

基于大数据分析的煤矿机电设备故障规律与预防性维修决策

张国堂

国能神东煤炭集团

DOI:10.32629/gmsm.v9i1.2389

[摘要] 为解决煤矿机电设备在恶劣工况下故障频发、传统维修模式滞后等问题,提升设备运行可靠性与生产安全性,本文提出基于大数据分析的故障规律挖掘与预防性维修决策方案。通过构建多源数据采集体系,采集设备振动、温度、电流等运行参数及历史故障数据,经清洗、预处理与特征提取后,运用统计分析、关联规则挖掘、机器学习等大数据技术,系统剖析煤矿机电设备故障类型、时间分布、影响因素等核心规律。基于故障规律构建预防性维修决策模型,实现设备健康状态评估、故障提前预警与维修策略动态优化。

[关键词] 大数据分析; 煤矿机电设备; 故障规律; 预防性维修; 健康状态评估

中图分类号: TD82 文献标识码: A

Mining Electrical and Mechanical Equipment Failure Patterns and Preventive Maintenance Decision-Making Based on Big Data Analysis

Guotang Zhang

CHN Energy Shendong Coal Group

[Abstract] To address the frequent failures of mining electrical and mechanical equipment under harsh working conditions and the lagging nature of traditional maintenance models, thereby improving equipment operational reliability and production safety, this paper proposes a solution for failure pattern mining and preventive maintenance decision-making based on big data analysis. By constructing a multi-source data collection system, operational parameters such as equipment vibration, temperature, and current, along with historical failure data, are collected. After processes of cleaning, preprocessing, and feature extraction, big data technologies including statistical analysis, association rule mining, and machine learning are applied to systematically analyze core patterns of mining equipment failures, including failure types, temporal distribution, and influencing factors. Based on these failure patterns, a preventive maintenance decision-making model is constructed to achieve equipment health assessment, early fault warning, and dynamic optimization of maintenance strategies.

[Key words] Big data analysis; Mining electrical and mechanical equipment; Failure patterns; Preventive maintenance; Health assessment

引言

煤矿机电设备是煤炭生产的关键载体,涵盖提升机、通风机、刮板输送机、液压支架、主排水泵等核心设备,承担着采掘、运输、通风、排水等关键生产任务。煤矿井下环境具有高温、高湿、高粉尘、高振动、强电磁干扰等显著特征,加之设备长期处于高负荷连续运行状态,导致机电设备易出现轴承磨损、齿轮断齿、电机过载、绝缘老化等故障。传统煤矿机电设备维修模式以定期检修和事后维修为主,存在明显弊端:定期检修依赖固定周期规划,无法适配设备实际运行状态,易出现“过修”造成资源浪费或“欠修”遗留安全隐患;事后维修属于被动响应,故障发生后才进行处置,易导致故障扩大化,引发连锁反应和长时间

停产。随着煤矿行业智能化转型推进,物联网、大数据、人工智能等技术在煤矿生产领域的应用日益深入,为构建数据驱动的故障管理与维修决策体系提供了技术支撑。基于大数据分析的煤矿机电设备故障规律挖掘与预防性维修决策,核心在于通过对设备全生命周期运行数据的深度分析,精准掌握故障发生机理与演化规律,实现从“被动维修”向“主动预防”的转型。本文结合煤矿机电设备运行特性,构建多源数据采集与处理体系,运用大数据分析技术挖掘故障规律,建立科学的预防性维修决策模型,为煤矿机电设备安全稳定运行提供技术保障,助力煤矿行业智能化、安全化发展。

1 煤矿机电设备大数据采集与处理体系

1.1 数据采集体系构建

煤矿机电设备故障规律分析与预防性维修决策的基础是高质量、全维度的运行数据，需构建覆盖设备关键部位、多参数同步采集的感知网络，确保数据的完整性、实时性和准确性。

(1) 运行状态参数数据：针对不同设备核心部件部署专用传感器，实时采集反映设备运行状态的关键参数。其中，旋转机械（提升机、通风机、电机）重点采集振动（径向、轴向、垂直方向，采样频率 $\geq 10\text{kHz}$ ）、温度（核心部件温度，测量误差 $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$ ）、转速、转矩等参数；液压设备（液压支架、液压泵站）重点采集压力、流量、液位、油温等参数；电气设备（开关柜、变压器、变频器）重点采集电流、电压、功率因数、局部放电等参数。(2) 历史故障与维修数据：通过梳理煤矿设备管理台账、维修记录、故障诊断报告等资料，采集设备故障类型、故障发生时间、故障部位、故障原因、维修措施、维修时长、备件消耗等信息，构建历史故障与维修数据库。同时，记录设备启停次数、运行时长、负载变化等工况信息，为关联分析故障影响因素提供数据支撑。(3) 环境与工况数据：采集井下温度、湿度、粉尘浓度、瓦斯浓度等环境参数，以及设备负载率、生产班次、工况切换等工况信息，分析环境因素与工况变化对设备故障的影响机制。

1.2 数据预处理技术

采集的原始数据存在噪声干扰、缺失值、异常值等问题，直接影响故障规律分析与模型构建的准确性，需通过数据预处理提升数据质量。

(1) 数据清洗：针对原始数据中的噪声、异常值和缺失值进行处理。采用小波包变换算法滤除振动信号中的电磁干扰和环境噪声，提升信号信噪比；通过 3σ 准则识别异常值，结合设备运行工况判断异常数据是否为真实故障前兆，对误采集的异常值进行剔除，对真实异常数据予以保留；针对缺失值，采用线性插值法、滑动平均法等进行补充，确保数据的连续性。(2) 数据标准化：由于不同类型数据的量纲和取值范围差异较大（如电流单位为A，温度单位为 $^\circ\text{C}$ ，振动幅值单位为 mm/s ），需进行标准化处理，消除量纲影响。采用Z-score标准化方法，将数据转换为均值为0、标准差为1的标准化数据。(3) 特征提取：从预处理后的数据中提取能够反映设备健康状态和故障特征的关键指标，为后续故障规律分析和模型构建提供输入。针对振动信号，提取时域特征（均值、标准差、偏度、峭度、峰值因子）和频域特征（主频幅值、频谱能量、包络熵）；针对温度、电流等时序数据，提取趋势特征（斜率、变化率、累积增量）和统计特征（最大值、最小值、波动范围）。采用主成分分析（PCA）方法对提取的多维特征进行降维处理，剔除冗余特征，保留贡献率 $\geq 85\%$ 的核心特征，提升分析效率与模型精度。

2 基于大数据分析的煤矿机电设备故障规律挖掘

煤矿机电设备故障规律挖掘是预防性维修决策的核心前提，通过运用大数据分析技术，从故障类型、时间分布、影响因素三个维度，系统剖析设备故障发生的内在规律，精准识别故障前兆与核心诱因，为构建预防性维修模型提供科学依据。

2.1 故障类型分布规律分析

基于历史故障数据与实时运行数据，采用统计分析与聚类分析相结合的方法，梳理煤矿机电设备主要故障类型及分布特征。煤矿机电设备故障主要分为机械故障、电气故障、控制故障三大类：

(1) 机械故障：占比最高，主要包括轴承磨损、齿轮断齿、皮带跑偏、联轴器松动、叶轮磨损等。通过关联规则挖掘发现，轴承磨损故障与振动峭度值、温度变化率呈显著正相关，当振动峭度值超过2.5、温度日变化率超过 5°C 时，轴承磨损故障发生概率提升80%以上；齿轮断齿故障多与负载波动、润滑不良相关，负载波动幅度超过额定负载的20%且润滑油污染度超标时，故障风险显著增加。(2) 电气故障：主要包括电机过载、绝缘老化、线路短路、局部放电等。采用时序分析方法发现，电气故障多发生在设备启停阶段和负载突变时刻，电机过载故障与电流有效值、功率因数密切相关，当电流持续超过额定电流的1.2倍且功率因数低于0.85时，易引发过载故障；绝缘老化故障与环境湿度、运行时长正相关，井下湿度超过85%且设备连续运行时长超过8000小时后，绝缘老化故障发生率显著上升。(3) 控制故障：主要包括PLC控制器失灵、传感器故障、通信中断等。通过聚类分析发现，控制故障多与电磁干扰、线路接触不良相关，在井下瓦斯抽采区域、大功率设备附近等电磁干扰强烈的区域，控制故障发生率是其他区域的2-3倍。

2.2 故障时间分布规律分析

运用时间序列分析方法，对大量历史故障数据按日、周、月、季节及设备运行时长进行统计分析，挖掘故障时间分布规律：

(1) 日内分布规律：故障多发生在设备启停阶段和生产高峰期，启停阶段（每日8:00-9:00、16:00-17:00）故障发生率占日内总故障的40%，主要原因是启停过程中设备负载突变、参数波动较大，易引发机械冲击和电气过载；生产高峰期（10:00-14:00）故障发生率占比35%，由于设备长时间高负荷运行，核心部件磨损加剧，易出现故障。(2) 周内分布规律：故障发生率呈现“周末略高、工作日相对平稳”的特征，周末故障发生率比工作日高15%-20%，主要原因是周末值班人员减少、巡检频次降低，部分轻微异常未能及时发现，导致故障扩大化。(3) 季节分布规律：冬季和夏季故障发生率较高，冬季故障占比35%，主要由于低温环境导致润滑油粘度增加、设备密封性能下降，易引发轴承磨损、液压系统故障；夏季故障占比30%，高温高湿环境加速电气设备绝缘老化，易出现电机过载、线路短路等故障。(4) 运行时长分布规律：设备故障发生概率随运行时长呈现“低-高-低”的阶段性特征，运行初期（0-2000小时）故障发生率较低（ $< 5\%$ ），主要为安装调试问题引发的初期故障；稳定运行期（2000-8000小时）故障发生率维持在10%-15%，主要为正常磨损引发的故障；老化期（ > 8000 小时）故障发生率显著上升（ $> 25\%$ ），核心部件性能衰退，易出现多发性、复合型故障。

2.3 故障影响因素关联规律分析

采用关联规则挖掘（Apriori算法）和相关性分析方法，探究

环境因素、工况因素、维护因素与设备故障的关联规律,识别故障核心影响因素:

(1)环境因素与故障的关联:井下粉尘浓度与机械故障呈强正相关(相关系数 $r=0.82$),粉尘浓度超过 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 时,机械部件磨损速率提升2倍以上;环境湿度与电气故障相关系数 $r=0.75$,高湿环境易导致电气设备绝缘性能下降,引发短路、漏电等故障;瓦斯浓度虽不直接引发设备故障,但瓦斯抽采过程中的电磁干扰会增加控制故障发生率。(2)工况因素与故障的关联:设备负载率与故障发生率呈非线性正相关,负载率在70%–90%时,故障发生率相对稳定;当负载率超过90%时,故障发生率急剧上升,每提升10%负载率,故障风险增加30%以上;设备启停频次与机械故障相关系数 $r=0.78$,频繁启停会加剧机械部件的疲劳损伤,启停频次每日超过10次时,轴承故障发生率提升50%。(3)维护因素与故障的关联:维护周期合理性对故障发生率影响显著,定期维护周期过长易导致“欠修”,过短则造成“过修”。通过大数据分析发现,提升机轴承维护周期最佳为2000小时,通风机叶轮维护周期最佳为3000小时,相较于传统固定周期(4000小时),优化后故障发生率降低40%;维护质量与故障复发率密切相关,规范维护后的故障复发率仅为10%,而不规范维护的复发率高达45%。

3 基于故障规律的预防性维修决策模型构建

3.1 设备健康状态评估模型

结合故障规律分析结果,构建设备健康状态评估指标体系,采用层次分析法(AHP)确定各指标权重,基于模糊综合评价法计算设备健康指数(EHI),量化评估设备健康状态。评估指标体系包括运行参数指标、故障历史指标、环境工况指标三个一级指标,每个一级指标下包含若干二级指标:

(1)运行参数指标(权重0.5):包括振动特征指标(峭度、主频幅值)、温度指标(核心部件温度、温度变化率)、电气参数指标(电流、电压、功率因数)等,反映设备实时运行状态。(2)故障历史指标(权重0.3):包括故障发生频次、故障严重程度、故障复发率等,结合设备历史故障情况评估健康状态。(3)环境工况指标(权重0.2):包括环境温度、湿度、粉尘浓度、设备负载率等,反映环境与工况对设备健康的影响。

健康指数EHI取值范围为0–1,根据EHI值将设备健康状态划分为四个等级:健康状态($EHI>0.85$)、亚健康状态($0.7\leq EHI\leq 0.85$)、预警状态($0.5\leq EHI<0.7$)、故障临近状态($EHI<0.5$)。健康状态下设备运行稳定,无需额外维修;亚健康状态需加强监测频次;预警状态需制定预防性维修计划;故障临近状态需立即停机维修。

3.2 故障预测预警模型

基于大数据分析技术,构建融合机器学习算法的故障预测预警模型,结合设备运行数据与故障规律,实现故障类型、故障发生时间的精准预测与预警。模型采用“边缘计算+云端协同”架构,边缘端部署轻量级预测模型,实现实时数据快速分析与即

时预警;云端部署高精度预测模型,实现长期趋势分析与故障深度预测。

(1)故障类型预测:采用随机森林算法构建故障类型预测模型,以预处理后的运行参数特征、环境工况特征为输入,输出各类故障发生的概率。随机森林算法具有抗干扰能力强、预测精度高的特点,通过集成多棵决策树的预测结果,提升模型泛化能力。通过历史数据训练与优化,模型对机械故障、电气故障、控制故障的预测准确率分别达到92%、88%、85%以上。(2)故障时间预测:采用长短时记忆网络(LSTM)构建故障时间预测模型,利用LSTM算法对时序数据的强拟合能力,分析设备运行参数的变化趋势,预测故障发生的剩余时间(RUL)。模型以设备健康指数时序数据、运行参数时序数据为输入,输出故障发生的预计时间。通过实际应用验证,模型可提前24–72小时预测潜在故障,预测误差控制在10%以内。(3)预警机制设计:根据故障预测结果,设置三级预警机制:一级预警(故障发生概率 $<30\%$,剩余时间 >72 小时),发出提示信息,加强设备监测;二级预警($30\%\leq$ 故障发生概率 $<60\%$, 24 小时 \leq 剩余时间 ≤ 72 小时),发出预警信号,制定预防性维修计划;三级预警(故障发生概率 $\geq 60\%$,剩余时间 <24 小时),发出紧急预警,立即安排人员现场检查与维修。预警信息通过短信、邮件、井下声光报警等方式同步推送至相关管理人员与维护人员,确保预警信息及时响应。

4 结论与展望

本文针对煤矿机电设备运行环境恶劣、故障频发、传统维修模式滞后等问题,构建了基于大数据分析的故障规律挖掘与预防性维修决策体系,通过多源数据采集与处理、故障规律多维分析、预防性维修决策模型构建,实现了设备故障的提前预警、精准诊断与科学维修,有效解决了传统维修模式“过修”“欠修”“被动维修”等弊端。未来研究方向可聚焦三个方面:(1)融合数字孪生技术,构建设备数字孪生模型,实现设备运行状态的可视化仿真与故障模拟推演,进一步提升故障预测与维修决策的智能化水平;(2)引入联邦学习算法,实现多矿井数据协同分析与模型共建共享,打破数据孤岛,提升故障规律挖掘的全面性与模型泛化能力;(3)结合5G、人工智能等技术,开发移动端智能运维平台,实现维修任务智能派发、现场数据实时上传、维修效果即时评估,进一步提升维修效率与管理便捷性。

[参考文献]

- [1]李兆丽.基于大数据的煤矿设备故障预测性维护在安全保障中的作用[J].建筑技术科学,2025,42(8):279–284.
- [2]高伟.煤矿机电设备故障预测模型与维护优化研究[J].煤矿机械,2025,46(7):132–135.
- [3]刘光.基于大数据技术的煤矿机电设备故障诊断与维修策略研究[J].模具制造,2024,24(6):259–261.

作者简介:

张国堂(1989--),男,汉族,陕西榆林人,本科,工程师,研究方向为煤矿机电。