

智慧消防的技术创兴驱动

甄国琴^{1*} 辜秋明² 许悦³ 曾佳焯⁴

厦门大学嘉庚学院

DOI:10.12238/ems.v7i6.13788

[摘要] 智慧消防技术作为应对城市化进程中火灾防控挑战的关键手段,正通过人工智能、数字孪生与物联网等技术的深度融合,推动消防体系从传统“人防”向“智防”转型。本文系统分析了智慧消防的技术创新驱动机制,结合上海、深圳等地的试点数据,验证了其在火灾风险预测与应急决策优化中的显著成效。研究显示,基于 Transformer-XL 架构的 AI 算法将早期火情识别窗口期缩短至 90 秒,烟雾识别准确率达 99.2%;数字孪生技术 (BIM+GIS) 通过量子计算辅助仿真,使火灾模拟时间从 8 小时压缩至 30 秒;边缘计算与物联网整合实现低功耗 ($\leq 0.1W$)、高密度 (1.5 节点/平方米) 覆盖,误报率降低至 3.8%。

[关键词] 智慧消防; 人工智能; 数字孪生技术; 物联网; 技术创新驱动

一、引言

随着城市化进程加速与建筑复杂度攀升,传统消防模式面临“响应滞后、防控粗放”的严峻挑战。据应急管理部统计,2023 年全国火灾直接经济损失达 48.6 亿元,其中 60% 的火灾因早期预警失效导致灾情扩大。与此同时,新型基础设施的涌现(如超高层建筑、地下综合管廊)对火灾防控提出了全域感知、智能决策的更高要求。在此背景下,以人工智能、数字孪生和物联网为核心的智慧消防技术,正推动消防体系从“人防为主”向“智防主导”的范式跃迁。

本文聚焦智慧消防技术创新的驱动机制,通过解构 AI 算法、数字孪生与边缘计算的技术融合路径,揭示其在火灾风险预测、应急决策优化等场景的应用价值。研究采用案例分析法与实证研究法,结合上海、深圳等地的试点数据,系统论证技术创新的经济社会效益,并提出标准化建设与生态协同的发展建议,以期智慧消防的规模化落地提供理论支撑与实践参考。

二、当前智慧消防领域的现状

当前智慧消防技术已形成“端-边-云”协同架构,在技术创新与政策驱动下实现阶段性突破,但仍面临多重发展瓶颈。

在技术应用层面,智慧消防体系已形成“端-边-云”协同架构,各层级技术的创新与融合为火灾防控提供了全新解决方案。感知层作为数据采集的基石,以 NB-IoT (窄带物联网) 智能传感器为核心,凭借其低功耗 ($\leq 0.1W$)、广覆盖 (单基站支持 10 万+终端) 的特性,广泛应用于温湿度监测、烟雾探测及气体浓度感知等场景。据统计,2024 年 NB-IoT 消防设备市场规模已达 87 亿元,年复合增长率超 25%。然而,设备协议碎片化问题成为制约发展的关键瓶颈。当前市场上存在 LoRa、ZigBee、Wi-SUN 等多种通信协议,30% 的终端因协议互不兼容而无法互联互通。例如,某大型商业综合体部署的传感器涉及 5 家供应商,其中两家设备因协议差异导致数据无法同步传输,需额外投入 15% 的集成成本进行协议转换,显著削弱了系统整体效能。

分析层依托人工智能算法实现火灾预警能力的跨越式提升。基于 Transformer 架构的深度学习模型,通过自注意力机制对多模态数据(如红外图像、声音频谱及环境参数)进行动态特征提取,显著优化了火情识别精度。以某省级消防平台为例,其烟雾识别准确率从传统 CNN 模型的 94.5% 跃升

至 99.2%,误报率降低至 3.8%。然而,跨区域数据共享的壁垒限制了模型的泛化能力。根据《数据安全法》与《个人信息保护法》,不同行政区域间的消防数据需通过联邦学习技术进行加密传输与分布式训练,但实际应用中仅 28% 的地方平台完成合规改造。例如,某跨省火灾风险预测项目因数据脱敏标准不统一,模型在未参与训练地区的识别准确率下降 6.7%,凸显隐私保护与数据利用的平衡难题。

决策层以数字孪生技术 (BIM+GIS) 为核心,通过构建建筑全息模型实现火灾动态仿真与应急策略优化。当前,该技术在重点建筑的普及率达 41%,如杭州亚运场馆通过集成 5G 通信与实时人流热力图,将应急响应时间缩短至秒级,疏散效率提升 40%。然而,高昂的部署成本阻碍了技术下沉。中小型场所单项目需投入超 50 万元用于 BIM 建模、传感器布设及算力配置,导致应用率不足 8%。以某历史街区改造项目为例,其数字孪生系统因成本超支被迫缩减 50% 的监测节点,火灾模拟精度随之下降 32%。相比之下,某化工园区通过边缘计算节点实现本地化数据处理,将预警延迟从 15 秒压缩至 2 秒,验证了“轻量化部署+云端协同”模式的有效性。

典型案例进一步佐证了技术应用的显著成效。杭州亚运场馆的数字孪生系统整合了 2.5 亿个数据点,实时监控 5000 余个消防设施状态,成功在演练中实现 0.3 秒内生成最优疏散路径;某化工园区采用 Matter 协议统一物联网设备标准,形成覆盖 15 平方公里的高密度感知网络,误报率降低至 3.8%。这些实践表明,技术突破需与成本控制、标准统一协同推进,方能实现智慧消防的规模化落地。

政策与市场驱动层面,国家《“十四五”国家消防工作规划》提出“2025 年建成 100 个智慧消防示范区”,北京、广东等 18 省市配套出台专项补贴 (最高 40%),加速技术落地。市场需求呈现爆发态势,2024 年市场规模突破 680 亿元,仓储物流 (年增 45%) 与古建筑保护 (年增 38%) 成为核心增长极。但《中国消防产业白皮书 2024》指出,中小企业因改造成本高、回报周期长,数字化改造意愿仅 43%,制约技术下沉。

三、技术创新驱动

在 AI 算法升级方面,通过构建多模态数据融合框架,新一代 AI 引擎可实现火灾风险的全要素感知。以 Transformer-XL 架构为例,其采用注意力机制对建筑结构数据(如材质耐火等级、通风系统布局)、历史火情记录(近十

年10万+案例库)及实时环境参数(温湿度、气体浓度等)进行动态权重分配,使早期火情识别窗口期从传统方法的5分钟缩短至90秒。例如,在上海市某高层综合体试点中,该系统成功预警3起初期电气火灾,响应时间较传统方式提升67%。此外,联邦学习技术的应用解决了跨区域数据孤岛问题,通过分布式训练模型整合北京、广州等8个城市的消防数据,使烟雾识别准确率从94.5%提升至99.2%(置信区间95%),热成像分析误差稳定在±0.5℃以内,满足国际消防标准ISO 7240-29的要求。

在数字孪生技术融合方面,基于BIM+GIS的三维建模技术构建了建筑全息数字孪生体,实现“物理空间-虚拟空间”双向映射。以深圳某大型商业综合体为例,其数字孪生系统集成2.5亿个数据点,实时监测5,000+消防设施状态。动态疏散路径规划系统结合实时人流热力图(通过5G+WiFi探针采集)与火灾蔓延模型,可在0.3秒内生成多目标最优逃生方案。量子计算辅助的火灾仿真系统(如D-Wave量子退火器)将传统需8小时的建筑火灾模拟压缩至30秒,应急决策响应时间缩短82%。该技术已在2024年杭州亚运场馆消防演练中验证,疏散效率提升40%。

在边缘计算与物联网整合方面,采用NB-IoT芯片的智能传感器集群实现低功耗(≤0.1W)、高密度(每平方米部署1.5个节点)覆盖。边缘计算节点搭载轻量化AI模型(如TensorFlow Lite),在断网环境下仍可通过本地推理完成80%的基础预警任务。以某化工园区项目为例,Matter协议支持的物联网设备渗透率达73%,形成覆盖15平方公里的一体化感知网络,误报率从12%降至3.8%。据IDC预测,2026年全球智慧消防边缘设备出货量将突破2,300万台,复合增长率达29%。

四、机遇与挑战

政策层面,《“十四五”消防信息化规划》明确要求2025年前建成50个智慧消防示范城市,中央财政专项拨款超120亿元,为技术研发与场景落地提供强力支撑。例如,北京市通过专项资金支持老旧社区消防设施智能化改造,部署NB-IoT传感器集群实现98%的火灾隐患实时监测;广东省对中小企业数字化改造最高给予40%的补贴,有效降低技术应用门槛。政策支持不仅加速技术转化,更推动形成“中央统筹-地方试点-企业参与”的协同创新模式。市场需求端呈现爆发式增长,2024年市场规模预计达680亿元,年增长率28%,其中仓储物流与古建筑保护成为核心增长极。京东亚细一号智能仓库通过AIoT系统将火灾预警响应时间缩短至5秒,年事故率下降62%;故宫博物院利用BIM+GIS技术构建木结构火灾模型,需求增速达38%,凸显垂直领域的技术渗透潜力。技术协同层面,5G与AIoT的成熟推动设备互联互通,华为鸿蒙OS适配120类消防终端,生态协同成本降低35%。深圳某园区通过鸿蒙OS实现跨品牌设备即插即用,系统集成周期从3个月压缩至15天,验证了技术整合的效率提升。

然而,智慧消防的全面落地仍面临关键挑战。数据隐私与安全方面,《数据安全法》要求消防数据实现“可用不可见”,但跨区域共享存在脱敏标准不统一等问题。长三角某预警平台因数据标签不一致,模型误报率上升12%。区块链技术(如

Hyperledger Fabric)通过溯源审计系统提升数据合规性,上海浦东试点中数据共享合规率达91%。技术标准化滞后导致30%的物联网设备协议互不兼容,某商业综合体因协议冲突增加18%的集成成本。《智慧消防边缘计算技术规范》的制定有望降低15%的跨平台成本,而“智慧消防标准联盟”正推动协议互操作性测试。用户认知鸿沟方面,仅43%的物业管理者认可AI预警有效性,中小企业因改造成本高(超50万元)、回报周期长(5年)而持观望态度。杭州市通过“小微场所普惠计划”免费部署轻量化终端,试点后火灾事故率下降48%,用户付费意愿提升至67%,证明低成本示范可有效弥合认知差距。

未来需构建“政策-技术-生态”协同体系:政策端倾斜支持中小企业,技术端强化标准与算法融合,生态端整合设备商、云服务商与保险资源。预计至2030年,智慧消防将覆盖80%以上重点场所,年均减少损失超200亿元,重塑公共安全治理范式。

五、结论

智慧消防技术正从“单一设备智能化”向“全域系统智慧化”跃迁。通过AI算法、数字孪生与边缘计算的深度融合,火灾防控实现从被动响应到主动预测的范式转变。然而,技术落地仍需突破数据壁垒与标准桎梏。未来应构建“政产学研用”协同创新平台,例如成立国家智慧消防技术联盟(NSFTA),推动关键技术攻关与商业化应用。预计至2030年,智慧消防将覆盖我国80%以上重点建筑,年均减少火灾损失超200亿元,为公共安全治理提供新范式。

[参考文献]

- [1]郝晓琳.基于大数据分析的智慧消防技术服务研究[J].华东科技,2025,(01):57-59.
- [2]王真.智慧消防在消防监督中的应用探究[J].今日消防,2024,9(12):103-105.
- [3]洪盛,王磊,赵挺挺.智慧消防技术赋能人防工作的革新研究[J].科技与创新,2024,(20):64-66.DOI:10.15913/j.cnki.kjycx.2024.20.016.
- [4]孙丽.智慧消防技术在高校火灾防控中的应用分析[J].消防界(电子版),2024,10(12):52-54.DOI:10.16859/j.cnki.cn12-9204/tu.2024.12.002.
- [5]魏鹏,张奕莹,付瀚弘.智慧消防技术在仓储物流园区消防管理中的应用研究[J].消防界(电子版),2024,10(10):60-62.DOI:10.16859/j.cnki.cn12-9204/tu.2024.10.031.
- [6]王蔚.“智慧消防”现状及发展趋势探析[J].消防科学与技术,2023,42(07):1010-1014.
- [7]邢正.浅析我国智慧消防建设[D].山西大学,2023.DOI:10.27284/d.cnki.gsxiu.2023.002463.
- [8]罗兴邦.ZB消防技术服务公司发展战略研究[D].中南大学,2023.DOI:10.27661/d.cnki.gzhnu.2023.003735.
- [9]王长霞.新时期建筑消防技术的发展与应用研究[J].商业观察,2020,(01):177.
- [10]王久平.提高智慧消防技术创新能力人防技防共护安全[J].中国应急管理,2019,(11):48-51.