

## 智慧消防在高层建筑消防安全管理中的应用研究

张琦

应急救援中心(消防支队)特勤综合应急救援站, 山东 东营 257000

**[摘要]**高层建筑消防安全管理面临垂直空间蔓延特性与风险要素动态耦合的双重挑战,传统防控模式因设备离散部署与人工经验主导的决策机制,难以应对电气线路老化、装修材料热解等隐性风险。智慧消防体系通过构建多模态传感网络与分布式决策中枢,整合物联网终端实时捕获建筑微环境参数,依托边缘计算节点实现异常热积累趋势的本地化预判。智能算法解析多源异构数据流,建立材料热解动力学模型与人员疏散效能评估矩阵,数字孪生平台通过多物理场耦合仿真优化防火分区动态调整策略。突破传统研究的技术协同壁垒,提出涵盖异构设备协议标准化、多系统协同响应机制与自适应疏散路径规划的递进式实施框架,构建风险认知-智能决策-动态干预的理论范式,为超高层建筑实现全要素感知、全流程管控的智慧消防体系奠定方法论基础。

**[关键词]**智慧消防; 高层建筑; 安全管理

DOI: 10.33142/sca.v8i6.16823

中图分类号: TU976.5

文献标识码: A

### Research on the Application of Smart Firefighting in Fire Safety Management of High-rise Buildings

ZHANG Qi

Emergency Rescue Center (Fire Brigade) Special Operations Comprehensive Emergency Rescue Station, Dongying, Shandong, 257000, China

**Abstract:** The fire safety management of high-rise buildings faces a dual challenge of vertical spatial spread characteristics and dynamic coupling of risk factors. Traditional prevention and control models are difficult to cope with hidden risks such as electrical circuit aging and decoration material pyrolysis due to the dispersed deployment of equipment and the decision-making mechanism dominated by human experience. The intelligent fire protection system, by building a multi-mode sensor network and a distributed decision-making center, integrates the Internet of Things terminals to capture the building microenvironment parameters in real time, and relies on edge computing nodes to achieve the localization prediction of abnormal heat accumulation trend. Intelligent algorithms analyze heterogeneous data streams from multiple sources, establish a material pyrolysis kinetics model and a personnel evacuation efficiency evaluation matrix, and optimize the dynamic adjustment strategy of fire zones through multi physics coupling simulation on the digital twin platform. Breaking through the technological collaboration barriers of traditional research, a progressive implementation framework covering heterogeneous device protocol standardization, multi system collaborative response mechanism, and adaptive evacuation path planning is proposed. A theoretical paradigm of risk cognition intelligent decision-making dynamic intervention is constructed, laying a methodological foundation for the intelligent fire protection system of super high-rise buildings to achieve full element perception and full process control.

**Keywords:** smart fire protection; high-rise building; safety management

#### 引言

高层建筑竖向通道引发的烟囱效应加速火势蔓延,传统消防模式受限于人工巡检滞后性与系统孤岛化缺陷,难以及时阻断初期灾变。智慧消防整合物联网感知节点与智能分析中枢,建立全周期防控机制,通过多源传感数据融合解析电气线缆热积累趋势、装饰材料热解特征等隐性风险,驱动智能喷淋阀组预动作与防烟分区自适应调整。探究智慧消防的技术适配性,不仅破解传统管理响应迟滞难题,更推动消防体系向数据驱动的预测性防控转型,为超高层建筑构建空间耦合的智能安防体系。

#### 1 高层建筑消防安全管理现状分析

当前高层建筑消防系统呈现多维度管理困境,技术迭代迟缓与制度创新乏力形成双重制约。系统架构存在显著

的多系统异构性特征,火灾报警主机、水喷淋控制柜及防排烟风机等关键设备因制造商协议差异形成信息壁垒,标准化接口缺失导致跨平台数据交互受阻,难以实现火情发生时的整体联动响应。设备维护流程过度依托人工经验驱动,常规巡检受限于检测工具精度不足与高空作业安全保障缺失,无法有效识别电气线路绝缘层碳化、防火阀机械卡阻等隐蔽性缺陷,且故障处置涉及多部门协调审批,应急响应时效性难以满足高层建筑火灾快速蔓延特性。消防档案管理仍停留于纸质文档与电子表格并存阶段,数据录入存在主观性偏差与更新延迟现象,风险评估模型因缺乏实时人流密度、装修材料热释放速率等动态参数支撑,导致风险预判与实际灾变场景出现偏差。技术认知层面,管理人员对分布式光纤测温、视频火焰识别等新型监测技术

掌握不足，部分项目虽部署智能应急照明系统，却因系统调试规范缺失与日常维保脱节，造成设备功能退化与误报率显著升高，技术先进性未能转化为实际防控效能，传统管理模式与智慧城市发展需求产生结构性矛盾。

## 2 高层建筑消防安全管理应用智慧消防的必要性

### 2.1 提高火灾预警能力

高层建筑因广泛使用有机保温材料、装饰性高分子复合材料等易燃物质，且多填充于幕墙夹层与管线井道等隐蔽空间，导致初期火情隐蔽性强、蔓延速度快。智慧消防预警体系通过构建多物理场耦合感知矩阵，在建筑立体空间分层部署激光散射式烟粒探测、气体色谱分析装置及分布式光纤测温系统，实时监测夹层材料热解特征。针对地下仓库封闭空间火情感知难题，系统采用毫米波雷达穿透探测技术结合红外热成像，有效识别通风死角区域的异常升温现象。边缘智能网关嵌入材料热历史分析算法，通过解析电缆沟内绝缘材料老化释放的特征气体浓度梯度，预判墙体夹层电气线路短路风险。深度残差网络模型融合建筑空间拓扑数据，构建电缆桥架弯折部位涡流热积累预测模型，结合 UWB 定位技术追踪封闭区域设备运行状态。当探测到幕墙空腔挥发性有机物浓度异常时，系统自动激活相邻防火分区水幕隔离装置，同步推送三维火源定位矢量图至消防控制中心，为应急处置争取关键时间窗口，显著提升复杂空间结构下的火灾防控主动性。

### 2.2 降低管理成本

智慧消防通过智能化技术重构传统运维体系，形成全要素成本控制机制。在设备检测领域，轨道式检测装置集成激光测距与多光谱成像模块，沿预置导轨对电缆桥架、风管夹层等复杂空间实施亚毫米级精度扫描，运用图像语义分割算法自动识别螺栓松动、涂层剥落等微观缺陷，同步生成数字化检测报告，显著降低高空吊篮作业频次与特种设备租赁费用。设备健康管理方面，数字孪生模型融合设备振动频谱、介质流量曲线等时序数据，采用马尔可夫链模型预测密封件弹性衰减趋势，结合故障树分析确定最佳维护窗口期，实现备件库存周转率优化与紧急抢修频次压缩。能源管理中枢通过强化学习算法构建设备能耗特征图谱，动态调节消防水泵变频参数与应急电源充放电策略，在确保系统冗余度的前提下消除无效能耗。管理流程再造方面，区块链智能合约自动执行设备巡检计划审批、维修资金拨付等业务流程，通过流程自动化减少行政管理资源消耗，形成涵盖设备全寿命周期、多维度成本要素的集约化管理方式。

### 2.3 提高消防监督管理的效果

智慧消防监管体系通过多技术融合实现监管模式革新，构建起全要素穿透式管理体系。监管平台基于建筑点云数据与 BIM 模型配准技术，将防火分区、消防水箱容积等静态参数与烟感报警频次、水压波动值等动态数据三维可视化，支持监管人员通过混合现实 (MR) 设备透视建筑内部消防设施运行状态。联盟链架构实现分布式账本

存证，采用国密算法对维保人员生物特征、设备检测时间等关键信息进行加密锚定，形成不可抵赖的操作证据链，有效解决传统纸质签单易篡改、责任追溯困难等监管痛点。智能诊断矩阵整合设备响应延迟时长、维护工单闭环率等 12 项核心指标，运用贝叶斯网络构建单位安全态势评估模型，结合行政区域火灾历史数据生成风险等级拓扑图，实现监管资源智能调度。监管规则引擎内嵌消防法实施条例条款，自动匹配违规行为与处罚标准，同步触发限期整改指令与信用积分扣减程序，形成智能感知-自动研判-精准执法的闭环监管机制，显著提升执法规范化水平与监管威慑效能。

## 3 智慧消防在高层建筑消防安全管理中的应用策略

### 3.1 建立消防安全管理工作标准化管理体系

智慧消防标准化体系构建需突破传统管理方式，形成技术规范与管理流程的协同创新机制。在技术规范层面，需建立传感设备信号采样精度分级标准，解决多源异构数据时空对齐难题，制定基于 OPC UA 架构的系统互操作协议框架，消除不同厂商设备间的通信鸿沟<sup>[1]</sup>。数据治理标准应涵盖信息加密等级划分、边缘节点计算资源分配规则等核心要素，确保感知数据从采集到决策应用的全链路合规性。运维管理规程编制需纳入人机协同操作守则，明确智能诊断系统误报复核流程与人工介入优先级，设立设备离线容错阈值与降级运行预案。人员能力认证体系引入虚拟现实 (VR) 考核模块，构建智能疏散指挥、算法参数调优等专项技能评估矩阵，同步制定智慧消防工程师职业能力标准。认证体系构建应融合功能安全完整性等级 (SIL) 认证要求，建立涵盖电磁兼容性、故障失效模式的安全认证指标库，对 AI 决策模块增设可解释性评估条款，确保智能系统运行符合消防安全工程伦理准则，为技术应用划定明确的合规边界。

### 3.2 提高消防子系统的集成化管理程度

智慧消防集成化转型需建立跨系统协同的智能决策中枢，通过多模态协议转换技术破解设备异构性难题。针对消防报警主机、气体灭火控制器等设备通信协议碎片化问题，研发嵌入式协议转换模组支持 BACnet、KNX 等 12 种工业协议的无损转换，构建标准化数据中间件实现跨平台指令透传。数字孪生平台集成建筑结构点云数据与设备运行参数，建立多物理场耦合仿真模型，通过强化学习框架模拟电缆过热引燃、锂电池热失控等复合灾害演化路径，迭代优化防火卷帘联动延迟时间、排烟风机风量调节曲线等 132 项控制参数<sup>[2]</sup>。边缘智能网关嵌入设备冲突仲裁算法，采用分布式一致性协议解决多系统指令竞争问题，在本地实现喷淋系统启停与电梯迫降的时序逻辑优化。智能协同中枢构建设备效能评价指标体系，通过在线学习机制持续分析应急广播声压覆盖效果、疏散指示可见度等交互参数，自适应调整语音引导参数与光带闪烁频率，形成与建筑空间声光特性匹配的动态联动方案，显著提升多灾种耦合场景下的系统协同处置鲁棒性。

### 3.3 建立动态风险预警系统

动态风险预警系统的架构创新需突破传统评估方法的时空局限性,构建基于跨域数据融合的风险认知框架。系统采用多源信息融合引擎整合建筑结构应力分布、装饰材料热解特性曲线及供电系统谐波特征等内生风险要素,同步接入气象雷电定位网络、周边应急救援资源分布等外源数据,形成多维风险特征张量。通过知识图谱技术建立建筑功能属性与火灾致灾因子的关联规则库,利用时空注意力机制解析人员流动轨迹与设备运行状态的耦合关系,构建疏散路径通行能力衰减模型<sup>[3]</sup>。系统部署联邦学习框架实现跨建筑风险知识迁移,将历史火灾案例中的烟气毒性扩散模式、钢结构失效临界温度等隐性知识注入新建项目风险评估体系,结合碳化硅传感器捕捉的微米级悬浮颗粒物浓度梯度变化,实时更新风险演化态势推演模型。预警参数自适应调节器采用多智能体协同优化算法,在数字孪生环境中模拟不同建筑材料热释放速率与消防系统响应能力的博弈过程,自主优化防火卷帘降落时机与排烟阀开启策略的匹配关系,生成风险浓度等值面云图。系统联动建筑设备管理系统预调整高危区域正压送风量,激活防火水幕区域隔离功能,形成风险态势感知-防控策略迭代-物理空间干预的全链条预警响应机制。

### 3.4 实施消防设施全生命周期管理

消防设施全生命周期管理的数字化重构需贯穿设备流转全流程,形成闭环管控机制。采购环节构建供应商动态评估模型,集成质量缺陷数据库与行业黑名单信息,通过自然语言处理技术解析投标文件技术参数符合度,自动生成供应商信用评级图谱。设施入场时采用量子点光谱检测技术验证消防管材阻燃性能,结合激光三维扫描建立设备唯一性数字指纹,实现从生产源头到现场安装的全程可追溯。施工阶段部署智能施工监理系统,基于 BIM 模型与增强现实 (AR) 空间叠加技术,实时校验喷淋头安装间距与防火门开合角度,自动生成施工质量偏差热力图指导整改。运维期植入微型 MEMS 传感器监测消防水泵轴承摩擦系数变化,通过小波包分解算法识别叶轮气蚀初期征兆,结合设备维修知识图谱推荐最优修复方案。报废处置阶段引入材料基因工程技术,构建消防设施材质降解模型,智能分拣机器人依据金属疲劳度图谱与聚合物老化特征实施精准拆解,分离可循环利用的铜合金阀门与需无害化处理的含石棉密封件。全流程数据流通过抗量子计算加密的区块链存证,形成不可篡改的设备生命周期数字档案,为质量责任追溯与保险精算提供可信数据基底。

### 3.5 构建智能应急疏散体系

智能应急疏散体系的革新需突破物理空间与信息维度的双重限制,构建自适应灾变环境的多模态引导系统。

定位层采用相控阵定位技术融合 UWB 时域信号与视觉 SLAM 空间坐标,通过联邦学习框架优化复杂反射环境下的定位误差补偿模型,实现人员三维轨迹的亚米级精度追踪。路径规划中枢集成多物理场耦合模型,实时解算火灾热辐射通量对疏散通道可用性的影响系数,运用 NSGA-II 多目标优化算法生成兼顾疏散效率与安全冗余的路径集合,通过全息投影幕墙呈现动态逃生矢量指引。信息传达系统创新性采用声波涡旋定向传输技术,在嘈杂环境中实现 20 米距离的清晰语音播报,同步激活触觉反馈背心的振动编码系统,为听障人员提供空间方位触觉指引。疏散指挥数字孪生体加载建筑热力学仿真数据,预演不同排烟策略下的毒气扩散轨迹,智能调节防烟楼梯间正压送风量阈值,通过边缘计算节点动态优化各分区疏散批次间隔。电梯群控系统引入火灾强度预测模型,在确保轿厢安全的前提下智能分配消防员专用梯与残障人员疏散梯的运行逻辑,形成立体救援通道与水平疏散路径的时空协同网络,重构传统一刀切式疏散模式的固有缺陷。

## 4 结语

智慧消防深度融合物联网感知、数字孪生仿真与智能决策技术,重构高层建筑火灾防控体系,实现风险识别从单点探测向多维度认知跃迁。通过立体化传感网络捕捉电气弧光、材料热解等隐性风险,结合边缘计算实现隐患潜伏期的主动干预,推动防控模式从事后处置转向全过程管控。当前技术虽突破传统烟感报警局限,但跨系统数据壁垒与复杂场景推演精度不足仍制约效能释放,尤其在新型储能火灾、超高层烟控等特殊场景中,算法机理建模深度亟待加强。未来需重点攻克多源设备协议兼容性难题,研发融合物理机理的多灾种耦合推演引擎,构建兼容国际标准的法规框架,明确 AI 决策的容错边界与责任认定规则。同步推进消防工程与信息物理系统的跨学科教育,建立智能诊断算法调优、系统协同优化等专项能力认证体系。通过技术迭代、标准升级与人才储备的协同发展,推动消防安全管理向自主感知-智能决策-动态调控的智慧化形态演进,为超高层建筑、城市综合体等复杂空间构筑本质安全屏障。

### [参考文献]

- [1]徐晶.智慧消防在高层建筑消防安全管理中的应用研究[J].消防界(电子版),2024,10(17):59-61.
  - [2]付博.智慧消防在高层建筑消防安全管理中的应用研究[J].今日消防,2024,9(3):97-100.
  - [3]李羽.BIM技术在高层建筑消防设备安全管理中的应用研究[J].消防界(电子版),2024,10(20):31-33.
- 作者简介:张琦(1989.2—),单位名称:应急救援中心(消防支队)特勤综合应急救援站,毕业学校和专业:中国石油大学(华东)石油工程。