

文章编号: 1005-0523(2026)01-0114-06



振动能量采集型磁流变阻尼器充电性能研究

类维政, 胡国良, 席兴盛, 钟俊辉, 喻理梵

(华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为了回收车辆悬架振动过程中的机械能, 基于所设计的振动能量采集型磁流变阻尼器和充电电路模块, 开展振动机械能的回收试验研究。采用COMSOL软件对振动能量采集型磁流变阻尼器发电性能进行建模, 并结合Simulink进行联合仿真, 分析振动能量采集型磁流变阻尼器对1.2 V锂电池的充电能力。设计和制作了全桥整流电路, 同时搭建了实验测试系统。在振动频率为4 Hz、振动幅值为8 mm的正弦位移激励下, 测试分析了感应线圈串联时的发电能力。测试结果表明, 感应线圈串联发电功率约为0.13 W, 由于机械振动的能量较为微弱且存在明显的电路损耗, 实际充电功率低于仿真得到的0.22 W; 此外, 在40 s时间内, 该阻尼器对1.2 V锂电池充电电量约为1.44 mAh, 完全充满时间为1 667 s。所设计的振动能量采集型磁流变阻尼器具有较好的充电性能。

关键词: 磁流变阻尼器; 振动能量采集; 充电性能

中图分类号: U463.33

文献标志码: A

本文引用格式: 类维政, 胡国良, 席兴盛, 等. 振动能量采集型磁流变阻尼器充电性能研究[J]. 华东交通大学学报, 2026, 43(1): 114-119.

Charging Performance Analysis of Vibration Energy Harvesting Magnetorheological Damper

Lei Weizheng, Hu Guoliang, Xi Xingsheng, Zhong Junhui, Yu Lifan

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to recover the mechanical energy during the vibration of the vehicle suspension, a vibration mechanical energy recovery was conducted based on the designed vibration energy harvesting magnetorheological (MR) damper and charging circuit module. The proposed vibration energy harvesting MR damper is modeled for power generation performance based on COMSOL software, and the charging capability for 1.2 V lithium battery is also analyzed combined with Simulink for co-simulation. The full-bridge rectifier circuit is designed and fabricated, and the experimental test system is also built. The generating electricity abilities of the induction coils in series are tested under the sinusoidal displacement excitation with frequency of 4 Hz and amplitude of 8mm. The test results show that the induction coils in series can generate power of 0.13 W, and it is lower than the simulated value of 0.22 W. The reason is that the mechanical vibration energy is relatively weak and there exists circuit loss. In addition, the charging energy from the damper to the 1.2 V lithium battery is about 1.44 mAh within 40 s, and it needs 1 667 s to be fully charged. The relevant results show the developed MR damper has a good charging ability.

收稿日期: 2024-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52165004); 江西省国际科技合作重点项目(20232BBH80010)

Key words: MR damper; vibration energy harvesting; charging performance

Citation format: LEI W Z, HU G L, XI X S, et al. Charging performance analysis of vibration energy harvesting magnetorheological damper[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(1): 114–119.

对于汽车悬架这类振动能量耗散系统,在确保磁流变阻尼器高性能的同时,对其进行功能拓展以实现能量的采集与回收利用,是学术界长期关注的焦点^[1-2]。

JASTRZEBSKI等^[3-4]建立了磁流变阻尼器振动能量回收系统,利用传感器和控制器并结合控制算法回收振动过程中的机械能。发现,在激励频率超过3.7 Hz条件下,可生成1.3 V的电源电压,通过回收产生的能量可以保证控制器和传感器的运行。Wang等^[5]设计了一种集成直线电机的自供电磁流变阻尼器,并在不同路面条件下测试了其发电功率和消耗功率。发现,该阻尼器可以产生5.08 W的发电功率,而阻尼器消耗功率仅为2.07 W,具有较好的应用前景。董小闵等^[6]设计了一种滚珠丝杠驱动盘式永磁发电机的能量采集器,将其并联在磁流变阻尼器上,将产生的电能为磁流变阻尼器进行供电。结果表明,发电机换能效率达到24%,但在运行不平稳时不能保证磁流变阻尼器的自供电。雷先华等^[7]基于磁流变弹性体设计了一种电磁式俘能减振器,并进行了仿真和实验测试。结果表明,该减震器在无外部控制电流下展示出一定的阻尼调节特性,对外部振动实现了抑制。Zhu等^[8]设计了一种具有自供电变刚度特性的磁流变阻尼器半主动车辆悬架系统,并对其进行了刚度特性和自供电特性实验研究。结果表明,阻尼器自发电组件可以产生4.5 V的感应电压,能够产生足够的电能进行自供电。席兴盛等^[9]设计了一种具有能量采集功能的磁流变阻尼器,并对其发电性能进行了仿真分析。结果表明感应线圈绕线槽高度值与发电性能基本呈线性关系。Hu等^[10]将微型滚珠丝杠结构集成到磁流变阻尼器中,得到一种旋转式能量采集型磁流变阻尼器。该阻尼器在20 mm/s的振动条件下,可以持续产生峰值为3.0 V的变化电压,但是产生的电压变化较大,且无规则,后续回收利用难度大。

以上研究虽使磁流变阻尼器实现了感应电压的产生并显示出一定的自供电功率,但均没有对回

收的振动能量进行存储研究,没有定量描述可回收的电能,也没有测试其充电功率。基于此,本文提出一种振动能量采集型磁流变阻尼器,通过全桥整流电路实现交流电到直流电的转换,结合1.2 V锂电池完成能量存储,最终通过仿真与实验验证其充电性能,填补现有研究中“能量存储与定量表征”的空白,重点解决振动能量的回收和存储问题。

1 结构与原理分析

针对集成化和节约成本的设计要求,设计了如图1所示的双层式振动能量采集型磁流变阻尼器。该阻尼器主要由内层套筒、永磁体、感应线圈、励磁线圈和外层套筒组成。感应线圈和永磁体是该阻尼器收集振动机械能的核心部分,感应线圈的匝数以及永磁体的磁场强度直接影响该阻尼器的发电性能。该阻尼器的感应线圈包括a、b、c三组。

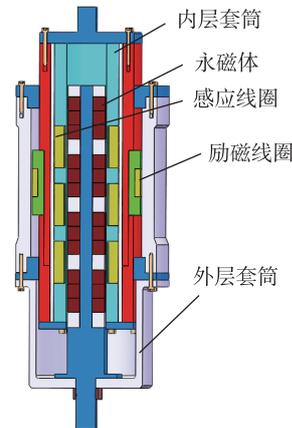


图1 振动能量采集型磁流变阻尼器结构图
Fig. 1 Schematic diagram of vibration energy harvesting MR damper

轴向振动过程中,固定在内层套筒的励磁线圈得到外部电源激励产生磁场。磁场作用下,内层与外层套筒中的磁流变液沿磁力线方向迅速呈链状排布,由液态转变为类固态,剪切屈服应力显著增大,从而表现出可观的阻尼特性。

图2为该阻尼器能量采集装置原理图。4组永磁

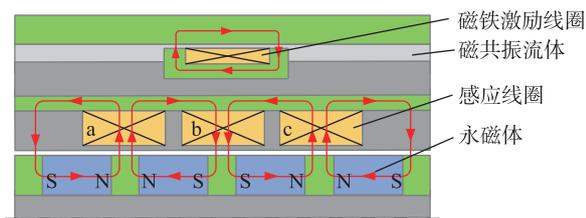
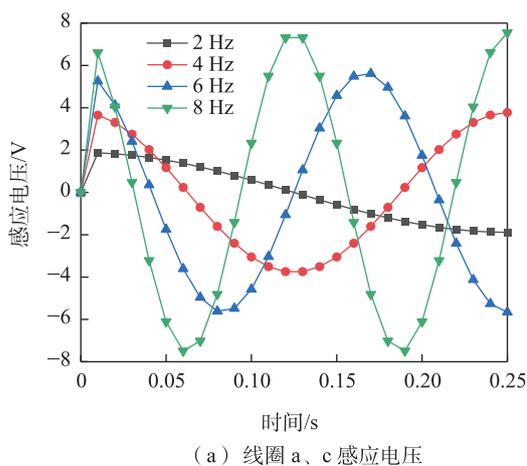


图2 振动能量采集原理图

Fig. 2 Schematic diagram of vibration energy collection

体相邻两组之间用隔片隔离,每组永磁体包含3个N35型钕铁硼永磁铁。永磁体产生的磁力线从N极出发,穿过感应线圈最终回到S极,形成闭合回路。阻尼器工作过程中,外层套筒带动永磁体与固定在内层套筒的感应线圈产生轴向相对运动,感应线圈内部磁通量不断变化,产生感应电动势。感应线圈产生的感应电压为

$$E = -N\varphi_g \frac{\pi}{\tau} \sin\left(\frac{\pi}{\tau}z + \theta\right) \frac{dz}{dt} \quad (1)$$



式中: N 为感应线圈的匝数; φ_g 为空气磁通量; τ 为隔片厚度; z 为感应线圈与永磁体之间的相对位移; θ 为初始相位角; t 为时间。

由式(1)可知,在结构尺寸一定的条件下,感应电压与感应线圈和永磁体之间相对速度呈正相关。根据电磁感应原理和阻尼器结构尺寸的要求,设计阻尼器在振幅8 mm下振动,以振动频率为变量进行参数化扫描,分析该阻尼器在不同频率条件下的发电性能,如图3所示。

仿真结果表明:感应电压随着振动频率的增加而增大。这是因为振动频率越高,感应线圈磁通量的变化率越大,产生的感应电动势越大。考虑到车辆在路面行驶时车辆悬架振动频率通常在2~10 Hz之间,车辆行驶过程绝大部分处于平稳行驶状态,振幅微弱,综合试验台设定的安全激振频率(4 Hz)以及阻尼器结构尺寸,选取振动频率为4 Hz、振幅为8 mm的振动激励,进行发电性能分析。

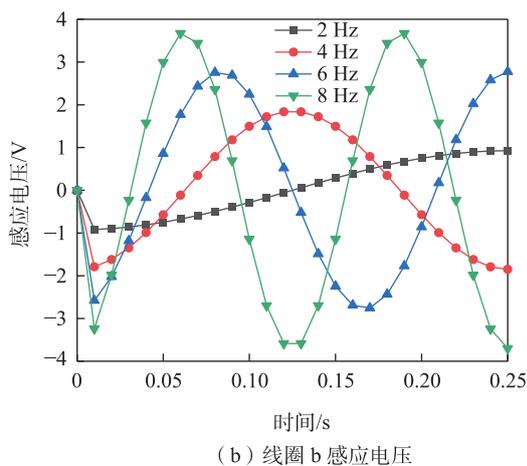


图3 感应电压仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of induced voltage

2 发电性能仿真分析

为了研究该阻尼器的发电性能,设计了如图4所示的联合仿真系统,包含MRD模块、整流模块和锂电池模块。通过给阻尼器设定不同的频率和振幅,调节感应电压。经过整流、滤波和稳压,使之达到能够给锂电池充电的条件。

将建立的COMSOL仿真模型导入Simulink进行联合仿真。结果显示,在频率为4 Hz、振幅为8 mm的正弦振动条件下,发电线圈a、c串联时,感应电压最高可达到3.7 V;经过整流、滤波和稳压,充电电

压可稳定在1.2 V,如图5(a)所示,能够持续为1.2 V锂电池充电,充电功率在0.22 W左右,30 s即可为总容量2 000 mAh的锂电池充电2.4 mAh,如图5(b)所示。发电线圈b单独为1.2 V锂电池充电时,感应电压最高可达到1.8 V,经过整流、滤波和稳压过后,充电电压维持在1.2 V,如图5(c)所示,但不能为1.2 V锂电池充电。前20 s,需要先对超级电容进行充电,电池同时放电,稳定后充电功率为0;30 s后电池放电1.2 mAh,如图5(d)所示。

a、b、c三个发电线圈的综合电能回收量可达到4.5 mAh/min,考虑到车辆单次行驶往往超过0.5 h,

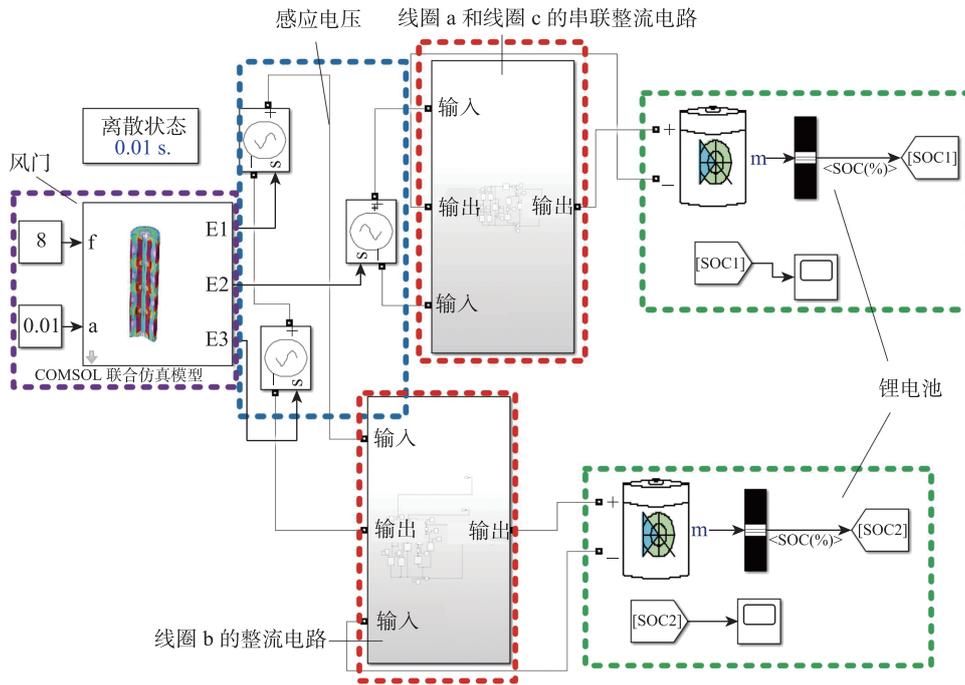


图4 联合仿真模型

Fig. 4 Co-simulation model

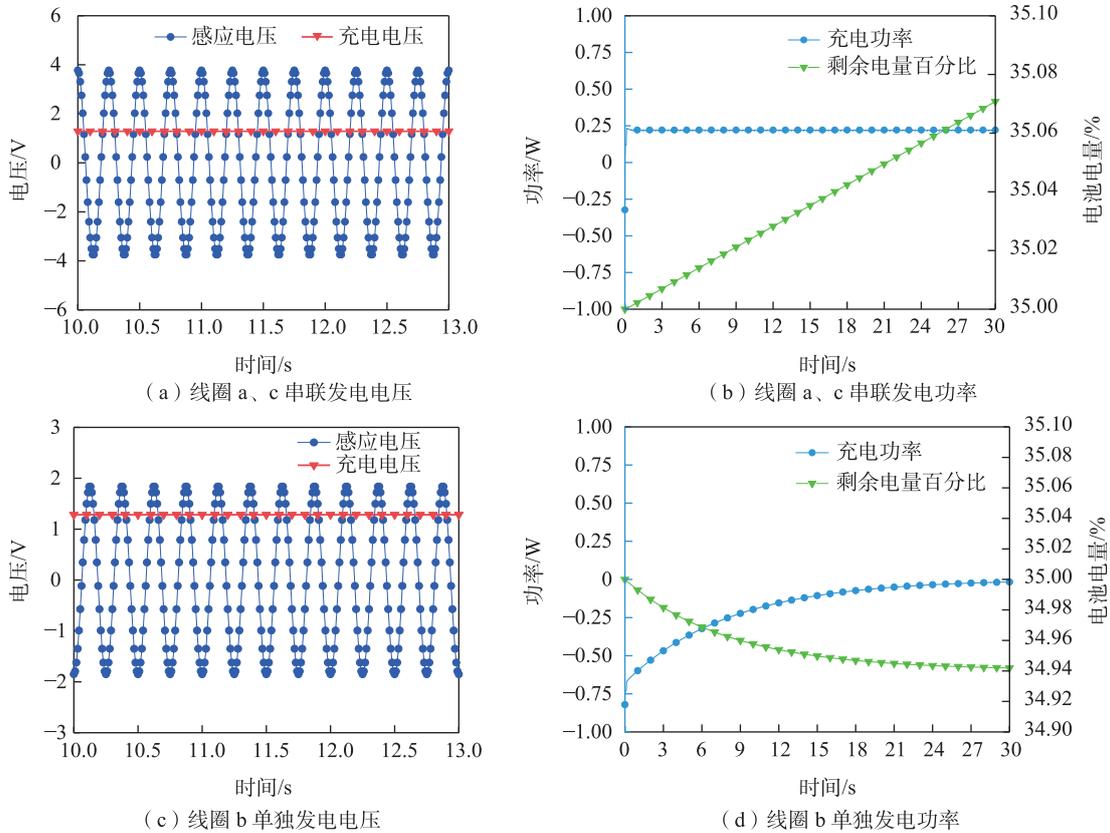


图5 联合仿真结果图

Fig. 5 Diagram of co-simulation results

此时,每0.5 h该振动能量采集型阻尼器回收的能量达到135 mAh。

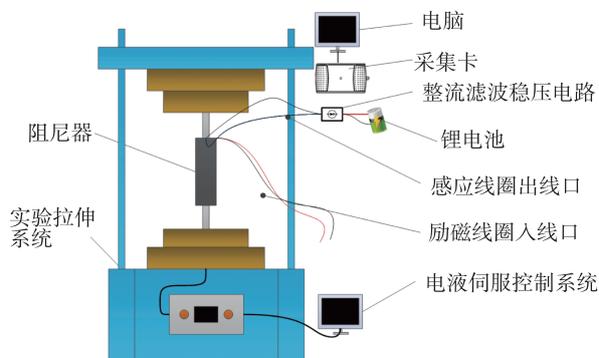
3 发电性能实验测试

为了获得阻尼器的振动能量回收效率,以及充电电压、充电功率随时间的变化情况,设计了如图6所示的实验系统。该系统包括振动能量采集型磁流变阻尼器、悬架试验台、整流电路、锂电池、采集卡和万用表等装置。

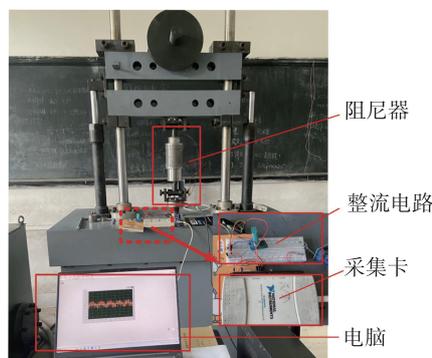
从仿真结果中可知,线圈b并不能单独为1.2 V锂电池充电,以下只研究a、c线圈串联的情况。实

验结果如图7所示,在频率为4 Hz,振幅为8 mm的条件下,线圈a、c两端的感应电压基本一致,a、c串联后可以得到2倍的感应电压,最大值达到2.6 V;锂电池端的充电电压稳定在1.2 V,充电功率维持在0.13 W,实际充电功率相对仿真充电功率较低,这是因为设计电路中电容、整流二极管等消耗了部分功率。

在持续振动的40 s过程中,扣除电路损耗与锂电池微弱放电的影响后,测得实际充电1.44 mAh。由实验可知,安装有该振动能量采集型磁流变阻尼器的车辆以一定速度行驶1 h,可回收的电量达130 mAh,



(a) 实验验证系统原理图



(b) 实验验证系统

图6 实验系统

Fig. 6 Experimental system

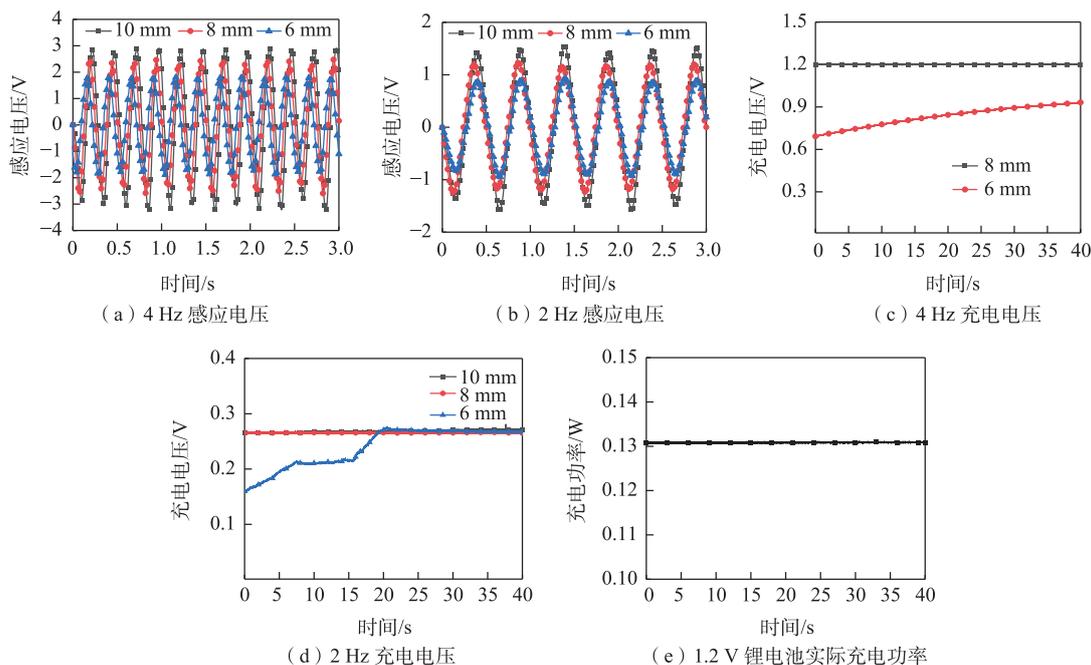


图7 实验结果

Fig. 7 Experimental result

这部分回收存储的电量可用于车辆的内部照明、音箱供电等,有效实现能量的回收利用,助力汽车行业的绿色减排。

4 结论

1) 基于磁流变阻尼器仿真模型和 Simulink 整流、稳压电路模型,得到了阻尼器能量回收对锂电池进行充电的联合仿真模型。随着振动频率和振幅的增大,磁流变阻尼器产生的感应电压越来越高;在振动频率为 4 Hz,振幅为 8 mm 的条件下进行仿真分析,结果显示阻尼器产生的感应电压为 3.7 V;经过整流、稳压后对锂电池充电的电压可达 1.2 V,充电功率为 0.22 W。

2) 对能量采集型阻尼器充电性能进行了实验验证。利用采集卡得到磁流变阻尼器产生的感应电压、充电电压和充电功率分别为 2.6、1.2 V 和 0.13 W。由于电路损耗和线圈内阻,感应电压、充电电压和充电功率均有折损。

参考文献:

- [1] HU G L, YING S C, QI H N, et al. Design, analysis and optimization of a hybrid fluid flow magnetorheological damper based on multiphysics coupling model[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 205: 110877.
- [2] LI Y, YANG X L, ZHU J H, et al. Design and performance study of hybrid channel-valved magnetorheological dampers[J]. Journal of Magnetics, 2023, 28(1): 6-15.
- [3] JASTRZEBSKI Ł, SAPIŃSKI B. Examination of a magnetorheological damper control system with vibration energy harvesting[J]. Acta Mechanica et Automatica, 2024, 18(1): 158-168.
- [4] SAPIŃSKI B, ORKISZ P, JASTRZEBSKI Ł. Experimental analysis of power flows in the regenerative vibration reduction system with a magnetorheological damper[J]. Energies, 2021, 14(4): 848.
- [5] WANG R C, JIANG Y, DING R K, et al. Design and experimental verification of self-powered electromagnetic vibration suppression and absorption system for in-wheel motor electric vehicles[J]. Journal of Vibration and Control, 2022, 28(19/20): 2544-2555.
- [6] 董小冈, 彭少俊, 于建强. 自供电式汽车磁流变减振器特性研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(20): 83-91.
DONG X M, PENG S J, YU J Q. Study on self-powered magnetorheological damper characteristics for automobile [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(20): 83-91.
- [7] 雷先华, 杨启正, 朱石沙, 等. 基于电磁式自供能 MRE 减振器的设计与试验研究[J]. 机械设计, 2020, 37(12): 107-111.
LEI X H, YANG Q Z, ZHU S S, et al. Design and experimental research of MRE damper based on the electromagnetic self-energy supply[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(12): 107-111.
- [8] ZHU X J, NING D H, HAO Z N, et al. Modelling and experimental evaluation of a variable stiffness MR suspension with self-powering capability[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2021, 32(13): 1473-1483.
- [9] 席兴盛, 胡国良, 朱文才, 等. 振动能量采集型磁流变阻尼器发电性能研究[J]. 工程设计学报, 2024, 31(2): 201-209.
XI X S, HU G L, ZHU W C, et al. Research on power generation performance of vibration energy collecting magnetorheological damper[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2024, 31(2): 201-209.
- [10] HU W B, XIAO P, ZHAI R J, et al. Research on energy-regenerative suspension based on WOA-PID algorithm [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2023, 34(5): 536-550.



第一作者: 类维政(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为磁流变半主动悬架及其控制。E-mail: 1842308725@qq.com。



通信作者: 胡国良(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为磁流变智能器件及结构。E-mail: glhu@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑: 李根)