

©姜翔程 著

水文时间 序列的 混沌特性 及预测方法



SHUIWENSHIJIAXULIE

DE HUNDUNTEXINGJI

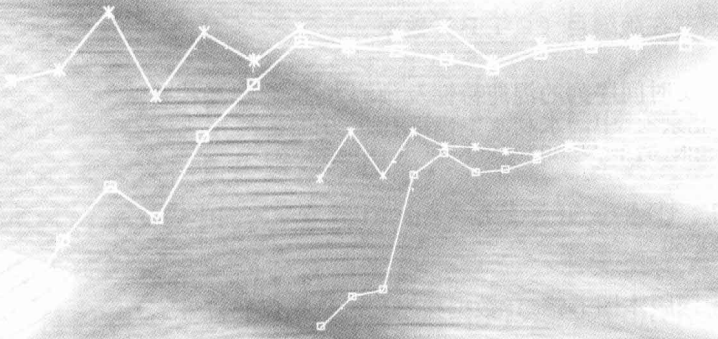
YUCEFANGFA



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水文时间 序列的 混沌特性 及预测 方法

◎ 姜翔程 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是非线性动力学理论和方法在水文时间序列复杂特性和预测应用上的最新研究成果,对该领域的国内外研究现状和文献进行了综述,研究了水文时间序列平稳性的处理方法,据此对径流、降水和蒸发序列通过多种方法确定水文系统的相空间参数,从定性和定量两个角度研究水文时间序列的混沌特性,提出了水文混沌时间序列一阶加权局域多步预测模型、水文混沌时序 Volterra 自适应模型,建立了水文混沌时序支持向量机回归模型。本书结合实例,深入阐述了混沌理论和非线性时间序列预测方法,是最新成果在水文时间序列复杂性研究中的应用。

本书可供水利、气象、环境、系统科学、管理科学等领域的科研技术人员阅读,也可对复杂系统和非线性预测技术应用研究的有关学者,以及高校师生提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

水文时间序列的混沌特性及预测方法 / 姜翔程著
— 北京:中国水利水电出版社,2011.7
ISBN 978-7-5084-8866-0

I. ①水… II. ①姜… III. ①水文—时间序列分析
IV. ①P33

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第154517号

书 名	水文时间序列的混沌特性及预测方法
作 者	姜翔程 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8.25印张 186千字
版 次	2011年7月第1版 2011年7月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	28.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



水文时间序列的描述和预测历来是水文水资源系统十分重要的研究课题之一，它是水资源规划、配置与调控的基本依据。气候变化和人类活动的影响，导致水文过程的时空变异，进而改变径流、蒸发和降水的形成与演变规律，给水资源开发利用带来了很多的不确定性。

水文时间序列具有非线性和复杂性，传统的分析方法很难对它们的演化规律和变化特征作出清晰的了解和准确的预测，因此，要求提出新思路和新方法，解决水文时间序列的预测、预报研究中尚未解决的和不断显现的问题。以混沌理论为代表的非线性时间序列分析方法的发展，有力地推动了水文时间序列的非线性研究与应用。本书以非线性动力学为理论基础，研究了水文时间序列的混沌特性和预测模型，建立了水文混沌时间序列的一阶加权局域多步预测模型，提出了水文混沌时间序列 Volterra 自适应预测模型，研究了基于支持向量回归机的水文混沌时间序列预测模型，本书主要内容包
括以下几方面。

(1) 相空间重构理论和方法，是水文时间序列混沌识别和非线性预测的前提。由于实际水文时间序列是有限长度的、非平稳的，把单整理论引入水文时间序列的平稳性研究，提出序列平稳性的处理方法，在此基础上，对径流、降水和蒸发序列通过多种方法综合确定水文系统的相空间重构参数。

(2) 在相空间重构基础上，从不同角度对水文时间序列的混沌特性进行了研究。依据相图法和功率谱分析法进行定性混沌分析，依据饱和和关联维数法和 Lyapunov 指数法进行定量混沌分析。研究表明，径流、降水和蒸发时间序列中均不同程度地存在着混沌现象。在实际水文时间序列最大 Lyapunov 指数曲线中，部分距离段存在波动，反映实际水文时间序列数据既包含着该系统的动力学特性，也存在量测误差和系统外对其叠加的噪声，说明水文系统时间序列是复杂的。

(3) 在现有混沌时间序列局域预测模型的基础上, 提出水文混沌时间序列一阶加权局域多步预测模型, 仿真表明一阶加权局域法计算简单, 应用方便, 但是, 预测的精度受时间序列长度影响较大, 同时, 其符合一定精度要求的预测步长是有限的。分别就三门峡水文站年径流量和直门达水文站月降水量混沌时间序列运用一阶加权局域法进行预测研究, 由于径流、降水等水文时间序列可获取的样本长度有限, 很大地制约一阶加权局域法在有限样本水文时间序列预测中的应用。

(4) 根据 Volterra 泛函级数和信号滤波技术, 基于水文时间序列混沌特性, 提出了一种新的预测模型——水文混沌时间序列 Volterra 自适应模型, 运用 Lorenz 系统产生的混沌时间序列进行仿真研究, 得出滤波器训练次数、收敛因子和模型训练样本量的大小对模型预测精度的影响规律, 仿真结果表明所建模型是有效的。通过三门峡水文站年径流量和直门达水文站月蒸发量模型预测实践, 结果表明, 提出的混沌时间序列 Volterra 自适应滤波模型, 对水文时间序列预测是可行的、有效的。

(5) 支持向量机在系统辨识和分类研究方面比较成熟, 目前尚没有提出有效的支持向量回归理论来解决非线性、时变、干扰的复杂问题。支持向量回归机主要用于因果关系点对的回归预测, 把支持向量回归机应用于水文混沌时间序列的预测研究是一个新的、有意义的工作。论文在支持向量机一般理论上, 提出了水文混沌时间序列支持向量机回归模型, 并就模型进行仿真计算, 讨论了惩罚参数、不敏感损失参数和高斯径向基核参数对向量回归机模型的敏感性, 为模型参数寻优提供一般指导原则。直门达水文站径流、蒸发量混沌时间序列 ϵ -SVR 向量回归机预测实现表明, 水文混沌时间序列向量回归机模型是有效的。

本书是作者多年来从事混沌时间序列问题研究的成果总结, 希望本书的出版有利于进一步推动混沌科学在实际应用中不断深化与发展。限于作者水平和资料条件, 书中难免存在一些不足之处, 敬请各位同行专家批评指正。

本书的出版得益于河海大学重点学科建设项目的资助, 感谢东南大学系统工程研究所陈森发教授审阅了全稿, 在研究过程中得到了东南大学、河海大学、南京水利科学研究院等单位以及有关专家的大力支持, 在此表示诚挚的感谢。

作者

2011年5月于南京



前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的和意义	2
1.3 混沌时间序列研究状况	2
1.4 水文时间序列预测研究状况	5
1.5 本书主要研究内容	9
第 2 章 重构水文系统相空间	11
2.1 概述	11
2.2 相空间重构理论	12
2.3 水文时间序列数据的平稳性	13
2.4 水文系统重构延迟时间的确定	21
2.5 水文系统重构嵌入维数的确定	28
2.6 同时确定延迟时间和嵌入维数方法	36
2.7 本章小结	38
第 3 章 水文时间序列的混沌特性分析	40
3.1 概述	40
3.2 水文时间序列的相图	40
3.3 水文时间序列功率谱分析	43
3.4 水文时间序列的关联维	46
3.5 Kolmogorov 熵	48
3.6 水文时间序列最大 Lyapunov 指数	49
3.7 本章小结	55
第 4 章 水文混沌时间序列加权局域多步预测研究	57
4.1 概述	57
4.2 全域建模法	58

4.3	局域建模原理	59
4.4	零阶局域建模法	59
4.5	加权一阶局域建模法	60
4.6	水文混沌时间序列加权一阶局域预测模型	62
4.7	本章小结	66
第5章	水文混沌时间序列的 Volterra 自适应预测研究	67
5.1	概述	67
5.2	Volterra 泛函级数	68
5.3	水文混沌时间序列 Volterra 自适应模型	69
5.4	Volterra 滤波器自适应算法	72
5.5	水文混沌时间序列 Volterra 自适应模型算法及实现	78
5.6	年径流量混沌时间序列 Volterra 自适应预测	81
5.7	月蒸发量混沌时间序列 Volterra 自适应预测	83
5.8	本章小结	84
第6章	水文混沌时间序列支持向量回归机预测研究	86
6.1	概述	86
6.2	统计学习与支持向量机	86
6.3	支持向量回归机模型及算法	98
6.4	水文混沌时间序列 SVR 机算法	108
6.5	水文混沌时间序列 SVR 回归模型	112
6.6	本章小结	115
第7章	总结与展望	116
	参考文献	118

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

水文循环受气象、流域下垫面和人类活动等因素的综合作用，表现出巨大的时空变异性 and 复杂的演化规律，水文系统是一个开放的、动态的非线性复合系统。水文复杂性涉及降水、蒸发、下渗和径流形成的水文循环机理与水文尺度问题，同时也与水文输入变量和水文状态变量观测精度有关。水文现象的确定性研究主要依靠水文要素的物理成因，建立蒸散发模型、入渗模型、流域模型等物理模型体系，它是水文系统研究的基础。然而，水文系统仍有许多物理机理有待探索，特别在全球水文及气候变化研究中，水文不确定性比较突出，成为水文科学发展中一个新的前沿课题。传统的水文不确定性涉及到水文的随机性或统计特性，近年来水文不确定性概念有了新的拓展，它包括对系统认识的不确定性（模糊性、灰色系统）和水文复杂性（混沌与分形）的未知程度^[1]。

通过水文时间序列的研究，来对水文动力系统的未来演变作出预测是非常有意义的工作。随机水文学是建立在水文现象随时间变化具有随机特性的基础上，用随机过程和时间序列分析技术研究这种复杂的水文过程。随机分析与统计理论本身发展相对比较成熟^[2]，它为研究水文不确定性提供了很好的工具。但是水文现象并非完全的纯随机问题，水文系统的形成、发生、发展的全过程因受众多因素的影响而表现出并非随机却貌似随机的特征，传统数学模型难以定量描述^[3]。因而，人们不断地探索、运用新的分析理论和方法，寻找水文时间序列的内在规律。随着模糊理论的发展，20 世纪 60 年代提出了模糊水文水资源学，认为水文现象具有模糊性，水文过程的不确定性就是模糊性。随着信息论和系统论发展和对水文学领域的交叉渗透，提出了灰色系统水文学，通过对不确定性参数、变量的灰度识别，认识水文现象不确定性的来源，识别水文风险和改善水文模拟的精度。目前这两领域仍在发展之中，其理论本身还存在未知或非确知的东西需要进一步研究。

工程实践中，虽然基于随机过程理论的水文时间序列描述应用广泛，但它不是基于水文过程物理机理而建立的模型。水文时间序列不只是系统简单输出，且包含了系统所有其他变量的信息，同时也蕴含着水文系统未来演化的信息，是确定性水文系统在不同时刻的特解的集合，因此水文时间序列是水文系统活动的刻画，反映了系统潜在吸引子的结构特征。

以混沌理论为核心的当代非线性科学的迅猛发展有力地推动了时间序列分析研究。动力学意义上的非线性时间序列分析始于 20 世纪 80 年代初，它以重建相空间为基础，研究相空间动力轨道的性质，并据此进行预测，这类方法在本质上是动力学的、非线性



的^[4]。水文系统是一个复杂的非线性系统，具有产生混沌的基本条件：对初始条件的敏感性和内在随机性，运用混沌理论及其非线性分析方法对水文系统演化的混沌性规律的研究刚刚开始^[5]。混沌理论的出现为研究这种复杂水文现象提供了新的思路，使得从复杂的非线性水文现象中提取确定性特征成为可能^[6]。

本书基于混沌理论的发展，以径流、降水和蒸发时间序列为对象，从不同角度研究水文时间序列的混沌特性和复杂程度，借鉴非线性科学的动力学思想，对水文混沌时间序列的理论和方法进行研究、推广和创新，对于有限长度实际水文时间序列，建立有效的水文时间序列预测模型，丰富和发展水文水资源系统非线性预测技术。

1.2 研究目的和意义

水是生命之源，是社会经济发展不可替代的自然资源。由于全球变化以及人类活动的负面影响，地球上的水循环在发生变化，正在发生如洪水、干旱、水体污染等严重的水危机。水问题已成为制约国家和区域发展的主要因素，因而水文水资源系统研究也就显得非常重要。

水文系统是一个复杂的系统。一方面，它是地球大气圈环境内相互作用和依赖的若干水文要素组成的，具有水文循环与演化功能的整体；另一方面，它又受地球及宇宙自然力的作用及来自人类的，不同程度的生产活动的影响，从而形成了水文系统复杂的演化规律。根据水文要素变化的非线性特点，引进新的分析途径是十分必要的。

基于混沌理论对水文系统演化的非线性规律研究，可从水文时间序列中发现其内在的、有序的、确定性规律，揭示水文动力系统的复杂运动特征。由于该方面的研究尚处在初级阶段，认识还不够深入，需要研究和解决的问题很多。因此，开展非线性理论及其应用的研究，认识水文系统的演变规律，对丰富水文水资源学研究的内容、推动水科学的发展具有重要的现实意义和科学价值。

随着混沌理论和非线性预测技术的不断进步，水文时间序列预测的理论和方法得到了很大的发展。各种新的理论和方法不断涌现，推动着对水文循环复杂过程更深入的研究。探索用混沌理论和非线性分析方法来揭示水文时间序列蕴含的规律，是本书努力研究的方向，将为流域水资源的可持续利用和合理调配提供科技支持，保障水文水资源系统经济、高效、安全运行。

1.3 混沌时间序列研究状况

1.3.1 混沌起源

1903年，法国科学家 H. Poincare^[7] 在研究太阳系稳定性问题时，把动力学系统和拓扑学有机地结合起来，提出了三体问题在一定范围内其解是随机的，实际上这是一种保守系统中的混沌。



1954年,苏联概率论大师 Kolmogorov^[8],在探索概率起源的过程中提出了 KAM 定理的雏形。随后 V. I. Arnold 等给出了严格的数学证明,为明确不仅耗散系统有混沌,而且保守系统也有混沌的理论铺平了道路。约 10 年后, E. Lorenz 等在天文、气象动力学研究中,发现了 Lorenz、Henon^[9,10] 确定性方程的混沌解,验证了系统混沌吸引子的演化。

20 世纪 70 年代,科学家对混沌作了大量的研究与发展^[11-13]。描述了混沌动力系统存在吸引子的几何特征,考察了混沌区的精细结构,绘制了分叉轮廓图,汇集了敏感函数、周期窗口、树枝分叉、切分叉、基本动力学单元、不动点谐波等混沌结构,促进了不同领域混沌学研究联成一体,把混沌学研究从定性分析推进到定量计算阶段。

20 世纪 80 年代,混沌科学又得到进一步发展。人们着重研究系统如何从有序进入新的混沌,以及混沌的性质和特点。除此之外,借助于单(多)标度分形理论和符号动力学,对混沌结构进行了研究和理论上的总结。1980 年, B. B. Mandelbrot 用计算机绘出了第一张 Mandelbrot 集的混沌图像。80 年代初 Takens、Packard、Farmer 等人根据 Whitney 拓扑嵌入定理提出了重构动力学轨道相空间的时间延迟法, Grassberger、Procaccia 首次运用这种相空间重构法,从实验数据时间序列计算出实验系统的奇怪吸引子的统计特征,如分数维、Lyapunov 指数和 Kolmogorov 熵等混沌特征量,从而使得混沌理论进入实际应用阶段。1989 年,郝柏林、郑伟谋在《现代物理学国际杂志》上发表文章,抛弃了人工造作的“反谐波”与“谐波”概念,推广了星号组合率,这是混沌学理论上近年来的重要进步。

到了 20 世纪 90 年代,混沌科学与其他科学相互渗透。无论是在生物学、生理学、心理学、数学、物理学、化学、电子学、信息科学,还是天文学、气象学、经济学甚至在音乐、艺术等领域,混沌理论都得到了广泛的应用。混沌在现代科学技术中起着十分重要的作用。

混沌中蕴含着有序,有序的过程也可能出现混沌。大自然就是如此纵横交错,如此复杂,包含着无穷的奥妙。因此,对混沌科学的进一步研究将使人类对大自然增加更深刻的理解。

1.3.2 混沌时间序列预测方法

混沌时间序列是指对一个混沌动力系统观测所得到的一个单(多)变量的时间序列。由于系统的混沌性质,混沌序列会表现得同随机噪声一样的混乱无序,大多数的混沌序列具有连续的宽带的功率谱,这说明了它们与随机噪声具有相似的线性统计特征。因此,传统的线性时间序列处理的手段用于分析混沌序列时是不足的,它不可能为动力系统提供必要特征,从而不可能真正地认识序列产生的机制。混沌时间序列的普遍存在性决定了对其研究的必要,而混沌时间序列的自身特点又限制了传统方法的应用,需要研究新的方法。

为了研究和处理混沌时间序列,混沌理论提出了如相空间重构、动力学建模的非线性分析方法。混沌时间序列预测方法就是这些非线性分析方法的具体应用,它优于简单



地认为系统是随机系统的统计预测方法和线性递归预测方法。

1. 相空间重构

混沌时间序列重构相空间始于 Packard 等^[14]，他们提出了由混沌时间序列重构相空间的两种方法：导数重构法和坐标延迟重构法，并采用导数重构法重构了 Rossler 吸引子，求出了 Lyapunov 指数。Grassberger 和 Procaccia 则提出了关联积分的概念及计算公式，采用时间延迟法，从一维时间序列中重构了 Henon 映射、Lorenz 方程、Logistic 方程和 Kaplan - York 映射等典型混沌系统，并求取了这些混沌系统的分数维。G-P 算法的提出是混沌时间序列研究中的一个极其重要的突破，它使得对混沌时间序列的研究不仅仅局限在已知的混沌系统，而是任何实测混沌时间序列，从而为混沌时间序列的研究进入实际应用开辟了一条道路^[15]。

实际应用中通常是不知道混沌时间序列的任何先验信息的，从数值计算的角度看，数值微分是一个对误差很敏感的计算问题，因此混沌时间序列坐标延迟相空间重构法仍有许多问题需要研究。坐标延迟相空间重构技术有两个关键的地方，即嵌入维数和延迟时间的确定。Takens 定理中，对于理想的无限长和无噪声的一维时间序列，嵌入维数和延迟时间可以取任意值，但实际应用中的时间序列都是有限长度且存在噪声，嵌入维数与延迟时间是不能随意取值的，必须精心确定，否则会极大地影响重构的相空间的质量。

若延迟时间确定的太小，相空间相点矢量非常接近，以至于无法区分，从而无法提供两个独立的坐标分量；但若延迟时间太大，则两坐标分量在统计意义上又是完全独立的，混沌吸引子的轨迹投影毫无相关性可言。这就需要用一定的方法来确定一个合适的延迟时间。目前，比较常用的有自相关函数法和互信息法，此外还有重构展开法^[16]、高阶关联法^[17]、填充因子法^[18]等方法。

嵌入维数的确定中，关联维数的计算是非常重要的。后来的研究者从两个角度对算法进行了改进，一是真正需要参与相关计算的点数，二是欧氏距离的选定^[19]。常用的有饱和关联维数法、虚假邻近点法和奇异值分解^[20]。

另外一种则认为，延迟时间和嵌入维数不能独立确定，应作为一个整体在相空间的重构中起作用^[21]。其实这两者并没有本质差别，关键是实测数据对具体的方法在确定时间延迟或嵌入维数的时候，参数的敏感程度不一样而已，这也是为什么各种方法都可以对某个具体的实际数据取得较好的效果的原因，对于实际应用而言，重要的是针对具体的数据，选择合适的算法和恰当的参数。

相空间技术的核心是嵌入维数和延迟时间的确定，目前没有一种通用的适合各种混沌时间序列的算法，文中所提及的多种方法都在不同程度上带有一定的主观性，其原因在于没有任何有关混沌时间序列的相空间的先验信息，因此缺乏一个明确的目标来度量相空间重建的效果。随着神经网络技术^[22]和小波分析的发展，未来的相空间重构技术的精度与置信水平将会不断得到提高。



2. 非线性时间序列预测技术

混沌时间序列在相空间重构的基础上,借助于相空间,传统的动力预测模式和统计预测模式可移植到混沌预测模式中,近年兴起的非线性预测模式,与混沌预测模式相结合后,可发挥出更大优势。混沌理论对于预测学的影响从它发展的一开始就得到了科学家们的重视。研究表明^[23],混沌一方面指出了原本认为不可预测的复杂事物具有可预测性,另一方面也指出了对原本认为可预测的简单事物的预测具有局限性。

混沌预测方法包括:全局预测^[24]、局部预测^[25]和自适应预测^[26]。全局预测法利用全部的过去的信息来预测未来,用全部已知数据来拟合动力方程。例如用神经网络建立的全局预测模型,它通过全部的输入输出对神经网络进行训练。但当加入新的数据时,预测模型须重新估计参数,因此计算量较大,且全局动力方程难于拟合。而局域预测法仅利用部分的过去的信息来预测未来,局域动力方程较容易拟合,且计算量较小。自适应预测是指在预测过程中,始终根据当前的预测误差来调整预测模型中的有关参数,使之在下一次预测的误差为最小,这种方法对算法的跟踪辨识和实时递推能力要求较高。

近期,随着非线性预测技术的发展,有些学者对混沌时间序列预测方法进行了较深入的探讨和应用。基于神经网络提出了多种类型的混沌神经网络模型:Aihara等^[27]提出的混沌神经网络模型;郭会军等^[28]提出一种基于正交小波神经网络的自适应预测模型,采用正交化逐步选择方法对于初始小波神经网络进行结构优化,从而建立最精简的网络模型;马千里^[29]提出一种动态递归神经网络模型进行混沌时间序列预测,用递归神经网络映射混沌相空间相点演化的非线性关系,提高了预测精度;国外,Suykens等^[30]提出递归神经网络模型,Parlos等^[31]的时延神经网络模型。在实际混沌时间序列预测中取得了比较令人满意的成绩。

由于神经网络模型采用经验风险最小化准则,因而不可避免地出现过拟合现象,导致模型的泛化能力受到限制,而且还存在诸如隐层节点数的选择等问题,从而大大限制了其进一步的应用。而支持向量机不存在局部极小问题、隐层节点数的选择等问题,并已在模式识别和函数回归中得到了成功的应用。崔万照等^[32]从理论上探索了支持向量机在混沌序列中应用,在此方面有许多问题需要研究。

1.4 水文时间序列预测研究状况

1.4.1 水文时间序列预测

水文时间序列预测的方法,目前主要有数理统计法、模糊数学预测法、灰色系统预测法、人工神经网络预测法四大类。数理统计法、模糊数学预测法、灰色系统预测法和人工神经网络法尽管都是以成因分析为基础,但属于不确定性问题分析方法范畴。

数理统计法是一种常用的预测方法^[33]。它依据大量历史资料,应用概率论与数理统计原理研究预测对象历史变化的统计规律,对对象未来发展进行预测。根据预测中依



据的资料不同,可分为两类:一是单序列预测,即通过分析要素本身的时序规律进行预报,如历史演变法、周期叠加法、平稳时间序列、马尔可夫法、卡尔曼滤波法等^[34];二是多序列综合预测,即分析要素与前期多因子之间的统计相关关系,然后用数理统计法加以综合分析,进行预报,如多元回归分析、逐步回归分析及多维时间序列等^[35]。数理统计预测方法需要用大量的资料来分析预测对象的演变规律,受先验水文统计分布规律的影响较大。

模糊数学预测法是从 20 世纪 80 年代开始发展的。陈守煜等^[36]在水文水资源模糊集理论与应用研究中注意到,水文系统要素受到形成机制复杂性的制约,水文时间序列存在大量的模糊性概念。1985 年,陈守煜、周惠成^[37]根据模糊控制的基本原理,以大伙房水库汛期入库流量为检验资料,提出了径流长期预报模糊推理模式。随后陈守煜创建模糊水文学,提出了一系列的论文与专著^[38]。1991 年陈守煜教授又提出了模糊识别模型和模糊聚类模型,并在此基础上建立了模糊识别预测模型。模糊理论预测方法成为水文水资源系统不确定分析与预测的研究方法之一^[39,40]。

灰色系统理论是我国著名学者邓聚龙教授在 1982 年提出的。灰色系统理论把观测数据序列看做是随时间变化的灰色量或灰色过程,通过累加或累减生成,使灰色量白化,建立相应于微分方程的模型,从而对序列未来做出预报^[41-43]。夏军等^[44]提出了灰色系统水文学的理论方法,基于水文信息量度和灰集合、灰数的分析工具,量化水文过程模拟、预测及其应用中的部分信息已知、部分信息未知的问题,通过对不确定性参数、变量的灰度识别,认识水文现象不确定性的来源,识别水文风险和改善水文模拟的精度。在水文时间序列研究中,胡惠方等^[45]利用等维新息 GM(1, 1) 模型预测城市生活需水量, H. V. Trivedi 等^[46]把灰色系统理论应用于径流量的预测。畅明琦等^[47]将灰关联度引入波谱分析,得出可用于非平稳时间序列的波谱分析方法。刘光吉等^[48]利用模糊数学和灰色系统理论对不严格具有无后效性的马尔柯夫过程进行描述,提出了模糊灰色马氏过程的新模式。灰色预测模型在实际应用过程中,也遇到了一些预测精度不高的例子,同时 GM(1, 1) 预测模型也存在理论缺陷,使用条件是研究对象的累加变量具有明显的指数增长规律,运用时总要根据实际情况对原公式进行修正和拓广。

人工神经网络理论上能够以任意小的误差逼近所给的函数^[49]。目前人工神经网络在水文系统的预测、分类识别、优化调度与计算、环境水质评价等方面都有了一定的应用,尤其在预测预报中应用最多。Linda See 等^[50]研究 BP 网络应用于洪水预报,与 ARIMA、BP 和实测资料比较,预报结果相对精确。张小峰等^[51]运用 BP 网络以流域降水条件为基本因子,建立了流域产流产沙 BP 网络预报模型。2002 年苑希民等^[52]出版了《神经网络和遗传算法在水科学领域的应用》一书,该书在系统阐述人工神经网络的基本概念、原理及运行过程的基础上,结合水科学领域的专业知识,全面系统地介绍了人工神经网络在气象、水文以及水环境等水科学领域的应用现状,深入研究了洪水预报、多泥沙洪水预报等实际预报和辨识模型及应用。人工神经网络为非线性水文系统的建模、识别和预测提供了一条崭新而有效的途径,但它却存在着网络结构难以确定、训练时间长、局部极小和初值依赖性等具体应用问题。



1.4.2 混沌理论在水文时间序列研究中的状况

由于降雨、径流、渗流、蒸发等水文过程受众多因素的影响而造成巨大的时空变异性,表现出并非随机却貌似随机的特征,致使传统确定性数学模型对这些水文过程的模拟遇到了很大的困难,而混沌理论的出现为研究这种高度复杂的系统提供了新的思路,使得从貌似无序的现象中提取出确定性的规律成为可能。

近 20 年来,混沌理论在水文领域取得了很大的研究进展^[53],不少研究表明水文时间序列存在着混沌特征,混沌预测方法可以取得比其他方法更好或者至少相同的预测结果。由于混沌理论还不成熟以及水文系统具有自身的特殊性,目前混沌理论和方法在水文水资源中的应用还存在很多争议和问题^[54,55]。混沌在水文中的研究主要集中在水文时间序列的混沌识别和混沌预测两个方面,而对于其他问题(如混沌优化和混沌控制等)则研究得较少。

水文时间序列的混沌特性识别,即判断水文过程是混沌的还是随机的,其中最常用的方法是饱和关联维数法、Lyapunov 指数法、Kolmogorov 熵等识别方法。由于上述方法都是混沌判定的必要条件而非充分条件,因此实际中多采用其中的几种方法对水文过程进行混沌识别^[56]。Hense^[57]最早在 1987 年将混沌理论应用水文领域,利用关联维数法分析了 Nauru 岛的 1008 个月降水数据,获得关联维数在 2.5 至 4.5 之间,由此提出降水序列存在低维混沌的假定。国内在 20 世纪 90 年代以后关于水文系统的混沌研究也相继展开。丁晶^[58]在 1992 年率先探讨了将混沌理论用于洪水分析的可能性,指出洪水过程可能是混沌的。王文均等^[59]对长江干流 5 个水文站的年径流序列进行混沌分析,发现长江干流年径流变化具有典型的混沌特征。王文等^[60,61]对混沌理论在水文中的應用提出不同的看法,通过对水文时间序列的最大可预报时间长度、混沌特征参数估计和数据量大小等存在问题的讨论,指出目前的混沌水文研究尚缺少谨慎合理的结论和解释,进一步对 4 个站不同时间尺度(日、旬、月、年)的径流序列进行研究,结果表明虽然径流序列具有非线性特征(随着时间尺度的增大非线性逐渐减弱),但未发现存在低维混沌现象。

在确定相空间参数时, Packard 和 Tanken 等提出的方法,对于延迟时间和嵌入维数的选择理论上没有任何限制。但是,实际研究中的选择非常复杂,至今还没有一个很好的方法。目前相空间参数的估计存在较强的主观性和不确定性问题,方法虽然有很多,但实际应用中采用不同方法或者不同的研究者得到的参数值不一定相同。丁晶等^[62,63]对嵌入维数和延迟时间的不同确定方法进行了比较,以长江日流量的混沌变化特性为例,分析了不同延迟时间方法和嵌入维数方法的优缺点,指出水文相空间参数的确定必须进行综合分析考虑。Sivakumar 等^[64]提出利用预测精度作为状态空间重建的标准,在预测阶段使用若干组可能的系统状态空间参数,以预测结果最优的那组参数确定为最终的系统状态空间参数。相空间参数确定方法都有各自的优缺点,故在实际水文时间序列的分析工作中,应多选用几种方法进行综合评判,以防止采用单一方法由于某种局限性而引起差错。

水文时间序列的混沌预测是对某一水文时间序列利用混沌识别方法判定是混沌的或是以混沌成分为主后,即可采用混沌方法进行预测。Jayawaidena 等^[65]在 1994 年首次利用混沌局域法对香港地区日降水序列和日径流序列进行预测,尽管结果表明混沌方法的预测精度不高,但与传统的自回归滑动平均模型 (ARMA) 相比,仍显示出较大的优越性。Porporato 等^[66]在混沌单变量预测的基础上提出混沌多变量预测,研究结果表明多变量混沌预测可以更加有效和充分地利用不同来源的信息,能够取得比单变量预测更好的效果。Karunasinghe 等^[67]对混沌全局法(神经网络法)和局域法(平均法和多项式法)的预测效果进行了比较,通过对 Mississippi 河和 Wabash 河两条河流的日径流序列 1d、3d 和 5d 的预测,结果表明神经网络法比局域法具有更好的预测性能。

在国内,丁晶等(1995)利用局域相空间法对金沙江屏山站日径流过程进行预测,揭示出相空间预测方法比传统的线性模型更能反映动力系统的非线性特征。赵永龙等将混沌相空间模型和小波网络模型相结合,对金沙江屏山站汛期日径流量进行拟合和预测。权先璋等^[68]利用径向基函数神经网络,对葛洲坝水库的日径流过程进行预测,获得了满意的精度。Zhou Y 等^[69]对 500 年来淮河流域洪涝变化序列,运用混沌理论和微分方程反演理论,重建了一个三维 2 次非线性动力模型,为淮河流域洪涝变化的进一步研究奠定了基础。钱镜林等^[70]提出了基于混沌理论的 Volterra 洪水预报模型,利用自组织法求解 Volterra 级数滤波器,提高了洪水预报效率和精度。席剑辉等^[71]根据所观测时间序列与典型混沌方程吸引子的相似性,建立了水文系统的动力学预测模型,利用扩展卡尔曼滤波跟踪辨识系统的主动态方程,实现了对大连市气温和降雨变量的自适应预测。

综上所述,尽管混沌科学在水文时间序列应用中取得了很大的进展,但是由于目前的研究方法不能准确提供混沌存在的确切证据,所以对于混沌理论能否应用于水科学本身以及水文过程中是否存在混沌现象仍存在一些争议。纯粹的混沌和纯粹的随机都只是数学上的一种理想状态,任何实际的、有限长的水文时间序列数据判定是否存在混沌现象,仅采用单一的方法所取得的结论,不能作为判定依据,而只能说明可能存在混沌特征。因而有必要采用多种研究方法,综合刻画某一水文序列中的混沌迹象,来判定该序列是以随机性成分为主,还是以混沌性成分为主。在这些现有的研究方法中,非线性时间序列预测和轨迹预测被认为是最有发展前景的。因为任何一个水文过程都可以看成是由非线性机制确定的输入输出系统,如果不规则的水文现象是一种混沌迹象,则非线性预测不仅本身就能够刻画混沌特征,更为重要的是它可以直接和实际结果相对比。

虽然,混沌理论在水科学问题研究中存在着一些争议,目前的研究仍强有力地表明,貌似高度无规则的水文系统可能是含有多个自由量的确定性系统。在水文时间序列预测问题中,如降水、径流、蒸发、渗流等的发生机制尚不特别明晰的情况下,混沌理论应用是很有前景的。因此,水文时间序列的混沌假设,为刻画和模拟水文系统和水文过程的动力学特征提供了新的思路和研究方法。显然,关于这方面的研究工作才刚刚起步,加强混沌的理论研究和应用混沌理论解决水文系统问题应该获得更广泛的关注。



1.5 本书主要研究内容

应用混沌理论对水文时间序列进行研究,可以发现其内在的、有序的、确定性规律,揭示水文动力系统的复杂运动特征。虽然,混沌理论在水文系统研究中存在些许争议,更有必要在水文水资源应用研究中探索和完善混沌理论,创新水文时间序列的预测理论和方法。用混沌理论研究水文系统,首先需要在水文时间序列进行混沌识别,判别水文系统的运动性质,而后运用相空间重构方法展开水文系统的结构,建立水文混沌时间序列的非线性预测模型。本书以径流、降水、蒸发时间序列为例,主要研究了水文系统相空间重构、水文时间序列混沌性质的识别和水文混沌时间序列的预测方法三个方面,建立了水文混沌时间序列一阶加权局域多步预测模型,提出了水文混沌时间序列 Volterra 自适应预测模型,首次把支持向量回归机引入水文混沌时间序列的预测中,并就模型的预测能力进行了计算分析。

本书的研究内容及各章安排如下:

第 1 章绪论。论述了研究的背景和意义,介绍了混沌理论及混沌时间序列研究的主要内容和进展,阐述了混沌理论在水文时间序列研究中的状况,在此基础上,提出了本书的研究思路和主要研究内容。

第 2 章重构水文系统相空间。相空间重构技术是建立水文混沌时间序列分析的基础,直接影响模型建立和预测。本章首先对相空间重构参数的计算方法进行了说明,由于实际水文时间序列长度有限,其参数需要综合确定,因此用自相关函数法和互信息法确定水文时间序列的延迟时间,用饱和关联维数法和 Cao 法确定嵌入维数,在计算参数前,对三门峡、直门达水文时间序列进行了单位根检验,并对非平稳水文序列作了一阶差分平稳处理,提高参数设定和建模效能。

第 3 章水文时间序列的混沌特性分析。从定性和定量两个方面对水文时间序列进行混沌识别。利用相图法和功率谱分析法进行定性混沌识别,定量混沌识别方法采用关联维数法和 Lyapunov 指数法。所研究的实际水文时间序列都存在混沌特性。

第 4 章水文混沌时间序列加权局域多步预测研究。对已有混沌时间序列预测方法作了深入研究,在动态局域预测模型的基础上,建立水文混沌时间序列加权一阶局部多步预测模型,并以经典混沌 Chen 系统和三门峡水文站年径流量、直门达水文站月降水量序列进行研究。研究表明一阶加权局域多步预测法计算简单,应用方便,但是预测的精度受水文时间序列长度影响较大,同时其符合一定精度要求的预测步长是有限的。

第 5 章水文混沌时间序列的 Volterra 自适应预测研究。混沌时间序列预测模型较多采用神经网络、遗传等人工智能算法,可能陷入局部最优。时间序列相空间重构技术,可以通过单个变量恢复复杂系统的时空结构,Volterra 级数可以高效的展开非线性系统变量序列,NLMS 自适应滤波器是一种快速、有效的优化技术。基于水文时间序列混沌特性,综合运用上述三种技术,提出一种新的预测方法:水文混沌时间序列 Volterra 自适应模型。运用 Loren 系统进行仿真研究,得出滤波器训练次数、收敛因子



和模型训练样本量的大小对模型预测精度的影响规律，仿真结果表明所建模型是有效的。通过三门峡水文站年径流量和直门达水文站月蒸发量模型预测实践，结果表明，提出的混沌时间序列 Volterra 自适应滤波模型，对水文时间序列预测是可行的、有效的。

第 6 章水文混沌时间序列支持向量回归机预测研究。支持向量机在系统辨识和分类建模的研究方面具有很好的特性，支持向量回归机的预测研究虽然有了一定进展，但是大都基于仿真研究，实际应用方面的研究不多，把支持向量回归机应用于水文混沌时间序列的预测研究是一个新的、有意义的工作。本章首先给出机器学习问题的一般表示，介绍了结构风险最小化原则的实现算法即支持向量机，研究了支持向量机模型的建立过程以及通过核函数到非线性问题的推广。在此基础上建立了水文混沌时间序列支持向量机回归模型，并就模型进行仿真计算，讨论了惩罚参数、不敏感损失参数和高斯径向基核参数对支持向量回归机模型的敏感性，得出参数寻优的一般指导原则。运用混沌时间序列 ϵ -SVR 向量回归机对直门达混沌径流序列、蒸发量序列进行了预测实现，结果表明水文混沌时间序列向量回归机模型是有效的。

第 7 章总结与展望。总结本书的主要研究内容以及取得的成果，并对有待进一步研究的问题进行展望。