

文章编号:1671-251X(2020)09-0008-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17658

煤矿巷道修复重载作业机器人现状与发展趋势

薛光辉, 侯称心, 张云飞, 吴淼

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083)



扫码移动阅读

摘要:煤矿重载作业机器人是替代高危岗位工人作业的智能装备,面临作业空间狭小局促、作业环境复杂多变等挑战。总结了重载工业机器人现状及煤矿巷道修复装备的发展历史,指出目前煤矿巷道修复装备仅实现了遥控和自动卷缆功能,智能化水平不高,需研发煤矿巷道修复重载作业机器人;提出了煤矿巷道修复重载作业机器人的概念及功能定位,指出煤矿巷道修复重载作业机器人研制面临狭长封闭巷道空间内位姿精确感知、行走路径规划与行走控制、作业轨迹规划与运动控制等关键技术问题;阐明了煤矿巷道修复重载作业机器人发展方向为提高煤矿巷道修复重载作业机器人的可靠性、稳定性和智能化水平,加强与其他机器人施工工艺的匹配。

关键词:煤矿机器人;重载作业机器人;巷道修复;位姿精确感知;行走路径规划;行走控制;作业轨迹规划

中图分类号:TD421 文献标志码:A

Current situation and development trend of heavy-duty operation
robot for coal mine roadway repair

XUE Guanghui, HOU Chenxin, ZHANG Yunfei, WU Miao
(School of Mechanical Electronic and Information Engineering,
China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract:Coal mine heavy-duty operation robot is an intelligent equipment to replace workers in high-risk positions, which faces challenges such as narrow working space and complex and changeable working environment. Current situations of heavy-duty industrial robots were summarized as well as development history of coal mine roadway repair equipment. It was pointed out that existing coal mine roadway repair equipment could only realize functions of remote control and automatic roll-cable with low intelligence level, and heavy-duty operation robot for coal mine roadway repair should be developed. The concept and functional localization of heavy-duty operation robot for coal mine roadway repair were put forward, and many key technical problems which needed to be solved were pointed out, such as accurate position and attitude perception in narrow and enclosed roadway space, walking path planning and control, operation trajectory planning and motion control, etc. Development directions of heavy-duty operation robot for coal mine roadway repair were expounded, which were improving its reliability, stability and intelligence level, and strengthening construction technique matching with other robots.

Key words: coal mine robot; heavy-duty operation robot; roadway repair; accurate position and attitude perception; walking path planning; walking control; operation trajectory planning

收稿日期:2020-08-19;修回日期:2020-09-03;责任编辑:李明。
基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2014CB046306);国家自然科学基金资助项目(51874308)。
作者简介:薛光辉(1977—),男,河南汝州人,副教授,博士,主要研究方向为煤矿机器人、矿山装备自动化与智能化、设备状态监测与故障诊断、无线传感器网络等,E-mail:xgh@cumtb.edu.cn。
引用格式:薛光辉,侯称心,张云飞,等.煤矿巷道修复重载作业机器人现状与发展趋势[J].工矿自动化,2020,46(9):8-14.
XUE Guanghui,HOU Chenxin,ZHANG Yunfei,et al. Current situation and development trend of heavy-duty operation robot for coal mine roadway repair[J]. Industry and Mine Automation,2020,46(9):8-14.

0 引言

国际能源署(IEA)报告预测,到2040年,中国对煤炭的需求将占全球煤炭需求的50%,全球煤炭需求将增加15%。中国能源研究会发布的《中国能源展望2030》预测2020、2030年煤炭占比分别为60%和49%^[1]。在未来相当长时期内,煤炭作为我国主体能源的地位不会改变^[2-4]。

随着煤矿机械化、自动化、信息化、智能化建设加快推进,我国煤矿安全生产达到了中等发达国家水平,安全生产环境得到了很大改善^[5],但仍有很多危险岗位威胁着煤矿工人的安全。煤矿井下破碎、钻锚、喷涂、调高、卧底等巷道修复及物料搬运、管道安装等作业,具有装备自重和装机功率大、劳动强度高、作业人员多、危险系数高等特点,属于煤矿井下重载作业。受煤矿井下机械设备自动化与智能化水平限制,上述高危作业仍需煤矿工人完成,效率低且危害人身安全。亟需研发煤矿重载作业机器人,将煤矿工人从高危繁重的岗位上替换出来,保障生产安全,提高作业效率。

美、日、韩及欧洲各国在机器人领域的研究起步较早,方向和技术优势有所分化。我国非常重视机器人研究,在相关研究领域重点部署了一系列国家高技术研究发展计划(863计划)、自然科学基金、科技重大专项资助项目。国际机器人联合会(IFR)统计的全球主要国家、地区工业机器人销售数据显示,2013年以来我国已成为工业机器人的第一大消费市场^[6]。由于煤矿井下复杂的作业环境,煤矿重载作业机器人发展相对缓慢,其智能化水平还需要进一步提升。

2019年初,国家煤矿安全监察局发布了《煤矿机器人重点研发目录》,聚焦关键岗位、危险岗位,重点研发应用掘进、采煤、运输、安控和救援5类38种煤矿机器人,并对每种机器人的功能提出了具体要求,在政策层面为煤矿机器人研发应用做出了有力倡导,明确了煤矿机器人重点研发方向和战略目标,提出了技术路径,引起业界广泛关注^[7]。

本文总结了重载工业机器人的现状,以煤矿巷道修复重载作业机器人为例,基于煤矿巷道修复装备的发展历史及存在的主要问题,提出了煤矿巷道修复重载作业机器人的概念和功能定位,分析了煤矿巷道修复重载作业机器人亟待解决的关键技术问题及发展趋势,以期为其研制提供借鉴,为煤矿井下重载作业装备的智能化发展添砖加瓦。

1 重载工业机器人

高速重载工业机器人是指末端载荷100 kg以

上、末端运行线速度最大值1 m/s以上的工业机器人,广泛应用于喷涂、焊接、物流搬运、码垛及重型制造业的自动化生产行业^[8]。当前,世界上重载工业机器人60%~80%市场份额被ABB、KUKA、FANUC、安川电机等外国公司占据^[9-10]。我国重载工业机器人研究起步较晚,但发展迅速,技术渐趋成熟,智能化水平逐渐达到世界先进水平。国内工业机器人公司主要有沈阳新松机器人自动化股份有限公司、安川首钢机器人有限公司、埃夫特智能装备股份有限公司、南京埃斯顿自动化股份有限公司等。国内外重载工业机器人见表1。

表1 国内外重载工业机器人
Table 1 Heavy-duty operation robots at home and abroad

型号	厂家	特点	实物
IRB 8700六轴重载搬运机器人 ^[11]	ABB	负载能力800 kg;重复精度±0.05 mm;作业半径3 200 mm;自身质量4 525 kg	
KR 1000 Titan 六轴重载机器人 ^[12]	KUKA	负载能力1 300 kg;作业半径3 202 mm;重复精度≤±0.10 mm;自身质量4 690 kg;主要用于包装、码垛、物料搬运、上下料	
M-900/M-2000i A ^[13]	FANUC	负载能力1 200 kg;重复精度±0.30 mm;作业半径3 734 mm;自身质量8 600 kg	
MPL800 四轴重载机器人 ^[14]	安川电机公司	负载能力800 kg;重复精度±0.05 mm;作业半径3 159 mm;自身质量2 550 kg	
SR500A系列重载搬运机器人	沈阳新松机器人自动化股份有限公司	采用刚性手臂设计;水平搬运载荷500 kg;作业半径约2 525 mm;重复精度±0.5 mm;主要用于搬运、上下料、铸造、锻造、磨削、装配等 ^[15]	
GP600 六轴垂直多关节重载机器人 ^[16]	安川首钢机器人有限公司	采用并联结构设计;负载能力600 kg;垂直运动半径2 898 mm;水平运动半径2 942 mm;重复精度±0.3 mm;自身质量3 035 kg	
ER400L-C20 六轴重载工业机器人	埃夫特智能装备股份有限公司	负载能力400 kg;重复精度±0.3 mm;主要用于电焊、打磨、搬运、码垛等 ^[17]	
ER450-4-3200 四轴重载搬运机器人	南京埃斯顿自动化股份有限公司	负载能力450 kg;作业半径3 200 mm;重复精度±0.5 mm;工作范围360°;主要用于搬运、码垛 ^[18]	

重载工业机器人发展迅速,智能化程度较高,但受井下作业环境高温、潮湿、煤尘、有害气体等限制,难以在煤矿井下应用,且重载工业机器人在固定岗位上定点作业,无法满足煤矿井下移动式作业需求。因此研制煤矿重载作业机器人面临较多困难,需要科技工作者联合攻关。

2 煤矿巷道修复装备

巷道修复装备是一种集破、扒、装、运为一体的新型煤矿机电设备^[19],可实现对煤矿井下巷道起鼓、顶底板和两帮的破碎与快速装运,提高巷道治理的机械化程度及安全性。

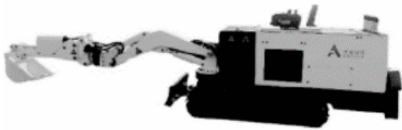
2005 年,我国开始推进煤矿井下巷道修复装备研制^[20-21]。2013 年,中煤科工集团西安研究院有限公司率先研发成功 WPZ-55/50L 型煤矿用巷道修复机,如图 1 所示。该装备主要用于巷道底板修复治理,兼顾侧帮和顶板修复施工^[22]。整机质量为 10 t,挖掘宽度、距离、高度、深度分别为 3.45,1.6,3.5,0.67 m,破碎锤冲击频率为 10~18 Hz,爬坡能力为 $\pm 15^{\circ}$,工作臂回转角度为 $\pm 38^{\circ}$ 。



图 1 WPZ-55/50L 型煤矿用巷道修复机

Fig. 1 WPZ-55/50L coal mine roadway repair machine

2014 年,沈阳天安科技股份有限公司研制了 WPZ-4/80 型矿用破碎转载卧底机^[23],如图 2 所示。该装备额定功率为 22 kW,最大卧底深度为 420 mm,最大卸载高度为 1 400 mm,破碎锤冲击功率为 4 kW,外形尺寸为 4 400 mm $\times$ 800 mm $\times$ 1 100 mm(长 $\times$ 宽 $\times$ 高),可遥控作业,保障作业人员安全。



(a) 卧底机



(b) 无线遥控器

图 2 WPZ-4/80 型矿用破碎转载卧底机

Fig. 2 WPZ-4/80 coal mine crushing and transshipment floor excavator

2014 年,石家庄煤矿机械有限责任公司研发了 WPZ-30/400 型煤矿用巷道修复机,如图 3 所示。

该装备的工作臂可沿车身轴线旋转 $\pm 180^{\circ}$,同时配有前推铲,满足挖掘、侧掏、翻转、破岩、装车、起吊等动作要求,实现挖掘毛水沟、卧底、破岩、清理浮煤、清理带式输送机底煤、平整巷道及小型配件吊装等功能。该装置还可选配铲斗和破碎锤快换装置^[23-24]。



图 3 WPZ-30/400 型煤矿用巷道修复机

Fig. 3 WPZ-30/400 coal mine roadway repair machine

在 WPZ-30/400 型煤矿用巷道修复机基础上,石家庄煤矿机械有限责任公司研制了一款高效率 WPZ-60/400 型煤矿用多功能卧底机,如图 4 所示。该装备标配卷缆装置,增强了作业灵活性,减轻了工人工作强度。其铲斗容量为 0.6 m³,装载宽度为 4 400 mm,卸载高度为 2 800 mm,卧底深度为 330 mm,爬坡能力为 $\pm 20^{\circ}$,整机质量为 8 000 kg。



图 4 WPZ-60/400 型煤矿用多功能卧底机

Fig. 4 WPZ-60/400 multifunctional coal mine floor excavator

2016 年,安华工程机械有限公司研制了 WPZ 型煤矿用巷道修复机,如图 5 所示。该装备适用于煤矿巷道修顶、刷帮、卧底,以及水利工程、地下工程、公路和铁路隧道施工与修复等^[24]。整机质量为 8 569~9 010 kg,最大挖掘高度为 4 200 mm,最大挖掘宽度为 4 770 mm,破碎冲击能不大于 1 000 J,冲击频率为 10~18 Hz,最大卧底深度为 1 150 mm,行走速度为 21 km/h,爬坡能力为 $\pm 16^{\circ}$,装载能力为 50 m³/h。



图 5 WPZ 型煤矿用巷道修复机

Fig. 5 WPZ coal mine roadway repair machine

文献[25]介绍了 WPZ-75/350 L 型全工况模块化巷道修复机。该装备增加了机载临时支护装置和可升降工作平台,可满足巷道掘进顶板临时支护及修复锚固作业需求。整机质量为 19 t,总功率为 75 kW,挖装范围为 2.5 m×6 m×5.5 m(长×宽×高),牵引力为 180 kN,挖掘力不小于 25 kN,挖臂回转角度为±180°,爬坡能力为±16°,破碎冲击能为 350 J,破碎锤打击频率为 500~1 000 次/min,液压剪破断力为 320 kN,最大剪断直径为 25 mm。

文献[26]介绍了一款经济型巷道修复机,如图 6 所示。整机质量为 6.8 t,电动机功率为 45 kW,爬坡能力为 20°,挖掘/破碎宽度为 3 553 mm,挖掘/破碎高度为 3 580 mm,挖掘/破碎距离为 1 500~3 550 mm,挖掘深度为 550 mm,破碎锤冲击能为 600 J,工作臂摆动角度为±35°。

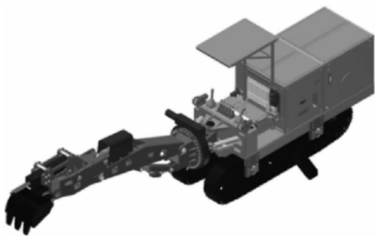


图 6 经济型巷道修复机

Fig. 6 Economical roadway repair machine

文献[27]介绍了一种多功能快换式巷道修复机。整机质量为 10.2 t,装机功率为 55 kW,装载能力为 50 m³/h,挖掘宽度为 3 770 mm,挖掘高度为 5 000 mm,卸载高度为 3 200 mm,破碎深度为 1 900 mm,通过快换装置可实现连续井下作业。

江西鑫通机械制造有限公司研制了 WPZ-37/600 型煤矿用巷道修复机^[28],如图 7 所示。整机功率为 37 kW,破碎冲击能为 600 J,冲击频率为 7.5~16 Hz,工作臂可沿车身轴线 360°转动,左右摆动角度为±35°(摆动幅度不小于 5 000 mm),上下移动距离为 350 mm,工作臂可最低限度贴地面横向侧掏作业,配备矿用隔爆型电缆卷筒,能自动收放电缆,安全性和自动化程度更高、灵活性更好。



图 7 WPZ-37/600 型煤矿用巷道修复机

Fig. 7 WPZ-37/600 coal mine roadway repair machine

2014 年至今,煤矿用巷道修复装备外形没有太大改进,大多在功能上进行改善,技术参数有所提高,见表 2。

表 2 当前巷道修复装备能达到的技术指标

Table 2 Achieved technical indexes of current roadway repair equipment

指标	数值	指标	数值
最大整机质量/t	19	最大冲击能/J	1 000
最大额定功率/kW	75	最大工作摆角/(°)	±180
最大卸载高度/mm	3 200	最大爬坡能力/(°)	±22
最大挖掘/破碎宽度/mm	3 770	破碎冲击频率/Hz	8~18
最大挖掘/破碎高度/mm	5 000	最大挖掘力/kN	25
最大挖掘深度/mm	1 500	最大破断力/kN	320
最大破碎深度/mm	1 900		

巷道修复装备目前仅实现了遥控和自动卷缆,智能化水平普遍不高,亟需在满足卧底、扩帮、侧掏、破碎、剪切等巷道修复、物料搬运与装载等作业功能之外,进一步提高其智能化程度,研发煤矿巷道修复重载作业机器人,使其具有自主定位与导航、自主路径规划和避障、作业目标自动识别、作业轨迹自主规划和自适应作业、作业效果和质量自主评价等智能化要素,代替人工在煤矿井下进行作业,以保障井下作业安全,提高煤矿生产效率。

3 煤矿巷道修复重载作业机器人

参考重载工业机器人,煤矿井下重载作业机器人应具有负载范围大、运动速度快、自重负载比小、重复定位精度高等特点。结合煤矿巷道修复装备现状,定义煤矿巷道修复重载作业机器人为具有一定自主或可编程能力,能够完成调高、卧底、扩帮、侧掏、破碎、剪切等巷道修复与清理作业的智能装备。其功能定位包括:① 末端有效载荷大于 1 000 kg,末端挖掘力不小于 25 kN,末端破断力不小于 320 kN,作业半径不小于 5 m,爬坡能力不小于 22°。② 具有自主定位与导航、自主行走路径规划与避障功能。③ 具有一定的作业目标自主识别能力。④ 具有作业轨迹自主规划和作业载荷自适应能力。⑤ 具有一定的作业质量自主评价能力。

煤矿巷道修复重载作业机器人的研究应基于当前巷道修复装备,充分利用机器人、人工智能和自动控制技术,针对其作业类型多样、作业环境复杂和作业空间狭长等特点,研究其底盘结构、动力系统、作业机构及与行走、作业相关的智能感知与控制方法。

4 煤矿巷道修复重载作业机器人关键技术问题

因煤矿井下巷道空间狭促、分布错综复杂、环境复杂多变,重载作业机器人在狭长封闭巷道空间内位姿精确感知、行走路径规划与行走控制、作业轨迹

规划与运动控制等基础科学问题^[29]尚未有效解决,限制了其在煤炭智能开采中的应用。

4.1 狭长封闭巷道空间内位姿精确感知

煤矿井下巷道分布错综复杂,空间狭长封闭,没有 GPS 信号。当前煤矿井下定位系统多为区间定位,无法精确实时感知煤矿巷道修复重载作业机器人等矿用机器人的位置和航向信息,不能为其自主行走提供导航信息。因此,构建煤矿井下定位与导航系统,为井下移动设备和人员提供实时准确的位置和姿态信息,是实现煤矿重载作业机器人自主移动和作业的前提和基础。

从目前的技术发展情况看,基于 UWB(Ultra Wide Band,超宽带)和惯导技术的定位与导航系统可实现局部封闭空间的位置和航向信息的实时感知,精度可达数十毫米级别,已在一些领域得到应用,是非常有潜力承担“井下北斗”重任的技术。但要达到煤矿巷道修复重载作业机器人自主移动的导航要求,还需解决基于 UWB 技术的 TDOA(Time Difference of Arrival,到达时间)模型算法角定位精度较差、NLOS(Non Line of Signal,非视距信号)误差大等问题,并研究与惯导技术的融合算法,提出适用于煤矿巷道重载作业机器人的改进定位算法,实现精确感知重载作业机器人在煤矿巷道空间中的位姿,从而进行有效的行走路径规划和作业轨迹规划,并为其行走和作业智能导控提供参考基准。5G 技术在煤矿井下的应用越来越受到煤炭行业的关注,其低延时、高带宽、广连接的特性可满足煤矿井下对延时和带宽的高要求。把 5G 技术和定位导航系统进行有机结合,探索适用于煤矿井下定位与导航系统的方法与途径,有助于实现煤矿巷道修复重载作业机器人行走与作业。

4.2 行走路径规划与行走控制

煤矿井下巷道地理信息数据是已知的,但由于空间狭促,又有随机出现的行人、车辆与设备物料等不确定性,要实现煤矿巷道修复重载作业机器人自主行走与控制,不仅要考虑成形巷道的确定性,还要考虑移动环境动态变化的不确定性,需在已知煤矿巷道地理信息系统基础上,完成全局路径规划,同时实时感知机器人所处位置的动态环境信息,以实现避障等局部路径规划。这就需要建立含障碍物区域和自由移动区域环境地图模型及适用于煤矿巷道动态多变环境障碍搜索算法,以便实现快速、实时的全局及局部路径规划。将三维激光 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping,同步定位与地图绘制)与毫米波雷达应用到巷道地图构建技术中,基于改进 LOAM(Laser Odometry and

Mapping,激光里程计与地图绘制)算法、滤波算法实现环境适应性更高的环境感知算法,以此建立复杂巷道空间模型及得到障碍物检测信息,结合 Dijkstra 算法、A* 算法等实现煤矿巷道修复重载作业机器人行走路径规划及避障,进一步实现整机行走控制。

4.3 作业轨迹规划与运动控制

煤矿巷道修复重载作业机器人作业空间小、负载量大、作业环境恶劣,决定了其作业臂要具有足够的自由度与刚度。研究有限空间中重载作业机器人作业机构是高质量、高效率完成作业要求的重要保证;建立典型巷道修复作业目标识别数据库,研究基于 PnP(Perspective-n-Point,透视 n 点)算法的 2D RGB 图像与 3D 物体间对应关系,从而获得作业对象 6D 位姿的作业目标识别方法;根据巷道修复作业工艺,研究基于机器视觉和机器学习的从初始运动状态到目标状态作业轨迹规划问题,使其在运动过程中平滑稳定;采用基于强化学习的自适应控制算法,研究机械臂的高效、精准智能导控,以期实现煤矿巷道修复重载作业机器人智能作业要求。

5 煤矿巷道修复重载作业机器人发展趋势

针对我国煤矿巷道修复重载作业机器人发展现状与面临的问题,煤矿巷道修复重载作业机器人的发展将集中体现在可靠性、智能化和工艺适应性等方面^[30]。

(1) 提高煤矿巷道修复重载作业机器人的可靠性和稳定性。重载作业机器人在封闭狭长巷道中作业面临作业空间局促、作业环境复杂多变等难题,且重载作业具有装备功率大、劳动强度高、作业人员多、危险系数高等特点,因此,要求重载作业机器人在结构尺寸尽可能小的情况下,其自身结构和控制系统具有足够的可靠性和稳定性。

(2) 提高煤矿巷道修复重载作业机器人智能化水平。重载作业机器人主要是在狭长变形巷道中施工作业,井下环境存在诸多不可预测性,因此需要进一步提高重载作业机器人的智能化水平,完善其安全监测功能。未来发展趋势是重载作业机器人能在巷道中实时获取自身位置和姿态,时刻感知周围环境信息,实时分析接收数据,控制整机自主行走与安全避障,使作业机构精准完成作业,并能对作业质量进行自主评估与提升。

(3) 加强煤矿巷道修复重载作业机器人与其他机器人施工工艺匹配。我国煤矿资源分布广泛,地质条件复杂,巷道条件不同,井下装备类型多样,随着煤矿机器人的发展和普及,要求煤矿巷道修复及

其他类型重载作业机器人与运输机器人、喷涂机器人、巡检机器人等进行交互,从而更好地发挥重载作业机器人作业能力,提高作业效率。

6 结语

煤矿生产系统庞大,作业环境复杂多变,亟需突破当前技术限制,研发煤矿重载作业机器人代替工人完成繁重、高危作业,提高作业效率。目前煤矿巷道修复重载作业机器人研制进展缓慢,尚处于自动化初级阶段,智能化程度普遍不高,面临位姿精确感知、路径规划与避障、智能化作业等亟待解决的关键技术问题。提高煤矿巷道修复重载作业机器人结构和控制系统的可靠性、智能化水平和工艺适配性是其发展方向。

参考文献(References):

[1] 中国能源研究会.中国能源展望 2030[M].北京:经济管理出版社,2016.
China Energy Research Association. China energy outlook 2030[M]. Beijing: Economic Management Press,2016.

[2] 谢和平,吴立新,郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报,2019,44(7):1949-1960.
XIE Heping,WU Lixin,ZHENG Dezhi. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(7):1949-1960.

[3] 王国法,赵国瑞,任怀伟.智慧煤矿与智能化开采关键技术分析[J]. 煤炭学报,2019,44(1):34-41.
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.

[4] 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.

[5] 本刊评论员.以机器人研发应用引领矿井“四化建设”建设[J]. 中国煤炭工业,2019(3):6-7.
Commentator. Leading the construction of " four chemical constructions " in mines with robotic research and development applications[J]. China Coal Industry,2019(3):6-7.

[6] IFR. Industrial Robots break worldwide sales record plus 27 percent [EB/OL]. (2015-03-23) [2020-08-10]. [http://www. ifr. org/news/ifr-release/global-survey-703/](http://www.ifr.org/news/ifr-release/global-survey-703/).

[7] 国家能源局.关于印发《关于加快煤矿智能化发展的

指导意见》的通知[EB/OL]. (2020-03-03) [2020-08-10]. [http://www. nea. gov. cn/2020-03/03/c_138838778. htm](http://www.nea.gov.cn/2020-03/03/c_138838778.htm).

National Energy Administration. Notice regarding the issuance of *Guiding opinions on accelerating the intelligent development of coal mines* [EB/OL]. (2020-03-03) [2020-08-10]. [http://www. nea. gov. cn/2020-03/03/c_138838778. htm](http://www.nea.gov.cn/2020-03/03/c_138838778.htm).

[8] 游玮,孔民秀. 重载工业机器人控制关键技术综述[J]. 机器人技术与应用,2012(5):13-19.
YOU Wei,KONG Minxiu. Overview of key technologies for heavy-duty industrial robot control [J]. Robot Technique and Application,2012 (5):13-19.

[9] 王浩. 工业机器人技术的发展与应用综述[J]. 中国新技术新产品,2018(3):109-110.
WANG Hao. Overview of the development and application of industrial robot technology [J]. New Technology & New Products of China,2018 (3):109-110.

[10] 赵杰.我国工业机器人发展现状与面临的挑战[J]. 航空制造技术,2012(12):26-29.
ZHAO Jie. Development and challenge of Chinese industrial robot [J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2012(12):26-29.

[11] ABB IRB 8700 六轴重载搬运机器人[EB/OL]. [2020-08-10]. [http://www05. abb. com/global/scot/scot241. nsf/veritydisplay/a5f743d22f74987a482572-7d003a1a1b/file/IRB%207600_C_small. pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/a5f743d22f74987a482572-7d003a1a1b/file/IRB%207600_C_small.pdf).
ABB IRB 8700 6-axis heavy-duty handling robot[EB/OL]. [2020-08-10]. [http://www05. abb. com/global/scot/scot241. nsf/veritydisplay/a5f743d22f74987a-4825727d003a1a1b/file/IRB%207600_C_small. pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/a5f743d22f74987a-4825727d003a1a1b/file/IRB%207600_C_small.pdf).

[12] 世界上最大的工业机器人 KR 1000 Titan[J]. 机械工程师,2008(7):11-12.
The world's largest industrial robot KR 1000 Titan [J]. Mechanical Engineer,2008(7):11-12.

[13] FANUC M-2000i A 重载机器人[EB/OL]. [2020-08-10]. [http://www. shanghai-fanuc. com. cn/images/fanuc/pdf/M-2000i A. pdf](http://www.shanghai-fanuc.com.cn/images/fanuc/pdf/M-2000i_A.pdf).
FANUC M-2000i A heavy-duty robot [EB/OL]. [2020-08-10]. [http://www. shanghai-fanuc. com. cn/images/fanuc/pdf/M-2000i A. pdf](http://www.shanghai-fanuc.com.cn/images/fanuc/pdf/M-2000i_A.pdf).

[14] MPL800 四轴重载机器人[EB/OL]. [2020-08-10]. [http://www. kedrobot. com/nvjve/169. aspx](http://www.kedrobot.com/nvjve/169.aspx).
MPL800 4-axis heavy-load robot [EB/OL]. [2020-08-10]. [http://www. kedrobot. com/nvjve/169. aspx](http://www.kedrobot.com/nvjve/169.aspx).

[15] 沈阳新松 SR500A 系列重载机器人[EB/OL]. [2020-08-10]. [http://www. ysr-motoman. cn/channels/14. html](http://www.ysr-motoman.cn/channels/14.html).
Shenyang Siasun SR500A series heavy-duty robot

[EB/OL]. [2020-08-10]. <http://www.ysr-motoman.cn/channels/14.html>.

[16] GP600六轴垂直多关节重载机器人[EB/OL]. [2020-08-10]. <http://www.siasun.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=24&id=43>. GP600 6-axis vertical multi-joint heavy-duty industrial robot [EB/OL]. [2020-08-10]. <http://www.siasun.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=24&id=43>.

[17] 埃夫特 ER400L-C20 六轴重载工业机器人[EB/OL]. [2020-08-10]. <https://www.efort.com.cn/index.php/product/product.html>. Efort ER400L-C20 6-axis heavy-duty industrial robot [EB/OL]. [2020-08-10]. <https://www.efort.com.cn/index.php/product/product.html>.

[18] 埃斯顿 ER450-4-3200 四轴重载搬运机器人[EB/OL]. [2020-08-10]. <https://www.cn.made-in-china.com/showroom/asdjqr01>. Estun ER450-4-3200 four-axis heavy-duty handling robot [EB/OL]. [2020-08-10]. <https://www.cn.made-in-china.com/showroom/asdjqr01>.

[19] 张幼振. 巷道修复机工作机构工作空间及运动轨迹分析[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(7): 97-101. ZHANG Youzhen. Analysis on working space and movement trajectory of working mechanism for mine roadway repair machine [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(7): 97-101.

[20] 王桂梅, 牛清娜, 高长举. 巷道卧底机设备设计研究[J]. 煤矿机电, 2007(2): 86-87. WANG Guimei, NIU Qingna, GAO Changju. Research on equipment design of tunnel undercover machine[J]. Coal Mine Electromechanics, 2007(2): 86-87.

[21] 王宏伟, 于治福. 巷道卧底机的设计研究[J]. 煤矿机械, 2006(2): 181-182. WANG Hongwei, YU Zhifu. Design of tunnel bottom cleaning machine[J]. Coal Mine Machinery, 2006(2): 181-182.

[22] 陈盼, 王金国, 张幼振, 等. WPZ-55/50L 型巷道修复机在禾草沟煤矿底板治理中的应用[J]. 煤矿安全, 2015, 46(10): 163-166. CHEN Pan, WANG Jinguo, ZHANG Youzhen, et al. Application of WPZ-55/50L roadway repair machine in controlling floor of Hecaogou Coal Mine[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(10): 163-166.

[23] 李旭涛. 我国煤矿巷道修复设备的应用现状及发展趋势[J]. 煤炭工程, 2019, 51(2): 137-138. LI Xutao. Application status and development trend of coal mine roadway repair equipment in China[J]. Coal Engineering, 2019, 51(2): 137-138.

[24] WPZ 煤矿用巷道修复设备[EB/OL]. [2020-08-15]. <http://www.hsanhua.com.cn/>. WPZ coal mine roadway repair equipment [EB/OL]. [2020-08-15]. <http://www.hsanhua.com.cn/>.

[25] 杨林. 全工况模块化巷道修复机的设计研究[J]. 煤矿机械, 2017, 38(5): 1-3. YANG Lin. Modular design of roadway repairing machine for full working conditions [J]. Coal Mine Machinery, 2017, 38(5): 1-3.

[26] 阳廷军. 经济型巷道修复机的研制[J]. 煤矿机械, 2018, 39(7): 40-41. YANG Tingjun. Development of economical roadway repair machine [J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(7): 40-41.

[27] 徐建兵. 多功能快换式巷道修复机研制[J]. 煤矿机械, 2019, 40(10): 45-47. XU Jianbing. Development of multifunctional quick-change roadway repairing machine [J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(10): 45-47.

[28] WPZ-37/600 型煤矿用巷道修复机[EB/OL]. [2020-08-15]. <https://www.sitoncn.com/products.php>. WPZ-37/600 coal mine roadway repair equipment [EB/OL]. [2020-08-15]. <https://www.sitoncn.com/products.php>.

[29] 王国庆, 许红盛, 王恺睿. 煤矿机器人研究现状与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(2): 73-77. WANG Guoqing, XU Hongsheng, WANG Kairui. Research status and development trend of coal mining robots[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(2): 73-77.

[30] 葛世荣, 郝尚清, 张世洪, 等. 我国智能化采煤技术现状及待突破关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 28-46. GE Shirong, HAO Shangqing, ZHANG Shihong, et al. Status of intelligent coal mining technology and potential key technologies in China[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 28-46.