

基于多参数融合的煤矿外因火灾预警系统研发与应用

何贵兵

中煤科工集团重庆研究院有限公司 重庆 400037

摘要：本文介绍了基于多参数融合的煤矿外因火灾预警系统的研发与应用。该系统通过整合温度、烟雾、火焰、气体浓度等多种传感器数据，采用先进的数据处理与融合算法，实现对煤矿外因火灾的实时监测和预警。系统具有高精度、高可靠性和智能化等特点，能够有效降低煤矿火灾风险，保障矿工生命安全，文章详细阐述系统架构设计、传感器选型与布置、数据处理与融合模块以及预警算法与决策机制等关键内容，为煤矿火灾预警提供新的解决方案。

关键词：煤矿外因火灾；多参数融合；预警系统；火灾监测

1 煤矿外因火灾概述

1.1 火灾类型与原因

煤矿外因火灾是指由外部火源引起的火灾，这些火源可以是明火、爆破、电流短路等。这种火灾在煤矿生产中具有较高的风险性，一旦发生，往往会造成严重的人员伤亡和财产损失。煤矿外因火灾主要可以分为以下几种类型；（1）明火火灾：这类火灾通常由井下吸烟、电焊、气焊、喷灯焊等明火作业，或用电炉、大灯泡取暖等行为引发。明火能够直接引燃可燃物，造成火灾。（2）电火花火灾：由于机电设备性能不良、管理不善，如电钻、电动机、变压器、开关、插销等设备的损坏、过负荷和短路，可能产生电火花，继而引燃可燃物。（3）爆破火灾：违章爆破作业，如放明炮、糊炮、空心炮，以及用动力电源爆破、不装水炮泥等，都可能产生爆破火焰，导致火灾。（4）机械摩擦及物体碰撞火灾：机械设备的摩擦，如胶带与滚筒、胶带与碎煤的摩擦，以及采掘机械截齿与砂岩的摩擦等，都可能产生高温，进而引发火灾。

原因分析；煤矿外因火灾的原因多种多样，但归根结底，都是由于火源与可燃物的相互作用所致。具体来说，可以归结为以下几点：如井下吸烟、违规使用明火等，都容易引燃可燃物。设备损坏、过负荷和短路等故障可能产生电火花，进而引发火灾。违章爆破作业不仅可能导致火灾，还可能引发瓦斯、煤尘爆炸等严重后果。机械设备在使用过程中产生的摩擦和碰撞，如未得到及时有效的控制，也可能引发火灾。

1.2 火灾特征分析

煤矿外因火灾是指由煤矿开采过程中外部因素引发的火灾，这些外部因素包括但不限于明火、电火花、机械摩擦、爆破作业不当等。这类火灾在煤矿安全生产中构成重大威胁，不仅影响煤矿的正常生产运营，更对矿

工的生命安全构成严重威胁。煤矿外因火灾的特征可以从以下几个方面进行深入分析；第一突发性强。煤矿外因火灾往往在短时间内突然发生，没有明显的预兆。这种突发性使得火灾初期的扑救工作尤为困难，极易造成火势的迅速蔓延。第二火源多样。引发煤矿外因火灾的火源种类繁多，包括明火、电火花、机械摩擦火花、爆破火焰等。这些火源的存在增加了火灾发生的可能性，也使得火灾的预防和监控工作更加复杂。第三蔓延速度快。煤矿井下环境复杂，存在大量的可燃物和易燃气体。一旦火灾发生，火势会迅速蔓延，特别是在有风流助燃的情况下，火势的蔓延速度更是难以控制^[1]。第四危害严重。煤矿外因火灾不仅会造成煤炭资源的损失，更重要的是会威胁矿工的生命安全。火灾产生的有毒气体和高温环境极易导致矿工中毒、窒息或烧伤等严重后果。第五扑救难度大。由于煤矿井下环境的特殊性，火灾扑救工作面临诸多困难。如空间狭小、通风不良、烟雾弥漫等，都增加了救援人员的作业难度和风险。煤矿外因火灾具有突发性强、火源多样、蔓延速度快、危害严重和扑救难度大等特征。

2 多参数融合技术在火灾预警中的应用原理

2.1 多参数融合技术概述

多参数融合技术是一种将多个参数或指标进行综合处理，以得出更全面、更综合的评估结果或决策依据的方法。在火灾预警系统中，多参数融合技术能够整合来自不同传感器的数据，如温度、烟雾浓度、火焰图像等，从而更准确地判断火灾的发生和发展趋势。传统的火灾预警系统往往依赖于单一的传感器，如温度探测器或烟雾探测器。这种单一参数的检测方式存在局限性，容易受到环境因素的影响而产生误报或漏报。例如，温度探测器可能在高温环境下误报火灾，而烟雾探测器则可能因灰尘或水蒸气的影响而产生误报。此外，单一参

数的检测方式也无法全面反映火灾的复杂性和多样性。相比之下,多参数融合技术通过整合多个传感器的数据,能够更全面地反映火灾的特征。这些传感器可以包括温度传感器、烟雾传感器、火焰探测器、红外热像仪等,它们各自具有不同的检测原理和优势。通过这些传感器的数据进行融合处理,可以实现对火灾的多维度监测和预警,从而提高预警的准确性和可靠性。多参数融合技术不仅提高了火灾预警的准确性,还增强了系统的鲁棒性和适应性。由于火灾的发生和发展受到多种因素的影响,包括可燃物的种类、数量、分布以及环境条件等,因此火灾预警系统需要能够适应不同的火灾场景和环境条件。

2.2 参数选择与优化

参数的选择应根据火灾预警的实际需求进行,既要考虑火灾的主要特征,又要兼顾系统的复杂性和成本效益。首先,参数的选择应基于火灾的主要特征,火灾的发生和发展通常伴随着温度上升、烟雾产生、火焰出现等特征。温度传感器、烟雾传感器和火焰探测器是火灾预警系统中不可或缺的传感器。还可以根据实际需求添加其他传感器,如红外热像仪用于监测火灾的蔓延趋势,气体传感器用于检测有害气体浓度等。其次,参数的优化应考虑到系统的复杂性和成本效益,过多的传感器会增加系统的复杂性和成本,而过少的传感器则可能无法全面反映火灾的特征。因此,在选择参数时需要进行权衡和优化。一方面,可以通过实验和数据分析来确定最优的传感器组合和数量;另一方面,可以利用先进的算法和技术来提高传感器的精度和可靠性,从而降低系统的复杂性和成本。另外,参数的优化还应考虑到环境因素的影响。火灾预警系统通常需要在复杂多变的环境下运行,如高温、高湿、灰尘等。这些因素可能会对传感器的性能和精度产生影响。因此在选择和优化参数时,需要充分考虑到环境因素的影响,并采取相应的措施进行补偿和校正^[2]。

2.3 信息融合算法

信息融合算法是多参数融合技术的核心,它负责将来自不同传感器的数据进行整合和处理,以得出更全面、更准确的火灾预警结果。信息融合算法可以分为多个层次,包括数据层融合、特征层融合和决策层融合。数据层融合是最底层的融合方式,它直接将来自不同传感器的原始数据进行整合。这种融合方式能够保留尽可能多的原始信息,但也需要处理大量的数据,对计算能力和存储资源要求较高。在实际应用中,数据层融合通常用于对传感器数据进行预处理和校准,以提高数据的

准确性和可靠性。特征层融合是在数据层融合的基础上进行的,它提取来自不同传感器的特征信息,如温度变化趋势、烟雾浓度变化率、火焰图像特征等。这些特征信息能够更全面地反映火灾的特征,同时也降低了数据的维度和复杂性。特征层融合算法可以采用加权平均法、指标线性组合法、层次分析法等方法进行融合处理。决策层融合是最顶层的融合方式,它根据来自不同传感器的数据和特征信息进行综合判断,以得出最终的火灾预警结果。决策层融合算法可以采用模糊推理、神经网络、贝叶斯网络等方法进行融合处理。其中,模糊推理能够根据不确定性和模糊性信息进行推理和判断;神经网络则能够通过学习和训练来识别火灾的特征和模式;贝叶斯网络则能够利用概率论和统计学原理进行推理和预测。不同的算法具有不同的优势和局限性,需要根据系统的复杂性和成本效益进行权衡和优化,还需要对算法进行充分的验证和测试,以确保其准确性和可靠性。

3 基于多参数融合的煤矿外因火灾预警系统设计

3.1 系统架构设计

系统架构设计是整个预警系统的基石,它决定了系统的整体性能、可扩展性和维护性。系统总体架构采用分层设计,从上至下依次为用户界面层、业务逻辑层、数据处理层、传感器网络层和物理硬件层^[3]。用户界面层负责与用户交互,展示预警信息和系统状态;业务逻辑层处理用户请求,执行预警逻辑和决策机制;数据处理层负责传感器数据的接收、预处理和融合;传感器网络层则负责传感器数据的采集和传输;物理硬件层包括各类传感器、通信设备和计算设备等。系统采用标准化的通信协议和数据接口,以确保各组件之间的无缝连接和数据交换。传感器网络层通过有线或无线方式(如 Zigbee、LoRa、Wi-Fi等)与数据处理层通信,传输实时数据。数据处理层与业务逻辑层之间采用高效的数据传输协议,如TCP/IP或MQTT,确保数据的实时性和完整性。系统架构设计注重安全性和可靠性,采用冗余设计和故障切换机制,确保在单个组件故障时系统仍能正常运行,系统采用加密通信和数据备份策略,保护数据的安全性和完整性。

表1: 系统架构设计概览

系统架构层	主要职责	数据传输方式与协议
用户界面层	与用户交互,展示预警信息和系统状态	无特定数据传输相关描述
业务逻辑层	处理用户请求,执行预警逻辑和决策机制	与数据处理层采用高效数据传输协议(如TCP/IP或MQTT)

续表:

系统架构层	主要职责	数据传输方式与协议
数据处理层	负责传感器数据的接收、预处理和融合	与传感器网络层通过有线或无线方式(如 Zigbee、LoRa、Wi-Fi 等)通信;与业务逻辑层采用高效数据传输协议(如 TCP/IP 或 MQTT)
传感器网络层	负责传感器数据的采集和传输	通过有线或无线方式(如 Zigbee、LoRa、Wi-Fi 等)与数据处理层通信
物理硬件层	包括各类传感器、通信设备和计算设备等	无特定数据传输相关描述
整体系统	确保各组件协同工作和数据流通	采用标准化通信协议和数据接口;提供开放 API;注重安全性和可靠性,采用冗余设计、故障切换机制、加密通信和数据备份策略

3.2 传感器选型与布置

传感器选型与布置是系统设计的关键环节,直接影响预警系统的准确性和可靠性。根据煤矿外因火灾的特点和预警需求,系统选用多种类型的传感器,包括但不限于温度传感器、烟雾传感器、火焰探测器、气体传感器(如一氧化碳、甲烷等)、红外热像仪和声音传感器等。温度传感器用于监测环境温度变化,烟雾传感器用于检测烟雾浓度,火焰探测器用于识别火焰特征,气体传感器用于检测有害气体浓度,红外热像仪用于监测火灾蔓延趋势,声音传感器用于捕捉异常声音信号^[4]。传感器布置需考虑煤矿的实际布局、工作环境和火灾风险区域。在关键区域如井口、巷道、工作面等,应布置高密度传感器网络,确保对火灾风险的全面覆盖。传感器应安装在易于维护和更换的位置,避免受到机械损伤或环境影响,传感器之间应保持适当的间距,以避免相互干扰和信号衰减。

3.3 数据处理与融合模块

数据处理与融合模块是预警系统的核心,负责接收、处理和融合来自不同传感器的数据。数据预处理阶段,系统对传感器数据进行清洗、去噪和标准化处理,以提高数据的质量和一致性。系统对异常数据进行识别和过滤,避免误报和漏报。数据融合算法采用多参数融

合技术,将来自不同传感器的数据进行综合处理。算法可以采用加权平均法、卡尔曼滤波、贝叶斯网络、神经网络等方法,根据火灾预警的需求和传感器的特性进行选择和优化。

3.4 预警算法与决策机制

预警算法与决策机制是预警系统的智能核心,负责根据融合后的数据做出预警决策。预警算法基于火灾发生的物理和化学原理,结合历史数据和专家经验,构建火灾预警模型。模型采用机器学习或深度学习算法,如支持向量机、随机森林、卷积神经网络等,对融合后的数据进行实时分析和预测。算法能够识别火灾的早期特征,如温度异常升高、烟雾浓度增加、火焰出现等,并根据这些特征进行预警^[5]。决策机制根据预警算法的输出结果,结合系统的阈值设定和决策规则,做出预警决策。当系统检测到火灾风险时,根据预警级别触发相应的报警机制和应急响应预案,系统提供手动和自动两种报警方式,确保在紧急情况下能够迅速响应。

结束语

随着煤矿安全生产要求的不断提高,基于多参数融合的煤矿外因火灾预警系统的研发与应用具有重要意义。本文所设计的预警系统通过多参数融合技术,实现了对煤矿火灾风险的实时监测和预警,有效提高煤矿的安全生产水平。未来,我们将继续优化和完善系统性能,推动其在更多煤矿企业的广泛应用,为煤矿安全生产贡献更多力量。

参考文献

- [1]罗小权,潘善亮.基于多传感器数据融合的火灾报警系统[J].数据通信,2019(6):22-26,31.
- [2]戴强,马顺青,冷海平,等.新型变电站高压开关柜漏电火灾在线监测算法[J].高压电器,2024,60(05):206-213.
- [3]邓军,李鑫,王凯,等.矿井火灾智能监测预警技术近20年研究进展及展望[J].煤炭科学技术,2024,52(01):154-177.
- [4]刘旭东.煤矿在线智能应急预警系统的研究与应用[J].能源与环保,2021,43(11):188-192+199.
- [5]格日勒,王刚,柳智鑫.基于视频技术的煤矿在线应急预警系统研究[J].能源与环保,2021,43(09):41-45.