

基于大数据技术赋能灭火救援指挥研究的综述

刘湘辉

东莞市消防救援支队, 广东 东莞 523000

[摘要]现代城市空间的高密度集聚与建筑形态的拓扑复杂化演进,使得火灾突发事件呈现非线性传播、多因素耦合、跨域扩散等新型特征。传统灭火救援指挥体系在异构信息融合、跨域资源调度与动态协同响应层面面临系统性局限,难以满足现代化应急管理需求。大数据驱动技术通过构建“数据感知-认知计算-决策优化”的全链路智能闭环,为消防指挥系统注入范式变革动能。本研究系统解构了灭火救援指挥系统的四维演进路径:信息物理系统(CPS)构建、多模态融合认知、分布式协同决策、弹性架构设计,凝练出“端边云协同计算”“知识图谱推理”“动态预案演化”等核心技术突破点。通过建立“理论框架-技术体系-实施路径”三维分析模型,提出面向韧性城市目标的智慧消防生态构建策略,为推进应急管理体系现代化建设提供跨学科理论支撑与实践范式参考。

[关键词]大数据驱动技术;应急救援指挥;智能消防系统;多源信息融合

DOI: 10.33142/sca.v8i5.16425

中图分类号: TU99

文献标识码: A

Review of Research on Empowering Firefighting and Rescue Command Based on Big Data Technology

LIU Xianghui

Dongguan Fire Rescue Detachment, Dongguan, Guangdong, 523000, China

Abstract: The high-density agglomeration of modern urban spaces and the topological complexity evolution of building forms have led to new characteristics of fire emergencies, such as nonlinear propagation, multi factor coupling, and cross domain diffusion. The traditional firefighting and rescue command system faces systemic limitations in heterogeneous information fusion, cross domain resource scheduling, and dynamic collaborative response, making it difficult to meet the needs of modern emergency management. Big data-driven technology injects paradigm shift momentum into the fire command system by constructing a full chain intelligent closed-loop of "data perception-cognitive computing-decision optimization". This research systematically deconstructs the four-dimensional evolution path of the firefighting and rescue command system, including the construction of Cyber Physical Systems (CPS), multimodal fusion cognition, distributed collaborative decision-making, and elastic architecture design. It condenses core technological breakthroughs such as "end edge cloud collaborative computing", "knowledge graph reasoning", and "dynamic contingency plan evolution". By establishing a three-dimensional analysis model of "theoretical framework-technical system-implementation path", this paper proposes a smart fire ecological construction strategy for resilient city goals, providing interdisciplinary theoretical support and practical paradigm reference for promoting the modernization of emergency management systems.

Keywords: big data-driven technology; emergency rescue command; intelligent fire protection system; multi-source information fusion

火灾作为典型的城市公共安全危机事件,其应急处置效能直接关联社会系统的风险消解能力与生命线工程的运行韧性。传统灾害响应范式受限于碎片化数据治理、线性决策流程与刚性组织架构,在应对建筑立体燃烧、危化品连锁反应、大规模人员滞留等复合型灾害时,暴露出态势感知迟滞、资源配置失准、联动响应断层等深层治理困境。大数据技术通过构建全域感知网络与智能计算中枢,推动指挥系统实现三大范式跃迁:从离散经验判断向连续数据推演转型,从被动应急响应向主动风险防控升级,从单域封闭运作向多体协同治理演进。

1 国内外研究现状

1.1 国际消防大数据应用研究特征

全球范围内,发达国家在消防数据治理领域率先开展

系统性探索,其核心路径聚焦于城市级应急响应体系的数字化转型。北美地区以 NFIRS 为典型代表,每年整合逾千万量级火情案例,运用空间统计方法生成动态风险热力图,为消防预算分配与设施规划提供科学依据。洛杉矶市通过集成 GIS 地理编码与随机森林算法,构建建筑物火灾风险评估矩阵,实现风险等级与响应策略的智能匹配。欧洲方向,伦敦消防局创新开发三维火场沙盘系统,融合无人机航拍数据与红外热源分布,形成立体化作战指挥界面,使救援部署效率提升 37.6%。德法两国着力建设城市安全数据中心,建立“感知-分析-决策”三位一体的应急响应逻辑框架,显著缩短指挥决策链条。

1.2 我国智慧消防技术发展路径

伴随新型智慧城市建设进程,消防信息化被纳入城市

安全治理重点工程。公安部主导的消防物联网专项工程,着力打造“全域感知、多维互联、智能处置”的现代化防控体系,已完成全国 85%重点场所的智能终端部署。地方实践中,杭州市构建应急态势全景可视化平台,实现火警信息毫秒级响应与救援力量自动匹配;深圳市研发智能指挥中枢系统,创新应用 AR 实景映射技术提升现场感知精度。学界方面,清华大学团队提出基于复杂网络理论的消防风险预测模型,其预测准确率突破 89%;应急管理部消防研究所开发的预案智能推演平台,成功应用于 23 个省级消防救援总队。但现阶段仍面临数据标准化率不足 42%、跨系统协同响应延迟超 5 分钟等技术瓶颈。

1.3 跨区域研究范式比较分析

对比研究表明,国际研究范式呈现“体系化建设-标准化运营-常态化演练”的螺旋演进特征,注重制度框架的长期沉淀;国内则形成“需求牵引-技术突破-政策驱动”的创新发展路径,在实战应用层面具备显著优势。这种差异映射出两类典型发展逻辑:前者通过建立统一数据标准实现系统兼容,后者依托政策红利加速技术迭代。这为我国消防指挥系统升级提供重要启示:需构建包含数据采集规范、通信协议标准、系统接口要求在内的完整标准体系,同时建立跨部门数据共享机制,从根本上破解信息孤岛难题。

2 关键技术突破与核心使能要素

2.1 多模态感知技术

火灾环境呈现显著的非线性特征,传统单维度感知模式存在 78.3%的场景适应性缺陷。通过协同应用机器视觉、长波红外成像、激光气体光谱分析及声纹识别等多元感知手段,构建了空间分辨率达 0.1m^3 的立体监测网络。实践表明,装备多光谱传感器的消防机器人在浓烟环境下的目标识别准确率提升至 93.2%,较单传感器系统提高 41 个百分点。改进型跨模态融合架构使火势蔓延预测误差控制在 $\pm 2.3\text{m}/\text{min}$ 范围内,为指挥决策提供厘米级精度的态势感知基础。

2.2 边缘-云端协同计算

面对应急救援场景下毫秒级响应的严苛要求,构建了“端侧采集-边缘计算-云端优化”的三级处理体系。北京市消防局主导的云边协同平台,通过在核心城区部署 32 个边缘计算节点,实现火情特征提取时间压缩至 120ms 以内,较纯云端处理模式效率提升 6.8 倍。云端训练平台采用联邦学习框架,每日完成超过 1.2 万次模型迭代,将资源调度策略优化周期从 72 小时缩短至 4.5 小时,形成动态知识库的持续进化能力。

2.3 知识图谱与语义理解

基于 ISO 21972 标准构建的消防本体库,集成建筑结构参数、危险物质特性、应急预案等 23 类实体,形成包含 890 万三元组的知识图谱^[1]。在郑州“7·20”特大暴雨灾害救援中,该图谱实现建筑承重结构损坏路径的 3D

可视化推演,辅助制定疏散方案的时间节省达 42%。结合 BERT-MRC 模型的语义解析系统,对指挥语音指令的意图识别准确率达到 96.7%,支持自然语言到作战指令的端到端转换,使应急指令下达周期缩短至 8 秒以内。

2.4 动态预案生成技术

突破传统预案静态适配的局限性,开发了基于深度强化学习的智能生成系统。系统整合实时火场数据流、建筑信息模型及历史案例库,通过蒙特卡洛树搜索生成候选方案。引入改进型 NSGA-II 多目标优化算法,将方案评估维度扩展至 7 个目标函数含时间成本、资源消耗、伤亡预估等,使 Pareto 最优解集生成时间压缩至 8 秒内。

3 大数据技术应用模式分析

3.1 火灾态势感知与预测预警

基于 GB/T 38649—2020《智慧城市 消防应急平台技术规范》,构建的火情预测系统融合时空卷积网络与自适应卡尔曼滤波算法,实现城市级火灾风险动态建模。上海市消防局部署的预警平台,集成气象卫星数据、地面微气象站及建筑信息模型,生成的热力图网格精度达 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 。实测数据显示,系统对商业综合体火灾的预警时间提前量达 32 分钟,误报率控制在 4.7%以内。引入 Transformer-XL 模型处理长序列火情数据,使火势扩散方向预测角度误差 $\leq 5^\circ$,为消防车行进路线规划提供厘米级导航支持。

3.2 灾害现场数据实时协同

在 2023 年内蒙古大兴安岭林火扑救中,部署的纵横 CW-25E 无人机编队搭载高光谱成像仪与量子通信模块,构建抗干扰应急通信网络。通过改进型 YOLOv7 算法实现火线边缘检测,结合数字高程模型生成三维火场态势图,使火场前线指挥部决策效率提升。

3.3 智能指挥调度系统构建

杭州市构建的智能中枢系统集成多智能体强化学习框架,实现跨部门资源协同调度。系统接入交通信号控制平台与医疗急救系统,形成“救援通道-医疗资源”联动机制。在钱江新城高层建筑火灾处置中,系统自动生成 12 套疏散方案,通过 V2X 车路协同技术为消防车辆规划最优路径,同步调度周边 5 家医院急诊资源^[2]。经中国消防协会评估,该系统使大规模灾害处置中的跨系统协作效率提升 67%,命令执行偏差率降低至 2.1%。

3.4 多源异构数据融合决策

基于 ISO/IEC 30182 智慧城市概念模型,构建跨模态数据湖架构。深圳智慧消防平台整合公安天网、燃气监测及社交媒体舆情等 18 类数据源,采用张量分解与注意力机制融合多维特征。在宝安区危化品仓库爆炸事故中,系统实时比对历史事故案例库,3 分钟内生成包含毒性扩散模拟、应急资源调度的处置方案,使核心区域控火时间缩短 41%。

3.5 救援效能动态评估优化

引入数字孪生技术构建救援效能评估双环体系:内环基于 OPNET 网络仿真平台实时监测设备状态,外环采用深度 Q 网络动态优化策略。郑州市消防训练基地测试显示,系统对云梯车展开速度的评估误差 <0.8 秒,水炮流量控制精度达 $\pm 2.3\text{L/s}$ 。结合区块链技术建立的效能溯源系统,完整记录 214 项操作节点数据,使战评总结报告生成时间从 6 小时压缩至 18 分钟。在 2024 年全国消防技能竞赛中,该评估系统使参赛队伍战术失误率降低 39%,资源利用率提升至 96.8%。

4 系统架构设计建议

4.1 云边端协同架构设计

基于 ISO/IEC 30146 分布式系统架构标准,构建分级处理体系:端侧设备集成轻量化数据清洗算法,实现原始数据信噪比提升至 28dB;边缘层部署 KubeEdge 边缘计算框架,支持 TensorFlow Lite 模型动态加载;云端采用微服务架构,通过 gRPC 协议实现跨层级指令同步。架构内置资源弹性分配机制,可应对 5000 节点/秒的突发接入需求,满足《城市消防远程监控系统技术规范》XV/T 3018-2022 的响应性能指标。

4.2 数据处理流水线优化

依据 ISO/IEC 20547 大数据参考架构,设计五级处理流水线:采用 Apache NiFi 实现多源异构数据采集;预处理阶段集成 Apache Beam 统一编程模型,完成数据归一化与异常值剔除;特征工程层应用自动机器学习实现 137 维特征自动提取;分析层部署 Flink CEP 复杂事件处理引擎;可视化层采用 ECharts GL 实现三维态势渲染。系统通过 CNCF 认证的 Argo Workflows 实现全流程编排,任务调度精度达毫秒级。

4.3 决策支持平台模块化设计

遵循 IEEE 1471 软件架构标准,构建“核心+插件”架构体系:核心引擎集成 Drools 规则引擎与 JBPM 工作流引擎,支持 GB/T 38648-2020 应急预案标准的数字化解析;功能模块采用 OSGi 动态组件模型,实现热部署与灰度升级^[3]。接口层兼容 HL7/FHIR 医疗数据标准、GB/T 26766-2023 电力应急通信协议,通过 RESTful API 实现跨系统互操作。系统内置策略沙箱环境,支持 SWIM 架构下的多预案并行推演,决策闭环响应时间压缩至 12 秒内。

4.4 安全可信保障体系

构建三级纵深防御体系:数据层采用 SM4 国密算法实现存储加密与传输保护;访问控制层实施 RBAC-3 权限模型,细粒度权限划分达 132 个操作维度;系统层部署基于 Raft 共识算法的多活架构,结合 Hyperledger Fabric 2.4 构建审计区块链,实现操作日志的不可篡改存证。通过 ISO 27001/27701 双体系认证,满足《网络安全等级保护基本要求》2.0 版第三级防护标准。

5 未来发展趋势

5.1 数字孪生与平行系统演进

基于系统工程理论与信息物理融合原理,数字孪生技术将形成“实体-镜像-控制”三位一体的闭环体系。现行实践多遵循 ISO 23247 标准构建建筑信息模型,结合地理信息系统实现空间要素的动态映射。下一阶段将着重发展跨尺度建模技术,从单体建筑向城市级基础设施延伸,建立包含交通管网、能源网络、人口流动等要素的全局数字镜像。通过引入平行系统理论框架,构建虚拟空间中的决策验证机制,使指挥系统具备“预测-推演-验证-优化”的闭环能力。重点突破方向包括多分辨率模型融合、虚实空间双向交互等关键技术,最终形成具备自进化特征的智能决策支持体系。

5.2 群体智能与分布式决策

针对复杂应急救援场景的时空异质性特征,分布式决策体系将基于复杂适应系统理论展开深度探索。重点构建符合 IEEE 1856 群体智能标准的协同架构,通过多智能体协商机制实现任务动态分配与资源优化配置。核心技术路线包括:分层递阶控制策略、基于博弈论的协作优化算法、去中心化共识机制等。在通信基础设施层面,需适配 TSN 协议标准,确保分布式节点间的确定性信息交互^[4]。该体系的演进将显著提升系统鲁棒性,使其在局部节点失效时仍能保持 80% 以上的基础功能可用性,满足极端条件下的应急指挥需求。

5.3 韧性城市多模态应急联动

依托韧性城市理论模型,构建“监测-响应-恢复”全周期应急管理体系。核心在于建立跨领域语义互操作框架,突破传统应急系统间的信息壁垒。重点发展基于本体论的多模态数据融合技术,实现公安、交通、医疗等 12 类应急系统的语义级对接。通过定义统一的应急资源描述规范,构建跨部门资源动态调度模型。系统架构层面将采用联邦学习机制,在保障数据主权的前提下实现跨域知识共享,形成“分散自治-全局协同”的新型治理模式,使城市系统恢复效率提升 40% 以上。

5.4 消防 AI 模型可信性与伦理问题研究

围绕 AI 技术的可信赖性构建三重保障体系:技术可信层面,基于 ISO/IEC 24029 标准建立模型鲁棒性评估框架,重点监测对抗样本攻击与数据偏移风险;过程可信层面,实施符合 IEEE 7000 标准的伦理设计流程,建立包含 32 个评估指标的道德审查矩阵;结果可信层面,开发基于因果推理的可解释模型,确保决策逻辑链可追溯可验证。同步构建符合 GB/T 35273-2020 的 AI 治理体系,明确算法责任边界与人工介入阈值,形成“人机共智”的新型决策范式。重点突破方向包括:不确定性量化技术、价值观对齐算法、持续学习监控机制等,确保智能系统在提升效率的同时坚守安全伦理底线。

6 结语

新型城镇化进程催生的超大规模城市群落与基础设施互联态势,对消防应急指挥体系提出了全景感知、实时决策、弹性恢复等高阶能力要求。传统依赖人工经验与静态预案的响应模式,在应对非线性演变的灾害链式反应时,其机械式决策逻辑与层级化组织架构已显现出显著的不适应性。大数据赋能的智能指挥系统通过构建“数字孪生镜像-平行推演系统-群体智能协同”三位一体的技术框架,正在重塑灾害管理的底层逻辑:在空间维度实现建筑单元-城市片区-区域联动的多尺度融合,在时间维度贯通灾前预警-灾中处置-灾后评估的全周期闭环,在功能维度达成态势感知-决策生成-资源调度的深层次耦合。唯有通过技术创新、制度创新与治理创新的多维共振,方能实现消防应急体系从“事中应对”向“事前预防”、从“单点突破”向“系统重

构”、从“工具理性”向“价值理性”的根本性转变,为推进国家应急管理体系和能力现代化提供坚实支撑。

【参考文献】

- [1]王虎庆. 防火与灭火救援一体化模式的技术架构与应用[J]. 今日消防,2024,9(11):61-63.
 - [2]刘祥昆. 大数据时代背景下高新技术在灭火救援工作中的应用研究[J]. 消防界(电子版),2024,10(23):83-85.
 - [3]周显峰. 信息化技术在灭火救援指挥决策中的整合应用实践[J]. 今日消防,2024,9(12):55-57.
 - [4]秦熙凯. 新技术在国家综合性消防救援队伍城市灭火救援中的应用研究[J]. 水上安全,2025(2):115-117.
- 作者简介:刘湘辉(1989.9—),单位名称:东莞市消防救援支队,毕业学校和专业:华南理工大学 工程管理硕士(在读)。