

文章编号:1671-251X(2020)05-0008-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17593

人工智能技术在矿山智能化建设中的应用初探

马小平^{1,2,3}, 杨雪苗³, 胡延军^{2,3}, 缪燕子^{2,3}

- (1. 中国矿业大学 人工智能研究院, 江苏 徐州 221116;
2. 地下空间智能控制教育部工程研究中心, 江苏 徐州 221116;
3. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116)



扫码移动阅读

摘要:介绍了人工智能技术的相关概念、发展概述及其在煤炭行业发展中的应用,指出目前人工智能技术在矿山应用只是点状结合和浅度结合,没有实现人工智能技术和矿山某个生产或管理系统层面的深度融合。概述了智能矿山的发展历程,指出智能矿山是人工智能技术、大数据技术、物联网技术和矿山实体的深度融合体,利用智能通信、智能控制和智能计算技术实现数字化矿山的计算、处理,构建数字孪生矿山,通过数字孪生矿山和物理矿山的智能交互演化,达到对煤矿安全、高效、绿色的生产控制。构建了将人工智能技术和矿山深度融合的包括设备层、智能层、应用层的智能矿山三层构架:应用层处于智能矿山的最高层,其中的数字孪生矿山子层相当于“数字大脑”,实现矿山最高层次的人工智能控制;智能层中的智能体要求子系统不仅仅是应用人工智能技术处理子系统所产生的数据,而是从架构上就要将智能计算、智能通信、智能控制融为一体。展望了智能矿山建设的发展趋势:智能化矿山需要加强人工智能技术和矿山融合度的深入研究,将现有的基于人工智能的故障检测、诊断及超前干预技术应用到机器人系统中,智能计算、智能通信、智能控制融合的巡检机器人将是最早能推广的井下智能体之一;智能化矿山需要进一步加强复杂巨系统建模技术的研究,只有建立了矿山的复杂巨系统模型,才能实现采矿活动和环境的协同互动,实现采煤活动的精准控制,复杂巨系统模型的缺乏将是未来智能矿山建设亟需解决的问题。

关键词:人工智能; 智能矿山; 数字孪生矿山; 复杂巨系统; 智能体; 弱人工智能

中图分类号:TD67 文献标志码:A

Preliminary study on application of artificial intelligence technology in mine intelligent construction

MA Xiaoping^{1,2,3}, YANG Xuemiao³, HU Yanjun^{2,3}, MIAO Yanzi^{2,3}

- (1. Artificial Intelligence Research Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Engineering Research Center of Intelligent Control for Underground Space, Ministry of Education, Xuzhou 221116, China; 3. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The paper introduced related concepts, development overview and application of artificial intelligence technology in development of coal industry, and pointed out that at present, application of artificial intelligence technology in mine is only a combination of point and shallow degree, and deep fusion between artificial intelligence technology and a certain production or management system of mine is not realized. The development process of intelligent mine was summarized. Intelligent mine is considered as a

收稿日期:2020-04-12;**修回日期:**2020-05-12;**责任编辑:**张强。

基金项目:国家重点研发计划重点专项项目(2018YFC0808100);国家自然科学基金面上项目(61976218)。

作者简介:马小平(1961—),男,四川绵阳人,教授,博士,主要研究方向为智能矿山、人工智能理论及应用、控制理论及应用、网络控制,E-mail: xpma@cumt.edu.cn。通信作者:胡延军(1974—),男,浙江开化人,副教授,博士,主要研究方向为矿山物联网、井下定位、图像处理,E-mail: yjhu@cumt.edu.cn。

引用格式:马小平,杨雪苗,胡延军,等. 人工智能技术在矿山智能化建设中的应用初探[J]. 工矿自动化,2020,46(5):8-14.

MA Xiaoping, YANG Xuemiao, HU Yanjun, et al. Preliminary study on application of artificial intelligence technology in mine intelligent construction[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(5): 8-14.

deep fusion of artificial intelligence technology, big data technology, Internet of things technology and physical mine, it combined intelligent communication, intelligent control and intelligent computing technology to realize calculation and processing of digital mine, and construct digital twin mine, uses intelligent interactive evolution of digital twin mine and physical mine to achieve coal mine safety, high efficiency, green production control. A three-layer structure of intelligent mine which integrates artificial intelligence technology with mine was constructed, including equipment layer, intelligent layer and application layer. The application layer is at the highest level of the intelligent mine, in which the digital twin mine sub-layer is equivalent to "digital brain" to realize intelligent control of the highest level of the mine. The agent in the intelligent layer requires the subsystem not only to use artificial intelligence technology to process the data generated by the subsystem, but also to integrate intelligent computing, intelligent communication and intelligent control in the architecture. The development trend of intelligent mine construction was prospected: intelligent mine need to strengthen in-depth study of the artificial intelligence technology and the mine fusion, existing fault detection and diagnosis based on artificial intelligence and advanced intervention technology are applied to robot system, inspection robot integrated intelligent computing, intelligent communication, intelligent control will be one of the earliest underground intelligent agent; it is necessary to further strengthen the research on the modeling technology of complex giant system in the intelligent mine. Only by establishing the complex giant system model of the mine, the collaborative interaction between mining activities and the environment can be realized, and the accurate control of coal mining activities can be realized. The lack of complex giant system model will be an urgent problem to be solved in intelligent mine construction in the future.

Key words:artificial intelligence; intelligent mine; digital twin mine; complex giant system; intelligent agent; weak artificial intelligence

0 引言

人工智能的快速发展促进了传统工业的智能化发展,也逐渐对煤炭行业产生了巨大影响,将人工智能技术应用于煤矿生产成为了煤矿发展的新趋势。人工智能技术可为进一步提升煤炭工业高质量发展提供核心技术支撑^[1]。《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》提出,到2021年,建成多种类型、不同模式的智能化示范煤矿;到2025年,大型煤矿和灾害严重煤矿基本实现智能化;到2035年,各类煤矿基本实现智能化,构建多产业链、多系统集成的煤矿智能化系统,建成智能感知、智能决策、自动执行的煤矿智能化体系。

智能化矿山的实现途径是建设智能矿山。但智能矿山的内涵是什么,人工智能技术应该如何与矿山深度融合,这些问题业界还未完全形成共识。已有研究人员从不同专业角度对智能矿山展开了讨论,如从智能化开采、掘进角度展开讨论^[1-3],从瓦斯抽采智能化钻探角度展开讨论^[4-5],还有从智能矿山通信网络角度展开讨论^[6]等。这些研究大大丰富了智能矿山建设的内容,但都未将人工智能技术应用到智能矿山的体系架构及矿山层面系统实现中。本文从人工智能技术角度对智能矿山进行探讨,设计

了基于人工智能技术的智能矿山架构,并探索了人工智能技术和矿山子系统的深度融合。

1 人工智能技术概述

1.1 智能和智慧

首先对“智能”和“智慧”的区别及联系进行讨论,并对“智能”一词的含义进行约定。

英语文献中与“智能”、“智慧”相关的词为 wisdom、smart、intelligence。这3个单词含义的区分度比较清晰,wisdom 偏向“智力”的含义,smart 偏向“聪明”的含义,而 intelligence 偏向“智能/智慧”的含义,intelligence 在智能程度上一般比 smart 更高一层次。但在中文文献中,“智能”和“智慧”2 个词常混用。字典中的“智能”和“智慧”2 个词有细微区别。在学术界中,2 个词的边界越来越模糊。一个典型的例子就是“Artificial Intelligence”被翻译成“人工智能”,而不是直译成“人工智慧”。

本文中的“智能”将包含相关文献中“智能”和“智慧”的相关含义。在后面的讨论中,也将相关参考文献中的“智慧”统一为“智能”。

1.2 人工智能技术概念

人工智能技术是研究人类大脑或人类思想方式,使机器能模仿人类大脑理解和运用思维方法的

技术^[7]。简而言之,人工智能技术就是任何能模拟与人的认知、学习能力相似的技术。

从模拟人的程度出发,人工智能技术可划分为弱人工智能和强人工智能两大类^[8]。弱人工智能是希望借鉴人类的智能行为,研制出更好的工具,以减轻人类智力劳动,类似于高级仿生学。强人工智能是希望达到甚至超越人类智慧水平的人造物,具有心智和意识、能根据自己的意图开展行动的技术,是“人造智能”。不言而喻,强人工智能更像想象中的人工智能,但从科学伦理角度来说,目前绝大多数研究者都认同人工智能学界不应朝向强人工智能方向发展^[8-9]。

本文作者对强人工智能也持否定态度。本文所讨论的人工智能技术限定为借鉴人类的智能行为研制出某种特定类型用以减轻人类智力劳动工具的技术。

1.3 人工智能技术发展概述

最初的人工智能技术主要关注自然语言翻译、符号推理和博弈论等问题,此类人工智能技术也被称为传统人工智能。传统人工智能试图构建能复制人类行为的计算机系统,但因目标过高而陷入窘境。随后,人工智能技术研究人员将目标调整到计算机在执行某些类任务时能提高性能这一目标,这就产生了机器学习(Machine Learning)这一领域的研究。

机器学习仍是一个范畴很大的概念。20 世纪 80 年代以来,被研究最多、最广的是机器学习中广义的归纳学习,它涵盖了监督学习、无监督学习等。最初的研究主流是以决策树和基于逻辑学习技术为代表的符号主义学习。随后的研究主流为基于神经网络的连接主义学习。最近的研究主流转向以支持向量机为代表的统计学习。目前,以神经网络自动选取数据特征方法^[10]及深度信念网络(Deep Belief Network)概念^[11]提出为标志,以深度学习为标志的连接主义学习引起了广大研究人员的关注。特别是基于深度学习的 AlphaGo 打败世界顶级围棋棋手李世石,让广大民众也知晓了深度学习和人工智能。深度学习的“深度”,形式上指的是人工神经网络具有的多个隐含层,功能上指的是人工神经网络能像生物一样“分层迭代,逐级抽象”出高级信息特征。深度网络不仅能表示更复杂的目标函数,还能自动找出关键的数据特征。目前,深度学习是人工智能技术的研究热点。

1.4 人工智能技术在矿山中的应用

伴随着人工智能技术的发展,研究人员对矿山各个生产系统中如何应用人工智能技术进行了探

索。由于人工智能技术的研究范畴大、时间跨度大,其与矿井的结合点也非常多,相关文献报道也较多。如将人工智能技术与矿山灾害治理相结合,可构建智能水害治理平台^[12-14]、智能瓦斯抽采技术^[4,5,15]、智能冲击矿压监控技术^[16]等。将人工智能技术与开采、掘进技术相结合,可构建智能煤岩识别技术^[17]、智能采煤工作面^[1-3]等。将人工智能技术与矿山的相关监控系统相结合,可构建智能化钻探监控系统^[18]、智能围岩监控系统^[19]。将人工智能技术应用到通信网络中,可构建出智能井下无线传感器网络路由算法^[20]。此外,还有人工智能技术与管理相结合构建以矿工动作识别为基础的智能矿工行为管理系统^[21]。

上述研究工作都有力地推动了煤矿智能生产、管理水平的提高。但是需要指出的是,上述研究成果中,人工智能技术都是与矿山的点状结合和浅度结合。具体而言,文献[12-19]所提及的智能系统,其智能性只体现在利用人工智能技术中的数据处理方法(符号化建模、专家系统、特征自动提取及基于以上技术的数据趋势分析、预测等)。文献[20-21]所提及的智能系统,其智能性体现在将人工智能技术应用到矿山对象实体中。如何实现人工智能技术和某个生产或管理系统层面的深度融合,以及人工智能技术在整个矿山系统层面中所处的地位、所担当的角色,这些问题的研究还未引起足够的重视。本文将对智能矿山架构及子系统和人工智能技术的深度融合进行探索。

2 智能矿山

人工智能技术和矿山的深度融合体是智能矿山。智能矿山强调的是矿山的认知、学习能力属性。在矿山已有演变过程简述基础上,本文提出了智能矿山概念及相应的三层结构。

2.1 智能矿山发展

煤矿已经历了矿山机械化、矿山自动化、矿山数字化/矿山信息化、物联网矿山等不同形态的演变^[22-23]。山西大同煤峪口煤矿的综合机械化开采模式掀开了我国煤炭工业综合机械化全面发展的序幕^[24-25]。煤矿综合自动化系统是继煤矿进行全面机械化开采之后的又一重大进步^[26]。自动化矿山研究的重点是提高机械与电气设备的自动化水平^[27],使用于采掘、输送的机械设备和其他设备能够长时间脱离人员操作。

随着煤矿开采的日益复杂,传统的机械化、自动化开采技术已不能满足进一步提高开采效率和安全水平的要求^[28-29]。随之提出了数字化矿山^[30]理论,

构建了矿山数字空间。煤矿数字化/信息化是将海量异质的矿山信息资源进行全面、高效和有序的管理、整合,将煤矿复杂多变的信息转换为可以度量的数字、数据,为实现煤矿综合管控的计算机化和网络化提供支撑。

从泛在感知、物物相连的理念出发,数字化矿山实现了物联网矿山^[31-32]的演变。按照物联网的理念,对于通信网和互联网的拓展应用和网络延伸,研究人员提出了感知层、网络层、应用层的物联网矿山三层架构。物联网矿山的突出优势是系统概念的拓展。矿山不仅可按原来的采、掘、通、运等生产环节构建监控系统,还可按设备地点、生产逻辑等灵活构建监控系统。

2.2 智能矿山架构及智能体

将煤矿和人做类比,矿山机械化和矿山自动化就像人类有了四肢,矿山数字化和矿山信息化就像人类有了各种感知器官,而物联网矿山就像人类有了筋脉,矿山还缺少一个“大脑”。矿山机械化、矿山自动化、矿山数字化/矿山信息化、物联网矿山在建设过程中并不是没有涉及“大脑”的建设,事实上,数字化矿山、物联网矿山的建设过程都构思有智能决策模块或功能,但由于受当时煤矿安全生产技术发展水平制约,矿山前期演变过程中都未将重点放在如何实现矿山智能化的研究上。随着物联网矿山建设进程的结束,智能矿山建设的高潮正在全国兴起^[33-34]。

智能矿山的概念和内涵目前还未形成共识。笔者认为,智能矿山是人工智能技术、大数据技术、物联网技术和矿山实体的深度融合体,它利用智能传感器装备对物理世界进行感知并数字化,利用智能通信、智能控制和智能计算技术实现数字化矿山的计算、处理,构建数字孪生矿山,通过数字孪生矿山和物理矿山的智能交互演化,达到对煤矿安全、高效、绿色的生产控制。与其他智能矿山概念^[33-34]相比,本文所提出的智能矿山概念更加突出人工智能技术在智能矿山信息技术体系中的地位。人工智能技术应贯穿矿山信息采集、传输、处理、应用的所有环节,并在矿山的生产、管理、灾害治理中发挥作用。

根据上述定义,本文提出了设备层、智能层、应用层的智能矿山三层构架,如图1所示。

设备层:处于智能矿山的最底层,由矿山中各种传感器和执行机构等组成,完成数据的采集、指令的执行。

智能层:是智能矿山的中间层,也是最核心层。该层由一个个智能体组成。每个智能体是融智能通信、智能控制、智能计算于一体的信息物理系统的实

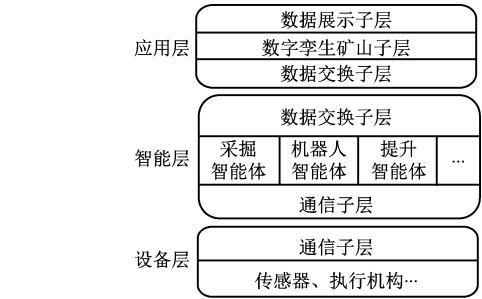


图1 智能矿山的三层架构

Fig. 1 Three layers structure of intelligent mine

体。智能体也可理解为传统矿山子系统的智能化。

应用层:处于智能矿山的最高层。该层是各种应用逻辑的组合及数据的显示,由3个子层组成,其中数字孪生矿山子层相当于“数字大脑”,实现矿山最高层次的智能控制;数据展示子层为报表、显示、业务逻辑等,在该层可实现业务的条块分割。

与已有的智能矿山架构相比,本文所提出的架构强调的是人工智能技术和矿山的深度融合。智能层智能体要求子系统不仅仅是应用人工智能技术处理子系统所产生的数据,而是从架构上就要将智能计算、智能通信、智能控制融为一体。应用层不仅仅是数据条块分割应用,而是利用人工智能技术和矿山大数据技术对整个矿山系统层面数据的融合处理。

2.3 智能矿山应用实例设计

将智能矿山三层架构与某煤矿实际情况相结合,具体设计了如图2所示的智能矿山架构。

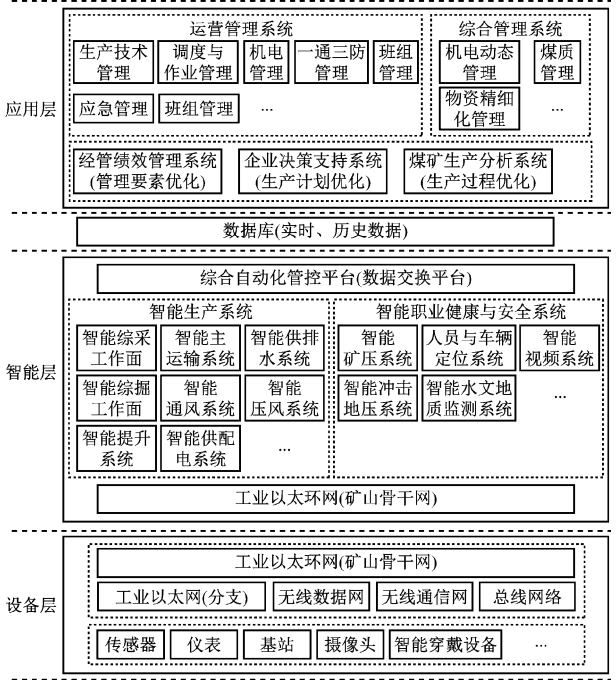


图2 智能矿山架构具体实现

Fig. 2 Implementation of intelligent mine layers

设备层设计的主要工作是消除监控盲点,如增

加摄像头监控点,添加基于光纤的多功能传感器,给矿工配置具备通信、定位、应急呼叫等功能的智能矿灯等。

智能层是设计的重点之一,设计了具有预测预警功能的矿压智能体、胶带运输智能体以及采煤智能体等。其中,胶带运输智能体将基于变频器的智能胶带电动机控制技术和机器学习相结合,如图 3 所示,利用视频信号,使用机器学习算法,完善胶带空载、跑偏等功能的监控,增加人员三违异常事件的监管功能,从而实现控制、管理一体化。此外,对无人化采煤工作面进一步进行优化,设计了如图 4 所示的采掘智能体。与现有无人化采煤工作面相比,采掘智能体实现了通信、控制、计算一体化,更加强调整个采煤工作面所有运动设备间的协同性,解决了现有的初步智能化采煤工作面中设备群位姿不关联问题。

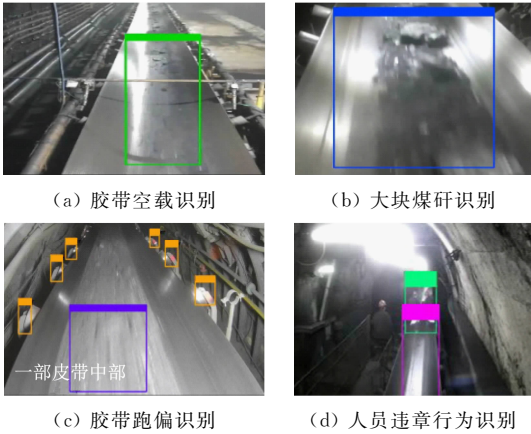


图 3 基于机器学习的煤矿运输智能体
Fig. 3 Coal mine transportation intelligent agent based on machine learning

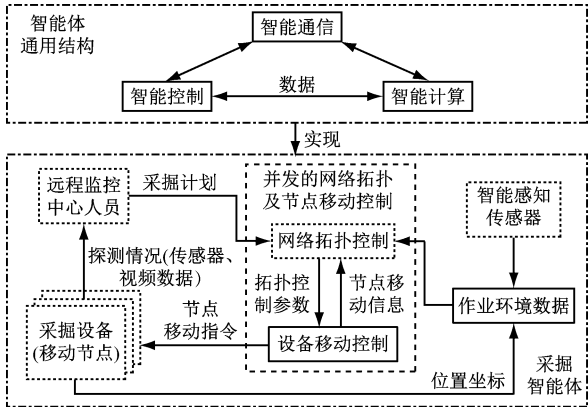


图 4 采掘智能体的具体实现
Fig. 4 Implementation of mining and excavating intelligent agent

在应用层,基于数字孪生的智能矿山运行机制如图 5 所示。在数据驱动下,利用矿山数字模型对矿山生产计划进行仿真演变分析,发出生产运行指令;智能生产控制系统在数据驱动下,根据控制指令对生产过程进行迭代求优;智能矿山管理系统在数

据驱动下,根据生产要素优化管控流程。如此反复迭代,完成煤矿生产计划。

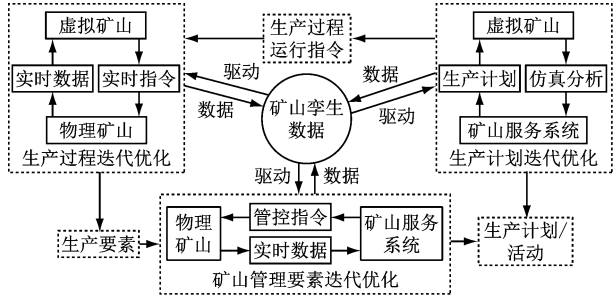


图 5 基于数字孪生的智能矿山运行机制
Fig. 5 Operation mechanism of intelligent mine based on digital twin technology

3 结论

(1) 矿山智能化一定是煤矿技术的再次革命,今后几年也一定会兴起矿山智能化建设的高潮。结合人工智能技术的发展趋势,提出了以人工智能技术为核心的智能矿山概念及建设架构,并介绍了结合某矿井实际情况的设计实践。

(2) 智能化矿山建设基础还需进一步夯实。现有的智能矿山方案设计实际上仍然包括诸如中央带式输送机无人值守改造、部分水泵房无人值守改造、数据接入平台完善等矿山数字化建设的内容。同一矿山中各物理子系统的数字化水平参差不齐,也是目前我国矿山建设现状。这将影响智能化矿山建设成效,特别是矿山各生产管理环节的智能协同、智能精准控制的实现。

(3) 智能化矿山需要加强人工智能技术与矿山融合度的深入研究。目前,有的矿井已有泵房、变电所、主运输系统等生产环节初步实现了智能巡检功能,但现有巡检系统的智能仅体现在自行走方面。如何将现有的基于人工智能的故障检测、诊断及超前干预技术应用到机器人系统中,从而实现自行走、自学习、自干预的智能巡检机器人,该方面研究值得关注。此类机器人技术和其他行业机器人技术有相通之处,因此,研究推进速度相对较快。可预测,智能计算、智能通信、智能控制融合的巡检机器人将是最早能推广的井下智能体之一。

(4) 需要进一步加强复杂巨系统建模技术的研究。在目前大多数智能矿山设计过程中,数字孪生矿山子层的控制机制设计还不完善,具体体现为只能被动接收环境参数作为控制输入,无法将环境的控制纳入整个控制环节之中。这是由于矿山级别的综合采矿活动和环境变化的复杂巨系统模型还未建立。只有建立了矿山的复杂巨系统模型,才能实现采矿活动和环境的协同互动,实现采煤活动的精准控制。复杂巨系统模型的缺乏将是未来智能矿山建

设亟需解决的问题。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] 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.

[3] 方新秋,梁敏富,李爽,等.智能工作面多参量精准感知与安全决策关键技术[J].煤炭学报,2020,45(1):493-508.
FANG Xinqiu, LIANG Minfu, LI Shuang, et al. Key technologies of multi parameter accurate perception and security decision in intelligent working face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 493-508.

[4] 王清峰,陈航.瓦斯抽采智能化钻探技术及装备的发展与展望[J].工矿自动化,2018,44(11):18-24.
WANG Qingfeng, CHEN Hang. Development and prospect on intelligent drilling technology and equipment for gas drainage [J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(11): 18-24.

[5] 刘送永,张德义.巷道掘进机智能化技术研究现状及展望[J].工矿自动化,2019,45(10):23-28.
LIU Songyong, ZHANG Deyi. Research status and prospect of intelligentization technology of roadheader [J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(10): 23-28.

[6] 孙继平,陈晖升.智慧矿山与5G和WiFi6[J].工矿自动化,2019,45(10):1-4.
SUN Jiping, CHEN Huisheng. Smart mine with 5G and WiFi6[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(10): 1-4.

[7] BELLO O, HOLZMANN J, YAQOUB T, et al. Application of artificial intelligence methods in drilling system design and operations: a review of the state of the art[J]. Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research, 2015, 5(2): 121-139.

[8] 周志华.关于强人工智能[J].中国计算机学会通讯[J].2018,14(1):45-46.
ZHOU Zhihua. About strong artificial intelligence [J]. Communications of the CCF, 2018, 14(1): 45-46.

[9] JARRAHI M H. Artificial intelligence and the future of work: human-AI symbiosis in organizational decision making[J]. Business Horizons. 2018, 61(4): 577-586.

[10] HINTON G E, SALAKHUTDINOV R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks [J]. Science, 2006, 313(5786): 504-507.

[11] HINTON G E, OSINDERO S, TEH Y W. A fast learning algorithm for deep belief nets [J]. Neural Computation, 2006, 18(7): 1527-1554.

[12] 靳德武,赵春虎,段建华,等.煤层底板水害三维监测与智能预警系统开发框架[J/OL].煤炭学报: 1-11[2020-04-10]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0309>.
JIN Dewu, ZHAO Chunhu, DUAN Jianhua, et al. Development of 3D monitoring and intelligent early warning system for water hazard of coal seam floor [J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-11 [2020-04-10]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0309>.

[13] 武强,徐华,赵颖旺,等.基于云平台的矿井水害智慧应急救援系统与应用[J].煤炭学报,2018,43(10):2661-2667.
WU Qiang, XU Hua, ZHAO Yingwang, et al. Cloud-based smart emergency rescue system and its application in mine water disaster[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(10): 2661-2667.

[14] 靳德武,乔伟,李鹏,等.煤矿防治水智能化技术与装备研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2019,47(3):10-17.
JIN Dewu, QIAO Wei, LI Peng, et al. Research status and prospects on intelligent technology and equipment for mine water hazard prevention and control[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 10-17.

[15] 周福宝,刘春,夏同强,等.煤矿瓦斯智能抽采理论与调控策略[J].煤炭学报,2019,44(8):2377-2387.
ZHOU Fubao, LIU Chun, XIA Tongqiang, et al. Intelligent gas extraction and control strategy in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2377-2387.

[16] 潘俊锋,刘少虹,马文涛,等.深部冲击地压智能防控方法与发展路径[J].工矿自动化,2019,45(8):19-24.
PAN Junfeng, LIU Shaohong, MA Wentao, et al. Intelligent prevention and control method of deep rock burst and its development path[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(8): 19-24.

[17] 葛世荣,王忠宾,王世博.互联网+采煤机智能化关键技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(7):1-9.
GE Shirong, WANG Zhongbin, WANG Shibo. Study on key technology of Internet plus intelligent coal shearer [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 1-9.

[18] 石智军,李泉新,姚克.煤矿井下智能化定向钻探发展

- 路径与关键技术分析[J/OL]. 煤炭学报: 1-9 [2020-04-10]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0336>.
- SHI Zhijun, LI Quanxin, YAO Ke. Development path and key technology analysis of intelligent directional drilling underground coal mine[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-9 [2020-04-10]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0336>.
- [19] 李化敏, 王伸, 李东印, 等. 煤矿采场智能岩层控制原理及方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 127-140.
- LI Huamin, WANG Shen, LI Dongyin, et al. Intelligent ground control at longwall working face[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 127-140.
- [20] 朱永红, 丁恩杰, 胡延军. PSO 优化的能耗均衡 WSNs 路由算法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1): 78-86
- ZHU Yonghong, DING Enjie, HU Yanjun. Energy balance routing algorithm for WSNs optimized with PSO[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(1): 78-86.
- [21] 杨小彬, 周世禄, 李娜, 等. 深度学习及其在煤矿安全领域的应用[J]. 煤矿安全, 2019, 50(1): 253-256.
- YANG Xiaobin, ZHOU Shilu, LI Na, et al. Deep learning and its application in coal mine safety[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(1): 253-256.
- [22] 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/OL]. 煤炭科学技术: 1-18 [2020-04-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20200416.1337.002.html>.
- GE Shirong, HAO Shangqing, ZHANG Shihong, et al. The status-of-art and key autonomous technology of smart coal mining in China[J]. Coal Science and Technology: 1-18[2020-04-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20200416.1337.002.html>.
- [23] 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.
- [24] 康红普, 徐刚, 王彪谋, 等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40 a 及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(2): 7-39.
- KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(2): 7-39.
- [25] 胡省三, 刘修源, 成玉琪. 采煤史上的技术革命: 我国综采发展 40 a [J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1769-1771.
- HU Shengsan, LIU Xiuyuan, CHENG Yuqi. Technical revolution in coal mining history: 40 years development of fully mechanized coal mining in China [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1769-1771.
- [26] HAO X D, YANG H W, YIN Z H. Research on the intelligent integrated management system of opencast coal mine [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1314(1): 1-4.
- [27] 谭得健. 我国煤矿自动化现状及发展趋势[J]. 工矿自动化, 2010, 36(9): 126-129.
- TAN Dejian. Status of automation of coal mine and its developing trend in China [J]. Industry and Mine Automation, 2010, 36(9): 126-129.
- [28] VALUEV A M, VOLKOVA L P. Problems of intelligent automation of unmanned underground coal mining [C]//International Conference of Artificial Intelligence, Medical Engineering, Education, Cham: Springer, 2018.
- [29] WANG G, XU Y, REN H. Intelligent and ecological coal mining as well as clean utilization technology in China: review and prospects[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(2): 15-23.
- [30] 王金华, 汪有刚, 傅俊皓. 数字矿山关键技术研究 with 示范[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1323-1331.
- WANG Jinhua, WANG Yougang, FU Junhao. Crucial technology research and demonstration of digital mines[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1323-1331.
- [31] 解海东, 李松林, 王春雷, 等. 基于物联网的智能矿山体系研究[J]. 工矿自动化, 2011, 37(3): 63-66.
- XIE Haidong, LI Songlin, WANG Chunlei, et al. Research of intelligent mine system based on Internet of things[J]. Industry and Mine Automation, 2011, 37(3): 63-66.
- [32] 丁恩杰, 赵志凯. 煤矿物联网研究现状及发展趋势[J]. 工矿自动化, 2015, 41(5): 1-5.
- DING Enjie, ZHAO Zhikai. Research advances and prospects of mine Internet of things[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(5): 1-5.
- [33] 王国法, 刘峰, 孟祥军, 等. 煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J]. 煤炭科学技术, 2019, 48(8): 1-36.
- WANG Guofa, LIU Feng, MENG Xiangjun, et al. Research and practice on intelligent coal mine construction(primary stage) [J]. Coal Science and Technology, 2019, 48(8): 1-36.
- [34] 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.