

数据-模型-知识三重驱动在山东省数字孪生水利中的应用

张云姣¹, 李莹², 葛召华², 邬海波³, 王勇⁴, 李亮亮⁵

(1. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 300222, 天津; 2. 山东省水利综合事业服务中心, 250014, 济南;
3. 内蒙古自治区水旱灾害防御技术中心, 010000, 呼和浩特; 4. 天津市水文水资源管理中心, 300061, 天津;
5. 水利部黄河水利委员会信息中心, 450004, 郑州)

摘要:随着数字孪生技术在水利行业的深入应用,数据、模型、知识如何更好地赋能“2+N”水利智能业务应用体系逐渐成为研究热点。目前,数据、模型、知识赋能业务的能力停留在单一驱动或两两耦合驱动赋能的层面。本文通过分析数据-模型-知识三重驱动的内涵,提出数字孪生平台中数据-模型-知识三重驱动之间存在相互赋能关系;聚焦防汛调度、水资源调度、工程安全运行等典型业务场景,深度剖析数据-模型-知识三重驱动相互耦合赋能预报、预警、预演、预案“四预”全流程的内在逻辑,以及三重驱动之间的数据流转关系;结合山东省数字孪生平台建设进行了实践应用,通过数字孪生平台中数据中台、模型平台、知识平台的深度融合,形成“数据输入—模型运算—知识决策—数据反馈”的迭代闭环。研究表明,数据、模型、知识的相互耦合赋能为数字孪生水利实时感知、动态模拟与智能决策提供了可行路径,可为其他省级数字孪生水利体系统筹谋划及数字孪生平台建设提供参考。

关键词:数据;模型;知识;耦合;防汛调度;水资源调度;工程安全运行;数字孪生水利

Application of data-model-knowledge triple drive in digital twin water conservancy of Shandong Province

ZHANG Yunjiao¹, LI Ying², GE Zhaohua², WU Haibo³, WANG Yong⁴, LI Liangliang⁵

(1.Beifang Investigation, Design & Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 2.Shandong Water Conservancy Comprehensive Service Center, Jinan 250014, China; 3.Technology Center on Flood & Drought Disaster Prevention and Control of Inner Mongolia, Hohhot 010000, China; 4.Tianjin Hydrology and Water Resources Management Center, Tianjin 300061, China; 5.Information Center of Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: With the in-depth application of digital twin technology in the water conservancy industry, how to better enable “2 + N” intelligent water conservancy business with data, models, and knowledge has gradually become a research hotspot. At present, the capabilities of data, models, and knowledge-enabled businesses remain at the level of single-driven or two-two coupling-driven empowerment. By analyzing the connotations of the data-model-knowledge triple drive, this paper proposed that there exists a mutual empowerment relationship among data, model, and knowledge within the digital twin platform. Focusing on typical business scenarios including flood control dispatching, water resources dispatching, and safe project operation, the internal logic of the data-model-knowledge triple-driven mutual coupling and empowerment throughout the entire process of forecasting, early warning, rehearsal, and contingency planning was deeply analyzed, as well

收稿日期:2026-01-22 修回日期:2026-05-01

作者简介:张云姣,高级工程师,主要从事水利信息化研究。E-mail:345239728@qq.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3211800)。

as the data flow relationships among the three drives. A practical application was carried out in the context of the digital twin water conservancy platform construction in Shandong Province. Through the deep integration of the data hub, model platform, and knowledge platform within the digital twin platform, an iterative closed loop of “data input, model computation, knowledge decision, and data feedback” was formed. The research shows that the mutual coupling and empowerment of data, model, and knowledge provide a feasible path for real-time perception, dynamic simulation, and intelligent decision-making of digital twin water conservancy, which can provide a reference for the overall planning of digital twin water conservancy and the construction of digital twin platforms in other provinces.

Keywords: data; model; knowledge; coupling; flood control scheduling; water resources scheduling; safe project operation; digital twin water conservancy

中图分类号: TV+TP39 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2026)09-0055-11

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2026.09.008

一、引言

水利部大力推进智慧水利建设,相继印发系列政策文件,明确要求加快构建具有“四预”(预报、预警、预演、预案)功能的数字孪生水利体系。同时,“人工智能+”行动的推进,特别是以DeepSeek等为代表的大模型技术迅猛发展,为水利行业的智能化提升提供了前所未有的动力。数字孪生水利作为物理水利对象的数字映射和智能模拟,需要深度融合数据、模型与知识,实现从“信息”到“决策”的转变。因此,探索如何利用数据、模型、知识赋能数字孪生水利建设,提升水利业务的智能化水平,已成为当前智慧水利研究的迫切需求。

数字孪生水利建设中,数据、模型、知识赋能水利业务有两种主要路径:一是“数据驱动”路径,通过汇集海量的监测和业务数据,构建“水利一张图”和统一的数据底座,实现对物理水利对象的“数字刻画”;二是“模型驱动”路径,通过对水文、水动力、水质等专业模型的集成与应用,实现对水利事件的预报和预演。然而,单纯的数据驱动难以挖掘数据背后的机理和规律,单纯的模型驱动受限于模型本身的精度和边界条件,难以应对复杂多变的实际情况和突发事件。近年,学者们开展了数据、模型、知识之间双驱动赋能水利业务的研究。在数据与模型耦合方面,有研究基于深度学习算法对水文监测数据进行降噪、补全与特征提取,显著提升了洪水预报模型的预测精度;有学者通过构建数据同化系统,将实时水文数据与数值模型动态融合,实现对水资源时空分布或洪水过程的精准模拟。在模型与知识耦合层面,部分研究采用规则嵌入方式,

将调度规则等显性知识转化为模型约束条件,使模型输出结果符合实际工程调度规程;另有研究基于专家经验训练机理模型参数智能优化技术,实现模型参数的自适应动态优化,为模型参数优化、边界条件设定提供逻辑支撑。在数据与知识耦合方面,利用水利知识定义数据质量评价指标,制定数据治理规则,引导数据中台对原始数据的治理。但总体来看,数据、模型、知识的耦合多停留在两两协同层面,三者深度耦合的技术框架缺乏,双向反馈机制不完善,限制了数字孪生水利的智能化水平。

基于此,本文解析了数据-模型-知识三重驱动赋能数字孪生水利的耦合机理,阐述了三重驱动在业务管理中的相互赋能和数据流转关系,并以山东省数字孪生水利体系典型业务场景为例,剖析了典型场景中数据-模型-知识三重驱动赋能业务的案例,旨在为提高数字孪生水利智能化水平提供参考。

二、数据-模型-知识三重驱动相互赋能关系

数据-模型-知识三重驱动指通过数字孪生平台中数据中台、模型平台、知识平台的深度融合,形成“数据输入—模型运算—知识决策—数据反馈”的迭代闭环,为数字孪生水利“四预”功能的落地提供关键技术路径。

数据中台作为基础支撑,汇集多源异构数据,经数据中台清洗、去重、补全、融合与特征提取后,存储于数据中台的数据仓库,为模型平台、知识平台、业务应用提供高质量数据资源。同时,接收业务应用生成的业务数据,实现根据业务主题分类的数据存储;接收知识平台下达的数据治理规则,指导对多源异构数据的治理。

模型平台接收来自数据中台的输入数据、来自业务应用的输入参数和约束条件,利用各类水利专业模型进行模拟计算,向业务应用输出“2+N”水利智能业务领域的模拟结果,同时将模型的模拟误差、参数变化等传递至知识平台,依托知识平台实现模型参数优化。

知识平台通过专家经验、调度方案、历史案例等构建结构化知识体系。一方面利用知识引导数据治理过程,明确数据治理标准,提升数据质量;另一方面为模型层提供约束条件、参数优化依据和逻辑支撑,提升模型模拟结果的合理性。同时,知识平台接收数据中台治理后的数据和模型平台的模拟结果,实现知识的更新迭代,并基于结构化知识引擎和大模型引擎生成调度方案,支撑业务应用的精准化决策。

遥感平台属于数据中台在地理空间数据维度的分支,遥感平台调用模型平台中的遥感数据处理模型,接收业务应用、知识平台提供的数据处理规则和参数,实现遥感数据分析处理。处理后的结果以遥感服务的形式,供业务应用、数据中台、模型平台、知识平台调用。

业务应用系统接收数据中台治理后的数据、模型平台的模拟预测结果及知识平台的调度方案,支撑“2+N”水利智能业务应用体系管理工作。同时,业务应用系统产生的“2+N”业务数据,会反向输入至数据中台,形成完整的数据流闭环。数据-模型-知识三重驱动相互赋能关系见图1。

三、典型业务场景下数据-模型-知识三重驱动赋能逻辑

依据山东省数字孪生平台的总体架构,结合省市级数字孪生平台的共建共享关系,以防汛调度、水资源调度、工程安全运行为典型业务场景,提出典型业务场景下数据、模型、知识耦合赋能业务应用的内在逻辑,剖析数据中台、模型平台、知识平台之间的数据流转关系。

1. 防汛调度场景

(1) 防汛调度场景下的数据-模型-知识三重驱动

在防汛调度场景下,数据-模型-知识三重驱动耦合的目标是支撑防汛系统“四预”功能,实现防汛智能化。

数据中台为模型平台、知识平台提供“天空地”实时雨情、水情、工情数据,保障洪水预报的时效性与准确性,为防汛预警提供依据。模型平台基于监测数据生成洪水预报结果和调度方案,为知识应用提供场景载体。知识平台引导数据治理方向,保障监测数据的质量,同时约束模型的运行,确保生成的调度方案符合法规标准和工程安全要求。模型模拟与实际执行情况的对比结果可反向验证和更新知识,推动知识的迭代和完善。数据-模型-知识三重驱动在防汛调度场景中的应用如图2所示。

(2) 防汛调度场景下的数据-模型-知识三重驱动数据流转分析

结合省级数据中台、模型平台、知识平台的部署架

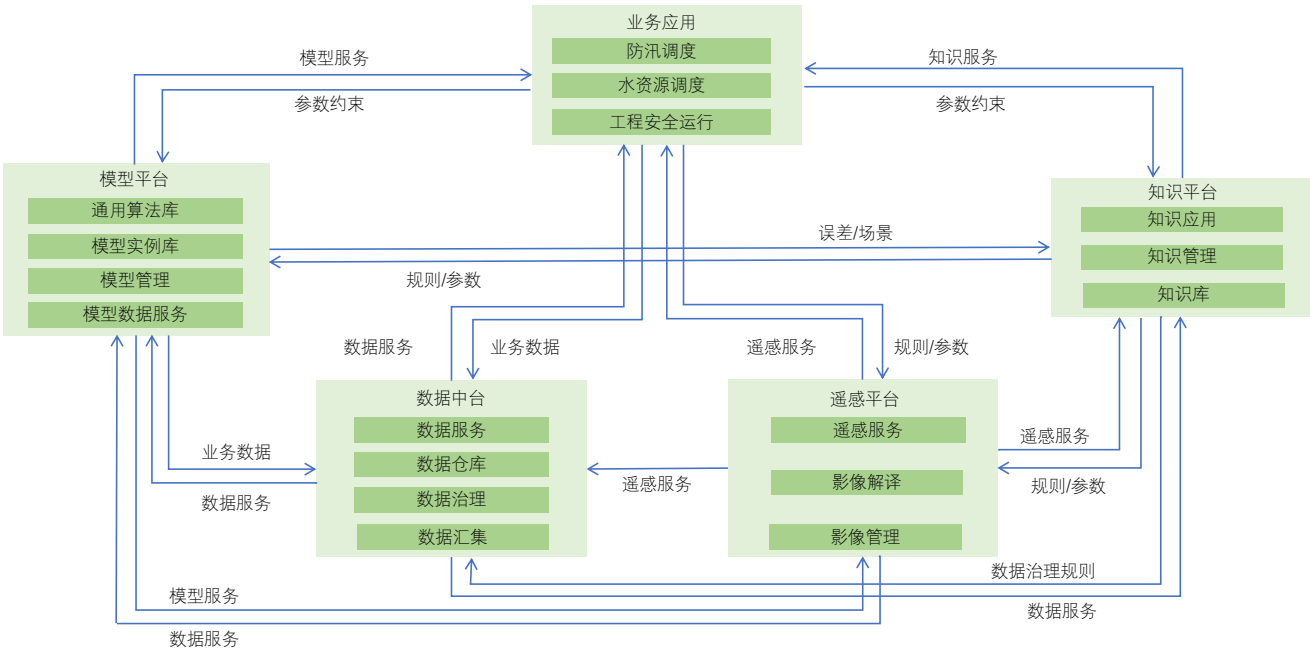


图1 数据-模型-知识三重驱动相互赋能关系

构,以及省市级的共建共享关系,以省级水旱灾害防御部门一次降雨洪水调度过程为例,分析防汛调度“四预”场景下数据中台、模型平台、知识平台之间的数据流转关系(见图3)。

①降雨洪水预报阶段

数据中台汇集雷达、地面水文站等多种途径采集的雨水情数据,经数据清洗、治理、标准化后,形成时

间同步、格式统一的标准化数据集,为模型运算、知识更新迭代、业务应用调用提供高质量输入。遥感平台依托智能识别算法实现对下垫面信息的高精度译解,为模型计算、业务应用调用提供基础信息。模型平台基于数据输入启动专业模型运算,调用水文水动力模型模拟降水产汇流过程及洪水演进过程。产汇流过程及重要控制断面的预报结果传递至知识平台。知识平

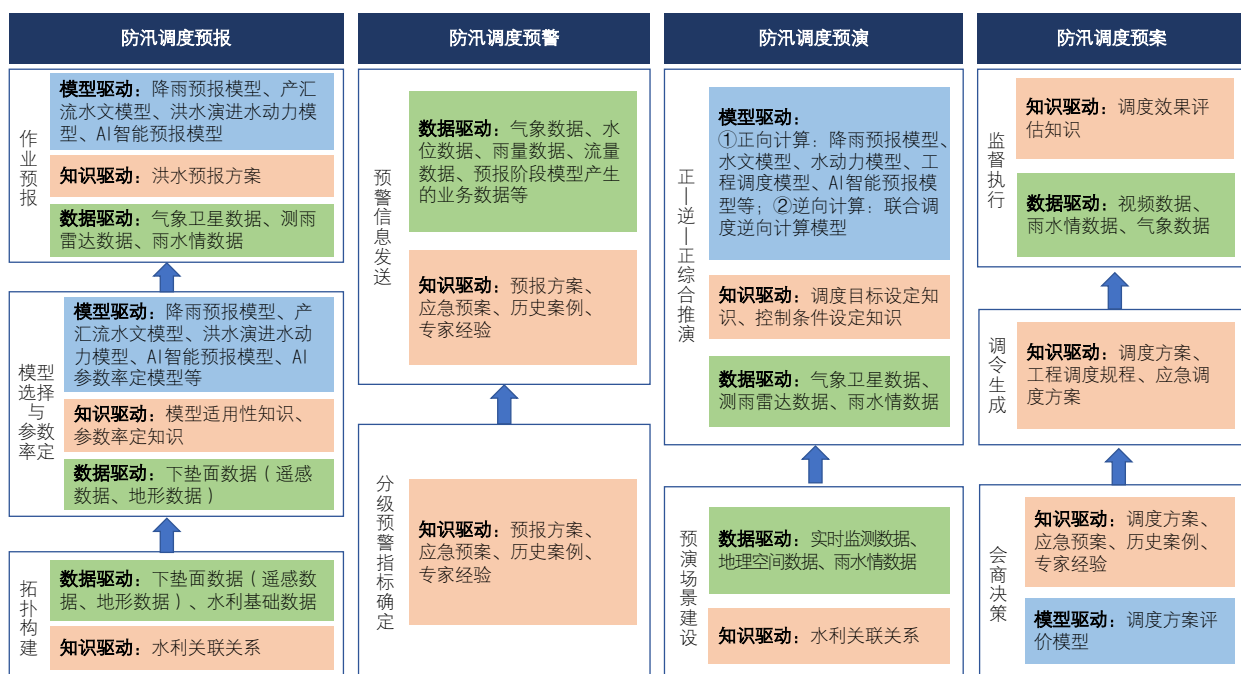
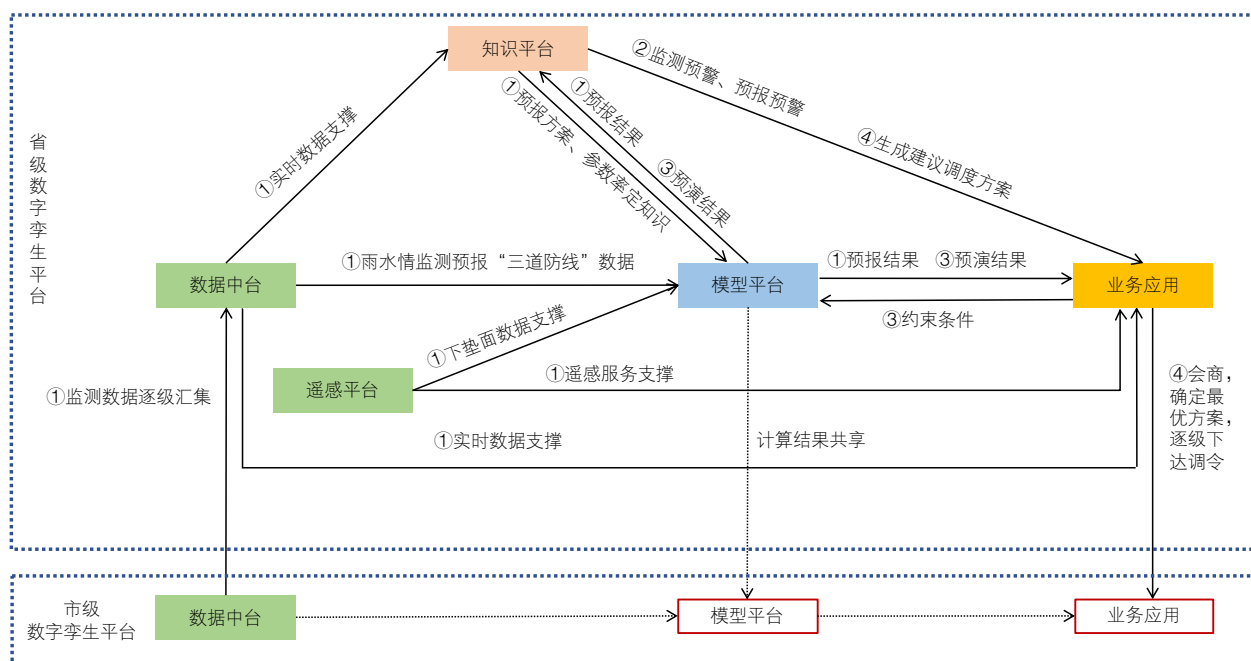


图2 数据-模型-知识三重驱动在防汛调度场景中的应用



注:图中序号代表与文中对应的调度场景阶段;□代表市级可结合自身条件决定是否开展建设。

图3 防汛调度场景中数据-模型-知识三重驱动数据流转关系分析

台根据历史案例、专家经验对模型预报结果进行精度评判,若预报误差不符合规范要求,则向模型提供参数率定指导。若预报误差在规范允许范围内,则向业务应用输出洪水预报结果作为最终预报结果。

②洪水预警阶段

数据中台汇集实时雨情、水情数据,更新人口分布、重要基础设施位置等基础数据,持续补充动态数据,为模型平台和知识平台提供支撑。模型平台基于实时监测数据进行洪水滚动预报,并调整洪水影响范围、影响程度等指标,预报结果传递至业务应用和知识平台。知识平台根据既定的预警指标(水位、流量、雨量等),以实时监测数据和模型计算结果为依据进行规则判定,研判是否需要监测预警或预报预警。一旦认定需要发出预警,则基于模型平台提供的洪水影响范围向业务应用发布预警信息。

③洪水仿真预演阶段

数据中台与遥感平台提供数据底板全场景数据,形成物理场景的实时映射。模型平台根据业务应用设定的不同调度目标、不同约束条件,构建多套调度方案,模拟不同方案下的洪水演进过程、水利工程运行状态,并将模拟结果提供给知识平台。

④调度方案制定与实施阶段

知识平台引导建立方案评估指标体系,引入工程安全、生态保护、防洪调度相关的规范、规程等知识,建立多维度评估体系,对调度方案进行综合评估,将评估得分最高的方案选为最优调度方案。调度决策人员基于数据中台提供的实时采集数据和模型平台、知识平台提供的计算结果,以业务应用为工具进行会商决策,确定最终的调度方案。数据中台与遥感平台实时采集处置过程数据,包括闸门实际开度、水库实时水位、洪水演进数据及受灾区域实时情况等,为预案执行效果评估与调整提供实时依据。模型平台基于数据中台提供的动态反馈数据,启动预案效果仿真模拟,对比预案预期效果与实际执行情况,预测后续风险与调整需求,输出风险预警与预案调整量化依据。知识平台结合数据与模型反馈的动态信息,研判是否触发预案调整规则,整合水利工程操作流程、人员转移路线规划、应急物资调配规则等知识,输出调度调整方案,确保处置方案能够快速适应实际灾情变化。

2. 水资源调度场景

(1) 水资源调度场景下的数据-模型-知识三重驱动

在水资源调度场景下,数据-模型-知识三重驱动耦合的目标是实现水资源在生产、生活、生态间的优化

配置,从而实现水资源科学调度。

数据中台为模型提供雨水情、需水量、墒情等数据,支撑水资源供需平衡分析。模型平台在多源数据的支撑下,调用水利专业模型生成来水预报成果、需水预测成果以及水资源配置方案,实现水资源优化配置。数据与模型的协同可跟踪调度计划的执行情况,实现调度计划的动态调整。知识平台约束模型的运行,为模型提供目标函数和约束条件;同时挖掘数据价值,引导数据治理。模型模拟与实际执行情况的对比结果可反向验证和更新知识,推动知识的迭代和完善。

数据、模型、知识三者协同赋能水资源调度“四预”,各阶段所依托的驱动耦合逻辑如图4所示。

(2) 水资源调度场景下的数据-模型-知识三重驱动数据流转分析

结合省级水网调度中心数据中台、模型平台、知识平台的部署架构,以及和省级数字孪生平台的共享共建关系,以省级水网调度中心一次水资源调度业务为例,分析数据中台、模型平台、知识平台之间的数据流转关系(见图5)。

①水资源调度预报阶段

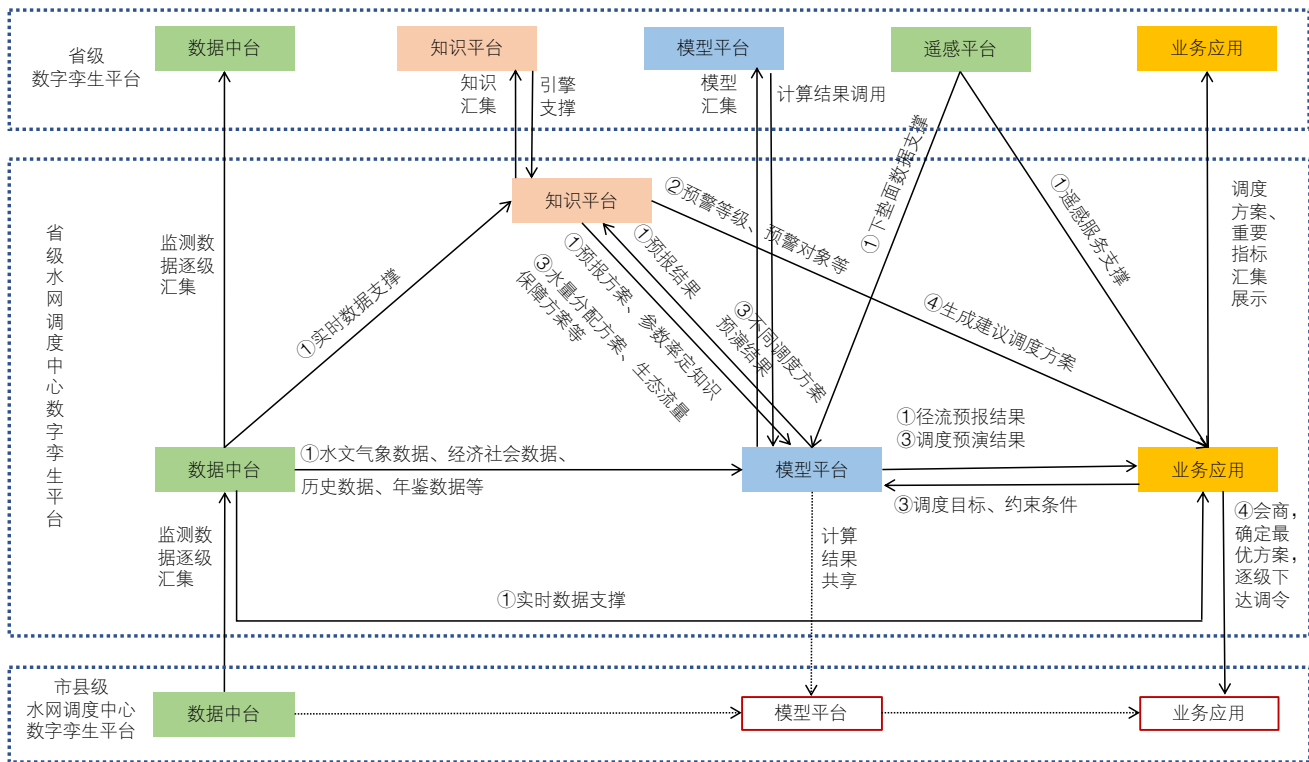
省级水网调度中心数据中台汇集控制断面水量、水文、气象等实时监测数据及地表地下水资源量、历史用水等数据,调用省级遥感平台的遥感数据,实现下垫面条件(如土壤含水量、土地利用等)自动解译,为模型平台提供多维度、高精度算据。模型平台基于需水预测模型、来水预报模型等,分析未来一定时期内水资源供需总量、时空分布特征及供需缺口变化趋势。来水预报、需水预报、旱情预报、可供水量分析等预报结果传递至知识平台。知识平台根据历史场景、专家经验、预报方案提炼参数率定知识,指导预报模型迭代优化,直至预报精度符合要求,模型平台将预报结果输出至业务应用。

②水资源调度预警阶段

数据中台向知识平台提供水利工程运行状态、水资源存量、各行业用水量等实时数据,提供预警判定的实时依据。模型平台滚动开展径流预报、需水预测及可供水量分析,以及水资源供需关系动态变化分析。知识平台基于水资源管理相关法规、历史预警案例知识,制定不同场景下的预警阈值标准(如农业灌溉高峰期缺水预警阈值、枯水年水资源短缺预警阈值等),划定不同的预警等级,一旦判定存在水资源短缺或过剩的风险,知识平台即向业务应用推送预警等级、预警对象等要素,指导业务应用发出

水资源调度预报	水资源调度预警	水资源调度预演	水资源调度预案
数据驱动: 水文数据、气象数据、下垫面数据、水利基础数据等 模型驱动: 水源来水预报模型、冰凌预报模型、旱情预报模型等 知识驱动: 水利关联关系、预报方案、模型适用性知识、参数率定知识等	数据驱动: 水文气象数据、控制断面流量数据、工程运行状态数据、预报数据等 知识驱动: 各层级水网调度方案, 调水工程、重要节点工程调度规程、应急调度方案等	数据驱动: 径流预报来水量、需水量、可分配水量、调蓄工程初始蓄水量等 模型驱动: 可供水量计算模型、多时间尺度水量调度模型 知识驱动: 水量调度目标与原则、水工程运行管理办法、水量调度案例等	数据驱动: 计划调水量、实际调水量、水源和受水区水资源情况、工程运行情况、受水区用水需求、年度实际调入调出水量、水源供水、用水需求、经济社会数据等 模型驱动: 年月旬调度计划执行评价模型、年度调水效果评价模型 知识驱动: 历年年月旬调度执行情况、调度评估指标与方法、调水效果评价指标与方法
来水预报	调度预警	调度计划编制	年调度评价
需水预测	分级预警阈值确定	输水过程模拟	
数据驱动: 经济社会数据、用水定额数据、历史用水数据等 模型驱动: 受水区不同时间尺度需水预测模型等 知识驱动: 经济社会情况、统计年鉴等	知识驱动: 预报方案、应急预案、历史场景、专家经验、水量调度方案、生态流量保障方案等	知识驱动: 模型参数设置、模型验证方法、流体力学知识 数据驱动: 水文数据、河湖库几何参数、管道特性数据、设备运行状态 模型驱动: 闸泵站联合调度模型、泵站(群)经济运行模型	

图4 数据-模型-知识三重驱动在水资源调度场景中的应用



注:图中序号代表与文中对应的调度场景阶段;□代表市级可结合自身条件决定是否开展建设。

图5 水资源调度场景中数据-模型-知识三重驱动数据流转关系分析

预警。

③水资源调度预演阶段

数据中台提供水利工程运行状态、水质、水量、气象等实时数据,为水资源配置模型提供场景化输入参数。模型平台基于水资源配置模型、水资源调度模型、

工程调度模型等模型算法,对不同调度方案(如跨区域调水、水库联合供水、节水限水等)进行预演,分别成年、月、旬调度计划和工程调度指令,并计算各方案的供水保障率、经济社会效益、生态效益等关键指标,为方案对比提供量化依据。不同方案的评判结果传递

给知识平台,知识平台提供水量分配方案、生态流量保障方案、供水优先级、历史案例等知识,为预演方案的优化提供逻辑指导。

④调度预案生成阶段

知识平台结合历史场景、专家经验,生成建议调度方案,为业务应用提供决策支撑。调度决策人员基于数据中台提供的实时采集数据及模型平台、知识平台提供的计算结果,以业务应用为工具,开展会商决策,确定最终的调度方案。数据中台与遥感平台实时采集处置过程数据,包括工程运行状态数据、控制断面水量数据、旱情数据等,为预案执行效果评估与调整提供实时依据。模型平台从水资源供需平衡效果、工程运行压力等方面对调度效果进行评判。知识平台基于历史调度案例、专家经验,指导预案的落地执行。同时,基于数据中台提供的实时数据进行风险研判,为及时启动预警机制提供决策建议。

3.工程安全运行场景

(1)工程安全运行场景下的数据-模型-知识三重驱动

在水利工程安全运行场景下,数据-模型-知识三重驱动耦合的目标是支撑水利工程安全“四预”,实现其全生命周期运行风险的智能诊断并提出决策建议。

数据中台为模型平台提供工程安全监测数据,支撑水利专业模型对当前及未来的工程运行状态进行研判。模型平台在数据支撑下,对工程的健康状态进行

研判,对工程的潜在故障进行诊断,并模拟不同环境条件下的调度预演结果。知识平台利用安全阈值等知识为模型的安全运行提供约束条件,引导数据治理。数据与模型的协同可更新知识,推动知识的迭代和完善。

数据、模型、知识三者协同实现水利工程安全运行“四预”,各阶段所依托的驱动耦合逻辑如图6所示。

(2)工程安全运行场景下的数据-模型-知识三重驱动数据流转分析

结合省级工程管理部门数字孪生平台的建设现状及需求,以及和省级数字孪生平台的共享共建关系,以工程管理部门一次工程安全运行管理为例,分析数据中台、模型平台、知识平台之间的数据流转关系(见图7)。

①安全状态预报阶段

工程管理部门数据中台汇集水利工程安全监测数据、环境数据(水位、流量、风浪、地震、温度、湿度等)及历史维修养护数据,构建多维度、全要素的工程安全数据底座,为模型平台提供数据支撑。遥感平台提供遥感影像数据至模型平台和业务应用,定期进行遥感服务支撑。模型平台基于数据中台提供的监测数据,调用监测数据统计分析模型、机器学习模型等专业模型实现工程安全状态的推演与风险预判。

②安全风险预警阶段

数据中台将实时监测数据传递至模型平台,提供实时数据支撑。知识平台依据安全监测规范等工程安

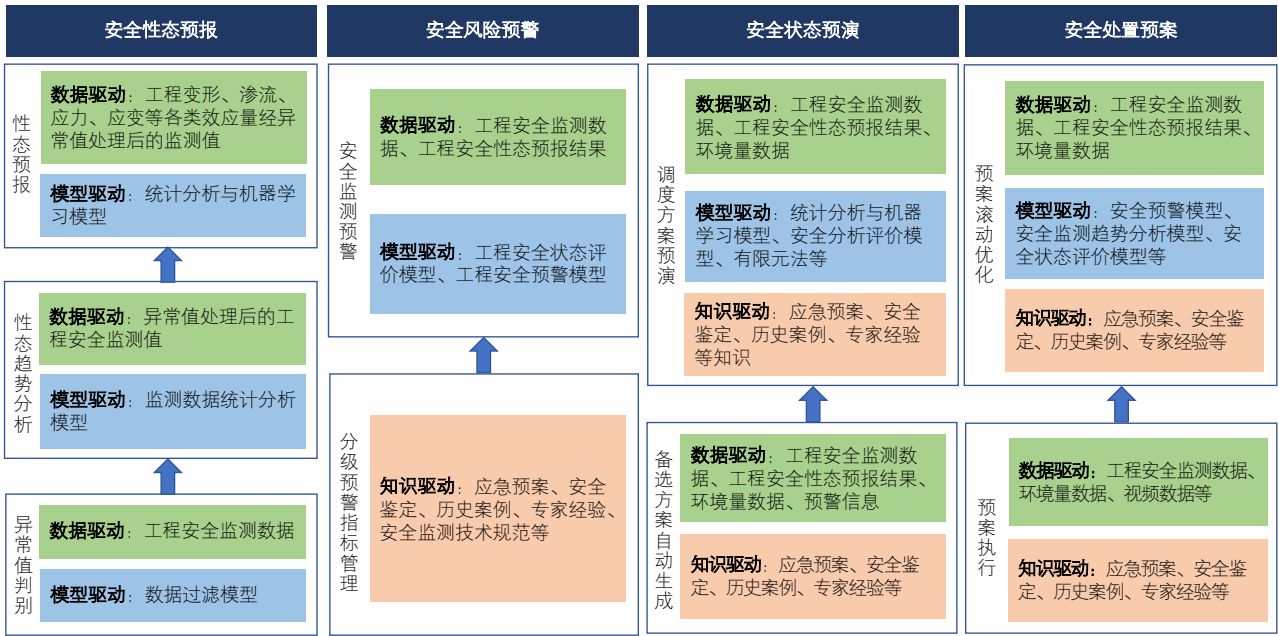
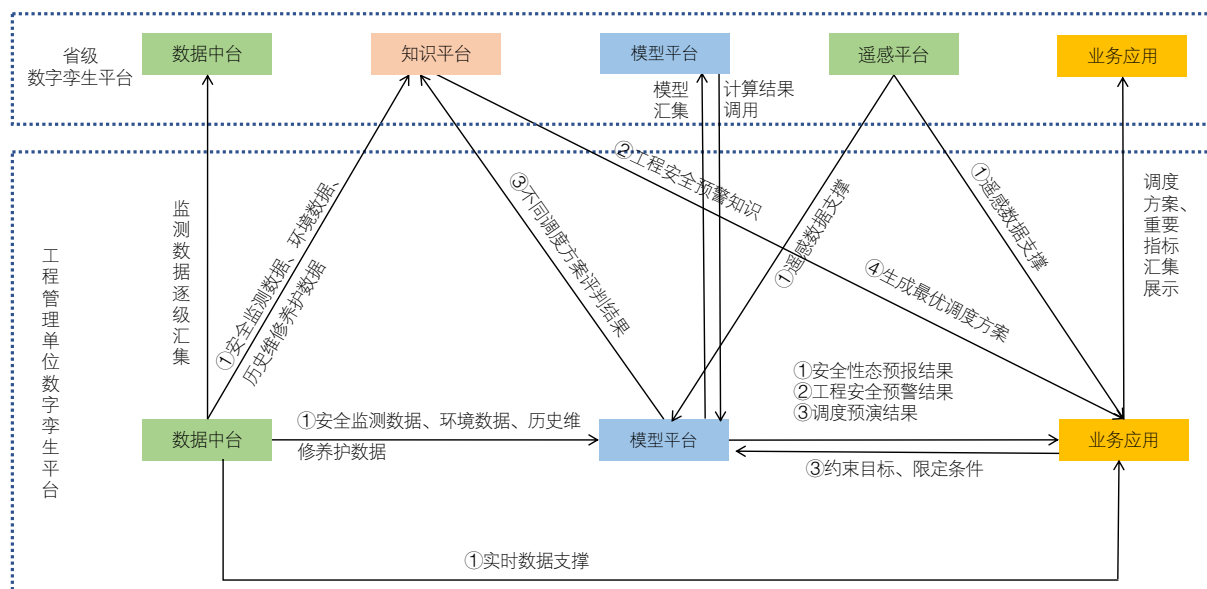


图6 数据-模型-知识三重驱动在工程安全运行场景中的应用



注：图中序号代表与文中对应的调度场景阶段。

图7 工程安全运行场景中数据-模型-知识三重驱动数据流转关系分析

全知识，确定预警指标和预警等级，为安全风险预警提供研判标准。模型平台以安全性态预报的结果为基础，调用工程安全预警模型，实现对监测数据超阈值情况的自动分析、判断和分级预警。模型平台的计算结果及知识平台的研判标准传递至业务应用，为业务应用的预警信息发送提供支撑。

③安全状态预演阶段

数据中台为安全状态预演提供持续的实时数据支撑。知识平台依托工程抢险技术规范、同类工程应急处置成功案例知识，为系统自动生成多套调度方案。模型平台接收业务应用输入的约束目标、限定条件，调用性态预测模型、安全评价模型、结构计算模型等对多套调度方案进行预演，预演结果传递至知识平台。

④安全处置预案阶段

知识平台根据方案评估知识对工程安全状态进行打分，并推送最优方案至业务应用系统。调度决策人员基于数据中台提供的实时数据及模型平台、知识平台提供的计算结果，以业务应用为工具，开展会商决策，确定最终的调度方案。数据中台与遥感平台实时采集处置过程数据，为调度方案跟踪执行提供数据支撑。模型平台根据调度方案执行情况，调用各模型，对后续工程安全状态进行滚动模拟，为及时调整调度方案、保障调度执行效果提供依据。知识平台根据模型平台滚动模拟结果、数据中台实时监测数据进行分析，研判调度执行预期效果，并依据应急预案、专家

经验等知识对后续工程调度方案进行及时调整。

四、典型业务场景下数据-模型-知识三重驱动山东应用案例

1. 山东省数字孪生水利体系总体架构

山东省数字孪生水利建设聚焦山东省现代水网布局和特点，围绕水网联合调度业务需求，实行省级统筹、省市县三级联动。立足山东省现代水网“一轴三环、七纵九横、两湖多库”的总体格局，省级统筹推进全省数字孪生水利建设，构建“1+3+4+N+4”（1个数字孪生平台+3个调水环网+4大孪生流域片+N类孪生工程+4个保障体系）现代水网数字孪生体系，推动形成横向打通、纵向贯通的“全省一盘棋”格局（见图8）。

山东省数字孪生平台是山东省数字孪生水利体系总体架构中的重要组成部分，由模型平台、知识平台、数据中台、遥感平台组成（见图9）。省级模型平台在共享水利部通用模型算法和流域机构专业模型基础上，采用“1+N”（1个省级平台+N个市级平台）建设模式，省级统筹、省市共建模型平台，省级统一建设标准版模型平台，市级根据自身条件自行建设。省级知识平台、遥感平台由省级统一开展建设，以知识服务、遥感服务的形式供市级、工程单位调用。数据中台集成了“全域覆盖、分级管理、动态更新”的水利数据体系，以“1+N”建设模式实现了全省范围的数据归集与共享服务。

2. 数据-模型-知识三重驱动赋能业务应用分析

(1) 防汛调度

在防汛调度业务方面,山东省打造重点流域防洪决策支持系统,围绕大汶河、沂沭河两个流域,建设了“1+5”软件平台,“1”指一个调度决策支持平台,“5”指数据底板、知识平台、模型平台、空间平台、数字引擎五大支撑平台。2025年汛期,“1+5”软件平台投入常态化

运行,全面提升了流域防汛智能化、科学化水平。

以大汶河流域为例,系统基于“1+5”软件平台,深度耦合降雨洪水监测数据、预报调度模型、应急处置风险研判知识,保障了大汶河流域安全度汛。

系统构筑了雨水情监测预报“三道防线”。基于“第一道防线”气象卫星及测雨雷达系统进行高分辨率面雨量监测,依托反演算法,生成未来0~3 h高精度

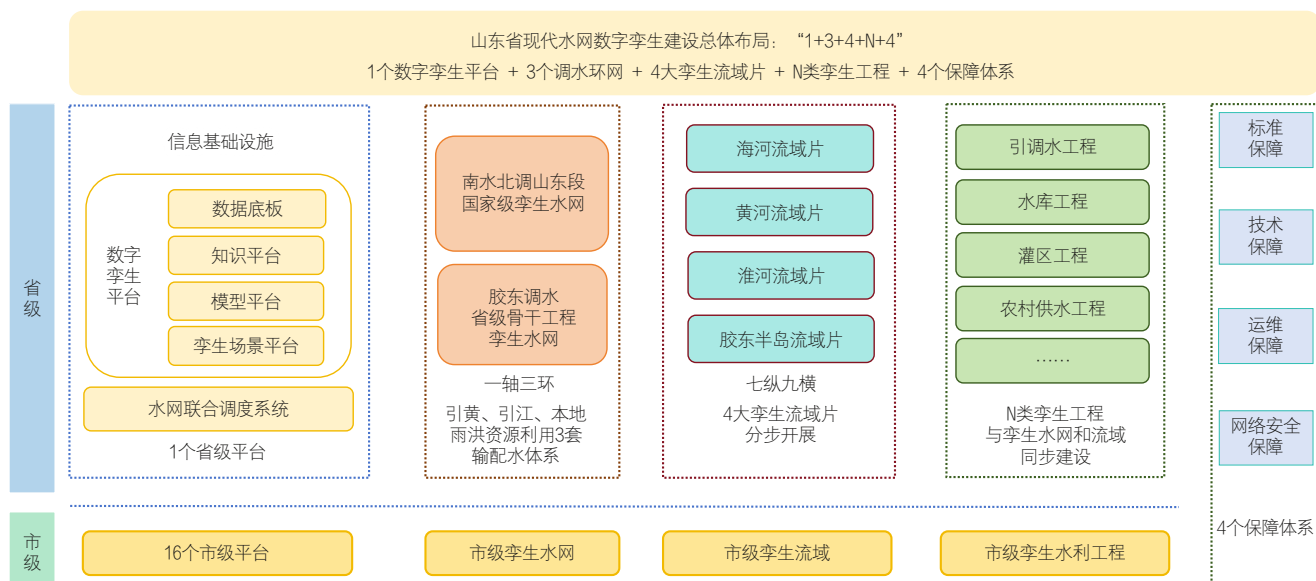


图8 山东省数字孪生水利体系总体架构

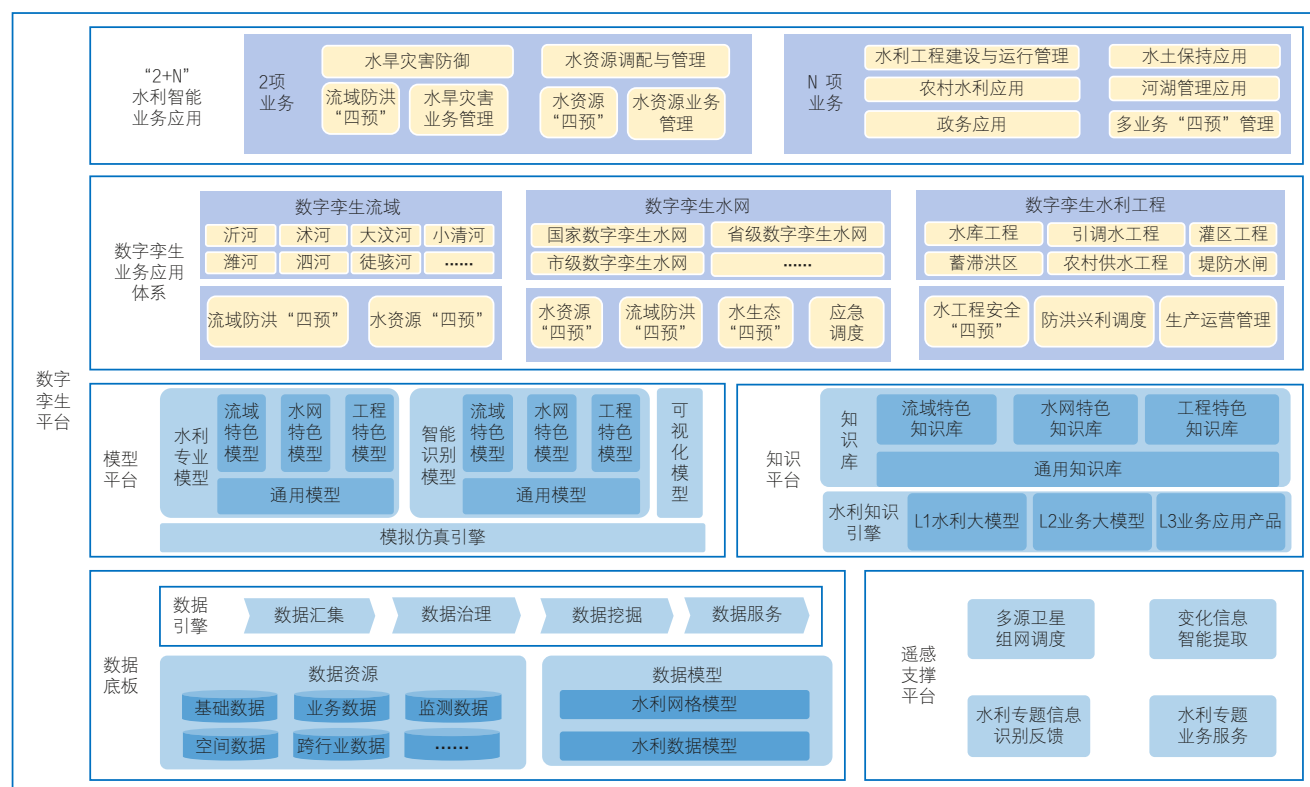


图9 山东省数字孪生平台布局

短临降水预报。以流域内1014个雨量站网构成“第二道防线”，以50个河道测站、768座水库站、74个视频测流站构筑“第三道防线”，为全流域水文信息实时监测、上下游联动预警提供核心支撑。

系统建立了“7 d 预判-3 d 预警-24 h 滚动”洪水预报机制。在应对多轮次强降雨过程中，基于模型平台进行“降雨—产流—汇流—演进—调度”一体化计算，对大汶河流域72个预报断面、607个河段进行滚动洪水预报。以数字流场的形式展示预报对象基本信息以及实测、预报的入库流量、出库流量、水位等信息，实时计算受影响区域。

根据场次洪水预演结果开展调度。首先进行正向调度计算，针对大中型水库，系统可结合纳洪能力分析结果、未来降雨趋势和下游承泄能力，生成并设置预泄方案，增强应对极端暴雨的主动性。系统支持联合调度的逆向计算（反向调度），如北望站按规程调度流量是 $1700\text{ m}^3/\text{s}$ ，经过反向调度目标反算，将北望站的流量控制在 $1550\text{ m}^3/\text{s}$ 以内。完成反向调度目标反算后，开展正向验证，通过验证模拟方案落地效果，确保调度方案科学可行。

预报调度方案涵盖关键断面流量过程、调度建议、风险提示等核心信息，便于市级业务人员快速掌握核心信息，高效开展线下会商与应急响应。在此基础上，系统调用应急资源图谱，自动匹配受影响区域周边的防汛物资仓库、抢险队伍位置，并结合路网状态，智能规划安全转移路线。同时复盘调度方案效果，持续优化模型与算法。

以上过程涵盖了从一次降雨发生、风险预警、大中型水库纳洪能力分析、基于正—逆—正机制的人工调度决策，到险情应急处置的全流程闭环管理，体现了数据、模型、知识协同耦合在防汛调度中的赋能作用，确保了洪水模拟的连续性与决策建议的科学性。

（2）水资源调度和工程安全运行

在水资源调度业务方面，山东省以“一轴三环”为重点，集成南水北调、胶东调水等骨干调水工程运行系统，建设省级调度平台，初步实现物理水网数字化映射、水网运行动态化感知、计划执行可视化监督、水网调度智慧化决策，省级骨干水网年均引调水量达到 17.7 亿 m^3 。针对水网水量均衡调配难题，开发年月旬水量调度模型，一键编制调度方案，预演“引—调—供”全过程，智能生成分钟级、厘米级调控指令，实现精准供水。位山灌区开发“灌区—县—典型区域”三级尺度需求预测模型，实现不同灌溉条件下作物需水

量、最优灌溉日期、灌溉量的科学预测，配水效率提高11%。针对多级水网衔接调度，发挥省级调度平台“一站式”服务作用，接入所有市级水网运行信息，实现“一网覆盖、一屏统览”。采用“全网统筹、分区调度”模式，统筹各市用水需求和可用水源，动态监控调水计划执行情况，实现省市水网一体化调度。

在工程安全运行方面，以“两湖多库”为重点，开发调水工程综合预警平台，实时汇集无人机巡检、视频识别、工业听诊等预警信息，运用人工智能AI分析精准定位、跟踪处置，2025年度推送并处理管道漏水、机组超温等预警信息2.4万条。

五、总结与展望

本文围绕数据—模型—知识三重驱动在数字孪生水利中的应用开展研究，解析了数据—模型—知识三重驱动的内涵，提出了数字孪生平台中数据—模型—知识三重驱动之间“数据输入—模型运算—知识决策—数据反馈”的赋能关系，剖析了三重驱动相互耦合赋能防汛调度、水资源调度、工程安全运行业务“四预”全流程的内在逻辑。以山东省数字孪生平台为例，分析了山东省数字孪生水利典型业务场景下数据—模型—知识三重驱动赋能业务的典型案例，应用案例表明，数据、模型、知识的相互耦合赋能为数字孪生水利实时感知、动态模拟与智能决策提供了可行路径，可为其他省级数字孪生平台建设提供参考。

未来，数据—模型—知识三重驱动在数字孪生水利中的应用可从以下方向进一步深化：一是构建动态自适应的三重驱动耦合框架，强化三者之间的实时双向反馈机制，提升对复杂水利业务场景动态变化的适应能力；二是突破多源异构数据融合、知识自动提取与更新、模型参数自适应优化等关键技术，特别是结合大语言模型提升知识图谱的构建效率和模型的自主学习能力；三是推动技术落地与标准化建设，制定数据共享、知识表示、模型接口等方面的标准规范，促进三重驱动技术在不同区域、不同层级水利部门的推广应用。

注：本文作者张云姣、邬海波、王勇、李亮亮均为水利部卓越水利工程师培养工程（第二期数字孪生水利班）学员，李莹、葛召华为顶岗实践锻炼阶段导师团队成员。

参考文献：

- [1] 周桂清, 张盼, 王林峰. 多源数据驱动的水利工程围堰施工数字孪生模型构建与风险管控应用[J]. 城市

- 建设理论研究(电子版), 2025(30):193-195.
- [2] 吴一戎. 遥感技术赋能智慧水利:问题、挑战与建议[J]. 中国水利, 2024(11):1-8.
- [3] 张智韬, 刘彦甫, 胡笑涛, 等. 多源遥感数据驱动的农业水利信息感知与应用研究进展[J]. 农业机械学报, 2025, 56(8):1-20.
- [4] 夏天, 任彦润, 张耀南, 等. 数据驱动下的渭河流域河道演变原因分析[J]. 数据与计算发展前沿(中英文), 2024, 6(3):173-183.
- [5] 潘佳佳, 郭新蕾, 王涛, 等. 基于数据驱动的南水北调中线干渠多参数水温预报模型[C]//中国水力发电工程学会水工水力学专委会, 国际水利与环境工程学会(IAHR)中国分会, 中国水利学会水力学专委会. 水力学与水利信息学进展2024——水利信息学. 2024:125-138.
- [6] 陈波, 潘婷婷, 谢正浩. 水利工程中的智能化管理与数据驱动决策研究[J]. 科学技术创新, 2026(1):154-157.
- [7] 郑红日, 黄伟宏, 廖添, 等. 基于数据同化技术的洪水演进模型参数自动校准方法——以武强溪流域为例[J]. 中国防汛抗旱, 2025, 35(11):34-37+64.
- [8] 王文鹏, 何站鹏, 巫义锐, 等. 基于集合卡尔曼滤波的水文模型状态变量反馈校正方法[J]. 水力发电学报, 2024, 43(10):17-31.
- [9] 袁鹏, 朱训国, 王曦阅, 等. 基于数据驱动的DMD城市洪水演进模型研究[J/OL]. 水电能源科学, 1-11 (2026-01-16) [2026-04-30]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1231.tk.20260116.0953.004>.
- [10] 徐浩, 倪神州. 数据同化在区域水资源分配中的研究探讨[J]. 治淮, 2025(5):32-34.
- [11] 董美君. 基于水文水动力模型的洪水过程预报同化方法研究[D]. 西安:西安理工大学, 2024.
- [12] 李巧玲, 刘兴文, 李致家, 等. 多源多层土壤湿度实时同化及在实时洪水预报中的应用[J]. 水科学进展, 2024, 35(5):773-783.
- [13] 陈才明, 王玉铜, 陈亚威, 等. 数字孪生飞云江流域水利知识平台建设研究[J]. 水利信息化, 2024(1):73-77+88.
- [14] 刘业森, 赵英虎, 张丽伟, 等. 天津市防洪工程调度知识平台构建与实践[J]. 中国水利, 2025(4):48-55.
- [15] 张然, 柴志勇, 张婷, 等. 基于机器学习模型的洪水预报研究进展[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(11):89-101.
- [16] 钱峰, 成建国, 夏润亮, 等. 水利大模型的建设思路、构建框架与应用场景初探[J]. 中国水利, 2024(9):9-19.
- [17] 刘昌军, 刘业森, 武甲庆, 等. 面向防洪“四预”的数字孪生流域知识平台建设探索[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(3):34-41.
- [18] 林子源, 赵强, 张驰, 等. 大模型与水文模型协同应用关键技术研究及展望[J]. 长江科学院院报, 2025, 42(12):216-226.
- [19] 邹明明, 陈建军, 龚顺子. 基于大模型的多源异构数据集集成与清洗方法[J]. 数字技术与应用, 2025, 43(3):217-219.
- [20] 袁赛瑜, 陈逸鸿, 罗霄, 等. 知识数据双驱动的感潮河网水动力智能模拟方法[J]. 水科学进展, 2025, 36(1):28-38.
- [21] 葛召华. 山东省数字孪生水利专业模型平台建设与优化[J]. 中国水利, 2025(10):65-72.
- [22] 刘国庆, 范子武, 何健, 等. 流域防洪“四预”业务流程与功能优化配置研究[J]. 水利信息化, 2025(4):1-9.
- [23] 晋成龙, 刘良. 浅谈数字孪生淮河蚌埠~浮山段工程水资源“四预”设计方案[J]. 治淮, 2025(12):23-25.
- [24] 李永胜, 余军, 李毅男, 等. 基于数字孪生的大坝运行安全预测-预警-预演-预案关键技术研究与应用[J]. 水利技术监督, 2025(12):34-37+73.
- [25] 张家德, 刘茂盛, 李昆, 等. 数字孪生技术在皂市水利枢纽工程安全运行中的应用研究[J]. 大坝与安全, 2025(5):23-27.
- [26] 冯钧, 唐海麟, 周思源, 等. 基于认知智能的水循环过程模拟框架与关键技术[J]. 人民长江, 2025, 56(10):225-235.
- [27] 舒全英, 马媛, 陈亮, 等. 数字孪生水利建设中的人工智能大模型应用探索[J]. 中国水利, 2025(6):14-30.
- [28] 唐海麟, 冯钧, 周思源. “认知数字孪生流域”框架与关键技术[J]. 中国水利, 2025(22):37-46.
- [29] 冯仲恺, 林腾, 牛文静, 等. 基于大语言模型的水库调度知识图谱智能构建[J]. 水利学报, 2025, 56(12):1556-1569.
- [30] 李意, 顾小林, 冯贤林, 等. 大语言模型与数字孪生水利融合应用场景分析探讨[J]. 吉林水利, 2025(10):15-18.

责任编辑 田灵燕