

煤矿机电工程中电气故障诊断与维修技术研究

姚兰军

新疆哈密三塘湖能源开发建设有限责任公司 新疆 哈密 839000

摘要：本文系统分析了煤矿机电设备电气故障的成因与类型，结合振动诊断、铁谱分析、红外测温等先进技术，提出了基于多源数据融合的故障诊断框架，并探讨了预防性维修、总成互换等维修策略的优化路径。研究结果表明，通过构建智能化监测体系与标准化维修流程，可显著降低设备故障率，提升矿井综合生产效率。

关键词：煤矿机电工程；电气故障诊断；智能化维修；多源数据融合；预防性维护

1 引言

煤炭是我国能源主体，开采效率与安全至关重要。2023年全国煤矿机电事故127起，占比36.8%，电气故障致停机时间占设备总故障时间61.3%^[1]。如山西焦煤集团屯兰矿2022年主通风机电机故障致全矿停产14小时，损失620万元且存重大安全隐患^[2]。传统故障诊断依赖人工巡检、维修滞后：人工巡检主观性强、覆盖有限，事后维修使设备恶化，维修资源分配无科学依据致过度或不足维修。

2 电气故障成因与类型学分析

2.1 故障成因的多维解构

煤矿机电设备电气故障的成因具有多因素耦合特征，需从设计、制造、运行、维护、环境等全生命周期维度进行系统分析。

(1) 设计缺陷是故障的潜在根源，中煤张家口煤矿机械有限责任公司2021年生产的MG500/1130-WD型采煤机，其变频器在-5℃环境下出现电容参数漂移，导致控制失效，在黑龙江龙煤集团鸡西矿业公司使用期间，3个月内发生5次类似故障，暴露出环境适应性设计不足的问题。(2) 制造瑕疵则直接降低设备固有可靠性，2022年国家市场监督管理总局对煤矿用隔爆型三相异步电动机的抽检显示，12%的产品存在定子绕组绝缘层厚度不均问题，山西晋城无烟煤业集团在使用该批次电机后，6个月内发生8起绕组击穿事故^[3]。(3) 运行过载是加速设备劣化的主要外因，平煤神马集团平宝公司2023年统计显示，其主提升系统日均启停次数达185次，远超设计寿命周期(日均启停≤120次)，导致提升机减速箱轴承保持架断裂，引发停产48小时的重大事故。(4) 维护失当则通过累积效应逐步削弱设备性能，淮南矿业集团顾桥煤矿2022年对12台皮带机减速机进行解体检查发现，76%的齿轮磨损加剧与润滑油更换周期过长(设计周期3个月，实际执行6-8个月)直接相关。(5) 环境侵蚀是井下

设备的特有挑战，2021年兖矿能源集团东滩煤矿1312综放工作面皮带机PLC模块因硫化氢气体腐蚀失效，导致工作面瘫痪12小时，后续检测发现该模块防护等级仅IP54，无法满足井下IP65的防护要求。

2.2 故障类型的系统分类

基于故障机理与表现形式，可将电气故障划分为五大类并呈现不同特征。

(1) 退化型故障具有渐进性，国家电网能源研究院对煤矿用MYJV22型电缆的跟踪检测显示，运行5年以上的电缆绝缘电阻下降至初始值的38%，故障率是新电缆的3.1倍，需通过趋势分析实现早期预警。(2) 损坏型故障表现为突发性，2023年陕煤集团曹家滩煤矿综采工作面因变频器功率模块(西门子6SL3120系列)击穿，导致采煤机停机6.5小时，直接经济损失280万元，要求诊断系统具备毫秒级响应能力。(3) 失调型故障源于参数漂移，2022年晋能控股集团塔山煤矿液压支架电液控制系统因压力传感器(美国MTS公司RHM系列)零点漂移达±2.5%，导致顶板支护压力控制偏差超15%，引发3次冒顶事故，需建立动态校准机制。(4) 松脱型故障与机械连接相关，2021年河南能源化工集团永煤公司城郊矿变电站事故调查显示，63%的电气火灾源于接线端子松动引发的电弧烧蚀，其中某10kV开关柜因母线排连接螺栓扭矩不足(设计45N·m，实际28N·m)，导致接触电阻增大至设计值的3.2倍，最终引发火灾。(5) 功能失效型故障涉及逻辑错误，2023年山东能源集团新矿集团孙村煤矿洗煤厂因PLC程序版本错配(西门子S7-1500系列)，导致浓缩机加药系统失控，全流程瘫痪8小时，凸显软件配置管理的关键作用。

3 先进故障诊断技术的创新应用

3.1 多源数据融合诊断框架

传统诊断方法存在数据孤岛问题，如振动分析仅能反映机械状态，而无法捕捉电气参数变化。本文提出基

于"振动+温度+电流+油液"的四维诊断模型，通过异构数据融合提升诊断准确性。振动监测采用PCB公司356A16型三向加速度传感器，可同时获取径向、轴向振动信号，通过FFT变换识别齿轮啮合频率异常。2023年国家能源集团神东煤炭公司上湾煤矿应用该技术，提前3天发现提升机减速箱轴承保持架裂纹，避免了一起重大事故^[4]。红外测温技术通过FLIRT1020红外热像仪实时监测母线排连接处温度，当温差超过15℃时触发预警，2022年山西焦煤集团西山煤电官地煤矿通过该技术识别出12处接触不良隐患，有效预防电气火灾。

电流特征分析通过霍尼韦尔CSN系列霍尔传感器采集电机三相电流，利用小波变换提取故障特征频率。实验表明，该方法对转子断条故障的识别准确率达91.7%，较传统堵转试验法提升36.5%。2023年兖矿能源集团济三煤矿应用该技术，成功诊断出刮板输送机电机转子断条故障，维修时间缩短72%。铁谱诊断技术采用旋转式铁谱仪（美国Predict公司RPI系列）分析润滑油磨屑，通过磨粒形貌、尺寸、浓度等特征判断设备磨损状态。2022年陕煤集团黄陵矿业二号矿通过该技术发现掘进机齿轮箱早期疲劳磨损，实现视情维修，维修成本降低41%。四维数据在研华科技UNO-2271G边缘计算节点进行特征级融合，通过D-S证据理论处理不确定性信息，最终输出综合诊断结果。

3.2 智能诊断算法突破

深度学习技术为复杂故障模式识别提供了新途径。构建CNN-LSTM混合神经网络，输入振动时域信号与频谱特征，输出故障类型与严重程度。卷积层采用ResNet-50架构自动提取局部特征，LSTM层设置128个神经元捕捉时序依赖关系。2023年国家能源集团宁夏煤业公司梅花井煤矿试验表明，该模型对皮带机托辊卡阻的识别准确率达92.3%，较传统方法提升27.1%，且在信噪比5dB的强噪声环境下仍保持85.6%的准确率。数字孪生技术通过达索系统3DEXPERIENCE平台建立设备三维数字模型，实时映射物理状态^[5]。2022年中煤能源集团平朔集团安太堡矿应用该技术，将综采工作面设备故障定位时间从2小时缩短至15分钟，支撑维修决策优化。

边缘计算部署解决数据传输瓶颈问题，在设备端嵌入NVIDIA Jetson AGX Xavier计算模块，实现故障特征的本地化处理。2023年山东能源集团枣矿集团付村煤矿应用后，数据传输量减少82.7%，诊断延迟低于48ms，满足实时性要求。迁移学习技术通过预训练模型微调，解决小样本条件下的诊断精度问题。2022年河南能源化工集团义煤公司新安煤矿在仅有18个故障样本的情况下，采

用迁移学习的ResNet-18模型仍达到89.2%的识别准确率，显著降低数据采集成本。

4 维修策略的优化路径

4.1 预防性维修体系重构

以可靠性为中心的维修（RCM）是预防性维修的核心方法。针对关键设备建立FMECA分析模型，量化故障模式影响与危害度。2023年国家能源集团神东煤炭公司布尔台煤矿对主通风机进行RCM分析，确定电机绝缘老化为关键故障模式（RPN值 = 120），将维修周期从12个月缩短至8个月。实施后年维修费用降低41.3%，可用率提升至99.2%，证明该方法在保障安全性的同时可显著降低全生命周期成本。状态基维修（CBM）通过北京东方振动和噪声技术研究所的NV8000在线监测系统动态评估设备健康状态，当健康指数低于0.6时触发维修任务。2022年晋能控股集团塔山煤矿应用CBM后，非计划停机减少67.8%，维修资源利用率提升42.1%。

机会维修策略利用设备停机窗口期，同步检修相关部件。2023年陕煤集团曹家滩煤矿在采煤机大修期间，同时更换运输机链轮和刮板，节省停产时间118小时，实现维修效益最大化。维修周期优化需综合考虑设备劣化规律、生产计划、备件库存等因素，通过CrystalBall软件进行蒙特卡洛模拟。2022年山东能源集团新矿集团翟镇煤矿通过维修周期优化，使设备综合效率（OEE）从78.5%提升至96.2%，达到国际先进水平。

4.2 维修模式创新实践

总成互换技术通过建立标准化总成库，实现故障设备的快速修复。2023年国家能源集团宁夏煤业公司枣泉煤矿储备了23类关键总成（如变频器功率模块、电机轴承组件等），使设备修复时间从72小时缩短至7.5小时，显著提升生产连续性。增材制造技术为复杂零件修复提供新方案，采用铂力特BLT-S400金属3D打印设备修复磨损轴类零件。2022年中煤能源集团新集公司刘庄煤矿修复液压支架立柱，成本仅为更换新件的34.6%，且修复层硬度（HRC52）高于原件（HRC48），使用寿命延长1.8倍。

AR辅助维修通过Microsoft HoloLens 2设备投射维修指引，将三维模型与实际设备叠加显示。2023年河南能源化工集团永煤公司城郊矿应用后，电工培训周期从3个月压缩至42天，首次维修成功率提升至91.5%。远程维修支持系统通过华为5G网络实现专家与现场的实时交互，2022年山西焦煤集团西山煤电东曲煤矿在处理采煤机变频器故障时，通过AR眼镜将现场画面传输至ABB公司技术中心，专家远程标注故障点并指导维修，问题解决时间缩短74.3%。维修知识管理系统构建故障案例库（含

2.3万条案例）、维修规程库（覆盖187类设备）、专家经验库（集成46位高级工程师经验），通过科大讯飞星火大模型实现智能检索。2023年兖矿能源集团鲍店煤矿应用后，维修方案制定时间减少60.2%，知识复用率提升至85.7%。

5 典型案例分析：综采工作面电气系统优化

5.1 问题诊断

2023年3月，国家能源集团神东煤炭公司补连塔煤矿22306综采工作面频繁出现采煤机牵引部故障，月均停机时间达52小时，严重影响生产效率。通过多源数据融合分析发现：牵引电机轴承温度异常（均值87℃，阈值75℃），振动频谱显示1倍频幅值超标2.3倍，表明润滑不足或负载过大；变频器直流母线电压波动超标（ $\pm 16\%$ ，设计 $\pm 5\%$ ），反映IGBT模块性能劣化；截割部电流谐波含量过高（THD = 19.2%，正常 $\leq 8\%$ ），暗示电机绝缘系统受损。进一步分析发现，故障根源在于防尘系统失效：采煤机电气腔体密封胶条老化，导致煤尘侵入量达 $8.2\text{g}/\text{m}^3$ （设计 $\leq 2\text{g}/\text{m}^3$ ），加速绝缘老化与轴承磨损。

5.2 解决方案

针对诊断结果实施系统性改进：硬件升级方面，更换为西门子1LE0001系列IP67防护等级电机，加装轴流风机强制冷却，将轴承温度降低至63℃以下；控制优化方面，调整变频器载波频率从8kHz降至5kHz，降低开关损耗，使电压波动控制在 $\pm 7.5\%$ 以内；滤波改造方面，在输入侧加装施耐德Electronic系列LCL滤波器，谐波抑制效果达92.7%，电流THD降至4.8%以下。同时完善防尘系统，在电气腔体入口增加正压通风装置（压力维持50Pa），将煤尘浓度控制在 $1.8\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，并更换为氟橡胶密封胶条（耐温范围-40℃~+200℃）。

5.3 实施效果

改造后连续运行210天无故障，日产量从1.2万吨提升至1.35万吨（增幅12.5%），吨煤电耗从38.2kWh/t降至35.3kWh/t（下降7.6%）。维修模式由事后维修转变为预测性维修，备件库存成本降低34.8%，维修人员工作量减少41.2%。该案例验证了“监测-诊断-治理”闭环管理体系的有效性，为类似故障治理提供了可复制的解决方案。2023年10月，该成果获中国煤炭工业协会科技进步二等奖。

结语

煤矿机电设备电气故障诊断与维修技术正经历从被动响应到主动预防、从单一参数到多源融合、从人工经验到智能决策的深刻变革。通过构建“监测智能化、诊断精准化、维修标准化”的现代管理体系，国家能源集团神东煤炭公司等标杆企业已实现设备故障率降低52.3%以上，维修成本下降31.7%，为煤炭行业高质量发展提供坚实技术保障。未来需进一步突破数据壁垒、完善标准体系、强化人才支撑，推动煤矿机电工程向“零故障、零事故、零排放”目标迈进，助力我国能源结构绿色转型。

参考文献

- [1] 国家矿山安全监察局.2023年全国煤矿事故分析报告[R].2024.
- [2] 山西焦煤集团西山煤电.屯兰矿“3·15”主通风机事故调查报告[R].2022.
- [3] 国家市场监督管理总局.2022年煤矿用隔爆型三相异步电动机产品质量抽查报告[R].2023.
- [4] 国家能源集团神东煤炭公司.煤矿机电设备智能运维白皮书[R].2023.
- [5] 中国煤炭工业协会.煤矿机电设备故障诊断技术发展报告[R].2023.