

丁晶 邓育仁 编著

随机水文学

STOCHASTIC HYDROLOGY

成都科技大学出版社

随机水文学

丁 晶 邓育仁 编著

成都科技大学出版社

内 容 介 绍

本书较系统地综合了国内外随机水文学领域的基本理论和方法以及研究成果；讲述了随机水文过程理论、水文序列分析方法和随机模拟技术；着重介绍了水文序列的各种随机模型；阐明了模拟序列本质和随机水文学的广泛应用。

本书可供工程水文和水资源学科研究生学习，其中基本内容可作为水文、水资源及水环境等专业本科生的教材；对与这些专业有关的工程技术人员和天气预报、地震预报、海洋水文及统计预测等专业工作者均有参考价值。

随 机 水 文 学

丁 晶 邓育仁 编著

责任编辑 孙康江

成都科技大学出版社出版、发行
四川省新华书店经销
成都科技大学印刷厂印刷
开本：787×1092毫米 1/32 印张：14.6875
1988年10月第1版 1988年11月第1次印刷
字数：330千字 印数：3000册

ISBN7-5616-0248-0/TV·8(课)

定价：3.07元

前 言

1985年我们为全国随机水文短训班编写了一本《随机水文学》讲义。本书是以该讲义为基础,做了大量地补充和修改而成。我们编著的这本专业教科书,可供工程水文及水资源学科的研究生学习;其中基本内容可作为水文、水资源及水环境等专业本科生的教材;同时也供从事水文计算、水利计算、水文预报、水文试验研究、水文测验、站网规划和环境水文工作的工程技术人员以及与水文学有关的专业人员自学和工作参考。

本书的特点是:较系统地综合归纳了国内外在随机水文学领域的基本理论和方法以及研究成果;密切结合水文现象及其物理成因;重视实践环节,联系实际应用;注意通俗易懂,利于自学提高。读者可以从中比较容易地学到随机水文学的理论和有关各种分析计算技术,以及建立随机模型的方法,并且能够根据书中介绍的具体方法和众多实例,应用这些理论、技术与方法,解决工程水文、水文预报、水文测验、站网规划、环境水文及水利计算等实际问题;同时读者还可以从中了解到当今这个领域的发展动向,以及随机水文学在各个方面广泛应用的概况。

本书由三部分组成,共计十二章。第一部分(1~3章)重点介绍随机水文过程的基本理论,水文时间序列的自相关分析、谱分析技术和随机模拟方法以及水文时间序列组成分析等;第二部分(4~10章)主要内容是水文时间序列的各种随

机模型,侧重讲述广泛应用的自回归滑动平均求和族模型、解集模型及流域系统模型等;第三部分(11~12章)综合归纳各种水文时间序列随机模拟方法,论述模拟序列的本质及其实际应用,并讨论了随机模拟中若干争议的问题,最后介绍水文时间序列的预报原理和方法。

在编著本书过程中,成都科技大学水利水电学院领导给予鼓励和支持,前水文教研室主任吴明远教授给予热情关怀,工程水文及水资源研究室主任高荣松教授曾参加《随机水文学》讲义部分章节的编写,他还积极参与本书大纲讨论,并提出了不少宝贵意见。在此对他们的大力支持表示衷心的感谢。

水文教研室杨荣富老师参与本书的部分工作,编写了第九章初稿,提供了部分计算实例和图表,并为书稿的整理付出了辛勤的劳动,对他勤勤恳恳的工作和热心的协助表示谢意。

书中某些资料引自有关高等院校、科研和生产单位以及个人发表的论文和技术文件,在此对各单位和有关作者一并致谢。

我们期望《随机水文学》一书的问世,对推广随机水文学在国内的应用和促进该门学科的发展起到积极作用。由于编著者时间仓促,特别是水平所限,书中错误和缺点在所难免,诚恳希望读者批评指正。

丁 晶 邓育仁

1988年5月于成都科技大学水利系

目 录

引论.....	(1)
---------	-----

第一章 随机水文过程.....	(9)
-----------------	-----

§1-1 水文过程的随机性.....	(9)
--------------------	-----

§1-2 随机水文过程的概念和数学描述.....	(12)
--------------------------	------

§1-3 随机水文过程的分类.....	(19)
---------------------	------

§1-4 平稳随机过程.....	(25)
------------------	------

第二章 水文序列的分析技术和随机模拟方法.....	(33)
---------------------------	------

§2-1 水文序列.....	(33)
----------------	------

§2-2 自相关分析和互相关分析.....	(34)
-----------------------	------

§2-3 谱分析和互谱分析.....	(41)
--------------------	------

§2-4 纯随机序列的随机模拟.....	(54)
----------------------	------

第三章 水文序列的组成分析.....	(64)
--------------------	------

§3-1 水文序列的组成.....	(64)
-------------------	------

§3-2 暂态成分和包含暂态成分的合成序列.....	(66)
----------------------------	------

§3-3 周期成分和包含周期成分的合成序列.....	(92)
----------------------------	------

§3-4 平稳随机成分.....	(110)
------------------	-------

第四章 水文序列线性平稳模型.....	(122)
---------------------	-------

§4-1 线性平稳模型的一般概念.....	(122)
-----------------------	-------

§4-2	线性平稳模型的形式	(126)
§4-3	水文序列线性平稳模型的物理基础	(132)
§4-4	建立随机水文序列模型的一般程序	(139)
第五章	水文序列的自回归模型	(143)
§5-1	一般自回归模型	(143)
§5-2	一阶自回归模型	(152)
§5-3	二阶自回归模型	(166)
第六章	水文序列的自回归滑动平均求和模型	(175)
§6-1	滑动平均模型	(175)
§6-2	自回归滑动平均模型	(182)
§6-3	主要ARMA (p,q)模型的统计特性和 参数估计	(191)
§6-4	自回归滑动平均求和模型	(196)
§6-5	模型参数不确定性的估计	(203)
§6-6	模型的识别和检验	(206)
§6-7	模型实用性的初步分析	(215)
§6-8	建立模型实例	(217)
第七章	水文序列的季节性模型	(227)
§7-1	季节性的自回归模型	(228)
§7-2	季节性的一阶自回归模型	(230)
§7-3	季节性的ARIMA模型	(240)
§7-4	解集模型	(244)
§7-5	散粒噪声模型	(261)
§7-6	正则展开模型	(268)

第八章 水文序列的长持续性模型	(273)
§8-1 水文序列的极差和轮次分析.....	(274)
§8-2 分数高斯噪声模型.....	(280)
§8-3 折线模型.....	(284)
§8-4 一种简单近似的长持续性模型.....	(288)
第九章 水文序列的多变量模型	(294)
§9-1 多变量AR(1)和AR(2)模型.....	(295)
§9-2 近似多变量ARMA(1,1)模型.....	(307)
§9-3 空间(多站)解集模型.....	(309)
§9-4 季节性的多变量自回归模型.....	(314)
§9-5 多变量序列模拟的正交变换法.....	(316)
§9-6 多变量序列模拟的主站法.....	(319)
§9-7 多变量自回归模型举例.....	(321)
第十章 流域系统的随机模型	(326)
§10-1 概述.....	(326)
§10-2 暴雨洪水准随机流域系统模型.....	(328)
§10-3 暴雨洪水随机流域系统模型.....	(341)
§10-4 降雨径流随机流域系统模型.....	(346)
第十一章 随机模拟序列的分析和应用	(354)
§11-1 模拟序列.....	(354)
§11-2 模型在实用上的选择.....	(356)
§11-3 模拟序列实用性分析.....	(364)
§11-4 无实测水文资料时水文序列的模拟.....	(381)
§11-5 水文序列模拟及其应用示例.....	(384)

§11-6 水文模拟序列应用中的一些问题.....(403)

第十二章 水文序列的预报.....(414)

§12-1 概述.....(414)

§12-2 平稳线性最小方差预报.....(417)

§12-3 ARMA序列的预报.....(425)

§12-4 ARIMA序列、季节性ARIMA序列及乘积型季节性ARIMA序列的预报.....(434)

附录

参考文献

引 论

一、 随机水文学

大家知道，水文现象随时间而变化，一般称之为水文过程。大量实测资料表明：实际的水文过程既受到确定因素的作用，又受到随机因素的作用，是十分错综复杂的过程。但是不管如何复杂，一般而言，水文过程中总包含两种成分，一是确定成分，二是随机成分。前者表现为水文现象的趋势变化和周期性变化等；后者表现为水文现象的相依性和纯随机变化。这种包含有随机性成分和确定性成分的水文过程，就称之为**随机水文过程**。比如，月径流过程受地球围绕太阳公转影响而呈现出周期性，受流域各种调节因素的影响而呈现出相依性，同时又受到许多偶然因素的综合影响而显示出纯随机性，所以月径流过程是一个典型的随机水文过程。人们通常依据随机过程理论研究这样的水文过程。随着高速电子计算机的应用和各种随机过程理论及分析技术引入水文学中，研究水文过程的领域，逐渐形成了一门新的学科，这就是随机水文学。因此，所谓随机水文学就是指以随机水文过程为研究对象的一门学科。它是最近二十多年发展起来的水文学中的一个新领域。按上述含义，随机水文学的研究范围是十分广泛的。当一个水文过程受随机因素的影响很小，即其中随机性成分相当小以致可忽略不计时，这一过程便是**确定性过程**（又称决定性过程）；反之，若一个水文过程不受

确定性因素影响而且在时序变化上无相依性，即确定性成分和序列相依性不予考虑，这一过程便为**纯随机过程**（又称为**概率过程**）。水文计算中通常的**频率计算方法**就是研究这一过程。因此，对确定性过程的研究和对纯随机过程的研究是随机水文研究中的两种极端情况^[2-1]。但一般而言，随机水文学是研究既受确定性因素又受随机性因素综合影响的随机水文过程。

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^[2-2]。在确定性水文学中，认为水文现象随时间的变化可由其它变数完全加以说明；在概率性水文学中，问题不牵涉到时间，而只涉及到某一事件的概率。在随机水文学中，现象发生的时间先后次序至关重要。随机水文学的研究重点在于与时间紧密有关的随机现象，即**随机水文过程**，表示这种过程的数学模型，叫做**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^[2-3]。

二、 随机水文学的发展

随机水文学作为一门比较完整的学科出现，虽是最近20多年的事情，但它的基本概念早在本世纪初就被引入水文学中。海森(Hazen)和塞德劳(Sudlen)的早期研究就表明，可以利用概率和统计理论来分析径流序列^[2-4]。五十年代初期赫斯特(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。在海森和塞德劳早期经验性研究的基础上，巴尔纳(Barnes)

于1954年应用正态随机数表模拟径流。然而随机水文学的迅速发展是从塞姆思(Thomas)、费营(Fiering)和叶菲耶维奇(Yevjevich)考虑到水文现象时序上客观存在着的相依性,而引用马尔柯夫模型(自回归模型)开始的。尽管这一模型在六十年代初期才用来模拟年月径流序列,但近20多年发展很快。目前此类模型广泛用于各种水文序列的预报和模拟。从六十年代末期以来,产生了新的模型,这类模型和上述马尔柯夫模型有别,故叫做**非马尔柯夫模型**,其中,主要有自回归滑动平均求和模型,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以及折线模型等。自回归滑动平均求和模型以及解集模型常用于生产实际,其它几种模型由于复杂,耗费计算机时间较长,尚未广泛应用。

在建立以上一些模型时,通常是将数学上的理论直接用到随机水文过程中来,而没有考虑水文过程的物理特性。为了克服这一缺点,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概念的随机模型,或者对已有模型作出物理解释。这一类模型尽管不太成熟,但加深了人们对随机模型的认识,并有助于对模型进行合理性分析。它们的出现促进了随机水文学的发展。

水资源系统的规划、设计和运行常常涉及到几个水文过程(例如几个站的径流过程),于是从单变量的随机模型发展到多变量的随机模型。现在已有不少多变量随机模型,例如多变量自回归模型,多变量分数高斯噪声模型以及多变量折线模型等。

为了尽可能利用各种信息,以提高模型的可靠性,从七十年代起引用贝叶斯方法和卡尔曼滤波方法来估计模型参

数。由于信息的不断增多，模型中的参数亦随之变化，所以特别称这样的模型为变参数模型。

近来，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），在广泛应用的线性正态模型基础上提出了非线性偏态模型，这一进展大大拓宽了随机水文的实用领域^[2-5]。

总之，随机水文的发展是从马尔柯夫模型到非马尔柯夫模型；从纯数学模型到有一定物理基础的模型；从定参数模型到变参数模型；从单变量模型到多变量模型；从线性正态模型到非线性偏态模型。今后随着随机水文学在各方面的应用和理论研究不断的深入，它必将有更大更快的发展^[2-80]。

三、 随机水文学的主要应用

随机水文学之所以不断发展，是因为生产实际中有着日益广泛的应用。近年来，依据随机水文学原理和分析技术对水文序列建立的模型，在水文水利计算，水文预报，水文测验以及其他方面均得到广泛应用，并显示出一定的优越性。

（一） 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，按其统计特性，可建立相应的随机模型；通过随机模型，借助统计试验法，获得大量的随机模拟序列（以下简称模拟序列）；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。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上。有些情况，随机模型可直接用于系统分析计算。

因此, 随机模型在各种系统分析中占有重要的地位。例如, 黄河上游已建和在建工程有刘家峡、盐锅峡、八盘峡、青铜峡和龙羊峡, 还有即将开工的李家峡, 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, 因为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^[1-1], 大量模拟序列的应用, 在一定程度上可以解决这类问题。又如四川省沱江规划, 特别是沱江环境保护系统分析时, 要求枯水流量序列作为系统输入, 对枯水流量建立适当随机模型, 进而获得大量模拟序列, 可以满足系统分析的要求^[1-2]。

2. 在插补序列中的应用

传统插补延长序列的方法, 只是用回归方程而没有考虑随机误差, 使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^[1-3]。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, 这些数值供给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, 便于作出插补值差异对频率计算成果影响的统计评估。

3. 在一些特殊问题上的应用

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获得。

在这种情况下，利用随机模型并藉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，可利用随机模型获得的各断面模拟序列加以推论。曾尝试用随机解集模型研究嘉陵江北碛站的洪水地区组成，并求得现行典型法和同频率法难以得到的成果^[1-4]。又如，通过随机模型得到模拟序列用于研究干旱持续历时特性^[1-2]。通过随机模型还可以研究人类活动对径流的影响^[2-14]。以上仅是几例，实际上随机模型结合统计试验法在解决一些特殊问题上已有多方面的应用。

(二) 在水文预报方面

1. 预报误差的处理

用传统预报模型作出的预报被认为是预报的第一步，第二步则是对第一步预报结果进行调整，从而获得第二步预报结果。构造第二步预报的依据在于用预报误差的统计结构特征^[2-6]。若预报误差序列是相依的，即相继误差之间存在一定的关系，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，预报误差的处理，其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。

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。例如长江汉口站各月水位，曾用季节性自回归滑动

平行预均求和模型进报^[1-6]。

3. 卡尔曼滤波实时预报

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获得应用。七十年代初被引入水文学^[2-7]。最近十年卡尔曼滤波理论在水文预报上的应用有所发展, 在一定程度上提高了预报精度。卡尔曼滤波实时预报是基于对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。

(三) 在水文测验和站网布设方面

近来在考虑测验误差和评判测验精度时, 随机过程的理论被引入水文测验中。例如, 流速及含沙量等要素的脉动现象, 可以看作是一种随机过程。在水文测验中, 要估计连续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^[1-6]。又如, 在流域上, 点雨量的观测可以看作是在随机场上的抽样, 在各个点的测量值和流域平均值的误差间, 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。文献^[2-8]利用随机过程的理论, 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某种水文要素。例如, 为了测算森林区平均积雪深度, 通过小面积的抽样测量, 建立一种适用的随机模型, 藉助随机模

拟估算出大面积上的平均积雪深度^[2-9]。

近十年来, 随机分析技术日益应用于站网规划布设方面, 例如, 利用雨量的空间相关结构设计雨量站网^[2-10]。白若斯 (Bras) 等人将流域上的点雨量看为多维随机过程, 提出对雨量站布设的要求和方法^[2-11]。麦思 (Moss) 等人将回归分析模拟用于地表水站网的设计^[1-12]。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^[2-13]。

由以上可以看出, 随机分析技术和随机模型在测验和站网规划方面的应用也是不可忽视的, 并且随着资料的积累, 先进技术的引入, 加之计算机的普及, 这种应用会愈来愈受到重视。