

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, 进行振动机械能的回收研究。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1.2V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4Hz、振动幅值8mm的正弦位移激励下, 测试分析了感应线圈串联发电的能力。测试结果表明, 感应线圈串联发电功率约为0.13W, 由于机械振动的能量较为微弱且存在明显的电路损耗, 使得实际充电功率低于仿真得到的0.22W; 此外, 在40秒时间内, 该阻尼器对1.2V锂电池充电电量约为1.2mAh, 完全充满需要1667秒。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: TH13

文献标志码: A

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 is 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 1.2V 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 4Hz and amplitude of 8mm. The test results show that the induction coils in series can generate power of 0.13W, and it is lower than the simulated value of 0.22W. 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 1.2V lithium battery is about 1.2mAh within 40s, and it needs 1667s to fully charging. The relevant results show the developed MR damper has a good charging ability.

Key words: MR damper; Vibration energy harvesting; Charging performance

磁流变液 (MR Fluid) 是一种智能可控材料, 它可在磁场作用下快速发生流变效应。以磁流变液为核心介质制作的磁流变阻尼器具有响应速度快、阻尼力连续可控、输出阻尼力大等诸多优点, 在汽车悬架、桥梁建筑、飞机起落架等减振抗震等领域取得了广泛应用^[1-3]。同时, 对于汽车悬架等振动能量耗散的系统, 在保证磁流变阻尼器优异性能的同时, 对其功能进行拓展, 实现振动能量的采集和再利用, 一直是研究的重点^[4-6]。

JASTRZEBSKI等^[7-8]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。结果表明, 在激励频率超过3.7Hz条件下, 可生成1.3V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^[9]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。结果表明该阻尼器可以产生5.08W的发电功率, 而阻尼器消耗功率仅为2.07W, 具有较好的应用前景。Choi等^[10]提出了一种集成线性电磁感应发电机的自供电磁流变阻尼器。发电机同轴安装在活塞头顶部, 在振动激励下永磁体上下运动, 发电机产生电能, 但输出功率不大。董小闵等^[11]设计了一种滚珠丝杠驱动的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。实验结果表明, 发电机换能效率达到24%, 但在不平稳过程中不能保证磁流变阻尼器的自供电。雷先华等^[12]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。实验结果表明, 在无外部控制电流下可实现减振器的阻尼特性调节, 实现对外部振动抑制。Zhu等^[13]设计了一种具有自供电变刚度特性的磁流变阻尼器的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进行实验。结果表明, 阻尼器自发电组件可以产生4.5V的感应电压, 能够产生足够的电能进行自供电。席兴盛等^[14]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^[15]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20mm/s的振动条件下, 可以持续产生峰值为3V的变化电压, 但是产生的电压变化较大, 且无规则, 后续回收利用的难度大。

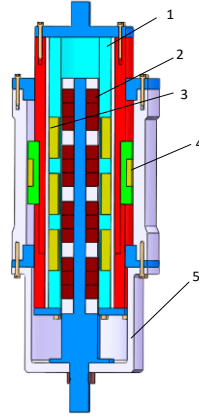
以上研究虽可以产生感应电压和自供电功率, 但均没有对回收的振动能量进行存储, 没有定量描述可回收的电能, 也没有测试其充电功率。基于此, 本文提出一种振动能量采集型磁流变阻尼器, 并设计全桥整流电路, 利用可充电锂电池, 对其充电性能进行理论分析和实验研究。

充电性能仿真和测试过程中, 利用1.2V的锂电池, 重点解决振动能量的存储和回收。

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。

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。内层套筒和外层套筒中的磁流变液在磁场作用下, 沿磁力线方向迅速呈链状排布, 由液态变为类固态, 剪切屈服应力增大, 表现出可观的阻尼特性。



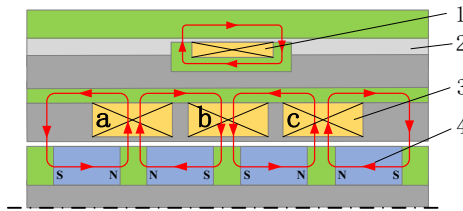
1. Inner sleeve 2. Permanent magnet 3. Induction coil 4. Magnet exciting coil 5. Outer sleeve

1.内层套筒 2.永磁体 3.感应线圈 4.励磁线圈 5.外层套筒

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

图2所示为该阻尼器能量采集装置原理图。4组永磁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上的相对运动，感应线圈内部磁通量不断变化，进而产生感应电动势。



1. Magnet exciting coil 2. MR Fluid 3. Induction coil 4. Permanent magnet

图2 振动能量采集原理图

Fig. 2 Schematic diagram of vibration energy collection

感应线圈产生的感应电压可表示为：

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

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。

从式1中可知，在结构尺寸一定的条件下，感应电压与感应线圈与永磁体之间相对速度的大小呈正相关。根据电磁感应原理和阻尼器结构尺寸的要求，设计阻尼器在振幅为8mm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快，感应线圈磁通量的变化率越大，进而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2-10Hz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4Hz以及阻尼器结

构尺寸, 选取振动频率4Hz、振动幅值8mm的振动激励, 进行发电性能分析。

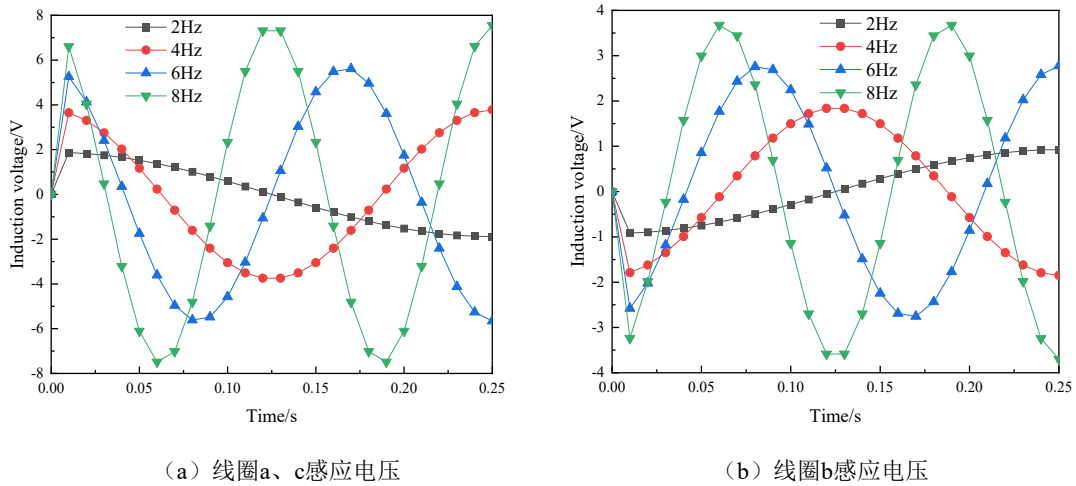
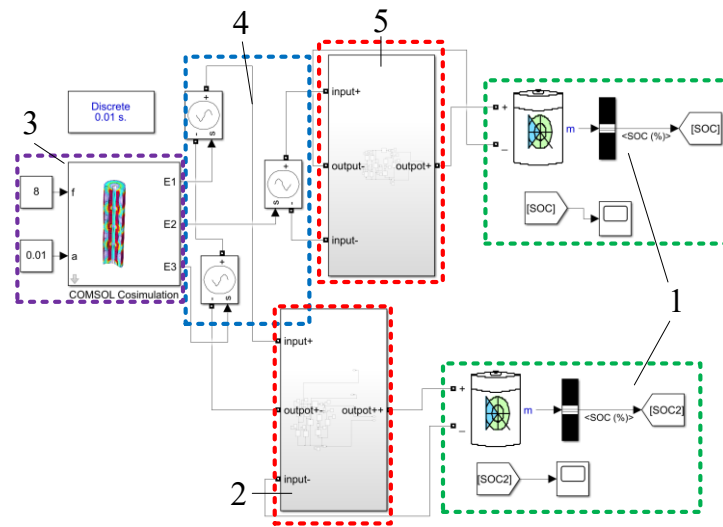


图3 感应电压仿真图

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能力, 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。通过设定阻尼器的不同频率和振动幅值, 产生感应电压。经过整流、滤波和稳压, 达到给锂电池充电的目的。



1. Lithium battery 2. Coil b rectifier circuit 3. Damper 4. Induction voltage 5. Series rectifier circuit with coils a and c

图4 联合仿真模型

Fig. 4 Co-simulation model

将建立的COMSOL仿真模型导入到Simulink中进行联合仿真, 仿真结果如下。在频率4Hz、振幅8mm的正弦振动条件下, 发电线圈a、c串联后, 感应电压最高可达到3.7V; 经过整流、滤波和稳压过后, 充电电压可稳定在1.2V, 如图5(a)所示, 能够持续为1.2V锂电池充电; 充电功率在0.22W左右, 30秒时间可持续为总容量2000mAh的锂电池充电, 充电电量达到2.4mAh, 如图5(b)所示。发电线圈b单独为1.2V锂电池充电, 感应电压最高可达到1.8V, 经过整流、滤波和稳压过后, 充电电压维持在1.2V, 如图5(c)所

示,但不能为1.2V锂电池充电。前20秒,需要先对超级电容进行充电,电池也放电,稳定后充电功率维持在0W;30秒时间电池总容量剩余34.94%,放电电量为1.2mAh,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每分钟发电4.5mAh,考虑到车辆单次行驶往往超过半小时,此时,该振动能量采集型阻尼器的能量回收达到135 mAh。

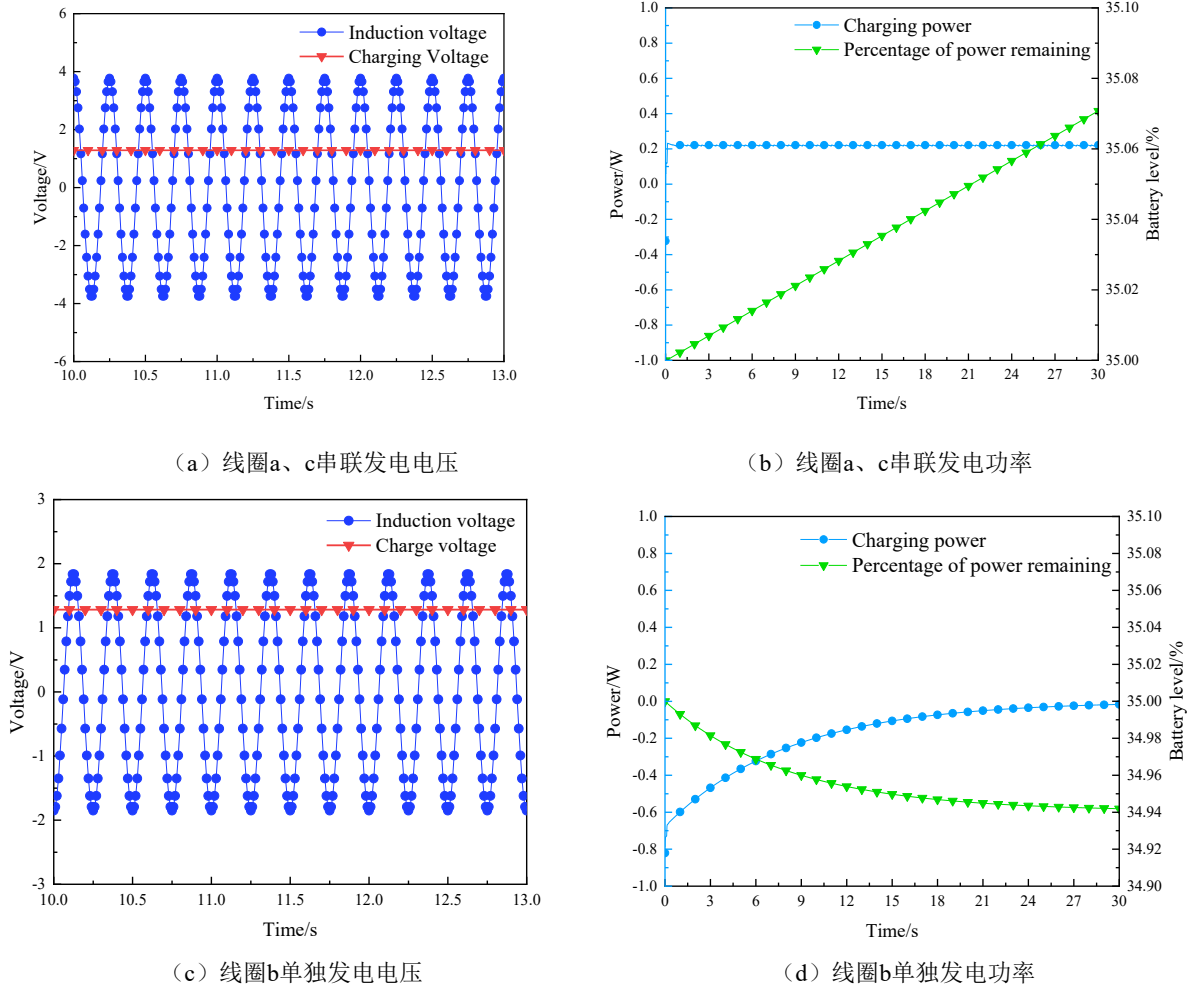
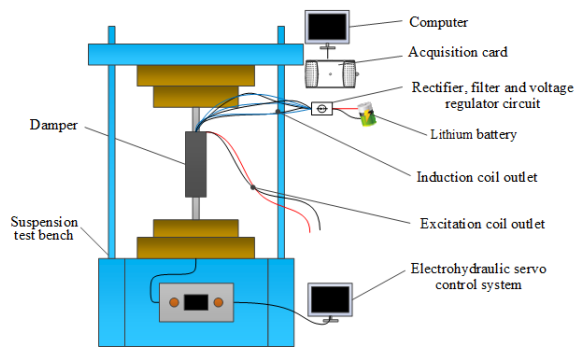


图5 联合仿真结果图

Fig. 5 Co-simulation results

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。



(a) 实验验证系统原理图

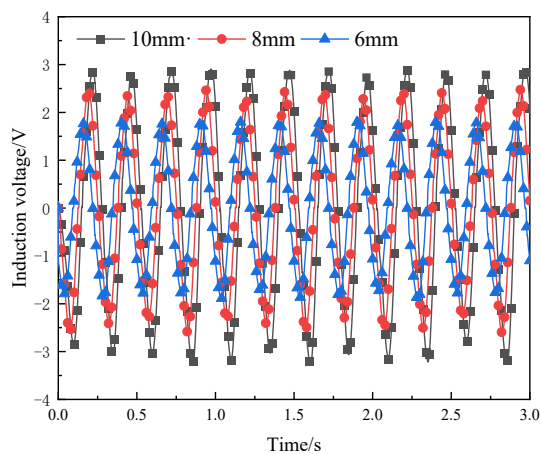
(b) 实验验证系统

图6 实验系统

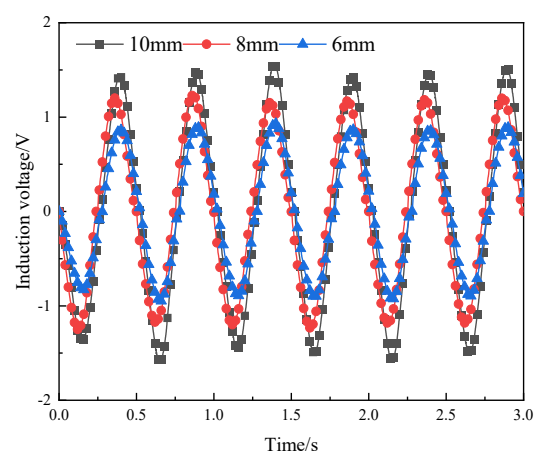
Fig. 6 Experimental system

从仿真中可知,线圈b并不能单独为1.2V锂电池充电,以下只研究a、c线圈串联的情况。在频率4Hz,振幅8mm的条件下,线圈a、c两端的感应电压基本实现一致,将a、c串联后可以得到两倍的感应电压,最大值达到2.6V;锂电池端的充电电压稳定在1.2V,充电功率维持在0.13W。可见,实际充电功率相对仿真充电功率有所降低,这是因为所设计电路中电容、整流二极管等都会消耗部分功率。

在进行持续振动的40秒过程中,排除电路中的损耗和锂电池的微弱放电,测得充电电量为1.44mAh。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一小时,可回收的电量理论可达130mAh,收集存储的电量可用于车辆的内饰照明、音箱供电等,最大限度的实现能量的回收利用,助力汽车行业的绿色减排。



(a) 4Hz感应电压



(b) 2Hz感应电压

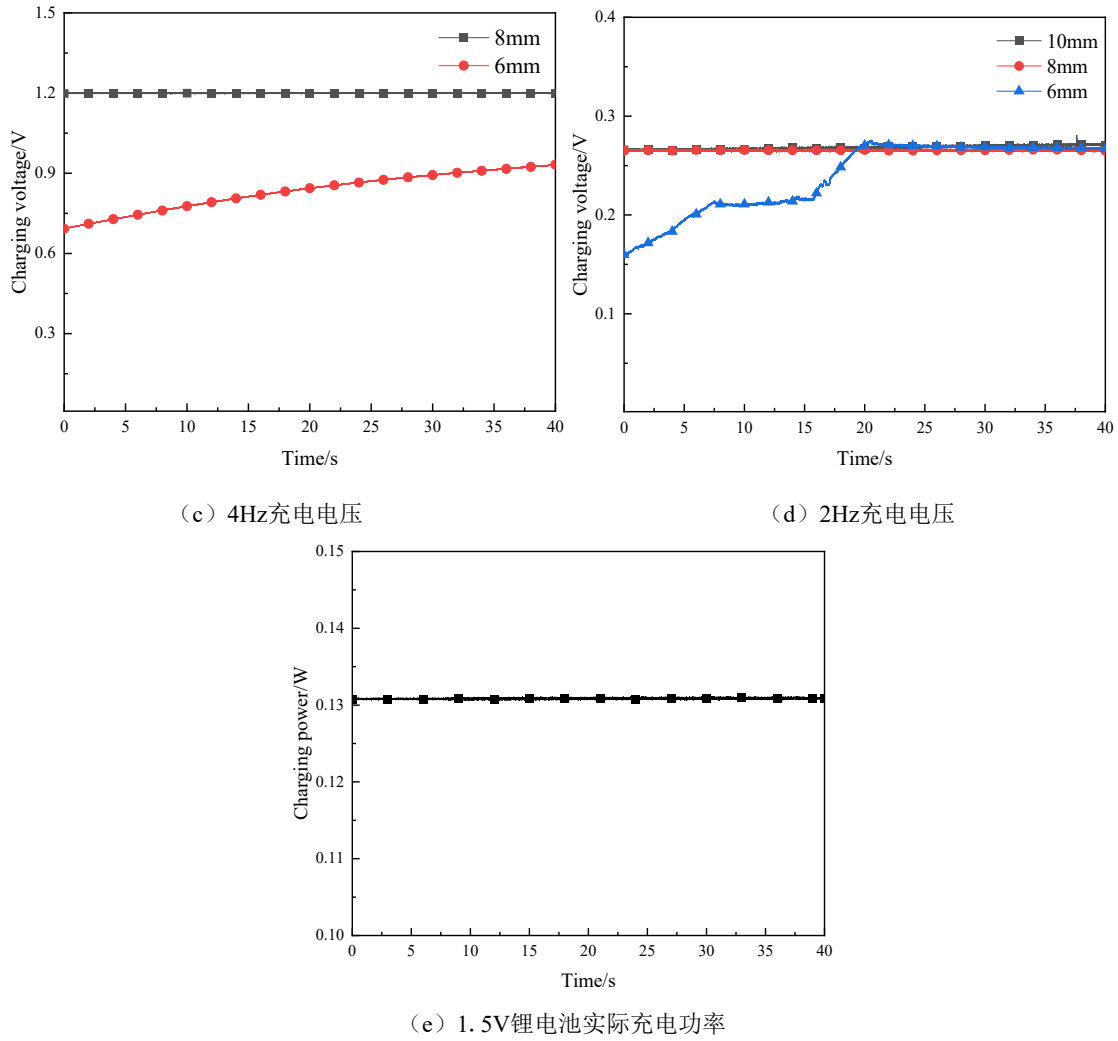


图7 实验结果

Fig. 7 Experimental result

4 结论

设计了整流稳压电路,采用COMSOL联合仿真方法以及悬架试验台测试方法,搭建振动能量采集与充电系统,对振动能量采集型阻尼器的充电能力进行了仿真和测试,得出以下结论:

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后对锂电池进行充电的联合仿真模型。随着振动频率的提升和振动幅值的提升,磁流变阻尼器产生的感应电压越来越高;在振幅8mm,频率4Hz的条件下,阻尼器产生的感应电压为3.7V;经过整流、稳压后对锂电池充电的电压可达1.2V,充电功率为0.22W。

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2.6V、1.2V和0.13W。由于电路损耗和线圈内阻的存在,感应电压、充电电压和充电功率出现下降。

参考文献

- [1] KUMAR S, SEHGAL R, WANI M F, et al. Stabilization and tribological properties of magnetorheological (MR) fluids: A review [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, 538: 168295
- [2] YU J, DONG X, SU X, et al. Development and characterization of a novel rotary magnetorheological fluid damper with variable damping and stiffness[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 165(6): 108320.
- [3] 胡国良, 杨肖, 朱文才, 等. 具有内外线圈结构的磁流变阀压降性能分析[J]. *南昌工程学院学报*, 2023, 42(3): 1-7.
HU G L, YANG X, ZHU W C, et al. Analysis of pressure drop performance of magnetorheological valve with inner and outer excitation coils[J]. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2023, 42(3): 1-7.
- [4] 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.
- [5] LI Y, YANG X, ZHOU Z Y. Design and performance study of hybrid channel-valved magnetorheological dampers[J]. *Journal of Magnetism*, 2023, 28(1): 6-15.
- [6] 何鹏, 陈京会, 徐进, 等. 磁流变液减振器性能试验研究[J]. *噪声与振动控制* 2023, 43 (02): 278-284.
HE P, CHEN J H, XU J, et al. Experimental study of magnetorheological fluid damper performance[J]. *Noise and Vibration Control*, 2023, 43(02): 278-284.
- [7] JASTRZĘBSKI U, SAPIŃSKI B. Examination of a magnetorheological damper control system with vibration energy harvesting[J]. *Acta Mechanica et Automatica*, 2024, 18(1): 158-68.
- [8] SAPIŃSKI B, Orkisz P, Jastrzbski U. Experimental analysis of power flows in the regenerative vibration reduction system with a magnetorheological damper[J]. *Energies*, 2021, 14, 848.
- [9] WANG R, JIANG Y, DING R, 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): 2544-55.
- [10] CHOI Y, WERELEY N. Self-powered magnetorheological dampers[J]. *Journal of Vibration & Acoustics*, 2009, 131(4): 323-329
- [11] 董小闵, 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. Characterization of self-powered magnetorheological damper for automobiles[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(20): 83-91.
- [12] 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 Study of Electromagnetic Self-Powered MRE Based Damper[J]. *Journal of Machine Design*, 2020, 37(12): 107-111.
- [13] ZHU X, NING D, HAO Z, 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): 1473-83.
- [14] 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(02): 201-209.
XI X S, HU G L, ZHU W C, et al. Study of power generation performance of vibration energy harvesting magnetorheological

dampers[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2024, 31(02): 201-209.

- [15] 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): 536-50.



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。