智慧工地系统在建筑施工安全管理中的应用

李　波　洪丽娟

湖北沛函建工集团有限公司　湖北　宜昌　443000

摘　要：建筑施工安全事故频发的根源在于传统模式对现场动态风险感知迟滞、响应被动。智慧工地系统依托物联网、AI、BIM 及大数据技术，构建了感知泛在化、预警智能化和决策数据化的全新能力框架。本文系统分析了其技术架构与安全功能模块，重点阐述了人员在岗识别、机械运行监控、环境实时预警及危险源动态管控等核心场景。针对当前面临的技术集成难、数据孤岛及标准缺失等挑战，提出了向数据驱动安全治理转型的路径：包括构建一体化数据平台、建立协同预警响应机制以及培育智慧安全文化。旨在推动施工安全管理从“人防为主”向“技防与人防融合”的深层次变革，提升本质安全水平。

关键词：智慧工地；施工安全管理；物联网；人工智能；风险预警

引言

建筑施工长期高危，高处坠落等五大事故频发，尽管监管加强，但受现场动态变化、人员流动及环境复杂等因素影响，传统依赖人工巡查和事后追责的管理模式在风险感知的即时性与预判性上存在短板，难以根本遏制事故。近年来，物联网、人工智能、BIM 及大数据等技术的发展为破解这一困局提供了新路径。智慧工地系统应运而生，通过部署智能传感器、视频监控及边缘计算节点，将物理工地实时映射至数字空间，并利用算法模型实现风险识别、评估与预警，构建起“感知—分析—响应”的闭环智能体系。这不仅是技术工具的叠加，更标志着安全管理从经验驱动向数据驱动、从被动响应向主动预防的治理范式转型，有望显著提升施工安全水平。

1 智慧工地系统的技术架构与安全功能体系

1.1 系统的基本架构与运行逻辑

智慧工地系统并非单一软件或硬件，而是一个“端—边—云”协同的分层分布式系统。其基本架构由四个层级构成：感知层负责通过各类传感器、摄像头、定位装置和射频识别（RFID）标签采集施工现场的原始数据，涵盖人员位置信息、设备运行参数、环境监测数据和视频图像流；传输层依托无线网络、5G 或局域网将采集的数据安全、低延迟地汇聚至边缘节点或云端平台；平台层负责数据的存储、清洗、整合和计算，部署各类算法模型实现数据的语义理解和风险推理；应用层面向安全管理人员提供可视化界面、预警推送和决策支持功能。运行逻辑可以概括为“实时采集—自动识别—智能研判—分级预警—闭环处置”，形成从风险感知到消解的完整回路。

1.2 安全管理的核心功能模块

针对施工安全管理的典型需求，智慧工地系统可解构为五个核心功能模块。人员安全管理模块以人员实名制为基础，集成定位与生物识别技术，实现作业人员出入管控、在岗状态监测、安全防护品佩戴检测和危险区域闯入报警。机械设备安全监控模块通过在塔吊、升降机等大型设备上安装倾角传感器、力矩限制器和风速仪，实时监控运行姿态和荷载状态，在超载或超限时自动报警并联动控制。环境安全监测模块利用气体传感器、扬尘监测仪和温湿度计，对有毒有害气体浓度、粉尘含量和微气候条件进行不间断监测，当环境参数超过预设阈值时自动触发疏散预警[1]。危险源动态管理模块通过 BIM 模型关联现场风险点，建立危险源电子台账，实施巡查任务自动派发和隐患整改状态追踪。应急指挥模块集成视频会商、广播系统和人员定位信息，在紧急状态下提供态势综合显示和快速疏散引导。

1.3 系统应用对安全管理效能的提升机理

智慧工地系统提升安全管理效能的机理可以从三个维度理解。时间维度上，系统将风险识别从“事后调查”和“事中巡查”前置为“事前预判”，使管理介入点大幅提前，切断了“隐患—险情—事故”的演化链条。空间维度上，系统打破了人眼巡查的视野局限和物理围挡的空间阻隔，使隐蔽工程、高空作业面和大型设备结构内部的运行状态进入管理视野，实现了风险感知的全域覆盖。认知维度上，系统通过对多源异构数据的

融合分析，能够揭示单一感官无法捕捉的关联风险模式——如某区域人员聚集密度、设备负荷和环境温度三者同步升高时坍塌风险的倍增效应——从而辅助管理者做出更准确的综合判断。

2 智慧工地系统的核心安全应用场景

2.1 人的不安全行为智能识别与干预

智慧工地系统对不安全行为的管控已从简单的“定位打卡”深化为“行为语义理解”。借助部署在关键作业面的高清摄像头和边缘 AI 算法，系统能够自动识别未佩戴安全帽、未系挂安全带、临边防护缺失、禁烟区吸烟、起重臂下站人等典型违章行为，识别准确率在理想光照条件下已达到较高水平。更为先进的是行为轨迹分析——系统通过超宽带（UWB）定位技术实时采集每个工人的三维坐标，结合电子围栏定义安全作业区和禁区，当工人进入危险区域或出现长时间静止（可能晕倒）等异常状态时，系统在秒级内向本人及管理人员推送告警。这种实时干预改变了传统安全巡查“抓到一次算一次”的随机性，形成了持续在线的行为约束力。

2.2 机械设备运行安全实时监控

大型施工机械的安全运行直接关系到群死群伤风险的控制。以塔吊为例，智慧工地系统通过加装幅度传感器、高度传感器、回转传感器、起重量传感器和风速传感器，实时采集塔吊的五项运行参数，在驾驶室电子屏上直观显示当前工况安全区间。一旦超负荷、超力矩或风速超限，系统不仅发出声光报警，还能自动切断危险方向的操作动作，实现“想违章也操作不了”的本质安全设计[2]。升降机监控同样实现了载重超限保护、楼层精准停靠和防坠落联动。更为关键的是，系统自动记录每台设备的累计运行时长和载荷谱，通过大数据分析预测关键部件的疲劳寿命，推动设备维保从“定时更换”向“状态检修”转变，有效降低了因机械故障导致的安全风险。

2.3 现场环境风险实时感知与联动响应

施工现场的环境风险具有突发性和连锁性，尤其在深基坑、隧道和地下工程中，有害气体积聚、氧气不足或地下水压突增都可能引发灾难性后果。智慧工地系统通过布设多参数气体检测仪、水位计和倾角仪，对环境指标实施不间断采集，监测频率可达秒级。系统内置风险演化模型，当监测值接近预警阈值时自动启动三级预警：一级预警推送现场班组长安排检查，二级预警启动局部停工并组织相关人员撤离，三级预警触发全工地紧急疏散并上报监管部门。与此同时，联动机制自动启动通风设备增开、基坑降水泵组加力等应急处置动作，抢在人工决策之前控制风险升级。

2.4 危大工程与危险源动态管控

危险性较大的分部分项工程是安全管理的重中之重。智慧工地系统将危大工程的专项施工方案、验收记录和监测数据统一纳入电子化管理。以深基坑支护工程为例，系统将支护结构的水平位移、竖向沉降、支撑轴力和地下水位等监测数据自动接入平台，与设计预警值进行实时比对，生成变化速率曲线和趋势预测。一旦速率异常加速，系统自动研判预警等级并向项目负责人推送处置建议。同时，系统对危大工程实施“全周期痕迹管理”，从方案编审、专家论证、安全交底到过程监测、阶段验收、完工销号，每个环节的时间、责任人和结论均不可篡改地记录在案，有效解决了传统管理中“方案和现场两张皮”的问题。

2.5 人员安全教育培训与智能准入

安全教育培训是提升工人安全素质的基础性工作。智慧工地系统将培训管理从“签字画押”的粗放模式升级为“能力画像”的精准模式。工人通过手机端或自助终端进行多媒体安全学习后，系统随机抽取试题进行考核，考核结果与工种、作业区域和危险源自动关联。对于特种作业人员，系统对接国家查询平台，自动核验证书真伪和有效期，到期前三十天推送复审提醒[3]。更为重要的是，系统建立“安全信用积分”机制，对违章行为扣分，对主动报告隐患加分，积分结果作为工人后续派工和评优的参考依据，形成正向引导与负向约束并重的安全教育生态。

3 智慧工地系统应用中面临的现实挑战

3.1 多源异构系统的集成难度

智慧工地系统涉及硬件设备供应商、软件平台开发商、通信运营商和系统集成商等多方主体，不同厂商的设备协议、数据格式和接口标准各不相同，“万国造”设备拼凑现象普遍存在。这种异构性导致系统集成过程中数据对接困难、通信协议转换复杂、系统间互操作性差，严重制约了整体效能的发挥。

3.2 数据孤岛与数据治理能力不足

数据是智慧工地发挥价值的燃料，但当前多数工地存在“重采集、轻利用”的倾向，采集到的海量数据沉淀在各自子系统内部，缺乏统一的数据治理架构进行汇聚和深度挖掘。数据标准不统一，同一字段在不同系统中命名迥异，数据清洗和融合的成本极高。数据质量也堪忧，传感器漂移、网络丢包和人为干扰导致的数据失

真时有发生，影响算法判断的可靠性。

3.3 技术成本与中小企业承受力

智慧工地系统的建设涉及大量硬件投入、软件开发、系统运维和技术人员配置，初始投资和持续运营成本均较为可观。对于资金实力有限的中小型施工企业而言，高昂的信息化投入与投标阶段不断压缩的利润空间构成尖锐矛盾。这在一定程度上导致了智慧工地应用“头部企业过剩、中小企业匮乏”的两极分化格局。

3.4 标准规范滞后与制度适配不足

智慧工地系统作为一种新生事物，其技术标准和验收规范还处在“一事一议”的阶段。系统应包含哪些基本功能模块、数据的存储周期和传输频率应如何规定、预警处置的时间节点如何界定等基础性问题，在国家和行业层面缺乏统一的标准支撑。

4 深化智慧工地安全应用的实施路径

4.1 构建统一数据中台，打通信息孤岛

破除数据孤岛的关键在于建设企业级或项目级的数据中台，实现所有子系统数据的统一接入、标准化清洗和规范化存储。数据中台采用统一的物联数据接入协议，将各厂家的异构数据转换为标准格式，建立统一的设备、人员、位置、告警等主数据管理，确保跨系统数据的一致性和可理解性。以“一数一源、一源多用”为原则，各业务应用层共享同一数据底座，消除重复录入和数据不一致问题。

4.2 建立分级预警与快速响应机制

技术系统的价值最终通过人的有效响应来实现。项目应建立与之适配的“蓝—黄—橙—红”四级预警分级制度，每一级别明确触发条件、推送对象、响应动作和反馈时限。预警信息通过平台、短信和语音广播三路并行推送，确保关键人员不错过[4]。系统自动追踪每条预警的处置闭环情况，对超时未处置的预警逐级上报至项目负责人乃至公司安全总监，借助管理压力倒逼响应时效提升。

4.3 推动轻量化、模块化方案降低应用门槛

针对中小企业成本敏感的特点，设备厂商和平台服务商应开发轻量化、可配置、模块化的智慧工地解决方案。允许企业根据项目的风险等级和实际需求，按需选配功能模块，采用“基础平台免费 + 增值功能按需付费”的 SaaS 模式，降低初始投资门槛。政府层面可通过专项资金补贴或税收抵扣等方式，对中小企业智慧化转型给予适当支持。

4.4 加快标准制定与数据安全治理

行业主管部门应加快推进智慧工地系统技术标准的编制工作，统一数据接口、设备编码、预警分级和验收评估等基础规范。同步建立智慧工地系统的分级认证制度，对系统功能完备性和数据安全性进行权威测评。在数据安全方面，制定施工安全数据的分类分级保护规则，明确哪些数据可公开、哪些需脱敏、哪些应严格保密，防范数据泄露和滥用风险。

4.5 培育智慧安全文化，实现人机深度融合

智慧工地系统的最高境界不是“机器取代人”，而是“人机协同”。企业应着力培育智慧安全文化，引导管理人员和一线作业人员正确理解系统的辅助决策角色。通过定期的数据解读会和安全复盘会，向工人直观展示系统如何发现隐患、如何避免事故，让工人切身体会到技术手段是保护他们安全的“隐形护盾”而非“电子监工”，从而主动接纳和配合系统的运行。

5 结语

智慧工地系统通过“人技融合”路径，利用感知泛在化、预警智能化和决策数据化，有效弥补了传统管理在风险感知时滞、视野局限及经验误差等方面的短板。本文梳理了其技术架构、功能模块及人员、设备、环境等应用场景，揭示其提升安全效能的机理，并针对集成难度、数据孤岛、成本及标准滞后等挑战提出实施路径。需强调的是，智慧工地的本质是赋能而非替代。技术工具虽能放大人的感知与决策能力，但安全责任主体仍为人。只有将系统输出的数据智慧转化为具体的管理行动与安全文化，才能真正实现施工现场从“被动应对风险”向“主动驾驭风险”的根本转变，从而为建筑业高质量发展筑牢坚实的安全基石。

参考文献

[1] 丁烈云, 周诚, 叶艳兵. 数字建造与施工安全智能化管控研究综述 [J]. 土木工程学报,2023,56(7):1-12.

[2] 方东平, 张一鸣, 李楠. 建筑安全管理的数字化转型: 概念、框架与路径 [J]. 清华大学学报 (自然科学版),2024,64(2):201-211.

[3] 黄志坚, 何清华, 杨明. 基于计算机视觉的施工现场不安全行为识别方法 [J]. 中国安全科学学报,2023,33(5):167-174.

[4] 刘刚, 王要武, 李忠富. 物联网 +AI 技术在塔吊安全监控中的应用研究 [J]. 建筑机械化,2025,46(1):32-38.