

水利数字孪生中的多尺度流域水文模型降尺度计算方法

郭嘉诚

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i7.6501

[摘要] 本文探讨了水利数字孪生中的多尺度流域水文模型降尺度计算方法。面对全球气候变化与人类活动加剧下极端水文事件频发的挑战,传统水利管理模式力不从心,水利数字孪生技术应运而生。本文首先阐述了水利数字孪生的概念与架构,接着分析了多尺度流域水文过程与模型的复杂性,指出降尺度技术在数字孪生中的特殊需求。进而,构建了融合物理机制驱动与数据同化的混合降尺度计算方法,通过高分辨率地理信息重构水文过程,并利用实时观测数据动态校正模型状态。最后,论述了降尺度计算模块的开发,实现了算法的工程化与标准化,并与水利数字孪生平台有效集成,显著提升了水文模拟的空间分辨率与精细化水平。

[关键词] 水利数字孪生; 多尺度流域; 水文模型; 降尺度

中图分类号: TV212.4 **文献标识码:** A

Downscaling calculation method for multi-scale watershed hydrological model in water conservancy digital twin

Jiacheng Guo

XPCC Surveying & Designing Institute Group Co., Ltd.

[Abstract] This article explores the downscaling calculation method of multi-scale watershed hydrological models in water conservancy digital twin. Faced with the challenges of frequent extreme hydrological events caused by global climate change and intensified human activities, traditional water management models are inadequate, and digital twin technology for water resources has emerged. This article first elaborates on the concept and architecture of water conservancy digital twin, and then analyzes the complexity of multi-scale watershed hydrological processes and models, pointing out the special requirements of downscaling technology in digital twin. Furthermore, a hybrid downscaling method combining physical mechanism driven and data assimilation was constructed, which reconstructs hydrological processes through high-resolution geographic information and dynamically corrects model states using real-time observation data. Finally, a downscaling calculation module was developed to achieve engineering and standardization of the algorithm, and effectively integrated with the water conservancy digital twin platform, significantly improving the spatial resolution and refinement level of hydrological simulation.

[Key words] water conservancy digital twin; Multi-scale watershed; Hydrological model; downscaling

引言

水资源是人类生存与社会发展的基础性、战略性资源。在全球气候变化与人类活动加剧的双重影响下,极端水文事件频发,水资源管理、防洪抗旱、水生态保护等面临的挑战日益严峻。传统的水利管理模式在应对复杂、动态、精细化的管理需求时显得力不从心。在此背景下,水利数字孪生(Water Resources Digital Twin, WRDT)作为一种融合了物联网、大数据、人工智能、高性能计算和物理模型的前沿技术范式,正逐步成为推动水利现代化、智能化转型的核心引擎。水利数字孪生旨在构建一

个与物理流域实时互动、虚实映射、仿真推演的虚拟模型系统,为流域的监测、预报、预警、调度和决策提供全要素、全过程、高精度的数字化支撑。

1 水利数字孪生与多尺度水文模拟基础

1.1 水利数字孪生概念与架构

水利数字孪生是利用数字技术对物理流域进行虚拟映射,构建一个能够实时感知、动态模拟、智能推演并与物理世界交互的数字模型系统。它并非简单的静态模型或可视化平台,而是集成了物联网感知、大数据管理、多源信息融合、高性能数值

模拟、人工智能分析和可视化交互等多种技术于一体的复杂系统。其核心在于实现物理流域与数字模型之间的数据同步、状态镜像和双向互动。典型的水利数字孪生架构通常包含多个层次:底层是感知层,通过各类传感器、遥感平台等实时采集水文、气象、工程等数据;中间是数据层,负责数据的存储、管理、清洗和融合,形成统一的数据资源池;模型层是核心,集成了水文、水动力、水质、泥沙、工程调度等多种专业模型,是进行仿真预测的基础;服务层则提供模型计算、数据查询、分析预警、可视化等标准化接口;最上层是应用层,支撑防洪调度、水资源配置、水环境治理、工程安全监控等具体业务场景。整个系统强调模型的实时驱动、动态更新和闭环反馈,为流域精细化管理与智能决策提供强大支持。

1.2 多尺度流域水文过程与模型

流域水文循环涉及降水、蒸发、下渗、坡面汇流、河网演进等多个环节,这些过程在不同空间和时间尺度上表现出显著的差异性和复杂性。例如,大范围的降水系统演变属于大尺度过程,而城市地表积水或小流域山洪暴发则属于小尺度事件。单一尺度的模型难以全面捕捉这种多尺度耦合特征。因此,发展多尺度水文模型成为必然趋势。这类模型通常采用分布式或半分布式结构,将流域划分为若干计算单元(如网格或子流域),在每个单元内基于物理或经验公式计算水文过程,并通过河网或坡面连接进行汇流计算。常见的模型如VIC、SWAT、WRF-Hydro等,能够在不同分辨率下运行,模拟从区域到流域的水文响应。然而,模型的尺度转换存在固有挑战,即尺度效应,表现为模型参数、结构和模拟精度随空间分辨率变化而改变。如何有效处理不同尺度模型之间的信息传递与耦合,特别是如何将大尺度模型的模拟结果有效应用于小尺度精细模拟,是多尺度水文模拟的关键问题,也为降尺度技术的应用提供了需求场景。

1.3 数字孪生对降尺度的特殊需求分析

在水利数字孪生框架下,降尺度技术的应用被赋予了新的内涵和更高要求。传统的降尺度研究多关注于提高模拟精度,而数字孪生则要求降尺度过程必须满足系统整体的运行逻辑。实时性是首要考量,降尺度计算需要在有限时间内完成,以支撑分钟级或小时级的预报预警服务,这对算法的计算效率提出了严格限制。高空间分辨率是基本目标,降尺度结果需达到支撑城市内涝、山洪沟道等精细模拟所需的米级或亚米级精度。同时,物理过程的一致性至关重要,降尺度生成的场数据必须符合水文物理规律,避免产生违背常识的“伪精细”结果。数字孪生丰富的实时观测数据为降尺度提供了校正机会,降尺度计算方法需要具备融合多源异构数据(如遥感土壤湿度、地面雨量站数据)的能力,实现动态同化与校准。整个过程的不确定性需要被量化并传递到后续模拟中,以评估预测结果的可信度。

2 基于物理机制与数据同化的混合降尺度计算方法构建

2.1 物理机制驱动的降尺度核心

物理机制驱动的降尺度计算方法致力于在高分辨率网格上

重建水文过程的物理基础,而非简单地插值或统计放大。该方法的核心在于利用粗分辨率模型提供的网格平均状态量(如平均降水、平均蒸散发、平均土壤湿度、网格出流)作为约束或驱动,结合高分辨率的地形、土地利用、土壤类型等地理信息数据,在子网格尺度上重新计算水文过程。具体而言,基于精细的数字高程模型(DEM),可以更准确地刻画坡面汇流路径、汇流时间以及河网结构,使得径流生成与汇集过程更符合实际地形。土地利用和土壤数据则用于精细化分配下渗能力、蒸散发系数等关键参数的空间异质性。例如,同一粗网格内,林地与裸地的蒸散发速率差异巨大,通过高分辨率数据可以合理解释这些差异。降尺度过程通常采用“自上而下”或“自下而上”策略,或两者的结合。“自上而下”将粗网格的总输出(如总径流量)作为目标,通过物理过程模型在子网格上分配产流;“自下而上”则在子网格上独立计算过程,其总和需与粗网格模型输出保持一致或通过同化约束。

2.2 数据同化增强的降尺度

数据同化技术为降尺度过程提供了强大的外部校正和动态更新能力,是提升降尺度精度和时效性的关键环节。在物理机制驱动的降尺度框架中,引入实时或准实时的高分辨率观测数据,可以有效修正模型模拟的偏差和累积误差。主要的数据源包括卫星遥感产品,如SMAP、SMOS提供的土壤湿度,MODIS或SEVIRI提供的蒸散发、地表温度,以及Sentinel、Landsat等提供的地表水体范围。地面观测站的降水、流量、水位数据同样至关重要。通过数据同化算法(如集合卡尔曼滤波EnKF、粒子滤波PF等),将这些观测信息与物理降尺度模型的模拟状态进行融合。同化过程实质上是寻找模型状态与观测值之间的最优估计,它能够调整模型内部状态变量(如各层土壤湿度、积雪水当量)或关键参数,使得模型输出更贴近真实情况。这种融合不仅发生在降尺度的初始时刻,也可以在模拟过程中持续进行,形成动态的、闭环的降尺度-同化循环。

3 降尺度计算模块开发与集成

3.1 模块功能设计

降尺度计算模块的设计旨在实现从粗分辨率水文模型输出到高分辨率水文场的自动化、标准化转换。模块的核心功能围绕数据输入、核心计算、结果输出与交互三大环节展开。输入接口需具备灵活的数据适配能力,能够接收来自不同来源的粗分辨率模型结果文件(如NetCDF、HDF5格式),同时读取高分辨率的地理空间数据集(DEM、土地利用、土壤类型等)以及用于同化的实时观测数据(遥感产品、站点数据)。核心计算引擎是模块的“大脑”,它集成了第三章提出的物理机制驱动、数据同化和统计校正等算法流程。该引擎能够根据预设的降尺度目标分辨率和研究区域,自动执行降尺度计算任务。计算过程支持配置化,用户可通过参数文件或配置界面设定算法选项、同化参数、校正模型等。模块还需具备基础的运行监控与日志记录功能,便于追踪计算状态和排查问题。输出接口负责生成标准化的高分辨率结果文件,通常采用与输入兼容的格式,并包含关键的元数据

信息(如时间、空间范围、变量定义、不确定性估计)。结果文件不仅包含主要水文变量(如降水、土壤湿度、蒸散发、径流),还应提供不确定性量化信息(如置信区间、标准差)。

3.2 软件架构与实现

为实现上述功能并保证性能,降尺度计算模块采用分层、模块化的软件架构。底层是数据访问与处理层,利用GDAL、NetCDF4等成熟库处理各类栅格、矢量和科学数据格式,实现高效的数据读写与坐标转换。中间层是核心算法库,将物理降尺度、数据同化(如集成EnKF算法)、统计/机器学习校正(如调用scikit-learn、TensorFlow/PyTorch)等核心功能封装为独立的、可复用的函数或类。这种设计便于算法的独立开发、测试和替换。上层是控制逻辑与业务流程层,负责协调各模块的调用顺序,管理数据流,处理异常,并执行用户配置。编程语言选择以Python为主,因其在科学计算、数据分析和机器学习领域拥有丰富的库支持,开发效率高,社区活跃。对于计算密集型的核心物理过程或同化循环,可采用C++或Fortran编写关键函数并通过Python接口调用,以平衡开发效率与运行速度。为应对大规模数据处理和长时间序列模拟带来的计算压力,模块设计充分考虑了并行计算能力。利用Python的multiprocessing模块或MPI(Message Passing Interface)库,可以将不同时间步、不同空间区域或不同集合成员的计算任务分配到多核CPU或计算集群上并行执行,显著缩短总计算时间。

3.3 与数字孪生平台的集成方案

降尺度模块的价值最终体现在与水利数字孪生平台的无缝集成与协同工作。集成方案设计为服务化或插件化模式,确保其能灵活嵌入平台的工作流。最常见的方式是将模块封装为一个独立的微服务或Web服务(如基于Flask或FastAPI构建),通过RESTful API或消息队列(如RabbitMQ、Kafka)与平台的其他组件通信。当数字孪生平台需要进行精细化模拟时,模型调度引擎会触发降尺度服务,通过API发送包含时间范围、区域、所需变量等信息的请求。降尺度服务接收请求,从平台的数据中台获取所需的粗分辨率模型输出和辅助数据,执行计算,并将生成的高分辨率结果文件推送回数据中台指定位置,同时通过API或消息通知平台任务完成。平台的水文模型引擎随后即可调用这些精

细化数据作为初始场或边界条件。另一种集成方式是作为平台模型引擎的内部插件,直接在模型计算流程中调用降尺度库函数,实现更紧密的耦合。无论采用何种模式,集成的关键在于定义清晰、稳定的数据接口和通信协议。模块需要遵循平台的数据标准和元数据规范,确保输出结果能被平台的其他模型和应用直接识别和使用。

4 结论

本研究围绕水利数字孪生中多尺度水文模拟的降尺度需求,提出并构建了一种融合物理机制驱动、数据同化与统计/机器学习校正的混合降尺度计算方法。该方法在利用高分辨率地理信息重构子网格水文物理过程的基础上,通过同化遥感与地面观测数据动态校正模型状态,有效提升了降尺度结果的准确性与时效性,统计/机器学习辅助校正进一步优化了结果的偏差。所开发的降尺度计算模块实现了算法的工程化与标准化,并通过服务化接口与水利数字孪生平台实现了有效集成。实验验证表明,该方法能够在保证水文物理一致性的前提下,显著提升水文模拟的空间分辨率,生成符合精细化应用需求的高分辨率水文场,同时兼顾了计算效率。研究成果为解决水利数字孪生中的尺度不匹配问题提供了有效技术途径,增强了系统在防洪、水资源管理等场景下的精细化模拟能力,对推动智慧水利发展具有积极意义。

[参考文献]

- [1]林运东,张龙,刘勇.数字孪生技术在水利工程运行管理中的分析与探索[J].黑龙江水利科技,2025,53(03):168-170.
- [2]张煜,刘亮.数字孪生峡江水利枢纽工程多尺度建模及可视化渲染关键技术应用[J].水利信息化,2023,(6):18-24.
- [3]俞志强,俞瑾.数字地理可视化技术在数字孪生流域建设中的作用探讨[J].治淮,2023,(09):32-34+37.
- [4]黄艳.以数字孪生长江支撑流域治理管理[J].中国水利,2022,(08):30-35.

作者简介:

郭嘉诚(1998--),男,汉族,辽宁朝阳人,硕士研究生,初级职称,研究方向:农田水利工程。