

龚微, 熊世树, 郑鑫城. 磁流变液阻尼器三段线性变阻尼模型及试验验证[J]. 华南地震, 2018, 38 (2): 88-93. [GONG Wei, XIONG Shishu, ZHENG Xincheng. Three-segment Linear Variable Damping Mechanical Model for Magneto-rheological Fluid Damper and Test Verification[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(2): 88-93]

磁流变液阻尼器三段线性变阻尼模型及试验验证

龚微^{1,2}, 熊世树³, 郑鑫城¹

((1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广州 510405;
3. 华中科技大学在学土木工程与力学学院, 武汉 430074))

摘要: 自行研发了一个最大出力约为 10 kN 的磁流变液阻尼器(MRFD), 基于阻尼器的力学性能试验结果, 分析最大阻尼力随速度和电流的变化规律, 提出了一种适用于控制器设计的简便高效 MRFD 唯象模型-三段线性变阻尼恢复力模型, 并对模型参数进行识别, 数值与试验结果对比分析表明该模型可较精确地模拟 MRFD 的非线性力学性能。基于该三段线性变阻尼恢复力模型可方便数值求解阻尼器逆模型, 阻尼器力学模型的研究思路可应用于其他具体研发的磁流变液阻尼器中。

关键词: 磁流变液阻尼器; 力学模型; 性能试验; 参数识别

中图分类号: TB535 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662(2018)02-0088-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.02.013

Three-segment Linear Variable Damping Mechanical Model for Magneto-rheological Fluid Damper and Test Verification

GONG Wei^{1,2}, XIONG Shishu³, ZHENG Xincheng¹

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Engineering and Advanced Technology, Guangzhou 510405, China; 3. Department of Civil Engineering and Mechanics of Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430073, China)

Abstract: The magneto-rheological fluid damper with maximum force capacity of 10 kN was self-developed. The mechanical property test of the MRFD was carried out. Based on the analysis of the test results, the variation of the maximum damping force with velocity and current was investigated. Subsequently, a simple and efficient MRFD phenomenological model for controller design was proposed, which is named the three-segment linear variable damping mechanical model. The model parameters were also identified. The comparison between numerical and experimental results showed that the three-segment linear variable damping mechanical model can

收稿日期: 2017-12-25

作者简介: 龚微(1989-), 女, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事结构振动控制相关工作。

E-mail: gongwei@gzhu.edu.cn.

satisfactorily simulate the nonlinear mechanical behavior of the MRFD. In addition, it is convenient to analytically calculate the inverse model of the damper by employing the three-segment linear variable damping mechanical model. The research strategy of the mechanical model of the self-made MRFD can be applied to other specific MRFDs.

Keywords: Magneto-rheological fluid damper; Mechanical model; Property experiment; Parameter identification

0 引言

磁流变液阻尼器因其具有能耗低(<50 w, 工作电压只需 2~25 V)、出力大、动态范围宽、响应速度快等优良特点, 已经成为土木工程结构新一代高性能和智能化的减振装置^[1-5]。磁流变液阻尼器通过改变输入电流控制磁场强度, 从而使磁流变液快速(毫秒级时间)在流动性良好的牛顿液体和高黏度、低流动性的 Bingham 塑性固体之间转换, 进而实现控制力可调。

建立磁流变液阻尼器的恢复力模型是结构振动控制系统设计和仿真分析中的一个重要环节^[6-7]。与流体力学模型和有限元模型相比, 以试验数据为基础的唯象模型可以根据控制器设计及数值仿真的需要采用合适的解析表达式, 而且对于具体磁流变液阻尼器有时可能显得更准确。Stanway^[8]将线性粘滞阻尼元件和库仑摩擦元件并联, 提出了 Bingham 粘塑性模型, 该模型能合理地描述阻尼器的力-位移响应, 但速度为零时阻尼力不连续, 且不能很好地描述阻尼力-速度的非线性响应。Sigmoid 模型^[9]能模型低速区阻尼力-速度的非线性性能, 同时也可以模拟低速区阻尼力-速度曲线斜率随频率的变化关系, 但在模拟低速区阻尼力-速度的滞回性能时稍显不足。Bouc-Wen 模型^[10]提供了一种能很好模拟阻尼器力-速度非线性响应行为的方法, 但不能拟合实验中见到的阻尼器在低速运动时恢复力衰减的现象。Spencer 等^[11]提出了基于 Bouc-Wen 滞回模型的现象模型, 该模型能很好地模拟包括小速度范围在内的阻尼器恢复力, 然而含有 14 个待确定参数, 计算繁杂。

现有的磁流变液阻尼器的力学模型虽然有着各自的优点, 但力学模型的逆模型数值求解困难, 不便于进行控制设计及实际应用, 为了发展有效的控制器, 实现目标控制力的实时跟踪, 需要建立合适的 MRFD 阻尼器动态力学模型, 使其能简便有效地求解目标控制力所对应的电流。Arturo^[12]提出了一种基于规划 Bouc-Wen 模型的磁流变液阻尼器逆模型, 该阻尼器逆模型需判别根的取

值, 判别准则复杂且耗时。吴斌^[13]提出了一种基于 Bingham 粘塑性模型的磁流变液阻尼器逆模型, 但其逆模型不能有效地跟踪和实现目标控制力。

本文研发一个最大力约为 10 kN 的磁流变液阻尼器, 对其进行力学性能试验, 充分分析最大阻尼力随速度及电流的变化规律, 在此基础上, 提出方便数值求解逆模型且能综合考虑电流和速度影响的三段线性变阻尼恢复力模型, 并对模型参数进行识别, 最后对比数值模拟和试验测量的阻尼力, 验证所提动态力学模型的有效性。

1 磁流变液阻尼器研发

磁流变液阻尼器的设计包括材料选用、几何尺寸确定及磁路设计。本文选用型号为 MRFD-J25T 的磁流变液自行设计制作了一个剪切阀式磁流变液阻尼器, 该磁流变液在磁感应强度为 0.5 T 时剪切屈服应力可达 50 kPa。选用具有较高强度和刚度的 45# 碳素钢作为缸筒材料, 具有较高磁导率和较低磁滞的 10# 钢作为活塞材料, 具有低磁导率的不锈钢(磁导率近似为 1)作为活塞杆的材料。所制作的磁流变液阻尼器关键尺寸见表 1。

表 1 MRD-20-1 型磁流变阻尼器的几何尺寸
Table1 Physical dimensions MRD-20-1

活塞杆直径 <i>d</i> /mm	活塞直径 <i>D</i> /mm	间隙 <i>h</i> /mm	活塞有效长度 <i>L</i> /mm
20	87	1	40

磁流变液阻尼器磁路设计的目的是要尽量保证间隙中的最大磁感应强度达到 0.5 T。阻尼器的磁路设计如图 1 所示, 缠线后的活塞和组装好的阻尼器见图 2。阻尼器的实际绕线圈数为 572 圈, 总电阻为 4.5 Ω, 总耗能小于 18 W。为了考察本文所设计和制作的阻尼器的剩磁和漏磁情况, 验证磁路设计的正确性, 对阻尼器在不同励磁电流下活塞间隙处的磁感应强度进行测量, 测量时将特斯拉计探头分别伸入 5 cm、10 cm、15 cm 和 20

cm 的活塞位置处, 不同位置处磁感应强度随电流的变化规律见图 3。当电流为 2 A 时, 磁感应强度

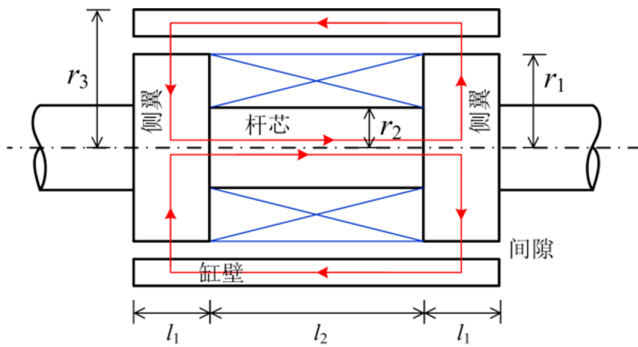


图 1 阻尼器磁路示意图

Fig.2 Schematic diagram of the damper magnetic circuit

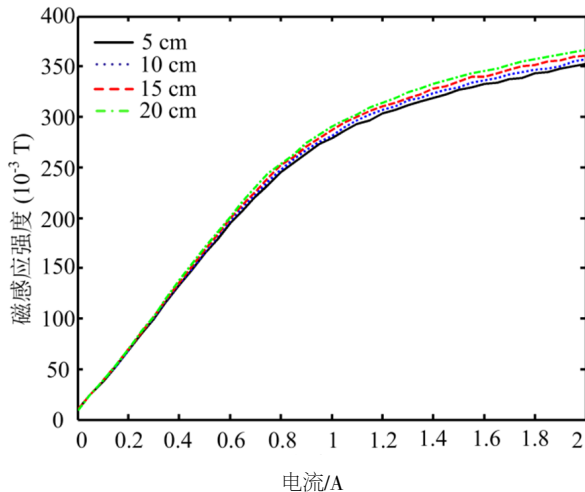


图 3 电流-磁感应强度关系曲线

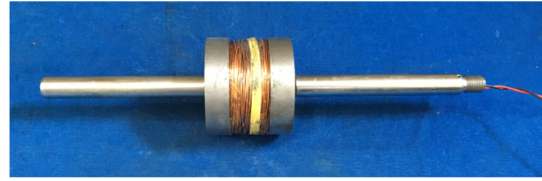
Fig.3 Relation curve of current - magnetic induction intensity

2 磁流变液阻尼器性能试验

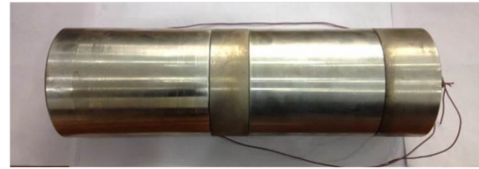
采用液压伺服加载系统对阻尼器进行水平加载。同步采集阻尼器的位移、力和线圈中的电流信号, 采样频率为 100 Hz, 速度响应通过位移的微分来获得。通过调节压控电流源的输入电压信号为阻尼器提供不同大小的恒定电流, 阻尼器的输入电流依次为 0 A、0.05 A、0.1 A、0.15 A、0.2 A、0.3 A、0.4 A、0.5 A、0.7 A、1 A、1.5 A 和 1.85 A。分别进行了三角波和正弦波下阻尼器的力学性能试验, 试验数据处理时均将实测阻尼力及实测位移进行了 Butterworth 滤波, 滤波截止频率为 5 Hz, 滤波阶数为 2。

图 4 和图 5 分别给出了不同频率和加载幅值

可达 0.35 T, 说明本文的磁路设计能够满足有效利用磁流变液剪切屈服强度的要求。



(a) 活塞



(b) 阻尼器

图 2 活塞及组装好的阻尼器

Fig.2 Piston and assembled damper

正弦波作用下的阻尼力-位移曲线和阻尼力-速度曲线。阻尼力-位移曲线左右两边不太对称, 这是由于灌入阻尼器的磁流变液中的气未排尽引起的。从阻尼力-速度曲线可以看出在输入电流为 0 A 时阻尼器表现出几乎纯粘滞的特性, 随着输入电流的增加, 阻尼器表现出较强的非线性。不同加载幅值和频率下, 电流最大和最小处所对应的最大阻尼力之比约为 7.9~11.6, 当加载幅值为 20 mm, 频率为 1 Hz 时, 最大阻尼力为 9.6 kN。

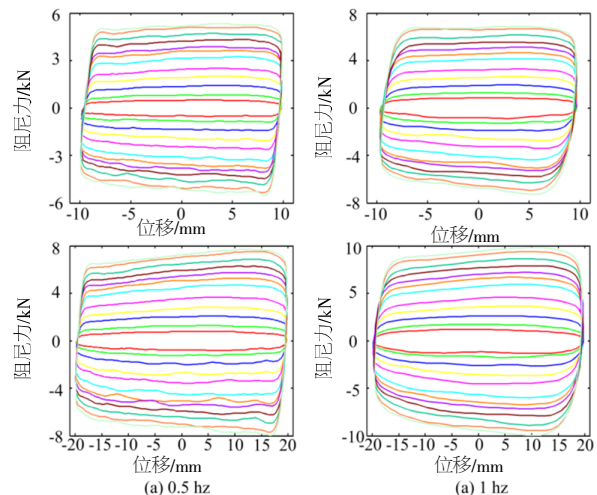


图 4 正弦波作用下阻尼力-位移曲线

Fig.4 Damping force - displacement curves under sinusoidal waves

图 6 给出了不同速度三角波作用下阻尼力-电流曲线, 曲线从下到上分别对应加载速度为 1 cm/s、2 cm/s、3 cm/s、4 cm/s、5 cm/s、6 cm/s、7 cm/s

s 和 8 cm/s。从图中可以看出,阻尼力随电流非线性变化。当电流小于 0.3 A 时,最大阻尼力随电流线性变化,当电流大于 0.3 A 时,随着电流的增加最大阻尼力的增速逐渐减缓,这是由间隙处的磁感应强度随电流的变化关系和磁流变液本构特性决定的,在电流接近 2 A 时,阻尼器接近磁饱和状态。此外,随着电流增加,阻尼力受速度的影响越来越大,这说明阻尼器恢复力的粘滞阻尼项应考虑电流的影响。

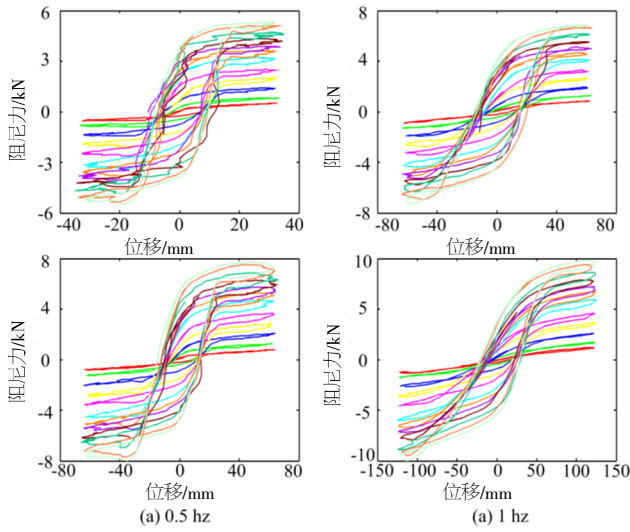


图5 正弦波作用下阻尼力-速度曲线

Fig.5 Damping force - velocity curve under sinusoidal waves

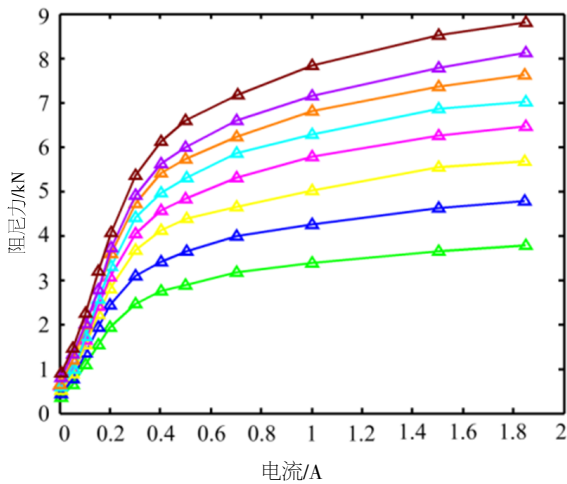


图6 三角波作用下最大阻尼力-电流关系曲线

Fig.6 Maximum damping force - current curves under triangular waves

3 力学模型及模型参数识别

磁流变液阻尼器的恢复力模型主要用于数值仿真时利用阻尼器的运动状态和输入电流信息计

算不同时刻的阻尼力,从而进一步计算结构的动力响应。其逆模型则主要用于结构控制时计算达到目标控制力所需输入的电流大小。由于最大阻尼力随电流非线性变化,考虑到方便阻尼器逆模型的数值求解,用分段线性函数表示阻尼力与电流的变化关系。参考图6中阻尼力与电流的变化曲线,综合考虑模拟精度和计算效率,将阻尼力-电流曲线分成三段来模拟。此外,粘滞阻尼力(与速度相关的阻尼力)相关项随着电流的增加而增大,可以假设粘滞阻尼系数与电流有关。据此,提出三段线性变阻尼恢复力模型:

$$F_{MR}(t) = [c_{1,n}i(t) + c_{2,n}] \& + [c_{3,n}i(t) + c_{4,n}] \text{sgn}(\&) \quad (1)$$

$$n=1, 2, 3$$

式中, $c_{1,n}$ 、 $c_{2,n}$ 、 $c_{3,n}$ 和 $c_{4,n}$ 为拟合常量。当 $i(t)$ 小于 0.3 A 时取 $n=1$, 当 $i(t)$ 大于 0.3 A 小于 0.5 A 时取 $n=2$, 当 $i(t)$ 大于 0.5 A 时取 $n=3$ 。

基于该三段线性恢复力模型,阻尼器的逆模型可表示为:

$$i(t) = [F_{MR}(t) - c_{2,n} \& - c_{4,n}] / (c_{1,n} \& + c_{3,n}) \quad (2)$$

$$n=1, 2, 3$$

编程时可先取 $n=1$ 计算 $i(t)$, 如果 $i(t) > 0.3$ A, 则取 $n=2$ 再次计算 $i(t)$, 如果 $i(t) > 0.5$ A, 则取 $n=3$ 再次计算 $i(t)$ 。该逆模型编程容易计算简单,能够完全满足结构实时控制的需求。

唯象模型需要根据试验数据对模型参数进行识别。根据三角波激励的试验结果(图6),利用最小二乘法拟合不同工况下的最大阻尼力和对应的电流和速度,得到 $c_{1,1}$ 、 $c_{2,1}$ 、 $c_{3,1}$ 和 $c_{4,1}$ 分别为 88.7、4.2、7 295.9 和 279.0, $c_{1,2}$ 、 $c_{2,2}$ 、 $c_{3,2}$ 和 $c_{4,2}$ 分别为 51.4、16.0、1 527.3 和 1 942.3, $c_{1,3}$ 、 $c_{2,3}$ 、 $c_{3,3}$ 和 $c_{4,3}$ 分别为 10.0、38.0、684.9 和 2 359.2。

4 模型验证

图7中的实线绘制了不同速度三角波作用下按式(1)计算的阻尼力随电流的变化关系,曲线从下到上分别对应加载速度 1 cm/s、2 cm/s、3 cm/s、4 cm/s、5 cm/s、6 cm/s、7 cm/s 和 8 cm/s。从图中可以看出,在绝大多数加载速度下,阻尼力最大值的拟合结果和试验结果吻合较好,说明本文提出的三段线性变阻尼恢复力模型能够较精确地模拟不同加载速度和输入电流下的阻尼器最大出力。

图8为不同速度三角波作用下阻尼力-位移曲线模拟结果和试验结果的对比图,图9为不同频率和加载幅值正弦波作用下阻尼力-位移曲线模拟

结果和试验结果的对比图。图 10 为三角波(速度为 4 cm/s)和正弦波作用下(0.5 Hz, 10 mm)阻尼力时程曲线模拟结果和试验结果对比图。

从图中可以看出,在零位移附近或在高速区时,阻尼力的拟合结果和试验结果吻合较好。这说明本文所提三段线性变阻尼恢复力模型能够较好的模拟不同工况下的阻尼力最大值,同时也说明本文使用的模型参数识别方法的有效性,利用三角波识别出的模型参数适用于正弦波的阻尼力仿真结果,利用阻尼力最大值识别出的模型参数适用于阻尼力的时程仿真结果。在阻尼器活塞运动方向改变或在低速区时,阻尼力的拟合结果和试验结果吻合效果不佳,图 7 中 1 cm/s 速度对应的阻尼力最大值拟合结果同样可以反应出这一问题。造成这一现象的原因有多种,其中包含低速区速度信息获取的准确度、阻尼器本身的不稳定性以及其它试验中的偶然误差。

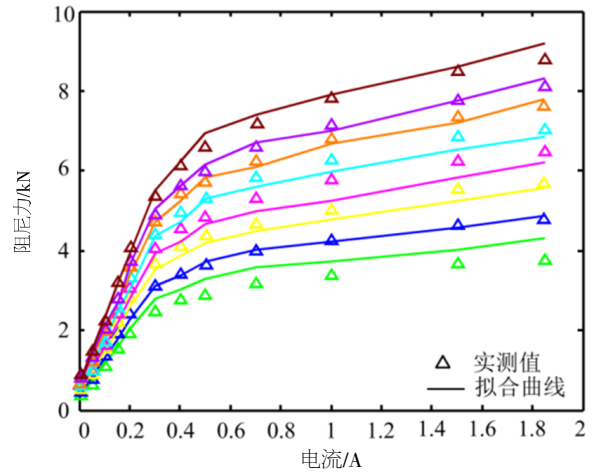


图 7 三角波作用下最大阻尼力模拟值与试验值对比

Fig.7 Comparison of maximum damping force between numerical results and experimental results under

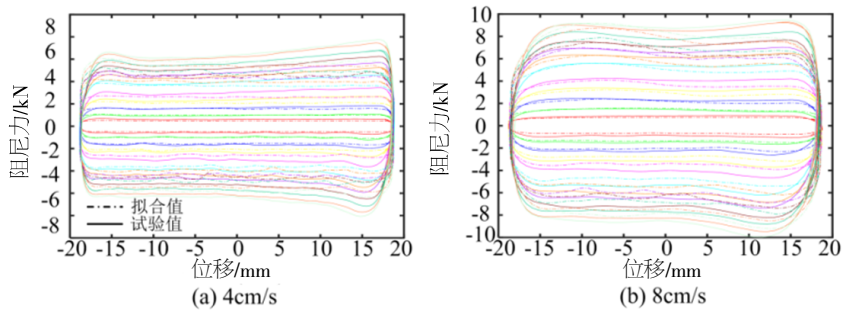


图 8 三角波作用下阻尼力-位移曲线模拟值与试验值对比

Fig.8 Comparison of damping force – displacement curves between numerical results and experimental results under triangular waves

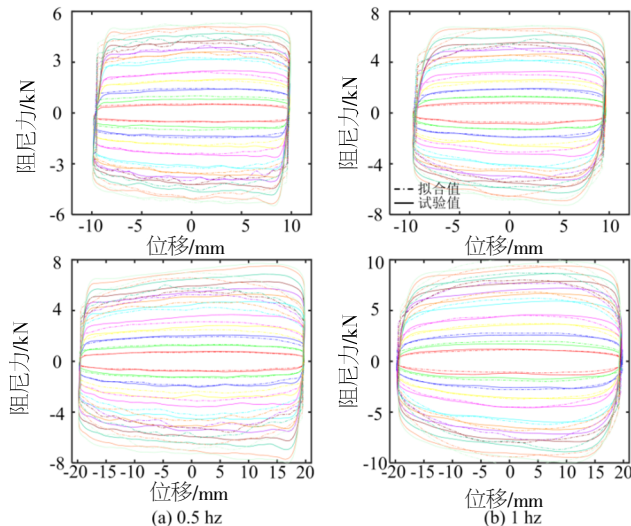


图 9 正弦波作用下阻尼力-位移曲线模拟值与试验值对比

Fig.9 Comparison of damping force – displacement curves between numerical results and experimental results under sinusoidal waves

图 11 为正弦波(0.5 Hz, 10 mm)作用下利用实测速度和公式(1)计算的阻尼力-速度曲线。从图可见三段线性变阻尼恢复力模型可模拟低速区阻

尼力-速度的滞回性能,较 Bingham 粘塑性模型或 Sigmoid 模型而言更符合阻尼器低速运动的力学特性。总体来看,三段线性变阻尼恢复力模型能够

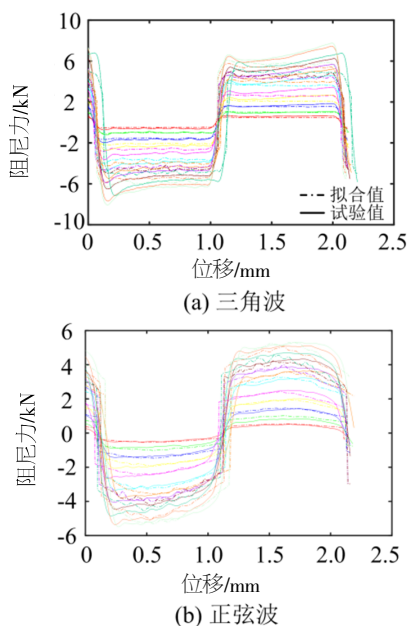


图10 阻尼力时程曲线模拟值与试验值对比

Fig.10 Comparison of damping force time-history curves between numerical results and experimental results under sinusoidal waves and triangular waves

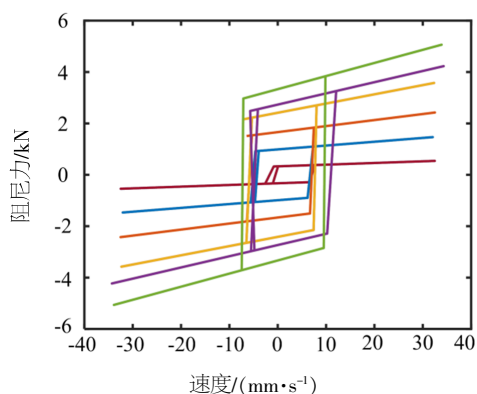


图11 正弦波下阻尼力-速度曲线数值模拟结果

Fig.11 Numerical simulation results of damping force-velocity curves under sinusoidal wave

较精确地模拟 MRFD 的动态力学性能, 且形式简单, 逆模型数值求解方便。

5 结语

本文对自行研发的一个最大出力约为 10 kN 的磁流变液阻尼器进行了三角波和正弦波作用下的力学性能测试, 通过分析最大阻尼力随电流和速度的变化规律, 提出了一种适用于控制器设计的简便高效 MRFD 唯象模型-三段线性变阻尼恢复力模型, 并对模型参数进行识别, 对比数值模拟和试验测量阻尼力的滞回和时程曲线以及不同工况下的最大阻尼力, 得出以下主要结论:

(1) 本文所设计磁流变液阻尼器的阻尼力随电流的增加非线性变化, 增速逐渐减缓; 与速度相关的粘滞阻尼力随电流的增加而增大。

(2) 三段线性变阻尼恢复力模型粘滞阻尼项系数随电流线性变化, 可控制阻尼项系数在不同电流区间取不同值。该模型能较好的模拟阻尼力的最大值, 虽然低速区拟合效果欠佳, 但仍具有一定精度, 且能模拟低速区阻尼力-速度的滞回性能。

(3) 利用不同工况下阻尼力最大值识别出的模型参数对阻尼力的时程仿真结果具有一定精度。

三段线性变阻尼恢复力模型可方便数值求解阻尼力逆模型, 便于控制器设计。本文对磁流变液阻尼器力学模型的研究思路可应用于其他具体研发的阻尼器中, 提出的三段线性变阻尼恢复力模型具有一定的通用性。

参考文献:

- [1] 周云, 谭平. 磁流变阻尼控制理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 李忠献, 徐龙河. 新型磁流变阻尼器及半主动控制设计理论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [3] 瞿伟廉, 刘嘉, 涂建维等. 500kN 足尺磁流变液阻尼器设计的关键技术[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(2): 124-130.
- [4] 汪志昊, 陈政清. 基于振动能量回收的自供电 MR 阻尼器集成与试验研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(12): 88-94.
- [5] 涂建维, 罗志机. 新型防泄漏磁流变阻尼器研发与力学模型[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(10): 87-92.
- [6] 关新春, 欧进萍. 磁流变耗能器的阻尼力模型及其参数确定[J]. 振动与冲击, 2001, 20(1): 5-8.
- [7] 张香成, 徐赵东, 王绍安, 等. 磁流变阻尼器的米氏模型及试验验证[J]. 工程力学, 2013, 30(3): 251-255.
- [8] Stanway R, Sproston J L, Stevens N G. Non-linear modeling of an electro-rheological vibration damper [J]. Journal of Electrostatics, 1987, 20(2): 167-184.
- [9] 李秀领, 李宏男. 磁流变阻尼器的双 sigmoid 模型及试验验证[J]. 振动工程学报, 2006, 19(2): 168-172.
- [10] Wen Y K. Method for random vibration of hysteretic systems [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1976, 102(2): 249-263.
- [11] Spencer B F, Dyke S J, Sain M K, et al. Phenomenological model for magnetorheological dampers [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(3): 230-238.
- [12] Rodríguez A, Pozo F, Bahar A, et al. Force-derivative feedback semi-active control of base-isolated buildings using large-scale MR fluid dampers[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2012, 19(1): 120-145.
- [13] Wu B, Shi P, Ou J. Seismic performance of structures incorporating magnetorheological dampers with pseudo-negative stiffness [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2013, 20(3): 405-421.