



第7章 调节系统的设计 (2)

——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)

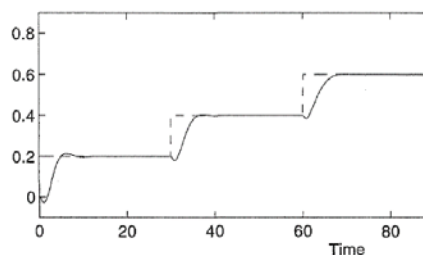


上一节课内容回顾

调节系统的定义和特点

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。

- 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（**非常值**）参考输入信号，有（**动态**）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（**按照期望开环特性**）进行校正。

调节系统与伺服系统的分类不是依据被控对象的特性、也不依赖于被控量物理意义，而是主要是根据参考输入的形式和控制需求。

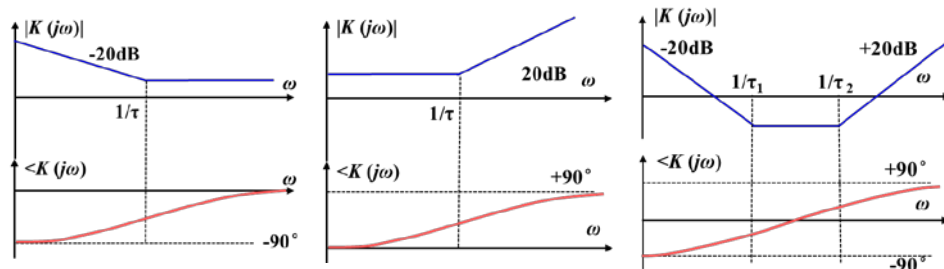


上一节课内容回顾

调节系统的控制规律

通常采用PID控制律，因为原理简单、实现方便、鲁棒性强

- 比例 (P) ————— P 提高带宽 | 引起振荡
- 积分 (I) ————— I 减小误差 | 增大超调
- 比例-微分 (PD) ————— D 增加阻尼 | 引入噪声
- 比例-积分 (PI)
- 比例-积分-微分 (PID)



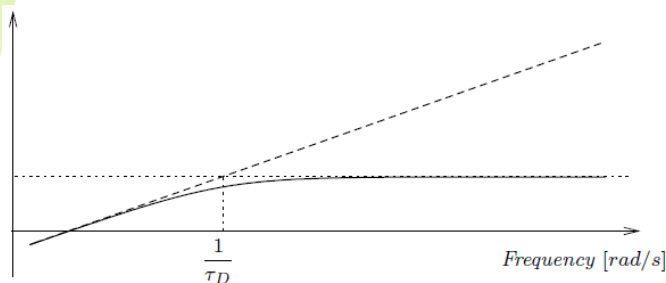
具体采用哪种组合需要根据系统需求、模型特点和实际工况来确定



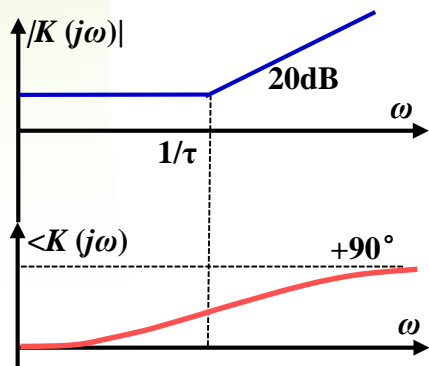
上一节课内容回顾

关于微分的实现方法

微分（比例+微分）可以通过两种方式实现，一种是近似实现

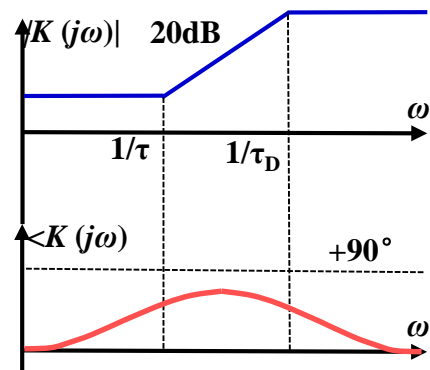


$$K_D s \Rightarrow \frac{K_D s}{\tau_D s + 1}$$



$$K_P + K_D s \Rightarrow \frac{K_P (1 + \tau s)}{1 + \tau_D s}$$

$$\tau \ll \tau_D$$



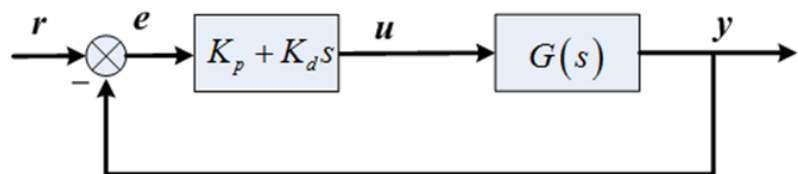
通过附加远大于微分时间常数的极点近似实现微分，可抑制高频噪声



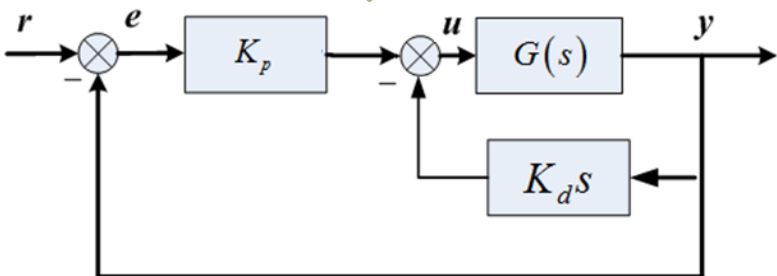
上一节课内容回顾

关于微分的实现方法

微分（比例+微分）可以通过两种方式实现，一种是利用传感器测量输出信号的导数（微分），使微分环节在反馈通道实现。



$r=0$



传感器的性能（延迟和噪声）会影响D的作用和效果。在反馈通道实现D，可防止指令突变时，微分带来过大的控制量。

能在反馈通道上实现的前提：指令保持不变或变化缓慢，导数可当做零



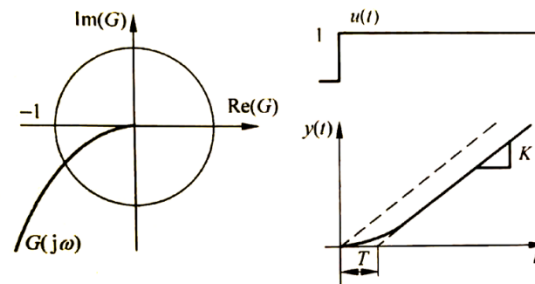
上一节课内容回顾

调节系统的类型

- 积分加一阶模型

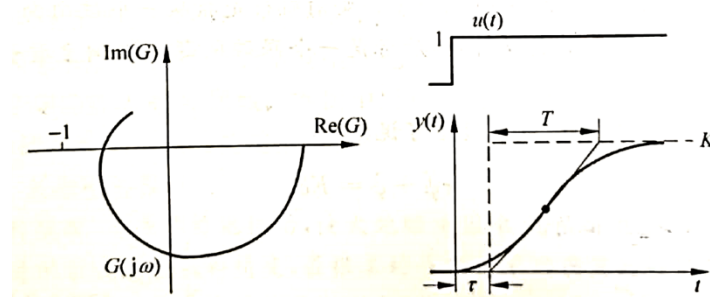
$$G(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}$$

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



- 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



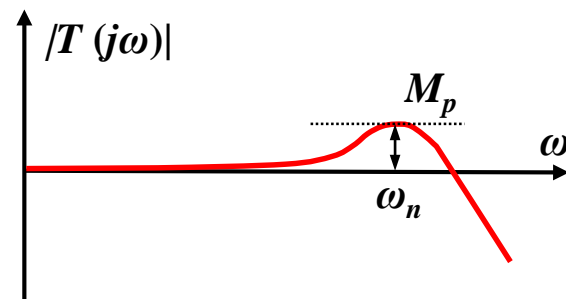
上一节课内容回顾

PID系统的设计

➤ 改变阻尼，提升稳定裕度，改善阶跃响应，采用PD

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

PD控制：
$$D(s) = K_p + K_d s$$



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

↓

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

若系统中存在常值扰动，还需要在PD基础上增加I，以消除扰动带来的误差，但是I的增益要尽可能小，不影响PD的作用



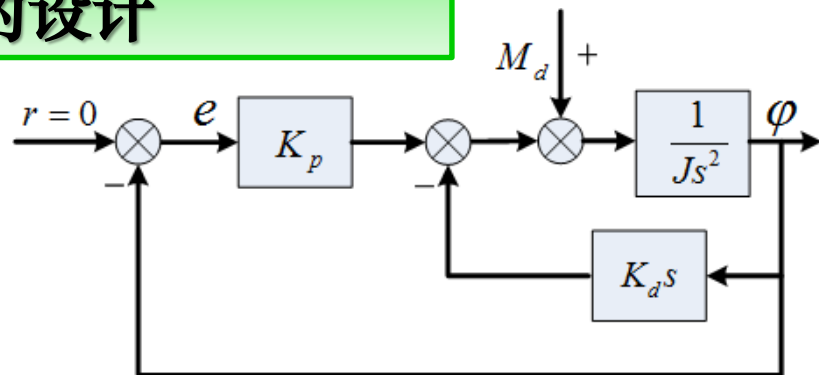
上一节课内容回顾

PID系统的设计

- 改变阻尼，改善阶跃响应，满足抗扰指标，采用PD

$$\frac{\Phi(s)}{M_d(s)} = \frac{1}{Js^2 + K_d s + K_p} \quad \left\{ \begin{array}{l} \xi = 1 \\ \Rightarrow K_d = 2\sqrt{K_p J} \end{array} \right.$$

$$\frac{\varphi_{\max}}{M_{\max}} = \left| \frac{1}{Js^2 + K_d s + K_p} \right|_{s=j\omega_k} = \frac{1}{J\omega_k^2 + K_p} \leq e_{\max} \quad \left\{ \begin{array}{l} K_p = x \\ K_p = y \end{array} \right.$$



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

在以抑制正弦类特殊扰动为主要指标时，要给出隔离度等指标



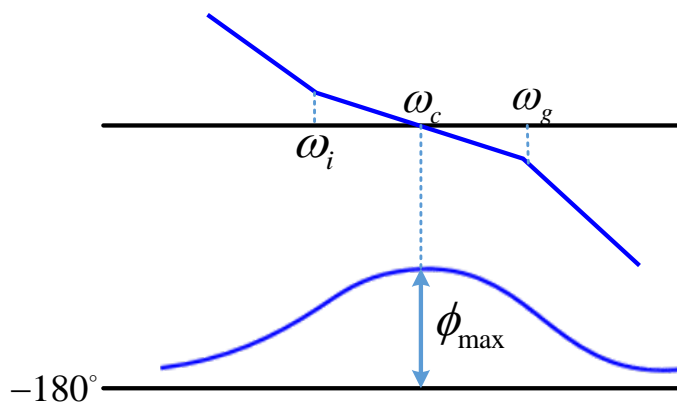
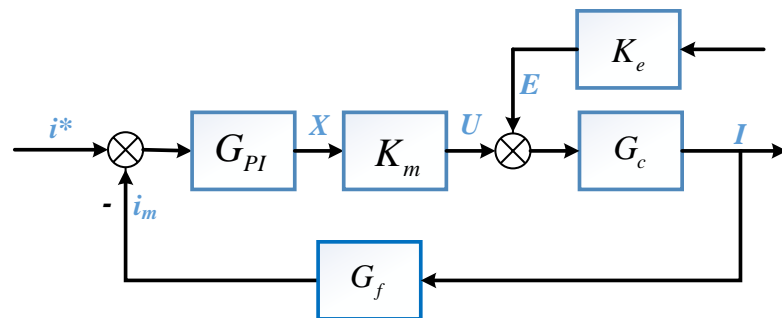
上一节课内容回顾

PID系统的设计

- 压低带宽抑制噪声，克服常值扰动，改善阶跃响应，采用PI控制

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

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



这里明确了 M_p ，用到了转折频率 ω_p 对称于 ω_c 可以获得最大补偿相角的这一隐含条件，这样确定了PI控制器的两个参数



上一节课内容回顾

PID系统的设计总结（依赖于模型的）

- 需求不同，采用的控制器形式不同，设计顺序也有区别，PD+I（先PD后I），PID（同时）；
- 利用已知模型（需要时进行简化），再依据指标，来计算控制器的参数；
- 求取控制器参数时，给定指标数量（给定和隐含的）应与控制器的参数个数相同，然后将一些不等式约束转化为等式约束，进行求解。所求得的参数通常是满足性能指标的参数上（下）界的参数，实际上满足指标的参数不一定唯一；
- 当给定指标数量（给定和隐含的）多于控制器参数个数时，要求取满足指标的控制器参数取值范围的交集，但有可能无解。可以先通过依据主要指标计算控制器参数，再验证其他指标是否满足的方式来确定控制器参数。



学习目标

本节课需要掌握的内容

- 掌握过程控制系统的定义；
- 掌握过程控制系统的特殊指标要求；
- 掌握过程控制系统的建模方法和模型特点；
- 掌握过程控制系统PID参数整定方法。



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



7.4 过程控制系统的设计

7.4.1

过程控制系统的对象特性

7.4.2

过程控制系统的设计特点

7.4.1

过程控制系统的整定



7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制系统的定义

一般是指石油、化工、冶金、机械、电力、轻工、建材、原子能等工业部门生产过程自动化，即通过采用各种控制装置及电子计算机等自动化技术工具，对整个生产过程进行**自动检测、监督和控制**，以达到实现各种优化的技术经济指标、**提高经济效益和劳动生产率、节约能源、改善劳动条件、保护环境卫生**等目的。





7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的任务和要求

□ 工业生产对过程控制的要求

- 安全性
- 经济性
- 稳定性

□ 过程控制的任务

在了解、掌握工艺流程和生产过程的静态和动态特性的基础上，根据要求应用理论对控制系统进行分析和综合，最后采用现代化技术手段加以实现。

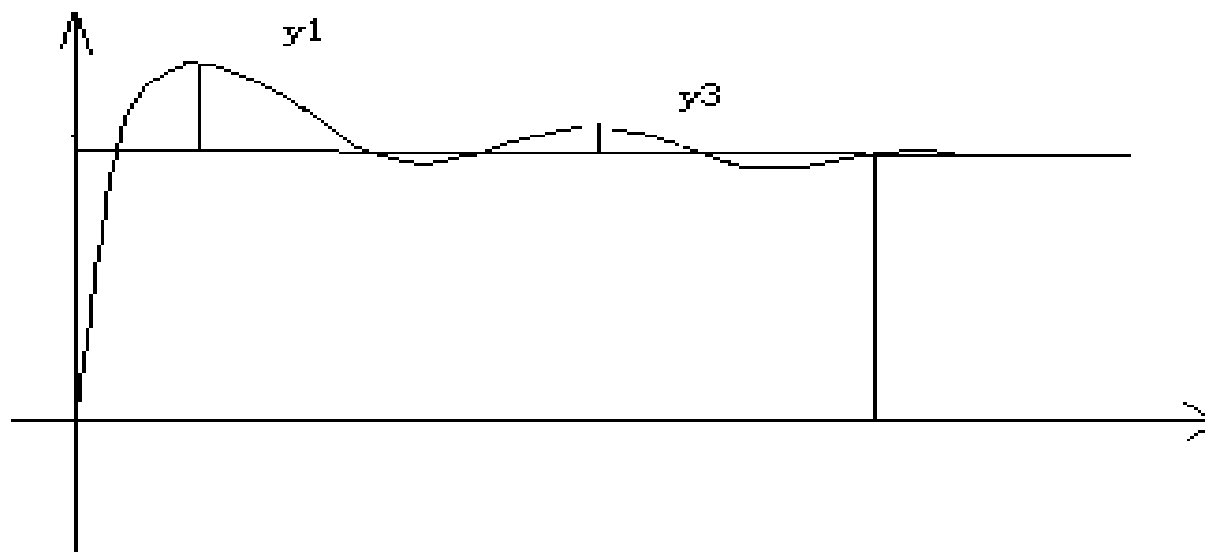




7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的性能指标

□ 衰减比和衰减率



衰减比: $n = \frac{y_1}{y_3}$

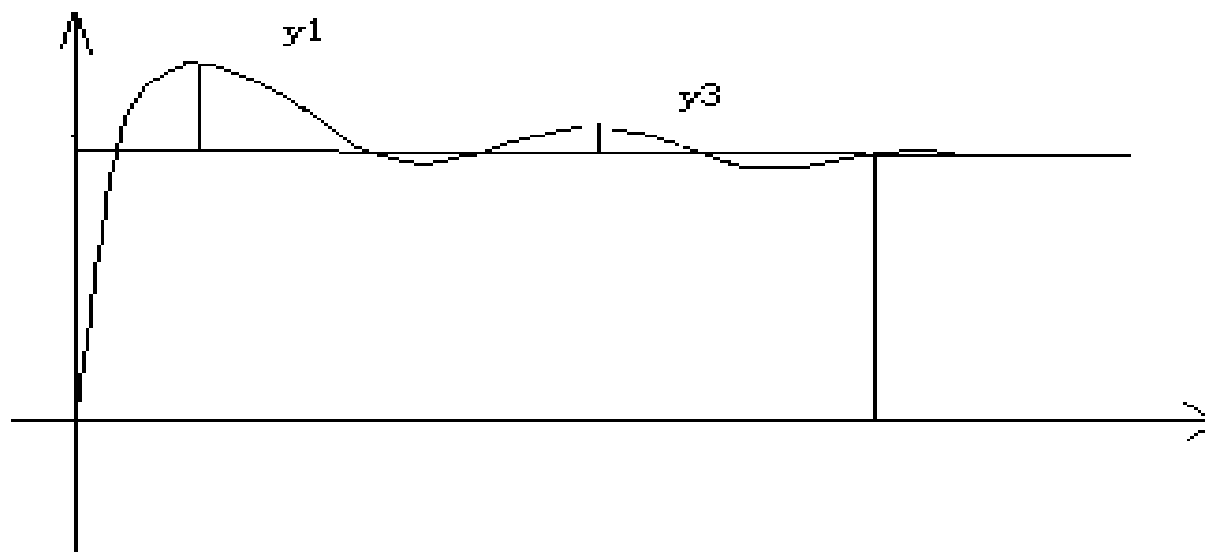
衰减率: $\psi = \frac{y_1 - y_3}{y_1}$



7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的性能指标

□ 最大动态偏差和超调量



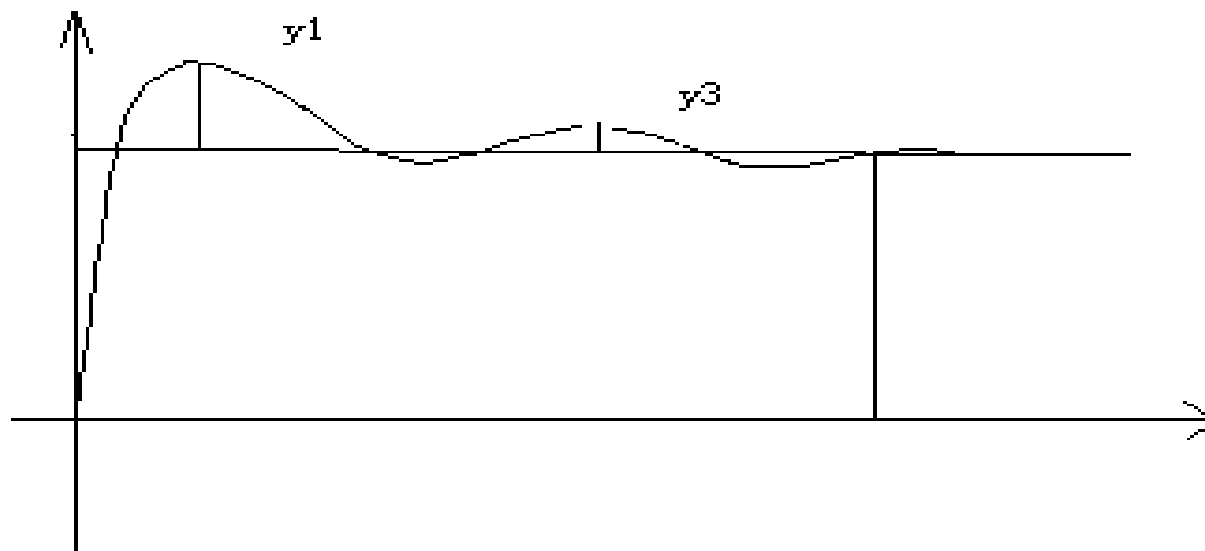
最大动态偏差: y_1



7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的性能指标

□ 残余偏差



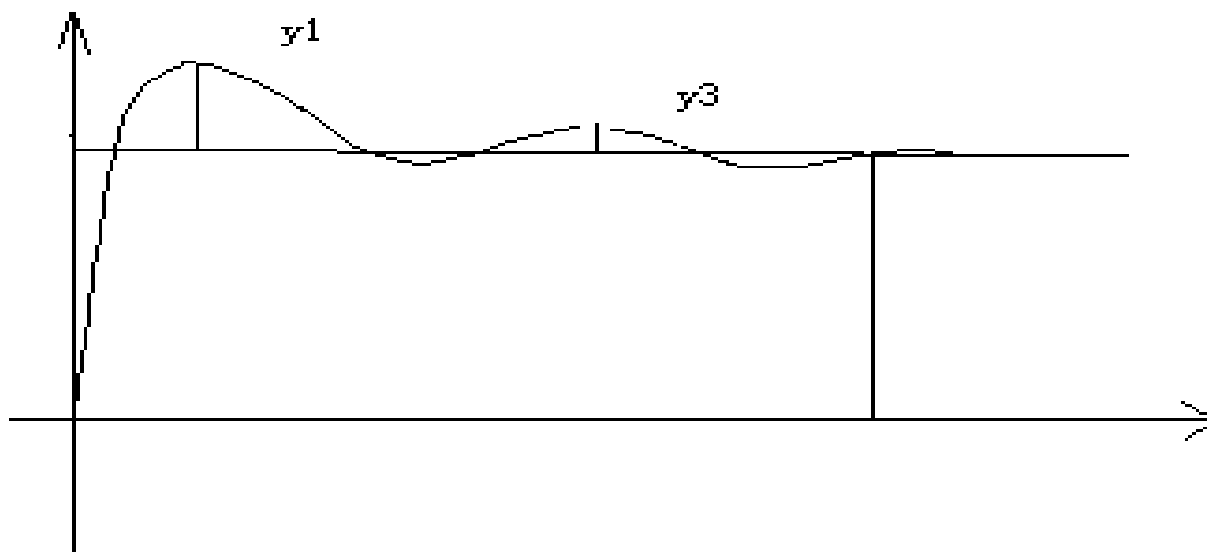
过渡过程结束后被调量新的稳态值与新设定值的差值，它是控制系统稳态准确性的衡量标志。



7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的性能指标

□ 调节时间和振荡频率



调节时间：过渡过程开始到结束所需的时间（一般认为被调量进入稳态值5%为结束）

振荡频率：衡量控制系统快速性的指标



7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的性能指标

□ 误差积分性能指标

➤ 误差积分

$$IE = \int_0^{\infty} e(t) dt$$

➤ 绝对误差积分

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

➤ 平方误差积分

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

➤ 时间与绝对误差乘积积分 $ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$

可以直接使用这些指标进行控制器设计（最优控制、预测控制），也可以用于调试过程中对比参数的优劣（每一组控制器参数都可以进行仿真或实验，计算出一个误差积分值，通过试凑等方法找出使得误差积分值最小的一组参数就完成了控制器的设计）。



7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的对象特性

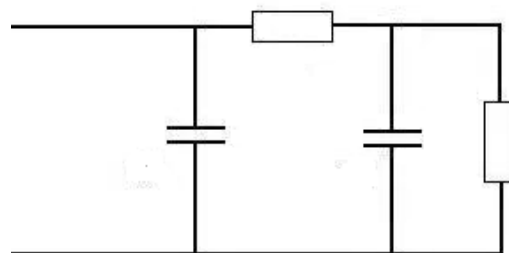
□ 容积描述

容积：控制对象内所储存的**物料或能量**，如水箱容量；

容积系数 C ：被调量改变一个单位所需的**物料的变化量**，决定了被调量的**变化速度**，如水箱的截面积；

液阻 R ：被调量的变化与物料（或能量）流量**变化的比值**，表示阻力，如出水阀；

□ 电阻-电容描述





7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的对象特性

□ 电炉加热器

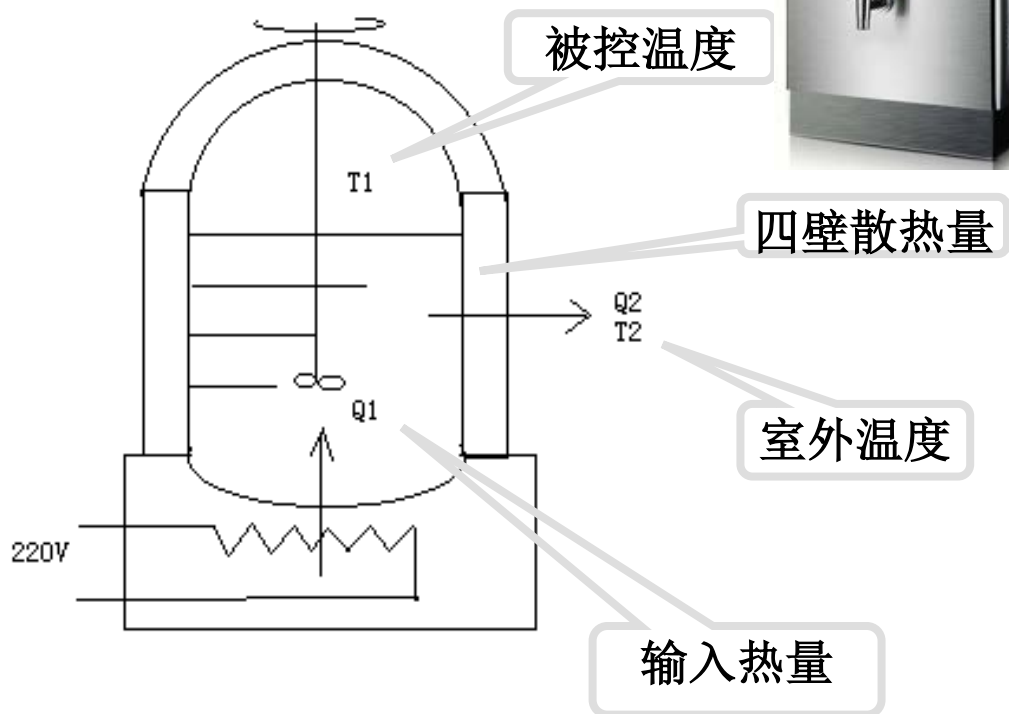
目标：容器内水的温度保持为 T_1

T_1 ：输出量

Q_1 ：输入量

Q_2 ：向四周散热量

当 $Q_1=Q_2$ 时，水从电炉得到的热量与散发的热量相等，容器内水的温度 T_1 不变。





7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的对象特性

□ 电炉加热器

热量存储的变化率为 $Q_1 - Q_2 = C \frac{dT_1}{dt} = GC_p \frac{dT_1}{dt}$

G ---加热器内水总重量

C_p ---水的定压比热容

C ---热容（表示单位重量下 T_1 每升高1度所需的储蓄热量）， $C=GC_p$

容器内被加热的水不断地通过保温材料向四周空气散发热量，这个热量可表示为

$$Q_2 = KA(T_1 - T_2)$$

K —传热系数； A —表面积； T_2 —周围空气温度



30L/h



7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的对象特性

□ 电炉加热器

$$Q_1 - Q_2 = C \frac{dT_1}{dt} = GC_p \frac{dT_1}{dt}$$

$$Q_2 = KA(T_1 - T_2)$$

保温材料向四周散发热量是有阻力的，这个阻力称热阻，用 R 表示。保温材料传热系数越大，则热阻越小，散热表面积越大，则热阻越小。

$$R = \frac{1}{KA}$$

由此，有

$$RC \frac{d\Delta T_1}{dt} + \Delta T_1 = R\Delta Q_1 + \Delta T_2$$

如果周围的空气温度不变，即 $\Delta T_2 = 0$ ，则：

$$RC \frac{d\Delta T_1}{dt} + \Delta T_1 = R\Delta Q_1$$



7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的对象特性

□ 电炉加热器

$$RC \frac{d\Delta T_1}{dt} + \Delta T_1 = R\Delta Q_1$$

写成更一般形式，有

$$T \frac{d\Delta T_1}{dt} + \Delta T_1 = K\Delta Q_1$$

由此，有

$$G(s) = \frac{T_1(s)}{Q_1(s)} = \frac{K}{RCs + 1} = \frac{K}{Ts + 1}$$

考虑到测温过程的延迟，可得被控对象为：

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

T —对象的时间常数， $T=RC$

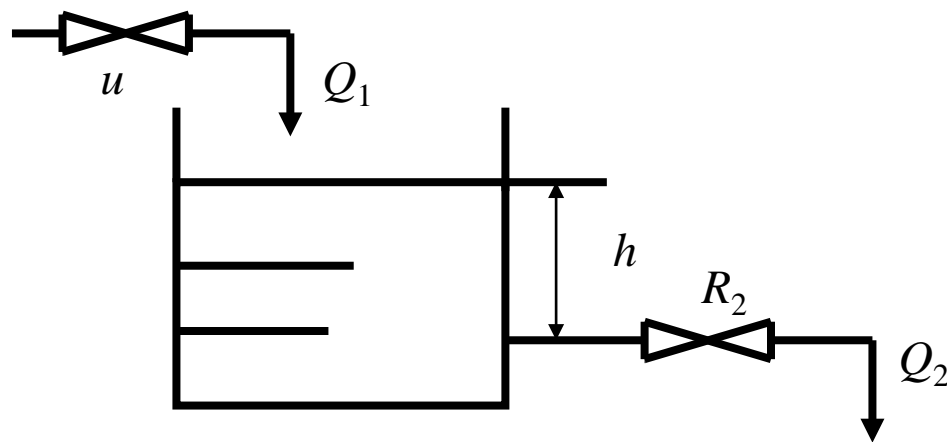
K —对象的放大系数， $K=R$



7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的对象特性

□ 单容水槽控制



水槽的流入量 Q_1 由调节阀 u 控制，流出量由负载阀 R_2 控制。被调量为水位高度 h ，它反映流入与流出量的平衡关系。

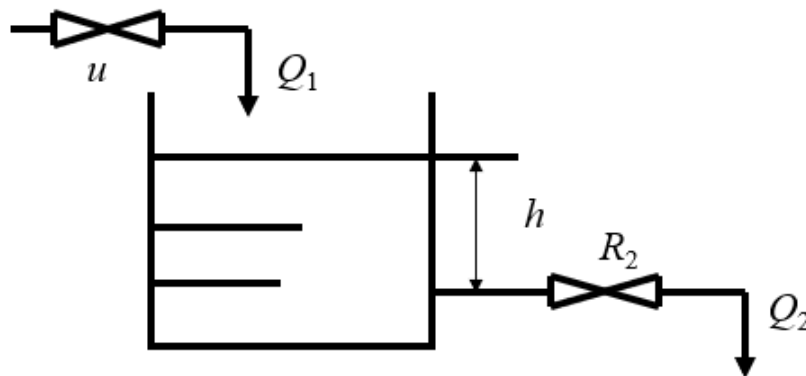


7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的对象特性

□ 单容水槽控制

物料平衡方程为：



$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{C}(Q_1 - Q_2)$$

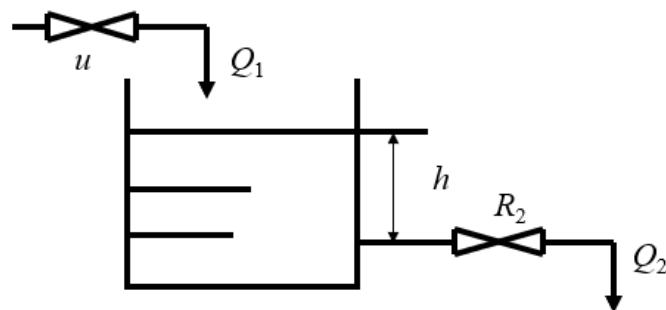
式中： C ——容积系数，本例中即水槽的截面积



7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的对象特性

□ 单容水槽控制



在过程控制中，扰动发生前，水槽处于平衡态，即：

$$\frac{1}{C}(Q_{10} - Q_{20}) = 0$$

上式说明平衡态时，流入量等于流出量，速度为零。

以增量形式表示上述各式为：

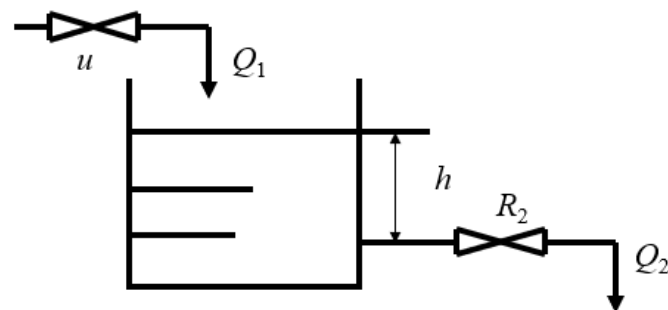
$$\Delta h = h - h_0, \Delta Q_1 = Q_1 - Q_{10}, \Delta Q_2 = Q_2 - Q_{20}$$



7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的对象特性

□ 单容水槽控制



$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{C}(Q_1 - Q_2) \quad \longrightarrow \quad \frac{d\Delta h}{dt} = \frac{1}{C}(\Delta Q_1 - \Delta Q_2)$$

液阻 R 表示为 $\frac{\Delta h}{\Delta Q_2} = R$

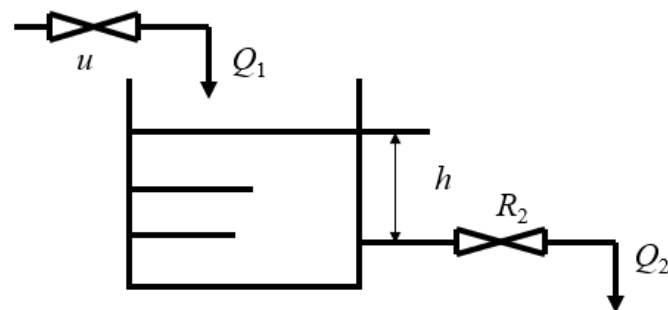
$$\frac{d\Delta h}{dt} = \frac{1}{C}(\Delta Q_1 - \frac{1}{R}\Delta h)$$



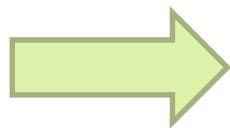
7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的对象特性

□ 单容水槽控制



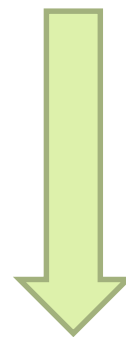
$$\frac{d\Delta h}{dt} = \frac{1}{C}(\Delta Q_1 - \frac{1}{R}\Delta h)$$



$$RC \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = R\Delta Q_1$$

T 为液位时间常数，它反映对象在扰动作用下被控参数的快慢程度，即表示对象惯性大小的参数。

$$T = RC$$



$$G(s) = \frac{Q_1}{h} = \frac{R}{Ts + 1}$$

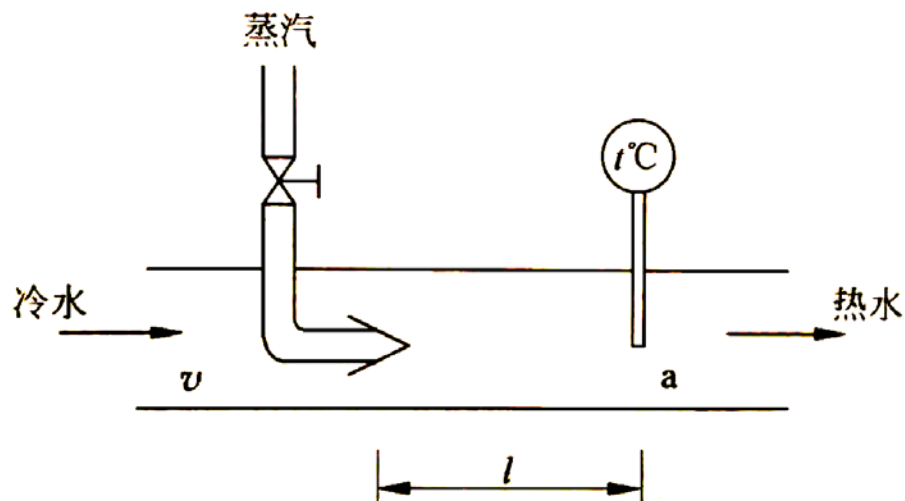
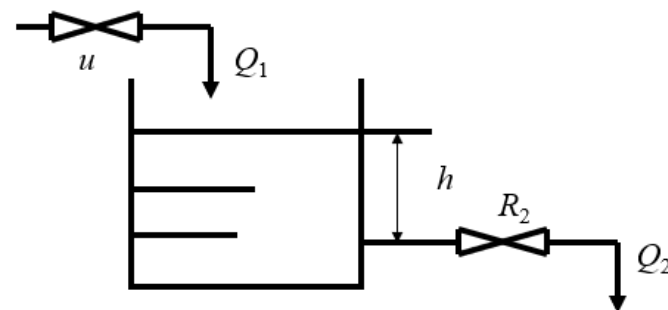


7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的对象特性

□ 单容水槽控制

与管道水温调节类似，管路的流量调节也存在传输滞后。



考虑到液位控制系统中存在的延迟，可得被控对象为：

$$G(s) = \frac{\Delta h}{\Delta Q_1} = \frac{R}{Ts + 1} e^{-\tau s}$$

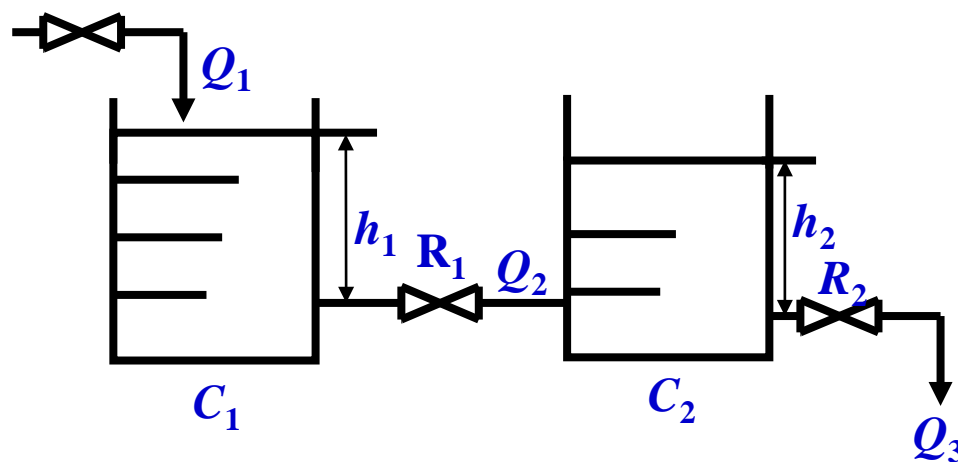


7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的对象特性

□ 多级水位过程控制

两只水箱,每只水箱的流出量是不变的,即与液位无关,当流入量发生阶跃变化时,液位发生变化. 该例为两只水箱串联工作。



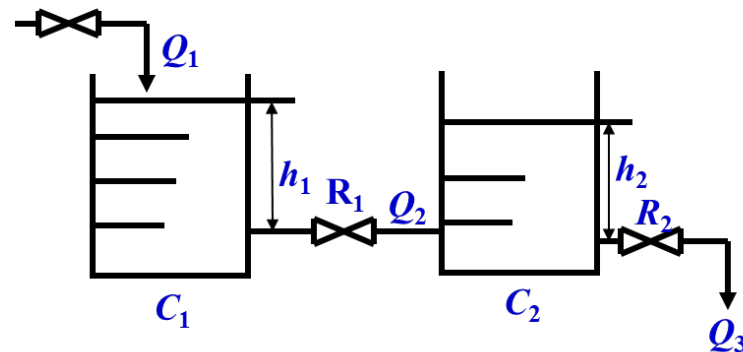


7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的对象特性

□ 多级水位过程控制

平衡关系：



$$\left. \begin{aligned} \frac{dh_1}{dt} &= \frac{1}{C_1} (Q_1 - Q_2) \\ \frac{dh_2}{dt} &= \frac{1}{C_2} (Q_2 - Q_3) \end{aligned} \right\}$$

$$Q_2 = \frac{1}{R_1} (h_1 - h_2)$$

$$Q_3 = \frac{1}{R_2} h_2$$



$$T_1 = C_1 R_1$$

$$T_2 = C_2 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$r = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

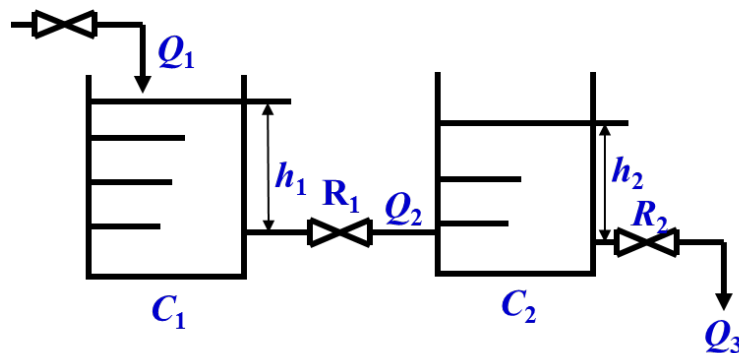
$$\left\{ \begin{aligned} T_1 \frac{dh_1}{dt} + h_1 - h_2 &= R_1 Q_1 \\ T_2 \frac{dh_2}{dt} + h_2 - r h_1 &= 0 \end{aligned} \right.$$



7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的对象特性

□ 多级水位过程控制



$$\begin{cases} T_1 \frac{dh_1}{dt} + h_1 - h_2 = R_1 Q_1 \\ T_2 \frac{dh_2}{dt} + h_2 - r h_1 = 0 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad G(s) = \frac{H_2(s)}{Q_1(s)} = \frac{r R_1}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + (1 - r)} = \frac{K}{(T_1' s + 1)(T_2' s + 1)}$$

对多容对象的特点是：当受到扰动后，被控参数 h_2 的变化速度不是一开始就变化，而是要经历一段滞后的时间，称**容积滞后**。产生容积滞后的原因主要是两个容积之间存在**阻力**。容量滞后的时间用 τ 表示，如果对象的容量愈大，则容量滞后的时间也愈大。



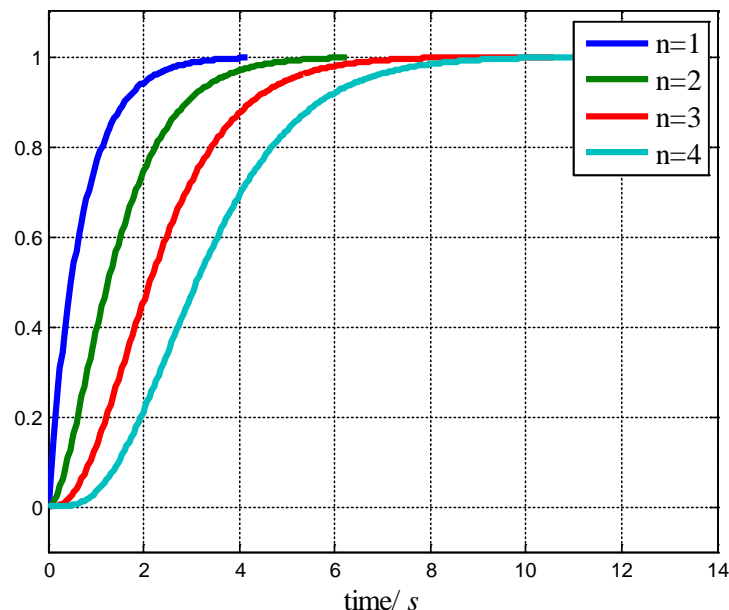
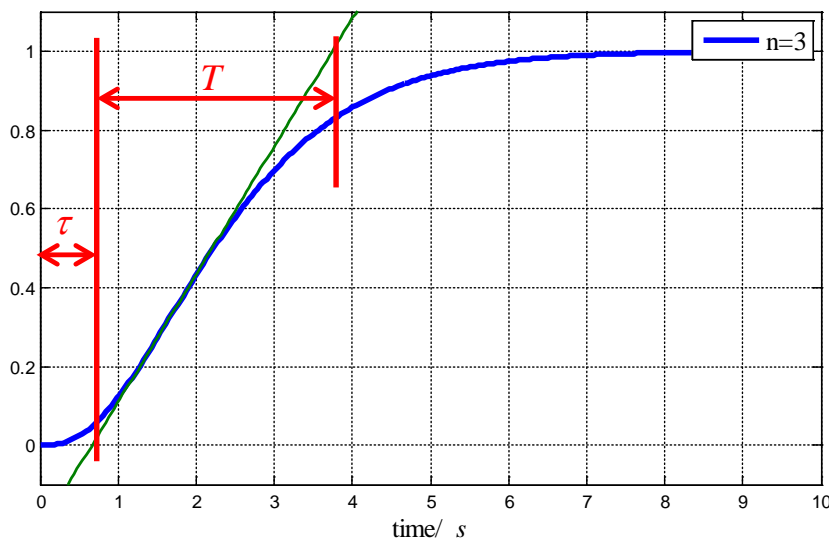
7.4.1 过程控制系统的对象特性

过程控制的对象特性

□ 多级水位过程控制

多容对象的传递函数为:

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



$$G_1(s) = \frac{e^{-\tau s}}{T_s + 1}$$

$$T = 3.0796s$$

$$\tau = 0.6655s$$

$$T_1 = 0.7s$$

$$T_2 = 0.8s$$

$$T_3 = 0.9s$$

$$T_4 = 1.0s$$



7.4.1 过程控制系统的对象特性

◆ 过程控制的对象特性小结

□ 单容对象—— $G(s) = \frac{R}{Ts + 1} e^{-\tau s}$

□ 多容对象—— $G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1) \dots (T_ns + 1)}$

□ 存在容积滞后 τ_e 和传输滞后 τ_0 —— $\tau = \tau_0 + \tau_e$

容积滞后：由于存在多个容积引起的响应特性滞后

传输滞后：被测量的测量需要一段时间后才能准确获得



7.4 过程控制系统的设计

7.4.1

过程控制系统的对象特性

7.4.2

过程控制系统的设计特点

7.4.1

过程控制系统的整定



7.4.2 过程控制系统的设计特点

◆ 过程控制的设计特点

调节系统的控制规律是PID，但对过程控制系统而言，又有其特有的设计考虑。

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

● 微分增加阻尼的效果不显著

由于对象的滞后特性，控制规律引入的微分项增加阻尼的效果并不明显，若设计不好，甚至会带来相反的效果。



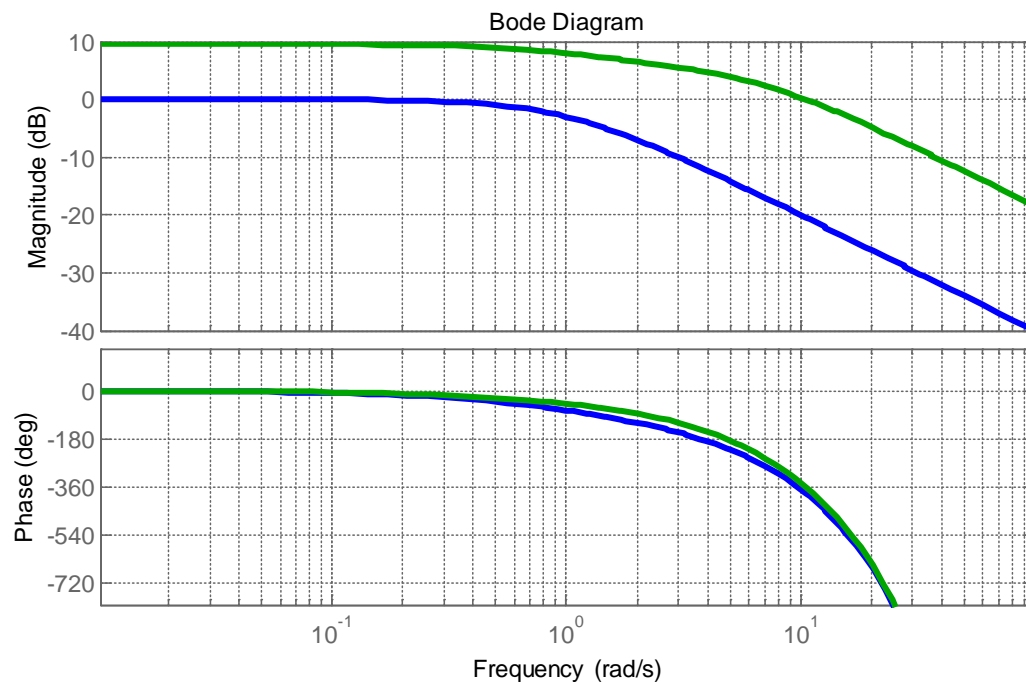
7.4.2 过程控制系统的设计特点

◆ 过程控制的设计特点

- 微分增加阻尼的效果不显著

$$G(s) = \frac{1}{s+1} e^{-0.5s}$$

$$D(s) = 3 \cdot \frac{s/1.5 + 1}{s/6 + 1}$$





7.4.2 过程控制系统的设计特点

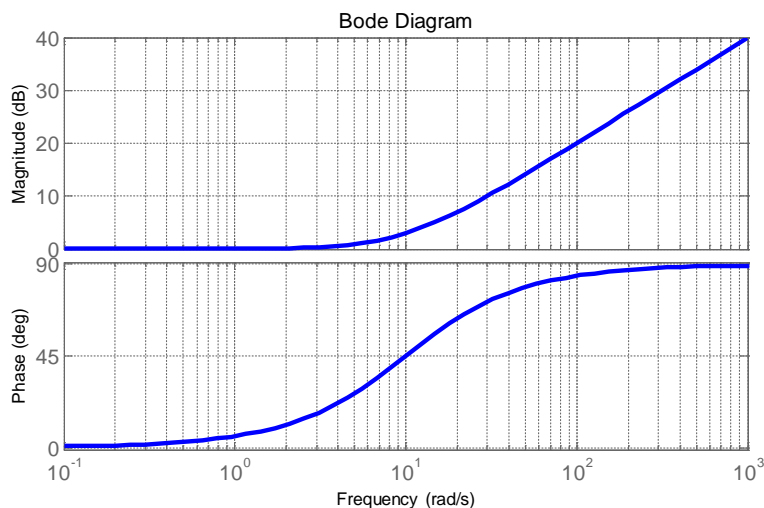
◆ 过程控制的设计特点

● 微分控制

过程控制系统中若采用比例微分控制，应该用其幅频特性增加比较平缓的频段，避免抬高增益改变过多抬高穿越频率。

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

$$D(s) = 1 + T_D s \quad \longrightarrow \quad \frac{1}{T_D} > \omega_c$$



$$D(s) = \frac{1 + T_D s}{1 + \tau_D s}$$

$$0.1T_D \leq \tau_D \leq 0.2T_D$$



7.4.2 过程控制系统的设计特点

◆ 过程控制的设计特点

● 例1 微分增加阻尼的效果不显著

$$\frac{1}{T_D} > \omega_c$$

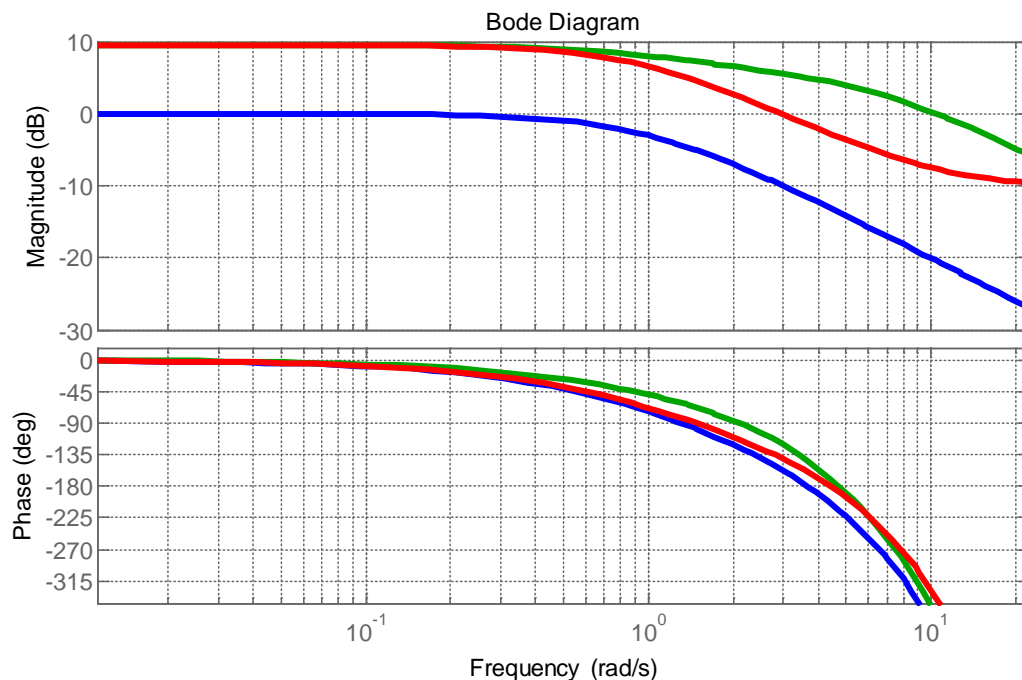
$$G(s) = \frac{1}{s+1} e^{-0.5s}$$

$$D(s) = 3(1+0.1s)$$

$$\omega_c = 3$$

$$\frac{1}{T_D} = 10$$

实现了40°的相角裕度。





7.4.2 过程控制系统的设计特点

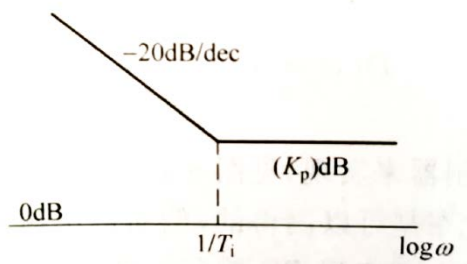
◆ 过程控制的设计特点

- 增益低、带宽窄导致静差大——引入积分

$$\frac{1}{T_D} > \omega_c$$

由于滞后环节的存在，系统的增益和带宽都比较小，要减少或消除静差就得在控制规律中加积分环节来提高其低频段增益，所以调节规律中都要加积分项。

系统在带宽以内的频率特性主要由PI决定，为使积分引起的相位滞后不影响系统的稳定性，-20dB/dec的积分特性应在到达带宽前衰减掉。



$$\frac{1}{T_I} = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{1}{4} \right) \omega_c$$



7.4 过程控制系统的设计

7.4.1

过程控制系统的对象特性

7.4.2

过程控制系统的设计特点

7.4.3

过程控制系统的整定



7.4.3 过程控制系统的整定

◆ 整定的含义

根据系统中被控过程的动态特性，确定调节器中的各可调整参数，使系统的工作性能达要求（如稳定性、某项指标最优）。

PID已成为调节系统的通用形式和标准设计，PID三个参数的选择称为整定。

$$K_P = ?$$

$$\frac{1}{T_I} = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{1}{4} \right) \omega_c$$

$$\frac{1}{T_D} > \omega_c$$



7.4.3 过程控制系统的整定

◆ 整定的方法

1. 理论计算整定

基于数学模型（传递函数、频率特性），按性能指标进行计算，得到整定参数。

2. 工程整定

根据响应曲线、特征参数，按工程经验数据或经验公式得到整定参数。

3. 直接经验调整

参照性能指标，按实际运行曲线进行调整。



7.4.3 过程控制系统的整定

◆ 整定的方法

● 临界比例度法

调节规律	K_P	T_I	T_D
P	$0.5K_{pc}$	∞	0
PI	$0.45K_{pc}$	$0.83T_c$	0
PID	$0.6K_{pc}$	$0.5T_c$	$0.125T_c$

K_{pc} ——临界增益； $T_c=2\pi/\omega_{cr}$ 。



7.4.3 过程控制系统的整定

◆ 整定的方法

● PID参数整定口诀

参数整定找最佳，从小到大顺序查
先是比例后积分，最后再把微分加
曲线振荡很频繁，比例度盘要放大
曲线漂浮绕大湾，比例度盘往小扳
曲线偏离回复慢，积分时间往下降
曲线波动周期长，积分时间再加长
曲线振荡频率快，先把微分降下来
动差大来波动慢。微分时间应加长
理想曲线两个波，前高后低4比1
一看二调多分析，调节质量不会低。



Thank You !

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）