

智能化煤矿机电设备故障诊断与预测性维护技术研究

范涛

内蒙古蒙泰不连沟煤业有限公司 内蒙古 鄂尔多斯 017004

摘要:为解决煤矿机电设备井下复杂工况下故障频发、维护低效等问题,本文围绕智能化故障诊断与预测性维护技术展开研究。分析了核心机电设备分类、工作原理及典型故障类型,构建分层式智能化故障诊断技术架构,对比传统、智能及混合诊断算法的适配性。进而研究预测性维护核心技术,包括故障预测模型构建与维护决策优化方法,设计“现场-边缘-云端”三级软硬件系统。研究表明,该技术体系可实现设备故障精准诊断、提前预判及维护方案优化,有效提升设备运行稳定性,降低维护成本,为智能化煤矿机电设备安全高效运行提供技术支撑。

关键词:智能化煤矿;机电设备故障;诊断技术;预测性维护技术;系统设计

引言:煤炭作为我国核心能源,煤矿机电设备是保障开采作业连续开展的关键。当前井下高湿、高尘、强干扰工况,导致设备故障频发,传统预防性维护存在过度维护、响应滞后等弊端,制约生产效率与作业安全。随着智能化矿山建设推进,亟需构建高效的故障诊断与预测性维护体系。本文立足煤矿机电设备运行特性,系统研究故障诊断技术架构、核心算法及预测性维护关键技术,设计适配井下工况的智能化系统,旨在突破传统维护瓶颈,推动煤矿机电设备运维向精准化、智能化转型,助力矿山安全生产与高效运营。

1 智能化煤矿机电设备基础理论与故障特性

1.1 核心机电设备分类及工作原理

煤矿机电设备是煤炭开采、运输、通风排水等环节的核心保障,类型多样且适配复杂工况。采掘设备以采煤机与掘进机为核心:采煤机通过截割部滚筒破碎煤体,依托牵引部沿工作面移动,搭配液压支架实现落煤、装煤一体化;掘进机以刀盘切削岩体,同步完成排矸与支护,为采煤作业开辟通道。运输设备主要包括胶带输送机与刮板输送机:胶带输送机借助输送带摩擦力实现煤炭长距离连续运输,适用于水平及缓倾斜巷道;刮板输送机通过刮板链带动煤炭运动,适配复杂巷道走向,多用于工作面与转载点衔接。通风与排水设备承担安全保障职责:通风机强制置换井下瓦斯、粉尘,保障人员安全;排水泵排除井下涌水,维持矿井正常水位。

1.2 煤矿机电设备典型故障类型

受井下高湿、高尘、强振动等工况影响,机电设备故障频发且类型集中。(1)机械类故障最为常见,主要表现为磨损、断裂及振动异常:磨损多发生在轴承、齿轮等传动部件,长期摩擦导致精度下降;断裂多由部件疲劳或冲击载荷引发,如刮板输送机刮板断裂;振动异

常源于部件失衡、不对中,易诱发连锁故障。(2)电气类故障包括短路、绝缘老化及电机故障:短路由电缆破损、接线错误导致,可能烧毁设备;绝缘老化受潮湿环境影响,降低设备绝缘性能;电机故障常表现为过载、堵转,影响动力输出。液压类故障以泄漏、压力异常为主,泄漏因密封件损坏导致,压力异常源于泵体故障、阀组堵塞,影响液压支架、掘进机等设备动作^[1]。

2 智能化故障诊断技术体系及核心算法

2.1 智能化故障诊断技术架构

智能化煤矿机电设备故障诊断技术架构遵循分层设计原则,各层级协同运作形成完整技术闭环,实现故障精准识别与高效处理。(1)数据采集层作为架构基础,承担设备运行状态数据实时捕获任务,依托适配井下工况的各类传感器及监测终端,全面采集机电设备机械、电气、液压等多维度参数,同时完成数据初步过滤,剔除环境干扰产生的无效数据,为后续处理提供高质量数据源。(2)数据预处理层核心负责数据净化与标准化,通过清洗、归一化、融合等操作,解决多源数据异构性、冗余性问题,修正采集偏差,将原始数据转化为可用于诊断分析的标准化数据,保障诊断算法可靠性。(3)故障诊断分析层为核心环节,集成各类诊断算法对预处理数据深度解析,通过特征提取、模式识别判定故障类型、定位故障位置,同步完成故障等级评估,为预警及维护提供决策依据。(4)结果输出与预警层负责诊断结果可视化呈现与精准推送,通过终端界面向运维人员展示故障核心信息,触发分级预警机制,按故障严重程度发出警示信号,确保及时响应,同时留存数据用于算法优化与追溯。

2.2 基于传感器的多源数据采集技术

基于传感器的多源数据采集技术是智能化故障诊断

的前提,需结合煤矿井下高湿、高尘、强干扰工况,保障数据采集的实时性、准确性与稳定性。(1)传感器选型与布置需科学适配设备类型及监测参数:机械参数监测选用高精度振动、温度传感器,精准捕获传动部件振动频率、温度变化;电气参数监测搭配电流、电压、绝缘传感器,实时采集电机电流电压波动及设备绝缘性能;液压参数监测采用压力、流量传感器,捕捉液压系统压力变化及介质流量。布置遵循就近监测、无死角覆盖原则,避开强振动、高粉尘干扰区域,确保传感器安装牢固、传输通畅,同时预留冗余位置,便于后续扩容与维护。(2)数据传输采用“边缘传输+云端汇聚”双层模式,井下数据通过工业以太网、无线传感网络传输至边缘计算节点,缩短传输延迟,核心数据经边缘预处理后上传云端。通过优化传输协议、压缩数据体积提升效率,搭配抗干扰技术抵御电磁干扰、信号衰减,保障数据完整性,满足诊断实时性需求,避免因数据滞后导致故障漏判、误判。

2.3 核心诊断算法及应用对比

核心诊断算法的适配性直接决定故障诊断精度,不同算法各具特性,需结合煤矿机电设备工况合理选用。

(1)传统诊断算法以信号处理类为主,原理成熟、运算量小:傅里叶变换可将时域信号转化为频域信号,适用于平稳振动信号的周期性故障特征提取,对非平稳信号处理效果有限;小波分析具备多分辨率能力,兼顾时域与频域信息,能有效处理非平稳、突变信号,捕获早期微弱故障特征,但诊断效果受小波基函数选择影响较大;希尔伯特-黄变换可自适应分解非平稳信号,无需预设基函数,适配复杂工况,却存在端点效应易导致特征提取偏差。(2)智能诊断算法基于数据驱动,具备自主学习、自适应能力,适配复杂故障场景:神经网络算法模拟人脑神经元结构,构建多层模型自动学习故障特征与数据的映射关系,适配多源异构数据,诊断精度高,但需大量标注数据训练,模型可解释性弱;支持向量机基于统计学习理论,通过最优分类超平面实现故障分类,适用于小样本场景,泛化能力强、运算高效,处理高维海量数据时速度较慢。(3)混合诊断算法融合两者优势,弥补单一算法缺陷,通过传统算法提取特征、降维以减少运算量,再借助智能算法识别故障模式,提升诊断精度与效率,增强复杂工况适配性,是当前主流发展方向,在故障识别准确率、抗干扰能力上较单一算法有显著提升^[2]。

3 煤矿机电设备预测性维护核心技术研究

3.1 预测性维护与预防性维护的差异及核心特征

煤矿机电设备预测性维护以设备运行状态数据为核心,实现维护精准化、智能化,与传统预防性维护存在本质差异。(1)核心逻辑不同,预防性维护基于固定周期或使用时长制定计划,遵循“到期必检、到龄必换”模式,忽视设备实际健康状态,易出现过度维护或维护不足问题;预测性维护依托实时数据监测与分析,动态研判设备健康趋势,仅针对故障隐患开展针对性维护,实现“按需维护”核心目标。(2)实施前提有别,预防性维护对数据依赖度低,仅需基础设备台账与运行记录,技术门槛低但灵活性不足;预测性维护需依托完善的数据采集体系与精准分析模型,通过多维度数据挖掘潜在故障,对技术架构与数据质量要求较高。(3)核心特征体现为动态性、精准性与经济性,可动态适配设备运行状态变化,精准定位隐患位置及发展趋势,优化维护资源配置,减少非必要停机时间,兼顾运行稳定性与成本控制,更适配煤矿复杂工况需求。

3.2 基于数据驱动的故障预测模型构建技术

数据驱动型故障预测模型是预测性维护核心,通过数据挖掘与模型训练实现故障预判,涵盖指标体系搭建、模型选型与优化等关键环节。(1)构建设备健康状态评估指标体系,结合煤矿机电设备类型及故障特征,建立分层级指标,基础指标含机械、电气、液压系统核心运行参数,衍生指标包括参数变化率、趋势偏离度等,剔除冗余干扰项后通过权重分配明确核心指标优先级,确保评估结果精准反映设备健康状态。(2)搭建短期故障预测模型,核心采用时序数据分析模型,依托历史与实时运行数据捕捉参数变化规律,适配井下数据波动特点,具备强抗干扰能力与快速响应能力,可精准预测短期故障及类型,通过参数迭代优化提升精度,为即时维护决策提供支撑。(3)优化长期寿命预测模型,聚焦核心部件全生命周期评估,融合疲劳损耗理论与数据驱动算法,综合工况环境、运行负荷、维护记录等因素修正预测偏差,具备趋势外推能力,精准预判核心部件剩余寿命,预留迭代接口,结合数据积累持续优化预测效果,为长期维护计划提供依据。

3.3 预测性维护决策优化技术

维护决策优化技术衔接故障预测结果与实际执行,核心实现维护方案的科学、经济与协同。(1)基于多目标优化确定维护周期,突破单一成本导向逻辑,综合考量故障损失、维护成本、设备利用率等核心目标,建立多目标优化函数,量化分析不同周期下的目标权重,平衡停机损失与维护投入,形成动态可调的维护周期方案,适配设备健康状态与煤矿生产节奏。(2)构建多设

备协同维护决策机制,结合煤矿机电设备联动运行特性搭建全局协同体系,通过数据共享实现多设备隐患联动分析,优先处理影响核心生产链路的隐患,统筹规划维护时间与资源,避免单一设备维护导致整体生产停滞,优化人员、工具、备件调配,提升资源利用率与作业效率。(3)应用维护方案动态调整技术,依托实时监测数据与维护反馈建立迭代机制,维护过程中实时更新设备健康数据,若出现新隐患或预测偏差,及时调整方案优先级,记录维护效果数据,为后续决策优化、模型参数调整提供支撑,形成“预测-决策-执行-反馈-优化”闭环^[3]。

4 煤矿机电设备智能化诊断与预测性维护系统设计

4.1 系统总体设计目标与原则

系统设计以适配煤矿井下复杂工况为核心,实现机电设备故障诊断与预测性维护的智能化、一体化运作。总体目标是构建集数据采集、智能诊断、故障预测、维护决策于一体的闭环系统,提升设备运行稳定性与维护精准度。设计遵循四项核心原则:(1)可靠性,适配井下高湿、高尘、强干扰环境,保障系统连续稳定运行;(2)兼容性,支持多类型、多厂家设备数据接入与协议适配,兼顾老旧设备改造;(3)实时性,优化数据传输与算法效率,满足故障快速诊断预警需求;(4)安全性,强化数据加密与权限管控,防范数据泄露及设备误操作风险。

4.2 系统硬件架构设计

硬件架构采用“现场感知-边缘计算-云端管控”三级协同架构。现场感知终端部署高精度传感器与采集模块,实时捕获设备机械、电气、液压等多维度参数,终端具备抗干扰、防粉尘、耐潮湿特性,适配井下恶劣工况。边缘计算节点就近部署于井下巷道,承担数据预处理、实时诊断与本地预警任务,减少数据传输延迟与带宽消耗,保障关键故障快速响应。云端服务器配置高性能运算与存储设备,负责全局数据存储、模型训练优化、维护决策统筹及系统管控,为边缘节点提供算法支撑。

4.3 系统软件模块设计

软件采用模块化开发,各模块协同实现核心功能。数据管理模块负责多源数据的接收、存储、清洗与标准化,建立设备全生命周期数据库,保障数据可用性。故障诊断模块集成混合算法,通过特征提取与模式识别,自动完成故障类型判定、位置定位及报告输出。预测性维护模块依托数据驱动模型,实现设备健康评估、短期故障预判及核心部件剩余寿命预测,为维护计划提供依据。

4.4 系统安全性与可靠性设计

安全性设计聚焦数据与设备双维度:数据层面采用传输、存储双重加密及权限分级管控,建立操作日志追溯机制,防止数据篡改泄露;设备层面设置故障隔离与应急启停功能,规避连锁风险。可靠性设计从软硬件双向强化:硬件选用工业级元器件,优化密封散热结构,提升环境适应性;软件引入冗余与容错机制,支持模块故障自动切换,定期迭代算法与系统,搭配完善运维保障体系,确保系统长期稳定运行,适配煤矿设备连续作业需求^[4]。

结束语:本文完整构建了煤矿机电设备智能化故障诊断与预测性维护技术体系,从理论分析、技术研究到系统设计形成闭环。通过分层架构、混合算法及数据驱动模型,有效解决了井下设备故障诊断精准度不足、维护决策不科学等问题。该技术体系与设计方案适配煤矿复杂工况,具备较强的实用性与推广价值。后续可结合实际应用场景,优化算法模型精度,拓展多设备协同运维能力。

参考文献

- [1]代存海,陈一.煤矿机电设备故障诊断与预测维护技术研究[J].山东煤炭科技,2025,43(4):189-192.
- [2]王明,刘建庄.面向煤矿机电设备维护的深度学习故障预测技术研究[J].机械与电子,2025,43(8):67-72+80.
- [3]张卫宁.智能化技术在煤矿机电设备故障诊断中的应用[J].山东煤炭科技,2025,43(7):166-170.
- [4]褚润涛.煤炭机电设备故障诊断与预测性维护研究与实践[J].中国高新科技,2024(7):78-79+117.