

叶片式阻尼器的参数辨识研究

郭鑫星,周瑾,曹晓彦,郭勤涛
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:叶片式阻尼器出力特性具有较强的非线性,为建立准确的力学模型,以实验室的一种叶片式阻尼器为研究对象,对其进行示功试验以获得它的出力特性;以双曲正切模型和双曲正切改进模型为基础,依据示功试验的实验数据选用顺序选择遗传算法辨识出这两种模型的参数,并在 Matlab 中进行出力仿真。结果表明:仿真得到的示功曲线与实验的示功曲线较为吻合,验证了这两种模型的准确性,双曲正切改进模型对比原模型具有更高的精度。

关键词:叶片式阻尼器;示功实验;双曲正切模型;参数辨识

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)06-0037-04

Study of Parameter Identification of Models for Vane Damper

GUO Xinxing, ZHOU Jin, CAO Xiaoyan, GUO Qintao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To establish an accurate mechanical model of vane damper whose output characteristics has relatively strong nonlinearities, indicator tests are conducted with a laboratory vane damper as the research subject to obtain its output characteristics. Based on the hyperbolic tangent model and its improved one, the parameters of the two damper models are identified by sequential selection genetic algorithm based on experimental data of indicator tests and output simulation in Matlab is performed. The results show that the simulated indicator curve and the one by experiments fit well, which verifies the correctness of the two models and higher accuracy of the improved hyperbolic tangent model than that of the original one.

Keywords: vane damper; indicator test; tangent model; parameter identification

0 引言

直升机在飞行过程中,操纵系统的振动会给驾驶员的操作以及仪器设备带来严重的影响。为了解决这一问题,在操纵系统中加入减振装置是有效的解决方案之一。目前,操纵系统的减振方式主要采用被动减振形式,而叶片式阻尼器作为一种新型阻尼器,它具有行程大、布置灵活、散热性能好和防护性能高等优点而被广泛应用于各种减振系统中。

为了研究叶片式阻尼器的出力特性并建立准确的阻尼器模型,需要对阻尼器进行示功试验。由于其出力与旋转角位移、旋转角速度及振动频率均相关^[1],并呈现出较强的非线性关系,这给实际的动力学建模带来了一定的困难。为了解决这一问题,相关学者对阻尼器建模做了大量的研究。KWOK N M 等^[2]于 2006 年提出了双曲正切模型,通过双曲正切函数来描述阻尼器的迟滞特性;KRAUZE P 等^[3]用双曲正切模型建立了磁流变阻尼器的模型,并与 Bouc-wen 模型进行了比较;CHENG M 等^[4]利用考虑激励的双曲正切模型对阻尼器进行了仿真并优化。本文主要选用双曲正切模型以及双曲正切改进模型对阻尼器进行参数辨识,通过仿真和实验的对比,验证了这两种模型的有效性。

1 叶片式阻尼器

叶片式阻尼器主要由壳体、隔板、转子叶片、阻尼调节装置以及阻尼介质组成。它的主要工作原理为:当振动物体受到激励时,通过连接臂带动转子叶片旋转,形成高压腔和低压腔;油液由于压力作用,从高压腔流向低压腔,由于阻尼通道的节流作用,产生阻尼力。图 1 为叶片式阻尼器的实物图及内部结构图。

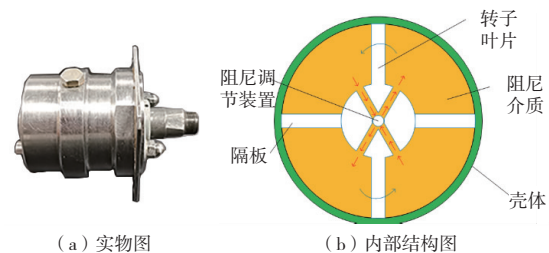


图 1 叶片式阻尼器实物图及内部结构图

2 示功试验

为了得到叶片式阻尼器的出力特性,需要对其进行示功试验来得到位移特性图和速度特性图,然后通过实验数

据来建立阻尼器的动力学模型。本次试验使用的试验机是 MTS 液压疲劳试验机,它在低频下具有良好的波形图,能够准确地给出指定的位移曲线。为了实验的可行性,需要在叶片式阻尼器上安装连接臂,通过连接臂将直线运动转化为阻尼器叶片的旋转运动^[5],如图 2 所示。试验机和阻尼器的安装示意图如图 3 所示。

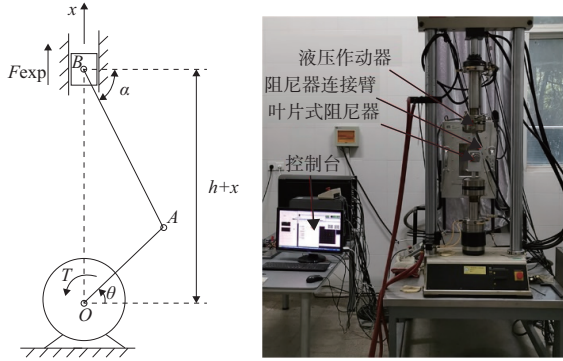


图 2 阻尼器力臂示意图 图 3 试验装置系统

为了验证阻尼器在不同工况下的性能,示功试验使用正弦信号作为激励信号,幅值分别为 1 mm、1.5 mm、2 mm,每个幅值下分别有 1 Hz、2 Hz、3 Hz 3 种频率,共有 9 种工况。完成示功试验后,为了能够更加直观清晰地表达叶片式阻尼器的出力特性,将上连接杆的位移通过式(1)转换为阻尼器叶片的旋转角位移(分别对应幅值为 0.012 5 rad、0.018 6 rad、0.024 8 rad 的简谐运动),再通过时间的微分得到角速度,将上连接杆受到的力根据式(2)转换为阻尼器产生的力矩。

$$\begin{cases} L_{OA} \cdot \cos\theta - L_{AB} \cdot \cos\alpha = 0 \\ L_{OA} \cdot \sin\theta + L_{AB} \cdot \sin\alpha - h - x = 0 \\ x = A \cdot \sin(2\pi f t) \end{cases} \quad (1)$$

$$T = F \cdot \sin\alpha \cdot L_{OA} \cdot \sin(\theta + \alpha) \quad (2)$$

在示功试验后通过上述处理得到叶片式阻尼器力矩-角位移、力矩-角速度图,如图 4 所示。

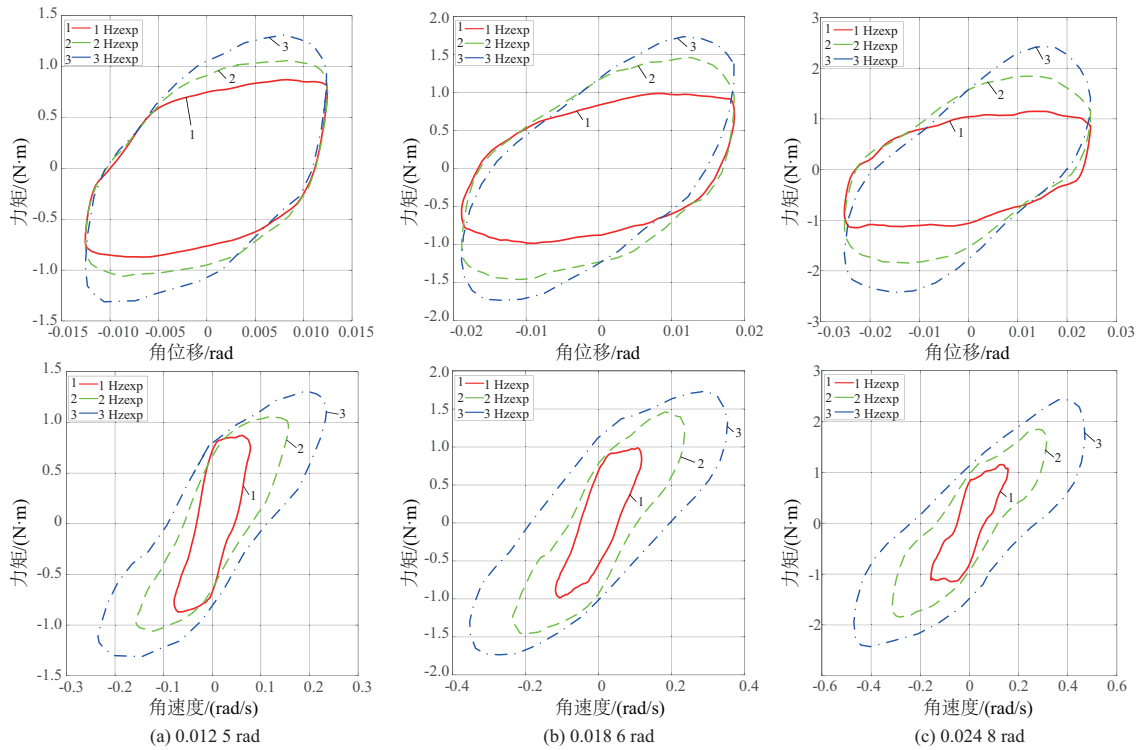


图 4 各工况下的阻尼器示功图

3 参数辨识

3.1 顺序选择遗传算法

遗传算法是由 1962 年由 Holland 提出的一种算法,它实质上是一种进化算法,在很多领域都有广泛的应用。通过遗传算法,一些多模型、多目标、非线性的函数优化问题能够方便地得到较好的结果^[6-7]。遗传算法主要包括选

择、交叉、变异三个主要过程,根据目标函数的值来确定是否继续进行寻优,从而得到最优解。目标函数一般取实验值与仿真值之间的平方差,其具体公式为

$$O_F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_{simu}(i) - T_{exp}(i)}{T_{max} - T_{min}} \right)^2 \quad (3)$$

式中: O_F 为目标函数值; n 为实验数据个数; $T_{simu}(i)$ 为第 i 个点的仿真值; $T_{exp}(i)$ 为第 i 个点的实验值; T_{max} 为实验值中的最大值; T_{min} 为实验值中的最小值。

顺序选择遗传算法是一种改进型的遗传算法,它与基

本遗传算法的主要区别是两者个体选择操作的不同。基本遗传算法中个体的选择概率与个体的适应度值直接相关^[7-8],其计算公式为

$$P_i = \frac{f_{\text{fitness}}(x_i)}{\sum_{i=1}^{N_p} f_{\text{fitness}}(x_i)} \quad (4)$$

式中: $f_{\text{fitness}}(x_i)$ 为个体的适应度值; N_p 为种群个体数; P_i 为个体的选择概率。

式(4)中如果某个个体适应度值为0,那么它的选择概率为0,这个个体就不能产生后代,这是基本遗传算法一个很大的缺点。而顺序选择遗传算法则将选择概率固定为某一个确定的值,其具体步骤为:

1)按适应度值大小对个体进行排序;

2)定义最好的个体的选择概率为 p ,则排序后第 j 个个体的选择概率为

$$P_i = \frac{p \cdot (1-p)^{j-1}}{1-(1-p)^{N_p}} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,每个个体被选择的概率均不为0,从而保证了遗传算法的精确性。

3.2 双曲正切模型

由于叶片式阻尼器的强非线性,普通模型难以准确预测其出力,需要寻找一种滞回模型来模拟阻尼器的滞回特性。常用的滞回模型主要有 Bouc-wen 模型和双曲正切模型(图5)。

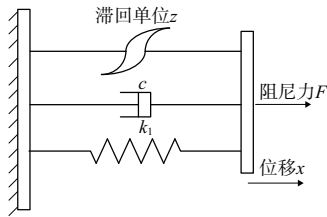


图5 双曲正切模型

双曲正切模型是一种利用双曲正切函数来描述阻尼器迟滞特性的模型,具有模型简单、易于识别、精度高等优点,适用于阻尼器的建模。它的公式为

$$\begin{cases} F = c \cdot \dot{x} + k_1 \cdot x + k_2 \cdot z + f_0 \\ z = \tanh[\alpha(x + \beta \cdot \text{sgn}(x))] \end{cases} \quad (6)$$

式中: F 为阻尼器的输出力; c 为阻尼器的阻尼系数; k_1 为阻尼器的弹性刚度; k_2 、 α 、 β 为滞回环的形状参数; x 为阻尼器的位移; f_0 为阻尼器的偏置力。

由于本文使用力矩-角位移、力矩-角速度特性图来描述阻尼器的特性,需将式(6)改写^[9-10],分别用角位移、角速度、力矩替代式(6)中的位移、速度、力,改写后的公式为

$$\begin{cases} T = c \cdot \dot{\theta} + k_1 \cdot \theta + k_2 \cdot z + T_0 \\ z = \tanh[\alpha(\theta + \beta \cdot \text{sgn}(\theta))] \end{cases} \quad (7)$$

式中: T 为阻尼器的输出力矩; θ 为阻尼器的角位移; T_0 为阻尼器的偏置力矩。

3.3 双曲正切改进模型

为了使上述的双曲正切模型更加精准地模拟阻尼器

的非线性特性,可以通过在和角速度相关的项加上一个指数系数来进一步修正阻尼器的仿真出力曲线。改进后的模型公式为

$$\begin{cases} T = c \cdot \dot{\theta}^n + k_1 \cdot \theta + k_2 \cdot z + T_0 \\ z = \tanh[\alpha(\theta + \beta \cdot \text{sgn}(\theta))] \end{cases} \quad (8)$$

式中 n 为角速度指数系数。

本文主要采用双曲正切模型和双曲正切改进模型来对阻尼器进行参数辨识,其参数辨识结果如表1、表2所示。从辨识的结果中可以看出两种模型的 c 值均随着频率的增大而减小,随着幅值的增大也有减小的趋势,这是由于阻尼器内部油液的剪切稀化效应所导致的。 k_1 值随着频率的增大而增加,随着幅值的增大变化较小,这与阻尼介质的可压缩性有关。参数中 k_2 、 α 、 β 则在一个范围内浮动,没有明显的规律性。 T_0 则是一个较小的值,这是因为实验室阻尼器是新型双通道式叶片阻尼器,改善了单通道叶片阻尼器偏置力较大的现象。

表1 双曲正切模型的参数辨识结果

工况	c	k_1	k_2	α	β	T_0	O_F
0.012 5 rad_1 Hz	14.49	19.82	0.38	-33.32	-0.05	-0.02	2.09×10^{-5}
0.012 5 rad_2 Hz	8.25	31.09	0.32	-18.32	-0.08	-0.04	1.37×10^{-5}
0.012 5 rad_3 Hz	5.21	50.38	0.10	-25.72	-0.09	-0.03	9.43×10^{-6}
0.018 6 rad_1 Hz	9.95	18.01	0.25	-39.88	-0.06	0.01	8.35×10^{-6}
0.018 6 rad_2 Hz	6.07	32.83	0.15	-13.69	-0.10	-0.06	1.57×10^{-5}
0.018 6 rad_3 Hz	4.09	54.78	0.82	-0.39	-0.07	-0.10	1.62×10^{-5}
0.024 8 rad_1 Hz	8.35	17.56	0.21	-53.12	-0.08	-0.02	3.02×10^{-5}
0.024 8 rad_2 Hz	6.32	30.91	0.96	-1.57	-0.06	0.04	1.40×10^{-5}
0.024 8 rad_3 Hz	4.10	61.42	0.21	-22.09	0.29	-0.06	4.00×10^{-6}

表2 双曲正切改进模型的参数辨识结果

工况	c	k_1	k_2	α	β	T_0	n	O_F
0.012 5 rad_1 Hz	8.04	29.67	0.37	41.13	0.03	-0.03	1.19	7.58×10^{-6}
0.012 5 rad_2 Hz	5.55	39.00	0.29	25.03	0.03	-0.04	1.19	3.37×10^{-6}
0.012 5 rad_3 Hz	3.49	51.81	0.19	31.84	0.05	-0.03	0.98	5.48×10^{-7}
0.018 6 rad_1 Hz	4.76	21.26	0.25	39.31	0.04	0.01	0.95	2.09×10^{-6}
0.018 6 rad_2 Hz	3.77	35.55	0.21	34.66	0.05	0.00	0.93	4.78×10^{-6}
0.0186 rad_3 Hz	3.01	53.27	0.14	16.38	0.05	-0.01	0.96	9.73×10^{-7}
0.024 8 rad_1 Hz	5.65	19.87	0.38	38.04	0.03	-0.01	1.20	2.02×10^{-6}
0.024 8 rad_2 Hz	3.70	28.18	0.14	61.70	0.31	0.02	0.82	4.32×10^{-6}
0.024 8 rad_3 Hz	3.17	46.27	0.17	46.13	0.48	-0.07	0.83	2.86×10^{-6}

4 模型验证

4.1 双曲正切模型验证

通过参数辨识得到双曲正切模型的参数后,将其代入模型并在 Matlab 中仿真,得到仿真实验对比图如图6所示。从图中可以看出双曲正切模型能较好地模拟实验室叶片式阻尼器的出力特性,但在部分区域还存在一定的误差。

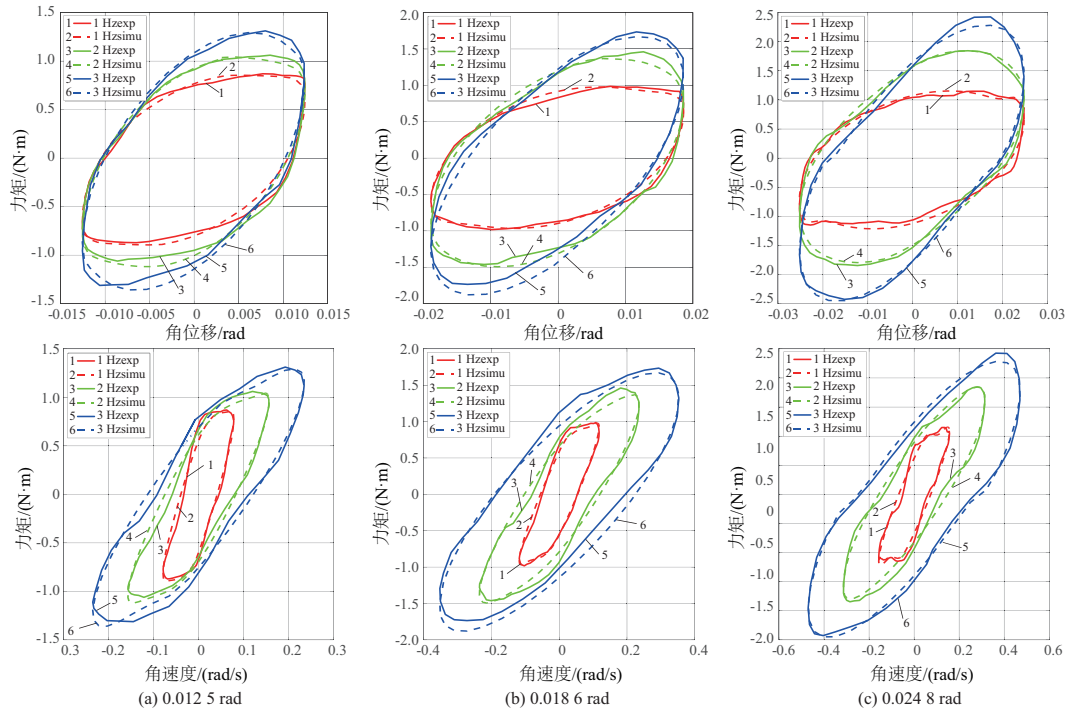


图 6 各工况下实验仿真对比图

4.2 双曲正切改进模型验证

将辨识得到的参数代入双曲正切改进模型并在 Matlab 中进行仿真,得到的仿真示功曲线如图 7 所示。图中示功曲线从里到外分别代表 1 Hz、1.5 Hz、2 Hz 工况下的示功曲线, tanh1 代表双曲正切模型, tanh2 代表双曲正切改进模型。从图中可以看出,双曲正切改进模型在双曲

正切模型的基础上进一步提高了模型的精度,尤其是在力矩与角速度的特性上,使得模型更加符合真实的曲线。这是因为阻尼器中的黏性力与速度不一定完全成线性关系,加入指数后,可以使得两者关系更加符合实际情况。从表 2 中目标函数值来看,双曲正切改进模型的值小于双曲正切模型的值,这也表明了双曲正切改进模型具有更好的精度(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

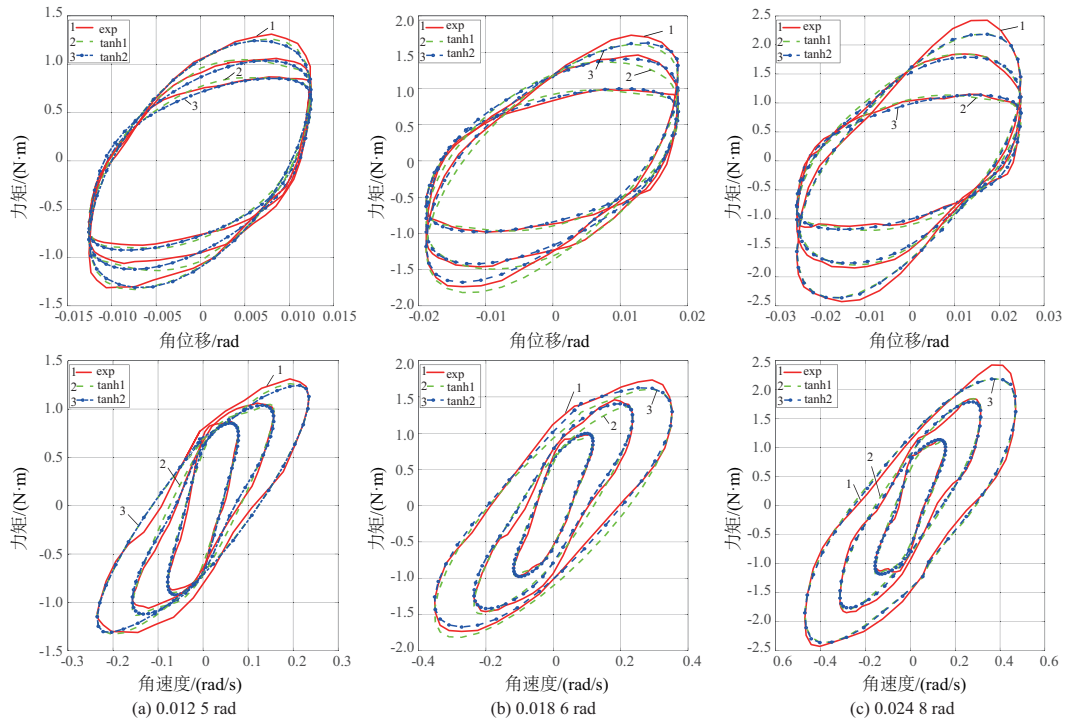


图 7 改进后各工况下实验仿真对比图

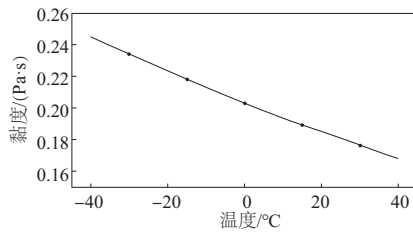


图7 磁流变液黏度辨识结果

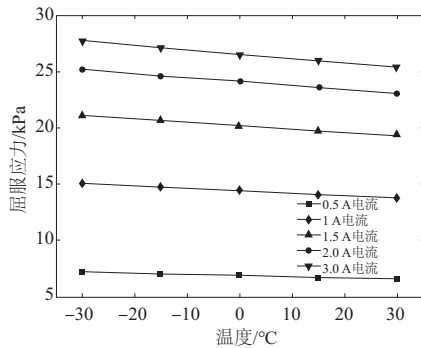


图8 不同电流下屈服应力辨识结果

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