

DOI:10.12170/20181201002

王子成, 许后磊, 赵志勇, 等. 特高拱坝动态安全风险分析系统研发及应用 [J]. 水利水电工程学报, 2020(1): 112-118. (WANG Zicheng, XU Houlei, ZHAO Zhiyong, et al. Development and application of dynamic safety risk analysis system for super-high concrete arch dam[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(1): 112-118. (in Chinese))

特高拱坝动态安全风险分析系统研发及应用

王子成¹, 许后磊¹, 赵志勇¹, 张礼兵¹, 陈 豪^{2,3}, 陈亚军¹, 徐智勇¹

(1. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051; 2. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650214; 3. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对特高拱坝运维期内结构安全风险的动态性和复杂性, 以及失事后果严重性, 基于层次分析法、模糊理论和定量风险评估分析法, 利用 SQL Server 数据库和 Visual C#.NET 编程技术, 研发了一套特高拱坝动态安全风险分析系统。根据特高拱坝的荷载结构特性、安全监测仪器种类繁多和安全监测体系布置复杂的特点, 构建了适应不同监测类型和大量安全监测数据的数据库, 以及基于监测数据、巡视检查和物探检测的特高拱坝安全综合评价体系, 确定特高拱坝事故发生的可能性级别。借助当量法量化分析事故损失, 并以此确定损失的级别。最后结合特高拱坝事故发生的可能性级别和由此引起的损失级别, 通过风险矩阵评估特高拱坝动态安全风险等级。

关键词: 特高拱坝; 安全监测; 层次分析法; 模糊理论; 当量法; 风险分析

中图分类号: TV698; TP391

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2020)01-0112-07

目前我国水电建设已进入快速发展阶段, 大坝数量已超过 9.8 万座^[1], 这些工程发挥了巨大的经济效益, 但同时也给大坝下游带来一定的安全风险。随着信息技术的快速发展, 通过计算机软件分析管理大坝的动态安全风险正成为解决大坝安全问题的新途径。国内许多学者对大坝安全风险分析已做了一定的研究。孙玮玮等^[2]利用模糊数学理论对大坝风险后果进行综合评价; 李升^[3]总结了大坝溃坝概率分析、经济损失以及环境社会评价的方法, 并开发实现了基于 GIS 的溃坝损失评估分析可视化; 彭雪辉等^[4]提出了针对我国水库大坝的社会环境影响指数计算方法, 以及社会环境风险标准。但综合考虑监测数据、巡视检查和物探检测三方面内容并引入大坝安全综合评价体系, 结合溃坝损失, 通过系统实时对大坝动态安全风险进行分析的研究尚无先例。鉴于此, 本文以我国西南地区某特高拱坝为依托, 对特高拱坝动态安全风险问题进行了研究, 以期提高特高拱坝安全风险管控水平。

1 特高拱坝动态安全风险分析系统结构

为了快速准确地分析特高拱坝的动态安全风险, 掌控整个大坝安全风险状况, 特高拱坝动态安全风险分析系统结构划分为安全监测数据管理、巡视检查信息管理、物探检测信息管理、安全综合评价、动态安全风险分析等 5 大方面, 其中, 安全综合评价包括评价模型管理、模型权重管理和综合分析评判。

收稿日期: 2018-12-01

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0407105); 华能集团总部科技项目(HNKJ17-H21)

作者简介: 王子成(1990—), 男, 湖北监利人, 工程师, 硕士, 主要从事安全监测预警及系统开发方面工作。

E-mail: wzctjdx@126.com

2 特高拱坝动态安全风险分析实现途径

2.1 特高拱坝动态安全风险分析步骤

(1) 根据特高拱坝荷载特征和安全监测布置情况, 建立与特高拱坝相适应的动态安全综合评价体系, 该体系综合考虑安全监测数据、现场巡视检查和物探检测数据。

(2) 确定监测点的评价指标, 结合工程实际, 综合统计模型法、总量历时特征值、速率历时特征值、计算成果对比法、工程类比法、规范允许值等评判准则综合拟定的单测点监控指标, 并确定测点级的安全等级。

(3) 利用层次分析法^[5-7]和模糊理论^[8]确定评判模型各节点的权重矩阵以及隶属度矩阵来形成综合评判矩阵, 最后再按最大隶属度原则^[9-10], 可得到大坝建筑物是否稳定以及稳定程度的综合评价结果, 即特高拱坝事故发生的可能性级别。

(4) 确定特高拱坝溃坝对下游造成的人口和财产等损失值, 并利用当量法进行量化统一, 以此确定损失级别。

(5) 根据特高拱坝事故发生的可能性级别和损失级别, 利用风险矩阵, 最后确定特高拱坝动态安全风险等级。

具体结构如图 1 所示。

2.2 安全监测数据库设计

安全监测数据库是特高拱坝动态安全风险分析系统的基础, 特别是随着时间增长监测数据会不断增多, 数据库设计的合理与否直接关系到系统风险分析响应的速度。

特高拱坝安全监测的项目主要包括变形、渗流和应力应变等, 而每一种监测项目又包含多种监测仪器类型。由于特高拱坝涉及监测仪器类型多, 而且现在大多实现了自动化监测, 监测频次较高, 数据量会呈现爆发式增长。为了缩短安全监测数据的检索时间, 提高系统响应速度, 将每种监测数据进行单独分类存储。针对安全监测数据的特点, 将每一类监测仪器的相关数据分为仪器考证基础信息、未整编的监测数据和整编后的监测数据。这样每种监测仪器都可以建立 3 个数据库实体, 即考证基础信息实体、未整编的监测数据实体以及整编后的监测数据实体。

针对任意一种仪器, 将与测点相关的信息存入考证信息表, 将监测原始数据存入原始表, 将监测整编成果存入整编表。

2.3 安全综合评价体系

在特高拱坝动态安全风险分析系统中, 为确定特高拱坝事故发生的可能性级别, 建立了从监测点、仪器类型、监测项目、基本部位、建筑物的五级评价体系, 采用层次分析法对特高拱坝安全稳定性的各种影响因素和判据进行分析, 确定权值并进行一致性检验, 将权值分析结果应用于模糊评价中, 评价模型每个节点都能得出 1 个隶属度矩阵, 最后根据最大隶属度原则得出安全评价结果, 该隶属度评价结果代表的是一种可能性。大坝失事可能性级别即安全评价集, 依据《水库大坝安全评价导则》(SL 258—2017), 评价集分成 A, B, C 共 3 个等级, 即安全可靠、基本安全、不安全; 根据实际需要, 可将安全可靠、基本安全、不安全分别表述为正常、关注、检查。安全综合评价体系见图 2。

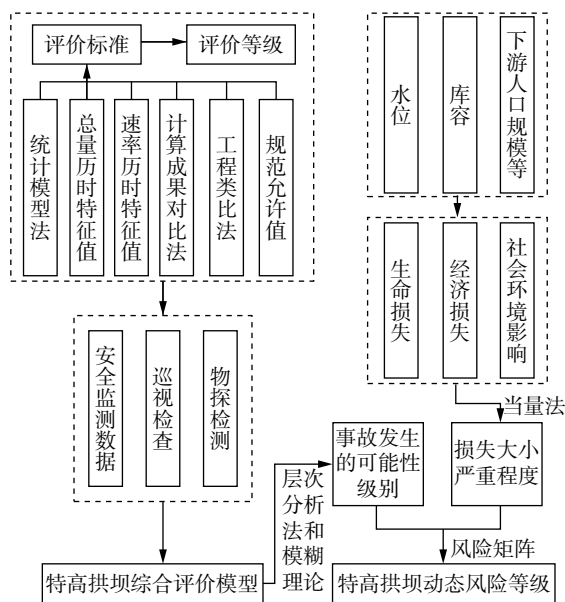


图 1 特高拱坝动态安全风险分析步骤

Fig. 1 Steps for dynamic safety risk analysis of superhigh arch dams

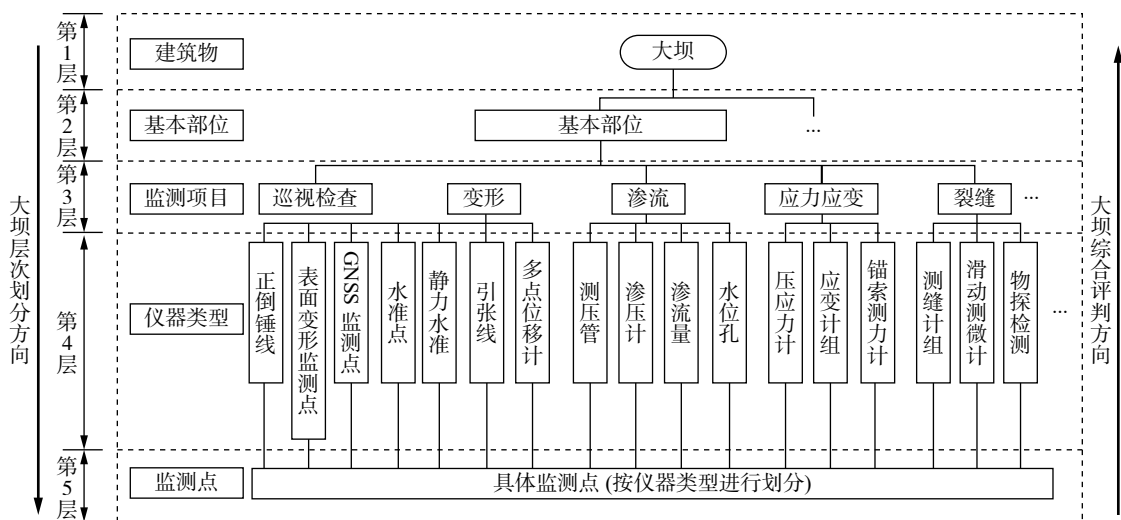


图 2 安全综合评价体系

Fig. 2 Comprehensive evaluation system of safety

(1) 监测点层分析, 根据敏感性分析建立评价模型中监测点的评价方法(统计模型法、总量历时特征值、速率历时特征值、计算成果对比法、工程类比法、规范允许值)的权重矩阵:

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & \cdots & w_n \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

式中: w_n 为第 n 种方法的权重值。

监测点测值根据以上 6 种评价方法和评价集建立对应的隶属度矩阵:

$$E = \begin{bmatrix} \mu_{1A} & \mu_{1B} & \mu_{1C} \\ \mu_{2A} & \mu_{2B} & \mu_{2C} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{nA} & \mu_{nB} & \mu_{nC} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

式中: $\mu_{nA}, \mu_{nB}, \mu_{nC}$ 分别为第 n 种评价方法对应评价集 A, B, C 的计算值。

监测点第 i 个测点综合评判矩阵 U_{li} :

$$U_{li} = E \cdot W = \begin{bmatrix} \mu_{1A} & \mu_{1B} & \mu_{1C} \\ \mu_{2A} & \mu_{2B} & \mu_{2C} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{nA} & \mu_{nB} & \mu_{nC} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & \cdots & w_n \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} u_{liA} & u_{liB} & u_{liC} \end{bmatrix} \quad (3)$$

(2) 其他层级分析除监测点层外, 包括仪器类型、监测项目、基本部位、大坝在内的其他层分析流程类似, 下面以基本部位层为例进行说明。

根据层次分析法建立评价模型中基本部位节点 i 的子节点间的权重矩阵。层次分析法主要涉及专家打分, 通过邀请不同的专家(工程设计人员、施工人员、管理人员等)利用倒数标度法对比层次结构模型各节点的重要性进行打分, 构造判断矩阵, 若通过一致性检验, 即可确定各节点权值。

$$W_{3i} = \begin{bmatrix} w_{3i1} & w_{3i2} & \cdots & w_{3in} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

式中: w_{3in} 为基本部位节点 i 第 n 个子节点的权重值。

基本部位节点 i 的子节点的综合评判矩阵构造对应的隶属度矩阵:

$$E_{3i} = \begin{bmatrix} U_{31} \\ U_{32} \\ \vdots \\ U_{3n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{31A} & u_{31B} & u_{31C} \\ u_{32A} & u_{32B} & u_{32C} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{3nA} & u_{3nB} & u_{3nC} \end{bmatrix}^T \tag{5}$$

式中: u_{3nA} , u_{3nB} , u_{3nC} 分别为基本部位节点 i 第 n 个子节点的综合评判矩阵对应评价集 A, B, C 的计算值。
基本部位节点 i 综合评判矩阵 U_{4i} :

$$U_{4i} = E_{3i} \cdot W_{3i} = \begin{bmatrix} u_{31A} & u_{31B} & u_{31C} \\ u_{32A} & u_{32B} & u_{32C} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{3nA} & u_{3nB} & u_{3nC} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} w_{3i1} & w_{3i2} & \cdots & w_{3in} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} u_{4iA} & u_{4iB} & u_{4iC} \end{bmatrix} \tag{6}$$

2.4 动态安全风险分析

由于大坝工程特别复杂, 运行工况各不相同, 尤其是特高拱坝更为突出。工程界对风险分析方法没有一个统一的界定, 不同专家学者对风险的理解也不尽相同, 但这些分析方法中都会包含事故发生的概率以及损失的严重程度这两个基本因素, 即

$$R = f(U, S) \tag{7}$$

式中: R 代表风险; U 代表事故发生的概率; S 代表事故造成损失的严重程度。

特高拱坝的动态安全风险分析是利用较为常用的风险矩阵^[11]进行分析, 根据事故发生的概率和造成的损失来确定特高拱坝的安全风险。事故发生的可能性等级可由安全综合评价中分析大坝的隶属度矩阵和最大隶属度原则确定。根据《水库大坝安全评价导则》(SL 258—2017), 大坝安全评价结果分为 3 个等级来反映溃坝的相对可能性, 即安全可靠、基本安全和不安全。溃坝损失按损失程度可分为轻度损失、中度损失和重大损失, 风险矩阵见表 1。

特高拱坝溃坝风险分析中的损失主要包括 3 个方面^[12], 即生命损失、经济损失和社会环境影响。由于三者单位不同, 无法直接计算, 为实现损失的结果量化统一, 可采用当量法^[13]确定溃坝损失级别。依据 2007 年 6 月 1 日起实施的《生产安全事故报告和调查处理条例》的相关规定, 1 人死亡相当于 300 万元左右的经济损失或 3 人左右的重伤, 为简化处理, 1 个当量损失可表示 1 人死亡或 3 人重伤或 300 万元经济损失。社会环境影响当量值可划分为 5(轻度的)、13(中度的)、18(重大的)。

$$S = N_1 + N_2 + N_3 \tag{8}$$

式中: N_1 代表生命损失当量; N_2 代表经济损失当量; N_3 代表社会环境影响当量; 当 $S \leq 13$, $13 < S \leq 20$, $S > 20$ 时, 分别代表轻度损失、中度损失、重大损失。

根据工程现场实际运维管理特点, 不同风险级别可采取不同的应对措施, 其中, 1 级风险不必采取应对措施, 因为风险等级最低, 若采取风险降低措施成本太高; 2 级风险可不必采取应对措施, 因为风险等级适度, 若采取风险降低措施成本较高; 3 级风险宜采取应对措施, 大坝管理人员宜加强工程安全管理, 采取工程或非工程措施降低风险等级; 4 级风险应该采取应对措施, 大坝管理人员应加密安全监测、现场巡视检查和物探观测, 在 1 年内采取工程或非工程措施降低风险等级; 5 级风险必须采取应对措施, 大坝管理人员必须加密安全监测、现场巡视检查和物探观测, 在半年内采取工程或非工程措施降低风险等级。

表 1 风险矩阵
Tab. 1 Risk matrix

安全等级	不同损失下的风险等级		
	轻度损失	中度损失	重大损失
不安全(检查)	3	4	5
基本安全(关注)	2	3	4
安全可靠(正常)	1	2	3

注: 表中 1~5 分别代表从小(风险最低)到大(风险最高)的不同风险等级。

3 系统研发及工程实例

根据上述评价方法及技术路线,利用 SQL Server 数据库和 Visual C#.NET 编程技术,研发了特高拱坝动态安全风险分析系统。

以我国西南地区某特高拱坝为例,进行动态安全风险分析。该特高拱坝位于云南省西部南涧县与凤庆县交界的澜沧江中游河段,为混凝土双曲拱坝,最大坝高 294.5 m,工程属大(1)型一等工程。该拱坝首次建成了超大型 300 m 级高拱坝安全监测自动化系统,安全监测点约 6 400 个,涉及表面变形监测点、正垂线、倒垂线、应变计等多种仪器类型,安全监测自动化系统的级别及复杂程度目前国内罕见。根据工程运行特点,同时考虑风险计算分析效率,以该拱坝的重点关注部位建立了安全综合评价体系进行动态安全风险分析,这些重点关注部位包括 4, 9, 15, 22 和 29 号坝段等。

3.1 测点级安全评价

该特高拱坝 29 号坝段布置有测点 C4-A29-PL-02 监测拱坝坝顶变形,以 2018 年 10 月 2 日的监测数据为例,根据统计模型法、总量历时特征值、速率历时特征值、计算成果对比法、工程类比法、规范允许值 6 种评价方法,对某一时时刻测值进行安全分析,隶属度矩阵为:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

根据专家打分确定以上 6 种方法间权重矩阵为: $W = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0.2 & 0.1 & 0.2 \end{bmatrix}^T$ 。

测点 C4-A29-PL-02 综合评判矩阵 U_1 : $U_1 = E \cdot W = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}$ 。

测点 C4-A29-PL-02 的评价集结果为: 0.7, 0.3 和 0, 分别隶属于正常、基本正常、异常,根据最大隶属度原则,则测点 C4-A29-PL-02 测值正常。

3.2 安全综合评价

根据该特高拱坝安全监测布置的特点,同时考虑各部位对整个大坝安全性的影响程度,系统选择了部分重点坝段和部位建立安全综合评价模型,通过选择监测数据、巡视检查和物探检测的日期。一般情况安全监测的频次要比巡视检查和物探检测高,当选取的日期当天无巡视检查和物探检测资料时,取所选日期最近的巡视检查和物探检测资料数据来参与分析。点击“分析评判”,即可快速分析出大坝的安全评价等级和隶属度矩阵。图 3 显示了该特高拱坝在 2018 年 10 月 2 日安全综合分析结果,其隶属度矩阵为 [0.983, 0.013, 0.005],根据最大隶属度原则,可得该特高拱坝当天的安全评价等级为正常。另外,为了便于用户查看特高拱坝的安全评价模型各节点评价等级,系统以思维导图的方式直观展示评价结果,如图 4 所示。

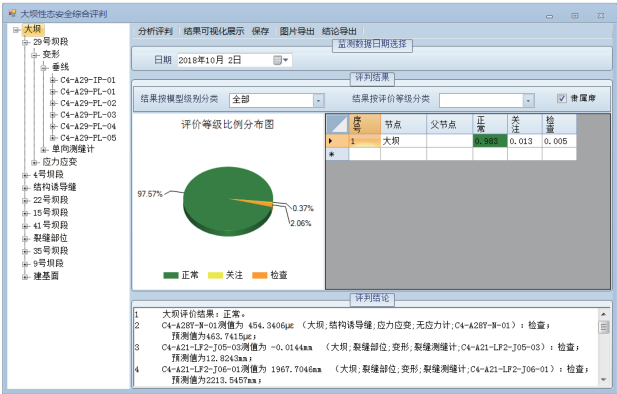


图 3 综合评价结果
Fig. 3 Comprehensive evaluation results

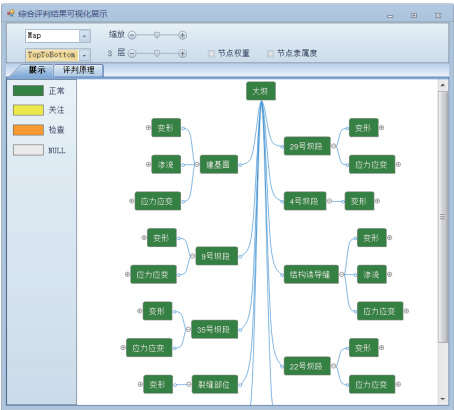


图 4 综合评价结果展示
Fig. 4 Show of comprehensive evaluation results

3.3 动态风险评估

选取特高拱坝在 2018 年 10 月 2 日的安全监测数据、现场巡视检查和物探检测数据, 并结合当量法计算的损失等级进行综合分析, 动态风险分析结果如图 5 所示。分析表明, 该坝当天风险等级是 1 级, 处于最低风险状态, 不必采取应对措施, 这与该拱坝实际运行情况相一致。

4 结 语

(1) 针对安全监测测点繁多的特点, 将每一类监测仪器的相关数据分为仪器考证基础信息、未整编的监测数据和整编后的监测数据 3 种, 构建了适应不同监测类型和大量安全监测数据的数据库。

(2) 提出了一套基于监测数据、巡视检查和物探检测的特高拱坝安全综合评价体系, 对特高拱坝事故发生可能性进行分析, 结合事故造成的损失, 研发了特高拱坝动态安全风险分析系统。

(3) 以我国西南地区某特高拱坝为例, 进行动态安全风险分析。系统对 2018 年 10 月 2 日的安全监测数据、现场巡视检查和物探检测数据进行风险分析, 分析结果显示当天风险等级是 1 级, 处于最低风险状态, 符合实际情况, 表明该系统为特高拱坝动态安全风险监控分析和科学管理提供了一个良好的辅助工具。

参 考 文 献:

- [1] 水利部, 国家统计局. 第一次全国水利普查公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. (Ministry of Water Resources, National Bureau of Statistics. Bulletin of first national census for water[M]. Beijing: China Water Power Press, 2013. (in Chinese))
- [2] 孙玮玮, 李雷. 基于模糊数学理论的大坝风险后果综合评价[J]. 水利水电工程学报, 2010(4): 16-20. (SUN Weiwei, LI Lei. Comprehensive hazard assessment model for consequences caused by dam failure based on fuzzy mathematics method[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(4): 16-20. (in Chinese))
- [3] 李升. 大坝安全风险管控关键技术研究及其系统开发[D]. 天津: 天津大学, 2012. (LI Sheng. Key technology research and system development of dam safety risk management[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese))
- [4] 彭雪辉, 盛金保, 李雷, 等. 我国水库大坝风险标准制定研究[J]. 水利水电工程学报, 2014(4): 7-13. (PENG Xuehui, SHENG Jinbao, LI Lei, et al. Research on dam risk criteria of China[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(4): 7-13. (in Chinese))
- [5] 赵博剑, 孔德琨, 谭忠盛. 基于层次分析理论的宜万铁路隧道病害评价体系[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊2): 243-248. (ZHAO Bojian, KONG Dekun, TAN Zhongsheng. Yichang-Wanzhou railway tunnel disease evaluation system based on analytic hierarchy process[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(Suppl2): 243-248. (in Chinese))
- [6] 范英, 李辰, 晋民杰, 等. 三角模糊数和层次分析法在风险评价中的应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(7): 70-74. (FAN Ying, LI Chen, JIN Minjie, et al. Research on application of triangular fuzzy number and AHP in risk evaluation[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(7): 70-74. (in Chinese))
- [7] 岳强, 刘福胜, 刘仲秋. 基于模糊层次分析法的平原水库健康综合评价[J]. 水利水电工程学报, 2016(2): 62-68. (YUE Qiang, LIU Fusheng, LIU Zhongqiu. Comprehensive assessment of plain reservoir health based on fuzzy and hierarchy analyses[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(2): 62-68. (in Chinese))
- [8] 段存国. 岸堤水库大坝安全模糊评价应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2011. (DUAN Cunguo. Study on application of fuzzy

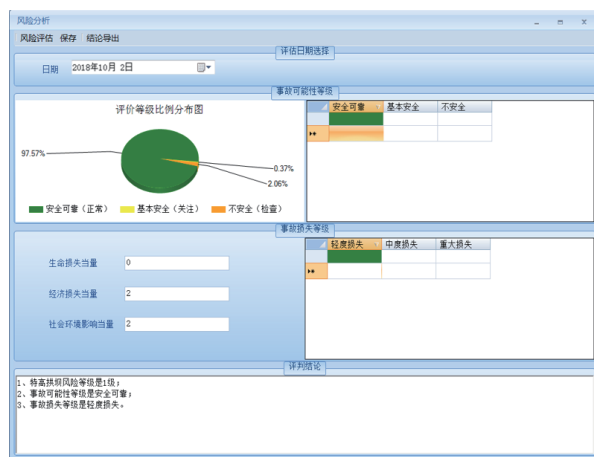


图 5 动态风险分析结果

Fig. 5 Dynamic risk analysis results

assessment to dam safety of reservoir[D]. Ji'nan: Shandong University, 2011. (in Chinese))

- [9] 刘阳, 向波, 张建经, 等. 公路边坡地震失稳规模模糊综合统计评估[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(4): 169-174. (LIU Yang, XIANG Bo, ZHANG Jianjing, et al. Fuzzy comprehensive statistical assessment of highway slope seismic instability scale[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(4): 169-174. (in Chinese))
- [10] 冯学慧. 基于熵权法与正态云模型的大坝安全综合评价[J]. 水电能源科学, 2015, 33(11): 57-60. (FANG Xuehui. Evaluation of dam safety based on cloud model and entropy weight method[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(11): 57-60. (in Chinese))
- [11] NI H H, CHEN A, CHEN N. Some extensions on risk matrix approach[J]. *Safety Science*, 2010, 48(10): 1269-1278.
- [12] 顾冲时, 苏怀智, 刘何稚. 大坝服役风险分析与管理研究述评[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 26-35. (GU Chongshi, SU Huaizhi, LIU Hezhi. Review on service risk analysis of dam engineering[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 26-35. (in Chinese))
- [13] 张超, 张社荣, 崔激, 等. 地下洞室群围岩稳定性动态风险分析及系统研发[J]. 水利水电工程学报, 2015(3): 73-80. (ZHANG Chao, ZHANG Sherong, CUI Wei, et al. Dynamic risk analysis and system development for stability of surrounding rock of underground carven group[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(3): 73-80. (in Chinese))

Development and application of dynamic safety risk analysis system for super-high concrete arch dam

WANG Zicheng¹, XU Houlei¹, ZHAO Zhiyong¹, ZHANG Libing¹, CHEN Hao^{2,3}, CHEN Yajun¹, XU Zhiyong¹

(1. PowerChina Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051, China; 2. Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd., Kunming 650214, China; 3. College of Water Resources and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In view of the dynamics and complexity of structural safety risk and the seriousness of accident consequences during the operation and maintenance of the super-high concrete arch dams, a dynamic safety risk analysis system for the super-high concrete arch dam is developed based on the analytic hierarchy process, fuzzy theory and quantitative risk assessment analysis method, by using the SQL Server database and Microsoft Visual C#. NET programming technology. According to the load structure characteristics of the super-high concrete arch dams and the characteristics of various kinds of the safety monitoring instruments and complex layout of the safety monitoring system, a database adapted to different monitoring types and massive safety monitoring data is established. Based on the comprehensive evaluation system of the monitoring data, inspection and geophysical detection for the safety of the super-high concrete arch dam, the probability level of the accident of the super-high concrete arch dam is determined. The economic losses and the impacts on the social environment caused by dam accidents are quantitatively analyzed by means of an equivalent method to determine the loss level. Finally, the risk matrix is used to evaluate the dynamic safety risk level of the super-high concrete arch dam according to the probability level of occurrence of the accident and the loss level caused by the dam accident.

Key words: super-high concrete arch dam; safety monitoring; analytic hierarchy process; fuzzy theory; equivalent method; risk analysis