

智慧水利背景下施工安全风险智能预警系统构建

马自峰

河南省安阳市水利科技服务中心 河南 安阳 455000

摘要: 本文立足智慧水利的宏观技术语境,系统分析了水利工程施工安全风险的主要类别及其演化规律,指出现行预警机制在信息采集、态势研判和响应联动等方面存在的结构性短板。在此基础上,提出由感知层、传输层、分析层和应用层构成的四层架构智能预警系统,重点阐述了基于多源数据融合的风险特征提取、基于深度学习的隐患识别以及分级预警响应机制等核心模块的技术逻辑与实现路径。进而讨论了系统构建过程中数据质量治理、模型可解释性及人机协同决策等关键问题。本文认为,施工安全预警的智能化转型不应仅是技术工具的叠加,更需推动管理流程从被动应对向主动预控转变,实现“感知—研判—预警—处置”的闭环管理。

关键词: 智慧水利; 施工安全; 风险预警; 智能系统; 数据融合; 深度学习

引言

水利工程施工具有作业面广、环境条件复杂、不确定性因素多、灾害链效应强等显著特征。高边坡开挖、深基坑支护、隧洞掘进、围堰施工及高空作业等典型工序,无不伴随着塌方、滑坡、透水、高处坠落等多类安全风险。近年来,随着国家水网建设和重大水利工程持续推进,施工强度与难度同步攀升,安全生产压力日益加剧。据统计,水利工程施工安全事故中,约60%与风险感知滞后、预警信息失真或响应延误直接相关,暴露出传统安全管理模式在动态风险辨识和快速决策方面的固有局限。智慧水利以物联网、大数据、人工智能、云计算及数字孪生等新一代信息技术为核心驱动力,正在深刻重塑水利行业的建设管理模式。在施工安全领域,智慧水利所倡导的全面感知、实时传输、智能分析和精准干预理念,为构建新一代风险预警系统提供了前所未有的技术可能。

1 水利工程施工安全风险特征与预警需求

1.1 施工安全风险的主要类别与演化规律

水利工程施工安全风险可分为物理性、环境性和管理性三类。物理性风险如高处坠落、机械伤害等,与设备状态、防护措施及操作规范密切相关;环境性风险包括滑坡、暴雨、洪水、地下水突变及有害气体聚集,具有突发性强、空间不均、难预判等特点;管理性风险源于组织设计缺陷、交底不足、分包混乱和应急资源缺失,是前两类风险的人为放大器。三者常呈链式传导:如强降雨(环境)诱发边坡失稳(物理),若监测或响应滞后(管理),则酿成事故。这种多因素耦合、多阶段演化的特性,要求预警系统具备跨源数据关联分析与趋势推演能力,而非孤立判断单一指标。

1.2 现有预警机制的局限性分析

当前水利工程施工现场的安全预警主要依托人工巡视、定期检测和少数点式自动化监测设备。其局限性体现在四个层面:其一,感知覆盖度不足——监测点位稀疏且布局固化,难以覆盖高动态变化的作业面和临时风险区域;其二,信息时效性滞后——从数据采集、人工录入到逐级上报,时间延迟数小时乃至数日,与风险快速演化的实际需求严重脱节;其三,研判深度不够——缺乏多源数据融合分析手段,监测数据之间无法建立有效关联,大量有价值信息被割裂为“信息孤岛”;其四,预警与响应衔接不畅——预警信息发布后,缺乏标准化的处置流程和闭环反馈机制,存在“重预警、轻响应”的现象。这些结构性不足,构成了智能预警系统替代传统模式的核心驱动力。

1.3 智慧水利赋予的新能力与新路径

智慧水利的技术体系为破解上述局限提供了系统性方案。在感知层,物联网传感器(如倾角计、渗压计、应力应变计、视频智能识别等)实现了对人员、设备、环境和结构状态的全面实时监测,其时空分辨率远超传统方式。在数据层,5G、LoRa等通信技术保障了海量数据的低时延可靠传输,云平台则解决了异构数据的汇聚存储问题。在分析层,机器学习算法能够从历史数据中学习风险演化模式,实现对异常状态的早期识别和趋势预测^[1]。在应用层,数字孪生和可视化技术可将预警信息以空间直观的方式呈现给决策者,大幅提升态势感知效率。这些能力的集成融合,使得从“单点监测”到“全域感知”、从“事后分析”到“事前预判”、从“人工决策”到“人机协同”的跨越成为现实。

2 智能预警系统的总体架构设计

2.1 设计原则与目标定位

智能预警系统的设计应遵循四项基本原则。第一是全面感知原则,要求系统能够覆盖施工区域的人员、设备、环境及关键结构部位,不留监测盲区。第二是实时响应原则,从数据采集到预警信号发出,全链路时延应控制在秒级至分钟级,匹配主要风险类型的响应时间窗口。第三是分级预警原则,依据风险严重程度和紧急程度设置多级预警阈值和对应的响应等级,避免信息过载或漏警误警。第四是闭环管理原则,实现“感知—传输—分析—预警—处置—反馈”的全链条贯通,确保每一次预警都有响应、有落实、有评价。系统的目标定位是:建成一套面向水利工程施工全过程的、具备多源数据融合分析能力和智能决策支持能力的风险预警平台,为施工现场安全管理人员提供准确、及时、可操作的风险态势信息和处置建议。

2.2 四层物理架构体系

2.2.1 感知层

由各类前端监测终端构成,包括但不限于GNSS位移监测站、深部测斜仪、渗流压力计、雨量计、应力应变传感器、视频监控摄像头、UWB定位基站及智能安全帽等。这些设备按空间布局和监测对象的不同,形成对“人一机一环一结构”的全方位感知网络。

2.2.2 传输层

负责将感知层采集的数据安全、可靠地传送至数据中心。针对水利工程施工现场地形起伏大、通信基础设施薄弱的实际情况,应采用有线光纤与无线通信(4G/5G、LoRa、ZigBee)相结合的混合组网方式,关键主干链路设置冗余备份,确保在恶劣天气条件下数据传输不中断。

2.2.3 分析层

承担数据融合、特征提取、模型推理和预警判别的功能。该层由数据预处理模块、风险特征库、算法模型库和推理引擎四部分组成,采用微服务架构设计,支持算法模块的灵活扩展和迭代更新。

2.2.4 应用层

面向最终用户,提供风险态势一张图、预警信息推送、处置指令下达、报告自动生成等交互功能。用户界面应适配PC端和移动端,确保现场管理人员和后方指挥中心能够同步获取关键信息。

2.3 数据流与信息闭环机制

系统的数据流遵循“感知采集—边缘预处理—云端融合分析—结果推送—处置反馈”的路径。前端设备采集的原始数据首先在边缘网关进行初步清洗、格式化和异常值剔除,降低无效数据传输量。之后通过传输层

汇聚至云端数据中台,与地质勘察资料、施工组织设计文件、气象预报数据等静态信息进行时空对齐和关联融合。分析层基于融合后的数据驱动预警模型运行,输出风险等级、影响范围和建议措施。预警结果经应用层推送给指定责任人,责任人完成处置后在系统中填报处置记录,形成闭环。该信息闭环机制确保了系统不是单向的信息发布工具,而是嵌入施工安全管理流程中的有机组成部分。

3 系统核心功能模块与技术实现路径

3.1 多源感知数据融合与特征提取

水利施工现场的数据源在时空分辨率、精度和可靠性方面差异显著,例如GNSS位移数据精度高但采样频率较低,而加速度计数据采样频率高但易受噪声干扰。数据融合的关键在于建立统一的空间坐标基准和时间同步机制,将异构数据映射到相同的时空网格中^[2]。随后,通过特征工程方法从融合数据中提取能够表征风险态势的关键指标,如边坡位移速率变化率、支护结构内力增量、渗流压力与降雨量的响应时滞等。这些特征指标相较于原始监测数据具有更强的风险指向性,是后续智能判别模型的直接输入。

3.2 基于深度学习的隐患识别与趋势推演

对于已发生的异常状态识别,卷积神经网络(CNN)可应用于视频监控图像中的人员违规行为(如未戴安全帽、临边作业无防护)和设备异常状态的自动识别。对于时间序列监测数据(如位移—时间曲线、渗压—时间曲线),长短期记忆网络(LSTM)和门控循环单元(GRU)等循环神经网络变体能够有效捕捉时序依赖关系,实现对变形加速、渗流突增等前兆特征的自动检出。在趋势推演层面,可构建结合物理约束的神经网络模型——即在对监测数据进行统计学习的同时,融入边坡稳定性、渗流力学等先验物理规律作为正则化约束,使预测结果既符合数据分布又满足力学合理性。需要明确的是,深度学习模型的应用效果高度依赖训练数据的质量和代表性,因此系统建设初期应着重开展历史数据的整理、标注和增广工作。

3.3 分级预警机制与动态阈值设定

建议将预警等级划分为四级:四级(关注级,蓝色),表示监测指标出现轻微异常,需加强观察;三级(警示级,黄色),表示异常趋势明显,需加密监测频率并现场巡查;二级(警报级,橙色),表示风险较高,需暂停相关作业并启动应急预案准备;一级(紧急级,红色),表示即将发生或已发生险情,需立即撤离人员并全面启动应急响应。各级预警对应的触发条件和

响应措施应在系统上线前经专家评审确定。动态阈值设定是分级预警的核心技术环节。传统固定阈值法无法适应施工过程和环境条件的动态变化,容易产生大量误报或漏报^[3]。建议采用基于统计过程控制(SPC)与贝叶斯更新相结合的自适应阈值方法——系统持续学习正常施工状态下的监测数据分布特征,根据置信区间动态调整告警边界,同时利用新到达的数据不断更新模型参数。这种方法能够有效降低季节性波动、施工扰动等因素对预警准确率的影响。

3.4 预警信息推送与应急联动接口

推送策略应基于责任矩阵和时空条件进行精准匹配:四级和三级预警以平台消息和短信形式通知现场专职安全员和班组长;二级预警增加电话通知至项目经理和安全总监;一级预警则同步推送至项目部和上级主管部门的应急指挥中心。推送内容应包括风险位置、等级、监测依据、建议措施和响应时限。此外,系统应预留与应急管理平台的标准化接口(如RESTful API或消息队列),实现预警事件触发后自动关联应急预案、物资调配计划和疏散路线图,将预警能力无缝转化为应急行动能力。

4 系统构建的关键问题与应对策略

4.1 数据质量治理与不确定性量化

施工现场传感器常因供电不稳、环境侵蚀、人为损坏等原因产生数据中断、漂移或噪声异常。为此,需在边缘端部署数据质量诊断模块,实时检测数据的完整性、一致性和合理性,对可疑数据自动标记并启动补传或校验机制。同时,系统中应内置不确定性量化框架,对来自传感器精度、传输丢包、模型简化及参数估计等各个环节的不确定性进行逐级传递和综合量化^[4]。最终输出的预警结果应附带置信度评分,帮助管理者合理评估风险判断的可信程度。

4.2 模型可解释性与工程适配

深度学习模型的“黑箱”特性在工程安全领域尤为敏感——现场管理人员难以接受一个无法解释其判别依据的“算法权威”。因此,在模型选择上应优先考虑具备可解释性的方法,例如基于注意力机制的模型可输出哪些输入特征对预警结论贡献最大,便于人工复核和

归因分析。此外,可引入SHAP(Shapley加法解释)或LIME(局部可解释模型)等事后再解释技术,为每次预警生成可读性强的解释报告。在模型训练阶段,将工程规范和专家经验编码为约束条件融入损失函数,使模型的决策边界更符合工程安全管理的实际逻辑。

4.3 人机协同决策与人员素养提升

必须清醒认识到,智能预警系统并非要取代安全管理人员的专业判断,而是作为增强决策能力的辅助工具。系统输出的预警结论在发布前应由值班人员进行确认和分级复核,尤其是涉及人员撤离的紧急预警,最终决策权应始终保留在具有法定资质的管理者手中。与此相适应,系统应用单位应开展系统的数字化素养培训,使安全管理人员理解系统的工作原理、信任合理的预警输出、同时具备识别系统异常的能力。只有实现“机器智能”与“人类智慧”的有效协同,智能预警系统才能真正在施工安全治理中发挥应有价值。

5 结语

智慧水利为施工安全风险智能预警提供了技术基础与应用场景。本文基于水利工程安全风险特征,提出“感知全面化、传输实时化、分析智能化、应用闭环化”的智能预警系统构建理念。研究表明,系统价值不仅依赖物联网、深度学习和云计算等技术集成,更关键在于配套的数据治理、模型可解释性及人机协同管理机制。唯有技术与制度同步革新,才能将智能预警转化为实际治理能力。未来,随着数字孪生与行业大模型发展,预警系统有望从“判别式预警”迈向“生成式推演与预案优化”,实现更全面、前瞻的智能安全保障。

参考文献

- [1] 张建云,王国庆,刘九夫.智慧水利建设框架与发展路径研究[J].水利学报,2022,53(10):1163-1173.
- [2] 陈晓红,胡东滨,曹文治.基于物联网与大数据的安全监测预警技术综述[J].中国工程科学,2023,25(3):98-108.
- [3] 吴庆洲,程晓陶,向立云.水利工程施工安全管理与风险控制研究进展[J].水力发电学报,2022,41(8):1-13.
- [4] 胡春宏,陈建国,郭庆超.水利工程全生命周期安全管理数据平台构建[J].中国水利,2024,75(15):40-48.