

露天煤矿机械设备的智能诊断与预防性维护

袁伟, 院鹏春, 吕鸿鹏

国家电投集团内蒙古能源有限公司, 内蒙古 通辽 028000

DOI:10.61369/ETQM.2026010023

摘 要 : 针对露天煤矿高强度、高粉尘、强振动的恶劣工况, 以及传统维护模式响应滞后、成本高昂的痛点, 本文提出了一套露天煤矿机械设备的智能诊断与预防性维护体系。系统分析挖掘、运输、破碎等核心设备的故障机理, 评析事后维修、定期维护等传统模式的局限性。并在此基础上, 构建了以可靠性、实时性、兼容性和可扩展性为设计原则, 涵盖感知层、传输层、平台层和应用层的“四层递进”体系架构。该体系依托工业物联网、大数据与人工智能三大关键技术, 重点阐述了多源异构数据采集与融合、基于机器学习的智能故障诊断、基于数据驱动的设备剩余使用寿命 (RUL) 预测, 以及面向生产全局的智能维护决策优化等核心实现方法。通过构建“监测-诊断-预测-维护-复盘”的闭环管理, 该体系能够实现了对设备故障的秒级预警、精准定位与寿命预测, 并输出兼顾维护成本与生产效益的最优维护方案, 为提升露天煤矿设备管理水平、保障安全生产、降低运营成本提供了系统性的技术解决方案。

关 键 词 : 露天煤矿; 智能诊断; 预测性维护; 剩余使用寿命预测

Intelligent Diagnosis and Preventive Maintenance of Mechanical Equipment in Open-Pit Coal Mines

Yuan Wei, Yuan Pengchun, Lv Hongpeng

State Power Investment Corporation Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Tongliao, Inner Mongolia 028000

Abstract : In response to the harsh working conditions of open-pit coal mines, characterized by high intensity, high dust levels, and strong vibrations, as well as the drawbacks of traditional maintenance models such as delayed response and high costs, this paper proposes an intelligent diagnosis and preventive maintenance system for mechanical equipment in open-pit coal mines. It systematically analyzes the failure mechanisms of core equipment such as excavation, transportation, and crushing, and evaluates the limitations of traditional models such as post-failure repair and regular maintenance. Building on this foundation, a "four-layer progressive" system architecture is constructed, adhering to design principles of reliability, real-time performance, compatibility, and scalability, encompassing the perception layer, transmission layer, platform layer, and application layer. Leveraging three key technologies—industrial IoT, big data, and artificial intelligence—the paper focuses on elaborating on core implementation methods such as multi-source heterogeneous data acquisition and fusion, intelligent fault diagnosis based on machine learning, data-driven remaining useful life (RUL) prediction of equipment, and intelligent maintenance decision optimization oriented towards overall production. Through the establishment of a closed-loop management system encompassing "monitoring–diagnosis–prediction–maintenance–review," this system enables second-level early warning, precise positioning, and life prediction of equipment failures, and outputs optimal maintenance plans that balance maintenance costs and production efficiency. It provides a systematic technological solution for enhancing the equipment management level, ensuring safe production, and reducing operational costs in open-pit coal mines.

Keywords : open-pit coal mine; intelligent diagnosis; predictive maintenance; remaining useful life prediction

引言

露天煤矿凭借其开采规模大、资源回收率高、生产效率高等优势, 在我国煤炭生产体系中占据着举足轻重的地位。然而露天煤矿的开采作业环境极其恶劣, 设备长期暴露于高粉尘、强振动、大温差及重载荷的严苛工况之下, 导致其故障率高、可靠性低。如何保障这

些关键设备的稳定、高效运行，已成为制约露天煤矿智能化转型与高质量发展的核心瓶颈。在此背景下，本文聚焦露天煤矿机械设备的智能诊断与预防性维护展开研究。旨在构建一套集数据采集、智能分析、预测预警与决策优化于一体的综合性技术体系。文章分析露天煤矿关键设备的维护现状与故障机理，进而提出智能诊断与预测性维护体系的总体架构与设计原则，并深入探讨多源数据融合、智能故障诊断、寿命预测及维护决策优化等核心关键技术的实现方法，以期为提升我国露天煤矿的设备管理智能化水平、保障安全生产、实现降本增效提供理论参考与技术路径。

一、露天煤矿关键设备及其维护模式分析

（一）核心设备分类与工作原理

露天煤矿设备机械维修的高效性一直是矿山行业的焦点问题。设备故障不仅会导致生产中断，还可能对工人的安全构成威胁^[1]。露天煤矿生产以“采、运、破”为核心流程，配套的关键设备需适配高强度、连续性作业需求，且需耐受高粉尘、强振动的恶劣工况^[2]。开采环节由挖掘设备主导，主要包括单斗挖掘机与轮斗挖掘机，前者通过液压驱动铲斗进行周期性挖掘，后者则利用旋转斗轮实现连续切削，其核心部件需承受百吨级的冲击载荷。运输环节作为物流枢纽，主要依靠载重百吨级的矿用自卸卡车在坡道上转运物料，大型矿山则配套自移式破碎站与带式输送机系统，通过摩擦力实现连续高效输送^[3]。破碎环节作为预处理单元，通常由颚式破碎机负责粗破，圆锥破碎机进行中细破，再经振动筛按粒度分级，以确保出料均匀，满足后续加工要求。

（二）设备常见故障模式与机理分析

露天煤矿设备故障的发生与恶劣工况、高负荷运行直接相关，不同类型设备的故障模式存在显著差异，但故障机理多围绕部件老化、磨损、应力集中展开^[4]。挖掘设备故障高发于液压系统与结构件，如密封件老化导致的液压油泄漏、冲击载荷引发的回转支承异响，以及频繁冲击造成的斗齿断裂^[5]。运输设备故障集中在传动与制动系统，例如粉尘进入或高温导致的发动机拉缸、重载工况下的变速箱齿轮磨损，以及长下坡时因高温引发的制动蹄片烧蚀。破碎设备故障则以易损件磨损和轴承故障为主，包括与硬岩直接摩擦导致的颚板磨损、润滑不良或粉尘侵入造成的轴承过热，以及异物划伤或跑偏摩擦引起的输送带撕裂。

（三）传统维护模式评析

露天煤矿传统维护模式以“被动响应”或“固定周期”为核心逻辑，难以适配设备动态运行状态，主要包含事后维修、定期预防性维护与视情维护三种类型。事后维修在设备故障后进行，虽短期成本低，但易导致突发停产和连锁故障^[6]。定期预防性维护按固定周期执行，能降低突发故障率，但易造成过度维修或遗漏非周期性隐患。视情维护依据人工巡检决策，虽更灵活，但高度依赖人员经验，无法实时监测内部状态，难以实现早期预警。

二、智能诊断与预测性维护体系总体架构

（一）设计原则

露天煤矿智能诊断与预测性维护体系的设计，必须以特殊工

况和生产需求为核心，并遵循四大原则，可靠性优先原则，要求硬件能抵抗极端温、粉尘与振动，确保数据采集稳定；实时性保障原则，要求故障预警响应在秒级至分钟级，避免生产中断；兼容性适配原则，需支持多协议解析，打通不同品牌设备间的数据孤岛；可扩展性预留，体系需为未来新增设备和算法升级预留接口与空间，降低长期改造成本。

（二）体系架构

基于上述设计原则，体系采用“四层递进”的结构设计，从数据采集到应用落地形成全流程闭环。感知层作为基础，针对挖掘机、卡车、破碎机等不同设备部署振动、温度、压力等多类型传感器，并同步采集 PLC 数据，全面覆盖核心部件的运行状态^[7]。传输层承担数据流转，移动设备采用 5G+北斗双模传输保障信号稳定，固定设备则通过工业以太网连接，同时利用边缘网关对原始数据进行预处理，以减轻云端压力并提升响应速度。平台层作为核心中枢，利用时序数据库存储海量历史数据，通过算法引擎进行故障诊断与寿命预测，并以可视化仪表盘直观呈现结果^[8]。应用层面向运维与调度人员，推送精准的故障报警与寿命报告，提供智能维护计划建议，并支持故障溯源查询，从而实现“监测-诊断-预测-维护-复盘”的闭环管理。

（三）关键技术支撑

体系的稳定运行依赖三大核心技术的协同支撑，共同保障数据采集、处理与智能分析的有效性。工业物联网（IIoT）技术通过耐极端环境的传感器与网关，保障了设备状态数据的全面采集与可靠传输。大数据处理技术负责对海量时序数据进行存储、清洗和特征提取，为智能分析提供高质量输入^[9]。人工智能（AI）技术作为“智能”核心，运用机器学习与深度学习算法，精准诊断故障并预测部件剩余寿命。三者协同运作，IIoT 确保数据“采得全、传得通”，大数据技术保障数据“洗得净、用得上”，AI 则实现数据“判得准、算得对”，共同构成了体系的技术基石。

三、核心技术与实现方法

（一）多源异构数据采集与融合技术

露天煤矿设备数据来源复杂且格式多样，多源异构数据采集与融合需围绕“全维度覆盖、高质量处理、多维度整合”展开^[10]。数据采集阶段，针对不同设备部署振动、温度等传感器，并通过 CAN 总线读取 PLC 数据，同时结合人工巡检记录，构建全面的数据网络。在预处理环节，采用 3σ 原则、小波变换等方法清洗噪声、填补缺失，并对数值与文本数据进行标准化，提升数

据质量。在融合阶段，采用特征层融合策略，将同一设备的多源特征整合为统一特征向量，通过加权算法形成全面反映设备状态的数据集合，为智能诊断提供高质量输入。

（二）基于机器学习的智能故障诊断

基于机器学习的智能故障诊断需结合露天煤矿设备故障特点，构建“数据标注-模型训练-实时诊断”的全流程技术体系。在数据集构建阶段，收集设备历史运行与故障记录，进行故障类型标注，并通过数据增强扩充小样本故障数据。其次在模型选择上，根据故障复杂度适配算法：对特征明确的故障采用支持向量机（SVM）；对多特征耦合的故障采用随机森林；对依赖深层特征的故障采用卷积神经网络（CNN）。模型训练通过交叉验证优化超参数，确保识别准确率超95%。在实时诊断阶段，模型在10秒内完成故障判断与定位，若概率超阈值则自动推送可能原因、处理建议，并向工作人员发送报警信息，实现快速响应。

（三）基于数据驱动的设备剩余使用寿命预测

基于数据驱动的设备剩余使用寿命（RUL）预测需聚焦设备退化规律，构建“特征筛选-模型构建-误差优化”的技术路径。退化特征提取是预测的核心前提，需从海量监测数据中筛选与部件寿命强相关的特征，对于轴承这类旋转部件，选取振动信号的“均方根随运行时间变化率”“峰值因子增长趋势”作为核心退化特征，因这些特征随轴承磨损加剧呈现明显上升趋势；对于发动机这类复杂系统，选取“机油污染度”“冷却液温度波动幅度”“油耗增长率”作为退化特征，这些参数直接反映发动机内部零件的老化程度；对于输送带这类易损件，选取“张紧力衰减速率”“跑偏量累积值”作为退化特征，可量化输送带的性能退化状态，特征筛选过程中通过皮尔逊相关系数与互信息熵，剔除与寿命相关性低的冗余特征，降低模型计算复杂度。预测模型构建需根据退化特征的线性/非线性特性选择适配算法，对于输送带磨损这类退化趋势平稳的场景，采用线性回归模型，通过拟合退化特征与运行时间的线性关系，计算特征达到失效阈值所需时间，即剩余使用寿命；对于发动机、轴承这类退化趋势非线性的部件，采用长短期记忆网络（LSTM），该模型可捕捉时序数据中的长期依赖关系，通过输入历史退化特征序列，输出未来一段时间内的特征变化趋势，进而预测寿命终点，模型训练时采用Adam优化器最小化预测值与实际寿命的均方误差（MSE）。模型优化环节需建立动态更新机制，定期将设备实际报废数据反馈至模型，重新训练调整参数，同时引入迁移学习技术，将成熟矿山的模型参数迁移至新矿山设备，减少新场景下的数据采集量，确保剩余使用寿命

参考文献

- [1] 杜林栋. 露天煤矿设备机械维修中故障诊断技术的应用[J]. 工程技术研究, 2024, 6(11): 190-192. DOI: 10.12417/2705-0998.24.11.058.
- [2] 孟祥健, 田定康. 露天煤矿机械设备故障诊断与维修[J]. 自动化应用, 2023, 64(15): 125-127, 131.
- [3] 富哈. 露天煤矿设备安全管理与维修保养管控[J]. 工程机械与维修, 2023(6): 35-37. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2114.2023.06.012.
- [4] 张永富. 浅谈露天煤矿机械设备的维修保养工艺[J]. 中国设备工程, 2021(15): 250-251. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2021.15.152.
- [5] 秦曙辉. 露天煤矿机械设备维修性的讨论[J]. 露天采矿技术, 2014(7): 70-71, 76. DOI: 10.13235/j.cnki.ltcn.2014.07.021.
- [6] 宋伟. 露天煤矿机械设备运行管理策略探究[J]. 魅力中国, 2020(44): 329.
- [7] 鲜小泉. 露天煤矿机械设备的发展与安全管理方法[J]. 科技资讯, 2015, 13(13): 144. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3791.2015.13.116.
- [8] 张玉林. 现代化露天煤矿机械设备维修性的讨论[J]. 科学与信息化, 2017(12): 121, 123.
- [9] 张国强. 露天煤矿设备安全管理与维修保养管控[J]. 工程建设与发展, 2024, 3(5): 155-157. DOI: 10.12417/2811-0722.24.05.052.
- [10] 李一林. 浅谈露天煤矿机械设备的维修保养工艺[J]. 工程建设与发展, 2024, 3(5): 101-103. DOI: 10.12417/2811-0722.24.05.034.

预测误差控制在10%以内，为预防性维护提供精准时间依据。

（四）智能维护决策与优化

智能维护决策与优化需结合露天煤矿生产实际，平衡设备维护需求与生产计划，构建“多要素输入-成本优化-方案输出”的决策体系。决策输入需整合三类核心要素，设备重要性等级，根据设备在生产流程中的作用划分优先级，优先级高的设备需优先安排维护；设备剩余使用寿命（RUL），当 $RUL < 7$ 天时标记为“紧急维护”， $7 \leq RUL \leq 30$ 天时标记为“计划维护”， $RUL > 30$ 天时暂不安排维护；生产计划安排，需避开矿山高产时段、衔接设备闲置窗口，避免维护导致的产量损失。维护决策优化以“总成本最低”为目标，总成本涵盖维护成本（备件采购费、人工维修费）与停产损失，通过建立成本优化模型，计算不同维护时间点的总成本。例如某台主采挖掘机RUL为10天，若选择当前维护，需支付备件费2万元+人工费1万元，但会导致日间停产8小时（损失80万元），总成本83万元；若选择3天后夜间维护，需支付维护成本3万元（备件库存紧张需加急采购），但仅停产4小时（损失40万元），总成本43万元，模型通过对比不同方案的总成本，选择最优维护时机。维护方案输出需明确具体执行细节，维护时间精确到小时，避免与生产冲突；维护内容细化至部件级，确保维护全面性；备件清单需同步至仓库管理系统，自动核查备件库存，若库存不足则触发紧急采购流程；同时将维护方案推送至生产调度部门，协调调整维护时段的生产计划，避免影响整体采剥进度，维护完成后需记录维护效果，反馈至决策模型优化后续维护策略，形成“预测-决策-执行-反馈”的闭环管理。

四、结束语

本文围绕露天煤矿机械设备维护的痛点与挑战，系统性地提出并构建了一套集智能诊断与预测性维护于一体的综合性技术体系。该体系从露天煤矿的实际生产需求与恶劣工况出发，通过构建“四层递进”的总体架构，整合了工业物联网、大数据与人工智能等前沿技术，深入阐述了从多源异构数据采集融合，到基于机器学习的故障诊断，再到基于数据驱动的剩余使用寿命预测，实现智能维护决策优化的全流程闭环管理方法。露天煤矿机械设备的智能诊断与预测性维护是一个持续演进、不断深化的过程，需要学术界与产业界共同努力，推动我国矿山行业向更安全、更高效、更绿色的未来迈进。