

矿用防爆电机故障诊断与预测维护技术研究

王亚

西昌市航天宏达建材有限责任公司四川凉山 615600

摘要：矿用防爆电机作为煤矿生产系统的核心动力设备，其运行可靠性直接关系到煤矿开采的安全性、连续性与经济性。煤矿井下高湿、高尘、重载、强电磁干扰的恶劣工况，导致电机易发生轴承磨损、绕组绝缘老化、转子不平衡等故障，若未能及时诊断与处理，可能引发设备停机甚至瓦斯爆炸等重大安全事故。本文深入探讨了当前主流的故障诊断技术与预测维护方法，展望了未来技术突破方向，对提升煤矿机电设备运维水平、降低安全风险具有重要现实意义。

关键词：矿用防爆电机；故障诊断；预测维护；传感器技术；智能算法

Research on Fault Diagnosis and Predictive Maintenance Technology of Mine Flameproof Motors

Ya Wang

Xichang Aerospace Hongda Building Materials Co., Ltd., Liangshan, Sichuan 615600

Abstract: As the core power equipment of coal mine production systems, mine flameproof motors have operational reliability that is directly related to the safety, continuity, and economy of coal mining. The harsh working conditions in coal mines, such as high humidity, high dust, heavy loads, and strong electromagnetic interference, make motors prone to faults like bearing wear, winding insulation aging, and rotor imbalance. If these faults are not diagnosed and addressed in a timely manner, they may lead to equipment shutdowns or even major safety accidents such as gas explosions. This paper deeply explores the current mainstream fault diagnosis technologies and predictive maintenance methods, and looks forward to the direction of future technological breakthroughs. It holds significant practical significance for improving the operation and maintenance level of coal mine electromechanical equipment and reducing safety risks.

Keywords: Mine Flameproof Motor; Fault Diagnosis; Predictive Maintenance; Sensor Technology; Intelligent Algorithm

引言

煤矿作为我国能源结构中的基础能源，其高效安全开采依赖于各类机电设备的稳定运行。矿用防爆电机作为煤炭开采、运输、通风等关键环节的动力核心，承担着将电能转化为机械能的重要职能，其运行状态直接影响整个煤矿生产系统的作业效率。与普通工业电机不同，矿用防爆电机需满足井下防爆、防尘、防潮等特殊要求，结构设计更为复杂，且长期处于高负荷、强腐蚀、空间受限的恶劣环境中，故障发生率显著高于常规工况下的电机设备。传统的矿用防爆电机维护模式以定期检修为主，该模式存在明显局限性：一方面，过度检修会增加设备停机时间与运维成本，另一方面，检修周期固定导致的“欠维修”可能遗漏潜在故障隐患，无法适应电机故障的随机性与突发性。随着煤矿智能化开采技术的推进，对矿用防爆电机的运维提出了更高要求，亟需建立一套精准、高效的故障诊断与预测维护体系，实现从“事后维修”“定期检修”向“状态检修”“预测维护”的转型^[1]。

1. 矿用防爆电机故障诊断技术研究

1.1 传统故障诊断技术

传统故障诊断技术以单一物理信号监测为核心，通过分析电机运行过程中产生的振动、温度、电流等信号的变化规律，判断设备运行状态，具有原理简单、操作便捷、成本较低等优势，是目前煤矿现场应用最广泛的诊断技术。

振动信号诊断技术是机械故障诊断的主流技术，其原理是电机机械部件发生故障时，会导致振动信号的幅值、频率谱特征发生变化。例如，轴承磨损会在振动信号中产生特定频率的谐波成分，转子不平衡会引发与转速同步的工频振动。该技术通过在电机轴承端盖、机座等关键部位安装振动传感器，采集振动加速度、速度或位移信号，经滤波、傅里叶变换等信号处理后，提取特征频率，与正常工况下的信号特征对比，实现故障诊断。该技术对轴承故障、转子不平衡等机械故障的诊断精度较高，但在井下高尘、强振动环境中，传感器易受干扰，信号采集稳定性有待提升^[2]。

温度信号诊断技术基于电机故障发生时的发热效应，通过监测电机关键部位的温度变化判断故障状态。电机绕组绝缘老化、

轴承磨损、接触不良等故障都会导致局部温度升高，例如，绕组匝间短路会使短路部位温度急剧上升，轴承润滑失效会导致轴承温度持续升高。该技术通过安装热电偶、红外温度传感器等设备，实时监测定子绕组、轴承、机座等部位的温度，当温度超过设定阈值时发出报警信号。该技术操作简单、成本低廉，但温度信号的变化具有滞后性，难以实现早期故障的精准诊断，多用于故障的辅助监测。

电流信号诊断技术又称电机电流签名分析技术，其原理是电机电气系统故障会导致定子电流的谐波成分发生变化。例如，定子绕组匝间短路会使三相电流不平衡，转子断条会在电流信号中产生特定频率的边频带。该技术通过采集电机定子电流信号，经频谱分析、小波变换等处理，提取电流信号的谐波特征、不平衡度等参数，实现对电气故障的诊断。该技术的优势在于无需在电机本体上安装额外传感器，可通过电机控制柜的电流互感器采集信号，适应井下空间受限的工况，但对机械故障的诊断灵敏度较低，需与其他技术结合使用。

1.2 智能故障诊断技术

随着人工智能、传感器网络等技术的发展，矿用防爆电机故障诊断技术逐步向多源数据融合、智能算法驱动的方向发展。智能故障诊断技术通过融合振动、温度、电流等多源信号，利用机器学习、深度学习等算法实现故障特征的自动提取与智能识别，具有诊断精度高、抗干扰能力强、适应复杂工况等优势，是当前技术研究的热点。

基于机器学习的故障诊断技术通过构建数据驱动模型，实现故障特征与故障类型的映射关系。该技术的核心流程包括数据采集、特征提取、模型训练与故障识别：首先通过多传感器采集不同工况下的电机运行数据，构建故障样本数据集；然后采用主成分分析、局部特征尺度分解等方法对原始数据进行降维与特征提取，筛选出对故障敏感的核心特征；最后基于支持向量机、随机森林、人工神经网络等算法构建诊断模型，通过样本数据训练优化模型参数，实现对未知故障的分类识别^[3]。

基于深度学习的故障诊断技术无需人工提取特征，通过神经网络的多层次感知结构实现原始信号到故障类型的端到端诊断，大幅提升了诊断的自动化水平与精度。卷积神经网络（CNN）凭借强大的特征提取能力，可直接对振动信号的时域图、频谱图等进行处理，自动提取深层次的故障特征，适用于复杂故障的诊断；循环神经网络（RNN）、长短时记忆网络（LSTM）则擅长处理时序数据，能捕捉电机故障发展过程中的动态特征，对渐变式故障的诊断效果显著。

2. 矿用防爆电机预测维护技术研究

2.1 预测维护的核心框架

矿用防爆电机预测维护系统的核心框架包括数据采集层、状

态评估层、寿命预测层与维护决策层，各层协同工作，实现从数据采集到维护执行的全流程智能化。

数据采集层是预测维护的基础，负责采集电机运行过程中的多源状态数据。该层需根据电机故障类型与监测需求，合理布置传感器网络，选择适配井下恶劣工况的传感器类型。例如，振动传感器应选择防爆型、抗干扰能力强的压电式传感器，温度传感器需具备防潮、防尘性能，电流信号可通过原有控制柜的互感器采集。同时，为保证数据质量，需对采集到的原始数据进行滤波、去噪、异常值剔除等预处理，消除环境干扰与传感器误差对后续分析的影响。数据传输采用有线传输与无线传输相结合的方式，并下关键区域采用防爆型有线传输保障稳定性，偏远区域采用无线传感器网络实现数据实时上传。

状态评估层的核心是构建电机健康指标体系，通过分析预处理后的多源数据，评估设备当前运行状态。健康指标的选择需满足敏感性、稳定性与可操作性要求，例如，针对轴承故障，可选择振动信号的峰值因子、峭度、温度信号的变化率作为健康指标；针对绕组绝缘故障，可选择电流不平衡度、绝缘电阻值作为健康指标。通过建立健康指标的正常阈值范围，对比实时监测数据与阈值的偏差，采用模糊综合评价、层次分析法等方法对电机健康状态进行分级，划分为“正常”“轻度异常”“中度异常”“严重异常”四个等级，为后续寿命预测与维护决策提供依据^[4]。

寿命预测层是预测维护技术的核心，通过建立数学模型预测电机剩余使用寿命（RUL）。根据建模方法的不同，寿命预测模型可分为物理模型与数据驱动模型：物理模型基于电机故障演化的机理，通过建立磨损、老化等故障的动力学方程，预测故障发展趋势，该模型适用于故障机理明确的场景，但建模过程复杂，对参数精度要求较高；数据驱动模型基于历史运行数据与故障数据，利用机器学习、深度学习等算法构建预测模型，无需明确故障机理，适用于复杂工况下的寿命预测。目前，混合模型是寿命预测的主流方向，通过融合物理模型的解释性与数据驱动模型的预测精度，提升剩余寿命预测的可靠性。例如，基于轴承磨损机理建立物理模型，结合 LSTM 算法对模型参数进行动态优化，可实现轴承剩余寿命的精准预测。

维护决策层根据状态评估结果与剩余寿命预测值，制定科学的维护策略。该层需综合考虑设备运行状态、生产任务优先级、维护成本、备件库存等因素，采用决策树、遗传算法等优化算法，确定最佳维护时间与维护方式。例如，当电机健康状态为“轻度异常”且剩余寿命较长时，可采取在线监测、延长监测周期的策略；当健康状态为“中度异常”时，可安排在生产间隙进行局部维修；当健康状态为“严重异常”或剩余寿命低于设定阈值时，需立即停机进行全面检修。同时，维护决策系统需具备自学习能力，通过积累维护案例数据，持续优化决策模型，提升维护策略

的科学性与合理性。

2.2 预测维护技术的应用与优化

矿用防爆电机预测维护技术的应用需结合煤矿井下的实际工况与生产需求，针对不同场景优化技术方案，提升技术的实用性和可操作性。

在多源数据融合优化方面，井下电机运行数据具有多维度、强耦合、高噪声的特点，单一信号难以全面反映设备运行状态。通过采用数据级融合、特征级融合与决策级融合相结合的多源数据融合策略，可提升故障特征提取的全面性与准确性。数据级融合通过对原始信号进行同步校准、互补增强，消除数据冗余与噪声干扰；特征级融合对各信号提取的特征参数进行整合，构建多维度特征向量；决策级融合结合不同诊断模型的输出结果，采用投票法、加权平均法等实现故障类型与健康状态的综合判断。例如，融合振动信号的频率特征、电流信号的谐波特征与温度信号的变化特征，可显著提升对早期微弱故障的识别能力。

在智能算法优化方面，针对井下电机故障样本稀缺、工况多变的问题，需对传统智能算法进行改进。采用迁移学习算法可将实验室环境下训练的模型迁移到井下实际工况中，通过少量现场样本微调模型参数，解决现场样本不足的问题；引入注意力机制的深度学习模型可自动聚焦对故障敏感的关键特征，提升模型的抗干扰能力和诊断精度；采用轻量化神经网络模型，可降低算法计算复杂度，满足井下边缘计算设备的算力需求，实现故障诊断与寿命预测的实时性^[5]。

在防爆与抗干扰设计方面，预测维护系统需严格遵循煤矿井下防爆标准，所有传感器、数据采集器、传输设备均需具备防爆认证，避免产生电火花引发安全事故。同时，针对井下强电磁干扰、高尘、高湿的环境特点，采用电磁屏蔽、接地保护等措施提升系统抗干扰能力；传感器安装部位需进行密封处理，防止粉尘、湿气进入设备内部影响性能；数据传输采用加密传输协议，保障数据传输的安全性与完整性。

在全生命周期管理方面，预测维护技术应与矿用防爆电机的全生命周期管理相结合，实现从设备出厂、安装调试、运行维护

到报废回收的全过程数据追溯。通过建立电机数字孪生模型，将物理设备的运行数据与虚拟模型实时同步，模拟电机运行状态与故障演化过程，为预测维护策略的制定提供更直观、全面的依据。同时，通过积累设备全生命周期的运行数据与维护记录，建立运维知识库，为同类设备的设计优化、故障诊断与预测维护提供数据支持。

3. 结论与展望

矿用防爆电机的故障诊断与预测维护是保障煤矿安全高效生产的关键技术，未来，随着煤矿智能化、工业互联网技术的持续发展，矿用防爆电机故障诊断与预测维护技术将向以下方向突破：一是多源异构数据深度融合技术，结合振动、电流、温度、声学等多维度信号，融合数字孪生、边缘计算技术，实现故障特征的全面提取与实时分析；二是轻量化、强泛化的智能算法开发，针对井下算力受限、样本稀缺的工况，优化迁移学习、小样本学习算法，提升模型的实用性和适应性；三是预测维护与煤矿生产系统的协同优化，将电机预测维护策略与煤矿生产调度相结合，实现运维成本与生产效率的动态平衡；四是全生命周期智能化运维体系构建，整合设备设计、制造、运行、维护等全流程数据，建立跨平台、跨领域的运维知识库，推动矿用防爆电机运维技术向智能化、精细化、协同化方向发展。

参考文献：

- [1] 王建国,李刚,张磊.矿用防爆电机故障诊断技术研究现状与发展趋势[J].煤炭学报,2020,45(3):1098–1108.
- [2] 刘军,王丽,赵强.基于振动信号与支持向量机的矿用电机轴承故障诊断[J].煤炭科学技术,2019,47(7):189–194.
- [3] 张明,陈亮,李娟.深度学习在矿用防爆电机绕组故障诊断中的应用[J].电工技术学报,2021,36(12):2510–2518.
- [4] 李强,王宇,孙伟.矿用电机预测维护系统的设计与实现[J].工矿自动化,2020,46(5):78–83.
- [5] 陈峰,刘敏,吴涛.基于数字孪生的矿用防爆电机寿命预测方法[J].机械工程学报,2022,58(8):234–242.