

煤炭堆场无人装载机应急阻燃系统研

魏朝晖 许茂根 郑世军

国家能源集团浙江省舟山发电有限责任公司 浙江舟山 316000

摘 要: 煤炭堆场自燃隐患一直是个大问题,想提升自燃隐患的检测和处理速度,就提出了一个用热成像和激光雷达数据融合的无人装载机应急阻燃系统,这个系统靠深度学习算法加跨模态融合技术,能马上找到并准确定位煤炭堆场里的高温点,还把尾气和阳光反射这些假阳性热源过滤掉,实验显示,在复杂动态环境里,这个系统的响应时间是 2.8 分钟,识别准确率达到 96.7%,这个系统给煤炭堆场无人化作业给了有效的技术保证。

关键词: 煤炭自燃;无人装载机;热成像;激光雷达;深度学习;应急阻燃

引言

伴随着自动化技术以及无人驾驶系统的发展,无人装载机在煤炭堆场等复杂环境中的应用逐渐成为研究的热点,在煤炭堆场中由于煤炭长时间处于空气中堆积,会受到氧化,日照等因素的影响,从而造成自燃事故,传统的巡检方式或者是定点检测的方式在煤炭堆场中存在许多弊端,尤其是对规模较大的煤炭堆场而言,采用人工巡检的方式效率低,并且存在着盲区,因为煤炭自燃具有隐蔽性并且突发性强,所以采用传统手段很难第一时间发现高温点,存在很大的安全隐患。如何实现煤炭堆场智能化监控,及时发现并处理高温自燃点是煤炭行业需要解决的重要问题。

本研究的主要目的就是针对煤炭堆场环境中的自燃隐患,提出一个基于无人装载机的应急阻燃系统,这个系统把热成像技术和激光雷达数据结合起来,利用深度学习方法把这些不同传感器的数据融合起来,从而实时监测煤炭堆场里的高温点,无人装载机接到调度平台下发的高温点信息以后,就能迅速而且精确地对高温煤堆实施铲取和转运,然后把它摊铺到空旷的地方,这样就能有效地防止自燃现象出现,这个系统具有完全无人化,智能化的特点,可以极大地减少人工干预的必要性,进而提高煤炭堆场的安全性以及作业效率。

在国内外的研究当中,关于煤炭堆场自燃的防控技术,早先大多依靠传统的传感器监测和人工巡检,存在盲区大,反应慢,效率低等状况,近些年来,由于热成像技术和激光雷达的运用,不少研究渐渐重视怎样用传感器技术来辨认煤炭堆场里的高温点,一些研究把热成像图像同红外图像融合

起来,用来检测自燃点,不过,这种办法很容易受环境改变和光照条件的影响,造成误报和漏报的情况,而且,随着深度学习的出现,学者们慢慢把深度学习算法应用到煤炭堆场自燃检测当中,从而提升识别精确度并缩减误差,可是,这些办法在耗费计算资源和即时性方面仍然存有一些困难。

在多传感器融合上,已有部分研究试图把激光雷达、IMU 以及视觉信息结合起来用于提升煤炭堆场的自燃监测精准度,借助多种类型的数据融合,在不同的环境条件下可获得更为全面的信息,并且在动态环境中也能提升系统的鲁棒性,但目前这些多传感器融合办法在处理复杂动态情形、即时性需求以及高计算量等状况时仍然显得力有未逮,很难符合无人装载机系统对于快速反应和准确性的需求。

本研究在已有研究基础上,提出了一个创新性的“全域感知-云端决策-单机执行”的无人装载机应急阻燃系统,利用热成像与激光点云数据结合,再用深度学习算法剔除动态干扰,精确定位高温点并迅速响应,这个系统的创新点在于它能在极短时间内响应并完成自动化操作,而且大幅提升了煤炭堆场自燃点识别的准确性,解决了传统方法中实时性差、假阳性率高的问题,经过 72 小时连续实测,系统识别准确率和响应速度都比较高,这表明该系统在煤炭堆场实际应用中很有潜力。

本研究得出的结论不但给煤炭堆场的智能监测和应急处理给予了比较有效的解决办法,而且对于类似复杂环境里的无人系统应用有着重要的参照意义,通过改良现存的技术框架,本研究为煤炭堆场的无人化管理以及智能化作业给予了有力支撑,也给其他领域里的无人作业系统发展给予了借鉴。

1 研究背景与创新点

1.1 煤炭堆场自燃危害及研究现状

煤炭堆场自燃严重影响煤炭储存与运输，其发生与氧化作用、湿度密切相关，长期暴露煤堆风险更高。传统人工巡查存在盲区大、反应慢的问题，难以适应大规模堆场动态变化。近年，热成像与激光雷达技术逐步应用于自燃监测，但多传感器融合与实时性仍是待解难题。

1.2 无人化阻燃需求与技术挑战分析

煤炭堆场自燃防控急需无人化应急阻燃技术，无人装载机是核心设备，需依托传感器实现高温点监测与快速响应。但堆场环境复杂多变，高温点识别的精确度与鲁棒性、路径规划的精准性与稳定性、实时决策调度，是系统设计的核心技术挑战。

1.3 本文贡献与创新点

本文提出“全域感知-云端决策-单机执行”的无人装载机应急阻燃系统，通过热成像与激光雷达数据融合，结合深度学习识别高温点并滤除动态目标，在保证识别精度的同时提升实时性；创新引入动态目标滤除与实时地面约束技术，增强系统复杂环境鲁棒性。实际煤场验证表明，系统具备高效性与实用价值。

2 系统总体架构

为实现煤炭堆场自燃隐患及时发现与应急处置，本文构建“全域感知-云端决策-单机执行”三层应急阻燃方案，三者高度协同，确保高温煤堆快速安全转运至空位摊铺，避免自燃。

2.1 全域感知层：热成像与激光雷达异构传感网络

全域感知层采用热成像阵列与激光雷达组合，实时采集堆场数据。热成像阵列精准捕捉温度异常，激光雷达提供精确三维空间信息，结合深度学习有效滤除假阳性热源，提升高温点识别精度。

2.2 云端决策层：高温点识别、风险分级及任务调度研究

云端决策层基于感知数据完成高温点识别、风险分级与任务调度指令下达，实时监测任务执行进度，确保无人装载机高效完成煤堆转运与摊铺作业。

2.3 单机执行层：无人装载机控制与作业闭环研究

单机执行层依托无人装载机，通过车端多传感器融合感知系统与分层路径规划，实现高温煤堆精准铲取与安全转运。融合全局路径规划与局部路径优化，保障作业精准性与

安全性。

3 高温点跨模态识别算法

煤炭堆场高温自燃点监测是研究核心，为实现快速精准识别，本文结合热成像与激光雷达数据，构建含注意力机制的热像-点云融合网络，通过体素级跨模态融合提升识别效果；同时提出假阳性热源抑制算法，结合深度学习滤除车辆尾气、阳光等干扰因素。

3.1 数据获取与标注策略

为训练高温点识别算法，采用热成像相机、激光雷达与 RGB 相机，在多环境条件下采集数据并手动标注；通过数据增强解决样本不均衡问题，提升模型泛化性能。

3.2 热像-点云融合网络中的注意力机制应用

设计基于注意力机制的热像-点云融合网络，通过语义分割获取热源概率图，与激光雷达点云数据融合，提升高温点识别准确度。注意力机制可自动调节不同模态数据权重，增强模型鲁棒性。

3.3 假阳性热源抑制方法

提出深度学习驱动的假阳性热源抑制方案，分析温度变化时序特征，结合环境特征实时滤除动态目标，保障高温点识别准确性。

3.4 算法评价指标与实验结果

实验表明，算法高温点识别准确率达 96.7%，召回率 94.3%，F1 值 95.5%，具备良好鲁棒性与实时性，在光照、粉尘等复杂条件下仍能保持高识别精度。

4 云端任务规划与调度

为实现煤炭堆场高温点快速响应与处理，云端任务规划与调度层对感知层数据进行处理，按优先级调度，通过多机协同优化资源配置，同时与堆场现有生产系统衔接，保障任务高效执行。

4.1 高温点优先级量化模型

针对堆场高温点分布广、变化快的特点，本文提出高温点优先级量化模型，基于高温点温度、位置、堆积形状与风险评价结果确定任务优先级。温度越高风险越大，优先级越高；结合高温点相对位置与煤堆堆积情况计算区域风险值，通过多维度风险评估为高温点打分，确保无人装载机优先处理高风险区域，最大程度降低自燃风险，提升应急阻燃效率。

4.2 多机协同任务分配算法

为应对多高温点场景下单机处理能力不足的问题，本

文提出多机协同任务分配算法。算法基于高温点优先级量化结果、无人装载机作业能力与工作区域分布,合理分配任务;分配过程中兼顾高温点风险等级与装载机工作负荷,避免任务过度集中或分散。同时,引入装载机间通信协作机制,通过无线网络共享作业状态与进度,实现堆场范围内协同作业,减少无效作业与资源浪费,提升整体效率。

4.3 堆场生产系统接口设计

为保障无人装载机应急阻燃工作与堆场生产流程协调,本文开发标准化接口系统,采用开放式通信协议,实现云端调度平台与堆场现有生产系统(含设备管理、作业调度、监控平台等)的数据共享与任务协同。调度平台可实时获取堆场设备状况、生产进程与工作区域利用情况,动态调整任务分配与调度策略;同时,接口设计匹配现有监控系统,确保调度平台实时监控装载机作业进度并与生产系统同步更新,保障突发状况下作业计划及时调整,不影响堆场正常生产。

5 无人装载机单体智能

为保障无人装载机在煤炭堆场高效安全作业,本章设计单体智能系统,涵盖多传感器标定与时空同步、高温煤堆铲取精准控制、动态障碍分层路径规划、作业轨迹优化与覆盖度评估,确保复杂环境下作业精准性、安全性与有效性。

5.1 车端多传感器的标定与时空同步研究

通过精准的传感器标定与时空同步技术,实现激光雷达、视觉传感器与 IMU 数据的精确融合,为路径规划与控制提供可靠数据支撑。

5.2 高温煤堆铲取精准控制策略

结合热成像与激光雷达数据,设计高温煤堆铲取精准控制策略,采用分层控制架构,保障铲取作业的精准性与安全性。

5.3 动态障碍环境中的分层路径规划方法

采用全局 A* 算法与局部 TEB 算法结合的方式,确保无人装载机在动态障碍物环境下快速调整路径,避免碰撞,维持高效作业。

5.4 作业轨迹优化与覆盖度评估研究

提出作业轨迹优化与覆盖度评估方法,保障摊铺作业效率与均匀性;同时实时评估作业进度,实现作业区域最大覆盖度。

6 集成测试与现场验证

本章通过集成测试与现场验证,考察无人装载机应急阻燃系统在实际煤炭堆场环境的性能表现,结合测试环境设

置、连续运行实验、性能指标分析与故障案例研究,全面验证系统有效性与可靠性。

6.1 测试堆场环境与工况设置

模拟实际煤炭堆场环境,设置复杂工况,包括不同光照、煤尘干扰与地面起伏条件,全面检测系统稳定性与精确性。

6.2 连续 72 小时运行实验

开展 72 小时连续运行实验,考察系统长时间作业稳定性与鲁棒性,验证系统在实际煤场环境下的高效作业能力。

6.3 性能指标:响应时间、识别准确率、作业效率与安全性分析

实验结果显示,系统响应时间为 2.8 分钟,高温点识别准确率达 96.7%,作业效率与安全性均满足实际应用要求。

6.4 故障案例与鲁棒性分析

通过模拟传感器数据丢失、设备故障等常见故障,检验系统应急反应能力。结果表明,系统具备较强鲁棒性,可有效应对各类突发故障。

7 结论与展望

7.1 研究成果总结

本文提出的无人装载机应急阻燃系统,通过热成像与激光雷达数据融合实现高温点实时检测与快速响应,经实际测试验证,系统具备高效性与工程化应用价值,为煤炭堆场自燃防控提供可靠技术方案。

7.2 后续工作:多堆场协同、极端天气适应与数字孪生闭环机制

未来研究将拓展至多堆场协同作业,提升系统在极端天气下的鲁棒性;同时结合数字孪生技术,进一步优化作业流程,提升决策智能化水平。

参考文献:

- [1] 裔建锋. 煤场堆取料机无人值守系统研究与应用 [J]. 中国宽带, 2023.
- [2] 杨晗芳, 孙伟哲, 周保华. 智能感知融合技术在干散货堆场动态环境中的应用 [J]. 水运工程, 2023.
- [3] 王文浩. 崔庄煤矿采空区高温点防治技术应用研究 [J]. 能源技术与管理, 2019.
- [4] 陈梁, 季瑞丰, 林戟等. 圆形煤场堆取料机无人值守系统研究与应用 [J]. 能源与节能, 2022.

基金项目: 国能浙江舟山发电有限责任公司 - 基于 5G 的煤场激光实施盘煤及装载机无人值守技术应用研究, 项目编号: NZS-JF-2024041。