Computer Science and Application 计算机科学与应用, 2026, 16(5), 406-413
Published Online May 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/csa
https://doi.org/10.12677/csa.2026.165193

Hans汉斯

基于多源信息融合的半开放环境智能火灾探测系统设计

肖山东，孔晨宇，陈姝均，段雨箬，黄　维

重庆科技大学安全科学与工程学院，重庆

收稿日期：2026年4月23日；录用日期：2026年5月22日；发布日期：2026年5月29日

摘　要

由于城市发展中半开放环境日益增多，因此火灾防控中必然要面对风速干扰、烟雾扩散快、物体遮挡、阴燃火情难识别诸种难题。为此，文章提出了基于红外、图像与烟雾多源信息融合的智能火灾探测器。该系统以STM32单片机为核心，将多模态传感器数据与神经网络算法有机结合，实现火情智能识别与风险等级评估，并集成本地声光报警、远程信息推送。通过在半开放场景的实验验证，探测器表现出误报率显著降低、响应速度加快、识别精度提高的优势。结果表明，基于多源信息融合及智能算法设计的智能火灾探测器能切实提高半开放环境火灾早期预警能力，也是公共安全防控极好的技术补充。

关键词

半开放环境，多源信息融合，智能火灾探测器，神经网络，火灾早期预警

Design of an Intelligent Fire Detection System for Semi-Open Environments Based on Multi-Source Information Fusion

Shandong Xiao, Chenyu Kong, Shujun Chen, Yuruo Duan, Wei Huang

School of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: April 23, 2026; accepted: May 22, 2026; published: May 29, 2026

Abstract

With the increasing number of semi-open environments in urban development, fire prevention and control inevitably face challenges such as wind speed interference, rapid smoke diffusion, object

文章引用: 肖山东, 孔晨宇, 陈姝均, 段雨箬, 黄维. 基于多源信息融合的半开放环境智能火灾探测系统设计[J]. 计算机科学与应用, 2026, 16(5): 406-413. DOI: 10.12677/csa.2026.165193

occlusion, and difficulty in identifying smoldering fires. To address these issues, this paper proposes an intelligent fire detector based on multi-source information fusion of infrared, image, and smoke data. Taking the STM32 microcontroller as the core, the system organically combines multi-modal sensor data with neural network algorithms to realize intelligent fire identification and risk level assessment, and integrates local acousto-optic alarm and remote information push functions. Experimental verification in semi-open scenarios shows that the detector has significant advantages including a remarkably reduced false alarm rate, accelerated response speed and improved recognition accuracy. The results indicate that the intelligent fire detector designed based on multi-source information fusion and intelligent algorithms can effectively improve the early fire warning capability in semi-open environments, and serves as an excellent technical supplement for public safety prevention and control.

Keywords

Semi-Open Environment, Multi-Source Information Fusion, Intelligent Fire Detector, Neural Network, Fire Early Warning

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

随着我国城市化进程的快速推进，以电动车充电棚、工厂物料区、码头堆放区为代表的半开放环境日益增多，已成为城市基础设施的重要组成部分。而此类场所人员密集、物资堆放复杂，又因通风性强、结构开放，故火灾发生后极易快速蔓延，防控难度大[1]。其中，电动车充电引发的火灾占电动车火灾总数 80%以上，半开放环境火情蔓延速度为传统封闭建筑的 3~5 倍。例如，2025 年太原迎泽区景泰花苑小区半开放存车棚因电动车充电热失控起火，火势数分钟内蔓延至 300 平方米区域，上百辆车被焚毁。2024 年北京大兴区半开放充电棚因充电线路老化起火，同样导致多车损毁。因此，半开放环境中的火灾有极强的高发性及蔓延快速性，急需构建高效可靠的火灾探测系统。

目前，火灾探测领域中对单一烟雾、红外、图像传感器的研究已经十分成熟，仍是市场主流探测方式，但单一传感器探测方案在半开放环境中存在误报率高、响应滞后等重大缺陷。目前，学术界对多传感器信息融合技术已有系统的探索，探测方式也自然地向智能化、图像化方向演化[2]。有研究人员通过卷积神经网络 CNN、YOLO 等深度学习模型，实现对火焰形态、烟雾扩散模式的动态识别，准确率极高[3] [4]。文献[5]选取 CO 体积分数、温度、能见度 3 个火灾敏感参量，以多特征参量融合为核心，有效提升了探测器的探测精准度。还有研究者通过融合温度、CO 浓度与烟雾浓度信息并引入极限学习机技术，实现储能电站火灾自动化精准预警。但现有研究多针对储能电站、船舶机舱等特定场景，对于半开放环境火情蔓延快、干扰因素复杂的特性设计不足，尚未形成适配该类场景的一体化智能探测方案。

针对半开放环境的火情探测需求，结合多源信息融合的技术研究成果，本文提出一种基于红外、图像及烟雾传感器的多源信息融合智能火灾探测器。该探测器结合神经网络算法实现火情智能识别，并集成本地报警、远程推送及联动喷淋功能。技术路线示意图可见图 1。通过对多模态探测数据的协同处理，系统可有效降低半开放环境火灾探测误报率、提升探测灵敏度与准确性，为火灾早期预警提供可靠的技术支撑，也为相关智能消防设备的设计优化提供实践参考。

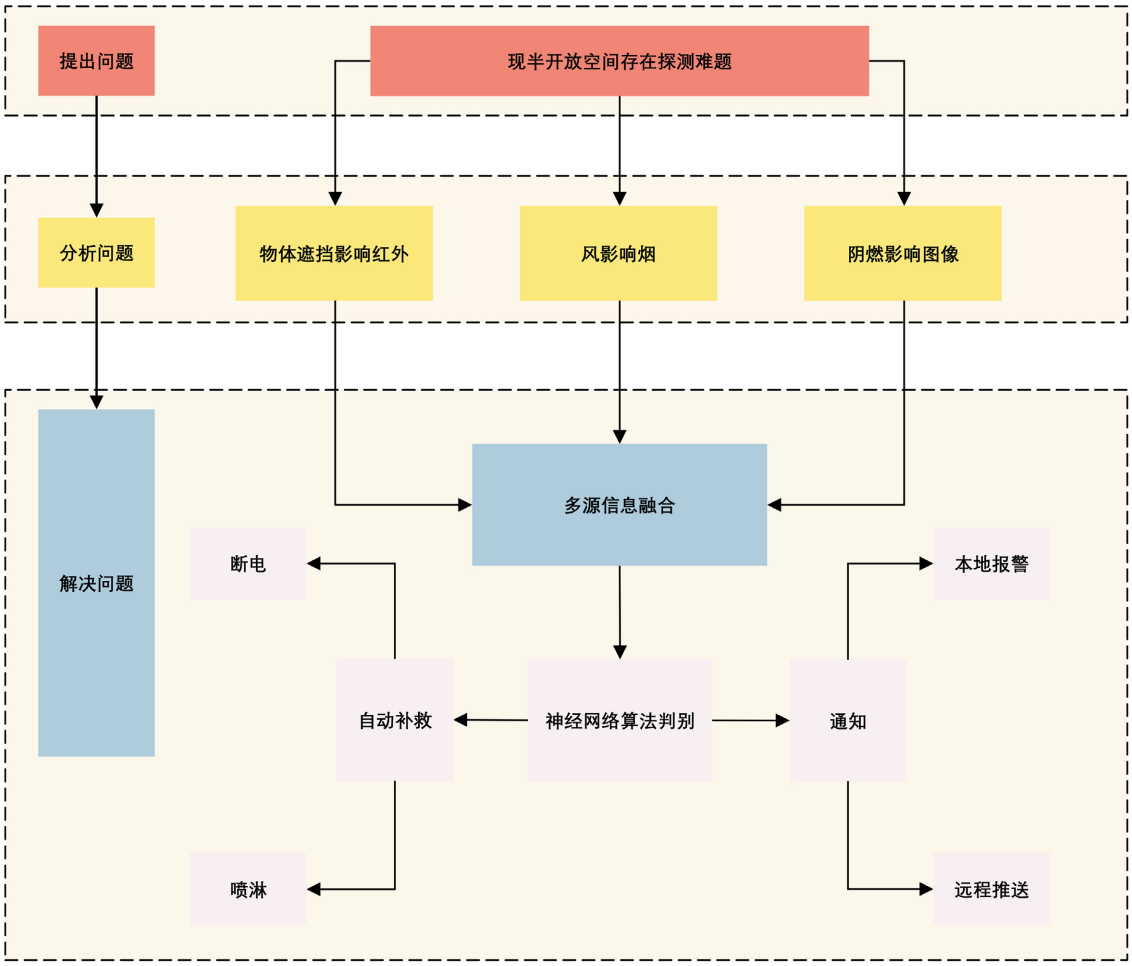

Figure 1. Technology roadmap diagram
图 1. 技术路线示意图

2. 模块设计

2.1. 信息采集模块

针对半开放环境下各类干扰造成的单一传感器探测局限性，本设计采用烟雾、红外、图像三类传感器协同采集架构，同步采集烟雾浓度与可燃气体、温度梯度与热辐射、火焰形态、颜色及纹理三类火灾关键信息。三类传感器的检测对象、输出信号及核心作用见表 1。同时，三类传感器在安装位置、采样频率、信号输出模式上形成互补设计，并参考《城市综合变电站探测器布局与监测技术研究》中提出的方法对传感器组合布置加以优化，保障多源采集数据的时间同步性，为后续的数据处理环节提供高质量的原始数据[6]。

Table 1. Sensor functions of information collection module
表 1. 信息采集模块传感器功能

传感器类型	检测对象	输出信号	核心作用
烟雾传感器	烟雾浓度、可燃气体	模拟量/数字量	判断烟气生成
红外探测器	温度梯度、热辐射	数字量	识别热失控与阴燃
图像传感器	火焰形态、颜色、纹理	图像数据流	视觉验证与定位

2.2. 数据处理模块

数据处理模块是信息采集与决策判断的重要枢纽，负责信号转换、降噪、特征提取、数据归一化与信息配准，直接影响火情判断可靠性及系统抗干扰性能[7]。模块先通过放大、稳压等电路完成模拟信号预处理。经 AD 转换器将其转化为单片机可识别的数字信号，并根据系统精度要求合理设置采样位数与频率。在保证信息完整性与数据量控制的同时，有效降低运算资源消耗[8]；再采用硬件与基础软件相结合的组合滤波策略消除环境干扰，提取烟雾浓度变化速率、温度上升斜率等典型火灾特征参数，并完成多源数据的时空校准；最终把标准化特征向量及时地传递给决策判断模块。

2.3. 决策判断模块

本单元以数据处理模块所输出的特征向量为基础，搭建硬件层面上的智能判断逻辑架构。其运行逻辑划分为信号有效性验证、多源信息综合评估、火情等级与动作输出三层。硬件层面支持轻量化神经网络算法与动态加权策略的嵌入式部署，借助多信号交叉验证与时间序列判断机制，依据单双三传感器的异常情况将系统状态划分为可疑、预警、火灾三种状态。因而从硬件逻辑上杜绝了单一信号异常导致的误判，也切实降低了漏报、误报概率。具体逻辑规则见表 2。

Table 2. Decision judgment logic rules
表 2. 决策判断逻辑规则

判断条件	输出结果	执行动作
单传感器异常	可疑状态	持续监测
双传感器异常	预警状态	本地提示
三传感器异常	火灾状态	报警 + 联动 + 推送

2.4. 联动执行模块

作为火情判定后的终端物理响应单元，该单元构建了监测、判断、响应、处置一体化的硬件闭环[9]，可适配半开放环境中火灾蔓延快的特点，集成本地声光报警、远程信息推送、智能断电与自动喷淋四大功能。各执行动作都采用并行输出设计，硬件上支持手动自动双模式切换且配有继电器、喷淋控制模块等可靠执行器件。系统从单一探测硬件升级为集预警、报警、控制、灭火于一体的智能消防终端，为软件远程控制与本地动作触发提供切实支撑。

3. 硬件设计

3.1. 核心元器件选型

Table 3. Selection parameters of core components
表 3. 核心元器件选型参数

元器件名称	型号	关键参数	选型理由
主控单片机	STM32	ARM Cortex-M4，多 ADC 接口	运算能力强，接口丰富
烟雾传感器	MQ-2	测量范围 100~10000 ppm	灵敏度高，成本低
红外探测器	非接触式	测温范围 20℃~120℃	适合热失控检测
Wi-Fi 模块	ESP8266	串口透传，TCP/IP 协议	远程通信稳定
报警器件	蜂鸣器 + LED	12 V 供电，声光同步	本地警示清晰

主控单元为硬件系统运算与控制核心，要求具备足够的运算能力、丰富的外设接口、稳定的运行性能以及较低的功耗[8]。因此，选用 STM32 系列 ARM Cortex-M4 内核单片机，其运算能力强、接口丰富且抗干扰性佳，适配半开放环境运行要求。传感器选型围绕多源信息融合展开：烟雾传感器选用 MQ-2 半导体气敏传感器，红外探测器选用非接触式红外测温模块，图像传感器选用小型高清摄像头。通信模块选用 ESP8266 Wi-Fi 模组，报警与执行器件选用 12 V 蜂鸣器、高亮 LED 灯与继电器模组。核心元器件选型参数见表 3。

3.2. 核心功能电路设计

传感器模块电路承担信号调理、噪声抑制等功能，因三类传感器电气特性差异大，为其设计独立调理电路，由此保证信号完整性的同时又实现统一接口接入主控系统，提升硬件模块化及可维护性。烟雾传感器电路以 MQ-2 为核心，采用分压采样和 RC 滤波结构，搭配稳压去耦电路保证稳定性；红外探测器电路包含信号放大、整形、稳压三部分，减少温度测量误差；图像传感器接口电路做电平和阻抗匹配设计，并加入 ESD 保护器件适应复杂电磁条件。同时对三类传感器电路做优化布局，减少电路间的相互干扰。

主控单元电路是数据处理、决策判断模块的硬件核心，以 STM32 单片机为核心，扩展电源、时钟、复位、存储、输入输出等功能电路，构成结构紧凑、抗干扰性能好的完整控制平台。电源电路采用 5 V/12V 双电源宽电压输入设计，含整流、滤波、过流/过压保护；时钟电路采用外部高精度晶振和内部时钟双路备份；复位电路结合上电自动复位与手动复位；存储电路支持掉电保存；输入输出接口采用光电隔离设计，避免外部干扰串入，保障半开放环境下长期稳定运行。

通信与报警电路为联动执行模块的硬件核心，整合 Wi-Fi 通信电路、声光报警电路、继电器控制电路三部分，分别承担远程数据传输、本地火情警示、智能断电/自动喷淋驱动功能，使系统具备本地可报警、远程可管控、自动可处置的综合能力。

4. 软件设计

4.1. 系统主程序设计

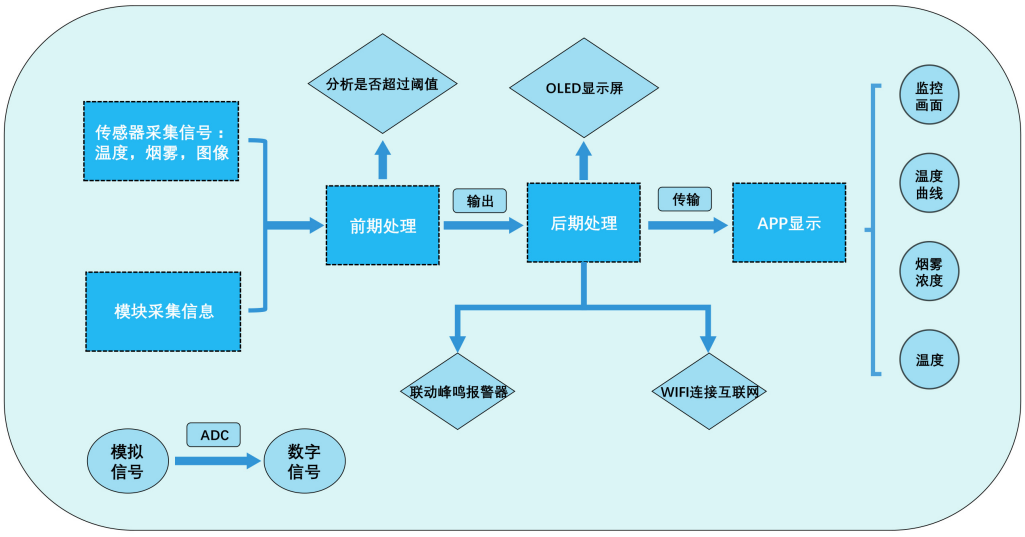

Figure 2. System main program flowchart
图 2. 系统主程序流程图

本程序采用模块化、结构化设计，兼顾火情响应实时性与设备低功耗的要求，是系统软硬件协同运行的总调度核心。系统上电后完成单片机内核、传感器、通信模块等硬件初始化与传感器基准校准，若出现异常则输出故障代码，便于后续维护；系统正常运行后采用“定时采样与中断响应”模式，无火情时降低采样处理频率，使系统进入低功耗模式，一旦检测到信号异常便自动提升运行频率；同时设置看门狗机制防止程序跑飞，保障半开放环境下系统不间断稳定运行，还能为多源数据融合算法、神经网络模型提供标准化的程序运行流程与数据调用接口。系统程序流程详情见图 2。

4.2. 多源数据融合算法

多源数据融合算法是本系统提升半开放环境适应性的关键技术，通过对烟雾、红外、图像三类传感器信息进行综合处理与加权判断，实现高可靠火情判断[10]。决策级融合采用动态加权综合评估方法，内在嵌入了大风、遮挡、粉尘等典型干扰场景模型，可根据环境特征自适应调整传感器权重(见表 4)，经加权计算得到综合火情概率。再对比预设阈值输出无火、预警、火灾三种结果，通过多信号交叉验证排除非火灾干扰，实现判断准确性与实时性的平衡。

Table 4. Weight distribution in multi-source data fusion
表 4. 多源数据融合权重分配

传感器	正常环境权重	大风环境权重	遮挡环境权重
烟雾	0.35	0.20	0.40
红外	0.35	0.40	0.20
图像	0.30	0.40	0.40

4.3. 神经网络识别模型

采用了轻量化卷积神经网络结构，针对嵌入式硬件环境进行量化压缩优化，在降低运算量与内存占用的同时保证识别精度。模型结构分为输入层、隐含层、输出层。输入层接收预处理后的图像特征向量与传感器数据；隐含层通过卷积、池化操作提取火焰颜色、纹理、动态变化等关键特征；输出层用 Softmax 函数求取无火、阴燃、明火三类状态的概率值。模型通过大量半开放环境实景样本训练，结合决策判断模块的硬件逻辑，实现火情的自适应智能识别，突破传统阈值算法的局限性。

4.4. 远程监控软件设计

该通信程序基于 TCP/IP 协议开发，由设备端与手机 APP 两部分构成，实现系统“现场采集－云端传输－远程监控－指令下发”的软件功能闭环，解决了半开放环境下无人值守的监控难题。设备端程序利用硬件 Wi-Fi 通信模块完成数据帧的封装、发送与解析，又设计了自动重连、心跳包、CRC 数据校验等机制，保障远程通信的稳定性与数据准确性，可主动上传实时温度、烟雾浓度、设备状态、报警信息等数据。手机 APP 端实现数据可视化管控，支持远程手动触发断电、喷淋等硬件执行动作，实现对探测器的跨空间管理，有效提升半开放环境下火灾防控的便捷性与有效性。

5. 模型调试与应用

针对烟雾、红外、图像三类传感器，开展严谨的精度调试以消除硬件及环境误差。烟雾传感器经零点校准、灵敏度调节与线性度校正，全量程测量误差控制在±2.5%；红外探测器以标准温度源为参考完成零点校准与线性补偿，测量误差±2.8%；图像传感器通过参数优化实现不同光照下火焰特征清晰采集，清

晰度与帧率均达标。三类传感器调试后数据一致性与准确性显著提升，为多源信息融合奠定可靠数据基础。详情传感器调试结果见表 5。

Table 5. Sensor debugging results
表 5. 传感器调试结果

传感器	调试项目	误差范围	是否合格
MQ-2 烟雾	零点/灵敏度	±2.5%	合格
红外测温	线性度	±2.8%	合格
图像采集	清晰度/帧率	达标	合格

为验证系统实际应用效果，选取电动车充电棚、工厂物料区、码头堆放区三类典型半开放环境进行测试，分别对应电气火灾、物料阴燃、露天堆放火灾等典型火灾类型。实际运行结果表明，系统可适配大风、遮挡、光照变化、高湿度等复杂环境条件，在电池热失控早期、物料阴燃阶段均能快速识别火情，及时触发本地报警、远程推送等功能，有效规避火灾蔓延风险。

6. 结论

本文提出了一种基于红外、图像与烟雾多源信息融合的半开放环境智能火灾探测器，结合轻量化神经网络算法与动态加权策略，构建了集信号采集、数据处理、火情判断、联动执行为一体的智能探测系统。经传感器精度调试、系统联调及典型半开放场景部署测试，该系统可有效抵御风速、遮挡、粉尘等环境干扰，实现火情的快速识别与主动处置，验证了系统的可靠性与环境适应性。

与此同时，本文所设计的火灾探测系统在传感器监测维度与算法优化程度上仍有提升空间，硬件成本尚未实现最优控制。下一步将拓展传感器监测类型，优化轻量化神经网络算法与系统整体功耗，降低硬件成本；开展多设备组网技术研究，实现半开放区域的全域协同监测与处置，进一步提升系统的工程化应用价值。

基金项目

重庆科技大学 2025 年度国家级大学生科技创新训练计划项目：半开放环境下的多源信息融合智能火灾探测器设计研究(项目编号：202511551021)。

参考文献

[1] 邱志刚. 一种基于 VOCs + CO 检测的微型数字式火灾探测器设计[J]. 电脑知识与技术, 2024, 20(13): 103-106.

[2] 蔡路, 郝爱玲, 郭伟. 历史文化街区保护性开发过程中的防火间距问题[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(12): 1747-1750.

[3] 徐鹏, 王一栋. 基于 LoRa 技术的火灾监测系统设计与实现[J]. 无线互联科技, 2025, 22(10): 30-34.

[4] Trofimov, A.Y., Gajiyev, K.G., Portnov, M.A. and Merkulov, A.A. (2025) Wireless Fire Safety Monitoring System. 2025 *International Russian Smart Industry Conference* (*SmartIndustryCon*), Sochi, 24-28 March 2025, 538-543. https://doi.org/10.1109/smartindustrycon65166.2025.10986043

[5] 韩海云, 杨浩, 谢永强, 等. 融合火灾多特征参量的寺院古建筑自适应火灾探测方法[J]. 消防科学与技术, 2025, 44(7): 970-976.

[6] Xie, D., Chen, Q. and Zhu, Y. (2024) Optimal Layout Scheme of Fire Detectors and Operation Condition Monitoring Technology in Urban Integrated Substation. *Measurement*, **236**, Article ID: 115093. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115093

[7] 刘畅, 王张舒君, 张恩茂, 等. 基于 BIM 建模和人工神经网络的快/慢速火灾识别方法[J]. 智能建筑电气技术, 2024, 18(3): 47-51.

[8] 宋志敏. 基于主动感知的船舶机舱火灾检测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2024.
[9] 许东辉. 居民住宅火灾探测预警系统研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林建筑大学, 2024.
[10] 季凯. 基于模糊神经网络的化工生产车间火灾报警方法[J]. 石油化工自动化, 2023, 59(5): 64-68.