

“数字孪生”技术在南水北调中线工程运维与水质预警中的应用前景

张银海亮

中国南水北调集团中线有限公司渠首分公司 河南 南阳 473000

摘要:南水北调中线工程对北方供水安全至关重要,但传统运维管理模式在应对突发水质污染、设备故障及极端气候时,存在响应滞后、决策粗放等问题。数字孪生技术集成了物联网、大数据、AI等前沿技术,为构建智慧水利工程提供新路径。本文探讨数字孪生技术在南水北调中线工程运维管理与水质预警中的应用前景,先阐述工程面临的挑战,解析数字孪生技术内涵与关键体系,构建面向中线工程的数字孪生总体架构,并从智能运维和水质精准预警两大场景剖析实现路径、功能模块与预期效益。最后分析当前在数据融合、模型精度等方面存在的挑战,提出对策。研究表明,构建高保真数字孪生体,可提升工程多方面能力,实现转型升级,对保障国家水安全意义深远。

关键词:数字孪生;南水北调中线工程;智能运维;水质预警;智慧水利;人工智能

引言

我国水资源“北缺南丰”,南水北调工程是优化配置、保障水安全的重大基础设施,中线工程更是“国之重器”,惠及沿线数亿人口。工程全面通水后,确保其长期安全稳定高效运行成核心课题。但工程是超大规模复杂巨系统,环节众多,微小故障或引发连锁反应;且穿越多省,面临农业面源、工业排放等多重污染风险及极端天气、地质灾害等,威胁输水水质。传统“人巡+机检”运维模式和固定监测断面水质预警体系,面对庞大动态系统力不从心,存在信息孤岛、响应延迟等问题。在此背景下,第四次工业革命浪潮下数字孪生技术应运而生,它构建物理实体高保真实时映射模型,实现物理与数字世界深度融合互动。对中线工程,构建全线全生命周期数字孪生体是趋势,更是破解运维与水质管理困境、提升治理能力的战略选择,研究其应用前景意义重大。

1 南水北调中线工程运维与水质管理挑战

1.1 运维管理挑战

中线工程的运维管理面临三大核心挑战:一是规模宏大与结构复杂性:1432公里的干线,上千座各类建筑物,使得人工巡检成本高昂且效率低下。许多关键设施(如深埋隧洞、大型渡槽内部)难以直接观测,设备状态感知存在盲区。二是故障诊断与预测困难:传统运维多为事后维修或定期检修,缺乏对设备健康状态的实时评估和剩余寿命的精准预测。例如,闸门启闭机、水泵机组的潜在机械磨损或电气老化,若不能提前预警,极易导致运行中断。三是应急响应与协同调度不足:一旦发生突发事件(如管道破裂、闸门失灵),需要快速定位、评估

影响、制定方案并协调多方力量。现有流程依赖于经验判断和电话沟通,信息传递链条长,决策效率低,难以满足“黄金时间”内的应急处置要求。

1.2 水质安全保障挑战

水质安全是中线工程的生命线,其保障工作同样面临严峻考验:一是污染源多样且隐蔽:除了常规的工业、生活点源污染外,更难防控的是农业面源污染(化肥、农药随雨水径流进入渠道)和突发性污染事件(如运输车辆侧翻导致危化品入渠)。这些污染源具有随机性、突发性和扩散快的特点。二是水质监测网络局限性:现有水质自动监测站主要布设在关键节点,空间分辨率有限,无法实现对全渠段水质的连续、无缝感知。对于污染物的迁移路径、扩散范围和浓度变化的动态过程,缺乏精细化的掌握^[1]。三是预警模型精度与时效性不足:传统的水质预警多基于简单的阈值报警或一维水质模型,难以准确模拟污染物在复杂水流条件下的三维扩散、吸附、降解等物理化学过程,导致预警滞后、误报率高或漏报风险大。

2 数字孪生技术体系与核心内涵

2.1 数字孪生定义与特征

数字孪生是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成对物理实体的映射,从而反映其全生命周期过程的技术。其核心特征包括:(1)虚实映射:在数字空间建立与物理实体一一对应的虚拟模型。(2)实时/准实时同步:通过物联网感知层,实现物理世界状态向数字世界的实时数据驱动更新。(3)高保

真仿真：利用先进的机理模型和数据驱动模型，对物理实体的行为和性能进行高精度模拟。(4) 闭环反馈：基于仿真结果进行分析、预测和决策，并将优化指令反馈回物理世界，形成“感知-分析-决策-执行”的闭环。

2.2 关键支撑技术

构建南水北调中线工程的数字孪生体，需要以下关键技术的深度融合：(1) 物联网 (IoT) 与传感技术：部署涵盖水位、流量、压力、水质 (pH、浊度、COD、氨氮、重金属等)、视频、振动、应力、位移等多类型传感器，形成覆盖全线的“神经末梢”感知网络。(2) 地理信息系统 (GIS) 与BIM/CIM：整合高精度地理空间数据、工程建筑信息模型 (BIM) 和城市信息模型 (CIM)，构建厘米级精度的三维可视化底座，直观展示工程全貌与周边环境。(3) 大数据与云计算：依托强大的云平台，对海量、多源、异构的感知数据进行存储、清洗、融合与管理，为上层应用提供算力支撑。(4) 人工智能 (AI) 与机器学习 (ML)：利用深度学习、强化学习等算法，从历史数据中挖掘规律，构建设备故障预测模型、水质异常检测模型和最优调度策略模型^[2]。(5) 多物理场耦合仿真：结合计算流体力学 (CFD)、结构力学、水质动力学等专业模型，对水流、结构应力、污染物扩散等复杂过程进行高保真、多维度的动态仿真。

3 面向南水北调中线工程的数字孪生总体架构

基于上述分析，本文提出一个“四横三纵”的数字孪生总体架构。

“四横”指四个层次：(1) 感知与控制层：部署于物理世界的各类传感器、执行器 (如远程控制的闸门、泵站) 和通信网络，负责数据采集与指令执行。(2) 数据与模型层：作为核心支撑，包括统一的数据湖 (DataLake) 用于汇聚所有原始数据，以及一系列经过校准和验证的专业模型库 (如水动力模型、水质模型、结构健康监测模型、设备故障诊断模型)。(3) 仿真与推演层：利用数据与模型层的资源，对当前工况进行实时仿真，并能对未来不同情景 (如暴雨、污染事故、设备故障) 进行推演预测。(4) 应用与服务层：面向最终用户，提供智能运维、水质精准预警、应急指挥、调度优化、公众服务等具体业务应用。

“三纵”指贯穿始终的三大体系：(1) 标准规范体系：统一数据格式、接口协议、模型标准，确保系统互联互通。(2) 网络安全体系：从物理安全、网络安全、数据安全到应用安全，构建全方位的防护屏障，保障国家关键信息基础设施安全。(3) 运维保障体系：包括模型的持续校准、系统的迭代升级、人员的培训等，确保

数字孪生体的长期生命力。

4 核心应用场景一：基于数字孪生的智能运维

4.1 全要素资产数字化管理

通过BIM+GIS技术，将中线工程的所有物理资产 (从一座阀门到一座大型渡槽) 进行数字化建档，形成“一物一档”。管理人员可在三维场景中直观查询任何资产的位置、规格、材质、安装日期、维修记录等全生命周期信息，彻底告别纸质档案和信息孤岛。

4.2 设备健康状态在线监测与预测性维护

数字孪生体能够实时接收来自关键设备 (如水泵、电机、闸门启闭机) 的振动、温度、电流等运行数据。AI算法 (如LSTM、Transformer) 对这些时序数据进行分析，不仅能识别当前是否存在异常，更能预测未来一段时间内设备发生故障的概率和剩余使用寿命 (RUL)。例如，当模型预测某台水泵轴承将在7天后失效时，系统会自动生成维修工单，提醒运维人员在非高峰时段进行预防性更换，从而避免非计划停机，变“坏了再修”为“该修才修”，大幅降低运维成本，提升系统可靠性。

4.3 虚拟巡检与沉浸式培训

利用VR/AR技术，运维人员可以佩戴头盔或使用移动终端，在办公室内对千里之外的工程现场进行“虚拟巡检”。系统可自动标记出传感器数据显示异常的区域，引导巡检重点^[3]。同时，新员工可以在高保真的虚拟环境中进行各种应急操作演练 (如闸门紧急关闭、管涌封堵)，无需接触真实危险环境，极大地提高了培训的安全性和效率。

4.4 应急推演与协同指挥

当发生突发事件时，指挥中心可在数字孪生平台上一键启动应急推演。系统会根据事发地点、类型和当前水文气象条件，快速模拟事态发展趋势 (如溃坝后的洪水淹没范围、管道破裂后的水量损失)。基于推演结果，AI辅助生成多套处置预案，并评估各方案的优劣。指挥人员可以在此基础上进行科学决策，并通过平台直接向现场人员和相关单位下达精确指令，实现扁平化、高效化的应急协同。

5 核心应用场景二：基于数字孪生的水质精准预警

5.1 全域水质动态感知与融合

数字孪生体打破了传统监测站的点状限制。通过融合固定站点数据、移动监测船数据、甚至卫星遥感反演的水质参数，结合高精度水动力模型，可以重构出整个输水干线任意时刻、任意位置的水质三维动态场。管理者可以像观看天气预报图一样，直观地看到水质指标的空间分布和时间演变。

5.2 污染溯源与路径追踪

一旦监测到水质异常，数字孪生平台能立即启动污染溯源模块。它利用逆向水质模型，结合实时水流方向和速度，快速反推出最可能的污染源位置和发生时间。同时，正向模型可以精准模拟污染物未来的扩散路径、到达下游关键取水口的时间以及峰值浓度，为采取拦截、稀释、关闭取水口等措施赢得宝贵时间。

5.3 多情景水质风险预警

数字孪生体可以预设多种风险情景，如“上游化工厂发生泄漏”、“强降雨导致面源污染激增”等。通过对这些情景进行常态化推演，系统能够评估不同风险事件对全线水质的影响程度，并提前发布分级预警。这种基于情景的主动预警，远比被动等待监测数据超标更为有效。

5.4 水质-水量联合调度优化

水质安全与水量调度密不可分。数字孪生平台可以将水质模型与水量调度模型进行耦合。例如，在预测到未来几天上游来水水质可能恶化时，系统可以智能调整各节制闸的开启度，在保证供水需求的前提下，通过增加流速、缩短停留时间等方式，减少污染物在渠内的累积效应，或者提前蓄存优质水，以备不时之需，实现水质与水量的协同最优控制。

6 面临的挑战与对策

尽管前景广阔，但构建南水北调中线工程的数字孪生体仍面临诸多挑战：（1）多源异构数据融合难题：工程涉及的数据来源广、格式杂、质量参差不齐。对策是建立统一的数据治理体系，制定严格的数据接入标准，并采用先进的数据融合算法（如卡尔曼滤波、深度学习融合网络）来提升数据质量^[4]。（2）模型精度与计算效率的平衡：高保真模型（如三维CFD）计算量巨大，难以满足实时性要求。对策是采用“多模型融合”策略，对关键区域使用高精度模型，对非关键区域使用简化模型，并利用高性能计算（HPC）和边缘计算技术进行加速。（3）标准体系与互操作性缺失：目前行业标准尚不完善，不同厂商的系统难以互通。亟需由国家层面主导，加快制定数字孪生水利工程的数据、模型、接口等系列标准。（4）网络安全

全与保密风险：作为国家关键信息基础设施，其数字孪生系统是网络攻击的重点目标。必须构建纵深防御体系，采用国产化、自主可控的技术，并建立完善的数据脱敏和访问控制机制。

结束语：南水北调中线工程的高质量发展，离不开科技的强力赋能。数字孪生技术以其独特的虚实融合、实时交互、仿真预测能力，为解决该工程在智能运维与水质预警方面的深层次矛盾提供了前所未有的机遇。通过构建一个覆盖“天空地水工”的一体化感知网络，打造一个集成了水动力、水质、结构、设备等多专业模型的高保真仿真引擎，并在此基础上开发面向业务场景的智能应用，南水北调中线工程将能够实现从“看得见”到“看得清”、从“看得清”到“看得懂”、最终到“看得准、控得住”的跨越式发展。这不仅将显著提升工程自身的安全韧性、运行效率和水质保障能力，降低全生命周期成本，更重要的是，它将为我国乃至全球的大型跨流域调水工程、国家水网建设树立一个智慧化、现代化的标杆范式。未来，随着5G、量子计算、更先进AI算法等技术的不断涌现，南水北调中线工程的数字孪生体将变得更加智能、更加自主，真正成为守护“国之重器”、保障国家水安全的“智慧大脑”和“数字哨兵”。

参考文献

- [1]孙维亚, 郭俊杰, 茹兴康, 等. 数字孪生在南水北调中线高质量发展中的应用实践[J]. 水利发展研究, 2024, 24(09): 85-89.
- [2]李喆, 叶松, 杨星玥, 等. 数字孪生驱动的南水北调中线水源工程水质平台设计与开发[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(03): 174-180.
- [3]王付才, 王忠运, 孟明, 等. 数字孪生赋能的南水北调中线输水风险管控研究[J]. 河南水利与南水北调, 2025, 54(06): 37-39.
- [4]管世珍, 谢广东. 基于数字孪生技术的南水北调中线工程运行管理体系构建[C]//中国水利学会. 2022中国水利学术大会论文集(第三分册). 中国南水北调集团中线有限公司河南分公司, 2022: 130-133.