

小型水库安全运行风险的不确定性分析

喻蔚然^{1,2}

(1. 江西省水利科学研究院, 南昌 330029; 2. 江西省大坝安全管理中心, 南昌 330029)

摘要: 我国小型水库数量众多, 但安全状况差, 且缺少有效的安全监测, 管理水平落后, 运行风险大。多年来水库安全鉴定主要以定性评价为主, 对病险水库运行风险及其对下游的危害程度缺乏定量的判断。小型水库的运行风险多样, 且不确定, 不同风险之间往往相互影响、相互依存。以风险的不确定性作为灰色系统, 将灰色理论和随机概率分析方法结合, 建立功能函数, 应用改进的一次二阶矩法把灰色-随机风险概率的计算转化为一般随机风险概率的计算, 较好地量化了水库运行风险的不确定性。工程实例表明, 计算结果对小型水库除险加固和安全运行具有良好的指导意义。

关键词: 水库运行风险; 不确定性; 灰色理论; 改进的一次二阶矩法

中图分类号: TV 697 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)01-0131-04

Uncertainty Analysis of the Risk in the Safe Operation of Small Reservoirs

YU Weiran^{1,2}

(1. Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China;

2. Jiangxi Provincial Dam Safety Management Center, Nanchang 330029, China)

Abstract: There are a number of small reservoirs in China, but they are in poor security situation with the lack of effective security monitoring and out of date management, therefore they have high risk in safe operation. Over the years, the security identification for reservoirs mainly focuses on qualitative evaluation, and the quantitative assessment of operation risk and impact on downstream properties of dangerous reservoirs are missing. The operation risk of small reservoirs varies and remains uncertain, and the uncertainty is often interactive and interdependent. In this paper, the uncertainty of operation risk was considered as a grey system, and the grey theory and stochastic probability method were combined to develop the power function. The modified first order second moment method can convert the calculation of grey stochastic probability into the calculation of general stochastic probability, which can better quantify the uncertainty of operation risk of reservoirs. The case studies of application of the above method demonstrate that the calculation can provide good guidance for the safe operation and reinforcement of small reservoirs.

Key words: operation risk of reservoir; uncertainty; grey theory; modified first order second moment method

小型水库在水利工程中占有重要的地位, 在防洪、灌溉、供水、发电、养殖等方面发挥了巨大的效益。据统计, 我国 98 002 座水库中, 小型水库为 93 308 座, 占水库总数的 95.2%^[1]。而江西省 10 819 座水库中, 小型水库为 10 526 座, 比例更高达 97.3%^[2]。但与此不相匹配的是, 绝大多数小型水库无专管机构, 无专管人员, 无维养经费, 工程老化, 普遍存在防洪标准低、工程质量差等安全隐患。虽然近些年国家开展了小型水库的除险加固, 部分水库硬件设施得以改善, 安全状况转好, 但仍有大量水库因配套资金不足, 无法保

质量完成加固措施, 尤其在水库管理水平、管理人员素质方面并没有提高。小型水库的运行风险具有多样性、随机性、不确定性, 因此迫切需要通过风险分析, 将其不确定性进行量化^[3], 为管理者提供决策依据。

1 风险分析

水库风险分析就是指运行管理人员对可能导致损失的风险因素进行系统分析和权衡, 评估其风险水平和风险状况, 主要工作内容包括风险识别、风险估计和风险评价三部分。

收稿日期: 2013-09-16 修回日期: 2013-11-07 网络出版时间: 2013-12-17
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01131.html>
基金项目: 江西省水利厅科技资助项目(KT201207)
作者简介: 喻蔚然(1975-), 男, 江西南昌人, 高级工程师, 从事大坝安全评估和管理研究。E-mail: yuweiran@sina.com.

1.1 风险识别

风险识别是指在风险事故发生之前,人们运用各种方法系统的、连续的认识所面临的各种风险以及分析风险事故发生的潜在原因。风险识别是风险分析的最基础环节,其具体步骤见图 1^[4]。

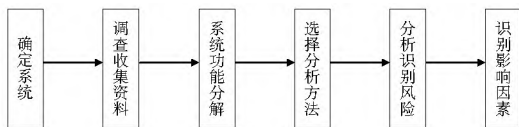


图 1 风险识别程序

Fig. 1 Procedure of risk identification

对于小型水库,其安全运行的风险因素很多,大致有以下几类。

(1) 防洪标准不足。其产生的原因主要是:当初兴建大坝时设计的防洪标准相比现在的标准偏低;小型水库溢洪道大多不规整,溢流宽度窄,泄流能力不足,以至于在遭遇较大的暴雨洪水时水位超过标准,甚至坝顶。这种风险很容易导致溃坝。

(2) 大坝质量差。大多数小型水库兴建于 20 世纪 50~70 年代,主要特点是技术人员少、施工队伍参差不齐、施工设备落后、质量控制不严,造成大坝的整体质量差。甚至很多水库刚刚完工,就显现出一些病险隐患。

(3) 渗漏。大坝渗漏是常见的安全隐患,包括三个方面:坝体渗漏、坝基渗漏、绕坝渗漏,以及大坝与坝下涵洞之间发生的接触渗漏。渗漏抬高了坝体浸润线,降低了坝体填筑材料的物理力学性能,有可能引起坝体和坝基的滑动,严重时可能造成大坝垮塌。

(4) 滑坡。一方面滑坡削弱了大坝结构,直接威胁大坝安全,另一方面,滑坡可能堵塞溢洪道或者激起巨大涌浪,对大坝形成冲击。

(5) 运行管理差。小型水库缺乏规范有效的管理,已经是一个不争的事实,由此带来的严重后果也多次印证了完善的管理的重要性,一个差的运行管理导致的风险往往是致命的。

(6) 地震等不可抗力的自然因素。虽然这是小概率事件,但一旦发生,将对建筑物整体结构造成破坏,对大坝的安全威胁很大。比如汶川地震时,几座水库受到不同程度的破坏。

1.2 风险估计

风险可定义为不希望事件的发生概率以及发生后果的严重性,因而风险估计主要内容是根据事件存在的风险因素估算出事件可能发生的概率和事件发生后的损失程度。具体地说,对水库而言,最大的事件就是溃坝,溃坝的风险因素有若干个,风险估计就是估算每一种风险因素造成溃坝的概率和溃坝后的各项损失。

根据掌握信息资料的不同,风险主要有确定型、随机型和不确定型三种^[5]。其中确定型风险是指出现的概率为 1,后果完全可以由精确的可靠的信息资料进行计算的风险;随机型风险是指随机出现但出现的状态和发生的概率均已知的风险;不确定型风险是指出现的各种状态及其概率均是未知的风险^[6]。显然,水库运行管理风险(或者说水库溃坝风

险)应属此种类型。不确定型风险的定量估算通常是计算风险变量的概率,主要有区间法、三角分布法、极大熵确定先验分布法、重现期法、蒙特卡罗模拟法、一次二阶矩法等^[5,8]。相比较而言,一次二阶矩法具有概率分布要求不高、应用不复杂、计算工作量不大等优点,特别适合小型水库的特点。

一次二阶矩法是一种近似分析法,R. Rackwitz 等提出了改进的一次二阶矩法。该法根据风险识别的因素的一、二阶矩推求功能函数的一、二阶矩,间接估算出风险事件的概率。具体计算方法不再赘述。运用该法计算出的概率,在风险变量呈正态分布的情况下,风险值才是精确的,但是水库运行状况受各种内因、外因影响较大,并非所有的风险变量均服从正态分布。因此,R. Rackwitz 进一步提出将非正态分布的变量转换成等价正态分布,转换得到的累积分布函数 CDF 的数值和概率密度函数 Pdf 的数值都与原非正态分布的相应值相同,即

$$F_{x_i}(x_i^*) = \Phi[(x_i^* - \bar{x}_i^{(N)})/\sigma_i^{(N)}] \quad (1)$$

$$f_{x_i}(x_i^*) = f^{(N)}[(x_i^* - \bar{x}_i^{(N)})/\sigma_i^{(N)}]/\sigma_i^{(N)} \quad (2)$$

式中: $F_{x_i}(x_i^*)$ 、 $f_{x_i}(x_i^*)$ 分别为变量 x_i^* 处 X_i 的累积分布函数 CDF 和概率密度函数 PDF; Φ 和 $f^{(N)}$ 分别为标准正态分布的累积分布函数 CDF 和概率密度函数 PDF; $\bar{x}_i^{(N)}$ 和 $\sigma_i^{(N)}$ 分别为等价正态分布的均值和标准差。

1.3 风险评价

风险评价是一个决策过程,是在风险识别及风险估计的基础上,决定已存在的风险是否可以容忍,风险控制措施是否合适,以及如何通过工程或非工程措施减少风险^[9]。水库大坝风险不仅包括工程本身的风险,而且包括生命风险、经济风险及社会与环境风险。盛金保^[10]等根据我国国情并借鉴国外尤其是澳大利亚的经验,初步提出了我国小型水库的风险标准(表 1)。

表 1 小型水库破坏事件发生的定性描述和概率

Table 1 Qualitative description and probability of the occurrence of destructive incident in small reservoirs

定性描述	相应概率	判断依据
事件极不可能发生	$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$	针对不同事件,根据历史资料和大坝安全鉴定结果,并结合水库大坝安全管理和长期运用情况给出。
事件基本不可能发生	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2}$	
事件可能发生	$1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1}$	
事件很可能发生	0.1 ~ 0.5	
事件极有可能发生	0.5 ~ 1.0	
事件极可能发生	0.5 ~ 1.0	

2 灰色-随机风险评价方法

水库运行的不确定性,既包含水库各建筑物本身的不确定性,也包含外部条件、系统内参数等的不确定性。Jon C Helton 将复杂系统的不确定性分为随机不确定性和主观不确定性,其中随机不确定性可用统计概率来描述,主观不确定性因信息缺乏,可通过灰色理论方法加以描述。

2.1 灰色-随机风险分析

通过风险识别可知水库运行的风险因素主要有 6 种类型。一般情况下,单一因素引起的水库失事相对少见,通常是多个因素共同作用,而且某些因素之间还有一定的相关性,但本文不考虑其相关性。

若将整个水库看作一个灰色系统, 每一个风险因素为一个变量, 用向量 $X_c = (X_{c1}, X_{c2}, \dots, X_{cn})$ 表示, 这些变量均服从用灰色概率分布函数或灰色概率密度函数表征的灰色概率分布, 水库失事的临界状态可表示为 $g(X_c) = 0$ 。因此, 水库失事的风险概率可表示为 $g(X_c) < 0$ 。

在几何学上, $g(X_c) = 0$ 表示一个 n 维的面, 这是一个临界面。由于向量 X_c 的灰色特性, 系统存在 2^n 个临界面。临界面到原点的最小距离用向量 $d = (d_1, d_2, \dots, d_n)$ 表示, 距离的大小反映了系统的风险大小, 距离越近, 风险越大, 反之, 风险越小。因此, 水库运行的风险性可用所有最小距离的最小值与最大值来度量^[11-12], 即 $[\min(d), \max(d)]$ 。水库失事的概率为:

$$R_c = \int_{g(X_c) < 0} f_{X_c}(X_c) dX_c \quad (3)$$

式中: $f_{X_c}(X_c)$ 为变量 X_c 的联合概率密度函数。

2.2 灰色-随机风险概率计算

式(3)的计算方法有很多, 考虑到小型水库大多结构较为简单、各项资料不全等情况, 推荐采用改进一次二阶矩法。通过将式(3)的灰色-随机风险概率转换成一般的随机风险概率, 然后按照改进一次二阶矩法的方法进行计算, 求得各个风险因素导致水库出险(溃坝)的灰色概率区间。根据风险因素变量 X_{ci} 变化对 R_c 大小的影响, 构造出各因素的一、二阶矩取值的两组组合, 在其中一组中求得最小风险概率值 R_* , 在另一组中求得最大风险概率值 R^* , 则水库失事的概率为:

$$R_c = [R_*, R^*] = [\min(P\{g(X_{ci}^*) < 0\}), \max(P\{g(X_{ci}^*) < 0\})] \quad (4)$$

3 实例分析

3.1 工程简介

共青水库位于锦江支流清溪港上游、高安市荷岭镇三桥村, 距高安市区 17 km。坝址以上控制流域面积 4 65 km², 总库容 624 万 m³, 灌溉面积 580 hm², 是一座以灌溉为主, 兼顾防洪、养殖等综合效益的小(1)型水库。水库 1959 年 12 月建成, 主要建筑物有大坝、溢洪道、输水涵管、引流渠及附属建筑物等。大坝为均质土坝, 坝顶高程 77.0 m, 最大坝高 21.5 m, 坝顶宽 5 m, 坝顶长 152.0 m。水库下游有荷岭镇、兰坊镇 2 个乡镇, 7 个行政村, 人口 1.8 万人, 农田 1 333.33 hm², 建有锦惠渠和锦河圩堤。水库一旦失事, 将给下游造成重大经济损失和不良的社会影响。

3.2 风险识别

根据安全鉴定成果, 判断共青水库主要存在以下几个风险因素。

(1) 防洪标准风险。大坝右侧与溢洪道接触部位有一防洪缺口; 溢洪道堰上工作桥底高程低于校核洪水位, 影响行洪。

(2) 渗漏风险。坝基、坝体均存在不同程度的渗漏问题, 内部渗透坡降均大于允许值, 排水棱体无反滤, 下游坝脚有多处渗漏点。

(3) 工程质量风险。上、下游护坡块石风化严重, 局部塌陷、缺损, 坝体填土压实度偏低, 溢洪道无衬护、无消能, 涵管管壁薄、强度低。

(4) 运行管理及其他风险。无大坝安全监测设施, 启闭设施陈旧老化, 存在白蚁危害, 无专管人员, 无维养经费。

3.3 风险分析

将上述风险因素分别标记为: X_1, X_2, X_3, X_4 。对于, 将泄流能力不足造成的超高水位作为负荷因子, 并服从 Gumbel 分布^[7] $F_H(X) = e^{-e^{-\frac{x-u}{\beta}}}$; 对于 X_2, X_3 , 当超过大坝极限承受能力后才能发生失事, 可考虑其概率服从泊松分布 $P(x) = \frac{\lambda^x \exp(-\lambda)}{x!}$; 对于 X_4 , 可作为一般随机事件, 其概率服从正态分布 $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp[-\frac{1}{2}(\frac{x-u}{\sigma})^2]$ 。

鉴于水库运行的条件(包括水文、地质条件等)、大坝结构性能(包括大坝填土、其他建筑物质量等)的灰色不确定性, 采用灰色-随机概率分析其风险, 应用改进的一次二阶矩法进行计算。根据改进的一次二阶矩法的要求, 需要将非正态分布的变量转换成等价正态分布, 求得等价正态分布的均值 $\bar{X}_i^{(N)}$ 和标准差 $\sigma_i^{(N)}$ 。通过转换, 风险因素是否超过大坝承受能力的问题即转化为风险变量的特征参数在一定范围内随机变动的问题, 即: 参数偏离了均值则有可能产生破坏, 偏离程度越大, 破坏的可能性越大。计算结果见表 2。

表 2 共青水库大坝风险因子特征参数值

参数	X_1	X_2	X_3	X_4
取值范围	0.35~1.29	0.13~1.16	0.663~1.287	0.01~0.99
均值	0.826	0.651	0.924	0.542
标准差	0.088	0.079	1.032	0.037

假设上述四个因子具有独立性(事实上具有一定的相关性, 但本文不做相关性分析), 建立功能函数 $g(X_c) = g(X_{c1}, X_{c2}, X_{c3}, X_{c4}, \dots)$, 其风险概率为 $P\{g(X_c) < 0\}$ 。由此采用一次二阶矩法求得各个因子可能导致水库失事的灰色概率区间, 按照式(4)构造一、二阶矩取值组合, 从组合中求得最小风险概率值 R_* 和最大风险概率值 R^* , 最终可计算出水库失事的风险概率为:

$$R_c = [R_*, R^*] = [\min(X_{c1}^*, X_{c2}^*, X_{c3}^*, X_{c4}^*), \max(X_{c1}^*, X_{c2}^*, X_{c3}^*, X_{c4}^*)] = [0.0128, 0.0241, 0.0503, 0.0237], \max(0.0436, 0.0719, 0.0102, 0.078) = [0.0128, 0.0719]$$

3.4 风险评价

将计算结果对照表 1 发现, 共青水库发生溃坝的风险水平是“可能发生”。共青水库风险从大到小依次是渗漏、工程质量、防洪标准、运行管理及其他, 最大的渗漏风险概率达到 0.0719, 最小的运行管理风险概率为 0.0237。风险程度均相对较高, 因此该水库应及时加以除险。

4 结语

多年以来, 小型水库为经济社会的发展做出了巨大的贡献, 但随着时间的推移, 水库的安全状况也不断下降。虽然投入了大量的加固资金用以除险, 但是小型水库数量众多, 分布广、散, 加固资金有限, 尤其是缺乏有效的管理, 因此小型水库仍然存在较大风险。水库运行的风险具有随机不确

定性,表现形式多样。小型水库无技术人员,大多无安全监测设施,无法定期进行安全监测和评价,而且由于信息缺乏,难以用一般的方法进行安全风险的定量评价。本文的研究结果表明,针对这种不确定性和灰色性,采用灰色-随机风险概率的概念,建立功能函数,将灰色-随机风险概率的计算转化为一般随机风险概率的计算,应用改进的一次二阶矩法进行分析计算,能够较好地量化水库运行风险的不确定性。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国水利部,中华人民共和国国家统计局.第一次全国水利普查公报[Z].2013.(Ministry of Water Resource of P. R. China, National Bureau of Statistics of P. R. China. Bulletin of First National Census for Water[Z].2013.(in Chinese))
- [2] 江西省水利厅,江西省统计局.江西省第一次水利普查公报[Z].2013.(Department of Water Resource of Jiangxi Province, Bureau of Statistics of Jiangxi Province. Bulletin of First Census for Water of Jiangxi Province[Z].2013.(in Chinese))
- [3] 张乾飞,王锦国,李雪红.大坝安全监控中的不确定性信息初探[J].河海大学学报(自然科学版),2002,30(5):113-117.(ZHANG Qian fei, WANG Jin guo, LI Xue hong. Preliminary Probe of the Dam Safety Monitoring Uncertainty Information [J]. Journal of Hehai University (Natural Sciences), 2002, 30(5): 113-117. (in Chinese))
- [4] 余建星.工程风险评估与控制[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.(YU Jian xing. Risk Assessment and Control Engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))
- [5] 吴中如,沈长松,阮焕祥.水工建筑物安全监控理论及其应用[M].南京:河海大学出版社,1990.(WU Zhong ru, SHEN Chang song, RUAN Huan xiang. Hydraulic Structures Safety Monitoring Theory and Applications[M]. Nanjing: Hohai University, 1990. (in Chinese))
- [6] 范道津,陈伟珂.风险管理理论与工具[M].天津:天津大学出版社,2010.(FAN Dao jin, CHEN Wei ke. Risk Management Theory and Tools[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2010. (in Chinese))
- [7] 王惠文.偏最小二乘回归方法及其应用[M].北京:国防工业出版社,1999.(WANG Hui wen, Partial Least Squares Regression and Application[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. (in Chinese))
- [8] 周建方,张迅炜,唐椿炎.基于贝叶斯网络的沙河集水库大坝风险分析[J].河海大学学报(自然科学版),2012,40(3):287-292.(ZHOU Jian fang, ZHANG Xun wei, TANG Chun yan. Dam Risk Analysis of Shaheji Reservoir Based on Bayesian Network[J]. Journal of Hehai University (Natural Sciences), 2012, 40(3): 287-292. (in Chinese))
- [9] 王仁钟,李雷,盛金保.病险水库风险判别标准体系研究[J].水利水电科技进展,2005(10):5-8.(WANG Ren zhong, LI Lei, SHENG Jin bao. Study on Risk Judgment Standard System for Dangerous Reservoirs[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005(10): 5-8. (in Chinese))
- [10] 盛金保,冯靖宇,彭雪辉.小型水库风险分析方法研究[J].水利水运工程学报,2008(01):28-35.(SHENG Jin bao, FENG Jing yu, PENG Xue hui. Research on Risk Analysis of Small Reservoir Dams [J]. Hydro Science and Engineering, 2008(01): 28-35. (in Chinese))
- [11] 杨杰.大坝安全监控中若干不确定性问题的分析方法与应用研究[D].南京:河海大学,2006.(YANG Jie. Analysis Method and Applications Research on Uncertainty Problems in Large Dam Monitoring and Control[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [12] L. Duckstein(USA), E J Plate(GRE). Engineering Reliability and Risk in Water Resource[M]. Martinus Nijhoff Publishers, 1987.

《南水北调与水利科技》编辑部郑重声明

《南水北调与水利科技》自创刊以来,从未委托任何中介机构、网站及个人征稿,请广大读者、作者提高警惕,不要通过他人投稿,更不要向他人或不明机构缴纳任何费用。

编辑部投稿邮箱:nsbdqk@263.net,电话:0311-85020535,85020639,85020507,85020512。

《南水北调与水利科技》编辑部