

数字孪生水利建设中的 人工智能大模型应用探索

舒全英¹, 马 媛², 陈 亮³, 李 磊⁴, 郭 磊⁵, 吴健柏⁶

(1. 浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 310002, 杭州; 2. 太湖流域管理局水文局(信息中心), 200434, 上海;
3. 黄河水利委员会信息中心, 450000, 郑州; 4. 水利部信息中心, 100053, 北京; 5. 广东省水利水电科学研究院, 510635, 广州;
6. 新疆维吾尔自治区水利厅网络信息中心, 830099, 乌鲁木齐)

摘 要:人工智能大模型可为数字孪生水利建设提质增效提供新动能。按照“分析定位、探索路线、摸清需求、落地应用、推广模式”思路,在分析数字孪生水利建设面临的问题挑战、人工智能大模型发展及行业应用情况、大模型在数字孪生水利建设应用的必要性与可行性基础上,从技术、业务、管理视角对大模型在数字孪生水利业务场景中的落地应用进行了探索思考。以“场景数字化、模拟智能化、决策精准化”为技术路径,梳理了动态数字场景构建、复杂系统智能模拟、人机协同精准决策等关键技术;按照“2+N”业务需求清单并以防洪预报、预警、预演、预案“四预”应用、网络安全防护场景为例,阐述人工智能大模型在具体业务场景落地应用的思路和应用步骤;提出了人工智能大模型在数字孪生水利应用中的共建共享模式,给出“共建共享、统分结合、合作推广”的建设思路。研究成果可为人工智能大模型在数字孪生水利建设中的功能定位和业务场景落地应用提供参考和借鉴。

关键词:数字孪生水利;人工智能;大模型;智能模拟;人机协同

Exploration of artificial intelligence large model applications in digital twin water conservancy construction//Shu Quanying, Ma Yuan, Chen Liang, Li Lei, Guo Lei, Wu Jianbai

Abstract: Artificial intelligence (AI) large models can provide new momentum for enhancing the quality and efficiency of digital twin water conservancy construction. Following the approach of “positioning analysis, route exploration, needs assessment, implementation, and model promotion”, this study analyzes the challenges in digital twin water conservancy, the development and industry applications of AI large models, and the necessity and feasibility of their application in this field. From the perspectives of technology, business, and management, the study explores the application of AI large models in digital twin water conservancy scenarios. Using the technical path of “scenario digitization, intelligent simulation, and precise decision-making”, the study outlines key technologies such as dynamic digital scenario construction, intelligent simulation of complex systems, and precise human-machine collaborative decision-making. Based on a “2+N” business demand framework, the application routes and steps of AI large models are illustrated through specific scenarios, such as the “four pre” (forecasting, warning, rehearsal, and planning) flood control applications and network security protection. The study proposes a co-construction and sharing model for the application of AI large models in digital twin water conservancy, offering a “co-construction and sharing, unified and distributed, collaborative promotion” development approach. The findings provide references for the functional positioning and business

收稿日期:2025-03-05

作者简介:舒全英,正高级工程师,主要从事流域防洪减灾、数字孪生水利相关工作。

基金项目:国家重点研发计划“流域多源异构信息智能融合与数据底板构建”(2023YFC3209201);国家自然科学基金长江水科学研究联合基金计划“基于数字孪生技术的长江下游感潮河网地区多目标调度研究项目”(U2340221)。

scenario implementation of AI large models in digital twin water conservancy construction.

Keywords: digital twin water conservancy; artificial intelligence; large models; intelligent simulation; human-machine collaboration

中图分类号: TV+TP39 文献标识码: B 文章编号: 1000-1123(2025)06-0014-17

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2025.06.002

习近平总书记指出:“中国高度重视创新发展,把新一代人工智能作为推动科技跨越发展、产业优化升级、生产力整体跃升的驱动力量,努力实现高质量发展。”进入新发展阶段,云计算、大数据、人工智能技术快速发展,推动水利发展向数字化、网络化、智能化转变的技术条件已经具备。数字孪生水利是发展水利新质生产力的重要标志。2024年全国水利工作会议明确提出,要大力推进数字孪生水利建设,推动人工智能大模型算法落地应用,提升“2+N”智能业务水平;2025年全国水利工作会议提出,推进水利智能业务应用,实施“人工智能+水利”行动,构建水利大模型建设应用框架。人工智能大模型是新质生产力中的领先生产工具,在数字孪生水利建设中,需要借助人工智能技术在专业技术和业务应用等方面实现创新与突破,以更加智能化和精准化的方式提升水安全管理水平、增强水灾害防御能力并服务于水利事业各个环节,驱动数字孪生水利建设场景数字化、模拟智能化、决策精准化,助力新阶段水利高质量发展。

一、背景分析

1. 数字孪生水利建设面临的问题和挑战

目前数字孪生流域、数字孪生水网、数字孪生工程组成的数字孪生水利框架体系构建基本完成,算据获取、算法优化、算力提升取得突破,正在赋能洪水灾害防御、水资源管理调配等决策支持。但总体而言数字孪生水利建设处于初步应用和探索阶段,存在算据不足、算法不强、算力不够、预报不准、预演不实等问题,网络安全隐患也普遍存在。对标新阶段水利高质量发展和“人工智能+水利”行动要求,数字孪生水利建设仍存在短板弱项。

(1) 业务应用智能化水平亟待提升

目前水利“2+N”业务应用整体智能化水平亟待提升。流域防洪方面,尚未全面实现洪水分布式模拟预报和基于大数据驱动的人工智能预报,缺乏从降水到流域洪水的全过程、全要素智能化模拟,受制于数据

底板、模型库和知识库平台不健全等因素,无法实现多场景预演和预案优选推荐。水资源管理与调配方面,主要是以数据统计分析为主,数字化场景和智能化模拟能力不足,面向决策支持的分析评价等方面能力较弱,诸多环节依赖人工分析和经验判断。此外其他N项业务现有应用系统功能主要以信息汇集、展示查询、统计分析为主,欠缺对业务的智能分析、智能交互、辅助决策和自动化提醒,整体水平不能满足水利业务智能化应用需要。

(2) 智能模型与知识平台和应用场景融合不深

智能模型应用场景覆盖度与稳定性不高。智能识别模型类型较少,与业务融合不深入,卫星遥感智能识别地物类型不够多、不够准,视频识别模型精度及稳定性不足,语音识别模型应用场景较为单一,不能满足水资源管理、水利工程建设与运行等业务需求。水利知识总体处于分散建设与应用试点阶段,知识组织管理方式数字化程度不高,成熟应用场景较少,知识建设、管理、应用与服务等各环节缺少技术规范 and 工具平台,未与相关业务耦合应用,规模化与实用性不明显。

(3) 数字孪生水平与智能管控、自主演化有较大差距

根据国家标准计划《信息技术 数字孪生能力成熟度模型》,数字孪生能力成熟度分为五个等级,自低向高分别为一级(虚拟建模)、二级(以虚映实)、三级(双向交互)、四级(智能管控)、五级(自主演化),各层级递进且较高层级涵盖较低层级能力要素要求。根据目前数字孪生水利建设情况来看,大部分数字孪生系统处于二级向三级演进阶段,少数(主要为少数重点大型数字孪生工程)由三级向四级演进,距离最高级的自主演化(即实现数字实体和目标实体在全生命周期中的自主学习和迭代优化)还有很大的差距,需要进一步加强人工智能、大数据等新技术应用。

(4) 大模型在水利行业中的落地应用尚在摸索阶段

通用大语言模型在面向专业性较强的领域时,经

常出现语义幻象和答非所问的问题,其能否在行业有效落地,衡量关键是其可否理解行业的专业语言和逻辑,可否调用行业专业模型和相关工具,可否易于理解地展示行业需求,可否驱动使用行业的专有设备和能力。针对以上问题,目前水利部本级、清华大学、中国水利水电科学研究院、长江水利委员会水文局针对水利、水文和水电等不同业务领域探索大模型的落地应用,但也存在科研难落地、缺少相关技术环境等问题,在高质量数据集开放共享、复合型人才、算力资源、标准制度等多方面存在制约。

2. 人工智能大模型发展及行业应用情况

(1) 人工智能大模型发展及特点

随着人工智能技术的飞速发展,大模型正引领全球科技创新新潮流。2017年Transformer结构的提出使深度学习模型参数突破1亿个,标志着大模型时代来临。国际科技巨头不断突破技术瓶颈,推出更强大、更高效的大模型,2023年年底至2025年年初OpenAI、谷歌、元公司(Meta)、阿里巴巴、百度、华为、深度求索等国内外头部企业新兴大模型应用密集亮相,如OpenAI GPT-4、o1, Google PaLM, Gemini, Meta Llama, Qwen, DeepSeek-R1等。2024年,“人工智能”首次写入我国的《政府工作报告》,诺贝尔物理学奖和化学奖均授予人工智能相关学者;2025年年初,以DeepSeek-R1为代表的推理大模型引爆了各行各业对人工智能的关注,激发了AI市场活力,在国内外引起强烈反响。

(2) 大模型发展及行业应用情况

大模型通识能力强,但缺少行业专业知识,通用大模型在泛化性(训练样本集之外的表现能力)、专业性(特定领域问题和任务的准确性和效率)和经济性(投入产出比)上存在“不可能三角”,如何将大模型融入千行百业,是大模型落地应用发展的重点。在垂直领域和行业应用方面,盘古气象大模型应用于气象预测预报;自然资源行业的“后土”大模型应用于国土空间规划、执法督查等;光明电力及大瓦特大模型应用于电网智能调度、智能巡查和智能运维等;医疗大模型应用于辅助诊断、药物研发、病历生成等,显著提升诊疗准确性和效率;金融大模型应用于智能客服、风控分析、投资决策支持场景等,可定制化解决高频、高精度需求;教育行业大模型可进行智能作文批改、个性化学习推荐等;制造行业将大模型应用于设备故障预测、生产流程优化等场景,实现降本增效。随着技术不断成

熟和政策积极引导,在可预见的未来,大模型将在更多领域展现其独特价值,产生更加广泛而深刻的影响,为经济社会发展注入新的强劲动力。

3. 大模型在数字孪生水利建设中应用的必要性与可行性

(1) 必要性分析

大模型是实现智慧水利“数字化场景、智能化模拟、精准化决策”的关键路径。水利部《关于大力推进智慧水利建设的指导意见》《智慧水利顶层设计》中提出,要坚持融合创新,加强新一代信息技术与水利业务的深度融合,强化数字孪生、大数据、人工智能、区块链等技术在水利业务中的应用研究,总体目标是实现数字化场景、智能化模拟、精准化决策,建成具有预报、预警、预演、预案“四预”功能的智慧水利体系。

水利大模型是水利新质生产力的重要引擎。模型和知识是数字孪生水利建设的关键所在,针对水利业务需求融合大模型、水利专业模型和知识形成的“水利大模型”,是发展水利新质生产力的重要引擎。目前水利部推动人工智能在数字孪生水利中的应用,构建以人工智能为新引擎的具有“四预”功能的数字孪生水利体系,推进水利人工智能应用关键技术装备标准攻关研发,统筹开展水利人工智能大模型建设,打造典型创新应用场景,完善水利人工智能发展生态和制度,提升水利治理管理水平。

行业大模型是AI+落地的“最后一公里”。目前数字孪生水利业务中,行业数据和知识利用率低,智能模型算法与业务融合不深,数字化场景和智能化模拟有较大差距,面向决策支持的分析评价等方面能力较弱,诸多环节依赖人工分析和经验判断。大模型在行业落地应用的出发点和落脚点,就是提升行业的工作效率和业务智能化、决策精准化水平。

(2) 可行性分析

数字孪生水利建设已有一定基础。随着近年数字孪生水利快速推进,一套较为成熟的数字孪生水利数据底板、模型平台建设体系已经建立。94项先行完成的数字孪生水利建设任务为水利大模型的建设提供了数据、知识库基础,并初步探索了相关业务模式。数据底板作为数字化场景构建的基石,涵盖多维度、多时空尺度数据模型,提供了坚实的算据支撑。模型平台作为数字孪生水利的核心与关键,集成了水利专业模型,为各类业务的模拟仿真和调度决策提供了有力的算法支持。这些基

础已初步具备构建水利大模型的训练数据和标准化应用场景。

通用大模型底座技术较成熟,且具备国产软硬件支持。技术架构方面,目前国内已全面开展大模型研发应用工作,在预训练语言模型时代,自然语言处理领域广泛采用“预训练+微调”范式,大模型底座技术趋向成熟。国内软硬件为行业大模型开发提供了良好支持,硬件层面,国产GPU、服务器等不断夯实支撑人工智能的“算力底座”;软件层面,国产的开源大模型DeepSeek、Qwen等为开发者提供了更多选择。

人工智能大模型在水利行业的落地应用实践有初步基础。在行业大模型研究方面,水利部组织研发的“上善”水利大模型,为行业大模型建设提供了指引。同时各科研院校、企事业单位也积极探索行业大模型落地应用场景,如长江水利委员会水文局的九派OpenHI,中国水利水电科学研究院的水科专业大模型SkyLIM,清华大学的“瀚沫”水电大模型,中国移动的九天·物联水利大模型等,这些初步研究成果为行业大模型落地提供了引导和借鉴。

二、技术架构

1. 总体技术框架

按照“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”要求,在水利部数字孪生水利框架体系基础上,建立人工智能大模型与数字孪生水利平台的交互关系,以“场景数字化、模拟智能化、决策精准化”为技术路径,建立基于人工智能大模型的数字孪生水利技术框架,使场景构建更高效、系统模拟更智能、调度决策更精

准。总体技术框架包括数字孪生水利、人工智能大模型及智能服务,见图1。

2. 框架组成

(1) 数字孪生水利

数字孪生水利是面向新阶段水利高质量发展需求,为水利决策管理提供前瞻性、科学性、精准性、安全性支持,实现水利业务与现代信息技术融合发展的智慧水利实施措施。数字孪生水利体系主要由数字孪生流域、数字孪生水网、数字孪生工程、业务应用“四预”及网络安全和保障体系构成(见图2)。

(2) 人工智能大模型

针对不同行业和业务场景需求的大模型能力构建是一个复杂的系统工程,利用大模型技术,针对特定行业数据和任务进行训练或优化,形成具备专业知识与能力的大模型及应用。当前大模型行业应用落地主要有4种路径:专业预训练、模型微调、知识增强检索(RAG)、提示工程。在L0通用大模型基础上,基于通用技术架构,增加水利领域数据和知识进行微调或预训练,形成L1水利行业大模型,在此基础上对特定的业务场景继续进行有监督微调(SFT)形成L2水利业务大模型,进一步进行工程化应用可形成L3水利智能体应用产品。行业大模型构建与应用技术路径见图3。

(3) 智能服务(关键技术)

基于人工智能大模型驱动的“场景数字化、模拟智能化、决策精准化”关键技术是赋能数字孪生水利建设提质增效的主要路径,主要包括动态数字场景构建、复杂系统智能模拟和人机协同的精准决策等相关

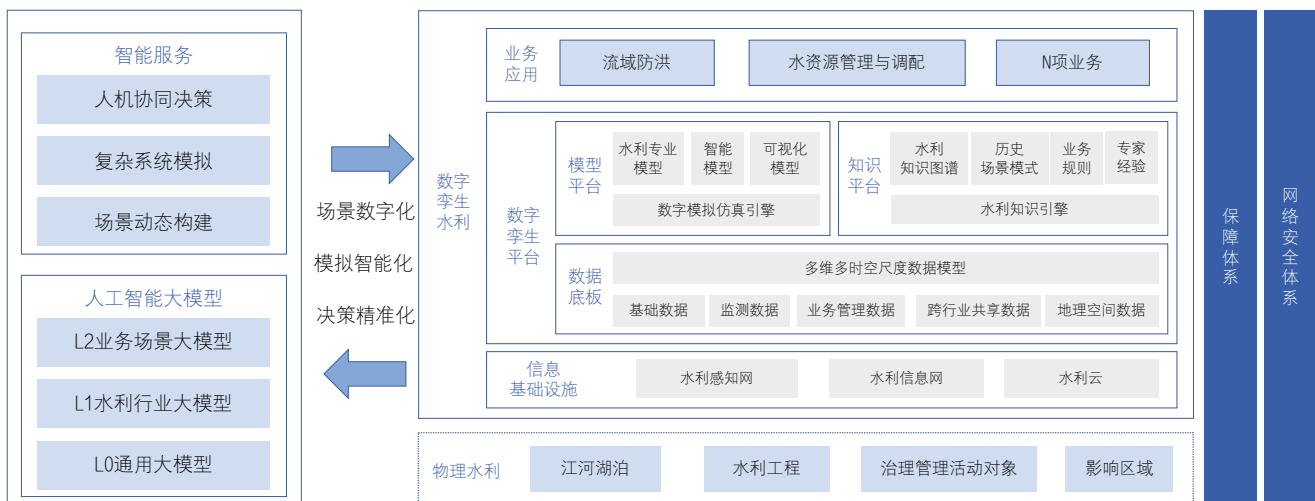


图1 总体技术框架

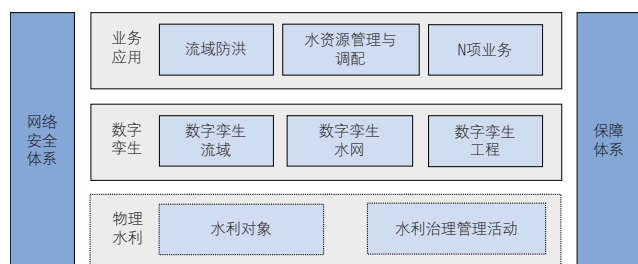


图2 数字孪生水利体系

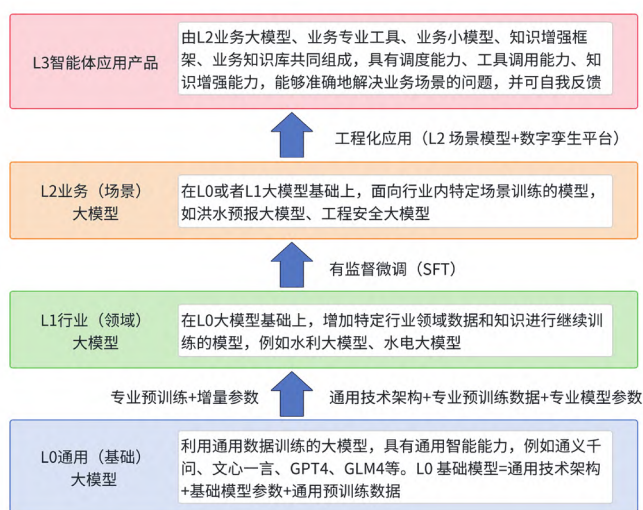


图3 行业大模型构建与应用技术路线

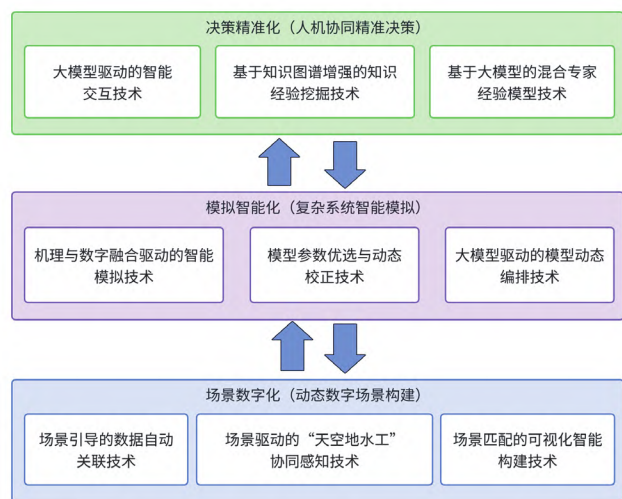


图4 智能服务(关键技术)

技术组合,三者之间相互关联、层层递进(见图4)。

三、关键技术

1. 动态数字场景构建

当前数字孪生水利场景与数据联系松散,应用时数据采集、计算、展示等专业性强、复杂度高,需要大

量专业人员通过人工交互进行操作与处理,与“同步仿真、虚实交互”的要求仍有差距。动态数字场景构建以水利业务场景为导向,以人工智能大模型为驱动,通过场景引导的数据自动关联、场景驱动的“天空地水工”协同感知、场景匹配的可视化智能构建等技术,构建协调统一、及时更新的动态数字场景,有序组织来自物理流域、工程和水网的不同类型、不同形态、不同来源的数据,为水利治理管理提供详实的基础算据,实现物理水利与数字孪生水利之间动态、实时的信息交互和深度融合,保持交互的精准性、同步性、及时性。关键技术路线见图5。

(1) 场景引导的数据自动关联技术

以业务场景为核心,通过构建“场景-流程-数据-模型”动态关联体系,实现多源数据的智能调用与协同。

①场景驱动数据关联构建。以水旱灾害防御、水资源调配等业务场景为牵引,解析场景内因果事件链,结合业务流程分析形成业务流程树,明确各环节所需数据与模型,通过场景编码与流程标签技术建立四者映射关系。

②知识图谱与动态建模。利用时序动态知识图谱技术,从业务推演数据中提取时空多维度特征,构建场景模式库,直观展示流程步骤、实体关系及数据流向,支撑复杂业务可视化分析与决策。

③大模型驱动的动态迭代。基于大模型的数据挖掘能力,在场景时空演变中持续优化业务流程,更新知识图谱,实现关联关系的动态调整,确保数据与模型适配场景变化。

④多源数据智能调用。通过自动化关联机制,按需调用基础数据、监测数据、地理空间数据及跨行业共享数据等异构资源,提升数据利用效率。

(2) 场景驱动的“天空地水工”协同感知技术

水利对象全要素和治理管理全过程的监测需要依靠“天空地水工”立体监测感知体系,涉及感知装备类型多、数量巨大、分布广、监测要素多样,高效、协同地驱动各种装备实施监测对动态数字场景构建至关重要。场景驱动的“天空地水工”协同感知技术路线见图6。

①构建“天空地水工”感知设备知识库。对设备信息和运行方式进行知识化管理,为实现设备智能协同驱动奠定基础。通过构建水利对象实体与监测感知设备拓扑关联的知识图谱,可以快速根据空间位置定

位感知设备;建立“天空地水工”监测感知方案库,记录各种监测感知设备监测对象、监测要素、监测范围、监测时机、监测频次、监测条件、数据传输、数据管理平台等信息。

②基于大模型根据场景动态变化按需智能驱动“天空地水工”监测设备协同感知。在场景-流程-数据智能关联分析基础上,根据特定业务场景,智能分析数据监测感知需求,运行设备监测感知方案。根据方案,调用设备拓扑关联知识图谱和“天空地水工”设备运行管理平台,监视设备运行状态,根据需要适时调整已运行感知设备的监测要素和频次,启用相关智能感知设备对事件关联实体及影响区进行数据采集,并将数据汇集到数据库;调用卫星、无人机、视频等多模态智能识别模型对采集的遥感影像和视频进行目标检测、信息提取与变化检测。通过场景驱动设备监测,调用智能识别模型,实现面向业务场景的多尺度、全周期、全过程基础数据和实时数据的高效汇聚与更新,满足模型智能模拟和精准化决策所需多源异构监测数据的实时采集需要。

(3) 场景匹配的可视化智能构建技术

大模型具有强大的意图识别、智能推荐与便捷交互能力,无需过多专业人员参与,便可根据业务场景特点和目标,结合用户角色和习惯等,通过场景-流程-数据关联分析,智能匹配并自动配置场景主题相关数据,快速、个性化地构建面向业务的物理实体可视化、动态过程可视化和业务专题可视化场景。场景匹配的可视化智能构建技术路线见图7。

①物理实体可视化。根据场景所涉及业务主题和时空范围,通过场景-流程-数据关联分析,智能调用关联的水利对象基础数据和L1、L2和L3级地理空间数据等,构建时空多尺度二三维一体化的可视化基础场景。根据业务流程变化,灵活动态切换不同场景下的物理实体可视化场景。

②动态过程可视化。根据业务场景分析需要,智能调用可视化工具,采用合适的形式和风格在物理实体可视化场景上自动实时展示模型模拟的水流演进、洪水淹没、污染团扩散等动态变化结果。

③业务专题可视化。在数字化基础场景上采用专题图表等展示模拟计算和决策分析等成果,根据业务场景特点、用户角色和习惯等,调用监测数据和业务数据,自动推荐最有价值的可视化组合,支持概化图、表格、专题图等多种形式,将抽象的业务数据形

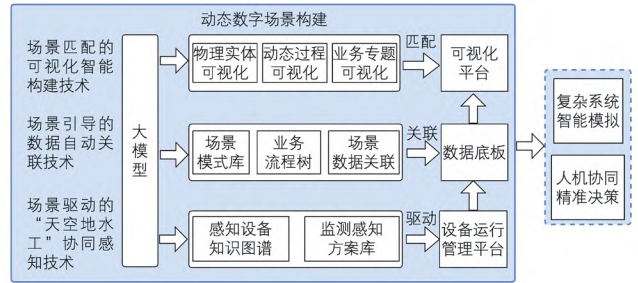


图5 动态数字场景关键技术路线

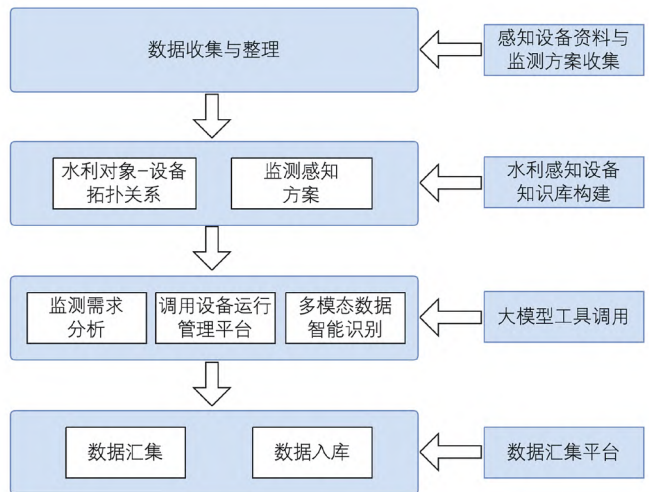


图6 场景驱动的“天空地水工”协同感知技术路线

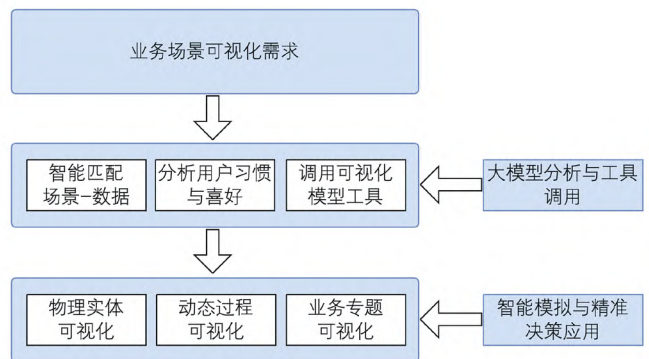


图7 场景匹配的可视化智能构建技术路线

象生动、直观易懂、多维立体地展示,便于各级用户使用。

2. 复杂系统智能模拟

复杂系统智能模拟主要解决的技术问题包括:灵活编排复杂系统涉及的多个和多类模型;融合传统机理模型与数据驱动模型,发挥各自优势;根据实际情况对模型进行实时调优互馈等。通过建立场景-流程-数据-模型相互关系,以大模型驱动的多模型动态编排技术为主线,将数据驱动模型和水利专业机理模型相融合,实现模拟智能化和智能化模拟。主要技术路

线见图8。

(1) 机理-数据融合驱动的智能模拟技术

通过机理-数据融合模型,有效结合机理建模与数据建模的优点,利用内在机理知识,并利用数据模型弥补机理知识缺失部分,实现问题全局和局部特征、经验与规则的结合。融合模式主要有以下几种:

①机理引导结构。机理模型基于已知的物理规律或理论假设构建,参数具有明确的物理意义,通过机理模型筛选特征因子(参数灵敏度分析或因子影响分析),以特征因子作为数据驱动模型的输入,减少数据驱动模型的计算量,提高模型的预测精度。

②串行结构。利用数据驱动修正机理模型的相关参数,使模型能够快速响应环境变化,保证模拟预测的可靠性,提高模型的泛化能力。

③机理嵌入结构。以机理模型的输出结果作为数据驱动模型的输入因子,降低原始输入数据的选择对数据模型精度的影响。

④反馈结构。机理模型构建过程中,内部有大量未知的中间变量和参数,利用数据驱动模型对这些未知中间变量进行模拟预测,增强模型的可靠性。

⑤并行结构。在机理模型预测性能较差的情况下,在数据驱动模型和机理模型的输出结果中引入加权因子或专家经验,以控制模型的输出结果。

(2) 机理模型参数自动优化技术

模型参数优化需要依赖专家专业知识和相关经验进行数据预处理、模型选择以及超参数调优。利用自动化机器学习进行数据集自动化特征选择,选择相关算法进行参数自动优化调整。以洪水预报模型参数自动调优为例,模拟预报人员的参数调整过程,建立洪水预报场景,提取特征,采用增量式自动优化模型参数。在洪水预报过程中,将新收集的各类监测感知数据进行多源融合,形成洪水样本数据,提取本次洪水特征值进行洪水分类识别,并且结合增量学习等人工智能技术,优化传统参数率定算法的寻优策略,提高模型参数率定速度。

(3) 大模型驱动模型动态编排技术

根据“业务解耦、模型耦合”思路,利用Agent实现大模型驱动并进行多个模型组件的动态选择和组合,以适应水利管理治理不同业务应用场景的需求。大模型驱动的动态编排技术主要涉及模型知识图谱引入和多模型融合驱动,通过模型知识图谱,建立模型平台中预报方案、各类模型组件等与水利对象及用户需

求之间的关联关系,为大模型的工具调用提供辅助支撑。将不同业务场景(问题分解)与不同模型组件的相关信息特征交互,根据业务场景需求,实现对模型的接口调用。

大模型通过模型知识图谱和业务知识库,对模型组件进行筛选、组合,在运行时根据输入数据和任务需求调整模型组件,并调用具体执行任务的Agent,调用筛选的模型组件,模型组件通过标准的接口协议及数据传输协议进行通信、计算。大模型驱动的多模型动态编排技术如图9。

3. 人机协同精准决策

人机协同精准决策针对决策者经验不同导致决策不确定、历史场景经验运用不足导致决策缺乏科学性或延续性、数字孪生平台复杂性影响决策效率等问题,聚焦智能交互、历史场景经验知识挖掘、专家知识经验量化等方面应用研究,包括基于大模型意图识别和智能调用技术、基于知识图谱的历史场景模式库构建、基于大模型的混合专家经验模型研究。主要技术路线见图10。

(1) 基于大模型的意图识别和智能调用技术

①意图识别。大模型本身具有一定的意图识别能力,就防洪“四预”平台而言,需要提高大模型的专业意图识别能力,技术实现方法通常包括上下文理解和

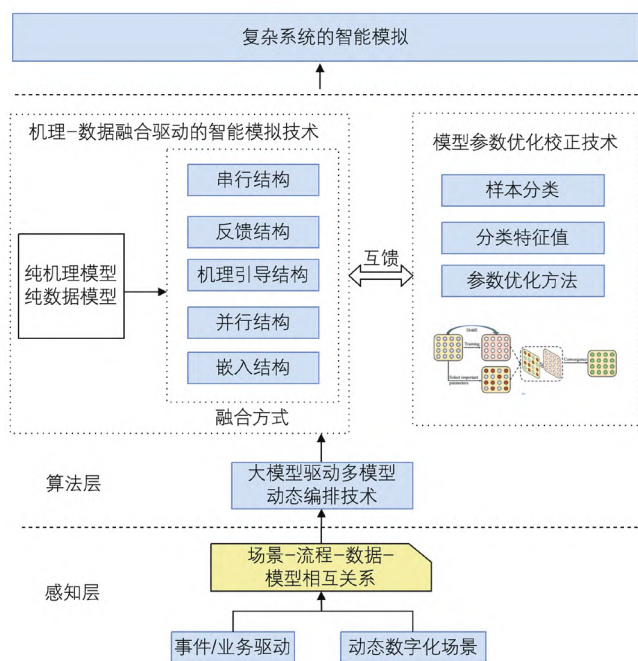


图8 复杂系统智能化模拟技术路线

多轮对话、规则或模式匹配、思维链等。

上下文理解和多轮对话将输入(Query)和平台功能集作为 Prompt 方式,并结合多轮交互对话,最终确定意图功能点,技术难度小,效率不高,效果与平台功能集质量相关。规则或模式匹配要求“四预”平台或行业领域专家定义一系列规则来捕捉特定意图的表达方式,优点是简单直接,易于理解和维护,但是难以覆盖所有情况,扩展性和泛化能力较弱。思维链形式需提前设定“四预”平台业务链条过程,作为大模型默认输入,让其“照葫芦画瓢”。

②智能调用。智能调用包括模型计算、预案生成、图表生成、智能问答模块等调用,其基础是意图识别。模型计算调用,可通过由大模型生成的中间数据交换

文件进行驱动,通常的中间数据交换格式包括 XML、JSON 等。对于预案、图表等功能模块的调用,则主要通过大模型意图识别,确定特定范围和对象的数据资源,然后调用功能模块进行展现,因此大模型与数据资源的对接关联是关键。

(2) 基于知识图谱的历史场景模式库构建

水利治理管理过程中积累了大量的历史资料,蕴含丰富的经验规律。利用知识图谱技术,通过聚类方法将历史典型事件数据集根据数据相似性划分为多个子集,在此基础上借助大语言模型的语义理解和生成能力抽取知识,通过分析水利业务类型、产生原因、演变记录与结果,快速构建基于历史场景的水利专题知识图谱,采用主流的图数据库技术实现知识存储、快速

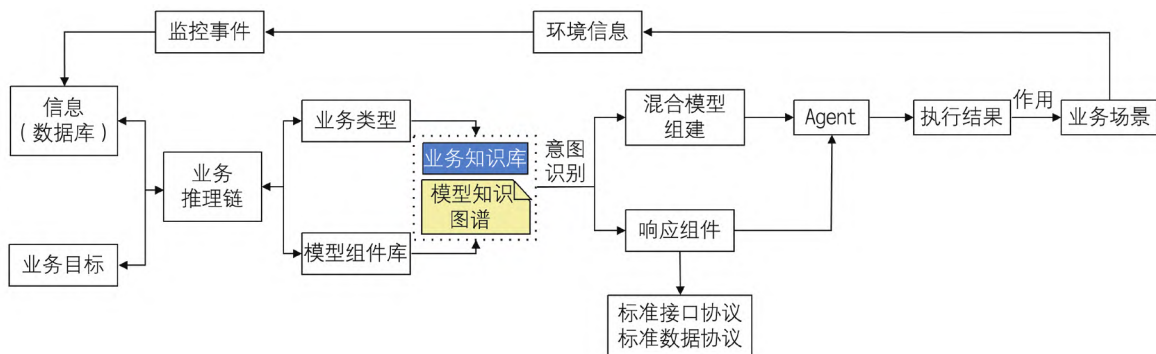


图9 大模型驱动的多模型动态编排技术

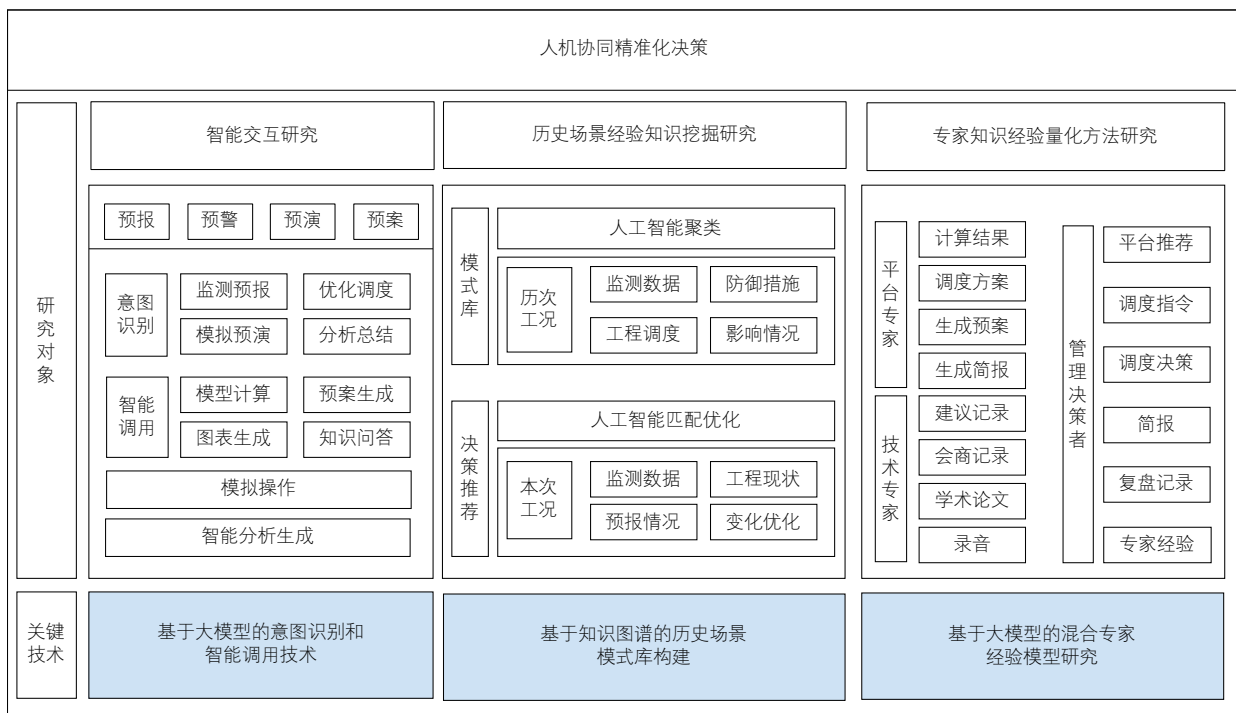


图10 人机协同精准决策技术路线

检索与智能匹配,实现在业务应用中根据输入水利事件的特征自动匹配对应类型的知识图谱,对比筛选出与其最为相似的历史场景记录,同时通过可视化表达形式为决策者提供参考。基于知识图谱技术的历史场景模式库构建流程见图11。

(3) 基于大模型的混合专家经验模型研究

水利行业领域专家众多、经验丰富,通过利用大模型深度学习优势,对各类专家的技能、知识和行为方式进行模仿学习,得到具有特征经验的行为策略,可进一步发挥专家各自特长,形成优势互补的综合经验。混合专家(Mixture of Experts, MoE)方法,实质上就是将复杂问题分解为多个子问题单独求解,利用每个专家模型可以专注于解决特定子问题的优势,结合可学

习门控网络,可在处理特定复杂问题时获得全局最优解。根据具体业务应用场景收集与处理相关领域涉及的专家经验资料,包括历史会商记录资料、发言语音转换文字、提交的技术报告、最终决策记录等,形成丰富全面的专家经验资料库。混合专家经验模型构建流程见图12。

首先将具有相同特征优势的专家资料利用神经网络进行训练学习,形成多个专家模型,每一类专家模型之间相互独立;其次将训练得到的单类专家模型通过门控网络开展专门的混合训练,根据具体事件场景决定应对特定输入数据或任务负责的专家模型,并通过调整权重分配体现在该事件中对不同专家模型的认可程度,利用生成对抗模仿学习等技术方法最终计算得

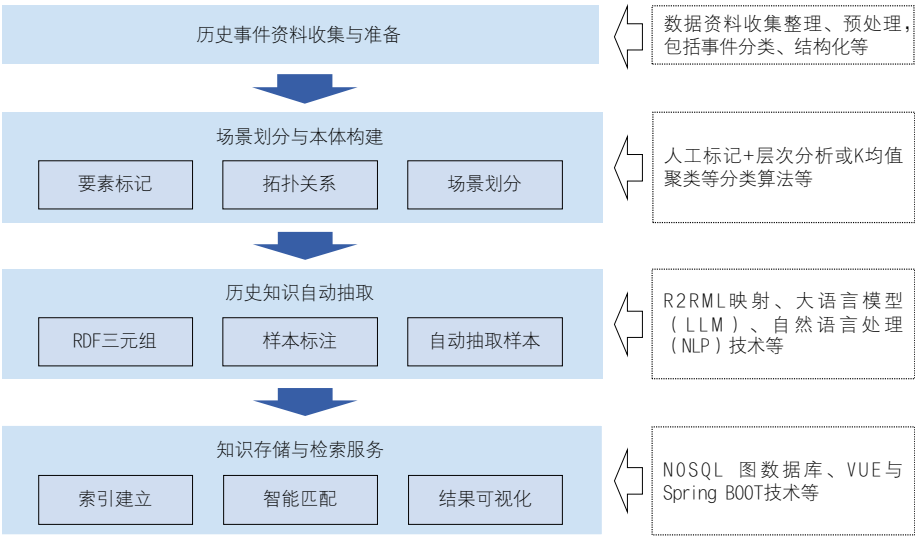


图11 基于知识图谱技术的历史场景模式库构建流程

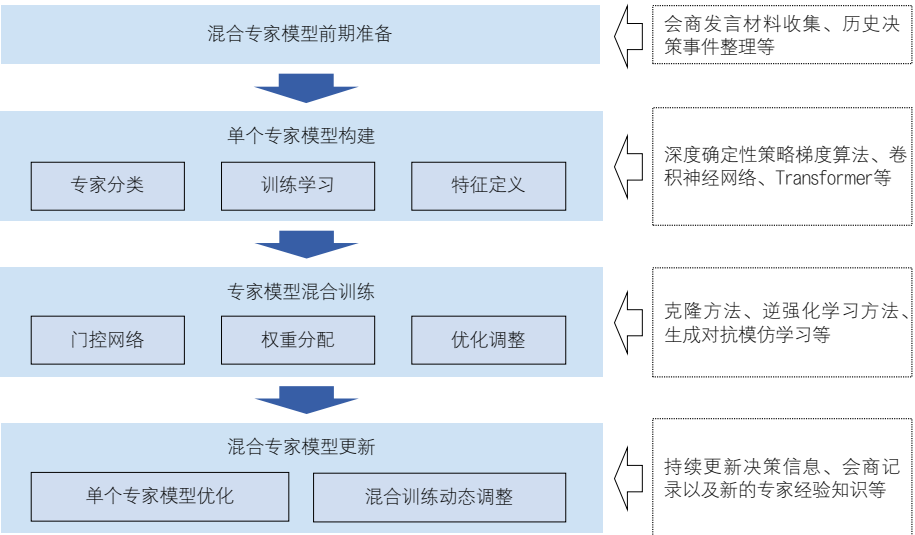


图12 混合专家经验模型构建流程

到混合专家模型的输出结果。建立完成的混合专家模型在投入实际应用过程中,会根据新的决策信息、专家经验等信息持续更新优化,可通过重新训练单个专家模型或者调整混合专家模型的权重分配等多种手段,得到与实际决策行为最相近的结果。

四、业务需求及典型场景

1. 业务智能化应用场景需求

按照“需求牵引、应用至上”要求,人工智能大模型在行业落地的出发点和落脚点是提升业务应用的

智能化水平。分析了流域防洪、水资源管理与调配等“2+N”业务中可以运用人工智能模型算法(包括自然语言内容生成、语音识别、遥感图像识别、视频识别、智能预测模型等)的应用场景,并初步评价场景的成熟度(指在特定业务场景中,从业务、技术、数据等方面的综合准备程度和发展水平评估该场景是否具备规模化应用或持续优化的评价指标),具体见表1。

2. 防洪业务典型场景

(1) 防洪业务智能化总体思路

人工智能大模型能否在行业有效落地,衡量关键

表1 业务智能化应用场景需求分析

序号	业务类别	应用场景	应用场景描述	主要应用的AI技术	场景成熟度	备注
1	流域防洪	台风降雨预报、洪水预报预警、智能交互等	台风路径预报、天气形势和降水预报、洪水智能预报、预警文档自动生成、智能交互预演、决策预案生成等	水文气象预测类场景大模型(基于深度学习的洪水预报等)、Agent智能交互、自动文档生成等	中	预报类场景模型缺少训练数据,专家经验较难
2	水资源管理与调配	智能调配、智能监管	中长期流域尺度水资源趋势性预测研判、生态流量智能监控监督复核、违规取水行为智能监管业务应用、探索推进“水资源管理+电力大数据”监管新模式	大数据分析预测(如LSTM预测)、大数据治理、视频监控等	低	潜在场景
3	水利工程建设与管理	智慧工地、智能预警	在建工程施工安全隐患智能识别、工程质量缺陷智能识别预警(如机电声纹识别)、安全度汛风险智能预警等智慧工地应用	水文气象预测类场景大模型、视频识别、音频识别、遥感识别等	中	部分成熟、潜在场景
4	河湖管理	“四乱”识别、智能巡检	基于遥感人工智能自动解译河湖库乱占、乱采、乱堆、乱建问题,江河湖库岸线智能电子围栏(遥感、视频识别、通信信号),智能巡堤等	遥感识别、目标检测、语义分割等智能模型	高	成熟场景
5	水土保持	遥感识别、智能监测	对未批先建、未验先投、未批先弃等违法违规行为的智能化、精准化判别,对水土流失坡耕地以及侵蚀沟各种指标的智能化监测与评价分析	智能监测感知、遥感图像识别、大数据监管	高	成熟场景
6	农村水利水电	农村智能供水、水电生态流量监控	对农村供水设施、供水环节以及供水区域和对象进行智能监测预警,农村水电站生态流量智能监控	视频监测感知、大数据分析	低	潜在场景
7	水文管理	站网监测智能运维	“天空地水工”智能感知(如视频测流、智能水尺)、站网监测智能运维、水文大数据智能分析治理、水文数据自动在线整编等	智能监测感知、大数据治理、内容生成等	中	部分成熟、潜在场景
8	水网调度运行	水网智能调度	在国家水网重要结点工程、控制性工程开展智能监测,单结点工程多目标智能调度,多结点工程组网、跨区域协同调度	视频识别、多目标智能调度等	低	潜在场景
9	水行政执法	智慧执法、远程监管	利用卫星遥感、无人机调查、遥控船监测、视频监控等信息构建水行政执法大数据,水行政App掌上执法等智慧执法,以远程监管、移动监管、预警防控为特征的非现场监管	遥感识别、视频识别、大数据分析、智能预警防控	中	部分成熟、潜在场景
10	水利监督	智能监督	单位或区域安全生产监管问题智能分析、水利工程监督检查效能提升	安全业务评价业务场景大模型	中	部分成熟、潜在场景
11	水利行政	智能办公、智能审核	办公文本内容智能生成、校核,文件相似性、冲突性分析,合同文本、招标文件合法性与合规(规划)性审核,可研报告、初设报告、项目预算申报文本智能审查	自然语言文本生成、内容审核	中	部分成熟、潜在场景
12	水利公共服务	智能客服	政务服务平台智能客服、全国水库“三个责任人”智能电话抽检等	智能语音识别、多轮对话、内容生成	高	成熟场景
13	网络安全	风险智能识别与处置	流量威胁特征检测、智能研判、网络安全设备智能值守,常态化网络安全运营水平提升	大模型+规则库(小模型)智能预测	中	部分成熟、潜在场景

是其可否理解行业的专业语言和逻辑,可否调用行业专业模型和相关工具,可否易于理解地展示行业需求,可否驱动使用行业的专有设备和能力。从水利的专业性、防洪“四预”场景的丰富性、模拟的复杂性、决策的精准性等方面考虑,流域防洪业务都是检验大模型应用成效的典型业务场景。根据上述关键技术研究,防洪应用技术路线见图13。

(2) 防洪业务智能化应用步骤

以某流域典型降雨事件为切入点,阐述大模型进行意图识别,分解任务,调用数据底板、模型平台的相关数据、算法,动态构建数字化场景、智能化模型,支撑精准化决策的步骤。

问题提出:“(在某流域)根据未来3天降雨预报,分析××站洪水位涨到多少、哪里有风险,并生成风险提示清单(或:假定未来24小时降雨200 mm,哪里可能有风险,如何调度风险最小)”。

主要实现步骤如下。

① 第一步:意图识别

针对需求,大模型需在通用意图识别能力基础上,对输入进行专业性意图识别。通用大模型已经具备一定水利专业意图识别能力,通过在输入中限定范围、

提示或示例,可有效提高大模型专业意图识别精度和速度。对于数字孪生水利建设,对相关的技术规范、标准、指引、指南等,进行适当量化、结构化或自然语言处理,形成通用和标准的规则、模式或知识库,可有效提高大模型助力决策的能力和效率。

② 第二步:任务分解

根据流域历史洪水大数据和防汛相关资料,结合流域防洪业务流程分析,建立流域防洪业务流程树,并将业务流程树与调用数据和监测感知设备相关联。当用户输入“假定未来24小时降雨200 mm,哪里可能有风险”问题后,无需人工的繁杂操作,大模型按照流程智能调用防洪业务流程树,对该场景进行任务分解,如首先将该任务分解成“预报—预警—预演—预案”,又将“预报”任务分解成“明确任务—调用方案—作业预报”。如图14所示。

③ 第三步:动态场景构建

大模型通过场景—流程—数据—模型自动关联,驱动设备监测感知和模型计算,动态构建可视化场景进行成果展示,将大幅度降低操作复杂性,提高业务人员与系统的交互效率。

在大模型逐一分解任务基础上,将任务动态分解

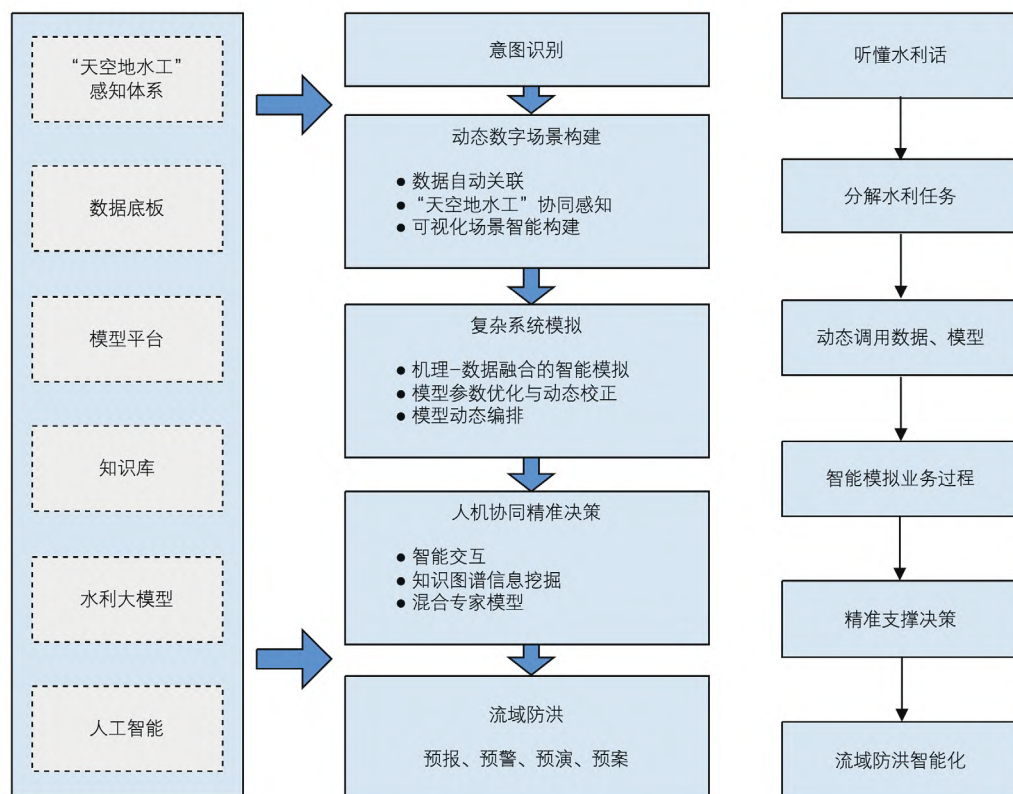


图13 人工智能大模型流域防洪应用技术路线

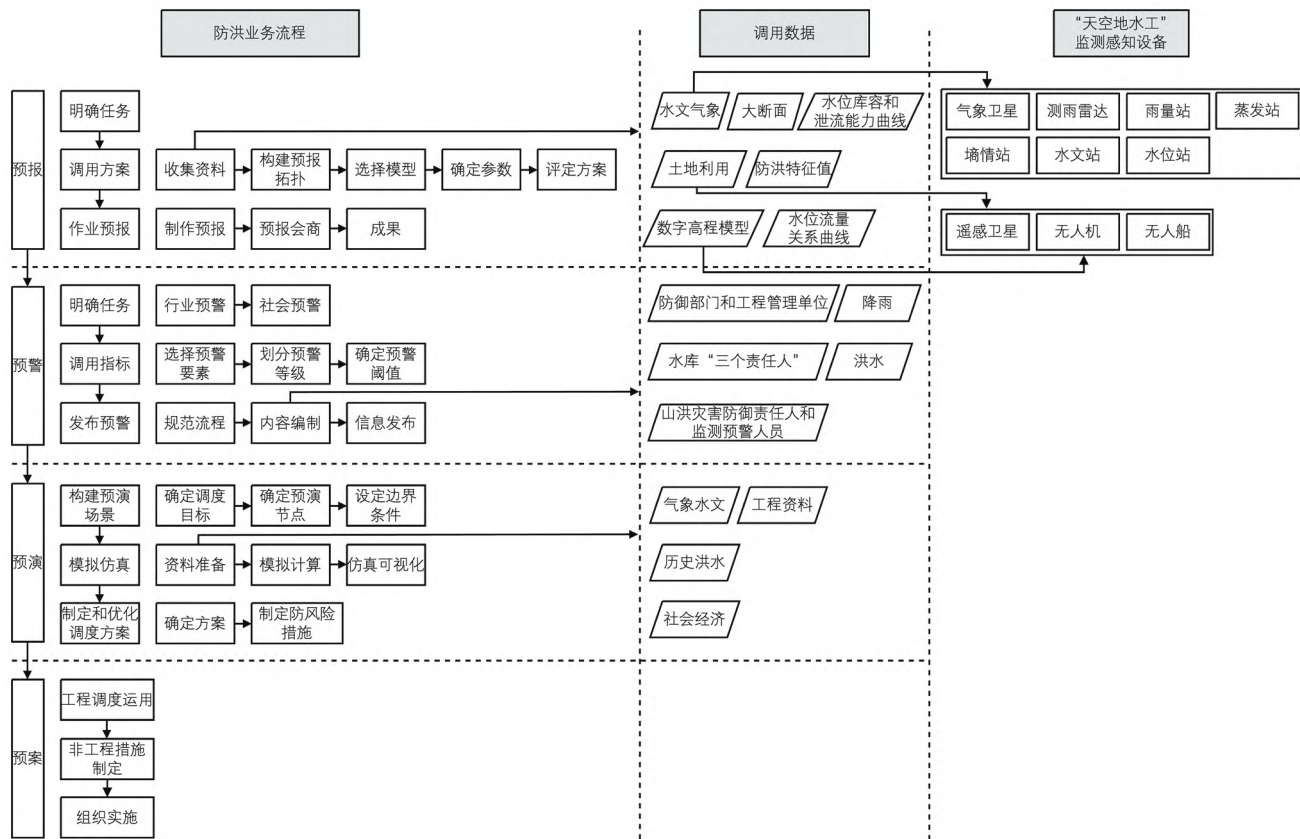


图14 防洪业务流程树

为多个场景，执行到某个场景时根据“场景-数据”关联关系，智能调用该场景所需要的数据。如在“调用方案”环节，无需人工输入，系统将自动调用实测的水文气象数据以及大断面、土地利用、数字高程模型等数据，以水文模型等进行计算，并将洪水演进过程以动态图的方式实时在“一张图”上展示。

④第四步：调用专业模型

根据当前事件和业务推理链，筛选调用模型平台中的模型方案、模型接口。例如，选择串联式XAJ-LSTM模型，在运行时可以通过人机交互调整模型组件及参数。利用Agent技术，将专业模型组件和外部交互工具封装成供大模型调用的工具函数，以业务库的方式为大模型函数提供参数，将计算结果以上下文的形式传递给大模型，使大模型了解函数的计算结果，重新组织语言回答用户的问题。执行流程如图15。

⑤第五步：风险分析

以预报预演智能化模拟结果和风险研判专题数字场景作为输入，依托构建好的知识图谱、训练好的混合专家经验模型、调度决策支持系统以及社会经济等数

据，开展风险影响分析和智能决策推荐，最终形成智能调度决策预案，见图16。

⑥第六步：调度决策

在风险分析研判的基础上回答“如何调度”等关键问题，精准、快速地给出决策者可以参考或执行的推荐方案。根据风险影响分析结果，结合给定的约束目标可得到相应的工程调度和防御预案。但是对于预案的针对性、可操作性、合理性，通常需要召集专家结合工程调度经验、洪水灾害防御经验、洪水预报不确定性经验和影响区域实际情况等会商研讨，依赖现场会商专家的经验知识进行决策，不可避免受制于场地、时间和人员等因素影响。而通过混合专家经验模型可以充分利用已有专家经验知识，同时可考虑各类别专家（如洪水预报专家、工程调度专家、工程安全专家等）在历史事件决策中的表现给予相应的重视程度，综合各类专家的特点和优势，自动推荐与当前实际情况贴合的方案，由决策者决定继续优化或直接采用该方案，进一步提高决策会商效率，提升决策的精准性和全面性。

3. 网络安全应用场景

(1) 网络安全智能化防护总体思路

网络安全是信息化工作的底线和红线。数字孪生水利建设涉及大量敏感数据,数据安全保护至关重要。运用人工智能技术赋能网络安全防护,是人工智能大模型的重要应用场景。

通过“大模型+小模型”安全防护技术路径,实现安全设备自动联动处置、安全事件辅助运维决策的全过程智能防护路径。采用本地部署机器学习小模型结合云端网络安全大模型的协同防护模式,构建端云协同的智能安全防护体系。通过对网络安全大模型运用模型剪枝、模型量化、知识蒸馏等技术,构建本地轻量

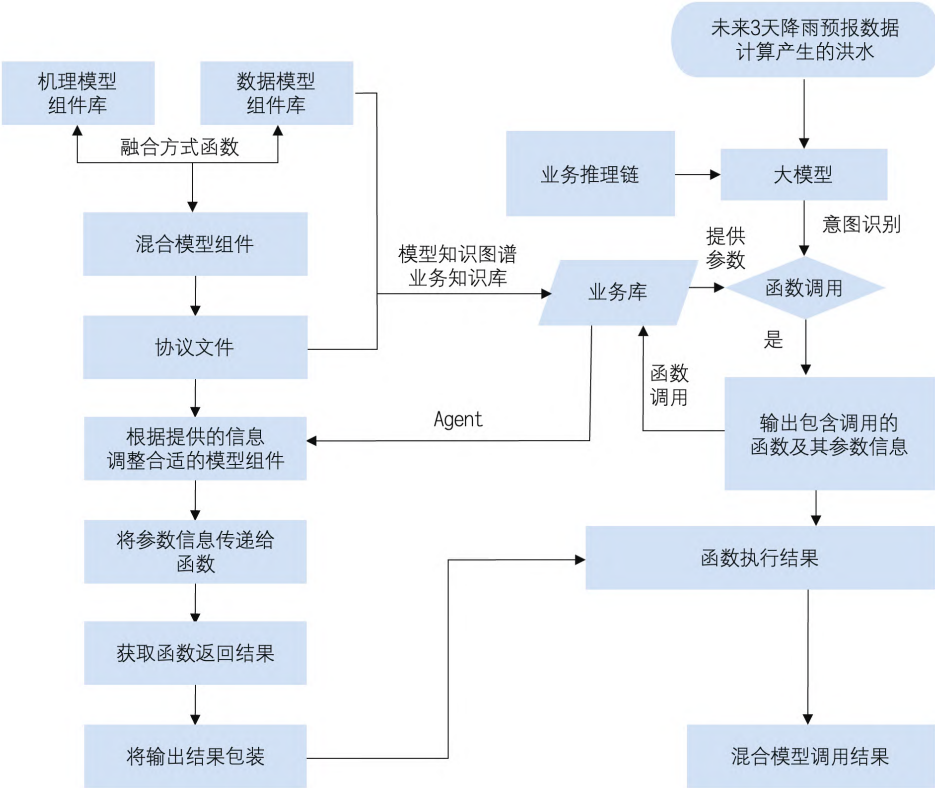


图 15 大模型调用专业模型执行流程

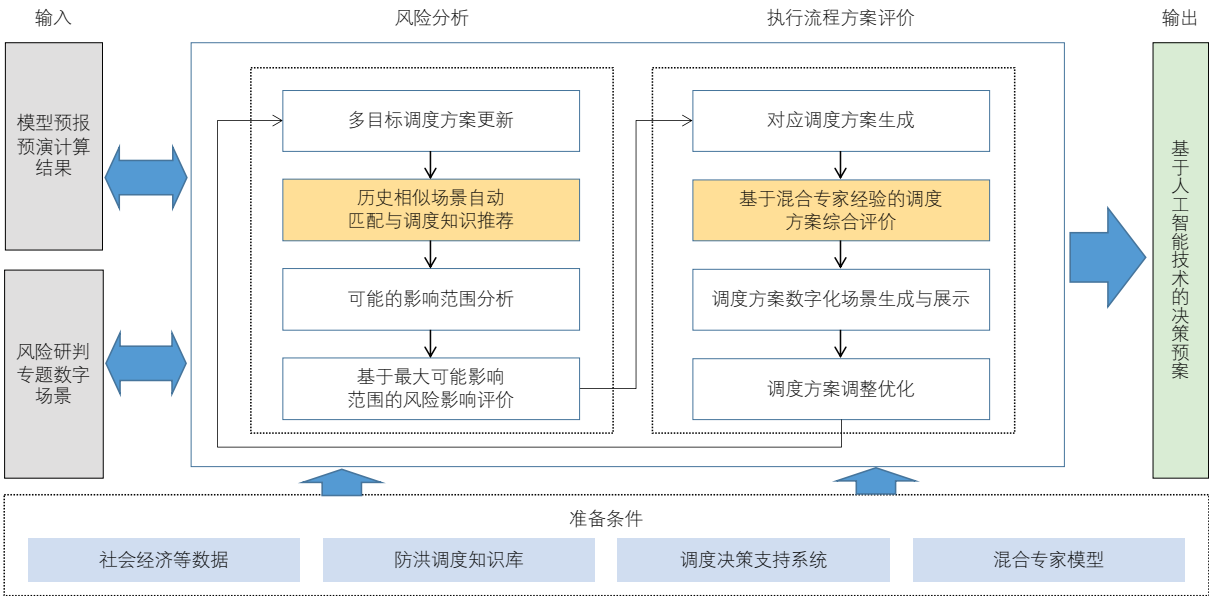


图 16 基于人工智能技术的精准化决策预案制定流程

化小模型。提取常规手段监测输出的告警结果,对具备业务特征的误报数据进行人工标注,供小模型学习训练,使其具备识别本地正常业务流量特征的能力。将本地小模型与云端大模型通过协同训练技术联合应用,其中端侧小模型进行数据特征提取、多级特征融合和轻量化模型训练,云侧大模型处理通用型情报规则分析和智能应用,从而解决大模型在识别水利业务流量时存在的个性化识别能力不足的问题。构建完成后,通过软件开发、端口调用等方式将人工智能大模型和专业小模型与已有安全设备进行对接,形成情报、规则、专业小模型、人工智能大模型多级互通、协同研判、综合处置的防护模式。技术路线见图17。

(2) 网络安全防护智能化应用路线

以一次网络安全事件为例,阐述“大模型+小模型”的端云协同智能防护体系在网络安全事件处置的各节点如何发挥效能,实现告警筛选研判、事件分析解读、防护设备智能联动、处置报告自动生成等关键功能。按照网络安全事件处置流程(图18),从监测判别、

威胁处置、总结上报3个阶段展开描述。

① 监测判别阶段

当安全事件发生,设备告警,云端大模型和本地小模型将同时对监测流量进行协同研判。大模型调用云端多源威胁分析情报、实时漏洞信息、高危攻击地址,对可疑流量进行分析;小模型经过对业务特征流量的专业训练,主要对可疑数据进行数据特征提取、多级特征融合和流量特征比对,从而判别可疑流量是否为业务数据。在此环节,小模型判别结果有较高的优先级,若大模型判定结果为高危,小模型判别结果为业务流量,将优先放行该数据并同步建议进行人工识别。在监测判别阶段通过应用“大模型+小模型”协同研判的方式提高威胁监测准确性,有效降低告警噪率,保障业务流量优先通行。

② 威胁处置阶段

经分析可疑流量,确定出现安全事件时,进入威胁处置阶段。此阶段主要发挥网络安全大模型对云端海量威胁情报资源和安全事件处置案例的学习能力。通

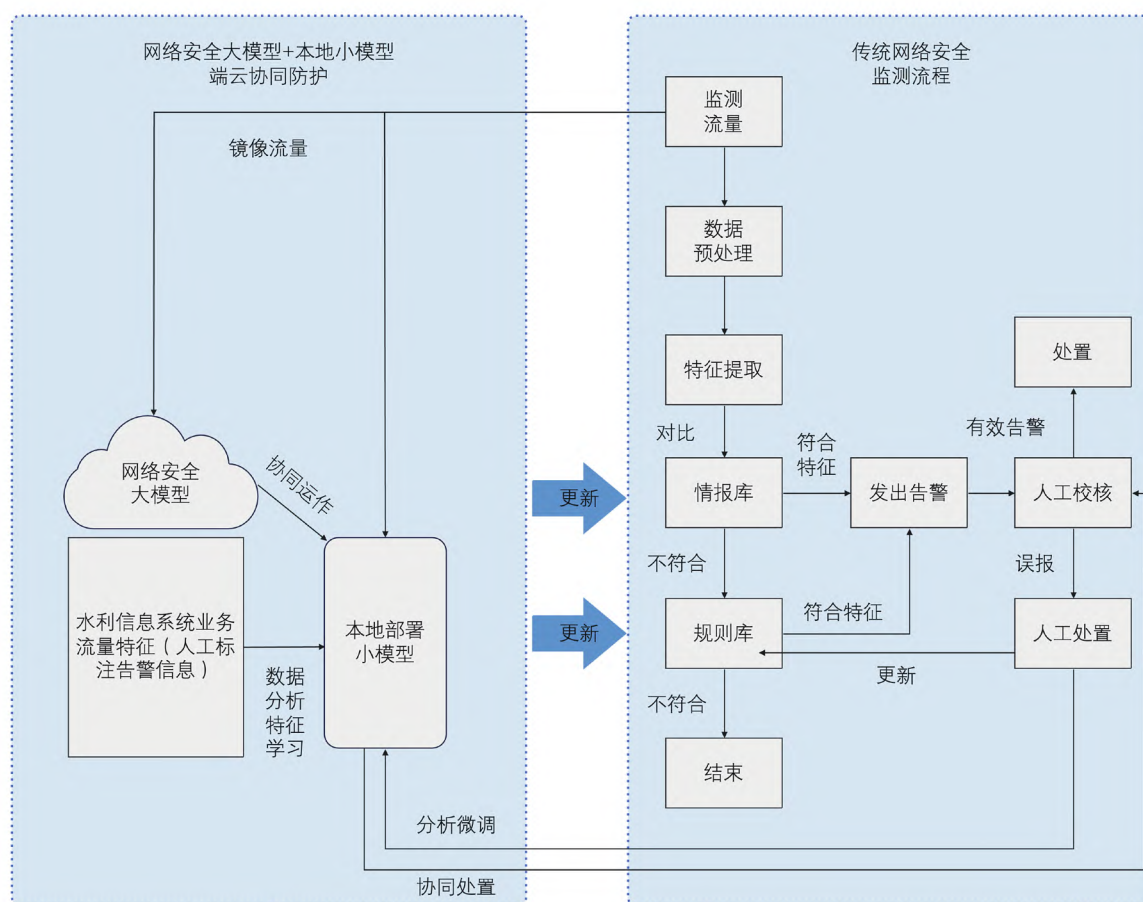


图17 端云协同智能防护模式示意

过匹配安全事件知识,利用安全事件编排与自动化响应技术(SOAR),对不同的安全事件灵活编排不同的处置流程,整合安全运营相关的技术、流程,形成立体纵深的综合处置方案。根据处置方案,通过应用开发、端口调用方式联动本地各类安全设备,对预授权的设备和命令进行自动化处置,对未授权的操作和设备提出处置建议。

③总结上报阶段

安全事件处置结束后,事件进入总结上报阶段。通过运用大模型的自然语言能力、多设备日志关联分析能力、向量数据检索学习能力,经过多轮对话或对历史威胁处置报告的学习,描述安全事件处置的各个环节,生成威胁处置情况报告,快速闭环网络安全事件处置流程。

基于以“大模型+小模型”构建的端云协同防护模式,由云端大模型研判海量流量数据和文件载荷等,及时溯源相关资产漏洞和威胁情报,发挥大模型实时威胁情报同步、智能分析监测、自然语言交互、设备联动处置和安全事件编排与自动化响应技术特点;小模型针对水利业务特定场景进行优化,识别放行水利业务特征数据,降低告警噪声率,发挥小模型部署灵活性强和专业化的特点(见图19)。“大模型+小模型”端云协同技术结合大模型通用能力和小模型专用能力,优

势互补,从而在保障数字孪生水利网络安全方面提供一种更加智能高效的防护方式。

五、共建共享模式

当前人工智能大模型行业应用仍然受到一些关键要素的制约,导致模型孤岛和数据孤岛、应用开发和复制边际成本高、自主可控不足等情况,不利于聚合成产业优势。构建水利行业大模型技术体系意义重大,考虑到建设资金成本高,涉及数据安全、网络安全和内容安全,需要统筹规划,按照“共建共享、统分结合、合作推广”的建设思路,协调行业主管部门、行业信息化支撑单位和人工智能企业等共同推动水利行业大模型高质量建设,减少重复建设,提高建设和利用效率,助力提升行业数字化、网络化、智能化水平。其中,“分”指的是不同层级不同业务分工细化的各自任务场景,根据地方和部门的需求及业务场景,基于水利行业大模型公共基础设施开展自身业务场景应用和开发工作;“统”指的是统筹行业大模型建设框架,统筹管理算力资源、数据资源、技术规范、测评标准等,形成更大范围更多方面行业性共识。在实际工作中,需要将“分”的试点探索经验“统”起来加以提炼和推广,通过试点创新为统筹规划和应用提供成熟经验。行业大模型共建共享框架见图20。

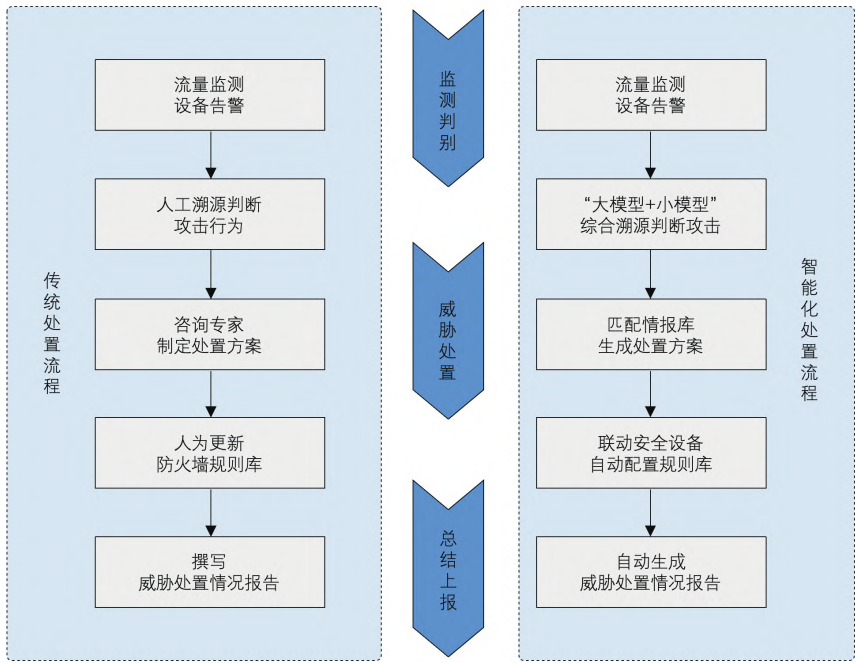


图18 网络安全事件处置流程对比

六、结 语

数字孪生水利建设是发展水利新质生产力的重要标志,是实现水利现代化的关键举措。随着人工智能技术的飞速发展,大模型正引领全球科技创新新潮流,当前全球人工智能技术呈现出快速迭代、多模态融合以及大规模行业应用加快落地的趋势。本文通过“分析定位、

探索路线、摸清需求、落地应用、建设模式”的思路,分析数字孪生水利建设面临的问题挑战,结合人工智能大模型能力特点,找准人工智能大模型在数字孪生水利建设体系中的定位,建立基于人工智能大模型的数字孪生水利技术框架;以防洪“四预”和网络安全防御应用场景为例阐述人工智能大模型的具体业务场景落地应用路线和步骤。大模型在水利行业的落地应用前景广阔,在技术、

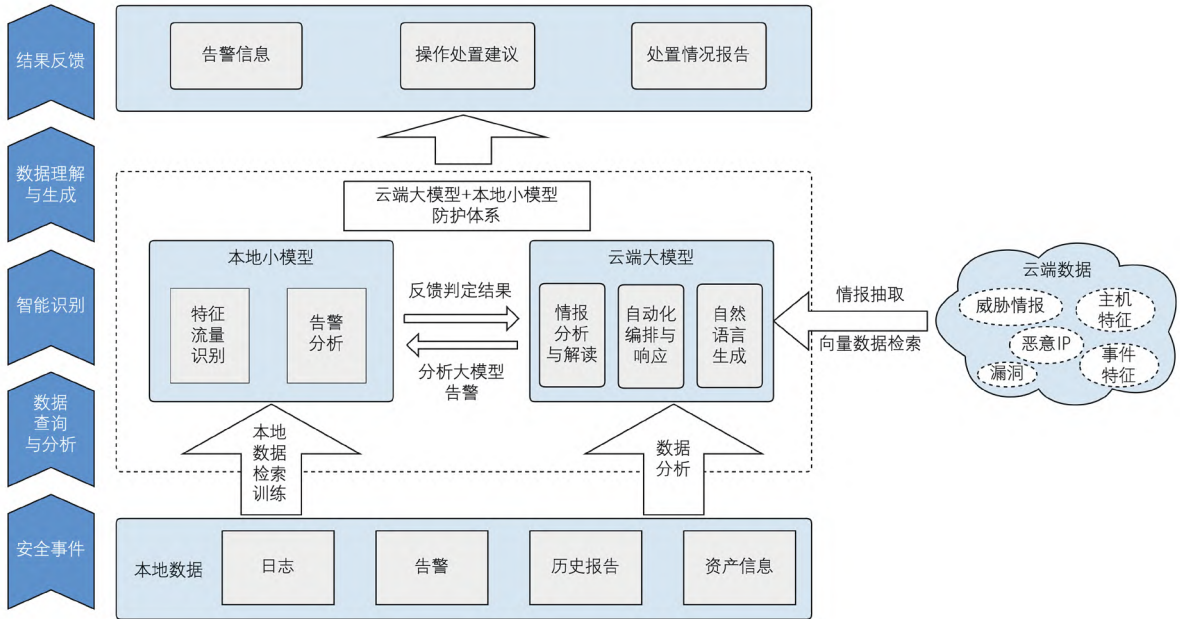


图19 端云协同防护技术架构



图20 大模型共建共享框架

业务和管理方面的协同发展是关键。技术上,需注重模型适配与实时处理能力;业务上,需明确核心场景并解决应用落地的具体需求;管理上,需统筹大模型分级分类建设,加强人才培养、数据治理和政策支持。

致谢:本研究是首届水利部卓越水利工程师培养工程(数字孪生水利班)六位学员于培训期间,在蔡阳、朱跃龙、冯钧、直伟等导师指导下完成的,导师对论文提出了许多宝贵建议,在此表达诚挚谢意。

参考文献:

- [1] 习近平在中共中央政治局第十一次集体学习时强调 加快发展新质生产力 扎实推进高质量发展[N].人民日报,2024-02-02(1).
- [2] 李国英.深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展[N].中国水利报,2023-01-17(1).
- [3] 李国英.进一步全面深化水利改革 为推动水利高质量发展、保障我国水安全作出新的贡献[N].中国水利报,2025-01-18(1).
- [4] 王忠静,沈文欣,石羽佳,等.数字孪生催动水利新质生产力与数字水利经济发展研究[J].中国水利,2024(15):7-12.
- [5] 蔡阳.数字孪生水利建设进展与发展思考[J].水利信息化,2025(1):1-7+20.
- [6] 水利部.关于大力推进智慧水利建设的指导意见[A].2021.
- [7] 水利部.智慧水利建设顶层设计[A].2022.
- [8] 水利部.“十四五”智慧水利建设规划[A].2022.
- [9] 水利部.“十四五”数字孪生流域建设总体方案[A].2022.
- [10] 蔡阳.数字孪生水利建设中应把握的重点和难点[J].水利信息化,2023(3):1-7.
- [11] 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.
- [12] 陈永灿,袁萍,黄实.AI通专模型,运营商应协同发展[J].中国电信业,2024(7):40-43.
- [13] 李兆石.从大语言模型到通用人工智能:第四次产业革命的滥觞[J].华东科技,2023(4):18-21.
- [14] 腾讯研究院.向 AI 而行,共筑新质生产力——行业大模型调研报告[R].2024.
- [15] 张文娟,邓辉,艾政阳,等.我国 AI 大模型数据集建设发展刍议[J].人工智能,2024(3):85-95.
- [16] 杨燕,叶枫,许栋,等.融合大语言模型和提示学习的数字孪生水利知识图谱构建[J/OL].计算机应用,(2024-08-26)[2025-03-04].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1307.TP.20240824.1732.002.html>.
- [17] 冯钧,畅阳红,陆佳民,等.基于大语言模型的水工程调度知识图谱的构建与应用[J].计算机科学与探索,2024,18(6):1637-1647.
- [18] 杭婷婷,冯钧,陆佳民.知识图谱构建技术:分类、调查和未来方向[J].计算机科学,2021,48(2):175-189.
- [19] 史宏志,赵健,赵雅倩,等.大模型时代的混合专家系统优化综述[J/OL].计算机研究与发展,(2024-10-16)[2025-03-04].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1777.TP.20241016.1437.010.html>.
- [20] 安全,徐国天.基于专家混合与领域特征的网络谣言识别模型[J].警察技术,2023(6):68-73.
- [21] 曾楠,谢志鹏.基于混合专家模型的词语上下位关系判别方法[J].计算机科学,2023,50(2):285-291.
- [22] 叶瑞禄,左翔,刘修恒.数字孪生秦淮河流域防洪四预平台建设与应用[J].人民长江,2024,55(3):13-20.
- [23] 何果.基于大模型的洪涝灾害防御数字化孪生系统的研究与实现[D].西安:西安理工大学,2024.
- [24] 郭永进,黄河俊.基于多门控混合专家模型的网络异常流量识别与防御模型[J].信息安全,2024,24(9):1458-1469.
- [25] 国家信息中心公共技术服务部.人工智能行业应用建设发展参考架构[R].2024.
- [26] 肖飞,吴洪涛,郭文华,等.自然资源行业大模型建设框架与典型场景研究[J].自然资源信息化,2024(6):54-62.

责任编辑 王 慧