



移动阅读

王国法,赵国瑞,任怀伟.智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析[J].煤炭学报,2019,44(1):34-41. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.5034

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.5034

智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析

王国法^{1,2,3},赵国瑞^{1,3},任怀伟^{1,3}

(1.天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013; 2.中国煤炭科工集团有限公司,北京 100013; 3.煤炭科学研究总院 开采研究分院,北京 100013)

摘要:为解决煤炭开采面临的突出问题,找到煤炭开采未来发展方向和急需突破的关键核心技术,分析了国内外能源结构及煤炭的现状,指出利用科技进步实现安全高效绿色开采和清洁高效利用是煤炭的发展方向,建设智慧煤矿发展智能化开采是煤炭工业发展的必然选择。提出了智慧煤矿的内涵和3个基础理论问题及研究方向:①数字煤矿多源异构数据的统一表达及信息动态关联关系;②复杂围岩环境-开采系统作用机理及设备群全程路径和姿态智能控制的理论基础;③矿井设备群的系统健康状况预测、维护决策机制。提出了建设智慧煤矿MOS多系统综合管理、井下机器人协同智慧和馈电管理、井下精确定位导航和5G通信管理、地质及矿井采掘运通信息动态管理、视频增强及实时数据驱动三维场景再现远程干预、环境及危险源感知与安全预警系统管理、智能化无人工作面系统管理和全矿井设备和设施健康管理八大智能系统管理操作平台的构想,分析了各平台的功能、特征和关键核心问题,提出了相应的建设路径和方法;分析了智慧煤矿的构成和建设目标,提出了智能化开采的八大核心技术短板和亟待攻破的关键技术,提出了技术层面从数据获取利用、智能决策和装备研发3个主要方向进行突破,管理层面从科学产能布局、专业化运行服务和建立新规范规程体系等促进发展的措施,指出了智慧煤矿和智能化开采技术发展的目标和实现路径。

关键词:智慧煤矿;智能化开采;智能系统;操作平台;补短板;发展对策

中图分类号:TD355 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2019)01-0034-08

Analysis on key technologies of intelligent coal mine and intelligent mining

WANG Guofa^{1,2,3}, ZHAO Guorui^{1,3}, REN Huaiwei^{1,3}

(1. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. China Coal Technology & Engineering Group Corp., Beijing 100013, China; 3. Mining Design Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to solve the outstanding problems faced by the coal mining, the key core technologies of the future development direction and the urgent breakthrough of the coal mining are found, the domestic and foreign energy structure and the coal status are analyzed. It is pointed out that using the scientific and technological progress to realize the safe and efficient green mining and clean and efficient utilization is the development direction of the coal, and the development of intelligent coal mine is an inevitable choice for the development of the coal industry. The connotation of intelligent coal mine and three basic theoretical problems and research directions are put forward: ① the unified expression of multi-source and heterogeneous data and the information dynamic correlation relationship in digital coal

收稿日期:2018-11-15 修回日期:2018-12-20 责任编辑:常明然

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0603005);国家自然科学基金山西煤基低碳联合基金资助项目(U1610251);国家自然科学基金重点资助项目(51834006)

作者简介:王国法(1960—),男,山东文登人,中国工程院院士。Tel:010-84262016, E-mail:wanguofa@tdkcsj.com

mine;② the mechanism of complex surrounding rock environment-mining system and the theoretical basis of intelligent control of the whole path and attitude of equipment group;③ the system health condition prediction and maintenance decision-making mechanism of mine equipment group. Eight operational management platforms of intelligent MOS multi-system integrated management, underground robot cooperative intelligence and feed management, underground precise positioning and navigation and 5G communication management, geological and mine mining and transportation information dynamic management, video enhancement and real-time data-driven 3D scene reproduction remote intervention, environment and hazard perception and security early warning system management, systematic management of intelligent unmanned working face and the health management of the whole mine equipment and facilities are conceived. The functions, characteristics and key problems of each platform are analyzed, and the corresponding construction paths and methods are put forward. By analyzing the composition and construction target of intelligent coal mine, the paper puts forward eight key technology short-boards and key technologies that need to be broken in intelligent mining, and puts forward the measures to promote the development in the aspects of both technology and management. At the technical level, there are three main directions: data acquisition and utilization, intelligent decision making and equipment R & D. At the management level, scientific production capacity layout, specialized operation service and the establishment of new standard rules and regulations system are put forward. The development goal and realization path of intelligent coal mine and intelligent mining technology are pointed out.

Key words: intelligent coal mine; intelligent mining; intelligent system; operating platform; compensate for short board; development countermeasure

煤炭是世界上最经济的化石能源,也是可以清洁高效利用的能源。中国、美国、澳大利亚、印度、印度尼西亚、俄罗斯是世界前六位的产煤大国。煤炭一直是中国的主体能源,占一次能源产量和消费量的70%和60%以上。

世界能源格局及现实的社会需求决定了在未来相当长时间内,煤炭仍将在世界能源结构中占有较大比例,仍将是中国的主体能源,难以被替代,利用科技的进步消除煤炭生产、利用的环境负效应,实现安全高效绿色开采和清洁高效利用是煤炭的发展方向^[1-5],其传统产业模式亟待变革。

另一方面,互联网+^[6]、人工智能和大数据^[7]等颠覆性技术的发展,拉开了第四次工业革命的序幕,加速了传统行业变革的进程。德国提出了工业4.0,美国提出了“智慧地球(Smarter Planet)”,中国提出了“中国制造2025”战略,发展智能制造、智能装备、智能生产是其主要内涵。建设智慧煤矿发展智能化开采符合国家战略,是煤炭工业发展的必然选择。

1 智慧煤矿基础与平台建设

1.1 智慧煤矿基础

智慧煤矿^[8]是基于现代智慧理念,将物联网、云计算、大数据、人工智能、自动控制、移动互联网技术,机器人、智能化装备等与现代煤矿开发技术深度融合,形成矿井(区)全面感知、实时互联、分析决策、自主学习、动态预测、协同控制的完整智能系统,实现矿

井(区)开拓、采掘、运通、洗选、安全保障、生态保护、生产管理全过程智能化运行的体系。智慧煤矿的总体目标是形成煤矿完整智慧系统,全面智能运行,科学绿色开发的全产业链运行新模式。

数字化和信息化是智慧煤矿的基本要求,首先要解决3个基础理论问题:①数字煤矿多源异构数据的统一表达及信息动态关联关系;②复杂围岩环境-开采系统作用机理及设备群全程路径和姿态智能控制的理论基础;③矿井设备群的系统健康状况预测、维护决策机制。

目前,针对这些基础问题正在开展研究(国家自然科学基金重点项目),以形成多源异构数据处理理论方法、复杂系统智能控制基础理论及系统性维护构成的数字煤矿及智能化开采基础理论体系,为数字煤矿智能决策、精准控制、可靠性保障提供理论支撑。

1.2 智慧煤矿智能平台建设

智慧煤矿要建设八大智能生产运行系统^[8],首先要建设承载生产运行系统的智能平台。

1.2.1 MOS智慧煤矿多系统综合管理操作平台

MOS智慧煤矿多系统综合管理操作平台是面向智慧矿山建设的一体化矿山信息感知、展示及应用平台,它对下应能够适配各煤矿子系统、传感器、智能设备的数据,对上能够支撑应用业务逻辑的功能性软件、多需求通讯、大数据分析、云计算等。通过系统内置“矿区一张图”、“智慧安监”、“智能生产”及“设备及人员管理”等基本矿山业务的应用功能模块,构建

智慧矿山基础骨架,全面覆盖矿山生产、安全、设备及人员管理等业务,构建实时、透明、清晰的矿山日常工作全息景象平台,解决智慧化矿山建设过程中数据采集困难、烟囱型子系统、数据存储割裂、数据资源混乱、子系统无法联动、无法进行大数据分析支持决策等一系列关键问题,实现生产过程自动化、安全监控数字化、企业管理信息化、信息管理集约化,最终实现矿井管理决策科学化、现代化和智能化。为此,MOS智慧煤矿多系统综合管理操作平台应具有以下基本特征:

(1)全面的数据标准化。所有接入操作系统平台的数据均使用统一的格式进行交换与存储,数据互联互通无障碍。

(2)统一的数据存储方案。所有监测数据使用统一的存储方案,数据的存储和查询性能充分保障,便于数据的统一管理,解决数据资源混乱问题。

(3)数据传输实时与稳定。数据传输首先要具有强实时性,解决数据传输延迟问题,满足远程实时决策控制的要求;其次要具有强稳定性,解决常见的数据通讯不稳定问题,满足智能系统长时可靠运行的需求。

(4)组态化可配置。操作系统的前后端架构设计支持全面的组态化开发,支持应用界面与业务逻辑的快速组态化构建,并在配置中心中做统一配置管理。

(5)能够支持大数据分析。可向上支持健康管理平台的大数据分析需求,支持数据统一接入、全维度数据管理、跨业务数据融合以及面向业务的数据仓重构。能够与大数据分析平台的高性能数据分析计算框架、数据可视化及数据应用迭代对接,支撑大数据应用。

(6)开放性。能够支持多种开采装备应用程序的开发与部署,以支持不同应用场景的灵活应用和未来更多先进智能装备的灵活接入。

1.2.2 井下精确定位、导航、5G通信管理操作平台

井下精确定位、导航是智慧煤矿精准控制的基础,5G通讯及其衍生技术是实时决策控制的通讯保障。构建井下精确定位、导航、5G通信管理操作平台,依托井下环境的三维模型,研究井下实时建图和三维模型自动更新技术、设备和人员精确定位和推进导航技术、信息实时更新技术,解决井下狭长、多转角、复杂干扰条件下的精确定位、实时导航、移动部署与自矫正等关键核心问题,为井下设备、人员定位导航应用场景提供核心芯片及成套技术解决方案。井下精确定位、导航、5G通信管理操作平台应满足以下

基本要求:

(1)全覆盖与低复杂度。井下狭长、多转角和复杂的电磁环境及设备遮挡等带来了无线覆盖的难题,研究固定与移动基站的灵活配比和布置方式,移动基站的自定位与自矫正方法,提高无线覆盖率的同时,充分利用开拓空间的相对“透明”性(已开拓空间的大致方向和位置是已知的),合理控制定位导航布置的复杂度,为定位导航模组的自主布置和组网提供支撑。

(2)低成本、抗干扰和高精度。煤炭开采空间是动态推进并不断垮落掩埋的变化空间,定位空间动态变化是区别于地面定位的首要特征,因此定位、导航和通讯系统要么动态布置,要么随开采过程掩埋,但无论何种方式都要求低成本。井下狭长、转角多、电磁环境复杂、振动大,因此抗干扰是系统需要解决的另一难题。井下巷道或工作面的截面空间尺寸最多为米级,加上电磁等多种因素的干扰,米级的定位导航精度显然难以满足井下的需求。目前基于超宽带技术、捷联式惯导技术等定位导航方法经研究相对适用于井下,但仍需从煤矿井下环境的现实出发,从材料选择、结构设计和算法优化等方面进行改进,以确保相关系统的适应性和使用精度。

(3)高速、大容量通讯。井下生产安全是首位的,因此实时的定位、导航和控制对通讯速度提出了极高要求。同时设备又相对集中,生产数据、视频监控数据等的并发数据量大,这又对智能开采系统的通讯容量提出了很高要求。从未来智能化开采的角度看,5G通讯与相关技术的融合能够较好满足井下多并发、大容量、高速度和低延迟的通讯要求,目前亟待解决井下应用场景核心芯片研制、锚点时钟同步、移动再定位等关键核心技术,为井下提供稳定可靠的定位、导航和通讯服务。

1.2.3 地质及矿井采掘运通信息动态管理操作平台

准确、及时、可靠的信息是智能化开采的决策依据,地质及矿井采掘运通信息动态管理操作平台主要解决的是多源异构数据的动态推送及统一显示问题。通过研究矿山的各行为事件的关联关系提出基于事件触发的数据智能匹配与推送策略;通过研究智能化开采模式提出开采行为预测推理及自我更新方法;通过历史数据的挖掘分析构建地质及矿井采掘运通信息的智能服务平台。

本平台基于MOS智慧煤矿多系统综合管理操作平台的标准化数据和统一的存储方案,将数据进行关联分析,通过开采事件分析和开采行为预测的知识积

累建立井下“信息实体”,构建以“信息实体”为载体的地质及矿井采掘运通信息智能匹配与精准推送模式,并通过5G通信管理操作平台完成信息的实时快速推送,为安全管理平台、无人工作面管理平台等各应用层平台提供全面、可靠的“一张图”数据。

1.2.4 视频增强及实时数据驱动三维场景再现远程干预操作平台

井下环境复杂,设备种类多,单纯依靠监测数据难以保障智能化开采的安全可靠运行,视频+三维场景再现技术可更加直观、全面的展现井下工作情况,不但成为了传统监测手段的有益补充,更逐渐发展为井下开采远程干预操作的主要手段。但受制于井下低照度、高粉尘、潮湿、复杂电磁环境的影响,视频增强及实时数据驱动三维场景再现远程干预操作平台仍需突破以下关键技术:

(1)煤矿井下视频增强及高清视频压缩处理技术。针对综采生产设备布置复杂且相互遮挡,开采时存在大量粉尘和水雾,全天候人工光照分布不均,环境状况复杂、多变等不利条件,研究摄像头自除尘装置、低照度下的视频增强和去燥技术、井下监控视频压缩算法等,为基于视频的应用场景提供支撑。

(2)基于视频图像的目标识别及跟踪技术。分析煤炭开采场景视觉特点以及有关设备、围岩和环境状况视频图像特征,研究基于深度学习的目标识别、目标跟踪和异常状况检测技术,从而实现井下主要设备目标、环境状况的实时监控,以及异常状况的预警、报警处理。

(3)融合激光扫描点云图像、可见光视频图像和红外视频图像的三维信息融合技术。基于激光三维扫描传感装置,研究井下三维虚拟场景模型实时构建技术;基于图形图像增强处理技术,研究可视化动态视频图像序列与三维场景信息实时匹配、融合技术;融合可见光视频图像的基础上,引入红外视频图像增强技术,实现可见光、红外视频图像与三维场景的实时匹配、融合,构建实时动态视频与虚拟现实同步的远程监控平台。

(4)真实数据驱动的三维虚拟场景远程控制技术。在构建井下三维虚拟现实场景的基础上,研究真实生产过程数据对虚拟场景的数据驱动技术,建设多源传感信息驱动的全景在线虚拟生产系统,解决生产过程信息离散、利用率不高、直观性不强、交互性差的问题,以简单直观的方式快速展现井下生产全貌,并提供除监控之外的预警分析、历史回溯等应用功能,实现身临其境般的操控和实时反馈。

1.2.5 环境及危险源感知与安全预警系统管理操作平台

安全始终处在煤炭生产的首位,智能化开采要建立煤矿井下环境的全面感知和安全预警,现有的传感系统一是没有全面覆盖现有的安全监测需求,二是传感器的易用性和可靠性等还有待提升,三是不符合长远智能化开采的物联需求。因此需要研究和解决以下关键问题:

(1)连接泛在。研究井下物网络低功耗部署模式,研制井下传感器物联芯片或模组,构建无缝网络架构。

(2)感知泛在。利用新原理、新技术和新材料研制传感终端,提供低成本、低功耗、高安全性、高稳定性、高集成度的解决方案,如利用光纤光栅抗电磁干扰、抗腐蚀、电绝缘、高灵敏度和低成本的特点研制井下温度、应力应变传感器等。

(3)智能泛在。充分发挥云计算、大数据以及智能技术的优势,构建并行技术集群、大数据平台和人工智能中心,提升基于历史数据的“深度学习”和模型优化等人工智能核心能力,研制智能感知终端,扩展安全预警大脑的广度和深度,形成不依赖于“中心大脑”的泛在智能,增强安全预警系统对断网故障的抵抗能力和独立决策预警能力。

1.2.6 智能化无人工作面系统管理操作平台

智能化无人工作面系统管理操作平台主要解决环境-装备-工艺的相互关系及利用多源信息智能化开采的问题。

(1)围岩地质与采动应力场实时管理。研究采动应力与地质构造综合反演技术,与地理信息系统融合的超前预判与自动修正技术,为智能化开采的协同推进提供决策依据。

(2)综采装备的协同推进与精准控制。研究液压支架姿态调节、工作面自动调斜、采煤机摇臂自动调高、刮板飘溜自动控制、端头与超前装备的协同推进等关键技术,实现基于围岩感知信息的综采装备协同推进与精准控制。

(3)开采工艺的智能化实现与远程干预。研究开采工艺的流程化实现方法、开采装备的智能化提升和对环境的自适应控制,从而实现开采的智能化,研究基于虚拟现实平台的远程干预技术,研制关键装备,提升智能化系统的应变处置能力,实现开采的无人化。

1.2.7 井下机器人协同智慧和馈电管理操作平台
机器人化开采是智能化开采的高级形式,以特种作业机器人实现的机器人协同开采是未来的发展

方向。传感的智能泛在化必然会引起机器人群的智能泛在化,这也为机器人协同智慧提供了重要基础。

现有煤矿机器人已在搜救、巡检等方面取得一定进展,但煤矿机器人在关键结构、材料、可靠性、复杂环境的适应性和智能决策及防爆电源的长时可靠供电技术等方面仍存在诸多短板。美德等国在复杂环境下的机器人研究走在前列,波士顿动力更是在避障机器人研究方面遥遥领先,国内新松、唐山开诚等也在机器人相关领域深耕多年,取得了一定成绩,但相较国外仍存在较大差距。另一方面,在井下机器人协同智能化控制方面尚缺乏研究,煤矿机器人定位导航及避障,信息融合及决策规划以及自适应控制等多种关键核心技术也亟待突破。

可靠供电及续航是限制井下机器人应用和发展的另一重要因素,在现有防爆要求和电池技术难以突破的情况下,能量产生及回收技术的研究是突破这一难题的重要研究方向之一,如基于振动、温差、风力等的自发电及馈电管理技术。

1.2.8 全矿井设备和设施健康管理操作平台

研究大规模复杂装备群分布式、多层次健康状态评价与智能维护决策技术,建立基于知识计算的开采装备群健康状态智能评价理论与方法,获取全生命周期关键指标数据,形成开采系统生命周期数据知识库;研究开采装备群健康状态智能预测理论与方法。综合考虑维护和生产在时间上的交互影响及维护对开采系统可靠性的影响,建立设备层多目标预知维护模型。切实解决综采装备的可靠性问题,为工作面自动化、智能化和无人化提供可靠保障。

2 煤炭智能化开采关键核心技术

智能化开采是智慧煤矿的核心。目前,在地质条件好的矿区煤炭智能开采取得很好效果^[9-17]。但由于煤矿开采条件的多样性和复杂性,智能化开采远未达到预期理想的效果和目标,要实现智能化无人开采目标仍需补齐以下八大核心技术短板:① 地下开采装备精确定位和导航;② 地下复杂极端环境信息感知及稳定可靠传输;③ 大规模复杂系统大数据分析;④ 复杂煤层自动割煤智能决策与控制;⑤ 井下大规模设备群网络化协同控制;⑥ 井下复杂作业机器人;⑦ 矿山采掘装备关键元部件进口替代;⑧ 工作面设备故障自动化处理。

2.1 地下开采装备精确定位和导航

地下开采定位导航模型如图1所示,为保证煤矿开采、掘进装备沿着规划的路径和方向推进,必须准

确测量设备的空间位置和运行轨迹。然而,煤矿井下为完全封闭空间和复杂电磁环境,没有卫星导航信号辅助,实现定位和导航的难度很大。

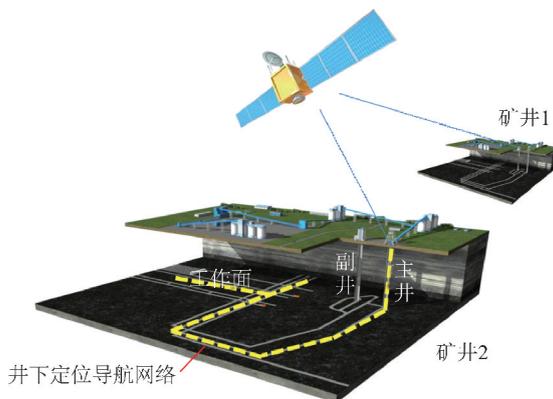


图1 地下开采定位导航模型

Fig. 1 Positioning and navigation model of underground mining

目前,提出了基于GIS地理信息系统的导航、基于RFID的AOA和TOA算法、捷联惯导系统、UWB超宽带定位等多种定位和导航技术,但还存在诸多问题。

亟待突破的核心技术包括:① 低成本、高精度的适用于复杂磁场环境下的捷联惯性导航技术;② 局部定位导航应用场景核心芯片技术;③ 井下5G高速无线通信技术;④ 井下高精度定位系统;⑤ 基于精确定位导航的井下避障技术;⑥ 掘进机精确制导技术;⑦ 辅助运输车辆无人驾驶系统。

2.2 地下复杂极端环境信息感知及稳定可靠传输

环境、设备状态的感知是实现智能决策、控制的先决条件。然而,井下狭长、潮湿、粉尘易爆、复杂电磁环境严重制约着探测技术的应用。三维激光扫描图如图2所示,煤岩识别、井下低照度空间视频监控、深地物理场探测等都在探索适于井下应用的技术方案。

目前,提出的地质雷达探测、振动探测、高光谱等煤岩识别技术,激光扫描点云、可见光视频和红外视频图像采集技术,压力、位移、倾角等智能传感器技术,都亟待进一步的突破和完善。

亟待突破的核心技术包括:① 采掘前端近距离高精度透地探测技术;② 高光谱煤岩探测传感器;③ 低速、高振动条件下基于光纤网络的采掘装备位姿智能传感器;④ 极端环境物理场(瓦斯、粉尘、温度、有害气体、复杂围岩体、复合动力灾害等)原位监测微纳纤维智能传感器及可穿戴技术;⑤ 磁共振矿井水害隐患探测传感器(利用地磁场磁共振和电磁波传感对矿井工作面、顶底板和两侧的水害隐患探测预警,实现工作面前方无盲区含水量、出水量、孔隙度等

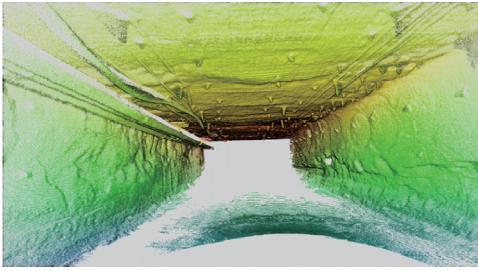


图 2 巷道三维激光扫描

Fig. 2 Three dimensional laser scanning chart of crossheading (parameters of direct detection and early warning); ⑥ 煤流监测识别智能传感器; ⑦ 具有自组网、自通信、自供电、自定位功能的智能微传感器及其物联系统。

2.3 大规模复杂系统数据分析

矿山生产系统是一个大规模复杂系统,生产过程中产生了海量的数据信息^[18]。数字煤矿智慧逻辑模型如图 3 所示,目前由于缺乏从这些数据中寻找、分析、挖掘信息的方法,因而一直无法有效得出开采过程的数据关联规律,并将其应用于智能开采的控制过程。

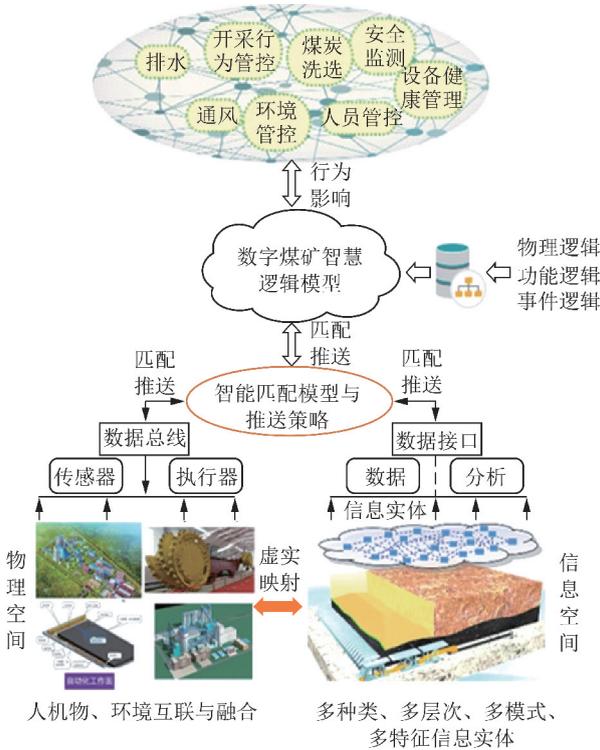


图 3 数字煤矿智慧逻辑模型

Fig. 3 Intelligent Logic Model of Digital Coal Mine

亟待突破的核心技术包括: ① 多种类、多层次、多特征数据信息分析; ② 基于自主感知的信息智能匹配与推送策略; ③ 面向视频内容识别的大数据处理分析平台; ④ 基于围岩监测、生产过程信息的数据融合与知识发现。

2.4 复杂煤层自动割煤智能决策与控制

为最大限度、高效率获取煤炭资源,需提高采煤装备的适应性和智能化水平,然而井下煤层厚度、走向复杂多变,断层、陷落柱等地质结构也时常出现,给自动截割带来极大困难。多方法融合煤岩识别如图 4 所示。目前开展了振动识别、灰度理论、图像识别等多种煤岩识别方法研究,但效果均不理想,诸多问题仍待解决。



图 4 多方法融合煤岩识别

Fig. 4 Coal and rock identification with multi-method fusion

亟待突破的核心技术包括: ① 复杂煤层自适应割煤技术; ② 多信息融合智能决策与协同控制技术。

2.5 井下大规模设备群网络化协同控制

井下无线网、工业以太网等多网并存,多通讯协议共在,造成互联互通障碍且网络承载能力差,严重阻碍了智能开采的发展。

目前虽然提出了“一网到底”的网络架构,但随着数据量的急剧增加,现有技术已不能满足大数据传输和实时控制的要求。

仍待突破的核心技术包括: ① 基于 5G 标准的井下高速通讯网络; ② 基于互联网+的数字化矿山技术; ③ 井下强时通讯与远程协同控制技术; ④ 井下紧急情况应急通讯保障系统。

2.6 井下机器人处理难题

工作面自动化、智能化、无人化的前提条件是以综采成套装备的高可靠性、高开机率为保证的,由于设备无法实现自维修,因此,任何设备故障都会使工作面自动化、智能化、无人化目标落空。现有井下巡检系统如图 5 所示。

亟待突破的核心技术包括: ① 井下防爆机器人创成关键技术; ② 井下防爆机器人特殊环境及自我状态辨识技术; ③ 井下复杂空间的防爆机器人平衡状态控制及自主避障技术; ④ 机器人信息融合及空间路径规划技术; ⑤ 井下防爆电源长时可靠供电及自馈电技术; ⑥ 井下多机器人联合通信及协同控制平台; ⑦ 井下防爆机器人安全标准。

2.7 矿山采掘装备关键元部件进口替代

经过多年的努力,矿山采掘装备已全部实现了国



图5 井下巡检系统

Fig. 5 Underground inspection system

产化,但在一些关键原材料、元部件等方面仍然依赖进口,受制于人,导致我国矿山采掘装备及其制造业大而不强,且存在技术安全风险。

亟待攻破的核心技术包括:①适用于煤矿高腐蚀环境的替代进口的耐腐蚀高强度材料及精细加工;②基于内反馈的高精度大工作阻力数字液压油缸;③超大流量高可靠性液力转化及电磁卸荷技术;④镐形截齿高性能硬质合金头耐磨新材料、破岩刀具及制造工艺;⑤非圆齿轮液压马达核心原件加工工艺技术;⑥滑阀多负载联动独立控制技术;⑦高端密封元件及密封技术。

2.8 工作面设备故障自动化处理难题

实现煤炭开采的连续、可靠、自动运行是智能化开采的核心要求,而工作面设备故障的及时发现和自动化处理是保障其连续可靠运行的核心技术。以往多是针对某一单一设备的故障开展的离线处理研究,对工作面设备系统级的复合故障和自动化处理方法缺乏研究,严重制约了智能化开采的发展。

亟待攻克的核心技术包括:①数据驱动的开采系统健康状态评价方法;②开采系统衰退行为与工况下的剩余寿命预测;③融合生产调度和维护行为的开采系统双层机会维修预知决策模型。

3 智慧煤矿与智能化开采发展对策

煤层赋存条件的多样性和安全制约因素的复杂性是智能化开采面临的重大难题,要针对智能化开采关键核心技术短板和煤矿机器人,开展重点专项研发,产学研用协同攻关,突破复杂煤层有限无人化开采难题。数据的获取利用、智能决策和技术装备研发是3个主要方向:

(1)数据的获取和利用。两个重点:一是研发工作面煤层地质条件高精度探测技术和装备,构造工作面煤层地质数字模型;二是研发低成本、高可靠性的井下设备精确定位和导航系统。

(2)智能决策。研究高效的机器学习算法使综采系统装备拥有自主学习能力,提高智能化水平与开采效率。

(3)技术装备研发。攻克井下特殊条件下的装备关键元部件、设备群网络化协同控制技术,研制井下复杂作业机器人和远程智能诊断及服务中心。

在攻克智能化开采技术难题的基础上,合理的政策措施、科学的生产管理亦是全面推进智能化开采的重要因素:

(1)加快完善煤炭资源管理与产能布局,将煤炭的安全高效绿色开采作为我国煤炭资源开发的基本产业政策,淘汰落后开采方法与产能装备。

(2)改革传统煤矿的运行和生产组织模式,推行智慧煤矿和智能化开采系统一体化解决方案、系统维护云端服务、智能采掘专业化队伍、市场化服务,解决煤矿人才、管理运行水平不平衡问题。

(3)加快建立智慧煤矿和智能开采的技术标准体系和运行管理规范、安全规程体系,解决现有安全规程制约智能无人化开采的问题。鼓励智能无人化开采技术及装备的创新。

4 结 语

智慧煤矿建设是煤炭工业技术革命、产业转型升级的战略方向和目标,智能化开采是智慧煤矿的核心技术。必须牢牢抓住新一代信息技术带来的发展机遇,将数字矿山建设与煤炭安全高效开发和清洁利用技术创新、管理改革相结合,利用信息化、数字化、物联网、人工智能、大数据等新技术提升和改造传统采矿业,不断开创安全、高效、绿色和可持续发展的智慧煤矿发展新模式。

参考文献(References):

- [1] 王国法,张德生. 煤炭智能化综采技术创新实践与发展展望[J]. 中国矿业大学学报,2018,47(3):459-467.
WANG Guofa, ZHANG Desheng. Innovation practice and development prospect of intelligent fully mechanized technology for coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 47(3): 459-467.
- [2] 谢和平,王金华,王国法,等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. 煤炭学报,2018,43(5):1187-1197.
XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1187-1197.
- [3] 雷毅. 我国井工煤矿智能化开发技术现状及发展[J]. 煤矿开采,2017,22(2):1-4.
LEI Yi. Present Situation and development of underground mine intelligent development technology in domestic[J]. Coal Mining Tech-

- nology,2017,22(2):1-4.
- [4] 霍中刚,武先利. 互联网+智慧矿山发展方向[J]. 煤炭科学技术,2016,44(7):28-33,63.
HUO Zhonggang,WU Xianli. Development tendency of internet plus intelligent mine[J]. Coal Science and Technology,2016,44(7):28-33,63.
- [5] 范京道. 煤矿智能化开采技术创新与发展[J]. 煤炭科学技术,2017,45(9):65-71.
FAN Jingdao. Innovation and development of intelligent mining technology in coal mine[J]. Coal Science and Technology,2017,45(9):65-71.
- [6] 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 Shibao. Study on key technology of internet plus intelligent coal shearer[J]. Coal Science and Technology,2016,44(7):1-9.
- [7] 杨韶华,周昕,毕俊蕾. 智慧矿山异构数据集成平台设计[J]. 工矿自动化,2015,41(5):23-26.
YANG Shaohua,ZHOU Xin,BI Junlei. Design of heterogeneous data integration platform of smart mine[J]. Industry and Mine Automation,2015,41(5):23-26.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 王国法,庞义辉,任怀伟,等. 煤炭安全高效综采理论、技术与装备的创新和实践[J]. 煤炭学报,2018,43(4):903-913.
WANG Guofa,PANG Yihui,REN Huaiwei,et al. Coal safe and efficient mining theory,technology and equipment innovation practice[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(4):903-913.
- [11] 王国法,庞义辉,马英. 特厚煤层大采高综放自动化开采技术与装备[J]. 煤炭工程,2018,50(1):1-6.
WANG Guofa,PANG Yihui,MA Ying. Automated mining technology and equipment for fully-mechanized caving mining with large mining height in extra-thick coal seam[J]. Coal Engineering,2018,50(1):1-6.
- [12] 范京道,王国法,张金虎,等. 黄陵智能化无人工作面开采系统集成设计与实践[J]. 煤炭工程,2016,48(1):84-87.
FAN Jingdao,WANG Guofa,ZHANG Jinhu,et al. Design and practice of integrated system for intelligent unmanned working face mining system in Huangling coal mine[J]. Coal Engineering,2016,48(1):84-87.
- [13] 李明忠. 中厚煤层智能化工作面无人高效开采关键技术研究与应用[J]. 煤矿开采,2016,21(3):31-35.
LI Mingzhong. Key technology of minerless high effective mining in intelligent working face with medium-thickness seam[J]. Coal Mining Technology,2016,21(3):31-35.
- [14] 任怀伟,孟祥军,李政,等. 8 m 大采高综采工作面智能控制系统关键技术研究[J]. 煤炭科学技术,2017,45(11):37-44.
REN Huaiwei,MENG Xiangjun,LI Zheng,et al. Study on key technology of intelligent control system applied in 8 m large mining height fully-mechanized face[J]. Coal Science and Technology,2017,45(11):37-44.
- [15] 王国法,李希勇,张传昌,等. 8 m 大采高综采工作面成套装备研发及应用[J]. 煤炭科学技术,2017,45(11):1-8.
WANG Guofa,LI Xiyong,ZHANG Chuanchang,et al. Research and development and application of set equipment of 8 m large mining height fully-mechanized face[J]. Coal Science and Technology,2017,45(11):1-8.
- [16] 田成金. 煤炭智能化开采模式和关键技术研究[J]. 工矿自动化,2016,42(11):28-32.
TIAN Chengjin. Research of intelligentized coal mining mode and key technologies[J]. Industry and Mine Automation,2016,42(11):28-32.
- [17] 黄曾华. 可视远程干预无人化开采技术研究[J]. 煤炭科学技术,2016,44(10):131-135,187.
HUANG Zenghua. Study on unmanned mining technology with visualized remote interference[J]. Coal Science and Technology,2016,44(10):131-135,187.
- [18] 万娜,景海涛,周琳. 智慧矿山空间数据元数据模型研究与应用[J]. 测绘与空间地理信息,2018,41(1):40-45,54.
WAN Na,JING Haitao,ZHOU Lin. Research and application of the spatial data metadata model oriented to smart mine[J]. Geomatics & Spatial Information Technology,2018,41(1):40-45,54.