

装车楼冻料堵塞检测与预警系统应用研究

周平伟 徐振奇 姜栋耀

日照港集装箱发展有限公司第一港务分公司 山东 日照 276800

摘要:装车楼作为港口、矿山等大宗散货运输的核心设备,其运行效率直接影响物流链的稳定性。在北方寒冷地区,冻料堵塞问题已成为制约装车楼高效运行的关键瓶颈。本文基于多源数据融合与智能算法,构建了装车楼冻料堵塞检测与预警系统,通过实时监测料流状态、环境参数及设备运行数据,结合机器学习模型实现堵塞风险的动态评估与分级预警。研究结果表明,该系统可将装车楼故障停机时间降低40%以上,显著提升冬季作业效率。本文从技术架构、核心算法、应用案例三个维度展开论述,为同类场景的智能化改造提供理论依据与实践参考。

关键词:装车楼;冻料堵塞;多源数据融合;机器学习预警;工业物联网

1 引言

在全球贸易量持续增长背景下,港口、矿山等大宗散货运输场景对装车效率要求愈发严苛。以山东港口日照港为例,其装车楼年吞吐量超千万吨,但冬季低温时冻料堵塞问题频发,2024年因该问题停机累计达120小时,直接经济损失超500万元。传统人工巡检在应对此问题时缺陷明显,难以实时捕捉冻料堵塞初期迹象,响应滞后,且人工判断受主观因素影响大、误判率高,还面临滑倒、冻伤等安全风险。因此,构建智能化检测与预警系统,实现对冻料堵塞问题的精准识别与主动干预迫在眉睫。该系统应用意义重大,能提升作业效率,提前发现潜在风险并处理,减少非计划停机;降低运维成本,减少人工巡检频次,避免设备损坏;保障生产安全,避免事故发生;还能推动大宗散货运输行业智能化升级,为行业提供技术参考。

2 装车楼冻料堵塞机理分析

2.1 冻料形成条件

冻料堵塞的本质是物料在低温环境下发生物理性质变化,导致流动性下降。其形成需要满足多个条件。首先,温度阈值是关键因素之一。当环境温度低于物料的凝固点时,物料中的水分开始结晶形成冰晶。不同物料的凝固点不同,例如,含水量较高的煤炭在较低温度下就容易形成冰晶。其次,湿度的影响也不容忽视。高湿度环境会加速冰晶的生长,因为空气中的水分会不断凝结在物料表面,增加物料的粘附性。此外,物料特性也是影响冻料形成的重要因素。粒径分布不均的物料在流动过程中容易出现局部堆积,而含水率超标的物料则更容易结块。最后,设备结构也会对冻料堵塞产生影响。例如,落料口角度过小会导致物料下落不畅,振动频率不足则无法有效打破物料间的粘附力,从而增加冻料堵

塞的风险。

2.2 堵塞演化过程

冻料堵塞通常经历初期粘附、局部堆积和完全堵塞三个阶段。在初期粘附阶段,冰晶在料斗内壁形成薄层,导致物料下落阻力增大。此时,物料流动速度会逐渐减慢,但尚未完全停止。随着冰晶的不断生长和积累,进入局部堆积阶段^[1]。在这个阶段,粘附层增厚形成拱桥结构,阻碍物料的连续流动。拱桥结构的形成会导致物料在料斗内局部堆积,进一步增加堵塞的风险。当拱桥坍塌后,大块冻料会卡死落料口,导致设备被迫停机,进入完全堵塞阶段。此时,需要采取人工或机械手段进行清理,才能恢复设备的正常运行。了解冻料堵塞的演化过程,有助于我们制定针对性的检测和预警策略,提前发现并处理潜在问题。

3 系统架构与关键技术

3.1 系统总体架构

装车楼冻料堵塞检测与预警系统采用“感知层-传输层-平台层-应用层”四级架构,实现数据采集、传输、分析与决策的闭环管理。

感知层是系统的数据来源,部署了温度传感器、湿度传感器、压力传感器、激光雷达等多种设备,用于实时采集环境参数与物料状态。这些传感器分布在装车楼的关键部位,如料斗内壁、落料口、振动给料机等,能够全面、准确地获取装车楼的运行信息。

传输层负责将感知层采集到的数据传输到平台层。采用5G/LoRa混合组网方式,充分发挥5G高速传输和LoRa低功耗、远距离传输的优势,确保数据传输的实时性与可靠性。

平台层是系统的核心,构建了边缘计算节点与云端大数据平台。边缘计算节点部署在装车楼控制室,负责

对采集到的数据进行预处理和初级预警,减少数据传输量,提高响应速度。云端大数据平台则用于数据存储、模型训练和全局优化,通过大数据分析和机器学习算法,实现对冻料堵塞风险的动态评估和分级预警。

应用层是系统的用户界面,开发了可视化监控界面与预警推送系统,支持PC端与移动端访问。用户可以通过可视化监控界面实时查看装车楼的运行状态和预警信息,及时采取措施进行处理。

3.2 核心算法设计

3.2.1 多源数据融合算法

针对单一传感器数据易受干扰的问题,系统采用卡尔曼滤波算法对温度、湿度、压力等多源数据进行融合。卡尔曼滤波算法是一种高效的递归滤波器,能够从一系列包含噪声的测量数据中估计动态系统的状态。在装车楼冻料堵塞检测中,通过融合料斗内壁温度(T1)、环境湿度(H)与物料压力(P)等多源数据,可以有效消除传感器噪声,提高状态识别的准确率^[2]。例如,在日照港装车楼项目中,由于环境复杂,传感器采集到的数据存在一定的噪声和误差。通过卡尔曼滤波算法对多源数据进行融合处理后,能够更准确地反映装车楼的实际运行状态,为后续的堵塞风险评估提供可靠的数据支持。

3.2.2 堵塞风险评估模型

基于LSTM神经网络构建堵塞风险评估模型。LSTM神经网络是一种特殊的循环神经网络,能够处理和预测基于时间变化的数据序列。该模型的输入层包含历史数据(过去24小时的温度、湿度、压力序列)与实时数据,输出层为堵塞风险等级(低/中/高)。模型训练采用日照港2023-2024年冬季作业数据,这些数据涵盖了不同工况下的装车楼运行信息,具有较高的代表性和可靠性。经过交叉验证,模型准确率达92.3%。在实际应用中,堵塞风险评估模型能够根据实时采集到的数据,动态评估装车楼发生冻料堵塞的风险等级,并及时发出预警信号,为运维人员提供决策依据。

3.2.3 自适应预警阈值设定

传统固定阈值预警方式易受环境波动影响,导致预警效果不佳。系统提出基于动态基线的自适应阈值算法,根据环境条件的变化自动调整预警阈值。例如,当环境温度低于-5℃时,系统自动将湿度预警阈值从80%调整为70%。这是因为低温环境下,物料更容易结冰,湿度对冻料形成的影响更加显著,降低湿度预警阈值可以更早地发现潜在的冻料堵塞风险。自适应预警阈值设定算法能够根据实际情况灵活调整预警策略,提高预警的准

确性和及时性,减少误报和漏报的发生。

3.3 关键技术突破

在系统研发过程中,实现了多项关键技术突破。一是低温环境传感器抗凝露设计。在低温环境下,传感器表面容易产生凝露,影响传感器的测量精度和稳定性。系统采用加热膜与疏水涂层技术,在传感器表面安装加热膜,通过加热去除凝露;同时,涂覆疏水涂层,防止水汽在传感器表面凝结。这些措施确保了传感器在-20℃环境下仍能正常工作,提高了数据采集的可靠性^[3]。二是激光雷达点云数据处理。激光雷达能够获取装车楼内物料的三维点云数据,但点云数据量大、噪声多,需要进行有效的处理和分析。系统通过点云分割与聚类算法,将点云数据中的物料区域与背景区域分离,并计算冻料堆积的体积。这种方法能够实时、准确地获取冻料堆积情况,为堵塞风险评估提供重要依据。三是边缘-云端协同计算。边缘计算节点完成数据预处理与初级预警,减少数据传输量,提高响应速度;云端完成模型训练与全局优化,利用大数据和强大的计算能力,不断提升堵塞风险评估模型的准确性。边缘-云端协同计算模式充分发挥了两者的优势,提高了系统的整体性能和效率。

4 应用案例分析

4.1 日照港装车楼项目实践

4.1.1 项目背景

日照港装车楼位于北方沿海地区,冬季平均气温在-5℃至5℃之间,物料含水率波动范围较大。在这样的环境下,冻料堵塞问题严重影响装车楼的作业效率。2024年冬季,装车楼因冻料堵塞导致日均停机2.5小时,不仅增加了运维成本,还影响了港口的整体物流效率。因此,日照港决定引入装车楼冻料堵塞检测与预警系统,以解决这一问题。

4.1.2 系统部署

系统部署包括传感器布局、网络架构和预警策略三个方面。在传感器布局方面,在料斗内壁、落料口、振动给料机等关键位置部署了28个传感器节点,全面覆盖装车楼的关键部位,确保能够准确采集到物料状态和环境参数。在网络架构方面,采用5G专网实现数据高速传输,边缘计算节点部署于装车楼控制室。5G专网具有高速、低延迟的特点,能够满足实时数据传输的需求;边缘计算节点则负责对采集到的数据进行初步处理和分析,减轻云端服务器的负担。在预警策略方面,设置三级预警机制(蓝色/黄色/红色),对应不同响应措施。蓝色预警表示存在潜在的冻料堵塞风险,运维人员需加强巡检;黄色预警表示风险较高,需准备处理措施;红色

预警表示即将发生堵塞，需立即采取措施进行处理。

4.1.3 应用效果

系统上线后，取得了显著的应用效果。在故障预警准确率方面，成功预警冻料堵塞事件，准确率达95.6%。这得益于系统采用的多源数据融合算法和堵塞风险评估模型，能够准确识别冻料堵塞的早期迹象。在停机时间减少方面，2024年冬季装车楼平均停机时间降至1.2小时/日，降幅达52%。通过提前预警和及时处理，有效避免了冻料堵塞问题的恶化，减少了设备停机时间。在经济效益方面，项目投资回收期为1.8年，年节约运维成本超300万元。系统降低了人工巡检成本、设备维修成本和物料损失成本，提高了装车楼的作业效率，为日照港带来了可观的经济效益。

4.2 对比实验分析

为验证系统有效性，选取日照港相邻两台装车楼进行对比实验。实验组部署冻料堵塞检测与预警系统，对照组采用传统人工巡检方式。对比实验结果表明，装车楼冻料堵塞检测与预警系统在提高作业效率、降低物料损失和能耗方面具有显著优势。

表1 对照实验结果

指标	实验组	对照组	提升幅度
故障响应时间	8分钟	35分钟	77.1%
物料损失率	0.3%	1.2%	75.0%
能耗降低率	12.5%	-	-

5 技术挑战与未来展望

5.1 技术挑战

尽管装车楼冻料堵塞检测与预警系统取得了一定的成果，但仍面临一些技术挑战。在极端环境适应性方面，在-30℃以下超低温环境中，传感器的寿命和数据传输稳定性仍需提升。超低温会对传感器的电子元件和电池性能产生严重影响，导致传感器故障或数据传输中断。在多物料兼容性方面，不同物料的冻料特性差异大，需要建立通用化模型。目前，系统的堵塞风险评估模型主要基于特定物料的训练数据，对于其他物料的适用性有待提高^[4]。在系统集成难度方面，与现有DCS/PLC系统的深度融合仍面临协议兼容性问题。不同厂家的DCS/PLC系统采用不同的通信协议，导致系统之间的数据交互和协同控制存在困难。

5.2 未来发展方向

未来，装车楼冻料堵塞检测与预警系统将朝着以下几个方向发展。一是数字孪生技术应用。构建装车楼数字孪生体，实现堵塞过程的虚拟仿真与优化。通过数字孪生技术，可以在虚拟环境中模拟装车楼的运行状态和冻料堵塞过程，提前发现潜在问题并进行优化设计，提高系统的可靠性和效率。二是绿色除冰技术融合。联动环保型融雪剂喷洒系统，形成“监测-预警-处置”闭环。当系统检测到冻料堵塞风险时，自动启动环保型融雪剂喷洒系统，及时融化冻料，避免堵塞的发生。同时，环保型融雪剂对环境友好，符合可持续发展的要求。三是跨平台数据共享。接入港口智慧物流平台，实现多设备协同调度。通过跨平台数据共享，装车楼冻料堵塞检测与预警系统可以与其他物流设备进行信息交互和协同控制，提高整个港口物流系统的运行效率和智能化水平。

结语

本文提出的装车楼冻料堵塞检测与预警系统，通过多源数据融合与智能算法，实现了冻料堵塞风险的动态评估与分级预警。日照港应用案例表明，该系统可显著提升装车楼作业效率，降低运维成本。在技术架构方面，系统采用四级架构，实现了数据采集、传输、分析与决策的闭环管理；在核心算法方面，多源数据融合算法、堵塞风险评估模型和自适应预警阈值设定算法等关键技术确保了系统的准确性和可靠性；在应用效果方面，系统在故障预警准确率、停机时间减少和经济效益等方面取得了显著成果。未来，随着数字孪生、绿色除冰等技术的融合应用，装车楼智能化水平将进一步提升，为大宗散货运输行业的高质量发展提供有力支撑。同时，我们也需要不断攻克技术挑战，提高系统的适应性和兼容性，推动该技术在更广泛领域的应用。

参考文献

[1]张水良,刘治邦.一种散货装车楼远程自动控制系统[J].港口装卸,2021,(05):56-58.
[2]韩传林.装车楼定量仓平板闸板液压回路故障处理[J].设备管理与维修,2019,(15):47-48.
[3]孙晔.港口矿石装车楼配车装载机构故障诊断系统设计[D].燕山大学,2019.
[4]矿石码头全自动协同作业与智能决策关键技术研究与应用[J].港口科技,2025,(01):43.