



文章编号:1671-251X(2020)10-0043-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020080042

矿用智能巡检机器人关键技术研究

潘祥生^{1,2}, 陈晓晶^{1,2}

(1. 中煤科工集团常州研究院有限公司, 江苏 常州 213015;

2. 天地(常州)自动化股份有限公司, 江苏 常州 213015)



扫码移动阅读

摘要:介绍了矿用智能巡检机器人研究现状,针对目前矿用智能巡检机器人的特点,从移动平台、定位与导航、图像识别、自主充电、后台管理及诊断等方面详细分析了矿用智能巡检机器人的关键技术:移动平台是矿用智能巡检机器人的重要组成部分,不同的移动平台工作方式不同,应根据巡检场所的环境特点选择轮式、履带式或者轨道式移动平台,平台设计时还需考虑防爆、防潮、防振、防尘等问题;定位与导航技术是矿用智能巡检机器人实现智能化和完全自主移动最关键的技术,从目前井下使用情况来看,轮式和履带式矿用智能巡检机器人定位与导航可采用激光雷达+SLAM技术,轨道式矿用智能巡检机器人由于巡检线路固定,定位与导航适合采用RFID技术;图像识别技术是矿用智能巡检机器人使用比较普遍的一项重要技术,通过拍摄设备图像,判别设备运行状况,根据矿用智能巡检机器人结构及组网方式不同,图像识别的数据处理分为后台处理和就地处理;自主充电技术是矿用智能巡检机器人长期自主工作后补充电能的重要手段,在电池设计时不仅要考虑增大电池容量,还要考虑电池的自主充电能力,才能实现机器人无人值守智能化巡检,体积小、质量轻、储量大、电池本安化是目前研究的难点;矿用智能巡检机器人在巡检过程中会采集到大量数据,其必须具备后台管理和数据分析诊断功能,但目前矿用智能巡检机器人受供电、网络传输技术等因素的影响,无法对采集的数据进行实时处理或上传,需要进一步研制出更加高效的后台管理及在线故障诊断系统。指出了数据分析智能化、移动平台轻量化、功能模块化、巡检定位精确化是矿用智能巡检机器人的发展趋势,为矿用智能巡检机器人关键技术的进一步研究提供参考。

关键词:矿用智能巡检机器人;移动平台;定位导航;自主充电;图像识别

中图分类号:TD67 文献标志码:A

Research on key technologies of mine-used intelligent inspection robot

PAN Xiangsheng^{1,2}, CHEN Xiaojing^{1,2}

(1. CCTEG Changzhou Research Institute, Changzhou 213015, China;

2. Tiandi (Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China)

Abstract: The research status of mine-used intelligent inspection robot was introduced. In view of characteristics of mine-used intelligent inspection robot, the key technologies of mine-used intelligent inspection robot were analyzed in detail from mobile platforms, positioning and navigation, image recognition, autonomous charging, background management and diagnosis. Mobile platform is an important component of mine-used intelligent inspection robot, different mobile platforms work in different ways, wheel, crawler or track type mobile platform should be selected according to environmental

收稿日期:2020-08-13;修回日期:2020-09-29;责任编辑:张强。

基金项目:天地(常州)自动化股份有限公司研发项目(2018MS031)。

作者简介:潘祥生(1985—),男,江苏盐城人,工程师,硕士,现主要从事煤矿机械自动化方面的研究工作,E-mail:357166499@qq.com。

引用格式:潘祥生,陈晓晶. 矿用智能巡检机器人关键技术研究[J]. 工矿自动化,2020,46(10):43-48.

PAN Xiangsheng, CHEN Xiaojing. Research on key technologies of mine-used intelligent inspection robot[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(10): 43-48.

characteristics of inspection site, and explosion-proof, moisture-proof, anti-vibration, dust and other issues should be considered in platform design. Positioning and navigation technology is key technology of mine-used intelligent inspection robot to realize intelligent and completely autonomous movement, from current underground application, laser radar+SLAM technology can be used for positioning and navigation of wheel type and crawler type mine-used intelligent inspection robot, due to fixed inspection line, RFID technology is suitable for positioning and navigation of track type mine-used intelligent inspection robot. Image recognition technology is an important technology widely used in mine-used intelligent inspection robot, which can determine running state of equipment by taking device images, moreover, according to difference of structure and networking mode of mine-used intelligent inspection robot, the image processing methods can be divided into background processing and local processing. Autonomous charging technology is an important means for mine-used intelligent inspection robot to supply electric energy for long-term autonomous work, the design of the battery should consider not only increasing battery capacity, but also having autonomous charging ability, so as to achieve unattended intelligent inspection; Intrinsically safe battery with small size, light weight and large reserves is the research difficulty. Mine-used intelligent inspection robot will collect a large amount of data in the process of inspection, so it must have background management and data analysis diagnosis function, but the current mine-used inspection robot can't process or upload collected real-time data due to the influence of power supply and network transmission technology, therefore, a more efficient background management and on-line fault diagnosis system needs to be developed. At last, it is pointed out that intelligent data analysis, light weight mobile platform, modularized function and accurate inspection positioning are the development trends of mine-used intelligent inspection robot, which provides reference for further research on the key technologies of mine-used intelligent inspection robot.

Key words: mine-used intelligent inspection robot; mobile platform; positioning and navigation; autonomous charging; image recognition

0 引言

我国煤炭储存量大,开采环境复杂,煤矿环境安全和设备故障一直是煤矿安全生产的一个难题。为了保证矿工人身安全及生产设备的正常运行,必须对井下环境和设备运行状态进行实时监测。现有的井下环境和设备运行状态监测方式主要有人工巡检和自动化监测 2 种,人工巡检方式是井下设备检测所采用的传统方式,存在巡检效率低、劳动强度大和手段单一等问题,逐步被淘汰。自动化监测方式虽然监测效果较好,但成本高、灵活性差、覆盖面积小,不具有普适性^[1]。

近年来,国家大力推行自动化减人、机械化换人方针,机器人技术得到了飞速发展,越来越多的低成本、高效率、高可靠性的矿用智能巡检机器人被研制出来,并应用于煤矿作业现场,替代人工巡检,有效地解决了人工巡检存在的不足^[2]。矿用智能巡检机器人可以长时间在井下恶劣环境中连续工作,结合智能化监测装置和分析软件,可以进行全天候数据快速采集、实时信息传输、智能分析预警与快速决策,形成管控闭环,加强了运行设备管理能力,极大

地提升了煤矿安全生产智能化管理水平。本文结合矿用智能巡检机器人的研究现状,分析了矿用智能巡检机器人的关键技术,并指出了矿用智能巡检机器人的发展趋势。

1 矿用智能巡检机器人研究现状

矿用智能巡检机器人是一种用于煤矿领域,可以自主运行的移动平台,根据煤矿井下使用场景,可搭载工业相机、拾音设备、环境类传感器、边缘计算单元等智能化检测或计算设备,实现全天候对设备运行状态数据进行快速采集,并通过软件算法对采集数据进行实时分析,分析结果可快速传输到后台集控中心,从而保障设备运行的可靠性。使用矿用智能巡检机器人是煤矿生产实现智能化和无人化的重要手段,也是未来智慧矿山发展的重要方向。

矿用智能巡检机器人是集机电一体化技术、多传感融合技术、机器视觉技术、无线传输技术于一体的复杂系统,技术含量高,研究和开发难度大,是煤炭行业发展水平的重要标志^[3]。

我国对巡检机器人的研究始于 20 世纪 80 年代,主要应用于电力领域变电站及高压输电线的巡

检,经过多年研究,取得了一定的成果。20 世纪 90 年代末逐步发展到各个领域,尤其是煤矿领域,机器人巡检部分取代了传统人工巡检,获得了市场的充分认可。目前矿用智能巡检机器人已在综采工作面、胶带运输系统、变电所、水泵房等场所应用。许望等^[4]成功研制了第 1 台应用于工作面的轮式移动巡检机器人(图 1),并对机器人壳体进行了防爆设计,通过机器人平台上装载的监测设备,实现了对工作面环境和设备安全状态的巡检。左敏^[5]提出了一种集成化履带式巡检机器人(图 2),在传统履带传动系统上增设一对摆臂,提高了机器人的越障能力,增强了机器人对地面环境的适应能力,通过搭载摄像机和传感器,实现了对井下环境和设备的安全巡检。裴文良等^[6]针对井下泵房情况,设计了一种轨道巡检机器人(图 3),通过在预先铺设的工字钢轨道上来回移动完成巡检任务,该巡检机器人控制系统简单,定位精度高。针对煤矿井下胶带运输系统,姜俊英等^[7]设计了一种以钢丝为轨道的巡检机器人(图 4),用于监测胶带运输系统的设备运行状况,该巡检机器人爬坡能力强,安装方便。



图 1 轮式巡检机器人
Fig. 1 Wheeled inspection robot



图 2 履带式巡检机器人
Fig. 2 Crawler inspection robot

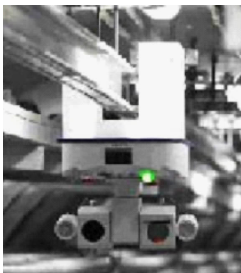


图 3 刚性轨道巡检机器人
Fig. 3 Rigid track inspection robot

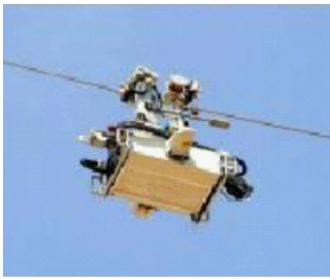


图 4 柔性轨道巡检机器人
Fig. 4 Flexible track inspection robot

上述矿用智能巡检机器人存在以下特点:

- (1) 轮式巡检机器人。运动部分结构简单、转向灵活、机动性强,但越障能力差,导航与定位系统复杂,对复杂地形适应性较差。
- (2) 履带式巡检机器人。具有一定的越障能力,不受井下巷道复杂地理环境、人员及设备分布的影响,但导航与定位系统较复杂。
- (3) 轨道式巡检机器人。移动路线固定,控制简单,定位精度高。轨道按照材料的强度可分为刚性轨道和柔性轨道,刚性轨道有槽钢、工字钢、片钢和其他特制钢轨,成本高且占用巷道空间资源;柔性轨道多为电缆或钢丝悬线,承重受到一定限制,同时移动过程中平稳性较差。

2 矿用智能巡检机器人关键技术

矿用智能巡检机器人的出现提升了煤矿作业环境的安全性,降低了矿工劳动强度,达到了减员增效的效果,有着巨大的应用前景和商业价值,其关键技术成为煤炭科技研究的热点。从研究现状来看,许多关键技术还有待进一步突破。

2.1 移动平台技术

移动平台是矿用智能巡检机器人的重要组成部分,不同的移动平台工作方式不同,因此,应根据巡检场所的环境特点选择轮式、履带式或者轨道式移动平台。张树生等^[8]介绍了巡检机器人移动平台的总体结构及在平台上搭载的设备检测系统。崔鑫^[9]给出了巡检机器人移动平台结构动力学建模和避障算法。巩利萍^[10]提出利用弹塑性力学理论对机器人外壳进行初始化设计,并采用 Solidworks 软件建立样机模型,再通过有限元分析软件 COSMOSworks 对矿用智能巡检机器人平台结构进行分析与设计。Rong Xuewen 等^[11]研究了矿用智能巡检机器人防爆技术,采用加压外壳防爆技术,并对机器人防爆系统的组成进行了详细介绍。此外,为保证移动平台能够在井下特殊环境中长时间稳定工作,设计时还需考虑防潮、防振、防尘等问题。

2.2 定位与导航技术

定位与导航技术是矿用智能巡检机器人实现智

能化和完全自主移动最关键的技术。针对智能巡检机器人的定位与导航,研究人员对变电站巡检机器人作了大量研究,提出磁轨迹引导、配合 RFID (Radio Frequency Identification, 射频识别) 电子标签的定位导航方式,这种方式需要在巡检机器人运行路径上预埋磁轨迹并在停靠位置埋设 RFID 电子标签,导航定位精度高、抗干扰性强,但存在施工复杂、工作量大、运行路线不灵活等缺点^[12]。基于此,杨森等^[13]提出了利用地面引导标志进行导航的单目视觉导航方法,通过图像采集对引导标志进行识别,自主规划巡检路径和停靠位置,该方法对光线比较敏感,光线不足或地面引导标志不清晰会严重影响巡检机器人导航的准确性。为了解决光线不足影响导航精度的问题,肖鹏等^[14]研制了一种基于人工路标的激光导航系统,有效地提高了导航精度,但该系统对人工路标要求较高,不适合井下大范围使用。李红梅等^[15]研制了一种不依赖人工路标的激光雷达 + SLAM (Simultaneous Localization and Mapping, 及时定位与地图构建) 技术,通过激光雷达扫描周围环境并建立电子地图,利用帧间匹配、回环检测等手段,实现智能巡检机器人的自主行走、自主避障和精确定位。近年来,研究人员尝试采用高精度差分 GPS (Global Position System, 全球定位系统) 定位技术对智能巡检机器人进行定位,这种方式对无线传输的信号依赖性较强,测试发现,周围设备的电磁扰动会对 GPS 信号产生影响,同时复杂的矿井环境会造成 GPS 信号丢失,严重制约了导航的可靠性^[16]。还有研究人员采用惯性导航方式实现定位导航,即在巡检机器人上安装 IMU (Inertial Measurement Unit, 惯性测量单元),通过测量加速度、角速度等数据,获取机器人速度和位姿信息,该方式由于巡检机器人的打滑、颠簸等因素,导致测量存在一定误差,长时间的巡检会产生较大的累计误差,从而使得导航偏移。

从目前井下使用情况来看,轮式和履带式矿用智能巡检机器人定位、导航可采用激光雷达 + SLAM 技术,该技术已经成功应用到无人机领域。通过该技术,矿用智能巡检机器人可以在完全未知环境中建立电子地图,同时利用地图进行路径规划和自主定位、导航。轨道式矿用智能巡检机器人由于巡检线路固定,因此,定位与导航适合采用 RFID 技术,RFID 定位装置价格便宜、安装方便且精度较高,具有较高的可行性。

2.3 图像识别技术

图像识别技术是矿用智能巡检机器人使用比较普遍的一项重要技术,通过拍摄设备图像判别设备运行状况。图像识别的类型主要包括仪表读数、指

示灯状态、开关位置、设备运行状况等^[17]。

经过多年发展,图像识别方法较为成熟,对于仪表读数的识别,通常将采集到的数字与数字模板图像库进行匹配,根据匹配结果能准确输出识别结果。对于指示灯、开关位置、设备状态的识别,通常是先获取被识别对象在图像中的位置,然后根据被识别对象的线状特征,基于 Hough 变换判断被识别对象的颜色及状态信息。利用图像识别技术可以准确获取仪表读数,然而井下设备复杂、种类繁多,如何实现对所有设备快速、准确识别是图像识别技术亟需解决的关键问题。为了提高识别准确性,一些特殊设备需要建立专用的识别模板和算法,甚至还需积累一些培训样本进行深度学习。

根据矿用智能巡检机器人结构及组网方式不同,图像识别的数据处理分为后台处理和就地处理。后台处理是将拍摄图像通过无线技术传输到远端服务器进行识别处理,这种方式存在传输时间长、实时性差和丢帧、损坏等问题;就地处理即利用自行搭载的边缘计算模块进行图像处理,该方式实时性好,可靠性高。

2.4 自主充电技术

随着矿用智能巡检机器人的功能不断扩展及大行程巡检要求被提出,对电池的续航能力提出了更高的要求^[18]。因此,在电池设计时不仅要考虑增大电池容量,还要考虑电池的自主充电能力,才能实现机器人无人值守智能化巡检。

自主充电技术是矿用智能巡检机器人长期自主工作后补充电能的重要手段。W. Grey^[19]利用光源作为导航信息实现自主充电,但光源容易受到环境光干扰。Li Li 等^[20]研究了一套巡检机器人自主充电系统,利用已知环境地图引导巡检机器人与充电站对接,实现巡检机器人自主充电,但一旦环境地图受到破坏,巡检机器人则无法自主完成充电任务,缺乏灵活性。J. Toth 等^[21]通过在充电站上设置色块和 IR 二极管引导巡检机器人对接实现自主充电,并可以对重点状况进行监控。黎阳生^[22]使用激光传感器、PTZ 彩色摄像机和里程计引导机器人自主充电,但存在对接误差容忍度小的缺陷。杨墨等^[23]提出了一种变电站巡检机器人自主充电系统,该系统采用磁轨道引导与 RFID 标签定位,导航精度高,简单可靠,无需人工干预,智能化程度高,当巡检机器人与充电桩对接时,通过检测充电结构位置及极片电压判断是否满足充电要求,同时充电机构设计了漏斗状对接窗口,提高了对接误差容忍度和可靠度,经测试发现,该充电技术可以移植到矿用智能巡检机器人上,考虑到井下环境的特殊性,在设计时需考虑电池及充电方式的本安化。体积小、质量轻、储

量大的电池本安化是目前研究的难点。

矿用智能巡检机器人的充电方式主要有非接触式和接触式2种。非接触式充电主要方式是无线充电,但缺乏完善的认证体系和行业标准,而且充电电流较小,无法实现快速充电;接触式充电需防止充电电极暴露在空气中产生电火花,应做好防爆、防静电处理,同时要做到对充电电流及充电状态的监测。

2.5 后台管理及诊断技术

矿用智能巡检机器人在巡检过程中会采集到大量数据,这些庞大的数据若直接上传至后台由人工进行分类管理及诊断,不仅增加了通信系统的传输压力,而且增加了人工处理的工作量,因此,矿用智能巡检机器人必须具备后台管理和数据分析诊断功能。张艳丽等^[24]设计了基于GPS卫星定位的输电线路巡检管理系统,实现了巡检工作的数字化管理,但该系统需要依靠巡检人员携带手持机进行巡检工作,不适用于巡检机器人。王波等^[25]针对巡检路径的特点,提出了融合巡检图像分类管理、巡检任务管理、分析诊断、数据传输及局域网于一体的后台管理与诊断系统的体系架构,实现了对采集数据的实时分析处理。

目前矿用巡检机器人受供电、网络传输技术等因素的影响,无法对采集的数据进行实时处理或上传,需要进一步研制出更加高效的后台管理及在线故障诊断系统。

3 矿用智能巡检机器人发展趋势

在新基建热潮下,以煤炭为代表的传统行业也在积极拥抱数字技术,加速走向智能化。由于煤矿井下特殊的工作环境和工作要求,矿用智能巡检机器人还需在技术上不断提升,主要发展趋势如下:

(1) 数据分析智能化。随着计算机和通信技术的发展,多传感器融合技术已在许多行业得到应用,但在煤矿领域应用较少。提高识别算法实用性,开展基于设备形状及外形特征的模式识别技术研究,增强机器人深度学习能力,实现信息处理和传输的智能化是矿用智能巡检机器人的发展趋势之一。

(2) 移动平台轻量化。目前矿用智能巡检机器人移动平台的材料主要是钢铁,外形笨重,移动缺乏灵活性,行走时需要较大的功耗。因此,研发体积小、质量轻的防爆新型材料是矿用智能巡检机器人移动平台的发展趋势。

(3) 功能模块化。矿用巡检机器人整体应采用模块化设计,不同应用场景配备不同的功能模块,扩大巡检机器人的应用范围。

(4) 巡检定位精确化。受限于工控机的性能及算法复杂度等因素,激光雷达+SLAM技术尚不能

实现矿用智能巡检机器人定位与建图的同步运算。随着工控机性能的快速提升及算法的不断革新,研制定位精度高、鲁棒性强的导航装置是矿用智能巡检机器人发展的必然趋势。

4 结语

矿用智能巡检机器人能够根据预定巡检任务进行巡检作业,其灵活性和智能性可以弥补人工巡检的不足,符合智慧矿山发展要求,也是煤炭行业无人值守发展的必然趋势,应用前景广阔。对矿用智能巡检机器人的关键技术进行了深度剖析,指出数据分析智能化、移动平台轻量化、功能模块化、巡检定位精确化是矿用智能巡检机器人的发展趋势,为矿用智能巡检机器人关键技术的进一步研究提供参考。

参考文献(References):

[1] 阙建立. 智能矿山平台建设与实践[J]. 工矿自动化, 2018,44(4):90-94.
QUE Jianli. Construction and implementation of platform for intelligent mine[J]. Industry and Mine Automation,2018,44(4):90-94.

[2] 葛世荣. 煤矿机器人现状及发展方向[J]. 中国煤炭, 2019,45(7):18-27.
GE Shirong. Present situation and development direction of coal mine robot[J]. China Coal, 2019, 44(7):18-27.

[3] 李学民. 矿用巡检机器人关键技术分析[J]. 煤矿机械, 2018,39(5):71-73.
LI Xuemin. Key technologies analysis of mine inspection robot [J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(5):71-73.

[4] 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.
XU Wang, JIA Ruiqing, JIANG Tao, et al. Research on mobile robots for monitoring safety of equipments on fully-mechanized working face of thin coal seam [J]. Mining & Processing Equipment, 2010, 38(20): 18-21.

[5] 左敏. 矿山智能巡检机器人的关键技术[J]. 金属矿山, 2012,41(7):120-122.
ZUO Min. Key technology of intelligent mine patrol robot[J]. Metal Mine, 2012,41(7):120-122.

[6] 裴文良,张树生,李军伟. 矿用巡检机器人设计及其应用[J]. 制造业自动化, 2017,39(2):73-74.
PEI Wenliang, ZHANG Shusheng, LI Junwei. The design and application of mine inspection robot[J]. Manufacturing Automation, 2017, 39(2):73-74.

[7] 姜俊英,周展,曹现刚,等. 煤矿巷道悬线巡检机器人结构设计及仿真[J]. 工矿自动化, 2018, 44(5):

- 76-81.
JIANG Junying, ZHOU Zhan, CAO Xiangang, et al. Structure design of suspension line inspection robot in coal mine roadway and its simulation[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(5): 76-81.
- [8] 张树生, 马静雅, 岑强, 等. 煤矿综采工作面巡检机器人系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 44(10): 136-140.
ZHANG Shusheng, MA Jingya, CEN Qiang, et al. Research on inspection robot system for fully-mechanized mining face in coal mine[J]. Coal Science and Technology 2019, 44(10): 136-140.
- [9] 崔鑫. 煤矿井下泵房智能巡检机器人的研究[J]. 煤矿机械, 2016, 37(11): 178-179.
CUI Xin. Research on intelligent patrol robot for pump house in coal mine[J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(5): 178-179.
- [10] 巩利萍. 隔爆电气设备外壳的设计与有限元分析[D]. 青岛: 山东科技大学, 2009.
GONG Liping. Design and finite element analysis of explosion-proof electrical equipment box [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2009.
- [11] RONG Xuewen, SONG Rui, SONG Xiaming, et al. Mechanism and explosion-proof design for a coal mine detection robot [J]. Procedia Engineering, 2011, 15(2): 100-104.
- [12] GUO Rui, LI Bingqiang, SUN Yutian, et al. A patrol robot for electric power substation [C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2009: 55-59.
- [13] 杨森, 董吉文, 鲁守银. 变电站设备巡检机器人视觉导航方法[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 11-17.
YANG Sen, DONG Jiwen, LU Shouyin. Visual navigation method of substation patrol robot [J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 11-17.
- [14] 肖鹏, 栾贻青, 郭锐, 等. 变电站智能巡检机器人激光导航系统研究[J]. 自动化与仪表, 2012, 27(5): 5-9.
XIAO Peng, LUAN Yiqing, GUO Rui, et al. Research of the laser navigation system for the intelligent patrol robot [J]. Automation & Instrumentation, 2012, 27(5): 5-9.
- [15] 李红梅, 王滨海, 廖文龙, 等. 基于地图匹配的变电站巡检机器人激光导航系统设计[J]. 制造业自动化, 2014, 36(1): 52-56.
LI Hongmei, WANG Binhai, LIAO Wenlong, et al. Laser navigation system design for substation equipment inspection robot based on map matching [J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(1): 52-56.
- [16] 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.
- [17] 马一鸣. 智能巡检机器人在无人值守变电站的应用[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
MA Yiming. The application of intelligent inspection robot in unattended substation [D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2017.
- [18] 王国法, 范京道, 徐亚军, 等. 煤炭智能化开采关键技术创新进展与展望[J]. 工矿自动化, 2018, 44(2): 5-12.
WANG Guofa, FAN Jingdao, XU Yajun, et al. Innovation process and prospect on key technologies of intelligent coal mining [J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(2): 5-12.
- [19] GREY W. The humanoid substation inspection robot modeling design[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 365/366: 771-774.
- [20] LI Li, WANG Binhai, LI Beidou, et al. The application of image based visual servo system for smart guard[C]//10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), 2013: 1342-1345.
- [21] TOTH J, POULIOT N, MONTAMBAULT S. Field experiences using lines count technology on large BC transmission crossings [C]//Proceeding of 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, Montreal, 2010: 1-6.
- [22] 黎阳生. 变电站巡检机器人自主充电装置及对接控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
LI Yangsheng. Study on auto-recharging device and docking control for substation inspection robot [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [23] 杨墨, 隋天日, 曹涛, 等. 变电站巡检机器人自动充电系统[J]. 制造业自动化, 2013, 35(3): 47-49.
YANG Mo, SUI Tianri, CAO Tao, et al. The auto-recharging system based on substation inspection robot [J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(3): 47-49.
- [24] 张艳丽, 张绍楠, 崔继仁, 等. 基于 GPS 的输电线路巡检管理系统的设计[J]. 自动化与仪表, 2010, 25(1): 49-52.
ZHANG Yanli, ZHANG Shaonan, CUI Jiren, et al. Design of management system of patrol inspection on power transmission line based on GPS [J]. Automation & Instrumentation, 2010, 25(1): 49-52.
- [25] 王波, 吴功平, 许鸣昌, 等. 输电线路巡检机器人后台管理及诊断系统[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(1): 110-114.
WANG Bo, WU Gongping, XU Mingchang, et al. Research and development of backstage management and inspection system based on transmission line inspection robot [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(1): 110-114.