

水文水资源 随机模拟技术

**Stochastic Simulation Technology for
Hydrology and Water Resources**

王文圣 金菊良 李跃清 张翔 编著



四川大学出版社

中国气象局成都高原气象研究所开放基金资助

国家自然科学基金项目 (编号 50579009、50579053) 资助

中国气象局成都高原气象研究所基本科研业务费专项 (BROP200701) 资助

水文水资源 随机模拟技术

**Stochastic Simulation Technology for
Hydrology and Water Resources**

王文圣 金菊良 李跃清 张翔 编著



四川大学出版社

责任编辑:刘 珺
责任校对:李思莹
封面设计:米茄设计工作室
责任印制:杨丽贤

图书在版编目(CIP)数据

水文水资源随机模拟技术 / 王文圣等编著. 成都: 四川大学出版社, 2007.8
ISBN 978-7-5614-3762-9

I. 水… II. 王… III. ①水文学-水流模拟②水资源-水流模拟 IV. P33 TV211.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 113013 号

内容提要

本书系统阐述了水文水资源随机模拟技术的基本原理和分析方法, 重点介绍了单变量线性参数随机模型、单变量非线性参数随机模型、多变量参数随机模型、非参数随机模型和基于计算智能的随机模型, 同时探讨了随机模拟技术在水文水资源系统分析、计算、预测、风险管理等方面的典型应用。全书具有系统性、新颖性和可操作性的显著特点。

本书可作为高校水文水资源及环境类专业的高年级本科生及研究生的教材和教学参考书, 也可供理工科高校农业、气象、地质等相关专业的高年级学生、研究生和教师阅读, 同时适合于有关科技工作者使用和参考。

书名 水文水资源随机模拟技术

编 著 王文圣 金菊良 李跃清 张 翔
出 版 四川大学出版社
地 址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行 四川大学出版社
书 号 ISBN 978-7-5614-3762-9/P·11
印 刷 成都蜀通印务有限责任公司
成品尺寸 185 mm×260 mm
印 张 17
字 数 380 千字
版 次 2007 年 8 月第 1 版
印 次 2007 年 8 月第 1 次印刷
印 数 0 001~2 000 册
定 价 40.00 元

◆读者邮购本书, 请与本社发行科
联系。电 话: 85408408/85401670/
85408023 邮政编码: 610065

◆本社图书如有印装质量问题, 请
寄回出版社调换。

◆网址: www.scupress.com.cn

前言

受自然变化和人类活动的双重影响,水文水资源系统呈现出明显的不确定性(主要表现为随机性)行为特征,是典型的复杂系统。这些不确定性对水文水资源系统规划设计与运行管理产生重要影响。目前,对水文水资源系统进行真实的物理实验以揭示其结构和功能,尚十分困难。另外,由于系统的不确定性,目前还不能用准确的数理方程描述并求解。要了解水文水资源系统各组成间的相互关系,预测水资源规划设计方案可能产生的效果及对环境、生态的影响,分析系统的发展趋势,当前可行的一类有效方法就是随机模拟技术(又称统计试验方法)。

水文水资源系统随机模拟技术已受到了水科学工作者的广泛研究、应用和创新。本书旨在系统地归纳、总结这方面理论和技术,内容不仅包括水文水资源系统随机模拟的基本理论、分析方法、主要随机模型及其完备的随机模拟程序,而且尽可能反映水文水资源随机模拟研究的最新进展。

全书包括8章内容:第1章简要介绍了水文水资源随机模拟技术的概念、实质、优势和在水文水资源系统中的理论与应用研究进展;第2章详细地介绍了随机模拟技术的基本理论和主要的分析方法;第3至7章详细地阐述了单变量线性参数随机模型、单变量非线性参数随机模型、多变量参数随机模型、非参数随机模型,以及基于计算智能的随机模型;第8章介绍了随机模拟技术在水文水资源系统中的一些典型应用。

本书内容新颖,理论联系实际。可以想见,书中介绍的某些有用的技术、方法和模型,不仅有助于水文水资源系统的规划设计,对高等院校的研究人员、学生和从事实际工作的工程师也很有价值。本书也可作为高校水文水资源及环境类专业、气象类专业、农业类专业的高年级本科生及研究生的教材和教学参考书。

全书各章执笔如下:第1、2章由王文圣、金菊良和李跃清执笔;第3、4、6章由王文圣执笔;第5章5.1至5.2节由李跃清执笔,5.3至5.5节由王文圣执笔,5.6至5.7节由张翔执笔,5.8节由周玉良和金菊良执笔;第7章7.1和7.3节由王文圣执笔,7.2和7.4节由周玉良和金菊良执笔;第8章由王文圣、金菊良和张翔执笔;全书由王文圣负责统稿,王文圣、金菊良负责校阅。

作者衷心感谢提供资料、研究成果的国内外学者和启发作者编写本书的各位专家,感谢四川大学、合肥工业大学、中国气象局成都高原气象研究所、水资源与水电工程科学国家重点实验室(武汉大学)的各级领导和诸多同事的热情帮助和大力支持。我们还要特别感谢四川大学水利水电学院丁晶教授和邓育仁教授,是他们严谨的治学态度、深厚的学术造诣、无私的帮助和殷切的鼓励,在激励作者不断前进。同时要衷心

感谢的有四川大学曹叔尤教授，武汉大学夏军教授、郭生练教授，中国科学院科技政策与管理科学研究所魏一鸣教授，成都信息工程学院李祚泳教授。

我们的家人默默承担了书之外的大量工作，付出了辛勤的汗水，在此对他们致以崇高的敬意。

我们最后还要十分感谢国家自然科学基金项目（编号 50579009，50579053）、中国气象局成都高原气象研究所开放基金和中国气象局成都高原气象研究所基本科研业务费专项（BROP200701）对本书的大力资助。四川大学出版社对本书的出版给予了大力的支持并付出了辛勤的劳动，在此致以深深的谢意！

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中的一些观点、方法难免存在争议甚至出现一些错误，敬请各位专家和读者给予批评指正。

编 者

2007 年 3 月 31 日

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 水文水资源随机模拟的概念与特点	(1)
1.2 水文水资源随机模拟的理论研究进展	(4)
1.3 水文水资源随机模拟的应用研究进展	(8)
第 2 章 随机模拟的基本理论与分析方法	(12)
2.1 概述	(12)
2.2 随机过程	(12)
2.3 马尔柯夫过程	(16)
2.4 平稳随机过程	(20)
2.5 水文水资源时间序列分析方法	(25)
2.6 水文水资源序列的组成分析及其识别	(34)
2.7 水文水资源序列的极差分析和轮次分析	(43)
2.8 纯随机序列的随机模拟	(45)
第 3 章 单变量线性参数随机模型	(50)
3.1 概述	(50)
3.2 建立随机模型的程序	(50)
3.3 线性平稳随机模型	(54)
3.4 季节性自回归模型	(75)
3.5 解集模型	(79)
3.6 正则展开模型	(87)
3.7 长持续性模型	(90)
3.8 分期平稳自回归模型	(93)
第 4 章 单变量非线性参数随机模型	(99)
4.1 概述	(99)
4.2 门限自回归模型	(101)
4.3 双线性模型	(108)
4.4 指数自回归模型	(113)
4.5 具有物理基础的随机模型	(116)

第 5 章 多变量参数随机模型	(123)
5.1 概述	(123)
5.2 多变量平稳自回归模型	(123)
5.3 多变量季节性自回归模型	(129)
5.4 空间典型解集模型	(131)
5.5 空间相关解集模型	(134)
5.6 多变量序列随机模拟的主站模型	(138)
5.7 多变量序列随机模拟的正交变换法	(143)
5.8 地统计学随机模拟方法	(145)
第 6 章 非参数随机模型	(152)
6.1 概述	(152)
6.2 最近邻抽样随机模型	(153)
6.3 单变量核密度估计随机模型	(158)
6.4 多变量核密度估计随机模型	(164)
6.5 非参数解集模型	(167)
6.6 基于小波变换的组合随机模拟模型	(174)
第 7 章 基于计算智能的随机模型	(182)
7.1 概述	(182)
7.2 基于遗传算法的水文变量正态数据转换模拟方法	(182)
7.3 基于人工神经网络的随机模型	(186)
7.4 基于模糊信息扩散技术的随机模型	(192)
第 8 章 随机模拟技术在水文水资源系统中的应用	(201)
8.1 概述	(201)
8.2 随机模拟技术在水文水资源系统分析计算中的应用	(201)
8.3 随机模型在水文水资源系统预测中的应用	(210)
8.4 随机模拟技术在设计洪水过程线法适用性探讨中的应用	(220)
8.5 随机模拟技术在水文水资源系统风险分析中的应用	(227)
8.6 随机模拟技术在水文系统干旱频率分析中的应用	(232)
8.7 随机模拟技术在改进层次分析法中的应用	(236)
8.8 随机模拟技术在流域暴雨洪水系统随机模拟中的应用	(239)
8.9 随机模拟技术在流域防洪体系超标准洪水风险分析中的应用	(244)
结束语	(254)
参考文献	(255)
附录一	(264)
附录二	(265)

第1章 绪论

水文水资源随机模拟技术这门学科内容丰富,而且至今仍处在迅速发展之中。本章主要介绍水文水资源随机模拟技术的概念、特点及其在水文水资源领域的理论与应用研究进展。

1.1 水文水资源随机模拟的概念与特点

1.1.1 水文水资源随机模拟的概念

水文水资源系统受自然变化和人类活动的双重影响,呈现出不确定性(主要表现为随机性)行为特征。在现有社会、经济和技术条件下,对水文水资源系统进行真实的物理实验以揭示其结构和功能,显然是困难的。由于系统的复杂性,目前尚不能用准确的数理方程描述并求解。要了解水文水资源系统各组成间的相互关系,预测水资源规划设计方案可能产生的效果及对生态的影响,分析系统的发展趋势,当前可行的一类方法就是水文水资源随机模拟(stochastic simulation in hydrology and water resources),也称蒙特卡洛(Monte Carlo)试验。正是水文水资源系统的随机性和动态性,使得随机模拟技术在该领域得到了大量的研究和广泛的应用。该技术的一般步骤为:①在深入了解水文水资源系统各要素及其关系、系统与环境间关系基础上,对研究问题进行定义和描述。②确定模拟目标和系统状态变量,建立反映水文水资源问题的随机水文模型(数学模型)。③求解数学模型的参数,收集模型运行的相关数据。④模型运行、验证,模拟结果分析,进而解决实际问题。

水文水资源随机模拟技术可定义为^[1,2],根据水文水资源系统观测资料的统计特性和随机变化规律,建立能预估系统未来水文情势的随机模型,由模型通过统计试验获得大量的随机模拟序列(简称模拟序列),用于水文水资源系统分析计算,解决系统的规划、设计、运行与管理问题的方法。它已成为认识、设计和管理水文水资源复杂系统的主要方式之一,一直是水科学研究的热点。

水文水资源随机模拟技术的萌芽最早可追溯到20世纪20年代末的Sudler,他将写有径流值的卡片进行抽样得到1000年径流模拟序列。经过几十年的发展,直到1961年Britta将马尔柯夫模型用于年径流模拟和1962年Thomas与Fiering将季节性马尔柯夫模型用于月径流随机模拟时,才标志着水文水资源随机模拟技术的成熟。我国20世纪70年代末及80年代,以成都科技大学(现为四川大学)、河海大学为代表开展了大量的水

水文水资源随机模拟的理论与应用研究工作,形成了以随机过程理论为基础的水文学新分支——随机水文学,其代表作为1988年成都科技大学出版社出版的《随机水文学》^[1]。

1.1.2 水文水资源随机模拟的实质

随着水文水资源随机模拟在水文水资源领域的广泛应用,人们对水文水资源随机模拟本质和科学作用的认识得到了全面的提升,主要表现在三个方面:一是模拟序列的本质问题,二是模拟序列中的特异值问题,三是随机模型的可靠性问题。

模拟序列来自于随机模型。当模拟序列足够长时,模拟序列就等同于随机模型。当随机模型可作为研究对象的总体时,那么模拟序列就可用来表征研究对象未来可能出现的各种时序和数量方面的变化,特别是可能出现的各种极端恶劣组合情况。这无疑有助于在水资源系统的规划设计和运行管理决策时,对可能出现的不利情况作出更全面的考虑。因此模拟序列也可称为估算序列。模拟序列与实测序列的区别何在呢?当随机模型仅利用了实测序列的信息,那么模拟序列的信息量没有变化,它仅仅利用实测序列含有的信息进行时序的外推,其代表性不变。当随机模型利用了实测序列之外的其他信息(例如地区的特大历史洪水),那么模拟序列的信息量得到了大量的增加,其代表性就高于实测序列。后者往往是通常采用的形式。所以,模拟序列不是所谓的“假造序列”。

由随机模型模拟出大量的模拟序列,其中可能出现个别的特异值,例如负流量、数值非常大的流量(经分析这样大的流量不可能出现)。随机模型中的独立随机项一般用正态分布或皮尔逊Ⅲ型(P-Ⅲ)分布来表征其统计特性。这些分布都是无上限的,当模拟序列数量很大时,可能出现个别“离奇”的特大值。这并不违背统计规律。问题的症结是能否用上端无限的分布曲线。这和下面的情况十分类似。误差尽管不会无穷大,但正态分布仍然为大家公认用来表示误差的分布。上端无限分布的应用导致模拟序列中出现“离奇”的特大值。又如在作洪水频率曲线分析时,当频率取非常大时,得到的洪水也非常大。因此问题的关键在于在分析计算时是否应采用特大值,以及基于大量模拟序列的水资源系统规划设计成果受个别“离奇”特大值的影响有多大。事实上对于后者,影响是微小的,因为设计成果一般是取用某种估计量的平均值和分位数,而平均值和分位数这些统计量主要取决于数量很大的模拟序列本身。这一点正好和处理实测序列的情况形成鲜明的对照。实测序列只有几十年,在这样一个短序列中加入一个特大值影响举足轻重。另外,在大量模拟序列中可能出现负值。如在模拟大量序列中出现的负值较少,其存在不影响实际应用;如出现的负值较多,则该随机模型必须进行修正或更换。

由于水文水资源过程的极端复杂性,观测资料往往较短,故所选择的随机模型未必能完全反映实际水文水资源过程的特性,即模型与原型之间可能存在着一定的差异。这种差异不仅表现在模型结构与原型可能有差异,而且模型参数的估计必定会存在着一定的误差。这就是随机模型的可靠性问题。大量应用研究表明,只要模型结构合理、参数估计方法比较稳健,则建立的随机模型是可靠的^[1-6]。这也正是随机模拟的关键所在。

1.1.3 水文水资源随机模拟的特点

现行水文计算提供水利工程规划、设计所需要的水文水资源序列,其计算方法主要

有两种,一是实测序列法,二是设计洪水过程线法。前者的优点是:能广泛适应各种工程(单一或系统工程,发电、灌溉、供水工程)兴利计算需要,而且由水文水资源序列估计各种水利指标时概念明确、计算直观。但缺点是:几十年的实测序列只是一个历史样本,未来出现的序列不可能与过去实测序列一样;而且,现有科学水平也不能确定性地预测未来将会出现怎样的具体序列,只能进行概率性预测,其可能性是多种多样的。因此,依据已有的实测序列计算出的水文特征或水利指标只是未来可能出现的一种情况,以此进行工程设计会有抽样误差,有时误差可能很大,而且实测序列法无法估计抽样误差。

以实测序列法进行设计的新安江水库所出现的问题生动地说明了这一点。新安江水库是一座大型水库,初设时的水文计算是依据罗桐埠站 1930—1956 年实测与插补的年、月径流序列进行的,这 27 年的多年平均流量为 $360 \text{ m}^3/\text{s}$ 。1958 年以后,新安江流域气候条件异常,出现了枯水年组,1958—1968 年的多年平均流量为 $260 \text{ m}^3/\text{s}$,较原设计值低 27.8%,发电量则较原设计值低很多。地处我国北方的黄河三门峡段和松花江哈尔滨段也发生过这种现象。这说明实测序列法作为水利工程规划、设计的依据是存在严重缺陷的。

设计洪水过程线法是依据观测的洪水资料,通过分析计算提供水利工程所需要的一套洪水序列。该法有一个重要假定,那就是设计洪水位的频率等同于设计洪量的频率。这个假定颇有问题。同样的时段洪量,时间过程与空间分配可以相差很大,调节计算后的水库最高洪水位也可相差很大,而且选取时空分布典型的主观任意性也颇大。此外,这种方法也不能给出设计水利指标(如水库设计洪水位)的抽样误差。

随机模拟技术和现行水文计算法相比,有以下显著特点^[1,2]:

(1)随机水文模型全面表征水文现象统计变化的特性,不同的模型表征水文现象变化特性的重点有所差异。有重点表征水文现象随时间变化的模型(时间模型),有重点表征水文现象随空间变化的模型(空间模型),有既表征时间变化又表征空间变化的模型(时空模型)。一般而言,随机水文模型将水文现象在时间和空间上的变化有机地结合在一起,即它综合表征水文现象的时空统计变化特性。模拟序列出自模型,大量的模拟序列以直观的方式并和模型等价地表征水文现象的时空统计变化特性。因此,根据模拟序列计算各种水利指标时,就能够科学地统一考虑水文现象在时空上的变化特性。这样,随机模拟技术克服了设计洪水过程线法将完整的洪水现象人为分割成洪量、时间过程和空间分配三个方面而分别孤立考虑和分析计算的缺陷。特别值得一提的是,随机模拟技术还克服了“最高洪水位的频率等同于洪量频率”这个不符合实际的假定所造成的缺点。

(2)由随机模型能模拟出大量的水文水资源时间序列。根据工程特性,模拟序列通过径流调节计算即可得到相应的大量水利指标序列(如坝前洪水位等)。依据长指标序列可以既方便又合理地获得水利指标频率曲线(例如坝前洪水位频率线)和各种特征值,以用于工程的规划和设计。

(3)大量的模拟序列表征着未来水文水资源现象可能出现的各种情况。正如前面提出的,实测序列法以短期实测序列为依据,而短期的实测序列只能表征未来水文水资源现象的一种可能情况。显然,在工程设计时不能只考虑一种情况,而必须考虑工程运行期内可能出现的各种情况,并据此对水利指标的抽样误差作出估计,使设计更加合理、

可靠。

总之,随机模拟技术是在水文计算法基础上发展起来的一种先进方法。它一方面对现行水文计算法所存在的问题进行了重大的改进;另一方面,它更全面、客观,适应性也更强。所谓全面,是指这种方法不仅可以提供单站(单点)各种特征水文量的模拟序列(年、月、旬、径流、洪水、雨量等),而且可以提供多站(多点)的序列;所谓客观,是说该方法有一定的原则和规则可供遵循,大大减少了计算过程中的主观性;所谓适应性强,是指该法能适应各种工程的规划、设计和管理的需要。

随着认识的提高和方法的成熟,我国在制定水利水电工程设计洪水计算规范^[3]和水文计算规范^[4]时也正式列入随机模拟技术。这标志着水文水资源随机模拟技术进入了实用阶段。从 20 世纪 60 年代初至今 40 多年里,国内外在干旱重演、梯级水电站优化调度、水环境容量评价、水库防洪安全设计、水文风险分析等方面对水文水资源随机模拟技术进行了大量的研究和应用,取得了显著的进展^[1,2]。

1.2 水文水资源随机模拟的理论研究进展

水文水资源随机模拟技术的关键是建立合理可靠的随机模型。就目前成熟的、应用较多的随机模型而言,可归纳为 3 类^[5]:①回归类模型。这类模型结构简单,概念清晰,参数不多,易于实现。其代表为单、多变量平稳和非平稳 ARMA(p, q)模型。②解集类模型。解集类模型的特点是能同时保持总量和分量的统计特性和协方差结构,且分量之和等于总量。③具有物理基础类模型。所谓物理基础,指在建模时,将统计上的推论与水文水资源过程形成的物理机制的合理分析有机结合起来,使得模型具有一定物理意义。为了探讨更合适的随机模型,水文水资源工作者近二十年来展开了以下几方面的工作。

1.2.1 常用随机模型的改进和发展

1990 年文献[6]在对洪水资料进行对数指数变换后建立了多维平稳自回归模型和混合回归模型,进而对长江流域 8 个站区、历时 180 天的洪水过程进行了随机模拟,取得了满意的成果,并对自回归模型的改进进行了探讨。1994 年文献[7]提出的混合回归疏系数模型,克服了回归模型和自回归模型的不足,以模型模拟序列为输入进行水库群优化运行,结果优于传统方法。同年文献[8]提出了线性扰动模型。该模型由两部分组成:一是表征水文序列确定性成分的季节模型部分,二是描述水文序列中短期随机变化成分的扰动模型部分。将该模型应用于洪水随机模拟是相当成功的。1994 年文献[9]对间断雨量序列中有雨、无雨状态的交替规律沿用马尔柯夫转移概率描述。无雨转到有雨时,有雨序列用某指定概率分布刻画;有雨转到有雨时,若相关,由相依随机模型表征,反之,后一个雨量序列用某指定概率分布刻画。1996 年文献[10]在现有随机模型基础上,通过分析月径流与日径流量的统计关系,提出了按月径流大小分组建立的日径流随机模拟模型,并用于气候变化研究。该模型包含了更多的气候变化对日尺度水文变量的影响信息。1997 年文献[11]考虑到日流量过程自相关结构在年内各分期内(汛前过渡期、汛期、

汛后过渡期、枯期)是相对平稳的,因而提出了一种分期平稳自回归模型。该模型兼顾了现行平稳和非平稳自回归模型的优点,模型概念清晰,结构简单,参数合适,适用性强。日流量过程随机模拟表明,建议模型是成功的。1997年文献[12]考虑年、月径流分类的模糊性,建立了多站径流随机模拟的模糊自回归模型。

在考虑水文序列偏态分布特性方面也作了一定的改进工作。1992年文献[13]提出了多种边际分布的季节性一阶自回归模型(SAR(1)),应用于实际流域的暴雨随机模拟,取得了较好的成果。1993年文献[14]探讨了中国四大河(长江、黄河、松花江、西江)月径流的时、空变化特性,研究表明季节性一阶自回归模型加上随机项的偏态变换可用来表征月径流的时序变化,主站模型可用来表征月径流的空间变化。1995年文献[15]建立了考虑年径流偏态特性的3站平稳AR(1)模型并获得了满意的应用效果。

1996年文献[16]提出了洪水特征值随机模拟的模糊典型解集模型。1998年文献[17]用空间解集模型把平均降雨量随机分解成点降雨量并与频率分析法、相关法对比,结果表明前者最优。相关解集模型存在模型参数太多和自相关结构不一致问题。为减少参数,开展了相关研究。文献[18,19]提出了压缩式解集模型,其思想是忽略一些不必刻画的协方差结构以减少参数。1990年文献[20]建立了动态解集模型(DDM)并应用于短时段降雨解集,1992年该作者对DDM模型进行深入研究并随机模拟了多站降雨和径流。该模型包括两个独立框架:基于连续相依模型(如SAR(1)模型)的矩确定过程(moments determination procedure)和分离过程(portion procedure)。连续相依模型参数即为DDM模型参数,故参数数目大大减少了。1992年文献[21]和1993年文献[22]研究了逐步式解集模型,其思路是逐步将总量分解成两部分:当前分量和余下待分配的总量,直至所需要的各分量。比如,年径流分解成月径流,先将年径流分解成1月径流和余下11个月径流之和,再将后者分解成2月径流和余下10个月径流之和;依此类推,可得各月径流模拟值。1996年文献[23]提出了基于准确修正的简单解集模型,该模型参数少,能保持总量、分量各种统计特性。为解决自相关结构不一致问题,文献[20,23]通过直接或间接使用SAR(1)模型克服了这一问题。

具有物理意义的随机模型研究进展不大。1990年清华大学对散粒噪声模型进行了改进并用于宜昌站洪水随机模拟^[24]。1998年文献[25]应用伊藤型随机微分方程建立了具有水文物理参数的日流量随机模型。水文水资源系统受气候、地形、地貌、植被和人文等因素影响,是十分复杂的非线性的开放的巨系统。考虑水文形成规律,赋予参数一定物理意义,既是一项比较困难的工作,也是目前研究的重要前沿问题。

1.2.2 非线性随机模型

传统的随机模型一般都是线性的,而水文水资源系统是非线性的。为客观描述水文水资源序列的非线性特征,还必须研究非线性随机模型。近十多年来,水文水资源非线性时间序列分析成为水科学的热门课题,取得了不少理论及应用方面的成果。

2001年文献[26]将门限自回归模型引入日流量过程随机模拟。门限自回归模型结构简单、概念清楚,可用来反映日流量在时序上的非线性特性。根据我国金沙江流域屏山站观测资料,建立了日流量随机模拟的门限自回归模型。适用性检验结果表明,该模

型能很好地表征日流量在时序上的随机变化特性。在此基础上,2002年文献[27]提出了用遗传算法估计门限自回归模型参数的简便方法,这为该模型进一步在水文水资源随机模拟中的应用奠定了基础。

1996年文献[28]将双线性模型首次引入随机水文学中并用于洪水期(5月1日—10月31日)日流量随机模拟。文中介绍了模型的结构和参数估计方法。实例分析表明双线性模型是可行的。2000年文献[29]提出了估计双线性模型参数的新方法——遗传算法。

1995年文献[30]创造性地将人工神经网络(ANN)模型用于印度多水库入库月径流序列随机模拟,并与多变量自回归模型进行了对比。研究表明,ANN模型适合于水文水资源随机模拟,且优于自回归模型。1998年文献[31]提出了一种基于水量平衡和非线性水库的水文模拟神经网络。该网络的结构和参数具有明显的物理意义,克服了BP网络在水文模拟上的缺陷,初步试用获得了较好结果。1999年文献[32]也提出了基于ANN的日流量序列随机模拟模型。其建模思路是,水文序列的确定成分由ANN模型描述,其随机成分由一般随机模型描述,两者组合就可以进行水文序列随机模拟。该模型适合于单变量和多变量水文序列的模拟。实例分析表明是可行的。

1997年文献[33]首次将指数自回归模型用于随机水文学,并在洪水预报中进行了试用,取得了较好的成果。2001年文献[34]建议了指数自回归模型参数估计的遗传算法,并用于日径流预测。

1.2.3 非参数随机模型

上述随机模型都是对水文水资源序列的概率分布(正态分布、P-Ⅲ型分布)和相依形式(线性或非线性)作了适当简化和假定的,因而有其自身的缺陷。为此,提出了非参数随机模型途径。非参数模型避免了序列相依结构和概率密度函数形式的人为假定,取得了令人满意的模拟效果。

对独立时间序列非参数模拟,主要有 Bootstrap(自展法)和 Jackknife(刀切法)两种方法。文献[35]从贝叶斯观点出发构造了非参数贝叶斯模拟方法,该法用于独立同分布序列模拟研究,取得了有价值的结果。

对相依水文水资源序列的非参数随机模拟最近十几年取得了较大的进展。1996年文献[36]提出非参数最近邻抽样模型,并首次将它用于水文相依时间序列随机模拟中。为了说明这种方法的有效性,作者使用三个实例作了验证:以AR(1)和SETAR(1)分别为总体生成100个容量为500的样本,根据样本由非参数最近邻抽样模型抽样。统计试验表明,该法能保持总体的线性或非线性相依结构,统计特性也保持得很好。将该法用于Webber River的月径流模拟中,并与AR(1)模型模拟结果对比,发现非参数最近邻抽样模型效果好,能优良地保持分布的偏态和多峰形态。但该法最大的缺点是对已知序列的重复抽样,没有实现合理的内插和外延。为此,2000年文献[37]提出了最近邻抽样扰动模型,在对水文序列随机模拟时进行了扰动,因此实现了合理的内插和外延。该模型结构简单、方便实用。单站和多站洪水随机模拟表明建议模型是优越的。

1996年文献[38]构造了核密度估计干、湿长度(以日为单位,有雨、无雨的时间长度)

的随机模型并用于单站日降雨量的模拟,通过与传统的干、湿长度模型对比,表明核密度估计模型是优良的,可用于降雨量模拟。1997年文献[39]建议了非参数一阶马尔柯夫模型(NP(1)),作者使用该模型分别对AR(1)和SETAR(1)模拟的序列进行统计试验。结果表明,NP(1)能逼近资料的真实分布,能保持总体的线性或非线性相依关系,且统计特性保持良好;同时将NP(1)用于Beaver River月径流模拟,并与AR(1)模型模拟结果对比,表明NP(1)优于AR(1),并且实现了合理的内插和外延,但该文局限于单变量一阶情况。1997年文献[40]构造了以高斯函数为核的多变量一阶核密度估计模型,并给出了详细的算法。根据Salt Lake City 30年日气候资料(降雨量、太阳辐射、最高气温、最低气温、平均露点温度和平均风速),用上述方法对后五种气候因子进行了模拟研究。Monte Carlo试验表明这种非参数统计方法用于多变量相依时间序列模拟是成功的。

2001年文献[41]基于核密度估计理论构造了单变量多阶非参数随机模型。将该模型用于金沙江屏山站日流量过程随机模拟,适用性分析表明该模型是适合的。2002年文献[42]将文献[41]建议的模型用于年径流过程随机模拟,并与平稳AR(2)模型对比。结果表明非参数模型是适合于水文水资源随机模拟的,是优越的。2003年,文献[43]将NP(1)模型用于月径流随机模拟并同AR模型进行了对比,表明前者在保持非线性、多峰形态方面优于后者。2003年文献[44]提出了多变量非参数随机模型,以金沙江流域屏山站和宜宾一屏山区间两站日流量过程同时随机模拟为例进行了应用研究。该模型模拟序列来自于实测样本而又不同于实测样本,因而能优良地保持日流量过程的各种统计特性。

1998年文献[45]基于核密度估计建立了一种新型非参数解集模型,并以墨西哥San Juan River 80年月径流资料为例进行了随机模拟研究,同参数解集模型模拟结果对比,表明非参数解集模型能良好地保持径流序列的各种统计特性。

1999年文献[46]将非参数解集模型用于月径流随机模拟中,获得较好的结果。2000年文献[47]将非参数解集模型在汛期日径流随机模拟中加以了应用。1999年文献[32]提出了改进的非参数解集模型并用于月径流随机模拟,研究表明改进的非参数解集模型更优。

1.2.4 基于小波分析的随机模型

20世纪80年代初兴起的小波分析(wavelet analysis)具有时频多分辨功能,能充分挖掘水文水资源序列中的信息。近十年来,小波分析在水文学中获得了较好的应用^[48],其中基于小波分析的随机模型就是其中的重要内容。

2000年文献[49]利用A Trous算法将日流量过程分解成几个小波系数序列和一个尺度系数序列,即小波变换序列,根据水文时间序列显示的主周期(年)将小波变换序列分解成若干段,经无条件随机抽样,获得大量组合,再由小波逆变换得到模拟日流量过程。以金沙江屏山站日流量为例,研究表明该途径是可行而有效的。

2002年文献[50]将小波分析与随机理论结合,提出了基于小波变换的组合随机模型。以屏山站年径流过程为例,建立了基于小波变换的组合随机模型,模型的适用性分析结果表明是可行的。

2005 年文献[51]将小波分析的滤波技术与改进的非参数解集模型结合,提出了基于小波消噪的非参数模型,并应用于月径流随机模拟中,取得了较好的成果。

1.3 水文水资源随机模拟的应用研究进展

随机模拟技术的主要目的在于用来求解实际水文水资源系统,目前主要表现在水文水利计算、水文预报、水文测验及其他几个方面。这里仅作简略介绍。

1.3.1 在系统分析方面

水文要素(如年径流量等)可按其统计特性建立相应的随机模型;通过随机模型,借助统计试验方法可获得大量的模拟序列;在系统分析中,以模拟序列作为输入,根据系统的特性和设计要求进行各种计算,从而得出系统响应,即输出(供水流量、保证出力、年电能、水库设计洪水位……)。显然,作为输入的模拟序列(如年径流量)是系统分析的基础,而合理可靠的模拟序列必须建立在合理可靠的随机模型基础之上。因此,随机模型在各种水文水资源系统分析中占有重要的地位。例如,黄河上游建有刘家峡、盐锅峡、八盘峡、青铜峡和龙羊峡等水利工程,对于这样的复杂系统,在进行各种分析时(如水库调度分析),作为系统输入的多站模拟序列是必不可少的。较短的实测序列用于这样的系统分析存在着一些难以解决的问题,比如连续枯水段考虑的程度、防洪和兴利库容的有效结合、调度图的合理绘制、破坏深度及其相应概率的估计等。大量模拟序列的应用在一定程度上可以解决这类问题。又如,在对四川省沱江流域规划中,特别是进行沱江的环境保护系统分析时,要求以枯水流量序列作为系统输入。对枯水流量建立适当的随机模型,进而获得大量模拟序列,可以满足系统分析的要求。

为了研究三峡防洪系统对长江中、下游防洪效益的影响,需要预估入库的洪水过程以及中、下游各防洪控制点的洪水过程。如何预估未来可能出现的各种洪水过程,是一个难题。建立多站洪水随机模型,模拟出各站的洪水过程,可以满足三峡防洪系统的实际需要。

在生产实际中,常常要研究某些水文特征量的统计特性,而这些统计特性很难用概率理论通过解析的方法来获得。在这种情况下,通过建立随机模型并借助统计试验法加以探讨,虽然得不到精确解,但求得的近似解可满足生产的实际要求。例如,在研究洪水地区组成时,各控制断面洪水特征量的统计特性及其相互关系可利用随机模型给出的各断面模拟序列加以推求。随机解集模型已被用于嘉陵江北碛站洪水地区组成的研究中,并得到了现行的典型法和同频率法难以得到的成果。又如,通过随机模型可得到大量模拟序列,用以研究干旱持续历时特性。以上仅为几个例子,实际上随机模型结合统计试验法在解决一些水文水资源系统特殊问题上已有多方面的应用。另外,随机模型还可用来研究人类活动对径流的影响过程和水文水资源系统对气候变化的响应过程。

1.3.2 在水文预报方面

用传统预报模型作出的预报被认为是预报的第一步。第二步则是对第一步的预报

结果进行调整,从而获得第二步的预报结果。构造第二步预报的依据在于预报误差的统计结构特征。若预报误差序列是相依的,那么就可利用误差的自相关特性建立合适的随机模型来预报将来的误差,从而提供第二步预报。这种基于预报误差反馈控制的实时校正预报技术的关键,是建立合适的误差随机模型。一旦获得这种随机模型,即可在作业预报中处理误差,以提高预报精度。

对预报变量直接建立随机模型,即可进行预报。这种类型的统计预报一般给出条件期望值,另附以一定显著性水平的置信限。例如,长江汉口站的各月水位曾用季节性自回归滑动平均求和模型进行预报。又如,用季节性自回归模型预报黄河主要站的过渡期径流量。

自1960年卡尔曼(Kalman)创立了卡尔曼滤波理论以后,这一理论便在自动控制方面得到应用,并于20世纪70年代初被引入水文水资源学。最近二十年,卡尔曼滤波理论在水文预报上的应用有所发展,预报精度有了一定程度的提高。卡尔曼滤波实时预报是基于系统所建立的数学模型。就广义而言,这些模型属于随机模型的范畴。显然,只有系统受到随机因素的影响才需应用滤波作实时预报。因此,随机理论的应用和随机模型的建立是卡尔曼滤波实时预报的关键之一。从这个意义上说,随机模型在近代预报中同样占有重要的地位。

1.3.3 在水文实验和水文站网规划管理方面

近年来,在考虑测验误差和评判测验精度时,用到了随机模拟技术。例如,流速及含沙量等要素的脉动现象可看作是一种随机过程。在水文测验中,要估计几次测量值的均值误差。为了正确地估计均值误差,必须考虑单项测次的误差过程,即要考虑各测次误差之间的相关性。又如,在一个流域中,点雨量的观测可被看作是随机场上的抽样。各点的测量值和流域平均值的误差之间可能存在着相关关系。在计算流域平均值时,必须计及这种相关关系。有人利用随机过程理论推导出测验过程中出现故障的次数和资料缺测长度的随机模型,并利用这一模型来改进测验方法。最近,随机模拟技术被用来测算地区上的某种水文要素。例如,为了测算森林区平均积雪深度,可通过小面积的抽样测量来建立一种适用的随机模型,并借助随机模拟估算出大面积的平均积雪深度。

近二十年来,随机模拟技术日益应用于水文站网规划与管理方面。例如,利用雨量的空间相关结构设计雨量站网。布若斯(Bras)等人把流域上的点雨量看作多维随机过程,提出对雨量站布设的要求和方法。莫斯(Moss)等人将回归分析模拟技术用于地表水站网的设计。鲁海宁(Rouhani)建立了一种所谓降低方差分析的技术,用在随机场内设计最佳搜集资料的方案。

1.3.4 在防洪安全设计方面

水库防洪安全设计现行方法具有严重的局限性,其适用性是有条件的。随机模拟技术可克服现行方法的一些缺点。1990年文献[52]对我国二滩水电站入库洪水建立了季节性AR(1)模型,由模型模拟出大量洪水过程线,根据调洪准则分别调洪演算得到坝前

年最高水位系列,点绘坝前年最高水位频率曲线;根据频率曲线可推求相应于设计标准的防洪特征水位,并用于水库防洪安全设计。同时对现行设计洪水过程线法的适用性作了初步探讨,指出其适用性是有条件的。1991年文献[53]用 SAR(1)模型随机模拟了威远河兴隆站洪水过程,并用于水库防洪安全设计,进一步探讨了现行法的适用性。1992年文献[54]对紫坪铺水电站入库洪水建立 SAR(1)模型,并成功地用于水电站防洪安全设计,再次验证了现行设计洪水过程线法确定实际工程防洪安全标准具有很大的不确定性,常出现高于或低于指定标准的情况。统计试验表明,影响偏离的主要因素为时段洪量设计值的抽样误差和典型洪水过程线的形状。

1998年文献[55]用多站典型解集模型模拟水库群的入库洪水过程,并提出一种新的模型参数估计方法——多站权重模型适线法。以湖南省某大流域水库群防洪库容的设计为例,建立了求解防洪发电相结合的水库群防洪库容优化模型。通过论证和检验,表明随机模拟技术在水库群的防洪库容分配方面优越于现行的设计洪水地区组成和常规调度方法。

2000年文献[56]在设定总体洪水随机模型(SAR(1))的前提下,对随机模拟法及传统方法推求设计防洪库容优劣作了对比研究。所考虑评价标准是设计防洪库容估计的不偏性及有效性,水库调洪方式采用削平头法,传统方法在推求设计洪水过程线时考虑了同频率及同倍比两种放大法。计算结果初步表明,在模型形式正确的情况下,随机模拟法比传统方法能提高设计防洪库容的计算精度,同频率法推求设计防洪库容的计算精度一般比同倍比法要好。

1.3.5 在水安全风险分析方面

水资源紧缺、水环境恶化、洪涝灾害这三大水问题抑制了我国水资源、经济和社会的可持续发展。水安全问题导致的风险有多大是需要特别关心的。随机模拟技术非常适合于风险分析。1993年文献[57]用 AR(1)模型模拟径流序列,然后对水库库容的可靠性进行评价。1994年文献[58]用 ARMA(p, q)模型拟合季节性洪水序列并应用于洪水风险性分析,取得了可靠的成果。

1994年文献[59]以发电量为风险变量,并假定为正态分布,建立了随机模型。由模型采用统计试验进行了紫坪铺水电站经济评价的风险分析,效果较好。1999年文献[60]对三峡7个站区洪水建立随机模型并进行随机模拟,获得坝前水位序列,从而探讨了三峡水库的防洪风险问题,证明了三峡工程采用1981年、1982年和1954年典型设计洪水推求防洪特征水位是偏安全的,最后指出洪水随机模拟技术是可行而有效的。2001年文献[61]利用随机模拟技术生成年径流的长系列,用年径流软划分聚类方法确定月径流系列,根据生成的月径流系列分析Kunene河的供水风险。用随机模拟技术分析的风险率在0%~3.7%之间,而实测系列短,据此得到的可靠性和可信度较低。因而随机模拟技术可提高风险分析结果的可靠性。2003年文献[62]探讨了随机过程中的马尔柯夫链以及随机模拟技术在水灾害风险管理中的应用。通过实例分析表明,应用马尔柯夫链可以评估未来某个时间单位中水灾的损失风险,在此基础上应用随机模拟技术评估未来若干个时间单位中水灾的总损失风险。从理论和实践两个角度探讨了当历史数据时间序列