

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.04.007

贵州省水库运行及安全监测监管系统关键技术

余再康¹, 程 井²

(1. 贵州省大坝安全监测中心, 贵州 贵阳 550002; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对贵州省水库雨水情及安全监测设施缺失严重、水文预报及库坝安全风险评工作效率较低的难题, 研发了全省水库运行及安全监测监管系统。该系统基于 B/S 架构, 应用了 WebGIS、GNSS 等技术, 集成了库坝雨水情测报与安全监测两大功能, 并利用现有数据及相关挖掘方法初步集成了库坝工程信息识别与风险评估功能。该系统包含整体功能模块及典型工程展示模块, 具备较强的大坝安全监测及雨水情测报能力, 可有效提升全省洪灾预警预报防御能力, 并为水库安全运行及智慧管理提供技术支撑。

关键词: 水库; 雨水情; 安全监测; 系统研发; WebGIS; GNSS; 数据挖掘

中图分类号: TV697 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)04-0046-09

Key technologies of supervision system for reservoir operation and safety monitoring in Guizhou Province

YU Zaikang¹, CHENG Jing²

(1. Guizhou Dam Safety Monitoring Center, Guiyang 550002, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Aiming at the serious lack of rainfall-flood regime and safety monitoring, and the difficulty of hydrological forecast and risk assessment of reservoir safety in Guizhou Province, a supervision system is developed for the reservoir operation and safety monitoring of the whole province. Based on a Browser/Server architecture, the system used the WebGIS, GNSS and other technologies, and possesses both the functions of rainfall-flood forecasting and dam safety monitoring; with the collected history information and real-time data, the mining technology is pursued for further information identification and risk management. By providing the display modules of the overall function and typical projects, the system shows a strong performance for the dam safety monitoring and rainfall-flood forecasting ability, can facilitate the capability of flood forecast and disaster defense in Guizhou province, and thus provides technical support for the safe operation and intelligent management of reservoirs.

Key words: reservoir; rainfall-flood regime; safety monitoring; system development; WebGIS; GNSS; data mining

2021 年水利普查显示,截至 2020 年底全国已建成各类水库 98 566 座,总库容达 9 306 亿 m³[1]。多数水库兴建时间较早,病险问题突出,多年来一直是影响我国防洪安全的心腹之患;而中小流域洪水频发,灾害严重,据统计,我国中小河流洪涝灾害导致的经济损失、人口损失分别占全国洪涝灾害总损失的 70%~80% 和 66.7% [2]。因此,水利部门十分重视中小流域水文预报、河道治理及病险水库除险加固工作[3-4]。一般大中型水库的水文监测系统、大坝安全监测与视频监控系统、机电设备运行系统比较完善,综合信息化建设的完整度和集成度较高。而小型水库存在数量多而散、位置偏远、运维费用严重不足、管理力量薄弱等问题,且受历史条件及现实条件限制,往往雨水情及安全监测设施缺失严重,无法开展有效的水文预报及库坝安全风险评工作。2021 年 4 月国务院办公厅及水利部陆续发文强调提升水库信息化管理能力,加快建设水库雨水情测报、大坝安全监测等设施,健全水库安全运行监测系统,加强分析预警能力。水利部李国英部长更是指

基金项目: 贵州省水利科技经费项目(KT202217,KT202218);国家重点研发计划项目(2022YFC3005501)

作者简介: 余再康(1967—),男,高级工程师,主要从事库坝安全监测及评价研究。E-mail:3451841416@qq.com

通信作者: 程井(1982—),男,副教授,博士,主要从事水工结构计算力学研究。E-mail:cj042@126.com

引用本文: 余再康,程井.贵州省水库运行及安全监测监管系统关键技术[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):46-54.

YU Zaikang, CHENG Jing. Key technologies of supervision system for reservoir operation and safety monitoring in Guizhou Province[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(4): 46-54.

出,要充分运用信息感知、数字映射、数字孪生与仿真模拟等技术,建立流域及库坝工程的数字化、智能化管理系统,推进流域防洪、水资源调度及其他涉水业务的智能化及精细化管理^[5]。

为贯彻国务院及水利部要求,贵州省水利厅于 2021 年启动全省水库雨水情及安全监测系统建设,在 2021 年年底前实施建设 181 座小型水库安全监测和 367 座小型水库的雨水情测报系统,2022 年年底前完成现有大中型水库的雨水情测报及安全监测自动化,2025 年年底前完成 1 453 座小型水库雨水情测报设施和 1 638 座小型水库安全监测设施建设,从而强化水库的运行管护,提升信息化管理能力。本文从贵州省水库运行及安全监测监管系统构架设计、关键技术及应用展示等几个方面介绍一期研究工作,并对后期工作进行展望。

1 贵州省库坝工程概况

贵州省水资源特别丰富,全省分属两大流域,苗岭以北的长江流域及苗岭以南的珠江流域(图 1)。近年来水利工作发展非常迅速,“十二五”时期开工建设了 64 座中型水库及 95 座小型水库;“十三五”期间新增建设中型水库 130 座,新增建设小型水库 230 座,其中中小型水库的规划数量占总规划数的 96.26%;“十四五”规划则明确开展水利“百库大会战”,新开工 90 座以上中小型水库。截至 2020 年,贵州省水库总数为 2 648 座,总库容超过 450 亿 m³,位居全国前列,其中小型水库 2 470 座,占全省水库总数的 93%。这些中小型水库大坝在贵州省经济建设和发展中、在防灾减灾中发挥了极其重要的作用。但大部分小型水库建设年代久远,存在雨水情测报和大坝安全监测设施缺失或年久失修等现象。坚持科技引领和数字赋能,提高库坝智慧管理水平,是全省水利工作的核心;而针对全省洪涝灾害特点,加强雨水情测报及库坝安全监测体系建设,实现对水量、水位、流量、水质等全要素的实时在线监测,集成开发共享工情、水情、雨情、视频等信息的贵州省水库运行及安全监测监管系统,全面提升信息感知能力,则是重中之重。

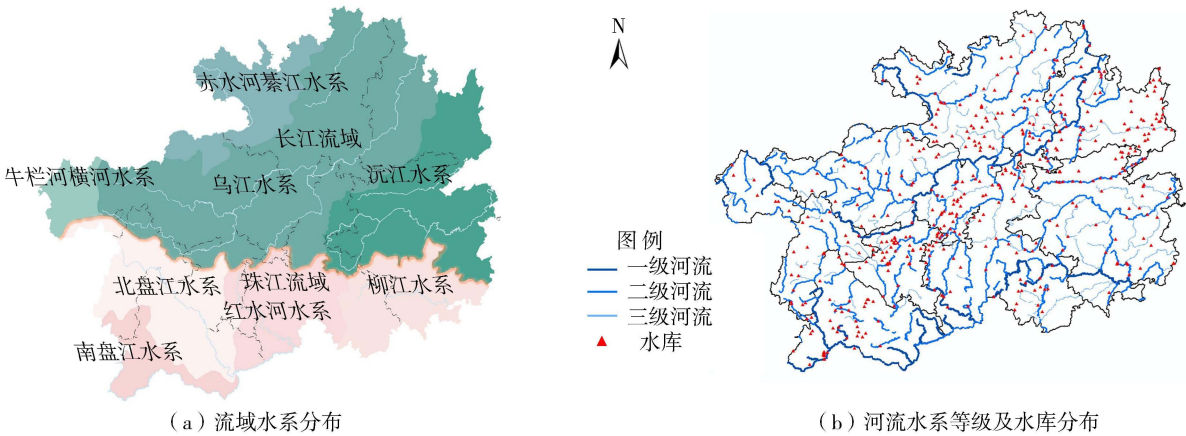


图 1 贵州省流域水系分布和河流水系等级及水库分布

Fig. 1 Watershed system distribution, river system grade and reservoir distribution of Guizhou Province

2 系统整体架构及关键技术

贵州省水库运行及安全监测监管系统共享工情、水情、雨情、视频等信息,可以对全省水库水情、雨情、视频及安全监测进行实时在线展示,实现实时数据与后台预设阈值的对比。通过该系统可实时掌控工程运行安全状况,提高水库风险隐患预警能力,全面提升贵州省水利工程大坝安全管理水平、提高规范化程度。

2.1 基于 B/S 模式的系统整体架构

基于 B/S 模式开发监测管理系统,将主要事务逻辑在服务器端实现,形成共享性较强的三层客户/服务器结构^[6];采用 WebGIS 技术实现 Web 方式交互,主要包括电子地图上的信息查询、结果展示等。

2.1.1 系统逻辑架构设计

该系统逻辑架构分为 5 层:资源层、感知层、数据层、能力层、应用层,如图 2 所示。①资源层包括为数据资源和业务应用提供实体环境的各类基础支撑保障工作,主要包括软件运行环境、硬件环境、网络环境的建设。②感知层是信息化系统的主要信息(数据)来源与控制信息输出的关键平台,包括各类雨水情信息、工

程安全监测及视频监控的数据采集。感知层是整个系统最基础的设施。③数据层包括数据库建设与数据服务建设两部分,数据库建设包括对数据抽取、转换、装载、分类整理入库存储,数据库分为基础数据库、专题数据库和专业数据库。基础地理信息、空间数据与水利专题数据独立存储,又深度融合,可以更好地满足应用层对数据维护、数据分析与查询的灵活性、安全性、共享性的需求。数据层提供了更有序、可靠、安全的数据服务功能。④能力层是连接数据层和应用层的桥梁,为应用系统的功能实现提供技术支持、多种服务及运行环境,是应用系统之间、应用系统与其他平台之间进行信息交换、传输、共享的核心,最终目的是实现应用层个性化业务应用的高效开发、集成、部署与管理。⑤应用层以问题为导向、以业务需求为核心,开展各类信息查询、建设与运行管理、安全鉴定、应急管理 with 风险处置等应用平台,这些应用平台包括 Web 端和移动端。

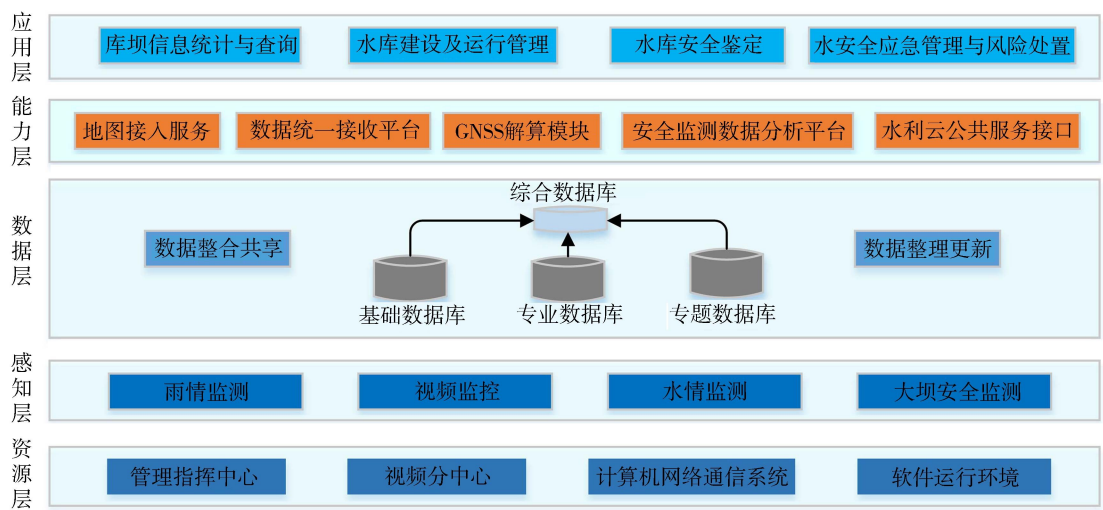


图 2 贵州省水库运行及安全监测监管系统模块

Fig. 2 Supervision system module of reservoir operation and safety monitoring in Guizhou Province

2.1.2 WebGIS 技术应用功能设计

该系统在大坝安全立体感知层的基础上,应用 WebGIS 技术,构建了如图 3 主要功能设计的水库运行与安全监测监管的多维数据展示与空间综合分析平台,提供采集数据输入、水利空间数据库存储、数据发布与展示、各类水利专题地图输出的全链条服务,具体服务链条如下:

- a. 水利空间数据。该系统建立了水利专业空间数据库。该数据库除基础地图栅格数据外,还包括水库及各类测站(雨量站、水位站、各种安全监测站)的矢量数据(位置、高程、属性信息)。
- b. 数据发布服务。该系统主要依循 OGC 制定的 WFS(要素 Web 服务)及 WMTS 标准(切片地图 Web 服务),提供各类空间数据的查询服务。
- c. 数据多维展示。远景视角,以 WebGIS 为载体,可通过多图层叠加进行展示库区地表地貌、河流网络、水库分布以及相关水文特征。近景视角辅以水库全景鸟瞰图,并实时监视大坝整体运行状态和库区环境变化。多视角对水库进行观测分析。

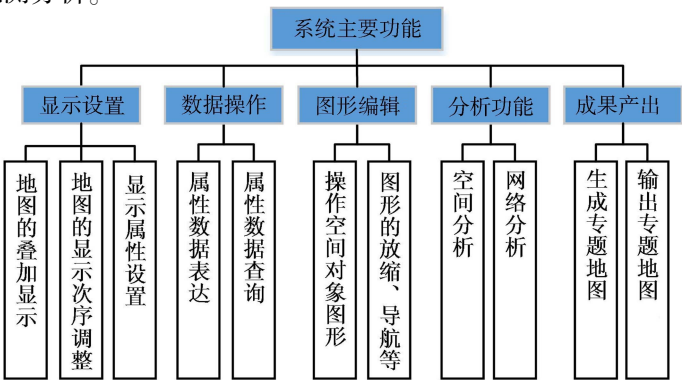


图 3 基于 WebGIS 技术的主要功能设计

Fig. 3 Design of main functions based on WebGIS technology

d. 空间数据分析。该系统可进行水利专业空间数据与行政区划图、水系图、降雨分布地图的叠加分析与统计,并为安全监测分析与可视化展示提供位置、高程的空间量算支持。

e. 专题地图输出。该系统将采集的各类监测数据,处理、转换为监测成果,并结合空间分析或插值算法,形成各类专题地图,如雨情地图、水情地图、雨量分布图、大坝风险图及建设专题地图等。

2.2 雨水情测报及安全监测系统集成

库坝系统的实时信息主要包括雨水情测报及结构安全监测两部分,二者都需要以有线或无线通信方式集成至综合监管系统^[7-9]。针对水库监测数据种类多、容量大的特点,为统筹规划系统建设过程中的各种资源,将该系统各模块集成为整体,研究设计出一套可对大坝雨水情、安全监测信息进行管理并具备查询及统计功能的科学统一监管系统。该系统可让管理者快速便捷地在平台端查询各水库大坝监测工作开展情况及监测数据,实现了对水库大坝监测工作的全记录,为各类工程风险与管理风险设置风险预警,并提醒相关责任人。

系统集成的实施是指在从硬件、界面、应用和数据集成等角度,对系统的集成需求进行梳理、设计和实现:①硬件集成。包括信息采集集成、视频集成,如新建雨量监测站、水位监测站点、视频监测站点、渗流监测站点、渗压监测站点及 GNSS 位移监测站点的集成应用。②界面集成。包括统一访问入口集成、统一展现内容集成。③应用集成。包括专项业务协同、公共功能组件调用。④数据集成。包括数据交换、数据格式转换,任意位置与类型的数据通过数据集成都能在该系统间实现数据和信息的共享。

2.3 基于北斗 GNSS 技术的大坝变形监测技术

全球导航卫星系统 GNSS 主要包括美国的全球定位系统、俄罗斯的全球卫星导航系统、欧洲的伽利略、中国的北斗卫星导航系统^[10-11]。基于 GNSS 的大坝变形监测技术具有全天候测量、定位速度快、连续实时、自动化程度高等多重优势,在中小型库坝监测中具有良好的应用前景。该系统采用北斗 GNSS 技术进行坝体沉降观测,主要分为 GNSS 数据接收、数据转换、解算 3 个模块。考虑大坝安全监测数据的敏感性,通过搭建独立自主的 GNSS 解算系统,进行 GNSS 测量数据的后处理工作,通过数据的后处理,方能获得最终可用的 GNSS 测量成果。解算系统主要包括数据预处理、周跳探测与粗差剔除、参数估计、残差检验及重定权、模糊度固定、解算成果数据,具体数据处理流程如下:

a. 数据预处理。预处理主要包括接收机钟差毫秒跳变修复、粗差剔除、周跳探测、DCB 改正等,其中周跳探测分析最为关键,直接影响最终结果的优劣。

b. 模型化,形成法方程,进行参数估计。完成数据预处理后,观测数据需要按照某一模型建立观测方程、误差方程,然后依次将其叠加在一起,形成法方程,并求解得到初始的解算结果。该过程最关键的是选择合理的数据处理模型。目前常用的模型有双差模型和非差模型。

c. 残差检验。小周跳和部分粗差难以一次性在数据预处理中全部探测出来,因此在法方程解算完毕后,需要对残差做进一步分析,以探测可能存在的小周跳或者粗差,然后再更新原有的数据预处理结果。

d. 重复步骤 b 和 c,直到残差检验没有发现周跳和粗差为止,一般而言需要重复 2 次或 3 次,若部分测站的数据质量较差,迭代次数可能需要增加。

e. 固定模糊度,输出结果。模糊度固定可以大幅度提高数据处理质量,增强解的强度。不同模型的模糊度固定方式不同,如非差模型中的模糊度并不直接具有整数特性,需映射成双差后才能加以固定。

2.4 基于大数据挖掘技术的库坝工程信息识别与风险管理

水利工程数据包括水利工程前期勘测设计数据、施工数据,以及运行期的各类雨情、水情、工期的监测、巡检及视频数据。如果扩大到工程效益和风险层次,则还可以扩展到水文气象^[12]、农业灌溉、下游防护区人口经济动态分布等。由于水利涉及因素的多样性、复杂性、动态性及关联性,导致水利业务数据也呈现多样性、动态性、大数据规模化等特点^[13],传统方法及单个项目化的数据分析方式已不能满足当前需求。

数据挖掘指对大体量、多维度的数据进行分析从而获取有用信息或结论。基于数据挖掘技术的库坝风险识别及评估,是一个技术难度大但极具发展前景的新兴研究方向。针对库坝工程运行与监管,可以开展工程风险特征、工程真实工作性态及工程风险识别评估等方面的数据挖掘工作^[14]。库坝工程风险特征包括工程孕灾、致灾和承灾特征;工程真实工作性态则是通过多源数据同化与融合^[15-16]等技术,并耦合物理驱动机制捕捉库坝系统的真实工作性态;工程风险识别则是在前述二者基础上,进一步综合历史灾变数据映射数据

集的关系,评估库坝风险。本文以库坝工程风险特征为例,介绍了数据挖掘相关成果。

2.4.1 库坝整体的数据化表达

聚焦库坝工程安全运行与风险防控的核心目标,充分研究贵州省库坝原始信息、各类信息管理系统、服务系统、监管系统等的特征数据,建立整合的全省库坝雨水情及监测基础信息库,构建充分、合理、高效的数据库关键词表;依据水建管[2003]271号《水库大坝安全鉴定办法》、SL258—2017《水库大坝安全评价导则》,结合全省中小型库坝工程存在的实际风险分布特点,研发集工程信息、雨情、水情、监测信息、风险区信息等于一体的数据库系统。

依据SL252—2017《水利水电工程等级划分及洪水标准》中对水利水电工程分等指标,结合雨水情测报、安全监测及安全鉴定时间与结论,初步筛选出图4所示的库坝风险特征指标(图中1亩≈667m²),并建立相应的数据库结构。

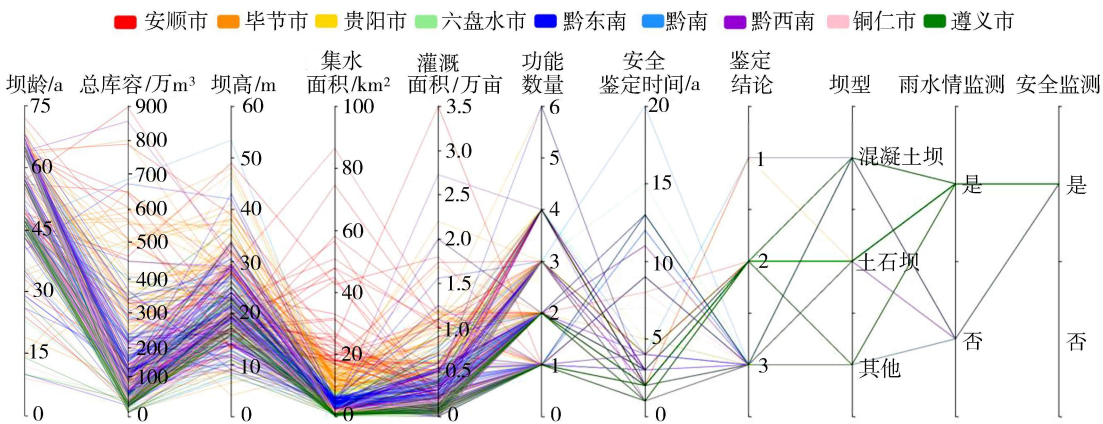


图4 贵州省391座中小型水库的风险特征指标

Fig.4 Risk characteristic indexes of 391 small and medium-sized reservoirs in Guizhou Province

将数据清洗后的贵州省391座水库按照风险特征进行数据化表达,将实体库坝工程转化为抽象数据,以便于对大量的库坝进行数据分析。图4中,从坝龄、总库容至鉴定结论的每条折线代表一条库坝数据,贵州省各市的库坝采用不同颜色加以区分,可直观地看出贵州省各市库坝群的先天基本条件,如坝龄多数大于40a且总库容较小、大部分水库坝高在15~35m之间等,从而对各市库坝群的风险特征分布进行整体把握。

2.4.2 数据挖掘及库坝风险特征

由于大部分中小型水库存在前期建设资料缺失、后期监测数据缺乏等问题,难以基于传统方法开展单个工程的安全评价工作。该系统可依托全省水库雨水情数据、现有监测数据及历史灾情数据,通过机器学习、多维属性关联及多元数据同化等技术,开展数据挖掘研究,并建立感知量与安全指标的映射关系,实现库坝信息与风险的自动快速识别及评价,从而提高水库运行调度模型的精度和效率。

a. 数据风险特征识别。由图5可知,贵州省水库有2个建设高峰期,一个是国家第2个五年计划1958—1962年,一个是20世纪70年代,2个区间的库坝工程建设总数均超过100座,占统计样本中库坝总数的半数以上。

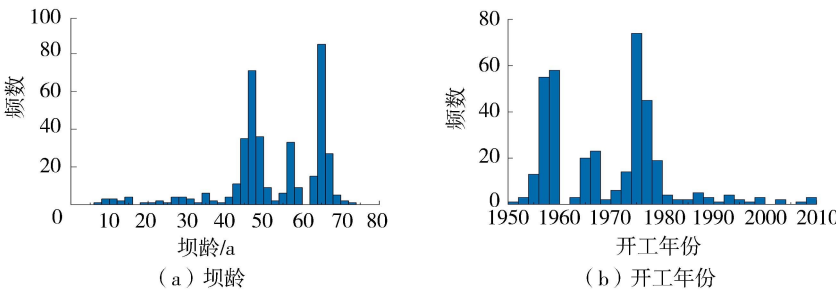


图5 贵州省391座水库的坝龄和开工年份分布

Fig.5 Distributions of dam age and construction year of 391 reservoirs in Guizhou Province

b. 数据相关性识别。相关系数主要包括 Pearson 相关系数与 Spearman 相关系数,其中 Pearson 相关系数要求数据为连续型变量且符合正态分布,而 Spearman 相关系数对原始变量的分布不做要求。由于一期 391 座水库的风险特征分布非连续且不符合正态分布,故选择使用条件较为宽松的 Spearman 相关系数进行分析。对贵州省 391 座中小型库坝的 7 项量化风险因子数据进行相关性分析,得到如图 6 所示两类坝型的相关系数矩阵。其中混凝土坝的坝高、总库容、灌溉面积相关性较大,相关系数均大于 0.55,符合大多数混凝土坝坝高越高、总库容越大、灌溉面积也越大的基本认知;土石坝仅有总库容与灌溉面积的相关性较大为 0.79;2 种坝型的坝龄、功能数量与鉴定时间与其他风险因子的相关性较低,相关系数均低于 0.3。系统还会陆续集成人口、经济、雨水情、工程监测量等方面的特征变量。不同变量的相关性分析不仅可供后续库坝风险特征分类及分级管理提供划分依据,还能挖掘出库坝安全评价的数据驱动机制。

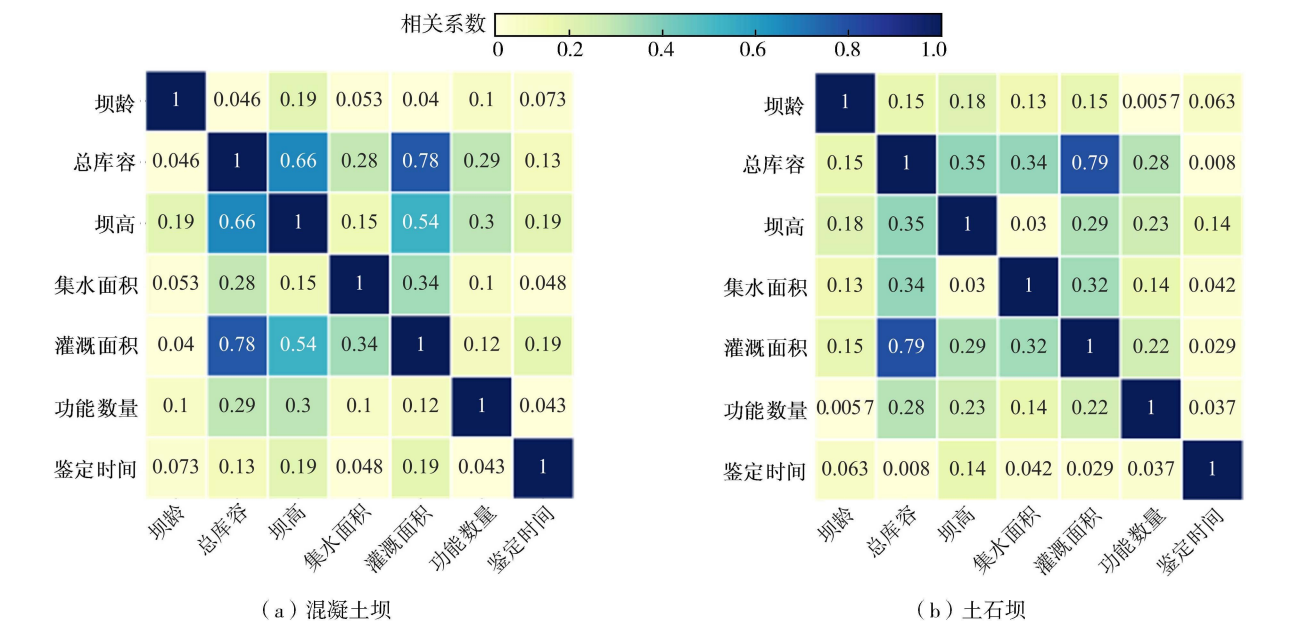


图 6 混凝土坝和土石坝风险特征相关系数矩阵

Fig. 6 Correlation coefficient matrix of risk characteristic for concrete dam and earth-rock dam

3 系统应用展示

3.1 整体功能

从库坝特征、雨情监测系统完备性、系统运维情况及溃坝后果严重性 4 个维度对贵州省库坝基本资料及工程风险特征进行分类展示,具体包括:①库坝工程特征值,包括流域控制面积、坝型、坝高、库容、完建时间等;②雨情监测设施数量及完好性,安全监测仪器数量及完备性、自动化情况;③库坝工程运维管理、安全鉴定及除险加固情况;④溃坝下游影响区情况,包括高精度的高程信息图、卫星图及土地利用类型分布图、溃坝下游地区人口的空间分布及人口组成、溃坝对工程本身造成的直接经济损失、历史发生洪水时的直接与间接经济损失等。

如图 7(a)所示,全部 2 390 座库坝的地理位置、坝型、水库规模、安全类型的分布与风险管理、隐患排查集中展示在系统首页。在首页中搜索具体坝名,可展示其详细信息,包括工程概况、雨水情测报、安全监测、测点布置及风险管理等,如图 7(b)所示。

3.2 典型工程模块

3.2.1 监测成果

以贵州省小(1)型土石坝幸福水库(普安县)为例,对安全监测与雨水情测报模块进行展示。该水库拦河大坝为土石坝,最大坝高 31.5 m。安全监测中的渗流监测模块,可对库坝上下游水位进行实时监测,并采用测压管法监测土石坝浸润线(图 8(a))。如图 8(b)所示,雨水情测报可实时监测每日降水量、水位过程线,并结合 GIS 地图进行实时展示。



(a) 系统首页



(b) 幸福水库详细信息页面

图7 贵州省水库运行及安全监测监管系统

Fig.7 Supervision system of reservoir operation and safety monitoring in Guizhou Province

3.2.2 GNSS 技术及其应用

大坝坝顶下游侧沿坝轴线布置了8个GNSS测点,用于监测大坝的实时沉降位移及水平位移。以2022年5月1日至6月19日为例,坝体沉降观测曲线如图9所示。目前该项目的GNSS监测周期尚不到1a,待后期拥有足够长的数据序列时,可综合环境监测量、其他变形资料及有限元法反馈分析成果,通过统计及模型法构建大坝的变形预警指标。

4 结 语

通过贵州省水库运行及安全监测监管系统建设,初步实现监测数据汇集、雨水情及安全监测实时在线监测、现有信息汇集共享、工程信息识别分析,并初步具备大坝安全监测全记录、大坝安全鉴定全面监管、水库

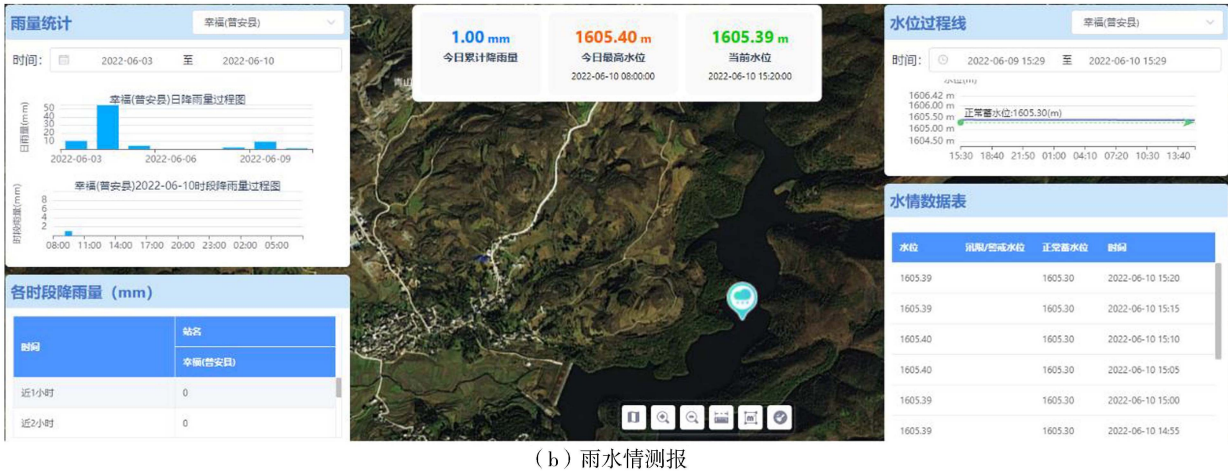
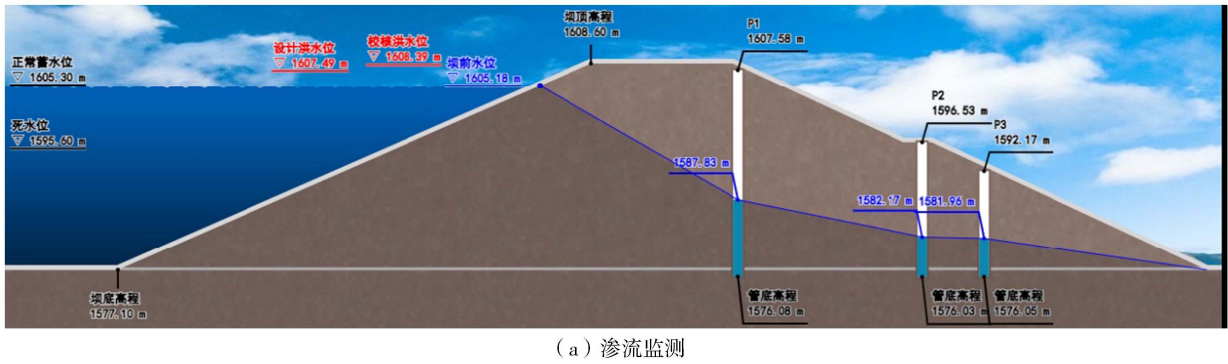


图 8 幸福水库大坝渗流监测和雨水情测报

Fig. 8 Dam seepage monitoring and rainfall-flood scheme forecasting of Xingfu Reservoir

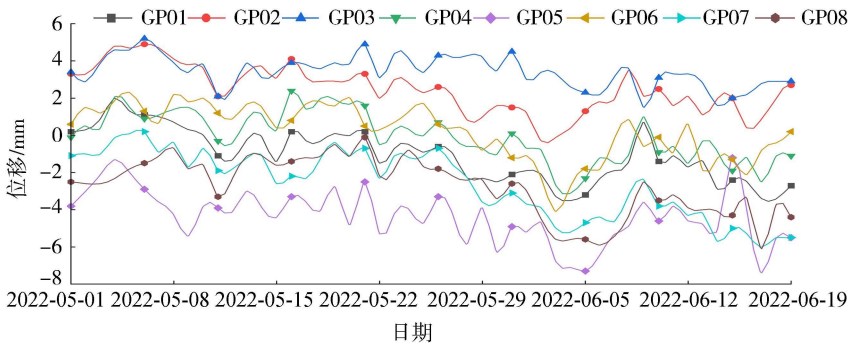


Fig. 9 Observation curve of dam settlement of Xingfu Reservoir based on GNSS

风险隐患预警、水库安全运行监管四大功能,可为贵州省水库安全运行提供技术支撑。依托该系统,开展了关键技术的研究,具体包括:①基于 B/S 模式开发监测管理系统。将主要事务逻辑在服务器端实现,形成共享性强的三层客户/服务器结构;②采用 WebGIS 技术实现 Web 方式的交互。实现电子地图上信息查询、结果展示等操作;③基于大数据挖掘技术识别库坝工程信息并展示。对库坝大量的数据资料进行定制挖掘,构成数据图像并分析不同数据及数据集间的相关关系。

目前,该系统完成了初步研发,后续研究工作包括:①继续集成全省大中小型水库信息;②基于各类监控仪器实时获取的图像及视频等信息,开展图像智能识别及库坝工作性态映射关系研究,实现基于智能 AI 技术的库坝要素及其性态识别;③继续深入开展数据库挖掘工作,充分利用历史灾情数据,研发缺乏信息条件下的库坝风险快速识别技术,为库坝的风险预演和防控提供技术支持。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 2020 年全国水利发展统计公告[R]. 北京:中国水利水电出版社,2021.
- [2] 水利部水利信息中心. 中小河流洪水预警指标确定与预报技术研究[M]. 北京:科学出版社,2016.
- [3] 李致家,朱跃龙,刘志雨,等. 中小河流洪水防控与应急管理关键技术的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):13-18. (LI Zhijia, ZHU Yuelong, LIU Zhiyu, et al. Thoughts on key technologies of flood prevention and emergency management in small and medium-sized rivers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 13-18. (in Chinese))
- [4] 张建新,刘九夫,金君良. 关于智慧水利的认识与思考[J]. 水利水运工程学报,2019,178(6):1-7. (ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, JIN Junliang. Understanding and thinking of smart water conservancy[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019, 178(6): 1-7. (in Chinese))
- [5] 李国英. 深入贯彻新发展理念,推进水资源集约安全利用[N]. 人民日报,2021-03-22(10).
- [6] 廖玉霞. 基于 B/S 模式的水环境监测系统设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2013.
- [7] 郑贵林,章志福. 基于 ZigBee 信标网络的水情测报系统设计[J]. 自动化与仪表,2012,27(4):27-30. (ZHENG Guilin, ZHANG Zhifu. Design of hydrographic acquisition system based on beacon-enabled ZigBee network[J]. Automation & Instrumentation, 2012, 27(4): 27-30. (in Chinese))
- [8] 陈敏,胡春杰,阮聪,等. 基于 NB-IoT 的水雨情实时监测系统与设计[J]. 电子测量技术,2020,43(2):133-138. (CHEN Min, HU Chunjie, RUAN Cong, et al. Real-time monitoring system and design of rainwater condition based on NB-IoT[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(2): 133-138. (in Chinese))
- [9] 胡春杰,王江燕,嵇海祥,等. 一种双信道的雨水情监测系统[J]. 水力发电,2021,47(1):23-26. (HU Chunjie, WANG Jiangyan, JI Haixiang, et al. A dual channel water and rain monitoring system[J]. Water Power, 2021, 47(1): 23-26. (in Chinese))
- [10] 王川,杨姗姗,董泽荣,等. GNSS 监测系统在小湾拱坝安全监测中的应用[J]. 水电自动化与大坝监测,2013,37(1):63-67. (WANG Chuan, YANG Shanshan, DONG Zerong, et al. The engineering application about GNSS monitoring system in Xiao Wan arch dam safety monitoring[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2013, 37(1): 63-67. (in Chinese))
- [11] 闵从军,周瑛,刘海滨,等. 北斗/GPS 大坝实时监测与预警系统精度测试研究[J]. 勘察科学技术,2018,215(2):19-22. (MIN Congjun, ZHOU Ying, LIU Haibin, et al. Research on accuracy test of real-time monitoring and early warning system of Beidou/GPS for dam[J]. Site Investigation Science and Technology, 2018, 215(2): 19-22. (in Chinese))
- [12] 吴志勇,徐梁,唐运忆,等. 水文站流量在线监测方法研究进展[J]. 水资源保护,2020,36(4):1-7. (WU Zhiyong, XU Liang, TANG Yunyi, et al. Research progress of on-line discharge monitoring methods in hydrometry stations[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 1-7. (in Chinese))
- [13] 叶枫,张鹏,夏润亮,等. 基于新一代大数据处理引擎 Flink 的“智慧滁河”系统[J]. 水资源保护,2019,35(2):90-94. (YE Feng, ZHANG Peng, XIA Runliang, et al. “Smart Chuhe River” system based on Flink, a new generation of big data processing engine[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 90-94. (in Chinese))
- [14] 欧斌,吴邦彬,袁杰,等. 基于 LSTM 的混凝土坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进步,2022,42(1):21-26. (OU Bin, WU Bangbin, YUAN Jie, et al. LSTM-based deformation prediction model of concrete dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 21-26. (in Chinese))
- [15] 朱跃龙. 基于数据挖掘与驱动的中小河流洪水预报[M]. 南京:河海大学出版社,2020.
- [16] 朱跃龙,赵群,余宇峰,等. 基于时空特征挖掘的流量过程智能模拟方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):7-12. (ZHU Yuelong, ZHAO Qun, YU Yufeng, et al. Intelligent simulation method of runoff process based on spatiotemporal feature mining[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 7-12. (in Chinese))

(收稿日期:2022-06-20 编辑:刘晓艳)