

金属矿山提升机智能监测与故障诊断技术研究

王汉臣

安徽开发矿业有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i8.21657

[摘要] 本文围绕金属矿山提升机的智能监测与故障诊断技术展开研究,结合工程实践需求与前沿技术,构建了涵盖硬件选型、软件平台开发、故障特征提取及智能诊断模型的创新体系。通过振动信号分析、多源数据融合及机器学习算法,实现了对提升机关键部件的精准故障识别,显著提升了设备运维效率与安全性。研究成果在安徽开发矿业等企业中得到验证,为矿山设备的预测性维护提供了理论支撑与实践范例。

[关键词] 金属矿山; 提升机; 智能监测

中图分类号: TB18 **文献标识码:** A

Research on Intelligent Monitoring and Fault Diagnosis Technology for Metal Mine Hoists

Hanchen Wang

Anhui Development Mining Co., Ltd.

[Abstract] This paper focuses on the intelligent monitoring and fault diagnosis technology of hoists in metal mines. Combining engineering practice needs with cutting-edge technologies, an innovative system covering hardware selection, software platform development, fault feature extraction, and intelligent diagnostic models is constructed. Through vibration signal analysis, multi-source data fusion, and machine learning algorithms, accurate fault identification of key components of the hoist is achieved, significantly improving equipment operation and maintenance efficiency and safety. The research results have been verified in enterprises such as Anhui Development Mining, providing theoretical support and practical examples for predictive maintenance of mining equipment.

[Key words] Metal mine; Hoist; Intelligent monitoring

1 引言

矿山提升机是矿井垂直运输的关键设备,稳定性直接关系到生产效率和作业安全。传统的做法靠人工巡检和定期维护,早期的小毛病很难发现,还容易修过头。用物联网和人工智能搭个智能诊断模型,就能提前识别故障、降低停机风险。在国际上,卷积神经网络和长短期记忆网络已经是故障诊断的主流手段;国内像博华科技的BH5000P系统,通过多参数分析把减速机故障诊断率提到了90%以上。不过,现有技术还是有不少短板,比如数据融合没有统一标准,传感器容易受环境影响,早期故障信号又容易被噪声盖住。针对这些问题,本研究用小波包分解和主成分分析来做多维度信号融合,开发了基于迁移学习的跨设备诊断模型,硬件方面也按GB/T 2423标准做了模块化设计。试点下来,这套系统把故障预警时间缩到了15分钟,设备综合效率提升了22%。

2 提升机运行特性与故障机理分析

2.1 提升机系统构成与工作原理

矿山提升机主要由卷筒、天轮、钢丝绳和制动系统四大部分组成。卷筒负责缠绕钢丝绳来实现升降,它的直径和宽度决定了能扛多重;天轮负责导向,把牵引力转成垂直方向;制动系统靠液压或者气动来控制松闸和抱闸。驱动方面,交流变频调速系统因为调速范围宽、功率因数高,成了主流方案,采用矢量控制算法,满载启动时电流能控制在额定值1.5倍以内,综合电耗比直流系统省了28%。特殊情况下,满载启动时轴向振动加速度能到5g以上,紧急制动时制动盘温度能飙到300℃以上,过卷保护能在0.3秒内把设备停下来,要求设备具备强抗冲击与散热能力。

2.2 常见故障类型与特征

滚动轴承出问题,常见的有内圈点蚀、外圈剥落和滚珠剥落,每一种在频谱里都有对应的特征频率。实测下来,有个主轴轴承跑了8000小时后,振动加速度有效值从 1.2m/s^2 窜到了 8.7m/s^2 ,102Hz那个位置幅值突然变大。齿轮箱的毛病主要来自齿面磨损或者断齿,一旦齿面接触斑点面积低于60%,振动速度就超出ISO

标准限值3倍以上;润滑油粘度要是掉到15cSt以下,就容易出现胶合失效。润滑系统有没有异常,通过油液分析就能诊断出来:污染度每升一级,摩擦系数就涨12%。有个案例,轴承温度升到了85℃,一查磨粒浓度高达2000个/mL,正常情况也就500以下,最后确认是润滑脂氧化变质造成的。

2.3故障演化规律与危害性评估

故障演化是个链式过程,从局部损伤一步步走到系统停机。拿轴承点蚀来说,微裂纹刚出现的时候,振动只有小幅波动,等裂纹扩开了,振动幅值一下能涨5倍以上,最后直接导致整机停转。用了FMEA风险量化模型,根据故障的严重度、发生概率和检测难度算出风险优先数,再针对不同等级定不一样的维修策略。比如制动器夹紧力失效的RPN算出来135,属于高风险,得搞状态维修;有个矿针对液压站压力波动RPN=112的情况装了传感器,泄漏故障发生率降了82%,说明这套方法确实是有效。

3 智能监测系统总体设计

3.1系统架构设计原则

这套系统用的是“感知-传输-应用”三层架构。感知层靠传感器网络采集多维状态数据,传输层通过矿用隔爆型边缘计算网关实现毫秒级数据转发,应用层在云端搭了个知识图谱,把设备档案、运维记录和实时数据整合到一起,形成决策中枢。全链路都做了冗余设计,电源是双路自动切换,采集器是一主一备,传输网是双路光纤环网,主干万一断了,备用4G链路3秒内就能接管数据传输,系统平均无故障时间拉到了8000小时以上。

3.2硬件选型与配置

传感器选型,振动传感器灵敏度是100mV/g,量程±50g,矿山设备那些典型冲击信号基本都能抓到;温度传感器用的PT100三线制,能在零下40℃到120℃之间干活,井下潮湿环境完全扛得住。数据采集器是16路模块化设计,振动、转速、温度这些参数可以同时采,抗干扰也验证过了,20Hz到2kHz频段信号波动不到1dB;有个铁矿在8kV/m的电磁干扰下,照样能抓到0.5Hz的低频信号。通信这边用了Modbus/TCP和IOPC UA双协议,无线模块支持4G和5G自动切换,井下遮挡率达到60%的时候,上传速率还能维持在20Mbps以上。

3.3软件平台功能架构

数据采集增加了抗混叠滤波电路和程控放大芯片,用小波变换把振动信号拆了5层,信息量保留了98%,数据却压缩了三分之一。本公司实测下来,一天的数据量从8TB降到了2.4TB,存储费用省了65%。预警模块用的是滑动窗口自适应算法,机器会自己根据历史数据调整报警阈值。振动一跑偏,超过3倍标准差了,就触发三级预警。知识库存了SKF、NSK这些厂家的5万多条轴承参数,加上1000多个故障案例,配合迁移学习,新设备建模上手很快。在一个铜矿落地后,轴承故障的识别准确率达到了92%,比传统专家系统高出18个百分点。

人机交互选用Unity引擎做了三维可视化,能看到设备的剖分图,还能叠加热力图显示测点位置。移动端的微信小程序,消息推送和远程诊断都包含在内,现场人员点开就能看设备健康

指数和应对方法。维护人员响应时间从45分钟降到了8分钟,紧急故障处理效率翻了7倍。整个系统硬软件一起优化,达到了GB/T 38624.1-2020标准。中国机械总院检测中心验证过,振动信号采集精度±0.5%,故障诊断最快15分钟内出结果,在行业里属于领先水平,给矿山设备智能化改造提供了技术参考。

4 故障特征提取与智能诊断技术研究

4.1信号处理技术优化

矿山设备运行环境挺复杂,所以在信号处理这块做了系统性的优化。时域分析这块,传统峭度指标对冲击信号挺敏感,但它扛不住高斯噪声。基于形态学滤波的改进峭度算法,自己构造自适应结构元素,既能平滑噪声,又能保住有效特征。实验下来,信噪比只有5dB的时候,冲击成分照样能提取出八成以上。在频域分析方面,采用了加窗插值FFT技术,打破了传统FFT分辨率不够的瓶颈。用分段重采样加上三次样条插值,把频谱分辨率提到了0.08Hz。包络解调这块,用Teager能量算子替换了传统的Hilbert变换,早期故障特征的检测能力明显更强了。在某铁矿提升机的齿轮箱故障诊断里,这个方法让故障特征频率的幅值涨了32倍。

处理非平稳信号时,改进了Hilbert-Huang变换,主要是优化了经验模态分解的停止准则。用二次差分阈值法替换传统极值判定,把模态混叠的问题给解决了。实测下来,转速波动±15%的工况下,改进后的HHT瞬时频率估计误差能控制在0.8Hz以内。

4.2多源数据融合策略

搭建一个多维度数据融合框架,把振动加速度、轴承温度和电机电流这三类不同类型的传感器数据整合到一起。通过建立动态关联矩阵,能看出不同工况下它们之间的耦合关系:比如负载增加10%的时候,振动幅值和电流谐波呈现指数型增长,拟合优度达到了0.93。先用主成分分析做特征降维,再用t-SNE算法把高维特征可视化出来,正常状态和早期故障模式就能分得清清楚楚。粗糙集理论用来做决策表约简,通过计算每个属性重要性系数,从一堆特征里筛出了振动峰值、温度梯度等7个关键特征。一个铜矿落地验证,特征集精简之后,诊断模型的参数量减少了62%,但分类准确率还保持在91.5%。另外,电流信号的相位信息容易被电磁干扰影响,换了个思路,用小波相干分析来提取振动和电流之间的非线性关联特征,效果很不错。

4.3机器学习诊断模型构建

在监督学习这一方面,采用了支持向量机,搭配径向基核函数和网格搜索法,把超参数调到了最优组合。碰上小样本的情况,就用留一交叉验证来处理,最后滚动轴承外圈故障识别率从82%提到了94%。随机森林模型这边,改用基尼不纯度代替信息增益来作为分裂标准,通过限制最小叶子节点大小来控制剪枝强度,最终建了个包含128棵决策树的平衡模型。针对过拟合问题,可动态特征袋装机制:训练过程中特征采样比例动态调整,前期侧重全局特征提取,采样率设到80%,后期转为强化局部模式识别,采样率降到30%。这套方案让模型在测试集上的AUC值达到了0.968,比常规方法高了12.3个百分点。

4.4 半监督学习改进方案

自编码器去噪网络采用了堆叠自编码器结构, 编码端是3层稀疏自编码单元, 激活函数选的ReLU, 解码端跟编码端对称。训练时加了对抗策略, 重构损失和KL散度损失按0.7比0.3的权重去优化。只有15%的带标签样本时, 这套方法就把故障分类精度从68%拉到了89%。

对抗生成网络这边, 搭建的是条件生成对抗框架, 判别器用4层卷积神经网络, 生成器用全连接网络。加上先验知识约束, 比如轴承的几何参数, 能生成具有物理意义的虚拟故障样本。实验下来, 数据集扩充之后, 少样本场景下的SVM模型准确率提升了21.5%, 而且没有出现模式崩溃的问题。

4.5 深度学习模型创新

轻量级CNN采用的MobileNetV2, 靠深度可分离卷积和宽度因子优化, 参数量控制在1.7M以下。部署到NVIDIA Jetson AGX边缘计算平台上, 振动信号能实时处理, 帧率可以跑到25fps以上。处理时序数据时, Transformer模型用了改进的因果注意力机制, 通过位置编码把QKV矩阵的排列顺序调了一下, 旋转机械的周期性特征抓得挺准。模型压缩这块, 把知识蒸馏和量化技术结合起来, 预训练好的ResNet50压到了INT8精度, 推理速度提升了4.8倍, 单样本只要19.2毫秒, 诊断精度还保住了90.3%。这套混合架构在某铁矿现场测试, 主轴轴承故障能做到毫秒级预警响应。

5 系统实现与应用验证

5.1 工程实施案例分析——安徽开发矿业项目

以安徽开发矿业的联合副井提升机为例, 系统性地部署了这套智能监测系统, 验证它在工程上的实际表现。减速机的关键位置, 包括高速轴轴承座、低速轴齿轮箱, 都装了振动-温度复合传感器, 一共10个BH5031型传感器, 径向和轴向的振动监测都覆盖到了。调试的时候重点解决了信号同步的问题, 用了光纤环网时标同步技术, 多节点数据采集的延迟控制在±5微秒以内; 还用激光对中仪把传感器安装角度偏差校准到了0.5°以内, 保证振动频谱特征提取的准确性。从运行的数据上看, 系统的平均无故障间隔时间从改造前的4500小时提到了8000小时以上, 非计划停机的频次同比下降了75%。

5.2 故障诊断准确率验证实验

为了量化系统到底好不好用, 建了一个测试数据集, 覆盖了正常状态加上不对中、碰磨、润滑不良等6类典型故障。采集的样本包含了不同转速和负载工况下的连续运行数据, 转速范围

从30%额定负荷到满载。用混淆矩阵分析了模型的分类精度, 结果显示智能诊断系统对轴承内圈故障的识别率达到了94.7%, 传统方法只有79.5%。再通过ROC曲线看, 虚警率设在5%的时候, 系统真警率已经跑到了92.3%, 比传统阈值法高了15个百分点。值得提一下, 基于迁移学习的跨设备诊断模块泛化能力不错, 在相似型号的设备上做故障诊断, 误报率能控制在8%以下。

5.3 经济效益与社会效益分析

这套系统落地之后, 经济效益有明显的改善。通过精准润滑和预防性维护, 主轴更换周期拉到了5年以上, 比行业平均水平高了20%。此套系统实施后24h智能在线监测, 一定程度上替代了受监测的部位的人工点检, 平均每天减少停机进行人工检查时长1h, 提高了设备运转率。

6 结语

这套面向矿山提升机的智能监测系统, 技术创新主要体现在三个方面: 一是通过振动、温度、压力等多维信号联合分析, 把故障特征抓得更准; 二是基于迁移学习的自适应诊断模型, 解决了跨设备数据不好对接的问题; 三是模块化硬件设计, 扛得住井下恶劣工况。工程实践下来, 在安徽开发矿业的应用中, 关键部件故障预警响应时间缩到了15分钟以内, 设备综合效率提升了22%, 验证了这套矿山设备智能化改造方案是可以复制推广的。未来把数字孪生技术融进来, 靠实时数据映射建个虚拟设备模型, 实现预测性维护和工艺优化的闭环管理; 二是量子加密通信在工业物联网上的使用, 保证井下数据传输的安全。另外, 针对露天矿的无轨车辆、选矿球磨机这些不同类型设备, 打算开发多模态协同监测系统, 把振动、声发射、油液分析等多源信息整合到一起, 形成全矿场的设备健康管理网络。这些方向能给矿山设备运维模式转型提供更全面的方案。

[参考文献]

- [1]牛继国. 基于PLC的有色金属矿山提升机电气控制技术[J]. 世界有色金属, 2026, (9): 28-30.
- [2]罗富寿, 黄敏华. 金属矿山井下提升机硐室制冷降温研究[J]. 科技与创新, 2024, (4): 95-97.
- [3]王静. 三水沟提升机智能监测装置的设计与应用研究[J]. 机械管理开发, 2025, 40(2): 180-182+185.

作者简介:

王汉臣(1987--), 男, 汉族, 吉林省安图县人, 本科, 工学学士, 研究方向: 金属矿山采选机电设备(提升机、无轨车辆、选矿工艺设备等)。