

高等纺织院校教材

过程控制系统 分析与设计

严伯钧 尹俊熙 张仁忠 杨公源 编 淳于怀太 审

中国纺织出版社

高等纺织院校教材

过程控制系统分析与设计

严伯钧 尹俊熙 编
张仁忠 杨公源

淳于怀太 审

中国纺织出版社

(京)新登字037号

内 容 提 要

本书共十一章，第一章绪论；第二章至第八章讨论过程控制系统分析与设计的基本原理；第九章至第十一章介绍生产过程中常用对象的控制方案及其设计、整定方法，包括流体输送、传热与供热、空调。化纤、纺织、印染生产中一些典型对象的数学描述与控制系统在有关章节中作为实例作了介绍。

本书可作高等纺织院校过程自动化专业本科生教学用书，也可供工厂和设计部门自控专业工程技术人员参考。

责任编辑：郑剑秋

高等纺织院校教材
过程控制系统分析与设计

严伯钧 尹俊熙 编
张仁忠 杨公源

淳于怀太 审

中国纺织出版社出版发行

(北京东直门南大街4号)

电话：4662932 邮编：100027

密云华都印刷厂印刷

各地新华书店经售

787×1092毫米 1/16 印张：15 字数：365千字

1994年5月第一版第一次印刷

印数：1—3,000 定价：15.00元

ISBN 7-5064-0990-9/TS·0003 (课)

前 言

本书是由高等纺织院校生产过程自动化专业教育委员会审定通过的本科生用的教材。全书包括两方面内容，第二章至第八章讨论过程控制系统分析与设计的基本原理；第九章至第十一章介绍生产过程中常用对象的控制方案及其设计、整定方法，包括流体输送、传热与供热、空调。化纤、纺织、印染生产中一些典型对象的数学描述与某些控制系统在有关章节中作为实例进行介绍。本书也可供工厂和设计部门自控专业工程技术人员参考。

绪论、第四章、第五章由张仁忠编写；第三章、第六章、第八章至第十一章由尹俊熙编写；第二章第三节中第五小节、第五节中第二小节由严伯钧编写；第二章第五节中第一小节、第七章中第四节由杨公源编写；这两章中的其余各节均由张仁忠编写。全书由严伯钧统稿。

本书承淳于怀太同志审稿，对本书初稿提出了许多宝贵的修改意见和建议，对修改稿又进行了仔细的审阅。生产过程自动化专业教育委员会的其他同志对书稿也提出了不少有益的意见。在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，恳切希望读者对书中不妥或错误之处予以指正。

编 者

封面设计：李 强

ISBN 7-5064-0990-9/TS·0003 (课) 定价：15.00元

试读结束，需要全本请在线购买：www.ertongbook.com

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 受控对象的特性及其求取方法	(3)
第一节 数学模型的基本概念	(3)
第二节 静态模型的测取及数据处理方法	(3)
第三节 动态模型的测取及数据处理方法	(7)
一、一般概念	(7)
二、由对象的输入输出数据求取其动态参数的方法	(8)
三、并条机牵伸机构的辨识	(26)
第四节 解析法求取对象的数学模型	(30)
一、对象数学模型解析求法的一般步骤	(30)
二、连续水洗过程动态分析	(30)
第三章 单回路控制系统的分析与设计	(36)
第一节 单回路反馈控制系统的构成及基本关系	(36)
一、单回路控制系统的构成	(36)
二、负反馈控制的作用	(37)
三、对象与调节器结合的动态关系	(39)
第二节 被控变量和操纵变量的选择	(47)
一、被控变量的选择	(47)
二、操纵变量的选择	(47)
第三节 纯滞后对象的控制	(53)
一、史密斯(Smith)预估器	(53)
二、增益自适应补偿	(55)
三、采样控制方案	(56)
第四节 调节器的参数整定	(59)
一、稳定裕度法	(59)
二、衰减频率特性法	(61)
三、临界比例度法	(65)
四、反应曲线法	(66)
第五节 执行器和测量变送单元	(68)
一、调节阀的选择原则	(68)
二、调节阀的非线性	(69)
三、选用测量变送单元应注意的问题	(69)
第四章 串级控制系统	(71)

第一节 基本原理和系统结构	(71)
第二节 串级控制系统品质分析	(72)
一、单回路控制系统的调节品质	(72)
二、串级控制系统的品质改善分析	(75)
三、串级控制系统的共振及其消除	(80)
第三节 串级控制系统的设计	(84)
一、串级控制系统的设计原则	(84)
二、串级控制系统调节器的选型	(85)
第四节 串级控制系统的应用实例	(85)
一、克服作用于对象的主要干扰	(85)
二、干扰情况复杂、对象有大的容量滞后	(85)
三、提高纯滞后对象的调节品质	(86)
四、改善对象的非线性影响	(86)
第五节 串级控制系统的投运与参数整定	(87)
一、串级控制系统的投运	(87)
二、串级控制系统的参数整定	(87)
第五章 比值、均匀、分程控制系统	(95)
第一节 比值控制系统	(95)
一、比值控制基本原理和系统结构	(95)
二、比值控制系统的分析与设计	(96)
三、比值控制系统实施中的问题	(103)
四、数字式配比控制系统	(104)
第二节 均匀控制系统	(110)
一、均匀控制的概念和分析	(110)
二、均匀控制系统的设计和整定计算	(118)
第三节 分程控制系统	(123)
一、分程控制的概念	(123)
二、分程控制系统的设计和调试	(125)
第六章 前馈控制系统	(129)
第一节 前馈控制的实质及前馈补偿器	(129)
一、关于完全抗干扰的概念	(129)
二、前馈控制及前馈-反馈控制	(129)
第二节 静态前馈控制及动态前馈控制	(131)
一、静态前馈控制	(131)
二、动态前馈控制	(132)
第三节 前馈-反馈及前馈-串级控制	(135)
一、前馈和反馈的互补作用	(135)
二、前馈控制器与反馈回路的连接和调整	(136)

第四节	用前馈控制实现静态自适应	(137)
第五节	前馈控制的实施	(140)
一、	前馈控制的适用场合	(140)
二、	前馈补偿信号的进入点选择	(140)
三、	前馈控制中的调节阀及开方器	(140)
第七章	非线性和选择性控制系统	(141)
第一节	位式控制	(141)
一、	调节过程的分析	(141)
二、	描述函数法分析的实例	(142)
第二节	开关式最短时间控制	(144)
一、	开关式控制原理	(144)
二、	开关时间的计算	(144)
第三节	线性过程的非线性控制	(146)
一、	液面的非线性控制	(146)
二、	变结构控制	(147)
第四节	非线性过程的非线性控制	(148)
一、	滴定曲线和pH对象的灵敏度	(149)
二、	pH控制的特点	(150)
三、	pH控制系统方案	(150)
第五节	选择性控制的基本原理及结构	(154)
一、	概述	(154)
二、	选择性控制系统的类型	(155)
第六节	选择性控制的工程实现	(156)
一、	选择器的选型	(156)
二、	调节器选型与参数整定	(156)
三、	选择性控制系统的防积分饱和措施	(157)
第七节	选择性控制系统应用举例	(158)
一、	实现软保护	(158)
二、	实现产量自动调整	(158)
第八章	多变量控制系统	(160)
第一节	多变量系统耦合特性的描述	(160)
一、	P规范耦合对象的数学描述及框图	(160)
二、	V规范耦合对象的数学描述及框图	(160)
第二节	多变量系统的设计原则	(162)
一、	自治原则	(162)
二、	解耦原则	(162)
三、	协调跟踪原则	(163)
第三节	协调控制系统	(164)

一、锅炉跟汽机的协调方案	(164)
二、汽机跟锅炉的协调方案	(165)
第四节 解耦控制系统	(165)
一、解耦设计中应考虑的基本问题	(166)
二、前馈解耦系统设计	(166)
三、反馈解耦系统设计	(169)
四、解耦控制的工程实践法	(170)
五、相对增益分析法	(174)
第九章 流体输送过程控制	(178)
第一节 泵和压缩机的结构原理及工作特性	(178)
一、容积式泵和压缩机	(178)
二、叶片式泵和压缩机	(180)
第二节 泵和风机的控制	(181)
一、容积式泵的控制	(181)
二、离心泵的控制	(182)
三、风机和真空泵的控制	(183)
第三节 离心式压缩机的控制	(184)
一、离心式压缩机特性的数学描述	(185)
二、离心式压缩机的喘振	(186)
三、离心式压缩机的控制	(188)
第十章 传热过程控制	(191)
第一节 锅炉工艺及控制系统	(191)
一、锅炉系统带控制点的工艺流程图	(191)
二、主要控制系统	(191)
第二节 给水控制系统	(194)
一、给水对象动态特性	(194)
二、给水控制系统的分析与设计	(195)
第三节 燃烧控制系统	(202)
一、燃料流量控制系统	(202)
二、送风量控制系统	(204)
三、炉膛负压及保护性控制系统	(205)
第四节 蒸汽温度控制系统	(206)
一、受控对象特性分析	(206)
二、蒸汽温度控制系统	(207)
第五节 换热设备的特性	(208)
一、换热对象的静特性	(208)
二、换热对象动态特性的经验公式	(210)
第六节 换热器的常用控制方案	(211)

一、调节载热体流量的方案.....	(211)
二、将工艺介质分路的方案.....	(212)
第七节 蒸汽加热器的控制.....	(213)
一、调节蒸汽流量的方案.....	(213)
二、调节传热面积的方案.....	(214)
第十一章 空调过程控制	(216)
第一节 湿空气的热力学性质及湿空气焓湿图.....	(216)
一、湿空气的热力学性质.....	(216)
二、湿空气性质图.....	(219)
第二节 典型空调设备的自控系统.....	(221)
一、单区系统控制.....	(221)
二、双风道(多区系统)控制.....	(226)
三、空调系统的全年运行控制.....	(226)
四、变露点、变风量的运行控制.....	(228)
附录.....	(231)
参考文献.....	(231)

第一章 绪 论

一、过程控制的定义及作用

过程控制是指用自动化装置,对生产过程实现自动检测和控制。过程控制工程(Process Control Engineering)作为自动化的一门分支学科,研究过程控制系统的分析与综合问题。在此,综合一般是指系统方案设计。因此,它是以控制系统为主体、控制理论为基础,化工、化纤、纺织、印染等工业过程和和设备为对象,自动化仪表及控制计算机为工具的有机结合。学科间的关系可用图1-1表示。

过程控制是保证生产过程或产品达到优质、高产、低耗、安全、减轻劳动强度、改善劳动条件、提高劳动生产率的重要手段,世界上工业发达的国家,在强调工艺、机械方面改造的同时,都在把最先进的控制工具引入生产过程的控制和管理中去,使先进的工艺过程向更高级、更大容量发展,使生产过程进一步强化和优化。反过来,这又促进了控制理论,控制工具及过程控制系统的进一步发展。

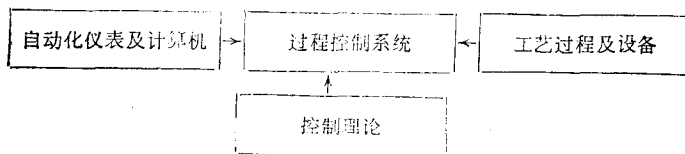


图 1-1 过程控制工程的学科结构

二、过程控制的发展概况及展望

工业自动化是与工业革命同时开始的,即以瓦特蒸汽机调速器为起点。那时的自动化装置是机械式的,而且是自力型的。随着各种动力源的开发,电动、液动和气动的控制装置为过程控制提供了新的控制手段。

60年代以前,控制理论已发展了Nyquist和Bode的频率法,Evans的根轨迹法等,不但在分析随动系统的调节品质方面起到很好的作用,而且也移植到过程控制中,一定程度上解决了系统的分析与设计问题。同时,电动与气动单元组合仪表的出现,为能更灵活、有效地设计和配置控制系统,提供了物质条件。自动化水平逐渐发展成为车间或全厂级的集中监测、控制,不但有简单的单回路控制系统,也发展了较先进,更适合工艺需要的复杂控制系统,使控制质量进一步提高。

60年代后,一个突出的标志是以R.E.Kalman的状态空间能控性和能观性的概念,以A.C.Понтрягин的极大值原理为代表的现代控制理论得到迅速发展,在航天、军事等领域取得了成就。此理论,已将分析和设计推广到多变量系统,并直接应用时域品质指标。由于它对过程模型有严格要求,在过程控制领域中的应用,尚处于起步阶段,有待逐步推广,以使过程控制系统的分析和设计建立在精确计算的基础之上。

在技术手段方面,数字计算机的出现是一个划时代的突破;发展到今天的单片微处理器,

无论从价格、性能上，已可与任何常规仪表相媲美。工业过程控制专用的集散控制系统和各种智能化传感器、仪表、数字调节器的涌现和相继投入运用，并且日趋完善，性能价格比也更高。不久的将来，除一些特殊要求外，数字式仪表与计算机控制将在更大范围内取代常规仪表控制。

三、过程控制工程研究的问题

过程控制工程研究过程控制系统的分析、设计及投运中的一些共同和特殊的问题。控制理论的发展，使人们可以建立过程数学模型，并借助计算机进行实时或离线仿真研究，将系统的分析从定性变为定量。但控制系统的基本方案或者说构成控制系统的基本方法、规律，并不因控制手段的改变而被扬弃，而是进一步完善和复杂化，使控制质量进一步提高。因此将过程控制中的典型系统，加以整理，就其共性，应用控制理论进行较深入的定量分析，对设计新的系统是有益的，也是摆脱单凭经验行事的有效途径。因此，过程控制工程被定为生产过程自动化专业主要专业课。

四、过程控制工程课与基础、技术基础课及其他专业课的关系

用图1-2可说明过程控制与其他课程之间的关系。从图中可看出，过程控制工程是综合性的应用学科，是实践性很强的学科，它的基本内容是对各类控制系统的结构、原理、特点的

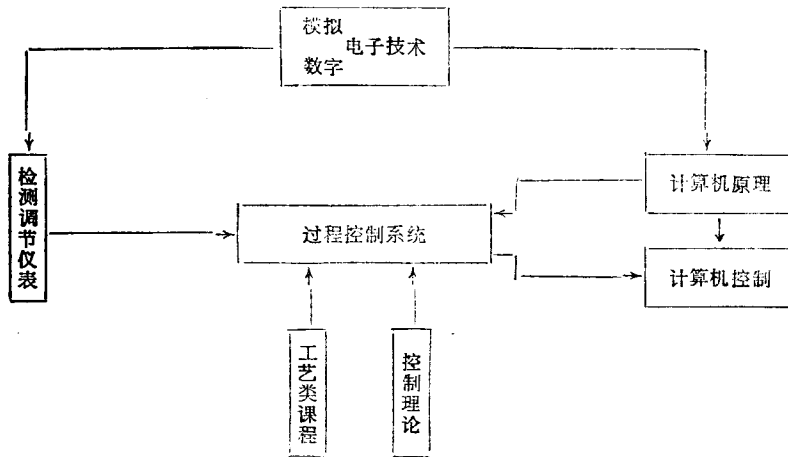


图 1-2 过程控制工程课与其他专业课的关系

分析和设计，它的基本技能是系统的设计、调试，投运和参数整定，它的基本理论是经典和现代控制理论。过程控制系统以工艺过程为受控对象，以检测、调节仪表和计算机及其他自动控制装置为工具，组成一个完成特定任务的整体。

本书按控制系统结构、特点分章，从简单到复杂，从定值到最优控制。书中对各类控制系统的分析，设计原理和方法，不但适用于以计算机为工具的过程控制系统，而且将丰富计算机控制技术课程的内容。

第二章 受控对象的特性及其求取方法

本章主要叙述过程控制中常用的对象动态和静态数学模型的求取方法。该法利用计算机能方便地完成实验和相应的数据处理，是工程处理中较实用的方法。

第一节 数学模型的基本概念

数学模型是描述系统各物理量之间关系的数学表达式。本书讨论过程控制系统中数学模型的求取问题。

根据不同的使用目的，可选择不同的数学模型。

静态模型为描述系统在稳态时各物理量之间关系的数学表达式。静态模型一般是代数表达式。

动态模型为系统各物理量随时间变化的数学表达式。可分为连续的和离散的两类。连续系统，一般用微分方程式、状态方程式和传递函数等形式来表示。离散系统，可用差分方程式、离散的状态方程和脉冲传递函数等形式描述。

线性模型是指各物理量之间的关系为线性。凡线性模型均可应用叠加原理。各物理量之间呈现非线性关系时，称为非线性模型。有时可将非线性模型线性化。其方法是在工作点的邻域内，用泰勒级数展开模型的表达式，保留级数中的一次项，略去高次项，而得到近似的线性模型。

定常模型的数学表达式中的系数是常数；反之，当数学表达式中的系数是时间函数时，这种模型称时变模型。定常模型描述的系统，其动态特性不随时间而变化，但时变模型所描述系统的动态特性随时间而变化。

集中参数模型，是指所描述的系统各物理量仅依赖于时间而不依赖于空间位置，用常微分方程描述；分布参数模型，是指所描述系统的物理量不仅依赖时间而且还依赖于空间，要用偏微分方程描述。

受控对象的数学模型，对于控制系统的设计和分析，有着重要的意义。本章介绍求取对象模型的实用方法，并用若干例子说明方法的使用。

第二节 静态模型的测取及数据处理方法

在优化生产过程时，一个工艺过程的最终要求往往是使产品达到某一给定指标，而影响这一质量指标的因素一般有几个，若用 y 代表产品的质量指标，用 x_1 、 x_2 ……、 x_m 代表影响质量的 m 个因素，其系统框图如图2-1所示。在静态时，常可写成如下关系式：

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_m x_m \quad (2-1)$$

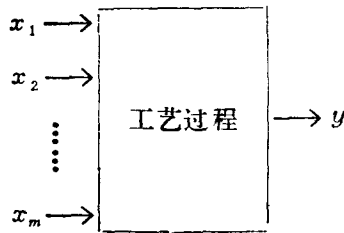


图 2-1 多输入单输出系统框图

式 (2-1) 表示多输入-单输出的关系, 可通过实验方法得到 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ 等参数。

对于线性定常系统, 可将工艺过程稳定在工作点上, 此时对于各输入量, 分别用 $x_{10}, x_{20}, \dots, x_{m0}$ 表示, 而输出量用 y_0 表示。变化各输入量 x_i ($i=1, 2, \dots, m$), 待工艺过程重新稳定后, 测量出相应的稳态输出量 y 。重复上述过程, 经 n 次测试后, 可得到列于表 2-1 中的测试数据。

表 2-1 测试数据表

测试次序			1	2	3	.....	m	.....	n
测量数据	输入量	x_1 x_2 \vdots x_m	x_{11} x_{21} \vdots x_{m1}	x_{12} x_{22} \vdots x_{m2}	x_{13} x_{23} \vdots x_{m3}	.....	x_{1m} x_{2m} \vdots x_{mm}	.....	x_{1n} x_{2n} \vdots x_{nn}
	输出量	y	y_1	y_2	y_3	.....	y_m	.....	y_n

利用表 2-1 数据, 根据式 (2-1), 可得到 n 个方程式:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= a_0 + a_1 x_{11} + a_2 x_{21} + a_3 x_{31} + \dots + a_m x_{m1} + \varepsilon_1 \\ y_2 &= a_0 + a_1 x_{12} + a_2 x_{22} + a_3 x_{32} + \dots + a_m x_{m2} + \varepsilon_2 \\ &\dots\dots\dots \\ y_m &= a_0 + a_1 x_{1m} + a_2 x_{2m} + a_3 x_{3m} + \dots + a_m x_{mm} + \varepsilon_m \\ &\dots\dots\dots \\ y_n &= a_0 + a_1 x_{1n} + a_2 x_{2n} + a_3 x_{3n} + \dots + a_m x_{mn} + \varepsilon_n \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

式 (2-2) 中, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_n$ 是由于存在扰动或测试误差, 当利用系数 a_0, a_1, \dots, a_m 进行计算时, 每次计算值和测试值之间的偏差。因为存在这一偏差 ε_i , 为了计算得更准确, 因此测试次数 n 应远大于所求参数的个数 ($m+1$)。

将式 (2-2) 写成矩阵形式:

$$Y = XA + E \quad (2-3)$$

式中 Y, X, A, E 分别为

$$Y = [y_1 y_2 y_3 \dots y_n]^T \quad (2-4)$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & x_{31} & \cdots & x_{m1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & x_{32} & \cdots & x_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & x_{3n} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}_{n \times (m+1)} \quad (2-5)$$

$$A = [a_0 \quad a_1 \quad a_2 \cdots a_m]^T \quad (2-6)$$

$$E = [\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \cdots \varepsilon_n]^T \quad (2-7)$$

利用最小二乘法时，损失函数（或称目标函数）按下式确定：

$$J = \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \cdots + \varepsilon_n^2 = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = E^T E \quad (2-8)$$

取 J 为极小值，求出模型参数 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ 的估计值。

$$\hat{A} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (2-9)$$

式中 \hat{A} 即为 $[\hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_m]^T$ 。

用最小二乘法计算 \hat{A} 时，估计值是否有偏，即 \hat{A} 的均值是否为实际值，或 $E\{(\hat{A} - A)\}$ 是否等于 0，应该给予重视。最小二乘估计只有在 E 的均值为 0，而且 X 与 E 独立无关时，才是无偏的。

当 X 是确定性矩阵，估计值的方差可这样求出，因为

$$\begin{aligned} A - \hat{A} &= (X^T X)^{-1} (X^T X) A - (X^T X)^{-1} X^T Y \\ &= -(X^T X)^{-1} X^T E \end{aligned}$$

所以

$$\begin{aligned} E\{(A - \hat{A})(A - \hat{A})^T\} &= E\{(X^T X)^{-1} X^T E E^T X (X^T X)^{-1}\} \\ &= (X^T X)^{-1} X^T E \{E E^T\} X (X^T X)^{-1} \end{aligned}$$

上述方法可推广应用于估计多输入（ p 个），多输出（ r 个）对象的静态系数。

多输入多输出对象静态模型可用式（2-10）表示

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= a_{10} + a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1p}x_p \\ y_2 &= a_{20} + a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2p}x_p \\ &\cdots \cdots \cdots \\ y_r &= a_{r0} + a_{r1}x_1 + a_{r2}x_2 + \cdots + a_{rp}x_p \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$

式中 $y_1 \sim y_r$ 表示 r 个输出量， $x_1 \sim x_p$ 表示 p 个输入量。

利用多输入单输出对象的试验过程，先使对象运行并稳定在正常工况，然后改变 p 个输入 $x_1 \sim x_p$ ，待工况重新稳定后，测量 r 个输出 $y_1 \sim y_r$ ，得到一组数据重复这个过程，在做了 n 次试验后，可得到 n 组数据，列表 2-2。

根据前面介绍的方法，将表 2-2 的实验数据亦写成相应的矩阵形式，令

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{21} & \cdots & y_{r1} \\ y_{12} & y_{22} & \cdots & y_{r2} \\ \vdots & \vdots & & \\ y_{1n} & y_{2n} & \cdots & y_{rn} \end{bmatrix}_{n \times r} \quad (2-11)$$

表 2-2

测试数据表

变 量 序 号	输 入 变 量 测 量 值		输 出 变 量 测 量 值	
	x_1	$x_2 \cdots \cdots x_p$	y_1	$y_2 \cdots \cdots y_r$
1	x_{11}	$x_{21} \cdots \cdots x_{p1}$	y_{11}	$y_{21} \cdots \cdots y_{r1}$
2	x_{12}	$x_{22} \cdots \cdots x_{p2}$	y_{12}	$y_{22} \cdots \cdots y_{r2}$
\vdots	\vdots	\vdots		
n	x_{1n}	$x_{2n} \cdots \cdots x_{pn}$	y_{1n}	$y_{2n} \cdots \cdots y_{rn}$

式中 y_{ij} ($i=1, 2, \cdots, r, j=1, 2, \cdots, n$) 是第 i 个输出变量的第 j 次测量值。又令

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{p1} \\ 1 & x_{12} & \cdots & x_{p2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{1n} & \cdots & x_{pn} \end{bmatrix}_{n \times (p+1)} \quad (2-12)$$

式中 x_{ij} ($i=1, 2, \cdots, p, j=1, 2, \cdots, n$) 为第 i 个输入变量的第 j 次测量值。将式(2-10)中所要估计的参数 a_{ij} ($i=1, 2, \cdots, r, j=0, 1, \cdots, p$) 写成相应的矩阵 A

$$A = \begin{bmatrix} a_{10} & a_{20} & \cdots & a_{r0} \\ a_{11} & a_{21} & \cdots & a_{r1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{1p} & a_{2p} & \cdots & a_{rp} \end{bmatrix}_{(r+1) \times r} \quad (2-13)$$

令计算值与实测值之间的误差矩阵为

$$E = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \cdots & \varepsilon_{r1} \\ \varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} & \cdots & \varepsilon_{r2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \varepsilon_{1n} & \varepsilon_{2n} & \cdots & \varepsilon_{rn} \end{bmatrix}_{n \times r} \quad (2-14)$$

利用式(2-11)~式(2-14), 根据多输入多输出的静态模型式(2-10), 可写出

$$Y = XA + E \quad (2-15)$$

套用式(2-9), 可得系数矩阵 A 的估计值 \hat{A} 为

$$\hat{A} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (2-16)$$

例 某对象由实验数据构成的相应矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} 6.3 & 9.64 & 8.54 \\ 11.8 & 17.6 & 16.4 \\ 18.65 & 29.35 & 29.85 \\ 21 & 31.0 & 32 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 0.9 & 1.2 & 1 \\ 1 & 2.4 & 1.8 & 2 \\ 1 & 3.5 & 2.5 & 3.8 \\ 1 & 5 & 3 & 4 \end{bmatrix}$$

利用上法，计算得参数矩阵为

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 0.5 & 1.8 & 0.3 \\ 0.5 & 0.5 & 0.2 \\ 2 & 1.2 & 0.9 \\ 2 & 6 & 7 \end{bmatrix}$$

上述估计方法是整批处理方法，此方法是在全部实验结束，获得所有数据后，一次求取参数的估计值。若增加几次实验，必须将新数据和老数据合在一起，仍用式(2-9)、式(2-16)计算。

用于估计参数的方法，在系统辨识的书中有详细叙述。下面仅介绍递推最小二乘估计法。

若在第 $n+1$ 次采样时，获得了输入 \mathbf{X} 和输出 \mathbf{Y} 的两组数据，

$$\mathbf{Y}_{n+1} = [y_{1,n+1}; y_{2,n+1}; \cdots; y_{r,n+1}]_{1 \times r} \quad (2-17)$$

$$\mathbf{X}_{n+1} = [1, \mathbf{X}_{1,n+1}; \mathbf{X}_{2,n+1}; \cdots; \mathbf{X}_{p,n+1}]_{1 \times (p+1)} \quad (2-18)$$

则可用下面的递推公式来估计 $n+1$ 拍时的参数 $\hat{\mathbf{A}}_{n+1}$ ：

$$\hat{\mathbf{A}}_{n+1} = \hat{\mathbf{A}}_n + \mathbf{K}_{n+1} [\mathbf{Y}_{n+1} - \mathbf{X}_{n+1} \hat{\mathbf{A}}_n] \quad (2-19)$$

$$\mathbf{K}_{n+1} = \mathbf{P}_n \mathbf{X}_{n+1}^T [1 + \mathbf{X}_{n+1} \mathbf{P}_n \mathbf{X}_{n+1}^T]^{-1} \quad (2-20)$$

$$\mathbf{P}_{n+1} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{n+1} \mathbf{X}_{n+1}]^T \mathbf{P}_n \quad (2-21)$$

式中 \mathbf{P} 为 $(p+1) \times (p+1)$ 对称方阵； \mathbf{K} 为 $(p+1) \times r$ 矩阵。式(2-19)的物理意义明显。第 $n+1$ 次估计 $\hat{\mathbf{A}}_{n+1}$ 是第 n 次估计 $\hat{\mathbf{A}}_n$ 加上一个修正量 $\mathbf{K}_{n+1} [\mathbf{Y}_{n+1} - \mathbf{X}_{n+1} \hat{\mathbf{A}}_n]$ 。 $\mathbf{X}_{n+1} \hat{\mathbf{A}}_n$ 是根据模型用第 n 次估计值 $\hat{\mathbf{A}}_n$ 计算得到的预报值 $\hat{\mathbf{Y}}_{n+1}$ ， \mathbf{Y}_{n+1} 是新的实测值， $[\mathbf{Y}_{n+1} - \mathbf{X}_{n+1} \hat{\mathbf{A}}_n]$ 便表示实测值与预报值之差。如果实测值与预报值相等，则 $\mathbf{Y}_{n+1} - \mathbf{X}_{n+1} \hat{\mathbf{A}}_n = 0$ ，式(2-19)即为 $\hat{\mathbf{A}}_{n+1} = \hat{\mathbf{A}}_n$ ；若 \mathbf{Y}_{n+1} 与 $\hat{\mathbf{Y}}_{n+1}$ 不等， $\hat{\mathbf{A}}_n$ 必须经过修正。称 \mathbf{K}_{n+1} 为增益因子， \mathbf{K}_{n+1} 越大，则修正量越大。

利用递推估计算式时，第一步有两种可取的方法。其一是用过去的的数据作为 $\hat{\mathbf{A}}_n$ ；其二是假定某个初值，如 $\hat{\mathbf{A}}_n = 0$ ， \mathbf{P}_n 取 $[1/\varepsilon]$ ，其中 ε 应足够大，先由式(1-20)计算 \mathbf{K}_{n+1} ，代入式(1-19)计算 $\hat{\mathbf{A}}_{n+1}$ ，再由式(1-21)计算 \mathbf{P}_{n+1} ，作为下一次计算 \mathbf{K}_{n+1} 时用，如此循环，就可根据两组新的数据 \mathbf{Y}_{n+1} 、 \mathbf{X}_{n+1} ，估计新的参数值 $\hat{\mathbf{A}}_{n+1}$ 。

第三节 动态模型的测取及数据处理方法

一、一般概念

控制系统最终能达到的品质，取决于控制方案和系统的各个环节。作为受控对象的“过程”，是否易于控制，对整个系统的运行有很大的影响。因此在设计控制方案或在系统投运、参数整定前，必须掌握对象的动态特性即动态数学模型。

本节首先介绍对象的几个重要性质。