

数字孪生与AI驱动的智慧流域管理系统：应用与挑战

范慧 马欣悦 操李璘

安徽职业技术大学 建筑工程学院, 安徽合肥, 230011;

摘要: 本文提出耦合数字孪生与机理-AI模型的智慧流域快速响应系统研究思路, 通过整合数字孪生的虚实映射特性与机理-AI模型的精准推演优势, 构建系统整体架构, 明确各模块功能与耦合逻辑, 分析系统关键技术要点, 探讨系统实现路径与优化策略, 解决传统系统在流域状态感知、动态模拟、应急响应等方面的短板。研究表明, 该系统可实现流域物理场景的精准复刻、水文过程的实时模拟和应急决策的快速输出, 提升流域管理的智能化、高效化水平, 为智慧流域建设提供理论支撑与技术参考。

关键词: 数字孪生; 机理-AI模型; 智慧流域; 快速响应系统; 耦合技术

DOI: 10.69979/3029-2727.26.04.064

引言

开展智慧流域建设是破解流域管理困局的有效途径, 其核心是建立能对流域状态进行实时感知、动态模拟、智能决策、快速响应的一体化系统。数字孪生技术可以建立起与真实流域一一映射的数字孪生流域, 并可实现虚实互动、实时同步、动态推演; 机理模型基于流域水文物理过程, 具有较好的可解释性和可信度, 人工智能模型可以用于发现隐藏的数据关系, 提高模拟和预测的速度及准确性, 二者相结合可以取长补短。

1 相关技术基础

1.1 数字孪生技术

数字孪生技术是一项集感知、建模、仿真、交互等技术于一体的综合性技术, 核心是建立物理实体的虚拟镜像, 实现虚拟空间到物理空间的实时映射、数据同步与协同优化。其核心特征为虚实同源、实时交互、动态演化以及闭环管控, 通过对物理实体多源数据的采集, 以高精度建模为基础建立虚体, 在仿真环境下模拟实体的运行情况及演变过程, 并根据对虚体进行推演的结果指导实体的运行管理。在流域管理中, 数字孪生能够将流域的地形、水文、水利工程等信息真实地反映出来, 作为整个流域过程模拟、状态监测以及决策优化的虚拟环境, 突破物理流域的时空边界约束, 实现流域管理的可视化、精细化。

1.2 机理模型

机理模型是依据流域水文循环、水量平衡、水质演化等物理规律建立起来的数学模型, 可定量地表征流域各要素之间存在的内在联系来模拟流域水文过程演化的机理。它的优点主要是具有良好的物理解释性, 能很好地反映流域水文过程的本质, 对资料短缺不太敏感, 对于开展流域长系列模拟、规律分析及机理研究等方面有着重要作用。常用的流域机理模型有水文动力学模型、

水量平衡模型等, 在确定了模型参数物理意义的基础上, 根据流域自然地理特征来完成参数率定工作, 则能够对流域径流、蒸发、下渗等水文过程进行有效模拟, 可作为流域水资源配置及防灾减灾的参考依据。

1.3 AI模型

人工智能模型基于机器学习、深度学习等算法, 从流域多种类型监测数据中提取隐含信息, 来表征和模拟流域的状态, 并进行快速预测。其主要优点是数据依赖程度高、计算速度快, 能快速适应流域水文过程的非线性和不确定性等特点, 适用于短历时预报、实时预报等领域。在流域管理领域, AI模型可用于流域水位、流量、水质等关键参数的快速预测, 以及流域灾害的早期识别与风险评估, 通过自主学习历史数据与实时数据, 不断优化预测精度, 弥补机理模型运算速度慢、对复杂非线性过程适配不足的短板。

2 系统整体架构设计

2.1 架构设计原则

耦合数字孪生与机理-AI模型的智慧流域快速响应系统架构设计遵循实用性、兼容性、可扩展性和实时性四大原则。实用化原则围绕流域管理的实际业务需求, 保障系统功能满足流域监测、模拟、响应及决策的主要应用场景, 提高系统的实用价值; 通用化原则保障系统对各类型监测仪器设备、数据格式、模型算法具有通用性, 能实现异构数据和多模型的接入; 开放性原则为系统后续升级提供接口。易扩展性原则: 方便后期新增功能模块、改进模型算法以及拓展应用领域; 实时性原则: 及时获取、分析各类型数据信息, 实现虚实对应关系的实时反映及控制命令的即时下达, 适应流域快速反应的需求。

2.2 整体架构组成

系统整体架构自上而下分为感知层、数据层、模型

耦合层、应用层和决策层五个层次，各层次协同联动，实现流域状态的实时感知、动态模拟、智能应用与快速决策。感知层负责获取流域全要素的数据信息，建立全方位、立体式的监测体系；数据层负责将各类数据进行整理、清洗、融合、存储，为系统的运作提供数据支持；模型耦合层是整个系统的灵魂所在，将数字孪生模型以及机理-AI模型深度融合起来，并进行流域状态的仿真模拟及预测；其中，应用层根据模型耦合的结果，给出多种多样的应用服务，包括流域监测、模拟、应急响应等方面；而决策层则是以应用层得出的结果为基础，产生科学、有效的决策命令，并进行流域管理的闭环控制。

2.3 各层次核心功能

感知层的主要作用是实时监测流域的多要素信息，包括水文、气象、水质、水利工程等要素，采用相应的监测仪器获取相应要素的数据，并借助通讯手段将数据实时传送到数据层中，形成流域“天空地”的监测体系；数据层主要的作用为数据处理及存储，对来自感知层中的不同来源、不同类型的数据进行规范化处理，对原始数据进行去伪存真处理，并进行数据集成得到流域的数据池，采用数据库技术对数据进行安全保存并快速读取。模型耦合层主要负责将数字孪生模型与机理-人工智能模型进行有机组合，实现流域数字虚镜的实时更新及水文演变模拟、预报。应用层的主要功能为提供各种应用服务，包括流域状态可视化监测、水文过程模拟、灾害预警、水资源调配等，以满足流域管理的各种多样化需求。

3 模型耦合机制研究

3.1 耦合逻辑设计

数字孪生模型与机理-AI模型的耦合遵循“虚实联动、优势互补、协同优化”的逻辑，构建双向耦合机制。一方面，数字孪生模型为机理-AI模型提供虚拟仿真载体与数据支撑，通过虚拟镜像复刻流域物理场景，将感知层采集的实时数据与虚拟模型的仿真数据同步输入至机理-AI模型，为模型参数率定、精度优化提供数据保障；另一方面，机理-AI模型为数字孪生模型提供动态更新与仿真驱动，通过机理模型描述流域水文过程的物理规律，利用AI模型实现流域状态的快速预测，将模型模拟与预测结果反馈至数字孪生模型，驱动虚拟镜像的动态演化，实现虚拟模型与物理流域的实时同步。

3.2 耦合方式选择

针对流域管理需求和技术特点，将数字孪生模型和机理-AI模型进行分层耦合，分为数据耦合、模型耦合与应用耦合三层。其中数据耦合为基础，实现数字孪

生模型与机理-AI模型数据源统一和数据同步，通过数据层的融合，将流域多源数据进行标准化处理并同时提供给两套模型使用，保证了模型输入的数据一致性及实时性；以模型耦合为核心，利用接口设计实现两个模型的联合运行，并由机理模型对流域水文过程的物理机理进行描述，AI模型实现快速预测与参数优化功能，数字孪生模型实现虚拟仿真与结果可视化功能。三个层次共同完成流域状态模拟及预测。

3.3 耦合流程优化

为提升模型耦合的效率与稳定性，优化模型耦合流程，明确耦合各环节的操作步骤与时间节点。耦合程序包含数据输入、模型协同运行、结果交互及反馈优化四步，首先将数据层处理后得到的标准数据同时输入到数字孪生模型、机理模型以及AI模型之中；随后，数字孪生模型实现对流域的虚拟映射，机理模型实现对流域中水文物理过程的模拟，AI模型则实现对流域状态的快速预判，三个模型联合运行、共同计算；其次，将机理-AI模型的模拟与预测结果反向给数字孪生模型以驱动其虚拟镜像，并将数字孪生模型的虚拟仿真结果反向给机理-AI模型进行模型参数的优化；最终根据耦合结果误差对耦合过程及参数不断优化，提高模型耦合精度及效率，保证系统的高效性以及输出流域状态信息的及时性和准确性。

4 系统关键技术实现

4.1 流域高精度建模技术

流域高精度建模技术作为数字孪生模型建设的基础，直接决定了虚拟镜像的精确程度及系统模拟结果的有效性。以流域地形、水文、水利工程等全要素为基础，运用多种技术相结合的建模方式，融合地理信息、遥感影像等资料建立流域地形地貌模型，实现流域地形地貌起伏形态、河流走向等地理信息的仿真再现；基于水利工程设计方案，建立包括水库、闸门、泵站等各种水利工程设施在内的水利工程模型，并确定工程设施的各项结构参数及其运行特征；综合考虑水文观测成果，建立流域水文模型，以准确反映流域内发生的水文现象。

4.2 多源数据融合技术

多源数据融合技术是解决流域监测数据异构、冗余、精度不均等问题的关键，为系统运行提供高质量的数据支撑。针对感知层采集的水文、气象、水质等多类型、多格式数据，采用分层融合的方法，首先对单一类型数据进行预处理，去除异常数据、填补缺失数据，实现数据的标准化；其次，对不同类型的同源数据进行融合，挖掘数据之间的关联关系，提升数据的完整性与可靠性；最后，对不同来源的异源数据进行融合，结合数据的权

重分配规则,整合各类数据的优势,形成统一的流域数据集。通过多源数据融合,确保输入至模型的数据流稳定、精准,提升模型模拟与预测的精度。

4.3 实时仿真与快速响应技术

实时仿真与快速响应技术是提升系统响应速度的核心,确保系统能够快速处理流域实时数据、模拟流域状态并输出决策指令。应用分布式仿真方法,将整个流域虚拟仿真任务分解成若干个子任务,并发送到不同计算机上进行仿真计算任务的并行执行,提高仿真效率;引入边缘计算的方法,将一些数据处理及模型计算的任务下放到边缘端,降低数据传输时延,实现对流域实时数据的高效处理以及模型的实时运行;对模型进行计算过程优化,减少不必要的计算环节以提高机理-AI模型的运行效率,保证在较短的时间内获得模型的模拟及预测结果;建立快速响应模块,并制定相应的应急响应启动条件、响应程序和职责,以便于当出现流域异常现象时及时给出预警信息以及应急响应措施建议。

5 系统优化与保障措施

5.1 系统优化策略

为提升系统的稳定性、精度与实用性,建立常态化的系统优化机制,从模型、数据、功能三个层面开展优化工作。模型优化:定期根据流域实际情况获取的数据资料来对机理-AI模型中的相关参数进行率定及调整,并进一步优化模型耦合逻辑,以提高模型的模拟与预测精度;数据优化:不断完善流域监测网络,增加监测点位,增强数据采集的及时性和全面性,同时不断优化数据融合算法。提高数据计算精度;在功能完善上,根据流域管理业务需求,增加实用性应用功能,优化应用界面,增强系统的友好性,并对系统性能进行优化,改善系统卡顿、延时等问题。

5.2 技术保障措施

技术保障是确保系统正常运转的关键因素之一,完善全面的技术保障机制。加大技术研发力度,时刻跟进数字孪生、AI、大数据等技术发展趋势,适时地将其应用到系统的改造升级中,提高系统的先进性;组建技术人员队伍,对系统进行日常维护、故障排除和技术支持,对系统运行中遇到的问题进行及时处理,保证系统正常运转;加强技术交流,学习借鉴国内外智慧流域建设中的先进技术,完善系统设计方案和技术实现方法,提高系统总体技术水平。

5.3 管理保障措施

系统有效应用离不开有效的管理保证,在系统中建立健全系统管理机制,保障系统能发挥其作用。制定系统运行管理制度,规定系统使用的制度、数据管理和安

全管理的标准,规范系统的使用及运行;建立数据安全管理体系,采用加密技术、访问控制技术等,保障流域监测数据及系统运行数据的安全性,防止数据泄漏、篡改、丢失;加强人员培训,定期开展针对流域管理工作人员的系统操作、模型应用等方面的操作培训,提高工作人员的专业技能和操作水平,保证系统的有效、高效运用。

6 结束语

本文针对融合数字孪生与机理-人工智能模型的智慧流域快速响应系统展开探讨,在分析其基础支撑技术的基础上,提出系统的总体框架方案,并对机理-人工智能模型的融合方法进行研究,给出系统的关键技术实现及优化保证策略,突破了传统流域响应系统存在的建模滞后性、耦合不充分以及响应速度慢等瓶颈,提出了面向精准性和时效性的智慧流域快速响应方法,在数字孪生及机理-人工智能模型融合方面进行了研究探索,实现对流域物理场景的精确映射、水文过程的实时仿真以及应急决策的快速生成,可有效提高流域管理的智能性、精准性与高效性,可以为智慧流域建设提供一定的理论基础和技术借鉴。

参考文献

- [1] 范雪环,孙强,马锐,杨卓妍,张星梓,贾海锋.智慧赋能赤水河流域绿色高质量发展研究[J].人民长江,2025,56(S2):277-282.
- [2] 王沁茹,邱瑞,寇旭,陈阳,郭洪光.中国流域富营养化时空评价与智慧驱动因素解析[J].哈尔滨工业大学学报,1-13.
- [3] 杨倩倩,李慧玲.智慧城市建设对城市绿色增长的影响研究——以黄河流域城市为例[J].工程经济,2025,35(11):68-80.
- [4] 年立强,潘红艳.基于BIM+GIS的水利工程数字孪生智慧流域体系构建[J].治淮,2025,(09):15-17+23.
- [5] 冶运涛,蒋云钟,曹引,尚毅梓,顾晶晶,董甲平,黄建雄,关昊哲.智慧水利理论体系与数字孪生流域虚拟模型研究成果述要[J].中国水利,2024,(05):41-51.

基金项目:1安徽省教育厅2025年度科学研究重大项目(自然科学类)2025AHGXZK20073耦合数字孪生与机理-AI模型的智慧流域快速响应系统研究;
2安徽职业技术大学2024年度质量工程项目2024xjjxyjy41产教融合背景下市政工程专业“数字工匠”培养质量监控体系研究;
3安徽职业技术大学2024年度质量工程项目2024xjjpkc05精品课程《市政工程构造与识图》