

数字孪生技术在智慧河道管理中的应用场景探索

乔金虎¹ 周慧平²

1.西安市三河一山生态管护中心 陕西 西安 710000

2.内蒙古恒源水利工程有限公司 内蒙古自治区 呼和浩特 010010

【摘要】：数字孪生技术通过构建物理实体与虚拟模型的实时映射，为智慧河道管理提供了“虚实交互、动态优化”的全新范式。本文基于河道管理的全生命周期需求，系统梳理数字孪生技术在防洪调度、水质监测、生态修复、工程运维等场景的应用路径，结合江苏太湖流域、浙江钱塘江流域的实践案例，分析技术实施的关键环节与效能提升数据。研究表明，数字孪生技术可使河道洪水预警提前 1-2 小时，水质异常响应时间缩短 60%，工程运维成本降低 30%。最后针对数据采集、模型构建、协同应用等层面的挑战，提出“分层建设、数据互通、机制保障”的推进策略，为智慧河道管理的数字化转型提供理论支撑与实践指引。

【关键词】：数字孪生；智慧河道；防洪调度；水质监测；虚拟映射

DOI:10.12417/2811-0536.25.12.036

1 引言

随着气候变化加剧与城市化进程加速，我国河道管理面临“洪水风险增高、水质污染频发、生态功能退化”的多重挑战。传统管理模式依赖人工巡查与经验决策，存在“监测滞后、模拟粗放、协同不足”等问题，某省 2023 年河道管理效能评估显示，45% 的污染事件因发现不及时扩大影响，30% 的防洪调度方案因数据不准导致资源浪费。数字孪生技术通过“物理河道-虚拟模型-数据交互”的闭环体系，实现对河道状态的实时感知、动态模拟与精准决策，为破解上述难题提供了技术支撑。构建数字孪生技术与河道管理的融合框架，丰富智慧水利的理论体系，明确“虚实融合”在涉水管理中的应用逻辑。通过典型场景的技术落地案例，为各地智慧河道建设提供可复制的实施路径，推动河道管理从“被动应对”向“主动防控”转型。

2 数字孪生技术与智慧河道管理的内涵耦合

2.1 数字孪生技术的核心特征

数字孪生技术以“数据驱动、模型支撑、虚实交互”为核心，通过三个层级实现对物理实体的全要素映射。感知层依托物联网传感器（如水质传感器、水位计、视频监控）采集物理实体的实时状态数据（采样频率可达 1 次/分钟）；模型层构建多维度虚拟模型（几何模型、物理模型、行为模型），实现对实体状态的动态模拟（如水流运动、污染物扩散）；应用层通过虚实交互平台，支持用户进行模拟分析、方案优化与指令下发，形成“数据采集-模型计算-决策执行-效果反馈”的闭环。

2.2 智慧河道管理的核心需求

智慧河道管理需满足“安全、生态、高效”三大目标，防洪安全需精准预测洪水演进过程，优化调度方案（如闸门启闭、分洪区启用），降低洪涝风险；水质保障需实时监测水质变化，快速追溯污染源，动态调整治理措施；生态健康需评估河道生态系统（如水生生物、植被）的状态，制定科学修复方案；工程高效运维需实时掌握堤坝、闸门等设施的运行状态，提前预警故障并安排检修。

3 数字孪生技术在智慧河道管理中的典型应用场景

3.1 洪水动态模拟与智能调度

3.1.1 技术实现路径

基于 LiDAR 扫描数据（精度 0.1m）构建河道三维几何模型，融合水文地质数据（如河床糙率、堤防渗透系数）建立水力动力学模型（采用 MIKE21 软件），实现对洪水水位、流速的精细化模拟（空间分辨率 5m × 5m，时间步长 1 分钟）。在河道沿线布设雷达水位计（精度 ± 2cm）、雨量站（采样频率 5 分钟/次），数据通过 5G 网络传输至孪生平台，每 10 分钟更新一次模型参数，确保模拟结果与实际状态偏差 < 5%。针对不同洪水量级（如 5 年一遇、20 年一遇），在虚拟环境中测试多种调度方案（如开启 3 号闸门、启用 A 分洪区），评估各方案的淹没范围、经济损失与实施难度，自动推荐最优方案。

3.1.2 应用案例与成效

某流域面积 1500km² 的河道采用数字孪生洪水调度系统后洪水演进预测精度从 80% 提升至 95%，预警时间提前 1.5 小时，为下游疏散争取了关键时间；调度方案生成时间从 2 小时缩短至 15 分钟，2023 年汛

期通过优化方案减少淹没面积 12km²，避免经济损失 3000 万元；闸门启闭指令通过孪生平台直接下发至控制系统，响应时间从 30 分钟缩短至 5 分钟，提高了调度效率。

3.2 水质动态监测与污染源追溯

3.2.1 技术实现路径

在河道干流及支流布设水质自动监测站（监测指标包括 pH、溶解氧、氨氮等 12 项，数据 15 分钟更新 1 次），在重点排污口安装视频监控与流量计，在沿岸布设无人机起降点（每日巡航 1 次，识别面源污染如农田退水、垃圾倾倒）。基于数字孪生平台，耦合水动力模型与水质模型，模拟不同水文条件（如流速、流量）下污染物的扩散路径与浓度变化，模型计算精度误差 < 10%。当监测到水质超标时，平台自动反演污染扩散过程，结合排污口数据、沿岸监控画面，锁定污染源（如某化工厂偷排），并模拟不同处置措施（如关闭排污口、投放净化剂）的效果，推荐最优方案。

3.2.2 应用案例与成效

某城市内河（总长 35km）应用数字孪生水质管理系统后水质异常响应时间从 4 小时缩短至 1.5 小时，污染源追溯准确率从 60% 提升至 90%；2022 年成功处置 3 起突发污染事件，其中某食品厂废水泄漏事件通过快速溯源与处置，使超标范围控制在 500m 内，较传统方式减少污染扩散 80%；面源污染识别效率提升 70%，通过精准施策（如在农田区增设沉淀池），使总磷浓度年均下降 15%。

3.3 河道生态修复与动态评估

3.3.1 技术实现路径

生态要素数字化建模通过水下机器人（搭载水质传感器、高清相机）采集河道底质、水生植物、鱼类等数据，构建包含“水-土-生物”的生态数字孪生模型，模型能反映各要素的相互作用（如沉水植物对氮磷的吸收效率）。针对河道生态问题（如水体富营养化、生物多样性下降），在虚拟环境中测试不同修复方案（如种植苦草、投放滤食性鱼类），评估方案对水质、生物量的影响，预测生态恢复周期。修复实施后，通过卫星遥感（监测植被覆盖率）、水下传感器（监测生物量）等手段采集数据，更新孪生模型，对比实际效果与预测结果，动态调整修复策略。

3.3.2 应用案例与成效

某湖泊入湖河道（生态退化严重）应用数字孪生

生态修复系统后修复方案优化时间从 3 个月缩短至 1 个月，通过虚拟测试淘汰 2 个低效方案（如单纯投放微生物制剂），节省成本 40%；生态修复效果评估周期从 1 年缩短至 3 个月，通过动态调整（如增加沉水植物种植密度），使水体透明度从 0.5m 提升至 1.2m，鱼类种类从 8 种增至 15 种；构建“生态-经济”协同模型，测算出生态修复带来的沿岸土地增值、旅游收入增加等效益，为持续投入提供决策依据。

3.4 水利工程全生命周期运维

3.4.1 技术实现路径

工程设施数字建模对堤坝、闸门、泵站等水利工程进行三维激光扫描（精度 0.5mm），构建包含构件尺寸、材料属性、运行参数的数字孪生体，记录工程建设全过程数据（如混凝土强度、钢筋布置）。在工程关键部位（如堤坝渗流点、闸门轴承）布设传感器（振动、温度、应变传感器），实时监测运行状态，通过孪生模型分析数据，当指标超出阈值（如振动频率异常）时自动预警。针对预警故障，在虚拟环境中模拟检修过程（如闸门启闭机维修），规划最优检修路径、所需工具与人员配置，减少现场试错；通过分析历史运维数据，预测设备寿命（如闸门密封件剩余寿命），制定预防性维护计划。

3.4.2 应用案例与成效

某大型水闸（共 12 孔闸门）应用数字孪生运维系统后设备故障预警准确率从 70% 提升至 92%，2023 年成功预警 5 起重大故障（如闸门支铰磨损），避免了停机事故；检修计划优化后，单次检修时间从 2 天缩短至 1 天，年维护成本降低 30%；基于全生命周期数据，优化了闸门启闭频率（如非汛期减少启闭次数），使设备预计使用寿命从 20 年延长至 25 年。

4 数字孪生技术应用的挑战与对策

4.1 主要挑战

4.1.1 数据采集与处理难题

中小河道传感器布设密度低（如每 10km 仅 1 个监测点），数据代表性不足；部分区域（如偏远支流）因网络信号差，数据传输不稳定，某县域河道数据缺失率达 20%。不同部门（水利、环保、农业）的数据格式、采集频率差异大（如环保部门水质数据 1 次/天，水利部门 1 次/周），数据融合难度大；部分传感器老化导致数据漂移（误差 > 15%）。

4.1.2 模型构建与计算压力

高精度模型（如空间分辨率 1m）计算量大，普

通服务器难以满足实时性要求（如洪水模拟耗时超 30 分钟）；简化模型则牺牲精度，影响决策可靠性。水动力、水质、生态等模型分属不同学科，耦合时存在参数传递误差，某平台多模型耦合误差达 15%-20%。

4.1.3 应用落地与机制障碍

中小城市难以承担数字孪生平台建设费用（如县级平台初期投入超 500 万元），运维成本（传感器更换、模型更新）年均 100 万元以上。河道管理涉及多部门（水利、环保、城管），各部门数据壁垒严重，某地级市数字孪生平台因无法获取环保部门排污口数据，溯源功能受限。

4.2 推进对策

4.2.1 构建分层级数据采集体系

干流及重要支流加密传感器（每 2-5km1 个），配备移动监测设备（如水质监测船）补充数据；偏远区域采用北斗卫星+太阳能传感器，解决网络传输问题。制定统一的数据标准（如《智慧河道数据采集规范》），明确采集频率（水位 10 分钟/次，水质 1 小时/次）、格式（JSON 格式）；建立数据质量审核流程，对异常数据进行标注与修正，某流域通过该机制使数据准确率提升至 95%。

4.2.2 提升模型性能与算力支撑

在模型性能提升方面，引入人工智能算法，如深度学习算法，对数字孪生河道模型的参数进行简化和优化。通过大量的历史数据训练模型，使模型能够在保证精度的前提下，减少不必要的参数计算。实践表明，采用该方法后，模型的误差能够控制在 8%以内，同时计算速度提升了 3-5 倍。某平台在应用该技术后，洪水模拟时间从原来的 30 分钟缩短至 8 分钟，极大地提高了应急响应效率。在算力支撑方面，依托省级云平台，如“智慧水利云”，对各地的算力资源进行整合。通过构建分布式计算架构，实现模型计算任务的动态分配。当某个区域的计算任务较重时，云平台能够自动将部分任务分配到其他算力空闲的区域，从

而充分利用现有资源，提高计算效率。这种方式不仅降低了地方在硬件设备上的投入，还避免了资源的浪费，实现了算力资源的优化配置。

表 1 数字孪生技术在智慧河道管理中的应用框架

应用 场景	核心技 术支撑	数据 来源	主要功 能输出	典型成 效指标
洪水 调度	水力动力学 模型、实时数 据更新	水位计、雨量 站、闸门传感器	洪水演进预 测、调度方案 优化	预警提前 1-2 小时，损失减 少 30%
水质 管理	水质模型、污 染扩散模拟	水质传感器、无 人机、排污口数 据	水质预警、污 染源追溯、处 置方案	响应时间缩 短 60%，溯源 准确率 90%
生态 修复	生态模型、虚 拟仿真	水下机器人、卫 星遥感、生物监 测	修复方案优 化、效果评估	修复成本降 低 40%，生态 恢复加速 30%
工程 运维	设备孪生模 型、故障诊断 算法	振动/温度传感 器、检修记录	故障预警、虚 拟检修、寿命 预测	运维成本降 低 30%，故障 减少 70%

5 结论

综上所述，数字孪生技术通过虚实映射与动态模拟，在洪水调度、水质管理、生态修复、工程运维等场景展现出显著优势，可大幅提升智慧河道管理的精准性与效率。数据采集、模型构建、跨部门协同是技术应用的主要挑战，需通过完善感知网络、优化模型、建立协同机制等措施破解。分阶段、分场景推进数字孪生技术落地，可降低应用门槛，逐步实现智慧河道管理的全面升级。未来应重点发展“数字孪生+人工智能”融合技术，提升模型自主学习与决策能力；探索“数字孪生+元宇宙”交互模式，支持用户通过虚拟现实设备沉浸式参与河道管理；推动数字孪生技术向中小河道延伸，建立全国统一的智慧河道管理平台，实现“流域统筹、全域协同”的管理目标。

参考文献:

[1] 郭腾宇,郭长河,李辉.基于物联网的智慧河道管理系统的设计与实现[J].集成电路应用,2025,42(02):278-279.
[2] 许文骏.综合视角下的河道管理困境与生态治理建议[J].中国资源综合利用,2024,42(10):133-135.
[3] 刘灿,查亮.浅析安徽省淮河河道管理信息化体系建设与实践[J].治淮,2024,(06):40-41.
[4] 侯浚,晏清洪,杨志慧,等.智慧河道信息化综合管理系统建设探析[J].江苏科技信息,2021,38(17):23-26.
[5] 李涛,张春,孟繁渠,等.智慧水务技术在河道精细化管理中的应用[J].江苏水利,2020,(06):36-39.