

智能开采革命——煤矿产业的数字化转型与未来范式

张超

山西焦煤霍州煤电锦程煤业有限公司, 山西临汾, 041000;

摘要: 在“双碳”目标与能源安全战略的双重引领下, 煤炭行业正经历从传统开采范式向智能化生产体系的结构性变革。作为我国能源安全的战略基石, 煤炭在一次能源消费结构中仍占据关键地位(国家统计局 2023 年数据显示, 煤炭消费占比达 56.8%), 但其开发过程中凸显的高安全风险、高强度人力投入、低资源利用效率等问题, 与新时代绿色低碳发展理念存在显著矛盾。《智能矿山建设规范》(GB/T42229-2022)等国家层面政策文件的颁布实施, 标志着智能化转型已成为煤炭行业突破发展瓶颈的核心战略方向。本文将系统梳理智能化煤矿的技术体系, 并分析其的技术应用现状及未来发展趋势。

关键词: 智能化煤矿; 开采技术; 5G; 数字孪生; 安全监测

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 05. 016

1 智能化煤矿开采技术体系构建

1.1 技术架构分层

智能化煤矿开采技术体系以“数据驱动-智能决策-自动执行”为核心理念, 构建四维立体架构。具体而言, 感知层通过多模态传感器阵列, 集成激光雷达、机器视觉、应力传感及气体监测终端, 实现开采环境全要素数字化采集, 构建物理空间数字孪生基础。同时, 传输层则采用 5G 蜂窝网、工业互联网协议栈与光纤环网融合组网方案, 搭建井下万兆级超低时延通信网络, 确保数据传输延迟控制在 10ms 以内, 满足远程控制的实时性需求。此外, 平台层基于云边协同架构, 构建煤矿大数据中枢与数字孪生系统, 运用边缘计算进行数据预处理、分布式存储及特征提取, 通过数字孪生模型实现开采工艺参数优化与设备故障预测性维护。最后, 应用层基于微服务架构开发智能综采、智能掘进、无人运输及安全风险预警等业务系统, 通过数字线程技术贯通全流程数据链, 实现开采作业的自主决策与闭环控制, 形成智能化开采生态体系。

1.2 关键使能技术

1.2.1 5G+工业互联网

针对煤矿井下传统通信网络带宽瓶颈与高时延难题, 5G+工业互联网融合解决方案通过构建专用通信架构实现突破。该技术依托 5G 网络的超高速率、低时延特性与工业互联网协议体系, 搭建井下万兆级通信链路, 为远程设备操控、实时数据回传提供确定性服务质量(QoS)保障。山西某煤矿实践表明, 部署 5G 网络后, 工

作面 4K 视频流传输时延从 500ms 降至 20ms, 远程控制响应效率提升 96%, 有效支撑了无人化开采场景下的设备实时协同控制, 实现井下通信从异步传输向同步交互的技术跨越。

1.2.2 数字孪生

数字孪生技术通过构建煤矿开采系统的数字镜像, 实现物理实体与虚拟模型的实时双向映射。基于多源数据融合(如传感器数据、三维建模数据)构建的数字孪生工作面, 集成设备运行状态仿真、工艺参数推演等功能模块。陕煤集团小保当煤矿应用案例显示, 该系统凭借预测性分析算法, 可提前 72 小时预判设备故障, 结合故障模式与影响分析(FMEA)实现预防性维护, 使设备综合效率(OEE)提升 40%。其动态仿真能力支持开采方案的虚拟验证与优化, 显著降低现场试验成本, 推动生产决策从经验驱动向模型驱动转型。

1.2.3 智能算法

智能算法体系在煤矿开采场景中承担核心决策功能。基于机器学习的随机森林算法通过对地质雷达数据、瓦斯监测数据的特征提取, 实现煤岩硬度、瓦斯涌出量的精准预测, 为截割路径规划与智能支护系统提供决策依据。强化学习算法则通过构建马尔可夫决策过程(MDP)模型, 在刮板输送机运输系统中实现动态调速控制。经实际应用验证, 该智能调控策略可根据瞬时煤流量、运输距离等状态变量优化运行参数, 较传统 PID 控制方案降低能耗 15%。两类算法的协同应用, 实现了煤矿开采过程的自适应动态优化。

1.2.4 物联网

基于物联网（IoT）技术构建的煤矿设备管理系统，通过 RFID 标识、边缘传感器网络与云计算平台的深度耦合，实现设备资产全生命周期数字化管理。充矿能源鄂尔多斯煤矿部署的 IoT 系统采用 EPC 编码体系对设备进行唯一标识，结合 LoRaWAN 低功耗网络实现设备状态数据实时采集与传输。系统运用数字线程（Digital Thread）技术贯通设备设计、运维、报废各环节数据，通过预测性维护算法生成智能巡检路线，使设备巡检效率提升 50%。同时，基于备件消耗的时间序列分析模型优化库存策略，备件周转率提高 30%，显著提升设备管理精益化水平。

2 智能化煤矿开采的现状与主要问题

当前，智能化煤矿开采技术在我国煤矿产业的实践应用中已取得初步且显著的成效，众多煤矿企业已成功部署并运行智能化开采系统，实现了生产效率的飞跃式提升与安全风险的有效管控。然而，在智能化煤矿开采技术的深入推广与应用过程中，仍面临多重挑战。首要问题在于开采技术的复杂度高，涵盖多领域技术的交叉融合与高度集成，这对技术人员的专业技能与跨学科知识体系构建提出了严苛要求。其次，我国煤矿地质构造复杂，煤层赋存条件多变，这对智能化开采技术的适应性与灵活应变能力构成了严峻挑战，要求技术系统具备高度的环境感知与自适应调整能力。此外，智能设备的管理与维护亦是亟待解决的关键问题，具体表现为部分煤矿企业在智能设备的日常运维管理、故障诊断排除及迭代升级方面存在短板，导致设备效能未能充分释放，影响了智能化开采技术的整体效能与推广应用。这些问题成为制约智能化开采技术深入发展的瓶颈，亟需行业内外加大技术研发力度、强化专业人才培养与管理机制创新，以促进智能化煤矿开采技术的持续优化与广泛应用。

3 煤炭智能化开采技术

3.1 直线度控制技术

直线度控制技术是煤炭智能化开采技术中的一项关键技术。该技术深度融合精密测量技术，包括激光导向定位系统与高清视觉传感装置，实现了对采掘机械行进轨迹的精确智能化调控。

具体而言，直线度控制技术首先运用激光导向定位系统，在井下作业空间内精确设定一条作为基准的导向线。此导向线相当于采掘机械的“定位基准”，为其行

进提供明确指引。随后，高清视觉传感装置被部署于关键监控点，以实时捕获采掘机械的工作状态及其所处环境的详细图像信息。这些信息经过图像识别与处理算法的分析，与激光导向系统提供的基准线进行对比，从而精确评估采掘机械的位置与姿态是否偏离预定轨迹。

一旦检测到采掘机械的位置或姿态偏差，直线度控制技术随即启动自动调整机制。通过向采掘机械发送精确的调控指令，该技术能够实时调整采掘机械的行进路线，确保其沿着激光导向系统设定的基准线保持直线行进。这一实时、动态的调整机制不仅有效规避了因工作面不直引发的设备故障与推进阻力增大问题，还显著提升了采掘作业的效率与稳定性。

此外，直线度控制技术的应用还带来了多方面的附加效益。例如，它有助于降低煤炭开采过程中的资源浪费，提高资源回收率；同时，该技术还能减轻操作人员的劳动强度，提升作业现场的安全性。尤为重要的是，直线度控制技术的成功实践为煤炭开采的智能化转型提供了坚实的技术基础，有力推动了煤炭行业向更高效、更安全、更可持续的发展路径迈进。

3.2 智能记忆截割技术

在煤矿智能化开采范畴内，智能记忆截割技术作为一项核心技术，展现了极高的应用价值。该技术通过模拟人类记忆与学习机制，实现了采煤机的自主导航与智能作业。一方面，智能记忆截割技术采用预设记忆截割路径的方式，引导采煤机进行初步的人工辅助自动化作业。在此过程中，采煤机通过学习算法不断积累截割路径、煤层特性等关键数据，形成记忆模型。完成学习阶段后，采煤机即可基于所建立的记忆模型，自主执行后续的截割作业循环，实现高效、精准的开采。这一转变不仅大幅降低了人工操作强度，更显著提升了开采作业的效率与精确度。

另一方面，针对特定的开采需求与计划，智能记忆截割技术能够运用先进的算法，制定出高度定制化、科学合理的采煤机自动截割方案。该方案综合考虑煤层地质构造、开采进度规划、设备性能状态等多重因素，确保开采作业的高效执行与安全管控。

在作业执行层面，智能记忆截割技术借助精密的控制系统，实现对采煤机调高油缸位置的精准调控，从而实现对工作面采高的自适应定位。这一功能使采煤机能够根据煤层厚度的实时变化，灵活调整截割深度，有效

应对复杂多变的开采环境。

此外,智能记忆截割技术还具备实时信息传输功能,能够将采煤机的精确位置信息实时传递至传感器网络。这些信息经过高效的数据处理与分析,被智能化开采平台实时掌握,为开采计划的动态调整与优化提供了可靠依据。管理人员可以依托这些信息,对开采进度、设备状态进行实时监控与精准决策,确保开采作业的高效运行与安全管控。

3.3 安全监测与应急指挥

煤矿安全监测与应急指挥体系通过技术集成构建全流程风险防控体系。智能安全感知网络基于多物理场耦合监测原理,融合瓦斯浓度、粉尘含量、温湿度、应力应变及水文参数等多元感知数据,运用分布式光纤测温(DTS)、微震监测(MS)等先进传感技术,实现井下灾害隐患的实时感知与早期预警。华阳新材料集团新景矿实践表明,该系统将瓦斯超限预警响应时间从30分钟压缩至5分钟,显著提升安全预警时效性。在应急处置领域,数字孪生应急指挥平台依托高精度三维建模与动态仿真技术,基于开采场景的数字孪生体快速推演应急预案,可在5分钟内生成最优救援路径规划,其模拟结果与实际救援偏差控制在10%以内。国家能源集团宁煤公司部署的智能应急指挥系统已成功处置3起顶板冒落事故,救援响应效率提升50%,有效验证了数字化应急体系在煤矿安全生产中的核心作用。

3.4 设备智能化自动诊断技术

设备智能化自动诊断技术是煤炭智能化开采技术的重要组成部分。该技术深度融合了先进传感技术、大数据智能分析算法与精密故障诊断模型,实现了对井下核心设备运行状态的全面、实时监测与精确诊断。

首先,该技术通过在井下关键设备上集成高精度、高可靠性的传感元件,持续、精准地采集设备的振动频谱、温度变化、压力波动等关键运行参数。这些参数数据随后被实时传输至云端或边缘计算平台,利用大数据智能分析算法与深度学习模型进行深度挖掘、特征提取与异常检测。

其次,一旦系统检测到参数异常或设备运行状态偏离预设的安全阈值,智能化在线故障自动诊断系统将立即启动故障识别与精确定位流程。依托精密的故障诊断模型与丰富的故障知识库,系统能够迅速识别故障类型、精确定位故障源头,并自动生成相应的故障处理建议或

预防性维护方案。

这种智能化的在线故障自动诊断方式不仅极大提升了设备维护的响应速度与诊断准确性,有效降低了因设备突发故障导致的生产中断风险与安全隐患,还通过优化设备运行参数、减少不必要的能耗,显著延长了井下关键设备的使用寿命。这对于确保煤炭开采作业的连续稳定、提升整体开采效率与经济效益具有至关重要的战略意义。

3.5 智能运输与提升系统

煤矿智能运输与提升系统通过多技术融合实现物流全流程智能化升级。在巷道运输环节,AGV自动导引车与刮板输送机构建协同作业网络,基于5G通信的毫秒级低时延特性与UWB超宽带定位技术,实现车辆运行路径的动态规划与智能避障,系统运输效率提升30%。例如,晋能控股塔山煤矿部署的无人运输系统,通过7×24小时连续作业模式,单班次减少8个司机岗位配置,显著降低人力成本。提升系统采用永磁同步电机驱动结合矢量控制技术,实现电机转矩与转速的精准调控,使提升机运行效率提升10%、能耗降低20%。同时,集成故障预测与健康管理系统(PHM),通过传感器数据实时采集与机器学习算法分析,实现关键部件寿命预测准确率达92%,有效保障提升设备安全稳定运行,推动煤矿运输提升系统向智能化、高效化方向发展。

4 现代智能化煤矿开采技术的未来发展趋势

4.1 深度融合与协同发展

未来,智能化煤矿开采技术将实现人工智能、物联网、5G、大数据等技术的更深度融合,形成更加完善、高效的智能化技术体系。不同技术之间将实现更好的协同工作,例如,人工智能算法可以利用物联网采集的数据进行更精准的分析和预测,5G通信技术保障数据的快速传输,为人工智能和大数据分析提供实时数据支持,从而实现对煤矿开采全流程的更精准控制和优化。同时,智能化技术与煤矿开采工艺也将进一步融合,根据不同的地质条件和开采需求,开发出更加适配的智能化开采方案。

4.2 全面无人化开采

随着技术的不断进步,煤矿开采将逐步向全面无人化方向发展。目前,部分煤矿已经实现了采煤工作面的少人化作业,未来,在智能化设备性能不断提升、通信

技术更加稳定可靠、人工智能算法更加成熟的基础上,煤矿井下的采煤、掘进、运输等主要作业环节有望实现完全无人化操作。地面控制中心通过远程控制和智能决策系统,对井下设备进行实时监控和管理,保障煤矿的安全生产和高效运行。

4.3 绿色智能化发展

在“双碳”目标的背景下,绿色发展成为煤矿行业的必然趋势。未来的智能化煤矿开采技术将更加注重节能环保和生态保护。一方面,通过智能化技术优化开采工艺和设备运行,降低能源消耗和废弃物排放;另一方面,利用大数据分析和人工智能技术对煤矿开采过程中的环境影响进行评估和预测,制定科学的环境保护措施。例如,对煤矿开采过程中产生的煤矸石进行综合利用,通过智能化分选技术实现煤矸石的分离和再加工;利用智能化通风系统优化通风网络,降低通风能耗,实现煤矿的绿色智能化发展。

4.4 标准化与产业化发展

为解决智能化煤矿开采技术应用中存在的兼容性和标准化问题,未来将加强相关标准的制定和完善。通过建立统一的技术标准、数据标准和设备接口标准,促进不同厂家生产的智能化设备和系统之间的互联互通

和协同工作,降低技术集成成本和难度。同时,随着智能化煤矿开采技术的不断成熟和推广应用,将形成完整的智能化煤矿产业链,带动相关产业的发展,包括智能化设备制造、软件开发、系统集成、技术服务等,实现智能化煤矿开采技术的产业化发展,推动煤矿行业整体转型升级。

5 结论

现代智能化煤矿开采技术是煤矿行业实现安全、高效、绿色发展的重要途径。尽管目前该技术在发展过程中面临着技术、人才、经济与管理等多方面的挑战,但随着新一代信息技术的不断创新和发展,以及国家政策的支持和行业的共同努力,智能化煤矿开采技术必将迎来更加广阔的发展前景。通过深度融合先进技术、推动全面无人化开采、实现绿色智能化发展以及加强标准化与产业化建设,智能化煤矿开采技术将为我国煤炭行业的可持续发展注入强大动力,助力煤炭行业在新时代实现高质量发展。

参考文献

- [1]蔡泽宇.现代智能化煤矿开采技术研究[J].内蒙古煤炭经济,2024(3):75-77.
- [2]连雅乐.煤矿智能化开采技术质量研究[J].中国石油和化工标准与质量.2021(13).