

多源数据融合的市政工程施工安全智能控制系统研究

陈韦华 王俊宁 刘耿鹏 邹柳槟 罗岩 郭威 罗鼎

中铁建工集团有限公司 北京 100000

DOI: 10.12238/ems.v7i8.14694

[摘要] 市政工程施工环境复杂、风险因素众多，传统安全管理模式存在信息滞后、监管覆盖不足等缺陷。本文提出一种基于多源数据融合的市政工程施工安全智能控制系统框架，旨在整合物联网传感数据、视频监控信息、环境监测数据、BIM模型及人员管理数据等，构建动态、智能的安全风险识别与预警体系。系统设计包含数据采集层、传输层、融合处理层、智能分析层与应用层五部分，重点阐述了多源异构数据的时空配准、特征提取及融合算法，以及基于深度学习的风险识别模型构建方法。研究表明，该系统框架能有效提升施工安全风险的主动感知与智能管控能力，为市政工程安全管理数字化转型提供理论支撑。

[关键词] 市政工程；施工安全；多源数据融合；智能控制；物联网；风险预警

1 引言

市政工程是城市发展的基础命脉，其施工过程常面临地质条件复杂、地下管网交错、交通干扰大、露天作业多等挑战，安全事故频发^[1, 2]。传统安全管理主要依赖人工巡检与被动响应，存在实时性差、覆盖面窄、预警能力弱等痛点^[3]。随着物联网（IoT）、人工智能（AI）^[4]、建筑信息模型（BIM）^[5]等技术的发展，构建基于多源数据融合的智能安全控制系统成为提升市政工程安全管理效能的必然趋势。

本文聚焦市政工程施工场景，提出一个融合多源异构数据的智能安全控制系统框架。研究旨在突破数据孤岛，实现安全风险的早期识别、动态评估与智能干预，为构建“感知-分析-决策-控制”的闭环安全管理新模式奠定基础。

2 市政工程施工安全风险与多源数据特征分析

2.1 主要安全风险类型

坍塌风险：深基坑、高边坡、隧道开挖支护失效等。

机械伤害：起重设备、挖掘机械、运输车辆操作不当或碰撞。

高处坠落：脚手架、作业平台、临边洞口防护缺失。

物体打击：高空坠物、物料搬运碰撞。

触电风险：临时用电设备老化、线路敷设不规范。

环境风险：有毒有害气体（管廊、隧道）、恶劣天气（大风、暴雨）。

人员行为风险：违章操作、疲劳作业、未佩戴防护用品。

2.2 关键多源数据类型及其特征

为实现对上述风险的全面感知，需整合下表1所示关键数据源，这些数据具有异构性、海量性、时空性、多尺度性等特点，亟需有效融合处理。

表1 关键数据源

数据来源	数据类型	主要监测内容/作用	特点
物联网传感器	结构化时序数据	位移、沉降、倾斜、应力应变、振动、气体浓度、温湿度、水位等	实时性强、精度高、点位部署
视频监控系统	非结构化图像/视频流	人员行为、设备状态、作业区域入侵、安全防护措施状况等	信息直观、覆盖面广、需智能分析
BIM模型	结构化几何与属性信息	工程结构设计、施工进度模拟、空间冲突检测、安全区域规划	提供空间基准、支持可视化分析
环境监测站/气象	结构化时序数据	风速、降雨量、温度、PM2.5等	影响施工安全的外部环境因素
人员定位系统	结构化位置轨迹数据	人员实时位置、活动轨迹、进入危险区域预警等	保障人员安全、行为分析基础
设备监控系统	结构化状态数据 & 日志	设备运行参数（油压、转速）、故障报警、操作记录	预防机械故障相关事故
安全管理台账	半结构化/结构化文档	隐患排查记录、安全教育记录、应急预案、资质信息	提供管理背景信息、辅助决策

3 多源数据融合的智能安全控制系统框架设计

本系统采用分层架构设计，自底向上分为五层：数据采

集层、网络传输层、数据融合与处理层、智能分析层、应用层。系统框架如图1所示。

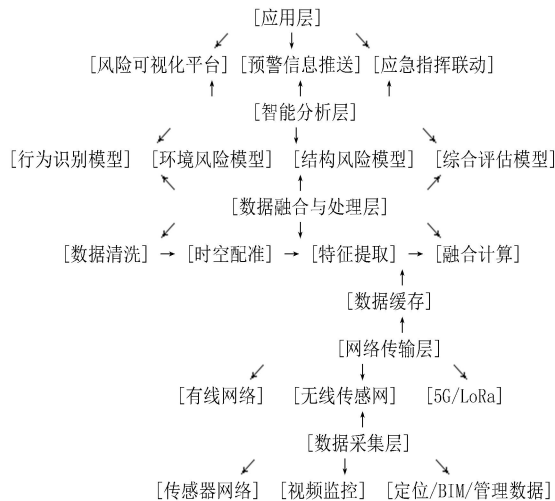


图1 多源数据融合的智能安全控制系统框架

3.1 数据采集层

传感器网络:部署各类智能传感器(如GNSS位移计、倾角计、裂缝计、土压力盒、气体传感器、振动传感器、智能安全帽内置传感器等)于关键风险点(基坑、边坡、隧道掌子面、大型设备、管廊内部)。

视频监控网络:布设高清/红外摄像头覆盖作业面、出入口、危险区域、材料堆放区、设备操作区等,支持RTSP流传输。

定位系统:采用UWB、蓝牙AOA或RFID技术实现人员与重要设备的精确定位。

BIM模型服务器:存储与更新施工阶段的BIM模型,包含几何、属性及进度信息。

环境监测站/气象数据接口:接入现场环境监测站数据及权威气象部门实时数据。

设备监控系统接口:接入大型施工机械的监控数据。

安全管理系统数据库接口:接入隐患排查、人员培训等管理信息。

3.2 网络传输层

异构网络融合:综合运用有线工业以太网、无线传感网、4G/5G等,确保各类数据的可靠、低延时传输。

边缘计算节点:在施工现场关键区域部署边缘计算网关,对视频流、传感器数据进行初步过滤、压缩和本地实时分析,减轻云端负担,提升响应速度。

3.3 数据融合与处理层

本层负责对汇聚的原始多源异构数据进行深度处理,为上层分析提供高质量、融合后的信息。主要步骤:

数据清洗与预处理:处理缺失值、异常值。数据标准化/归一化。视频数据抽帧、去噪、增强。

时空配准与关联:采用NTP协议或硬件时间戳,确保不同来源数据时间基准统一。将传感器坐标、视频画面坐标、人员/设备定位坐标统一到BIM模型坐标系或工地全局坐标系中。利用空间数据库建立映射关系。基于时空标签,将描述同一对象或同一事件的不同来源数据进行关联。

特征提取:提取统计特征、时域特征、频域特征、趋势特征等。应用计算机视觉(CV)技术提取特征,包括识别人员、设备、安全设施、危险源。跟踪人员/设备运动轨迹,分析行为模式。识别攀爬、跌倒、违规操作等危险行为。分析作业区域整体安全状态。提取空间关系、构件属性、计划进度与实际的偏差信息。提取关键指标。

多源数据融合计算:主要在特征层和决策层进行融合。通过加权平均/卡尔曼滤波处理不确定信息,融合来自不同源的证据评估风险置信度。建立风险因素间的概率依赖关系,进行因果推理和风险概率计算。直接输入不同模态的特征向量,通过神经网络学习其内在关联,输出融合后的高层语义信息或风险指标。这是处理复杂异构数据融合的有效手段。

3.4 智能分析层

基于融合处理后的高质量数据,构建智能模型进行安全风险识别、评估与预测:

结构安全风险分析模型:输入融合后的位移、沉降、倾斜、应力应变、振动等监测数据,地质环境数据,施工进度信息。应用LSTM(长短期记忆网络)、GRU(门控循环单元)等时序模型预测变形趋势;结合有限元分析结果或专家规则库,判断结构稳定性风险等级。

人员行为安全风险分析模型:输入融合后的人员位置、轨迹、姿态(来自视频CV)、安全装备佩戴状态(CV)、作业区域信息(BIM)。基于时空图卷积网络或Transformer的行为识别模型,判断跌倒、碰撞、进入危险区域、违规操作等风险行为。

机械设备安全风险分析模型:输入设备运行参数(油压、温度、电流)、工作状态、定位信息、周边环境(视频)、人员接近信息(定位+视频)。结合设备故障预测与基于SVM、随机森林的故障分类等方法,以及人员防碰撞算法,评估机械故障风险和碰撞风险。

环境安全风险分析模型:输入融合后的气象数据、现场气体浓度、粉尘浓度、水位数据。基于规则引擎或统计模型/机器学习模型,评估恶劣天气影响、有毒有害气体泄漏、积水等风险。

综合安全风险评估与预警模型: 输入以上各专项模型的分析结果、历史事故数据、管理台账状态。采用模糊综合评判、层次分析法结合专家知识, 或深度神经网络, 进行多因素、多层次的综合风险评估, 生成全局性的安全态势感知结果和分级预警信息。

3.5 应用层

将智能分析结果转化为直观、可操作的管控措施:

安全风险可视化平台: 基于 WebGIS 和 BIM 轻量化引擎, 构建三维可视化平台。实时监测数据、风险点位置与等级(热力图、标记点)、人员设备分布、视频画面。对高风险区域/对象进行高亮闪烁、弹窗提示。实现查询历史数据、预警记录、事故案例。

多级预警信息推送: 根据风险等级, 通过现场声光报警器、移动 APP 消息、短信、PC 端弹窗等方式, 定向推送给现场作业人员、班组长、安全员、项目经理及公司管理层。预警信息包含风险类型、位置、级别、建议措施。

辅助决策与应急指挥联动: 提供基于预案的处置建议流程。在重大预警时, 可一键启动应急响应, 联动广播系统、门禁系统、应急资源调度。

安全数据统计与分析报告: 自动生成日报、周报、月报, 统计隐患类型分布、风险趋势、预警响应效率等。为安全管理考核、流程优化提供数据支撑。

4 系统实现的关键技术讨论

(1) 异构数据融合的精度与效率: 时空配准误差、不同模态数据表征差异、融合算法的复杂性与时实性平衡是核心挑战。需持续优化融合算法, 探索更高效的多模态深度学习架构。

(2) 复杂场景下 AI 模型的鲁棒性: 施工现场光照变化、遮挡、扬尘等干扰因素影响 CV 模型精度; 设备工况多变影响基于数据的模型性能。需要大量高质量、多样化的标注数据进行训练, 并采用数据增强、迁移学习、在线学习等技术提升模型泛化能力。

(3) 边缘-云协同计算: 合理划分边缘节点与云中心的计算任务(边缘: 实时性要求高的简单分析、过滤; 云端: 复杂模型训练、大数据分析、全局决策), 优化资源分配与任务调度策略, 满足低延时和高吞吐需求。

(4) 系统安全与隐私保护: 数据传输加密、访问权限控制、人员位置等敏感信息脱敏处理至关重要, 需符合网络安全与个人信息保护法规。

(5) 标准与互操作性: 推动传感器接口、数据格式、通信协议的标准化, 是实现不同厂商设备与系统无缝集成的关键。

5 结论与展望

本文构建了一个面向市政工程施工安全的多源数据融合智能控制系统框架。该系统通过整合物联网传感数据、视频监控信息、BIM 模型、环境数据、人员设备信息及管理数据, 构建了从数据采集、传输、融合处理到智能分析和应用服务的完整技术链条。其核心价值在于:

(1) 打破信息孤岛, 实现了多源异构数据的有效汇聚、配准与融合, 为全面感知施工安全状态提供了数据基础。

(2) 提升风险感知能力, 利用深度学习、机器学习和多源融合技术, 实现了对结构失稳、人员行为风险、设备故障、环境危害等关键风险从被动监控到主动识别、早期预警的转变。

(3) 赋能智能决策与控制, 通过可视化平台、分级预警和辅助决策功能, 显著提升了安全管理的时效性、精准性和可操作性, 推动安全管理模式向智能化、精细化、动态化转型。

[参考文献]

[1]王振华, 李国栋, 刘洋. 基于物联网的建筑工程安全实时监控研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53 (S2): 1-8.

[2]张雨薇, 陈立伟, 黄志强. 多源信息融合技术在隧道施工安全预警中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40 (05): 1020-1031.

[3]Chen C., Tang L., Zhang W. A multimodal data fusion framework for real-time safety risk assessment in metro construction[J]. Automation in Construction, 2023, 145: 104672.

[4]Wang P., Zhang S., Li H., et al. Blockchain-enabled secure data fusion for IoT-based construction safety management[J]. Advanced Engineering Informatics, 2022, 54: 101756.

[5]Liu Y., Wang Q., Yan X., et al. Spatio-temporal fusion of BIM and UWB for proactive hazard warning in underground utilities construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 143: 105458.

作者简介: 陈韦华(1987-), 男, 高级工程师, 本科, 石家庄铁道学院。研究发现: 市政工程、施工安全。