

架空线移动机器人行走越障特点

房立金¹, 王洪光²

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要:面向电力巡检及维护作业任务需求,以电力输电线路为对象,分析了架空线移动机器人运动环境的特点,对典型架空线移动机器人行走越障过程的特点以及质心调节的影响情况进行了分析,探讨了机器人质心调节方法.提出了一种新型双臂四轮机器人结构以及被动适应的手臂方案,并提出了一种主被动结合的运动协调控制方法.提出的方法在巡检机器人系统中得到了实际应用,实验室模拟线路及实际线路的运行情况表明了机器人系统设计的合理性以及所提出方法的有效性.

关键词:移动机器人;架空线路;质心调节

中图分类号:TP24 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4785(2010)06-0492-06

Research on the characteristics of the movement and obstacle-clearing processes of a wire-suspended mobile robot

FANG Li-jin¹, WANG Hong-guang²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: In order to meet inspection and maintenance requirements based on power transmission lines, the robot's moving environment and the obstacle-clearing processes were analyzed. The robot design characteristics and the centroid-adjustment influence were given. A new robot structure with two arms, four wheels, and a passive adaptive arm design was presented. Moreover, a centroid-adjustment method and a new passive-active hybrid motion control method were also presented. Finally, the method was used in the robot inspection system and verified through experiments in artificial environments and actual transmission lines. The results show that the method is feasible and very effective for improving the performance of robot control.

Keywords: wire-suspended mobile robot; overhead lines; centroid adjustment

高压和超高压电力输电线路是保障国民经济生产和人们日常生活的能源大动脉,要求其能够可靠稳定地运行.架空线移动机器人沿电力输电线路行走,可携带相关仪器完成对电力线路的巡检及其他作业任务,是我国电力部门急需的自动化设备之一.近年来该类移动机器人引起了国内外研发单位和相关用户的广泛关注.

电力输电线路是一类典型的架空线路,电力输电线路环境的特殊性使得机器人需要具备沿大角度线路上下坡行走、跨越由杆塔连接金具构成的多种不同障碍物的能力.由于机器人是在架空环境中运

行,处于悬挂状态,机器人自身的重量和质心位置等因素会对其行走和越障过程产生诸多不利的影响.

日本20世纪90年代即开展了电力线移动机器人的研究,并研制出了相应的机器人样机系统^[1-2].但由于技术和市场等多方面的原因,该类机器人未能得到广泛应用.我国自2002年起在国家“863”计划的支持下,由中国科学院沈阳自动化研究所、武汉大学以及中国科学院自动化研究所等单位针对500 kV、220 kV以及110 kV电压等级线路分别开展了电力输电线路移动机器人的研究与开发工作,有力促进了该类机器人的研究进展^[3-5].最近几年,国内外对电力架空线移动机器人的研究和开发较为活跃,大多数项目都得到了电力部门的参与和合作.但是,由于电力输电线路的复杂性以及野外环境的苛刻性,从工程应用角度来衡量,该类机器人的研发

收稿日期:2010-04-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60875082);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N090403003).

通信作者:房立金. E-mail: ljfang@mail.neu.edu.cn.

工作还面临着很多难点问题需要加以解决。

针对目前出现的几种典型的架空线移动机器人结构形式,对其行走和越障动作过程进行分析,重点讨论机器人重心变化对行走越障过程的作用机制和影响特点,为该类机器人行走越障机构优化设计及机器人控制系统设计提供参考。

由于重力的作用,架空线的形状是一条近似于抛物线的悬链线。架空线两端挂点的位置不同,悬链线的具体形状也不同。在不同路段,输电线路悬链线形成的坡度会随着地形及档距等参数的变化而改变。因此,在机器人的行走路径上,不同的路径位置其爬坡角度也不相同。特别地,对于导线而言,在耐张杆塔上还存在一段用于连接杆塔两侧导线的跳线。该跳线的长度较短,其形状为空间不规则曲线,对机器人而言是一段更为特殊和复杂的行走路径。

在设计中,为适应上述电力输电线路环境需求,机器人应具有较多的运动自由度数量,但这会引起一系列实际困难:自由度的增加会使机器人的结构变得更加复杂,也会增加机器人自身的重量和功耗,而重量和功耗的增加则会显著影响机器人的有效工作时间。因此该类机器人的设计在工程上面临着多种限制条件,应该说目前出现的典型机器人系统还难以满足工程实际需求,还不是工程上理想的设计解决方案。

1 典型的架空线移动环境及典型的架空线移动机器人

电力架空输电线路按输送的电流划分,有交流输电线路和直流输电线路2种形式。按输送的电压等级划分,架空输电线路包括1 000 kV及以上等级的特高压输电线路、500 kV超高压输电线路、330 kV、220 kV、110 kV高压输电线路以及其他低电压等级的多种输电和配电线路。以500 kV超高压输电线路为例,其架空输电线包括3组导线和2根地线。地线具有防雷的功能,也被称为避雷线,杆塔的左右两侧各有一根,地线的直径较小,一般在10~20 mm之间。500 kV超高压输电线路的导线多为分裂导线,典型的是四分裂导线,即每相导线上分别有4根并联的导线组成,4根导线之间由间隔棒相互支撑,四分裂导线线径较粗,一般为20~30 mm。输电线路的导线和地线均由相应的杆塔来实现其架空支撑。为了适应不同线路和地形环境对支撑高度和支撑强度等方面的要求,杆塔又分为直线杆塔和耐张杆塔等多种形式。耐张塔通过水平排列的绝缘子串支撑导线,可承受较大的水平方向张力。导线在通过

耐张塔时,需要通过一段跳线将杆塔两端的导线连接起来,其连接形式较为复杂。直线塔则主要提供铅锤方向的张力,通过垂直悬挂的绝缘子串来支撑导线,线路与杆塔的连接也较为简单。输电线路的导线和地线均须借助多种连接金具与杆塔相连接。这些连接金具中,与机器人关系密切,形成障碍影响机器人行走运动的线路金具主要包括以下几种:即线夹、间隔棒、压接管、绝缘子等。

对架空输电线路移动机器人而言,机器人的行走移动路径可作如下描述:1)机器人行走的路径为不同直径的圆形导线,路径为悬链线形式,一般情况下最大坡度为50°;2)以耐张杆塔为界,可将2个耐张杆塔之间的线路定义为耐张段路径;3)对于耐张段路径中的导线来说,其路径上的障碍包括线夹、压接管、间隔棒;路径周围的障碍主要有杆塔和绝缘子串。除此之外,随机出现的异物和破损也将形成新的机器人障碍;4)与导线不同,耐张段路径中的地线均为单导线,没有间隔棒一类障碍。路径上的其他障碍与导线相似,但尺寸上有很大差别。

对于机器人而言,贯通耐张杆塔的路径非常复杂。导线路径上的跳线具有较小的曲率半径,形成很陡甚至垂直的行走路径。在耐张杆塔上,地线路径则形成了中断形式。因此,不论是导线路径还是地线路径,机器人通过耐张杆塔的路径均十分特殊,难以跨越。

此外,对于电力架空输电线路机器人而言,除了需要跨越上述各种障碍物以外,机器人还需满足其他环境方面的要求。首先是来自电力输电线路本身的高压电场和强电磁干扰环境,其次野外自然运行环境对机器人的要求也极为苛刻。机器人应能够适应高低温、潮湿、雷电、雨雪、冰冻等恶劣自然环境条件的要求。

从机器人运行环境特点及机器人技术发展特点综合分析,根据工程应用的实际需求,将机器人运行条件作一些限制是必要的。特别是,如将机器人的运行路径限制在耐张段内,则排除了跨越耐张杆塔的复杂情况,可降低机器人行走及跨越障碍物的难度。实际上,对于目前国内外出现的典型机器人系统,从其行走越障能力方面来看,也大多不具备跨越耐张塔行走的能力。

图1~3为目前出现的几种典型的电力输电线路移动机器人。图1为中科院沈阳自动化研究所研制的巡检机器人样机^[6]。该机器人通过箱体及手臂上相应关节的运动实现机器人重心的调节和适应。图2所示为日本学者提出的一种电力巡检机器人。该机器人主要由2只手臂和一个质心调节机构组

成^[7],通过质心调节机构可改变机器人的重心位置,并在结构设计中采用了一些被动运动关节.图3为加拿大学者提出的电力巡检机器人系统.机器人通过水平布置的导轨机构实现前后2组手臂的越障运动^[8].



图1 中科院沈阳自动化研究所巡检机器人样机

Fig.1 Power line inspection robot, Shenyang Institute of Automation, Academy of Sciences, China

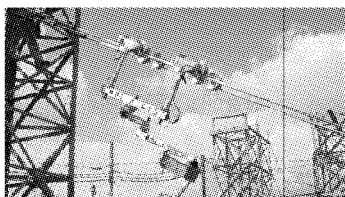


图2 日本 HiBOT 公司研制的电力巡检机器人样机

Fig.2 Expliner-robot for inspection of transmission lines, HiBot Corp., Tokyo Institute of Technology, Kansai Electric Power Corp. (KEPCO), and J-Power Systems Corp. (JPS), Japan

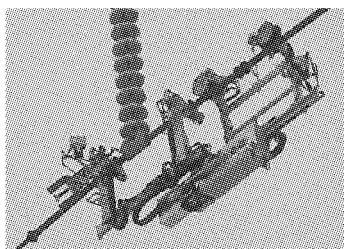


图3 加拿大魁北克电力研究院研制的巡检机器人样机

Fig.3 Power line inspection and maintenance robot, Hydro-Québec Research Institute (IREQ), Canada

为了与架空输电线路相适应,机器人在沿线行走和跨越杆塔障碍的过程中一般应处于倒置悬挂状态,即机器人的重心应始终位于线路的下方,以提高机器人的稳定性.

机器人在线路上悬挂的方式可以有单点悬挂、双点悬挂以及多点悬挂等多种形式.采用单点悬挂方式时,只有在挂点处安装上行走轮,才可以让机器人运动起来.机器人仅仅具有前进或后退2个方向

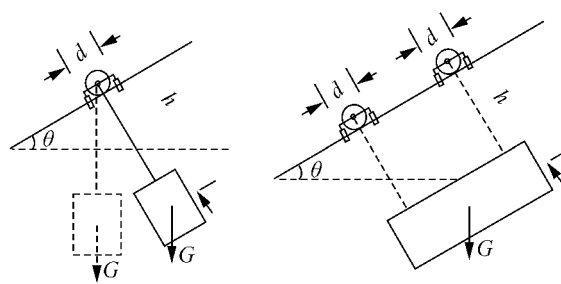
的行走能力,不可能实现抬手跨越或躲避障碍物的动作,限制了机器人跨越障碍行走的能力.因此,采用单点悬挂形式的机器人只适合在单档距小范围内使用.

采用双点悬挂的机器人(以下简称为双臂机器人)跨越障碍时,以一只手臂将机器人支撑在线路上,另一只手臂松开,运动到某一目标位置后重新抓线,2只手臂交替运动,完成机器人跨越障碍物的运动过程.可以看出,双臂机器人在跨越障碍过程中会出现单挂点悬挂支撑状态.

2 机器人单臂悬挂状态时的行走特点及机器人手部机构设计

以机器人单点悬挂状态为例,分析机器人重心的作用特点.对于可双点悬挂的机器人,当机器人处于双点悬挂状态时,只要合理布置2挂点之间的距离使之与机器人的爬坡角度相适应,机器人的重心处于2挂点之间,机器人将处于稳定状态.但机器人在跨越障碍的过程中还是无法避开单点悬挂的情况,因此首先以单点悬挂状态对机器人重心的影响进行分析.

图4(a)为机器人单点悬挂状态示意图.架空线路与水平面的夹角(坡度)为 θ ,机器人重心与线路的垂直距离为 h ,机器人重量为 G ,机器人挂点的宽度为 d (挂点处的结构一般设计成夹爪,或行走轮,亦或夹爪与行走轮的组合结构).图4所示为夹爪/行走轮组合形式.



(a)单臂支撑状态 (b)双臂支撑状态

图4 机器人单点及双点悬挂状态简图

Fig.4 Robot suspended by single and two arms

如挂点处只有轮子,机器人将在自身重力的作用下调整到图4(a)虚线所示姿态.当挂点处设计有夹子时,将由夹子提供平衡力,与重力矩平衡,保持机器人姿态不变,参见图4(a)实线所示姿态.假定夹子两端作用到线路的一对平衡力为 N ,则有 $Nd = Gh \sin \theta$.以 $\theta = 30^\circ$ 为例,当 $d = 150 \text{ mm}$ 、 $h = 500 \text{ mm}$ 、 $G = 40 \text{ kg}$ 时,须提供的平衡力为 $N = 653.7 \text{ N}$.假定夹子与线路导线之间的摩擦系数为

$u=0.2$, 则夹子作用到线路导线上的夹持力为 3 268.3 N. 显然, 夹子作用到线路的压力过大, 可能对线路造成损伤. 因此, 在机器人设计中应尽可能使机器人的姿态处于铅锤悬挂状态, 以降低机器人对线路造成损坏的几率, 即要求机器人的质心能够根据机器人所处位置和线路坡度而随时调整改变. 即对于图 4 的单挂点情况, 应使机器人绕行走轮的中心点 A 转动至虚线所示状态.

如上所述, 为减小机器人运动过程中自重引起的夹持力增加, 要求机器人的重心要不断进行调整. 在实际线路运行过程中机器人的重心位置是随线路坡度而实时变化的, 如采用主动调整重心位置的方法, 则要求实时测量采集机器人的实际位姿, 实时计算重心位置, 并进行实时调整. 重心位置的实时动态调整将带来额外的数据采集、运算以及控制任务的增加, 增大了机器人控制系统处理实时任务的负担. 在实际应用系统设计中, 如采用主动和被动调节相结合的方法, 即利用机器人自身的重力实现机器人重心位置的被动调节和自动适应, 则有可能简化重心调整控制过程, 降低系统的实时控制任务处理难度.

为防止机器人发生打滑现象, 要求夹爪能够提供足够的夹持力. 夹爪的设计应与上述线路角度变化相适应, 即应保持夹爪相对于架空线的姿态不变, 避免因夹爪夹持力不足引起机器人位姿发生变化. 如果夹爪与手臂设计成固联的形式, 则夹爪与架空线的相对位置将随机器人的位姿变化而改变, 破坏其夹持姿态, 最终难以保持对架空线的有效夹持.

由于机器人爬坡行走过程中机器人的位姿会随时发生变化, 机器人手爪部分的姿态也要与机器人行走的线路角度相适应. 手爪的设计既要兼顾考虑行走和夹持 2 方面的功能性能指标要求, 也要满足越障过程对结构尺寸的限制要求. 这些要求和约束很大程度上增加了机器人手部结构设计的复杂性和设计难度. 因此机器人手爪部分的行走轮/夹爪/手臂复合结构设计是机器人结构设计中的重点和难点内容之一. 其结构设计难度主要体现在以下方面: 一是要求夹爪能够适应机器人姿态的变化; 二是要求夹爪具有既能夹又能走的能力. 当然, 机器人手部夹爪的夹紧动作和夹爪的姿态调整也需要相应的电机驱动, 使得其结构设计变得愈加复杂.

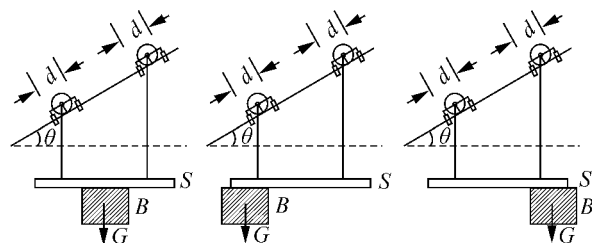
这里提出一种被动适应夹爪的结构方案. 将夹爪位于行走轮前端和后端的 2 个部分设计成一体化对称结构. 在前后夹爪对应于架空线上方的位置分别设置一个横梁. 机器人位姿发生变化时, 横梁与架空线接触, 带动夹爪转动, 实现与架空线角度的自动

调节. 此外, 在夹爪与行走轮支座之间再设置一个弹性复位机构, 使夹爪的自由姿态保持在对称中心位置. 这里, 夹爪姿态的调节是通过横梁与线路的内部相互作用被动完成. 该方案既可满足手部结构适应机器人位姿变化的设计要求, 同时取消了夹爪的驱动电机及其相关传动机构, 简化了系统结构设计.

3 机器人双臂悬挂状态时的行走越障运动特点

图 5 所示为一种双臂悬挂形式的机器人示意图. 在机器人系统中设计了一个用于调整质心的重块, 通过改变重块的位置即可改变机器人的质心, 使重心位于后臂支撑平衡位置 (即图 5(b) 对应的位置) 或前臂支撑平衡位置 (图 5(c) 对应的位置). 对机器人进行重心调整操作后, 再操作机器人的非支撑手臂, 此时不会改变机器人的质心, 可方便地实现机器人跨越障碍物的动作. 图 1 所示机器人即是依照该思路进行的设计.

机器人正常行走时, 为保证机器人行走过程中其重心始终位于双轮支撑范围内 (参见图 5(a) 所示状态), 需通过相应的传感器实时检测线路的倾斜角度, 并进行必要的调整.



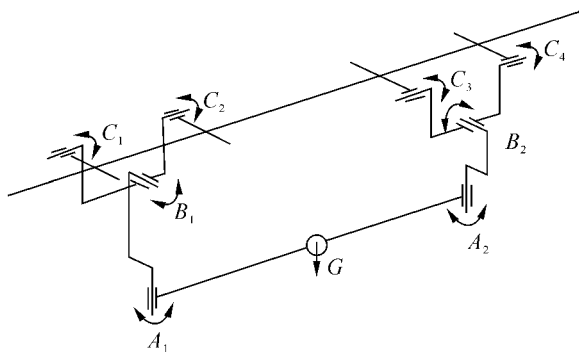
(a) 质心居中 (b) 质心位于后臂 (c) 质心位于前臂

图 5 双臂机器人质心状态简图

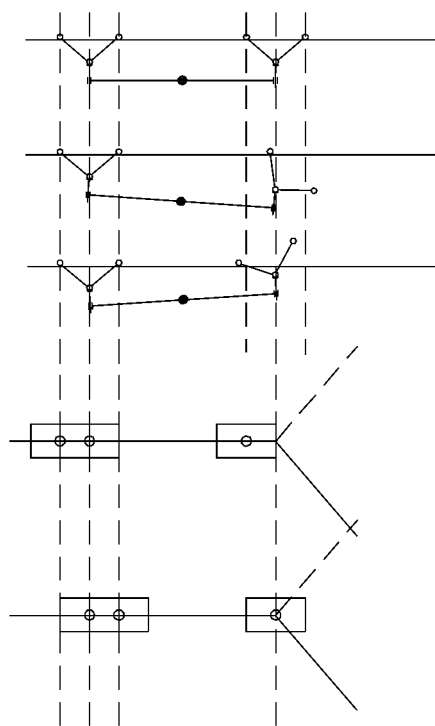
Fig. 5 Centroid state of two-arm robot

依照该思路进行质心调整时存在如下不足, 即调整质心的同时还要求调整 2 个手臂的长度, 尽可能保证重块的运动方向为水平方向, 因此调整过程也较为复杂.

为弥补上述不足, 简化机器人质心的调整过程, 提出一种基于双臂 4 轮结构的机器人, 其机构原理如图 6(a) 所示. 图中, 机器人重量为 G , 质心位于其对称中心. 关节 A_1 和 A_2 使前后臂分别绕铅锤轴旋转, 实现水平转向运动. 关节 B_1 和 B_2 使前后臂分别绕水平轴旋转, 实现俯仰运动. 手部机构 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 提供机器人行走轮的旋转运动以及行走轮的脱线运动. 图 6(b) 为调整机器人手臂俯仰关节 B_2 时的运动状态简图.



(a) 机构简图



(b) 俯仰运动示意

图6 双臂4轮机器人结构原理

Fig. 6 Structure and principle of the robot with two arms and four wheels

在机器人正常行走运动过程中,4个行走轮共同支撑机器人的重量,并可以采用4轮驱动方式运动.当机器人跨越障碍物时,4个行走轮分别脱线,依次分别跨越障碍.这种双臂4轮机器人结构具有水平转向和俯仰运动能力,既可适应线路爬坡角度变化,也可在一定范围内适应线路水平转角变化,可提高机器人对不同线路的适应能力.该机器人可满足在耐张段路径上的行走运动要求.

4 双臂4轮行走越障原理及其运动控制方法

通常情况下,典型的机器人关节控制多采用位置闭环控制算法.以机器人基坐标系为参考坐标系

实现对机器人各个关节的位置控制.算法计算要求已知关节的实际位姿信息.但对于架空输电线路而言,线路及其金具也可能根据实际安装情况而发生变动,因此难以获得机器人相对于线路的准确位姿.

针对图6所示机器人特点提出一种基于主被动协调机制的运动控制方法.即利用主被动关节的运动特性,将参与运动的关节分为主动驱动关节和被动运动关节2部分.控制过程中仅对选定的主动驱动关节施加闭环位置控制,其他关节处于开环状态.以图6(b)所示的俯仰运动为例,为抬起关节 C_4 对应的行走轮,控制关节 B_1 处于被动运动状态、 B_2 处于主动运动状态、 C_3 对应的行走轮处于被动运动状态.驱动关节 B_2 转动,关节 B_1 和行走轮 C_3 协调运动,实现行走轮 C_4 的抬起运动.

基于主被动结合的控制方法可降低多关节位置控制算法的实时同步控制要求以及对机器人位姿的实时测量要求,可简化算法的程序设计难度.该控制方法在图7所示的机器人系统中得到了实际应用验证,在实验室搭建的模拟实验线路上以及在实际带电运行线路的实验情况表明:该文所述的主被动混合控制方法可满足该类机器人的操作和控制要求,具有较好的实用性.

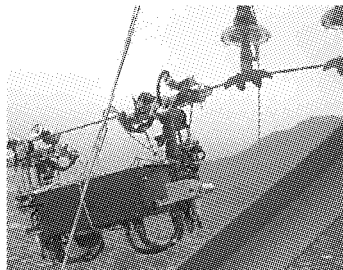


图7 双臂四轮结构巡检机器人样机

Fig. 7 Inspection robot with two arms and four wheels

5 结束语

本文围绕电力架空线路移动机器人的运行环境、质心调整以及运动控制等方面的基本问题进行了研究,总结归纳了架空线路移动机器人的行走越障运动环境特点,对典型行走越障机构及其控制方法进行了介绍.重点分析了单臂、双臂及双臂4轮等结构形式和运行状态情况下机器人质心调整控制的特点并且提出了一种新型双臂4轮机器人结构形式以及基于主被动结合的机器人位姿调整控制方法.

架空移动机器人在电力输电线路巡检及维护领域具有广泛的应用需求,具有良好的发展前景.但电力输电线路的野外恶劣复杂环境对机器人各方面要求均较高,机器人研究开发难度较大.就现阶段技术

水平而言,机器人本身作为基础移动平台,其机构设计及自主运动控制依然是该类机器人的重点研究内容.本文围绕机器人质心调节问题对机器人机构及其控制两方面进行探讨,取得了一些进展.但从提高机器人实用性能方面衡量,未来需要研究解决的技术难点还有很多,相关研究工作也有待进一步深入.

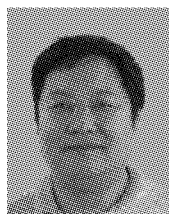
参考文献:

- [1] AOSHIMA S, TSUJIMURA T, YABUTA T. A wire mobile robot with multi-unit structure[C]//IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems. Tsukuba, Japan, 1989: 414-421.
- [2] SAWADA J, KUSUMOTO K, MAIKAWA Y, MUNAKATA T, ISHIKAWA Y. A mobile robot for inspection of power transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6: 309-315.
- [3] TANG Li, FANG Lijin, WANG Hongguang. Development of an inspection robot control system for 500kV extra-high voltage power transmission lines [C]//The 43rd Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers. Sapporo, Japan, 2004: 1819-1824.
- [4] 李恩,梁自泽,谭民. 基于规则库的巡线机器人自主越障动作规划[J]. 机器人, 2005, 27(5): 400-405.
LI En, LIANG Zize, TAN Min. Rule based motion planning method for inspection robot to cross obstacles autonomous [J]. Robot, 2005, 27(5): 400-405.
- [5] 吴功平,肖晓晖,郭应龙,胡基才. 架空高压输电线自动爬行机器人的研制[J]. 中国机械工程, 2006, 17(3): 237-240.
WU Gongping, XIAO Xiaohui, GUO Yinglong, HU Jicai. Development of a crawling robot for overhead high-voltage transmission line [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(3): 237-240.
- [6] 朱兴龙,王洪光,房立金,赵明扬,周骥平. 输电线巡检机器人行走动力特性与位姿分析[J]. 机械工程学报, 2006, 42(12): 143-150.
ZHU Xinglong, WANG Hongguang, FANG Lijin, ZHAO Mingyang, ZHOU Jiping. Experiments and mechanism of obstacle negotiation of an inspection robot for transmission lines[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(12): 143-150.
- [7] DEBENEST P, GUARNIERI M, TAKITA K, FUKUSHIMA E F, HIROSE S, TAMURA K, KIMURA A, KUBOKAWA H, IWAMA N, SHIGA F. Expliner-robot for inspection of transmission lines[C]//2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena, USA, 2008: 235-340.
- [8] POULIOT N, MONTAMBAULT S. Geometric design of the linescout, a teleoperated robot for power line inspection and maintenance[C]//2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena, USA, 2008: 132-137.

作者简介:



房立金,男,1965年生,教授,博士生导师.主要研究方向为仿生机械及其控制系统,发表学术论文50余篇.



王洪光,男,1965年生,研究员,博士生导师,主要研究方向为机器人机构学,发表论文多篇.