

数字孪生水网数据治理技术分析

何可文¹, 齐飞¹, 朱丹萍¹, 左渤¹, 刘俊伟²

1. 太极计算机股份有限公司, 北京 100000

2. 泰瑞数创科技(北京)股份有限公司, 北京 100000

DOI: 10.61369/SSSD.2026010021

摘要：数字孪生水网作为智慧水利建设的核心载体，其运行效能高度依赖数据治理的质量。本文聚焦数字孪生水网数据治理技术体系，从数据全生命周期视角出发，分析数据采集、传输、存储及质量管控的关键技术要点，进而探讨数据融合、智能分析、安全治理及标准规范构建等核心技术应用。结合水网系统复杂性特征，剖析技术应用中的关键问题，为数字孪生水网数据治理的规范化、高效化实施提供技术参考，助力智慧水利精准化管理水平提升。

关键词：数字孪生水网；数据治理；全生命周期；数据融合；智能分析

Analysis of Data Governance Technology for Digital Twin Water Network

He Kewen¹, Qi Fei¹, Zhu Danping¹, Zuo Bo¹, Liu Junwei²

1.Taiji Computer Corporation Limited, BeiJing 100000

2.Terry Digital Innovation Technology (Beijing) Co., Ltd., BeiJing 100000

Abstract：As the core carrier of smart water conservancy construction, the operational efficiency of the digital twin water network highly depends on the quality of data governance. This paper focuses on the data governance technology system of the digital twin water network. From the perspective of the full data lifecycle, it analyzes the key technical points of data collection, transmission, storage and quality control, and further discusses the application of core technologies such as data fusion, intelligent analysis, security governance and standard specification construction. Combined with the complex characteristics of the water network system, it analyzes the key issues in technology application, provides technical references for the standardized and efficient implementation of data governance in the digital twin water network, and helps improve the precise management level of smart water conservancy.

Keywords：digital twin water network; data governance; full lifecycle; data fusion; intelligent analysis

引言

水网是保障水资源优化配置与防洪抗旱的关键基础设施，数字孪生技术与水网的深度融合推动传统水网向智能化升级。数字孪生水网通过虚拟映射、实时交互实现水网运行状态的精准模拟与预测，而数据作为连接物理水网与虚拟模型的核心纽带，其治理质量直接决定孪生模型的可靠性。当前数字孪生水网数据存在来源分散、格式异构、质量参差不齐等问题，制约孪生应用效能发挥^[1]。因此，系统分析数字孪生水网数据治理技术，构建科学的技术体系，对推动数字孪生水网高质量建设具有重要现实意义。

一、数字孪生水网数据全生命周期治理基础技术

（一）多源数据采集技术

数字孪生水网数据来源涵盖水文监测、工程运行、环境感知等多个维度，多源数据采集技术是实现数据全面覆盖的基础。在水文监测方面，采用物联网感知终端与传统监测设备相结合的采集模式，针对江河水文监测场景，部署超声多普勒流速仪、雷达水位计等设备，实现流速、水位等参数的实时采集，采样频率可根据监测需求调整至分钟级；在水利工程监测中，通过光纤光栅传感器、应变计等设备对堤坝、渠道等建筑物的结构应力、位移

等数据进行采集，保障工程安全监测的精准性。同时，整合气象部门的降水、气温数据及水资源管理部门的调度数据，通过 API 接口实现跨部门数据共享采集。针对偏远地区监测场景，采用太阳能供电的无线传感网络技术，解决传统有线采集的布线难题，提升数据采集的覆盖范围^[2]。通过多源数据采集技术的协同应用，构建覆盖物理水网全要素的数据采集体系，为数字孪生水网提供全面的数据源支撑。

（二）数据传输优化技术

数据传输的实时性与稳定性直接影响数字孪生水网的实时交互能力，需结合数据特征采用差异化传输技术。对于水文监测、

工程安全等实时性要求较高的数据，采用5G+边缘计算的传输模式，5G网络的低时延特性保障数据传输时延控制在毫秒级，边缘节点对采集数据进行初步预处理，过滤冗余信息，减少核心网络传输压力。针对海量历史监测数据、遥感影像数据等非实时数据，采用光纤宽带网络结合断点续传技术进行传输，通过数据压缩算法将影像数据、监测历史数据压缩至原体积的30%~50%，提升传输效率^[3]。为应对复杂水文环境下的信号干扰问题，采用自适应调制编码技术，根据信道质量动态调整传输参数，当信道质量较差时，自动降低数据传输速率以保障传输稳定性，信道质量改善后恢复高速传输。同时，构建传输链路冗余机制，当主传输链路出现故障时，自动切换至备用链路，确保数据传输的连续性，避免因传输中断导致孪生模型与物理水网状态脱节。

（三）分层数据存储技术

数字孪生水网数据包含结构化数据与非结构化数据，数据体量庞大且增长迅速，分层数据存储技术可实现数据的高效存储与快速调用。采用“热点数据-温数据-冷数据”的分层存储架构，将实时监测数据、当前运行状态数据等热点数据存储于内存数据库中，实现毫秒级数据读取，满足孪生模型实时计算需求；将近3年的监测数据、工程维护记录等温数据存储于关系型数据库，兼顾数据查询效率与事务一致性，支撑日常数据统计分析；将历史遥感影像、长期水文观测数据等冷数据存储于分布式文件系统，通过数据归档压缩降低存储成本，同时保障数据长期保存的完整性^[4]。针对水利空间数据的存储需求，采用时空数据库技术，实现对水网地理空间信息、监测点位置信息等数据的高效管理，支持空间查询与空间分析操作。通过分层存储策略与多元数据库协同应用，实现不同类型数据的适配存储，提升数据存储系统的扩展性与访问效率。

二、数字孪生水网数据治理核心技术深度应用

（一）多维度数据融合技术

多维度数据融合技术是打破数字孪生水网数据孤岛、实现数据价值挖掘的关键。采用“数据预处理-特征提取-融合建模”的技术流程，首先对多源异构数据进行标准化处理，将不同格式的监测数据转换为统一的数据格式，如采用JSON格式规范水文、工程、气象等数据的字段定义。在特征提取阶段，针对结构化数据采用统计特征提取方法，如计算水位数据的均值、方差等特征；针对非结构化数据如遥感影像，采用深度学习模型如CNN提取影像中的水体边界、植被覆盖等空间特征^[5]。在融合建模方面，采用联邦学习与传统融合算法相结合的模式，对于跨区域水网数据，通过联邦学习技术在不共享原始数据的前提下实现跨节点数据融合，保障数据隐私安全；对于同一区域内的多源数据，采用加权融合、证据理论等算法实现数据融合，如结合水文监测数据与气象预报数据构建降水-径流融合预测模型。构建多尺度数据融合体系，实现宏观区域水网数据与微观监测点数据的融合，如将流域尺度的水资源调度数据与单个水库的运行数据融合，提升调度决策的精准性^[6]。通过多维度数据融合技术，实现数字孪生水

网数据的全面整合，为水网运行状态的综合评估提供数据支撑。

（二）智能数据分析与挖掘技术

智能数据分析与挖掘技术为数字孪生水网的预测预警、优化调度提供核心支撑，通过挖掘数据关联规律实现水网运行的智能化决策。在预测预警方面，构建基于深度学习的预测模型，如采用LSTM神经网络模型结合历史水文数据、气象数据预测未来72小时的水位、流量变化，预测精度可达90%以上；针对洪涝灾害场景，采用时空注意力机制的Transformer模型，融合水文监测数据与地理空间数据，实现洪涝灾害风险等级预测与淹没范围模拟。在优化调度方面，采用强化学习算法构建水网调度优化模型，以水资源利用率最大化为目标，结合水网工程约束条件如水库库容、渠道输水能力等，生成最优调度方案^[7]。针对水网故障诊断场景，采用异常检测算法如孤立森林模型，通过分析设备运行数据的异常波动识别水泵、闸门等设备的潜在故障，提前发出维护预警，将设备故障发生率降低30%以上。建立智能分析平台，集成数据挖掘算法库与可视化展示模块，实现分析结果的直观呈现，如通过热力图展示水网流量分布、通过折线图展示水位预测趋势，为管理人员提供便捷的决策支持工具。智能数据分析与挖掘技术的应用，使数字孪生水网从“被动监测”向“主动预测”转变，提升水网运行管理的智能化水平^[8]。

（三）数据安全治理技术

数字孪生水网数据包含水利工程布局、水资源调度等敏感信息，数据安全治理技术是保障水网安全运行的重要屏障。构建“数据加密-访问控制-安全审计-应急响应”的全流程安全治理体系。在数据加密方面，采用对称加密与非对称加密相结合的方式，对传输中的数据采用AES加密算法进行加密处理，对存储的数据采用RSA加密算法进行加密存储，确保数据在传输与存储过程中的机密性。在访问控制方面，建立基于角色的访问控制模型，根据管理人员的岗位职责分配不同的数据访问权限，如普通监测人员仅拥有数据查看权限，调度决策人员拥有数据修改与调度权限，同时采用双因素认证技术提升访问安全性。在安全审计方面，部署日志审计系统，对数据的访问、修改、删除等操作进行全程记录，日志信息保留6个月以上，定期对审计日志进行分析，及时发现非法访问行为^[9]。建立数据安全应急响应机制，针对数据泄露、网络攻击等安全事件，制定应急预案，采用数据备份与恢复技术，定期对核心数据进行备份，当发生安全事件时可在1小时内完成数据恢复。同时，开展定期数据安全培训，提升管理人员的安全意识，构建人员-技术-制度相结合的数据安全防护体系。

（四）数据治理标准规范构建技术

数据治理标准规范是实现数字孪生水网数据治理规范化、标准化的基础，通过技术手段推动标准落地实施。构建涵盖数据采集、数据格式、数据质量、数据安全等多维度的标准体系，在数据采集标准方面，明确不同监测设备的技术参数要求、数据采集频率等规范；在数据格式标准方面，制定统一的水网数据元标准，规范数据字段名称、数据类型、单位等属性。采用元数据管理技术实现标准的落地，构建元数据管理平台，对数字孪生水网

数据的元数据进行注册、管理与维护，元数据包含数据来源、数据格式、质量指标等信息，通过元数据关联实现数据标准的自动校验，当数据不符合标准时自动发出预警。建立标准动态更新机制，采用版本管理技术对数据标准进行管理，结合数字孪生水网技术发展与应用需求，定期对标准进行修订与更新，确保标准的适用性^[10]。通过标准化接口技术实现不同系统间的标准兼容，开发符合国家标准的数据交换接口，实现数字孪生水网与其他智慧水利系统的数据互联互通。数据治理标准规范的构建与实施，解决了多部门、多系统间的数据异构问题，为数字孪生水网的规模化建设提供标准化支撑。

三、结语

数字孪生水网数据治理技术体系涵盖基础技术与核心技术，基础技术保障数据全生命周期的高效流转与质量管控，核心技术实现数据价值挖掘与安全保障。多源数据采集、分层存储等基础技术为数据治理提供支撑，数据融合、智能分析等核心技术提升治理效能。当前技术应用仍面临复杂场景适配、跨区域协同治理等问题。未来需加强跨学科技术融合，推动治理技术与水网业务深度结合，完善标准规范体系，提升数据治理的智能化与协同化水平，为数字孪生水网高质量发展奠定坚实基础。

参考文献

[1] 李雅琨, 赵建伟, 霍少菲. 德州市现代水网建设中数字孪生技术应用研究 [J]. 海河水利, 2024, (09): 120-123+128.

[2] 林斌. 数字孪生水网成熟度评价思考 [J]. 水利信息化, 2024, (03): 7-14.

[3] 孙勇, 赵妮妮, 水永胜, 等. 基于县域的数字孪生水网应用研究 [J]. 水上安全, 2024, (05): 18-21.

[4] 王超, 李犇, 陈竹青, 等. 国家水网智能调度总体框架与关键问题认识和思考 [J]. 中国水利, 2024, (03): 1-13.

[5] 赵国荣, 李浩霖. 数字孪生在引洮供水水网信息化中的实践与探索 [J]. 水利技术监督, 2024, (01): 52-55.

[6] 李新利, 李国超. 河南省范县数字孪生水网建设的任务与实施 [C]// 河海大学, 浙江水利水电学院, 河北工程大学, 浙江省水利学会. 2024 (第三届) 城市水利与洪涝防治学术研讨会论文集. 中原大河水利水电工程有限公司; 黄河勘测规划设计研究院有限公司; , 2024: 272-278.

[7] 陈见长, 祝许珂, 郭冬冬. 数字孪生新质生产力在国家水网建设中的探索与应用 [C]// 河海大学, 浙江省水利河口研究院 (浙江省海洋规划设计研究院), 浙江省水利学会. 2024 (第十二届) 中国水生态大会论文集. 云河 (河南) 信息科技有限公司; 黄河水利委员会河南水文水资源局; , 2024: 1512-1518.

[8] 蔡阳. 数字孪生水网建设应着力解决的几个关键问题 [J]. 中国水利, 2024, (17): 36-41.

[9] 谢明霞. 数字孪生水网内涵及应用场景研究 [J]. 人民长江, 2024, 55 (02): 245-251+264.

[10] 宋亚威, 黄一昀, 徐伟, 等. 基于数字孪生的海安市智慧水网 " 一张图 " 关键技术研究 [J]. 江苏水利, 2023, (06): 40-43+48.