

文章编号:1006-1355(2014)06-0184-04

## 新型磁流变弹性体隔振器关键技术

李 季<sup>1</sup>, 赵 韩<sup>1</sup>, 梁天也<sup>2</sup>, 王少万<sup>3</sup>, 李志远<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 机械与汽车工程学院, 合肥 230000;

2. 吉林大学 机械学院, 吉林 132000;

3. 安徽微威胶件集团有限公司, 安徽 桐城 231400)

**摘 要:**磁流变弹性体是近年来广泛应用的一种新型智能隔振材料,它继承了磁流变液的可控、可逆、响应速度快等优良性能,同时具有稳定性好、不易磨损和不易沉降等特点,广泛应用于高新技术隔振领域。以橡胶作为基体研制出的新型磁流变弹性体,充分利用磁流变弹性体刚度和阻尼可控的特性,设计一款新型磁流变弹性体隔振器,对其在不同外加控制电流和激励频率下的振动响应特性进行了试验研究,试验结果表明在外加电流的改变下,该隔振器刚度相应改变,从而引起固有频率的改变,达到宽频隔振的效果。

**关键词:**振动与波;磁流变;弹性体;隔振器;振动响应

中图分类号:O422.6

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1335.2014.06.041

## Key Technology of a New-type Magnetorheological Elastomer Vibration Isolator

LI Ji<sup>1</sup>, ZHAO Han<sup>1</sup>, LIANG Tian-ye<sup>2</sup>, WANG  
Shao-wan<sup>3</sup>, LI Zhi-yuan<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology,  
Hefei 230000, China; 2. School of Mechanical Engineering, Jilin University, Jilin 132000, China;  
3. Anhui Weiwei Rubber Parts Group Co. Ltd., Tongcheng 231400, Anhui China)

**Abstract:** Magnetorheological elastomer (MRE) is a new-type smart vibration isolation material, which is widely used in recent years. It not only has the traditional advantages of MRF such as controllable, reversible and fast response characteristics, but also has the characteristics of good stability, wear-resisting and anti-settling. It is widely used in high-tech vibration isolation fields. In this article, a new-type MRE with rubber as matrix was developed. According to MRE controllable stiffness and damping characteristic, a new MRE vibration isolator was designed and the vibration response characteristics under different external controlled current and excitation frequency were tested experimentally. The test results show that when the external current changes, the vibration isolator stiffness also changes, so that the natural frequency also changes and the effect of the broadband vibration isolation is achieved.

**Key words:** vibration and wave; magnetorheology; elastomer; vibration isolator; vibration response

磁流变弹性体(magnetorheological elastomer, MRE)作为一种新型智能材料,因其优良的性能正逐渐成为国内外工程技术人员关注的热点。磁流变

弹性体的制备最早可以追溯到1995年,日本丰田中心研发实验室的Shiga等<sup>[1]</sup>使用硅橡胶与铁粉混合制备出一种磁性凝胶。美国福特汽车的Ginder等1997年以来对MRE的力学模型、基于天然胶的MRE以及在汽车减振装置上的应用等方面进行了研究<sup>[2-4]</sup>。近年来,瑞典、俄罗斯、新加坡、澳大利亚等国家的研究人员也在进行磁流变弹性体的研究<sup>[5]</sup>。我国磁流变弹性体的研究起步较晚,中国科学技术大学的龚兴龙教授等首先对MRE进行了研究,制备了磁流变弹性体样品,为MRE性能的改进

收稿日期:2014-02-24

基金项目:国家新能源汽车产业技术创新工程项目、国家科技支撑计划资助项目(2013BAG08801)

作者简介:李季,男,安徽桐城人,硕士生,主要研究方向:电动汽车动力学分析,磁流变弹性体悬置。

E-mail: lij3319717@126.com。

通信作者:赵韩,男,安徽宿州人,博士生导师。

和工程应用奠定了基础<sup>[6,7]</sup>。

目前MRE尚处于研究阶段,本文结合前人的研究成果,从磁流变基体的选择到预硫化装置的设计,提出一种新型的制备方案。该方案经济适用,易于操作,制出的MRE材料具有较高的磁流变效应、良好的材料力学性能。并且以此材料设计一种新型闭路导磁体磁流变弹性体隔振器,通过调节线圈绕组的电流大小,实现对磁场强弱控制,进而控制磁流变弹性体的刚度及阻尼,隔振器通过主动改变系统的固有频率达到移频减振的目的,实现宽频带的振动隔离。

## 1 MRE的制备与检测

### 1.1 配方研制

MRE材料配方主要由以下三类材料组成:基体材料、软磁性颗粒、合理的添加剂。基体材料的选择对磁流变弹性体的性能起了至关重要的作用。基体材料目前常见的有硅橡胶<sup>[8]</sup>、天然胶、聚氨酯橡胶<sup>[9]</sup>。本配方采用顺丁胶为基体,它不仅能产生较好的磁致效应,还具有高强度低硬度的良好力学特性。其邵氏硬度最低能达到18度,可以起到良好的低频隔振效果。软磁性颗粒选择国产羰基铁粉,为了增加软磁材料与胶体之间的结合力,选用偶联剂进行表面处理。为了达到预期效果,还添加一定比例的添加剂<sup>[10]</sup>。

将一定比例的块状顺丁胶放到双筒炼胶机上进行炼制,再按照一定顺序加入各种添加剂和羰基铁粉,使其混炼均匀,最后得到混合均匀的胶体。

### 1.2 预结构化成型

混炼胶在固化的过程中按照固化方式的不同可分为无磁场固化和有磁场固化,由此得到的MRE材料的内部结构也不同,前者磁性粒子在集体中均匀分布,被称为各项同性MRE,后者在基体中定向排列成链状结构,被称为各项异性MRE。各项异性MRE一般具有更高的磁流变效应和磁致模量变化,故本试验采用有磁场固化制备各项异性MRE。

对于MRE材料的预结构化装置,目前市场上有专门的磁热耦合硫化装置(如图1所示)可供采购,该装置通过上下两组通电线圈产生强磁场,通过控制装置控制时间、温度等条件实现预结构化,但是价格昂贵,浪费电能,因此本试验自行设计一款新型的预结构化装置,该装置采用高强度永久磁铁材料钕铁硼代替电磁线圈,大大简化装置结构。

磁流变预结构化装置如图2、3所示,由温度控制装置、气缸装置和底板3组成,温度控制装置由温

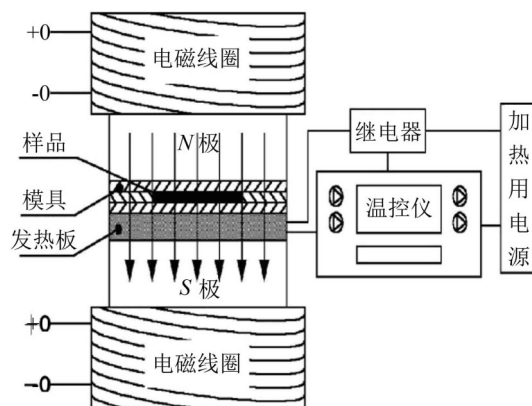


图1 磁热耦合硫化装置示意图

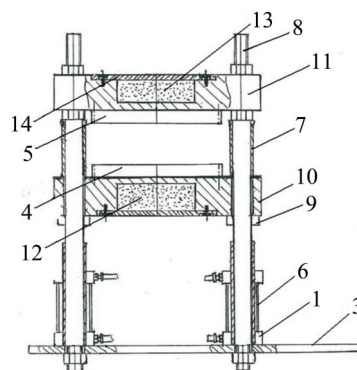


图2 预结构化装置主视图

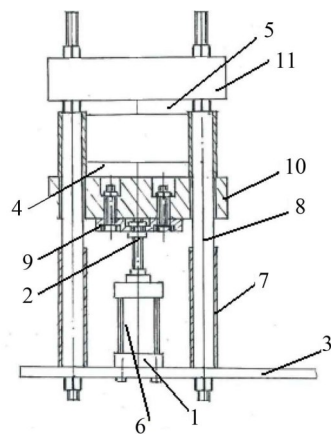


图3 预结构化装置左视图

度继电器、时间继电器组成,气缸装置包括气缸6和换向阀,四个导柱8呈四边形固定在底板3上,导柱8下端通过六角螺母固定在底板3上,气缸6的自由端1通过螺栓固定在底板3上,气缸6的伸缩端2固定在顶板9的中部,顶板9上侧与下模10接触。下模10通过四个对应的圆孔套装在导柱8上。导柱8上还设有上模11,上模11也设有与四个导柱8相对应的圆孔,通过圆孔套装在导柱8上,圆孔上下两侧有六角螺母,将上模11固定。下模10底侧中部位置内嵌有第一磁铁12,下模10上侧固定有下加热板4,上模11上侧中部位置内嵌有第二磁铁13,上模11底侧

固定有上加热板5,第一磁铁12和第二磁铁13相对面的极性相反,第一磁铁12和第二磁铁13的下侧和上侧加盖有盖板14。预结构化装置实物如图4所示。

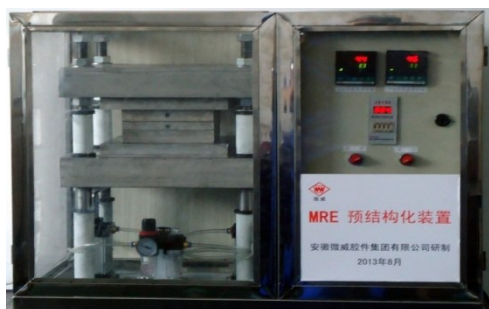


图4 预结构化装置实物图

将混炼后的胶体放入铝制模具中,随后将模具放置于钕铁硼磁铁架构磁场中的电加热板上,保持恒温80℃,保温至足够时间后,将装有预结构化后磁流变弹性体的铝质模具放进硫化机,硫化条件153℃~160℃,一段时间后即得到成型的磁流变弹性体(如图5所示)。



图5 磁流变弹性体成品

### 1.3 材料试片性能检测分析

为检测磁流变弹性体材料力学性能,制作专门试片分别用拉力测试仪和刚度测试仪做拉力实验和静刚度实验。结果表明该材料拉伸强度与扯断伸长率均符合材料性能要求。图6所示为力一位移变化曲线,根据结果分析其静刚度满足材料性能要求。

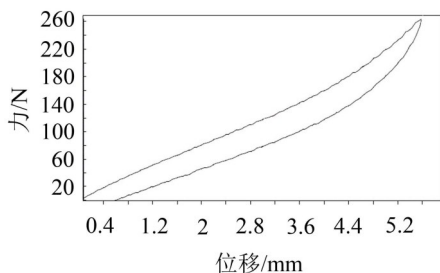


图6 试片力一位移变形曲线

## 2 磁流变弹性体隔振器的研制

传统的隔振器的弹性元件采用橡胶或弹簧,这类隔振器结构简单、造价较低,一旦结构设定,系统的固有频率不能改变,只对特定频率的激励隔振效

果较好,隔振频带窄,不能适应宽频带的隔振要求,无法适应变频工况下的隔振。磁流变弹性体是一种刚度可调的智能材料,具有控制能耗低、响应速度快、连续控制等特点,可以用来研制变刚度的主动隔振器,实现不同工况下宽频带的最佳隔振。

### 2.1 磁流变弹性体隔振原理

由于磁流变弹性体的磁致效应,即在磁场作用下,磁流变弹性体内部颗粒被磁化后,产生相互作用力。当磁流变弹性体受到形变时,这些磁力在其内部形成反向力矩,增强材料抵抗变形能力,这种能力是随着磁场变化而变化的,从宏观上表现为MRE弹性模量随磁场变化<sup>[11]</sup>。

随着外加磁场增加时,磁流变弹性体的弹性模量变大,在受力方向上的刚度也随之变大,从而导致系统的固有频率增大。磁流变弹性体隔振器的隔振原理,就是指通过控制通电线圈电流的大小改变磁场的强度,从而控制磁流变弹性体的弹性模量,最终达到控制隔振系统的固有频率目的,使之远离外界激励的频率,使被保护对象的振动减小。

### 2.2 MRE隔振器的设计

图8为本文设计的闭路磁体磁流变弹性体隔振器,该隔振器由动导磁块1、导磁上盖板2、导磁筒体3、线圈绕组4、磁流变弹性体5和导磁支撑底座6组成。导磁上盖板2一端固定在导磁筒体3上,另一端与动导磁块1的两侧连接,动导磁块1和导磁支撑底座6之间安装有磁流变弹性体5,磁流变弹性体5与两侧的导磁筒体3之间固定线圈绕组4,导磁支撑底座6两端与导磁筒体3通过六角螺母固定。

当直流电源提供给线圈绕组4直流电,产生磁场。动导磁块1、导磁上盖板2、导磁筒体3、磁流变弹性体5、导磁支撑底座6构成电磁回路。通过调节线圈绕组4电流大小,实现磁场强弱控制,随着磁场强弱变化,磁流变弹性体的刚度发生变化,进而改变系统的固有频率,实现系统宽频带的隔振与降噪。

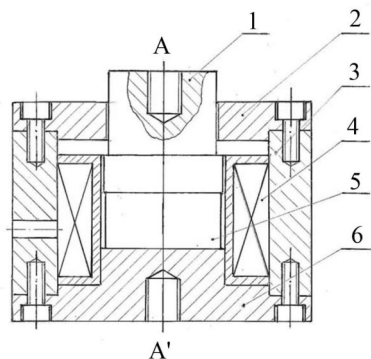


图7 隔振器机构示意图



## 2.3 振动响应试验研究

如图8振动实验结构框图所示,MRE隔振器通过铝板固定于振动试验台上,隔振器上方放置一块质量为 $M$ 的铁块作为发动机的模拟质量。信号分析仪在计算机控制下发出的正弦信号经过功率放大器作用于振动实验台,提供输入激励;计算机同时发出的控制信号控制直流电源的大小作用于隔振器内部的励磁线圈,两个加速度传感器分别安装在基座和配重块上,将所测量的输入和输出的响应信号传输至信号分析仪进行频谱分析,分析结果由计算机显示输出。图9为试验平台实物图。

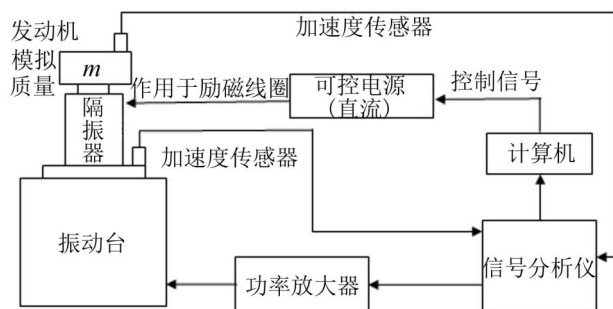


图8 振动实验结构框图



图9 试验平台实物图

根据固有频率公式

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k(i)}{m}}$$

其中 $f_n$ 为隔振器与模拟质量振动系统的固有频率, $k(i)$ 为刚度, $m$ 为质量。

由公式可以看出隔振器的刚度随着外加电流的改变而改变,从而引起了隔振器的固有频率的改变。通过频谱分析仪分析表明,共振频率与电流的对应关系,如图10所示,电流的大小从0 A变化到4.5 A,共振频率也发生相应改变,变化范围11.5 Hz~14.5 Hz。由此可以看出随着电流的不断增加,其刚度发生变化,隔振器共振频率明显发生偏移,与预期的推理一致。

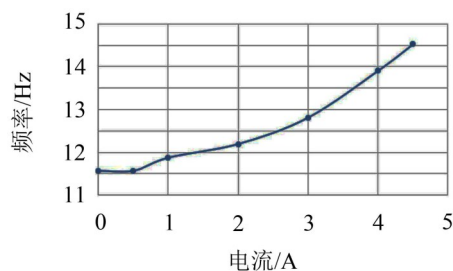


图10 共振频率值与电流的关系

## 3 结语

本文通过自主设计的磁流变弹性体预结构化装置研制出具有高强度低硬度的磁流变弹性体,并且根据弹性体材料合理设计出一种新型结构的主动隔振装置,试验证明在外加电流的改变下,该隔振器刚度相应改变,从而引起固有频率的改变,达到宽频隔振的效果,有利于形成自主知识产权的主动隔振器。

参考文献:

- [1] Shiga T, Okada A, Kurauchi T. Magnet viscoelastic behavior of composite gels[J]. *J. Appl Polym Sci*, 1995, 58: 787.
- [2] Ginder J M, Schlotter W F, Nichols M E. Magnetorheological elastomers intunable vibration absorbers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4331: 103.
- [3] Ginder J M, Nichols M E, Elie L D. Controllable-stiffness components based on magnetorheological elastomer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 3985: 418.
- [4] Ginder J M, Clark S M, Schlotter W F. Magnetostrictive phenomena in magnetorheological elastomers[J]. *Int. J. Modern Phys B*, 2002, 16: 2412.
- [5] 杜林平, 孙树民. 磁流变阻尼器在结构振动控制中的应用[J]. *噪声与振动控制*, 2011, 31(2): 127-130+133.
- [6] 党辉, 龚兴龙, 张培强. 无磁场制备的磁流变弹性体的一种物理模型[J]. *中国科学技术大学学报*, 2005, 36(4): 398.
- [7] 龚兴龙, 李剑锋, 张先舟, 等. 磁流变弹性体力学性能测量系统的建立[J]. *功能材料*, 2006, 37(5): 733.
- [8] DONG Xu-feng, MA Ning, QI Min, et al. The pressure-dependent MR effect of magnetorheological elastomers [J]. *Smart Materials & Structures*, 2012, 21(7): 1-7.
- [9] Boczkowska A, Awietjan S F. Smart composites of urethane elastomers with carbon iron [J]. *Journal of Materials Science*, 2009, 44( 15): 4104-4111.
- [10] 王宇飞, 何琳, 杨雪. 磁流变弹性体隔振器设计中若干问题[J]. *噪声与振动控制*, 2011, 31(3): 129-132.
- [11] 余淼, 严小锐, 毛林章. 一种刚度、阻尼可控的新智能材料—磁流变弹性体[J]. *材料导报*, 2007, 7: 103-107.