

功能集成型磁流变阻尼器设计与试验

胡国良^{1,2} 刘丰硕¹ 卢 昀²

(1. 华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室, 南昌 330013; 2. 伍伦贡大学机械、材料与机电一体化学院, NSW 2522)

摘要: 设计了一种集振动能量采集、速度自感应和阻尼力可控功能于一体的功能集成型磁流变阻尼器,该磁流变阻尼器的振动能量采集和速度自感应装置内置于阻尼器活塞杆空腔内,通过紧固销和紧固片将8个永磁铁和8个隔片按序固定安装在支撑杆上。在永磁铁作用下,缠绕在感应线圈绕线架上的感应线圈产生感应电压,实现振动机械能的能量采集;另外采集到的感应电压与活塞杆速度成正比例关系,可实现速度自感应。推导了振动能量采集和速度自感应数学模型,并采用ANSYS有限元仿真软件对振动能量采集进行了电磁场仿真分析。搭建试验台对所设计的功能集成型磁流变阻尼器进行了性能测试分析,试验结果表明:在0.06 m/s的激励下,振动能量采集装置能产生1.0 V的直流电压;感应电压与加载速度基本成正比例关系;另外,对该阻尼器的励磁线圈施加0.6 A的直流电时,能产生750 N左右的阻尼力,实现阻尼力可控。

关键词: 磁流变阻尼器; 振动能量采集; 速度自感应; 阻尼性能; 功能集成

中图分类号: TH137.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0384-07

Design and Experiment of Multi-functional Magnetorheological Damper

Hu Guoliang^{1,2} Liu Fengshuo¹ Lu Yun²

(1. Key Laboratory of Conveyance and Equipment, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China
2. School of Mechanical, Materials and Mechatronic Engineering, University of Wollongong, Wollongong NSW 2522, Australia)

Abstract: A multi-functional magnetorheological (MR) damper with energy harvesting, velocity self-sensing and controlled damping force was designed, fabricated and tested. The energy harvesting and velocity self-sensing mechanism was composed of a permanent magnet array and induced coils which moved vertically. The proposed MR damper used the piston rod as the sharing component between the energy harvesting and velocity self-sensing mechanism and the MR damper part, and this shared component could isolate the magnetic field between two function areas. The mathematical model for the energy harvesting and self-sensing capability of the proposed MR damper was derived. Finite element model of the energy harvesting part was built up to address the power generating efficiency using ANSYS software. Experimental tests were carried out to address the performances of the proposed MR damper. The results showed that the damping force was ranged from 200 N at the current of 0 A to 750 N at the current of 0.6 A. The dynamic range equaled to about 3.75. The AC-DC rectifier was applied on the power generating, and the results showed that 1.0 V DC voltage output was harvested after the AC-DC processing. Meanwhile, the velocity self-sensing performance was experimentally evaluated under different excitation frequencies and amplitudes. The experimental results showed a well fit curve under different excitations. In other words, the efficiency and feasibility of the velocity self-sensing capability of the MR damper were proved.

Key words: MR damper; vibration energy harvesting; velocity self-sensing; damping performance; multiple function

收稿日期: 2016-07-24 修回日期: 2016-08-24
基金项目: 国家自然科学基金项目(51475165、11462004)、江西省自然科学基金项目(20151BAB206035)、江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ150525)和江苏省研究生创新资金项目(YC2016-S252)
作者简介: 胡国良(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事磁流变智能器件及结构、流体传动及控制研究,E-mail: glhu@ecjtu.edu.cn

引言

磁流变阻尼器所具有的毫秒级响应速度、大阻尼力输出和高可调范围特点,使得它成为工业应用领域典型的半主动执行器件^[1]。目前,磁流变阻尼器已在建筑物及桥梁的减振抗震系统、铁路机车车辆及汽车半主动悬架系统的减振等方面取得广泛应用^[2-3]。但在半主动控制系统中,磁流变阻尼器往往需要与速度传感器、位移传感器等结合使用才能更好发挥其优势,这势必会增大系统安装空间和提

高维护成本。另外,现有的磁流变阻尼器需要外部电源输入来产生可调磁场激励,而在一些特殊场合,比如偏远地区,电力很难送达;或由于自然灾害等原因导致供电难以持续保证,这些因素将进一步限制磁流变阻尼器的工业应用领域。

目前对集成振动能量采集功能的磁流变阻尼器研究主要分两大类。第 1 类是通过机械传动装置将阻尼器机械直线运动转换成转动,并通过直流或交流发电机采集振动能,这些机械传动装置包括齿轮齿条、滚珠丝杆、液压传动部件等。如,CHOI 等^[4]提出了一种带能量回收装置的电流变吸振器,活塞杆的直线运动通过齿轮齿条装置传给发电机,发电机产生的电能直接供给阻尼器里面的激励线圈。GUAN 等^[5]提出了一种新型自供电磁流变阻尼器,通过滚珠丝杆和直流发电机采集外部机械振动能,并直接供阻尼器激励线圈发电,从而产生可控阻尼力。YU 等^[6]提出一种采用叶轮和交流发电机组成的能量采集装置,并集成在阻尼器里面用于检测其运行状态。第 2 类是基于电磁感应原理,通过永磁铁和感应线圈的相对运动来进行振动能量采集^[7-12]。但现有电磁感应装置产生的齿槽力过大;另外,由于感应线圈绕线架为导磁材料,使得电磁感应装置里面的感应线圈和阻尼器活塞头里面的激励线圈也会相互作用,从而产生电磁干扰。

除了能量采集型磁流变阻尼器外,对自感应磁流变阻尼器的研究也日益兴起。WANG 等^[13-14]基于载波叠加原理,提出了一种集成相对位移传感的磁流变阻尼器,并加工样机进行了相关试验分析。HU 等^[15-17]也提出了一种新型位移差动自感式磁流变阻尼器,并对感应线圈产生的电压进行了系统分析。JUNG 等^[18-20]提出了一种用于斜拉索桥梁减振用自感应磁流变阻尼器,但这种采用永磁铁和线圈组成的自感应装置和阻尼器采用的是分离式设计。

基于此,本文提出一种集成振动能量采集、速度自感应以及阻尼力可控的功能集成型磁流变阻尼

器,实现阻尼器振动机械能的高效采集和速度自感应,并有效缩小阻尼器的外形尺寸。同时对所设计的磁流变阻尼器进行结构设计、理论分析和试验验证。

1 工作原理与结构

图 1 为所设计的功能集成型磁流变阻尼器结构原理图,活塞头将阻尼器内部分割成 2 个压力区 I 和 II,内部充满磁流变液。浮动活塞、外套筒和下端盖之间围成腔体 III,内安装有压缩弹簧,用于支撑浮动活塞的运动。当活塞头凹槽内的励磁线圈通入直流电时,在活塞头两端的导磁部分产生磁场,此时阻尼间隙内的磁流变液被磁化,产生高强度剪切屈服应力,形成一定的阻尼力。通过控制输入电流,可控输出阻尼力大小。

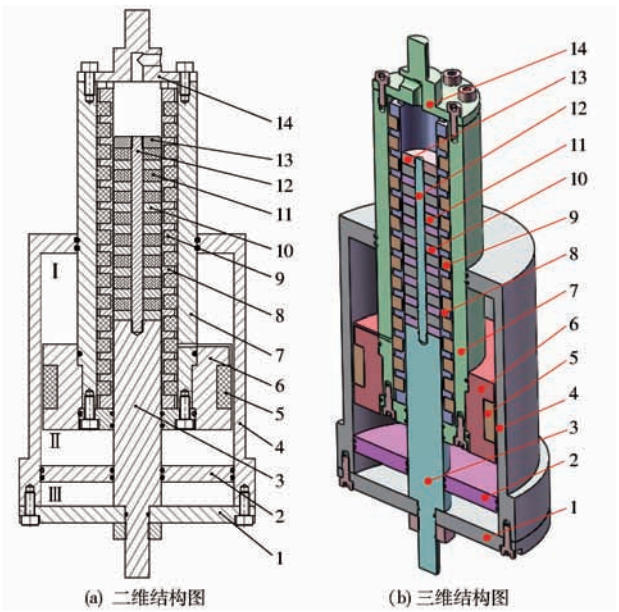


图 1 功能集成型磁流变阻尼器结构原理图

Fig.1 Schematic diagram of multi-functional magnetorheological damper

1. 下端盖 2. 浮动活塞 3. 支撑杆 4. 外套筒 5. 激励线圈
6. 活塞头 7. 活塞杆 8. 感应线圈绕线架 9. 感应线圈 10. 隔片
11. 永磁铁 12. 紧固销 13. 紧固片 14. 上端盖

如图 1 和图 2 所示,振动能量采集和速度自感应装置内置于活塞杆空腔内,永磁铁以 N-N 极相向,S-S 极相向的结构布置,2 个永磁铁之间通过一个隔片隔开,8 个隔片和 8 个永磁铁按照顺序依次安装在紧固销上,并通过紧固片压紧;紧固销与支撑杆通过螺纹刚性连接。

感应线圈绕线架加工有 14 个绕线槽,绕线槽内缠绕有感应线圈。相邻 2 个绕线槽内的感应线圈相位角相差 90°,为了提高感应电压采集效率,0°和 180°相位角的感应线圈串联,90°和 270°相位角的感

应线圈串联。如图 3 所示,感应线圈由 2 组独立线圈组成,其中一组独立线圈分别从绕线槽 2、4、6、8、10、12、14 中按串联的方式缠绕,构成感应线圈 A;另外一组独立线圈分别从绕线槽 1、3、5、7、9、11、13 中按串联的方式缠绕,构成感应线圈 B。

活塞杆的上下运动带动感应线圈绕线架往复运动;在永磁铁作用下,缠绕在感应线圈绕线架上的两组感应线圈将产生感应电压,通过整流电路转换成直流电压,可实现振动机械能的能量采集。另外,通过对感应电压信号进行分析即可得到活塞速度,实现速度自感应。该阻尼器集振动能量采集、速度自感应和阻尼力可控于一体,功能集成且结构紧凑。

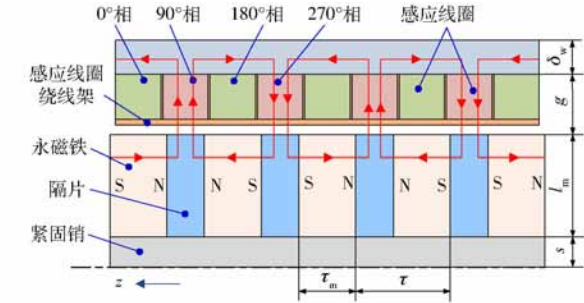


图 2 振动能量采集及自感应装置结构与原理图

Fig. 2 Structure and principle of energy harvesting and self-sensing mechanism

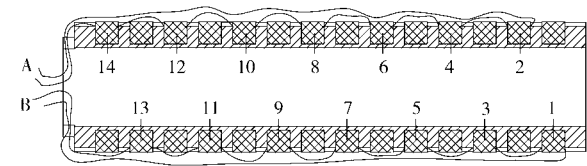


图 3 2 组独立线圈缠绕方式

Fig. 3 Schematic diagram of two separated inducing coils

2 振动能量采集与速度自感应数学模型

忽略紧固销和隔片的磁阻,由磁路原理可得气隙中的磁通量 ϕ_g 为^[21]

$$\phi_g = \frac{B_{rem} \tau_m \mu_0 H_c A_g}{2gB_{rem} + \tau_m \mu_0 H_c \frac{A_g}{A_m}} \tag{1}$$

式中 ϕ_g ——气隙中的磁通量
 μ_0 ——相对磁导率, $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$
 τ_m ——磁铁厚度 B_{rem} ——磁铁剩磁
 H_c ——磁铁磁场强度
 A_g ——气隙横截面积
 A_m ——磁铁横截面积
 g ——活塞杆内径和磁铁外径之间气隙长度
气隙横截面积 A_g 可表示为

$$A_g = \pi \left(s + l_m + \frac{g + \delta_w}{2} \right) (\tau - \tau_m) \tag{2}$$

式中 s ——紧固销半径

l_m ——磁铁宽度 τ ——磁极厚度
 δ_w ——活塞杆厚度

磁铁横截面积 A_m 可表示为

$$A_m = \pi [(s + l_m)^2 - s^2] \tag{3}$$

感应线圈 A 中的感应电压可表示为

$$E_A = -N\phi_g \frac{\pi}{\tau} \sin \left(\frac{\pi}{\tau} z + \theta \right) \frac{dz}{dt} \tag{4}$$

式中 E_A ——感应线圈 A 中的感应电压
 N ——感应线圈匝数
 z ——活塞杆位移
 θ ——初始相位角

感应线圈匝数 N 可表示为

$$N = \frac{2A_c}{\sqrt{3}d^2} \tag{5}$$

式中 A_c ——感应线圈横截面积
 d ——电线直径

由于相邻 2 个感应线圈的相位角相差 90° ,因此感应线圈 B 中产生的感应电压 E_B 可表示为

$$E_B = -N\phi_g \frac{\pi}{\tau} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} z + \theta \right) \frac{dz}{dt} \tag{6}$$

式中 E_B ——感应线圈 B 中的感应电压

考虑到安装时磁铁的初始零位置和感应线圈的初始零位置不能完全对应,因此式(5)和(6)中需增加初始相对位移 z_i ,公式(5)和(6)分别表示为

$$E_A = -N\phi_g \frac{\pi}{\tau} \sin \left(\frac{\pi}{\tau} (z + z_i) + \theta \right) \frac{dz}{dt} \tag{7}$$

$$E_B = -N\phi_g \frac{\pi}{\tau} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} (z + z_i) + \theta \right) \frac{dz}{dt} \tag{8}$$

式中 z_i ——磁铁相对于感应线圈零位时初始位置
由公式(5)和(6)可得到

$$E_A^2 + E_B^2 = \left(-N\phi_g \frac{\pi}{\tau} \right)^2 \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 \tag{9}$$

因此,活塞杆绝对速度和两组感应线圈 A、B 产生的感应电压关系可表示为

$$\left| \frac{dz}{dt} \right| = \sqrt{\frac{E_A^2 + E_B^2}{\left(-N\phi_g \frac{\pi}{\tau} \right)^2}} \tag{10}$$

图 4 所示为活塞杆速度自感应控制算法流程图。首先根据公式(10)得出活塞杆绝对速度,然后得出相对位移 z_1 和 z_2 ,再代入到公式(7)中计算出感应线圈 A 感应到的电压 E_{A1} 和 E_{A2} ,并把这两个值和初始电压 E_A 进行比较,偏差较小的 E_{A1} 可提供初步的活塞杆速度信息。经过连续性检测后,可获得完整的速度信息。也就是说,活塞杆的速度与感应线圈产生的感应电压成正比例关系,从而实现速度自感应。

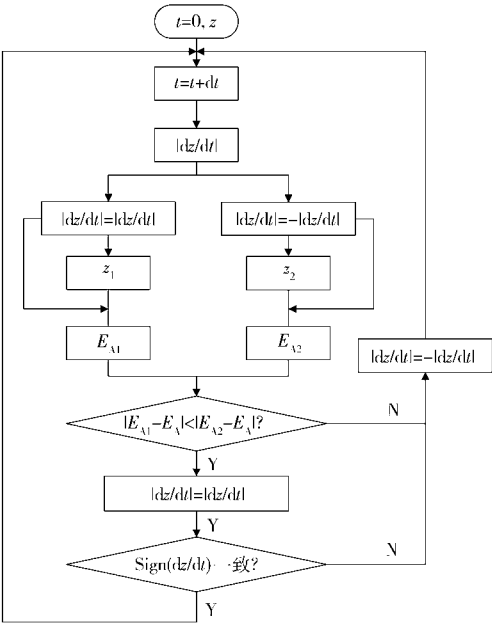


图 4 速度自感应控制算法流程图

Fig. 4 Control strategy of self-sensing velocity

3 振动能量采集电磁场仿真分析

采用 ANSYS 电磁场仿真软件对振动能量采集装置进行仿真分析,图 5 所示为振动能量采集装置实体模型和有限元模型图。由图 5a 可知,实体模型划分为 9 个区域,包括气室 A1,代表 4 个相位角的永磁铁组 A2、A3、A4 和 A5,圆柱销 A6,感应线圈绕线架和感应线圈区域 A7,活塞杆 A8、MRF 填充区域 A9。图 5b 为划分好网格的有限元模型图,单元类型选用 PLANE 13 单元,整个模型共有 1 217 个单元和 3 816 个节点。模型中的感应线圈绕线架由 ABS 不导磁材料制成,感应线圈电线材料为黄铜,这 2 种材料在气隙中的磁导率相等;圆柱销由铝制成,隔片和活塞杆由 1020 不锈钢制成,具有较高的磁导率。

图 6a 所示为振动能量采集装置磁力线分布,由图可观察到磁力线穿过永磁铁和活塞杆之间的气隙。因此,当永磁铁和感应线圈产生相对直线运动时,安装在感应线圈绕线槽内的 2 组感应线圈 A 和 B 会产生感应电压。图 6b 为振动能量采集装置磁场强度分布图,在磁极中最大的磁场强度为 0.9 T,而隔片中的平均磁场强度只有 0.3 T。

图 7 所示为振动能量采集装置的齿槽力有限元仿真结果。从图中可以看出,所设计的振动能量采集装置所产生的电磁力最大只有 1 N,远小于常规磁流变阻尼器所产生的阻尼力。因此,内置的振动能量采集装置对整个磁流变阻尼器的动态输出影响可以忽略不计。

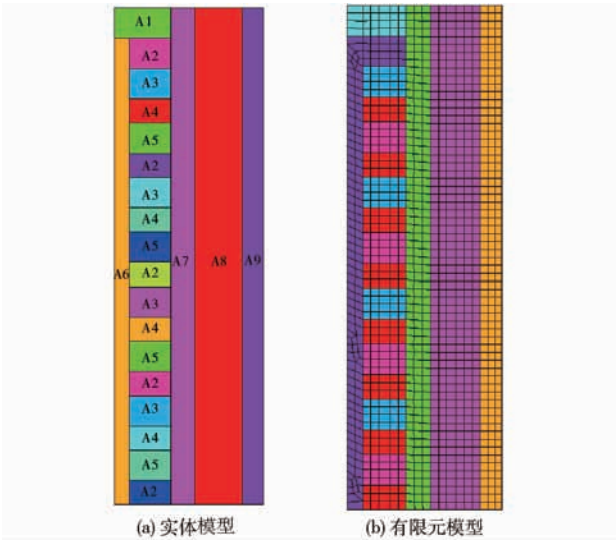


图 5 振动能量采集装置实体模型和有限元模型

Fig. 5 Model of energy harvesting mechanism

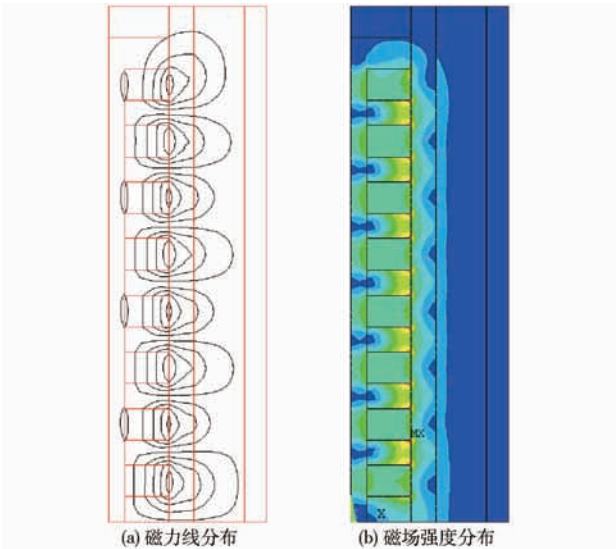


图 6 振动能量采集装置有限元仿真结果

Fig. 6 Finite element analysis of energy harvesting mechanism

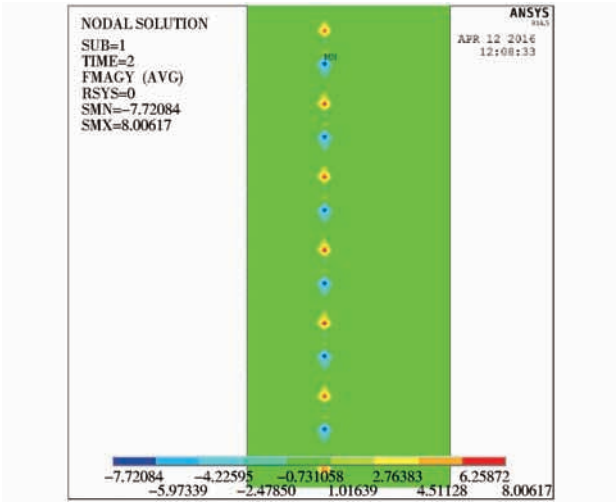


图 7 振动能量采集装置齿槽力仿真结果

Fig. 7 Finite element analysis of cogging force for proposed energy harvesting mechanism

4 试验分析

4.1 磁流变阻尼器样机与性能测试系统

图 8 所示为加工的功能集成型磁流变阻尼器关键元器件及样机。其中,8 个永磁铁选用 N52 钕铁硼磁铁;为了降低齿槽力,感应线圈绕线槽材料选用 ABS 不导磁材料。



图 8 功能集成型磁流变阻尼器关键元器件与样机
Fig.8 Key parts and prototype of multi-functional MR damper

图 9 所示为所设计的阻尼器性能测试试验台,阻尼器上下端盖通过夹头与 MTS 拉伸机固定连接,通过设定加载频率和拉伸位移,就可测试分析阻尼器产生的感应电压以及阻尼力变化。



图 9 功能集成型阻尼器性能测试试验台
Fig.9 Test rig of multi-functional MR damper

4.2 振动能量采集性能试验分析

图 10 所示为感应线圈 A 和 B 产生的感应电压的变化曲线,试验时拉伸位移为 15 mm,加载频率为 4 Hz,其中理论计算值分别由式(7)、(8)推导而来,公式中所需的磁通量 ϕ_g 为定值,该定值由图 6 所示的电磁场仿真结果得出。从图中可观察到理论计算值和试验值基本相符,试验最大感应电压为 1.22 V。但是,图中感应电压波形不是典型的正弦波形,这主要是由于试验过程中加载位移为 15 mm,大于振动能量采集装置中单个磁极的厚度(9 mm),导致相邻磁极间产生的电压相互干扰,产生频率叠加效应^[22]。

由于安装在阻尼器活塞头凹槽内的励磁线圈等

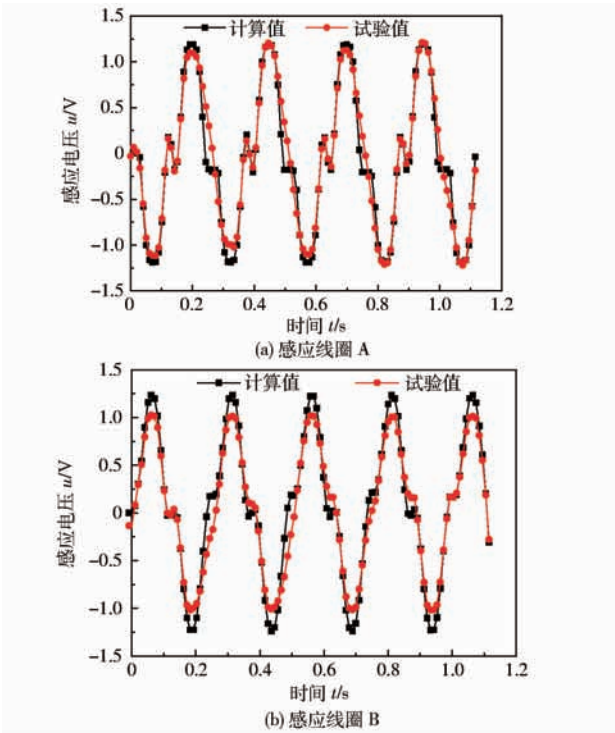


图 10 感应电压计算值与试验值比较
Fig.10 Comparison between numerical analysis result and experimental test of induced voltage

效于一个电阻,输入直流电流后就会产生一个等效直流电压,因此有必要分析感应线圈 A 和 B 产生的直流电压,从而评价其振动能量采集效果。图 11 所示为所设计的桥式整流电路,电路里面包含 6 个二极管和 1 个电容,感应线圈 A 和 B 产生的交流电压经过整流后转换成直流电压输出。

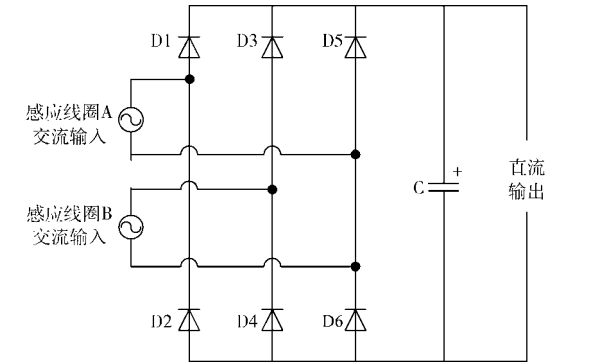


图 11 交直流整流器原理图
Fig.11 Schematic of AC-DC rectifier

图 12 所示为经过整流后的感应电压值,在 0.06 m/s 的正弦激励下,感应线圈 A 和 B 经过整流后产生的直流电压大约为 1.0 V。由于没有滤波,从图中可观察到整流后的直流电压存在锯齿,但其拟合值基本在 1.0 V 左右。

4.3 速度自感应性能试验分析

在 MTS 拉伸机上对功能集成型阻尼器的速度自感应功能进行试验测试,图 13 所示为 2 种典型加

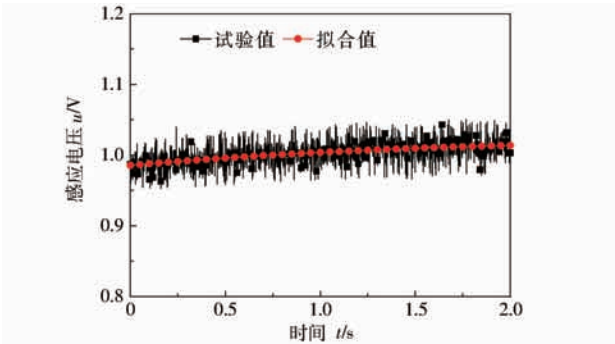


图 12 整流后的感应电压

Fig. 12 Induced voltage with AC-DC rectifier

载频率和拉伸位移下的速度自感应响应曲线。从 2 个图中可观察到,自感应速度试验值和理论值基本相符,但图 13a 中两者有些偏差,主要原因在于加载频率较小时,会导致式 (10) 中感应电压试验值偏小。当加载频率增加到 4 Hz 时,从图 13b 可看到自感应速度试验值和理论值基本相符。

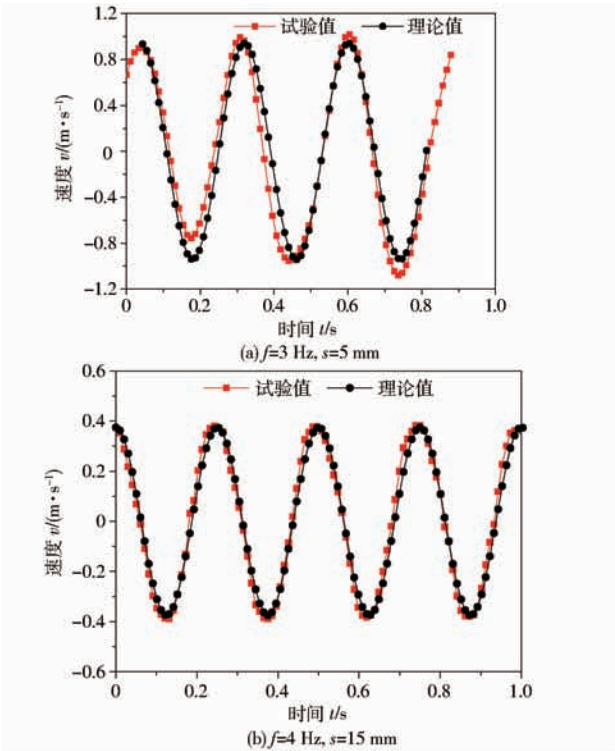


图 13 不同工况下的速度自感应变化曲线

Fig. 13 Experimental result of self-sensing velocity

图 14 所示为不同自感应速度下的感应电压变化,从图中可看出感应电压与激励速度近似呈一阶线性关系。也就是说,所设计的阻尼器感应电压与速度的对应关系可通过一阶关系式进行描述。这在一定程度上验证了公式 (7) 和 (8) 所表征的电压与自感应速度的关系,并为图 4 中所描述的自感应速度算法研究提供了试验依据,从而使得所设计的功能集成型磁流变阻尼器能更好地应用于车辆悬架等半主动控制系统。

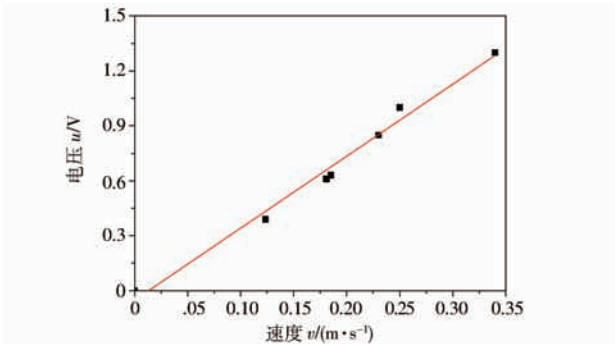


图 14 不同自感应速度下的感应电压

Fig. 14 Induced voltage at different self-sensing velocities

4.4 阻尼性能试验分析

图 15 所示为功能集成型阻尼器产生的阻尼力随加载位移变化曲线,试验时 MTS 拉伸机加载频率为 1 Hz,拉伸位移为 5 mm,分别对励磁线圈输入 0、0.2、0.4、0.6 A 的直流电流。由图可知,0 A 激励下的阻尼器能产生 200 N 左右的阻尼力,这个阻尼力主要来自零场下的阻尼间隙处 MRF 产生的粘滞阻尼力以及蓄能器内安装的压缩弹簧产生的初始弹簧力。随着加载电流的增加,阻尼力也相应增加;当电流加载到 0.6 A 时,阻尼器能产生 750 N 左右的阻尼力。加载电流从 0 A 变化到 0.6 A 时,阻尼力可调范围为 3.75,可见所设计的功能集成型阻尼器具有可控阻尼特性。此时阻尼器消耗的功率大约为 1.4 W,具有较低的功耗。

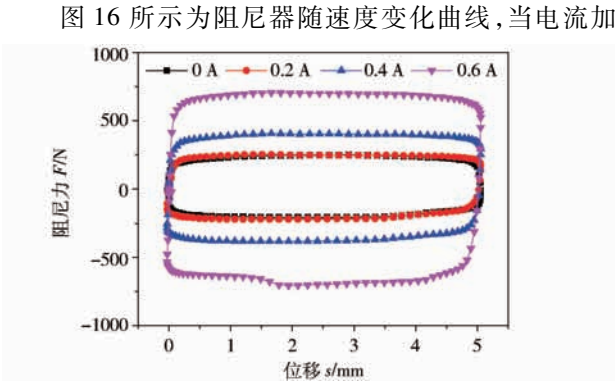


图 15 阻尼力随位移变化曲线

Fig. 15 Curves of MR damper force versus displacement

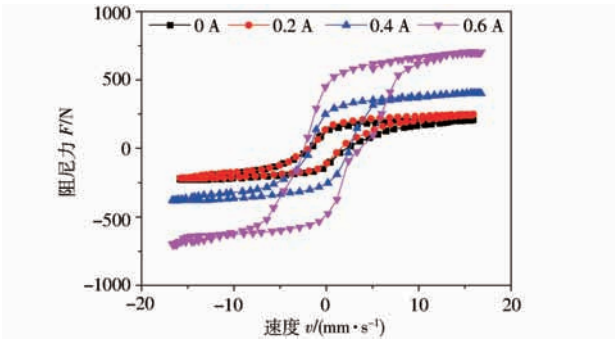


图 16 阻尼力随速度变化曲线

Fig. 16 Curves of MR damper force versus velocity

载到 0.6 A 时,阻尼器最大速度为 17 mm/s。

5 结论

(1)设计了一种集振动能量采集、速度自感应和阻尼力可控于一体的功能集成型磁流变阻尼器,振动能量采集和速度自感应功能通过永磁铁和感应线圈的相互直线运动来实现,该磁流变阻尼器结构紧凑、功能集成。

(2)对功能集成型磁流变阻尼器振动能量采集功能进行了理论分析和电磁场仿真,试验结果表明在 0.06 m/s 的激励下,整流后的振动能量采集装置

能产生 1.0 V 的直流电压,具有较好的能量采集效果。

(3)推导了功能集成型磁流变阻尼器速度自感应数学模型,并进行了试验分析。结果表明采集到的感应电压与活塞杆速度成正比例关系,可实现速度自感应。

(4)对功能集成型磁流变阻尼器活塞头中的励磁线圈施加 0.6 A 的直流电时,产生的阻尼力能从 0 A 时的 200 N 变化到 750 N 左右,阻尼力可调范围为 3.75,实现了阻尼力可控功能。

参 考 文 献

- 冯志敏,伍广彬,张刚. 磁流变阻尼器设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 33-38.
FENG Zhimin, WU Guangbin, ZHANG Gang. Mechanical performance test of magnetorheological damper [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 33-38. (in Chinese)
- ZHU X C, JING X J, CHENG L. Magnetorheological fluid dampers: a review on structure design and analysis [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2012, 23(8): 839-873.
- 寇荣荣. 汽车磁流变半主动悬架系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 280-287.
KOU Farong. Design and test of vehicle semi-active suspension with magnetorheological damper [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 280-287. (in Chinese)
- CHOI S B, SEONG M S, KIM K S. Vibration control of an electrorheological fluid-based suspension system with an energy regenerative mechanism [J]. Proc IMechE, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2009, 223(4): 459-469.
- GUAN X C, HUANG Y H, RU Y, et al. A novel self-powered MR damper: theoretical and experimental analysis [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(10): 105033.
- YU M, PENG Y, WANG S, et al. A new energy-harvesting device system for wireless sensors, adaptable to on-site monitoring of MR damper motion [J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(7): 077002.
- CHO S W, JUNG H J, LEE I W. Smart passive system based on magnetorheological damper [J]. Smart Materials and Structures, 2005, 14(4): 707-714.
- CHOI K M, JUNG H J, LEE H J, et al. Feasibility study of an MR damper-based smart passive control system employing an electromagnetic induction device [J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(6): 2323-2329.
- CHOI Y T, WERELEY N M. Self-powered magnetorheological dampers [J]. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 2009, 131(4): 044501.
- SAPINSKI B. Vibration power generator for a linear MR damper [J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(10): 105012.
- SAPINSKI B. Energy-harvesting linear MR damper: prototyping and testing [J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(3): 035021.
- CHEN C, LIAO W H. A self-sensing magnetorheological damper with power generation [J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(2): 025014.
- WANG D H, WANG T. Principle, design and modeling of an integrated relative displacement self-sensing magnetorheological damper based on electromagnetic induction [J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(9): 095025.
- WANG D H, BAI X X. A magnetorheological damper with an integrated self-powered displacement sensor [J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(7): 075001.
- HU G L, ZHOU W, LI W H. A new magnetorheological damper with improved displacement differential self-induced ability [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(8): 087001.
- HU G L, RU Y, LI W H. Design and development of a novel displacement differential self-induced magnetorheological damper [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2015, 26(5): 527-540.
- HU G L, ZHOU W, LIAO M K, et al. Static and dynamic experiment evaluations of a displacement differential self-induced magnetorheological damper [J]. Shock and Vibration, 2015(2015): 295294.
- JUNG H J, JANG D D, CHOI K M, et al. Vibration mitigation of highway isolated bridge using MR damper - based smart passive control system employing an electromagnetic induction part [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2009, 16(6): 613-625.
- JUNG H J, JANG D D, KOO J H, et al. Experimental evaluation of a 'self-sensing' capability of an electromagnetic induction system designed for MR dampers [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(8): 827-835.
- JUNG H J, JANG D D, LEE H J, et al. Feasibility test of adaptive passive control system using MR fluid damper with electromagnetic induction part [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(2): 254-259.
- EBRAHIMI B, KHAMSESE M B, GOLNARAGHI M F. Feasibility study of an electromagnetic shock absorber with position sensing capability [C]//Proceedings of the 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2008: 2988-2991.
- CHENG S, ARNOLD D P. A study of a multi-pole magnetic generator for low-frequency vibrational energy harvesting [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 20(2): 025015.