

# 水利工程风险分析研究现状综述

李爱花, 刘 恒, 耿雷华, 钟华平, 姜蓓蕾

(南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 将水利工程风险分析分为单一和综合两种情况进行归纳分析。总结了风险分析在水利工程中应用的各种分析方法, 并就各种方法在研究应用中的适用条件、相关关系和优缺点进行评述。指出单一风险在水利工程中的应用主要以数理统计方法为主, 分析水利工程的随机不确定性。综合风险能够考虑水利工程的随机、模糊和灰色等不确定性, 但存在着相关性、一致性、行为因素影响分析等技术难点。给出了正确选择评价方法、结合失事后果进行分析等一些建议。

**关键词:** 风险分析; 水利工程; 综述

中图分类号: P333. 9; G353. 11 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2009)03-0453-07

风险与事件的不确定性紧密相连。理论上, 风险分析主要包括 3 个要素: 事件的状态或过程、发生的可能性或概率以及发生的后果。水利工程风险分析应从系统工程的角度, 建立经济投入、系统安全与系统破坏可能带来的人员、经济和环境等损失之间的关系。在国外如荷兰等, 风险明确定义为工程失事发生概率与其所致后果的乘积, 即期望损失值, 将提高系统安全所需要的经济投入与减少的期望损失进行对比以决策<sup>[1-3]</sup>。在中国, 由于种种原因, 风险常表述为与可靠度相对应的风险率, 即荷载大于系统承载能力引发系统失效的概率。近年来, 大坝安全管理和研究人员开展了一系列大坝失事后果的分析研究<sup>[4]</sup>, 但鲜有与风险率结合考虑计算风险, 且失事后果评价多延用国外准则, 尚未形成系统。因此, 本文主要从风险率计算的角度来总结水利工程风险分析方法并加以评述。

自 1971 年 Yen 等首先论证了风险分析在水系统的可行性后<sup>[5]</sup>, 风险分析在水库、大坝、堤防等水利工程系统及范围更广的水文水资源与水环境系统中逐渐推广应用。时至今日, 水利工程风险分析已发展到定性定量相结合的阶段。在资料调查的基础上通过外推或主观估计得到基本数据<sup>[6]</sup>, 然后采用数理统计法、层次分析法等进行风险分析和处理。统观水利工程风险分析发展趋势, 笔者认为可将这些方法初步归纳为单一风险分析和综合风险分析两种。

## 1 单一风险分析

单一风险分析主要考虑水利工程系统的随机不确定性, 以数理统计法为主, 应用最广, 研究也最为成熟, 已经从直接积分法、蒙特卡罗法(MC)等发展到均值一次二阶矩法(MFOSM)、改进一次二阶矩法(AFOSM)、JC 法、二次二阶矩法等。

(1) 直接积分法 在已知水利工程风险因素概率密度函数和概率关系的情况下, 对建立的功能函数进行解析和数值积分计算求出工程风险。如吴兴征等<sup>[7]</sup>通过分析堤防的水位荷载和承载土体的概率密度函数, 采用分

收稿日期: 2008 04 06

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAB04A09)

作者简介: 李爱花(1983-), 女, 福建邵武人, 硕士研究生, 主要从事水资源风险分析方面研究工作。

E-mail: liaihua02@tsinghua.org.cn

段数值积分方法建立了堤防失稳模型以计算堤防结构风险; Vrijling 等<sup>[8]</sup>从水力学角度分析大坝失事机理, 采用直接积分法计算了大坝漫顶、溢流的失事概率。此法理论概念强, 当概率密度函数近似线性、随机变量影响因素个数又较少时, 方法简单有效。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, 有时即使找到, 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。

(2) MC 法 由于水利工程荷载等因素概率密度函数均较复杂, 采用直接积分法难以求得解析解。有鉴于此, 采用 MC 法统计试验计算风险率, 直接处理风险因素的不确定性。MC 法在水利工程中应用广泛, 如 Hreinnsson 等<sup>[9]</sup>采用 MC 法对不同类型的水电工程扩建规划进行风险分析并决策; 高波等<sup>[10]</sup>采用 MC 法生成系列的典型入库洪水过程, 进行水库调洪的风险率计算; 徐卫亚等<sup>[11]</sup>研究了堤防失稳条件概率的计算方法, 用 MC 法计算了超标洪水下堤防失事风险率等。MC 法关键在于将生成的伪均匀分布随机数转换为符合风险变量概率分布的随机数。方法原理简单, 精度高, 但进行模拟的前提要求各个风险变量之间相互独立, 因此难以解决风险变量之间的相互影响, 且计算结果依赖于样本容量和抽样次数, 计算量大。对变量的概率分布假设很敏感, 需要给出各个风险变量的概率分布曲线, 这在统计数据不足时是难以实现的。正是因为 MC 法的这些缺点, 人们发展了各种所需信息量少、计算量小且精度不错的 FOSM 法。

(3) FOSM 法 不需要变量的概率分布, 只需均值和方差, 利用泰勒级数展开将风险变量线性化后, 采用迭代法求解原点面到极限状态面的最短距离来转求风险率<sup>[13]</sup>。当已知变量近似正态分布时, 根据线性化点选择的不同, 分为 MFOSM 法和 AFOSM 法。MFOSM 法假设各影响因素相互独立, 将线性化点选为均值点, 因此可能计算误差颇大。AFOSM 针对这一缺点, 将线性化点选为风险发生的极值点(风险点)。JC 法将 FOSM 法进一步扩展到风险变量为任意分布的情况, 将风险变量的非正态分布转化为当量正态分布, 求得等效均值和方差用 FOSM 法求出风险。FOSM 法计算效率一般远高于 MC 法, 当风险变量非线性化程度不高时, 可满足精度要求, 因此广受欢迎, 尤其是 JC 法。如陈凤兰等<sup>[12]</sup>将 JC 法和 MC 法应用于泄洪风险中, 进行对比计算, 认为 JC 法有足够的精度; 胡志根等<sup>[13]</sup>建立了用 JC 法求解过水围堰设计风险率的计算模型并进行计算; Mailhot 等<sup>[14]</sup>用 FOSM 法推导了水质风险率计算式, 研究了 FOSM 法在水环境评价中的应用等。作为一种解析法, FOSM 法收敛性有待理论上的证明。

除上述外, 单一风险分析还有重现期法、回归法、随机有限元法、Bayes 法等。但就数理统计理论讲, 这些都是概率估计问题, 其正确与否, 主要取决于统计资料的真实齐全, 也取决于风险分析的理论水平。如 Bayes 法<sup>[15]</sup>, 虽然具有坚实的理论基础, 但必须计算先验概率和条件概率才能求得风险的后验概率, 计算难度、工作量都较大。

## 2 综合风险分析

从系统工程角度看, 水利工程除本身所具有的水文、水力等随机不确定性外, 因其牵涉到工程技术、经济、社会、环境等各个方面<sup>[16]</sup>, 还具有模糊不确定性、灰色不确定性等, 需要通过综合的风险分析方法来对众多竞争和矛盾的定性定量风险因素进行优先排序及总体评价, 实现对风险的权衡、优选和决策。

从数学的角度讲, 综合风险分析就是通过两次映射, 把无序空间上的点映射到有序空间上, 从而实现风险的比较优化。通过指标体系的量纲一化实现将一个由  $n$  个无序的、单位不统一的指标构成的  $n$  维空间  $A$  上的点映射到一个由无量纲单位的  $n$  个指标构成的  $n$  维空间  $B$  上的点, 而后通过各种综合分析方法, 将各项指标值转化为一个综合指标值, 实现在一个一维有序空间中的比较分析。

因此, 综合风险分析的步骤一般包括确定评价对象、选择评价指标并通过极差变换、线性比例变换等方法对指标数据进行量纲一化处理, 确定权重系数, 利用单一风险分析结果或专家评价结论建立评价模型等, 结合权重系数得出各个系统的综合评价值。

## 2.1 指标权重确定

各项指标权重原则上是可以通过指标间的数值关系分析、对评价结果的影响分析等来确定。但在实际使用时, 由于许多风险因素难以用定量方法来计算, 因此, 指标权重的确定通常采用 Delphi 法(专家调查法)和层次分析法(AHP法)。AHP法主要利用求判断矩阵特征向量的方法, 求出递阶层次结构中同一层次各元素对上一层次某元素的权重, 最后获得最底层对最高层(总目标)的相对重要性赋权。其本质就是故障树分析法。

## 2.2 综合分析方法

(1) AHP法 运用灵活、易于理解, 又具有一定的精度, 是水利工程综合风险分析中最常用的方法。在权重系数确定之后, 将在同一层次两两对比得到的各因素评价分数与之相乘, 其结果代表上一层的综合, 如此逐步综合直至得出系统的综合评价。

AHP法综合考虑对系统有影响的因素, 量化主观判断; 同时处理可定量和不易定量因素, 细化工程风险评价指标体系, 可对评判结果的逻辑性、合理性进行辨别和筛选。但另一方面, 对非定量事件做定量分析, 对主观判断做客观分析, 风险的衡量和确定主要依靠以往经验, 这有失客观性, 也使判断矩阵常常不一致, 因此多用作风险分析的比较、参考或作为模糊、灰色分析法改进的基础。Crum等<sup>[17]</sup>用AHP法分析了堤防失事模式, 结合AFOSM法计算堤防的可靠指标; 金菊良等<sup>[18]</sup>将城市防洪规划方案综合评价系统分解为由许多自然技术指标和社会经济指标组成的多目标决策系统, 探讨了把层次分析法(AHP)作为评价模型的具体建模过程。针对AHP中判断矩阵的一致性问题的, 直接从判断矩阵的定义出发, 提出用加速遗传算法检验判断矩阵一致性的新模型(AGA-AHP)等。

(2) 模糊综合评价法 除随机不确定性外, 水利工程风险还存在大量的模糊因素, 许多风险因子难以用确定性的数值进行描述, 只能给出发生概率大或小之类的评语。在应用时, 若不考虑这种模糊不确定性, 风险分析的可行性和可靠性可能会存在问题。模糊综合评价法将风险因子视为模糊变量, 应用模糊集理论建立风险因子的隶属函数, 将文字性描述转化为数学描述, 按照模糊关系运算规则计算系统的不确定性, 弥补了上述方法的不足。如殷峻暹等<sup>[19]</sup>提出了应用模糊综合评价法确定工程防洪标准的步骤, 与层次分析法进行比较与验证, 认为模糊综合评价法具有重要应用价值与现实意义。张伟等<sup>[20]</sup>针对防洪工程影响因素众多且多为定性因素的特点, 采用层次分析与模糊集相结合的方法, 建立城市防洪规划指标评价体系, 确定最优城市防洪工程规划布局。陈守煜等<sup>[21]</sup>立足全局的系统观, 提出防洪工程体系综合评判的模糊可变集合方法, 并就模糊数学在水利、水文、水资源及环境领域的应用开展了较为系统、深入的研究。

与层次分析法相比, 模糊综合评价法也能实现定性指标量化, 且考虑了参数等的不确定性, 对一些问题不是绝对的肯定或否定, 涉及到模糊因素, 模糊综合评价法能很好地解决。但它也存在缺陷: 首先, 隶属度函数不太容易确定。要求风险分析人员具有丰富的工程经验和相关知识, 并采取科学的统计分类方法获得。其次, 评价过程本身无法解决指标相关造成的评价信息重复问题。在进行评价前, 要对指标进行预处理, 删去相关程度较大的指标。再次, 模糊评价结果是风险大或小之类的语言描述, 带有明显的模糊性, 存在一定的误差和判断困难, 日后难以结合失事后果进行分析。

(3) 灰色综合评价法 水利工程除随机、模糊不确定性外, 还常会出现资料信息的不完全和不精确, 如资料误差、资料质量和数量的影响等。这种信息部分已知部分未知, 就是灰色不确定性。灰色综合评价法着重研究水利工程中随机方法、模糊数学等所不能解决的“小样本、贫信息不确定”问题, 提供了贫信息情况下复杂系统的风险分析途径。其特点是“少数据建模”<sup>[22]</sup>, 用数据生成的方法, 将杂乱无章的原始数据整理成规律性强的生成数列来寻求现实规律。目前, 灰色综合评价法已经有多种分析体系, 包括灰色关联评价法、灰色聚类法、灰色随机风险分析等。如陈新民等<sup>[23]</sup>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。胡国华等<sup>[24]</sup>针对水文水环境系统存在的随机不确定性和灰色不确定性, 提出了灰色-随机风险率概念, 并将其转换成一般的随机风险率, 用AFOSM进行计算。黄俊等<sup>[25]</sup>通过AHP确定指标权重, 应用灰色关联分析法, 对城市防洪方案进行综合评价。

灰色综合评价法计算简单, 通俗易懂, 数据不必进行归一化处理, 可用原始数据进行直接计算; 也不需要经典的分布规律, 只要有代表性的少量样本即可。但目前灰色综合评价法的发展还不是十分完善, 如现在常用的灰色关联度分析法所求出的关联度总为正值, 这不能全面反映指标间的关系, 使得评价可能出现错误结论。且方法不能解决指标相关造成的评价信息重复问题, 因而指标的选择对评判结果影响很大。评价值趋于均化、分辨率不高等。

(4) 最大熵原理 在水利工程风险分析中, 理论研究最为完善成熟的是单一风险分析。许多工程人员希望综合评价时能尽量利用风险变量自身的随机特性, 以期评价结果主观成分最少。但水利工程许多风险因子的随机特性都无先验样本, 而只获得一些数字特征, 而这些数字特征的概率分布有若干个甚至无穷多个, 要从中选择一个分布作为真分布以进行风险分析, 从数学角度看, 其优选标准就是最大熵准则<sup>[26]</sup>。虽然熵理论与方法尚不够完善, 仍处于技术方法阶段, 但到目前为止, 它对研究水利工程不确定性问题的有效性还是值得推广和肯定的。张继国等<sup>[27]</sup>对信息熵分析方法在水文水资源不确定性分析中的应用进行了综述。王栋等<sup>[28]</sup>应用最大熵原理与 MC 法相结合对水文和水环境进行不确定性评价。李继清等<sup>[29]</sup>应用最大熵原理与 AHP 法相结合, 分析了水利工程经济效益的风险。最大熵原理的优点是可以排除人为因素、风险因素等的干扰, 能反映评价对象的客观信息。但熵度量与传统的风险度量之间的转化, 以及工程师的直观接受习惯等都限制了其应用。

综合风险分析方法常用的还有故障树、事故树、计划评审技术、影响图法、主成分分析法、极值理论、多目标决策法等。

### 2.3 几个技术性问题

(1) 相关性分析 在综合风险分析中, 建立指标体系时, 常常会出现指标之间统计相关的现象, 目前各种分析方法或者不能解决这种相关性, 或者处理不够成熟。在日益复杂的系统分析中, 如何选择具有代表性的指标, 并在量化过程中尽量考虑并消除其相关性, 是风险分析的难点和热点。另外, 风险事件的相关性考虑不足, 如地震、洪灾等引起多个系统同时发生共因失效<sup>[30]</sup>, 其相关性在处理分析时, 应进一步分解出系统失效模式, 把造成共因失效的因素显式地表达出来, 但直接的困难在于模型过于庞大。因此, 如何利用共因失效分析技术对发生共因失效的系统建立概率模型和综合分析, 仍是水利工程风险分析的难点和重点。

(2) 一致性分析 综合风险分析的实质就是通过一定的数学方法将多个评价指标合成一个整体性的综合评价。但当采用不同的综合评价技术对水利工程进行分析时, 会出现评价结论非一致的问题, 难以得到与客观实际相符的确定一致性评价。造成评价结论的非一致性的主要原因有指标量纲一化方式不同, 权重系数选择不同, 以及各评价方法的评价机理不同等。实际上, 即使用同一个评价方法, 采用不同方法对指标量纲一化处理, 都存在评价结果的非一致性。因此, 如何建立一个兼容多个综合评价方案的数学模型或者将各种综合评价结果进行组合评价, 对评价结果进行敏感性和一致性分析, 寻找真实的综合评价排序, 仍是目前水利工程风险分析领域亟待解决的一大问题, 也是提高风险决策水平的关键所在。

(3) 行为因素影响分析 综合风险分析致力于评价结果的全面、合理, 希望评价时能够避开人为权重, 减小因主观性造成的误差, 使评价结论能反映评价对象的真实水平。但在实际操作时, 却不可避免的需要借鉴专家和以往的经验, 而决策者的风险偏好也势必会影响风险决策水平。指标权重不是综合评判过程伴随生成的, 而是采用 AHP 法和 Delphi 法确定, 这种主观估计, 可能会违反概率理论和客观实际。例如, 当询问专家某事件出现的概率时, 得到的答案可能是 0.6; 然而, 当询问该专家同一事件不发生的概率时, 得到的答案可能是 0.5; 这是导致评价结果的不一致性的原因之一。决策者某些倾向性的言语行为对专家选择权重的影响, 以及行为因素在风险分析中的概率分布, 值得进一步的研究。另一方面, 在水利工程建设运行时, 若某种风险因素发生的可能性明显大于其它因素, 或者其发生的后果极为恶劣, 则会引起评价者和决策者的普遍关注, 使得风险实际发生的可能性降低, 而使另一些因素的发生概率上升。这种风险评价决策中的行为因素互动影响分析, 也是值得关注的一面。

### 3 结论与建议

纵观水利工程风险分析的研究进展, 可以看出, 水利工程系统的风险分析理论和方法已经有了长足的进步和创新, 从定性走向定量, 从主观判断逐步实现客观分析, 更全面考虑水利工程各种不确定性, 并在应用中取得了许多宝贵的经验和成果。统观文中所评述的水利工程单一和综合风险分析方法, 除了针对各方法进行改进外, 还存在两点不足之处:

(1) 已有的风险分析研究成果, 多是将现有工程方案或者现状作为研究对象, 仅仅计算工程风险率, 对计算结果进行定性分析, 没有结合失事结果进行深入的分析 and 评价。

(2) 现有分析多从逻辑关系的角度, 侧重分析某一方面的风险, 如对工程本身, 或者对生态环境, 没有将各种风险真正综合到水利工程系统中。对于环境、生态以及工程运行中与时间相关的风险因素, 由于指标难于选定及量化, 通常是简单带过。

因此, 在水利工程风险分析中, 建议:

(1) 正确选择评价方法并进行综合应用。如上述, 各风险分析方法均有其优缺点, 因此应针对具体的评价目标选择合适的评价方法。同时, 由于水利工程不确定性形式表现多样, 要注意不同方法的综合应用, 以进一步揭示各类风险因子的相互影响和转化机理关系, 减小或消除其相关性, 使评价结果更为合理一致。

(2) 借鉴新的风险分析方法和理论。风险分析可引用的学科理论很多, 遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)和人工神经网络(ANN)等方法, 能够很好的处理离散和非线性的大规模风险分析问题, 已成功借鉴应用于水利工程风险分析研究中。从信息社会发展的角度看, 利用3S技术进行水利工程风险分析, 也必将成为人们关注的热点。

(3) 开展“风险分析的风险”的研究。由于受到自然发展过程内在随机性、信息资料完备性以及主观认识水平的限制, 风险分析的成果也是不确定的, 风险分析有可能出现大小不同的偏差。因此, 树立“风险分析的风险”的概念非常重要。但关键是如何量化“风险分析的风险”。

(4) 考虑失事后果并重视应用。随着社会的发展, 考虑失事后果的风险计算将对决策起着越来越重要的作用。除理论方面的问题外, 中国风险分析在应用方面问题更为突出, 只有将先进的理论和方法与具体应用相结合, 才能发挥其效益。

#### 参考文献:

- [1] JONKMAN S N. Loss of life estimation in flood risk assessment: Theory and application[D]. Delft: IHE, 2007.
- [2] NGUYEN G N. Probabilistic design and risk analysis for the Duong River Dike in the Red River Delta in Vietnam[D]. Delft: IHE, 2002.
- [3] VRISOU van ECK N, KOK M. Standard method for predicting damage and casualties as a result of floods[C] // Public works and water management, Delft: Ministry of Transport, the Netherlands, 2001: 22- 41.
- [4] 李雷, 王仁中, 盛金保. 溃坝后果严重程度评价模型研究[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(1): 1- 4 (LI Lei, WANG Ren zhong, SHENG Jin bao. Study on evaluation models of severity degree of dam failure impact[J]. J of Safety and Environment, 2006, 6(1): 1- 4. (in Chinese))
- [5] YEN B C, ANG A H S. Risk analysis in design of hydraulic projects[C] // CHIU C L. Proc 1st inter sump on stocha hydrau. Pittsburg: University of Pittsburg, 1971: 694- 709.
- [6] FORD, DAVID T. Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1996: 95- 111.
- [7] 吴兴征, 赵进勇. 堤防结构风险分析理论及其应用[J]. 水利学报, 2003(8): 79- 85. (WU Xing zheng, ZHAO Jin yong. Theory of structure risk analysis for levee and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(8): 79- 85. (in Chinese))
- [8] VRIJLING J K, VERHAGEN H J. Probabilistic design of hydraulic structures[M]. Delft: Delft University of Technology, the Netherlands, 2005.

- [ 9 ] HREINSSON, EGIL L B. Monte Carlo based risk analysis in hydroelectric power system expansion planning in the presence of uncertainty in project cost and capacity[ C ] // 38th International Universities Power Engineering Conference, Thessaloniki: UPECGR, 2003: 308– 311.
- [ 10 ] 高波, 王银堂, 胡四一. 水库汛限水位调整与运用[ J ]. 水科学进展, 2005, 16(3): 326– 333. (GAO Bo, WANG Yir-tang, HU Si-yi. Adjustment and application of the limited level of reservoirs during the flood season[ J ]. Advances of Water Science, 2005, 16(3): 326– 333. (in Chinese))
- [ 11 ] 徐卫亚, 邢万波, 王凯, 等. 超标洪水下堤防失事风险评价及工程应用[ J ]. 水利水运工程学报, 2006(3): 39– 44. (XU Wei-ya, XING Wan-bo, WANG Kai, et al. Integrated risk assessment of levees under over level flood condition and a case study[ J ]. Hydr Science and Engineering, 2006(3): 39– 44. (in Chinese))
- [ 12 ] 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. (CHEN Feng-lan, WANG Chang-xin. Analysis and calculation of diversion risk[ J ]. Advances of Water Science, 1996, 7(4): 361– 366. (in Chinese))
- [ 13 ] 胡志根, 胡建明, 李燕群. 过水土石围堰下游护坡的溢流设计风险率模型[ J ]. 水科学进展, 2003, 14(5): 622– 625. (HU Zhi-gen, HU Jian-ming, LI Yan-qun, et al. A design risk model for the downstream slope for overtopped rockfill cofferdam during flood[ J ]. Advances of Water Science, 2003, 14(5): 622– 625. (in Chinese))
- [ 14 ] MAILHOT A, VILLENEUVE J P. Mean value second order uncertainty analysis method: application to water quality modeling[ J ]. Advances in Water Resources, 2003, 26: 491– 499.
- [ 15 ] ERTO P, GIORGIO M. Assessing high reliability via Bayesian approach and accelerated tests[ J ]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 76: 301– 310.
- [ 16 ] 王才君, 郭生练, 刘攀, 等. 三峡水库动态汛限水位洪水调度风险指标及综合评价模型研究[ J ]. 水科学进展, 2004, 15(3): 376– 381. (WANG Cai-jun, GUO Sheng-lian, LIU Pan, et al. Risk criteria and comprehensive evaluation model for the operation of Three Gorges Reservoir under dynamic flood limit water level[ J ]. Advances in Water Science, 2004, 15(3): 376– 381. (in Chinese))
- [ 17 ] CRUM J R, DOUGLAS A. Reliability applied to levee seepage analysis[ C ] // Probabilistic mechanics and structural and geotechnical reliability: Proceedings of the specialty conference. New York: ASCE, 1996: 946– 949.
- [ 18 ] 金菊良, 刘永芳, 丁晶, 等. 城市防洪工程经济风险分析的蒙特卡洛法[ J ]. 长江科学院院报, 2003, 20(1): 40– 43. (JIN Ju-liang, LIU Yong-fang, DING Jing, et al. Monte Carlo method for economical risk analysis in urban flood control engineering[ J ]. J of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 20(1): 40– 43. (in Chinese))
- [ 19 ] 殷峻暹, 陈守煜, 梁国华. 应用模糊决策分析理论确定城市防洪标准研究[ J ]. 水电能源科学, 2001(3): 52– 54. (YIN Jun-xian, CHEN Shou-yu, LIANG Guo-hua. The fuzzy decision making analysis theory and application on ascertaining standard of city flood control[ J ]. Water Resources and Power, 2001(3): 52– 54. (in Chinese))
- [ 20 ] 张伟, 唐德善, 胡其勇, 等. 模糊优选理论在城市防洪规划中的应用[ J ]. 水利经济, 2003, 21(3): 3– 5. (ZHANG Wei, TANG De-shan, HU Qi-yong, et al. Application of fuzzy optimum selection to plan of flood control in cities[ J ]. Water Economics, 2003, 21(3): 3– 5. (in Chinese))
- [ 21 ] 陈守煜, 郭瑜. 模糊可变集合及其在防洪工程体系综合风险评价中的应用[ J ]. 水利水电科技进展, 2005, 25(6): 4– 8. (CHEN Shou-yu, GUO Yu. Variable fuzzy sets and their application to comprehensive risk evaluation for flood control engineering system[ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(6): 4– 8. (in Chinese))
- [ 22 ] 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. (CHEN Xin-min, XIA Jia, LUO Guo-yu. Risk analysis and assessment for burst of Hanging river at down reaches of Huanghe river[ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(10): 66– 70. (in Chinese))
- [ 23 ] 邓曦东, 王春燕. 工程项目风险的灰色模糊评判方法研究[ J ]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2007, 29(1): 49– 53. (DENG Xi-dong, WANG Chun-yan. The grey fuzzy theory appraises the risk of the project[ J ]. J of China Three Gorges Univ: Natural Sciences, 2007, 29(1): 49– 53. (in Chinese))
- [ 24 ] 胡国华, 夏军. 风险分析的灰色随机风险率方法研究[ J ]. 水利学报, 2001(4): 1– 5. (HU Guo-hua, XIA Jun. Grey stochastic risk method for risk analysis[ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(4): 1– 5. (in Chinese))
- [ 25 ] 黄俊, 傅湘, 柯志波. 层次分析法在城市防洪工程方案选择中的应用[ J ]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(1): 52– 55. (HUANG Jun, FU Xiang, KE Zhi-bo. Application of analytic hierarchy process (AHP) in choosing engineering scheme of urban flood control[ J ]. J of Water Resources and Architectural Engineering, 2007, 5(1): 52– 55. (in Chinese))

- [ 26] JOWITT P W. A maximum entropy view of probability distributed catchment models[J]. Hydrol Sci J, 1991, 36(2): 123– 134.
- [ 27] 张继国, 刘新仁. 降雨时空分布不均匀性的信息熵分析[J]. 水科学进展, 2000, 11(2): 133– 137. (ZHANG Ji Guo, LIU Xin ren. Information entropy analysis on nonuniformity of precipitation distribution in time[J]. Advances of Water Science, 2000, 11(2): 133– 137. (in Chinese))
- [ 28] 王栋, 朱元生. 最大熵原理在水文水资源科学中的应用[J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 424– 430. (WANG Dong, ZHU Yuan sheng. Principle of maximum entropy and its application in hydrology and water resources[J]. Advances of Water Science, 2001, 12(3): 424– 430. (in Chinese))
- [ 29] 李继清, 张玉山. 应用最大熵原理分析水利工程经济效益的风险[J]. 水科学进展, 2003, 14(5): 626– 630. (LI Ji qing, ZHANG Yu shan. Application of the maximum entropy principle to risk analysis of economic benefits for water projects[J]. Advances of Water Science, 2003, 14(5): 626– 630. (in Chinese))
- [ 30] MOSEH A. Common cause failures: An analysis methodology and examples[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1991, 34: 249– 292.
- [ 31] 程卫帅, 陈进. 防洪体系系统风险评估模型研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 114– 120. (CHENG Wei shuai, CHEN Jin. Systematic risk evaluation model for flood control system[J]. Advances of Water Science, 2005, 16(1): 114– 120. (in Chinese))

## Review of risk analysis of hydraulic engineering system\*

LI Aihua, LIU Heng, GENG Leihua, ZHONG Huaping, JIANG Beilei

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstracts:** The risk analysis in hydraulic engineering system is classified into the single risk assessment and the comprehensive risk assessment in this paper. Various risk analysis methods, developed and applied in hydraulic engineering system, are summarized including the applicable conditions, advantages and disadvantages of each method and their interrelationship. The main methods for the single risk assessment are the mathematical statistics methods, concerning the stochastic uncertainties of the hydraulic system. The comprehensive ones, on the one hand, can take into account the stochastic, fuzzy and grey uncertainties; on the other hand, there still exist some problems, such as the correlation, consistence and impact analysis of behavior factors. Based on the review, some suggestions are put forward, such as choosing appropriate assessment method and integrating the probability with the consequences in risk analysis.

**Key words:** risk analysis; hydraulic engineering; review

\* The study is financially supported by the National Key Technology R&D of China during the 11th Five-year Plan Period(No. 2006BAB04A09).