



文章编号: 1671-251X(2023)04-0023-10

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18081

煤炭工业互联网技术研究综述

杨军^{1,2,3}, 张超^{1,2}, 杨恢凡^{1,2}, 郭一楠^{1,3}

1. 煤矿智能化与机器人创新应用应急管理部重点实验室, 北京 100083;
2. 中国矿业大学(北京)大数据与物联网研究中心, 北京 100083;
3. 矿业大学(北京)内蒙古研究院, 内蒙古 鄂尔多斯 010300)

摘要: 煤炭工业互联网是加速煤炭领域高质量发展的重要引擎, 可有效驱动能源领域设备智能化、产业数字化。给出了煤炭工业互联网体系架构, 从感知层、传输层、赋能平台、工业 APP、信息安全 5 个方面分析了煤炭工业互联网技术研究现状和发展方向。感知层在实现超低功耗、精准感知、高可靠性、能量自动捕获等方面取得进步, 但仍存在感知手段单一、易受环境因素影响等问题, 目前还无法充分满足矿井泛在感知需求, 可从新型传感器研发、低功耗和能量收集技术、抗电磁干扰技术、智能感知技术等方面进一步提高感知层智能化水平。传输层现有的以太网、4G、WiFi 等技术无法满足智慧矿山高可靠、高带宽、低延迟的传输要求, 5G 技术可满足全矿井泛在感知需求, 但在井下应用中仍存在最大射频功率受限、无法可靠应对井下应急场景等问题, 因此目前井下还不能完全使用 5G 替代传统通信网络。赋能平台是煤炭工业互联网推动智能化的中枢和核心, 指出大数据是赋能平台的关键要素, 煤炭工业机理模型和诊断决策模型是赋能平台的灵魂, 数字孪生技术可为煤炭行业生产、决策、管理等环节赋能。工业 APP 可为煤炭产业链各环节提供服务, 帮助煤炭行业攻克高风险、工艺继承创新难、产业链协同难等难题, 但是煤炭领域工业 APP 的发展应用仍不成熟。信息安全是煤矿智能化建设的保障, 需要从物理信息安全、网络信息安全、系统信息安全、数据信息安全和应用信息安全等方面采取措施, 提升安全防护水平。

关键词: 煤炭工业互联网; 智能感知; 5G; 赋能平台; 工业 APP; 信息安全; 大数据; 数字孪生; 设备智能化; 产业数字化

中图分类号: TD67

文献标志码: A

Research summary on coal industry internet technology

YANG Jun^{1,2,3}, ZHANG Chao^{1,2}, YANG Huifan^{1,2}, GUO Yinan^{1,3}

1. Key Laboratory of Intelligent Mining and Robotics, Ministry of Emergency Management, Beijing 100083, China;
2. Research Center of Big Data and Internet of Things, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
3. Inner Mongolia Research Institute of China University of Mining and Technology-Beijing, Erdos 010300, China)

Abstract: The coal industry internet is an important engine to accelerate the high-quality development of the coal field. It can effectively drive the equipment intelligence and industry digitization in the energy field. The architecture of the coal industry internet is given. The research status and development direction of the coal industry internet technology are analyzed from five aspects: perception layer, transmission layer, empowerment platform, industrial APP, and information security. The perception layer has made progress in achieving ultra-low power consumption, precise perception, high reliability, and automatic energy capture. However, there are still

收稿日期: 2023-02-22; 修回日期: 2023-03-31; 责任编辑: 胡娴。

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(52121003)。

作者简介: 杨军(1978—), 男, 河南南阳人, 教授级高级工程师, 主要研究方向为大数据理论与技术、煤炭工业互联网, E-mail: yj@cumtb.edu.cn。

引用格式: 杨军, 张超, 杨恢凡, 等. 煤炭工业互联网技术研究综述[J]. 工矿自动化, 2023, 49(4): 23-32.

YANG Jun, ZHANG Chao, YANG Huifan, et al. Research summary on coal industry internet technology[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(4): 23-32.



扫码移动阅读

problems such as single perception method and susceptibility to environmental factors. It cannot fully meet the needs of ubiquitous perception in mines. The intelligence level of the perception layer can be further improved through the development of new sensors, low-power and energy collection technologies, anti-electromagnetic interference technologies, and intelligent perception technologies. The existing Ethernet, 4G, WiFi and other technologies in the transmission layer cannot meet the high reliability, high bandwidth, and low latency transmission requirements of intelligent mines. 5G technology can meet the ubiquitous sensing requirements of the entire mine. However, there are still problems in underground applications such as limited maximum RF power and the incapability to reliably respond to underground emergency scenarios. Therefore, currently, 5G cannot fully replace traditional underground communication networks. The empowerment platform is the center and core of the coal industry internet to promote intelligence. It points out that big data is the key element of the empowerment platform. The mechanism model and diagnostic decision-making model of the coal industry are the soul of the empowerment platform. Digital twin technology can empower the production, decision-making, management and other links of the coal industry. Industrial APP can provide services for various links in the coal industry chain, and help the coal industry overcome challenges such as high risks, difficulty in process inheritance and innovation, and difficulty in industrial chain collaboration. However, the development and application of industrial APP in the coal industry are still immature. Information security is the guarantee for the intelligent construction of coal mines, and measures need to be taken from physical information security, network information security, system information security, data information security, and application information security to improve the level of security protection.

Key words: coal industry internet; intelligent perception; 5G; empowerment platform; industrial APP; information security; big data; digital twin; equipment intelligence; industry digitization

0 引言

当前,物联网、大数据、云计算、人工智能(Artificial Intelligence, AI)等新一代信息技术迅速发展,深刻影响了世界各国的经济和社会发展,推动了第四次工业革命进程。2013年,德国最先提出工业4.0,将物理信息系统与工业制造产生的信息数据进行融合,通过“智能+网络化”方式推动产业革命。美国通用电气公司提出将互联网和工业结合,将人、机器、数据进行互联,形成开放的工业互联网,从而实现工业高效率、智能化生产。日本提出社会5.0背景下的互联工业,通过物联网和AI连接人、设备、技术等,实现价值创造的互联工业。我国提出了“中国制造2025”三步走战略计划,积极推进工业互联网发展。

煤炭是我国的主要能源,煤炭工业经历了从机械化、自动化、数字化到智能化的发展过程,当前煤炭行业面临的主要问题已发生重大变化。文献[1-3]分析了煤炭行业发展不平衡、不充分的几大问题,表现在矿井开采效率和技术水平、煤炭利用清洁程度不平衡,煤炭安全发展、绿色发展、低碳发展、人力资源发展、企业转型发展等不充分。文献[4-7]指出传统信息技术应用到矿山时存在信息感知不够精准、缺乏大数据分析、工业APP不成体系等问题。

文献[8]分析了智慧矿山建设目标和技术体系架构,指出了以大数据、物联网、AI等新一代信息技术为基础的工业互联网是智慧矿山发展的必然趋势和技术路径。

煤炭工业互联网是加速煤炭领域高质量发展的重要驱动力。当前,我国正在加快建设新型基础设施,先后发布了《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》《关于加快推进国有企业数字化转型工作的通知》《工业互联网发展行动计划(2021—2023)》等一系列政策文件,指出要依托工业互联网在能源领域的支持性作用,发展能源领域设备智能化,推动产业数字化。然而,工业互联网在煤炭领域的发展和应用还面临着许多挑战,本文深入探讨煤炭工业互联网的发展现状、技术特点、应用案例及未来趋势,旨在为相关领域的研究者和决策者提供有益参考。

1 煤炭工业互联网体系架构

煤炭工业互联网主要由感知层、传输层、赋能平台和工业APP组成,如图1所示。

感知层位于架构最底层,主要由部署在现场的各类传感器和摄像机等构成,用于实时采集煤炭开采、运输、存储和销售各环节中井下机械设备、人员、环境或其他设备资产的数据信息,完整、精准获取煤炭工业全生命周期的状态数据。

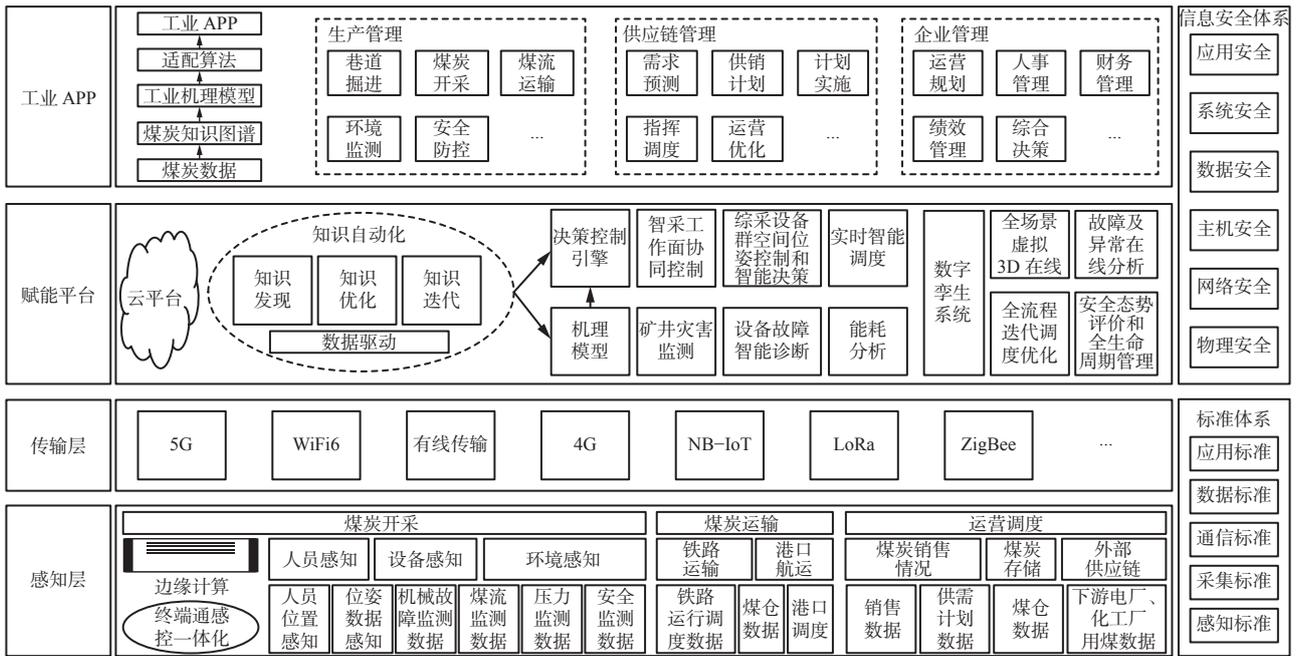


图1 煤炭工业互联网体系架构

Fig. 1 Coal industry internet architecture

传输层将感知层的数据发送到赋能平台进行进一步处理和分析,由于煤炭生产环境的复杂性,各传输技术在实际应用中需考虑不同业务场景。

赋能平台整理和分析从感知层获得的数据,利用大数据和AI技术提供可靠、高效、灵活的数据管理和分析功能,基于煤炭工业机理模型实现知识发现-知识优化-知识迭代的知识自动化过程,提高生产效率和安全性,提高运维效率,帮助企业实现数据驱动智能化转型。

工业APP是工业互联网体系中最上层的部分,负责提供各种工业应用服务,支持工业生产的数字化、智能化和自动化,从而提高产品质量,降低生产成本。

为保障采集、存储、处理、交换等环节中数据的标准化、规范化,实现各层之间数据的无缝对接和交换,需要设计适用于煤炭工业互联网的标准体系。另外,信息安全在整个工业互联网架构中担任着至关重要的角色,信息安全保障包括多个维度,涉及物理安全、网络安全、主机安全、数据安全、系统安全和应用安全。

2 煤炭工业互联网技术

2.1 感知层

感知是煤炭工业互联网的基础,精准实时感知是实现煤矿智能化的前提,感知数据是智慧矿山的核心数据。感知层通过射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)读写器、传感器、摄像机等各类

感知设备采集煤矿设备运行状态和健康状况、生产环境数据及突发事件数据等,实现对煤矿各类系统数据的实时感知^[9]。

随着矿山数字化建设的不断推进和微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)传感器、光纤传感器等技术的发展,感知层在实现超低功耗、精准感知、高可靠性、能量自动捕获等方面取得进步,井下设备状态感知范围得到延伸^[10-12],但仍存在一些问题,如感知手段单一、传感器易受环境因素影响、网络化分布式监测理论与方法欠缺、传感器智能化程度不高等。感知层目前还无法充分满足矿井泛在感知需求,矿井生产过程仍处于不透明状态^[13]。

矿井感知主要包括人员感知、设备感知、环境感知等方面^[12]。人员感知研究主要集中于人员精确定位应用中,而对体温、心率等人员生命特征指标的感知研究较少。设备感知研究主要集中于感知信息的数值显示和简单阈值分析,缺乏深入研究。环境感知方面,如综采工作面需感知煤岩变化、截割状态等信息,为智能决策和控制提供支持^[14]。

随着新材料、半导体技术的不断发展,矿用传感器向智能化不断推进。相较于传统传感技术,智能传感器具有以下优势:能提供不同量级的边缘计算能力,具备更强的实时服务能力,可实现自我诊断、自我识别与自适应实时决策反馈功能^[15];自带微处理器,可自动处理待测信息、记忆存储信息等,同时还可决定数据弃存,通过智能控制运行时间实现最优功耗;成本低且功能多样化,可通过边缘计算提供

实时决策反馈,助力井下工作面实现感知-通信-控制一体化。

为满足矿山智能化建设需求,可从以下方面进一步提高感知层智能化水平:① 研发新型传感器,拓宽感知边界,使煤炭工业互联网平台获得更为完备、全面的数据。② 研究传感器低功耗和能量收集技术,降低传感器整机功耗。③ 研究传感器抗电磁干扰技术,提升井下传感器的鲁棒性。④ 研究智能感知技术,提供更强大的实时处理能力和一定程度的决策能力,借助矿井传输网络,实现矿井的感知-通信-控制一体化。

2.2 传输层

传输层是煤炭工业互联网中不可缺少的部分,通过设备之间的互联通信实现数据的可靠交换,完成矿井监测数据的上传、设备控制信号的实时交互及高可靠通信。矿井一般网络架构中通常采用千(万)兆级工业以太环网作为骨干网络,采用工业无线网络和现场总线系统作为分支网络,由此构成矿井物联网体系^[16]。

智慧矿山需要传输视频、语音、振动、温度、瓦斯浓度等各类型数据,同时矿山全要素实时精准监测的要求使得数据体量快速增加,这对传输网络提出了很高要求,尤其是井下视频监控密集的区域要求传输网络具有很大的上行带宽。在智能化场景中,当出现突发灾害时,要可靠、快速地将前端环境感知数据上传到决策层,保证准确、高效地完成预测并下达控制指令。为了实现智能化、无人化开采的愿景,未来将会有更多的设备、监控点接入网络,需要更灵活的接入控制技术和更高的承载能力,实现全要素的广连接。因此,高可靠、高带宽、低延迟的传输技术才能满足智慧矿山传输要求。

目前矿山网络中以太网、4G、NB-IoT、LoRa、WiFi、ZigBee、RS485 等多类型有线网络与无线网络共存^[17]。在煤矿井下,有线网络具有高效、稳定等优势,但其固定布线无法满足工作面动态作业需求,且在巷道作业过程中易受破坏,安装、维修成本较高。主流无线通信技术包括 ZigBee、LoRa、WiFi、UWB 等,其优缺点见表 1。

表 1 无线网络技术对比

Table 1 Comparison of mine wireless network technologies

传输技术	技术指标	优点	缺点
ZigBee	采用IEEE 802.15.4标准,传输距离从75 m至数百米	近距离,低复杂度,低功耗,低成本	性能较差,传输速率较低
4G	支持100 Mbit/s下载速率、50 Mbit/s上传速率	便捷高效,传输速率高,传输距离长	成本较高,功耗较高
WiFi	采用IEEE 802.11标准,传输速率为54 Mbit/s或更高,空旷地带无线传输距离为300 m	传输速率高,成本较低,较为可靠	覆盖范围受限,跨AP切换时延较大
LoRa	空旷地带传输距离达15 km,最高传输速率为600 KiB/s	广覆盖,低功耗,长距离	传输速率低
UWB	采用时间间隔极小(纳秒级)的脉冲进行通信	密度低,功率低,穿透力强,抗干扰效果好,传输速率高,定位精度高	传输距离短,缺少大规模商业应用
5G	要求最低速率为1 Gbit/s,时延为1 ms	高带宽,低时延,广连接	成本较高,井下应用存在限制

LoRa 技术具有低功耗、长距离、广覆盖的优势^[18],适用于对实时性要求不高的感知数据传输,对于视频监控、矿灾监测等场景,LoRa 技术无法满足高带宽需求。ZigBee 是一种近距离、低复杂度、低功耗、低速率、低成本的双向无线传输技术,其性能较差,性价比较低,可用于井下人员和其他移动目标精确定位,无法支撑矿井其他数据传输^[19]。WiFi 移动性差,跨无线接入点(Access Point, AP)切换时延大于 100 ms^[20]。UWB 技术可实现厘米级高精度定位,满足机械设备定位、姿态监测定位精度需求^[21],但建设成本较高,不利于应用推广^[22]。矿井不同场景对通信网络的需求差别很大,传统的 4G+WiFi 的数据传输技术难以满足这种差异化需求^[20]。

5G 采用全维多输入多输出、大规模多输入多输

出和毫米波无线接入技术,具有高带宽、低时延、广连接的特性,可在 10^6 km^{-2} 连接密度下,将时延控制在 10 ms 内,实现海量智能互联传感器感知数据及高清视频的实时传输,满足全矿井泛在感知需求^[23-25]。同时,5G 可通过网络切片技术提供强大的定制化能力^[26],针对不同应用场景进行相关方面的增强,从而支持矿山各场景应用,如矿用卡车无人驾驶场景^[27]。但 5G 在井下应用中存在诸多限制,GB 3836.1—2010《爆炸性环境 第 1 部分:设备 通用要求》中允许使用的最大射频功率为 6 W,使得 5G 在实际应用中的效果受限。在井下精确定位方面,使用 UWB 技术的定位系统精度已达到厘米级,而基于 5G 的精确定位技术还在研究中。在特定频率范围内,WiFi6 的传输速率高于 5G,在对时延和移动性要求不高的视频监控

场景应选用性价比更高的矿用WiFi6^[28]。另外,停电会导致5G网络无法正常工作,在应急通信场景下使用5G的实际效果不如有线通信系统,5G无法可靠应对各种特殊情况。综合来看,目前井下还不能完全使用5G替代传统通信网络。

2.3 赋能平台

赋能平台是煤炭工业互联网推动智能化的中枢和核心^[29]。其汇聚海量矿山数据,通过机理模型进行数据分析、价值挖掘、知识发现、高效决策,利用大数据和AI技术实现知识的自优化、自迭代,通过数字孪生技术实现数字孪生体与设备实体之间的虚实交互,最终反馈到采、掘、机、运、通各环节的各场景中,为煤炭行业生产、决策、管理等赋能。大数据是赋能平台的关键要素,以数据为驱动、由知识发现和知识自动化构成的煤炭工业机理模型和诊断决策模型是赋能平台的灵魂^[30-33]。

2.3.1 煤炭工业机理模型

目前针对煤炭领域的工业机理模型已有大量研究,成果主要集中在煤炭开采、矿井灾害监测和设备运行状态监测方面^[34]。

在煤炭开采方面,文献[35]提出了智采工作面建设的几个阶段,构建了智采工作面评价指标体系。文献[36]针对现阶段煤炭开采的实际需要,分析了矿山机器人研发设计亟需突破的关键技术,可为实现无人化开采提供指导。文献[37]提出了数字孪生智采工作面架构,从物理工作面、数字工作面和数据信息3个方面阐述了构建数字孪生智采工作面的机理。文献[38]归纳了针对薄煤层、中厚煤层、大采高与超大采高、特厚煤层的智能化采煤基本模式,总结了井下采煤机、液压支架、刮板输送机、带式输送机智能控制技术,最后提出了目前有待突破的关键问题。

在矿井灾害监测方面,对煤矿井下灾害影响参数、致灾机理、演变规律等关键问题已有大量研究^[39]。文献[40]提取了工作面瓦斯涌出量的典型作用因子,建立了瓦斯涌出模型,实现了瓦斯涌出灾害动态预测。文献[41-44]对矿井突水判据、水灾模式、水灾演变的时空规律进行研究,构建了矿井突水多因素耦合预警模型。文献[45-46]主要从煤自燃机理、火灾预测预警、应急处置等方面进行研究,结合火灾致灾因素对矿井火灾场景进行建模,探究矿井火灾预警、处置、评价等各环节时空演化过程中的众多影响因素。文献[47]从发生冲击地压的地质构造条件、致灾机理、孕灾过程等方面进行阐述,构建了冲击地压预警模型。由于井下地质条件极为复杂

且影响因素众多,对各种矿灾机理模型的研究仍有待进一步深入。

在设备运行状态监测方面,对煤矿综采设备、主要通风机、带式输送机、提升系统设备等的运行指标监测和故障机理、故障诊断等已有大量研究。文献[48]通过研究通风机故障机理,利用量子粒子群优化-极限学习机算法实现了通风机故障诊断和分析。文献[49]构建了智慧矿山信息模型,为综采设备群空间位姿控制、智能决策及全局最优规划提供了解决方案。文献[50]论述了基于数据的综采装备协同控制模型的相关理论和应用。文献[51]研究表明利用神经网络作为故障分类器进行煤矿机械设备故障诊断是完全可行的。

2.3.2 煤矿大数据处理技术

传统矿山数据分析侧重于单一场景数据分析,通过工业互联网赋能平台的多维融合共享,可实现不同场景、多层次的丰富数据融合,实现数据多元分析。煤矿数据种类多、价值密度低、更新快^[52],为实现海量数据的有效管理和利用,已在数据标准、数据集成、数据分析与挖掘、业务应用等方面进行了一系列研究。

文献[53]构建了煤炭生产各环节的标注体系框架,为基础支撑技术、平台设计、安全保障等提供一系列标准。文献[54]在对煤炭行业相关标准整理分析的基础上,给出了设备接口协议标准、统一数据编码、工业信息化模型标准、集成规范等目前亟需的相关标准。煤矿数据具有多源异构的特点,需要进行数据集成与治理,以提高数据质量。文献[55]梳理总结了近20a数据集成领域的成果,对数据集成技术发展的几个阶段进行了阐述。文献[56]应用数据抽取-转换-加载(Extract-Transform-Load, ETL)方法实现异构数据的集成和综合管理,最终实现矿山设备维修数据集成。

煤矿大数据处理过程如图2所示。采集井下人员、设备、环境和管理数据,通过ETL方法完成清洗、转换、加载等数据处理操作,实现对煤炭基础数据的汇总。通过数据挖掘技术提取各业务场景数据

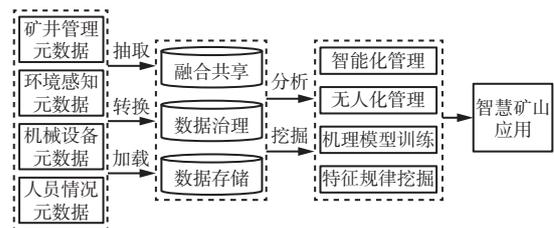


图2 煤矿大数据处理过程

Fig. 2 Process of coal mine big data processing

的一般规律,构建煤炭工业机理模型,结合大数据和 AI 技术进行模型优化,实现煤炭领域知识的自优化、自迭代,支撑智慧矿山高效运营^[57-58]。

2.3.3 数字孪生技术

煤炭工业互联网汇聚了海量数据,为煤矿数字孪生系统的建设奠定了基础。煤矿数字孪生系统借助 AI、大数据技术,实现矿山各环节可视交互、知识建模与服务、预测分析和优化管理。郭一楠等^[58]提出知识驱动的智能数字孪生主动管控模式,建立了知识引导的虚实空间信息主动管控机制。丁恩杰等^[59]提出智慧矿山的前提是实现可测、可观、可控,结合数字孪生技术可实现对矿山各环节对象状态及演化规律的可观,另外围绕数字孪生模型的深度数据挖掘分析技术可为矿山安全生产过程的实时再现、预测分析、交互演绎提供支撑。

2.4 工业 APP

在煤炭行业数字化和智能化升级过程中,工业 APP 至关重要,在将工业知识和各工业要素数字化的基础上,可为煤炭产业链各环节提供服务,实现知识的复用,促进煤炭行业数字化和智能化。

针对煤炭生产各阶段,引入工业 APP 将极大提升信息化管理水平。煤炭领域工业 APP 应用如图 3 所示。在研发设计阶段引入工业 APP,可实现对通用组件的重复利用,降低研发成本,提高研发效率。在煤炭生产和运输等现场环节,依托大数据、AI 和数据挖掘技术,工业 APP 可助力煤炭智能化升级,加强对工作面的智能化监控。在数据采集和分析处理基础上,通过工业 APP 可实现系统智能调控和业务管理决策优化。

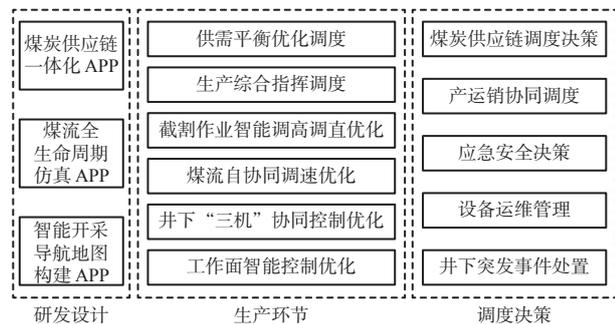


图 3 煤炭领域工业 APP 应用

Fig. 3 Industrial APP application in coal field

工业 APP 应用可帮助煤炭行业攻克高风险、工艺继承创新难、产业链协同难、资源消耗高、效率低等一系列难题,加快推进煤炭行业数字化转型。但是煤炭领域工业 APP 的发展应用仍不成熟,未来,基于物联网、云计算、AI 驱动的工业 APP 将具备自动采集海量工业数据、海量数据计算处理、机器学习

与挖掘、自动生产等能力,实现煤矿智能化生产。

2.5 信息安全

煤炭行业在向智能化发展的过程中,对大数据、云平台等新技术的应用提高了企业的生产效率和管理水平,但也给原本相对封闭的系统带来了安全隐患。在工业互联网应用中,往往更多关注其适用性和可用性,而对安全性不够重视,存在以下问题:物理信息安全方面,从业人员对物理信息安全的认识不足,在设备物理安全保障方面较欠缺;网络信息安全方面,工业互联网在煤矿中的应用面临网络攻击等风险;系统信息安全方面,可能存在越权访问、数据权限设计缺陷等问题;数据安全方面,数据隐私缺乏有效的防护手段;应用信息安全方面,在煤矿生产和管理中,可能存在工业互联网平台运营管理安全问题。

针对以上问题,在参考信息化程度更高的智能电网并考虑煤矿信息化现状的基础上,总结了提高煤炭工业互联网安全性的措施。在管理方面,应构建完备的信息安全管理组织、制度和预案,提升从业人员信息安全意识,加强设备物理安全保障。针对数据安全,通过数据加密机制保障数据传输安全,同时加强身份认证和访问控制,限制用户对资源的非法访问,从而提高数据的安全性。在信息技术上,利用防火墙、安全网关等技术实现关键生产设施区域的隔离防护,利用入侵检测、漏洞挖掘等技术提升系统信息安全性和鲁棒性,保障系统网络安全。同时,应严格执行网络安全等级保护制度,严格遵守安全标准,定期进行安全等级评估和整改^[60-61]。通过保障设备物理安全防护、网络安全防护、系统安全防护、数据安全防护、应用安全防护,构建起煤矿信息安全防护体系,保障煤矿智能化建设。

3 结论

1) 新传感器技术的研发不断拓宽矿山感知的边界,同时在功耗、可靠性等方面也有了突破,但在矿山智能化应用中仍有拓展空间,目前感知层智能程度还无法满足矿山泛在感知要求。通过新技术的发展,智能感知将向着集成化、智能化方向发展,在感知层提供更强大的实时处理能力和一定程度的决策能力,借助矿井传输网络,实现矿井感知-通信-控制一体化。

2) 5G 高带宽、低时延、广连接的特性为矿山智能化各场景提供了新的解决方案。但目前 5G 在矿山应用中仍存在许多问题,由于允许使用的射频电磁能最大功率限制为 6 W,使符合标准的 5G 在煤矿

井下实际应用效果大打折扣,无法有效支持煤矿智能化建设。在井下部分场景中5G技术现场应用效果不如传统通信网络,目前井下还无法完全使用5G替代传统通信网络,以6G为代表的新一代通信技术应在这些方面进一步突破和发展。

3) 赋能平台是煤炭工业互联网的大脑,大数据是赋能平台的关键要素,煤炭工业机理模型和诊断决策模型是赋能平台的灵魂。目前,针对煤炭工业机理模型已有大量研究,但在结合大数据和AI技术方面仍处于初级阶段,需进行深入研究,实现知识的自优化、自迭代。

4) 工业APP可为煤炭产业链各环节提供服务,帮助煤炭行业攻克高风险、工艺继承创新难、产业链协同难、资源消耗高、效率低等一系列难题。但是煤炭领域工业APP的发展应用仍不成熟。

5) 受制于煤炭行业特点,煤炭信息安全防护方面有缺失,需要从物理信息安全、网络信息安全、系统信息安全、数据信息安全和应用信息安全等方面采取措施,加强管理,提升安全防护水平,保障煤矿智能化建设。

参考文献(References):

- [1] 王国法,王虹,任怀伟,等.智慧煤矿2025情景目标和发展路径[J].煤炭学报,2018,43(2):295-305.
WANG Guofa, WANG Hong, REN Huaiwei, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 295-305.
- [2] 王国法,任怀伟,赵国瑞,等.煤矿智能化十大“痛点”解析及对策[J].工矿自动化,2021,47(6):1-11.
WANG Guofa, REN Huaiwei, ZHAO Guorui, et al. Analysis and countermeasures of ten 'pain points' of intelligent coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(6): 1-11.
- [3] 康红普,王国法,王双明,等.煤炭行业高质量发展研究[J].中国工程科学,2021,23(5):130-138.
KANG Hongpu, WANG Guofa, WANG Shuangming, et al. High-quality development of China's coal industry[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(5): 130-138.
- [4] 王国法,刘峰,庞义辉,等.煤矿智能化——煤炭工业高质量发展的核心技术支撑[J].煤炭学报,2019,44(2):349-357.
WANG Guofa, LIU Feng, PANG Yihui, et al. Coal mine intellectualization: the core technology of high quality development[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 349-357.
- [5] 王国法,赵国瑞,任怀伟.智慧煤矿与智能化开采关键技术分析[J].煤炭学报,2019,44(1):34-41.
WANG Guofa, ZHAO Guorui, REN Huaiwei. Analysis on key technologies of intelligent coal mine and intelligent mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 34-41.
- [6] 王国法,范京道,徐亚军,等.煤炭智能化开采关键技术创新进展与展望[J].工矿自动化,2018,44(2):5-12.
WANG Guofa, FAN Jingdao, XU Yajun, et al. Innovation progress and prospect on key technologies of intelligent coal mining[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(2): 5-12.
- [7] 姜德义,魏立科,王翀,等.智慧矿山边缘云协同计算技术架构与基础保障关键技术探讨[J].煤炭学报,2020,45(1):484-492.
JIANG Deyi, WEI Like, WANG Chong, et al. Discussion on the technology architecture and key basic support technology for intelligent mine edge-cloud collaborative computing[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 484-492.
- [8] 王国法,庞义辉,任怀伟.智慧矿山技术体系研究与发展路径[J].金属矿山,2022(5):1-9.
WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei. Research and development path of smart mine technology system[J]. Metal Mine, 2022(5): 1-9.
- [9] 丁恩杰,金雷,陈迪.互联网+感知矿山安全监控系统研究[J].煤炭科学技术,2017,45(1):129-134.
DING Enjie, JIN Lei, CHEN Di. Study on safety monitoring and control system of internet+perception mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 129-134.
- [10] 李军,赵军.MEMS传感器的发展及其在煤矿井下的应用研究[J].煤炭技术,2014,33(7):238-240.
LI Jun, ZHAO Jun. Development and application of MEMS sensor under coal mine[J]. Coal Technology, 2014, 33(7): 238-240.
- [11] ZHAO Yong, LI Zhongqiang, DONG Yue. Design and experiments on a wide range fiber Bragg grating sensor for health monitoring of coal mines[J]. *Optik*, 2014, 125(20): 6287-6290.
- [12] REDDY N S, SAKETH M S, DHAR S. Review of sensor technology for mine safety monitoring systems: a holistic approach[C]. IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation, Kolkata, 2016: 429-434.
- [13] 丁恩杰,施卫祖,张申,等.矿山物联网顶层设计[J].工矿自动化,2017,43(9):1-11.
DING Enjie, SHI Weizu, ZHANG Shen, et al. Top-down design of mine Internet of things[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(9): 1-11.
- [14] 李首滨,李森,张守祥,等.综采工作面智能感知与智能控制关键技术与应用[J].煤炭科学技术,2021,49(4):28-39.

- LI Shoubin, LI Sen, ZHANG Shouxiang, et al. Key technology and application of intelligent perception and intelligent control in fully mechanized mining face[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 28-39.
- [15] 王继业, 蒲天骄, 仝杰, 等. 能源互联网智能感知技术框架与应用布局[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(4): 1-14.
WANG Jiye, PU Tianjiao, TONG Jie, et al. Intelligent perception technology framework and application layout of energy Internet[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(4): 1-14.
- [16] 赵小虎, 张凯, 赵志凯, 等. 矿山物联网网络技术的发展趋势与关键技术[J]. 工矿自动化, 2018, 44(4): 1-7.
ZHAO Xiaohu, ZHANG Kai, ZHAO Zhikai, et al. Developing trend and key technologies of network technology of mine Internet of things[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(4): 1-7.
- [17] 袁亮, 俞啸, 丁恩杰, 等. 矿山物联网人-机-环状态感知关键技术研究[J]. 通信学报, 2020, 41(2): 1-12.
YUAN Liang, YU Xiao, DING Enjie, et al. Research on key technologies of human-machine-environment states perception in mine Internet of things[J]. Journal on Communications, 2020, 41(2): 1-12.
- [18] 霍振龙. LoRa技术在矿井无线通信中的应用分析[J]. 工矿自动化, 2017, 43(10): 34-37.
HUO Zhenlong. Application analysis of LoRa technology in mine wireless communication[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(10): 34-37.
- [19] 孙继平. 矿井宽带无线传输技术研究[J]. 工矿自动化, 2013, 39(2): 1-5.
SUN Jiping. Research of mine wireless broadband transmission technology[J]. Industry and Mine Automation, 2013, 39(2): 1-5.
- [20] 王国法, 赵国瑞, 胡亚辉. 5G技术在煤矿智能化中的应用展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 16-23.
WANG Guofa, ZHAO Guorui, HU Yahui, et al. Application prospect of 5G technology in coal mine intelligence[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 16-23.
- [21] 葛世荣, 王世佳, 曹波, 等. 智能采运机组自主定位原理与技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 75-86.
GE Shirong, WANG Shijia, CAO Bo, et al. Autonomous positioning principle and technology of intelligent shearer and conveyor[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 75-86.
- [22] 杨健健, 张强, 吴淼, 等. 巷道智能化掘进的自主感知及调控技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2045-2055.
YANG Jianjian, ZHANG Qiang, WU Miao, et al. Research progress of autonomous perception and control technology for intelligent heading[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2045-2055.
- [23] 范京道, 闫振国, 李川. 基于5G技术的煤矿智能化开采关键技术探索[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 92-97.
FAN Jingdao, YAN Zhenguo, LI Chuan. Exploration of intelligent coal mining key technology based on 5G technology[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 92-97.
- [24] 毛馨凯, 刘万远. 5G技术在智能采煤工作面的应用研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(增刊1): 39-41, 50.
MAO Xinkai, LIU Wanyuan. Research on application of 5G technology in intelligent coal mining face[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(S1): 39-41, 50.
- [25] 霍振龙, 张袁浩. 5G通信技术及其在煤矿的应用构想[J]. 工矿自动化, 2020, 46(3): 1-5.
HUO Zhenlong, ZHANG Yuanhao. 5G communication technology and its application conception in coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(3): 1-5.
- [26] 王睿, 张克落. 5G网络切片综述[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2018, 38(5): 19-27.
WANG Rui, ZHANG Keluo. Survey of 5G network slicing[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2018, 38(5): 19-27.
- [27] 刘伟芳, 吴迪. 国内外露天矿山无人驾驶技术发展现状[J]. 露天采矿技术, 2020, 35(4): 32-34, 38.
LIU Weifang, WU Di. Technology development status of unmanned driving in open-pit mines at home and abroad[J]. Opencast Mining Technology, 2020, 35(4): 32-34, 38.
- [28] 孙继平. 煤矿智能化与矿用5G[J]. 工矿自动化, 2020, 46(8): 1-7.
SUN Jiping. Coal mine intelligence and mine-used 5G[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8): 1-7.
- [29] 李君, 邱君降, 窦克勤. 工业互联网平台参考架构、核心功能与应用价值研究[J]. 制造业自动化, 2018, 40(6): 103-106, 126.
LI Jun, QIU Junjiang, DOU Keqin. Research on the reference architecture, core function and application value of industrial internet platform[J]. Manufacturing Automation, 2018, 40(6): 103-106, 126.
- [30] 丁恩杰, 俞啸, 廖玉波, 等. 基于物联网的矿山机械设备状态智能感知与诊断[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2308-2319.
DING Enjie, YU Xiao, LIAO Yubo, et al. Key technology of mine equipment state perception and online diagnosis under Internet of things[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2308-2319.
- [31] 张建中, 郭军. 智慧矿山工业互联网技术架构探讨[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 238-246.
ZHANG Jianzhong, GUO Jun. Discussion on Internet

- technology framework of smart mine industry[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(5): 238-246.
- [32] 吴群英, 蒋林, 王国法, 等. 智慧矿山顶层架构设计及其关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(7): 80-91.
WU Qunying, JIANG Lin, WANG Guofa, et al. Top-level architecture design and key technologies of smart mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7): 80-91.
- [33] 李首滨. 煤炭工业互联网及其关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(7): 98-108.
LI Shoubin. Coal industry Internet and its key technologies[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7): 98-108.
- [34] 毛善君, 刘孝孔, 雷小锋, 等. 智能矿井安全生产大数据集成分析平台及其应用[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(12): 169-176.
MAO Shanjun, LIU Xiaokong, LEI Xiaofeng, et al. Research and application on big data integration analysis platform for intelligent mine safety production[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(12): 169-176.
- [35] 葛世荣. 煤矿智采工作面概念及系统架构研究[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(4): 1-9.
GE Shirong. Research on concept and system architecture of smart mining workface in coal mine[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(4): 1-9.
- [36] 葛世荣, 胡而已, 裴文良. 煤矿机器人体系及关键技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 455-463.
GE Shirong, HU Eryi, PEI Wenliang. Classification system and key technology of coal mine robot[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 455-463.
- [37] 葛世荣, 张帆, 王世博, 等. 数字孪生智采工作面技术架构研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 1925-1936.
GE Shirong, ZHANG Fan, WANG Shibo, et al. Digital twin for smart coal mining workface: technological frame and construction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 1925-1936.
- [38] 葛世荣, 郝尚清, 张世洪, 等. 我国智能化采煤技术现状及待突破关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(7): 28-46.
GE Shirong, HAO Shangqing, ZHANG Shihong, et al. Status of intelligent coal mining technology and potential key technologies in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7): 28-46.
- [39] 蓝航, 陈东科, 毛德兵. 我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(1): 39-46.
LAN Hang, CHEN Dongke, MAO Debing. Current status of deep mining and disaster prevention in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(1): 39-46.
- [40] 付华, 谢森, 徐耀松, 等. 基于ACC-ENN算法的煤矿瓦斯涌出量动态预测模型研究[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(7): 1296-1301.
FU Hua, XIE Sen, XU Yaosong, et al. Gas emission dynamic prediction model of coal mine based on ACC-ENN algorithm[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(7): 1296-1301.
- [41] 乔伟, 靳德武, 王皓, 等. 基于云服务的煤矿水害监测大数据智能预警平台构建[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(7): 2619-2627.
QIAO Wei, JIN Dewu, WANG Hao, et al. Development of big data intelligent early warning platform for coal mine water hazard monitoring based on cloud service[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2619-2627.
- [42] 王益伟. 大水矿山地下水致灾机理及防治研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
WANG Yiwei. Research on disaster mechanism & prevention and control induced by groundwater in the groundwater abundant mines[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [43] 张志龙. 矿井水致灾条件与致灾机理分析及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(增刊2): 222-225, 228.
ZHANG Zhilong. Application and analysis on condition and mechanism caused by mine water disaster[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(S2): 222-225, 228.
- [44] 朱宗奎, 徐智敏, 孙亚军. 矿井水害的临突监测指标及预警模型[J]. *煤矿安全*, 2014, 45(1): 170-172.
ZHU Zongkui, XU Zhimin, SUN Yajun. Critical water inrush monitoring index and early-warning model of mine water disaster[J]. *Safety in Coal Mines*, 2014, 45(1): 170-172.
- [45] 邓军, 李贝, 王凯, 等. 我国煤火灾害防治技术研究现状及展望[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(10): 1-7, 101.
DENG Jun, LI Bei, WANG Kai, et al. Research status and outlook on prevention and control technology of coal fire disaster in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(10): 1-7, 101.
- [46] 李翠平, 曹志国, 钟媛. 矿井火灾的场量模型构建及其可视化仿真[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(4): 902-908.
LI Cuiping, CAO Zhiguo, ZHONG Yuan. Field variables modeling and visualization simulation of fire disaster in underground mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(4): 902-908.
- [47] 贾宝新, 陈浩, 潘一山, 等. 多参量综合指标冲击地压预测技术研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(2): 330-337.
JIA Baoxin, CHEN Hao, PAN Yishan, et al. Rock burst prediction technology of multi-parameters synthetic index[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(2): 330-337.
- [48] 王浩宇. 基于数据的煤矿主通风机故障诊断方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
WANG Haoyu. Research on fault diagnosis method of mine main ventilator based on data[D]. Xuzhou: China

- University of Mining and Technology, 2017.
- [49] 任怀伟, 王国法, 赵国瑞, 等. 智慧煤矿信息逻辑模型及开采系统决策控制方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2923-2935.
REN Huaiwei, WANG Guofa, ZHAO Guorui, et al. Smart coal mine logic model and decision control method of mining system[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2923-2935.
- [50] 路正雄, 郭卫, 张帆, 等. 基于数据驱动的综采装备协同控制系统架构及关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 195-205.
LU Zhengxiong, GUO Wei, ZHANG Fan, et al. Collaborative control system architecture and key technologies of fully-mechanized mining equipment based on data drive[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 195-205.
- [51] 普亚松, 郭德伟, 张文斌. 故障诊断技术在煤矿机械设备中的应用[J]. 工矿自动化, 2015, 41(4): 36-39.
PU Yasong, GUO Dewei, ZHANG Wenbin. Application of fault diagnosis technologies in coal mine machinery[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(4): 36-39.
- [52] 崔亚仲, 白明亮, 李波. 智能矿山大数据关键技术与发展研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 66-74.
CUI Yazhong, BAI Mingliang, LI Bo. Key technology and development research on big data of intelligent mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 66-74.
- [53] 王国法, 杜毅博. 煤矿智能化标准体系框架与建设思路[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 1-9.
WANG Guofa, DU Yibo. Coal mine intelligent standard system framework and construction ideas[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 1-9.
- [54] 张建明, 曹文君, 王景阳, 等. 智能化煤矿信息基础设施标准体系研究[J]. 中国煤炭, 2021, 47(11): 1-6.
ZHANG Jianming, CAO Wenjun, WANG Jingyang, et al. Research on information infrastructure standard system for intelligent coal mine[J]. China Coal, 2021, 47(11): 1-6.
- [55] 王淞, 彭煜玮, 兰海, 等. 数据集成方法发展与展望[J]. 软件学报, 2020, 31(3): 893-908.
WANG Song, PENG Yuwei, LAN Hai, et al. Survey and prospect: data integration methodologies[J]. Journal of Software, 2020, 31(3): 893-908.
- [56] 滕晓旭, 全厚春, 祁金才, 等. 矿山设备维修数据集成与管控系统研究[J]. 采矿技术, 2021, 21(5): 180-183.
TENG Xiaoxu, QUAN Houchun, QI Jincai, et al. Research on data integration and control system for mining equipment maintenance[J]. Mining Technology, 2021, 21(5): 180-183.
- [57] 孙继平. 煤矿事故分析与煤矿大数据和物联网[J]. 工矿自动化, 2015, 41(3): 1-5.
SUN Jiping. Accident analysis and big data and Internet of things in coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(3): 1-5.
- [58] 郭一楠, 杨帆, 葛世荣, 等. 知识驱动的智采数字孪生主动管控模式[J/OL]. 煤炭学报: 1-12[2023-01-10]. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0223.
GUO Yinan, YANG Fan, GE Shirong, et al. Novel knowledge-driven active management and control scheme of smart coal mining face with digital twin[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-12[2023-01-10]. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0223.
- [59] 丁恩杰, 俞啸, 夏冰, 等. 矿山信息化发展及以数字孪生为核心的智慧矿山关键技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 564-578.
DING Enjie, YU Xiao, XIA Bing, et al. Development of mine informatization and key technologies of intelligent mines[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 564-578.
- [60] 张旻旻, 刘增志, 刘潇健, 等. 以标准促进我国工业APP发展的几点建议[J]. 标准科学, 2020(9): 49-52.
ZHANG Yangyang, LIU Zengzhi, LIU Xiaojian, et al. Suggestions on promoting the development of Chinese industrial APP with standards[J]. Standard Science, 2020(9): 49-52.
- [61] HUANG Ping, LIU Wei, LIU Xinlin, et al. Technology architecture of smart grid information security defense system[C]. International Conference on Applications and Techniques in Cyber Intelligence, 2020: 660-665.