

基于数字孪生的水利信息化系统实时监测与智能决策应用研究

段胜康

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 随着信息技术的飞速发展,数字孪生技术为水利信息化系统的建设与升级提供了新的思路与方法。本文聚焦于基于数字孪生的水利信息化系统实时监测与智能决策应用,深入探讨其技术架构、关键技术、应用场景。分析了该系统在提升水利管理效率、保障水安全、优化水资源配置等方面的重要作用,旨在为水利行业的数字化转型提供理论支持与实践参考。

关键词: 数字孪生;水利信息化系统;实时监测;智能决策

1 引言

水利事业是国家经济社会发展的重要基础支撑,关乎国计民生。传统的水利管理模式在面对日益复杂的水资源环境、极端气候事件频发以及社会对水资源利用和保护提出的更高要求时,逐渐暴露出监测手段有限、决策过程依赖经验、应急响应不及时等问题。数字孪生技术的出现,为解决这些问题带来了新的契机。数字孪生通过构建物理实体的虚拟映射,实现对物理实体的实时监测、模拟预测与智能决策,为水利信息化系统的升级改造提供了强大的技术驱动力。

2 数字孪生与水利信息化系统概述

2.1 数字孪生技术原理

数字孪生是一种集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,它利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据,在虚拟空间中完成映射,从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程。简单来说,数字孪生就是在虚拟世界中构建一个与现实物理实体高度一致的“数字克隆体”,通过实时数据交互,使虚拟模型与物理实体同步运行,进而实现对物理实体的状态监测、性能评估、故障预测以及优化决策等功能。

2.2 水利信息化系统发展现状

水利信息化系统经历了多年的发展,在数据采集、传输、存储以及初步的应用分析等方面取得了一定的成果。目前,许多水利部门已经建立了涵盖水文监测、水资源管理、防汛抗旱等多个领域的信息化平台,实现了对部分水利设施和自然水体的实时监测^[1]。然而,现有的水利信息化系统仍存在一些不足之处,如数据融合度低、缺乏智能分析决策能力、系统之间协同性差等,难以满足新时代水利事业发展的需求。

2.3 数字孪生与水利信息化系统融合必要性

将数字孪生技术融入水利信息化系统,能够有效弥补传统系统的短板。一方面,数字孪生可以实现多源异构数据的深度融合,打破信息孤岛,为水利管理提供全面、准确的数据支持;另一方面,通过构建高精度的虚拟水利模型,结合实时监测数据和智能算法,能够实现对水利系统运行状态的精准模拟与预测,为科学决策提供依据,从而提升水利管理的精细化、智能化水平。

3 基于数字孪生的水利信息化系统技术架构

3.1 总体架构设计

基于数字孪生的水利信息化系统总体架构主要包括物理层、数据层、模型层、应用层和用户层五个层次,各层次之间相互关联、协同工作,共同实现系统的实时监测与智能决策功能。

3.2 各层次功能解析

物理层: 物理层是整个系统的数据来源,包括各类水利设施(如水库、堤防、泵站等)、自然水体(河流、湖泊等)以及与之相关的传感器、监测设备等。这些物理实体通过传感器实时采集水位、流量、水质、降雨量等多种数据,并通过通信网络将数据传输至数据层。

数据层: 数据层负责对采集到的海量水利数据进行存储、管理和处理。它采用分布式数据库、数据仓库等技术,对多源异构数据进行整合、清洗和转换,构建统一的数据平台。同时,数据层还提供数据查询、分析和挖掘等功能,为模型层和应用层提供数据支持。

模型层: 模型层是数字孪生系统的核心,通过构建水利工程的物理模型、数学模型和仿真模型,实现对水利系统运行状态的模拟与预测。物理模型基于水利工程的设计图纸和实际结构,精确描述水利设施的几何形

状、材料属性等；数学模型则利用流体力学、水文学等相关理论，建立描述水流运动、水质变化等过程的数学方程；仿真模型结合实时监测数据，对水利系统的运行过程进行动态模拟，预测未来的发展趋势。

应用层：应用层基于模型层的分析结果，为用户提供各种实际应用功能，主要包括实时监测、预警预报、智能决策、应急管理等。实时监测功能通过可视化界面实时展示水利系统的运行状态，包括水位变化、流量动态、水质指标等；预警预报功能根据预设的阈值和模型预测结果，对可能发生的水利灾害（如洪水、干旱、水污染等）进行提前预警；智能决策功能通过综合分析多种因素，为水利调度、水资源分配等提供科学合理的决策建议；应急管理功能则针对突发水利事件，制定应急预案，指导应急处置工作。

用户层：用户层是系统的使用者，包括水利管理部门、科研机构、社会公众等。不同用户根据自身需求，通过相应的终端设备（如电脑、手机等）访问应用层提供的功能，获取所需的信息和服务。

4 基于数字孪生的水利信息化系统关键技术

4.1 高精度建模技术

高精度建模是数字孪生水利信息化系统的基础，能精准还原水利设施状态，为后续分析与决策提供可靠依据。

（1）水利工程建模：三维激光扫描与无人机倾斜摄影是获取水利工程高精度几何数据的核心手段。三维激光扫描利用激光束反射原理，快速获取表面三维坐标，分辨率与精度高，可捕捉细微结构，如水闸缝隙、堤防裂缝。多站扫描时，借助特征点匹配与ICP算法拼接数据，误差控制在毫米级，满足精度要求。无人机倾斜摄影搭载多相机多角度拍摄，生成带真实纹理的三维模型，立体感强。数据处理运用摄影测量与计算机视觉技术，包括特征提取、空中三角测量、密集匹配等，生成高精度点云与网格模型。同时，利用地面控制点辅助测量，联合平差影像与地面数据，消除畸变与定位误差。此外，结合工程地质、水文地质资料，详细描述模型物理属性，如堤防土质、密度、渗透系数，大坝材料属性与结构强度，使模型更贴近实际。

（2）水文模型构建：分布式水文模型可提升降雨径流过程模拟精度。它将流域划分为多个网格单元，每个单元有独立的地形、土壤、植被特征。模拟时考虑降水空间分布不均与网格间水力联系，根据各单元土壤含水量、下渗能力分别计算地表径流与地下径流，再汇流得到流域出口总径流。相比传统集总式模型，能更准确反映水流运动规律。

4.2 多源数据融合与实时传输技术

水利系统数据来源广、格式多、精度与时间尺度差异大，多源数据融合与实时传输技术可解决数据整合与传输难题。

（1）数据预处理：包括数据清洗、转换与归一化。清洗时去除噪声、异常值与重复数据，如水位传感器异常值，通过设定阈值剔除。转换将不同格式数据统一，如日期时间格式标准化。归一化对不同量纲数据缩放，使其可比，如水位、流量数据归一化到 $[0,1]$ 区间。

（2）特征提取：是数据融合关键。时间序列数据可提取均值、方差、峰值等统计特征，或用傅里叶变换、小波变换提取频域特征，反映周期性与趋势性。空间数据通过图像分割、目标检测提取特征区域与对象，如遥感影像中的水域、植被。

（3）数据融合算法：常用卡尔曼滤波、贝叶斯网络、D-S证据理论。卡尔曼滤波适用于动态系统状态估计与预测，可融合多个传感器数据得到更准确状态估计。贝叶斯网络通过变量概率依赖关系推理多源数据，如评估洪水风险时综合多种数据计算风险概率。D-S证据理论处理不确定与冲突信息，当数据源矛盾时合成证据，得到合理融合结果。

（4）实时传输技术：5G与物联网保障数据及时稳定传输。5G高速率、低时延、大容量，能满足大规模传感器数据快速传输需求。如水库监测中，传感器实时采集水位、水质、降雨量数据，通过5G毫秒级传输至数据中心。物联网构建传感器网络，实现设备互联与数据自动采集传输。水利工程中用LoRaWAN、ZigBee等LPWAN技术连接传感器，形成监测网络，数据经网关汇聚后通过5G或有线网络传输。同时，采用加密、校验和重传机制提高传输可靠性，防止数据丢失或篡改。

4.3 智能算法与机器学习技术

智能算法与机器学习技术在水质预测、水资源优化配置等方面发挥重要作用。

（1）水质预测：机器学习算法如神经网络和支持向量机应用广泛。神经网络中，BP神经网络由输入层、隐藏层、输出层组成。输入层接收历史水质数据（溶解氧、化学需氧量等）与相关因素（水温、pH值等），隐藏层进行非线性变换，输出层给出预测结果。训练时用反向传播算法调整权重，使预测接近实际。支持向量机通过找最优超平面分类或回归预测水质，泛化能力强，能避免过拟合，处理小样本数据效果佳。

（2）水资源优化配置：是复杂决策问题，遗传算法和粒子群算法可求解。遗传算法模拟生物进化，将分配

方案表示为染色体,基因代表用水户或区域的水量。设定适应度函数,综合考虑供需平衡、生态保护、经济效益等目标评价方案。迭代中选适应度高的方案交叉变异,生成新方案逼近最优解。粒子群算法模拟群体行为,粒子代表潜在分配方案,根据自身与群体最优位置调整位置,找到全局最优方案。

4.4 可视化与交互技术

可视化与交互技术直观展示分析结果,提高用户对水利系统的认知与管理效率。

(1) 三维可视化技术:将虚拟模型与实时监测数据结合,展示运行状态。如将水库模型与实时水位关联,动态显示水位变化及影响。用流体模拟算法根据流量与地形数据模拟水流运动轨迹与速度,以色彩或箭头在模型中呈现。结合VR和AR技术,用户戴VR设备可身临其境感受运行场景,如在大坝上实时观察数据与状态。

(2) 交互界面设计:采用GUI设计原则,通过鼠标、触摸屏操作。用户可旋转、缩放、平移模型,从不同角度观察细节。界面设查询按钮与菜单,方便查询设备参数、历史数据、报警记录等信息。触摸屏用手势识别技术,如滑动切换场景、捏合调整比例。同时,界面有实时反馈功能,操作或查询时及时给出结果与提示,提升用户体验。

5 基于数字孪生的水利信息化系统应用场景

5.1 防汛抗旱决策支持

在防汛抗旱工作中,基于数字孪生的水利信息化系统能够发挥重要作用。通过实时监测降雨量、水位、流量等数据,结合水文模型对洪水演进过程进行模拟预测,提前预判洪水的淹没范围、到达时间等信息,为防汛指挥部门制定科学的防汛预案提供依据。在干旱时期,系统可以分析土壤湿度、蒸发量、水资源供需情况等数据,预测干旱发展趋势,制定合理的抗旱调度方案,保障农业灌溉、居民生活用水等需求。

5.2 水资源优化配置

随着社会经济的快速发展,水资源供需矛盾日益突出。基于数字孪生的水利信息化系统可以综合考虑水资源分布、用水需求、生态环境等因素,通过智能算法对水资源进行优化配置。例如,在跨流域调水工程中,系统可以实时监测各水源地和受水区的水位、水质、水量等信息,根据用水需求和水资源状况,动态调整调水方案,提高水资源的利用效率,实现水资源的可持续利用。

5.3 水利工程运行管理

对于水库、堤防、泵站等水利工程,数字孪生系统可以实现对工程运行状态的实时监测和智能管理。通过安装在工程上的传感器,实时采集工程的应力、变形、渗流等数据,结合工程的安全监测模型,对工程的运行安全进行评估^[4]。一旦发现异常情况,系统能够及时发出预警,并提供相应的处理建议。同时,系统还可以根据工程的设计参数和运行状况,优化工程的调度运行方案,提高工程的运行效益。

5.4 水生态保护与修复

水生态保护与修复是水利工作的重要内容。基于数字孪生的水利信息化系统可以集成水质监测数据、水生生物数据、生态流量数据等,构建水生态模型,评估水生态系统的健康状况。通过模拟不同治理措施对水生态系统的影响,为水生态保护与修复提供科学决策依据。例如,在河流生态修复项目中,系统可以模拟河道整治、生态补水等措施对河流生态系统的影响,选择最优的修复方案,促进水生态系统的恢复与改善。

结语

基于数字孪生的水利信息化系统实时监测与智能决策应用研究,为水利行业的数字化转型提供了新的途径和方法。通过构建高精度的数字孪生模型,融合多源异构数据,运用智能算法与可视化技术,该系统在防汛抗旱、水资源优化配置、水利工程运行管理、水生态保护与修复等方面展现出了显著的应用优势,有效提升了水利管理的精细化、智能化水平。未来,需要进一步加强相关技术的研究与创新,完善技术标准与规范,加大人才培养力度,强化安全防护措施,推动基于数字孪生的水利信息化系统在更大范围内得到应用和发展。随着信息技术的不断进步,相信数字孪生技术将在水利领域发挥更加重要的作用,为保障国家水安全、促进经济社会可持续发展做出更大贡献。

参考文献

- [1]张靖翼,王美慧.数字孪生在水利水电信息化上的应用研究[J].水电站机电技术,2023,46(08):61-63.
- [2]林运东,张龙,刘勇.数字孪生技术在水利工程运行管理中的分析与探索[J].黑龙江水利科技,2025,53(03):168-170.
- [3]许文涛.数字孪生技术在水利工程运行与维护中的创新应用[J].水上安全,2025,(05):49-51.
- [4]蔡阳.数字孪生水利建设进展与发展思考[J].水利信息化,2025,(01):1-7+20.