doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.044

磁流变阻尼器结构设计与能量采集效能仿真与试验

胡国良　易　锋　刘　浩　邵　帅　喻理梵
(华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室, 南昌 330013)

摘要: 设计了一种集阻尼可控、位移自感应和振动能量采集功能于一体的自感应振动能量采集型磁流变阻尼器,对设计的单感应线圈式、双感应线圈式振动能量采集装置进行了电磁场仿真分析。搭建了试验测试系统,测试分析了单感应线圈式、双感应线圈式振动能量采集装置的能量采集效能,分析了弱导磁性不锈钢绕线架和不导磁 PLA 绕线架对能量采集效能的影响。测试结果表明,在幅值为 7.5 mm、频率为 4 Hz 的正弦位移激励下,双感应线圈式振动能量采集装置采集的感应电压幅值为 2.512 V、能量采集功率为 1.5 W,其能量采集效能约为单感应线圈式的 2 倍;弱导磁性与不导磁绕线架的能量采集效能几乎相同。

关键词: 磁流变阻尼器; 振动能量采集装置; 位移自感应; 能量采集效能
中图分类号: TH703.62　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)08-0391-09　　**OSID**:

Structure Design and Energy Harvesting Efficiency Simulation and Test of Magnetorheological Damper

HU Guoliang　YI Feng　LIU Hao　SHAO Shuai　YU Lifan
(*Key Laboratory of Conveyance and Equipment*, *Ministry of Education*, *East China Jiaotong University*, *Nanchang* 330013, *China*)

Abstract: A novel magnetorheological damper (MRD) integrated with controllable damping, displacement self-induced and vibration energy harvesting ability was proposed to solve the problems of simple function integration and low efficiency of vibration energy harvesting in conventional MRD systems. The working principle of the proposed MRD was analyzed, especially the principle of vibration energy harvesting device with a single induction coil and a double induction coil, and winding frame with a non-magnetic and a low-magnetic material were explained in detail. Then, the vibration energy harvesting device with the single induction coil and double induction coil was simulated by ANSYS software. The prototype of the proposed MRD was manufactured, and the experimental test system was also set up. Afterwards, the energy harvesting performance of the developed MRD with the single induction coil and double induction coil was experimentally tested, respectively. The experimental results showed that the induced voltage with the double induction coil was 2.512 V and the energy harvest power with the double induction coil was 1.5 W under the sinusoidal displacement excitation with 7.5 mm amplitude and 4 Hz frequency, and the energy harvesting efficiency was about twice of that with the single induction coil. In addition, the energy harvesting efficiency with the non-magnetic and low-magnetic winding frame of the proposed MRD was almost the same.

Key words: magnetorheological damper; vibration energy harvesting device; displacement self-induced; energy harvesting efficiency

0　引言

磁流变液是一种智能流体,可在磁场作用下发生磁流变效应,即其流变性能随外部磁场强度的变化而变化[1]。以磁流变液为核心介质的磁流变阻尼器(Magnetorheological damper, MRD)是一种半主动控制元件,具有响应速度快、阻尼连续可调、调节范围宽等优点,广泛应用于桥梁建筑、土木工程以及汽车行业的减振抗震领域[2-3]。

在 MRD 半主动控制系统中,为充分发挥 MRD

收稿日期: 2019-11-11　修回日期: 2019-12-18
基金项目: 国家自然科学基金项目(51765016)
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和流体传动及控制研究,E-mail: glhu@ecjtu.edu.cn

的性能,需将状态信息输送给控制策略系统。传统外置传感器易受外部磁场、温度、噪声等因素影响,使系统的可靠性和稳定性降低;外置传感器增加了系统复杂度,增大了 MRD 的安装空间,系统成本也增加[4-6]。

MRD 活塞杆往复运动过程中会产生机械能,通过磁流变液与缸体间的摩擦损耗而使机械能浪费[7]。另外,在一些特殊场合,如处于偏远地区、因自然灾害等原因而断电的便携设备,MRD 无外部供能设备使其实际应用受到限制[8]。因此,为使 MRD 系统能在复杂环境中使用,必须保证 MRD 在突发情况断电后还能充分发挥其阻尼功能。

为进一步拓宽 MRD 在半主动控制系统中的应用,不仅需要将相应的状态信息(位移、速度和加速度等)反馈到控制系统,还需保证在特殊情况下 MRD 继续发挥其优异的阻尼连续、实时可调的减振性能。故近年来功能集成型 MRD 是 MRD 系统发展的主要趋势[9]。功能集成型 MRD 是在传统 MRD 上集成两种以上的功能,其中最广泛和最有发展潜力的是集成位移自感应和振动能量采集功能[10-11]。目前,大多数功能集成型 MRD 存在集成方式单一、机械化等不足,造成 MRD 系统复杂、安装体积大、成本高[12-13]。

现有的振动能量采集装置一般采用压电式和电磁式,其中电磁式较为常用[14]。电磁式能量采集装置主要依靠电磁感应装置(Electromagnetic induction, EMI),工作时 MRD 与 EMI 系统相对运动,根据电磁感应定律,EMI 系统将产生感应电压[15]。通过整流电路和储能电路可将感应电压储存,并在 MRD 断电时为其供电。目前,振动能量采集型 MRD 普遍存在能量采集效能低的问题,而影响能量采集效能的主要因素是能量采集装置的结构。因此需要设计一种能量采集效能高的振动能量采集装置,使 MRD 在断电时能稳定为其供电。

国内外学者在功能集成型 MRD 上进行了许多研究。CHEN 等[16]提出一种具有能量采集功能的 MRD,并将其用于车辆悬架,仿真结果表明,在不同随机路面激励下,该 MRD 可在外部电源断开时为其供电,并具有良好的减振性能,但没有试验数据验证仿真结果的正确性。LI 等[17]提出一种新型能量采集型吸振器,可将 MRD 的上下振动转换为发电机的单向转动,从而提升能量采集效率,并降低外界振动。YU 等[18]提出一种集成无线传感器及能量采集功能的新型磁流变阻尼器,磁流变液流动带动固定在旋转发电机上的扇叶旋转,旋转发电机收集电能,同时给无线传感器供电。BAI 等[19]设计了一种自发电式磁流变吸振器,其特点在于环形间隙和滚珠丝杠结构,其中滚珠丝杠结构将旋转的阻尼转矩转换成线性的阻尼力。BOGDAN 等[20]提出了一种能量采集型磁流变阻尼器,并将其用于半主动控制系统和单自由度的机械系统中,结果表明,该阻尼器能实现能量回收功能,并具有自感应功能。胡国良等[21-23]将振动能量采集装置集成在活塞杆内,提出并设计了一种振动能量采集型磁流变阻尼器,MRD 工作时感应线圈切割永磁铁磁场的磁感线,采集的感应电压达到 1.0 V。以上研究拓宽了能量采集型 MRD 的应用范围,但均存在一定的局限性,如能量采集效能低、系统复杂、结构体积庞大等。

本文提出并设计一种集阻尼可控、位移自感应和振动能量采集功能于一体的振动能量采集型磁流变阻尼器,并通过仿真和试验研究分析振动能量采集装置对能量采集效能的影响。

1 结构及工作原理

图 1 为所设计的位移自感应振动能量采集型磁流变阻尼器结构示意图。该阻尼器主要由 MRD 阻尼装置、位移自感应装置及双感应线圈式振动能量采集装置 3 部分组成。

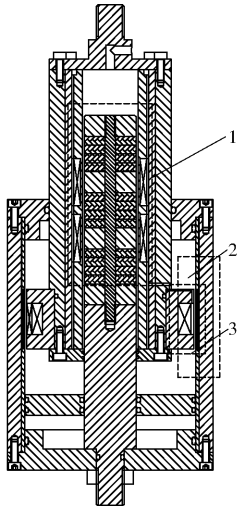


图 1 位移自感应振动能量采集型磁流变阻尼器结构图

Fig. 1 Structure schematic of proposed MRD

1. 双感应线圈式振动能量采集装置 2. 位移自感应装置 3. MRD 阻尼装置

MRD 阻尼装置是阻尼器的减振元件,当励磁线圈通入电流时,有效阻尼间隙处的磁流变液产生剪切应力,从而使磁流变阻尼器产生输出阻尼力。通过控制励磁线圈中电流可实现对输出阻尼力的准确控制,从而减少 MRD 的外部振动。

位移自感应装置相当于内置的位移传感器,主要由活塞头、激励线圈、绕线缸体、自感应线圈及外缸体等组成。自感应线圈均匀缠绕于绕线缸体,当

激励线圈输入高频的交流电时，自感应线圈处于变化磁场，故自感应线圈会产生与激励线圈频率相等的感应电压信号。同时，感应电压信号将反映出活塞杆与绕线缸体之间发生相对运动情况。

双感应线圈式振动能量采集装置是该阻尼器的核心装置，将 MRD 工作时产生的振动能量采集并储存到电路，可在 MRD 断电时为励磁线圈供电，从而使该位移自感应振动能量采集型磁流阻尼器可在各种意外条件时继续发挥减振和位移传感器的作用。

图 2 为双感应线圈式振动能量采集装置原理图，其中 3 组环形永磁铁和 4 个导磁的隔片共同组成定子，感应线圈 1、2 及绕线架共同组成动子。每组永磁铁包括 4 个 N35 型钕铁硼永磁铁；永磁铁之间通过隔片隔离；永磁铁和隔片通过固定销固定于支撑杆。采用不锈钢的绕线架外表面设置两个相同的绕线槽用于缠绕感应线圈 1、2；感应线圈 1、2 两相布置，即当感应线圈 1 产生正向感应电压时，感应线圈 2 中产生相同大小的负向感应电压。MRD 工作时活塞头带动感应线圈 1、2 轴向运动，切割永磁铁激发的磁力线。根据电磁感应定律，感应线圈 1、2 将产生感应电压，通过整流电路和储能电路可实现该感应电压采集。

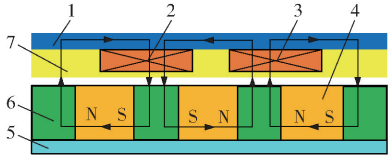


图 2　双感应线圈式振动能量采集装置原理图

Fig. 2　Schematic of vibration energy harvesting device with double induction coil

1. 套筒　2. 感应线圈 1　3. 感应线圈 2　4. 永磁铁　5. 固定销　6. 隔片　7. 绕线架

根据振动能量采集原理，为提高能量采集效能，可增加感应线圈的个数和提高感应线圈处的磁感应强度。为了研究能量采集效能与感应线圈数量的关系，在双感应线圈式的基础上设计了单感应线圈式振动能量采集装置，结构如图 3 所示。单感应线圈式结构与双感应线圈式类似，区别仅在于采用了 2 组永磁铁。在不影响感应线圈周围磁场强弱的前提下，这样不仅使得振动能量采集装置的轴向尺寸减小，同时减少了永磁铁的材料费用。为提高感应线圈处的磁感应强度，应使磁力线尽可能垂直穿过感应线圈，故绕线架的导磁性应尽可能弱。为研究振动能量采集效能与绕线架导磁性能的关系，在采用不锈钢绕线架（弱导磁性）的基础上，同时加工了不导磁的 PLA 绕线架。

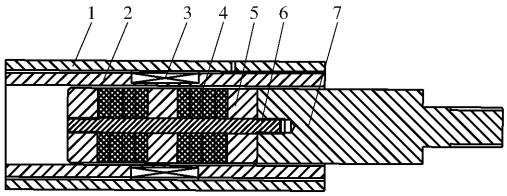


图 3　单感应线圈式振动能量采集装置结构图

Fig. 3　Structure schematic of vibration energy harvesting device with single induction coil

1. 套筒　2. 绕线架　3. 感应线圈　4. 永磁铁　5. 隔层　6. 固定销　7. 支撑杆

感应线圈采集的感应电压[23]可表示为

$$E = -N\varphi_g \frac{\pi}{\tau}\sin\left(\frac{\pi}{\tau}z+\theta\right)\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中　N——感应线圈匝数

φ_g——空气气隙磁通量

τ——隔片厚度

t——时间

z——永磁铁与感应线圈之间的相对位移

θ——初始相位角

由式(1)可知，φ_g、N、τ、θ 仅与振动能量采集装置的结构参数有关，故感应电压与永磁铁和感应线圈之间的相对速度呈线性关系。

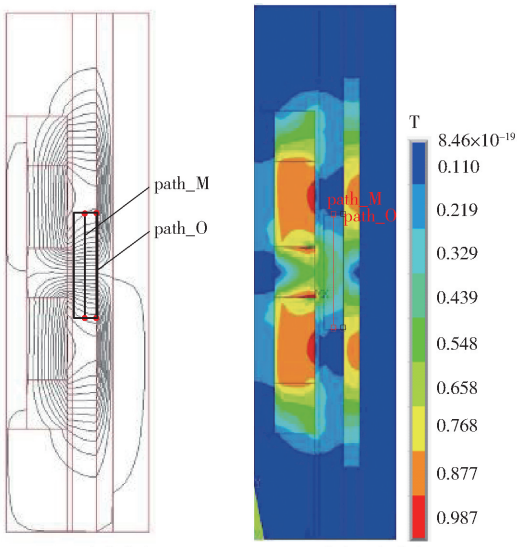
2　能量采集仿真分析

2.1　单感应线圈式振动能量采集装置

由于设计的振动能量采集装置是轴对称结构，在不影响精度条件下取 1/2 的振动能量采集装置二维结构模型作为磁场分析对象。首先建立 MRD 的有限元模型，然后网格划分、电流激励及施加磁力线边界条件，最后通过求解及后处理得到单感应线圈式振动能量采集装置的有限元仿真结果。

图 4a 为单感应线圈式振动能量采集装置的磁力线分布图。由图可知，永磁铁产生的磁力线垂直穿过隔片、空气气隙、绕线架、感应线圈和套筒，形成闭合回路；永磁铁与感应线圈相对运动时使得感应线圈切割磁力线，两组感应线圈将产生感应电压。在固定销、支撑杆和空气气隙处有少许漏磁，这是由于永磁铁的磁场较强，但该部分漏磁对感应线圈的磁感应强度影响可忽略。图 4b 为单感应线圈式振动能量采集装置的磁感应强度云图。由图可知，磁感应强度最大值分布在永磁铁处；空气气隙、绕线架及感应线圈处磁感应强度较低，这是由于该处均采用弱导磁性材料；永磁铁处的最大磁感应强度为 0.987 T，感应线圈处磁感应强度为 0.23 ~ 0.58 T。

建立如图 4 所示的感应线圈中间路径 path_M 和外侧路径 path_O，得到图 5 所示的感应线圈中间



(a) 磁力线分布 (b) 磁感应强度分布

图 4 单感应线圈式振动能量采集装置有限元仿真结果

Fig. 4 Finite element analysis of vibration energy harvesting device with single induction coil

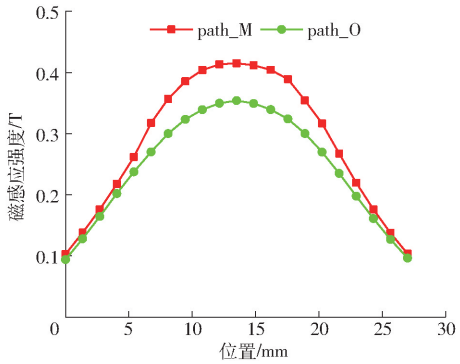


图 5 不同路径磁感应强度分布曲线

Fig. 5 Distribution of magnetic flux density in different paths

路径和外侧路径的磁感应强度分布曲线。其中,中间路径与外侧路径的磁感应强度与位置的关系变化趋势均为先增大后减小,中间路径和外侧路径的最大磁感应强度为 0.41、0.35 T。通过计算得到感应线圈中间路径和外侧路径的平均磁感应强度分别为 0.29、0.25 T。

对单感应线圈式振动能量采集装置采集的能量进行动态仿真,位移激励设定幅值为 7.5 mm、频率为 4 Hz 的正弦激励,得到感应电压如图 6 所示。由图可知,感应电压的频率和激励频率保持一致,感应电压幅值为 1.22 V。

2.2 双感应线圈式振动能量采集装置

为进一步分析振动能量采集装置的能量采集效能与感应线圈个数的关系,采用双感应线圈式振动能量采集装置进行磁场仿真并与单感应线圈式进行对比。图 7a 为双感应线圈式振动能量采集装置的磁力线分布图。与图 4a 类似,在固定销和活塞杆处存在部分漏磁,但主磁场仍然作用于感应线圈 1、2;

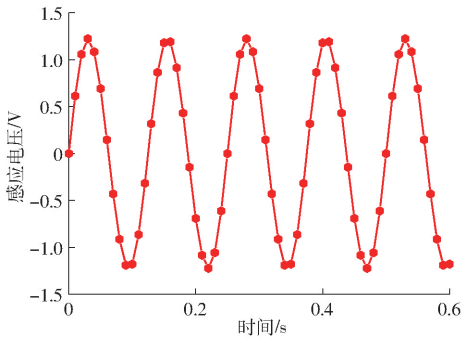
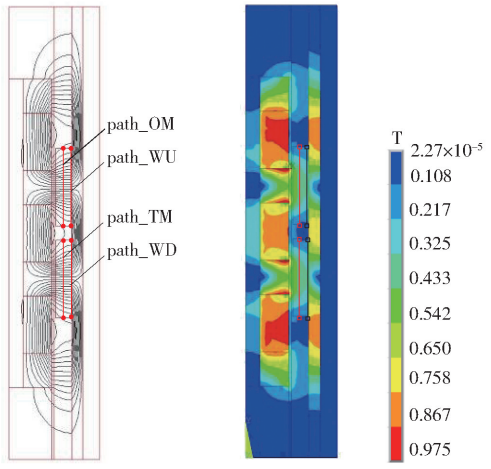


图 6 感应线圈采集到的感应电压

Fig. 6 Induced voltage collected by induction coil



(a) 磁力线分布 (b) 磁感应强度分布

图 7 双感应线圈式振动能量采集装置有限元仿真结果

Fig. 7 Finite element analysis of vibration energy harvesting device with double induction coil

磁力线几乎垂直通过感应线圈。双感应线圈式振动能量采集装置的磁感应强度分布如图 7b 所示。由图可知,永磁铁处的最大磁感应强度为 0.975 T,感应线圈处的磁感应强度为 0.11 ~ 0.56 T。

同理,分别建立如图 7 所示的感应线圈 1、2 处中间路径 path_OM 和 path_TM、外侧路径 path_WU 和 path_WD,得到感应线圈 1、2 中间路径和外侧路径磁感应强度分布曲线如图 8 所示。与图 5 类似,感应线圈 1 中间路径与外侧路径的磁感应强度随位置的增加呈先减小后增大,中间路径和外侧路径的

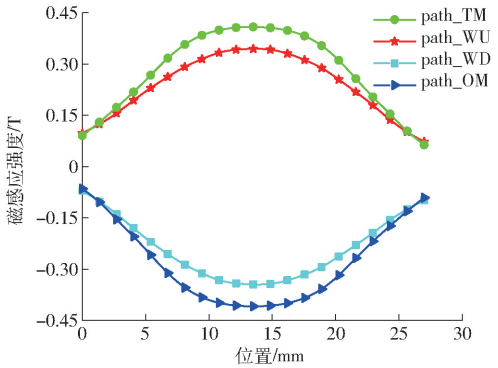


图 8 不同路径磁感应强度分布曲线

Fig. 8 Distribution of magnetic flux density in different paths

最大磁感应强度为 0.41、0.34 T。感应线圈 2 中间路径与外侧路径的磁感应强度随位置的增加呈先增大后减小，中间路径和外侧路径的最大磁感应强度为 0.41、0.33 T。通过计算得到感应线圈 1 中间路径和外侧路径的平均磁感应强度分别为 0.29、0.24 T，感应线圈 2 中间路径和外侧路径的平均磁感应强度分别为 0.29、0.24 T。对比图 5 可知，单、双感应线圈式的磁感应强度基本一致。

对双感应线圈式振动能量采集装置采集到的能量进行动态仿真，位移激励设定幅值为 7.5 mm、频率为 4 Hz 的正弦激励，得到感应线圈 1、2 采集到的感应电压如图 9 所示。与图 6 类似，感应线圈 1、2 采集到的感应电压的频率和激励频率保持一致，感应线圈 1、2 采集到的感应电压信号初始相位角差 180°；感应线圈 1、2 采集到的感应电压幅值相等，均为 1.22 V。综上所述，双感应线圈式的感应线圈 1、2 采集到的感应电压与单感应线圈式采集到的感应电压几乎相同，故双感应线圈式的采集效能约为单感应线圈式 2 倍。

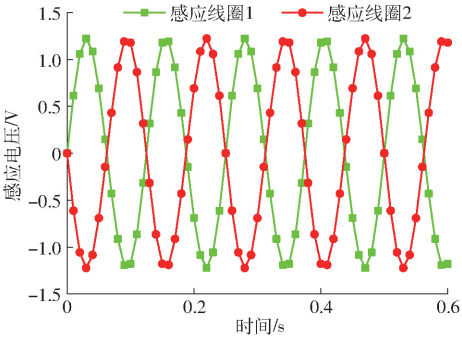


图 9　感应线圈 1、2 采集到的感应电压

Fig. 9　Induced voltages collected by induction coil 1 and 2

3　振动能量采集装置采集效能测试分析

3.1　性能测试系统

加工的 MRD 样机如图 10 所示，同时搭建了振动能量采集装置性能测试系统，如图 11 所示。其中直流电源分别为 MRD 提供直流电；激振器产生不同类型激励信号；试验时将 MRD 的上下端分别通过夹具固定在试验台，设定激励信号的幅值和频率后激振器带动 MRD 的活塞头上下往复运动；激振器上安装有位移传感器（LVDT）和压力传感器，压力传感器信号直接传输到计算机控制端，位移信号和感应电压信号通过采集卡传输到计算机信号采集系统。



（a）零件图　　（b）装配图

图 10　自感应振动能量采集型磁流变阻尼器样机

Fig. 10　Prototype of proposed MRD

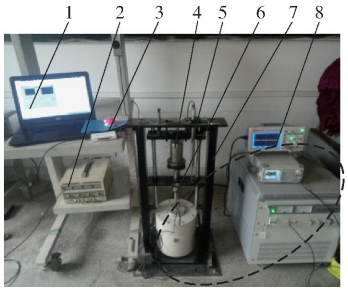


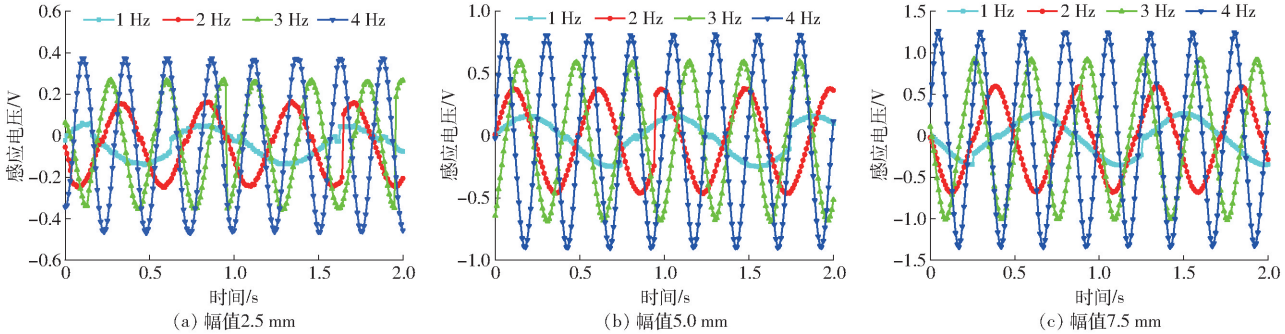
图 11　振动能量采集性能测试系统

Fig. 11　Experiment test system of proposed MRD

1. 信号采集系统　2. 直流电源　3. 采集卡　4. MRD　5. LVDT　6. 压力传感器　7. 试验台架　8. 激振器

3.2　单感应线圈式

将单感应线圈式振动能量采集装置安装于振动试验台上进行振动能量采集试验，分别设定正弦位移激励幅值为 2.5、5.0、7.5 mm，频率设置为 1、2、3、4 Hz，并通过采集卡将感应电压采集到计算机数据采集系统，得到不同幅值和频率下的感应电压变化曲线如图 12 所示。由图 12 可知，单感应线圈式采集到的感应电压呈现正弦曲线，感应电压频率和激



（a）幅值2.5 mm　　（b）幅值5.0 mm　　（c）幅值7.5 mm

图 12　不同幅值和频率下的感应电压变化曲线

Fig. 12　Induced voltage under different displacement amplitudes and frequencies

励频率保持一致,且感应电压随激励频率的增大而增大。

根据图 12 的感应电压分布,建立不同幅值下感应电压幅值随频率变化曲线如图 13 所示。由图 13 可知,当激励频率固定时,感应电压幅值随激励幅值的增加而增加;当激励幅值固定时,感应电压幅值随激励频率的增加而线性增加,这与式(1)中感应电压与相对速度线性关系相一致。

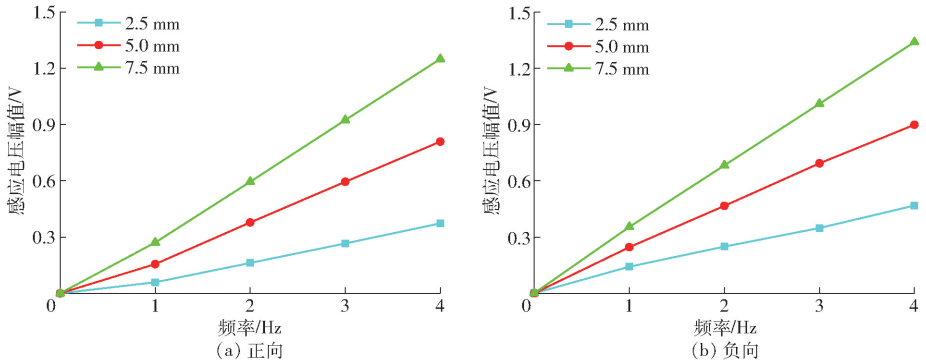


图 13 不同幅值下感应电压幅值随频率变化曲线

Fig. 13 Induced voltage with frequency under different displacement amplitudes

当激励幅值为 7.5 mm,频率分别为 1、2、3、4 Hz 时,感应电压幅值的试验值和仿真值如图 14 所示。当激励幅值为 7.5 mm、频率为 4 Hz 时,单感应线圈式振动能量采集装置采集的感应电压幅值为 1.342 V;感应电压幅值的试验值与仿真值几乎相等;当激励频率较小时,两者几乎没有误差,当激励频率为 4 Hz 时,两者最大偏差仅为 5.58%,并不影响单感应线圈式能量采集装置的采集效能。单感应线圈式的最大能量采集功率计算式为

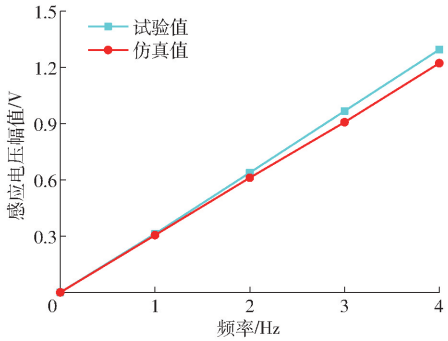


图 14 感应电压幅值仿真值与试验值对比

Fig. 14 Comparison of induced voltage between simulation and experimental tests

$$P=\frac{U^2}{R} \tag{2}$$

式中 P——能量采集功率,W

U——感应电压,V

R——感应线圈电阻,取 2.1 Ω

计算得 P 为 0.86 W。

3.3 双感应线圈式

为方便进行感应电压的信息采集,将感应线圈 1 的负向与感应线圈 2 的正向相连。分别设定正弦位移激励幅值为 2.5、5.0、7.5 mm,频率设置为 1、2、3、4 Hz,得到不同幅值和频率下的感应电压变化曲线如图 15 所示。与图 12 所示单感应线圈式采集到的感应电压变化规律类似,感应电压的频率和激励频率保持一致,且感应电压随激励频率的增大而增大。

图 16 为不同幅值下感应电压幅值随频率的变化曲线。当激励频率固定时,感应电压幅值随激励幅值的增加而增加;当激励幅值固定时,感应电压幅值与激励频率的增加而线性增加。

当激励幅值为 7.5 mm,频率分别为 1、2、3、4 Hz 时,将试验所得的正、负向感应电压幅值取平均值得

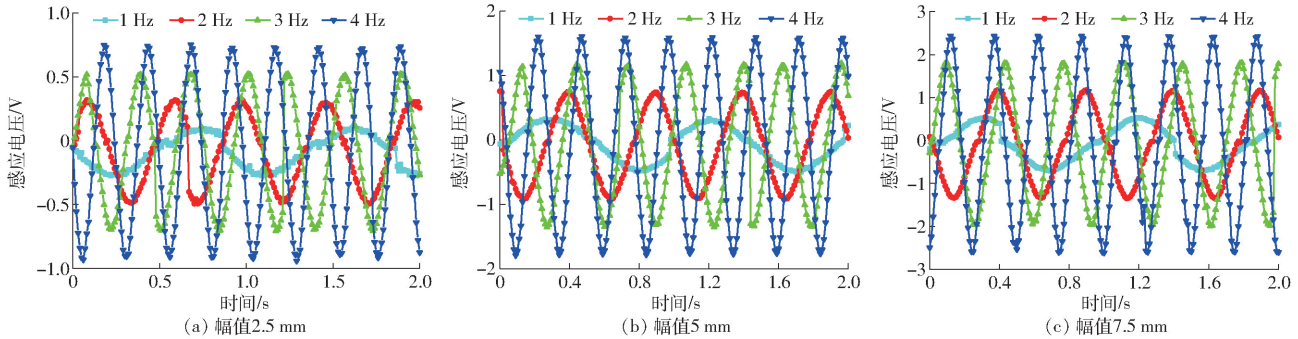


图 15 不同幅值和频率下的感应电压变化曲线

Fig. 15 Induced voltage under different displacement amplitudes and frequencies

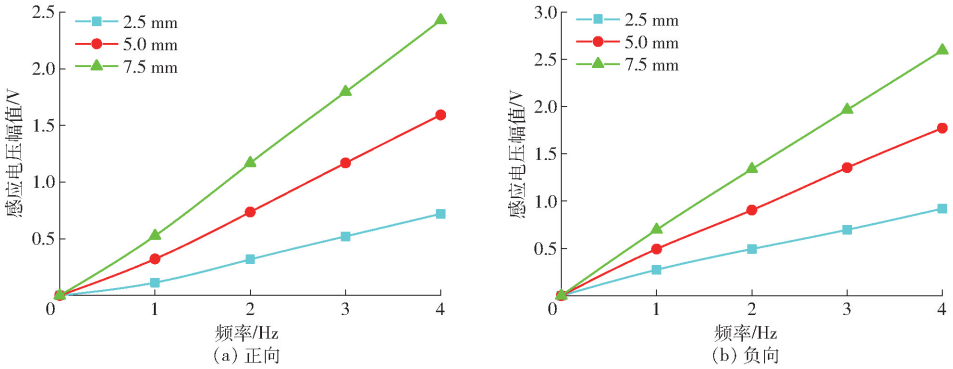


图 16　不同幅值下感应电压幅值随频率变化曲线

Fig. 16　Induced voltage amplitudes with frequency under different displacement amplitudes

到感应电压幅值，并与仿真所得感应电压幅值进行对比，结果如图 17 所示。与图 14 类似，激励幅值为 7.5 mm、频率为 4 Hz 时，双感应线圈式振动能量采集装置采集的感应电压幅值为 2.512 V；激励频率为 4 Hz 时，试验和仿真值最大偏差仅为 2.65%。利用式(2)计算得到双感应线圈式的能量采集功率为 1.5 W，为单感应线圈式的 1.74 倍。

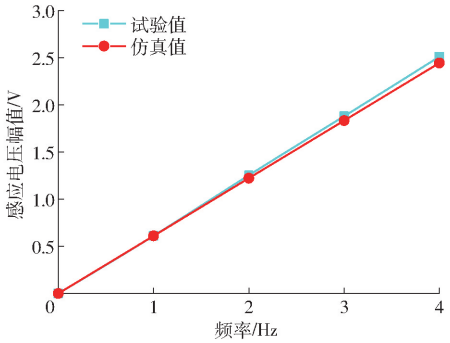


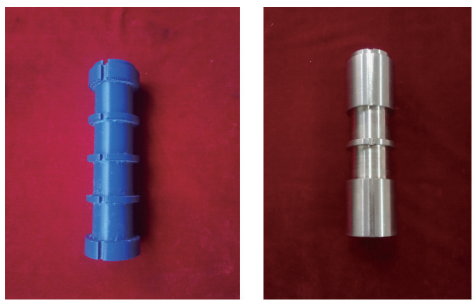
图 17　感应电压幅值的仿真值与试验值对比

Fig. 17　Comparison of induced voltage between simulation and experimental tests

综上所述，与单感应线圈式振动能量采集装置相比，双感应线圈式振动能量采集装置采集的平均感应电压幅值约为其 2 倍，说明增加感应线圈数量将成倍增加感应电压幅值。但增加感应线圈数量同时也增加了振动能量采集装置的轴向尺寸和质量，使得多感应线圈式振动能量采集装置很难安装在尺寸受限和移动式系统中。故在设计振动能量采集装置时需综合考虑采集的电能(感应电压)及其适用场合，如结构尺寸、安装空间和质量等。

3.4　绕线架导磁性能对能量采集效能的影响

加工的不导磁 PLA 绕线架和弱导磁性不锈钢绕线架如图 18 所示，用于分析绕线架导磁性能对能量采集效能的影响。将 PLA 绕线架装配到双感应线圈式振动能量采集装置中，并在振动试验台上进行振动能量采集试验。分别设定正弦位移激励幅值为 2.5、5.0、7.5 mm，频率设置为 1、2、3、4 Hz，得到不同幅值和频率下的感应电压时间曲线如图 19 所示。与图 15 所示低导磁性的不锈钢绕线架类似，采用 PLA 绕线架的振动能量采集装置采集的感应电压频率和激励频率保持一致，且感应电压随着激励频率的增大而增大。



(a) PLA绕线架　(b) 不锈钢绕线架

图 18　不同导磁性的绕线架

Fig. 18　Prototype of winding frame with different magnetic conductivities

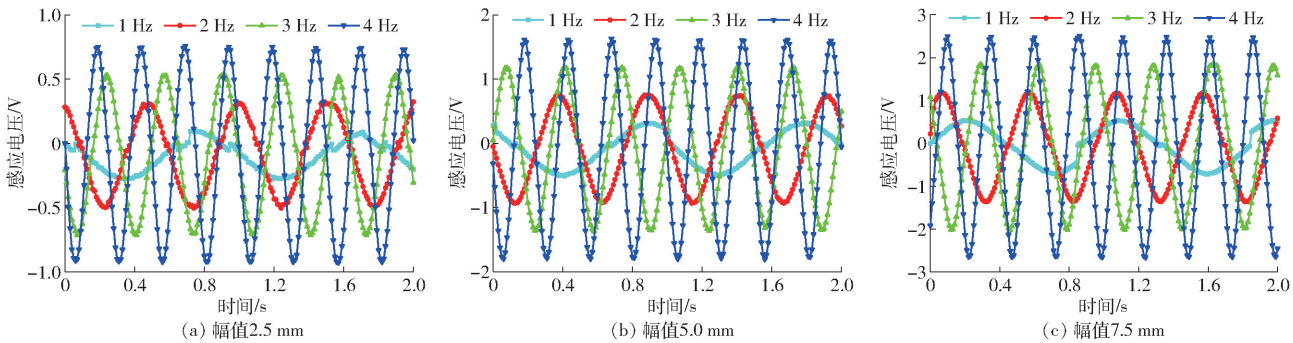


图 19　不同幅值和频率下的感应电压变化曲线

Fig. 19　Induced voltage under different displacement amplitudes and frequencies

同理,在幅值为 7.5 mm、频率为 4 Hz 的正弦位移激励下,得到采用 PLA 和不锈钢绕线架的感应电压幅值如图 20 所示。由图可知,采用 PLA 绕线架采集到的感应电压幅值与采用不锈钢绕线架采集到的感应电压幅值变化规律一致;在相同位移下,随着频率的增加,两者的感应电压幅值几乎相同,说明弱导磁性与不导磁绕线架的能量采集效能几乎相同。

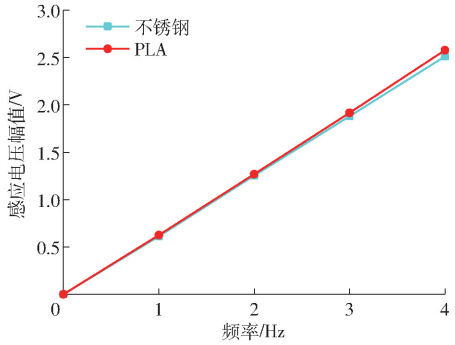


图 20 不锈钢与 PLA 绕线架的感应电压幅值对比

Fig. 20 Comparison of induced voltage amplitude between stainless steel and PLA winding frame

4 结论

(1)振动能量采集装置采集的感应电压随激励频率的增加而线性增加。位移激励幅值 7.5 mm、频率 4 Hz 时,双感应线圈式振动能量采集装置采集的感应电压幅值为 2.512 V、能量采集功率为 1.5 W,而单感应线圈式振动能量采集装置采集的感应电压幅值为 1.342 V、能量采集功率为 0.86 W,说明双感应线圈式的能量采集效能约为单感应线圈式的 2 倍。

(2)采用 PLA 绕线架的双感应线圈式振动能量采集装置采集到的感应电压幅值与采用不锈钢绕线架的感应电压幅值几乎相同,说明弱导磁性绕线架与不导磁绕线架的能量采集效能几乎相同。

(3)所设计的磁流变阻尼器结构紧凑、安装尺寸小,具有振动能量采集效能高的优点。

参 考 文 献

[1] HENRIE A J M, CARLSON J D. Magnetorheological fluids[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2002, 252(3): 224 - 228.

[2] KUBÍK M, MACHÁČEK O, STRECKER Z, et al. Design and testing of magnetorheological valve with fast force response time and great dynamic force range[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(4): 047002.

[3] TU J W, YU Y, HUANG L, et al. Research on new type viscoelastic damper based on MRE smart material: design, experiment and modelling[J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(Supp. 2): 243 - 249.

[4] SHARMA S. Vibration control in quarter-car model with magnetorheological dampers using bingham model[J]. Journal of Applied Mechanical Engineering, 2018, 7(1): 299 - 304.

[5] 胡国良, 刘丰硕, 刘浩, 等. 位移差动自感式磁流变阻尼器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 383 - 389,397.
HU Guoliang, LIU Fengshuo, LIU Hao, et al. Design and experiment of novel dispalcement differential self-induced magnetorheological damper[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 383 - 389, 397. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20171147 & journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.047. (in Chinese)

[6] CHEN Z H, LAM K H, NI Y Q. Enhanced damping for bridge cables using a self-sensing MR damper[J]. Smart Material Structures, 2016, 25(8): 085019.

[7] RIZZO R, MUSOLINO A, LAI H C. An electrodynamic/magnetorheological clutch powered by permanent magnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(2): 1 - 7.

[8] AHAMED R, FERDAUS M M, LI Y. Advancement in energy harvesting magneto-rheological fluid damper: a review[J]. Korea-Australia Rheology Journal, 2016, 28(4): 355 - 379.

[9] LI Z, ZUO L, LUHRS G, et al. Electromagnetic energy-harvesting shock absorbers: design, modeling, and road tests[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(3):1065 - 1074.

[10] SUN S, YANG J, LI W, et al. Development of an MRE adaptive tuned vibration absorber with self-sensing capability[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(9): 095012.

[11] CHEN C, LIAO W H. Design and analysis of a self-powered, self-sensing magnetorheological damper[J]. Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering, 2011, 26(1): 16 - 28.

[12] CHAO C, LIAO W H. A self-sensing magnetorheological damper with power generation[J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(2): 025014.

[13] 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.

[14] BOGDAN S. Vibration power generator for a linear MR damper[J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(10): 105012.

[15] BAI X X, WERELEY N M. A fail-safe magnetorheological energy absorber for shock and vibration isolation[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(17): 17B535.

[16] CHEN C, ZOU L, LIAO W H. Regenerative magnetorheological dampers for vehicle suspensions[C]// Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2015. International Society for Optics and Photonics, 2015, 9435: 94353K.

[17] LI Z, ZUO L, KUANG J. Energy-harvesting shock absorber with a mechanical motion rectifier[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(2): 025008.

[18] 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 & Structures, 2014, 23(7): 07700.

[19] BAI X, ZHONG W M, ZOU Q, et al. Principle, design and validation of a power-generated magnetorheological energy absorber with velocity self-sensing capability[J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(7): 256 - 268.

[20] BOGDAN S, MACIEJ R, MARCIN W. Evaluation of an energy harvesting MR, damper-based vibration reduction system[J]. Journal of Theoretical & Applied Mechanics, 2015, 311(2): 758 - 769.

[21] 胡国良, 刘丰硕, 卢昀. 功能集成型磁流变阻尼器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 384 - 390.
HU Guoliang, LIU Fengshuo, LU Yun. Design and experiment of multi-functional magnetorheological damper[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 384 - 390. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20161152&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.052. (in Chinese)

[22] HU Guoliang, LU Yun, SUN Shuaishuai, et al. Performance analysis of a magnetorheological damper with energy harvesting ability[J]. Shock and Vibration, 2016:2959763.

[23] HU Guoliang, LU Yun, SUN Shuaishuai, et al. Development of a self-sensing magnetorheological damper with magnets in-line coil mechanism[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 255(5): 71 - 78.

(上接第 390 页)

[19] MAULIK U, BANDYOPADHYAY S. Geneticalgorithm-based clustering technique[J]. Pattern Recognition, 2000, 33(9): 1455 - 1465.

[20] 蒋波. 基于主成分分析和归一化 RBF 神经网络优化的财务综合评价[J]. 系统工程, 2009, 27(9): 87 - 90.
JIANG Bo. Comprehensive financial evaluation based on principal component analysis and normalized RBF neural network optimization [J]. Systems Engineering, 2009, 27(9): 87 - 90. (in Chinese)

[21] 王桂娟, 徐红东, 王佐勋, 等. 基于 MATLAB 仿真的神经网络控制器的设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(3): 742 - 745.
WANG Guijuan, XU Hongdong, WANG Zuoxun, et al. Design and implementation of neural network controller based on MATLAB simulation [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(3): 742 - 745. (in Chinese)

[22] 王彪, 沈春林. 利用遗传算法进行稠密视差图估计[J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(2): 184 - 191.
WANG Biao, SHEN Chunlin. Dense disparity map estimation using genetic algorithms[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 35(2): 184 - 191. (in Chinese)

[23] 张栋, 焦嵩鸣, 刘延泉. 互补滤波和卡尔曼滤波的融合姿态解算方法[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(3): 62 - 65, 69.
ZHANG Dong, JIAO Songming, LIU Yanquan. A fusion attitude solution method based on complementary filtering and Kalman filtering [J]. Sensors and Microsystems, 2017, 36(3): 62 - 65, 69. (in Chinese)

[24] RAO B S, DURRANT-WHYTE H F. Fully decentralised algorithm for multisensor Kalman filtering[J]. IEE Proceedings. Part D, 1991, 138(5): 413 - 420.

[25] 成英燕, 李夕银. 适用于不同椭球的高斯平面坐标正反算的实用算法[J]. 测绘科学, 2004, 29(4): 26 - 27, 84.
CHENG Yingyan, LI Xiyin. Practical algorithm for forward and inverse calculation of Gaussian plane coordinates of different ellipsoids [J]. Science of Surveying and Mapping, 2004, 29(4): 26 - 27, 84. (in Chinese)

[26] HU Wusheng, SHA Yuejin. A new method for transforming GPS elevation based on neural network[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2003(1): 53 - 57.

[27] 王解先, 王军, 陆彩萍. WGS - 84 与北京 54 坐标的转换问题[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(3): 70 - 73.
WANG Jiexian, WANG Jun, LU Caiping. The conversion problem between WGS - 84 and Beijing 54 coordinates [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2003, 23(3): 70 - 73. (in Chinese)