

文章编号: 1006-1355(2014)06-0197-05

一种新型电涡流阻尼器及阻尼性能研究

肖登红, 潘强, 何田

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 基于电涡流原理提出一种新型的可用于航天器振动被动抑制的电涡流阻尼器。首先, 依托数值仿真建立阻尼器的磁场和力学有限元分析模型, 对阻尼器的性能进行分析计算。其次, 在振动测试实验台上进行阻尼特性测试, 获得了小位移 0.1 mm、大位移 1 mm 下的 1 Hz~50 Hz 频率范围内正弦激励工况下的阻尼系数。然后根据 Bouc-Wen 滞回模型建立了阻尼器的力学模型, 研究了负载、阻尼器结构、交变洛伦兹力之间的关系。研究结果表明这种新型的电涡流阻尼器在外载激励作用下能够输出与仿真结果较为接近的阻尼力, 且阻尼系数随激励频率变化具有明显的规律性, 根据仿真和实验结果建立的阻尼力力学模型可以很好地用于电涡流阻尼器的力学特性仿真分析。

关键词: 振动与波; 电涡流阻尼器; 减振; 阻尼特性; 有限元

中图分类号: TH212; TH213.3

文献标识码: A

DOI 编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2014.06.044

Design and Analysis of a Novel Eddy Current Damper

XIAO Deng-hong, PAN Qiang, HE Tian

(School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the eddy current principle, a novel eddy current damper applicable to attenuating vibration of spacecraft is proposed. Firstly, by virtue of the numerical simulation, the magnetic and mechanical finite element model is established to analyze the damping characteristics of the eddy current damper. Then the damping characteristic is tested on a vibration test bench, where the sinusoidal excitation with amplitudes of 0.1mm and 1mm are applied respectively in the frequency range of 1-50Hz. Finally, the mechanical model of the damper is established based on the Bouc-Wen hysteretic theory, which is used to study the relationship among the loading, the damper structure, and the alternative Lorentz force. The results show that this new eddy current damper can provide a damping force under the excitation loading. The damping force acquired from the test is close to that of the simulation results. Therefore, the presented model can be efficiently used to reflecting the mechanical properties of the eddy current damper.

Key words: vibration and wave; eddy current damper; vibration reduction; damping characteristics; finite element

随着航天技术的发展, 由星上振源和有效载荷引起的卫星结构振动, 将成为影响精密有效载荷实际工作性能的重要因素, 如高分辨率对地遥感、观测相机的成像质量^[1]等。为了满足精密有效载荷对卫星振动环境的要求, 必须设法隔离、抑制振动的影响。由于航天器在轨运行维护不便, 航天器阻尼器要有极高的可靠性, 能够适应空间高真空、热交换等

复杂环境, 并能满足在轨 5 年—15 年的寿命要求^[2]。电涡流阻尼器是基于导体在磁场中运动或在交变磁场中产生电涡流效应的原理来工作的, 其具有非接触、无机械摩擦和磨损、无须润滑、寿命长等优点, 满足航天领域对阻尼器的要求, 有光明的应用前景。

近几十年来, 电涡流阻尼器在结构振动控制工程中的应用受到了重视。曹青松^[3]将横向电涡流阻尼器引入旋转圆盘的振动控制, 并对电磁阻尼器振动主动控制技术进行了总结分析^[4]。Sodano^[5]综述了电涡流阻尼器在结构减振中的应用情况, 并指出电涡流阻尼器在航天领域具有很广泛的应用前景。Kienholtz^[6]提出了一种桶状的电涡流阻尼器, 由两块永磁体和一个铜板串联而成, 并将其应用到哈勃望远镜中的精密光学仪器减振系统中, 验证了电涡

收稿日期: 2014-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(51105018)

作者简介: 肖登红(1986-), 男, 湖北孝感人, 博士生, 主要研究方向: 振动与噪声控制、机械系统故障诊断研究。

通信作者: 何田, 男, 硕士生导师。

E-mail: hetian@buaa.edu.cn

流阻尼器在航天领域中的可行性。Ebrahimi^[7]对比分析了几种不同永磁体排列方式的电涡流阻尼器的阻尼特性,并提出了一种新的电涡流吸振器结构,并具有弹性缓冲能力。Zuo^[8]针对土木工程领域的大型结构减振问题设计了一种基于多极磁路的阵列电涡流阻尼器,具有较好的阻尼输出效果。汪志昊^[9]详细阐述了电涡流调谐质量阻尼器(TMD)的研究现状,基于电磁感应原理研制了具有自供电特性的MR阻尼器减振系统与采用电涡流作为阻尼元件的新型TMD装置,并分别用于工程结构的振动控制。邹向阳、朱坤^[10]开发了基于电涡流阻尼的直接耗能减振装置。该阻尼器主要由装有强磁性材料的磁盒与涡流板两大组件构成,当涡流板与磁盒之间存在相对运动时,就会产生电磁阻尼力。楼梦麟^[11]采用外供电产生励磁磁场开发了电涡流TMD,并开展了振动台模型试验研究,证明了其良好的减震效果。祝长生^[12]基于电涡流原理提出了一种新型的转子系统径向电涡流阻尼器。

由于航天器内部能源珍贵,在设计电涡流阻尼器器时需考虑能耗问题。永磁体型电涡流阻尼器无需外界供能,在这方面具有较大的优势。航天器内部空间以及有效承载有限,电涡流阻尼器的结构应当尽可能的紧凑且结构较轻。鉴于这些设计要求,本文在单磁体-单涡流板型电涡流阻尼器结构的基础上,提出了一种单磁体-双涡流板新型电涡流阻尼器,并对其阻尼特性进行研究。

1 高性能电涡流阻尼器的结构

Sodano电涡流阻尼器方案的设计原理是,当涡流板上下运动时,其内部的磁通发生变化,从而在金属板内形成电涡流,继而产生反向的一个洛伦兹力,阻碍悬臂梁运动。在此过程中,由于金属板的电阻特性,电涡流转化为焦耳热释放。为了提高阻尼系数,可以通过提高电涡流阻尼器中永磁体的磁场利用率来达到目的。考虑到单涡流板阻尼器结构方案中所用的永磁体的磁场分布,如果结构完全对称,则理论上两块涡流板作用力上下对称。因此,为了更好地利用磁场,在永磁体两侧均布置金属板。当金属板上下运动时,所处的磁场在其运动方向上交替变化时,在其内部会形成相应数量的电涡流。与单一金属板的结构方案比较而言,双涡流板方案理论上可输出更大的阻尼力,可能有更好的阻尼性能。

鉴于此,本文在Sodano电涡流阻尼器方案基础上增加一块电涡流板,如图1所示。所用永磁体为一立方体形永磁体,中间开有一圆柱形通孔,固定在

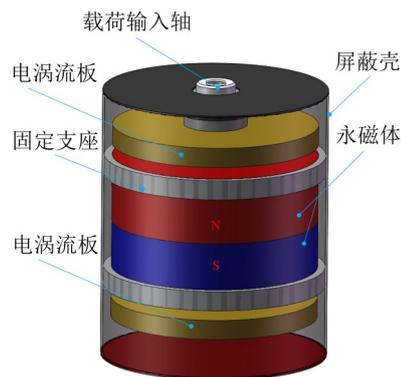


图1 双涡流板阻尼器结构图

电涡流阻尼器中部。其功能是为金属板在其运动方向上提供一个非均匀磁场。当输入轴带动上、下金属板运动时,在金属板中产生抑制其运动的电涡流,产生阻尼力,从而耗能减振。双涡流板阻尼器一些几何尺寸及物理参数如表1所示。

表1 电涡流阻尼器相关几何及物理参数

参数名称	参数值
永磁铁材料	NdFeB合金
电涡流板材料	铜
永磁体直径	52 mm
永磁体厚度	34 mm
屏蔽壳厚度	2 mm
电涡流板厚度	2 mm
电涡流板直径	46 mm
电涡流板电导率	$5.96 \times 10^7 \Omega \cdot m$
电涡流板弹性模量	$1.08 \times 10^{11} \text{ Pa}$
上电涡流板与磁极距离	3 mm
下电涡流板与磁极距离	3 mm
屏蔽壳总长度	69 mm

2 电涡流阻尼器有限元仿真分析

本文采用有限元软件ANSYS电磁场仿真分析模块对阻尼器内部磁场进行分析,基于ANSYS三维电磁场瞬态分析法的电涡流阻尼器阻尼特性仿真的方法,为阻尼器的性能优化提供依据。

目前在ANSYS电磁分析模块中,考虑速度效应时,在二维静态磁场分析中,可以分析永磁体存在的情况;在三维静态磁场分析中,则不能考虑永磁体。对于电磁场三维仿真模型考虑速度效应时,可以进行谐波分析以及瞬态分析。进行谐波分析时,只能应用于恒定磁场^[8]。因此本文进行三维瞬态分析

时,将永磁体产生的恒定磁场等效为一个随时间变化的载荷步。

图2(a)是该阻尼器的整体磁场分布。当电涡流板的运动速度为0.1 m/s,仿真得到金属板所受阻尼力矢量图如图2(b)所示。可以看出上、下板都输出了阻尼力,而且下板所受的阻尼力较上板大。这是由于下板中的磁场强且不均匀,导致磁通变化较大,产生了更大的电涡流,从而阻尼力更大。

表2给出了双涡流板阻尼器与传统单涡流板电涡流阻尼器的阻尼力计算结果对比。可以看出下板

提升了双涡流板电涡流阻尼器的阻尼性能。在同等尺寸条件下,与单涡流板电涡流阻尼器相比,双涡流板电涡流阻尼器能输出更大的阻尼力。

表2 双涡流板与单涡流板阻尼器阻尼力对比

阻尼器参数		上板	下板	整体
双涡流板	阻尼力/N	3.99	4.64	8.63
	阻尼系数/(Ns/m)	/	/	86.3
单涡流板	阻尼力/N	4.12	/	4.12
	阻尼系数/(Ns/m)	/	/	41.2

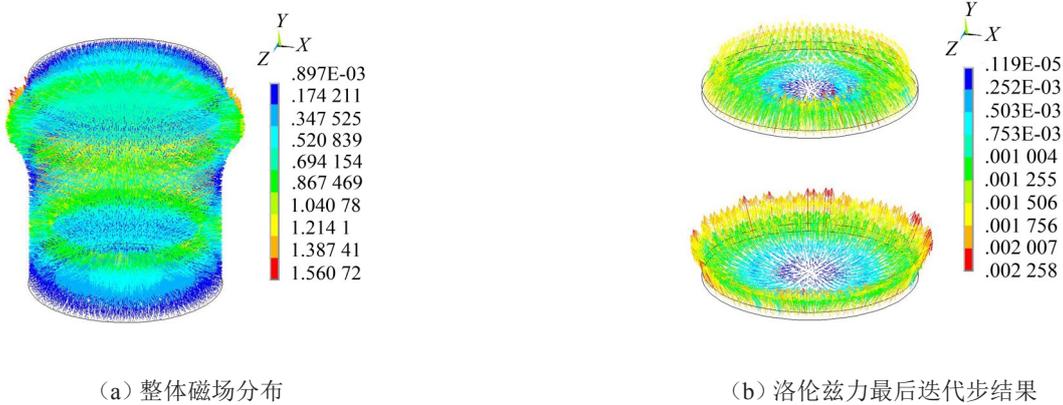


图2 双涡流板电涡流阻尼器有限元分析结果

3 阻尼性能测试

3.1 实验原理

如图3所示,电涡流阻尼器阻尼特性测试实验台主要由控制计算机、数据采集计算机、激光测振仪、电磁激振器、信号发生器、功率放大器、控制器、数据采集仪、高精度力传感器、高精度加速度传感器组成。电涡流阻尼器安装于两个转接工装之间,通过电磁激振器对其进行激励。控制计算机、激光测振仪、信号发生器控制所施加信号频率,经功率放大

器放大后传输到电磁激振器对电涡流阻尼器进行激励。通过测试计算机获得力与位移信号,对数据进行处理可以得到所需的阻尼器性能参数。

实验过程中,采用正弦激励法,输入位移,对该电涡流阻尼器施加1 Hz~50 Hz的正弦激励。幅值分别为小位移0.1 mm、大位移1 mm的正弦激励。每次试验前检查阻尼器有无异常情况,进行多个循环测试。限于篇幅,以下分别给出小位移0.1 mm、大位移1 mm正弦激励下的10 Hz的示功图,如图4所示。各频率下示功图饱满,阻尼效果良好。

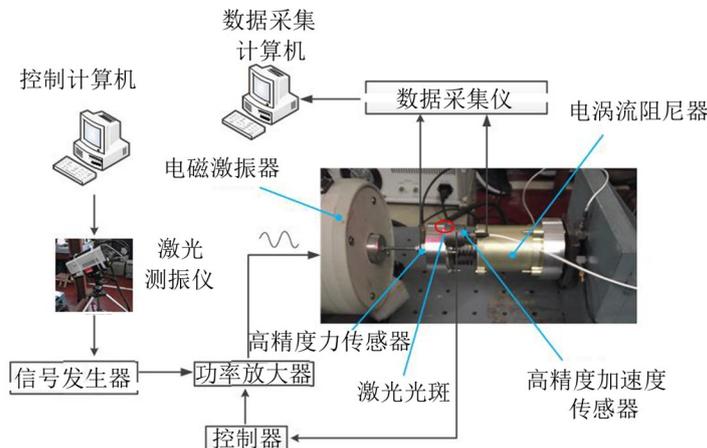


图3 电涡流阻尼器阻尼特性测试实验原理

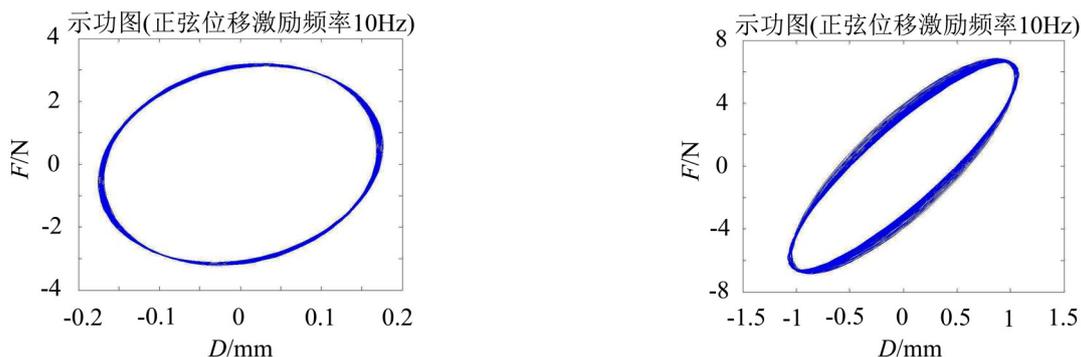


图4 大位移1 mm激励下的两个典型示功图

阻尼系数 c 可以通过求取迟滞环面积获得。

具体计算公式如下

$$c = \Delta W / (2\pi^2 A^2 f) \quad (1)$$

式中 ΔW ——迟滞环面积

A ——正弦位移激励的振幅

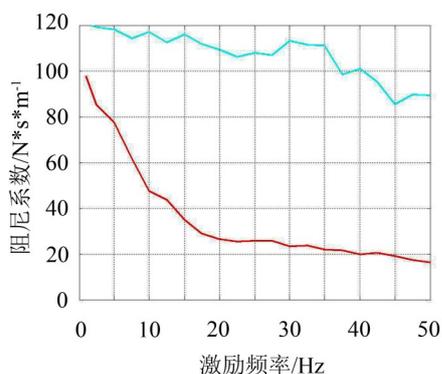
f ——正弦位移激励的频率

阻尼系数可以通过求取迟滞环面积获得。图5给出了双板阻尼系数随激励频率变化趋势。

3.2 双板电涡流阻尼器实验结果分析

首先,对比分析小位移和大位移工况下的电涡流阻尼器测试结果,可得出以下结论:

(1) 对于大位移工况下,激励频率从1 Hz增加到50 Hz时,阻尼系数逐渐降低,直至趋于稳定。当

图5 两种位移下各频率正弦激励时的阻尼系数($\text{Ns}\cdot\text{m}^{-1}$)

频率低于30 Hz时,随着频率的增加,阻尼系数减小较快。当频率高于30 Hz时,随着频率的增加,阻尼系数趋于稳定。该结果表明本文提出的电涡流阻尼器在外载激励作用下能够输出一定的阻尼力。小位移工况下,阻尼系数也随着频率的增加而出现衰减。

(2) 阻尼系数随频率的增高而逐渐减小

高频激励过程中,电涡流板运动速度快,在电涡流板表面会产生集肤效应,导致电涡流增长变缓,从而引起阻尼系数减小;

(3) 小位移的阻尼系数比大位移的大,原因有二:一方面电涡流板的不同平衡位置对电涡流阻尼器的阻尼特性影响很大。因此,大位移情况下阻尼系数变化大,周期内平均得到的阻尼系数上要小于小位移情况。另一方面大位移高频激励下,电涡流板速度更快,集肤效应更明显。

(4) 大位移阻尼系数下降更快,原因是大位移高频激励下,电涡流板速度变化更快,集肤效应更明显。

其次,对比测试结果与仿真分析结果可知:

(1) 大位移阻尼系数小于仿真结果,分析原因主要有:实验测试中电涡流板未精确地处于仿真计算的平衡位置;在仿真的过程中只考虑电涡流板在某一位置的瞬时速度情形,即阻尼系数是一个瞬态值;而试验过程中,所测得的阻尼力是电涡流是多个周期内的平均值;电涡流阻尼器具有集肤效应,这也是导致阻尼系数逐渐降低的主要原因之一,而仿真中无法准确模拟集肤效应;

(2) 小位移阻尼系数略大于仿真结果:小位移情形阻尼系数受系统自身机械摩擦阻尼特性影响较大,仿真中则未考虑这一方面;小位移激励下,电涡流板平衡位置受激励的影响变化不大,因而试验得到的数据整体上与仿真结果接近。该力与仿真结果较为接近,验证了电涡流阻尼器的结构设计的正确性。

4 电涡流阻尼器的力学模型

实验结果表明,电涡流阻尼器的阻尼力具有滞回特点。建立电涡流阻尼器的力学模型,能更好的研究电涡流阻尼器的动力学特性。国内外许多学者提出了众多的阻尼器力学模型,其中比较具有代表性的Bouc-Wen模型,如图6所示。该模型可以较好地体现电涡流阻尼器出力与速度的强非线性关系^[9, 12],从而得到了广泛的应用,本文也采用这一模型进行电涡流阻尼器的性能进行分析。

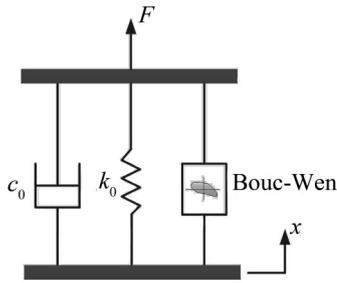


图6 电涡流阻尼器的Bouc-Wen模型

Bouc-Wen模型中阻尼器的输出阻尼力为

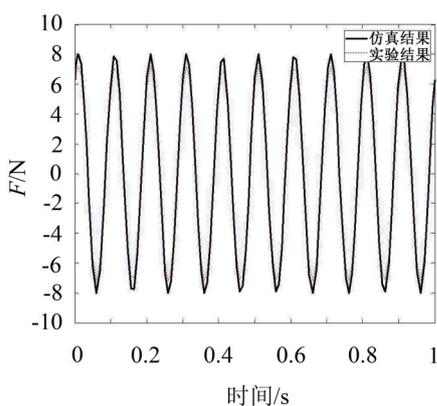
$$F_{\text{damper}} = c_0 \dot{x} + k_0(x - x_0) + z \quad (1)$$

式中 x 与 \dot{x} 分别表示阻尼器的位移与速度；中间变量 z 由下面 Bouc-Wen 模型决定

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| |z|^{n-1} z - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \quad (2)$$

式中 A, β, γ, c, n 是 Bouc-Wen 模型的参数，通过实验的方法获得。Babak 试验识别了电涡流阻尼器的五个模型参数^[9]，数值如下： $[c, \beta, \gamma, A, n] = [1.11, -50, 24, -69.5, 2]$ 。本文在此基础上，经过多次试验，修改模型参数，最终各参数的值确定为 $[c, \beta, \gamma, A, n] = [1.11, -10, 50, 10, 2]$ 。

图7给出了1 mm振幅、10 Hz正弦激振频率下，电涡流阻尼器的示功图以及阻尼力的时程。从输出阻尼力时间历程可以看出，放着与实验吻合度较高，说明本文建立的力学模型及其参数识别的正确性。此外，阻尼力的最大值存在一定的误差，这主要是由于阻尼器的自感效应，导致阻尼器力学模型中的最大阻尼力减小。



输出阻尼力时间历程

图7 电涡流阻尼器的仿真输出结果

5 结语

本文基于电涡流原理提出了一种新型可用于航天器振动被动抑制的电涡流阻尼器结构设计方案，

并从数值仿真、阻尼特性测试两方面对其阻尼特性进行了深入的研究，得到了如下结论：

(1) 仿真与实验结果都表明双板电涡流阻尼器阻尼性能要明显优于单板阻尼器阻尼，从而说明了双板电涡流阻尼器的结构设计较单板更优。

(2) 新型电涡流阻尼器的阻尼系数受外载激励幅值、频率或者速度影响较大，特别是在大位移高频激励过程中，会产生较为严重的集肤效应，导致阻尼系数急剧减小。

(3) Bouc-Wen模型建立的阻尼力力学模型可以很好的反映出负载、阻尼器结构、交变洛仑兹力之间的关系。该理论模型可用于电涡流阻尼器的力学特性仿真分析。

参考文献：

- [1] 张博文,王小勇,胡永力. 振动对高分辨率空间相机成像影响的集成分析[J]. *航天返回与遥感*, 2012, 33(2): 60-66.
- [2] 罗敏,王耀兵. 航天器振动被动抑制技术[J]. *现代振动与噪声技术*, 2012, 10: 91-95.
- [3] 曹青松,张敏. 横向电涡流阻尼器阻尼力的计算分析[J]. *噪声与振动控制*, 2010(05): 181-185.
- [4] 曹青松,王顺发. 基于电磁阻尼器振动主动控制技术的研究进展[J]. *噪声与振动控制*, 2008(03): 1-5.
- [5] H. Sodano, J. Bae. Eddy current damping in structures[J]. *Shock and Vibration Digest*, 2004, 36(6): 469.
- [6] D. Kienholz, C. Smith, W. Haile. Magnetically damped vibration isolation system for a space shuttle payload[J]. *International Society for Optics and Photonics*, 1996: 272-280.
- [7] B. Ebrahimi, M. Khamesee, F. Golnaraghi. Permanent magnet configuration in design of an eddy current damper [J]. *Microsystem Technologies*, 2010. 16(1-2): 19-24.
- [8] L. Zuo, S. Nayfeh, X. Chen. Design and analysis of a new type of electromagnetic damper with increased energy density[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2011. 133(4): 041006-1-041006-8.
- [9] 汪志昊. 自供电磁流变阻尼器减振系统与永磁式电涡流TMD的研制及应用[D]: 长沙: 湖南大学, 2011.
- [10] 邹向阳,王晓天,朱坤,等. 多层磁盒与涡流板电磁阻尼器性能研究[J]. *长春工程学院学报(自然科学版)*, 2008(03): 1-3.
- [11] 楼梦麟,吴和霖,马恒春,等. 电磁耗能TMD结构减震效率的振动台试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2003(04): 158-164.
- [12] 祝长生. 径向电涡流阻尼器对柔性转子系统振动的控制[J]. *机械工程学报*, 2007(12): 120-126.