

矿山设备全生命周期管理的智能化与数字化技术研究

郭亮亮

山西省信息产业技术研究院有限公司, 山西 太原

收稿日期: 2025年7月26日; 录用日期: 2025年8月29日; 发布日期: 2025年9月9日

摘要

针对矿山设备管理中全生命周期数据割裂、维护效率低等问题, 结合物联网、大数据及人工智能技术, 分析当前矿山设备全生命周期管理的技术现状与挑战。通过多源数据融合采集、信息集成平台搭建和环境自适应维护策略, 构建基于数字化平台的设备全生命周期管理系统, 并结合典型矿山应用案例, 验证该平台智能化与数字化技术的深度应用在提升矿山设备管理的精细化水平、机电系统安全高效运行等方面的有效性, 为智慧矿山建设提供技术路径参考。

关键词

矿山设备, 全生命周期管理, 智能化, 数字化, 维护策略

Research on Intelligent and Digital Technologies for the Whole Life Cycle Management of Mining Equipment

Liangliang Guo

Shanxi Information Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Taiyuan Shanxi

Received: Jul. 26th, 2025; accepted: Aug. 29th, 2025; published: Sep. 9th, 2025

Abstract

Aiming at the problems such as data splitting in the whole life cycle of mine equipment management and low maintenance efficiency, combined with the Internet of Things, big data and artificial intelligence technology, the technical status and challenges of the current mine equipment, whole life cycle management are analyzed. Through the strategy of multi-source data fusion acquisition,

information integration platform establishment and environment adaptive maintenance, the whole life cycle management system of equipment based on digital platform is established. Combined with typical mine application cases, the effectiveness of the in-depth application of intelligent and digital technologies of the platform in improving the fine level of mine equipment management, safe and efficient operation of mechanical and electrical systems, etc. is verified, providing technical path reference for the construction of intelligent mines.

Keywords

Mine Equipment, Whole Life Cycle Management, Intelligence, Digital, Maintenance Strategy

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着科技的飞速发展，智慧矿山解决方案融合了物联网、大数据、人工智能、BIM 等先进技术，为矿山管理带来了全新的思路。国家发改委联合能源局等七部委发布的《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》以及各省份相继出台的配套政策，为行业智能化转型奠定了坚实的基础。据《2024 煤炭行业发展年度报告》数据显示，全国煤矿数量近 4300 座，按产能等级测算的智能化改造市场规模超万亿元，发展前景十分广阔。然而，现阶段煤矿安全生产核心子系统(采、掘、机、运、通、安)仍存在数据孤岛现象，缺乏统一集成管理系统，导致生产全流程协同效率不足。在此背景下，开展矿山设备全生命周期智能化与数字化管理研究具有显著的现实必要性。

矿山设备全生命周期管理作为涵盖设备台账、设备采购管理、设备出入库管理、设备点巡检、设备运行监控、设备维管理、设备检维修、设备备品备件管理、设备报废管理、设备检验管理及设备文档管理等的全流程管理体系，是保障矿山安全生产效能与经济效益的核心环节。随着智能化矿山建设的不断推进，传统的依赖于人工经验的设备管理模式已经难以满足当前复杂工况下高效运维的实际需求。马永亮等学者表明，采矿设备运行数据采集的实时性与完整性，是构建全生命周期管理体系的基础支撑[1]；而于嘉成等通过设备全生命周期信息集成与工况判别算法研究，验证了数据驱动型状态监测技术的工程可行性[2]。如何借助自动化与数字化技术构建全流程闭环管理体系，已成为矿山机电领域的关键研究方向。

2. 矿山设备全生命周期管理的技术现状

2.1. 数据采集与监测技术

早期关于矿山设备管理的研究，主要聚焦于设备运行基础数据的采集方面。例如，马永亮等人设计的设备数据采集系统，通过分布式部署振动与温度传感器，构建传感器网络，实现了采矿设备运行参数的实时采集。然而，该系统多源数据融合技术滞后，未能突破“数据烟囱”的技术瓶颈，导致设备健康状态的多维表征能力不足。

随着物联网技术的纵深发展，贾盼盼等提出的智能化管理系统[3]，进一步集成了视频监控、地理信息(GIS)等多模态数据，打造了“设备-环境-人员”协同监测体系。这一体系极大地丰富了数据来源，为设备全生命周期管理提供了更为全面、准确的数据源，有助于更精准地把握设备在复杂矿山环境中的

运行状况。

2.2. 信息集成与智能分析

在矿山设备管理中，数据孤岛现象严重制约了管理效能的提升。于嘉成等人提出的分层式信息集成模型[2]，通过松耦合架构实现了设备全生命周期数据的跨平台汇聚。该模型采用模糊神经网络算法进行工况判别，在某矿压监测系统验证中，准确率高达 92.3%。但在应对 ERP、MES 等异构系统的数据交互时，仍需依赖人工定义映射规则，智能化水平有待提升。

袁智等人引入的数字化孪生技术[4]，则为信息集成提供了全新的解决方案。该技术通过构建数字孪生模型，实现了设备运行状态的动态推演与效能优化。某煤矿应用案例显示，基于孪生模型的负载均衡算法使设备故障率降低了 18%，能耗优化 15%。这种“数据驱动模型、模型反哺决策”的闭环机制，标志着信息集成技术从简单互联迈向深度赋能的新阶段。Li 等[5]提出的多传感器融合 XGBoost 模型，侧重输送带跑偏故障的预测，其核心思路与本文信息集成方向一致，但本文进一步扩展了环境特征与历史维护特征，提升了模型对多故障类型的适配性。

2.3. 维护策略与环境适应性

露天矿山的恶劣环境，如高温、高粉尘以及复杂多变的地质条件，给设备维护带来了诸多挑战。唐义文针对非洲露天矿山的实证研究表明，缺乏环境适应性设计的设备，其故障率相比国内高出 25% [6]。因此，需要从提升设备材料的防腐性能、加固设备结构以及完善智能预警系统等多个维度优化。

国内煤矿则通过“预测性维护 + 主动式保养”的技术链条创新。例如，某矿区采用振动频谱分析与油液铁谱技术[3]，构建了设备健康度评价模型，将非计划停机时间减少了 30%；建立环境感知联动机制，通过部署气象传感器网络，自动触发设备防护模式，这种自适应策略使传动系统故障率下降了 41% [6]。此类实践表明，维护策略的智能化升级，需将环境载荷数据纳入全生命周期管理范畴，实现“设备状态 - 环境参数 - 维护行为”的动态耦合。Zhang 等[7]利用数字孪生优化矿山提升设备能耗，但未考虑环境载荷动态影响，本文的环境感知机制可有效弥补这一不足。

3. 全生命周期管理的智能化与数字化技术架构

设备全生命周期管理系统依托数据采集、数据治理及统一服务等基础支撑平台，构建全生命周期智能化管理体系。该系统架构如图 1 所示：



Figure 1. System architecture diagram

图 1. 系统架构图

3.1. 感知层：多源数据精准采集

感知层是实现矿山设备全生命周期管理智能化与数字化的基础。通过构建“传感器 + 边缘计算”一体化的采集网络，实时采集矿山凿岩设备、铲运设备、运输设备、辅运设备、通风设备、压风设备、排水设备、供电设备等设备的运行数据(如振动、温度、电流等)、环境参数(如气体浓度、粉尘含量)等数据。

同时，利用边缘计算节点对采集到的数据进行预处理(提取时域均值/方差、频域频谱峰值)与压缩。这样既可以有效减少数据传输过程中的延迟，又能降低云端的负载压力，确保数据能够及时、准确地传输到上层系统进行分析处理。在井下复杂的巷道环境中，引入 LoRa 无线传输技术，有效解决信号覆盖难题，保障数据采集的全面性和稳定性。

3.2. 平台层：全生命周期数据中枢

基于大数据平台构建设备数字孪生体，是实现设备全生命周期智能化管理的核心环节。该数字孪生体能够集成设备台账、运行日志、维护记录等设备全生命周期的各类数据，实现设备状态可知、过程可控。

采用时序数据库 TDengine 存储实时监测数据，高效处理海量的时间序列数据，满足设备运行数据快速存储和查询的需求。通过 ETL 工具实现与 ERP、MES 等系统的数据互通，打破数据壁垒，实现数据的共享与协同。

在该层，还借鉴袁智等人的数字化管理模型[4]，开发设备健康度评估模块，其核心采用 XGBoost 算法构建故障预测模型，具体实现如下：

1) 输入特征工程

将采集数据划分为三类核心特征(共 17 维)。前 12 维是设备运行特征，分别是振动峰值、震动有效值、轴承温度、电机电流的均值、方差与频谱峰值；第 13~15 维是环境关联特征，分别是井下湿度、粉尘浓度、瓦斯浓度，经插值匹配至 1 Hz 时序；最后 2 维是历史维护特征：近 30 天维护次数和上次维护时长(编码为 0-1 离散特征)；所有特征通过 Z-score 标准化消除量纲影响。

2) 标签定义

采用二分类标签，标签 1 表示“故障状态”(设备未来 72 小时内发生需停机维修的故障，如轴承卡死)，标签 0 表示“正常状态”(运行参数在安全阈值内)，标签由历史故障记录与维修工单回溯标注。

3) 样本划分

选取某煤矿 2023 年 1~12 月 8 台刮板输送机时序数据(总样本 10,800 条，故障样本 820 条，正样本比例 7.6%)，按时间序列划分为：训练集(2023.1~9 月，70%)：采用 SMOTE 算法[8]处理类别不平衡，使正负样本比 1:1；验证集(2023.10~11 月，20%)：用于超参数调优；测试集(2023.12 月，10%)：用于最终性能评估。

4) 超参数调优

基于贝叶斯优化算法优化核心参数，其中，学习率设置为 0.05，树深度设置为 6，迭代次数设置为 200，正则化系数 $L1 = 0.1$ 、 $L2 = 0.2$ 。

5) 性能评估

在测试集上采用精确率、召回率、F1 分数和 AUC 值对设备健康度进行评估，结果为：精确率 89.2%、召回率 91.5%、F1 分数 90.3%、AUC 值 0.94(如图 2)。

该模型能够提前 72 小时对潜在故障发出预警，为设备维护人员争取充足的时间进行预防性维护，降低设备突发故障带来的损失。

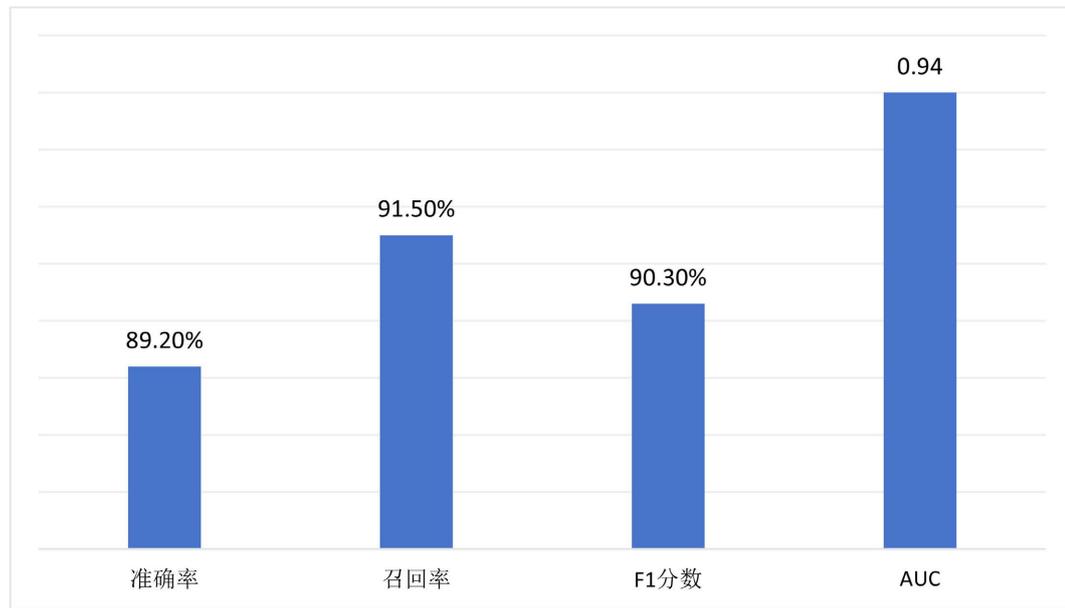


Figure 2. Performance evaluation results
图 2. 性能评估结果

3.3. 应用层：智能运维与决策支持

3.3.1. 智能维护系统

借鉴贾盼盼等人提出的智能化管理系统理念，开发具备“故障诊断-维护计划-备件管理”功能的闭环模块。当设备出现故障或异常时，系统能够接收 XGBoost 模型预警信号，并结合数字孪生体定位故障部位。然后，根据故障诊断结果自动生成维护工单，并通过工单系统将维护任务精准派发给相应的维修人员(如图 3)。同时，系统关联备件库存数据，实时掌握备件的库存数量和状态。在制定维护计划时，能够根据备件库存情况合理安排维修工作，避免因备件短缺导致维修延误，实现维护成本的动态管控。



Figure 3. Overview of the equipment
图 3. 设备总览

3.3.2. 效能优化分析

基于设备数字孪生模型，采用遗传算法对设备启停时序与负载分配进行优化，核心数学模型如下：以单条运输线路日能耗最小化为目标，约束生产任务完成率 $\geq 98\%$ ：

$$\begin{aligned} \min f(x) &= \sum_{i \in T} [P_i(t) \times x_i(t) \times \Delta t] \\ \text{s.t.} \sum_{i \in T} [Q_i(t) \times x_i(t) \times \Delta t] &\geq Q_{req} \times 0.98 \end{aligned}$$

其中： $x_i(t)$ 表示设备在 i 时刻 t 的运行状态(0: 停机, 1: 运行, 2: 满负载运行)； $P_i(t)$ 表示设备 i 在状态 $x_i(t)$ 下的实时功率(kW)； Δt 表示时间步长，此算法中 $\Delta t = 15 \text{ min}$ ； T 表示单日时间集合($T = 96$ ，即 24 h/0.25 h)； $Q_i(t)$ 表示设备 i 在状态 $x_i(t)$ 下的运输量($t/15 \text{ min}$)； Q_{req} 表示单日运输任务量(t)。

在该算法中，种群个数设置为 50，交叉概率设置为 0.7，变异因子设置为 0.05，最大迭代次数设置为 100。某运输线路测试显示，优化后日能耗降低 16.8%，生产任务完成率 99.2%，优于 Wang 等[9]提出的混合遗传算法。

合理安排设备的启停时间，避免了设备频繁启动造成的能源浪费和设备损耗；优化设备的负载分配，使设备在运行过程中能够保持最佳的工作状态，从而实现能耗降低 15% 以上的目标，提高矿山生产的经济效益。

4. 典型应用案例与成效

2024 年 1 月~6 月，将设备全生命周期管理系统用于某百万吨级煤矿的 50 台关键设备和 30 台井下电气设备，并与 2023 年 1 月~6 月同期数据进行比较，成效如下：

在数据采集效率方面，通过部署无线传感器网络，实现了对 90% 以上关键设备的覆盖。传输延迟由 5.2 秒降至 1.8 秒，数据完整性提升至 98%。这使得设备运行数据能够及时、准确地被采集和传输，为后续的设备管理和分析提供了坚实的数据基础。在故障管理能力方面，基于 XGBoost 算法的智能预警模型使 2024 年同期非计划停机次数由 2023 年的 88 次降至 46 次，降幅 47.7%；单台设备月均维护成本由 1.2 万元降至 0.936 万元，降幅 22.1%。智能预警模型能够提前发现设备潜在的故障隐患，使维护人员能够及时采取措施进行预防性维护，避免设备突发故障导致的生产中断，有效降低了维护成本和生产损失。在环境适应性方面，针对井下潮湿的环境特点，对设备的密封结构进行了优化，并部署了智能除湿系统。经过优化后，电气设备的故障率由 12.8% 降至 8.3%，下降了 35.1%。这不仅提高了设备在井下潮湿环境中的可靠性和稳定性，还保障了煤矿生产的连续性和安全性。

5. 讨论

5.1. 研究局限性

本研究仅在 1 座百万吨级井工煤矿进行了验证，未覆盖露天煤矿、中小型煤矿(原煤年生产能力 < 120 万吨)。露天矿高温粉尘环境和中小型矿老旧设备占比高的特点，可能导致系统适配性下降。

XGBoost 模型未考虑瓦斯突涌等极端干扰，此类事件会导致数据分布偏移，预警 AUC 值可能降至 0.85 以下。

5.2. 改进方向

引入迁移学习解决数据分布偏移问题，使 XGBoost 模型 AUC 值保持在 0.9 以上；收集露天矿和中小型煤矿相关数据，针对高温粉尘环境和老旧设备高占比等因素，持续优化该系统，提升普适性。

6. 结论与展望

矿山设备全生命周期管理的智能化与数字化,是推动煤矿机电系统向高效、安全、智能方向升级的必然趋势。通过整合数据采集、数字孪生、智能算法等先进技术,实现了设备管理模式从传统的“被动维护”向现代化的“主动优化”的重大转变。这种转变不仅提高了设备的可靠性和可用性,降低了设备故障率和维护成本,还提升了矿山生产的整体效率和经济效益。

矿山设备全生命周期管理领域的研究,需要进一步突破多源数据融合算法、极端环境下设备可靠性设计等关键技术瓶颈。随着5G、数字孪生等新兴技术的不断发展,应加强这些技术与矿山机电技术的深度融合。例如,利用5G网络的高速率、低延迟特性,实现设备数据的实时高速传输,为实时控制和远程操作提供有力支持;通过数字孪生技术,构建更加精准、逼真的设备虚拟模型,实现对设备运行状态的全方位、实时监测和预测。在技术创新和行业需求的双重驱动下,矿山设备全生命周期管理将不断完善和发展,为智慧矿山建设提供更为强大的技术支撑,助力矿山行业实现可持续发展。

参考文献

- [1] 马永亮, 王贵根, 付艳龙, 等. 关于采矿设备数据采集系统的研究[J]. 铜业工程, 2019(4): 17-22+108.
- [2] 于嘉成, 王刚, 刘卫东, 等. 矿山设备全生命周期信息集成与工况判别算法研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(4): 38-43.
- [3] 贾盼盼, 花洋, 曾艳阳. 煤矿设备智能化管理系统研究[J]. 大众科技, 2024, 26(1): 19-23+38.
- [4] 袁智, 迟焕磊, 宋振铎, 等. 煤机设备全生命周期数字化管理与效能优化[J]. 内蒙古煤炭经济, 2025(8): 112-114.
- [5] Li, Y., Wang, H. and Chen, J. (2024) Predictive Maintenance of Mine Conveyors Based on Multi-Sensor Fusion and XGBoost. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **20**, 3215-3224.
- [6] 唐义文. 非洲露天矿山设备维护的关键挑战与优化策略——基于环境适应性与全生命周期管理的视角[J]. 中国金属通报, 2025(S2): 98-100.
- [7] Zhang, L., Liu, C. and Zhao, W. (2023) Digital Twin-Driven Energy Optimization for Mine Hoisting Equipment. *Journal of Cleaner Production*, **380**, Article ID: 135120.
- [8] Fernández, A., García, S., Herrera, F., *et al.* (2018) SMOTE for Learning from Imbalanced Data: Progress and Challenges, Marking the 15-Year Anniversary. *Journal of Artificial Intelligence Research*, **61**, 863-905. <https://doi.org/10.1613/jair.1.11192>
- [9] Wang, Z., Li, J. and Sun, Y. (2025) A Hybrid Genetic Algorithm for Scheduling of Mine Loading Equipment. *Applied Soft Computing*, **142**, Article ID: 111456.