

干式除尘器综掘工作面的智能数据应用研究

文 | 郝耀平 高禹德 杜宏飞

综掘工作面粉尘浓度高、分布复杂，严重威胁作业人员的健康与设备安全。传统干式除尘器依赖人工调节，难以适应工况动态变化，除尘效果不理想。智能数据应用技术通过多源数据融合、机器学习分析、自适应控制等手段，显著提升除尘器的控制精度与响应速度。因此，研究干式除尘器在综掘工作面的智能数据应用方法具有重要意义。

综掘工作面干式除尘智能数据融合与分析

多源异构数据采集与预处理

综掘工作面井下截割产尘具有瞬时性强与浓度峰值高的特点，粉尘成分随煤层地质条件的变化呈现不同荷电特性。数据采集系统针对井下强电磁干扰、有限通信带宽环境，采用分布式传感器节点构建抗干扰监测网络，单节点功耗 50mW 以下确保防爆电源供电。截割头前方布置粉尘浓度传感器，采样频率 100Hz 捕获截齿破煤瞬间的粉尘爆发过程，结合煤岩界面识别传感器区分不同岩性产尘特征，干式除尘器内部署静电场强度传感器阵列，测量范围 0 ~ 50kV/m，空间分辨率 10cm，监测荷电粉尘运动轨迹。滤料阻力监测采用差压传感器配合振动加速度计，响应时间 ≤ 100ms 适应脉冲清灰过程，数据预处理采用井下多径传播信道建模，处理无线传输信号衰落，通过煤层介电常数修正算法，消除地质环境对电磁波传播的影响。

基于机器学习的数据融合分析模型

综掘工作面荷电粉尘在电场-流场耦合作用下，呈现复杂时空分布特征。数据融合模型采用物理约束神经网络，将静电学定律嵌入学习过程，电场分布预测采用有限元神经网络求解泊松方程，网络层数 8 层，隐藏单元 512 个，学习率 0.001。截割参数与产尘强度非线性映射通过时间卷积网络识别，卷积核尺寸 3×1，步长 2，卷积层数 6 层，结合截齿磨损周期与煤岩硬度系数，荷电粉尘运动轨迹预测集成拉格朗日粒子追踪模型，粒子数量 1 万个，时间步长 0.01s，空间网格分辨率 5mm。滤料积灰状态识别采用一维卷积神经网络，卷积核长度 64，池化窗口 8，通过小波变换提取 0 ~ 500Hz 频段能量分布特征。多源数据时序对齐采用动态时间规整算法，约束带宽 10%，确保截割动作与粉尘产生、电场变化的时序一致性。

智能数据驱动的干式除尘优化控制技术

粉尘浓度智能预测与参数优化算法

截割头推进过程中通过实时监测截割电流波形识别煤岩界面变化，硬煤截割时电流波动幅度增大，算法据此提前调高静电场电压至 45kV，防止硬质粉尘穿透。软煤截割时

降低电压至 25kV，避免反电晕现象。预测算法建立截割速度与粉尘产生量的动态关联模型，当推进速度超过 8m/班时，预测粉尘浓度将在 15 分钟后达到峰值，提前调节脉冲清灰频率至 30 秒间隔。粉尘浓度预测模型表达式为：

$$C(t + \Delta t) = \alpha \cdot I_{cut}(t) \cdot v_{advance} + \beta \cdot H_{coal} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_{cycle}} \cdot t\right) + \gamma$$

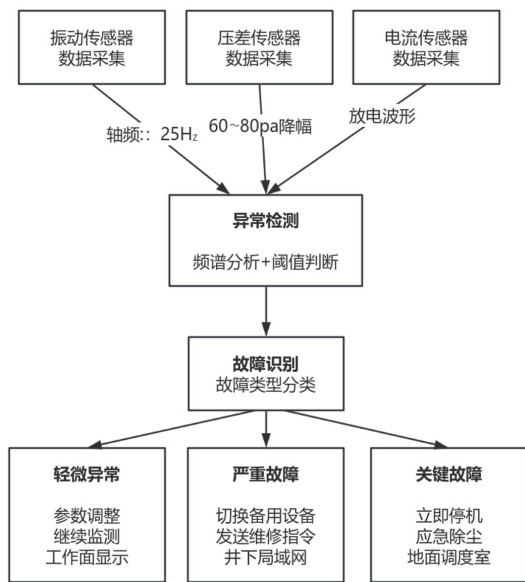
其中 $C(t + \Delta t)$ 为预测时刻粉尘浓度 (mg/m^3)， $I_{cut}(t)$ 为截割电流 (A)， $v_{advance}$ 为推进速度 (m/班)， H_{coal} 为煤层硬度系数， T_{cycle} 为截割循环周期 (s)， α 、 β 、 γ 为模型参数。参数优化采用分时段控制策略，截割工序期间静电场维持高强度 40kV，支护间隙降至 20kV，减少电能消耗，运输期间升至 35kV，控制转载点扬尘。算法集成井下供电功率分配机制，当截割功率超过额定值 85% 时，自动将除尘器电场功率降低 30%，通过功率让渡方式重新分配供电负荷，井下功率协调分配算法为：

$$P_{dust}(t) = P_{total} - k_{priority} \cdot P_{cut}(t) - P_{ventilation}$$

其中 $P_{dust}(t)$ 为除尘系统可用功率 (kW)， P_{total} 为井下总供电功率 (kW)， $k_{priority}$ 为截割作业优先系数 (取值 1.2 ~ 1.5)， $P_{cut}(t)$ 为截割功率 (kW)， $P_{ventilation}$ 为通风系统功率 (kW)。预测窗口采用滑动时间窗口技术，短期窗口 10 秒预测截割循环内浓度变化，长期窗口 30 分钟预测班次内总体趋势，根据预测结果提前配置静电除尘器运行参数。

设备状态智能诊断与故障预警技术

滤料堵塞诊断通过监测脉冲清灰前后压差变化幅度判断清灰效果，正常情况下清灰后压差下降 60 ~ 80Pa，当下降幅度低于 40Pa 时，判定滤料积灰严重需要更换。风机轴承状态监测采用振动频谱分析方法，通过安装在轴承座的加速度计监测轴频及其倍频分量，当轴频幅值超过基准值 2 倍时，启动备用风机并安排轴承检修。静电除尘器电极积灰检测通过监测放电电流波形特征识别，正常放电呈规律性尖峰波形，积灰时尖峰幅值降低且出现连续性小幅波动。诊断系统建立设备运行状态数据库，记录不同工况下的正常运行参数范围，通过对比实时参数与历史基准值识别异常状态。故



来源：鄂尔多斯市转龙湾煤炭有限公司

图 1 设备故障诊断与分级响应流程图

障处理采用分级响应策略，轻微异常时，系统自动调整运行参数补偿性能下降；严重故障时，切换至备用设备并发送维修指令；关键故障时，立即停机保护并启动应急除尘措施（如图 1 所示）。

自适应除尘策略动态调整机制

地质条件变化适应采用煤层硬度系数在线识别方法，通过截割电机电流与转速比值判断煤质软硬程度，硬度系数大于 6 时，切换至强力除尘模式将风机转速提升至 1200rpm；小于 3 时，采用节能除尘模式降低至 800rpm。静电场强度调节根据粉尘比电阻实时测量结果执行，比电阻高于 $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 时，将电极电压降低 15% 防止反电晕；低于 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 时，提高电压 20%。多工作面协调控制，通过井下工业环网实现除尘设备运行状态共享，相邻工作面同时启动高功率设备时，执行错峰控制策略，间隔 3 分钟依次启动。自适应清灰频率调节基于滤料压差变化速率确定，压差上升速率大于 10Pa/min 时，将清灰间隔从 120 秒缩短至 60 秒；小于 5Pa/min 时，延长至 180 秒。工况变化监控通过掘进作业计划提前配置除尘模式，爆破前 30 分钟启动全功率除尘，准备应对瞬时高浓度粉尘，爆破后维持强力除尘 15 分钟，直至浓度恢复到正常水平。

综掘工作面智能除尘系统应用验证

现场测试方案与评价指标体系

综掘工作面智能除尘系统现场测试选择某煤矿 3 号煤层综掘工作面作为验证平台，该工作面煤层厚度 2.8 米，倾角 8 度，日进尺 6~8 米，测试方案采用对比验证方法，智能除尘系统与传统除尘系统在相同工况下，进行 30 天连续

对比测试。建立多点位粉尘浓度监测网络，在掌子面前方 5 米、10 米、15 米位置设置测点，巷道断面按等分原则布置监测点位，评价指标体系包含除尘效率、能耗水平、设备可靠性、操作便利性四个维度。除尘效率通过进出口粉尘浓度差值计算，能耗水平采用单位除尘量功耗指标衡量，设备可靠性统计故障率与平均无故障运行时间，操作便利性评估人工干预频次与维护工作量。数据采集频率每分钟记录一次，同时记录截割参数、通风参数及地质条件等环境因素。

智能除尘系统性能评价与分析

基于 30 天现场测试数据，智能除尘系统与传统系统性能对比分析表明技术优势明显。实际运行过程中，系统在不同工况条件下均保持稳定高效的除尘性能，验证了智能数据驱动除尘技术的工程可行性。

表 1 数据表明智能除尘系统在所有关键性能指标上均显著优于传统系统，粉尘浓度控制达到《煤矿安全规程》的要求，能耗控制与设备可靠性大幅提升，系统响应时间由 15 分钟缩短至 0.75 分钟，人工干预频次从每班 8 次减少至 2 次，维护周期从 15 天延长至 35 天，证明智能数据驱动的除尘技术具备良好的工程应用价值与推广前景。

表 1 智能除尘系统与传统系统性能对比

评价指标	传统除尘系统	智能除尘系统	改善幅度
工作面粉尘浓度 (mg/m ³)	12.5	4.2	-66.4%
平均功耗 (kW)	185	132	-28.7%
月故障率 (次/月)	3.2	1.1	-65.6%
系统响应时间 (分钟)	15	0.75	-95.0%
人工干预频次 (次/班)	8	2	-75.0%
维护周期 (天)	15	35	+133.3%

来源：鄂尔多斯市转龙湾煤炭有限公司

结束语

综掘工作面干式除尘智能数据应用研究构建了完整的技术体系，从数据融合分析到优化控制再到应用验证，形成了闭环解决方案。多源异构数据采集技术解决了信息获取难题，机器学习融合模型提升了数据分析能力，智能预测算法实现了精准控制，故障诊断技术保障系统可靠运行，自适应调整机制增强了环境适应性，现场验证结果证明了技术方案的有效性，为综掘工作面粉尘治理提供了科学依据。随着人工智能技术的不断发展，智能除尘技术将向更高精度、更强适应性方向演进，为煤矿安全生产提供更可靠的技术保障。

作者简介：郝耀平 高禹德 杜宏飞 鄂尔多斯市转龙湾煤炭有限公司

责任编辑：孙姗姗 投稿邮箱：zhouhl@staff.ccidnet.com