

智慧建造驱动的建筑施工健康、安全与环境 (HSE) 动态监控与智能预警机制研究

汤琪¹ 姚俊杰²

1.湖北文理学院理工学院 湖北 襄阳 441000

2.湖北联投汉江投资有限公司 湖北 襄阳 441000

【摘要】：建筑施工领域本身具有高风险特性，这和传统健康安全环境管理方式存在的结构性局限冲突愈发尖锐，智慧建造技术的系统融合为解决这一困境开创了全新思路。依托建筑信息模型、物联网以及地理信息系统等技术，构建感—知—析—警—控一体化动态监控框架，并且采用三角模糊，熵权法优化失效模式与影响分析模型，以此对施工现场风险实施动态量化评估，进而构建起四级智能预警机制与多源异构数据融合决策辅助系统，这显著推动施工全周期内健康安全与环境风险的主动预防与精准管控。

【关键词】：智慧建造；健康安全与环境管理；动态监控；智能预警；失效模式与影响分析

DOI:10.12417/2811-0528.26.13.081

引言

建筑工地现场环境变化多样且危险作业集中，传统健康安全管理靠人工巡查和事后处理，存在监督不及时、风险响应慢、信息沟通不畅难题，无法满足现代大型复杂工程项目管理要求。智慧建造技术出现为施工安全管理带来全新变革，不过目前研究较零散多关注单一技术局部改进，缺乏技术整合、数据支撑与智能决策协同系统化方案，迫切需要建立覆盖施工全周期健康安全与环境动态监测与智能预警综合体系。

1 智慧建造驱动 HSE 管控的框架设计与技术集成 <1>

1.1 智慧建造核心技术体系

在建筑业朝着技术密集型方向深度转型的这股浪潮当中，智慧建造技术体系依靠建筑信息模型、物联网、地理信息系统、射频识别以及云计算等关键技术，通过多种技术相互融合构建起覆盖施工全周期的智能管控架构。建筑信息模型作为数字化载体，把施工现场的空间结构、设备分布以及人员动态整合在三维信息平台，为健康、安全与环境管理提供精确的数据基础。物联网传感网络持续采集现场各类风险参数，射频识别技术实

现人员位置与设备状态的实时监控，地理信息系统在空间维度对数据进行关联分析和可视化展示，云计算平台为海量异构数据的存储、处理以及共享提供弹性算力支持。多技术协同破解传统管理模式里信息分散、数据孤立的难题，推动健康、安全与环境管理从经验导向转变为数据与模型双驱动的管理范式。

1.2 感—知—析—警—控一体化总体架构

面向建筑施工健康、安全与环境管理的复杂性与动态性需求，感，知，析，警，控一体化架构把现场风险管控分解成感知、认知、分析、预警和控制这五个功能层级，各层级依靠数据驱动来实现有序衔接，一起保障全流程闭环管理目标能够达成（如图1所示）。感知层借助分布式传感器网络实时采集人员行为、设备状态以及环境危害等现场数据，为整个体系提供数据支撑；认知层利用建筑信息模型与地理信息系统对多源数据进行空间关联和语义解析，赋予原始数据管理价值；分析层通过改进失效模式与影响分析模型对风险进行动态量化评估，输出结构化风险判断结果，预警层依据风险等级自动触发差异化警报；控制层将指令精准传达至责任人并联动现场应急设施采取主动措施，进而实现从风险识别到现场处置的全程贯通。

<2>

作者简介：汤琪（1992.08.28），男，河南信阳，汉，武汉理工大学，硕士研究生（毕业）湖北文理学院理工学院，助教，智慧建造；姚俊杰（1990.02），女，湖北襄阳，汉，武汉交通职业学院，专科（毕业），湖北联投汉江投资有限公司，助理工程师，城市更新。

项目信息：湖北文理学院理工学院 2025 年度校级科学研究一般项目（2025XJYBKT010）

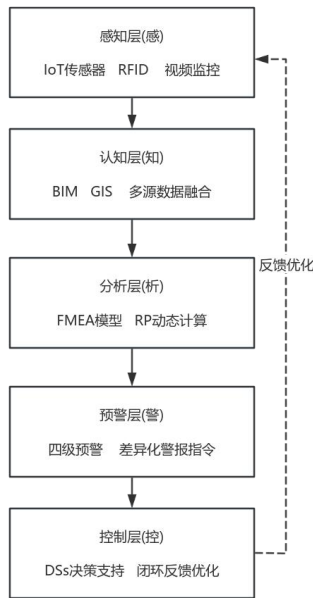


图1 感—知—析—警—控一体化总体架构

1.3 人员—设备—环境三维监控实现路径

建筑施工现场的健康安全与环境风险主要来自人员操作不当、设备状态失常以及环境指标超限这三个核心方面，针对这三个方面分别设计差异化实时管控措施是提升整体管理效能的关键所在。人员管控方面，运用深度卷积神经网络对视频图像开展智能分析，自动识别未按规定佩戴防护用品、擅闯危险作业区等典型违章行为，同时融合超宽带定位技术实现对人员位置实时追踪与接近危险源的预警，进而将人的不安全因素纳入动态监管体系。设备管控方面，通过振动传感器与工况监测模块持续采集塔吊、深基坑支护等关键设备运行数据，异常状态立即触发报警系统以避免设备故障演变为连锁性事故。环境管控方面，粉尘仪、气体检测仪及噪声监测仪共同组成环境监测网络，同步追踪多种污染物的浓度与强度，一旦监测结果超出安全标准，系统将按预设方案启动分级响应并自动控制通风及喷淋装置进行主动防护，这三维管控路径协同运作共同构建施工现场全方位风险精准防控体系。

2 基于 FMEA 的 HSE 动态风险识别与量化评估

2.1 FMEA 方法在施工 HSE 中的适用性分析

失效模式与影响分析方法是从事航空航天领域的可靠性工程发展而来，它的基本思路是对系统里面潜在的失效模式做系统性识别、分类以及影响评估，通过计算风险优先数来优先控制高危的失效模式，这一方法和建筑施工健康、安全与环境管理方面的需求高度契合。施工现场存在的风险种类比较多且原因较为复杂，人员违规操作、设备出现故障以及环境发生变化

都是典型的失效模式，其严重性、发生概率和检测难度这三项指标恰好对应健康、安全与环境管理当中的风险后果评估、概率分析和监测能力评价。传统的失效模式与影响分析方法采用的是静态评分，没办法表现出施工现场风险状态的动态变化情况，而把实时监测数据动态融入严重性、发生概率和检测难度的评估体系，能够解决这个问题，让风险评估从定期静态分析转变为连续动态跟踪，极大提高健康、安全与环境风险管理的效率和准确性。<3>

2.2 失效模式库构建与 RPN 动态计算

动态风险量化评估的核心要点是失效模式库的系统性建设，此过程需要融合行业规范、专家意见和历史事故资料，对施工阶段人员、设备、环境这三类失效模式进行系统梳理并分类存储。人员失效模式主要体现为防护用具佩戴不当、违规进入高危区域、高处作业未系安全带等状况，设备失效模式包含起重机械超负荷作业、脚手架缺少连接构件、基坑监测点异常位移等情形。环境失效模式则涵盖有害气体浓度过高、粉尘积聚至危险水平、高温高湿导致作业人员中暑等情况。基于这个模式库，风险优先数通过严重度、发生概率与检测难度三个参数的乘积来确定，这些参数值依靠传感器实时数据、RFID 追踪信息及视频智能分析结果进行持续更新，以此确保风险优先数能根据现场实际情况实时调整，进而实现风险等级的自适应更新与预警的准确发布。

2.3 三角模糊—熵权法驱动的风险预警阈值确定

施工现场健康安全与环境风险评估长久以来存在专家主观判断和客观监测数据难以有效融合的问题，三角模糊，熵权法的运用给这个问题提供了科学的解决办法。三角模糊数理论把专家对严重度、发生可能性以及难检度的语言评价转化成模糊数区间，有效量化了定性判断里的不确定性与模糊性，让专家经验能够以数学形式被纳入风险计算模型。熵权法依据风险指标监测数据序列的信息熵值客观确定权重，权重大小由数据离散程度决定而非主观赋值，进而避免了传统层次分析法中权重确定的主观偏差。两种方法相结合实现了定性专家判断和定量实时数据的深度融合，通过统计分析和模糊综合评价确定各级预警阈值，使预警触发标准具备科学性、客观性以及到现场动态变化的自适应能力，为四级预警体系的精准运行提供了可靠的阈值依据。

2.4 风险监测—分析—警报—反馈闭环预警流程

要想最大化实现风险管控效能，就得把监测、分析、警报和反馈这四个环节融合成紧密衔接的闭环机制，要是任一环节缺失，预警系统就会陷入被动应付的局面。如图2所示，监测环节依靠感知层传感器网络持续获取人员、设备以及环境的多

维实时数据,以此保障风险信息的完整性与连续性,分析环节基于改进后的失效模式与影响分析模型对监测信息开展动态风险优先数计算与等级判定,然后输出规范化的风险评估报告。警报环节会依据风险等级自动激活差异化预警指令,通过移动终端、现场广播以及管理平台向责任人精准分发包含风险位置、类别、级别和应对方案的结构化预警信息。反馈环节要求责任人员在指定时间内反馈处置结果,处置记录会自动存档构建可追溯的健康、安全与环境事件数据库,并且通过数据累积持续优化失效模式库与预警阈值参数,推动整个预警体系进行自适应迭代优化。

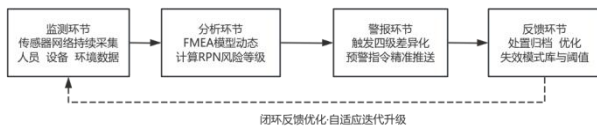


图2 风险监测—分析—警报—反馈闭环预警流程

3 HSE 智能预警机制设计与决策支持

3.1 四级预警指标体系构建

智能预警机制想要高效运作得依靠科学完备的预警指标体系,依据风险优先数评估结果和施工现场风险演变特征,把健康、安全与环境预警划分成蓝、黄、橙、红这四级预警,不同级别对应不同的风险阈值范围、响应时长以及处置权限,从而构建起分级明晰且责任明确的管控机制。蓝色预警针对常规风险隐患,要求班组安全员在限定时间内完成自主排查与整改,黄色预警表示较大风险状态,需要项目安全管理部门介入实施专项检查,橙色预警反映重大风险临界点,必须启动应急预案并停止相关作业区域施工,红色预警表明发生紧急险情,需立即启动全面应急响应程序同时上报主管部门。该预警指标体系的建立融合人员操作失误次数、设备运行异常程度以及环境危害因子超标水平这三项关键要素,运用三角模糊,熵权法实时调节各要素指标权重,让预警触发标准能根据施工进度与现场环境变化实现自适应调整。<4>

3.2 多源异构数据融合与决策支持系统

施工现场健康、安全与环境管理包含传感器监测、射频识别追踪、视频智能分析、建筑信息模型空间数据以及人工巡检报告等多种异构信息,完成这些信息的规范整合与深度关联是构建高效决策支持体系的关键前提。统一的健康、安全与环境

参考文献:

- [1] 雷俊.(2020).基于智慧建造技术的建筑施工 HSE 监控与预警研究.(Doctoral dissertation,西安建筑科技大学).
- [2] 毛行波.基于智慧建造技术的建筑施工 HSE 管理体系构建[J].建筑与装饰,2022(18):187-189.
- [3] 潘登.基于 BIM-GIS 数字建造融合的公路工程变更动态成本追溯系统研究[J].工程技术研究,2025(13).
- [4] 崔咏颂.基于 BIM 技术的 LNG 接收站工程进度管理应用分析[C]//2025 智慧设计与建造经验交流会论文集.2025.

监控信息模型框架通过制定标准化数据接口和语义映射规范,把各感知终端原始数据转化为格式统一且语义明确的结构化信息,为后续分析提供基础数据支撑,基于证据理论的多源信息融合算法。在这基础上对多维度数据进行综合研判,能显著提高单一感知方式在复杂环境下的风险识别准确性,决策支持系统将融合后的风险评估结果与建筑信息模型三维空间数据匹配,以可视化方式展示现场风险分布状况,为管理人员提供从风险识别、等级判定到处置建议的全流程决策支持,推动健康、安全与环境管理决策从经验判断转向数据与模型驱动的科学模式。

3.3 预警响应闭环与智慧 HSE 管理组织保障

预警机制的落地实施不仅依赖技术系统的精准运行,更需要与之深度耦合的扁平化智慧健康、安全与环境管理组织架构与制度保障体系作为支撑。组织架构层面,设立智慧健康、安全与环境管理岗位,明确数据采集人员、风险分析工程师以及应急响应指挥官的职责边界与协同机制,确保预警信息能够在最短时间内触达具备处置权限的责任主体;制度保障层面,制定涵盖技术配置标准、预警响应时限、处置记录归档以及绩效考核评价的建筑施工健康、安全与环境智慧监控实施规范,将技术系统运行要求转化为可执行的管理制度约束。预警响应闭环流程的持续优化依托历史处置数据的积累分析,通过对预警准确率、响应时效以及事故发生率等关键绩效指标的动态追踪,定期评估预警阈值设定的合理性并驱动模型参数迭代更新,最终形成全面感知、智能预警、科学决策、精准执行以及反馈优化的持续改进闭环,推动建筑施工健康、安全与环境管理向智慧化、精准化迈出实质性步伐。<5>

4 结语

智慧建造技术进行系统整合后,为建筑施工健康安全与环境管理体系革新提供有力支撑。感,知,析,警,控一体化框架有效突破了施工现场数据流通存在的障碍,基于三角模糊,熵权法优化的失效模式与影响分析模型,实现了风险评估从静态离散向动态持续的转变,四级预警机制和多源异构数据融合决策支持系统协同运作,促使管控模式从事后补救转向事前防范。未来研究可进一步探索数字孪生技术与健康安全环境实时监控深度结合途径,持续优化智能预警模型在复杂施工场景下的自适应性能。