



- 高等学校水利类专业教学指导委员会
- 中国水利教育协会
- 中国水利水电出版社

共同组织编审

普通高等教育“十三五”规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
全国水利行业规划教材

随机水文学

(第三版)

王文圣 金菊良 丁晶 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



- 高等学校水利类专业教学指导委员会
- 中国水利教育协会
- 中国水利水电出版社

共同组织编审

普通高等教育“十三五”规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
全国水利行业规划教材

随机水文学

(第三版)

王文圣 金菊良 丁晶 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统地介绍了随机水文学的基本理论、分析方法、模拟技术和主要随机模型，阐述了随机模拟技术和随机模型在水文与水资源、水环境系统中的实际应用。

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和研究生的教材和教学参考书，也可供理工科高校中农业、气象、地理等相关专业的高年级学生和研究生阅读，同时适合于有关科技工作者使用和参考。

图书在版编目（C I P）数据

随机水文学 / 王文圣, 金菊良, 丁晶编著. -- 3版
-- 北京 : 中国水利水电出版社, 2016.1
普通高等教育“十三五”规划教材 普通高等教育“
十一五”国家级规划教材 全国水利行业规划教材
ISBN 978-7-5170-4066-8

I. ①随… II. ①王… ②金… ③丁… III. ①随机水
文学—高等学校—教材 IV. ①P333.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第022707号

书 名	普通高等教育“十三五”规划教材 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 全国水利行业规划教材 随机水文学（第三版）
作 者	王文圣 金菊良 丁晶 编著
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 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 12.5印张 304千字
版 次	1997年10月第1版 1997年10月第1次印刷 2016年1月第3版 2016年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	28.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

第三版前言

《随机水文学（第三版）》为普通高等教育“十三五”规划教材和全国水利行业规划教材，是在第一版、第二版基础上进一步结合水文水资源专业教学要求及随机水文学新进展撰写而成。

随机水文学是把随机过程的理论与方法引入水文学而形成的一门学科。它以水文过程为研究对象，建立能够反映水文过程统计特性和随机变化规律的随机模型，通过模型随机模拟大量水文序列来满足水利工程规划、设计和运行需要，或者运用随机模型进行统计预测。本书共九章，系统地介绍了随机水文学的基本理论、分析方法和主要随机模型，讲述了随机模拟技术和随机模型在水文水资源水环境系统中的实际应用。书中各章配有适量的习题。

为加强《随机水文学（第三版）》的科学性、实用性和可读性，本书对第二版部分章节进行了适当增减。将随机模拟技术独立成章，增加了随机数检验内容，更新了指定分布纯随机序列的模拟途径；增加了 Man-kendall 突变点检验法和功率谱周期识别法；删除了长持续性模型，突出了自回归滑动平均模型，去掉了不常用的流域暴雨洪水系统随机模型；强化了随机模型在水文学中的应用。

全书由王文圣、金菊良和丁晶共同执笔而成，并由王文圣统稿，丁晶审稿。

本书有些材料引自有关院校、生产和科研单位编写的教材和技术资料以及个人发表的论著，编者在此谨致以衷心的感谢！本书部分成果得到了国家自然科学基金（编号 51179110，71273081）的资助。编者同时感谢中国水利水电出版社为本书的再次出版所付出的辛勤劳动。

书中有关内容请斟酌选用。由于编著者水平有限，书中有不少的缺点和错误，恳请读者批评指正。书中错误之处请函告：四川大学水利水电学院王文圣，邮编：610065，E-mail: wangws70@sina.com。

编著者

2015年7月

第一版前言

本书是按照《1990~1995 年高等学校水利水电类专业本科生、研究生教材选题和编审出版规划》的规定进行编写的。

随机水文学是把随机过程的理论与方法引入水文学而逐渐形成的一门新学科。它以现实水文过程为研究对象,建立能够反映水文现象随机变化特性的数学模型,并通过模型模拟出的大量水文序列来满足水利工程规划、设计和运行的各种需要。本书共分八章,系统地介绍随机水文学的基本原理、分析方法和计算模型,重点讲述随机模型和模拟技术在水利工程中的实际应用。各章均有一定数量的习题,书末列有主要的参考文献。

本书第一章由刘权授、丁晶共同编写,第二、五、六章由刘权授编写,第三、四、七、八章由丁晶编写。全书由长江水利委员会水文局季学武高级工程师主审,由丁晶修改定稿。

本书有些材料引自有关院校、生产和科研单位编写的教材和技术资料以及个人发表的论文,编者在此谨致以诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中有不少的缺点和错误,敬请读者批评指正。

编 者

1997 年 1 月

第二版前言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。近10年来,随着科学技术的进步和社会经济的发展,随机水文学取得了新的进展,为了适应水文水资源专业的教学要求,特编写了本教材。

随机水文学是把随机过程的理论与方法引入水文学而逐渐形成的一门学科。它以实际水文过程为研究对象,建立能够反映水文现象统计特性和随机变化规律的数学模型(随机模型),通过模型模拟出大量的水文序列来满足水利工程规划、设计和运行的各种需要,或者运用随机模型进行统计预测。本书共9章,系统地介绍随机水文学的基本原理、分析方法和各种随机模型,重点讲述随机模型和模拟技术在水文水资源系统中的实际应用。

本书对第一版的体系和内容作了一定更新:①增加了水文序列成分识别技术;②增加了一些新的随机水文模型,如非线性随机模型、非参数随机模型;③加强了随机模型在水文学中的应用;④在季节性随机模型中删掉了不常用的散粒噪声模型和正则展开模型;⑤简化了流域系统随机模型。

本书编写力求结构合理,条理清晰,文字简洁,通俗易懂。编写过程中避免了抽象的数学推理和繁琐的公式演绎。书中各章配有适量的习题。

本书由王文圣、丁晶和金菊良共同讨论、分别执笔而成。全书由王文圣统稿,丁晶审稿,王文圣修改定稿。

本书有些材料引自有关院校、生产和科研单位编写的教材和技术资料以及个人发表的论著,编者在此谨致以诚挚的谢意!本书部分成果得到了国家自然科学基金(50779042, 70771035)的资助。同时感谢中国水利水电出版社为本书出版付出的辛勤劳动!

书中有关内容请各院校斟酌选用。由于编者水平有限,加之时间仓促,书中有不少的缺点和错误,恳请读者批评指正。书中错误之处请函告:四川大学水利水电学院王文圣,邮编:610065, E-mail: wangws70@sina.com。

编著者

2008年1月

目 录

第三版前言

第一版前言

第二版前言

第一章 绪论	1
第一节 随机水文学	1
第二节 随机模拟法	2
第三节 随机水文学的应用	4
第四节 随机水文学的发展	7
习题	9
第二章 随机水文学的基本理论	10
第一节 随机过程的概念	10
第二节 随机过程的分布函数	11
第三节 随机过程的数字特征	12
第四节 随机过程的分类	15
第五节 平稳随机过程	16
第六节 马尔柯夫过程	20
习题	23
第三章 水文序列分析方法	24
第一节 水文序列及其组成	24
第二节 水文序列相关分析	25
第三节 水文序列的谱分析	29
第四节 水文序列组成成分识别	33
第五节 水文序列极差分析和轮次分析	45
习题	50
第四章 随机模拟技术	52
第一节 概述	52
第二节 均匀随机数的模拟	53
第三节 指定分布的纯随机序列的模拟	56

习题	60
第五章 自回归滑动平均模型	61
第一节 基本概念	61
第二节 自回归滑动平均模型的物理基础	64
第三节 自回归模型	67
第四节 滑动平均模型	75
第五节 自回归滑动平均模型	78
第六节 建立随机模型的程序	80
第七节 实例分析	85
第八节 平稳化处理办法	89
习题	90
第六章 季节性随机模型	91
第一节 概述	91
第二节 季节性自回归模型	91
第三节 典型解集模型	96
第四节 相关解集模型	99
习题	107
第七章 多变量随机模型	108
第一节 概述	108
第二节 多变量平稳自回归模型	108
第三节 多变量季节性自回归模型	115
第四节 空间典型解集模型	117
第五节 空间相关解集模型	120
第六节 多变量水文序列随机模拟的主站模型	124
习题	129
第八章 新型随机模型	131
第一节 概述	131
第二节 门限自回归模型	131
第三节 基于核密度估计的非参数模型	136
第四节 基于核密度估计的非参数解集模型	141
第五节 基于小波分析的组合随机模型	144
习题	149
第九章 随机模型在水文学中的应用	150
第一节 概述	150
第二节 随机模型的选择	150
第三节 随机模型在水文系统分析计算中的应用	154
第四节 随机模型在水文系统预测中的应用	163

第五节	随机模型在设计洪水过程线法适用性探讨中的应用	170
第六节	随机模型在水文系统频率分析中的应用	176
第七节	随机模型及其水文模拟序列在实用中的一些问题	181
习题		187
附录一	赫斯特系数 K 经验分位值 (独立 P -Ⅲ型序列)	188
附录二	$[0,1]$ 上均匀分布的随机数表	189
参考文献		190

第一章 绪 论

第一节 随 机 水 文 学

水文现象随时间变化的过程称为水文过程或水文序列。水文现象是一种自然现象，既有确定性变化规律，又有随机性变化规律。这些确定性和随机性变化规律通过水文过程可以直接或间接地展示出来。水文过程的确定性变化规律突出表现在过程中有年、日等周期变化。如日、旬、月径流过程，明显存在以年为周期的变化（图 1-1）；逐时气温及蒸发量过程存在以日为周期的变化。这是由于影响水文过程的气候因素存在以年为周期的变化和某些气象因素存在以日为周期的变化之故。水文过程受确定性因素的影响，还表现出随时间的增长，过程出现逐渐上升或下降的趋势或跳跃的变化等现象。如图 1-2 所示，岷江高场站年平均流量呈现局部增加和降低趋势现象，这可能是由于气候波动和人类活动影响造成的。

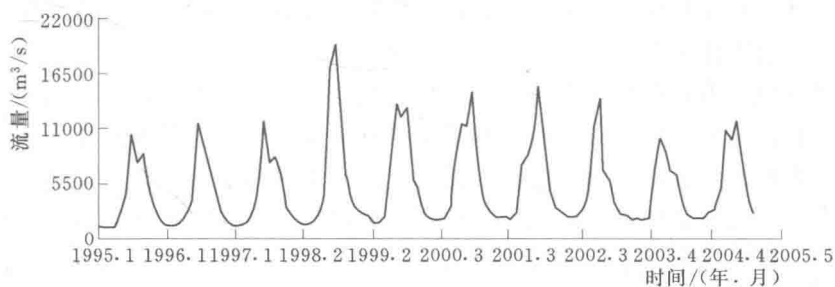


图 1-1 金沙江屏山站月平均流量过程

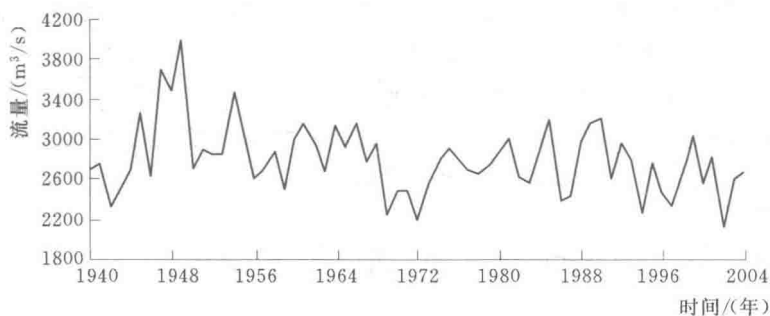


图 1-2 岷江高场站年平均流量过程

从图 1-1、图 1-2 同时可以看出，水文过程还表现出随机性变化特征，每一年的月平均流量过程不相同，形状和数量相差较大；水文过程内前后数值之间似乎变化无序，时大时小，但它们之间存在相依（相关）关系，如 2 月平均流量与 1 月平均流量有关，后 1

年径流量与前 1 年径流量相依,如岷江紫坪铺站相邻年年平均流量之间的相关系数达 0.44。随机性变化特征是水文过程形成和演变中的众多影响因素所致。所有这些影响的无限复杂性和多样性,致使水文过程的变化不断发生着各种各样的情形,表现出随机性变化特征。

水文过程既然表现出随机变化特征,因此,它是一个随机过程,又称为随机水文过程。纯粹确定性水文过程是不存在的。如何通过水文过程来研究水文现象的随机变化特征呢?传统水文学不能回答这个问题。

将随机过程理论和时间序列分析技术引入水文学领域,广泛开展水文过程随机变化特性研究并不断把科学成果用于水文水资源的实际问题,结果逐渐形成了一门重要的学科——随机水文学。随机水文学是以水文过程为研究对象、以随机过程理论和时间序列分析技术为手段的一门学科。水文过程是随机过程,因此应用随机过程的理论和方法研究水文过程是有客观依据的。一个水文过程是依发生的时间先后次序排列的,因此在随机水文学中,水文变量的时间顺序极为重要。

随机水文学填补了确定性水文学(研究确定性过程)和概率性水文学(研究纯随机过程即概率过程)之间的缺口。在确定性水文学中,认为水文现象随时间的变化可由其他变量完全加以说明;在概率性水文学中,问题不牵涉到时间,而只涉及某一事件的概率。随机水文学的研究对象是与时间紧密有关的随机现象,即随机水文过程。描述水文过程的数学模型,称为随机水文模型或随机模型。作为两种极端情况的确定性过程和概率过程,在随机水文学中一般不作专门探讨。

随机水文学的基本任务是在全面随机分析的基础上对随机水文过程建立起反映水文现象主要变化特性的随机模型;根据建立的模型,既可随机模拟大量水文序列,也可作统计预测,以满足水利水电工程规划、设计、运行及水文水资源水环境各种分析、计算和研究的需要。本书重点讲述如何依据观测到的水文序列建立随机模型,如何由随机模型模拟大量序列,如何将模拟序列应用于工程的规划、设计、运行及水文水资源特性分析等。具体而言,就是对水文过程建立合适的随机模型,一方面模拟出水文序列(例如年、月、日径流序列,洪水序列等),依据这些模拟序列并结合工程特性和要求进行水利计算(径流调节、洪水调节、水能计算等),最后计算出指定频率下的各种水利、水能特征值,如保证出力、年电能、水库供水流量、水库坝前洪水位等,供全面分析之用;另一方面依据模型对水文现象进行统计预测,预估未来可能的变化情势。

由此可见,随机水文学的主要任务和水利计算的任务在很大程度上是一样的,但它们之间也有明显的差异。为了加深对随机水文学的理解,下面介绍随机模拟法。

第二节 随 机 模 拟 法

一、基本概念

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,反映其随机变化特征,显然是困难的。要了解水文水资源系统各组成要素间的相互关系,预测水资源规划、设计方案可能产生的效果及其对生态的影响,分析系统的发展趋势,当前可行的途径就是统计试验法,又称 Monte Carlo 法。在随机水文学中常被称为

为随机模拟法 (stochastic generation method)。随机模拟法已成为认识、设计和管理复杂水文水资源系统的主要方式之一,一直是随机水文学研究的重要途径。

针对随机水文学,可以这样定义随机模拟法,指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),再对模拟序列进行分析计算,解决水文水资源系统规划、设计、运行与管理问题的方法。随机模拟法一般包括以下步骤:①分析水文水资源系统各要素及其关系、系统与环境间的关系,定义和描述研究问题;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模型;③估计随机模型的参数;④验证随机模型和分析模拟结果,进而解决规划、设计、运行等有关问题。

随机模拟法的核心内容是建立随机模型。

二、随机模拟法的特点

对于水文水资源系统而言,常需要了解它的变化规律,如千年一遇的洪水、保证率为90%的年径流量、多年平均发电量、远期供水可靠度、中等干旱发生频率,等等。传统分析方法有两种:①实测序列法;②设计过程线法。

实测序列法能广泛适应于各种工程(单一或系统工程,发电、灌溉、供水工程)的分析计算需要,而且由实测水文序列估计各种水利指标或水文特征值时概念明确、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值或水利指标只是未来可能出现的一种情况,以此进行工程设计存在抽样误差,有时误差可能很大,而且实测序列法无法回答抽样误差的大小问题。

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得很多。地处我国北方的黄河三门峡段和东北的松花江哈尔滨段也发生过类似现象。这说明实测序列法作为工程规划、设计的依据是存在严重缺陷的。

现行设计过程线法有设计年径流过程线法和设计洪水过程线法。这里以后者为例给予评价。设计洪水过程线法是依据观测的洪水资料,通过分析计算提供设计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峰和(或)设计时段洪量的频率。这个假定颇有问题。同样的设计洪峰和(或)设计时段洪量,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能相差很大,而且选取时空分布典型的主观任意性也颇大。也就是说,设计成果具有明显的不确定性。同样,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。

随机模拟法能克服传统分析方法的不足,有以下显著特点:

(1)随机模型能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或特征值时,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,随机模拟法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弊病。特别是,该法还避免了“最高洪水位的频率等同于洪量和(或)洪峰频率”这个不符合实际的假定。

(2) 由随机模型能模拟出大量的水文序列。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现象可能出现的各种情况。如前所述,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做出估计,使设计更加合理、可靠。

总之,随机模拟法是在现行水文分析算法基础上发展起来的一种先进方法。它一方面对现行方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)的模拟序列;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,我国在制定的水利水电工程设计洪水计算规范和水文计算规范时也正式列入随机模拟法,这标志着随机模拟法进入了实用阶段。随机模拟法的关键在于如何根据样本序列建立一个适用的随机模型。这正是本书重点讲述的内容。

第三节 随机水文学的应用

随机水文学的应用十分广泛。本节简略介绍在水文水利计算、水文预报、水文测验站网规划、防洪安全设计、风险分析及其他方面的应用。

一、在水文水利计算方面

1. 在系统分析计算中的应用

水文要素(如年径流量)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、水库设计洪水位等)。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,随机模型在各种系统分析中占有重要地位。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,对于这样复杂的系统,在进行各种分析时(如水库调度分析),作为系统输入的多站径流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,例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一类问题。又如,在对四川省沱江进行规划,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研究需要。

2. 在插补序列中的应用

传统插补延长水文序列只是简单用回归方程而没有考虑随机误差,因而插补变量的方差偏小。对传统插补方法的改进,其关键在于对随机误差建立合适的随机模型。一旦建立了这样的模型,便可随机插补序列。尽管这样的插补不能为插补变量提供确定性的估值,但具有下列优点:

(1) 可插补出各种可能的估值,这些数值供水文工作者结合流域的水文气象条件作综合分析。

(2) 将插补出的各种可能值用于频率计算,得出多种设计值,便于做出插补值差异对频率计算成果影响的统计评估。

3. 在处理一些特殊问题中的应用

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分析的方法来获得。在这种情况下,利用随机模型并借助统计试验法加以探讨,虽然得不到精确解,但求得的近似解可以满足生产实际的要求。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,并已得到现行的典型法和同频率法难以获得的成果。又如,通过随机模型得到的模拟序列来研究干旱持续历时特性;通过随机模型估计可能最大洪水;通过随机模型还可以研究人类活动和气候变化对径流的响应。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成功应用。

二、在水文预报方面

1. 预报误差的处理

用传统预报模型做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。因此,处理预报误差的实质是寻求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。例如,对流域洪水用新安江模型预报后,对其预报误差建立自回归模型再进行改正预报。

2. 随机模型预报

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,用平稳自回归模型预报湖北清江各控制站年径流。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,用门限自回归模型预测月平均地下水位和年径流。此外,20世纪70年代初引入水文学中的卡尔曼(Kalman)滤波实时预报就是基于系统所建立的数学模型。就广义而言,这类模型也属于随机模型的范畴。

三、在水文实验和站网规划方面

近年来,在考虑测验误差和评判测验精度时,用到了随机模拟法。例如,流速及含沙量等要素的脉动现象可看做是一种随机过程。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做是随机场上的抽样。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。有学者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,随机模拟法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,并借助随机模拟法估算出大面积上的平均积雪深度。

近20年来,随机模拟技术日益应用于站网规划与布设方面。例如,利用雨量的空间相关结构设计雨量站网。布若斯等学者将回归分析模拟技术用于地表水站网的设计。鲁海宁建立了一种降低方差分析的技术,用于随机场内设计最佳搜集资料的方案。

四、在防洪安全设计和风险分析方面

水库防洪安全设计现行方法具有明显的局限性,其适应性是有条件的。随机模拟法用于水库防洪安全设计的思路是:对入库洪水建立随机模型,由模型模拟出大量洪水过程线,根据水库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,从频率曲线上可推求相应于设计标准的防洪特征水位。以我国二滩水电站、紫坪铺水电站、溪洛渡水电站等为例,成功地将随机模拟法用于水库防洪安全设计,同时用随机模拟的大量洪水过程线探讨了现行设计洪水过程线法的适用性。研究结果表明,设计洪水过程线法确定的工程实际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;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。有学者还将随机模拟法用于水库群防洪库容设计中,对入库洪水建立多站典型解集模型,由模拟洪水过程求解防洪库容优化模型。

近20年来,随机模拟法不断尝试应用于水文系统风险分析中。如对长江三峡段7个站区洪水建立多站随机模型并进行随机模拟,获得三峡水库坝前水位序列,从而探讨了三峡水库的防洪风险问题,证明了三峡工程以1981年、1982年和1954年为典型的设计洪水推求的防洪特征水位是偏安全的。又如将马尔柯夫链和随机模拟法结合用于水灾风险管理中。有学者根据年径流随机模型模拟大量的年径流系列,以聚类方法得到模拟的月径流系列,进而分析Kunene河的供水风险。有学者把随机模拟方法用于干旱危险性分析中。

五、在其他方面

随着水文工作者的认识水平的提高,随机水文学和随机模拟法在水科学领域得到了越来越多的应用。如将随机模拟法与水库群优化运行结合起来,得到比传统方法更优的调度效果。如对入库径流序列建立随机模型,由模拟序列获得若干个有效库容值及相应的水库运行策略,进一步验证了水库调度的合理性。有文献以黄河上游梯级水电站为例尝试应用径流随机模拟法研究水库群多年运行电能指标的抽样误差。有文献提出用随机模拟法模拟

洪水系列,以防洪工程使用期为一个时间单位,考虑资金的时间价值,对工程的减灾损失进行计算,得到了防洪效益的概率分布模式,结果表明随机模拟法计算的防洪效益更加符合客观实际。

有人提出了各种边际分布的季节性一阶自回归模型并尝试暴雨随机模拟。为克服常规水文计算方法的不足,建议了随机模拟技术与常规水文计算方法相结合的洪水过程模拟途径,并成功应用于太子河流域的库群联合防洪调度中。有人根据随机理论,推导了一个描述污染带变化的概率模型,用随机模拟法求其数值解。有人在大量实测年径流量资料的基础上,分析了作为水文干旱定量指标——负轮长的统计变化特性,并以松花江哈尔滨和黄河陕县站为例,以随机模拟途径探讨了严重干旱出现可能性的定量估计。为模拟灌区灌溉需水量,提出了一个含有趋势分量、季节分量、随机分量的随机模型,同时有人将随机模拟法用于作物灌溉管理中。为探讨土壤水力特性空间变异性,有人建立了随机模型并对一维、二维随机场进行了随机模拟。等等。

第四节 随机水文学的发展

最早的时间序列分析可以上溯到 7000 年前的古埃及。古埃及人把尼罗河涨落的情况逐天记录下来,对这个时间序列长期的观察使他们发现尼罗河的涨落非常有规律。由于掌握了尼罗河泛滥的规律,使得古埃及的农业迅速发展,从而创造了灿烂的埃及史前文明。

随机水文学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。20 世纪 50 年代初期, Hurst 研究了径流和其他地球物理现象的长期实测序列,他的研究对随机水文学的发展产生了很大的影响。直到 1961 年 Britta 将马尔柯夫模型用于年径流模拟,1962 年 Thomas、Fiering 将季节性马尔柯夫模型用于月径流随机模拟和 1972 年 Yevjevich 把随机过程的理论和方法系统地应用于水文过程,标志着随机水文学的成熟。世界各国也正在开展这方面的研究,提出了许多随机模型。我国 20 世纪 80 年代以来,以成都科技大学(今四川大学)、河海大学等为代表开展了大量的随机水文学应用研究工作。

随机水文学的发展史就是随机模型的发展史。目前已形成了各式各样的随机模型,例如自回归滑动平均类求和模型、解集模型、散粒噪声模型、分数高斯噪声模型、快速分数高斯噪声模型、正则展开模型、折线模型、非参数随机模型、小波随机模型、人工神经网络模型等。在建立随机模型时,不少水文学者致力于对水文过程进行概化,或者提出了一些有一定物理基础的随机模型,或者对已有模型作出物理解释。这样的工作加深了人们对随机模型的认识,有助于对模型进行合理性分析。为了尽可能利用各种信息,以提高模型的可靠性,应用贝叶斯方法和卡尔曼滤波方法来估计模型参数。

目前技术成熟、应用广泛的随机模型主要有:

(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自回归滑动平均模型。近来对自回归类模型作了进一步改进工作,如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,提出了一种分期平稳自回归模型。又如考虑年、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。为了使模型除反映水文过程的相依特性

外,尚能反映水文变量边际分布的统计特性(如皮尔逊Ⅲ型分布,简称P-Ⅲ型分布),在广泛应用的线性正态模型基础上提出了多种非线性偏态模型。

(2)解集类模型。解集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。解集模型可分为单站典型解集模型、空间典型解集模型、单站相关解集模型、空间相关解集模型。近年来,对典型解集模型中的典型选择问题提出了一些行之有效的改进,如聚类、模糊分类、最近邻判别等方式,取得了较好的模拟效果。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,为此提出了压缩式解集模型、动态解集模型、分步式解集模型、基于准确修正的简单解集模型、非参数解集模型等。

另外,近10多年来,水文学者开展了大量的随机模型研究工作,取得了有效的成果,其进展包括以下几个方面:

(1)非线性随机模型研究。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系统。为客观描述水文序列的非线性特征,有必要研究非线性随机模型。水文学者尝试将门限自回归模型、双线性模型、人工神经网络模型、指数自回归模型等非线性随机模型应用到日流量过程、洪水过程随机模拟和预测中。研究表明,这些非线性随机模型能表征水文序列的非线性特性。在此基础上,建议了演化算法(遗传算法、蚁群算法)估计非线性随机模型参数,这为模型方便应用提供了重要的技术支撑。

(2)非参数随机模型研究。常规随机模型是对水文序列的概率分布(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,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,随机模拟效果较好。对独立时间序列,主要有Bootstrap和Jackknife两种非参数模型,最近有学者提出了非参数贝叶斯随机模型。对相依水文序列,水文学者提出了最近邻抽样随机模型、单变量核密度估计随机模型、多变量核密度估计模型、非参数解集模型等模型。以年、月、日平均流量序列为例建立了多种非参数随机模型,统计试验表明该类模型能保持研究对象的线性或非线性相依结构,统计特性也保持得很好。与此同时,进一步对非参数随机模型进行了改进,提出了最近邻抽样扰动随机模型和改进的非参数解集模型。

(3)其他随机模型的研究。20世纪80年代初兴起的小波分析(wavelet analysis)具有时频多分辨率功能,能充分挖掘水文序列中的信息。近10多年来,开展了基于小波分析的水文随机模型研究。为模拟日流量过程,提出了基于小波变换的组合随机模型,该模型模拟出的日流量过程能反映其真实变化特性。考虑年径流的多时间尺度特征,将小波分析与自回归模型结合建立了年径流随机模拟的组合模型。有学者将小波分析与人工神经网络模型结合提出了小波网络模型,并在径流随机模拟和预测中得到了成功应用。最近有学者将小波分析与非参数解集模型结合并应用于月径流随机模拟中,取得了较好的成果。

有学者基于Copula函数构建了洪峰和洪量的联合分布,提出了基于联合分布的随机模拟方法,模拟的洪水过程能保持实测洪水的变化特性。

近10年来随机水文学获得快速发展,其显著特点是:①我国社会经济和水利水电事业蓬勃发展,对工程规划、设计、建设、管理提出了更高和更多的要求,为了适应新形势,满足新要求,随机模拟法和模拟序列不断获得了应用,这种日益增多的实际应用无疑促进了随机水文学的发展;②在科技进展日新月异的当代,新理论、技术和方法不断涌现