

矿山搜救机器人研究现状及关键技术分析

林雪静,赵建博,王志义,赵华明,周锦江,杨俊彦*

(枣庄学院机电工程学院)

摘要: 矿山搜救机器人主要应用于井下灾害发生后的搜救反馈工作,对提升救援效率、保障矿山安全生产具有重要意义。从机械结构设计、通信系统发展、定位技术优化、防爆装置 4 个方面进行综述。机械结构方面,分析了履带式、智能仿生式及改进轮式设计的优缺点,并提出六轮机器人在矿山搜救中的应用构想;通信系统方面,介绍了 Mesh 技术、WiFi 技术、ZigBee 技术、新兴 5G 技术及其他无线通信技术的适用性,提出关于通信系统不同功能侧重点的改进;定位技术方面,探讨了环境感知、救援路径规划、惯性测量单元定位及同步定位与建图技术四大主流技术应用及融合;防爆装置方面,阐述了防爆电动机、防爆外壳、电源动力及防爆材料选取策略,为机器人轻量化设计提供依据。展望了矿山搜救机器人发展趋势,为矿山搜救机器人研发与应用提供参考,从而推动行业技术升级。

关键词: 矿山搜救机器人;机械结构;通信系统;井下搜救定位;防爆设计;智能化

中图分类号:TD77

文章编号:1001-1277(2025)07-0014-12

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250702

引 言

近年,为实现矿山相关行业的高质量发展,加强矿山安全监管,通过智能化手段实现对矿山安全生产的实时监控和预警成为完善国家及相关部门智慧化建设相关政策与标准的重要环节^[1]。矿山灾后条件恶劣,矿井内设备损坏,井下高浓度有害气体随时可能引发二次事故,导致救援人员不能及时进行相关区域搜救^[2]。为提高井下救援效率,一种可以代替救援人员进行搜寻的矿山搜救机器人成为矿山行业发展的刚需^[3]。该机器人在满足复杂环境要求的同时对井下活动进行实时监测定位,以减少人员伤亡并保证救援工作的高效完成。

矿山搜救机器人属于新兴的危险作业机器人领域,其研究内容涵盖运动机构创新、仿生智能结构应用、信息远程传输及数据融合处理、机器人自主控制导航与传感探测、防爆装置设计等多个方面。该技术前景广阔,但在应用上仍存在技术条件限制^[4-7]。在现有研究及应用的基础上,对矿山搜救机器人的关键技术进行总结分析并提出重点研究方向,以期促进矿山建设智能化、无人化技术发展,助力矿山智慧化建设。

1 机械结构设计

1.1 履带式机器人

履带式机器人具有稳定性及安全性强、负载能力

优秀、越障及地形适应能力较好等特点。因此,传统矿山搜救机器人的机械结构主要采用履带式设计,现存矿山救援机器人的履带式行走机构主要分为普通型、摇臂式和 W 型摇臂式 3 种类型。在普通型中,又可细分为普通型双履式履带行走机构、具有接近角和离去角的双履式履带行走机构。而摇臂式则包括单摆臂式履带行走机构和双摆臂式履带行走机构^[8]。国内最早研制的机器人为 CUMT-1 型煤矿救援机器人,其由中国矿业大学研发,采用普通型履带行走机构。

普通型履带行走机构能够完成搜救机器人基本行走功能,但越障性能较差,越障高度受机器人重心位置和履带长度限制,对矿井下复杂环境的适应性弱。中国矿业大学对履带行走机构进一步创新,设计了基于摇臂式履带行走机构的 CUMT-2 型、CUMT-3 型煤矿救援机器人,如图 1 所示,其已取得国家应用许可^[9]。摇臂式机器人行走方式为前后摇臂相互配合进行越障,具有较强的井下环境适应能力,但较复杂精密的机械结构增加了机器人的故障率,其在现场应用中仍存在一定问题^[9]。

W 型摇臂式履带行走机构在前二者基础上进一步创新。中国矿业大学最先成型应用的 CUMT-4 型煤矿救援机器人差动系统进一步增强了机器人对复杂地形的适应能力^[10]。W 型摇臂式履带行走机构兼具越障性能优越及故障率低的优势,但其与地面接触

收稿日期:2025-02-20; 修回日期:2025-04-03

基金项目:2024 年山东省大学生创新创业训练计划项目(S202410904008)

作者简介:林雪静(2003—),女,大学本科,研究方向为智能机器人;E-mail:1711032039@qq.com

*通信作者:杨俊彦(1986—),男,讲师,博士,从事矿山机械设备及工艺研究工作;E-mail:yang8865139@163.com

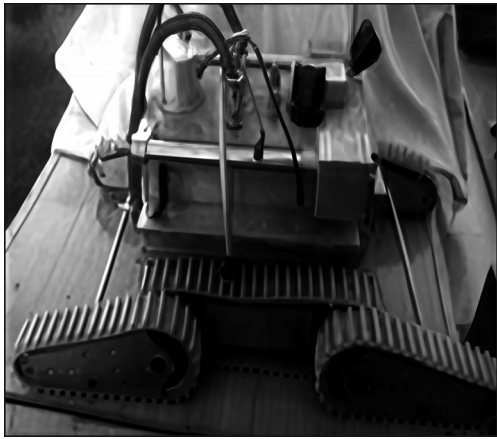
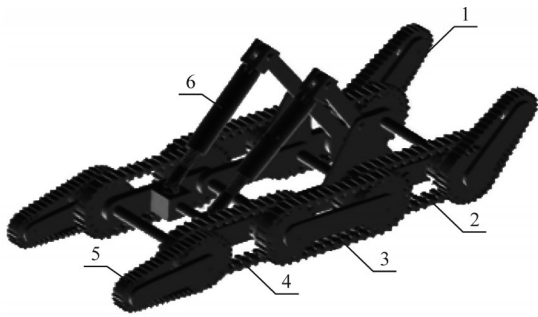


图1 CUMT-3型煤矿救援机器人
Fig. 1 CUMT-3 coal mine rescue robot

部分较小,仅为节点支撑,而煤矿救援机器人的质量普遍较大,造成机器人接地比压大、摩擦力小,易发生底盘链条损坏、断裂及机器人打滑、侧翻等问题^[11]。针对W型摇臂式履带行走机构存在的问题,孙国栋等^[9]对W结构进行增大履带接地长度的扩展,有效增强了矿山搜救机器人的稳定性并提高其越障能力。李秋生等^[12]在摇臂式履带行走机构的基础上采用多支撑点模式,机器人通过调整丝杠机构可以实现摇臂式越障功能。该结构可搭载高动力驱动装置,保持机器人越障后的动力趋势,保证机器人有效越障(如图2所示)。



1—前摆臂 2—主履带 I 3—中间履带 4—主履带 II
5—前后摆臂 6—丝杠抬升机构

图2 多节履带救援机器人行走机构三维建模
Fig. 2 3D modeling of the walking mechanism of a multi-segment tracked rescue robot

履带式机器人自身的结构设计存在一定的局限性,履带行走机构需加载防爆系统、电池等装备,导致机器人体积较大、续航较短,对非结构化地形的适应能力弱,无法进入狭小地带进行探测,因此履带式机器人设计轻量化、电池高续航化、防爆系统轻便化成为履带式机器人需突破的技术难点及发展趋势。

1.2 仿生式机器人

近年来,随着智能仿生技术的兴起,其被广泛应用于人工智能、机器学习等领域。随着矿山搜救机器

人研究的深入,仿生机器人与生物相似的结构更利于机器人对非结构化地形的适应。其打破传统的机电应用系统、驱动器模式、机器刚体结构及单一的运动模式,转向生物应用系统、仿生物肌肉的灵活驱动器、机器刚柔混合结构、高机能多模式运动发展^[13],在环境适应、信息处理、功能执行等方面具有高度的科学性和进步性^[14]。

国内关于矿山搜救仿生机器人的正式研究始于对类蜘蛛、仿生蚂蚁机器人的研究^[15-16]。参照蜘蛛、蚂蚁等运动模式,机器人能够快速灵活地进入狭缝、窄道,具有运动结构重复性运动,多环节、自适应拓扑功能。但是,该机器人并未进行实地试验,多行走机构可能存在部分区域稳定性差等问题。经过多方考量和验证,蛇形机器人因具有伸缩性强、体积小、稳定性高的结构可变换多种运动模式,与传统矿山搜救机器人相比,在进入狭缝、洞穴等难以搜索地带具有优势,且在翻越崎岖危险区域时不易发生安全问题,即稳定性较好的同时对复杂地形具有较强的适应性。

国外学者对蛇形机器人开展了深入研究。YAMADA等^[17]为完善搜救机器人行走系统功能问题,设计了“ACM”“GENBU”“SOR YU”等系列蛇形救援机器人样机;之后进一步研发了ACM-R5蛇形救援机器人(如图3所示),通过对机器人关节构型的改进,实现了直接控制驱动、侧移驱动及螺旋前进等运动形式,更能适应复杂环境对机械结构的要求。KELASIDI等^[18]研制了可用于执行水下检查及维护任务的蛇形 Eelume 系列机器人,且经过多代研制实现了蛇形机器人的水陆两栖功能,可进行陆地灾害及水下环境搜救。



图3 ACM-R5蛇形救援机器人
Fig. 3 ACM-R5 snake-like rescue robot

ZHAO等^[19]设计了采用基于航向轨迹曲率估计法控制加载正压防爆系统及方位探测传感器得到机器人的转向与航向数据,从而提高机器人路径规划的准确率;栾宪超等^[20]利用多目标遗传算法(NSGA-II)对机器人不同模块的结构参数及废墟机动性能涉及的函数关系进行优化,极大地减小了越障高度的相对

误差;LI等^[21]采用自制叶片轮驱动的移动结构,通过增加机器人加载的单元模块、传感器及变换舵机的运动模式优化机器人在矿井下的环境位姿控制、路径规划策略等问题;毛湘宇等^[22]采用十字轴万向节的新型连接方式改进机器人高冗余自由度运动模式,完善机器人进入狭窄缝隙的探索功能;魏巍等^[23]在旋量理论的基础上,对3-RSR并联机构单元模块进行结构拓展,最终形成四关节、一体化样机模型,其在模拟理想矿井环境中的测试性能优良。

蛇形机器人在具有较强环境搜索能力及适应性的同时,也存在系统故障率高、硬件设计较复杂等缺点,导致维护困难等问题。因此,蛇形机器人的优化方向为提高其运动性能和可重构能力,主要分为对结构进行轻量化、密封性改进,降低其故障率,并进一步提高机器人灵活性;将多信号传感器的结构布置与反馈控制算法进一步结合,实现机器人在实际场景中的应用价值。

四足式机器人的研究是仿生搜救机器人领域的另一研究重点。四足式机器人的优势在于重心稳定,类人关节的机械腿结构特征使机器人可以根据不同地形环境及时调整运动方向并平衡机械结构,高效开展救援工作(如图4所示)。YUTA等^[24]及ZHANG等^[25]分别研发了雪貂机器人及仿生土拨鼠矿难救灾机器人(如图5所示)。雪貂机器人主要用于三维井地图的构建,通过加载声纳和激光测距传感器模块,实时获取井下环境信息;仿生土拨鼠机器人的重点在于对其机械结构的改进,身体具备蠕动功能,可进入狭窄地区搜索,在减少环境探测盲区方面起重要作用。这2个侧重点也是目前四足式机器人的重要改进趋势。

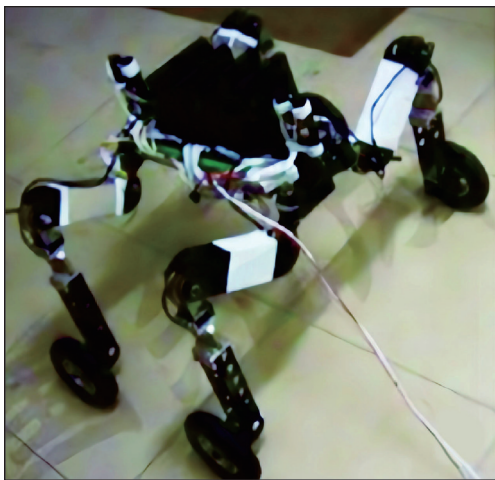


图4 四足式机器人

Fig. 4 Quadruped wheeled robot

1.3 轮式机器人

由于传统轮式机器人对井下复杂环境的适应性

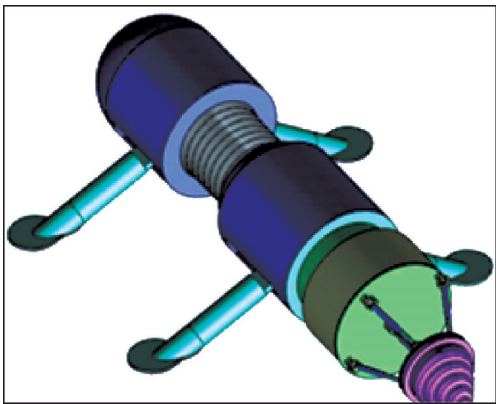


图5 仿生土拨鼠矿难救灾机器人结构示意图

Fig. 5 Structure of bionic marmot-inspired mine rescue robot

较差,容易发生侧翻,且对轮式机器人结构改进的不确定性较大,因此轮式机器人不作为矿山搜救机器人结构改进的主流研究。但是,近年来随着研究的不断深入,轮式机器人在矿井下的应用构想被相继提出。2021年,尚祖恩等^[26]创造性地提出了一种可折叠水弹轮式结构(如图6所示),通过对比采用平行四边形径向构造,对轮式结构的极限承载力、疲劳寿命、展折能力进行优化。试验证明,该结构单轮承载能力可达162.5 N,疲劳寿命较传统履带式提高了55.4%,且水弹式结构灵活,更能适应复杂多变的地形环境。

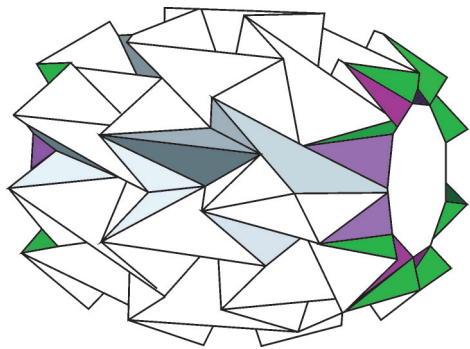


图6 可折叠水弹轮式结构示意图

Fig. 6 Foldable waterbomb wheel structure

轮式结构的另一构想为六轮底盘设计。六轮比四轮稳定性更强,不易发生侧翻,因此对于六轮的研究成为轮式改进的热点。目前,尚未有六轮式矿山搜救机器人的研究报道,但其在地震灾后场景搜救中有应用,而由于地震灾后场景与矿山灾后复杂场景有许多共同之处,故可以将六轮机器人作为借鉴。尹理才^[27]对六轮式机器人进行深入研究,采用全向移动六轮式移动底盘结构,六轮组均采用摇臂式减震系统,配置独立的避震器,保证机器人平稳运行。

综上所述,目前矿山搜救机器人的结构改进由初始的履带式向仿生及轮式改进,仿生机器人由于特殊的机械结构对复杂地形适应能力强,更易到达二次爆炸后的缝隙区域;轮式机器人便于进行轻量化设计,

对于防爆系统的设计改进更具有优势。

2 通信系统

通信问题是解决矿山搜救机器人在矿井下实际应用及矿山智能化和无人化发展的关键。但是,工作面与井口距离较远,且灾后井下通信系统易遭到破坏,基站自身的有线或无线模式均易受井下环境影响而导致信息传递具有较强的延时性,对救援工作的开展产生一定阻碍。因此,要求机器人自身具备远程通信能力,可与地面基站取得联系。

现存可用于矿山监测监控系统的通信技术分为有线通信技术,如RS485、CAN总线等串行通信协议、工业以太网、光纤网等有线通信技术;无线通信技术如4G、5G及WiFi等^[28]。矿山搜救机器人通信技术以无线通信技术为主,部分采用以太网分布式,较成熟的无线通信技术为Mesh技术、WiFi技术及ZigBee技术等3种模式^[29]。5G技术作为新兴通信技术,其在矿山搜救中应用前景广阔,被认为是实现矿山高效通信最具潜力的技术之一。

2.1 Mesh技术

Mesh技术具有信息传输可靠性高、井下信号覆盖范围广、组网灵活性高等优势,但网络规模的扩大会导致无线Mesh多跳机制的技术误差不断积累^[30],信息传输的干扰性增强。针对这一问题,研究主要从Mesh技术的分配算法改进、硬件装置选型设计及路由协议的选择3方面进行优化。

表 1 主要 Mesh 产品性能指标对比

Table 1 Comparison of performance metrics of major Mesh products

Mesh 产品	时间延迟/ms	可扩展性	组网时间/s	自恢复时间/s	拓扑结构	兼容性及扩展性
MeshDynamics	每跳<1	8~12跳	45	<1.8	星型	优秀
Firetide	每跳2	8~10跳	28	2	星型	较好
Microsoftmesh	每跳2	4~8跳	35	2.5	星型	较好

Mesh技术具有多跳性、低功耗、易安装、鲁棒性强、部署便捷等特点^[34],且可与其他网络配合通信,适用于矿井下应急通信系统多个环境场所的要求和特点;但同样存在延迟增加、信号干扰、网络拓扑限制等问题,对其在井下应用产生一定的干扰。

2.2 WiFi技术

WiFi传输速度远高于其他无线通信设备,目前最普及的IEEE 801.11g可达到54 MB/s,而WiFi电话的实际发射功率不超过70 mW(小于IEEE 802.11规定发射功率100 mW),且WiFi是世界范围内通用的开放频段,因此WiFi技术具有性价比高、数据带宽极

武先利等^[31]采用骨干路由、中继路由节点结合的方式弥补了Mesh网络框架结构的缺陷,扩大系统数据的容量范围并进行最小费用路由算法的链路优化,减少网络规模扩大带来的误差积累;张立亚等^[32]采用对拓扑节点进行层层分配的方式,从干扰情况角度进行信道分配,该方法在提高宽带利用率、降低信道分配中的传输干扰方面具有优势;孙红雨等^[33]通过对源驱动路由协议(AODV)、按需多径距离矢量路由协议(AOMDV)和混合式无线网状路由协议(HWMP)3种最常见的路由协议进行网络、链路利用率及抗干扰能力对比,结果显示,AODV在优化节点的利用路径及分配机制、降低无效能耗、预防网络热点及信息传输失真等方面更适合应用于井下通信。

Mesh硬件选型由其布置方式决定,例如:分级网络结构进行通信系统设计则可加载无线Mesh便携式终端(MC)和无线Mesh路由器(MR),与地面实现通信传输;也可采用基带板和射频前端结合进行Mesh网络硬件模块化布局^[34],实现系统内信息的交互传递、模数转换器(ADC)后的波形重建、自动进行接收信号的增益控制及放大射频发送信号强度功率功能;视频传输硬件方面,MeshDynamics的无线Mesh网络组网方案相较于Firetide、Microsoftmesh,虽组网时间稍有延迟(如表1所示),但其采用的双射频模式可以保证方案上行链路和下行链路同时工作,且有较强的自我恢复能力,综合性能更优,更适合应用于井下通信^[35]。

高,满足矿山安全生产绿色环保的要求;其下一代产品预计可达300 MB/s,在意外或危险情况下获取信息的能力也进一步增强,因此也越来越被认可。对于WiFi技术的开发主要集中于丰富通讯功能及与其他系统如人员定位系统、视频监控、电力监控等进行融合,在保留WiFi技术自身优势的同时降低其信息传输损耗,从而保障井下传输数据的可靠性。

王军等^[36]提出了WiFi技术应与4G通信技术、矿井物联网通信技术等相互融合,以解决矿井通信系统对网络扩展能力、兼容能力及通信速率的要求。李培焯等^[37]提出组建可及时反馈井下救援目标位置处的

瓦斯浓度、H₂S浓度、温度等各种环境参数的应急救援无线通信系统,为井下救援工作的科学有效开展提供有力依据;WiFi技术也可与嵌入式处理器和嵌入式Linux操作系统进行融合^[38],经验证,该系统具有低延迟性、低抖动率及传输速率稳态增长的性能优势。王燕^[39]将WiFi技术与语音处理技术(VoIP)结合,在保证良好通讯状态的同时可从漫游切换为正常速度,并进行实际生产的应用;矿用广播系统可进行远程有线调度通信系统及IP通信技术(包含以太网、无源光网络)2种模式的选择,在满足多媒体通信、脱网通信、无线自组网的功能需求后可进行宽带平台的有效传输。孙继平^[40]在对WiFi进行功能验证的试验中发现:WiFi优于宽带码分多址(WCDMA)、码分多址2000(CDMA2000)和时分同步码分多址(TD-SCDMA)的传输性能,矿井无线宽带传输宜采用WiFi技术。

2.3 ZigBee技术

ZigBee技术是一种近距离、复杂度低、功耗低、数据速率低、成本低的双向无线通信技术,其在自动控制和远程控制领域中应用广泛,可嵌入多种设备进行通信系统的构建。ZigBee技术一直是矿山通信系统的研究重点,其在软硬件方面可进行不同的装备配置及技术融合。

ZigBee技术的硬件方面,可采用WM8731音频采集和CC2530无线传输的语音终端,并在硬件上加载使用分离的A/D及D/A器件,其通过多跳转发后更适用于长距离通信;选用CC2530芯片作为主控及900 MHz的ZigBee组网进行矿山救援机器人无线通信系统的硬件改进,可进一步增强机器人无线组网性能,提高无线宽带通信速率的同时其数据传输路径的维护也更加方便(如图7所示)^[41]。



图7 ZigBee系统组成

Fig. 7 ZigBee system architecture

在实验室环境下进行的语音通信节点距离与信号强度的测试中,信号强度与节点距离在一定范围内呈负相关关系,基站间距为60 m时通信系统效率最佳^[42]。胡娟^[43]在ZigBee定位技术的基础上利用信号强度作为检测工具,实现对井下人员位置信息及重要

仪器设备的监测警报。ZigBee技术可进一步与信息、通用分组无线服务(GPRS)技术进行融合^[44-45],打造矿山环境远程安全监测系统。在与信息融合方面,基于模糊贴近度算法和灰色关联度算法的两级数据模型,可实现矿井安全等级评定的高度准确性;与GPRS技术的结合则是利用网状拓扑结构,采用CC2530射频芯片、SHT10数字温湿度传感器、GY-63-03数字气压传感器及WG-8010GPRS DTU模块等器件,通过Z-Stack协议栈实现传感器关于温度、湿度、气压等数据的远程传输反馈,降低监测成本的同时实用性较强。

2.4 5G技术

实现矿井宽带无线通信需达到10余km巷道全覆盖、本质安全防爆、工作频段适中且有一定的绕射能力、信息传输及反馈抗干扰性强等要求。5G技术作为实现矿山移动通信的关键技术之一^[46-47],对解决矿山搜救机器人通信系统的实时性、多功能性及稳定性要求有着极高的实际应用价值。

5G无线通信系统的基本架构由5G核心网、基带处理单元(BBU)、远端汇聚站(RHUB)及5G基站与承载网组成^[48]。数据流经远端汇聚站整合后反馈给基带处理单元,最后将信息接入5G核心网。5G远程控制机器人组网系统如图8所示。需注意的是,不同上行速率及工作频段时达到不同的覆盖范围、控制系统接入的最大终端数量、井下基站及终端的无线发射功率、基站的无线工作频率(最优为700~900 MHz)、基站及终端的无线接收灵敏度10 Mbit/s和20 Mbit/s上行业务运行系统的平均延时、移动台蓄电池及备用电源可连续工作时间等。在实际应用中应控制各指标调制数据大小在其规定范围内,且能够实现高效的设备级冗余保护,数据传输的机密性和完整性,终端的认证、检查、限制及保护,5G通信设备的集成一体化管理及其网络性能和服务性能的统一监控等功能^[49]。

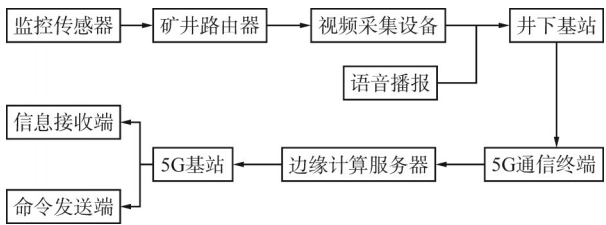


图8 5G远程控制机器人组网系统图

Fig. 8 Networking system diagram of 5G-based remotely controlled robots

欧阳贵喜等^[50]利用100 MHz带宽的5GNR信号对新空口(MP)模型和多精度算数库(GMP)模型进行5G通信改良能力的对比,结果表明二者均达到矿井通信需求,但GMP预失真器线性化能力更强,其改良

范围可超过 17 dB。韩利强^[51]采用 3.5 GHz 射频加 4G 和 5G 射频模块建立 2 套非独立组网(NSA)5G 基站完善控制系统,高效进行矿工位置及障碍信号的实时反应。根据现有研究,5G 技术发展的 6 个方向为 5G 核心网设计小型化、基站设备的低功耗及本安化、基站范围覆盖全面化、手机终端及行业 APP 定制化、通信模组高效化及应用场景现实化。

2.5 其他非主流技术

随着矿山智能化的发展,部分矿山搜救通信系统的创新跳脱主流技术发展思想,进行新技术的融合拓展。基于以太网将有线与无线结合的技术特征,刘建^[52]采用上下位机 stop-wait-ARQ 串口通信协议及高级数据链路控制(HDLC)协议对 ISO/OSI 层次模型进行创新,其通信系统的可靠性实现了更高的保障。朱华等^[53]设计了一种带旋转轴的光纤释放装置,在光纤不断释放的过程中实现单机和多机间的无间断通信,可有效解决有线通信链路自动连接和防爆问题。张旭辉等^[54]借助虚拟现实(VR)技术充分融合人、机和环境三方信息,对传感器数据进行动态解读,该方案适用于人工远程干预。陈炜等^[55]利用实验室虚拟仪器工程平台(LabVIEW)的万维网(Web)技术传输信息,增强远程控制系统的稳定性。段晓峰等^[56]采用 LoRa 传输代替传统的无线传输,并搭载了 TI-MP430 单片机及 5.8 GHz 的无线图传模块,增强信息传输的准确性并减小功耗。超宽带无线通信(UWB)技术作为矿井无线通信应用的一种新技术,由于其功耗低、数据传输率高、抗干扰能力强、系统复杂性低等优势,成为未来高效应用于矿井巷道无线通信的较好选择。但是,UWB 技术需要设计一套适用于矿井特殊环境的超宽带无线通信系统,涉及诸多尚未解决的技术问题,关键技术点在于超宽带信号在矿井下的传播特性研究。

上述通信技术均有其在矿井环境下面对不同问题的应用优势及缺陷,但不同通信技术之间的相互融合存在一定限制,如何解决不同技术之间的互联互通或整合为最佳技术成为促进井下智能感知及决策控制,推动矿山智能化发展的关键。

3 定位系统

定位系统是决定矿山搜救机器人井下技术发展的关键。定位系统的优化包括多个方面,按照目前的研究热点分为环境感知、救援路径规划、惯性测量单元(IMU)定位及同步定位与建图(SLAM)技术。

3.1 环境感知

矿山搜救机器人的环境感知主要分为传感器的改进及基于控制论的方法改进。传统的矿山机器人

路径规划方法对救援类矿山机器人同样适用,但该方法缺乏自主性,与传感器信息及控制论改进的融合更利于实现机器人路径规划技术的自主决策及自动控制,提高机器人在复杂矿井环境下的搜救能力。

戴珊珊等^[57-58]在机器人的前方和两侧加载不同数量的传感器装备,以仿生机器人作为试验对象,结果表明,在一定范围内加载的高精度传感器的数量与其环境感知能力成正比。刘罡等^[59]借助智能滤波算法,通过融合里程计、电子罗盘、惯性导行等多传感器,实现对障碍物的边缘单独感知,从而提高信息检测效率。此外,通过惯性导航和视觉导航融合对导航系统的路径偏移进行修正^[60]、激光雷达与 Kinect 相机结合进行远近地形信息的采集^[61]、双目摄像机进行三维重建^[62]均采用多传感器互通的方式减少系统反馈信息的误差,提高定位精度。对于无线传感器安全监控系统改进方面,可利用无线传感器节点对井下目标位置处温度、气体等数据进行采集,也可搭载 IAREmbeddedWorkbench 平台使用人机交互功能,实现对井下情况的安全监控警报;监控系统也可通过搭载多种传感器,经由反向传播神经网络算法的多向融合对井下目标位置环境的危险气体种类及浓度进行实时监测。微机电系统(MEMS)惯性传感器的改进则是通过加载其他的测量单元来完成,张元刚等^[63]将蓝牙测距信息、MEMS 惯性传感器及车载里程计信息进行组合,融合卡尔曼滤波技术,减少传感器惯性漂移误差的同时增强数据的可靠性。李世银等^[64]将 MEMS 中的加速度计、陀螺仪和磁力计结合进行数据的精准获取,通过对粒子滤波的研究减少传感器漂移误差。结果表明,该系统百米定位误差小于 2 m,适合井下人员定位系统的应用。

在控制论相关技术改进方面,视觉与惯导融合的矿山搜救机器人通过对随机抽样一致性(RANSAC)算法及描述(ORB)算法的融合实现特征点的抑制处理及自适应调解,提高矿井下暗区域目标位置的特征点提取及匹配的准确性^[65]。采用对极几何法对单目视觉定位无法确定的机器与目标点间的距离进行视觉解算,准确得到定位尺度信息;利用图优化方法对惯导及单目视觉采集的数据进行融合求解,得到机器人位姿信息。基于无损卡尔曼滤波方法在环境感知中有较广泛的应用,在改进超声网络定位输出数据方面,利用对光电码盘和电子罗盘定位得到机器人位置坐标和航向角度,通过无迹卡尔曼(UKF)滤波进行机器人的实时位置更新及预测^[66];在改善误差方面,卡尔曼滤波可用于对陀螺仪姿态角数据的误差补偿及对检测机器人方向角的原始数据修正,从而实现井下目标的精准定位^[67]。

马尔可夫链蒙特卡尔重采样理论改善了粒子滤波在未知环境中产生的粒子退化问题,该方法可进一步提高机器人在狭小空间定位的准确性和实时性^[68]。在算法改进上,综合测距的定位和非测距的定位方法,结合接收信号强度指示器(RSSI)算法可进行固定锚节点权值的校正。乔钢柱等^[69]采用动态 β 算法进行井下放置的信标节点间的距离和信号强度计算,其仿真试验与RSSI算法在定位平均误差和标准差方面表现优秀,定位准确性极大提高。此外,还可通过设计约束控制器构建机器人搜救的数学模型,提高机器人搜救的准确性^[70]。

硬件配置标准对矿山搜救机器人的环境感知技术起决定性作用,现有的理论成果在感知能力和识别准确率上有较大突破,但其稳定性和实时性仍处于探索阶段。

3.2 救援路径规划

机器人移动的底层逻辑为路径规划技术,其是环境感知和底层控制互联互通的核心技术。矿山救援机器人在矿井非结构化地形中进行搜救任务时,由于环境需搜索的空间较大或环境复杂度较高,存在机器人偏离预设轨道、搜救效率低、非最优路径选择等问题。合理迅速规划出适于搜救的最佳路径是完善机器人井下定位的研究重点,也是实现自主导航的关键环节^[71]。目前,该领域的相关研究集中在遗传算法、粒子群优化算法、蚁群算法等进化计算方面,该类方法的优势在于其可进行集群计算,操作简单,且可调出数学模型框架直接求解计算过程中产生的诸如非线性、不可微、不可导、分段等复杂问题^[72]。

对于路径规划领域使用最成熟的蚁群算法,宁竞等^[73]融合SLAM方案构建基于改进蚁群(ACO)算法的路径寻优模型,进一步缩短了ACO算法规划用时,有效降低了机器人搜救过程中的能耗。利用B-spline函数对混合蚁群-蜂群算法进行惯性优化,可得到适于机器人运行的最佳平滑运动路径,保障机器人运行的平稳性。在人工鱼群算法方面,姚正华等^[74]利用一维坐标参数表示二维参考点的方式对人工鱼个体的编码方式进行简化,该算法在优化迭代程序、规划有效路径方面具有优势。遗传算法方面的改进可采用优先级分组的方式,选用5种遗传算子在变异节点的替代处利用种群初始化的方法进行优化,基于栅格变化情况实现局部避障,保证了局部避障的有效性与鲁棒性^[75]。融合染色体编码改进的遗传算法采用随机指导式搜索策略生成初始种群,针对传统遗传算法存在早熟及收敛慢的现象对算法中的交叉和变异算子进行优化,试验证明该方案有效可行^[76]。GAO等^[71]对人工蜂群算法(AFSA)和动态窗口算法(DWA)进

行混合研究,并结合遗传算法进行全局路径规划能力的进一步提高。

A*算法因具备良好的扩展性、适应性及能够快速找到路径最优解等优势一直为矿山搜救路径规划研究的热点。A*算法和人工势场算法的结合在无人驾驶领域得到广泛认可,鲍久圣等^[77]在此基础上加入指数函数加权和3次样条插值,并采用斥力势场反映相对速度势场情况的相对模型,改进后算法的路径规划时间仅为单一A*算法的20%。在提高机器人的导航精度方面,A*算法与RANSAC拟合算法结合构建可纳入坐标规划的矿井壁面几何模型^[78],实现机器人在复杂环境中的路径规划、自主行驶、自动避障等能力。针对传统A*算法在栅格地图环境下存在的路径规划冗余点、死角较多的问题,张伟民等^[79]对A*算法通过增加扩展节点数量并设置距离阈值实现初始路径的快速搜索并去除冗余点,多次拟合后得到路径更优、转角更小的规划路径。A*算法还可通过将自身步骤迭代生成的轨迹初值与MinimumSnap目标函数结合,生成不等式进行约束,生成无碰撞、低能耗、光滑连续的轨迹路线。对于改进A*算法规划路径平滑性低的问题,陶德俊等^[80]利用动态规划(D-P)算法进行路径中关键节点的提取及冗余节点的剔除,仿真试验证明其路径质量高于遗传平滑算法。在非主流的路径规划算法改进当中,薛光辉等^[81]利用阶段引入人工势场法改进PRM算法的路径规划,实现节点均匀布置;黄友锐等^[82]结合膜计算(MC)及Informed-RRT*算法,通过构建多步长细胞型膜结构,实现机器人自由调整可行搜索区域的空间大小;SULAIMAN等^[83]利用混合算法对概率路线图(PRM)算法进行延迟配置,但创建节点如何均匀分配还需进一步考虑。

3.3 IMU定位

IMU定位具有易于集成、抗干扰性强、成本低等优点,适用于井下定位,但同时其存在误差容易积累、全局定位较弱等问题。目前,较高效的方法是将IMU与其他技术融合或改进该技术算法。例如:将UWB和IMU进行融合^[84],利用最小二乘支持向量机(LSSVM)修正模型进行距离信息修正,减少非视距误差的干扰;二者融合也可对惯性导航定位装置进行位姿和漂移的误差补偿,并利用变分无迹卡尔曼滤波(VB-UKF)技术对机器进行平滑处理以提高定位精度,试验结果表明,卡尔曼滤波在融合模型中可大幅度修正IMU的定位偏差,并为井下现场应用提供了很好的参照经验^[85]。IMU也可与激光雷达(LiDAR)建立融合模型并与激光雷达数据进行紧耦合^[86],在加入改进人工势场法和快速扩展随机树动态路径规划方法的基础上实现对定位建图精度的优化,提高路径规

划效率并减少路径代价。赵红菊^[87]提出光电编码器与EKF滤波方法结合对IMU获得的相对角度等数据进行机器人位姿的实时更新,该方法的滤波效果平稳,鲁棒性较强。

3.4 SLAM 技术

SLAM技术可同时进行井下目标定位及地图的构建,完成机器人在未知环境下的自主定位导航。与激光雷达相比,SLAM技术具有成本较低、井下暗光照适应性强等优点。为了进一步提高SLAM技术在井下的定位性能,可在支持视觉加惯导、混合地图同步定位与建图(ORB-SLAM3)框架基础上对收集的结合自注意力模块的EnlightenGAN图像进行数据筛选,改善系统在低光照区域的定位效果^[88];MU等^[89]通过提取目标点的融合点和线特征进行SLAM系统的进一步定位。对激光雷达观测模型的改进,可选用快速同步定位与建图(Fast-SLAM)算法进行优化,在进行自适应蒙特卡罗定位算法的数据重采样后,可有效解决机器人位姿估算产生的误差并精化其地图构建模型。为提高机器人在复杂环境下的适应能力,可采用LiDAR或IMU与SLAM进行紧耦合^[86],IMU可进行运动状态的信息预测并进行有效补偿,LiDAR可进行点-线和点-面的匹配并构建激光的相对位姿约束,通过构建LiDAR、IMU的不同数据约束因子实现与SLAM的紧耦合,与当前最优的激光里程计与建图(LOAM)方法、激光雷达惯性状态估计(LINS)方法、雷达惯性里程计与建图(LIO-mapping)方法的对比试验中,该方法在构建地图一致性模型、增强机器人在不同复杂地形中运动的平滑性、实现精准定位方面性能最佳。为防止矿井下昏暗环境对SLAM特征点匹配的影响,陈伟等^[90]结合ORB-SLAM3定位算法及前端特征点提取(ORB)算法进行特征点均匀化匹配,经过RANSAC算法及蝙蝠(BA)算法的迭代优化,改进后的定位算法APE各项指标均优于ORB-SLAM3算法及实时单目视觉惯性导航系统(VINS-Mono)算法。

4 防爆系统

矿山搜救机器人在防爆装置方面已取得一定进展,但仍存在许多技术尚未完善,其改进主要集中在防爆电动机、防爆外壳、动力电源、防爆材料应用、能源动力应用及本安控制的优化和故障诊断等方面^[91],轻便化、高效化、本安化、智能化成为防爆技术的发展趋势。

隔爆型和本安型是矿山井下搜救防爆技术应用最广泛的2种技术。本安型防爆技术是目前井下防爆设备中最安全的防爆技术,与其他防爆技术的区别在于该技术将设备上可能引发导线产生燃烧类安全

问题的热量限制在不能产生燃烧的水平。隔爆型防爆技术则是设计隔爆外壳,保护设备不受进入气体的影响而发生爆炸。更多防爆装置将2种技术进行结合,例如:CUMT-1型机器人采用防爆外壳设计,其传感器采用本安型防爆技术。其他充油型、浇封型等防爆技术从限制装置周围浓度的角度防止发生爆炸,但该方法不确定性较大,对气体进行严格限制所需的技术要求较高,目前无法达到矿井下对于多种复杂气体的分辨要求,因此应用较少。

矿山搜救机器人各方面都有较大改进。在防爆电动机方面,郭长亮^[92]基于超声电动机特点,进行防爆型直线超声电动机的创新,对直线电动机和驱动电源防爆外壳的设计进一步优化,且已取得防爆合格证书。此外,一体式设计的矿用隔爆变频电动机^[93]为新型矿用隔爆电动机提供了开发设计的理论及实物依据;为平衡电动机发热率设计的水冷结构^[94]可使电动机在有效制冷的同时保证电动机使用安全。

动力电源研究关键在于实现高性能、低成本。但是,目前防爆电动机无法完全采用本安型防爆技术,且如何进行防爆电动机的故障诊断问题也并未得到解决,因此现有防爆电动机无法完成0级危险区域内的搜救工作。赵峰^[95]为解决电气供电电流输出有限的问题进行了动力电池和超级电容混合的动力电源设计;鲁怀敏等^[96]则通过对不同电池性能对比得出,磷酸铁锂电池更适合作为矿山搜救机器人动力电源的结论。矿山搜救机器人对动力电源有大功率、实用性、安全性的应用要求,其研究趋势为低压大容量。动力电源的另一种防爆思路为制定个性化的电池安全评估方案,MA等^[97]利用人工智能思想对锂电池进行了健康评估方案的建立。

在防爆外壳设计方面,王长龙等^[98]引入静态正压技术解决防爆要求与机器人性能匹配的要求;李允旺等^[99]在主驱动轮轴与摆臂旋转驱动轴的轴座内连接驱动电动机,并伸出隔爆壳体,机器人的电源、控制、通讯等单元模块均罩在隔爆壳体内,壳体间利用法兰连接加固。对于隔爆外壳的改进还有材料方面的研究,矿用机器人外壳初始化设计中应用弹塑性力学理论进行强度刚度分析,在符合标准的前提下对不同钢材进行有限元分析,从而得到最适宜进行轻薄化设计的外壳材质。韩一鹏^[100]对锻件补强、焊板补强、加固圈补强等进行研究,孔补强焊接的设计方法可为防爆外壳的加固工作提供理论依据;王海燕等^[101]研发了可用于井下机器人防爆外壳的纤维复合增强材料,其为同类传统材料产品质量的1/10,极大地降低了设备制造成本,且可降低能耗,提升产品性能。简化防爆壳体结构及轻量化的短时防爆手段对提高机器人移

动能力有着至关重要的作用,但该方法需进行严格的试验,且需设计新的防爆检测路线,因此仍处于探索阶段。防爆外壳材料以钢铁为主,其缺陷在于质量较大,一般占机器人总质量的一半以上。研究证明,ZL401型铸铝合金相较于钢铁质量较小,适于机器人隔爆壳体的加工,但其并未完全满足机器人井下作业的材料需求,轻型防爆材料研究是制作防爆外壳的关键环节。

5 结论与展望

1)结构轻量化。矿山搜救机器人作为特殊的移动机器人,其整机质量对整个电源装置的质量要求起关键作用。现有矿山搜救机器人的质量普遍较大,对机器人的机动性能产生一定阻碍。因此,如何进行救援机器人轻量化设计是改善机器人整体性能的关键性问题。履带式机器人、仿生式机器人虽在结构上有所改进,但其设计并未达到矿山搜救机器人多复杂场景运用的实际要求,多数只适用于某些特定场景,且较大运动惯性对机器人的搜救产生不利影响,易受井下二次事故影响。矿山搜救机器人轻量化改进集中在轻质高强度材料的寻找、进一步优化机器人的移动结构及改善高容量电池质量等方面。

2)通信交互化。未来智能矿山通信需要具备高带宽、低时延、高可靠,以及满足海量终端用户的交互功能。不同场景对通信需求不同,且多数比较复杂,因此不同通信技术通过协议转换器、网关等设备进一步融合实现矿井搜救多技术一体化平台是智能化关键手段。将不同的通信技术、系统进行融合互通,进一步规范不同厂家的标准接口、开放的网络架构、统一的用户数据,保证数据在各系统内低延时、高效率、实时、同步流通,并根据实际情况采用不同技术进行监测是未来通信技术发展的主要方向。目前,5G、WiFi6因较好的适用性及在传输速率、可靠性方面的优势成为矿用无线通信技术的主流解决方案,主芯片及电路模块低功耗设计是推动5G技术在井下作业大规模运用的关键。

3)定位融合化。矿山搜救机器人的定位技术理论相对成熟,且传统控制论方法已在其他领域成功运用,但该方法需要搭配其他环境感知技术才可以解决动态避障等问题。路径规划类方法侧重于优化,结构具有随机性,且其必须搭配合适的环境感知系统,二者的融合也需进行大量试验验证。受限于井下环境多变及算法复杂度等,不同算法间的搭配使用成为完善机器人定位功能重要技术方向之一。因此,提高识

别算法的实际应用能力、实现信息处理和传输的智能化,以及研制精度高、鲁棒性强的导航装置成为矿山搜救机器人发展的必然趋势。

4)防爆应用化。矿山搜救机器人防爆技术在防爆材料的选取、能源动力技术、技术本安化、机器人的故障诊断与容错方面存在难题。现有防爆外壳材料仍以钢铁为主,导致其加载的驱动设备质量增加,无法实现机器人轻量化设计,故障率增加;有线供电限制机器人作业范围,而无线供电则限制机器人井下作业时间;防爆技术以隔爆兼本安型技术应用最广,但其在矿山搜救过程中仍存在安全问题;未有针对搜救机器人方面的防爆技术故障诊断措施。因此,如何寻找轻质、坚固、耐高温的防爆壳体材料,如何设计高品质、大容量的动力电池,如何实现防爆技术完全意义上的本安化并增大设备功率,如何进行故障诊断与容错控制技术研究成为未来解决防爆技术发展的重要依据。

[参 考 文 献]

- [1] 胡荣华,安冬,史梦圆,等.智能矿用机器人研究现状及发展趋势[J].黄金,2023,44(9):59-68.
- [2] 薛春荣,李小波.矿用救援探测机器人系统设计与研究[J].煤炭工程,2023,55(9):170-174.
- [3] 郑学召,赵炬,张铎,等.煤矿救援机器人研究现状及发展趋势[J].工矿自动化,2019,45(9):7-12.
- [4] 王国法,孟令宇.煤矿智能化及其技术装备发展[J].中国煤炭,2023,49(7):1-13.
- [5] 王国法,任怀伟,马宏伟,等.煤矿智能化基础理论体系研究[J].智能矿山,2023,4(2):2-8.
- [6] 王国法,庞义辉,任怀伟,等.矿山智能化建设的挑战与思考[J].智能矿山,2022,3(10):2-15.
- [7] 葛世荣,张晞,薛光辉,等.我国煤矿煤机智能技术与装备发展研究[J].中国工程科学,2023,25(5):146-156.
- [8] 李雨潭,李猛钢,朱华.煤矿搜救机器人履带式行走机构性能评价体系[J].工程科学学报,2017,39(12):1 913-1 921.
- [9] 孙国栋,李雨潭,朱华.一种新型煤矿救援机器人履带行走机构设计[J].工矿自动化,2015,41(6):21-25.
- [10] 李允旺,葛世荣,朱华,等.四履带双摆臂机器人越障机理及越障能力[J].机器人,2010,32(2):157-165.
- [11] 李允旺,葛世荣,朱华.摇杆式履带悬架的构型推衍及其在煤矿救灾机器人上的应用[J].机器人,2010,32(1):25-33.
- [12] 李秋生,闫小军.履带式煤矿救援机器人行走机构研究[J].煤炭技术,2017,36(10):199-201.
- [13] GAO Z H, SHI Q, FUKUDA T, et al. An overview of biomimetic robots with animal behaviors [J]. Neurocomputing, 2018, 332: 339-350.
- [14] 宋锐,郑玉坤,刘义祥,等.煤矿井下仿生机器人技术应用与前景分析[J].煤炭学报,2020,45(6):2 155-2 169.

- [15] 刘建辉,叶静.基于类蜘蛛仿生煤矿救灾机器人步态研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2008,27(6):878-880.
- [16] 黄俊军,葛世荣,曹为.仿生蚂蚁煤矿救灾机器人的单腿运动学分析[J].煤矿机械,2008,29(1):83-84.
- [17] YAMADA H, TAKAOKA S, HIROSE S. A snake-like robot for realworld inspection applications (the design and control of a practical active cord mechanism) [J]. Advanced Robotics, 2013, 27(1): 47-60.
- [18] KELASIDI E, LILJEBCK P, PETTERSEN K Y, et al. Innovation in underwater robots: Biologically inspired swimming snake robots [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine: A publication of the IEEE Robotics and Automation Society, 2016, 23(1): 44-62.
- [19] ZHAO J, HAN Z F, LIU G F. Development of a serpentine omnitread robot for searching in explosive gas atmospheres [J]. The Industrial Robot, 2011, 38(5): 469-475.
- [20] 栾宪超,常健,王聪,等.主动关节履带式蛇形救援机器人结构参数多目标优化设计[J].机器人,2022,44(3):267-280.
- [21] LI H Y, HOU Y B. Study of ant colony optimization algorithm in snake-like robot path planning [C]//Proceedings of the international conference on logistics, engineering, management and computer science (LEMCS 2014). Dordrecht: Atlantis press, 2014: 757-760.
- [22] 毛湘宇,李青松,施明奎.十字轴万向节式蛇形机器人机构设计[J].实验室研究与探索,2013,32(5):8-11.
- [23] 魏巍,庄哲明,唐昭,等.基于3-RSR并联机构的蛇形机器人本体构型设计与运动性能研究[J].机械工程学报,2021,57(23):21-33.
- [24] YUTA S, ASAMA H, PRASSLER E, et al. Field and service robotics [M]. Heidelberg: Springer berlin, 2006: 189-198.
- [25] ZHANG D, GAO Z. Hybrid head mechanism of the groundhoglike mine rescue robot [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 27(2): 460-470.
- [26] 尚祖恩,赵丽娟,刘雄豪,等.煤矿救援机器人可折叠水弹轮式结构分析与优化[J].中国机械工程,2021,32(24):2 924-2 933.
- [27] 尹理才.六轮救援机器人的设计与研究[D].天津:天津理工大学,2016.
- [28] 刘成武,景东旭.4G+5G+Wi-Fi6融合通信系统在煤矿井下的应用[J].现代矿业,2023,39(2):164-167.
- [29] 白雪峰,舒晓军.煤矿井下无线通信技术演进[J].工矿自动化,2023,49(7):14-18.
- [30] 郑学召,郭行,郭军,等.矿井广播系统及其在煤矿应急通信中的应用探讨[J].工矿自动化,2020,46(1):32-37.
- [31] 武先利,王鹏,温良,等.一种新型煤矿井下无线通信系统研究[J].工矿自动化,2013,39(8):22-25.
- [32] 张立亚,孟庆勇,温良.煤矿应急救援中无线 Mesh 网络多信道分配算法[J].工矿自动化,2015,41(6):83-86.
- [33] 孙红雨,宋娇,刘霞,等.无线网状网络路由协议在矿山应急通信中的应用研究[J].科学技术与工程,2023,23(2):429-439.
- [34] 魏正华,叶小兰.煤矿井下无线 Mesh 通信系统的设计[J].工矿自动化,2021,47(10):115-120.
- [35] 马晓丽,展庆召.基于 Mesh 网络的矿井多媒体数据传输研究[J].煤炭技术,2022,41(12):238-240.
- [36] 王军,顾义东,曾苛.WiFi 通信技术在煤矿信息化中的应用分析[J].工矿自动化,2017,43(7):90-93.
- [37] 李培焯,强蕊.基于 WiFi 的煤矿井下应急救援无线通信系统的研究[J].中国安全生产科学技术,2011,7(4):139-143.
- [38] 梁庆杰.基于嵌入式 Linux 的煤矿救援机器人控制系统设计[J].煤矿机械,2020,41(7):187-190.
- [39] 王燕.井下移动通信系统中 Wi-Fi 技术探讨[J].煤炭技术,2012,31(10):238-239.
- [40] 孙继平.现代化矿井通信技术与系统[J].工矿自动化,2013,39(3):1-5.
- [41] 隋永东,戚克明,郑平,等.基于 ZigBee 技术的井下人机定位系统在焦家金矿的应用[J].黄金,2011,32(8):38-40.
- [42] 张渤,侯智新.基于 ZigBee 的井下语音通信终端设计[J].煤炭技术,2016,35(1):232-234.
- [43] 胡娟.基于 ZigBee 的井下人员定位与通信系统设计[J].煤炭工程,2010,42(4):16-17.
- [44] 吴景红,刘迅.基于 ZigBee 技术与信息融合的煤矿安全监测系统的设计[J].煤炭工程,2017,49(10):55-58,62.
- [45] 杨文环,孙久运,王阔音.基于 ZigBee 与 GPRS 的煤矿环境远程监测系统的设计[J].金属矿山,2015(6):125-129.
- [46] WANG G F, REN H W, ZHAO G R, et al. Research and practice of intelligent coalmine technology systems in China [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2022, 9(1): 24.
- [47] ZHANG K X, KANG L, CHEN X X, et al. A review of intelligent unmanned mining current situation and development trend [J]. Energies, 2022, 15(2): 513.
- [48] 顾义东,孟玮.煤矿 5G 无线通信系统建设构想[J].工矿自动化,2021,47(10):1-6,13.
- [49] 孙继平.煤矿用 5G 通信系统标准研究制定[J].工矿自动化,2023,49(8):1-8.
- [50] 欧阳贵喜,许高明,刘太君.5G 光载无线通信前传系统数字预失真线性化研究[J].微波学报,2023,39(3):85-88,96.
- [51] 韩利强.基于 5G 技术控制的煤矿救援机器人的设计[J].煤矿安全,2021,52(6):168-171.
- [52] 刘建.矿用救援机器人关键技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
- [53] 朱华,由韶泽.新型煤矿救援机器人研发与试验[J].煤炭学报,2020,45(6):2 170-2 181.
- [54] 张旭辉,董润霖,马宏伟,等.基于虚拟现实的煤矿救援机器人远程控制技术[J].煤炭科学技术,2017,45(5):52-57.
- [55] 陈炜,马利,陈吉保.救援机器人远程控制系统的设计与实现[J].制造业自动化,2016,38(2):67-70.
- [56] 段晓峰,玉正英,刘琪,等.基于 LoRa 及 MSP430 的影音实时传输搜救机器人研究与设计[J].机电信息,2017(9):86-87.
- [57] 戴姗姗,王学让.仿人型煤矿环境探测机器人自主避障研究[J].煤矿机械,2010,31(3):50-51.
- [58] 王学让,朱华,高进可.煤矿环境探测救灾机器人自主避障研

- 究[J].煤矿机械,2010,31(10):46-48.
- [59] 刘罡,刘玉斌,赵杰,等.基于可视切线图的新型煤矿救援机器人路径规划[J].吉林大学学报(工学版),2011,41(4):1 107-1 112.
- [60] 朱晓飞.煤矿救灾机器人的惯性/视觉组合导航方法研究[J].矿山机械,2010,38(4):12-14.
- [61] 卢万杰,付华,赵洪瑞.煤矿井下探测搜救机器人地形感知系统及路径规划方法研究[J].传感技术学报,2019,32(7):979-985.
- [62] 翟国栋,张文涛,岳中文,等.基于双目视觉技术的煤矿救援机器人研究进展[J].煤炭科学技术,2020,48(7):206-217.
- [63] 张元刚,刘坤,白猛,等.井下多传感器组合导航系统[J].工矿自动化,2019,45(7):10-16.
- [64] 李世银,王铨,张楠.基于MEMS惯性传感器的井下人员定位系统[J].煤矿安全,2017,48(4):111-114.
- [65] 张羽飞,马宏伟,毛清华,等.视觉与惯导融合的煤矿移动机器人定位方法[J].工矿自动化,2021,47(3):46-52.
- [66] 谭玉新,杨维.一种基于UKF的井下机器人超声网络定位方法[J].煤炭学报,2016,41(9):2 396-2 404.
- [67] 张力,赵子恺,许晓东.惯性陀螺仪姿态角误差校正方法的研究[J].煤矿机械,2018,39(6):50-52.
- [68] 张鹏.基于改进粒子滤波的煤矿机器人定位方法研究[J].煤炭工程,2016,48(3):113-115,118.
- [69] 乔钢柱,曾建潮.信标节点链式部署的井下无线传感器网络定位算法[J].煤炭学报,2010,35(7):1 229-1 233.
- [70] CHENG T, KRIHELI B, LEVNER E, et al. Scheduling an autonomous robot searching for hidden targets [J]. Annals of operations Research, 2021, 298(1/2): 95-109.
- [71] GAO Y X, DAI Z L, YUAN J. A multiobjective hybrid optimization algorithm for path planning of coal mine patrol robot [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022(6): 1-10.
- [72] 杨春雨,张鑫.煤矿机器人环境感知与路径规划关键技术[J].煤炭学报,2022,47(7):2 844-2 872.
- [73] 宁竞,龙妍.改进蚁群算法的煤矿巡检机器人路径规划[J].煤炭技术,2023,42(6):235-237.
- [74] 姚正华,任子晖,陈艳娜.基于人工鱼群算法的煤矿救援机器人路径规划[J].煤矿机械,2014,35(4):59-61.
- [75] 朱磊,樊继壮,赵杰,等.基于栅格法的矿难搜索机器人全局路径规划与局部避障[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(11):3 421-3 428.
- [76] 周巍,李元宗.基于改进遗传算法的煤矿探测机器人路径规划[J].太原理工大学学报,2010,41(4):364-367.
- [77] 鲍久圣,张牧野,葛世荣,等.基于改进A*和人工势场算法的无轨胶轮车井下无人驾驶路径规划[J].中国煤炭学会学报,2022,47(3):1 347-1 360.
- [78] 王宏伟,李超,梁威,等.基于改进A*和势场法的轮式煤矿救援机器人路径规划[J].煤炭科学技术,2024,52(8):159-170.
- [79] 张伟民,张月,张辉.基于改进A*算法的煤矿救援机器人路径规划[J].煤田地质与勘探,2022,50(12):185-193.
- [80] 陶德俊,姜媛媛,刘延彬,等.煤矿救援机器人路径平滑算法研究[J].工矿自动化,2019,45(10):49-54.
- [81] 薛光辉,刘爽,王梓杰,等.基于改进概率路线图算法的煤矿机器人路径规划方法[J].工矿自动化,2023,49(6):175-181.
- [82] 黄友锐,李静,韩涛,等.基于膜计算的煤矿井下机器人路径规划算法[J].工矿自动化,2021,47(11):22-29.
- [83] SULAIMAN S, SUDHEER A P. Modeling of a wheeled humanoid robot and hybrid algorithm-based path planning of wheel base for the dynamic obstacles avoidance [J]. The Industrial Robot, 2022, 49(6): 1 058-1 076.
- [84] 郁露,唐超礼,黄友锐,等.基于UWB和IMU的煤矿机器人紧组合定位方法研究[J].工矿自动化,2022,48(12):79-85.
- [85] 曹波,王世博,葛世荣,等.基于IMU/UWB的井下采煤工作面端头采煤机定位试验研究[J].煤炭科学技术,2023,51(6):217-228.
- [86] 李猛钢,胡而已,朱华.煤矿移动机器人LiDAR/IMU紧耦合SLAM方法[J].工矿自动化,2022,48(12):68-78.
- [87] 赵红菊.基于IMU的煤矿机器人定位算法研究[J].煤炭技术,2022,41(6):192-195.
- [88] 江松,崔智翔,代碧波,等.暗环境适应性的基于SLAM的煤矿井下机器人定位方法[J].煤炭科学技术,2025,53(5):349-361.
- [89] MU Q, WANG Y H, LIANG X, et al. Autonomous localization and mapping method of mobile robot in underground coal mine based on edge computing [J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2024, 33(1): 2450018.
- [90] 陈伟,巫帅达,田子建,等.基于ORB-SLAM3视觉与惯导融合的煤矿机器人定位算法研究[J/OL].煤炭科学技术, 1-12 [2025-04-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240325.1213.002.html>.
- [91] 郑学召,闫兴,郭军,等.煤矿救灾机器人防爆技术研究[J].工矿自动化,2019,45(9):13-17.
- [92] 郭长亮.防爆型直线超声电机的研究[D].郑州:郑州大学,2012.
- [93] 何惠明.隔爆变频一体式电机关键技术研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2012.
- [94] 李建成,王富春.矿用隔爆型电机的水冷结构与温升计算[J].电机与控制应用,2017,44(11):89-94.
- [95] 赵峰.煤矿环境探测机器人混合动力电源研究[J].煤矿机械,2011,32(12):60-62.
- [96] 鲁怀敏,方海峰,蔡李花,等.煤矿救灾机器人动力电源研究[J].工矿自动化,2013,39(7):38-42.
- [97] MA G J, XU S P, JIANG B B, et al. Real-time personalized health status prediction of lithium-ion batteries using deep transfer learning [J]. Energy & Environmental Science, 2022, 15(10): 4 083-4 094.
- [98] 王长龙,李学威,徐芳,等.静态正压防爆技术在矿井搜救机器人中的应用[J].煤炭工程,2009,41(11):96-98.
- [99] 李允旺,葛世荣,朱华,等.煤矿救灾机器人隔爆壳体的设计与加工[J].煤矿机械,2009,30(2):104-106.
- [100] 韩一鹏.矿用隔爆壳体开孔补强设计强度研究[J].电气防爆,

2017(1):9-12.

材料研究与应用[J].中国煤炭,2024,50(1):87-92.

[101] 王海燕,张梅,代卫卫,等.煤矿机器人防爆外壳纤维复合增强

Research status and key technologies of mine rescue robots

Lin Xuejing, Zhao Jianbo, Wang Zhiyi, Zhao Huaming, Zhou Jinjiang, Yang Junyan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Zaozhuang University)

Abstract: Mine rescue robots are primarily used for search-and-rescue feedback operations following underground disasters and play a significant role in improving rescue efficiency and ensuring mine safety. This paper reviews the research progress from 4 perspectives: mechanical structure design, communication systems, positioning technologies, and explosion-proof mechanisms. In terms of mechanical structure, the advantages and disadvantages of tracked, intelligent bionic, and modified wheeled designs are analyzed, and a concept for the application of six-wheeled robots in mine rescue is proposed. In the communication system section, the applicability of Mesh, WiFi, ZigBee, 5G, and other wireless technologies is introduced, along with suggestions for improving system functions based on different usage priorities. Regarding positioning technology, the paper discusses the applications and integration of 4 mainstream techniques: environmental sensing, rescue path planning, IMU-based positioning, and SLAM. For explosion-proof systems, explosion-proof motors, protective enclosures, power supply, and explosion-proof material selection strategies are addressed to support lightweight robot design. Finally, the development trends of mine rescue robots are forecasted, offering a reference for future research and application, and contributing to the technological advancement of the industry.

Keywords: mine rescue robot; mechanical structure; communication system; underground rescue positioning; explosion-proof design; intelligentization