

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.10.004

磁流变差动阻尼器的设计与有限元分析*

徐兴文¹, 郑 堤^{1,2*}, 胡利永^{1,2}, 詹建明¹

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江大学 宁波理工学院, 浙江 宁波 315100)

摘要: 针对旋转式磁流变液阻尼的磁滞性问题以及由于磁滞性而造成的旋转式磁流变液阻尼器输出力矩不稳定的问题,设计了一种差动式阻尼器,不仅可以使输出的力矩可控性更好,而且有效地克服了磁滞现象的影响。在通过理论计算得到磁流变液差动阻尼器输出力矩模型的基础上,利用ANSYS有限元分析软件对磁流变液差动阻尼器进行了磁场分析,得到了磁流变液的磁感强度与磁流变液差动阻尼器线圈中的控制电流之间的关系,结合数值分析软件得到了磁流变液差动阻尼器的输出力矩与线圈中的控制电流之间的关系。研究表明,通过控制磁流变液差动阻尼器的控制电流可以实时调整差动阻尼器的输出力矩大小及方向,对磁流变液阻尼器作为精确控制的力矩控制元件奠定了理论基础。

关键词: 磁流变液差动阻尼器; 有限元分析; 磁场分析

中图分类号: TH139

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)10-1188-04

Design and finite element analysis of magneto-rheological differential damper

XV Xing-wen¹, ZHENG Di^{1,2*}, HU Li-yong^{1,2}, ZHAN Jian-ming¹

(1.School of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

Abstract: Aiming at the hysteresis of the rotational magneto-rheological damper (MRD) and the instability of the output torque caused by the hysteresis, the magneto-rheological differential damper (MRDD) was designed. The output torque was controlled easily and the hysteresis was eliminated. The output torque model for the MRDD was established. The magnetic field inside the MRDD was analyzed by using ANSYS software and the relationship between the input current and the magnetic flux density was received. At last, the correlation between the input current and the output torque was obtained. The results indicate that the output torque can be controlled by the input current without causing hysteresis, and it lays the good foundation for the application of the MRDD.

Key words: magneto-rheological differential damper(MRDD); finite elements; magnetic field analysis

0 引 言

磁流变液(Magnetorheological Fluid, MRF)作为一种智能材料,在没有外界磁场的作用下,表现为牛顿流体,当有外界磁场作用时,可以在毫秒级的时间内由牛顿流体变为粘塑性固体状态,从而呈现出类似于固体的一些特性。而且由于磁流变液的这种变化具

有连续性、可控性、可逆性等特点,使得磁流变液在机械传动、结构减振、精密加工、柔性夹具等方面得到了广泛地研究和应用^[1-2]。

美国 Lord 公司制造的旋转式制动器,回转阻尼力可控,已用于自行车式和台阶攀登式健身器材中^[3];中国矿业大学的侯友夫等^[4]对磁流变液阻尼器的动力传递机理进行了研究,并开发了小功率的磁流变液传动

收稿日期: 2013-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50705044);浙江省自然科学基金资助项目(LY12E05007);宁波市自然科学基金资助项目(2011A610130)

作者简介: 徐兴文(1988-),男,湖北襄阳人,主要从事基于磁流变液的柔顺研抛装置方面的研究。E-mail:xuxingwen7760@163.com

通信联系人: 郑 堤,男,教授,硕士生导师。E-mail:zhengdi@nbu.edu.cn

装置;王修勇等^[5]也设计制作了阻尼力可调范围大、位移不受限制的旋转剪切式磁流变阻尼器;李军强等^[6]利用有限元软件对旋转剪切式磁流变阻尼器进行了优化设计并对其力矩输出特性进行了测试,得到了输出力矩与电流之间的关系。但这些研究中,都没有彻底改善磁流变液的磁滞问题,当减小磁流变液所在的磁场强度后,由于剩磁的作用,磁流变液的实际磁感应强度比理论值偏大。当作为阻尼器使用时,对应的输出力矩也明显会比实际需要的力矩偏大,影响了旋转式磁流变阻尼器输出力矩特性的稳定性。而且现有的旋转剪切式磁流变阻尼器输出力矩的方向与输入力矩的方向有关,若要改变阻尼器输出力矩的方向则必须要改变输入力矩的方向。

本研究设计一种差动式的磁流变液阻尼器,采用双阻尼盘分别驱动两个独立的阻尼器。在使用时,分别增加两个阻尼器对应的控制电流,即可改变阻尼器整体输出力矩的大小和方向。由于系统采用增加电流的方式来控制磁流变液的磁场强度,可有效地克服磁滞现象的影响。

1 磁流变液差动阻尼器的设计

1.1 磁流变液差动阻尼器的工作原理

磁流变液差动阻尼器的模型如图1所示。磁流变液差动阻尼器由左、右两个对称的阻尼器组成,中间采用连接件,将两个阻尼器刚性连接在一起。

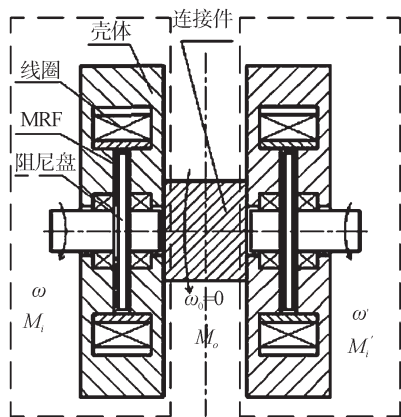


图1 磁流变液差动阻尼器的模型

两个阻尼器分别在两个阻尼盘的驱动下工作,两个阻尼器内部的线圈分别为各自的磁流变液提供磁场强度。线圈中的电流值越大,磁流变液的剪切应力越大,作用在壳体上的力就越大,阻尼器的输出力矩也越大。磁流变液差动阻尼器的模型如图1所示,不计摩擦作用,假如作用在左、右两个阻尼盘上的剪切力矩和转动的角速度分别为 M_i 、 M_i' 和 ω 、 ω' ,整个阻尼器的输出力矩为 M_o ,转动的角速度为0。如果 M_i 和 M_i' 产

生的输出力矩方向相同,那么整个阻尼器的输出力矩可以表示为 $M_o = M_i + M_i'$,否则 $M_o = M_i - M_i'$ 。当两个阻尼器产生的输出力矩方向相反时,增加其中一个阻尼器线圈中的电流值,整个阻尼器的输出力矩也随之改变。通过对两个阻尼线圈中电流的控制,实现了对输出力矩大小和方向的控制,同时还一定程度上克服了磁滞对阻尼器输出力矩的影响。

1.2 差动阻尼器的输出力矩模型

磁流变液差动阻尼器为完全对称结构,在分析磁流变液差动阻尼器输出力矩时,为讨论的方便,本研究先分析其中一个阻尼器的输出力矩,然后根据对称性得到另外一个阻尼器的输出力矩,进一步得到总的输出力矩。磁流变液与阻尼盘和壳体之间的关系可以简化表示,计算简图如图2所示。

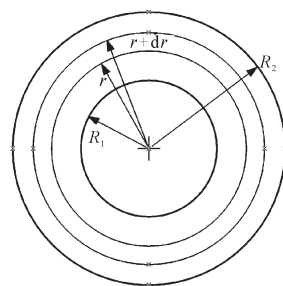


图2 单个阻尼器力矩计算简图

为了得到磁流变液差动阻尼器理论输出力矩计算公式,还需要对一些条件进行假设:

- (1) 磁流变液为一稳定、不可压缩流体;
- (2) 当线圈匝数较多的情况下,近似地认为作用于磁流变液的磁感强度 B 处相等;
- (3) 磁流变液与阻尼盘和壳体之间不存在相对滑动,并且忽略阻尼盘边缘处的剪切应力。

根据以上假设可以得到,一个阻尼器的输出力矩等于一个阻尼盘上的总的剪切力矩。由于阻尼盘的两个面都会受到剪切力矩的作用,因此,半径为 r 处的剪切力矩微元为:

$$dM = 2dF; \quad r = \int_{R_1}^{R_2} 4\pi r^2 \tau_B dr \quad (1)$$

式中: τ_B —磁流变液在一定磁场强度和剪切速率下的剪切应力; R_1, R_2 —阻尼盘工作部分的内径和外径。

磁流变液在一定磁场强度和剪切速率下的剪切应力 τ_B 可以用 Bingham 模型^[7]描述为:

$$\tau_B = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (\dot{\gamma} > 0) \quad (2)$$

$$\tau_B \leq \tau_0 \quad (\dot{\gamma} = 0) \quad (3)$$

式中: τ_0 —一定磁场强度下的剪切屈服应力,大小与磁场强度有关; η —磁流变液的剪切粘度; $\dot{\gamma}$ —磁流变液的剪切速率。

公式(2,3)表明,在一定的磁场强度下,磁流变液的剪切应力与剪切速率有关:当磁流变液的剪切速率 $\dot{\gamma} > 0$ 时,磁流变液的剪切应力与剪切速率之间是一种线性关系,此时,磁流变液呈现出类似牛顿流体的特性;当剪切速率 $\dot{\gamma} = 0$ 时,磁流变液表现出粘塑性固体的特性。磁流变液的剪切工作模式可以用公式(2)表示。

当磁流变液工作在剪切模式时,磁流变液的剪切速率将沿着壳体和阻尼盘的轴线方向线性分布。此时,可以求得不同半径处磁流变液的剪切速率的计算公式为:

$$\dot{\gamma} = \frac{v_1 - v_2}{h} = \frac{\omega r}{h} \quad (4)$$

式中: ω —其中一个阻尼器阻尼盘的角速度; h —阻尼盘与壳体之间的间隙宽度; r —阻尼盘上任意一点处的半径。

将式(2,4)代入式(1)中,可得到一个阻尼盘上受到的剪切力矩,即输出力矩为:

$$M = \frac{4\pi\tau_0}{3}(R_2^3 - R_1^3) + \frac{\pi\omega\eta}{h}(R_2^4 - R_1^4) \quad (5)$$

式中: $4\pi\tau_0(R_2^3 - R_1^3)/3$ —磁流变液的剪切屈服应力产生的力矩,其大小与磁流变液内部的磁场强度有关; $\pi\omega\eta(R_2^4 - R_1^4)/h$ —磁流变液的剪切运动产生的粘滞力矩,其大小与磁流变液的剪切速率有关。

磁流变差动阻尼器具有对称性,根据公式(5)可以得到另一个阻尼器产生的输出力矩为:

$$M' = \frac{4\pi\tau'_0}{3}(R_2^3 - R_1^3) + \frac{\pi\omega'\eta}{h}(R_2^4 - R_1^4) \quad (6)$$

式中: τ'_0 , ω' —另一个阻尼器的剪切屈服应力和旋转的角速度。

磁流变液差动阻尼器由左、右两个阻尼器组成,并且每个阻尼器的工作状态相互独立。在两个阻尼器输出力矩方向相同和相反的情况下,整个磁流变差动阻尼器的输出力矩的大小可以分别表示为:

$$M_o = \frac{4\pi\tau_0}{3}(R_2^3 - R_1^3) + \frac{\pi\omega\eta}{h}(R_2^4 - R_1^4) \pm \frac{4\pi\tau'_0}{3}(R_2^3 - R_1^3) + \frac{\pi\omega'\eta}{h}(R_2^4 - R_1^4) \quad (7)$$

其中:方向相同时为“+”,方向相反时为“-”。

以上只是得到了磁流变差动阻尼器的输出力矩模型,要对磁流变差动阻尼作进一步分析,还需要先确定其主要零件的尺寸。阻尼盘、壳体和线圈尺寸如表1所示。

表1 差动阻尼器主要零件的尺寸

零件	内径/mm	外径/mm	厚度(宽度、壁厚)/mm
阻尼盘	10	19	2
线圈	22	30	14
壳体	30	40	3

2 磁流变液差动阻尼器有限元分析

磁路的简化和材料属性的定义是磁流变液差动阻尼器有限元分析的基础。磁流变液差动阻尼器的磁路简化可以参照相关书目^[8]。

磁流变液的壳体和阻尼盘部分采用高磁导率的电工纯铁DT4^[9],磁流变液采用Lord公司的MRF-132DG磁流变液,其B-H曲线由Lord公司提供^[10]。在进行有限元分析时,本研究所加载的边界条件为通量平行条件,并且假定没有漏磁现象。

磁流变差动阻尼器内部的磁场分布与两壳体之间的间距有关。为了研究磁流变液差动阻尼器两个壳体之间的距离对磁力线分布状况的影响,在电流强度相等的情况下,取磁流变液差动阻尼器两壳体间距为0 mm、0.25 mm、0.5 mm、2 mm、5 mm等不同值时分别建模并进行了仿真。两壳体间距为0 mm和5 mm时的磁力线分布图如图3所示。

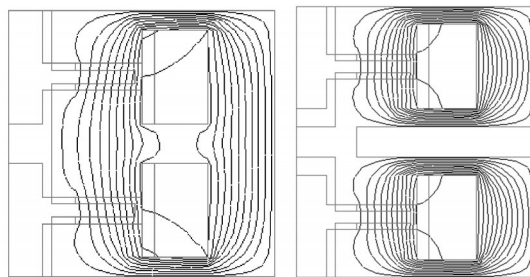


图3 壳体的设计对磁力线分布影响

从仿真结果可以得出:当两壳体没有间隙时,两壳体内部的磁力线相互耦合,当两壳体存在间隙时,两壳体内部的磁力线不发生耦合。两个阻尼器壳体利用中间的连接件连接,使两壳体之间产生一个空气隙,防止磁力线相互耦合。本研究利用隔磁材料代替上述的空气隙,同样进行建模并通过仿真,得出的结果与上述结果完全一致。由于理论与实际的差别,间隙值不宜太小,一般应保证间隙值在1 mm以上。该磁流变差动阻尼器选择两壳体之间的间隙值为20 mm。

磁流变液的相对磁导率比电工纯铁DT4的相对磁导率小很多,减小壳体与阻尼盘之间的工作间隙有利于提高磁通密度。取工作间隙为1 mm^[11],再次仿真得到电流强度为1.6 A时的磁通密度分布图如图4所示。

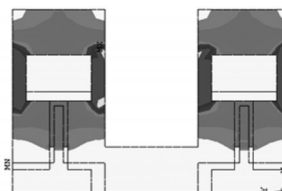


图4 电流为1.6 A时的节点磁通密度分布图(旋转90°)

从图3、图4中都可以看出,阻尼盘处的磁通密度

比较均匀。由于阻尼器边缘处的横截面积比阻尼盘处的横截面积小,导致阻尼器边缘处的磁通密度比阻尼盘处的磁通密度大。但是,磁流变液的剪切应力只与工作间隙处的磁通密度(即磁感应强度)有关,因此,提高工作间隙处的磁感应强度有利于提高磁流变液的剪切应力。

此外,磁流变液的磁感应强度还与线圈中的电流有关。为了得到线圈中的电流与磁流变液磁感应强度之间的关系,本研究在0.2 A~2.4 A的电流范围内,每隔0.2 A为一个步长,分别对磁流变差动阻尼器进行有限元仿真。由于磁流变差动阻尼器在结构上具有对称性,取其中一个阻尼器的工作间隙处的磁感应强度值的平均值作参考值,得到的 I 与 B 的值如表2所示。

表2 电流 I 与磁感应强度 B 值

I/A	B/T	I/A	B/T
0.2	0.052	1.4	0.361
0.4	0.103	1.6	0.415
0.6	0.153	1.8	0.468
0.8	0.206	2.0	0.520
1.0	0.258	2.2	0.572
1.2	0.310	2.4	0.625

利用 Matlab 对表2中的数据进行二次曲线拟合,可以得到电流 I 与磁感应强度 B 之间的关系为:

$$B = 0.002I^2 + 0.2557I + 0.00016 \quad (8)$$

B 与 I 的二次拟合图如图5所示。

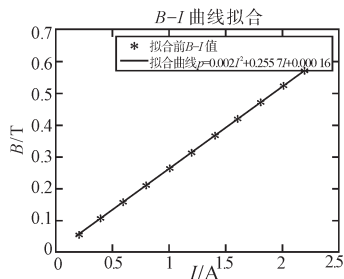


图5 磁流变液 B - I 的二次拟合曲线

本研究用到的磁流变液的剪切屈服应力由MRF-132DG的剪切屈服应力 τ_0 (单位:kPa)与磁感应强度 B (单位:T)之间的关系图经二次拟合得到:

$$\tau_0 = -3.817B^2 + 83.068B + 0.0645 \quad (9)$$

将公式(8,9)代入到公式(7)中,利用 Matlab 拟合处理后可得:

$$M_o = \frac{4\pi(-0.083I^2 + 21.24I + 0.078)}{3}(R_2^3 - R_1^3) + \frac{\pi\omega\eta}{h}(R_2^4 - R_1^4) \pm \left[\frac{\pi\omega\eta}{h}(R_2^4 - R_1^4) + \frac{4\pi(-0.083I'^2 + 21.24I' + 0.078)}{3}(R_2^3 - R_1^3) \right] \quad (10)$$

公式(10)中阻尼盘的内径 R_1 和外径 R_2 为常数,磁

流变液的剪切速率 $\eta=0.112 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,阻尼盘的角速度 ω 和 ω' 也可保持为一稳定值。因此,磁流变差动阻尼器的输出力矩 M_o 只与电流 I 和 I' 有关。当两个阻尼输出力矩的方向相同时,增加其中一个阻尼器中的电流就可以增加差动阻尼的输出力矩 M_o ;当两个阻尼器输出力矩的方向相反时,增加电流 I ,输出力矩 M_o 增加;增加电流 I' ,输出力矩 M_o 减小,如果 I' 足够大,输出力矩 M_o 的方向将发生改变。由于控制输出力矩 M_o 的电流并没有减小,避免了磁滞现象的发生。

3 结束语

通过分析与仿真,本研究得到了磁流变差动阻尼器输出力矩与控制电流之间的关系。同传统的旋转剪切式磁流变阻尼相比,磁流变差动阻尼器能够在不产生磁滞的情况下,通过增加线圈中的电流改变输出力矩的大小。

在下一阶段,本研究将对磁流变差动阻尼器的力矩输出特性进行测试,以不断提高磁流变差动阻尼器的特性,为磁流变差动阻尼器的应用奠定基础。

参考文献(References):

- [1] 路 和,刘新华. 磁流变液及其在机械工程中的应用[J]. 制造技术与机床,2013(1):66-70.
- [2] 张 冲,鲁刘磊. 磁流变液矩形夹层板的动力特性分析[J]. 机电工程技术,2013,42(2):15-20.
- [3] YANG G, SPENCER B F J, CARLSON J D, et al. Large-scale MR fluid dampers modeling and dynamic performance considerations[J]. **Engineering Structures**, 2002, 20(24):309-323.
- [4] HOU You-fu, TIAN Zu-zhi, WANG Nan-nan. Numerical calculation of torque transmission and magnetic circuit finite element analysis of a magneto-rheological clutch[C]// CCIE2010, 2010:403-407.
- [5] 王修勇,孙洪鑫,陈政清. 旋转剪切式磁流变液阻尼器设计及力学模型[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10):77-81.
- [6] 李军强,臧希喆,赵 杰. 旋转式磁流变阻尼器优化设计与力学性能测试[J]. 机械工程学报, 2010, 46(5):177-182.
- [7] BOSSIS G, KHUSIR P, LACIS S. Yield behavior of magneto-rheological suspensions [J]. **Magnetic and Magnetic Materials**, 2003(258-259):456-458.
- [8] 张 倩,胡仁喜,康士廷,等. ANSYS12.0电磁学有限元分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [9] 谢龙汉,耿 煜,邱 婉. ANSYS电磁场分析[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.
- [10] Lord Inc.. MRF-132DG, Magneto-Rheological Fluid Typical Properties[EB/OL]. [日期不详]. [http://www.lord.com/products-and-solutions/magneto-rheological-\(mr\)/product.xml/1645/1](http://www.lord.com/products-and-solutions/magneto-rheological-(mr)/product.xml/1645/1).
- [11] 苏会强,郑 堤. 基于磁流变液的回转式阻尼器设计与有限元分析[J]. 宁波大学学报, 2007, 20(4):547-551.

[编辑:张 翔]