

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.045

温度效应下磁流变阻尼器动力学仿真建模与试验

冯志敏¹ 孙捷超¹ 赵洪洋² 张刚¹ 王龙飞¹ 李宏伟³

(1. 宁波大学海运学院, 宁波 315211; 2. 浙江大学海洋学院, 舟山 316021;
3. 宁波杉工智能安全科技股份有限公司, 宁波 315100)

摘要: 为了精确预测磁流变阻尼器在温度效应下的动力学性能规律,提出一种参数化的仿真建模方法。采用磁流变液试验实测数据拟合方法,建立粘温特性相关非线性物理参数方程;基于 Bingham 力学模型及对温度效应的影响分析,运用 ANSYS 软件编译 UDF 程序、设置模型参数进行参数化仿真建模,以 Fluent 模块求解粘滞阻尼力,以 Emag 模块求解库伦阻尼力。搭建温度效应下磁流变阻尼器力学试验平台,并通过试验对仿真模型进行修正、对比与验证,讨论不同温度对阻尼力、能量耗散的变化规律。结果表明,温度效应主要影响粘滞阻尼力,仿真结果与试验实测值高度吻合;不同温度和电流下阻尼器的能量耗散与温度成反比,与库伦阻尼力成正比。仿真建模方法可预测分析输出阻尼力特征,以对磁流变阻尼器进行结构设计和参数优化。

关键词: 磁流变阻尼器; 力学性能; 温度效应; 仿真; 能量耗散

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)09-0382-07

Dynamic Simulation Modeling and Test of MR Damper under Temperature Effect

FENG Zhimin¹ SUN Jiechao¹ ZHAO Hongyang² ZHANG Gang¹ WANG Longfei¹ LI Hongwei³

(1. Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, China
2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China
3. Ningbo Shangong Intelligent Security Technology Co., Ltd., Ningbo 315100, China)

Abstract: The magneto-rheological damper (MR damper) is a kind of vibration control device with excellent performance, which is used in construction machinery, vehicle, bridge and other fields widely. The MR damper is a complex system of multi field coupling at work, expressing accurately its mechanical properties with mathematical analytical equations is very difficult. In order to accurately predict the dynamic performance of the MR damper under temperature effect, a parameterized simulation modeling method was proposed. A nonlinear physical parameter equation related to the viscosity temperature characteristics was established by using the measured data fitting method of the magneto-rheological fluid test. Based on the Bingham mechanical model and the influence analysis of temperature effect, the ANSYS UDF programs were compiled, the model parameters were set up, and the parametric simulation modeling was carried out. The viscous damping forces were solved by using the Fluent module, and the coulomb damping forces were solved by using Emag module. A mechanical testing platform for MR dampers under temperature effect was built, and the simulation models were modified, compared and verified through experiments, and the variation laws of damping force and energy dissipation at different temperatures were discussed. The results showed that the temperature effect mainly affected the viscous damping force; the simulation results were highly consistent with the measured values. The energy dissipation of dampers at different temperatures and currents was inversely proportional to the temperature and proportional to the coulomb damping force. The simulation modeling method can predict the characteristics of the output damping force, and can be used to carry out the structure design and parameter optimization of the MR damper.

Key words: magneto-rheological damper; mechanical properties; temperature effect; simulation; energy dissipation

收稿日期: 2018-03-12 修回日期: 2018-05-28
基金项目: 国家自然科学基金项目(51675286, 51505237)
作者简介: 冯志敏(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事海洋工程结构检测与振动控制技术研究,E-mail: fengzhimin@nbu.edu.cn

0 引言

磁流变(Magneto-rheological, MR)阻尼器是一种性能优良的减振控制器件,在工程机械、车船、桥梁等领域均有着广泛应用^[1-2]。工作时 MR 阻尼器是一个电-磁-流-固-热多场耦合的复杂系统,通常难以用数学解析方程精确表达其力学特性。文献[3-4]提出基于有限元法(Finite element method, FEM)磁路分析的阻尼力预测方法,文献[5-7]利用 FEM 仿真结果优化 MR 阻尼器力学性能,文献[8-9]研究对比新的阻尼力仿真方法,文献[10-12]用数学模型研究了输出阻尼力及其滞后现象。相关研究大多集中在静态磁场分布下阻尼力对磁场的响应关系,而忽略 MR 阻尼器的动态粘滞特征,温度对粘滞阻尼力影响的变化规律缺乏深入研究。实际应用发现,温度效应对磁流变阻尼器的动力学性能影响不可忽视。文献[13-14]对 MR 阻尼器瞬态温度场及温升建模等进行理论与试验研究,但并未考察温度效应与力学性能的相互影响关系。

本文基于 Bingham 力学模型及对温度效应的影响分析,提出利用 ANSYS 软件中 Fluent、Emag 等模块求解方法,进行温度效应下 MR 阻尼器动力学仿真建模与分析计算;搭建具有温控系统的试验平台进行对比分析,探究不同工况下阻尼力、能量耗散随温度变化的规律。

1 MR 阻尼器及其特征

1.1 MR 阻尼器结构

单出杆双线圈剪切阀式 MR 阻尼器示意图如图 1 所示,主要由缸体、活塞、活塞杆、线圈、永磁铁、端盖、密封圈等组成。活塞与缸体之间的狭窄环状阻尼间隙是形成阻尼力的主要部位。

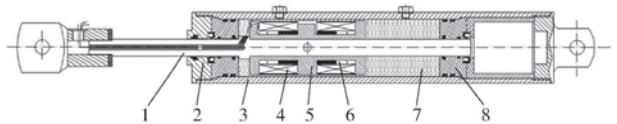


图 1 MR 阻尼器结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of MR damper

1. 活塞杆 2. 端盖 3. 缸体 4. 励磁线圈 5. 活塞 6. 永磁铁
7. 磁流变液 8. 密封环

主要结构参数:缸体内径 60 mm,活塞直径 57 mm,活塞长度 120 mm,线圈宽度 20 mm,线圈匝数 400 圈,缸体厚度 6 mm,活塞杆直径 22 mm,活塞行程 80 mm。选用 SG-MRF2035 型磁流变液,密度 3 090 kg/m³,永磁铁由特制的钕铁硼材料制成。

1.2 工作原理

MR 阻尼器内部腔体充满磁流变液,在无外加

磁场时相当于普通粘滞阻尼器;外加磁场作用下磁流变液从牛顿流体转变为粘塑性流体,产生一定的屈服应力并呈可调可逆状态。通常采用半主动控制方法,当 MR 阻尼器受到外界振动激励时,控制系统将根据预先建立的模型以及控制算法,对缠绕在活塞上的线圈施加一定强度电流,激发相适应的电磁场,以调节输出阻尼力,从而平稳地吸收外界的振动能量。此外,由于 MR 阻尼器工作时温度变化呈非稳态和非线性特征,不同程度影响磁流变液的物理特性,使实际输出阻尼力偏离原先理论设计状态,难以达到预期的减振效果,因此,需要建立温度效应下 MR 阻尼器力学模型。MR 阻尼器各物理场的相互耦合关系如图 2 所示。

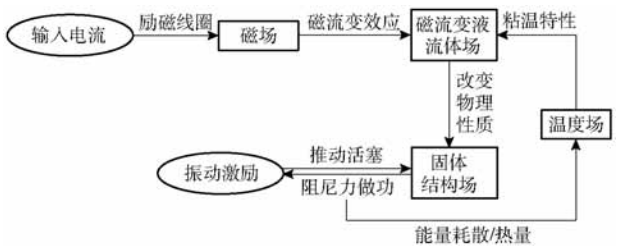


图 2 各物理场相互耦合关系
Fig. 2 Coupling relation of physical fields

1.3 粘温特性

结合 Reynolds 对矿物油粘温关系的理论^[15],以指数方程对生产企业提供的 SG-MRF2035 型磁流变液实测粘度数据进行曲线拟合,结果如图 3 所示。

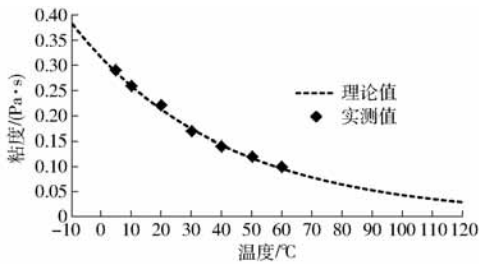


图 3 磁流变液粘度与温度关系
Fig. 3 Relationship between viscosity and temperature of magnetorheological fluid

由图 3 可知,磁流变液的粘度随温度的升高而迅速下降,指数函数的理论曲线与实测值高度吻合,表征磁流变液的粘温特征,粘温方程为

$$\eta = ce^{\beta T} = 0.3166e^{-0.02T} \quad (R = 0.998) \quad (1)$$

式中 η ——粘度 T ——温度

1.4 屈服应力特性

根据提供的磁流变液实测数据,对磁感应强度 B 与屈服应力 τ_y 的关系进行多项式拟合,在 0.1 ~ 0.7 T 区间具有局部线性拟合关系,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,当磁感应强度由 0.1 T 增至 1.3 T

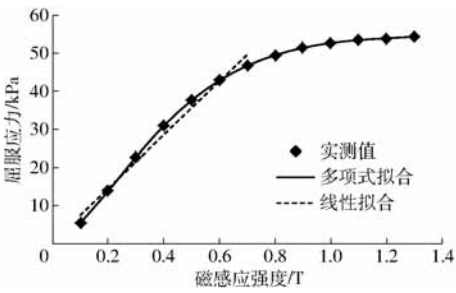


图4 磁感应强度与屈服应力关系

Fig.4 Relationship between magnetic induction strength and yield stress

时,屈服应力随之增加,但增速逐渐变缓;磁感应强度大于1 T后,屈服应力增幅小于1%/(0.1 T),可认为磁流变液达到磁饱和状态。曲线拟合方程为

$$\tau_y = -63.629B^5 + 259.72B^4 - 370.37B^3 + 171.9B^2 + 56.714B - 1.6395 \quad (R=0.999) \quad (2)$$

以此函数计算不同磁感应强度下磁流变液的屈服应力。

此外,磁流变液屈服应力在0.1~0.7 T区间内呈高度线性变化规律,为磁流变液的最佳应用区间,此时 τ_y - B 曲线拟合方程形式简单,对MR阻尼器阻尼力的控制效果更优,关系为

$$\tau_y = 71.386B \quad (R=0.991) \quad (3)$$

2 力学仿真建模

2.1 理论表达与假设

在MR阻尼器力学模型中,Bingham模型形式简明且物理意义明确,较好地表征了MR阻尼器的力学特征^[16],在器件结构优化设计以及动力学性能分析时应用十分普遍,其数学表达式为

$$F = f_\eta + f_\tau \operatorname{sgn}(\dot{x}) + f_0 \quad (4)$$

式中 F ——MR阻尼器的输出阻尼力

f_η ——粘滞阻尼力,由液体流动粘性产生

f_τ ——库伦阻尼力,由液体磁流变效应产生

f_0 ——密封圈部位的摩擦力

根据试验数据分析^[17],温度20℃时式(4)中第2项与第1项的比值为1.5~4,粘滞阻尼力占总输出阻尼力20%~40%,库伦阻尼力占比为60%~80%,二者均不可忽略;而密封圈与活塞杆接触部位采用表面光滑和润滑减摩措施, f_0 一般可忽略不计。

为便于仿真计算分析,可作如下假设简化:

(1) 根据磁流变液材料学的相关研究结果^[18-20],温度对磁流变液屈服应力的影响不大,主要是通过改变磁流变液粘度,影响输出粘滞阻尼力。试验与仿真时,MR阻尼器内部温度均匀分布。

(2) 在阻尼力测试中,活塞速度过慢会使机构柔性引起的相对误差较大,而速度过快会使磁流变

液产生剪切稀化、空程等突变效应,引起实测数据不准确。因此,仿真和试验时仅讨论MR阻尼器施加振幅10 mm、频率0.5 Hz正弦激励等典型工况。

(3) 由于MR阻尼器轴对称结构,为减少仿真计算工作量,计算流体动力学(Computational fluid dynamics,CFD)模拟仿真和FEM仿真分析均按照试验用MR阻尼器实际结构尺寸建立1:1的1/2二维实体模型。

2.2 参数化模型

运用ANSYS软件分别对粘滞阻尼力、库伦阻尼力进行CFD与FEM仿真分析,计算MR阻尼器的最大输出阻尼力,其模拟仿真值是基于守恒定律、流动模型以及电磁场理论的综合计算结果,由软件直接迭代计算得出。由于仿真模型对实际环境的简化、材料物理参数出厂偏离及试验误差等因素,其仿真结果与实际值必然存在一定差异,需要进行数据修正。经研究比较,采用数乘法对仿真值进行相应修正,可在不改变参数特征前提下使仿真结果更符合实际值。

MR阻尼器动力学仿真模型为参数化隐式数学表达式

$$F = F_\eta + F_\tau = K_1 f_\eta + K_2 \tau_y = K_1 A_p \Delta p(\eta(T), v(t)) + K_2 \tau_y(B(I)) \quad (5)$$

式中: $\Delta p(\eta, v)$ 由CFD仿真模型计算得到; $\eta(T)$ 、 $v(t)$ 通过试验实测数据拟合方程,并编译用户自定义函数(User-defined function,UDF),在仿真结果 Δp 中体现; $\tau_y(B)$ 为磁流变液屈服应力,用式(2)求解, $B(I)$ 可用ANSYS参数化设计语言(ANSYS parametric design language,APDL)编制FEM仿真程序求解获得; K_1 、 K_2 为与工况相关参数; A_p 为活塞有效面积。

2.3 粘滞阻尼力CFD仿真

在ANSYS软件的Workbench模块中,对MR阻尼器中磁流变液进行建模,并划分CFD网格;为保证计算精度,对阻尼间隙及其附近的网格进行加密,共得到16 824个非结构三角形网格,节点9 627个;网格最小正交质量为0.7,满足动网格要求;网格模型如图5所示。



图5 MR阻尼器CFD网格模型

Fig.5 CFD mesh model of MR damper

将网格模型导入Fluent模块进行求解设置。由于阻尼间隙极小,环状厚度为1.5 mm,且活塞运动速度较低,磁流变液呈现低雷诺数的层流状态,故选择Laminar流动模型。编译模拟活塞运动的UDF程

序,结合动网格技术仿真外界的振动激励,模拟 MR 阻尼器整体工作过程。编译 UDF 程序将粘温方程式(1)内嵌入 Fluent 模块,以实现该模型对温度变化的动态响应。输入磁流变液的相关物理参数并设定仿真温度。设置 monitors,监测活塞两端面的压力,并通过 out 文件进行输出,从而计算压力差 Δp 。

设置迭代步长为 0.001 s,迭代 5 000 步,求解计算 5 s 内 MR 阻尼器活塞两端压力差 Δp 的变化,计算过程中压力场的梯度分布如图 6 所示,不同温度下压力差 Δp 的时程曲线如图 7 所示。

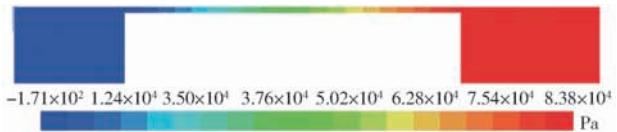


图 6 MR 阻尼器工作过程中压力场分布
Fig. 6 Distribution of pressure field in MR damper

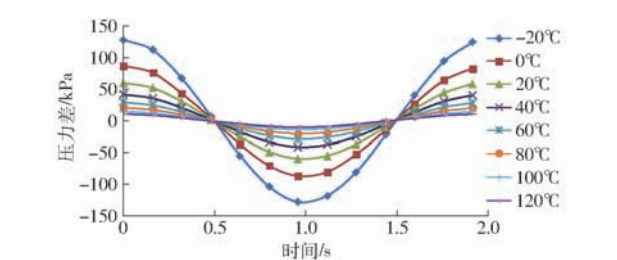


图 7 不同温度下压力差的时程曲线
Fig. 7 Change of pressure with time at different temperatures

2.4 库伦阻尼力 FEM 仿真

调用 Emag 模块,使用命令流模式调试 FEM 仿真的 APDL 程序。建立 MR 阻尼器实体模型,全部选用 4 节点二维平面单元 PLANE13,并划分 FEM 网格,如图 8 所示。

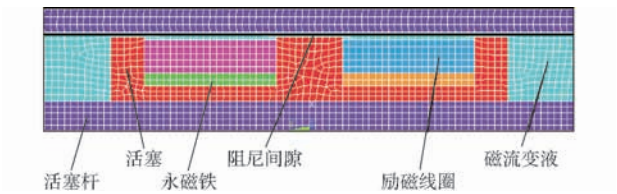


图 8 MR 阻尼器 FEM 网格模型
Fig. 8 FEM mesh model of MR damper

按生产厂家提供的相关数据,输入各材料电磁物理参数,其中磁流变液、缸体和活塞分别由 SG - MRF2035、45#钢和 DT4 电工纯铁制成,其磁性能呈非线性状态,需要导入 $B - H$ 曲线。据磁通连续性定理,认为外界无磁通通过,设置模型边界为磁力线平行边界条件。

对两励磁线圈分别施加方向相反的励磁电流密度载荷,用磁矢量位法 (Magnetic vector potential, MVP) 进行求解,磁通密度分布云图如图 9a 所示,磁感线分布如图 9b 所示。设置路径并映射提取 X 向、 Y 向与总磁感应强度,如图 9c 所示。平均磁感

应强度随励磁电流的变化规律,如图 10 所示。

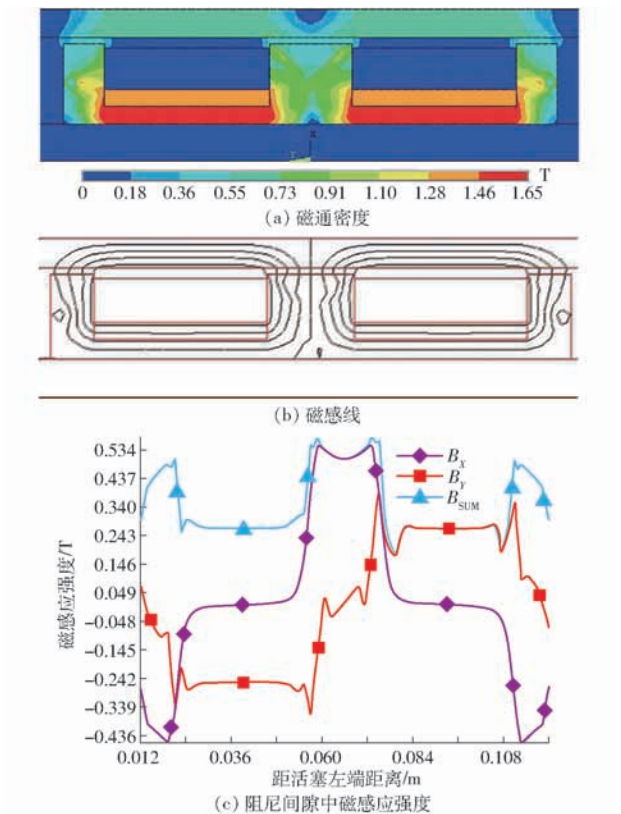


图 9 MR 阻尼器磁场 FEM 仿真
Fig. 9 FEM simulation of MR damper

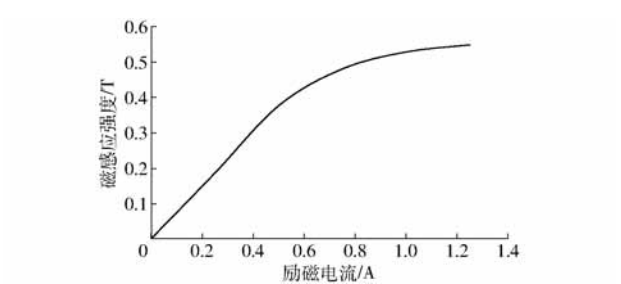


图 10 磁感应强度随电流的变化
Fig. 10 Variation of magnetic induction intensity with current

3 试验及温度效应分析

3.1 试验平台与方法

为验证对比和修正仿真结果,进行了温度效应下的 MR 阻尼器动力学特性试验。搭建由 SDS - 100 型电液伺服动静试验机、定制温度控制系统、DOLI - EDC580 型全数字控制仪、Tektronix - PWS2326 型电流源等设备组成的试验平台以及结构示意图,如图 11 所示。

设定温度、电流两个自变量,并加载与模拟仿真相同的正弦振动激励,测定 MR 阻尼器的总输出阻尼力。选择 0 ~ 80℃ 温度范围,选择 5 个均等温度区间作为测试工况,以表征 MR 阻尼器的温度效应;选择 0、0.25、0.5、0.75、1、1.25 A 6 个均等电流工况,以验证仿真模型对励磁电流的适应性。



图 11 MR 阻尼器温度-动力学试验平台

Fig. 11 Temperature-dynamic test platform of MR damper

3.2 修正仿真模型

结合 MR 阻尼器动力学特性试验实测数据,利用 Matlab 软件中的最小二乘法对 K_1 、 K_2 进行参数辨识,可得 $K_1 = 4.523$, $K_2 = 0.0824$ 。据已研制 MR 阻尼器的结构参数, $A_p = 0.0022973\text{ m}^2$ 。对于试验设定工况,温度效应下 MR 阻尼器动力学模型表达式为

$$F = K_1 A_p \Delta p(\eta(T), v(t)) + K_2 \tau_y(B(I)) =$$
$$4.523 \times 0.0022973 \Delta p(\eta(T), v(t)) +$$
$$0.0824 \tau_y(B(I)) \tag{6}$$

3.3 变温下阻尼力特征

选用 0、20、40、60、80℃ 时阻尼力随电流的变化规律、以及电流为 1 A 时 MR 阻尼器示功图进行实测验证比较分析,结果如图 12 所示。

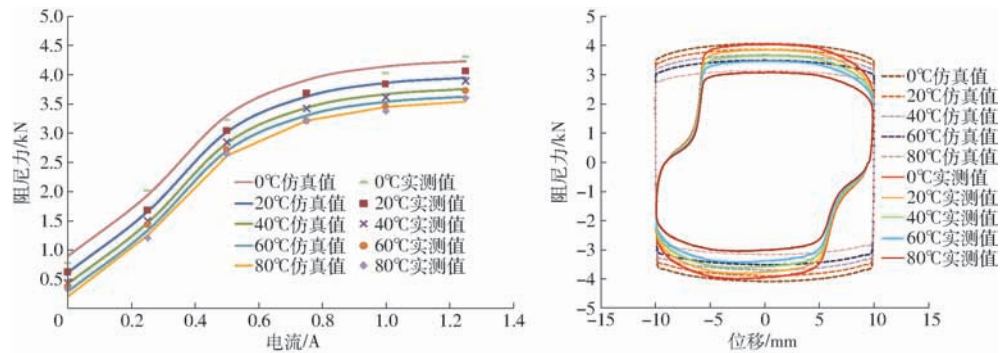


图 12 MR 阻尼器仿真结果验证

Fig. 12 Simulation results of MR damper

由图 12 可知,模拟仿真模型计算的输出阻尼力随电流的变化规律与实际试验的测量值高度吻合,相对误差小于 1.43%。由于 MR 阻尼器灌液工艺、活塞空程效应、测试机构柔性连接等因素,实测试验所得的阻尼器示功图存在一定畸变,而计算机仿真预测模型的示功图对输出阻尼力变化趋势等动力学特征的描述更清晰准确,模拟仿真模型可以满足 MR 阻尼器设计和预测阻尼力变化要求。

3.4 变温下阻尼力特征仿真

利用计算机仿真模型计算在 -20 ~ 120℃ 温度区间内 MR 阻尼器的最大输出阻尼力,以及温度、电流综合作用下输出阻尼力的响应曲面,并与试验实测结果进行比较,如图 13 所示。

由图 13 可知,仿真结果与试验实测值吻合良好,两者绝对偏差小于 0.126 kN。当有励磁电流时,最大相对偏差 3.57%,说明建模时提出的温度效

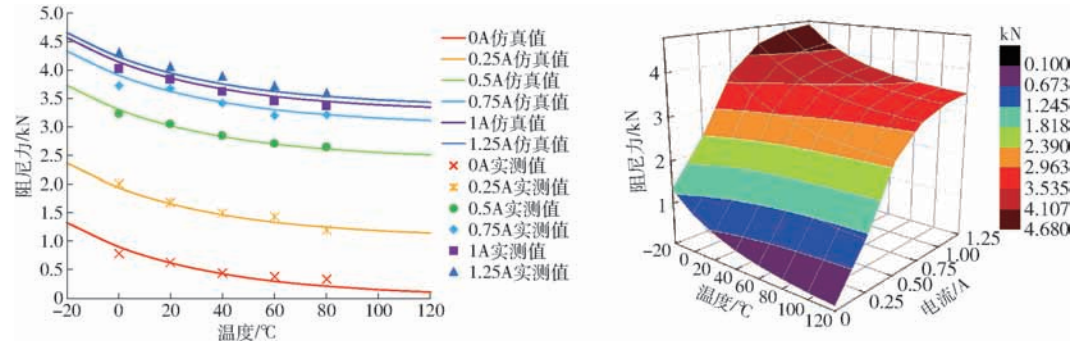


图 13 温度效应下阻尼力特征

Fig. 13 Variation of damping force of MR damper with temperature

应相关假设是可行的,仿真模型能较为准确描述温度对MR阻尼器动力学性能的影响。同时,不同励磁电流下MR阻尼器的最大输出阻尼力随温度升高均呈现下降变化趋势,且变化率不断减小,对于试验用的MR阻尼器,温度在-20~120℃变化时,最大输出阻尼力变化率由0.427 kN/℃减小至0.041 kN/℃。

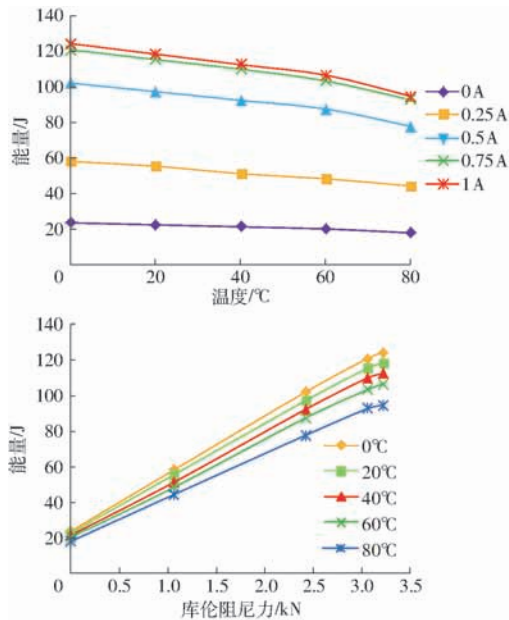


图 14 MR 阻尼器耗散能量随温度的变化

Fig. 14 Variation of dissipation energy of MR damper with temperature

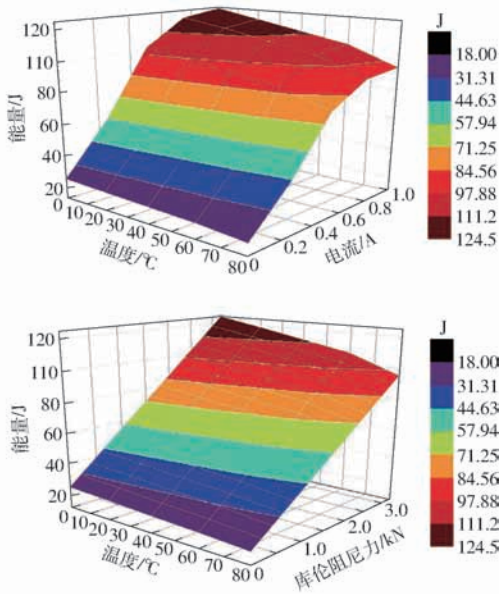
由图 14 可知,MR 阻尼器的能量耗散随温度升高而逐渐下降,阻尼器吸收振动能力随之降低,励磁电流为 1 A 时,在 0~80℃ 的温度区间内,能量耗散由 124.25 J 下降为 94.67 J,最大降幅为 23.81%。电流较低时能量耗散值随温度呈线性变化规律。因为励磁电流较大时,磁流变液半固化程度高、屈服应力大,受温度影响敏感。此外,MR 阻尼器的能量耗散同库伦阻尼力呈明显的正比例,线性相关系数 $R=0.994$ 。

4 结论

(1) 基于 MR 阻尼器 Bingham 动力学模型,对粘滞阻尼力与库伦阻尼力分别建立 CFD 和 FEM 模拟

3.5 变温下能耗特征仿真

通常外界激励振动通过活塞往复运动对磁流变液做功,使振动产生的动能转换为 MR 阻尼器内能,其 MR 阻尼器能量耗散能力可表示为试验测得的变温状态下“阻尼力-位移”曲线求面积积分,如图 14 所示。



仿真模型,可以较为准确分析求解不同温度、不同电流下阻尼器输出阻尼力特征及其相互影响,试验证明了仿真结果与试验实测值的一致性。

(2) 磁流变液的粘温特性可用指数形式描述,拟合相关系数达 0.998。MR 阻尼器的温度效应主要通过改变磁流变液粘度,影响输出粘滞阻尼力,并随温度升高而减小,变化速率呈现持续减小。MR 阻尼器在不同励磁电流下的能量耗散随温度升高呈线性下降,不同温度下的能量耗散与库伦阻尼力呈正比例。

(3) 建立的参数化模型是一种预测 MR 阻尼器输出阻尼力变化规律的有效方法,可用于 MR 阻尼器的结构设计、参数优化和材料选择。

参 考 文 献

1 WANG J, MENG G. Magneto-rheological fluid devices: principles, characteristics and applications in mechanical engineering[J]. Journal of Materials Design and Applications, 2001, 215(3): 165-174.

2 张进秋, 张建, 孔亚男, 等. 磁流变液及其应用研究综述[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(2): 1-6.

ZHANG J Q, ZHANG J, KONG Y N, et al. Summarization of magneto-rheological fluid and its application[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2010, 24(2): 1-6. (in Chinese)

3 瞿伟廉, 樊友川. 磁流变阻尼器的磁路有限元分析与优化设计方法[J]. 华中科技大学学报, 2006, 23(3): 1-4.

QU W L, FAN Y C. Magnetic circuit finite element analysis and optimum design method of a MR damper[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2006, 23(3): 1-4. (in Chinese)

4 张红辉, 廖昌荣, 唐旭东, 等. 磁场有限元在估计磁流变阻尼器性能中的应用[J]. 重庆大学学报, 2005, 28(10): 9-12.

ZHANG H H, LIAO C R, TANG X D, et al. Application of magnetic analysis in magneto-rheological damper performance

- estimation[J]. Journal of Chongqing University, 2005, 28(10): 9–12. (in Chinese)
- 5 侯保林. 基于磁场有限元分析的磁流变缓冲器结构设计[J]. 弹道学报, 2007, 19(3): 80–84.
HOU B L. Design of a magneto-rheological damper based on magnetic field FEM analysis[J]. Journal of Ballistics, 2007, 19(3): 80–84. (in Chinese)
- 6 陈昆山, 袁善发, 周孔亢, 等. 磁流变减振器磁路磁场特性分析[J]. 拖拉机与农用运输车, 2008, 35(2): 39–41.
CHEN K S, YUAN S F, ZHOU K K, et al. Analyze of magnetic structure's characteristics of MR fluid damper[J]. Tractor and Farm Transporter, 2008, 35(2): 39–41. (in Chinese)
- 7 许飞鸿. 多级线圈磁流变阻尼器磁路分析[J]. 东南大学学报, 2016, 46(1): 100–104.
XU F H. Magnetic circuit analysis on multi-coil magneto-rheological damper[J]. Journal of Southeast University, 2016, 46(1): 100–104. (in Chinese)
- 8 于振环, 刘顺安, 张娜, 等. 磁流变减振器多场耦合仿真分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 1–7. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140101&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.001.
YU Z H, LIU S A, ZHANG N, et al. Multi-field coupling simulation analysis of MR damper[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 1–7. (in Chinese)
- 9 胡国良, 李海燕, 张海云. 圆环流磁流变阀压降性能分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 381–388. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160354&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.054.
HU G L, LI H Y, ZHANG H Y. Performance analysis and experimental tests of pressure drop of annular type magnetorheological valve[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 381–388. (in Chinese)
- 10 BOADA M J L, CALVO J A, BOADA B L, et al. Modeling of a magneto-rheological damper by recursive lazy learning[J]. International Journal of Non-linear Mechanics, 2011, 46: 479–485.
- 11 CHEN Z B, HUANG S Y, YU D, et al. Mechanically delay dynamic model of magnetorheological damper[J]. Journal of Donghua University (English Edition), 2014, 31(4): 401–405.
- 12 DAO T L, DINH Q T, KYOUNG K A. Hysteresis modeling of magneto-rheological damper using self-tuning lyapunov-based fuzzy approach[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(1): 31–41.
- 13 王道明, 孟庆睿, 侯友夫, 等. 传动装置磁流变液瞬态温度场研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 287–292. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130449&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.049.
WANG D M, MENG Q R, HU Y F, et al. Transient temperature field of magneto-rheological fluid in transmission device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 287–292. (in Chinese)
- 14 董凯, 冯志敏, 孙玉坤, 等. 热辐射影响下磁流变阻尼器温升建模与试验[J]. 船舶工程, 2016, 38(5): 53–58.
DONG K, FENG Z M, SUN Y K, et al. Heating model and experiment of magneto-rheological damper under the influence of solar radiation[J]. Ship Engineering, 2016, 38(5): 53–58. (in Chinese)
- 15 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- 16 YANG G. Large-scale magneto-rheological fluid damper for vibration mitigation: modeling, testing and control [J]. Engineering Structures, 2002, 24(3): 309–323.
- 17 胡海刚, 尹兵宽, 冯志敏, 等. 考虑温度效应的磁流变阻尼器的 Bouc – Wen 模型[J]. 船舶工程, 2016, 38(5): 45–49.
HU H G, YIN B K, FENG Z M, et al. Improved Bouc – Wen model based on temperature effect of MR damper[J]. Ship Engineering, 2016, 38(5): 45–49. (in Chinese)
- 18 潘胜, 吴建耀, 胡林, 等. 磁流变液的屈服应力与温度效应[J]. 功能材料, 1997, 28(2): 264–267.
PAN S, WU J Y, HU L, et al. Yield stress and temperature effect of magneto-rheological fluids[J]. Journal of Functional Materials, 1997, 28(2): 264–267. (in Chinese)
- 19 陈松, 李峰, 黄金, 等. 温度对磁流变液材料即传力性能的影响[J]. 材料导报, 2015, 29(8): 151–155.
CHEN S, LI F, HUANG J, et al. Influence of temperature on magneto-rheological fluid and transmission performance[J]. Materials Review, 2015, 29(8): 151–155. (in Chinese)
- 20 陈飞, 田祖织, 王建. 温度对磁流变液性能的影响研究[J]. 功能材料, 2014, 45(20): 20095–20098.
CHEN F, TIAN Z Z, WANG J. Influence of temperature on the performance of magnetorheological fluid[J]. Journal of Functional Materials, 2014, 45(20): 20095–20098. (in Chinese)