



水电系统预报、优化及 多目标决策方法及应用

■ 王文川 著



科学出版社

水电系统预报、优化及多目标 决策方法及应用

王文川 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书就水电系统预报、优化、调度及多目标决策等相关问题的关键技术进行了探讨,系统研究和分析了人工智能技术在中长期径流预报中的应用、水文模型参数的优选及不确定性分析及其应用、马斯京根参数优化及其在河道洪水预报中的应用、基于判别分析法的泥石流预报技术及其应用、人工智能优化技术在水电站水库(群)优化调度中的应用和基于多目标可变模糊优选技术的水库正常蓄水位的确定等。具有系统性、新颖性和实践性特点。

本书可作为高等院校水文与水资源工程及水利水电工程专业的高年级本科生和研究生的教学、科研参考书,也可对相关专业的科研人员及关心水利行业发展的读者使用,同时也可供水利管理部门的科技工作者和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水电系统预报、优化及多目标决策方法及应用/王文川著. —北京:科学出版社,2015.3

ISBN 978-7-03-043705-1

I. ①水… II. ①王… III. ①水文预报-研究②防洪工程-洪水调度-多目标决策系统-系统优化-研究③水力发电工程-最佳化 IV. ①P338②TV87③TV7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 049889 号

责任编辑:姚庆爽 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 4 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 4 月第一次印刷 印张:10 1/4

字数:210 000

定价:55.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

水电系统运行与管理涉及径流预报、洪水预报、发电优化、防洪优化调度、多指标决策等一系列问题,随着水电系统规模越来越大,这些问题的高维、非线性、非凸等特征越加突出,仅利用传统的方法对问题进行求解往往不能取得理想结果,需要探索更有效的方法。

近年来,随着人们对自然科学的认识以及计算机技术、交叉学科的发展,一些现代智能方法相继提出,如人工神经网络、遗传算法、进化策略、支持向量机、混沌理论、可变模糊集理论等。但每种方法都有各自的适用条件和局限性。例如,人工神经网络能够有效地模拟本质为非线性的实际水文系统,但存在如何确定网络结构、过学习与欠学习、局部极小点等问题;遗传算法局部搜索能力差、存在未成熟收敛等现象;支持向量机存在参数选取困难等。因此尽管这些人工智能技术受到各领域广泛的关注和应用,并已成为求解复杂问题的有力工具,但与实际应用尚存在差距,当问题的规模和复杂度增加时,单一方法的求解能力大为削减,同时新方法的理论研究的落后,也导致了单一方法性能改进程度的局限性,而基于自然机理提出新的方法也并非易事。鉴于这种现状,算法混合的思想已成为提高算法性能的一个重要而有效的途径,其出发点是使单一算法互相取长补短,产生更好的性能和效率,因此根据研究问题的特点,有机结合各算法的优点,构造更高效的算法,必将对研究和解决水电系统相关问题提供全新的思路。本书重点主要集中在现代混合智能方法在径流中长期预报、概念性水文模型参数优选、概念性水文模型参数不确定性分析、水电站水库(群)发电、防洪优化调度研究和多指标决策上的应用探索。

本书是在系统总结作者近年来的研究成果的基础上形成的,在编写过程中,参阅和引用了大量相关文献,在此谨向有关作者和专家表示感谢。本书能够问世,要特别感谢我的硕士生导师邱林教授和博士生导师程春田教授,感谢他们多年来在我求学和工作中在很多问题上给予的指导和帮助。

本书的编写得到了河南省高校科技创新人才支持计划项目(13HASTIT034)、河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目(2012GGJS-099)、河南省高校科技创新团队(14IRTSTHN028)、水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心、2014年华北水利水电大学青年科技创新人才(70456)及河南省高校卓越计划专业建设经费的资助。

由于作者水平有限,且部分成果内容有待进一步深入研究,书中难免存在不妥之处,恳请读者多提宝贵意见!

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 中长期径流预报研究现状	2
1.3 水文模型参数优选及不确定性研究现状	6
1.3.1 水文模型参数优选研究现状	6
1.3.2 水文模型不确定性研究现状	8
1.3.3 河道洪水演算研究现状	10
1.4 水电站水库(群)优化调度研究现状	11
1.4.1 传统的数学规划方法	11
1.4.2 现代混合智能方法	13
1.4.3 水库蓄水位多目标决策研究现状	15
1.5 研究现状分析与结论	16
1.6 本书主要研究内容	17
第 2 章 基于粒子群优化支持向量机的年径流预报	20
2.1 引言	20
2.2 粒子群优化算法	20
2.3 支持向量机	21
2.4 基于粒子群优化支持向量机参数的预报模型	23
2.5 实例应用	23
2.6 小结	25
第 3 章 几种人工智能技术在月径流预报中应用与比较	26
3.1 引言	26
3.2 研究模型简介	27
3.2.1 人工神经网络	27
3.2.2 自适应模糊推理	28
3.2.3 遗传程序设计	30
3.2.4 支持向量机的基本原理	31
3.3 应用实例	32

3.3.1	研究背景资料	32
3.3.2	预报输入个数的确定	34
3.3.3	预报结果评价指标	35
3.3.4	预报建模	37
3.4	应用结果及分析	41
3.5	小结	44
第4章	新安江模型参数优化及其在河道洪水预报中应用	45
4.1	引言	45
4.2	新安江模型结构与参数	46
4.3	混合启发式优化算法	47
4.3.1	遗传算法	48
4.3.2	混沌和 Logistic 映射	49
4.3.3	模拟退火	51
4.3.4	混合混沌遗传和模拟退火	52
4.3.5	CGASA 的实现	52
4.4	应用实例	55
4.4.1	研究区域	55
4.4.2	率定准则	57
4.4.3	应用结果和分析	58
4.5	小结	63
第5章	新安江模型参数随机优化及不确定性分析	64
5.1	引言	64
5.2	SCEM-UA 算法评估新安江模型参数不确定性	65
5.2.1	SCE-UA 算法	65
5.2.2	SCEM-UA 算法	67
5.2.3	SCEM-UA 算法评估新安江模型参数不确定性	69
5.3	应用实例	69
5.3.1	研究区域和数据	69
5.3.2	应用结果和分析	70
5.4	小结	84
第6章	马斯京根模型参数优化及其在河道洪水预报中的应用	86
6.1	引言	86
6.2	马斯京根参数优化模型	87
6.3	差分进化算法简介	87
6.4	应用实例	88

6.5 小结	90
第7章 基于判别分析法的泥石流预报方法研究	91
7.1 引言	91
7.2 Fisher 判别分析预报模型	91
7.2.1 基本原理	91
7.2.2 判别函数的建立	91
7.2.3 判别准则	92
7.2.4 Fisher 判别分析预报模型检验	93
7.3 距离判别分析法预报模型	93
7.3.1 马氏距离	93
7.3.2 判别准则的评价	94
7.4 应用实例	95
7.4.1 预报参数的选取	96
7.4.2 Fisher 判别预报法	96
7.4.3 山洪泥石流距离判别分析法	99
7.5 小结	100
第8章 基于混沌遗传算法的水电站(群)优化调度	102
8.1 引言	102
8.2 水电站优化调度的数学模型	103
8.2.1 单一水电站优化调度的数学模型	103
8.2.2 梯级水电站优化调度的数学模型	104
8.3 混沌遗传算法	105
8.3.1 混沌及其特性	105
8.3.2 混沌与遗传算法的结合	105
8.3.3 混沌遗传算法的步骤	106
8.4 应用实例	108
8.4.1 复杂函数优化算例	108
8.4.2 典型径流水电站优化调度算例	111
8.4.3 长系列历史径流水电站优化算例	112
8.4.4 梯级水电站优化调度算例	113
8.5 小结	117
第9章 基于群居蜘蛛优化算法的水库防洪优化调度	118
9.1 引言	118
9.2 水库防洪优化调度模型	118
9.3 群居蜘蛛优化算法	119

9.3.1 群居蜘蛛优化算法概述	119
9.3.2 群居蜘蛛优化算法优化原理	120
9.4 基于群居蜘蛛优化算法的防洪优化调度模型的求解	123
9.5 实例应用	123
9.6 小结	125
第 10 章 基于改进指标权重模糊 ISODATA 的洪水分类	126
10.1 引言	126
10.2 基于改进指标权重的模糊 ISODATA 方法	126
10.3 应用实例	128
10.3.1 相对隶属度矩阵	128
10.3.2 指标权重的确定	128
10.3.3 实例 1	129
10.3.4 实例 2	129
第 11 章 基于多目标可变模糊优选的水库正常蓄水位确定	131
11.1 引言	131
11.2 多目标可变模糊优选方法	132
11.3 应用实例	133
11.4 小结	135
第 12 章 结语	136
参考文献	139

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

我国河流众多,径流丰沛,落差巨大,蕴藏着丰富的水能资源,技术可开发利用的水能资源为 5.42 亿 kW,是世界上水能资源总量最多的国家。虽然早在 1912 年就有了第 1 座水电站(云南石龙坝水电站,装机 480kW),但由于工业化进程的滞后,水电开发利用真正起步于 20 世纪后半期。经过五十多年的建设,特别是 2000 年(水电装机 7708.5 万 kW,占技术可开发容量的 14.22%)以后,随着西电东送国家战略目标的实施和我国经济的快速发展,迎来了我国水电建设的高潮。截止到 2012 年年底,我国水电装机容量约为 2.49 亿 kW,占技术可开发容量的 45.94%,还远低于世界上水能资源相对丰富的国家。美国在 1986 年时已开发 43.3%,加拿大在 1997 年时已开发 42.9%,日本在 1986 年时已开发 95.0%,意大利在 1986 年时已开发 93.0%。我国水电事业发展极其迅速,到“十一五”末(2010 年),中国水电装机总容量达到 19400 万 kW,占技术可开发容量的 35.79%。到“十二五”末(2015 年),中国水电装机总容量将达到 32800 万 kW,将占技术可开发容量的 60.52%。水电的快速发展和新机组的不断投产,必然会给水电站运行管理和水库调度带来新的挑战。

水电系统运行与管理涉及径流预报、洪水预报、发电优化、防洪优化调度、多目标决策等一系列问题,随着水电系统规模越来越大,这些问题的高维、非线性、非凸等特征越加突出,仅利用传统的方法对问题进行求解往往不能取得理想结果,需要探索更有效的方法。

近年来,人工神经网络理论、支持向量机、遗传算法、混沌理论、模糊集理论等新的理论和方法的出现,从一定程度上可以解决水电系统优化与决策过程具有多维、多层次和非线性等特征的问题,丰富了水电系统运行与管理所涉及问题的研究手段和途径。但每种方法都有各自的适用条件和局限性。如人工神经网络能够有效地模拟本质为非线性的水文系统,但存在如何确定网络结构、过学习与欠学习、局部极小点等问题;与传统的神经网络等学习方法相比,支持向量机具有泛化能力强、维数不敏感、收敛到全局最优等优点,很好地解决了前者容易出现的过学习、局部极值、维数灾难等棘手问题,因而成为近几年机器学习领域中的一个非常活跃的研究热点。然而,支持向量机是机器学习领域中相对比较新的理论,它在很多方面尚不成熟、不完善,需要进一步地研究和改进;遗传算法虽然长于全局寻优,但局部

搜索能力差、存在未成熟收敛等现象;因此虽然这些新的理论和方法已成为求解复杂问题的有力工具,但当问题的规模和复杂度增加时,单一方法的求解仍有一定的局限性,并不能满足实际问题中出现的多模态、高维、带约束和多目标优化问题,所以针对水电系统相关具体问题设计混合的智能算法具有十分重要的理论意义和应用价值。由此,本书重点主要集中在现在混合智能方法在径流中长期预报、概念性水文模型参数优选、概念性水文模型参数不确定性分析、水电站水库(群)发电、防洪优化调度研究和多指标决策上的应用探索。

1.2 中长期径流预报研究现状

中长期径流预报是根据前期和现实的水文、气象等信息,运用天气学、数理统计、宇宙-地球物理分析方法,对未来较长时间内水文情势做出定性或定量预报,通常泛指预见期3天以上、1年以内的水文预报。对径流预报而言,预见期超过流域最大汇流时间的即为中长期水文预报。传统的中长期预报方法主要是根据河川径流的变化具有的连续性、周期性、地区性和随机性等特点开展研究,主要有成因分析和水文统计方法;近年来,新的数学分支和计算机技术的发展,为中长期水文预报拓展了新的研究途径,主要包括模糊分析、人工神经网络、灰色系统分析、小波分析、混沌分析、支持向量机、遗传程序设计等以及这些方法的相互耦合,中长期径流预报是中长期水文预报研究的主要内容。

1) 成因分析法

成因分析法主要侧重于水文现象物理形成过程的描述与分析。它的主要思想是根据前期的大气环流特征以及表示这些特征的各种高空气象要素,直接与后期的水文要素建立起定量的关系进行预报。章淹(1995)从水文气象学角度论述了近年国内在暴雨中期预报研究方面的若干新进展,探索了中期预报的方法。

2) 水文统计方法

水文统计方法是水文中长期预报中应用比较广泛的一种方法,它从大量历史资料中寻找已经出现过的预报对象和预报因子之间的统计规律和关系或水文要素自身历史变化的统计规律,建立预报模式进行预报。按预报时考虑因素的多寡可分为单因素预报和多因素综合预报。单因素预报是利用水文要素自身历史演变规律,来预报该要素未来可能出现的数值,又称时间序列分析预报。常用的有历史演变法、周期分析方法和平稳时间序列法等。事实上,水文气象要素是由多种因素决定的,要作出未来较长期的水文气象预报,往往需要挑选多个相关程度比较高的因子,进行多要素综合预报。常用的有多元线性回归分析法、主成分分析等。许士国等(2007)建立了基于物理成因概念的多元线性回归预报模型,利用该模型对镇西站2005年的最大洪峰流量和峰现时间做了预报,取得了较好的效果。

3) 模糊分析

20 世纪 80 年代初,陈守煜(1990)在水利、水文、水资源与环境科学领域进行了模糊集的应用研究,并将模糊集分析与系统分析结合起来,形成了一个新的模糊随机系统分析体系。陈守煜、周惠成(1986)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。陈守煜(1997)又提出了中长期水文预报的综合分析理论模式与方法,该方法将水文成因分析、统计分析、模糊集分析有机地结合起来,为提高中长期水文预报的精度提供了一条新途径。白子岩(1999)应用模糊模式识别法进行了中长期径流预报。

4) 人工神经网络

90 年代以来,人工神经网络在水文预报中的应用逐渐增多。吴超羽等(1994)认为人工神经网络模型具有生物神经网络的一些特性,能够“学习”,因此易于应用在各种类型的流域系统,能够有效地模拟本质为非线性的实际水文系统。Karunanithi 等(1994)应用人工神经网络进行了河川径流预报。钟登华等(1995)提出了水文预报的时间序列神经网络模型,并指出探索利用输入输出数据进行建模的方法是十分必要的。胡铁松等(1995)对人工神经网络在水文水资源中的应用现状作了全面的介绍,并认为神经网络为一些复杂水文水资源问题的研究提供了一条有效的途径。Hsu 等(1995)提出了确定三层 BP 网络模型结构和参数的线性最小二乘单纯形法,并认为三层结构的 BP 网络就能满足水文预报的一般需要。丁晶等(1997)尝试应用人工神经网络模型预报兰州站过渡期的月径流量,结果表明,人工神经网络模型用作过渡期径流预报可行,且效果优于多元回归方法。邱林等(1998)提出了模糊模式识别神经网络预测模型,开创了神经网络拓扑结构建模的新思路。许永功等(2001)提出的基于神经网络的径流中长期预报模型。程春田等(2005)研究了 BP 模型结构对漫湾径流预报精度的影响。Huang 等(2004)将神经网络模型预测结果和 ARIMA 模型的预测结果做了全面的比较分析,结果表明,以预测值与实际值的相关系数及均方误差作为评价标准,神经网络模型表现了比 ARIMA 模型更好的效果。徐留兴等(2006)采用改进的 Elman 递归神经网络对岷江紫坪铺站的天然月径流进行预测分析,结果表明该模型应用在紫坪铺水文站的月径流预测中是合理、可行的。同时,屈亚玲等(2006)提出了改进的采用局部回归的 Elman 神经网络应用于凤滩水库的中长期预报。Sohail 等(2008)应用 BP 神经网络分析研究了季降雨径流过程。

5) 灰色系统理论

水文中长期预报内含的不确定性成分较多,如系统动力学本身的复杂性、变化的随机性以及人类认识的不完善性等,且各种成分难以严格区别,即部分信息清楚部分信息不清楚,基于这一事实,可以将水文过程看成一个含有灰信息和灰元素的多因素影响的灰色系统。夏军(1993)基于时间序列多重信息利用的扩维原理和灰

色系统理论的关联分析思想,提出一种适合于缺乏输入因子资料或选择影响因子有困难条件下的中长期水文预报方法。冯平等(1992)采用灰色系统理论中灰关联度分析方法,对枯水期径流量的预估模式进行了探讨。袁秀娟等(1994)将灰关联模式(GM)识别与预测应用于径流中长期预报。陈意平等(1996)认为 GM(1,1)模型为水利系统的中长期预报提供了一种新方法。赵瑾(2007)采用灰序列关联分析技术对年径流量和年最大洪峰流量两要素进行预测,并与自回归模型 AR(p)的预测结果进行对比,证明灰序列关联分析法预测精度优于自回归模型 AR(p)。

6) 混沌理论

混沌理论认为,客观事物的运动除定常、周期、准周期运动外,还存在着一种更加普遍的运动形式——混沌运动,即一种由确定性系统产生的、对初始条件具有敏感依赖性、永不重复的、回复性周期运动。大多数水文现象的运动特征都具有确定性的一面又具有随机性的一面。把水文时间序列嵌入到重构的相空间中,并借助于分形理论和符号动力学,便可在相空间中揭示出水文动力系统复杂运动特征,这样就可能从复杂水文系统运动中发现其内在的规律。Breaford 等(1991)首次将混沌理论应用于融雪径流的研究,认为嵌入空间求取饱和关联维数的方法能鉴别低维混沌系统,但其结果表明融雪径流是具有很多自由度的随机行为,支持用随机模型描述径流。Jayawardena 等(1994)分析了水文时间序列的混沌特性,并对降雨径流时间序列进行了混沌性分析和预测,但也只是初步研究。Sivakumar 等(2001)基于确定性的混沌理论建立了二阶局域预测模型,并应用于巴西 Araguari 流域的月径流预测,结果验证了模型的可行性,也得出该流域的月径流动力系统具有低维混沌特性的结论。赵永龙等(1998)利用小波网络模型,将混沌重建相空间理论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(1999)以葛洲坝水库为例,计算得到日径流序列的最大 Lyapunov 指数,并针对河川径流非线性动力学混沌过程,采用神经网络对其日径流进行预报,取得了满意的结果。丁涛等(2004)应用混沌理论研究了月径流序列的区间预测。陈南祥等(2005)以汉江石泉水库逐月平均入库径流序列为例,建立了径流时间序列相空间重构与神经网络耦合预测模型,计算结果表明,模型有较高的预测精度。李红霞等(2007)在混沌动力系统相空间重构的基础上,利用关联维数法和最大 Lyapunov 指数法,对月径流时间序列进行混沌特性识别,结合自适应技术的实时递推特性和 Volterra 级数的非线性表征能力,利用 Volterra 自适应滤波法可对径流时间序列进行预测。

7) 小波分析

小波分析是一种强有力的信号分析工具,是 Morlet 于 20 世纪 80 年代在分析地球物理信号时提出来的,它是傅里叶分析、样条理论、数值分析等多个学科相互交叉的结果,是一种信号的时间-尺度(时间-频率)分析方法。而水文序列均含有

多种频率成分,每一频率成分都有其自身的制约因素和发展规律,因此仅从水文序列本身出发构造模型,将难以把握水文序列的内在机制,可以利用小波分析对水文序列进行分频率研究。Cao(1995)将小波分析与混沌、ANN 结合建立了小波网络模型对具有混沌特征的时间序列进行了短期和长期预测并获得了成功。尤卫红等(1999)将小波分析与混沌耦合建立了不同时间尺度的气候预测模型,对滇中月降水距平值在月、季、年三种尺度上进行了预测。李贤彬等(1997)将 ANN 与小波耦合,提出了基于小波变换序列的 ANN 组合预测模型:首先对水文序列施行 ATrous 小波变换,再利用 ANN 对小波系数进行多尺度组合预测,最后对预测分过程重构即得原始水文序列预测,文中以宜昌站年平均流量做了研究,表明预测效果理想。周惠成等(2007)根据小波分析理论,建立了月径流序列的小波分解预测校正模型,以长江的宜昌站和寸滩站的月径流资料为例,与 ARMA、ARIMA、BP 网络模型相比,结果表明,所建立的小波分解预测校正模型比其他模型具有更高的预测精度。

8) 遗传程序设计及支持向量机

遗传程序设计(GP),是一种迅速发展起来的自动化编程技术,是在遗传算法的基础上加以延伸而形成的一种新的演化算法,可以用来实现问题求解程序的自动设计和程序代码自动生成。GP 在水文中的应用也引起了水文工作者的关注,Khu 等(2001)将 GP 作为误差校正工具应用于降雨径流模型(NAM)中,在 1~9 小时实时降雨径流预报中取得了比回归分析和 Kalman 滤波更好的效果,Liong 等(2002a)将 GP 应用于推断降雨径流关系,其预报结果表明可以代替传统的降雨径流模型。王文川等(2006)、袁晓辉等(2006)将其应用于径流预测建模,取得了较好的效果。支持向量机(SVM)是 Vapnik(1995)提出的一种新型机器学习方法,它具有完备的统计学习理论基础和出色的学习性能,其突出特点是根据结构风险最小化(structural risk minimization, SRM)原则进行学习,可以从本质上提高学习机的泛化能力;同时,它将优化问题转化为求解一个凸二次规划的问题,二次规划所得的解是唯一的全局最优解,这样就不存在一般神经网络的局部极值问题;另外,它运用核函数巧妙地解决了维数问题,使得算法的复杂度与样本维数无关。支持向量机在水文预报中的应用正在不断发展。Liong 和 Sivapragasm(2002b)将其应用于洪水预报中,得出 SVM 的预报精度优于 ANN,廖杰等(2006)探讨了支持向量机及其在径流预测中的应用,林剑艺等(2006)已将支持向量机成功应用于中长期的径流预报。Yu 等(2006)应用 SVM 建立了实时洪水位预报模型。Khan 和 Coulibaly(2006)将 SVM 应用于湖水位预测。但是,支持向量机在应用上还存在一些问题:①不同的核函数适合描述不同的数据结构,对于给定的数据,如何选择最为合适的核函数;②支持向量机中的参数选取对预测模型的泛化性能影响很大,但是目前尚缺乏结构化的方法来实现参数的最优选择。

1.3 水文模型参数优选及不确定性研究现状

1.3.1 水文模型参数优选研究现状

流域水文模型将流域概化为一个系统,采用数学的形式简化描述流域水文过程,将流域上的输入因素(降雨、蒸发、前期含水量等)转换为出口断面的响应(如流量等),使其能够在一定的目标下代替实际水文过程,对流域的行为进行预测,其预测效果的好坏很大程度上又依赖于模型参数的选取。因此,水文模型参数优选一直是水文预报研究的一个重要内容。传统的参数优选通常为人工方法(如试错法),在人工优选过程中,模型模拟结果的好坏主要通过比较模拟与实测水文过程的吻合情况。经验丰富的水文工作者,通过人工优选可以得到一组较好的参数。但由于受人为因素影响,没有统一的评价标准,因此很难评价模型优选结果的优劣;并且人工优选还是一项非常耗时的工作,尤其是对缺乏经验的水文工作者。随着计算机技术的迅速发展,参数自动优选方法得到了普遍应用,大大加快了参数优选的速度,弥补了工作人员缺乏经验的不足,增加了模拟结果的客观性和可信度。

早在1970年,Nash等(1970)就提出了用模型的确定性系数来评价模型模拟结果的精度。Johnston等(1976)对水文模型参数优选进行了探讨。Pickup(1977)对降雨-径流模型自动率定的算法及搜索策略进行了有效性进行了测试。Gupta等(1985)利用基于导数的优化方法对水文模型的参数进行了自动率定。Hendrickson等(1988)比较了降雨-径流模型参数自动率定的Newton法和直接法。这些早期的传统优化方法都是基于单点迭代的局部优化方法,难以解决复杂水文模型参数优选问题,而且局部寻优法对参数初值要求较高,给定不同参数初值,往往会得到不同优选结果,因此采用局部寻优法很难确定优选结果是否为全局最优。

随着20世纪80年代启发式全局优化算法兴起,水文工作者对其在水文中应用进行了研究。Wang(1991)最早将遗传算法应用于概念降雨-径流模型的产流参数优选。毛学文(1993)利用二进制编码的遗传算法,进行了新安江模型参数优选。为了提高二进制编码的遗传算法的求解效率,杨晓华等(2002)提出实编码加速遗传算法,在大坳流域模型的参数优选中得到成功的应用。谭炳卿(1996)以新安江模型为例,应用14个流域的资料,对罗森布瑞克法、改进的单纯形法和遗传算法优选模型参数的效果,优化方法和收敛速度及参数初值对优选效果的影响进行了比较分析,指出以遗传算法的优选结果作为参数初值,再用其他两种方法进一步优化,是模型参数识别的一个有效途径。Franchini(1996)将遗传算法和局部搜索算法相结合对降雨径流模型进行参数自动优选,取得了较好的效果。Franchini(1997)等以11个参数的CRRM模型-ADM模型为例对不同遗传算法的结构、鲁棒性及效率进行了比较研究,最后得出Pattern Search(PS)具有更好的性能。

Marca 等(1997)在进行概念降雨-径流模型参数的自动率定时,比较了几种遗传模式的应用效果。武新宇等(2004)使用并行算法技术和遗传算法结合,在微机集群环境下利用 Java 编程,快速稳定地获得了新安江模型参数,使算法的优选时间缩短。陈炯烽等(2006)应用遗传算法研究了新安江模型日模拟参数的优选。李娜等(2007)提出基于小生境技术的混合加速遗传算法,在广西合浦水库流域的洪水预报中得到成功应用。江燕等(2006;2007)将粒子群及改进的粒子群算法应用于新安江模型参数优选。

为了解决复杂水文模型参数的优选问题,Duan 等(1992)结合了单纯形法、随机搜索和生物竞争进化等方法的优点,提出的 SCE-UA(shuffled complex evolution)算法,可以一致、有效、快速地搜索到水文模型参数全局最优解,SCE-UA 算法被认为是连续型流域水文模型参数优选最有效的方法之一,在流域水文模型参数优选中应用十分广泛。Sorooshian 等(1993)以 DRMS 和 HMLE 两个不同的目标函数,采用 SCE-UA 算法和 MSX(multistart simplex)算法分别对 NWSRFS 的 SAC-SMA 模型进行 10 次独立的参数优选试验,结果发现 SCE-UA 算法更有效,收敛速度更快。Yapo 等(1996)采用 SCE-UA 算法对概念性降雨径流模型参数率定中率定数据的敏感性进行了分析。Kuczera(1997)在水文模型参数子空间概率优化中,比较了 SCE-UA 算法、遗传算法、MSX 算法(分别采用单纯形和拟牛顿法)的搜索性能,结果表明,SCE-UA 算法鲁棒性更强、收敛效果更佳,遗传算法虽然在初始进化阶段具有较快的收敛速度,但是在接近最优解的区域却无法有效地搜索到该最优解。Luce 等(1994)将 SCE-UA 算法应用于有道路森林地区产流模型渗透参数估计。最近,Cooper 等(2007)将 SCE-UA 算法结合基于约束的水文过程用于水箱模型参数率定。Goswami 等(2007)应用 SCE-UA 算法率定 SMAR(soil moisture accounting and routing)模型参数。

文献研究认为在进行水文模型参数优选时,通过采用单一的目标函数来评价模型参数的好坏,往往不能恰当地描述由观测资料所反映出来的各种水文特征。Yapo 等(1998)在单目标 SCE-UA 算法的基础上提出了旨在解决多目标全局优化问题的 MOCOM-UA 算法,为水文模型参数优选方法研究开辟了新的途径,吸引了越来越多的水文专家和学者的研究。Yu 等(2000)为提高传统的目标函数性能,提出了模糊多目标函数方法,使得该方法能够适合于产流分布很不均匀的流域。Cheng 等(2002)采用模糊优选模型构造多目标评价函数,再利用遗传算法对三水源新安江模型的参数分产流和汇流两部分分别进行了参数优选。由于在汇流计算前需要对参数进行预处理,调整每个时间间隔的净雨值以减少观测值和模拟值的误差,因此率定过程不能完整地模拟模型的实际情况。Cheng 等(2006)在文献中将产流和汇流过程合并一起,全面考虑参数率定过程中的洪水主要特征指标:洪峰流量、峰现时间及场次洪水总量,采用理想点法构造多目标问题的 GAs 评价

函数,减少了模型模拟结果的误差,有效地提高了场次洪水参数优选的效果。Khu等(2005)指出参数优选算法中随着所包含的目标函数的增多,Pareto解及近似Pareto解的数量也随之增多,参数优选问题变成决策问题,自动优选程序必须从大量的Pareto解中找出一组合适的模型参数,提出了多目标遗传算法和Pareto偏爱排序相结合的方法,并对Danish流域的MIKE11/NAM模型进行率定,结果表明,该方法可以有效地对大量的Pareto解进行过滤,从中选择少数偏爱方案。在给出模型参数最优估计的情况下,该方法是十分有效的。李向阳等(2007)提出了水文模型模糊多目标SCE-UA参数优选方法。

1.3.2 水文模型不确定性研究现状

水文过程具有随机性,这是不争的事实。而且在当前的客观条件下,人们既不能很准确地取得水文资料,也不可能获得流域内水循环诸要素(降水、蒸发、截留、下渗、土壤水、地表及地下径流等)可靠的时空变化值。因此,对复杂的随机水文过程进行概化的水文模型必然有很大的不确定性。由于水文模型不确定性的存在,在采用优化率定算法进行流域水文模型参数优选时,我们总是可以搜索到几组或者很多组不同的参数值,使得模型的目标函数达到几乎一样的水平,即所谓的异参同效(equifinality)现象。这使得我们在最终选择一组最优参数值时具有很大的不确定性,同时也给水文预报产生的模型输出带来很大的不确定性。近些年来,水文模型参数及水文预报的不确定性问题在国际上得到了广泛和深入的研究。

Gupta等(1985)通过分析发现水文资料的质量对模型参数优选的影响远大于所选取水文资料的数量对模型参数优选的影响。水文资料的质量依赖于数据中所包含的有关水文过程信息的多少与数据本身存在的误差,数据包含的信息多少取决于水文过程的变幅,如果数据涵盖了丰水、中水、枯水年,则认为数据中包含的水文信息较多。Lye(1990)运用贝叶斯方法近似地得到了洪峰流量超过频率的估计,把洪水的自然不确定性与模型参数的不确定性综合起来,减小了防洪风险。Krzysztofowicz(1999)提出通过确定性水文模型进行概率预报的贝叶斯理论,建立了BFS,该理论的基础也是贝叶斯公式,它把水文预报量的总的不确定性分为两大类:一类是以先验分布描述的模型输入的不确定性;另一类是以似然函数描述的除输入不确定性以外的所有不确定性(包括模型结构、参数估计及测量误差等),统称为水文不确定性。该系统最后得到预报量的后验密度,实现概率水文预报。王善序(2001)介绍了BFS,提出了研究水文预报不确定性是十分重要的课题。钱名开等(2004)利用BFS研究了淮河息县站流量的不确定性预报,结果表明概率预报至少与确定性预报一样有价值,特别当预报不确定性较大时,概率预报比现行确定性预报具有更高的经济价值。张洪刚等(2004a)将考虑水文模型不确定性的概率预报模型应用到白云山水库流域进行实例验证,得到预报流量的后验密度。结果

表明概率预报在提高精度的同时还可提供基于风险分析的信息。李向阳等(2006)建立了基于BP神经网络的贝叶斯概率水文预报模型,应用于水库流量的概率预报中,试验结果令人满意。

20世纪90年代初,Beven(1993)针对模型参数的异参同效现象,在Hornberger等(1981)的RSA(regionalized sensitivity analysis)方法的基础上,提出GLUE(generalized likelihood uncertainty estimation)方法。GLUE方法基于蒙特卡罗方法,采用似然度的概念区分参数对应的模拟结果与实际过程的差别,认为与实测值最接近的模拟值所对应的参数具有最高的可信度,离实测值越远,则可信度越低,似然度越小,当模拟值与实测值的距离大于规定的指标时,就认为这些参数的似然度为0。如果说目标函数代表参数对应的模拟值与实测值之间的相似程度,似然度则代表参数在整个参数可行区间内的相对优劣,直接说明参数的可接受程度。Freer等(1996)将GLUE方法应用到法国Ringelbach流域的TOPMODEL模型不确定性预测,结果表明,预测流量的分布为非高斯分布,且形状随时间和流量的变化而变化。Cameron等(1999)在GLUE框架下,以威尔士Wye河流域TOPMODEL模型为例,采用21年的降雨径流数据对洪水频率进行了研究,最后得出在GLUE框架以及指定条件下, TOPMODEL模型可以有效地完成洪水频率和连续模拟分析目标。Franks和Beyen(1997)研究了缺少率定资料情况下SVAT模型的不确定性,采用GLUE方法,根据贝叶斯公式由新的资料对原似然值进行更新,通过比较更新前后的不确定性估计,可以对新增信息的价值进行评价。Cameron等(2000)应用GLUE方法估计流域最大降雨,讨论了最大降雨模型的存在等效性及不同参数对最大降雨预测的影响。Montanari(2005)认为, GLUE方法依赖于某些清晰或隐含的假定,当应用于大样本数据时,并不清楚这些假定如何对不确定性估计产生影响。文中通过人工方式,生成长系列河道流量数据,研究了长系列模拟时,各种假定对GLUE方法不确定性分析的影响。通过GLUE不确定性范围和所模拟的带不确定性的人造大样本数据的比较发现, GLUE往往低估了水文模型模拟所产生的不确定性。

Kuczera等(1998)在贝叶斯推断理论框架下,采用经典的MCMC方法——Metropolis算法对概念性流域水文模型的参数不确定性进行研究,通过实例研究表明, Metropolis算法得到的结果比传统的一阶近似(traditional first-order approximation)更有效。Campbell等(1999)将目前最流行的MCMC方法即Metropolis-Hastings算法应用到非线性事件型水文模型,以西澳大利亚的五个流域为例,论证了该方法是参数估计的有用工具。Bates等(2001)对Metropolis-Hastings算法进行了改进,提出了MHBC(Metropolis-Hastings algorithm of Bates and Campbell)算法,该算法在循环迭代过程中,按照模型参数相关性的大小分成几块逐块更新。该方法需要对参数的相关性具有较好的了解以保证具有较高相关