

doi: 10.7690/bgzd.2023.08.018

六轮六驱火灾巡检机器人

叶俊杰¹, 郝亮超¹, 车红娟², 赵鹏², 罗定吉³, 高学山^{1,3}

(1. 广西科技大学机械与汽车工程学院, 广西 柳州 545006;

2. 广西科技大学电气电子与计算机科学学院, 广西 柳州 545006;

3. 北京理工大学机电学院, 北京 100081)

摘要: 为满足城市环境预防火灾的需要, 设计一款适用于火情监测且运动灵活的巡检机器人。该机器人由移动平台与云台组成, 悬挂系统使用摇臂转向架结构, 采用 6 轮 6 驱的驱动方式运动; 底层控制系统采用嵌入式设计, 集成超声波传感器、温度传感器、烟雾传感器、灰度传感器、摄像头和无线通信模块, 通过巡线的方式实现机器人的自主移动; 设计一款遥控器手动控制机器人运动; 对机器人主要部件进行静力学分析, 利用 Adams 软件进行仿真实验, 搭建实验样机进行巡线实验。结果表明, 该火灾巡检机器人具备可行性。

关键词: 巡检机器人; 运动学分析; 移动性能

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

Six-wheel Six-drive Fire Inspection Robot

Ye Junjie¹, Hao Liangchao¹, Che Hongjuan², Zhao Peng², Luo Dingji³, Gao Xueshan^{1,3}

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China;

2. School of Electrical, Electronics and Computer Science, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China;

3. School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to meet the needs of fire prevention in urban environment, a flexible inspection robot suitable for fire monitoring is designed. The robot is composed of a mobile platform and a cradle head, the suspension system uses a rocker bogie structure, and moves in a six-wheel and six-drive mode; the bottom control system adopts an embedded design, integrates an ultrasonic sensor, a temperature sensor, a smoke sensor, a gray sensor, the camera and a wireless communication module, and realizes the autonomous movement of the robot in a line inspection mode; A remote controller is designed to manually control the movement of the robot; the statics analysis of the main parts of the robot is carried out, the simulation experiment is carried out by using Adams software, and the experimental prototype is built to carry out the line inspection experiment. The results show that the fire inspection robot is feasible.

Keywords: inspection robot; kinematics analysis; mobile performance

0 引言

巡检机器人是具有移动能力并能完成巡检任务的智能系统, 其相关研究从开始就是机器人学和智能控制领域的探索方向之一。随着移动机器人技术的不断发展, 为减少人工成本, 降低劳动强度, 巡检机器人在工业^[1]、农业^[2]、军事^[3]、抢险救灾、星际探索、水下探测和安全巡检等行业都有广泛应用^[4]。随着国内人口老龄化愈加严重, 劳动力愈发不足, 市场与社会对巡检机器人的需求也不断扩大; 因此, 巡检机器人作为移动机器人的一种重要类型, 具有很大的研究价值。

为提高巡检机器人的综合性能, 国内外对巡检机器人展开了系列研究。山东鲁能智能技术有限公司研发了一款用于变电站仪器仪表巡检的巡检机器

人, 该机器人采用 4 轮结构, 由移动平台搭载云台组成, 可以由 1 台巡检机器人完成 1 个场站的仪器仪表巡检任务; 此类机器人可以搭载各类传感器以适应不同的巡检任务需要, 从而实现全面替代人工巡检^[5-6]。该机器人能够很好地应用于变电站的仪器仪表巡检任务, 具有良好的自主能力。新西兰电网公司与梅西大学合作研发了一款全地形巡检机器人, 该机器人安装有防碰撞的可见光摄像机和超声波传感器, 可实现现场设备图像和视频回传, 但是该机器人仅能采用远程遥控方式工作^[7]。武汉大学于 2016 年研发了一款用于电线基站巡线的巡线机器人, 该机器人使用效率高, 能在 1 个月时间内完成 119 km 的巡线任务, 但是整体成本高, 需要对全部电站加设地线辅线^[8]。

收稿日期: 2023-04-29; 修回日期: 2023-05-28

基金项目: 柳州市科技计划项目(2020PAAA0601)

作者简介: 叶俊杰(1998—), 男, 江西人。

现有的许多巡检机器人能很好地完成预定的巡检任务，但其应用场合相对单一，应用场景在设计之初就固定下来。为提高火灾巡检机器人的综合性能与多应用场景的适应能力，笔者设计一款 6 轮 6 驱火灾巡检机器人，该机器人采用摇臂转向架结构作为巡检机器人的悬挂系统以提高巡检机器人的越障性能，在结构上保证机器人能够出入多种场合；在控制上设计有自动模式与手动模式 2 种控制方式，使其能够更好地应用于火灾巡检任务中。

1 机器人整体设计

1.1 设计目标

巡检机器人的整体性能体现在移动平台的运动性能与机器人的自主能力。良好的移动能力能够保证巡检机器人出入复杂地形，良好的自主能力有利于减轻人的劳动强度。因此，为使巡检机器人具有良好的综合性能，机器人需要有良好的移动能力与自主能力。

1.2 整体结构组成

火灾巡检机器人主要由机械结构与控制系统 2 部分组成。其机械结构主要包括移动平台与云台；控制系统涉及硬件与软件系统。控制系统与机械结构结合，使得火灾巡检机器人具有良好的应用性能。图 1 为 6 轮 6 驱火灾巡检机器人的整体框架。

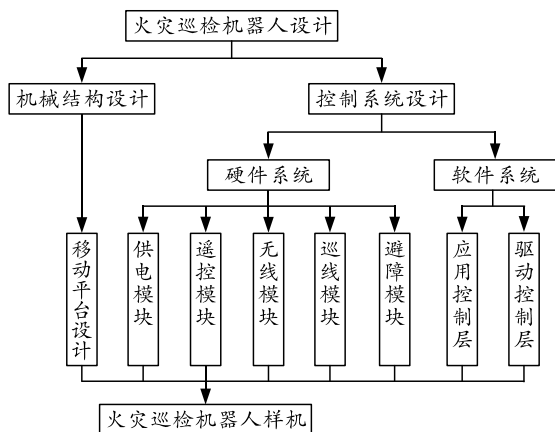


图 1 火灾巡检机器人整体框架

2 机器人机械结构设计

2.1 机器人机械结构整体设计

根据移动机器人运动方式的不同，移动机器人主要分为轮式、履带式、腿式和混合式 4 大类^[9]。相比较而言，轮式机器人运动速度快，控制系统相对简单，运动相对灵活，故巡检机器人采用轮式结构。对轮式结构来说，车轮数量是影响移动平台稳

定的重要因素。轮式机器人按照车轮数目不同可分为单轮、2 轮、3 轮、4 轮和多轮移动机器人。为使火灾巡检机器人移动平台运动更稳定，且具有良好的越障能力，笔者采用 6 轮 6 驱结构，此外还采用摇臂转向架结构作为巡检机器人的悬挂系统；为使巡检机器人运动更加灵活，能够实现差速转向与原地转向，在巡检机器人前后各安装 2 个伺服电机以提供转向所需扭矩。机器人机械结构整体设计如图 2 所示。

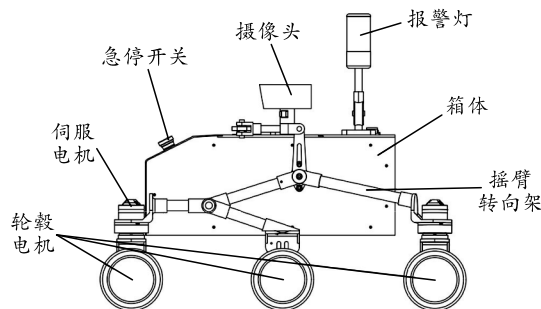


图 2 机器人机械结构

2.2 摇臂转向架结构

摇臂转向架结构最初被美国设计并应用于星际探索。该结构简单，却具有良好的力学性能^[10]。图 3 为本次应用于火灾巡检机器人的摇臂转向架结构。

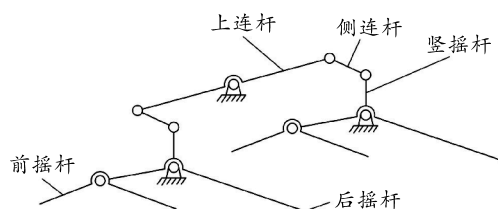


图 3 摇臂转向架结构

摇臂转向架安装在巡检机器人箱体上。为减少摇臂转向架上连杆所受拉力，静止时两侧后摇杆和竖摇杆与箱体构成的 2 个转动副的转动轴心应在箱体质心所在竖直面上。前摇杆后部通过中间轮毂电机支架安装中间轮毂电机，前摇杆前部与后摇杆后部通过伺服电机支架安装伺服电机，伺服电机下安装前后轮毂电机支架以安装前后轮毂电机。

2.3 摇臂转向架结构静力学分析

为保证巡检机器人在结构上满足力学要求，对主要受力部件(摇臂转向架结构)进行静力学分析。图 4 为机器人单侧 2 摇杆运动简图。在绘制运动简图时，取小车左侧为平面为运动简图投影面。 A 处连接机器人箱体， C 处、 D 处与 E 处通过电机支架与舵机或轮毂电机连接。

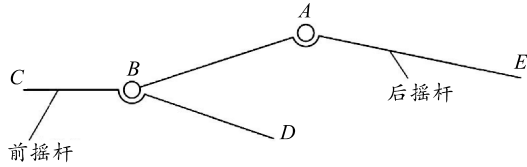


图 4 摇杆运动

通过运动简图对前摇杆与后摇杆进行了受力分析。由于杆件自重对杆件强度与刚度影响较小，故在受力分析时忽略杆件自重影响。图 5 为后摇杆受力分析，图 6 为前摇杆受力分析。

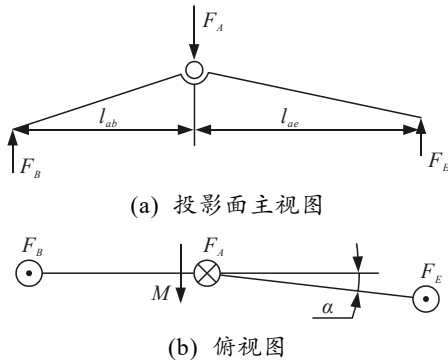


图 5 后摇杆受力分析

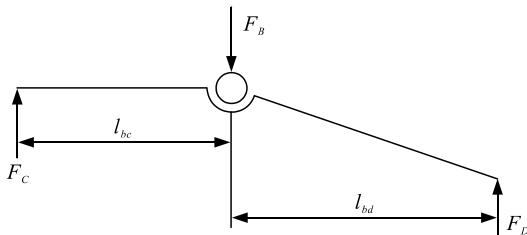


图 6 前摇杆受力分析

图中： F_A 为 A 点所受外力， F_B 、 F_E 分别为 B、E 点所受外力，由于后摇杆 AE 段与投影面存在一定角度 α ，故箱体需提供 1 个用于平衡的转矩 M ； l_{ab} 与 l_{ae} 分别为受力点 A、B 与 A、E 间在投影面水平方向上的距离； F_B 、 F_C 、 F_D 分别为 B、C、D 点所受外力， l_{bc} 与 l_{bd} 分别为受力点 B、C 与 B、D 间在投影面水平方向上的距离。由图 5 和 6，在不考虑杆自重的情况下可得：

$$F_A = -F_B - F_E; \tag{1}$$

$$F_B \cdot l_{ab} = F_E \cdot l_{ae}; \tag{2}$$

$$M = F_E \cdot l_{ae} \cdot \tan \alpha; \tag{3}$$

$$F_B = -F_C - F_D; \tag{4}$$

$$F_C \cdot l_{bc} = F_D \cdot l_{bd}。 \tag{5}$$

由于摇臂转向架结构为左右对称结构，且箱体质量为一定值 m ，故：

$$F_A = mg/2。 \tag{6}$$

由于 $l_{ab} + l_{ae} = l_{be}$ ， $l_{bc} + l_{bd} = l_{cd}$ ，故整理可得：

$$\begin{bmatrix} F_A \\ F_B \\ F_C \\ F_D \\ F_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mg/2 \\ -mg/2 + mgl_{ab}/2l_{be} \\ \frac{1}{2}mg - \frac{mgl_{ab}}{2l_{be}} - \frac{mgl_{bc}}{2(l_{bc} + l_{bd})} + \frac{mgl_{ab}l_{bc}}{2l_{be}l_{cd}} \\ \frac{mgl_{bc}}{2(l_{bc} + l_{bd})} - \frac{mgl_{ab}l_{bc}}{2l_{be}l_{cd}} \\ -mgl_{ab}/2(l_{ab} + l_{ae}) \end{bmatrix}; \tag{7}$$

$$M = \frac{-mgl_{be}}{2l_{be}} \tan \alpha。 \tag{8}$$

3 机器人控制系统设计

为使火灾巡检机器人能更好地完成巡检任务，设计了自主控制与手动控制 2 种控制模式。在巡检机器人自主完成巡检任务时，由 STM32F405RGT6 芯片为主构成的控制核心通过处理判断灰度传感器传来的信息来控制移动平台的运动方向。在手动模式下，由操作者通过分析判断机器人携带的摄像头传回的图像信息或直接观测机器人所遇情况，通过上位机或遥控器对巡检机器人进行控制。当机器人通过烟雾传感器或温度传感器发现火情时，机器人将通过报警灯和蜂鸣器传递火灾信息，并由上位机显示。火灾巡检机器人控制系统整体结构如图 7 所示。

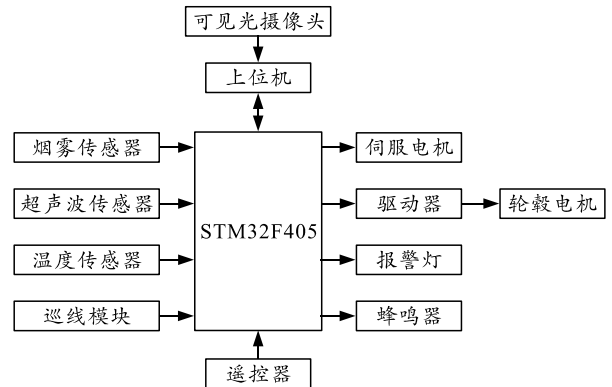


图 7 机器人控制系统整体结构

3.1 火灾巡检机器人系统硬件设计

对机器人控制系统而言，硬件设备的选择是决定机器人能否良好实现预定功能的重要因素。为使机器人能够顺利完成巡检任务，设计的硬件既要满足移动平台自主移动的需要，又要满足巡检机器人工作任务的需要；因此，机器人的硬件设计皆是为了满足任务需要。

对控制系统来说，控制核心的性能尤为重要，为保证巡检机器人的工作性能，采用 STM32F405 作为底层控制的 MCU。该芯片的频率有 168 MHz

能够满足火灾巡检机器人在执行任务时信息实时信息传输的需要；此外，该芯片还可兼容丰富的外设，被广泛应用于众多自主移动机器人平台中。

为满足巡检机器人的自主移动需要，机器人移动平台搭载了超声波雷达以避免与其他物体发生碰撞，避障雷达使用电应普的收发一体式超声波传感器 DYP-A05-V1.1。该传感器可以设定门阈值，以控制障碍物与机器人之间的安全距离。还搭载了灰度传感器以识别巡检路径，保证巡检机器人按照预定轨迹运动。巡线模块使用星慈光的灰度传感器 HL-XJ5，该传感器有 5 路探头，各路间距为 15 mm，能很好地适应地标线的宽度。

为满足火灾巡检机器人的任务需要，机器人移动平台搭载了温度传感器与烟雾传感器以监测火情。温度传感器采用红外线温度传感器 T10S-B-HW，该传感器采用 RS485 协议传递信息，利用移动平台上的无线通信模块，可将温度信息传递到上位机。烟雾传感器采用精研电子的 MQ-2 烟雾传感器，该传感器灵敏度可调能够满足机器人巡检需要。

为更好地实现机器人的手动控制，设计一款遥控器以远程控制机器人移动平台的运动。该遥控器采用嵌入式设计，以 RP2040 树莓派作为控制核心，集成 OLED、摇杆、旋钮开关与 WiFi 模块等硬件构成遥控器硬件系统。图 8 为遥控器硬件系统结构。

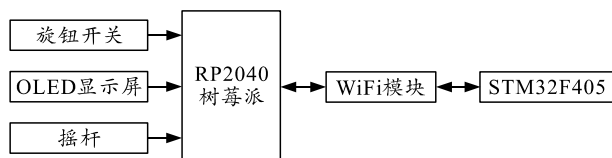


图 8 遥控器硬件系统

3.2 火灾巡检机器人软件设计

机械结构的设计为控制系统的开发，提供了良好的物理实验平台。为更好地实现巡检机器人预定功能，软件设计可分为超声波传感器中断初始化程序、驱动控制层和电机驱动程序的应用驱动程序与烟雾传感器驱动程序和应用控制层。软件整体利用软件 keil5 为开发环境进行编译，C 语言编程。图 9 为软件具体流程。

3.3 轮毂电机 PID 控制

由于巡检机器人在运动过程中车轮之间转速存在误差，可能导致巡检机器人偏移预定的路线，为降低巡检机器人的实际运动路线与预定路线的误差，采用 PID 控制算法以提高轮毂电机的运动精度。

PID 控制器由比例单元、积分单元和微分单元组成。由于其具有结构简单、稳定性高的特点，被广泛用于工程实际应用中。图 10 为 PID 控制原理框图，采用数学公式表达 PID 控制规律为：

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e dt + K_d (de/dt) \quad (9)$$

式中： $U(t)$ 为 PID 控制的输出和被控对象的输入^[11]； K_p 为控制器的比例系数，其主要作用在于对偏差瞬间反应，使实际速度快速靠近目标速度； K_i 为积分系数，用于消除稳态误差； K_d 为微分系数，其作用在于降低超调量，使实际速度维持在目标速度的一定范围内。

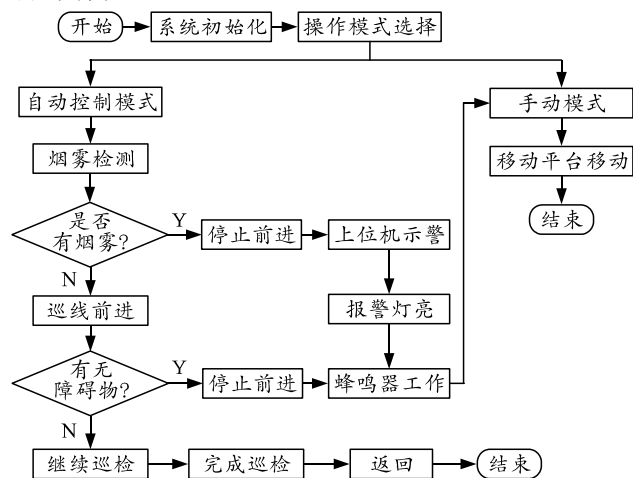


图 9 软件系统流程

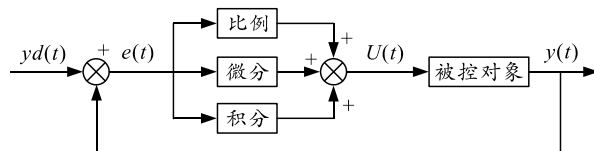


图 10 PID 控制原理

PID 参数的整定方式主要有理论计算与工程经验整定 2 种，笔者使用的 PID 参数是采用驱动器自带的上位机软件进行整定的。

4 机器人仿真实验与样机实验

为检验设计的机器人运动性能与工作能力，通过 Adams 软件建立了机器人运动模型，并据此对机器人模型进行了复杂路面实验；此外，还根据设计方案，搭建了机器人实验样机，并据此进行了机器人巡线实验。

4.1 火灾巡检机器人仿真实验

根据机器人机械结构，利用 Adams 软件搭建了巡检机器人仿真实验模型。为便于仿真模型的建立，在搭建仿真模型时，将固定在 1 块且互相没有自由度的零件视为同一构件。为验证机器人的稳定性与

运动的灵活性，机器人仿真路面设计为 1 段凸起路段，该路段突起部分高为 40 mm、宽为 200 mm^[12]。为更好地检验机器人的运动性能，将路面长度确定为 5 m，其中前后 1 m 路段不设置凸起，中间路段左右均匀交叉设置凸起，每米设置 3 个凸起。图 11 为搭建好的仿真模型。



图 11 仿真实验模型

在仿真实验中将箱体的质心近似为巡检机器人的质心，得到巡检机器人过凸形路面时质心在 Y 轴上的变化曲线如图 12 所示。

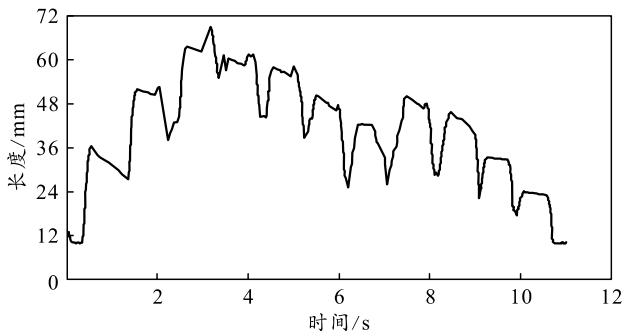
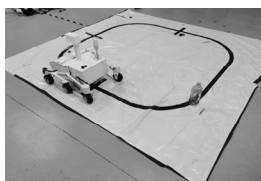


图 12 质心 Y 轴变化曲线

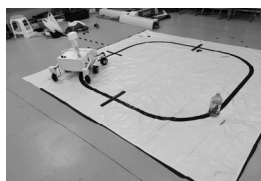
由上图可知：火灾巡检机器人在通过凸形路面时质心的波动范围在 68 mm 内，整体运行较为稳定，体现了火灾巡检机器人良好的越障能力与稳定性。

4.2 火灾巡检机器人样机巡检实验

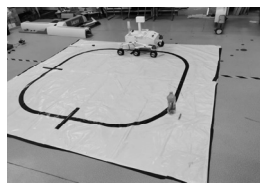
为检验巡检机器人巡检过程中是否拥有良好的自主运动能力，搭建巡检机器人实验样机，并据此进行巡检实验。图 13 为巡检实验图。采用黑色地标构成巡检机器人的运动回路，图中十字交叉位置代表重点巡检区域，为了实验的安全，采用热水代替火源，机器人探测到热源能使蜂鸣器工作，报警灯亮。实验结果表明：机器人结构合理，能够遵循预定轨迹进行运动，在遇到热源时能够起到预警作用。



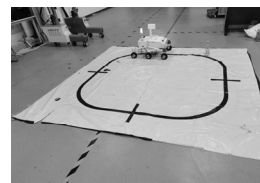
(a) 起点



(b) 第一弯道



(c) 定点停留



(d) 报警

图 13 巡检实验

5 结束语

笔者设计一款 6 轮 6 驱的火灾巡检机器人。利用 Adams 软件对机器人进行仿真实验，验证了机器人的越障能力，并搭建巡检机器人样机进行巡线实验。实验结果证明：该巡检机器人能够按照预定轨迹运动，满足火灾巡检的需要。

参考文献：

- [1] 江新奇, 刘敬玉, 李忠飞, 等. 煤矿巡检机器人智能传感与控制系统设计研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(1): 171-175.
- [2] 张振乾, 李世超, 李晨阳, 等. 基于双目视觉的香蕉园巡检机器人导航路径提取方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 7.
- [3] 韩宇星, 丁刚毅, 柴作鸿. 军事协同巡检路线优化策略[J]. 兵工学报, 2019, 40(8): 1673-1679.
- [4] KIM D, HONG H, KIM H S, et al. Optimal design and kinetic analysis of a stair-climbing mobile robot with rocker-bogie mechanism[J]. Mechanism & Machine Theory, 2012, 50: 90-108.
- [5] 郑亮. 变电站智能机器人的设计与实现[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [6] 黄岩. 巡检机器人自动读取工业现场指针仪表方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [7] 蔡焕青, 邵瑰玮, 文志科, 等. 变电站智能巡检机器人应用研究现状[C]//输电线路运行维护新技术交流会暨中国电机工程学会输电线路专业委员会运行学组 2015 年学术年会. 中国电机工程学会, 2015.
- [8] 王钊宇. 泵房巡检移动机器人平台的研制[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- [9] CONDURARU A, DOROFTEI I, CONDURARU I. An Overview on the Design of Mobile Robots with Hybrid Locomotion[J]. Advanced Materials Research, 2013, 837: 555-560.
- [10] 常勇, 王洪光, 马书根, 等. 月球车六轮摇臂转向架的优化设计[J]. 机械设计, 2010, 27(6): 64-70.
- [11] 任志阳. 移动机器人控制器的研究及其实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [12] 柴书杰, 王许涛, 孙东. 电动乘用车试车跑道设计[J]. 时代汽车, 2020(15): 3.