

# 煤矿无轨辅助运输无人驾驶关键技术与发展趋势研究

袁晓明, 郝明锐

中国煤炭科工集团太原研究院有限公司

## 摘要

首先, 通过对比国内外矿山无人驾驶技术发展现状和我国煤矿智能化发展现状, 指出我国煤矿井下无轨辅助运输智能化和无人化的发展水平相对落后, 已经成为煤矿智能化建设的技术瓶颈和主要短板。其次, 结合煤矿爆炸性环境安全要求和井下封闭受限空间的特点, 系统分析了同步定位与地图构建技术, 辅运巷道环境内的路径规划和主动避障技术, 矿井环境高速低延迟无线通信技术等煤矿井下无人驾驶关键技术的应用特点, 指出可覆盖井下路网的通信定位网络, 多传感器融合同步定位与地图构建技术, 煤矿专用路径规划算法是无人驾驶技术在煤矿井下应用的关键。最后, 根据井下人员运输、物料配送和特种作业3大煤矿辅助运输任务, 提出了建设由人员智能通勤系统, 井下物料自动配送系统和特种作业远程操控系统组成的智能无轨辅助运输系统的发展目标。

**关键词:** 无轨辅助运输; 无人驾驶; 煤矿智能化; 无线通信; 路径规划

煤矿辅助运输系统是整个煤炭生产体系中的关键环节, 其技术水平和作业效率, 直接关系到煤矿生产减人增效目标的达成。无轨辅助运输系统主要采用防爆无轨胶轮车作为运载工具, 利用车辆机动灵活的特点, 点对点地完成井下运输作业, 其优势是安全性高、井下用工少、运行成本低。据统计, 我国产能排名前100的煤矿中, 采用无轨辅助运输的达73家, 产量为5.48亿t。全国范围使用无轨辅助运输的矿井占全国矿井总数的比例不到10%, 但产量却占全国总产量的25%<sup>[1]</sup>, 说明无轨辅助运输对高产高效现代化矿井建设意义重大。

当前我国煤炭开采已逐步从机械化、自动化向智能化方向迈进, 智能化矿山、无人化矿井的发展目标已经成为行业共识。随着采掘活动的无人化, 煤矿辅助运输成为了制约煤矿无人化的瓶颈, 且是井下零星事故的多发环节, 辅助运输系统亟须往标准化、智能化、无人化方向发展<sup>[2-3]</sup>。2019年国家煤矿安监局颁布了煤矿机器人重点研发目录, 明确提出了井下无人驾驶运输车辆研发需求<sup>[4]</sup>。无人驾驶技术在矿区环境内率先落地具有独特的优势: ①矿区厂内作业环境封闭, 无上牌照要求; ②矿区道路结构简单、循环往复, 运输路线相对固定; ③行驶速度相对较低, 最大

基金项目: 山西省重点研发计划资助项目(201803D121121); 中煤科工集团科技创新重点资助项目(2018-TD-ZD011); 山西天地煤机青年资助项目(M2020-QN08)

作者简介: 袁晓明(1975—), 男, 河北赞皇人, 副研究员, 硕士。E-mail: emyxm@126.com

通讯作者: 郝明锐(1985—), 男, 山西太原人, 助理研究员, 硕士。E-mail: haomingrui@163.com

不超过40 km/h；④矿区用工成本日益增加，招工难问题已经凸显，矿企有“机器换人”的意愿和动力。但是，无人驾驶技术在煤矿辅助运输领域的应用，受井下环境和产业规模限制，关键技术无法照搬地面系统，外加煤矿和设备制造厂家无人驾驶技术方案多样，行业发展趋势判断不明，造成发展不成规模，技术研究散乱不成体系，重复研究现象突出，亟需系统研究解决方案。

## 1 矿用车辆无人驾驶技术发展现状

### 1.1 国内外矿山无人驾驶技术发展现状

早在20世纪八九十年代，智能矿山概念、无人驾驶矿卡、远程遥控操作等先进技术和理念就在矿业发达国家开始了应用研究。目前诸多技术成果已经投入实际生产，创造了巨大经济效益。日本小松公司生产的无人驾驶矿卡已在全球6座矿山投入运行，总数超过100台，累计运输物料15亿t；美国卡特彼勒集团在索罗门矿区进行无人驾驶卡车集群化作业，车队规模已增至59台，累计运量超过2.4亿t，是世界单一矿区规模最大的无人车队，与同类普通车队相比，生产力提高20%，且有效提高了生产安全系数；澳大利亚北帕克斯矿山，2015年起实现了井下采矿作业100%自

动化，全年不间断运行，年产6万吨铜金属量，作业时只需6名工作人员；智利的埃尔特尼恩特矿山采用无人运输和驾驶系统带来了138%的产量增长，节省了可观的人员维护和培训资金；沃尔沃公司生产的无人矿卡2016年在瑞典克里斯汀堡矿投入使用，实现了在深度约1 320 m的矿井内自主运送岩石和其他材料（图1a）；山特维克公司2020年9月发布了井下无人驾驶铲运机（图1b），其采用无驾驶室设计，具备环境感知、路径规划、自动驾驶、自主铲运等功能，并在作业过程中同步构建环境三维数字地图，实时虚拟再现井下作业场景（图1c）。

国内参与矿山智能运输装备研究的企业和机构日益增加，主要有：以国家能源投资集团有限责任公司为代表的大型采矿企业；以内蒙古北方重型汽车股份有限公司、中国中车股份有限公司为代表的矿用车辆生产企业；以丹东东方测控技术股份有限公司、长沙迪迈数码科技股份有限公司为代表的数字矿山装备企业；以北京踏歌智行科技有限公司、上海西井信息科技有限公司、青岛慧拓智能机器有限公司（慧拓智能）为代表的智能驾驶创业公司。目前部分技术成果已投入实际应用：在洛阳栾川钼业集团股份有限公司三道庄矿区，实现了开采到运输环节的远程遥控和无



(a) 沃尔沃无人驾驶卡车



(b) 山特维克无人驾驶铲运机



(c) 井下作业场景的实时三维数字化再现



(d) 慧拓智能的无人矿卡在露天煤矿投入运营

图1 国内外矿山无人驾驶技术的应用实例

人驾驶，每年节约人工成本1 200万元左右；由慧拓智能主导的全国首个露天煤矿无人化运输系统在中国大唐集团内蒙古宝利煤炭有限公司实际营运，实现在封闭式矿区内矿石的自动装载、无人化运输、智能调度和远程接管等作业（图1d）。但是，目前国内相关研究和应用主要集中在与地面环境更为接近的露天矿山环境，而在占全国煤炭产量80%以上的井工型煤矿，无人驾驶车辆技术的实际应用尚属空白。

## 1.2 煤矿辅助运输装备智能化发展现状

我国从20世纪80年代开始，在引进国外先进技术的同时，逐步研制煤矿辅助运输机械化设备，研制生产了具有独立知识产权、自主开发的多种型号和规格的井下运人、运货和特种作业的防爆车辆，在神东、宁煤、晋煤、中煤等大型煤炭企业推广使用。据统计，当前国内使用无轨运输车辆的煤矿超过700余处，使用数量超过15 000台。经过十几年的发展，在防爆电喷柴油发动机技术、交流变频调速技术、防爆动力电池技术、矿用车载数据采集、故障诊断及监控技术等领域都有所突破，形成了较完备的无轨辅助运输装备体系及配套工艺技术<sup>[5]</sup>，如图2所示。

在防爆车辆智能化技术方面，突出表现在微机控制、嵌入式系统、通信技术等的广泛应用，实现了车辆智能保护、车辆姿态监测和行车信息存储、自动灭火、主动防撞、车辆定位、无线通信、智能调度与管理等功能。借助物联网技术，无轨辅助运输车辆正在向具备联网、调度、监控的高级辅助驾驶、遥控驾驶、自动驾驶等方向发展。同煤集团塔山煤矿建立的无轨胶轮车智能调度管理系统，采用基于UWB的煤矿井下定位技术，将基站定位精度由原来的200 m提升至0.3 m，可根据井下人员发出的用车申请及位置信息，给距离最近的车辆发出用车指令，实现了“井下网约车”，使运输效率提高了20%<sup>[6]</sup>。近年来，随着防爆电喷柴油机技术的应用、防爆电驱车辆技术的成熟，为无人驾驶技术在煤矿无轨辅助运输领域的应用提供了必要的装备基础。但当前防爆车辆普遍存在可靠性差、故障率高、种类繁多等问题，主要车型仍以机械和液压传动为主，无人驾驶所必须的防爆智能传感器和防爆电液比例阀等关键元部件缺失，导致无人驾驶车辆在煤矿井下的实际应用尚有距离。

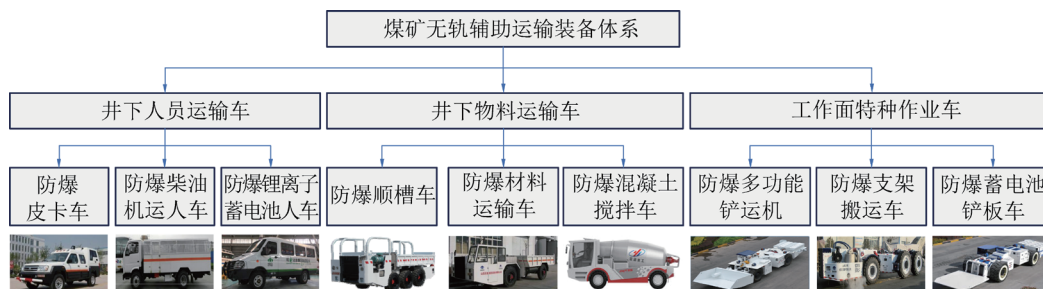


图2 煤矿无轨辅助运输装备体系架构

## 2 煤矿辅助运输车辆无人驾驶关键技术

同地面道路和露天煤矿的应用场景相比，无人驾驶车辆技术在煤矿井下应用有其特殊性和复杂性，主要表现在：①煤矿井下属于全球定位系统的拒止环境，地面常用的GPS+惯性导航模式不再适用，确定可用于深部地下空间内的精确定位及导航方法是无人驾驶技术在煤矿井下应用的前提和基础；②无人驾驶

车辆的车载传感元件和电气部件均需进行防爆设计；③煤矿井下辅运巷道长达十几公里，多转角、有分支和岔路，巷道会随着井下开采作业动态延伸、甚至发生形变，且难以保证运行线路上无人员或其他设备出现，对无人驾驶车辆的路径规划及避障能力要求较高；④煤矿井下环境照度低、粉尘大、电磁干扰现象严重，影响传感设备的探测精度和探测范围，对环境



感知系统的鲁棒性和穿透能力提出了更高的要求；⑤在煤矿井下布置无人驾驶所需的，符合防爆要求的，覆盖整个辅运路网的低延迟、高带宽无线通信网络的成本较高，且巷道环境对井下基站系统的稳定性、可靠性和适应能力提出了挑战；⑥煤矿辅助运输车辆种类繁多，大小、吨位、车体结构、动力形式等差异较大，以机械和液压传动为主，对现有设备进行线控改造的难度较大。针对上述问题，辅运装备生产厂家和相关的科研院所，利用物联网、机器人技术和人工智能等领域的最新研究成果，提出了煤矿井下同步定位与地图构建技术，辅运巷道环境中路径规划和主动避障技术，矿井环境高速低延迟无线通信技术等关键技术，对无人驾驶技

术在煤矿井下的应用进行了积极探索。

## 2.1 煤矿井下同步定位与地图构建技术

同步定位与地图构建（Simultaneous Localization and Mapping, SLAM）技术将自主地图创建和自身定位二者相结合，一方面依靠已创建的地图信息进行自身定位，另一方面根据定位结果对地图进行滚动更新和优化<sup>[7]</sup>。该技术被广泛应用于移动机器人在未知环境和封闭空间内的定位导航，近年来也开始用于煤矿井下设备的自主定位。根据采用传感器类型的不同，主要分为激光SLAM、视觉SLAM和毫米波SLAM技术，其特点对比见表1。

表1 3种煤矿井下同步定位与地图构建技术路线的特点对比

技术类型	传感设备	数据类型	设备成本	技术成熟度	优势	劣势
激光 SLAM	多线激光雷达	激光点云数据	高	高	视野范围广、响应快、可靠性高、无累计误差、技术相对成熟。	硬件成本高、数据类型单一、环境信息标注与分类工作耗费大量人力、算力。
视觉 SLAM	RGB-D 相机	图像和深度数据	低	中	结构简单、硬件成本低、信息丰富，可提取环境语义信息。	视角和视野有限、易产生累计误差需进行回环检测，对光线变化敏感。
毫米波 SLAM	毫米波成像雷达	毫米波点云数据	中	低	探测器对井下环境的适应性好、数据计算量小、探测实时性好。	所获取的点云数据较为稀疏，探测结果的可靠性和鲁棒性有待验证。

**1) 激光SLAM技术。**激光SLAM利用激光雷达可高速精确地捕获障碍物距离信息的特点，在地面无人驾驶车辆中大量使用，在煤矿井下巡检机器人、自动梭车中也有应用<sup>[8-9]</sup>。但其缺点是数据类型单一，无法提取环境语义信息，获取的环境信息需要进行人工标注，且多线三维激光雷达成本较高，在复杂路况环境下容易损坏等，这会限制其在矿区环境中的推广应用。

**2) 视觉SLAM技术。**视觉SLAM利用视觉传感器实时获取运行环境的图像信息，通过提取图像特征点，在相邻两帧图像中进行匹配计算，确定摄像头的姿态变化，实现自主定位的同时构建环境地图<sup>[10-11]</sup>。文献[12]提出了一种煤矿井下移动机器人深度视觉自主导航方法：通过车载RGB-D相机实时获取运行环境的彩色图像和深度信息，对相邻两帧图像进行特征提取和匹配，并利用图优化理论构建与求解机器人的实时

定位与建图问题。

**3) 毫米波SLAM技术。**无论是激光雷达还是摄像头在煤矿井下使用都面临着辅运巷道内粉尘大、照度低、湿度大、路面颠簸等问题，尤其是在经过防爆改造后，传感器的探测精度和探测结果的可靠性都面临着巨大的挑战。毫米波雷达具有鲁棒性好、穿透能力强、不易受环境变化影响等特点，适宜作为煤矿井下无人驾驶车辆的环境感知设备。文献[13]提出了采用毫米波成像雷达作为传感器的自主定位导航方案，采用深度学习算法对毫米波稀疏点云进行配准、滤波、降噪、稠密化等处理，再利用SLAM算法构建全局环境地图实现自主定位。

**4) 感知融合SLAM技术。**鉴于煤矿井下环境的特殊性和复杂性，笔者认为在当前的技术条件下，采用单一环境感知设备的同步定位与地图构建技术难以满

足辅助运输车辆无人驾驶的安全性要求,而采用多传感器融合的SLAM自主感知定位,加之覆盖辅运路网的无线通信定位,二者形成的组合定位方法才能满足无人驾驶车辆在煤矿井下运行的定位精度和实时性要求。文献[14]提出了采用平面激光雷达和深度相机等多传感器融合的SLAM自主定位方法,结合UWB无线通信定位技术,以相对较低的设备成本实现煤矿井下的精确定位。

## 2.2 辅运巷道环境内的路径规划和主动避障技术

无人驾驶车辆的路径规划是指在具有障碍物的环境中,按照一定评价标准,寻找一条从起始状态到目标状态的无碰撞路径,一般分为全局路径规划和局部路径规划。同地面车辆的行驶环境相比,煤矿辅运巷道具有运输环境封闭、路况相对单一、最大双车道等优势,但又存在路面起伏多、有坑洼积水、环境照度低、具有直角弯道、空间狭窄、标志标线等特征点稀缺、部分巷道断面不规则等特殊工况。无人驾驶辅运车辆的全局路径规划需要利用已知的井下巷道数字地图,根据运输任务,按照路径长度最短、能量消耗最少和车辆安全性最高等原则,采用适宜的全局路径规划算法,快速合理地规划一条全局最优路径<sup>[15-17]</sup>。

考虑到煤矿井下巷道并不是完全封闭的作业环境,会有人员或设备等障碍物临时出现在运输线路上,且巷道会随着采掘作业推进而动态延伸,在受地压影响下巷道会发生变形影响车辆的通过,必须通过局部路径规划来动态生成车辆的实际运行线路,以达到主动避障、安全行车的目的。无人驾驶辅运车辆的局部路径规划是在全局最优路径指导下,依据感知设备采集的环境信息,生成未来一段时间内车辆所要实际运行的路径轨迹。所规划出的局部路径需要充分考虑防爆车辆的结构特点、满足车辆的运动学约束条件。

文献[12]使用八叉树数据结构存储由车载深度相机获取的点云数据,并将其转化为Octomap地图,用于井下移动机器人的运动规划。文献[14]提出了一种煤矿辅助运输机器人的路径规划方法:全局路径规划采用启发式搜索的A\*算法,首先构建作业范围的栅格

地图,再根据路径最短原则规划出全局期望路径;局部路径规划则采用DWA算法,计算出机器人在多种速度条件下的运动轨迹,从中选取最优轨迹所对应的速度来驱动机器人运动。文献[18]提出了一种基于混合蚁群—蜂群算法的,面向煤矿井下局部复杂空间的三维路径规划方法。文献[19]提出了一种基于模糊控制的井下移动机器人智能视觉避障方法。上述方法都是对无人驾驶装备实现在煤矿井下自主路径规划和安全运行的有益探索,但大部分算法尚处于仿真测试阶段,其对煤矿辅运巷道环境的适应性有待验证。鉴于煤矿井下环境的复杂性和特殊性,笔者认为难以用一种路径规划方法适应所有矿井条件,必须针对特定矿井、不同种类的辅运车型,制定相应的规划算法和控制策略以保障无人驾驶车辆在煤矿井下的安全高效运行。

## 2.3 矿井环境高速低延迟无线通信技术

在煤矿井下布置可覆盖整个辅运路网的高速低延迟无线网络,有助于构建井下车联网系统,实现辅助运输车辆间的数据交互V2V (Vehicle-To-Vehicle),以及车辆与井下各种设备、人员和基础设施间的信息共享V2X (Vehicle-To-Everything),从根本上保证无人驾驶车辆在辅助运输巷道内的安全高效作业<sup>[20]</sup>。第5代移动通信技术(5G),具有传输速率高、时延小、可靠性高、容量大等优点。2020年7月,国家矿用产品安全标志中心按照新产品审核发放模式,发放了我国第1个煤矿5G通信系统安全标志准用证。但该系统仅是对地面5G产品进行了防爆改造,并没有针对煤矿井下环境进行研发设计,当前只能用于矿井的语音通信和视频图像传输<sup>[21]</sup>,与真正的矿用5G系统尚有距离,无法满足井下无人驾驶车辆的使用需求。

文献[22]指出:矿井宽带无线通信系统除应满足传输速率高、时延小、并发数量大、可靠性高、性价比高等要求外,还应满足以下特殊要求:①需覆盖煤矿井下长达10余千米的巷道;②无线发射必须为本质安全型防爆;③无线工作频段不宜过高;④无线传输宜具有一定的绕射能力;⑤抗干扰能力强;⑥对移动

性要求较低<sup>[13]</sup>。针对煤矿井下安全要求和特殊工况，开发矿用5G系统是无人驾驶技术在煤矿井下实际应用的工作重点和难点。

应用以上关键技术，山西天地煤机装备有限公司生产的3种防爆无人驾驶测试车（图3），通过搭载激光雷达、摄像头和毫米波雷达、电液控制、传感元件等，结合5G或WiFi高速通讯技术，GPS和UWB定位技术，实现了地面工业广场到井下巷道的无人自动驾驶功能，并进行了现场测试。

### 3 煤矿无轨辅助运输系统的发展方向

煤矿辅助运输系统可分为人员运输、物料运输和特种作业3类，为适应煤矿智能化、无人化的发展要求，煤矿智能无轨辅助运输系统精简运输装备种类，减少井下人员数量，提高辅助运输效率后可以归纳为人员智能通勤、物料自动配送和特种作业远程操控3种系统，如图4所示，可实现煤矿井下辅助运输的标准化、模块化和少人化。



图3 山西天地煤机装备有限公司生产的防爆无人驾驶技术验证车在煤矿井下试运行

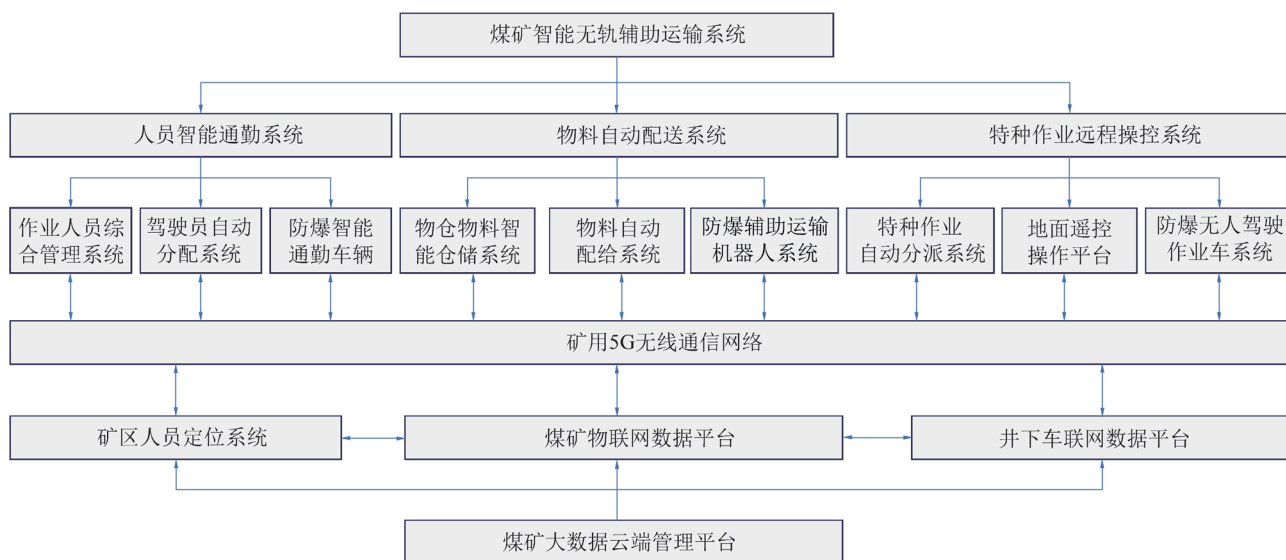


图4 煤矿井下智能无轨辅助运输系统架构

#### 3.1 人员智能通勤系统

人员智能通勤系统由作业人员综合管理系统、驾驶员自动分配系统和防爆智能通勤车辆组成。该系统可根据井下作业任务和用车需求自动完成用工分配、车辆调度、人员接送等任务（图5）。作为该系统的运输工具，防爆智能通勤车将当前的十几种不同种类和形式的防爆运人车型进行优化，形成由9座和19座

防爆通勤车为主的装备体系。该车型配备有高级辅助驾驶系统，可根据作业任务自动获取人员位置和目的地信息，帮助驾驶人员自动完成路线规划、自动驾驶和人员接送等工作。出于人员安全角度考虑，防爆智能通勤车辆仍需配备专职驾驶人员，负责随车监控车辆行驶情况，并可根据需要进入人工驾驶模式，接管车辆控制权，保证人员运输安全。



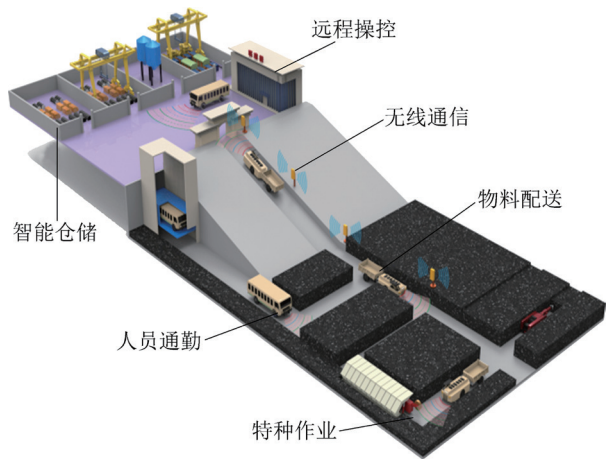


图5 煤矿井下智能无轨辅助运输系统模型

### 3.2 物料自动配送系统

物料自动配送系统主要由物料智能仓储系统、物料自动配给系统和防爆辅助运输机器人系统组成，可实现煤矿生产所需物料的智能仓储、自动装卸、寄售管理、自动结算和精确配送等功能，是一个完全自动化和无人化的物料运输系统，其作业流程如图6所示。

作为该系统的主要运载设备，防爆辅助运输机器人采用标准化、模块化设计，将辅运车辆的行走、装载等基本功能划分为各自独立的单元模块，可根据不同作业需求进行组合，完成不同的运输任务。该机器人主要由通用动力底盘和系列化、标准化的可换上装

载具组成：通用动力底盘是机器人的行走装置，集成了防爆电驱线控系统和自动驾驶系统等功能模块，具备环境感知、自主定位、路径规划和自动行走等功能；可换上装是机器人的承载容器和执行机构，可根据不同的运输任务进行快速换装，实现井下物料的标准化装载和无人化配送。

### 3.3 特种作业远程操控系统

煤矿智能无轨辅助运输系统的另一项重要任务是完成井下巷道路面的浮煤清理、设备装卸以及综采设备的搬家倒面等特种作业。此类作业的特点是工作环境恶劣、工序较为复杂、劳动强度较大、作业随机性高、难以形成标准化的作业流程，而且涉及的装备种类较多、价格昂贵、多为专用设备。特种作业远程操控系统是对现有的防爆特种作业车辆进行无人化技术改造，使其能够根据作业任务，自主到达工作地点，具备自动完成简单铲运作业的能力。而对于复杂的井下特种作业，如综采设备的搬家倒面工作，则由操作人员通过远程遥控平台在地面完成，以到达减少井下人员数量、降低作业人员劳动强度的目的，其操作流程如图7所示。

## 4 结 论

1) 通过研究国内外矿山无人驾驶技术现状和煤

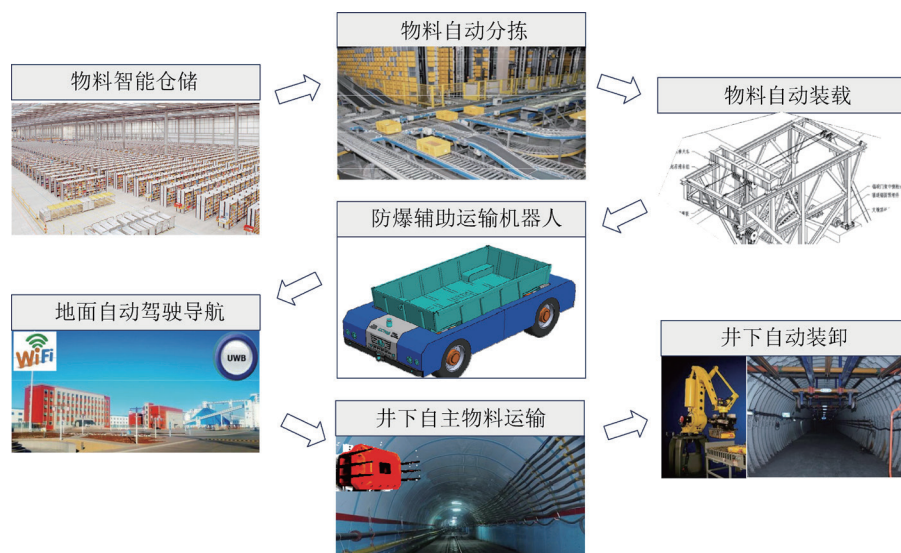


图6 煤矿井下物料自动配送流程



图7 特种作业远程遥控操作流程

矿辅助运输车辆智能化发展水平，指出与露天矿山无人驾驶技术已经开始工程应用并产生了一定经济效益的情况相比，我国井工煤矿无轨辅助运输的智能化和无人化水平还相对较低，已经成为了制约煤矿智能化建设的瓶颈和短板。

2) 分析了无人驾驶技术在煤矿无轨辅助运输领域应用的复杂性和特殊性，总结了煤矿井下同步定位与地图构建技术，辅运巷道环境内路径规划和主动避障技术，矿井环境高速低延迟无线通信技术等关键技术的特点和研究现状，指出多传感器融合的SLAM定位技术，针对不同矿区和设备制定专用的路径规划算法、构建可覆盖井下路网的矿用无线通信网络是无人驾驶技术在煤矿辅助运输中应用的关键。

3) 智能化是煤矿无轨辅助运输发展的必然趋势。提出了建设以矿用无线通信、定位技术和无人驾驶车辆技术为支撑，构建由人员智能通勤系统、物料自动配送系统和特种作业远程操控系统组成的智能无轨辅助运输系统的发展目标。

■ 责任编辑：朱恩光

## Key technology and development trend of mine auxiliary transport autonomous vehicle

YUAN Xiaoming HAO Mingrui

**Abstract:** Firstly, by introducing the development status of driverless technology in mines at home and abroad and comparing with the current status of intelligentized coal mines in China, it is pointed out that the development level of intelligentized and unmanned trackless auxiliary transportation in underground coal mines in China is relatively backward, which has become the technical bottleneck and main shortcoming of intellectualized coal mine construction. Secondly, Application and research status quo of the key technology in coal mine underground unmanned characteristics, including simultaneous localization and mapping (SLAM) technology, auxiliary transport roadway environment and active obstacle avoidance path planning technology, the mine environment high-speed low latency wireless communication technology, is analyzed systematically by combination with the field of explosive environment safety requirements and characteristics of underground closed limited space. It is pointed out that the key to the application of driver-less technology in underground coal mine is to construct the communication and positioning network covering underground road network, the synchronous positioning and map building technology of multi-sensor fusion, and the special path planning algorithm of coal mine. Finally, based on the three major tasks of mine auxiliary transportation system: personnel transportation, material distribution and underground operation, the development goal of the construction of intelligent trackless auxiliary transportation system is proposed, which was composed of three subsystems: mine personnel intelligent transportation system, underground materials automatic distribution system and underground operation remote control system.

**Key words:** mine auxiliary transportation; autonomous driving technique; intelligent coal mine; wireless communication; path planning

Taiyuan Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group





## 参考文献

- [1] 张彦禄,高英,樊运平,等.煤矿井下辅助运输的现状与展望[J].矿山机械,2011,39(10):6-9.
- [2] 葛世荣,胡而已,裴文良.煤矿机器人体系及关键技术[J].煤炭学报,2020,45(1):455-463.
- [3] 陈杨阳,霍振龙,刘智伟,等.我国煤矿运输机器人发展趋势及关键技术[J].煤炭科学技术,2020,48(7):233-242.
- [4] 国家煤矿安全监察局.煤矿机器人重点研发目录[R].北京:国家煤矿安全监察局,2019.
- [5] 袁晓明.煤矿无轨辅助运输工艺和发展方向研究[J].煤炭工程,2019,51(5):1-5.
- [6] 中国煤炭报.同煤集团智能化矿井建设:井下也有“网约车”[N].2020-10-09(2).
- [7] 梁明杰,闵华清,罗荣华.基于图优化的同时定位与地图创建综述[J].机器人,2013(4):118-130.
- [8] 杨林,马宏伟,王岩,等.煤矿巡检机器人同步定位与地图构建方法研究[J].工矿自动化,2019,45(9):18-24.
- [9] VASILIS Androulakis, JOSEPH Sottile, STEVEN Schafrik, et al. Concepts for development of autonomous coal mine shuttle cars[J]. IEEE Transaction on Industry Application, 2020, 56(3): 3272-3280.
- [10] MUR-ARTAL R, TARDOS J D. ORB-SLAM2: an open-source slam system for monocular, stereo and RGB-D cameras[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(5): 1255-1262.
- [11] LI Dongjiang, YANG Wei, SHI Xuesong, et al. A visual-Inertial localization method for unmanned aerial vehicle in underground tunnel dynamic environments[J]. IEEE Access, 2020, 8: 76809-16822.
- [12] 马宏伟,王岩,杨林.煤矿井下移动机器人深度视觉自主导航研究[J].煤炭学报,2020,45(6):2193-2206.
- [13] 陈先中,刘荣杰,张森,等.煤矿地下毫米波雷达点云成像与环境地图导航研究进展[J].煤炭学报,2020,45(6):2182-2192.
- [14] 袁晓明,郝明锐.煤矿辅助运输机器人关键技术研究[J].工矿自动化,2020,46(8):8-14.
- [15] 龚建伟,刘凯,齐建永.无人驾驶车辆模型预测控制[M].2版.北京:北京理工大学出版社,2020.
- [16] 朱大奇,顾明重.移动机器人路径规划技术综述[J].控制与决策,2010,25(7):961-967.
- [17] 马军,宋栓军,韩军政,等.融合蚁群-A\*算法的移动机器人路径规划[J].西安工程大学学报,2020,34(1):72-77.
- [18] 谭玉新,杨维,徐子睿.面向煤矿井下局部复杂空间的机器人三维路径规划方法[J].煤炭学报,2017,42(6):1634-1642.
- [19] 彭继国,张波,孙凌飞,等.井下移动机器人智能视觉避障研究[J].工矿自动化,2020,46(9):51-56.
- [20] 霍振龙,张袁浩.5G通信技术及其在煤矿的应用构想[J].工矿自动化,2020,46(3):1-5.
- [21] 孙继平.煤矿智能化与矿用5G[J].工矿自动化,2020,46(8):1-7.
- [22] 孙继平,陈晖升.智慧矿山与5G和WiFi6[J].工矿自动化,2019,45(10):1-4.

