



推荐阅读：

[智能化煤矿分类、分级评价指标体系](#)

[煤矿智能化标准体系框架与建设思路](#)

[煤矿智能化\(初级阶段\)研究与实践](#)

[综采工作面煤层装备联合虚拟仿真技术构想与实践](#)

[煤矿井下随钻测量定向钻进技术与装备现状及展望](#)

[智慧煤矿主体架构设计与系统平台建设关键技术](#)

[虚拟现实技术在煤矿领域的研究现状及展望](#)

[德国工业4.0与中国煤机装备智能制造的发展](#)

[智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向](#)

[智能矿井安全生产大数据集成分析平台及其应用](#)

[基于TOA压缩感知的矿井分布式目标定位方法](#)

[松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势](#)

[我国煤层气钻井技术及装备现状与展望](#)

[煤矿井孔钻进技术及发展](#)

[2311m顺煤层超长定向钻孔高效钻进技术](#)

[我国煤矿区钻进技术装备发展与应用](#)

[煤矿井下人员精确定位方法](#)

[智慧矿山建设架构体系及其关键技术](#)

[矿山工程信息物理系统研究及挑战](#)

[智能化无人开采系列关键技术之——综采智能化工作面调斜控制技术研究](#)



移动扫码阅读

郝 勇,袁 智.综采工作面自动巡检机器人系统设计[J].煤炭科学技术,2020,48(8):145-149.doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.08.018

HAO Yong,YUAN Zhi.Design of automatic inspection robot system for fully-mechanized coal mining face[J].Coal Science and Technology,2020,48(8):145-149.doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.08.018

## 综采工作面自动巡检机器人系统设计

郝 勇,袁 智

(中国煤矿机械装备有限责任公司,北京 100011)

**摘要:**为解决综采工作面巡视作业空间狭小、设备间配合动作复杂、作业环境恶劣导致的人工巡检困难,巡检人员安全无法保障的问题,设计了一种占用空间小,适应三大设备相互动作,可以实现自动化巡检,集视频监控、数据融合、数据上传、温度异常报警等功能为一体的综采工作面巡检机器人系统。自动巡检机器人系统包括自动巡检系统、机器人本体、电气控制系统、通信网络系统和集控室集控系统。其自动巡检系统采用吊缆机构与悬轨支撑机构相结合的方式实现了综采工作面液压支架拉架动作后机器人巡检路径轨道的自适应;机器人本体上装载的可见光相机和红外热成像仪采集的工作面作业数据可通过通信网络系统实现与控制主机间的双向信息交互,采集的作业数据通过集控室集控系统实现可见光和红外数据的实时融合,为进一步通过智能分析算法实现更高级识别奠定基础;集控室系统可以对采集数据进行可视化处理,对巡检机器人工作状态进行实时智能控制,并在综采设备工作异常时报警。自动巡检机器人在中煤张家口煤矿机械有限责任公司综采工作面实验室进行了试验性研究,研究结果表明:在综采工作面的狭小设备空间中,液压支架经常性会进行拉架操作,现有的固定轨道的巡检机器人无法进行巡检,自适应轨道系统可以吸收拉架产生的设备位置变化,保证巡检轨道的畅通,实现了巡检机器人的无障碍通过;机器人本体采用高精度可见光传感器和热成像传感器,可以获取高精度的可视化图像信息,相较于现有人工目测或手持仪表测量,数据真实可靠,并可实时反馈现场环境状况。集控室系统可视化处理后的数据能直观反映出设备运作时的工作状况,提高了巡检人员对工作设备操控的准确度,其报警功能可以在工作异常时及时告知巡检人员作业异常原因及异常区域,提高巡检作业的安全可靠性。此综采工作面自动巡检机器人站地空间小,可代替人工实现对综采工作面的巡检作业,巡检作业安全可靠。

**关键词:**自动巡检机器人;自动化巡检;自适应;数据采集;可视化;智能控制;煤矿智能化;智能矿山

**中图分类号:**TP242      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2020)08-0145-05

## Design of automatic inspection robot system for fully-mechanized coal mining face

HAO Yong, YUAN Zhi

(China National Coal Mining Equipment Co., Ltd., Beijing 100011, China)

**Abstract:**In order to solve the problems of narrow inspection operation space in complex mining face, complicated coordination between equipment and difficult manual inspection caused by poor working environment as well as the safety of inspection personnel can not be guaranteed, this paper has designed a kind of small space occupation, adapting to the interaction of three major equipment, which can realize automatic inspection and gather video surveillance. The system integrates data fusion, data upload, abnormal temperature alarm and other functions. The automatic inspection robot system includes an automatic inspection system, a robot body, an electrical control system, a communication network system and a centralized control room system. The automatic inspection system adopts the method of combining the suspension cable mechanism with the suspension rail support mechanism to realize the adaptation of the robot inspection path and track of the robot after the pulling of the hydraulic support in the fully mechanized mining face. The working data collected by the visible light camera and infrared thermal imager loaded on the robot body can be realized by two-way information interaction with the control host through the communication network system. The collected working data can realize the real-time fusion with visible and infrared data through the

收稿日期:2020-03-11;责任编辑:赵 瑞

作者简介:郝 勇(1976—),男,北京人,高级工程师,硕士。Tel :010-64249365,E-mail:haoyong@chinacoal-cme.com

centralized control system of the centralized control room, which lays the foundation for further advanced recognition through intelligent analysis algorithm. The centralized control room system can perform visual processing on the collected data, real-time intelligent control of the working status of the inspection robot, and alarm when the comprehensive mining equipment works abnormally. The automatic inspection robot conducts experimental research in the laboratory of the fully-mechanized coal mining face of the coal mining machine. The results show that in the narrow equipment space of fully-mechanized mining face, the hydraulic support often carries out the pulling operation, and the existing fixed-track inspection robot can not carry out the inspection. The adaptive rail system designed in this paper can absorb the equipment position changes caused by the pulling frame to ensure the smooth inspection track and realize the barrier-free passage of the inspection robot. The robot body adopts high-precision visible light sensor and thermal imaging sensor to obtain high-precision visual image information. Compared with the existing manual visual measurement or hand-held instrument measurement, the data are true, reliable and real-time feedback on-site environmental conditions. The data processed by the visualization of the centralized control room system can directly reflect the working status of the equipment during operation, improve the accuracy of the inspection personnel's control of the work equipment. Its alarm function can timely inform the inspection personnel of the abnormal cause abnormality of the operation when the work is abnormal, so as to improve the safety and reliability of the inspection operations. The station space of the automatic inspection robot for fully-mechanized mining face is small, which can replace manual implementation of the inspection work on the fully-mechanized mining face and collect data accurately and reliably.

**Key words:** automatic inspection robot; automatic inspection; adaptive; data collection; visualization; intelligent control; coal mine intelligentization; intelligent mine

## 0 引 言

煤炭行业是我国的能源支柱行业,经过多年的发展,我国煤炭行业基本实现了机械化,并在自动化领域取得了优异的发展。近些年来,随着人工智能的高速发展,机器人的应用领域得到了更广阔的发展,推动了智慧矿山的发展<sup>[1]</sup>,较于先进国家同行业来说,国内现场仍以人操作为主,作业安全问题突出。巡检机器人是减轻综采工作面人工劳动强度,解决工作面巡检安全问题的有效手段。

目前,巡检机器人可分为固定轨道式<sup>[2-3]</sup>、地面行走式<sup>[4-6]</sup>和吊缆悬挂式<sup>[7-9]</sup>。矿用固定轨道式巡检机器人系统采用在刮板输送机上布置固定轨道的方式,但在实际安装运行过程中,由于刮板输送机强烈的振动,巡检机器人巡检作业受到影响,采集的数据准确性达不到数据分析的要求。商德勇<sup>[10]</sup>设计了一种六履带四摇臂式移动机器人,其行走机构采用履带式行走机构<sup>[11-13]</sup>,在综采工作面地面行驶以实现对采煤工作面巡视数据的采集,其结构优点在于可改变自身高度以适应不同地形环境的要求,既可以在狭小空间内工作,又能借助前后摇臂作用辅助翻越障碍。但仍是模拟人工在工作面行走的巡检路径方式进行巡检,由于不同工作面地质环境不同,其机器人爬坡角度及跨沟长度无法满足实际工况,不能有效保障机器人巡检路径的可靠性,影响机器人采集数据的准确性。靳子浩<sup>[14]</sup>设计了一种悬挂式巡检机器人,其采用轮臂复合式结构,具有结构简单,纯机械越障机构,控制系统简化的优点。但在工

作面拉架作业引起液压支架相对位置变化后,其支撑钢丝线缆的固定悬挂杆会发生错位,导致钢丝路径折弯,其设计的巡检机器人转弯角度无法满足正常工作要求。

通过对综采液压支架拉架动作和巡检作业要求的深入研究,综合考虑固定轨道式巡检机器人实际工况下的震动影响和地面行走式巡检机器人越障能力<sup>[15-17]</sup>,以及吊缆悬挂式机器人机械越障特点<sup>[18-20]</sup>,笔者设计了一种自动巡检机器人系统,适应综采工作面狭小的布置空间和自适应液压支架拉架动作对机器人巡检路径的影响,使巡检机器人巡检路径更稳定,采集的作业数据更可靠。并且可实现工作面图像和温度数据的数据融合和畸变校正,为今后实现像素级智能视觉分析提供参考,对推动综采工作面智能化,提高煤矿经济效益有重要意义。

## 1 自动巡检机器人系统组成

自动巡检机器人系统由自动巡检系统、机器人本体、电气控制系统、通信网络系统、集控室集控系统组成。自动巡检机器人系统结构如图 1 所示。

1) 自动巡检系统。自动巡检系统是液压支架拉架作业导致巡检整体路径变化后做出无动力自适应调整,保证巡检机器人的自动化双向往复巡检路径可靠性的关键装置。其主要结构由驱动装置架、迂回装置架、悬轨支撑机构和牵引钢丝线缆组成。

2) 机器人本体。机器人本体主要由壳体框架、采集传感器、供电系统、通信控制系统组成。其中采集传感器包括 2 路可见光相机和红外热像仪。

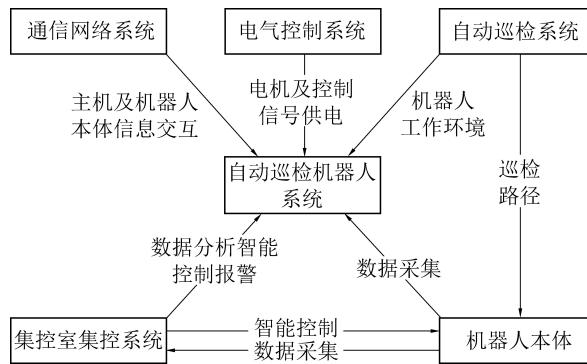


图 1 自动巡检机器人系统结构

Fig. 1 Architecture of automated patrol robot system

3) 电气控制系统。电气控制系统由强电系统和弱电系统 2 部分组成。强电系统经接现场电源到配电箱完成电机驱动装置供电及限位检测元件供电,集控室主机及显示器供电也是经由现场外接电源。弱电系统主要是系统的控制电信号接线,包括电机驱动装置控制信号与控制主机交互,以及限位检测元件触发信号与电机驱动装置交互。

4) 通信网络系统。通信网络系统搭建在控制主机与机器人本体之间用来实现机器人与控制主机之间的双向信息交互。

5) 集控室集控系统。集控室集控系统实现对巡检机器人的巡检模式控制、速度控制,并对采集到的图像进行了数据融合、展示,在出现高温异常时,进行实时报警。

## 2 自动巡检机器人关键技术

### 2.1 自动巡检

自动巡检系统结构如图 2 所示,包括用以支撑缆绳、封闭机器人巡视路径的驱动装置架与迂回装置架,实现机器人导向牵引作用的牵引钢丝线缆,实现支撑线缆作用的悬轨支撑机构,以及连接线缆与机器人的抱索机构。

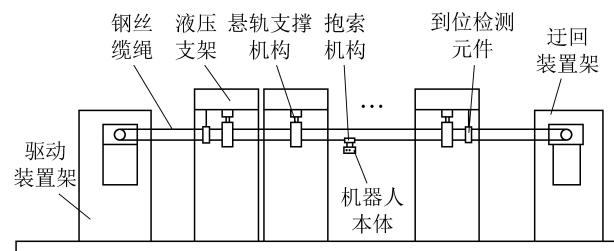


图 2 自动巡检机器人系统

Fig. 2 Systematic of automatic inspection robot

驱动装置架和迂回装置架相较于传统支撑吊缆的两端支撑架,其上布置有线路调整轮和活动悬架臂,配合使用可适应不同采高工作面巡检机器人吊

缆环境的搭建。悬轨支撑机构如图 3 所示,其采用滑轨和支撑机构配合使用的方式,在工作面液压支架拉架作业后,支撑机构可以在滑轨上进行前后方向的自适应运动,保证巡检机器人的自动化双向往复巡检路径。同时,为保证巡检机器人的越障能力,即穿越支撑机构的能力,支撑机构设计成一侧穿越,一侧支撑钢缆的结构,穿越侧设置有浮动滑轮座,连接有机器人本体的抱索机构穿越该支撑机构时顶起浮动滑轮座实现机器人越障。机器人本体结构如图 4 所示。

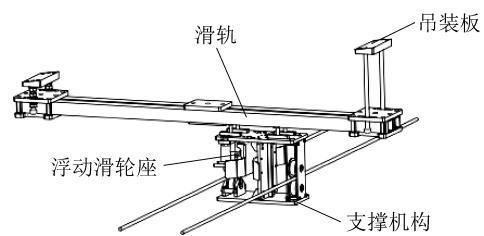


图 3 悬轨支撑机构

Fig. 3 Suspension rail support mechanism

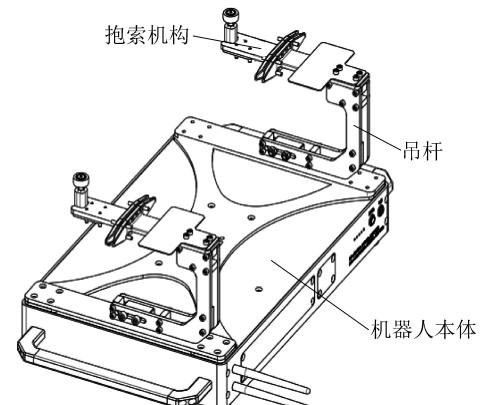


图 4 机器人本体结构示意

Fig. 4 Robot body structure sketch

### 2.2 数据采集与融合

自动巡检机器人本体上布置有高精度可见光传感器和热成像传感器,可以获取高精度的可视化图像信息。为使系统在同一瞬间从不同角度观测环境,建立真实可靠的静态模型,自动巡检机器人系统采用硬件同步方式,解决了多传感器触发机制和采样频率不同造成的时间差,在 1 ms 的精度上同步采集 3 幅图片,并赋予图片真实的时间属性,这是智能视觉分析所需要的源数据必不可少的核心属性。

单幅可见光和单幅热成像红外数据,只能独立观测外观和温度信息,由于传感器的视场角、空间位置差异,简单叠加无法精准匹配,会产生较大偏差,无法用于智能图像分析。传感器成像原理如图 5 所示。

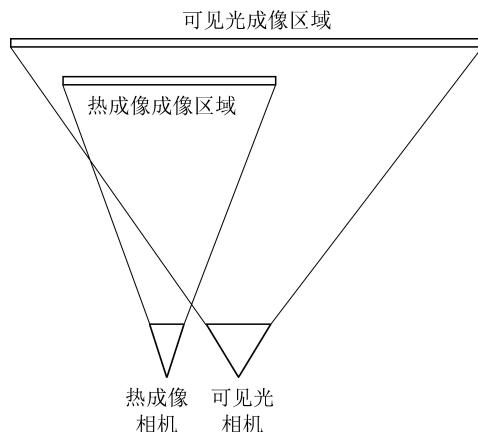


图5 传感器成像原理

Fig. 5 Principle of sensor imaging

自动巡检机器人的集控室集控系统实现了可见光和红外数据的实时融合,根据2个传感器的相对位置,视场角差异,进行实时计算,在像素级进行空间配准,使其在空间上保持一致,外观和其温度在图像上严格匹配,既可以真实观测具体物体的温度,也可以进一步通过智能分析算法实现更高级的识别。

### 2.3 可视化与智能控制

自动巡检机器人系统中机器人与控制主机之间可通过通信网络系统实现双向信息交互。

热成像红外所获取的原始数据为在一定温度范围的灰度图,由于灰度仅表示相对温度,无法直观了解温度信息。集控室控制主机将灰度图实时转化为绝对温度的彩色图,可以通过对颜色的观测一目了然的了解温度信息,极大方便了对温度场的观测。同时,集控室集控系统也可以对巡检机器人的巡检速度、电机转速、驱动器温度、驱动转矩、CPU负载、内存用量、网络延迟和图像传输刷新频率等巡检状态进行实时监测,可实现对机器人巡检状态的实时控制。

### 2.4 报警

采煤机的温度无法直接观测,人工巡检无法迅速而准确地把握温度异常情况。自动巡检机器人系统采集的热成像温度图像,获得观测范围内的所有温度信息,精度达0.1℃,根据设定的温度阈值,迅速发现异常温度信息(如高温,特定温度区间),在集控室控制主机可视化界面实时显示温度异常画面并报出警告。

## 3 自动巡检机器人试验情况

自动巡检机器人系统在中煤张家口煤矿机械有限责任公司综采工作面实验室进行试验性研究,如图6和图7所示,实验室工作面煤壁厚度3m,工作面长度70m。布置有1台MG500/1130-WD采煤

机,1台SGZ1000/1050刮板输送机,其长度为70m,1部SZZ1000/400转载机,安装有43架ZY9000/15/28D液压支架。自动巡检机器人主要技术参数如下:

机器人本体尺寸/(mm×mm×mm)	600×350×200
机器人本体质量/kg	15
机器人续航能力/h	4
机器人运动速度/(m·min⁻¹)	0~20
可见光传感器分辨率/(pix×pix)	1 920×1 200
热成像传感器分辨率/(pix×pix)	640×512
热成像传感器测温范围/℃	-25~135

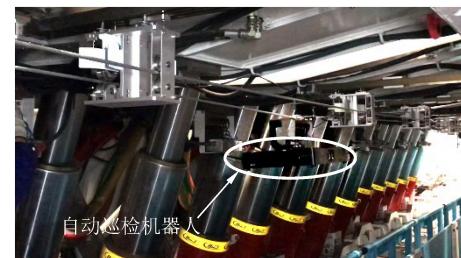


图6 自动巡检机器人现场安装

Fig. 6 Installation diagram of automatic inspection robot



图7 集控室可视化显示

Fig. 7 Visual display of central control room

## 4 试验结果及分析

自动巡检机器人系统在综采工作面实验室进行试验过程中表现出良好的实用性,达到了设计的初步预期效果。

自动巡检机器人在试验中具有如下特点:

1) 自动巡检机器人系统布置合理,有效节约安装空间,工作过程安全可靠,完全适应综采工作面的狭小空间。

2) 根据综采工作面液压支架经常性会进行拉架操作的需求,固定轨道的巡检机器人无法进行巡检,而自动巡检系统可以吸收拉架产生的设备位置变化,保证巡检轨道的畅通,实现了巡检机器人的无障碍通过。

3) 集控室集控系统将灰度图实时转化为绝对

温度的彩色图,通过对颜色的观测直观地了解温度信息,非常方便对温度场的观测。

4)机器人本体采集的热成像温度图像可以获得观测范围内的所有温度信息,通过设定报警值可实现高温报警并显示实时画面。

## 5 结 论

1)综采工作面自动巡检机器人的自动巡检系统可在液压支架拉架动作后,实现对设备位置变化的自适应,有效保证了巡检机器人巡检作业的可靠性。

2)综采工作面自动巡检机器人系统可将巡检采集的数据可视化,并在温度过高时发出报警,可代替人工完成工作面的巡检过程和数据采集过程,降低了工作人员的工作强度,提高了巡检工作面巡检作业的安全性和可靠性。

3)综采工作面自动巡检机器人存在结构强度不足和未作防爆处理问题,提高自动巡检系统的结构强度和设计防爆功能以满足井下作业需求是下一步的研究重点。

## 参考文献(References):

- [1] 孙继平.煤矿信息化与自动化发展趋势[J].工矿自动化,2015,41(4):1-5.  
SUN Jiping. Development trend of coal mine informatization and automation [J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(4): 1-5.
- [2] 郭 峰.轨道式变电站设备巡检机器人的设计与应用[D].鞍山:辽宁科技大学,2016.
- [3] 吴锴,左兆陆,窦少校.我国轨道式巡检机器人研究及发展现状[J].软件,2018(11):80-83.  
WU Kai,ZUO Zhaolu,DOU Shaoxiao. Research and development status of track inspection robot in China [J]. computer engineering & Software, 2018(11):80-83.
- [4] 江 雪.巡检机器人底盘结构设计及其振动特性研究[D].淮南:安徽理工大学,2018.
- [5] 商德勇,杨 壘,杜少庆.基于ADAMS宏命令的薄煤层工作面巡检机器人建模与仿真[J].机床与液压,2017,45(15):20-22.  
SHANG Deyong, YANG Lei, DU Shaoqing. Modeling and simulation on inspection robot in thin coal seam based on ADAMS macro instruction [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(15): 20-22.
- [6] 朱宇昌,李军伟,张树生,等.防爆轮式巡检机器人设计及应用[J].制造业自动化,2019(2):39-40,51.  
ZHU Yuchang, LI Junwei, ZHANG Shusheng, et al. The design and application of explosion-proof wheeled Inspection robot, 2019(2): 39-40,51.
- [7] 闫法兵.线缆巡检机器人的机构设计与控制研究[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2018.
- [8] 周风余.110kV输电线路自动巡检机器人系统的研究[D].天津:天津大学,2008.
- [9] 任志斌.高压输电线巡检机器人控制系统的研究与实现[D].上海:上海大学,2009.
- [10] 商德勇.薄煤层综采工作面巡检机器人运动分析及试验研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2016.
- [11] 商德勇,杨 壘,杜少庆,等.薄煤层工作面巡检机器人越障前动力学分析[J].机械设计与制造,2018(1):261-263.  
SHANG Deyong, YANG Lei, DU Shaoqing, et al. Dynamic analysis before the obstacle crossing of inspection robot in thin coal seam [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(1):261-263.
- [12] 赵建伟,杨 壘,商德勇,等.薄煤层工作面巡检机器人越障动力学建模与分析[J].制造业自动化,2015(15):7-9.  
ZHAO Jianwei, YANG Lei, SHANG Deyong, et al. Dynamics modeling and analysis for obstacle-climbing of thin coal seam inspection robot [J]. Manufacturing Automation, 2015(15):7-9.
- [13] 商德勇,范 迅,赵建伟.薄煤层工作面巡检机器人搭载平台应力与模态分析[J].煤炭技术,2015(5):280-283.  
SHANG Deyong, FAN Xun, ZHAO Jianwei. Stress and modal analysis of carrying platform for inspection robot in thin coal mining seam face [J]. Coal Technology, 2015(5):280-283.
- [14] 靳子浩.矿用悬挂式巡检机器人设计[D].西安:西安科技大学,2017.
- [15] 张继明.摆臂履带机器人综合评价及运动分析[D].淮南:安徽理工大学,2018.
- [16] 商德勇,范 迅,赵建伟.薄煤层工作面巡检机器人行走机构设计及越障分析[J].矿业科学学报,2016,1(1):67-73.  
SHANG Deyong, FAN Xun, ZHAO Jianwei. Walking mechanism design and analysis on obstacle crossing for inspection robot in thin coal seam face [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2016, 1(1):67-73.
- [17] 商德勇,崔栓伟,周丹,等.薄煤层巡检机器人行走机构跨沟性能分析及试验研究[J].煤炭工程,2017,49(4):136-138.  
SHANG Deyong, CUI Shuanwei, ZHOU Dan, et al. Ditch-crossing performance analysis and experimental study on inspection robot walking mechanism in thin coal seam [J]. Coal Engineering, 2017, 49(4):136-138.
- [18] 许 博.高压线巡检机器人的设计与研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [19] 赵东雷.输电线路巡检机器人越障行走装置设计与研究[D].北京:华北电力大学,2018.
- [20] 何 缘,吴功平,王伟,等.改进的穿越越障巡检机器人设计及越障动作规划[J].四川大学学报(工程科学版),2015,47(6):157-164.  
HE Yuan, WU Gongping, WANG Wei, et al. Advanced Design and Motion Plan of an Improved Inspection Robot Running Across Obstacles [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(6):157-164.