

5G+AI 驱动下的煤矿信息化系统架构设计与应用

刘旭东

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司金家渠煤矿 宁夏回族自治区 吴忠 751100

摘要: 随着新一轮科技革命和产业变革的深入发展,以第五代移动通信技术(5G)和人工智能(AI)为代表的新一代信息技术正加速向传统产业渗透。本文聚焦于5G与AI深度融合对煤矿信息化系统的重构作用,提出了一种“云-边-端”协同、“感知-决策-执行”闭环的新型煤矿信息化系统架构。该架构以5G网络为神经中枢,实现井下全域高速、低时延、高可靠的数据传输;以AI算法为核心引擎,赋能智能感知、智能决策与智能控制。文章详细阐述了该架构的层次化设计、关键技术支撑,并结合智能综采、智能掘进、智能运输、灾害预警等典型应用场景,论证了其在提升煤矿本质安全水平、优化生产效率和降低运营成本方面的显著价值。最后,本文探讨了当前面临的挑战并展望了未来发展方向,为煤矿智能化建设提供了理论参考与实践路径。

关键词: 5G; 人工智能; 煤矿信息化; 系统架构; 智能矿山; 工业互联网

引言

煤矿信息化建设已从早期的自动化、数字化阶段,迈入以数据驱动、智能决策为核心的智能化新阶段。传统的矿用工业环网和Wi-Fi等通信技术,在带宽、时延、连接密度和可靠性方面已难以满足海量传感器接入、高清视频回传、远程精准控制等智能化应用的需求。同时,孤立的信息系统形成了众多“数据孤岛”,制约了全局性智能分析与协同优化能力的发挥。5G技术凭借其增强型移动宽带(eMBB)、超高可靠低时延通信(uRLLC)和海量机器类通信(mMTC)三大核心特性,为构建覆盖井上井下的一体化信息高速公路提供了可能。而AI技术,特别是深度学习、计算机视觉、知识图谱等,能够从海量多源异构数据中挖掘深层规律,实现对复杂工况的智能感知、预测与决策。5G与AI的深度融合,不仅是技术叠加,更是催生新业态、新模式的化学反应,为煤矿信息化系统带来颠覆性的变革。因此,如何科学设计一个能够充分发挥5G与AI优势的煤矿信息化系统架构,并有效落地应用,成为当前亟待解决的关键问题。

1 煤矿信息化系统演进与5G+AI融合需求分析

1.1 传统煤矿信息化系统的局限性

早期的煤矿信息化系统主要围绕“监测监控”展开,如安全监控系统、人员定位系统等,各系统独立建设、协议各异,形成了典型的“烟囱式”架构。随后,虽然通过综合自动化平台实现了部分数据的集中展示,但本质上仍是数据的简单聚合,缺乏深度关联分析与闭环控制能力。其主要痛点包括:(1)通信瓶颈:井下有线网络部署困难、维护成本高;无线网络(如Wi-Fi、4G)存在信号盲区、切换时延长、上行带宽不足等问题,无法支

撑4K/8K超高清视频、AR/VR等大带宽业务^[1]。(2)数据孤岛:来自地质、采掘、机电、通风、安全等不同专业的数据分散在各自系统中,格式不一,难以进行跨域融合分析,限制了全局优化决策。(3)智能水平低:现有系统多以“事后报警”为主,缺乏对设备故障、安全隐患的“事前预测”和“事中干预”能力,智能化停留在浅层应用。(4)人机协同弱:大量依赖人工巡检和经验判断,不仅效率低下,且存在人身安全风险。

1.2 5G+AI融合的核心价值

5G与AI的融合,恰好能针对性地解决上述痛点,形成“1+1>2”的协同效应:(1)5G是AI的“加速器”:5G提供的高带宽、低时延、广连接能力,使得海量井下终端(如高清摄像头、各类传感器、机器人)产生的数据能够实时、无损地上传至边缘或云端,为AI模型的训练和推理提供了高质量、大规模的数据基础。没有5G,许多需要实时反馈的AI应用(如远程操控)将无法实现。(2)AI是5G的“价值放大器”:5G网络本身产生了海量的信令和性能数据,AI可以用于网络的智能运维(如故障预测、切片资源动态调度),保障关键业务的服务质量(QoS)。更重要的是,AI赋予了5G网络所承载的数据以“智慧”,使其从单纯的信息传输管道,转变为驱动业务创新的价值引擎。二者的融合,共同指向了煤矿信息化的终极目标:构建一个具备全面感知、自主分析、智能决策和协同执行能力的“数字孪生”矿山。

2 5G+AI驱动的煤矿信息化系统架构设计

基于上述分析,本文提出一种分层解耦、云边协同、数据驱动的新型煤矿信息化系统架构。

2.1 总体架构

该架构自下而上可分为四个核心层次：智能感知与执行层（端）、5G融合通信网络层（网）、智能计算与数据处理层（边/云）、智能应用与决策支持层（用）。

2.1.1 智能感知与执行层（端）

作为整个系统的“感官”和“手脚”，负责物理世界的全面感知和指令执行。包括各类智能传感器（瓦斯、温度、压力、振动、位移等）、高清/红外/激光雷达等多模态视觉设备、智能穿戴设备（矿灯、手环）、智能装备（采煤机、掘进机、液压支架、巡检机器人、无人驾驶胶轮车）等^[2]。特点是设备普遍具备边缘计算能力，可进行初步的数据预处理和本地闭环控制。

2.1.2 5G融合通信网络层（网）：

作为系统的“神经系统”，提供统一、可靠、灵活的通信底座。组成包括：（1）井下5G专网：采用本安型基站、隔爆型核心网用户面功能（UPF）下沉，实现井下全域5G信号覆盖。利用5G网络切片技术，为不同业务（如远程控制、视频监控、人员定位）分配独立的逻辑网络，保障关键业务的带宽、时延和可靠性。（2）融合通信：5G网络与现有的工业环网、UWB精确定位、LoRa等物联网技术深度融合，形成一张多制式、多层次的立体化通信网络，确保无死角覆盖。

2.1.3 智能计算与数据处理层（边/云）：

作为系统的“大脑”和“小脑”，负责数据的汇聚、存储、处理、分析和模型训练。组成包括：（1）边缘计算节点（MEC）：部署在井下或井口附近，靠近数据源。主要承担对时延敏感、带宽消耗大的任务，如视频流的实时AI分析（人员行为识别、设备状态识别）、本地设备的快速闭环控制等。这极大地降低了端到端时延，减轻了核心网和云端的负载。（2）私有云/混合云平台：部署在地面数据中心，提供强大的算力和存储资源。负责全局性、非实时性的大数据分析、AI模型的集中训练与迭代、数字孪生体的构建与仿真、以及所有业务系统的统一承载。

2.1.4 智能应用与决策支持层（用）：

作为系统的“智慧输出”，面向不同角色（矿长、调度员、技术人员、安全员）提供直观、智能的业务应用。基于微服务架构开发的一系列智能化应用，如智能综采工作面控制系统、智能掘进导航系统、智能主运输系统、智能通风与瓦斯抽采系统、全矿井安全风险智能预警平台、设备全生命周期健康管理系统、经营管理决策支持系统等。这些应用通过统一的门户或移动APP进行访问，并与数字孪生平台深度集成，实现虚实互动。

2.2 关键技术支撑

（1）5G专网与网络切片：这是保障业务SLA（服务等级协议）的核心。例如，为远程操控采煤机分配一个uRLLC切片，确保控制指令的端到端时延低于20ms；为高清视频回传分配一个eMBB切片，保证流畅的4K视频体验。（2）多源异构数据融合：建立统一的数据湖或数据中台，通过数据治理、标准化、清洗、融合等手段，打破数据孤岛，为上层AI应用提供“干净”、“一致”、“关联”的高质量数据集。（3）分布式AI与云边协同：AI模型根据任务需求，在云和边之间进行合理部署与协同。边缘侧运行轻量化的推理模型，云端负责复杂的训练和模型更新，通过OTA（空中下载技术）将优化后的模型下发至边缘。（4）数字孪生：构建一个与物理矿山完全同步、动态更新的虚拟映射。它不仅是可视化窗口，更是进行生产过程仿真、应急预案推演、设备性能优化的“沙盒”。

3 典型应用场景与应用价值

3.1 智能综采工作面

在5G+AI驱动的智能综采工作面中，采煤机、液压支架、刮板输送机核心装备的状态数据与多路高清视频流通过5G网络实时、无损地回传至边缘计算节点。部署在边缘的AI算法随即对视频流进行深度分析，能够自动识别煤岩分界面以指导精准截割，实时监测液压支架的姿态是否符合支护要求，并即时告警任何未经授权的人员闯入危险区域。同时，通过对设备振动、电流、温度等多维传感数据的时序分析，AI模型能够精准预测潜在的机械或电气故障^[3]。基于这些全面、实时的感知与分析结果，综采工作面控制系统得以实现“一键启停、自动跟机、无人干预”的常态化智能开采模式。这一变革不仅将工作面作业人员数量降低，极大地降低了高危环境下的人员暴露风险，同时也通过优化截割路径和减少非计划停机，使采煤效率提升了百分之十至二十，设备的综合故障率也得到显著下降。

3.2 智能掘进与辅助运输

智能掘进系统通过在掘进机上集成激光雷达和高清摄像头，在5G网络的支持下，将巷道环境的三维点云数据和实时视频画面同步回传。AI系统利用SLAM（即时定位与地图构建）算法，结合预先输入的地质模型，能够自主规划最优掘进路径，并精确控制截割头的动作，从而解决传统掘进中存在的速度慢、巷道成型质量差等顽疾。在辅助运输环节，无人驾驶胶轮车依托5G网络的高可靠连接和UWB技术提供的厘米级精确定位，能够接收来自中央调度系统的指令，自主完成物料配送、人员接送等任务，全程无需人工干预。这不仅解放了繁重的体

力劳动,更重要的是彻底杜绝了因人为操作失误或疲劳驾驶引发的井下运输事故,显著提升了辅助生产环节的安全性及效率。

3.3 全矿井智能安全防控

全矿井智能安全防控体系打破了传统单灾种、单点式的监测模式。它通过5G网络将瓦斯浓度、水文变化、顶板压力、火灾征兆、冲击地压前兆等多灾种监测数据,与人员精确定位信息、全域视频监控画面进行深度融合。AI平台利用先进的多模态融合分析和时空关联挖掘技术,构建动态的安全风险评估与预警模型。该模型能够超越简单的阈值报警,对全矿井的安全态势进行宏观推演,识别出多个风险因子耦合作用下的潜在高危区域,并提前数小时甚至数天发出精准预警^[4]。这种从“被动响应”到“主动预防”的转变,标志着矿井灾害防治能力实现了质的飞跃,从根本上筑牢了煤矿安全生产的防线。

3.4 设备预测性维护(PdM)

对于主通风机、主排水泵、提升机等关乎全矿安全运行的关键大型设备,5G+AI驱动预测性维护(PdM)系统展现出巨大价值。系统通过5G网络对这些设备的运行参数进行7×24小时不间断采集,并将数据流送入AI分析引擎。该引擎利用深度学习等先进算法,对设备的历史与实时数据进行建模,能够精准预测其剩余使用寿命(RUL)和具体的故障模式。当系统判断某台设备即将进入故障窗口期时,会自动生成包含故障部位、维修建议和所需备件的最优维护工单,并推送至维修管理系统。这种按需维护的模式,有效避免了灾难性的非计划停机所造成的巨大经济损失,同时将传统的定期强制维护转变为精准的按需维护,使得整体维护成本得以降低,设备的可用性和可靠性得到双重保障。

4 面临的挑战与未来展望

尽管5G+AI为煤矿信息化注入革命性动能,但实际落地仍面临多重挑战:井下巷道狭长、金属设备密集、电磁环境复杂,导致5G信号严重衰减干扰,需定制化网络

规划与本安型设备;煤矿地质条件差异显著,AI模型泛化能力不足,跨矿井迁移需大量标注数据与持续调优;设备互联标准、数据接口不统一,制约系统整体效能;既懂采矿又精通5G/AI的复合型人才极度匮乏。未来,技术融合将进一步深化,5G-A/6G、AI大模型、量子通信等前沿技术将赋能更强大的感知、连接与智能能力;“矿鸿”等矿山专用操作系统有望普及,从底层打通设备壁垒,构建统一生态;智能矿山将从“单矿智能”向“集团协同”演进,融入能源互联网协同网络,实现跨矿井、跨集团的资源优化配置与效益最大化,推动煤炭行业向数字化、智能化、绿色化全面升级。

5 结语

5G与AI的深度融合,正在重塑煤矿信息化的内涵与外延。本文提出的“云-边-端”协同架构,为构建新一代智能矿山提供了清晰的技术路径。该架构以5G网络为基石,打通了数据流动的“任督二脉”;以AI为核心,赋予了矿山系统自主思考与行动的“智慧”。通过在智能采掘、安全防控、设备运维等场景的成功应用,充分证明了其在提升煤矿安全生产水平、推动降本增效和绿色低碳转型方面的巨大潜力。面对挑战,需要产学研用各方协同攻关,共同推动标准制定、技术创新和人才培养,加速5G+AI在煤矿行业的规模化、高质量落地,为我国煤炭工业的智能化、现代化发展注入强劲动能。

参考文献

- [1]王志军,李杨.煤矿安全生产与智能自动化技术应用研究[J].能源与节能,2026,(02):270-272.
- [2]张安世.基于智能技术的煤矿辅助生产管理系统构建与实践[J].西部探矿工程,2026,38(01):135-138.
- [3]张春帅,雷有军.煤矿智能快速掘进关键技术研究及展望[J].能源与节能,2026,(01):169-171+175.
- [4]赵欣.人工智能驱动的煤矿开采经济效能研究[J].煤炭经济研究,2025,45(12):337-341.