

电气火灾监控系统在智能建筑中的精准定位技术探索

房连富 唐瑾 黄超
上海倍安实业有限公司 上海 200032

摘要: 电气火灾监控系统的精准定位技术是智能建筑安全管理的关键环节,随着建筑结构复杂化与用电设备密集化,传统定位方法因抗干扰能力弱、精度不足等问题难以满足需求。本文聚焦智能建筑场景,系统探讨多传感器融合、无线通信、深度学习及算法优化等定位技术的创新应用。通过分析温度、烟雾、电流等多源数据融合方法,结合Wi-Fi、UWB等无线通信技术的信号模型优化,提出基于卷积神经网络与自适应滤波的混合定位框架,解决非视距传播与动态环境干扰难题,旨在为智能建筑电气火灾的快速定位与处置提供理论支撑与技术路径,助力构建更安全的智慧建筑生态。

关键词: 电气火灾监控系统;智能建筑;精准定位技术

引言

智能建筑作为城市现代化的重要载体,其内部电气系统复杂度高、用电负荷大,电气火灾风险随之攀升。现如今,电气故障引发的火灾占建筑火灾总数的较高比例,而精准定位火源位置是缩短应急响应时间、降低损失的关键。传统定位技术多依赖单一传感器或简单信号处理,在复杂建筑结构(如多层停车场、设备机房)中易受多径效应、非视距传播等因素干扰,导致定位精度不足或稳定性差。近年来,随着物联网、人工智能与无线通信技术的发展,多传感器融合、深度学习等新兴技术为定位精度提升提供了新思路。

1 电气火灾监控系统基础理论

(1) 电气火灾的发生通常源于电气系统中的异常能量释放,主要成因包括线路过载、短路、接触不良、漏电及设备老化等。过载时导线温度持续升高,绝缘材料性能劣化,最终引发燃烧;短路产生的电弧能量可在极短时间内释放大量热量,直接点燃周围可燃物;接触不良导致局部电阻增大,形成高温热点;漏电电流通过非正常路径入地,可能引发电火花或电弧。这些成因在电气参数上表现为电流突变、电压波动、温度异常升高、电弧光产生等特征,为监控系统提供检测依据。(2) 电气火灾监控系统由前端感知层、数据传输层与后台处理层构成闭环架构。感知层通过部署电流互感器、温度传感器、剩余电流探测器及电弧故障检测装置等,实时采集电气线路的电流、电压、剩余电流、温度及电弧特征参数。这些传感器需具备高灵敏度与抗干扰能力,以准确捕捉微弱故障信号。数据传输层采用有线或无线通信技术,将前端数据稳定传输至监控主机,确保数据完整性与实时性^[1]。后台处理层基于嵌入式系统或云计算平台,对

采集数据进行多维度分析,通过预设阈值比对、趋势预测及模式识别算法,判断电气系统是否存在火灾隐患。当检测到异常时,系统立即触发声光报警,并通过短信、APP推送等方式通知管理人员,同时记录故障位置、时间及参数,为后续排查提供依据。(3) 故障特征提取与识别是监控系统的技术核心,电流突变特征可通过瞬态波形分析捕捉,温度异常需结合环境温度进行补偿校正,剩余电流检测需排除正常泄漏电流干扰,电弧故障识别则依赖高频电流分量分析。现代监控系统逐渐引入人工智能技术,通过机器学习模型对历史故障数据进行训练,优化特征提取与分类算法,提升故障识别的准确率与泛化能力。

2 精准定位关键技术研究

2.1 多传感器融合定位技术

(1) 多传感器融合定位技术通过整合温度、烟雾、电流、视频等多类型传感器的数据,突破单一传感器在信息维度与空间覆盖上的局限,构建更全面、精准的电气火灾定位体系。温度传感器可捕捉电气线路或设备的异常温升,反映火灾早期的热积累过程;烟雾传感器通过检测空气中的悬浮颗粒浓度,识别燃烧产生的可见或不可见烟雾;电流传感器监测线路电流的突变或持续过载,揭示电气故障引发的能量异常释放。不同传感器在时间分辨率、空间覆盖范围及信息类型上形成互补。而数据融合的核心在于将这些异构数据进行时空对齐与特征关联,通过加权平均、卡尔曼滤波或贝叶斯估计等方法,消除单传感器噪声干扰,提取更可靠的故障特征。(2) 基于多源信息融合的定位算法需解决传感器数据的时间同步与空间配准问题,时间同步通过统一时钟源或时间戳对齐实现,确保不同传感器采集的数据对应同一

时刻的电气状态。空间配准则利用建筑平面图或三维模型,将传感器位置映射至统一坐标系,结合视频图像的几何校正技术,实现故障点在物理空间中的精准定位^[2]。算法设计上,可采用分层融合策略:底层融合直接处理原始数据,通过特征提取与关联规则生成初步定位结果;高层融合则结合电气系统拓扑结构与火灾蔓延模型,对底层结果进行优化修正。(3)融合定位的精度提升源于多维度信息的交叉验证与冗余校正,单传感器定位易受环境干扰或设备故障影响,导致误差累积或定位漂移;多传感器融合通过信息互补与冗余设计,显著降低误报率与漏报率。温度与电流数据的融合可区分正常负载升温与故障过热,避免因设备运行导致的虚警;视频与烟雾数据的结合能快速确认火情真实性,减少因灰尘或水汽引发的误判。此外,融合算法通过动态调整传感器权重,适应不同场景下的信息可靠性变化。

2.2 基于无线通信的定位技术

(1)无线通信技术在定位领域的应用为智能建筑电气火灾监控系统提供了灵活高效的解决方案,Wi-Fi技术凭借广泛的基础设施覆盖,通过接收信号强度指示与指纹定位算法实现室内粗略定位,适用于大范围区域监测,但易受环境衰减与多径效应影响导致精度波动。ZigBee技术以低功耗、自组网特性见长,通过时间差或信号强度测量实现短距离精确定位,尤其适合设备密集的建筑内部部署,其动态拓扑结构可自适应调整信号传输路径,增强复杂环境下的定位鲁棒性。UWB技术通过纳秒级窄脉冲传输实现厘米级定位精度,其高时间分辨率有效抑制多径干扰,结合到达时间差算法在障碍物密集场景中仍能保持稳定性能,成为高精度需求场景的首选方案。(2)无线信号传输模型的优化需从信号传播特性与算法设计双重维度突破,针对室内复杂环境,需建立包含反射、衍射、散射的多径传播模型,通过引入信道衰落补偿机制修正信号强度测量偏差。空间滤波技术可提取直达路径信号分量,减少非视距传播干扰^[3]。定位算法层面,融合加权最小二乘法与卡尔曼滤波,通过迭代优化估计位置参数并抑制动态噪声,提升轨迹跟踪平滑性。机器学习算法可训练环境特征与定位误差的映射模型,实现误差的实时校正。(3)系统稳定性的增强依赖于多层次抗干扰策略设计,频谱感知技术动态监测干扰频段分布,通过跳频扩频或认知无线电技术规避高干扰信道。智能天线阵列利用波束成形技术形成定向接收波束,抑制非目标方向干扰信号。信号处理层面,采用自适应噪声抵消算法分离干扰分量,结合小波变换去噪技术提升信号纯净度。针对同频干扰,引入正交码分多址技术实现用

户信号正交化传输。系统架构设计上,采用分布式定位节点与集中式数据处理相结合的方式,通过冗余传输与数据融合机制降低单点故障风险,确保在局部干扰环境下仍能维持整体定位功能。

2.3 基于深度学习的定位技术

(1)基于深度学习的定位技术通过构建高维特征提取与映射模型,突破传统定位方法对环境先验知识的依赖,为智能建筑电气火灾监控系统提供更智能的定位解决方案。卷积神经网络凭借其局部感知与权重共享特性,可自动从多传感器数据中提取空间-时间联合特征,通过卷积层逐层抽象故障特征,全连接层实现特征到位置的映射^[4]。循环神经网络及其变体(如LSTM、GRU)则擅长处理时序依赖性强的定位数据,通过记忆单元捕捉电气故障从萌芽到发展的动态过程。针对多径效应与非视距传播干扰,注意力机制可动态调整不同传感器数据的权重,强化关键特征对定位的贡献,抑制噪声干扰。(2)定位模型的构建需兼顾数据表征能力与计算效率,输入层设计需统一多源异构数据的维度与格式,例如将温度、电流等标量数据与视频图像的像素矩阵进行拼接或编码,形成可被神经网络处理的张量结构。隐藏层采用模块化设计,卷积模块负责空间特征提取,循环模块处理时序依赖,注意力模块增强关键特征表达,通过残差连接缓解深层网络梯度消失问题。输出层根据定位需求设计,直接回归坐标值或分类输出区域标签,结合损失函数优化模型参数。训练阶段采用迁移学习策略,利用公开数据集预训练模型基础参数,再通过建筑场景的特定数据微调,加速收敛并提升泛化能力。(3)定位准确性与鲁棒性的验证需构建多维度测试体系,静态场景测试评估模型在固定环境下的定位误差分布,动态场景测试模拟人员移动、设备启停等干扰因素对定位的影响,极端场景测试验证模型在传感器故障、信号遮挡等异常条件下的容错能力。通过混淆矩阵分析分类模型的区域识别准确率,利用误差椭圆评估回归模型的定位不确定性。长期运行测试显示,模型对环境变化的自适应能力较强,可通过在线学习持续优化参数,保持定位性能的稳定性,为电气火灾的快速定位与处置提供可靠技术支撑。

2.4 定位算法优化与改进

现有定位算法在复杂建筑环境中普遍面临精度受限、稳定性不足及适应性差等问题。传统基于信号强度的定位方法易受多径效应与非视距传播干扰,导致距离估计偏差累积;基于时间差的定位算法对时钟同步精度要求严苛,硬件成本与实现难度较高;而基于指纹匹配的定位方法则依赖大量先验数据采集,环境变化时需频繁更

新数据库,维护成本高昂。此外,多数算法采用静态参数配置,难以适应动态场景中信号传播特性的实时变化,导致定位结果波动或漂移。参数估计方法方面,最小二乘法等传统优化技术易陷入局部最优解,尤其在非线性系统中收敛性难以保证;卡尔曼滤波及其变体在处理非高斯噪声或突发干扰时性能下降,鲁棒性不足^[5]。针对上述不足,算法优化方案从信号处理、参数估计与动态适应三方面展开。第一,在信号处理层面,引入多径分离技术,通过空间滤波或时频分析提取直达路径信号分量,削弱反射与衍射干扰。结合信道状态信息(CSI)的细粒度特征,替代传统信号强度指标,提升距离估计的分辨率。第二,参数估计方法上,采用粒子滤波替代卡尔曼滤波,利用蒙特卡洛采样处理非线性与非高斯系统,增强对突发干扰的抑制能力。引入期望最大化(EM)算法迭代优化模型参数,避免局部最优解,提升全局收敛性。第三,针对动态环境适应性,设计自适应权重调整机制,根据传感器实时数据动态分配不同定位方法的权重,例如在视距传播条件下优先采用时间差定位,非视距场景下切换至信号强度与指纹融合定位。同时构建环境感知模块,通过在线学习实时更新信号传播模型参数,使算法具备环境自适应能力。此外,仿真实验通过构建包含多材质障碍物、动态人员流动的虚拟建筑场景,验证算法改进效果。对比优化前后算法的定位误差分布,改进算法在非视距区域内的定位精度显著提升,误差波动范围缩小;粒子滤波与EM算法的组合使参数估计收敛速度加快,且在低信噪比条件下仍能保持稳定定位;自适应权重调整机制使系统在环境突变时(如门窗开启导致信号传

播路径改变)快速恢复定位性能,减少定位中断时间。

结语

综上所述,电气火灾监控系统的精准定位技术是智能建筑安全防护的“最后一公里”。本文通过整合多传感器数据融合、无线通信信号优化、深度学习特征提取及算法自适应改进等技术,构建了覆盖静态与动态场景的混合定位体系。研究验证了多源信息交叉验证对定位精度的提升作用,无线通信模型的优化显著增强了复杂环境下的抗干扰能力,而深度学习与自适应滤波的结合则使系统具备环境自适应与长期稳定性。未来,随着5G、数字孪生等技术的融合,定位系统将向更高精度、更低延迟、更强智能化的方向发展。智能建筑需持续迭代定位技术,结合标准化建设与场景化部署,推动电气火灾防控从被动响应向主动预警转型,为城市安全运行提供坚实保障。

参考文献:

- [1]王少军.电气火灾监控在现代智能建筑中的应用[J].智能建筑与智慧城市,2024,(02):138-140.
- [2]杨昊,朱秀锦.建筑电气火灾成因及防控策略[J].今日消防,2025,10(09):71-73.
- [3]梁伟.基于无线传感器网络的民用建筑电气火灾报警系统设计[J].电工技术,2025,(16):93-95.
- [4]李进,毕研鹏.建筑电气设计中的火灾隐患及其对策研究[J].电工技术,2025,(14):257-259.
- [5]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(04):32-34.