

温度影响下磁流变阻尼器的力学性能研究

吴赞翊

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:为了探究在不同温度下磁流变阻尼器阻尼力输出性能差异较大、造成阻尼力失调或传动失效等问题,通过建立温度影响下的 Herschel-Bulkley 流动力学模型,分析温度对磁流变液黏度和屈服应力的影响,同时对不同温度下的阻尼器进行实验,将实验结果由粒子群算法对模型参数进行辨识,并将辨识结果通过仿真与实测结果进行对比验证。结果表明,温度对磁流变液黏度和屈服应力影响显著,且该数学模型能够很好地描述不同温度下磁流变阻尼器的力学性能。

关键词:磁流变阻尼器;力学性能;温度;黏度;屈服应力

中图分类号:TH113 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)06-0052-04

Study on Mechanical Performance of Magnetorheological Damper by Influence of Temperature

WU Zanyi

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

Abstract: To explore the large difference in the damping force output performance of the magnetorheological damper at different temperatures causing damping force imbalance or transmission failure, etc., a Herschel-Bulkley flow dynamic model under the influence of temperature was established, and the temperature effect on the viscosity of the magnetorheological fluid was analyzed. Meanwhile, experiments on dampers at different temperatures were carried out, and their results with model parameters were identified by the particle swarm algorithm. The identification results were compared and verified by simulation and measured results. The results show that temperature has a significant effect on the viscosity and yield stress of the magnetorheological fluid, and the mathematical model can best describe the mechanical properties of the magnetorheological damper at different temperatures.

Keywords: magnetorheological damper; mechanical properties; temperature; viscosity; yield stress

0 引言

磁流变液(MRF)是一种力学特性随外加磁场变化而瞬时发生变化的新型智能材料,主要成分是软磁性颗粒、基载液和一些添加剂。在外加磁场下,磁流变液的流变特性转化为类固体性质的流体,且转化速度非常快,在 ms 级。磁流变阻尼器是一种以磁流变液为载液的新型阻尼器,具有阻尼力大、响应快、阻尼力连续可控等优点^[1]。

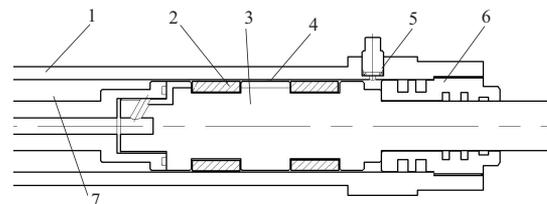
磁流变液的力学特性与温度密切相关。磁流变阻尼器运作过程中的液体黏性耗散与线圈长时间通电的发热会使温度上升,导致磁流变液黏度与屈服应力变化,从而影响阻尼力的输出性能和阻尼器的正常工作。因此有必要探究温度变化对磁流变阻尼器力学性能的影响。WANG D M 等^[2]对自行制备的磁流变液在不同温度下测试得到黏度降低 71.6%,屈服应力降低 11.52%。胡海刚等^[3]对磁流变阻尼器测试了温度对阻尼力的影响,验证了温度效应下的 Bouc-Wen 模型能够描述不同温度下的阻尼特性。

本文针对温度对磁流变阻尼器力学性能影响问题,使

用磁流变阻尼器温度特性测试实验系统对不同温度下阻尼器进行测试,并通过实验结果与温度影响下 Herschel-Bulkley 模型来探究温度影响下的磁流变阻尼器的力学性能。

1 磁流变阻尼器结构设计及原理

本文使用的磁流变阻尼器结构示意图如图 1 所示。



1—外筒;2—铜线圈;3—活塞;4—间隙通道;5—螺塞;
6—堵头;7—基液腔。

图 1 间隙式阻尼器结构

磁流变阻尼器内部的磁流变液在磁场作用下会呈现

作者简介:吴赞翊(1996—),男,福建南平人,硕士研究生,研究方向为磁流变技术与磁流变阻尼器控制。

强屈服应力,内部附加磁场由两个缠绕在中间活塞上的通电铜线圈产生。磁场覆盖的区域称之为激活区,而磁场没有覆盖区域称为非激活区。因此这种设计可以通过外部改变电流的方式,来控制磁流变阻尼力的大小。

2 磁流变阻尼器温度影响分析

2.1 磁流变阻尼器流体力学模型

在描述磁流变液力学特性上,大部分文献常常使用简单的 Bingham 模型来描述,但该模型不能体现剪切率变化下剪切稠稀化现象,而引入流体行为指数的 Herschel-Bulkley 模型能解决这个问题。

Herschel-Bulkley 本构方程为

$$\tau = \tau_0(B) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + K(\dot{\gamma})^n \quad (1)$$

式中: τ 为流体在剪切过程中的切应力; $\dot{\gamma}$ 为流体的剪切应变率; $\tau_0(B)$ 为剪切屈服应力,与磁感应强度 B 相关; $\operatorname{sgn}(\dot{\gamma})$ 为符号函数,正负取决于剪切方向; K 为流体黏度; n 为流体行为指数,当 $n=1$ 时,Herschel-Bulkley 模型退回 Bingham 模型,当 $n>1$ 时呈剪切变稠现象,当 $n<1$ 时呈剪切变稀现象。

建立平行板流动模型,平行板流口磁流变液流动速度分布图如图 2 所示。

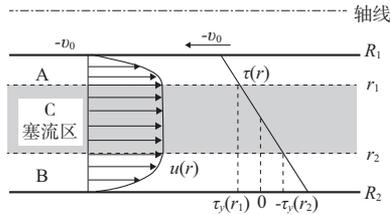


图 2 平行板流口磁流变液流动速度分布图

流过平行板流口流量 Q 计算公式可表示为

$$Q = v_0(A_p - A_r) = \pi(R_2 + R_1) \int_0^h u dz \quad (2)$$

式中: v_0 为活塞杆速度; A_p 为活塞横截面积; A_r 为活塞杆横截面积; R_1 和 R_2 分别表示活塞杆外半径和外筒内半径; $h=R_2-R_1$,表示间隙宽度; u 为流速; z 表示轴向坐标。

流口两端压力差 ΔP_a 可表示为

$$|\Delta P_a| = \frac{2\tau_0 L_a}{\delta h} \quad (3)$$

式中: δ 为无量纲塞流厚度,该参数代表塞流区在间隙宽度中的占比; L_a 为间隙激活区长度。

由式(2)与式(3)可推出无量纲塞流厚度满足^[4]

$$(1-\bar{\delta})^{n+1} \left(1 + \frac{\bar{\delta}n}{n+1}\right)^n - \left[\frac{2(2n+1)}{n}\right]^n \frac{\bar{\delta}}{B_i} = 0 \quad (4)$$

其中 B_i 为广义宾汉数,表示为

$$B_i = \frac{\tau_0}{K \left\{ (A_p - A_r) v_0 / [\pi(R_1 + R_2) h^2] \right\}^n} \quad (5)$$

其中 τ_0 与磁感应强度 B 相关。由 Ansys Maxwell 软件的

电磁场仿真后拟合可得到 B 与 I 的关系为

$$B = 17.86I^3 - 187I^2 + 686.2I - 25.94 \quad (6)$$

激活区的库仑阻尼力 F_a 可表示为

$$F_a = (A_p - A_r) \Delta P_a \quad (7)$$

非激活区的黏滞阻尼力 F_u 可表示为

$$F_u = (A_p - A_r)^2 \frac{12K(L-L_a)}{\pi R_1 (R_2 - R_1)^3} v_0 \quad (8)$$

阻尼力由激活区与非激活区共同构成。式中 L 为流口间隙总长度。磁流变阻尼器尺寸参数如表 1 所示。

表 1 磁流变阻尼器尺寸参数

参数	数值
活塞横截面积 A_p/m^2	2.29×10^{-3}
活塞杆横截面积 A_r/m^2	7.07×10^{-4}
间隙总长度 L/m	0.12
间隙激活区长度 L_a/m	0.06
活塞杆外半径 R_1/m	0.027
外筒内半径 R_2/m	0.028

2.2 温度对阻尼力影响分析

由式(7)-式(8)可以看到,磁流变阻尼器的阻尼力主要由黏度、屈服应力、剪切速率与磁感应强度决定。为了探究磁流变液的黏温特性,磁流变液的黏度与温度之间关系,可以通过 Reynolds 提出的黏温方程式^[5]进行拟合,关系表示为

$$K(T) = Ae^{-BT} \quad (9)$$

式中: K 为磁流变液黏度; T 为温度; A 、 B 为拟合常数,其中 A 、 $B>0$ 。

温度对屈服应力的影响可用 $\tau_y(B)$ 的指数衰减函数捕获。根据 Arrhenius 方程及屈服应力与磁场之间的关系^[6],温度对屈服应力影响可以描述为

$$\tau_0(B, T) = C \cdot B^m \cdot e^{-DT} \quad (10)$$

式中 T 为温度; C 、 m 、 D 为拟合常数,其中 C 、 m 、 $D>0$ 。

根据式(9)与式(10),温度影响下 Herschel-Bulkley 模型的本构方程可以表示为

$$\tau = \tau_0(B, T) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + K(T) (\dot{\gamma})^n \quad (11)$$

温度影响下非激活区黏滞阻尼力表示为

$$F_u = (A_p - A_r)^2 \frac{12K(T) \cdot (L - L_a)}{\pi R_1 (R_2 - R_1)^3} v_0 \quad (12)$$

温度影响下激活区库仑阻尼力表示为

$$F_a = (A_p - A_r) \frac{2\tau_0(B, T) \cdot L_a}{\delta(v_0, B, K, T) \cdot h} \quad (13)$$

由式(13)可知无量纲塞流厚度 $\bar{\delta}(v_0, B, K, T)$ 修正为与活塞速度、磁感应强度、黏度和温度相关的函数。修正后的温度影响下 Herschel-Bulkley 模型具体参数通过温度特性测试实验对数据分析和辨识后得到。

3 温度特性测试实验与结果分析

3.1 实验准备

为对磁流变阻尼器温度特性进行测试实验,自行设计

和搭建了一套测试系统,通过电动缸与定制的控制采集系统设备实现对阻尼器活塞杆传力与数据采集,再由 LP3005D 型直流稳压电源对线圈输入稳定电流。阻尼器载液选用某研究院生产的 MRF-J25T 型磁流变液,再结合温控装置对阻尼器进行温度控制,阻尼器在温控装置中达到目标温度后,在该温度下保持 2 h 以后再进行测试。通过该系统测试不同电流、不同温度下的阻尼力变化情况。磁流变阻尼器实验设备如图 3 所示。

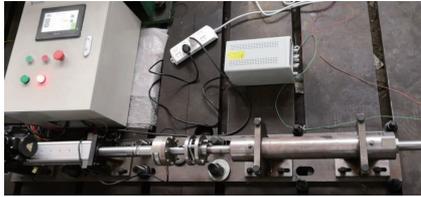


图 3 磁流变阻尼器实验设备

3.2 实验结果及分析

研究温度效应下磁流变阻尼器流变特性,需要对不同温度下的阻尼器进行温度特性测试。因此实验条件是以 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 5 个等温度区间为测试工况来表征磁流变阻尼器的温度效应,在 20 mm/s 速度条件下通过直流电源分别施加 0 A 、 0.5 A 、 1.0 A 、 1.5 A 、 2.0 A 、 3.0 A 的固定电流。实验结果如图 4 所示。

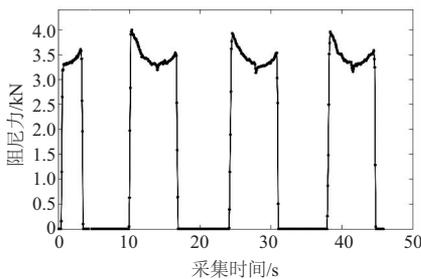


图 4 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 1.0 A 电流采集结果

由图 4 可以看到,在推动过程中,开始与结束的阻尼力较稳定时偏大,这是因为活塞杆运动速度突然转向会产生一定的惯性阻尼力。因此取阻尼力稳定时的平均值作为测量数据,可以得到图 5 所示测量结果。

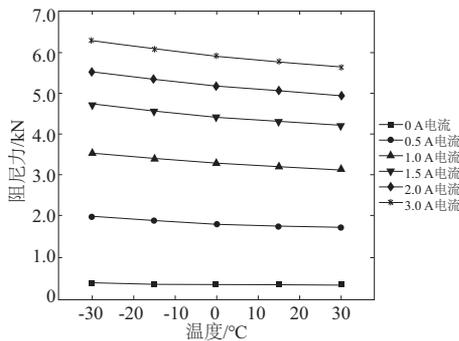


图 5 阻尼力温度特性实验测量结果

从图 5 中可以看到,随着温度的不断升高,对应施加

不同电流的阻尼力都有不同程度的降低。 0 A 电流时阻尼力变化并不大,这是由于阻尼器存在内摩擦力,而不加电流情况下内摩擦力相比黏滞阻尼力较大,因此阻尼力变化不明显。通过不加电流且极低速情况下测量得到阻尼力约为 313 N ,估计该值为内摩擦力,测量值减去该值即为实际值。

在电流为 0 A 的情况下,温度从 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的变化过程中平均阻尼力的衰减幅度大约在 25% 。而在电流为 0.5 A 时,阻尼力的衰减幅度就下降到了 10.9% 。当电流分别为 1.0 A 、 1.5 A 、 2.0 A 、 3.0 A 时,在温度变化过程中平均阻尼力的衰减幅度分别为 10.10% 、 9.50% 、 9.16% 、 9.18% 。因此可以看出,在施加电流后,磁流变阻尼器阻尼力的大小受温度变化影响减弱。主要原因在于当未给通电线圈施加电流时并没有磁流变效应,磁流变阻尼器的阻尼力主要来自油液的黏滞阻尼力与内摩擦力,因此温度升高时黏度降低导致黏滞阻尼力减小。但是在施加电流之后,库仑阻尼力在总阻尼力中占比更大,而库仑阻尼力的大小主要取决于磁感应强度而受温度影响相对较小,因此温度升高对阻尼力的影响力相对下降。

3.3 模型参数辨识与分析

温度影响下描述力学特性 Herschel-Bulkley 数学模型具有待辨识参数 A 、 B 、 n 、 C 、 m 、 D ,将实验测得数据与数学模型通过基于粒子群算法的参数辨识方法,辨识后得到结果如表 2 所示。

表 2 模型参数辨识结果

A	B	n	C	m	D
0.203 1	$4.716 5 \times 10^{-3}$	0.937 1	35 069.2	1.246 7	$1.474 8 \times 10^{-3}$

为了验证该模型的正确性,通过模型仿真与实际测量数据进行对比来验证模型的预测情况。图 6 为实验值与仿真值的对比。从图中可以看出,该模型可以很好地描述不同电流和不同温度下的磁流变阻尼器的力学性能。电流从 0 A 增至 2.0 A 时,阻尼力变化最大,此时磁感应强度增加较快,而当电流超过 2.0 A 时,屈服应力增速趋于平缓,此时磁流变液接近磁饱和状态。

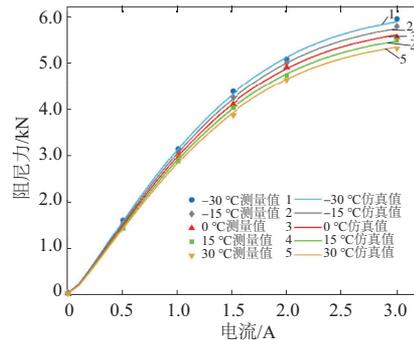


图 6 磁流变阻尼器模型仿真验证

通过辨识结果,可以得到温度变化下阻尼器内 MRF-J25T 磁流变液黏度曲线与屈服应力曲线,分别如图 7 与图 8 所示。

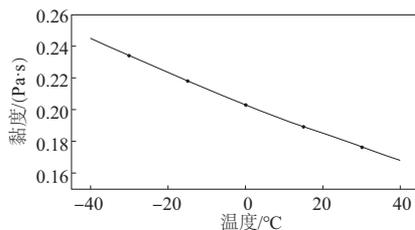


图7 磁流变液黏度辨识结果

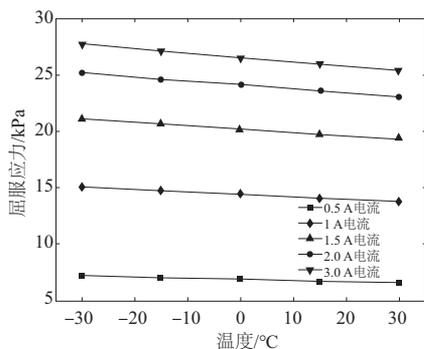


图8 不同电流下屈服应力辨识结果

可以看到温度从 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,磁流变液黏度下降了25%,并且屈服应力也在不同电流时都有下降,下降比例约为8.5%,明显看出磁流变液黏度相比屈服应力有更大程度的降低。

(上接第40页)

5 结语

本文针对实验室的一种叶片式阻尼器进行了出力特性的研究。首先通过示功实验采集了阻尼器9种工况下的实验数据,然后以双曲正切模型为基础,将其转化为力矩形式,对修改后的模型进行了指数修正,用顺序选择遗传算法分别对双曲正切模型和双曲正切改进模型进行了参数辨识。结果表明,辨识得到的模型误差较小,可以很好地模拟实验室阻尼器的出力,而双曲正切改进模型则进一步提高了模型的精度,对以后叶片式阻尼器的建模具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 刘孝辉,徐新喜,白松,等. 军用直升机振动与噪声控制技术[J]. 直升机技术,2013(1):67-72.
- [2] KWOK N M, HA Q P, NGUYEN T H, et al. A novel hysteretic model for magnetorheological fluid dampers and parameter identification using particle swarm optimization[J]. Sensors and Actuators A:Physical,2006,132(2):441-451.
- [3] KRAUZE P, KASPRZYK J. F. LMS algorithm with preview for vibration control of a half-car model with magnetorheological dampers[C]//2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Besacon, France: IEEE, 2014:518-523.

4 结语

本文研究了不同温度下磁流变阻尼器力学性能的变化,在建立了温度影响下 Herschel-Bulkley 的修正模型后,通过该模型与实验结果分析了温度对黏度与屈服应力的影响。结果表明,温度对黏度和屈服应力影响十分明显。将实验结果对模型参数进行辨识,验证了模型在不同温度下描述阻尼力的准确性,为今后不同温度下磁流变阻尼器的应用提供了参考。

参考文献:

- [1] 董立磊,李开明,葛帅帅,等. 用于机床减振的磁流变阻尼器优化设计[J]. 机械制造与自动化,2020,49(2):34-37,53.
- [2] WANG D M, ZI B, ZENG Y S, et al. Measurement of temperature-dependent mechanical properties of magnetorheological fluids using a parallel disk shear stress testing device[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C:Journal of Mechanical Engineering Science,2017,231(9):1725-1737.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 高春甫,周崇秋,郑强,等. 温度对磁流变液剪切应力特性的影响[J]. 应用力学学报,2020,37(4):1724-1730,1872.
- [6] SAHIN H, WANG X J, GORDANINEJAD F. Temperature dependence of magnetorheological materials[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures,2009,20(18):2215-2222.

收稿日期:2020-12-08

- [4] CHENG M, CHEN Z B, LIU W T, et al. A novel parametric model for magnetorheological dampers considering excitation characteristics [J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(4):045002.
- [5] MIAH M S, CHATZI E N, DERTIMANIS V K, et al. Nonlinear modeling of a rotational MR damper via an enhanced Bouc - Wen model [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(10):105020.
- [6] KRISTINSSON K, DUMONT G A. System identification and control using genetic algorithms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1992,22(5):1033-1046.
- [7] SCHNEIDER T R. A genetic algorithm for the identification of conformationally invariant regions in protein molecules[J]. Acta Crystallographica Section D,2002,58(2):195-208.
- [8] 齐畅,王冬霞,韩颖. 多种遗传算法在函数优化方面的性能比较分析[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版),2013,33(5):290-293.
- [9] IMADUDDIN F, MAZLAN S A, ZAMZURI H. A design and modelling review of rotary magnetorheological damper [J]. Materials & Design, 2013,51:575-591.
- [10] PAWLUS W, KARIMI H R. Neural network-based models for a vibration suppression system equipped with MR brake [C]//2012 6th IEEE International Conference Intelligent Systems. Sofia, Bulgaria:IEEE,2012:330-335.

收稿日期:2020-10-30