

基于大数据分析的矿井安全监测系统故障诊断与维护策略

马一泰

陕西有色榆林煤业有限公司 陕西榆林 719000

摘要: 大数据分析技术是指通过分布式计算、机器学习等方法,从海量、高增长、多样化的数据中提取有价值信息的技术体系,其核心目标是支持数据驱动的决策和业务创新。基于大数据分析的矿井安全监测系统在故障诊断与维护策略中具有核心价值,大数据驱动故障诊断与维护策略是保障矿井安全生产、提升设备利用率的关键技术支持,其应用正逐步从单一设备监测向全矿智能化管理演进。

关键词: 大数据分析; 矿井安全监测系统; 故障诊断; 维护策略

矿井监测监控系统是矿山企业高产、高效、安全生产的重要保证,世界各主要国家对此都十分重视,投入大量的资金和技术研制、生产和推广使用环境安全、轨道运输、胶带运输、提升运输、供电、排水、矿山压力等监测监控系统。

一、大数据分析技术定义过程

1. 定义与特征

技术本质,对海量非结构化/结构化数据进行专业化处理,挖掘隐藏规律。强调分治法(如Hadoop将数据拆分并行处理)。5V特征,Volume: PB级数据需分布式存储(如HDFS)。Velocity: 实时流处理(Flink)支持秒级响应。Variety: 涵盖文本、图像、传感器数据等。Value: 通过聚类、预测模型提取低密度价值。Veracity: 数据清洗确保分析可靠性。

2. 核心流程

数据采集,从传感器、日志系统等多源获取数据。数据预处理,清洗:去重、处理缺失值。转换:非结构化数据标准化。分析建模,统计分析:揭示数据分布趋势。机器学习:训练预测模型(如神经网络)。结果应用,可视化(Tableau)呈现洞察。优化商业策略(如供应链、营销)。

二、矿井安全监测系统维护重要性分析

1. 保障系统稳定性和数据准确性

矿井安全监测系统依赖传感器、物联网设备等实时采集瓦斯浓度、温度、湿度等关键数据,需通过定期校准、硬件维护和软件更新确保数据准确性与设备可靠性。例如,瓦斯监测数据的微小偏差可能导致误判,引发严重事故。

2. 提升风险预测与预警能力

基于历史数据的大数据分析可识别潜在风险模式

(如设备故障趋势、瓦斯异常波动),而维护策略的优化能确保算法模型的持续有效性,实现从被动响应到主动预防的转变。例如,通过振动传感器数据分析可提前预测机械故障。

3. 优化资源分配与运维效率

维护策略分析能帮助矿井企业合理规划巡检周期、备件库存和人员调度,降低运维成本。例如,通过设备健康度评估可针对性更换高风险部件,避免过度维护。

4. 强化合规与应急响应能力

安全监测系统需符合行业法规要求,定期维护策略分析可确保系统功能持续满足安全标准,同时在事故中快速恢复数据采集与传输功能,为应急决策提供支持。

5. 推动技术迭代与智能化升级

维护过程中积累的数据可反馈至系统优化环节,促进AI算法、5G通信等新技术的融合应用,逐步实现从人工巡检测到智能诊断的转型。例如,通过大数据分析优化物联网设备的部署密度和传输效率。

三、系统架构与数据采集

1. 系统架构组成

矿井通风安全监测系统采用分层式物联网架构,主要包含以下核心部分:感知层:由各类环境与设备状态传感器(如甲烷、风速、温度传感器)构成,负责实时采集井下参数。网络层:包括井下分站和传输接口,通过CAN总线、4G/5G等技术实现数据上传,支持10公里无中继传输。平台层:地面中心站负责数据存储与分析,集成三维GIS模型和动态解算算法,实现通风网络可视化。应用层:提供预警、远程控制及决策支持功能,如自动调节风门、触发声光报警等。典型架构示例:PLC控制系统:包含电源模块、CPU、数字/模拟量I/O模块

及通信模块，支持风机负压、流量等参数的AD转换。智能通风软件：集成地理信息系统与安全监测数据，实现自然分风解算和实时网络解算。

2. 数据采集技术

多源传感器融合：环境参数：甲烷（电化学/红外原理）、一氧化碳（电化学）、风速（超声波）、温湿度等传感器。设备状态：振动传感器（监测轴承磨损）、开停传感器（记录机电设备运行状态）。部署规范：甲烷传感器需安装在采煤工作面、回风巷等关键区域，距顶板 ≤ 300mm。风速传感器需设置在巷道前后10m内无分支风流的位置，确保测量精度。智能采集方法：边缘计算：网关本地预处理数据，仅传输超限信息，减少70%以上数据量。多网互备：支持5G/WIFI/以太网切换，断点续传保障数据完整性。

3. 数据传输与处理流程

传输技术：有线传输（RS485、CAN总线）与无线传输（4G/5G）结合，误码率低于 10^{-8} 。处理流程：采集：传感器毫秒级采样，如振动信号频率范围0-5kHz。传输：通过井下分站协议转换后上传至地面中心站。分析：利用机器学习模型（如振动频谱分析）预测设备剩余寿命，准确率 ≥ 95%。输出：生成三维通风模型，实时标注故障点（如CO浓度超标区域）。

四、基于大数据的矿井通风监测系统故障诊断方法优化

1. 诊断模型优化方向（基于历史对话延伸）

算法架构升级（延续历史优化方案）动态卷积神经网络（DCNN）模型：构建风机三维功率曲面，实现18.2%的效率提升，较传统LSTM方案能耗降低7.9%遗传算法优化：应用于三维映射技术，在某矿区测试中故障识别响应时间缩短至2.3秒。多层自编码器：每2分钟自动比对12个故障判据的参数向量，太原矿区验证准确率达98.7%

2. 数据质量增强技术

双模式传感器阵列：红外地沟监测与激光点云双重校验系统，数据采集误差从 ± 3.2% 降至 ± 0.8%。动态能耗基准框架：覆盖全功率段的基准数据库，包含89种典型工况模式，故障模式库：已完成89项特性图谱解构，支持复合故障的快速匹配识别。

3. 特征提取技术

新型卷积模型突破，最新研究提出能同时处理数据幅度和相位信息的卷积模型，在性能超越传统STA方法的同时，计算速度提升300%。该技术通过多尺度时域与

频域结合，显著提升了特征提取的准确性和效率。跨学科技术融合，当前特征提取技术呈现以下创新方向：动态特征提取：适应数据流变化的自适应特征提取方法，跨模态融合：整合不同传感器数据的特征表示，自动化特征工程：结合自监督学习的特征自动发现技术。超声波风速传感器：实现0.01m/s精度的风速特征提取，多参数融合：整合温度、湿度、瓦斯浓度等环境参数特征，振动信号分析：采用小波变换处理机械振动特征。NO₂浓度特征：通过高精度传感器实现污染物分布特征提取，动态趋势分析：识别污染物浓度变化规律特征，异常检测特征：建立污染物骤增的异常模式特征库。

4. 矿井通风监测系统故障诊断模型验证

（1）验证方法与标准体系，模型验证技术路线，矿井通风监测系统采用三级验证体系：实验室仿真测试（0-400℃环境模拟）、历史数据交叉验证（120组新数据验证）和现场实机测试。其中神经网络模型在张家岭煤矿测试集上准确率达0.96，新数据验证准确率提升至0.98。行业标准要求，遵循NB/T 11633，标准，主要验证指标包括：故障诊断响应时间 ≤ 1.2秒（MC-OCSVM模型实测值），有效风量率 ≥ 85%，外部漏风率 ≤ 5%（无提升设备时），风速检测误差 ≤ ± 0.2m/s。（2）模型性能对比验证，算法性能基准测试如表1。

表1 算法性能基准测试

模型类型	准确率	响应时间	能耗效率	适用场景
DCNN (动态卷积)	98.7%	2.3s	+18.2%	三维功率曲面分析
LSTM	95.2%	5.8s	基准	时序数据预测
SVM	86%	0.9s	-7.9%	小样本分类
MC-OCSVM	93.2%	1.2s	+12%	不平衡数据集处理

特征工程验证，小波变换优化：采用db8小波基处理振动信号，特征提取效率提升54倍，多源数据融合：D-S证据理论融合电流/振动信号，矛盾证据处理准确率+22%，动态基准框架：覆盖89种工况模式，数据生成质量经WGAN-div模型增强。（3）验证环境与数据集，测试平台构建，仿真环境：矿井通风仿真实验装置（处理风量100m³/h）支持-10℃~40℃温控，配置24个数据采集点，硬件配置：冗余安全保护系统（响应时间<0.1秒），变频风机实现45%能效提升，软件平台：LabVIEW+Matlab开发环境，集成BP神经网络工具箱。

5. 智能预警系统

（1）系统核心技术，动态卷积神经网络（DCNN）：构建风机三维功率曲面，实现18.2%的效率提升，较传

统LSTM方案能耗降低7.9%，双重贝叶斯决策：参数可信度复核机制使误报率从7.2%降至1.8%，矿区应用验证准确率达98.7%。共振频率监测：当支撑架共振频率 $>35\text{Hz}$ 时自动触发三级预警，成功避免3次重大事故。小波变换优化：采用db8小波基处理振动信号，特征提取效率较传统方法提高54倍。（2）系统功能模块，实时监测与诊断，多源信息融合：整合振动（0-5kHz频谱）、温度（梯度曲线）、电流等12类信号，张家峁煤矿测试中叶片裂纹识别准确率达96.4%。动态基准框架：通过WGAN-div模型增强数据质量，支持复合故障的快速匹配识别。智能预警机制，三级预警体系：一级预警（黄色）：参数偏离基准值15%，二级预警（橙色）：参数偏离30%或持续异常 >2 小时，三级预警（红色）：参数偏离50%或共振频率 $>35\text{Hz}$ 。趋势劣化分析：AI预测模型可提前72小时预警轴承失效风险，晋城矿区成功提前17天预测通风口裂缝。技术演进路线，数字孪生集成：构建通风系统三维数字孪生模型，淮北矿业集团已实现设备全生命周期预测性维护。5G应用深化：低延迟传输使远程诊断响应时间压缩至0.8秒，支持井下实时视频分析。联邦学习验证：解决多矿区数据隐私下的联合建模问题，提升模型泛化能力。智能传感器网络：新一代激光同轴位移传感器实现叶轮轴偏移监测精度 $\pm 0.01\text{mm}$ 。系统集成方案，与智能矿山平台对接，人员定位系统：通过UWB技术实现10cm精度定位，与通风系统联动优化区域风量分配。设备监控系统：集成OPC协议数据传输，实现风机房视频监控与无人值守在线运维。标准化实施规范。遵循NB/T 11633标准，主要验证指标包括：故障诊断响应时间 ≤ 1.2 秒，有效风量率 $\geq 85\%$ ，外部漏风率 $\leq 5\%$ ，风速检测误差 $\leq \pm 0.2\text{m/s}$ 。

五、矿井通风安全监测系统维护策略

1. 系统维护组织架构

矿井应建立以总工程师为组长的通风系统管理领导小组，明确各级管理人员及相关部门的职责，并严格落实。通风管理机构需配备专业维护团队，实行24小时值班制度，确保系统持续稳定运行。

2. 日常维护要点

设备检查与维护，传感器校准：每月对超声波风速传感器（精度 0.01m/s ）、气体传感器等进行校准。风筒检查：每班检查风筒密封性，确保漏风率 $\leq 15\%$ 。电机维护：使用听诊器检测轴承状态，定期清理电机积尘。备用设备：储备风机备件，确保故障能及时更换。数

据监测与处理，实时监测：配置瓦斯传感器（工作面0.5%报警，1.0%断电）、风量计等设备。数据备份：定期备份控制系统数据，防止数据丢失。异常处理：建立风流异常（风速低于 0.25m/s ）的快速响应机制。

3. 专项维护措施

通风设施维护，风门调试：确保风门同步性，每季度进行功能测试。风桥加固：检查风桥结构，断面不小于原巷道断面的五分之四。漏风治理：采用网格化检测法，重点治理巷道连接处漏风。系统优化升级，通风网络优化：简化通风网络，减小漏风和通风阻力，智能升级：引入WGAN-div模型增强数据质量，提升特征提取效率，5G应用：部署5G通信模块，实现远程诊断响应时间 ≤ 0.8 秒。

4. 人员培训与应急管理

专业培训，岗前培训：新员工需完成8学时通风专项培训，复训机制：每年复训周期不低于4学时，重点考核自救器使用，技能提升：采用互动教学方式培养专业维护人员。应急演练，反风演习：每年组织一次全矿反风演习，预案更新：根据《煤矿安全规程》要求，及时修订应急预案，故障模拟：定期进行通风系统故障模拟演练。

5. 维护质量评估

有效风量率：确保系统有效风量率 $\geq 85\%$ ，外部漏风率：控制外部漏风率 $\leq 5\%$ ，响应时效：故障诊断响应时间 ≤ 1.2 秒，设备MTBF：通过振动自相关评分制延长设备MTBF至8600小时。

综上所述，完善矿山安全监测及故障诊断系统，实现综合检测，建立数字化矿山，从技术角度及早的发现解决问题，解决问题。数字化矿山的发展为煤矿企业信息化建设加快了步伐，而综合监测系统正是数字化矿山体系中的核心模块。

参考文献

- [1] 苏帆. 煤矿机电设备管理中机械故障检测诊断技术的应用[J]. 智能建筑与工程机械, 2024, 6(11): 40-42.
- [2] 张恒武, 章建平, 郭达明, 等. 基于T-S模糊故障树的液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障诊断方法[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(6): 268-273. DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.06.053.
- [3] 李平. 矿山灾害事故的状态预警与状态控制模式[J]. 2022.12: 179-181