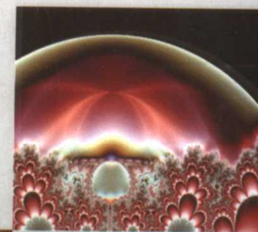
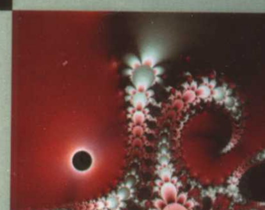



马军海 著

复杂非线性系统的重构技术

天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

复杂非线性系统的重构技术

马军海　著

天津大学出版社
Tianjin University Press

内容简介

本书主要阐述由无法直接建立解析形式数学模型的复杂动力系统所生成的混沌时间序列的重构技术，为读者进入这一殿堂提供一条捷径。主要内容包括：时序数据的非线性混沌特性的判定、相位随机化方法、混沌时序的分形及混沌特性研究、高维混沌排斥子的分维数和拓扑熵、混沌排斥子的Parry测度和拓扑熵、由噪声引起低激活能从混沌鞍点的逃逸路径、混沌时序的Lyapunov指数、混沌时序动力系统的相空间重构技术、混沌时序非线性预测方法及其应用、复杂系统理论在经济及金融系统中的应用等。

本书可作为大专院校从事相关理论及实际应用研究专业的本科生、硕士生及博士生教材，也可供相关研究机构从事实际问题研究的工程技术人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂非线性系统的重构技术/马军海著.—天津：天津大学出版社，2005.1
ISBN 7-5618-1775-4

Ⅰ.复… Ⅱ.马… Ⅲ.非线性系统(自动化)
Ⅳ.TP271

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第128493号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨风和
地　　址 天津市卫津路92号天津大学内(邮编：300072)
网　　址 www.tjup.com
电　　话 发行部：022-27403647　邮购部：022-27402742
印　　刷 昌黎太阳红彩色印刷有限责任公司
经　　销 全国各地新华书店
开　　本 185mm×260mm
印　　张 15.75
字　　数 393千
版　　次 2005年1月第1版
印　　次 2005年1月第1次
印　　数 1-2 000
定　　价 22.00元

前　言

如何认识具有复杂结构的系统往往存在三个基本的困难:一是系统本身的复杂性;二是人们往往只能通过某种“观测器”才能采集到系统某一状态的时间序列;三是与时序本质特征相互耦合、缠绕的噪声的剥离和剔出等问题。这样,就需要一种技术,它可以在很大程度上通过系统整体行为的一维“投影”来“重构”复杂系统的整体行为,然后依其来对系统内在的复杂本质特征进行探讨,包括:混沌特性判定及分形特征,各类吸引子、排斥子及不稳定周期轨道的确定,混沌预测模型的选取,阶的确立技术,预测及其控制等相关研究工作。

混沌时序重构是近二十年来新兴的一个多学科交叉的重要研究领域,它涉及现代数学、现代计算技术、非线性混沌科学、复杂系统科学、现代控制理论以及其他相关学科。它一出现,就很快在许多领域得到了广泛应用,开阔和加深了人们对社会、自然、管理工程和工程技术等领域中复杂现象的认识,解决了或正在解决着这些领域的一些复杂问题,同时,科学的实践又使得混沌时序的重构理论向纵深发展,但目前还有许多理论上不能解决的问题,有待于学者们进一步去探索和研究。总的来讲,当前对非线性混沌时序理论的研究,一般有三个主要目的:一是探讨解决问题的方法;二是相空间重构后揭示可能产生的时序所对应的动力学现象;三是最终解决其在自然科学和社会系统中的应用问题。就研究水平而言,目前从理论到计算,计算机仿真、预测、预报及工程应用等诸多方面都很不完善,没有完全形成一整套的应用体系。但可以相信,随着研究工作的继续深入,通过不断的努力最终会为无法建立起数学模型的复杂非线性系统的故障预测、预报及其控制提供有效的方法,并为动力过程设备设计、制造等方面的改进和提高提供可靠的理论依据。由于混沌学的兴起,一些人认为传统的决定论与随机性之间的鸿沟正在逐步消失。

本书主要向读者介绍由无法直接建立解析形式数学模型的复杂动力系统所生成的混沌时间序列的重构及其预测技术的一些基本知识和基本方法。包括:非线性混沌时序所反应的动力系统非线性混沌特征的判定;一些重要的非线性指标的理论分析及计算机实现、重构技术,建模及预测技术;混沌时间序列的基本理论、方法及其应用。所涉及的内容反映了该研究领域的国内外最新研究成果,是作者对其近几年从事混沌时间序列研究成果和当前国内外文献中介绍的研究成果的一个总结。全书共分 8 章。

第 1 章介绍了混沌的起源、本质,复杂系统的现状及其发展趋势;混沌时间序列的非线性动力学方法。

第 2 章介绍了时间序列的非线性检验。包括:功率谱方法;BDS 统计量、渐近分布及其应用;判定时序随机或混沌特性的相位随机化方法及其应用等。

第 3 章介绍了时序动力系统的分形及混沌特性。包括:Hausdorff 维数,关联维数,自相似维数,盒维数,Lyapunov(李雅普诺夫)维数,信息维数,点形维数;分数维及 Kolmogorov 熵的定义;计算关联维数和 Kolmogorov 熵的最小二乘法;分形维数的统计估计,噪声对关联积分 $C(r,N,m,w)$影响的一个统计估计;分形维数算法的误差分析;嵌入维数与分维数关系分析研究;G-P 算法的改进;(m,j)窗口的确定;最佳嵌入维数的计算;最佳采样间隔 τ 的选取。

第 4 章介绍了高维混沌排斥子的分维数。包括:高维混沌排斥子维数公式;扩展的二维映射模型时间衰减和自然测度,排斥子维数公式应用的数值检验,排斥子的非典型情形;一个三维弹子混沌分散器;排斥子的稳定流形的相图以及 Lyapunov 指数,排斥子的衰减时间和稳定流形的公式,排斥子的吸引盆边界维数的公式,排斥子的典型系统的维数;最后给出了相应的讨论和结论。

第 5 章介绍了动力系统实测数据的 Lyapunov 指数的算法。包括:Lyapunov 指数的轨线算法;Lyapunov 指数的 Jacobian 算法;Lyapunov 指数的 P 范数计算方法;Lyapunov 指数的矩阵算法;Lyapunov 指数的小数据量方法及其改进;最后给出相应的计算结果和结论。

第 6 章介绍了混沌时序动力系统的相空间重构方法,包括:重构相空间及 Takens 定理;自相关法和复自相关法;互信息量法;C-C 方法;相空间重构中的基本分量坐标法;本征值分解的数学基础;嵌入空间矩阵中本征值、本征向量的求解算法;相空间重构的勒让德法;时间间隔 τ 的选取;依据时间序列的分岔图重构;线性参数映射分岔图的重构;线性参数映射和主要成分分析法;重构线性参数映射的分岔图应用举例:Hénon 映射、逻辑斯谛映射、立方映射、延迟逻辑斯谛映射、Lorenz 方程及相空间重构相关参数的确定。

第 7 章介绍了混沌时序非线性预测方法及其应用,包括:指数自回归(EAR)模型;非线性映射迭代模型;小波神经网络预测方法;非线性自相关混沌迭代模型;金融市场的可预测性及不可预测性;鼓风炉中观察到的时间序列的复杂动态行为的分析及预测。

第 8 章从一类复杂金融系统的数学模型出发,分析这一模型所反映的我国宏观金融系统运行中可能出现的各种情况:平衡、稳定周期、分形、Hopf 分岔、参数与 Hopf 分岔之间的关系,直到混沌运动等。通过模型中各经济意义下参数的变化,分析这类金融系统产生复杂行为的条件,以及宏观经济政策的调整和某一参数的变化对整个金融系统行为的影响情况。这一研究将有助于加深人们对各种金融政策杠杆作用的理解。

书中还反映了我们这个研究集体的若干成果。整个研究工作曾得到国家自然科学基金资助(课题编号:70271071)、国家高技术研究发展 863 计划资助(课题编号:2003AA41330)、天津市教委课题(课题编号:20041702)和天津大学 211 项目的支持。

在本书的编写过程中,得到了天津大学机械学院知名学者陈予恕教授、天津大学管理学院院长齐二石教授及天津大学研究生院王洪礼主任的指导和帮助,在此表示衷心的谢意。

感谢李秀英、卢英、王建俯、张晓峰、辛宝贵等同志在本书的写作过程中所给予的帮助!

在本书的写作过程中,参阅了大量的国内外论文,在此特向这些作者表示谢意!

尽管本人花费了大量的时间和精力来完成此书的写作,但书中难免存在一些缺点或不足,敬请同行及读者指正。

马军海

2004.9

目　录

第 1 章　绪　　论

1.1　关于复杂性科学

复杂性科学是用以研究复杂系统和系统内在复杂性的一门科学。它包括系统的演化、涌现、自组织、自适应、自相似、不稳定的周期轨道、吸引子、排斥子、分形、分岔、混沌及其通向混沌的道路等特征。虽然目前国际上对复杂性科学还没有明确的定义,对其研究还处于萌芽状态,但已被一些科学家誉为“21 世纪的科学”。

混沌是近二十年来由于计算机的迅速发展而新兴起来的一门多学科交叉的科学,它涉及的学科之多、应用范围之广是其他学科所远远不能比拟的。混沌行为最本质的特点是非线性系统对于初始条件的极端敏感性。“混沌是决定性系统的内在随机性”。国际上权威的科学家称:20 世纪的科学史上将永远铭记的只有四件大事,那就是:相对论、量子力学、基因工程与混沌理论。混沌时序非线性重构是混沌学的一个重要的研究领域,涉及现代数学、非线性科学、复杂系统科学、现代控制理论以及其他相关学科。它一出现,就很快在许多领域得到了广泛应用,开阔和加深了人们对社会、自然、管理工程和工程技术等领域中复杂现象的认识。由决定性可以产生随机性,而且是内在的随机性,由于混沌学的兴起,一些人认为决定论与随机性之间的鸿沟正趋于消失。

1975 年,混沌作为一个数学名词首次在科学文献中出现,近三十年来,它以前所未有的速度,迅猛发展成为有丰富的非线性理论背景和深刻数学内涵的现代学科的重要分支。仁者见仁,智者见智,目前学者们较为一致的观点是:混沌是物质科学、数学科学和系统科学等多学科交叉的边缘科学。它主要研究复杂系统对于初始状态的极度敏感依赖性、拓扑传递性及其系统内部的复杂结构。包括:系统周期点的稠密性、随机性和遍历性;系统是否存在不稳定的周期轨道;系统存在的吸引盆的大小;系统是否存在正的 Lyapunov 指数、存在几个正的 Lyapunov 指数以及正的 Lyapunov 指数数值的大小;系统的多重分形特性及其分数维值的大小(它反映系统内部结构的复杂程度);系统是否存在奇怪吸引子或者奇异排斥子(它们反映系统不同特性的复杂结构)。

目前,混沌在许多实际领域中正在得到或已经开始得到较为广泛的应用,如现代数学、声学、光学、湍流、化学反应中的混沌变化,地震的混沌特性及其与预测有关的问题,天气预报中的“蝴蝶效应”,商业周期中蕴含着的有序性,股市细微分散的交易和大规模变动情况之间的内在关联等。亚洲金融危机的根源以及股市黑色星期五的复杂机理至今还没有得到令人信服的解释,但随着混沌理论的进一步深入研究,这一复杂机理的谜底也许会大白于天下。

其实在人们的日常生活中,混沌现象几乎无处不在:河流中湍急的水流所形成的漩涡中肯定孕育着混沌,如黄河的一大奇观——壶口瀑布中水流的喷射中就蕴藏着令人不解的混沌之

谜;人们手中一支上翘的香烟,烟纹袅袅,其缓缓扩散的精致形态耐人寻味;风中摆动的旗帜令人着迷;自来水龙头口水由稳态转变为不同形态的流动花样令人沉思,这其中的现象也必然孕育着混沌。此外,在一年四季气候的变换中、在飞行中的飞机的不同性态中、在高速公路上汽车流拥挤的难以描述的状态中、在地下石油管道内油的流动状态中,这一切都会有混沌出现。不管上述问题的介质是什么,这些性态都遵循同一条或同一类新发现的混沌规律。人们对混沌的这种存在状态重新认识改变了管理工作者对于保险问题决策的态度,改变了天文学家对太阳系的运行规律过去传统的认识方式,同时也正在改变着政治家们对于紧张局势导致武装冲突方式的认知态度。

混沌研究最早开始于法国的科学家庞加莱。1903年,庞加莱在他的《科学与方法》一书中提出了"庞加莱猜想"。他把动力学系统和拓扑学有机地结合起来,并提出三体问题在一定范围内其解是随机的论断,实际上这是一种保守系统中的混沌。

1954年,前苏联科学家柯尔莫哥洛夫(Kolmogorov)发表了被后来认为是KAM定理的雏形的论文《哈密顿函数中微小变化时条件周期运动的保持》的文章。几乎同时,瑞士数学家J. Moser对这一结论给出了更进一步的被后来认为是完整的数学证明。这种思想对于探讨保守系统是否存在混沌以及如何发现混沌指明了方向,也为确认并探明耗散系统以及保守系统是否存在混沌找到了行之有效的理论上和实际应用上的方法。

1963年,洛伦兹(Lorenz)在研究大气在温度梯度作用下的自然对流系统时,提出了一种极其简化了的天气预报模型,这就是著名的洛伦兹方程。研究表明,洛伦兹方程在某种状态下是一种耗散系统,但这种耗散系统的解的性质却极其复杂,在某些情况下也可能产生混沌现象。

1964年,法国天文学家海伦(Henon)从研究球状星团中得到启发,给出了著名的Henon映射,发现其系统运动轨道在相空间中分布似乎越来越令人琢磨不定。海伦用它建立的"热引力崩塌"理论,解释了几个世纪以来一直遗留的关于太阳系的稳定性问题。

1971年,法国数学物理学家D. Ruelle和荷兰学者F. Takens在其发表的论文《论湍流的本质》中首次提出用混沌理论来描述湍流形成机理的新观点,发现了动力系统存在奇怪吸引子,并描述了这种奇怪吸引子的几何特征,发现了第一条由奇怪吸引子通向混沌的道路,这一研究工作作为该领域开拓性的研究成果,为后来的研究工作奠定了坚实的工作基础。

1975年,著名学者李天岩和约克(Yorke)发表的论文《周期3蕴涵混沌》震动了整个世界学术界,它找到了由周期状态通向混沌状态的条件和道路。这就是数学界著名的Li-Yorke定理。

1976年,著名生态学家梅(May R.)以单峰映射为对象,重点研究了逻辑斯蒂(Logistic)方程,全面系统地分析了这一方程的复杂动力学内在本质特征,系统研究了方程所对应的复杂系统进入分岔、混沌区域的道路及其精细结构,绘制了轮廓图,提出了树枝分岔、切分岔、不动点、谐波、鞍点(Saddle point)等混沌学新的词汇。

1979年费根包姆(Feigenbaum)在梅的研究工作基础上独立地发现了复杂系统在倍周期分岔过程中分岔间距的几何收敛率的内在规律,并发现了收敛率(即其每次缩小的倍数)为4.669 2…是一个常数,通常称为费根包姆常数。这一重要研究成果把混沌学研究从定性分析推进到定量计算阶段,成为混沌学研究的一个重要里程碑。

20世纪80年代以来,混沌研究进入了一个新的时期。1980法国数学家曼德莱布(Mandelbrot)用计算机绘出了世界上第一张曼德莱布集的混沌图像。Takens, Packard, Farmer等人根据Whitney拓扑嵌入定理提出重构动力学轨道相空间的延迟法。1985年Wolf提出了著名的计算

混沌时间序列 Lyapunov 指数的算法,这种算法至今还有着重要的作用。

1988 年 A.M.Albano,J.M.Muench 给出了奇异谱分解的基本思想,这对于混沌时序除噪有着极其重要的作用;1991 年 Martin Casdagli,Stephen Eubank 和 J.Doyne Farmer 研究了存在噪声下混沌时序的相空间重构问题;2000 年 Dejin Yu,Michael Small 和 Robert G.Harrison 研究了含有噪声数据本质特征的估计方法;2000 年 J.P.M.Heald 和 J. Stark 研究了混沌时序所对应的动力系统的噪声水平的估计问题;2002 年 T.G. Muller 和 J. Timmer 给出了一种含有噪声数据的建模方法,Degli Esposti Boschi 和 G.J. Ortega 给出了范德波方程所得到的混沌时序加入噪声后的影响,Octavio Miramontes 和 Pejman Rohani 研究了时序中含有噪声的比例问题;2003 年 H.W. Hunt, J.M. Antle 和 K. Paustian 研究了含有噪声时序混沌的判定问题,Yu.A. Kravtsov 和 E.D. Surovyatkin 研究了饱和的分岔参数噪声的放大问题。这一系列研究工作,使得混沌数据的除噪技术逐步地得以发展,但这一技术目前无论从理论上还是从实际的应用上都仍处于探索阶段,离实际应用还有一段距离。

2000 年,英国的《自然》杂志发表了“洛伦兹吸引子的存在性”的论文,首次从数学上严格证明了洛伦兹吸引子在自然界中的存在,以及系统在长期的演化过程中混沌是怎样出现的。40 多年来,洛伦兹方程一直是学术界研究的热点,是人们认识其他混沌现象的基石,它的许多复杂机理还有待于人们进一步去探明。

2001 年,Michael D. Mckenzie 利用 BDS 方法研究了国际股票市场中澳大利亚、加拿大、芬兰、德国、日本、新加坡、瑞士、泰国及香港股市数据的非线性特性,Arvind Mahajan 应用 BDS 方法及分形维数研究了国际外汇市场数据的变化规律。这些研究工作将非线性混沌理论应用到汇率数据的研究之中。

从本质上说,混沌是直接研究我们所看得见摸得着的宇宙,人们日常生活的某些经历与这个世界的诸多复杂现象都是我们所必须探索的目标。因此,混沌是一种关于过程的科学而不是一种关于状态的科学,是关于演化的科学而不是关于存在的科学。复杂性科学研究的复杂系统涉及的范围很广,包括自然、工程、生物、经济、管理、政治与社会等各个方面,它探索的复杂现象从一个细胞呈现出来的生命现象,到股票市场的涨落与社会的兴衰等复杂现象。

目前,关于复杂性的研究已受到了世界各国科学家们的广泛关注。1999 年美国的《科学》杂志有一组文章,专辑主题为“Complexity System”。这个专辑分别就化学、生物学、神经学、动物学、自然地理、气候学、经济学中的复杂性研究成果进行了报道。由于各学科对复杂性认识和理解还不一致,所以学术界便统一采用一个“复杂系统”的词。概括起来,复杂系统都有一些共同的特点,就是在变化无常的活动背后,呈现出某种琢磨不定的秩序,其中演化、涌现、自组织、自适应、自相似、分形、分岔及其混沌运动等被认为是复杂系统的共同特征。

涌现机制是复杂系统出现各种激动人心现象、图案和模式的共同表征,这里既包括灾难式的突现,也包括创新式的涌现。其自然学、社会学表征及其临界点将成为认识复杂系统的重要标志。复杂系统中宏观结构的涌现往往孕育于其自组织的机制,这在生物学、社会学和金融经济系统中均不乏例证。自组织还是复杂系统对环境产生自适应性的一个重要的调整机制。自适应性表征了复杂系统在系统层次上的自身调控能力。复杂系统与各层次子系统之间往往具有一定的自相似性,可以利用分形来刻画其内在复杂特征。

社会层次的复杂系统因具有思维能力的人的介入而变得更为复杂。典型的如社会经济系

统、金融系统、企业组织管理系统、人力资源系统等，在这类系统中，因人的参与所产生的不确定性、投机性及主客体易位等特征赋予了系统额外的复杂性。如何将描述复杂系统的动力学理论引入社会学、管理学、经济学，探讨在危机涌现时的系统行为的演化过程是管理科学的重要问题。

20世纪以来，特别是二次世界大战以后，人们为了探索复杂动力系统的奥秘，科学视野极大开阔，努力寻找各种途径，从不同方面广泛而又深刻地去考察各种复杂动力系统的规律性，例如，从静态到动态、从微观到宏观、从低级到高级、从简单到复杂、从离散到连续、从无序到有序、从线性到非线性，直至混沌运动等等，对复杂动力系统从时间、空间、功能等方面进行全方位考察。由于科学技术的互相联系和渗透加强了，从而加速了科学技术的整体化发展进程。基础科学(如数学、物理学)的作用突出了，并由此而引出系统论、信息论及混沌非线性动力学等。

为研究复杂动力系统，科学家特别需要以对自然科学和社会科学高度抽象概括的哲学观点作指导，同时现代科学的发展又促进哲学的深化和进一步发展。要研究复杂动力系统还要用到社会科学，但长期以来，自然科学和社会科学相隔如山，自从西德哈肯学派建立协同学后，他们发现自然系统和社会系统受同一原理，即协同学所支配。根据协同学原理，既然建立局部与整体联系，支配系统由简单到复杂、由低级到高级、由无序到有序稳定发展的最本质的东西是一种协同作用，那么作为系统的主要特征应该是协同性，而层次性、结构性、稳定性、有序性都只与协同性相关。

系统的协同性可拓延到各种复杂系统，这就证明了物质世界的统一性，说明整个自然界是由无限多个不同的物质组成的相互联系的统一体。如在这里给它赋予科学的内容，则认为可以用已知系统所揭示的规律性去认识和揭示各种未知的复杂动力系统的规律性，去认知和揭示各种非线性系统的本质特征。

自从人们对非线性动力系统开展研究以来，人们逐渐发现了复杂非线性系统的多解、跳跃、幅频依赖、极限环、分岔现象、间歇、激变及其混沌运动等特性，表明非线性动力学行为是极其复杂的，人们甚至预言除混沌运动外，还存在比混沌更复杂的动力学行为——超混沌运动。因此系统地开展对这种复杂行为的研究会有利于对自然科学、社会科学和生物系统中与时间有关过程的详尽了解，有利于揭示非线性动力学中的一些奇怪现象，如可能对自然科学中普遍存在的“广义湍流”的理解起到很好的作用，进而达到控制和利用混沌为人类造福的目的，因而世界各国都十分重视对非线性动力学的研究。

在国内，关于复杂性、复杂系统的研究，早在20世纪80年代初钱学森就在军事对阵模拟研究中，把博弈论和系统科学相结合用于结构复杂、成员众多的对阵集团。1981年夏到1982年10月，他提出了半经验理论的处理对阵问题的方法论，并在后来的工作中赋予这一方法论更广泛的涵义：处理复杂系统的定量学方法，是科学理论、经验知识和专家判断力的结合。1986年开始，钱学森直接指导“系统学讨论班”，对当时各类开放的复杂巨系统进行研究和探索。特别是在对社会系统、人体系统、地理系统及复杂经济系统研究提炼概括和抽象的基础上，于1989年提出了研究开放的复杂巨系统的方法论——“从定性到定量集成法”，简称集成(Meta-Synthesis，M-S)。这个方法实际是专家系统、统计数据和信息资料计算机技术三者的有

机结合，构成的一个高度智能化的人机结合系统。1992 年钱学森又提出了“从定性到定量集成研讨厅体系”的思想和方法，该方法是半经验半理论的定量方法，也就是说建立复杂系统的数学模型，通过定量方法得出结论。1995 年钱学森又指出：要开展对无穷维复杂动力学系统的研究。目前国内学者正在此领域广泛地展开卓有成效的研究工作。

在国外，1984 年，在诺贝尔奖获得者 Gell-Mam 等人的发起下，一批物理学家、理论生物学家、计算机专家和经济学家等聚集于美国新墨西哥州 Santa Fe，组织了一个 SFI（Santa Fe Institute）研究所，由 G.A.Cowan 负责，其主要研究目标就是复杂系统。他们分别在自己从事的领域中开展对不同复杂系统的研究，以解决他们在实践中遇到的复杂性难题，因为他们弄清楚了传统的分解还原论方法在处理现实的复杂问题时已行不通了。

在 1991 年，SFI 提出了自动机网络（Automata Network，AN）方法，该方法的特点如下：

（1）不认为在了解系统的宏观行为时，每个单元的细节是重要的，因此可以采用充分简单的模型对复杂系统的单元进行简化；

（2）认为主要是单元的数目，即系统规模对系统的宏观特性有决定性的影响，因此可以用充分简单的模型模拟单元间的相互作用；

（3）着重于观察与研究的宏观特性。

Santa Fe 研究所是国际上公认的复杂性问题的研究机构，1991 年该所举办了“复杂系统夏季研讨班”。在此会上复杂问题研究专家 A.S.Weigend 和 N.A.Gersherd 提出对复杂问题主要基于以下两方面的考虑：

（1）如何理解复杂行为；

（2）用何种技术实现这种认识。

在实际问题中往往给出的是一个时间序列，因而第二个问题很大部分就归结为对时间序列的分析。时间序列分析是一门古老学科，近年来由于受到非线性科学影响，有了很快发展，文献分布很广，提出了各种观点。当然也有理论上不能解决的问题，学者们认为有必要通过一次竞赛来总结一下现有成果，以利于在此领域更进一步地开展工作。

首先是征集题目，结果得到来自各个领域的近 200 个时间序列题目，最后组织者们选定了以下六个题目作为竞赛题目。

（A）在一个非常干净的物理实验室中的实验中，在红外线激光器中得到 1 000 个波动点，近似可用三个耦合的普通不同动力系统方程描述。其时间历程图见图 1-1(a)。

（B）对一个具有窒息病人的监测资料，从睡着病人中获得 34 000 个点，心速、肺活量、血氧浓度、脑电，这些观察是相互影响和相互制约的。所用的诊断仪器是不知道的，其时间历程图见图 1-1(b)。

（C）非常频繁的货币交换资料，共 10 段、3 000 个点，它们是瑞士法郎与美元之间的交换速率，两个报价之间的平均时间在一到两分钟之间，如果是市场在充分起作用，这样的数据特性为随机游动，其时间历程图见图 1-1(c)。

（D）为这次竞赛设计的由数值方法所生成的序列。计算在四维非线性多重势能（九个自由度）中的一个驱动粒子，要求势能的深度有小的非稳态漂移，其时间历程图见图 1-1(d)。

（E）从一个可变行星获得的天体物理资料，是从大型天文望远镜采集到的一个可变白矮

星的强度时间序列,共 17 段、27 704 个点。强度变化起因于相对独立的球形调和倍数和噪声,其时间历程图见图 1-1(e)。

(F)一个多声部的乐曲,是从“遁走曲艺术”得到的 J. s. bach's 最后(未完成)遁走曲,竞赛结束后这部没有完成的乐曲被复原,其时间历程图见图 1-1(f)。

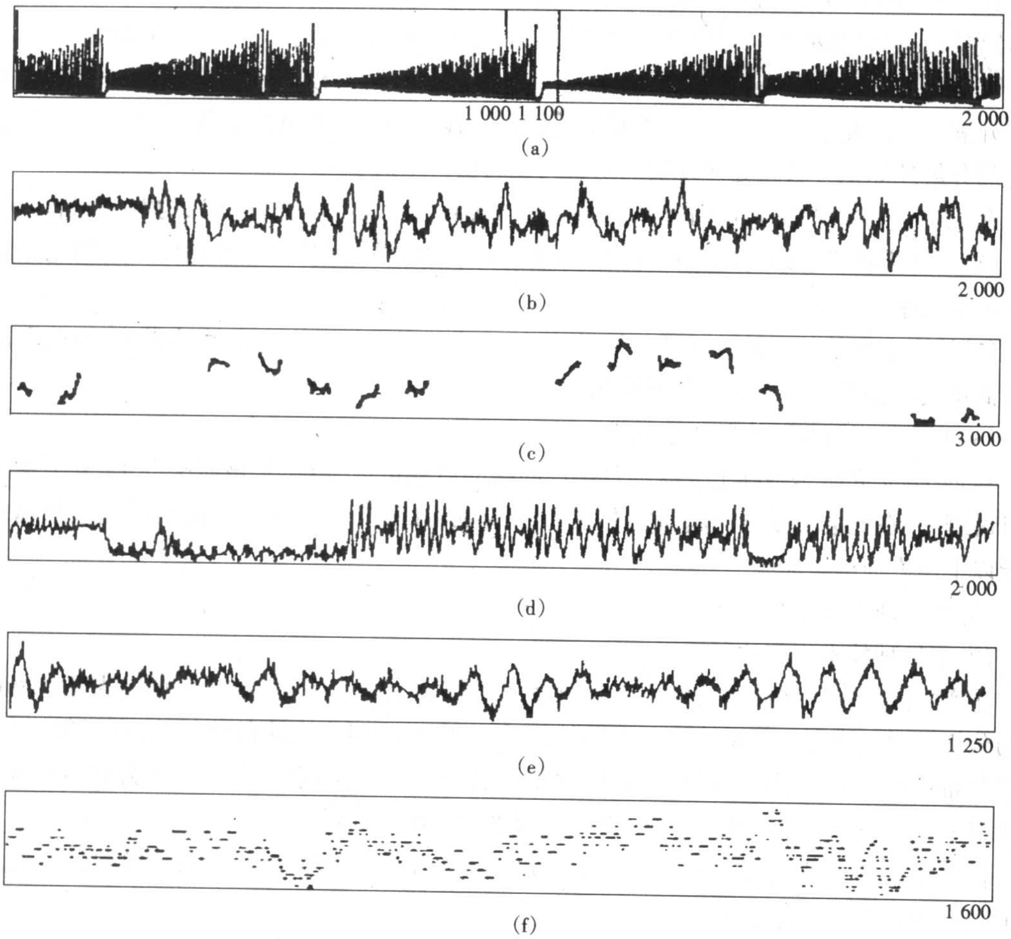


图 1-1　六个竞赛题目的时间历程图

图 1-2 描述了数据集(A)~(F)具有的一些基本特点。

规定竞赛应完成的工作为:

(1)在给定的测量误差下,数据集的连续性预测;

(2)系统的特征(包括自由度数目、可预测性、噪声的特征和系统的非线性本质);

(3)给出控制系统的模型;

(4)给出所用算法。

竞赛题目和要求于 1991 年 8 月 1 日公布,1992 年 1 月 15 日为给出结果的截止日期。部分竞赛题目见图 1-1,对题目的详细解析见图 1-2,参赛者对题目 A、B、C、D、E、F 的分析和解答分别如图 1-3 ~ 图 1-14 所示。

自然的	EB　A　　　　D	合成的
平稳的	A　D　　　B　C	非平稳的
低维的	A　　D　　　C	随机的
无噪声的	A　　　B　　　E	有噪声的
短序列	A　　　C　　　D	长序列
信息公开的	BE　　　AC　　　FD	信息不公开
线性的	E　　　　　　　AD	非线性的
标量	A　　　　　B　F	向量
一次实验	A　　　　　　C	多次实验
	CE	不连续
	D	转换
连续的	B	时有时无

动力系统能否赚钱？C

动力系统能否救命？B

图 1.2　样本数据集具有的一些特点

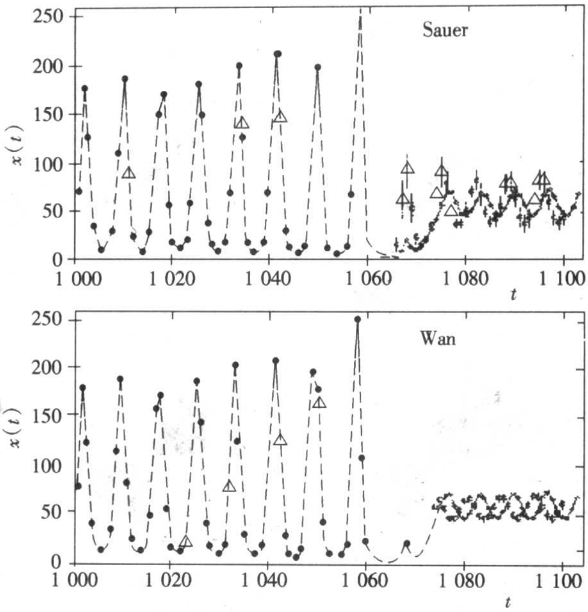


图 1-3　Sauer 和 Wan 对样本数据集 A 作出的两个最好的预测结果

"△"表示预测值；垂直线段表示预测误差；真值（作预测时，不知道真值）用点线表示（该处的圆点连在了一起以便区分）

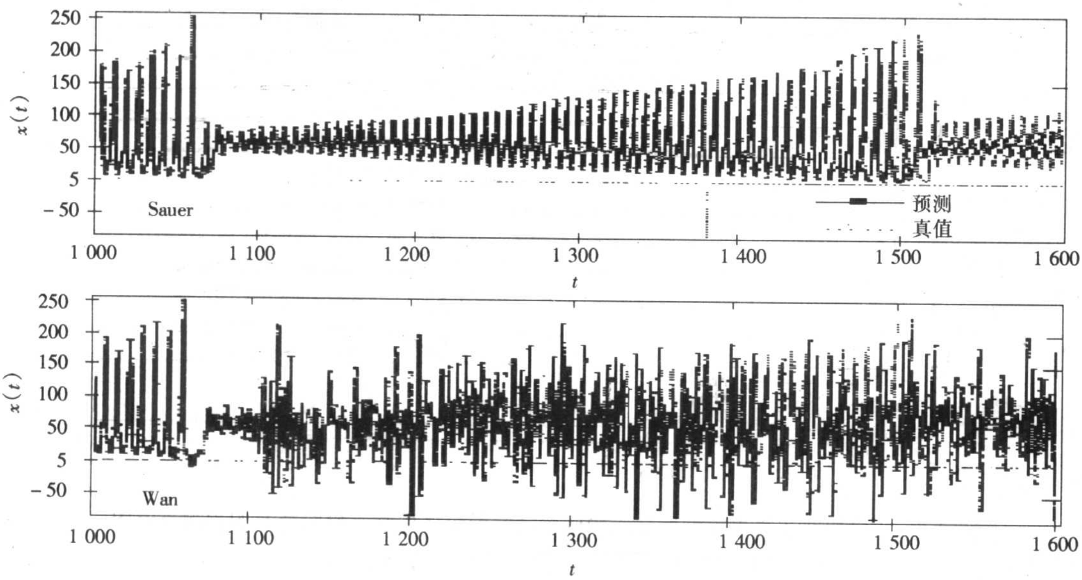


图 1-4　Sauer 和 Wan 给出的两个模型，再向前多预测 500 点的时间历程图

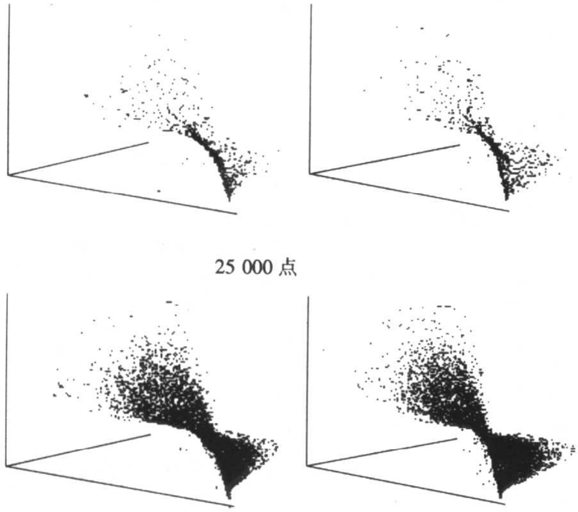


图 1-5　样本数据集 A 在给定样本点 1 000 点时在三维嵌入空间中的立体结构的对比图

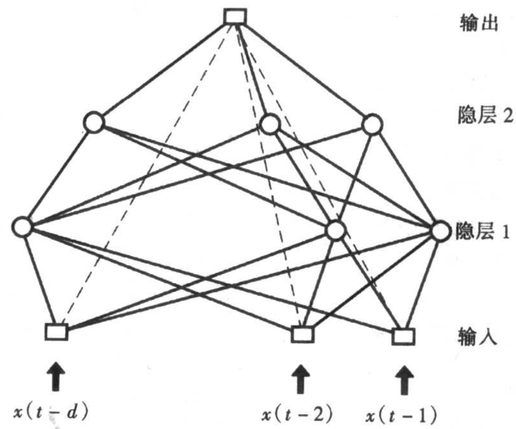


图 1-6　带有两个隐层的前馈网络的结构及从输入到输出的模型

线段表示权重值;点线表示从输入到(线性)输出单位的直接联系。偏好未显示出来

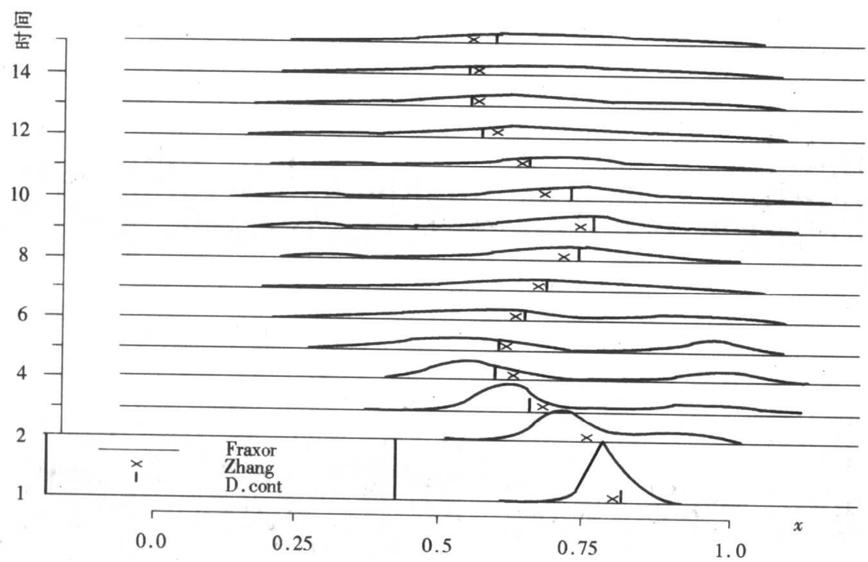


图 1-7　由隐层马尔可夫模型所生成的概率密度函数模型对于数据集 D 的预测真值图

曲线表示由神经网络产生的点预测值;垂直线代表真值

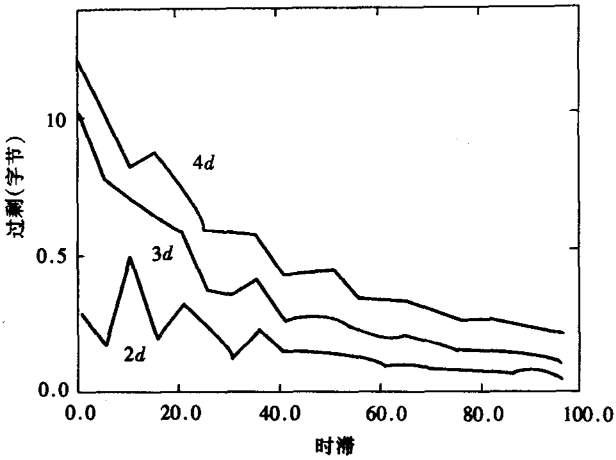


图 1-8　由数据集 A 增加的相互信息作为时间步长数的函数预测图

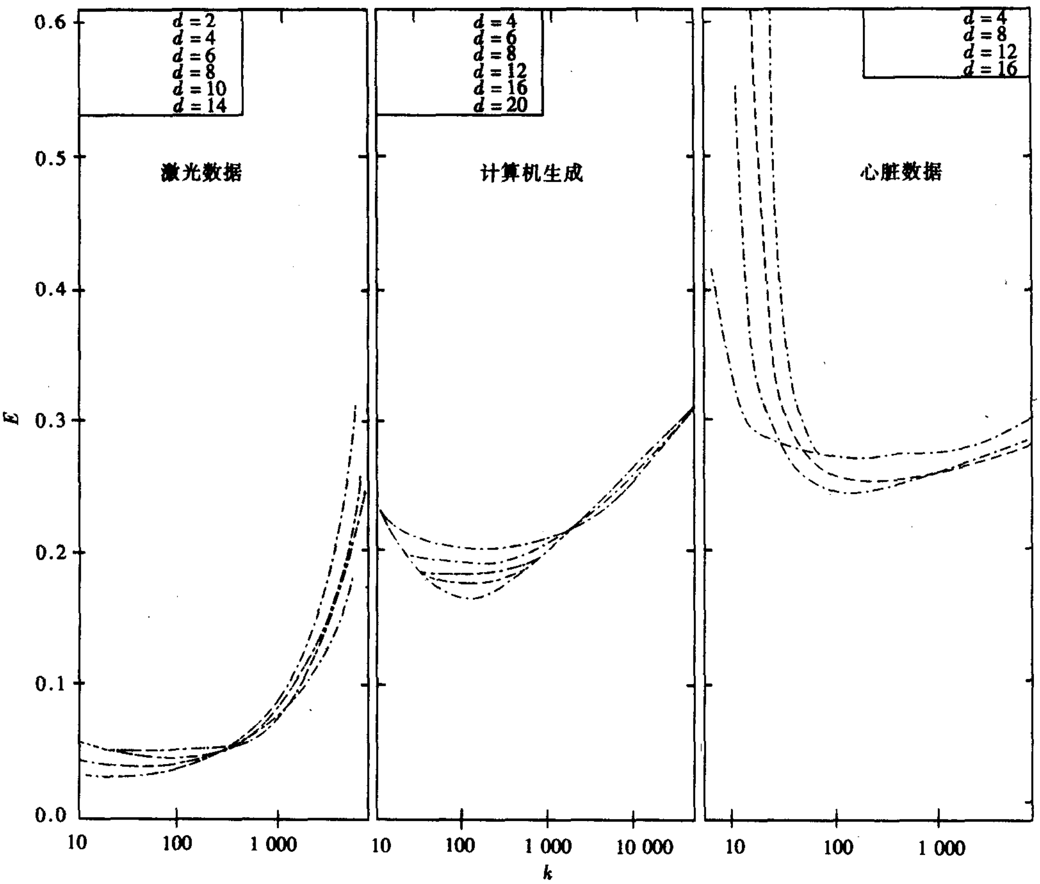


图 1-9　决定与随机模型图

正规化的抽样误差 E 表现为邻域数 k 的函数，用来构建 d 阶局部线性模型

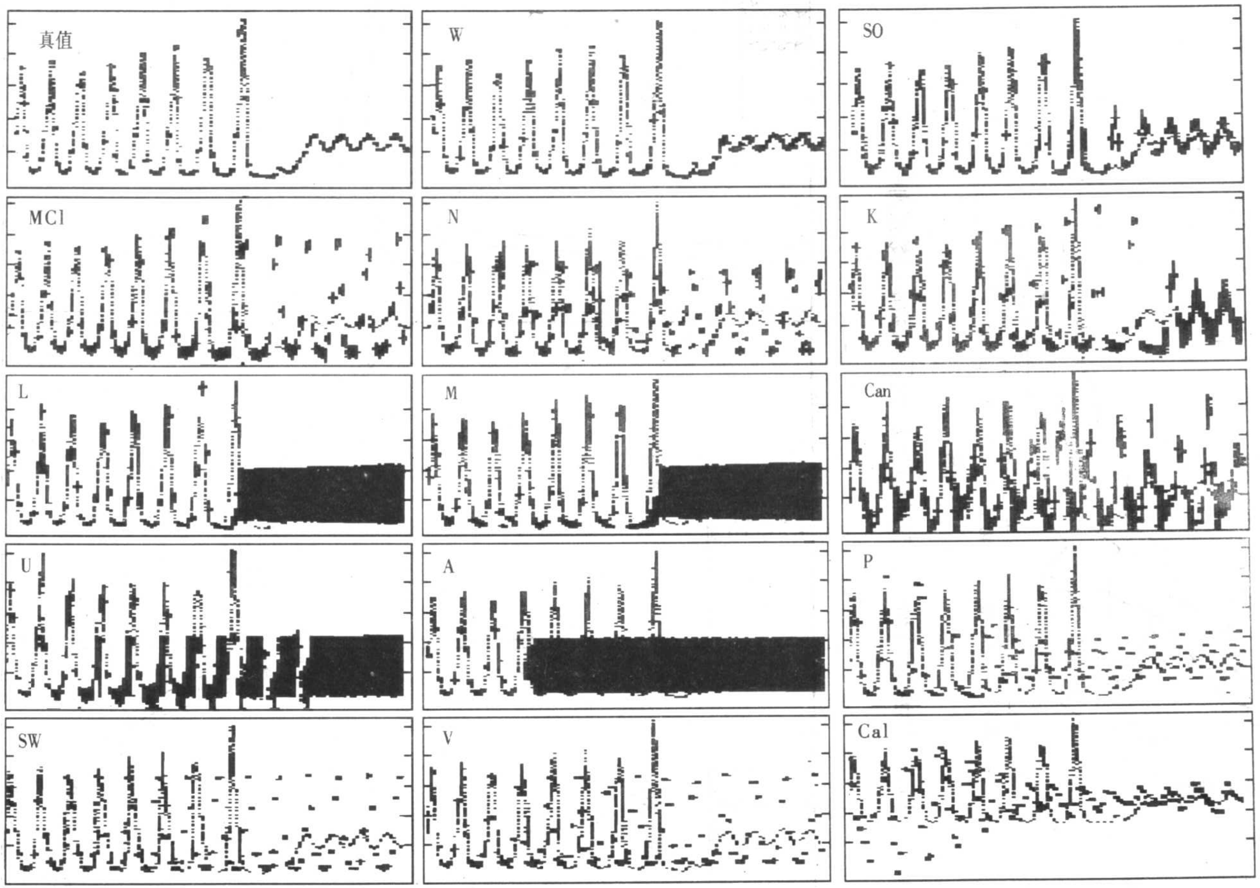


图 1-10　数据集 A(激光)的继续部分

字母代表参赛者记号;点线表示真值;预测值在真值的后面;垂直棒表示预测的不确定性