

doi: 10.7690/bgzd.2019.12.011

基于有限元分析的磁流变阻尼器动态响应

郑杰, 秦凯

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 针对阻尼器特殊的结构特点, 通过静态磁场仿真确定阻尼器的磁路结构。利用 ANSYS 软件对阻尼器进行瞬态磁场有限元仿真, 获得阶跃电压作用下阻尼器的瞬态磁场响应过程, 通过与简化数学模型的对比得出涡流对阻尼器电磁响应时间的影响, 并由磁场有限元仿真结果获得流道内磁流变液的剪切屈服应力时程曲线。通过阻尼器动态响应时间测试实验获得激励电流作用下阻尼力的实测响应时间。结果表明: 计算获得的剪切屈服应力时程曲线与阻尼力的实测响应过程基本吻合, 说明电磁响应是影响磁流变阻尼器动态响应的主要因素。

关键词: 磁流变阻尼器; 响应时间; 涡流; 电磁响应

中图分类号: TP302.7 **文献标志码:** A

Dynamic Response of MR Damper Based on Finite Element Analysis

Zheng Jie, Qin Kai

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: For the special structure of the MR damper, the magnetic circuit structure of the damper is determined by static magnetic field simulation. The ANSYS software is used to simulate the transient magnetic field of the damper piston to obtain the electromagnetic response process of the damper under the step voltage. The influence of eddy current on the electromagnetic response process of the damper is obtained by comparison with the simplified mathematical model. The shear yield stress time-history curve of the magnetorheological fluid in the flow channel is obtained from the finite element simulation results of the magnetic field. The measured response time of the damping force is obtained by the damper dynamic response test experiment. The results show that the calculated shear yield stress time history curve is basically consistent with the measured response process of the damping force, indicating that the electromagnetic response is the main factor affecting the dynamic response of the MR damper.

Keywords: MR damper; response time; eddy current; electromagnetic response

0 引言

作为新型半主动控制装置, 磁流变阻尼器已经被尝试应用于火炮领域。阻尼器的响应时间很大程度上影响了最终的控制效果。磁流变阻尼器的输出阻尼力可通过调节磁场的大小来进行控制^[1]。由于磁流变液具有非线性的导磁特点, 对其磁感应强度的数值计算具有较大难度。

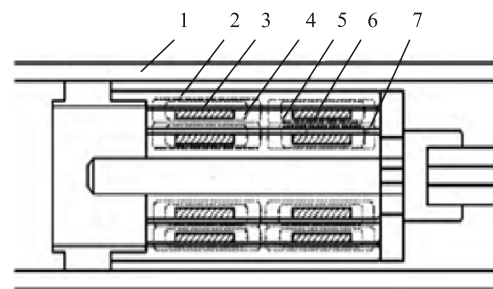
吴俊奇等^[2]通过 FLUENT 对磁流变阻尼器进行流场仿真, 获得了阻尼器的稳态阻尼特性; 兰文奎等^[3]对磁流变阻尼器进行了电磁场有限元仿真, 对比不同磁路在相同载荷作用下的不同响应; 张进秋等^[4]利用 Ansoft 和 Adams 联合仿真分析了阻尼器磁场的动态响应过程。这些研究大多停留在静态磁场及流场的仿真分析、阻尼器的数学建模及控制方法的验证等领域。在以往的磁场计算过程中, 往往忽略涡流的影响, 导致计算结果存在较大误差。

针对非线性问题, 由于 ANSYS 的磁场有限元

分析模块支持材料的非线性磁化曲线特性, 因而可以较全面地考虑阻尼器各个部分的结构和磁流变液的非线性磁化特性, 得到较准确的磁场分析结果。

1 活塞磁路的稳态有限元分析

笔者研究的磁流变阻尼器预用于火炮反后座装置。阻尼器活塞部分结构如图 1 所示。



1. 阻尼器外筒; 2. 外软磁材料; 3. 外流道;
4. 隔磁环; 5. 内流道; 6. 线圈; 7. 内软磁材料。

图 1 阻尼器活塞结构

不同于传统的单流道磁流变阻尼器, 为增大阻

收稿日期: 2019-08-22; 修回日期: 2019-09-18

作者简介: 郑杰(1993—), 男, 浙江人, 硕士, 从事磁流变阻尼器的动态响应特性研究。E-mail: 1126617367@qq.com。

尼力可调范围，活塞部分设计内外 2 条磁流变液通道。为减少内外线圈产生的磁场耦合，在内外流道间的软磁材料中添加隔磁环。由于内外流道均采用 2 级线圈提供磁场，故活塞部分共缠绕 4 个励磁线圈。在线圈通电的情况下，不同线圈产生的磁场互相影响。线圈的缠绕方式决定了阻尼器的磁路结构，良好的磁路结构可以保证流道有效区域的磁场得到加强，提高阻尼器的性能。

在 ANSYS 中建立阻尼器轴对称模型如图 2 所示。对于 2 维的静态磁场分析，模型单元均采用 PLANE 13。给模型对应区域赋予相应的材料属性，划分网格时采用智能网格划分，同时细化处理阻尼器流道部分的网格，提高计算精度。

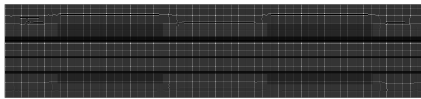


图 2 阻尼器活塞轴对称模型

如图 3—6，线圈的绕线方式有 4 种情况。

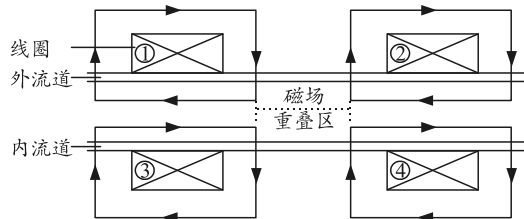


图 3 绕线方式 1

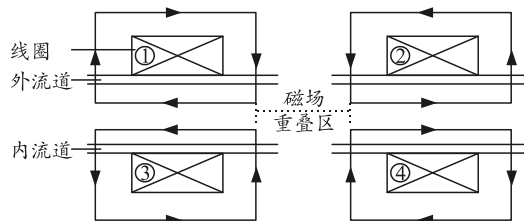


图 4 绕线方式 2

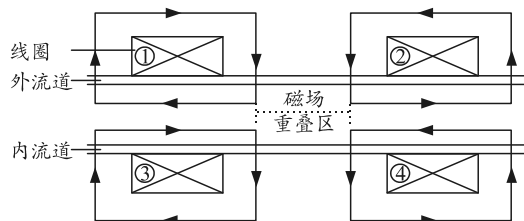


图 5 绕线方式 3

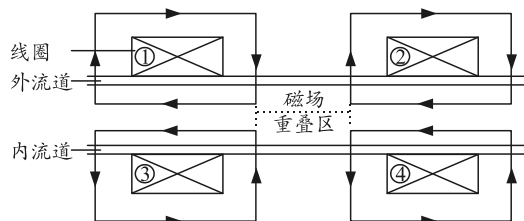


图 6 绕线方式 4

ANSYS 中可以通过施加电流的正负值来表示线圈的绕线方式。对模型边界施加磁力线平行条件，施加 2 A 电流时对应的磁场分析结果如图 7—10。



0.127E-15 0.441 852 0.883 705 1.325 56 1.767 41
0.220 926 0.662 778 1.104 63 1.546 48 1.988 34

图 7 绕线方式 1 磁场仿真结果



0.743E-16 0.426 895 0.853 79 1.280 68 1.707 58
0.213 447 0.640 342 1.067 24 1.494 13 1.921 03

图 8 绕线方式 2 磁场仿真结果



0.106E-15 0.436 136 0.872 272 1.308 41 1.744 54
0.218 068 0.654 204 1.090 34 1.526 48 1.962 61

图 9 绕线方式 3 磁场仿真结果



0.868E-16 0.425 06 0.850 119 1.275 18 1.700 24
0.212 53 0.637 589 1.062 65 1.487 71 1.912 7

图 10 绕线方式 4 磁场仿真结果

活塞流道中，磁流变液产生流变效应的区域称为有效区域。为对比 4 种绕线方式，需要获得有效区域的平均磁感应强度。求解完成后，通过 APDL 编程提取计算结果中每个单元的磁感应强度及有效区域单元数。平均磁感应强度由下式^[5]计算。

$$\bar{B} = \frac{\sum_i^N B_i}{N} \quad (1)$$

式中： N 为有效区域的单元个数； B_i 为第 i 个单元的磁感应强度。

通过分别计算 4 种绕线方式流道有效区域的平均磁感应强度，4 种绕线方式获得的平均磁感应强度分别为 0.51、0.484、0.53 及 0.496 T。方式 3 获得的磁感应强度要大于其他 3 种绕线方式，由此可以确定阻尼器活塞的最优磁路结构。

2 磁流变阻尼器电磁响应数学模型

如图 11 所示,磁流变阻尼器的简化电路模型为电阻和电感串联而成。

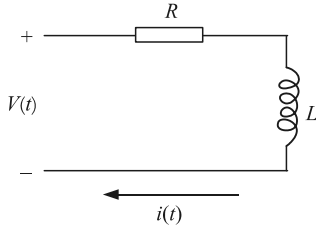


图 11 阻尼器简化电路

根据基尔霍夫定律,阻尼器两端的压降与所施加的电流满足下列方程:

$$V(t) = \frac{d\varphi(i)}{dt} + RI(t) \quad (2)$$

式中: $V(t)$ 为阻尼器两端的电压; $i(t)$ 为流过阻尼器的电流; R 为串联线圈等效电阻; φ 为线圈的磁链。

忽略涡流影响,则

$$V(t) = L \frac{dI(t)}{dt} + RI(t) \quad (3)$$

对电路施加上升阶跃电压输入信号,即

$$V(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ V_0 & t \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)可获得电流响应为

$$I(t) = \frac{V_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \quad (5)$$

忽略涡流的影响,假设线圈通电瞬间产生磁场,则线圈产生的磁感应强度可由下式表示, c 为常数。

$$B(t) = cI(t) \quad (6)$$

则电磁响应过程的传递函数为

$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1} \quad (7)$$

式中: K 为系统增益; $T = L/R$ 为电流响应时间常数。

由此可获得阻尼器电磁响应数学模型^[6]:

$$B(t) = K \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (8)$$

3 阻尼器活塞瞬态电磁场分析

建立活塞轴对称模型如图 12 所示。不同于静态电磁场分析,存在涡流的区域只能用矢量方程来表示,故选用 PLANE53 作为模型单元。该单元包含磁矢势(AZ)及时间积分电势,同时需要激活电流自由度(CURR)。

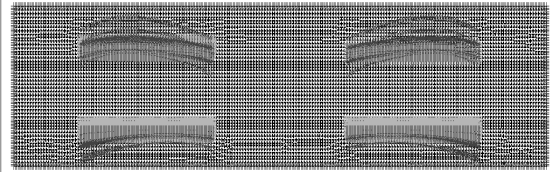


图 12 活塞瞬态电磁场分析模型

对于平面模型,需要定义线圈的实常数,包括线圈匝数、电流正方向、线圈区域横截面积及线圈填充系数。线圈填充系数由下式计算:

$$C_f = \frac{N^2 \rho L}{AR_{\text{coil}}} \quad (9)$$

式中: N 为线圈匝数; ρ 为线圈磁导率, Ω/m ; L 为折合长度; A 为横截面积; R_{coil} 为单匝线圈电阻值。

对线圈施加 12 V 的阶跃电压,为使截面处每匝线圈的电流值相等,需要分别耦合 4 个线圈的电流自由度。单个线圈电流自由度耦合结果如图 13。

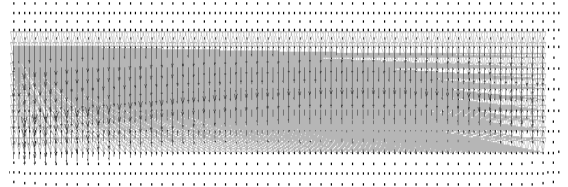


图 13 单个线圈电流自由度耦合结果

施加磁力线平行条件,选择瞬态分析类型,定义时间步长后进行求解计算。求解完成后可通过后处理获得施加阶跃电压时线圈电流的时程曲线。线圈采取图 5 所示绕线方式缠绕。如图 14 所示,施加正向电压的线圈电流在 0~2 A 间变化,施加负向电压的线圈电流在 -2~0 A 间变化。

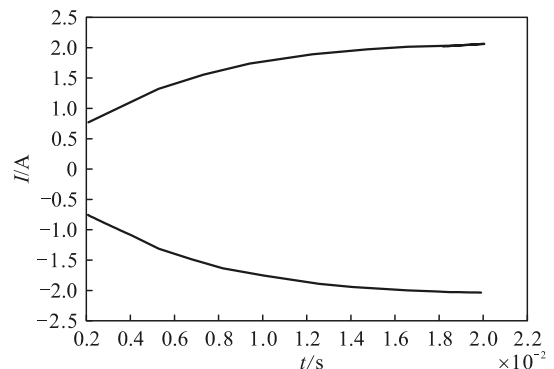


图 14 线圈电流时程

对每个时间步进行单元磁感应强度求和,由式(1)获得每个时间步上阻尼器流道有效区域的磁感应强度,由此可获得考虑涡流影响时,平均有效磁感应强度的时程曲线,与式(8)所示的无涡流影响状态下的电磁响应模型进行对比。阻尼器的电磁响应时间主要由励磁线圈中电流的变化时间及电流激发

磁场的变化时间组成，上述仿真过程同时考虑了这 2 部分时间。如图 15 所示，当 $t=4$ T 时，磁感应强度可达稳态值的 98%，将其定义为阻尼器电磁响应的响应时间。可以发现由于涡流的影响，导致电磁响应过程延时约为 2 ms。

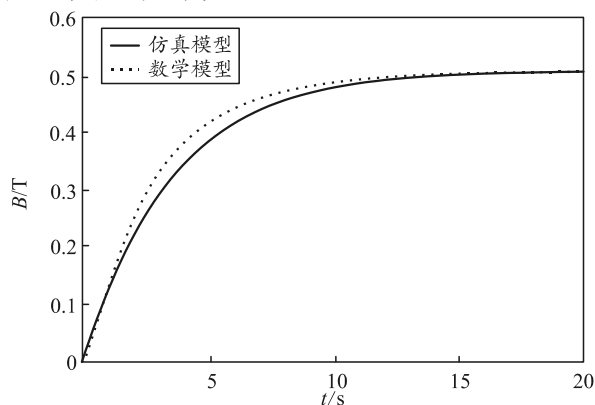


图 15 磁感应强度时程

4 磁流变阻尼器动态响应实验与分析

磁流变阻尼器动态响应测试实验在南京理工大学材料实验室完成。实验用设备为 PA500 型疲劳试验机。由 1503D 型直流稳压电源给阻尼器线圈提供阶跃电压。阻尼器活塞杆在疲劳试验机的带动下作速度为 40 mm/s 的匀速运动，在活塞杆下降过程中突然接通阻尼器电路。在工况机上反馈出阻尼器输出阻尼力的变化过程。测试现场环境如图 16 所示。

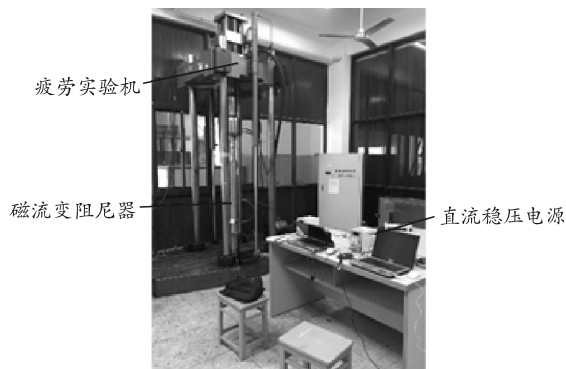


图 16 测试实验照片

实验用磁流变液由重庆材料实验室提供，由磁流变液性能曲线可获得剪切屈服应力 τ 与磁感应强度关系式：

$$\tau = 43.44B^4 - 178.12B^3 + 183.74B^2 + 183.74B - 3.02B \quad (11)$$

代入瞬态磁场仿真获得的各个时间步上的平均磁感应强度 $B(t)$ ，可获得阻尼器平均有效剪切屈服应力的时程曲线 $\tau(t)$ ，与实验获得的阻尼力变化过程进行对比如图 17 所示。

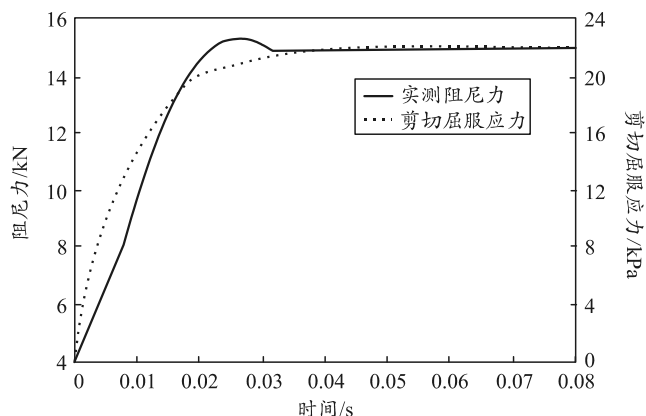


图 17 剪切屈服应力与实测阻尼力时程

从图中可以发现，剪切屈服应力变化过程基本与阻尼力变化趋势吻合。略微滞后的原因在于磁流变液流场的响应过程未考虑。从上述分析可知，电磁响应是影响磁流变阻尼器动态响应时间的主要因素。

5 结论

笔者通过静态电磁场仿真确定双流道磁流变阻尼器的最优磁路结构。通过瞬态磁场仿真获得阶跃电压作用下流道有效磁感应强度的变化过程，将其与忽略涡流影响的数学模型对比，发现涡流使电磁响应的过程延迟了约 2 ms。结合磁流变液剪切屈服应力与磁感应强度的关系，获得阶跃电压作用下剪切屈服应力的变化过程，将其与阻尼器动态响应试验获得的阻尼力实测时程曲线进行对比，发现两者变化趋势基本一致，可以认为电磁响应是影响磁流变阻尼器动态响应的主要因素。

参考文献：

- [1] KIKUCHI T, NOMA J, AKAIWA S. Response time of magnetorheological fluid-based haptic device[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2016, 27(7): 859-865.
- [2] 吴俊岐, 侯保林. 基于 FLUENT 的磁流变阻尼器阻尼特性分析[J]. 兵器装备工程学报, 2017(11): 142-145.
- [3] 兰文奎, 郑玲, 李以农. 活塞式磁流变液阻尼器磁场有限元分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(4): 142-145.
- [4] 张进秋, 张磊, 高永强, 等. 磁流变阻尼器响应时间仿真与试验研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2011, 25(6): 29-34.
- [5] 郭鹏飞, 关新春, 欧进萍. 磁流变液阻尼器响应时间的试验研究及其动态磁场有限元分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(6): 1-5.
- [6] 李赵春, 顾权, 周冰倩, 等. 冲击缓冲用磁流变阻尼器的响应特性模型与实验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(5): 163-168.