

人工智能赋能水文测验：设备能力提升与内业智能化的双视角

王学斌

昌吉水文勘测中心

DOI:10.32629/hwr.v10i5.6992

[摘要] 水文测验的智能化转型涉及外业感知设备能力跃升与内业数据处理模式变革两个相辅相成的维度。在设备能力提升方面,计算机视觉与深度学习技术正推动水位观测、流量测验、泥沙分析等核心环节从接触式向非接触转变,多项技术已达厘米级业务化精度。在内业智能化方面,AI Agent(智能体)与Skill(技能模块)技术的引入,使测验计算、资料整编、数据审查、运维诊断与知识管理从“人盯数据”升级为“智能自主执行”,标志着水文信息系统从工具型向智能体型范式迁移。本文以研究视角,分别从感知端设备AI赋能与平台端智能体架构两条主线,系统梳理相关技术的实现原理、研究方法 with 典型验证案例,分析当前技术瓶颈,并对未来发展方向进行展望。

[关键词] 水文测验; 人工智能; 设备能力提升; AI Agent智能感知

中图分类号: P335 **文献标识码:** A

Artificial Intelligence Empowering Hydrological Measurement: A Dual Perspective on Equipment Capability Enhancement and Office Intelligence

Xuebin Wang

Changji Hydrological Survey Center

[Abstract] The intelligent transformation of hydrological measurement involves two mutually reinforcing dimensions: the leap in field sensing equipment capabilities and the change in office data processing paradigms. In terms of equipment capability enhancement, computer vision and deep learning technologies are promoting the transformation of core processes such as water level observation, flow measurement, and sediment analysis from contact-based to non-contact approaches, with many technologies achieving centimeter-level operational accuracy. On the office intelligence side, the introduction of AI Agent and Skill module technologies has upgraded measurement calculation, data compilation, review, operation and maintenance diagnosis, and knowledge management from “human-monitored data” to “intelligent autonomous execution,” marking a paradigm shift of hydrological information systems from tool-based to agent-based. From a research perspective, this paper systematically reviews the implementation principles, research methods, and typical validation cases of the two main lines—AI empowerment at the sensing device level and agent architecture at the platform level—analyzes current technical bottlenecks, and provides prospects for future development directions.

[Key words] Hydrological measurement; Artificial intelligence; Equipment capability enhancement; AI Agent; Intelligent sensing

引言

传统水文测验长期遵循“人工观测为主、设备辅助为辅”的作业范式,在极端水文事件频发的背景下,高洪期作业安全、复杂环境数据获取、海量数据时效性处理三大矛盾日益尖锐^[1]。人工智能技术的介入,为破解上述矛盾提供了双重路径:一是在感知层面,通过AI算法赋能传统传感器和新型视觉设备,提升单点监测的精度、稳健性与自动化水平;二是在业务层面,通过AI Agent架构重构内业工作流程,实现从数据采集、审

核、整编到报告生成的全链条智能化。

已有研究多聚焦于某一具体AI技术在水文单项要素观测中的应用^[2-4],缺乏对“设备能力提升”与“内业流程再造”这一整体图景的系统审视。本文尝试建立这一分析框架:将AI在水文测验中的应用划分为前端感知设备智能化(水位、流量、泥沙、巡检设备的能力跃升)与后端内业工作智能化(基于Agent与Skill技术的工作模式变革),分别论述其研究进展、技术路径与实证效果,以期水文现代化的整体推进提供参考。

1 前端感知设备能力提升研究

前端感知设备是水文测验的“数据源头”。AI技术的嵌入,使传统水文仪器突破了物理原理的固有限制,实现了感知精度、环境适应性与自动化程度的显著提升。

1.1 水位观测设备的视觉智能化升级

传统水位观测依赖浮子式水位计或人工观读水尺。浮子式水位计需建设专用自记井,建设维护成本高且易受淤积影响;人工观读则存在时效性差、高洪期安全风险大等问题。基于计算机视觉的水位智能识别技术,为水位观测设备的能力跃升提供了新方案。

1.1.1 基于深度学习的固定式视频水位计。研究思路是将水位测量转化为图像语义分割问题。在测站岸边架设高清摄像头对准水尺,采集不同光照、天气、水流条件下的水尺图像,构建标注数据集。采用DeepLab v3+或U-Net等语义分割网络,对水尺区域、刻度字符及水面线进行像素级分类^[3]。为增强模型对复杂环境的稳定性,研究中常引入数据增强策略(随机亮度、对比度变换、模拟雨雾噪声)和多尺度特征融合机制。在验证方面,黄河河曲水文站的比测实验表明,基于DeepLab v3+的水位识别模型在包含强反光、夜间补光、水面漂浮物遮挡等复杂场景的测试集中,平均绝对误差(MAE)为0.79 cm,均方根误差(RMSE)为1.02 cm,满足《水位观测标准》(GB/T 50138-2010)对水位观测精度的要求。

1.1.2 多级矮桩水尺的无人机巡检水位识别。针对宽浅河道布设的多级矮桩式水尺,传统巡测需人工沿岸线逐桩查看。研究者提出基于无人机航拍与目标检测算法的智能识别方法:无人机沿断面航线自动飞行采集图像,YOLOv8算法同步检测画面中所有水尺桩,通过分析每根桩被水体淹没的程度判定当前水位级,再对目标水尺进行局部图像增强与水面线精细分割。在黄河宁蒙河段的野外实验中,该方法对矮桩水尺的检测召回率达97.3%,水位级判定准确率为100%,单次巡检时间由人工方式的40min缩短至8min。

1.2 流量测验设备的非接触式AI增强

流量测验是水文测验中技术难度最高的项目。传统转子流速仪和ADCP均需将传感器置于水中,在高速水流、高含沙量或漂浮物密集条件下,设备安全与数据质量难以兼顾。AI技术的引入催生了视觉测流设备与雷达测流AI修正两个重要方向。

1.2.1 视频图像表面流速测量系统。该类系统的核心原理是:利用高清摄像机连续采集水面图像序列,通过光流法或粒子图像测速算法计算相邻帧间水面纹理的位移矢量场,经时空滤波与深度学习降噪后获得表面流速分布,再结合断面地形资料积分得到断面流量。AiFlow系统是该技术路线的代表性成果,其创新之处在于引入了基于卷积神经网络的虚假矢量识别模块,能够有效区分水流运动与船只扰动、风生波浪造成的伪运动。在黄河河曲站的比测研究中,AiFlow系统与走航式ADCP同步施测30次,覆盖流量变幅320-2850 m³/s。结果表明,视觉测流与ADCP测流的流量相对误差绝对值平均为4.2%,相关系数R²=0.987。特别在高含沙量(>50 kg/m³)条件下,ADCP出现底跟踪失效的6个

测次中,视觉测流仍保持稳定输出,其数据与上下游水量平衡分析结果一致^[5]。

1.2.2 雷达测流设备的AI系数修正。雷达波测流仪测量的是河流表面流速,传统方法采用固定系数(如0.85)将表面流速换算为断面平均流速,忽略了水位、比降、糙率等因素对流速垂向分布的影响。研究者提出基于机器学习动态系数模型的修正方法:以水位、水面比降等为输入特征,以历史ADCP实测断面平均流速与雷达表面流速的比值为标签,训练XGBoost回归模型。在长江中游某站的验证中,AI动态系数法的流量计算RMSE较固定系数法降低37.5%,尤其在涨落水阶段的绳套效应刻画上表现更优。

1.3 泥沙测验设备的AI辅助分析

泥沙测验长期依赖烘干称重法,过程繁琐、周期长。AI技术虽不能完全替代物理测量,但在实时估算与采样优化方面具有研究价值。基于水样图像含沙量反演的研究思路为:在可控光照条件下拍摄不同含沙量水样的数字图像,提取颜色矩、灰度共生矩阵等特征,或直接以卷积神经网络进行端到端回归。在黄河中游某站的实验中,使用ResNet-50模型对5-50 kg/m³范围的含沙量进行反演,测试集MAE为3.2 kg/m³,相对误差在20%以内的样本占86%。该方法可用于沙峰过程的加密监视,弥补烘干法时时间分辨率不足的短板。

2 内业工作智能化研究

如果说前端设备能力提升解决的是“数据怎么来”的问题,那么内业工作智能化解决的是“数据怎么用”的问题。长期以来,水文内业工作涵盖数据录入、测验计算、资料整编、报告编写、技术审查、知识管理,高度依赖专业技术人员的个人经验与人工操作,效率低、周期长、经验传承困难。AI Agent与Skill技术的出现,为内业工作的系统性智能化提供了全新架构。

2.1 AI Agent的技术内涵及其水文适配性

AI Agent是指能够感知环境、理解目标、自主调用工具并执行任务的智能软件实体。其与传统的规则引擎或单一机器学习模型的核心区别在于:Agent具备“感知—规划—执行—反馈”的闭环能力,能够将复杂的、开放性的业务目标分解为可执行的子任务序列,并在执行过程中动态调整策略。在水文内业场景中,Agent的技术架构通常包含以下组件:(1)基于大语言模型的推理核心,负责理解任务意图和拆解任务;(2)Skill技能库,封装了数据查询、规范计算、图表绘制、模型计算、报告生成等原子化功能模块;(3)知识库,整合水文规范、历史案例、设备手册等专业知识;(4)工具调用接口,连接各类水文数据库、业务系统与计算模型。这一架构使Agent能够以“数字同事”的角色,承担大量结构化、重复性的内业工作。

2.2 资料整编Agent:从人工定线到智能推流

水文资料整编是内业工作的核心,其关键难点在于水位—流量关系的确定。受洪水涨落、断面冲淤、回水顶托等因素影响,水位—流量关系常呈现复杂的绳套曲线或需要多临时曲线分段处理,人工定线耗时长、主观性强。湖南水文中心开展的AI整编研究采用“规范学习+案例推理”的技术路线。首先,将《水

文资料整编规范》(SL 247-2020)中的定线原则、推流方法、合理性检查规则进行知识抽取与结构化表示,构建整编知识图谱。其次,利用历年已整编资料训练关系曲线分类模型,对于新一年的实测流量成果,模型自动判断应采用单一曲线、临时曲线还是连时序法,并推荐最优分割节点。最后,Agent调用绘图Skill自动生成水位—流量关系图与推流成果表,供技术人员审核确认。应用评估显示,单站年度流量整编工时由平均3.5人·天压缩至0.5人·天,且整编成果在省级审查中的首次通过率由78%提升至94%。

2.3 水文测验日常值守Agent: 视觉识别、自动化计算与智能校核的集成

水文站日常测验工作涵盖水位定时观测、流量施测、泥沙采样、数据校核整编与仪器巡检等高度重复的标准化流程,人工操作耗时密集且汛期安全风险突出。水文测验日常值守Agent采用“视觉识别+自动化计算+时序异常检测”技术路线:接入自动监测的各类要素数据自动读取与合理性检查,完成基础测验的统计计算,按规范填入报表,还可基于LSTM模型自动筛查遥测数据中的跳点、僵值与突变,持续监测遥测设备在线状态与数据传输质量实现故障预警与初步诊断。

2.4 运维诊断Agent: 从被动响应到主动预警

水文遥测站点分布广、数量多,传统运维依赖故障发生后的被动响应。基于AI Agent的智能运维研究,旨在将运维模式从“事后救火”转变为“主动预警”。新昌县水文站以水雨情遥测数据接收软件(ME软件)为研究对象,构建了融合设备手册、历史维护记录、运行日志与服务器状态数据的运维知识图谱。Agent核心采用基于Transformer的语义匹配模型,当运维人员以自然语言描述故障现象时,系统在知识图谱中检索相似案例,返回可能原因列表与处置建议。对于高频故障类型,Agent可主动分析日志数据中的异常模式,在故障发生前发出预警。系统部署后,全县370余套遥测设备的数据接收畅通率由92.7%提升至99.1%,平均故障排查时间由4.2 h缩短至1.1 h。

2.5 Skill技术: 水文内业智能化的能力基座

Skill是Agent执行具体任务的能力单元。在水文内业场景中,Skill模块化具有重要工程价值:一是实现能力的复用与组合,同一数据查询Skill可被资料整编、水情简报、防汛会商等多个Agent调用;二是支持能力的动态扩展,新开发的算法模型或工具可通过标准化接口注册为新的Skill;三是降低大模型应用门槛,将专业计算逻辑封装为Skill后,Agent只需正确调用即可,无需大模型自身具备水文专业计算能力。山东浪潮提出的基于多模态智能体的水利数据处理方法,给出了Skill管理的实现方案:通过RESTful API接口注册新的水利数据处理技能,技能元数据(名称、功能描述、输入输出格式、调用方式)存入关系型数据库的water_resources_skills表;Agent接收请求后进行意图解析与任务分解,通过技能选择器匹配所需Skill,生成调用参数并执行,最后整合多个Skill的返回结果形成完整输出。

2.6 典型案例: 湖北水文智能体平台

湖北水文智能体平台是AI Agent在水文内业中规模化应用的典型案例。该平台聚焦防汛会商决策与水情预报预警6大业务场景,集成27个专业智能体和36个智能微工具。其核心创新在于构建了“水文神经网络”:每个智能体专注于特定业务功能(如雨情分析智能体、水位预报智能体、简报生成智能体),通过统一的消息总线实现协同工作。平台试运行期间,水情简报实现每小时自动生成,单份简报生成时间由人工编制的30 min缩短至2 min;用户可通过自然语言查询任意站点任意时段的水位流量数据,系统平均响应时间1.2 s;针对沮漳河、府澧河等重点流域开发的灾害分级预警模型,在2025年汛期试运行中,对3次洪水过程的预警时间较传统方式平均提前6.5 h。

3 技术挑战与研究展望

当前智慧水文智能应用仍存在诸多亟待突破的技术难题:感知层面,视觉水位识别模型易受浓雾、暴雨等恶劣天气影响导致识别精度降低,亟需融合多光谱、毫米波雷达等多元感知手段,并结合图像复原技术筑牢设备稳定运行边界;决策层面,智能Agent自主研判存在推理过程不透明问题,影响决策可追溯性与实际应用效力,需依托可解释人工智能实现水文决策推理过程可视化;数据层面,水文行业标注样本匮乏,极端水文场景数据更为稀缺,要借助物理信息神经网络、迁移学习等方式缓解数据依赖;应用层面,单一站点智能能力有限,还需完善多智能体协同机制,搭建层级化协同体系,全面提升流域整体智能化管控水平。

4 结束语

人工智能技术在水文测验中的应用,沿着“前端感知设备能力提升”与“后端内业工作智能化”两条主线协同推进。前端设备通过嵌入视觉算法、深度学习模型,实现了非接触、全天候、高精度的数据获取能力跃升;后端内业通过AI Agent与Skill技术架构,正在经历从人工操作到智能自主执行的工作模式变革。二者共同指向一个目标:将水文工作者从高风险、高重复性的劳动中解放出来,聚焦于分析、研判与决策。展望未来,物理信息融合、多智能体协同、轻量化边缘部署将是水文AI研究的关键方向。

[参考文献]

- [1]张建云,刘九夫.水文监测技术发展智慧水利建设[J].水利学报,2021,52(10):1155-1166.
- [2]赵红莉,冶运涛.基于深度学习的河流表面流速视频测量方法研究[J].水利学报,2023,54(5):587-596.
- [3]许继军,袁喆.基于计算机视觉的水位智能识别技术在水文测站的应用[J].人民长江,2023,54(8):102-108.
- [4]李新,车涛.水文时序数据异常检测的无监督深度学习方法[J].水文,2024,44(2):12-19.
- [5]湖北省水文水资源中心.湖北水文智能体平台试运行评估报告[R].武汉:湖北水文中心,2025.

作者简介:

王学斌(1990--),男,汉族,甘肃张掖人,大学本科,工程师,研究方向为水文信息化。