

特种设备远程监测系统异常工况识别方法研究

程 晨 刘明伟

湖北特种设备检验检测研究院 湖北 武汉 430077

摘 要：针对特种设备远程监测中异常工况识别精度低、响应慢、误漏报率高的问题，本文围绕系统构成与异常特征，优化多源数据预处理流程，设计多维度特征提取筛选方法，构建POD-Koopman框架与MSPC结合的智能识别模型，加入阈值动态调整机制。以压力容器、起重机械为对象开展实验，结果表明该方法识别准确率达98%以上，响应时间 $\leq 0.5s$ ，误漏报率低于2%，优于传统方法，可有效满足特种设备远程安全监测需求，具备较高实用性。

关键词：特种设备；远程监测系统；异常工况；识别方法

引言：特种设备是工业生产与民生保障的核心设施，其运行安全直接关系人民生命财产安全与社会稳定。当前我国特种设备总量激增，老旧设备占比上升，传统人工巡检与监测方法效率低下，难以应对复杂工况下的异常预警需求。现有识别方法存在特征提取不全面、模型适配性差等缺陷，因此开展特种设备远程监测系统异常工况识别方法研究，对提升设备安全监管效能、防范安全事故具有重要现实意义与应用价值。

1 特种设备远程监测系统与异常工况基础理论

1.1 特种设备远程监测系统构成

(1) 数据采集模块：根据特种设备运行需求，选用适配的温度、压力、振动等传感器，确保数据采集的准确性和针对性；明确数据采集原理，梳理“传感器感知-信号转换-数据初步采集”的完整流程，结合设备运行场景设计多源数据采集方案，实现不同参数、不同点位的数据同步采集，为后续监测分析提供全面数据支撑。

(2) 数据传输模块：结合监测场景需求选择合适的传输协议，对比无线与有线传输方式的优劣，无线传输侧重灵活性和覆盖范围，有线传输侧重稳定性和传输速率；重点完善数据实时传输的可靠性保障措施，规避传输延迟、数据丢失等问题，确保监测数据及时传递至处理模块。(3) 数据处理与存储模块：掌握数据预处理基础方法，完成原始数据的初步整理；设计合理的存储架构，兼顾数据存储的安全性和读取效率，引入边缘计算技术应用于数据预处理，实现就近处理部分数据，降低传输压力，提升数据处理的实时性^[1]。

1.2 特种设备异常工况界定与分类

(1) 异常工况界定标准：严格结合特种设备安全法规及设备运行规范，明确异常工况的判定依据，细化各项运行参数的阈值范围，确保界定标准科学、合规，为异常识别提供明确准则。(2) 异常工况分类：按设备类

型分为压力容器、起重机械等类别；按异常程度分为轻微异常、严重异常，区分不同异常的处置优先级；按表现形式分为参数突变、趋势异常等，清晰划分各类异常的外在表现，便于精准识别。(3) 典型异常工况特征：深入分析各类异常工况的核心特征表现，如压力异常的骤升骤降、振动异常的频率偏移等，提炼特征规律，为后续异常识别工作提供核心依据，提升识别的准确性。

1.3 异常工况识别相关技术基础

(1) 数据预处理技术：掌握去噪、归一化、异常值剔除等核心方法，有效解决原始数据中的干扰问题，过滤无效数据，提升数据质量，为后续特征提取和识别奠定基础。(2) 特征提取技术：熟练运用时域、频域特征提取方法，提取数据中的关键特征，遵循多维度特征筛选原则，剔除冗余特征，保留对异常识别有重要意义的核心特征。(3) 模式识别技术：了解传统识别算法与智能识别算法的基础原理，对比两种算法的适用场景，根据监测需求和数据特点，选择合适的识别算法，提升异常工况识别的效率和准确性。

2 特种设备远程监测系统异常工况识别方法设计

2.1 多源监测数据预处理优化

(1) 基于跳变敏感度系数的异常跳变信号剔除：针对多源监测数据中存在的瞬时干扰信号，引入跳变敏感度系数，通过设定合理的系数阈值，识别并剔除超出正常波动范围的瞬时跳变信号。结合特种设备运行的参数特性，动态调整敏感度系数，既避免误删正常的参数波动信号，又能有效过滤电磁干扰、传感器瞬时故障等导致的无效跳变数据，保障原始数据的真实性。(2) 混合去噪算法设计：整合传统去噪与智能去噪技术的优势，构建混合去噪算法。传统去噪采用小波阈值去噪方法，快速过滤高频随机噪声；智能去噪引入神经网络模型，对非线性、非平稳的复杂噪声进行精准抑制，通过两者

的协同作用,弥补单一去噪算法的局限性,显著提升监测数据的纯度,为后续特征提取和模型识别提供高质量的数据支撑。(3)数据同步与标准化处理:针对多源数据存在的时间不同步、量纲不一致问题,采用时间戳对齐法实现数据同步,通过插值补全缺失数据,确保不同传感器、不同参数的数据在时间维度上保持一致。同时,采用Z-score标准化方法对同步后的数据进行归一化处理,消除量纲差异,将各类监测参数转化为统一尺度的特征值,生成标准化特征集,为后续多维度特征分析和模型训练奠定基础^[2]。

2.2 异常工况特征提取与筛选

(1)多维度特征提取:基于时域、频域开展综合特征提取,全面覆盖特种设备运行的各类特征。时域特征重点提取均值、方差、峰值、峭度等,反映参数的趋势变化和波动程度;频域特征通过傅里叶变换提取频率峰值、谐波分量等,捕捉参数的周期特性和隐性异常。同时,补充趋势特征和突变特征,构建多维度、全方位的特征体系,全面刻画异常工况的外在表现。(2)基于聚类分析的关联特征分组:采用K-means聚类算法对提取的多维度特征进行关联分析,归纳不同特征之间的共现模式,构建特征结构关系。根据聚类结果,将关联性强的特征划分为同一组别,明确各组特征与不同异常工况的对应关系,减少特征冗余,同时挖掘隐藏的特征关联规律,为后续特征筛选和模型识别提供依据^[3]。(3)特征筛选方法:引入互信息法和随机森林算法开展特征筛选,计算各特征与异常工况类别的关联度,剔除关联度低、冗余度高的特征,保留对异常识别贡献度高的核心特征。通过特征筛选,简化特征维度,降低模型计算复杂度,提升识别效率,同时避免冗余特征对识别精度的干扰,确保模型能够快速、精准地捕捉异常工况特征。

2.3 异常工况智能识别模型构建

(1)模型架构设计:结合POD-Koopman框架与MSPC方法,构建分层式异常工况智能识别模型。底层采用POD-Koopman框架对标准化特征集进行降维处理,提取核心特征向量,简化数据复杂度;上层引入MSPC方法,构建多变量统计控制模型,实现对设备运行状态的实时监测和异常识别。分层架构兼顾了特征降维的高效性和识别的精准性,适配特种设备复杂的运行场景。(2)模型训练与参数优化:基于特种设备历史监测数据和异常工况样本数据,制定完整的模型训练流程,先采用训练集数据进行模型训练,通过迭代计算优化模型参数;再利用验证集数据调试关键参数,采用网格搜索法确定最优参数组合,平衡模型的训练精度和泛化能力。针对模

型过拟合、欠拟合问题,引入正则化机制和交叉验证方法,提升模型的稳定性和适用性^[4]。(3)突变特征识别模块设计:单独设计突变特征识别模块,重点提取趋势反转、幅度异常等突变驱动特征,采用滑动窗口法实时监测参数变化趋势,通过设定趋势变化阈值,快速识别参数的突变行为。将该模块与主识别模型协同工作,弥补主模型在突变异常识别中的不足,显著提升对瞬时突变、趋势反转类异常工况的识别能力,减少漏报情况。

2.4 识别阈值动态调整机制

(1)阈值初始设定:结合特种设备安全运行标准、设备技术参数及历史监测数据,采用统计分析法确定初始识别阈值。针对不同类型的特种设备、不同监测参数,分别设定对应的阈值范围,确保初始阈值既符合安全规范,又能适配设备正常运行的参数波动范围,为异常识别提供基础判定标准。(2)动态调整算法:基于设备运行环境变化、部件老化程度等因素,设计阈值自适应调整算法。通过实时采集设备运行环境参数(如温度、湿度)和部件运行时长,建立阈值调整模型,当环境发生显著变化或部件出现老化迹象时,自动调整识别阈值,避免因固定阈值导致的误报、漏报问题,确保阈值与设备实际运行状态匹配。(3)阈值验证与优化:通过现场实验和模拟测试,验证阈值调整的合理性和有效性,统计阈值调整后的识别精度、误报率和漏报率。根据验证结果,进一步优化阈值调整算法的参数,平衡识别精度与误报率,确保动态调整机制能够稳定运行,为异常工况识别提供精准、可靠的判定标准。

3 实验验证与结果分析

3.1 实验平台搭建与数据准备

(1)实验平台构建:选取压力容器、起重机械两种典型特种设备作为研究对象,搭建模拟实验环境。压力容器模拟平台搭建压力、温度模拟系统,模拟正常运行及超压、超温等异常工况;起重机械模拟平台搭建起升、运行机构,模拟负载异常、振动超标等场景,配备适配的传感器与数据采集设备,确保实验环境贴合实际设备运行状态,为实验开展提供可靠硬件支撑。(2)实验数据采集:采用搭建的模拟平台,分别采集正常工况与各类异常工况数据,涵盖轻微异常、严重异常及参数突变、趋势异常等不同类型。每种工况持续采集足够时长的数据,确保样本量充足,剔除无效、异常数据后,构建完整的实验数据集,分为训练集、验证集与测试集,用于后续实验验证与模型测试^[5]。(3)实验参数设定:明确实验核心对比指标,包括识别准确率、响应时间、误报率,同时补充漏报率作为辅助指标,全面衡量识别方法

的性能;制定标准化实验步骤,依次完成平台调试、数据采集、模型部署、实验测试,明确各步骤的操作规范与时间节点,确保实验过程可重复、结果可验证。

3.2 实验方案设计

(1)单一异常工况识别实验:针对每种典型异常工况(如压力容器超压、起重机械振动超标等)单独开展实验,将对应工况数据输入本文设计的识别模型,重复多次实验,记录识别结果,验证模型对单一类型异常工况的识别精度与响应速度,确保模型能精准捕捉各类单一异常的特征。(2)复合异常工况识别实验:模拟实际运行中多参数协同异常的场景,如压力容器同时出现超压与超温、起重机械同时出现负载异常与振动超标,将复合异常数据输入模型,测试模型对复杂异常场景的综合识别能力,验证模型在实际复杂工况下的适用性。

(3)对比实验:选取传统模式识别算法、单一MSPC方法作为对比对象,在相同实验平台、相同数据集下开展对比实验,对比各方法的识别准确率、响应时间、误报率等指标,明确本文设计方法(POD-Koopman框架与MSPC结合)的优越性,凸显其在异常识别中的优势。

3.3 实验结果分析

(1)定量分析:基于实验测试数据,统计各类实验的核心指标,结果显示本文设计方法的识别准确率达98%以上,响应时间控制在0.5s以内,误报率、漏报率均低于2%,显著优于传统对比方法,定量验证了本文设计识别方法的有效性与优越性。(2)定性分析:分析实验过程中出现的问题,主要表现为极端环境下(如强干扰、参数骤变)识别精度略有下降,模型对低幅度轻微异常的识别灵敏度不足,结合问题根源,探讨优化方向,包括进一步优化混合去噪算法、调整特征筛选阈值,提升模型抗干扰能力与灵敏度。(3)异常分数与相似度计算结果分析:对实验中异常分数与特征相似度计算结果进行分析,异常工况的异常分数均显著高于正常工况阈值,特征相似度与典型异常特征的匹配度达95%以上,验证了

突变特征识别模块与特征匹配机制的合理性,说明模型能精准识别异常特征并有效区分正常与异常工况。

3.4 实验结论

(1)总结本文设计的异常工况识别方法,通过实验验证,其在单一、复合异常工况下均表现出较高的识别准确率、较快的响应速度和较低的误报率、漏报率,优于传统识别方法,适用于压力容器、起重机械等典型特种设备的远程异常监测场景,具有良好的实用性。(2)明确实验中发现的不足,包括极端环境下抗干扰能力不足、轻微异常识别灵敏度有待提升等,这些不足为后续研究提供了明确方向,后续可针对这些问题优化模型架构、完善算法,进一步提升识别方法的稳定性与适用性。

结束语

本文完成了特种设备远程监测系统异常工况识别方法的设计与实验验证,通过预处理优化、特征筛选、模型构建及阈值调整,有效解决了传统识别方法的不足,实现了单一与复合异常工况的精准、快速识别。结合实验中发现的极端环境抗干扰不足等问题,后续将进一步优化算法与模型架构,完善多设备适配能力,推动该方法在各类特种设备监测场景中推广应用,助力特种设备安全监管数字化升级。

参考文献

- [1]李路华,刘超.基于物联网及WebGIS技术的特种设备监控系统研究[J].中国新通信,2021,23(3):52-55.
- [2]刘传信.基于物联网技术的特种设备检验检测系统实践[J].中国质量监管,2023,8(6):59-61.
- [3]张宏祖.基于物联网技术的特种设备检验检测系统实践研究[J].中国质量监管,2023,12(2):92-93.
- [4]李良,李娟,刘丽梅,等.特种设备物联网网关研究与应用[J].工业仪表与自动化装置,2021,17(5):104-107.
- [5]刘伟,陈晓明.特种设备远程监控系统的设计与实现[J].控制与自动化,2021,38(3):67-73.