

建筑电气火灾预警的智能传感器网络与联动控制设计

曹晓宁

(山东省建筑设计研究院有限公司)

【摘要】建筑电气火灾预警的核心在于智能传感器网络与联动控制的协同设计，针对传统监测手段响应滞后和误报率高的问题，文章构建了多类型传感器融合的分布式监测体系，其覆盖电流、电压、温度和烟雾及气体等参数，采用高可靠性低功耗传输方式保障数据的稳定性。同时，结合实时监测与动态阈值调整，提升火灾早期识别能力，并设计预警等级分级响应机制联动智能断电、消防系统与应急疏散设备，实现火灾前兆精准预警与高效处置，降低火灾损失和提高建筑电气安全性。

【关键词】建筑电气火灾；智能传感器网络；联动控制

中图分类号：TU892

DOI：10.13655/j.cnki.ibci.2026.03.043

Design of Intelligent Sensor Network and Linkage Control for Building Electrical Fire Early Warning

CAO Xiao-ning

(Shandong Provincial Architectural Design and Research Institute Co., Ltd.)

【Abstract】The core of building electrical fire early warning lies in the collaborative design of an intelligent sensor network and linkage control. In response to the issues of delayed response and high false alarm rates in traditional monitoring methods, this paper establishes a distributed monitoring system based on the integration of multiple types of sensors, covering parameters such as current, voltage, temperature, smoke, and gas. The system utilizes a high-reliability and low-power transmission method to ensure data stability. At the same time, by combining real-time monitoring with dynamic threshold adjustments, it enhances the ability to detect fires at an early stage. Additionally, a graded response mechanism is designed for fire alerts, which links intelligent power disconnection, fire protection systems, and emergency evacuation devices. This approach achieves precise fire precursor warnings and efficient handling, reduces fire damage, and enhances the electrical safety of buildings.

【Keywords】building electrical fire; intelligent sensor network; linkage control

1 引言

建筑电气火灾已成为建筑安全的核心威胁，国家消防救援局2024年数据显示，全国电气故障引发的火灾占比达32.3%，其中居住场所火灾占建筑物火灾总量的79%。传统监测技术依赖剩余电流式报警装置与人工巡检，存在电弧火灾监测盲区，漏电模块无法捕捉金属性接地故障火花，隐蔽过热点识别不足，温度模块采样频率低，阈值报警误报率高，固定阈值难以适应动态负荷变化，导致夜间0~6时亡人占比达31.3%。智能传感器网络结合电气火灾监测需求，在高温、异常电弧、短路和漏电等参数监测上具备更强适应性。无线传输与分布式部署提升火灾预警覆盖范围，结合多参数融合策略有助于提高监测精度并降低误报率，联动控制可在火灾前兆阶段自动执行负载调整、局部断电以及消防系统预启动等措施，提高建筑电气安全性。

2 智能传感器网络的架构设计

2.1 传感器网络系统架构

智能传感器网络采用分层式架构，由感知层、传输层、处理层和应用层组成，架构图见图1。感知层负责数据采集，包含电流、电压、温度、烟雾及气体传感器；传输层采用有线与无线结合的方式，有线部分依托RS485、CAN总线等工业协议确保本地稳定传输，无线部分基于Zigbee、LoRa、NB-IoT等协议实现低功耗远程监测；处理层通过边缘计算设备进行数据预处理，包括信号降噪、异常识别和数据缓存等，并向云端或控制中心上传关键信息；应用层整合数据可视化、联动控制及远程管理功能，通过监测平台实现火灾风险评估、分级报警推送、联动设备控制及历史数据分析，保证系统具备高效的火灾预警能力^[1]。

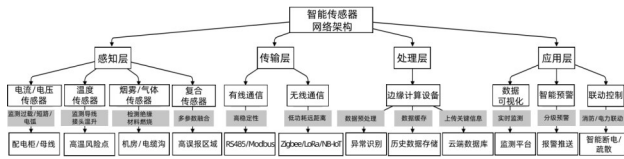


图1 智能传感器网络架构图

2.2 关键传感器类型及选型

电流和电压传感器采用霍尔效应与分流检测方式,使用LTS 6-NP(霍尔效应电流传感器)和INA169(精密分流电压传感器)这类传感器,分别安装在主配电柜母线、分路开关和终端负载回路等关键位置,实时监测负载电流、电压波动,识别短路、过载、接地故障及异常电弧放电。复合传感器利用 Bosch BME680 多传感器模块,将电气参数与环境参数结合,通过数据交叉验证降低误报率,提高监测准确性(见图2)^[2]。

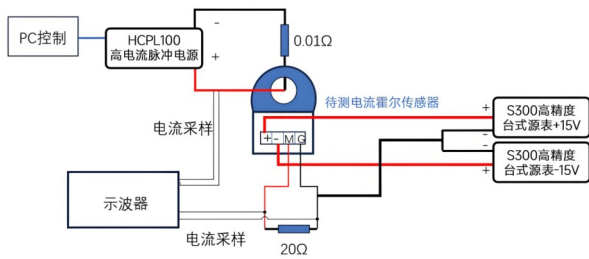


图2 消防系统传感器布局图

3 建筑电气火灾预警系统的技术实现

3.1 电气火灾风险识别方法

建筑电气火灾的风险识别依赖于智能传感器网络中各类传感器的协同工作。电流传感器部署在建筑内配电系统、回路及负载处,通过监测电流波动、过载和短路等异常变化,识别电气设备潜在的火灾风险,电流数据I用公式计算:

$$R_{current} = w_1 \times I_{load} + w_2 \times I_{fault} \quad (1)$$

式(1)中: I_{load} 为正常负载电流; I_{fault} 为故障电流; w_1 、 w_2 为加权系数。温度传感器与电流传感器相结合,温度异常升高时能及时反馈电气设备过热的预警,防止由于接触不良或设备老化引发的电气火灾;烟雾与气体传感器用于检测电气设备过热或高压导致的有毒气体泄漏,及时捕捉火灾前兆。为提高监测准确度,采用传感器数据的交叉验证与多模态数据融合技术,一旦电流和温度传感器同时出现异常,系统会认定为潜在的火灾风险信号,减少误报警^[3]。

3.2 监测数据的实时分析与处理

电气火灾监测数据的实时分析与处理依赖于边缘计算与云计算的协同设计,在设计的传感器网络架构中,电流、温度、烟雾等数据通过传感器采集模块实时传输至边缘设备,进行初步的信号处理与异常检测^[4]。边缘计算模块基于设定的阈值对数据进行实时判断。当电气系统中的电流波动($I_{current}$)、温度异常(T_{temp})等情况发生时,边缘设备使用以下公式进行初步预警:

$$R_{edge} = w_1 \times I_{current} + w_2 \times T_{temp} \quad (2)$$

式(2)中: $I_{current}$ 和 T_{temp} 分别是电流和温度数据; w_1 和 w_2 是权重系数;若 R_{edge} 超过设定阈值,边缘设备将触发本地报警,并进行数据预处理以减少延迟。经过无线协议(Zigbee、LoRa、NB-IoT)上传至云端后,云平台结合历史数据与实时数据,利用大数据分析技术进行故障模式识别与趋势预测,平台采用以下公式对数据进行深度分析:

$$R_{cloud} = \sum_{i=1}^n (w_i \times D_{sensor}(i)) \quad (3)$$

式(3)中: $D_{sensor}(i)$ 是第*i*个传感器的采集数据, w_i 是每个传感器的权重,基于分析结果系统动态调整预警阈值,优化火灾预警系统的灵敏度与准确度。

4 建筑火灾预警的联动控制与应急响应设计

4.1 预警信息的多级响应机制

建筑电气火灾预警系统的预警信息响应机制,基于火灾风险等级科学划分,分为低风险、中风险、高风险和紧急报警四个层级。当电流、温度等传感器监测到轻微数据异常时,系统将触发低风险预警,提示相关人员及时开展设备巡检排查;处于中风险状态时,系统自动推送中风险预警信息,明确要求相关人员开展设备专项维护,防范风险升级;高风险预警触发后,将自动启动联动控制措施,如局部断电、故障区域隔离等,快速遏制风险蔓延;当系统监测到高温、浓烟等紧急火灾信号时,立即启动紧急报警程序,同步触发全建筑电力隔离、消防系统联动启动及人员疏散指引^[5]。预警信息通过短信、APP通知、建筑管理系统及消防中心等多渠道同步推送,确保不同层级管理人员第一时间接收警报、快速响应处置,具体详见表1。

表1 预警等级与联动控制响应

风险等级	预警内容	联动控制	响应机制	推送渠道
低风险	设备轻微异常	提醒巡检	短时间设备检查	APP、短信
中风险	温度、负载等异常	强化巡检,预警	提前关闭部分负载	APP、建筑管理系统
高风险	电弧、严重过载	自动断电	启用局部隔离	消防中心、管理人员报警
紧急报警	高温、浓烟等	全面断电,启用消防系统	火灾区域疏散指引	紧急通知、报警推送

4.2 智能断电与电气系统安全控制

智能断电与电气系统的联动控制设计保证了火灾发生时电气系统的安全运行,当传感器检测到电气设备的故障信号(如温度过高或电流过载等),系统使用边缘计算模块分析火灾风险并启动自动断电机制。系统根据故障电流和设备状态确定需要断电的区域,并使用分级保护机制控制电力供应,局部断电机能够确保仅受影响的电路和设备被切断,而不会影响整个建筑的电力供应,特别是对于电梯、医疗设备以及数据中心等关键负载,系统采取单独的电力管理策略。智能电力管理系统与建筑管理系统联合,实时监控和智能调度可对电气设备进行安全管理。电力系统与消防设备、疏散指引系统联动,使其在火灾发生时电力供应的安全性,并保证建筑内其他重要设备的正常运转。

4.3 消防系统与应急疏散联动

①火灾报警系统依托电流、温度、烟雾等传感器数据,对电气设备运行状态进行实时精准监测,一旦触发预警信号,系统立即自动启动联动控制程序,同步激活各类消防设备。喷淋系统依据火灾区域热量分布精准自动启动,有效遏制火灾蔓延势头;排烟系统结合火灾区域烟雾浓度、温度动态变化实时调节运行参数,切实保障疏散通道烟雾及时清除,减少有毒有害气体积聚,为人员疏散创造安全环境。

②智能应急疏散指引系统在火灾报警触发后,立即自动启动疏散路径与指示系统调整程序。该系统联动建筑管理系统(BMS)实时采集火灾相关数据,动态优化调整疏散指示灯、语音广播、紧急照明等设备运行状态,确保人员快速定位最安全、最高效的疏散通道。系统联动控制环节,结合火灾区域烟雾扩散态势、火灾发生位置及建筑结构特点,科学优化疏散指引方案,保障人员安全、快速撤离。

③应急照明系统在火灾报警触发瞬间自动启动,确保电力故障或火灾发生期间,疏散通道照明持续稳定有效。系统结合火灾区域实际情况,智能调

节应急灯光亮度与分布,确保人员在低能见度环境下清晰辨识疏散路线,保障疏散工作有序推进。

4.4 事故追溯与应急管理优化

火灾事故的追溯与应急管理优化,依托系统完善的事故记录与数据存档功能。事故发生后,系统自动生成详细事故报告,明确包含事故发生时间、地点、持续时长及受影响区域等关键信息,为事后事故分析提供坚实数据支撑,助力精准识别火灾发生根源。平台汇聚建筑电气系统各类运行数据,结合历史火灾事件开展大数据分析,持续提升火灾预警系统的预警精准度与可靠性,推动应急管理优化。

5 结语

本文提出基于智能传感器网络与联动控制设计的建筑电气火灾预警方法,有效解决传统监测方式中存在的响应滞后、误报率偏高的痛点问题。通过多类型传感器融合与分布式部署,全面覆盖电流、电压、温度、烟雾等电气火灾关键监测参数,结合高可靠性、低功耗传输技术,实现电气火灾的早期精准识别与预警阈值动态优化调整。联动控制设计可在火灾前兆阶段高效实现智能断电、消防系统联动启动及人员应急疏散引导,显著提升建筑电气火灾预警系统的精准性、实用性与可靠性,为建筑电气安全提供坚实保障。

参考文献

- [1] 苏周燕. 建筑电气消防设计与施工方案探究[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23 (12): 116-118.
- [2] 张倩. 建筑防火中电气火灾监控运用探讨[J]. 消防界(电子版), 2024, 10 (18): 66-68.
- [3] 谢永芳. 建筑常见电气火灾类型与消防配电设计要点[J]. 建材发展导向, 2024, 22 (17): 59-62.
- [4] 王宗超, 方江平. 火灾预警系统的应用现状与发展趋势[J]. 今日消防, 2022, 7 (4): 32-34.
- [5] 解倩. 建筑电气火灾事故原因分析及预防措施[J]. 今日消防, 2022, 7 (1): 100-102.