中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

第 47 卷第 6 期 煤炭科学技术 Vol. 47 No. 6
2019 年 6 月 Coal Science and Technology Jun. 2019

高旭彬.综掘工作面远程可视化控制关键技术研究[J].煤炭科学技术,2019,47(6):17-22.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.06.003
GAO Xubin.Research on key technology of remote visual control in fully-mechanized heading face[J]. Coal Science and Technology,2019,47(6):17-22.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.06.003

移动扫码阅读

综掘工作面远程可视化控制关键技术研究

高 旭 彬[1,2]
(1.中国煤炭科工集团太原研究院有限公司,山西 太原 030006;2.山西天地煤机装备有限公司,山西 太原 030006)

摘 要:针对综掘工作面智能化、信息化水平滞后的现状,在借鉴综采工作面智能化技术体系的基础上,提出综掘工作面远程可视化控制方法。通过分析综掘工作面作业需求,提出各单机设备、工作面成套装备必需的智能化信息技术支撑。阐述了成套设备协同控制、智能截割、智能锚护、智能运输、视频监控、故障诊断及预测 6 项关键技术。对现有综掘装备情况及技术可行性进行了详细分析,明确了综掘工作面远程可视化控制的技术路线。同时提出在辅料运输、环境安全监测等方面,需要因地制宜进行工艺革新,进而实现智能化系统集成的问题。在现阶段,通过远程可视化控制技术体系,实现了综掘工作面减人增效、安全作业、沉淀生产数据的目标。

关键词:综掘工作面;智能化;远程可视化;协同控制
中图分类号:TD421 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2019)06-0017-06

Research on key technology of remote visual control in fully-mechanized heading face

GAO Xubin[1,2]
(1. *Taiyuan Institute Co.,Ltd., China Coal Technology and Engineering Group,Taiyuan* 030006,*China*;
2. *Shanxi Tiandi Coal Mining Machinery Co.,Ltd.,Taiyuan* 030006,*China*)

Abstract:Based on the present status of the intelligent and informational level of fully-mechanized heading face, the remote visualization control of fully-mechanized heading face is proposed on the basis of the intelligent technology system of fully mechanized heading face.By analyzing the working requirements of comprehensive fully-mechanized heading face, the intelligent information technology support necessary for each stand-alone equipment and working face equipment is proposed.The six key technologies of collaborative control, intelligent cutting, intelligent anchor protection, intelligent transportation, video surveillance, fault diagnosis and prediction were described.The present status and technical feasibility of fully-mechanized equipment were analyzed in detail, and the technical route of remote visual control of fully-mechanized heading face was clarified.At the same time, it is proposed that in the aspects of auxiliary material transportation and environmental safety monitoring, it is necessary to carry out process innovation according to local conditions, and then realize the problem of intelligent system integration.At this stage, through the remote visual control technology system, the goal of reducing the efficiency of people, increasing safety, and precipitating production data is realized.

Key words:fully-mechanized heading face; intelligentialize; remote visualization;cooperative control

0 引 言

综掘工作面工况恶劣,高粉尘、高湿度和高噪声等严重影响作业人员职业健康,冒顶片帮、冲击地压、煤与瓦斯突出和透水等更是威胁作业人员的生命安全。综掘工作面还涉及掘、支、运、探、通等多种作业,作业自动化水平低,用工数量及工作强度难以降低,导致采掘工作面成为煤矿灾害事故的高发区。据不完全统计,近年来我国煤矿重大事故中,掘进事故最多,约占全部事故的 40%以上[1]。随着综采工作面自动化、智能化以及无人化技术的快速发展,综采工作面采煤效率大幅提高,使得矿井采掘比例失

收稿日期:2019-01-27;**责任编辑**:赵 瑞
基金项目:山西省科技重大专项资助项目(20181102027);中国煤炭科工集团太原研究院有限公司技术创新资助项目(M2018-24)
作者简介:高旭彬(1979—),男,山东潍坊人,副研究员。E-mail:wfgxb@sina.com

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

调矛盾更加突出,严重制约着矿井的安全高效生产。

解决这些困扰综掘工作面安全高效生产的问题,普遍共识是依靠自动化、智能化、无人化技术。综采工作面在这方面做出了较多探索,全国有超过 50 处智能综采工作面投入使用,相关的成功经验值得综掘工作面借鉴。文献[2-3]提出了新的可行性技术路线、进化阶段及目标,相关机构、学者针对工作面控制技术[4-6]、网络构建及利用开展了大量技术攻关[7-8],共同构建、丰富了综采工作面智能化信息化的技术体系。结合当前客观技术水平,较成功的工程应用都立足于“远程可视化控制”、“可视化远程干预控制”,实现“有人巡视、无人操作”、“少人工作面”[9-10]。

在借鉴综采工作面成功经验的基础上,提出综掘工作面“远程可视化控制”。以工作面整体为控制对象,构建工作面高速数据网络,研究成套装备协同控制工艺。作为基础条件,进一步提高掘进装备单机自动化水平,提高锚护作业自动化程度,研究与掘进工艺相匹配的运输、通风、除尘、围岩监测等自动化、智能化技术等。

1　综掘工作面装备现状

1.1　综掘工作面成套装备现状

综掘工作面主要作业包括掘、支、运等环节。根据巷道条件,合理选用掘进破岩、装运和支护技术及综掘成套装备,科学协调各种作业的时空关系,实现高效掘进。

其中,掘进作业尤为关键,掘进装备是综掘工作面的关键设备,其性能对于提高掘进工效和掘进进尺具有重要作用[11]。掘进装备一旦确定,综掘成套装备的配套方式也基本确定。目前国内掘进作业主要以悬臂式掘进机、连续采煤机、掘锚机组为主,其配套方式见表 1。

1.2　掘进装备现状

悬臂式掘进机经过多年的消化吸收和创新,已经实现系列化生产。生产厂家众多,截割功率覆盖 50~450 kW,适应煤巷、半煤岩巷、全岩巷掘进作业需求,产品可完全替代进口设备。

连续采煤机及其成套装备主要应用于双巷掘进,实现掘、支交叉平行作业。在陕蒙地区的神东煤炭集团、陕煤集团、伊泰集团等顶底板条件较好的矿井应用较多。初期以 JOY 为代表的进口设备为主。经过近 10 年的努力,国产设备也实现了从薄煤层到大采高连采成套装备的设计生产能力。

掘锚机机组实现了掘锚的平行作业,减少了掘进、支护设备换位作业时间。较连续采煤机作业具有顶板支护及时、安全系数高等优点。掘锚机组代表着巷道掘进装备的最高技术水平,典型设备代表为 SANDVIK 生产的 MB670 型掘锚机组,全球总计有超过 200 台的实际应用,国内应用也主要集中在陕蒙地区的大型矿井。因设计制造难度大,国内还处于样机测试阶段。

1.3　综掘工作面配套方式

巷道条件不同,掘进工艺及设备配套也有所不同,见表 1。从移动随机性来讲,以连续采煤机为龙头的配套装备最为复杂,各单机均为独立操作,移动交叉作业频繁,时空关系复杂;快速掘进系统各设备间移动约束性最强,易于协同控制;以掘进机为龙头的工作面环境最为恶劣,工作强度大,安全性低,自动化水平低。

表 1 综掘工作面设备配套及特点

Table 1　Equipmenx matching and characteristics of fully-mechenized heading face

掘进设备配套方式	特　点
悬臂式掘进机、单体锚杆钻机、桥式转载机、带式输送机	适用于普氏系数小于 10 的岩巷及半煤岩巷,适应范围广,掘锚不能平行作业
悬臂式掘进机、机载锚杆钻机、桥式转载机、带式输送机	适用于普氏系数小于 10 的岩巷及半煤岩巷,适应范围广,有利于提高支护效率和作业安全性
连续采煤机、梭车、锚杆钻车、铲车、给料破碎机、带式输送机	适用于巷道条件较好的大断面双巷掘进,掘锚交叉作业,掘进速度快,适应范围小
掘锚机组、桥式转载机、带式输送机	适用于巷道条件较好的大断面单巷掘进,掘锚平行作业,掘进速度快,适应范围小
快速掘进系统(掘锚机或全断面掘进机、破碎机、多臂锚杆钻机、自移机尾、可弯曲带式输送机)	“掘支运”三位一体作业[12],掘进速度快,已成功应用于陕蒙地区顶板条件较好的巷道

2　综掘工作面远程可视化控制构架

综掘工作面远程可视化控制是众多技术的集成,须建立以工作面成套装备为控制对象的远程监控系统。这意味着:①需要在远程(地面或井下监控中心)和工作面、工作面各装备之间进行视觉、状态数据、控制指令等的实时交互。②工作面各单机装备具备一定的自动化、智能化基础,以保证现场作业的有序衔接、保护。如图 1 所示,涉及众多专业领域、门类。主要包括成套设备协同控制、智能截割、

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

智能锚护、智能运输、视频监控、故障诊断及预测 6 项关键技术。

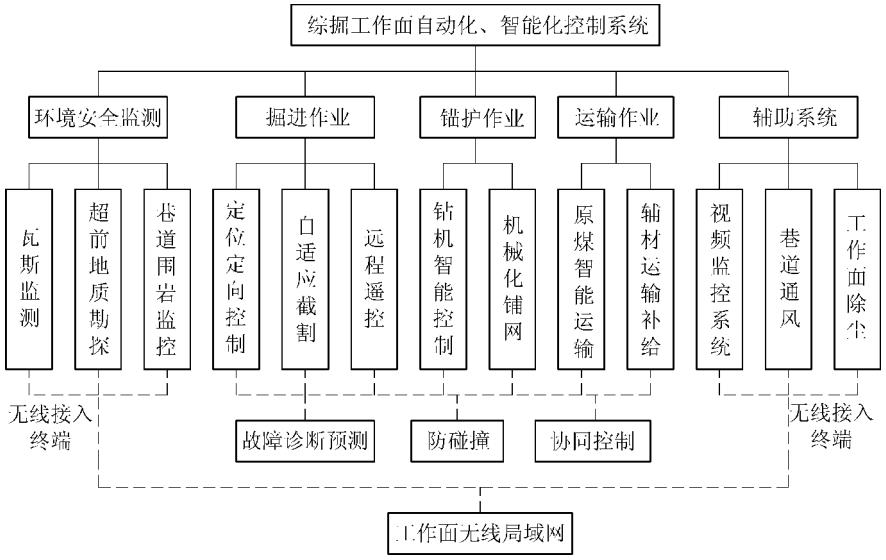


图 1　综掘工作面控制系统示意

Fig.1　Schematic of control system for fully-mechanized heading face

3　关键技术分析

3.1　成套装备协同控制技术

3.1.1　工作面高速通信网络技术

综掘工作面成套装备控制需要实现:①工作面与监控中心数据传输;②工作面单机设备之间数据传输。

第 1 个问题要解决综掘工作面信息孤岛的现状。目前井下网络建设都无法延伸、覆盖综掘工作面,导致大量的设备运行数据、生产数据、工况信息(含环境、视频信息)无法沉淀下来。这些数据可以为用户事后分析事故原因、评估工艺配套设备效率、优化生产工艺等大数据应用提供数据基础,使远程诊断、维护成为可能。

第 2 个问题要解决工作面设备协同控制没有可靠传输通道的现状。最典型的是以连续采煤机为龙头的双巷掘进工艺,多台独立设备配合作业且频繁移动。一旦掘、支、运、破碎、清浮煤等环节中某一项故障停机,其他环节各设备无法及时获知并主动避害,极易造成堆煤、堵车,引起工作面混乱。

对于综掘工作面来讲,设备移动范围大、随机性强,通过无线方式接入井下环网是相对可行、便利的途径。通过“设备现场总线网络+工作面无线局域网+矿井工业以太网”的方式,实现综掘工作面数据交互、上传。对比现有 WiFi、Zigbee、LoRa 等无线通信技术,工作面无线局域网优先选择工业 4G 专网技术,以满足高带宽、移动接入稳定性、网络调度、可扩展性等需求。

3.1.2　协同控制技术

综掘工作面的自动化控制对象不仅是各单机设备,更须将整个工作面作为一个整体来进行协调控制,甚至将通风、除尘、围岩监测等辅助系统与掘进作业系统联动控制。例如,在以掘锚机组为龙头的快速掘进系统中,已能够按照掘、支、运工艺要求,实现成套设备之间联动、闭锁、行走、牵引、姿态等的协同控制,并解决了重载启动、掘运效率匹配等具体问题[13]。

以连续采煤机为龙头的双巷掘进作业中,实现了掘支交叉平行作业、物料断续运输。为此,连续采煤机、梭车、锚杆机、铲车、给料破碎机等设备需要频繁调动作业。实际生产中对各设备作业衔接顺序、设备避让逻辑、梭车的合理运距、电缆布设收放等以作业工艺的型式进行了约束。但这些均依赖人工监控、协调。在井下狭窄空间内,一旦出现监控不到位或协调不及时,极易给工作面带来安全隐患。连采工作面成套设备的协同控制可通过协调作业衔接点时空关系实现。底层仍须依靠稳定的通信网络支撑,保证各单机设备能够实时共享作业进度、状态信息及周边工况,操作人员及时作出合理预判并调整本机操作。例如,根据煤流有无、负荷大小进行设备启停、调速、联动控制。目前,通过其他技术手段在物料运输环节做了一定尝试并取得不错的应用效果。梭车与给料破碎机的卸煤作业已实现联动操作,给料破碎机可以根据梭车位置自动启停,提高运输系统机械寿命。

3.1.3　防碰撞技术

移动设备间的碰撞、跨骑设备相对运动时的碰

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

撞、拽脱,以及工作面中人与设备之间的危险接近,都会造成生产事故。迄今已对多种防碰撞技术进行过井下测试,如基于光学的红外监测,基于无线信号的雷达技术,基于图像的人体识别技术,基于无线测距的超宽带定位技术等。

这些技术均有一定的局限性。如红外、雷达技术只能识别障碍物,无法区分人/物;基于图像的人体识别受制于实时性和振动,在快速移动的设备上无法应用;无线定位技术要求受保护人员须携带标识卡,否则无法识别,该识别卡与人员定位标识卡无法通用。

通过对现有技术的融合,已保证工作面安全有序的运行。针对掘进工作面人员防护,静态时依靠机器视觉实现人员预警,动态则依靠红外、雷达等技术避免人员闯入。对于设备与巷道主要依靠雷达避免无谓的碰撞。对于设备与人、设备与设备,仍重点考虑无线定位技术,通过行政手段或物理手段将标识卡与人或设备进行绑定。

3.2　智能截割

3.2.1　定位和定向技术

掘进机的定位和定向是通过采用各种方法建立掘进机与巷道之间的相对坐标空间角度,实时调整掘进机的航向角、水平偏距、俯仰角、横滚角等位姿参数,然后结合巷道设计参数,为整机行走控制提供直接的控制参数,使掘进机始终处于巷道设计要求的理想位置上。

掘进机的定位和定向是智能截割控制的基础,也是整个综掘工作面智能化、少人化的基础。当前使用的主要技术有全站仪、陀螺仪、电子罗盘、激光导向仪以及视觉测量等方式。目前主要问题是如何适应井下恶劣工况,包括机器振动、粉尘、高温高湿等恶劣工作环境,将在其他领域成功应用的自主导航技术应用于煤矿装备。目前,惯性导航系统(陀螺仪+加速度计)在综采工作面的应用上取得了进步,仍需克服低速、漂移、算法精度等难点,以期能够为综掘工作面提供准确的基础坐标系。

3.2.2　自适应截割

根据掘进工艺要求自主完成断面的循环截割,主要包含断面成形控制、截割路径规划、截割头自动调速控制等,以提高截割效率和截割质量。

在准确定向的基础上,按照巷道断面轮廓的工艺要求,通过量化的指标自动调整截割循环路径,避免超挖、欠挖。主要实现方式有记忆截割、设定边界参数等。在保证截割质量和效率的基础上,文献[14-15]进一步对掘进空顶区顶板破坏机理进行了研究,提出了自下而上推进式 S 型截割更有利于保持巷道围岩的稳定。

截割头自动调速控制是指根据岩石硬度自动调整截割头速度及截割臂摆动速度。对于煤及较软岩石,适宜使用截割头高转速和较高的截割臂摆动速度的方式,以提高工作效率;对于较硬岩石,则采取降低截割速度、提高截割转矩的方式增加破岩能力,降低刀具损耗。巷道掘进的主要任务是截割出符合设计要求的巷道断面,并根据截割载荷调整截割策略。截割头动载荷实时识别技术还处于理论探索阶段,以实测和反演计算 2 种模式为代表。利用神经网络对截割电流、截割振动、油缸压力等信息融合处理进行识别[16-17],利用截割头振动响应反向推导得出动载荷计算表达式[18]。

3.2.3　远程遥控

操作人员在井下监控中心或地面远程遥控操作,必须考虑实时性问题。井下电磁环境恶劣、数据传输线路长、远程操作时还须通过层层网络转换,可靠性、实时性难以保证。对于井下监控中心可以考虑低频低带宽的数据专网实现,实现设备的实时控制。对于必须通过工业以太网的地面操作,须在网络层实现高效数据传输调度,避免传输链路的访问拥堵、通信竞争等物理局限。考虑到网络延时的客观存在,地面操作主要用来监视或“一键控制”。

3.3　智能锚护

在综掘工作面,掘快支慢的矛盾越来越突出。支护工作直接关系施工安全,影响循环进尺、循环次数等。除了生产企业科学合理地组织施工方式外,更需要从锚护装备自身提高机械化、自动化水平,进而提升支护效率。智能锚护作业主要包括自动铺网、自动钻孔、自动装药、自动上杆与紧固等。

目前,以山西天地煤机为代表的装备制造商已经在智能锚护技术上进行了攻关,具备巷道空间锚杆自主定位、自动锚护、排间距控制等技术,并逐步开始工程应用。在锚护作业中仍存在大量依赖人工经验操作的工序,仍须进行深入探索替代人工的理论及技术,包括钻孔自动定位、探顶、围岩状态实时监测等关键技术。

3.4　智能运输

运输系统智能化关键在于原煤运输、材料运输和补给的智能化。原煤运输智能化目前具有可行的解决方案及工程案例,自带轨道的自移机尾等设备的成功应用为智能化运输提供了必要的装备基础。相关研究也集中于原煤运输装备自动化、可靠性等性能提升方向。材料运输和补给的智能化受综掘工

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

作面空间、材料的自动搬运等限制很难取得突破,甚至尚无可行的机械化装备,需要全行业从综掘工作面全工艺流程内进行优化创新,找到合适的成套解决方案。

3.5 视频监控

视频监控作用在于将远程操作人员的视觉延伸到综掘工作面,提供“身临其境”的视觉感受,以指导远程生产。

目前视频采集、视频压缩/存储、视频传输、视频再现等产品已有大量工程应用,具备远程可视的基础条件。

综掘工作面为新开拓巷道,喷浆、硬化、照明、供电、监控系统安装等均滞后于掘进作业。因此,目前的工程实践中,视频监控更多地是以各单机设备为载体,通过各单机周边及搭接点视频信息,尽可能还原工作面场景。为满足智能化工作面的需求,需要在视频拼接、视频识别、全景成像等技术进行攻关。受综掘工作面粉尘影响,掘进迎头存在较大视觉盲区,具有应用以热成像技术为代表的非光学成像技术的需求,甚至开展基于数据驱动的虚拟现实技术(3VDR 数字平台)的前期研究,为最终实现少人、无人做好技术储备。另外,考虑到综掘工作面粉尘、水雾、振动等恶劣工况,在工程应用中还须集成图像增强、防抖处理等技术。

3.6 故障诊断及预测

单机设备可靠运行是工作面连续高效运行的基础。对整机工况进行全面监测,获得液压、电气、机械方面的状态数据,通过数据拟合,在远程再现设备完整的实时状态,远程操作人员据此做出合理操作。通过信号处理、特征提取和模式识别,实现故障的在线诊断、预警预报,有助于提前检修,避免故障扩大或停工检修。

针对综掘工作面装备工况复杂、故障源多、机械传动链长等特点,利用温度、压力、流量、液位、供电、位姿等数据,进行多传感器数据融合处理,研究多种状态监测技术及参数数据融合,实现掘进装备部件或者整机安全评估。同时,对其关键机械部位进行在线振动测试,对超过振动限值或振动明显变化进行诊断处理,利用频谱分析等技术实现故障判定和准确定位[19-21],并依据监测数据进行故障趋势分析,为故障预警和预测维护提供支撑。

4 结 论

1)通过综掘工作面无线网络实现的成套设备协同控制,实现了工作面各种数据和信息的有效关联及上传。以远程可视控制的方式实现工作面掘进作业系统的协调、联控,以及大数据的沉淀。

2)客观来讲,大量的研究集中到掘进环节的智能控制,并取得了有效进展。对于探掘锚运、环境安全监测及辅助作业的循环作业自动化、智能化缺乏成套的解决方案,需要因地制宜地进行工艺创新,通过新装备新工艺逐步应用智能化信息技术手段实现减人增效的目标。

3)视频监控作为重要的辅助手段,为综掘工作面自动化、智能化提供了重要的支撑。从长远看,要真正实现“透明综掘工作面”,须开展基于数据驱动的 3DVR 数字平台研究。

4)故障诊断及预测技术是提高设备安全性、可靠性、降低事故损失、减少维护成本的有效方法,是提高综掘工作面安全、连续、高效生产的技术途径之一。

参考文献(References):

[1] 张科学.综掘工作面智能化开采技术研究[J].煤炭科学技术,2017,45(7):106-111.
ZHANG Kexue. Study on intelligent mining technology of fully-mechanized heading face[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7):106-111.

[2] 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 University of Mining & Technology, 2018, 47(3):459-467.

[3] 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.

[4] RALSTON Jonathon R D, HARGRAVE Chad, HAINSWORTH David. Sensing for advancing mining automation capability: a review of underground automation technology development[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(5): 305-310.

[5] 郑 兴,张高峰,王红旗.煤矿灾害救援双级式信息探测机器人系统研制[J].煤炭科学技术, 2017, 45(5):58-64,135.
ZHENG Xing, ZHANG Gaofeng, WANG Hongqi. Research and development on robot system of mine disasterrescue second grade information detection[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5):58-64,135.

[6] 王金华,黄乐亭,李首滨,等.综采工作面智能化技术与装备的发展[J].煤炭学报,2014,39(8):1418-1423.
WANG Jinhua, HUANG Leting, LI Shoubin, *et al*. Development of intelligent technology and equipment in fully-mechanized coal mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8):

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

1418-1423.

[7] 陈晓晶,何　敏.智慧矿山建设架构体系及其关键技术[J].煤炭科学技术,2018,46(2):208-212,236.
CHEN Xiaojing,HE Min.Framework system and key technology of intelligent mine construction [J].Coal Science and Technology,2018,46(2):208-212,236.

[8] 何　敏.智慧矿山重要特征与实现途径[J].工矿自动化,2018,44(3):31-35.
HE Min.Important characteristics and realization ways of wisdom mine[J].Industry and Mine Automation,2018,44(3):31-35.

[9] 孙　江.综采工作面远程控制采煤技术探讨[J].中国矿山工程,2017,46(6):62-65,77.
SUN Jiang.Discussion on long-range control coal mining on fully mechanized working face[J].China Mine Engineering,2017,46(6):62-65.

[10] 黄曾华,南柄飞,张科学,冯银辉.基于 Ethernet/IP 综采机器人一体化智能控制平台设计[J].煤炭科学技术,2017,45(5):9-15.
HUANG Zenghua,NAN Bingfei,ZHANG Kexue,Feng Yinhui.Design on intelligent control platform of mechanized mining robot based on Ethernet/IP [J].Coal Science and Technology,2017,45(5):9-15.

[11] 李　刚,牛　磊,李文龙.煤矿硬岩巷道快速掘进技术研究[J].煤炭科学技术,2018,46(11):13-20.
LI Gang,NIU Lei,LI Wenlong.Study on rapid excavation technology for hard rock roadway in coal mine[J].Coal Science and Technology,2018,46(11):13-20.

[12] 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.

[13] 呼守信.高效快速掘进系统的协同控制[J].工矿自动化,2017.43(4):86-88.
HU Shouxin.Cooperative control of high-efficient and rapid excavation system[J].Industry and Mine Automation,2017,43(4):86-88.

[14] 曹飞飞.岩巷快速掘进优化设计及应用[D].邯郸:河北工程大学,2014.

[15] 马　睿.巷道快速掘进空顶区顶板破坏机理及稳定性控制[D].徐州:中国矿业大学,2016.

[16] 王　伟,田慕琴,闫　琳,等.多神经网络与证据理论相融合的掘进机动载荷识别方法[J].煤炭技术,2018,37(4):228-231.
WANG Wei,TIAN Muqin,YAN Lin,*et al*.Dynamic load identification method of rock roadheader using multineural network and evidence theory[J].Coal Technology,2018,37(4):228-231.

[17] 王　伟,田慕琴,宋建成,等.基于小波包神经网络的岩巷掘进机动载荷识别方法[J].煤矿机械,2015,36(3):238-241.
WANG Wei,TIAN Muqin,SONG Jiancheng,*et al*.Dynamic load identification method of rock roadheader based on wavelet packet and neural network[J].Coal Mine Machinery,2015,36(3):238-241.

[18] 何　洋,李晓豁.纵轴式掘进机截割头随机截割载荷识别方法研究[J].武汉科技大学学报,2017,40(2):138-143.
HE Yang,LI Xiaohuo.Identification of random cutting load on cutting head of longitudinal roadheader[J].Journal of Wuhan University of Science and Technology,2017,40(2):138-143.

[19] 刘旭南.掘进机动态可靠性及其关键技术研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2014.

[20] 袁冯丹.全断面掘进机故障预测与健康管理系统研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2017.

[21] 左庆林.盾构机关键设备状态监测与故障诊断究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2014.