

文章编号:1001-5132(2007)04-0547-05

基于磁流变液的回转式阻尼器设计与有限元分析

苏会强, 郑 堤

(宁波大学 工学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 根据磁流变液在磁场作用下可进行固-液转换的特点, 设计了一种回转式阻尼器, 并建立了相应的阻尼器力矩模型, 又利用 ANSYS 9.0 软件对其磁场分布进行了仿真. 总结了设计磁流变阻尼器应注意的问题, 为磁流变液阻尼器的结构设计和制作提供了相应的理论依据.

关键词: 回转式磁流变阻尼器; 磁场分析; 有限元分析

中图分类号: TH138

文献标识码: A

磁流变液(Magneto Rheological Fluid, MRF)是当前智能材料研究领域中的一个重要分支. 它在无外磁场作用下, 具有良好的流动性; 而在磁场作用下, 可在毫秒级时间内从牛顿流体变为剪切屈服应力较高的Bingham粘塑性体, 其表观粘度可增大2个数量级以上, 呈现类似固体的力学性质, 且这种转变是可控、连续和可逆^[1]. 近年来, 磁流变液及其应用器件的研究引起了国内外学者和工业界的广泛兴趣, 美、日、俄、法、德等发达国家均投入了巨大的财力和物力开展这方面的研究. 目前, 磁流变液在汽车、机械、航空、建筑及医疗等领域具有广泛的应用前景, 被认为是未来极具前途的智能材料之一. 针对各种不同的工程应用对象, 研究者们主要采用试验研究法研究和开发相应的磁流变阻尼器. 当应用对象和目的不同时, 磁流变阻尼器的励磁磁路、器件结构及材料属性也将改变, 相应的磁流变阻尼器也需作必要的更新设计与开发, 并反复进行试制和测试以满足工程要求. 通常, 这种试验研究方法会增加磁流变阻尼器的研究成本

和新产品的开发周期, 在一定程度上制约了磁流变阻尼器的工程应用推广.

有限元法(Finite Element Method, FEM)是目前工程技术领域中实用性强、应用广泛的数值模拟方法之一. 有限元仿真分析工具ANSYS则是基于有限元法的大型数值模拟软件, 其中的电磁场分析模块ANSYS/Emag用来求解电磁场的多方面问题, 如磁力线、磁感应强度、磁场强度、涡流、电磁力、电场分布和电感等^[1]. 而回转式阻尼器可作为回转机械的实时、可控的加载装置, 本文将就其结构的设计和其磁场有限元分布等问题作一些探讨研究.

1 回转式阻尼器的设计

1.1 阻尼器的工作原理

基于磁流变液的回转式阻尼器通常工作在剪切模式, 磁流变液作为传动介质充满在阻尼圆盘与壳体的间隙中, 阻尼盘利用间隙中的磁流变液剪切应力产生负载力矩, 且负载力矩随外加磁场的变化

而迅速变化. 输入轴的转动速度为 ω , 在没有磁场作用的情况下, 磁流变液处于液体状态, 所能传递的力矩仅为粘性阻力矩, 阻尼转矩很低. 当有足够强度的外加磁场作用时, 磁流变液中的磁性粒子马上被磁化, 并沿着磁力线方向成链状分布. 这种链状结构使得磁流变液的剪切应力增大, 表现出塑性体的特性. 由于粘塑性流体的屈服应力是磁场强度的函数, 因此可通过控制线圈中的电流强度来调节磁场强度, 就可以调节流体的剪切应力, 从而调节阻尼制动器定子对转子的负载力矩, 阻尼器具体工作原理如图 1 所示.

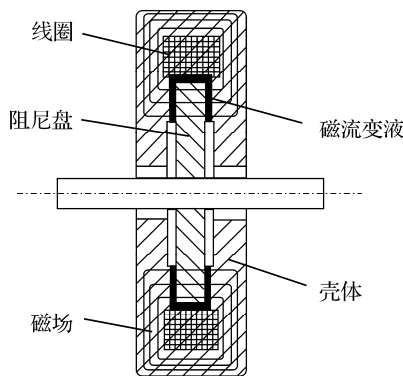


图 1 阻尼器工作原理

1.2 阻尼器的负载力矩计算模型

回转式磁流变阻尼器在剪切工作模式下, 假设磁流变液在定子与转子之间的工作区域视为 1 个圆盘, 磁流变液为切向流动模型, 如图 2 所示.

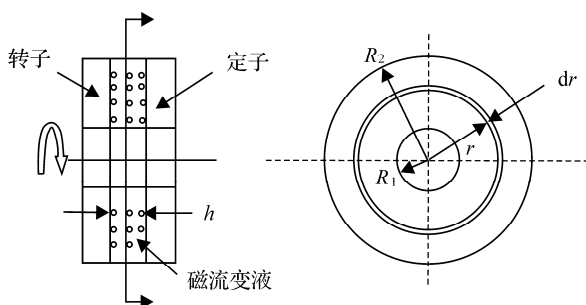


图 2 阻尼盘间的磁流变流动负载力矩模型

为便于分析磁流变液传递的扭矩, 特作以下假设: (1)磁流变液不可压缩; (2)磁流变液的流动是稳态的; (3)在轴向和径向没有流动; (4)磁流变液的流动只是半径的函数; (5)不计磁流变液本身的重力影响; (6)磁场强度在工作间隙上是线性分布;

(7)磁流变液的压力沿厚度方向不变.

那么, 对于阻尼盘与壳体之间任意点液体层的半径 r 处的微元 $2\pi r dr$ 上的力矩, 则:

$$dT = r dF_T = r T 2\pi r dr, \tag{1}$$

其中, dF_T 为盘型磁流变液所产生的微剪力.

作为智能材料的磁流变液, 可随外部磁场在“固-液”两相间转换的现象用宾汉(Bingham)模型来描述, 其关系方程为^[2]:

$$T = T_B + \eta \dot{\gamma}, T > T_B, \tag{2}$$

$$\dot{\gamma} = 0, T < T_B, \tag{3}$$

其中, T_B 为动态屈服应力, 它是磁感应强度 B 的函数; η 为磁流变液零磁场作用时的粘度; $\dot{\gamma}$ 为剪切率.

宾汉模型假定在零磁场时液体的屈服应力为 0, 并呈牛顿流体的性质. 当在一定磁场力作用下时, 屈服应力随磁场的增加而增大, 剪切应力 $T > T_B$ 时, 磁流变液呈牛顿流体的性质; 剪切应力 $T < T_B$ 时, 磁流变液则具有粘弹性.

阻尼盘端面剪切流动: 设磁流变液在转盘与壳体之间沿水平方向处于线性分布, 如图 3 所示, 则剪切率公式为:

$$\dot{\gamma} = v/h = r\omega/h, \tag{4}$$

其中, r 为流层的半径; h 为阻尼盘与壳体之间的轴线间隙; ω 为转轴角速度; v 为流层半径 r 处的线速度.

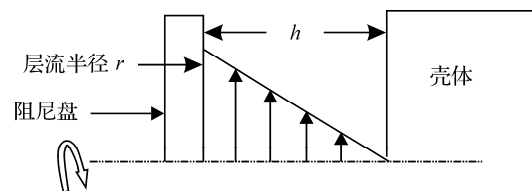


图 3 剪切率原理

将(2)式和(4)式代入(1)式, 并积分, 得到单面负载力矩为:

$$T = \int_{R_1}^{R_2} T 2\pi r^2 dr = \int_{R_1}^{R_2} (T_B + \eta r\omega/h) 2\pi r^2 dr = 2\pi T_B (R_1^3 - R_2^3)/3 + \pi \eta \omega (R_1^4 - R_2^4)/2h. \tag{5}$$

式(5)中 $2\pi T_B (R_1^3 - R_2^3)/3$ 代表磁致屈服应力产生的力矩, 属可调的库仑力矩; $\pi \eta \omega (R_1^4 - R_2^4)/2h$

代表流体粘性传递的不可调的粘滞力矩. 因阻尼盘 2 面的参数完全相同, 则总的力矩 T_{Σ} 为:

$$T_{\Sigma} = 4\pi T_B (R_1^3 - R_2^3) / 3 + \pi \eta \omega (R_1^4 - R_2^4) / h. \quad (6)$$

1.3 阻尼器的结构设计

图 4 为基于剪切模式的回转式阻尼器样机组装图, 其采用外壳体固定线圈, 线圈用于产生外加励磁磁场, 这样控制线圈的励磁电流就可以输出可控的负载转矩.

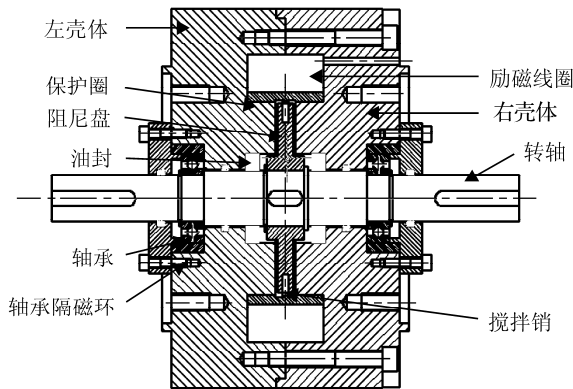


图 4 阻尼器组装图

2 阻尼器磁路有限元仿真及分析

回转式磁流变阻尼器的磁路为: 阻尼盘—右侧间隙—右壳体—左壳体—左侧间隙—阻尼盘, 如图 5 所示. 壳体与阻尼盘的材料均选用相对磁导率较高的 DT6 电工纯铁, 其相对磁导率 > 1600 . 间隙处的磁流变液型号为 SG-MRF2035, 其磁导率所使用材料的 B-H 数据曲线(磁感应强度 - 磁场强度曲线)由宁波杉工提供.

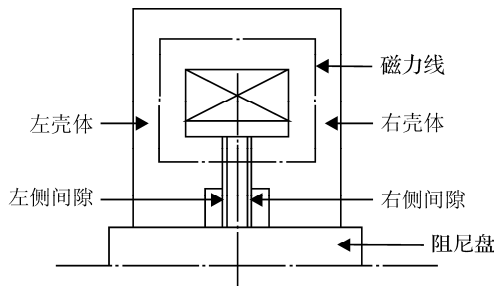


图 5 阻尼器磁路简图

若阻尼器要获得较高的阻尼性能, 则应使间隙处的磁通密度较大. 考虑到磁流变液的相对磁导

率远小于壳体和阻尼盘的相对磁导率, 因此取较小的间隙将有利于产生较大的磁通密度, 通常 $h = 0.25 \sim 2 \text{ mm}$. 为便于加工, 本文选择 $h = 1.5 \text{ mm}$. 并在此基础之上, 应用电磁场仿真分析工具 ANSYS/Emag, 建立磁流变阻尼器的实体模型和有限元模型.

由于磁路为轴对称式结构, 因此建立相关有限元模型时, 采用二维轴对称模型(2D-Axisymmetric Model). 由于模型为规则的长方形, 所以选取了二次四边形等参单元(PLANE53), 该单元求解精度高、边界适应性强. 模型分别由上下壳体、激励线圈、转轴、阻尼盘、保护圈、隔磁环、简化的轴承环以及磁流变液组成.

阻尼器的工作效率直接取决于磁流变液的磁感应剪切应力. 而磁感应剪切应力决定于磁流变液工作时的磁感应强度. 为了研究电流强度与磁感应强度的关系, 分别在 0.2 A、0.4 A、0.6 A、0.8 A、1.0 A、1.2 A、1.4 A、1.6 A、1.8 A 和 2.0 A 等 10 种电流情况进行仿真.

本文不考虑漏磁, 只加通量平行条件, 而励磁线圈以电流源的形式加载. ANSYS 软件对电磁场分析求解出节点的矢量磁势值, 然后经后处理得到通量线、磁通量密度和磁场分布等. 由于篇幅所限, 本文只列出了励磁电流为 2.0 A 时仿真得到的磁力线分布和磁通密度分布.

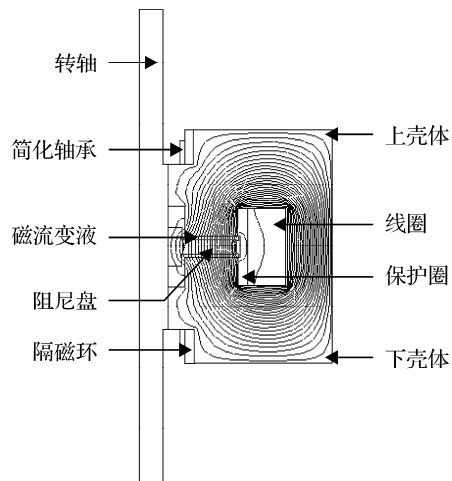


图 6 励磁电流 2.0 A 时的磁力线分布

由图 6 可看出,由于在轴承处另有隔磁环,起到了很好的隔磁作用.励磁线圈产生的磁力线基本沿着设计的磁路分布,磁力线呈非均匀分布,离线圈越近,磁力线越密,并且随着励磁电流的增大,说明磁通越大,磁力线几乎全部分布在有效的模型内,因此磁路结构设计和材料选择符合要求.

由图 7 可看到在实体模型的边界,特别位于保护圈和阻尼盘拐角处的地方,磁感应强度变化比较大,但此处的作用面积很小,对阻尼器的转矩不会造成太大的影响.除此情况外,阻尼器的整个磁路的磁动势主要降落在间隙处,达到 MRF 阻尼器磁路设计的目的.这是因为阻尼器结构材料的磁导率远大于磁流变液的磁导率,从而使得在很小的间隙中就可以产生很大的磁压降,二者的磁导率比值越大,则间隙中的磁压降越大;产生的磁压降越大,产生的磁场越强,磁流变效应也相对越强.

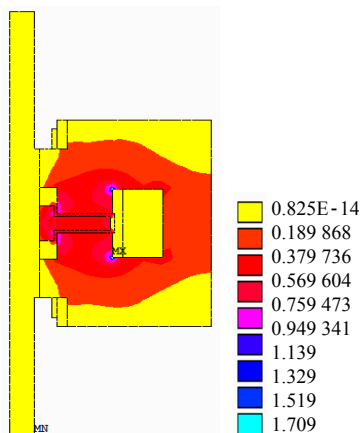


图 7 励磁电流 2.0 A 时的磁通密度分布

综上所述,在阻尼器工作间隙一定的情况下,通过改变励磁电流密度,可以得到在不同励磁电流情况下的工作间隙中的磁感应强度.工作间隙磁感应强度采取对有限元分析关键节点数据求平均值的方法得到,具体见表 1.

利用 MATLAB 绘图工具对上述有限元分析数据进行二次曲线拟合,可得工作间隙在 1.5 mm 时,磁感应强度 B 与励磁电流 I 的函数公式为:

$$B = 0.0101I^2 + 0.216I + 0.00912, \quad (7)$$

由此函数公式得到的关系曲线如图 8 所示.

表 1 1.5 mm 间隙时磁场随激励电流变化的情况

电流/A	磁感应强度/T
0.2	0.048
0.4	0.093
0.6	0.148
0.8	0.196
1.0	0.242
1.2	0.290
1.4	0.320
1.6	0.360
1.8	0.440
2.0	0.489

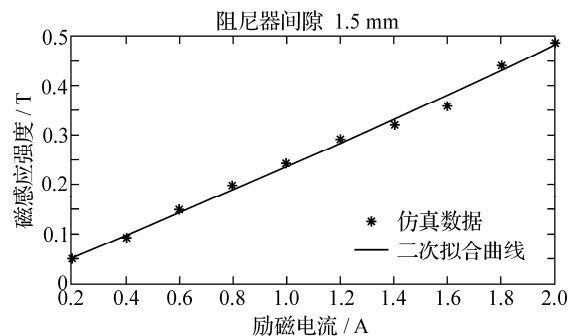


图 8 励磁电流与磁感应强度关系曲线

在得到阻尼间隙磁流变液中磁感应强度分布函数后,就可建立回转式阻尼器的负载转矩数学模型.采用 SG-MRF2035 型磁流变液在室温 20 时,其本构关系为^[5]:

$$\tau_B = 64.27(1 - \exp(-1.63B)). \quad (8)$$

把(7)式和(8)式代入(6)式,可得到阻尼器总的负载转矩公式为:

$$T_\Sigma = 4\pi T_B (R_1^3 - R_2^3)/3 + \pi\eta\omega(R_1^4 - R_2^4)/h = 4\pi \times 64.27(1 - \exp(-1.63B))(R_1^3 - R_2^3)/3 + \pi\eta\omega(R_1^4 - R_2^4)/h = 4\pi \times 64.27(1 - \exp(-1.63(0.0101I^2 + 0.216I + 0.00912))) \cdot (R_1^3 - R_2^3)/3 + \pi\eta\omega(R_1^4 - R_2^4)/h. \quad (9)$$

3 结论

(1) 要提高阻尼器的阻尼力性能,主要是提高磁流变液工作区域的磁场强度.因此设计磁流变

阻尼器的关键是正确建立所需的阻尼力矩与结构参数和磁场参数的关系.

(2) 为尽可能使外加磁场对磁流变效应有最大的影响,必须确保磁力线垂直于阻尼间隙通道中磁流变液的流动方向,并确保磁力线集中在阻尼间隙通道中.

(3) 阻尼盘和壳体应由高导磁材料制成,可产生较大的磁感应强度.

(4) 通过 ANSYS 对阻尼器磁路的仿真研究可以减少试验次数,缩短原型研制周期,并节约开发成本.

参考文献:

- [1] 王代华, 赖大坤. 缸体感应式磁流变阻尼器的集成相对位移自传感方法及系统: 中国, 200510057276.4[P]. 2005-9-15.
- [2] Lord Material Division. Designing with MR fluids[EB/OL]. [1999-12-06]. <http://www.rheonetic.com>.
- [3] Ashour, Craig. Magnetorheological fluid, materials, characterization and devices[J]. Int Mater Sys truct, 1996, 7:123-130 .
- [4] 唐兴伦. ANSYS 工程应用教程—热与电磁教学篇[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [5] 肖璐, 王凡. 用于薄壁件加工的磁流变夹具[J]. 新技术新工艺—机械加工工艺与装备, 2007(1):26-27.

Design and FEM Analysis of MRF Based Rotary Damper

SU Hui-qiang, ZHENG Di

(Faculty of Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The smart material, magneto-rheological fluids (MRF) are characterized in being able to interchange solid and liquid states under variant magnetic field. Based on these characteristics, a new kind of rotary damper is designed, and a load torque model for the damper is established. Simulation for the magnetic field distribution is carried out using ANSYS 9.0 software, and some technical points in the design of the damper are made. This work is expected to serve as a theoretical basis for the structural design and manufacturing of MRF based rotary dampers.

Key words: MRF based rotary damper; magnetic field analysis; finite element analysis

CLC number: TH138

Document code: A

(责任编辑 章践立)