

井下铲运机无人驾驶系统发展及 5G 应用

李 铭^{1,2,3}, 刘 伟^{1,2,3}, 宋岳汶^{1,2,3}, 曹 彪^{1,2,3}, 王湖鑫^{1,2,3}

(1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;

2. 金属矿山智能开采技术北京市重点实验室, 北京 102600;

3. 北京北矿智能科技有限公司, 北京 100070)

摘 要:铲运机无人驾驶是智能矿山建设的重要组成部分,为了实现高海拔高寒地区井下无人采矿,通过梳理国内外铲运机无人驾驶系统发展现状,分析铲运机自主行驶系统相关理论和关键技术,从地下铲运机轨迹偏差预测技术、自主行驶多偏差控制技术和防碰撞预测与控制技术等方面进行了归纳总结。以西藏华泰龙矿为例,采用最新网络通信技术 5G,建设了 5G+铲运机无人驾驶系统。对铲运机无人驾驶系统在高海拔高寒地区的发展具有重要意义。

关键词:智能矿山;井下铲运机;无人驾驶;5G 应用;高海拔高寒地区

中图分类号:TD525

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2024)02-0001-05

Development of unmanned system for underground scraper and application of 5G

LI Ming^{1,2,3}, LIU Wei^{1,2,3}, SONG Yuewen^{1,2,3}, CAO Biao^{1,2,3}, WANG Huxin^{1,2,3}

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

2. Beijing Key Laboratory of Nonferrous Intelligent Mining Technology, Beijing 102600, China;

3. BGRIMM Intelligent Mining Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: Unmanned scraper is an important part of intelligent mine construction, in order to achieve unmanned underground mining in high-altitude and cold areas, this article summarizes the current development status of unmanned driving systems for scrapers both domestically and internationally, analyzes the relevant theories and key technologies of autonomous driving systems for scrapers, and summarizes them from the perspectives of trajectory deviation prediction technology for underground scrapers, autonomous driving multi deviation control technology, and collision prevention prediction and control technology. Taking Huatailong mine in Tibet as an example, the latest network communication technology 5G was used to build a 5G+scraper unmanned system. It is of great significance for the development of unmanned scraper systems in high-altitude and cold areas.

Key words: intelligent mine; underground scraper; unmanned; 5G applications; high-altitude and alpine regions

矿产资源的开采对国家安全、民生发展起到至关重要的作用。金属矿地下开采环境恶劣、工作强度高、危险系数大,尤其是面对深部开采、井下温度升高,给人员和设备带来危害。国务院颁布的《中国

制造 2025》白皮书在智能化关键技术专题中,提出了矿山采选智能感知控制环节;同时 5G 通信、人工智能等技术快速发展,矿山智能化发展迅猛,为金属矿地下开采带来安全保障和效率提升。井下铲运机无人驾驶系统应运而生。

1 国内外铲运机无人驾驶发展现状

1.1 国外技术现状

自 20 世纪 60 年代,国外发达国家开展了一系列的铲运机自动化研究。其中,在铲运机无人驾驶

收稿日期:2023-10-31

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2903805)

作者简介:李 铭(1997—),男,助理工程师,硕士,矿业工程专业,研究方向为智能矿山,E-mail:liming@bgrimm.com。

通信作者:王湖鑫(1980—),男,教授级高级工程师,博士,采矿工程专业,主要从事大直径深孔高效采矿、空区处理与智能矿山采区等方面的研究,E-mail:wanghuxin@bgrimm.com。

方面具有代表性的公司有山特维克(Sandvik)、卡特彼勒(Caterpillar)、安百拓(Epiroc)等^[1]。山特维克公司研发了 AutoMine 装备自动化及远程遥控系统,该系统采用惯性导航设备和激光扫描仪系统来进行精准定位^[2]。加拿大国际镍业公司(Inco)利用环形-加速度计系统研发出实时定位技术。卡特彼勒公司联合 DAS 公司研发了 MINEGEM 系统。该系统含有多种操控模式:人工、远程遥控、半自动、全自动模式,实现自动铲装运环节。安百拓公司(Epiroc)研发了 Scooptram Automation Multi 系统,该系统通过自动化交通控制功能提高机队性能,促进更高水平的多机队铲运机自动化。

1.2 中国技术现状

与国外相比,我国关于铲运机智能化研究较为缓慢。20 世纪 80 年代矿冶科技集团开展国产遥控铲运机研究。限于当时的技术水平,国产遥控铲运机实用性不高。矿冶科技集团在“十二五”、“十三五”对 863 计划的研究取得了一系列进展,研发了智能铲运机等装备。根据目标线路规划和激光扫描术得到铲运机的最佳自动驾驶路径。对铲运机自动驾驶、算法、轨迹跟踪等进行了深入研究并取得了一系列成果^[3-5]。战凯等自主研发了铲运机无人驾驶的导向技术和定位技术,通过通信平台,建立铲运机无人驾驶模型^[6]。马飞等在铲运机路径规划方面使用了 A* 改进算法,实现了有效无人驾驶,证明了该算法的可操作性^[7]。李建国等基于最优轨迹跟踪,验证了铲运机无人驾驶的可实现性^[8]。目前,山东黄金矿业三山岛金矿、安徽马钢罗河矿业、西藏华泰龙矿已实现铲运机智能改造和应用。

2 铲运机无人驾驶系统关键技术

1) 地下铲运机行驶轨迹偏差预测技术

地下铲运机行驶轨迹偏差预测技术以一组实测偏差值和目标路径为基础数据,结合现有轨迹偏差情况及铲运机的当前运行状态,对铲运机后续轨迹偏差进行预测。该技术融合了绝对定位与相对定位的优点,通过该项技术可减少实测值的过分依赖,提高自主行驶控制系统的运算效率和快速性^[9-10]。

2) 地下铲运机自主行驶多偏差控制技术

地下铲运机自主行驶多偏差控制技术由自主行驶控制算法和控制程序构成,融合地下铲运机行驶

轨迹偏差预测技术,融合横向位置偏离、航向位置偏离,通过多种位置偏离对铲运机位置进行导向,兼具稳定性和快速性^[11]。

3) 地下铲运机防碰撞预测与控制技术

地下铲运机防碰撞预测与控制技术通过专门计算程序,来预测车体边缘是否存在碰撞危险,并及时采取刹车措施和转向避让控制措施,防止铲运机对人员、设备、巷道壁的碰撞,保障人员和设备的安全^[12]。

4) 铲运机传动系统自动换挡控制技术

通过采集到的发动机油门开度、发动机转速、变矩器转速和工作装置载荷参数,结合驾驶意图判断,对铲运机变速箱档位进行智能操作控制,使得铲运机行驶与作业载荷与换挡操作有最佳匹配和平顺性,有效提高工作效率,减少车辆传动系统故障率,减少燃油消耗,提高作业效率^[13]。

5) 自主行驶控制器平台软硬件技术

控制器平台软件是各项控制技术与控制思想的综合体现,代表着自主行驶控制器的整体控制水平,该控制器硬件平台是算法软件的载体和运行基础,其运算速度、可靠性、稳定性和兼容性等至关重要。

3 铲运机无人驾驶 5G 应用案例

以华泰龙多金属矿为工程背景,进行 5G 通信技术和井下铲运机智能行驶控制技术的研究与应用。

3.1 矿山 5G 高速数据通信网络

根据华泰龙矿业投资情况及业务需求设计,井上系统建设包括 MEC 边缘云计算设备,IPRAN 核心交换机;井下 5G 网络全面覆盖 4 400 m/4 450 m 运输水平轨道系统巷道等重要场所。

在华泰龙矿业地面核心机房放置 1 台 IP RAN 核心设备,井下布置 2 台 IP RAN 设备组成一张传输网。IP RAN 环网采用抗灾结构进行建设,通过光缆上墙的方式,采用 36 芯光缆,满足未来信息化发展的需要。IP RAN 设备上行端口可支持 10 G 和 50 G 光模块,案例设计的 10 G 模块完成移动通信上行端口接入和下行设备基站控制器接入以及视频环业务的接入。控制环、安全环等承载业务可以根据实际需求,配置不同的模块^[14]。网络系统拓扑结构如图 1 所示。

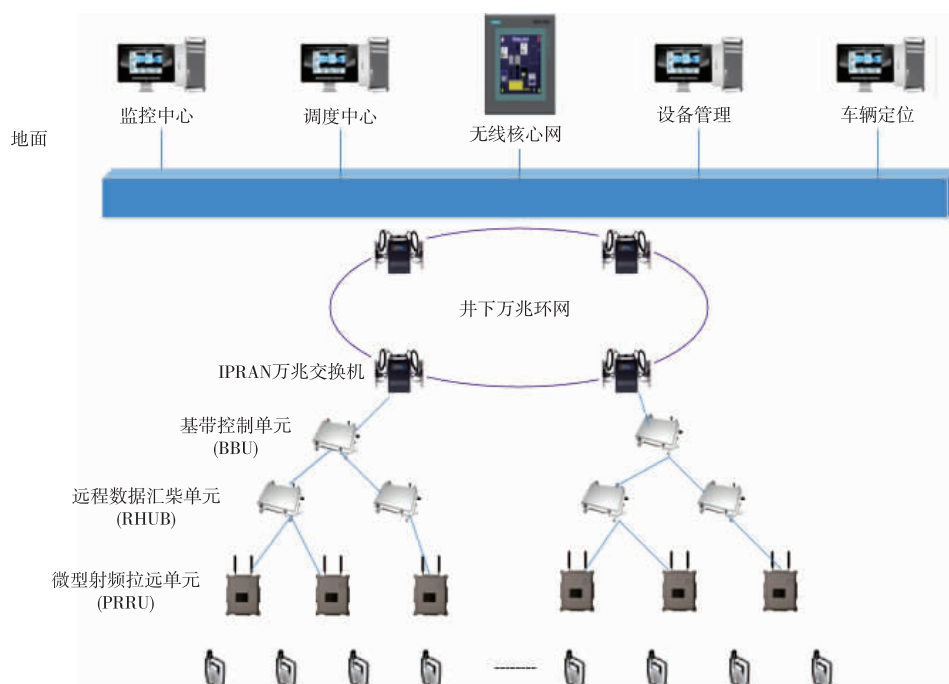


图1 5G 网络系统拓扑结构

Fig. 1 The topological structure of 5G network system

3.2 铲运机智能化系统设计

控制系统总体结构方案采用 CAN 总线分布式系统。地下智能铲运机需要具备包括自主控制、自主环境识别、远程遥控操作、无线通信、状态监控和故障诊断等智能化控制功能。总体控制结构框图如图 2 所示。

其中发动机采用康明斯 QSB4.5 全电控发动机。发动机控制模块主要控制发动机的输出转速和

扭矩;自动换挡控制模块用于根据作业工况自动控制变速箱档位;自主行驶控制模块用于控制铲运机在巷道内的自主行驶和对障碍物的自动避让;工作装置控制模块用于铲运机动臂和铲斗的控制,实现装载和卸载;动态称重计量模块用于计量铲斗内物料重量,提供出矿数据;巷道环境数据采集模块用于扫描巷道轮廓,为自主行驶提供环境数据;状态监测与诊断模块通过采集油温、油压、转速、车速等参数,

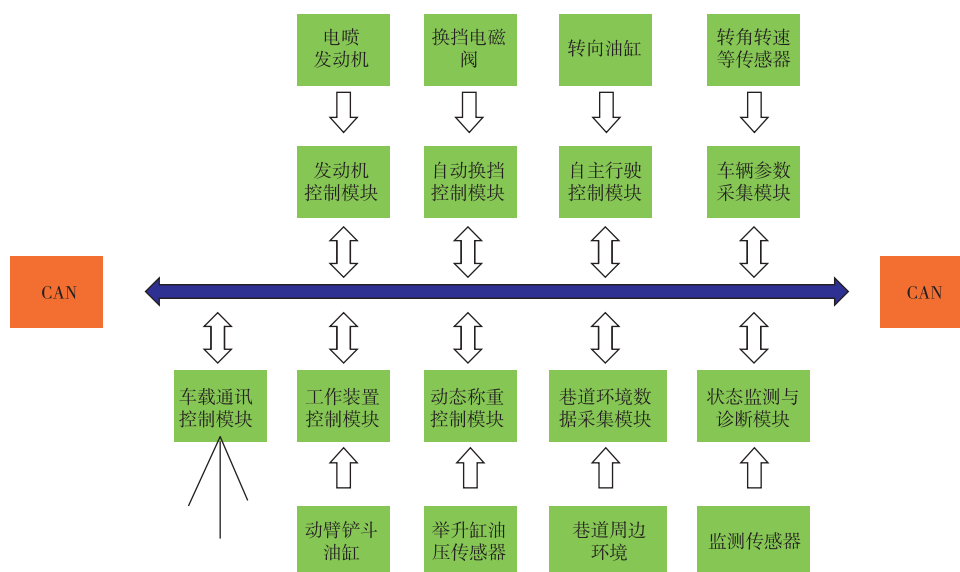


图2 铲运机无人驾驶系统总体控制结构框图

Fig. 2 Overall control structure block diagram of the unmanned driving system of a scraper

对地下铲运机工作状态进行监控,并检测故障状态给出故障提示;车载通讯控制模块通过无线和有线网络通讯平台与管理控制系统相联系,接收控制指令,发送车辆相关数据。

3.3 铲运机传感器系统设计

转角传感器选择德国 mobil-elektronik-GmbH 公司产品,最大轴向 70 N,最大径向 250 N。采用 CAN 通讯接口,CAN 通讯具有完善的数据校验、错误处理以及检错机制。抗冲击振动能力强,适合井下铲运设备使用。防护结构可靠,密封性能好,适合井下恶劣环境使用。前后转角传感器外形图如图 3 所示。



图 3 前后转角传感器外形图

Fig. 3 External view of front and rear angle sensors

地下铲运机在自主行驶控制和跟踪轨迹预测时,需要测量铲运机的车速,为了提高预测和控制精度,需要高精度的车速(里程计)传感器,否则经过误差积累,误差会急剧增加。采用 DANA 公司 R32360 变速箱,配套基站 C122 控制器,变速箱选配有专门的磁编码转速传感器,通过 CAN 总线可以得到该信号,换算后得到行走车速,不需要另外购买和加装车速传感器。已选定的 DANA 变速箱上里程计的转换系数是 100 Hz/km/h,当车速是 8 km/h 时,则方波信号的频率是 800 Hz,车轮半径是 0.615 m,凯斯勒驱动桥的总速比为 24.54,桥输入端每一转,对应的距离是 m,在 1 km 的距离桥输

入端的转数为:转数,即在桥传动轴 6350.67 转数/h = 1.764 转数/s,里程计的转换系数是 100 Hz=100 脉冲数/s,则驱动桥输入轴一转对应的脉冲数为 19,原来模型样机试验车的里程计脉冲数是 7 个(对应 7 个齿),DANA 里程计(选择最大脉冲频率的里程计)比起原来的里程计提高了 7 倍脉冲数,测速精度显著提高。

地下铲运机的行驶航向对于铲运机自主行驶控制来说是至关重要的参数,为了感知地下铲运机运行过程中的航向状态,采用基于激光扫描测量系统的逆向推算计算得到实际的航向角信息。

3.4 远程遥控操作台设计

铲运机、人(遥控驾驶员)以及远程操控系统(操控台、上位机、无线路由、无线摄像头、控制器等)构成一个闭环控制系统。操作台由座椅、控制器、指示灯与操作机构组成,操作机构包括手柄和按钮,外观示意图如图 4 所示。控制器采集操作机构信号,经逻辑转换后生成指令,通过串口或其他通讯方式将信息发送到上位机。



图 4 操作台外观

Fig. 4 Console appearance

左右两个扶手上各有一个遥控手柄,功能如表 1 所示。

右手柄用于控制车辆行走,其功能如表 2 所示。控制按钮功能如表 3 所示。

表 1 操作台左手柄功能

Table 1 Left handle function of the operation console

方向	名称	功能	信号类型
前	上翻斗	车辆挖掘斗上翻	CAN 总线
后	下翻斗	车辆挖掘斗下翻	CAN 总线
左	举臂	车辆挖掘斗举起	CAN 总线
右	放臂	车辆挖掘斗放下	CAN 总线

表 2 操作台右手柄功能

Table 2 Right handle function of the operation console

方向	名称	功能	信号类型
按钮 1	前进	车辆前进	开关量 24 V
按钮 2	后退	车辆后退	开关量 24 V
按钮 3	空挡	车辆处于空挡位置	开关量 24 V
左	左转	车辆根据手柄位置左转	CAN 总线
右	右转	车辆根据手柄位置右转	CAN 总线
前	加速油门	车辆给油门加速	CAN 总线
后	刹车制动	车辆刹车制动	CAN 总线

表 3 控制按钮功能

Table 3 Control button function

名称	按钮类型	状态	功能	信号类型
启动	自复位按钮	通/断	车辆发动机启动	数字量
熄火	自复位按钮	通/断	车辆发动机熄火	数字量
喇叭	二位置开关	通/断	车辆鸣笛	数字量
总电源	系统电源	开/关	给系统上电	数字量
操作模式	三位置旋钮开关	手动/自动	切换车辆工作模式	数字量
急停	黄色大蘑菇头	开/关	车辆工作中止	数字量
驻车	红色蘑菇头	开/关	使车辆驻车	数字量
照明	二位置开关	开/关	灯开关	数字量
备用	二位置开关	开/关	备用	数字量

显示指示灯:空挡白色 LED 指示灯(施耐德 24 V)、驻车红色 LED 指示灯、正常工作绿色 LED 指示灯,上述手柄优先选择 CAN 总线通讯方式的操作手柄。

控制器的主要作用为采集手柄的各类信号,对信号进行识别,转换成上位机能够接收的信号,通过 RS232 或其他通讯方式传送至上位机进行识别。选择德国 STW 系列控制器,带 4~20 ma 输入和 CAN 总线输入。和上位机通过 RS232 连接。

4 结语

本文总结了铲运机无人驾驶系统国内外技术发展现状和关键技术,并在高海拔高寒地区建设了 5G+铲运机无人驾驶系统。具有良好的应用效益。未来将开展铲运机作业路线三维建模与调度协同控制研究,推动多台铲运机在井下高效率有序无人作业。

参 考 文 献

- [1] 高梦熊. 论国外地下装载机的现在与未来[J]. 有色设备, 2010(6):8-10.
GAO Mengxiong. On the present and future of underground loaders abroad [J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2010(6):8-10.
- [2] MAKELA H, LEHTINEN H, RINTANEN K, et al. Navigation system for LHD machines[C]// Proceedings of the 2nd IFAC Conference on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV'95), 1995:295-300.
- [3] ERIKSSON G, KITOK A. Automatic loading and dumping using vehicle guidance in a Swedish mine[C]//Proceedings of the First International Symposium on Mine Mechanization and Automation, 1991, 2:1533-1540.
- [4] 战凯, 吕潇, 金枫, 等. 地下金属矿智能开采技术与装备现状及“十四五”的思考[J]. 智能矿山, 2021, 2(1):11-15.
ZHAN Kai, LYU Xiao, JIN Feng, et al. Current situation of intelligent mining technology and equipment of underground metal mines and thinking of the “14th five year plan”[J]. Intelligent Mining, 2021, 2(1):11-15.
- [5] 张元生, 战凯, 马朝阳, 等. 智能矿山技术架构与建设思路[J]. 有色金属(矿山部分), 2020, 72(3):1-6.
ZHANG Yuansheng, ZHAN Kai, MA Chaoyang, et al. Technical framework and construction ideas of intelligent mines[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2020, 72(3):1-6.
- [6] 战凯, 顾洪枢, 周俊武, 等. 地下遥控铲运机遥控技术和精确定位技术研究[J]. 有色金属, 2009, 61(1):107-112.
ZHAN Kai, GU Hongshu, ZHOU Junwu, et al. Research on remote control technology and positioning technology of underground remote control scraper[J]. Nonferrous Metals, 2009, 61(1):107-112.
- [7] 马飞, 杨峰, 顾青, 等. 基于改进 A* 算法的地下无人铲运机导航路径规划[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7):303-309.
MA Fei, YANG Haoshen, GU Qing, et al. Navigation path planning for underground unmanned Scraper based on improved A* Algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7):303-309.

(下转第 25 页)

- 2019,28(11):128-130.
- [30] 张青林,张勇,费子琼. 新疆某铀矿床 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 中性浸出试验研究[J]. 中国矿业,2012,21(增刊1):435-438.
- ZHANG Qinglin, ZHANG Yong, FEI Ziqiong. Experimental study on $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ neutral pregnant from a uranium deposit in Xinjiang[J]. China Mining Magazine, 2012, 21 (Suppl. 1): 435-438.
- [31] DOS E C, SANTOS MENDONÇA DE J C, SILVA H A. Duarte pyrite oxidation mechanism by oxygen in aqueous medium [J]. Journal of Physical Chemistry, 2016, 120: 2760-2768.
- [32] PAUL R. HOLMES, FRANK K. CRUNDWELL, The kinetics of the oxidation of pyrite by ferric ions and dissolved oxygen; an electrochemical study [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(2): 263-274.
- [33] SALMON S, RATE A, RENGEL Z, et al. Hinz Reactive transport controls on sandy acid sulfate soils and impacts on shallow groundwater quality water resource [J]. Water Resources Research, 2014, 50: 4924-4952.
- [34] BELLI K M, TAILLEFERT M. Geochemical controls of the microbially mediated redox cycling of uranium and iron Geochem[J]. Cosmochim Acta, 2018, 235: 431-449.
- [35] ZHAO L, LI P. Relationship between chamosite alteration and Fe-plugging in sandstone pores during acid in situ leaching of uranium[J]. Minerals, 2021, 11: 497. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11050497>.
- [36] 刘津麟,孟舒,钟平汝,等. 含铀铀尾矿库渗出水处理工艺及工程应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2022, 74(4): 110-114.
- LIU Jinlin, MENG Shu, ZHONG Pingru, et al. Treatment technology and engineering application of thallium contained seepage water from uranium tailings pond [J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2022, 74(4): 110-114.
- [37] 马晋芳,李乾,孙静,等. 某低品位铀矿微生物柱浸试验及其菌群分布规律分析[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(11): 138-143.
- MA Jinfang, LI Qian, SUN Jing, et al. Microbial column pregnant test of a low-grade uranium ore and analysis of its microbial flora distribution [J]. Mining Research and Development, 2021, 41(11): 138-143.
- [38] 刘玉龙,丁德馨,李广悦,等. 沥青铀矿石硫酸和细菌浸出过程的比较研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2012(9): 48-50.
- LIU Yulong, DING Dexin, LI Guangyue, et al. Comparative study on sulfuric acid and bacterial pregnant process of pitchblende ore[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2012(9): 48-50.

(上接第5页)

- [8] 甄文昊,张元生,吕潇,等. 电动铲运机无损智能化改造及应用实践[J]. 有色金属(矿山部分), 2023, 75(2): 13-18.
- ZHEN Wenhao, ZHANG Yuansheng, LYU Xiao, et al. Nondestructive and intelligent transformation and application practice of electric scraper [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023, 75(2): 13-18.
- [9] LI J G, ZHAN K. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment [J]. Engineering, 2018, 4(3): 181-203.
- [10] 杜青炎,任助理,马宏超. 基于改进混合 A * 算法的地下无人铲运机智能路径规划[J]. 有色金属(矿山部分), 2023, 75(2): 1-12.
- DU Qingyan, REN Zhuli, MA Hongchao. Intelligent path planning of underground unmanned LHD based on improved hybrid A * algorithm [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023, 75(2): 1-12.
- [11] 高泽宇,张元清,郭鑫,等. 基于地下铲运机铲斗斗刃位置的工作机构油缸行程解算模型推导及分析验证[J]. 矿冶, 2022, 31(1): 120-125, 130.
- GAO Zeyu, ZHANG Yuangling, GUO Xin, et al. Derivation and analysis verification of stroke solution model of working mechanism oil cylinder based on bucket edge position of underground scraper [J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(1): 120-125, 130.
- [12] 张元清,战凯,郭鑫,等. 基于正逆运动学方程的地下铲运机铲斗斗刃运动轨迹分析[J]. 矿冶, 2021, 30(4): 122-128.
- ZHANG Yuanqing, ZHAN Kai, GUO Xin, et al. Motion trajectory analysis of bucket edge of underground scraper based on forward and inverse kinematics equations [J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(4): 122-128.
- [13] 石宇芃,马宏军. 有色金属矿山智能协同作业系统的一致性控制技术研究[J]. 有色金属工程, 2022, 12(2): 121-127.
- SHI Yupeng, MA Hongjun. Research on consistency control technology of Intelligent collaborative operation system in non-ferrous metal mines [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(2): 121-127.