

煤矿智能快速掘进关键技术研究现状及展望

毛君, 杨润坤, 谢苗, 卢进南, 王贺, 刘治翔, 王帅

(辽宁工程技术大学 机械工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:针对煤矿巷道掘进智能化建设情况, 探讨了现阶段分别以连采机、掘锚一体机、全断面掘进系统、掘锚机为核心的四大类智能快速掘进成套装备发展现状, 分析了四大类智能快掘装备与地质条件适用性, 提出了实现煤矿智能化掘进需要解决的关键技术的问题, 探讨了以信息传输与智能分析技术、智能感知技术、精确定位导航技术, 自主定型定向截割技术、掘进机远程自主截割控制技术以及多级多工序智能协同控制技术为基础的智能化掘进实现途径; 基于复杂地质条件下煤矿巷道掘进亟待解决的关键问题, 提出了以掘进作业功能需求、掘进工艺要求为依据的系统化分析、模块化设计、功能优化组合的设计方法; 研究了以虚控实、虚实结合的多级数字孪生构架, 基于掘进巷道设备、环境、地质构造多维信息再现实现掘进机远程控制; 提出了单机智能化、系统协同化、井下智控与地面远程监控相协同的控制方法。开发了新型的无重复碾压柔性超前支护技术、截割部多级伸缩截割技术、智能锚固机组多钻机并行作业等技术, 研制了具有掘、支、锚、运、探多工序并行作业的新型快速掘进作业联合机组, 提出了掘进机器人、超前支护机器人、锚固机器人、辅助运输机器人组柔性并行作业技术; 提出了基于数据驱动的多机多工序协同控制行为规划决策方法。提出构建完整的煤矿井下跨系统全时空信息数字感知体系, 构建集井下现场生产状态、掘进巷道空间信息、掘进装备状态、风险信息等多参量、多尺度、全时空特性的数据感知智能化监控平台, 实现虚拟系统与实际掘进系统实时通信, 通过数据驱动规划分析实现智能化、少人化掘进。

关键词:智能掘进; 自主定性定向截割; 柔性并行作业; 多级多工序协同控制; 数字孪生

中图分类号: TD713 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)02-1214-16

Research status and prospects of key technologies for intelligent rapid excavation in coal mines

MAO Jun, YANG Runkun, XIE Miao, LU Jinnan, WANG He, LIU Zhixiang, WANG Shuai

(School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In view of the intelligentization of coal mine roadway excavation, this paper discusses the current development status of four major categories of intelligent fast excavation equipment, including continuous mining machine, excavation and anchor machine, full-section excavation system, and anchor excavation machine, analyzes the applicability of the four major categories of intelligent fast excavation equipment with the geological conditions, proposes some key technological issues for the realization of intelligent coal mine excavation which need to be resolved, and also explores the information

收稿日期: 2023-11-01 修回日期: 2024-01-23 责任编辑: 王凡 DOI: [10.13225/j.cnki.jccs.2023.1424](https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1424)

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51774162, 51874158)

作者简介: 毛君(1960—), 男, 辽宁鞍山人, 教授, 博士生导师。E-mail: maojun608@263.net

通讯作者: 杨润坤(1995—), 男, 辽宁阜新人, 博士研究生。E-mail: yrk5093@163.com

引用格式: 毛君, 杨润坤, 谢苗, 等. 煤矿智能快速掘进关键技术研究现状及展望[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 1214-1229.

MAO Jun, YANG Runkun, XIE Miao, et al. Research status and prospects of key technologies for intelligent rapid excavation in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 1214-1229.



移动阅读

transmission and intelligent analysis technology, intelligent perception technology, precise positioning and navigation technology, autonomous stereotyped directional cutting technology, remote and autonomous cutting control technology of road-header and multi-level and multi-process intelligent cooperative control technology, as they are the basis for the realization of intelligent roadway excavation. Based on the key technological issues needed to be solved in the mine roadway excavation under the complex geological conditions, the paper puts forward the design method of systematic analysis, modular design and optimal combination of functions, according to the functional requirements of the excavation operation and the requirements of the excavation process. A multi-level digital twin architecture of virtual control and virtual-reality combination is studied based on the multi-dimensional information reproduction of heading equipment, environment, and geological structure to realize the remote control of road-heading machine. A control method that integrates single-machine intelligence, system synergism, and synergism of underground intelligent control and surface remote monitoring is proposed. A new type of flexible advance support technology without repetitive crushing, multi-stage telescopic cutting technology of cutting section, and multi-rig parallel operation technology of intelligent anchoring unit have been developed, and a new type of combined unit for rapid roadway heading operation with a parallel operation of excavating, supporting, anchoring, transporting, and exploring processes has been also developed, and a flexible parallel operation technology of excavation robot, advance support robot, anchoring robot, and auxiliary transportation robot group has been proposed. A data-driven multi-machine, multi-process collaborative control behavior planning and decision-making method is proposed. In addition, it is proposed to construct a complete coal mine underground cross-system full-temporal-spatial information digital sensing system, build a data sensing intelligent monitoring platform with multi-parameter, multi-scale and full-temporal-spatial characteristics, that integrates the production state of underground site, spatial information of roadway, state of heading equipment, and risk information, etc., and realize a real-time communication between virtual system and actual tunneling system, so as to realize the intelligent and less-manned heading through data-driven planning and analysis.

Key words: intelligent tunneling; autonomous qualitative directional cutting; flexible parallel operation; multi-stage and multi-process collaborative control; digital twins

依据国际能源署(IEA)最新发布的预测报告显示,未来我国的煤炭资源需求在可用能源占比中仍起到主导地位,预计到2040年国内煤炭需求量约占国际能源的一半,其中井工煤矿资源占比约为煤炭总资源的80%,井工煤矿开采主要遵循着“采掘并重,掘进先行”原则。智能化掘进建设是煤矿智能化矿山建设的重要组成部分,是保障掘进作业安全、高效,解决煤炭生产中掘采比失调的重要技术手段^[1-2]。

2020年国家发改委、能源局等八部委联合印发了《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》及《煤矿重点研发机器人目录》等文件,明确了在2030年前基本实现重点矿区工作面无人化开采作业^[3]。为促进我国煤矿机器人研发应用与煤炭开发的智能化水平,国家矿山安全监察局提出通过建立“国家矿山机器人协同创新中心”、研发示范基地等措施来引导矿山装备智能化与机器人技术发展。并将矿井掘进机器人列入《煤矿机器人重点研发目录》,极大的促进了智能化掘进作业进程。截至目前我国已累计建成1277个具备智能化掘进功能的掘进工作面^[4],国内外的高校、研

究院所、装备制造企业和煤炭生产企业的专家学者做了大量的创新性工作,为智能化掘进提供了理论技术支持与工程实践。但智能快掘是系统工程,需结合地质条件特征,深度融合新一代智能化技术,多设备高效匹配联合作业才能实现智能快速掘进^[5-8]。笔者以掘进设备分类情况为主要脉络,分析并论述了智能快掘系统的装备配套以及关键技术的现状与发展趋势,针对现阶段存在的掘进—支护—锚固—运输协同作业效率低、“掘锚比失衡”等主要挑战,提出掘进装备精确定位导航技术、自主定型定向截割技术、掘进机远程自主截割控制技术、多机多工序协同控制技术等关键技术并给出研究方向。

1 智能快速掘进系统发展现状

现阶段各类型装备在适应性地质条件服役的同时,也在不断创新,开拓更多应用场景。按照核心装备分类,现今煤矿巷道智能快速掘进系统主要分为4种,分别采用了悬臂式掘进机(含掘锚机)、连采机、掘锚一体机、全断面硬岩掘进机(TBM)作为核心掘进装备^[9]。

1.1 连采机为核心的智能快掘系统

以连续采煤机为主的快速掘进技术,在巷道掘进作业过程中能够实现掘锚同步或多巷交叉作业,具备智能化程度高、切割速度快、巷道成型质量高等优点。适合煤巷掘进、切割矩形断面巷道,在地质条件较好的矿区,如神东、陕北、鄂尔多斯等的应用效果良好^[10]。

我国自1979年开始引进连采机进行煤炭开采,最早是以单机引入为主,至20世纪90年代,以神东为首的国内大型煤业集团开始成套引进以连采机、梭车、锚杆钻车为核心的双巷掘进成套装备,其机动灵活的调机特点满足双巷共用一套掘进设备,提高了设备综合利用率,且现场管理维护方便减少了辅助人员数量。连采机月进尺可达1000 m以上,奠定了双巷快速掘进的基础。目前已研制出采高1.3~5.5 m、切割功率340 kW、多种系列的连续采煤机,并研制了多种型号的锚杆钻车、梭车等配套装备。成套设备方面,通过消化吸收,国内煤机研发企业已实现了连采机、梭车、锚杆钻车全系列设备的研发与制造,并结合智能化发展要求,形成了具有我国特色的智能双巷掘进成套装备^[10],在陕蒙地区实现了双巷掘进月进尺1000~1500 m的常态化作业,如图1所示。



图1 连续采煤机及配套装备

Fig.1 Continuous miner and its supporting equipment

1.2 掘锚一体机智能快速掘进系统

稳定围岩条件下(稳定围岩指顶、帮稳定,空顶距和空帮距均大于20 m的巷道条件)掘锚一体机智能快速掘进系统主要由掘锚一体机、转载破碎机、柔性运输系统、锚杆钻车、迈步自移机尾组成。切割和锚护作业相对独立,以切割为主,锚护作业服务切割作业,甚至可以只掘不锚。掘锚一体机后方配转载破碎机和柔性运输系统,实现对物料的破碎和连续运输,满足月进2000 m以上的转载要求。跨式锚杆钻车机载多组钻机,一般以10臂居多,跨骑于柔性运输系统上方,并能根据锚护作业的需求自由移动,实现独立的锚护作业。柔性运输系统与迈步自移机尾重叠搭接,搭接长度长,满足快掘进尺要求。由于该种设备配套方式对地质条件变化时的适应性较弱,仅在神东、陕煤等矿区的非常稳定围岩巷道内小范围试用,未得到大面积推广,如图2所示。

中等稳定围岩条件下(中等稳定围岩条件是指顶、帮中等稳定,空顶距和空帮距均大于2.5 m的巷道条

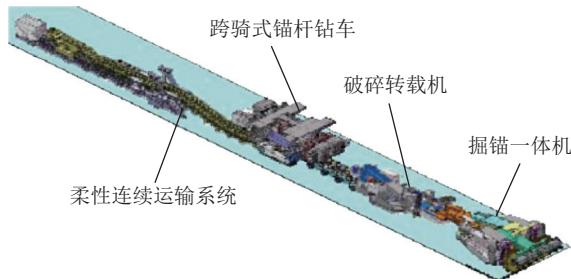


图2 掘锚一体机成套装备配置

Fig.2 Equipment configuration schemes in mine rapid excavation

件,广泛分布于晋陕蒙宁新等主要产煤区)掘锚一体机智能快速掘进系统,主要由掘锚一体机、锚杆转载机、连续运输系统、迈步自移机尾组成。掘锚一体机上的工作必须兼顾截割和锚护,且一般是掘锚同步作业。在中等稳定围岩地质条件下,掘锚一体机以完成全部锚杆支护作业为主,截割作业服从于锚护作业,锚杆转载机主要进行锚索的支护。这套掘进作业装备组合在应用的过程中,可依据地质条件合理调整作业方式,适应性较强,应用最为广泛。在神木汇森凉水井矿业投入使用,实现了日最高进尺75 m,月最高进尺1506 m,掘进队人员数量减少25%。陕煤红柳林矿、曹家滩矿业、黄陵二号煤等多个矿井应用效果显著,掘进工效得到提高,如图3所示。



图3 煤矿快掘成套装备配置

Fig.3 Equipment configuration schemes in mine rapid excavation

一般及以下地质条件下的掘锚一体机智能快速掘进系统由小空顶掘锚一体机、锚杆转载机、带式转载机、迈步式自移机尾组成。新型的多臂可移动式的锚护平台配合藏截割头支护工艺,使掘锚一体机的支护空顶距由2.5 m降低到0.5 m,提高了掘锚一体机对软弱煤层的适应性。掘锚一体化快速掘进技术具有掘锚平行、全宽截割的优势,其截割轨迹简单、截割掏槽过程受底板性质影响小、机身位姿易控、掘锚同步作业充分保障了掘进效率和安全水平,我国稳定围岩、中等稳定围岩条件下的掘锚一体化快速掘进技术已经得到快速的发展和应用。一般在系统的末端安装集中控制台,具有远程监视操作等功能。在集中控制台的后方设置负压除尘风机、组合开关、电缆存储仓和材料存储仓等装置,集成通风、除尘、供电和供水装置

以及管路通道,减少辅助工序,降低劳动强度,改善作业环境,安全生产水平较高。以掘锚一体机为核心的快掘工作面开展智能化较为容易。

1.3 煤矿全断面智能掘进系统

TBM优点是巷道断面一次成型且可截割异型断面,截割、支护、锚固、运输等环节并行作业,易于实现智能化。由于这种掘进设备体积大、机身长、转弯半径大、作业准备工期长且割刀盘的截割方式和形状不能随地质条件变化而改变,适合于长距离、小曲率转弯、断面形状固定的巷道掘进作业。近年来,陆续有少数煤矿等先后引入TBM进行快速掘进,武汉大学刘泉声项目组^[11]针对TBM掘进过程岩-机作用信息实时感知技术展开了研究,初步提出了TBM掘进

参数自适应智能决策方法。在淮南张集煤矿西二采区的瓦抽巷道,采用QJYC045M型煤矿全断面掘进系统(图4)进行全岩掘进,平均月进尺达404 m,最高月进尺达560 m^[12]。初步取得了良好的工程效果。但全面推广还存在以下难点:TBM在巷道内组装、拆解需要专门施工大断面组装和拆解硐室;TBM推进过程煤系软硬复合地层破岩机理不清,高效破岩控制难度大;软弱地层挤压变形卡机灾害风险大,灾害预测和安全控制难度大;掘进空间狭小和粉尘水雾干扰严重,TBM掘进过程监测难度大,难以进行掘进参数决策控制和灾害预警等等,由于煤矿特殊的施工环境和复杂地质条件,TBM在煤矿巷道掘进中的应用还处于试验探索阶段。

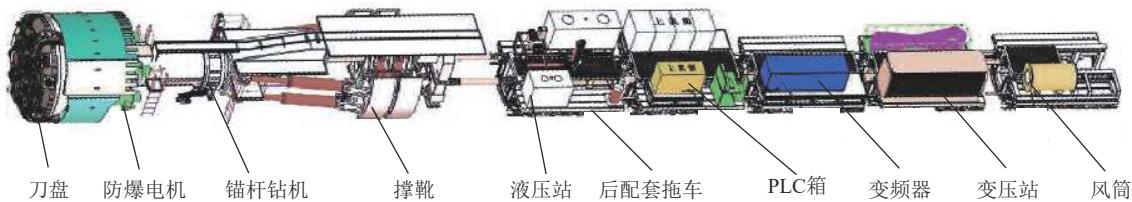


图4 QJYC045M型煤矿全断面硬岩掘进机

Fig.4 QJYC045M coal mine hard rock TBM

1.4 以掘锚机为核心的智能快掘系统

由于我国大部分煤矿地质条件复杂,连采机、掘锚一体机的使用量受到很大限制,从目前的统计分析看约有80%的巷道掘进使用悬臂式掘进机或在此基础上衍生的掘锚机。伴随着国内掘锚机技术迅速发展,很多掘进机制造企业具备掘锚机研发和改造的能力,各种形式的掘锚机研发落地,多数体现在掘锚机截割功率的提升,钻臂数量2~8臂,尤以2臂式掘锚机居多,可适应全煤岩、半煤岩巷道的掘进。钻臂通过滑轨、机械臂等形式与掘锚机机身连接,掘进时收回到机身上,支护时钻臂沿轨道滑出,完成顶帮锚杆支护。在复杂地质条件下,以掘锚机为核心的快速掘进装备组成为:掘锚机、带式转载机、自移机尾、除尘系统、远程集控系统。其特点是在传统掘进机上集成可移式的锚杆钻机,通过实时控制,可实现空顶距<0.5 m的顶锚、帮锚的全支护,满足极不稳定围岩破碎前的支护要求。为提高掘进装备与围岩的适应性,马宏伟团队研发了护盾式快速掘进系统^[13],其包括截割机器人、临时支护机器人、钻锚机器人和铺网机器人。截割机器人在临时支护机器人的下方,钻锚机器人在掘进机器人的后方,实现了钻锚与截割同步作业,智能化程度较高。2021年兖煤黑豹提出护盾强化式快掘系统,采用模块化临时支护装置可实现无重复碾压功能,配套6臂运锚机可实现多位置锚固作业。景隆

重工研发的6臂掘锚机,满足最小空顶距为0.3 m、最小空帮距为2.5 m的要求,具有钻机一键展开、一键收回的功能,极大提高了掘锚机的锚护速度^[14]。

2 快速掘进智能控制系统关键技术

智能快速掘进装备为智能无人掘进工作面构建了平台、奠定了硬件基础。但实现智能无人作业还需要融合云计算、大数据、5G传输和人工智能等技术,让每个设备都具有自主感知和智能控制能力,使得掘进机器人群组协同工作,完成探-掘-支-锚-运等环节平行作业,还需重点突破信息传输与智能分析技术、智能感知技术、设备精确定位导航技术、自主定型定向截割技术、多机多工序智能协同控制技术和远程自主截割控制等关键技术。

2.1 信息传输与智能分析技术

按照传递方式的不同,掘进面信息传递主要分为有线、无线2种方式。按照所需要传输的数据类型不同,根据其数据特点传输方式大致可以分为2类:一是掘进巷道内所有工作设备之间的联系互通,保证设备之间近距离的数据共享;二是掘进工作面数据与集控室之间的交互,实现生产场景再现以及各类数据还原显示。

设备多、数据量大和实时性高是掘进巷道内设备之间信息交互的主要特点,服务器无法支撑当前的海量数据处理请求量,为解决这一问题,满足实际生产

管理的需求,王国法院士^[15]提出基于“ABCD”(即人工智能(Artificial intelligence)、区块链(Block chain)、云计算(Cloud computing)、大数据(Big data))的智能化煤矿系统耦合技术,建立了智能化煤矿数据标准体系。将多传感器信息融合的海量数据提前进行计算匹配归类,减少数据拥堵,为智能决策系统快速响应提供了保障。生产单位可根据不同设备的相对运动状态、结合生产工艺的差异性设置适合自身的数据传递方式^[16-17]。当前,绝大部分矿区参与掘进生产的设备之间的信息交互通常以RS485、以太网和光纤等传输方式为主,基于5G技术的低延时、高可靠性特点,初步实现了端到端的工作面远程控制及数据监控。随着5G和VR技术的成熟与推广,5G超大带宽、超低延时成为主流趋势生产系统的远程操作正在逐渐取代传统的人工操作。但从实际应用角度,应把工作重心放在解决5G网络系统架构的一致性问题上,助力5G技术在煤矿的全面部署推广。同时还应致力于5G终端设备的研发,基于5G定制智能终端增加生产管理、设备巡检、人员定位等功能^[18-19]。

2.2 智能感知技术

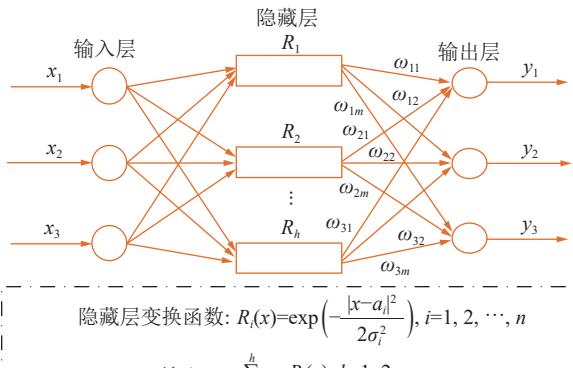
为实现掘进工作面智能化建设,需建立井上井下多系统全时空信息感知体系,为智能化系统运行决策实时提供感知数据信息,包括:环境感知、设备感知、地质感知^[20]。

2.2.1 掘进设备运行状态感知技术

设备运行状态包括工作性能参数感知、设备故障感知等,其中包括现已发展较为成熟的温度、电流、电压、功率等机组常规参数监测技术,以及正在发展完善阶段的截割头截割数据感知技术^[21]、钻进随钻数据感知技术等^[22];相关感知数据信息通过井下环网传输至远程监控软件,集中处理信息数据,可以采用RBF(Radial Basis Function)神经网络与粗糙集相结合的方法,对掘进作业装备健康状态进行诊断。作业过程中传感器采集到的故障信息中包含大量的冗余数据,粗糙集理论的作用是将其去除,然后再通过RBF神经网络模型进行数据重构,以实现掘进设备的快速、准确故障诊断^[23-24]。RBF神经网络是由输入层、隐藏层和输出层组成的3层网络结构,如图5所示。

2.2.2 地质状态感知技术

地质信息的准确感知对智能化掘进作业至关重要,同时也是制定合理的掘进工艺的基础,智能化掘进作业需要探明的地质信息包括:瓦斯、地下水、断层构造、围岩压力、煤岩硬度等信息,目前多采用机械超前钻探技术,物理探测技术,包括电流法、地震波分析



其中, x 为输入向量; a_i 为第 i 个基函数的中心; σ_i 为第 i 个基函数的方差; $\omega_{k,i}$ 为输出层第 k 个神经元与隐藏层第 i 个神经元的调节权重

Fig.5 RBF 神经网络

Fig.5 Structure diagram of RBF neural network

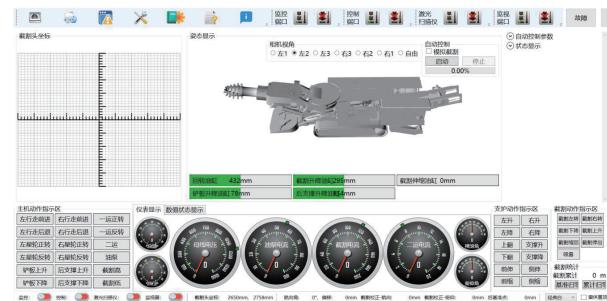


Fig.6 设备参数感知

Fig.6 Device parameter perception

法等。超前钻探作业耗时长,物探技术精度较低,单独使用都不能满足快速掘进作业的要求。为此,王虹等^[25]提出钻探+物探融合的探测技术,如图7所示,在掘进路径上采用短距钻探方式,利用孔间物探透视技术提高探测距离同时控制钻探方向,为快掘作业的效率提供了保障。在预测煤层气富集区、瓦斯突出的构造煤、突水通道、 ≥ 3 m断层、顶底板围岩稳定性方面^[26-27],煤矿高分辨率三维地震勘探技术应用效果较好,如图8、9所示。

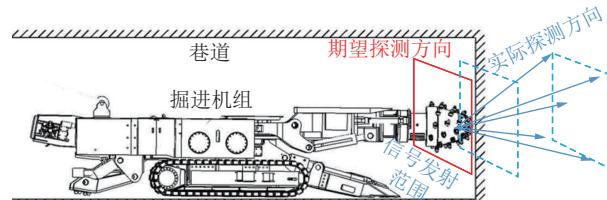


Fig.7 钻探+物探融合探测示意^[25]

Fig.7 Schematic diagram of drilling+geophysical fusion exploration technology^[25]

相关科研技术人员研发出的与惯导技术一体的高分辨率地质雷达,探测精度为2 cm,该设备加装在综掘设备上并与之联动,实时动态获取掘进工作面前方5 m以上范围的煤岩结构^[28],精准解析出地质构造、

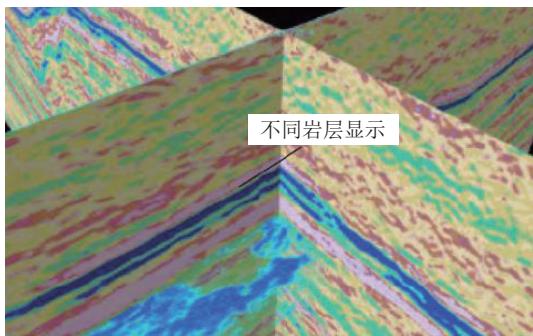
图8 三维地震勘探对地质体的识别^[20]

Fig.8 Effect of 3D seismic exploration on seismic data identification of geological body^[20]

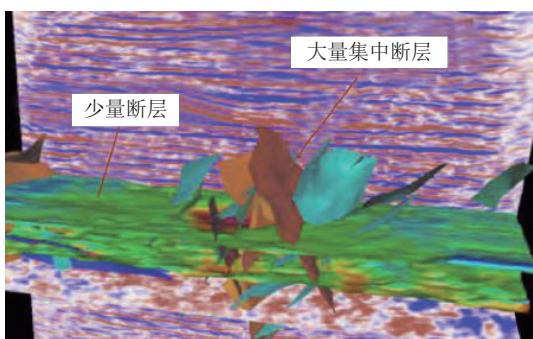
图9 三维地震勘探对地质构造的预测^[20]

Fig.9 Effect of 3D seismic exploration on seismic data prediction of geological structure^[20]

隐患灾害。该技术再结合井下千米钻机、探水钻机等常规地质钻探技术,更能提前精确预测出掘进工作面前方断层、褶曲、采空区、陷落柱、破碎带、含水构造等。随着计算机视觉与图像处理技术的发展,还可采用粉尘条件下图像识别与处理技术监测围岩的变形

和破坏,对巷道围岩稳定性进行辨识^[29],并为综掘设备智能安全高效快速掘进提供参考

2.2.3 透明矿山技术

巷道环境信息感知包括掘进工作面的粉尘、瓦斯、一氧化碳、环境温湿度、煤岩硬度、围岩稳定性、截割断面质量、水文、危险区域人员误入等信息。采用高清摄像头进行组合监控实现井下巷道作业空间全景成像是目前应用最广泛的技术手段。若想在复杂地质条件下实现煤矿巷道智能掘进,还要依靠透明矿山技术。通过在掘进装备上固设三维激光扫描装置,实时捕捉巷道空间数据;通过激光SLAM、点云算法等对所检测巷道信息做拼接处理,形成巷道三维模型,进而实现对巷道成形质量的准确监控。

3D激光扫描建模,利用激光扫描仪在物体表面记录对象点的位置和反射率为基础进行的,由计算机构建被扫描物体3D模型。3D激光扫描建模技术,能够快速集中的扫描对象,并根据扫描对象的大量数据,构建对象精确的3D模型。激光扫描仪获取的目标点坐标是相对于激光扫描仪本身的,在构建巷道三维模型前,需将目标点的相对坐标转换为相对大地的绝对坐标。在激光扫描仪获取目标点的信息后,通过坐标转换程序将其转换以大地坐标为基准的坐标,如图10(c)所示。

对于复杂地质工况复杂,受井下空间狭小、设备多、湿度和粉尘大、腐蚀介质、照度低、视线阻挡、设备振动大等因素限制,感知元器件的可靠性、精度与寿命较低,研发高可靠的传感设备是现阶段亟需解决的问题之一^[30]。

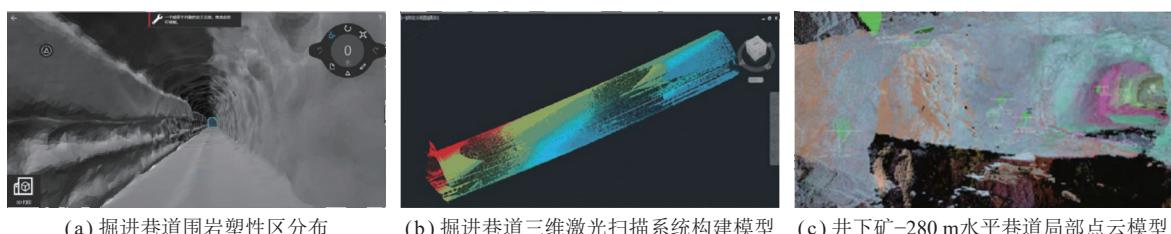
图10 巷道三维建模技术^[31-32]

Fig.10 Three-dimensional modeling technology of roadway^[31-32]

2.3 精确定位导航技术

煤巷掘进环境复杂多变,设备的精确定位与导航是实现快掘自动化与无人化的关键技术之一。国内相关学者对掘进装备的定位导航进行了深入研究^[33-36],采用多种传感器融合测绘仪器技术、惯性导航方位检测技术、姿态检验技术、超宽带TW-TOF测距技术探索了多种定位方法,笔者对多种定位技术进行了功能原理分析,针对不同地质条件的煤矿进行不同种类定

位技术的组合选用,增加掘进设备自主移动导航技术的适应性及实用性。

2.3.1 基于机器视觉的位姿监测技术

机器视觉测量具有效率高、非接触测量、抗干扰能力强等优点,已开始逐渐应用于各种位姿测量。在进行掘进机位姿参数测量时,激光指向仪固定在掘进后方的巷道中,相机固定在掘进机机身,相机通过对激光指向仪发出的激光束进行图像采集、处理最终得

到掘进机的机身为姿参数,如图 11 所示。巷道断面坐标系为 $O_hX_hY_hZ_h$, 坐标原点 O_h 位于巷道断面的几何中心, 激光坐标系为 $O_aX_aY_aZ_a$, 机身坐标系 $(O_bX_bY_bZ_b)$ 建立在掘进机机身顶部, 原点 O_b 位于机身顶部沿前进方向中轴线上, 初始状态下 X_b 、 Y_b 、 Z_b 三轴分别与 X_h 、 Y_h 、 Z_h 三轴平行。掘进机的位姿由偏航角 α 、俯仰角 β 、横滚角 γ 、车前距为 d 。

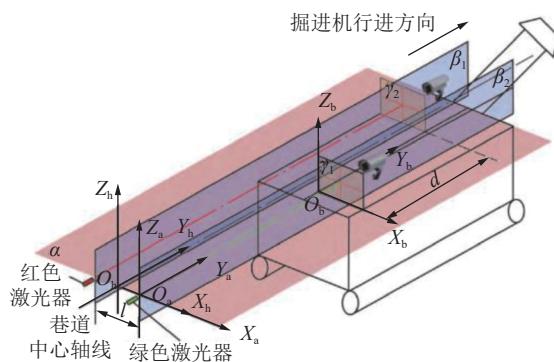


图 11 基于机器视觉的位姿监测系统^[37]

Fig.11 Position and attitude monitoring system based on machine vision^[37]

2.3.2 基于激光测距的掘进机定位技术

通过扇面激光发射器将扇形激光发射到掘进机上, 通过掘进机上安装的接受器接收发射信号, 对发射器和接收器之间的距离进行测量。得出掘进机相对于巷道的位置, 如图 12 所示。

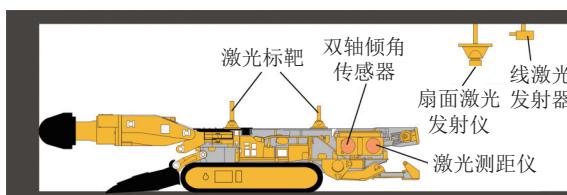


图 12 基于线结构光的掘进机位姿检测系统

Fig.12 Pose detection system of roadheader based on linestructured light

2.3.3 基于全站仪的定位导航技术

目前在掘锚一体机上应用较多^[38]。利用全站仪测量安装在掘进机上的棱镜相对于全站仪的距离与角度, 以全站仪坐标为基准, 计算出安装在掘进机上的棱镜坐标, 从而得出掘进机相对于巷道的位姿信息, 如图 13 所示。

2.3.4 超宽带位姿检测系统——UPDS 系统结构

采用位置已知的 4 台 UWB 基站依靠 TW-TOF 测距原理对固定在掘进机上的 3 台基站进行测量, 计算出掘进机上 3 台基站的位置信息, 从而求解出掘进机相对巷道的位姿信息, 包括掘进直线度, 左右倾角与前后倾角, 从而计算出目标点的位置, 如图 14 所示。

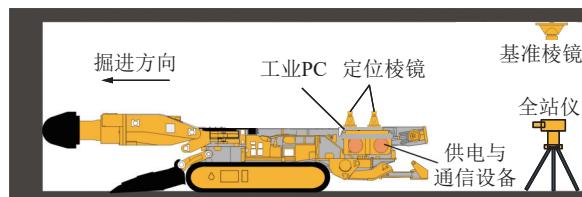


图 13 掘进装备位姿监测系统

Fig.13 Position and posture monitoring system of roadheader

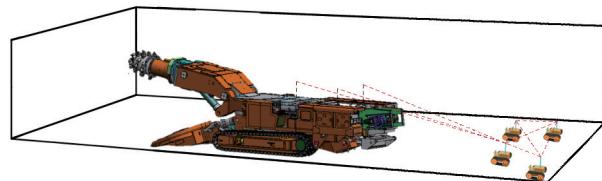


图 14 传感器与执行器布置情况^[39]

Fig.14 Arrangement of sensors and actuators^[39]

2.3.5 多传感器融合的导航定位技术

定位导航的测量分为: 掘锚一体机和锚护转载破碎一体机之间的导航定位以及相互协同、集中控制台与锚护转载破碎一体机绝对坐标定位。安装在掘锚一体机上的位姿测量装置能够实时提供掘锚一体机上的姿态(航向角、俯仰角、横滚角)信息; 安装在锚护转载破碎一体机上的激光导引装置能够对掘锚一体机进行实时跟踪和精确定位, 通过激光靶标、视觉测量和惯导数据组合, 计算掘锚一体机坐标; 安装在集中控制台上方的后配套设备定位装置带有激光跟踪指向功能, 对锚护转载破碎一体机进行精准的定位, 集中控制台在一个工作流程内静止不动, 故作为该工作区域的测量基准来使用。同时通过无线精确测距, 设计自动跟随算法, 使掘锚一体机卸料端与锚护转载破碎一体机受料端保持搭接, 以保证运输系统的连续性。定位导航元件的布置方式如图 15 所示。

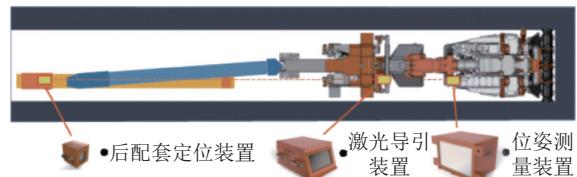


图 15 掘锚一体机高效掘进系统定位导航元件布置^[40]

Fig.15 Layout of positioning and navigation elements of the efficient tunneling system of the digging and anchoring integrated machine^[40]

2.4 自主定型定向截割技术

掘进机自主定型定向截割控制技术是煤矿智能快速掘进系统的关键技术之一, 自动定型定向截割技术需要 3 种技术为支撑: 精确定位定姿技术、记忆截割控制技术和自适应截割技术。精确定位定姿技术

可以控制的机身姿态和掘进方位,并根据截割支护步距要求,实现定步距前移,保证巷道直线度。记忆截割技术能够有效降低掘进机信息采集及处理的工作量,同时降低自主定型定向截割的控制难度。自适应截割技术的核心是掘进机恒功率截割控制(图16),能够有效降低截割振动量,同时提高掘进机截割效率。

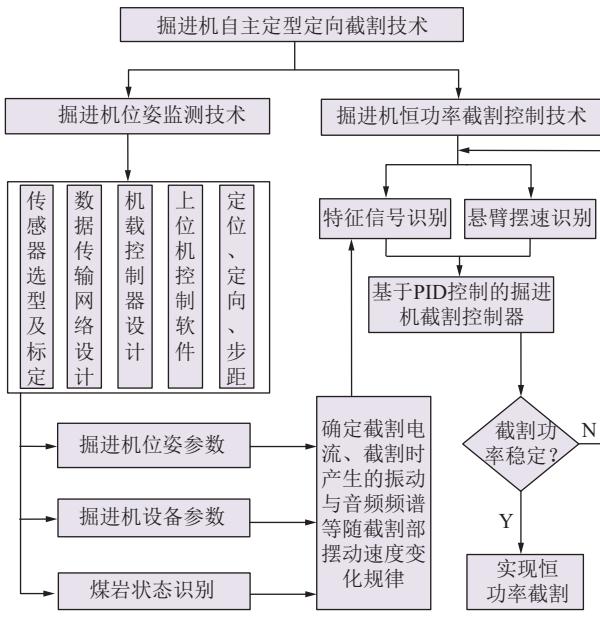


图16 恒功率截割控制原理

Fig.16 Constant power cutting control principle

掘锚一体机采用全宽截割的方式,定型定向截割相对悬臂式掘进机较容易实现,其截割控制流程为:整机定位、升刀、扫顶、下切、扫底、定步距前移,通过精确定位定姿系统控制整机姿态和掘进方位,并根据截割支护步距要求,实现定步距前移。通过截割高度传感器和掏槽位移传感器精确感知截割滚筒的位置,依据设置的最大截割高度、卧底量和掏槽深度等参数实现升刀、扫顶、下切、扫底、前移等工序的自动截割循环,精确控制巷道高度、起伏角度。根据截割电流、截割电机温升对截割切削速度进行PID控制,自动调节截割升降油缸和掏槽油缸的运行速度,实现恒功率截割,降低设备过载故障率,使设备处于最优运行状态,有效提高生产效率;另外通过截割滚筒高度、截割电流、截割时产生的振动和音频频谱等信息,以机器视觉辅助,经过深度学习训练,结合煤岩分界探测识别算法,可为平巷掘进、沿底掘进、沿顶掘进以及上下坡掘进工况下煤层顶底板高度控制提供依据。可以采用RBF神经网络或者改进粒子群算法优化的神经网络(IPSO-BP)设计截割载荷识别器,通过井下实测多传感器数据进行离线训练,将截割过程中实时采集的信号输入到已训练好的神经网络识别器中,输出

为表征煤岩硬度的截割载荷信号。另外还可以采用遗传算法或者改进模拟退火粒子群算法(ISAPSO)等算法优化的模糊PID智能控制器最终实现掘进机恒功率控制,为自主定型定向截割提供依据。

掘进机截割作业形式与连采机不同,其截割时运动自由度更高,相对巷道位置变化更大。掘进机记忆截割需要应用位姿检测系统检测并记录掘进机的位姿情况,包括掘进机相对巷道既定截割断面的位姿情况、掘进机行走马达转速及压力情况,通过行走马达转速分析掘进机截割过程中相对巷道的位姿变换情况,通过行走马达压力起伏记录掘进巷道前端地表平整度情况,在下次截割过程中进行记忆导向。通过对截割头位姿及掘进机位姿的记忆减少现截割过程中参数采集及截割控制工作量,同时降低恒功率截割误差率。

2.5 掘进机远程自主截割控制技术

掘进机远程自主截割控制技术是实现煤矿掘进智能化、数字化、无人化的关键关节之一,是实现掘进工作面物理空间与掘进信息虚拟空间的深度融合与交互的主要基础。近年来国内很多科研院所结合数字孪生技术对此展开了深入研究,煤矿巷道智能掘进数字孪生系统^[41],为煤矿井下综采综掘工作面设备的远程智能监测与控制提供了全新的思路^[42]。

数字孪生^[43-45](Digital Twin, DT)是一种利用数字化方法创建物理实体虚拟模型的技术,其通过建立虚拟孪生体与物理实体之间的数字交互,实现虚拟模型对物理实体的监测和控制,从而实现了虚实结合的智能化运维,为煤矿智能化发展提供了新的方向。

智能快速掘进数字孪生系统的关键在于数字孪生模型、数据传输、数据感知与多机协同控制。对于数字孪生模型,包括虚拟数字模型和以掘进机器人运动学模型为基础的数字孪生驱动模型。虚拟数字孪生模型可以通过Unity3D、3DMax等构建,利用动态编程实现掘进机器人动作绑定;利用机器人技术实现虚拟场景与现实的统一,通过其运动学模型驱动虚拟模型动作。数据传输的关键在于如何低延迟、完整的将掘进机器人状态信息和工况环境信息传输至协同控制中心,同时将控制指令低延迟、无损耗的下发至控制器中。为了保证通信的实时性及数据的可操作性,通过将Modbus、CAN、工业以太网等多种通信方式相结合,构建以数据库技术为核心的数据交互平台实现整个数字孪生系统的数据传输与通信。利用多传感器技术实现掘进机器人多个关键部位的实时状

态监测。以煤矿井下巷道掘进过程中的经验为基础设计智能掘进机器人工序,在实现单机控制的基础上,构建协同控制器按照巷道掘进工序实现远程自动截割控制技术。

数字孪生远程自主截割的基础在于数据采集,掘进机位姿数据和巷道环境数据为远程自主截割的核心数据,2者构成数字孪生驱动的数据来源。利用感知数据在本地防爆计算机上搭建可视化辅助截割系统,实现掘进过程的实时在线监测。同时通过防爆计算机将感知数据发送至远程控制端,提前构建掘进装备虚拟三维模型,根据数字孪生驱动模型实现虚拟装备同步动作,如图17所示。远程控制端可实现虚拟远程控制和视频监控功能。虚拟远程控制可设置手动和自动2种操作模式。手动模式是通过人机交互方式实现远程截割控制;自动模式是基于多元地质数据解译融合技术,构建掘进空间三维数字化模型,基

于地质模型自主规划截割路线,结合精准定位、位姿控制、自适应截割控制,预置跟机工艺与掘进工艺自适应精准协同,实现基于无人化智能自适应掘进,掘进设备远程智能控制系统架构如图18所示。

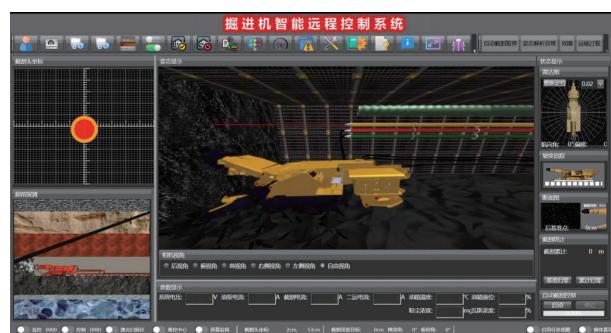


图17 掘进工作面精准地质保障系统

Fig.17 Precision geological guarantee system of heading face

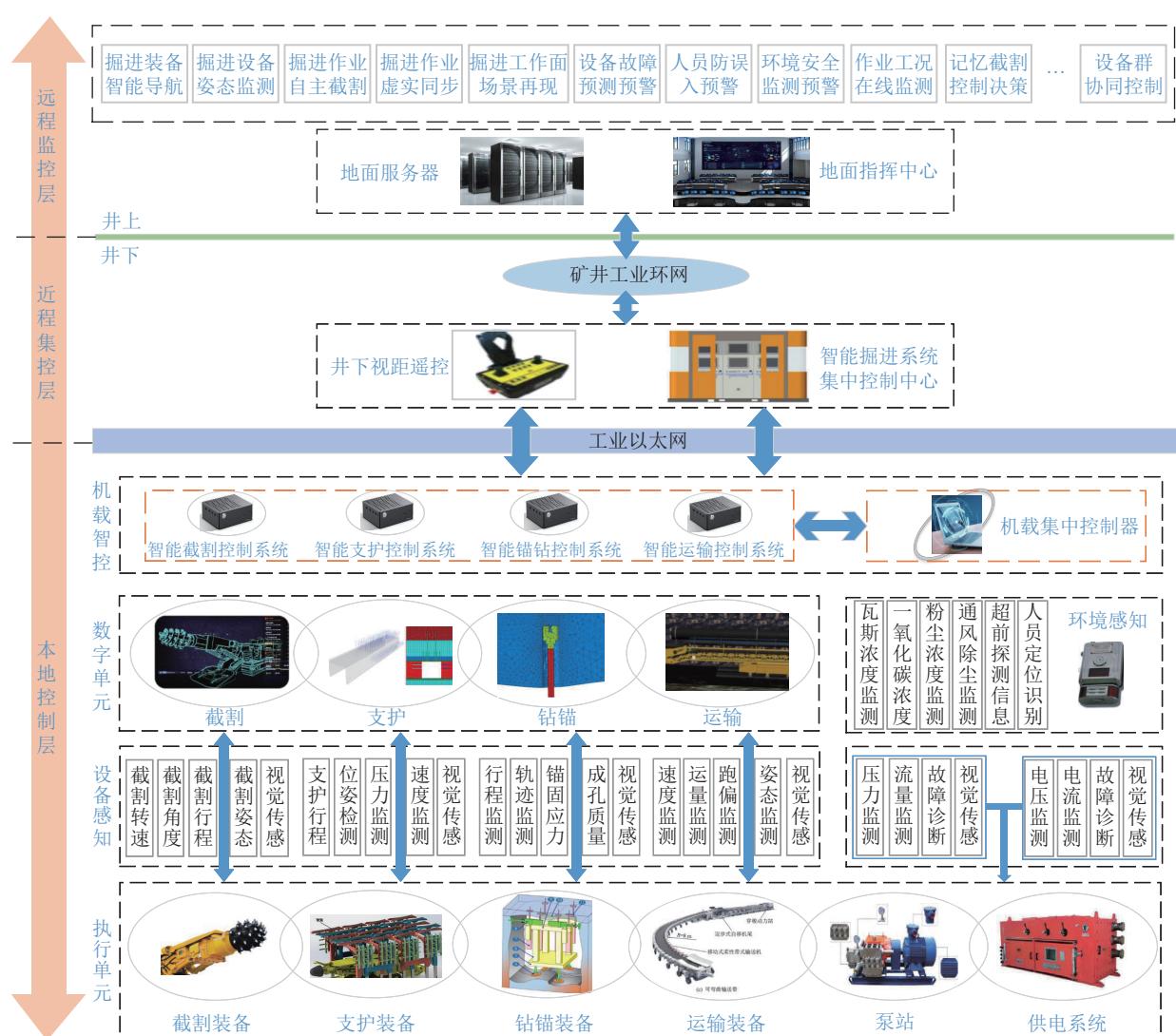


图18 掘进设备远程智能控制系統架构^[46]

Fig.18 Remote intelligent control system architecture for roadheading equipment^[46]

2.6 多机多工序智能协同控制技术

多机多工序智能协同控制技术是实现智能快速掘进无人化开采的关键技术之一,是一个多学科交叉的高新技术系统工程,多机多工序智能协同控制首先需要具备并行作业的掘进装备作为基础支撑,掘进装备作业阶段会形成大量数据,是工作面掘进装备本机、工作面环境空间和控制系统信息流相互作用的产物,实现多机多工序智能协同控制必须深度利用这一数据资源,研究系统各单元智能协同控制方法。基于此,笔者针对煤矿快速掘进装备多机多工序协同作业提出掘支锚柔性并行作业技术及基于数据驱动的行为规划决策两大关键技术并给出其研究方向。

2.6.1 掘支锚柔性并行作业技术

随着采煤深度与强度的不断增加,受到矿区冲击地压、深部高应力、强采动等影响,出现了大量膨胀性、高应力和节理化等软弱围岩特性巷道^[47]。据统计,软岩巷道约占年掘进总量的30%,该类巷道给掘进工作面多机协同工作带来一系列重大风险和挑战,如巷道失稳垮冒增加安全管理难度、巷道冒顶及片帮增加了支护难度、底板松软增加了设备通过难度等问题,这些问题导致掘进水平进一步降低,采掘接续紧张问题进一步突出。针对这一问题,国内外学者及相关煤机装备厂家均对其进行了深入研究,其中主流产品主要以全断面式掘锚机、连采机组以及综掘快速掘进系统构成,其中掘锚一体机组与连采机组对于巷道煤层条件要求高,不适用于复杂地质条件下的普遍综掘巷道快速掘进要求。掘锚一体机依据钻机安装位置不同可分为截割部集成式与本体后置式,2者在国内市场都占据一定份额。国内兖煤黑豹已成功研制出第5代掘锚一体机,其采用截割部集成式,可实现掘进、临

时支护、锚固为一体的机械化,不干扰综掘机的运行和截割作业功能,替代传统人工吊挂式前移支护方式及人工钻孔作业,降低了工人的劳动强度;景隆重工已开发出国内首套6臂后置式掘锚一体机,后置式钻机安装形式可保证整机重心靠中,维持设备运行稳定,且6臂钻机可同步并行作业,有效提高锚固效率。

但掘锚一体机在实际作业过程中仍然存在着如下问题:①钻臂集成在截割部上导致整体重心前移,在上下坡过程中会导致机组侧偏,实际应用效果不理想;②伸缩式钻臂形式,现场实际工作调控困难,定位精度差;③仅提供机械化锚固钻机,无法从根本上解决掘锚比失衡的问题。

本团队针对以上综掘工作面掘锚作业不同步、锚固滞后距离过长等问题,提出了一种新型掘支锚并行作业快速掘进机组,其主要由掘进系统、超前支护系统、锚固系统三大部分构成,如图19所示,多工序机器人柔性协同作业智能控制架构如图20所示。其中掘进系统采用三级截割进给方式与全断面铲运方式,在掘进主机主体位置姿态不调整情况下实现全断面自主截割与铲运功能,且掘进机组采用前后车四驱驱动形式,既可保证行走动力的充足,又可极大限度的将锚固系统前移,减少永久锚固滞后距离;超前支护系统采用迈步式无重复碾压形式,支护上方布有多组柔性支撑单元,可适应复杂地质条件下临时支护作业,同样侧帮采用迈步式侧支护形式,保护巷道侧帮稳定性,防止片帮;锚固系统搭载在前后主机的连接桥上,即可实现掘锚同步行走功能,减少锚固系统行走驱动,掘锚系统位置相对固定。在掘进截割作业过程中,可实现掘锚分离、互不干扰,减少截割振动对锚固系统耦合振动影响,提高锚固钻孔质量与效率。

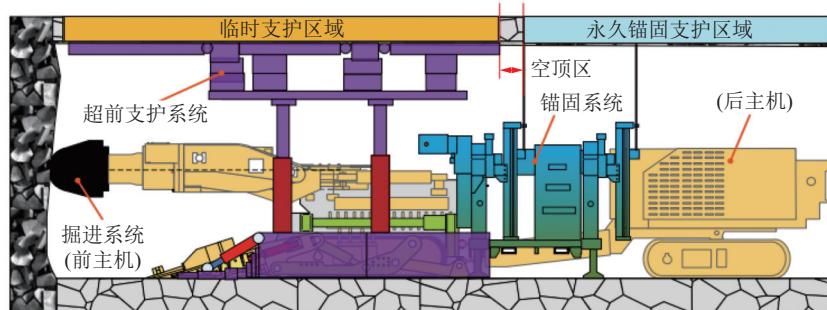


图19 新型掘支锚并行快速掘进系统

Fig.19 New parallel rapid tunneling system for digging, supporting and anchoring

图21为锚固钻机部方案示意,整机平台采用4只腿支撑调节模式,可适应复杂巷道底板形状,维持锚固平台始终处于水平状态。钻机模块主要分为顶锚钻机模块、侧锚钻机模块与锚索钻机模块,各钻机

单元模块皆可实现回转、移动及俯仰微调等功能,可实现对顶板、侧帮及锚索的平行锚固作业。其中顶锚钻机模块既可实现锚杆间距的调整,还可调整纵向排距以适应不同地质条件下支护作业需求。

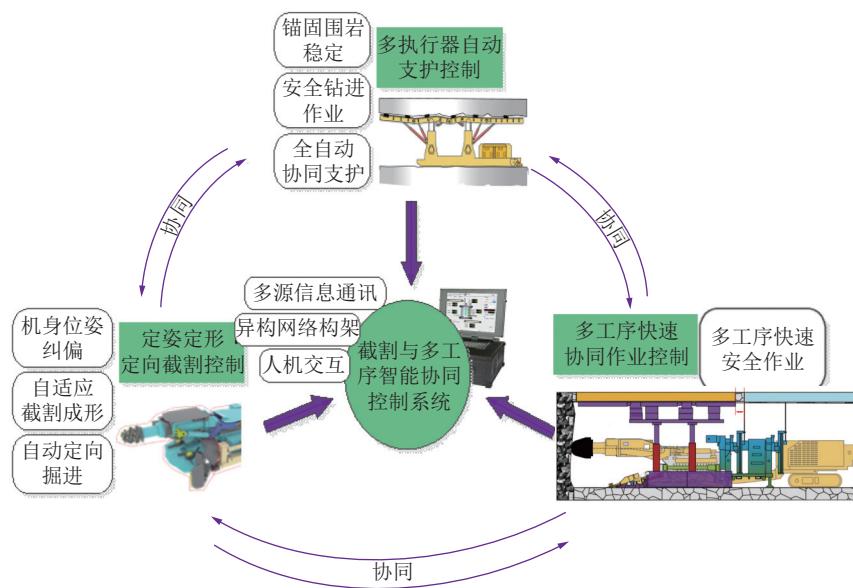


图 20 多工序机器人柔性协同作业智能控制架构

Fig.20 Intelligent control architecture for flexible cooperative operation of multi-process robot

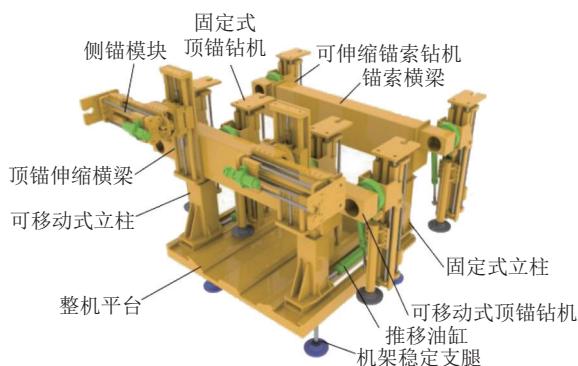


图 21 锚固钻机部方案示意

Fig.21 Schematic diagram of the program of the anchor drilling rig department

可靠的临时支护也是掘支锚运并行作业快速掘进的重点之一,在此前提下才能实现永久锚固的滞后作业,进而真正意义上实现掘支锚并行作业模式,从根本上解决采掘比失衡问题。对于稳定性较差的软弱巷道,为了保证巷道的安全支护要求,在掘进成巷初期需要对掘进迎头附近的煤层进行及时支护(临时支护或永久支护),减少空顶区域范围。我国煤矿企业和研发单位研发了若干种超前支护装备,包括机载式超前支护、交替迈步式超前支护、护盾轨吊式超前支护、快速掘进系统配套超前支护等。但受煤矿巷道地质条件的复杂性、顶板和侧帮表面形状的随机性等因素的影响,仍存在对巷道顶板重复碾压支护、对顶底板、侧帮形状及尺寸变化适应性差、对顶板有效支护率较低、影响掘进机作业空间等问题,并且护盾式超前支护在支撑作业过程中框架存在的应力集中现象、运锚机结构尺寸过大导致超前支护距离过长、永久锚固

滞后距离更远、顶板支护效果较差等问题^[48-50]。现有超前支护装备不能很好满足巷道及时有效支护的需求。

基于此,本项目组提出了掘进工作面顶板柔性支护技术和多级柔性支护结构,如图 22 所示,横纵组合式和复合支护材料的柔性支护结构可在一定程度上

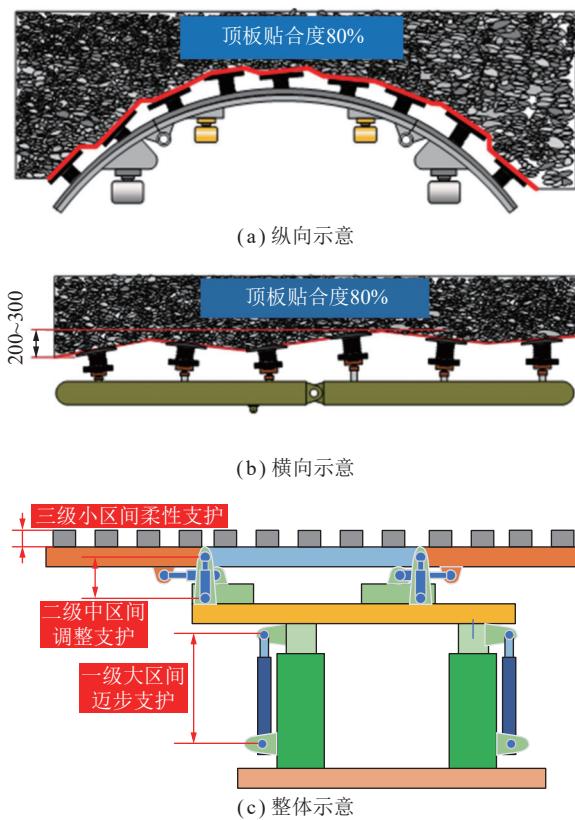


图 22 综掘工作面顶板多级柔性支护结构

Fig.22 Roof multi-level flexible support structure of fully mechanized heading face

提高支护结构的贴合率,降低支护结构对顶板围岩的局部过载。为快速掘进临时支护的可靠性保障提供了解决方案。

同时基于掘进工作面空间效应,笔者针对复杂地质条件下的掘支锚运探并行作业机组展开研究,建立了掘进机和超前支护装备的时空协同作业匹配模型,基于不同巷道环境和顶板载荷进行超前支护结构拓扑优化,形成与工作场景、工况和掘进机匹配的跟随式超前支护装备。先后提出拱形、矩形巷道临时支护系统、迈步式超前支护系统及无重复碾压支护系统等多种技术方案,如图23所示,配合后方搭载配套锚固钻机群组设备实现断面永久锚固作业,有效提高掘进效率。

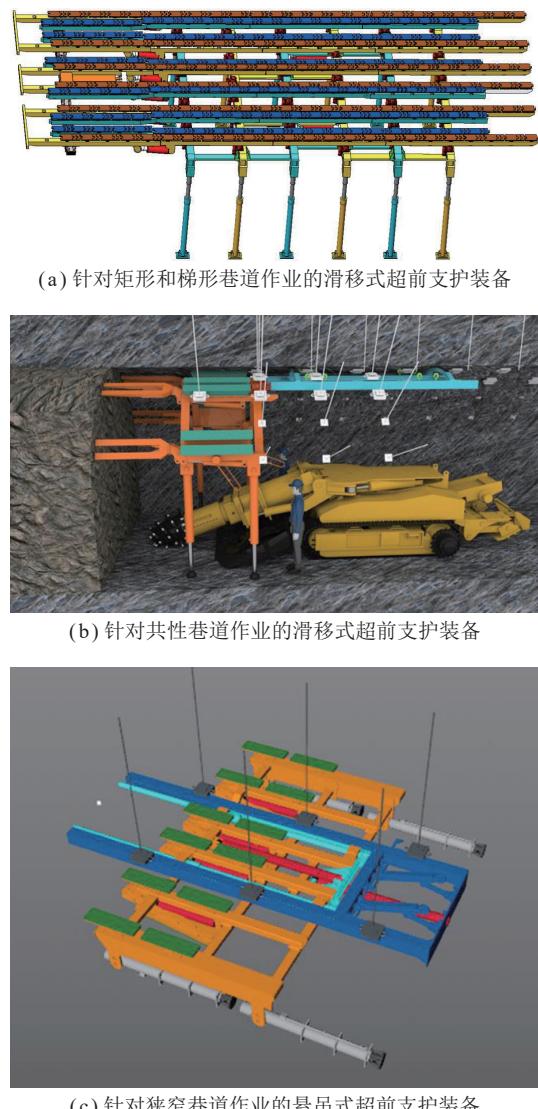


图23 不同工况下超前支护装备

Fig.23 Advanced support equipment under different working conditions

2.6.2 基于数据驱动的行为规划决策

掘进开采是一个掘、支、锚、运、探等作业设备之

间、设备与掘进巷道环境之间相互作用的过程,多级多工序协同作业控制就是要在时间与空间上作好动作行为规划,使其能够自行判断并执行正确的动作。如何自主决策规划动作,避免发生人-机-环在时间与空间上发生冲突,是实现协同控制的核心所在。基于此,笔者提出基于历史状态参量和数据驱动的行为决策方法,为智能快速掘进装备动作行为的协同决策提供依据。

笔者将基于案例推理(Case-Based Reasoning, CBR)和基于规则推理(Rule-Based Reasoning, RBR)融合的混合推理方法引入到智能快速掘进装备多机多工序智能协同控制中,具体实现过程如图24所示。CBR与RBR是2种基于知识的问题求解方法^[51],是一种基于经验学习的决策过程,不要求必须明确被控对象的具体运行机理和过程,而是利用历史行为决策知识与现有决策情境之间的相似性进行推理和计算进行决策,可避免大量的过程分析和复杂的模型计算,较符合掘进生产系统决策的特点。工作面工况状态变化大且充满不确定性,单独使用CBR匹配完全相同的情景来对掘进装备的行为进行决策非常困难,所以将CBR与RBR融合的混合推理方法引入到掘进作业多机多工序智能协同行为决策中,实现掘进装备动作自主规划决策及多机参数动态匹配。

定义工序标准行为模态类,运用动态聚类算法对行为模态信息进行子空间划分,集井下现场生产状态、掘进巷道空间信息、掘进装备状态等多参量、多尺度数据感知信息进行建模,通过多特征联合权重以及相似度评价方法,进行当下情境相似的行为决策,最后,运用面向检索子空间的支持向量机参数修正模型,调整经验决策与待解决问题之间的偏差,解算并下发掘进装备工作参数调整控制指令,实现掘进面装备行为的自主调度决策。

3 结语与展望

本文探讨了我国快速掘进装备智能化发展现状,总结了智能快速掘进四大类成套装备特点及地质条件适应性,探讨了实现智能化掘进的基本途径和需要解决的六大关键技术。全面分析了快速掘进智能控制系统的信息传输与智能分析技术、智能感知技术、精确定位导航技术、自主定性定向截割技术、远程自主截割控制技术以及多机多工序智能协同控制技术。开发了新型的无重复碾压柔性超前支护技术、截割部多级伸缩截割技术、智能锚固机组多钻机并行作业等技术,提出了一种掘、支、锚、运、探柔性并行作业的智能快速掘进技术。提出了单机智能化、系统协同化、

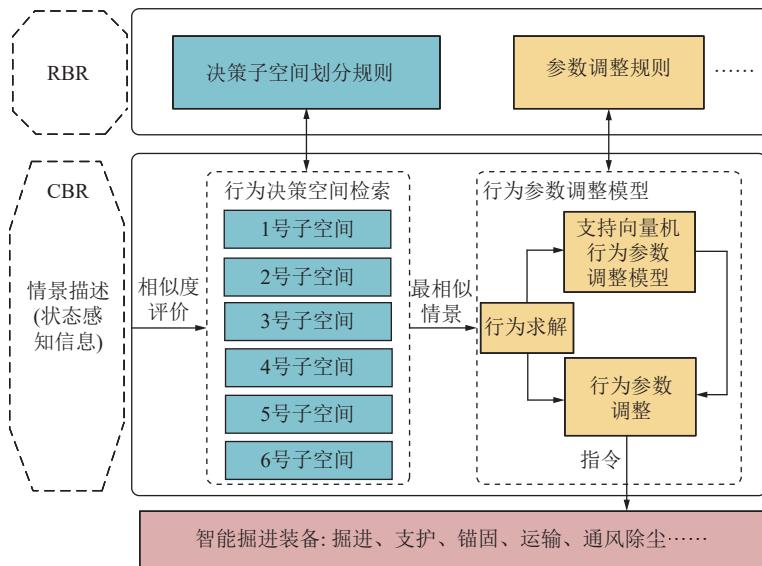


图 24 挖进装备多机多工序行为决策混合推理流程

Fig.24 Mixed reasoning process of “rapid excavation Equipment” behavior decision

井下智控与地面远程监控相协同的控制方法,提出了基于数据驱动的掘进装备行为规划决策方法,结合多级数字孪生构架技术为实现高效智能化掘进提供支撑。

近年来我国掘进装备研发设计和生产制造进步迅速,多种快速掘进成套系统应运而生。随着我国煤矿智能化建设的推进,结合煤矿快速掘进的现状,提出以下建议:

(1) 推进适合复杂地质条件的智能化掘进尚有许多关键理论和技术问题需要突破。由于我国煤炭赋存地质条件复杂,软岩、大变形是我国煤矿巷道的主要特征。不确定性地质构造,导致截割和钻孔载荷呈现大冲击、强耦合的特点,增加了自适应控制技术难度;现场工况恶劣,工作面存在水害、瓦斯、顶板、冲击地压等威胁。工作面粉尘浓度大,提升了机器视觉技术现场应用难度;且多工序并行作业受空间限制,给智能快速掘进带来挑战。

(2) 产品装备方面,考虑装备时间-空间维度协同配合作业需求,依据功能需求分析结果,进行单元模块化设计,研发由截割、临时支护、钻锚、锚网运输、电液控平台、通风除尘、辅助运输、环境感知、设备感知及多信息融合处理智能控制等分区模块组合的煤矿智能化掘进新产品,为实现煤矿智能掘进提供技术支持和产品保障。

(3) 研究煤矿井下跨系统全时空感知技术,解决传统掘进模式中遇到的看不清、断不明、掘不快、维修难的实际问题,通过感知煤层赋存和围岩特性、掘进环境和装备工况,将掘进工作面各设备和环境有机和谐地统一起来,实现自主感知、自主分析、自主决策、

自主执行的智能化掘进生产系统;研究多源异构数据描述与分布式存储处理机制和数据推送策略,为井下多源异构数据的实时处理、关联分析及应用奠定基础。将物联网、云计算、边缘计算、大数据、人工智能、自动控制、移动互联网、掘进系统装备等与煤矿巷道掘进技术工艺深度融合;建立井上井下多系统全时空信息感知体系,形成全面自主感知、实时高效互联、智能分析决策、自主学习、动态预测预警、精准协同控制、自主执行的煤矿智能掘进系统。

(4) 精确地构建掘进系统的物理模型,结合感知信息通过对物理模型的解算,可以实现对设备工作性能、健康状态、参数匹配性的评价、管理与控制决策,实现掘进智能化技术保障。为智能掘进数字孪生系统提供理论支撑。研究截割部截齿与煤岩的接触力学特性,探究截割部-煤岩体耦合动力学规律,研究煤岩层组织变化、断面形状变化各工况下的耦合动力学模型的动态响应、截割部关键部件的载荷谱变化特征,形成基于煤岩状态变化适时调控的截割部作业控制规则。研究在推进过程中截割部在巷道围岩压力变化、截割扰动等对围岩稳定性的影响,探究控制规则和实时补偿修正策略,研究超前支护-围岩动力学耦合问题,包括截割振动对超前支护区围岩的扰动影响规律、交替支护情况下围岩与支护结构的耦合作用机理、超前支护移架时围岩耦合动力问题。研究超前支护区的支护贴合度、支护强度对顶板完好性的影响、研究低截割扰动作业技术。为复杂工况下智能掘进数字孪生系统提供理论依据。

(5) 实现复杂地质条件下煤矿巷道智能掘进,需要

更深入的研发数字孪生技术, 构建完整的煤矿井下跨系统全时空信息数字感知体系, 构建集井下现场生产状态、掘进巷道空间信息、掘进装备状态、风险信息等多参量、多尺度、全时空特性的数据感知智能化监控平台, 实现虚拟系统与实际掘进系统实时通信, 具备数据可视化集成监控、数据驱动孪生仿真和参数规划计算分析控制功能, 实现通过规划分析实现智能化、少人化掘进。以虚控实, 在作业过程中不间断地进行参数监测、设备健康评价、设备零件预维护、地质信息探测。

参考文献(References):

- [1] 汤家轩, 刘具, 梁跃强, 等. “十四五”时期我国煤炭工业发展思考[J]. *中国煤炭*, 2021, 47(10): 6–10.
TANG Jiaxuan, LIU Ju, LIANG Yueqiang, et al. Thoughts on the development of China's coal industry during the “14th Five-Year Plan” period[J]. *China Coal*, 2021, 47(10): 6–10.
- [2] 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. Research on high-quality development of coal industry[J]. *China Engineering Science*, 2021, 23(5): 130–138.
- [3] 王国法, 徐亚军, 张金虎, 等. 煤矿智能化开采新进展[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(1): 1–10.
WANG Guofa, XU Yajun, ZHANG Jinhu, et al. New progress in intelligent mining of coal mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 1–10.
- [4] 鄢丽娜, 刘永宏. 我国煤矿智能化建设全面升级提速[N]. *中国煤炭报*, 2023–04–22(001).
YAN Lina, LIU Yonghong. The intelligent construction of coal mines in China has been comprehensively upgraded and accelerated[N]. *China Coal News*, 2023–04–22(001).
- [5] 毛君, 董钰峰, 卢进南, 等. 巷道掘进截割钻进先进技术研究现状及展望[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(7): 2084–2099.
MAO Jun, DONG Yufeng, LU Jinnan, et al. Research status and prospect of advanced technology of cutting drilling in roadway excavation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(7): 2084–2099.
- [6] 王国法, 张良, 李首滨, 等. 煤矿无人化智能开采系统理论与技术研发进展[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(1): 34–53.
WANG Guofa, ZHANG Liang, LI Shoubin, et al. Progress in research and development of theory and technology of unmanned intelligent mining system in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 34–53.
- [7] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 1–27.
WANG Guofa. Discussion on the latest technological progress and problems of intelligent coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 1–27.
- [8] 张建国, 孙海良, 张国川, 等. 煤矿智能掘进关键技术探讨及工程实践研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2023, 19(2): 609–621.
- ZHANG Jianguo, SUN Hailiang, ZHANG Guochuan, et al. Discussion on key technologies and engineering practice of intelligent tunneling in coal mine[J]. *Journal of Underground Space and Engineering*, 2023, 19(2): 609–621.
- [9] 王步康. 煤矿巷道掘进技术与装备的现状及趋势分析[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(11): 1–11.
WANG Bukang. Present situation and trend analysis of coal mine roadway excavation technology and equipment[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(11): 1–11.
- [10] 王虹, 王建利, 张小峰. 掘锚一体化高效掘进理论与技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 2021–2030.
WANG Hong, WANG Jianli, ZHANG Xiaofeng. Theory and technology of high-efficiency excavation of excavation-anchor integration[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2021–2030.
- [11] 刘泉声, 黄兴, 潘玉丛, 等. TBM在煤矿巷道掘进中的技术应用和研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 242–259.
LIU Quansheng, HUANG Xing, PAN Yucong, et al. Technical application and research progress of TBM in coal mine roadway excavation[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 242–259.
- [12] 程桦, 唐彬, 唐永志, 等. 深井巷道全断面硬岩掘进机及其快速施工关键技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(9): 3314–3324.
CHENG Hua, TANG Bin, TANG Yongzhi, et al. Full face tunnel boring machine for deep-buried roadways and its key rapid excavation technologies[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(9): 3314–3324.
- [13] 马宏伟, 王鹏, 张旭辉, 等. 煤矿巷道智能掘进机器人系统关键技术研究[J]. *西安科技大学学报*, 2020, 40(5): 751–759.
MA Hongwei, WANG Peng, ZHANG Xuhui, et al. Research on the key technology of intelligent tunneling robot system for coal mine roadway[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2020, 40(5): 751–759.
- [14] 范要辉. 六臂掘锚机的设计研究[J]. *煤炭技术*, 2021, 40(8): 205–207.
FAN Yaohui. Design and research of six-arm bolter-miner[J]. *Coal Technology*, 2021, 40(8): 205–207.
- [15] 王国法, 任怀伟, 赵国瑞, 等. 智能化煤矿数据模型及复杂巨系统耦合技术体系[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 61–74.
WANG Guofa, REN Huaiwei, ZHAO Guorui, et al. Digital model and giant system coupling technology system of smart coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 61–74.
- [16] 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. Application prospect of 5G technology in coal mine intelligence[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 16–23.
- [17] 李伟宏. 矿用4G与5G融合系统解决方案研究[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(S2): 78–80.
LI Weihong. Research on solution of mine 4G and 5G integration system[J]. *Journal of Mine Automation* 2021, 47(S2): 78–80.
- [18] 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.
- [19] 杜毅博, 赵国瑞, 巩师鑫. 智能化煤矿大数据平台架构及数据处理关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 48(7): 177–185.
DU Yibo, ZHAO Guorui, GONG Shixin. Study on big data platform architecture of intelligent coal mine and key technologies of data processing[J]. Coal Science and Technology, 2022, 48(7): 177–185.
- [20] 胡兴涛, 朱涛, 苏继敏, 等. 煤矿巷道智能化掘进感知关键技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2123–2135.
HU Xingtao, ZHU Tao, SU Jimin, et al. The key technology of intelligent tunneling perception in coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2123–2135.
- [21] 李茂林. 基于磁流变的巷道掘进机高效运行分析探讨[J]. 山西焦煤科技, 2018, 42(8): 47–50.
LI Maolin. Discussion on efficient operation of roadheader based on magneto rheological[J]. Shanxi Coking Coal Science & Technology, 2018, 42(8): 47–50.
- [22] 史海岐. 随钻测量定向钻进技术在煤矿水害防治中的应用[J]. 现代矿业, 2014, 30(4): 38–41.
SHI Haiqi. Application of MWD directional drilling technology in coal mine water disaster prevention and control[J]. Modern mining, 2014, 30(4): 38–41.
- [23] 宋立业, 万应才. 基于 RBF 神经网络的隧道掘进机推进自适应 PID 控制[J]. 中国机械工程, 2017, 28(14): 1676–1682.
SONG Liye, WAN Yingcai. Adaptive PID control based on RBF neural network for TBMs[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(14): 1676–1682.
- [24] 张敏骏, 蔡岫航, 吕馥言, 等. 受限巷道空间区域栅格化掘进机自主纠偏研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 62–70.
ZHANG Minjun, CAI Xiuhang, LÜ Fuyan, et al. Research on roadheader auto rectification in limited roadway space based on regional grid[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3): 62–70.
- [25] 王虹, 王步康, 张小峰, 等. 煤矿智能快掘关键技术与工程实践[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2068–2083.
WANG Hong, WANG Bukang, ZHANG Xiaofeng, et al. Key technology and engineering practice of intelligent rapid excavation in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2068–2083.
- [26] 王庆涛. 府谷庙哈孤矿区断层特征及综合探查技术[J]. 煤炭技术, 2020, 39(4): 94–97.
WANG Qingtao. Fault characteristics and comprehensive exploration technology of miaohagu mining area in fugu[J]. Coal Technology, 2020, 39(4): 94–97.
- [27] 孙希杰. Goody GIS 在复杂地表区三维地震特殊观测系统设计中的应用[J]. 煤矿开采, 2018, 23(3): 18–20.
SUN Xijie. Application of goody gis on 3d seismic special observation system design of complex surface area[J]. Coal Mining Technology, 2018, 23(3): 18–20.
- [28] 彭苏萍. 我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2331–2345.
PENG Suping. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2331–2345.
- [29] KANG Hongpu. Support technologies for deep and complex roadways in underground coal mines: A review[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 261–277.
- [30] 王国法, 任怀伟, 庞义辉. 煤矿智能化 (初级阶段) 技术体系研究与工程进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 1–27.
WANG Guofa, REN Huaiwei, PANG Yihui. Research and engineering progress of intelligent (primary stage) technology system of coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 1–27.
- [31] 田迎春, 李文, 马东. 基于点云数据的井下矿巷道岩体结构特征分析[J]. 中国矿山工程, 2020, 49(5): 19–22, 26.
TIAN Yingchun, LI Wen, MA Dong. Analysis of rock mass structure characteristics of underground mine roadway based on point cloud data[J]. China Mining Engineering, 2020, 49(5): 19–22, 26.
- [32] 王国法. 煤矿智能化十大“痛点”解析及对策[J]. 智能矿山, 2021, 2(3): 1–4.
WANG Guofa. Analysis and countermeasures of the top ten “pain points” of coal mine intelligence[J]. Smart Mines, 2021, 2(3): 1–4.
- [33] 孙彦景, 左海维, 钱建生, 等. 面向煤矿安全生产的物联网应用模式及关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(1): 84–88.
SUN Yanjing, ZUO Haiwei, QIAN Jiansheng, et al. Application mode and key technology of internet of things faced to coal mine safety production[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(1): 84–88.
- [34] 卢新明, 闫长青, 袁照平. 掘进机精准定位方法与掘进机器人系统[J]. 通信学报, 2020, 41(2): 58–65.
LU Xinming, YAN Changqing, YUAN Zhaoping. Precisely positioning method for road headers and robotic road header system[J]. Journal on Communications, 2020, 41(2): 58–65.
- [35] 田原. 基于四点式光靶的掘进机自动定位方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(12): 35–40.
TIAN Yuan. Research on automatic positioning method of road header based on four point light target[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(12): 35–40.
- [36] 段笑蔚. 基于超宽带技术的掘进机自主定位定向方法研究[J]. 机械管理开发, 2020, 35(12): 234–235, 267.
DUAN Xiaowei. Research on autonomous positioning and orientation method of road header based on UWB technology[J]. Machine Management Development, 2020, 35(12): 234–235, 267.
- [37] 杜雨馨, 刘停, 童敏明, 等. 基于机器视觉的悬臂式掘进机机身位姿检测系统[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2897–2906.
DU Yuxin, LIU Ting, TONG Minming, et al. A fuselage position detection system based on machine vision[J]. Journal of Coal Science, 2016, 41(11): 2897–2906.
- [38] 张旭辉, 刘博兴, 张超, 等. 掘进机全站仪与捷联惯导组合定位方法[J]. 工矿自动化, 2020, 46(9): 1–7.
ZHANG Xuhui, LIU Boxing, ZHANG Chao, et al. Combined positioning method of total roadheader station and JETIT[J]. Industrial and Mining Automation, 2020, 46(9): 1–7.
- [39] 符世琛, 李一鸣, 杨健健, 等. 基于超宽带技术的掘进机自主定位定向方法研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2603–2610.
FU Shichen, LI Yiming, YANG Jianjian, et al. Research on autonomous positioning orientation method of roadheader based on

- uwidband technology[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2603–2610.
- [40] 史先影. 掘锚一体机高效掘进系统智能控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(S2): 265–270.
SHI Xianying. Research on intelligent control technology of efficient tunneling system of excavating and anchor integrated machine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(S2): 265–270.
- [41] 张旭辉, 杨文娟, 薛旭升, 等. 煤矿远程智能掘进面临的挑战与研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 579–597.
ZHANG Xuhui, YANG Wenjuan, XUE Xusheng, et al. Challenges and research progress of remote intelligent tunneling in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 579–597.
- [42] 张超, 张旭辉, 张楷鑫, 等. 数字孪生驱动掘进机远程自动截割控制技术[J]. 工矿自动化, 2020, 46(9): 15–20, 32.
ZHANG Chao, ZHANG Xuhui, ZHANG Kaixin, et al. Digital twin driven remote automatic cutting control technology of roadheader.[J]. Journal of Mine Automation, 2020, 46(9): 15–20, 32.
- [43] 张颖伟, 高鸿瑞, 张鼎森, 等. 基于多智能体的数字孪生及其在工业中应用的综述[J]. 控制与决策, 2023, 38(8): 2168–2182.
ZHANG Yingwei, GAO Hongrui, ZHANG Dingsen, et al. A review of multi-agent-based digital twins and their applications in industry[J]. Control and Decision-Making, 2023, 38(8): 2168–2182.
- [44] 刘占省, 史国梁, 杜修力, 等. 数字孪生驱动的预应力钢结构安全智能控制方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023, 56(10): 1043–1053.
LIU Zhanxing, SHI Guoliang, DU Xiuli, et al. Intelligent safety control method of prestressed steel structure driven by digital twin[J]. Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Technology Edition), 2023, 56(10): 1043–1053.
- [45] 丁志昆, 孙奕程, 段亮亮, 等. 基于数字孪生的增强现实多人协作装配[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(6): 2019–2034.
DING Zhikun, SUN Yicheng, DUAN Liangliang, et al. Augmented reality multi-person collaborative assembly based on digital twins[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2023, 29(6): 2019–2034.
- [46] 马宏伟, 王世斌, 毛清华, 等. 煤矿巷道智能掘进关键共性技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 310–320.
MA Hongwei, WANG Shibin, MAO Qinghua, et al. Key common technology of intelligent tunneling in coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 310–320.
- [47] 康红普. 我国煤矿巷道围岩控制技术发展 70 年及展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 1–30.
KANG Hongpu. 70 years of development of surrounding rock control technology in coal mine roadway in China[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 1–30.
- [48] 闫明, 曹小辉. 煤巷智能快速掘进技术发展现状与关键技术分析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(13): 133–135.
YAN Ming, CAO Xiaohui. Development status and key technology analysis of intelligent rapid tunneling technology in coal roadway[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2023(13): 133–135.
- [49] 邹雁斌. 煤巷全断面施工快速掘进装备研究[J]. 能源与节能, 2022(8): 213–215.
ZOU Yanbin. Research on rapid excavation equipment for full-section construction of coal roadway[J]. Energy and Energy Saving, 2022(8): 213–215.
- [50] 何吉超, 潘丽君. 煤矿用锚杆转载机组的设计研究[J]. 大众标准化, 2022(20): 116–118.
HE Jichao, PAN Lijun. Research on the design of bolt transfer unit for coal mine[J]. Public Standardization, 2022(20): 116–118.
- [51] 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. Architecture and key technologies of data-driven collaborative control system for fully mechanized mining equipment[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 195–205.