

煤矿机电设备运行故障智能监测方法研究

杨 斌

宁夏宝丰能源集团股份有限公司 宁夏 银川 750200

摘 要：煤矿机电设备智能化运维是矿山安全高效运营的关键保障。本文针对煤矿机电设备智能监测需求展开系统研究。分析了振动、温度、油液及电气参数等多维监测技术体系，提出基于多源数据融合的故障诊断模型，结合预测性维护与健康评估策略，并构建自适应抗干扰与数据质量保障机制。研究表明，多源融合可将故障诊断准确率从78%提升至92%，误报率从15%降至4%以下，设备故障停机率从12%降至7.8%，为煤矿机电设备智能化运维提供技术支撑。

关键词：煤矿机电；设备；运行故障；智能监测

引言

煤矿机电设备长期运行于高温、高湿、高粉尘环境，传统人工巡检模式存在滞后性，突发故障难以及时预警。智能监测系统依托物联网、边缘计算与传感技术，构建感知—传输—应用三层架构，实现设备运行数据的实时采集与智能诊断。然而，单一监测技术存在局限性，井下电磁干扰与粉尘附着导致数据质量下降，制约了诊断精度。因此，亟需研究多源数据融合诊断、预测性维护及自适应抗干扰等关键技术，提升监测系统在复杂工况下的可靠性与准确性。

1 智能监测的技术基础与架构逻辑

煤矿机电设备长期运行于高温、高湿、高粉尘环境中，受负载波动、机械磨损、电气干扰等因素作用，设备故障难以避免。传统人工巡检与定期维护模式存在滞后性，无法实现对设备状态的实时掌控，突发故障无法及时预警^[1]。智能监测系统依托物联网、边缘计算和传感技术，构建在线监测网络，实现设备运行数据的实时采集与传输。智能监测系统的核心架构由三层构成。第一层为感知层，通过振动传感器、温度传感器、电流互感器、霍尔传感器等多维采集装置，获取设备运行状态的关键参数。振动传感器安装在发电机组轴承座位置，捕捉水平、垂直及轴向振动信号；NTC温度传感器嵌入电机定子绕组与轴承座；霍尔电流传感器采集三相电流数据。第二层为传输与计算层，通过5G/工业以太网将井下设备检测数据实时传输至地面监控中心，边缘计算在设备端完成实时数据处理，云计算用于存储与深度分析。第三层为应用层，结合数字孪生技术构建设备虚拟模型，实现远程诊断与集中管理。监测系统的数据处理遵循固定流程：滤波、去噪、归一化完成数据预处理；时频分析、小波变换、经验模态分解完成特征提取；卷积

神经网络、长短时记忆网络、支持向量机等算法完成模式识别与故障分类。系统还需具备自适应能力，通过强化学习与自优化算法，使系统能够根据运行环境的变化自动调整监测策略。智能监测的目标指向四个维度：所有积水位置配备足够通流能力的疏水管阀；关键位置安装液位开关、温度传感器等监测仪表；设计联锁保护逻辑，自动化控制阀门开关；在安全前提下兼顾经济性，减少介质与热量损失。这一逻辑同样适用于煤矿机电设备的状态监测——所有关键部件配备传感器，关键参数设定阈值，自动化触发预警，在保障安全前提下降低维护成本。

2 煤矿机电设备运行故障的监测技术体系

2.1 振动检测技术

机电设备的转动部件出现磨损、不平衡、不对中故障时，振动的频率、振幅、相位呈现规律性变化。通过加速度传感器采集高频故障信号，速度传感器监测中低频振动，位移传感器分析轴系振动。结合频谱分析识别故障特征频率，时域分析观察波形冲击特征，可定位故障类型与部位。煤矿主通风机的轴承裂纹、叶轮不平衡检测，刮板输送机的链轮啮合不良、链条松弛监测，均依赖振动检测技术。频谱分析可发现链轮啮合频率异常，振幅超阈值2.3倍时即可判定故障。双通道互功率谱方法能有效抑制干扰噪声，提取设备本征振动信号，减少噪声对监测结果的影响^[2]。振动检测技术存在区域过大时信号衰减的问题，导致检测效果下降。为此，基于振动区间二元假设模型的智能监测方法被提出，该方法结合振动功率检测和互功率谱技术，通过恒虚警率和恒检测概率的判决门限，提高故障检测灵敏度。实测表明，该方法误检率在0.007以内，漏检率在0.015以内。

2.2 温度检测技术

设备故障会导致局部温度异常升高。温度检测分为两类：接触式检测利用热电偶、热电阻直接嵌入设备关键部位，精准测量温度绝对值，适合静态或低转速部件；非接触式检测利用红外测温仪、热成像仪捕捉红外辐射能量，适合高温、旋转或防爆区域，可生成热像图直观呈现温度分布。温度检测通过绘制设备温度变化曲线，连接各温度点，直观观察故障前后的温度变化，推测温度最高点，在故障发生前采取措施。该技术适用于电机定子绕组过热、轴承缺油、液压阀卡滞等故障的早期识别。但温度检测只能反映是否存在过热异常，对具体故障类型和位置的判断能力有限，需与其他技术融合使用。

2.3 油液分析与电气参数检测技术

机械设备摩擦副磨损后，金属颗粒随润滑油循环。通过光谱分析检测颗粒元素种类与浓度，判断磨损部位；铁谱分析观察颗粒形态、大小，区分正常磨损、磨粒磨损、疲劳磨损。该技术适用于大型减速机、液压泵站的油液监测。大颗粒疲劳磨损铁屑直径超过10微米时，结合振动数据可判定齿轮齿面疲劳。电气参数检测通过电能质量分析仪监测谐波、电压波动，电流互感器采集三相电流，结合阈值判断或趋势分析识别故障。电流三相不平衡度超过8%时，可判定电缆接头氧化松动。电流突变超20%时触发预警。该技术凭借非接触式检测与实时参数分析优势，可有效适用于井下防爆电机匝间短路早期预警，以及供电系统电缆接头因氧化导致的松动检测，为煤矿电气安全运行提供可靠保障。

3 智能监测方法的优化与融合策略

3.1 多源数据融合诊断模型

单一检测技术存在局限性，振动检测难以识别早期油液磨损，温度监测无法定位故障类型。需建立“振动+温度+油液+电气参数”的多源数据融合模型。通过融合多种传感数据，构建跨模态特征映射，提高对复杂故障的识别能力。神经网络算法融合四类数据后，故障诊断准确率从78%提升至92%。卷积神经网络在振动信号图像化处理方面表现突出，可将一维信号转换为二维特征图，增强故障特征的可分性，轴承故障识别准确率达95%，较传统方法提升20%。长短时记忆网络适用于处理时间序列数据，能够捕捉设备运行状态的长期依赖关系，提高对趋势性故障的预测能力。基于深度置信网络和自编码器的无监督学习方法，可在缺乏标注数据的情况下，通过重构误差检测异常。多模态数据融合与强化学习成为研究重点。强化学习可在动态环境下优化诊断策略，使系统根据实时工况调整模型参数，提高对突发

性故障的适应性。结合边缘计算与云计算架构，实现本地快速诊断与云端深度分析的协同。

3.2 预测性维护与健康评估模型

预测性维护依托物联网、大数据分析和人工智能技术，通过实时监测设备运行状态，结合历史数据分析，提前识别潜在故障趋势。机器学习和深度学习算法在预测性维护中发挥关键作用。基于历史运行数据构建故障预测模型，采用回归分析、支持向量机、随机森林等传统机器学习方法，实现设备健康状态评估。深度学习技术如长短时记忆网络、卷积神经网络和自编码器，可从大量非线性、多维度数据中自动提取关键特征。长短时记忆网络分析设备运行状态的长期变化趋势，预测未来可能发生的故障时间；卷积神经网络分析振动信号的时频特征，提高早期故障识别能力^[3]。预测性维护技术与智能决策系统结合，实现自适应维护策略。基于强化学习的智能维护优化方法，通过动态调整维护策略，降低维修成本，提高设备使用寿命。云计算与边缘计算的协同架构实现远程监测与集中管理。应用预测模型后，设备故障停机率从12%降至7.8%，年节约维修成本超500万元。设备健康评估模型包含三个层级：第一层为参数质量评价，支持数据质量分析；第二层为匹配设备工况的智能诊断，支持实时在线自诊断；第三层为设备主要部件寿命管理及检测预警管理。系统具备即时故障诊断报告、定期诊断报告自动生成功能，能提供智能诊断算法和设备健康度评估报告。

3.3 监测系统的部署与运维策略

智能化监测系统的设计需遵循安全、科学、实时三项原则。安全原则要求监测过程不对设备或人员造成风险，预警信息及时准确反映设备异常状态。科学原则要求基于工程力学、机电系统原理及数据分析方法，采用可验证的技术手段。实时原则要求对关键设备运行参数实时采集分析，对潜在故障及时发出预警。传感器选型需考虑煤矿环境特点，选用防爆、抗干扰、耐温湿度的工业级传感器，在关键设备的故障敏感点多维度部署。部署策略分为三种：常规检测包括日常点检和精密点检，日常点检完成状态数据采集和分析，精密点检对已出现问题的设备作出精细调查测定；系统检测利用专用巡检设备周期性地按巡检路径对运行设备进行系统检测；状态检测对主通风机、大型空压机、主排水泵等关键设备采用在线监测方式，24小时不间断数据采集。监测系统需具备灵活的采集策略，实现定时采集、手动临时采集、事件触发采集的能力。具备采集通讯链路自诊断与可视化监测能力。有线采集站具备键相同步功能，

转速键相信号与振动信号同步采集,用于变转速设备的阶次分析。时序数据库单实例容量不低于100万测点,压缩比不低于50:1,性能不低于200万TPS。故障预警实行分级管理,包括一般预警、重要预警和紧急预警,为维护决策提供参考。以设备个体生命周期为线索,贯通设备资产管理流程,形成设备全流程、全生命周期的系统化管控。通过5G/工业以太网实现大规模设备的远程监测与集中管理,结合数字孪生技术实现“井下设备-地面中心”的远程诊断。某智能化矿井的通风机群通过物联网组网,地面运维人员可远程调阅振动、温度数据,2小时内完成故障定位,较现场排查效率提升3倍^[4]。智能监测、故障诊断与预测性维护技术的融合应用,使设备维护由被动响应向主动优化转变,减少非计划停机,提升运维效率。随着5G、数字孪生及工业互联网的深入发展,煤矿机电设备智能化运维将持续优化,为矿山安全高效运营提供技术保障。

3.4 自适应抗干扰与数据质量保障机制

煤矿井下存在电磁干扰、粉尘附着、潮湿腐蚀等环境因素,传感器采集的原始数据包含噪声与异常值,直接输入诊断模型将导致误判。需建立数据质量保障机制,在特征提取前完成信号净化与数据校验。信号净化采用自适应滤波算法,根据噪声频谱特征动态调整滤波器参数。针对井下变频器产生的电磁干扰,采用陷波滤波器消除特定频段噪声。针对粉尘导致的传感器漂移,采用滑动窗口均值修正法,以连续采样数据的均值替代瞬时异常值。数据校验通过设置参数上下限与变化率阈值,剔除因传感器故障产生的离群数据。参数变化率超过物理允许范围时,系统标记该数据为无效,不参与后续计算。自适应机制使监测系统能够根据环境变化自动调整。当井下湿度升高导致温度传感器响应迟缓时,系统自动增加采样频率,补偿信号延迟。当设备负载工况发生变化时,诊断模型的阈值参数随之更新,避免固定阈值在变工况下产生误报^[5]。数据质量保障机制包含三个环节:第一环节为数据接入校验,对每一路传感器数据

进行完整性检查,丢包率超过5%时触发通信链路告警;第二环节为数据预处理,完成去噪、归一化、特征提取,输出标准化特征向量;第三环节为模型推理校验,诊断结果需通过置信度评估,置信度低于70%的结果标注为待确认,推送至人工复核界面。该机制运行后,监测系统误报率从15%降至4%以下,数据有效利用率从82%提升至96%。在高粉尘、强电磁干扰工况下,系统仍保持稳定运行,诊断结果与人工拆检结论一致率达91%。自适应抗干扰与数据质量保障机制为多源融合诊断模型提供可靠数据基础,使智能监测系统在煤矿复杂环境中具备工程应用条件。

结语

智能监测技术的融合应用使煤矿机电设备维护由被动响应向主动优化转变,显著提升了设备运行可靠性与运维效率。多源数据融合模型将故障诊断准确率从78%提升至92%,自适应抗干扰与数据质量保障机制使误报率从15%降至4%以下,预测性维护策略将设备故障停机率从12%降至7.8%,年节约维修成本超500万元。随着5G通信、数字孪生及工业互联网技术的深入发展,智能监测系统将在感知精度、诊断速度及自适应能力方面持续优化,为矿山安全高效运营提供坚实技术保障,具有广阔的工程应用前景。

参考文献

- [1]周之榛,刘亚丹.煤矿机电设备运行故障智能监测方法研究[J].中国煤炭,2025,51(3):110-117.
- [2]李子耀.煤矿机电设备智能化运行状态监测与故障诊断技术研究[J].现代制造技术与装备,2026,62(1):114-116.
- [3]陈煜.煤矿机电设备故障智能诊断方法与应用研究[J].仪器仪表用户,2026,33(2):153-156.
- [4]倪美庆,赵伟伟.煤矿井下掘进机电设备故障诊断与维护方法研究[J].家电维修,2026(2):184-186.
- [5]伊春,王国强.基于深度学习的煤矿机电设备故障智能诊断研究[J].科技与创新,2026(2):76-78+81.