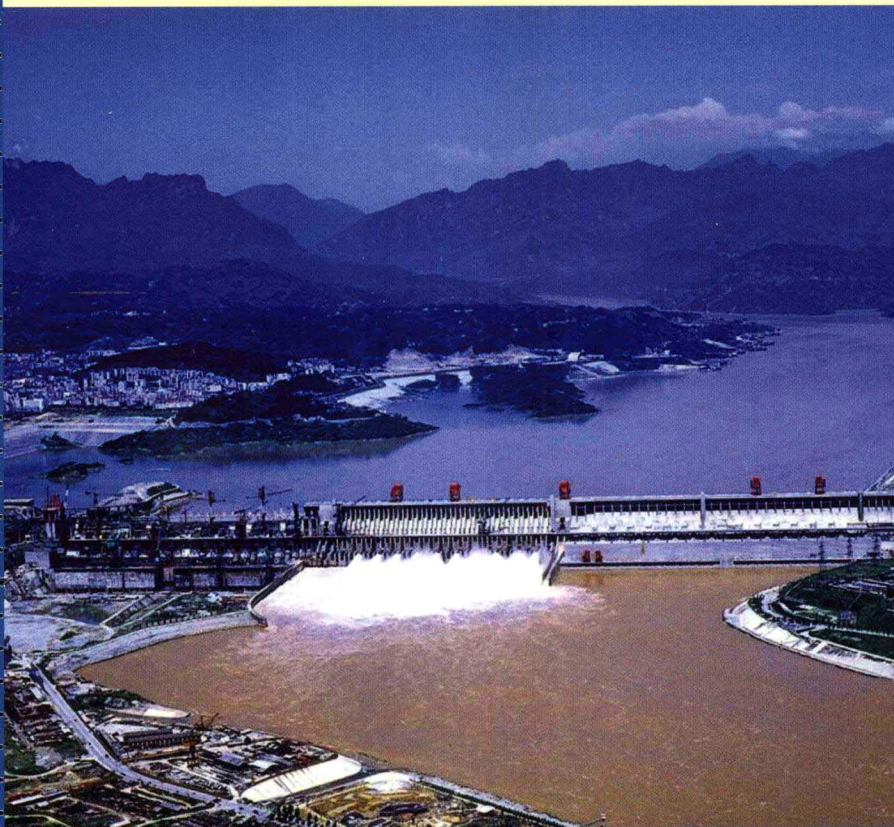


水文风险分析 的理论与方法

程根伟 黄振平 著



科学出版社

www.sciencep.com

水文风险分析的理论与方法

程根伟、黄振平 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书根据现代水利工程设计和管理的需要,阐述了水文风险研究的对象与任务,风险分类及其影响因素,以及风险研究的主要方法。并系统介绍了水文风险分析的概率统计基础,重点对风险分析中的随机模拟方法,水文风险分析原理和减小风险的途径进行了全面地阐述,在此基础上,以典型示例说明了风险分析在水利工程和环境保护上的应用。

本书可作为水利及其相关学科研究生的教材,也适合从事水利工程设计的工程技术人员、管理人员以及其他相关领域希望了解水文风险分析原理的人员参考阅读。它是一本用数学工具研究水文风险的入门书,尤其适合这方面的初学者自学。

图书在版编目(CIP)数据

水文风险分析的理论与方法 / 程根伟, 黄振平 著. —北京: 科学出版社, 2010.6
ISBN 978-7-03-027669-8

I. ①水… II. ①程… ②黄… III. ①水文分析: 风险分析-研究 IV. ①P333

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 092432 号

责任编辑: 杨 岭 张 展 封面设计: 陈思思

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 5 月第 一 版	开本: B5 (720×1000)
2010 年 5 月第一次印刷	印张: 12.625
印数: 1—1500	字数: 240 千字

定价: 38.00 元

前 言

水文风险一直是水文计算中评价设计成果的一个中心问题，但也是一项困难的任务，长期以来仅限于定性分析或在简单情况下的估算。近年来通过各国水文界的努力，采用了许多新的研究方法，逐步取得了一些可供实际分析计算用的成果，并在特定的范围内得到应用。

总的来看，现有的风险分析方法虽然不少，但很不系统，也不易找到统一的分析原则，往往使初学者无所适从，难以入手。而且现在的各种方法均散布于中外文献之中，国内尚无可作教材的资料。基于此，初学者迫切需要一本条理清楚、系统连贯、内容比较全面、有算例便于学习和讲授，又能指导实用的教材。

本书是作者在对水文风险分析原理的学习和研究基础上，以讲义形式编写的研究生教材。希望能以简明的形式让学生对水文风险分析的主要原理和计算过程有一个初步的了解，并可供今后实际工作中作参考。突出逻辑联系和可计算性是本书两大特点，其中有的算例是作者或其他研究者的最新成果。本书对相关领域的研究人员也有一定的参考价值。

作 者

2009 年 10 月

目 录

前 言

第 1 章 概论	(1)
1.1 水文风险研究的对象与任务	(1)
1.2 水文风险研究历史与风险定义	(3)
1.3 水文风险分类及其影响因素	(6)
1.4 水文风险研究的主要方法	(8)
第 2 章 水文风险分析的概率统计基础	(10)
2.1 概率的定义与性质	(10)
2.2 条件概率与事件的独立性	(20)
2.3 随机变量的类型与分布	(29)
2.4 随机变量的数字特征	(48)
2.5 参数的点估计	(56)
2.6 参数的区间估计	(67)
第 3 章 风险分析中的随机模拟方法	(72)
3.1 随机过程简述	(72)
3.2 平稳随机过程	(74)
3.3 随机模拟技术	(78)
3.4 随机水文过程的模拟	(82)
3.5 水文随机模拟中的统计检验	(89)
第 4 章 水文风险分析原理	(93)
4.1 经典风险分析理论	(93)
4.2 方差分析及合成风险	(100)
4.3 风险动态模型	(104)
4.4 模糊破坏的风险分析	(107)
4.5 设计洪水中的风险分析	(110)

4.6	水库系统中的风险分析	(116)
4.7	Monte-Carlo 风险分析法	(123)
第5章	减小风险的途径	(132)
5.1	增加信息的途径	(132)
5.2	信息论和决策论途径	(136)
5.3	风险率与经济规划	(141)
5.4	多因素风险率及安全度分析	(146)
第6章	风险分析在水文上的应用	(151)
6.1	风险分析的模型选择	(151)
6.2	径流预报中的风险分析	(157)
6.3	洪水灾害的风险分析	(164)
6.4	水库汛限水位调整的风险分析	(173)
6.5	河流水质评价中的风险分析	(181)
6.6	暴雨泥石流风险率与规模估计	(183)
6.7	含特异值的依概率适线总体方差	(189)
结 语		(193)
主要参考文献		(194)

第 1 章 概论

1.1 水文风险研究的对象与任务

水文科学是研究自然状态下的水循环、河川径流变化、地下水流运动和人工干预下水文特性变化的学科。我们认识水文规律的目的之一是要利用它来为人类社会服务。古往今来，奔腾汹涌的江河、烟波浩渺的湖泊养育了亿万人民，带来了无尽的财富，创造了辉煌的文化，但也带来了水涝洪灾。人类对水的利用从来就不是一帆风顺的，人力与大自然的抗争互有胜负。大自然的美好胜景为自在之物，但未被人类利用之前，绿水青山枉自多，只有当自在之物转化成为我之物后，它才成为人类进步的财富。要从自然之主中获得地球的财富必须承担一定的风险，这是人与自然的博弈。对成功的收益率、失败的可能性、自然力和人类社会力量的评价和判断，这就是广义的风险评价分析的内容。

世界上现有大中型水库数百万座，据统计每年约有万分之一的水库要被破坏。国内的大中型水库约 86 000，其中库容超亿方的约 300 座。在大洪水期间，可以一次造成几十座中小水库的破坏，在特大洪水条件下大型水库发生溃坝的事也曾发生过。美国 Biswas 和 Chatterju (1971) 统计了 1 600 座失事的大坝，将其破坏的原因归纳成如下几个因素：坝基（40%），溢洪道（23%），结构（12%），沉陷（10%），孔隙压力（5%），战争（3%），堤坎滑坡（2%），材料（2%），运行（2%），地震（1%）。

另外，大江大河的堤防在历史上也经常发生决口事件，这些工程的破坏带来的结局往往是灾难性的，其影响远不是一座工厂失火，一个城市瘟疫所能比拟

的,而是可以在一个时期内影响该地区的历史与发展,使区域条件变化(如安康大水与板桥水库失事),甚至使国家处于非常时期(上古的夏禹时期),故大型水利工程的失事可能性和失事结果的估计一直是备受重视的问题,同时其他小型工程,如公路、桥梁、堤防、过洪涵管、隧洞的设计也要考虑一定的风险。此外,水力发电,市政供排水,大型引水工程等也有一个供水和出力保证率问题,它们是风险率的另一种表述,也是应该研究的课题。

洪水风险发生的根源是由于所面临的自然现象是不确定的,其发生具有随机性。在影响工程安全的水文要素中,降水的时间是偶然的,历时是随机的,降水总量也是不确定的,即使不考虑流域产汇流场中的不确定性因素,最终的出流过程也属于随机过程。而水利工程一旦建成,其主要的抗洪能力和蓄水能力也就确定了,不能随时变动,因而必然要有设计规模小于需要的情况,这时就发生水文意义上的风险,这是从大洪水事件造成的工程损害的情况;若遇干旱,事先未能蓄够足够的水量(受工程规模或调度规则限制),到一定时期难以提供必要的水量或电量,这也是一种风险,它的损害是以工程效益小于设计效益为标志的。

一般来说,工程规模越大,设计标准越高,工程能抗御的洪水或干旱能力就越大,风险就越小。但是不可能也不必要使工程能抗御一切洪水(或干旱),因为工程规模的扩大要受经济条件、技术条件和当地材料的限制,而选择偏小的设计值将使工程冒一定的风险,只要这个风险是为公众和社会能接受就行。换句话说,如果现在全国已建成的水库全部完好,而且今后也无破坏的可能,这并不是好事,而是说明工程的设计标准太高了,相反如果有很小比例的水利工程在非常洪水中毁损,这种设计才是合理的。这种说法似乎荒唐,但仔细分析却是正确的。如美国水资源委员会的《大坝设计手册》(1979)规定,在任何一年中,每一万座大坝应有一座垮坝,并且其中有一半的垮坝事件发生在蓄水初期。

风险来源于事件的不确定性,而不确定性分为两种。一是暴雨洪水本身的不确定性,它包括降水的时机、大小、历时等的随机性,是复杂天气系统固有的属性。流域下垫面的产流条件,汇流参数的偶然变化也是这一类的不确定性,称为客观的不确定性;二是人类认识能力和分析方法欠缺产生的不精确性,它们是简化和近似的结果,如流域洪水过程预报的误差,对未来需求预估的不准确,分析工具的线性化,参数误差以及工程调度不适当等,它们代表主观的不确定性。

风险研究就是要分析与计算这两种不确定性,并确定出由此产生的工程失事(广义的失事或者失效)可能性大小。

水利工程由于多方面的效益,在社会经济中起的作用越来越大,因此它们正加速发展起来,但同时它们的被破坏所造成的灾害和损失也是极其巨大的,故研究水工建筑物的破坏风险是风险分析的一个重要的领域。这种工程破坏的特点是

“小概率、大损失”，仅按照一般的平均损失率来分析和评价是不行的。如考虑长江堤防，若要能抗御 300 年的洪水，即使建成也不能正确地管理使用，虽说按此设计平均损失很小，但是在工程的有限寿命内（一般约 50 年）可能遇不到一次这样量级的洪水，那么工程就没有发挥效益，而又若遇上这样量级的洪水，由于堤坝长期未受江水的淹没，隐患就特别多，又难以事先查找，故可能造成非水文的失事，这说明只以期望损失作为唯一的风险指标是有局限的。如果不计投资代价和效果，尽量加大工程规模，风险也是可以尽量减小的，但这是谁也不会接受的理论，因此研究工程风险率还要结合投资来分析，即将工程经济性，工程损失函数，可接受的风险率都纳入一个统一的规划框架内，在可接受的风险水平内选择较小的投资方案，或在允许的投资额内，如何选择设计参数使风险最小，这是研究工程风险率的最终目的。

风险分析的主要环节及所要完成的任务可概括为如下几点：

- (1) 作出工程设计，确定工程参数和所对应的设计频率或设计保证率；
- (2) 对设计值进行可靠性分析，对一定工程寿命求出相应的经典风险率；
- (3) 研究设计频率的分布、平均设计频率以及对应的风险率变化；
- (4) 确定工程抗洪能力（抗旱能力）的分布范围，计算结合抗洪能力的风险；
- (5) 分析工程投资及损失函数，建立经济风险模型，求出最优工程设计参数，以满足一定的经济要求与风险水平；
- (6) 研究影响风险的因素，探索减小风险的模型方法，分析方法，工程措施和管理规则。

以上是风险分析的几个重要方面，但不是全部内容，特定工作领域内的水文学家可能采用一些独特的分析方法，这些在需要时可以参考有关文献（畅明琦等，2007；董胜等，2003；付湘等，2008；韩宇平等，2003）。

1.2 水文风险研究历史与风险定义

风险率分析国外约在 1960 年代之后开始，它与各种估计的不确定性分析结合起来，合称不确定性与风险率分析。

1.2.1 研究历史回顾

1956 年，Bonhan 将置信区间概念用于极值分布理论，以估计洪水设计值的可靠性问题。

1963 年, Borgman 引进风险率指标, 将遭遇概率定义为工程寿命之内来水大于设计洪水的概率, 从而定义出动态风险率 (Borgman, 1963)。

1970 年, Yen 指出, 具有一定重现期的设计洪水和期望寿命的工程, 水文计算中总包含有失事风险, 同时由于资料限制, 资料处理方法等的不确定性因素影响, 还会给工程带来附加风险 (Yen, 1970)。

1971 年, Vulorov 将大样本分解为若干小样本, 计算小样本估计的不同重现期的设计值, 将它与大样本比较, 以研究序列长度对设计洪水的影响。

1974 年, J. K. Wauace 从容许限的角度出发, 探讨了洪水设计值的不确定性问题, 并借助于 Monte-Carlo 方法研究不同参数下容许限的大小。

1977 年, Condie 推导了 P-Ⅲ分布的 T 年一遇洪水设计值的标准离差公式, 作为度量洪水设计值的不确定性的依据 (Condie et al., 1977)。

1982 年, 在国际学术刊物 *Water Resources Resecrch* 中以 *Risk and uncertainty in water resources management* 为题, 编入了七篇总结性文章, 作为前十年风险研究的概括, 文中日本的 Hashimoto (1982) 和美国的 Stedinger (1982) 特别提到有关系统性能评价的四个新概念: 可靠性、稳健性、脆弱性、恢复性。

1983 年, 美国的《设计洪水指南》中, 以置信区间方式描述了设计值不确定性大小, 并提出了期望概率等方面的概念。之后, 风险分析的工作集中在 Bayes 分析, 极大似然法, 以及和经济性相联系的风险计算与最优规划, 并有一些用于实际的成果。在工程设计领域, 当时还有传统的设计值方差加成法, 期望概率讨论等都很有特色。

我国在 20 世纪 60 年代初, 金光炎的《水文统计原理与方法》(金光炎, 1964) 中就介绍了经典的风险率公式, 但此后没有什么进展, 直到 1977 年之后, 这方面的研究才开始活跃。当时华东水利学院(河海大学)丛树铮(1980)和南京水文研究所的谭维炎(1983)等在水文设计洪水的统计试验研究中, 采用 Monte-Carlo 方法对样本长度、参数估计的不确定性及其影响进行了研究, 之后成都科技大学的张永平开展了频率曲线的横标与纵标适线的对比, 带特异值的参数估计方法的研究, 南京水文所谭维炎等开展了多水库系统下游城市防洪概率计算, 取得了较好的成果, 宋德敦、雷时忠(1987)完成了梯级水库下游抗洪风险分析, 1986 年武汉水电学院徐宗学对风险分析方法作了系统的归纳, 在国内首先开办了水文风险评价方面的讲座, 同年河海大学的程根伟也为成都科技大学的本科生开设了水文风险分析选修课, 并编制了风险分析讲义。

以上是国内外风险研究的一个简单的回顾, 由此可见这方面的研究领域和现有水平, 总的来说, 目前对水文风险的定义还不统一, 公认适用的计算方法也还未找到, 有的只是对特定问题的具体处理方法, 分析结果具有很大的主观随意

性,而且这些方法很难为初学者所掌握,因此有必要加以系统化和规范化。

1.2.2 风险的定义

工程风险概念,它是指当工程建成之后,遭遇到难以确知的外来作用造成损害或破坏,这种遭受破坏的可能性和破坏的程度就叫风险(Risk),而对风险的大小所赋予它的一个指标就叫风险率(Risk Degree)。在不产生理解上的歧义的时候,有时也将风险和风险率的概念混同使用。在一些情况下,研究者更强调灾害性事件发生的可能性,或者重点关注灾害本身的危险性大小,也可以只用灾害发生的可能性(概率,Probability)来称风险。

为了将风险率与具体工程的设计条件结合,需要给出一个能定量的、便于分析计算的定义,以下就是若干风险定义:

(1) 风险率是一个概率,它是工程在预计运用期间遭受随机洪水造成破坏的可能性,它包括由于设计洪水概率不可靠的不确定性和设计洪水发生时机的不确定性两部分。

(2) 风险率是一个概率,它是在设计洪水概率已确知的条件下,在运行期发生大于设计洪水的概率,而将洪水概率的不准确性称不确定性,这时风险 R 与设计概率 P 、运行期 n (年) 的关系是

$$R = 1 - (1 - P)^n \quad (1-1)$$

该式称为经典风险公式。

(3) 以上风险未计及抗洪能力的随机性,若将其结合在一块,则风险为洪水 ξ 大于工程抗洪能力 η 的概率

$$R = Pr\{\xi > \eta \mid \text{已知分布 } F(\eta)\} \quad (1-2)$$

(4) Yevjevich (1974) 认为: 概率 P 已确知时, 与洪水有关的随机变量超过其设计值的概率称基本风险, 而由样本推断总体, 因抽样误差使计算概率具有的不确定性称附加风险。

(5) Haimes 等 (1977) 认为, 事件的随机性可用概率分布描述的, 就叫风险, 而不能这样描述的, 则叫不确定性, 其值只得由 Monte-Carlo 方法或经验统计法解定。

(6) 以上风险定义都是以“破坏”为基础的, 而这里的破坏是指完全的毁损, 即只要 $x > x_p$, 则系统完全失效, 造成最大的损失; 实际上还有另一种情况, 即软破坏, 这时的破坏是一个模糊的概念, 它可用设计值领域的一个模糊集合表示: “破坏” $\triangleq \xi > \tilde{X}_p$, 故又提出软破坏的风险定义。

设工程破坏是随机事件 ξ 大于 (或小于) 模糊标准 $\tilde{X}_p$ 的后果, 模糊水平的

隶属函数为 $\mu(\tilde{X}_p)$, 采用查德记号

$$\mu(\tilde{x}_p) \triangleq \mu_1 | x_{p1} + \mu_2 | x_{p2} \cdots \mu_n | x_{pn}$$

则风险是软破坏的概率

$$\begin{aligned} \tilde{R} &= Pr\{\xi > \tilde{x}_p\} \\ &= \sum_{i=1}^n M_i \cdot Pr\{\xi > x_{pi}\} \end{aligned} \quad (1-3)$$

这样定义的风险是有工程实际背景的, 尤其是在发电供水系统中, 常说的破坏都是指“软破坏”, 过去采用的简单破坏的计算方法不妥, 宜按此定义处理。

(7) 风险是灾害事件 i 出现的概率 P_i 以及可能的损失后果 L_i 的综合度量, 可以用风险度来表示

$$R = P_i \times L_i \quad (1-4)$$

本书主要研究水文随机特性造成的风险和不确定性, 而将经济评价和社会因素暂时忽略, 这些因素可以在风险模型的基础上建立多目标规划来解决(刘道祥, 2003; 刘涛等, 2005), 以后谈到的风险多为以上(3)和(4)所定义的, 有时也要用(6)或(7)所定义的风险。

1.3 水文风险分类及其影响因素

1.3.1 风险的分类

由于分类基础的不同, 风险有许多类型。

(1) 按照事件产生的原因来分类, 风险可分为自然风险和人为风险。自然风险是指在自然力的作用下, 导致物质毁损或人员伤亡的风险, 如风暴、洪水、地震等。人为风险是指造成物质毁损和人员伤亡的直接作用力是与人的活动有关。根据人们的不同活动方式, 人为风险又可分为行为风险、经济风险、政治风险和技术风险。

(2) 按照风险的损害对象来分类, 风险可以分为人身风险、财产风险与责任风险。人身风险是指因生、老、病、死而导致的风险; 财产风险是导致财产发生毁损、灭失和贬值的风险; 责任风险是指对于他人所遭受的人身伤害或财产损失应负法律赔偿责任, 或无法履行契约致使对方受损失应负的契约责任风险。

(3) 按照风险的具体构成性质来分类, 风险可以分为总风险和特定风险。特定风险可以是气象灾害、洪水灾害、地震灾害、狂风灾害、雪冻灾害、地质灾害、结构破坏等具体原因造成的灾害风险; 总风险是前面多个因素造成的综合性

风险,例如暴雨洪水造成溃堤风险,地震作用下的病险水库溃坝风险等等。

(4) 按照破坏损失的性质来分类,风险还可以分为破坏明确的风险和破坏模糊的风险,一般对于突发性灾害的破坏对象的损失是明确的、一次性的,例如水库溃坝,洪水淹没面积,人员损失数目等等。还有一种灾害的损失是模糊的、长期的,例如旱灾的损失(农田歉收、供水短缺),沙尘暴灾害(生活品质受损、社会经济干扰),水污染灾害(饮水困难、生产停滞、成本加大)等等。

(5) 按照风险能否预测和控制来分类,风险可分为可管理风险和不可管理风险。可管理风险是指可以预测、可以控制的风险,不可管理风险是指无法预测和无法控制的风险。风险能否管理,不但受灾害本身的类型影响,还取决于所收集信息的多少和管理技术的水平。

1.3.2 影响风险的主要因素

能引起灾害风险的因素是很多的,其后果的严重程度也是各异的。完全不考虑这些因素或遗漏了主要因素是不行的,但每个因素都要考虑也会使问题复杂化。影响风险的主要原因就是导致灾害发生的各种不确定性,风险识别就是要确定这种不确定性。

在水利工程中,不确定性因素有很多,按学科分类简述如下:

(1) 水文气象不确定性,是指水利工程系统所涉及的具有不确定性的水文和气象因素,包括洪水频率分布(年径流量、洪量、洪峰系列)及年内洪水的时间分布、可能最大洪水、降雨-径流关系、暴雨系列频率分布、暴雨时空分布、年降雨量系列频率分布、汛前库水位、水位-库容关系、库区冲淤等不确定因素。

(2) 水力不确定性,是指影响泄流能力和计算水力荷载时具有不确定性的物理量。这些物理量的不确定性是由于其技术特征值的离散性和模型的简化所造成的,如实际工程中的三维水流简化为一维水流,以及河流糙率的简化选择等。

(3) 土工不确定性,是指地质构造、土工因素方面的物理量的技术特征值的离散性,包括地质构造、管涌、渗流、坝基扬压力、沉降、边坡结构等因素。

(4) 地震(地质)因素的不确定性,是指地震的强度、烈度、震源、地震作用、材料液化、地震引起的波浪等具有的不确定性。

(5) 结构和技术的确定性,是指建筑物结构设计和工程材料中的技术特征值的偏差,包括设计不当、施工材料强度和施工质量偏差。

(6) 施工管理因素不确定性,是指操作规程、管理行为与工程实际配合过程中出现的不协调现象,包括操作、运行方案的不确定性程度,工程的维护、保养程度、操作不当,管理过程中人为的过失等。

(7) 统计上的不确定性: 由于参数估计所用的样本容量有限, 或者所估计的参数不可靠, 所以存在计算结果的不确定性;

(8) 预测模型的不确定性: 由于所选择的预测模型仅仅是原型的一个同构, 加上模型简化上的原因, 所以亦存在不确定性。

(9) 损失评价的不确定性: 估计与人类生命相联系的经济损失中存在的确定性, 防洪工程经济核算中存在不确定性, 估算贴现率及其他经济参数中存在的确定性。

以上各种不确定性可以分为两类, 一类是由于自然界固有的随机性所致, 另一类是由于预测偏差产生。自然现象的变化具有随机性, 难以完全用确定性模型予以准确描述, 必然会包含偶然性的变化, 即事件的不确定性, 这种不确定性就是由于自然界本身的变化特性所引起的, 可以用一些统计分析方法加以描述, 但是其发生的风险是难以避免的。

与预测不可靠相联系的不确定性, 包括估计误差与模型选择不当所造成的偏差, 即预测的随机误差和系统的误差。采集很多样本, 每一样本对应一均值与方差, 对上述均值取平均, 即认为是总体真值, 则样本均值与该总体真值之差就是系统误差, 对各样本均值求均方差就是随机误差。

1.4 水文风险研究的主要方法

风险研究从方法论的角度主要分为:

(1) 不确定性传递函数分析法, 从基本量的不确定性开始, 逐步传递到最终结果的不确定性中, 并研究各因子的不确定性范围, 及其它们对总风险的贡献。

(2) 置信区间分析法, 利用数理统计原理, 计算危险性事件的可能出现的范围, 从容许限和置信区间分析不确定量的大小。

(3) 方差分析法, 研究随机变量的方差, 将灾害事件的方差作为风险指标, 并研究减小方差的方法。

(4) 随机点过程方法, 把暴雨或洪水事件作为随机点过程, 采用泊松流的概念, 研究有关设计指标的分布问题。

(5) Bayes 方法, 应用 Bayes 决策理论研究随机事件的最佳估计方法, 以及减小风险和损失的决策。

(6) 信息论方法, 应用系统熵的概念及最大熵原理, 研究洪水灾害的频率分布及参数估计问题。

(7) 随机模拟法, 采用 Monte-Carlo 随机统计试验, 研究不同条件下, 各风险指标的变化, 或借助统计模拟方法得到难以解析推导的有关分布函数。

(8) 洪水演算方法, 采用基于水文学的洪水演算模型, 计算不同设计条件下

的洪水淹没线或设计洪水位，划定不同风险率的洪水淹没范围。

在洪水设计和工程调度方案评价中，应用上述方法主要研究如下几个方面：

(1) 研究设计值的变化范围，以及对对应事件的频率的不确定性。

(2) 研究能提高设计可靠性的模型类型（如线型选择），增加信息的方法，如历史资料的作用，区域信息的利用等。

(3) 探索较好的分析方法与手段，如适线法的适线准则，特异值的鉴别处理，参数估计方法等。

(4) 研究和模拟工程对洪水的影响，提出减小洪水风险的工程设计方案或调度运用规则。

(5) 应用风险评价与最优决策模型，将工程风险与设计经济性结合，研究不同经济水平下的最小风险率或允许风险水平下的工程最经济方案。

(6) 在发电、供水或河流污染模拟中，还借助 Monte-Carlo 方法模拟工程运行情况，提供设计条件的发电（供水）保证率与工程规模的关系，提供河段水质分布与水环境工程运用规则的关系，从而提出较优的设计运用方案。

第 2 章 水文风险分析的概率统计基础

概率统计理论是风险分析的重要基础，为了更好地理解和掌握有关水文风险分析的理论和方法，需要对相关的概率统计知识作简要介绍。

2.1 概率的定义与性质

2.1.1 随机试验与事件

众所周知，自然界中广泛地存在着随机现象，概率论与数理统计是研究随机现象统计规律的数学分支。水文现象具有显著的随机性，因此，概率统计方法在水文科学中有着广泛的应用。

为研究某种现象，就需要对它进行观测、试验或调查，我们把这类活动统称为试验。

概率统计中所讨论的试验称为随机试验，它具有以下特点：

- (1) 试验可以在相同的条件下重复进行；
- (2) 每次试验的可能结果不止一个，在试验之前能明确知道有哪些可能结果；
- (3) 每次试验能并且只能出现所有可能结果中的一个，但在试验之前不能预测哪个结果会出现。

随机试验的结果称为随机事件，简称事件。试验的所有可能结果构成的集合称为基本空间或样本空间，一般记为 Ω ，试验中每一种根据试验目的而定义的不

可细分的事件称为基本事件。例如掷一颗骰子,观测出现的点数,可能出现1点、2点、3点、4点、5点、6点,这6个基本事件。这6个基本事件就构成了观测出现点数这一掷骰子试验的基本空间。

对随机试验研究,除关心基本事件外,更重要的是复合事件,它是由基本空间中某些基本事件构成的子集。例如在掷骰子试验中,“出现点数不大于3”或“出现点数为偶数”等都是复合事件。前者是由出现点数为1、2、3三个基本事件构成的子集,后者是由出现2、4、6三个基本事件构成的子集。

现实世界中,各种随机现象之间的关系是非常复杂的,但从概率统计观点看,这些关系可归纳为以下几种:

(1) 包含关系,在每次试验中,若事件 A 发生必然导致事件 B 发生,则称为事件 B 包含事件 A ,记为 $B \supset A$ 。例如,若 A 表示某次洪水洪峰流量小于等于 $3000\text{m}^3/\text{s}$, B 表示洪峰流量小于等于 $5000\text{m}^3/\text{s}$,则 $B \supset A$ 。因为,若同次洪水的洪峰流量小于等于 $3000\text{m}^3/\text{s}$,则必然小于 $5000\text{m}^3/\text{s}$ 。

(2) 互斥关系,在同一次试验中,若事件 A 与事件 B 不能同时发生,则称事件 A 与事件 B 互斥或称互不相容。例如,若 A 表示某次洪水洪峰流量小于等于 $3000\text{m}^3/\text{s}$, B 表示同次洪水洪峰流量大于等于 $5000\text{m}^3/\text{s}$,则 A 与 B 为互斥事件,因为它们不能同时发生。

(3) 对立事件,设 A 与 B 是两个事件,若 A 与 B 不可能同时发生,但每次试验,其中必有一个发生,则称事件 A 与 B 对立或互逆。例如,掷一颗骰子,若 A 表示出现偶数点, B 表示出现奇数点,则 A 与 B 互为对立事件。

A 的对立事件记为 $\bar{A}$,所以若 B 是 A 的对立事件,则 $B = \bar{A}$ 或 $A = \bar{B}$ 。

事件有下列几种运算:

(1) 事件之和,若事件 C 为“事件 A 与事件 B 中至少有一个发生”,则称事件 C 为事件 A 与事件 B 的和(或并),记为 $C = A + B$ 或 $C = A \cup B$ 。

例如,观测某次洪水的洪峰流量,若事件 A 表示“ $2000\text{m}^3/\text{s} \leq Q_m \leq 4000\text{m}^3/\text{s}$ ”,事件 B 表示“ $3000\text{m}^3/\text{s} \leq Q_m \leq 5000\text{m}^3/\text{s}$ ”,若 $C = A + B$,则 C 表示“ $2000\text{m}^3/\text{s} \leq Q_m \leq 5000\text{m}^3/\text{s}$ ”。

(2) 事件之积,若事件 C 为“事件 A 与事件 B 两者同时发生”,则事件 C 为事件 A 与 B 的积(或交),记为 $C = AB$,或 $C = A \cap B$ 。

例如,在上例中,若 $C = AB$,则 C 表示“ $3000\text{m}^3/\text{s} \leq Q_m \leq 4000\text{m}^3/\text{s}$ ”。

(3) 事件之差,若事件 C 为“事件 A 发生,而事件 B 不发生”,则称事件 C 为事件 A 与事件 B 的差,记为 $C = A - B$ 。

例如,在上例中,若 $C = A - B$,则 C 表示“ $2000\text{m}^3/\text{s} \leq Q_m \leq 3000\text{m}^3/\text{s}$ ”。

随机事件在一次试验中可能发生,也可能不发生,而且,人们还发现在同一