



文章编号:1671-251X(2019)02-0024-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018010010

矿山钻孔救援探测机器人研究进展

马宏伟, 马琨, 田海波

(西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:分析了国内外钻孔救援技术、煤矿救援探测机器人及矿山钻孔救援探测机器人的研究现状,指出将煤矿救援探测机器人和管道机器人的研究成果与矿山钻孔救援的探测需求相结合,可以研制出满足要求的矿山钻孔救援探测机器人,提高井下灾后救援的成功率。从移动机构、导航、定位和路径规划、传感探测、通信和控制方式、能源供给、防爆性能等方面分析了矿山钻孔救援探测机器人的关键技术及其发展趋势,指出应围绕机器人的通过性、可靠性、轻量化、智能化等目标,在移动机构、能源供给和防爆性能等方面进行创新设计,提高传感检测范围和精度,研究未知、非结构化环境中的导航、定位及控制的智能算法,提高机器人的环境适应性。

关键词:矿山钻孔救援;煤矿救援探测机器人;矿山钻孔救援探测机器人;移动机构;导航定位;路径规划;传感探测;通信;能源供给

中图分类号:TD77 文献标志码:A

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20190121.1331.002.html>

Research progress of mine drilling rescue detection robots

MA Hongwei, MA Kun, TIAN Haibo

(College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The paper analyzed research status of rescue drilling technology, coal mine rescue detection robot and mine drilling rescue detection robot at home and abroad. It pointed out that using the research achievements of the coal mine rescue detection robot and pipeline robot combined with detection requirements of mine rescue drilling can develop the mine rescue drilling detection robot which meet the requirements of mine application, and improve rescue success rate of mine disaster. It also analyzed key technologies and development trend of mine rescue drilling detection robot in items of mobile mechanism, navigation, location and path planning, sensor detecting, communication and control mode, energy supply and explosion-proof performance. Meanwhile, it put forward that innovative design should be done on mobile mechanism, energy supply and explosion-proof performance around trafficability characteristic, reliability, lightweight, intelligentization of robot, so as to improve detection range and accuracy of the sensor; and intelligent algorithms of navigation, location and control in unknown and unstructured environment should be researched, so as to improve the environmental adaptability of the robot.

Key words: mine drilling rescue; coal mine rescue detection robot; mine drilling rescue detection robot;

收稿日期:2018-01-08;修回日期:2018-08-21;责任编辑:张强。

基金项目:陕西省科技统筹创新工程计划项目(2013KTCL01-02);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2015JM5235);陕西省教育厅科学研究计划服务地方专项项目(16JF019)。

作者简介:马宏伟(1957—),男,陕西兴平人,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为智能检测与控制、机器人技术、现代无损检测与评价、煤矿机电设备及其智能化、矿山机电设备故障诊断与健康维护等,E-mail:mahw@xust.edu.cn。

引用格式:马宏伟,马琨,田海波. 矿山钻孔救援探测机器人研究进展[J]. 工矿自动化,2019,45(2):24-29.

MA Hongwei, MA Kun, TIAN Haibo. Research progress of mine drilling rescue detection robots[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(2): 24-29.

mobile mechanism; navigation and location; path planning; sensing and detection; communication; energy supply

0 引言

在矿山井下开采作业中,瓦斯爆炸、冒顶垮塌、透水等事故时有发生,常常导致人员伤亡。事故发生后,井下环境和事故现场情况均未知,若救援人员贸然下井,极易造成伤亡。如何快速开展救援,直接关系到被困人员的生命安全^[1-2]。

井下事故救援中,探测机器人是不可缺少的媒介和探测工具。应用救援探测机器人代替救援人员迅速进入事故现场,可对井下环境信息进行采集和检测,并传送到地面救灾中心,为救援决策及时提供现场信息^[3]。煤矿救援探测机器人作为井下的特种机器人,其研究进展的快慢、功能的完善和性能的优劣,直接关系到煤矿救援技术的水平。

钻孔救援技术是矿山事故应急救援的有效新途径,也是应急救援发展的热点。随着地面大型救生钻机和井下轻型救生钻机及其配套的支护、排水、注浆等装备的发展,精确钻孔和定位技术及救援钻孔效率的提高,矿山钻孔救援将会成为矿山应急救援的重要组成部分。

目前钻孔救援信息探测所用的相关仪器缺乏移动能力,仅能获取井下孔口附近小范围的信息,探测范围小,救援效率低。利用钻孔救援探测机器人通过探测孔进入灾害现场附近,通过移动机构扩大救援探测范围,可为后续钻孔提供精确坐标,并可将相关环境和人员信息及时反馈回救灾中心,为制定救援方案提供依据。钻孔救援探测机器人的研究和应用对创新钻孔救援理念、提升钻孔救援探测技术水平、构建全新的钻孔救援系统、提高钻孔救援效率具有极其重要的意义。

1 矿山钻孔救援技术研究现状

矿山井下发生事故后,以往采用的直接透巷或新掘绕巷的方法效率低下且易引起二次事故。为此,近年来越来越多的研究人员把注意力转移到了矿山钻孔救援技术领域^[4]。

钻孔救援技术是指发生事故后,在巷道堵塞或被毁的情况下,在地面使用大型救生钻机,采用地面定向钻井技术,通过钻孔打通通道,向被困人员提供给养,再扩孔抢救被困人员。钻孔救援主要包括2个阶段:小直径钻孔探测和大直径钻孔救人,即先从地面钻直径为225 mm左右的小孔至井下,提供给养或放置信息探测仪器到井下孔口,探测孔口周

围的环境和生命信息,获得被困人员的准确位置,然后从地面钻600 mm左右的大孔至井下巷道,放置救生舱救人。

通过实际救援案例发现,钻孔救援技术在矿山事故救援中发挥了重要作用,并积累了宝贵经验。在国外,2002年6月,美国宾夕法尼亚州某煤矿发生透水事故后,采用钻孔救援技术打通先导孔实现与被困人员通信并提供氧气和给养,再利用大直径钻孔将被困人员救出。这是美国在煤矿事故救援中第一次成功运用钻孔技术,对后来的钻孔救援方法产生了重大影响^[5]。2003年1月,澳大利亚某煤矿发生冒顶事故后,采用钻孔救援技术准确透巷并与被困人员取得联系,提供给养,通过扩孔救出被困人员^[6]。2010年8月,智利某铜矿发生坍塌事故后,利用小直径孔与被困人员取得联系并输送给养,再扩孔救人,经过70多天救援,30多名被困人员成功获救^[7]。

在国内,也多次尝试在矿山事故救援中运用钻孔救援技术。2004年4月,在河南某煤矿透水事故救援中,采用地面垂直快速钻进、掘绕巷等多种方案同时开展救援工作。虽然最后通过掘绕巷的方法将被困人员救出,但也演练了通过钻孔投放食物的项目,证明了钻孔救援技术是一种切实可行的救援手段^[8]。2010年3月,在山西某煤矿透水事故救援中,按照地面钻孔救援技术方案,完成了钻井定位、快速钻进和实施救援等任务^[9]。2010年3月,内蒙古某煤矿发生透水事故,也实施了钻孔救援,但由于灾情复杂,虽累计钻孔20多个,但仍未达到救援目的。2015年12月,山东某石膏矿发生垮塌事故,同样先通过探测孔对井下环境进行探测,确定被困人员位置信息,再进行大直径钻孔,将被困人员救出^[10]。

目前,钻孔救援技术还存在一些不足。首先,井下受困人员的精确定位是钻孔救援的最基本要素,但目前缺乏对长距离和强穿透能力的生命探测技术、被困人员求救信号的远距离辨识和定位技术的研究^[11]。其次,在精确定位的基础上,提高钻孔效率是营救被困人员的关键,而目前缺乏专用快速救援钻孔装备及其配套机具的研究和应用。

钻孔救援技术是矿山应急救援的一项有效实用的救生、救援技术。如果研制钻孔救援探测机器人进行探测,对井下被困人员进行精确定位,钻孔救援效率必将有很大的提高。

2 矿山救援探测机器人研究现状

目前,对于矿山救援探测机器人的研究以应用于煤矿救援探测为主,其探测方式主要是救援队携带机器人进入巷道,当救援人员无法前进时,通过远程控制机器人前进,到达事故现场。而矿山钻孔救援探测机器人则是利用机器人穿过打好的探测孔道进入事故现场附近进行救援探测,其研究才刚刚起步。

2.1 煤矿救援探测机器人研究现状

国内外研究者对煤矿救援探测机器人进行了深入研究并试制了机器人样机,但灾害发生后,井下实际情况比较复杂,事故现场环境更是恶劣,使得机器人无法快速到达事故现场,影响了救援效率。

在国外,美国卡内基梅隆大学研制了 Grounghog 和 Ferret^[12] 机器人,Remote 公司研制了 V2 煤矿救援机器人^[13](图 1),桑迪亚实验室研制了 Gemini-Scout 搜救机器人(图 2),这些机器人基本都从地面巷道口进入,采用履带式移动机构,通过携带的传感器对相关信息进行采集,并利用无线或有线方式进行通信和控制。但由于结构及控制方式的限制,这些机器人在应用时仍存在问题。日本针对狭小空间探索,研制了“ACM”系列蛇形仿生机器人样机^[14],能在崎岖的废墟上前进,并利用携带的小型摄像头和传感器寻找幸存者。

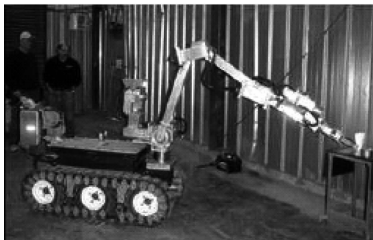


图 1 煤矿救援 V2 机器人
Fig.1 V2 coal mine rescue robot



图 2 Gemini-Scout 搜救机器人
Fig.2 Gemini-Scout search and rescue robot

在国内,中国矿业大学研制出了 CUMT-IIIB 型救援探测机器人^[15]、唐山开诚电控设备集团有限公司研制出了 KQR48 型矿井灾害环境探测机器人^[16](图 3),太原理工大学研制出了 TUT-CMDR 煤矿井下搜救机器人等^[17]。这些机器人都是针对

煤矿井下灾后非结构化环境,采用多节履带,携带相关传感器对环境和人员信息进行探测,以无线或有线通信实现远距离通信和控制。西安科技大学设计了六履带四摆臂煤矿救援探测机器人^[18],并在运动学动力学分析、运动控制、井下应急救援无线网络搭建和无线通信中继布放装置等方面进行了深入研究,取得了一系列成果,为今后的研究奠定了基础。

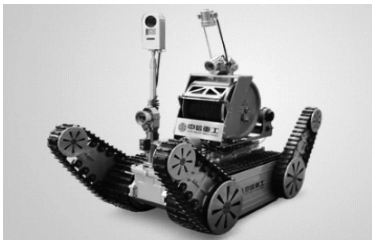


图 3 KQR48 型矿井灾害环境探测机器人
Fig.3 KQR48 mine disaster environment detection robot

目前,煤矿救援探测机器人大多处于试验研究阶段,鲜有成功救援探测的报道。但已积累了大量的经验,为进一步的研究奠定了基础。

2.2 矿山钻孔救援探测机器人研究现状

与一般的煤矿救援探测机器人相比,矿山钻孔救援探测机器人还需要通过狭长的管道,而煤矿救援探测机器人由于体型较大,根本无法通过探测管道。近几年来,国内外也开始利用机器人穿过孔道进行信息探测。

美国犹他州某矿在 2009 年发生矿难后,救援人员利用经过改装的 Inuktun 机器人,通过地面钻孔形成的通道进入到地下巷道,并把巷道探测图像传输到地面,但由于环境条件太差,4 次试验仅有一次成功,并且机器人在回收时丢失了^[19]。

在新西兰某矿的瓦斯爆炸事故救援中,将管道机器人经过防火花改造,试图进入矿井内部进行探测,但由于机器人不具有防水性能而发生短路,未能完成探测任务^[20]。

唐山开诚电控设备集团有限公司研制了一种钻孔探测机器人,如图 4 所示,机器人在钻孔救援时从地面沿孔道到达钻孔下口,探测孔口附近灾变信息,并将这些数据实时传输到地面^[21]。

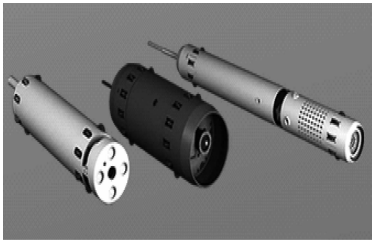


图 4 钻孔探测机器人
Fig.4 Drilling detection robot

西安科技大学针对钻孔救援设计了生命信息钻孔探测系统,并应用到了山东某石膏矿坍塌事故救援中,通过在钻孔下口对周围环境和被困人员进行探测,为救援提供了重要信息^[22]。

总体而言,国内外对于矿山钻孔救援探测机器人的研究尚处于探索起步阶段,现有的用于信息探测的仪器设备不具备移动能力,仅能获取钻孔所在位置巷道附近的信息,且存在探测距离较短、易被障碍物遮挡、探测设备尺寸过大且功能单一、不适用于小直径的信息探测等局限性。而经过改装的小型机器人由于结构、控制或者防护性能等原因未能很好地适应钻孔救援探测条件。

2.3 矿山钻孔救援探测机器人研究的可行性分析

首先,钻孔救援技术的发展、钻孔精度和效率的提高及前期钻孔救援技术在矿山事故实际案例中的应用,证实了钻孔救援技术是一种切实可行的救援手段,为矿山钻孔救援探测机器人能够顺利通过探测孔道、到达事故现场附近奠定了基础。

其次,虽然用于矿山钻孔救援的探测机器人没有成功先例,但是煤矿救援探测机器人和管道机器人已经有了成功应用实例,且这几类机器人在一些方面的研究与应用具有相似性。根据矿山钻孔救援探测机器人的应用特点,机器人需要通过已打好的探测孔道到达井下,这就与管道机器人在移动机构的通过性、管径适应性等方面具有类似的需求;到达井下后,利用移动机构在非结构化环境中行走,扩大探测范围,这与煤矿救援探测机器人在地形适应性、越障能力等方面具有类似的需求;另外,无论是在探测管道还是在井下巷道,机器人都需要携带相关内外部传感器、视频图像采集设备等,这在信息探测采集和传输、运动与姿态控制等方面同样具有相似性。

因此,若将煤矿救援探测机器人和管道机器人等已有的相关研究成果与矿山钻孔救援的探测需求相结合,可以研制出满足要求的矿山钻孔救援探测机器人,提高井下灾后救援的成功率。

3 矿山钻孔救援探测机器人关键技术

3.1 移动机构

矿山钻孔救援探测机器人要通过狭长的管道,并进入井下非结构化环境。轮式、履带式、腿式等单一运动形式移动机构各有局限,很难满足钻孔救援探测要求。

现有的煤矿救援探测机器人虽然在适应地下非结构化环境方面具有一定的优势,但体积较大,无法通过探测孔道。现有管道机器人能够很好地适应探测管道内的行走,但无法适应巷道的结构化地形和

灾后的非结构化地形环境^[23]。

根据钻孔救援探测特点,移动机构应能够适应探测孔道内的行走,并具有一定的地形适应能力和移动速度,且能耗较低。

3.2 传感探测技术

钻孔救援探测机器人通过携带的相关传感器主要对3个方面的信息进行检测:本体运动情况和动作姿态、井下环境信息及被困人员相关信息。其中环境信息和被困人员位置坐标信息的确定是最主要任务。本体运动情况包括机器人的位置、姿态、速度和系统内部状态等;环境信息检测包括氧气浓度、甲烷浓度、温度、湿度和周围地形情况等;被困人员相关信息包括位置坐标、生命信息、声音、体温等。

传感设备除了要满足稳定性好、检测分辨率高、响应速度快等要求外,还应具有尺寸小、集成度高等特点。

3.3 导航、定位和路径规划

钻孔救援探测机器人在执行任务时,以探测孔道下出口为原点,确定自身和被困人员相对探测孔道下出口的位置坐标,为后续的钻孔救援提供精确位置坐标。这就要求机器人在执行救援探测任务时要具有一定的导航、定位和路径规划能力。

在室内环境,移动机器人的导航、定位和路径规划等技术已经基本成熟。在煤矿灾后现场环境中,机器人处在非结构化环境中,且存在煤尘干扰,虽然巷道矿图已知,但如何确定自身和目标位置,优化探测路径,还需要深入研究。

3.4 通信和控制方式

目前的救援探测机器人大多为半自主控制系统,通过人机交互平台,将实时探测信息显示在操作平台上,利用遥控操作,实现越障、路径规划等复杂运动,完成探测任务。

对于地面移动机器人,由于GPS、WiFi等技术的发展,采用无线通信系统十分方便。但在钻孔救援探测中,由于孔道的屏蔽,巷道的拐角导致信号传播的衰减或中断、无线电波的多路径效应及岩石和煤层对无线电波的吸收等影响,对信息传递的可靠性和高效性提出了挑战^[24]。机器人若采用有线通信系统,其稳定性和高效性能够得到很好的保障,但非结构化环境中的线缆收放机构的设计和收放性能问题必须予以考虑。

3.5 能源供给

目前机器人的能源供给形式包括线缆传输和自身携带蓄电池2种。采用线缆传输形式时,机器人通过外接线缆进行能量传输,不受机器人尺寸影响,但线缆长度对救援探测距离有一定的限制。机器人

携带蓄电池时,蓄电池质量和体积会增加机器人的设计尺寸,影响机器人在孔道的通过性和井下移动能力。同时,能源管理与分配问题也应予以考虑^[25]。

3.6 防爆性能

防爆性能是矿山钻孔救援探测机器人的关键性能之一。机器人相关电路模块应采用本质安全型元器件。若采用隔爆型外壳,必然带来体积和重量的增加,影响机器人移动性能;若采用静态正压防爆,则对机器人外壳的密封条件要求较高,且还要携带保护性气体储存罐,这对机器人结构设计也有一定影响。另外,目前针对煤矿机器人专门设计的防爆电动机还很少,普通防爆电动机存在隔爆壳体质量过大,安装在机器人内部不易散热。

另外,机器人在执行救援探测任务过程中,探测管道和井下巷道事故现场的泥浆、尘土、烟雾都会增加任务的难度,机器人行走机构的故障或某些电子电路问题也应充分考虑。

4 矿山钻孔救援探测机器人的发展趋势

4.1 移动机构

由于需要工作在狭小空间和非结构化环境中,移动机构应向复合式行走机构及仿生结构发展,同时向小型化、可重构、可变形和模块化等方向发展。

4.2 传感探测技术

要满足钻孔救援探测机器人需求,传感器应采用非接触式、速度快、抗干扰性强且具有防爆特性和小型化特点的新型传感器。

4.3 导航、定位和控制方式

机器人的导航、定位和路径规划从已知环境、结构化环境向未知、复杂环境发展,基于非结构化环境的视觉导航及人机交互是研究重点。

机器人的控制方式从人工干预的半自主控制向机器人自主控制方向发展,在非结构化环境或非确定性环境中智能控制算法的研究是重点。

4.4 能源供给

若机器人自带蓄电池,须选择高容量、长寿命的蓄电池,并合理进行能源分配。动力电源和电源管理系统的设计是研究和发展的重点。

4.5 防爆性能

机器人可采用隔爆兼本质安全的防爆型式,即机器人的主腔体采用隔爆型式,而内部各类传感器电路可采用本质安全型防爆型式。电动机的防爆及轻量化设计是研究重点。

5 结论

(1) 矿山钻孔救援是一种新型的救援技术,煤

矿事故的频繁发生,使研制矿山钻孔救援探测机器人的需求十分迫切,随着机器人技术的不断发展,研发条件已经具备。本文分析了煤矿救援探测机器人及矿山钻孔救援探测机器人的研究现状,重点分析了矿山钻孔救援探测机器人的移动机构、导航、定位和路径规划、传感探测、通信、能源供给和防爆等关键技术,最后给出了矿山钻孔救援探测机器人的发展趋势。

(2) 针对矿山钻孔救援探测机器人的研发,应紧紧围绕通过性、可靠性、轻量化、智能化等目标,在移动机构、能源供给和防爆性能等方面进行创新设计,提高传感探测范围和精度,研究未知、非结构化环境中的导航、定位及控制的智能算法,提高机器人的环境适应性,满足实际应用领域的工况和任务需求,使其能真正应用于矿山救援探测。

参考文献(References):

- [1] 钱善华,葛世荣,王永胜,等. 救灾机器人的研究现状与煤矿救灾的应用[J]. 机器人, 2006, 28(3): 350-354.
QIAN Shanhua, GE Shirong, WANG Yongsheng, et al. Research status of the disaster rescue robot and its application to the mine rescue[J]. Robot, 2006, 28(3): 350-354.
- [2] 刘金国,王越超,李斌,等. 灾难救援机器人研究现状、关键性能及展望[J]. 机械工程学报, 2006, 42(12): 1-12.
LIU Jinguo, WANG Yuechao, LI Bin, et al. Current research, key performance and future development of search and rescue robot [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(12): 1-12.
- [3] 李允旺,葛世荣,朱华. 煤矿救灾机器人应用探讨[J]. 煤矿机械, 2009, 30(1): 164-167.
LI Yunwang, GE Shirong, ZHU Hua. Research on application of coal mine rescue robots[J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30(1): 164-167.
- [4] 祁海莹,唐述明. 国内外矿山救援装备现状及发展趋势探讨[J]. 矿业安全与环保, 2011, 38(4): 89-92.
QI Haiying, TANG Shuming. Research status and development of mine rescue equipment at domestic and overseas [J]. Mining Safety and Environment Protection, 2011, 38(4): 89-92.
- [5] DAVISON C, MASSAGUER D, PARADIS L, et al. Practical experiences in enabling and ensuring quality sensing in emergency response applications [C]// IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, 2010: 388-393.
- [6] 刘腾飞,汪芸. 钻探技术在煤矿事故救援中的应用分

- 析[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(4): 86-88.
- LIU Tengfei, WANG Yun. Application of exploration boring technology in rescue of mine accident [J]. Mining Safety and Environment Protection, 2010, 37(4): 86-88.
- [7] BROOKES K. Buried alive, but carbide drills at core of Chile miners' rescue [J]. Metal Powder Report, 2010, 65(7): 7-10.
- [8] 宋元明, 刘志军, 王万生. 快速钻孔技术在煤矿应急救援中的实践[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(6): 63-65.
- SONG Yuanming, LIU Zhijun, WANG Wansheng. Practice of quick drill in coal mine emergency rescue [J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(6): 63-65.
- [9] 李湖生, 刘铁民. 从“3·28”王家岭煤矿透水事故抢险救援反思中国事故灾难应急准备体系[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(3): 5-12.
- LI Husheng, LIU Tiemin. Reflection of the Chinese disaster emergency preparedness system based on the analysis of the "3. 28" Wangjialing Coal Mine flooding accident rescue [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(3): 5-12.
- [10] 李亮. 平邑石膏矿坍塌事故救援成功后的几点思考[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(10): 281-286.
- LI Liang. Discussion of Pingyi Gypsum Mine collapse accident rescue [J]. Exploration Engineering (Rock and Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(10): 281-286.
- [11] 赵普生, 胡俊粉. 井下被困人员救援技术及装备现状分析[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(8): 38-41.
- ZHAO Pusheng, HU Junfen. Status analysis on rescue technology and equipment for personnel in difficult in underground mine [J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(8): 38-41.
- [12] BAKER C, MORRIS A, FERGUSON D, et al. A campaign in autonomous mine mapping [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004: 2004-2009.
- [13] MURPHY R R, KRAVITZ J, STOVER S, et al. Mobile robots in mine rescue and recovery [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2009, 16(2): 91-103.
- [14] SHIGEO H, EDUARDO F F. Development of mobile robots for rescue operations [J]. Advanced Robotics, 2002, 16(6): 509-512.
- [15] 柳玉龙. 煤矿搜救机器人的研究现状及关键技术分析[J]. 矿山机械, 2013(3): 7-12.
- LIU Yulong. Analysis on current research status and key technologies of mine search and rescue robots [J]. Mining & Processing Equipment, 2013(3): 7-12.
- [16] 田海波, 马宏伟, 魏娟. 矿井搜救机器人移动系统的研究与发展[J]. 机床与液压, 2012, 40(20): 147-151.
- TIAN Haibo, MA Hongwei, WEI Juan. Research and development of search and rescue robot's locomotion system for mine disaster [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(20): 147-151.
- [17] 胡晗. 煤矿井下探测机器人机构与特性分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- [18] WANG Chuanwei, MA Hongwei. Lightweight design for coal mine rescue robot's swing arm brackets [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 496-500: 657-661.
- [19] ROBIN R M, JEFERY K, KEN P J, et al. Preliminary report: rescue robot at crandall canyon, utah, mine disaster [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008: 2205-2206.
- [20] Science Media Center. Experts on effectiveness of robots in mine rescue operations [EB/OL]. (2016-10-02) [2018-01-05]. <http://www.infonews.co.nz/default.cfm>.
- [21] 张树生, 陆文涛, 裴文良, 等. 钻孔探测机器人的设计与实现[J]. 煤矿机械, 2016, 37(3): 25-26.
- ZHANG Shusheng, LU Wentao, PEI Wenliang, et al. Design and realization of detecting robot through drilling [J]. Coal Mine Machinery, 2016, 37(3): 25-26.
- [22] 郭连江. 西科大生命探测系统为平邑石膏矿难救援提供信息保障 [EB/OL]. (2016-02-01) [2018-01-05]. <http://sn.people.com.cn/n2/2016/0201/c340863-27665106.html>.
- [23] 李鹏, 马书根, 李斌, 等. 具有自适应能力管道机器人的设计与运动分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(1): 154-161.
- LI Peng, MA Shugen, LI Bin, et al. Design and motion analysis of an in-pipe robot with adaptability to pipe diameters [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(1): 154-161.
- [24] 陈为, 李元宗. 煤矿救援探测机器人通信系统的综合研究[J]. 机械工程与自动化, 2009(4): 75-77.
- CHEN Wei, LI Yuanzong. Communication system of searching and rescuing robot [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2009(4): 75-77.
- [25] 刘建, 葛世荣, 朱华, 等. 基于多目标优化的矿用救援机器人动力匹配[J]. 机械工程学报, 2015, 51(3): 18-28.
- LIU Jian, GE Shirong, ZHU Hua, et al. Mine rescue robot power matching based on multi-objective particle swarm optimization [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(3): 18-28.