

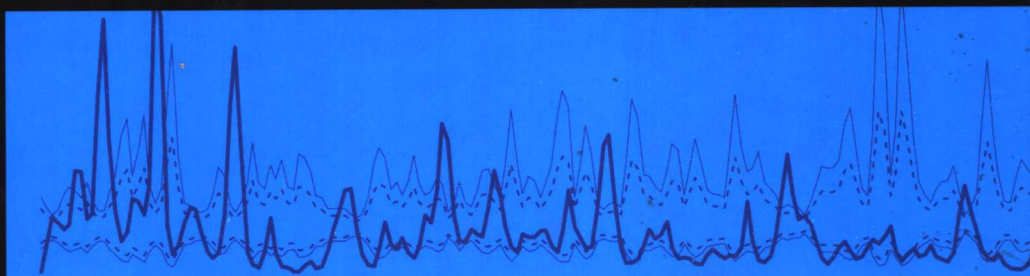


当代科学前沿论丛
NEW FRONTIERS OF SCIENCES

非线性时间序列

——建模、预报及应用

Nonlinear Time Series



范剑青 姚琦伟 著 陈敏 译



高等教育出版社 HIGHER EDUCATION PRESS



当代科学前沿论丛

非线性时间序列

——建模、预报及应用

范剑青 姚琦伟 著 陈敏 译

内容简介

本书主要介绍非线性时间序列理论和方法的一些最新研究成果,尤其以近十年来发展起来的非参数和半参数技术为主。本书不仅对这些技术在时间序列状态空间、频域和时域等方面的应用给出了详细的介绍,同时,为了体现参数和非参数方法在时间序列分析中的整合性,还系统地阐述了一些主要参数非线性时间序列模型(比如 ARCH/GARCH 模型和门限模型等)的近期研究成果。此外,书中还包含了一个对线性 ARMA 模型的简洁介绍。为了说明如何运用非参数技术来揭示高维数据的局部结构,本书借助了很多源于实际问题的具体数据,并注重在这些例子的分析中体现部分的分析技巧和工具。阅读本书只需要具备基础的概率论和统计学知识。

本书适用于统计专业的研究生、面向应用的时间序列分析人员以及该领域的各类研究人员。此外,本书也对从事统计学的其他分支以及经济计量学、实证金融学、总体生物和生态学的研究人员有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

非线性时间序列:建模、预报及应用/范剑青,姚琦
伟著;陈敏译. —北京:高等教育出版社,2005.12
ISBN 7-04-017357-3

I. 非... II. ①范...②姚...③陈... III. 非线性
一时间序列分析 IV. 0211.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 142561 号

策划编辑 张小萍 责任编辑 郭伟 封面设计 刘晓翔 责任印制 陈伟光

出版发行 高等教育出版社

社址 北京市西城区德外大街 4 号

邮政编码 100011

总机 010-58581000

经销 蓝色畅想图书发行有限公司

印刷 北京外文印刷厂

开本 787×1092 1/16

印张 27.5

字数 670 000

购书热线 010-58581118

免费咨询 800-810-0598

网址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.landaco.com>

<http://www.landaco.com.cn>

畅想教育 <http://www.widedu.com>

版次 2005 年 12 月第 1 版

印次 2005 年 12 月第 1 次印刷

定价 65.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 17357-00

《当代科学前沿论丛》专家委员会

(按姓氏笔画为序)

(国内部分)

王 夔	冯 端	师昌绪	曲钦岳	朱清时
孙 枢	李三立	李大潜	李国杰	杨芙清
吴建屏	邹承鲁	张尧庭	陈 竺	陈佳洱
陈希孺	陈宜瑜	周秀骥	姜伯驹	袁亚湘
钱 易	徐光宪	徐端夫	徐冠华	翟中和
戴立信	戴汝为			

(海外部分)

王中林	文小刚	邓兴旺	田 刚	丛京生
刘 钧	汤 超	许 田	危 岩	严晓海
李 凯	李 明	邱子强	余振苏	范剑青
周午纵	郑元芳	宫 鹏	俞陆平	袁钧瑛
徐希平	鄂维南	程正迪		

出版者的话

人类创造了科学技术,科学技术推动了人类的文明进程。两者的互动影响,今天已达到了前所未有的程度:人类的经济发展和进步的需要,为科学技术迅猛的创新,提供了强大的动力;科学技术的发展,在急剧地改变着人类的思维方式、学习方式、工作方式、生活方式、娱乐方式。科学技术已成为强大的社会生产力和巨大的社会资本。现在,每个国家,每个地区,甚至每个单位,都把科学技术创新、科学技术转化为生产力作为头等大事,抢占科学技术制高点,以此来提高自己的综合实力。

新中国成立 50 多年特别是改革开放 20 多年来,随着经济的蓬勃发展,科学技术得到了长足的进步,两弹一星、载人飞船、生物工程、信息技术等正在大步追赶国际先进水平。科学技术转化成的强大生产力,对国民经济发展和进步,对增强综合国力产生了重大的影响。

改革开放以来,在中国共产党的“科教兴国”方针的鼓舞下,举国上下,尊重科技,学习科技,普及科技,创新科技,应用科技,发展科技,已蔚然成风。科技结硕果、神州尽彩虹的绚丽画面,正展示于世人面前。自 16 世纪中叶中国科学技术失去世界领先地位后所形成的中西科学技术的差距,现在正在缩小。重振中华科学技术雄风的序幕已经拉开。

为了能使我国的科学技术水平在不久的将来赶上并达到世界先进水平,我们不仅要自己进行科学技术创新,也要学习世界上一切国家的先进科学技术:不仅要靠国内的科技工作者发展我国的科学技术,还要借助海外学者特别是华人学者的力量。在这种思想的指导下,我们萌生了组织海外学者编写科技前沿丛书的想法。这一想法在海内外学者中引起了强烈的反响。在他们中,有的出谋献策,有的出资开会,有的撰稿,有的审稿,有的愿把稿酬作为基金,……海内外学者的诚言乐行,极大地感染着我们,鼓舞着我们。这一想法得到了教育部陈至立部长和分管我社的周远清副部长的肯定和支持,这增加了我们开展此项工作的决心和信心。根据各方面意见,经过反复研究,最后将丛书定名为《当代科学前沿论丛》。《论丛》是我们献给祖国母亲的 21 世纪的圣礼,企盼我国能在 21 世纪夺回三四百年前失去的科学技术领先的地位。《论丛》如能在推动我国科学技术进步和“科教兴国”中有所作用,将是我们的最大欣慰。为了做好本《论丛》的出版工作,我们邀请了国内一些著名科学家和在海外工作的部分优秀学者组成《论丛》的专家委员会,帮助筹划、组织和评议《论丛》的出版。随着学科的发展,专家委员会的成员可能会有所变化。我们向一切关心和支持《论丛》出版工作的人士,表示衷心的感谢。由于缺乏经验,《论丛》出版后,编辑出版方面的不足,在所难免,诚望各方指正。

高等教育出版社

2000 年 6 月

序 言

众所周知,现实世界的运动规律往往是非线性的.事实上,在一个线性的世界里,量变永远都不能产生质变的.换言之,物理学的相变,生物学的细胞突变,经济学的收益递减等等都会消失于线性的世界里.可想而知,线性的世界是多么的乏味.

时间序列是探讨现实世界的运动规律的主要工具之一,近代统计学在廿世纪初刚出世的时候就已经包括了这个分支.可惜的是,和其它的分支一样,线性的模型长期地统治了整个时间序列的领域,长达半个世纪之久.在这漫长的岁月中,我们看到的主要是英国的 U. Yule 在 1927 年创建的回归模型和俄国的 E. Slutsky 在同年创建的滑动平均模型和它们的混合体.可以说,在时间序列发展史中,线性模型毫无疑问曾经起过非常积极的作用,但是它们也起过消极的作用.事实证明,过度沉迷于线性模型的研究,推迟了非线性模型的诞生.这是时间序列的不幸,也是统计学的不幸.

事实上,我们一直要等到 20 世纪的七十年代末和八十年代初,才可以开始看到以门限自回归 (TAR) 模型和 ARCH 模型为典型代表的非线性时间序列模型组陆续登上舞台来.从此,整个时间序列的科研气象就焕然一新了,我已经在《Non-linear Time Series》(1990, 牛津大学出版社)以见证人的身份较系统地介绍了这段历史时期的收获.特别令人喜悦的是,新方向一出来就获得了各方面的专家和前辈的大力支持.特别值得一提的是,华罗庚教授廿五年前热情的邀请信,现在想起来还是令人激动不已.他老人家的意思是要我早日将这新动向传到北京去、传到中国去.

往事稍提,还是言归正传吧.近年来,非线性时间序列正处在突飞猛进的发展时刻.过去,我们的模型主要是参数化的.但是,现在非参数化,甚至是半参数化的模型正在发挥着无与伦比的威力,把整个时间序列的领域提升到一个空前未有的新境界.既然有了这样美丽的新境界,如果凡人难得一睹其奥妙,岂非惜哉?在最佳时刻里写出最佳的篇章,可以作为我对剑青教授和琦伟教授的最恰当的赠言吧.既是过来人,我当然知道他们俩尝过什么样的酸甜苦辣.可以肯定的是,一本既系统地又独具风格地概述非线性时间序列迄今的全部历程的书,则非《非线性时间序列:建模、预报及应用》莫属了.

汤家豪

2005 年 8 月于伦敦

译者的话

2002 年夏,我的老师——中科院数学与系统科学研究院安鸿志研究员告诉我,范剑青教授和姚琦伟教授将合作在 Springer-Verlag 出版一本《非线性时间序列分析》专著,他们希望保留中文版权,能够在国内出版翻译本,并希望我能承担翻译工作.我和这两位教授都认识,对他们的学识和为人甚为钦佩.当下就承诺翻译这本专著,使国内学人能够早日拜读.为此,我曾先后两次与范教授在香港中文大学讨论翻译此书的相关事宜,也多次在北京大学光华管理学院与来访的姚琦伟教授讨论译稿的问题.全书的翻译主要由我完成.广州大学数学学院李元教授翻译了第七章,我的学生李东、李木易、刘峰和郭绍俊分别翻译了第八、九、十章和第六章的部分.最后,由我统一整理成书,并请姚琦伟教授校对.时历三年,终于可以可和读者见面了.本书是集体协作的结晶,但文责我负.

国内有关时间序列分析的专著不少,比如安鸿志等的《时间序列分析及其应用》(科学出版社),也有翻译的外国专著,为什么我们还要花这么长的时间来翻译这本书呢?众所周知,时间序列分析是一门应用性很强的学科.通俗一点地讲,凡是研究依时间顺序而获得的观测数据的规律都离不开时间序列分析这一统计工具.实际上,时间序列分析的发展到现在大约经历了 100 多年.1927 年,英国的 U. Yule 将自回归模型用于太阳黑子数据分析和俄国的 E. Slutsky 创建滑动平均模型标志着时间序列分析作为一门学科诞生了.之后,大约到 20 世纪 80 年代中期,人们对时间序列分析的研究和应用主要还是围绕着线性时间序列模型来展开的.1970 年,Box 和 Jenkins 的专著《Time Series Analysis, Forecasting and Control》的出版标志着线性 ARIMA 模型的建模方法的成熟.在我国,具有线性结构的时间序列在诸如气象科学、工程技术、海洋科学、经济等领域得到广泛的应用.尽管线性时间序列模型无论在理论上还是在应用上都取得了非常丰富的成果,但对我们所感兴趣的自然现象的表示往往显得乏力,人们期待着更为有效的时间序列模型的诞生.一直到 20 世纪的 70 年代末汤家豪(H.Tang)创建门限自回归模型和 80 年代初 R.F.Engle 创建 RACH 模型起,非线性参数时间序列模型才陆续出现在时间序列分析的舞台上,并得到广泛的应用.汤家豪(1990)的专著对非线性时间序列理论研究的发展起了极大的推动作用.可以说 20 世纪 90 年代是非线性时间序列发展的黄金年代,其方法、理论和应用成果层出不穷.范剑青教授和姚琦伟教授在非线性的时间序列分析方法和理论方面颇有建树,特别是范剑青教授是以在非参数方法方面的重要贡献而享誉国际统计学界的.因此,他们两位合作的这部关于非

线性时间序列的专著可以说是非线性时间序列研究成果的集中表现,是一本值得推荐的非常优秀的专著.

在我们的翻译过程中得到了很多人的热情帮助.在此,我们特别感谢原著的作者范剑青教授和姚琦伟教授,以及安鸿志研究员自始至终关心和支持本书的翻译.我们还要特别地感谢高等教育出版社的编辑们,他们为本译著的出版付出了许多辛勤的劳动.他们对我因工作一而再、再而三地延迟翻译稿交稿时间给予的容忍、等待,使我非常感动,也常常自责.无奈杂事缠身,又无分身之术,使得本应早日问世的优秀学术译著拖延了三年.不过,书最终还是与学人见面了.我本人对译稿的质量还算满意,希望读者也能够满意,更希望读者通过阅读这本专著在自己的专业方面有所裨益.

陈敏

2005年11月30日于北京

前言

在近二十年来取得过重要进展的统计学的诸多领域中,非线性时间序列和非参数时间序列似乎是沿着两个不同的轨迹发展起来的。尽管在时间序列分析中运用非参数的技术可以追溯到上个世纪40年代,但是人们对非参数方法对时间序列的应用仍然持有不同程度的疑虑。作为现代非参数方法的积极的探索者,我们觉得有责任来将迄今为止该领域里的一些主要研究成果及方法汇集在一起。本书的目的不仅在于推介一些已被证明对分析实际数据行之有效的非参数方法,更重要的是希望藉此来催生更多的对于非参数时间序列的理论和方法的关注和探索。

信息技术以及计算机工业的发展无疑给统计学家带来更多的机遇和挑战。现代计算机技术使得数据的收集爆炸式地增长,比如超市的销售记录、股票市场的交易记录、microarray数据等等。互联网的发展使得我们对大型数据仓库的处理变得非常容易。尽管传统的基于对系统整体架构进行数学假设的参数模型仍然是非常有用的,但是大型数据的获取显然可以使得我们进一步探索系统更加精细的结构,从而对真实世界给出更加合理和接近的解释。原则上讲,除了参数的模式,其它可用的技术应该很多的。非参数方法显然对此提供了一种有效的探索工具,同时它也可以帮助我们验证已有的参数模型的合理性并促成一些新的参数模型。

本书可以看作是对当前时间序列数据分析技术的一次集中展现。我们的最初目标是想对每一个主要的方法向读者提供一个比较完整的介绍,因此在写作时我们尽量协调对方法、理论以及数值结果等部分的描述。对于一个具体的时间序列模型,我们力图从定义、概率性质(如果可能的话)、统计推断方法以及应用于实际数据的数值结果等方面逐步展开,与此同时,我们也会向读者推荐一些我们自己比较喜欢的相关的计算机程序。在实际例子的选择方面,我们尽量在众多的学科中寻求一种平衡,尽管我们自己的兴趣更多是来自数量金融、风险管理和生物学。我们鼓励读者尝试运用这些技术来分析自己遇到的数据。

本书不仅面向那些初次涉及该领域的人,同时也希望对那些已经熟悉该领域的专家有参考价值。由于书中主要讲述方法以及引用了大量的实际数据,我们设想这对于那些涉及时间序列应用的非专业人士也会具有参考作用。我们支持在实际应用中非参数的方法应该和参数的方法携手并进的观点。具体一点说,参数的方法对潜在的系统提供了一种简洁有效的描述,这是它相比非参数方法的优势所在。为此,我们在书中对线性和非线性的参数模型也给出了适当篇幅的介绍,这也会给初学者尽快了解一些经典的技术提供一个支持。我们寄希望于该书能够体现参数和非

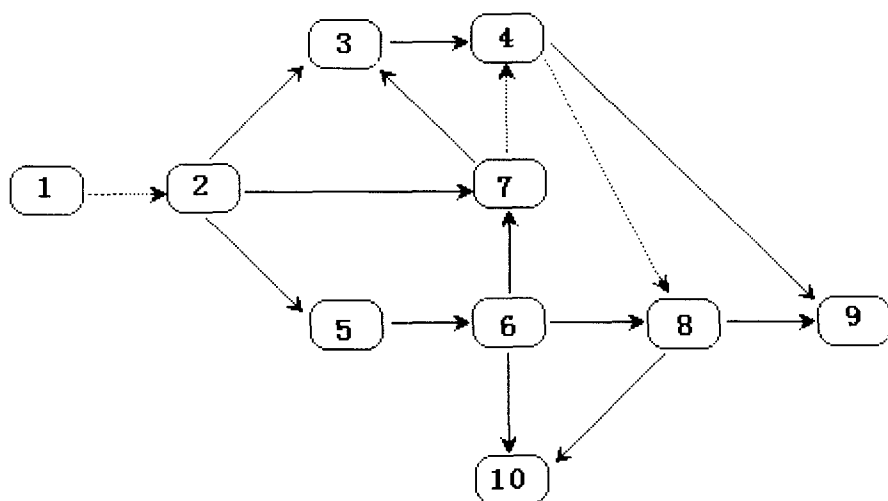
参数方法的结合在时间序列分析方面的优势. 为了适合更广泛的读者群, 阅读本书只需基本但扎实的概率论和数理统计学的知识背景. 从应用的角度来了解非参数和参数方法的作用不需要涉及到理论的技术细节中去, 当然, 更加深入的高等数学知识会对理解某些非线性时间序列模型的性质有所帮助. 对于那些无法避免的技术性较强的内容, 我们在相应的章节号后加了“*”予以标示. 大多数的技术环节都通常被安排在每一章的最后一节作为“补充”, 当然主要的观点还是在正文中给出来.

下面是对本书各章的概括: 第一章引言给出了全书内容的一个轮廓. 第二章介绍了时间序列过程的基本概率性质, 包括严平稳性以及马氏链的遍历性(2.1节)以及时间序列的混合性(2.6节)等, 同时, 我们还针对满足 α 混合性过程的基于核函数的非参数回归估计给出了一般性的中心极限定理. 第三章介绍了线性的ARMA模型, 包括基于高斯分布的极大似然估计(3.3节)、模型选择的准则(3.4节)以及基于ARIMA模型的线性预测(3.7节). 在第四章我们引入了三种主要的参数非线性模型. 首先介绍了门限自阈自回归模型, 侧重于Tong(1990)后该方面的主要结果. 其次, 考虑到在以往的统计学著作中涉及较少, 我们对ARCH和GARCH模型给出了比较详细的介绍. 除此之外, 我们还给出了双线性模型的一个简单的描述. 第五章给出了非参数核密度估计的基本方法. 通常它被认为是最基本的非参数技术之一. 在该章的第三节(5.3节)我们分析了非参数方法中的“局部化”和时间序列中的“白噪化”技术之间的联系. 非参数技术在估计时间序列的趋势和建立单变量自回归函数等方面应用的例子在第六章中给出. 第五章和6.3节是本书后面内容的一个基础. 第七章引入了谱密度函数的估计方法以及一个关于白噪声的非参数检验方法. 在第八章中我们分析了一些具体的非参数自回归时间序列模型, 具体来讲包括泛函系数自回归模型(FAR)(8.3节)、相加性自回归模型以及非参数估计条件方差或者波动率的技术. 第九章介绍了非参数模型相对于参数模型的一些检验方法, 尤其是具有广泛适用性的广义似然比检验. 第十章则是关于非线性预测的内容, 强调了非线性预测与线性预测的区别, 同时也引入了非参数方法如何应用于预测条件分布函数以及建立最小预测区间等.

各章节之间的独立性如下图所示. 实线表示箭头对应的一章需要相应前面一章的知识, 而虚线则表示这种联系较弱. 对于较长的章, 各节的关联性通常比较弱, 比如第四章和第八章(例外只是(8.4节)依赖(8.3节), (8.7节)需要其它各节的内容), 基本可以分开各节阅读. 第五章和(6.3节)主要是对非参数方法的基础性的介绍, 熟悉这部分内容的读者可以略过这部分直接进入第八、九章. 对于那些希望对本书的内容有一个总体认识的人, 我们推荐他们阅读第一章、(2.1节)、(2.2节)、第三章、(4.1节)、(4.2节)、第五章、(6.3节)、(8.3节)、(8.7节)、(9.1节)、(9.2节)、(9.4节)、(9.5节)、(10.1节). 以这部分内容为主题可以组织一个一学期的研究生非线性时间序列课程.

尽管本书力图包括的内容广泛, 但是显然未能涉及该领域的全部. 关于非参数方法我们主要围绕基于局部多项式的光滑方法, 而非参数的假设检验则基本以广义似然比检验为主. 事实上, 本书对涉及的许多方法也没有正式地展开数学的探讨. 对状态空间模型我们只是在讨论双线性模型和随机波动率模型时简单地提及, 对多元时间序列模型则基本没有涉及到. Tong(1990)第三章中列出的大部分参数非线性模型都未能在本书中作进一步探讨. 其原因之一是与之相应的理论及方法尚未完善地建立起来. 有些模型的应用潜力有待进一步探索.

我们尽了很大力量来组织参考文献, 同时在每章的后面面对涉及的文献专门准备了文献注记,



以帮助读者更好地获取相关方面的原始文献。尽管文献罗列很多，但也仅仅是体现了我们自己的兴趣。很多重要的文章没有被收录进来，部分固然是由于内容和本书的关联性较小，但也可能纯粹是我们的疏漏造成的，我们都向有关作者表示歉意。尽管我们两人共同负责本书的内容，但是具体的分工是范剑青撰写了第1以及第5~9章，姚琦伟撰写了第2~4以及第10章。

范剑青的工作部分得到了美国国家科学基金和国家健康研究所以及香港特别行政区研究基金理事会的资助。姚琦伟的工作部分得到了英国工程与物理研究理事会以及生物工程和生命科学研究理事会的资助。本书写作期间，范剑青任职于加利福尼亚大学洛杉矶分校、北卡罗来那大学Chapel Hill分校以及香港中文大学；姚琦伟则任职于英国肯特大学以及伦敦经济与政治科学学院。我们感谢各自同事们的大力支持。同时，我们也想借此机会感谢我们的诸多合作者们，因为他们友善的和富于启发性的合作研究成果体现在本书中。

范剑青、姚琦伟

2004年3月

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 时间序列的例子	1
1.2 时间序列分析的目的	6
1.3 线性时间序列模型	7
1.3.1 白噪声过程	7
1.3.2 AR 模型	8
1.3.3 MA 模型	8
1.3.4 ARMA 模型	9
1.3.5 ARIMA 模型	10
1.4 什么是非线性时间序列?	11
1.5 非线性时间序列模型	12
1.5.1 一个简单例子	12
1.5.2 ARCH 模型	12
1.5.3 门限模型	12
1.5.4 非参数自回归模型	14
1.6 从线性模型到非线性模型	15
1.6.1 局部线性建模	15
1.6.2 全局样条逼近	17
1.6.3 拟合优度检验	18
1.7 进一步的阅读材料	19
1.8 软件实现	20
第二章 时间序列的特征	21
2.1 平稳性	21
2.1.1 定义	21
2.1.2 平稳 ARMA 过程	22

2.1.3	平稳高斯过程	24
2.1.4	遍历非线性模型*	25
2.1.5	平稳 ARCH 过程	27
2.2	自相关	28
2.2.1	自相关和自协方差	29
2.2.2	ACVF 和 ACF 的估计	31
2.2.3	偏自相关	32
2.2.4	ACF 图, PACF 图和例子	33
2.3	谱分布	36
2.3.1	周期过程	37
2.3.2	谱密度	38
2.3.3	线性滤波	42
2.4	周期图	46
2.4.1	离散傅里叶变换	46
2.4.2	周期图	47
2.5	长记忆过程*	49
2.5.1	分式求和噪声	49
2.5.2	分式求和 ARMA 过程	51
2.6	混合性*	52
2.6.1	混合条件	52
2.6.2	不等式	54
2.6.3	α 混合过程的极限定理	56
2.6.4	非参数回归的中心极限定理	58
2.7	补充	60
2.7.1	定理 2.5(i) 的证明	60
2.7.2	命题 2.3(i) 的证明	60
2.7.3	定理 2.9 的证明	61
2.7.4	定理 2.10 的证明	61
2.7.5	定理 2.13 的证明	62
2.7.6	定理 2.14 的证明	63
2.7.7	定理 2.22 的证明	64
2.8	附加文献注释	67
第三章	ARMA 建模和预报	68
3.1	模型和背景	68
3.2	最优线性预报——预白化	69
3.3	极大似然估计	71
3.3.1	估计量	71

3.3.2	渐近性质	74
3.3.3	置信区间	75
3.4	模型定阶	76
3.4.1	Akaike 信息准则	76
3.4.2	AR 建模的 FPE 准则	78
3.4.3	贝叶斯信息准则	79
3.4.4	模型识别	79
3.5	诊断检验	84
3.5.1	标准化残差	84
3.5.2	可视诊断	84
3.5.3	白化的检验	85
3.6	一个实际例子——德国鸡蛋价格的分析	86
3.7	线性预报	89
3.7.1	最小二乘预报	90
3.7.2	对 AR 过程的预报	91
3.7.3	AR 过程的均方预报误差	91
3.7.4	ARMA 过程的预报	92
第四章	参数非线性时间序列模型	95
4.1	门限模型	95
4.1.1	门限自回归模型	95
4.1.2	估计和模型识别	99
4.1.3	线性性检验	101
4.1.4	对加拿大山猫数据案例的研究	103
4.2	ARCH 和 GARCH 模型	108
4.2.1	ARCH 过程的基本性质	108
4.2.2	GARCH 过程的基本性质	111
4.2.3	估计	120
4.2.4	条件 MLE* 的渐近性质	123
4.2.5	自助置信区间	125
4.2.6	检验 ARCH 效应	126
4.2.7	金融数据的 ARCH 建模	128
4.2.8	数值例子: 建模 S&P500 指数的回报率	130
4.2.9	随机波动模型	136
4.3	双线性模型	138
4.3.1	一个简单例子	138
4.3.2	马尔可夫表示	140
4.3.3	概率性质*	141

4.3.4 极大似然估计	144
4.3.5 双谱	144
4.4 文献注释	145
第五章 非参数密度估计	147
5.1 引论	147
5.2 核密度估计	147
5.3 加窗和白化	150
5.4 带宽选择	151
5.5 边界修正	153
5.6 渐近结果*	155
5.7 补充——定理 5.3 的证明	161
5.8 文献注释	162
第六章 时间序列的平滑	164
6.1 引论	164
6.2 时域平滑	164
6.2.1 趋势和季节分量	164
6.2.2 滑动平均	165
6.2.3 核平滑	166
6.2.4 核平滑的变种	168
6.2.5 滤波	168
6.2.6 局部线性平滑	169
6.2.7 其他的平滑方法	170
6.2.8 季节分量修正	171
6.2.9 理论概况*	171
6.3 状态域平滑	174
6.3.1 非参数自回归	174
6.3.2 局部多项式拟合	176
6.3.3 局部多项式估计的性质	178
6.3.4 标准误差和估计偏度	184
6.3.5 带宽选择	185
6.4 样条方法	188
6.4.1 多项式样条	188
6.4.2 非二次罚样条	190
6.4.3 光滑样条	191
6.5 条件密度估计	193
6.5.1 估计方法	193
6.5.2 渐近属性*	194

6.6 补充	196
6.6.1 定理 6.1 的证明	196
6.6.2 定理 6.3 的条件和证明	198
6.6.3 引理 6.1 的证明	203
6.6.4 定理 6.5 的证明	205
6.6.5 定理 6.6 和定理 6.7 的证明	206
6.7 文献注释	207
第七章 谱密度估计及其应用	210
7.1 引论	210
7.2 锥形化、核估计及预白化	211
7.2.1 锥形化	211
7.2.2 周期图平滑	215
7.2.3 预白化和减小偏度	215
7.3 谱密度的自动估计	217
7.3.1 最小二乘估计和带宽选择	217
7.3.2 局部极大似然估计	219
7.3.3 置信区间	222
7.4 白噪声检验	226
7.4.1 Fisher 检验	226
7.4.2 广义似然比检验	227
7.4.3 χ^2 -检验适应 Neyman 检验	229
7.4.4 基于检验的其他平滑	230
7.4.5 实例	231
7.5 补充	232
7.5.1 定理 7.1 – 7.3 的条件	232
7.5.2 引理	233
7.5.3 定理 7.1 的证明	234
7.5.4 定理 7.2 的证明	234
7.5.5 定理 7.3 的证明	235
7.6 文献注释	238
第八章 非参数模型	240
8.1 引言	240
8.2 多元局部多项式回归	241
8.2.1 多元核函数	241
8.2.2 多元局部线性回归	242
8.2.3 多元局部二次回归	243
8.3 函数系数自回归模型	243

8.3.1	模型	243
8.3.2	与随机回归的关系	244
8.3.3	遍历性 *	244
8.3.4	系数函数的估计	246
8.3.5	带宽和模型依赖变量的选择	247
8.3.6	预测	248
8.3.7	例子	248
8.3.8	抽样性质*	253
8.4	自适应函数系数自回归模型	256
8.4.1	模型	256
8.4.2	存在性和可辨识性	258
8.4.3	Profile 最小二乘估计	259
8.4.4	带宽选择	261
8.4.5	变量选择	261
8.4.6	具体实现	262
8.4.7	例子	263
8.4.8	推广	268
8.5	可加模型	268
8.5.1	模型	268
8.5.2	向后拟合算法	269
8.5.3	投影和平均表面估计	270
8.5.4	系数函数的可估性	272
8.5.5	带宽选择	272
8.5.6	例子	273
8.6	其他非参数模型	279
8.6.1	两项交互作用模型	280
8.6.2	部分线性模型	280
8.6.3	单指数模型	281
8.6.4	多指数模型	282
8.6.5	环境数据的分析	284
8.7	条件方差建模	287
8.7.1	估计条件方差的方法	287
8.7.2	一元情形	289
8.7.3	函数系数模型	292
8.7.4	可加模型	293
8.7.5	乘积模型	295
8.7.6	其他非参数模型	295
8.8	补充	295