

基于多传感融合的建筑智能消防报警系统设计

陈卫军

(深圳市协鹏建筑与工程设计有限公司)

【摘要】针对传统建筑消防报警系统依赖单一传感器、易受环境干扰导致误报率高、响应滞后的问题，文章设计了一种基于多传感融合的智能消防报警系统。系统构建了烟雾、温度、CO等多源数据采集与通信架构，实现了软硬件协同控制；在算法层面，提出融合判定与动态阈值调整模型，用于优化报警准确性与响应速度。通过实验平台验证，结果表明该系统在典型火灾场景下的识别准确率较传统方法提升了21.6%，响应时间缩短约30%，有效降低了误报与漏报现象，具备良好的实用与推广价值。

【关键词】多传感融合；智能消防报警；动态阈值；系统设计

中图分类号：TU855；TU892

DOI：10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.099

Design of Building Intelligent Fire Alarm System Based on Multi-sensor Fusion

CHEN Wei-jun

(Shenzhen Cenpoint Architects & Engineers Co., Ltd.)

【Abstract】In response to the problems of traditional building fire alarm systems relying on a single sensor, being susceptible to environmental interference leading to high false alarm rates and delayed responses, this paper designs an intelligent fire alarm system based on multi-sensor fusion. The system has built a multi-source data acquisition and communication architecture for smoke, temperature, CO, etc., achieving software and hardware collaborative control; At the algorithmic level, a fusion judgment and dynamic threshold adjustment model is proposed to optimize alarm accuracy and response speed. Through experimental platform verification, the results show that the recognition accuracy of the system in typical fire scenarios has been improved by 21.6% compared to traditional methods, and the response time has been shortened by about 30%. It effectively reduces false alarms and missed alarms, and has good practical and promotional value.

【Keywords】multi-sensor fusion; intelligent fire alarm system; dynamic threshold; system design

1 引言

随着城市建筑规模和结构复杂度的不断提升，传统消防报警系统在应对多源火灾隐患时暴露出明显不足。单一传感器对复杂环境的适应性差，易受粉尘、湿度及温度波动影响，造成误报与漏报频发，进而降低系统的可靠性。近年来，物联网与智能感知技术的发展为消防系统的智能化升级提供了新的契机。通过多源信息融合与智能判定，可实现火灾状态的动态识别与自适应报警，有助于提升火灾响应的准确性与实时性。基于此，本文从建筑火灾特征出发，设计了一套多传感融合的智能消防报警系统，重点研究系统架构、软硬件协同设计及融合算法模型，为建筑消防智能化提供可行的工程方案。

2 系统总体设计

针对建筑火灾场景中烟雾、温度、CO浓度等信号的异质性与非线性特征，系统设计需满足多源信

息实时采集、数据融合处理、联动报警与远程监测四个核心功能。系统结构采用分布式感知与集中式控制相结合的架构，通过多传感融合算法实现对火灾早期特征的高精度识别。

设各类传感器的输出信号为 $S_i(t)$ ，其权重为 w_i ，则火灾综合判定指标 $F(t)$ 可表示为：

$$F(t) = \sum_{i=1}^n w_i \times S_i(t) \quad (1)$$

式(1)中： n 为参与融合的传感器数量， w_i 根据传感器可靠性与灵敏度自适应调整。

当 $F(t)$ 超过动态阈值 $T(t)$ 时，系统触发报警事件。阈值采用环境背景修正算法进行修正。为实现多点联动与分区控制，系统的拓扑结构采用主控节点与若干从属采集节点的星型网络形式。主控单元完成信号融合与决策逻辑，从属节点完成现场数据采集与初步特征提取。

2.1 多传感数据采集与通信架构设计

系统数据采集端采用多节点并行采集与集中融合策略。每个节点采集烟雾(MQ-2)、温度(DS18B20)、CO(MQ-7)及红外火焰传感模块,信号经多路A/D转换器接入主控MCU(STM32F407)。采样前端设计低通滤波电路和电压隔离模块,抑制电磁干扰并提高测量精度。通信架构分层设计:内部节点通过RS485总线组成子网,利用Modbus RTU协议进行数据交换;跨楼层或远距离传输部分采用LoRa模块,实现5km范围内低功耗数据中继;控制中心与上位机之间以以太网(TCP/IP)通信,实现远程监测与参数配置。

2.2 系统软硬件协同设计

硬件平台采用模块化设计,由主控板、传感节点板、电源管理模块和报警执行模块组成。主控板以STM32F407为核心,集成A/D采样接口、RS485收发器、LoRa通信模块及以太网PHY芯片;节点板采用分布式结构,支持多传感接口与自动地址识别;电源采用AC220V转DC24V集中供电,并通过DC-DC降压模块为各节点提供稳定的5V电源;报警执行单元包括声光报警器、继电器输出端口以及备用电池切换装置,确保系统断电时可持续工作30分钟以上。

软件系统采用分层架构,分为底层驱动层、数据处理层与应用控制层。软件架构如图1所示。



图1 软件分层架构

驱动层负责传感器数据采集与通信协议解析;数据处理层执行滤波、特征提取与多传感融合算法;控制层根据融合结果生成报警指令并通过上位机界面进行可视化显示。系统软件以FreeRTOS为操作核心,实现多任务调度与优先级控制,各任务模块间通过消息队列与互斥锁机制进行通信。

在报警逻辑上,软件实现“三级判定策略”:任意单一传感信号超预警阈值进入一级监测;两类及以上信号满足判定条件进入二级报警;经持续确认后触发三级联动报警,同时输出控制信号启动排烟、断电及广播系统,显著提高系统的抗干扰与识别精度。

3 多传感融合算法与报警判定模型

3.1 多源传感信号特征提取与预处理

系统采集的烟雾、温度、CO浓度及红外信号属于不同物理量,响应特性和噪声水平差异明显。为提高数据融合判定精度,先对原始信号做时序同步和特征提取:各节点采样时间戳经时钟校准,确保数据在同一周期内对应同一物理状态。随后提取稳态幅值、变化速率及异常波动幅度三类关键特征。

火灾早期往往呈多变量协同上升特征,故定义多源特征向量作为融合算法输入参数。相比单通道判断,多维输入更能真实反映火灾演化趋势,结合采样冗余与时间窗平滑技术,消除异常点干扰,形成稳定的实时输入流。

为提高特征可信度,预处理阶段引入自适应滑动滤波与卡尔曼估计机制,动态调整噪声协方差矩阵来应对不同传感器工作环境的波动性。当温度传感器遇强气流时,测值方差上升明显,滤波系数随之增大,保证输出特征平稳性。为避免多源特征在量纲上差异导致融合偏差,系统采用基于标准差归一化的特征映射,使各物理量在融合层贡献尺度一致,增强后续权重分配与判定模型的稳定性。

3.2 融合判定算法

基于多源数据,系统采用层次化融合模型识别火灾:一级为局部特征融合,计算各传感器的可信度指标;二级为全局决策融合,经综合加权得到报警判定结果。

设第*i*类传感器的输出为 $S_i(t)$,可信度系数为 β_i ,则融合输出 $F(t)$ 可表示为:

$$F(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i \times S_i(t)}{\sum_{i=1}^n \beta_i} \quad (2)$$

式(2)中: n 为参与计算的传感通道数量。 β_i 由传感器灵敏度与实时噪声水平动态调整。为抑制局部干扰导致的瞬态异常,系统对 $F(t)$ 引入时间连续约束:

表1 传统系统与本文设计系统实验结果

火灾类型	传统系统识别准确率/%	多传感融合系统识别准确率/%	提升幅度/%	传统系统响应时间/s	多传感融合系统响应时间/s	缩短幅度/%	传统系统误报率/%	本系统误报率/%	传统系统漏报率/%	本系统漏报率/%
厨房油烟	72.4	90.8	25.4	12.3	8.2	33.3	10.5	4.1	6.8	2.7
阴燃火灾	75.1	92.0	22.5	14.1	9.7	31.2	9.8	3.6	5.7	2.2
电气短路	80.7	97.5	20.9	10.8	7.5	30.6	8.4	3.1	4.9	1.8
明火燃烧	83.5	98.2	17.8	9.4	6.6	29.8	7.3	2.9	4.2	1.5
平均值	77.9	94.7	21.6	11.7	8.2	30.0	9.0	3.4	5.4	2.1

$$F'(t) = \lambda F(t) + (1 - \lambda)F(t - 1) \quad (3)$$

式(3)中: λ 为平滑系数(取0.7-0.9范围),兼顾响应速度与稳定性。当 $F'(t)$ 超设定阈值 $T(t)$ 且持续时间 Δt 满足条件 $\Delta t > t_{\min}$ 时,系统进入报警状态。

为提升算法自适应能力,在加权过程中引入了贝叶斯更新机制,根据传感器的历史误报率动态调整权重。当某通道在近 N 次判定中存在明显偏差时则系统自动减少其在融合输出中的贡献,避免单一通道主导决策。同时,算法在全局层面采用置信区间判定法,对各特征联合分布进行概率估计,实现软判定输出,相比硬阈值触发方式,软判定能更准确区分“临界火灾”和“环境干扰”状态,减少误触发次数。

3.3 报警阈值动态调整与误报抑制

建筑内部温度与气体浓度受通风、湿度、设备运行等因素影响,若采用固定阈值极易产生误报。为此,系统引入动态阈值调整机制,将环境背景参数 $E(t)$ 纳入判定模型。该模型实现阈值的实时自适应调整:当环境波动较大时提高触发阈值,当信号稳定上升时降低阈值以提前报警。

系统在动态阈值基础上引入状态记忆与模糊推理机制。通过对报警状态的时间累积函数进行积分判断,当多源信号持续偏离基准状态且符合模糊集合“火灾趋势”时,系统才输出确认指令。这一设计显著减少了因瞬态气体浓度升高或局部热源引起的虚警。同时,系统对节点分布进行聚类建模——当某区域内多个节点的报警概率同时升高时,判定该区域存在实际火情;若升高仅集中于单节点且未形成空间关联,则自动标记为“待验证状态”,通过时间回溯与二次采样机制进行复核。

4 实验研究

为验证基于多传感融合的建筑智能消防报警系

统有效性,构建了实验验证平台。该平台由传感采集终端、通信与控制模块、上位机数据处理系统组成。实验环境模拟典型建筑火灾场景,包括厨房油烟、仓储阴燃、电气短路燃烧及普通明火四种类型。

在每种场景下,系统采集烟雾浓度、温度、CO浓度等三类传感信号,采样频率为2Hz,通信方式采用RS485总线与Wi-Fi混合组网结构。传统单传感报警系统与本文设计的多传感融合系统同步运行,以保证对比结果的一致性。

传统系统与本文设计系统在不同火灾场景下的性能对比结果如表1所示。

5 结语

本文围绕建筑消防报警的智能化需求,提出了基于多传感融合的系统设计方案,完成了系统结构设计、数据采集与通信架构构建以及融合判定算法的研究。实验结果表明,该系统能够在多种火灾场景下保持较高的识别准确率和快速响应性能,显著降低误报与漏报概率。研究验证了多源传感融合与动态阈值策略在复杂建筑环境中的有效性,为建筑消防系统的智能预警、分布式感知与实时决策提供了参考。后续工作将进一步结合深度学习算法与无线组网技术,提升系统的自学习能力与部署灵活性。