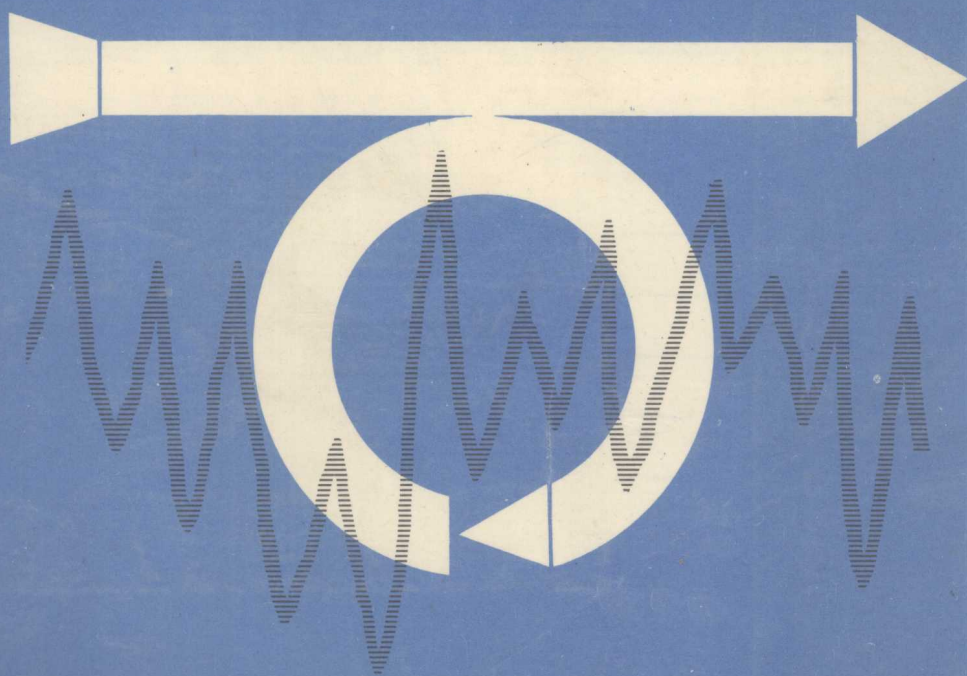


现代时间序列分析及其应用

建模、滤波、去卷、预报和控制

邓自立 郭一新 著



知识出版社

现代时间序列分析及其应用

建模、滤波、去卷、预报和控制

书 日 期

邓自立 郭一新 著

知 识 出 版 社

内 容 简 介

本书介绍由作者将传统时间序列分析与现代控制论相结合而产生的新兴的边缘学科——现代时间序列分析及其应用。本书以 ARMA 时间序列模型与状态空间模型的相互转化作为基本出发点,以时域上的状态空间方法和新息方法取代了传统时间序列分析的频域方法(谱分析),研究单变量和多变量、平稳和非平稳、常参数和时变参数、带观测噪声和无观测噪声的 ARMA 和 CARMA 时间序列的建模、最优与次优及自校正与自适应滤波、平滑、去卷、预报和控制,从根本上突破了传统时间序列分析的局限性,提出了一系列新理论、新方法、新技术和新结果,具有较大的理论价值和广泛的应用价值。

本书包含大量应用实例和仿真例子,所涉及的应用领域包括石油、化工、通信、制导、航天、经济、冶金、机械、电力、环境、水文、气象、能源、生物、医学、海洋研究等。为了应用方便,书末的附录还给出了 AR、CAR、CARMA 模型自动辨识机的 BASIC 语言程序和主要数学模型程序库的语句说明。

本书对象是时间序列分析、信息和控制、系统分析、信号处理领域的教师、研究生、高年级大学生、科研和工程技术人员。对于相近的领域,例如系统工程、控制工程、计算机应用、计量经济学、生物工程等,也有较大的参考价值 and 实用价值。

责任编辑:张律和 李秀云

封面设计:孙东权

现代时间序列分析及应用
建模、滤波、去卷、预报和控制

邓自立 郭一新 著

知识出版社出版

(北京阜成门北大街 17 号)

辽宁省新华书店发行

中国科学院沈阳自动化研究所

计算机出版技术开发部印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 31.875 字数 765,000

1989 年 6 月第 1 版 1989 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1-2,500

ISBN 7-5015-0307-9/TP·8

定价: 15.50 元

序

当今时代是信息时代，是知识爆炸性地增长的时代。近三十年来，现代科学技术飞速发展，呈现了由分支走向统一的趋势。一方面，各门学科不断分化，分支学科越来越多，各种新学科不断出现；另一方面，各学科之间又不断相互渗透、相互交叉，走向综合化，不断产生许多新的边缘学科。因此客观上要求有一般的方法论作为沟通各学科的桥梁和媒介，于是产生了以“三论”(信息论、系统论、控制论)为代表的现代科学方法论。当前，“三论”正在向许多学科渗透，显示了强大的生命力。

现代时间序列分析作为传统时间分析与现代控制理论之间的新兴的交叉学科或边缘学科，就是在上述历史背景下产生的。它随着现代控制理论和计算机应用的结合应运而生，并从传统时间序列分析中脱颖而出。

现代时间序列分析这门新兴交叉学科是由邓自立和郭一新两同志将传统时间序列分析与现代控制理论相结合而形成的一门交叉或边缘学科。它吸收了现代控制理论的思路和方法论，从根本上加以改造，创新和发展了时间序列分析。它以 ARMA 时间序列模型与状态空间模型的相互转化作为基本出发点，以时域上的状态空间方法和新息方法取代了传统时间序列分析的频域方法(谱分析)，研究了单变量和多变量、平稳和非平稳、常参数和时变参数、带观测噪声和无观测噪声的 ARMA 和 CARMA 时间序列的建模、最优、次优、自校正和自适应滤波、平滑、去卷、预报和控制，克服了博克斯和詹金斯的传统时间序列分析的缺点和局限性。作者在书中系统地提出了一系列新理论、新方法、新技术和新结果，并给出了大量的应用实例和大量的仿真例子。这是一本有较大理论价值和广泛应用价值的专著。

邓自立和郭一新两同志在近十年中对于现代时间序列分析的开拓付出了辛勤的劳动。他们在国内外发表了有关的论文七十余篇，并且理论同应用相结合，在炼油等领域取得了重要的应用成果，多次获省级和国家级奖励。这种治学和钻研精神是难能可贵的。

一些学者、研究生、科研和工程技术人员已将现代时间序列分析的理论和方法应用于合成氨自校正预报控制、拖拉机故障预测、洪水预报、长江水文建模、海洋开发、机器人自适应控制、动态船舶定位、生物工程建模、经济系统建模等实际问题中，取得了可喜的成果。

现代时间序列分析的应用领域已远远超出了传统时间序列分析的应用范围，触及到现代控制理论、信号处理、系统分析以及系统工程、管理科学、经济控制论、生物工程的各个领域。

本书的出版将会大大推进现代时间序列分析理论和应用的发展。在这门年青的边缘学科中进行开拓、探索、创造、应用的前景是十分广阔的。可以预见，现代时间序列分析将以崭新的理论和方法获得更广泛的应用。

张钟俊

上海交通大学

1988年4月

引言

传统的时间序列分析是统计学的重要分支，是一个应用领域十分广泛的学科。它主要研究单变量 ARMA(自回归滑动平均)时间序列的建模、预报和控制。经典著作见 Box 和 Jenkins 的书《Time Series Analysis, Forecasting and Control》(Holden Day, San Francisco, 1970)和 Priestley 的书《Spectral Analysis and Time Series》(Academic Press, New York, 1981)。基本的分析方法是频域上的谱分析方法，它起源于通信工程。

现代科学发展的重要特点是各学科、各领域、各分支之间的相互渗透、相互交叉，新的边缘学科象雨后春笋似地相继出现。

作者将时间序列分析与现代控制论相结合、相交叉，以时间序列 ARMA 模型与状态空间模型的相互转化作为基本出发点，用时域上的状态空间方法和新息方法取代了传统时间序列分析的频域上的谱分析方法，开拓了传统时间序列分析与现代控制论之间的新的边缘学科——现代时间序列分析。它从根本上突破和更新了传统时间序列分析的研究对象、内容、方法和理论。

回忆现代控制论的历史，正是由于本世纪 50 年代末美国数学家和控制论学者 Kalman 创立了时域上的状态空间方法，并用它取代了经典调节理论的频域方法，才标志着现代控制论的诞生。现代时间序列分析的产生运用了 Kalman 的方法论。

传统时间序列分析有如下局限性：

- (1) 模型类通常局限于单变量、平稳、常参数的 ARMA(或 CARMA)模型。
- (2) 分析方法主要是频域方法(谱分析)。
- (3) 建模方法用极大似然法或非线性最小二乘法。算法是非递推的，计算量大。
- (4) 建模与预报和控制是单独进行的，因而是非自适应预报和控制。
- (5) 没有考虑被噪声污染的时间序列的估计问题，即没有考虑滤波问题。

现代时间序列分析突破了上述的局限性，具有如下特点：

(1) 它以带有观测噪声的时间序列为研究对象，因此除了预报和控制外，滤波、平滑和去卷问题和在噪声环境下的建模问题将是现代时间序列分析的新课题。

(2) 它以时间序列分析方法和状态空间方法相结合作为方法论，利用时间序列 ARMA 模型与状态空间模型的相互转化，利用频域方法与时域方法的相互转化，以时域上的状态空间方法和新息方法取代了传统时间序列分析的频域方法。

时域方法与频域方法是对立统一的：例如由作者首先在 IFAC 辨识会议上用时域方法提出的多变量 ARMA 时间序列的自校正滤波器和平滑器(1981)及最优去卷平滑器(1985)，后来曾分别被英国学者 Moir 和 Grimble(1984)及 Moir(1986)独立地用频域方法得到。

(3) 它重点研究多变量、非平稳、带时变参数、带观测噪声的 ARMA 或 CARMA 时间序列。

(4) 建模方法用计算简单的递推最小二乘法或递推推广最小二乘法，以及自适应滤波方法。

(5) 自适应和自校正原理贯穿整个现代时间序列分析。

(6) 现代时间序列分析作为现代控制论与传统时间序列分析这两个学科之间的新的边

缘学科，它兼具有两者的某些特征而又不同于每个学科。从现代控制论观点看，现代时间序列分析是关于离散时间动态系统的辨识、滤波、预报和控制的理论。但它具有传统时间序列分析的特色，主要研究用 ARMA 或 CARMA 模型描写的时间序列。从传统时间序列分析观点看，现代时间序列分析仍以 ARMA 或 CARMA 时间序列为研究对象，但它具有现代控制论的特色，主要研究带有观测噪声的 ARMA 或 CARMA 时间序列的建模、滤波、平滑、去卷、预报和控制。

本书是作者近年来在现代时间序列分析领域所做的一系列理论和应用工作的总结，主要阐述由作者提出的新理论、新方法、新技术和新成果及其应用。但为了完整性和系统性，书中也介绍了国外新近的有关的重要结果作为背景材料。

本书是从理论和应用相结合观点阐述的，具有明显的实用价值。由作者提出的一些方法和结果已应用到实际问题中。所涉及的应用问题包括油田产量动态预报，石油炼制微机监测预报系统，商品销量预报，水文预报，电力载荷预报，石油勘探地震数据处理，分馏塔前馈自校正控制，氨合成塔自校正预报控制，机器人自适应控制，飞行器自适应跟踪，自适应雷达跟踪系统，动态船舶定位系统，通信系统线性最佳接收机，语音信号识别，脑电波图和心电图分析，故障诊断等；所涉及的应用领域包括石油、化工、通信、冶金、机械、电力、环境、水文、气象、经济、制导、能源、生物、医学、海洋研究等。除了应用实例外，为了验证作者提出的新的理论、方法、技术的有效性，书中还给出了大量的仿真例子。为了使读者应用方便，书末附录中还给出了由作者研制的 CARMA 模型自动辨识机的几个典型的 BASIC 语言程序及使用说明。

本书共分十章，且书末有若干附录。

第一章 CARMA 模型的参数估计和结构辨识介绍了由作者提出的 CARMA 模型结构辨识新方法及由作者研制的相应的 AR 模型、MA 模型、CAR 模型、CARMA 模型自动辨识机，也介绍了作者提出的有观测噪声的 AR 模型的二种辨识方法。

第二章 新息方法与 Hilbert 空间中射影运算，系统地介绍了解决最优估计问题所用到的新息方法和射影理论，是本书的理论基础。

第三章 最优滤波、平滑、去卷及其应用，除了介绍 Kalman 最优滤波和平滑外，重点介绍由作者提出的新的稳态最优滤波、平滑和去卷理论及其在地震信号数据处理和通信系统线性最佳接收机方面的应用。

第四章 自适应 Kalman 滤波及其应用除介绍 Sage 和 Husa 的自适应 Kalman 滤波外，重点介绍作者对 Sage 和 Husa 的极大后验噪声统计估计方法的各种推广和改进工作，并给出了在飞行器自适应跟踪和故障诊断方面的应用，发展了噪声统计估计理论。

第五章 多重时滞系统自适应递推滤波和去卷介绍了在 Tamura 次优递推滤波器基础上由作者提出的多重时滞系统的自适应递推滤波和去卷理论及其在地震信号去卷问题中的应用。

第六章 虚拟噪声补偿技术及其应用介绍了由作者提出的虚拟噪声补偿新技术及其在各种自适应滤波问题和自适应雷达跟踪系统中的应用。

第七章 自适应滤波方法在系统辨识领域的应用主要介绍由作者提出的一系列自适应滤波新方法在时变参数系统辨识方面的应用，发展了时变参数系统辨识理论和方法。

第八章 自校正滤波、平滑、去卷及其应用除介绍 Hagander 和 Wittenmark 的单变

量自校正滤波器和平滑器外，主要介绍在此基础上由作者提出的单变量和多变量 ARMA 信号的自校正滤波、平滑和去卷理论及其在动态船舶定位系统中的应用。

第九章 自校正和自适应预报及其应用介绍了 Wittenmark 自校正预报器，自校正 Box-Jenkins 递推预报器和 Keyser 等的多步自校正预报器，还介绍了由作者首先提出的多变量多步自校正递推预报器和时变参数系统的自适应预报器及其在油田产量预报和石油炼制微机监测预报系统中的应用。

第十章 自校正和自适应控制及其应用除介绍 Åstrom 和 Wittenmark 的自校正调节器和 Clarke 和 Gawthrop 的自校正控制器外，主要介绍由作者提出的显式自校正控制理论和方法。基于显式多步自校正递推预报器，作者提出了一系列新的单变量和多变量显式自校正控制器和极点配置前馈自校正控制器。还提出了时变参数系统的新的自适应控制器，并给出了在机器人自适应控制，炼油分馏塔前馈自校正控制，氨合成塔自校正预报控制等方面的应用。

作者在本书中对现代时间序列分析做了一系列开拓性工作，主要有：

在时间序列建模方面，提出了单变量和多变量 CARMA 模型结构辨识新方法；提出了带观测噪声的 CARMA 模型辨识的新方法；提出了时变参数系统辨识的一系列自适应滤波新方法，发展了时变参数系统辨识理论。在时间序列状态估计方面，提出了稳态最优滤波、平滑、去卷理论；提出了极大后验(MAP)噪声统计估计理论，给出了一系列新的噪声统计估值器；提出了多重时滞系统次优和自适应递推滤波和去卷理论；提出了 ARMA 时间序列自校正滤波、平滑、去卷理论；提出了虚拟噪声补偿新技术。在控制方面，提出了显式自校正和自适应控制理论，并且在书中给出了大量应用实例和大量仿真例子。

本书探讨和研究的是传统时间序列分析与现代控制论之间的新兴的边缘学科——现代时间序列分析及其应用。它的应用领域远远超出了传统时间序列分析应用的范围，扩展到现代控制论、系统分析、信号处理的各个应用领域，显示了强大的生命力。它的许多理论和方法是新的，许多问题有待于进一步研究。可以预见，这门新兴的边缘学科将以其特有的理论和方法得到更广泛的应用。

由于作者水平和精力有限，缺点和错误之处在所难免，望读者批评指正。

在完成本书过程中，张钟俊先生给予热情鼓励和支持，审阅了原稿，提出了很宝贵的意见，并为本书作序，作者在此深表谢意。

邓自立 郭一新

1988年9月

目 次

第一章 CARMA 模型的参数估计和结构辨识	(1)
§ 1.1 AR 模型辨识	(2)
1.1.1 引言	(2)
1.1.2 非递推最小二乘法	(4)
1.1.3 递推最小二乘法(RLS)	(5)
1.1.4 指数加权最小二乘法—时变参数估计	(6)
1.1.5 模型阶的 F 检验判决器	(7)
1.1.6 应用实例: 太阳黑子建模, 机械振动建模, 商品零售额建模	(8)
§ 1.2 MA 模型辨识	(10)
1.2.1 MA 参数估计的 Gevers-Wouters 算法	(10)
1.2.2 仿真例子	(11)
§ 1.3 CAR 模型辨识	(12)
1.3.1 引言	(12)
1.3.2 RLS 参数估计	(14)
1.3.3 模型阶的 F 检验判决器	(14)
1.3.4 子阶和时滞的 F 检验判决器	(15)
1.3.5 仿真例子	(15)
1.3.6 应用例子: 经济系统建模	(17)
§ 1.4 CARMA 模型辨识	(18)
1.4.1 引言	(18)
1.4.2 递推增广最小二乘法(RELS)	(19)
1.4.3 模型阶的 F 检验判决器	(20)
1.4.4 子阶和时滞的 F 检验判决器	(20)
1.4.5 仿真例子	(22)
§ 1.5 CARMA 模型的两段最小二乘法辨识	(25)
1.5.1 引言	(25)
1.5.2 用 CAR 建模产生新息序列	(25)
1.5.3 用改进的 RELS 算法的参数估计	(26)
1.5.4 仿真例子	(26)
§ 1.6 带白色观测噪声的 AR 模型辨识	(27)
1.6.1 用 RELS 算法的 ARMA 新息模型的辨识	(28)
1.6.2 仿真例子	(29)
§ 1.7 带有色观测噪声的 AR 模型辨识	(29)
1.7.1 用 RELS 算法的 ARMA 新息模型辨识	(30)
1.7.2 仿真例子	(31)
§ 1.8 多变量 CAR 模型辨识	(32)
1.8.1 引言	(32)

1.8.2	RLS 参数估计	(33)
1.8.3	多重递推最小二乘法(MRLS)	(33)
1.8.4	子模型阶的确定	(35)
1.8.5	节省参数模型的阶和时滞的确定	(35)
1.8.6	仿真例子	(36)
§ 1.9	多变量 CARMA 模型辨识	(40)
1.9.1	引言	(40)
1.9.2	RELS 参数估计	(41)
1.9.3	子模型阶的确定	(42)
1.9.4	节省参数模型、子阶和时滞的确定	(43)
1.9.5	仿真例子	(44)
§ 1.10	多变量 CARMA 模型的两段最小二乘法辨识	(46)
1.10.1	引言	(47)
1.10.2	用多变量 AR 建模产生新息序列	(47)
1.10.3	用改进的 MRELS 算法的参数估计	(48)
1.10.4	模型结构辨识的 F 检验法	(48)
1.10.5	仿真例子	(49)
第二章	新息方法与 Hilbert 空间中的射影运算	(54)
§ 2.1	线性最小方差估计和射影	(54)
2.1.1	线性最小方差估计	(54)
2.1.2	射影及其性质	(55)
§ 2.2	新息序列	(57)
§ 2.3	无穷维 Hilbert 空间中的射影运算	(60)
2.3.1	正交射影定理	(60)
2.3.2	新息序列	(60)
2.3.3	规范化正交序列和射影公式	(61)
2.3.4	新息序列的完全性	(63)
2.3.5	射影运算交换极限次序定理	(64)
§ 2.4	规范化正交序列的完全性、闭合性、稠密性	(65)
§ 2.5	在 Hilbert 空间中的多维射影运算	(66)
§ 2.6	非零均值随机变量的射影问题	(69)
2.6.1	一维情形	(69)
2.6.2	多维情形	(70)
§ 2.7	求 MA 参数的 Gevers-Wouters 算法	(70)
第三章	最优滤波、平滑、去卷及其应用	(75)
§ 3.1	Kalman 滤波	(75)
3.1.1	Kalman 滤波推导	(75)
3.1.2	稳态 Kalman 滤波	(80)
§ 3.2	用时间序列分析方法的稳态最优滤波	(84)

3.2.1	ARMA 新息模型	(85)
3.2.2	稳态最优滤波、预报和平滑	(85)
3.2.3	稳态 Lindquist 滤波器	(38)
3.2.4	稳态 Kalman 滤波器的 Tajima 算法及其改进	(89)
3.2.5	四种稳态 Kalman 滤波算法的等价性	(91)
3.2.6	ARMA 新息模型的降阶问题	(93)
§ 3.3	Kalman 平滑	(96)
3.3.1	单步平滑器	(96)
3.3.2	两步平滑器	(98)
§ 3.4	带有色观测噪声系统 Kalman 滤波	(99)
§ 3.5	推广的 Mendel 的最优白噪声估值器	(101)
§ 3.6	稳态最优白噪声滤波器和平滑器——应用于地震数据去卷	(103)
3.6.1	ARMA 新息模型	(104)
3.6.2	稳态最优白噪声估值器	(105)
3.6.3	单通道稳态最优白噪声估值器	(106)
3.6.4	Moir 的稳态最优白噪声去卷平滑器	(108)
3.6.5	Mendel 的单通道稳态最优白噪声估值器	(109)
§ 3.7	模型噪声和观测噪声稳态最优估值器	(110)
3.7.1	CARMA 新息模型	(110)
3.7.2	稳态最优噪声估值器	(111)
§ 3.8	ARMA 信号稳态最优去卷平滑器	(112)
3.8.1	从时间序列分析观点阐述 Goodwin 和 Sin 去卷问题	(112)
3.8.2	ARMA 新息模型	(114)
3.8.3	第 1 类稳态最优去卷平滑器	(114)
3.8.4	第 2 类稳态最优去卷平滑器	(115)
3.8.5	仿真例子	(116)
§ 3.9	稳态最优波成形滤波器和平滑器	(118)
3.9.1	Mendel 的波成形问题	(119)
3.9.2	波成形问题的时间序列分析阐述	(119)
3.9.3	稳态最优波成形滤波器和平滑器	(120)
§ 3.10	数字通讯系统的线性最佳接收机	(121)
3.10.1	ARMA 新息模型	(122)
3.10.2	线性最佳接收机	(122)
3.10.3	仿真例子	(123)
第四章	自适应 Kalman 滤波及其应用	(128)
§ 4.1	Sage 和 Husa 的自适应 Kalman 滤波方法	(129)
4.1.1	极大后验(MAP)噪声统计估值器	(129)
4.1.2	次优无偏 MAP 噪声统计估值器	(131)

§ 4.2 时变噪声统计估值器——改进的 Sage 和 Husa	
自适应 Kalman 滤波器	(132)
4.2.1 用指数加权法的时变噪声统计估值器	(133)
4.2.2 时变噪声统计跟踪的无偏性	(134)
4.2.3 应用实例: 油田产油量自适应动态预报	(134)
4.2.4 多层自适应递推预报器	(135)
4.2.5 限定记忆时变噪声统计估值器	(136)
§ 4.3 Yoshimura 和 Soeda 时变噪声统计估值器——新推导和新解释	(137)
4.3.1 Yoshimura 和 Soeda 估值器的新推导方法	(137)
4.3.2 Yoshimura 和 Soeda 估值器的新解释	(138)
§ 4.4 Yoshimura 和 Soeda 估值器的改进	(139)
§ 4.5 Sage 和 Husa 观测噪声统计估值器的改进	(141)
§ 4.6 改进的 Todini 噪声统计估值器	(142)
§ 4.7 基于白噪声平滑器的 Q、R 估值器	(145)
4.7.1 一种新的 Q、R 估值器	(145)
4.7.2 仿真例子	(147)
§ 4.8 带有色观测噪声系统自适应 Kalman 滤波	(148)
4.8.1 带有色观测噪声系统 Kalman 滤波	(149)
4.8.2 次优无偏递推 MAP 噪声统计估值器	(149)
4.8.3 仿真例子	(150)
§ 4.9 稳态 Kalman 增益估计	(150)
4.9.1 ARMAX 新息模型	(151)
4.9.2 稳态滤波增益的估计	(152)
§ 4.10 应用块伴随形的稳态 Kalman 增益的估计	(153)
§ 4.11 自校正 Kalman 滤波器	(154)
4.11.1 单输出系统块伴随形下的自校正 Kalman 滤波	(155)
4.11.2 ARMA 信号的自校正滤波器	(156)
§ 4.12 飞行器的自适应跟踪	(157)
4.12.1 运动定律和状态空间模型	(157)
4.12.2 用三种方法导出 ARMA 新息模型	(158)
4.12.3 自校正自适应 Kalman 滤波器	(159)
4.12.4 仿真结果	(160)
§ 4.13 氧化炉脱碳速度自校正、自适应滤波器	(160)
4.13.1 脱碳速度建模	(161)
4.13.2 非平稳 ARMA 信号的自校正滤波器	(161)
§ 4.14 参数故障诊断和故障参数估计	(162)
4.14.1 参数故障诊断的 WSSR 方法	(163)
4.14.2 应用自适应推广的 Kalman 滤波估计故障参数	(164)
4.14.3 应用递推推广最小二乘法(RELS)估计故障参数	(165)

4.14.4 仿真例子	(165)
第五章 多重时滞系统自适应递推滤波和去卷	(172)
§ 5.1 Tamura 次优递推滤波器的推广	(172)
5.1.1 先验统计的假设	(173)
5.1.2 推广的 Tamura 次优递推滤波器	(174)
§ 5.2 多重时滞系统的自适应递推滤波器	(175)
5.2.1 噪声统计估计器和自适应递推滤波器	(175)
5.2.2 仿真例子	(177)
§ 5.3 多重时滞系统的次优和自适应递推去卷滤波器	(178)
5.3.1 次优递推去卷滤波器	(178)
5.3.2 自适应噪声统计估值器和去卷滤波器	(181)
5.3.3 带有色观测噪声的次优和自适应去卷滤波器	(183)
5.3.4 仿真例子	(183)
§ 5.4 地震信号自适应递推去卷滤波器	(185)
5.4.1 地震信号自适应递推去卷滤波器	(185)
5.4.2 仿真例子	(188)
§ 5.5 多重时滞系统参数和状态估计的两段 Bootstrap 算法	(188)
§ 5.6 带有色观测噪声的多重时滞系统的参数和状态估计	(190)
5.6.1 参数和状态估计的两段 Bootstrap 算法	(190)
5.6.2 仿真例子	(191)
第六章 虚拟噪声补偿技术及其应用	(194)
§ 6.1 带模型误差系统自适应 Kalman 滤波	(194)
6.1.1 虚拟噪声补偿技术	(194)
6.1.2 仿真例子	(196)
§ 6.2 非线性系统的自适应推广的 Kalman 滤波	(199)
6.2.1 推导和算法	(199)
6.2.2 仿真例子	(201)
§ 6.3 多重时滞非线性系统的自适应递推滤波器	(202)
6.3.1 推导和算法	(203)
6.3.2 仿真例子	(204)
§ 6.4 带随机参数系统的自适应 Kalman 滤波	(205)
6.4.1 随机参数的分解	(205)
6.4.2 仿真例子	(205)
§ 6.5 带未知随机参数系统自适应 Kalman 滤波	(206)
6.5.1 增广状态 Kalman 滤波方法	(206)
6.5.2 自适应推广的 Kalman 滤波算法	(207)
6.5.3 仿真例子	(208)
§ 6.6 参数和状态估计的两段互耦自适应 Kalman 滤波算法	(208)
6.6.1 自适应参数估值器	(209)

6.6.2	自适应状态估值器	(210)
6.6.3	应用于油田产水量动态预报	(211)
§ 6.7	多重时滞系统参数和状态估计的自适应滤波算法	(212)
6.7.1	自适应参数估值器	(212)
6.7.2	自适应状态估值器	(213)
6.7.3	仿真例子	(214)
§ 6.8	具有随机系数的多重时滞系统的自适应滤波	(215)
6.8.1	随机系数的均值已知的情形	(215)
6.8.2	随机系数的均值未知的情形	(216)
6.8.3	仿真例子	(217)
§ 6.9	自适应分割 Kalman 滤波器	(218)
§ 6.10	自适应雷达跟踪系统	(220)
第七章	自适应滤波方法在系统辨识领域的应用	(225)
§ 7.1	递推最小二乘法(RLS)算法与 Kalman 滤波的关系	(226)
§ 7.2	应用自适应 Kalman 滤波的时变参数系统的辨识	(227)
7.2.1	时变参数的广义随机游动模型和伪随机模型	(228)
7.2.2	时变参数的自适应 Kalman 滤波器	(228)
7.2.3	仿真例子	(229)
§ 7.3	应用自适应 Kalman 滤波的 ARMA 模型辨识	(230)
7.3.1	用虚拟噪声补偿观测模型误差	(231)
7.3.2	仿真例子	(232)
§ 7.4	带观测噪声的时变系统辨识的 Bootstrap 算法	(232)
7.4.1	参数和状态估计的两段互耦自适应滤波算法	(233)
7.4.2	仿真例子	(234)
§ 7.5	带观测噪声的时变参数系统辨识的增广状态方法	(235)
7.5.1	增广状态非线性系统的自适应滤波	(235)
7.5.2	仿真例子	(237)
§ 7.6	带未知时变参数信号的自适应去卷滤波器	(238)
7.6.1	增广状态非线性系统自适应滤波	(238)
7.6.2	仿真例子	(241)
§ 7.7	带 AR 时变参数的 CAR 模型的辨识	(242)
7.7.1	两段互耦自适应滤波算法	(242)
7.7.2	仿真例子	(244)
§ 7.8	带 AR 时变参数的多重时滞非线性系统的辨识	(245)
7.8.1	两段互耦自适应滤波算法	(245)
7.8.2	仿真例子	(248)
§ 7.9	改进的自适应 Wood 和 Hebson 分块状态和参数估计算法	(249)
7.9.1	新的自适应分块状态和参数估计算法	(249)
7.9.2	仿真例子	(252)

§ 7.10	Wood-Hebson 滤波器与 MRLS 和 Kalman 滤波关系	(253)
7.10.1	Wood-Hebson 滤波器与 MRLS 算法关系	(254)
7.10.2	Wood-Hebson 滤波器与 Kalman 滤波器关系	(255)
§ 7.11	自适应推广的 Wood-Hebson 滤波器	(256)
7.11.1	带随机参数阵的多变量 CAR 模型的辨识	(256)
7.11.2	自适应推广的 Wood-Hebson 滤波器	(257)
第八章	自校正滤波、平滑、去卷及其应用	(261)
§ 8.1	Hagander 和 Wittenmak 的自校正滤波器和平滑器	(262)
8.1.1	最优滤波器和平滑器	(263)
8.1.2	自校正滤波器和平滑器	(265)
§ 8.2	多变量自校正滤波器和平滑器	(266)
8.2.1	多变量 ARMA 信号最优滤波器	(267)
8.2.2	多变量自校正滤波器	(268)
8.2.3	最优固定滞后平滑器	(269)
8.2.4	多变量自校正固定滞后平滑器	(270)
8.2.5	仿真例子	(271)
§ 8.3	ARMAX 信号的自校正滤波器和平滑器	(274)
8.3.1	稳态最优滤波器和平滑器	(275)
8.3.2	自校正滤波器和平滑器	(276)
§ 8.4	多变量 ARMAX 信号的自校正滤波器和平滑器	(276)
8.4.1	稳态最优滤波器和平滑器	(277)
8.4.2	自校正滤波器和平滑器	(278)
§ 8.5	应用于语音信号识别的自校正滤波器和平滑器	(279)
8.5.1	在噪声环境中的语音信号识别问题	(279)
8.5.2	最优滤波器和平滑器	(280)
8.5.3	自校正滤波器和平滑器	(282)
§ 8.6	带有色观测噪声系统的自校正 Kalman 滤波器	(283)
8.6.1	稳态最优 Kalman 滤波器和平滑器	(283)
8.6.2	自校正 Kalman 滤波器和平滑器	(285)
§ 8.7	应用于动态船舶定位系统的自校正 Kalman 滤波器	(286)
8.7.1	船舶运动系统的描写	(287)
8.7.2	低频运动最优 Kalman 滤波器	(287)
8.7.3	高频运动稳态最优滤波器	(288)
8.7.4	自校正 Kalman 滤波器	(288)
8.7.5	仿真结果	(290)
§ 8.8	应用于地震数据去卷的自校正白噪声估值器	(290)
8.8.1	最小方差去卷问题	(291)
8.8.2	两个 ARMA 新息模型的辨识	(291)
8.8.3	自校正白噪声估值器	(293)

§ 8.9 ARMA 信号的自校正去卷平滑器	(295)
8.9.1 最优去卷平滑器	(296)
8.9.2 自校正去卷平滑器	(297)
8.9.3 仿真例子	(299)
§ 8.10 自校正 α - β 滤波器	(302)
8.10.1 稳态最优 α - β 滤波器	(302)
8.10.2 自校正 α - β 滤波器	(303)
第九章 自校正和自适应预报及其应用	(308)
§ 9.1 自校正 Box-Jenkins 递推预报器	(312)
9.1.1 单变量和多变量 ARMA 过程的相关性、平稳性、可逆性	(312)
9.1.2 Box-Jenkins 递推预报器	(315)
9.1.3 自校正 Box-Jenkins 递推预报器	(316)
9.1.4 应用实例: 温度预报	(317)
§ 9.2 Wittenmark 自校正预报器	(318)
9.2.1 Åstrom 稳态线性最小方差预报器	(319)
9.2.2 Wittenmark 自校正预报器	(321)
§ 9.3 Keyser 和 Cauwenberghe 自校正多步预报器	(322)
9.3.1 Wittenmark 型超前 k 步自校正预报器	(323)
9.3.2 自校正多步递推预报器	(324)
9.3.3 自校正预报控制	(325)
§ 9.4 多变量多步自校正递推预报器及其应用	(326)
9.4.1 带外扰的多变量 CARMA 过程的多步自校正预报器	(327)
9.4.2 用于油田产量动态预报	(329)
§ 9.5 石油炼制的微机监测预报系统	(331)
9.5.1 系统的组成与主要功能	(331)
9.5.2 主要工艺参数变化的趋势预报	(331)
§ 9.6 时变系统的自适应 Kalman 滤波预报方法	(335)
§ 9.7 带观测噪声的时变系统的短期自适应预报	(336)
9.7.1 两段互耦自适应滤波和预报算法	(337)
9.7.2 仿真例子	(338)
§ 9.8 指数平滑预报方法	(338)
9.8.1 指数平滑预报公式的推导	(339)
9.8.2 指数平滑预报器与 Kalman 滤波的关系	(339)
9.8.3 指数平滑预报器与 ARMA 模型关系	(340)
9.8.4 应用实例: 电冰箱销售量短期预报	(341)
第十章 自校正和自适应控制及其应用	(347)
§ 10.1 Åstrom 和 Wittenmark 的自校正调节器	(348)
10.1.1 Åstrom 稳态最小方差控制器	(348)
10.1.2 Åstrom 和 Wittenmark 自校正调节器原理	(350)

10.1.3	隐式自校正调节器算法	(351)
§ 10.2	复杂分馏塔的前馈自校正调节器	(352)
10.2.1	设备与工艺情况	(352)
10.2.2	系统的控制方案	(353)
10.2.3	子系统自校正调节器的离线试验	(354)
10.2.4	结论	(355)
§ 10.3	极点配置前馈自校正控制器	(355)
10.3.1	前馈自校正控制器	(355)
10.3.2	隐式极点配置前馈自校正控制器	(358)
10.3.3	简单的极点配置前馈自校正控制器	(359)
10.3.4	显式极点配置前馈自校正控制器	(360)
10.3.5	仿真例子	(361)
§ 10.4	Clarke 和 Gawthrop 的自校正控制器	(362)
10.4.1	带已知参数系统的控制器设计	(362)
10.4.2	Clarke 和 Gawthrop 自校正控制器	(363)
10.4.3	关于闭环系统输出的稳态偏差问题	(364)
§ 10.5	显式自校正控制器	(364)
10.5.1	显式自校正控制器设计	(365)
10.5.2	显式自校正前馈控制器	(368)
10.5.3	仿真例子	(368)
§ 10.6	多变量显式自校正控制器	(369)
10.6.1	显式自校正控制器设计	(369)
10.6.2	显式 Koivo 多变量自校正控制器	(372)
10.6.3	仿真例子	(372)
§ 10.7	氨合成塔温度的自校正预报控制	(375)
§ 10.8	时变参数系统的自校正控制	(376)
10.8.1	基于自适应 Kalman 滤波的设计方法	(376)
10.8.2	仿真例子	(379)
§ 10.9	一种新的机器人自适应控制方式	(380)
10.9.1	数学模型和自适应控制系统设计	(380)
10.9.2	仿真结果	(382)
§ 10.10	极点配置自校正 PID 调节器	(382)
10.10.1	离散 PID 调节器	(382)
10.10.2	改进的离散 PID 调节器	(383)
10.10.3	极点配置 PID 调节器	(384)
10.10.4	极点配置自校正 PID 调节器	(385)

附 录

附录 A	状态空间模型与时间序列模型的相互关系	(389)
附录 B	矩阵微分运算	(391)

附录 C F 分布表	(392)
附录 D 现代时间序列分析程序库	(393)
D.1 AR 模型自动辨识机—MTS1 / BAS	(394)
D.2 MA 模型 G-W 算法程序—MTS2 / BAS	(403)
D.3 CAR 模型自动辨识机—MTS3 / BAS	(404)
D.4 多输入单输出 CAR 模型自动辨识机—MTS4 / BAS	(413)
D.5 CARMA 模型自动辨识机—MTS5 / BAS	(422)
D.6 带模型偏差的 CARMA 模型自动辨识机—MTS6 / BAS	(431)
D.7 CARMA 模型两段最小二乘法自动辨识机—MTS7 / BAS	(433)
D.8 多变量 CAR 模型自动辨识机—MTS8 / BAS	(442)
D.9 多变量 CARMA 模型自动辨识机—MTS9 / BAS	(450)
D.10 多变量 CARMA 模型的两段最小二乘自动辨识机—MTS10 / BAS	(457)
D.11 自适应 Kalman 滤波估计故障参数器—MTS11 / BAS	(463)
D.12 噪声统计估计器和自适应递推滤波器—MTS12 / BAS	(465)
D.13 油田产油量自校正优选预报器—MTS13 / BAS	(467)
D.14 油田产水量自校正优选预报器—MTS14 / BAS	(471)
D.15 自校正调节器—MTS15 / BAS	(473)
D.16 显式极点配置自校正控制器—MTS16 / BAS	(476)
D.17 单输入单输出 CAR 过程显式自校正控制器—MTS17 / BAS	(477)
D.18 单输入单输出 CARMA 过程显式自校正控制器—MTS18 / BAS	(480)
D.19 多输入多输出 CAR 过程显式自校正控制器—MTS19 / BAS	(484)
D.20 多输入多输出 CARMA 过程显式自校正控制器—MTS20 / BAS	(489)
附录 E 现代时间序列分析程序库一览表	(493)