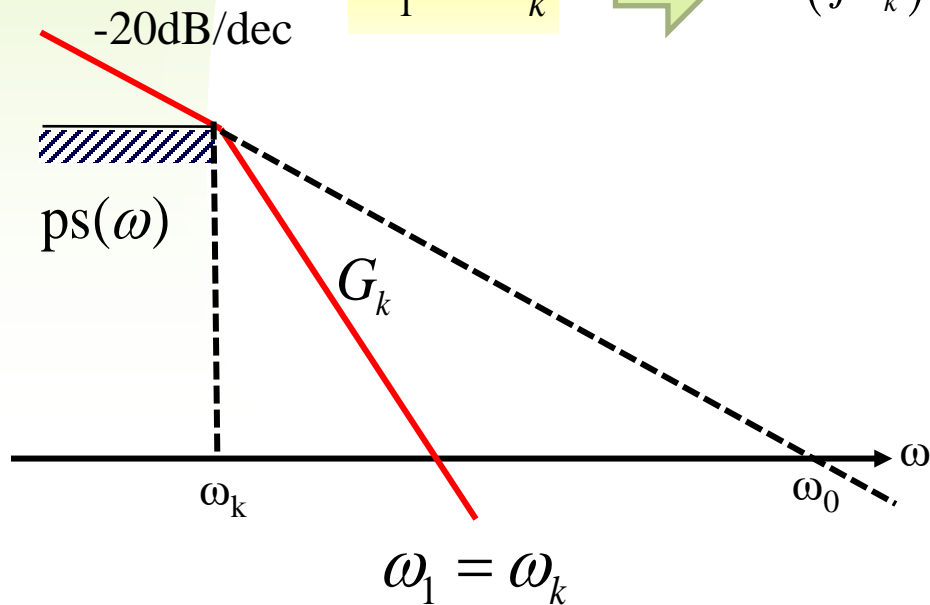
$$\omega_1 = \omega_k$$



$$G(j\omega_k) = \frac{\omega_0}{s(s/\omega_k + 1)} \Big|_{s=j\omega_k} = \frac{\omega_0}{\omega_k} \frac{1}{j-1} = \frac{\omega_0}{\sqrt{2}\omega_k} e^{-j135^\circ}$$



$$e_{\max} = \frac{\theta_{\max}}{|G(j\omega_k)|} = \frac{\theta_{\max} \omega_k \sqrt{2}}{\omega_0} = \frac{\dot{\theta}_{\max}}{\omega_0} \sqrt{2}$$

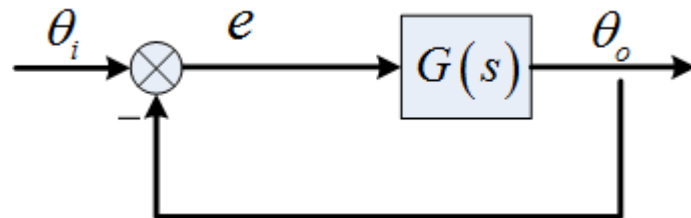




6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

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

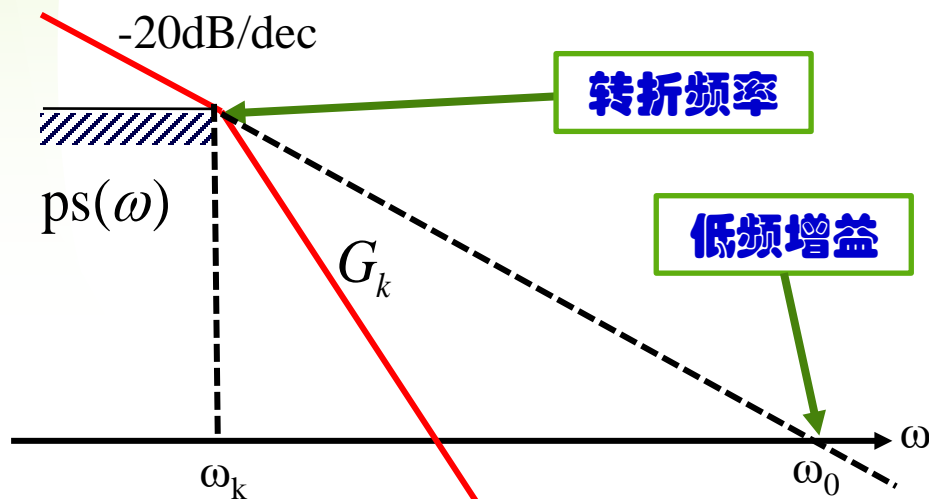


转折频率和跟踪误差公式小结：

此类系统常用公式——

$$\omega_1 = \omega_k$$

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



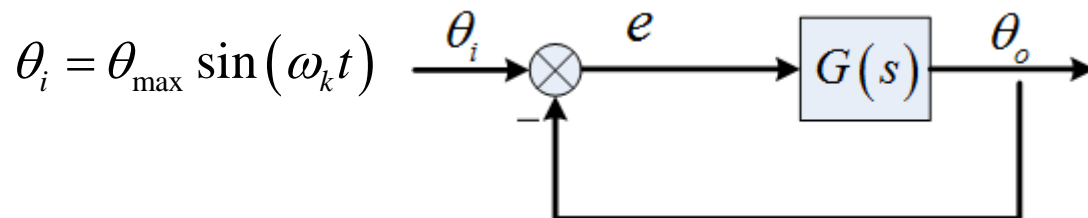
- 输入信号频率确定 ω_1 ；
- 最大速度和精度指标确定增益 ω_0 ；



6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

(3) 确定增益

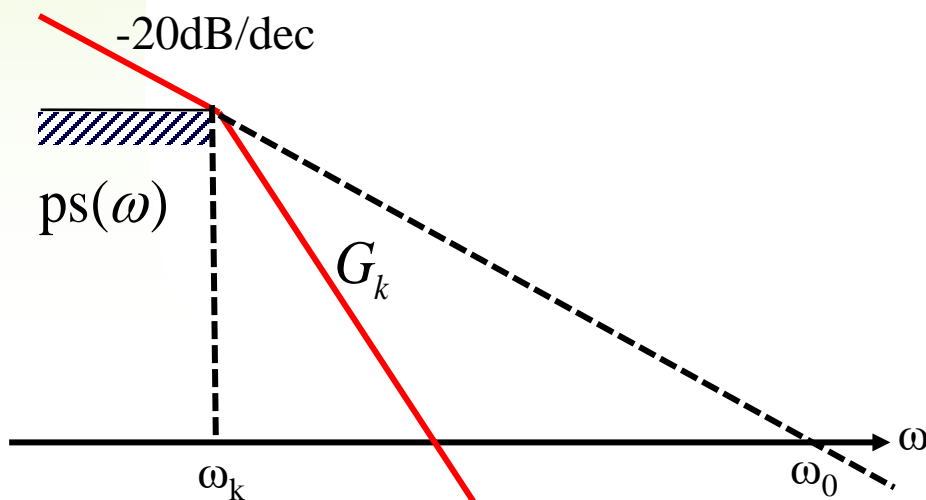


$$\omega_1 = \omega_k = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{10s} = 0.628 \text{ rad/s}$$

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



$$\begin{aligned} \omega_0 &= \sqrt{2} \frac{\dot{\theta}_{\max}}{e_{\max}} = \sqrt{2} \frac{\theta_{\max} \omega_k}{e_{\max}} \\ &= \sqrt{2} \frac{20^\circ / 57.3 \times 0.628 \text{ rad/s}}{0.0005 \text{ rad}} \\ &= 620 \text{ rad/s} \end{aligned}$$





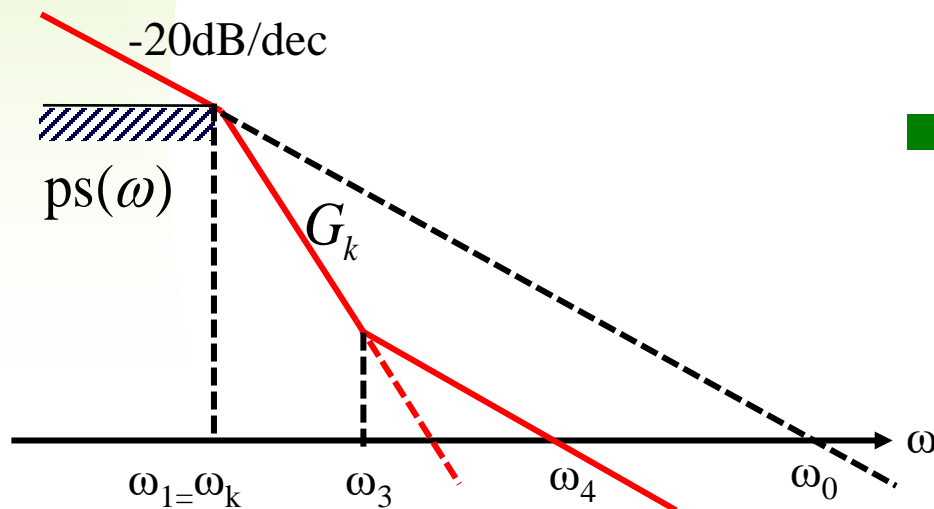
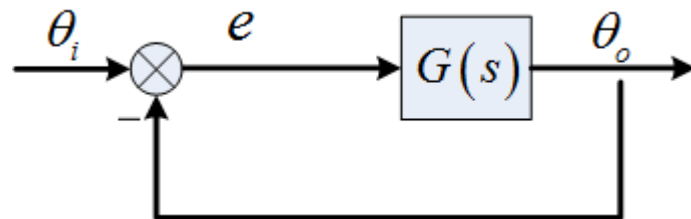
6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

Step 3: 穿越频率的确定

$$\omega_1 = \omega_k$$

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



■ ω_3 的确定需要保证具有足够的相角裕度可采用试凑法



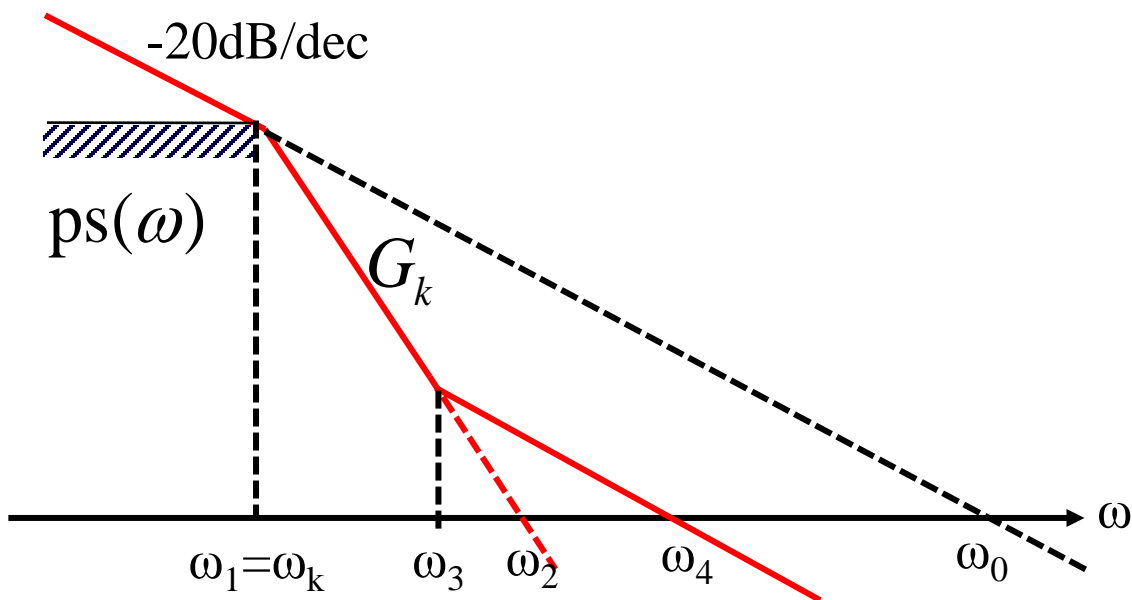
$$\omega_3 = 10 \text{ rad/s}$$



6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

Step 4: 根据期望频率特性和被控对象特性, 求解控制器

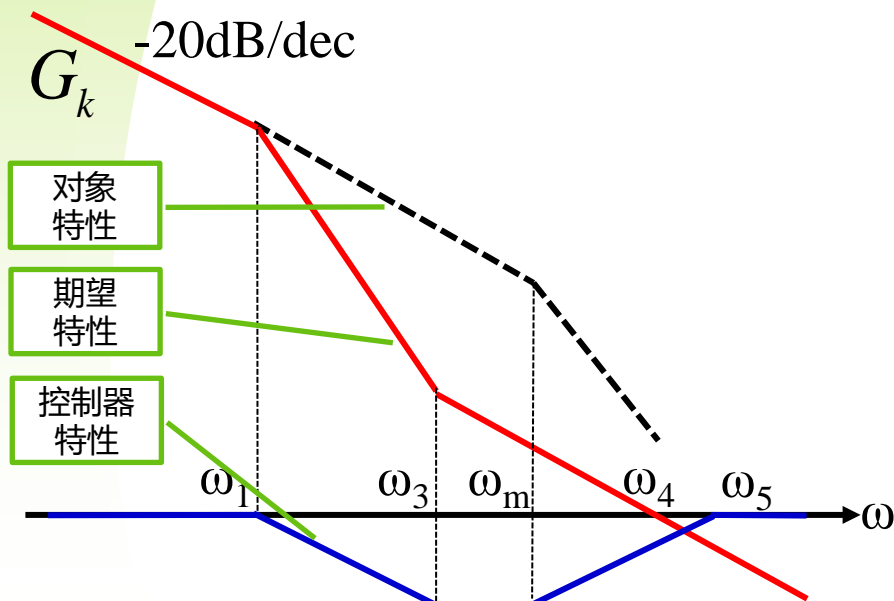




6.2.2 改进I型系统

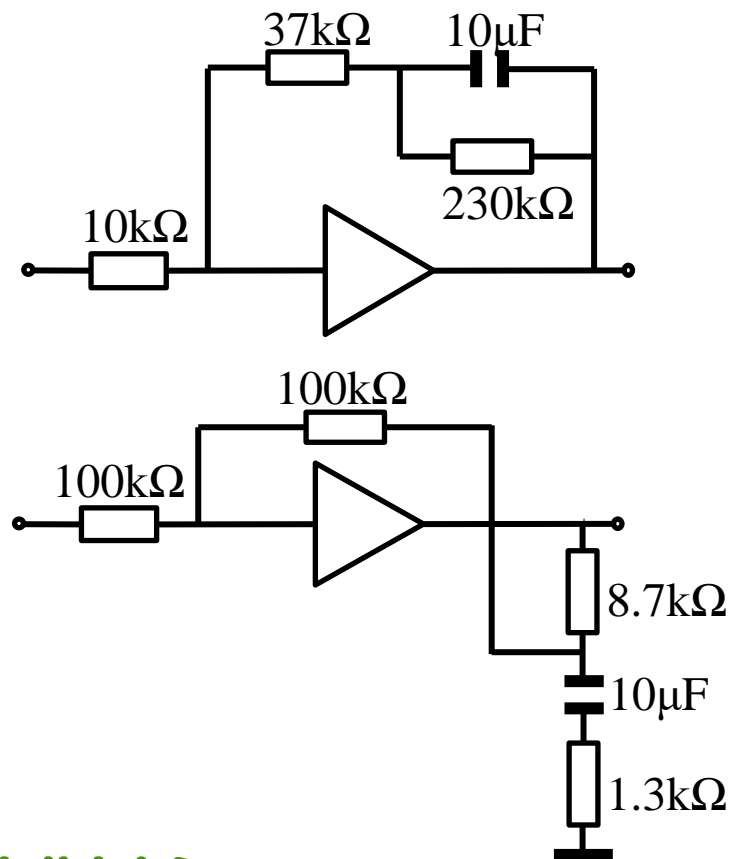
改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

Step 4: 用期望特性和对象特性之差，求解控制器



这需要什么校正环节来实现？

干扰留给大家分析





6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

例5. 火炮随动系统，用于跟踪指挥仪的输出信号。

指标要求： (1mil=0.06°)

跟踪误差： $\dot{\theta} = 24^\circ / s$ $e(t) \leq 2$ 密位 $\ddot{\theta} = 5^\circ / s^2$ $e_a(t) \leq 4$ 密位





6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

例5. 火炮随动系统，用于跟踪指挥仪的输出信号。

指标要求：(1mil=0.06°)

跟踪误差： $\dot{\theta} = 24^\circ / s$ $e(t) \leq 2$ 密位

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

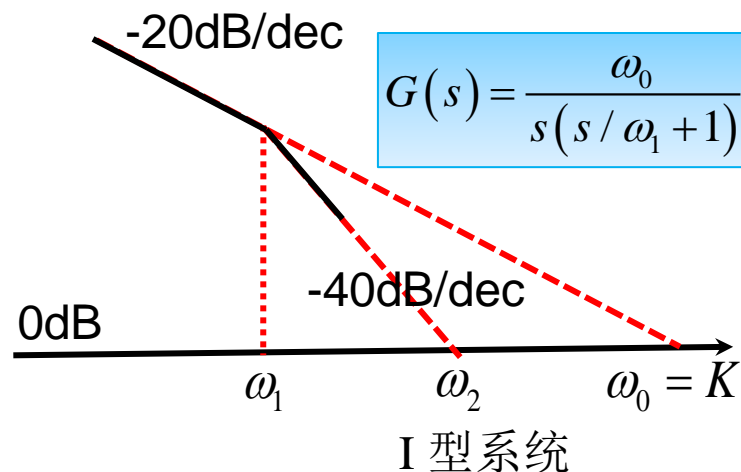
Step 1: 转折点的确定

$$C_1 = \frac{0.12^\circ}{24^\circ / s} = \frac{1}{200}$$

$$C_2 = \frac{0.24^\circ}{5^\circ / s^2} = \frac{1}{21}$$

$$\omega_0 = 200$$

$$\omega_1 \approx 0.1$$



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

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



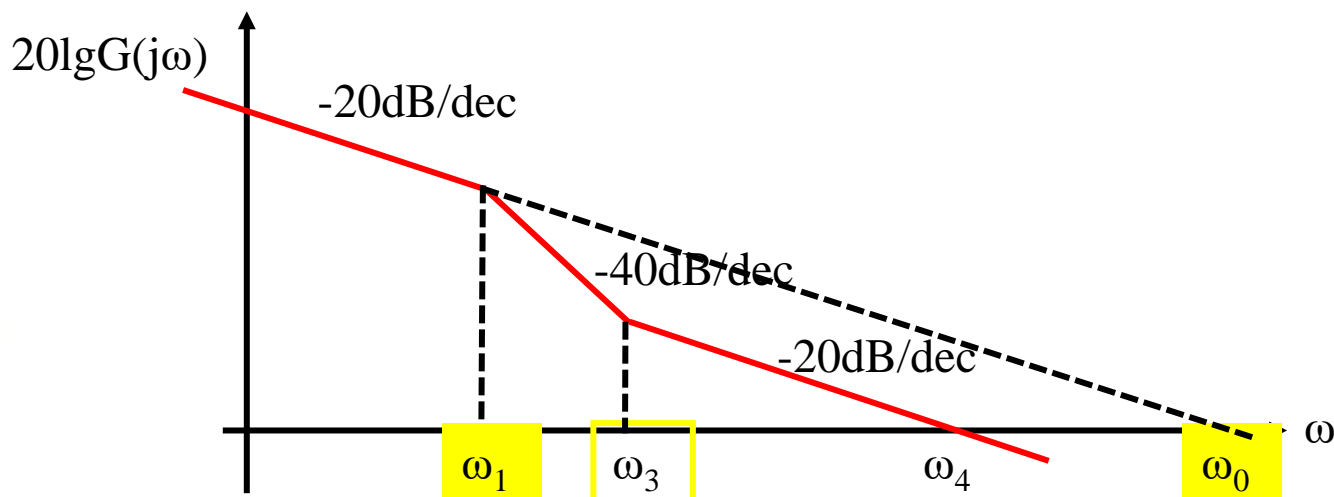
6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

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

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

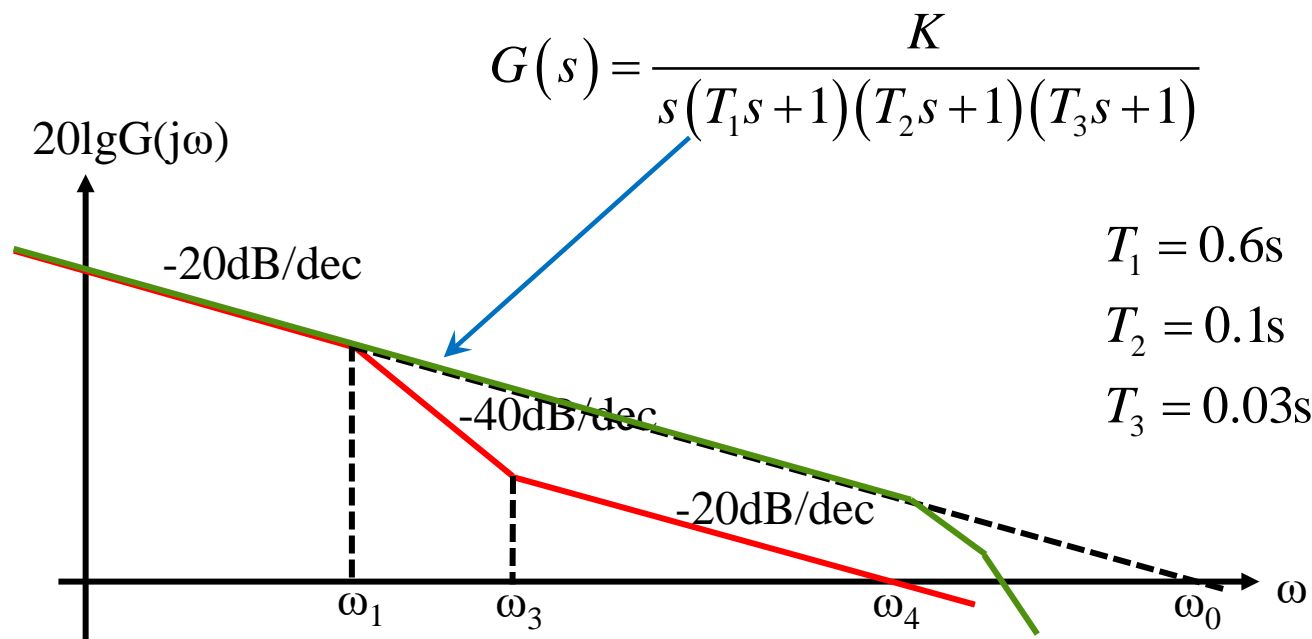




6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

Step 3: 控制器设计





6.2.2 改进I型系统

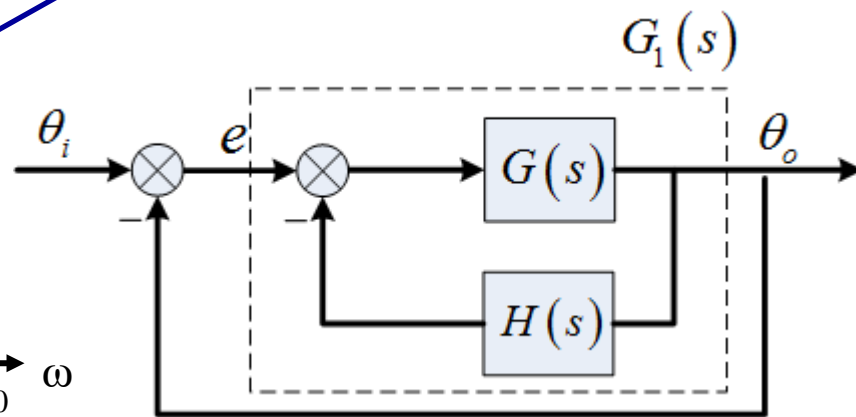
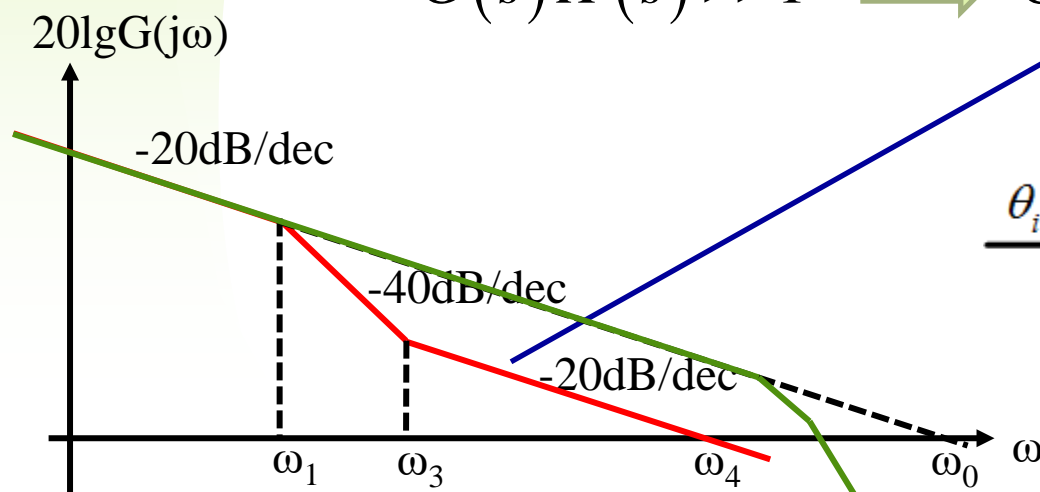
近似

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

Step 3: 控制器设计

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

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

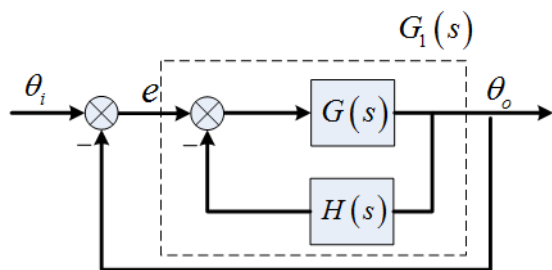




6.2.2 改进I型系统

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

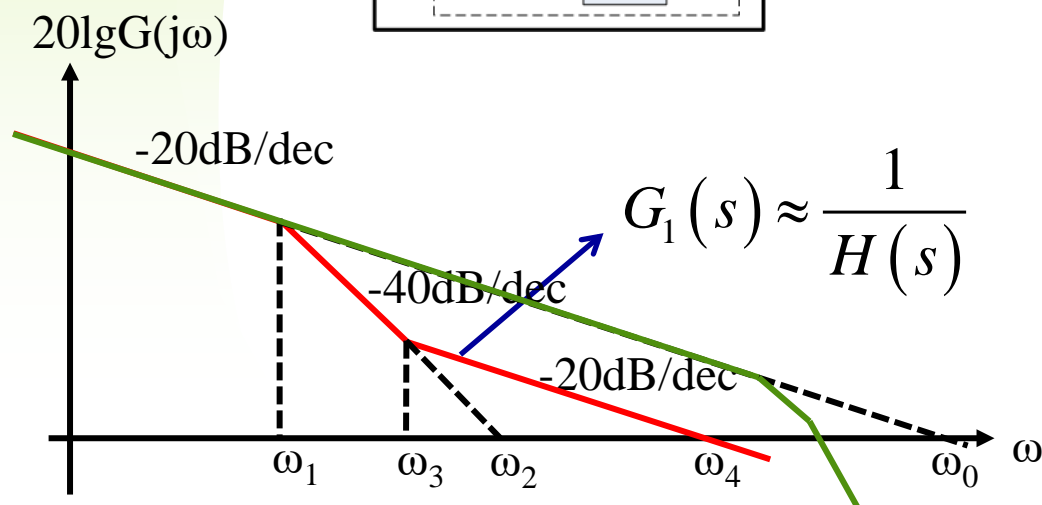
Step 3: 由期望频率特性, 求解反馈校正控制器



中频段:

$$G_1(s) = \frac{\omega_2}{s^2} \cdot (s/\omega_3 + 1)$$

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



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



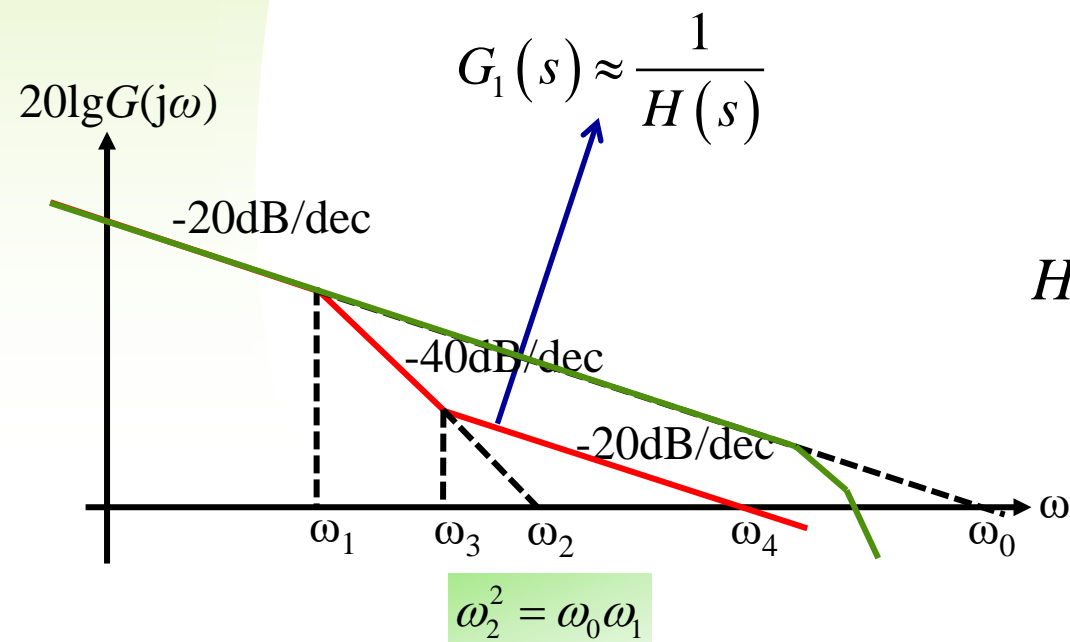
6.2.2 改进I型系统

检验

改进I型系统特性 | 例3. 雷达系统 | 例4. 舰载系统 | 例5. 火炮系统

Step 3: 由期望频率特性和被控对象频率特性, 求解控制器

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



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

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

设计结束后要通过测试来验证指标是否满足。



6.2.2 改进I型系统

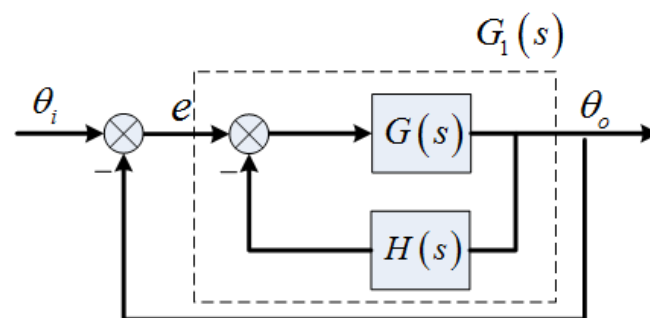
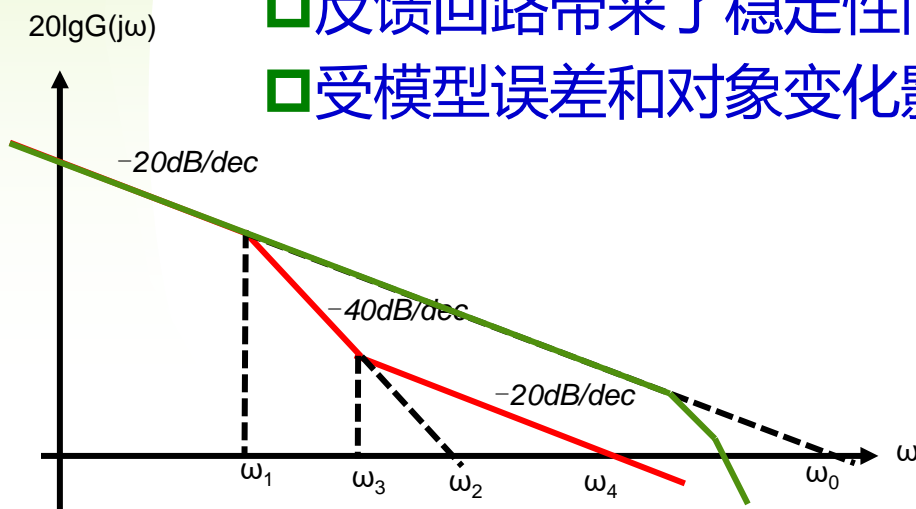
实现

改进I型系统总结

小结：反馈校正的特点

- 反馈校正实现（测速电机和微分网络）；
- 高通特性，只改变中频段，不影响低频段（ $G \ll 1/H$ ）；
- 反馈回路带来了稳定性问题；
- 受模型误差和对象变化影响小，鲁棒性好。

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





Contents

A1

伺服系统的数学模型

A2

I型系统

A3

II型系统

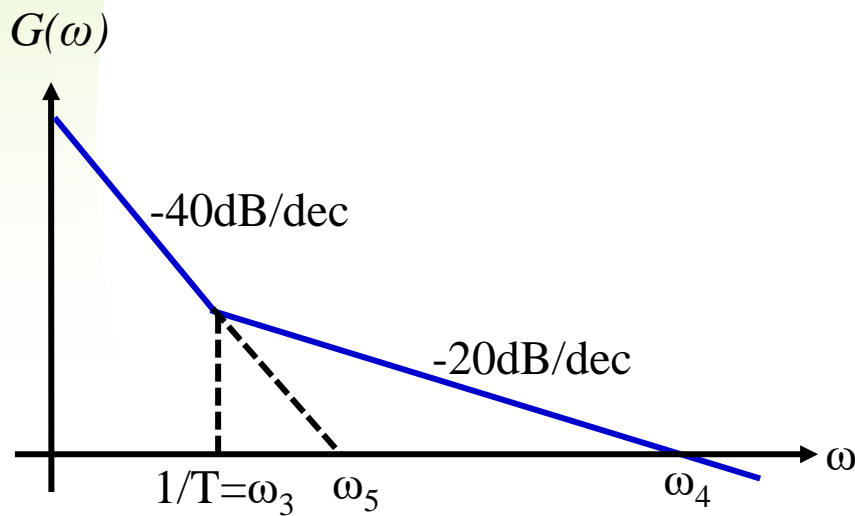


6.3 II型系统

基本II型系统特性 | 例6：电液随动系统

基本II型系统也只有一个转折频率，两个参数，其开环

频率特性为 $G(s) = K_a \frac{(Ts + 1)}{s^2}$



$$K_a = \omega_5^2 = \frac{1}{T} \cdot \omega_4$$

$$K = \omega_4 \cdot T \\ = \omega_4 / \omega_3$$



对于 II 型系统, T 不变的前提下, 下列正确的是

$$G(s) = K_a \frac{(Ts + 1)}{s^2}$$

A

K越大相角裕度越好

B

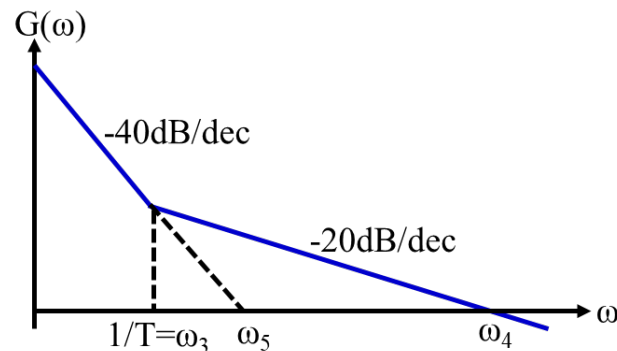
K越大带宽越大

C

K越大系统阶跃响应静态精度越高

D

K太大, 系统会出现不稳定



$$\begin{aligned} K &= \omega_4 \cdot T \\ &= \omega_4 / \omega_3 \end{aligned}$$

提交

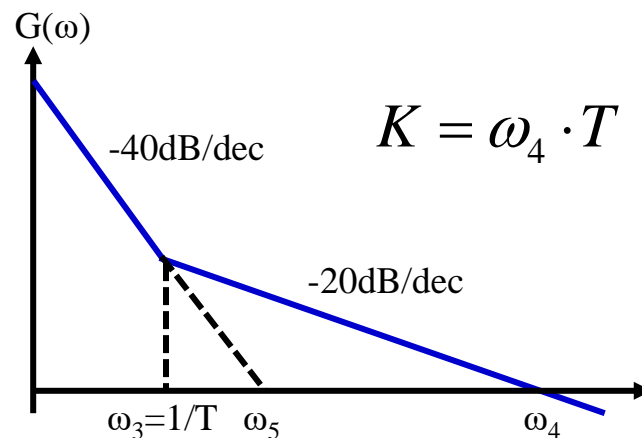


6.3 基本II型系统

基本II型系统特性 | 例6: 电液随动系统

闭环频率特性:

$$\Phi(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{K_a s + K_a / T}{s^2 / T + K_a s + K_a / T}$$



$K = \omega_4 / \omega_3$	1	2
单位阶跃输入下输出的峰值	1.3	1.22
阻尼比	0.5	0.707
等效噪声带宽	$\sqrt{K_a}$	$1.06\sqrt{K_a}$

$$1 < K \leq 2$$



6.3 基本II型系统

基本II型系统特性 | 例6：电液随动系统

应用场合：

- 高精度、重载；
- 高性能、低带宽（大系统）

一般的传递函数为

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

一般以**幅值裕度**作为稳定裕度指标，为保证5dB的幅值裕度，通常要满足 $\omega_c = 0.3/T$ ，使得高频特性都在0dB以下



6.2.2 II型系统

基本II型系统特性 | 例6：电液随动系统

例6：电液随动系统

系统采用液压传动，传动部分特性对带宽有限制，控制律中要加入积分。

$$G(s) = K_a \frac{(Ts + 1)}{s^2}$$

技术要求： 角加速度为 $3^\circ/\text{s}^2$ ，误差不超过8密位

Step 1：性能指标分析

取最大允许误差为5密位，即 $e_{\max} = 0.3^\circ$ ，对于II型系统，

只需考虑误差的**加速度项** $e \approx \frac{1}{K_a} \ddot{\theta}$



6.2.2 II型系统

基本II型系统特性 | 例6：电液随动系统

Step 2: 关键参数确定

最大允许误差为5密位，即 $e_{\max}=0.3^\circ$ ，
对于II型系统，只需考虑加速度引起的
误差

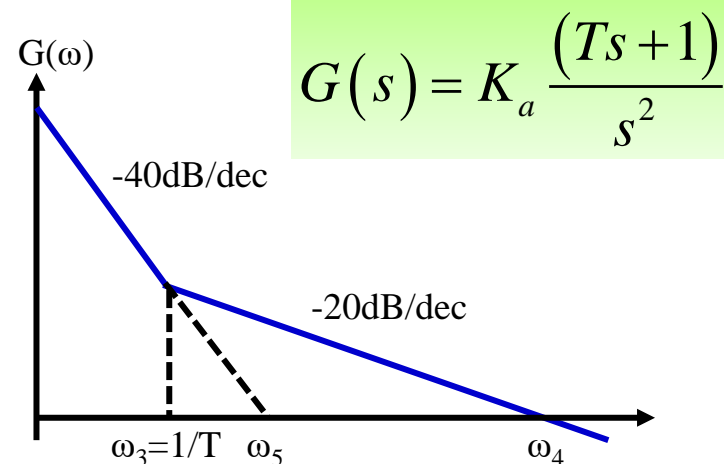
$$K_a = \ddot{r}_{\max} / e_{\max} = 10\text{s}^{-2}$$

取 $K=\omega_4/\omega_3=2$ ，得

$$\omega_3 = \sqrt{K_a / 2} = 2.24\text{rad/s}$$

根据可用元器件参数，取

$$\omega_3 = 2.7\text{rad/s}$$



$K = \omega_4 / \omega_3$	1	2
单位阶跃输入下输出的峰值	1.3	1.22
阻尼比	0.5	0.707
等效噪声带宽	$\sqrt{K_a}$	$1.06\sqrt{K_a}$



6.2.2 II型系统

基本II型系统特性 | 例6：电液随动系统

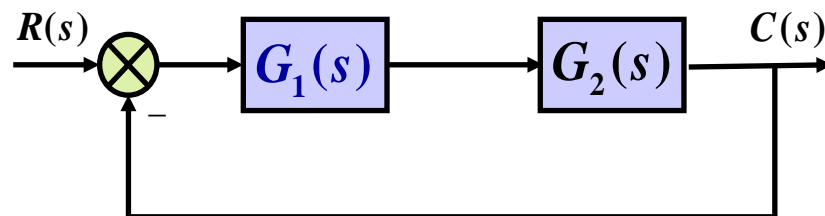
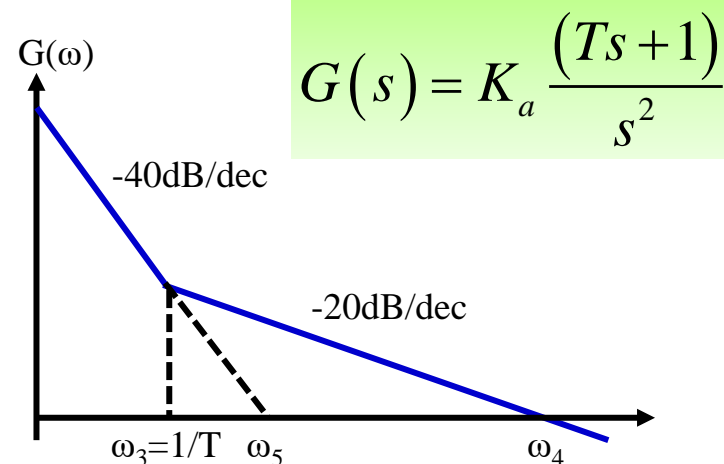
Step 3: 系统实现

在**信号带宽**内，假定系统的传递函数为

$$G_2(s) = \frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{K_2}{s}$$

若采用串联校正，控制器与被控对象结合，在**低频**形成II型系统，则控制器形式为

$$G_1(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_1 \frac{s / \omega_3 + 1}{s}$$





6.2.2 II型系统

实现

基本II型系统特性 | 例6：电液随动系统

Step 3: 系统实现

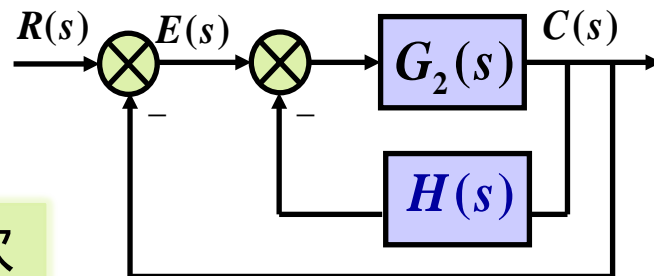
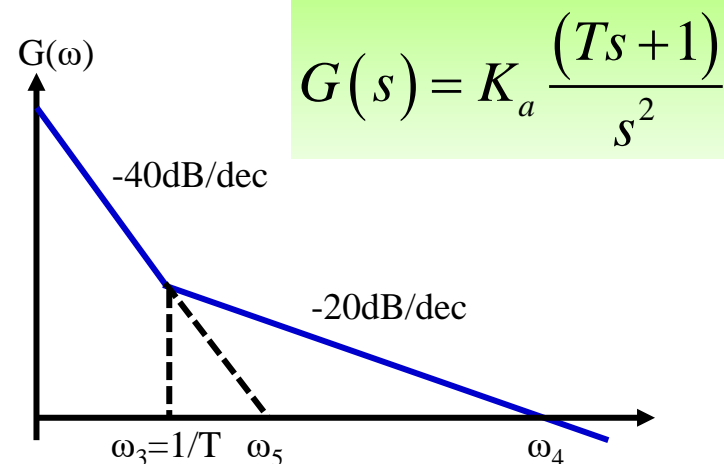
若采用反馈的方式实现校正，在回路增益较高时 ($GH \gg 1$) 有

$$G(s) = 1/H(s)$$

$H(s)$ 应该按期望特性的倒数来实现

$$H(s) = \frac{1}{K_1} \frac{s^2}{1 + s / \omega_3}$$

具体可用电机**电流信号**作为近似输出的二次微分，再用RC网络实现转折（惯性环节）





总结

本节课内容回顾

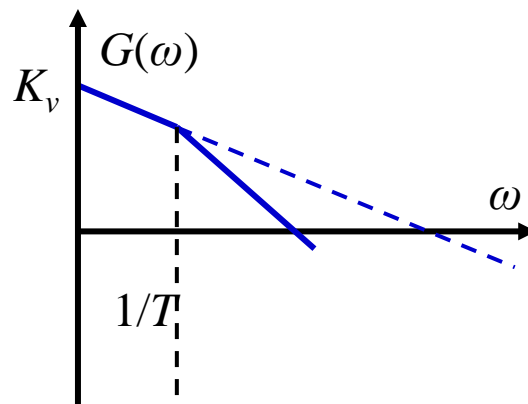
- 介绍了改进I型系统的基本思路；
- 多个设计实例给出了设计流程（**不同指标，不同指令，不同方法**）；
- 基本II型系统的特点（**高精度，低带宽**）；



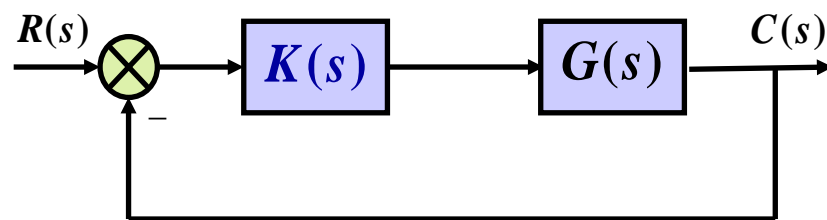
第20次课作业

1 必选作业

20-1 设计题：参考例题，采用改进I型系统方式对给定系统进行控制设计，保证系统的对1Hz，1rad的正弦指令跟踪误差不大于0.01rad。请给出 $K(s)$ 的表达式，并给出仿真结果。



$$G(s) = \frac{K_v}{s(Ts+1)}, \quad K_v = 10, T = 0.5$$



20-2 参考课件和课本，自学基本二型系统的相关知识



第20次课作业

2 可选作业

20.1 总结改进 I 型系统控制系统设计步骤和流程；

20.2 改进 I 型系统的优点是可实现带宽和增益的独立设计，实际上也可以采用滞后与超前环节相配合实现开环系统增益和带宽的独立设计，请总结一下具体的方法；

20.3 结合 II 型系统，总结一下什么系统适合用幅值裕度作为相对稳定性指标；

20.4 总结反馈校正的特点（优缺点）、作用、适用条件、和实现方法等；

20.5 结合教材，解释条件稳定现象，并通过仿真复现条件稳定系统失稳的现象，并分析如何避免系统出现条件稳定问题；



拓展思考

自己总结，无需上交

- a. 控制理论和方法的能力边界（控制不是万能的）；
- b. 每一种控制方法的利与弊（硬币总有正反两面）；
- c. 控制系统中的各种约束与限制（你不能随心所欲）；
- d. 各种方法都有自己的适用条件（看准了再用）
- e. 控制系统设计中的优化问题（处处有优化）；
- f. 哪些是针对信号的，哪些又是针对系统的，如何进行转化（信号与系统）；
- g. 控制系统中的各种性能指标（为什么这么多）；
- h. 控制系统设计中的各种概念和原理给我们的人生启发（你可以控制好人生）；
- i. 控制系统中各种概念的联系与区别（对比才能深刻理解）
- j. 控制系统中主动和被动的办法（上工治未病）；
- k. 分析仿真和实验，理论与实际的差别（纵然无法解决，也要给出解释）；
- l. 开环与闭环的特性（为什么一定要闭环）；
- m. 控制设计中可用的信息有哪些（信息有多重要）



拓展思考

自己总结，无需上交

- n 反馈的力量，闭环的作用（日用而不知）；
- o 时域和频域的联系与区别（形式不同，本质相通）；
- p 高与低，宽与窄，谁相对于谁（相对与绝对）；
- r 控制系统中的各种非线性及处理方法（对付非线性）；
- s 反馈中的反馈，闭环中的闭环（只要有用就可以嵌套着使用）；
- t 特殊到一般，简单到复杂（走上科研创新之路）；
- s 一般到特殊，复杂到简单（开启工程应用之门）；



Thank You !



哈尔滨工业大学控制与仿真中心