

基于 Workbench 的三轴搬运机器人结构与模态分析

阚常凯, 曹冲振, 张传美, 王凤芹, 许彤然
(山东科技大学, 青岛 266590)

摘要: **目的** 为将货架上的货物直接搬运至目的地, 真正实现货物到人的目的, 设计一款三轴搬运机器人。**方法** 利用 SolidWorks 与 Workbench 软件建立三维模型与有限元模型, 对底盘机构与升降机构进行详细设计, 并对底盘结构进行模态分析, 分析其外部激励来源。**结果** 两侧升降机构安装板是主要的动态特性影响因素, 所设计的底盘结构不会因为外部激励而发生共振。**结论** 该搬运机器人的结构新颖、设计合理, 能够广泛应用于多种场合, 如货物拣选、工件存放与搬运等, 具有较高的应用价值。

关键词: 搬运机器人; 结构设计; 外部激励; 模态分析

中图分类号: TH113; TP242 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2017)17-0158-05

Structural Design and Modal Analysis of Three-axis Transport Robot Based on Workbench

KAN Chang-kai, CAO Chong-zhen, ZHANG Chuan-mei, WANG Feng-qin, XU Tong-ran
(Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

ABSTRACT: The work aims to design a three-axis transport robot to transport the goods on the shelves to the destination directly, thus realizing the purpose of transporting the goods to the people. The three-dimensional model and finite element model were established with SolidWorks and Workbench software, and the chassis mechanism and the lifting mechanism were designed in detail. The modal analysis of chassis structure was conducted, and the external excitation source was analyzed. The plates on both sides used to install the lifting mechanism were the main factor affecting the dynamic characteristics. The chassis structure designed would not resonate due to the external excitation. The proposed transport robot is featured by novel structure and reasonable design. It can be widely applied in many cases, such as picking goods, storing and transporting artifacts, and it has higher application value.

KEY WORDS: transport robot; structural design; external excitation; modal analysis

随着科技的快速发展和自动化水平的日益提高, 机器人在生产制造中的应用越来越普遍^[1]。其中, 在烟草、汽车、物流以及仓储等行业对搬运机器人的应用日益广泛, 尤其是在自动化仓储以及智能制造车间的应用也备受关注^[2]。整个制造业和物流行业一直以来都在探索如何降低生产运输成本, 搬运机器人的出现使得其在搬运、拣选过程中凸显出愈发重要的地位, 加之近几年新技术、新场景的发展, 加速了人们对搬运机器人更智能化的探索。现有的搬运机器人主要用来搬运平面上的货架、托盘^[3], 但对将货架上的

货物直接搬运至目的地、真正实现货物到人的机器人尚缺乏相关的设计。针对此问题, 文中设计一款适用于直接搬置于货架上货物的三轴搬运机器人。另外, 机器人结构的动态特性对机器人的精度和可靠性会产生极大的影响^[3], 搬运机器人在运动过程中会有前进后退等动作, 且在叉取货物过程中会有伸缩、升降等动作, 在工作过程中会出现晃动振动的现象, 所以有必要深入了解其动态特性, 这能对其结构的合理设计与改进提供理论支持。模态分析针对机械结构的固有振动特性, 每一个模态具有特定的固有频率、阻

收稿日期: 2017-05-01

基金项目: 山东省高等学校科技计划(J16LB05)

作者简介: 阚常凯(1991—), 男, 山东科技大学硕士生, 主攻机器人与物流自动化。

通讯作者: 曹冲振(1975—), 男, 博士, 山东科技大学副教授, 主要研究方向为工业自动化与机器人技术。

尼比和模态模型^[4]。通过模态分析方法可以了解三轴搬运机器人在某一频率范围内各阶主要模态的特性，以此分析该机器人的结构在振源作用下产生的实际振动响应^[5]。

1 搬运机器人的方案设计

1.1 总体方案

该搬运机器人的整体结构见图 1，由具有导航功能的移动底盘、2 个升降机构、U 型板、伸缩货叉、控制系统等组成。其中底盘结构、升降机构是主要受力支撑部件，也是整个机器人的框架结构。移动底盘利用了成熟的自动引导车技术与结构，由车架、车轮、驱动装置、换向装置、通信装置、安全保护装置等组成。2 个升降机构通过螺栓对称固定在移动底盘的两侧，升降机构可以将伸缩货叉升降至货架的每层高度。伸缩货叉安装在 2 个升降机构之间的 U 型板上，分别叉取位于该搬运机器人两侧货架层数上的目标货物。蓄电池为其提供能量，蓄电池及控制系统设置在移动底盘结构中部。该搬运机器人为具有三自由度的机器人。

运动过程：装备有自动导引装置的搬运机器人在驱动系统的驱动下按照预先设定的路线移动，换向装置配合驱动装置实现前进、后退方向的转换。当运动至目标货物的货架附近，升降机构、伸缩货叉在控制系统的控制下，升降至所取目标货物的位置，将货物所在的小型托盘连同货物一起叉取，并运送至对应的位置。

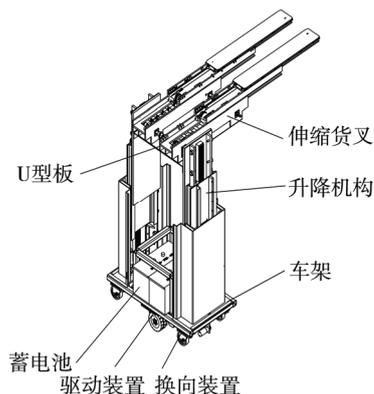


图 1 搬运机器人的总体结构

Fig.1 The overall structure of transport robot

1.2 主要设计参数

根据搬运需求和设计目的进行调查与数据采集。底盘尺寸为 1200 mm×600 mm×3000 mm，质量为 40 kg，行走速度为 1.0 m/s，目标货物尺寸为 600 mm×400 mm×400 mm，加速度为 0.5 m/s²，爬坡角度 $\alpha \leq 3^\circ$ ，载质量为 120 kg。

2 关键结构设计

2.1 底盘结构

底盘的主要作用是承载整个机器人自身的重量和搬运货物的重量，其应在强度和刚度两方面上满足机器人运行和加速时的要求。底盘至少应包括驱动装置、换向装置、悬挂装置（见图 2），并将它们布置在相对合理的位置。由于整个搬运机器人结构复杂，且考虑到质量较大部件（如蓄电池）的安放问题，对整个结构稳定性要求较高，因此选用六轮结构。六轮结构需要设计换向装置，使得前进时或者后退时，前轮与后轮能进行定向轮与万向轮的转换。由于重心越低越有利于抗倾翻^[6]，整个机器人升降高度较高，还应降低底盘重心。底盘结构采用 40 mm×40 mm 铝合金型材，通过角架连接，有利于安装调整。驱动电机选用直流伺服电机，采用双轮差速驱动^[7]。

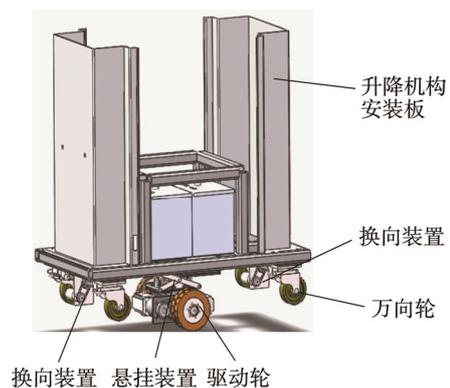


图 2 底盘结构

Fig.2 Chassis structure

2.2 驱动电机功率计算

搬运机器人在运行时需要克服来自地面的滚动摩擦阻力 F_f 、空气阻力 F_a ，以及在有坡度的路面上行驶的坡路阻力 F_i 、加速行驶时的加速阻力 F_j ^[8]，因此搬运机器人行驶时的总阻力为：

$$\sum F = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (1)$$

$$F_f = \mu mg$$

搬运机器人在工厂、仓储室内运行，地面为耐用型环氧砂浆地坪^[9]，参考有关数据知 μ 为 0.018~0.020，这里取 $\mu=0.019$ ，设计总质量 $m=160$ kg，代入式（1）得： $F_f=29.8$ N，加速阻力 $F=ma=80$ N；坡路阻力 $F=mgsin \alpha=82.1$ N；路况较好的室内地面坡度 $\alpha \leq 3^\circ$ ；室内最高速度为 1.0 m/s，可以不考虑空气阻力，因此总阻力： $\sum F = F_f + F_w + F_i + F_j = 191.9$ N。采用 2 个电机驱动，车轮半径 $r=0.075$ m，所以总车驱动力矩 $\sum M = F \cdot r = 14.4$ N·m，单个电机功率

$$P = \frac{T \cdot n}{9549} \cdot \frac{1}{2} = \frac{T \cdot v}{19098\pi d} = 0.096 \text{ kW}。$$

2.3 升降机构

升降机构的主要功能是将伸缩货叉升降至不同的高度，以保证能够叉取所需要的货物。升降机构需要有较高的升降速度，以最短的时间将伸缩货叉送至目的地，减少取货时间。为此设计一款多级升降机构，一个电机的转动能同时升降 1 级、2 级、3 级升降结构，使得三级结构同时升高或降落。升降结构传动方式采用齿轮齿条与同步带相结合的方式，见图 3。不同级的升降机构采用齿轮齿条传动，电机通过同步带轮带动齿轮转动，以达到升降目的。升降机构分别通过螺栓固定在底盘上部的两侧钢板上，两侧升降机构的三级结构之间连接有 U 型板，用于固定伸缩货叉。

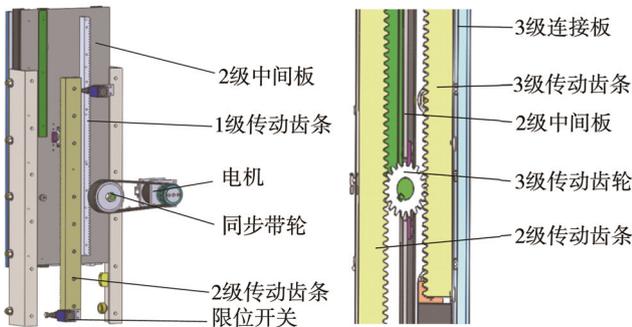


图 3 升降机构的传动结构
Fig.3 Driving structure of lifting mechanism

3 有限元模型的建立

3.1 模型简化

借助 SolidWorks 软件，建立该搬运机器人底盘结构的三维模型。为了减少网格划分时计算机的处理量，对整个模型进行了简化。动态特性分析时，由于固有频率和主振型主要与结构的质量和刚度分布有关^[10]，因此模型简化的思想是保证整体质量分布均匀，网格划分合理，且单元数目不宜过多。具体处理方法：对影响不大的螺栓孔、非承载的小台以及细小的转折面等进行简化；将车轮简化成与地面接触；忽略结构中的倒角、倒圆。

3.2 定义单元属性

在 SolidWorks 中完成该搬运机器人底盘结构的三维模型建立后，利用 SolidWorks 和 Workbench 的专用接口，将底盘结构 .x_t 模型直接导入 Workbench 中^[11]，定义单元属性，对机器人的材料性能参数进行设置。车体结构框架选用铝合金 ZL110，材料属性： $E=689 \text{ GPa}$ ，密度 $\rho=2700 \text{ kg/m}^3$ ，泊松比 $\mu=0.35$ ；升降机构安装板选用 45 号钢，材料属性： $E=206 \text{ GPa}$ ，密度 $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$ ，泊松比 $\mu=0.32$ 。

3.3 网格划分

划分的方法有扫掠网格划分、多域扫掠型网格划分、四面体网格划分、六面体主导的网格划分^[12]。不同的划分方法直接影响到计算量和分析结果的准确性^[13]。对于空间物体尽量使用六面体主导的方式，它会在外层形成六面体网格，而在心部填充四面体网格。该文采用六面体划分的方法，划分后整个结构共得到 67 295 个节点、25 293 个单元。网格划分完成后的底盘结构网格模型见图 4。

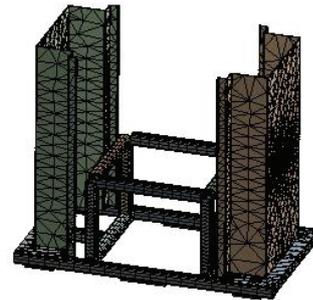


图 4 底盘结构的网格模型
Fig.4 Grid model of chassis structure

3.4 添加位移边界条件

在模态分析中，除了边界条件外，其它载荷对模态分析的结果没有影响^[14]，不需要添加载荷和力矩，只需添加其与地面的约束。该搬运机器人的工作面为地面，经简化后，添加底盘的 6 个悬挂点与地面固定约束。

4 有限元模态求解

当底盘 6 个悬挂点均被约束时^[15]，经过模态分析过程得到底盘结构的前 10 阶固有频率与振型，见表 1。

表 1 搬运机器人前 10 阶固有频率与振型
Tab.1 The first ten-order natural frequencies and vibration mode of transport robot

模态阶次	固有频率/Hz	幅值/mm	振型特征
1	58.508	23.91	两侧安装板绕y轴向外弯曲
2	58.511	23.969	两侧安装板绕y轴异向弯曲
3	60.73	24.008	两侧安装板沿z轴方向扭转
4	60.772	23.944	两侧安装板沿z轴方向扭转
5	109.25	11.912	两侧安装板x轴向平移振动、弯曲
6	109.35	11.921	两侧安装板x轴向平移振动、弯曲
7	174.13	14.428	两侧安装板异向z轴方向扭转、弯曲
8	175.24	14.762	两侧安装板同向z轴方向扭转、弯曲
9	179.84	12.704	底盘上部x轴向平移
10	198.11	12.598	底盘上部z轴向平移、扭转

从图 5 可以看出,前 8 阶主要为两侧升降机构安装板振动,其在振动频率为 58~61 Hz 时振动幅度比较大。升降机构安装板的振动直接影响到升降机构的运动与上端伸缩货叉的叉取精度,故需重点考虑两侧升降机构安装板的共振问题。第 7 阶及第 8 阶两侧安装板产生了 z 轴方向明显的扭转、弯曲叠加变形,对车体的稳定性有很大的影响,若在该模态的状态发生共振,将使整个搬运机器人上部分稳定性变差。第 9、10 阶主要是车架上部振动幅度较大,但由于振动位置安装有蓄电池,对整个底盘的影响较小,而且其固有频率较高。综上分析,两侧升降机构安装板是主要的动态特性影响因素,应当通过适当增加壁厚或者提高材料的刚度进行改进。

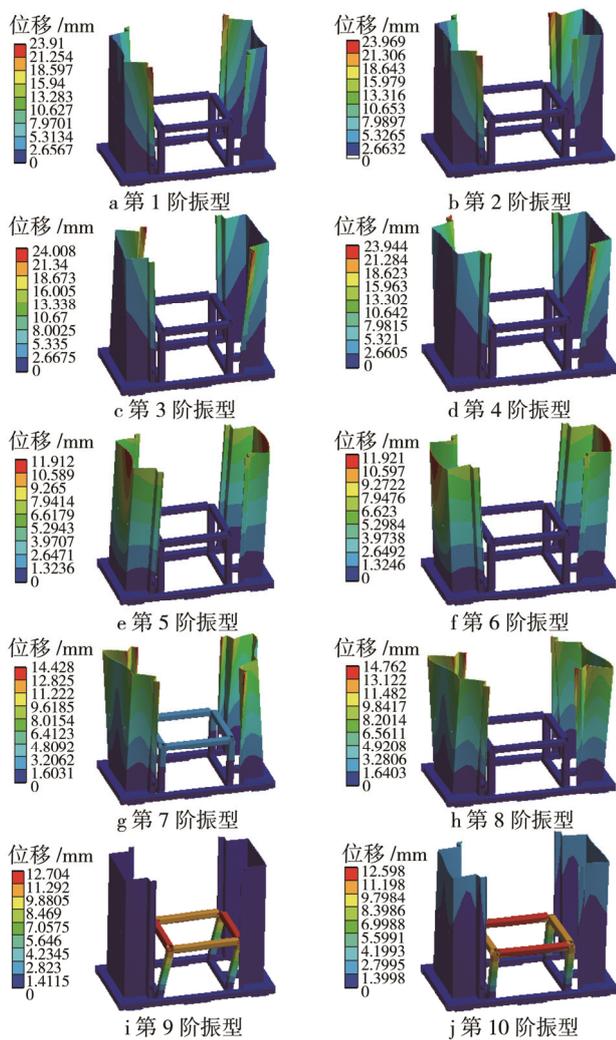


图 5 各阶模态对应的振型

Fig.5 Vibration modes corresponding to each modality

5 主要激励

为了防止共振的发生,底盘结构的固有频率应尽可能地避开外部激励频率。该三轴搬运机器人的外部激励主要有路面激励和电机激励^[16]。

1) 路面激励。路面对三轴搬运机器人的激励频率主要受路面不平度和其行驶速度的影响^[17]。当该三轴搬运机器人以速度 $v(\text{m/s})$ 行驶在路面不平度波长为 $\Delta(\text{m})$ 的路面上时,激励频率 $f_r=v/\Delta$ 。已知搬运机器人的行走速度为 1.0 m/s,经查阅相关资料,得到我国不同路面的不平度波长范围^[18],代入计算得到路面激励频率范围,结果见表 2。可以看出,路面的激励均为低频激励,与底盘的固有频率差距较大,故路面激励不会使底盘结构产生共振。

表 2 不同路面波长及频率范围
Tab.2 Different pavement wave lengths and frequency ranges

路面状况	波长/m	激励频率/Hz
平坦路面	4.2~90.9	0.011~0.24
石块路面	0.8~6.7	0.149~1.25
搓板路	0.5~1.1	0.91~2.0

2) 电机激励。电机的激励频率计算^[19]: $f=n/60$, 式中 n 为电机额定转速, $n=1800 \text{ r/min}$ 。故电机的激励频率 $f=30 \text{ Hz}$ 。驱动电机激励频率与底盘结构的各阶固有频率有一定差值,但是电机转速超过 3000 转以上对底盘结构的激励将有可能使底盘共振。文中拟选用功率为 120 W、转速为 1800 r/min 的电机,故电机激励不会引起搬运机器人底盘的共振。

6 结语

基于 Solidworks 与 Workbench 设计了一款三自由度搬运机器人,该机器人具有平面运动、升降、货叉伸缩的特点,能叉取货架上的目标货物,将目标货物搬运至对应的位置。该机器人能够实现自主快速、高效地搬运货物,适用于物流仓储、生产制造等。根据搬运功能要求,对搬运机器人进行了方案设计并确定其基本工作要求,对搬运机器人的底盘结构、多级升降机构进行了设计,并计算了驱动电机的功率与扭矩,使其能满足功能需求。对底盘结构进行有限元建模,对其进行了模态分析,得到其前 10 阶的固有频率与振型。分析了底盘结构的主要激励来源,计算了外部激励频率,结果表明外部激励不会对底盘结构造成共振。该机器人的结构新颖,设计合理,灵活性强,能够广泛应用于多种场合,如仓储、货物拣选、工件存放与搬运等,具有很高的应用价值。

参考文献:

[1] 王占军,赵玉刚. 码垛机器人结构设计与模态分析[J]. 机械设计与制造, 2014(8): 164—166.
WANG Zhan-jun, ZHAO Yu-gang. Structural Design and Modal Analysis of Palletizing Robot[J]. Mechan-

- calDesign and Manufacture, 2014(8): 164—166.
- [2] 吴伟涛. 物流搬运 AGV 的总体方案及其关键技术研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2013.
WU Wei-tao. The Overall Scheme and Key Technology Research of Logistics Transportation AGV[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2013.
- [3] 田美子, 何芳, 王殿东. 基于有限元法的码垛机器人模态分析[J]. 机床与液压, 2015, 43(9): 80—83.
TIAN Mei-zi, HE Fang, WANG Dian-dong. Modal Analysis of Destacking-Robot Based on Finite Element Method[J]. Machine tool & Hydraulics. 2015, 43(9): 80—83.
- [4] 刘云, 蹇兴东. 基于 Hypermesh 和 ANSYS 的拖拉机驾驶室模态分析[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(5): 1221—1224.
LIU Yun, JIAN Xing-dong. Modal Analysis of Tractor Cab Based on Hypermesh and ANSYS[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(5): 1221—1224.
- [5] 苗登雨. 重载搬运机器人结构设计与动态性能分析优化[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
MIAO Deng-yu. Structure Design and Dynamic Performance Analysis and Optimization of Heavy-load Transfer Robot [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [6] 张伦玠. 轮式自动导航机器人的研制[D]. 广州: 广东工业大学, 2004.
ZHANG Lun-jie. Reaserch and Development of Wheeled Automatism Navigati on Robot[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2004.
- [7] 张轲, 吴毅雄, 吕学勤, 等. 差速驱动式移动焊接机器人动力学建模[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 116—120.
ZHANG Ke, WU Yi-xiong, LYU Xue-qin. Dynamic Modeling for Differentially Steered Welding Mobile Robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11): 116—120.
- [8] 吴伟涛, 刘文波. 磁引导式差速转向 AGV 的电机确定与磁导航方法[J]. 现代制造, 2012(36): 144—145.
WU Wei-tao, LIU Wen-bo. Method for Determining Motor and Magnetic Navigation of Magnetic Steering Differential Steering AGV[J]. Modern Manufacturing, 2012(36): 144—145.
- [9] 张晓华, 朱华, 陈晓龙. 环氧砂浆性能影响的研究[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(5): 23—25.
ZHANG Xiao-hua, ZHU Hua, CHEN Xiao-long. Study on the Influence of the Properties of Epoxy Mortar[J]. New Building Materials, 2016, 43(5): 23—25.
- [10] 程丽, 刘玉旺, 骆海涛, 等. 165 kg 焊接机器人有限元模态分析[J]. 机械设计与制造, 2012(1): 147—149.
CHENG Li, LIU Yu-wang, LUO Hai-tao, et al. Finite Element Modal Analysis of 165 kg Welding Robot[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(1): 147—149.
- [11] 孙亮, 陈希良, 齐明思. 基于 Workbench 的二通阀疲劳分析及结构优化设计[J]. 包装工程, 2016, 37(19): 132—136.
SUN Liang, CHEN Xi-liang, QI Ming-si. Fatigue Analysis and Structure Optimization of Two-way Valve Based on Workbench[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(19): 132—136.
- [12] 丁欣硕, 凌桂龙. ANSYS Workbench 14.5 有限元分析案例详解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
DING Xin-shuo, LIN Gui-long. Case Analysis of ANSYS Workbench 14.5 Finite Element Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- [13] 张成玉. 基于 ANSYS 的起落架减震支柱设计技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
ZHANG Cheng-yu. Technical Research on Detailed Design of the Landing Gear's Shock Strut Medi-Stem Based on ANSYS[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [14] 刘晓军, 施永强, 王伟. 基于 ANSYS Workbench 的复合齿轮泵啮合齿轮有限元分析[J]. 煤矿机械, 2009, 30(5): 52—54.
LIU Xiao-jun, SHI Yong-qiang, WANG Wei. ANSYS Workbench Based on Compound Gear Pump Meshing Gear Finite Element Analysis[J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30(5): 52—54.
- [15] 朱本辉. 基于 ANSYS 的户外 AGV 车辆结构设计及疲劳寿命分析[D]. 西安: 陕西科技大学, 2015.
ZHU Ben-hui. A Study of Fatigue Life Analysis and Vehicle Structural Design of the Outdoor AGV Based on ANSYS[D]. Xi'an: Shanxi University of Science and Technology, 2015.
- [16] 车睿. 基于虚拟样机技术的货叉式 AGV 稳定性研究与结构优化[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2015.
CHE Rui. The Stabilization Research of Fork-type AGV Based on Virtual Prototyping Technology and Structure Optimization[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science & Technology, 2015.
- [17] 赵子男. 基于悬架控制的车辆行驶平顺性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
ZHAO Zi-nan. Reserach on Land Vehicle's Ride Comfort Based on Suspension Control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [18] 段虎明, 石峰, 谢飞, 等. 路面不平度研究综述[J]. 振动与冲击, 2009, 28(9): 95—101.
DUAN Hu-ming, SHI Feng, XIE Fei. A Survey of Road Roughness Study[J]. Journal of Vbration and Shock, 2009, 28(9): 95—101.
- [19] 许海, 赵淳生. 双足型直线超声电机的实验研究[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(11): 1498—1500.
XU Hai, ZHAO Chun-sheng. Experiments of Double-foot Linear Ultrasonic Motor[J]. Mechanical Science and Technology, 2007, 26(11): 1498—1500.