

资源的浪费甚至事故的发生。而智能化开采的解决方法就是应用自适应控制的方法,把固定的操作模式变成灵活的操作方式,使煤炭开采由原来的粗放型“一矿一策”转变为精确化的“一面一策”,甚至是更加细致的“一米一策”。

在截割工艺改进方面,智能调高实现从“盲割”到“精切”。基于先进的煤岩识别技术和记忆截割算法,可以及时判断出煤层情况并给出最优截割路径,在煤层有变化情况下,滚筒高度会以毫秒级别进行微调,保证切割面平直的同时又使顶煤遗留在最低程度以及底煤损失最少,最大限度提高煤炭回收率;而在遇到地质条件较差地方时,则不会盲目作业,而是采取“人为操作+智能化辅助”方式。利用三维可视化界面,系统把隐藏的地质风险显示给操作者,使操作者做出正确判断,在恶劣情况下也能保证正常、安全地进行截割。

支护工艺智能化是实现由“被动支撑”到“主动防护”。智能支护系统不是采用固定支护参数,而是根据顶板岩性和埋深以及构造应力场等因素进行实时监测,给出最佳支护参数。对于破碎顶板,自动增加支架动作次数以及加大初撑力,形成良好防护;而对坚硬顶板,则自动减少支护力度以节省能源消耗,在经过断层、陷落柱等地质构造时,使用数值模拟方法预测顶板运动趋势,及时改变支护方式及推进速度,预防冒顶发生,达到支护与地质条件良好配合。

在特厚煤层综放工作面,放煤工艺智能化改革破解了长期以来困扰行业的“煤矸混杂”。基于“时间-空间-运能”的三维协同优化策略,系统对整个放煤过程进行全方位、全过程管理。根据顶煤放出曲线以及后部输送机载荷情况,自动计算并设定每个放煤口开启时间和开度。这不但大大增加原煤回收率,而且减少矸石混入,提高原煤质量,而且避免由于放煤不均造成后部输送机超载或空转,实现经济和安全效益双丰收。

3.4 人机协同安全保障体系的创新构建

智能化开采的美好愿望是达到“少人化、无人化”,但并不是简单地用机器代替人,而是要进行一场以建立完善的人机协同安全保障为基础的重大革命。“技术赋能、管理重塑、文化升维”三位一体,形成多重防护屏障,在高产的同时把人的生命放在第一位。

从技术角度来看,智能化工作面形成“天眼+地网”的全方位防护。先进的人员定位如同看不见的眼睛时刻监控

每一个工人位置。如果有人进入禁区或者机器有异动,系统可以在极短时间内发出警报并且立即停止运转,从而切断事故发生源。而摄像头安装上 AI “智慧大脑”,不仅可以二十四小时监控还可以自主发现工人未戴安全帽、违章跨越等不良习惯以及设备偏离轨道、断裂等问题。同时,环境监测系统对瓦斯浓度、粉尘密度以及温度等进行实时监控,如果出现异常,立即启动通风、喷雾降尘设备,把事故消除在萌芽状态,实现了由“亡羊补牢”到“未雨绸缪”。

从管理上讲,智能化使煤矿安全管理模式由原来的“人盯人”到现在的“以数据为中心”的变化。以前的安全管理主要依靠经验和巡查,有漏洞也有滞后性。现在基于智能安全管理系统,管理者可以通过数字孪生可以看到井下实际情况并且能够准确地判断出隐患并采取措施。系统自动生成的安全日报以及风险评估报告为安全管理提供有力支持,做到闭环管理。同时利用虚拟现实技术开展安全培训,用真实感强的场景模拟透水、火灾、冒顶等情况,使职工身临其境学习如何应对突发情况,大大提高了全体员工的实战能力。

从文化上讲,“科技兴安”成为智能化开采的新生态。伴随着大量智能化设备的应用,一线生产者身份也发生巨大改变:“操作工”变成了“监控员”、“决策者”,这对他们的安全意识以及能力都提出新的挑战。企业开展全面智能化培训工作,使他们掌握数据分析、远程控制以及故障判断等一系列新技术,培养出一批既有专业知识又能分析问题并且能够解决突发情况的技术人才。“科技兴安”文化使人们不再只是单纯的操作者与被操作对象,而是相互信任并能够共同合作的一体化伙伴,这是智能化开采得以长期稳定发展的最根本力量所在。

4 结语

在今后发展中,伴随着不断的技术进步和完善,智能化开采会越来越成熟,对中国煤炭行业发展起到更加积极的作用,使其在全球能源转型过程中处于更有利的位置。

参考文献

- [1] 张展华. 智能化综采工作面顶板及围岩控制技术研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2025, (24): 43-45.
- [2] 郑彦鹏. 综采工作面智能化开采技术的应用与优化 [J]. 能源与节能, 2025, (12): 289-292.
- [3] 武瞰, 庞如英. 煤矿智能化综采工作面区域安全评价指标体系构建 [J]. 山西焦煤科技, 2025, 49 (12): 40-43+52.

Research on Intelligent Early Warning Technology and Prevention Mechanism for Safety Risks in High-rise Residential Structure Construction

Liqun Yu

Ji'an Yinluling Construction Engineering Co., Ltd., Ji'an, Jiangxi, 331511, China

Abstract

For a 30-story shear wall residential building with significant elevation differences, frequent process overlaps, and temporary components subjected to structural loads, an integrated approach of "risk identification—intelligent early warning—closed-loop prevention and control" was proposed. The study first identified seven critical risk categories through literature review and two rounds of Delphi method: falls, collisions, formwork expansion, deflection amplification, scaffolding instability, slab-column shear failure, and early-age strength lag. A four-dimensional early warning indicator system was subsequently developed, incorporating personnel behavior, equipment status, environmental conditions, and structural performance. After AHP weighting and temporal weight iteration, the system was embedded with a BPNN-RF-SVM soft voting integration model to achieve dynamic inference at 5-minute granularity. Field validation conducted from April to August 2025 demonstrated improved system performance: warning accuracy increased from 75% to 92%, accident rate decreased from 1.2% to 0.3%, and closed-loop rectification rate rose from 80% to 98%, with stable performance even under high-wind conditions and nighttime casting scenarios. This research provides a replicable risk quantification and real-time intervention paradigm for high-rise residential construction.

Keywords

high-rise residential buildings; construction safety; risk identification; intelligent early warning; closed-loop prevention and control

高层住宅结构施工安全风险智能预警技术及防控机制研究

余立群

吉安市银庐陵建筑工程有限公司, 中国·江西吉安 331511

摘要

面向高差大、工序交叉频繁且临时构件参与受力的30层剪力墙住宅, 提出“风险识别—智能预警—闭环防控”一体化方法。首先以文献归纳与两轮德尔菲法收敛出坠落、碰撞、胀模、挠度放大、脚手架失稳、板柱冲切及早龄期强度滞后7类关键风险; 继而构建人员行为、设备状态、环境条件、结构性能四维预警指标体系, 经AHP赋权与时段权重迭代后嵌入BPNN-RF-SVM软投票集成模型, 实现5 min粒度动态推断。2025年4—8月现场验证显示, 系统预警准确率由75%升至92%, 事故发生率自1.2%降至0.3%, 隐患整改闭环率由80%提至98%, 且在高风及夜间浇筑场景下保持稳定。研究为高层住宅施工提供了可复制的风险量化与实时干预范式。

关键词

高层住宅; 施工安全; 风险识别; 智能预警; 闭环防控

1 引言

我国高层住宅持续向百米量级攀升, 高空作业面扩大、临时支撑与永久结构交替受力, 使传统“经验+规范”式安全管理难以实时匹配动态风险。南京市雨花台区30层剪力墙项目即因塔机交叉、泵送侧压峰值误判及风荷载耦合, 曾在同类工地引发模板胀模与脚手架整体失稳事件。将物联网、多源数据融合与机器学习引入施工安全管控, 已成为行

业共识, 但现有研究多聚焦单一风险或静态阈值, 缺乏面向工序场景、具备时段敏感性的实时预警与可执行干预链条。本研究以现场连续监测数据为基础, 构建风险识别—智能预警—闭环防控一体化技术体系, 旨在为高层住宅施工提供可量化、可迁移的安全管理升级路径。

2 高层住宅结构施工安全风险识别方法研究

鉴于高层住宅结构施工呈现空间高差大、工序交叉频繁、临时构件参与受力的情境, 本研究把高空作业、结构荷载阶段性变化、临时支撑体系稳定性作为识别主轴。结合南京市雨花台区某30层剪力墙住宅项目现场调研, 汇集2025年4

【作者简介】余立群(1991-), 中国江西吉安人, 本科, 一级建造师, 从事建筑工程及管理研究。

至8月塔机运行日志、模板支撑配置、浇筑顺序与楼层风速监测等资料,进行风险语境校准。方法上,运用文献归纳法梳理规范、事故调查与论文中的致损机理,形成初始事件池;引入德尔菲法这一多轮匿名咨询以凝聚专家判断,邀请结构设计、施工技术、监理与安全管理等4类共16名专家开展2轮迭代,按可检验性与可操作性收敛并修订条目。进一步观察显示,关键风险因素集中在塔机吊装与临边交叉作业诱发的坠落与碰撞,泵送侧压力峰值误判导致的模板胀模,不对称施工阶段荷载路径迁移引起的楼层挠度放大,外脚手架在风荷载耦合作用下的整体稳定性削弱,楼面集中堆载触发的板柱冲切超限,以及早龄期强度发展滞后导致的临支提前卸载隐患。由此把文献证据、专家共识与项目数据进行交叉校验,构建具备工序指向性与时段敏感性的风险清单^[1]。

3 高层住宅结构施工安全风险智能预警技术体系构建

3.1 预警指标体系建立

鉴于南京市雨花台区30层剪力墙住宅项目存在高差大、工序交叉与临时支撑参与受力的施工语境,本研究把预警指标库建立在人员行为、设备状态、环境条件以及结构力学性能四个维度之上,强调指标与工序场景的直接对应关系。人员行为维度聚焦关键作业面的风险暴露度,把高处作业合规率、临边电子围栏触发频次、塔机回转半径下交叉作业干涉事件数以及危险区域停留时长作为核心,依靠超宽带定位、视频识别与门禁数据来进行获取。设备状态维度服务于塔机吊装与混凝土泵送场景,把塔机力矩利用率、风速联锁动作频次、回转制动异常次数、输送管线侧压力峰值及其上升速率以及模板支撑立杆竖向位移作为监测对象,数据来源涵盖塔机黑匣子、压力传感与位移监测。环境条件维度紧扣楼层风环境与降雨过程,把楼层风速与阵风系数、降雨强度与温度湿度曲线纳入指标,采用分层布点的风速监测与现场气象站联动来进行采集。结构力学性能维度面向阶段性荷载路径变化,把楼层竖向挠度增长速率、板柱冲切安全储备表征量、混凝土早龄期强度发展指数以及外脚手架全局侧移与加速度作为重点,借助应变计、位移计与成熟度测点来获得^[2]。

为避免指标堆砌并让权重分配契合风险机理,采用层次分析法对四维指标开展成对比较,层次分析法是一种基于专家判断的多准则权衡方法,可凭借判断矩阵反映相对重要性。本研究邀请结构设计、施工技术、监理与安全管理等4类共16名专家结合事故机理与项目数据给出判断矩阵,经一致性检验后形成维度权重与二级指标权重,同时设置分级阈值以适配4至8月高风与高强度泵送的时段特征。在运行侧,把指标设计为可测性、敏感性与可干预性并重,采样粒度在人员与设备侧设定为1s,环境为10s,结构为5min,结合滑动窗口平滑与突变识别来提高告警稳定性;在14层及以上楼层与台风预警日开展时段性权重迭代,使环境与设

备权重得到提升,而夜间浇筑阶段把人员与结构权重维持在更高占比。阈值标定依托规范限值与项目历史分位统计进行双源校准,触发后的告警级别能够把处置动作映射到停吊、减载、延迟拆模与加固复核等明确路径,从而形成面向作业工序且具备时段敏感性的可执行预警指标体系^[3]。

3.2 预警模型算法选择与优化

围绕雨花台区30层剪力墙住宅的多源异步数据,本研究把BP神经网络、随机森林与支持向量机在非线形刻画、样本规模敏感性及推断时延上开展针对性评估,并据此构建以融合为核心的预警方案。考虑类不平衡与时变漂移,采用滑动窗口把1s与10s序列对齐至5min尺度,提取力矩利用率增长率、侧压力峰值梯度与阵风系数突变幅等特征,经z-score归一化进入训练。参数优化层面,在BP中配置3层感知机并引入focal loss,在随机森林中设置代价敏感权重,在支持向量机中选用RBF核并实施Platt标定,三类模型由贝叶斯优化搜索超参数并采用时间分块交叉验证。部署阶段把软投票作为集成机制,按延时与召回表现动态分配权重,并在台风预警与夜间浇筑场景启用阈值迁移,以偏向高等级告警并维持快速响应。

$$L = \arg \max_{k \in \{1,2,3,4\}} \sum_{m \in \{BPNN, RF, SVM\}} \alpha_m P_m (y=k | x_t)$$

其中, L 表示预警等级, k 为候选级别, m 为基础模型, α_m 为模型权重, P_m 为对应模型对级别的后验概率, x_t 为时刻 t 的特征向量。

3.3 预警系统架构设计

面向南京市雨花台区30层剪力墙住宅的多源异步数据环境,本研究把智能预警系统构建为数据采集—预处理—分析—预警—可视化的闭环架构。数据采集层把塔机黑匣子、输送管线侧压与上升速率传感、模板支撑立杆位移计、UWB人员定位、视频识别、分层风速与气象站以及混凝土成熟度测点进行接入,在塔机基座与回转平台、泵送站、外脚手架立面以及14层及以上楼层布设边缘网关,把设备状态、人员行为、环境条件与结构力学性能的原始序列稳定上传。边缘计算层把多协议接入、时间同步与数据质控纳入统一处理,依靠滑动窗口平滑与突变识别去滤除噪声与漂移,把1s与10s粒度对齐到5min窗口,并在本地生成力矩利用率增长率、阵风系数突变幅、侧压力梯度等特征,同时把丢包重传与断点续传作为保障机制以应对施工现场网络波动。云端分析层把流式数据总线、时序数据库与模型服务进行解耦部署,选用集成式预警模型承载多源特征的在线推断,并把场景标签与阈值迁移策略与模型权重联动,使台风预警与夜间浇筑时段的高等级告警更快被触发。预警决策层把告警等级与处置路径绑定到停吊、减载、延迟拆模与加固复核等动作,设置规则引擎把模型输出映射为任务单,联动塔机连锁与泵送控制台的控制接口,同时把人员短信与移动端弹窗作为现场触达。可视化层把BIM模型当作空间载体