

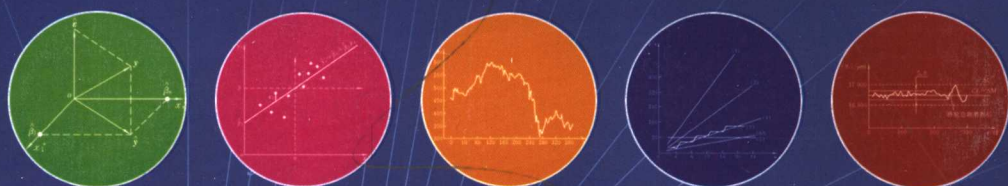
时间序列分析的工程应用

杨叔子 吴雅 轩建平 等 著 (第二版)

·上册·

Time Series Analysis in Engineering Application

(本书荣获首届国家图书奖、第六届中国图书奖)



华中科技大学出版社

时间序列分析的工程应用

杨叔子 吴 雅 轩建平 等 著 (第二版)

·上册·

0211.61/21

:1

2007

*T*ime Series Analysis in Engineering Application

华中科技大学出版社

· 中国 武汉 ·

图书在版编目(CIP)数据

时间序列分析的工程应用(上册)(第二版)/杨叔子 吴 雅 轩建平 等著.
—武汉:华中科技大学出版社,2007年6月
ISBN 978-7-5609-3898-1

I. 时… II. ①杨… ②吴… ③轩… III. 时间序列分析-应用-研究
IV. O211.61

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第159095号

时间序列分析的工程应用(上册)
(第二版)

杨叔子 吴 雅 轩建平 等著

责任编辑:黎秋萍 刘丽昆
责任校对:朱 霞

封面设计:刘 卉
责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心
印 刷:武汉中远印务有限公司

开本:787mm×960mm 1/16

印张:21.75 插页:2

字数:378 000

版次:2007年6月第2版

印次:2007年6月第5次印刷

定价:39.80元

ISBN 978-7-5609-3898-1/O·412

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

再版前言

明天,2007年3月21日,春分之日。俗语云:“春分秋分,昼夜平分。”今天,白天黑夜,彼此同长,非常公平。

《时间序列分析的工程应用》出版17年了。17年,读者对此书的评论总是好的,历史是公平的,我们十分感谢。17年,读者多次询问,此书何时再版,我们也多次拟修改、再版,由于种种原因,未能遂愿。今天,修改了,再版了,终于圆了这个梦。

17年,时间的跨度经历了三个“五年计划”,等于两个抗日战争时间之长。我国形势确是又一个“虎踞龙盘今胜者,天翻地覆慨而慷”;东风浩荡,春潮澎湃,气象万千,史所未有,毋庸多说。与此同时,世界上,科学技术进步,日新月异,突飞猛进,众所周知;时间序列分析,深入发展,广泛应用,行家均晓。为了能与与时俱进,吸收有关新的成就,适应新的形势,此书原版,不能不改。

17年,我与有关同志所共同指导的博士研究生,取得学位者,已达百人以上,其中有不少博士学位论文在时间序列分析及其工程应用方面以不同形式做了一些有价值的工作,并得到有关方面的支持,例如,国家“九五”攀登项目B计划“大型机电设备若干动力学关键技术的研究”(编号:PD9521908)、国家重点基础研究发展规划项目(973项目)“数字化制造基础研究”(编号:2005CB724101)项目等的资助,为了总结这17年来我们所取得的有关成果,并参考兄弟学校在时间序列分析及其工程应用方面所获得的有关进展,以能为这方面的研究与应用尽到我们应尽的一份职责,此书原版,不得不改。

17年,此书原版作者多已分手,不可能再复聚集。俯仰之间,多少事已为陈迹。作为此书的第二作者,吴雅教授不幸于20世纪90年代因车祸而去世,作为此书的源头《Time Series and System Analysis with Applications》一书的第一作者吴贤铭教授也不幸于20世纪90年代因医疗事故而长逝。还有不少作者已不在原单位,分散在海内外。为了纪念与感谢我优秀的学生吴雅博士,为了纪念与感谢我在美国访问时美籍华人导师吴贤铭先生,为了感谢分散在各地的合作者,为了我们的友谊与事业永在一起,为了这一切而不得不修改与再版此书,藉此寄托深挚之情与完成未遂之愿。愿亡者安心,生者励志。

此书再版时,主要修改如下:

- (1) 将原版下册“第八章 ARMA 模型的最佳预测与最佳控制”移入再版上册;
- (2) 将原版下册“第十四章门限自回归模型”与“第十五章双线性时序模型”

合并成再版“第十四章非线性时序模型”;

(3) 再版增写“第十五章非高斯时序模型”,并将原版上册第四章“4.6.4 双谱分析”这一节移入此一新的第十五章;

(4) 再版附录只保留了原版“附录1 数据”,删去原版“附录2 IBM 系列机及其兼容机上的实用程序及其使用说明”。拟另出版《时间序列分析的工程应用——MATLAB 实现》一书,以提供相应的实用程序。

此外,对每章均作少量的必要的修改。但是,原版的结构体系、主要内容与特色均予以保留。

应感谢轩建平副教授! 增写、删除、移动、合并的工作都是由他完成的,对每章的修改主要是他完成的。我对整个修改与再版工作做了总体指导,校阅了再版稿,并同轩建平副教授共同定稿。应该说,没有轩建平副教授的工作,此书目前无法再版。还应感谢我校数学系刘次华教授! 在原版的使用与修改中,他提出了许多很好的修改意见。还应感谢华中科技大学出版社的同志们! 此书原版的出版与修改,再版的迅速实现,他们作出很大的支持与帮助。还必须感谢我国国家有关项目的支持! 当然,饮水必须思源,还必须感谢在原版前言中所感谢过的一切同志们! 感谢本书的作者们! 不管他们现在何方,他们的劳动、智慧与贡献已晶凝在再版之中;他们的支持、帮助与友谊永远铭刻在我心中! 在此,我还要再一次感谢并怀念吴贤铭先生与吴雅博士。

春分,正值千里江南“芳林新叶催陈叶”之际,“阳春召我以烟景,大块假我以文章”;此书再版,敬添小草;以增春色;然水平有限,此缺彼欠,在所难免,尚希读者,不吝指教。

谨序。

杨叔子

2007年3月20日瑜园

序言(一)

时序分析是从具有先后顺序的信号中提取有用信息的一门学科。它原是数理统计学的一个分支。由于它的应用范围甚广,遍及自然界、工程界、社会界以及生物医学等众多的领域,它的发展极为迅猛。相对来说,时序分析在机械类工程中的应用开展得较晚,但近二三十年来发展极为迅速,不仅应用现有成果解决了一批重要的实际问题,而且推动了时序分析本身的发展。现在甚至可以这么说:极大多数综合性的工程技术问题的良好解决,都离不开信号分析。

虽然时序分析的理论研究和应用研究在我国起步较晚,但在改革开放的十年中已取得了可喜的成绩,解决了我国现代化建设中的一些实际问题,在服务对象、分析方法等方面形成了我国自己的特色,受到了国外同行甚高的评价。

本书第一作者杨叔子教授是我国时序分析工作者中活跃的一员。本书总结了我国时序分析工作者、特别是作者们的研究成果,是作者结合多年教学经验,精心编写,几经修改补充而成的,它是国内外首次结合机械类工程实际讲授时序分析的专著。

本书的重点在于工程应用。书中有丰富的多方面的应用实例;与应用有关的种种方法讲述得比较详尽透彻;书末还附有一系列实用程序。对于任务紧迫、急需实用的读者,了解了这些程序后就可以解决一定的实际问题。虽然本书在数学推导上只花了少量篇幅,但对基本概念和理论结论的说明是通俗而又相当确切的,这使有些读者需要钻研某些理论问题时,能较顺利地进行转移。

对于希望全面深入掌握时序分析在机械类工程中应用的读者,本书是不可不读的、难得的好书。对于抱有与时序分析有关的其他特殊目的的读者,本书也富有参考价值,值得一读。

衷心祝愿本书将为培养时序分析的高级技术人才,为时序分析应用和研究的进一步发展,起到有力的推动作用。

中国科学院学部委员 胡海昌

1989.12

序言(二)

适用于工程学科研究生的高等技术基础理论课程的教材在我国尚不多见. 杨叔子教授等所著的《时间序列分析的工程应用》是一本跨学科的技术基础理论课教材, 它对于提高工程学科研究生的技术基础理论水平, 培养他们的数据分析能力和科学研究能力将会起重要的作用.

时间序列分析原系数理统计学科的一个分支, 它是研究随机过程的重要数学工具. 在社会科学、自然科学、管理工程和工程技术等许多领域中, 若干实际问题的某种信息的发生和发展具有随机性, 并随时间的推移而具有某种统计规律, 在这些情况下, 不可能或者难以应用一般确定的解析方法描述其过程, 而时间序列分析则是用现代统计学和信息数据处理技术, 窥测其规律, 探明其特征, 是解决实际问题的有力工具. 应用时间序列分析解决这些领域中的若干问题, 在国外已有广泛的实践, 诸如利用时序分析与微型计算机相结合的软件解决机械加工中的误差补偿、产品质量控制、刀具磨损、机械设备的动态性能识别、高速运转机械的工况监视、设备运行或桥梁的故障诊断、市场预测以及地震、气象预报、医疗诊断等方面的问题, 都取得了良好的效果.

为研究工程实际问题所摄取的信息, 往往是特定系统性能的综合表征, 而不仅仅是一种简单的随机过程. 引入系统工程的概念和分析方法, 结合时间序列分析, 对于透彻理解和解决复杂的工程问题, 进行系统分析和系统识别, 有着特殊重要的意义; 而对于多因素影响的系统识别问题, 则引入聚类分析与模式识别技术, 进一步加强了时间序列分析的功能.

解决工程技术问题, 科学实验是不可缺少的关键环节. 在实验研究中探讨复杂的工程问题时, 若采用传统方法, 往往需要使用昂贵的精密仪器设备, 而应用时序分析方法, 则往往只需正确选择和摄取系统的重要信息数据, 便可进行统计数据处理和分析, 洞察系统的特征和内在规律, 分析和辨识系统, 从而解决工程实际问题; 而且所用的仪器简单、经济、易于实现、便于技术推广. 这也是用时序分析解决工程

实际问题的一个重要方面。

杨叔子教授于1982年底自美国回国后,即着手编纂了《时序分析及其工程应用》讲义,首先在我国高校为工程研究生开设了这门新课,系统地讲授了这门新兴学科。几年来,先后被邀到各地讲学。在他的倡导下,成立了“全国高校机械工程时序分析应用研究会”,定期举行学术讨论会,发行会议论文集,促进了我国时间序列分析在工程应用方面科学研究的大发展,提高了我国工程技术水平和生产水平。

本书结合我国实际,使用工程术语阐明技术理论,在理论与实践上都有所创新和发展,是作者们根据多年教学经验和科研成果,又在教学中不断加以修订、补充和完善,数易其稿后完成的。本书将时间序列分析与控制理论、模式识别等学科相结合,自成体系,焕然一新,独具特色。本书反映了本学科国内外现代最新成果,与国际上的同类教材相比,有过之而无不及,对我国培养工程研究生作出了重要贡献。

在本书出版之际,谨为之作序,并向杨叔子教授及其领导的学科组致以衷心的祝贺。

天津大学教授 彭泽民

1989.11

序言(三)

在近几十年中,时间序列分析以其发展迅速、内容丰富和应用广泛,成为数理统计学科中的一个活跃分支.虽然介绍时间序列分析方法的著作,在国内已有几部相继问世,但是仍不能满足广大读者日益增长的需要.我觉得,其中最突出的问题在于,缺少适用于非数学专业的,介绍时间序列分析方法的教科书,据我所知,在国内的某些领域中,正在准备(或许已经)出版结合具体专业介绍时间序列方法的著作.应当说,这是普及和发展时间序列分析的必然趋势.

众所周知,时间序列分析与工程技术领域的联系之密切,胜过任何其他领域.因此,出版一部关于时间序列分析的工程应用方面的著作,无疑是迫切需要的.《时间序列分析的工程应用》一书,恰是以广泛的工程技术领域中的研究生为读者的,介绍与工程密切相关的时间序列分析方法的教科书.

我粗读此书后,觉得它有两个突出的特点.其一是内容非常丰富.从数学角度看,在时序分析方面的内容之丰富,是国内已出版的同类著作所不及的.比如本书在介绍非线性时序分析、连续与离散模型的转换以及模态参数估计等方面内容时,都包括了较近的和较新的研究成果.从工程应用角度看,该书内容所涉及的幅度也是很宽的.它不仅包括了较成熟的内容,还包括了像“表面形貌识别”这样较新的内容.此内容介绍的是将时间序列方法推广到随机场列的尝试性方法,对读者更具有启发性.该书另一突出特点是,介绍时间序列分析方法重在工程实际应用,而不深涉数学概念化的推理.因此,书中引用了丰富的工程实例,辅以说明方法的实用性,在数学上力求简捷易懂,而又不失其准确性.同时,本书还附有主要方法的程序,以利读者学以致用.

《时间序列分析的工程应用》一书的作者,是在工程界应用时间序列分析方法颇有造诣的学者们.他们当中有的从事这一领域的研究和教学工作多年,有的曾在美国和英国做访问学者和工作数年.他们丰硕的研究成果,见之于国内外有关学术刊物上,这些成果既促进了工程科研和教学工作的发展,又丰富了时间序列分析的文献宝库.我一

直认为,有如这样的学者,在工程中应用时间序列分析有切身体会,又有丰富的教学经验,则是撰写时间序列分析在工程中应用的教科书的最合适的作者.现在,他们终于胜此大任.我相信,《时间序列分析的工程应用》一书,不仅将为培养掌握时间序列分析方法的工程人才发挥重要作用,也将促进我国时间序列分析的普及与发展.

中国科学院应用数学研究所研究员 安鸿志

1989.11

前 言

时间序列是数理统计这一数学学科的一个重要分支.但是,作为现代数据处理方法之一的时序分析还是在 20 世纪 20 年代后期才开始出现的.在 60 年代后期,时序分析在谱分析与谱估计方面取得了突破性进展后,得到了迅速发展.尤其值得注意的是,时序分析同控制理论的结合,赋予了时序分析以更为丰富、更为深入、更为活泼的内容,使之不仅成为有效的现代数据处理方法之一,而且也是系统辨识与系统分析的重要方法之一.这并不奇怪,时序分析的应用范围涉及到自然界、社会界、工程界,涉及众多的学科领域,从一般的市场预测到地震预测,从机械设备的工况监视与故障诊断到语音的分析、识别与合成,从零件加工表面形貌的分析到生物生理、心理状态的研究,其应用范围是如此之广,其应用类型是如此之多,确实是令人注意与深思的.“见贤思齐”,确应如此!可以这么说,时序分析这一方法为人们认识、适应与改造世界提供了又一种有力的数学工具.因此,作为工科研究生,了解与掌握时序分析方法是大有好处的;其实,对于其他学科的研究生,学习一些这方面的知识,也是有所裨益的.

工科,就是将理论付诸工程实践的学科.工科学生学习时序分析,就是为了要解决工程实际的有关问题,即为了工程应用.正是从这一点出发,撰著本书的指导思想是力求立足于工程应用,此即,本书一方面是阐述工程应用;另一方面是为了这一阐述能得到深入,从而又阐述有关的时间序列分析的概念、理论与方法,但这后一阐述不是从数学角度出发,而是从工程角度出发,并直接为工程应用服务的.当然,这只是作者们的一种良好愿望与积极努力,其结果如何,有待于读者检验.

时间序列的理论研究与应用研究在我国起步虽然较晚,但发展极为迅速.在数学界与工程界都有一大批时序工作者,他们所开展的研究工作的广度与深度以及所取得的研究成果是十分有价值的,在一些方面,同国际先进水平相比,也不逊色.或许正因为如此,1987 年 10 月在我国举行的“全国第二届时间序列会议”上,国际著名的时序

分析学科专家、英国伦敦政治科学院 Robinson 教授指出:“中国正在把它(指时序分析)天才地应用到不同领域,以利于人民生活水平的提高,同时也为其他国家的同行提出了新的方法,这将带来深远的国际影响。”也正有鉴于此,在本书中大量采用了我国时间序列工作者、特别是作者们所取得的研究成果。关于这点,读者将本书有关章节的内容同所附的参考文献予以对照,就十分清楚了。

在此,有必要追溯一下本书成书与出版的过程。1982年,我在美国 Wisconsin 大学(Madison)机械系作为访问学者,承该系美籍华人吴贤铭(S. M. Wu)教授的关心与指导,同他合作,在他与 S. M. Pandit 合著的《Time Series and System Analysis with Applications》一书的原讲义的基础上,我执笔写了一本有关“动态数据的系统处理”讲义的初稿。1982年底,我回国后,同王治藩同志一起,对这一初稿进行了重大的修改,形成了一份以本书前八章内容为主的讲稿,并在1983年上半年为机械系研究生开设了“时序分析及其工程应用”课程,还在第二汽车制造厂的有关学习班上作了简扼的讲授。1983年12月,“全国第一届时间序列分析在机械工程中的应用学术讨论会”在我校举行后,我又同王治藩同志一起,充分吸取我国研究成果,对上述讲稿又作了更大的修改。此后,我每年都根据作者们与国内时间序列工作者所取得的成果,并参考国际上时间序列有关研究的进展,对讲稿内容作了增删、修改与体系调整。特别要提出的是,1985年3月,承天津大学彭泽民教授邀请,我赴天津大学为机械系研究生讲授此课,此时,对此讲稿作了重大的修改,当然,这一修改得到了天津大学彭泽民教授与有关教师的关心与鼓励。这是情况的一方面。情况的另一方面是,早在1984年,我校出版社拟出版《时间序列分析及其工程应用》一书,但是,鉴于三点情况,一是我工作忙,无时间将讲稿写成书,二是感到内容还不成熟,缺乏我国特色,三是认为缺乏较多的教学实践,不易确定体系与选取内容,因而我一再将交稿时间推迟。直至1988年初,我仍然感到讲稿还得加工,但又确无时间,出版社催稿甚急,此时,我得到了吴雅同志的大力支持与齐心合作,她以我的讲稿为基础,结合她对时序分析的研究与应用成果,与我一起共同决定了本书的最后体系与内容,日以继夜,奋力拼搏,于1989年3月终于完稿。但是,为了慎重起见,先作为内部教材发行,这样,一方面解决了研究生教材的有无问

题,另一方面可广泛听取专家与研究生的意见.5月印出后,寄给了国内近100位专家,又在研究生教学中试用,广泛征求了意见.同年暑期,在这基础上,吴雅同志又担负了主要的修改与执笔工作,不辞辛劳,充分发挥她的才智,直至秋末,完成了本书的终稿,在黄逸云、马孝江同志支持下,终稿较原内部教材增加了两章.应该说,没有吴雅同志的通力合作,没有她在时序分析方面的深入研究,没有她在成书过程中卓有成效的工作,本书至少是不可能在近几年内出版的.

本书前十章大体上是在我1987年的讲稿的基础上,作了重大修改、扩充与发展后编写而成的.第1章由我执笔;第2、3章由吴雅同志执笔;第4章由丁洪、康宜华同志执笔,吴雅同志参加了其中前两节的执笔工作;第5、6、7、8章由吴雅同志执笔,其中,高平同志提供了6.5的初稿,欧阳普仁同志执笔了6.4中Marple算法的内容;第9章主要由欧阳普仁同志执笔,我与吴雅同志参加了执笔工作;第10章由吴雅同志执笔;第11章由黄逸云同志执笔(这章是终稿中新增加的);第12、13章由吴雅同志执笔;第14章由吴今培同志与吴雅同志共同执笔;第15章由马孝江同志执笔,吴雅同志作了修改与整理(这章是终稿中新增加的);第16章由熊有伦同志执笔.全书由我与吴雅同志共同统稿,并在吴雅同志参加下,由我定稿.

本书每章末附有一定量的习题供读者练习,并由杨克冲同志主编了相应的习题解.第1、4、9、11、15、16章习题与解分别由我、康宜华、欧阳普仁、黄逸云、马孝江、熊有伦同志编写,第2、3、5、6、7、8、10章习题与解由杨克冲同志编写,第12、13、14章习题与解由吴雅同志编写.所有习题与解由杨克冲同志统稿与定稿.

应该说明,本书是集体劳动的成果.作者决不仅限于上述人员,赵星、郑小军、陈志祥、宾鸿赞、杨绪光、梅志坚、杨克冲、刘经燕、王阳生、师汉民、陈小鸥、杜润生、卢文祥诸同志都以不同的方式参加了本书的编著工作.“有心酬岁月,无梦到功名”,我想,这正是作者们紧密合作的基础,是作者们愿在时序分析的工程应用这方面为我国建设贡献一份力量的希望的体现.

在本书成书过程中,得到兄弟院校与研究单位有关专家与同行的鼓励,例如,天津大学彭泽民教授、刘又午教授、陈志荣副教授、吕扬生副教授;西安交通大学屈梁生教授、邱阳副教授、何正嘉副教授;东南

大学黄仁教授、钟秉林副教授;清华大学严普强教授、黄世霖教授、杨友堂副教授;哈尔滨工业大学黄文虎教授、蔡鹤皋教授、邵成勋教授、徐世昌副教授;上海交通大学徐敏教授、薛秉源教授;大连理工大学袁景侠教授、唐秀近教授;中国科技大学李川奇教授;浙江大学路甬祥教授;成都科技大学赵沔教授;北京机械化管理学院朱骥北教授;长沙国防科技大学李均教授;北京农业工程大学陈继武副教授;西南石油学院陈良浩教授;北京科技大学陈克兴教授;天津大学分校李莉副教授;西北轻工业学院徐元昌副教授;江苏工学院金瑞琪教授;湖南大学李传乾教授;东北工学院闻邦椿教授、虞和济教授;厦门大学黄长艺教授;铁科院应怀樵研究员;郑州工学院张瑞林教授,等等,在此向他们表示衷心的感谢!与此同时,中科院应用数学研究所安鸿志、陈兆国研究员;北京理工大学张志方教授;北京大学谢衷洁教授;中山大学邓集贤教授等也对作者们的工作给予了关心、支持与指教,在此向他们表示衷心的感谢!中国科学院学部委员胡海昌教授与天津大学彭泽民教授,中国科学院应用数学研究所安鸿志研究员分别为本书作序,并提出了许多宝贵的意见,在此向他们表示深深的谢意!我校周晖同志和雷敏同志参加了本书的抄写工作,在此向她们表示衷心的感谢!最后,我还要向吴贤铭教授表示衷心的感谢,在某种意义上来说,没有他对我的关心、支持与合作,或许就没有本书的出版,在本书中,读者可清楚地看到他工作的影响。

作者再次表明,由于工作忙,水平有限,目前没有可能对本书的体系与内容再作推敲与修改,衷心希望广大读者对书中的错误与不妥之处提出批评,予以指正,我们将不胜感激。

杨叔子

1990.1.4

主要符号说明

$\{x_t\}$	平稳、零均值时间序列	D	微分算子
$\{a_t\}$	残差序列或白噪声序列	B	后移算子
σ_a^2	$\{a_t\}$ 的方差	∇	后差分算子
λ_i	自回归部分的特征根	φ_i	自回归参数
η_j	滑动平均部分的特征根	θ_j	滑动平均参数
μ	均值函数	δ_k	Kronecker- δ 函数
C_k	k 步自协方差函数	ρ_k	k 步自相关系数
R_k	k 步自相关函数 (对于平稳、零均值时序, C_k 与 R_k 是一致的, 均用 R_k 表示)	G_j	Green 函数
N	样本长度或 $\{x_t\}$ 的数据个数	I_j	逆函数
α_i	连续模型的自回归参数	φ_{kk}	偏自相关函数
β_i	连续模型的滑动平均参数	$H_x(\omega)$	频率特性函数
μ_i	连续模型自回归部分的特征根	$S_{xx}(\omega)$	自谱函数
ν_i	连续模型滑动平均部分的特征根	Δ	采样时间间隔
φ_{ni}	n 阶 AR 模型的第 i 个自回归参数	Δf	系统分辨力
K_i	反射系数	$\{z(t)\}$	连续白噪声
Φ_k	平稳、零均值的随机变量	σ_z^2	$\{z(t)\}$ 的方差
m_k	k 阶矩	$f_{n,t}$	向前滤波误差
c_k	k 阶累积量	$b_{n,t}$	向后滤波误差
Ch_k	k 阶相干函数	M_k	k 阶矩谱
		S_{xxx}	双谱函数

上册目录

再版前言	杨叔子	(I)
序言(一)	胡海昌	(I)
序言(二)	彭泽民	(III)
序言(三)	安鸿志	(V)
前言	杨叔子	(VII)
主要符号说明		(XI)
第 1 章 绪论		(1)
1.1 时间序列·时间序列分析·系统		(1)
1.2 时序分析与系统辨识		(5)
1.3 有关数学知识		(9)
1.4 时序分析的发展		(15)
1.5 本书的内容安排		(20)
习题		(21)
第 2 章 ARMA 模型		(22)
2.1 线性回归模型		(22)
2.2 AR(1)模型		(29)
2.3 ARMA(2,1)模型		(37)
2.4 ARMA(n, m)模型		(41)
习题		(52)
第 3 章 ARMA 模型的时域特性		(54)
3.1 Green 函数		(54)
3.2 逆函数		(68)
3.3 自协方差函数		(75)
3.4 偏自相关函数		(84)
习题		(87)
第 4 章 ARMA 模型的频域特性		(89)
4.1 频率特性函数		(89)
4.2 周期图分析		(92)
4.3 自谱函数		(94)
4.4 ARMA 谱值估计的快速算法		(108)
4.5 ARMA 谱谱峰的计算		(119)
4.6 某些谱及其估计方法		(124)

习题	(134)
第 5 章 离散模型与连续模型的转换	(135)
5.1 连续模型的基本特性	(135)
5.2 一阶模型的转换	(144)
5.3 二阶模型的转换	(148)
5.4 高阶模型的转换	(157)
5.5 用自协方差函数在频域内进行模型转换	(163)
5.6 用 Green 函数进行模型转换	(167)
习题	(173)
第 6 章 ARMA 模型的建模(一)	(175)
6.1 数据的采集、检验与预处理	(175)
6.2 AR 模型参数的直接估计法	(184)
6.3 AR 模型参数的矩阵递推估计法	(192)
6.4 AR 模型参数的参数递推估计法	(201)
6.5 协方差矩阵加窗计算的讨论	(219)
6.6 AR 模型在语音分析与合成中的应用	(222)
习题	(226)
第 7 章 ARMA 模型的建模(二)	(227)
7.1 ARMA 模型参数的时序理论估计法	(228)
7.2 ARMA 模型参数的优化理论估计法	(237)
7.3 ARMA 模型参数的控制理论估计法	(247)
7.4 模型的适用性检验	(254)
7.5 ARMA 建模流程	(265)
7.6 模型参数的实时估计	(270)
习题	(275)
第 8 章 ARMA 模型的最佳预测与最佳控制	(277)
8.1 最佳预测原理	(277)
8.2 最佳预测的计算	(280)
8.3 最佳预测的校正	(286)
8.4 指数加权平滑预测	(288)
8.5 利用 ARMA 模型特性加权的最佳预测计算	(292)
8.6 最佳预测的应用实例	(296)
8.7 最佳控制	(299)
8.8 最佳控制的应用实例	(306)
习题	(311)
附录 数据	(313)
主要参考文献	(318)