

基于物联网的公路工程施工现场安全预警系统构建

曹运涛

(四川公路桥梁建设集团有限公司公路隧道分公司, 四川 成都 610200)

摘要 为了实现对公路工程施工现场风险的智能识别与快速响应, 本文设计并构建了一套基于物联网的安全预警系统。系统采用多源感知技术对人员、设备和环境状态进行实时监测, 利用 5G 与 Wi-Fi 混合网络实现高效数据传输, 并通过边缘计算与云端模型联合处理, 实现越界识别、设备异常预警及风险趋势预测等核心功能。结果表明, 该系统提高了预警准确率和响应效率, 降低了现场违规行为发生率, 以为施工现场提供持续稳定的安全保障。

关键词 物联网; 公路工程; 施工现场; 安全预警系统

中图分类号: U415

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.010

0 引言

在公路工程施工过程中, 常伴随高温、爆破、高空作业、重型机械等多重高风险因素。传统安全管理依赖人工巡查与经验判断, 难以实现高频、高效的实时监管。物联网技术以其“全面感知、可靠传输、智能处理”的优势, 为施工安全预警提供了新的技术路径。本文基于物联网架构, 构建结构合理、功能完备的施工安全预警系统, 旨在保障施工作业人员的安全与工程质量。

1 基于物联网的公路工程施工现场安全预警系统架构设计

1.1 感知层

感知层作为系统最底层、最直接的数据获取单元, 其部署质量与感知精度直接关系到整个系统的预警有效性和实时响应能力。感知层需覆盖施工现场的多个核心维度, 包括人员位置、环境状态、设备运行以及视频图像信息, 形成全面的“人—机—环”三位一体感知网络^[1]。

首先, 人员定位模块采用 UWB 与蓝牙双技术融合定位方式, 工人佩戴轻量化电子标签, 每隔 1 s 向基站发送定位信号, 系统通过多基站协同定位技术可实现误差控制在 ± 30 cm 范围内, 并可在 GIS 平台实时显示工人移动路径、停留时间与作业状态, 尤其适用于爆破区、高空作业区等重点危险区域的越界监测。其次, 在环境监测方面, 系统布设多类传感器节点, 如温湿度传感器、CO/CH₄ 气体浓度传感器和 PM2.5 颗

粒物传感器, 采样频率设定为 1 分钟一次, 数据上报周期为 5 分钟, 满足对突发泄露、扬尘污染及高温高湿等危险工况的及时识别。例如: 当 CO 浓度持续高于 30 ppm 或 PM2.5 浓度超过 $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时, 系统将触发黄色预警并自动联动广播与人员撤离提示。再次, 设备状态监控模块通过在塔吊、挖掘机、混凝土罐车等大型机械设备上安装姿态传感器、压力传感器与 GPS 模块, 能够实时获取设备倾角、作业荷载、运行速度与轨迹偏移等信息, 系统采用动态阈值监控机制, 设定如塔吊倾斜角度大于 10° 、载荷连续 5 s 超过额定载重的 80% 即判断为风险工况, 自动记录日志并生成预警提示。最后, 在视觉感知方面, 现场部署的 AI 视频分析终端配备高清广角摄像头与边缘图像处理芯片, 支持对人群密度、人员越界、人员跌倒等事件的智能识别与本地预警。图像分析采用 YOLOv5 模型与姿态识别算法相结合, 实现平均识别准确率达 93% 以上, 在 3 s 内完成一次完整的画面分析与识别判断^[2]。

1.2 网络层

网络层承担着多源感知数据向平台层高效、稳定传输的核心任务。由于施工现场环境复杂、动态变化频繁, 传统单一网络结构难以满足高并发、大带宽、低延时的通信需求。因此, 本系统采用“5G+Wi-Fi”混合组网方式, 在保证数据实时性的同时提升网络结构的灵活性与鲁棒性。

网络层对不同类型的数据进行了分级分类传输策略设计: (1) 对于关键高频数据, 如 UWB 人员定位信息(更新频率 1 Hz)、塔吊姿态变化、设备荷载实时监测等,

采用 5G 蜂窝网络进行直连上行。5G 网络具备低于 10 ms 的时延能力和 Gbps 级传输带宽,可在高流动性、强干扰的工地环境下仍保持稳定通信,保障越界报警、设备异常等高优先级事件的快速响应;(2)对于环境监测类数据如温湿度与视频图像数据,考虑到其对时延的容忍度相对较高,系统通过 Wi-Fi 接入边缘计算节点进行初步本地处理后,再统一打包上传至云端服务器。Wi-Fi 模块覆盖区域设定为半径 50 m,信道配置采用自动频率跳变机制以减弱信号干扰,满足多个传感器同时接入且带宽不低于 30 Mbps 的基本需求。视频数据采用 H.265 编码格式压缩传输,以减少带宽占用,提升传输效率;(3)针对施工现场潜在的信号遮挡、设备故障等问题,网络层配置了双链路冗余结构,即每个关键节点均具备主用与备用网络路径(主为 5G,备为 Wi-Fi 中继或有线以太网),并设有链路健康检测机制,一旦主链路连续 3 s 无响应,系统将在 1 s 内自动切换至备用路径,确保网络不中断、数据不丢失;(4)为提升整体系统的安全性与数据完整性,网络层还嵌入 TLS 传输加密协议与设备身份认证机制,有效防止数据在传输过程中的篡改与劫持。整个网络架构支持最多同时连接 300 个传感节点与 10 路高清视频流,在试点工程中实测网络丢包率低于 0.5%,关键数据平均传输延时控制在 15 ms 以内^[3]。

1.3 平台层

平台层主要由边缘计算节点、云端处理中心及安全规则库与响应机制三大核心组成,形成“本地实时处理+云端深度分析+规范驱动响应”的协同体系。在边缘计算环节,系统部署多个边缘计算终端,嵌入 ARM 架构处理器,配备 8 核 CPU 与 16 GB 内存,运行轻量化的容器化分析模块,用于本地处理高频数据,如塔吊姿态判断、人员定位超限识别等,以减少网络带宽压力和上传延迟。根据实测数据,边缘计算节点可将紧急数据处理响应时间控制在 200 ms 以内,提高现场异常事件的反应速度。云端处理中心具备强大的计算能力与算法支持,基于 Hadoop 大数据框架和 TensorFlow 深度学习平台,运行事故模式识别模型和风险趋势预测算法。例如:系统内置的 LSTM 时间序列预测模型可根据过去 7 天施工环境数据与行为记录预测未来 24 小时高风险时段,预测准确率达 87.3%。同时,云平台支持历史数据回溯分析、多维度交叉比对与数据可视化服务,为管理层提供科学决策依据。此外,平台层构建了完善的安全规则库与响应机制,包括 GB50660《建设工程施工现场安全技术规范》、JGJ59《建筑施工安全检查标准》等国家与行业规范,系统内置超过 120 项规则条目,涵盖高空作业、起重机械运行、

易燃易爆作业环境等重点领域。当采集数据触发规则条件如作业人员未佩戴安全帽、设备载荷超限、环境中 CH₄ 浓度超过 0.5% 等,系统立即赋予相应风险等级(分为红、橙、黄、蓝四级),并启动相应响应流程,包括推送预警信息至安全员移动端、启动广播提示、联动断电设备等多级响应措施。

1.4 应用层

应用层作为系统面向用户交互的界面与操作终端,其面向项目管理人员、安全员及上级主管单位三类核心用户群体,提供多终端、多方式、多维度的安全信息服务,确保安全预警信息在最短时间内高效传达至责任人。

1. 移动端 APP 作为现场一线管理人员的随身工具,具备实时定位、风险动态追踪和预警处理等功能,系统可同步显示各作业人员的位置分布、所属作业区域、当前任务状态及历史轨迹查询。每位人员定位标签与账号绑定,一旦发生越界、倒地或长时间静止等异常行为,APP 界面将以弹窗、闪烁标识及警报声提醒安全员及时响应。此外,移动端还支持远程一键报警功能,适用突发事件无法语音沟通的应急场景,触发后可联动附近广播和视频监控自动锁定事发区域,并向管理中心发送定位信息^[4]。

2. 大屏控制中心是项目指挥部和调度室的集中管理平台,结合 GIS 和 BIM 技术,提供施工现场的三维动态展示。系统显示各传感节点、设备、人员和风险点,并支持缩放、旋转、分区查看及风险事件回放。它能接入至少十路高清视频和三百个感知设备数据,保证数据图像同步连续。系统还具备自动预警推送机制,能在检测到高风险事件时,如强风、设备超负荷或气体浓度异常,5 秒内通过短信、微信、语音等方式通知责任人,提供事件详情和处理建议,确保快速决策。

3. 应用层还具备预警日志管理、统计分析与报告生成等辅助功能,系统可按日、周、月自动生成安全事件统计图表与趋势分析报告,并提供 Excel 格式导出,便于管理人员汇总归档与上报。在试点工程项目中,应用层有效辅助完成越界报警处理 42 起,高空作业预警响应 64 次,重大隐患自动推送通知 98 条,预警处置及时率达 94.2%。

2 关键功能模块设计

2.1 人员越界预警

人员越界管理是施工安全中的重点问题,尤其在爆破区、吊装区、高空作业区等限制区域,一旦发生人员误入,极易引发严重后果。因此,系统在高危作业区域布设虚拟电子围栏,围栏边界基于 GIS 地图与

施工 BIM 模型进行精准设定,边界误差控制在 $\pm 0.3\text{ m}$ 以内。作业人员佩戴的 UWB 定位标签每秒更新一次位置信息,并与系统后台同步。系统持续比对人员实时位置与围栏边界关系,如果出现越界行为,将在平台地图界面标注红色高危点位,并同步触发三级响应机制。一级响应为后台弹窗警示,二级响应为移动端安全员震动提醒,三级响应则联动现场广播与闪灯报警,并可按需触发断电等紧急停机操作。为避免误报,系统融合移动速度分析与行为识别机制,如人员越界速度低于 1 m/s ,系统将判定为可能误入,联动最近视频点位实时画面进行二次确认。系统还支持“越界预警+视频回溯”组合机制,在人员离开限制区后自动生成事件录像,并记录入系统日志供后续审查。

2.2 设备违规操作识别

施工机械设备的违规操作是引发施工事故的重要诱因,尤其是塔吊、履带吊、混凝土罐车等重型设备在运行过程中,姿态异常或超载运行可能造成设备倾翻、结构冲击或人员伤害。基于此,系统在关键设备上安装姿态传感器、载荷传感器及陀螺仪模块,实时采集倾角、摆动幅度、运行速度、载荷变化等核心参数,数据采样频率为 10 次/s 。系统内置基于专家规则的安全阈值库,如塔吊倾角大于 15° 、吊钩摆幅超过最大允许范围、载荷超过额定值的 80% 持续 10 s 以上,即触发违规操作判断。如果识别为异常状态,系统立即启动语音报警,通过设备内置喇叭播放提示语音,并将异常参数自动上传至后台数据库。后台同时锁定当前操作日志,包括设备编号、操作员 ID、违规时间点与对应参数变化趋势,供事后溯源与责任划分。

2.3 智能风险预警

传统安全管理多依赖历史经验与人工判断,缺乏前瞻性与系统性,难以对隐性风险做到有效预测。本系统引入基于机器学习的智能风险预测模型,通过对施工现场长期积累的多维数据进行训练,实现风险趋势识别与预报功能。系统采用 LSTM(长短期记忆网络)对环境温度、湿度、风速、作业密度、设备运行状态、人员行为频率等十余项关键参数进行动态建模,每小时进行一次风险指数计算,输出未来 $6\sim 24$ 小时的高风险时间段和空间分布图。模型训练数据来自施工现场实测数据与历史事故案例数据集,模型预测准确率稳定在 87% 左右。以高温风险为例,当系统连续监测到气温超过 35°C 、湿度大于 85% 且人员心率频率异常上升,系统将主动判断中暑风险等级,并生成预警建议,包括调整作业时间、缩短连续作业时长、增加补水频率等措施推送至 APP 终端和大屏控制台。系统还支持

风险分布图与施工计划联动显示,使管理人员可视化安排低风险时段作业,降低人员负荷^[5]。

3 实地测试与应用成效

本系统在某省重点高速公路项目中进行了为期 3 个月的实地试点,覆盖施工区域面积超过 12 万 m^2 ,共布设 UWB 人员定位标签 215 个,传感器节点 156 组, AI 视频识别终端 60 套。运行数据显示,系统整体预警准确率达到 94.6% ,误报率控制在 2% 以下,关键功能运行稳定、响应高效。人员越界行为显著下降,由平均每周 16 起减少至 4 起,下降幅度达 75% ,尤其在爆破区和吊装作业区预警效果明显。设备异常操作识别功能协助发现载荷超限与倾角异常共 69 起,避免了数起潜在设备事故;安全员对现场异常的响应平均用时由传统的 5 分钟压缩至 1 分钟以内,处理效率提升 80% 。此外,智能风险预测功能为施工计划优化提供了支持,施工单位据此调整高温高湿时段施工安排 12 次,未发生与中暑相关的健康安全事件。系统联动推送预警信息累计超过 320 条,触发自动语音警报 102 次,系统日志记录与图像回溯功能被用于 6 起现场问题调查,有效提升了事件处置的可追溯性与证据支持水平。根据现场管理人员反馈,系统上线后,安全员日均巡查次数由原来的 6 次减少至 4 次,巡查覆盖区域更具针对性,安全管理工作负担明显减轻,工作效率提高约 35% 。

4 结束语

基于物联网技术构建的公路工程施工现场安全预警系统,通过感知层、网络层、平台层与应用层的协同运作,实现了对人员、环境与设备的全方位智能监控与预警。实地测试表明,该系统提升了预警准确率与响应速度,有效降低了安全事件发生率,减轻了安全管理人员工作负担。未来,可进一步融合多源异构数据,优化算法模型,提升系统自适应能力,推动公路工程安全管理向智能化、精细化方向持续演进。

参考文献:

- [1] 王军.公路工程施工安全管理及风险预警系统的构建[J].大众标准化,2024(18):83-85.
- [2] 郭晓炜,贺静,李倩.高速公路改扩建施工区安全风险预警系统应用研究[J].公路,2025,70(02):323-327.
- [3] 苏志华.山区高速公路施工安全预警及防护新技术应用[J].交通世界,2025(Z2):15-18.
- [4] 纪国栋,叶聿森.公路施工安全事故诱因与预警管理的探讨[J].汽车周刊,2025(05):180-182.
- [5] 王康,信聪.BIM技术在高速公路施工安全管理中的应用[J].汽车周刊,2025(06):81-83.