

高原高寒水利工程数字孪生技术应用综述

全科会, 郭永刚

(西藏农牧大学 水利土木工程学院, 西藏 林芝 860000)

摘要: 为厘清高原高寒环境下水利数字孪生的研究现状、关键技术需求和未来发展方向, 遵循 PRISMA 规范, 以 Web of Science、Scopus 和 CNKI(中国知网)为主要检索源, 对 2015—2026 年发表的相关文献进行了系统检索与筛选, 纳入核心文献 52 篇, 结合背景文献共引用 64 篇, 以高原高寒环境为独特视角, 对数字孪生技术在水利工程领域的研究进展与关键挑战进行了全面梳理。结果表明: 该领域自 2020 年以来呈爆发式增长, 但配水管网与污水处理占据近七成研究, 高原寒区案例严重匮乏; 实际工程中实现物理-数字双向闭环的系统不足 5%, 多数停留在“仅咨询”模式; 高原环境对数字孪生提出了多物理场耦合仿真、低功耗边缘计算、冻融智能预警和自适应调度四大关键技术需求, 尚未被现有研究体系充分覆盖。在此基础上提出了从近期到远期的分阶段实施路径, 并建议以西藏跨流域调水工程为载体建设示范项目。

关键词: 数字孪生; 高原寒区; 水利工程; 冻融循环; 边缘计算

中图分类号: TV672; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)04-0137-10

Review of Digital Twin Technology Applications in Plateau Alpine Water Engineering

QUAN Kehui¹, GUO Yonggang¹

(School of Water Conservancy and Civil Engineering, Xizang Agriculture and Animal Husbandry University, Nyingchi, Xizang 860000, China)

Abstract: To clarify the research status, key technical requirements, and future directions of DT for water engineering in high-altitude alpine environments, a comprehensive literature synthesis was conducted following the PRISMA protocol, with Web of Science, Scopus and CNKI as the main databases and a search period from 2015 to 2026. A total of 52 core publications were included for in-depth analysis, with 64 references cited when combined with background literature, and the research progress and critical challenges of DT technology in water engineering were systematically examined from the unique perspective of high-altitude alpine environments. The results show that: the field has expanded rapidly since 2020, yet water distribution networks and wastewater treatment account for nearly 70% of existing research, while plateau and cold-region case studies remain extremely scarce; fewer than 5% of full-scale deployments achieve genuine bidirectional physical-digital closed-loop control, with most operating in "advisory-only" mode; plateau environments impose four critical technical requirements multiphysics coupled simulation, low-power edge computing, intelligent freeze-thaw early warning, and adaptive scheduling that have not been adequately covered by current research. Based on these findings, a phased implementation roadmap from the near term to the long term is proposed, and a demonstration project based on the Tibetan inter-basin water transfer scheme is recommended.

Keywords: digital twin; plateau cold region; water engineering; freeze-thaw cycle; edge computing

收稿日期: 2026-02-25

修稿日期: 2026-03-31

基金项目: 西藏自治区重点研发计划项目(XZ202201ZY0034G); 西藏农牧大学研究生创新计划项目(SGYC2026006)

作者简介: 全科会(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高原高寒水利工程数字孪生、人工智能技术与水利信息化。

E-mail: 2226330355@qq.com

通讯作者: 郭永刚(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事基于 BIM 技术、大数据技术和人工智能技术的智慧河湖系统研发工作。

E-mail: 1960373107@qq.com

随着全球人口增长和城市化进程加速,水资源的可持续管理已成为各国面临的重大挑战。在水利基础设施的规划、建设与运维中,如何实现高效、智能和安全的管理模式,是当前水利行业亟需解决的核心问题^[1-3]。数字孪生(Digital Twin, DT)技术作为将物理系统映射为数字虚拟体的先进技术范式,近年来已在制造业^[4-5]、智慧能源^[6]和城市管理^[7]等多个领域得到广泛应用。在水利行业,数字孪生通过整合实时传感数据、高保真仿真模型和智能分析算法,能够实现对水处理、输配水和污水处理等系统的实时监测、预测控制和优化决策,展现出巨大的应用潜力^[8]。

然而,现有研究和工程实践主要集中在中低海拔的温带和亚热带地区,对高原高寒环境下水利工程数字孪生的系统性研究仍十分薄弱^[9]。本研究依托西藏自治区重点研发计划项目,聚焦高原高寒环境下数字孪生技术的适用性分析。以青藏高原为代表的高原高寒地区,平均海拔超过 4 000 m,大气压仅为标准大气压的 55%~65%,年平均气温低于 0℃,日温差可达 25℃以上,冻融循环极为频繁。研究表明,青藏高原地-气相互作用过程对区域气候和水循环具有显著影响^[10],土壤冻融过程对水热交换的调控作用尤为关键^[11],冻土退化导致活动层增厚,对管道基础稳定性构成长期威胁^[12]。这些极端环境条件对水利工程提出了独特挑战:低气压直接影响泵站汽蚀余量计算和设备选型;强冻融循环加速管道材料疲劳破坏,这一现象已在国内寒区输水渠道工程中得到充分验证^[13];稀薄大气导致太阳辐射增强,管道温度场分布复杂;通信基础设施薄弱制约实时数据传输^[14-15]。

Ghorbani Bam 等^[8]对 2015—2025 年间水务领域数字孪生研究的系统综述表明,该领域研究呈爆发式增长态势,但来自高原和寒区的研究案例极为匮乏。本文在此基础上进一步纳入国内水利数字孪生政策文件、高原寒区工程文献和长距离输水研究成果,形成纳入系统分析 52 篇、结合背景文献共 64 篇的综合分析。与文献^[8]相比,本文的差异和拓展体现在:①文献范围上,补充检索了中文文献和政策标准文件;②特色视角上,以高原高寒环境为独特切入点,系统分析极端环境对数字孪生各组件的特殊需求;③技术路线上,提出了面向高原场景的分阶段实施路径和关键技术方向。

文献检索方面,本文遵循 PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Ana-

lyses) 系统综述规范开展文献检索与筛选。英文文献以 Web of Science 和 Scopus 为检索数据库,使用检索式“digital twin” AND (“water” OR “wastewater” OR “hydraulic” OR “pipeline”);中文文献以 CNKI 为主要检索源,使用检索式“数字孪生” AND (“水利” OR “水处理” OR “管网” OR “输水”)。为确保高原寒区相关研究的充分覆盖,补充检索“高原” OR “高寒” OR “冻融” OR “plateau” OR “alpine” OR “freeze-thaw”。检索时间范围为 2015 年 1 月至 2026 年 3 月。

初步检索获得 143 (Web of Science $n = 55$, Scopus $n = 30$, CNKI $n = 45$, 政策文件 $n = 13$) 条记录,去除重复文献 27 篇后得到 116 篇,经题目与摘要筛选排除不相关文献 32 篇,对 84 篇进行全文评审,最终排除无法获取全文(5 篇)、非水利数字孪生领域(13 篇)和未涉及数字孪生核心组件(14 篇)共 32 篇,纳入本综述系统分析的文献共 52 篇,其中国际文献 31 篇、国内文献 15 篇、政策与标准文件 6 篇。此外,还引用了若干数字孪生通用定义文献和非水利领域的背景文献 12 篇(如文献^[1-7]、^[16-20]等),这些文献用于概念介绍和理论背景阐述,未纳入 PRISMA 系统筛选流程。

1 数字孪生基本概念与技术架构

1.1 定义与核心组件

数字孪生是指在数字空间中创建的、与物理实体特征一致的高保真虚拟模型,通过传感器实时获取物理实体状态数据驱动虚拟模型运行,并将仿真结果反馈以优化物理实体的决策过程,形成物理-数字双向闭环的智能系统^[5,16-17]。在水利行业中,需要区分数字影子(Digital Shadow, DS)和数字孪生:前者仅支持从物理实体到数字模型的单向数据流,虚拟模型输出需人工解读后方可用于决策;后者支持自动化的双向数据交换,可自主触发物理系统的控制动作^[18-19]。

综合国际文献^[8,20],完整的水利工程数字孪生系统应包含八大核心组件(表 1)。该框架在总体逻辑上适用于高原场景,但在具体技术要求上需作显著调整:①物理传感器与分析仪需满足耐低温、抗冻融和抗强紫外辐射等环境适应性要求;②物理-虚拟连接在通信薄弱的高原地区需采用卫星通信或北斗短报文等替代方案;③高保真仿真器需纳入低气压、大温差和冻融耦合效应。

表 1 水利工程数字孪生核心组件

序号	组件名称	功能描述
1	物理实体	实际运行的全规模水利工程设施
2	高保真仿真器	能近似关键物理化学过程的动态仿真模型
3	物理传感器与分析仪	实现实时数据流的温度、流量、水质等传感设备
4	执行器与虚拟连接	泵驱动器、阀门等远程控制执行的执行设备
5	物理-虚拟连接	支持双向信息流的持续数据同步通道
6	高级数据分析	数据清洗、滤波及 AI/ML 智能分析模块
7	交互与服务	用户界面、实时/近实时状态展示与控制模块
8	执行反馈机制	虚拟模型自主触发物理系统控制的闭环机制

1.2 建模范式与系统架构

水利数字孪生的建模范式分为三类:基于守恒定律和物理化学原理的机理模型(如活性污泥模型(Activated Sludge Model, ASM)和 EPANET(美国环保署管网水力分析模型)),通过机器学习从数据中提取模式的经验模型,以及将两者有机结合的混合模型^[21]。张建云等^[22]从智慧水利的宏观视角分析了物联网和大数据等技术在水利行业中的应用前景。在高原高寒环境下,混合模型的优势尤为突出——机理模型可描述低气压和低温条件下的物理过程变化,数据驱动组件可学习难以用方程精确描述的冻融劣化过程。

系统集成架构需解决变量命名映射、数据管线和数据访问权限三个关键问题。Cavalieri 和 Gambadoro^[23] 基于资产管理壳(Asset Administration Shell, AAS)构建供水系统数字孪生,为标准化、可互操作的系统集成提供了可借鉴的方案。对于高原地区而言,通信基础设施薄弱使得数据管线的设计更需注重低带宽条件下的数据压缩与边缘预处理。水利部指导意见鼓励应用北斗短报文和卫星通信等技术提高通信保障率^[24]。在国家层面,《数字孪生水利工程建设技术导则(试行)》进一步细化了水利工程层面的建设规范^[25],《数字孪生流域建设技术大纲(试行)》明确了水利数字孪生的总体框架与建设要求^[26],李国英^[27]进一步指出数字孪生流域是推动新阶段水利高质量发展的重要支撑,为高原地区水利数字化转型提供了顶层政策依据。

2 数字孪生在水利工程各子领域的应用进展

综合 Ghorbani Bam 等^[8] 对国际文献的分类体系与本文的补充检索,水利领域数字孪生研究可划分为七个主题类别。在文献[8]纳入的 147 篇国际文献中,各类别分布为:综述与概念研究(38 篇)、污水处理(41 篇)、污水收集系统(17 篇)、配水管网(47 篇)、饮用水处理(25 篇)、水资源回用(17 篇)和海水淡化(4 篇)。由于部分研究涉及多个领域,采用多标签分类法。表 2 总结了各子领域应用概况及高原环境特殊挑战。表中的篇数均引自文献[8]的统计,本文在此基础上补充了高原视角分析。此外,大坝与水库枢纽数字孪生作为水利工程数字孪生的另一重要分支,在三峡、白鹤滩等重大工程中已实现基于 GIS + BIM 的在线智能监测^[28];国际上 BIM 与数字孪生在大坝工程中的集成应用同样取得显著进展^[29]。

表 2 水利工程各子领域数字孪生应用概况

子领域	篇数	代表性技术	高原环境特殊挑战
污水处理	41	LSTM 软传感器、混合 ASM-CNN、MPC	低温抑制生物活性,曝气效率随海拔降低
配水管网	47	CNN-VAE 泄漏检测、T-GCN 泵速优化	管道冻融疲劳、水锤加剧、蒸发损失大
污水收集	17	深度强化学习泵送、PINN 热传递	冻土对管道结构的长期影响
饮用水处理	25	BiLSTM 水质预警、RL 化学投加	冰期原水浊度骤变、低温絮凝效率下降
水资源回用	17	混合 NN/ASM、GHG 排放预测	高海拔膜性能衰减、能耗修正
海水淡化	4	MPC 控制、膜清洗决策支持	研究严重不足,高原应用尚属空白

注: LSTM (Long Short-Term Memory, 长短期记忆网络)、CNN (Convolutional Neural Network, 卷积神经网络)、MPC (Model Predictive Control, 模型预测控制)、VAE (Variational Auto-Encoder, 变分自编码器)、T-GCN (Temporal Graph Convolutional Network, 时序图卷积网络)、PINN (Physics-Informed Neural Network, 物理信息神经网络)、BiLSTM (Bidirectional LSTM, 双向长短期记忆网络)、RL (Reinforcement Learning, 强化学习)、NN (Neural Network, 神经网络)、GHG (Greenhouse Gas, 温室气体);软传感器(Soft Sensor, 基于模型推断而非物理测量的虚拟传感器)。

污水处理是数字孪生应用最活跃的子领域之一,研究经历了从独立软传感器到集成式模型预测

控制的演进过程^[30-31]。Heo 等^[32]利用数字孪生驱动的曝气控制策略,在维持氮约束条件下实现了鼓风机能耗降低约 17%。Bolorinos 等^[33]证明数字孪生的预测性负荷转移可优化污水处理厂能源消耗结构。在高原高寒地区,低温显著抑制生物反应速率,高海拔曝气效率因气压降低而下降,传统 ASM 模型中的动力学参数需根据高原环境条件重新标定。

配水管网是研究最多的子领域,典型应用包括泄漏检测、能耗优化和水质管理。实验室规模的研究利用 CNN-VAE 架构实现了大于 97% 的泄漏分类准确率^[34];最新研究进一步引入图神经网络与语义规则学习以应对管网的演化性变化^[35];Ostfeld 等^[36]提出了从静态模型到自更新数字孪生的分阶段演进路线,对于高原长距离输水管网,需特别关注管道内水体冻结导致的水锤效应加剧和昼夜温差造成的管道热胀冷缩疲劳累积。

饮用水处理数字孪生从异常检测概念验证发展至全厂自适应控制系统^[37]。Wang 等^[38]在深度确定性策略梯度强化学习框架下实现了化学投加的 AI 优化控制。而水资源回用和海水淡化数字孪生研究相对不足^[39-40]。在污水收集系统领域,Bartos 和 Kerkez^[41]开发的 Pipedream 交互式数字孪生为自然与城市排水系统提供了开源工具基础。

各子领域组件完备度分析表明(图 1),“执行反馈(闭环)”组件在所有子领域中得分最低(10%~25%),验证了绝大多数系统仍以咨询模式运行。

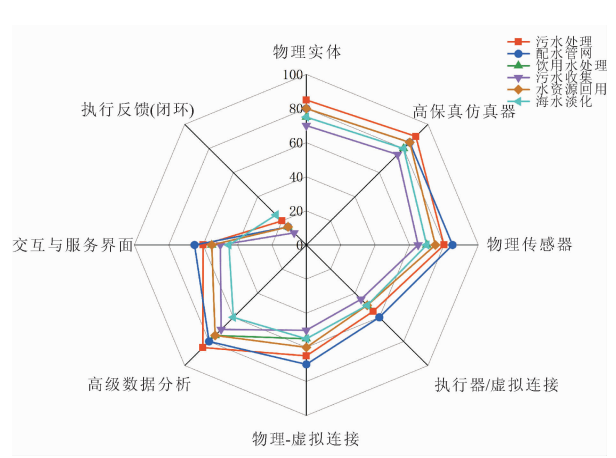


图 1 各子领域数字孪生组件完备度雷达图

3 高原高寒环境特殊挑战与应对策略

3.1 低气压与大温差的多物理场耦合效应

青藏高原平均海拔 4 000 m 以上,当地大气压约为标准大气压的 55%~65%。低气压对水利设备

的影响主要体现在(图 2):①泵站汽蚀余量发生显著变化,装置有效汽蚀余量(Net Positive Suction Head Available,NPSHA)的计算必须采用当地实际大气压,否则将导致设备选型错误和运行安全隐患;②水体沸点降低,海拔 4 500 m 处大气压约为 57.7 kPa、水沸点约 84.5℃,海拔 5 000 m 处水沸点降至约 83℃;③曝气效率因气体溶解度变化而降低,标准氧转移效率(Standard Oxygen Transfer Efficiency,SOTE)较平原约下降 15%,需按海拔进行修正。

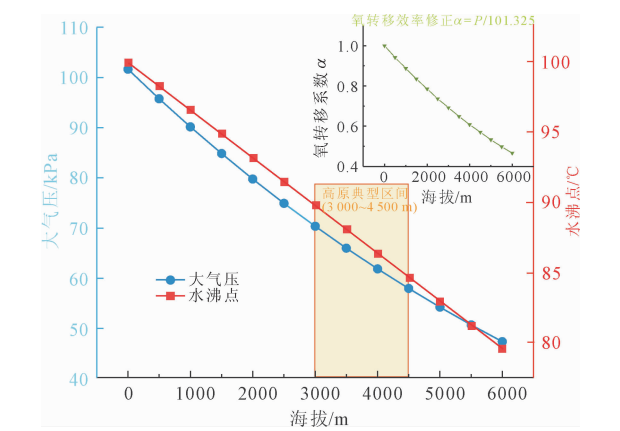


图 2 关键水利参数随海拔变化曲线

同时,高原地区日温差可达 25℃ 以上,年温差超过 50℃,强烈的冻融循环导致管道材料经历反复的膨胀-收缩应力循环。传统参数化模型难以准确描述此类非线性劣化过程。因此,高原数字孪生系统需要建立耦合低气压、大温差和冻融周期的多物理场仿真模型(图 3),国内学者在寒区衬砌渠道水-热-力耦合冻胀建模方面已取得重要进展^[42],并已扩展至水-热-汽-力四场耦合建模^[43]。在此基础上,可将热力学模型(管道壁面-流体-土壤温度场)、结构力学模型(冻融疲劳累积损伤)和水力学模型(流体特性随温度压力变化)进行耦合计算,以准确模拟极端工况下的系统行为。

3.2 通信基础设施薄弱与边缘计算架构

高原地区地广人稀,4G/5G 网络覆盖率低,光纤铺设成本高昂,传统依赖云端计算的数字孪生架构面临数据传输延迟大、带宽不足和链路不稳定等问题。边缘 IoT、AI 与大数据技术融合为智慧水务边缘智能化提供了重要技术路径^[44]。针对这一挑战,需要探索低功耗、抗干扰的边缘计算架构,实现传感数据的本地化实时处理,降低对云端通信链路的依赖。

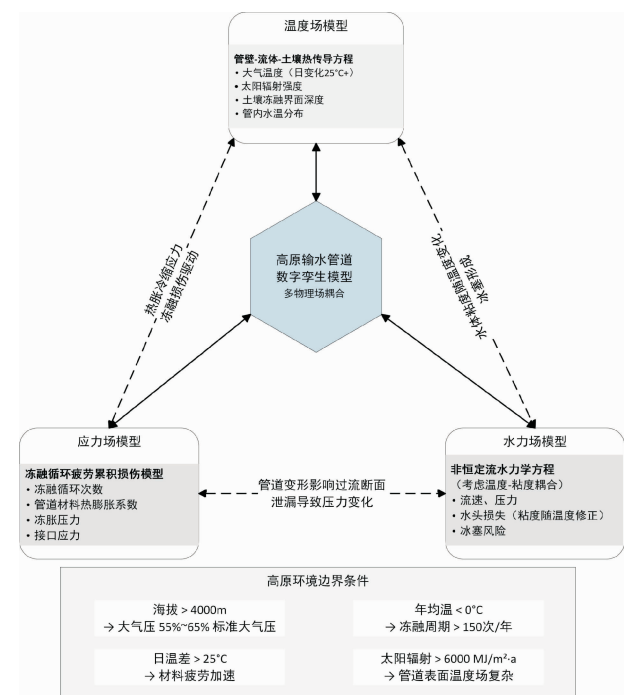


图 3 高原环境多物理场耦合仿真框架

借鉴 Molin 等^[45]对水资源回收设施数据管线的研究,边缘计算设备可以在现场完成数据预处理和软传感器推断,将亚分钟级延迟的预测结果提供给本地决策模块,仅将关键聚合数据上传至云端。Travaš 等^[46]开发的基于低成本微控制器和边缘计算设备的管网泄漏检测数字孪生,为高原地区提供了可借鉴的技术方案。综合比较不同计算架构,云-边协同架构最适合高原场景:关键任务由本地边缘设备处理以保证实时性和抗断网能力,非关键任务弹性上传至云端以利用其强计算能力。此外,边缘设备还需考虑低温工作适应性和太阳能供电方案,以适应偏远地区缺乏稳定电力供应的现实。

3.3 冻融循环对管道系统的影响与智能预警

冻融循环是影响高原水利工程安全运行的关键因素之一。管道中水体冻结不仅导致输水中断,还会引发管道胀裂、接口松动和防腐层破损等结构性损伤;工程实践中可通过土壤添加剂、保温层等措施缓解冻胀危害^[47]。传统监测方法依赖人工巡检,在高原广袤而人烟稀少的区域难以实施。数字孪生技术为此提供了新的解决思路:通过沿管道布设温度传感器阵列,结合管道壁面-土壤温度场数值模型,可以实时预测管道内水体的冻结风险区域和时间窗口,在冻结发生前自动启动伴热系统或调整输水流速以防止冻管。

Li 等^[48]提出的物理信息神经网络(PINN)方

案,通过将能量守恒方程嵌入神经网络约束中,提高了管壁-土壤温度分布预测的准确性,该方法可扩展至冻土环境下管道温度场的建模。南水北调中线工程的冬季数字孪生调度模型已初步验证了基于水温预测的冰期(冬季水体部分冻结期)动态调度策略的可行性^[49],为高原冻融智能预警提供了技术参考。潘佳佳等^[50]在寒区引调水工程输水安全领域的水冰耦合数值模拟研究,为高原输水工程提供了重要方法论基础。

3.4 高原特殊工况下的自适应调度模型

高原地区水利工程的调度面临显著的季节性变化:雨季(6—9月)降水充沛但洪水风险增大;旱季(10月至翌年5月)水源匮乏且冰冻风险突出。这种强时变工况特征要求数字孪生的调度模型具备高度的自适应能力。

借鉴 MPC 的思想,可建立滚动优化调度框架(图4):在每个调度时段,数字孪生获取最新的水库水位、管道流量、用水需求和气象预报信息,预测未来一段时间的系统响应,求解最优调度方案后仅执行前一小段方案,随后滚动更新。该方法已在多个全规模水利设施中得到验证:Changi 水回收厂实现了长达 5 d 的过程事件预测^[51,8];Zhou 等^[52]实现了给水泵站能耗降低 9.8%。对于高原地区,调度模型还需纳入冰情约束、低温泵效修正和太阳能供电波动等特殊约束条件。

4 实施经验与高原地区建设启示

在全规模实施案例中,仅有中国庐山供水系统等少数案例实现了“咨询+过程控制”的双向闭环,其余均以“仅咨询”模式运行^[8],无法自主调整实际系统,需要人工干预。在 Ghorbani Bam 等^[8]综述基础上,本文进一步梳理出 8 个具有代表性的全规模实施案例(表3),涵盖供水、污水处理、污水收集和综合水循环等子领域,以体现当前国际数字孪生在水利工程的部署现状。跨案例分析揭示三个关键机制决定项目能否过渡到过程控制:①治理与约束映射——只有明确定义写回权限和边界条件的项目才能实现闭环;②估计保真度与更新频率需与目标过程的动态特性匹配;③在 P&ID(Piping and Instrumentation Diagram,工艺管道和仪表流程图)、SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition,数据采集与监视控制系统)标签和模型状态之间建立清晰映射的项目推进速度明显更快。

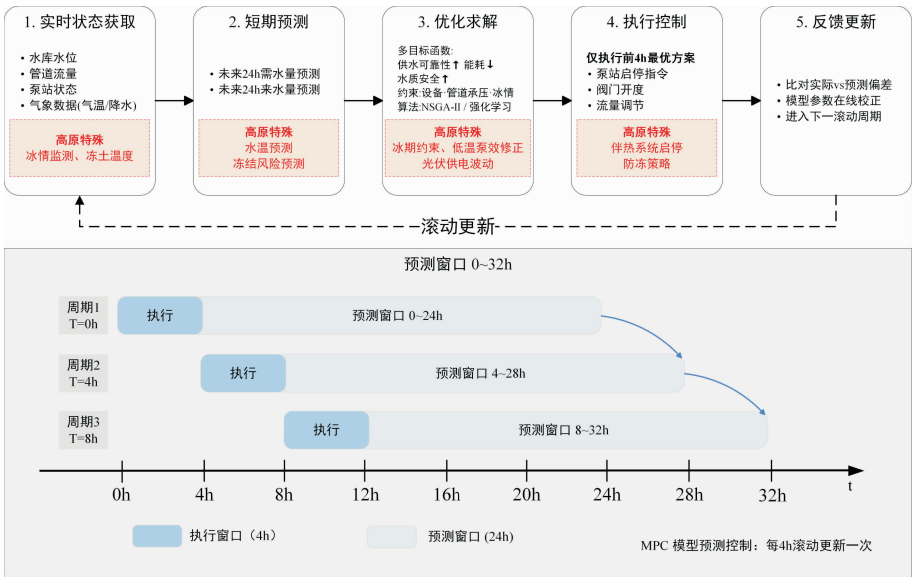


图 4 自适应滚动调度框架

表 3 全球全规模水利数字孪生实施案例

设施名称	国家	类型	实施模式	主要成果	参考文献
Changi 水回收厂	新加坡	水资源回用	DT(咨询)	1 200 个数据标签,5 d 事件预测	[8]
Eindhoven WRRF	荷兰	水资源回收	DS(咨询)	2 h 超前仿真,湿天气精度待提升	[53]
哥德堡污水系统	瑞典	污水收集	DS(咨询)	250 km ² 集水区域管网实时预测控制	[8]
Ewe Wasser GmbH	德国	污水处理	DS(咨询)	曝气能耗降低 30%,年省电量 120 万 kW·h	[8]
庐山供水公司	中国	供水系统	DT(咨询+控制)	西门子 SCADA,水力仿真优化	[8]
瓦伦西亚配水管	西班牙	配水管网	DS(咨询)	2 万+ 测点,泄漏检测与需求预测	[8]
Águas do Porto	葡萄牙	综合水循环	DS(咨询)	22 类数据集集成,全城水循环系统	[8]
Strongford WWTP	英国	污水处理	信息不足	6 万+ 静态和动态指标,达到碳中和目标	[8]

注:DT = Digital Twin(数字孪生,具备双向交互能力);DS = Digital Shadow(数字影子,仅支持单向数据流);括号内为实施模式(咨询/咨询+控制)。

对高原地区建设的启示:①高原偏远地区管理层级较多且信息化基础薄弱,更需在项目初期明确数据写回权限和安全边界;②高原冻融过程的时间尺度(小时级温度骤变至季节级冻融循环)要求模型具备多时间尺度预测能力;③通信条件差,建议优先建立离线可用的本地真值字典。在约束逻辑不透明或治理权限未正式授权的情况下,应从咨询模式起步,逐步积累信任后再向有限闭环过渡。

在国内,数字孪生三峡工程实现了多目标多约束的联合调度智能决策^[54];南水北调中线冬季数字孪生调度是最具高原/寒区参考价值的案例^[49]。长距离输水工程数字孪生数据融合方法^[55]和输水渠系糙率在线估计方法^[56],为长距离输水数字孪生提供了关键技术支撑;近期研究还提出了面向大坝安全管理的数字孪生开发框架^[57],以及面向大型水工金属结构智能运维的数字孪生平台^[58],进一步拓展

了水利工程数字孪生的应用边界。在国际典型案例方面,Daneshgar 等^[53]报道了一座全规模污水资源回收设施数字孪生的运行实践,验证了混合建模在实际工程长期运行中的可靠性,对高原寒区有限运行年限下的模型部署具有借鉴意义。Savic^[59]借鉴汽车与航空工业的数字化与自动化经验指出,水利数字孪生应循序推进自动化等级、避免盲目追求一步到位的全闭环,这一思路与本文提出的“咨询模式-有限闭环”渐进式路径相吻合。

5 关键挑战与未来研究方向

5.1 主要研究差距

5.1.1 数据质量与标准化

数据质量是决定数字孪生效能的基础。Eindhoven WRRF 的实践表明,即使在完善的数据管线下,湿天气条件仍会导致硝酸盐和 MLSS(Mixed Liq-

uor Suspended Solids,混合液悬浮固体)预测精度显著退化^[53],说明瞬变水力学和测量不确定性会严重影响校准和短期预测。对于高原地区,传感器在极端温度下的标定漂移、结冰导致的信号中断以及强紫外辐射对电子元器件的加速老化,使数据质量问题更加突出。建立包含冻融周期标定协议的高原专用元数据(Metadata,描述数据的数据)规范,是保障数字孪生模型准确性的前提。

5.1.2 标准化框架缺失

目前水利行业缺乏标准化的数字孪生开发框架,这在高原地区尤为突出。模块化框架、监管对齐和协作平台是推进标准化的三个关键方向^[8]。对于高原环境,中国已发布《数字孪生水利工程质量评价》团体标准^[60],但尚未涵盖高原寒区特殊工况。目前,针对高原环境的传感器耐低温部署规范、模型参数海拔修正标准和冻融工况验证基准均处于空白状态,这一标准化缺口制约了高原水利数字孪生的规模化推广。

5.1.3 双向数据传输与控制权限

如前所述,绝大多数全规模部署仍以咨询模式运行。实现自动化双向数据传输的主要障碍包括安全法规、网络安全顾虑和操作人员信任问题。在高原偏远地区,还存在网络不稳定导致控制指令丢失的风险。建议采用渐进式自动化策略——从低风险操作(如流量调节、化学投加设定值)开始,逐步扩展至更高级别的控制操作。同时需要开发面向弱网环境的断点续传和指令确认机制。

5.1.4 机器学习方法的应用与局限

从文献检索方法分布结果来看,约 40% 的文献采用了机器学习方法,表明混合建模正成为主流趋势。但 ML 模型在高原环境下面临训练数据严重不足的挑战——高原水利工程运行年限短、传感器覆盖密度低,难以积累足够的高质量标记数据。同时,高原极端工况(如冻融突变、低温异常)在训练集中属于稀有事件,常规 ML 模型容易对此类极端样本欠拟合。此外,数据标注的困难和跨站点数据分布差异也制约了 ML 方法在高原水利领域的推广应用。物理信息神经网络(PINN)作为融合机理与数据的新兴范式,在复杂流体动力学问题中展现出独特优势^[61],并已系统应用于饮用水管网、污水处理、城市排水等水务系统^[62]。Fu 等^[63]和 Saddiqi 等^[64]的综述均强调了可迁移 ML 模型和标准化测试数据集的重要性。

5.2 未来研究方向

综合以上分析,本文提出面向高原高寒环境的水利工程数字孪生分阶段研究方向(表 4),并提出以下的建议措施。

表 4 高原水利工程数字孪生未来研究方向			
优先级	研究方向	具体内容	预期突破
近期	多物理场耦合仿真	低气压-大温差-冻融周期耦合建模	极端工况下管道行为准确预测
近期	低功耗边缘计算	抗寒、太阳能供电的边缘设备开发	弱网环境下实时决策能力
中期	自适应调度模型	强时变工况下的滚动优化调度	雨旱季切换的智能调度
中期	冻融智能预警	管道温度场预测与防冻策略优化	冻管事故零发生
中期	高原元数据规范	传感器标定、海拔修正标准	数据质量的制度性保障
远期	全规模高原示范	西藏跨流域输水工程 DT 试点	高原 DT 从理论到实践的跨越
远期	水-能耦合优化	太阳能泵站+储能系统 DT 集成	高原水利的绿色低碳运行

(1) 全规模高原示范工程。目前高原地区尚无完整的水利数字孪生示范项目。建议以西藏跨流域调水工程或城镇供水系统为载体,建设端到端的数字孪生示范,覆盖从取水、输水、处理到配水的全流程,验证技术可行性并积累高原运维经验。

(2) 高级分析集成。针对第 5.1.4 节所揭示的高原 ML 训练数据不足问题,建议发展面向高原小样本场景的迁移学习和联邦学习方法,将中低海拔地区积累的水利运行数据作为源域,通过领域自适应技术迁移至高原场景。同时,可将自适应学习算法嵌入数字孪生,使其能够随系统动态自我演化,实现典型和极端条件下的持续优化和可靠预测。此外,还应建立高原水利工程标准化测试数据集,为 ML 模型的跨站点验证提供基准。

(3) 可持续性与资源效率。随着水资源稀缺加剧和能源成本上升,数字孪生应将系统引向可持续运行。通过耦合稳健的数据管线与面向操作的用例(如能耗感知控制和需求预测),数字孪生可同时实现环境和经济效益。在高原地区,可探索光伏-储能-水泵联合调度的数字孪生优化方案。

(4) 分阶段实施路径。建议采用“三步走”策略:第一步,强化不确定性感知的估计和校准,确保在湿天气条件下保持稳健;第二步,标准化数字孪生就绪的元数据、开放 API(Application Programming Interface,应用程序编程接口)和可审计的变更管

理,针对第 5.1.2 节所揭示的高原标准化缺口,应优先制定传感器耐低温部署规范、模型参数海拔修正标准和冻融工况验证基准;第三步,从仅咨询模式过渡到有限授权的设定值调整,在数字孪生镜像 PLC (Programmable Logic Controller,可编程逻辑控制器)或 SCADA 的约束逻辑中调整。以及未来使用卫星网络进行实时通信技术,解决高原网络通信基础。

6 结 论

本文以高原高寒环境为视角,系统综述了数字孪生技术在水利工程领域的研究进展与关键挑战。经 PRISMA 规范筛选,纳入系统分析 52 篇核心文献,结合背景文献共引用 64 篇,主要得出以下结论:

(1) 数字孪生在水利领域的研究呈爆发式增长态势,但地域和领域分布不均衡。配水管网和污水处理是研究最密集的子领域,高原和寒区的应用案例极为匮乏。真正实现全组件双向闭环的完整数字孪生仅占约 5%,绝大多数系统以仅咨询模式运行。

(2) 高原高寒环境为数字孪生技术带来了多层次特殊挑战,包括低气压对设备选型和过程效率的影响、冻融循环对管道系统的疲劳破坏、通信基础设施薄弱对数据传输的制约,以及强时变工况对调度模型自适应能力的要求。这些挑战尚未被现有研究体系充分覆盖。

(3) 本文提出了多物理场耦合仿真、低功耗边缘计算架构、自适应调度模型和冻融智能预警等关键技术路线,设计了从近期到远期的分阶段实施路径。建议以西藏跨流域调水工程为载体建设全规模高原水利数字孪生示范项目。

(4) 基于八大核心组件体系,各子领域“执行反馈(闭环)”组件覆盖率最低(10%~25%),而高原特殊工况对传感器耐候性、边缘计算自主性和模型海拔参数修正提出了额外的成熟度要求。建议推动从“仅咨询”模式向“有限闭环”模式的系统性跃迁。

本研究存在以下局限:文献检索仅限中英文,未涵盖灰色文献和会议论文;政策文件的技术解读可能存在主观偏差;高原水利数字孪生案例稀少使得部分结论的代表性有待后续工程实践进一步验证。

参考文献:

- [1] Taylor J E, Olmsted F L, Bennett G, et al. Engineering smarter cities with smart city digital twins[J]. *Journal of Management in Engineering*, 2021,37(06):02021001.
- [2] Beji H, Lade M. Impact of digital transformation on car-

bon emission reductions in the water industry[M]. *Lecture Notes in Energy*. Cham: Springer, 2022,86:117-127.

- [3] 张绿原,胡露骞,沈启航,等. 水利工程数字孪生技术研究与探索[J]. *中国农村水利水电*,2021(11):58-62.
- [4] Tao F, Sui F, Liu A, et al. Digital twin-driven product design framework[J]. *International Journal of Production Research*, 2019,57(12):3935-3953.
- [5] Singh M, Fuenmayor E, Hinchey E P, et al. Digital twin: Origin to future[J]. *Applied System Innovation*, 2021,4(02):36.
- [6] O'Dwyer E, Pan I, Charlesworth R, et al. Integration of an energy management tool and digital twin for coordination and control of multi-vector smart energy systems[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020,62:102412.
- [7] Schrotter G, Hürzeler C. The digital twin of the city of Zurich for urban planning[J]. *PFG-Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 2020,88(01):99-112.
- [8] Ghorbani Bam P, Rezaei N, Roubanis A, et al. Digital twin applications in the water sector: A review[J]. *Water*, 2025,17(20):2957.
- [9] 刘家宏,梅超,王浩,等. 数字孪生流域:未来流域治理管理的新基建新范式[J]. *水科学进展*,2022,33(5):683-696.
- [10] 马伟强,马耀明,马龙腾,等. 青藏高原地-气相互作用过程及其天气、气候效应数值模拟研究综述[J]. *气象学报*,2025,83(03):584-638.
- [11] 赵林,胡国杰,邹德富,等. 青藏高原土壤冻融过程研究进展[J]. *地理科学进展*,2020,39(11):1950-1962.
- [12] 程国栋,赵林. 青藏高原多年冻土变化及其对生态过程的影响[J]. *中国科学(地球科学)*,2022,52(01):1-17.
- [13] 王羿,王正中,刘铨鸿,等. 寒区输水渠道衬砌与冻土相互作用的冻胀破坏试验研究[J]. *岩土工程学报*,2018,40(10):1799-1808.
- [14] 夏润亮,李涛,余伟,等. 流域数字孪生理论及其在黄河防汛中的实践[J]. *中国水利*,2021(20):11-13.
- [15] 朱思宇,杨红卫,尹桂平,等. 基于数字孪生的智慧水利框架体系研究[J]. *水利运工程学报*,2023(03):68-74.
- [16] Grieves M, Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham: Springer, 2016:85-113.
- [17] 陶飞,张萌,程江峰,等. 数字孪生车间——一种

- 未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017,23(01):1-9.
- [18] Kritzinger W, Karner M, Traar G, et al. Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(11): 1016-1022.
- [19] Jones D, Snider C, Nassehi A, et al. Characterizing the digital twin: A systematic literature review[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020,29(Part A):36-52.
- [20] Rasheed A, San O, Kvamsdal T. Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective[J]. IEEE Access, 2020,8:21980-22012.
- [21] Schneider M Y, Quaghebeur W, Borzooei S, et al. Hybrid modelling of water resource recovery facilities: Status and opportunities[J]. Water Science and Technology, 2022,85(09):2503-2524.
- [22] 张建云,刘九夫,金君良,等. 关于智慧水利的认识与思考[J]. 水利水运工程学报,2019(06):1-7.
- [23] Cavalieri S, Gambadoro S. Digital twin of a water supply system using the asset administration shell[J]. Sensors, 2024,24(5):1360.
- [24] 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[EB/OL]. 中华人民共和国中央人民政府网. (2024-10-14)[2025-06-30]. https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue_11726/202411/content_6989758.html.
- [25] 詹全忠,陈真玄,张潮,等.《数字孪生水利工程建设技术导则(试行)》解析[J]. 水利信息化,2022(04):1-5.
- [26] 谢文君,李家欢,李鑫雨,等.《数字孪生流域建设技术大纲(试行)》解析[J]. 水利信息化,2022(04):6-12.
- [27] 李国英. 建设数字孪生流域 推动新阶段水利高质量发展[J]. 中国水利,2022(13):1-3.
- [28] Li Shuangping, Zhang Bin, Tong Guangqin, et al. Online intelligent monitoring system and key technologies for dam operation safety[J]. Advances in Civil Engineering, 2025,2025:9983255.
- [29] Pereira R C C, Resende P N, Pires J R C, et al. BIM-enabled strategies for dams and hydroelectric structures: a comprehensive analysis of applications from design to operation[J]. Architectural Engineering and Design Management, 2025,21(03):491-512.
- [30] Dairi A, Cheng T, Harrou F, et al. Deep learning approach for sustainable WWTP operation: A case study on data-driven influent conditions monitoring[J]. Sustainable Cities and Society, 2019,50:101670.
- [31] Verhaeghe L, Verwaeren J, Kirim G, et al. Towards good modelling practice for parallel hybrid models for wastewater treatment processes[J]. Water Science and Technology, 2024,89(12):2971-2990.
- [32] Heo S K, Oh T, Woo T Y, et al. Real-scale demonstration of digital twins-based aeration control policy optimization[J]. Desalination, 2025,593:118235.
- [33] Bolorinos J, Mauter M S, Rajagopal R. Integrated energy-flexibility management at wastewater-treatment facilities[J]. Environmental Science and Technology, 2023, 57(45):18362-18371.
- [34] Cody R A, Tolson B A, Orchard J. Detecting leaks in water distribution pipes using a deep autoencoder and hydroacoustic spectrograms[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2020,34(02):04020001.
- [35] Degeler V, Hadadian M, Karabulut E, et al. Ditec: Digital twin for evolutionary changes in water distribution networks[C]//International symposium on leveraging applications of formal methods. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024:62-82.
- [36] Ostfeld A, Abhijith G R. Digital twin for water distribution system management—Towards a paradigm shift[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2023,14(04):02523001.
- [37] Inoue J, Yamagata Y, Chen Yuqi, et al. Anomaly detection for a water treatment system using unsupervised machine learning[C]//Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW). New Orleans, USA, November 18-21, 2017. Piscataway: IEEE, 2017:1058-1065.
- [38] Wang Hai,Guo Yesshuang,Li Long,et al. Development of AI-based process controller using deep reinforcement learning[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2024,157:105407.
- [39] Serrao M, Jauzein V, Juran I, et al. Hybrid modelling of nitrogen removal by biofiltration[J]. Water Science and Technology, 2024,90(6):1416-1432.
- [40] van Rooij F, Scarf P, Do P. Planning the restoration of membranes in RO desalination using a digital twin[J]. Desalination, 2022,519:115214.
- [41] Bartos M, Kerkez B. Pipedream: An interactive digital twin model for natural and urban drainage systems[J]. Environmental Modelling & Software, 2021, 144: 105120.
- [42] 江浩源,王正中,刘铨鸿,等. 考虑太阳辐射的寒区衬砌渠道水-热-力耦合冻胀模型与应用[J]. 水利学报,2021,52(05):589-602.
- [43] 年作斌,王正中,李中煜,等. 基于水-热-汽-力耦合

- 的寒区河渠湖库护岸冻融破坏机理[J/OL]. 水利学报. [2025-04-26]. <https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20250426>.
- [44] Amanatidis P, Lyratzis E, Angelopoulos V, et al. Intelligent water management through edge-enabled IoT, AI, and big data technologies[J]. *IoT*, 2025,7(01):5.
- [45] Molin H, Wärf C, Lindblom E, et al. Automated data transfer for digital twin applications: Two case studies[J]. *Water Environment Research*, 2024,96(08):e11074.
- [46] Travaš V, Gal E, Lučin I, et al. Digital twin for real-time leakage detection and localization in pressurized piping systems[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2025,27(4):755-770.
- [47] Ji Yukun, Wang Haihang, Li Xianzhao, et al. Effect of anionic polyacrylamide polymer on frost heave mitigation and its implication for frost-susceptible soil[J]. *Polymers*, 2023,15(09):2096.
- [48] Li Jiuling, Mohamad N N N, Sharma K, et al. Establishing boundary conditions in sewer pipe/soil heat transfer modelling using physics-informed learning[J]. *Water Research*, 2023,244:120441.
- [49] 李景刚,陈晓楠,卢明龙,等. 南水北调中线干线冰期输水动态调度初探[J]. *中国水利*,2023(02):30-33.
- [50] 潘佳佳,郭新蕾,付 辉,等. 南水北调中线工程冰期输水水温-冰情耦合模拟[J]. *水利学报*,2023,54(3):296-306.
- [51] Torfs E, Nicolai N, Daneshgar S, et al. The transition of WRRF models to digital twin applications[J]. *Water Science and Technology*, 2022,85(10):2840-2853.
- [52] Zhou Shengwen, Guo Shunsheng, Xu Wenxiang, et al. Digital twin-based pump station dynamic scheduling for energy-saving optimization[J]. *Water Resources Management*,2024,38:2773-2789.
- [53] Daneshgar S, Polesel F, Borzooei S, et al. A full-scale operational digital twin for a water-resource-recovery facility[J]. *Water Environment Research*, 2024,96(05):e11016.
- [54] 中国水利水电科学研究院. 中国数字孪生水利建设成果亮相第十五届国际水信息学大会[EB/OL]. 中国水利水电科学研究院网站. (2024-06-25). <http://www.iwhr.com/zgskywnew/mtzs/webinfo/2024/06/1713251117838388.htm>.
- [55] 潘志权,闫 飞,贾东远,等. 长距离输水工程数字孪生模型数据融合及编码技术研究[J]. *水利与建筑工程学报*,2024,22(2):12-18.
- [56] 管光华,刘王嘉仪,陈晓楠,等. 输水渠系水动力数字孪生模型糙率估计方法[J]. *水科学进展*,2023,34(06):901-912.
- [57] Ding Shaolin, Pan Jiajun, Wang Yanli, et al. Developing a digital twin for dam safety management[J]. *Computers and Geotechnics*, 2025,180:107120.
- [58] Li Helin, Zhang Rui, Zheng Shufeng, et al. Digital twin-driven intelligent operation and maintenance platform for large-scale hydro-steel structures[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2024,62:102661.
- [59] Savic D. Digital water developments and lessons learned from automation in the car and aircraft industries[J]. *Engineering*, 2022,9(02):35-41.
- [60] T/CI 257—2023 数字孪生水利工程质量评价[S]. 北京:中国水利水电出版社,2023.
- [61] Zhao Chi, Zhang Feifei, Lou Wenqiang, et al. A comprehensive review of advances in physics-informed neural networks and their applications in complex fluid dynamics[J]. *Physics of Fluids*, 2024,36(10):101301.
- [62] Di Bella A, Raissi M, Santoro D, et al. Physics-informed neural networks in water and wastewater systems: a critical review[J]. *Water Research*, 2026:125449.
- [63] Fu Guangtao, Jin Yiwei, Sun Siao, et al. The role of deep learning in urban water management: A critical review[J]. *Water Research*, 2022,223:118973.
- [64] Saddiqi M M, Zhao Wanqing, Cotterill S, et al. Smart management of combined sewer overflows: From an ancient technology to artificial intelligence[J]. *WIREs Water*, 2023,10(04):e1635.