

基于微服务架构与达梦数据库的大坝安全评价系统

余浩然¹, 秦泽宁², 刘阳¹, 嵇莹¹, 陈华^{1*}, 杨祖强¹, 桂发二³

¹武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉

²水利部珠江水利委员会珠江水利综合技术中心, 广东 广州

³浙江贵仁信息科技股份有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2025年12月14日; 录用日期: 2026年1月13日; 发布日期: 2026年4月30日

摘要

针对传统大坝安全评价中存在的评价规范性与信息化水平不足等问题, 本文基于《水库大坝安全评价导则》(SL258-2017), 研发了基于微服务架构与达梦数据库的大坝安全评价系统。系统技术架构包括数据层、服务层、接入层、表现层与四大体系, 以多源监测数据为核心、模型协同融合为支撑构建了由监控对象、监控部位、监控项目及监控测点组成的大坝安全评价体系, 结合机器学习算法对监测数据的异常、趋势与风险等级进行自动识别, 将不同模型输出的评价结果进行加权融合, 实现大坝安全智能评价。本文主要介绍大坝渗流安全评价、结构安全评价及抗震安全评价三大模块, 以湖北省黄陂区7座中小型水库为例的工程应用表明, 该系统能够实现工程安全状态评判, 显著提升了安全评价的规范化、准确性与智能化水平, 为大坝运行管理提供科学决策支撑。

关键词

大坝安全评价, 微服务, 达梦数据库, 多源监测数据, 模型协同融合

Dam Safety Evaluation System Based on a Micro-Service Architecture and the Dameng Database

Haoran Yu¹, Zening Qin², Yang Liu¹, Ying Ji¹, Hua Chen^{1*}, Zuqiang Yang¹, Fa'er Gui³

¹State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan Hubei

²Pearl River Comprehensive Technology Center, PRWRC, Guangzhou Guangdong

³Zhejiang Keep Soft Technology Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

作者简介: 余浩然, 硕士研究生, 研究方向为智慧水利, Email: yuhaoran030902@163.com

*通讯作者 Email: chua@whu.edu.cn

文章引用: 余浩然, 秦泽宁, 刘阳, 嵇莹, 陈华, 杨祖强, 桂发二. 基于微服务架构与达梦数据库的大坝安全评价系统[J]. 水资源研究, 2026, 15(2): 142-150. DOI: 10.12677/jwrr.2026.152017

Received: December 14, 2025; accepted: January 13, 2026; published: April 30, 2026

Abstract

To address the insufficient standardization and low level of informatization in traditional dam safety evaluations, this study, based on the Guidelines for Safety Evaluation of Reservoir Dams (SL258-2017), develops a dam safety evaluation system based on a micro-service architecture and the Dameng Database. The technical architecture comprises four layers—data, service, access, and presentation—along with four core subsystems. Centered on multi-source monitoring data and supported by model collaboration and integration, a hierarchical dam safety evaluation framework is constructed, consisting of monitoring objects, monitoring parts, monitoring items, and monitoring points. By incorporating machine learning algorithms, the system automatically identifies anomalies, trends, and risk levels within monitoring data, and performs weighted fusion of evaluation results from different models to achieve intelligent dam safety assessment. The study focuses on three major modules: seepage safety evaluation, structural safety evaluation, and seismic safety evaluation. An engineering application involving seven medium- and small-sized reservoirs in Huangpi District, Hubei Province, demonstrates that the system can effectively determine the safety status of dam projects, significantly improving the standardization, accuracy, and intelligence of safety evaluations. The proposed system provides robust scientific support for decision-making in dam operation and management.

Keywords

Dam Safety Evaluation, Micro-Service, Dameng Database, Multi-Source Monitoring Data, Model Collaboration and Integration

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前中国已建成 9.5 万座水库，总库容超过 1 万亿立方米，在水库的类型、数量以及高坝数量上均位居世界首位。水库大坝在长期运行过程中，持续承受水力、渗流及环境侵蚀等多重物理作用，其材料性能与结构完整性随着时间的推移而渐进退化。同时，初始设计所依据的水文条件与现行气候模式下的极端降水事件之间存在显著的不确定性，导致原设计标准可能不足以覆盖当前及未来的洪水风险。此类水库一旦失事，瞬间释放的能量将对下游人口、城镇及生态体系造成灾难性的冲击。为保障大坝安全与下游区域的整体安全，必须对大坝进行动态监测与安全评价。传统的大坝安全评价方式以静态监测资料和人工巡检信息为主要数据来源，评价过程依赖专家经验判断与规范性指标比对，评价结果受主观因素的影响较大，导致评价结果规范性不足。随着水电信息技术的发展，上述大坝安全评价方式已难以满足现代化管理的时效性。因此，大坝安全评价亟需向基于数据与模型融合驱动的智能安全评价体系转型。

近年来，为提高安全评价工作效率，国内研究者在研发大坝安全评价系统领域取得相关进展。郭江[1]等针对大坝巡检工作的业务特征研发了基于 Web 架构的水电站大坝巡检管理系统，优化了系统数据共享与业务流程；谭界雄[2]等研发的评价系统采用 B/S 架构设计，并基于现行技术标准自动生成安全评价报告与计算书，有效提升了安全评价工作的规范性与客观性；马开远[3]等依托统一的平台架构，实现计算复核、指标分析与图文一体化处理等功能的集成；王思德[4]等建立群坝综合风险评价系统，考虑群坝运行特征，借助 GIS 等信息化技术实现群坝安全状态的感知与调控；赵寿昌[5]等整合大坝基础数据与相关算法，形成可支持安全状态感知与评价的

技术平台；王霄[6]等提出具备数据存储功能的 GIS-Q 技术实现大坝安全评价；Xie [7]等利用 LoRa 技术的低功耗与远距离传输特性实现大坝安全数据的采集，但在极端场景下系统稳定性有待提高；Han [8]等建立基于专家系统的大坝在线安全监测平台，采用全局数据库(GDB)存储数据。以上研究大多采用单体架构，导致系统维护和拓展困难，且数据库难以支撑系统兼容性与稳定性等方面，安全评价采用静态定性的方法，即依据有限的监测数据和专家经验进行安全判定。基于此，本文采用微服务架构与达梦数据库研发设计大坝安全评价系统，构建以多源监测数据为核心、以模型协同融合为支撑的综合评价体系，实现大坝智能化安全评价。

2. 系统架构设计与实现

2.1. 微服务架构

微服务架构(Microservice Architecture)是一种面向服务的分布式系统架构模式，它将一体化架构下的复杂应用拆分成多个微小的服务，每个服务围绕特定业务功能独立部署与运行，并通过轻量级通信机制进行协作[9]。与传统单体架构相比，微服务架构在系统可扩展性、容错性、模块复用及运维效率等方面具有显著优势[10]。本系统采用模块化设计，按照功能和业务逻辑将整个平台划分为多个独立的子系统，引入微服务架构将不同的业务模块解耦为多个服务单元，子系统独立部署和运行。通过标准化的 API 接口，各个子系统能够无缝对接与协作。在此架构下结合达梦数据库的国产化特性与高性能事务处理能力，有效提升了系统的数据处理效率，同时增强了系统在国产数据库环境下的适应性与安全性。

2.2. 系统技术架构

系统基于《水库大坝安全评价导则》(SL258-2017)[11]中大坝安全综合评价指南，即通过对各个站点数据的深入分析，全面掌握大坝在渗流、结构和抗震等方面的性能表现，从而综合得出整个大坝的安全度评价。系统总体研发目标为开展感知设施、信息化平台、业务应用和网络安全等方面的建设，利用相关安全评价模型及工程安全运行知识库，开展工程安全评价，全面提升工程运行安全保障与突发事件应急处置能力。为实现上述目标，本文基于 Spring Cloud 微服务架构实现大坝安全评价系统。Spring Cloud 用于快速构建分布式系统，它提供了服务发现、配置管理、智能路由、微服务治理等一整套解决方案，极大地简化了分布式系统的开发和管理。系统框架包括数据层、服务层、接入层、表现层四个层级以及评价体系、安全保障体系、统一运维体系与技术支撑体系，具体技术架构如图 1 所示。

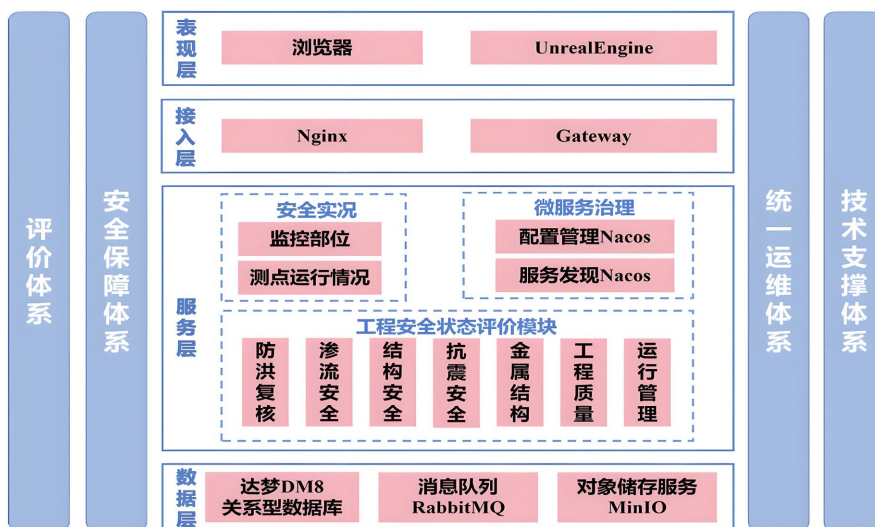


图 1. 大坝安全评价系统技术架构

数据层为系统提供底层数据支撑与资源管理能力,采用达梦 DM8 关系型数据库作为主数据库,构建了涵盖渗流压力、结构应力及变形等多源监测数据的统一数据管理框架。达梦数据库支持多种部署模式与高可用机制,其在国产软硬件环境下具有良好的适配性,在处理结构化监测数据、时序数据及业务管理数据方面表现稳定,适合支撑大坝安全评价系统中多源数据的集中管理与长期存储。RabbitMQ 消息队列用于系统间的异步通信,提高系统的解耦性和响应速度。系统部署 MinIO 对象储存服务,支持大规模非结构化数据存储。

服务层是系统架构的核心部分,负责实现大坝安全评价的主要业务功能。该层采用微服务架构将系统评价功能划分为多个子系统模块,如防洪复核、渗流安全、结构安全、抗震安全、金属结构安全、工程质量与运行管理等。此外,服务层还包含安全实况模块,系统可根据监测数据的变化趋势识别异常状态,并触发风险预警,为综合评价提供辅助决策支持。在服务治理方面,Nacos 提供了服务注册与发现、配置管理、DNS 解析等功能。在微服务架构中,Nacos 可以作为服务发现和配置中心,帮助开发者快速构建和管理分布式系统。

接入层作为系统外部访问与内部业务逻辑之间的桥梁,采用 Nginx 作为反向代理器和负载均衡器,提升系统性能和可靠性。在 Spring Cloud 生态中,Gateway 是一个基于 WebFlux 的 API 网关,为微服务架构提供了一种简单有效的方式来路由和过滤请求。相比 Zuul 等其他网关产品,Gateway 支持更丰富的路由匹配规则和过滤器,且性能更优。

表现层作为系统的人机交互界面,系统采用 B/S 架构,用户可通过浏览器直接访问系统,实现跨平台、跨终端的安全接入。基于 UnrealEngine 三维可视化引擎,系统能够将监测数据进行空间映射与动态展示,支持创建高度逼真的 3D 场景,提升用户体验。

系统构建了评价体系、安全保障体系、技术支撑体系与统一运维体系四个支撑系统。评价体系旨在实现大坝安全的多维度综合评定,于下文 3.1 节详细介绍。安全保障体系实现测点异常识别与工程状态感知,技术支撑体系依托微服务架构、与达梦数据库,实现系统的高性能运行、数据安全管理与服务弹性调度,统一运维体系确保各模块在运行、更新与维护过程中的一致性与可追溯性。

2.3. 系统开发架构

2.3.1. 部署与运行环境

系统部署分为现地计算存储资源与云端计算存储资源两类,核心设备包括 Web 应用服务器与数据库服务器,均采用酷睿 i7 处理器,分别运行 Nginx 与达梦数据库,网络接入基于水利专网,确保各级节点之间的安全通信与高效数据传输。系统后端采用 Spring Boot + Spring Cloud + MyBatis 的分布式微服务架构,前端以 Vue.js 为主框架,结合 Ant Design Vue 实现可视化界面构建;数据展示采用 ECharts 与 Highcharts 图表库,三维可视化部分利用 CesiumJS 与 Unreal Engine 实现复杂地理空间场景渲染。整体技术体系涵盖了前端可视化、后端服务治理与模型算法集成三大环节,形成可扩展的技术支撑体系。

客户端运行环境面向管理端与监测端双重需求,采用酷睿 i7 处理器、64 GB 内存、Windows 10 操作系统。该配置可支持实时监测信息的图表化与三维场景渲染,确保系统在多业务负载下的稳定响应。

2.3.2. 数据库

数据库系统采用达梦 DM8 关系型数据库,辅以达梦时序数据库、文档数据库、图数据库与缓存数据库,实现结构化与非结构化数据的统一管理。消息队列选用 RabbitMQ,负责异步消息通信;对象储存采用 MiniIO,为监测视频与模型计算结果提供高性能非结构化数据存储服务。数据资源整合过程如图 2 所示。

2.4. 系统业务流程

大坝安全评价系统业务流程包括工程信息录入、数据分析与特征提取、测点级安全性态分析、大坝安全综合评价与评价结果展示五个阶段,系统业务流程如图 3 所示。

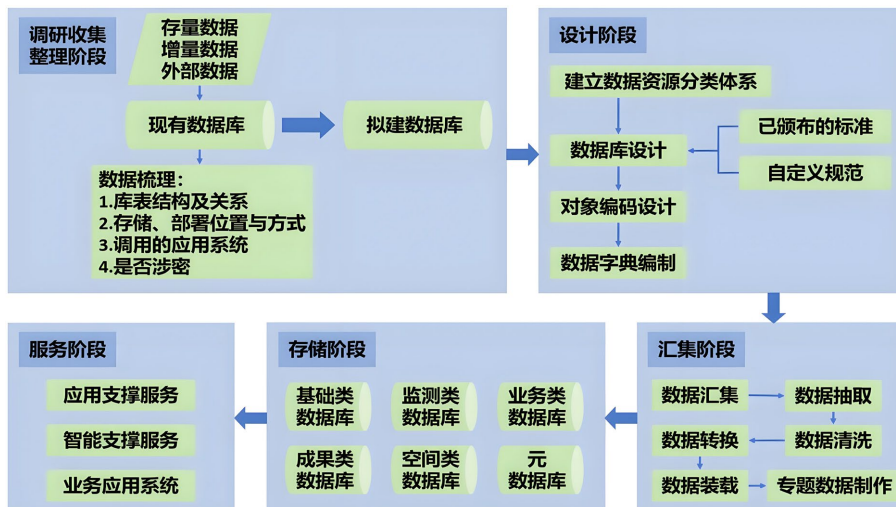


图 2. 大坝安全评价系统数据库设计整合流程

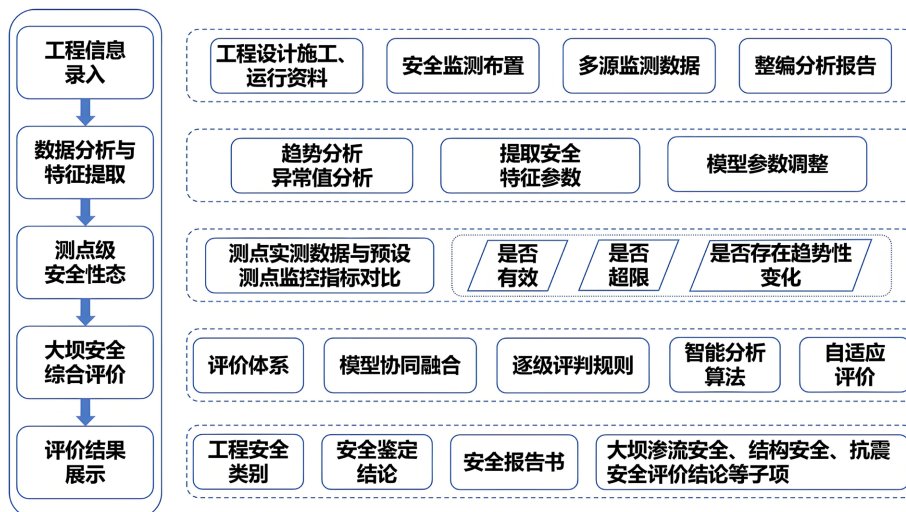


图 3. 大坝安全评价系统业务流程

系统首先对大坝工程的基础资料进行全面汇总与录入，包括工程施工记录、运行管理资料、监测布置方案及多源监测数据等内容。通过对原始信息进行数据标准化处理，建立工程信息数据库，实现动态数据与历史数据的统一管理。

通过对长期监测序列的趋势分析与异常值分析，提取关键安全特征参数，如渗流梯度、位移速率、应变耦合因子等，为模型输入提供高质量特征支撑。系统支持基于实时数据的动态计算，当监测数据出现显著偏离时，模型参数可通过反馈机制自动调整。

在测点级安全性态分析环节，系统针对不同类型的监测数据建立测点级判定规则，通过实测数据与预设的测点监控指标进行对比，判别实测数据是否有效、是否超限、是否存在趋势性变化。系统内置数据清洗与异常识别算法，可自动识别数据波动特征并生成预警测点数量。

基于工程安全综合评价体系、模型协同融合、逐级评判规则，系统通过智能分析算法实现对监测数据异常、趋势与风险等级的自动识别，构建了基于数据驱动的自适应评价机制，在实时数据更新与模型参数迭代条件下，实现安全状态的动态评价，评价结果较好地反映坝体在运行期的整体稳定性、安全裕度及风险分布特征。最终

得到大坝安全鉴定结论并生成安全报告书，系统利用可视化技术对综合评价结果进行多维度展示，将坝体的安全类别与测点运行情况等直观呈现。

3. 系统安全评价体系与主要功能模块

3.1. 评价体系

系统以多源监测数据为核心、模型协同融合为支撑，构建了由监控对象、监控部位、监控项目及监控测点组成且覆盖重力坝、拱坝、土石坝等三类坝型的大坝安全评价体系。体系覆盖工程安全性态的重要监控内容和重点关注问题，设计遵循逐级评判的逻辑框架，将多层评价结果逐级融合，实现大坝安全状况的智能化评价。系统评价体系结构图如图4所示。

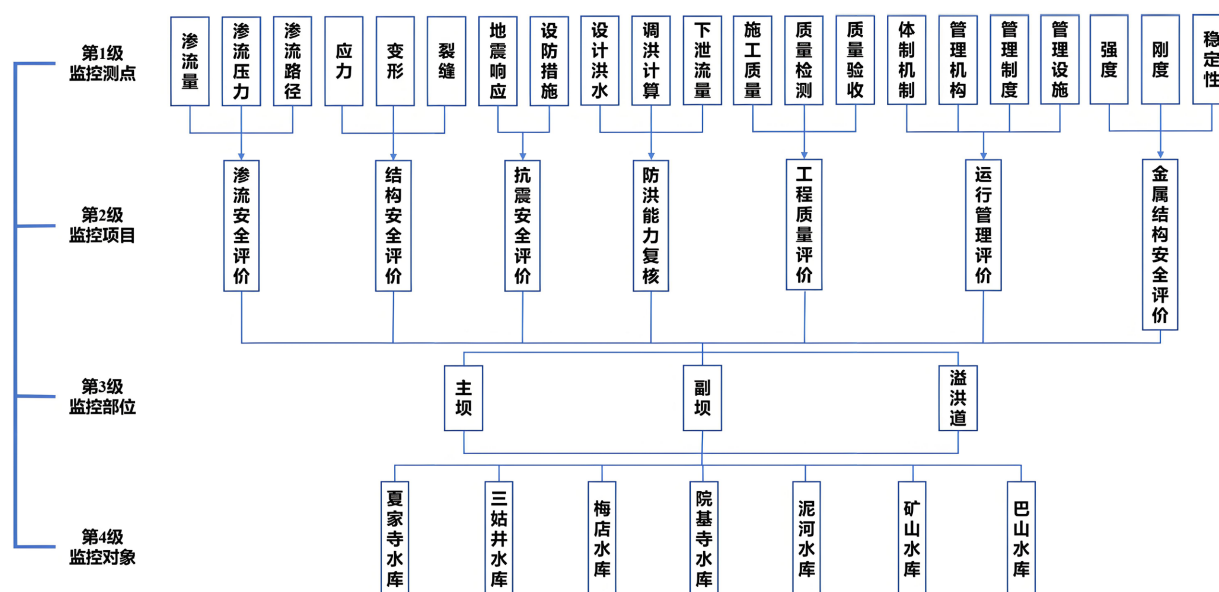


图4. 大坝安全评价体系

在监控测点层面，工程的安全状况反映在诸多方面，如变形、渗流、应力、裂缝、近坝区滑坡等。系统依据不同监测类型建立测点级判定规则，引入基于多元线性回归与随机森林算法，对监测数据的变化趋势、周期规律及异常模式进行识别，当监测数据出现显著偏离时，模型参数可通过反馈机制自动调整，实现数据驱动的自适应安全评价。该层能够反映大坝局部结构的安全状况，为逐级评判提供基础数据支撑。

在监控项目层面，根据导则中涉及的评价项目建立包含渗流安全评价、结构安全评价与抗震安全评价等模块的评价模型。系统考虑不同效应量之间的逻辑联系，将不同模型之间的结果共享与参数交互，对各类测点的安全性态与判定结果进行综合分析，以揭示该监测项目的整体运行状态和异常分布特征。当监测项目的异常指标超过规范标准，可自动判定该监测项目存在潜在安全风险。依据导则将防洪能力、渗流安全、结构安全、抗震安全、金属结构安全的评价结果分为A、B、C三级。A级为安全可靠；B级为基本安全，但有缺陷；C级为不安全。工程质量评价结果分为“合格”“基本合格”“不合格”；运行管理评价结果分为“规范”“较规范”“不规范”[11]。

在监控部位层面，将各监控项目模型输出的评价结果进行加权融合，实现对坝体与各类溢洪道等工程部位安全状态的综合评价。系统能够识别坝体局部结构性能的变化规律，如应力集中、渗流异常或局部变形等特征，从而揭示局部结构的潜在风险，实现安全评价从单一监测效应量向工程部位整体性评估转变。

最后，在监控对象层面，将测点、项目、部位的多层结果逐级融合，形成工程级的综合安全指数，并结合设计施工条件、运行管理、巡检记录及外部环境因素，实现对整个大坝安全运行状况的全局性智能化评价与等级

判定, 最终输出的综合评价结论可为安全运行决策、风险预警及预演方案提供科学依据。

综上所述, 各层之间通过明确的评价关系实现数据向信息、信息向结论的逐级转化, 从而构建起科学、系统、全面的大坝安全综合评价框架。根据该体系框架, 通过数据驱动与模型融合的深度结合, 系统能够实现大坝安全状态的动态评估与自适应修正, 为大坝安全综合评价提供逻辑清晰、结构完整的技术支撑。

3.2. 渗流安全评价

在渗流安全评价模块中, 主要选取渗流量、渗流压力与渗流路径三类指标作为核心分析因素。渗流量的分析主要采用计算分析法, 即基于水力学与渗流理论建立坝体及坝基的渗流模型, 通过求解渗流场分布与孔压场来反映渗流特征[12]。渗流压力的判定则通过对长期监测数据进行统计分析, 研究孔隙水压力的变化趋势与波动规律。渗流路径的识别需综合运用计算分析、监测资料分析与现场调查等方法, 建立渗流数值模型, 结合孔压与渗流量监测结果识别集中渗流区或异常通道, 还可采用现场检查方法进行补充验证。

3.3. 结构安全评价

对于结构安全评价模块, 主要选取应力、变形与裂缝三类指标作为核心分析因素。应力指标的分析主要采用有限元复核计算方法对坝体进行受力状态分析与极限承载能力复核。变形指标的评价采用位移计、倾斜计等长期监测数据分析结构变形与应变随时间的变化趋势。裂缝指标的判定主要通过视觉观察、裂缝测量、混凝土试件检测及钢筋探测等方法, 对裂缝宽度、深度、延展趋势及渗透特征进行系统评估。

3.4. 抗震安全评价

针对抗震安全评价模块, 主要分析大坝在地震作用下的响应以及抗震设防措施的适用性与有效性。对于地震响应指标, 采用建立结构动力模型与时域积分法、频域分析法模拟大坝结构在地震作用下的动态响应过程。对于抗震设防措施的复核, 若现有设防标准或结构措施与最新规范要求存在偏差, 应参照《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015) [13]及时调整抗震设防烈度。

4. 工程应用

4.1. 工程背景

大坝安全评价系统对黄陂区 7 座大中型水库, 包括梅店、夏家寺、院基寺、泥河、三姑井、矿山、巴山水库进行了综合安全评价工作。以夏家寺水库大坝安全评价为例, 该水库是具有多年调节功能的大 II 型水库, 总库容 2.535 亿立方米, 正常蓄水位 49.93 米, 主坝为黏土心墙坝, 承担防洪、供水及综合利用等多重任务。随着水库运行年限的增长, 原有的安全监测设施和技术已不能满足现代化水库管理的要求。为建设信息化平台, 本工程通信网络涉及光通信、4G/5G 通信、IPv4/IPv6、窄带物联网、虚拟化等技术, 水库管理处配备有中控室、防汛会商室和机房, 水库大坝安全监测及信息化管理能力得到提升。

4.2. 评价成果展示

使用本系统对夏家寺水库工程安全状态进行综合评价, 监控部位选取主坝、副坝和各类溢洪道等, 各部位开展大坝渗流安全评估、大坝结构安全状态评估、大坝地震安全评估等项目。其中针对主坝开展的渗流安全评估项目中, 一年内坝体断面的水位变化与各测点具体信息如图 5 所示, 系统在所选时间范围自动生成水位过程线, 将渗透压力等因素监测数据与预设监控指标比对, 进而判断测点是否为正常测点或预警测点。该水库工程以测点类型与数量反映其运行情况, 系统界面使用仪表图、柱状图、环形图及列表等多种可视化形式展示监测信息, 测点数据管理如图 6 所示。系统在多源监测数据和模型融合驱动下的大坝安全智能评价结果如图 7 所示。评价结果满足实际工程要求, 为大中型水库的综合决策提供部分支撑。



图 5. 主坝测点渗透压力数据



图 6. 大坝安全评价系统测点数据管理

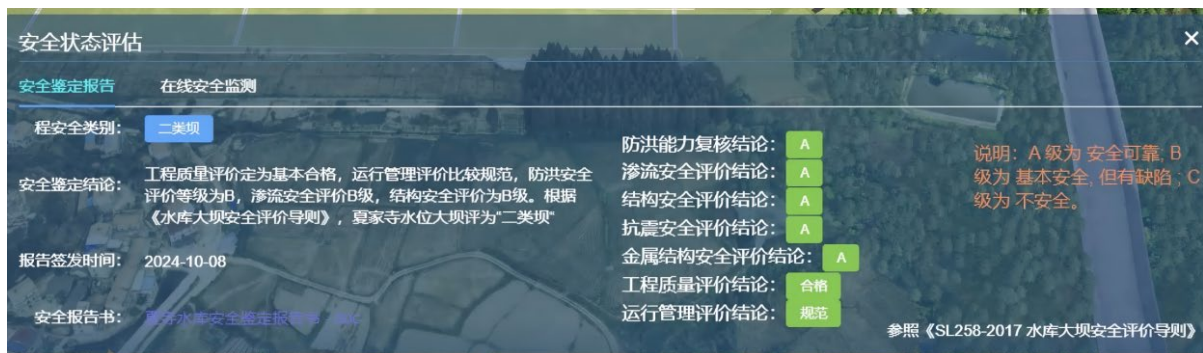


图 7. 大坝安全综合评价成果展示

5. 结语

本文以《水库大坝安全评价导则》(SL258-2017)为技术依据,针对传统大坝安全评价方式中存在的主观性与信息化程度不足等问题,研发设计了大坝安全评价系统。系统以多源监测数据为核心、模型协同融合为支撑,构建了由监控对象、监控部位、监控项目及监控测点组成的大坝安全评价体系,实现了大坝安全状态的多维度、智能化评价与可视化展示。基于该系统的工程应用结果表明,该系统能够实现多维度工程安全状态评判,计算结果准确,显著提升了安全评价的规范化、准确性与智能化水平。

随着水利信息化与人工智能技术的不断发展,后续研究可进一步结合时空大数据分析 with 机器学习方法,在跨流域群坝风险评价与管理、灾害应急调度及数字孪生大坝建设等领域进一步拓展应用,为构建智能化、精细化的大坝安全管理体系提供新思路与技术路径。

基金项目

水利部重大科技项目(SKS-2022158)资助。

参考文献

- [1] 郭江, 林霖, 曹禹, 等. 基于 Web 的水电站大坝巡检系统设计与开发[J]. 水电能源科学, 2010, 28(7): 54-56.
- [2] 谭界雄, 陈利强, 位敏, 等. 水库大坝安全评价系统软件开发及工程应用[J]. 人民长江, 2015, 46(23): 104-107.
- [3] 马开远, 万飏, 高仕春, 等. 统一平台下大坝安全评价系统设计与开发[J]. 水利水电技术, 2014, 45(2): 126-128+134.
- [4] 王思德, 周涛, 查龙. 水库群坝安全风险评价体系信息化研发与应用[C]//中国大坝工程学会, 巴西大坝委员会, 西班牙大坝委员会, 美国大坝委员会. 建造安全韧性绿色的国家水网之“结”. 2024: 25-34.
- [5] 赵寿昌, 周涛, 吴琦, 等. 基于风险指数法的群坝智能评价研究及应用[J]. 大坝与安全, 2022(3): 15-21.
- [6] 王霄, 陈超, 沈优, 等. 基于 GIS-Q 技术的动态大坝安全评价研究及应用[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(S1): 372-375.
- [7] XIE, C. J. Research and application of key technologies for dam safety monitoring based on LoRa. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 768(1): 012131. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/768/1/012131>
- [8] HAN, Z., LI, Y. L., ZHAO, Z. P., et al. An online safety monitoring system of hydropower station based on expert system. Energy Reports, 2022, 8(S4): 1552-1567. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.040>
- [9] 龚召忠, 秦辉. 基于微服务架构的水利工程建设管理系统设计[J]. 广西水利水电, 2025(1): 55-59.
- [10] 赵然, 朱小勇. 微服务架构评述[J]. 网络新媒体技术, 2019, 8(1): 58-61+65.
- [11] 中华人民共和国水利部. 水库大坝安全评价导则: SL 258-2017 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [12] 沈庆双, 蒋德才, 普俊华, 等. 高冲水库大坝渗流安全评价分析[J]. 人民珠江, 2023, 44(S1): 134-138+160.
- [13] 全国地震标准化技术委员会. 中国地震动参数区划图: GB 18306-2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.