

仪器仪表学术专著

滞后过程的 预估与控制

王永初 著

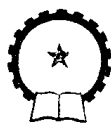


机械工业出版社

仪器仪表学术专著

滞后过程的预估 与控制

王永初 著



机械工业出版社

本书系统地介绍滞后过程预测和控制的方法,许多内容是著者研究工作的总结,提出了改进型Smith预估器方法,并从提高数字模式与模拟模式的精度着手研究微型计算机控制的算式。在随机过程预测控制方面,本书强调工业噪声的白噪声化,并将成形滤波器同预估控制方法联系起来,将现代控制理论同经典控制理论联系起来,是当前微型计算机在生产过程控制中开辟的一个新领域,可能使检测滞后所产生的困难得到较好地克服。

本书对从事自动控制、仪器仪表行业的科技工作者和大专院校的师生有参考价值。

滞后过程的预估与控制

王永初 著

责任编辑:李 敬

封面设计:方 芬

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 10 $\frac{1}{8}$ ·字数 266 千字

1987年10月北京第一版·1987年10月北京第一次印刷

印数 0,001—2,300·定价:3.50 元

科技新书目:152-111

统一书号:15033·6896

前 言

为了开展仪表学科的学术活动,1980年创刊了《仪器仪表学报》,到目前已先后刊载400多篇学术论文,汇集了我国仪表学科的科研、理论探讨和应用的精华。每篇论文都具有一定创新与独立的见解,这对仪表工业的发展与繁荣起到了很好的促进作用,也受到国内外的好评。美国仪表学会最近准备选用我国已出版仪器仪表学报部分论文,首先出版一本《中国仪器仪表学报》专集(英文版),在世界发行;而且多次与我国联系酝酿准备按期出版《仪器仪表学报》英文版。

关于组织出版仪器仪表专著的问题,我们认为,建国三十多年,特别是近几年来,我国仪器仪表科学技术和工业生产得到了很大的发展,取得了许多重要的科研成果,其中不少成果具有我国自己的特色,有的达到国际先进水平。为了总结和交流科技成果,提供和保存科技文献,促进仪器仪表科技事业的发展,不仅有必要,同时也有可能出版一批仪器仪表专门著作。专著是《学报》的扩展和延伸,反映著者在仪器仪表某一学科领域或某个专门课题上创造性的工作所取得的研究成果,具有较高的学术水平和指导意义。专著是由《仪器仪表学报》编委会推荐选题和组织审稿,机械工业出版社审定选题和编辑出版。

1983年,1984年先后推荐组织了六个专著选题是:《黑体辐射源特性计算及应用》、《白度理论及计测》、《振动传感器的绝对校准(装置)》、《滞后过程的预估与控制》、《金属膜片的设计》、《实用建模方法》。

经过各方面两年多来的共同努力,这批专著即将陆续出版。在此我们应对仪器仪表学报各位编委、审阅稿件的专家以及机械工业出版社表示感谢。仪器仪表专著出版确实是仪表行业的一件

大事，它标志着我国仪表学科已经走向国际，进入科学技术先进之列。

我们深信，这批专著的出版一定会受到国内外仪表学术界与仪表行业的欢迎，并对此表示祝贺。

这批专著是初次组织，一定还存在一些问题，希望读者关心、提意见，以便今后改进提高。

《仪器仪表学报》主编

王良楣

1986年5月

序

迟后与滞后是工业过程的一种固有特性。这两种特性在一定条件下可以互相转化，可以说是一种量变至质变的过程。众所周知，滞后对象是相当难于控制的，不少工业生产过程由于滞后太大或迟后的阶次太高，影响了生产过程控制品质，严重时会造成产品质量低劣，其经济损失是难于估计的。作为自动化与仪器仪表行业的一个科技工作者，著者曾广泛地接触现场，致力于解决这个难题，虽然经过多年来的努力，在许多同志的帮助下，研究了一些滞后控制方法和装置，发表了若干有关的论文，受到学会和同行专家的勉励，但感到这个课题仍然有广阔的研究前景。鉴于当前国内外许多学者对滞后过程的预估与控制发生了浓厚的兴趣，促使我们将自己研究的点滴体会加以系统化，归纳成这样的一本书，献给有志克服过程滞后预测与控制难关的同志们。

本书的编写得到中国仪器仪表学会领导和仪表界的许多老前辈的支持和鼓励，尤其是浙江大学周春晖教授，在百忙中审阅了本书，给予著者许多帮助。著者借本书出版的机会，向他们表示深切的敬意和衷心的感谢。由于著者水平不高，学习不够，书中肯定会有不少缺点和错误，欢迎读者批评指正，待本书有机会再版时给予改正。

著者

1985年2月

目 录

前言

序

第一章 概述	1
§ 1-1 生产过程中的信息传递	1
§ 1-2 滞后时间的辨识	7
§ 1-3 滞后对象的控制	9
第二章 滞后对象的预估与控制	12
§ 2-1 Smith预估控制方法	12
一、Smith预估器原理	12
二、Smith预估控制的实质	14
三、Smith预估控制存在的问题	15
§ 2-2 改进型的Smith预估控制方法	18
一、复合型Smith预估控制系统	18
二、多环Smith预估控制系统	20
三、改型预估控制系统	25
四、无自衡对象的改型预估控制系统	41
§ 2-3 自适应Smith预估控制方法	49
一、适用于对象静态增益变化的预估器	50
二、动态补偿的自适应预估器	57
三、修改模型参数的动态预估器	61
§ 2-4 纯滞后单元与预估器模型的实现	64
§ 2-5 利用衰减模型的迟后系统设计方法	77
一、频率特性与衰减频率特性	78
二、PD [*] 与PID [*] 的调节模式	95
§ 2-6 小纯滞后系统的自适应控制	105
一、梯度方法	107
二、超稳定性方法	111
§ 2-7 简易采样控制系统的设计方法	121
一、简易采样调节器的构成	122

二、简易采样控制与连续控制的比较	122
三、系统参数的选择	126
§ 2-8 纯滞后预估与补偿控制方法的应用	130
一、转窑温度控制系统	130
二、发电厂表面式减温器蒸汽温度控制系统	135
第三章 采样与数字控制迟后的预测与控制	142
§ 3-1 采样与数字控制生成迟后的原因及其误差分析	142
一、采样造成连续信号的失真	142
二、量化误差与传播	145
§ 3-2 数字模式与模拟模式的拟合	159
一、稳态匹配 z 变换方法	159
二、古典数值积分拟合方法的比较	170
三、虚拟保持器的 z 变换方法	183
四、大步长的拟合方法	197
五、快速计算的拟合方法	210
§ 3-3 高精度算式的制定	220
一、PID控制算式	221
二、预估模型的算式	230
§ 3-4 数字纯滞后预估控制方法的应用	242
一、连续轧钢机钢带厚度控制系统	242
二、多级纯滞后补偿控制系统	250
第四章 检测元件迟后的预估与控制	261
§ 4-1 由时间序列信号辨识模型	262
一、由生产记录曲线分析模型的例子	262
二、时间序列信号的白噪声化问题	275
§ 4-2 时间序列信号的超前预估与控制	288
一、预估原理	288
二、若干典型的预估函数	292
三、预估控制系统的设计	294
四、预估控制方法的应用	300
§ 4-3 卡尔曼滤波器的预测方法	304
一、卡尔曼滤波原理	304
二、卡尔曼预测原理	309
三、预测在纯氧顶吹转炉定碳控制中的应用	310
参考文献	315

第一章 概 述

§ 1-1 生产过程中的信息传递

在生产过程中，信号的关系如图1-1所示，包括两种类型：

(1) 源信号：

在设备外部产生，并可以产生响应的信号。如生产过程的输入信号（物料流量、

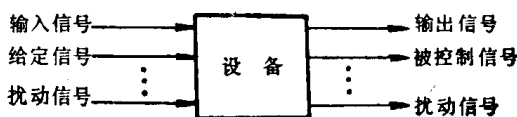


图1-1 设备及其联系的信号

能流量)，给定信号以及扰动信号；

(2) 响应信号：在源信号作用下，依照设备固有特性激发产生的信号。

无论何种信号都可以用其内含的能量、变化幅值与变化频率来表征。给信号赋予量的概念就是信息。信号在传递过程中，必然会产生滞后或迟后。滞后或称纯迟后，或传输滞后，用数学式表示为

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = e^{-\tau s} \quad (1-1)$$

式(1-1)的含义是信号 $X(t)$ 与 $Y(t)$ 形状一样，但沿着时间轴 $Y(t)$ 的各个部分总是落后 $X(t)$ 一段固定的时间 τ 。滞后的含义说明如图1-2所示。而从相位的

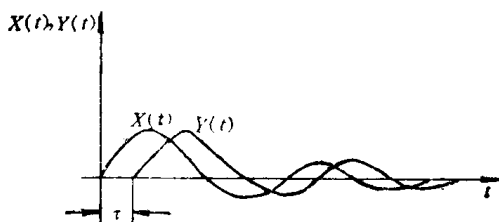


图1-2 滞后的含义说明

角度看, $Y(s)$ 比 $X(s)$ 的相迟角增加 $\left(\frac{\tau 360^\circ}{T_s}\right)$, 式中 T_s 为信号 $X(s)$ 的周期。例如皮带输送机上两点间的重量信号在时间上相差 τ , 其中 $\tau = \frac{L}{v}$, L 为两点间的距离, v 为皮带的传输速度。

但是, 在工业生产过程中, 单纯的滞后是很少的。例如一条气体传输管道, 在输入端压力阶跃变化, 其输出响应并不是阶跃的, 如图1-3所示。前面一段不响应的时间为 τ , τ 过后的响应亦不是阶跃的, 有一个缓慢变化到稳态值的过程, 这个过程就表现出容积迟后现象。

长管道这种响应是容易解释的, 正如图1-3a所示, 长管道可以划分成许多串联的小容积气室和气阻, 譬如 I 气室的压力信号 P_i 用如下方程式表示

$$C_i \frac{dP_i}{dt} = \frac{P_{i-1} - P_i}{R_1} - \frac{P_i - P_{i+1}}{R_2} \quad (1-2)$$

式中 C_i 为气室 I 的气容量; R_1 与 R_2 为气室 I 的输入与输出气阻。或记成

$$P_i(s) = \frac{k_1}{T_2 s + 1} P_{i-1} - \frac{k_2}{T_2 s + 1} P_{i+1} \quad (1-3a)$$

式中

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

$$k_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad k_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

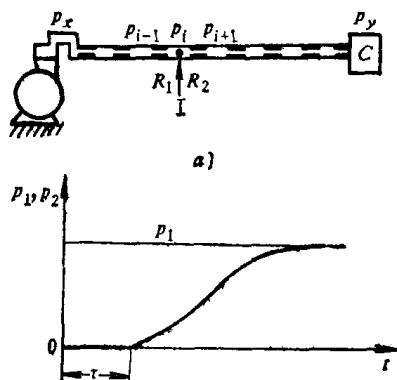


图1-3 传输管道的压力响应特性

a) 气体传输管道 b) 源信号与响应信号

⊖ $X(s)$ 为信号 $X(t)$ 的拉普拉斯变换, 为了简化有时也记为信号 $X(s)$ 。

这里不妨假设所有的气阻均相等，所有的气容亦相等，于是式(1-3a)可记成

$$p_i(s) = w p_{i-1}(s) - w p_{i+1}(s) \tag{1-3b}$$

式中
$$w = \frac{k}{Ts + 1}$$

气阻可以用电阻，气容可以用电容来模拟，如图1-4所示。若用传递函数方框图表示，则如图1-5所示。这种结构方框图环节之间有互相耦合的影响，在化简过程中，可以由最后一级逐步往前推进，最后一级 P_{y1} 至 P_{z1} 的传递函数为

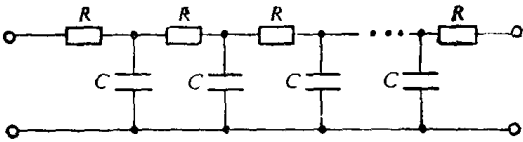


图1-4 气体传输管道响应的电模拟

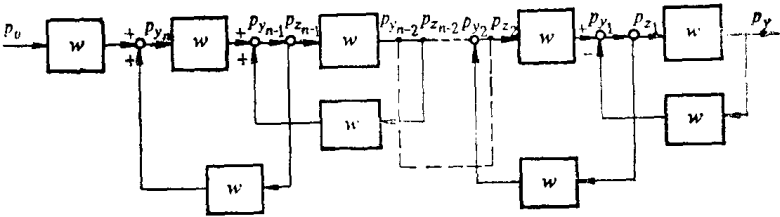


图1-5 用方框图表示阻容网络的关系

$$\frac{P_{z1}}{P_{y1}} = \frac{1}{1 - w^2} \tag{1-4}$$

这样，最后两个级的结构方框图可简化成图1-6。

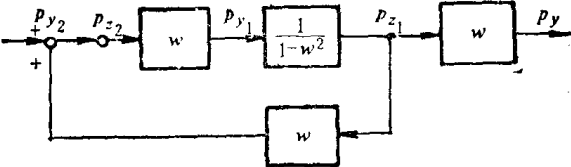


图1-6 图1-5最后两个部分的化简说明

同样得到

$$\frac{p_{r2}}{p_{r2}} = \frac{1}{1 - \frac{w_2}{1 - w^2}} \quad (1-5)$$

同理可得

$$\frac{p_{r3}}{p_{r3}} = \frac{1}{1 - \frac{w^2}{1 - \frac{w^2}{1 - w^2}}} \quad (1-6)$$

于是 n 级阻容网络的传递函数可用如下一个连分式表示:

$$\frac{p_r}{p_s} = \frac{w^2}{1 - \frac{w^2}{1 - \frac{\vdots}{1 - \frac{w^2}{1 - \frac{w_2}{1 - \frac{w^2}{1 - \frac{w_2}{1 - \frac{w_2}{1 - \frac{w^2}{w^2}}}}}}}}} \quad (1-7)$$

式 (1-7) 的连分式可进一步化简成

$$\frac{p_r(s)}{p_s(s)} = \frac{a_0 + a_1 s^1 + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n}{b_0 + b_1 s^1 + b_2 s^2 + b_n s^n} \approx \frac{1}{\left(\frac{\hat{T}}{n} s + 1\right)^n} \quad (1-8)$$

式中 $\hat{T}$ 表示近似等 n 阶环节的时间常数。

显然, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{\frac{\hat{T}}{n} s + 1} \right)^n = e^{-\frac{\hat{T}}{n} s} \quad (1-9)$$

上述的分析说明滞后与迟后是一个量变到质变的过程, 由无限多个无限小的气容 (或电容)、气阻 (或电阻) 组成网络可以模拟滞后的特性。假如气容 (或电容) 与气阻 (或电阻) 的数量不是无限大, 而且数值亦不是无限小, 则这个环节的特性可以用如下一个传递函数表示

$$x_n = \frac{Qx_a + Q_r x_{n-1}}{Q + Q_r} \quad (1-12c)$$

若记
$$r = \frac{Q_r}{Q + Q_r} \quad (1-13)$$

并代入式 (1-12a)、式 (1-12b) 与式 (1-12c)，则可得到

$$x_1 = (1 - r)x_a + rx_0 \quad (1-14a)$$

$$x_2 = (1 - r)x_a + rx_1 = (1 - r^2)x_a + r^2x_0 \quad (1-14b)$$

$$\vdots$$

$$x_n = (1 - r^n)x_a + r^n x_0 \quad (1-14c)$$

x_n 表示经历时间 $t = n\Delta t = nv/Q + Q_r$ 后混合器中液体的浓度。为了分析 x_n 的变化过程，在式 (1-14c) 的两边分别减去 x_0 ，即

$$\begin{aligned} x_n - x_0 &= (1 - r^n)x_a + r^n x_0 - x_0 \\ &= (1 - r^n)x_a - (1 - r^n)x_0 \\ &= (1 - r^n)(x_a - x_0) \end{aligned}$$

由上式得到

$$\frac{x_n - x_0}{x_a - x_0} = 1 - r^n \quad (1-15a)$$

或记成

$$\frac{\Delta x_n}{\Delta x_a} = 1 - r^n \quad (1-15b)$$

式 (1-15b) 是表示混合器中液体浓度变化的增量与进料浓度变化的增量之间的关系。假如 $r = 0.6$ ， $\Delta x_n = 1$ ，则式 (1-15b) 可写成

$$\Delta x_n = 1 - (0.6)^n \quad (1-16)$$

图1-8表示混合器浓度的单位阶跃响应曲线。于是混合器浓度对象的传递函数可以写成

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

(1-17)

式中 τ 表示对象的滞

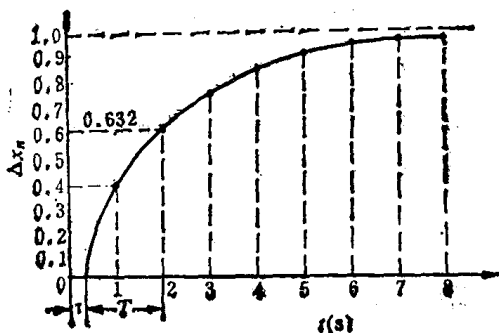


图1-8 混合器浓度对象的单位阶跃响应曲线

后时间; T 表示对象容积迟后的时间常数。

上述两例说明, 生产过程特性滞后与迟后是普遍存在的。当 τ 同 T 的比值大到一定程度(例如1.5左右), 对象就变得难于控制。

§ 1-2 滞后时间的辨识

对象的滞后是对象的一种固有特性, 其大小可以通过辨识的方法得到。例如在对象的输入端施加一个阶跃信号, 并从阶跃信号加入时刻开始计时, 至对象的输出能够观测到响应的时刻为止, 这一段时间称为滞后时间 τ , 这是一个开环辨识 τ 的方法。对象的滞后的闭环辨识方法, 是对系统的给定值施加一个阶跃信号, 同样由观察系统不响应的时间确定 τ 。上述两种方法对于没有不灵敏区的对象是适用的。当对象具有不灵敏区时, 必须首先辨别不灵敏区的大小。不灵敏区表现为静态的特性, 滞后 τ 则表现为动态的特性, 不灵敏区是指对象具有如下的特性

$$Y(t) = \begin{cases} 0 & -\Delta \leq X(t) \leq \Delta \\ f(X(t) - \Delta) & \text{其它} \end{cases} \quad (1-18)$$

在图1-9中, $X(t - \tau)$ 表示原信号 $X(t)$ 通过滞后 τ 环节后的信号, $f(X(t - \tau) - \Delta)$ 表示原信号 $X(t)$ 通过既延时又有不灵敏区环节后的信号。因此, 在有不灵敏区的场合下, 不响应的时间不等于 τ , τ 应为不响应时间 t_r 减去不灵敏区对应的时间 t_Δ , 即

$$\tau = t_r - t_\Delta$$

式中 t_Δ 由下式决定

$$\Delta = X(t_\Delta)$$

滞后时间辨识的一个困难问题是对象经常承受随机性的扰动, 其输出信号本身就处于变动的状态, 因此应用简单的测试方

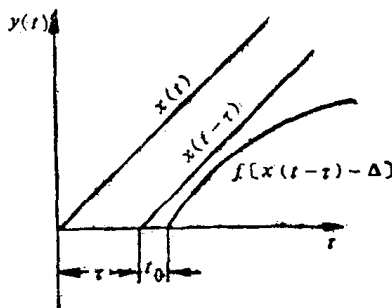


图1-9 不灵敏区与滞后时间的图解说明

法和肉眼的观察，时常产生很大的误差，采用加入伪随机信号的测试方法，能够比较准确地获得滞后时间。

对象的输出 $X(t)$ 与输入 $W(t)$ 时间序列的关系一般可以表示为

$$X_n = \sum_{i=0}^{\infty} v_i W_{n-i} \quad (1-19)$$

若记 z^{-1} 为延时一拍，即

$$z^{-1}X_n = X_{n-1}$$

$$z^{-2}X_n = X_{n-2}$$

$$\vdots$$

$$z^{-m}X_n = X_{n-m}$$

其中

$$z^{-1} = e^{-\Delta T s}$$

式中 ΔT 表示采样周期。

则式 (1-19) 可以写成

$$\frac{X(z^{-1})}{W(z^{-1})} = \sum_{i=0}^{\infty} v_i z^{-i} \quad (1-20)$$

由于 z^{-1} 相当于 z 变换算子 z 的逆，而且 W_n 为近似白噪声的信号，所以上式为对象的脉冲传递函数。图1-10表示一个典型的脉冲响应函数。由于 v_0 、 v_1 与 v_2 均为零，所以 $\tau = 3 \times \Delta T$ ，在式 (1-20) 中 v_i 是通过求相关函数得到的，因此扰动造成的影响是很小的。这种辨识方法第四章将进一步介绍。

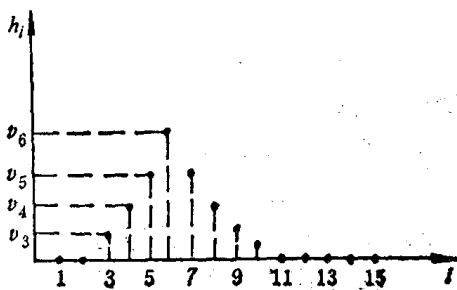


图1-10 脉冲响应函数

这里强调一个问题，就是大多数生产过程所记录的曲线，输入信号几乎不是白噪声，直接利用相关分析方法会遇到困难，正因为这个问题，本书最后一章将要详细介绍成形滤波器的设计方法。

采用相关分析方法必须注意如下两个问题：

(1) 合理选择采样周期

根据申农采样定理知道, 为使所取的离散数据能够代表实际过程, 采样周期 ΔT 应不大于变化频率最高那个信号周期 T_w 的 $\frac{1}{2}$, 即

$$\Delta T \leq \frac{T_w}{2}$$

实际上申农定理很难应用于生产过程, 原因是最高的频率信号不容易估计, 而且在采样调节过程中还有保真度与粗糙度问题, 数据的整化误差问题, 这些都会影响采样周期的选择。正因为这样, 本书第三章专门分析采样周期的选择问题。

(2) 获取数据时记录曲线的最低时间长度 L

平稳随机过程的自相关函数可以表示为

$$\rho(\tau) = K \exp$$

$$\left[\left(-\frac{1}{T_0} \right) |\tau| \right]$$

(1-21)

其中 K 为大于零的常数。

图1-11表示自相关函数 $\rho(\tau)$ 的误差 $\delta_m(\tau, t)$ 同 τ 及 L 的关系。例如: 当对象特性用 $\frac{1}{T_0 s + 1}$ 函数近似时, $L \geq 1000 T_0$, 故知采样数据的总数 $N =$

$$\frac{L}{\Delta T} \geq 1000 \frac{T_0}{\Delta T}.$$

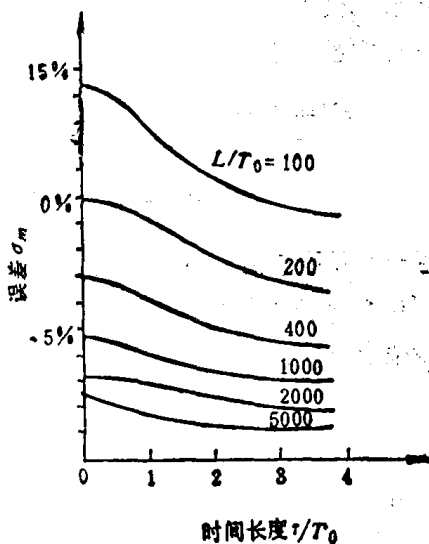


图1-11 $\rho(\tau)$ 与 τ 及 L 的关系

§ 1-3 滞后对象的控制

滞后对象是一种很难控制的对象。“具有滞后的过程, 在输