

文章编号:1671-251X(2019)09-0034-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17476

矿山救援机器人群设计

文虎^{1,2}, 刘洋^{1,2}, 郑学召^{1,2}, 郭军^{1,2}

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054;
2. 国家矿山救援西安研究中心, 陕西 西安 710054)



扫码移动阅读

摘要:针对目前矿山机器人适应性差、通信能力弱、机动性差等问题,设计了矿山救援机器人群。该机器人群主要包括通信机器人、搜救机器人、辅助救援机器人和数据处理中心。通信机器人利用超宽带雷达进行生命探测,找出被困人员的具体位置,同时通过内置中继设备保证救援过程中的信息传输;搜救机器人按照实时路径规划行驶并传回音频、视频、井下环境信息,在找到被困人员之后充当通信设备,构建救援人员与被困人员的通信渠道;辅助救援机器人包括负责打通救援路径的清障机器人和为被困人员输送救援物品的物资运送机器人;数据处理中心根据被困人员位置信息,通过 GIS 规划搜救机器人的搜救路线,并根据井下实时信息进行路径修正。机器人群中各类机器人相互协作、功能互补、信息统一化处理,可有效减少因灾 after 环境不明而带来的二次伤害,提高救援效率。

关键词:矿山救援; 机器人群; 通信机器人; 搜救机器人; 辅助救援机器人; 清障机器人; 物资运送机器人

中图分类号:TD67 文献标志码:A

Design of mine rescue robot group

WEN Hu^{1,2}, LIU Yang^{1,2}, ZHENG Xuezhao^{1,2}, GUO Jun^{1,2}

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Research Center of National Mine Rescue, Xi'an 710054, China)

Abstract: In view of problems of poor adaptability, communication ability and maneuverability of current mine robots, a mine rescue robot group was designed. The robot group mainly includes a communication robot, a search and rescue robot, an auxiliary rescue robot, and a data processing center. The communication robot uses UWB radar for life detection to find out specific location of trapped person, and at the same time guarantees information transmission during rescue process through built-in relay device. The search and rescue robot walks according to the real-time path and feedback audio, video, and underground environment information, and acts as a communication device after finding the trapped person, thus constructs a communication channel between the rescuer and the trapped person. The auxiliary rescue robot includes a wrecking robot which is responsible for getting through the rescue route and a material transport robot which is responsible for delivering rescue items to the trapped people. The data processing center plans search and rescue route of rescue robot through GIS according to position information of the trapped person, and correct the path according to underground real-time information. All kinds of robots in the robot group cooperate with each other, complement each other's functions, and unify the information, which can effectively reduce secondary damage caused by unclear environment after

收稿日期:2019-07-15;**修回日期:**2019-08-11;**责任编辑:**胡娴。
基金项目:国家重点研发计划重点专项项目(2018YFC0808201);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JM5009,2018JQ5080)。
作者简介:文虎(1972—),男,新疆石河子人,教授,博士生导师,主要从事煤自燃理论与矿山应急救援方面的科研与教学工作,E-mail:wenh@xust.edu.cn。
引用格式:文虎,刘洋,郑学召,等. 矿山救援机器人群设计[J]. 工矿自动化,2019,45(9):34-39.
WEN Hu, LIU Yang, ZHENG Xuezhao, et al. Design of mine rescue robot group[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(9): 34-39.

the disaster and improve rescue efficiency.

Key words: mine rescue; robot group; communication robot; search and rescue robot; auxiliary rescue robot; clearing robot; material transport robot

0 引言

煤炭在我国能源结构中占有重要地位,为经济发展提供了主要推力^[1]。近年来我国煤矿总体安全形势大为好转,事故起数、死亡人数、百万吨死亡率等大幅度下降^[2-3]。但是重特大事故时有发生,对煤矿安全生产造成了严重影响^[4]。实践证明,矿难发生后,往往有多数矿工存活,如能及时营救,被困人员获救生还的概率将大大提高^[5]。但是由于灾后井下环境状况不明,传统的逐步推进救援模式效率低下,而且一旦遇到二次灾害还有可能加大人员伤亡数量。利用机器人救灾为矿井救援带来了新的方向^[6]。

国外对煤矿救援机器人的研究较早,已研发了多种用途的救援机器人^[7]。V. Gomathi 等^[8]设计了一种使用无线传感器网络的煤矿救援机器人,可对井下气体、温度等环境数据进行实时采集传输。L. Molyneaux 等^[9]通过研究机器人煤矿救援失败的原因,设计了具有独特底盘和运动系统、对井下灾后环境适应力强的机器人。C. Baker 等^[10]设计了可自主勘探矿井并绘图的机器人,成功获得了大量实验数据。我国在煤矿救灾机器人方面的研究虽起步较晚,但也取得了不错的成绩^[11]。哈尔滨工业大学机器人研究所研制的煤矿井下探测机器人可以实现较高障碍物的攀爬,而且配置了多种传感器,为实现机器人局部自主避障与导航提供了保障^[12]。李懿等^[13]针对井下掩埋情况下不容易实施搜救的问题,结合蚯蚓在土壤中运动的生物特点,设计了一种新的救援机器人。李起伟等^[14]提出了一种矿山救援机器人的全局路径规划方法,在一定程度上实现了机器人自主避障和路径选择。

虽然煤矿机器人在事故救援中的应用取得了一些成绩,但是依然存在机动性差、通信能力弱、适应性差等问题^[15]。如美国智能系统和机器人中心开发的 RATLER 矿井探索机器人,虽然装备了主动红外摄像机、陀螺仪和危险气体传感器等设备,但是存在通信距离短、机动性差等问题,与矿井实际应用要求还有不小的差距。卡内基梅隆大学机器人研究中心开发的全自主矿井探测机器人 Groundhog 虽然功能强大,但是体积巨大,灾后环境适应能力不强,曾经陷入泥浆,目前还不适合在煤矿搜救方面应用^[16]。针对上述问题,笔者设计了矿山救援机器人

群,该机器人群包含 3 类机器人:① 搭载 UWB (Ultra Wideband,超宽带)雷达和中继设备、负责大区域生命探测与通信的通信机器人。② 具有小体积、高移动性,搭载摄像头、灯光及各类传感器的搜救机器人。③ 能够进行挖掘、钻扩、救援物资运输的辅助救援机器人。通过机器人群的协作救援,可大大提高煤矿救援效率,增加救援成功率。

1 总体设计思路

矿山救援机器人群工作原理如图 1 所示。

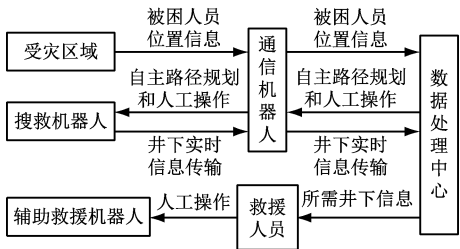


图 1 矿山救援机器人群工作原理

Fig. 1 Working principle of mine rescue robot group

通信机器人利用 UWB 雷达进行生命探测,找出被困人员的具体位置,将信息上传至数据处理中心。数据处理中心将被困人员位置信息传输到救援指挥中心和各管理人员手机中,并通过 GIS (Geographic Information System,地理信息系统) 规划搜救机器人的搜救路线,根据井下实时信息进行路径修正。同时,通信机器人开启内置中继设备,将其作为通信节点构建灾后通信网络,保证救援过程中的信息传输。搜救机器人按照实时路径规划行驶,在行驶过程中实时传回音频、视频、井下环境信息,在找到被困人员之后充当通信设备,构建救援人员与被困人员的通信渠道,使救援人员能够掌握被困人员信息。数据处理中心根据搜救机器人传输的各类信息生成可供参考的救援方案,并选取合适的辅助救援机器人。辅助救援机器人在搜救机器人确定区域安全的情况下由救援人员操作前进,在道路不通的情况下打通道路,保证救援顺利进行,还可为被困人员提供所需物资,直到救援成功。

2 机器人设计

2.1 通信机器人

通信机器人主要包括控制器、动力系统、中继器、UWB 雷达、电池、隔爆外壳、红外摄像头,用于确定被困人员的具体位置和建立灾后通信网络。

通信机器人关键部分设计:

(1) 定位方式。灾害发生后,快速、精确地确定被困人员位置对于之后搜救机器人的行动和后续救援的开展十分重要。机器人属于无线控制,在救援过程中要尽可能延长作业时间,因此需要降低能耗。UWB 技术具有抗干扰能力强、功率小、能耗低、信息传输速率高等特点^[17],且经过优化后定位精度可达到厘米级^[18]。因此,通信机器人采用 UWB 技术进行人员定位。

(2) 防爆方式。对于煤矿而言,救援机器人的应用效果一直不理想,主要原因在于井下有甲烷、一氧化碳、煤尘等易燃易爆物体,必须对救援机器人进行防爆设计。当前应用最广的防爆设计方法主要有隔爆设计和本质安全设计。本质安全设计主要是限制电气设备所能释放的最大能量,以此来防止爆炸,采用这种设计的电气设备虽然安全性高,但是功率较小。隔爆设计主要是通过一定强度的腔体将电气设备和外界环境隔离,即使发生爆炸也不会破坏腔体,防止爆炸扩散^[19]。隔爆外壳可以对内部元件起到一定保护作用^[20],为保证隔爆强度,隔爆壳体一般质量较大,较为笨重。为保证机器人机动性与安全性,本文所涉机器人均采用本质安全兼隔爆设计。根据实际要求调整本质安全型与隔爆型所占比例,以尽可能保证机器人功能。

灾后环境不稳定,可能会发生二次灾害,而且通信机器人主要承担的任务为人员定位与辅助通信,对机动性要求不高,但是需要具有较长的工作时间。结合以上要求,通信机器人采用防爆外壳,将除 UWB 雷达、中继天线外的所有设备全部包裹在内,其中 UWB 雷达采用本质安全设计。考虑到 UWB 雷达成本较高^[21],为其加装玻璃钢防护罩,在遇到二次爆炸时尽可能保证机器人内部仪器的安全,使其能正常执行任务。如果遇到的爆炸较大,也可保证设备的完好性,以进行二次利用。

(3) 中继器。机器人远程控制及信息实时传输都必须依赖良好的通信能力^[22]。通信方式主要包括有线和无线 2 种,有线通信距离往往受线缆长度限制,井下无线通信传输距离也十分有限。为解决该问题,张旭辉等^[23]提出,井下通信网络会出现断点、弱点,在断点、弱点处设立中继器可满足正常通信要求。因此,在通信机器人中装入中继器,利用机器人的机动能力,使其变成一个移动的通信基站。通信机器人根据搜救机器人的信号强弱,随时调整位置,填补通信网络的断点与弱点,提供可靠的网络传输。

(4) 电池设计。通信机器人采用 2 块电池,其

中一块为动力系统和红外摄像头供电,另一块为中继器和 UWB 雷达供电。当动力电池故障时,机器人仍可执行通信侦测任务,当另一块电池故障时,机器人仍可以正常行驶,保证机器人撤出井下。

2.2 搜救机器人

搜救机器人的主要功能是按数据处理中心规划的路径找到被困人员,并将路径中的路况信息、气体成分反馈给数据处理中心。搜救机器人主要包括控制器、动力系统、红外摄像头、本安电池、多种气体传感器、红外预警装置、音视频通信器、定位导航系统。

搜救机器人关键部分设计:

(1) 外形设计。搜救机器人主要用于人员搜索,要求具有一定的行驶速度,因此,外壳选用轻质金属,以减轻自身质量。由于井下行驶环境复杂,机身过轻易发生侧翻,所以在机器人两端各装备 4 个动力轮,每 2 个相邻动力轮夹角为 90° ,且机身设计成正长方体,这样即便发生侧翻,机器人仍能正常行驶。

(2) 红外摄像头。搜救机器人要对井下路况进行实时侦查,结合为防止侧翻的机身设计,在机器人前、后、左、右、上、下加装红外摄像头,以保证地面指挥中心深入了解井下情况。即使机器人发生侧翻,仍可采集井下视频信息。后部装配摄像头主要是因为井下灾后环境易发生变化,需要掌握机器人后方信息。

(3) 各类气体传感器。矿井中存在多种有毒有害气体,给作业人员带来极大的威胁,甚至危及生命^[24]。因此,搜救机器人上装有多种气体传感器,用于检测行驶路径上的有毒有害气体,检测信息实时传输至数据处理中心,辅助生成救援方案。

(4) 音视频通信器。音视频通信器主要实现被困员工与地面救援中心的沟通,通过沟通了解被困员工的具体情况,根据员工需求配送物品,还可以对员工进行心理疏导,增强他们的信心。

(5) 防爆方式。搜救机器人要有一定的机动能力,自身不能太重,因此,只对电动机和电池进行隔爆处理,其余装备采用本质安全型设备,以尽可能减小机器人质量,在保证机动性的同时,降低能耗。

(6) 红外预警装置。搜救机器人在行驶过程中可能会遇到障碍物,虽然装有红外摄像头,但是考虑井下环境昏暗和操作人员自身状态,设置了红外预警装置,在发现障碍物时自动报警,提醒操作人员避让。

(7) 定位导航系统。定位导航对搜救机器人来说至关重要,能否准确定位和导航对其工作效率有很大影响。当前较为通用的定位技术主要为 GPS (Global Positioning System, 全球定位系统),但是井下无法接收 GPS 信号^[25]。近年来 GIS 在矿山应

用方面迅速发展, 矿山 GIS 不仅可满足机器人定位导航需求, 还可针对实际情况进行路径规划^[26-27]。综合考虑, 搜救机器人采用 GIS 技术实现定位导航。

利用矿区现有的电子矿图、巷道信息等各类矿区地理信息建立矿区 GIS。实施救援时将通信机器人采集到的人员位置信息输入矿区 GIS, 由专家确定救援路径。然后根据搜救机器人传回的信息, 利用矿用 GIS 实时更新搜救机器人位置^[28]。根据采集的信息和专家分析判断进行路径修正, 为操作人员提供最佳搜救路径导航。定位导航系统原理如图 2 所示。

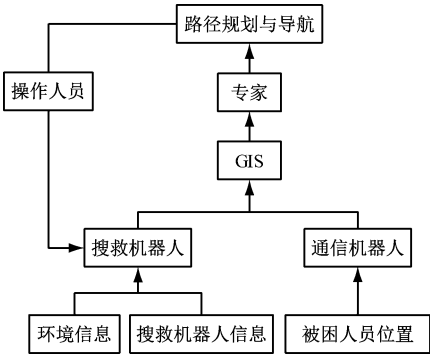


图 2 定位导航系统原理

Fig. 2 Principle of positioning navigation system

2.3 辅助救援机器人

辅助救援机器人的主要任务是帮助救援人员打通救援路径, 并为被困人员提供必须的物质保障。为满足救援需求, 结合井下灾后环境的不确定性, 提出清障机器人、物资运送机器人这 2 种救援机器人。为实现辅助救援功能, 机器人需要大功率电气设备的配合, 因此, 2 种机器人都采用与通信机器人相似的防爆方式。清障机器人主要任务是配合救援人员打通救援路径, 具有重物搬运、钻扩、挖掘等功能, 可大大缩短救援时间。物资运送机器人负责向被困人员输送食物、水、药物等, 维持被困人员生命, 为救援工作赢取时间, 增加被困人员获救的可能性。

目前, 我国矿用救援机器人快速发展。王南等^[29]提出的新型智能救援机器人可实现井下重物托举, 帮助救援队员实施营救。中国矿业大学救灾机器人研究所研制的 CUMT-I 救灾机器人不仅可获取井下视频信息, 还可以向被困人员运输水、药品等救灾物资^[30]。

3 数据处理中心

数据处理中心是救援机器人群的核心, 包括智能信息处理系统、机器人远程控制系统、信息共享平台 3 个部分。

3.1 智能信息处理系统

智能信息处理系统主要利用云计算与大数据技术进行信息分析、处理, 实现机器人群的整体化、智能化和救援的高效化。

(1) 机器人群的整体化。机器人群中的多种机器人采用同一个智能处理平台, 彼此信息共享, 从而实现整体化。具体来说, 通信机器人定位信息可用于搜救机器人路径规划, 搜救机器人的信号强弱可辅助通信机器人进行位置调整, 搜救机器人采集的路径信息和被困人员信息可为辅助救援机器人的选择提供依据。在统一的信息处理平台下, 多种机器人形成了一个可实现定位、通信、信息采集和辅助救援等功能的有机整体, 如图 3 所示。

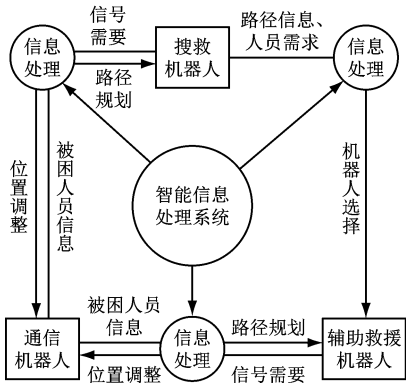


图 3 机器人群整体化原理

Fig. 3 Integration principle of robot group

(2) 机器人群的智能化。受限于井下特殊的救援环境, 实现救援机器人智能化具有一定难度^[31]。随着计算机网络的发展, 相关研究者提出可将计算机网络看成和移动机器人一样的智能系统^[32]。考虑井下环境与未来发展, 本文采取的构建方法为机器人个体的简单化和信息处理系统的智能化。机器人个体仅负责信息采集和指令执行, 用大数据、云计算构建的智能信息处理系统负责数据处理和分析, 并将结果反馈给各机器人。虽然机器人个体不具备信息分析、处理能力, 但是利用通信手段实现信息实时传输, 可以达到机器人群集数据采集、信息处理、命令执行于一体的效果, 如图 4 所示。

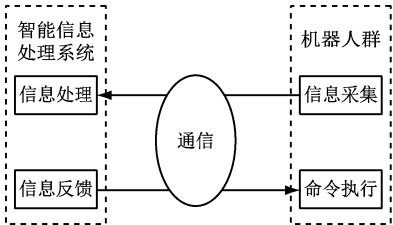


图 4 机器人群智能化原理

Fig. 4 Intelligent principle of robot group

(3) 救援的高效化。智能信息处理系统可实现信息快速处理和集中分析, 对救援中的各类情况进

行预先模拟判断,结合以往救援经验,自主生成科学的救援方案供管理人员和专家参考,从而大大节省决策时间。

3.2 远程控制系统

远程控制系统用于实现救援人员对机器人的远程操作,同时,进一步筛选处理井下各类信息分析处理结果,提出建议,辅助操作人员进行操作。远程控制原理如图 5 所示。

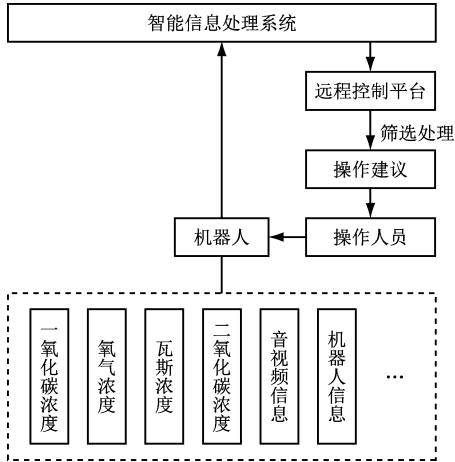


图 5 远程控制原理
Fig. 5 Remote control principle

为方便使用,考虑操作人员的驾驶习惯,采用一大屏、多小屏的方式显示机器人采集的视频信息。机器人前方视频信息在大屏上显示,其余视频信息、气体浓度、机器人信号强度等由小屏显示。操作人员可随时将小屏的视频信息切换到大屏显示。

3.3 信息共享平台

为提高救援的成功率,除需要全面采集信息外,提高信息利用率也是非常重要的一环。通过信息共享平台可将井下视音频信息、气体浓度信息等传输给不在现场的专家、井下救援人员等,使专家对救援现场情况有更加直观、深入的了解,便于提出更科学的救援建议,同时也可使井下救援人员对信息有更加实时、全面的了解。信息共享平台原理如图 6 所示。

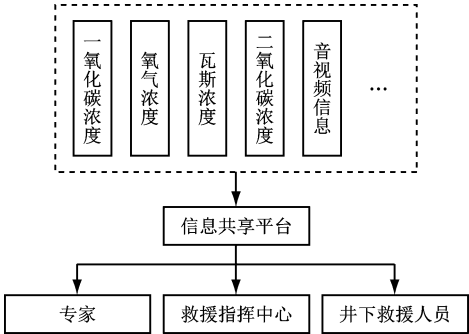


图 6 信息共享平台原理

Fig. 6 Principle of information sharing platform

4 结语

针对当前机器人的发展状况与煤矿灾后条件,设计了矿山救援机器人,包括负责人员定位和保证灾后通信的通信机器人、负责人员搜救和信息采集的搜救机器人及负责疏通路径和输送物品的辅助救援机器人,通过统一的数据处理中心将 3 种机器人组合成一个具有定位、搜索、救援功能的有机整体,通过信息采集、分析、处理,生成可供参考的救援方案。该机器人可提高井下救援效率,增加救援成功率,同时可有效减少因灾后环境不明而带来的二次伤害。

参考文献(References):

[1] 郭军,刘荫,金永飞,等. 矿井胶带火灾巷道环境多参数时空演化规律[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(1):21-27.
GUO Jun, LIU Yin, JIN Yongfei, et al. Spatiotemporal evolution law of multiple parameters of roadway environment for rubber-belt fire in mine[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(1):21-27.

[2] 郑学召,回硕,文虎,等. 矿井火灾孕灾机制及防控技术研究进展[J]. 煤矿安全, 2017, 48(10):148-151.
ZHENG Xuezhao, HUI Shuo, WEN Hu, et al. Research progress on preventing and controlling technology and disaster-forming mechanism of mine fire[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(10):148-151.

[3] 孙继平. 煤矿物联网特点与关键技术研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1):167-171.
SUN Jiping. Research on characteristics and key technology in coal mine Internet of things[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1):167-171.

[4] 郑学召,王虎,文虎,等. 矿井钻孔救援通信技术研究进展及趋势[J]. 工矿自动化, 2017, 43(9):41-45.
ZHENG Xuezhao, WANG Hu, WEN Hu, et al. Research progress and tendency of mine drilling rescue communication technology[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(9):41-45.

[5] 文虎,张铎,郑学召. 矿山钻孔救援生命探测技术研究进展及趋势[J]. 煤矿安全, 2017, 48(9):85-88.
WEN Hu, ZHANG Duo, ZHENG Xuezhao. Research progress and trend of life detection technology of drilling and rescue in mine[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(9):85-88.

[6] 由韶泽,朱华,赵勇,等. 煤矿救灾机器人研究现状及发展方向[J]. 工矿自动化, 2017, 43(4):14-18.
YOU Shaoze, ZHU Hua, ZHAO Yong, et al. Research status of coal minie rescue robot and its development direction[J]. Industry and Mine Automation, 2017,

43(4):14-18.

[7] 李猛钢. 煤矿救援机器人导航系统研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.

[8] GOMATHI V, SOWMYA A S, AVUDAIAMMAL P S, et al. Design of an adaptive coal mine rescue robot using wireless sensor networks [C]//IJCA Proceedings on National Conference on Information Processing and Remote Computing, 2015.

[9] MOLYNEAUX L, CARNEGIE D A, CHITTY C. HADES: An underground mine disaster scouting robot[C]//IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, 2015.

[10] BAKER C, MORRIS A, FERGUSON D, et al. A campaign in autonomous mine mapping[C]// IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2004.

[11] 何凯. 基于双目视觉的煤矿井下救援机器人避障策略的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.

[12] 庄秀丽. 煤矿井巷环境下的机器人障碍识别研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.

[13] 李懿, 马翔宇, 李媛. 救援机器人设计与分析[J]. 煤矿机械, 2018, 39(9): 12-14.

LI Yi, MA Xiangyu, LI Yuan. Design and analysis of rescue robot[J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(9): 12-14.

[14] 李起伟, 张立亚. 矿山应急救援机器人全局路径规划的研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(8): 249-251.

LI Qiwei, ZHANG Liya. Research of global path planning in mine emergency rescue robot [J]. Coal Technology, 2016, 35(8): 249-251.

[15] 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.

[16] 王勇, 朱华, 王永胜, 等. 煤矿救灾机器人研究现状及需要重点解决的技术问题[J]. 煤矿机械, 2007, 28(4): 107-109.

WANG Yong, ZHU Hua, WANG Yongsheng, et al. Current status and technical problems in research of coal mine rescue robot [J]. Coal Mine Machinery, 2007, 28(4): 107-109.

[17] 刘书伦, 王树森. 基于超宽带技术的井下人员定位系统[J]. 工矿自动化, 2014, 40(10): 81-83.

LIU Shulun, WANG Shusen. Underground personnel positioning system based on ultra wideband technology[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(10): 81-83.

[18] 张忠娟. 基于 UWB 的室内定位技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.

[19] 李雨潭, 朱华. 煤矿救援机器人防爆创新设计探讨[J]. 煤炭技术, 2018, 37(2): 269-271.

LI Yutan, ZHU Hua. Discussion on explosion-proof innovative design of coal mine rescue robot [J]. Coal Technology, 2018, 37(2): 269-271.

[20] 雷利伟, 朱斌, 贾瑞卿. 轻型轮式废弃矿井探测机器人的防爆设计[J]. 煤矿机械, 2014, 35(4): 1-3.

LEI Liwei, ZHU Bin, JIA Ruiqing. Explosion-proof design for light wheel abandoned mine detection robot [J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(4): 1-3.

[21] 郑学召, 李诚康, 文虎, 等. 矿井灾害救援生命信息探测技术及装备综述[J]. 煤矿安全, 2017, 48(12): 116-119.

ZHENG Xuezhao, LI Chengkang, WEN Hu, et al. Summary of mine disaster rescue life information detection technology and equipment[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(12): 116-119.

[22] 葛世荣, 朱华. 危险环境下救援机器人技术发展现状与趋势[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 1-8.

GE Shirong, ZHU Hua. Technical development status and tendency of rescue robot in dangerous environment[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 1-8.

[23] 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.

ZHANG Xuhui, DONG Runlin, MA Hongwei, et al. Study on remote control technology of mine rescue robot based on virtual reality [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 52-57.

[24] 胡国庆. 综采作业面毒害气体积聚机制和安全监测技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.

[25] 贾建华, 张静. 基于 GIS 的矿井救援机器人定位导航研究[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(5): 76-79.

JIA Jianhua, ZHANG Jing. Research on position and navigation of mine rescue robot based on GIS [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(5): 76-79.

[26] 张峰. GIS 支持下的矿井可视化信息管理系统研究[D]. 唐山: 河北理工大学, 2005.

[27] 桑玲玲. 适合煤矿救援机器人的矿山地理信息系统研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2008.

[28] 张静. 基于救援机器人的矿井 GIS 技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.

[29] 王南, 贺娜. 新型智能救援机器人的设计[J]. 煤矿机械, 2015, 36(8): 163-166.

WANG Nan, HE Na. Design of new intelligent rescue robot [J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(8): 163-166.

[30] 魏毅龙. 煤矿井下探测与搜救机器人机械系统设计与研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.

[31] 于振中, 蔡楷偶, 刘伟, 等. 救援机器人技术综述[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2015, 14(4): 498-504.

YU Zhenzhong, CAI Kaiti, LIU Wei, et al. Review of rescue robot technology [J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2015, 14(4): 498-504.

[32] 鄂旭. 物联网概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.