# “路安飞卫”-无人机群高速公路火患监测与灭火系统研究

贺巳中 [1], 赵子镕 [1], 向省贵 [1]*
1. 西华大学, 汽车与交通学院, 四川 宜宾,644000

**摘要：** 针对高速公路车辆自燃事件多发，传统人工巡护、固定视频监控存在监测盲区、火情响应滞后，难以应对山区高速、隧道出入口等复杂路段火情处置的问题，本文提出一套无人机群协同的高速公路火患监测与灭火一体化系统。该系统以油动六旋翼无人机为硬件载体，融合北斗导航高精度定位、多角度热成像感知技术与轻量级 YOLOv5s 目标检测模型，实现早期火源多模态识别与精准定位；依托 ZigBee 自组网完成无人机蜂群任务分配与编队协同飞行，搭载 ABS 壳体干粉智能灭火弹实现分级火情处置：小规模隐火、初期火情由单机完成压制；大面积火情则调度不少于 10 架无人机组成蜂群协同开展灭火作业。多传感器融合算法实现复杂路况下巡航路径规划与飞行姿态稳定控制。分析表明，本系统能够弥补传统巡检方式受地形、天气制约的缺陷，实现高速公路火情早识别、早处置，可为降低高速公路火灾次生灾害、保障道路通行安全提供工程参考。

**关键字：** 高速公路火患监测；无人机蜂群；热成像技术；YOLOv5s 模型；北斗导航

# Research on “Lu-An-Fei-Wei” UAV Swarm for Highway Fire Hazard Monitoring and Fire Extinguishing System

Sizhong He[1], Zirong Zhao[1], Shenggui Xiang[1*]
*1. School of Automobile and Traffic Engineering, Xihua University, Yibin Sichuan, 644000, China*

**Abstract:** Aiming at the frequent occurrence of vehicle spontaneous combustion on highways, traditional manual patrols and fixed video monitoring have monitoring blind areas and delayed fire response, which make it difficult to deal with fire disposal in complex road sections such as mountainous highways and tunnel entrances and exits. This paper proposes an integrated system of highway fire hazard monitoring and fire extinguishing coordinated by UAV swarm. Taking oil-powered hexacopter UAV as the hardware carrier, the system integrates Beidou navigation high-precision positioning, multi-angle thermal imaging perception technology and lightweight YOLOv5s target detection model to realize multi-modal identification and accurate positioning of early fire sources. Relying on ZigBee ad-hoc network, it completes task allocation and formation cooperative flight of UAV swarm, and is equipped with ABS shell dry-powder intelligent fire-extinguishing bomb to realize graded fire disposal. Small-scale hidden fire and initial fire are suppressed by a single UAV; for large-scale fire, no less than 10 UAVs are dispatched to form a swarm for cooperative fire-extinguishing operation. The multi-sensor fusion algorithm realizes cruise path planning and stable flight attitude control under complex road conditions. The analysis shows that the system can make up for the defects of traditional inspection methods restricted by terrain and weather, realize early identification and disposal of highway fire, and provide engineering reference for reducing highway fire secondary disasters and ensuring road traffic safety.

**Keywords:** Highway fire hazard monitoring; UAV swarm; thermal imaging technology; YOLOv5s model; Beidou navigation

## 0 引言

随着低空巡检技术的不断进步，无人机在高速公路火源检测领域逐渐崭露头角。近年来，众多学者致力于开发基于无人机与人工智能的火灾检测算法，以应对传统巡检方式的低效与危险[1]。2024 年，我国高速公路最高日车流量突破 7000 万辆，国庆期间新能源车出行占比达 15.9%。但随着新能源汽车行业火热的同时也面临诸多安全问题，尤其是新能源汽车起火事故频发，严重影响行业的发展和消费者的积极性，政府和社会各行也积极应对，将安全问题视为首要解决的瓶颈，努力为新能源的健康发展铺平道路[2]。

该项目拟通过系统融合轻量级 YOLOv5s 模型[3]和热成像技术[8]以及北斗高精度导航技术[7] 实现准确、快速的火源定位和避障功能。之后，利用蜂群协同控制技术[1] 实现高效的任务分配、编队飞行和实时避障。从而提高灭火效率，实现对火灾的有效控制。最后，基于智能灭火弹技术[9] 将灭火剂精准地弥散到火场，提高灭火效果。已有森林火灾探测无人机研究将热成像、GPS 定位与图像回传相结合[11]，为火情监测与应急辅助处置功能的集成提供了参考。

## 1 研究背景

### 1.1 高速公路火灾事故的严峻形势与危害

道路火源，是交通运输系统的致命威胁，以突发性强、监测覆盖难、救援响应慢、伤亡风险高、财产损失大、交通影响广、社会影响深为显著特征。一旦发生，会发生重大连锁反应，导致社会和人民损失严重。据统计，在相关部门的努力下，我国每年发生高速公路火灾的次数从 2015 年的超过 16279 起，骤降至 2025 年的不足 300 起，高速公路火灾预防取得了长足进步。但如果火情发现较晚，依然可能导致高速公路火灾造成严重的后果。如 2020 年 10 月 25 日，G60 沪昆高速雪峰山隧道 K1376+600 处发生一起半挂车燃烧事故，造成 2 人死亡，31 台车辆及所载货物烧毁，隧道设施受损；2025 年 3 月 1 日凌晨 4 时，G60 沪昆高速拱坝隧道 K1364+320 处，一辆载货重型半挂车车厢底部起火，到晚上 11 时才疏通道路，造成严重交通拥堵，损害公共利益超十万元；2024 年，一辆小型轿车在宁夏固原市某乡村道路中间停滞并起火燃烧，火势较大，燃烧程度较严重，造成环境危害污染严重[4] ；此外，世界各地高速公路火灾惨痛教训也历历在目，如 2025 年 4 月 7 日，巴西圣卡塔琳娜州一辆乙醇运输车在公路侧翻，车身起火火焰瞬间蔓延连烧 25 辆车，造成道路环境和社会损失超十万美元。突发的高速公路火灾不仅造成道路设施的严重损毁，还直接威胁驾乘人员的生命财产安全，引发大面积交通拥堵。

传统的高速公路人工巡护与固定监控方式，不仅响应速度缓慢，而且受路段地形（如山区、隧道）、天气条件制约严重，效率极为低下，且难以全面覆盖超长里程的高速路网，容易形成监控盲区，导致车辆自燃初期的微弱火情、油路故障前兆等隐患无法及时被发现。现有的无人机技术快速发展为解决上述问题提供了新的思路，无人机受地形与车流限制较低，容易实现高速路段的全面覆盖，能够有效、及时地发现火情，从而为及早控制火势提供条件。但是，无人机技术依然存在续航能力不足、携带灭火设备数量有限等问题。因此依然需要研究如何通过无人机系统协调提升其高速公路灭火效率。

高速公路火灾的发生，将对道路生态环境造成次生污染，此外，肆意蔓延的火情还将对驾乘人员、救援人员的生命财产安全造成巨大威胁，同时引发区域交通网络瘫痪。为此，火灾的及时发现与警情快速处置是预防高速公路火灾产生严重后果的重要前提。鉴于此，亟需一套高精度、实时监

控系统，实时监控高速公路的安全状态，为相关部门的有效决策提供依据。为此，项目提出“‘路安飞卫’-无人机群高速公路火患监测与灭火系统”的研究。

## 2 系统设计原理

### 2.1 系统总体架构

系统整体分为感知层、通信层、决策控制层、执行层四大层级。感知层包含北斗-RTK 定位模块、多角度旋转热成像摄像头、惯性测量单元、气压计、电子罗盘，完成位置、姿态、红外图像、可见光图像信息采集；通信层包含 ZigBee 机间自组网、蜂窝网络、卫星通信，ZigBee 用于无人机集群内部近距离交互，蜂窝与卫星通信实现无人机集群与地面控制中心远距离数据交互；决策控制层为地面控制中心，负责全局任务调度、火源信息解析、蜂群任务分配、路径规划；执行层以油动六旋翼无人机为作业平台，搭载智能灭火弹发射装置，完成巡航探测、火情压制作业。单机搭载 14 枚干粉灭火弹，针对小规模火情可直接完成打击；当系统判定为大范围火情时，单机回传现场图像、火源坐标，地面中心调度无人机蜂群抵达现场，通过编队协同完成联合灭火作业。

### 2.2 系统设计思路

“路安飞卫”灭火无人机系统围绕高速公路智能巡航与灭火一体化目标设计，以六旋翼油动无人机为平台，通过发动机燃烧燃料提供飞行动力和保障续航，控制模块以 STM32F103C8T6 飞行控制器联动含惯性检测单元 MPU6050、气压计 MS5611、电子罗盘 BDS 的检测模块保障飞行稳定，集成含 360 度高精度热成像摄像头、北斗定位和轻量级 YOLOv5s 模型的多模态感知模块，配备 14 枚干粉灭火弹的智能发射装置；技术上依托北斗导航定位系统（结合 RTK 技术），融合多传感器控制算法、神经网络传感器定位系统构建运动模型，完成巡查区域路径规划实现精准巡航，借助光热成像技术和轻量级 YOLOv5s 模型算法识别火源，小范围火情通过灭火弹精准打击，大规模火情则通过通讯单元实时反馈，启动蜂群协同控制器，利用编队设计与智能集群技术实现蜂群配合抑制火情，同时内置智能控制系统简化操作，经简单培训即可上手，助力高速公路火患监测与应急处置高效开展。

### 2.3 关键技术

#### 2.3.1 热成像火情侦测技术

热成像摄像头采用多角度旋转热成像摄像头（分辨率 640×480，测温范围-20℃~550℃），通过其强大的抗隐蔽性，同时通过红外辐射识别隐火与地下残留火源，有助于迅速发现并处理这些潜在的安全隐患，具有穿透烟雾、克服雾的能力，在恶劣天气和极端环境下优势巨大。

#### 2.3.2 北斗自适应巡航技术

在电力巡检场景中，已有研究将北斗定位与星基增强用于无人机自主导航，并对巡检路径避障和巡检点坐标优化进行了研究[10]。针对高速公路巡检任务，本系统拟采用以下路径跟踪方案。高精度自适应全区域路径跟踪算法，通过北斗卫星系统 RTK 技术获取的精准位置信息，由传感器获取的无人机航向、速度、姿态信息构建无人机实时运动模型，应用核心的多传感器信息融合控制算法，使无人机能够适应复杂的工作环境与路线，实现巡查区域规划路径跟踪高精度自适应控制。

#### 2.3.3 轻量级 YOLOv5s 模型

YOLOv5s 作为轻量级目标检测模型，采用“输入端-骨干网络-颈部网络-预测网络”四阶段结构，以 640×640 尺寸图像为输入，经骨干网络中 CBS 模块（卷积层）两次下采样（特征图尺寸依次缩减至原图 1/2、1/4）提取底层特征，再通过 C3 模块（含 3 层卷积的跨阶段部分网络）增强特征表达、

SPPF 池化层（空间金字塔池化层）融合多尺度特征，随后颈部网络通过上采样恢复特征图尺寸并结合 Concat 操作（特征拼接）实现特征拼接融合，最后预测网络基于分类损失（$l_{cls}$，用于判断锚框与标定分类是否正确）、置信度损失（$l_{obj}$，用于计算网络的置信度）和定位损失（$l_{box}$，用于计算预测框与标定框的误差）构成的加权损失函数（$l = a \times l_{obj} + b \times l_{box} + c \times l_{cls}$，其中 a、b、c 为平衡系数，通常 $a > b = c$，即置信度损失权重最高）优化参数，精准完成早期火苗的实时检测，兼顾检测效率与准确性[3]。

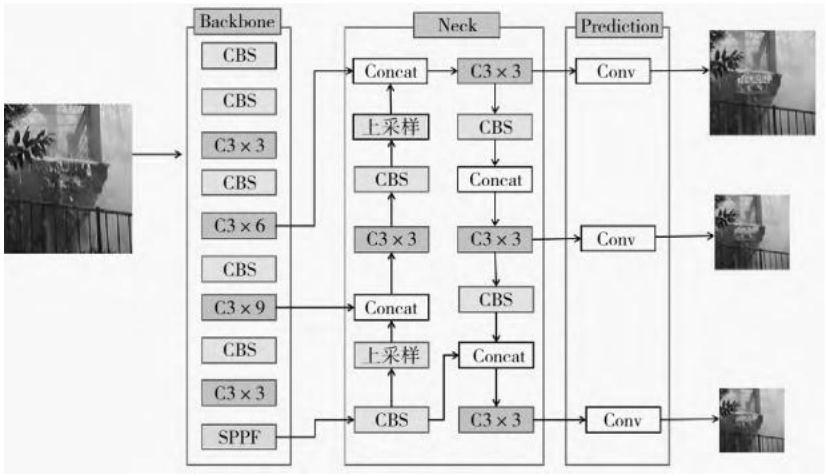



**图 1 基于轻量级 YOLOv5s 模型检测火焰**

**Fig. 1 Flame detection based on the lightweight YOLOv5s model**

2.3.4 ZigBee 蜂群编队协同技术

单机巡检识别火情后，地面控制中心可调度不少于 10 架无人机组成蜂群协同作业。无人机集群内部依靠 ZigBee 协议完成机间自组网，实现集群内部避障协商、任务分配、编队控制；远距离和地面站的数据交互依靠蜂窝网络与卫星通信补充，弥补 ZigBee 通信距离有限的短板。

分级处置机制：①单机识别小型隐火，本机直接使用机载灭火弹压制火情，同步回传现场信息至地面中心；②识别大面积火情，单机上传火源位置、现场图像，地面站下发指令调度蜂群，无人机集群按照规划航线抵达火场，协同完成火情压制。

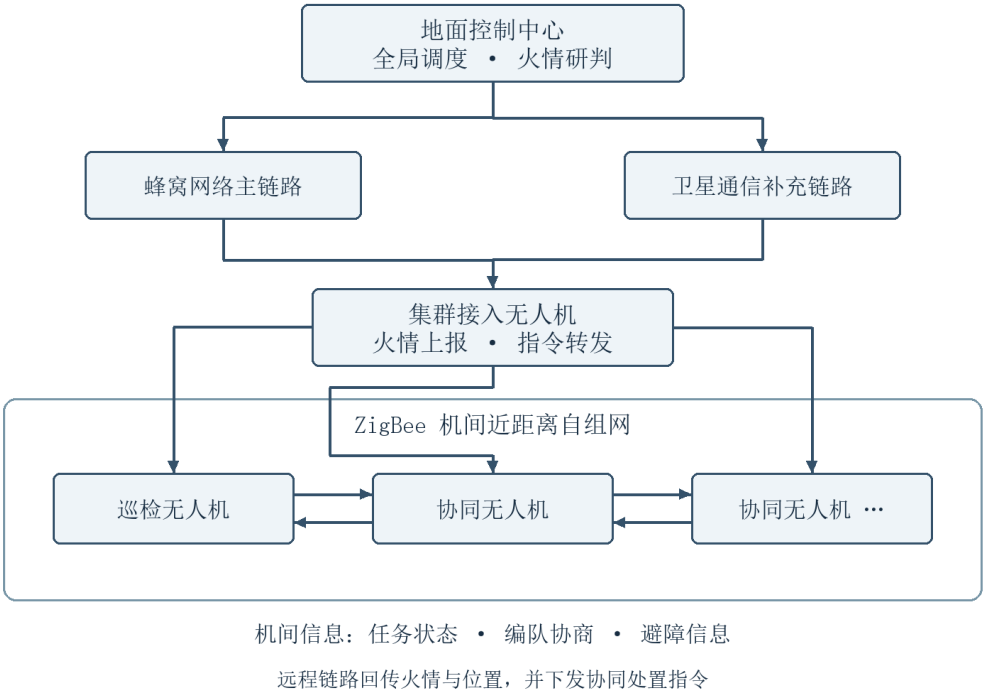



**图 2 基于 ZigBee 的无人机群协同通信架构**

**Fig. 2 ZigBee-based collaborative communication architecture for the UAV swarm**

2.3.5 定轴发射装置和智能灭火弹

灭火弹发射基座采用定轴转动结构，可调节俯仰角度，完成远近不同目标瞄准。灭火弹壳体选用 ABS 工程塑料，引信接收指令后引爆内部爆管，使壳体开裂弥散干粉灭火剂，灭火剂扩散半径可达 8 m。ABS 壳体可以在保障发射强度前提下，减少爆炸产生的硬质破片，避免对人员、车辆造成二次伤害。

## 2.4 监测灭火过程流

火灾监测模块持续采集道路红外、可见光数据，完成火源识别；确认火情后进入灭火执行模块；地面控制中心开展任务分配，分别完成无人机路径规划、灭火弹喷洒控制；无人机按照规划航线飞行抵达作业点位；执行灭火喷洒作业；灭火完成后将现场状态反馈至控制中心，判断火情是否完全消除，未消除则继续开展处置作业。

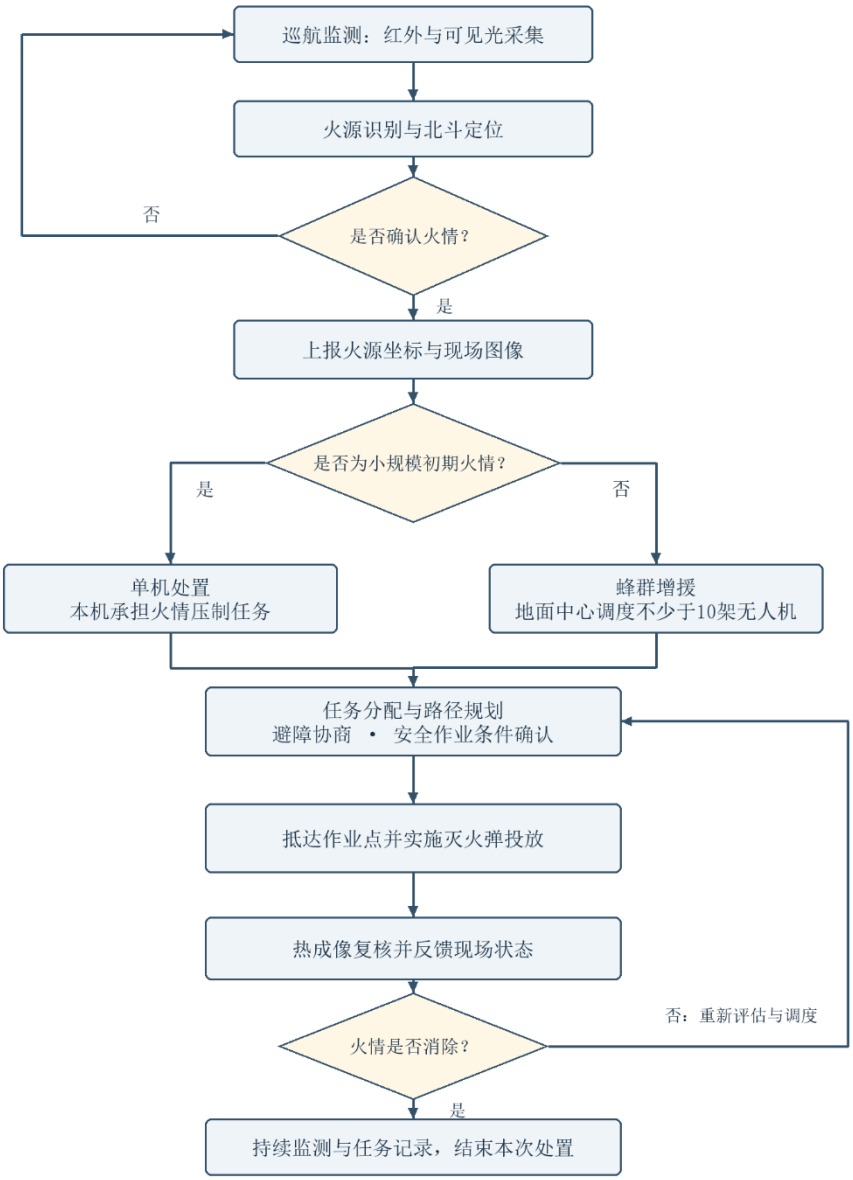



**图 3 系统监测与分级灭火流程图**

**Fig. 3 System workflow for monitoring and graded fire suppression**

## 2.5 飞行过程运动分析

### 2.5.1 滚转运动

将无人机旋翼 Motor1、Motor2、Motor3 的转速增加或者将 Motor4、Motor5、Motor6 的转速减小时，六旋翼会产生向右上方的合力，使六旋翼向右飞行。反之，如果减小 Motor1、Motor2、Motor3 的转速或者增加 Motor4、Motor5、Motor6 的转速，六旋翼会产生向左上方的合力，使六旋翼向左飞行。

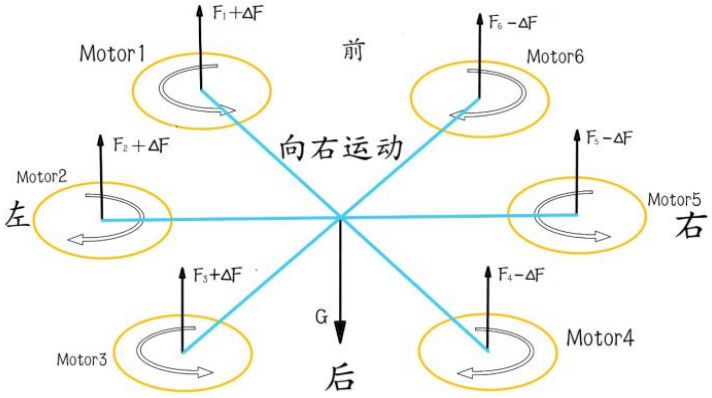



**图 4 滚转运动分析**

**Fig. 4 Analysis of roll motion**

2.5.2 俯仰运动

将无人机旋翼 Motor3、Motor4 的转速减小或者将 Motor1、Motor6 的转速增加时，六旋翼会产生向前上方的力，使六旋翼向前飞行。反之，如果将 Motor3、Motor4 的转速增加或者将 Motor1、Motor6 的转速减小时，六旋翼会产生向后上方的力，使无人机向后飞行。

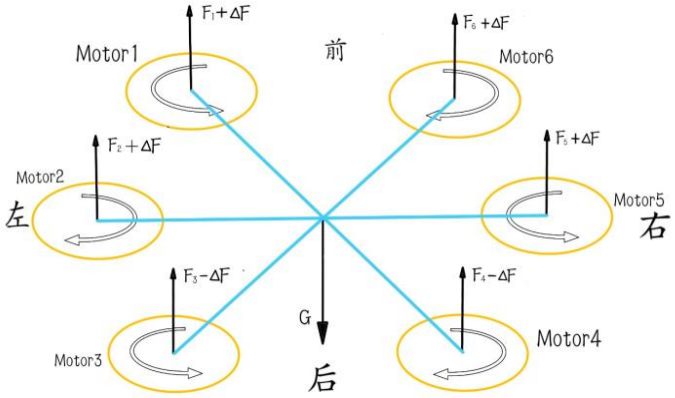



**图 5 俯仰运动分析**

**Fig. 5 Analysis of pitch motion**

2.5.3 垂直运动

如下图所示，在保证六旋翼无人机每个旋翼转速大小相同(产生的总扭矩为零)，对每个旋翼增加或减小大小相同的转速，即可实现无人机的垂直上升下降运动。

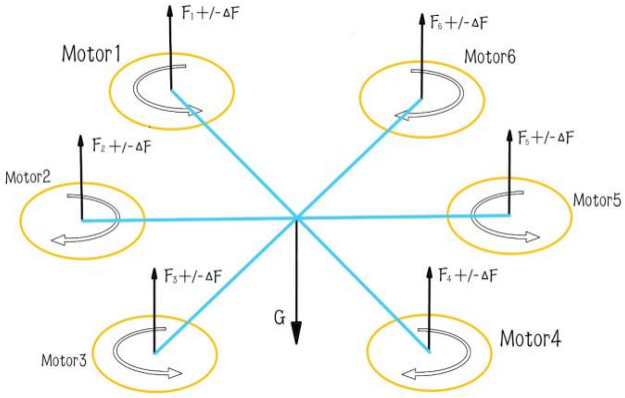



**图 6 垂直运动分析**

**Fig. 6 Analysis of vertical motion**

## 3. 创新特色

本项目"路安飞卫"无人机系统突破传统高速公路灭火瓶颈，构建了“感知-决策-执行-防护”全链条创新体系，具体特色如下：

### 3.1 热像侦巡--火患肃清

热成像火情侦测技术采用分辨率达 640×480、测温范围为- 20℃~550℃的多角度旋转热成像摄像头搭配轻量级 YOLOv5s 模型，以强大抗隐蔽性识别隐火与地下残留火源，凭借穿透烟雾和克服雾的能力，在恶劣环境下发挥优势。

### 3.2 北斗定位--路径智控

北斗技术通过北斗卫星系统 RTK 技术获取精准位置信息，结合传感器信息构建无人机实时运动模型，利用多传感器信息融合控制算法，实现高精度自适应全区域路径跟踪。

### 3.3 ZigBee 集群--协同灭火

蜂群编队在单机发现火情后，可调度≥10 架无人机协同作业，借助 ZigBee 通信协议完成编队避障、任务分配及智能集群，配合触发式灭火弹快速压制火势，并根据火情规模灵活应对。

### 3.4 定轴发射--高效扑救

发射装置的定轴转动机动发射基座可瞄准远近目标，灭火弹采用 ABS 工程塑料壳体，依靠引信引爆中心爆管弥散灭火剂，既保证发射强度又避免过多破片。

### 3.5 油动重载--续航无忧

采用油动动力系统，突破传统电动无人机载重与续航瓶颈，在保持高负载能力的同时，显著延长作业时间，为长距离、大载重任务提供可靠支撑。

## 4. 应用前景与系统局限

本系统面向高速公路火情“早发现、快处置”的应急需求，具备多场景落地潜力，可分为干线高速常态化巡检、重点路段定点值守、应急增援联动三类应用模式开展工程化应用。

### 4.1 干线高速公路常态化空中巡护

对于山区高速公路、长隧道群、高架桥梁等传统地面巡检盲区，可采用多机轮巡模式，无人机蜂群按预先规划航线分段巡航，持续采集红外与可见光数据，自动识别车辆高温、初期隐火等隐患。可与高速公路运营公司现有监控平台对接，将火源坐标、现场图像实时推送至高速监控中心，替代

部分人工路面巡查任务，降低巡检人员在车流密集路段作业的安全风险。在车流量大的节假日出行高峰时段，可临时增派无人机编队加密巡检频次，提升自燃事故高发时段的隐患监测能力。

### 4.2 重点路段定点值守

在长隧道出入口、服务区、长下坡路段等车辆自燃高发点位，部署无人机起降基站。基站可实现无人机自动充电、弹药补给，一旦监测到火情，就近无人机可快速起飞开展灭火作业，大幅压缩应急响应时间。这类路段车辆长时间制动易引发刹车过热、新能源车辆电池热失控，是高速火灾高发区域，定点值守模式能够发挥本系统早期火情压制优势，在火势扩大前完成处置。

### 4.3 突发事件应急增援联动

当高速公路发生车辆自燃事故，地面消防车辆受拥堵影响难以快速抵达火场时，可调度无人机蜂群作为前置应急力量。无人机到达现场后，一方面通过热成像实时回传火场范围、有无人员被困信息，辅助消防指挥决策；另一方面投放灭火弹压制初期火势，防止火势蔓延引燃周边车辆，为地面消防救援争取宝贵时间。系统输出的火情定位数据，可同步共享给高速交警、消防救援、路政等多部门，实现多方信息协同。

除高速公路主场景外，系统硬件与算法框架具备良好拓展性：更换任务载荷与调整识别模型后，可用于国省干线公路、大型露天停车场、油气输送管线廊道的热隐患巡检；若调整灭火弹类型与投放策略，也可适配林区边缘火情监测处置场景。

从产业化推广角度分析，现阶段可优先在省内山区高速路段开展小范围试点应用。试点阶段可采用租赁+运维服务模式，由高速运营单位采购空中巡检服务，降低一次性硬件采购成本；待样机经过外场试验验证性能稳定后，再逐步扩大部署规模。

同时系统也存在一定局限，在强降雨、6 级及以上大风等极端气象条件下无人机无法安全起飞作业；油动无人机作业噪声较大，对靠近居民区路段作业存在一定干扰；当前研究仅完成系统原理方案设计，尚未开展样机外场试验，识别算法、发射机构与灭火弹匹配参数仍需通过实物测试进一步优化。

## 5 结论与展望

针对高速公路火情早期识别难、地面救援响应滞后的现实问题，本文设计“路安飞卫”无人机群高速公路火患监测灭火一体化系统。构建感知-通信-决策-执行四层系统架构，完成油动六旋翼无人机硬件平台选型；结合热成像与 YOLOv5s 实现多模态火源识别，基于北斗-RTK 与多传感器融合算法实现自适应巡航；依靠 ZigBee 自组网实现无人机蜂群分级协同处置火情；搭载定轴发射机构与 ABS 壳体智能灭火弹完成火情压制。整套系统可以弥补传统巡检方式的短板，适合山区高速、隧道出入口等复杂路段火情防控，也具备向森林、管线巡检场景拓展的潜力。

本文目前完成整体方案与原理设计，尚未开展样机试验，后续研究将构建高速公路火情专用图像数据集，完成 YOLOv5s 模型训练与消融实验，优化火焰检测准确率、降低误报率；开展无人机集群路径规划与协同调度仿真，验证蜂群任务分配算法有效性；搭建物理样机，开展外场模拟火情试验，调试发射机构、灭火弹工作参数，进一步检验系统实际作业性能。

### 参考文献

[1] 崔培强，罗梦琪，刘世达，等. 基于改进 YOLOv12 的无人机高速公路边坡起火检测算法研究[J]. 电子技术应用，2026, 52 (1)：14-20.

[2] 唐倩. 高速公路交通事故防控和治理探究——基于车辆隧道起火多案例对比的数据浅析[J]. 中国公路,2025,13:112-115.

[3] 王丽, 沈晓波, 束仁义. 基于卷积神经网络的早期火苗检测研究[J]. 长春师范大学学报, 2024, 43(6): 64-69.

[4] 王立华. 交通事故中汽车起火原因分析与鉴定[J]. 交通与安全,2024, 40(5):76-80.
[5] 李学龙. 无人机续航能力[J]. 中国科学:信息科学, 2023, 53(07):1233-1261.
[6] 李军,陈士超. 无人机蜂群关键技术发展综述 [J]. 兵工学报, 2023, 44 (9): 2533-2545.
[7] 科普中国、新华网、中国科协科普部. 《北斗与林草的“美丽邂逅”》，2023-12-05
[8] 林志辉. 红外热成像测温技术在水利行业的应用[J].水电站机电技术, 2025, 48(02):137-139.
[9] 戴慎超, 顾保虎, 孙景富,等.未知环境下的消防机器人智能灭火技术[J].兵工自动化,2023, 42(01):86-91+96.
[10] Libo Yang, Jiani Yang, Wencan Yao, et al. Design of autonomous navigation system for electric patrol Unmanned Aerial Vehicle Based on Beidou Positioning and satellite based enhancement[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2005(1): 012093. DOI: 10.1088/1742-6596/2005/1/012093.
[11] P. Aruna Jeyanthy, S. Balasubramanian, R. Balavignesh, et al. Design and Development of Forest Fire Detecting Drone[J]. International Journal of Recent Technology and Engineering, 2019, 8(4S2): 331-333. DOI: 10.35940/ijrte.D1074.1284S219.

[1] **第 1 作者简介：**贺巳中（2005-），男，西华大学本科在读，研究方向：公路交通应急。E-mail: 2732472015@qq.com。

[*]**通讯作者简介：**向省贵（2005-），男，西华大学本科在读，研究方向：交通灾害感知。 E-mail: 2935871480@qq.com。