

数字孪生技术在水库库区智能巡检中的应用

马 芬

新疆维吾尔自治区塔里木河流域下坂地水利枢纽管理中心, 新疆 喀什 844000

[摘要]水库库区覆盖范围广、地质环境复杂、安全要素众多,传统巡检方式在实时性、全面性和精准性方面存在明显短板。数字孪生技术通过构建物理库区的高保真虚拟映射体,能够融合多源异构监测数据,实现库区状态实时感知、异常精准辨识和巡检任务动态优化。本文立足水库库区“大坝—库岸—水域”协同巡检的需求特点,系统梳理了数字孪生技术在库区智能巡检中的应用架构,重点论述了多源数据融合与实时映射、巡检路径与任务动态规划、视觉与点云智能缺陷识别、异常场景仿真推演等关键技术,并设计了日常巡查、专项检查与应急巡查相衔接的闭环业务模式。

[关键词]数字孪生; 水库库区; 智能巡检; 数据融合; 异常诊断

DOI: 10.64635/ja.2026.1361

中图分类号: TV697

文献标识码: A

Application of Digital Twin Technology in Intelligent Inspection of Reservoir Areas

Ma Fen

Management Center of Xiabandi Water Conservancy Project in the Tarim River Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Kashgar, Xinjiang 844000, China

Abstract: Reservoir areas usually cover wide spatial ranges, involve complex geological environments, and contain numerous safety-related factors. Traditional inspection methods have obvious shortcomings in real-time performance, comprehensiveness, and accuracy. By constructing a high-fidelity virtual mapping of the physical reservoir area, digital twin technology can integrate multi-source heterogeneous monitoring data and realize real-time perception of reservoir-area conditions, accurate identification of abnormalities, and dynamic optimization of inspection tasks. Based on the requirements of coordinated inspection involving “dam–reservoir bank–water area” systems, this paper systematically reviews the application architecture of digital twin technology in intelligent inspection of reservoir areas. It focuses on key technologies such as multi-source data fusion and real-time mapping, dynamic planning of inspection routes and tasks, intelligent defect identification based on visual data and point clouds, and simulation-based deduction of abnormal scenarios. In addition, it designs a closed-loop business model that connects routine inspection, special inspection, and emergency inspection.

Keywords: digital twin; reservoir area; intelligent inspection; data fusion; abnormality diagnosis

引言

水库库区涵盖挡水建筑物、泄水建筑物、库岸边坡、近坝库区水域以及各类监测设施所覆盖的范围。受蓄水位波动、库岸再造、地质灾害诱发以及人类活动等多重因素影响,库区内的变形、渗漏、裂缝、滑坡、淤积和漂浮物聚集等风险众多。因此,对库区进行高频次、全覆盖、多要素的巡检,是实现风险早发现、早预警、早处置的基础性工作。随着北斗卫星导航系统、无人机、无人船、三维激光扫描、视觉感知及物联网等技术的日益成熟,库区巡检的感知手段已大为丰富,但如何将这些多源异构数据高度集成到统一的时空环境中,形成面向巡检业务的智能

分析能力,仍是一个亟待解决的问题。

数字孪生是以数字化方式创建物理实体的高仿真虚拟模型,借助数据模拟物理实体在现实环境中的行为,通过虚实交互反馈、数据融合分析、仿真优化决策,实现物理世界与信息世界的精准映射与闭环优化^[1]。将数字孪生引入水库库区智能巡检,本质上是要构建一个与物理库区同步演化、可计算、可推演的数字孪生体,以此为基础重新组织巡检数据采集、状态评估、缺陷识别和应急响应等业务流程,使巡检工作从经验驱动转向数据驱动和模型驱动。

1 库区巡检与数字孪生

水库库区的巡检对象具有鲜明的层次性和空间关联

性,这与一般基础设施明显不同。巡检内容需覆盖三大类:大坝主体及附属建筑物,应检查混凝土裂缝、结构变形、接缝错动、基础渗漏及金属结构锈蚀;库岸及边坡,需关注崩塌、滑坡、泥石流前兆、卸荷裂缝扩展及植被异常变化;库区水域,则要监测水面漂浮物聚集、水体浑浊度异常、岸坡坍塌入水,以及违法采砂、围垦等人类活动。这些对象不仅在空间上紧密相邻,其致灾机理也相互耦合,因此,孤立地检测某一类项目难以全面反映库区的安全状态。另一方面,水库库区具备构建数字孪生的良好基础:库区范围相对固定,基础地理信息与工程勘察资料较为完备;已布设了变形、渗流、水文、气象等在线监测系统,且无人机、无人船等移动感知平台日益普及。数字孪生所需的数据底板、感知体系和模拟引擎,正好可在库区巡检场景中实现系统集成,从而充分释放应用价值,为安全管理提供更精准的技术支撑。

2 面向水库库区智能巡检的数字孪生架构

为满足库区巡检对多对象覆盖、多源数据融合和智能决策的需求,本文提出包含物理层、感知层、数据层、模型层、孪生平台层与应用层在内的分层架构^[2]。

(1) 物理层即真实的库区实体,包括大坝及其廊道、泄洪闸门、两岸边坡、近坝库岸、水域及环境要素。物理层是巡检的对象和数据源头。

(2) 感知层由固定式监测设施和移动式巡检装备共同构成。固定监测包括 GNSS 位移监测站、渗压计、测缝计、雨量计、水位计、高清视频监控和边坡深部测斜仪等;移动装备涵盖多旋翼无人机、倾转旋翼无人机、无人船和水下机器人,搭载可见光相机、热红外成像仪、激光雷达和多波束测深系统。移动装备按巡检任务需要,实现对大坝表面、库岸高陡部位和水域下地形的精细探测^[3]。

(3) 数据层汇集并处理多源异构数据,包括基础地理信息数据、工程 BIM 模型、倾斜摄影实景三维模型、无人机巡检影像、激光点云、传感器时序数据、水文气象数据以及历史检查维护记录等。数据层完成时间同步、空间配准、格式转换和清洗去噪,为数字孪生模型提供标准化数据供给。

(4) 模型层是数字孪生智能巡检的核心。该层包括三类模型:一是数据驱动的现状映射模型,即借助实时传感数据驱动三维场景,使孪生体动态反映库区表面变形、库水位、裂缝开展等状态;二是物理机理模型,如渗流场分析模型、边坡稳定分析模型和大坝结构应力应变模型,用于推演一定工况下的库区安全性态;三是人工智能识别

模型,如基于深度学习的裂缝目标检测、滑坡体位移趋势预测、漂浮物识别等,支持从海量影像和点云中自动提取异常信息。

(5) 孪生平台层提供三维可视化引擎、模型管理、仿真调度和数据接口,能够加载库区全要素数字孪生场景,支持巡检过程的模拟和异常信息的空间标注。

(6) 应用层直接面向水库管理单位的巡检业务,包括巡检任务规划与调度、自动化数据采集与回传、智能缺陷识别与变化检测、巡检报告自动生成以及应急辅助决策等模块。

3 数字孪生在库区智能巡检中的关键技术

3.1 库区多源异构数据融合与实时映射

水库库区数字孪生体需要融合的数据类型庞杂、时空尺度差异悬殊。为此,必须以统一的空间坐标系和时间轴实现多源数据的精准融合。首先,以机载激光雷达和倾斜摄影技术获取的库区高分辨率地形影像为空间基底,将大坝 BIM 模型、地下洞室三维模型与地表实景模型进行空间嵌合,形成室内外一体化、地上地下一体化的精细场景。针对无人机、无人船搭载传感器所获取的巡检数据,通过 GNSS/惯性导航系统与视觉同步定位与建图技术实现即时空间定位,使每一帧影像和每一块点云都能准确映射到孪生体中的对应位置。

在实时映射方面,库水位、变形、渗流等低频时序数据通过物联网消息协议持续推送至孪生平台,驱动三维场景中水位面的平滑升降、测点变形矢量的实时更新。对于高频视频流,则依据预设的空间兴趣区域将动态画面纹理映射至孪生模型表面,使得巡检人员可以在虚拟环境中获得近乎实时的现场画面。这种虚实联动的呈现方式,实际上将固定视频监控和移动巡检影像都整合到统一的可视化空间中,消除了传统巡检中“看图”与“看现场”的割裂。

3.2 基于数字孪生的巡检路径与任务动态规划

传统巡检路径通常由经验确定,难以根据库区实时风险动态调整。数字孪生体集成了历史缺陷数据、实时监测数据和气象水文预报,可对库区各单元进行动态风险评估,将风险较高的坝段、边坡或岸线标注为重点巡检区域。在此基础上,平台利用路径优化算法为无人机、无人船和地面机器人规划巡检航线,使其在有限续航内覆盖最多的高风险点位,并自动绕开禁飞区、强电磁干扰区和恶劣气象区域。

数字孪生还支持对巡检方案的先验推演。在虚拟环境

中模拟无人机沿拟定航线飞行,可预先检查相机视场对重点部位的覆盖情况,调整云台角度和拍摄距离,确保获取的影像满足裂缝识别等后继分析所需的清晰度和重叠度。对于坝体廊道等封闭空间,可通过孪生模型优化挂轨式机器人的巡检路径与停留位置,提高狭小空间内的巡检质量和效率。这种“在数字空间先试、在物理空间后行”的模式,极大降低了无效巡检和返工成本。

3.3 视觉与点云智能缺陷识别

库区巡检的核心产出是对缺陷和异常的辨识。数字孪生平台将历史巡检影像和点云作为本底,利用深度卷积神经网络等算法,对新获取的可见光影像进行裂缝、脱落、露筋、渗水白华等表观病害的目标检测,并在孪生体中自动标记病害的空间位置、几何尺寸和发展趋势。对于热红外影像,系统则通过温度异常区自动圈定坝体渗漏点和边坡地下水出溢点。多波束测深数据与库区水下地形本底模型比对后,可以快速发现冲刷坑、淤积体和岸坡水下坍塌等水下异常。

值得注意的是,基于数字孪生的缺陷识别不只停留在单次发现,更强调变化检测与趋势分析。通过将不同时期巡检获取的点云进行三维差分,可量化坝体表面变形、边坡位移和堆积体体积变化;将不同时期的裂缝提取结果叠加,可自动计算裂缝长度和宽度的增长速率,进而判断其活动性。当变化速率超出孪生模型中预设的预警阈值时,系统主动推送报警信息并建议立即组织现场核查,从而真正实现从“静态巡检”到“动态追踪”的升级。

3.4 库区异常场景仿真与应急巡检支持

水库库区安全不仅需要常态巡检,还要求在遭遇极端降雨、水位陡涨陡落、地震等突发事件时快速掌握灾变态势。数字孪生平台可调用水文水动力模型和边坡稳定分析模型,在虚拟环境中复演或预演异常场景。例如,基于预报降雨量和当前库水位,动态模拟库区汇流过程、库岸地下水位变化及边坡稳定系数演变,识别可能率先失稳的岸坡区段,从而指导巡检力量提前部署到高风险部位,实施加密监测和针对性地表巡查。在大坝遭遇超标准洪水时,孪生系统可模拟泄洪雾化对下游岸坡的冲刷范围,规划无人机应急巡检航线以避开雾化强风区,安全高效地获取关键部位的受损影像。

仿真推演的结果又反哺数字孪生模型,更新风险图谱,使得后续的日常巡检方案能够持续优化。虚实之间的这种互动,使水库库区巡检从被动响应走向主动防护,显著提升对突发灾害的早期预警和快速处置能力。

4 智能巡检业务闭环与应用模式

基于数字孪生的水库库区智能巡检按照业务类型可以分为日常巡检、专项检查与应急巡查三种模式,三种模式共享数字孪生底座,形成统一的业务闭环。

(1) 日常巡检模式以高频次、大范围覆盖为目标。系统根据孪生模型中的风险分区和传感器异常提示,自动生成每周或每半月的差异化巡检任务,调度无人机对坝面、近坝库岸及主要边坡进行航拍巡查,调度无人船对水域漂浮物及水下地形进行扫测。巡检影像和点云实时回传,与孪生本底比对,自动生成包含异常点位、问题类型和处置建议的巡检报告。技术人员在平台中对自动标注的疑似缺陷进行复核确认,形成闭环管理。

(2) 专项检查模式聚焦于特定对象或特定工况,如汛前泄洪设施检查、闸门启闭机运行状态检查、高水位下大坝渗流专项巡查等。专项检查过程中,巡检装备按照预设的重点目标精细采集数据,孪生模型同步提供对应的设计参数、历史缺陷记录和相关仿真结果,辅助现场工程师进行比较判断。所有检查结果均以结构化数据存入数字孪生体的对应构件,支持全生命周期追溯。

(3) 应急巡查模式启动于监测数据超过警戒值或发生有感地震、特大暴雨等事件时。数字孪生平台快速开展灾变情景的模拟推演,划定应急巡查优先区域,并实时调度处于待命状态的无人机、无人船等机动装备,第一时间获取现场影像。此时,系统重点提供前后对比影像、快速变形分析以及初步灾损评估,为应急指挥部判断险情发展趋势、制定抢护方案提供定量依据。应急阶段结束后,全面的巡查数据又作为数字孪生模型修正和风险重评估的输入,推动常态巡检方案进一步优化。

三种模式相互衔接,通过数字孪生平台实现了信息的高度共享和业务的联动,使水库库区巡检从过去以规程规定的固定项目和时间节点为主的被动式检查,转变为基于实时状态评估与风险预测的主动感知和主动防御。

5 结束语

数字孪生技术为水库库区智能巡检提供了全新的技术范式。通过构建库区全要素、多尺度、可计算、可推演的数字孪生体,将固定监测、移动巡检、图像识别、仿真分析等分散的能力高度融合在同一时空底座上,实现了巡检对象的完整映射、巡检过程的动态规划和巡检结果的智能辨识。面向大坝、库岸、水域的差异化需求,多源数据融合与实时映射、动态路径规划、视觉与点云缺陷识别、异常场景仿真等关键技术协同作用,使巡检工作呈现出时空覆盖

全面化、风险识别主动化和业务响应敏捷化等特征。日常巡检、专项检查和应急巡查三种模式形成的闭环,确保数字孪生模型在运行中持续进化,巡检策略在反馈中不断优化。未来,随着边缘计算、5G/低轨卫星通信、在线学习以及具身智能等技术的发展,数字孪生有望进一步向“孪生体自学习、巡检装备自主决策、人机混合协同”的方向演进,为水库库区安全运行提供更加可靠和智能化的技术保障。

[参考文献]

[1]张建云,刘九夫,金君良,陈炼钢,杨堃,鲍振鑫.数字孪生

流域构建关键技术研究与应用[J].水利学报,2022,53(5): 505-516.

[2]包腾飞,吴艳,朱赵辉,等.基于数字孪生的大坝安全智能巡检系统构建[J].水利水电技术,2023, 54(2): 1-12.

[3]曹红,张宇,刘志.无人机载 LiDAR 及倾斜摄影测量技术在水库库区巡查中的应用[J].人民长江,2021,52(S2): 156-159.

作者简介:马芬(1986.11—),女,回族,甘肃永靖人,大学本科学历,中级工程师,研究方向为水库运行管理。