

自动控制实践B——2022年春季学期

第七章 调节系统的设计（1）

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

调节系统的特点及控制规律

2

调节系统的类型

3

PID系统的设计

4

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

调节系统的定义及特点

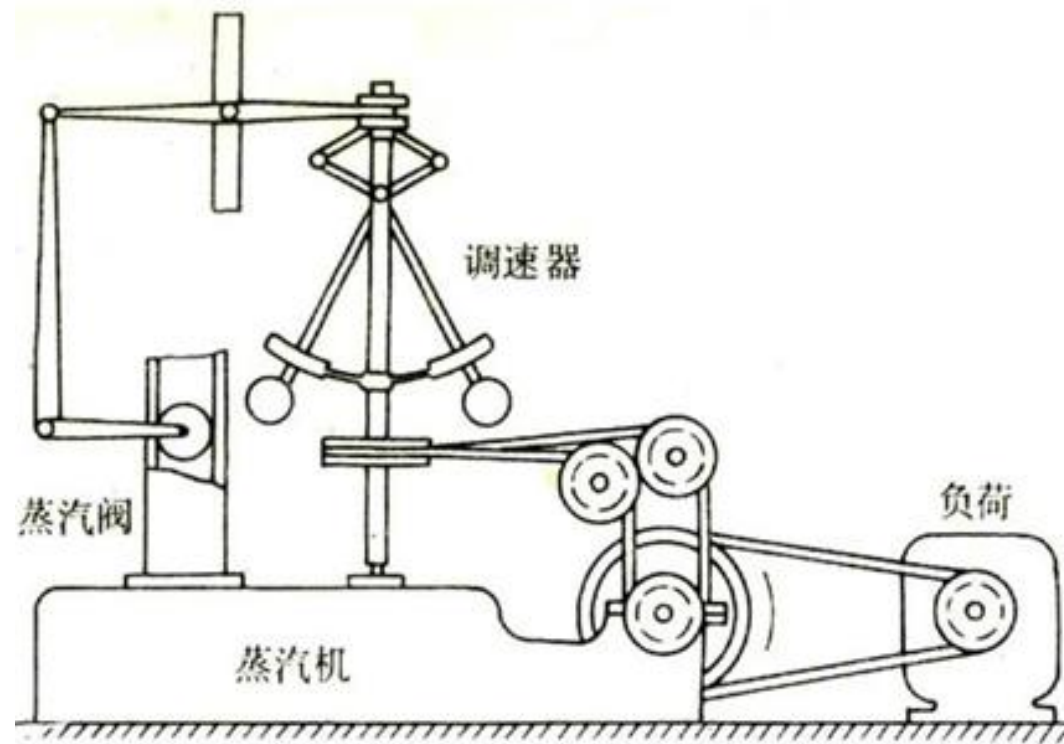
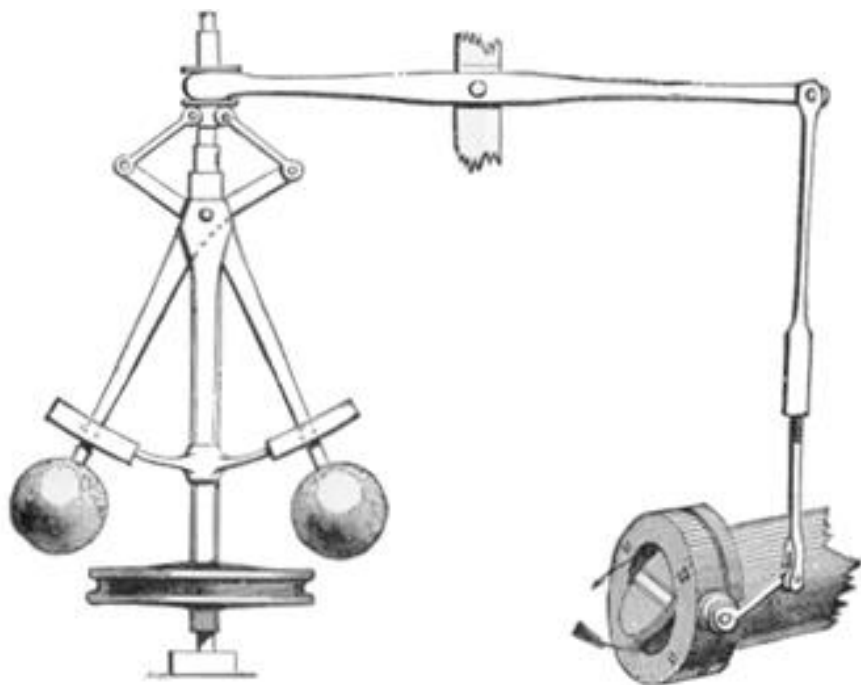
7.1.2

调节系统的控制规律



◆ 调节系统的定义

调节系统是将被调量（系统的输出量）保持在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

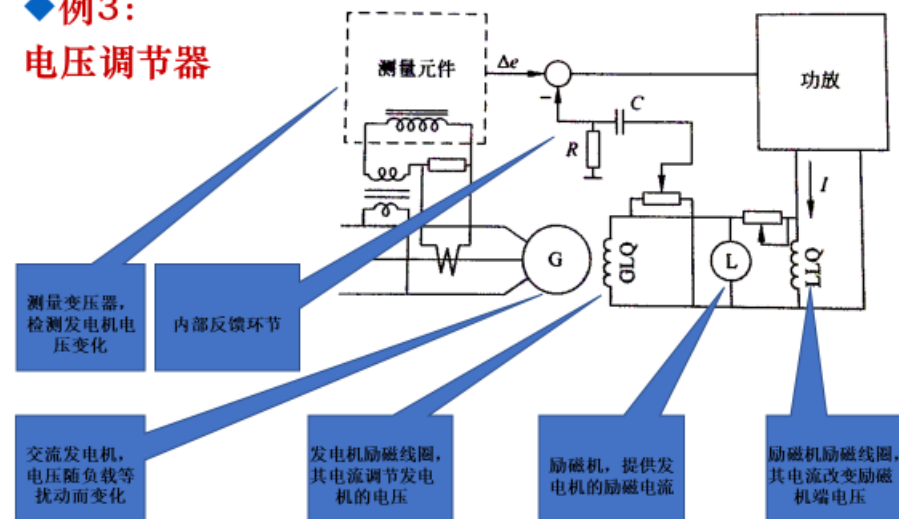
调节系统是将被调量（系统的输出量）保持在设定值上的控制系统。

- 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
-



4.3.3 带宽设计

◆ 例3： 电压调节器



◆ 调节系统的定义

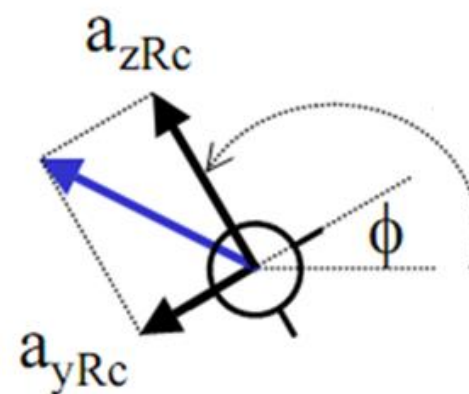
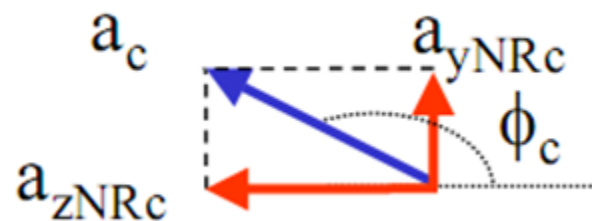
调节系统是将被调量（系统的输出量）保持在设定

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
-



BTT vs STT

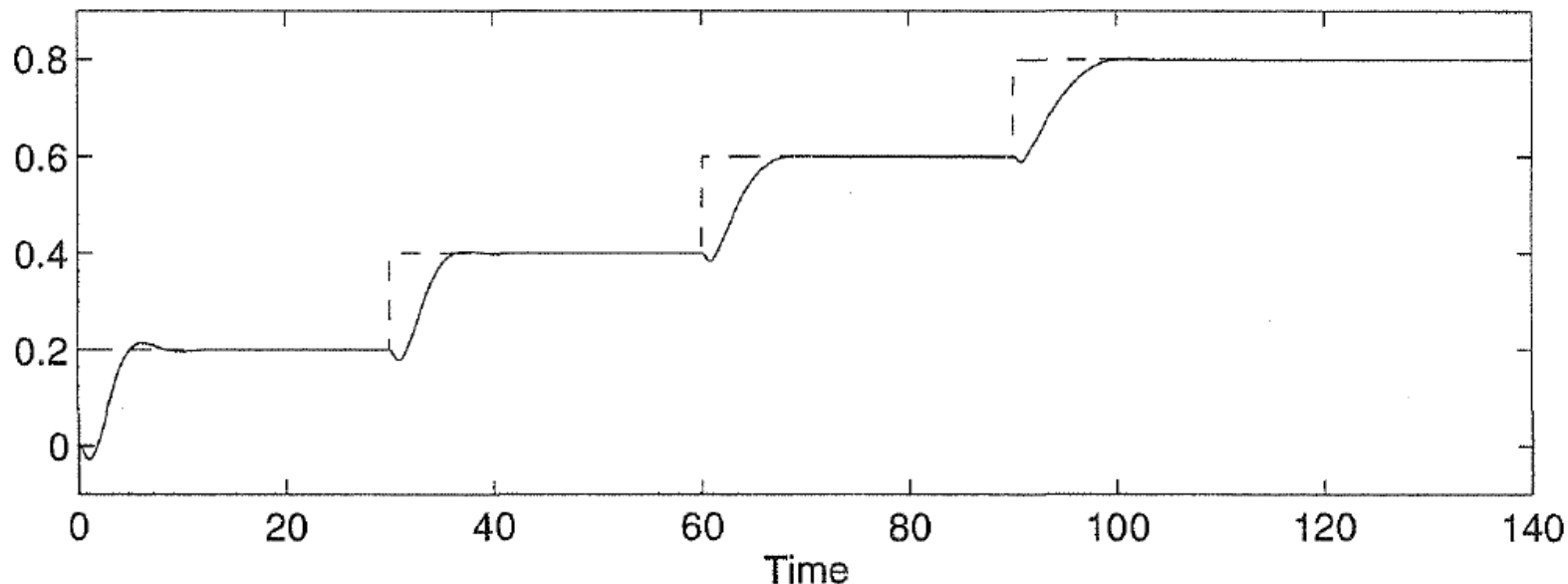


◆ 调节系统的特点

- 输出量保持某个设定值
- 无跟踪误差的要求
- 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。





7.1 调节系统的特点及控制规律



7.1.1

调节系统的定义及特点

7.1.2

调节系统的控制规律





◆ 调节系统的控制规律

基本控制规律包括比例（P）、积分（I）、比例微分（PD）、比例-积分（PI）和比例积分微分（PID）控制规律。





PID控制具有以下优点：

- (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敏感。**





7.1.2 调节系统的控制规律



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环节，确定连接方式以及它们的参数，以便使系统满足所要求的性能指标。





7.1.2 调节系统的控制规律

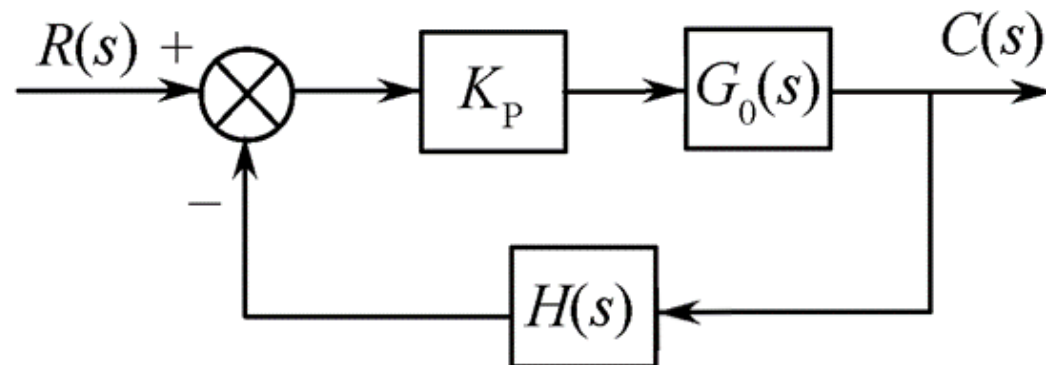


◆ 比例 (P) 控制作用

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



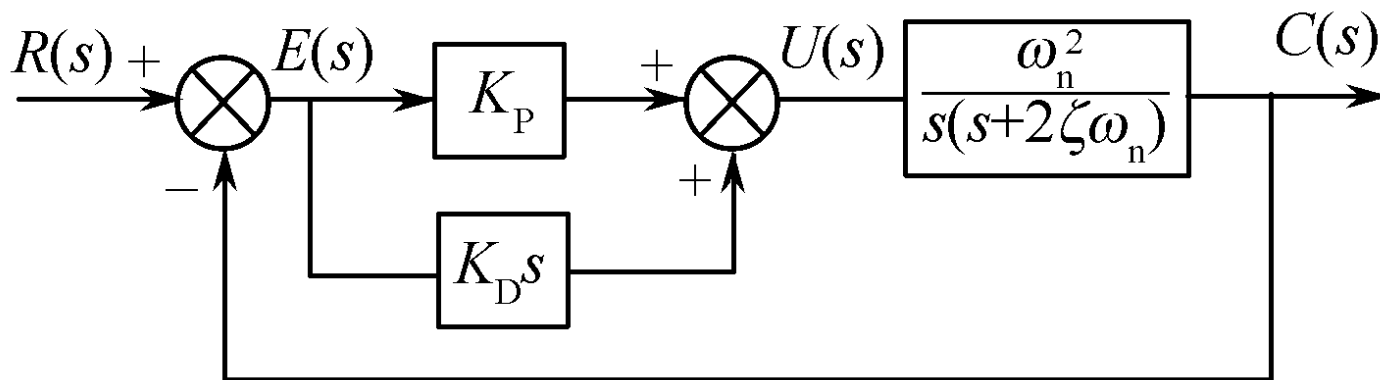
◆ 比例微分 (PD) 控制作用

比例微分控制的传递函数为

$$G_c(s) = K_P + K_D s \quad K_D \text{称为微分增益}$$

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

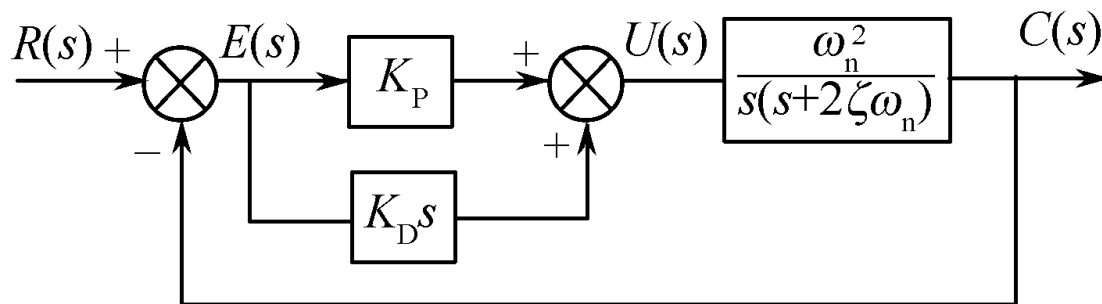
系统的开环传递函数:

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

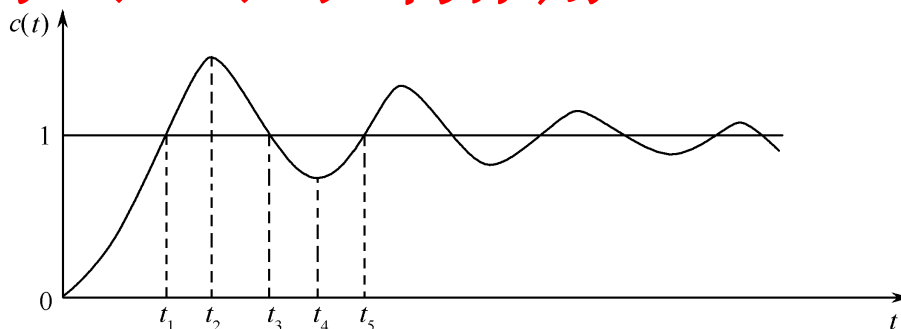
$$G_{CR}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

串联PD控制器后系统的闭环传递函数:

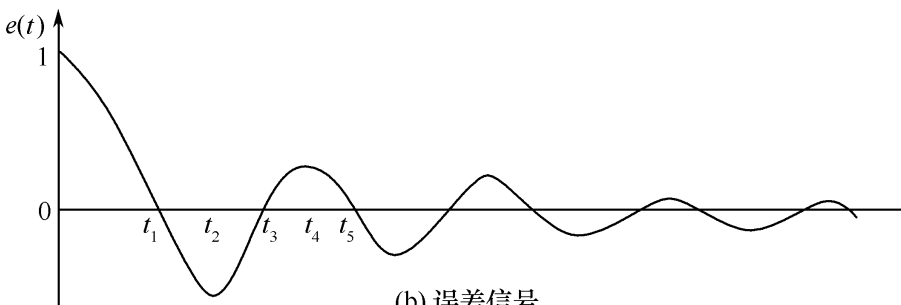
$$G_{CR}(s) = \frac{\omega_n^2(K_P + K_D s)}{s^2 + 2(\zeta + \frac{K_D \omega_n}{2})\omega_n s + K_P \omega_n^2}$$



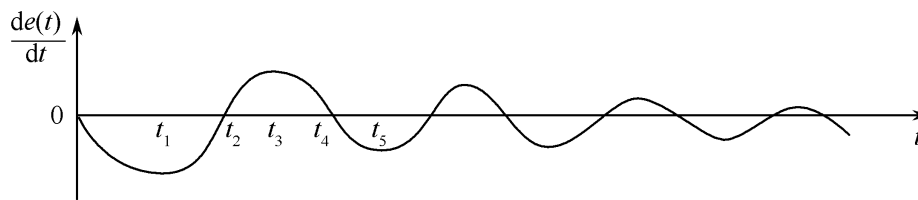
◆ 比例微分 (PD) 控制作用



(a) 单位阶跃响应



(b) 误差信号



(c) 误差导数信号

比例控制时，为保证稳态误差和上升时间指标，系统阶跃响应有相当大的超调量和较强烈的振荡。

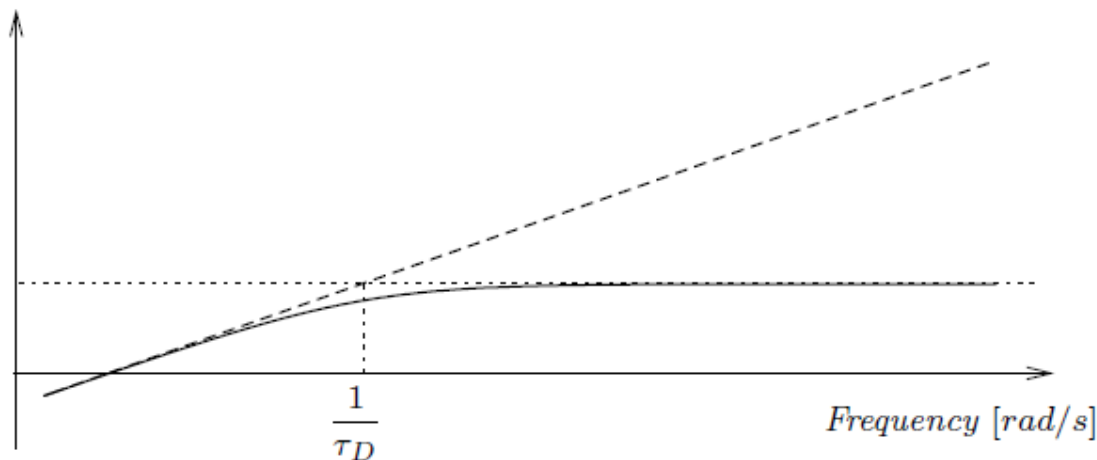
误差及其微分信号



◆ 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都不能单独地与被控对象串联使用，而只能构成PD或PID控制。

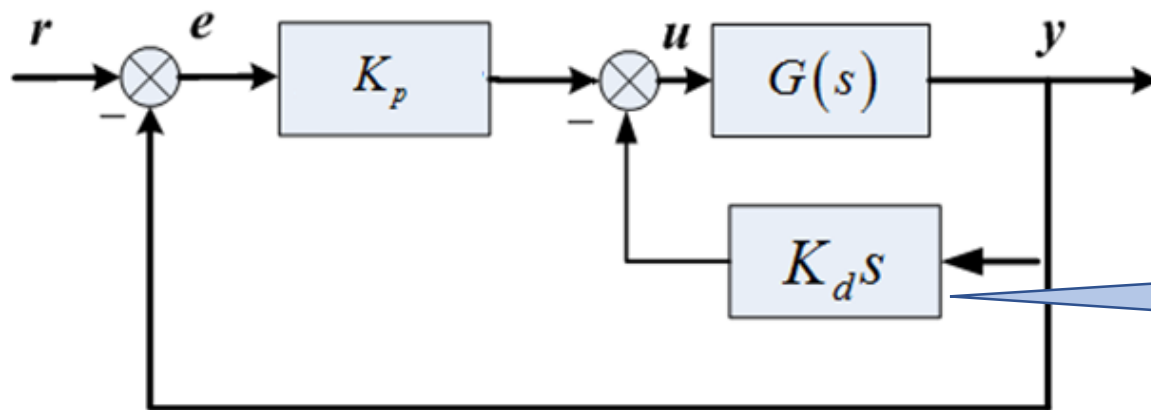
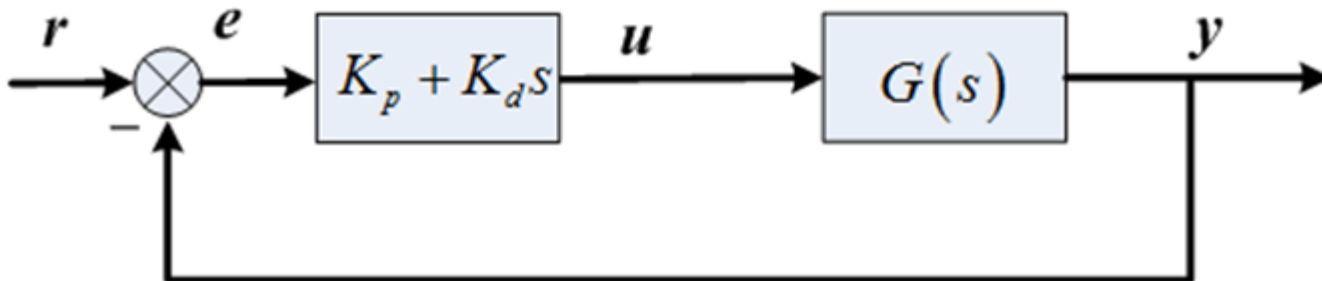
另外，微分控制有放大噪声信号的缺点。



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

保证可实现性，降低高频噪声的影响。

◆ 比例微分 (PD) 控制作用



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

测速发电机
速率陀螺

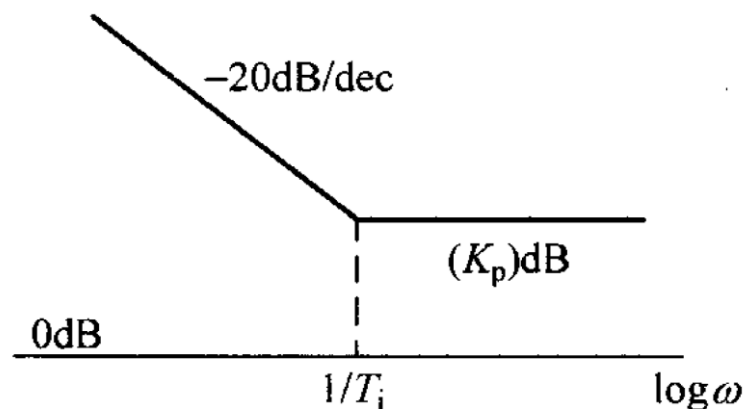


◆ 积分 (I) 控制作用

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



$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) = K_P \frac{T_i s + 1}{T_i s}$$



◆ 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：

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



◆ 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控制器的微分时间;

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

不参与PID控制参数的设计

实际工业中PID控制器的传递函数为

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{1 + \tau_D s} \right), \quad 0.1 T_D \leq \tau_D \leq 0.2 T_D$$



◆ 比例积分微分(PID)控制作用

例： 三阶对象模型

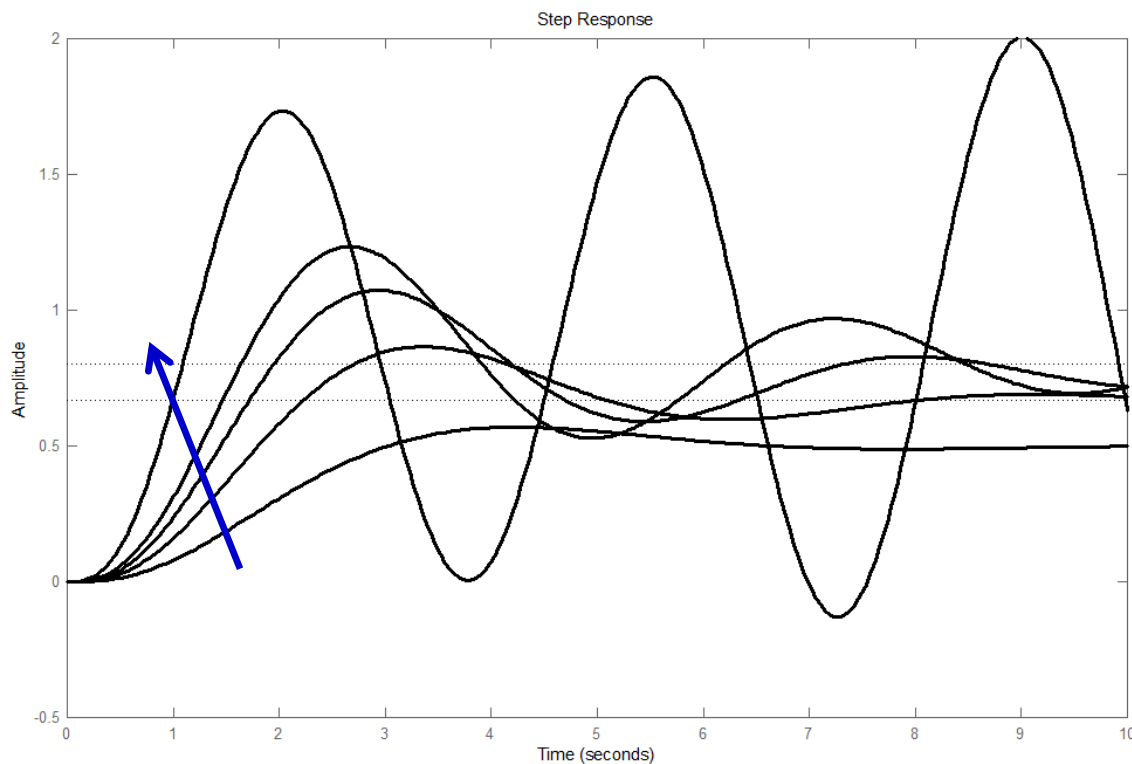
$$G_o(s) = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}$$

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



◆ 比例积分微分(PID)控制作用

例： 三阶对象模型



P控制

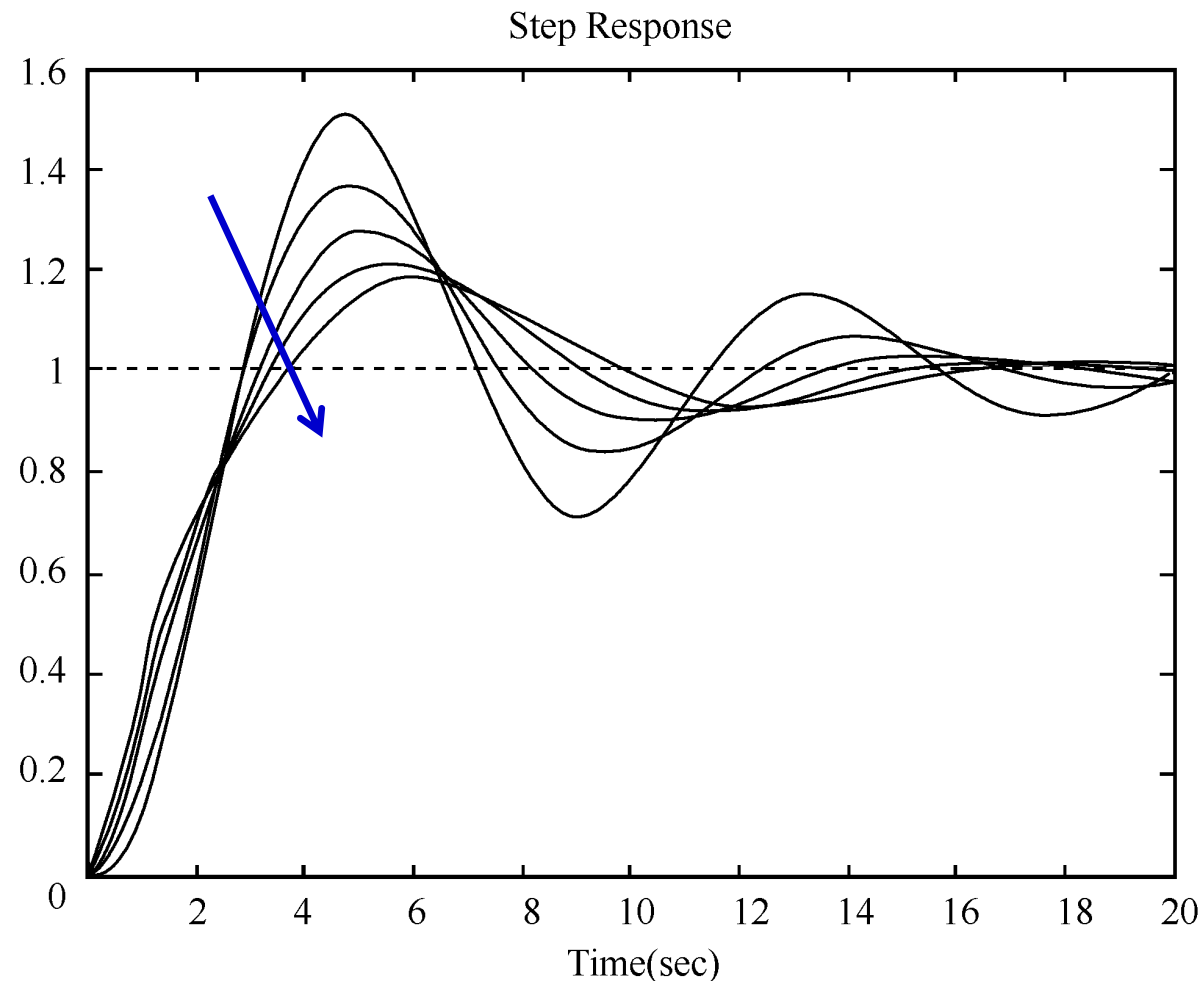
随着 K_p 值的增大，系统响应速度增快，稳态误差减小，振荡增大，当 K_p 增大到一定值时，闭环系统会失去稳定性。

◆ 比例积分微分(PID)控制作用

例： 三阶对象模型

将 K_p 值固定，采用PI控制，
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
振荡减弱。



◆ 比例积分微分(PID)控制作用

例： 三阶对象模型

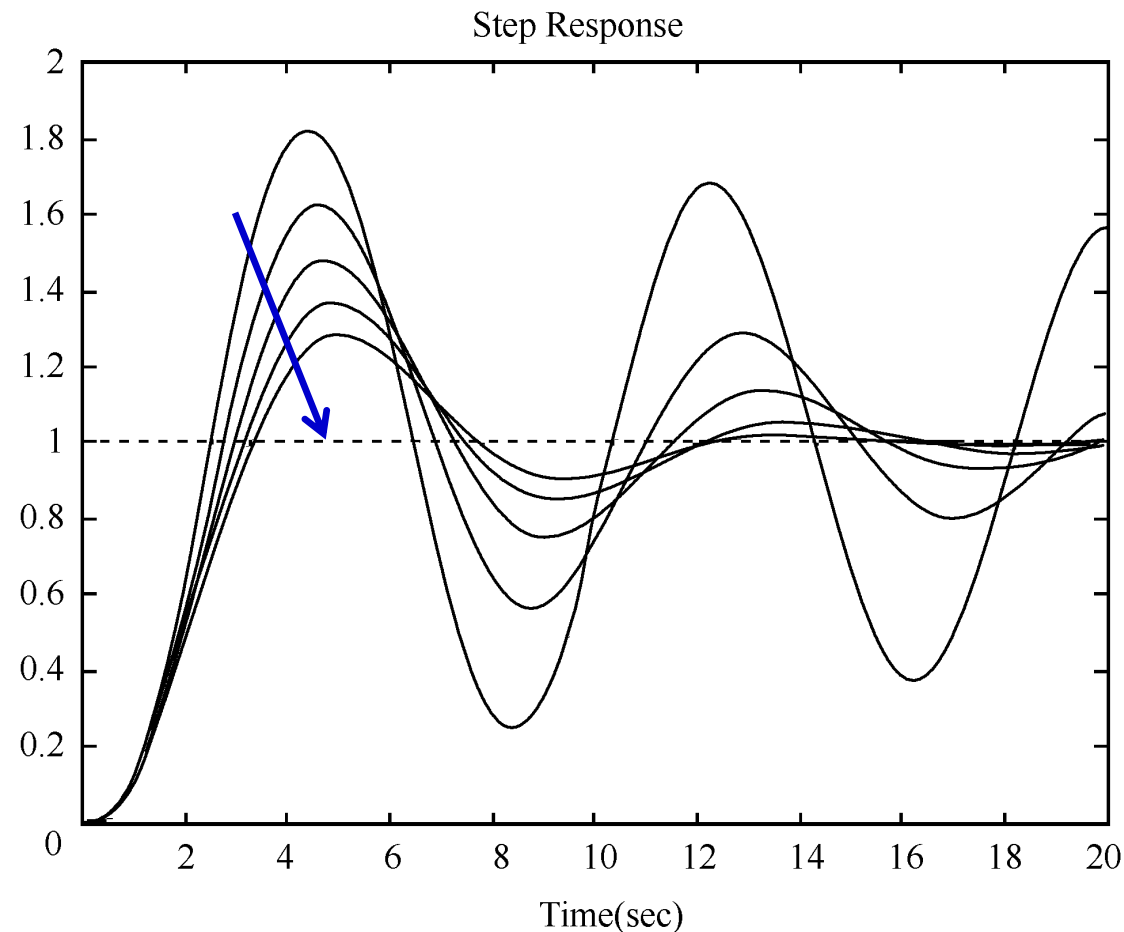
$K_p = 1$, $T_I = 1$, 使用

PID控制。研究 T_D 变

化时系统的单位阶

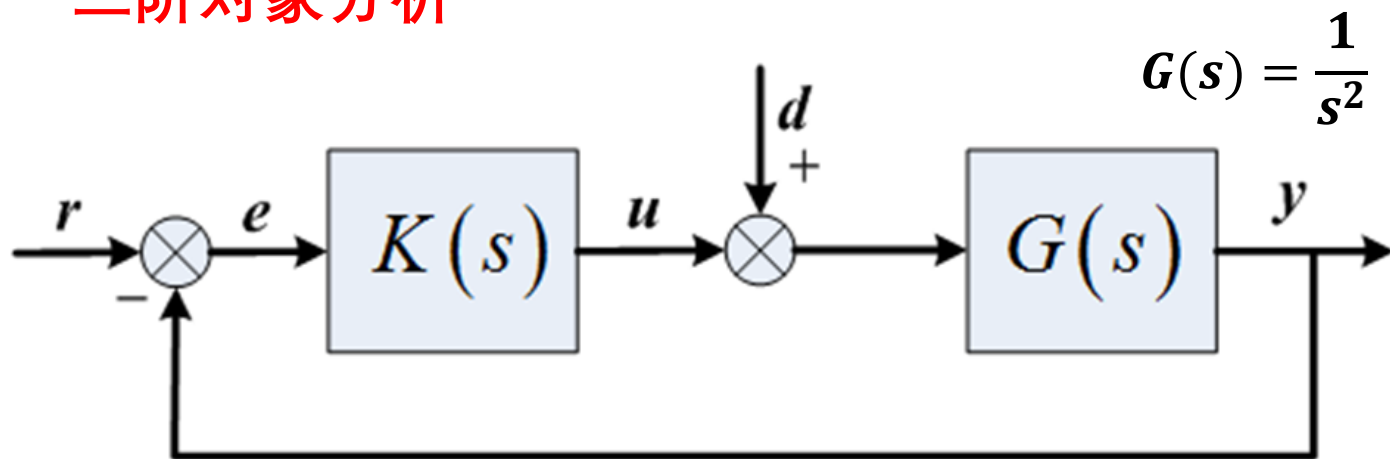
跃响应。

随着 T_D 值增大，系统的
响应速度降低，系统的
振荡也将减弱。



◆ 比例积分微分(PID)控制作用

例： 二阶对象分析



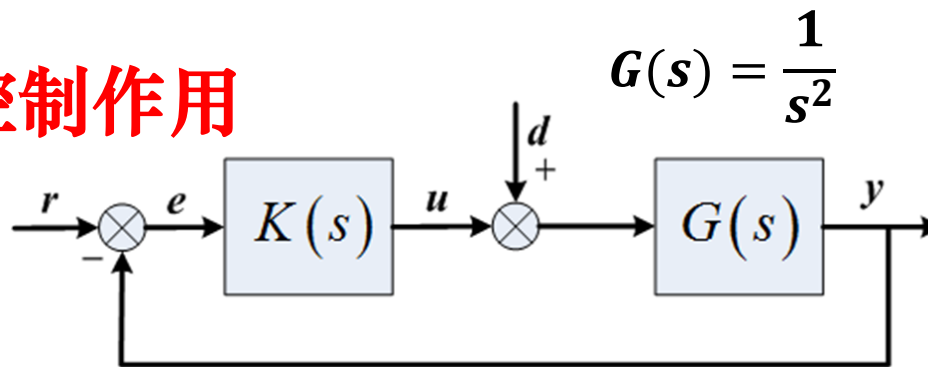
$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= d + u \\ y &= x_1 \\ r(t) &= r_c \end{aligned}$$

$$e_1 = r(t) - y = r_c - x_1, \quad e_2 = -x_2$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= -d - u \end{aligned}$$

◆ 比例积分微分(PID)控制作用

例： 二阶对象分析



$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= -d - u \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= -d - k_1 e_1 - k_2 e_2 \end{aligned}$$

误差及误差微分反馈 (PD) :

$$u = k_1 e_1 + k_2 e_2$$

稳定条件:

$$k_1 > 0, k_2 > 0$$

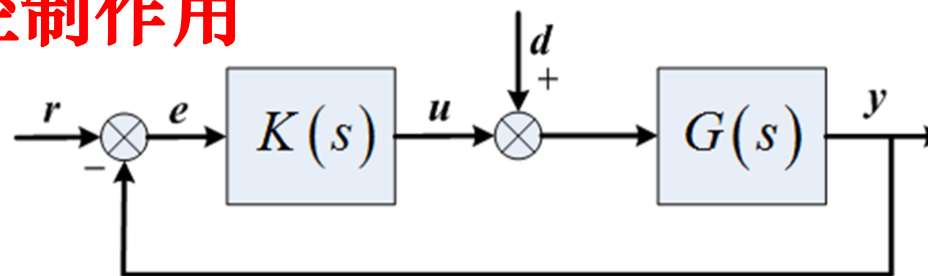
系统的平衡点:

$$e_2 = 0, e_1 = -\frac{d}{k_1}$$

系统存在稳态误差 (静差)

◆ 比例积分微分(PID)控制作用

例： 二阶对象分析



$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= -d - u \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_0 &= e_1 \\ \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= -d - k_0 e_0 - k_1 e_1 - k_2 e_2 \end{aligned}$$

误差、误差微分及误差积分反馈 (PID) :

$$u = k_0 e_0 + k_1 e_1 + k_2 e_2, e_0 = \int_0^t e_1 d\tau$$

稳定条件:

$$k_0 > 0, k_1 > 0, k_2 > 0, k_1 k_2 > k_0$$

系统的平衡点:

$$e_1 = 0, e_2 = 0, e_0 = -\frac{d}{k_0}$$

$$e_0 = \int_0^t e_1 d\tau$$

系统无跟踪静差，静差转移到 e_0 。



课程 安排

1

调节系统的特点及控制规律

2

调节系统的类型

3

PID系统的设计

4

过程控制系统的设计





◆ 调节系统的类型

- 积分加一阶模型——一般按相角裕度设计

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

- 一阶加时间滞后——滞后是典型问题

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

典型调节系统对象特性，并非对象的真实特性，主要是为了反映其设计特点。





◆ 调节系统的类型

● 积分加一阶模型

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

$$Y(s) = \left(\frac{K}{s} - \frac{KT}{Ts + 1} \right) U(s)$$

Steady state:

$$y(t) = Kt - KT$$

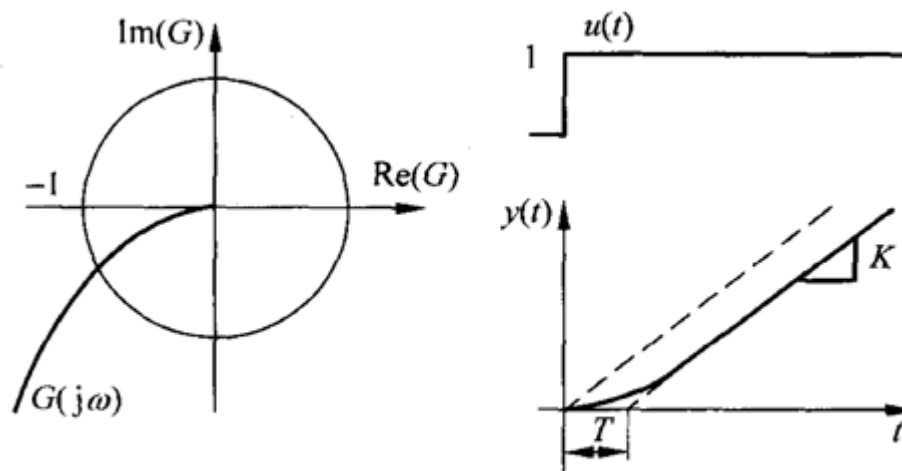


图 8-3 积分加一阶对象的特性

◆ 调节系统的类型

● 一阶加时间滞后

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

$$y(t) = 0, t < \tau$$

$$y(t) = K - K e^{-\frac{t-\tau}{T}}, t \geq \tau$$

$$\dot{y}_{max} = \frac{K}{T}, t = \tau$$

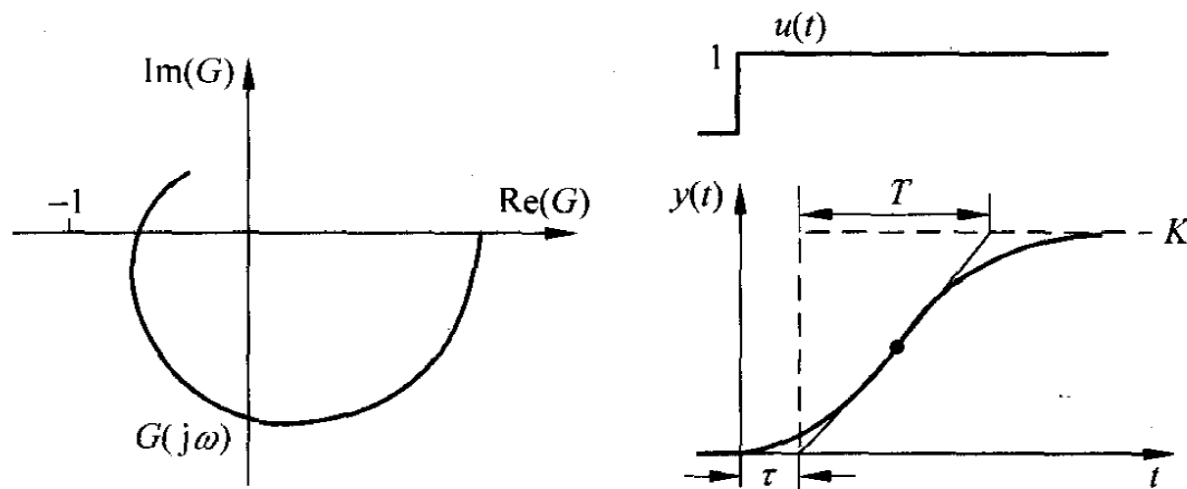
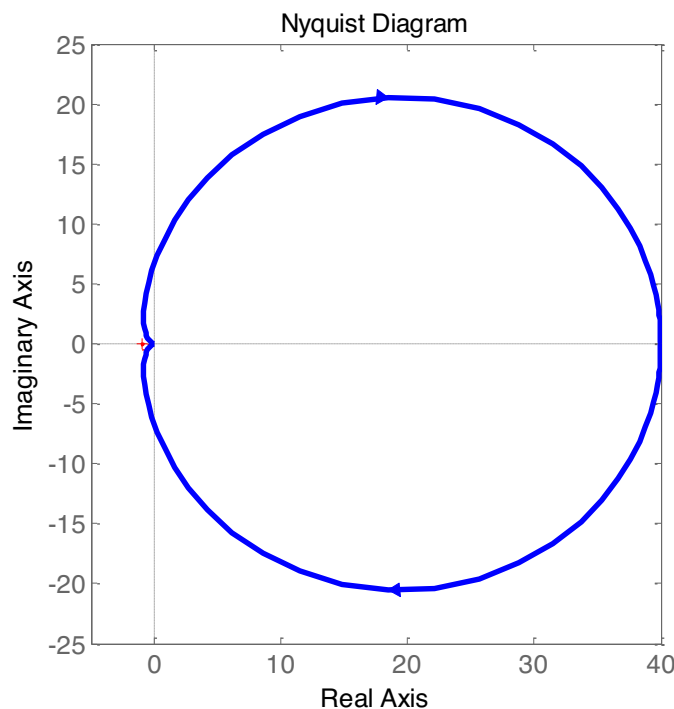


图 8-4 一阶加时间滞后的特性

◆ 调节系统的类型

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

典型调节系统对象特性，并非对象的真实特性，主要是为了反映其设计特点。

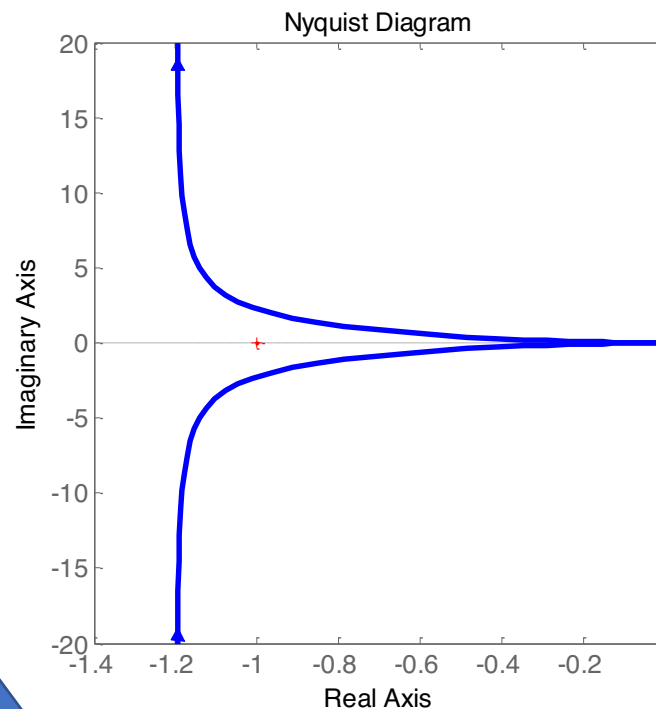


$$G(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}$$

$$K = 40$$

$$T_1 = 1$$

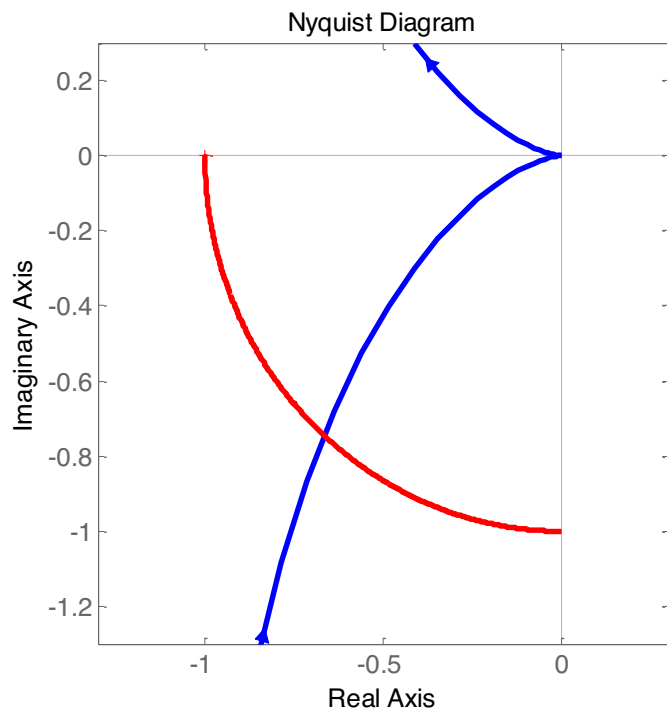
$$T_2 = 0.03$$



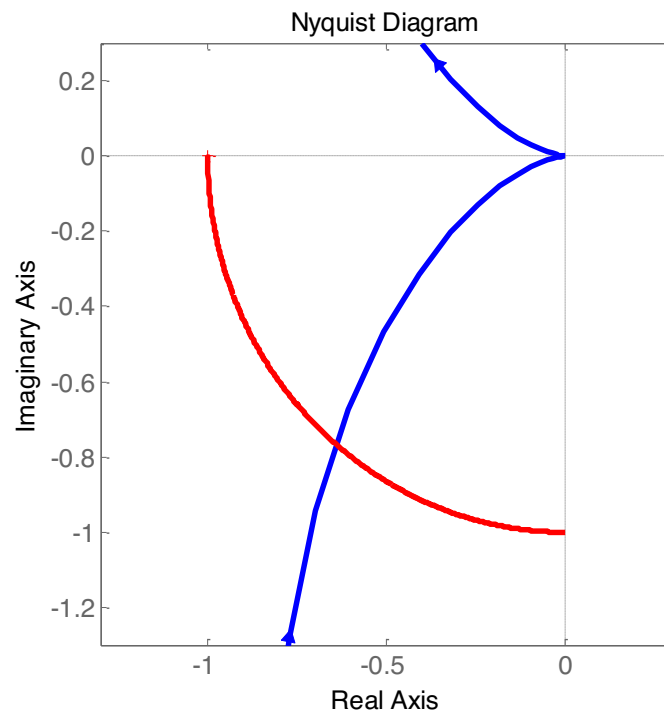
$$G_1(s) = \frac{K/T_1}{s(T_2s + 1)}$$

◆ 调节系统的类型

$$G_1(s)$$



$$G(s)$$



典型调节系统对象特性，并非对象的真实特性，主要是为了反映其设计特点。



课程 安排

1

调节系统的特点及控制规律

2

调节系统的类型

3

PID系统的设计

4

过程控制系统的设计





◆ 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

考虑的被控对象形式：

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





◆ 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？提高精度？……





◆ 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：

$$G(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)} \quad \tau \ddot{\psi} + \dot{\psi} = K\delta$$

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。

调节问题，与航向跟踪问题不同。





◆ 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： $\tau s^2 + (1 + KK_D)s + KK_P = 0$



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



◆ 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： $\tau s^2 + (1 + KK_D)s + KK_P = 0$



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

控制律微分项是不可缺少的，否则当增加 K_P 提高响应速度时，系统的阻尼将下降，微分项可以增加阻尼，提高系统的相对稳定性。

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。



◆ 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

干扰的频谱一般分布在0.05~0.2Hz之间，分析中作为高频噪声来处理。

- (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，应该再增加积分控制提高精度，减小扰动响应。



采用PID控制





◆ PID系统的设计

- 例1：航向保持时，船舶自动驾驶仪设计。

积分控制：应比较弱，不影响动态设计结果。

干扰的频谱一般分布在0.05~0.2Hz之间，分析中作为高频噪声来处理。

对象参数： $\tau = 16\text{s}$, $K = 0.07\text{s}^{-1}$

确定阻尼： $\zeta = 0.85$ $\omega_n = 0.066\text{rad/s}(0.01\text{Hz})$

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

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



◆ PID系统的设计

- 例1：航向保持时，船舶自动驾驶仪设计。

$$\omega_n = 0.066\text{rad/s}(0.01\text{Hz})$$

针对这样的固有频率，驾驶仪功放级的时间常数以及舵机的时间常数均可忽略不计。

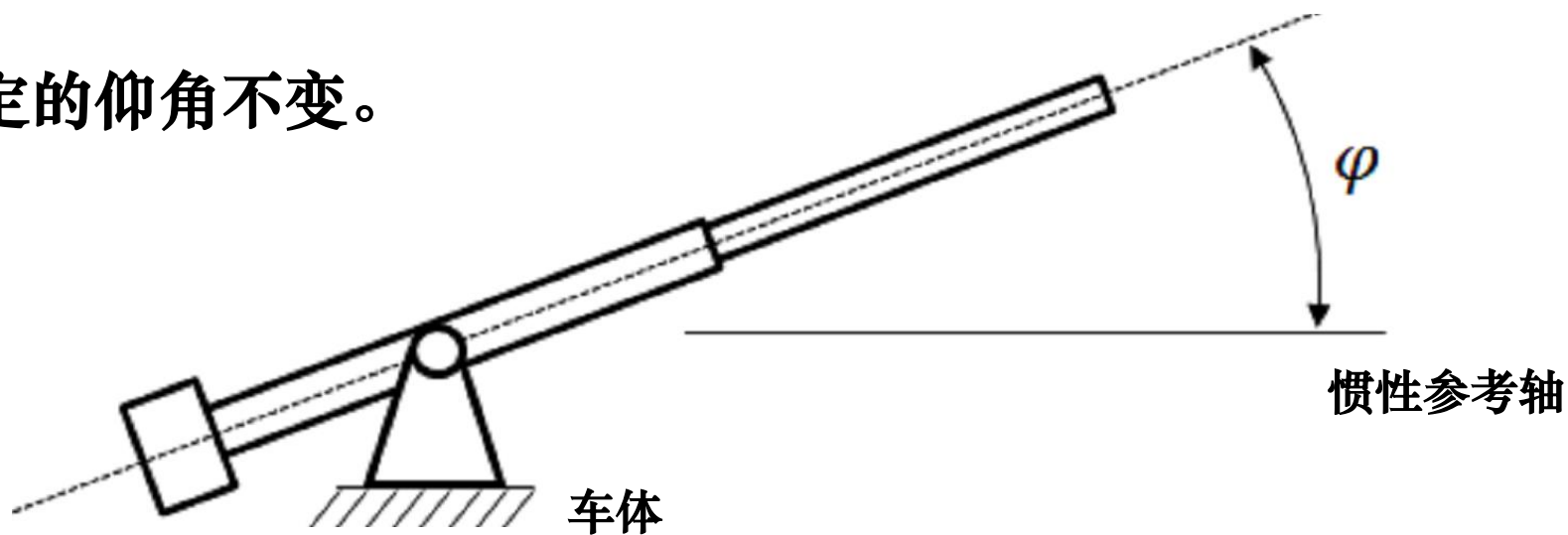
这一特点对于调节系统来说具有普遍性：执行机构、功放级、测量元件等的动特性在系统工作频段内都可以忽略不计，PID已经概括了整个控制器（包括执行机构）的特性。



◆ PID系统的设计

● 例2：火炮稳定器

坦克行驶时，车身振动影响火炮的姿态。火炮稳定器用来检测车体振动，使火炮在垂直平面内保持一定的仰角不变。





◆ 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？……



◆ PID系统的设计

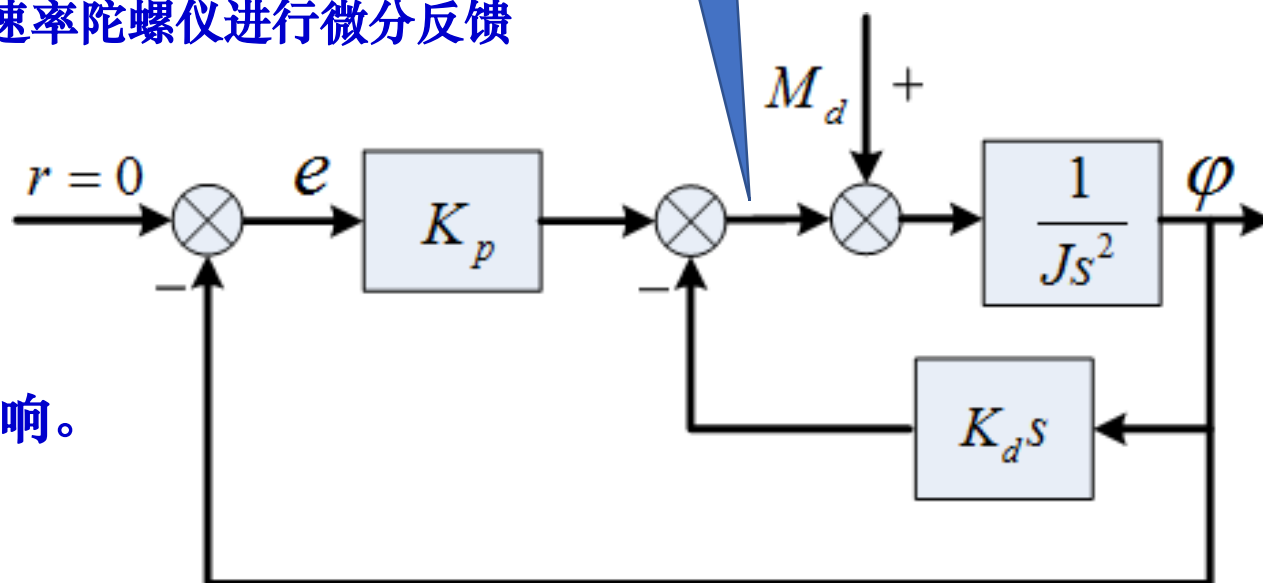
● 例2：火炮稳定器

被控对象特性为双积分环节，考虑微分反馈后变为：

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

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

执行机构

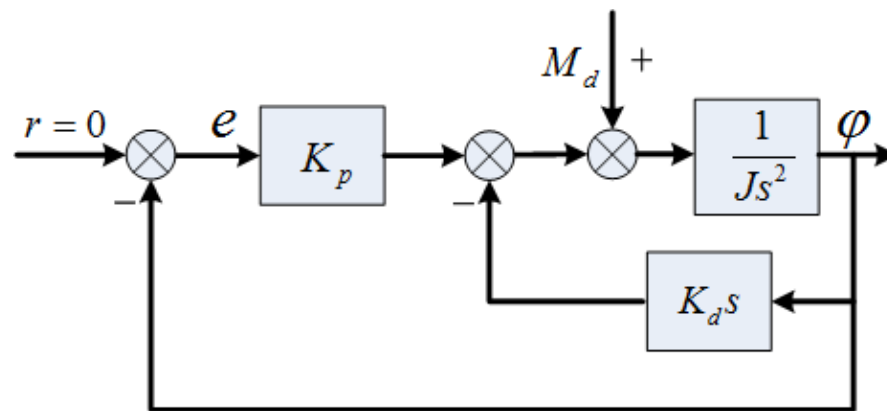


控制问题：
扰动力矩的影响。

设计中假设： $r=0$ 。

◆ 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。

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

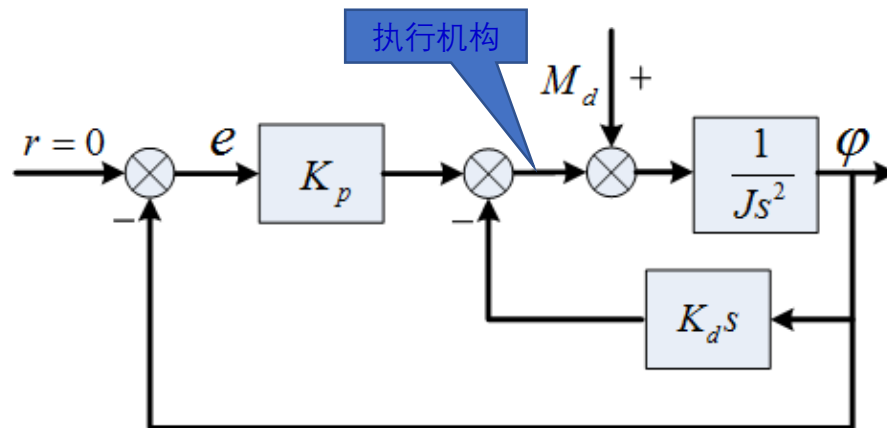
起抑制作用的二阶低通滤波器，
不希望频率特性出现谐振峰值。

$$\zeta = 1$$

$$K_D = 2\sqrt{K_P J}$$

◆ PID系统的设计

● 例2：火炮稳定器



如果转动惯量为 $J=350\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$ ，车体振动幅度 $\theta_{\max}=6^\circ$ ，振动周期 $T=1.5\text{s}$ ，即 $\omega_k=4.2\text{rad/s}$ ，对应于外力矩的幅值为 $M_{\max}=38\text{kg}\cdot\text{m}$ 。允许炮身强迫振荡的幅值为：

$$\frac{\varphi_{\max}}{M_{\max}} = \left| \frac{1}{Js^2 + K_D s + K_P} \right|_{s=j\omega_k} = \frac{1}{J\omega_k^2 + K_P}$$

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

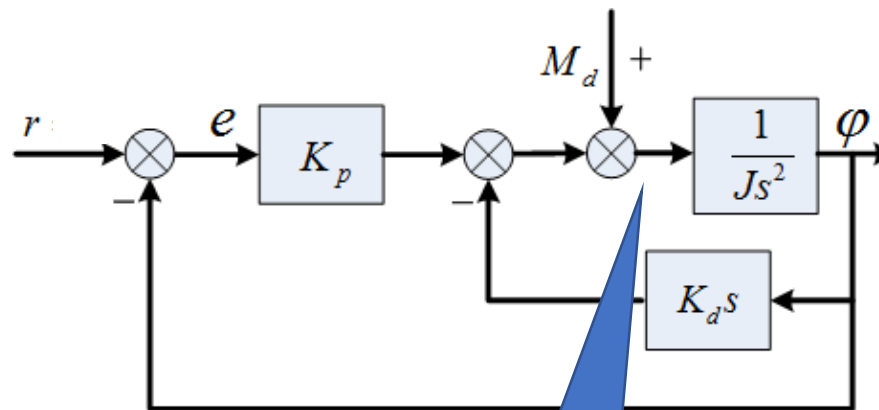
伺服刚度

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



◆ PID系统的设计

● 例2：火炮稳定器



采用反馈控制的目的是在车体运动和火炮之间起到隔离作用。火炮稳定器相当于一个隔离器，隔离度为40dB：

$$\frac{\theta_{\max}}{\varphi_{\max}} = \frac{6^\circ}{0.001\text{rad}} \approx 100 = 40\text{dB}$$

系统为II型系统，传动部分的间隙会产生自振荡，设计和调试中需要控制自振荡的幅值。



Thanks for your attention!
