



全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Theory of System Identification
with Applications

系统辨识理论及应用

萧德云 编著
Xiao Deyun

方崇智 主审
Fang Chongzhi

清华大学出版社



全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Theory of System Identification
with Applications

系统辨识理论及应用

萧德云 编著
Xiao Deyun



清华大学出版社

北京

内 容 简 介

系统辨识是研究建立系统数学模型的一种理论和方法。所谓辨识就是从含有噪声的输入和输出数据中提取被研究系统的数学模型。一般说来,辨识模型只是系统输入输出特性在某种准则意义下的一种近似,近似的程度取决于对系统先验知识的认识和对数据集性质的了解以及所选用的辨识方法。

本书主要内容包括系统描述和辨识模型,辨识方法及数值计算,辨识理论与性能分析,辨识应用与实践等相关知识。本书突出基础性、逻辑性和理论性,强调理论联系实际,在有明显应用背景和清晰物理概念的前提下,论述辨识的理论和方法,并从较高的层次揭示各种辨识方法的内在联系和应用考虑。

全书共 17 章,各章论述详尽,配有仿真验证例子或工程应用实例和适量的习题,书中还附有常用的辨识算法程序,书后给出若干辨识实验研究指示书。这些都是为了给读者提供学习、模仿的蓝本,以帮助读者深化对辨识知识的理解。

本书可供自动化类及相关专业高校师生和工程科技人员选用。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

系统辨识理论及应用/萧德云编著.--北京:清华大学出版社,2014

全国高等学校自动化专业系列教材

ISBN 978-7-302-34853-5

I. ①系… II. ①萧… III. ①系统辨识—高等学校—教材 IV. ①N945.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 310957 号

责任编辑:王一玲

封面设计:傅瑞学

责任校对:时翠兰

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm 印 张:38.5 字 数:818 千字

版 次:2014 年 7 月第 1 版 印 次:2014 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:69.00 元

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

顾问 (按姓氏笔画):

王行愚(华东理工大学)	冯纯伯(东南大学)
孙优贤(浙江大学)	吴启迪(同济大学)
张嗣瀛(东北大学)	陈伯时(上海大学)
陈翰馥(中国科学院)	郑大钟(清华大学)
郑南宁(西安交通大学)	韩崇昭(西安交通大学)

主任委员: 吴澄(清华大学)

副主任委员: 赵光宙(浙江大学) 萧德云(清华大学)

委员 (按姓氏笔画):

王雄(清华大学)	方华京(华中科技大学)
史震(哈尔滨工程大学)	田作华(上海交通大学)
卢京潮(西北工业大学)	孙鹤旭(河北工业大学)
刘建昌(东北大学)	吴刚(中国科技大学)
吴成东(沈阳建筑工程学院)	吴爱国(天津大学)
陈庆伟(南京理工大学)	陈兴林(哈尔滨工业大学)
郑志强(国防科技大学)	赵曜(四川大学)
段其昌(重庆大学)	程鹏(北京航空航天大学)
谢克明(太原理工大学)	韩九强(西安交通大学)
褚健(浙江大学)	蔡鸿程(清华大学出版社)
廖晓钟(北京理工大学)	戴先中(东南大学)

工作小组(组长): 萧德云(清华大学)

(成员): 陈伯时(上海大学) 郑大钟(清华大学)
田作华(上海交通大学) 赵光宙(浙江大学)
韩九强(西安交通大学) 陈兴林(哈尔滨工业大学)
陈庆伟(南京理工大学)

(助理): 郭晓华(清华大学)

责任编辑: 王一玲(清华大学出版社)



为适应我国对高等学校自动化专业人才培养的需要,配合各高校教学改革的进程,创建一套符合自动化专业培养目标和教学改革要求的新型自动化专业系列教材,“教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会”(简称“教指委”)联合了“中国自动化学会教育工作委员会”、“中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会”、“中国系统仿真学会教育工作委员会”和“中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科委员会”四个委员会,以教学创新为指导思想,以教材带动教学改革为方针,设立专项资助基金,采用全国公开招标方式,组织编写出版了一套自动化专业系列教材——《全国高等学校自动化专业系列教材》。

本系列教材主要面向本科生,同时兼顾研究生;覆盖面包括专业基础课、专业核心课、专业选修课、实践环节课和专业综合训练课;重点突出自动化专业基础理论和前沿技术;以文字教材为主,适当包括多媒体教材;以主教材为主,适当包括习题集、实验指导书、教师参考书、多媒体课件、网络课程脚本等辅助教材;力求做到符合自动化专业培养目标、反映自动化专业教育改革方向、满足自动化专业教学需要;努力创造使之成为具有先进性、创新性、适用性和系统性的特色品牌教材。

本系列教材在“教指委”的领导下,从2004年起,通过招标机制,计划用3~4年时间出版50本左右教材,2006年开始陆续出版问世。为满足多层面、多类型的教学需求,同类教材可能出版多种版本。

本系列教材的主要读者群是自动化专业及相关专业的大学生和研究生,以及相关领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望本系列教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者和工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的参考资料。感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并欢迎提出批评和意见。

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

2005年10月于北京

自动化学科有着光荣的历史和重要的地位,20世纪50年代我国政府就十分重视自动化学科的发展和自动化专业人才的培养。五十多年来,自动化科学技术在众多领域发挥了重大作用,如航空、航天等,“两弹一星”的伟大工程就包含了许多自动化科学技术的成果。自动化科学技术也改变了我国工业整体的面貌,不论是石油化工、电力、钢铁,还是轻工、建材、医药等领域都要用到自动化手段,在国防工业中自动化的作用更是巨大的。现在,世界上有很多非常活跃的领域都离不开自动化技术,比如机器人、月球车等。另外,自动化学科对一些交叉学科的发展同样起到了积极的促进作用,例如网络控制、量子控制、流媒体控制、生物信息学、系统生物学等学科就是在系统论、控制论、信息论的影响下得到不断的发展。在整个世界已经进入信息时代的背景下,中国要完成工业化的任务还很重,或者说我们正处在后工业化的阶段。因此,国家提出走新型工业化的道路和“信息化带动工业化,工业化促进信息化”的科学发展观,这对自动化科学技术的发展是一个前所未有的战略机遇。

机遇难得,人才更难得。要发展自动化学科,人才是基础、是关键。高等学校是人才培养的基地,或者说人才培养是高等学校的根本。作为高等学校的领导和教师始终要把人才培养放在第一位,具体对自动化系或自动化学院的领导和教师来说,要时刻想着为国家关键行业和战线培养和输送优秀的自动化技术人才。

影响人才培养的因素很多,涉及教学改革方方面面,包括如何拓宽专业口径、优化教学计划、增强教学柔性、强化通识教育、提高知识起点、降低专业重心、加强基础知识、强调专业实践等,其中构建融会贯通、紧密配合、有机联系的课程体系,编写有利于促进学生个性发展、培养学生创新能力的教材尤为重要。清华大学吴澄院士领导的《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会,根据自动化学科对自动化技术人才素质与能力的需求,充分吸取国外自动化教材的优势与特点,在全国范围内,以招标方式,组织编写了这套自动化专业系列教材,这对推动高等学校自动化专业发展与人才培养具有重要的意义。这套系列教材的建设有新思路、新机制,适应了高等学校教学改革与发展的新形势,立足创建精品教材,重视实

践性环节在人才培养中的作用,采用了竞争机制,以激励和推动教材建设。在此,我谨向参与本系列教材规划、组织、编写的老师致以诚挚的感谢,并希望该系列教材在全国高等学校自动化专业人才培养中发挥应有的作用。

吴恪迪 教授

2005年10月于教育部

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会在对国内外部分大学有关自动化专业的教材做深入调研的基础上,广泛听取了各方面的意见,以招标方式,组织编写了一套面向全国本科生(兼顾研究生)、体现自动化专业教材整体规划和课程体系、强调专业基础和理论联系实际的系列教材,自2006年起将陆续面世。全套系列教材共50多本,涵盖了自动化学科的主要知识领域,大部分教材都配置了包括电子教案、多媒体课件、习题辅导、课程实验指导书等立体化教材配件。此外,为强调落实“加强实践教育,培养创新人才”的教学改革思想,还特别规划了一组专业实验教程,包括《自动控制原理实验教程》、《运动控制实验教程》、《过程控制实验教程》、《检测技术实验教程》和《计算机控制系统实验教程》等。

自动化科学技术是一门应用性很强的学科,面对的是各种各样错综复杂的系统,控制对象可能是确定性的,也可能是随机性的;控制方法可能是常规控制,也可能需要优化控制。这样的学科专业人才应该具有什么样的知识结构,又应该如何通过专业教材来体现,这正是“系列教材编审委员会”规划系列教材时所面临的问题。为此,设立了《自动化专业课程体系结构研究》专项研究课题,成立了由清华大学萧德云教授负责,包括清华大学、上海交通大学、西安交通大学和东北大学等多所院校参与的联合研究小组,对自动化专业课程体系结构进行深入的研究,提出了按“控制理论与工程、控制系统与技术、系统理论与工程、信息处理与分析、计算机与网络、软件基础与工程、专业课程实验”等知识板块构建的课程体系结构。以此为基础,组织规划了一套涵盖几十门自动化专业基础课程和专业课程的系列教材。从基础理论到控制技术,从系统理论到工程实践,从计算机技术到信号处理,从设计分析到课程实验,涉及的知识单元多达数百个、知识点几千个,介入的学校50多所,参与的教授120多人,是一项庞大的系统工程。从编制招标要求、公布招标公告,到组织投标和评审,最后商定教材大纲,凝聚着全国百余名教授的心血,为的是编写出版一套具有一定规模、富有特色的、既考虑研究型大学又考虑应用型大学的自动化专业创新型系列教材。

然而,如何进一步构建完善的自动化专业教材体系结构?如何建设基础知识与最新知识有机融合的教材?如何充分利用现代技术,适应现代大学生的接受习惯,改变教材单一形态,建设数字化、电子化、网络化等多元

形态、开放性的“广义教材”？等等，这些都还有待我们进行更深入的研究。

本套系列教材的出版，对更新自动化专业的知识体系、改善教学条件、创造个性化的教学环境，一定会起到积极的作用。但是由于受各方面条件所限，本套教材从整体结构到每本书的知识组成都可能存在许多不当甚至谬误之处，还望使用本套教材的广大教师、学生及各界人士不吝批评指正。

吴炯 院士

2005年10月于清华大学

问世于 20 世纪 80 年代后期的《过程辨识》是本书的初版,初版书一直在清华大学及国内多所高等学校自动化专业教学中使用。许多现已成为国内自动化界知名的学者也都读过本书的初版,有些学生出国留学也不忘将本书的初版带在身边,以备翻阅。20 世纪 90 年代初,我国台湾格致圖書公司还将本书的初版翻印成繁体书发行。二十多年过去了,明知初版书存在许多问题,但一直没有动笔修订,只因觉得对辨识的认识仿佛越来越粗浅,不敢贸然提笔。

现今,辨识领域的研究和教学都发生了很大的变化,辨识的知识不断丰富和完善,作者从 1982 年至 2011 年一直为大学高年级学生和研究生讲授辨识课程,在教学活动中与学生和同事相互共勉,对辨识有了进一步的理解,加上作者的老师方崇智先生生前的敦促,而且商定好修订方案和改写细节,作者本人也到了致事之年,修订初版书该是时候了,并按“全国高等学校自动化专业系列教材”的整体规划,再版书更名为《系统辨识理论及应用》。

系统辨识的应用领域非常广泛,而且具有科学与技术的双重属性和鲜明的工程应用特色,吸引着各类专业技术人才很有激情地在探索辨识的理论及其应用。因此,修订初版书也是读者的一种渴望,更是自动化专业高年级学生和研究生学习需要,或许也是相应专业工程技术人员和面临设计各种控制系统工程师潜在的需求,但愿再版书能再次燃起各种层次读者的兴趣。

再版书与初版书一样,依然采用多层次的结构。低层次从概念性和基础性出发,论述辨识的基础知识、系统描述与辨识模型、经典与现代的辨识方法、模型结构辨识及辨识问题的实践考虑等;高层次从系统性、逻辑性和完整性出发,论述辨识信息实验设计、闭环系统辨识、多变量系统辨识、EIV 模型辨识、非均匀采样系统辨识、辨识算法的一般结构及递推辨识算法的性能分析等。全书始终突出理论和实践相结合的原则,论述方法始于物理概念,导出理论结果的同时用仿真例子或工程实例予以验证。各章给出的例证同时附有关键的 MATLAB 程序段,以便读者模仿再现,体会辨识的内在真谛。各章配有适量的习题,习题多源于教学实践的累积,许多习题都是在课堂讨论过程中形成的,习题有难有易,对巩固所学知识非常

有益。

再版书仍由 17 章组成,与初版书比较,删去了原来的第 3、9、10、12 和 17 章,增加了第 2、3、11、13、14 和 16 章,初版书的第 2 章被改编成附录 C 和附录 D。再版书的各章内容与初版书大不相同,除了继承一些经典的知识外,各章都重新编写。

第 1 章讨论辨识的一些基本概念,包括系统、模型和辨识的定义与表达形式、辨识算法的原理、辨识的误差准则及辨识的内容和步骤等。作为全书的起点,初学者应该认真细读,并在学习过程中经常加以回顾,对理解全书的内容会有意想不到的效果。

第 2 章讨论系统描述和辨识模型,包括线性时不变集中参数系统的数学描述及辨识模型形式,对时变系统和非线性系统也有相应的讨论。这章内容是从辨识需要的角度论述的,读起来会有特别的适应感。

第 3 章讨论辨识信息实验设计,包括辨识输入信号设计、采样时间和数据长度的选择等。这章内容有点抽象,是学习系统辨识必须迈越的门槛。

第 4 章讨论经典的辨识方法,包括相关分析法和谱分析法。这章内容难度不大,然而所讨论的辨识方法具有很强的实用性。

第 5 章~第 6 章讨论最小二乘类辨识方法,包括最小二乘法及其变形、增广最小二乘法、广义最小二乘法、辅助变量法、相关二步法和偏差补偿最小二乘法等。最小二乘类辨识方法的基本思想是通过极小化某准则函数来辨识模型参数的,其中最小二乘法是最基本、应用最广泛的一种方法,其他方法都是以最小二乘法为基础的。

第 7 章讨论梯度校正辨识方法,包括梯度搜索原理、确定性与随机性梯度校正法和随机逼近与随机牛顿法等,后者是解决辨识问题一种有效的方法。梯度校正辨识方法的基本思想是沿着某准则函数的负梯度方向逐步修正模型参数的。

第 8 章讨论极大似然法及与之密切相关的预报误差法,其基本思想是使系统输出在模型参数条件下概率密度函数最大限度地逼近真实参数模型下的条件概率密度。

第 5 章~第 8 章内容涉及三种不同思想的辨识方法,是对众多辨识方法的分类概括,以便对辨识方法有一个完整的认识。

第 9 章讨论各种辨识算法之间的统一性,包括模型预报值及其关于参数的一阶梯度、辨识算法的一般结构、单变量一般模型与状态空间模型辨识及一般结构辨识算法的实现等问题。这章内容揭示了各种辨识方法之间的内在联系,引入统一的模型结构后,构成辨识算法的一般形式,显现了辨识算法的统一性。

第 10 章讨论模型结构辨识问题,包括单变量系统的模型阶次辨识,如 Hankel 矩阵秩法、F 检验法、AIC 法与最终预报误差准则法等以及多变量系统的模型结构辨识,如 Guidorzi 方法。这章内容难度也不大,和第 4 章一样具有很强的实用性。

第 11 章讨论利用 Bierman 的 UD 分解原理,构造一种基于增广 UD 分解的辨识算法,用于同时辨识模型参数和模型阶次。这章内容是全新的,思想新、方法新,给

人眼前一亮的感觉。

第 12 章讨论多变量系统辨识方法,包括脉冲传递函数矩阵模型辨识、Markov 参数模型辨识和输入输出差分方程模型辨识及增广 UD 分解辨识方法等。就某种意义上说,多变量系统辨识可以看作单变量系统的扩展。

第 13 章讨论系统输入输出受到噪声污染的 EIV 模型辨识方法,包括最大似然法及偏差补偿最小二乘法的应用和 L_2 最优辨识方法。这章内容可能会碰到数学麻烦,然而需要的是要有耐心。

第 14 章讨论非均匀采样系统辨识方法,包括通过构造积分滤波器,建立连续状态模型下的变型子空间辨识方法和非均匀步长及数据不完备情况下的高斯牛顿辨识方法。这章内容源于工程实际问题,值得好好学习。

第 15 章讨论闭环系统辨识方法,包括闭环系统的可辨识性和开环系统辨识方法在闭环系统中的应用。这章内容的要害是可辨识性问题,抓住关键,其他问题会迎刃而解。

第 16 章讨论递推辨识算法的收敛性及性能分析问题,包括基于 ODE 法的辨识算法收敛性分析和最小二乘类辨识算法误差界与收敛性分析。这章内容纯属理论问题,对深入理解辨识算法非常有益。

第 17 章讨论辨识的一些实际考虑及应用问题,包括系统分析、辨识实验设计、数据预处理、准则函数的选择、模型结构的选择、算法初始值的选择、遗忘因子的选择、噪声特性分析、可辨识性、模型检验、模型转换及辨识的应用等。这章内容工程实践性强,最好能结合第 1 章阅读,或许会有新的启迪。

附录包括随机变量与随机过程、伪随机码(M 序列)及其性质、矩阵运算和估计理论等,是阅读本书的一些数学基础。所附的辨识仿真实验指示书,如能认真完成的话,对巩固所学的知识会有意外的收获。

作者为了对全书内容的正确性树立信心,除了对理论推导和论述不敢怠慢外,书中所有的验证程序都亲自编写,使理论内容与程序验证相互支撑、浑为一体。的确,作者已过了编程年龄,往往会因某个低级的错误得不到正确结果而抓耳挠腮。不过作者总是尽心尽力,不敢轻易放弃亲自验证理论结果的信念。

再版书的修订得到清华大学自动化系许多老师的支持和勉励,尤其与叶昊教授的合作与交流,每每是“山重水复疑无路,柳暗花明又一村”。杨帆和刘敏华博士孜孜不倦地通解了本书的大部分习题,对一些有深度的习题以提示的方式给出解题思路。耿立辉和倪博溢博士独立编写了第 13 章和第 14 章,作者做了必要的统稿。责任编辑王一玲老师为本书的再版呕心沥血、鞠躬尽力。郭晓华老师对全书进行了认真仔细的校对和勘误,夕阳下伏案校稿的情影是那么一丝不苟。在此,向所有的合作者和勉励者及家人的默默支持表示衷心的感谢。

方崇智先生是作者学习和研究系统辨识的引路人,先生在世时为修订版制定好了方案,也详细阅读过各章的初稿,初稿上落有先生的圈圈点点,并嘱咐不再做第一

作者,想站在更高处,当主审人。再版书出版之日,“无忘告乃翁”——先生的夙愿实现了。

限于作者的水平 and 学识,再版书的错误和不足依然难免,欢迎读者及同仁不吝批评指正。

编者 萧德云

于清华大学

2014年初夏

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 系统	1
1.3 模型	4
1.3.1 模型概念	4
1.3.2 建模方法	7
1.4 辨识	9
1.4.1 辨识的定义	9
1.4.2 辨识的表达形式	9
1.4.3 辨识的基本原理	12
1.5 辨识的三要素	13
1.5.1 数据集	13
1.5.2 模型类	15
1.5.3 等价准则	16
1.6 辨识的内容与步骤	20
1.7 辨识模型的质量	24
1.8 辨识的应用	25
1.9 小结	26
习题	26
第 2 章 系统描述与辨识模型	31
2.1 引言	31
2.2 系统描述	31
2.2.1 系统时域描述	31
2.2.2 系统频域描述	36
2.3 辨识模型	38
2.3.1 线性时不变模型	39
2.3.2 线性时变模型	42
2.3.3 非线性模型	42
2.4 小结	49
习题	49

第 3 章 辨识信息实验设计	53
3.1 引言	53
3.2 辨识信息实验	53
3.2.1 开环辨识信息实验	53
3.2.2 持续激励信号	54
3.2.3 闭环辨识信息实验	58
3.3 辨识输入信号设计	60
3.4 采样时间的选择	62
3.5 数据长度的选择	64
3.6 小结	64
习题	65
第 4 章 经典的辨识方法	66
4.1 引言	66
4.2 相关分析法	66
4.2.1 频率响应辨识	66
4.2.2 脉冲响应辨识	72
4.3 谱分析法	82
4.3.1 周期图法	82
4.3.2 平滑法	83
4.4 由非参数模型求传递函数	85
4.4.1 Hankel 矩阵法	85
4.4.2 Bode 图法	87
4.4.3 Levy 法	89
4.5 小结	92
习题	92
第 5 章 最小二乘辨识方法	95
5.1 引言	95
5.2 最小二乘批处理算法	97
5.2.1 最小二乘原理	97
5.2.2 最小二乘辨识问题的假设条件	98
5.2.3 最小二乘辨识问题的解	99
5.2.4 最小二乘估计的几何意义	102
5.2.5 最小二乘估计的统计性质	103
5.3 最小二乘递推辨识算法	107

5.3.1	递推算法	108
5.3.2	损失函数的递推计算	109
5.3.3	递推算法分析	111
5.3.4	递推算法的几何解析	114
5.3.5	RLS算法 MATLAB 程序实现	115
5.4	最小二乘法的变形	119
5.4.1	加权最小二乘法	119
5.4.2	遗忘因子法	120
5.4.3	折息法	124
5.4.4	协方差调整法	126
5.4.5	带约束条件的最小二乘法	126
5.5	小结	127
	习题	128
	附 辨识算法程序	134
第 6 章	最小二乘类辨识方法	136
6.1	引言	136
6.2	增广最小二乘法	136
6.2.1	递推算法	136
6.2.2	RELS算法 MATLAB 程序实现	138
6.3	广义最小二乘法	140
6.3.1	批处理算法	140
6.3.2	递推算法	142
6.3.3	RGLS算法 MATLAB 程序实现	143
6.4	辅助变量法	146
6.4.1	批处理算法	146
6.4.2	辅助向量的选择	147
6.4.3	递推算法	148
6.4.4	RIV算法 MATLAB 程序实现	149
6.5	相关二步法	151
6.5.1	RCOR-LS算法	151
6.5.2	RCOR-LS算法 MATLAB 程序实现	153
6.6	偏差补偿最小二乘法	156
6.6.1	偏差补偿递推算法	156
6.6.2	RCLS算法 MATLAB 程序实现	158
6.7	不同噪声模型下辨识结果比较	161
6.8	小结	166

习题	166
附 辨识算法程序	171
第 7 章 梯度校正辨识方法	176
7.1 引言	176
7.2 梯度搜索原理	176
7.3 确定性梯度校正辨识方法	178
7.3.1 梯度校正算法	178
7.3.2 权矩阵的选择	179
7.3.3 算法性质	181
7.4 随机性梯度校正辨识方法	185
7.4.1 随机性辨识问题分类	186
7.4.2 梯度校正补偿算法	186
7.5 随机逼近辨识方法	189
7.5.1 随机逼近原理	190
7.5.2 随机逼近算法	191
7.6 随机牛顿辨识方法	192
7.6.1 牛顿算法	192
7.6.2 随机牛顿算法	193
7.7 小结	194
习题	194
第 8 章 极大似然与预报误差辨识方法	197
8.1 引言	197
8.2 极大似然辨识方法	197
8.2.1 极大似然原理	197
8.2.2 极大似然模型参数估计	199
8.2.3 极大似然递推辨识算法	202
8.2.4 RML 算法 MATLAB 程序实现	204
8.2.5 极大似然估计的统计性质	206
8.3 预报误差辨识方法	209
8.3.1 预报误差模型	209
8.3.2 预报误差准则	209
8.3.3 预报误差算法	211
8.3.4 预报误差估计的统计性质	213
8.4 小结	214
习题	214