

智能制造背景下地下矿山机电设备数字化运维研究

宋泓奇

云南金沙矿业股份有限公司, 云南 昆明 654100

[摘要]金属非金属地下矿山提升、通风、排水等核心机电设备长期依赖人工经验运维, 存在感知滞后、维修策略粗放、隐患处置不闭环等问题, 极易诱发淹井、有害气体积聚等重大安全事故。现有矿山智能运维研究多侧重算法仿真, 缺乏井下防爆场景成套落地方案与安全闭环管理体系。本文以工业物联网边缘计算为基础, 构建多源防爆数据采集体系; 采用滑动标准差阈值与自编码器重构偏差双重预警模型实现设备早期劣化识别; 建立基于安全风险矩阵的 A/B/C 分级状态维修机制, 设计带刚性时限的点检异常全闭环流程, 结合备件预测算法与设备全生命周期技改方案搭建数字化运维体系。现场实践表明, 该体系关键设备故障预警准确率达 91%, 非计划停机减少 47%, 点检异常闭环率由不足 40% 提升至 86%, 备件库存资金降低 24%, 主通风机节电 18%, 井下通风、排水系统安全保障率达 100%。研究可为同类地下矿山机电设备数字化、智能化运维转型提供成套可复制技术与方案。

[关键词]智能制造; 地下矿山; 机电设备; 预测性维护; 边缘计算; 故障预警

DOI: 10.33142/sca.v9i8.20206

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Research on Digital Operation and Maintenance of Underground Mining Electromechanical Equipment under the Background of Intelligent Manufacturing

SONG Hongqi

Yunnan Jinsha Mining Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 654100, China

Abstract: The core mechanical and electrical equipment such as lifting, ventilation, and drainage in metal and non-metal underground mines have long relied on manual experience for operation and maintenance, which has problems such as lagging perception, extensive maintenance strategies, and non closed loop disposal of hidden dangers, which can easily lead to major safety accidents such as flooding and accumulation of harmful gases. The existing research on intelligent operation and maintenance of mines mainly focuses on algorithm simulation, lacking a complete set of underground explosion-proof scenarios and a safety closed-loop management system. This paper builds a multi-source explosion-proof data acquisition system based on edge computing of the Internet of Things; Adopting a dual warning model of sliding standard deviation threshold and autoencoder reconstruction deviation to achieve early degradation identification of equipment; Establish an A/B/C graded state maintenance mechanism based on a security risk matrix, design a closed-loop process for detecting anomalies with rigid time limits, and build a digital operation and maintenance system by combining spare parts prediction algorithms with equipment lifecycle technical renovation plans. On site practice has shown that the accuracy of key equipment failure warning in this system reaches 91%, unplanned downtime is reduced by 47%, the closed-loop rate of abnormal inspections is increased from less than 40% to 86%, spare parts inventory funds are reduced by 24%, the main ventilation fan saves 18% electricity, and the safety guarantee rate of underground ventilation and drainage systems reaches 100%. Research can provide a complete set of replicable technologies and management solutions for the digital and intelligent operation and maintenance transformation of similar underground mining electromechanical equipment.

Keywords: intelligent manufacturing; underground mines; mechanical and electrical equipment; predictive maintenance; edge computing; fault warning

引言

金属非金属地下矿山生产环境复杂，提升、通风、排水、压气、破碎、运输等机电设备连续运转，非计划停机容易造成井下涌水积聚和有害气体浓度超标等重大安全风险。智能制造依靠工业物联网、大数据重塑生产系统，矿山机电设备运维对井下安全、系统稳定和能耗控制的影响更加突出。然而，传统定时维修与事后抢修对连续化矿山生产响应慢、浪费大，运维资源配置冗余，设备安全管控高度依赖人工经验，标准化程度低。已有研究包含深度学习剩余寿命估计及边缘轻量化处理，但是大多数矿山仍然存在传感器缺少、井下网络覆盖不好、模型工程化难、管理同数据相脱离等问题。

1 机电设备运维管理现状与共性难题

考察的设备主要是矿井提升机、主通风机、主排水泵、凿岩台车、铲运机、井下破碎机、带式输送机、空压机组。长时间使用之后，主轴轴承磨损、钢丝绳断丝锈蚀、液压内泄、水泵汽蚀、电机绝缘下降、电气接点氧化等问题就会陆续出现。目前多数矿山维护体系仍以周期性保养加事后抢修为主，少数试行专业点检，执行力度参差不齐。

归纳出四个突出难题。第一，状态信息碎片化。大量的在役提升机、老式空压机、排水泵没有完备的数据接口，主轴轴承、天轮轴承、水泵叶轮等重要部位一直缺少连续的振动、温度、流量监测，依靠人工感官与从业经验开展定性判定，无量化监测数据支撑。新设备控制器虽已联网，因协议封闭或数据治理缺失，实际利用率不到三成。某矿在用 22 台老式排水泵无在线监测接口，仅依靠每班巡检人员触摸判断温度，曾出现水泵汽蚀加剧未及时发现、排水能力下降的情况。第二，劣化识别无量化支点。点检记录多用“正常”或“异常”勾选，对振动烈度、温升速率、绝缘阻值、风压、排水量等连续量缺乏跟踪，轻微劣化难以在恶化前发现，维修总在功能失效边缘^[1]。第三，维修策略同质化。不论设备在矿山系统中的位置，统一按固定

周期大修或换油，造成主通风机、提升机等安全关键设备维修不到位，辅助设备过度保养，备件工时双耗，安全边际不清。第四，异常处理链路中断。隐患写在纸面，未自动生成工单，信息传递靠电话口头，问题跟踪丢失严重，同类安全故障重复发生。仅仅依靠采购硬件或者简单上线系统，不能对矿山特有的安全约束流程和配套规则进行重塑，也就无法消除隐患。

2 运行状态监测与智能诊断

2.1 多源数据采集与边缘处理

数据采集分层创建，先对提升机、主通风机、主排水泵等安全和系统命脉的设备进行数据采集。振动传感器为压电型，灵敏度 100mV/g，防爆等级 Ex ib I Mb，安装于提升机主轴轴承座、天轮轴座、通风机轴承箱、排水泵轴承体刚性面，满足防爆要求。贴片铂热电阻对轴承座、电机绕组和液压站油温进行监测。霍尔互感器采集电机三相电流。在井下硐室、地面变电所部署边缘网关，协议汇聚和初级处理。振动采用 2560Hz 采样，每 2 秒计算均方根值、峰值上传，高频波形报警时存盘；温度、电流、风压等慢变量每秒取均值上送^[2]。网关中断时可以保存 48 小时的统计值，补传保证数据不断。网关仅上传振动 RMS、温度均值等统计特征，高频原始波形仅异常触发时本地存储，大幅削减上行传输载荷。实施之后一台主通风机 8 测点上行流量由 230kB/s 降到 5kB/s 以下。

2.2 典型劣化趋势分析与早期预警

获得连续统计特征后，对提升机主轴、通风机轴承、排水泵叶轮等建立劣化模型。以主通风机为例，固定叶片角度转速下采集振动均方根值，按小时聚合成日趋势线。取前 500h 稳定运行数据作为基线，黄、红预警阈值设为均值加 3 倍、5 倍标准差。连续 5 点超阈值推送，30 点滑动窗口斜率计算——通过滑动窗口斜率识别振动加速劣化趋势，区分正常小幅波动与不可逆部件损耗——斜率突升提示劣化加速，一周内安排点检。

表 1 地下矿山核心机电设备典型故障统计

设备名称	高发故障类型	潜在安全风险	传统运维方式
矿井提升机	主轴轴承磨损、钢丝绳断丝锈蚀、闸瓦间隙超标	过卷、断绳、坠罐	定期更换钢丝绳、人工检查闸瓦
主通风机	轴承疲劳、叶片磨损、电机绝缘下降	工作面有害气体积聚、窒息风险	每月人工测振、季度更换润滑油
主排水泵	叶轮汽蚀、阀门内漏、轴封磨损	涌水无法排出、淹井	定期盘车、人工判断排水效率
凿岩台车	液压内泄、钻头磨损、推进机构卡滞	掘进效率下降、作业面停滞	故障后维修、按台班保养
铲运机	传动轴断裂、制动失灵、轮胎过度磨损	井下运输安全事故	每日出车前检查、定期更换油品
井下破碎机	锤头断裂、衬板磨损、润滑失效	矿石处理中断、系统卡堵	定期更换锤头、凭经验判断磨损
带式输送机	托辊卡死、皮带跑偏、接头老化	运输中断、火灾隐患	班前巡检、定期更换托辊
空压机组	活塞环磨损、冷却器结垢、电气接点氧化	压气中断、气动设备失效	定期保养、故障后抢修

对复杂部件采用自编码器重构偏差法,用无故障数据训练欠完备自编码器。模型输入 6 维特征(振动 RMS、峰值、温度、电流、风压、转速),编码器 3 层网络(64-32-16)、解码器 2 层(32-64),训练集为 500 h 无故障平稳运行数据,损失函数采用均方误差 MSE。在线计算重构误差,指数加权移动平均平滑,平滑误差超基线 6 倍标准差且持续 15 分钟预警。该方法对主排水泵轴承提前 11 天预警,查实保持架裂纹,及时更换避免涌水时排水能力丧失^[3]。三种预警方法性能对比如表 2 所示。结合维修反馈调整阈值,关键设备预警准确率 91%,预报窗口 7~20 天,给撤人、切换备用设备争取了宝贵的时间。

表 2 三种预警方法性能对比

预警方法	误报率	平均提前预警天数	适用场景
固定阈值法	28.3%	2~3 天	设备工况稳定场景
滑动标准差阈值法	11.6%	5~8 天	风机、水泵平稳运转设备
自编码器重构误差法	4.2%	11~20 天	轴承、齿轮等复杂旋转部件

以 1#试验矿井主排水泵轴承为例,自编码器模型在故障发生前 11 天捕捉到重构误差持续抬升,较固定阈值法提前 9 天发出预警,点检人员拆检确认保持架存在早期裂纹,及时更换轴承总成,避免了涌水季排水能力丧失的重大险情。

3 运维业务流程优化与闭环管控

3.1 维护策略制定与计划排程

状态信息进入业务系统后,不再采用统一维护方式。引入矿山安全风险矩阵对设备进行分级,纵轴是停机对人员安全、井下涌水、通风中断的影响,横轴是故障概率,把设备分为 A、B、C 三类。A 类为提升机、主通风机、主排水泵、井下供电等安全相关或者单一瓶颈设备,强制状态维修,每周红外热像、油液分析、钢丝绳无损检测;

B 类为凿岩台车、铲运机、破碎机等关键采掘设备,按照开动率及劣化趋势动态调节保养周期;C 类辅助设备故障后维修。

维护排程模块与矿山生产调度系统对接,获取未来两周采掘计划,自动找出交接班、爆破警戒、计划检修等可用窗口,按优先级嵌入工单,冲突时人工调整^[4]。状态监测预警请求生成紧急工单,相关时段生产任务置为不可执行,并向井下带班人员下达指令。工单带标准作业指导书、备件预留和安全隔离、瓦斯检测要求,通过矿用移动终端派工。1#铜矿上线之后,预防性维护按时完工率从原来的 54%提高到现在的 91%,非计划停机减少 47%,杜绝了因维护窗口不足导致的强制性连续作业风险。

3.2 点检作业数字化与异常闭环

日常点检取消纸质清单。每条点检项目明确检测部位、方法、数据单位、正常范围和判定逻辑,录入矿用移动终端,点检员按路线刷卡识别,录入实测值,超标自动标红触发异常处置流。拍照、录音与工单挂钩。异常闭环刚性安全时限见表 3。

超时工单在调度大屏和移动端高亮报警,自动推送主管矿长。实施刚性时限闭环管控后,该矿点检异常闭环率由不足 40%提升至 86%,重复性隐患引发的事故征候下降 60%以上。

3.3 备件消耗预测与共享储备

用维修工单、运行数据预测备件需求。对提升钢丝绳、通风机滤芯、排水泵盘根等规律消耗件用二次指数平滑法;对天轮衬垫、破碎机锤头、铲运机传动轴等间歇需求件用 Croston 法——前者适用于周期稳定、需求连续的消耗件,后者适配需求间断、波动大的备件。预测结果经过备件工程师确认之后,得到补货建议。加入劣化趋势因子,对于某批次轴承振动 RMS 上升速率超过同类均值的,上浮该批次专项安全库存。

表 3 点检异常闭环流程节点与责任时限

节点	责任岗位	操作要求	时限
异常发现	点检员	移动终端录入异常现象,勾选类型,上传影像	即时
异常确认	井下当班队长/班组长	现场核查,判定是否停机撤人及紧急程度,补录初步原因	15min 内
维修派工	维修调度	按技能标签和忙闲指派承修人,预留备件,告知安全事项	10min 内
现场维修	承修工	到场排查修复,记录故障部位、根本原因及所换备件,执行气体检测及停电闭锁	重大停机 30min 内到场
效果复核	点检员	逐项复测,确认数值正常,签署关闭	修复后 30min 内
归档	设备管理员	审核工单完整性,提取范例归入故障知识库,标注安全标签	当班结束前

集团层面创建共享备件库,各个矿区的库存信息实时同步,缺件时一键内部调拨,费用内部结算。单价大于2万元或者采购周期大于3个月的备件,如提升机主轴装置、高压电机、定制排水泵叶轮等,与供应商签订寄售合同,按照消耗结算。该集团实行共享库一年之后,备件库存资金减少24%,紧急采购次数减半,调拨满足率达到93%,防止出现长时间停产或者非健康状态持续运转的情况。

3.4 维修过程记录与案例归档

维修工单成为知识入口。接单后维修人员用移动端勾选故障现象、排查动作、更换备件批次号、根本原因分类、修复后参数。必填项全部完成方可提交关闭。照片和测试数据自动归入设备档案。

每周设备主管挑选代表性工单,整理为标准故障案例,格式统一为标题、背景、现象描述、原因树、处理步骤、预防建议、趋势曲线图(表4)。根据设备型号、部件、故障模式检索案例库^[5]。预警出现时,系统自动推送最相似的三条历史案例到维修工手持终端。1#铁矿一年中共产生有效案例387例,约占全部常见故障的85%,新晋维修工独立顶岗时间由12周缩减至7周,平均故障修复时间由35天降至20天,同类安全故障重复发生率明显降低。

表4 故障案例标准化字段模板

字段	内容说明	示例
标题	设备名称+部件+故障模式	1#主通风机轴承保持架断裂
设备型号	厂家/型号/出厂编号	XX 风机厂 FBCDZ-8-No.20
故障现象	点检/监测异常描述	振动 RMS 由 2.1mm/s 升至 5.6 mm/s, 持续 3 天
原因树	根本原因层次分解	润滑油失效→滚动体点蚀→保持架断裂
处理步骤	维修操作序列	停机→拆解→更换 SKF 6324 轴承→复测
预防建议	监测阈值/检查周期调整	振动 RMS 超 3.5mm/s 触发预警, 润滑周期缩短至 2000h
趋势曲线图	劣化过程数据截图	附振动趋势图标注预警点和故障点

4 转型落地条件与长效保障

4.1 责任分工与绩效牵引

运维转型需明确设备、生产、安全、信息技术等部门职责。设备部门负责状态模型、策略、备件参数和数据质量;生产部门执行日常点检、自主保养和异常上报;安全

部门监督安全闭锁执行、防护装置完好和紧急停机响应;信息技术部门保障网络和数据接口,不承担业务决策;维修团队进行精密点检、故障检修和案例编写。

关键绩效指标由系统自动取数,含平均故障间隔时间、平均修复时间、设备综合效率、点检准时率、异常闭环率、备件周转天数,增加安全闭锁执行率、紧急停机演练达标率等^[6]。指标按采区、班组、个人三层展示在井下硐室和调度室看板,月度考核与技能津贴、安全奖金挂钩。运维流程上线初期存在点检复核流于形式、工单虚假办结等数据失真问题;增设复测复核强制校验机制后,数据真实性显著提升。多维 KPI 考核体系见表5。

表5 运维多维 KPI 考核指标体系

维度	指标名称	计算方式	考核周期	目标值
安全	安全闭锁执行率	执行闭锁工单数/应执行闭锁工单数×100%	月度	≥98%
安全	紧急停机演练达标率	达标演练次数/总演练次数×100%	季度	100%
设备	MTBF(平均故障间隔时间)	统计周期总运行时间/故障次数	月度	环比提升
设备	MTTR(平均修复时间)	故障总修复时间/故障次数	月度	环比下降
设备	OEE(设备综合效率)	可用率×性能率×合格率	月度	≥85%
设备	点检准时率	准时完成点检项数/总点检项数×100%	日/周	≥95%
成本	备件周转天数	平均库存金额/日均消耗金额	季度	≤90 天

4.2 一线人员技能重塑

矿山设备的数字化运维需要维修工、点检员具备新能力。培训分为三线:第一线为数据判读,能识别趋势图中的正常波动、劣化爬升、突发冲击,能识别轴承、齿轮、通风机喘振、提升系统不平衡等典型频谱特征;第二线为仪器操作,熟悉矿用便携式测振仪、热像仪、超声检漏仪、气体检测仪的使用,可以调取案例;第三线为基础 PLC 和驱动诊断,能查看提升信号、排水自动控制等梯形图状态和报警代码,独立排查传感器、执行器硬线故障。培训方式是微课自学加实操闯关,内训师与厂家工程师联合考核,技能矩阵上墙(表6)。推行机电一体化通岗,具有机械、电气和基本安全检测能力的人员发给多能工津贴。1#金矿技能重塑之后,维修工自主处理率从42%提高到74%,外协费用降低58%。

表 6 机电运维人员三级技能矩阵

技能层级	数据判读能力	仪器实操能力	PLC/驱动诊断能力	津贴标准
初级	能识别趋势图正常波动与异常抬升	能操作测振仪、热像仪完成日常点检	能读取 PLC 状态指示灯、识别报警代码	基础工资×1.0
中级	能区分轴承/齿轮/风机喘振频谱特征	能使用超声检漏仪、气体检测仪完成精密点检	能查看梯形图状态、排查传感器硬线故障	基础工资×1.2
中级	同上（覆盖初级全部能力）	同上	同上	同上
高级	能综合多源数据判定故障根因与剩余寿命	能培训指导他人操作全部检测仪器	能独立修改 PLC 参数、优化控制逻辑	基础工资×1.4

表 7 老旧设备低成本数字化改造方案对比

设备类型	改造硬件	单台成本/元	监测点位	预期收益
普通空压机	本安型三轴振动+温度采集器	5200	轴承振动、排气温度、电机电流	避免非计划停机，年节电 5%~8%
老式通风机	振动+转速+电流集成采集终端	5800	轴承振动、叶轮转速、电机负载	预警叶片磨损，年节电 10%~18%
旧式排水泵	振动+温度+流量一体采集器	4 500	轴承振动、泵体温升、出口流量	预警汽蚀，吨水百米电耗降 10%~12%
淘汰提升机（串口）	串口转以太网模块+OPC UA 网关	3200	电控状态、闸瓦间隙、钢丝绳张力	实现提升系统状态在线监控

4.3 老旧设备数字化改造与系统对接

存量老旧矿山机电设备属于数据采集的难点。对无数数据接口的普通空压机、老式通风机、旧式破碎机等采用矿用本安型外接智能采集器，集成三轴振动、温度、转速、电流，内置边缘计算芯片，通过井下工业环网或者 4G/5G 上传。单台改造费用控制在 6000 元以内，主要对影响通风、排水、提升的老旧设备进行改造。各类设备改造方案及效益对比如表 7 所示。对于只有串口的控制器，加装串口转以太网模块，使用 OPC UA 协议开放数据，只采集状态量，严禁写入控制参数。系统对接方面运维管理系统使用中间件同矿山生产调度系统、ERP 系统、安全监控系统进行通信^[7]。统一编码体系，备件出库对应具体的工单，建立故障代码和备件物料号的对应关系，堵住物料管理的漏洞。

4.4 基于状态评估的设备更新与能效安全提升

根据运维数据的积累以及劣化趋势开展机电设备周期性状态评估工作，给出更新技改的建议，达到节能降耗、安全升级的目的。技改建议按三维度评分排序：投资回收期（权重 30%）、能耗降幅（权重 30%）、安全风险降低幅度（权重 40%），综合得分≥80 分列入年度计划。

经过长时间的监测识别出效率下降、能耗高的设备，并提出相应的改进措施。1#试验矿井主通风机经由振动及电流趋势分析得知叶片出现磨损状况以及电机低效时段，进而对风机实施更新，并增设了变频调速装置，使得其年节电率达到 18%，并且工作面有害气体积聚的危险被完全消除。2#试验矿井多级排水泵经由流量与电流的相关性诊断，判定出汽蚀以及阀门内漏，给出更换高效耐汽蚀叶

轮并创建智能排水控制系统的建议，吨水百米电耗削减 12%，达成自动启停、避峰填谷的目的，明显削减涌水时排水能力不足隐患。

提升机系统按照钢丝绳无损检测、闸瓦磨损趋势、电控状态来制订安全改造计划，加装钢丝绳在线监测和尾绳保护、升级恒减速闸控之后，安全制动响应时间缩短了 40%，杜绝了过卷、断绳的风险。气压系统根据单机能耗、管网压损数据进行空压机群控和管网堵漏，系统比功率降低 8%。所有的更新建议按照投资回收期以及安全风险的量化进行排序，分期列入年度技改计划当中。改造之后系统会自动比较能耗和故障率的变化情况，形成效益报告，不断改进更新策略，从而让设备的运维工作变成安全与成本的双重防线。

5 结论与展望

5.1 结论

（1）搭建了井下防爆多源边缘数据采集与双模型劣化预警体系，采用滑动标准差阈值与自编码器重构偏差双重预警，故障预警准确率达 91%，提前 7~20 天识别部件损耗。

（2）建立了设备分级维修与刚性时限隐患闭环管理模式，基于安全风险矩阵将设备分为 A/B/C 三类实施差异化维修策略，点检异常闭环率由不足 40%提升至 86%，非计划停机减少 47%。

（3）构建了备件预测与集团共享库存机制，采用二次指数平滑和 Croston 算法分类预测备件需求，备件库存资金降低 24%，紧急采购减半，调拨满足率 93%。

（4）依托设备状态评估开展节能安全技改，主通风

机年节电 18%，排水系统吨水百米电耗降 12%，提升机安全制动响应时间缩短 40%，重大安全风险清零。

5.2 研究不足与未来展望

本研究仍存在以下局限：①井下巷道复杂电磁干扰、粉尘潮湿环境会造成传感器短时数据漂移，模型未针对环境噪声做专项优化；②罕见重大故障样本数量少，自编码器对极端故障预警精度仍有提升空间；③当前仅实现设备独立调控，未深度联动采掘生产工艺参数协同优化。

后续研究方向包括：①引入数字孪生技术，搭建矿山机电设备虚实映射平台，实现可视化仿真运维与虚拟调试；②融合采掘产量、通风需风量、排水负荷等工艺数据，构建设备自适应协同调控模型；③引入小样本学习算法，提升罕见故障识别能力，进一步降低误报、漏报率。

[参考文献]

[1]赵春来.机电设备状态数据采集与智能化运维管理研究

[J].中国战略新兴产业,2026(15):79-81.

[2]彭龙生.电气设备故障诊断与预测维护技术优化策略[J].金属矿山,2025(8):112-118.

[3]闫鹏飞,桂文标,郑天昆,等.基于多源大数据的机电设备智能运维平台设计[J].工矿自动化,2026,26(4):183-185.

[4]朱光波.机电设备远程运维的人工智能信息化解决方案[J].信息与电脑,2025,37(24):202-204.

[5]马桂云.智能矿山建设环境下煤矿机电管理技术研究[J].工矿自动化,2021,47(2):103-104.

[6]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.

[7]韩世杰,孙春耕,陈胜友.有限元与 PLC 协同的电解行车数字孪生系统构建[J].机电工程,2026,43(4):783-793.

作者简介：宋泓奇（1994—），男，机电一体化专业，现从事井下机电设备与安全管理工，机电中级工程师申报阶段。