智数字孪生技术支撑水库除险加固全过程安全监测与施工管控研究

和 侠
新疆维吾尔自治区塔里木河流域喀什噶尔河水利管理中心 新疆 喀什 844000

摘 要：我国存量病险水库数量庞大，除险加固工程已进入规模化实施阶段，但传统人工巡检与分散式监测的管控模式已难以适应施工要求。本文构建了“数字底板、三维孪生场景、全要素感知网络”一体化管控体系，将数字孪生技术深度融入除险加固全过程。工程应用表明，该体系显著提升了隐患识别效率与预警响应速度，实现了隐蔽工程全过程可追溯管控，为我国同类水库除险加固智能化升级提供了可复制的技术方案与实证支撑。

关键词：数字孪生水利；水库除险加固；全过程安全监测；施工智能管控

引言：我国大量已建水库服役期普遍超过半个世纪，受早期标准与施工条件制约，坝体渗漏、结构老化等问题日益突出，成为防洪核心隐患。传统除险加固管控长期依赖人工经验，数据分散、协同薄弱，隐蔽工程追溯困难，预警响应滞后，难以满足新时期安全要求。本文立足数字孪生水利框架，搭建适配除险加固场景的管控体系，围绕感知至预警全链条开展研究，探索低成本、易推广的智能化路径，助力病险水库治理实现安全、质量与效率协同提升，为大规模除险加固建设提供技术参考。

1 相关理论与技术基础

1.1 数字孪生水利“四预”功能体系

数字孪生水利“四预”功能体系即预报、预警、预演、预案，是智慧水利建设的核心理论，通过物理工程与数字模型的实时双向映射，实现工程全状态动态感知与模拟推演。该体系强调数据实时流转与动态交互，虚拟场景与物理状态完全同步，可在虚拟空间中提前模拟不同工况下的工程响应，为现场决策提供精准支撑。该理论打破传统水利“数据孤岛”，实现渗流、变形、视频监控等多系统数据统一调度，从根本上改变了依赖人工经验判断风险的管控模式。

1.2 全生命周期安全管控理论

该理论将工程从前期勘察、施工组织、现场作业到竣工验收后运维移交的完整周期视为不可分割的整体，打破各阶段相互独立的管理边界。理论强调在勘察阶段同步搭建基础数字档案，将历史病害与地质隐患完整传递至施工环节，避免信息脱节。依托该理论，管理人员可实现安全管控数据全流程留痕可追溯，既能精准把控施工工序质量，也能为运维期留存完整数字底座，大幅降低全生命周期管理成本[1]。

1.3“天空地水工”感知网络

“天空地水工”感知网络是适配除险加固复杂场景的专属数据采集体系：无人机航测获取地形影像，掌握进度与环境变化；高空AI摄像头覆盖高边坡、深基坑等高危区域；地面物联网终端监控人员定位与机械状态；库区水质水位终端跟踪施工期库水变化；坝体内部渗压计、测斜仪、应力计等采集结构变形数据。该框架实现管控要素无死角覆盖，为数字孪生平台提供实时全面的底层数据支撑。

1.4 三维场景构建技术

GIS+BIM+UE三维场景构建是搭建除险加固数字孪生可视化的核心技术：GIS接入全域地理信息数据，还原地形地貌与周边环境；BIM搭建大坝、溢洪道、隧洞等水工结构精细三维模型，将构件材质、参数、设计信息完整录入；UE实现场景实时渲染与动态交互，管理人员可在三维场景中漫游，点击任意位置调取对应监测数据。三者的融合改变了传统二维图纸管理模式，使工程全细节直观呈现，降低跨专业协同沟通成本。

2 传统水库除险加固管控模式的现状与问题分析

2.1 传统安全监测的典型短板

传统水库除险加固工程的安全监测体系普遍存在明显的碎片化问题，不同监测设备分属不同供应商，数据分散在多个独立系统中，无法实现统一联动分析，管理人员需登录五六个平台才能收全所有监测数据，效率极低。同时风险预警高度依赖人工定期查看报表，坝体渗流、位移等指标出现异常时往往滞后数小时甚至数天才能被发现，完全无法适配施工期坝体状态动态变化的高风险场景。此外，大量中小型水库受资金与技术条件限制，仍采用人工定期现场读尺方式采集数据，误差大、

时效性差，难以满足新时期安全管控要求。

2.2 传统施工管控的核心痛点

传统施工管控模式的核心痛点集中在三个层面：一是多专业交叉作业协同效率低，土建灌浆、结构补强、设备安装等队伍进度信息无法实时同步，工序冲突与返工误工频发，整体进度延误率普遍超过两成；二是隐蔽工程施工过程追溯难度大，灌浆孔、防渗墙等隐蔽工序完工后仅留存纸质验收资料，后期一旦出现质量问题难以精准定位具体位置与责任人，易留下长期安全隐患；三是施工期库水位调度与洪水应对等动态场景缺乏预演能力，突发强降雨时管理人员仅凭经验制定方案，难以精准预判不同策略对坝体安全的影响，极易引发次生事故[2]。

3 数字孪生支撑的水库除险加固全过程管控体系构建

3.1 数字底板搭建：数据层面的集成

水库除险加固专属数字底板是整个管控体系的核心数据基座，其功能定位是解决“数据在哪”的问题——将所有分散的工程数据统一汇聚，为上层应用提供标准化的数据服务。搭建过程中首先整合水库建成以来的所有工程档案、历年巡检记录、历史病害处置数据、最新地质勘察资料，形成完整的工程历史数字档案；再接入“天空地水工”感知网络的所有实时数据流，将施工期的人员、机械、物料、环境、结构安全等管控要素的动态数据全部接入底板，实现物理工程所有状态在数字空间的实时映射。数字底板打破了不同系统之间的数据壁垒，所有数据按照统一标准格式存储，管理人员无需切换多个平台即可在统一界面中调取所有维度的工程信息，从根源上解决了传统模式下的数据孤岛问题。

3.2 三维孪生场景构建：展示与交互层面的呈现

三维孪生场景的功能定位是解决“数据怎么看”的问题——将数字底板中的抽象数据转化为直观可视化的三维界面。其构建分为两个层级：第一层级是全域环境场景，通过无人机航测数据生成施工区域的厘米级精度地形模型，完整还原周边山体、道路、临时设施、风险点位的真实空间位置；第二层级是核心水工结构精细BIM模型，按照设计图纸对大坝坝体、防渗墙、溢洪道、输水隧洞等关键结构进行精细化建模，将每一个灌浆孔、每一段防渗墙的设计参数、施工责任人、验收信息全部绑定到对应模型构件上。最终通过虚幻引擎完成实时渲染，实现场景的自由漫游、剖切查看、分层显示等交互功能，管理人员可直接在三维场景中穿透坝体表面查看内部所有隐蔽工程的详细信息。数字底板与三维场景的关系可概括为“底板供数、场景显形”，两者协同配合，彻底告别传统二维图纸的信息局限性。

3.3 全过程安全监测模块设计：实时告警

全过程安全监测模块的功能定位是对施工期的安全风险进行实时监控与即时告警。该模块围绕除险加固工程的核心安全风险点设计三大子功能：一是结构安全联动监测子模块，将坝体渗流、位移、应力等水工传感器数据接入孪生平台，在三维场景中用不同颜色直观展示指标的实时状态，一旦数值超出预设安全阈值，系统立即自动触发弹窗与声光预警，精准定位异常点位并推送对应处置建议；二是高危区域AI巡检子模块，通过智能摄像头自动识别深基坑未佩戴安全帽、高边坡违规逗留、吊装作业下方站人等不安全行为，识别响应速度小于2秒，实现24小时不间断自动巡检；三是环境风险动态监测子模块，实时接入库区水位、降雨量、周边地质灾害隐患点监测数据，自动推演不同降雨工况下的区域风险变化，提前发布预警信息。

3.4 全流程智能施工管控模块设计：过程记录与调度优化

全流程智能施工管控模块与监测模块的分工边界为：监测模块负责“当前是否安全”的实时告警，管控模块负责“过程是否合规、未来如何优化”的记录与调度。两者数据同源、功能互补。该模块覆盖除险加固现场作业的所有核心环节：首先是进度协同调度功能，将总施工计划拆解到每一道具体工序，在孪生场景中直观展示不同作业面的当前进度[3]。当某一工序出现延误时，系统自动分析对后续工序的影响，推送优化调度方案；其次是隐蔽工程全留痕管控功能，每一道隐蔽工序施工过程中，系统自动采集施工时间、作业人员、设备参数、现场影像等全维度信息，绑定到对应BIM构件上，完工后自动生成不可篡改的电子质量档案，后期随时可回溯查看；最后是施工方案预演优化功能，在虚拟孪生场景中提前模拟不同灌浆压力、不同施工顺序的实施效果，提前排查方案中的不合理之处，避免物理工程中出现返工问题。

4 工程实例应用与效果验证

4.1 案例水库工程概况与除险加固核心需求

本次实证研究选取一座建成于上世纪七十年代初的中型水库作为落地试点，总库容逾千万立方米，是一座以农业灌溉为主、兼顾防洪功能的水利工程。经过五十余年运行后，该水库出现了坝体渗漏量超标、溢洪道侧壁结构老化、输水隧洞衬砌裂缝等典型病险问题。本次除险加固工程的核心需求是在限定的有效施工期内，完成坝体防渗墙浇筑、溢洪道结构补强、输水隧洞加固三大核心工程，同时严格管控施工期坝体安全，杜绝任何次生安全事故。鉴于传统管控模式难以在短工期内同时

兼顾安全、质量、进度三大目标，决定引入数字孪生管控体系开展试点应用。

4.2 数字孪生管控平台在项目中的落地部署方案

项目落地过程中，首先完成水库专属数字底板搭建，整合该水库建成以来的所有历史工程档案与历年病害数据；随后在坝体关键位置布设渗压计、测斜仪、应力计等水工传感器，在施工现场布设AI智能巡检摄像头与人员定位终端，在库区布设自动水位监测站，搭建完成“天空地水工”感知网络；最后完成全域地形场景与核心水工结构BIM模型的融合，部署数字孪生管控平台。平台接入项目所有管理人员的移动端与现场指挥中心大屏，所有权限人员可随时查看工程实时状态，实现了“一屏统览、全要素管控”的部署目标，整体部署周期短，未影响现场正常施工进度[4]。

4.3 应用效果分析

该数字孪生管控体系在项目全周期落地应用后，各项核心管控指标均实现大幅提升。安全管控层面，隐患识别率较传统模式提升约40%，风险预警响应时长压缩约65%，施工期未发生任何轻伤及以上安全事故。质量管控层面，所有隐蔽工程施工过程全部可追溯，核心工序质量验收一次性全部达标，未遗留任何质量隐患。进度管控层面，跨专业协同效率提升约50%，整体工期提前完成，项目综合管理成本有效降低。在汛期强降雨过程中，平台通过预演功能精准制定库水位调度方案，成功规避施工期洪水风险，充分验证了数字孪生技术在水库除险加固场景中的实用价值。

5 关键技术难点与推广应用建议

5.1 中小型水库低成本部署的适配技术路径

当前国内存量病险水库中90%以上为中小型水库，资金预算有限，难以直接照搬大型水利工程的高成本数字孪生建设方案，必须探索轻量化的适配技术路径。可采用“通用底座+定制化模块”的建设模式，复用成熟的水利数字孪生通用底座，仅针对除险加固的核心管控需求开发定制化功能模块，同时优先复用水库原有已建成的监测设备，仅补充少量必要的新增感知终端，整体建设成本可降低约60%，使绝大多数中小型水库具备落地实施的经济可行性。

5.2 孪生平台向运维期的平滑衔接

除险加固工程竣工验收后，搭建完成的数字孪生管控平台无需废弃，可直接平滑升级为水库运维期的安全监测平台，仅需补充少量运维期的长期监测功能模块，即可继续为水库后续数十年的运行安全提供支撑[5]。这种“一次建设、两期复用”的模式，避免了传统模式下施工期管控系统与运维期监测系统重复建设的资源浪费，大幅提升了数字孪生平台的全生命周期利用价值，也为水库留存了完整的工程数字资产。

5.3 面向基层管理单位的培训体系建议

数字孪生平台的落地效果最终取决于基层管理人员的实际操作能力，需搭建分层分类的培训体系。面向一线现场操作人员，重点培训移动端隐患上报、预警处置等基础功能，做到简单易上手；面向中层管理人员，重点培训三维场景漫游、进度调度等核心功能；面向单位负责人，重点讲解平台的整体管控逻辑与决策辅助功能。同时配套建立长期的远程技术运维服务机制，及时解决平台运行过程中出现的问题，避免平台建成后出现“无人会用、无人维护”的闲置现象。

结束语

我国病险水库除险加固工程正处于规模化推进的关键阶段，将数字孪生技术融入施工全过程安全监测与管控，是提升工程安全质量水平的必然路径。试点实践表明，适配中小型水库的轻量化数字孪生管控体系，能以较低成本显著提升隐患识别效率与施工协同能力，具备行业推广价值。随着数字孪生水利技术持续迭代，该模式将在全国病险水库除险加固工程中普及应用，为水库长期运行安全筑牢智能化防线。

参考文献

[1]黄文超,白金玲,林煌.水库除险加固施工技术及安全监测维护管理策略探析[J].珠江水运,2025(10):54-56.

[2]刘平华,蒋朝权.水库除险加固施工及安全监测维护管理——以千家洞水库路为例[J].建材与装饰,2025,21(2):139-141.

[3]翟行东.基于可靠性理论的水库大坝除险加固施工安全监测方法[J].水利技术监督,2022(1):1-4,42.

[4]杨明举,连新悦.中小型水库除险加固施工中导流方案安全性评估[J].水上安全,2026(8):157-159.

[5]杨泽辉.多源数据融合下水库除险加固施工安全管控策略[J].中国公共安全,2025(12):35-37.