

康复机用多片旋转型磁流变阻尼器研究*

李 辉, 龚兴龙, 张培强

(中国科学技术大学 力学和机械工程系, 中国科学院材料力学行为与设计重点实验室, 安徽 合肥 230027)

摘 要: 康复机是一种能自身产生阻尼力来抵抗人体施加的作用力, 达到锻炼人员四肢力量的器械, 已被广泛应用于医疗、大众健身等领域, 其核心部件为产生可控阻尼力的阻尼器。磁流变液是一种将微米尺寸磁性颗粒混合在非磁性液体中形成具有诸多优良特性的浓悬浮液。而磁流变阻尼器是利用磁流变液做介质进行工作的一种智能阻尼器, 它具有重量轻、响应快和能耗低等突出特点。将此阻尼器用于康复机的阻尼部件, 能降低噪音、减少污染, 延长使用寿命, 并能实现阻尼力的连续可控调节。

本文综合考虑了旋转型磁流变阻尼器工作片数、间隙、隔磁、散热及加工等诸多因素, 研制出一种有效提高磁流变液工作效能和器件工作稳定性的阻尼器; 并建立了研究该阻尼器主要动力特性的实验。实验结果表明, 该阻尼器的阻尼力矩、力矩可控区间、工作稳定性等较单片型阻尼器均有较大幅度提高, 散热性能有明显改善。

关键词: 磁流变阻尼器; 动力特性; 康复机

中图分类号: TH703.62

文献标识码: A

文章编号: 1001-9731(2006)05-0765-03

1 引 言

康复机是一种能产生阻尼力来抵抗人施加的作用力, 达到锻炼人员四肢力量的器械, 已应用于医疗、健身等领域。其核心部件为产生可控阻尼力的阻尼器, 传统康复机的阻尼部件绝大部分为机械摩擦式, 其寿命短、噪音大, 且只能手动离散调整阻尼力大小。

磁流变液是智能材料家族中的重要分支。在磁场作用下, 磁流变液能在瞬间(毫秒量级)由普通的牛顿流体状态转变成类固体状态, 剪切屈服强度和表观粘度会增加若干个数量级并随磁场强度连续可调^[1]; 去除磁场后, 材料又恢复到原来状态。正是由于其这些高科技特征, 磁流变液近 20 年来在工程上的应用探索获得迅猛发展。当前, 半主动振动控制和力矩传递是磁流变液应用的重要增长点。冲击缓冲器、可调阻尼器、制动闸和密封装置是磁流变液最活跃的应用领域^[2~5]。它们具有重量轻, 灵敏度高、响应快、噪音小、无污染和能耗低等突出优点。国外, 美国 LORD 公司研究设计的商用磁流变阻尼器最有代表性, 有起减振作用的洗衣机阻尼器, 以及在建筑中产生 180kN 阻尼

力抗击地震的阻尼器。国内, 此类阻尼器件多局限于直线式和单阻尼盘片旋转型阻尼器。

根据磁流变液在磁场作用下的特点而设计的智能阻尼器完全能取代现有康复机市场上机械摩擦式阻尼部件, 且工作时无任何噪音和污染, 使用寿命长, 并能实现阻尼力的连续调节。在研制过程中, 综合考虑了流体流变性能、器件工作模式、磁回路设计、磁感应引导和线圈构造等关键参数, 在应用有限元方法对多片阻尼器结构和磁路进行计算优化的基础上, 加工了样机, 并设计实验对扭矩进行测试。

2 阻尼器设计和研制

2.1 磁流变液力学模型

对于工程应用, 采用简单的宾汉模型(Bingham model)就可以描述磁流变液在稳态剪切条件下的力学模型:

$$\tau = \tau_y(B) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma} \quad |\tau| \geq \tau_y$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad |\tau| < \tau_y \quad (1)$$

式中 η 为磁流变液的粘性系数, $\dot{\gamma}$ 为剪切应变率。 $\tau_y(B)$ 定义为磁流变液动态屈服应力, 随外界磁感应强度 B 增加而增加, 实验中发现, 当磁流变液中磁性颗粒未达到完全饱和前可以写成磁感应强度的幂函数形式^[6]:

$$\tau_y(B) = \alpha B^n \quad (2)$$

式中 α 为常数, 幂指数 n 因材料的不同在 1~2 之间变化(由实验决定)。

图 1 表示磁流变液剪切屈服强度和磁场、应变、应变率之间的关系^[7]。

对于圆片型旋转阻尼器的阻尼力矩, 表示为 MRF 剪切应力和盘片面积乘积对转轴取矩并求积分, 即:

$$M_r(B, \omega) = \iint_s \tau \left(B, \frac{\omega r}{h} \right) r ds = 2\pi \int_0^R \tau \left(B, \frac{\omega r}{h} \right) r^2 dr \quad (3)$$

式中 ω 为旋转角速度, h 为转动盘片和固定面的间隙大小, R 为盘片半径。由于磁场稍大后, 磁感应强度使磁流变液产生的剪切力远远大于粘性力, 所以可以认为剪切屈服强度仅为磁感应强度的函数, (3) 式可以简化为:

* 基金项目: 安徽省 2005 年度重点科研资助项目(05021019)

收到初稿日期: 2005-12-15

收到修改稿日期: 2006-02-07

通讯作者: 龚兴龙

作者简介: 李 辉 (1975-), 男, 安徽合肥人, 在读硕士, 师承龚兴龙教授, 从事智能材料应用方面的研究工作。

$$M_t = \frac{2}{3} \pi R^3 a B^n \quad (4)$$

从(4)式看出,要提高阻尼力矩,除改进磁流变液本身性能外,要求扩大阻尼器外径、提高磁感应强度等。然而,磁流变液强度有限,扩大阻尼器外径使器件笨重,提高磁感应强度也受到线圈、电流等因素制约。因此,通过改进结构、优化磁路,提高磁流变液工作效能才是问题的关键。

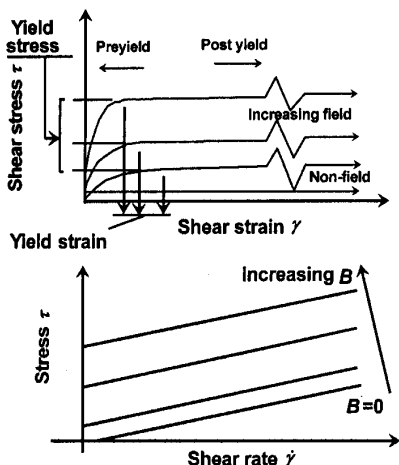


图1 MRF 剪切屈服强度和磁场、应变、应变率的关系图^[7]

Fig 1 The relationship between stress, strain and strain ratio of MRF^[7]

2.2 阻尼器结构和磁路优化设计

本文所述阻尼器主要有以下几个特点:首先是缩小盘片间隙为 0.75mm,降低系统磁阻。因为数值模拟表明,随工作间隙减小其力矩则呈现快速增长态势,同时考虑加工精度和液体加注方便;其次,在中轴和阻尼片之间嵌入隔磁铜套,将磁场人为地推向阻尼片外缘。由于盘片外圈力臂长,相对中轴来说,相同磁感应强度对器件力矩贡献更大,能充分发挥磁流变液的工作效能;第三,磁回路从左侧线圈→左端盖→中轴→右端盖→右线圈→磁流变液和阻尼片相互间隔区域→左侧线圈,如图 2 所示。

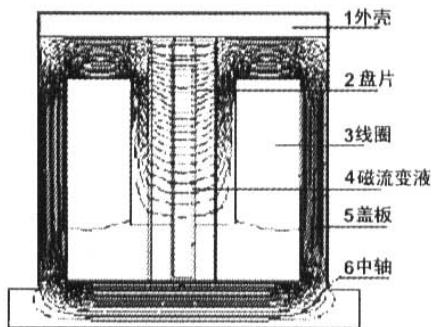


图2 优化计算后的磁场分布图

Fig 2 Optimized magnetic field

外壳用铜质材料能改善散热和磁场屏蔽效果。考虑工作空间的尺寸限制,阻尼片数目为 3 片,其中两侧

的两片随中轴一同旋转称动阻片;中间一片同外壳固定连接称静阻片。

图 3 为设计出的康复机上使用的阻尼器结构示意图,整体外观为圆柱型,包括中轴、阻尼片、线圈和外壳等主要部件,除少量黄铜外,全部采用磁导率高的纯铁加工完成。

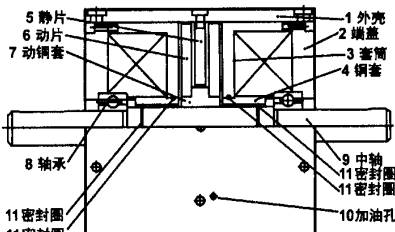


图3 阻尼器结构示意图

Fig 3 Damper structure

3 阻尼器动力特性的测试

3.1 动力特性测试系统

为进一步研究该阻尼器动力学特性,特别是力矩和电流之间关系,本文设计了一套测试方法,如图 4 所示。阻尼器主轴用两个带有滚珠轴承的支座支撑在基座上,将阻尼器的外壳和力测量设备相连后固定在基座上;计算机通过 DSP 线路板控制步进电机驱动阻尼器旋转速率,获得不同应变率下的力矩和电流关系。无阻尼力矩时,外壳和主轴相对自由转动,测力计读数为零;有阻尼力矩后,外壳会限制主轴转动,而测力计将测量此时的阻尼力大小。改变励磁电流大小来改变阻尼器内部磁感应强度,磁流变液的剪切屈服强度和阻尼力随之变化。阻尼器外壳温度变化,可以通过温度计的热电偶探头测到。

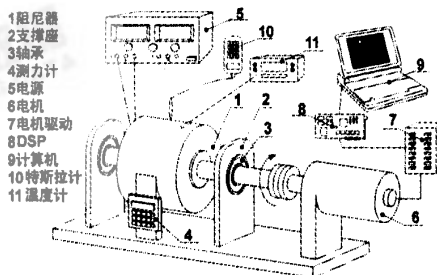


图4 阻尼器动力特性测试原理图

Fig 4 Testing system for characteristics of MRD

根据上述实验思想,本文对恒转速(100N/min)下的励磁电流和阻尼力之间关系进行测量,实验装置如图 5 所示。本实验采用平衡力矩法测量,液体为美国 LORD 公司的 MRF-241ES;阻尼力臂为 0.16m;两励磁线圈各取 800×2、1100×2、1400×2、1700×2 匝 4 组抽头,连接方式为串联和并联两种。表中力矩值单位均为 N·m。

3.2 实验结果

实验中测试的阻尼力矩和励磁电流关系表示成图

6 曲线。从两图均可看出随线圈匝数的递增,力矩值逐渐增大,且增长的幅度逐渐趋缓;相同电流条件下,采用串联方式比采用并联方式连接力矩值更大些,实验结果与前期数值模拟计算结果相吻合。

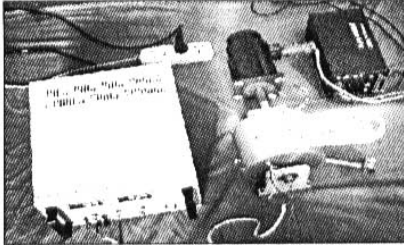


图5 阻尼器力矩测试实验装置图

Fig 5 Experimental device to measure torque

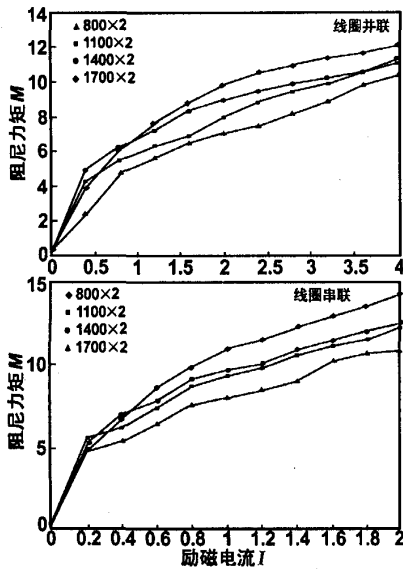


图6 阻尼力矩和励磁电流关系曲线

Fig 6 Damping torque-current curves by multiple numbers coils

1A 电流下,分别对原中国科大研制的单片旋转阻尼器 D1,美国 LORD 公司 RD-2069 型商用阻尼器 D2 及本文研制的多片旋转型阻尼器 D3 的力矩值进行比较: M_{D1} 约 $3.402\text{N}\cdot\text{m}$ 、 M_{D2} 约 $11.003\text{N}\cdot\text{m}$ 、 M_{D3} 约 $10.841\text{N}\cdot\text{m}$ 。力矩可调倍数 L 分别为 $L_{D1}=8$ 、 $L_{D2}=26$ 、 $L_{D3}=31$ 。可见 D3 无论是力矩值还是力矩可调倍数较 D1 都有较大幅度提高,和 D2 基本相当。

4 结 论

本文针对康复机设计了一种多片旋转式磁流变阻尼器,通过对其结构和磁路设计、数值计算、选材加工和实验测试的研究,提出了相应的结构和磁路优化方案。实验表明,阻尼力矩值受阻尼盘片数、介质工作间隙、线圈匝数、线圈连接方式等因素的综合影响,通过优化能有效提高最大阻尼力矩值和扩大力矩控制范围。另外,该阻尼器以 $100\text{N}\cdot\text{m}$ 转速连续工作 1h,壳体表面温度不超过 25°C ,说明用导磁和隔磁材料设计磁路,能改善器件散热效果。

致谢:感谢中国科学院“百人计划”项目对本课题的大力支持!

参考文献:

- [1] Carlson J D, Jolly M R. [J]. *Mechatronics*, 2000, 10: 555-569.
- [2] Jolly M R, Bender J W, Carlson J D. [J]. *Intelligent Material Systems and Structures*, 1999, 10(1): 5-13.
- [3] Spencer B F, Dyke S J, Sain M K, et al. [J]. *Engineering Mechanics*, 1997, 123: 230-238.
- [4] Rabinow J. [J]. *AIEE Transactions*, 1948, 67: 1308-1315.
- [5] Bossis G, Khuzir P, et al. [J]. *Magnetism and Magnetic Materials*, 2003, 258: 456-458.
- [6] Jin Y, Tang X L, Wang X J, et al. [J]. *Chinese Experimental Mechanics*, 1998, 13: 168-173.
- [7] 李卫华. 有关电流变液、磁流变液若干应用基础问题的研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 1999. 12.

Study on multidisc rotary magnetorheological damper for recovery machinery

LI Hui, GONG Xing-long, ZHANG Pei-qiang

(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Mechanics and Mechanical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Recovery machinery usually works to resist force from man's body through damping components. It has been widely applied to medical treatment, people's training and so on. Magnetorheological fluids (MRF) consist of dispersed micron size particles and a carrier fluid. These fluids exhibit fast and large reversible changes in their rheological characteristics when they are subjected to external magnetic fields. By using these rheological properties, magnetorheological damper have many advantages, such as light weight, high sensitivity, quick response, low noise and so on.

In this paper, by considering the factors of working disk, the gap, the magnetic field distribution and heat elimination, a kind of rotary MRF damper is designed for recovery machinery. A testing system for measuring the damping torque is also set up. Results show that this kind of MRF damper has large torque and wide controllable range. Its stabilization and heat elimination are also improved.

Key words: magnetorheological damper; dynamical characteristics; recovery machinery