

秦台水库多技术融合病险探测体系的构建与应用

沈真真¹, 刘霞², 张家棣²

(1.滨州市水利资源开发建设中心, 山东 滨州 256600; 2.滨州市城乡水务发展服务中心, 山东 滨州 256600)

【摘要】针对传统水库病险探测单一技术覆盖不全、多源数据融合不足等问题,滨州市秦台水库构建“天-空-地-水”多技术融合探测体系。该体系引入“集中式决策-分布式执行”双层架构,建立“无人机初筛-无人船详查-地面精确”三级协同巡检机制,并通过数据配准、特征关联与决策推理实现多源信息深度协同。该体系自运行以来,巡检效率提升70%,渗漏定位精度达亚米级,隐患识别率由75%提高至95%,应急响应时间由72 h压缩至24 h。结果表明,该体系为中小型水库病险探测提供了可复制、可推广的技术方案,对推动水库安全管理从经验驱动向数据驱动转型具有重要参考价值。

【关键词】秦台水库;病险隐患探测;智能巡检;多源数据融合

【中图分类号】TV697

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-07-0028-04

Construction and Application of Multi-technology Integrated Hazard and Risk Detection System for Qintai Reservoir

SHEN Zhenzhen¹, LIU Xia², ZHANG Jiadi²

(1. Water Resources Development and Construction Center of Binzhou Municipality, Binzhou, Shandong 256600, China;

2. Urban and Rural Water Development Service Center of Binzhou Municipality, Binzhou, Shandong 256600, China)

Abstract: Aiming at the defects of traditional reservoir hazard and risk detection such as incomplete coverage of single technology and insufficient fusion of multi-source data, Qintai Reservoir in Binzhou construct a multi-technology integrated detection system integrating spaceborne, airborne, ground and underwater monitoring. The system adopts a two-layer framework of "centralized decision-making and distributed execution", and establishes a three-level collaborative inspection mechanism of "UAV preliminary screening - unmanned vessel detailed survey - ground precise measurement". Deep collaboration of multi-source information is realized via data registration, feature correlation and decision reasoning. The system has increased inspection efficiency by 70% since its operation, achieved sub-meter leakage positioning accuracy, raised the hazard identification rate from 75% to 95%, and cut emergency response time from 72 hours to 24 hours. The results show that the system provides a replicable and promotable technical scheme for hazard detection of small and medium-sized reservoirs, and offers important reference for transforming reservoir safety management from experience-driven mode to data-driven mode.

Key words: Qintai Reservoir; Hazard and risk detection; Intelligent inspection; Multi-source data fusion

我国已建成各类水库 9.8 万余座,其中病险水库占比超过 30%,坝体渗漏、结构变形等隐患隐蔽性强、破坏性大,传统人工巡检效率低下、覆盖面有限,难以满足精细化管理需求。为应对上述挑战,水利部自 2023 年起推进现代化水库运行管理矩阵建设,秦台水库作为全国首批试点水库,率先探索了多技术融合的智能监测路径。该水库为山东省重点中型平原水库,总库容 1 200

万 m³,承担着滨州市区及周边区域的供水任务。水库以“智感、智算、智脑、智用”四大体系为核心,综合运用无人机、无人船、渗漏探测仪等多种智能技术,建立了覆盖“天-空-地-水”全空间的病险隐患探测体系^[1]。目前已建成智能无人机机场系统、多型无人测量船编队及高精度渗漏探测

收稿日期:2026-02-12

作者简介:沈真真(1987—),女,高级工程师

系统(含分布式光纤测温、高密度电法测量和地下水渗流监测),在坝顶、坝坡及下游坡脚等关键部位布置 200 个监测点,数据通过 5G 网络实时接入安全监测信息平台。文章系统阐述该体系的技术融合模式、协同机制与多源数据融合分析方法,总结运行成效与管理经验,以期为同类水利工程智能化转型提供参考。

1 病险隐患探测技术现状与局限性分析

1.1 单一探测技术的固有限制

传统水库病险探测主要依靠人工巡检、定点仪器监测、地球物理探测和水下检测。人工巡检效率低、主观性强且受天气制约;定点仪器仅反映局部信息;地球物理方法多解性强、易受环境干扰;水下检测因浑水能见度低、单波束数据稀疏,难以发现局部冲刷与结构损伤。秦台水库坝线长、水域面积大,单一巡检方式时空覆盖不均、漏检率高,水下结构检测几乎为安全监测盲区。

1.2 多技术融合的内在需求

无人机、无人船与地面渗漏监测设备在空间覆盖上天然互补:无人机扫描坝体表面,无人船精细探测水下结构,地面设备感知内部渗流场,三者结合是实现全空间无盲区监测的内在要求。但多技术融合并非设备简单叠加,而在于数据与决策层面的深度协同:多源异构数据的时空基准统一、多平台任务的动态协同调度,以及异源信息冲突下的不确定性综合诊断,均是体系构建必须解决的关键问题。

2 多技术融合体系设计与构建

2.1 体系总体架构

针对上述问题,秦台水库构建了“天-空-地-水”多技术融合病险隐患探测体系。该体系在逻辑上分为 4 个层次:

1)感知层。由无人机、无人船、分布式光纤测温系统、高密度电法测量仪等智能装备构成,负责多维度数据的全面采集。

2)传输层。依托 5G 通信和边缘计算节点,实现监测数据的低延迟传输和前端预处理。

3)融合层。以统一时空基准为基础,完成多源数据的配准、清洗和关联分析,构建数据驱动的安全状态评估模型。

4)应用层。集成 BIM 和数字孪生模型、预警系统和决策支持模块,为管理人员提供可视化的工程安全态势感知与辅助决策工具。

该体系采用“集中式决策-分布式执行”双层架构:融合层负责全局任务规划、数据融合和综合诊断,感知层的各平台根据分配的子任务自主执行巡检作业并在发现异常时实时回传数据。这种架构既保证了全局优化的能力,又赋予了前端设备应对突发状况的自主响应空间。

为直观呈现上述架构的运转流程与各模块协同关系,系统配备了专门的融合技术操作平台,如图 1 所示。该平台可将多源感知信息、巡检任务调度与诊断结果进行一体化展示。



图 1 秦台水库多技术融合探测系统操作平台界面

2.2 多智能体协同巡检机制

协同巡检机制的核心在于实现不同平台间任务的有效分工与动态衔接。该研究采用“无人机初筛-无人船详查-地面精测”的三级递进协同流程。

一级筛查由无人机完成。无人机搭载高清可见光相机与红外热像仪,按照预设航线对大坝外观、坝坡及近岸水域进行全覆盖扫描。通过部署轻量化深度学习模型,系统可在边缘端实时识别裂缝、沉降、渗水区等表观异常,识别准确率达到 95%以上。当发现疑似隐患时,自动标记异常区域的空间坐标,触发二级详查指令。

二级详查由无人船执行。无人船搭载多波束测深系统与侧扫声呐,针对一级筛查标定的水域进行高密度水下地形测量和结构物扫描。侧扫声呐分辨率达 1.25 cm,可清晰识别水下护坡破损、冲刷坑等隐患特征。多波束系统波束开角为 150°,最大测深 200 m,能够生成厘米级精度的水下数字高程模型。

三级精测针对经二级详查确认为高风险的点位,由分布式光纤测温系统和高密度电法测量仪进行定点连续监测。分布式光纤通过监测坝体温度场异常反演渗流场特征,灵敏度可达 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$;高密度电法则可清晰识别渗流路径的空间展布,为渗漏连续监测提供可靠依据。

2.3 多技术融合探测的技术创新

该体系的技术创新主要体现在3个方面:一是建立多平台统一时空基准。通过GNSS-RTK和NTP时间同步,实现无人机、无人船与地面传感器数据在厘米级空间精度和毫秒级时间精度上的统一配准。二是设计动态任务分配与路径重构方法。当一级筛查发现新隐患时,系统自动调整二级平台的巡检优先级和路径规划,实现多智能体动态协同。三是构建“新技术全面巡查+传统方法抽样校验”双轨运行机制。智能设备大范围初筛后,由经验丰富的技术人员对检测结果复核验证,将传统实践经验有效融入智能监测体系,既提升判读准确性,又降低新技术应用初期的误报风险。

2.4 多源数据融合与分析方法

该研究建立了分层次的数据融合分析框架:数据层,对不同传感器原始数据进行时空配准和异常值剔除,采用克里金插值和重采样实现网格化处理;特征层,对多源数据提取的特征参数进行关联分析,如将热红外温度异常区与分布式光纤测温曲线空间匹配;决策层,基于贝叶斯网络和D-S证据理论,对不同来源的隐患诊断结论进行不确定性推理与综合判断,而多源证据一致时提升置信度,证据冲突时触发补充检测。该方法有效解决了单一传感器误报率高的问题,将系统整体隐患识别率提升至95%。

3 多技术融合体系应用与效益分析

3.1 多源数据融合分析实例

以2024年10月秦台水库西坝段协同探测为例,完整展示了多技术融合的递进验证过程。

第一步:无人机红外初筛。热红外影像发现西坝0+850桩号坝后坡脚存在长约15 m的条带状低温异常区,但单一图像无法判别渗漏、雨水或植被干扰,系统自动标记坐标并触发详查。

第二步:无人船水下详查。多波束与侧扫声

呐扫测显示,异常区对应迎水面存在深约3.5 m的冲刷坑,六角块护坡明显错台塌陷,入渗通道获物证支撑,但渗漏是否活跃仍不明确。

第三步:光纤与电法精测。分布式光纤测温显示该处温度梯度异常自9月持续存在,与水库水位波动显著正相关($p<0.01$)。高密度电法剖面揭示坝体内部存在贯通上下游的低阻异常带,与冲刷坑、温度异常区空间吻合。多源证据交叉确认该处为渗漏-冲刷耦合型隐患。

若仅靠单一手段,无人机可能误判,无人船“只见坑不知渗流状态”,光纤测温难以精确定位结构破损,均无法完成从“疑似”到“定性”的闭环。融合体系通过递进式多源互馈,定位精度控制在0.3 m以内,渗流量估算误差小于15%,诊断置信度与研判时效均显著提升。

3.2 多技术融合体系的协同效应验证

为量化评估多技术融合产生的协同效应,该研究设计了对比实验:分别采用单一无人机巡检模式、单一无人船探测模式、单一地面渗漏监测模式和融合体系模式,对相同区域的隐患检测结果进行比较,结果见表1。

表1 不同探测模式下的隐患检测结果对比

探测模式	检测隐患 数量/处	误报数 量/处	漏检数 量/处	平均定位 误差/m
单一无人机巡检	18	6	3	0.8
单一无人船探测	12	2	8	0.5
单一地面渗漏监测	15	3	5	0.4
多技术融合体系	23	1	1	0.3

结果表明,多技术融合体系的隐患检出率显著高于各单一模式,误报量和漏检量均大幅降低。尤其值得注意的是,无人机单独巡检存在较高的误报率(主要是将温差变化误判为渗漏),而无人船单独探测则存在大量漏检(仅限于水下探测,无法覆盖坝体表面隐患)。融合体系通过多源证据交叉验证,有效避免了单一传感器的误报并弥补了覆盖盲区。

3.3 运行成效

自2024年9月全面运行以来,该体系累计完成无人机巡查500余架次、无人船探测60余航次,识别并推送隐患90余处,生成巡查报告48份。与传统运行模式相比,各项核心指标均有显著提升,具体见表2。

表 2 传统模式与融合体系核心指标对比

指标	传统模式	融合体系	改善幅度
单次巡检耗时/(h·km ⁻¹)	8.0	2.4	70%
渗漏定位误差/m	>1.0	<0.3	>70%
隐患识别率/%	75	95	27%
空间监测覆盖率/%	60	98	63%
年度运维成本/万元	120	96	20%
应急响应时间/h	72	24	67%
年度数据采集量/GB	10	1 024	100 倍

3.4 综合效益

1)工程安全层面,实现了从“事后处置”向“事前预警”的转变。系统建立了三级预警机制(蓝-黄-红),2024 年共发出蓝色预警 35 次、黄色预警 12 次、红色预警 2 次,所有预警均得到及时有效处置。

2)经济效益层面,年度安全管理成本降低 20%,年节约运维成本约 24 万元。通过隐患早发现、早处置,避免了潜在的安全事故损失,按照水库规模估算,间接经济效益超过 500 万元。

3)管理效能层面,监测数据总量增长 100 倍,数据分析由人工经验判断转变为数据驱动的

(上接第 27 页)效果。因此,水泥土搅拌桩地基处理技术对刁口河及黄河冲积平原其他同类水利工程具有重要的推广价值。

6 结论与展望

6.1 主要结论

一是水泥土搅拌桩在处理黄河冲积平原可液化地基方面具有显著效果,能够有效提高地基承载力、消除液化风险和控制渗流稳定性;二是采用直径 600 mm、桩间距 1.2 m、水泥掺入量 12%的设计参数,复合地基承载力特征值可达 145 kPa 以上,完全满足水闸工程的荷载要求;三是通过严格的施工质量控制,包括桩位偏差控制、垂直度控制、浆液配比控制等,可以确保搅拌桩的施工质量;四是经济分析表明,水泥土搅拌桩方案比传统桩基方案节约造价 25%,缩短工期 30%,具有显著的经济效益;五是处理后的地基在地震作用下的动力响应特性良好,最大加速度放大系数小于规范限值,满足抗震设计要求;六是该技术对刁口河等黄河冲积平原同类水利工程具有良好的适用性,仅需根据当地土层厚度微

智能诊断,管理决策的科学性和时效性大幅提升。基于系统累积的监测数据构建的水库健康状态评估模型,可为年度维修养护和安全鉴定方案制定提供定量化依据。

4 结 语

文章以滨州市秦台水库为对象,针对传统水库病险隐患探测中单一技术覆盖不全、多源数据缺乏融合、诊断依赖人工经验等核心问题,提出了“天-空-地-水”多技术融合病险隐患探测体系,并开展了系统性的设计构建与应用验证。该系统整体隐患识别率由 75%提升至 95%,渗漏定位精度由米级提升至亚米级。巡检效率提升 70%,应急响应时间由 72 h 压缩至 24 h,年度运维成本降低 20%,为水库安全管理从“经验驱动”向“数据驱动”转型提供了可行技术路径。

参考文献

[1] 滨州市城乡水务局.秦台水库运行管理矩阵建设经验做法[N].中国水利报,2025-03-03.

(责任编辑 崔春梅)

调桩长、根据特殊土层调整水泥掺入量,即可实现高效应用。

6.2 研究展望

该研究仍有一些方面需要进一步探索:一是不同水泥掺入量对搅拌桩强度发展的长期影响;二是搅拌桩在复杂应力状态下的本构关系;三是桩-土复合地基在地震作用下的动力相互作用机理;四是环境水腐蚀性对搅拌桩耐久性的长期影响;五是针对刁口河等沿海黄河故道的海水入侵区,水泥土搅拌桩的抗盐蚀性能优化。这些问题的深入研究将进一步完善水泥土搅拌桩在水利工程中的应用理论和技术体系。

参考文献

[1] 刘松玉.水泥土搅拌桩复合地基技术规程理解与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2019.
[2] 龚西城,苏立志,徐凡,等.预制混凝土管桩技术在黄河下游液化地基处理中的应用[J].水利水电技术,2019,50(S2): 70-75.
[3] 东营市水利局.刁口河流域水利工程建设规划(2021—2030)[R].东营:东营市水利局,2021.

(责任编辑 崔亚男)