

数字孪生流域构建关键技术及其在智慧水利中的应用

邱 然

包头水文水资源分中心 内蒙古 包头 014030

摘 要: 数字孪生技术作为新一代信息技术与物理世界深度融合的产物,为流域治理提供了全新的范式。本文系统阐述了数字孪生流域的基本内涵与核心架构,深入剖析其构建过程中的五大关键技术:多源异构数据融合、高精度水文水动力模型耦合、智能感知与物联网集成、三维可视化与虚拟仿真、人工智能驱动的智能决策支持。在此基础上,探讨了数字孪生流域在洪水预报预警、水资源调度、水环境治理、水利工程安全监测及流域综合管理等智慧水利典型场景中的应用路径与实践成效。

关键词: 数字孪生;流域;智慧水利;水文模型;人工智能;三维可视化

引言

流域治理因系统、复杂和动态特性而难度大,传统“经验+规则”式水利管理模式在应对灾害、污染及争端时局限性凸显。与此同时,新一代信息技术迅猛发展,为水利数字化转型提供强大动能。数字孪生流域(DTW)在数字空间构建与物理流域实时同步的高保真虚拟模型,能复现静态要素,模拟动态过程,实现全面感知、精准预测、科学推演与智能调控。2021年水利部明确提出构建数字孪生流域,打造“四预”智慧水利体系,使其成为国家水网和智慧水利建设核心支撑。但数字孪生流域构建是复杂系统工程,涉及多学科、多技术、多尺度,有效整合数据、构建高精度模型、实现虚实双向闭环控制等是关键问题。本文将梳理其关键技术体系,探讨典型应用场景,为相关研究与实践提供参考。

1 数字孪生流域的概念内涵与体系架构

数字孪生流域是具备全要素映射、全生命周期管理、实时动态交互及“四预”能力的智能体。全要素映射涵盖自然、工程、社会经济要素,真实反映流域结构与状态;全生命周期管理覆盖流域规划到退役全过程,积累数据资产;实时动态交互依赖数据流输入,形成闭环反馈;具备“预报、预警、预演、预案”能力,提升治理前瞻性与主动性。数字孪生流域系统采用“云-边-端”协同五层架构。感知层采集全域数据;网络层传输数据至边缘节点或云端;数据层构建数据湖或仓库,集成多模态信息;模型层集成专业模型与人工智能算法,形成仿真引擎;应用层提供智能化服务,实现闭环治理。

2 数字孪生流域构建的关键技术

2.1 多源异构数据融合技术

流域数据来源极其多样,既包括地面水文站网提供的高精度但空间稀疏的监测数据,也涵盖卫星遥感获取

的大范围但受天气影响的地表参数,同时还涉及来自统计部门的社会经济统计数据和水利工程的BIM模型信息。这些数据在格式、精度、时空分辨率和语义定义上存在显著差异,若不加以有效融合,将导致模型输入失真甚至失效。为此,必须建立一套系统化的数据融合机制^[1]。首先,在时空维度上,需采用先进的插值与同化方法,如克里金插值或集合卡尔曼滤波(EnKF),将点状观测与面状遥感产品有机结合,生成连续、一致的初始场数据。其次,在语义层面,应构建流域知识图谱,通过本体建模统一不同数据源的概念体系,解决因术语不一致或分类标准不同造成的“语义鸿沟”。此外,还需发展多尺度数据集成技术,利用瓦片金字塔或LOD(Level of Detail)策略,实现从宏观流域尺度到微观工程细节的无缝切换与高效调用。只有通过上述多层次融合,才能为数字孪生流域提供坚实、可信的数据支撑。

2.2 高精度水文水动力模型耦合技术

单一模型难以全面刻画流域中水循环、水流运动、污染物迁移及生态响应等多物理过程的耦合作用,因此必须构建多过程、多尺度耦合的综合模型体系。例如,在上游山区,可采用分布式水文模型(如SWAT或HEC-HMS)模拟降雨-产流-汇流过程;而在下游平原河网或城市区域,则需引入二维甚至三维水动力模型(如MIKE 21/3D或Delft3D)精确模拟洪水漫溢与淹没过程。两者通过动态边界条件实现无缝衔接,形成“产汇流-洪水演进”一体化模拟链。进一步地,为支撑水环境治理,还需在水动力模型基础上耦合水质模块(如WASP或EFDC),模拟氮磷、重金属等污染物的输移转化;同时结合生态模型评估水生态系统对水文情势变化的响应。值得注意的是,传统机理模型虽物理意义明确,但在参数率定、小样本场景下表现受限。因此,近年来兴起的

物理-数据混合建模方法备受关注,即将深度学习模型(如LSTM、Transformer)嵌入机理框架中,利用数据驱动弥补物理模型的不足,从而在保证可解释性的同时提升预测精度与泛化能力。然而,模型耦合也带来接口标准化、计算效率优化及不确定性量化等技术难题,亟需通过GPU加速、并行计算和贝叶斯推断等手段加以解决。

2.3 智能感知与物联网集成技术

现代流域感知体系正朝着“空-天-地-水”一体化方向发展,强调多平台、多手段协同。地面布设的智能传感器网络可实现水位、雨量、水质等关键参数的分钟级甚至秒级监测;空中无人机可快速获取灾情影像或巡检工程隐患;天基卫星则提供大范围的地表覆盖、土壤湿度和蒸散发等宏观信息。这些感知终端通过物联网技术互联,形成一张覆盖全域的动态感知网。在此基础上,边缘智能技术的引入进一步提升了感知系统的自主性与响应速度。在网关或边缘服务器部署轻量化AI模型(如TinyML),可在本地完成异常检测、数据压缩或事件触发等任务,避免将海量原始数据全部上传至云端,既节省带宽又降低延迟^[2]。此外,为保障系统长期稳定运行,还需解决传感器自校准、低功耗设计(如太阳能供电)、通信协议兼容性以及网络安全防护等问题。唯有构建起高可靠、自适应、智能化的感知基础设施,数字孪生流域才能真正实现“感知即服务”的目标。

2.4 三维可视化与虚拟仿真技术

数字孪生流域需构建高逼真、可交互的三维场景,使管理者能够直观理解复杂水情。这一过程始于实景三维建模,通过倾斜摄影测量、激光雷达(LiDAR)点云扫描和水利工程BIM模型融合,生成厘米级精度的流域数字底板。在此基础上,利用WebGL、Unity或Unreal Engine等高性能图形引擎,实时渲染水流运动、降雨过程、洪水淹没范围及污染物扩散轨迹等动态要素,使抽象的数值结果转化为具象的空间体验。更进一步,虚拟现实(VR)、增强现实(AR)和混合现实(MR)技术的引入,使得用户可沉浸式漫游于数字流域之中,通过手势或语音指令操控仿真进程,从任意视角观察水文现象。这种深度交互不仅提升了决策效率,也为公众科普和应急演练提供了新途径。然而,大规模三维场景的高效加载、动态数据的实时驱动以及多终端(PC、移动端、大屏)的适配仍是技术难点,需依赖场景分块、LOD优化和WebGPU等前沿图形技术予以突破。

2.5 人工智能驱动的智能决策支持技术

在预报方面,时空图神经网络(ST-GNN)能够有效融合气象数值预报与历史水文序列,捕捉流域内站点

间的空间依赖关系,显著提升洪水或干旱的预见期与精度。在预警环节,无监督学习算法如孤立森林或自编码器可用于识别监测数据中的异常模式,提前发现堤防渗漏、水质突变等潜在风险。预演阶段则依赖于高效的方案生成与仿真能力。强化学习(RL)或遗传算法(GA)可在短时间内探索数千种调度策略,模拟不同水库泄流、分洪闸启闭等操作对下游的影响,为决策者提供多情景对比。最终,在预案生成环节,多目标优化算法(如NSGA-II)结合专家知识库,可自动生成兼顾防洪安全、供水保障、生态流量和发电效益的综合调度方案。值得强调的是,为增强决策的可信度,还需发展可解释人工智能(XAI)技术,使AI建议背后的逻辑清晰可见,并建立人机协同机制,确保人类专家始终掌握最终决策权。

3 数字孪生流域在智慧水利中的应用

3.1 洪水预报预警与应急调度

数字孪生流域通过整合气象数值预报、分布式水文模型与高精度二维水动力模型,实现了从“点预报”向“面模拟”的跃升。系统可提前1至3天预测山洪暴发风险,并基于高分辨率DEM动态生成街道级洪水淹没图,精确显示水深、流速和到达时间,为人员转移和物资调配提供科学依据。更重要的是,在灾害发生前,决策者可在数字流域中预演多种应急调度方案——如三峡水库是否加大泄流、蓄滞洪区是否启用——直观比较不同方案对下游城镇、农田和基础设施的影响,从而优选出风险最小、效益最大的行动路径。2020年长江流域汛期,数字孪生平台成功支撑了三峡水库的科学调度,有效缓解了中下游防洪压力,充分验证了其在实战中的价值。

3.2 水资源优化配置与调度

数字孪生流域为跨流域、多水源、多用户的联合调度提供了量化工具。系统可动态整合农业、工业、生活及生态用水需求,结合水库可供水量、河道来水预测及输水工程能力,实时评估区域水资源承载力。在此基础上,基于强化学习的智能调度模型能够自适应调整水库群出库流量,在保障供水安全的同时,最大化水能利用效率和河流生态健康。在干旱应对方面,系统通过融合土壤墒情遥感反演与作物需水模型,可提前识别农业干旱热点区域,优化灌溉计划,减少无效用水^[3]。南水北调中线工程的数字孪生系统已实现全线水量的精准计量与智能调度,年节水超1亿立方米,彰显了其在国家水网骨干工程中的应用潜力。

3.3 水环境与水生态协同治理

“山水林田湖草沙”是一个生命共同体,其治理需系统思维。数字孪生流域为此提供了强大的模拟与评估平

台。当突发水污染事件发生时,系统可迅速结合水质模型与污染源清单,反向溯源定位排放点,并模拟污染物在未来数小时内的扩散路径与浓度变化,指导应急打捞与截污措施。在生态调度方面,水文-生态耦合模型可评估不同水库下泄流量对鱼类产卵场、湿地植被等关键生态要素的影响,从而制定兼顾防洪与生态的调度规则。太湖流域数字孪生平台曾成功模拟蓝藻暴发情景,提前启动生态补水与机械打捞,有效遏制了水华蔓延。此外,系统还可构建河湖健康评价指标体系,动态监测水质、水量、生物多样性等参数,为“美丽河湖”建设提供数据支撑。

3.4 水利工程安全监测与运维

大型水利工程的安全运行关乎国计民生。数字孪生技术通过构建“工程级”数字孪生体,实现了从被动检修向主动预防的转变。以大坝为例,系统集成GNSS位移监测、光纤渗压传感、InSAR地表形变反演等多源数据,实时追踪坝体变形、渗流压力和内部应力状态。深度学习模型可从海量监测序列中识别微弱异常信号,早期预警裂缝扩展或管涌风险。同时,基于BIM+IoT的数字孪生工程模型支持远程虚拟巡检、维修方案模拟与结构寿命预测,大幅降低人工巡检成本与安全风险。三峡大坝数字孪生系统已实现毫米级变形监测与智能安全评估,成为国家重大基础设施智慧运维的典范。

3.5 流域综合管理与公众服务

数字孪生流域打破了水利、环保、住建、农业等部门之间的“信息孤岛”,推动流域治理从“碎片化”走向“一体化”。通过构建“一张图”管理平台,所有

涉水要素与业务数据在统一时空框架下集成展示,实现“一屏统览、一图通办”。在政策制定阶段,决策者可在数字流域中预演退耕还湿、海绵城市建设或生态补偿等政策实施后的水文效应,科学评估其可行性与效益^[4]。面向公众,系统可通过移动APP发布洪水风险地图、节水提示、水质公报等信息,提升全民水安全意识与参与度。这种“政府主导、社会协同、公众参与”的治理新模式,正是数字孪生流域赋能流域综合治理的生动体现。

4 结语

数字孪生流域作为智慧水利的核心载体,通过构建物理流域与数字空间的深度映射与智能交互,正在重塑流域治理的范式。本文系统梳理了其构建所需的五大关键技术,并展示了在防洪、供水、生态、工程安全等领域的应用价值。尽管当前仍存在数据、模型、标准等方面的挑战,但随着技术进步与制度完善,数字孪生流域必将为实现“江河安澜、人水和谐”的治水目标提供强大支撑,助力国家水网高质量发展。

参考文献

- [1]张夏,张涛.基于数字孪生的流域大数据治理技术研究[J].海河水利,2025,(10):111-118.
- [2]李慧,杨林.浅析数字孪生流域资源共享平台建设路径[J].治淮,2025,(12):29-31.
- [3]王婧.关于建设数字孪生流域与水资源调配管理的思考[J].智能建筑与智慧城市,2025,(11):181-183.
- [4]汤国栋,卫璇.浅谈数字孪生水利体系建设在黄河流域中的应用[J].黄河.黄土.黄种人,2025,(16):73-74.