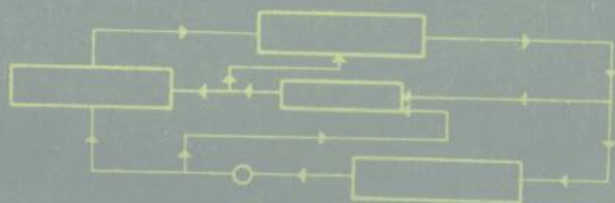


时间序列分析辨识 与适应性滤波

[美] D. 格罗彼 著



科学出版社

57.7191
483

时间序列分析辨识 与适应性滤波

〔美〕D. 格罗彼 著

梁泽环 译

科学出版社

1987

D406/68

内 容 简 介

本书是控制理论、应用数学同生物控制相结合的工程应用参考书。书中应用了时间序列的分析方法,把适应性滤波与适应性控制结合在一起,着重讨论如何通过微型计算机对混在噪声中的有用信息进行实时地、有效地辨识与过滤,最终达到在未知参数和未知噪声的环境中实现适应性控制的目的。书中还对有关辨识算法的实现性、模型阶数的确定、采样间隔、收敛速率、不稳定和不可逆系统的辨识等问题进行了讨论,比较了各种辨识算法的优缺点和应用的可能性,并附有可供直接使用的计算机源程序。附录B介绍了作者从事多年并取得良好成果的“假肢或瘫肢肌电图控制微型计算机系统”的研究工作。全书叙述深入浅出、通俗易懂,读者只要具备起码的概率论知识便能阅读。

本书可作为在通信、制导、控制工程、信号处理、医学诊断、语音识别、生物控制等领域从事工作的研究人员、工程技术人员、教师及学生们的参考书。

Daniel Graupe

TIME SERIES ANALYSIS,

IDENTIFICATION AND ADAPTIVE FILTERING

Robert E. Krieger Publishing Co., Inc., 1984

时间序列分析辨识与适应性滤波

[美] D. 格罗彼 著

梁泽环 译

责任编辑 李淑兰 杨 艳

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1987 年 5 月第一次印刷 印张: 13 7/8

印数: 0001—2,600 字数: 312,000

统一书号: 15031·804

本社书号: 4526·15—8

定价: 3.25 元

译 者 的 话

微型计算机的发展,为时间序列分析、适应性滤波及适应性控制开辟了实时应用的广阔前景。本书的作者正是应用了时域的分析方法,把适应性滤波与适应性控制结合在一起,统一在时间序列分析的基础上,使适应性滤波与适应性控制的理论能够通过微型计算机应用到生物控制的实践中去(参看本书附录 A 和 B),从而丰富了适应性滤波与适应性控制的理论。反过来,由于实践应用的需要,例如快速性、准确性、超小型的紧凑性又给微型计算机提出了更高的要求。所以这是一本系统辨识、现代控制与现代估值的理论书,又是一本与实践紧密结合的工程应用参考书。它既有严密的理论,又有良好的应用背景。作者首先总结了有关随机收敛理论的三十三条定理,然后介绍有实际应用价值的各种辨识算法,并比较它们的优缺点和实用可能性。还介绍了有关适应性滤波器和线性最优控制器的设计问题。其中有关算法的实现性、模型阶数的确定、采样间隔的选择、收敛速率、计算机短字长的敏感误差、不稳定和不可逆系统的辨识等问题,都是工程实际应用中非常重要的、也是为科技工作者所关心的新问题。

作者 D. 格罗彼是美国伊利诺伊理工学院著名教授,是国际自动控制学会和美国科学院成员。目前,他领导着“语音识别”和“假肢控制及截瘫病人计算机行走系统”课题的研究工作。在本书附录 B 中介绍了有关后一课题的研究工作。其中“截瘫病人肌电图信号控制计算机行走系统”是世界上开创性的研究工作,并取得了良好的成果。作者曾于 1985 年 7 月应

邀来中国讲学,介绍有关这方面的研究成果。

本书是作者写的前一本书《系统辨识》的继续与发展。在1985年6月美国出版的全国性书评中给予本书较高的评价。尽管这是一本控制理论、应用数学方面的研究生用书,但内容深入浅出,读者只需要具备起码的概率论知识便能阅读。对于工业、医学、地质学、统计学、经济学方面的广大实践家,这是一本很好的参考书。

本书的翻译工作最初是根据原书的清样稿进行的,1984年9月正式出版后又重新对译稿作了校订。整个翻译工作是在D. 格罗彼教授直接关心下进行的,全部译稿(除附录外)由疏松桂先生负责校定。清华大学的杨福生老师对译稿提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。由于时间仓促及本人水平有限,难免存在缺点与错误,敬请读者批评指正。

译者

1985年冬于北京

中文版序言

对于本书能够译成中文并在中国出版我感到非常荣幸。书中讨论了有关时间序列、辨识技术、适应性滤波和适应性控制等理论及其应用问题。其目的是为从事信号处理和控制系统实际工作的科研人员、工程技术人员、教师及学生提供参考书或教科书。本书的理论可应用于制导与导航、通信、医学诊断、语音辨识、生物医学控制，甚至经济学、地质学、地球物理学等领域。

本书对适应性滤波器进行了严格的分析，从而实现了在最少信号和(或)噪声参数先验知识的情况下，对混在噪声或无关信号中的有用信号进行滤波与估值。书中介绍的适应性滤波理论的内容包括如何恢复混在噪声中的有用信息信号，然后，在此基础上如何实现未知系统的自适应控制（当然，在实现控制以前，首先要对这些信号进行辨识与过滤）。此外，书中还讨论了自适应决策与自适应诊断的有关理论问题。所有这些问题的分析都建立在时间序列分析和辨识理论的基础上，因此，有关时间序列分析和辨识理论的内容将贯穿全书。此外，书中将主要讨论线性离散型的时间序列，因为在实际应用中，这种时间序列是最便于使用计算机进行实时处理的。

从工程实际的要求出发，书中还用了很大的篇幅介绍关于计算时间、收敛性和收敛速率等问题。在附录中给出了详细的计算机源程序及计算结果，从而使读者在实践中进一步理解书中的理论。这些源程序与结果是从计算机输出的原形件照相复印的，因而可以避免抄写或打印的错误。同时也可

使读者看到实际的计算过程。

本书的内容原来是作为研究生两个学期课程的讲授内容,包括第一—十二章。当然也可以在第一学期中讲授《系统辨识》(我写的另一本书)中的第一—八章,第二学期讲授《适应性滤波》(本书)中的第一,二,四,九—十二章,其中第二和第四章是作为基础的内容。在本书的附录中还介绍了有关的矩阵代数学和我们的一个研究课题。

在这里,我还要衷心地感谢中国科学院的梁泽环先生在本书的翻译中所作的大量工作。在附录B所介绍的研究工作中我们之间进行了很好的合作,这个合作所讨论的内容已经超出了本书的水平。感谢他在翻译过程中改正了原书中不少的错误。

我衷心地希望本书能对工作在时间序列分析、系统辨识、适应性滤波和适应性控制领域中的广大中国读者有所帮助。

最后,我深知本书还会存在缺点与错误,为此,作为本书的唯一作者,我诚恳地向读者表示歉意。

D. 格罗彼

1984年秋于美国

序 言

由于微型计算机技术的出现,使得严格的时间序列分析有可能从实验室的理论研究走到工业、通信和医学等领域的实践中去,在适应性控制、适应性滤波以及适应性决策理论方面获得了广泛的应用。

本书就是介绍在信号处理中采用时域方法的时间序列分析问题。在这些分析中,我们着重介绍当缺乏信号参数的先验知识而在测量中又存在噪声时的情形,所采用的计算机是在实际应用中最切实可行的短字长的微型计算机。在讨论中,我们把线性时间序列分析、适应性滤波、适应性控制、适应性决策和特征判别或诊断理论等问题结合到统一的概念上。在这些分析和应用中,有关收敛性、收敛速率、有偏和对计算机字长的敏感性等问题都是些很重要的问题,我们将给予详细的严格讨论。此外,为了复习随机收敛性的理论,我们介绍三十三个基本的收敛性定理。我们将讨论有关信息信号,例如语音信号的噪声适应性滤波理论的实时计算的应用问题。同时,我们还将附录 B 中详细介绍我们的一个研究课题,它是通过肌电图信号特征的分析来控制截肢者的假肢或截瘫病人的电刺激瘫肢的时间序列分析微型计算机的应用问题。

本书的内容是作者在芝加哥市伊利诺伊理工学院给研究生讲授一学期的课程内容。课程的对象是在工业、研究室、医院或在(适应性)控制、通信、医学、地质学、计量经济学等领域从事信号处理工作的研究人员、工程师、医生、应用数学工作者和研究生。因此,我们假定读者在概率论、统计学、矩阵理

论和线性控制理论等方面具有一定的基础知识。在本书附录中，我们也提供了关于这些基础知识的背景材料。作者希望本书能对工业、医学、研究室和大学的广大读者有所帮助。

在本书的附录中，我们还将介绍十三个有代表性的计算机源程序及有关的计算结果，这些程序贯穿了全书的主要内容。读者可根据这些程序重新在计算机上进行运算，从而加深对本书内容的理解。为避免抄写上的错误，这些源程序都是直接照相复印的，它们可以被大多数的计算机直接接受。

本书的内容，作者已经在伊利诺伊理工学院为研究生讲授过好几遍了，它最早源于作者在科罗拉多州立大学和加利福尼亚州伯克利大学任教时的讲稿。

我应该感谢参加听我这门课的许多学生。他们参加这门课的讨论、提问题，从而有助于本书内容的完善。特别是在伊利诺伊理工学院 1981 年至 1983 年参加我的这门 EE539 课程的学生，他们对本书附录中的计算机程序的编写、运算及计算结果有直接的帮助。同时，本书也得到校内校外许多有名的学者、朋友、患者、亲属的支持和帮助，在此我表示衷心的感谢。

D. 格罗彼

目 录

第一章	目的与概述	1
1.1	引言	1
1.2	目的与范围	3
1.3	为什么要采用时域分析法呢?	6
1.4	概述	9
第二章	随机过程的基本概念与定义	16
2.1	引言	16
2.2	概率论中的基本定义	16
2.3	一些常用的分布	25
2.4	时间序列分析中的一些重要概念	27
2.5	高斯过程的某些基本特性	43
2.6	在连续型随机过程理论中存在的困难	44
2.7	维纳过程	45
2.8	随机积分问题	47
第三章	基本的不等式与收敛性定理	49
3.1	随机过程理论中基本的不等式	49
3.2	基本的随机收敛性定理	51
第四章	线性模型的作用	65
4.1	使用白色噪声驱动线性模型	65
4.2	更新序列和伪更新序列	71
4.3	非平稳情况的 ARMA 模型	73
第五章	时间序列和系统的最小二乘参数辨识	75
5.1	概述	75
5.2	最小二乘辨识	77
5.3	序列最小二乘辨识	83

5.4	格型最小二乘算法和序列格型最小二乘算法	87
5.5	时变过程中序列辨识的遗忘因子	102
5.6	成批型与递推型处理的比较	104
第六章	最小二乘辨识器的收敛性	107
6.1	信号模型稳定情况下的收敛性证明	107
6.2	信号模型不稳定情况下的收敛性证明	115
6.3	最小二乘辨识器的收敛速率及其极大似然特性	126
6.4	关于辨识器对舍入误差的鲁棒性和结论	129
第七章	递推梯度辨识方法	131
7.1	引言	131
7.2	随机近似算法	132
7.3	随机近似辨识器的收敛性	134
7.4	一个快速的序列格型梯度算法	143
7.5	梯度格型辨识器与最小二乘辨识器之比较	145
第八章	下列模型的辨识及阶数的确定: MA/ARMA, 不可逆, 反馈和部分确定性结构	148
8.1	由纯 AR 模型参数推导 ARMA 模型的参数与阶数	148
8.2	不可逆系统的辨识	163
8.3	在单位圆上有零点的 ARMA 模型	168
8.4	纯 MA 模型的直接辨识	173
8.5	混合 ARMA 模型的直接辨识	176
8.6	纯 AR 模型与纯 MA 模型或直接辨识的 ARMA 模型相 比较, 纯 AR 模型的优点	177
8.7	输入-输出-噪声模型的辨识	181
8.8	稳定的和不稳定的闭环结构辨识	183
8.9	系统建模中采样间隔的选择	188
第九章	适应性决策理论	192
9.1	问题的提出	192
9.2	定义	193
9.3	贝叶斯决策定律: 二元决策	195

9.4	自适应决策算法	198
9.5	自适应决策: 多类型情况	202
9.6	在检测及模式识别问题中分类算法的作用	202
第十章	噪声的最优线性滤波	204
10.1	问题的提出	204
10.2	维纳滤波器	206
10.3	卡尔曼滤波器	209
10.4	对于有色测量噪声的扩展的卡尔曼滤波器	214
10.5	维纳滤波器和卡尔曼滤波器的误差特性与比较	217
第十一章	适应性滤波	227
11.1	具有部分先验知识的适应性滤波	227
11.2	当信号参数和噪声参数都是未知时的适应性滤波	231
第十二章	适应性控制	246
12.1	一般问题的提出及必然性的等效问题	246
12.2	在分别设计辨识器、滤波器、控制器基础上的适应性控制	247
12.3	博克斯-詹金斯型适应性控制的设计	260
12.4	预测适应性控制	263
附录 A	计算机源程序及计算结果	280
程序 P-5.1	序列最小二乘算法: 对序列最小二乘辨识误差的影响	280
程序 P-5.2	评价初始参数估值对序列最小二乘辨识误差的影响	286
程序 P-5.3	不稳定时间序列模型的序列最小二乘辨识	290
程序 P-5.4	在不稳定的时间序列模型中 P_0 的选择对序列最小二乘辨识的影响	293
程序 P-5.5	序列最小二乘辨识: 当过程的极点在 B 平面单位圆上的情形	297
程序 P-5.6	序列最小二乘辨识: 当极点在单位圆上和和单位圆内/外时的情形	307

程序 P-5.7	序列最小二乘格型辨识算法——稳定系统的情形	317
程序 P-5.8	序列最小二乘格型辨识算法——不稳定系统的情形	328
程序 P-7.1	梯度格型辨识——稳定系统的情形	330
程序 P-7.2	梯度格型辨识——不稳定系统的情形	339
程序 P-8.1	序列最小二乘辨识——不可逆时间序列模型的情形	340
程序 P-9.1	自适应分类	343
程序 P-11.1	自适应滤波器	350
附录 B	在时间序列辨识与单场肌电图信号判别基础上的多功能假肢和矫正术控制	356
B.1	前言	356
B.2	背景	358
B.3	多功能控制器	360
B.4	试验步骤与结果	362
B.5	结论	369
附录 C	一些基本的矩阵关系	372
C.1	矩阵的范数	372
C.2	本征值与谱半径	374
C.3	行列式与迹函数	374
C.4	多项式与非降阶矩阵	375
C.5	正定/负定(半定)的定义	376
C.6	正交与对称矩阵	377
C.7	逆矩阵	377
C.8	对角化	379
C.9	矩阵的伴随形式	380
C.10	矩阵的微分	382
C.11	其他有关的矩阵特性	384
附录 D	传递函数/状态空间的变换	385

D.1 从状态空间到传递函数的变换	385
D.2 从传递函数到状态空间的变换	386
附录E 序列收敛性的一些定理	389
习题	397
参考文献	406
汉英术语对照	415
数学符号	428

第一章 目的与概述

1.1 引言

在本书中，我们主要分析、讨论离散型的时间序列(顾名思义，它是一些以时间为过程所观察与测量得到的离散集)，它们的参数或特性是先验未知的。在工程、经济和医学的信号处理、预测与控制问题中，缺乏这种先验知识是一种非常现实的情况。我们将集中分析、讨论随机(概率的)型时间序列而不是确定型的时间序列，因为随机的问题是真实世界中有趣的问题之一，这就是本书问题提出的原因所在。

大家所熟悉的随机时间序列的例子很多，从地震的数据到股票价格随时间的起伏变化。其他例子如出现在示波器上的肌电图信号(EMG)、脑电图信号，甚至还有作为时间函数显示在示波器上的语音信号。后者是用传感器(话筒)的输出电压来表示的。

时间序列的随机形式并不一定意味着时间序列本来就有内在的随机性质。人们会认为语音本来是确定的。我们似乎知道，而且能确定自己说的是哪一些字，然而，即使忽略伴随着语音的环境噪声，从示波器上看到的语音信号，其随机性质也是明显的。当语音的信号，特别是不发声的音符(“sh”，“f”，“s”等在较高的频率范围上，例如在 1500 赫兹以上)显示在示波器上时，其随机性质更明显。由于这个原因，即使两个相同字的发音，当显示在常规示波器上时，其波形也不可能是完全相同的。又如，当人们购买 IBM 公司的股票时，通常会对它

的售价问题考虑得很多。然而,从每天成千上万的这些股票的购买者与出售者的积累效应中得到随时间而变化的股票价格,它是具有随机性质的。因此,随机分析是对一个可能确定的微观现象进行宏观的或全局的描述。

人们可以将这些概念进一步地延伸到随机过程和量子力学的基础中去^[1.1,1.2],利用应用于确定型(非随机型)函数的“迭代混合”变换方法,来非常准确地产生或模拟随机过程。因此,随机过程和确定过程的界线似乎是不明显的¹⁾,无需再作详细的、超出本书范围的叙述。我们可以说,时间序列是讨论“过程”的,不管在原始上这些过程是确定的或不确定的,它们都呈现出随机的性质,而且人们都可以对它们进行随机分析。此外要达到解决预测、决策、滤波(将有关的信息从无关的信息中滤出)和检测等问题,使用随机分析的方法比真正深入到确定的原始状态中去求解(假如能办到的话)要迅速和简单得多。譬如,在使肌电信号联系到肢体功能的问题上,辨识若干随机型时间序列参数要比研究脑中数以亿计的神经元简单得多。又如,为确定股票价格的趋势,对价格趋势的时间序列进行观察,比接见每一个购买者和出售者要快得多。同样,分析大量分子或粒子和它们之间的碰撞行为,比应用基本物理规律分析每一粒子和所有粒子之间的相互作用快得多。

那么,为什么要讨论离散型时间序列呢?

在时间序列中,采用离散的时间形式是方便的,这里有两个主要原因: 首先,它可以避免在连续时间的随机分析中所

- 1) 譬如,当你掷一个硬币时,如果你完全知道并能调整初始条件,例如每次手指的位置、移动等等,那么,这可能是个确定的动作。当然,如果你要进行预测,这仍然是非常费劲的。同样,如果你产生一序列,并打印出其结果, $y(t) = \sin(t)$, $t = \frac{17}{24}k^2$, $k = 1, 2, \dots$, 当然这是完全确定的,但其结果却非常类似于随机型的序列(见习题 1.1)。因此,这说明即使是最简单的确定型函数,也是容易混淆的。

出现的困难,这些困难是由于对随机变量应用古典积分理论而引起的.简单地说,古典的微分与积分意味着在短的时间间隔内具有连续性与可预测性,而随机变量则不然.为了克服这些困难,人们必须应用随机积分理论^[1,3],这样,即使在最好的情况下,也会使分析大大地复杂化.但在离散型时间的分析中,积分用离散集之和代替,而微分则用差分代替.因此,不需要再假定连续性——这个引起困难的概念,这也就使得分析问题得到简化.其次,任何对时间序列有意义的分析,只能是在数字计算的基础上,而数字计算机是离散型的机器.因此,只要合适地选择采样速率,离散的时间分析是唯一合理的.

1.2 目的与范围

本书不是一本时间序列理论的教科书,而是在缺乏数学结构、系统或信号参数结构、或噪声结构的先验知识情况下,为混杂在噪声(如同在通常的真实世界情形)中的有用信息的复原提供严格的、有效的、应用时间序列分析的工具.这个复原的过程被称为:从先验未知的噪声背景中获取先验未知信息的适应性滤波(参看图 1.1).当然,适应性滤波问题范围很广,但本书所关心的是最一般化的最复杂的情形,是在缺乏先验知识情况下的适应性决策和分类;在未知噪声中的适应性控制等问题.可是,这种适应性滤波不可能完全地被解决,它至少要求知道某种先验知识.本书将首先利用关于信号和(或)噪声等各类信息中的部分先验知识,求得部分的解答,在这基础上,再得到解决一般问题的步骤.本书不仅提供解决此问题的严格方法和必要的理论背景,而且,还将介绍可能找到的部分先验知识的类型,如何去寻找此种部分知识,并如何去构造它.经常有这种情况:即使在缺乏系统或噪声知识的