



第7章 调节系统的设计 (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)

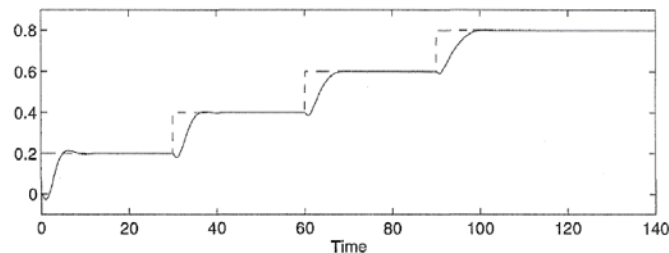


回顾篇

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性能需求。

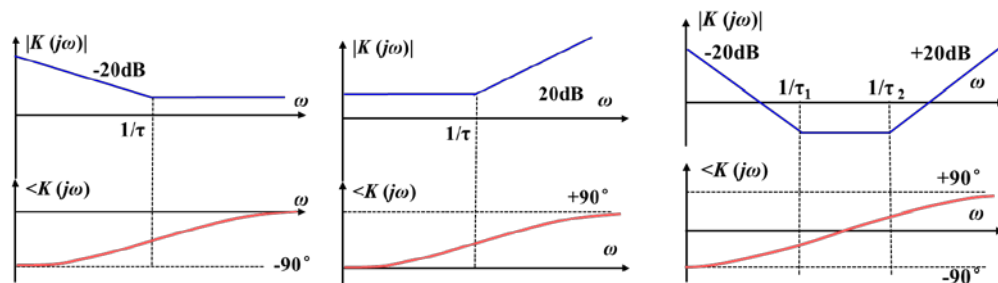


回顾篇

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、调参容易

- 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)



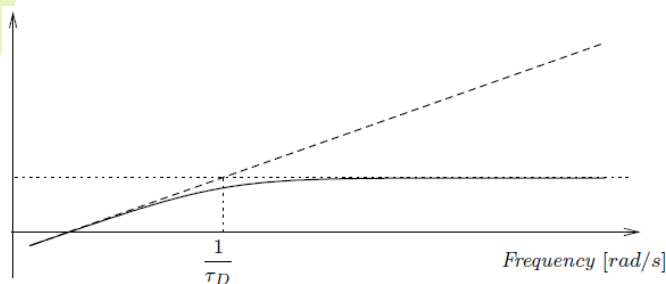
具体采用哪种组合需要根据具体工况、对象特点和实际需求来确定



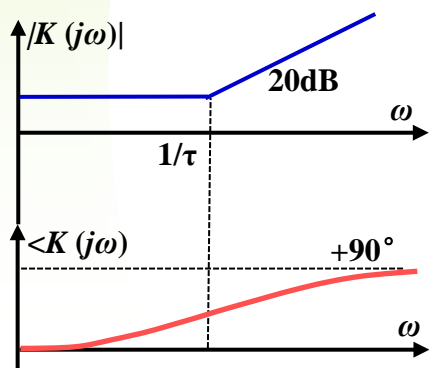
回顾篇

关于微分的实现方法

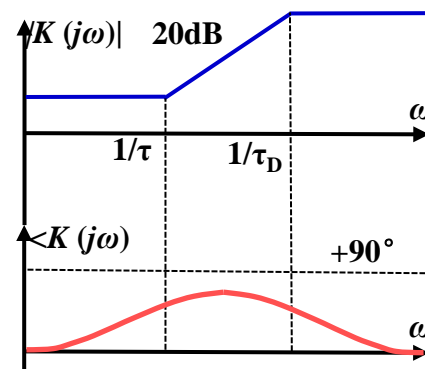
微分（比例+微分）可以通过两种方式实现，第一种是近似实现



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



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



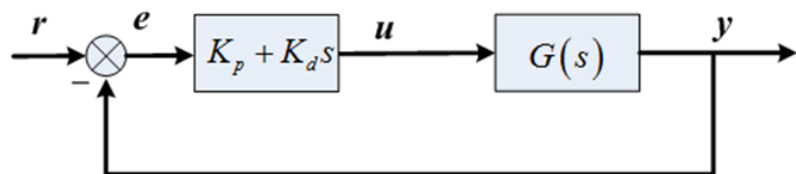
通过附加远大于微分时间常数的极点近似实现，可抑制高频噪声



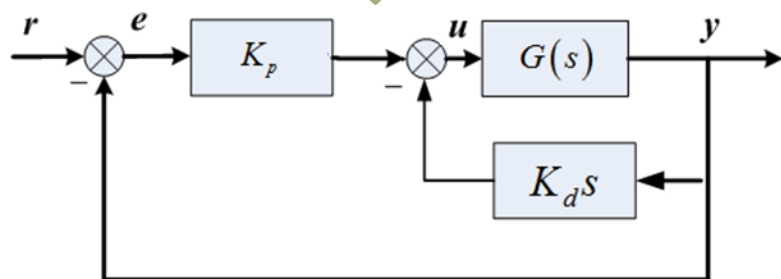
回顾篇

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，第二种是利用**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对系统造成冲击。

能在反馈通道上实现的前提：指令保持不变或变化缓慢，导数近似为零



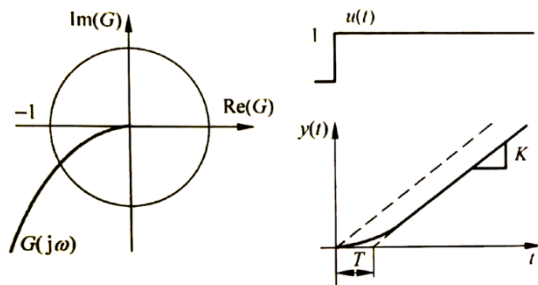
回顾篇

调节系统的类型

■ 积分加一阶模型

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

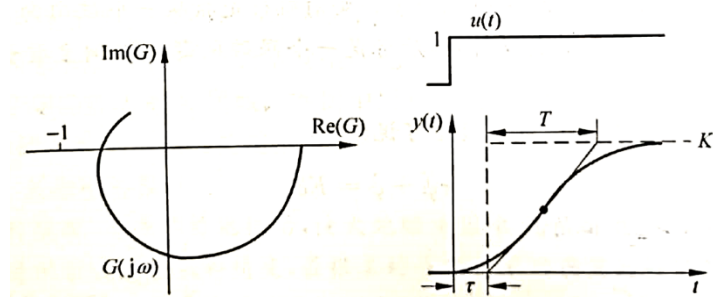
$$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}, T_1 \gg T_2$$



伺服系统能用这种方法辨识吗？

■ 一阶加时间滞后

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



典型对象特性，反映了系统的主要特性，方便分析和设计



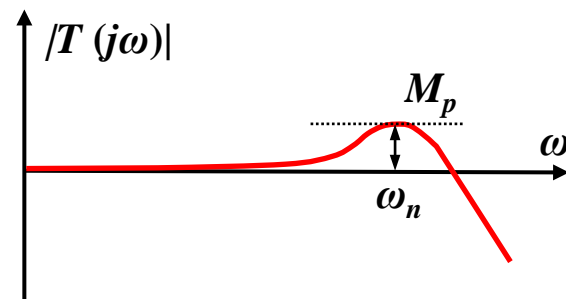
回顾篇

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：
$$\tau s^2 + (1 + K K_d)s + K K_p = 0$$

↓

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

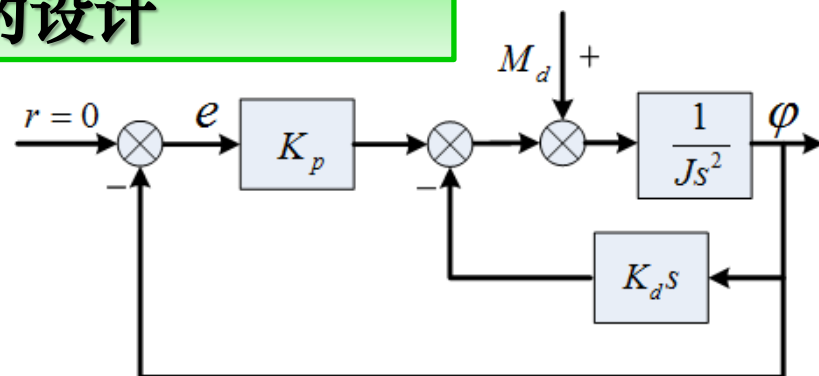
若系统中存在常值扰动，还需要在PD基础上增加I，以消除扰动带来的误差，但是I的增益要尽可能小，不影响PD的作用



回顾篇

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



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

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

$$\left. \begin{matrix} K_p = x \\ K_D = y \end{matrix} \right\} \Rightarrow$$

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

抑制正弦类特殊扰动为主要控制目的时，可以采用隔离度指标



拓展篇

如何成为一名优秀的控制工程师（2）

设计能力

- 既善于时域分析，又善于频域设计；
- 既善于定性分析，又善于定量设计；
- 既善于仿真分析，又善于系统实现；
- 既善用模型公式，又善用图形工具；
- 既善于折中处理，又善于性能优化；
- 既善用已知信息，又善用隐含信息；
- 既善于精确计算，又善于简化处理；
- 既具备扎实基础，又拥有丰富经验；
- 既能够把握原则，又懂得灵活处理；
- 既善于事前预判，又善于事后救急；



学习目标

本节课需要掌握的内容

- 通过一个设计的示例，巩固PID定量设计方法
- 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

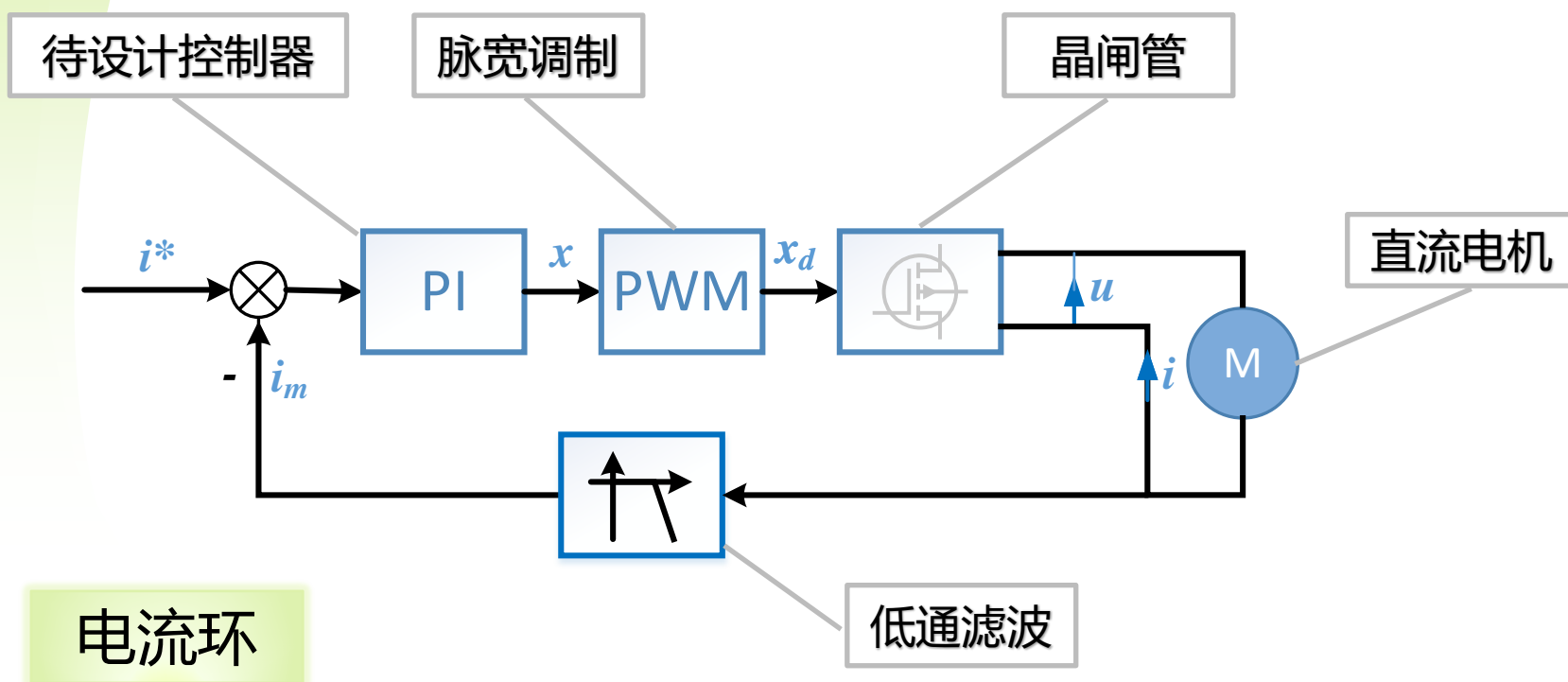
- A1 调节系统的特点及控制规律
- A2 调节系统的类型
- A3 PID系统的设计
- A4 过程控制系统的设计



7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例3：电流回路整定（用于电机调速内回路）

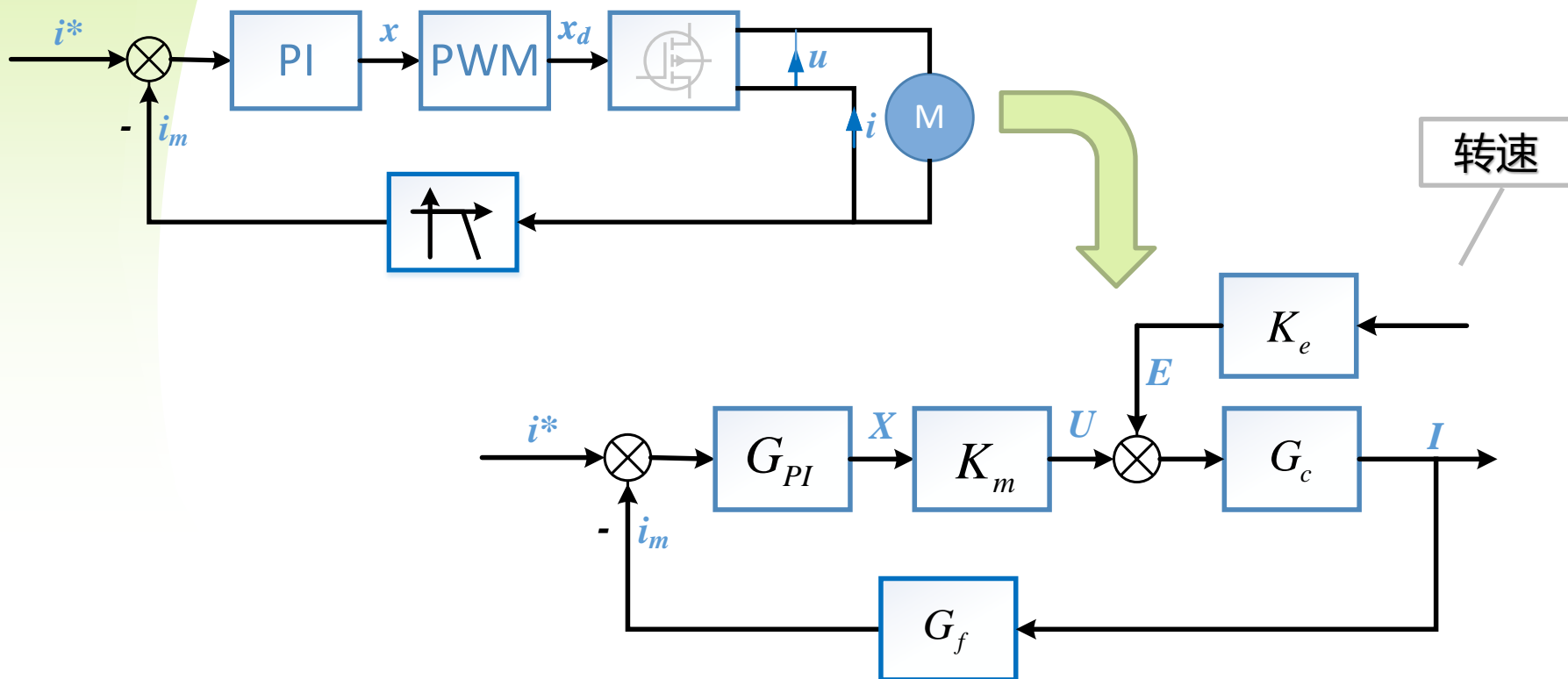




7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

例3：电流回路整定

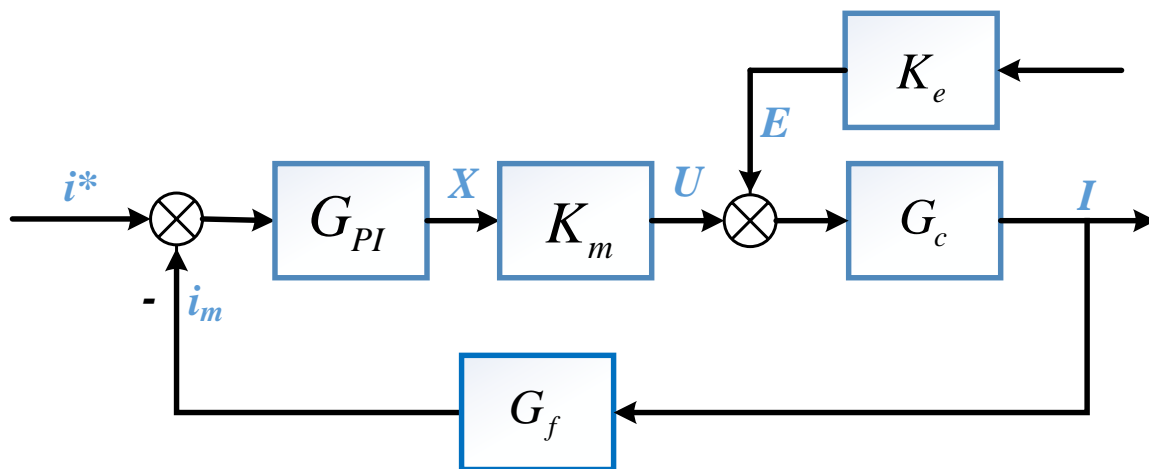




7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

例3：电流回路整定



设计需要考虑的问题：

- (1) 被控对象类型 (2) 主要控制问题



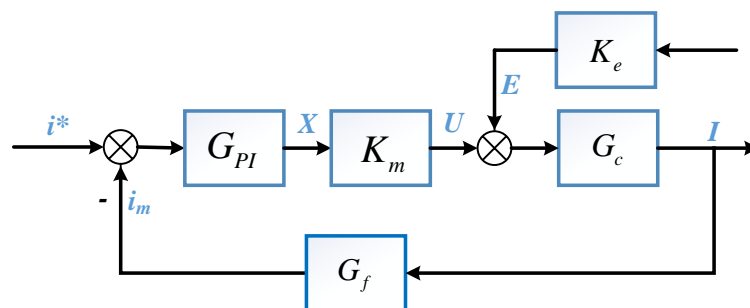
7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

例3：电流回路整定

(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

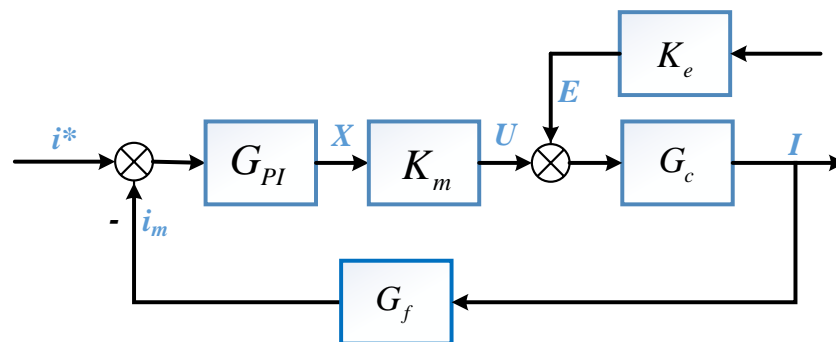
一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例3：电流回路整定

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

(2) 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)

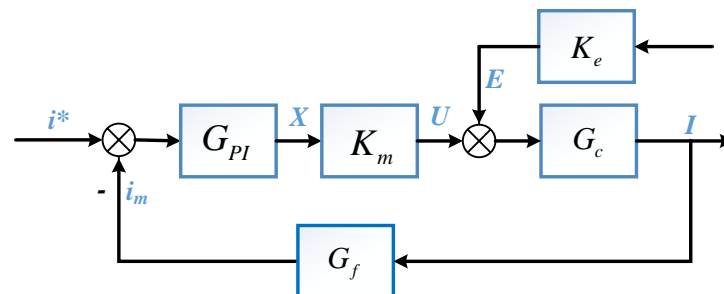


7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

例3：电流回路整定

(1) 被控对象简化



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

$$T_f = 20\mu\text{s}, \quad L_a / R_e = 3.5\text{ms}$$

怎么简化?



7.3 PID系统的设计

相对

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例3：电流回路整定

(1) 被控对象简化

为什么能去掉高阶项？

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

$$T_f = 20\mu\text{s}, \quad L_a/R_e = 3.5\text{ms}$$

$$T_g = 2T_f = 40\mu\text{s}, \quad K_g = K_m/L_a = 1.3 \times 10^4 \text{ rad/s}$$



7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

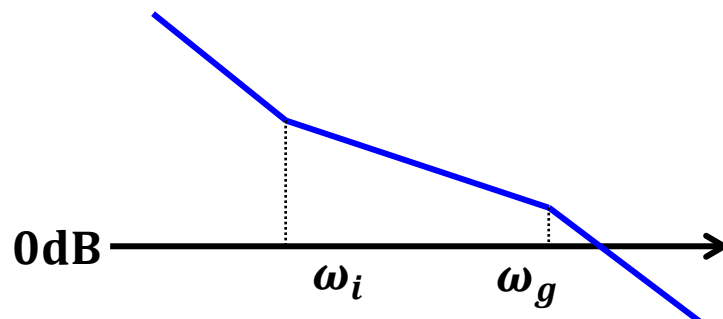
■ 例3：电流回路整定

(2) 控制器设计

保证精度：PI控制器——保证相角裕度

$$G(s) = \frac{K_g}{s(T_g s + 1)}$$
$$K(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$
$$K(s)G(s) = \frac{K_p K_g \omega_g (s + \omega_i)}{s^2 (s + \omega_g)}$$

怎么确定 $\omega_i(\frac{1}{T_i})$ 和 K_p





7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

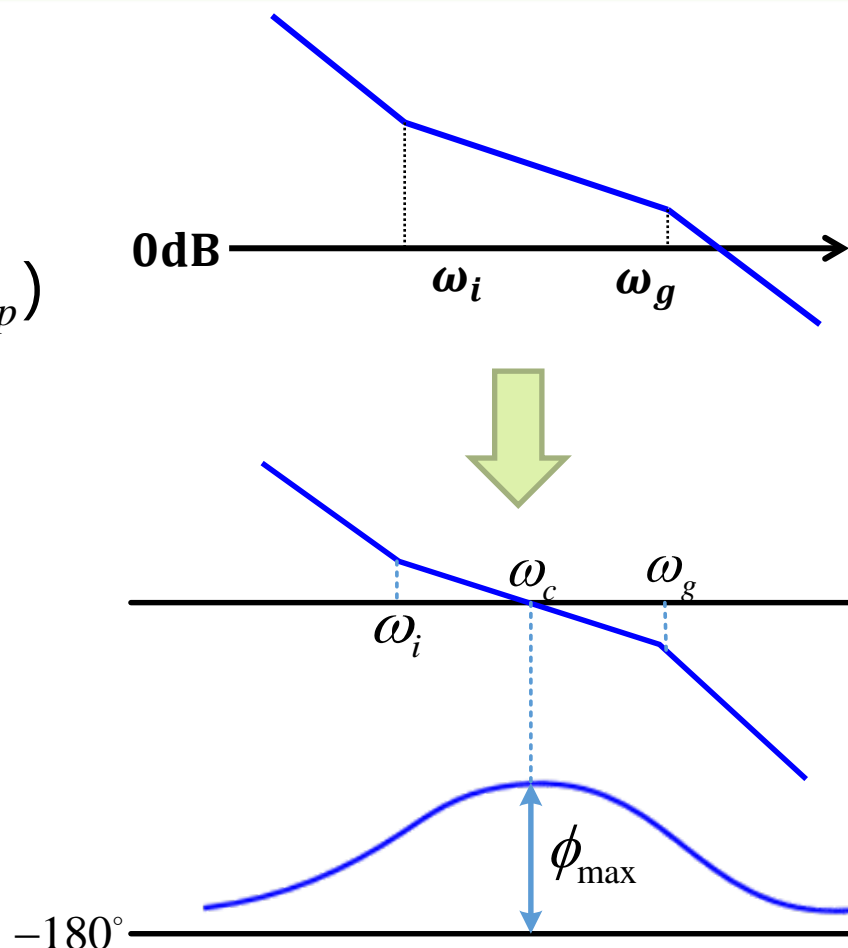
例3：电流回路整定

(2) 控制器 (怎么确定 ω_i 和 K_p)

对称转折频率可获得最大相角裕度

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

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





7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

例3：电流回路整定

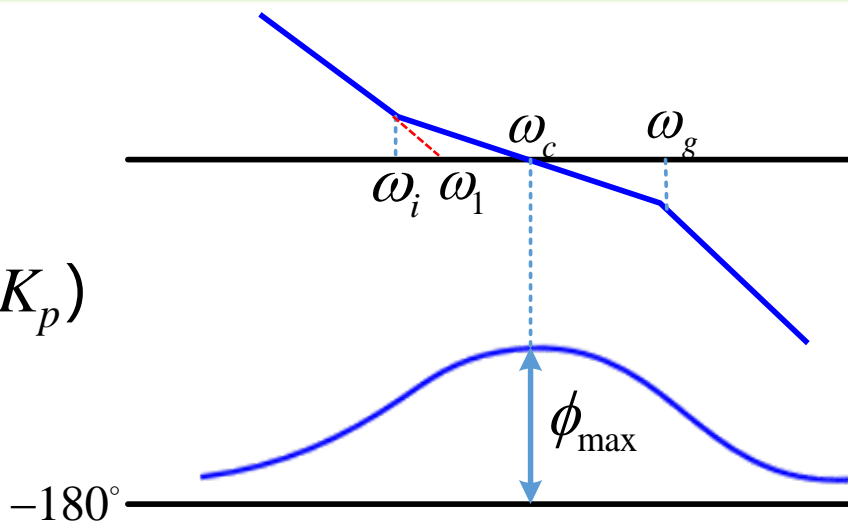
(2) 控制器（怎么确定 ω_i 和 K_p ）

$$K(s)G(s) = \frac{K_p K_g \omega_i (s / \omega_i + 1)}{s^2 (s / \omega_g + 1)}$$



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

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



$$K_p K_g \omega_i = \omega_1^2 = \omega_i \omega_c$$



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



7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

例3：电流回路整定

(2) 控制器设计

保证相角裕度，怎么确定 ω_i 和 K_p

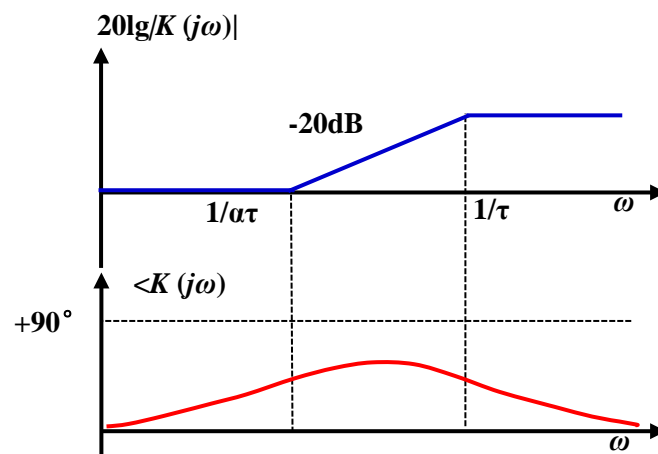
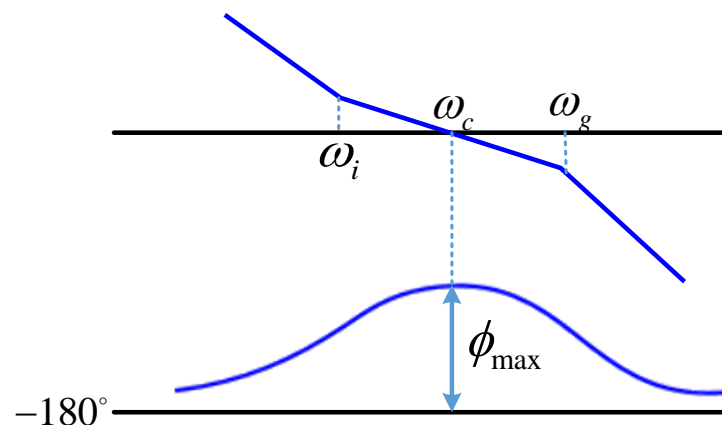
$$\omega_c = \frac{\omega_g}{\sqrt{\alpha}}$$

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

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

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

如何确定 α ?



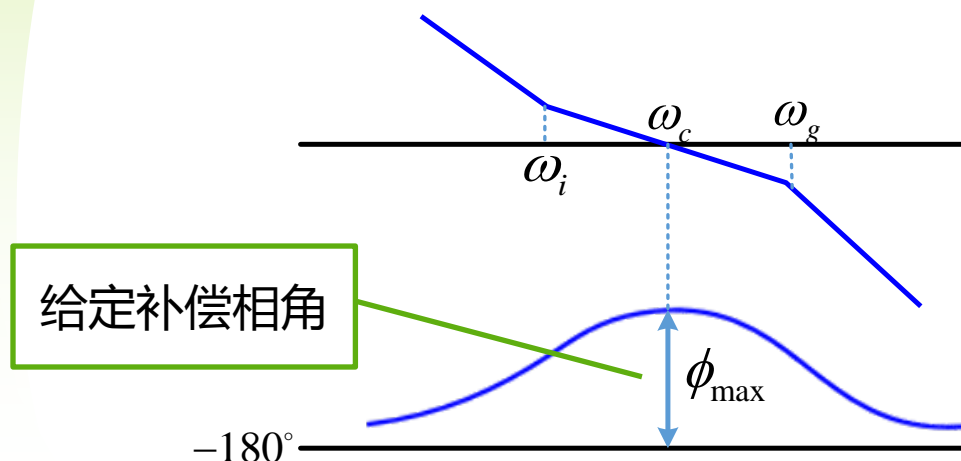


7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例3：电流回路整定

(2) 控制器（怎么确定 α ）



如何确定 ϕ_m ?

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

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

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

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



7.3 PID系统的设计

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

■ 例3：电流回路整定

(2) 控制器（如何用PI控制补偿相角）

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

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

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

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



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

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



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



7.3 PID系统的设计

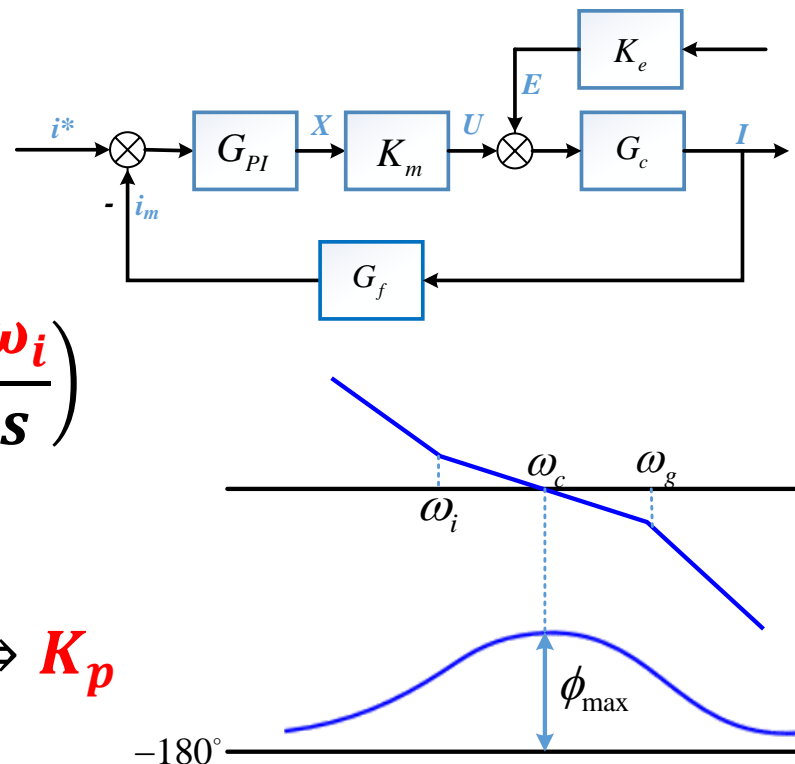
中频

一般原则 | 例1：航向保持 | 例2：火炮稳定 | 例3：电流调节

- 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

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

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



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，最终确定了PI控制器的两个参数



7.3 PID系统的设计

基于模型和指标的PID控制器设计总结

- 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，考虑隐含的稳定性等要求；
- 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，也可能无解；
- 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。



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

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 对象特性

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

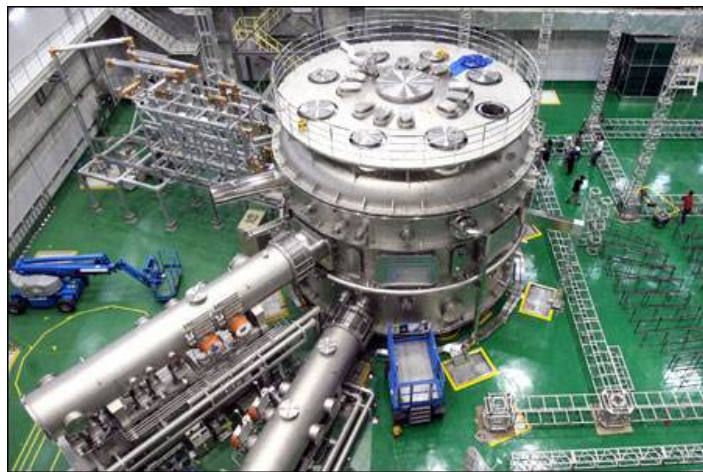
过程控制定义 | **任务和需求** | 性能指标 | 对象特性

□ 工业生产对过程控制的要求

- 安全性
- 经济性
- 稳定性

□ 过程控制的任務

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。

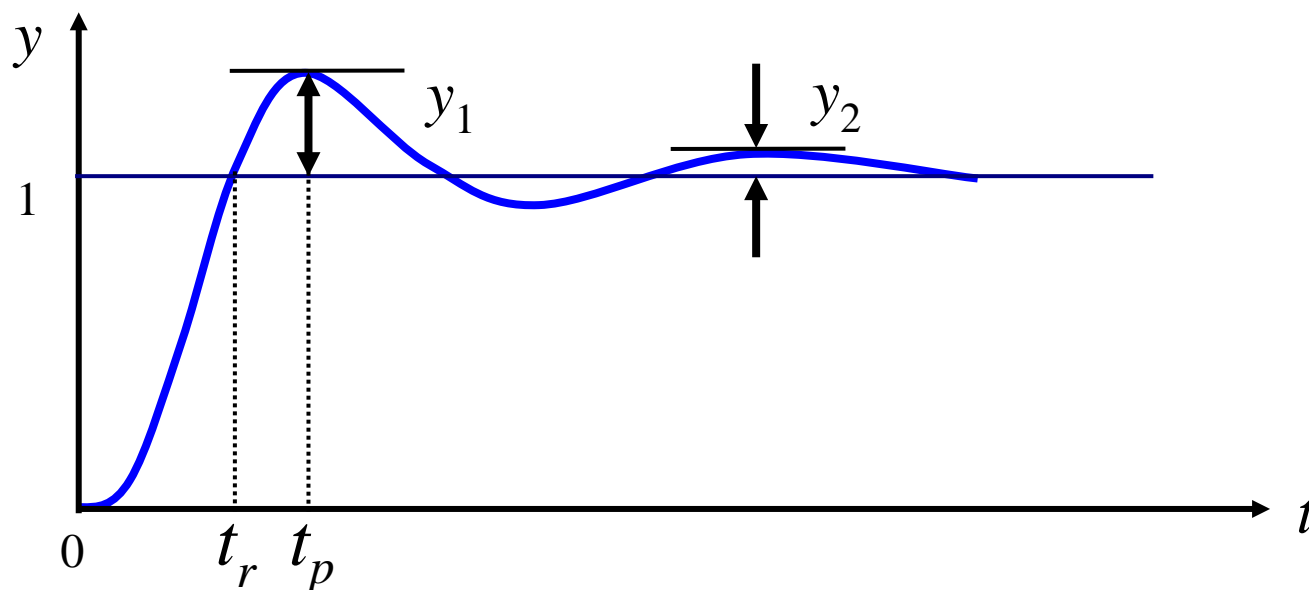




7.4.1 过程控制系统的对象特性

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 对象特性

□ 衰减比和衰减率



衰减比: $n = \frac{y_1}{y_2}$

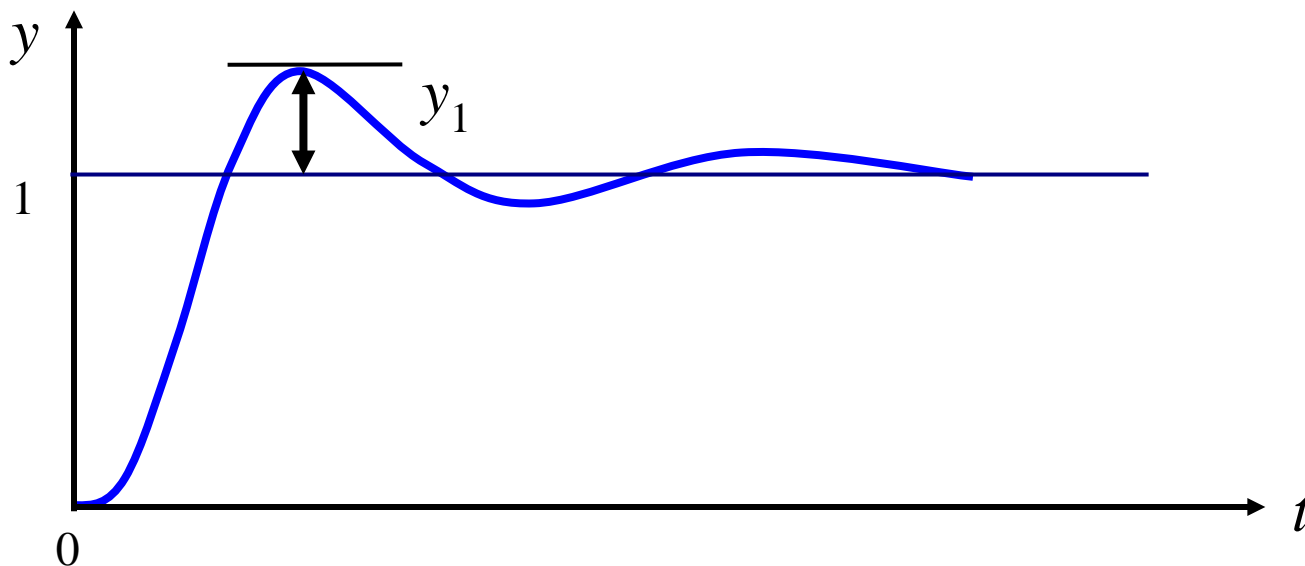
衰减率: $\psi = \frac{y_1 - y_2}{y_1}$



7.4.1 过程控制系统的对象特性

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 对象特性

□ 最大动态偏差和超调量



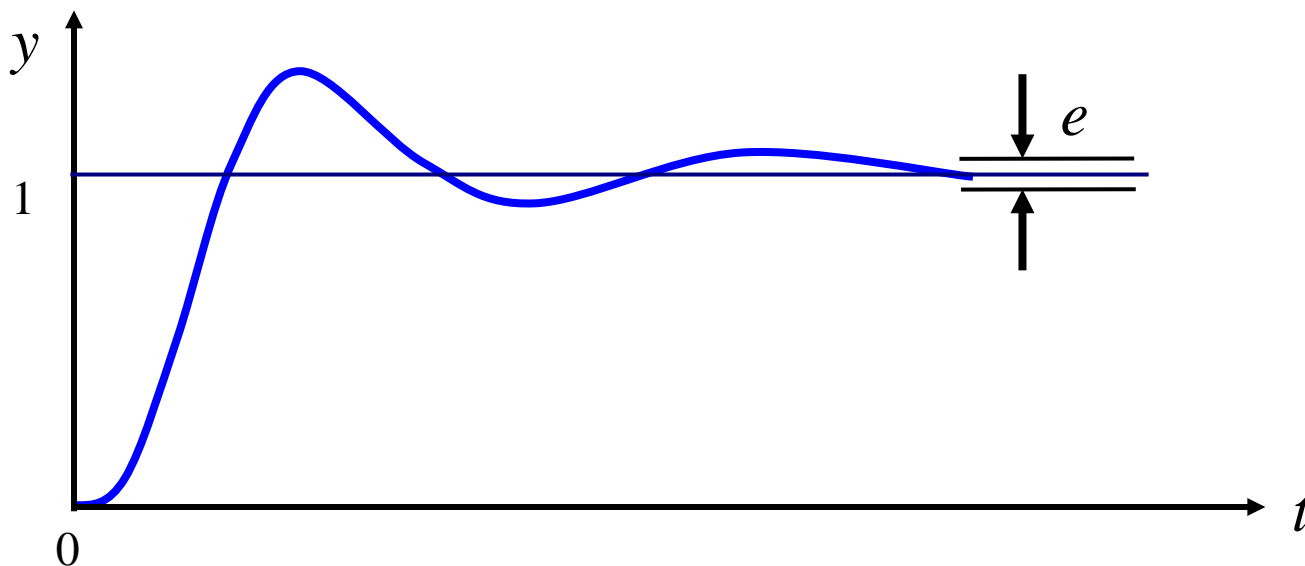
最大动态偏差: y_1



7.4.1 过程控制系统的对象特性

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 对象特性

□ 残余偏差



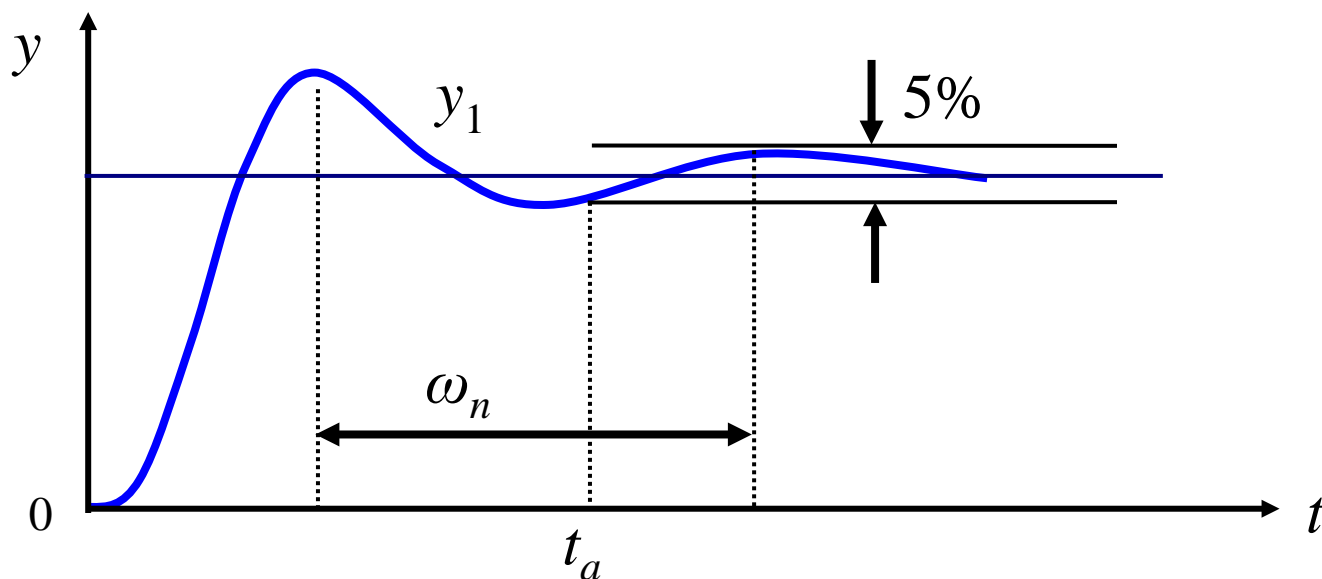
过渡过程结束后被调量新的稳态值与新设定值的差值，它是控制系统稳态准确性的衡量标志。



7.4.1 过程控制系统的对象特性

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 对象特性

□ 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

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 对象特性

□ 误差积分性能指标（综合指标）

- 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，这样就完成了控制器的设计）。



7.4.1 过程控制系统的对象特性

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 对象特性

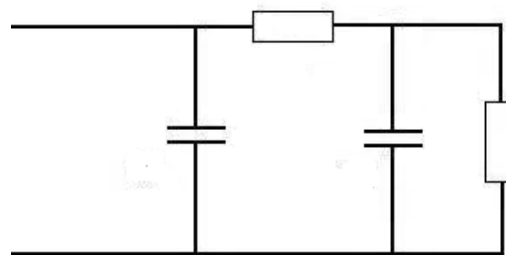
□ 容积描述

容积：控制对象内所储存的物料或能量，如水箱容量，热量；

容积系数 C ：被调量（液位，温度）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

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 对象特性

□ 电炉加热器

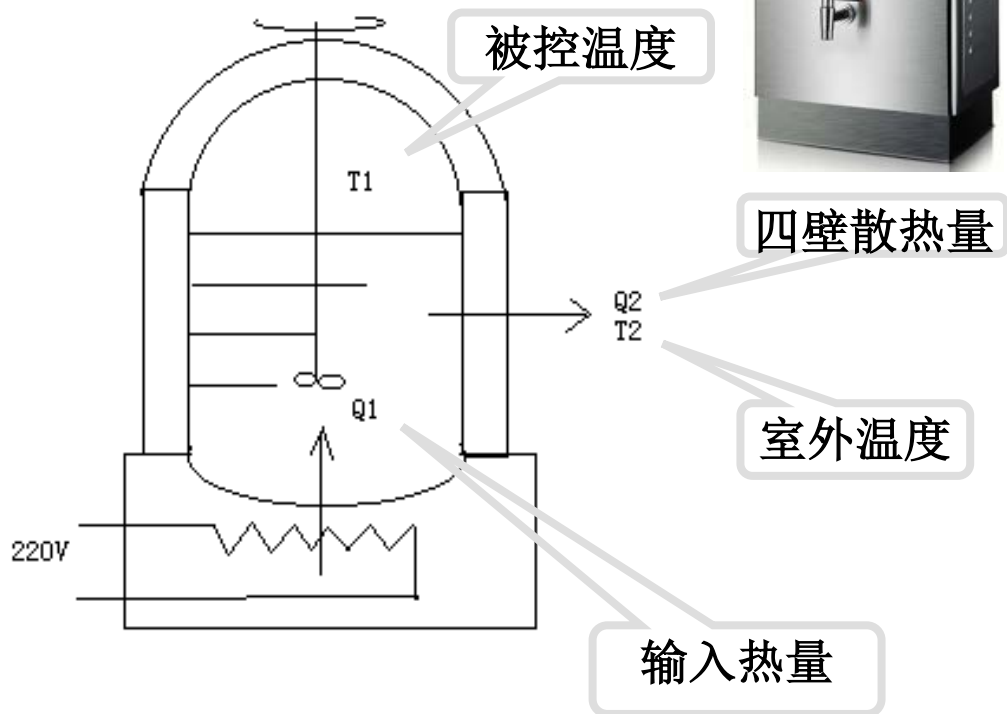
目标：容器内水的温度保持为 T_1

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

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 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



7.4.1 过程控制系统的对象特性

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 对象特性

□ 电炉加热器

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。

$$R = \frac{1}{kA} \quad Q_2 = \frac{1}{R}(T_1 - T_2)$$

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

取增量形式有

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

$$RQ_1 - (T_1 - T_2) = RC \frac{dT_1}{dt}$$

假设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

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | **对象特性**

□ 电炉加热器

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

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

T —对象的时间常数, $T=RC$

K —对象的放大系数, $K=R$

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

考虑到测温过程的**延迟**, 可得
被控对象为:

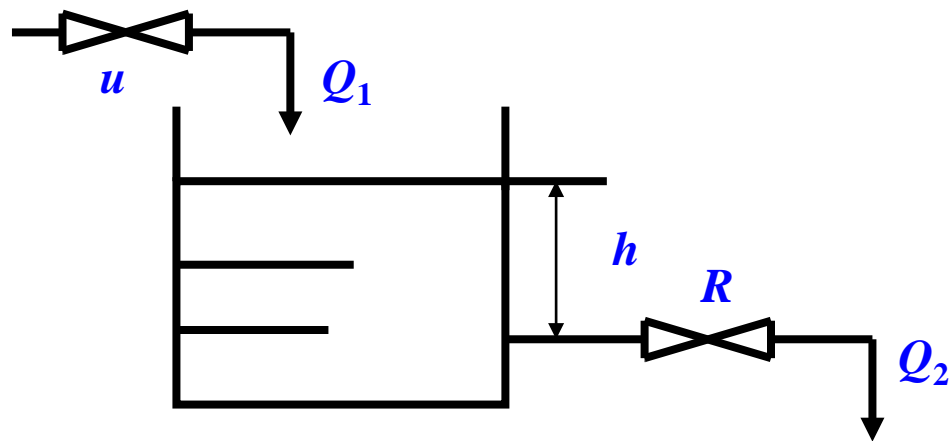
$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}$$



7.4.1 过程控制系统的对象特性

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 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 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

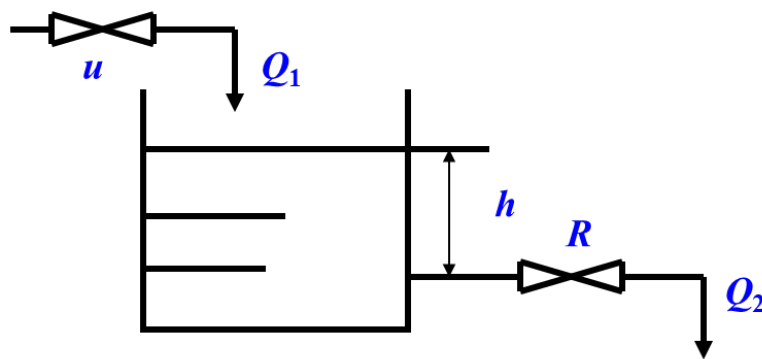
过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 对象特性

□ 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

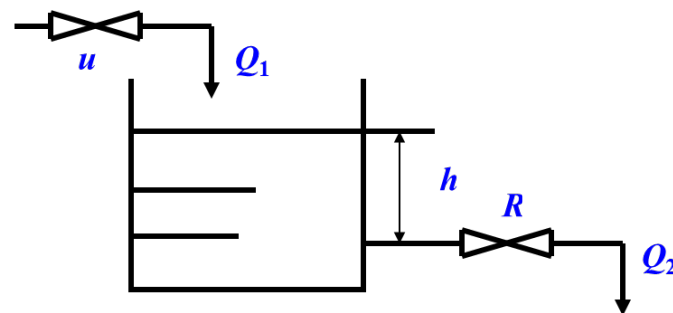




7.4.1 过程控制系统的对象特性

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 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：

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

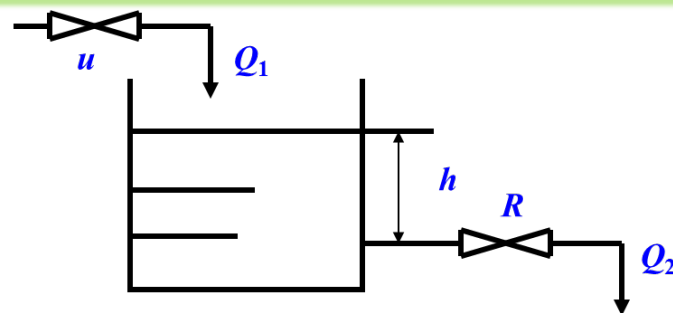


7.4.1 过程控制系统的对象特性

增量

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 对象特性

□ 单容水槽控制



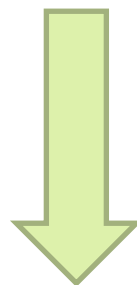
$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{C} (Q_1 - Q_2)$$

取增量



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

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



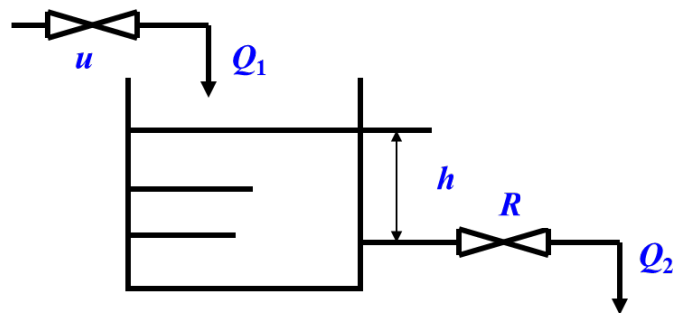
$$\frac{d\Delta h}{dt} = \frac{1}{C} (\Delta Q_1 - \frac{1}{R} \Delta h)$$



7.4.1 过程控制系统的对象特性

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 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。

$$T = RC$$

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

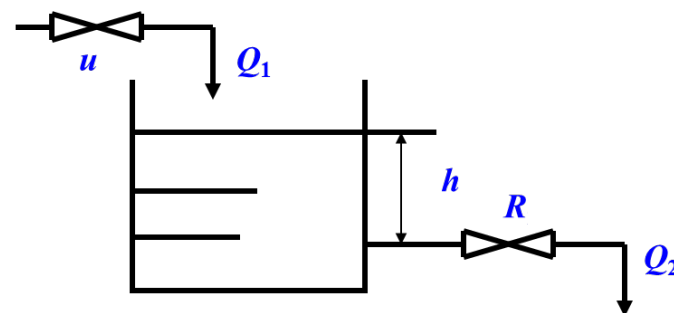
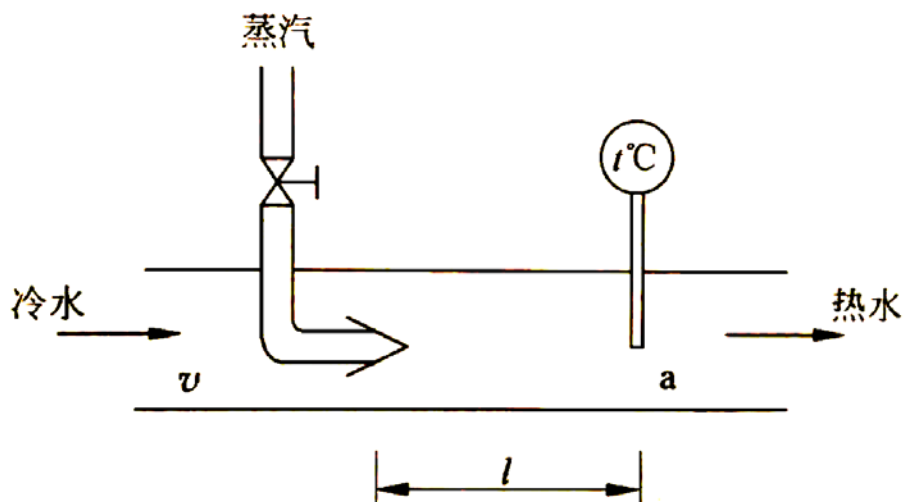


7.4.1 过程控制系统的对象特性

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 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：

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

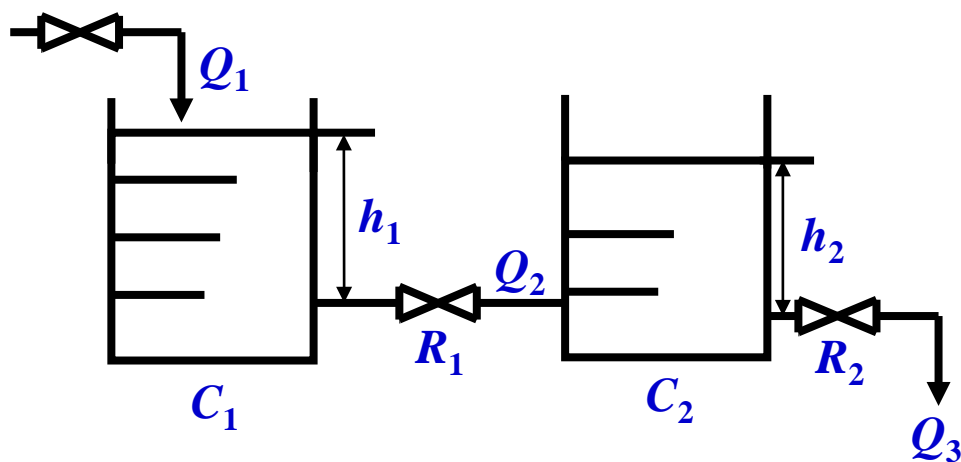


7.4.1 过程控制系统的对象特性

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 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

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 对象特性

□ 多级水位过程控制

平衡关系:

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

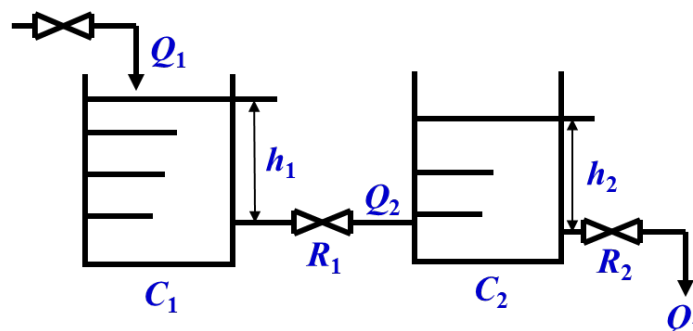
$$Q_2 = \frac{1}{R_1} (h_1 - h_2)$$

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

$$T_1 = C_1 R_1$$

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

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

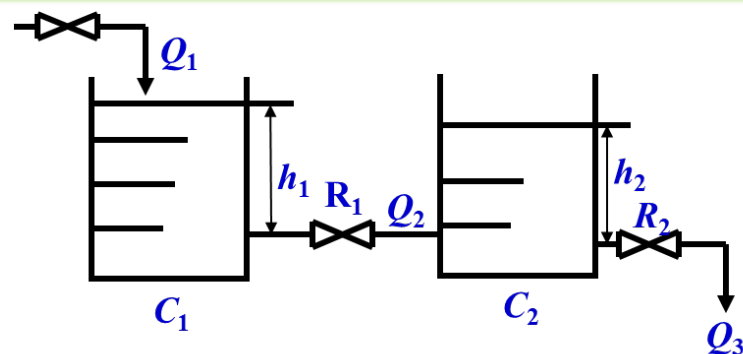

$$\left\{ \begin{aligned} T_1 \frac{dh_1}{dt} + h_1 - h_2 &= R_1 Q_1 \\ T_2 \frac{dh_2}{dt} + h_2 - r h_1 &= 0 \end{aligned} \right.$$



7.4.1 过程控制系统的对象特性

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 对象特性

□ 多级水位过程控制



$$\begin{cases} T_1 \frac{dh_1}{dt} + h_1 - h_2 = R_1 Q_1 \\ T_2 \frac{dh_2}{dt} + h_2 - r h_1 = 0 \end{cases} \Rightarrow G(s) = \frac{H_2(s)}{Q_1(s)} = \frac{r R_1}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + (1 - r)} = \frac{K}{(T'_1 s + 1)(T'_2 s + 1)}$$

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。



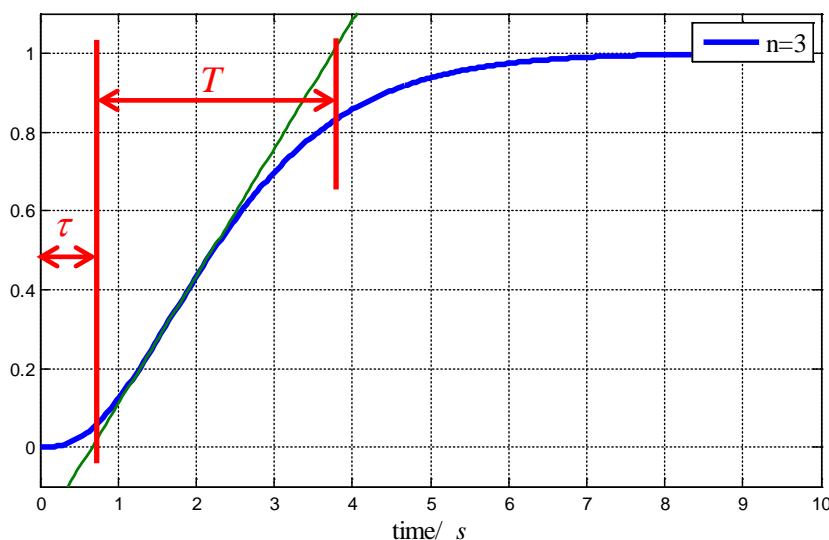
7.4.1 过程控制系统的对象特性

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 对象特性

□ 多级水位过程控制

多容对象的传递函数为:

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



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

$$T = 3.0796s$$

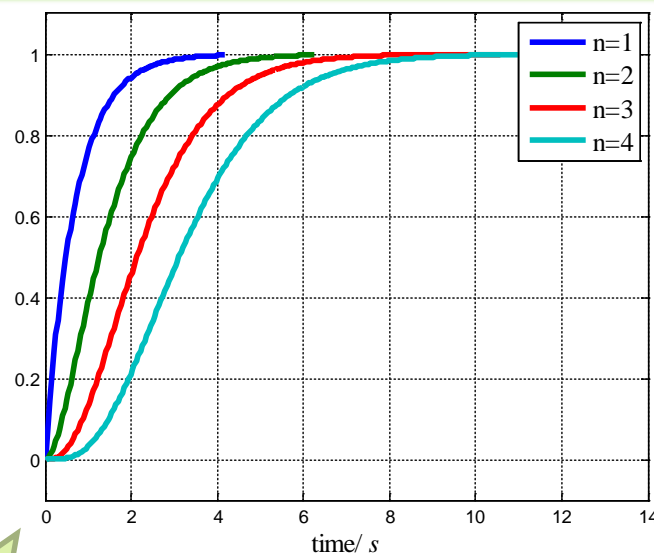
$$\tau = 0.6655s$$

$$T_1 = 0.7s$$

$$T_2 = 0.8s$$

$$T_3 = 0.9s$$

$$T_4 = 1.0s$$





7.4.1 过程控制系统的对象特性

过程控制定义 | 任务和需求 | 性能指标 | 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

微分增加阻尼 | 积分提升精度

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。

为什么？



7.4.2 过程控制系统的设计特点

微分增加阻尼 | 积分提升精度

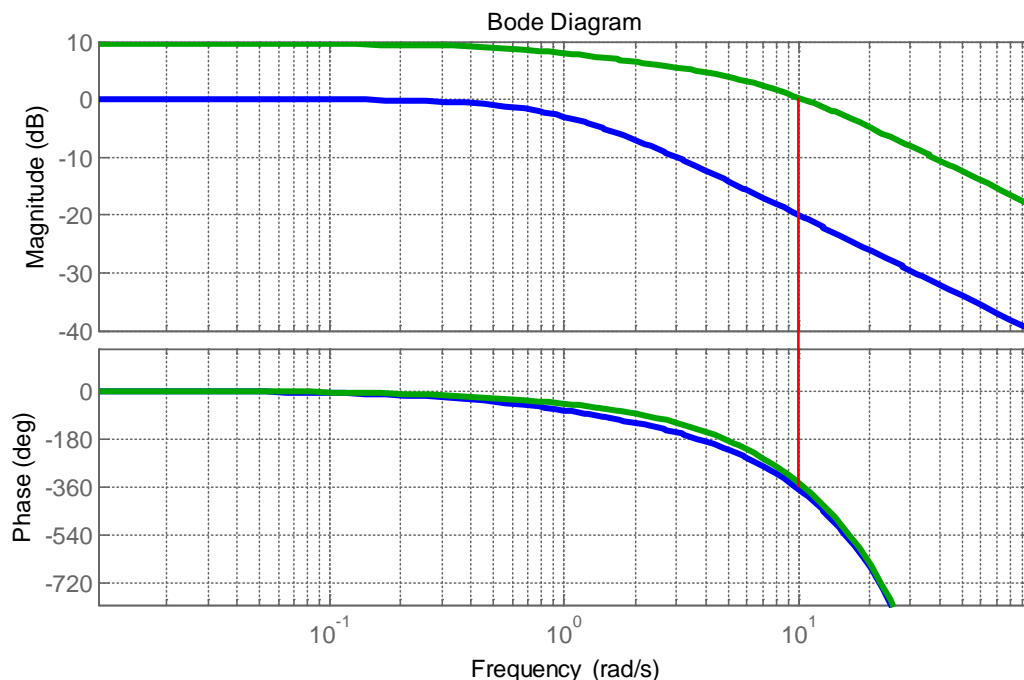
■ 微分增加阻尼的效果不显著

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

仅用比例环节 $K_p=3$ ，穿越频率为 $\omega_c=3\text{rad/s}$ ，相位裕度 $\gamma=22.5^\circ$

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

采用近似比例加微分，穿越频率为 $\omega'_c=12\text{rad/s}$ ，相角为 -409°





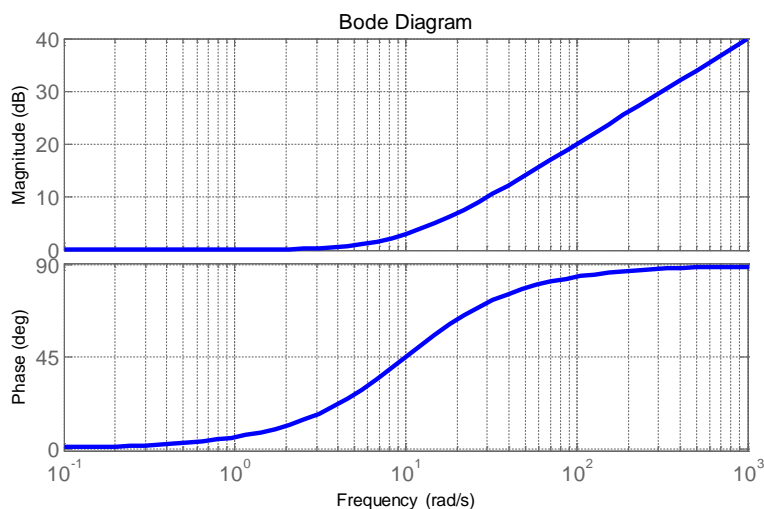
7.4.2 过程控制系统的设计特点

微分增加阻尼 | 积分提升精度

■ 微分控制

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

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，避免抬高增益过多抬高穿越频率。



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

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

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



7.4.2 过程控制系统的设计特点

微分增加阻尼 | 积分提升精度

● 例1 微分增加阻尼的效果不显著

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

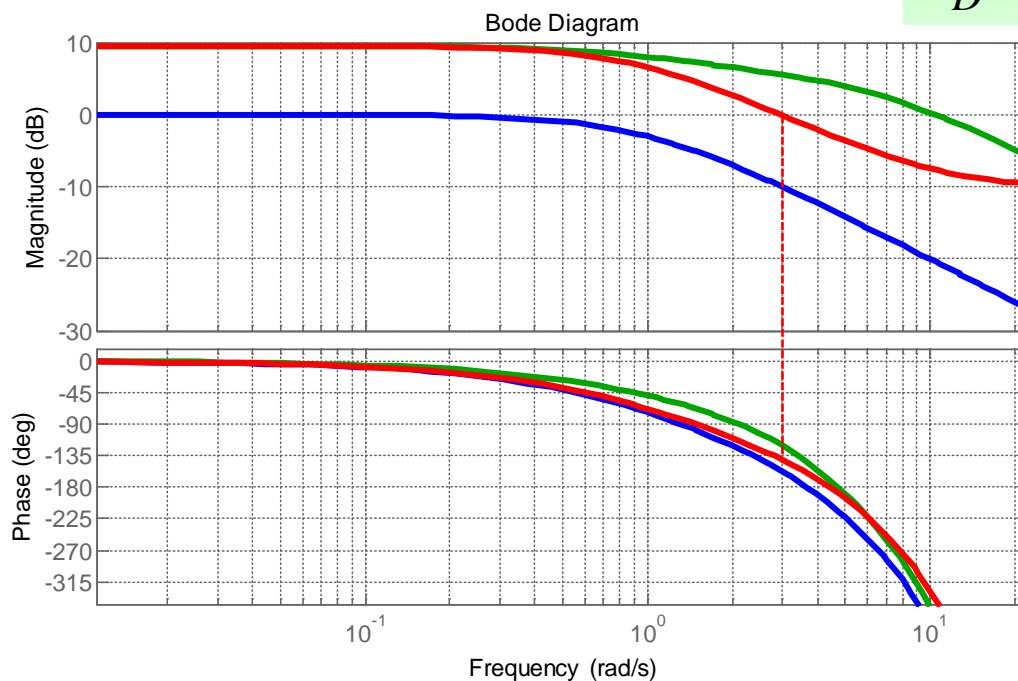
$$G(s) = \frac{1}{s+1} e^{-0.5s}$$

$$D(s) = 3 \frac{(1+T_D s)}{(1+\tau_D s)}$$

$$\omega_c = 3$$

$$T_D = 0.1$$

$$\tau_D = 0.1T_D$$



实现了40°的相角裕度。

$$D(s) = 3 \cdot \frac{s/10 + 1}{s/100 + 1}$$

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



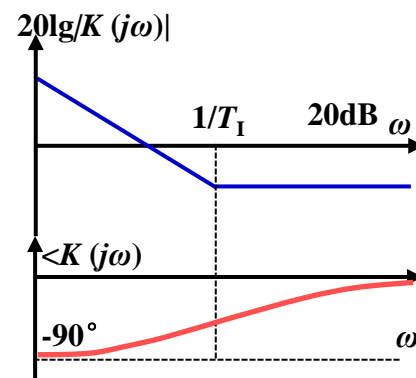
7.4.2 过程控制系统的设计特点

微分增加阻尼 | 积分提升精度

■ 增益低、带宽窄导致静差大——引入积分

由于时延环节的存在，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（剪切频率）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（剪切频率）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 | 整定的方法

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）。

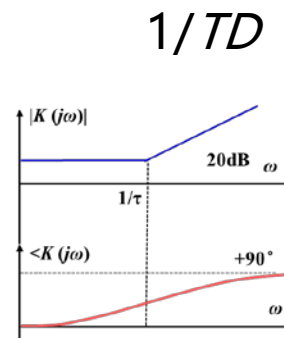
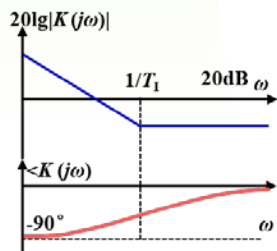
PID已成为调节系统的通用形式和标准设计，PID三个参数的选择称为整定。

1. 改增益，调带宽

$$K_P \Leftrightarrow \omega_n \Leftrightarrow \omega_c$$

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

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



3. 提精度，抗干扰

2. 补相角，增阻尼



7.4.3 过程控制系统的整定

整定的含义 | 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，根据参数的作用规律，基于设计者的经验，观察实际运行曲线进行参数调整。



7.4.3 过程控制系统的整定

整定的含义 | 整定的方法

● 临界比例度法

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

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

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} 为临界增益, $T_c=2\pi/\omega_{cr}$ 为振荡周期

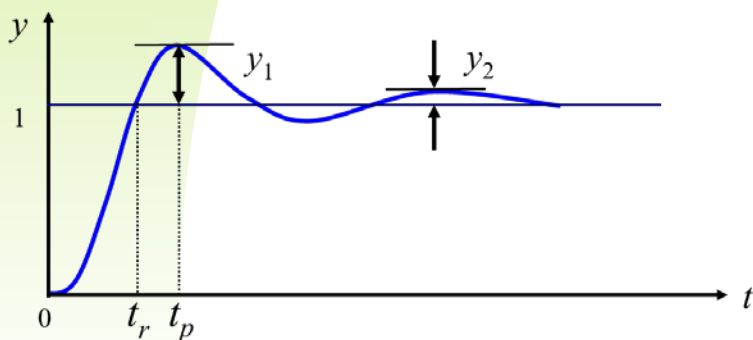
步骤: 开始仅用比例, 不断增大 K_p 直至出现等幅振荡, 记下此时的增益 K_{pc} , 以及振荡周期 T_c , 然后根据要采用的控制器形式, 按照表格中的公式计算出PID参数。



7.4.3 过程控制系统的整定

整定的含义 | 整定的方法

PID参数整定口诀



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

*出自1973年11月出版的《化工自动化》

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**^[1]
曲线漂浮绕大湾，比例度盘往**小扳**^[1]
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，前高后低四比一
一看二调多分析，调节质量不会低。

[1] 这里比例盘放大，实际是减小了增益，往小扳则是增大增益的意思



总结

本节课内容回顾

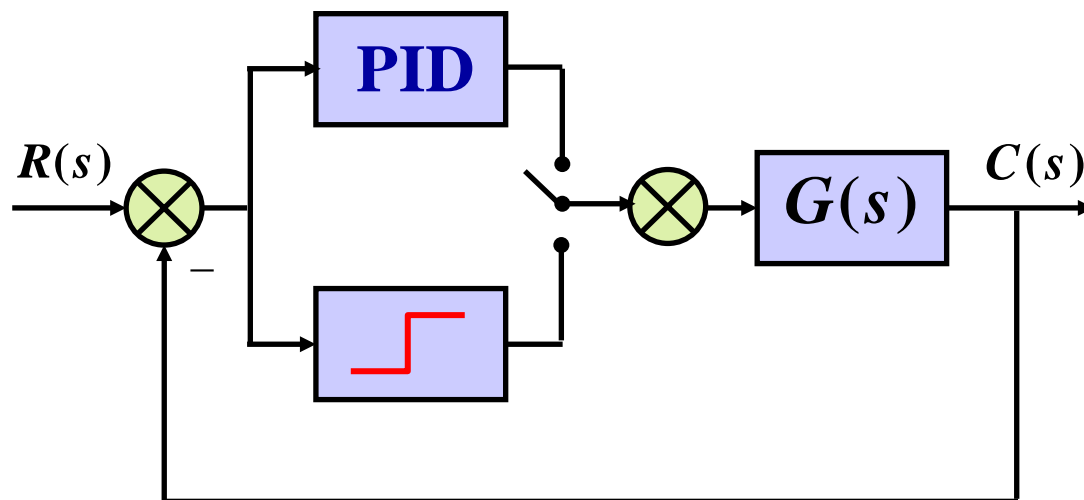
- 总结了PID定量设计的方法;
- 介绍了过程控制系统定义、特点、用途和指标;
- 给出了温度, 液位等过程控制系统的模型推导过程及结果;
- 说明了过程控制系统 (一阶加延迟) PID设计特点。



第22讲课后作业

1 可选作业

22-1 设计题：参考课本139页的3.4.4节，自行设计PID参数自整定系统，具体实现方法不限，可以采用S函数实现。最后通过仿真验证有效性。（可以只做简单P或者PI或PD，对象任选）



最好能在实验B中用上



第22讲课后作业

2 可选作业

- 22.1 总结温度和液位控制系统与电路系统模型相同之处，并试着举出一些类似的例子（公式描述相同，具体对象不同、物理意义不同）；
- 22.2 综合课程所有涉及PID控制设计的内容，总结PID参数的各种设计方法（这里指理论计算整定）；
- 22.3 简单总结一下什么系统适合用相角裕度进行设计，什么系统适合用幅值裕度进行设计；
- 22.4 分析一下PID的三种整定方法——理论计算整定，工程整定和直接经验整定的优劣和适用条件；
- 22.5 总结所有涉及到近似（附加零点或者极点）实现的课程内容；



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的方法（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（不同回路不同功能）；
- t 特殊到一般，简单到复杂（走上科研创新之路）；
- u 输入、指标和对象（控制设计的三要素）；
- v 控制系统设计中，各种简化方法（大胆简化、小心验证）；
- w 科学与工程，理论与实践，理想与现实（三对概念，三种视角）；
- x 时频域数据分析的重要性（数据中有黄金）；



Thank You !