

煤矿机器人研究现状与发展趋势

王国庆,许红盛,王恺睿

(中国矿业大学 信息与电气工程学院,江苏 徐州 221116)

摘要:从煤矿机器人主要应用,即煤矿日常生产作业、矿难事故处理与救援、日常监测与维护 3 个方面,介绍了国内外煤矿机器人的研究现状,并剖析了煤矿机器人在能源供给、导航、通信、可靠性方面面临的问题,最后展望了煤矿机器人技术发展趋势,以期煤矿机器人的进一步开发利用提供参考。

关键词:煤矿机器人;机器人技术;事故处理;监测维护

中图分类号:TP242.2

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2014)02-0073-05

Research Status and Development Trend of Coal Mining Robots

WANG Guo-qing, XU Hong-sheng, WANG Kai-rui

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: According to three main applications, daily production and operations, accident management and rescuing, daily detection and maintenance of key facilities, the research status of coal mining robots at home and abroad was summarized. Problems on energy supply, navigation, communication and reliability of coal mining robots were analyzed. The paper provided development orientation of coal mining robots in order to provide the reference to the high efficient development and utilization of coal mining robots.

Key words: coal mining robots; robot technology; accident management; detection and maintenance

0 引言

目前,煤炭在我国一次能源消费构成中占 70% 以上,为我国提供了 76% 的发电能源、76% 的工业燃料和动力、60% 的民用商品能源以及 70% 的化工原料。煤炭是我国重要能源和重要材料,预测 2015、2020、2030 年需求量分别为 37 亿~39 亿,39 亿~44 亿,45 亿~51 亿^[1]。煤炭工业的发展对于我国经济持续快速发展具有重要意义。我国煤炭开采条件极其复杂,90% 以上的煤炭资源仅适合井工开采,平均开采深度 600 m,全国 50% 以上煤炭储量处于高瓦斯地区。煤矿生产系统庞大复杂,作业环境恶劣,水、火、煤尘、瓦斯、顶板等灾害多,其非机构化环境使得传统自动化机械的使用受到局限。中国煤炭生产百万吨死亡率是世界主要产煤国中最高的,是美国的 100 倍、南非的 30 倍^[1]。基于此,在煤矿生产部分环节中引入机器人技术对于改善工人作业环

境、降低百万吨死亡率、提高生产效率具有重要意义。同时我国矿山机械和机器人技术水平的提高以及国家相关经费投入,也为机器人技术在煤矿开采中的应用提供了有力的保证。国内外在 20 世纪末均已开展了将机器人技术引入煤炭工业生产的工作,并已经取得很多研究成果。笔者参考对核工业机器人分类方法,对煤矿机器人进行了分类,对国内外相关煤矿机器人研究情况从研究背景、主要技术、创新点等方面进行了详细论述,并归纳了其存在的问题,分析了煤矿机器人的发展趋势。

1 煤矿机器人研究现状

国外煤矿机器人研究起步较早。美国 20 世纪 80 年代开始将基于计算机远程遥控加局部自治式控制作为非结构化采煤工作环境下机器人的重点发展方向,研制出了计算机控制采煤作业系统及多种特种机器人,如支护机器人、凿岩机器人、装载机器

收稿日期:2013-08-02;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.est.2014.02.020

基金项目:国家大学生创新创业训练计划资助项目(201210290030)

作者简介:王国庆(1990—),男,山东滕州人。Tel:15252012622,E-mail:15252012622@163.com

引用格式:王国庆,许红盛,王恺睿.煤矿机器人研究现状与发展趋势[J].煤炭科学技术,2014,42(2):73-77.

WANG Guo-qing, XU Hong-sheng, WANG Kai-rui. Research Status and Development Trend of Coal Mining Robots[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(2): 73-77.

人、采煤机器人、煤矿救灾机器人等。澳大利亚从煤矿机器人传感器系统、导航系统、通信系统等方面,进行了针对煤矿露天开采的拉铲挖掘机、轮斗挖掘机等设备的机器人化工作^[2]。

机器人产业是近30年发展起来的新型产业,我国早在“七五”期间就开始组织专家学者对国际先进机器人全面跟踪、研究和探索。在国家高技术研究发展计划(863计划)等资助项目支持下,对包括喷浆机器人、凿岩机器人、采煤机器人、救灾机器人、机器人矿车等在内的多种煤矿机器人进行研究开发,其中部分机器人已投入使用,取得良好的效果。

机器人在煤矿中的应用主要包括以下3个方面:①生产作业,包括凿岩机器人、掘进机器人、喷浆机器人、采煤机器人、机器人矿车等,用于巷道掘进、巷道支护、采煤、运输等工作;②矿难事故处理与救援,即矿难发生后机器人进入事故现场进行现场环境探测、受灾人员搜救、事故处理等工作;③煤矿日常监测与维护等服务,利用机器人对井下环境、设备进行监测,协助处理管道清淤等工作^[3]。

1.1 煤矿生产作业机器人

1) 凿岩机器人。巷道掘进是现代煤矿大规模基础设施建设中的一项重要施工作业。巷道掘进在相当长的时期仍以钻爆法施工为主,是目前最经济有效的方法。随着液压控制和微电子技术的发展,凿岩循环已实现自动化、智能化。智能化凿岩台车被称为凿岩机器人,具有高精度、超挖少、欠挖少、高经济性、高效率、低劳动强度的优势。20世纪70年代末,许多国家开始了凿岩机器人的研究,目前瑞典、芬兰、美国、英国、法国、日本、挪威等近20个国家的厂商已开发高性能的计算机控制液压凿岩机器人,并已推广应用^[4-5]。实践表明,凿岩机器人的应用,可以在保证巷道掘进质量前提下大幅提高凿岩速度,同时能显著改善工人作业环境。

1997年中国矿业大学和哈尔滨工业大学联合研制了用于在具有瓦斯突出与爆炸危险的井下环境进行安全钻孔的钻孔机器人^[6]。该机器人以国产MYZ-150型深孔钻机为基本主体,具有自动输送、接续与拆卸钻杆,以及自动推进与退出作业的功能;配有工业电视、瓦斯与温度传感器,能对钻场环境以及钻机工况进行远距离监视与监控。井下现场试验表明该系统能在煤矿井下恶劣的条件下正常工作,具有良好的工作性能及较高的可靠性,实现了安全作业的远距离遥控操作。中南大学(原中南工业大

学)成功开发了国内第一台电脑控制隧道凿岩钻车样机,具有电脑导向、自动防卡钎等功能,在简单工况下可以实现孔位自动导引与自动钻孔功能。

2) 喷浆机器人。喷浆支护是国内大力推广应用的一种巷道支护新工艺,与传统的木材、钢梁支护方法相比,喷浆支护不仅节省大量木材和钢材,而且具有施工速度快、支护效果好等优点。但喷浆支护也存在一些需要解决的问题,如人工喷浆时,混凝土回弹率高(30%~50%),粉尘大,而且混凝土结构疏密不一,不能保证喷层质量。另外对于大断面隧道,人工喷浆需要搭脚手架,影响施工进度,且费工费料^[7]。采用喷浆机器人不仅可以提高喷涂质量,也可以将工人从恶劣和繁重的作业环境中解放出来。

山东科技大学机器人研究中心已研制出PJR-2喷浆机器人^[8]。它由机械手、液压系统、控制系统、操作器等组成,共有6个自由度,其中机械手有5个自由度,即大臂俯仰、小臂摆动、腕旋转、腕摆动和喷浆旋转,另一个自由度为行走。依靠这6个自由度,喷枪可以运动到工作空间的任何位置,并按照喷浆工艺要求完成喷浆作业。喷浆机器人有自动轨迹控制和遥控控制2种控制方式,可以随时转换且具有示教功能;电控系统具有防爆、防潮、抗振等特性,并能够进行故障诊断和故障报警;系统中设有超声波测距装置,以检测喷层厚度和防止机器人与巷道壁面碰撞。井下试验表明,喷浆机器人能保证喷射混凝土质量,降低混凝土回弹率,改善工人作业环境。

文献[9]中提出了一种基于液压支架的支护机器人。该支护机器人在目前液压支架人工操作的基础上,增加计算机控制的液压系统和顶板压力监测系统,实现支架的推进、移架及支护的连续动作机器人化或程序化,并具备顶板支护的智能型自适应控制功能,从而提高顶板支护可靠性和支护速度。

3) 其他作业机器人。文献[10]提出一种特殊煤层采掘机器人。针对薄煤层作业,目前使用的综合性机械化采煤机很不方便,甚至是不可能的,人工开采十分艰苦与危险。采用遥控式采掘机器人进行特殊煤层采掘将是最佳的选择。目前韩国已经研制出一套液压履带式采煤机器人系统,通过搭载的激光扫描仪、红外摄像机、旋转编码器、倾角罗盘等装置生成三维图像并进行姿态位置控制,可在远程监控下进行人工或自动作业^[11]。

除凿岩机器人和喷浆机器人,国内对采煤机器人、掘进机器人、机器人矿车、提升机器人等煤矿作

业机器人的研究尚处于初级阶段。文献[12]介绍了近10余年来我国在煤机装备领域液压支架、采煤机、刮板输送机、带式输送机以及综采自动化技术等方面取得的技术成果。文献[13]中以EBZ-30/45小型煤巷掘进采煤机为基础,通过建立三维模型,对远程控制采煤机器人进行了研究。“十二五”国家“863计划”中的资源环境技术领域“地下金属矿以智能开采技术”项目指南提出^[14],研发具有自主知识产权的地下金属矿智能化主体采矿装备,攻克地下金属矿泛在信息采集与高速通信、设备精确定位与智能导航、智能采矿爆破、生产过程智能控制与调度等关键技术难题,初步建立我国地下金属矿智能开采技术体系,促进我国采矿技术向智能化方向发展。研究内容包括智能中深孔全液压凿岩台车、地下高气压智能潜孔钻机、地下智能铲运机、地下智能矿用汽车、地下智能装药车、地下金属矿泛在信息采集与通信系统、地下金属矿智能开采智能调度与控制系统、地下金属矿设备精确定位与智能导航技术等方面。此项目的开展对于煤炭智能开采具有重大借鉴意义。

1.2 煤矿救灾机器人

煤矿作业环境复杂,事故易发。研发代替或部分代替救护人员及时、快速深入矿井灾区,进行环境探测和搜救工作的救灾机器人具有极其重要的意义^[15-16]。国外救灾机器人发展迅速,技术日益成熟,并进入实用化阶段,澳大利亚、美国、日本等已开始装备使用。澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)研制的Numbat矿山救援机器人系统,由一个可移动地面控制站和一辆远程救助车^[2]组成。机器人搭载的多种检测装置,通过装有Linux系统的计算机处理后能实现对现场环境和车辆运行状态的实时监控。机器人通过摄像机、红外成像装置、激光扫描仪进行动作控制及导航,采用光纤通信,利用加压氮气进行电气隔离,使用充电电池供电。美国研发了多种煤矿救灾机器人并已经应用于美国矿山安全与卫生管理局(MSHA)组织的多次矿难救援和矿难现场工作恢复任务中^[17]。V2煤矿救援机器人采用防爆电机驱动履带前进,配备了导航和监视摄像机、气体检测仪、1个机械臂,具备夜视能力,采用光纤通信。

The mine cavern crawler 机器人可通过一个小洞进入矿井工作面开展工作。日本千葉工业大学研制的Hibiscus救援机器人^[18],通过搭载红外热成像摄

像机检测被困幸存者,采用的是锂聚合物电池供电,使用WiFi通信。

中国矿业大学可靠性工程与救灾机器人研究所于2006年成功研制了我国第1台用于煤矿救援的CUMT-1型矿井搜救机器人。该机器人装备有摄像机、气体传感器、温度计等设备,能实时探测现场环境,并传回现场图像;具有双向语音对讲及无线网络通信功能,能携带多种救灾物资^[19]。后续研制的CUMT-2型救灾机器人采用通信中继抛投装置用以加强无线通信。北京理工大学研制的救灾机器人将轮腿式结构与履带结构相结合,其越障能力强,且具有防爆设计,装有减震装置,能够防水、防泥;能够调节系统内部温度,防止过热^[20]。哈尔滨工业大学为唐山开诚电器有限公司研制的煤矿井下探测机器人采用3节履带机构形式,可采集井下视频信号、音频信号、温度、风速、一氧化碳和甲烷气体浓度等信息^[21]。太原理工大学也研制出类似的煤矿井下探测机器人^[22]。中国科技大学研制的仿土拨鼠救灾机器人能通过拨土来穿越土堆等障碍^[23]。

上述煤矿救灾机器人代表了目前国内外研究水平,但距离实际应用还有距离,在通信、避障、机械结构、导航与定位、适应性等方面存在技术问题。在美国矿山安全与卫生管理局(MSHA)组织的多次矿难救援和恢复任务中,救灾机器人救灾能力和救灾效果并不好^[17]。

1.3 煤矿服务机器人

煤矿服务机器人是指用来提供设备日常维护、日常巡检、绘制矿图等功能的机器人。美国卡内基梅隆大学研制了专门用于探测废弃矿井、进行精确测绘的测量机器人Groundhog。Groundhog采用四轮驱动,专门设计的底盘能适应矿井复杂地形;搭载有嵌入式计算机、激光测距仪、气体检测仪、夜视摄像机等装备,可将传感器测得的二维数据生成矿井三维模型,并已经进行了多次井下测绘任务^[24]。

国内对此研究尚处于起始阶段。针对井下作业中可能遇到的瓦斯突出和冲击地压,文献[25]提出使用带有专用传感器的移动式检测机器人,连续监测采矿状态,以便及早发现事故前兆,文献[26]提出了一种利用自旋转高压水射流法清除煤矿排水管道内壁垢层机器人的设计,经试验验证,弯道通过性能良好,垢层清理效果明显。文献[27]提出了一种液压驱动的煤仓清仓机器人,用于代替人工清理煤仓仓壁的粘结物。文献[28]提出一种用于薄煤层

工作面设备安全监测的移动机器人平台;文献[29]中提出了利用机器人技术、无线通信技术、视频压缩与传输技术、视觉技术实现矿山智能巡检机器人,利用该智能巡检机器人可实现对矿山的全面监控;文献[30]介绍了一种选煤厂巡检机器人。

2 煤矿机器人所面临的主要问题

针对上述对机器人技术在煤矿日常开采作业、事故处理与救援、生产服务方面应用的介绍。可看到对于煤矿机器人的研究,整体上处于理论与试验阶段,在事故处理与救援应用领域研究较多,离大规模应用仍有一定距离。其面临的主要问题包括:

1) 能源动力技术。对于小功率煤矿机器人,采用有线供电可不受机器人尺寸影响,但存在导线压降,需考虑井下电网中谐波对于设备控制的干扰,限制了其作业距离;电池供电可摆脱导线的限制,但电池性能限制了其续航能力和作业时间。大功率煤矿机器人需提高井下供电品质,保证设备可靠运行。

2) 导航技术。导航技术是煤矿机器人等智能移动机器人技术的关键,包括通过一定的检测手段获取移动机器人在空间中的位置、方向以及所处环境的信息,用一定的算法对所获信息进行处理,建立环境模型并进行路径规划^[31]。目前已有移动机器人定位的成熟理论与技术,但对于在煤矿复杂环境下的定位、避障、路径规划等技术有待进一步研究。

3) 通信技术。包括机器与人、机器与机器,作业人员与指挥人员的可靠通信。有线通信可靠性高,但同样存在与有线供电一样的问题;井下无线通信,信号受到巷道等屏蔽,传播距离有限,同时需考虑大型设备启停产生的电磁干扰。

4) 可靠性技术。由于井下工作环境的复杂性和不可预测性,一旦出现故障,不仅无法完成作业任务,而且可能引发事故,造成巨大损失。其可靠性技术包括2个方面,一是机器人结构的可靠性,具备机动性和地面适应性好、越障能力强、可靠性高的机械结构,应具有防爆、防尘、防潮、防水、抗腐蚀等功能^[32],解决其密封性与散热的矛盾;二是煤矿机器人控制系统的可靠性。作为复杂控制系统的故障诊断与容错控制技术,目前已经取得一系列的研究成果,特别是在航空航天系统、核电站系统有许多成功应用,但在煤矿机器人方面的研究成果却非常有限^[33],尚未见到有关理论报道及实际产品。

3 煤矿机器人发展趋势

1) 多传感器信息融合技术。信息融合是指将多个传感器所提供的环境信息进行集成处理,形成对外部环境的统一表示。通过传感器之间的冗余数据和互补数据,提高系统的可靠性和鲁棒性,扩展时间上和空间上的观测范围,增强数据的可信度和系统的分辨率^[34]。信息融合技术有助于改善机器人环境参数监测、路径规划与导航的能力,提高控制系统决策、规划、反应的快速性和正确性,降低决策风险。目前常用的方法有:加权平均法、贝叶斯推理与证据推理、统计决策理论、卡尔曼滤波、神经网络和模糊推理法以及带置信因子的产生式规则^[35]。

2) 多机器人技术。多机器人系统具有单机器人系统所没有的优点,如空间上的分布性、功能上的分布性、执行任务的并行性、较强的容错能力、较好的鲁棒性、更低的经济成本、分布式的感知与作用、合作的机器人相比单个机器人可更加有效地完成一些任务等^[36]。通过对多机器人技术的研究,弥补单个机器人的不足,发挥系统的优势,解决系统中存在问题或降低其不利影响,使系统能够灵活、快速地适应环境和任务的变化,从而在复杂环境中高效、可靠地完成如工作面瓦斯、冲击地压监测、矿井灾后环境监测,废弃矿井测绘等任务^[37]。由于多机器人系统的研究涉及到多个领域和学科,因此其发展也受到相关学科和技术发展的限制,其理论框架和实现方法均需要得到进一步完善^[38]。

3) 机器人软硬件模块化、标准化技术^[39]。机器人作为机电产品,要实现其产业化,必须实施软硬件分离,并将其软硬件模块化、标准化。采用标准化结构,可以提高系统的可靠性,增强系统的可拓展性,容易形成系列化产品。重视机器人研制的技术标准化、模块化,强调研发技术的继承性,能够降低后续研究风险,节约研究经费,提高系统可靠性,有利于产品产业化。

4) 通信系统网络化技术。建立基于网络的机器人遥控操作,可使操作人员远离危险的作业环境,避免人身伤害,同时有助于指挥调度人员决策。

4 结 语

煤矿机器人在煤矿安全生产中具有广阔的应用前景。目前,煤矿机器人已取得一定进展,具体应用在煤矿日常生产作业、矿难事故处理与救援、日常监

测与维护3个方面。但煤矿机器人可靠性技术、能源供给技术、导航技术、通信和控制技术等方面仍需不断改进和完善。随着多传感器信息融合、多机器人系统、通信系统网络化等技术的发展,煤矿机器人将在我国煤炭工业中实现更加重要的功能。

参考文献:

- [1] 董维武.世界煤炭生产与消费趋势[J].中国煤炭,2006,32(12):76-78.
- [2] Ralston J C, Hainsworth D W, Reid D C, *et al.* Recent Advances in Remote Coal Mining Machine Sensing, Guidance, and Teleoperation[J]. *Robotica*, 2001, 19(5): 513-526.
- [3] 徐文福, 毛志刚.核电站机器人研究现状与发展趋势[J].机器人, 2011, 33(6): 758-767.
- [4] 谢习华, 何清华, 周亮.凿岩机器人的发展现状与趋势及应用前景[J].凿岩机械气动工具, 2003, 30(5): 12-14.
- [5] 林福严, 张运九, 薛光辉.机器人化采煤设备系统及控制模式探讨[J].煤炭科学技术, 2010, 38(8): 97-99, 103.
- [6] 许世范, 郝继飞, 何凤有.我国首台采掘机器人: 机器人化自动钻机[J].中国煤炭, 1997, 23(9): 21-24.
- [7] 李东晓.机器人技术在煤矿自动化中的应用[J].煤炭科学技术, 2007, 35(5): 62-64.
- [8] 逢振旭, 李贻斌, 樊炳辉. PJR-2 喷浆机器人的结构与控制[J].山东矿业学院学报, 1997, 16(3): 265-269.
- [9] 岳巧珍.煤矿机电一体化及其发展方向初探[J].西安矿业学院学报, 1999, 19(S): 119-127, 137.
- [10] 肖南峰.工业机器人[M].北京:机械工业出版社, 2011: 4-15.
- [11] Sungsik Huh, Unghui Lee, Hyunchul Shim, *et al.* Development of an Unmanned Coal Mining Robot and a Tele-operation System[C]//2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2011). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 31-35.
- [12] 王金华.我国煤矿开采机械装备及自动化技术新进展[J].煤炭科学技术, 2013, 41(1): 1-4.
- [13] 宋胜涛, 张浩, 李瑞琴.远程控制采煤机器人采煤机构的研究[J].中北大学学报:自然科学版, 2010, 31(6): 592-595.
- [14] 国家科技部.国家高技术研究发展计划(863计划)资源环境技术领域“地下金属矿智能开采技术”主题项目申报指南[EB/OL]. (2010-10-28) [2013-01-10]. <http://program.most.gov.cn/htmledit/E0B28D89-38B2-4B92-57B3-B20D7E78DE67.html>.
- [15] 刘建, 朱华, 郑之增, 等.煤矿救援机器人的通信系统设计[J].煤炭科学技术, 2009, 37(8): 87-90.
- [16] 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.
- [17] Murphy R, Kravitz J, Stover S, *et al.* Mobile Robots in Mine Rescue and Recovery[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2009, 16(2): 91-103.
- [18] Techfresh. Hibiscus, the New Rescue Robot[EB/OL]. [2013-01-10]. <http://www.techfresh.net/hibiscus-the-new-rescue-robot/Mobile Robots in Mine Rescue and Recovery>.
- [19] 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.
- [20] GAO Jun-yao, GAO Xue-shan, ZHU Jian-guo, *et al.* Coal Mine Detect and Rescue Robot Technique Research[C]//2009 IEEE International Conference on Information and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1063-1066.
- [21] 王争.井下探测机器人控制系统研制及其运动性能分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007: 63-64.
- [22] NIU Zhi-gang, WANG Lu. Hazardous Gas Detecting Method Applied in Coal Mine Detection Robot[C]//2011 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). Los Alamitos, CA, USA: IEEE, 2011: 308-311.
- [23] 冯勇.仿土拨鼠矿难救灾机器人控制系统关键技术研究[D].合肥:中国科学技术大学, 2012: 9-18.
- [24] Thrun, Sebastian, Thayer Scott, *et al.* Autonomous Exploration and Mapping of Abandoned Mines; Software Architecture of an Autonomous Robotic System[J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2004, 11(4): 79-91.
- [25] 李东晓, 黎彦学.机器人与全矿山自动化[J].工矿自动化, 2007(5): 40-42.
- [26] 王成军.煤矿管道除垢机器人的设计[J].煤矿机械, 2009, 30(8): 24-26.
- [27] 宋志安.井下煤仓新型清仓技术[J].矿业工程研究, 2010, 25(1): 59-62.
- [28] 许旺, 贾瑞清, 江涛, 等.薄煤层综采工作面安全监测移动机器人的研究[J].矿山机械, 2010, 38(20): 18-21.
- [29] 左敏.矿山智能巡检机器人的关键技术[J].金属矿山, 2012(7): 120-122.
- [30] YAN Guang, WANG Jun, ZHU Mei-qiang, *et al.* Research and Design of Coal Preparation Plant Inspection Robot[C]//Proceedings of the 2011 Chinese Control and Decision Conference, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 2393-2395.
- [31] 蔡自兴, 贺汉根, 陈虹.未知环境中移动机器人导航控制研究的若干问题[J].控制与决策, 2002, 17(4): 385-390.
- [32] 苏学成, 李贻斌, 樊炳辉, 等.煤矿井下机器人结构与控制若干问题[J].煤炭学报, 1995, 20(5): 514-518.
- [33] 朱大奇, 胡震.水下机器人故障诊断与容错控制技术[M].北京:国防工业出版社, 2012: 24-32.
- [34] 王耀南, 李树涛.多传感器信息融合及其应用综述[J].控制与决策, 2001, 6(5): 518-521.
- [35] 曹其新, 张蕾.轮式自助移动机器人[M].上海:上海交通大学出版社, 2012: 9-11.
- [36] 蔡自兴.多移动机器人协同原理与技术[M].北京:国防工业出版社, 2011: 273-275.
- [37] 谭民, 王硕, 曹志强, 等.多机器人系统[M].北京:清华大学出版社, 2005: 6-20.
- [38] 原魁, 李园, 房立新.多移动机器人系统研究发展近况[J].自动化学报, 2007, 33(8): 785-794.
- [39] 富巍, 刘美俊.排爆机器人的研究与开发[M].北京:电子工业出版社, 2010: 6-7.