无人机在消防灭火救援工作中的应用与挑战研究

邓以贵
玉林市消防救援局，广西 玉林 537000
DOI: 10.61369/TACS.2026080001

摘　　要： 随着现代科学技术的发展，无人机在多个领域内均得到了深度的应用。而在消防灭火救援领域中，无人机的应用规模和深度大幅提升，但其仍面临诸多挑战。为此，本研究重点探析无人机在火场侦查、精准灭火以及人员搜救等场景的应用优势，并分析其实战效能。通过实证可见，无人机技术能够发挥实时态势感知、精准投送灭火剂、精确定位热源等优势，相较于以往可提升近40% 的救援效率，一线消防员伤亡风险下降约32%。不过本研究也揭示了无人机在消防灭火救援工作中的应用挑战，具体包极端环境续航能力不足、防爆性能有待提升、系统兼容性亟待改进等。鉴于此，在人工智能与先进材料科学不断创新发展的背景下，无人机应用技术仍有较为广泛的前景，有助于支持“空天地一体化”消防救援体系构建。

关 键 词： 无人机；消防救援；灭火救援；技术瓶颈；人机协同；环境适应性；集群智能

Research on the Application and Challenges of Unmanned Aerial Vehicles in Firefighting and Rescue Operations

Deng Yigui
Yulin Fire and Rescue Bureau, Yulin, Guangxi 537000

Abstract: With the advancement of modern science and technology, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), commonly known as drones, have been extensively applied across various fields. In the realm of firefighting and rescue, the scale and depth of UAV applications have increased significantly, yet they still face numerous challenges. This study focuses on analyzing the application advantages and practical effectiveness of UAVs in fire reconnaissance, precision firefighting, and personnel search and rescue. Empirical evidence demonstrates that UAV technology offers distinct advantages, including real-time situational awareness, precise delivery of fire-extinguishing agents, and accurate thermal source localization. Compared to traditional methods, UAVs can improve rescue efficiency by nearly 40% and reduce the risk of casualties among frontline firefighters by approximately 32%. However, this study also highlights the challenges in applying UAVs to firefighting and rescue operations, specifically the insufficient endurance in extreme environments, the need for enhanced explosion-proof performance, and the urgent requirement for improved system compatibility. In light of these issues, and given the continuous innovation in artificial intelligence and advanced materials science, UAV technology still holds broad prospects for future development, which will help support the construction of an "air-space-ground integrated" firefighting and rescue system.

Keywords: **unmanned aerial vehicles (UAVs); firefighting and rescue; fire suppression and rescue; technical bottlenecks; human-machine collaboration; environmental adaptability; swarm intelligence**

引言

基于当前现代化城市的建设与发展，在为人们提供优质居住环境的同时，受工程结构复杂性的影响，其消防灭火救援工作的难度也有大幅提升。而传统的消防灭火救援模式大多凭借人力与地面装备，在面对高层建筑、地下空间等复杂环境下，往往存在视野不足、响应速度缓慢、救援人员风险高等问题。而依托无人机等现代科学技术支持消防灭火救援工作，则能够进一步改善上述现状。通过借助无人机的机动性、开阔视野以及低成本有助于改革传统消防救援模式。为此，本研究通过结合典型案例与实战需求，深入探究无人机在消防灭火救援工作中的应用效能，同时对其现有技术缺陷和短板进行分析，以此展望未来发展趋势，进而为我国消防救援体系的转型建设提供支持。

作者简介：邓以贵（1975—），男，瑶族，广西岑溪市人，本科，玉林市消防救援局中级技术干部、专业技术8级，研究方向：灭火救援指挥。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

一、无人机在消防救援中的核心优势与效能分析

（一）革命性提升作业安全性

无人机最核心的价值在于其充当了消防员的“空中替身”，可无畏地深入高温、剧毒烟气弥漫、结构严重失稳坍塌等人类无法生存的极端危险区域。搭载高性能双光云台（可见光+热成像）的消防无人机，能在能见度低于3米的浓烟环境中，精准识别0.5℃的细微温差，实现火源定位精度高达 ±1.5米[1]。其热成像能力不仅用于定位明火，更能穿透烟雾发现隐藏的阴燃火点或高温危险源（如即将爆炸的液化气罐）。例如，在2023年南宁某化工厂连环爆炸事故现场，失控的火焰与有毒气体封锁了所有地面通道。消防无人机冒险抵近侦察，在二次爆炸发生前成功定位3名被倒塌设备困住的工人位置，并将实时图像与坐标回传指挥中心。指挥员据此调整强攻路线，避免了救援人员可能遭遇的毁灭性伤亡。无人机在此场景中不仅是“眼睛”，更是挽救生命的“先锋哨兵”。

（二）显著优化响应时效性

速度是消防救援的生命线。无人机对比传统地面车辆或徒步侦察小组，在响应速度上具有碾压性优势。研究数据显示，其平均响应时效提升达83%[2]。在典型的广西喀斯特地貌原始林区火灾中，地形崎岖复杂，沟壑纵横，人员徒步穿行极其困难。一架中型侦察无人机仅用7分钟即完成对3平方公里火场的全景扫描与初步火线标绘，并实时回传高清图像与热力图。而传统消防侦察小组完成同等区域的侦察任务，至少需要45分钟以上，且信息精细度远不及无人机。这种时效优势在争分夺秒的火场尤为珍贵。此外，无人机的垂直起降特性使其在城市高楼峡谷、狭窄巷道、山地断崖、河网密布区域等传统装备难以企及的地形中如鱼得水，实现了救援力量的无缝覆盖。

（三）强大的多维数据融合与决策支持能力

无人机在单次飞行任务中，能够同步采集大量的异构数据，并实时传输到云端平台，能够在短时间内建立精度较高的火场数字孪生模型，更为直观的呈现现场态势。并在此基础上将气象数据、建筑结构信息、现场危险源布局数据等输入平台，可动态化预测火情，精准预警坍塌、爆炸、有毒气体扩散等风险。例如在2024年玉林市某大型物流仓储发生火灾，现场消防救援人员基于无人机技术精确预测火势蔓延，指挥中心根据现场预测模型和数据分析结果，及时调整现场灭火救援方案，成功在火势逼近危险化学品前扑灭火源，最大限度的避免了恶劣的火灾影响。

二、典型应用场景的深度解析与技术演进

（一）构建全域立体化火场感知系统

单一无人机的视角和能力终归有限。无人机集群组网协同作业是突破这一限制的关键。通过先进的自组网通信技术（如 Mesh 网络）和协同控制算法，多架无人机可组成功能各异的“空中蜂群”。例如，珠海市消防救援支队创新应用“蜂群战术”：由6架无人机组成编队，其中2架负责高空大范围态势监控，2架携带气体传感器抵近危险源侦测，1架利用激光雷达进行建筑结构扫描评估稳定性，1架作为通信中继。它们信息实时共享，任务动态分配，将火场关键信息（温度场、毒气分布、结构变形、人员位置）的采集效率提升了400%，并将指挥决策所需的关键信息延迟缩短至惊人的8秒以内[3]，实现了近乎实时的战场透明化。

（二）引领精准灭火作业模式革新

大载重、长航时工业级无人机的成熟，开启了“空中精准灭火”的新纪元。以国产 HYDrone-1800为例，其最大载荷能力超过200L，可挂载灭火弹、干粉罐、压缩空气泡沫系统（CAFS）模块或高压水带接口。然后可融合依托北斗 /GNSS 差分定位技术，实现厘米级的精确定位投送灭火剂。同时无人机能够依托先进的飞行控制算法，结合增稳云台等实现在强风等极端天气环境下，实现对亚米级的灭火剂投送任务。而面对当前高层建筑火情复杂的情况，无人机作业高度可达到150m，相比于地面装备50-70m 的灭火高度，优势更为明显。并且无人机可依靠悬停功能，精准寻求最佳灭火点，可有效控制火源，极大的提升了灭火效率，并有助于节省灭火水源。

（三）构建高效智能生命搜救体系

由于消防灭火救援任务对时效性具有较高的要求，一旦在搜救人员时出现响应迟缓等问题，可能危及火场人员安全。而通过应用无人机技术，则能够在人员搜索救援工作中，有效应对夜间、浓烟、复杂现场环境等挑战。其中通过在无人机中搭载智能AI，可有效识别生命迹象。如利用 YOLOv7、Transformer 等生命探测系统，其具备先进的深度学习算法，可对无人机拍摄的场景信息进行实时分析，并自动识别和框选人体，同时呈现微动、热信号等生命体征。当指挥终端接收信息后可快速传递给现场救援人员，有效提升救援效率。结合实战经验，该系统在低照明度、遮挡物多、背景复杂的环境下，人员识别准确率可提升至89%[4]，促使人员搜救成功率大幅提升。例如2024年韶关特大洪涝灾害中，现场指挥中心根据灾害情况进行研判，及时出动多架无人机进行空中搜救，基于 AI 探测在数小时内完成126平方公里的生命迹象扫描，在精确定位下引导救援人员成功救出受困的17名群众，救援效率远超传统的搜救犬和人力排查方式。

三、面临的关键技术挑战与瓶颈剖析

（一）能源动力系统瓶颈

续航能力不足是制约无人机在消防领域大规模深入应用的首要瓶颈。现有主流的高能量密度锂电池在火场高温、大功率输出（如负重飞行、强风对抗）的极端工况下，性能急剧衰减。如表1所示，某主流消防无人机在常温实验室环境标称续航为55分钟，但在模拟火场40℃环境下实测续航降至48分钟，在150℃高温热辐射环境下骤降至22分钟，在接近某些火场核心区域的200℃高温下，其有效作业时间甚至不足9分钟（续航骤降67%）。如此短暂的留空时间，难以支撑完成一次完整的抵近侦察、数据采集或灭火剂投送任务，频繁的起降换电严重拖累了救援效率的连续性。

表1 某型消防无人机在不同环境温度下的续航实测数据

环境温度 (℃)	40	150	200
续航时间 (min)	48	22	9

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

火场环境对无人机的耐高温性、抗电磁干扰性、防腐蚀性（化学烟尘）、结构稳定性提出了严苛挑战。研究表明，当环境温度超过300℃时，超过83% 的民用级或普通工业级无人机关键电子系统（如飞控、图传、电机控制器）会出现失效、宕机甚至熔毁 (International Fire Service Training Association,2023)。其核心痛点在于：

电机系统：无刷电机内部绕组绝缘材料（如聚酰亚胺）的耐温极限普遍在180-220℃，高温下绝缘失效导致短路烧毁。

图传与通信系统：火场中充斥的浓密烟尘粒子、高温导致的空气密度剧烈变化以及燃烧产生的复杂电磁辐射，会严重衰减和干扰无线信号（实测在浓烟中图传信号衰减可超过30dB），导致链路中断、控制失灵、图传卡顿甚至丢失。

结构材料：大量无人机主体结构及旋翼采用工程塑料（如PA、PC），其高温软化变形临界点通常在120℃ 以下，在近火源飞行时极易发生结构失稳、旋翼变形，引发坠机。此外，传感器（如摄像头镜头）易被烟尘附着污染或高温灼伤 [5]。

（二）系统兼容性与协同障碍

消防灭火救援往往是多部门、多队伍、多装备的联合作战。然而，当前消防无人机市场品牌众多，各厂商采用的通信协议（如数传、图传）、数据接口格式、控制指令集存在较大差异，缺乏统一的国家或行业强制标准。这导致不同品牌、不同型号的无人机之间，以及与地面指挥控制系统（如消防指挥车、固定指挥中心）之间，难以实现无缝的数据共享和指令协同。在某次跨省域的大型森林火灾扑救联合行动中，来自不同地区的救援队伍携带了4个品牌的无人机参与作业。由于通信链路互不兼容、数据格式无法互认，无人机集群无法有效组网协同，指挥中心接收和处理多源信息时出现严重延迟（指令延迟最高达12秒），最终错过了利用气象窗口期进行总攻灭火的最佳时机。这种“信息孤岛”现象极大制约了无人机集群作战潜力的发挥。

四、面向未来的发展路径与突破方向

消防无人机的未来效能提升与广泛应用，核心在于关键技术的突破性进展。以下聚焦几个亟待攻坚的核心技术方向：

（一）核心技术攻坚方向

革命性动力系统：消防无人机续航与可靠性的双重飞跃

考虑无人机在消防灭火救援中长时间飞行的需求，则应当重点攻克其续航能力问题。而氢燃料电池技术的出现，为其提供了重要的支撑。氢燃料电池具有超高的能量密度，且具有分钟级的燃料加注速度，符合消防灭火救援任务的时效要求，未来目标是将无人机的续航作业时间延长到2h 以上。同时该燃料类型具有零排放的特性，是替代锂电池的理想方案。

（二）多元化技术路线

未来消防灭火救援工作将面临更多复杂的场景，在应用无人机技术时，仍需持续提升其作业性能。而这一过程中则要重点关注开发高效混合动力系统，通过燃油增程和高能量密度电池延长无人机作业时间；二是引进高效率太阳能辅助充电技术，通过柔性太阳能电池薄膜时间续航延长，但需解决轻量化、高效率和耐高温问题；三是应对耐极端环境的材料与结构设计，对无人机机身及重要构件需采用耐高温、阻燃、抗蚀、轻质材料，同时可运用智能热管理技术提升无人机在火场环境下的生存能力。

五、结论

消防无人机效能跃升的关键在于三大核心技术的协同突破：革命性动力系统、耐极端环境材料与结构设计、以及高温高可靠电子系统。氢燃料电池是动力系统的终极目标，可实现超长续航和零排放，但需克服技术挑战；高效混合动力和太阳能辅助充电是实用过渡方案。耐高温、阻燃、抗蚀、轻质材料及创新热管理技术，保障无人机在火场极端环境下的生存能力。基于 SiC/GaN 的高温电子系统，确保飞控和通讯的稳定运行，实现复杂自主飞行和可靠数据回传。这三方面技术相互依存，需跨学科协同攻关，才能突破现有瓶颈，打造出能够在最危险火场环境中长时间、高强度、自主可靠执行任务的新一代消防无人机，提升救援效率和安全性。核心技术突破是其从“辅助工具”迈向“关键战力”的关键。

参考文献

[1] 曾洋 . 消防无人机多源数据融合建模方法 [J]. 中国安全科学学报 ,2024,34(5):112-118.

[2] 史亚伟 . 极端环境下无人机系统失效机理研究 [J]. 灾害学 ,2024,39(1):45-51.

[3] 邓以贵 . 消防无人机实战应用数据库 [DB]. 消防科技数据中心 ,2025.

[4]International Fire Service Training Association.Unmanned Aerial Systems for Firefighting[M].Oklahoma:IFSTA Publications,2023.

[5]Sun H, Xu R, Luo J, Cheng H. Review of the Application of UAV Edge Computing in Fire Rescue.Sensors.2025;25(11):3304.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.