

# 蛇形磁路多片式磁流变液阻尼器设计\*

高 瞻<sup>1</sup>, 宋爱国<sup>1</sup>, 秦欢欢<sup>1</sup>, 陈大鹏<sup>1</sup>, 刘玉庆<sup>2</sup>, 姜国华<sup>2</sup>

(1. 东南大学仪器科学与工程学院 远程测控技术江苏省重点实验室 南京 210096;

2. 中国航天员科研训练中心人因工程国家重点实验室 北京 100094)

**摘要:**提出了一种大输出阻尼力矩,低初始阻尼力的小体积多片式磁流变液阻尼器的设计方法。阻尼器内部的导磁元件、隔磁元件和间隙中磁流变液构成闭合的蛇形磁路。针对漏液的问题采用铁磁密封的设计思想,显著减小了转轴处的摩擦力。基于 Bingham 塑性模型分析了磁流变液的力学特性,导出了阻尼器的力矩模型,采用 ANSYS Maxwell 软件对阻尼器进行了有限元分析,验证了磁路的准确性,并在原始设计的基础上对阻尼器的结构进行了优化,研制出了一种小体积磁流变液阻尼器。在自主搭建的实验平台上进行力矩测量实验和响应时间测量实验,实验结果验证了该阻尼器具有大输出力矩,低初始阻尼力和低响应时间的特点。阻尼器的直径为 33.6 mm,高度为 21.6 mm,重约 200 g,当输入电流为 1.2 A 时,产生的力矩为 350 N·mm,达到了操作者抓取虚拟物体所需的力矩。

**关键词:**磁流变液阻尼器;蛇形磁路;铁磁密封;有限元分析

**中图分类号:** TH703 TP24 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.804

## Design of multi-disc MRF damper with serpentine flux path

Gao Zhan<sup>1</sup>, Song Aiguo<sup>1</sup>, Qin Huanhuan<sup>1</sup>, Chen Dapeng<sup>1</sup>, Liu Yuqing<sup>2</sup>, Jiang Guohua<sup>2</sup>

(1. Remote Measurement and Control Key Laboratory of Jiangsu Province, School of Instrument Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. National Key Laboratory of Human Factors Engineering, China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The design method of a new type multi-disc MRF damper with large output damper torque, low initial damper force is introduced. The magnetic elements, non-magnetic elements and magneto rheological fluid (MRF) in the gap constitute a closed serpentine flux path inside the damper. Aiming at the leakage problem, the design idea of ferro-fluidic sealing is adopted, which significantly reduces the friction force at the rotating shaft. Based on the Bingham plastic model, the paper analyzes the mechanical characteristics of MRF, and derives the damper torque model. The ANSYS Maxwell software is used to conduct the finite element analysis of the damper, which verifies the accuracy of the flux path, and then the structure of the damper is improved on the basis of the original design. Finally, a small volume MRF damper was developed. An experiment platform was built by our own, on which torque measurement experiment and response time measurement experiment were carried out; the experiment results verify that the damper has the characteristics of large output torque, low initial damping force and low response time. The diameter of the damper is 33.6 mm, its height is 21.6 mm, and the weight is about 200 g; when the input current is 1.2 A, the output torque is about 350 N·mm, which reaches the required torque for the operator to grasp virtual objects.

**Keywords:** magneto rheological fluid (MRF) damper; serpentine flux path; ferro-fluidic sealing; finite element analysis

## 1 引言

在军事<sup>[1]</sup>、机器人<sup>[2]</sup>、医学<sup>[3]</sup>、工业<sup>[4]</sup>、教育<sup>[5]</sup>、科学研究<sup>[6]</sup>、游戏<sup>[7]</sup>等领域中,力反馈设备向操作者提供的力反馈信息增强了系统的交互性和沉浸性,能使操作者高效、准确地完成较为精细、复杂的任务,具有极大的应用价值。力反馈设备分为主动式和被动式两种,传统的主动式力反馈设备包括采用电机驱动或者气压驱动的设备,但是传统设备存在安全上的难题,不能确保操作人员的人身安全,而被动式力反馈设备由于具有安全性高的优点而得到广泛的应用。

磁流变液是一种新型的智能材料,其最独特之处是其流变效应,即在外加磁场作用下,它可在液态和类固态之间进行快速、可逆的转换,此外磁流变液还具有安全、屈服应力大、受杂质影响小等性质<sup>[8]</sup>。而磁流变液阻尼器是利用磁流变液的其独特的流变特性而制成一种半主动的阻尼装置,具有结构简单、易维护、重量轻、响应快、阻尼力大、可控精度高和能耗低等突出的优点<sup>[9]</sup>。磁流变液阻尼器按照结构分类可以分为活塞式和旋转式两大类,两种结构的阻尼器各有特点,不同的应用环境采用不同结构的阻尼器。目前,主流的旋转式磁流变液阻尼器分为多片式和圆筒式两种。当下设计磁流变液阻尼器的难点在于,在保证阻尼器体积小的前提下,还要能够输出足够大的阻尼力矩。

在传统的蛇形磁路<sup>[10]</sup>的基础上,提出了一种将蛇形磁路和多片式结构相结合的设计方案,摒弃了传统的蛇形磁路设计中的复杂结构,自主设计出一种新型的小型多片式磁流变液阻尼器,并完成了磁场有限元分析。

## 2 多片式 MRF 阻尼器的结构设计

磁流变液(magneto rheological fluids, MRF)是一种磁性颗粒分散于非磁性基液中的悬浮液。在没有外加磁场的时候,磁流变液的特性与牛顿流体类似<sup>[11]</sup>。在有外加磁场作用时, MRF 流变特性发生改变,粘度也迅速增大,具有一定的屈服剪切应力,其力学行为可以用 Bingham 方程<sup>[12]</sup>来描述:

$$\tau = \tau_y(B) + \eta\dot{\gamma} \quad (1)$$

式中: $\tau$ 为磁流变液的剪切应力, $\tau_y(B)$ 为磁流变液的屈服剪切应力, $B$ 为磁感应强度, $\eta$ 为磁流变液的粘度, $\dot{\gamma}$ 为磁流变液的剪应变率。MRF 阻尼器处于低速运动状态时,剪应变率 $\dot{\gamma}$ 的值就很小,因此第2项可忽略。

### 2.1 设计指标

MRF 阻尼器由于 MRF 的优异特性而具有较大的力矩/重量比,故其适合安装在设备的末端或者作为便携式

半主动动力反馈装置来使用,用于向手指提供力反馈信息。这就要求 MRF 阻尼器的体积尽可能小,还要能够产生手指抓取虚拟物体时所需的抓取力矩。MRF 阻尼器从感知扰动到产生阻尼力的过程所需要的时间即为响应时间,主要由 MRF 阻尼器机构的响应时间和控制电路的响应时间两部分组成,由于不涉及到控制电路的设计,所以这里的响应时间只是前者。MRF 阻尼器响应时间决定了阻尼器的应用范围和减振效果,响应时间越短,越有利于实时控制, MRF 阻尼器的性能越好。本 MRF 阻尼器的设计指标是外径不能大于 35 mm,高度不能大于 22 mm,阻尼器可输出力矩 300 N·mm,响应时间小于 70 ms。

### 2.2 蛇形磁路的实现

#### 2.2.1 蛇形磁路分析

要想设计出的旋转式 MRF 阻尼器既有较小的体积,又能输出较大的力矩,那么在设计的时候就要考虑到,当有外加磁场的时候,增大被磁通影响的 MRF 的表面积。在相同的体积下,圆筒式的 MRF 阻尼器的输出力矩要明显小于多片圆盘式的 MRF 阻尼器输出力矩。其原因在于同等体积下,圆筒式的 MRF 阻尼器切割 MRF 的有效工作面积非常小。圆筒式 MRF 阻尼器优点在于结构非常简单易于加工和装配,在外界对阻尼力或阻尼力矩要求不高的条件下,可以用圆筒式阻尼器代替片式阻尼器。

目前,一般的旋转式 MRF 阻尼器的绕线圈是由隔磁材料制成的工字型零件,处在当中的线圈通电后产生的磁场依次通过导磁外壳, MRF 间隙和导磁转子,转子是导磁盘片或者是导磁圆筒。但是这种结构设计最大的缺陷在于磁力线只能单次穿越某一区域的 MRF 间隙,易造成剪切面积的浪费。

磁力线穿越 MRF 间隙的次数越多,有效剪切面积的利用率就越高,相应的输出阻尼力矩也就越大。传统的多片式 MRF 阻尼器通过增加盘片数的方法来增大阻尼力矩也是利用了这个原理<sup>[12]</sup>。随着动盘和静盘数目的增加,磁力线穿越 MRF 间隙的次数也增加了。但是,传统多片式 MRF 阻尼器并没有考虑到动盘侧面积的有效利用,若是设计出一种弯曲的蛇形磁路多次穿越 MRF 间隙,充分利用动盘的侧面积,将会显著提升 MRF 阻尼器的性能。

在保持多片式结构、不限定阻尼器体积的情况下,蛇形磁路穿越 MRF 间隙的次数显然是越多越好,显然此时输出力矩只和剪切面积有关,这是一个近似线性的关系。但是本实验室致力于 MRF 阻尼器的小型化研究,对设计的 MRF 阻尼器的体积有限制,同时还要获得较大的输出力矩和较短的响应时间。需要注意的是,蛇形磁路也是一把双刃剑,蛇形磁路增大了输出阻尼力矩,但同时可能会影响磁滞。因此蛇形磁路穿越 MRF 间隙的次数不可能无限放大,必然存在一个最佳值。

使用 ANSYS Maxwell 软件对本实验室历代不同 MRF

阻尼器模型进行有限元分析的仿真,仿真图中选取的 MRF 是美国 LORD 公司生产的 MRF-140CG 型,且只取阻尼器的右侧截面进行仿真。如图 1 所示,图 1(a)是没有蛇形磁路的 MRF 阻尼器的仿真图,图 1(b)是两次穿越侧面 MRF 间隙的 MRF 阻尼器的仿真图,图 1(c)是 4 次穿越侧面 MRF 间隙的 MRF 阻尼器的仿真图。

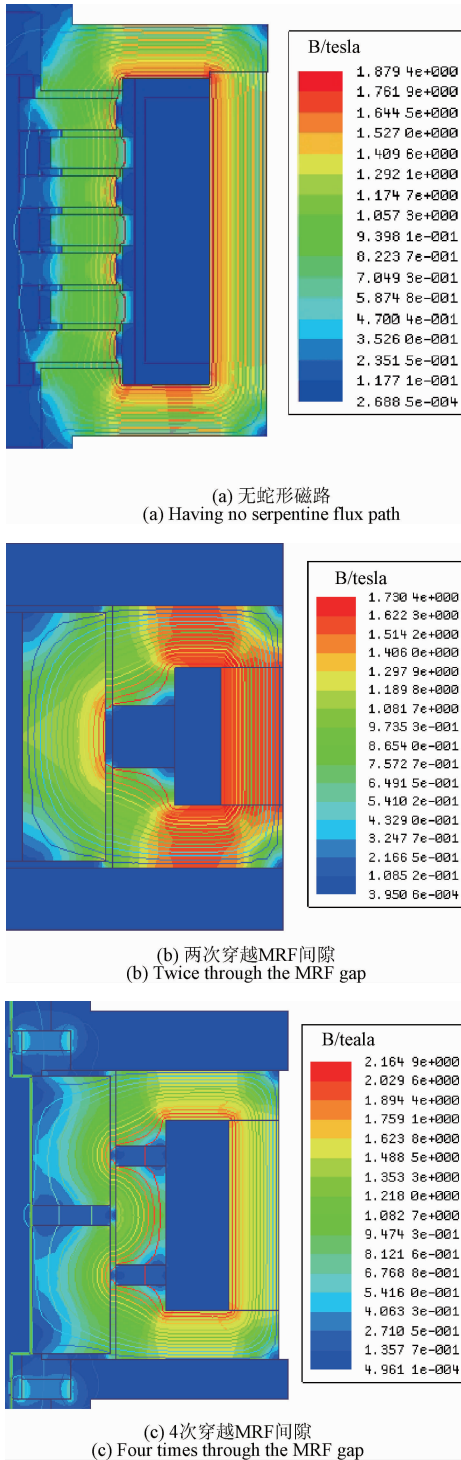


图 1 不同 MRF 阻尼器的有限元分析结果

Fig. 1 The FEA result diagram for different MRF dampers

由图 1 可知,上下对称式结构的 MRF 阻尼器穿越侧面 MRF 间隙的次数必然为偶数次,否则不能形成闭合的磁路。通过比较我们可以发现,图 1(a)所示为传统的多片式 MRF 阻尼器,虽然盘片数多,但是侧面积没有被利用。图 1(b)只有两次穿越侧面 MRF 间隙,有效剪切面积太少。图 1(c)中 4 次穿越侧面 MRF 间隙,虽然有效利用了动盘的侧面积,但是动盘数太少,且动盘的横截面几乎没有被利用。图 1(b)、(c)中动盘的厚度都不小于 6 mm,小型多片式 MRF 阻尼器的盘片厚度通常取 1.5 ~ 2 mm<sup>[12]</sup>,再薄会影响它的强度,图 1(a)中盘片的厚度就是 1.5 mm。

6 次、8 次甚至更多次穿越侧面 MRF 间隙必然会继续增大阻尼器的输出力矩,但是由于小型化的要求和加工水平的限制,使得穿越侧面 MRF 间隙次数不可能一直增加。以图 1(c)中结构为基准,取导磁盘片厚度为 1.5 mm,隔磁盘片厚度为 1 mm,经过计算,8 次穿越侧面 MRF 间隙的设计远远超出设计指标要求,6 次穿越侧面 MRF 间隙的设计虽然能勉强达到设计指标,但是这样的设计会导致加工困难、装配繁琐,零件加工带来的累积误差可能使装配体转轴出现卡死的情况,同时 MRF 间隙的高度也很难保持在一个定值。为了尽量规避以上问题,本文取穿越 MRF 间隙的次数的最佳值为 4 次。

### 2.2.2 蛇形磁路设计

综合以上分析,根据材料导磁性的不同,设计出一种由高导磁率材料 DT4 和隔磁材料铝组成的组合绕线圈。当 MRF 填满绕线圈、动阻尼盘、静阻尼盘和铝盘之间的间隙时,线圈通入直流电后,线圈产生的磁场依次通过组合绕线圈、MRF 间隙、动阻尼盘、静阻尼盘和外壳壳体,其中磁通路径多次垂直穿过 MRF 间隙,形成蛇形的闭合弯曲磁场,阻尼器左右对称,其右侧磁路路径如图 2 所示,磁力线多次穿过 MRF 间隙,极大地增加了被磁通影响的 MRF 表面积。这样可以在获得比较大的输出力矩的同时不用增大阻尼器体积。

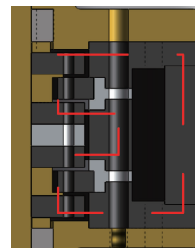


图 2 蛇形磁路路径

Fig. 2 Serpentine flux path

保留了以往片式 MRF 阻尼器的动阻尼盘和静阻尼盘相结合的设计,同样也增大了可以被磁通影响的 MRF 的表面积,这样可以进一步缩小 MRF 阻尼器的尺寸,同时可以获得比较大的输出阻尼力矩。

### 2.3 剖面示意图及工作原理

多片式 MRF 阻尼器的剖面示意图如图 3 所示。

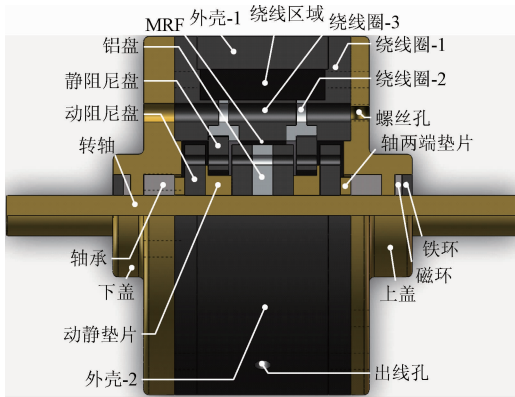


图3 MRF 阻尼器剖面示意图

Fig.3 Cross-section diagram of the MRF damper

阻尼器的零部件共 27 个,其中构成闭合蛇形磁路的部分包括 4 片 DT4 动阻尼盘、2 片的 DT4 静阻尼盘、2 片外壳壳体(壳体 - 1,壳体 - 2)、1 套组合绕线圈(绕线圈 - 1,绕线圈 - 2,绕线圈 - 3)、铝盘以及 MRF。动阻尼盘、铝盘、垫片都可以随轴转动,静阻尼盘固定在组合绕线圈上,不能转动。外壳壳体、部分组合绕线圈(绕线圈 - 1,绕线圈 - 3)、动阻尼盘和静阻尼盘都是用高磁导率材料 DT4 制成,铝盘和绕线圈 - 2 是由隔磁材料铝制成,转轴和所有垫片都是由隔磁材料铜组成。动阻尼盘和组合绕线圈、动阻尼盘和静阻尼盘之间留有间隙,间隙内充满了 MRF。

MRF 受磁场激发,其内部的磁性颗粒沿磁场方向呈链状排布,当转轴转动的时候,动阻尼盘相对于静阻尼盘在垂直于磁场的水平面内做旋转运动,动阻尼盘会切割沿磁场方向排列的链状的磁性颗粒,从而产生剪切应力来阻碍轴的转动。另外,当动阻尼盘随转轴转动的时候,动阻尼盘的侧面相对于与它平行的组合绕线圈的内侧面在垂直于磁感线方向产生相对运动,同样会切割沿磁场方向排列的链状的磁性颗粒,此时也会产生阻尼力来阻碍轴的转动。

最终获得的总的阻尼力矩是两者之和。在组合绕线圈、动阻尼盘、静阻尼盘和 MRF 达到磁饱和之前,阻尼力矩随加在 MRF 上的磁感应强度的变化而变化,而磁感应强度随线圈电流变化而变化,因此可通过控制线圈电流的大小来控制输出的阻尼力矩的大小。

### 2.4 力矩模型

在外加磁场的作用下,MRF 阻尼器输出的总阻尼力矩  $T$  由 3 部分组成:屈服剪切应力  $\tau_y(B)$  产生的阻尼力矩  $T_1$ 、MRF 的粘度产生的阻尼力矩  $T_2$  和装置的摩擦力产生的阻尼力矩  $T_3$ 。 $T_2$  不是一个定值,随剪切速率  $\dot{\gamma}$  的变化而变化。在实际的应用中,多片式 MRF 阻尼器一般工作在低速环境下,而且由于  $T_1 \gg T_2$ ,通常采取放大  $T_1$  而忽略  $T_2$  来达到外界对阻尼力矩的要求。有如下表达式:

$$T \approx T_1 + T_3 \quad (2)$$

由屈服剪切应力  $\tau_y(B)$  产生的阻尼力矩  $T_1$  可以分解为动、静阻尼盘相对运动产生的阻尼力矩  $T_{11}$  和动阻尼盘和组合绕线圈相对运动产生的阻尼力矩  $T_{12}$ 。

$T_{11}$  的简化力矩计算模型如图 4 所示。由于动阻尼盘和静阻尼盘的半径很相近,故可以假设动阻尼盘和静阻尼盘的半径均为  $R_o$ ,取动静垫片的宽部半径  $R_1$  和窄部半径  $R_2$  的平均值为  $R_i$ 。根据上述假设,在 MRF 的任一液体层的半径  $r$  处取一微小圆环,微小圆环的面积为  $dS = 2\pi r dr$ ,当轴以角速度  $\omega$  旋转时,微小圆环中的 MRF 产生的剪切力矩为  $dT = 2\pi r^2 \tau_y(B) dr$ 。那么动、静阻尼盘相对运动产生的阻尼力矩  $T_{11}$  为:

$$T_{11} = n \int_{R_i}^{R_o} 2\pi r^2 \tau_y(B) dr \quad (3)$$

式中: $n$  表示处于动阻尼盘和静阻尼盘之间工作面的个数,本设计中  $n = 8$ 。化简可得:

$$T_{11} = n \frac{2}{3} \pi (R_o^3 - R_i^3) \tau_y(B) \quad (4)$$

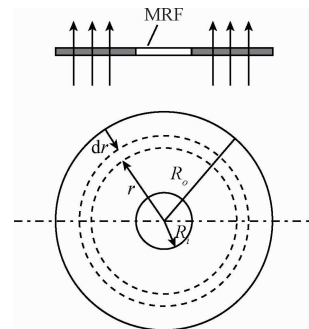


图4 力矩模型图

Fig.4 Torque model diagram

另外,假设  $L$  为磁场垂直穿过 MRF 的有效作用长度,动阻尼盘厚度为  $l$ ,绕线圈 - 2 宽部厚度是窄部的 3 倍,窄部厚度为  $t$ ,计算可知  $L = ml - 2(t - h)$ , $m$  为动阻尼盘个数,本设计中  $m$  取 4,故动阻尼盘和组合绕线圈相对运动产生的阻尼力矩  $T_{12}$  的简化计算公式可以表示为:

$$T_{12} = 2\pi R_o^2(ml - 2(t - h))\tau_y(B) \quad (5)$$

式中: $R_o$ 为动阻尼盘半径, $\tau_y(B)$ 为MRF的屈服剪切应力, $h$ 为MRF间隙高度。综上所述,由于屈服剪切应力 $\tau_y(B)$ 产生的总阻尼力矩为:

$$T_1 = T_{11} + T_{12} \quad (6)$$

机械摩擦力产生的阻尼力矩 $T_3$ 是由机械连接装置产生的。在装配过程当中,一定要使MRF阻尼器的转轴与上下端盖、组合绕线圈、动阻尼盘、静阻尼盘保持垂直,否则装配完毕之后其机械摩擦力产生的阻尼力矩非常大,转轴很难做旋转运动。在设计过程当中,在不影响MRF阻尼器其它因素时,应使 $T_3$ 尽可能小。

### 2.5 铁磁密封

旋转式MRF阻尼器设计的另一个难点在于如何对MRF进行很好的密封。MRF阻尼器传统的堵漏方式是采用橡胶O型圈。在实际使用中,O型圈的缺点还是特别明显的。O型圈在受到挤压时,其发生的形变是随机的,是不可控的,这就造成产生的堵漏效果不平均。不仅如此,O型圈的形变有可能会造成装配的时候零件与转轴不垂直,严重影响装配精度。

因此在本设计中采用磁环代替O型圈,这样做的好处于于磁环的磁场可以激发磁环附近的MRF,改变其流变特性,使其呈类固态不再以液体的方式漏出。这里需要特别注意的是磁环放置的位置,传统的设计思想是考虑将磁环放在端盖内部,但这很容易造成磁环和MRF距离过近。磁环一旦和MRF距离太近,那么会立即影响MRF的流动性,这样会明显增大MRF阻尼器的初始阻尼力。当给线圈通电时,如果磁环和MRF距离过近,线圈电流产生的磁场和磁环的磁场会相互叠加,在进行磁场有限元分析的时候会严重影响分析结果。

另外,磁环放在端盖内部还会给注射MRF带来很大的麻烦。当把MRF从上盖开始向阻尼器内部注射时,一旦注射的MRF靠近磁环便会被其影响其流动性,使其不再向底部流动,导致很难将整个间隙注满。因此,如图3所示,本设计将磁环放置在端盖外面,并使用铁环压紧,使其与空气隔离,磁环、铁环和间隙中的MRF构成闭合磁路。这样既可以解决漏液的问题,又可以避免磁环和MRF距离过近的问题。

### 3 多片式MRF阻尼器的磁场有限元分析

虽然根据设计指标初步确定了阻尼盘半径 $R_o$ ,但是还有一些其他参数需要考虑,例如MRF间隙的高度 $h$ 、外壳的壁厚、线圈匝数等。MRF间隙的高度 $h$ 越小越好,一般在0.25~2mm之间<sup>[13]</sup>,取MRF间隙高度 $h$ 为0.3mm,其他参数由有限元分析的结果确定。对MRF阻尼器进行有限元分析的目的有两个:1)验证磁路设计的

正确性,即磁力线应被聚集在高磁导率材料构成的期望闭合回路中;2)通过磁饱和分析,合理配置阻尼器的结构参数,使磁路中MRF和DT4的磁感应强度同时达到饱和,充分发挥MRF和DT4的作用。

采用ANSYS Maxwell软件对MRF阻尼器进行二维静态磁场分析,由于阻尼器左右对称,故只取右侧进行分析。动阻尼盘、静阻尼盘、外壳壳体、绕线圈-1和绕线圈-3均采用导磁材料DT4制成,上下端盖、垫片和转轴均采用绝磁材料铜制成,绕线圈-2和铝盘采用绝磁材料铝制成,线圈由直径0.3mm的漆包线绕制而成。MRF阻尼器的结构参数,如表1所示。

表1 MRF阻尼器的设计参数

Table 1 The design specifications of the MRF damper

参数	数值
MRF间隙高度 $h$	0.3
动阻尼盘外径 $d_1$	14
静阻尼盘内径 $d_2$	8
阻尼盘、铝盘厚度 $l$	2
阻尼器外径 $d_3$	35
绕线圈-1工字顶厚度 $l_1$	2.5
绕线圈-2右台阶厚度 $t$	1
外壳壳体厚度 $l_2$	3.2
绕线圈-3外径 $d_4$	22.6
外壳壳体内径 $d_5$	28.6

MRF-140CG的屈服应力 $\tau_y(B)$ 的变化范围是0~58kPa,粘度 $\eta$ 约为(0.280±0.070)Pa·s。在软件中设定好有限元分析的边界条件,输入线圈安匝数为450安匝。有限元分析结果如图5所示。

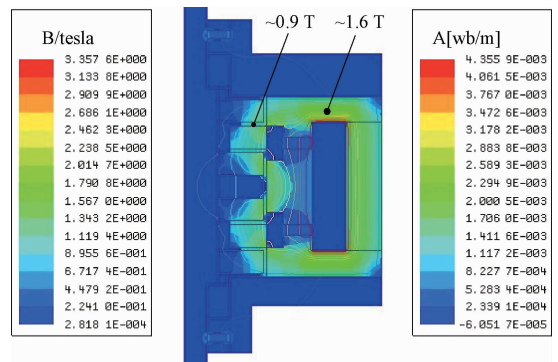


图5 有限元分析结果

Fig. 5 Finite element analysis result diagram

从图5可以明显地看出,几乎所有的磁力线都被聚集在期望的闭合磁路中,软件中不同材料之间设置的是气球边界,图中极少量磁力线由于气隙边缘有向外扩张的趋势,这些磁力线不影响仿真结果,所以磁路设计正

确。根据 B-H 曲线, MRF 的饱和磁感应强度约为 0.9 T, MRF 的特性和 B-H 曲线见其产品手册, DT4 的饱和磁感应强度约为 1.6 T。如图 5 所示, MRF 的磁感应强度约为 0.9 T, 阻尼盘和组合绕线圈的最大磁感应强度值接近 1.6 T, 但是组合绕线圈的各部分并不是同时达到饱和, 绕线圈-2、绕线圈-3 和外壳壳体的壁厚设置不太合理。线圈匝数为 375 匝, 线圈电流为 0~1.2 A, MRF 间隙的磁感应强度为 0~0.9 T, 而电流在到达 1 A 以后, MRF 间隙处的磁感应强度增长很缓慢, 发生磁饱和现象<sup>[14]</sup>。

上述分析表明, 外壳壳体厚度、组合绕线圈工字顶厚度和绕线圈-3 的外径偏大, 材料浪费, 不能做到在 MRF 达到饱和的时候也同时达到饱和, 需要减小厚度。绕线圈-2 右侧台阶的厚度偏小, 导致隔磁效果较差, 需要增加厚度。改进后的磁流变阻尼器结构参数, 如表 2 所示。

表 2 优化后的设计参数

Table 2 The design specifications after improvement

参数	数值
外壳壳体厚度 $l_2$	2.5
绕线圈-1 工字顶厚度 $l_1$	2.3
绕线圈-2 右台阶厚度 $t$	2
绕线圈-3 外径 $d_4$	21.6
阻尼器外径 $d_3$	33.6

通过调整磁路中组合绕线圈各部分的厚度, 使得绕线圈各部分能在 MRF 达到磁饱和的同时, 尽可能地达到 DT4 材料的磁饱和值, 避免绕线圈某些位置提前达到磁饱和, 从而优化了阻尼器的结构, 避免了材料浪费, 还解决了绕线圈-2 的漏磁问题。MRF 阻尼器实物图如图 6(a) 所示, 其外径为 33.6 mm, 高度为 21.6 mm, 线圈匝数约为 450 匝, 约重 200 g。图 6(b) 为外径 35 mm, 高度为 20 mm 的传统多片式 MRF 阻尼器。

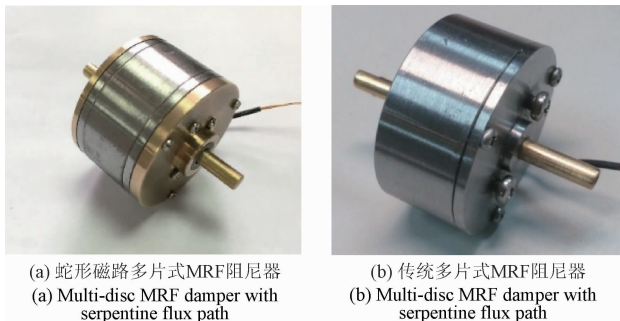


图 6 MRF 阻尼器实物

Fig. 6 Photos of the MRF dampers

## 4 实验验证与分析

实验平台如图 7 所示, 实验设备包括多片式 MRF 阻尼器、步进电机、联轴器和力矩传感器。步进电机驱动阻尼器, 电机驱动器控制步进电机的位移和速度, 力矩传感器测量输出阻尼力矩的大小。

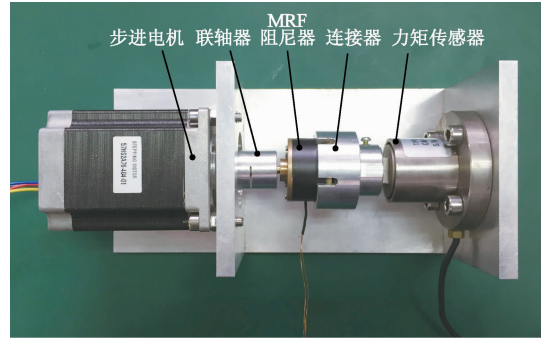


图 7 实验平台

Fig. 7 The experiment platform

### 4.1 输出力矩

实验开始时不给阻尼器通电, 当电机通电后, 阻尼器随着电机以恒定的角速度 ( $180^\circ/\text{s}$ ) 自由旋转。随后给阻尼器通电, 在电流增大的过程中, 电机转动受到的阻尼力会越来越大, 最终电机堵转。设定电流变化区间为 0~1.2 A, 首先以 0.1 A 为步长逐渐增大电流, 到达 1.2 A 后再以相同的步长逐渐减小电流到 0 A, 采用力矩传感器测量输出阻尼力矩的大小。本实验将采取对比实验的方式, 将分别比较: 1) 带有蛇形磁路的多片式 MRF 阻尼器和传统多片式 MRF 阻尼器输出力矩的差异; 2) 带有蛇形磁路的圆筒式 MRF 阻尼器和带有蛇形磁路的多片式 MRF 阻尼器输出力矩的差异。实验时在每个测量点上测量 10 组数据, 取其平均值作为输出力矩的大小。蛇形磁路 MRF 阻尼器和同体积传统多片式 MRF 阻尼器的输出力矩和输入电流的关系如图 8 所示。

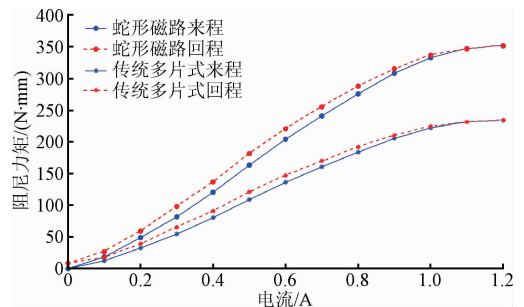


图 8 输出力矩和输入电流的关系

Fig. 8 Torque output versus current input

MRF 阻尼器因结构不同,应用环境不同,体积大小有明显差异,造成输出力矩不同,因此不能直接比较阻尼力矩。从减少变量的角度出发,比较单位体积下的输出力矩是比较合理的。通过比较表3前两行,可以验证了2.2节的分析,单位体积下,圆筒式 MRF 阻尼器的输出阻尼力矩确实明显小于多片式 MRF 阻尼器。圆筒式 MRF 阻尼器的有效剪切面积只有转子的一个侧面,远远小于多片式 MRF 阻尼器各阻尼盘的截面构成的有效剪切面积。因此多片式 MRF 阻尼器要优于圆筒式 MRF 阻尼器。

表3 输出力矩对比表

Table 3 Output torque comparison table

结构特征	外径/mm	厚度/mm	最大力矩/(N·mm)	力矩/体积/(N·mm <sup>-2</sup> )
多片式蛇形磁路	33.6	21.6	350	0.018 3
圆筒式蛇形磁路 <sup>[15]</sup>	25	26.5	209.8	0.016 1
三圆盘式 <sup>[12]</sup>	32	18	260.7	0.018 0

通过比较上表3的第1和3行可知,在单位体积下,虽然都是多片式结构,但是由于磁力线穿越 MRF 间隙次数的增加,有效剪切面积也随之增加,因此带有蛇形磁路的多片式 MRF 阻尼器输出的阻尼力矩要优于普通的多片式阻尼器。从表格数据上看,两者相差的并不是特别明显,但若是在条件允许的情况下,继续增加阻尼盘的数量,或是增加阻尼盘的厚度,逐渐累加,这个差距还是相当可观的。

同时,由图8可知,当不给阻尼器通电时,由于转轴处摩擦力的影响,阻尼器会有一个很小的初始阻尼力矩,该阻尼力矩不大于 5.5 N·mm。同时,可以从图8中观察到,在 0~1 A 的范围内,输出力矩和输入电流是呈线性关系的,且在大约 1 A 的时候, MRF 开始出现磁饱和现象,这也和有限元分析的结果相吻合,最大输出力矩为 350 N·mm,达到设计指标要求。

另外,在图中还可以观察到磁滞现象,虽然 MRF 的 B-H 曲线上观察不到磁滞,但是 DT4 中存在的磁滞会影响阻尼器的力矩-电流特性。磁滞现象的出现时因为磁性体的磁化存在着明显的不可逆性,当磁性体被磁化到饱和状态后,若将磁场强度由最大值逐渐减小时,其磁感应强度不是按照原来的途径返回,而是沿着比原来的途径稍高的一段曲线而减小。当电流回到 0 A 时,阻尼器输出力矩为 8.35 N·mm,动态范围为 35.3 dB。与其它阻尼器相比,本阻尼器的动态范围小于 43 dB<sup>[16]</sup>,大于 21 dB<sup>[17]</sup>。

从图8可以归纳出,相同体积下,蛇形磁路对多片式 MRF 阻尼器输出力矩的影响在于显著增大了输出力矩,但同时也会轻微增大磁滞。磁滞与最大输出力矩有关,输出力矩越大,磁滞越大。磁滞越小, MRF 阻尼器的性

能越好。虽然蛇形磁路会增大磁滞带来的轻微副作用,但是从整体上来看,它是利大于弊的。相比于蛇形磁路对输出力矩的提升,它对磁滞的影响就显得很小了。

4.2 响应时间

实验开始时,预先设定好力矩传感器的采样频率,给步进电机通电, MRF 阻尼器不通电,阻尼器随着步进电机以恒定的角速度(180°/s)旋转。此时给力矩传感器供电,突然给阻尼器输入 1 A 电流,阻尼器会产生一个明显的电流阶跃响应。 MRF 阻尼器转轴受扭产生的电信号放大后经 V/F 转换成为与力矩成正比的频率信号,在 PC 端记录下此信号,将数据处理后得到下图所示力矩-时间关系图。由图9可知, MRF 阻尼器的动态特性近似于一阶线性系统。阻尼器输出力矩的时间常数定义为从给定输入电流至阻尼器达到磁饱和总时间的 63.2%<sup>[18]</sup>。由此可知,蛇形磁路 MRF 阻尼器的响应时间为 60 ms。

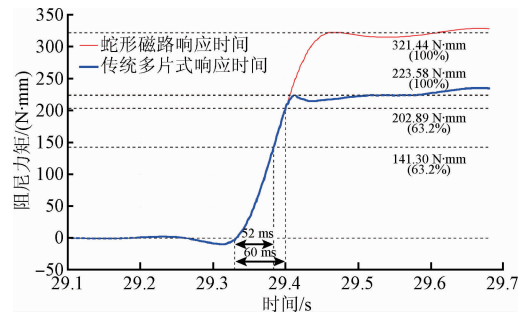


图9 MRF 阻尼器响应时间测量结果

Fig. 9 Response time test result of MRF dampers

通过图9可知,相同体积下,蛇形磁路会使得多片式 MRF 阻尼器的响应时间轻微延长 8 ms。响应时间的延长还与 MRF 阻尼器输出力矩的增大有关。虽然这样的影响不利于改善 MRF 阻尼器的性能,但是蛇形磁路对输出力矩提升更为显著,相比之下,蛇形磁路对响应时间的影响就可以忽略不计了。

由下表可知,本阻尼器响应时间比 Senkal D 等人<sup>[19]</sup>和 Nam Y. J. 等人<sup>[20]</sup>设计的阻尼器都要小,优于其他阻尼器,达到设计指标要求。从图9中还可以观察到一些轻微的抖动,这可能是由于 MRF 阻尼器的转轴和步进电机的转轴存在轻微的错位,因此响应时间的测量还有一定的改进空间。

表4 响应时间对比表

Table 4 Response time comparison table

阻尼器类别	响应时间/ms
本文设计	60
Senkal D 等人 <sup>[19]</sup> 的设计	67
Nam Y. J. 等人 <sup>[20]</sup> 的设计	170

MRF 阻尼器机构的响应时间是阻尼器的一项重要指标,它可以归结为 MRF 在保持体积流速不变情况下,由一种稳定流动状态转变为另一种稳定流动状态所需的时间。它取决于所选 MRF 的特性及磁路的设计,在阻尼器设计完成后就基本确定。

优化缩短 MRF 阻尼器的响应时间的途径和方法主要有:1)选择的 MRF 应具有磁性颗粒的体积含量大、塑性粘度低、响应速度快、工作温度范围宽等优点;2)在允许的条件下,尽量减小阻尼盘之间以及阻尼盘和绕线圈之间的 MRF 间隙的高度  $h$ ;3) MRF 内部含有气泡将导致响应时间延长,所以应该采用专用设备和技术将 MRF 注入阻尼器。

## 5 结 论

本文设计了一种能输出大力矩的小体积的多片式 MRF 阻尼器,该 MRF 阻尼器综合了蛇形磁路和多片式结构的优点,极大地增加了可被磁场激发的 MRF 的面积。在密封的问题上,使用铁磁密封代替了传统的橡胶 O 型圈密封,杜绝了漏液的情况出现。基于 Bingham 模型提出了输出阻尼力矩的数学模型,并对 MRF 阻尼器进行二维磁场有限元分析,验证了蛇形磁路的设计。根据磁场仿真结果,结合力矩输出的数学模型,预估 MRF 阻尼器的输出力矩,并进行了结构优化。磁场有限元分析可有效模拟导磁元件和 MRF 的饱和现象发生情况,为 MRF 阻尼器的高效准确设计提供了保证。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] KOHLI L. Redirected touching: Warping space to remap passive haptics [ C ]. IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), 2010: 129-130.
- [ 2 ] ŽLAJPAH L. Simulation in robotics [ J ]. Mathematics and Computers in Simulation, 2008, 79(4): 879-897.
- [ 3 ] ABATE A F, ACAMPORA G, LOIA V, et al. A pervasive visual - haptic framework for virtual delivery training [ J ]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2010, 14(2): 326-334.
- [ 4 ] VO D M, VANCE J M, MARASINGHE M G. Assessment of haptics-based interaction for assembly tasks in virtual reality [ C ]. Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems World Haptics, 2007: 494-499.
- [ 5 ] FISACKERLY S, ZADEH M H. Haptic-enabled virtual handwriting: Multimodal handwriting instructions for

young students [ C ]. IEEE International Symposium on Haptic Audio-Visual Environments and Games (HAVE), 2010: 134-139.

- [ 6 ] SIEBER A, VALDASTRI P, HOUSTON K, et al. A novel haptic platform for real time bilateral biomanipulation with a MEMS sensor for triaxial force feedback [ J ]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 142(1): 19-27.
- [ 7 ] BASORI A H, DAMAN D, BADE A, et al. The feasibility of human haptic emotion as a feature to enhance interactivity and immersiveness on virtual reality game [ C ]. International Conference on Virtual Reality Continuum and ITS Applications in Industry, 2008: 1-2.
- [ 8 ] 张登友, 鲁嘉, 刘奇, 等. 磁流变阻尼器的研究及应用现状 [ J ]. 中国仪器仪表, 2007, 28(10): 29-32  
ZHANG D Y, LU J, LIU Q, et al. Present status of research and application of magneto-rheological damper [ J ]. China Instrument, 2007, 28(10): 29-32.
- [ 9 ] 文辞, 宋爱国. 适用于力反馈的三圆盘磁流变液执行器工作机理及建模 [ J ]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(5): 892-897  
WEN C, SONG AI G. Working principle and modeling of three-plate magnetorheological fluid actuator for force feedback [ J ]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2012, 42(5): 892-897.
- [ 10 ] SENKAL D, GUROCAK H. Serpentine flux path for high torque MRF brakes in haptics applications [ J ]. Mechatronics, 2010, 20(3): 377-383.
- [ 11 ] 文辞, 宋爱国, 王爱民. 适用于力反馈的圆筒式磁流变液执行器的设计 [ J ]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 1921-1926  
WEN C, SONG AI G, WANG AI M. Design of a cylindrical magnetorheological fluid actuator for force feedback [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(9): 1921-1926.
- [ 12 ] 文辞, 宋爱国, 王爱民. 基于磁流变液的小型力反馈装置的设计① [ J ]. 高技术通讯, 2012, 22(12): 1310-1315  
WEN C, SONG AI G, WANG AI M. Design of a small force feedback device based on magnetorheological fluids [ J ]. Chinese High Technology Letters, 2012, 22(12): 1310-1315.
- [ 13 ] LIU B, LI W, KOSASIH P B, et al. Development of an MR-brake-based haptic device [ J ]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(6): 1960-1966.
- [ 14 ] 张红辉, 廖昌荣, 陈伟民. 磁流变阻尼器磁路设计与



性能的相关性研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(增刊3): 546-550.

ZHANG H H, LIAO CH R, CHEN W M. The correlation study on magnetic design and performance of MR damper [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(Suppl. 3): 546-550.

- [15] BLAKE J, GUROCAK H B. Haptic glove with MR brakes for virtual reality [ J ]. IEEE/ASME Transactions On Mechatronics, 2009, 14(5): 606-615.
- [16] SENKAL D, GUROCAK H. Compact MR-brake with serpentine flux path for haptics applications [ C ]. Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems World Haptics, 2009: 91-96.
- [17] AVRAAM M, HORODINCA M, ROMANESCU I, et al. Computer controlled rotational MR-brake for wrist rehabilitation device [ J ]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(15): 1543-1557.
- [18] KIM K-H, NAM Y-J, YAMANE R, et al. Smart mouse: 5-DOF haptic hand master using magneto-rheological fluid actuators [ C ]. Journal of Physics: Conference Series, 2009: 012062.
- [19] SENKAL D, GUROCAK H. Spherical brake with MR fluid as multi degree of freedom actuator for haptics [ J ]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20(18): 2149-2160.
- [20] NAM Y J, PARK M K. Performance evaluation of two different bypass-type MR shock dampers [ J ]. Journal of

Intelligent Material Systems and Structures, 2007, 18(7): 707-717.

## 作者简介



高瞻, 2013 年于苏州大学获得学士学位, 现为东南大学硕士研究生, 主要研究方向为机器人传感与控制技术。

E-mail: macMilan@126.com

**Gao Zhan** received his B. Sc. degree from Soochow University in 2013. Now he is a master student in Southeast University. His main research interest is robotic sensing and control technology.



宋爱国(通讯作者), 分别在 1990 年和 1993 年于南京航空航天大学获得学士学位和硕士学位, 1996 年于东南大学获得博士学位, 现为东南大学仪器科学与工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为机器人传感与控制技术。

E-mail: a. g. song@seu. edu. cn

**Song Aiguo** (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (NUAA) in 1990 and 1993, respectively, and obtained Ph. D. degree from Southeast University in 1996. Now he is a professor and supervisor for Ph. D. candidate in School of Instrument Science & Engineering, Southeast University now. His main research interest is robotic sensing and control technology.