

数字孪生流域信息采集体系优化布设应用研究

卜立鹏

新疆维吾尔自治区水利科技发展中心

DOI:10.32629/hwr.v10i5.7005

[摘要] 数字孪生流域是智慧水利建设的核心载体,高精度、全覆盖、实时化的信息采集体系是保障流域孪生模型精准映射、动态推演与智能决策的基础支撑。当前我国流域信息采集体系存在站点布设不均、多源数据融合度低、监测要素不全、运维机制不完善等问题,难以适配数字孪生流域精细化、动态化、智能化的建设需求。本文基于数字孪生流域核心理论框架,系统剖析现有信息采集体系的建设短板与应用痛点,从站点布设、数据融合、技术升级、运维管理四个维度,提出可落地、可实操的优化布设策略,构建空天地水工一体化全域信息采集体系。

[关键词] 数字孪生流域; 信息采集; 体系优化; 站点布设; 数据融合

中图分类号: C37 **文献标识码:** A

Research on Optimization and Application of Digital Twin Watershed Information Collection System

Lipeng Bu

Xinjiang Uygur Autonomous Region Water Conservancy Technology Development Center

[Abstract] Digital twin watershed is the core carrier of smart water conservancy construction, and a high-precision, fully covered, and real-time information collection system is the basic support for ensuring accurate mapping, dynamic deduction, and intelligent decision-making of watershed twin models. The current watershed information collection system in China has problems such as uneven station layout, low degree of multi-source data fusion, incomplete monitoring elements, and imperfect operation and maintenance mechanisms, which are difficult to adapt to the construction needs of digital twin watersheds for refinement, dynamism, and intelligence. This article is based on the core theoretical framework of digital twin watershed, systematically analyzing the shortcomings and application pain points of the existing information collection system. From four dimensions of station layout, data fusion, technology upgrading, and operation and maintenance management, feasible optimization deployment strategies are proposed to build an integrated information collection system for air, space, water and engineering.

[Key words] digital twin watershed; Information collection; System optimization; Site layout; data fusion

引言

伴随着智慧水利战略的不断深入,数字孪生流域成了推动流域治理体系和治理能力现代化的重要途径,它把真实的流域物理空间、水文过程、生态状态等各方面实时地反映到虚拟孪生场景中,从而对流域的全部要素、全过程、全周期进行智能化的控制。信息采集体系属于数字孪生流域的数据来源,它的布设是否合理、数据是否准确、传输是否及时都会影响到孪生模型的仿真精度以及业务应用的效果。目前我国大多数流域仍然采用传统的手工监测、定点监测方式,监测网络存在盲区死角、数据时序断层、多源数据割裂等状况,海量的异构数据不能支撑孪生模型的迭代优化以及四预功能的落地。本文从数字孪生流域

建设的实际需要出发,对信息采集体系的理论基础进行梳理,分析目前存在的主要问题,并从系统性角度出发,提出相应的系统化优化布设方案,为流域数字化、智能化转型提供一些实践上的参考。

1 数字孪生流域信息采集体系基础理论

1.1 数字孪生流域核心内涵与技术框架

数字孪生流域就是以物理流域为基础,利用物联网、大数据、人工智能、三维建模等新一代信息技术,建立起来的虚实映射、实时交互、迭代演化的数字化流域载体,主要实现物理流域和虚拟流域的精准同步、动态联动和智能推演。其技术架构由感知采集层、数据传输层、数据融合层、模型仿真层和业务应

用层五个层次组成,各个层次互相联系、互相促进^[1]。感知采集层属于底层基础,负责完成流域水文、气象、水质、地形、生态等各方面的数据采集工作,是整个数字孪生体系的数据根基。相比传统的数字化流域来说,数字孪生流域对于数据的实时性、完整性、精确性、多维性有更高的要求,抛弃了传统的静态数据采集方式,创建起动态、实时、全域的动态感知体系,保证孪生场景的动态更新和精准仿真。

1.2 信息采集体系核心构成与运行机理

数字孪生流域信息采集体系是以监测设备、传输网络、数据处理、存储管理为主要内容的综合性感知系统,主要由空、天、地、水、工五个方面组成,形成立体化的全域监测格局。空域依靠无人机、气象雷达对中小尺度气象、岸线进行监测,天域依靠卫星遥感完成大范围流域地形、植被、水体覆盖监测,地域依靠地面雨量站、水位站、墒情站完成常规水文要素监测,水域依靠无人船、水下传感器监测水流、水质、河床演变特征,工域针对水利工程设备运行状态开展专项监测^[2]。体系运行遵循的是“实时采集-高速传输-预处理清洗-融合汇聚-入存储”的闭环机理,用标准化的数据接口把多源数据统一归集起来,给后续模型运算、趋势推演、智能决策提供标准的数据支持。

2 数字孪生流域信息采集体系现存核心问题

2.1 监测站点布设不合理,全域感知存在盲区

目前流域的监测站点大多为长期零星建设而成,没有统一的数字化布设规划,总体上呈现出“城区密集、偏远稀疏、干流密集、支流薄弱”的不均衡局面。大多数流域重点城市、主干河道监测站点密集,山区支流、山洪易发区、小型水库、农村水系等区域站点稀少,存在大量的监测盲区,不能覆盖流域全地理单元和水文单元^[3]。同时现有的站点布置大多根据传统的水文监测需求进行设计,只考虑了水位、雨量等基本因素,不能满足数字孪生流域对于水质、生态、地形、工程工况等多维要素的监测要求。部分老旧站点布设时间过长,没有考虑到流域地形的变化、水文特征的改变,监测数据的代表性较差,不能反映局部流域水文动态的变化,造成孪生模型局部仿真的失真,影响整体推演的准确性。

2.2 监测技术体系滞后,数据采集精度不足

目前流域信息采集还存在着技术设备新旧混用、技术标准不统一的现象,传统的人工监测、半自动监测依然占据主导地位,自动化、智能化监测设备的应用较少。老旧监测设备精度低、响应慢,雨量、水位等基本数据的采集误差大,且抗恶劣环境的能力差,在暴雨、洪水、台风等极端天气中很容易出现故障,造成数据中断或者漏传。多维监测技术融合应用不够,卫星遥感、无人机巡检、水下智能监测等新技术没有实现规模化应用,空天地水工一体化协同监测体系还没有完全建立起来。传统的监测大多采用定点、定时采集的方式,动态连续的监测能力较弱,不能捕捉到流域水文过程瞬时的变化特征,不能满足数字孪生流域动态仿真、实时迭代的数据精度要求。

2.3 多源数据融合不畅,数据孤岛问题突出

流域信息采集牵涉到水利、气象、生态、自然资源、住建等众多部门,各个部门所设的监测设备、数据格式、传输标准、存储系统各自为政,没有形成统一的标准化规范。不同的来源监测数据存在格式不同、时序错位、精度不一致等各方面的差异,数据兼容性差,不能很好地进行融合归集。同时现有的数据共享机制还存在着部门间的数据壁垒没有完全消除的情况,大量的监测数据被分散存放在各个部门各自独立的平台上,不能实现全域数据的互联互通和共建共享。数据预处理、清洗、纠错技术使用较少,原始采集的数据存在冗余、缺失、异常等状况,没有经过标准化处理就直接用于孪生模型运算,大大降低了模型仿真的准确性、可靠性,影响数字孪生流域智能化应用的落地。

2.4 运维管理机制不完善,体系运行稳定性不足

信息采集体系长效运维管理机制的缺乏,是造成监测体系高效运转的瓶颈。目前流域监测设备运维大多采取分散式管理模式,责任不清,缺少常态化的巡检、校准、维护制度,老旧设备长期处于带病运转状态,设备故障处理迟缓的现象比较普遍,造成监测数据稳定性、连续性下降。同时缺少专业的运维技术人员,基层运维人员的专业技能水平低,对智能化监测设备、数据融合系统等的操作、维护、故障处理能力欠缺,不能满足数字化监测体系的运维要求^[4]。另外没有建立完善的质量检查、溯源、考核制度,不能及时发现和纠正数据异常、缺失、错误等问题,不能保证采集的数据是规范的、有效的,不能支撑数字孪生流域长期稳定运行。

3 数字孪生流域信息采集体系优化布设应用策略

3.1 科学优化站点布局,消除全域监测盲区

根据数字孪生流域全要素、全覆盖监测的需求,结合流域地形特点、水文分区、灾害风险等级、生态管控区域,开展监测站点全域统筹优化布设,创建均衡化、精细化、全覆盖的监测网络。首先对现有的站点进行全面的排查梳理,保留布局合理、设备完好、数据稳定的有效站点,淘汰老旧失效、选址偏差、数据失真的冗余站点,对主干河道、重点水利工程、城市河段等核心区域的站点进行提质升级,提高基础监测精度。其次,针对监测盲区的短板进行针对性补点加密,在山区支流、山洪灾害易发区、小型水库、湿地生态区、偏远流域等薄弱区域增设自动化监测站点,补齐基层监测短板,实现流域水文单元、地理单元全覆盖^[5]。采用泰森多边形分析法、流域边界划分法优化站点的空间分布,根据流域水文响应特征确定站点的布设密度,兼顾监测精度和建设成本。根据不同的监测要素设置不同的监测站点,增加水质、生态流量、土壤墒情、岸线地形等专项监测点位,丰富了监测要素的维度,满足孪生模型多维仿真的需要。最后建立站点动态优化机制,根据流域开发建设、水文特征变化、业务需求升级等及时调整站点布局,保证监测网络的科学性和适应性。

3.2 升级智能监测技术,提升数据采集精度

以提高数据采集的精度、及时性、连续性为目标,对监测技术进行全方位的升级,创建起空天地水工一体化智能感知系统,满足数字孪生流域动态监测的需求。一是推进老旧设备智能化

改造替换,淘汰精度低、稳定性差的传统监测设备,全域部署自动化雨量计、雷达水位计、高精度水质传感器、墒情监测仪等智能设备,实现水文、水质、气象、生态要素的全自动、不间断采集,大幅度降低人工干预成本,减少数据采集误差。二是普及新型监测技术的应用,构建立体化的监测体系,依靠高分辨率卫星遥感对流域大范围的地形、植被、水体覆盖、水土流失等宏观要素进行监测;依靠无人机携带激光雷达、高清摄像头对重点区域、复杂地形进行精细化巡检监测;依靠无人船、水下监测终端对水下地形、水流速度、水质分层指标进行动态采集,弥补地面定点监测的不足^[6]。第三是创建实时动态传输网络,用5G、物联网、北斗定位等手段把监测数据传输成毫秒级高速率,并且可以抵御传统网络传输延时、断连的情况,使数据可以及时传送到孪生平台。

3.3 统一数据标准规范,破除数据孤岛壁垒

以数据标准化、融合化、共享化为方向,创建起一个统一的、规范的多源数据归集系统,从根本上消除部门间的数据壁垒,从而达到全域数据高效复用的目的。首先建立统一的流域信息采集技术标准,对各部门、各类监测设备的数据采集格式、精度要求、传输协议、更新频率进行统一规定,统一数据编码、坐标系、时序标准,消除不同源数据的异构性、不兼容性问题,使各种类型的监测数据能够标准化地归集起来。其次,创建流域一体化数据共享平台,把水利、气象、生态、自然资源等各方面的监测数据资源融合起来,创建起跨部门数据共享交换体系,确定数据共享的范围、更新频率、权责划分,破除数据传输障碍,达成数据互通互联、实时共享、共建共用的目的。其次,建立多源数据融合处理体系,用大数据清洗、筛选、融合技术,对原始采集数据做统一预处理,完成数据去重、纠错、补全、标准化转换,用AI算法把时序数据、空间数据、结构化数据、非结构化数据深入地融合在一起,形成一个全域统一的流域基础数据库。最后,建立数据分级分类管理机制,依照数据保密等级、应用场景来对数据实施分级管控,规范数据调用、使用、存储的流程,在保证数据安全的基础上,最大可能地发挥数据的价值,给孪生模型仿真、趋势预测、智能决策赋予高品质的数据支撑。

4 结束语

信息采集体系是数字孪生流域创建的基础,信息采集体系的设置是否合理、运行是否稳定、数据是否准确都会直接影响到流域数字化治理的效果。本文通过对数字孪生流域信息采集体系基础理论的梳理,对站点布设不均、采集精度低、数据融合难、运维机制弱这四个主要问题进行了分析,并根据流域治理的实际需要提出了站点布局优化、智能技术升级、数据标准统一、长效运维赋能这四个落地性的优化措施,构建起一个覆盖全面、精度高、智能化、标准化的信息采集体系。本次研究提出的方法符合基层实际操作的要求,可以较好地弥补传统采集体系存在的不足,提高流域全要素感知能力以及数据质量。根据不同的流域地形特点、治理需求不断优化采集体系布设方式,加深智能技术与流域治理深度融合,释放数据价值,推进数字孪生流域精细化、智能化、现代化建设。

[参考文献]

- [1]魏宁,王海红.黄河流域数字孪生水文站建设的应用与研究[J].人民黄河,2025,47(S2):184-185+188.
- [2]吴继红.数字孪生流域数据归档与共享协同机制研究[J].人民长江,2025,56(S2):283-286.
- [3]陈杰,李国元,崔希民,等.高分七号卫星在流域级数字孪生水利中的应用研究与实践[J].红外与毫米波学报,2025,44(06):942-952.
- [4]陈钢,张天舒,俞悦,等.非线性马斯京根法在山区小流域数字孪生中的应用[J].水资源保护,2025,41(06):12-17.
- [5]安建民,张鹏举,张建新,等.基于疏勒河数字孪生流域平台的洪水预测模型及应用[J].干旱区研究,2025,42(11):2018-2030.
- [6]余真真,闫莉,秦奋,等.黄河流域生态保护数字孪生平台构建技术与应用[J].人民黄河,2025,47(08):10-14.

作者简介:

卜立鹏(1995--),男,满族,黑龙江宁安市人,硕士研究生,研究方向:图像处理、低功耗无线传感器网络、水利数字孪生。