

风险分析在水系统中的应用研究进展及其展望

王 栋 朱元生

(淮海大学水文水资源及环境学院 江苏 南京 210098)

摘要 : 首先概述了水系统中风险分析研究方法 , 然后从防洪安全、水资源利用、水利工程施工、地下水及其污染等方面的实际问题入手 , 综述了风险分析在水系统中的应用研究进展 , 并展望了其发展趋势 , 将熵理论引入到风险分析的研究领域中 , 开展“ 风险分析的风险 ” 的研究 , 比较和改进现有的风险分析研究方法 , 等等 .

关键词 : 风险分析 ; 水系统 ; 应用研究 ; 评述

中图分类号 : TV214 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-1980(2002)02-0071-07

风险是与不确定性联系在一起的 . 风险与可靠性问题的研究 , 始于 20 世纪 30 ~ 40 年代 , 人们运用概率论研究机器设备的维修问题 . 后来 , 风险分析和可靠性理论不断完善充实 , 逐步形成为一门应用科学 .

水系统是一个开放的复杂的巨系统 . 开展水系统的风险分析工作 , 不仅要预估未来自然资源 and 灾害可能出现的情势 , 还须考虑人类社会、经济和环境的承受能力与敏感程度 , 即资源需求和抗灾能力未来可能的变化 , 以及人与自然的相互作用、相互影响的互动关系^[1] .

具体到水系统 , 不确定性一般分为水文不确定性、水流不确定性、建筑结构不确定性和经济不确定性 . 长期以来 , 传统的重现期方法只考虑如洪水流量之类施加于结构上的荷载的水文随机性 , 结构承载能力作为确定性量处理 , 以引入安全系数的形式增加设计承载能力 , 消除由于不确定性造成的不安全因素 . 这种方法已不适合于水系统的风险分析 , 因为该法不能系统考虑水系统规划设计中的多种不确定性 , 不能显式评价水文和水流等不确定性 , 采用安全系数既没有科学基础 , 也同样不能考虑这些不确定性 . 因此 , 采用风险分析的方法势在必行 .

1 风险分析在水系统中的应用研究进展

水系统方面 , 20 世纪初即已经考虑洪水发生频率的问题 , 水文工程师对此贡献甚大 . 20 世纪 70 年代初期 , Ang , Yen 和 Tang^[2,3] 以雨水排水系统设计为例 , 建立了包括水文风险和水流风险在内的耦合风险模型 , 首先介绍了风险分析在水系统上的可行性 . 此后 , 风险分析在水系统上的应用逐渐推广 .

1.1 风险分析方法的研究进展

目前 , 水系统中风险分析方法已有多种 , 从直接积分法、MC(蒙特卡罗) 法、MFOSM(均值一次两阶矩) 法 , 发展到 AFOSM(改进一次两阶矩) 法、JC 法、二次矩法等 . 概括起来 (a) 直接积分法理论概念强 , 在研究随机变量影响因素个数较少时尚可应用 , 但如果影响因素较多 , 就难以找出概率密度函数或概率关系 , 或即使找到 , 也难以求得分布的解析解或数值解 . 所以 , 直接积分法在实用时限制最多 . (b) MC 法可以考虑随机变量各影响因素 , 不管怎样总会有结果 , 但计算量最大且结果未必一定精确 . 所以 , 在有其它简单方法时 , 一般都避免使用 MC 法 , 或以此法作为一种对照 . (c) FOSM(一次两阶矩) 法是一种在随机变量分布尚不清楚时 , 采用只有均值和方差的数学模型的方法 . 它运用泰勒级数展开 , 使之线性化 . 根据线性化点选择的不同 , 分为 MFOSM(均值一次两阶矩) 法和 AFOSM(改进一次两阶矩) 法 . MFOSM 法假设各影响因素相互独立 , 将线性化点选为均值点 . MFOSM 的计算可能误差颇大 . AFOSM 针对这一缺点 , 在进行泰勒级数展开时 , 将线性化点选

收稿日期 2001-01-16

作者简介 : 王栋 (1972—) 男 , 山东沂水人 , 博士 , 主要从事水系统风险分析、系统优化、非线性建模、不确定问题研究 .

① Tang W H , Yen B C . Hydrologic and hydraulic design under uncertainties . In Proc Inter Symp Uncertainties in Hydrologic and Water Resour Systems . Tucson , Ariz . , 1972 2 866 ~ 882 .

为风险发生的极值点(风险点)。(d)JC法适用于随机变量为任意分布的情况,其基本原理是:先将随机变量的非正态分布用正态分布代替,对于此正态分布函数要求在验算点处的累计概率分布函数(CDF)值和概率密度函数(PDF)值与原来分布函数的CDF值和PDF值相同,然后根据这两个条件求得等效正态分布的均值和标准差,最后用FOSM法求出风险值。

1.2 风险分析在防洪安全中的应用研究

洪灾是当今世界上损失最大的自然灾害,风险分析在此方面得到了最早和较广泛的应用。

排水水道涵洞风险分析方面,国外这方面的研究较多,Young等^[4]对公路箱式涵洞建立了一个考虑经济不确定性的优化设计模型,Mays^[5]基于水文不确定性的一阶分析,在涵洞优化设计中综合考虑了水文、水流和经济的风险,Yen^①从数学上对工程可靠性进行定义,概括了可靠性评估的步骤,以确定涵洞设计上游洪水的概率为例用MFOSM法计算,Tung等^[6]采用基于风险的优化设计法进行了公路管式涵洞的水流设计。

堤防系统行洪风险分析研究方面,堤防系统失事可以分为漫顶、边坡失稳、管涌、风浪冲刷侵蚀4种类型,漫堤和管涌与洪峰流量有关,边坡失稳与洪峰流量和水位过程线有关,风浪冲刷侵蚀与洪峰流量和水位有关,Szidarovszky等^[7]较早对汇流处河段堤防的可靠性问题进行了研究,Wood^[8]试图建立一个堤防可靠性模型同时考虑结构失事和漫顶,Tung等^[9]分静态和时变两种情况,考虑水文、水力的不确定性,建立了漫堤风险模型,Lee等^[10]以曼宁方程的一阶分析方法研究了防洪堤中的水力不确定性,朱元铎^[11]从剖析水文和水流风险因素入手,采用随机组合法综合各种风险因素对下关站年最大水位的作用,Cesare^[12]以复合河道曼宁方程和Gumbel分布对水力学中包含的不确定性加以研究,冯平等^[13]分析了水库保护区内的防洪堤水文风险因素,姜树海^[14]以随机微分方程进行河道行洪的风险分析,朱元铎等^[15]建立了南水北调中线工程总干渠洪水水毁风险计算的框架,提出了二维复合事件的风险计算模型,李纪人等^[16]以线性分段连续演算马斯京根法进行河道流量预报,采用AFOSM法对预报结果进行了定量分析,赵永军等^[17]计算了河道堤坝仅由水流参数偏差而失事的概率,王卓甫等^[18]对边坡失稳和渗透变形提出了风险计算模型,用MC法计算,李国芳等^[19]求得不同设计频率下关站设计水位及风险度,陈新民等^[20]以灰色系统理论研究了黄河下游若干河段的决口灾害风险评价问题。

水库大坝泄洪风险分析研究方面,Yazicigil等^[21]较早进行了这方面的研究,Karlsson等^[22]以分块多目标风险方法对大坝安全问题加以分析,徐祖信等^[23]提出了开敞式溢洪道水力设计中风险的计算模式,首次将JC法用于泄洪风险,郑管平等^[24]综合考虑了水文和水工方面的不确定因素对溢流坝泄洪能力的影响,姜树海^[25]用JC方法进行了泄水构件免空化概率极限设计的计算和分析,金明^[26]系统研究了水力不确定性在防洪泄洪系统风险分析中的作用,储祥元^[27]以FOSM法进行参数估计,以MC法结合拟优选择的办法求得泄流能力的最佳概率模型,姜树海^[28]推导了调洪演算Itô方程,求解了与泄洪风险率紧密相关的库水位过程的概率密度分布,朱元铎等^[29]就水库安全设计与垮坝风险问题进行了研究,认为设计标准应因地制宜和因时而异,杨百银等^[30,31]研究了单一和梯级水库两种泄洪风险分析模式,将JC法引入水库泄洪风险分析计算中,王长新等^[32]对泄洪消能风险计算的JC法和MC法进行了对比,姜树海^[33]建立了漫坝失事的随机模糊风险分析模型,熊明^[34]提出了大坝防洪安全风险计算的原则、方法及适用条件,王本德等^[35]建立了水库防洪实时风险调度模型,该模型考虑了水库下游防洪效益与水库风险两个目标。

防洪风险管理决策方面,美国自60年代起注重非工程措施,可是洪水危害仍不断上升,对此,James等^[36]认为应加强管理机构、风险评估专家和洪泛区居民之间的联系,朱元铎^[37]阐述了洪泛区洪灾风险分析的定义、具体内容、影响因素和计算方法,朱元铎等^[38]通过敏感性分析筛选出4个主要风险因子,在3种不同信息条件下建立了长江中游防洪决策风险分析模型,Simonovic^②对可持续水资源管理中的不确定性来源进行了分类,以概率方法和模糊集方法定义风险,对风险管理方法进行了评述,傅湘等^[39]用概率组合方法估算了水库下游防洪区的洪灾风险率。

在洪水等水文极值事件中,风险分析是一种强有力的研究工具,尤其在洪水分析与计算中,由于引入了

① Yen B C. Engineering approach to risk and reliability analysis. Risk analysis and Management of Natural and Man made Hazards. Haines Y Y and Stakhiv E Z, ASCE, 1989.

② Simonovic S P. Risk in sustainable water resources management. Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty (Proc Rabat Sympo S1, April 1997). IAHS Publ, 1997 (240): 3~17.

洪水风险率等概念,得以从新的角度去认识和把握洪水设计标准。Todorovic 等^[40-41]借助 POT 模型最先描述了季节性洪水风险的变化情况,又将该模型推广到非同分布的随机变量。Wood^[42]将水文过程的不确定性分为 3 种类型,以 Bayes 方法处理之。Ashkar 等^[43]建立了洪水风险分析的随机模型,并与 Bayes 法进行比较。Archer^[44]则研究了季节变化对年洪水风险变动的影响及评估问题。Kuczera^[45]研究了参数估计可靠性与水文序列数据的关系。Stedinger 等^[46-47]研究了随机年径流模型参数的不确定性,还讨论了特定设计洪水风险问题。李景玉等^[48-50]先后探讨了 Poisson 过程、更新过程、Neyman-Scott 过程等在洪水风险率分析中的应用。不过,应用随机点过程必须要满足一些假定。王燕生^[51]建立了区间洪水预报误差的风险计算模型。邢大伟等^[52]以水力学二维非恒订流计算了渭河下游洪水风险性。华家鹏等^[53]对洪水保险中的费率制定和经营风险问题进行了深入研究。Clarke^[54]对水位-流量关系曲线的模糊不确定性进行了分析。陈元芳^[55]以统计实验法研究了随机模拟中模型及参数不确定性对推求设计防洪库容精度的影响。

1.3 风险分析在水资源利用中的应用研究

水资源问题日益引起人们的广泛关注,风险分析在这一领域也得到了广泛应用。

水资源系统风险与可靠性度量指标研究方面,Nazar 等^[56]较早定义了风险表征的量化指标。Fiering^[57-58]建立了一个筛选模型量化水资源系统的可恢复性指标,介绍了 11 种关于系统可恢复性量度的定义。Goicoechea 等^[59]提出了一种在水资源工程收益-成本分析中考虑风险和不确定性的方法。Hashimoto^[60]提出了可靠性、可恢复性、脆弱性 3 个评价指标,从数学上加予以了定义。冯平^①把风险分析方法用于干旱期水资源管理,给出了相应的风险、可靠性、可恢复性和易损性等具体的风险指标。

配水供水系统规划设计的风险分析研究方面,早期配水系统优化设计工作大多致力于配水管网本身的费用最少方面。1987 年,Goulter^[61]指出:可靠性分析将成为配水系统研究者面临的重要课题。Vogel^[62]对于供水系统的设计引入了一个可靠性指标,并以 Markov 链进行验证。Lansey 等^[63]首次考虑了需求供水量、需求水压力和管道糙率的不确定性,建立了一个配水系统费用最优设计的非线性规划模型。Goulter 等^[64]对配水管网提出了一种耦合两种失事类型的方法。Awumah 等^[65]基于熵表征配水管可靠度和冗余度。Cullinane 等^[66]基于水力利用率提出了一种配水系统可靠性的实用量度。

配水供水系统运行管理风险分析研究方面,Bargiela 等^[67]以 MC 法、优化法和敏感性矩阵分析法对配水系统中的遥测水压和流量的不确定性进行了研究。Fujiwara 等^[68]以 Markov 链对供水系统的可靠性进行了评估。阮本清等^[69]以黄河下游沿黄地区供用水系统为例,对由于水文现象的随机影响而带来的风险进行了研究。王道席^[70]从来水和用水不确定性角度分析了黄河下游水量调度风险,建立了水量调度风险分析模型。

水库运行管理的风险分析研究方面,Baecher 等^[71]引入风险收益系数计算大坝失事概率。Moy 等^[72-73]引入了易损性和可恢复性量度指标。洪家宁通过来水、来沙的随机模拟和水库冲淤计算,分析了水库泥沙淤积量的风险度。梁川^[74]以极差分析法进行防洪调度风险评估。冯平等^[75]研究了汛限水位对防洪和发电的影响,通过风险效益比较定量给出了合理的汛限水位。谢崇宝等^[76]分析了水库防洪风险计算中水文、水流及水位库容关系的不确定性,研究了水库防洪全面风险率模型应用问题。傅湘等^[77]用系统分析方法建立了大型水库汛限水位风险分析模型。田峰巍等^[78]提出了依据典型联合概率分布函数的风险决策方法。

1.4 风险分析在水利工程施工中的应用研究

这方面综述主要集中于国内的研究。周厚贵^[79]应用 VERT(风险评审技术)对土石围堰填筑和运行施工问题进行了风险分析。王卓甫^[80]运用概率树和决策树法选择导流方案。肖焕雄等^[81]提出用费用及工期两个目标联合确定导流建筑物的设计标准。吕岳鹏^[82]以每次过水淹没损失为常值作为前提,将淹没损失费用转化为初期导流阶段基坑淹没次数的研究。王卓甫^[83]较全面地分析了施工导流存在的各种不确定量,探讨了其分布及参数的确定方法。肖焕雄等^[84-85]把超标洪水间隔时段作为随机变量来研究超标洪水风险率,并对洪水间隔时间的概率分布作了初步研究,首次提出费用风险率,建立了两重随机有偿服务系统的风险率计算模型。唐晓阳等^[86]定义了风险率功能函数,提出并建立了施工导流系统设计风险率模型。周宜红等^[87]建立了施工截流系统风险率计算模型。孙志禹^[88]以三重随机过程理论推导了过水围堰导流工期风险率计算模

①冯平. 风险分析方法在干旱期水资源管理中的应用. 见:朱元生,黄振平主编. 水文计算进展问题和展望论文集. 南京: 河海大学水文水资源及环境学院, 1997. 136 ~ 143.

型.陈凤兰等^[89]引入洪峰削减系数,用JC法计算了施工导流风险.李本强等^[90]将施工洪水考虑为非齐次Poisson过程,建立了相应的瞬时风险分析模型.石明华等^[91]根据实测日径流系列建立了随机模拟模型,经统计得出各种风险率下的设计流量与超标洪水发生次数的关系.王卓甫等^[92]建立了施工导流风险计算的数学模型,探讨了确定施工导流最大泄水流量概率密度函数的方法.周宜红等^[93]分析了三峡大江截流施工过程中水文、水力等不确定性因素,计算了其动态风险率.王卓甫等^[94]提出了水利水电施工进度计划风险分析的计算方法和步骤.

1.5 风险分析在地下水中的应用研究

将可靠性和风险分析用于地下水问题在国际上是近年来出现的.地下水中溶质迁移的空间是一个复杂的随机场,溶质浓度的分布也是一个随机量,具有很大的不确定性.

Dettinger等^[95]对地下水的不确定性建立了一阶数学模型.Sitar等^[96]以一阶可靠性方法分析了一维地下恒定流和无吸附的污染物迁移问题.Wagner等^[97]应用一阶可靠性分析方法和耦合管理模型提出了满足给定水质约束的优化抽水对策.Hobbs等^[98]建立了一个含水层污染物的风险分析模型.Cawfield等^①将一阶可靠性分析方法推广到地下稳定流的二维有限元分析中,并研究了空间变异的影响.La Venue等^[99]用FOSM法分析了地下水运行时间的不确定性.Jang等^[100]采用一阶和二阶可靠度方法对污染物在饱和多孔介质中的迁移进行了可靠度分析.蔡树英等^[101]分别用AFOSM法和MC法对地下水污染的风险概率进行了预测计算,并对各种参数的灵敏度进行估计.陈小红等^[102]构造了水质超标风险分析的CSPPC模型.束龙仓等^[103]将评价区内各点的导水系数作为随机变量进行MC模拟,对某水源地地下水资源评价进行了可靠性分析.Weiler等^[104]以对数P-Ⅲ型分布产生月最大系列,以评估洪泛区地表水污染风险.

2 展 望

由上可见,风险分析已在水系统的防洪安全、水资源利用、水利工程施工、地下水及其污染等方面得到了应用.今后工作中,以下几方面应予以重视.

a.将熵理论引入到风险分析中.根据信息论,信息蕴含于不确定性中,信息的定量表征必然联系着不确定性的度量.熵是衡量系统不确定性程度的一个量度,同时又间接反映了时空量测信据特征.在水系统的许多问题上,熵理论都得到了应用^[105].因此,将熵理论与风险分析结合是有意义的.

b.开展“风险分析的风险”的研究.风险分析和传统的统计分析一样,都要依据所掌握的信息,预估将来出现各种情势和后果的可能性.由于受自然过程本身的随机性、信息资料完备程度和主观认识水平的限制,风险分析的成果是不确定的,风险分析也可能出现偏差.因此,建立“风险分析的风险”的概念非常重要.如何量化“风险分析的风险”是一项有意义又较为艰巨的工作.

c.比较和改进现有的风险分析方法.目前,水系统中风险分析方法已有多种.它们在考虑因素、需求输入信息、计算量以及适用对象上各有不同.在具体应用时,采用何种方法为好?如何改进这些方法?如何扩大其应用范围?都需详细研究.

d.拓展其他新理论新方法的研究.水系统是一个开放的巨系统,其复杂特性仅凭一种理论是不能研究透彻的.同时,各学科相互融合、相互交叉也是当代科技发展的重要特征之一.所以,应开展和加强随机理论、模糊数学、灰色系统理论等理论方法耦合的研究.

参考文献:

- [1] 朱元牲.水利风险分析的进展问题和展望——与Klemes商榷[A].见:中国水利学会主编.全国水文计算进展和展望学术讨论会论文选集[C].南京:河海大学出版社,1998.435~440.
- [2] Yen B C, Ang A H S. Risk analysis in design of hydraulic projects[A]. In: Chiu C L eds. Proc 1st Inter Sympo on Stocha Hydrat[C]. Pittsburgh: University of Pittsburg, 1971.694~709.
- [3] Yen B C. Risks in hydrologic design of engineering projects[J]. J Hydraul Div Proc ASCE, 1970, 96(HY4):959~966.

①Cawfield J D, Sitar N. Stochastic finite element analysis of groundwater flow using the first-order reliability method. IAHS Publ, 1988, 175:191~216.

- [4] Young G K, Childrey M, Trent R E. Optimal design of highway drainage culverts[J]. J Hydraul Div ASCE, 1974, 100(HY7): 971 ~ 993.
- [5] Mays L W. Optimal design of culverts under uncertainty[J]. J Hydraul Div Proc ASCE, 1979, 105(HY5): 443 ~ 460.
- [6] Tung Y K, Bao Y. On the optimal risk based design of highway drainage structure[J]. Stochast Hydrol Hydraul, 1990, 4(4): 295 ~ 308.
- [7] Szidarovszky F, Duckstein L, Bogardi I. Levee system reliability along a confluence reach[J]. J Mech Eng Div ASCE, 1975, 101(EM5): 609 ~ 622.
- [8] Wood E F. An analysis of flood levee reliability[J]. Water Resour Res, 1977, 13(3): 665 ~ 671.
- [9] Tung Y K, Mays L W. Risk models for flood levee design[J]. Water Resour Res, 1981, 17(4): 833 ~ 841.
- [10] Lee H L, Mays L W. Hydraulic uncertainties in flood levee capacity[J]. J Hydraul Engr, 1986, 112(10): 928 ~ 934.
- [11] 朱元生. 长江南京段设计洪水位的风险分析[J]. 水文, 1989, 29(5): 8 ~ 15.
- [12] Cesare M A. First order analysis of open channel flow[J]. J Hydraul Engr, 1991, 117(2): 242 ~ 247.
- [13] 冯平, 李润苗. 水库保护区内防洪堤的水文风险估算[J]. 河海大学学报, 1994, 22(6): 98 ~ 100.
- [14] 姜树海. 基于随机微分方程的河道行洪风险分析[J]. 水利水运科学研究, 1995, 2(2): 127 ~ 137.
- [15] 朱元生, 韩国宏, 王汝慈. 南水北调中线工程交叉建筑物水毁风险分析[J]. 水文, 1995, 35(3): 1 ~ 7.
- [16] 李纪人, 章四龙. 河道洪水预报的可靠性研究[J]. 水科学进展, 1995, 4(4): 325 ~ 330.
- [17] 赵永军, 冯平, 曲兴辉. 河道防洪堤坝水流风险的估算[J]. 河海大学学报, 1998, 26(3): 71 ~ 75.
- [18] 王卓甫, 章志强, 杨高升. 防洪堤结构风险计算模型探讨[J]. 水利学报, 1998(7): 64 ~ 67.
- [19] 李国芳, 黄振平, 章志强. 长江防洪堤南京段设计洪水位风险分析[J]. 河海大学学报, 1999, 27(2): 22 ~ 27.
- [20] 陈新民, 夏佳, 罗国煜. 黄河下游悬河决口灾害的风险分析与评价[J]. 水利学报, 2000(10): 66 ~ 70.
- [21] Yazicigil H, Houck M H, Toebes G H. Daily operation of a multipurpose reservoir systems[J]. Water Resour Res, 1983, 19(3): 727 ~ 738.
- [22] Karlsson P O, Haimen Y Y. Risk assessment of extreme events : application[J]. J Water Resour Plann Manage, 1989, 115(3): 299 ~ 320.
- [23] 徐祖信, 郭子中. 开敞式溢洪道泄洪风险计算[J]. 水利学报, 1989(4): 50 ~ 54.
- [24] 郑管平, 王木兰. 溢流坝泄流能力可靠度计算[J]. 河海大学学报, 1989, 17(5): 15 ~ 21.
- [25] 姜树海. 泄水建筑物免空化设计的可靠性分析[J]. 水利学报, 1990(5): 12 ~ 20.
- [26] 金明. 水力不确定性及其在防洪泄洪系统风险分析中的影响[J]. 河海大学学报, 1991, 19(1): 40 ~ 45.
- [27] 储祥元. 水力不确定模型研究[J]. 水利学报, 1992(5): 33 ~ 38.
- [28] 姜树海. 水库调洪演算的随机数学模型[J]. 水科学进展, 1993, 4(4): 294 ~ 300.
- [29] 朱元生, 王道席. 水库安全设计与垮坝风险[J]. 水利水电科技进展, 1995, 15(1): 17 ~ 24.
- [30] 杨百银, 王锐琛, 安占刚. 水库泄洪布置方案可靠度及风险分析研究[J]. 水力发电, 1996(8): 54 ~ 59.
- [31] 杨百银, 王锐琛, 安占刚. 单一水库泄洪风险分析模式和计算方法[J]. 水文, 1999, 39(4): 5 ~ 12.
- [32] 王长新, 王惠民, 徐祖信. 泄洪风险计算方法的比较[J]. 水力发电, 1996(12): 13 ~ 16.
- [33] 姜树海. 大坝防洪安全的评估和校核[J]. 水利学报, 1998(1): 18 ~ 24.
- [34] 熊明. 三峡水库防洪安全风险研究[J]. 水利水电技术, 1999, 30(2): 39 ~ 42.
- [35] 王本德, 梁国华, 程春田. 防洪实时风险调度模型及应用[J]. 水文, 2000, 40(6): 4 ~ 8.
- [36] James L D, Hall B. Risk information for floodplain management[J]. J Water Resour Plan Mgmt Div ASCE, 1986, 112(4): 485 ~ 499.
- [37] 朱元生. 洪泛区洪灾风险的分析和治理[J]. 水利经济, 1990(2): 55 ~ 62.
- [38] 朱元生, 沈福新, 黄振平. 长江防洪决策支持系统——防洪决策风险分析[J]. 水科学进展, 1996, 7(4): 295 ~ 304.
- [39] 傅湘, 王丽萍, 纪昌明. 洪水遭遇组合下防洪区洪灾风险率估算[J]. 水电能源科学, 1999, 17(4): 23 ~ 26.
- [40] Todorovic P, Zelenhasic E. A stochastic model for flood analysis[J]. Water Resour Res, 1970, 6(6): 1641 ~ 1648.
- [41] Todorovic P, Rousselle J. Some problems of flood analysis[J]. Water Resour Res, 1971, 7(5): 1144 ~ 1150.
- [42] Wood E F. Bayesian approach to analyzing uncertainty among flood frequency model[J]. Water Resour Res, 1975, 11(6): 839 ~ 843.
- [43] Ashkar F, Rousselle J. Design discharge as a random variable : a risk study[J]. Water Resour Res, 1981, 17(3): 577 ~ 591.
- [44] Archer D R. Seasonality of flooding and the assessment of flood risk[J]. Proc Inst Civ Eng, 1981, 70 : 1023 ~ 1035.
- [45] Kuczera G. On the relationship between the reliability of parameter estimated and hydrologic time series data used in calibration[J]. Water Resour Res, 1982, 18(1): 146 ~ 154.
- [46] Stedinger J R, Taylor M R. Synthetic streamflow generation, 2. Effect of parameter uncertainty[J]. Water Resour Res, 1982, 18(4): 919 ~ 924.

- [47] Stedinger J R. Design events with specified flood risk[J]. Water Resour Res , 1983 , 19(2) : 511 ~ 522.
- [48] 李景玉, 徐宗学. 洪水风险率 Poisson 模型应用分析[J]. 数理统计与应用概率, 1988 , 3(4) : 392 ~ 401.
- [49] 邓永录, 徐宗学. 洪水风险率分析的更新过程模型及其应用[J]. 水电能源科学, 1989 , 7(3) : 226 ~ 232.
- [50] Xu Z X , Li J Y , Ito K. Clustering stochastic point process model for flood risk analysis[J]. Stocha Hydrol and Hydraul , 1998 , 12(1) : 53 ~ 64.
- [51] 王燕生. 防洪调度风险分析[J]. 水力发电, 1996(10) : 19 ~ 21.
- [52] 邢大伟, 栗晓玲, 张玉, 等. 渭河下游“二华夹槽”洪灾风险模拟[J]. 西北水资源与水工程, 1997 , 8(1) : 1 ~ 6.
- [53] 华家鹏, 李国芳, 朱元胜. 洪水保险研究[J]. 水科学进展, 1997 , 8(3) : 233 ~ 239.
- [54] Clarke R T. Uncertainty in estimation of mean annual flood due to rating-curve indefiniton[J]. J Hydrol , 1999 , 222 : 185 ~ 190.
- [55] 陈元芳. 随机模拟中模型与参数不确定性影响的分析[J]. 河海大学学报, 2000 , 28(1) : 32 ~ 35.
- [56] Nazar A M , Hall W A , Albertson M L. Risk avoidance objective in water resources[J]. J Water Resour Plan Mgmt Div , ASCE , 1981 , 107(WR1) : 201 ~ 209.
- [57] Fiering M B. A screening model to quantify resilience[J]. Water Resour Res , 1982 , 18(1) : 27 ~ 32.
- [58] Fiering M B. Alternative indices of resilience[J]. Water Resour Res , 1982 , 18(1) : 33 ~ 39.
- [59] Goicoechea A , Krouse M R , Antle L G. An approach to risk and uncertainty in benefit-cost analysis of water resources projects[J]. Water Resour Res , 1982 , 18(4) : 791 ~ 799.
- [60] Hashimoto T , Stedinger J R , Loucks D P. Reliability , resiliency , and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation[J]. Water Resour Res , 1982 , 18(1) : 14 ~ 20.
- [61] Goulter I. Current and future case of systems analysis in water distribution network design[J]. Civ Eng Syst , 1987 , 4(4) : 175 ~ 184.
- [62] Vogel R M. Reliability indices for water supply systems[J]. J Water Resour Plan Manage , 1987 , 113(4) : 563 ~ 579.
- [63] Lansey K E , Duan N , Mays L W , et al. Water distribution system design under uncertainties[J]. J Water Resour Plann Manage , 1989 , 115(5) : 630 ~ 657.
- [64] Goulter I , Bouchart F. Reliability-constrained pipe network model[J]. J Hydraul Eng , 1990 , 116(2) : 211 ~ 229.
- [65] Awumah K , Goulter I , Bhatt S K. Assessment of reliability in water distribution networks using entropy-based measures[J]. Stocha Hydrol Hydraulic , 1990 , 4(4) : 309 ~ 320.
- [66] Cullinane M J , Lansey K E , Mays L W. Optimization availability-based design of water-distribution network[J]. J Hydr Engrg , 1992 , 118(2) : 420 ~ 441.
- [67] Bargiela A , Hainsworth G D. Pressure and flow uncertainty in water system[J]. J Water Resour Plan Manage , 1989 , 115(2) : 212 ~ 229.
- [68] Fujiwara O , Ganesharajah T. Reliability assessment of water supply systems with storage and distribution networks[J]. Water Resour Res , 1993 , 29(8) : 2917 ~ 2924.
- [69] 阮本清, 梁瑞驹, 陈韶君. 一种供用水系统的风险分析与评价方法[J]. 水利学报, 2000(9) : 1 ~ 7.
- [70] 王道席. 黄河下游水资源调度管理研究[D]. 南京: 河海大学, 2000.
- [71] Baecher G B , Pate M E , Neufville R D. Risk of dam failure in benefit-cost analysis[J]. Water Resour Res , 1980 , 16(4) : 449 ~ 456.
- [72] Moy W S , Cohon J L , Revelle C S. A programming model for analysis of the reliability , resilience , and vulnerability of a water supply reservoir[J]. Water Resour Res , 1986 , 22(4) : 489 ~ 498.
- [73] 洪家宁. 水库泥沙淤积量风险分析[J]. 水文, 1994 , 14(4) : 14 ~ 18.
- [74] 梁川. 极差分析在水库防洪调度风险评估中的应用[J]. 四川水力发电, 1994(4) : 25 ~ 28.
- [75] 冯平, 陈根福, 纪恩福, 等. 岗南水库超汛限水位蓄水的风险分析[J]. 天津大学学报, 1995 , 28(4) : 572 ~ 576.
- [76] 谢崇宝, 袁宏源, 郭元裕. 水库防洪全面风险率模型研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997 , 30(2) : 71 ~ 74.
- [77] 傅湘, 纪昌明. 水库汛期调度的最大洪灾风险率研究[J]. 水电能源科学, 1998 , 16(2) : 12 ~ 15.
- [78] 田峰巍, 黄强, 解建仓. 水库实施调度及风险决策[J]. 水利学报, 1998(3) : 57 ~ 62.
- [79] 周厚贵. 应用风险评审技术(VERT)进行水利工程施工风险分析的探讨[J]. 水利经济, 1988(4) : 44 ~ 46 , 32.
- [80] 王卓甫. 用风险决策方法选择施工导流方案[J]. 水利学报, 1989(11) : 28 ~ 33.
- [81] 肖焕雄, 史精生. 施工导流标准的多目标风险决策[J]. 水利学报, 1990(11) : 66 ~ 71.
- [82] 吕岳鹏. 施工导流方案决策研究[D]. 武汉: 武汉水利电力学院, 1991.
- [83] 王卓甫. 施工导流风险分析[J]. 水利学报, 1992(5) : 65 ~ 71.
- [84] 肖焕雄, 韩采燕. 施工导流系统超标洪水风险率模型研究[J]. 水利学报, 1993(11) : 76 ~ 83.
- [85] 肖焕雄, 孙志禹. 过水围堰初期导流费用风险率计算模型[J]. 武汉水利电力大学学报, 1994 , 27(6) : 622 ~ 627.

[86]唐晓阳,肖焕雄. 施工导流系统设计风险率模型研究[J]. 武汉水利电力大学学报 ,1996 ,29(1):25 ~ 31.

[87]周宜红,胡志根. 施工截流系统风险率研究[J]. 水电能源科学 ,1996 ,14(3):171 ~ 175.

[88]孙志禹. 过水围堰初期导流工期风险计算模型[J]. 水电能源科学 ,1996 ,14(3):176 ~ 181.

[89]陈凤兰,王长新. 施工导流风险分析与计算[J]. 水科学进展 ,1996 ,7(4):361 ~ 366.

[90]李本强,胡颖,侍克斌. 过水围堰导流系统瞬时风险分析[J]. 水电能源科学 ,1997 ,15(2):42 ~ 46.

[91]石明华,钟登华. 施工导流超标洪水风险率估计的水文模拟方法[J]. 水利学报 ,1998(3):30 ~ 33.

[92]王卓甫. 考虑洪水过程不确定的施工导流风险计算[J]. 水利学报 ,1998(4):33 ~ 37.

[93]周宜红,肖焕雄. 三峡工程大江截流风险决策研究[J]. 武汉水利电力大学学报 ,1999 ,32(1):4 ~ 6.

[94]王卓甫,陈登星. 水利水电施工进度计划的风险分析[J]. 河海大学学报 ,1999 ,27(4):73 ~ 87.

[95]Dettinger M D , Wilson J L. First order analysis of uncertainty in numerical models of groundwater flow , 1. Mathematical development [J]. Water Resour Res ,1981 ,17(1):149 ~ 161.

[96]Sitar N , Cawfield J D , Kiureghian A D. First-order reliability approach to stochastic analysis of subsurface flow and contaminant transport[J]. Water Resour Res ,1987 ,23(5):794 ~ 804.

[97]Wagner B J , Gorelick S M. optimal groundwater management under parameter uncertainty[J]. Water Resour Res ,1987 ,23(7):1162 ~ 1174.

[98]Hobbs B F , Von Patterson C , Maciejowski M E , et al. Risk analysis of aquifer contamination by brine[J]. J Water Resour Plan Mgmt Div ASCE ,1988 ,114(6):667 ~ 685.

[99]LaVenue M , Andrews R W , RamaRao B S. Groundwater travel time uncertainty analysis using sensitivity derivatives[J]. Water Resour Res ,1989 ,25(7):1551 ~ 1566.

[100]Jang Y S , Sitar N , Kiureghian A D. Reliability analysis of contaminant transport in saturated porous media[J]. Water Resour Res ,1994 ,30(8):2435 ~ 2448.

[101]蔡树英,杨金忠. 地下水污染风险分析的初步研究[J]. 武汉水利电力大学学报 ,1997 ,30(1):6 ~ 10.

[102]陈小红,涂新军. 水质超标风险率的 CSPPC 模型[J]. 水利学报 ,1999(12):1 ~ 5.

[103]束龙仓,朱元胜,孙庆义,等. 地下水资源评价结果的可靠性探讨[J]. 水科学进展 ,2000 ,11(1):21 ~ 24.

[104]Weiler K , Walter M T , Walter M F , et al. Seasonal risk analysis for floodplains in the Delaware River Basin[J]. J Water Resour Plan Mgmt Div ASCE ,2000 ,126(5):320 ~ 329.

[105]王栋,朱元胜. 信息熵在水系统中的应用研究综述[J]. 水文 2001 ,21(2):9 ~ 14.

Review and Expectation of Application of Risk Analysis
to Water Resource Systems

WANG Dong , ZHU Yuan-sheng

(College of Water Resources and Environment , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Advances in research on application of risk analysis to water systems are summarized from the aspects study methods and some practical issues , such as flood control , water resources utilization , water conservancy project construction , groundwater and its pollution , and so on. The directions for its future development are prospected , i. e. to introduce entropy theory into risk analysis , to perform the research of “ risk of risk analysis ” , to compare and develop the current methods for research of risk analysis , etc.

Key words : risk analysis ; water system ; research of application ; review