



系統科學叢書

Series of System Science

徐南榮 宋文忠 夏安邦

系統辨識

SYSTEM IDENTIFICATION

東南大學出版社

SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

系统辨识

徐南荣 宋文忠 夏安邦

东南大学出版社

内 容 简 介

本书对系统辨识作了全面、系统的介绍。全书共分十章,分别论述:模型方法及系统辨识,模型参数的最小二乘估计法、最大似然估计法和预报误差估计法,连续时间系统模型参数的估计,模型结构的判定,线性多变量系统的辨识,时变系统的辨识,非线性系统的辨识,试验信号的优化设计,闭环系统的辨识。书中突出基本概念和基本问题,对系统辨识最基本的理论和方法作了深入的论述。兼顾了线性单变量和多变量系统的辨识,离散时间系统和连续时间系统的辨识,线性和非线性系统的辨识,并考虑了时域和频域两类模型的辨识。

本书是工科自动控制学科各专业及其相关专业研究生教材。对于系统分析、系统工程等领域的科技人员及本科生都很有参考价值。

责任编辑 陈天授

系 统 辨 识

徐南荣 宋文忠 夏安邦

东南大学出版社出版

南京四牌楼2号

东南大学激光照排印刷中心印刷

江苏省新华书店发行

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 14.25 字数 383 千

1991年3月第1版 1991年3月第1次印刷

印数:1—1500册

ISBN 7-81023-356-4

TP·25

定价:3.30元

《系统科学丛书》出版说明

当今人类社会已经由“机器时代”跨入“系统时代”。系统科学是新时代占主导地位的科学,它是范围广、渗透性强的综合性学科。现实世界错综复杂、千变万化,但是,只要站在系统科学的高度就能透过其复杂的表象,抓住其主要特征,研究其相互关系,找出其共同规律,探求事物的本质。

为了适应科学发展的形势,加强出书的计划性和系统性,在有关专家的大力支持下,我社决定出版《系统科学丛书》。本丛书的选题围绕系统科学的基础理论、方法及其工程应用,主要收录有关学术专著、研究生教材或参考书,是侧重理论性和方法论的高层次系列书。相信本丛书的出版不仅会对从事系统科学、控制论、信息论、运筹学、系统工程等学科的专业人员、研究生、高年级大学生有所帮助,而且也便于其它领域的科技工作者拓宽思路、有所借鉴,从而促进边缘学科、交叉学科的发展。东南大学出版社愿为繁荣系统科学尽绵薄之力,努力扶植学术著作的出版,欢迎国内外专家学者踊跃投稿。

本丛书将陆续出版,各册相互独立,自成体系,编号以出版先后为序。

东南大学出版社

《系统科学丛书》编审委员会

主任委员:钱钟韩

副主任委员:冯纯伯 徐南荣

常务编委:陈天授

编委:(以姓氏笔划为序)

史维 邢汉承 宋文忠 盛昭瀚 黄可鸣

前 言

观察和测量是人们认识客观世界最根本的手段。系统辨识,简单地讲,就是从对系统进行观察或测量所获得信息中,提取出该系统的数学模型的理论和方法。为了定量地认识所研究系统的运动规律,并用数学语言加以描述,除了从机理入手外,利用实验手段寻求被研究对象特性的方法早已为许多科学分支所采用。这些早期的实验归纳方法的发展,形成了一门对研究各种各样系统都普遍适用的方法论学科,这就是系统辨识。

随着科学技术的发展,各门学科的研究方法都在逐步向定量化方向发展。“建模”这一术语已成为各门学科的共同语言。系统辨识也就成为各种学科共同关心的学科。人们利用所建立的数学模型,就有可能对系统进行分析、设计、仿真、预报、控制和决策。所以,系统辨识学科涉及到广泛的应用领域、具有显著的应用价值。它吸引着大量科学技术工作者,他(她)们要求了解、熟悉、掌握这门学科。

系统辨识是近 20 年发展起来的,是系统理论的一个重要分支,它所涉及的理论基础相当广泛,内容也比较丰富。本书比较全面、系统地介绍了系统辨识领域的主要内容。全书共分十章,从模型方法和系统辨识的基本概念出发,详细讨论了线性离散时间系统模型参数的辨识问题和模型结构的判定问题,在此基础上,进一步讨论了连续时间系统、多变量系统和时变系统的辨识,对于较为困难和复杂的非线性系统辨识问题亦作了比较全面的介绍,此外还讨论了试验信号的优化设计和闭环系统辨识问题,从而使辨识过程中的各种实质问题都得到了完整的论述。

本书第一章介绍了模型方法及系统辨识的基本概念,从认识论和方法论的角度,就如何正确而透彻地理解模型作了较深入的

阐述。在此基础上介绍了系统辨识的概念和基本原理。通过系统辨识过程的介绍,使读者对系统辨识的全过程有一个完整的概念。读者在学习过后续各章以后,回过头来阅读这一章,往往会得到新的启示。

第二章用较多的篇幅系统地介绍了模型参数的最小二乘估计法及其各种主要变型,此外还介绍了利用 Kalman—Bucy 滤波估计模型参数的方法,并从工程应用的角度阐明了随机逼近法的基本思想及其在模型参数估计中的应用。

第三章介绍模型参数估计的其他方法。首先介绍最大似然方法,然后导出更具有普遍意义的预报误差法及其与最大似然方法的关系。在此基础上,进一步论述了系统模型参数估计的一般原则和途径。此外对一些主要估计量的渐近性质作了较系统的论述。

第四章介绍连续时间系统模型的参数估计。从离散模型与连续模型之间的转换入手,讨论了连续模型参数估计的时域方法和频域方法。

在掌握模型参数估计方法的基础上,第五章讨论模型结构的判定问题。在提出判定模型结构的指导原则后,论述了建立在不同假设基础上的两类结构判定方法,并就每一类方法介绍了多种判定结构的具体方案,以使读者既掌握模型结构判别的原则,又能全面地了解各种具体方法的特点。

作为单变量系统辨识的进一步发展,第六章讨论线性多变量系统的辨识。这一章抓住多变量系统与单变量系统的不同之处,就多变量系统模型的结构及其参数估计等问题分别对各种不同类型的多变量系统模型展开讨论。

第七章讨论时变系统的辨识。介绍了时变模型的背景、辨识时变系统的基本观点以及时变系统辨识的基本方法。侧重讨论了变参数回归模型和变参数动态模型的辨识,介绍了带可变遗忘因子的参数递推估计算法。

第八章转入非线性系统的辨识。讨论了非线性特征的检验、非

线性系统的结构描述、以及非线性系统辨识的各种时域和频域方法。

第九章讨论最优试验信号设计问题。介绍了试验信号优化设计的时域方法、频域方法和直接方法。还讨论了闭环系统输入信号优化设计的几个特殊问题。

第十章介绍闭环系统辨识。首先讨论了如何检验系统是否存在反馈的问题。接着介绍了系统可辨识性的基本概念,具体讨论了辨识闭环系统的各种方法以及闭环系统可辨识的各种条件。

为使本书能适应不同层次的读者对系统辨识学习的要求,在内容取舍、组织和论述等方面,采取了由浅入深、面向各类读者的编写方式。对于初次接触“系统辨识”的读者,考虑到他们首先需要的是建立系统辨识的基本概念、理解和掌握其基本原理和基本方法,作者建议他们阅读第一、二、三、五、六章,这些章节是系统辨识最基本的部分,也是最成熟的线性动态系统辨识中的主要部分。对于一些已掌握系统辨识基本知识或者已进入研究生学习阶段的读者,他们在系统性和深入上提出了更高的要求,作者建议他们在阅读基本部分各章的基础上,可以根据自己的需要,有选择地阅读本书其他有关章节。在这些章节中,作者注意强调问题提出的背景,介绍解决问题的思路 and 主要方法,以及有待研究的问题和探索的方向,以培养读者考察、研究问题的科学方法。本书各章后面均附有与该章内容有关的参考文献,为读者提供了深入钻研问题的条件,启发读者探索新思路、寻求新知识的愿望,将他们带到本学科的前沿。

本书是在多年教学、研究工作的基础上,几经修订编著而成。在本书出版过程中,得到了曹忻博士的大力协助。作者在此深表谢意。由于我们水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,殷切欢迎广大读者批评指正。

编著者

1989年2月

目 录

绪论	(1)
第一章 模型方法及系统辨识	(6)
§ 1-1 模型与实体	(6)
§ 1-2 认识论与模型方法	(10)
§ 1-3 系统辨识的基本原理	(17)
§ 1-4 系统辨识的过程	(22)
1-4-1 实验条件的设计	(25)
1-4-2 模型类型和结构的选定	(26)
1-4-3 模型参数的估计	(27)
1-4-4 模型的验证	(28)
参考文献	(31)
第二章 模型参数的最小二乘估计法	(33)
§ 2-1 线性动态系统的数学模型	(33)
2-1-1 确定型数学模型	(33)
2-1-2 随机噪声及其模型	(36)
2-1-3 随机型输入输出模型	(38)
2-1-4 随机型状态模型	(40)
2-1-5 预报误差模型	(43)
§ 2-2 普通最小二乘法	(47)
2-2-1 基本概念和基本关系式	(47)
2-2-2 最小二乘法的递推解	(64)
2-2-3 普通最小二乘法的局限性	(70)
§ 2-3 广义最小二乘法	(72)
2-3-1 基本思想	(72)

2-3-2	整批算法	(74)
2-3-3	递推算法	(79)
2-3-4	广义最小二乘估计量的性质	(81)
2-3-5	偏倚校正算法	(83)
2-3-6	几种广义最小二乘算法的比较	(87)
§ 2-4	辅助变量法	(89)
2-4-1	普通的辅助变量法	(91)
2-4-2	精致的辅助变量法	(94)
§ 2-5	扩充最小二乘法	(95)
§ 2-6	Kalman—Bucy 滤波法	(98)
§ 2-7	扩充 Kalman 滤波器	(104)
§ 2-8	随机逼近法	(111)
2-8-1	基本概念和基本算法	(113)
2-8-2	随机逼近算法的收敛条件	(117)
2-8-3	离散时间模型参数的随机逼近估计	(119)
	参考文献	(124)

第三章 模型参数的最大似然估计法和预报误差估计法

		(128)
§ 3-1	最大似然估计法	(128)
3-1-1	似然函数及其计算	(129)
3-1-2	模型参数的最大似然估计	(134)
§ 3-2	近似最大似然法	(138)
§ 3-3	预报误差估计法	(143)
3-3-1	基本概念	(143)
3-3-2	与最大似然估计法的关系	(149)
3-3-3	递推预报误差估计法	(152)
§ 3-4	模型参数估计的一般方法	(155)
3-4-1	系统及其预报模型	(155)
3-4-2	参数估计的原则和途径	(159)

3-1-3 参数估计算法	(163)
§ 3-5 参数估计量的渐近性质	(165)
3-5-1 基本假设	(166)
3-5-2 渐近性质	(168)
§ 3-6 参数估计算法的选择	(174)
3-6-1 模型集合的选择	(174)
3-6-2 输入信号的选择	(175)
3-6-3 辨识准则的选择	(177)
参考文献	(179)
第四章 连续时间系统模型参数的估计	(182)
§ 4-1 引言	(182)
§ 4-2 离散模型到连续模型的转换	(183)
4-2-1 连续模型和离散模型的等价关系	(184)
4-2-2 脉冲传递函数转换为连续模型	(186)
4-2-3 离散状态空间模型转换为连续模型	(187)
4-2-4 权序列转换为连续模型	(191)
4-2-5 离散误差准则的频域解释	(192)
§ 4-3 连续模型参数估计的时域方法	(195)
4-3-1 连续时间系统的模型	(196)
4-3-2 误差和准则函数	(198)
4-3-3 数据处理方法	(201)
4-3-4 连续模型参数估计的协方差法	(202)
§ 4-4 随机过程的 Fourier 变换	(207)
4-4-1 弱平稳过程和广义函数空间	(208)
4-4-2 弱平稳序列的离散 Fourier 变换	(215)
§ 4-5 连续模型参数估计的频域方法	(224)
4-5-1 连续模型的频谱估计	(224)
4-5-2 有理最小二乘法	(226)
4-5-3 广义模型法	(228)
参考文献	(232)

第五章 模型结构的判定	(234)
§ 5-1 引言.....	(234)
§ 5-2 判定模型结构的指导原则.....	(238)
§ 5-3 判定模型结构的两类方法.....	(240)
5-3-1 经典法	(240)
5-3-2 近似模型法	(243)
§ 5-4 根据矩阵奇异性判定模型的结构.....	(244)
5-4-1 根据 Hanker 矩阵的判定法	(244)
5-4-2 根据积矩矩阵的判定法	(247)
§ 5-5 根据残差特性判定模型的结构.....	(250)
5-5-1 判定模型阶次的 F 检验法	(250)
5-5-2 根据残差自相关特性判定模型阶次	(254)
5-5-3 根据残差特性的信息度量判定模型阶次	(256)
§ 5-6 根据预报误差判定模型的结构.....	(261)
§ 5-7 根据信息度量判定模型的结构.....	(264)
参考文献.....	(271)
第六章 线性多变量系统的辨识	(275)
§ 6-1 状态空间模型的辨识.....	(276)
6-1-1 能观测型典范状态模型	(277)
6-1-2 Ho-Kalman 算法	(283)
6-1-3 状态模型直接辨识法	(286)
§ 6-2 差分方程模型的辨识.....	(289)
6-2-1 典型差分方程模型的辨识方法	(290)
6-2-2 多步最小二乘(MSLS)法	(295)
§ 6-3 传递函数矩阵模型的辨识.....	(296)
§ 6-4 脉冲响应矩阵模型的辨识.....	(299)
§ 6-5 多变量系统辨识的实例.....	(302)
参考文献.....	(309)
第七章 时变系统的辨识	(311)

§ 8-4 非线性模型的辨识和参数估计·····	(374)
8-4-1 泛函级数核的估计·····	(375)
8-4-2 非线性常微分方程的求解·····	(378)
8-4-3 非线性代数方程的参数估计·····	(381)
8-4-4 方框图模型的辨识·····	(384)
§ 8-5 非线性系统辨识的频域方法·····	(386)
8-5-1 具有一个非线性环节的系统模型结构·····	(387)
8-5-2 非线性系统的频率响应特性·····	(389)
8-5-3 非线性系统辨识的 M_f 轨迹法·····	(394)
参考文献·····	(394)
第九章 试验信号的优化设计·····	(397)
§ 9-1 引言·····	(397)
§ 9-2 时域设计方法·····	(399)
§ 9-3 频域设计方法·····	(402)
§ 9-4 直接设计法·····	(410)
9-4-1 时域直接设计法·····	(412)
9-4-2 频域直接设计法·····	(415)
§ 9-5 闭环系统输入信号的优化设计·····	(418)
参考文献·····	(422)
第十章 闭环系统的辨识·····	(424)
§ 10-1 引言·····	(424)
§ 10-2 反馈的检验·····	(425)
10-2-1 频域检验法·····	(427)
10-2-2 时域检验法·····	(431)
§ 10-3 系统可辨识性的基本概念·····	(433)
§ 10-4 闭环系统的辨识方法·····	(437)
§ 10-5 闭环系统的可辨识性·····	(440)
10-5-1 绝对可辨识的充分条件·····	(440)
10-5-2 无反馈噪声时的可辨识条件·····	(441)

参考文献.....	(445)
附录:符号说明	(446)

绪 论

人类社会的一切活动,不外乎认识世界和改造世界。人们通过实践去认识世界,而认识世界的目的又在于改造世界。观察和测量是自然科学和社会科学研究工作者认识客观世界的最重要的基础。根据实验和观察,科学工作者进行归纳和推理,对所研究的问题提出概念,确立一些见解,进而构成对所研究问题的较系统的认识,这就形成一种理论。理论就是用语言或其他形式(包括数学形式)表达所研究事物的模型。所谓系统辨识,简单地说,就是利用系统的观测数据,构造该系统数学模型的理论和方法。这里所指的“系统”,应理解为广义的系统概念。世界上一切由若干个相互作用、相互依赖的事物组成的具有特定功能的整体,就是“系统”。为了寻求各式各样系统的运动规律,并用数学语言加以描述,目前已经形成了对各种学科都具有普遍适用意义的一种方法论,系统辨识就是这样一种方法论,它是研究系统的一种有效的工具,利用这种工具可以对复杂的实际系统进行定量描述。

系统辨识是 20 世纪 60 年代开始迅速而蓬勃发展起来的一门学科。1960 年在莫斯科召开的国际自动控制联合会学术会议上,还只有很少几篇论文涉及系统辨识问题。然而,此后不久,关于系统辨识理论和应用的学术讨论和交流迅速增多,国际自动控制联合会决定从 1967 年起每三年专门组织一次“辨识和系统参数估计”专业性的国际学术讨论会。到目前为止的八届“辨识和系统参数估计”学术讨论会上,提出的学术论文总数已在 1500 篇以上。除了在自动控制理论及应用学科方面的学术刊物上刊登有这方面大量论文外,其他一些学科的学术刊物亦登载了不少关于系统辨识的论文。关于系统辨识的教科书和专论已陆续出版。各种系统辨

识的应用程序包相继开发,其中一部分已进入商品化阶段。

系统辨识问题为什么会获得如此蓬勃的发展?概略地说,在20世纪60年代,自动控制理论发展到了很高的水平,经典的控制概念被更有前途的现代控制理论所超越。与此同时,工业大生产的发展,也要求将控制技术提到更高的水平,要求现代控制理论能够在推动生产发展上显示其实际作用。现代控制理论的应用是以掌握被控对象的数学模型为前提的。在必要时,还需要掌握对系统的干扰特性。然而当时对被控对象数学模型的研究,却并没有象控制理论那样发达。现代控制理论的应用工作中遇到了确定对象合适的数学模型的各种困难。能否构成一个基本恰当的数学模型已成为现代控制理论应用成败的关键。因此,建立系统数学模型的方法——系统辨识就成为应用现代控制系统的重要前提。与此同时,数字计算机,无论作为离线科学计算,还是作为在线监测控制,都得到了广泛的使用,它为辨识系统所需进行的离线计算和实时计算提供了高效的工具。在这样的背景下,系统辨识问题便愈来愈受到人们的重视,它已成为发展系统理论,开展实际应用工作中必不可少的组成部分。

值得提出,系统辨识学科之所以得到如此迅速的发展,不仅仅是由于控制理论应用的需要。随着科学技术的发展,各门学科的研究方法进一步趋向定量化。在许多科学和工程领域内,是否进行定量的分析;能否建立所研究问题的数学模型,代表了在这些领域内人们所具有的认识水平。正是由于各门学科对观测和定量分析的重视,“建模”这个名词已成为各门学科的共同语言。作为方法论的系统辨识,已成为其他各种学科所共同关心的学科,其理论和方法上的成果也已经是各门学科共享的财富。之所以会这样,是因为在众多领域的生产实践和科学实验中,人们对于所研究的、较为复杂的对象,往往都希望通过观测其外部信息来定量地判明对象的内在规律。这就是要求通过辨识建立所研究对象的数学模型。利用所建立的数学模型,人们就有可能对该系统进行分析、设计、仿真、