

自动控制实践B——2022年春季学期

第七章 调节系统的设计 (2)

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





◆ 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：

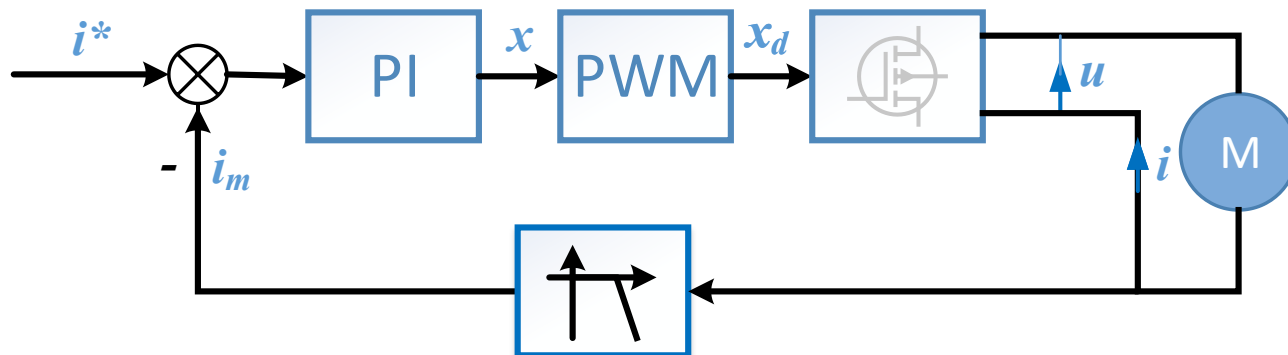
$$G(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}$$





◆ PID系统的设计

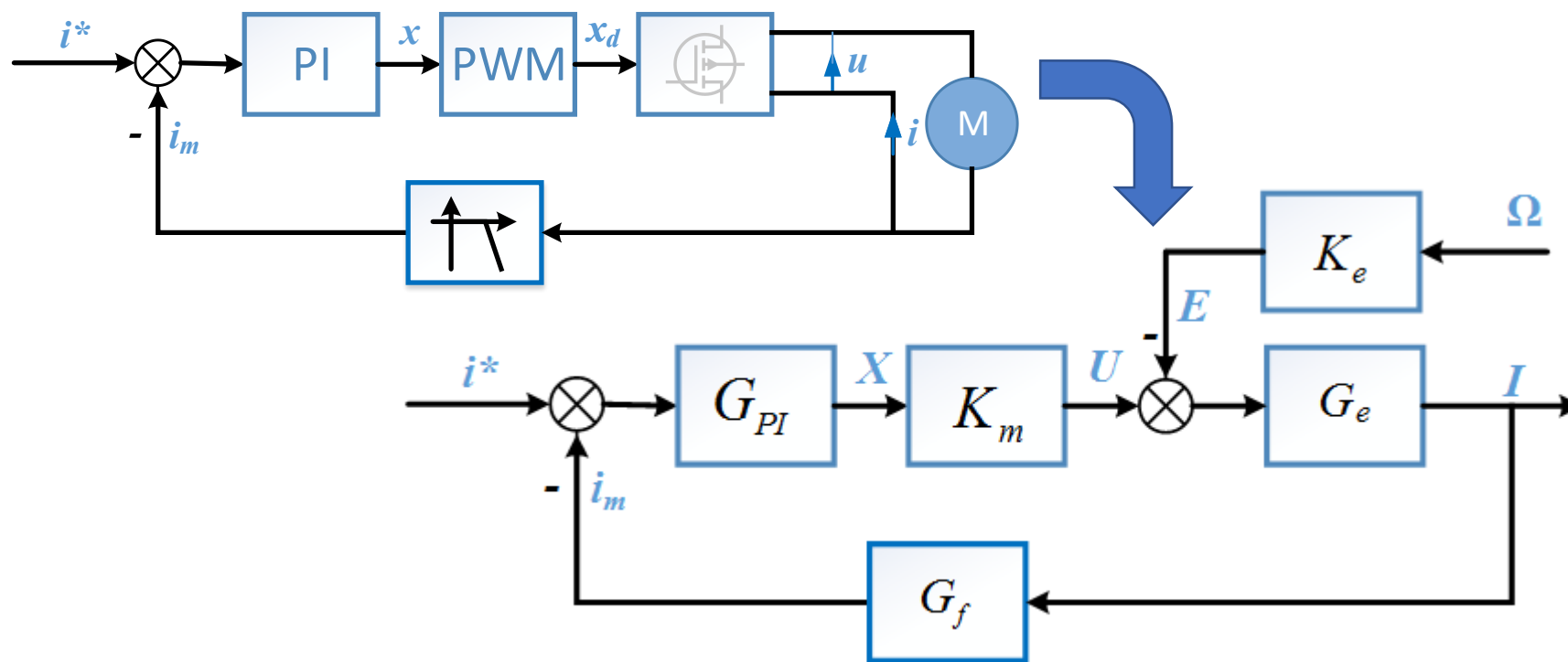
● 例3：电流回路整定 (p131例8-3)



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

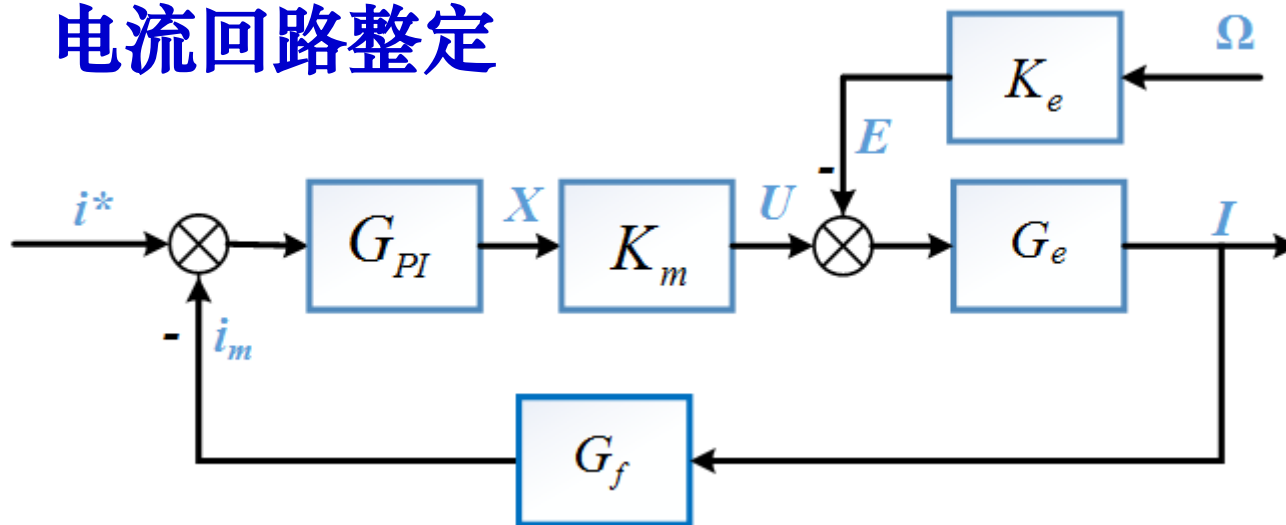
◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定



◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定

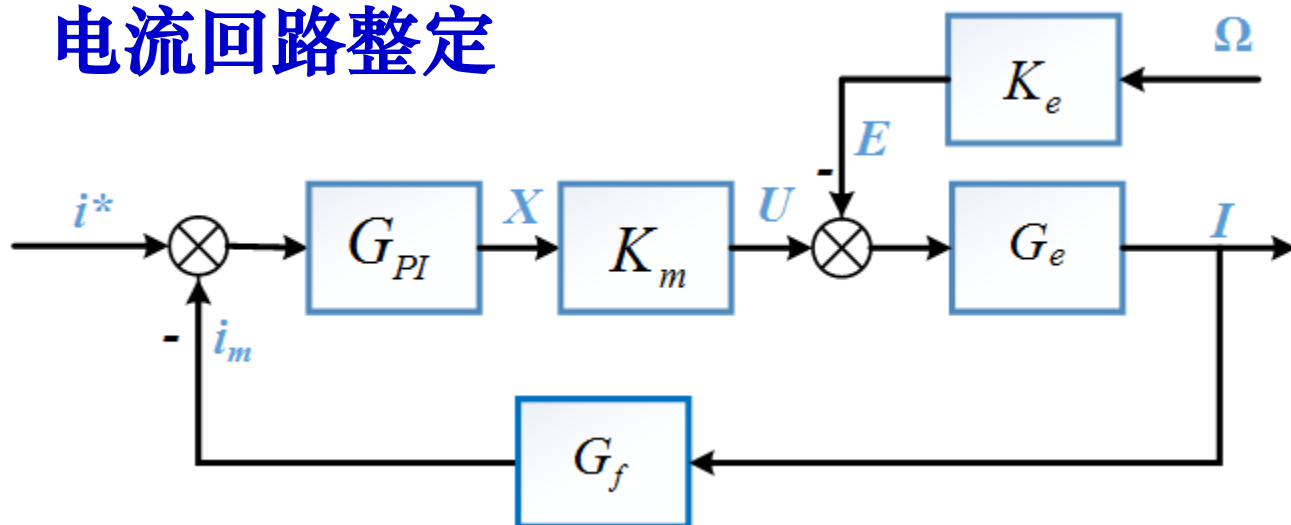


设计需要考虑的问题：

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

◆ PID系统的设计

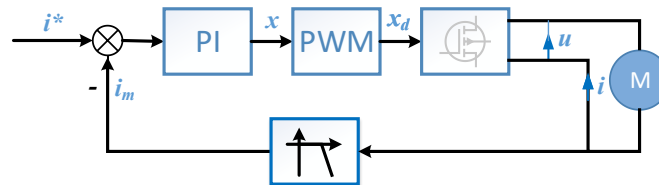
● 例3：电流回路整定



干扰：反电动势，会造成静差，引入积分控制；

噪声：脉宽调制导致高频噪声，不采用微分控制；

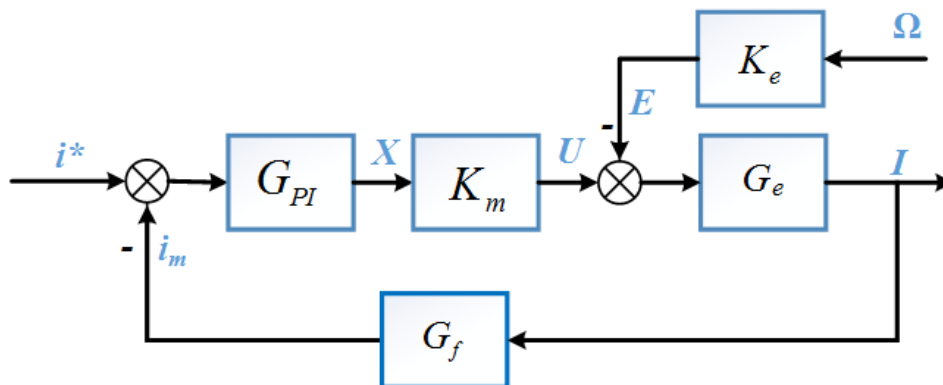
相对稳定性。



◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定

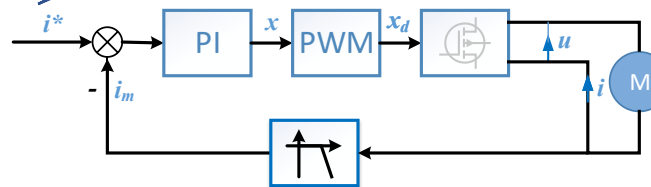
(1) 被控对象类型



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

调制器及MOSFET电路: $G_2(s) = K_m$

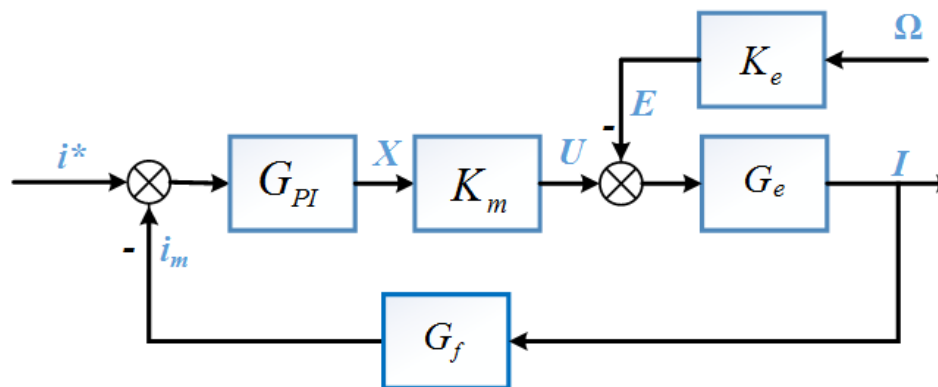


调制频率很高:
20KHz

◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定

(1) 被控对象类型



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

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



7.3 PID系统的设计

◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定

$$T_f = 20\mu s$$
$$\frac{L_a}{R_a} = 3.5ms$$

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

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

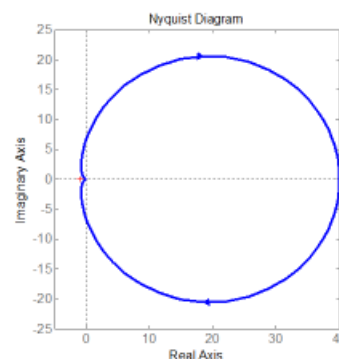


7.2 调节系统的类型

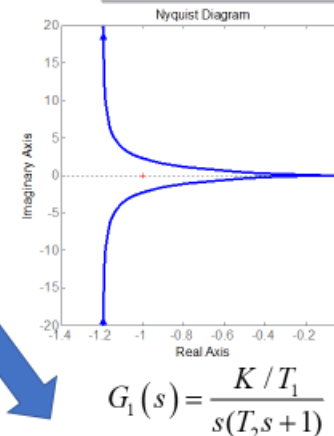
◆ 调节系统的类型

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

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。



$$G(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}$$
$$K = 40$$
$$T_1 = 1$$
$$T_2 = 0.03$$



◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定

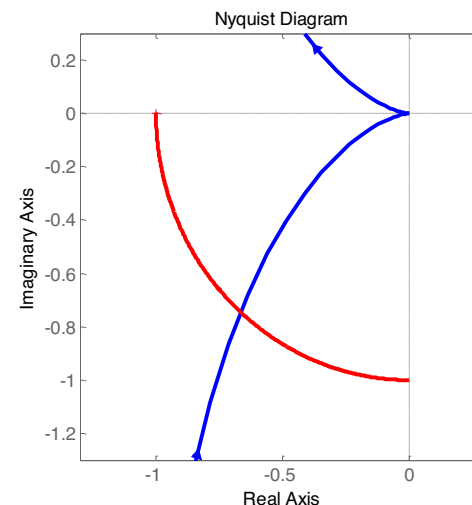
(2) 控制器

保证精度：PI控制器，需保证相角裕度。

$$\omega_i = \frac{1}{T_I}, \quad \omega_g = \frac{1}{T_g} \quad G_{PI}(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

设计任务：
确定参数 K_P 和 ω_i 。

$$G(s) = \frac{K_g}{s(T_g s + 1)} = \frac{K_g \omega_g}{s(s + \omega_g)}, \quad G_{PI}(s) = K_P \left(1 + \frac{\omega_i}{s} \right)$$





7.3 PID系统的设计

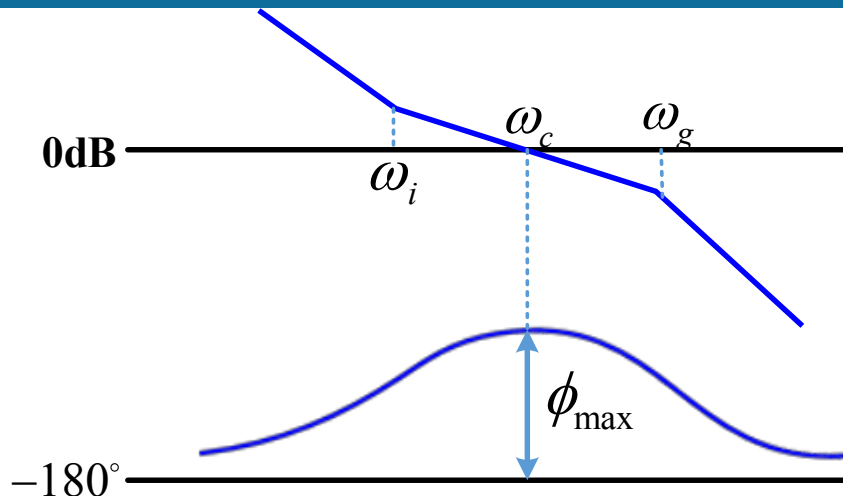


◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定

(2) 控制器

保证精度：PI控制器，需保证相角裕度。



$$G_{PI}(s)G(s) = \frac{K_P K_g \omega_g (s + \omega_i)}{s^2 (s + \omega_g)}$$

由于被控对象的时间常数 T_g 较小，可以将其所对应的转折频率安排在穿越频率 ω_c 之外。

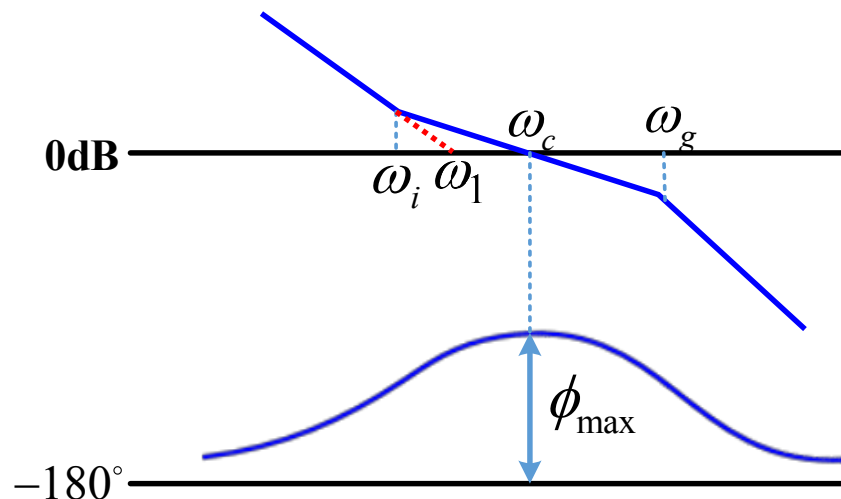


◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定

(2) 控制器

保证精度：PI控制器，需保证相角裕度。



设计任务：

确定参数 K_P 和 ω_i 。

$$\begin{aligned} G_{PI}(s)G(s) &= \frac{K_P K_g \omega_g (s + \omega_i)}{s^2 (s + \omega_g)} \\ &= \frac{K_P K_g \omega_i (s/\omega_i + 1)}{s^2 (s/\omega_g + 1)} \end{aligned}$$

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

$$\rightarrow K_P = \frac{\omega_c}{K_g}$$



7.3 PID系统的设计

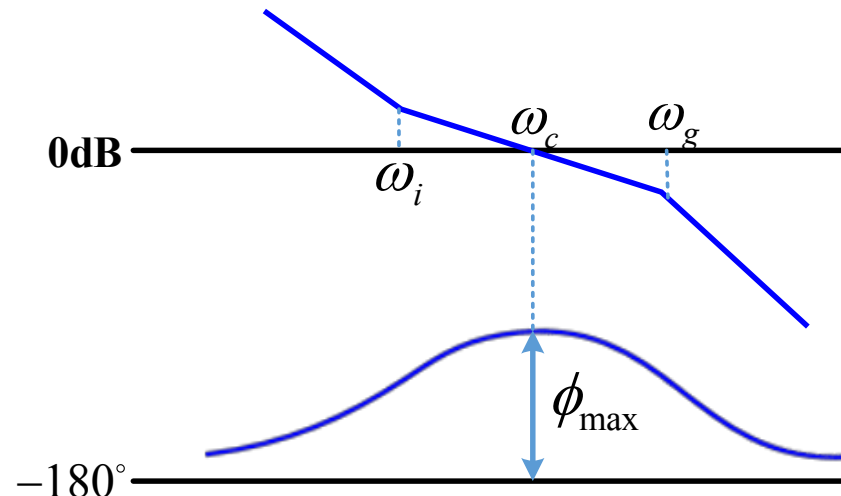


◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定

(2) 控制器

保证精度：PI控制器，需保证相角裕度。



设计任务：

确定参数 K_P 和 ω_i 。

对称转折频率可获得最大相角裕度



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

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



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

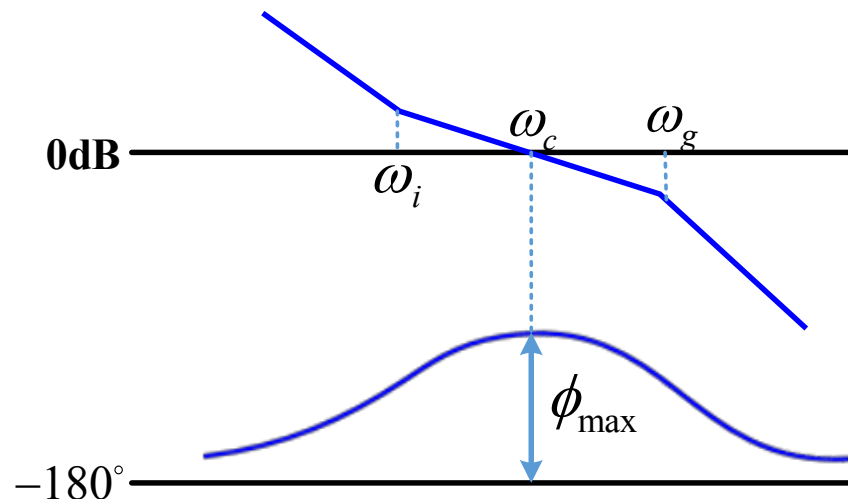


◆ PID系统的设计

● 例3：电流回路整定

(2) 控制器

保证精度：PI控制器，需保证相角裕度。



$$G_{PI}(s)G(s) = \frac{\omega_c \omega_g (s + \omega_i)}{s^2 (s + \omega_g)}$$

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

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

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

设计任务：

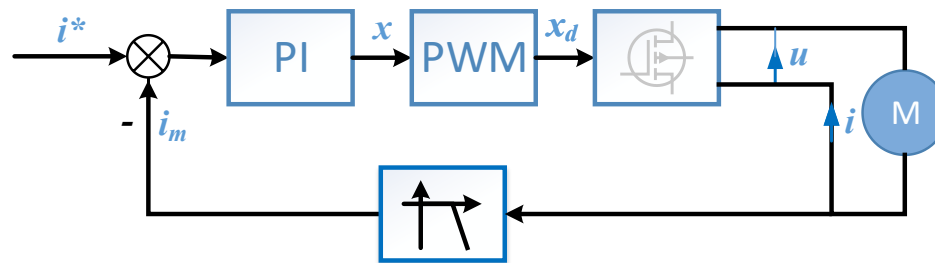
确定参数 K_P 和 ω_i 。

根据相角裕度指标
确定 α ，进而确定
控制参数。

$$G_{PI}(s) = K_P \left(1 + \frac{\omega_i}{s} \right)$$

◆ PID系统的设计

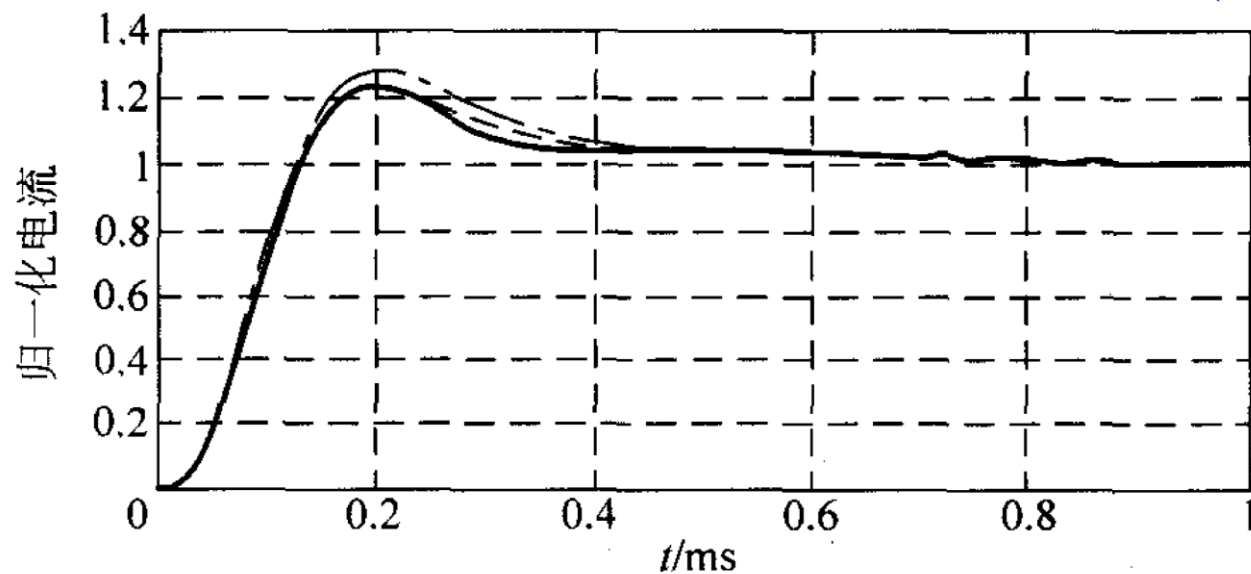
● 例3：电流回路整定



(3) 设计结果验证

————— 实测曲线
 - - - - - 仿真(设计参数)
 ····· 仿真(精确参数)

根据相角裕度指标进行参数整定



$$G_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

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

参数整定模型：

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



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





7.4 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





7.4.1 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。

过程控制是控制理论、工艺知识、计算机技术和仪表等知识相结合构成的应用科学。

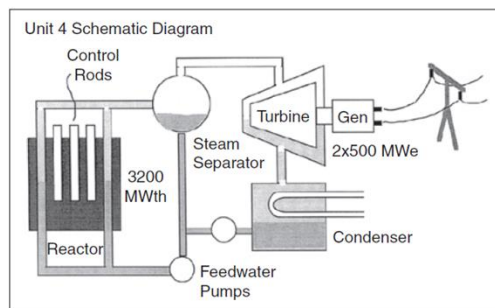
过程控制系统通常指对温度、压力、流量、液位等工艺参数进行控制的控制系统。



◆ 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



Schematic diagram of Chernobyl Unit 4 reactor.



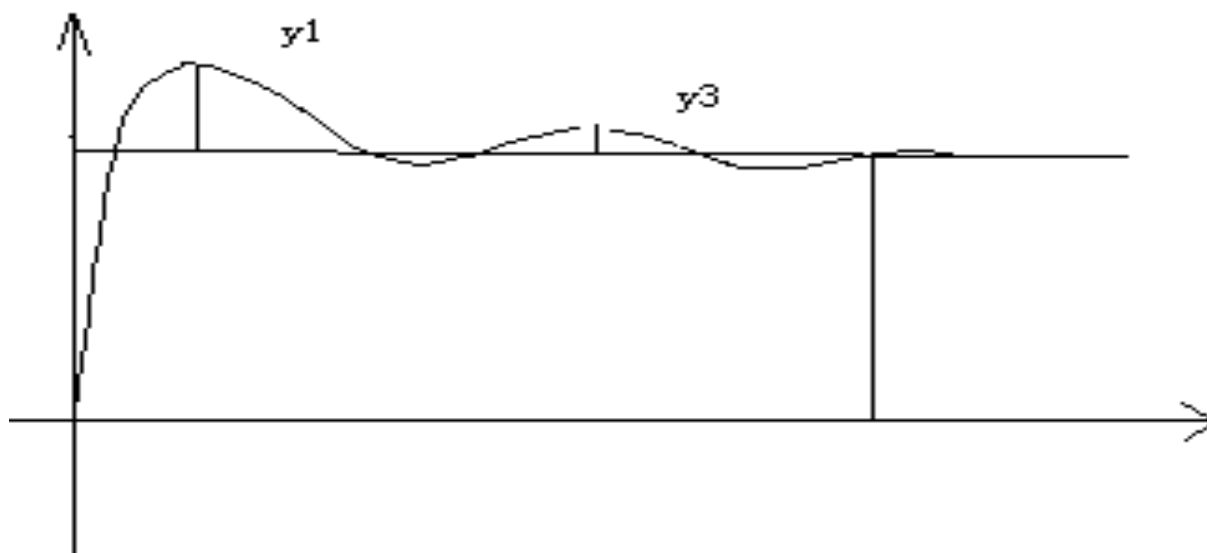
Chernobyl nuclear power plant shortly after the accident on 26 April 1986.

□ 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。

◆ 过程控制的性能指标

□ 衰减比和衰减率

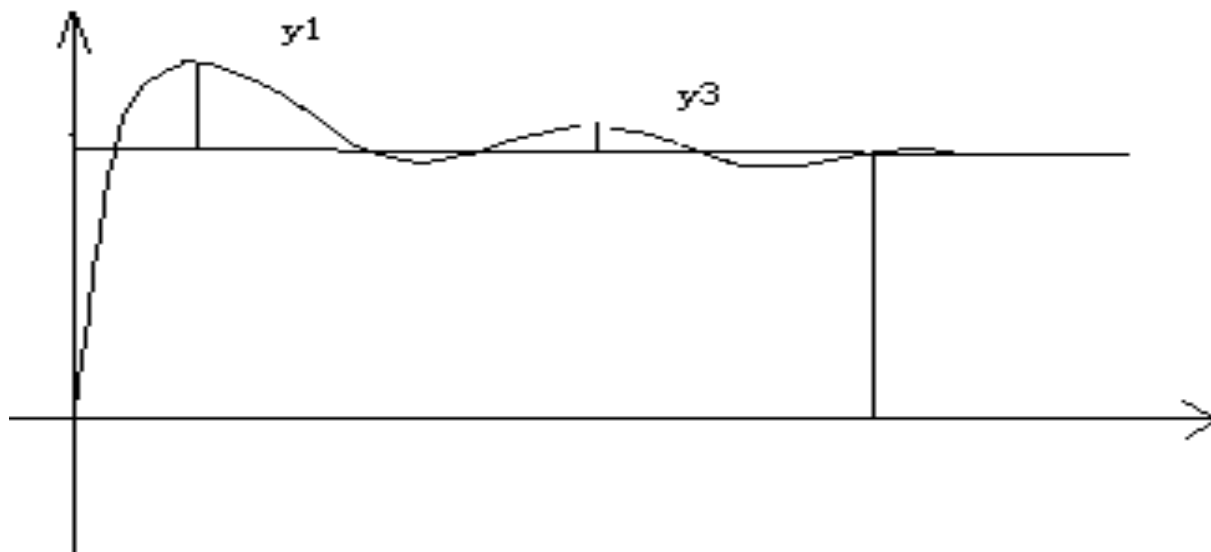


衰减比: $n = \frac{y_1}{y_3}$

衰减率: $\psi = \frac{y_1 - y_3}{y_1}$

◆ 过程控制的性能指标

□ 最大动态偏差和超调量

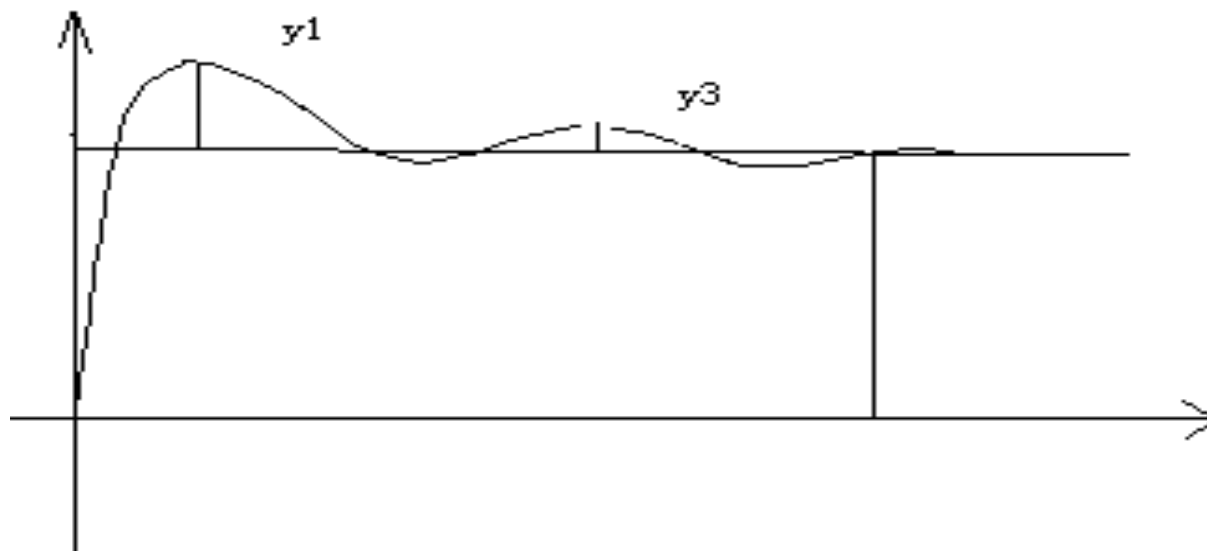


最大动态偏差: y_1 (超调量)



◆ 过程控制的性能指标

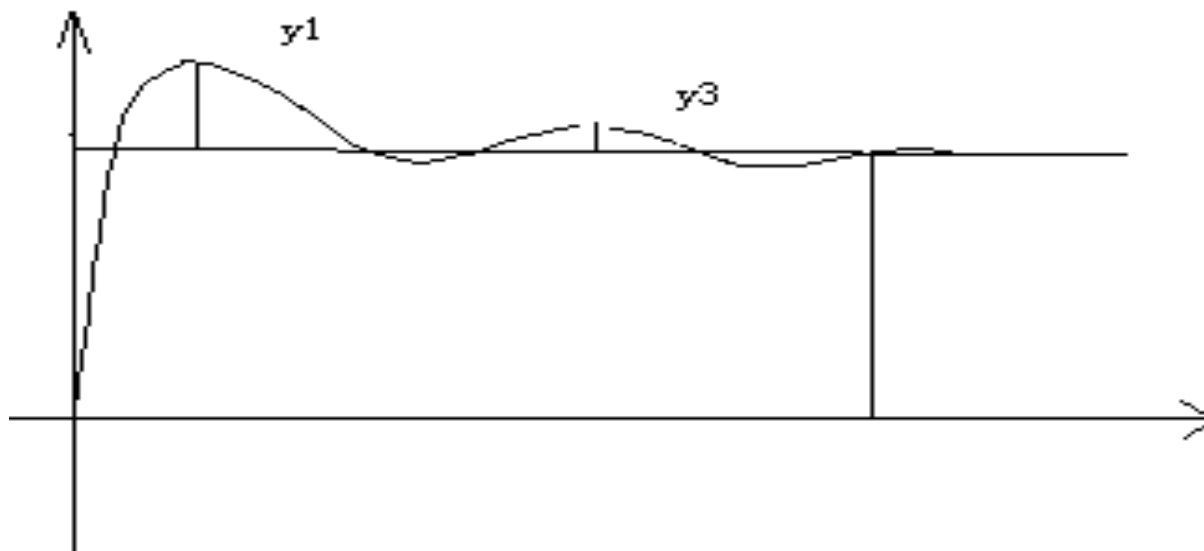
□ 残余偏差



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。

◆ 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



◆ 过程控制的性能指标

□ 误差积分性能指标

- 平方误差积分: $ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$
- 绝对误差积分: $IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$
- 时间-平方误差积分: $ITSE = \int_0^{\infty} te^2(t) dt$
- 时间-绝对误差乘积积分: $ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt$





◆ 过程控制的对象特性

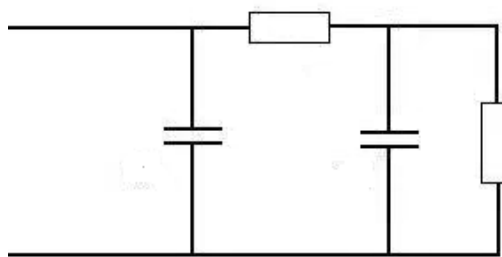
□ 容积描述

容积：控制对象内能储存的物料或能量，如水箱容量；

容积系数 C ：被调量的单位改变量所需物料的变化量，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



◆ 过程控制的对象特性

□ 电炉加热器

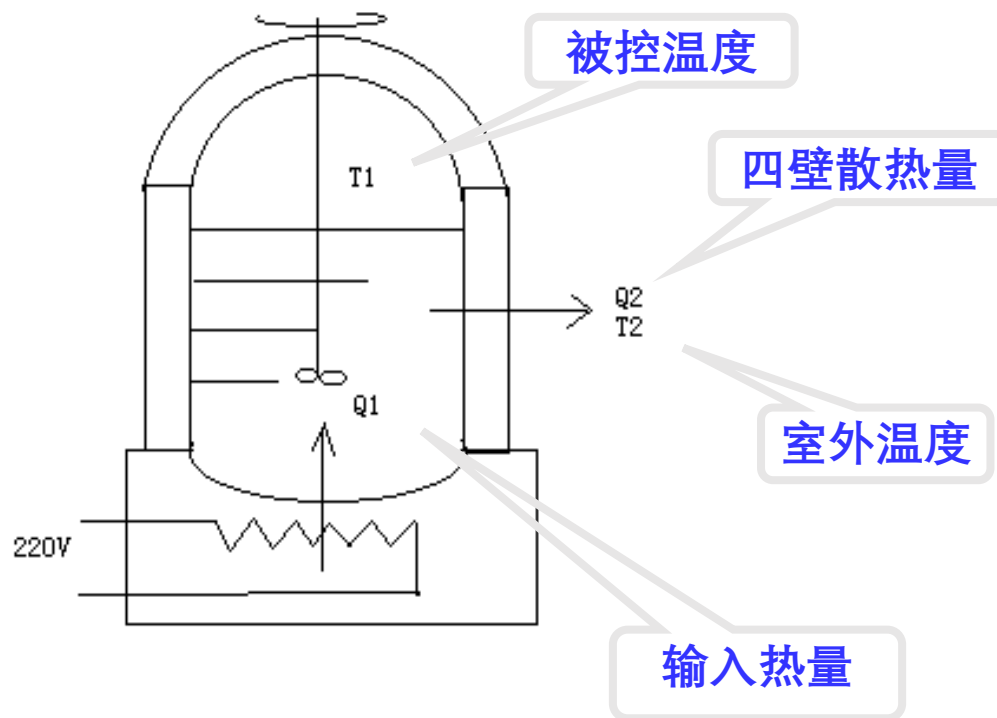
目标：容器内水的温度保持为 T_1

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。



◆ 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

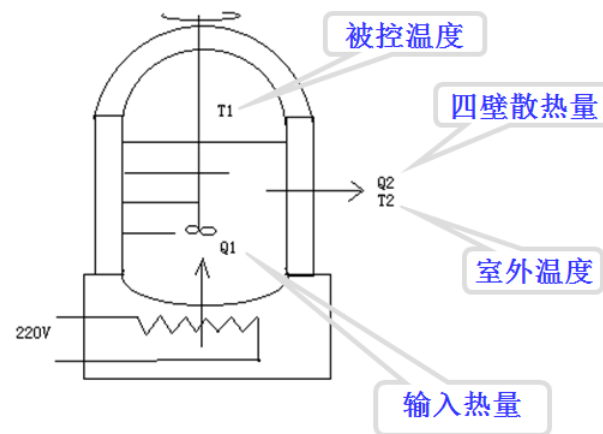
C_p ---水的定压比热容

C ---热容（表示 T_1 升高单位温度所需的热量）， $C=GC_p$

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。



◆ 过程控制的对象特性

□ 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：

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

取增量形式，有

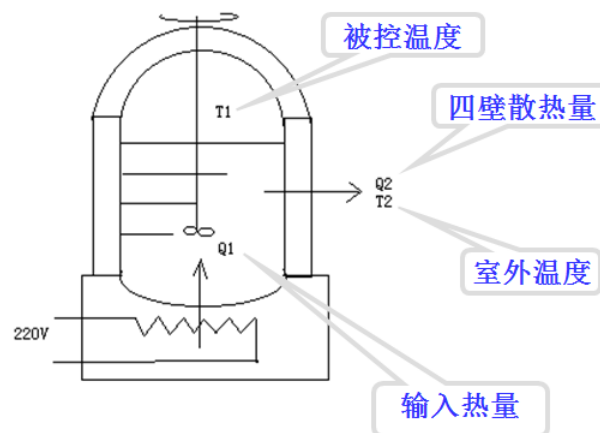
$$RC \frac{d\Delta T_1}{dt} + \Delta T_1 = R\Delta Q_1 + \Delta T_2$$

如果周围空气的温度不变，即 $\Delta T_2 = 0$ ，则：

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

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

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





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

写成更一般形式，有

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

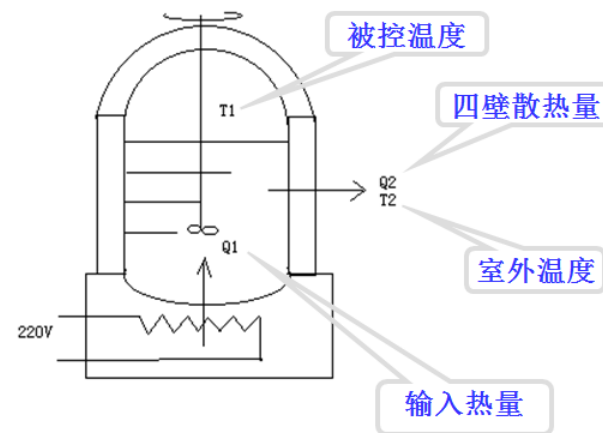
$$T \frac{d\Delta T_1}{dt} + \Delta T_1 = K\Delta Q_1$$

由此，有

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

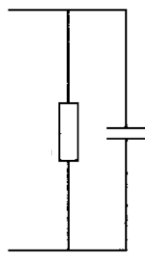
T —对象的时间常数， $T=RC$

K —对象的放大系数， $K=R$



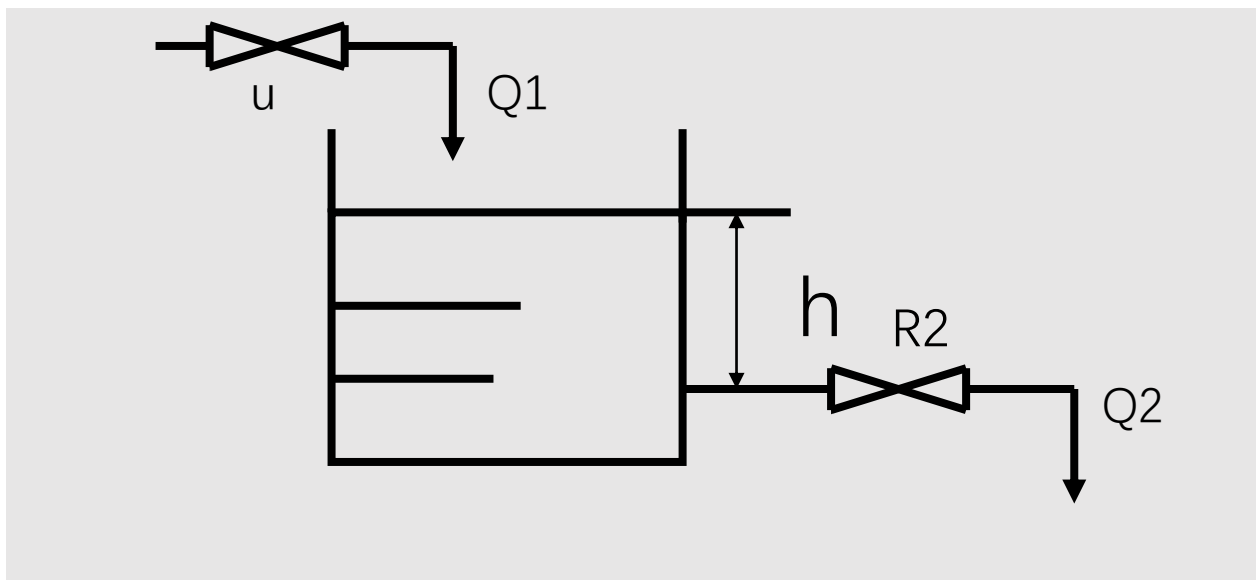
考虑到测温过程的延迟，可得被控对象为：

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



◆ 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。被调量为水槽的水位高度 h ，它反映流入与流出量的平衡关系。

◆ 过程控制的对象特性

□ 单容水槽控制

物料平衡方程为：

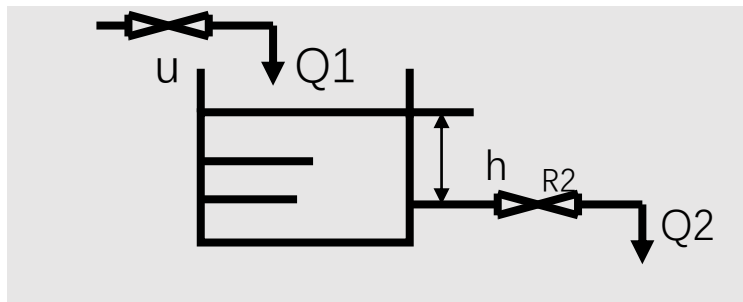
$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{C} (Q_1 - Q_2)$$

式中：C——容积系数，本例中即水槽的截面积。

在过程控制中，扰动发生前，水槽处于平衡态，即：

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

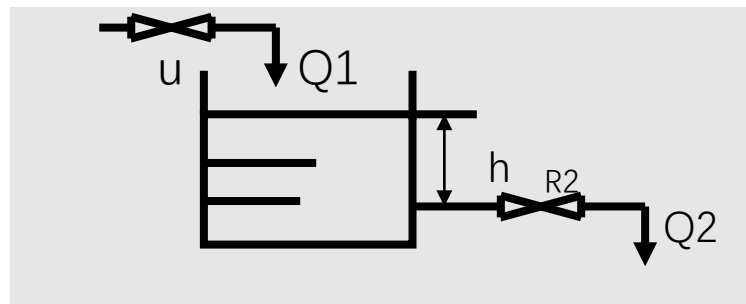
上式说明平衡态时，流入量等于流出量，水位变化速度为零。



◆ 过程控制的对象特性

□ 单容水槽控制

以增量形式表示上述各式为：



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

$$\left. \begin{array}{l} \frac{dh}{dt} = \frac{1}{C}(Q_1 - Q_2) \\ \frac{1}{C}(Q_{10} - Q_{20}) = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{d\Delta h}{dt} = \frac{1}{C}(\Delta Q_1 - \Delta Q_2)$$

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

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

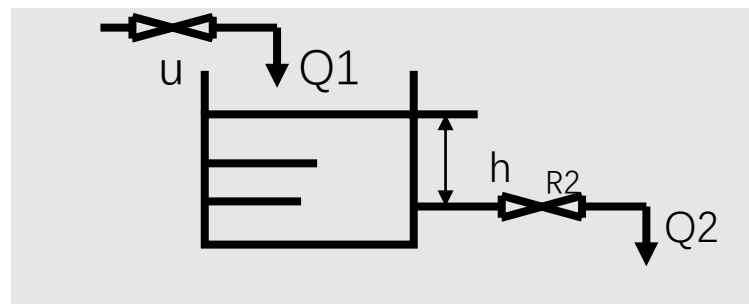


7.4.1 过程控制系统的对象特性



◆ 过程控制的对象特性

□ 单容水槽控制



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

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。

$$T = RC$$

$$\frac{\Delta h(s)}{\Delta Q_1(s)} = \frac{R/Cs}{R + 1/Cs} = \frac{R}{RCs + 1}$$

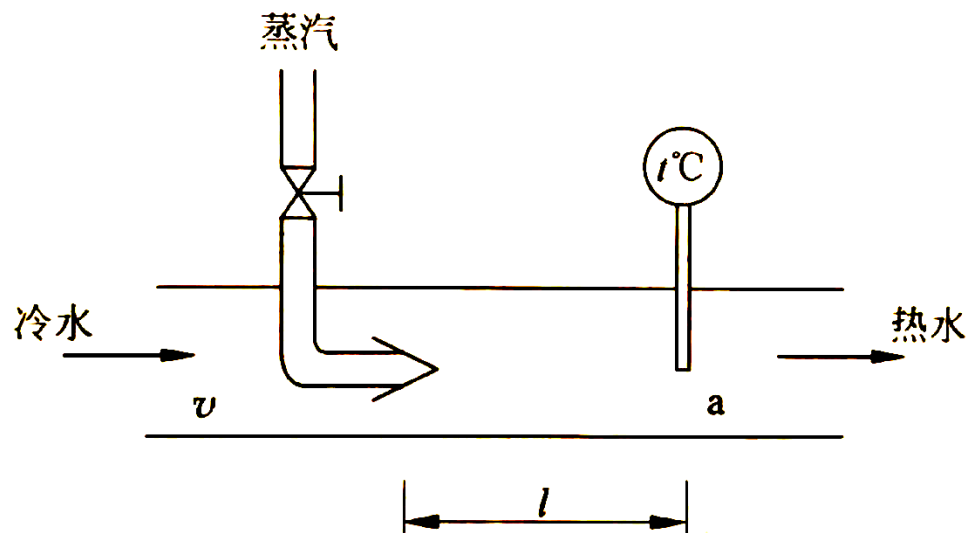
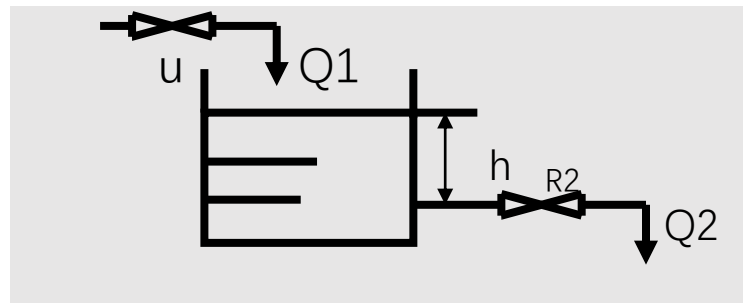
$$G(s) = \frac{\Delta h}{\Delta Q_1} = \frac{R}{Ts + 1}$$



◆ 过程控制的对象特性

□ 单容水槽控制

与管道水温调节类似，管路的流量调节容积小，但存在传输滞后。



考虑到液位控制系统管路中存在的延迟，可得被控对象为：

$$G(s) = \frac{\Delta h}{\Delta Q_1} = \frac{R}{Ts + 1} e^{-\tau_0 s}$$

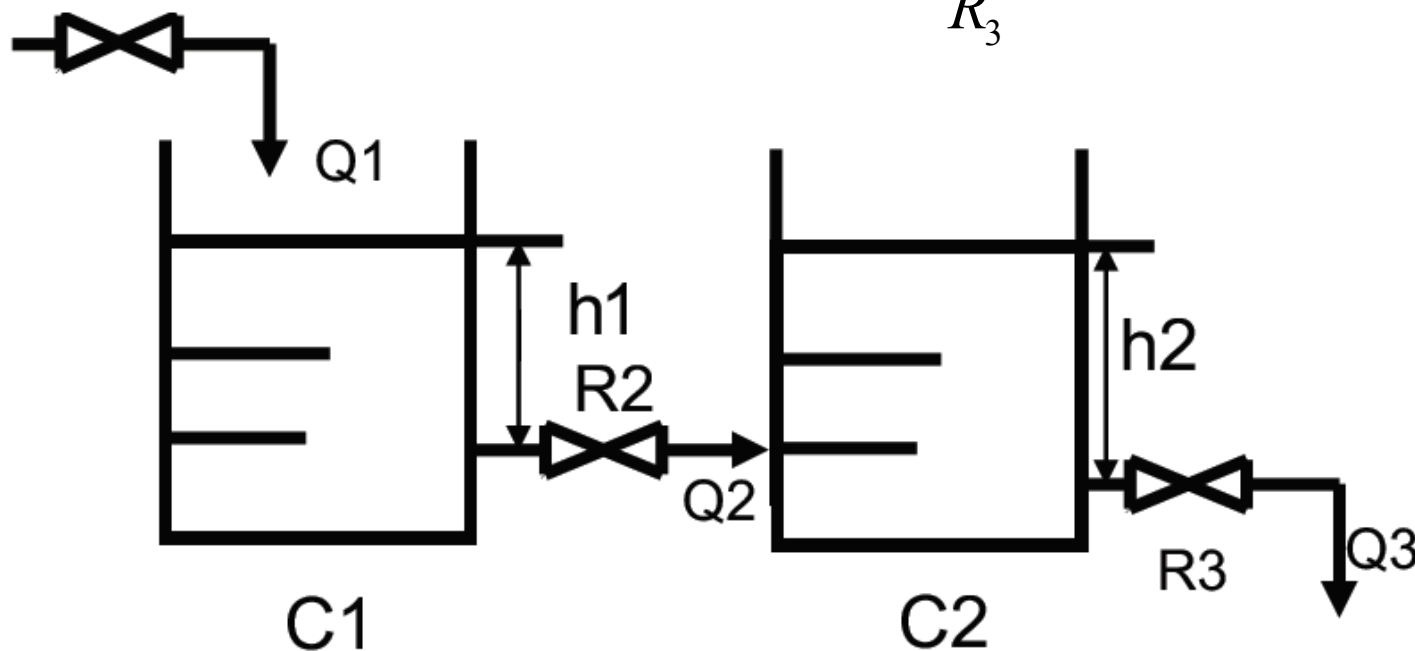
◆ 过程控制的对象特性

□ 多级水位过程控制

两只水箱串联工作。

$$Q_2 = \frac{1}{R_2} (h_1 - h_2)$$

$$Q_3 = \frac{1}{R_3} h_2$$





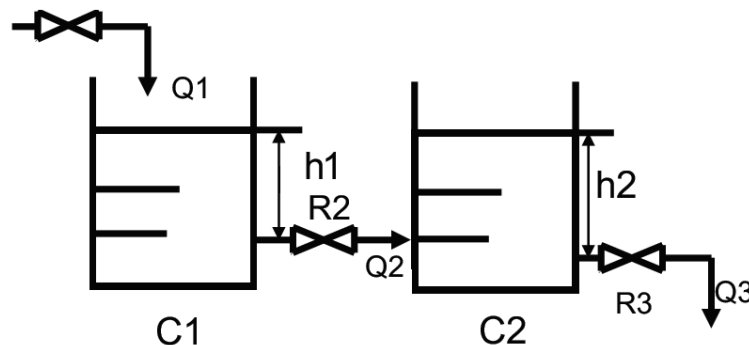
7.4.1 过程控制系统的对象特性



◆ 过程控制的对象特性

□ 多级水位过程控制

平衡关系：



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

$$Q_2 = \frac{1}{R_2} (h_1 - h_2)$$

$$Q_3 = \frac{1}{R_3} h_2$$



$$\begin{aligned} T_1 &= C_1 R_2 \\ T_2 &= C_2 \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \end{aligned}$$

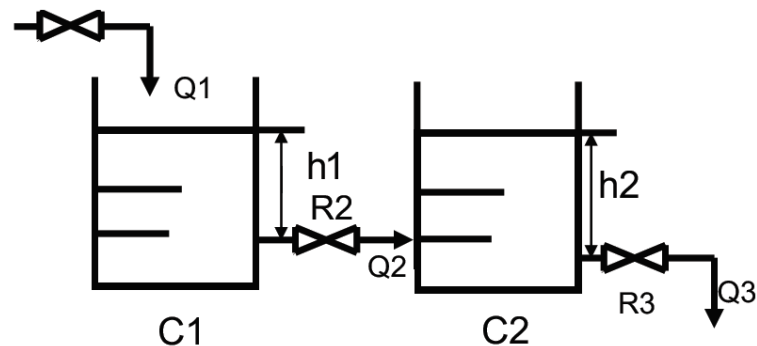
$$r = \frac{R_3}{R_2 + R_3}$$

$$\left\{ \begin{aligned} T_1 \frac{dh_1}{dt} + h_1 - h_2 &= R_2 Q_1 \\ T_2 \frac{dh_2}{dt} + h_2 - r h_1 &= 0 \end{aligned} \right.$$

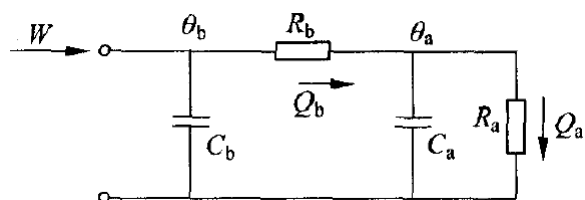


◆ 过程控制的对象特性

□ 多级水位过程控制



$$G(s) = \frac{H_2(s)}{Q_1(s)} = \frac{rR_2}{T_1T_2s^2 + (T_1 + T_2)s + (1-r)}$$



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

$$\begin{cases} T_1 \frac{dh_1}{dt} + h_1 - h_2 = R_2 Q_1 \\ T_2 \frac{dh_2}{dt} + h_2 - r h_1 = 0 \end{cases}$$

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_e 表示。如果对象的容量愈大，则容量滞后的时间也愈大。

◆ 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：

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

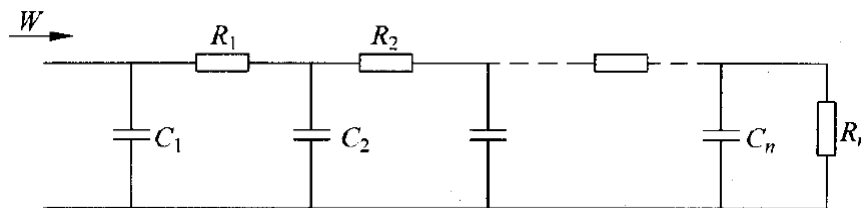
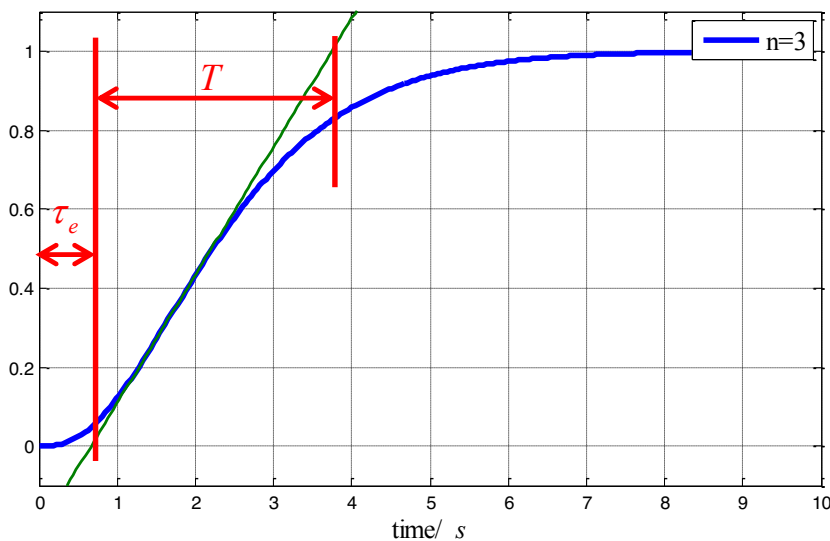
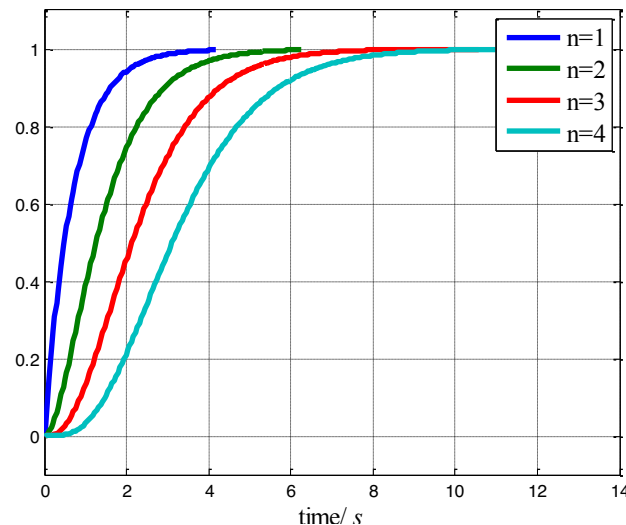
$$T_1 = 0.7s$$

$$T_2 = 0.8s$$

$$T_3 = 0.9s$$

$$T_4 = 1.0s$$

$$K = 1$$



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

$$T = 3.0796s$$

$$\tau_e = 0.6655s$$

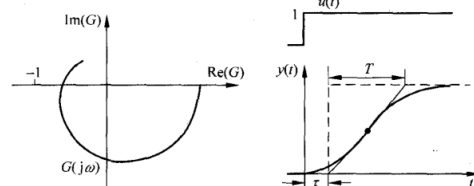


图 8-4 一阶加时间滞后的特性



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—— $G(s) = \frac{K}{Ts + 1}$

存在传输滞后 τ_0 —— $\tau = \tau_0$

□ 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 —— $\tau = \tau_0 + \tau_e$

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

容积滞后：由于多了容积使响应特性滞后

传输滞后：被测量的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

7.4.3

过程控制系统的整定





◆ 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：

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

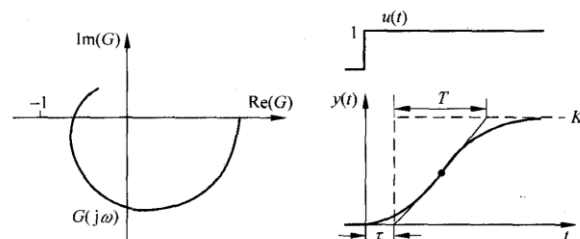


图 8-4 一阶加时间滞后的特性

● 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。



◆ 过程控制的设计特点

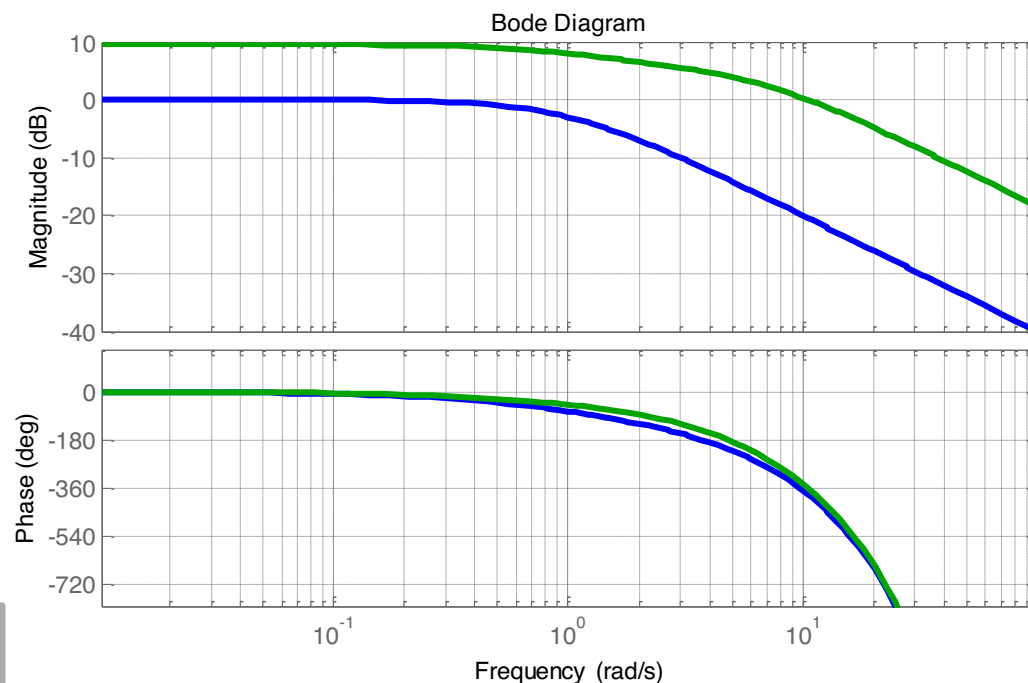
● 例1 微分增加阻尼的效果不显著

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

$$P(s) = 3$$

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

比例控制时穿越频率是3rad/s。





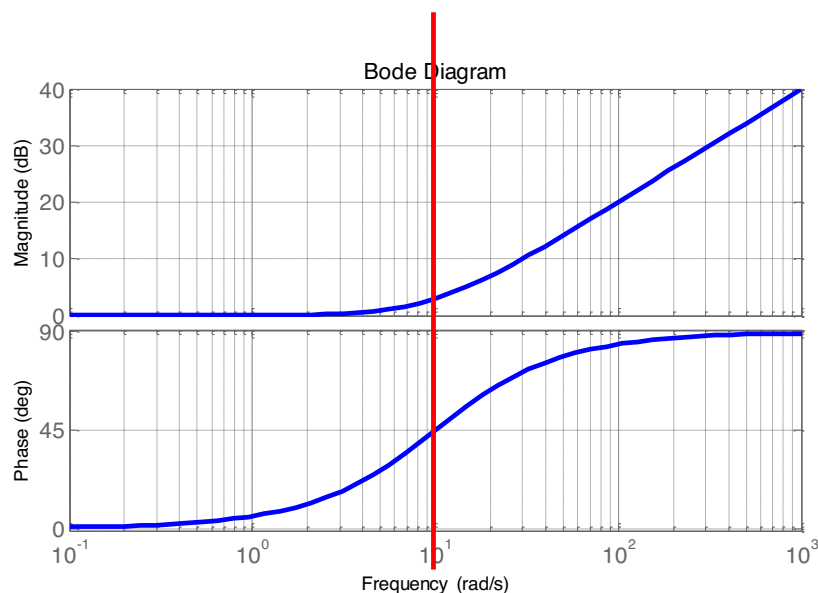
7.4.2 过程控制系统的设计特点



◆ 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。



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

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

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





7.4.2 过程控制系统的设计特点



◆ 过程控制的设计特点

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

● 例1 微分增加阻尼的效果不显著

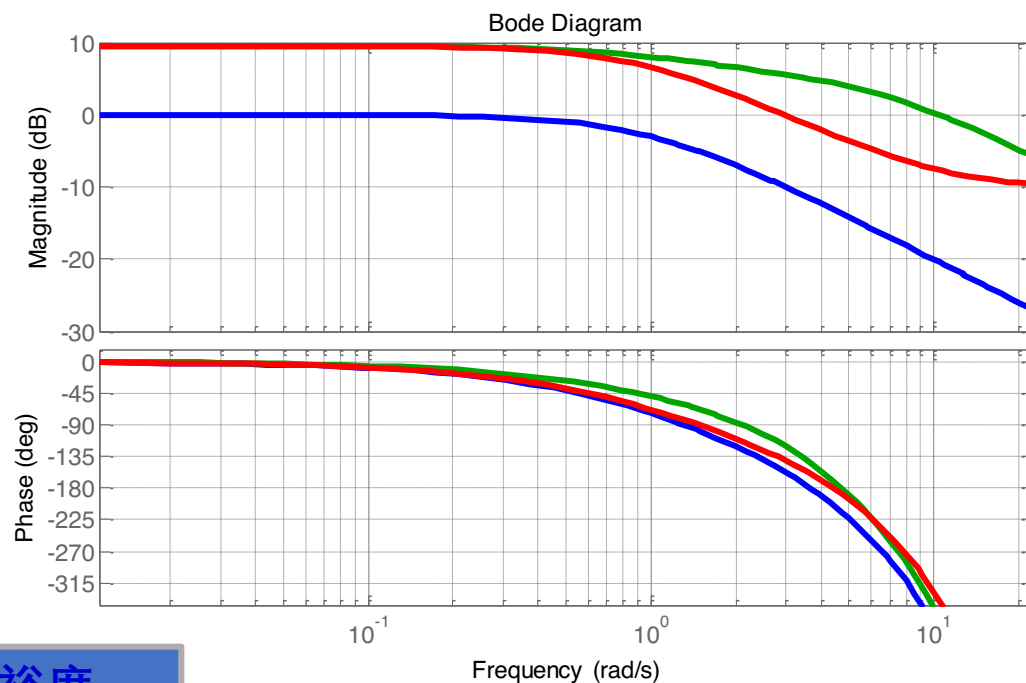
$$G(s) = \frac{1}{s+1} e^{-0.5s}$$

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

$$\omega_c = 3$$

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

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

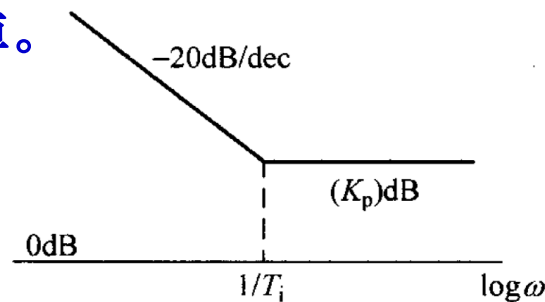
- 增益低、带宽窄导致静差大——引入积分

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

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。

微分项的转折频率大于带宽，因此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。

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

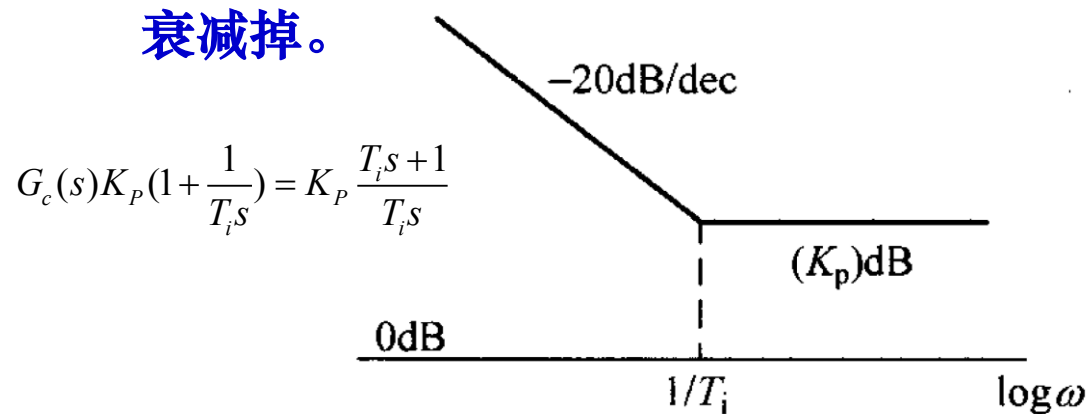


◆ 过程控制的设计特点

- 增益低、带宽窄导致静差大——引入积分

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

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。



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

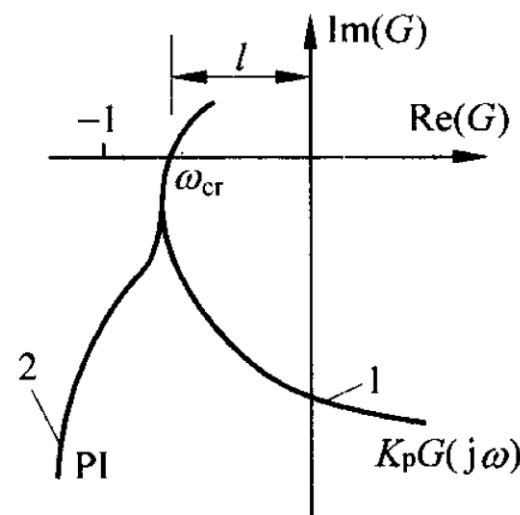


图 8-19 PI 系统的特性



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到要求（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。

$$K_P = ?$$
$$\omega_c = ?$$

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

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





◆ 整定方法

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。



◆ 整定方法

$$K_P = ?$$

$$\omega_c = ?$$

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

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

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

根据积分和微分参数的选择，系统在负实轴附近的特性主要

由PID控制中的比例项决定。

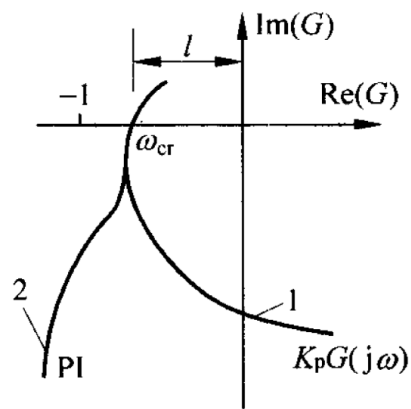
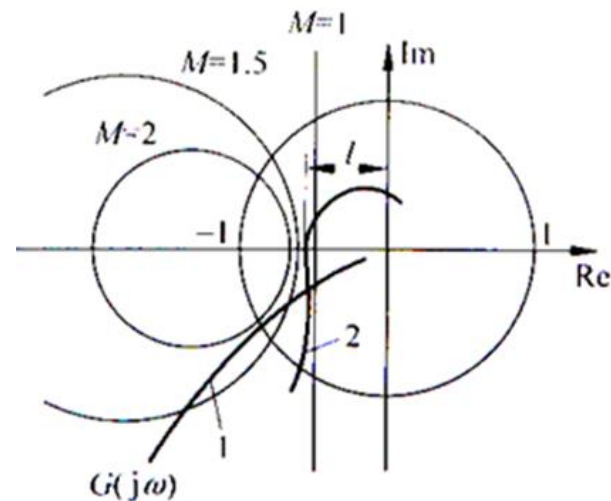
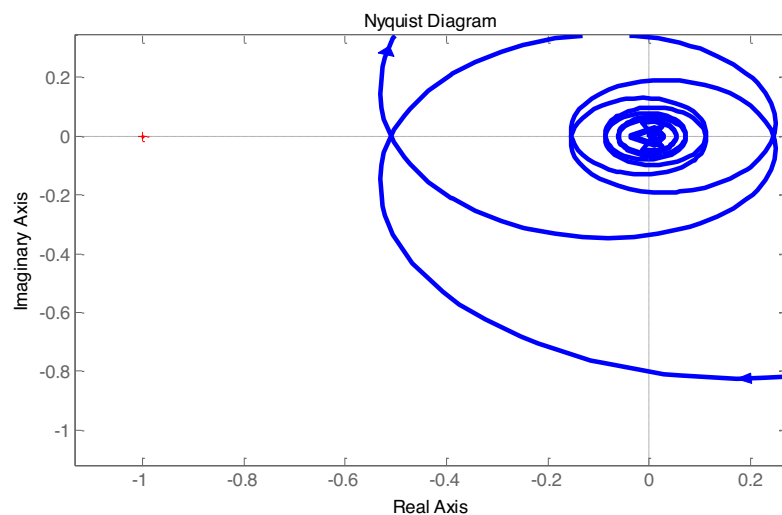


图 8-19 PI 系统的特性



特性1: 相角裕度
特性2: 幅值裕度

◆ 整定方法——临界比例度法

按照幅值裕度进行整定的方法！

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

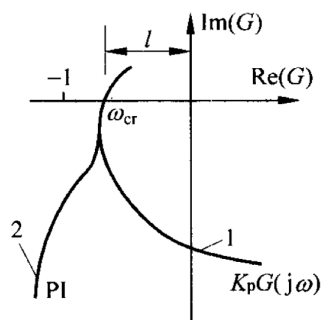


图 8-19 PI 系统的特性

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； $T_c = 2\pi/\omega_{cr}$ 。

- 纯比例控制
- 线性振荡
- 在控制器的输出端检测

不参与PID控制参数的设计

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

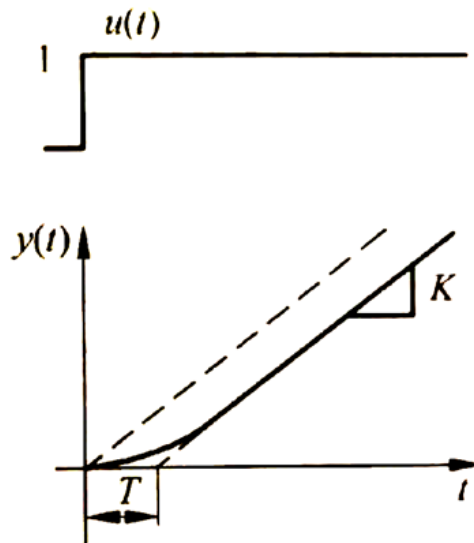
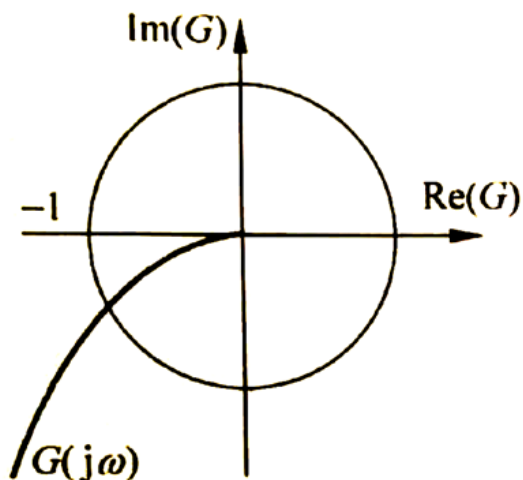
$$0.1T_D \leq \tau_D \leq 0.2T_D$$

幅值裕度为2。

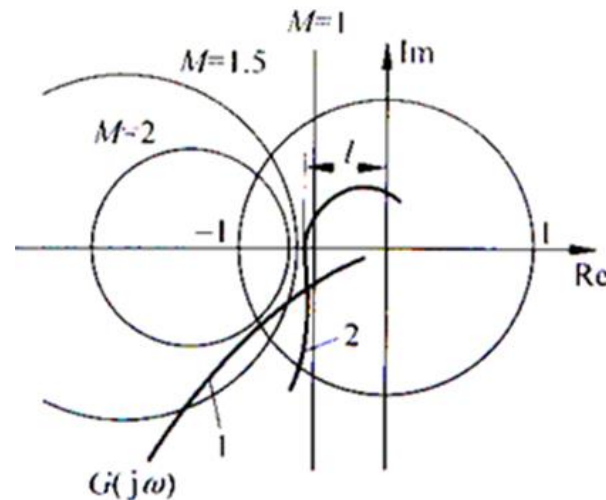
◆ 整定方法——临界比例度法

对比：

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



应考虑相角裕度！



特性1：相角裕度
特性2：幅值裕度

◆ 整定方法——自整定

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

对象的Nyquist曲线与继电非线性
的负倒特性必然相交，系统在整定模
式下存在振荡，其周期可通过对象输
出两次过零时间获得。根据对象输出
的一次谐波和输入方波的一次谐波，
可获得此时的频率特性幅值。

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_{cr}} \Rightarrow \omega_{cr} = \frac{2\pi}{T_c}$$

$$K_p |G(j\omega_{cr})| = 0.5 \Rightarrow K_p = \frac{0.5}{|G(j\omega_{cr})|}$$

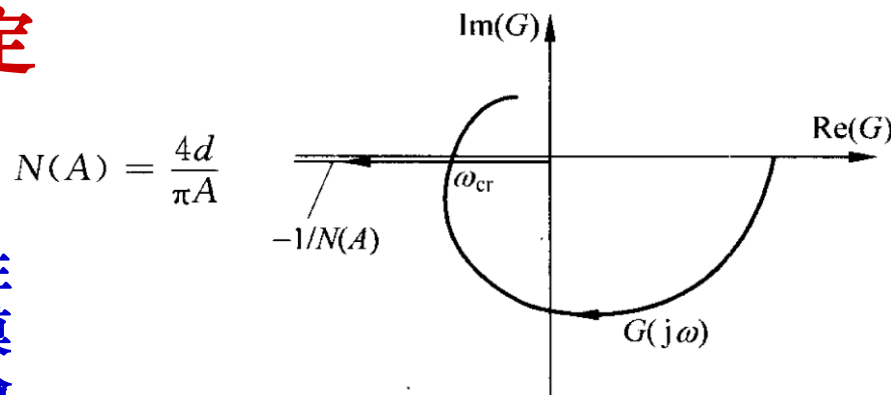


图 8-21 继电特性的自振荡分析

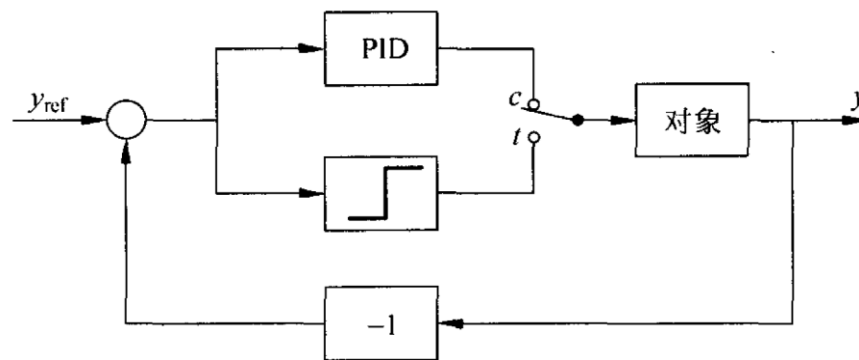


图 8-20 自整定 PID 原理

◆ 整定方法——自整定

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

基于这一原理的自整定方法自提出以来（1984）很快得到发展和推广，并形成了产品。

$$K_p |G(j\omega_{cr})| = 0.5 \Rightarrow K_p = \frac{0.5}{|G(j\omega_{cr})|}$$

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

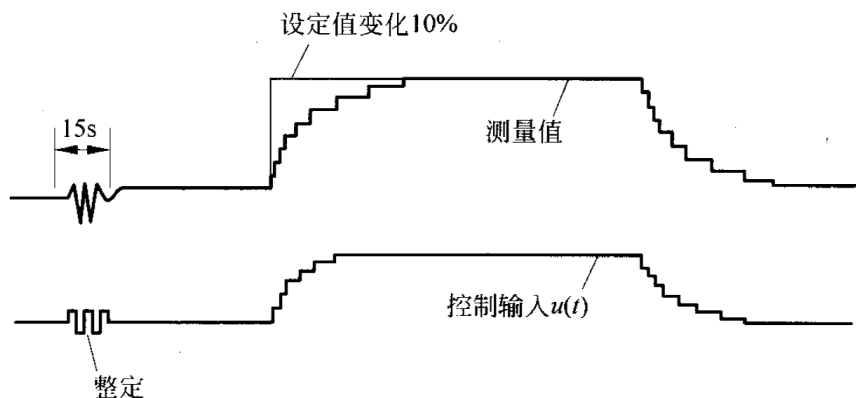


图 8-22 流量回路的自整定

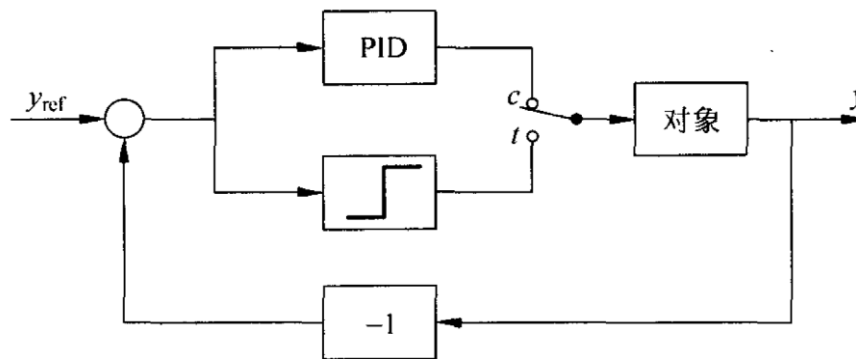


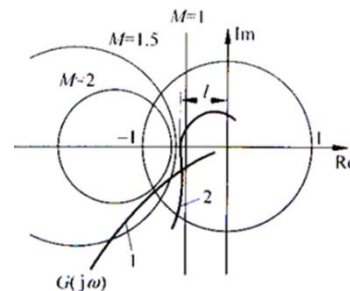
图 8-20 自整定 PID 原理



1. 调节系统将被调量保持在设定值上，无跟踪误差的要求，主要考虑系统的稳定性和抑制扰动。
2. 调节系统的控制规律一般采用PID控制。
3. 调节系统典型类型包括积分加一阶惯性的对象和一阶加时间滞后的对象。这是典型的调节系统对象特性，不一定是对象的真实特性，而是为了反映其设计特点。

$$G(s) = \frac{K}{s(Ts+1)} \quad \text{按相角裕度设计}$$

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s} \quad \text{按幅值裕度设计}$$





- 4. 对于一阶加积分的对象，PID设计包括：采用PD控制以提供阻尼；采用PI控制，提高精度和相角裕度。
- 5. 过程控制系统中，滞后是调节对象所具有的共同特性，采用一阶加时间滞后进行描述。
- 6. 过程控制系统增益低，带宽窄，基本控制规律是PI控制，微分项在一定程度上提高系统的稳定性，但作用有限。

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s} \quad \text{按幅值裕度设计}$$



7. 过程控制调节系统的整定：要求微分项的转折频率大于带宽；带宽以内的特性主要由PI决定，积分项的转折频率应为穿越频率的1/2~1/4；适宜采用幅值裕度衡量系统的相对稳定性；穿越频率处特性由P决定，控制参数整定时可采用临界比例度法；可以实现参数自整定。

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

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

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

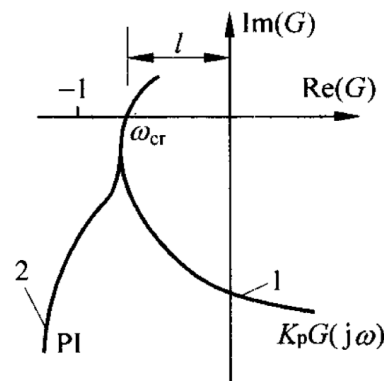


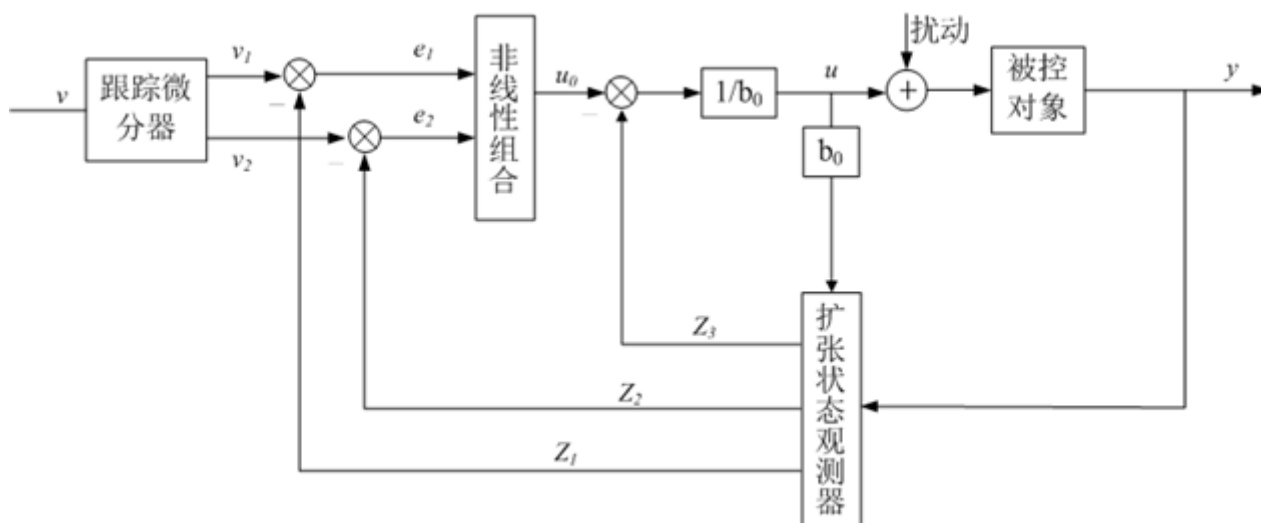
图 8-19 PI 系统的特性

自抗扰控制 (ADRC) :

跟踪微分器, 扩张状态观测器, 非线性PID控制。

模型预测控制 (MPC) :

被控模型, 最优控制, 滚动时域实现反馈控制。

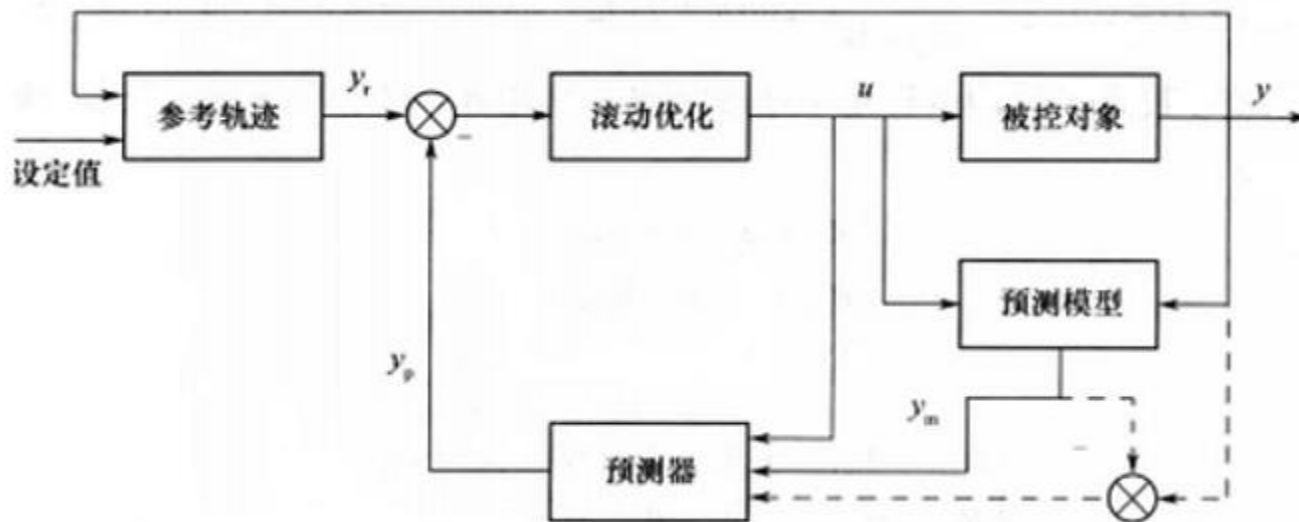


自抗扰控制 (ADRC) :

跟踪微分器, 扩张状态观测器, 非线性PID控制。

模型预测控制 (MPC) :

被控模型, 最优控制, 滚动时域实现反馈控制。





Thanks for your attention!
