

# 自动驾驶技术在井下矿用卡车中的应用

Application of Automatic Driving Technology in Underground Mining Trucks

邹龙<sup>1</sup>, 张君<sup>2</sup>, 曾体强<sup>1</sup>, 张东永<sup>1</sup>, 寇永渊<sup>1</sup>, 瞿士文<sup>1</sup>, 李玉哲<sup>2</sup>

(1. 金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌 737100; 2. 长沙施玛特迈科技有限公司, 湖南 长沙 410083)

**摘要:**地下开采矿山无轨车辆的自动驾驶技术一直是影响矿山真正实现自动化和智能化进程的关键一环。本文通过对井下矿用卡车自动化驾驶系统改造使用环境和技术难点进行了分析研究,提出了自动驾驶系统整体设计方案,并对自动驾驶系统应用的关键技术进行研究和讨论,研究结果表明自动驾驶系统线控改造技术、智能感知技术、定位技术、通信技术和矿卡集群调度技术可以很好的解决矿山驾驶人员安全问题和生产效率问题,有力的提升了矿山装备的智能化水平。

**关键词:**自动驾驶技术; 井下矿用卡车; 线控改造; 智能感知; 5G; 集群调度

**中图分类号:** TD529      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-609X(2022)06-0077-06

**Abstract:** The automatic driving technology of underground mining trackless vehicle is always a key link that affects the realization of automation and intelligence in mines. In this paper, based on the analysis and research of the application environment and technical difficulties of the automatic driving system of underground mining trucks, the overall design scheme of automatic driving system is put forward, and the key technologies in the application are studied and discussed. The study results show that the issues of the safety of mine drivers and production efficiency can be solved by the technologies of automatic driving system drive-by-wire upgrading, intelligent perception, positioning, communication and mining truck integrated dispatching, and these technologies also effectively improve the intelligent level of mine equipment.

**Key words:** automatic driving technology; underground mining truck; drive-by-wire upgrading; intelligent perception; 5G; integrated dispatching

## 1 前言

进入21世纪,传统采矿业正在迈入一个信息化、自动化、智能化的崭新的发展阶段。传统采矿存在劳动者密集、资源消耗多、生产效率低、安全性差、污染严重等问题,这都与采矿行业发展速度不相匹配,成为限制我国新常态下的地下采矿行业发展的瓶颈<sup>[1-6]</sup>。在中国现阶段劳动力成本上升的背景下,随着我国人口红利的逐渐消失,采矿业等劳动力密集型行业通过机械替代人工,即机械化率的提升和产业结构的升级来实现成功转型。同时,在“机械化换人、自动化减人”科技强安行动等政策推动下,机械化、自动化、智能化成为改造传统产业、推进产业转型升级、减员增效、提高矿山安全生产的有效途径<sup>[7-9]</sup>。矿用卡车作为重要的井下无轨设备之一,在矿山生产中承担着关键的运输任务,其运转灵

活、效率高、运行时间长、运行成本高。因此,地下矿卡从有人驾驶迈向自动驾驶,实现智能化无人作业是地下矿山运输设备智能化发展的必由之路<sup>[10]</sup>。

20世纪70年代初,国外发达国家在矿山领域开展了矿山车辆自动驾驶相关技术研究,经过近50年的发展,在矿山自动驾驶领域基本形成了较成熟的解决方案。在少数矿山初步实现了自动化和智能化控制,如瑞典北部生产能力为2 200万t/a的地下矿山基律纳铁矿<sup>[11]</sup>,就目前来说,国外发达国家在矿山自动驾驶车辆方面,无论是可行性还是实用性,均走在了前列。国内矿山车辆自动化改造技术由于起步晚,目前在远程驾驶控制、设备自动化和智能化、矿卡制造这几个方面与国外领先的矿卡制造企业还存一定的技术差距<sup>[12]</sup>。国内目前存在的主要问题为控制信号抗干扰能力差,传输信道与井下其他通讯系统往往存在干扰问题影响信号传递效果,感知与监测系统对周围环境的感知及模型重建存在精度低、速率慢等问题。

金川集团股份有限公司是我国最大的有色金属采、选、冶联合企业,在新时代背景下也面临着自动

[作者简介] 邹龙(1972-),男,甘肃金昌人,金川集团股份有限公司二矿区矿长,工程师,从事矿业生产技术管理工作。

[引用格式] 邹龙,张君,曾体强,等.自动驾驶技术在井下矿用卡车中的应用[J].中国矿山工程,2022,51(6):77-82.

化、信息化和智能化升级的压力。在金川集团、金川二矿、中南大学、中国移动、长沙迪迈科技、长沙施玛特迈等国内企业和院校的共同推动下,在二矿区井 1 000 m 运输水平的运输大巷及溜井装卸矿区域建设一套由 3 台 JKQ-25 型号矿用卡车、5G 通信技术、远程驾驶舱、调度系统构成的自动运输系统试点工程,探索我国自主研发的井下矿卡自动化驾驶技术。本文将通过对矿卡运输的现状和自动驾驶技术难点分析,提出适应我国井下环境的矿卡自动驾驶的技术路线,并对关键技术展开分析和讨论。通过矿卡自动驾驶技术研究,实现矿卡自动驾驶和集群调度与监管,一方面大幅降低了成本,同时由于人员无需在井下工作面作业,降低了安全风险。

## 2 矿用卡车运输现状及自动驾驶技术应用难点分析

金川二矿区井下 1 000 m 水平采用 JKQ-25 矿用卡车进行矿石转运工作,具体如图 1 所示,作业期间存在大量噪音、粉尘和尾气,对作业人员的体力和精神消耗很大。目前生产任务的排班形式为共 13 台矿卡,矿卡作业形式为 12 备 1,4 班 2 倒,每班约为 16 人,共计 63 人,其中职工 51 人,劳务 12 人。人员投入较大,同时恶劣的井下作业环境严重影响司机职业健康,12 h 的井下工作时间其体力和注意力消耗也远大于地表作业,疲劳驾驶以及注意力降低等都存在一定的安全隐患,除此之外为确保驾驶员视野,井下矿卡都不具备驾驶室,无防护作业也具有一定的安全隐患。

依据金川二矿生产实际和车辆运输活动范围,针对装矿点、运矿路段、卸矿点、停车点,将整个作业流程划分为远程装矿、运矿、卸矿和停车(加油、维



图 1 JKQ-25 矿用卡车搬运矿石现场图片(修)四大基础场景,每个场景下作业流程如图 2 所示。

根据现场使用要求和当前自动驾驶技术特点,本次井下矿卡自动驾驶技术应用的难点有以下几个方面:

(1)JKQ-25 型矿卡为传统型运输车辆,自身不带遥控驾驶和自动行驶功能,因此需要对转向、刹车、油门、换挡、举升、熄火、驻车制动、前后灯、喇叭等进行线控改装,改造难度较大,需要车辆电气原理熟悉和掌握,而且需支持人工驾驶与自动驾驶并行控制。

(2)自动驾驶技术对通信能力要求较高,需要建设一套覆盖矿卡运输全路径的无线通信网络,满足低时延、高带宽的要求。

(3)适用于井下巷道应用环境的车辆高精度、实时定位技术以及适用于铰接式刚性车辆的运动控制技术。

(4)井下自动驾驶区域安全控制措施,巷道环境的障碍物识别、防碰撞功能设计。

(5)多台矿卡运行自动化集群作业调度功能技术。

## 3 自动驾驶系统整体架构设计

自动驾驶系统通过感知传感器对行驶环境、车、

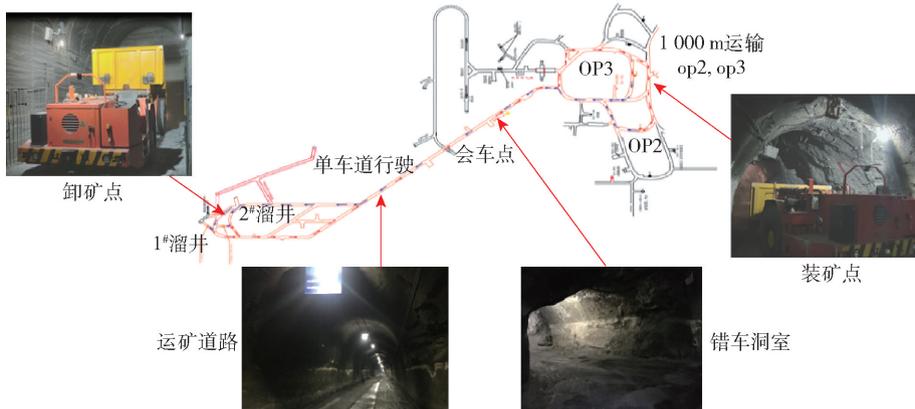


图 2 JKQ-25 矿用卡车运行场景流转示意图

人、车辆位置信息进行感知,将结果发送至车载计算单元,并结合后台调度系统下发的调度任务,由计算中心根据位置和调度指令以及车辆状态,自动生成车辆的行驶轨迹,并将行驶轨迹转化成车辆的控制指令,发送至车辆线控单元,由车辆线控单元将控制指令转化成具体的油门、制动、转向、挡位控制指令驱动车辆线控执行器,从而实现矿卡从起始点到目的地的自动驾驶。

图3所示为金川JKQ-25型矿卡自动驾驶系统整体架构图,自动驾驶系统自下而上可以分为硬件

平台、系统软件、功能软件和应用软件。硬件平台包括激光雷达、毫米波雷达、摄像头、超声波雷达、组合导航等硬件输入。系统软件包括操作系统和中间件,为上层提供调度、通信、时间同步、调试诊断等基础服务。功能软件层包括感知、决策、规划和控制等自动驾驶核心功能的算法。应用软件则包含自动起步、自动循迹、自动泊车、自动跟车、调度管理、故障诊断依据场景实现的功能。硬件平台层、系统软件层和功能软件层共同向上支撑应用软件层功能的实现。

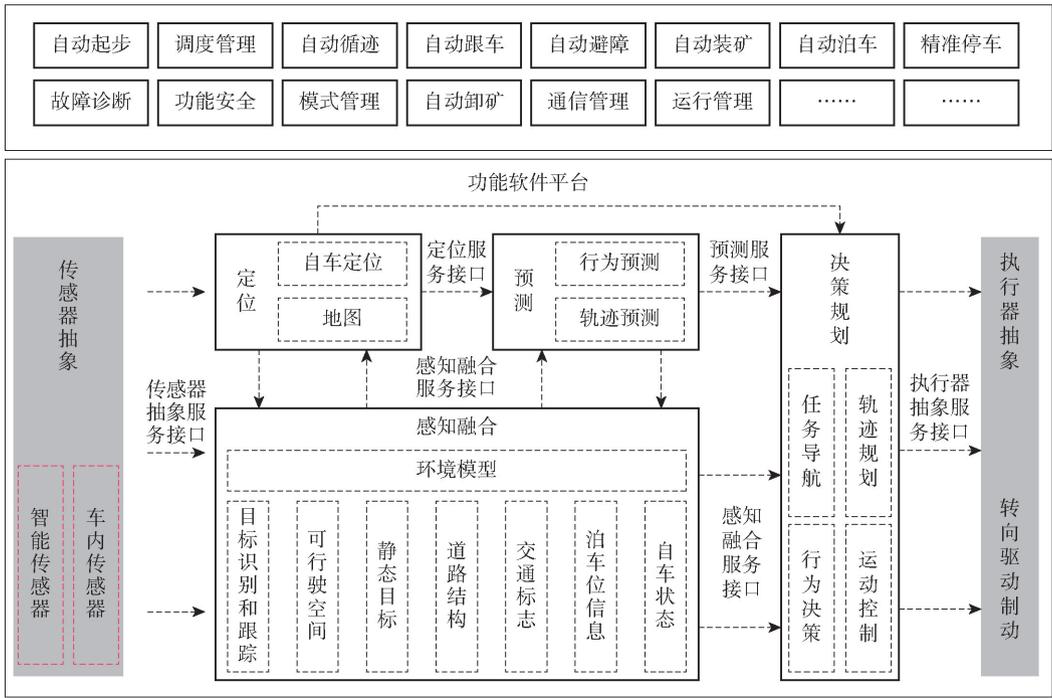


图3 矿卡自动驾驶控制系统架构示意图

## 4 自动驾驶系统应用关键技术研究

### 4.1 智能感知与控制技术

感知、决策、控制是自动驾驶的3个环节,感知环节用来采集周围环境的基本信息,也是自动驾驶的基础。自动驾驶汽车通过传感器来感知环境,主要智能感知设备包括IMU惯导、前向激光雷达、后向激光雷达、前向毫米波雷达、单线激光雷达、360激光雷达、车载计算单元等硬件,具体组成如图4所示。

IMU惯导由陀螺仪、加速度计和磁力计组成,根据位姿算法进行矫正和计算最终为车载计算单元提供高精度可靠的车辆水平/垂直线性速度、加速度、倾斜角、角加速度。

激光雷达包括360激光雷达、前后感知激光雷

达以及单线激光雷达等多重冗余感知,可实现三维高精地图构建,实现厘米级激光点云定位功能;车辆行人等障碍物自动停车避障功能;沿巷道壁路径规划,保持与巷道壁安全距离行驶功能;检测到溜井口距离后,精准停车功能。毫米波雷达可实现探测车距及前车速度,是实现主动刹车、自适应巡航的基础。

车载计算单元是承载车辆的软件系统运行部件,线控单元用于控制车辆油门和刹车等底盘系统。

### 4.2 井下自动驾驶建图与定位技术

封闭环境下,例如矿山井下巷道,可行的定位方案包括UWB、蓝牙、微波等方案。大致都采用地面基站发射信号,移动端接收并通过时延等换算相对于基站的距离,从而换算得到相对位置的技术路线。这类技术主要存在需要布设大量路旁/固定基站带

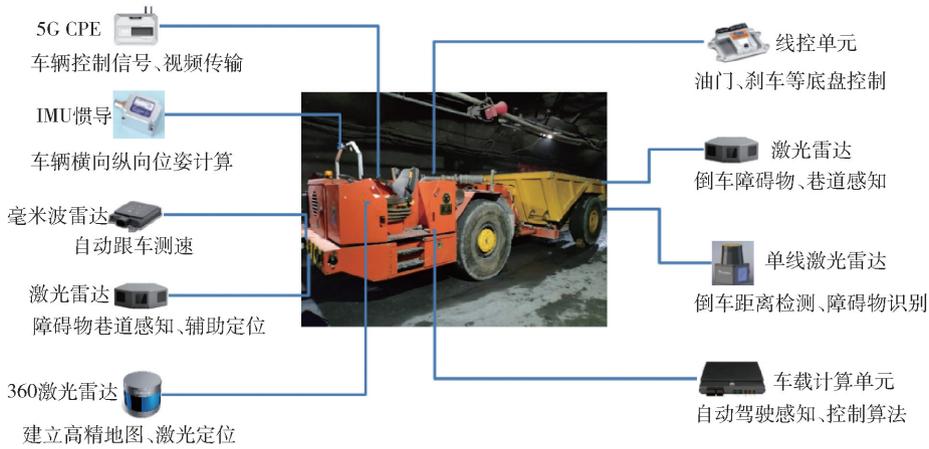


图4 车载智能感知与控制系统构成

来的维护工作量大、变更部署工作量大等问题,同时还存在定位精度不高等问题。基于上述原因,本文提出了同步建图与定位技术,该技术分为以下两步。

1) 地图构建

激光雷达采集自动驾驶汽车周围环境的激光点云数据,自动驾驶计算单元对该数据进行预处理,完成激光点云识别与配准,再通过激光SLAM算法将激光点云拼接,形成定位地图。

2) 激光定位

自动驾驶计算单元通过NDT算法对当前点云数据与高精地图点云数据进行匹配,再结合惯性导航解算和卡尔曼滤波对成功匹配结果和IMU数据进行融合,得到车辆当前位姿和位置,实现车辆定位,具体过程如图5所示。

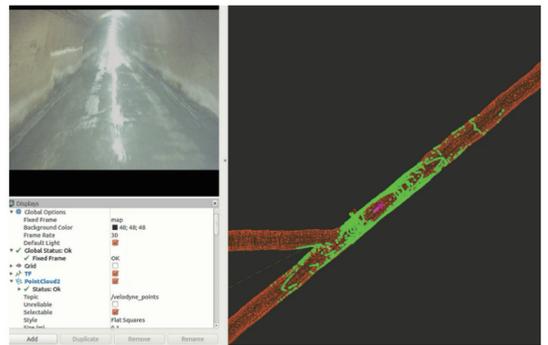


图5 高精度地图激光点云定位

4.3 井下通信技术

金川集团联合中国移动公司在井下1000m巷

道部署5G通信技术,图6所示为5G通信系统建设拓扑图,5G基站部署于井下巷道中,具体部署在装载点、溜井点和运输线路中,在运输线路中按200m间距布置5G基站从而实现井下矿卡作业路线5G无线信号连续覆盖。矿卡远程控制系统将交换机、5G工业CPE、摄像头、车载控制器等核心设备集中

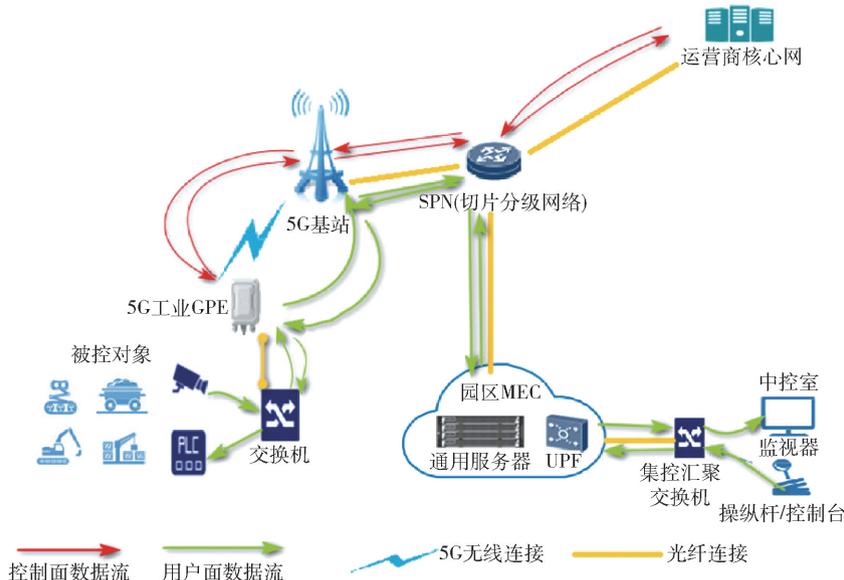


图6 5G通信系统建设拓扑图

部署在卡车上,基于 CPE 实现 5G 网络连接。5G 技术的应用可以为井下矿卡自动驾驶系统提供高带宽(30 ~ 50 Mbps)、低延时(10 ms)和更加可靠安全的通信方式,此外 5G 技术可以为自动驾驶系统提供接入安全的(AKA),网络域安全(IPsec),结合设备认证等机制,安全强度远大于 WiFi(用户鉴权方式)。

#### 4.4 矿卡集群作业调度技术

金川二矿区井下一共 13 台矿卡,完全实现全自动化调度的难度还是非常困难的,依据当前的使用环境和技术水平,采取的是人工调度与自动调度混合应用的方式。无人矿卡调度系统主要包含以下几大功能。

##### 1) 计划录入

通过手工或自动等方式获取矿山月、天、班生产计划,从而为矿卡集群调度提供目标。

##### 2) 人工调度

调度人员可根据矿山情况,实现对井下矿卡任务、目标、路线等的实时指令下达。

##### 3) 自动调度

为最大效率的完成每日生产计划,根据最优化算法、整数规划等方法,动态调度矿卡任务。

##### 4) 数据统计

自动根据矿卡装、卸循环过程中的数据信息,统计矿山生产完成量、完成比、效率、故障、能耗等指标。

##### 5) 会车调度

由于地下矿山环境特殊,会车地数量少且固定,因此优秀的会车调度策略是提高自动驾驶效率的重要因素。根据金川二矿实际,会车调度流程如图 7 所示。

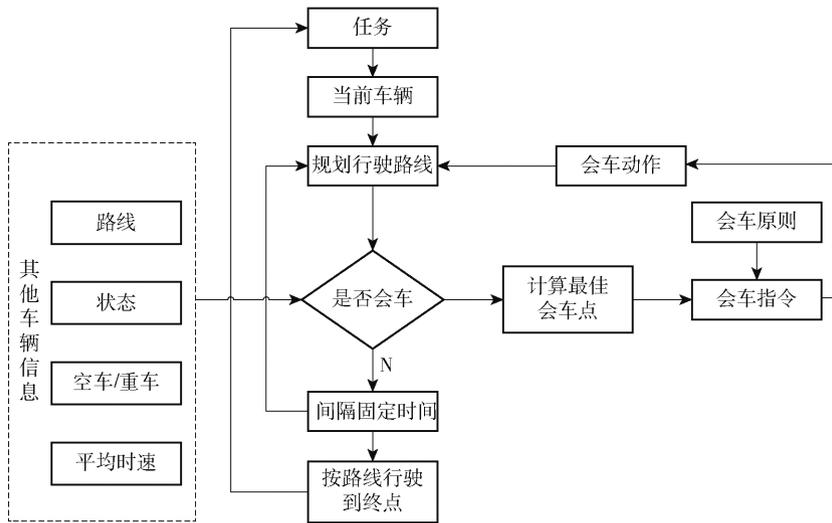


图7 井下矿卡会车调度流程

## 5 金川二矿井下自动化驾驶矿卡应用效果讨论

金川二矿井下自动化驾驶矿卡的应用是我国矿山首次对井下运输矿卡开展的一次有意义的探索,完全采用国内自主知识产权技术,这对于井下其他无轨设备如铲运机、凿岩台车、装药台车具有很好的借鉴价值。

金川二矿通过对矿卡自动驾驶集群控制系统及装备研制与部署,实现了在调度系统智能调度指挥、1个驾驶舱监控、3台自动驾驶矿卡的全作业流程自动化,并实现了自动发车、自动运行、远程装矿、自动卸矿、自动收车在内各环节高效、安全运行目标,提高了矿山设备的智能化程度。

矿卡在地表驾驶人员远程监控下,在井下全作业过程的自动运行,操作人员不进入工作面,杜绝了安全风险,改善人员工作环境,大大降低人员劳动强度;大大减少了人工误操作现象,也不会出现因疲劳导致工作效率下降的情况,实现无人则安,提高了矿卡运行的安全与可靠性。

矿卡自动驾驶集群控制系统的应用,可以提高矿山开采的整体效率,降低能耗以及设备损耗,并且节省人工成本。矿山有人作业中,一台采矿设备需要配备三名司机,以自动驾驶代替工人井下操作,可以一人控制多台设备,大幅度降低运营成本,提高生产效率。

当然在使用的过程中也存在着如设备稳定性不

够、采矿工艺与自动驾驶技术之间匹配度不高、自动驾驶速度慢等问题,而这也促使整个行业对这些问题进一步思考和改进。例如在新建区域或者新建矿山在做开采设计时是否把自动驾驶相关技术要求纳入到采矿设计当中去,设计尺寸更大的巷道或采场、溜井位置更加集中、巷道转弯半径更加适合自动驾驶车辆行驶等。

## 6 结论

本文通过对金川二矿井下 1 000 m 巷道运输矿卡的自动化驾驶系统改造与应用技术开展了分析、研究和讨论,主要研究结论如下:

(1)金川二矿区通过建立无人矿卡智能调度系统,实现对井下无人矿卡的集群调度,真正实现矿卡运输的无人化,打造我国首座 5G + 矿卡自动驾驶矿山,具有非常好的示范意义。

(2)通过对传统的 JKQ-25 型矿卡的详细的研究分析,设计了矿卡线控系统,对矿卡进行了完全意义上的线控改装,而非采用机械臂、推杆等,确保了线控改造后的性能满足自动驾驶要求,同时保证了线控改造后系统的可靠性。

(3)在线控改造基础上,通过加装激光雷达、摄像头、自动驾驶控制器以及 5G 通信设备,使矿卡具备了整车自主定位、行车区域障碍物自动检测与响应系列功能,极大的提高了矿卡在运行过程中的安全保障。

(4)远程驾驶技术在井下矿卡上的成功应用,大幅提高了矿卡等运输系统的自动化、信息化水平,加快了矿山装备自动化、信息化建设速度,为智能化

矿山建设奠定了扎实的基础。

### [参考文献]

- [1] 古德生. 开启矿业信息化的大幕 演绎矿业现代化的未来——矿业信息化智能化专业委员会成立会上的发言[J]. 金属矿山, 2014(12): 1-2.
- [2] 于润沧. 现代矿山工程设计理念诠释——献给中国有色工程设计研究总院建院 65 周年[J]. 中国矿山工程, 2018, 47(4): 1-3.
- [3] 丁震, 孟峰. 矿用无人卡车国内外研究现状及关键技术[J]. 中国煤炭, 2020, 46(2): 42-49.
- [4] 古德生. 地下金属矿采矿科学技术的发展趋势[J]. 黄金, 2004(1): 18-22.
- [5] 王李管, 陈鑫. 数字矿山技术进展[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(8): 1693-1710.
- [6] 李国清, 王浩, 侯杰, 等. 地下金属矿山智能化技术进展[J]. 金属矿山, 2021(11): 1-12.
- [7] 赵鹏, 骆军军, 冯金庆. 龙首矿电机车无人驾驶系统 5G 网络构建与优化[J]. 矿山机械, 2021, 49(9): 17-23.
- [8] 王国法, 杜毅博. 德国工业 4.0 与中国煤机装备智能制造的发展[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 1-9.
- [9] 杨百顺, 赵德凯, 周宏磊. “新基建”概念及 5G 技术在采矿设备中的应用[J]. 化工矿物与加工, 2020, 49(12): 38-40.
- [10] 汪玥玢. 矿山无人驾驶技术及发展前景分析[J]. 黄金, 2020, 41(3): 48-50.
- [11] 文兴. 基律纳铁矿智能采矿技术考察报告[J]. 采矿技术, 2014, 14(1): 4-6.
- [12] 王洛锋, 徐青松, 李学现, 等. 地下金属矿无人驾驶电机车多目标调度优化与应用[J]. 中国铝业, 2022, 46(4): 19-27, 39.