

特约综述



移动扫码阅读

王国法,杜毅博. 智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 1-10. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.01.001

WANG Guofa, DU Yibo. Development direction of intelligent coal mine and intelligent mining technology[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 1-10. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.01.001

智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向

王国法^{1,2,3}, 杜毅博^{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 开采设计研究分院,北京 100013)

摘要:发展智慧煤矿是我国煤炭工业发展的必由之路,我国煤炭以井工开采为主,在薄煤层、大采高、超大采高、特厚煤层综放智能化开采方面取得重要进展。提出智慧煤矿应基于一套标准体系、构建一张全面感知网络、建设一条高速数据传输通道、形成一个大数据应用中心、开发一个业务云服务平台,面向不同业务部门实现按需服务,构建 8 大智慧系统,并对智慧煤矿智能系统设计建设的基本结构和原则进行分析。同时提出了智慧煤矿当前 5 大重点研发方向:精准地质信息系统及随掘随采探测技术与装备;智慧煤矿物联网技术与装备;巷道智能化快速掘进技术与装备;智能化无人开采关键技术与装备;煤矿机器人技术及产品研发,对各研发方向所涉及的关键核心技术问题进行了具体分析,并提出了研发的技术路线与关键装备。指出智慧煤矿与智能化开采是一个巨系统,应遵循系统工程理论和采矿规律,开发智慧煤矿巨系统综合管理开发式操作平台,智慧煤矿巨系统操作平台核心应包括:基于 Ethernet/IP 的生产过程控制数据交换标准化;基于 Web Service 的信息系统跨平台交互;煤矿大数据采集分析处理平台;开放式多系统管理软件及操作平台。根据智慧煤矿巨系统业务逻辑,提出建设“1+8 智能操作平台”,实现各生产环节多信息融合和智能化协同生产。最后提出了智慧煤矿建设的总目标和阶段性实现目标及发展路径。

关键词:智慧煤矿;智能化开采;技术架构;煤矿机器人;煤矿巨系统;操作平台

中图分类号:TD67 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2019)01-0001-10

Development direction of intelligent coal mine and intelligent mining technology

WANG Guofa^{1,2,3}, DU Yibo^{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: It is pointed out that the development of intelligent coal mine is the only way for the development of China coal industry. The coal mining in our country is dominated by underground mining, and important progress has been made in intelligent fully-mechanized mining for the thin coal seam mining, large height mining, super high height mining, and super thick seam coal caving. It is proposed that wisdom coal mines should build a comprehensive perceptual network, establish a high-speed data transmission channel, form a big data application center, and develop a business cloud service platform based on a set of standard system. Eight intelligent systems should be constructed for different business departments to realize on-demand service and the basic structure and principles of intelligent coal mine intelligent system design were put forward. Five key research and development directions of intelligent coal mine were put forward: accurate geological information system technology and equipment; Internet of things technology and equipment in intelligent coal mine; Intelligent and rapid tunneling technology and equipment of roadway; Key technology and equipment of unmanned mining; Research and development of coal mine robot technology and products. At the same time, the key technical issues involved in each research and development

收稿日期:2018-12-10;责任编辑:赵 瑞

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

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: wangguofa@tdkcsj.com

direction were analyzed in detail, and the technical route and key equipment of R & D was put forward. It is pointed out that the wisdom coal mine and intelligent mining is a giant system, which should follow the system engineering theory and mining rules, develop the intelligent coal mine giant system comprehensive management and development operation platform. The core of the intelligent coal mine giant system operation platform should include: production process control data exchange standardization based on Ethernet/IP; information system cross-platform interaction based on Web Service; coal mine big data acquisition and analysis processing platform; open multi-system management software and operation platform. According to the business logic of intelligent coal mine giant system, this paper put forward the construction of "1+8 intelligent operation platform" to realize multi-information fusion and intelligent collaborative production of each production link. Finally, the general goal, stage realization goal and development path of intelligent coal mine construction were put forward.

Key words: intelligent coal mine; intelligent mining; technical architecture; coal mine robot; coal mine giant system; operating platform

0 引言

煤炭是我国的主体能源,也是最经济和可清洁高效利用的能源。基于当前世界能源格局和我国资源禀赋以及现实经济社会需求,未来相当长时间内,煤炭仍将在世界能源结构中占较大比例,仍将是我国主体能源。在当前第3次工业革命与第4次工业革命的历史交汇期,应用信息技术、智能制造技术和人工智能技术发展的成果,实现煤炭安全高效绿色开采和清洁高效利用,发展智慧煤矿成为煤炭工业发展的必由之路^[1-2]。我国煤炭以井工开采为主,经过多年发展,我国煤炭综采技术装备已从依赖进口到全部国产化。近10年来,通过智能化开采技术与装备的创新研发,突破多项关键技术,在薄和较薄煤层智能化综采,大采高和超大采高智能化综采以及特厚煤层综放开采智能化技术与装备方面实现领跑。建成了如黄陵智能化开采示范矿井、兖矿金鸡滩煤矿世界首套8.2 m超大采高综采成套技术与装备等标志性成果^[3-4]。已建成一批现代化特大型安全高效煤矿,为

全面推进智慧煤矿建设和智能化开采发展奠定了基础。围绕智慧煤矿及智能化无人开采的重大技术需求,突破行业共性核心问题,加快智能、安全、高效现代煤炭生产体系建设成为主要目标。

1 智慧煤矿技术架构

做好智慧煤矿顶层设计的保证智慧煤矿建设沿着正确方向的首要条件。智慧煤矿应基于一套标准体系、构建一张全面感知网络、建设一条高速数据传输通道、形成一个大数应用中心、开发一个业务云服务平台,面向不同业务部门实现按需服务。其总体架构包括8大智慧系统:①地下精准定位导航系统;②随掘随采精准探测地质信息系统;③智能快速掘进和采准系统,矿井通风、供排水、主副运智能系统;④工作面智能开采系统;⑤危险源智能预警与灾害防控系统;⑥矿井全工位设备设施健康智能管理系统;⑦煤矿地面分选运销与生态建设智能系统;⑧煤矿物联网综合智能管理系统^[10]。智慧煤矿总体架构如图1所示。

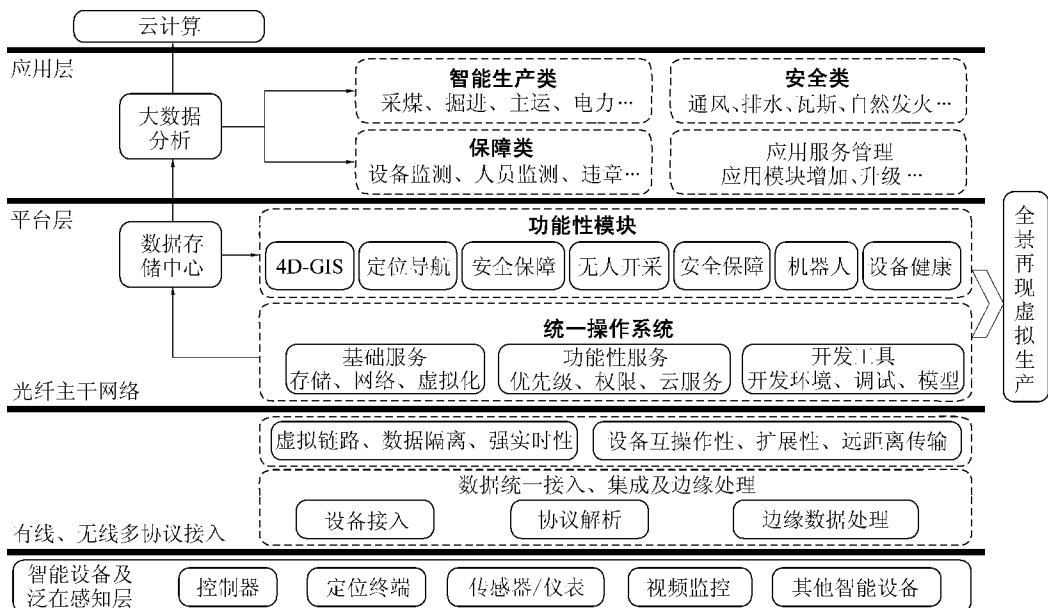


图1 智慧煤矿总体架构

Fig. 1 Overall framework of intelligent coal mine

智慧煤矿智能系统设计建设的基本原则是要以网络融合安全、信息互联互通、数据共享交换、功能协同联动为智慧煤矿实现物联网全部功能的总原则。在智慧煤矿顶层设计和建设中,遵循“打通信息壁垒”、铲除“信息烟囱”、消除“信息孤岛”、避免“重复建设”的技术方法,要遵循采矿规律,实现人工智能与采矿工艺技术深度融合。

智能开采是智慧煤矿的核心,智能感知、智能决策和自动控制是智能化开采的三要素。智能开采区别于一般自动化开采的显著特点是设备具有自主学习和自主决策功能,具备自感知、自控制、自修正的能力。具备这样能力的智能化综采系统才能充分地响应生产环境变化,实现真正意义上的智能化开采,实现有限条件下的无人开采目标。

2 智慧煤矿关键核心技术研究方向

煤矿智能化开采和煤矿物联网技术目前已取得了重要进展,已建成一批以工作面智能化开采和数字化信息化管理系统为标志的先进煤矿。但是,由于煤矿开采条件的复杂性和多样性,大多数智能化工作面还远没有达到理想效果,智慧煤矿建设还处于初级起步阶段。目前,需要重点进行以下5个方向的攻关研发:①精准地质信息系统及随掘随采探测技术与装备。②智慧煤矿物联网技术与装备。③巷道智能化快速掘进技术与装备。④智能化无人开采关键技术与装备。⑤煤矿机器人技术及产品研发。

除上述这5大核心技术攻关外,还需要不断发展完善上述8大智慧系统。

2.1 精准地质信息系统及随掘随采探测技术装备

煤矿地质信息是一种随着采掘活动在时间与空间不断发生变化的四维动态信息。精准地质信息作为掘进与开采的基础,是智能化决策的前提条件。因此开发工作面随掘随采探测关键技术及装备,实现地球物理数据和随掘随采数据的自动采集、处理和解释,建立精准四维动态地质-巷道模型,搭建多源、全方位信息透明的矿井4D GIS云平台,实现地质、测量及生产动态信息的一张三维电子图管理^[14],是实现智慧煤矿的先决条件。

现有的2D或3D地测“一张图”应用系统基本实现了现多部门多层次的地质数据共享,专业图件动态绘制,图纸、文档和报表网络上报等,大幅提高了矿山生产管理的效率,为安全生产决策提供技术保障。但这些系统无法实现随生产推进的自动更新,无法实时、准确地反应矿井信息。目前,实现精准地质信息探测

的关键是在现有三维GIS图形化管理平台的基础上,基于采掘过程获取的多源实时数据信息,开发工作面快速3D地质动态建模技术,建立具备多兼容性开放端口的透明矿井智能开采地质分析与协同管理平台,为煤矿井下智能开采提供地质保障。

实现精准地质信息探测核心技术的研发方向包括矿井4D云GIS平台构建,研发测井岩性识别技术、全数字高密度三维地震数据采集、处理、解释方法和采煤工作面随采地震监测装备,提高地震资料的岩性解释水平和随掘随采工作面地层和构造的快速探测精度。

1) 矿井4D云GIS平台。矿井4D云GIS平台构建实现对多源、异构矿井地测数据、地震资料、生产实测数据、矿井GIS图件及其时空关系等信息的一体化管理。主要完成三维GIS基础平台搭建,矿井地测大数据共享服务平台开发,矿井4D GIS图形管理平台开发,浏览器端矿图管理系统开发,移动客户端矿图管理系统开发等。

2) 全数字高密度三维地震数据采集、处理及工作面随采地震监测装备。重点根据随采工作面地层和构造岩性差异,应用物探技术实现地质信息多源融合,实现工作面快速动态建模与实时修正。主要包括:钻孔岩性探测技术,3D地震数据采集、处理与解释,工作面随采地震精细探测技术与装备等技术的研发。

实现精准地质信息及随掘随采探测技术与装备,最终统一于全矿的GIS系统,其高端形式是构建四维可视化平台。其特征是基于GIS系统,全面整合三维数字模型、三维高程模型、三维景观建模、三维地质构模,并在生产过程中实时更新、修正形成动态四维模型,与实际空间物理状态保持一致,可随时针对某一变量、特征查询其历史变化特征。最终,实现“透明矿井”。

2.2 智慧煤矿物联网技术与装备

环境、设备状态的感知是实现智能决策、控制的先决条件。现有煤矿各类监控系统已实现飞跃式发展,实现了对于煤矿生产关键信息的基本感知。然而不同厂家的产品基于本企业标准生产,其数据接口与平台各异,数据独立进行处理,相互之间缺乏通信与融合,数据孤岛与数据碎片化现象严重,因而难以形成有效的数据分析模型与算法,分析结构也就缺乏准确性,难以指导生产。物联网技术旨在打破数据壁垒,实现设备之间、设备与环境之间、设备与人员之间的数据互联,最终实现万物互联^[15-16]。因而,物联网技术与装备是实现智慧煤矿的关键核心技术。

针对煤矿物联网技术,从应用方面关键是实现

以下2个方面的突破:①建立井下位置服务与空间感知场,实现人员设备的准确定位;②提供边缘计算与云计算服务,实现设备数据互联。

1) 物联网位置服务。研究基于超宽带(UWB)定位技术在开采工作面复杂条件下,针对环境温度、不同介质条件下提高定位精度的纠偏算法,并通过

惯导和激光雷达进行协同定位/定姿,最终构建协同定位平台。定位基站实现自组网功能,并针对该基站的走时和晶振误差进行自动补偿,实现对于人员、设备的位置、速度乃至加速度进行定位计算,判定设备运行状况,避免碰撞,保证安全。如图2所示。

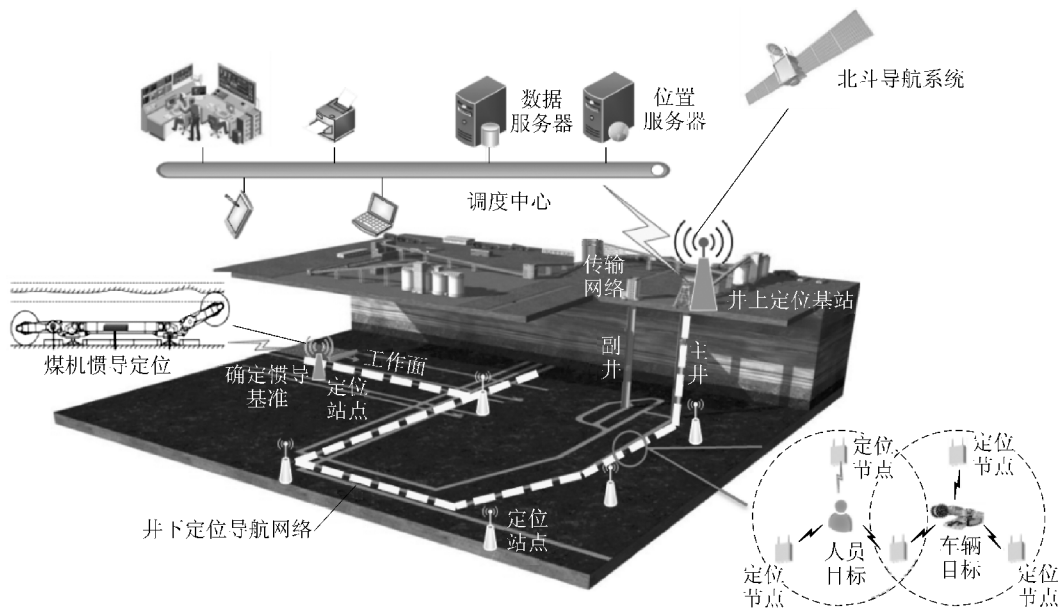


图2 智慧煤矿物联网位置服务示意

Fig. 2 Internet of things location service for intelligent coal mine

2) 物联网云计算服务。基于分布式计算技术,建立综采工作面大数据计算框架;研发适用于专家分析决策的数据分析引擎,支持时序数据、空间数据、音视频数据、生产管理数据等多种类型;开发标

准算法库,实现回归、聚类、分类等大数据分析;研究主流数据可视化工具,开发扩展接口,实现对外数据交互。从而为各设备控制节点提供边缘计算与云计算服务,如图3所示。

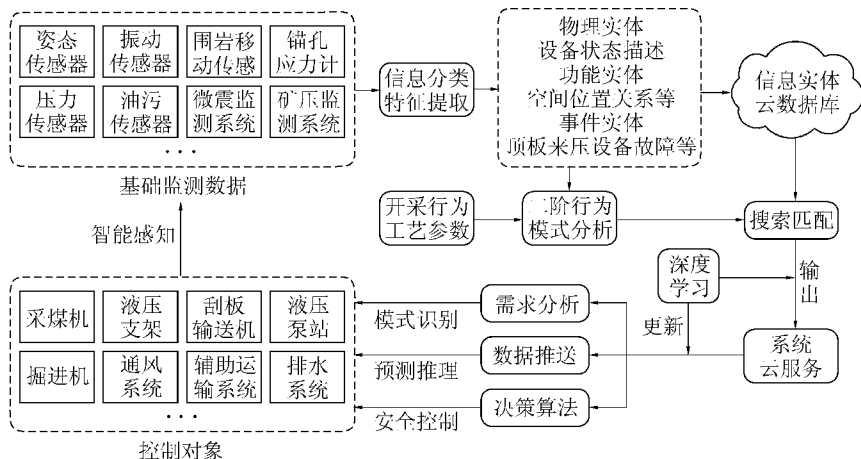


图3 智慧煤矿物联网云计算服务示意

Fig. 3 Internet of thing cloud computing service for intelligent coal mine

2.3 巷道智能化快速掘进技术与装备

作为煤矿生产的重要前端环节,巷道掘进的主要难题是采掘失调。目前综掘支护以单体锚杆钻机为主,钻孔效率低;工序复杂,锚护时间长;机载钻机高精度定位困难。锚杆支护时间占巷道掘进时间的

60%,支护人员也占60%以上。掘进工序及装备分散,辅助装备落后、工艺复杂,掘、锚工序在掘进工作面有限空间交替作业成巷效率低,制约了掘进作业的快速化、机械化、智能化。目前巷道快速掘进亟需解决的关键技术问题包括:快速支护及掘支平行作

业技术;自主导航与自主连续截割技术;远程智能管控平台技术;适应各类条件的高效无人掘进成套装备。

改进掘进工艺技术模式,攻克快速支护、自主连续掘进等关键技术难题,探索实现配套装备自动化、智能化、一体化掘进模式,构建适用于不同煤层条件的煤矿智能化快速掘进工艺技术与装备体系成为智能化快速掘进的重点研究方向^[17-18]。

1) 快速支护及掘支平行作业技术。掘进作业过程中最突出的矛盾是“掘-支”矛盾,支护作业难以实现机械化快速化是掘进作业的核心问题。解决这一问题应该从掘进临时支护和钻锚注一次作业工艺2个方面进行重点突破。首先研发柔性自移临时支护系统,实现掘进装备机身范围内的主动支护,为锚杆等永久支护滞后设置创造条件;之后研发新型钻锚注一次性安装新型锚杆及随掘自动钻装机构,将掘进支护分散的生产工序统一起来,实现掘支平行快速化作业;最终研制锚杆支护机器人,构建全自动化智能锚杆支护作业系统,开发紧跟临时支护的自动铺网和联网技术,实现锚杆支护由人工操作到机器人化的转型。

2) 自主导航与自主连续截割技术。掘进截割速度的提高是从设备到工艺到控制技术的全方位的提高,包括:①煤岩硬度与截割刀具力学特性研究,提高截割刀具效率;②动载识别与智能调速技术;③基于自主导航信息的截割断面自动成形控制技术;④全巷道高效自适应集料系统等技术的研发,从而实现掘进机最优化自适应截割,提高截割效率并降低损耗。

3) 适应各类条件的高效智能化掘进成套装备(图4)。针对不同地质条件,开发研制适应的快速掘进成套技术与装备:①半煤岩及岩巷智能化快速掘进技术与成套装备研发,研究基于悬臂式掘进机的快掘工艺,用于一般地质条件岩石普氏系数小于9的半煤岩、岩巷快速掘进系统装备及高效除尘系统;②中等稳定顶板条件下煤巷智能化快速掘进系统装备研发,研制掘锚一体机+锚杆转载机,实现锚杆、锚索多排多臂同时作业,掘锚一体机自主支护锚杆,锚杆转载机自主支护顶锚索、锚杆;③稳定顶板条件下煤巷智能化快速掘进系统装备研发,研制新型掘锚一体机+跨骑锚杆机,实现锚杆多排多臂同时作业。④研制适应复杂煤层全断面矩形快速掘进机系统,研究矩形复合截割刀盘、方向、姿态控制、快速换刀机器人等关键技术,开发适应复杂煤层条件的全断面矩形快速掘进机。

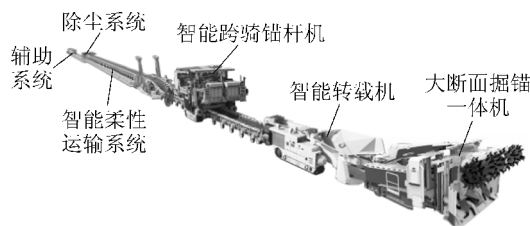


图4 智能化掘进成套设备

Fig. 4 Complete set of intelligent excavating equipment

2.4 智能化无人开采关键技术与装备

随着智能化无人开采的深入发展,更多的机械化、信息化的短板被补充完善,煤矿井下精准定位导航、图像智能识别、智能化控制等关键核心技术的应用将会越来越成熟。在地质条件日益复杂、生产环境要求日益提高、安全要求日益严格的大趋势下,智能化无人开采的需求将会越来越迫切。

煤矿智能化无人开采系统是要建立一个从开采准备、工艺规划到开采过程实时控制、设备管理,直至远程监控服务的煤炭生产全过程无人或少人的智慧生产系统。目前,针对智能化无人开采,以下5个关键科技问题亟待解决:①工作面有限空间内装备位姿及运动关系精确探测;②低照度、高粉尘空间视频监控及图像识别;③围岩-开采系统耦合作用规律及多机协同控制;④复杂条件下超前巷道装备自动化技术;⑤关键材料、元部件及整机可靠性提升技术。

针对上述问题,煤矿智能化无人开采技术与装备研发的关键内容包括:①工作面装备位姿检测及多信息驱动的三维场景实时再现;②围岩-装备耦合自适应协同控制系统研发;③智能装备关键元部件及可靠性技术研发;④煤流及两巷辅助作业智能化系统研发。智能化无人开采技术与装备总体技术路线如图5所示。

2.4.1 工作面装备位姿检测及多信息驱动的三维场景实时再现

井下工作面装备的位置、姿态及运动状态的感知和测量是实施装备智能控制的前提条件。井下环境复杂多变,高可靠性、高精度的适用于复杂境下的捷联惯性导航技术、基于UWB的超宽带局部定位技术、基于SLAM的同步定位与地图构建等技术,都将成为定位导航体系的关键技术。因此该研究方向的关键研究包括:

1) 工作面三维激光扫描及地图构建。其关键技术主要为:①三维激光扫描仪、高清与红外双视摄像机在运动过程中的同步动态扫描方法;②三维激光扫描点云、高清红外视频图像与钻孔、UWB雷达

等物探信息的融合技术;③井下工作面及巷道环境三维地图的自动构建与实时修正及更新技术。工作

面三维激光扫描及地图构建如图6所示。

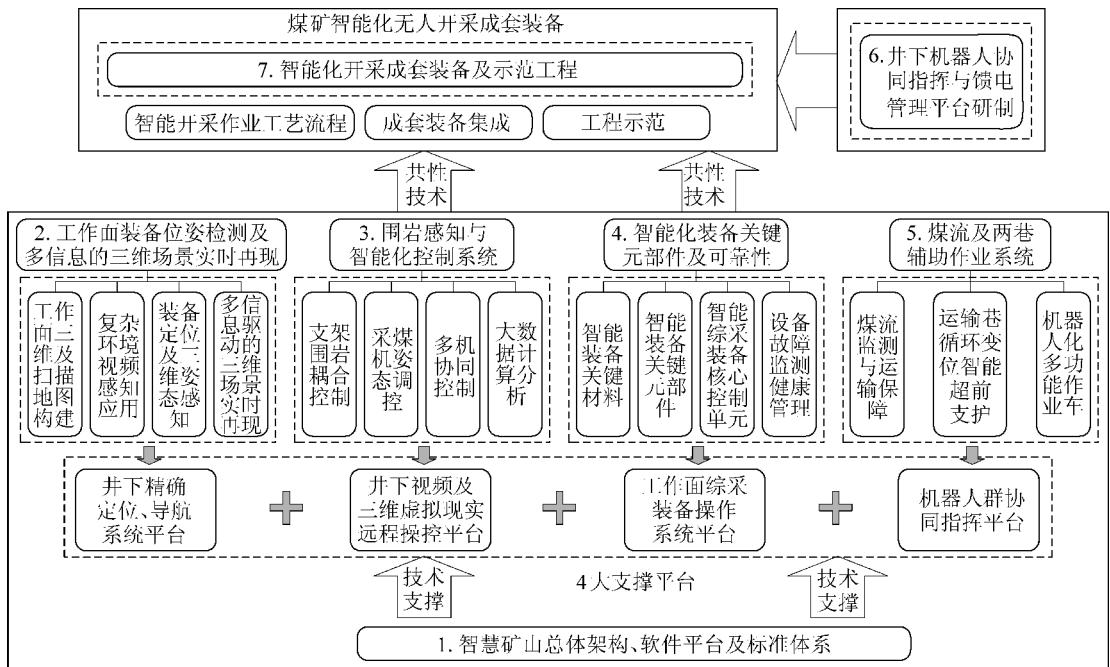


图5 智能化无人开采技术与装备总体技术路线

Fig. 5 General technical route of intelligent unmanned mining technology and equipment

2) 井下环境高清视频图像获取。其关键技术主要为:①具备仿生除尘部件,具有图像智能去雾、去噪功能的本安型防爆视觉传感器;②基于机器学习的井下视频压缩算法;③井下实时视频图像采集、海量存储平台。

3) 综采装备实时动态位置及位姿检测。其关键技术主要为:①惯性导航、超宽带 UWB、毫米波、MEMS、机器视觉和激光扫描等传感定位技术;②井下环境传感器间数据通信与多源传感数据融合定位技术;③适用于井下工作面复杂环境中不同综采装备的多传感手段集成检测装置。

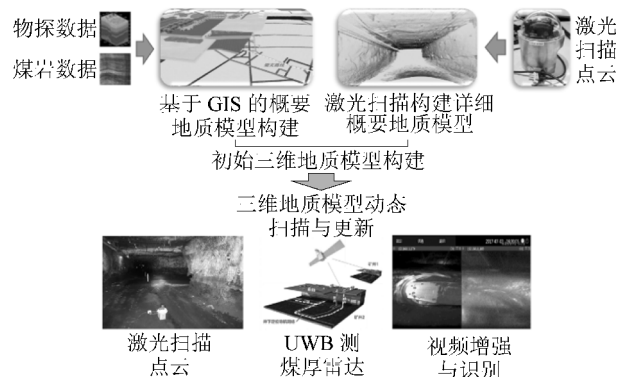


图6 工作面三维激光扫描及地图构建

Fig. 6 Complete set of intelligent excavating equipment

4) 多信息驱动的三维场景实时再现。其关键技术主要为:①井下综采装备的三维及物理仿真技

术;②井下综采装备之间的运动及物理约束关系研究;③井下综采装备与围岩之间的几何及运动约束关系研究;④在工作面三维地图、装备倾角、压力、行程传感等多源信息综合驱动下工作面环境与装备状态的三维场景实时再现技术。

最终融合视频增强、三维点云扫描和动态建图技术构建远程全景在现虚拟生产系统,不仅可以实现井下场景的三维再现,还可实现虚拟操控、危情模拟、超前规划等。

2.4.2 围岩-装备耦合自适应协同控制系统研发

工作面围岩的稳定性控制是实现煤炭安全开采的根本。目前,围岩状态的监测参数、围岩的失稳判据、液压支架的动载承载特性、液压支架与围岩的智能耦合控制逻辑等均尚不明确,因此,需要对工作面围岩状态感知与智能控制技术进行系统研究,从而为实现综采工作面智能化开采提供围岩智能控制方面的理论与技术支撑。该研究方向的关键研究包括:

1) 液压支架与围岩自适应控制技术与系统研发。该方向需重点攻克:①基于采煤机振动信息感知的采动应力场测量方法;②基于液压支架承载特征感知反演的围岩失稳判据与控制机理;③液压支架与围岩姿态自适应控制原理、系统与装置;④液压支架与围岩耦合自适应控制专家系统和控制装置。

2) 采煤机与围岩自适应控制技术与系统研发。

其关键研究内容包括:①基于采煤机截割阻力感知的采煤机功率协调、牵引速度调控原理;②采煤机智能自动调高系统;③采煤机姿态感知技术与自适应控制装置。

3) 综采工作面分布式多机协同控制技术与系统研发。其关键研究内容包括:①构建基于统一坐标系统的综采设备群姿态、位置关系的运动学模型;②综采设备群分布式协同控制原理及控制算法;③仰俯采等复杂条件下液压支架自动跟机移架、液压支架自适应条件及刮板输送机智能调速等技术与装置;④研发具有快速响应特性的智能供液系统。

4) 综采大数据集成与挖掘利用。其关键研究内容包括:①围岩环境数据与开采设备运行数据等多类别多时间尺度的数据插值算法与软件,构建多层次数据特征数据库;②基于深度学习构建智能开采控制行为模式推理与决策算法与软件;③围岩环境及设备运行趋势的推理算法与软件;④构建综采大数据推送策略与系统。

2.4.3 煤流及两巷辅助作业智能化系统研发

综采工作面的连续智能化快速化推进是包括工作面开采设备、煤流运输设备、两巷辅助作业设备等设备群协同作业的结果,各设备相互配合缺一不可。随着综采智能化开采技术的不断发展,工作面开采效率不断提高。而对于两巷的辅助作业设备,其智能化关键技术目前缺乏研究,严重落后于综采工作面智能装备的发展,成为工作面安全生产及高效推进的瓶颈。因此,煤流及两巷辅助作业智能化系统是亟待研究的方向。该方向的关键技术包括:

1) 煤流监测与运输系统保障技术研究。其关键研究内容包括:①煤流动态扫描与煤流量分布状态评估;②基于多信息融合的大块煤快速识别技术;③基于煤流平衡的多机协同控制技术;④超大块煤岩高效破碎技术。

2) 运输巷循环变位智能超前支护系统。其关键研究内容包括:①变体式防冲超前支护单元研制;②转载机顶铺轨道式移架系统;③超前支护单元自适应变载调节系统;④超前支护单元自动移位控制系统。

3) 机器人化多功能超前巷道作业车开发。其关键研究内容包括:①遥控式全方位移动多功能作业平台,适应底鼓路面移动环境;②锚杆回收、退锚、管路辅助回撤等一体化修巷模块开发;③特殊功能机械作业手开发。超前巷道一体化修巷作业如图7所示。

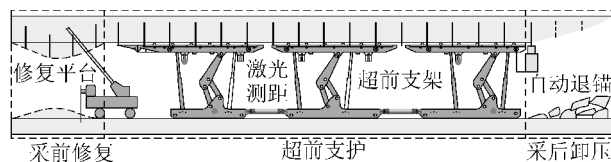


图7 超前巷道一体化修巷作业示意

Fig. 7 Schematic diagram of integrated roadway repair in advance roadway

2.4.4 智能综采装备核心控制模块及其操作系统

控制装置是智能化综采装备的核心部件,是影响装备自动化程度的最直接因素。嵌入式硬件、软件是控制装置的大脑与灵魂,其自主安全性、平台统一性问题,是综采智能化领域亟待解决的关键问题。目前各大企业主要通过委托开发,系统集成等方式实现各综采设备的控制。这种模式缺乏统一的硬、软件平台,系统的稳定性、安全性均难以保证,嵌入式控制平台统一化,成为提高装备智能化水平,提升产品核心竞争力的瓶颈问题。

智能综采装备核心控制模块及其操作系统的关键研究核心技术包括:①基于 ARM 架构的 MPU 和 MCU 等高、中、低端 3 种硬件平台;②操作系统移植、底层驱动、GUI 开发等嵌入式软件设计技术;③基于 CIP (Common Industrial Protocol) 框架的跨平台通用协议栈;④组态化的集成开发环境 (IDE) 等。重点研发一套能广泛应用于各种综采装备,且标准化、模块化、可配置、软硬一体的智能综采装备核心控制单元及开发平台,并开发一套上位机软件集成开发环境,支持组态化二次开发,保证综采智能化设备的控制需求。

2.5 煤矿机器人

煤矿生产系统庞大复杂,作业环境恶劣,靠人工操作机械的方式,无法有效减少井下一线作业人员,实现无人则安。用机器人替代井下作业、安控和应急救援人工作业是建设智慧煤矿的新要求。煤矿作业类机器人属于重载防爆机器人,其他领域尚无可借鉴的技术和产品。煤矿安控和应急救援类机器人属于极端复杂环境机器人,不单要有必备的感知检测功能,还要求有可靠的防爆、运移、导航、避障、路径规划和抗颠覆及自救等功能。因此针对煤矿机器人,以下共性的关键技术成为重点研究方向:①井下机器人自适应变阻抗;力跟踪控制方法;②井下机器人自我状态识别、避障和自主平衡;③井下长时可靠供电及自主寻径无线快速充电技术;④井下多机器人联合通信及协同控制平台。

国家应急管理部发布了“煤矿机器人重点研发产品目录”,引导企业大力发展和使用煤矿机器人,

并给予政策激励。目前,以智能化综采工作面系统装备组成的采煤机器人已在70多个煤矿应用,部分固定岗位机器人和设备巡检、危险环境探测及辅助作业机器人已有初级产品试用。煤矿巡检机器人应用现场如图8所示。



图8 煤矿巡检机器人应用现场

Fig. 8 Application site of coal mine inspection robot

1) 井下机器人自适应变阻力跟踪控制方法。针对井下非结构环境下机器人易碰撞或冲击,对周围设备或人员造成安全隐患的问题,研究机器人与环境的接触阻力变化规律,分析机器人控制参数对接触阻力的作用规律,提出基于变阻力跟踪的非结构环境下的机器人自适应力跟踪控制方法,避免机器人在井下的碰撞和破坏,保障运行的安全及对周围设备和人员的无损害。

2) 井下机器人自我状态识别、避障和自主平衡。研究井下机器人未知区域扫描探测方法、障碍识别方法,基于SLAM算法优化自主定位及建图方法,构建模拟试验平台,研究危险探测机器人自我状态识别、避障和自主平衡装置。

3) 井下长时可靠供电及自主寻径无线快速充电技术。依据煤矿井下电气设备安全规范,井下机器人的电池容量与防护壳体受到严格要求。因此研究井下长时可靠供电及自主寻径无线快速充电技术成为突破煤矿机器人应用的关键技术。其关键研究内容包括:①防爆电源轻量化长时可靠供电;②机器人的无线自主寻径充电方法;③研制无线充电装置并完成相关防护设计。

4) 井下多机器人联合通信及协同控制平台。煤炭机器人化开采既有串行关联又有并行关联,为实现机器人系统的协调高效运行,需针对井下机器人研究联合通信及协同控制平台。包括:①井下狭长、强干扰环境机器人高速、可靠联合通信方法;②无线信息远程通信与无线自组网研究;③井下机器人串并联复合关系的多机协同控制方法。

3 智慧煤矿巨系统综合管理系统平台

煤矿生产职能部门众多,矿用设备又千差万别,存在各设备系统数据标准不一致、融合困难、无法联

动、网络传输可管可控性差以及缺乏大数据分析手段等问题,无法实现数据的充分利用和智能化管控。因此在上述核心技术研究的基础上,其核心模块必须统一于智慧煤矿综合管理系统软件及操作平台。

智慧煤矿巨系统综合管理操作平台是面向整个智慧矿山的一体化基础操作系统,对下获取和处理数据,对上支撑应用业务的功能性软件、通信、大数据分析、云计算等,是构建智慧矿山的基础操作平台,解决子系统数据割裂、无法联动、无法大数据分析支持等关键问题。它的基本特征包括:全面的数据标准化;统一的数据存储方案;数据实时传输;组态化可配置;支持大数据分析;具有开放性。所有信息包括实时数据、多媒体数据和管理数据,可以通过局域网和广域网进行准时、可靠、安全的传输,必要的数据要保证时钟同步。智慧煤矿巨系统综合管理操作平台核心包括:①基于Ethernet/IP的生产过程控制数据交换标准化;②基于Web Service的信息系统跨平台交互;③建设煤矿大数据采集分析处理平台;④开放式多系统管理软件及操作平台。

智慧煤矿巨系统综合管理操作平台根据其业务逻辑,可建设为以智慧煤矿多系统综合管理操作平台为核心的包括①井下精确定位、导航、5G通信管理操作平台;②地质及矿井采掘运信息动态管理操作系统平台;③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;④环境及危险源感知与安全预警系统管理操作平台;⑤智能化无人工作面系统管理操作平台;⑥井下机器人协同智慧和馈电管理操作平台;⑦全矿井设备和设施健康管理操作平台;⑧分选运销及采区规划设计智能管理操作平台。通过这“1+8智能操作平台”,实现多层次、多信息融合处理与操作,从而实现各生产环节智能化协同生产。

4 智慧煤矿与智能化开采发展目标

作为煤炭产业转型升级和技术革命的战略目标,智慧煤矿和智能化开采核心技术的研发已成为采矿行业升级发展的强大推动力。然而,建设智慧煤矿不是简单技术改造就能建成的,其中包含的系列关键技术需要进行不断的探索和攻关,并借助新一代信息技术带来的发展机遇,借助第4次工业革命和新技术发展的成果,与煤炭开发技术深度融合,开创绿色、安全、高效的煤矿发展新模式。

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。智能化开采是煤炭综合机械化、自动化开采

技术的新发展,其总目标是实现无人化开采,智慧煤矿与智能化开采技术的发展尚处于起步阶段,必然经历一个不断发展的过程,要经历从初级智能化到高级智能化的过程,其分阶段目标如下:

1) 近期目标:到2020年,在目前煤矿信息化、数字化和智能化开采技术成果基础上,通过推广应初和技术升级,建设100个示范煤矿,初步构建智慧煤矿系统框架,实现采掘运主要环节单个系统、单项技术的智能化决策和自动化运行,实现工作面内无人操作、有人巡视,远程监控的自动化生产。

2) 中期目标:到2025年,攻克一批智慧煤矿与智能化开采的短板技术,提高煤矿智能化水平,全部大型煤矿全面实现智能化开采,构建起多信息融合的智慧煤矿系统,实现采掘运通多个系统的智能化决策和自动化协同运行,井下主要岗位作业、安控与应急救援的机器人替代,工作面无人化作业。

3) 远期目标,到2035年,全面突破和完善智慧煤矿与智能化开采的关键技术,全面实现煤矿的智能化和现代化,构建起煤矿及矿区多产业链、多系统集成的智慧煤矿系统,全面实现生产和管理信息的数字化,全部主要生产环节的智能决策和自动化运行,达到全矿井一线作业、安控和应急救援的机器人化,无人化作业。

5 结 论

1) 智慧煤矿与智能化开采是煤炭工业现代化的必然趋势,做好顶层设计是智慧煤矿与智能化开采健康发展的重要保证基础,坚持正确的原则,科学规划智慧煤矿的总体架构,建立完善的标准体系,是智慧煤矿与智能化开采技术发展的重要保证。

2) 精准地质信息探测,物联网技术与装备,智能化快速掘进技术与装备,无人开采关键技术与装备以及煤矿机器人,是当前智慧煤矿建设中的重点研究方向。

3) 智慧煤矿与智能化开采是一个复杂巨系统,应遵循系统工程理论,开发智慧煤矿巨系统开放的综合管理操作平台,实现感知、分析、决策、管理、开采、运输全生产周期的智慧化一体化管理,从而建成煤矿智能生态体系。

4) 智慧煤矿与智能化开采是一个不断发展的过程,需要不断探索和攻关,逐步解决关键核心技术难题,实现智慧煤矿与智能化开采分阶段发展目标。

参考文献 (References):

[1] 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.

[2] 袁 亮.煤炭精准开采科学构想[J].煤炭学报,2017,42(1):1-7.

YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1-7.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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 Technology, 2017, 22(2): 1-4.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 毛善君.“高科技煤矿”信息化建设的战略思考及关键技术[J].煤炭学报,2014,39(8):1572-1583.

MAO Shanjun. Strategic thinking and key technology of informatization construction of hightech coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1572-1583.

[10] 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.

[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 Jinhua, *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] 毛善君, 杨乃时, 高彦清, 等. 煤矿分布式协同“一张图”系统的设计和关键技术[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 280-286.
MAO Shanjun, YANG Naishi, GAO Yanqing, *et al.* Design and key technology research of coal mine distributed cooperative “one map” system[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 280-286.
- [15] 吕鹏飞, 何敏, 陈晓晶, 等. 智慧矿山发展与展望[J]. 工矿自动化, 2018, 44(9): 84-88.
LYU Pengfei, HE Min, CHEN Xiaojing, *et al.* Development and prospect of wisdom mine[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(9): 84-88.
- [16] 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(4): 1-5.
DING Enjie, ZHAO Zhikai. Research advances and prospects of mine Internet of Things[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(4): 1-5.
- [17] 张东宝. 煤巷智能快速掘进技术发展现状与关键技术[J]. 煤炭工程, 2018, 50(5): 56-59.
ZHANG Dongbao. Development status and key technology of intelligent rapid driving technology in coal seam roadway[J]. Coal Engineering, 2018, 50(5): 56-59.
- [18] 康红普, 王国法, 姜鹏飞, 等. 煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1789-1800.
KANG Hongpu, WANG Guofa, JIANG Pengfei, *et al.* Conception for strata control and intelligent mining technology in deep coal mines with depth more than 1000m[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1789-1800.
- [19] 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): 2582-2590.
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): 2582-2590.
- [20] 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.