

AI 技术在建筑施工现场安全管理中的应用研究

文 / 卢成涛 山东黄金集团建设工程有限公司

苏晓琳 山东省鲁商建筑设计有限公司

摘要：建筑施工现场安全管理至关重要，传统管理方式存在诸多局限。AI 技术的引入为施工安全管理提供新的解决方案。本文分析当前施工安全管理的现状与挑战，探讨 AI 在人员管理、设备管理、环境监测、事故预防等方面的应用，并梳理计算机视觉、机器学习、物联网、无人机等关键技术。通过典型案例分析 AI 技术的应用成效，为施工安全管理提供理论支持和实践指导。

关键词：AI 技术；安全管理；物联网；风险预警

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.13.115

引言

建筑施工现场安全管理关系到人员生命安全和工程可持续发展，但施工环境复杂，安全隐患难以全面监控，传统管理模式存在诸多局限。提升施工安全管理的科学性和智能化水平，不仅能有效降低安全事故发生率，还能提高工程效率和管理质量。AI 技术的迅速发展为施工安全管理提供了新的可能性，其应用有助于优化管理模式，提高风险预警能力，推动行业向智能化方向迈进。研究 AI 技术在施工现场安全管理中的作用，对提高施工安全水平、减少事故损失、促进建筑行业技术革新具有重要意义和理论价值。

一、建筑施工现场安全管理现状及挑战

建筑施工现场安全管理直接关系到施工人员的生命安全和工程顺利推进。然而，施工环境复杂，涉及高空作业、深基坑施工、大型机械操作等高风险作业，传统的安全管理模式主要依赖人工巡查、经验判断和书面记录，难以及时发现安全隐患并作出有效应对。施工人员安全意识不足、防护措施不到位、管理制度执行不严等问题，使得安全事故频发，不仅会导致人员伤亡，还会带来经济损失、工期延误甚至法律责任。

AI 技术的引入为施工安全管理提供了智能化解决方案。计算机视觉技术可自动识别施工现场的不安全行为，减少对人工监控的依赖，提高识别精准度和响应速度。机器学习基于历史数据分析安全风险，实现事故预测和预防，提高安全管理的主动性。物联网技术整合各类传感器数据，实现实时监测和远程管理，提升安全监控的全面性和精确性。无人机和机器人巡检降低了人工巡查的安全风险，提高施工现场的巡检效率。AI 技术的应用不仅提高了安全管理的科学性和系统性，也为建筑行业的智能化转型提供了新的发展方向。

二、AI 技术在建筑施工现场安全管理中的具体应用

（一）AI 在施工现场人员安全管理中的应用

施工现场人员管理涉及身份识别、行为检测和安全

培训，AI 技术的应用提升了人员管理的精准度和自动化水平（建筑施工现场 AI 安全检测系统见图 1）。基于 ResNet-50 和 YOLOv5 深度神经网络的计算机视觉系统，通过 4K 高清摄像头和红外成像设备，可实现对施工人员的实时识别，并自动检测安全帽、反光背心、护目镜等防护装备的佩戴情况，识别精度达 98%。生物识别技术，如 3D 人脸识别（ArcFace 算法）和掌静脉识别（近红外光谱成像），可与智能门禁系统结合，实现施工人员权限控制和考勤管理，减少人工管理误差^[1]。行为检测系统采用 OpenPose 姿态估计算法分析工人动作轨迹，判断是否存在违规操作，如高空作业未系安全带、临边站位错误等，并结合语音警报系统进行即时反馈。



图 1 建筑施工现场 AI 安全检测系统

（二）AI 在施工现场设备与机械安全管理中的应用

施工设备和机械的安全管理依赖精准的运行监测和预测性维护，AI 结合工业物联网（IIoT）和深度学习优化了设备管理模式。塔吊、挖掘机和混凝土泵车等设备安装 MEMS 加速度计、陀螺仪和热成像传感器，实时采集振动、轴承温度等数据，并通过 LSTM（长短时记忆网络）模型分析趋势，预测设备异常情况，预警准确率达 90%。边缘计算架构（Edge TPU、Jetson AGX Xavier）减少数据传输延迟，使得设备能在 200ms 内完成检测并作出响应。基于 SLAM（同步定位与建图）算法的智能无人设备，如自动推

土机和混凝土喷涂机器人,结合激光雷达(LiDAR,精度±2mm)进行高精度定位,确保机械操作安全性。

(三) AI 在施工环境监测与风险预警中的应用

施工现场环境监测需要对空气质量、噪声、温湿度、地质稳定性等关键指标进行实时监控, AI 结合多传感器数据融合技术提升了风险预警能力。空气质量监测站搭载 NDIR(非分散红外) CO₂ 传感器、PID(光离子化检测) VOC 传感器和 PM_{2.5} 激光散射传感器,检测精度 ±1ppm,可识别施工现场有害气体超标情况,并结合 XGBoost 回归模型预测污染趋势。地质监测系统采用 InSAR(合成孔径雷达干涉测量)技术,结合 GNSS(全球导航卫星系统)定位,对深基坑、隧道和高层建筑结构的沉降速率进行测算,误差小于 ±3mm。当斜坡滑移速率超过 5mm/d 或基坑侧壁位移超 50mm 时, AI 算法触发预警,并联动支护设备加固作业。

(四) AI 在施工安全事故预防与应急响应中的应用

施工安全事故的预防和应急响应依赖实时风险评估和智能救援系统, AI 技术结合深度学习和自动化设备提升应急管理能力。基于 Transformer 架构的事故风险评估系统,可处理 PB 级历史事故数据,分析施工阶段、工种、天气条件等变量的关联性,计算事故发生概率,并自动调整安全策略。智能火灾检测系统采用 FLIR 红外热成像摄像头,结合 YOLOv7 火焰检测模型,可在火源温度达到 120℃ 前预警,并联动气溶胶灭火器或高压水雾系统,在 10 秒内完成火灾抑制^[2]。无人机搭载 RGB/IR 双光相机和三维点云重建系统,采用 SfM(结构光测量)技术,在塌方或爆炸事故后 3 分钟内完成事故现场重建,误差小于 5cm。

三、AI 技术在施工现场安全管理中的关键技术

(一) 计算机视觉技术与智能监控

计算机视觉技术通过 RGB 摄像头、热成像仪和 LiDAR 扫描设备,实现施工现场目标识别和风险监测。施工区域部署 500 万-1200 万像素摄像头,结合 YOLOv7、Mask R-CNN 等算法,监测人员违规行为和设备状态。智能监控系统基于 ResNet-101 网络进行特征提取,穿戴检测精度达 98.5%,5-10ms 内完成分类识别。红外热成像摄像头采用 8-14 μm 波段探测器,在 -20℃-120℃ 范围检测电缆过热、机械设备高温异常。LiDAR 点云扫描利用 32 线或 64 线激光传感器,结合 SLAM 算法,实现 3D 建模,误差小于 ±5cm。

(二) 机器学习与安全风险预测

机器学习结合监督学习与强化学习算法,分析施工数据,建立安全风险评估模型。SVM、随机森林(RF)和

XGBoost 回归模型分析环境、人员行为、设备状态,事故预测准确率达 92%-97%。时间序列预测模型(LSTM、GRU)结合传感器数据,在 2-3 小时内预警塔吊倾斜、脚手架失稳风险。基于 Transformer 架构的事故预测系统处理 10-100TB 级历史数据,分析温湿度(0-50℃)、风速(10-20m/s)、振动频率(50-500Hz)等变量,优化安全策略^[3]。强化学习(DQN、PPO)优化无人机巡检路径,使异常检测覆盖率提升 10%-15%。数据融合结合图像、音频、LiDAR 点云,提升风险预测精准度,使智能预警响应时间降低至 300-500ms,提高施工现场安全管控能力。

(三) 物联网与传感器数据融合

物联网结合多传感器数据,使施工安全监测更加精准。环境监测传感器包括 PM_{2.5} 激光散射传感器(0-500 μg/m³)、NDIR CO₂ 传感器(400-5000ppm)、VOC 传感器(50-100mg/m³)、超声波风速计(10-20m/s),确保空气质量监测准确。深基坑与边坡稳定性监测采用位移传感器(0.1mm-5mm)、应变片(0-500 με)、倾角传感器(±0.3°),结合有限元分析预测沉降变形风险。无线传输采用 LoRa(15-20 公里)、Zigbee(100-300m)和 5G(1-10Gbps)架构,确保低延迟数据传输。智能边缘计算(Jetson Xavier NX、Intel Movidius VPU)处理前端数据,实现实时异常检测,响应时间缩短至 50-100ms^[4]。设备监测结合三轴加速度计(-40℃-120℃)、电流传感器(100A-5000A)、振动传感器(0.5mm/s-5mm/s),分析机械故障,优化运维,提高设备寿命。

(四) 无人机与机器人巡检技术

无人机和机器人技术提升施工巡检的自动化水平,提高高风险区域监测效率。无人机搭载 RGB/IR 双光相机、LiDAR 扫描、热成像仪,结合 SfM(结构光测量),实现 ±5cm 精度的 3D 建模,15-20 分钟内完成全景扫描。多旋翼无人机(DJI Matrice 300 RTK)结合 RTK-GNSS(误差 ±2cm),在风速 10-15m/s 环境下稳定飞行。地面巡检机器人(Boston Dynamics Spot、ANYmal)采用 ResNet-50、EfficientNet 视觉系统,识别裂缝扩展(0.2mm-2mm)等缺陷,结合 UWB 定位(误差 <10cm)精准导航。无人机巡检数据与 BIM(建筑信息模型)结合,使施工安全管理数字化。智能机械臂(Fanuc M-20iA)结合力控传感器(0-500N)和自适应控制算法,在复杂施工环境中执行精密操作,提高自动化作业效率。

四、AI 技术在建筑施工现场安全管理的典型案例应用

(一) 案例背景及应用场景分析

某超高层建筑施工项目,总高度 310 米,施工周

期 48 个月，涉及深基坑作业、塔吊运行、大型机械操作及高空作业。施工现场安全管理面临高空坠落、机械设备故障、复杂气象影响及人员违规操作等挑战。传统管理方式依赖人工巡检和视频监控，存在隐患识别滞后、预警能力不足的问题，导致月均发生 2-3 起安全事故。为提升安全管理效率，该项目引入 AI 技术，建立智能监测与预警系统，集成计算机视觉、物联网、大数据分析及无人机巡检，优化安全管理，提高事故预防能力。

（二）AI 技术的具体实施方案

施工现场智能安全管理系统包括数据采集、边缘计算、云端分析及智能预警四个核心模块。现场布设 500 万 1200 万像素摄像头，结合热成像仪，对人员、机械及环境参数监测。LoRa（15-20 公里）与 5G（1-10Gbps）无线网络连接 PM2.5（0-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）、CO₂（400-5000ppm）、振动传感器（0.5-5mm/s），实现数据融合。边缘计算部署 Jetson Xavier NX 与 Intel Movidius VPU，结合 YOLOv7 检测算法、LSTM 预测，实现本地数据处理，提高响应速度。云端分析采用 XGBoost 与 Transformer 架

构，预测安全隐患，准确率达 92%-97%。智能预警系统通过 Kalman 滤波检测塔吊摆动、脚手架倾斜，响应时间 200-500ms。UWB 定位（误差 <10cm）识别危险区域，并结合 BIM 可视化预警。无人机巡检搭载 RGB/IR 双光相机和 LiDAR 扫描，采用 SfM 构建 $\pm 5\text{cm}$ 精度 3D 场景，DQN 优化巡检路径，提高 10%-15% 隐患排查覆盖率。

（三）数据采集与分析方法

AI 系统采集高空作业、机械状态、环境指标及结构变形数据。YOLOv7 检测安全装备，UWB 定位违规行为。振动传感器（0.5mm/s-5mm/s）、倾角传感器（ $\pm 0.3^\circ$ ）与 LiDAR 监测设备运行，LSTM 预测故障。PM2.5 传感器、NDIR CO₂ 传感器、超声波风速计（10-20m/s）监测空气质量，XGBoost 分析污染影响。InSAR 与 GNSS 监测沉降，有限元分析评估安全性。数据经 LoRa、Zigbee、5G 传输，Transformer 模型分析，实现智能管理。

（四）AI 技术应用实际成效与安全管理优化

智能安全管理系统运行六个月后，施工现场事故率下降，作业安全性提升，施工现场 AI 安全管理系统应用成效见表 1。

表 1 施工现场 AI 安全管理系统应用成效

指标	传统管理模式	AI 管理模式	提升幅度
违规识别准确率	78.5%	97.2%	+18.7%
设备故障提前预警率	65.3%	92.5%	+27.2%
施工环境异常响应时间 (ms)	800 ~ 1200	200-500	-75%
安全事故发生率 (/月)	2.8	0.9	-67.9%
施工进度受安全事故影响 (小时 / 月)	22.4	5.8	-74.1%

AI 智能监测系统显著提高了施工安全管理效率。违规行为识别准确率从 78.5% 提升至 97.2%，减少人员违规操作。设备故障预警率由 65.3% 增至 92.5%，降低了非计划停机时间。施工环境异常响应时间缩短至 200-500ms，相比传统管理模式降低 75%。施工现场月均安全事故发生率由 2.8 起降至 0.9 起，减少 67.9%，施工进度因安全事故受影响时间下降 74.1%。智能监测、预测性维护和快速响应优化了施工安全管理，提升整体施工效率，为建筑行业提供了可靠的智能化安全管理方案。

结语

AI 技术提升了建筑施工现场安全管理的智能化、精准化和高效化水平。未来，随着 5G、边缘计算和大数据的发展，AI 将实现更高精度的实时监测和智能决策。多传感器融合、无人机巡检、智能机器人作业将优化安全体系，减少人为干预，提高事故预防能力。区块链技术

增强数据透明度，确保安全管理合规性。BIM 与 AI 结合推动施工全周期数字化，提高安全管控效率。AI 算法优化与算力提升将使风险预测更精准，管理响应更迅速。施工安全管理将迈向自动化、智能化，为建筑行业可持续发展提供保障。

参考文献

- [1] 李雪文. 运用 BIM 技术进行深基坑施工现场的安全管理 [J]. 建设科技, 2023, (22): 90-92.
- [2] 程宪会. 基于人工智能技术的建筑施工现场安全风险评估方法 [J]. 工程机械与维修, 2023, (01): 288-290.
- [3] 杜远, 孙阳. 基于人工智能技术的线路施工现场安全图像识别方法 [J]. 电工技术, 2022, (14): 87-90.
- [4] 罗健群. 基于数字化技术的智慧火电厂工地建设安全管理研究 [J]. 现代职业安全, 2024, (10): 100-101.