doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.047

改进阻尼特性的内置平行双线圈磁流变阻尼器研究

金京设[1,2]　陈照波[1]　程　明[1]　于　东[1]　王晓宇[3]

(1.哈尔滨工业大学机电工程学院,哈尔滨 150001;2.金策工业综合大学机械工程系,平壤 999093;
3.中国空间技术研究院,北京 100094)

摘要:提出了一种内置平行双线圈的磁流变阻尼器。推导了径向流和环形流磁流变阻尼器的压降数学模型。比较了具有串联双线圈的常规磁流变阻尼器和所提出的磁流变阻尼器的阻尼性能。分别对提出的磁流变阻尼器和常规磁流变阻尼器进行了电磁分析,从而验证所提出的磁流变阻尼器的原理并获得其磁路的磁特性。利用数值模拟分析比较了 2 种磁流变阻尼器的阻尼性能,分析结果表明内置平行双线圈的磁流变阻尼器具有更好的阻尼性能。依据所提出的磁流变阻尼器的结构原理制作了原型样机,通过实验验证了其阻尼性能的优越性。实验结果显示所提出的磁流变阻尼器的最大阻尼力约是常规磁流变阻尼器的 1.86 倍,等效阻尼约为常规磁流变等效阻尼的 2 倍。

关键词:磁流变阻尼器;径向阻尼间隙;阻尼性能;流动式;平行双线圈;等效阻尼

中图分类号:TH137.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2017)03-0368-08

Magneto-rheological Damper with Parallel Double Coil for Improvement of Damping Performance

KIM Kyongsol[1,2]　CHEN Zhaobo[1]　CHENG Ming[1]　YU Dong[1]　WANG Xiaoyu[3]

(1. *School of Mechatronics Engineering*, *Harbin Institute of Technology*, *Harbin* 150001, *China*
2. *Department of Mechanical Engineering*, *Kim Chaek University of Technology*, *Pyongyang* 999093, *DPR Korea*
3. *Beijing Institute of Spacecraft System Engineering*, *Beijing* 100094, *China*)

Abstract: Magneto-rheological (MR) damper is one kind of dampers using magneto-rheological fluid as the working medium. The design and fabrication of a novel MR damper with parallel double coil are presented. Usually, MR damper with double or multi coil in serial is designed to obtain large damping force. This will lead to increase of MR damper length, and is not fit to limited installation space of length. The structural design of MR damper is focused to obtain required damping performance under limited dimension (especially the length). The technical originality is to propose a new MR damper configuration with the additional radial gap by double coil in parallel. The proposed MR damper is featured by the additional radial gap due to double coil in parallel. The conventional MR damper with serial double coil inevitably has two non-active parts due to its structural features, while the proposed MR damper with parallel double coil has only one non-active part. In addition, the conventional MR damper with serial double coil has four magnetic poles, while the proposed MR damper with parallel double coil has two radial poles in addition to the four magnetic poles. A mathematical model for the proposed MR damper is developed. The conventional MR damper with serial double coil is also considered to compare damping performance with that of the proposed MR damper. The electromagnetic analysis for proposed and conventional MR damper is conducted to validate the principle of the proposed MR damper and obtain the magnetic properties of its magnetic circuit. After numerical comparison of the damping performances for the two MR damper designs, the MR damper with parallel double coil is chosen because of its better performance. The proposed MR damper is fabricated and investigated by means of experiment. According to the measured data, the proposed MR damper can provide much larger controllable damping force and almost twice the equivalent damping of the conventional MR damper.

Key words: magneto-rheological damper; radial damping gap; damping performance; flow mode; parallel double coil; equivalent damping

收稿日期:2016-11-28　修回日期:2016-12-20

基金项目:国家自然科学基金项目(11172075、11372083)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(613235)

作者简介:金京设(1975—),男,博士生,主要从事机械振动控制研究,E-mail:kgs1110@163.com

通信作者:陈照波(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事机械振动控制研究,E-mail:chenzb@hit.edu.cn

引言

磁流变阻尼器是一种以磁流变液作为工作介质的阻尼器，它具有功耗低、阻尼出力可调范围宽、响应迅速以及结构简单等特点。

磁流变液的工作模型可以分为：剪切模式[1]、流动模式[2-5]和挤压式[6-8]。另外，通过组合可以形成混合模式。YAZID 等[9]提出了一种具有剪切和挤压混合工作模式的磁流变阻尼器的概念设计。MUGHNI 等[10]提出了一种由不同模式（剪切-流动和流动模式）通过串联方式布置的新方案。另外，文献[11－14]研究了通过电磁感应装置进行自供电的磁流变阻尼器，它们被广泛应用于车辆悬架减振系统。

文献[15－18]研究了尺寸限制下使磁流变阻尼器获得更大的可控阻尼力范围。MAO 等[15]提出并通过实验测试了一种带有折叠阀的磁流变阻尼器。BAI 等[16]设计了一种在活塞中带有环形径向间隙的磁流变阻尼器，并且通过实验与常规磁流变阻尼器的性能进行了对比。KIM 等[17]设计了一种具有折叠流动模式的新型磁流变阻尼器，建立了数学模型，并进行了实验研究。ICHWAN 等[18]提出了具有蜿蜒流动路径的模块化磁流变阀的新设计方案，从而提高阀的动态性能的可调节性。

本文提出一种具有内置平行双线圈的磁流变阻尼器，以期实现在有限尺寸特别是长度限制下获得所需要的阻尼。基于 Bingham 模型和流体动力学理论，对所提出的磁流变阻尼器的静准态特性进行分析，并对具有串联形式的双线圈常规磁流变阻尼器和所提出的磁流变阻尼器的阻尼性能进行比较。在对两种磁流变阻尼器的阻尼性能进行评估和比较之后，制作阻尼性能较好的内置平行双线圈的磁流变阻尼器。最后，使用液压激振系统对所提出的磁流变阻尼器的性能进行实验测试，并对测试结果进行分析。

1　磁流变阻尼器原理与设计

通常，具有双线圈或多线圈串联的磁流变阻尼器[19]设计用来获得更大的阻尼力，如图 1 所示。但是，这会导致磁流变阻尼器长度的增加，并且不适合有限长度的安装空间。图 2 分别显示了内置平行双线圈的磁流变阻尼器的结构原理，依据原理制作了物理样机，其主要尺寸参数如表 1 所示。

内置平行双线圈的磁流变阻尼器由壳体、外筒、内筒、2 个径向磁极、2 个线圈盖、活塞、2 个外磁极、2 个分隔环、内线圈和外线圈组成，如图 2 所示。垫圈与相应的螺栓同轴安装，用来保证径向间隙的厚度。线圈盖、分隔环、螺栓和垫圈均由非磁性材料制成。

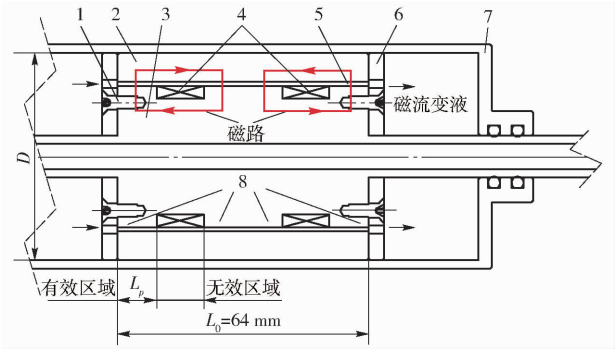


图 1　具有串联双线圈的常规磁流变阻尼器

Fig. 1　Conventional MR damper with serial double coil

1. 螺栓　2. 圆筒　3. 活塞　4. 线圈　5. 环形间隙　6. 活塞盖　7. 壳体　8. 磁极

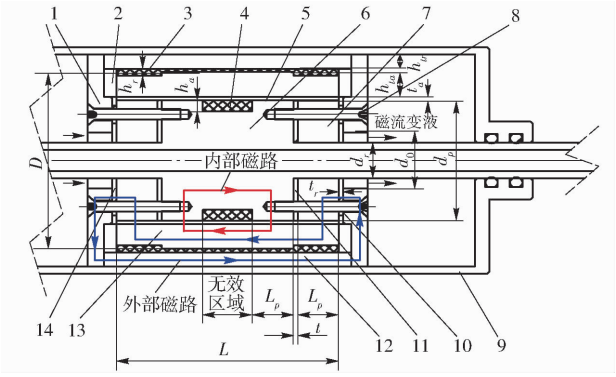


图 2　内置平行双线圈的磁流变阻尼器

Fig. 2　Configuration of MR damper with parallel double coil

1. 径向磁极　2. 线圈盖　3. 外线圈　4. 内线圈　5. 环形间隙　6. 活塞　7. 外磁极　8. 螺栓　9. 壳体　10. 垫圈　11. 分隔环　12. 外筒　13. 内筒　14. 径向间隙

表 1　所提出磁流变阻尼器的主要结构尺寸

Tab. 1　Main structural dimension of proposed MR damper　　mm

参数	数值
活塞部分直径 D	50
活塞直径 d_p	34
径向磁极直径 d_0	16
活塞杆直径 d_r	10
活塞部分长度 L	54
磁极长度 L_p	19
外筒厚度 h_{tr}	4
内筒厚度 h_{ta}	6
环形间隙厚度 t_a	1
径向间隙厚度 t_r	1
分隔环厚度 t	1
内线圈高度 h_a	3
外线圈高度 h_r	2
漆包线直径 d_w	0.5

内置平行双线圈的磁流变阻尼器的结构特点是:具有由径向磁极和外磁极形成的附加径向间隙,且所提出的内置平行双线圈的磁流变阻尼器仅具有一个无效区域。此外,常规磁流变阻尼器具有 4 个磁极,但所提出的磁流变阻尼器除具有 4 个磁极外,还有 2 个径向磁极。因此,不可控的粘性阻尼力可以通过减小无效长度而减小,并且可控的库仑阻尼力可以通过增加附加的径向磁极而增加。

内部线圈和外部线圈平行布置,但附加的径向间隙和环形间隙是串联布置的。如图 2 所示,当活塞部分相对于阻尼器壳体来回运动时,磁流变液从左腔室流入左径向磁极孔,并通过左径向间隙流入环形间隙。然后,通过环形间隙流入右径向间隙,再通过右径向间隙流入右径向磁极孔。最后,磁流变通过右径向磁极孔流入右腔室。

如图 2 所示,所提出的磁流变阻尼器具有 2 个闭合磁路:一个是由内部励磁线圈产生的内部磁路,另一个是由外部励磁线圈产生的外部磁路。由通入电流的内部励磁线圈产生的磁通从活塞的右侧磁极开始,穿越环形间隙后沿着内筒前进,再次穿越环形间隙,然后沿着活塞的左磁极形成闭合的磁场回路。由通入电流的外部励磁线圈产生的磁通从左侧径向磁极开始,沿着外筒前进并通过右径向磁极,再次穿越右径向间隙后沿着右外磁极前进而穿越环形间隙,通过内筒和环形间隙以及左外磁极后,穿越左径向间隙而形成闭合的磁路。

2 磁流变阻尼器建模

由于所提出的磁流变阻尼器具有 2 种不同的间隙,所以所提出的磁流变阻尼器的总阻尼力为环形间隙和径向间隙产生的力之和。因此,预测的阻尼力[20]可表示为

$$F = F_a + 2F_r = (\Delta p_a + 2\Delta p_r)A_p \tag{1}$$

其中

$$A_p = \frac{\pi}{4}[(D + 2h_r + 2h_{tr})^2 - d_0^2] \tag{2}$$

式中 F_a、F_r——通过环形间隙和径向间隙的阻尼力,N

Δp_a、Δp_r——通过环形间隙和径向间隙的压降, Pa

A_p——活塞部分有效面积,m^2

2.1 在环形间隙内的建模

图 3a 描述了在外筒的内面和磁极的外环形面之间的环形流体流动通道。如图 3b 所示,由于活塞直径远大于环形间隙,可以使用平板模型。磁流变阻尼器的压降 Δp_a通常假定为粘性部分和由磁场引入的屈服应力部分综合作用的结果,可以表示为

$$\frac{dp_a}{dx} = \frac{dp_\eta}{dx} + \frac{dp_\tau}{dx} = \frac{6\eta Q}{\pi t_a^3 r_p} + \frac{c\tau_y}{t_a} \tag{3}$$

式中 Q——通过磁流变阻尼器间隙中的磁流变液的体积流量,m^3/s

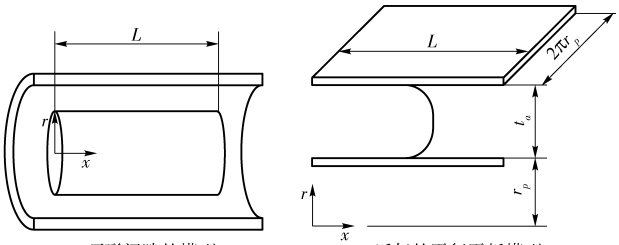
η——无外加磁场时的磁流变液的粘度,Pa·s

τ_y——磁流变阻尼器中磁流变液的剪切屈服应力,Pa

c——修正系数,取 2 ~ 3

t_a——近似的平行平板间隙的厚度,m

r_p——活塞半径,m



(a) 环形间隙的模型 (b) 近似的平行平板模型

图 3 磁流变液在环形间隙的流动模型

Fig. 3 Modelings of MR fluid flow in an annular gap

通过对平行平板通道长度方向上(从 0 到 L)的积分,可以得到

$$\Delta p_r = \Delta p_\eta + \Delta p_\tau = \frac{6\eta QL}{\pi t_a^3 r_p} + \frac{c\tau_y L}{t_a} \tag{4}$$

式中 Δp_η——粘滞压降, Pa

Δp_τ——屈服压降, Pa

L——平行平板通道长度, m

2.2 在径向间隙内的建模

图 4 表示了磁流变液在径向流体流动通道的工作模型。径向通道的厚度等于面 A 和面 B 之间的 t_r, 所提出的磁流变阻尼器的径向间隙也考虑了近似的平行平板模型。按照磁流变液在径向间隙中的流动方向,磁流变阻尼器中的磁流变液压降沿着径向磁极的径向变化。在该近似中,平行平板通道的宽度为 $2\pi r_0 \sim 2\pi r_p$。

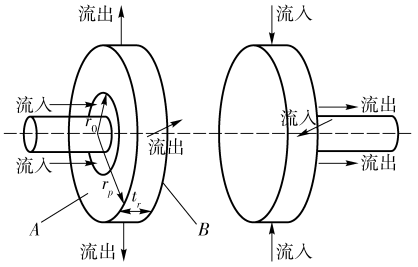


图 4 磁流变液在径向间隙的流动模型

Fig. 4 Modeling of MR fluid flow in radial gaps

磁流变液在径向间隙中的压降 Δp_r在径向方向上包含了粘性部分和由场引入的屈服应力部分。在径向间隙的压降可以表示为

$$\frac{\mathrm{d}p_r}{\mathrm{d}r}=\frac{\mathrm{d}p_\eta}{\mathrm{d}r}+\frac{\mathrm{d}p_\tau}{\mathrm{d}r}=\frac{6\eta Q}{\pi r t_r^3}+\frac{c\tau_y}{t_r} \tag{5}$$

通过对式(5)在 r_0 到 r_p 上的积分，可以得到

$$\Delta p_r=\Delta p_\eta+\Delta p_\tau=\frac{6\eta Q}{\pi t_r^3}\ln\frac{r_p}{r_0}+\frac{c\tau_y}{t_r}(r_p-r_0) \tag{6}$$

式中　r_0——径向磁极孔的半径，m

使用 LORD 公司提供的 MRF－132DG 型磁流变液，其塑性粘度为 112 Pa·s。值得注意的是，在 Bingham 模型中，磁流变液屈服后的粘度被假定为常数。

通过使用最小二乘曲线拟合方法对流体性质进行描述，屈服应力的近似多项式曲线如图 5 所示，相应的 $\tau_y(B)$ 的近似多项式可以表示为

$$\tau_y(B)=0.144+13.708B+158.79B^2-176.51B^3+52.962B^4 \tag{7}$$

式中　B——磁流变阻尼器间隙中磁流变液的磁感应强度，T

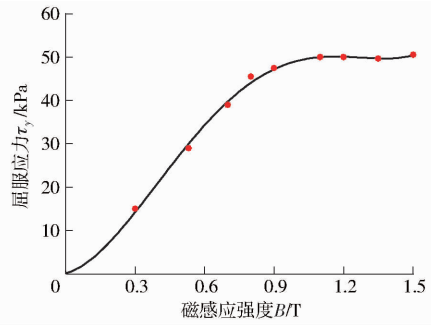


图 5　磁流变液的屈服强度

Fig. 5　Field-dependent yield stress of MR fluid

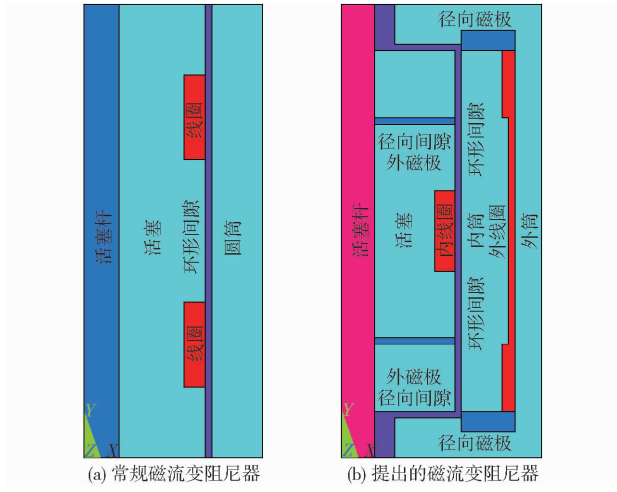
3　仿真

基于有限元分析方法进行电磁分析，得到了常规磁流变阻尼器和所提出的磁流变阻尼器的磁场特性。图 6 显示了表 1 所示的结构尺寸的常规磁流变阻尼器和所提出的磁流变阻尼器的磁路的轴对称模型。

当仅向内线圈通入 2.5 A 电流而外线圈不通入电流时，所提出的磁流变阻尼器的磁力线分布如图 7a 所示。而图 7b 显示了仅向外线圈通入 2.5 A 电流而内线圈不通入电流时的磁力线分布。

如图 7a 所示，当仅对内线圈施加 2.5 A 的电流时，尽管存在一些磁漏，但是绝大部分磁力线沿着内部磁回路行进。如图 7b 所示，当仅对外线圈施加 2.5 A 的电流时，存在一些漏磁现象，但是绝大部分磁力线是沿着外部磁回路。

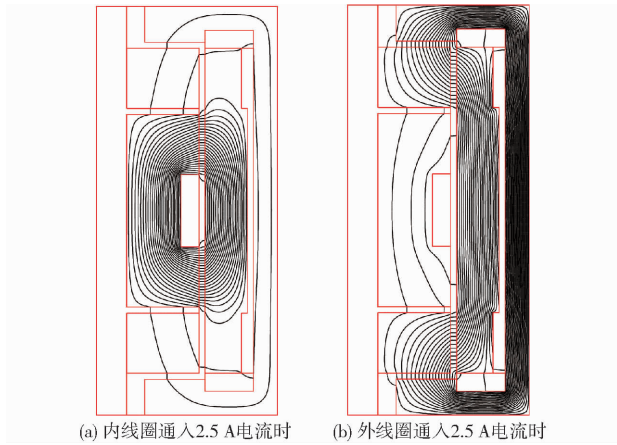
图 8 和图 9 分别给出了对双线圈施加 2.5 A 异向电流时，常规磁流变阻尼器和提出的磁流变阻尼器的磁力线分布和磁感应强度云图。



(a) 常规磁流变阻尼器　(b) 提出的磁流变阻尼器

图 6　磁流变阻尼器的轴对称模型

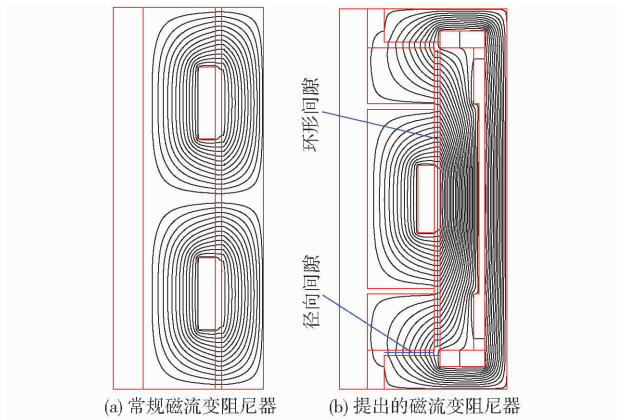
Fig. 6　Axis-symmetric entity model of MR dampers



(a) 内线圈通入2.5 A电流时　(b) 外线圈通入2.5 A电流时

图 7　所提出的磁流变阻尼器的磁力线分布

Fig. 7　Magnetic flux distributions of proposed MR damper



(a) 常规磁流变阻尼器　(b) 提出的磁流变阻尼器

图 8　磁力线分布

Fig. 8　Magnetic flux distributions

图 10 为在不同电流下沿常规磁流变阻尼器的环形间隙的磁感应强度。

图 11 为在不同电流下，沿着所提出的磁流变阻尼器间隙路径的磁感应强度。所提出的磁流变阻尼器的环形间隙中的磁感应强度略小于常规磁流变阻尼器的，而径向间隙中的磁感应强度略大于环形间隙中的。

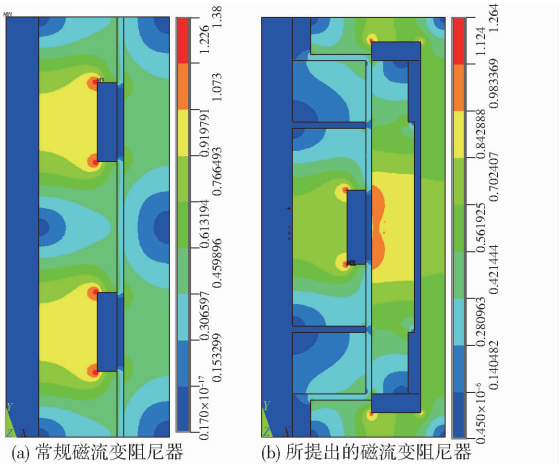


图 9 磁感应强度云图

Fig. 9 Magnetic flux density cloud diagrams

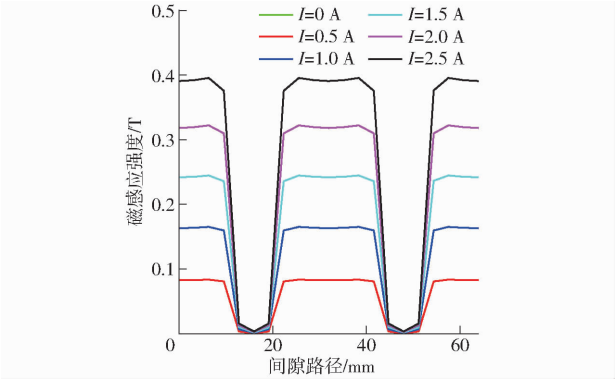


图 10 沿常规磁流变阻尼器的间隙路径的磁感应强度

Fig. 10 Magnetic flux densities in gap of conventional MR damper

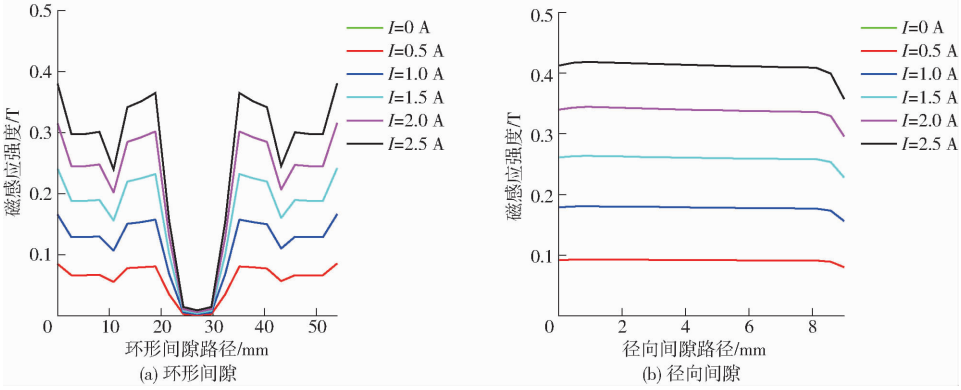


图 11 所提出的磁流变阻尼器的间隙路径的磁感应强度

Fig. 11 Magnetic flux densities in gaps of proposed MR damper

图 12 为在频率为 2 Hz 的正弦位移激励下常规磁流变阻尼器的预测阻尼力分别对位移和速度的关系曲线。

如图 12 所示,当将 2.5 A 的电流分别提供给励磁线圈时,最大和最小阻尼力分别为 4 227 N 和 -4 227 N,而不通入电流时,最大和最小阻尼力分别为 733 N 和 -733 N。

图 13 为在频率为 2 Hz 的正弦位移激励下所提出的磁流变阻尼器的预测阻尼力分别对位移和速度的关系。

如图 13 所示,当将 2.5 A 的电流分别提供给励磁线圈时,最大和最小阻尼力分别为 7 805 N 和 -7 805 N,而不通入电流时,最大和最小阻尼力分别为 1 921 N 和 -1 921 N。

图 14 为常规磁流变阻尼器和所提出的磁流变阻尼器的预测等效阻尼随着激励频率变化的关系。所提出的磁流变阻尼器的等效阻尼比常规磁流变阻尼器的等效阻尼大得多。

如图 12、13 所示,在 0.25 m/s 的激励速度下,常规磁流变阻尼器提供的最大阻尼力为 4 227 N,而所提出的磁流变阻尼器的阻尼力为 7 805 N。所提出的磁流变阻尼器的最大阻尼力约是常规磁流变阻尼器的 1.86 倍。如图 14a、14b 所示,在通入 2.5 A 电流时,随着激励频率从 0.25 Hz 增大到 10 Hz,常规磁流变阻尼器的等效阻尼由 146.3 kN·s/m 减小至 6.1 kN·s/m,所提出的磁流变阻尼器等效阻尼从

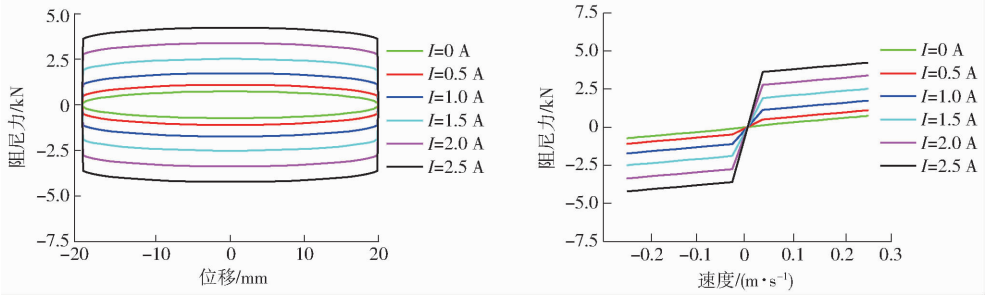


图 12 常规磁流变阻尼器的阻尼力

Fig. 12 Damping force of conventional MR damper

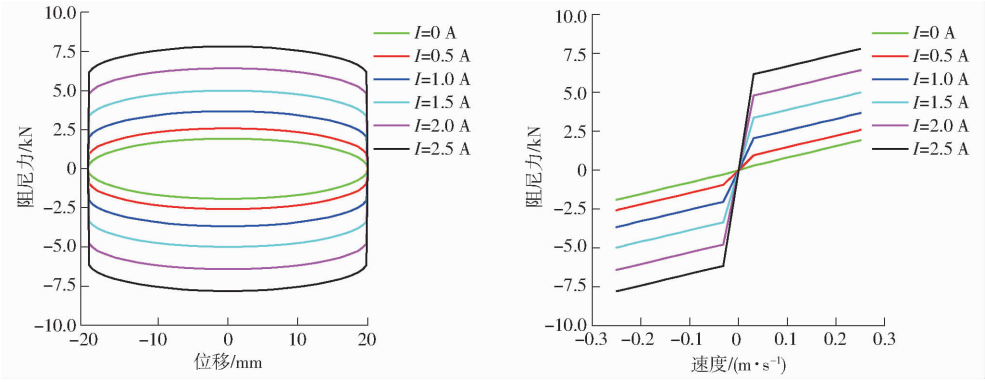
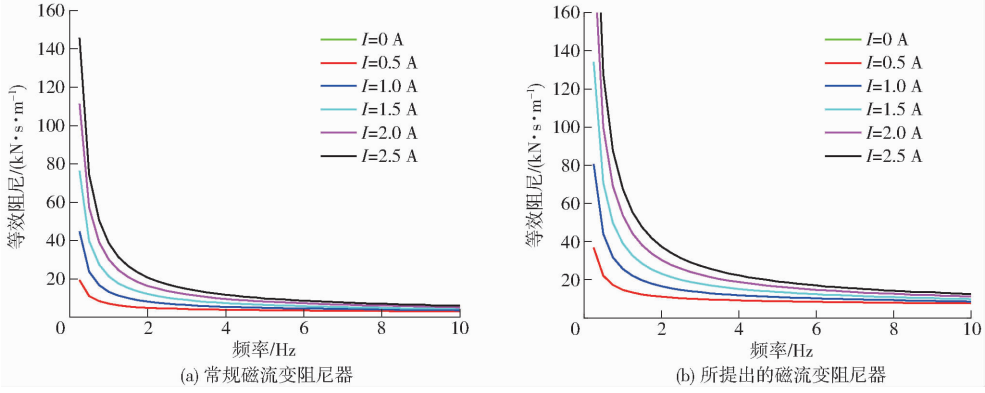


图 13　提出的磁流变阻尼器的阻尼力

Fig. 13　Damping force of proposed MR damper



(a) 常规磁流变阻尼器　　(b) 所提出的磁流变阻尼器

图 14　等效阻尼

Fig. 14　Equivalent damping (C_{eq})

248.4 kN·s/m 减小至 12.5 kN·s/m。所提出的磁流变阻尼器等效阻尼约为常规磁流变等效阻尼的 2 倍。

总而言之，表明通过内置平行双线圈的磁流变阻尼器的磁路设计可获得更大的阻尼力和等效阻尼。

4　实验测试

为了评估所提出的磁流变阻尼器阻尼力性能，进行了实验测试。实验系统如图 15 所示。图 16 为所制造的磁流变阻尼器的实物照片，其结构尺寸见表 1。所提出的内置平行双线圈的磁流变阻尼器的阻尼力特性由实验系统测量。

当同时向所提出的磁流变阻尼器的双线圈中通入相同大小的电流时，得到了在频率为 2 Hz 和振幅为 20 mm 的正弦位移激励下，所提出的磁流变阻尼器的测量阻尼力分别对位移和速度的关系，如图 17 所示。在 2.5 A 的电流下，其最大和最小阻尼力分别为 7 642 N 和 −7 723 N，而通入电流为零时，其最大和最小阻尼力为 1 761 N 和 −1 784 N。如图 13、17 所示，比较预测的阻尼力与测量的阻尼力，验证了建立的阻尼力模型的有效性。

评估了所提出的磁流变阻尼器的测量等效阻尼和阻尼系数，如图 18、19 所示。理论模型预测的等效阻尼和阻尼系数能很好地匹配测量结果。



图 15　阻尼力测试实验系统

Fig. 15　Experimental system for damping force measurement

1. LVDT 位移传感器　2. 磁流变阻尼器　3. 力传感器　4. 信号调理装置　5. 数据采集系统　6. 电流源

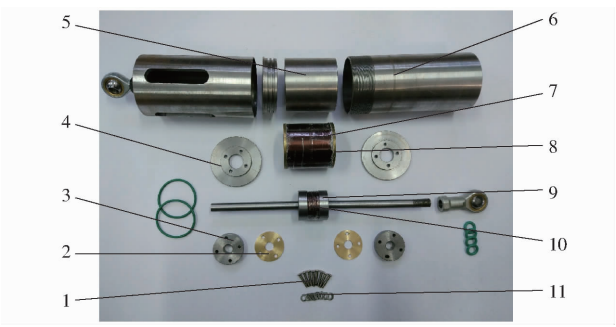


图 16　阻尼器零部件

Fig. 16　Photograph of damper components

1. 螺栓　2. 分隔环　3. 外磁极　4. 径向磁极　5. 外筒　6. 壳体　7. 外线圈和内筒　8. 线圈盖　9. 活塞　10. 内线圈　11. 垫圈

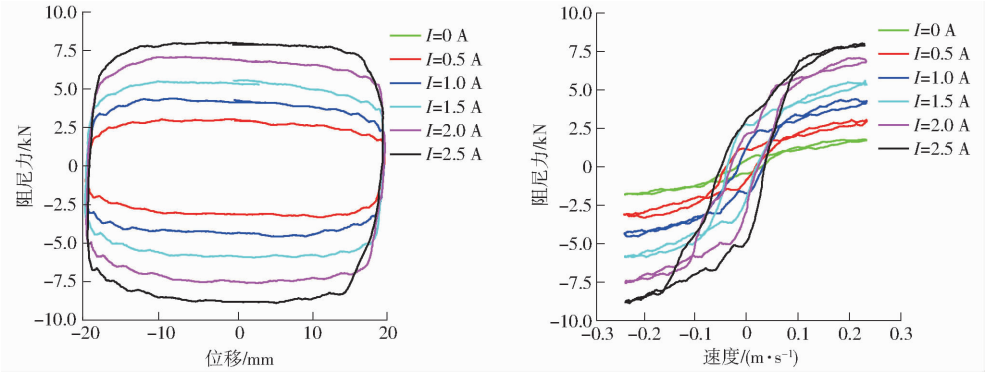


图 17 阻尼力特性

Fig. 17 Damping force characteristics

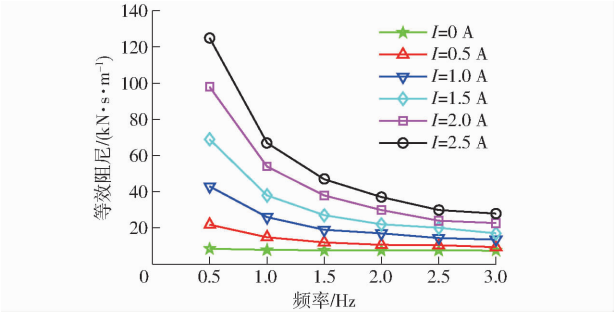


图 18 等效阻尼

Fig. 18 Equivalent damping

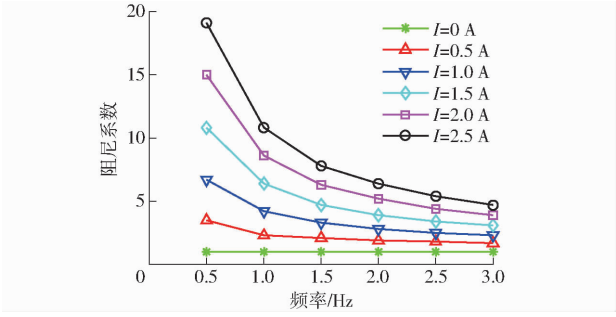


图 19 阻尼系数

Fig. 19 Damping coefficient

5 结论

(1) 提出了一种内置平行双线圈的磁流变阻尼器,实现了在有限尺寸的限制下获得更好的阻尼性能。对比分析了内置平行双线圈磁流变阻尼器和与其具有相同尺寸(活塞直径和磁极长度)的常规磁流变阻尼器的阻尼性能,并制作了平行双线圈磁流变阻尼器的结构实物。

(2) 在正弦位移激励下,使用液压激振测试系统对所提出的磁流变阻尼器的阻尼性能进行了测试。分析所测试的数据结果,在 0.25 m/s 的激励速度下,所提出的磁流变阻尼器的阻尼力为 7 805 N。所提出的磁流变阻尼器的最大阻尼力约是常规磁流变阻尼器的 1.86 倍。在通入电流 2.5 A 时,随着激励频率从 0.25 Hz 增至 10 Hz,所提出的磁流变阻尼器等效阻尼从 248.4 kN·s/m 减至12.5 kN·s/m。所提出的磁流变阻尼器的等效阻尼约为常规磁流变等效阻尼的 2 倍。

(3) 推导的数学模型可以准确地预测所提出的磁流变阻尼器的阻尼性能。内置平行双线圈的磁流变阻尼器可用于具有有限阻尼器安装空间的结构的减振。

参 考 文 献

1 LOU Z, ERVIN R D, FILISKO F E. A preliminary parametric study of electrorheological dampers[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1994,116(3): 570 - 576.

2 WERELEY N M, PANG L. Nondimensional analysis of semi-active electrorheological and magnetorheological dampers using approximate parallel plate models[J]. Smart Materials and Structures, 1998 , 7(5): 732 - 737.

3 胡国良, 李海燕, 张海云. 圆环流磁流变阀压降性能分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(3): 381 - 388. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160354&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.054.
HU Guoliang, LI Haiyan, ZHANG Haiyun. Performance analysis and experimental tests of pressure drop of annular type magnetorheological valve [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(3): 381 - 388. (in Chinese)

4 WERELEY N M, LINDLER J, ROSENFELD N, et al. Biviscous damping behavior in electrorheological shock absorbers[J]. Smart Materials and Structures, 2004,13(4): 743 - 752.

5 胡国良, 钟芳, 廖明科, 等. 混合流动式磁流变阀结构设计与压降性能分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9): 389 - 396. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160952&journal_id=jcsam. DOI: 10.

6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 09. 052.
HU Guoliang, ZHONG Fang, LIAO Mingke, et al. Design and pressure drop analysis of hybrid fluid flow magnetorheological valve [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 389 - 396. (in Chinese)

6 WILLIAMS S W, RIGBY S G, SPROSTON J L, et al. Electrorheological fluids applied to an automotive engine mount[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1993, 47: 221 - 238.

7 SIMS N D, STANWAY R, JOHNSON A R. Vibration isolation using an magneto-rheological damper in the squeeze-flow mode[C]// Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 1999, 3668: 520 - 527.

8 AHN Y K, HA J Y, KIM Y H, et al. Dynamic characteristics of squeeze-type mount using magneto-rheological fluid[J]. Proc. IMech E, Part K-Journal of Multi-Body Dynamics, 2005, 219(1): 27 - 34.

9 YAZID I I M, MAZIAN S A, KIKUCHI T F, et al. Design of magnetorheological damper with a combination of shear and squeeze modes[J]. Materials & Design, 2014, 54: 87 - 95.

10 MUGHNI M J, ZEINALI M, MAZLAN S A. Experiments and modeling of a new magneto-rheological cell under combination of flow and shear-flow modes[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2015, 215: 70 - 79.

11 FERDAUS M M, RASHID M M, BHUIYAN M M I, et al. Novel design of a self powered and self sensing magneto-rheological damper[C]// IOP Conference Series-Materials Science and Engineering, 2013, 53: 012048.

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

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

14 GUAN X, HUANG Y, RU Y, et al. A novel self-powered MR damper: theoretical and experimental analysis[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(10): 105033.

15 MAO M, HU W, CHOI Y T, et al. A magnetorheological damper with bifold valves for shock and vibration mitigation[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2007,18(12): 1227 - 1232.

16 BAI X X, WANG D H, FU H. Principle, modeling, and testing of an annular-radial-duct magneto-rheological damper[J]. Sensors Actuators A:Physical, 2013, 201: 302 - 309.

17 KIM K, CHEN Z, YU D, et al. Design and experiments of a novel magneto-rheological damper featuring bi-fold flow mode[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(7): 075004.

18 ICHWAN B, MAZLAN S A, IMADUDDIN F, et al. Development of a modular MR valve using meandering flow path structure [J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(3): 037001.

19 HU G, LONG M, HUANG M, et al. Design, analysis, prototyping, and experimental evaluation of an efficient double coil magnetorheological valve[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 403410.

20 AI H X, WANG D H, LIAO W H, et al. Design and modeling of a magnetorheological valve with both annular and radial flow paths [J]. Intelligent Material Systems and Structures, 2006, 17(4): 327 - 334.