

Construction of intelligent water system: digital monitoring, intelligent decision-making and engineering application

Laiyou Xu

Yunnan Hengcheng Construction Supervision Consulting Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

Through the deep integration of digital monitoring, intelligent decision-making, and engineering applications, smart water management is revolutionizing the operational models and technological paradigms of hydropower projects. This paper systematically constructs a three-tier architecture of "sensing-decision-application" for smart water systems, analyzes multidimensional technical implementation pathways for digital monitoring, and elaborates on model development and algorithmic innovations in intelligent decision-making systems. By examining case studies such as the Yellow River Basin flood control project and Shandong's digital twin water network, the research demonstrates the practical effectiveness of smart water technologies in engineering applications. The study reveals that an integrated "sky-ground-water-engineering" monitoring system, powered by digital twin and AI technologies, significantly enhances the safety assurance capabilities and comprehensive benefits of water conservancy projects, providing critical technological support for national water security strategies.

Keywords

intelligent water conservancy; digital monitoring; intelligent decision making; digital twin

智慧水利体系构建：数字化监测、智能决策与工程应用

徐来有

云南恒诚建设监理咨询有限公司，中国·云南昆明 650000

摘要

智慧水利通过数字化监测、智能决策与工程应用的深度融合，正在重塑水利水电工程的管理模式与技术范式。本文系统构建了智慧水利体系的“感知-决策-应用”三层架构，解析了数字化监测的多维度技术实现路径，阐述了智能决策系统的模型构建与算法创新，结合黄河下游河防工程、山东数字孪生水网等典型案例，探讨了智慧水利技术在工程实践中的应用成效。研究表明，以“天空地水工”一体化监测为基础、以数字孪生与AI技术为核心的智慧水利体系，能够显著提升水利工程的安全保障能力与综合效益，为国家水安全战略提供关键技术支撑。

关键词

智慧水利；数字化监测；智能决策；数字孪生

1 引言

新一代信息技术与传统水利工程的深度融合，推动智慧水利成为破解水资源短缺、水旱灾害频发、生态环境恶化等复杂水问题的重要途径。水利部《关于推进水库、水闸、蓄滞洪区运行管理数字孪生的指导意见》明确提出，到2027年需初步建成运行管理智能应用体系，实现水利工程关键数据实时采集、重要场景仿真模拟；到2030年全面实现水利工程数字化、网络化、智能化运行管理，形成全域感知、智能决策、协同控制的智慧水利新格局。这一政策背景为智慧水利体系的构建提供了清晰的发展路径和目标导向。

1.1 智慧水利的核心特征

与传统水利相比，智慧水利具有三个显著特征：

1. 监测感知的立体化，通过卫星遥感、北斗定位、无人机巡检、水下探测等多元技术构建多维度、全要素监测网络，实现从宏观到微观的全域覆盖；
2. 决策支持的智能化，利用人工智能、数字孪生、大数据分析等技术，实现水利调度的精准化、前瞻化和动态化，提升决策的科学性和时效性；
3. 工程应用的协同化，通过数据共享平台与业务融合机制，打破部门壁垒和信息孤岛，提升水利系统的整体运行效能和应急响应能力。

1.2 研究现状与基础

当前，智慧水利研究已从单一技术应用转向体系化建设阶段。河海大学冯仲恺教授团队在水库调度领域提出的梯级水库群调度响应面逐步优化方法，通过引入自适应模拟退

【作者简介】徐来有（1994-），男，中国云南曲靖人，初级技师，从事水利水电工程研究。

火机制,将求解效率提升40%以上,为解决复杂水利系统的"维数灾"问题提供了新思路;黄河水利委员会构建的"天空地水工"一体化监测感知网,在100多道坝体及南水北调中线工程中实现了水情、工情数据的实时采集与传输,数据准确率达98.7%,验证了数字化监测的工程价值。这些研究与实践为智慧水利体系的理论构建与技术集成奠定了重要基础。

2 智慧水利体系的总体架构

智慧水利体系融合感知层、决策层与应用层,通过数据流贯通与业务流协同实现水利工程智能化转型,遵循"需求牵引、应用至上"原则,以提升工程安全、水资源效率及综合效益为核心目标。

2.1 感知层:全要素监测的"神经末梢"

感知层构建"天空地水工"一体化监测网络,承担全要素全时空监测功能:

1. 天基监测:依托高分辨率卫星实现流域宏观监测,获取汛情、旱情等信息,为流域管理提供数据支撑;
2. 空基监测:无人机搭载激光雷达等设备完成中小尺度高精度监测,提供精细地形数据支撑河势分析;
3. 地面监测:由雨量站、水位站等组成,实现水位、渗压等数据分钟级采集传输;
4. 水下监测:无人船配备测深设备,解决高含沙水体地形测量难题;
5. 工程本体监测:通过"智能石头"、渗压计等设备监测坝体结构,捕捉瞬时变形。

该网络全面捕捉水情、工情等关键信息,为智能决策奠定数据基础。

2.2 决策层:智能分析的"大脑中枢"

决策层以数字孪生平台为核心,实现数据融合与智能分析:

1. 数据底板:整合监测数据、工程特性数据及地理空间数据,形成动态更新数据库;
2. 模型库:集成水文水动力、工程安全评估等专业模型,支持多场景仿真;
3. "四预"功能:通过预报(洪水预见期72小时)、预警(响应<10分钟)、预演(多方案快速对比)、预案(智能生成处置方案)支撑精准决策。

河海大学优化算法可快速生成调度方案,提升复杂系统决策效率。

2.3 应用层:业务协同的"实践载体"

应用层推动技术向工程转化,构建专业化应用模块。以河南黄河"1+6"数字化矩阵为例:

1. "豫黄大脑"作为中枢,实现数据汇聚、模型调用与跨系统协同;
2. 专业模块覆盖防洪、节水、生态监管等领域,提升风险预测与资源配置能力;

3. 通过统一接口标准促进互联互通,数据共享率达85%,协同效率提高60%。

3 数字化监测技术体系与创新实践

数字化监测是智慧水利体系的基础支撑,核心是实现水利工程全要素、全时空精准感知。随着传感器、通信与遥感技术的发展,已从传统点式监测升级为"天空地水工"一体化立体模式,形成多技术融合、多尺度覆盖、多维度协同的技术体系。

3.1 监测技术的多维度集成

空间维度构建"天-空-地-水-工"五层监测网络:

1. 天基监测:依托高分系列、哨兵-1号卫星,光学卫星分辨率0.5-30米,雷达卫星全天候工作,通过NDVI、NDWI指数识别旱情与洪水,周期1-30天,受天气和数据处理限制。
2. 空基监测:固定翼无人机覆盖50-500平方公里,多旋翼适用于1-50平方公里精细观测,搭载高分辨率相机、激光雷达等,可检测0.5毫米堤防裂缝,单架次成本约2000元。
3. 地面监测:翻斗式雨量站(精度 $\pm 3\%$)、雷达水位站(精度 ± 0.01 米)实现自动化采集;400万像素摄像头识别漂浮物、违章建筑准确率达85%、90%,每10平方公里设1个雨量站。
4. 水下监测:无人船配备多波束测深仪,日均测量5平方公里,经校正后在高含沙水体中误差<0.3米,适用于水库库容监测。
5. 工程本体监测:"智能石头"续航超5年,渗压计、应力传感器实时监测内部参数,按结构布设确保数据代表性。

3.2 数据融合与智能处理方法

多源数据融合需解决异构数据时空匹配与校准:

1. 数据融合技术:空间融合通过高斯-克吕格投影等统一坐标,位置偏差<1米;时间融合对卫星(3天/次)与地面(10分钟/次)数据插值,时间误差<5分钟;属性融合结合水位与雨量、位移与渗压数据,预测精度提升15%-20%。河南黄河统一数据平台整合多源信息,制定JSON/GeoJSON格式标准,数据完整率99.2%、准确率98.5%,支撑智能决策。
2. 智能处理算法:机器学习模型(孤立森林等)按 3σ 原则识别异常,准确率95%;克里金插值等构建全域要素场,空间误差<5%;YOLOv8等模型自动识别0.5毫米裂缝、1平方米冲刷坑,山东项目通过DeepSeek大模型使识别效率提升10倍。

工程应用验证价值:小花间无控区优化监测布局后,暴雨洪水预报精度从80%升至92%,预见期从6小时延至12小时;黄河下游河防工程通过监测锁定12处重点部位,延长防守预见期3-5天,入选水利部典型案例。数字化监测

不仅掌握工程状态，更能挖掘数据价值实现风险早识别。

4 智能决策系统的模型构建与算法创新

智能决策系统是智慧水利的核心，通过整合多源数据、构建专业模型与创新算法，实现水利工程运行状态的精准研判和科学决策。

4.1 数字孪生平台的构建

数字孪生平台通过数字化映射物理工程实现全生命周期动态模拟，构建分三阶段：

- 数据采集与建模：**三维激光扫描（点云精度 0.5mm）获取几何特征，结合 BIM 模型（含材料属性）构建初始孪生体。黄河某水利枢纽建模耗时 3 个月，包含 12 万个构件；
- 动态更新：**建立“监测数据-模型参数”映射，如渗压值关联坝体渗透系数，每小时自动校准，确保与物理实体偏差 <5%；
- 仿真应用：**分布式计算引擎（支持 1000 核并行）实现洪水演进（5 倍实时速度）、结构变形（误差 <3mm）等场景快速仿真。

平台功能模块：数据中台用 HBase 存储时序数据，支持每秒 10 万条写入；模型经 Docker 封装实现秒级调用；WebGL 可视化引擎支持亿级三角面片渲染，可剖切查看工程内部结构。

4.2 智能决策模型的集成

- 水文水动力模型：**MIKE11 用四点隐式差分求解圣维南方程组，黄河下游模拟网格 500 米，洪峰误差 <8%；HEC-HMS 通过 SCS 曲线法计算净雨，淮河流域洪水总量预报误差 <10%。
- 工程安全评估模型：**ANSYS 有限元模型（单元 0.5-2 米）计算坝基沉降，与监测值偏差 <10%；堤防滑坡预警模型耦合稳定系数（简化毕肖普法）与位移速率，当系数 <1.1 且日位移 >5mm 时触发预警。
- 水资源调度模型：**以“三生用水”平衡为目标，含 12 个水库下泄流量、8 个灌区取水量变量，引入黄河下游 200m³/s 生态基流约束，10 分钟内完成求解。

5 智慧水利的工程应用案例

5.1 黄河下游河防工程

该工程覆盖 1371 公里堤防，构建了“四预”一体化决策体系：

- 监测网络：**布设 1200 个渗压计、800 个位移计，无人机每周巡检 1 次，卫星每月监测 1 次，实现险情早发现；
- 智能决策：**数字孪生平台可模拟 50 年一遇洪水场景，预演不同控导工程调度方案的效果，2023 年汛期通过预演优化了 3 处控导工程的调度方式，减少滩区淹没面积 20 平方公里；
- 应用成效：**险情响应时间从 2 小时缩短至 30 分

钟，2024 年成功处置 6 处管涌险情，防汛物资储备量减少 15%。

5.2 山东数字孪生水网

作为全国首个省级水网试点，其实现了三大突破：

- 全域监测：**整合 5362 处水文站、1.2 万眼地下水监测井数据，构建水资源“一张图”，地下水开采量监测精度达 95%；
- 智能调配：**开发胶东调水工程数字孪生系统，模拟不同调水方案的输水损失（误差 <3%），2023 年通过优化调度减少输水损失 1800 万立方米；
- 生态调控：**建立南四湖生态水位模型，当水位低于 3.2 米时自动触发补水机制，2024 年保障了湖区 80 平方公里湿地生态安全。

6 挑战与展望

当前智慧水利发展面临三项核心挑战：多源数据融合的时空对齐难度大（卫星与地面数据时间同步误差达 15 分钟）、复杂水文过程的模型机理尚未完全明晰（中小流域洪水预报精度仍待提升）、基层技术应用能力不足（约 30% 县级水利部门缺乏专业运维人员）。

未来发展将呈现三大趋势：

- 技术融合深化：**6G 通信技术实现空天地一体化组网，监测数据传输时延 <1ms；量子传感技术突破传统测量极限，应力监测精度达 0.1MPa；
- 应用场景拓展：**从防洪调度向生态修复延伸，如基于数字孪生的河道生态流量动态调控；
- 标准体系完善：**制定《智慧水利数据分类与编码》《数字孪生模型精度要求》等标准，2025 年前将形成 15 项国家标准。

智慧水利通过技术创新持续提升水利工程的智能化水平，为国家水安全战略提供坚实保障，推动水利行业向数字化、网络化、智能化转型。

参考文献

- 丁文辉. 智慧水利赋能水利工程材料防伪与质量保障体系构建[J]. 中国品牌与防伪, 2025, (07): 148-150.
- 甘肃智慧水利建设项目荣获2024中国地理信息产业优秀工程金奖[J]. 甘肃水利水电技术, 2024, 60 (09): 64.
- 桑蕊. 智慧水利框架下立体化感知体系构建[J]. 东北水利水电, 2024, 42 (05): 68-70.
- 刘泽, 张智韬, 许景辉. 智慧水利“教学+科创+竞赛”协同体系构建——以智慧水利“人工智能与机器学习”课程建设为例[J]. 黑龙江教育(高教研究与评估), 2024, (04): 89-91.
- 俞志强, 俞瑾. 数字地理可视化技术在数字孪生流域建设中的作用探讨[J]. 治淮, 2023, (09): 32-34+37.
- 张潮, 房志刚, 郭冉. 面向智慧水利的网络安全技术体系构建[J]. 中国水利, 2023, (11): 41-44.