

# 数字孪生流域建设实践与思考

吴昊

东台市南沈灶镇水务站 江苏 盐城 224224

**摘要:** 随着流域治理精细化、智能化要求的不断提升,数字孪生流域建设对推动流域治理从经验驱动向数据驱动转型至关重要。首先阐释其以物理流域为基准的虚实映射核心内涵与多元建设价值,接着拆解全要素数字化映射、动态仿真模拟等核心建设体系,梳理实践落地关键要点,最后从技术适配、业务协同等维度探讨长效优化路径,为流域高质量治理提供系统的理论与实践参考。

**关键词:** 数字孪生流域; 流域治理; 动态仿真; 智能决策

**引言:** 当前流域治理面临水资源时空配置失衡、水生态修复难度大、水安全风险防控压力加剧等多重挑战,传统经验驱动的管理模式存在显著的时空局限,难以适配新时代流域可持续发展的核心需求。数字孪生技术凭借实时同步、多维度模拟、动态预测的核心优势,为破解流域治理痛点提供了全新技术路径,厘清其建设逻辑与优化方向,是实现流域治理现代化的核心前提。

## 1 数字孪生流域的核心内涵与建设价值

数字孪生流域以物理流域及灌区为基准,通过高精度数据采集与动态仿真技术构建虚拟映射体系,实现自然过程与灌区运行活动的实时同步模拟。其核心内涵强调数据驱动与物理规律双约束,通过多源数据融合与智能算法优化,形成从数据采集到模型优化的闭环逻辑;建设价值体现在流域及灌区状态预测精度提升、资源利用效率优化及系统运行稳定性增强等方面,山区灌区通过地形数据迭代、优化水流及灌溉输水模型,平原灌区通过渠网分布模型更新提升输水效率与排水演进预测能力,最终推动流域及灌区管理向智能化、可持续化方向演进<sup>[1]</sup>。

## 2 数字孪生流域建设的核心体系构成

### 2.1 流域全要素数字化映射体系

流域全要素数字化映射体系以物理流域及灌区为基础,通过多源异构数据融合与智能算法建模,构建涵盖地形、水文、生态、气象及灌区渠系、灌溉设施等要素的虚拟镜像系统。该体系强调全要素覆盖与动态更新,利用卫星遥感、无人机巡测、地面传感器网络实现空间数据与灌区运行数据的高精度采集,结合机器学习算法对复杂水文及灌溉输水过程进行动态模拟。数字映射不仅实现物理流域与灌区的静态复制,更通过实时数据流完成动态同步,形成“数据采集—模型优化—反馈修正”的闭环机制;体系核心在于多尺度数据融合能力,既能刻画宏

观流域格局与灌区整体布局,又能解析微尺度生态过程与灌区渠系细节,为流域及灌区状态评估提供多维度视角。通过数字孪生技术,该体系突破传统监测手段的时空限制,实现流域要素与灌区设施的精准刻画与动态追踪,为水资源调配、灌区灌溉优化、生态保护提供科学支撑,推动流域及灌区治理向智能化、精细化方向演进,最终实现自然过程与灌区运行活动的协同优化。

### 2.2 流域动态仿真模拟核心模块

流域动态仿真模拟核心模块以物理流域及灌区实时数据为驱动,通过高精度数值模型与智能算法构建动态演化系统,实现流域水文、生态、气象及灌区灌溉输水、排水等过程的实时模拟与预测。该模块突破传统静态模型局限,采用自适应网格技术与多物理场耦合算法,精准刻画各类复杂过程,核心优势在于动态响应能力,可整合多源数据完成多时空尺度模拟;模块融入地域特色,山区灌区重点刻画陡峭地形对渠系水流的影响,平原灌区侧重还原密集渠网输水特性,沿海附近灌区兼顾潮汐对排水的干扰,通过参数本地化校准实现地域灌区特性精准再现,为流域及灌区状态评估提供高精度虚拟实验平台,推动管理从被动响应向主动预测转型,实现自然过程与灌区运行活动的协同优化<sup>[2]</sup>。

### 2.3 流域多源数据融合交互框架

流域多源数据融合交互框架以高精度数据采集为基石,通过卫星遥感、无人机巡测、地面传感器网络,获取地形、水文、生态及灌区渠系参数、灌溉流量等多维数据,经清洗、标准化处理形成统一数据底座。数据融合采用智能算法优化匹配效果,山区灌区强化地形数据与渠系水流模型耦合,精准刻画陡峭地形对输水的影响;平原灌区优化渠网分布与灌溉输水算法协同,提升输水效率与排水路径预测能力;沿海附近灌区整合潮汐数据与排水水位波动模型联动,增强潮汐作用下的排水预测

精度。数据交互通过标准化接口实现无缝对接，消除信息孤岛，保障数据在流域监测与灌区运行场景高效流通共享，最终形成从数据采集到应用的闭环体系，推动数字孪生流域及灌区向智能化、可持续化方向演进。

#### 2.4 流域智能决策支撑底层逻辑

流域智能决策支撑底层逻辑依托多源数据融合与动态仿真模拟，构建基于物理规律的智能分析模型，实现从数据驱动到知识驱动的决策范式升级。其强调模型自适应性，通过机器学习算法持续优化参数，贴合流域及灌区实际运行规律，同时注重多尺度耦合，形成从微观水体、灌区渠系水流到宏观流域演变的跨尺度协同分析框架。融入地域特色可精准刻画不同灌区水文特征：山区灌区陡峭地形导致渠系水流湍急，平原灌区水网密布影响灌溉输水与排水路径，沿海附近灌区潮汐作用改变排水水位波动。通过本地化参数调整实现模型与区域灌区特性深度匹配；底层逻辑通过智能算法挖掘数据隐含规律，为流域状态预测、灌区运行评估提供科学依据，推动管理模式从经验依赖向数据智能转型，实现自然过程与灌区运行活动的动态平衡与可持续优化。

### 3 数字孪生流域建设的实践落地要点

#### 3.1 流域孪生模型的精准构建路径

流域孪生模型精准构建以高精度数据采集为基石，通过多尺度数据融合与智能算法优化，实现与物理流域及灌区的深度契合；构建过程强调数据驱动与物理规律双约束，依托卫星遥感、无人机巡测、地面传感器网络，获取地形、水文、生态及灌区渠系、灌溉设施等多维数据，经清洗、标准化处理形成统一数据底座。模型融入地域特色，山区灌区调整渠系水流速度参数适配陡峭地形，平原灌区优化灌溉输水与洪水演进算法匹配密集渠网，沿海附近灌区校准潮汐作用下的排水水位波动模型，通过本地化参数调整实现精准匹配。构建路径注重动态更新，依托实时数据流完成模型迭代，确保模拟结果贴合实际运行状态，最终形成数据采集至模型优化的闭环体系，为流域状态评估与灌区运行优化提供可靠支撑。

#### 3.2 多维度业务场景的适配优化

多维度业务场景的适配优化需立足场景特性差异，通过技术融合与地域特色融入实现精准匹配；灌溉输水监测场景侧重实时数据采集与动态模拟，确保渠系水位、流速等参数与物理灌区同步；灌区生态保护场景需整合周边生物多样性数据，通过模型校准提升生态过程模拟精度。适配过程采用机器学习算法优化多源数据融合效果，强化场景模拟的精度与可靠性，同时贴合地域特性，山区灌区调整地形参数匹配陡峭地形对渠系水流的影响，平

原灌区优化渠网分布模型反映灌溉输水与排水路径。优化策略强调动态调整，根据场景需求迭代模型参数，确保业务场景与数字孪生模型深度融合，推动流域及灌区管理向智能化、精细化演进，实现自然过程与灌区运行活动的动态平衡与可持续优化<sup>[3]</sup>。

#### 3.3 全流程技术体系的协同落地

全流程技术体系的协同落地聚焦多技术模块无缝衔接与动态优化，融合数据采集、模型构建、仿真模拟、运行评估等环节，形成闭环式技术生态。协同机制强调技术适配性与流程高效性，数据采集模块与灌区模型构建模块实时交互，保障输入数据高精度、时效性；仿真模拟模块与灌区运行评估模块紧密配合，实现模拟结果向运行优化依据的快速转化。地域特色体现在技术参数本地化调整，山区灌区强化地形数据采集精度适配陡峭地形，平原灌区优化渠网模型反映灌溉输水路径，沿海附近灌区校准潮汐参数精准模拟排水水位波动。协同落地通过动态反馈持续优化技术体系，确保适配流域及灌区实际需求，推动管理向智能化、精细化演进，实现自然过程与灌区运行活动的动态平衡与可持续优化。

#### 3.4 系统运行稳定性的保障机制

系统运行稳定性保障机制以数据质量为核心，通过多源数据校验与动态更新，确保输入数据的准确性与时效性，避免数据偏差导致灌区运行模拟误判；模型鲁棒性提升采用自适应算法优化，结合地域灌区特性调整参数阈值，山区灌区强化地形数据对渠系水流速度的校准，平原灌区优化渠网模型应对输水与排水路径变化，沿海附近灌区调整潮汐参数保障排水水位模拟精准性。实时监控体系依托多维度传感器网络追踪系统状态，结合智能算法完成异常检测与自动预警；故障快速恢复机制借助备份与动态重构技术，保障局部故障时系统基本功能，通过反馈持续优化性能，最终形成从数据采集到故障恢复的全链路保障体系，推动流域及灌区管理向高可靠性、高适应性方向演进。

### 4 数字孪生流域建设的深层思考与优化路径

#### 4.1 模型精度与算力适配的平衡把控

模型精度与算力适配的平衡把控，需兼顾数据分辨率、算法复杂度与计算资源的高效匹配。高精度模型依赖高分辨率地形、水文及灌区渠系数据，以及复杂物理过程模拟算法，山区灌区需刻画陡峭地形对渠系水流速度的非线性影响，平原灌区需优化渠网模型精准反映灌溉输水路径，均对算力提出较高要求。算力适配采用动态资源分配技术，根据场景需求调整计算资源比例，实时灌溉调度优先保障时间分辨率，灌区生态修复侧重空

间细节；平衡机制通过模型简化与算力扩展协同实现，采用降维算法压缩非关键参数，或依托分布式计算提升并行处理能力，最终在保障模型精度的同时，实现算力高效利用与动态平衡，推动数字孪生流域及灌区向智能化、可持续化演进<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 多业务协同的壁垒破除思路

多业务协同壁垒破除核心在于数据共享与技术接口标准化，通过统一数据中台实现多源异构数据无缝对接，消除信息孤岛；技术融合注重模块化设计与跨平台兼容，水文模拟模块与灌区灌溉评估模块通过标准化接口互通数据，精准响应不同业务场景需求。地域特色融入业务逻辑并进行本地化适配，山区灌区侧重地形数据与渠系水流模型深度耦合，平原灌区强化渠网分布与灌溉输水算法协同优化，沿海附近灌区整合潮汐作用与灌区排水模型。通过动态反馈机制持续优化业务逻辑，确保各模块在数据、算法、模型层面有机联动，推动数字孪生流域及灌区从单一功能向多业务协同智能化体系演进，实现自然过程与灌区运行活动的动态平衡与可持续优化。

#### 4.3 技术迭代与实用价值的协同统一

技术迭代与实用价值的协同统一以动态反馈机制为核心，实现技术进步与实际效能双向驱动。技术迭代聚焦算法优化与灌区模型更新，通过自适应学习算法提升模拟精度，依托分布式计算增强数据处理能力，确保技术贴合流域复杂过程与灌区运行需求；实用价值体现在灌区灌溉预测准确性、运行效率及系统稳定性的提升，直接反映技术落地效益。两者协同通过地域特色深度融合实现，山区灌区利用地形数据迭代渠系水流模型，精准刻画陡峭地形对水流的非线性影响；平原灌区更新渠网模型优化灌溉输水算法，提升输水效率与排水路径预测能力。沿海附近灌区整合潮汐数据迭代排水水位模型，增强潮汐作用下的预测精度，推动数字孪生流域及灌区从技术探索向实用价值创造转型，实现自然过程与灌区运行管理的动态平衡。

#### 4.4 长效运维与价值延续的核心逻辑

长效运维与价值延续的核心逻辑以动态适应性与持续价值创造为双核心，通过技术更新与地域灌区特性深度绑定实现长效发展。运维机制聚焦数据流持续优化，山区灌区定期更新地形数据适配渠系水流路径变化，平原灌区动态调整渠网模型贴合灌溉输水规律，沿海附近灌区整合潮汐数据迭代排水算法，确保模型贴合实际运行状态。价值延续依托技术成果跨场景复用，水文模拟算法在灌区灌溉调度与排水预警中双重应用，提升技术投入边际效益；核心逻辑通过反馈循环自我优化，运维数据反哺模型改进、模型优化提升运维效率，形成从数据采集到价值释放的闭环体系，推动数字孪生流域及灌区从短期项目向长期生态转型，实现技术生命力与流域及灌区可持续性的双重延续<sup>[5]</sup>。

结束语：数字孪生流域是实现流域治理现代化的核心引擎，其建设需立足物理流域的地域特性，构建全要素覆盖、全流程闭环的虚实融合体系。从核心体系搭建到实践场景落地，从技术瓶颈破解到长效运维优化，需始终坚持精度与算力适配、技术与业务协同。通过持续的技术迭代与机制完善，可充分释放数字孪生技术的赋能价值，实现流域生态保护与高质量发展的协同共赢。

#### 参考文献

- [1]于海泓.数字孪生黄河“全链条”建设思考与实践[J].中国水利,2025(13):14-23.
- [2]钟惠钰,史益鲜,毛程阳.数字孪生苏州河西闸工程建设实践与思考[J].海河水利,2025(6):115-119.
- [3]李自尊,王益民,楚楠.数字孪生黄河算力建设实践与思考[J].中国水利,2025(3):22-30.
- [4]王舜.数字孪生胶东调水工程建设实践与思考[J].海河水利,2025(9):114-119.
- [5]薄成.基于数字孪生技术的流域防洪应用建设研究与实践[J].城市勘测,2025(5):95-100.