



第7章 调节系统的设计 (1)

——2019年春季学期

授课教师：马 杰（控制与仿真中心）

罗 晶（控制科学与工程系）

马克茂（控制与仿真中心）

陈松林（控制与仿真中心）



上一节课内容回顾

伺服系统的主要性能指标

能力指标：最大（小）速度，最大加速度，最大负载(干扰)

时域指标：阶跃响应、正弦响应、位置精度、速度精度、特定输入下误差，速度误差、加速度误差

频域指标：带宽（-3dB, -90°）、双十（五、三）频响指标、闭环谐振峰、剪切频率、幅值/相位裕度

其他指标：鲁棒性、抗扰性、均方误差、品质系数等

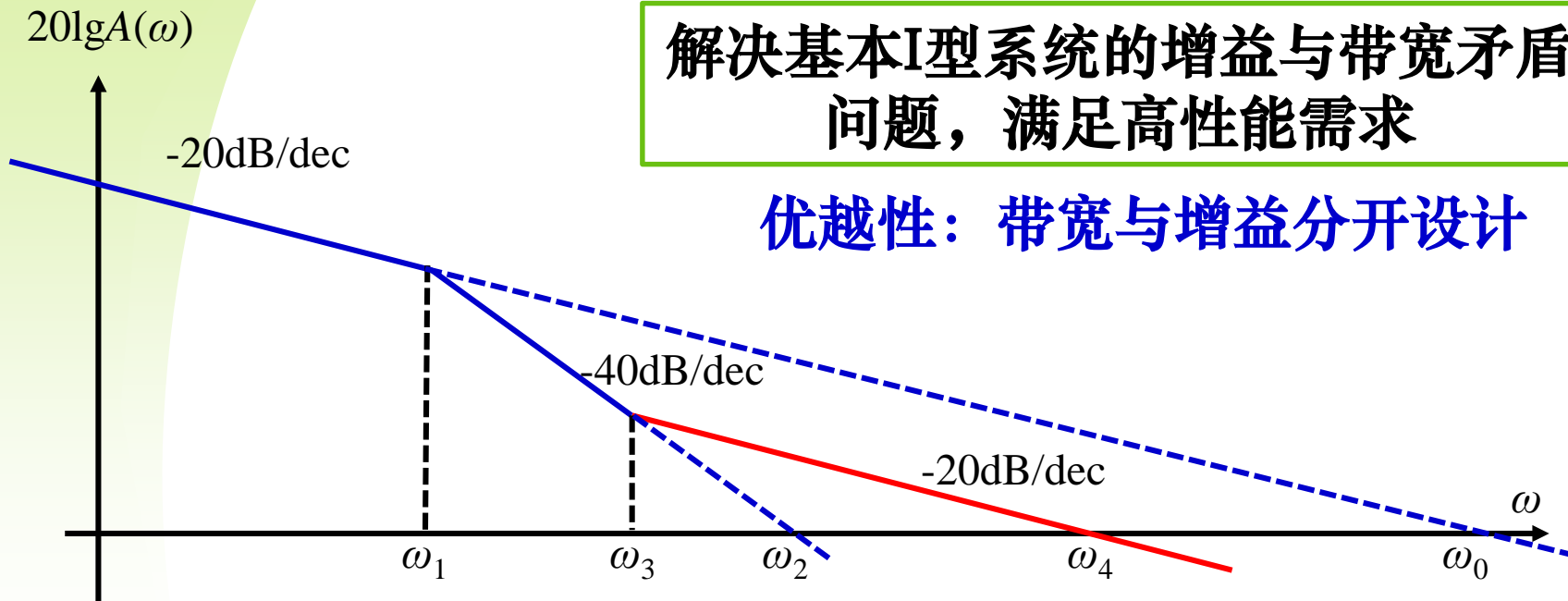


上一节课内容回顾

改进I型系统的特点

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

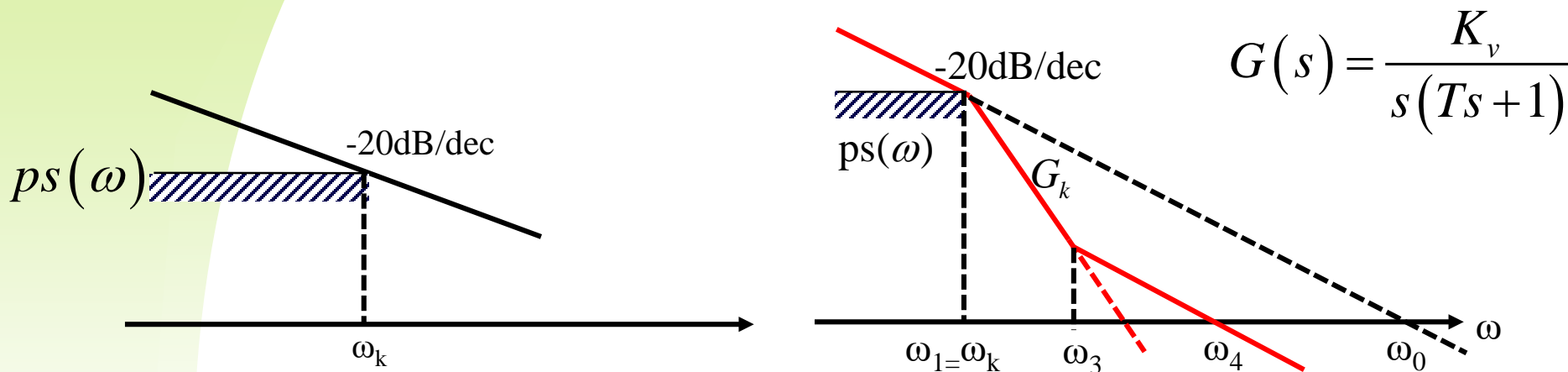


是基于期望开环特性的设计方法，设计过程主要是根据性能要求和稳定性要求依次确定增益 ω_0 和两个转折频率 ω_1 和 ω_3



上一节课内容回顾

改进I型系统的设计要点



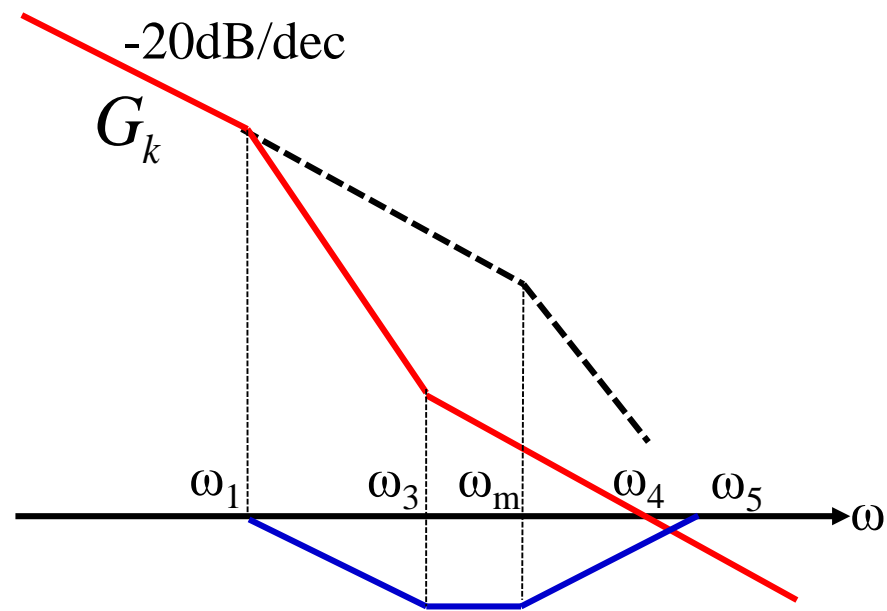
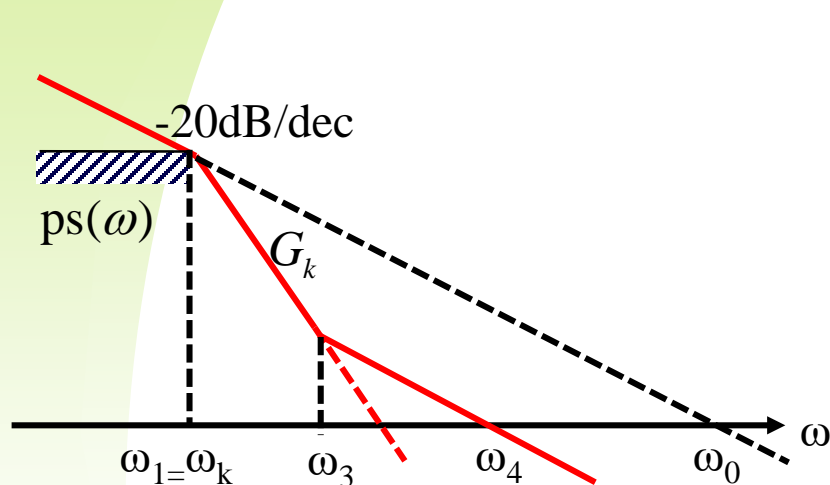
根据给定的指标确定系统的界函数，得到系统增益 ω_0 ，同时明确性能界的宽度，可以确定第一个转折频率 ω_1 的最小值，然后再根据稳定裕度要求，根据经验（试凑）确定第二个转折频率 ω_2

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



上一节课内容回顾

改进I型系统的设计要点

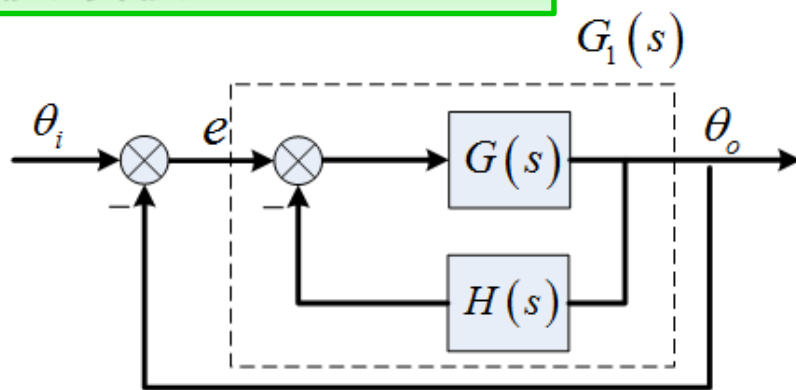
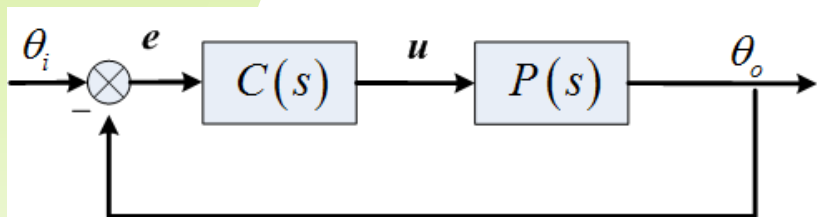


一旦系统的期望开环特性确定 (ω_0 , ω_1 和 ω_3)，并且被控对象的特性已知，即可通过做差的方式获得串联校正控制器的传递函数。



上一节课内容回顾

串联校正与反馈校正



- 被控对象模型已知，并且模型摄动小时，用串联校正；
- 对象模型未知，或者摄动较大时，并有输出信号导数可测时用反馈校正更好；

- 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，也不改变高频；
- 不受对象变化影响，鲁棒性好。

- 反馈回路带来了稳定性问题；
- 测速元件增加成本，有误差、滞后噪声



上一节课内容回顾

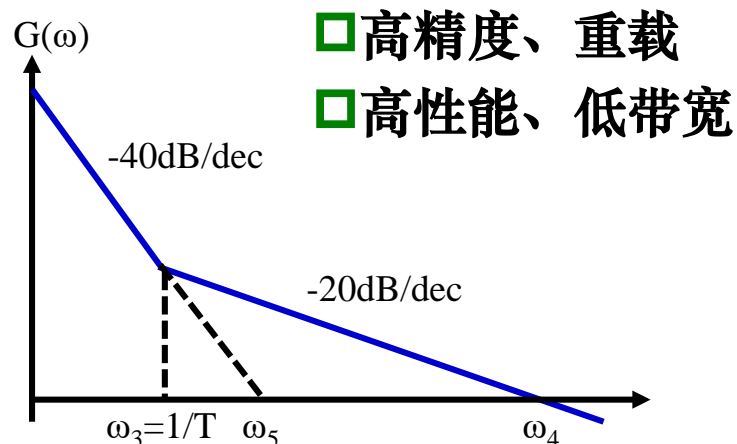
基本II型系统

$$G(s) = K_a \frac{(Ts + 1)}{s^2} \quad K_a = \omega_5^2 = \frac{1}{T} \cdot \omega_4$$

$$K = \omega_4 \cdot T = \omega_4 / \omega_3 = K_a T^2$$

$$1 < K \leq 2$$

设计的主要任务就是根据指标确定 K_a 和 (或) 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	$\sqrt{K_a}$	$1.06\sqrt{K_a}$

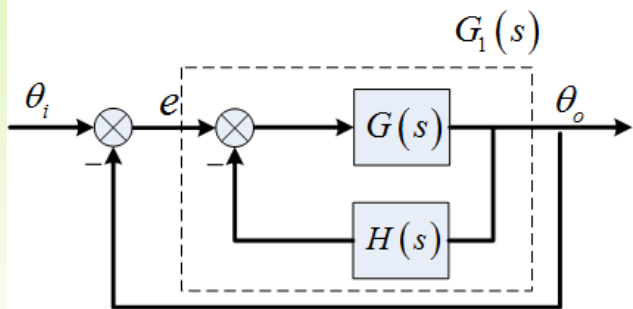


上一节课内容回顾

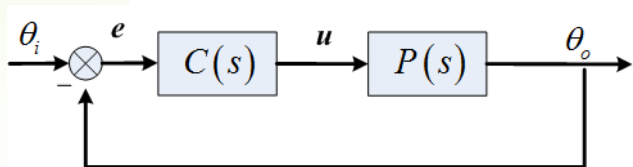
设计过程中的各种近似

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

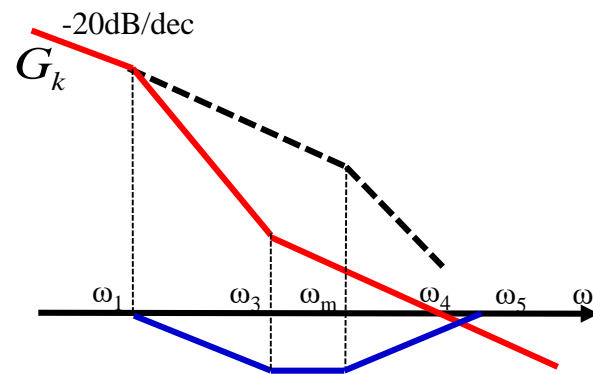
$$e \approx \frac{1}{K_a} \ddot{\theta}$$



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



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



注意：误差的分配，误差的近似关系，各种等效简化处理，包括对象摄动，控制器实现时引入误差，对设计结果都有影响



学习目标

本节课需要掌握的内容

- 掌握调节系统的特点;
- 掌握调节系统控制规律PID的作用和特点;
- 了解调节系统的类型和特点;
- 掌握几种调节系统PID控制律的设计方法。



Contents

A1

调节系统的特点及控制规律

A2

调节系统的类型

A3

PID系统的设计

A4

过程控制系统的设计



7.1 调节系统的特点及控制规律

7.1.1 调节的定义及特点

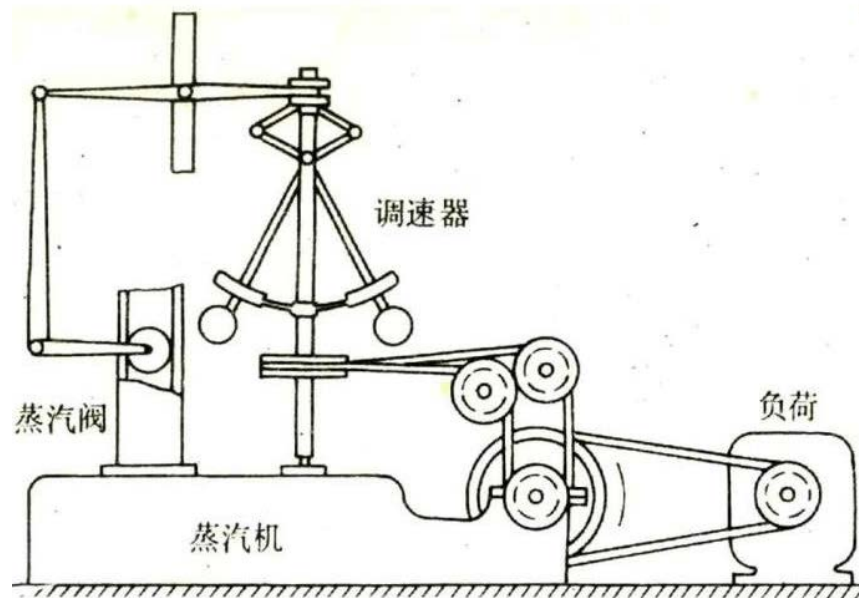
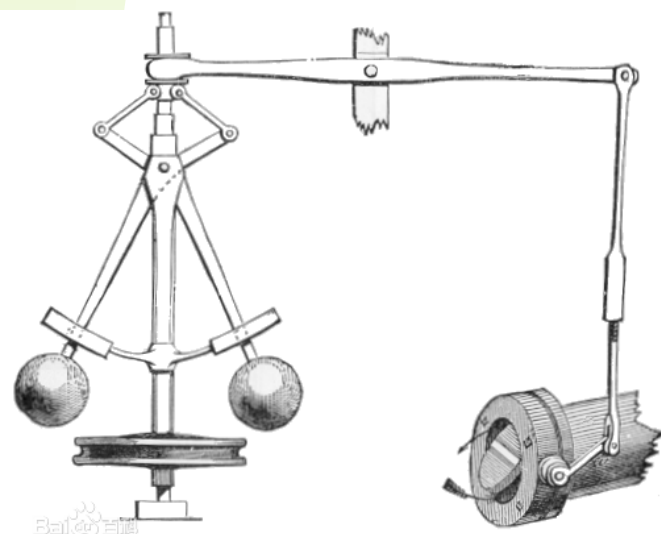
7.1.2 调节系统的控制规律



7.1.1 调节系统的定义及特点

◆ 调节系统的定义

调节系统是将被调量（系统的输出量）保持设定值上的控制系统。



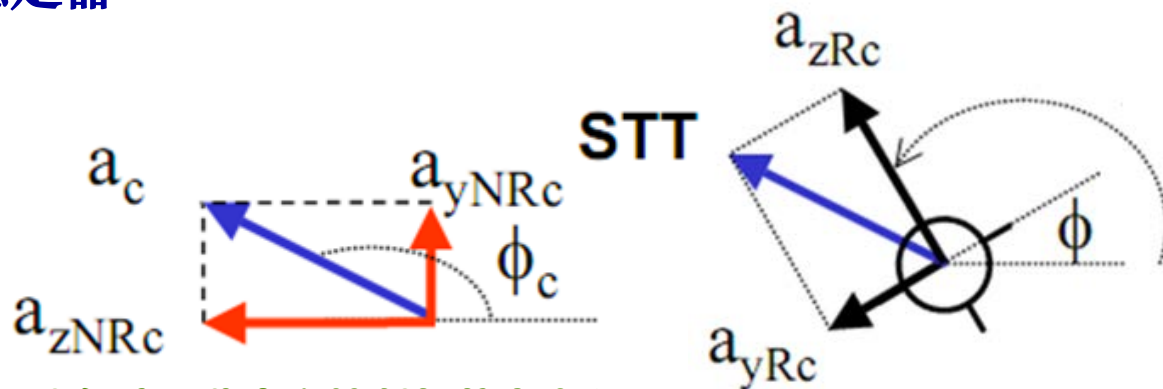


7.1.1 调节系统的定义及特点

◆ 调节系统的定义

调节系统是将被调量（系统的输出量）保持设定值上的控制系统。

- 家用电器
- 电压调节、电流调节
- 航向保持、火炮稳定器
- 工业过程控制
-





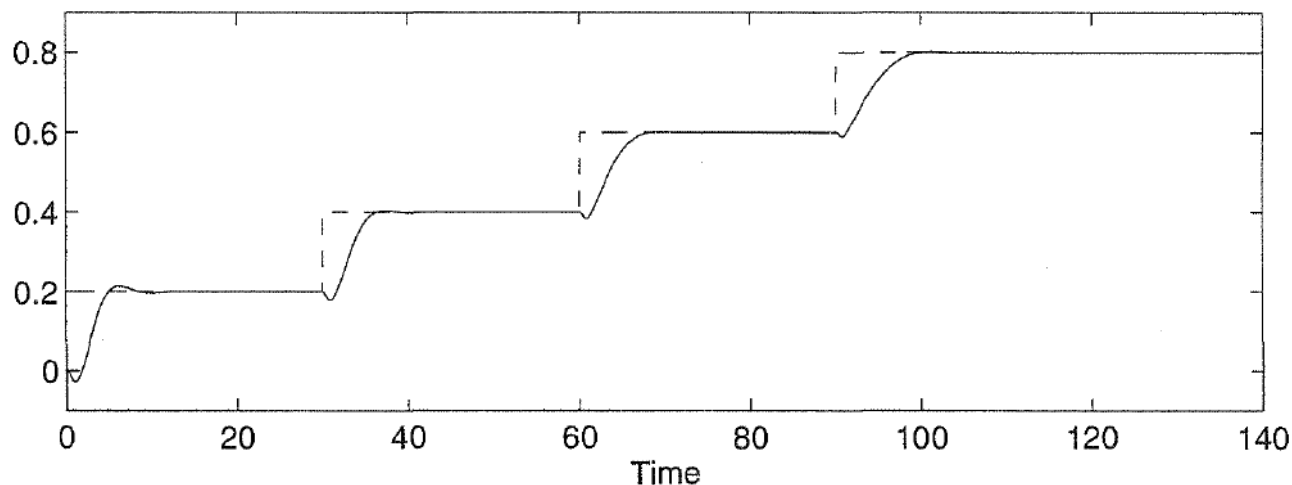
7.1.1 调节系统的定义及特点

◆ 调节系统的特点

- 输出量保持某个设定值
- 通常带宽较窄
- 主要考虑稳定性和抑制扰动

伺服系统：

跟踪参考输入信号，有跟踪误差要求，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。



调节系统控制输入的形式

哈尔滨工业大学控制与仿真中心



7.1 调节系统的特点及控制规律

7.1.1

调节的定义及特点

7.1.2

调节系统的控制规律



7.1.2 调节系统的控制规律

◆ 调节系统常用的控制规律

- 比例 (P)
- 积分 (I)
- 比例-微分 (PD)
- 比例-积分 (PI)
- 比例-积分-微分 (PID)



7.1.2 调节系统的控制规律

◆ PID控制规律的特点

- (1) 原理简单，使用方便；
- (2) 适应性强，按PID控制规律进行工作的控制器早已商品化，即使目前最新式的过程控制计算机，其基本控制功能也仍然是PID控制；
- (3) 鲁棒性强，即其控制品质对被控制对象特性的变化不大敏感。





7.1.2 调节系统的控制规律

◆ PID控制规律的形式

在控制系统的设计与校正中，PID控制规律的优越性是明显的，它的基本原理却比较简单。基本PID控制规律可描述为

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

这里 K_P 、 K_I 、 K_D 为常数。设计者的问题是如何恰当地组合这些元件或环节，确定连接方式以及它们的参数，以便使系统全面满足所要求的性能指标。

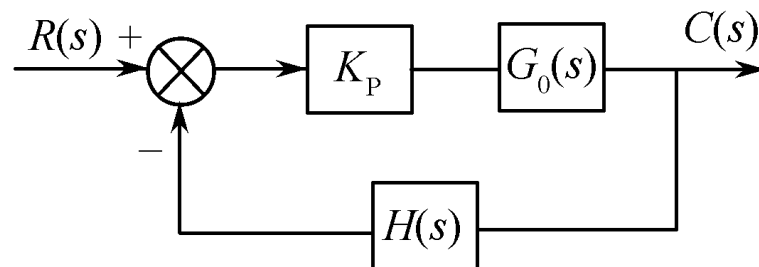


7.1.2 调节系统的控制规律

◆ 比例 (P) 控制作用

比例控制器的传递函数为

$$G_c(s) = K_P$$



式中, K_P 称为比例系数或增益 (视情况可设置为正或负)。

比例控制器作用于系统, 系统的特征方程

$$D(s) = 1 + K_P G_0(s) H(s) = 0$$



7.1.2 调节系统的控制规律

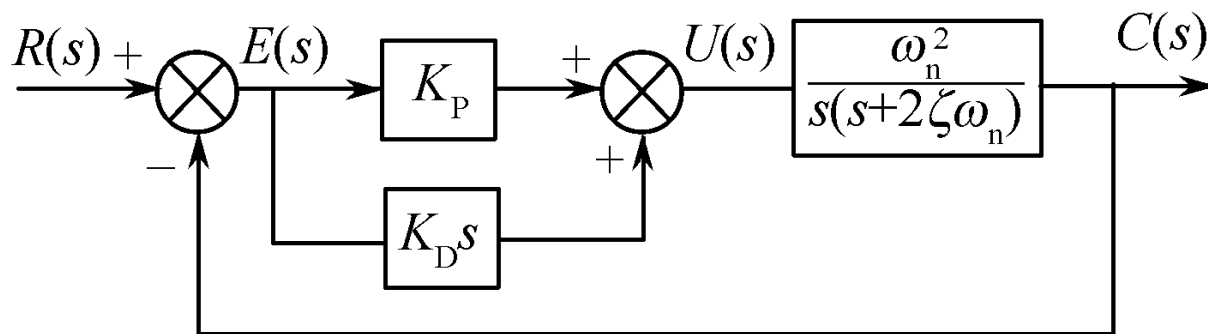
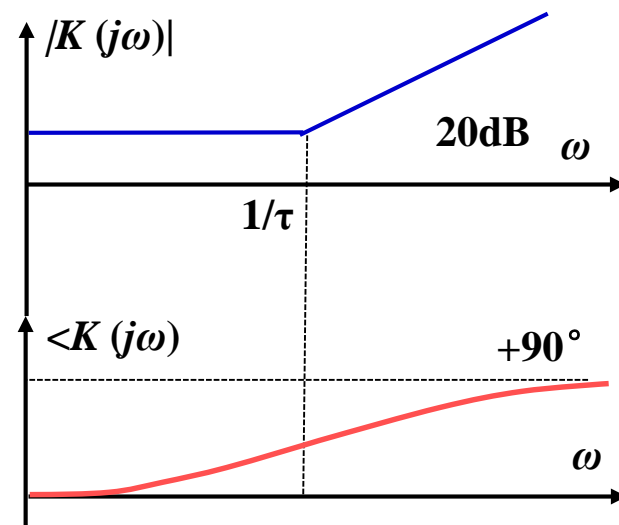
◆ 比例微分 (PD) 控制作用

比例微分控制的传递函数为

$$G_c(s) = K_P + K_D s$$

控制器的输出信号:

$$u(t) = K_P e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt}$$



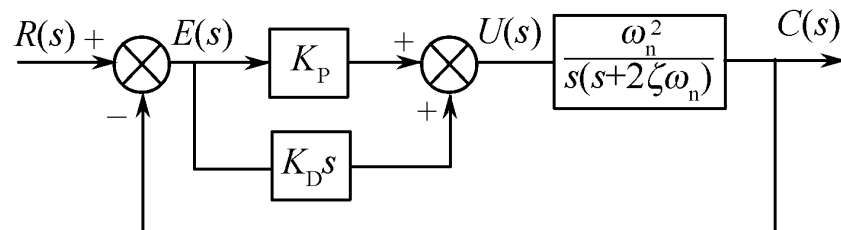


7.1.2 调节系统的控制规律

◆ 比例微分 (PD) 控制作用

原系统的开环传递函数:

$$G_0(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\zeta\omega_n)}$$



串入PD控制器后系统的开环传函:

$$G(s) = G_c(s)G_0(s) = \frac{\omega_n^2 (K_P + K_D s)}{s(s + 2\zeta\omega_n)}$$

串入PD控制器后系统的闭环传递函数:

$$\frac{G_c(s)G_0(s)}{1 + G_c(s)G_0(s)} = \frac{\omega_n^2 (K_P + K_D s)}{s^2 + 2(\zeta + \frac{\omega_n K_D}{2})\omega_n s + \omega_n^2 (1 + K_P)}$$

增大阻尼

增大带宽

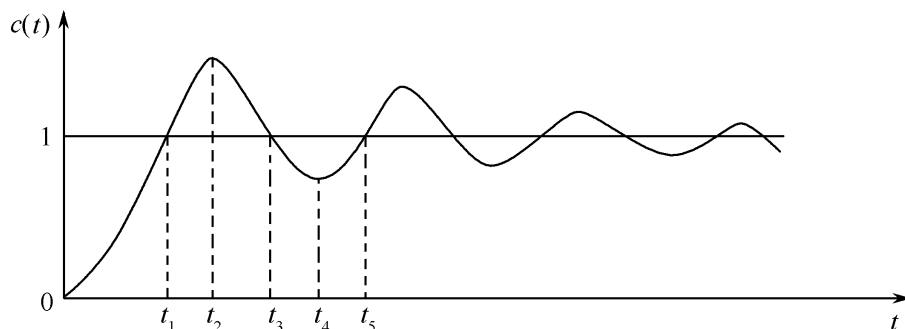


7.1.2 调节系统的控制规律

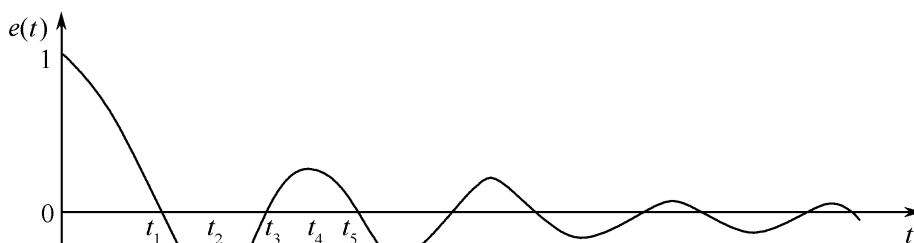
◆ 比例微分 (PD) 控制作用

增大比例可以
减小稳态误差，
提高响应速度，
但会增大超调
量和增加振荡
幅值和次数。

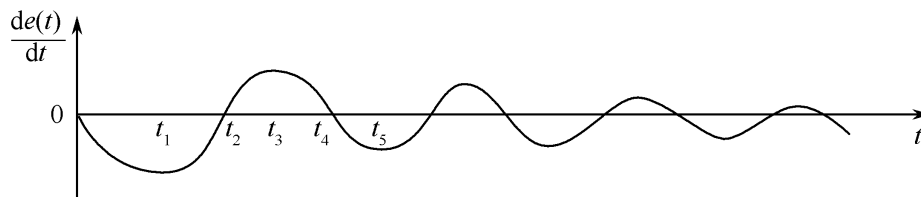
微分作用的波形图



(a) 单位阶跃响应



(b) 误差信号



(c) 误差导数信号

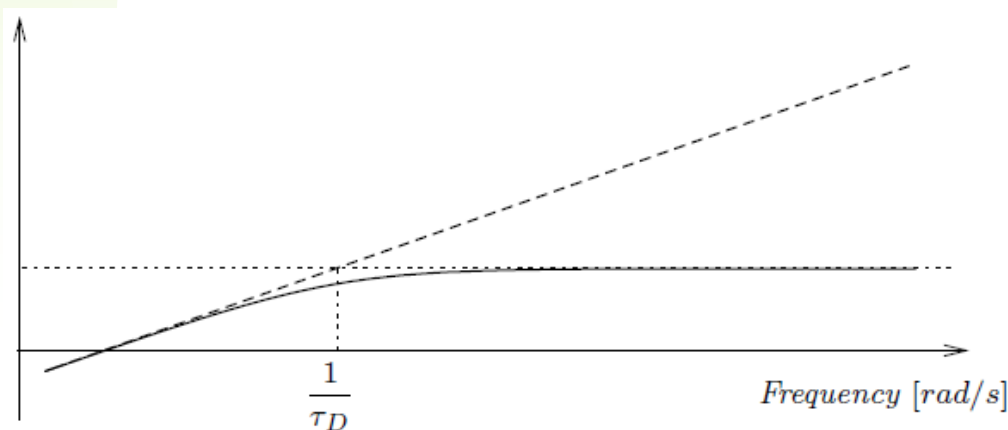


7.1.2 调节系统的控制规律

◆ 比例微分 (PD) 控制作用

微分控制反映误差的变化率，只有当误差随时间变化时，微分作用才会对系统起作用，而对无变化或缓慢变化的对象不起作用，因此微分控制在任何情况下不能单独地与被控对象串联使用，而只能构成PD或PID控制。

另外，微分控制有物理实现的问题和放大噪声信号的缺点。



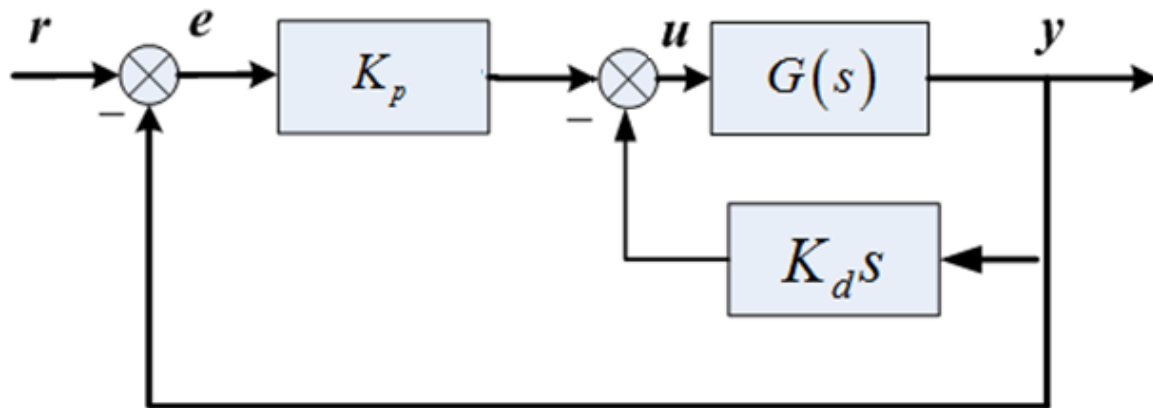
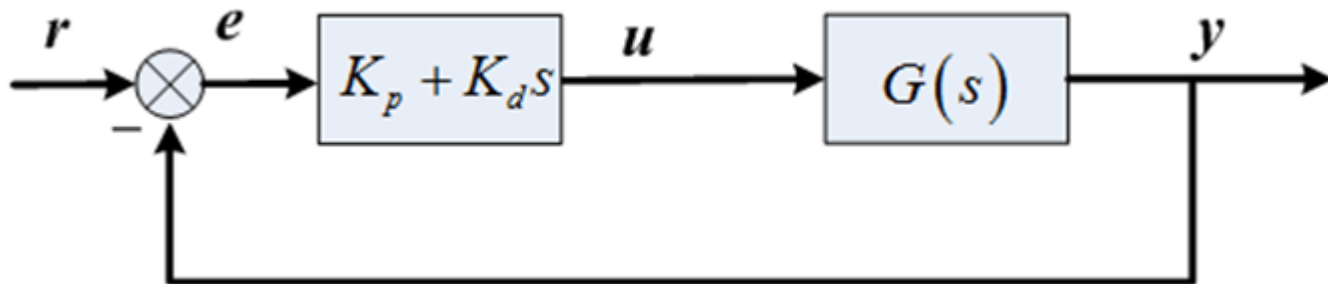
$$\frac{K_D s}{\tau_D s + 1}$$

保证可实现性，降低高频噪声的影响。



7.1.2 调节系统的控制规律

◆ 比例微分 (PD) 控制作用



$r=\text{const}$ 时，两种结构等价。下面结构的优点是避免控制作用 u 有大的波动。



7.1.2 调节系统的控制规律

◆ 积分 (I) 控制作用

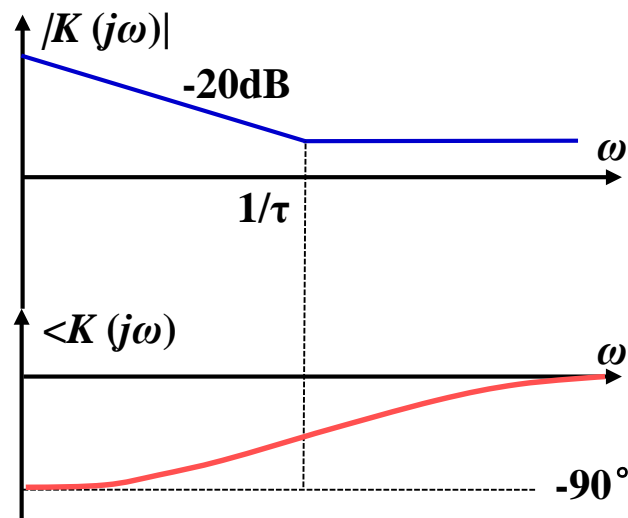
积分控制的传递函数

$$G_c(s) = \frac{K_I}{s}$$

PI控制器的传递函数为

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} = \frac{K_P(s + K_I / K_P)}{s}$$

I 的作用是提高系统的型别，减小系统的静差，还可以降低系统的开环穿越频率，压低系统带宽。





7.1.2 调节系统的控制规律

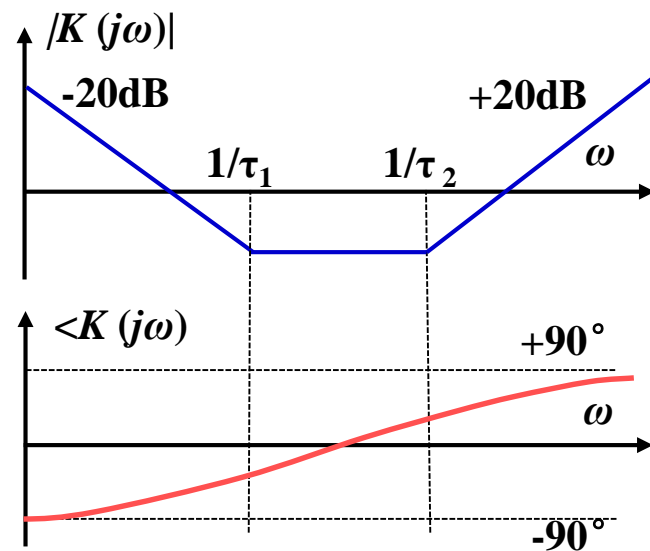
◆ 比例积分微分(PID)控制作用

PID控制器是比例、积分、微分三种控制作用的叠加，又称为比例-微分-积分校正，其传递函数可表示为

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

可改写为：

$$G_c(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$





7.1.2 调节系统的控制规律

◆ 比例积分微分(PID)控制作用

$$G_c(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

式中, $T_D = \frac{K_D}{K_P}$ 称为PID控制器的积分时间;

$T_I = \frac{K_P}{K_I}$ 称为PID控制器的微分时间。

实际工业中PID控制器的传递函数为

$$G'_c(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{1 + \tau_D s} \right)$$



7.1.2 调节系统的控制规律

◆ 比例积分微分(PID)控制作用

例： 对一个三阶对象模型

$$G_o(s) = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}$$

单采用比例控制，由MATLAB，可研究不同 K_p 值下闭环系统的单位阶跃响应曲线。

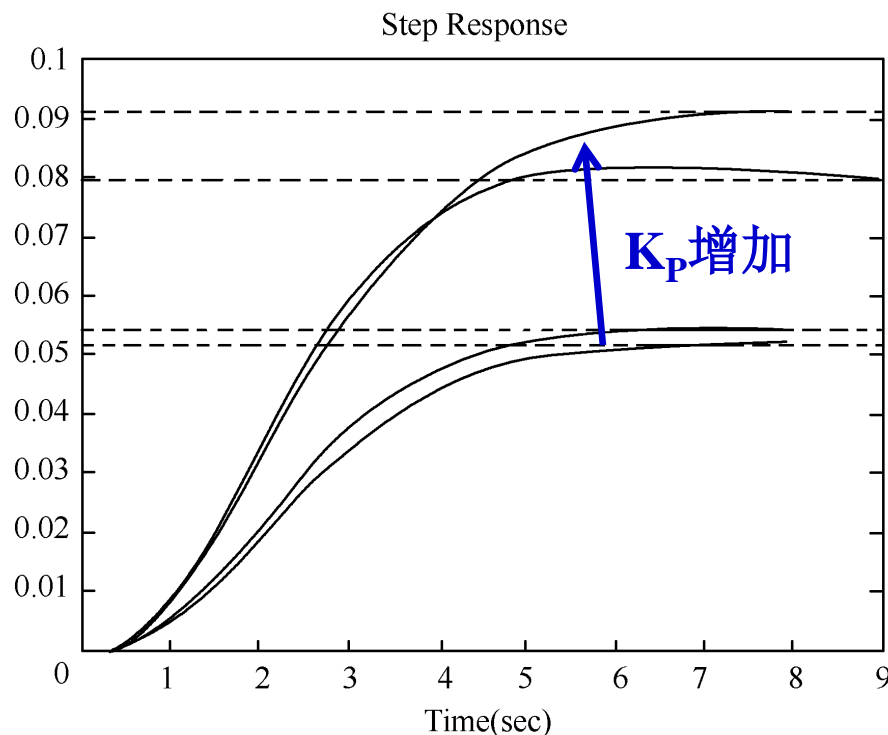


7.1.2 调节系统的控制规律

◆ 比例积分微分(PID)控制作用

$$G_o(s) = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}$$

P控制



随着 K_p 的值增大，系统响应速度也相应增快，但当 K_p 增大到一定值，闭环系统将趋于不稳定。

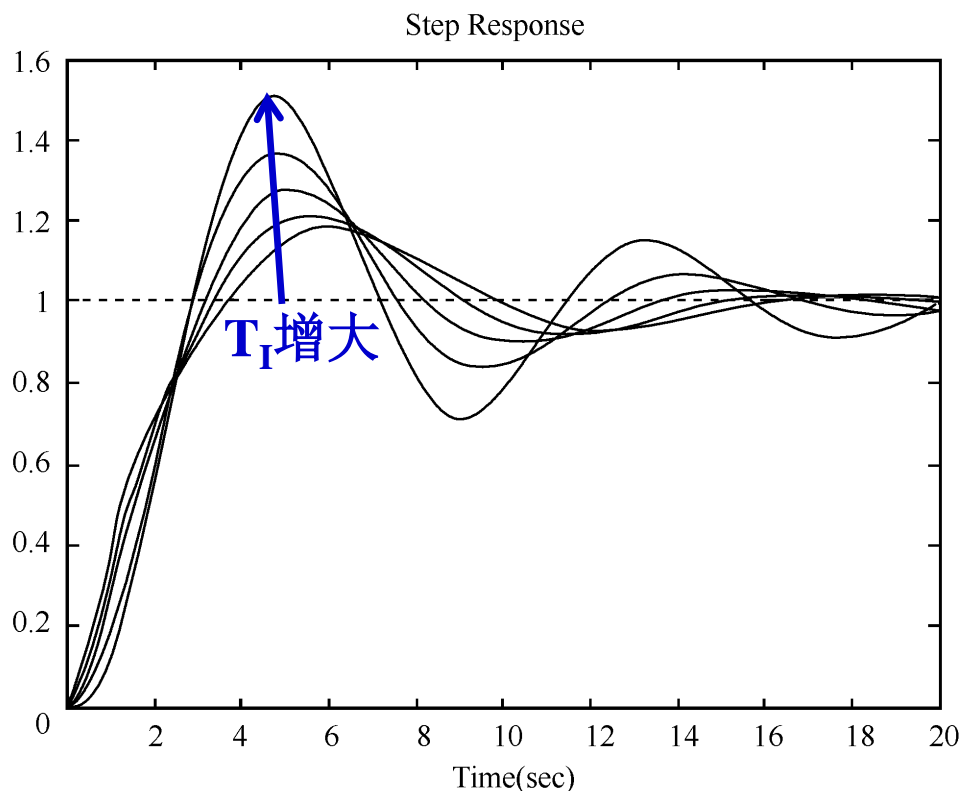


7.1.2 调节系统的控制规律

◆ 比例积分微分(PID)控制作用

$$G_o(s) = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}$$

PI控制



将 K_p 值固定, 采用, 不同 T_I 值下的闭环系统阶跃响应。随着 T_I 值增大, 系统的响应速度将增大, 系统的振荡也将加剧。

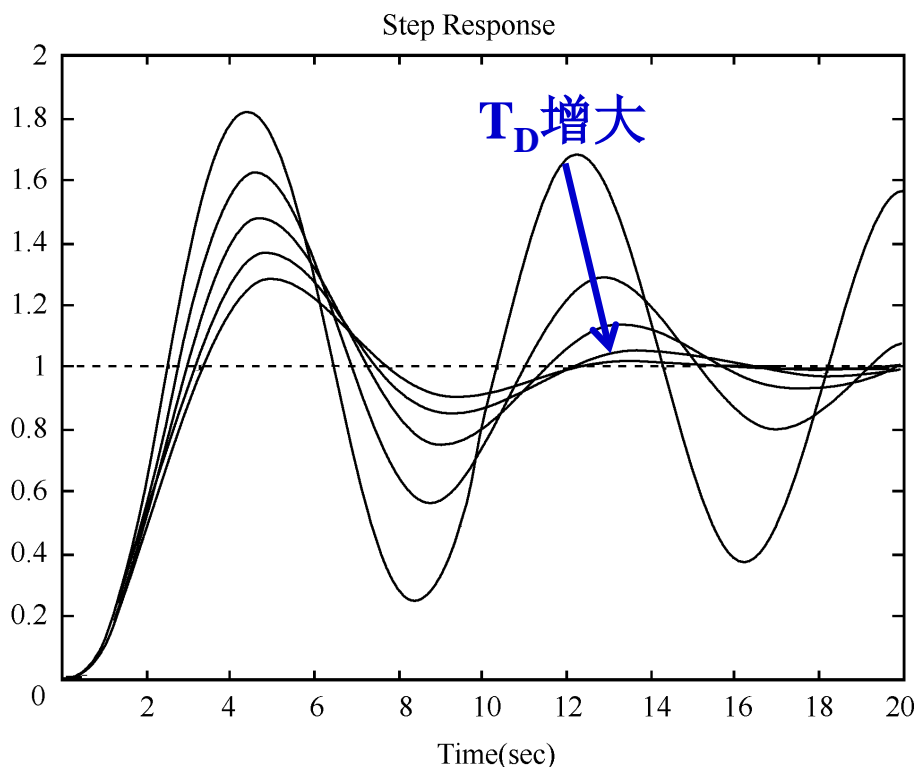


7.1.2 调节系统的控制规律

◆ 比例积分微分(PID)控制作用

$$G_o(s) = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}$$

PID控制



将 K_p 、 T_I 值固定 $K_p = 1$,
 $T_I = 1$, 研究 T_D 变化时
系统的单位阶跃响应。
随着 T_D 值增大, 系统
的响应速度将减低,
系统的振荡也将减弱。



Contents

A1

调节系统的特点及控制规律

A2

调节系统的类型

A3

PID系统的设计

A4

过程控制系统的设计



7.2 调节系统的类型

◆ 调节系统的类型

- 积分加一阶模型

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

- 一阶加时间滞后

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}$$

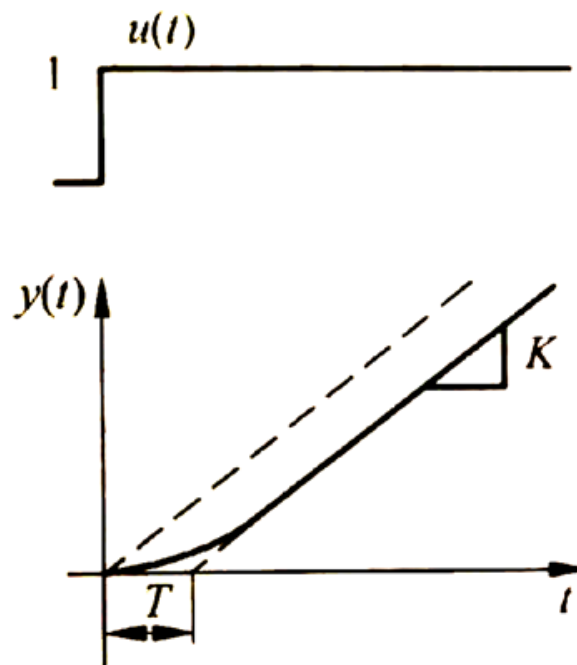
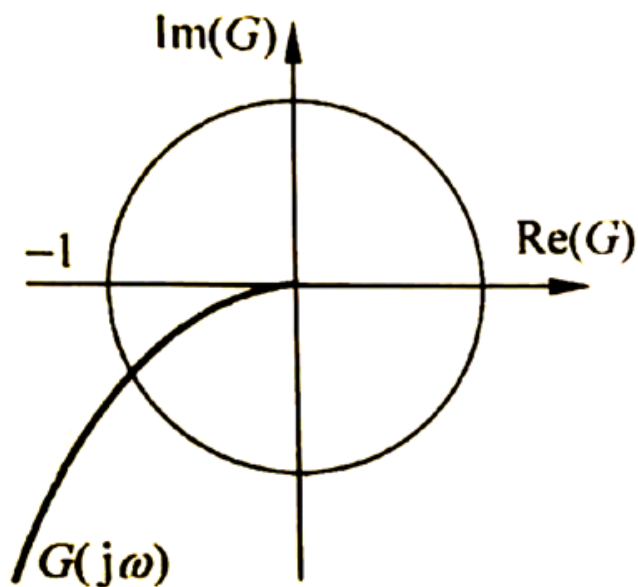
典型对象特性，并非对象的真实特性，主要是为了反映其设计特点。



7.2 调节系统的类型

◆ 调节系统的类型

- 积分加一阶模型 $G(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}$

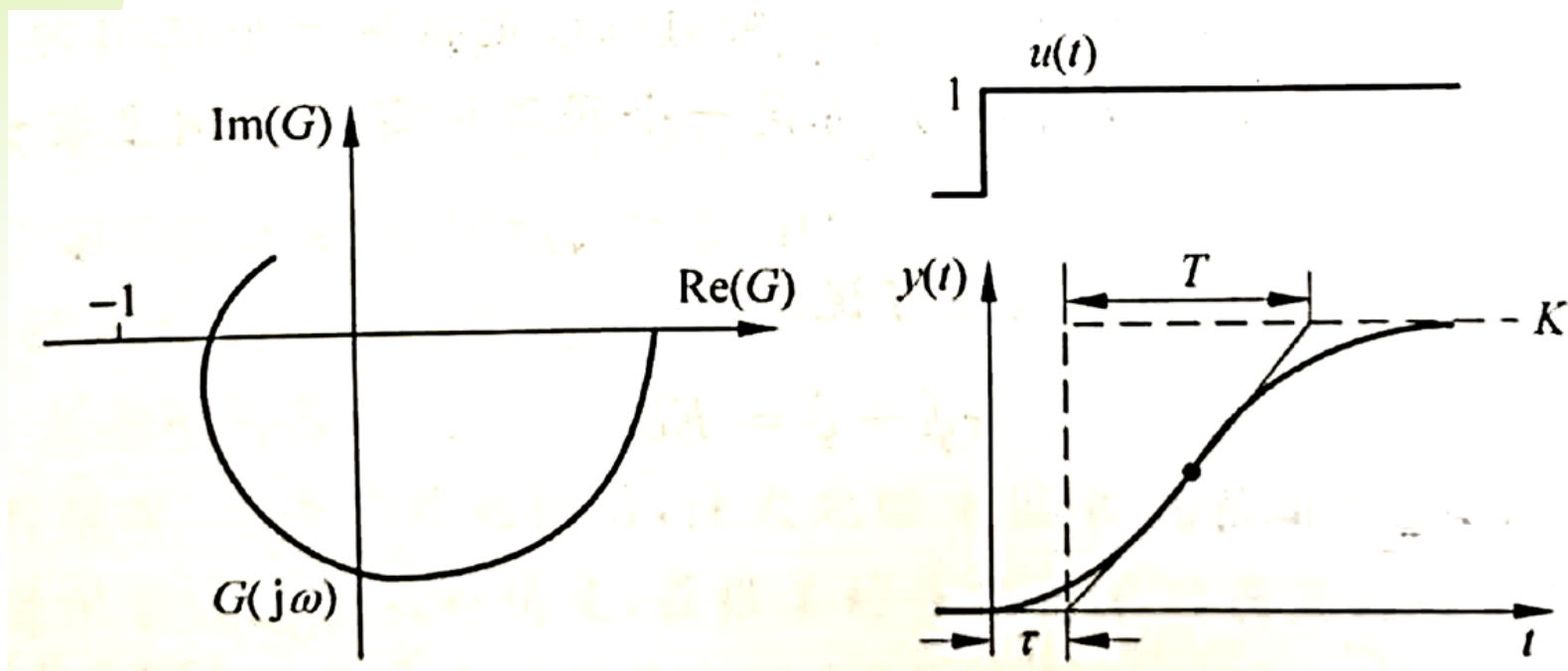




7.2 调节系统的类型

◆ 调节系统的类型

- 一阶加时间滞后 $G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}$



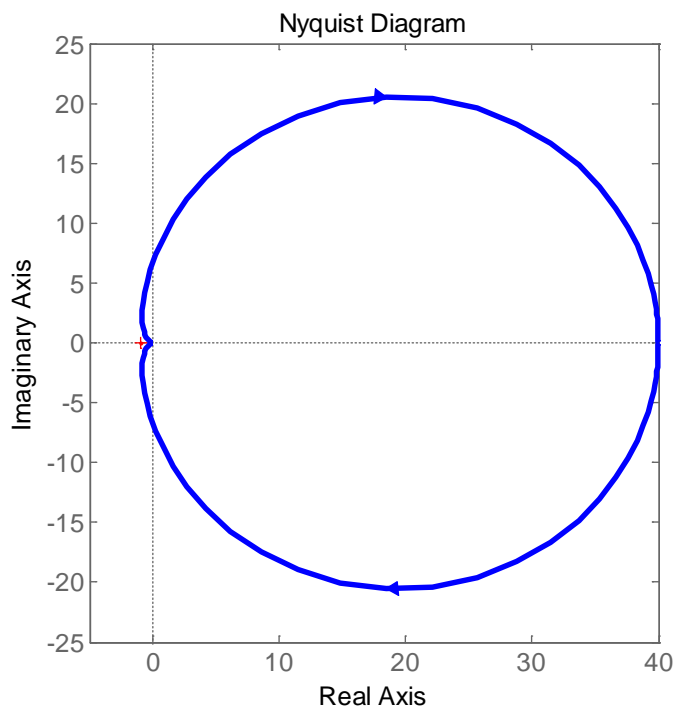


7.2 调节系统的类型

◆ 调节系统的类型

典型对象特性，并非对象的真实特性，主要是为了反映其设计特点。

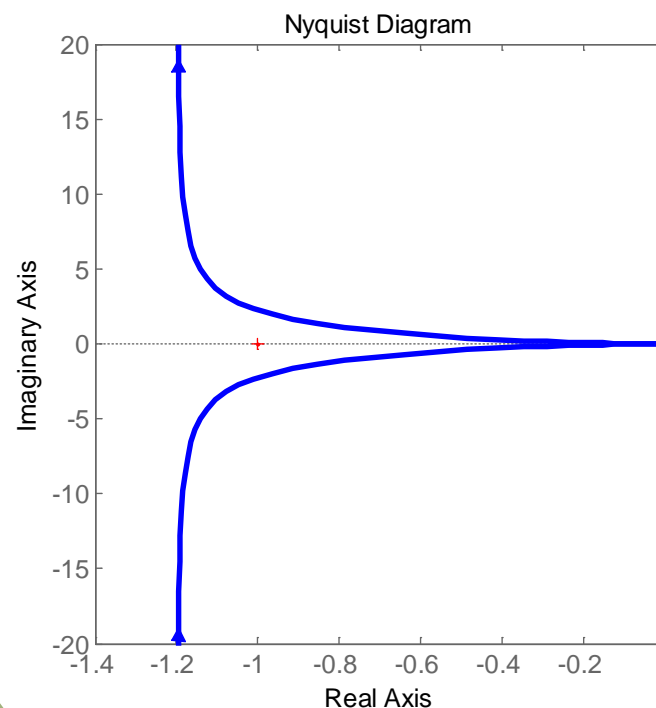
$$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}, \quad T_1 \gg T_2$$



$$K = 40$$

$$T_1 = 1$$

$$T_2 = 0.03$$



$$G_1(s) = \frac{K / T_1}{s(T_2s + 1)}$$

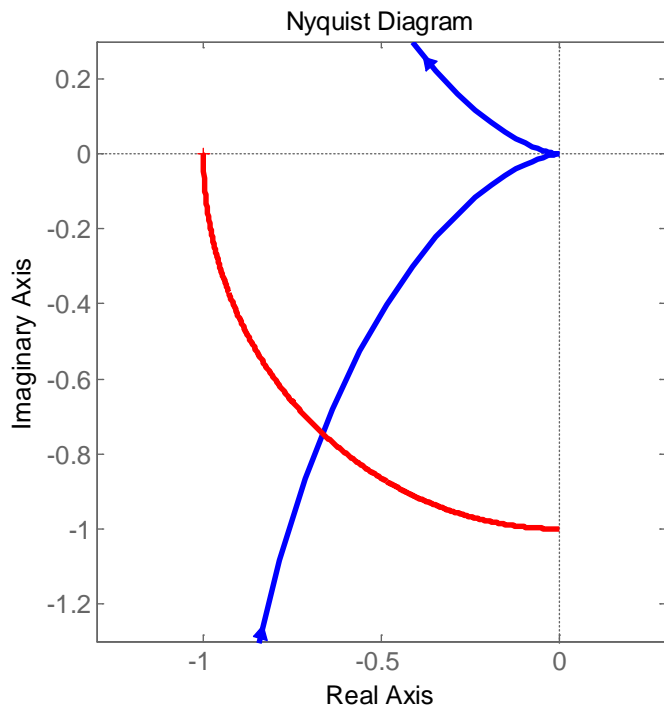


7.2 调节系统的类型

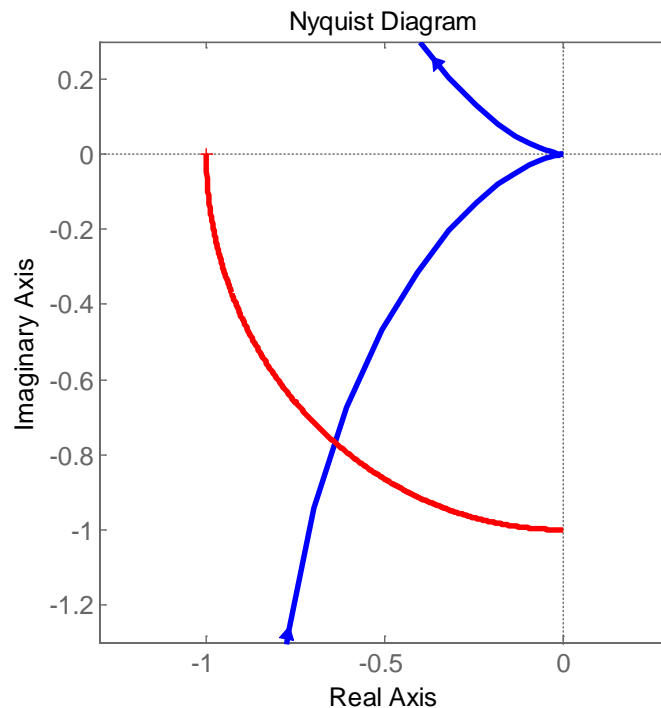
◆ 调节系统的类型

典型对象特性，并非对象的真实特性，主要是为了反映其设计特点。

$$G_1(s) = \frac{K / T_1}{s(T_2 s + 1)}$$



$$G(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, T_1 \gg T_2$$





Contents

A1

调节系统的特点及控制规律

A2

调节系统的类型

A3

PID系统的设计

A4

过程控制系统的设计



7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

- PD控制，调节系统的阻尼系数
- PI控制，考虑相角裕度，提高系统精度



7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

- 例1：航向保持时，船舶自动驾驶仪设计。

设计需要考虑的问题：

(1) 被控对象类型

(2) 控制问题是什么？调节阻尼or提高精度





7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

- 例1：航向保持时，船舶自动驾驶仪设计。

被控对象：

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

航向保持：是指在风、浪和洋流等环境下将船保持在给定的航向下。



7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

- 例1：航向保持时，船舶自动驾驶仪设计。

对象：
$$G(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)}$$

PD控制：
$$D(s) = K_p + K_d s$$

特征方程：
$$\tau s^2 + (1 + KK_d)s + KK_p = 0$$



$$K_p \rightarrow \omega_n, \quad K_d \rightarrow \xi$$



7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

- 例1：航向保持时，船舶自动驾驶仪设计。

特征方程： $\tau s^2 + (1 + KK_d)s + KK_p = 0$



$$K_P \rightarrow \omega_n, \quad K_D \rightarrow \xi$$

比例项 K_P ：决定了系统的固有频率，即响应速度；

微分项 K_D ：决定了系统的阻尼系数。



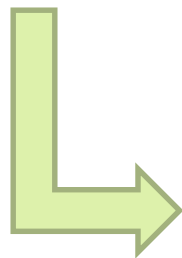
7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

- 例1：航向保持时，船舶自动驾驶仪设计。

风、浪等环境影响：随机扰动

- (1) 随机扰动——频谱较高，按噪声处理；
- (2) 随机扰动均值——平均力矩扰动，应该在增加积分控制提高精度，减小扰动响应。



采用PID控制



7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

- 例1：航向保持时，船舶自动驾驶仪设计。

$$\tau s^2 + (1 + KK_d)s + KK_p = 0$$

积分控制：应比较弱，不影响动态设计结果。

$$\tau = 16s, K = 0.07s^{-1}$$

$$\zeta = 0.85$$

$$K_P = 1, K_D = 11.43 \Rightarrow -0.0563 \pm j0.0348$$

$$K_I = 0.005 \Rightarrow \begin{cases} -0.0058 \\ -0.0533 \pm j0.0301 \end{cases}$$



7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

● 例2：火炮稳定器

设计需要考虑的问题：

- (1) 被控对象类型
- (2) 控制问题是什么？（调节阻尼, 提高精度）

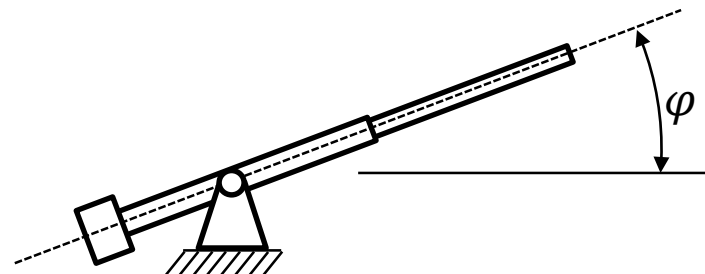




7.3 PID系统的设计

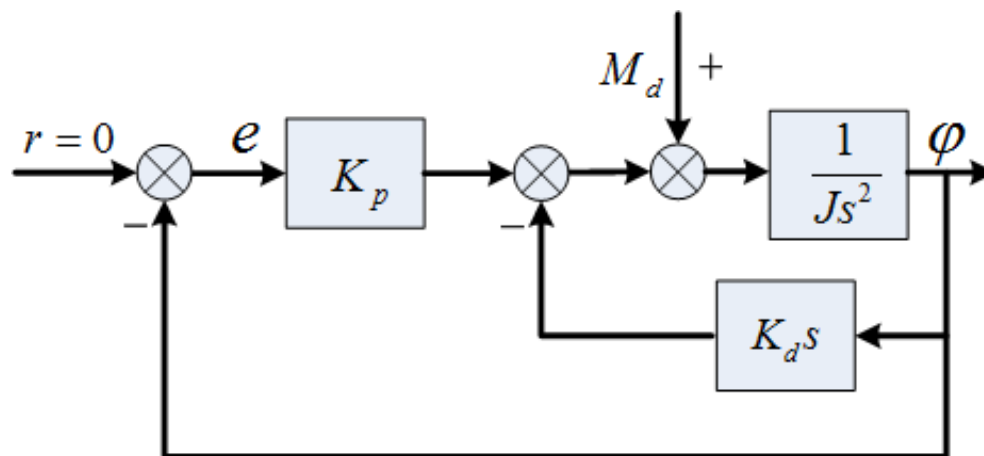
◆ PID系统的设计

● 例2：火炮稳定器



传感器：角度陀螺仪——测量失调角 $r - \varphi$

速率陀螺仪进行微分反馈

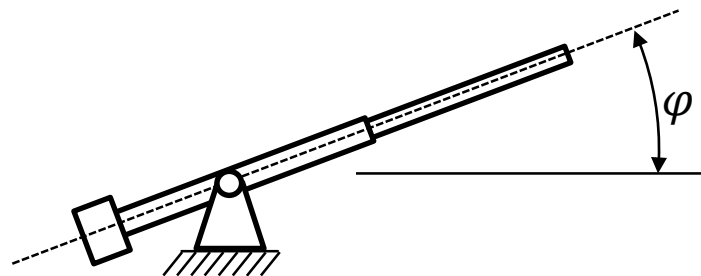




7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

● 例2：火炮稳定器

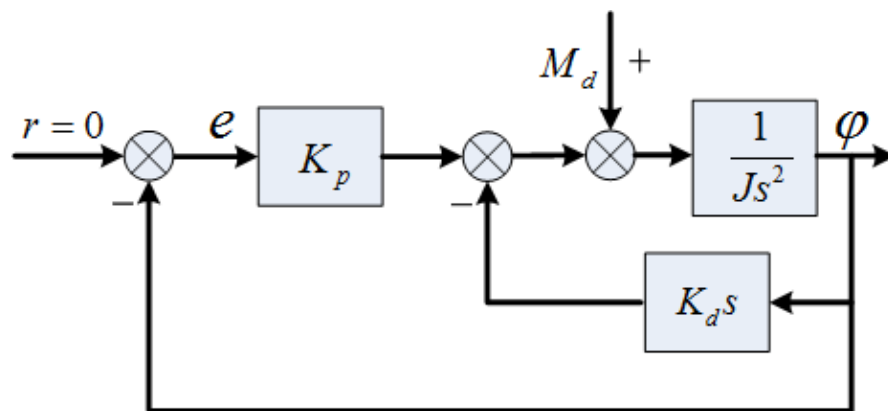


M_d : 外力矩。包括火炮的耳轴与轴承间的摩擦力矩、车体振动时，因火炮重心偏离耳轴轴线而引起的惯性力矩。

$$\frac{\Phi(s)}{M_d(s)} = \frac{1}{Js^2 + K_d s + K_p}$$

↓

$$\xi = 1$$

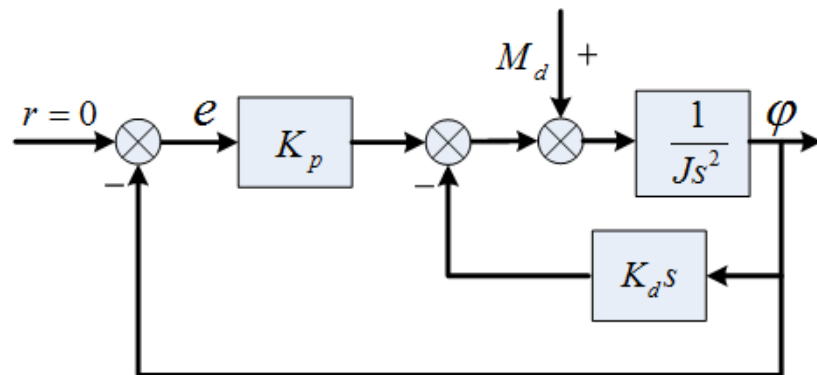




7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

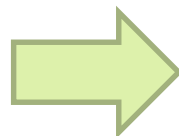
● 例2：火炮稳定器



若车体振动幅度 $\theta_{\max}=6^\circ$ ，振动周期 $T=1.5\text{s}$ ，即 $\omega_k=4.2\text{rad/s}$ ，设此时外力矩的幅值 $M_{\max}=38\text{kg}\cdot\text{m}$ ，允许炮身强迫振荡的幅值为 $\varphi_{\max}=0.001\text{rad}$

$$\frac{\Phi(s)}{M_d(s)} = \frac{1}{Js^2 + K_d s + K_p}$$

$$\xi = 1$$



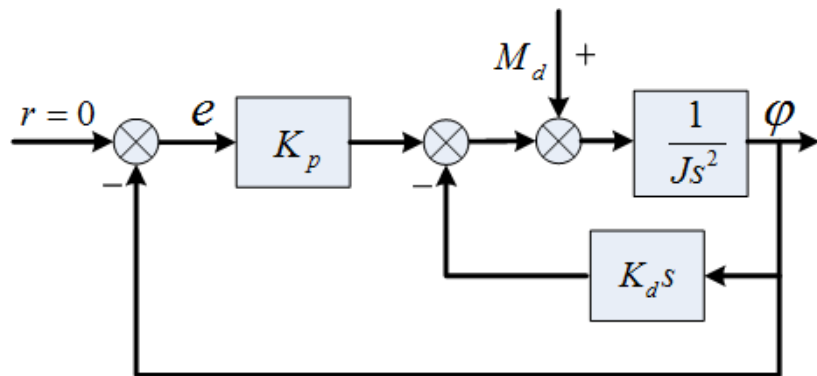
$$K_d = 2\sqrt{K_p J}$$



7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

● 例2：火炮稳定器



若车体振动幅度 $\theta_{\max}=6^\circ$ ，振动周期 $T=1.5\text{s}$ ，即 $\omega_k=4.2\text{rad/s}$ ，设此时外力矩的幅值 $M_{\max}=38\text{kg}\cdot\text{m}$ ，允许炮身强迫振荡的幅值为 $\varphi_{\max}=0.001\text{rad}$

$$\frac{\varphi_{\max}}{M_{\max}} = \left| \frac{1}{Js^2 + K_d s + K_p} \right|_{s=j\omega_k} = \frac{1}{J\omega_k^2 + K_p} \leq 0.001\text{rad}$$



$$K_p = 32000\text{kg}\cdot\text{m/rad}$$

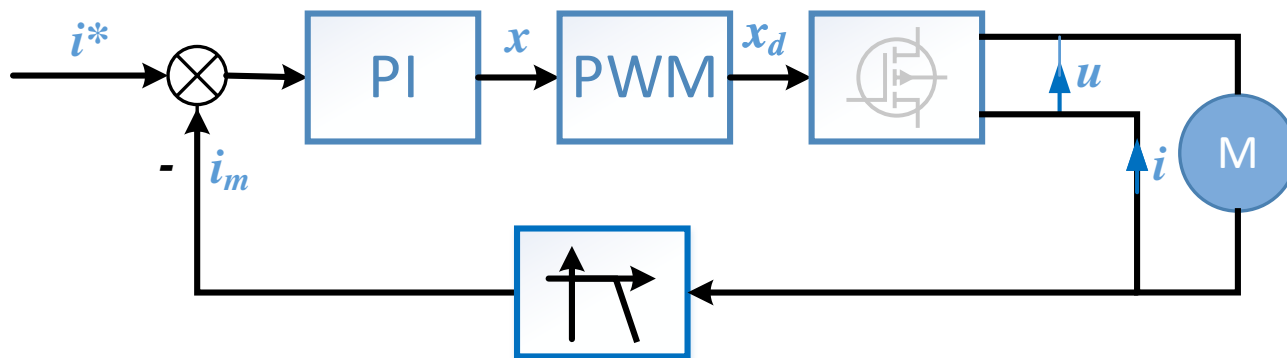
$$\text{隔离度 } \theta_{\max}/\varphi_{\max} = 100 = 40\text{dB}$$



7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定 (p131例8-3)



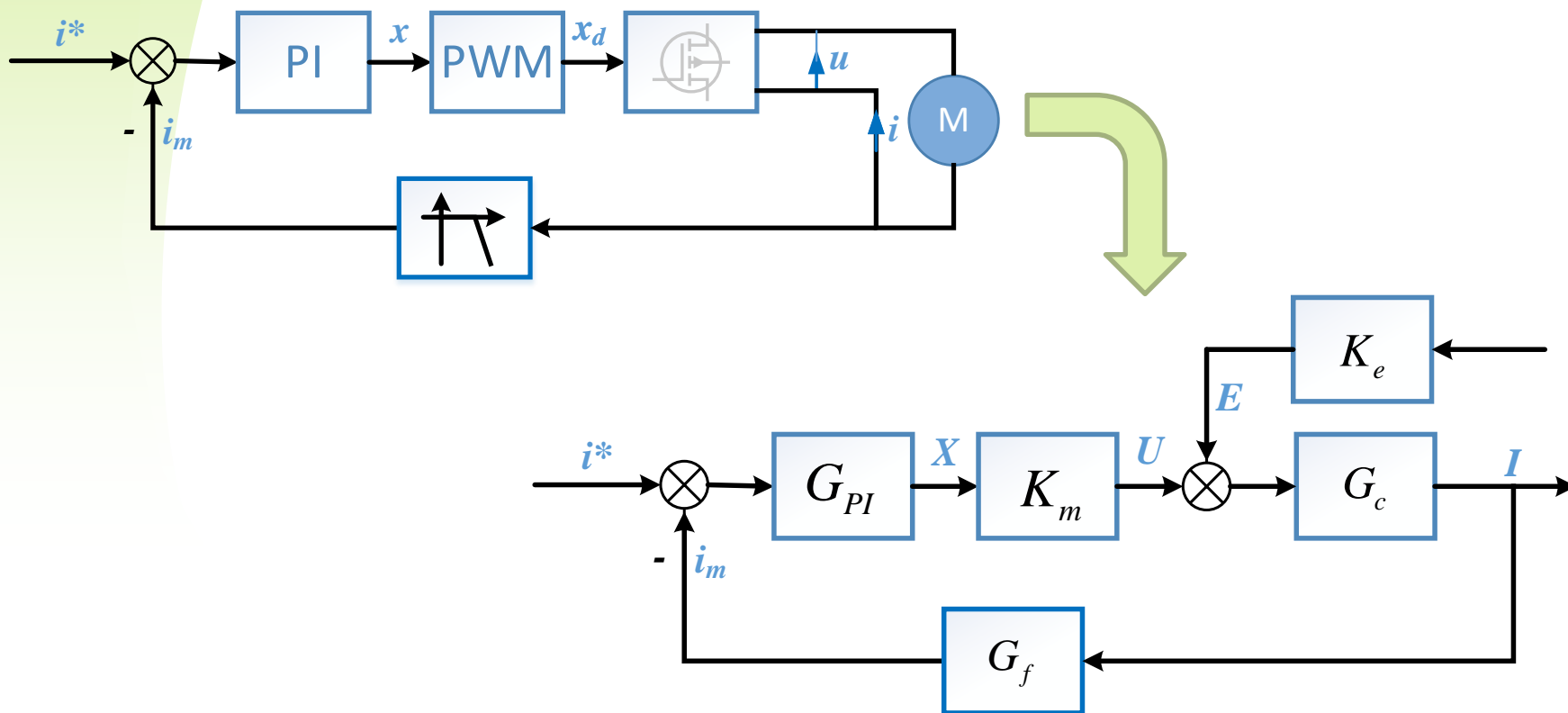
电流控制回路包括控制器、脉宽调制器(PWM)、MOSFET电路、直流电机、电流传感器和低通滤波器。



7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定 (p131例8-3)

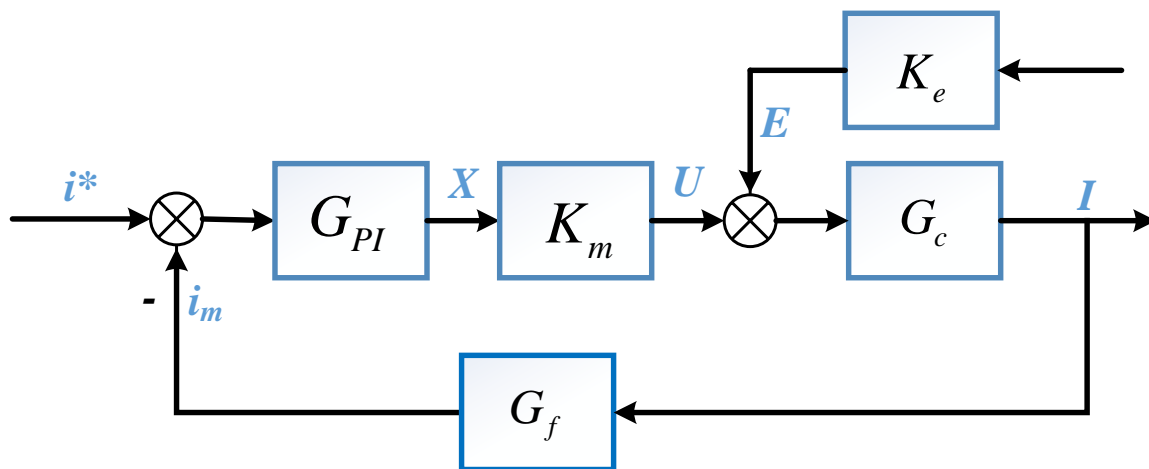




7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定 (p131例8-3)



设计需要考虑的问题：

- (1) 被控对象类型 (2) 控制问题是什么？



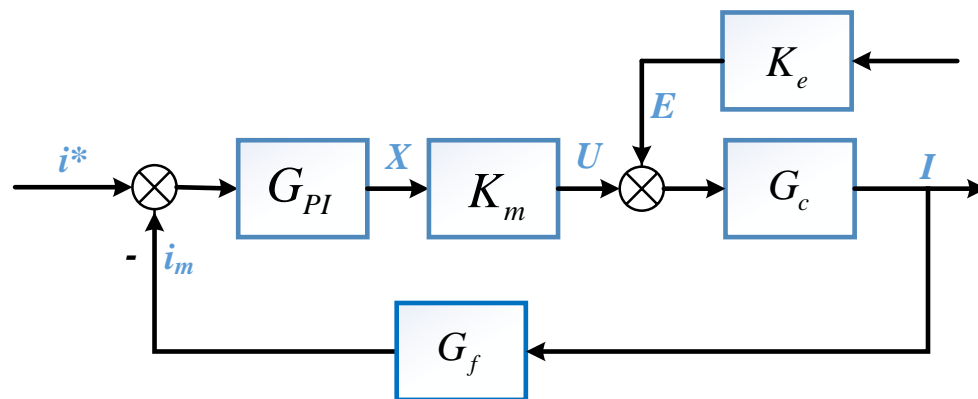
7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定 (p131例8-3)

主要控制问题：

- 反电动势造成的静差
- 脉宽调制带来的高频噪声
- 理想的阶跃响应特性



克服扰动消除静差、压低带宽抑制噪声、同时保证稳定裕度
(压低闭环谐振峰，减小超调量)



7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定 (p131例8-3)

(1) 被控对象简化

电枢等效传递函数：

$$G_e(s) = \frac{1}{L_a s + R_e}$$

低通滤波器传递函数：

$$G_f(s) = \frac{1}{(T_f s + 1)^2}$$

脉宽调制器及MOSFET电路： $G_2(s) = K_m$



7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定 (p131例8-3)

(1) 被控对象简化

$$G(s) = K_m G_e G_f = \frac{K_m}{L_a s + R_e} \frac{1}{(T_f s + 1)^2}$$

$$T_f = 20\mu s, \quad L_a / R_a = 3.5ms$$



7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定 (p131例8-3)

(1) 被控对象简化

$$G(s) = \frac{K_m}{L_a s + R_e} \frac{1}{(T_f s + 1)^2}$$
$$\approx \frac{K_g}{s(T_g s + 1)}$$

$$T_g = 2T_f = 40\mu s, \quad K_g = K_m / R_e = 13 \text{ rad} / s$$



7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

- 例3：电流回路整定 (p131例8-3)

(2) 控制器设计

保证精度：PI控制器——保证相角裕度

$$K(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$



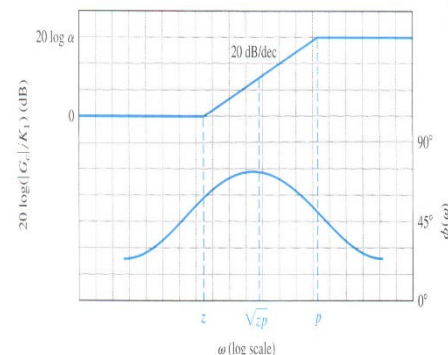
7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

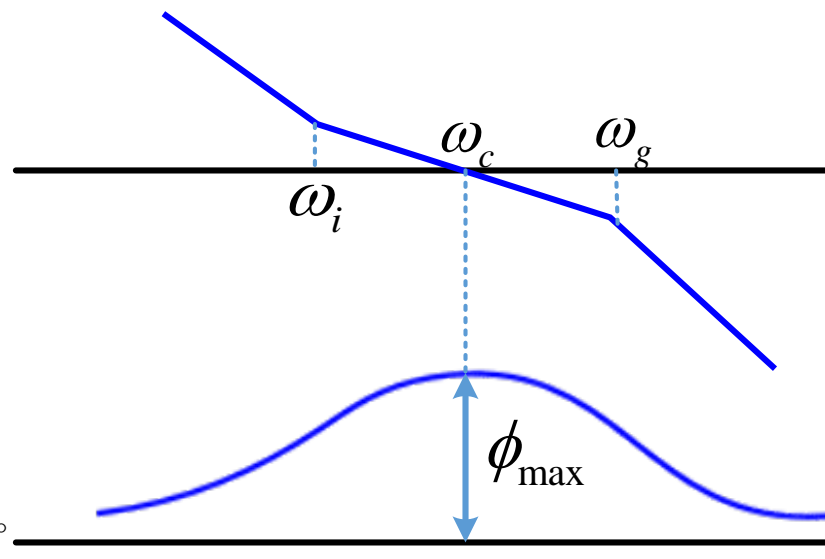
● 例3：电流回路整定 (p131例8-3)

(2) 控制器设计

保证精度：PI控制器——保证相角裕度



对称转折频率可获得最大相角裕度



$$\frac{\omega_g}{\omega_c} = \frac{\omega_c}{\omega_i}$$

$$\alpha = \frac{\omega_g}{\omega_i}$$

$$\omega_c = \frac{\omega_g}{\sqrt{\alpha}}$$



7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

$$\alpha = \frac{\omega_g}{\omega_i}$$

$$\frac{\omega_g}{\omega_c} = \frac{\omega_c}{\omega_i}$$

● 例3：电流回路整定 (p131例8-3)

(2) 控制器设计

保证精度：PI控制器——保证相角裕度

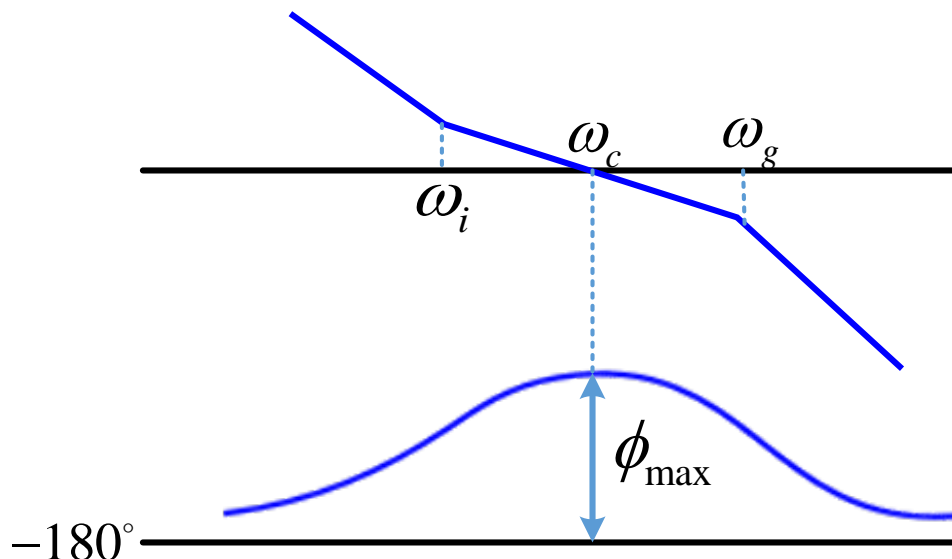
对称转折频率可获得最大相角裕度



$$\omega_c = \frac{\omega_g}{\sqrt{\alpha}}$$

$$\omega_i = \frac{\omega_g}{\alpha}$$

$$K_p = \frac{\omega_c}{K_g}$$





7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定 (p131例8-3)

(2) 控制器

保证精度：PI控制器——保证相角裕度

对称转折频率可获得最大相角裕度

$$\begin{aligned} \omega_i &= \frac{1}{T_i} & G(s) &= \frac{K_g \omega_g}{s(s + \omega_g)} \\ \omega_g &= \frac{1}{T_g} & K(s) &= K_p \left(1 + \frac{\omega_i}{s} \right) \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\omega_c = \frac{\omega_g}{\sqrt{\alpha}}} \quad \boxed{\omega_i = \frac{\omega_g}{\alpha}} \quad \boxed{K_p = \frac{\omega_c}{K_g}}$$

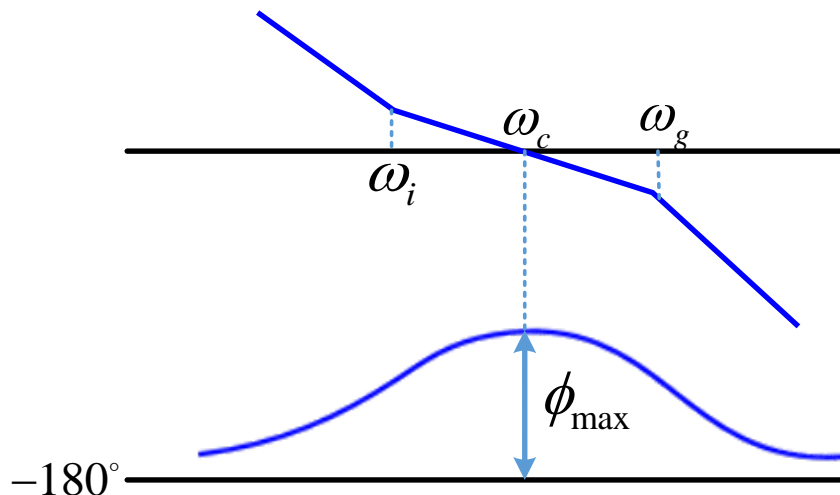


7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定 (p131例8-3)

(2) 控制器



$$G(s) = \frac{K_g \omega_g}{s(s + \omega_g)} \quad K(s) = K_p \left(1 + \frac{\omega_i}{s} \right)$$

$$\alpha = \left(\frac{1 + \sin \phi_m}{\cos \phi_m} \right)^2$$



$$T_i = \frac{1}{\omega_i} = \frac{\alpha}{\omega_g}$$

$$\omega_c = \frac{\omega_g}{\sqrt{\alpha}}$$



$$K_p = \frac{\omega_c}{K_g}$$



7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定 (p131例8-3)

(2) 控制器

$$G(s) = \frac{K_g \omega_g}{s(s + \omega_g)} \quad K(s) = K_p \left(1 + \frac{\omega_i}{s} \right)$$

$$M_p \Rightarrow \phi_m \Rightarrow \alpha \Rightarrow \left. \begin{matrix} T_i (\omega_i) \\ \omega_g \end{matrix} \right\} \Rightarrow \left. \begin{matrix} \omega_c \\ K_g \end{matrix} \right\} \Rightarrow K_p$$

给定 $M_p=2.3\text{dB}$, $\phi_m=50^\circ \Rightarrow K_p=1.095$, $T_i=0.3\text{ms}$

$$\alpha = \left(\frac{1 + \sin \phi_m}{\cos \phi_m} \right)^2$$



$$T_i = \frac{1}{\omega_i} = \frac{\alpha}{\omega_g}$$

$$\omega_c = \frac{\omega_g}{\sqrt{\alpha}}$$



$$K_p = \frac{\omega_c}{K_g}$$



Thank You !