

基于大数据分析的矿山机电设备故障预测与安全管理研究

文 | 时肖田 王鹏 吴琪

矿山机电设备长期处于高粉尘与强振动的复杂工况，提升机、通风机、排水泵等关键设备一旦非计划停机，极易引发连锁安全事故，传统定期检修依赖人工经验，对设备劣化缺乏定量感知，预警严重滞后于故障演变。大数据驱动的智能分析技术为故障超前预判提供了新路径，将预测结果嵌入安全管理体系，推动管理从被动响应转向主动防控。

基于大数据分析的矿山机电设备故障预测模型构建

矿山机电设备多源运行数据的采集与预处理

针对提升机、通风机、排水泵这类典型矿山机电设备，在轴承座、电机端盖、泵体出口等关键部位布加速度传感器、热电偶、电流互感器、压力变送器，把采样频率设置在1kHz到10kHz的范围内来捕捉高频瞬态故障信号，通过工业以太网与无线传感网络融合组网，实现井上井下数据实时同步传输，且将传输延迟控制在50ms以内，单台设备每日产生的原始数据量达到GB级规模。原始信号经过基于sym8小波基函数的自适应阈值去噪处理，针对电磁干扰产生的脉冲噪声，单独建立形态学滤波模块进行剔除，对传感器通信中断造成的缺失数据段，采用同类历史工况匹配的片段重建策略加以填补。引入基于最大公约数的多率信号重采样方法，对异步数据进行时间轴对齐，将振动与温度以及电流信号统一映射至10ms分辨率的时间基准，每隔24小时利用设备空载基准信号自动校正各传感器通道的零点偏移。

大数据驱动的故障特征提取与预测算法建模

采用时域、频域及时频域三类特征并行提取策略，时域层面针对矿山机电设备轴承、齿轮等易损部件提取均方根值、峭度系数、波形因子等统计特征，其中峭度系数K定义为：

$$K = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right)^2}$$

式中， x_i 为第*i*个采样点的振动幅值， \bar{x} 为信号均值，N为采样点总数，K值对轴承早期点蚀产生的冲击脉冲高度敏感，单独建立动态阈值加以监控。频域层面，通过快速傅里叶变换提取1~5倍转频处的边频带特征作为传动系统故障专属判据；时频域层面引入希尔伯特-黄变换提取各固有模态函数的瞬时频率与瞬时能量熵，应对矿山宽转速工况下信号频率成分随负载波动的非平稳特性，构建80维初始特征集合后，经最大相关最小冗余准则压缩至15~20维最优子集。预测算法以双层长短期记忆网络为主干，第一层捕捉提升机与通风机等设备的短时冲击故障特征，第二层提取长

周期劣化趋势，引入多头注意力机制，对不同传感器通道贡献度动态加权，采用梯度提升决策树处理负载率等非时序特征，预测时间窗口设定为72小时，输出涵盖机械松动、绝缘劣化、轴承磨损等七类故障的分类识别结果。

预测模型的验证评估与自适应优化机制

验证阶段运用时间序列交叉验证策略，把历史数据前70%当作训练集与后30%作为测试集，评估指标包含均方根误差、平均绝对百分比误差、F1分数以及提前预警时间窗口达标率，误报率上限严格约束在5%以内、漏报率上限约束在2%以内。在自适应优化方面，设计基于滑动窗口的增量学习策略，每隔168小时将新采集的数据批量纳入模型更新队列，采用弹性权重巩固算法对历史重要权重施加惩罚约束，以此避免新数据学习过程覆盖旧工况知识。引入基于Page-Hinkley检验的概念漂移检测模块对输入特征分布变化逐窗口进行监测，当统计量超过预设阈值时自动触发重训练流程，重训练样本窗口设定为近720小时的滚动数据，保留各类故障样本的历史原型向量来应对故障样本稀少导致的类别不平衡问题，重训练完成后，对新旧模型参数执行加权融合更新以实现平滑过渡。

故障预测结果导向的矿山安全管理体系

预测预警信息驱动安全管理决策流程的协同嵌入机制

把故障预测模型输出的剩余使用寿命估计值和七类故障分类结果直接接入矿山安全管理信息系统，按照预测置信度与故障发生概率来构建三级预警触发规则，当故障概率超过60%时推送黄色预警到班组长终端，当故障概率超过80%时同步推送到生产调度中心并且锁定设备操作权限，当故障概率超过95%时自动触发停机保护指令，同时启动应急响应预案，三级阈值根据设备类型和井下作业环境风险系数分别进行标定。预警信息推送采用结构化工单的形式，工单内容包含故障类型、预测发生时间窗口、受影响设备编号、建议处置措施以及关联安全规程条款，从工单生成到送达责任人的全流程时延控制在3分钟以内，责任人需要在规定时限内

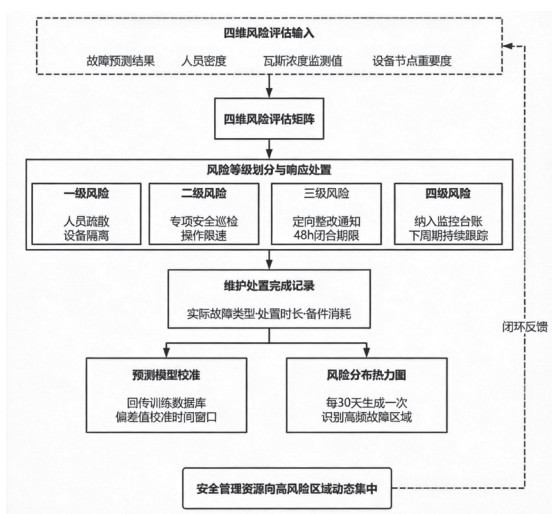
完成确认回执，若超时未确认则自动升级到上级管理层，形成预警信息在安全管理层级间的强制流转机制。

基于大数据预测的设备预防性维护策略动态调整

依托故障预测模型输出的设备剩余使用寿命估计值，以72小时为滚动周期动态生成维护任务优先级排序，将传统固定周期检修计划替换为以预测剩余使用寿命为核心参数的状态触发式维护调度。维护资源调度层面，依据预测故障类型匹配所需备件型号与专项技能工种，提前48小时完成备件出库与人员排班，针对提升机主轴承、通风机叶轮、排水泵机械密封等矿山高价值易损件，建立基于剩余使用寿命预测消耗速率的动态安全库存模型，按预测更换频次自动触发备件采购申请，当同一类型设备集中进入维护窗口时，依据井下巷道作业空间限制与通风系统运行要求，对维护工序进行错峰排列，按设备节点重要度与预测剩余使用寿命的综合排序确定各台设备的维护先后顺序与时间间隔。

安全风险分级响应与闭环反馈管控体系构建

将故障预测结果当作输入源，结合设备所在作业区域人员密度、瓦斯浓度监测值以及设备在生产系统里的节点重要度，来建立四维风险评估矩阵，将井下作业风险划分成四个等级并对应差异化的响应处置流程，一级风险启动局部区域人员疏散和设备隔离工作，二级风险触发专项安全巡检及操作限值管控，三级风险推送定向整改通知并设定48小时整改闭合期限，四级风险纳入常规监控台账并在下一轮预测周期内持续跟踪。在闭环管控方面，每次维护处置完成后把实际故障类型、处置时长、备件消耗记录回传至预测模型训练数据库，以实际故障发生时间和预测时间窗口的偏差值作为模型校准依据，每30天生成一次风险分布热力图来识别高频故障区域与薄弱管控环节，驱动安全管理资源向高风险区域动态集中（如图1所示）。



来源：兖煤菏泽能化有限公司赵楼煤矿

图1 安全风险分级响应与闭环反馈管控体系

典型矿山场景的应用实施与综合效能评估

典型机电设备故障预测的工程落地与部署验证

选取某煤矿井下提升机、主通风机、排水泵三类典型机电设备作为工程验证对象，在关键部位共布设128路传感器采集通道，涵盖振动、温度、压力等多物理量信号。双层长短期记忆网络预测模型部署于地面边缘计算服务器，推理周期设定为10分钟，对三类设备的剩余使用寿命与故障类型实施滚动预测，预测结果经三级预警触发规则自动推送至矿山安全管理信息系统，同步驱动维护任务优先级排序与四维风险评估矩阵更新。连续180天运行周期内完整记录预警触发次数、工单响应时效、设备运行时长及维护成本台账，形成可供效能评估的系统运行数据集。

大数据驱动安全管理优化的多维效能评估与对比分析

基于180天工程运行数据，从故障预测精度、预警响应时效、设备可用率、维护成本、安全风险事件五个维度对体系综合效能进行评估，与同矿山实施前历史同期数据形成对比分析。

表1 大数据驱动安全管理体系多维效能评估对比

评估维度	实施前	实施后	变化幅度
故障预测准确率	71.3%	93.6%	提升22.3个百分点
预警响应平均时效	47min	8min	缩短83%
关键设备可用率	91.2%	97.8%	提升6.6个百分点
年度维护综合成本	100%	72.4%	降低27.6%
安全风险事件发生次数	18次/半年	4次/半年	下降77.8%

来源：兖煤菏泽能化有限公司赵楼煤矿

表1显示，故障预测准确率由71.3%提升至93.6%，预警响应时效由47min压缩至8min，关键设备可用率、维护成本、安全风险事件三项指标同步改善，验证了故障预测结果导向安全管理体系重构的实践价值。

结束语

故障预测结果驱动安全管理决策、维护策略动态调整、风险分级闭环管控三者协同，推动矿山机电设备安全管理从经验驱动转向数据支撑，工程验证确认该体系在复杂井下环境中的可落地性。未来随着边缘计算与数字孪生技术的融合深入，故障预测精度与管理响应实时性有望持续提升，为智慧矿山建设提供技术支撑。

作者简介：时肖田 王鹏 吴琪 兖煤菏泽能化有限公司赵楼煤矿

责任编辑：杨佳宇 投稿邮箱：zhouhl@staff.ccidnet.com