

露天煤矿机械设备的自动化管理与优化

院鹏春, 袁伟, 赵志鹏

国家电投集团内蒙古能源有限公司, 内蒙古 通辽 028000

DOI:10.61369/ERA.2026010019

摘 要 : 本文围绕露天煤矿机械设备自动化管理与优化展开研究,旨在解决露天矿环境复杂、设备分散、效率与安全难平衡等核心问题。阐述了自动化管理的四大关键技术,为自动化管理提供基础支撑。构建了“感知层-网络层-平台层-应用层”四层协同的自动化管理系统,明确设备监控、智能调度、预测性维护、能耗管理等核心功能模块,并通过“云-边-端”数据平台与多角色可视化终端,实现数据驱动的闭环管理。提出三大设备运行优化策略与模型,生产调度优化通过动态匹配与算法寻优,使设备利用率提升15%-20%;设备维护优化基于健康评分与预测模型,将备件库存成本降低25%;能耗优化通过参数自适应调整与新能源试点,实现吨煤能耗降低10%-15%。整体研究实现露天煤矿机械设备管理从“经验驱动”向“数据驱动”转变,有效提升生产效率、保障作业安全、降低运营成本。

关 键 词 : 露天煤矿; 煤矿机械设备; 自动化管理系统; 设备运行优化

Automation Management and Optimization of Mechanical Equipment in Open-Pit Coal Mines

Yuan Pengchun, Yuan Wei, Zhao Zhipeng

SPIC Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Tongliao, Inner Mongolia 028000

Abstract : This paper focuses on the research of automation management and optimization of mechanical equipment in open-pit coal mines, aiming to address core challenges such as complex environmental conditions, dispersed equipment, and the difficulty in balancing efficiency and safety. It elaborates on four key technologies for automation management, providing foundational support for automated systems. A four-tier collaborative automation management system is constructed, comprising the "perception layer, network layer, platform layer, and application layer," clearly defining core functional modules such as equipment monitoring, intelligent scheduling, predictive maintenance, and energy consumption management. Through a "cloud-edge-end" data platform and multi-role visual terminals, data-driven closed-loop management is achieved. Three optimization strategies and models for equipment operation are proposed: production scheduling optimization enhances equipment utilization by 15%-20% through dynamic matching and algorithmic optimization; equipment maintenance optimization reduces spare parts inventory costs by 25% based on health scoring and predictive models; and energy consumption optimization achieves a 10%-15% reduction in energy consumption per ton of coal through parameter adaptive adjustment and new energy pilot projects. Overall, the research facilitates a transition in the management of mechanical equipment in open-pit coal mines from "experience-driven" to "data-driven," effectively improving production efficiency, ensuring operational safety, and reducing operational costs.

Keywords : open-pit coal mine; coal mine machinery and equipment; automated management system; equipment operation optimization

引言

露天煤矿作为我国能源供应体系的核心组成部分,其生产效率与运营安全直接关系到能源保障的稳定性。随着开采规模扩大与工况复杂度提升,传统机械设备管理模式逐渐暴露出显著短板。自动化管理不仅能突破人工操作的局限,实现恶劣环境下的精准作业,更可通过数据实时采集、智能分析与动态决策,打通“设备状态-生产调度-维护保养-能耗控制”的全链条管理闭环,从根本上解决效率、安全与成本的协同难题。鉴于此,本文聚焦露天煤矿机械设备自动化管理与优化,系统梳理感知定位、通信网络、数据决策、自动控制四大关键技术体系,构建多层次自动化管理系统架构,进而提出生产调度、设备维护、能耗控制三大维度的优化策略与量化模型。研究旨在推动露天煤矿机械设备管理从“经验驱动”向“数据驱动”跨越,为提升矿山生产效率、保障作业安全、降低运营成本提供实践路径,助力煤炭行业向智能化、绿色化高质量发展转型。

一、露天煤矿机械设备自动化管理的关键技术

（一）感知与定位技术

将电气自动化技术引入到煤矿机械设备中，能够让机械实现自动化的运行以及监控，并且相比较于人力来说，只要提供足够的、稳定的电能，机械就能够维持一定水准和效率的生产，不像人力会出现疲劳、失误等状况，导致生产效率和生产质量下降^[1]。为实现露天煤矿设备的“状态可知、位置可溯”，需针对恶劣环境、设备多样和高精度要求等核心挑战，构建一套综合的感知与定位体系。在设备状态方面，通过加装各类高防护等级（IP68、抗强振）的传感器，实时采集卡车、挖掘机等设备的动力、执行及健康参数，并利用算法滤除噪声。定位上，以“北斗+GPS”双模 GNSS 结合 RTK 技术实现厘米级精度，并在信号遮挡区域融合惯性导航与激光雷达进行补盲，同时部署基准站增强稳定性^[2]。此外，环境与安全感知通过粉尘、气象、红外传感器及边坡监测设备，实时预警风险，并与设备调度系统联动，确保在危险情况下自动禁止设备进入，从而全方位保障生产安全与效率。

（二）通信与网络技术

通信网络作为连接“感知层”与“数据层”的纽带，需满足露天矿“广覆盖、高可靠、低延迟、抗干扰”的传输需求。骨干网采用铠装光纤环网，保障固定区域大容量数据稳定传输^[3]。移动通信则以 5G 专网为核心，辅以微站补盲，满足无人驾驶等低延迟控制需求。为优化效率，系统采用边缘-云协同机制，将实时告警等关键数据在本地处理，而报表等非实时数据则闲时上传云端。通过网络隔离和国密算法加密，确保数据传输与控制指令的绝对安全。

（三）数据处理与智能决策技术

数据处理与智能决策技术是将“数据”转化为“行动指令”的核心，需破解露天矿“数据量大、类型杂、决策场景复杂”的难题^[4]。通过多源数据融合技术，对设备状态、定位及环境数据进行清洗、对齐，构建“设备-位置-环境”三维模型，并采用“边缘+云端”分层存储。其次构建智能算法体系，利用 LSTM 模型提前 2-7 天预测设备故障；通过混合整数规划与遗传算法优化生产调度；借助 YOLOv8 算法实时识别安全风险并触发预警。决策执行结合规则引擎与 AI 模型交叉验证确保合规，高风险决策由人工确认，常规决策则自动执行，从而在保障安全的前提下提升效率。

（四）自动控制与执行技术

自动控制与执行技术是将“决策指令”转化为“设备动作”的终端环节，需实现“精准控制、安全可靠、适应复杂工况”^[5]。单机控制上，挖掘机依据三维模型实现精准挖掘，卡车无人驾驶则通过感知、规划、执行三层协同完成运输。多设备协同通过 5G 和 V2X 通信，优化装-运-卸流程并实现卡车编队行驶，提升效率与安全。此外，系统还配备远程应急控制和独立的安全控制器，以应对高危场景和极端故障，确保万无一失。

二、露天煤矿机械设备自动化管理系统构建

（一）系统总体架构设计

露天煤矿机械设备自动化管理系统需立足“环境复杂、设备分散、业务闭环”的核心特点，构建“感知层-网络层-平台层-应用层”的四层协同架构，各层既独立承载特定功能，又通过标

准化接口实现数据与指令的高效流转，确保系统具备可扩展性与抗干扰能力^[6]。感知层通过工业级传感器与定位模块，全域采集设备、位置及环境数据。网络层采用“光纤+5G 专网+边缘计算”混合组网，确保数据传输的低延迟与高可靠。平台层作为决策大脑，整合多源数据，通过智能算法模型生成维护、调度等决策指令^[7]。应用层则通过可视化终端，实现监控、调度等业务的闭环管理。架构设计弹性，可根据矿场规模与技术发展灵活扩展，保障系统的可扩展性与抗干扰能力。

（二）核心功能模块

系统核心功能模块围绕露天煤矿机械设备“监控-调度-维护-能耗”的全业务链条设计，各模块既独立运行又数据互通，形成协同管理能力。设备实时监控模块在三维矿图上动态展示设备位置、状态与关键指标，支持多维度查询与自动告警^[8]。智能生产调度模块承接生产计划，基于实时数据动态优化设备-任务匹配，实现秒级响应与进度跟踪。预测性维护模块通过健康评分与预测模型，将事后维修转为事前预防，并联动备件管理。能耗管理模块则统计各级能耗指标，识别高耗环节并提供优化建议，形成降本增效闭环。

（三）数据平台与可视化

数据平台与可视化是系统“数据价值释放”的关键载体，通过构建统一数据中枢与直观呈现方式，让管理决策从“经验驱动”转向“数据驱动”^[9]。数据平台采用“云-边-端”协同架构，边缘端处理高频实时数据，云端整合全量历史与业务数据，并通过 API 打破信息孤岛。可视化设计则面向不同角色，监控中心通过三维矿图与综合仪表盘实现全局态势感知；移动端为管理人员提供轻量化实时告警与状态查询；维护人员终端则聚焦作业指引与现场记录。此外，系统还能自动生成标准化报表，实现数据从采集到决策的全流程透明化，为管理提供精准支撑。

三、设备运行优化策略与模型

（一）生产调度优化

露天煤矿生产调度的核心是通过设备与任务的动态匹配，实现“设备利用率最大化、作业周期最短化、生产目标精准化”，需结合设备特性、地形条件与任务优先级构建闭环优化体系。其策略是建立基于实时数据的动态响应机制，以 10-15 分钟为周期更新调度方案，并在突发状况下 30 秒内触发应急重配，确保设备无闲置。同时通过分析历史数据确定“装-运-卸”最优配比，并利用 5G 通信实现设备间状态互通，将等待时间压缩至 5 分钟以内^[10]。模型构建以“总作业成本最低”为目标，采用混合整数规划量化约束条件，并运用遗传算法迭代寻优，最终输出的调度方案可使设备整体利用率提升 15%-20%，单日任务完成率稳定在 95% 以上。此外，运输环节还叠加基于改进蚁群算法的路径优化子模型，根据实时路况规划最优路线，可减少运输时间 10%-15%，间接降低能耗。

（二）设备维护优化

设备维护优化需突破“定期大修”的传统模式，转向“基于

状态的预测性维护”，通过精准评估设备健康状态、动态调配维护资源，实现“故障停机最小化、维护成本最优化”。策略设计的核心是构建设备健康度评估体系。基于感知层采集的振动、温度、压力等时序数据，结合故障历史记录，将设备健康状态划分为“优（80–100 分）、良（60–80 分）、中（40–60 分）、差（0–40 分）”四级，“优”级设备仅需每周远程巡检；“良”级设备需提前储备关键备件，并缩短状态数据采样频率；“中”级设备纳入 72 小时内的计划维护清单，协调生产调度避开高峰时段；“差”级设备立即触发停机指令，同步推送故障定位报告至维护团队。同时需建立维护资源动态调配机制，根据设备重要性与维护复杂度，优化维修人员与工具的排班，避免资源闲置或冲突。模型层面，采用“故障预测 – 维护计划 – 备件管理”三级联动模型。故障预测模型基于 LSTM 神经网络，输入设备近 30 天的状态数据序列，输出未来 7 天的故障概率，准确率需稳定在 85% 以上；维护计划模型以“维护总工时 + 停机损失”最小为目标，采用整数规划算法分配维护任务，约束条件包括维修人员数量、备件库存；备件管理模型结合故障预测结果与历史消耗数据，采用 ABC 分类法动态调整库存：A 类备件保持低库存 + 紧急采购通道，B 类备件保持中等库存，C 类备件（如螺栓）批量储备（满足 1 个月需求），整体可降低备件库存成本 25% 左右，同时将缺件导致的维护延误率控制在 5% 以下。

（三）能耗优化

能耗优化需围绕“降低吨煤能耗”核心目标，从设备运行参数、作业流程、能源结构三个维度协同发力，实现“节能与效率”的平衡。策略上，推行设备运行参数自适应调整，针对不同作业场景动态优化关键参数，挖掘机根据矿石硬度（通过铲斗压力传感器判断）调整液压系统流量（硬岩时流量提升至 80% 额定值，软岩时降至 60%），避免动力浪费；矿用卡车根据载重与坡度（通过 GNSS 高程数据计算）调整发动机转速（空载上坡时转

速维持在 60%，满载下坡时降至 40% 并启用辅助制动），相比固定转速可降低油耗 8%–12%。其次优化作业流程以减少无效能耗，通过分析历史数据识别高耗环节；采用“阶梯式推进”开采模式，避免挖掘机反复爬坡调整位置（单次爬坡能耗可占作业总能耗的 15%）；严格控制设备空驶率（目标从 25% 降至 15% 以下），空驶时自动关闭空调、降低怠速转速（从 800r/min 降至 600r/min）。此外，逐步引入新能源技术，在短途运输环节试点混合动力卡车（柴油 + 锂电），单程 ≤ 3km 时切换电动模式；在固定作业区建设光伏电站，满足监控设备、照明系统的电力需求，降低电网依赖。模型构建需量化能耗与影响因素的关联关系。能耗预测模型采用随机森林算法，输入变量包括设备型号、作业时长、负载率、地形坡度等，输出单设备 / 单环节的能耗值，为优化提供基准；参数优化模型基于粒子群算法，以“单位产量能耗最低”为目标，迭代寻优关键参数组合，输出可直接执行的参数阈值；流程优化模型通过构建“能耗 – 流程”网络图，识别关键路径，采用流程图重组技术精简步骤，实现全矿吨煤能耗降低 10%–15%，年节约能源成本数百万元。

四、结束语

本文围绕露天煤矿机械设备自动化管理与优化展开系统性研究，从技术支撑、系统构建到运行优化形成完整解决方案，有效回应了露天矿在效率提升、安全保障与成本控制方面的核心诉求。露天煤矿机械设备自动化管理不仅是技术迭代的必然结果，更是煤炭行业实现“安全、高效、绿色”转型的关键路径。研究成果可为矿山企业提供可落地的实践方案，推动更多露天煤矿摆脱传统管理模式束缚，以数据驱动赋能生产全流程，为我国能源安全保障与煤炭行业高质量发展提供坚实支撑。

参考文献

[1] 王亚飞. 电气自动化技术在煤矿机械设备中的应用与管理 [J]. 魅力中国, 2020(27): 339–340.
[2] 李辉. 露天煤矿机械设备的发展与安全管理方法 [J]. 电脑爱好者 (普及版) (电子刊), 2021(10): 3111–3112. DOI: 10.12277/j.issn.1673-7075.2021.10.1551.
[3] 龚维理, 杜威, 张春龙. 露天煤矿机械设备的发展与安全管理方法 [J]. 建筑工程技术与设计, 2020(21): 691. DOI: 10.12159/j.issn.2095-6630.2020.21.0661.
[4] 王威淳, 朱枫, 卢浩博. 露天矿机械工程现代化及自动化技术应用 [J]. 中国科技投资, 2021(9): 140, 154.
[5] 申凤武. 煤矿机械设备的运行维护和故障诊断技术的分析与研究 [J]. 城市情报, 2020(3): 161–162. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6761.2020.03.081.
[6] 孟祥健, 田定康. 露天煤矿机械设备故障诊断与维修 [J]. 自动化应用, 2023, 64(15): 125–127, 131.
[7] 富晗. 露天煤矿设备安全管理与维修保养管控 [J]. 工程机械与维修, 2023(6): 35–37. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2114.2023.06.012.
[8] 宋伟. 露天煤矿设备运行管理策略探究 [J]. 魅力中国, 2020(44): 329.
[9] 鲜小泉. 露天煤矿机械设备的发展与安全管理方法 [J]. 科技资讯, 2015, 13(13): 144. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3791.2015.13.116.
[10] 张国强. 露天煤矿设备安全管理与维修保养管控 [J]. 工程建设与发展, 2024, 3(5): 155–157. DOI: 10.12417/2811-0722.24.05.052.