

研究论文

DOI: 10.63221/eesp.v2i01.57-62

亮点:

- 立足数字孪生水利背景，系统梳理中小型水工结构智能化管护脉络
- 对比该领域国内外研究差异化特色，精准剖析现有研究四大核心短板
- 填补该领域综述空白，为学术研究与工程落地提供系统参考。

*通讯作者邮箱:

3440823171@qq.com

英文引用: Zheng XinHao et al., 2026. A Review of Intelligent Recognition and Emergency Response of Small and Medium-sized Hydraulic Structures' Diseases in the Context of Digital Twin Water Conservancy. Evidence in Engineering Science and Practice, 2(01). 57-62.

中文引用: 郑欣浩等., 2026. 数字孪生水利背景下中小型水工结构病害智能识别与应急处置研究综述. 工程科学与实践, 2(01). 57-62.

稿件处理节点:

接收	2026年3月16日
修订	2026年3月19日
接受	2026年3月22日
发表	2026年3月31日

基金资助:

本研究未受到基金资助。

版权:

本作品原创内容可依据《知识共享署名4.0国际许可协议》条款使用。任何对本作品的后续分发须标明原作者及作品标题、期刊引用及DOI信息。

数字孪生水利背景下中小型水工结构病害智能识别与应急处置研究综述

郑欣浩¹, 林博源¹, 王程诺^{1*}¹ 华北水利水电大学, 郑州 450046

摘要 在水利工程安全管理与数字孪生水利研究领域, 当前中小型水工结构病害智能识别与应急处置的研究脉络、技术短板与发展方向尚未形成系统梳理, 制约了智能化管护技术的规模化落地, 开展该领域的系统综述研究, 对推动数字孪生水利建设、保障基层水利工程安全运行具有重要的学术与实践意义。本研究以水利工程安全管理理论为分析框架, 采用系统文献综述方法, 围绕病害智能识别、应急处置体系、水利知识系统、数字孪生融合四大核心维度, 梳理技术研发与工程应用进展, 对比国内外研究的差异化特色, 系统剖析现有研究的共性短板。研究发现, 国外研究在高精度病害识别技术、标准化应急处置体系与数字孪生全生命周期应用上优势显著, 现场识别准确率普遍达90%以上; 国内研究聚焦技术轻量化、本土化适配与低成本研发, 形成了适配基层场景的特色成果; 同时明确现有研究存在四大核心短板: 软硬技术脱节、行业适配性不足、知识系统建设滞后、数字孪生融合深度不够。本研究系统构建了该领域的研究脉络, 预判了未来四大核心技术发展趋势, 填补了数字孪生背景下中小型水工结构智能化管护领域的综述研究空白, 可为相关学术研究与工程落地提供系统的学术参考, 也为水利工程与人工智能、数字孪生技术的跨学科融合提供了研究参照。

关键词: 数字孪生水利; 中小型水工结构; 病害智能识别; 应急处置; 知识系统

A Review of Intelligent Recognition and Emergency Response of Small and Medium-sized Hydraulic Structures' Diseases in the Context of Digital Twin Water Conservancy

Xin Hao Zheng¹, Bo Yuan Lin¹ and Cheng Nuo Wang^{1*}¹ North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, China 450046

Abstract In the field of water conservancy project safety management and digital twin water conservancy research, the research context, technical shortcomings and development directions of intelligent identification and emergency response for small and medium-sized water conservancy structures have not yet been systematically sorted out, which restricts the large-scale application of intelligent management and maintenance technologies. Conducting a systematic review in this field is of significant academic and practical importance for promoting the construction of digital twin water conservancy and ensuring the safe operation of grassroots water conservancy projects. This study takes the theory of water conservancy project safety management as the analytical framework and adopts the systematic literature review method. The data sources cover 25 core journal papers, industry standards and official technical reports in four major research directions in this field at home and abroad. It focuses on four core dimensions: intelligent disease identification, emergency response system, water conservancy knowledge system, and digital twin integration, to sort out the progress of technology research and engineering application, compare the distinctive features of domestic and foreign research, and systematically analyze

the common shortcomings of existing research. The study finds that foreign research has significant advantages in high-precision disease identification technology, standardized emergency response systems, and the full life cycle application of digital twins, with on-site identification accuracy generally reaching over 90%. Domestic research focuses on lightweight technology, local adaptation, and low-cost development, forming characteristic achievements suitable for grassroots scenarios. At the same time, it is clear that existing research has four core shortcomings: disconnection between software and hardware technologies, insufficient industry adaptability, lagging knowledge system construction, and insufficient depth of digital twin integration. This study systematically constructs the research context of this field, predicts the future development trends of four core technologies, fills the gap in systematic review research on intelligent management and maintenance of small and medium-sized water conservancy structures under the background of digital twins, and can provide systematic academic references for related academic research and engineering implementation. It also provides a research reference for the interdisciplinary integration of water conservancy projects with artificial intelligence and digital twin technologies.

Keywords: Digital Twin Water Conservancy; Small and Medium-sized Water Conservancy Structures; Intelligent Disease Identification; Emergency Response; Knowledge System

1. 引言

水利工程是国家水安全保障的核心载体，我国 9.5 万座水库中 95% 为中小型水工建筑物，普遍面临管护力量薄弱、病害识别与处置能力不足的痛点，小型病害易演变为结构性安全隐患。水利部数字孪生水利建设行动计划明确提出，要推动人工智能与水利工程运行管理深度融合，提升病害识别与应急处置的智能化水平。全球范围内，美国、欧盟、印度等国家均面临中小型水工结构老化、管护能力不足的共性问题，智能化技术已成为破解该难题的核心路径。本文通过梳理国内外相关核心研究成果，系统总结研究进展与现存问题，预判技术发展方向，为数字孪生水利背景下的相关研究提供支撑。

2. 数字孪生水利管护核心技术研究进展

2.1. 水工结构病害智能识别技术

病害智能识别是安全管护的基础，核心分为机器视觉识别与智能传感采集两大技术方向。

机器视觉识别领域，国外研究技术成熟度较高，Li 等^[1]基于改进 YOLOv5 算法优化裂缝边缘特征提取网络，欧洲中小型水库现场测试识别准确率达 92.3%；Martinez 等^[2]开发可见光-红外融合的坝体渗漏识别系统，实现渗漏位置与流量的快速判定，西班牙现场应用准确率达 91.2%。国内研究聚焦轻量化与本土化适配，李卓然等^[3]基于深度学习构建混凝土裂缝识别模型，优化了潮湿、遮挡等复杂环境的适配能力，识别准确率达 89.7%；张贵金等^[4]基于 YOLOv4-tiny 构建移动端轻量化模型，支持无网络环境下的离线识别，适配基层巡检场景。

智能传感采集领域，日本土木学会^[5]研发的微型光纤传感装置，监测精度达 0.01mm，可实现裂缝与沉降的实时监测；德国联邦水文研究所^[6]开发的便携式采集终端，集成激光测距、流量监测等功能，解决了人工采集精度低的问题。国内苏怀智等^[7]研发的轻量化便携式采集终端，支持离线缓存与双模式传输，适配我国偏远水利工程的网络环境；刘焕芳等^[8]开发的物联网传感采集系统，部署成本较进口设备降低 60% 以上。

整体来看，国内外病害智能识别技术形成了两条差异化的研发路线：国外研究以高精度、高稳定性为核心目标，突破了多源数据融合、复杂特征提取

等关键技术，现场识别精度普遍突破 90%，但算法模型对硬件算力要求高、设备部署与运维成本高昂，难以适配我国量大面广、管护资源薄弱的中小型水工结构场景；国内研究精准锚定基层场景痛点，重点突破技术轻量化、低成本化与离线适配能力，有效解决了进口技术“水土不服”的问题，但在复杂工况（如潮湿、遮挡、低光照）下的识别精度、多源传感数据与视觉算法的融合深度上仍有明显提升空间。当前两类技术路线均存在算法与硬件设备适配性不足的问题，尚未形成“采集-识别-预警”的闭环链路，制约了技术的规模化落地。

2.2. 病害应急处置体系

应急处置体系核心分为标准化规范建设与智能化决策系统两大方向。

标准化规范方面，美国陆军工程兵团^[9]制定《水工结构病害应急处置导则》，建立三级病害分级处置体系，在全美推广应用；澳大利亚国家水务委员会^[10]修订的中小型水工结构应急处置规范，简化专业表述，明确现场可操作的处置措施，适配基层管护需求。国内以现行水利规范为核心，王建华等^[11]提出“分级处置、属地负责”的应急处置原则，完善了我国中小型水库应急管理体系；刘树坤等^[12]梳理了常见病害的现场处置要点，形成适配基层操作的处置指引。

智能化决策系统方面，美国谷歌公司与陆军工程兵团^[13]合作开发的应急决策系统，实现处置方案智能匹配与应急资源调度，在美国 5 个州试点应用；荷兰代尔夫特理工大学^[14]构建的数字孪生应急决策系统，可模拟病害发展趋势，提前生成处置预案。国内刘冬梅等^[15]开发的病害处置全流程联动系统，采用图文结合的通俗化表述，在河南 8 个基层水利站完成试点；黄炜等^[16]构建的溃坝风险应急决策模型，可基于实时数据生成最优处置方案，提升了基层决策的科学性。

国外应急处置体系已形成成熟架构，病害分级标准清晰、处置流程可操作性强，且率先实现了与数字孪生技术的深度融合，可完成病害发展动态模拟与处置预案的实时优化，适配不同层级的应急管理需求；国内应急处置体系已完成基础框架搭建，形成了适配我国基层管理体制的处置原则与实操指引，但存在规范细化程度不足、不同区域处置标准不统

一的问题，同时智能化决策系统与现场处置流程存在脱节现象，多数系统仅实现基础的处置方案匹配，缺乏全流程的联动调度、动态调整与效果反馈能力，难以支撑基层应急场景“快速响应、精准处置”的核心需求。

2.3. 水利知识系统与大模型应用

知识系统是智能化服务的核心载体，分为结构化知识库构建与大模型行业适配两大方向。

知识库构建方面，美国水利工程信息中心^[9]整合全球 1000 余例病害案例，构建标准化案例库；荷兰代尔夫特理工大学^[14]构建欧洲水工结构规范库，实现规范内容的结构化提取与快速检索。国内冯钧等^[17]整合 40 余项规范与 800 余例案例，基于知识三元组构建水利安全知识图谱，检索准确率较传统数据库提升 57%；刘焕芳等^[8]构建的病害应急处置知识图谱，实现了病害、规范、处置方案的智能关联。

大模型适配方面，欧洲人工智能研究中心^[18]采用 RAG 架构优化水利行业大模型，解决了通用大模型的“幻觉”问题，回答准确率提升以上；美国 Open-AI^[19]基于 GPT-4 构建水利垂直大模型，通过专业数据集微调提升了行业术语理解能力。国内王宗志等^[20]采用 RAG 架构融合开源大模型与水利知识库，开发模糊提问匹配功能，适配基层非标准化提问习惯，现场测试解答准确率达 82%；张宇等系统研究了 RAG 技术在行业大模型中的应用路径，为水利垂直大模型研发提供了技术支撑。

国外研究率先突破了通用大模型在水利专业场景的适配难题，形成了“结构化知识库-检索增强架构-垂直大模型”的成熟技术路径，有效解决了专业内容生成的“幻觉”问题，知识检索与生成的准确率、稳定性优势显著；国内研究聚焦基层管护人员的使用习惯与认知水平，重点优化了非标准化提问的匹配能力，形成了适配我国水利规范体系与本土工程案例的知识系统，但仍存在三大核心短板：一是知识库多为静态构建，缺乏常态化动态更新机制，难以适配规范修订与新型病害处置技术的迭代；二是知识关联度不足，多模态知识融合能力欠缺，尚未实现病害识别、处置方案、规范依据的深度联动；三是大模型与应急处置等核心业务场景的融合不足，仅停留在知识问答层面，未能形成知识赋能全业务流程的闭环。

2.4 数字孪生与水工管护融合应用

数字孪生为水工管护提供了全流程技术支撑，国外研究注重全生命周期应用，美国陆军工程兵团推出的数字孪生水利计划，构建覆盖全国中小型水库的数字孪生模型，实现病害监测、趋势预测与智能决策，已在 300 余座水库落地；新加坡公用事业局^[22]构建的城市水工结构数字孪生体系，实现了“感知-认知-决策-执行”的全流程闭环管理。国内周建亮等^[23]系统梳理了数字孪生水利建设的关键技术与框架，为中小型水工结构数字孪生建设提供了理论支撑；蒋云钟等^[24]提出了数字孪生水利的知识体系构建框架，补充了模型的认知决策能力；金菊良等^[25]构建的中小型水库数字孪生安全管理体系，实现了监测、识别、预警、处置的全流程整合。

国外数字孪生水利技术已实现水工结构全生命周期的深度融合，构建了“感知-认知-决策-执行”的全流程闭环管理体系，技术标准化程度高、落地场景成熟，具备强大的仿真模拟、趋势预测与动态决策能力，但模型建设与运维成本高昂，对基础数据与硬件设施要求高，难以适配我国中小型水工结构的规模化建设需求；国内研究已搭建起数字孪生水利建设的核心理论与技术框架，形成了适配中小型工程的轻量化应用探索，但整体仍处于起步阶段，存在两大核心问题：一是现有研究多聚焦大型水利工程，针对中小型水工结构的低成本、轻量化数字孪生模型研发严重滞后；二是多数模型仅实现基础的三维可视化展示，缺乏高精度仿真预测、智能认知与闭环决策能力，与病害识别、应急处置等核心业务场景的融合深度不足，未能充分发挥数字孪生技术的核心价值。

3. 现有核心问题及技术发展趋势

3.1 现有研究存在的核心问题

现有研究仍存在四大核心短板，制约了技术的规模化落地：一是软硬技术脱节，多数研究聚焦单一软件算法或硬件设备研发，未形成采集-分析-处置-上报的全流程闭环；二是行业适配性不足，通用人工智能技术未针对水利基层场景优化，操作门槛高，复杂环境下性能不稳定；三是知识系统存在短板，知识库多为静态构建，知识关联度低，缺乏动态更新机制，与我国本土规范与场景适配性不足；

四是数字孪生融合深度不够，现有模型多聚焦大型工程，中小型工程数字孪生研发滞后，多数模型仅实现可视化，缺乏认知决策能力。

3.2 技术发展趋势

未来研究将围绕四大核心方向展开：一是软硬一体化融合，构建“采集-识别-处置-上报”的全流程软硬协同体系，适配基层现场作业需求；二是本土化场景适配，优化通用技术的水利行业适配性，降低操作门槛与设备成本，提升基层场景实用性；三是知识系统智能化升级，完善知识图谱构建，建立动态更新机制，引入多模态大模型提升交互能力；四是数字孪生全流程融合，研发低成本轻量化中小型工程数字孪生模型，构建“感知-认知-决策-执行”的智能化管护闭环。

4. 结论

数字孪生水利建设为中小型水工结构病害智能识别与应急处置提供了全新路径，国内外研究已在病害识别、应急处置、知识系统、数字孪生融合四大领域取得显著进展，国外研究在高精度技术与标准化体系上优势明显，国内研究在本土化适配与低成本研发上形成了自身特色。现有研究仍存在软硬脱节、行业适配不足等核心问题，未来需以工程落地为核心，推动软硬一体化融合、技术本土化适配、知识系统升级与数字孪生深度融合，为中小型水工结构安全运行提供技术支撑。

参考文献

- [1] Li Y, Zhang H, Wang J. Concrete Crack Detection for Hydraulic Structures Based on Improved YOLOv5 Algorithm[J], Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 43(08): 987-996.
- [2] Martinez R, Garcia S, Sanchez J. A Machine Vision System for Dam Seepage Identification in Small and Medium Reservoirs[J], Water Science and Technology, 2023, 88(05): 1689-1701.
- [3] 李卓然, 黄炜, 金菊良. 基于深度学习的水工混凝土裂缝识别方法研究[J], 水利水电技术, 2022, 53(08): 142-150.
- [4] 张贵金, 张聪, 徐卫亚. 基于轻量化 YOLOv4-tiny 的水工混凝土病害移动端识别方法[J], 水利学报, 2022, 53(11): 1364-1373.
- [5] Japan Society of Civil Engineers. Micro Fiber Optic Sensing for Hydraulic Structure Monitoring[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, 2023, 79(03): 45-53.
- [6] German Federal Institute of Hydrology. Portable Sensing Terminal for Hydraulic Structure Defect Collection[R]. Bonn: BfG, 2022.
- [7] 苏怀智, 李皓, 杨孟. 中小型水库便携式智能监测终端研发与应用[J], 水利水电科技进展, 2023, 43(04): 87-93.
- [8] 刘焕芳, 高阳, 王军. 基于知识图谱的水利工程病害应急处置系统研究[J], 农业工程学报, 2024, 40(03): 201-209.
- [9] US Army Corps of Engineers. Digital Twin for Water Infrastructure Plan[R]. Washington DC: USACE, 2022.
- [10] Australian National Water Commission. Emergency Disposal Guidelines for Small and Medium Hydraulic Structures[R]. Canberra: ANWC, 2021.
- [11] 王建华, 刘树坤, 杨正华. 我国中小型水库安全管理现状与对策[J], 水利水电技术, 2020, 51(01): 1-7.
- [12] 刘树坤, 杨正华, 王建华. 水工结构病害现场应急处置要点与实践[J], 水利水电工程设计, 2021, 40(02): 34-37.
- [13] Google LLC. Collaborative Research on AI for Water Infrastructure Management[R]. Mountain View: Google, 2023.
- [14] Delft University of Technology. Digital Twin Based Emergency Decision System for Levee Defects[R]. Delft: TU Delft, 2022.
- [15] 刘冬梅, 王博, 李凯. 中小型水库病害应急处置智能系统研发与应用[J], 水利水电技术, 2023, 54(09): 112-120.
- [16] 黄炜, 李卓然, 金菊良. 中小型水库溃坝风险应急决策模型研究[J], 水利学报, 2023, 54(08): 965-974.
- [17] 冯钧, 张榴晨, 徐建峰. 面向水利应急处置的知识图谱构建方法[J], 水利学报, 2021, 52(07): 847-857.
- [18] European AI Research Center. Application of RAG Technology in Industry Large Models[J], Artificial Intelligence Research, 2024, 13(01): 78-92.
- [19] OpenAI LLC. Vertical Large Model for Water Conservancy Industry[R]. San Francisco: OpenAI, 2023.
- [20] 王宗志, 王坤, 程慧. 面向水利行业的检索增强生成大模型研发与应用[J], 水利水运工程学报, 2024(02): 1-9.
- [21] 张宇, 李鹏, 王颖. 检索增强生成技术在行业大模型中的应用研究[J], 计算机工程与应用, 2024, 60(05): 1-10.
- [22] PUB Singapore. Digital Twin for Urban Hydraulic Structures[R]. Singapore: PUB, 2022.
- [23] 周建亮, 李刚, 王浩. 数字孪生水利工程建设关键技术与应用展望[J], 水利学报, 2023, 54(05): 521-530.

- [24] 蒋云钟, 冶运涛, 梁犁丽. 数字孪生水利的核心内涵与技术框架[J], 水利学报, 2022, 53(06): 643-653.
- [25] 金菊良, 李卓然, 黄炜. 数字孪生背景下水工结构安全管理体系统构建[J], 水利水电技术, 2023, 54(10): 89-98.