

丁朝朝

热工过程自动调节

第一章：自动调节的基本概念

The Basic concept of Automatic adjustment

§1-1 人工调节和自动调节 manual adjustment and Automatic adjustment

本章主要通过汽机炉、给水调节的实例和人工调节引入自动调节的设计思想，反映出调节为整体概念，并引入下一章。

§1-2 常用术语 General terminology

1. 被调对象

被调对象为生产过程或生产设备

2. 被调量

通过调节需要维持的物理量

3. 给定值

和规定为被调量所对应的数值

4. 扰动

引起被调量变化的各种原因

5. 闭环和开环系统

系统为输入和输出端之间，存在反馈回路为系统，称为闭环系统

§1-3 系统方框图 Block diagram

1. 方框图 { 环节 { 环节可大可小。
环节是抽象的组合件。
信号线 具有单向性（明确的因果关系）

2. 依据汽机炉、给水调节实例中的示意图画出原理方框图

§1-4 系统为分类 System classification

一. 按给定值的特征分:

1. 恒值调节系统 (水位、汽温)
2. 程序调节系统 (滑压启动)
3. 随动调节系统 (负荷调节)
4. 比值调节系统 (空气-燃料系统)

二. 按信号馈送方式分

1. 反馈系统 (负反馈偏差调节)
2. 前馈系统 (负反馈扰动调节)
3. 复合系统 (兼有前两者的综合)

三. 按系统中闭合回路的数目分:

1. 单回路
2. 双回路或多回路

四. 按系统为特性分:

1. 线性系统
2. 非线性系统

调节过程的类型

§1-5. 系统的调节过程 Types of adjusting process

1. 定义

在输入信号作用下, 系统从平衡状态过渡到另一个新的平衡状态的过程。

2. 阶跃扰动 (单位)

$$X = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ A & t \geq 0 \end{cases}$$

3. 过程的类型

有四种过程图, 并加以说明

4. 过程的评价标准

(1) 稳定性

(2) 准确性

(3) 快速性

主

次

本章学习要点和重点：

1. 了解调节理论的常用术语和系统分类

2. 掌握用方框图来描述系统的方法

3. 理解调节过程的几种形态和特点

第二章 线性系统的数学描述

(系统为组成环节和联接方式) linear system

§2-1 环节的特性 character of link

一、静态特性 static character

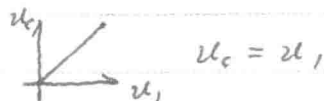
1. 定义: 在平衡状态时, x 和 y 间的关系.

2. 描述: (1) 曲线描述 (2) 函数式描述

举例:

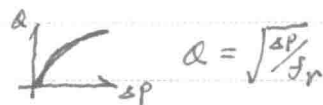
(1) RC电路

$$x = u_1, y = u_c$$



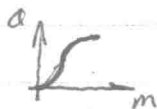
(2) 阀门

$$x = \Delta p, y = Q$$



(3) 阀门

$$x = m, y = Q$$

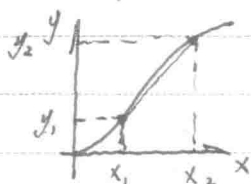


* (1) 线性环节

(2) (3) 非线性环节

3. 线性化

(1) 平均法



$$\Delta y = y - y_0$$

$$\Delta x = x - x_0$$

$$\Delta y = k \Delta x$$

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

(2) 切线法

在指定工作点 x_0 处求该切线斜率

$$\Delta y = k \Delta x \quad k = \left(\frac{dy}{dx} \right)_{x=0}$$

例: $Q = \sqrt{\Delta P / f_r}$

$$k = \left(\frac{dQ}{d(\Delta P)} \right)_{\Delta P = \Delta P_0} = \frac{1}{2 \sqrt{\Delta P} \sqrt{f_r}}$$

$$\therefore \sqrt{f_r} = \sqrt{\Delta P} / Q$$

$$\therefore k = \frac{Q_0}{2 \Delta P_0}$$

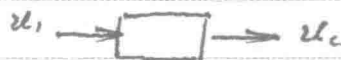
二. 动态特性 dynamic character

动态特性可用微分方程描述

$$a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_0 y = b_m x^{(m)} + b_{m-1} x^{(m-1)} + \dots + b_0 x$$

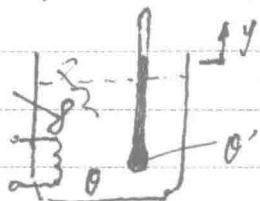
例 1: RC 电路

$$\begin{cases} i = (u_i - u_c) / R \\ u_c = \frac{1}{C} \int i dt \end{cases}$$



$$RC \frac{du_c}{dt} + u_c = u_i$$

例 2: 加热炉



$$\begin{cases} dQ = \frac{\theta - \theta'}{R} dt \\ C d\theta' = dQ \\ y = k\theta' \end{cases}$$

$$\Rightarrow RC \frac{dy}{dt} + y = k\theta$$

讨论:

1. 两个环节的微分方程如果相似, 那么不管它的物理结构是否相同, 我们称它为同类型环节。
2. 同一环节, 当输入或输出量选择不同时, 微分方程是不同的。
3. 微分方程为阶次的系数由环节内部的物理结构和物理参数决定。
4. 静态特性包含在动态特性之中。

例3: 双容水箱

$$\begin{cases} (Q_1 - Q_2) dt = F_1 dH_1 \\ Q_2 = H_1 - H_2 / R_{e2} \\ (Q_2 - Q_3) dt = F_2 dH_2 \end{cases}$$

$$R F_1 F_2 \frac{d^2 H_2}{dt^2} + (F_1 + F_2) \frac{dH_2}{dt} = Q_1 - Q_3 - F_1 R \frac{dQ_3}{dt}$$

§2-2 传递函数 transfer function

一、拉氏变换复习. Laplace

1. 定义

设函数 $f(t)$ 满足下列条件

- (1) $t > 0$ 为每个有限区间上是分段连续的
- (2) 存在一个常数 σ , 使

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\sigma t} |f(t)| = 0$$

则有: $F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt$

或: $f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} e^{st} F(s) ds$

s -复变函数 $F(s)$ - 象函数 $f(t)$ - 原函数

记号: $F(s) = \mathcal{L}[f(t)]$

例1: 阶跃函数

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ A & t \geq 0 \end{cases}$$

解: $F(s) = \int_0^{\infty} A e^{-st} dt$

$$= -\frac{A}{s} e^{-st} \Big|_0^{\infty} = A/s$$

若单位阶跃扰动: $f(t) = 1(t)$, $F(s) = 1/s$

例2: 指数函数

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ e^{-at} & t \geq 0 \end{cases}$$

解: $F(s) = \int_0^{\infty} e^{-at} e^{-st} dt$

$$= \int_0^{\infty} e^{-(a+s)t} dt = \frac{1}{s+a}$$

2. 拉氏变换表.

2. 定理:

1. 线性定理

$$\mathcal{L}[f_1(t) + f_2(t)] = \mathcal{L}[f_1(t)] + \mathcal{L}[f_2(t)]$$

2. 微分定理:

$$\mathcal{L}\left[\frac{d^2}{dt^2} f(t)\right] = s^2 F(s) - sf(0) - f'(0)$$

3. 积分定理:

$$\int_0^\infty f(t) dt = \lim_{s \rightarrow 0} s F(s)$$

4. 初值定理:

$$\lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} s F(s)$$

5. 位移定理:

$$\mathcal{L}[e^{at} f(t)] = F(s-a)$$

6. 延迟定理:

$$\mathcal{L}[f(t-\tau)] = e^{-s\tau} F(s)$$

3. 部分分式

$$F(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0}$$

$$F(s) = \frac{K(s-z_1)(s-z_2)\dots(s-z_m)}{(s-s_1)(s-s_2)\dots(s-s_n)}$$

s_i - 极点

z_i - 零点

极点可能出现三种情况

(1) 具有不相同的极点

$$F(s) = \frac{C_1}{s-s_1} + \frac{C_2}{s-s_2} + \dots$$

待定系数 C_i 可由 $F(s)$ 在 s 在 s_i 极点处求留数得到

$$\text{pp. } C_i = \text{Res}(s_i) = \lim_{s \rightarrow s_i} (s-s_i) F(s)$$

例3: 求 $F(s) = \frac{s+5}{s^2+4s+3}$ 的原函数

解: $F(s) = \frac{C_1}{s+1} + \frac{C_2}{s+3}$

$$C_1 = \lim_{s \rightarrow -1} (s+1)F(s) = \frac{s+5}{s+3} = 2$$

$$C_2 = \lim_{s \rightarrow -3} (s+3)F(s) = -1$$

$$\therefore F(s) = \frac{2}{s+1} - \frac{1}{s+3}$$

$$f(t) = 2e^{-t} - e^{-3t}$$

(2) 具有相同极点

$$F(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{N(s)}{(s-s_1)^k}$$

$$F(s) = \frac{C_k}{(s-s_1)^k} + \frac{C_{k-1}}{(s-s_1)^{k-1}} + \dots + \frac{C_1}{s-s_1}$$

待定系数求法:

$$C_k = \lim_{s \rightarrow s_1} (s-s_1)^k F(s)$$

$$C_{k-1} = \lim_{s \rightarrow s_1} \frac{1}{1!} \frac{d}{ds} [(s-s_1)^k F(s)]$$

$$C_1 = \frac{1}{(k-1)!} \lim_{s \rightarrow s_1} \frac{d^{k-1}}{ds^{k-1}} [(s-s_1)^k F(s)]$$

例4: 求 $F(s) = \frac{s^2+2s+3}{(s+1)^3}$ 的原函数

解: $F(s) = \frac{b_3}{(s+1)^3} + \frac{b_2}{(s+1)^2} + \frac{b_1}{s+1}$

$$b_3 = \lim_{s \rightarrow -1} (s+1)^3 F(s) = 2$$

$$b_2 = \lim_{s \rightarrow -1} \frac{d}{ds} (s+1)^3 F(s) = 0$$

$$b_1 = \frac{1}{(3-1)!} \lim_{s \rightarrow -1} \frac{d^2}{ds^2} (s+1)^3 F(s) = 1$$

$$F(s) = \frac{2}{(s+1)^3} + \frac{1}{s+1} \quad f(t) = \frac{1}{2}e^{-t} + e^{-t}$$

(3) 具有实根复根的极点

$$F(s) = \frac{C_1 s + C_2}{(s-s_1)(s-s_2)} + \frac{C_3}{s-s_3} + \dots$$

待定系数求法:

寻求两边同乘 $(s-s_1)(s-s_2)$, 并取 $s \rightarrow s_1$ 或 $s \rightarrow s_2$ 为极限

$$\text{即: } \lim_{s \rightarrow s_1} [(s-s_1)(s-s_2)F(s)] = \lim_{s \rightarrow s_1} (C_1 s + C_2)$$

例 5: 求 $F(s) = \frac{s+1}{(s+2)(s^2+2s+10)}$ 的拉氏反变换

$$\text{解: } F(s) = \frac{C_1 s + C_2}{(s+1)^2 + 3^2} + \frac{C_3}{s+2}$$

$$\lim_{s \rightarrow -1+j3} \left(\frac{s+1}{s+2} \right) = \lim_{s \rightarrow -1+j3} (C_1 s + C_2)$$

$$\text{经整理: } 3j = C_2 - 10C_1 + 3C_3$$

$$\begin{cases} C_2 - 10C_1 = 0 \\ 3j = 3C_3 \end{cases} \quad \therefore \begin{cases} C_1 = 0.1 \\ C_2 = 1 \end{cases}$$

$$C_3 = \lim_{s \rightarrow -2} (s+2)F(s) = -0.1$$

$$F(s) = \frac{0.1s + 0.1 + 0.9j \cdot 3}{(s+1)^2 + 3^2} - \frac{0.1}{s+2}$$

$$f(t) = 0.1e^{-t} \cos 3t + 0.3e^{-t} \sin 3t - 0.1e^{-2t}$$

习题:

$$1. F(s) = \frac{1}{s(s+1)} (1 - e^{-t})$$

$$2. F(s) = \frac{4(s+2)}{(s+2)^2(s+1)} (-4[(t+2)e^{-2t} - 2e^{-t}])$$

$$3. F(s) = \frac{1}{s(s^2+1)} (1 - \cos t)$$

$$4. F(s) = \frac{s^3 + 7s^2 + 16s + 14}{s^2 + 4s + 3} \left(\frac{d}{dt} + 3\delta(t) + 2e^{-t} - e^{-3t} \right)$$

(课时授课计划用纸, 除备课用外, 请勿作其他用途)

二. 传递函数

微分方程一般形式

$$a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_0 y = b_m x^{(m)} + b_{m-1} x^{(m-1)} + \dots + b_0 x$$

设初始条件为零, 对其拉氏变换

$$a_n s^n Y(s) + a_{n-1} s^{n-1} Y(s) + \dots + a_0 Y(s) = b_m s^m X(s) + b_{m-1} s^{m-1} X(s) + \dots + b_0 X(s)$$

定义: 在零初始条件下, 输出为拉氏变换和输入为拉氏变换之比, 称为传递函数。

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0}$$

举例:

1. RC电路: 微: $RC \frac{du_c}{dt} + u_c = u$,

传: $W(s) = \frac{1}{RCs + 1}$

2. 加热炉: 微: $RC \frac{dy}{dt} + y = k_0$

传: $W(s) = \frac{k}{RCs + 1}$

3. 双容水箱:

微: $RF_1 F_2 \frac{d^2 H_2}{dt^2} + (F_1 + F_2) \frac{dH_2}{dt} = Q_1 - Q_3 - F_1 R \frac{dQ_3}{dt}$

传: $H_2(s) = \frac{1}{RF_1 F_2 s^2 + (F_1 + F_2) s} Q_1(s) - \frac{1 + F_1 R s}{RF_1 F_2 s^2 + (F_1 + F_2) s} Q_3(s)$

显而易见:

1. 传递函数为代数方程, 比分析系统带来方便。

2. 是描述动态特性的数学模型, 它表征系统或环节固有特性, 和输入信号的具体形式无关。

3. 传递函数为分母就是微分方程的特征方程, 从而能方便地判断动态过程的基本特性。

第四章：调节系统的时域分析

§4-1 二阶系统

1. 微分方程 $a_2 \frac{dy}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x$

2. 传递函数: $W(s) = \frac{b_1 s + b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$

考虑对动态特征取决于特征方程(分母), 为方便起见, 式略

$$W(s) = \frac{b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$$

设: $\omega_n = \sqrt{a_0/a_2}$ $\xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$ $K = b_0/a_2$

— 无阻尼自然振荡频率 — 阻尼系数 — 放大系数

则有: $W(s) = \frac{K}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$

特征方程式: $s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0$

3. 飞升特性

在 $x(t)$ 作用下: $y(t) = y_k(t) + y_a(t)$

$y_k(t)$ — 稳态解, 非齐次微分方程的特解

取决于输入量的是何形态

$y_a(t)$ — 动态解, 齐次微分方程的通解

取决于环节本身的特性

$$y_k(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s Y(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{KA}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} = KA/\omega_n^2$$

$$y_a(t) = C_1 e^{s_1 t} + C_2 e^{s_2 t}$$

特征根: $s_{1,2} = -\omega_n (\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1})$

可能情形: $\begin{cases} \text{不相等实根} & \begin{cases} \text{正根} \\ \text{负根} \end{cases} \\ \text{重根} & \begin{cases} \text{正根} \\ \text{负根} \end{cases} \\ \text{共轭复根} & \begin{cases} \text{负实部} \\ \text{正实部} \\ \text{虚根} \end{cases} \end{cases}$

(1) $\zeta > 1$ 两个实根 $s_{1,2} = -\omega_n(\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1})$

$$W(s) = k/s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad \text{设: } x(s) = A/s$$

$$Y(s) = kA/s(s-s_1)(s-s_2)$$

$$= C_1/s + C_2/s-s_1 + C_3/s-s_2$$

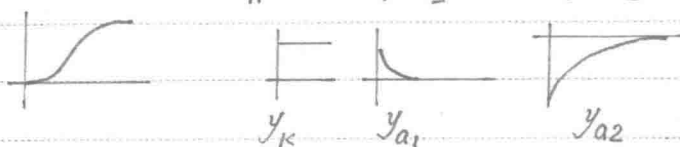
待定系数: $C_1 = kA/s_1 s_2$

$$C_2 = kA/s_1(s_1-s_2)$$

$$C_3 = kA/s_2(s_2-s_1)$$

$$y(t) = \frac{kA}{\omega_n^2} \left(1 + \frac{s_2}{s_1-s_2} e^{s_1 t} - \frac{s_1}{s_1-s_2} e^{s_2 t} \right)$$

$$s_1, s_2 = \omega$$



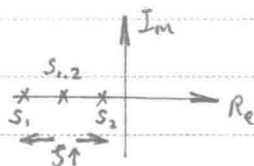
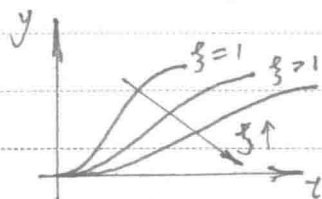
小结:

1. 从复平面看, $\zeta > 1$ 时, s_1, s_2 存在实轴上, $y(t)$ 是一条单调非周期曲线
2. ζ 越大, s_1 和 s_2 相距越远, 调节时间加长
3. 根的位置离原点越近, 衰减越慢, 离原点最近的根称主导根

(2) $\zeta = 1$ 重实根 $s_{1,2} = -\omega_n$

$$W(s) = \frac{k}{(s-s_{1,2})^2} = \frac{k}{(s+\omega_n)^2}$$

$$y(t) = L^{-1} \left[\frac{A}{s} \cdot \frac{k}{(s+\omega_n)^2} \right] = \frac{kA}{\omega_n^2} [1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t)]$$



(3) $0 < \xi < 1$

$$s_{1,2} = -\omega_n(\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1}) = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2} = -\alpha \pm j\omega_d$$

$$W(s) = \frac{K}{(s+\alpha)^2 + \omega_d^2}$$

$$y(t) = L^{-1} \left[\frac{A/s \cdot W(s)}{\omega_n^2} \right]$$

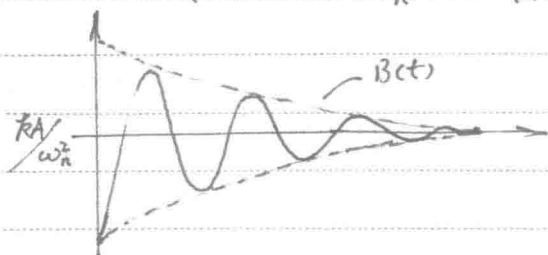
$$y(t) = \frac{KA}{\omega_n^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_n\sqrt{1-\xi^2} t + \varphi) \right]$$

$\therefore$ 部分方程有3项:

$$\frac{A}{s} + \frac{BS+C}{(s+\alpha)^2 + \omega_d^2} \quad \text{稳态值} + [C_1]e^{-\alpha t} \sin\omega_d t + [C_2]e^{-\alpha t} \cos\omega_d t$$

包络线:

$$包络线: B(t) = \frac{KA}{\omega_n^2} \left(1 \pm \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \right)$$



引号:

1. 衰减的快慢取决于包络线方程中的时间常数 $T = \frac{1}{\xi\omega_n} = \frac{1}{\alpha}$
 $\alpha \uparrow$ 衰减越快

2. 根据 $y(t)$ 方程, $\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\xi^2}$, 振荡周期 $T_K = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_n\sqrt{1-\xi^2}}$
 $\omega_d \uparrow$ 振荡快

3. 衰减率 m 和衰减指数 (ψ 和 m)

$$\psi = \frac{m_1 - m_3}{m_1} = 1 - \frac{M_3}{M_1}$$

$$M_1 = \left(\frac{KA}{\omega_n} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \right) e^{-\xi\omega_n t}, \quad M_3 = \left(\frac{KA}{\omega_n} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \right) e^{-\xi\omega_n (t_1 + T_K)}$$

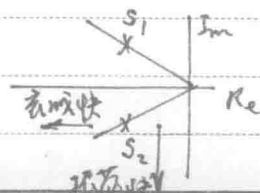
$$\psi = 1 - e^{-\xi\omega_n T_K} = 1 - e^{-\xi\omega_n \frac{2\pi}{\omega_d}} = 1 - e^{-2\pi m} \quad m = \frac{\alpha}{\omega_d} = \frac{1}{\tan \gamma}$$

m 为衰减指数, 每 m 成上有相同的 ψ

$$\psi = 1 - e^{-2\pi m}$$

$$m = \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}$$

$$\xi = \frac{m}{\sqrt{1+m^2}}$$



南京电力高等专科学校授课教案 (2学时)

章节、内容	第一章 自动调节的基本概念
目的要求	了解自动调节的任务和要求,调节系统采用方框图描述的方法和常用术语,理解四种基本的调节过程。
重点难点	重点: 1. 用方框图描述调节系统 2. 几种基本调节过程的特点
提问内容	
教学环节方法提要 时间分配	
1. 从热力过程自动调节引出人工调节的调节方式 2. 从人工调节的调节方式引出自动调节的基本方式 3. 通过汽水调节系统的实例引出常用术语 4. 提出可能出现的四种基本的调节过程。 5. 将四种调节过程分为稳定的、边界稳定的和不稳定的 6. 指出判评调节过程的三大性能指标	

习题或思考题

p10: 1-1
1-2
1-5

参考书

课后记载

编写教师 丁打 (签名) 编写日期 年 月 日

注：凡属教材改变、专业不同、计划课时或大纲要求变动较大，教案应重写。