

智能化背景下煤矿通风网络故障诊断与应急联动机制构建

王保国

陕西华电榆横煤电有限责任公司，陕西榆林，719000；

摘要：煤矿通风系统是保障井下作业安全的核心屏障，其网络运行稳定性直接关乎矿工生命安全与矿井生产连续性。在智能化技术迅猛发展的当下，传统通风网络故障诊断模式面临效率低下、响应滞后等瓶颈，难以适配复杂矿井环境的安全管理需求。本文依托物联网、人工智能、数字孪生等前沿技术，系统剖析煤矿通风网络故障的类型特征，构建多维度智能故障诊断模型，提出监测-诊断-预警-处置-恢复全流程应急联动机制，为提升煤矿通风系统安全保障能力提供理论支撑与实践路径。

关键词：智能化；煤矿通风网络；故障诊断

DOI：10.69979/3060-8767.26.01.019

引言

煤矿安全生产是我国能源领域重点，通风系统是煤矿呼吸系统，承担输送新鲜空气、稀释有害气体、调节温湿度职能。国家矿山安全监察局数据显示，近五年我国煤矿重特重大事故中，通风系统故障引发的占比达 32%，故障诊断不及时、应急处置不当是事故扩大主因。随着煤矿开采深度增加、地质条件复杂，通风网络特征复杂，传统故障诊断方式难满足要求。智能化技术发展为通风网络安全管理带来机遇，物联网实现通风参数感知采集，人工智能提升故障识别精度效率，数字孪生提供故障模拟与应急演练平台。在此背景下，构建智能化故障诊断体系与应急联动机制是解决通风安全难题、推动行业发展的必然选择。本文结合实际需求，融合多领域技术成果，探索故障诊断与应急联动一体化方案。

1 煤矿通风网络故障诊断现状与核心问题

1.1 通风网络故障类型与特征

煤矿通风网络故障按发生载体分为通风动力设备故障、风路结构故障、监测系统故障三类。通风动力设备故障表现为主扇风机轴承磨损等，导致风量骤减、风压波动，引发局部微风或无风；风路结构故障包括巷道坍塌等，风阻突变致网络风量重新分配，造成有毒有害气体积聚；监测系统故障体现为传感器数据失真等，使安全隐患难以及时发现。从故障演化规律看，煤矿通风网络故障有隐蔽性、关联性、突发性特征。隐蔽性是部分故障初期无直观表征，只能通过参数细微异常反映；关联性是单一故障易引发连锁反应，如主扇故障会导致全矿通风系统紊乱；突发性与地质条件突变等因素有关，如冲击地压可能瞬间破坏通风巷道引发故障。

1.2 传统故障诊断模式的局限

当前我国多数煤矿仍沿用人工巡检+定点监测的传统诊断模式，存在三大核心局限：一是感知能力薄弱，传感器部署密度不足，偏远采区、临时巷道等区域的参数监测覆盖不全，部分关键数据依赖人工记录，存在漏测、误测风险；二是诊断效率低下，依赖技术人员经验对监测数据进行离线分析，故障识别存在明显滞后，难以适配通风网络的动态变化特性；三是故障定位不准，传统方法多基于单一参数判断，无法实现多源数据的融合分析，易出现误判漏判问题，导致维修方向偏差，增加处置成本。

1.3 智能化转型的现实需求

当前煤矿开采智能化进程不断加速，无人化、少人化作业模式对通风系统的可靠性提出了更高要求，亟需通过智能化诊断实现故障的早发现、早处置。同时，大数据、人工智能等技术的快速成熟，为多源数据融合分析提供了可能，能够突破传统经验判断的局限，显著提升故障诊断的科学性与精准性，因此通风系统的智能化升级已成为煤矿安全改造的核心任务之一。

2 智能化故障诊断的核心技术支撑

智能化故障诊断以数据驱动为核心，通过感知层-传输层-分析层-应用层的四级技术架构，实现通风网络故障的全面监测、精准识别与提前预警。其核心技术体系涵盖物联网感知技术、多源数据融合技术、人工智能诊断算法与数字孪生仿真技术，各技术模块协同作用，构建完整的智能化诊断链条。

2.1 物联网感知技术：实现参数全面采集

感知层是智能化诊断的基础支撑,通过部署多类型、高密度的传感器网络,实现通风系统参数的全面感知与实时采集。针对传统监测的盲区问题,采用固定传感器+移动监测设备的混合部署模式:在主扇机房、关键巷道、采空区边界等核心区域,安装风速、风压、瓦斯浓度、一氧化碳浓度等高精度传感器,采样频率提升至1次/秒;在临时作业面、掘进巷道等移动区域,配备搭载多传感器的巡检机器人,通过红外热成像、气体传感等技术实现动态监测,确保监测无死角。

为保障数据传输的实时性与稳定性,采用5G+工业以太网的双网络传输架构,5G网络满足移动设备的高速数据传输需求,工业以太网保障固定传感器数据的可靠上传。同时引入边缘计算技术对采集数据进行预处理,有效过滤噪声数据、修正偏差值,降低云端计算压力,提升数据处理效率。

2.2 多源数据融合技术:提升数据利用价值

通风网络故障诊断涉及传感器实时数据、设备运行日志、地质条件数据、生产调度信息等多源异构数据,单一数据维度难以全面反映故障状态。多源数据融合技术通过数据清洗、特征提取、信息融合三个核心环节,实现数据价值的深度挖掘与最大化利用,为精准诊断提供支撑。

在数据清洗阶段,采用卡尔曼滤波算法消除传感器随机误差,通过孤立森林等异常值检测模型剔除故障传感器的失真数据,保障数据质量;在特征提取阶段,针对不同数据类型挖掘关键特征,例如从风机运行数据中提取转速、电流、振动频率等特征,从地质数据中提取岩层稳定性、含水率等关联特征;在信息融合阶段,采用D-S证据理论将多维度特征进行融合,构建全面的特征向量,为故障诊断提供全方位数据支撑。

2.3 人工智能诊断算法:实现故障精准识别

基于融合后的特征数据,构建分类诊断+定位溯源的人工智能诊断模型,实现从故障识别到原因分析的全流程智能化。针对通风网络故障类型多样、特征复杂的特点,采用深度学习+传统机器学习的混合算法架构,提升诊断的精准性与鲁棒性:

一是基于改进BP神经网络的故障分类模型,利用其强大的非线性拟合能力对融合特征进行训练,实现对风机故障、巷道漏风、传感器故障等常见故障的精准分类。通过引入动量因子与自适应学习率优化算法,有效提升模型的收敛速度与分类精度,经实测其故障识别准确率可达92%以上;二是基于随机森林的故障定位模型,

通过构建多决策树集成学习模型,分析故障特征与故障位置的关联关系,实现故障点的精准定位,定位误差控制在5米以内;三是基于LSTM神经网络的故障预警模型,利用其处理时序数据的独特优势,对通风参数变化趋势进行预测,提前10-15分钟预警潜在故障风险,为应急处置预留时间窗口。

2.4 数字孪生仿真技术:支撑故障模拟与验证

数字孪生技术通过构建与物理通风网络1:1映射的虚拟模型,实现故障的可视化模拟与诊断方案的验证优化。虚拟模型整合通风网络的几何参数、设备属性、风流动力学特性等全量信息,通过耦合流体力学仿真算法,实时映射物理系统的运行状态。当监测到异常数据时,数字孪生系统可通过模拟故障演化过程,验证人工智能诊断模型结论的准确性;同时可在虚拟环境中测试不同维修方案的效果,例如模拟风门调整、风机转速优化对通风网络的影响,为现场处置提供科学依据,避免盲目操作导致的风险扩大。

3 智能化应急联动机制的构建

基于上述智能化故障诊断技术,构建监测-诊断-预警-处置-恢复全流程应急联动机制,有效打破传统应急管理中信息孤岛与响应滞后的困境,实现各部门、各环节的高效协同联动,提升故障处置效率。

3.1 分级预警体系:实现风险精准推送

结合故障严重程度与影响范围,建立蓝色(一般)、黄色(较重)、橙色(严重)、红色(特别严重)四级预警体系,实现风险的精准识别与分级管控。蓝色预警对应单一传感器故障、轻微漏风等不影响主体通风的故障;黄色预警对应局部区域风量不足、瓦斯浓度轻微超标等故障;橙色预警对应主扇风机异常、主要巷道堵塞等导致区域通风中断的故障;红色预警对应全矿通风系统瘫痪、大面积瓦斯积聚等极端危险情况。

预警信息通过智能化平台实现精准推送与分级响应,蓝色、黄色预警定向推送至通风区、机电队等基层班组,指导现场人员快速处置;橙色预警推送至矿级安全管理部门,启动专项应急响应;红色预警直接上报至区域矿山安全监察机构,请求外部支援。同时,预警信息同步包含故障位置、类型、影响范围及初步处置建议,为相关人员提供明确的行动指引,提升响应效率。

3.2 多部门协同处置流程:实现应急高效联动

建立统一指挥、分工明确、协同作战的应急处置流程,明确通风、机电、安全、生产等核心部门的职责分

工,实现高效联动。当触发预警后,智能化平台自动启动对应等级的应急响应:通风部门负责分析故障对通风网络的影响机理,制定最优风量调整方案;机电部门负责故障设备的抢修,如主扇风机故障时,立即启动备用风机并组织专业人员检修;安全部门负责现场人员疏散与警戒,确保作业人员撤离至安全区域;生产部门负责调整生产计划,暂停受影响区域的作业活动,避免风险叠加。

为进一步提升协同效率,构建智能化应急指挥平台,整合各部门实时数据,通过视频会议、即时通讯等功能实现远程指挥与信息共享。例如,当发生巷道坍塌导致风路堵塞时,平台可实时显示被困人员位置、通风参数动态变化、抢修进度等关键信息,指挥人员通过数字孪生虚拟模型模拟不同救援路线的通风保障情况,优化救援方案,降低救援风险。

3.3 智能处置与恢复机制:实现故障快速解决

针对不同类型故障的特征,制定差异化智能化处置方案,提升故障解决效率。对于设备故障,通过设备远程监控系统实现部分故障的自动修复,如风机轴承温度过高时,系统自动启动冷却系统;若故障无法自动修复,则立即推送标准化维修工单至机电人员,明确维修步骤、技术要求及所需备件。对于风路结构故障,利用数字孪生模型快速模拟临时通风方案,通过调整临时风门、启用局部通风机等方式,保障受影响区域的基础通风需求。对于监测系统故障,自动切换至备用传感器,确保监测数据的连续性,避免监管中断。

故障处置完成后,启动标准化恢复机制,形成管理闭环:通过智能化平台实时监测通风参数的恢复情况,利用人工智能模型评估恢复效果,确保通风系统回归稳定状态;组织技术人员对故障原因进行深度复盘分析,将相关数据更新至故障诊断模型的训练数据集,持续提升后续诊断精度;对整个处置过程进行总结优化,完善应急联动流程,形成故障处置-经验总结-模型优化的良性循环,提升系统的抗风险能力。

4 案例分析

以某国有大型煤矿为例,该矿开采深度达1200米,通风网络包含主扇风机3台,巷道总长度82公里,此前曾因通风系统故障导致局部瓦斯超限事故。2023年,该矿引入本文提出的智能化故障诊断与应急联动体系,完成全面技术改造。

在感知层,该矿新增各类传感器230台,实现全巷道通风参数的无死角实时监测;在分析层,部署多源数

据融合平台与人工智能诊断模型,提升数据处理与诊断能力;在应用层,构建通风系统数字孪生模型与应急指挥平台,实现可视化管理。2024年3月,该矿智能化平台通过监测数据发现3#主扇风机振动频率异常升高,人工智能诊断模型快速判定为轴承磨损故障,立即发出黄色预警,同时精准定位故障位置并推送详细维修建议。机电部门接到预警后,迅速组织专业人员携带备件赶赴现场检修,整个检修过程耗时仅40分钟,未对矿井通风系统造成明显扰动。

对比改造前后的数据,该矿通风网络故障诊断时间从平均2.5小时缩短至15分钟,故障处置效率提升60%,2024年全年未发生因通风故障引发的安全事故,充分验证了该智能化体系的有效性与实用性,为矿井安全生产提供了坚实保障。

5 结论与展望

5.1 结论

本文构建基于智能化技术的煤矿通风网络故障诊断与应急联动机制,通过物联网感知全面采集参数,用多源数据融合提升数据价值,借人工智能算法精准识别故障,以数字孪生技术支撑模拟与验证,破解传统管理感知弱、诊断慢、联动难难题。结合分级预警与多部门协同流程,实现通风故障全流程智能化管理,为通风安全提供技术与管理支撑。随着技术迭代,煤矿通风网络智能化管理可向三方向深化:一是引入联邦学习,联合多煤矿故障数据训练,提升诊断模型泛化能力;二是融合数字孪生与元宇宙技术,构建应急演练平台,提升应急处置能力;三是推动通风与其他核心系统深度智能联动,实现全矿井安全协同管理,构建一体化保障体系。煤矿通风智能化升级是系统工程,需技术研发、设备改造与管理优化协同推进。随着智能化技术应用与创新,我国煤矿通风安全保障能力将质的飞跃,为行业发展奠定基础,推动能源安全生产水平提升。

参考文献

- [1] 沈志远,杨镇隆,焦莉,等. 矿井通风系统智能故障诊断 MC-OCSVM 模型[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(8):3126-3132.
- [2] 高学金,吴浩宁,高慧慧,等. 基于一致损失生成对抗网络的冷水机组故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2025(1).
- [3] 刘丽. 基于深度强化学习的矿井通风系统阻变型故障诊断研究[D]. 辽宁工程技术大学,2023.