

建设数字孪生秦淮河 实现流域管理“四预”能力

朱跃龙¹, 冯 钧¹, 李致家², 张 珂², 左 翔³, 刘修恒³

(1. 河海大学 计算机与信息学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 南京中禹智慧水利研究院有限公司, 江苏 南京 210019)

摘要: 数字孪生秦淮河通过高效获取海量流域数据, 对物理流域进行网格划分, 构建河流、湖泊、水库、水闸等水利对象的关联网络, 形成面向业务主题的知识图谱, 支撑物理流域到数字镜像空间的映射; 依托多模型解耦与耦合技术, 实现面向多业务场景的模型灵活组装和网格嵌套计算; 通过知识驱动的“四预”智能应用, 实现传统的要素预报向影响预报转变, 传统的阈值预警向风险预警转变, 预演过程的正向推演反向溯源, 基于预演形成多个预案并选择最优预案, 支撑流域精细管理和精准决策。

关键词: 秦淮河; 数字孪生流域; 数据组织; 模型解耦与耦合; 知识驱动

中图分类号: TV317.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7839(2022)Sup2-0001-04

Building a digital twin Qinhuai River, realizing the “Four Pre” ability of watershed management

ZHU Yuelong¹, FENG Jun¹, LI Zhijia², ZHANG Ke², ZUO Xiang³, LIU Xiuheng³

(1. College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Nanjing Zhongyu Intelligent Water Conservancy Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: The digital twin of the Qinhuai River obtains massive watershed data efficiently, divides the physical watershed into grids, and constructs the associated network of water conservancy objects such as rivers, lakes, reservoirs, and sluices, and forms a business-oriented knowledge map to support physical watersheds to digital mirror space mapping; relying on multi-model decoupling and coupling technology, realize flexible assembly of models and grid nested calculations for multiple business scenarios; through knowledge-driven “Four Pre” intelligent applications, realize the transformation from traditional element forecasting to impact forecasting, the traditional threshold early warning is transformed into a risk early warning. The forward deduction and reverse tracing of the rehearsal process form multiple scenarios based on the rehearsal and select the optimal scenario to support fine management and precise decision-making of the watershed.

Key words: Qinhuai River; digital twin basin; data organization; model decoupling and coupling; knowledge-driven

收稿日期: 2022-11-07

作者简介: 朱跃龙(1959—), 男, 教授, 博士, 主要从事水利信息化研究工作。E-mail: ylzhu@hhu.edu.cn

通信作者: 左翔(1984—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水利信息化研究工作。E-mail: knightzuo@163.com

数字孪生流域建设是实现智慧水利的关键技术路径。数字孪生流域以物理流域为单元、以时空数据为底座、以数学模型为核心、以水利知识为驱动,对物理流域全要素和水利治理活动全过程进行数字化映射、智能化模拟,实现与物理流域同步仿真运行、虚实交互和迭代优化^[1]。通过推进数字孪生流域建设,实现预报、预警、预演、预案流域管理的“四预”能力。秦淮河是南京的“母亲河”,上游有溧水、句容城区,下游则穿越南京城区,流域总面积2 684 km²,现有圩区82个,排涝泵站305座,中小型水库108座(其中中型水库8座),目前流域管理主要面临洪涝灾害威胁、水生态环境恶化等问题。数字孪生秦淮河通过高效获取海量的流域数据、敏捷匹配流域适用模型、沉淀流域水利知识,从而在数字镜像空间中生成虚实交互的数字孪生场景,通过“四预”智慧应用,实现水灾害防御精准化预报预警和智能化调度决策,实现水环境精准调控和生态水量及时保障,支撑秦淮河“防御水网、生态水环”的愿景。

1 数字孪生秦淮河建设总体框架

数字孪生秦淮河以水灾害防御与水生态环境保护为主要目标,依托江苏省数字孪生水利智能中枢,建设包括数据底板、模型平台、知识平台以及

“四预”场景化应用等为内容,构建数字孪生秦淮河总体框架(图1)。其中数据底板汇集各区域、各层级和各行业的流域海量时空数据,对不同类型的数据进行一体化组织,通过与可视化场景、水利模型和知识图谱形成互馈机制,实现物理流域在数字镜像空间的实时映射;模型平台融合专业模型和智能识别模型等,预测河道水位变化、流向、流速、流量和水质演变,为流域业务活动的模拟仿真提供“算法”支撑;知识平台沉淀流域涉水知识和治水经验,满足数据分析、专业模型、自主学习等不同需求,支撑自我优化运行;江苏省数字孪生水利智能中枢是实现数据底板、模型平台、知识平台等数字资产的汇聚、治理、服务和管理的共建共享平台;以水利智能中枢的动态知识图谱服务为驱动,实现“四预”业务活动全过程场景化模拟仿真和智慧决策。

2 多元时空数据一体化组织,构建高效访问的数据底板

数据底板是数字孪生秦淮河的“基石”,汇聚数字映射网的各类数据,为模型平台和知识平台提供数据服务,支撑上层的智能应用。基于江苏省30 m DEM,0.8~2 m DOM数字底板,构建秦淮河全流域多尺度数字化底板,为秦淮河流域大场景提供基础地



图1 数字孪生秦淮河总体框架

形数据支持。对骨干河道、水库、具有防洪功能的主要湖泊,实现优于2.5 m格网的水下地形数据测量精度,其中大断面数据测量精度优于1:5000比例尺;防洪保护区、水库湖泊及赤山湖蓄滞洪区,实现分辨率亚米级;聚焦重点河段,河段沿线构建分辨率优于5 cm的OSGB格式倾斜摄影三维模型,并利用河道断面测量资料,对河段进行水下地形建模;重点关注地区沿线主要水闸、泵站、口门、船闸、溢洪道等水工建筑物,开展BIM建模、工程上下游及两岸构建分辨率优于5 cm的OSGB格式倾斜摄影三维模型。

在汇聚秦淮河流域多元多类型时空数据的基础上,根据标准统一的水利对象分类体系,以及点/线/面水利对象的空间、属性、关系、时态等信息,构建水利数据模型,实现水利对象空间特征、业务特征和关系特征一体化组织;根据行政区划、自然流域、水资源功能区和数值计算等需求构建网格化管理模型^[2],与水利数据模型耦合后,形成一套多元化、精细化、嵌套化的数据网格化管理体系,实现L1/L2/L3级数据底板的融合和组织。根据水利对象空间结构、属性、关系和时间特征,使用时可以根据应用主题自主提取相关数据特征,形成差异化的主题数据集,使一套统一的数据及其维护体系可以服务于不同的业务应用。

3 水利专业模型解耦,构建灵活调用的模型平台

模型平台是数字孪生秦淮河的“算法”,是实现数字孪生秦淮河精准映射和虚实互动的核心。通过研究秦淮河流域多尺度嵌套的流域水文模型^[3-4]、防洪保护区一二维水动力耦合模型、城区内涝预警与分析模型、防洪预报调度一体化模型、水污染智能分析模型、生态水量调度模型等,构建业务逻辑完备、分析要素齐全、灵活响应的模型平台。

以“功能化解耦、自适应组装”为核心理念,通过分析模型内部主要参数的耦合关系对模型进行功能分解^[5-7],使用基于领域驱动设计思想的方法将整体的模型拆分成不同的原子功能模块;然后根据基于模型的数据格式描述语言和服务描述语言,对模型数据和服务进行规范化描述,完成功能模块的服务封装^[8];对解耦后的模型进行标准化、特征化和标签化处理,根据秦淮河流域特征要素、气候条件等对模型服务进行自主推荐和灵活组合,从空间尺度实现模型多维度嵌套,满足不同尺度网格下的计

算要求。基于模型间的松耦合机制,通过模型服务相互调用,使不同水利模型能够进行深度融合,对产汇流、洪水演进、多目标调度等决策全过程进行网格化嵌套模拟和计算。

4 多源专业知识沉淀,构建智慧的知识平台

知识平台是数字孪生秦淮河的“智慧”,通过知识引擎沉淀水利对象关联关系、历史场景、调度方案、业务规则和专家经验等知识,构建历史调度方案、防洪知识图谱和生态知识图谱。历史调度方案针对秦淮河流域特定调度过程,以通用方式记录气象水文信息、调度决策信息、重要水利工程运行过程、保护对象状态以及调度效果,针对当前暴雨、干旱、区域淹没等特定工况,挖掘历史相似水文过程要素特征指标,输出历史相似场景下的水利工程调度措施,为同类事件的精准决策提供知识化依据;防洪知识图谱对秦淮河流域内的河流、湖泊、水利工程、下垫面、蓄滞洪区、建筑物等对象建立关联关系,收集各对象属性,同时结合流域内的降雨情况、洪水预报、水利工程运行情况等影响条件,分析不同影响条件下各水利对象的状态;生态知识图谱通过构建秦淮河流域内的河流、湖泊、污水处理厂、排污口等对象的关联关系,收集各对象属性,同时结合导致水环境变化产生的重要对象、基础与监测数据进行关联,便于实现水污染溯源分析。依托知识平台的智慧赋能,在全域预报、预警、预演、预案等功能环节,提升精准分析、整体研判、协同指挥、迭代优化能力。

5 知识驱动决策,构建智能的“四预”应用

智能应用是数字孪生秦淮河的“四预”能力的具体实现,通过防洪知识图谱和生态知识图谱中对水利对象空间特征、属性特征和关系特征的松耦合时态化管理,形成动态知识图谱,能够满足面向业务事件的对象重组以及业务过程时态追踪的多种需要^[9]。在此基础上,融合可视化仿真和模型数值模拟,支撑水灾害防御和水生态环境保护“四预”能力的实现。

“预报”采用模型计算、成因分析和数理统计等方法对洪水和水质要素发展趋势作出短期、中期、长期的定量或定性分析,以提高预报精度、延长预见期、缩短作业时间;“预警”通过制定水利灾害风

险阈值和指标,完善水利业务预警发布机制,及时把风险预警信息直达流域防御工作一线,打通预警信息“最后一公里”,直达受影响区域的社会公众,实现水利风险预警发布全流域覆盖;“预演”针对不同情景目标,在数字孪生流域中进行水利工程调度方案模拟仿真预演,实时分析水利工作面临的风险形势,提出调度方案集;“预演”结合预演仿真,对预案集进行评估并推优,滚动调整水利工程运行、应急调度、人员防灾避险等应对措施,精细化编制流域或区域水利工程调度预案、方案、计划等,确保预案的科学性和可操作性。通过“四预”应用的建设,实现业务全过程场景化模拟仿真,将“四预”过程和监管贯穿在业务流程中,提高流域水灾害的防御能力和水生态环境的保护能力^[10]。

6 总结试点经验,引领示范数字孪生建设

数字孪生秦淮河是对数字孪生流域建设与应用的初步探索,借助江苏数字孪生水利智能中枢提供的能力支撑,在数字镜像空间中创建一个与真实世界物理实体相互映射、协同交互的数字孪生体,通过对象虚拟化、状态实时化与可视化技术,在虚拟世界中模拟和再现流域水利对象的关联关系,解析要素时空动态演化规律,实现流域水模拟、水工程调度及其影响快速响应与精准分析,通过知识驱动,支撑智能决策。

数字孪生流域不仅是实体流域在虚拟空间的数字映射,也是支撑新一代水利高质量发展的复杂综合技术体系。为满足江苏省水利业务多样化场景需求,基于数字孪生秦淮河平台的建设成果,利用水利智能中枢统筹其数据、模型、知识和应用等数字资产,实现各种资源、能力与服务的标准化和产品化,实现复杂水利业务应用的敏捷搭建、快速发布和全面推广。数字孪生秦淮河的建设,为江苏水利乃至我国积累了一批技术和产品,助推江苏省数字孪生水利的建设。

参考文献:

- [1] 李国英. 加快建设数字孪生流域 提升国家水安全保障能力[J]. 水利建设与管理, 2022, 42(9): 1-2.
- [2] 朱跃龙, 赵群, 余宇峰, 等. 基于时空特征挖掘的流量过程智能模拟方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 7-12.
- [3] 张珂, 张企诺, 陈新宇, 等. 栅格新安江-地表地下双人工调蓄分布式水文模型[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 94-101, 139.
- [4] 李致家, 臧帅宏, 刘志雨, 等. 新安江模型中河道汇流方法的改进[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 189-194.
- [5] Prieto Cristina, Kavetski Dmitri, Le Vine Nataliya, Álvarez César, Medina Raúl. Identification of Dominant Hydrological Mechanisms Using Bayesian Inference, Multiple Statistical Hypothesis Testing, and Flexible Models [J]. Water Resources Research, 2021, 57(8).
- [6] Trotter Luca, Knoben Wouter J. M., Fowler Keirnan J. A., Saft Margarita, Peel Murray C.. Modular Assessment of Rainfall-Runoff Models Toolbox (MARRMoT) v2.1: an object-oriented implementation of 47 established hydrological models for improved speed and readability [J]. Geoscientific Model Development, 2022, 15(16).
- [7] BENJAMIN N O, KUFFOUR, NICHOLAS B. ENGBAHL, CAROL S. WOODWARD, LAURA E. Condon, Stefan Kollet, Reed M. Maxwell. Simulating coupled surface-subsurface flows with ParFlow v3.5.0: capabilities, applications, and ongoing development of an open-source, massively parallel, integrated hydrologic model [J]. Geoscientific Model Development, 2020, 13(3).
- [8] 余宇峰, 胡健伟, 严琳, 等. 水文模型的服务化封装方法研究与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 34-41.
- [9] 冯钧, 杭婷婷, 陈菊, 等. 领域知识图谱研究进展及其在水利领域的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 26-34.
- [10] 张珂. 城市极端暴雨及洪涝灾害防控薄弱环节分析与对策[J]. 中国水利, 2021(15): 21-23.