

文章编号: 1000-4750(2016)10-0123-06

铅-磁流变阻尼器的试验及计算模型

张香成¹, 何尚文¹, 李倩¹, 徐赵东²

(1. 郑州大学力学与工程科学学院, 河南, 郑州 450001; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏, 南京 210096)

摘要: 首先介绍了铅-磁流变阻尼器(LMRD)的构造与特点。然后根据 LMRD 试验测得的滞回曲线, 提出了该阻尼器的力学模型-Michaelis-Menten 模型, 并对模型参数进行了识别。最后通过将模拟结果与试验结果进行对比对模型进行了验证。结果表明: Michaelis-Menten 模型能描述电流、位移幅值和激励频率对 LMRD 力学性能和非线性滞回性能的影响。

关键词: 铅-磁流变阻尼器; 性能试验; Michaelis-Menten 模型; 非线性滞回特性; 参数识别

中图分类号: TU352 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.03.0219

TEST AND MATHEMATIC MODEL OF LEAD MAGNETORHEOLOGICAL DAMPER

ZHANG Xiang-cheng¹, HE Shang-wen¹, LI Qian¹, XU Zhao-dong²

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: The composition and characteristic of a Lead Magnetorheological Damper (LMRD) were introduced firstly. Then according to the hysteresis curves obtained from the test of LMRD, a Michaelis-Menten model of an LMRD was proposed, and the parameters in this model were then identified. Finally, the proposed model was verified by comparing the numerical results with the experimental results. The comparison results show that the Michaelis-Menten model can describe the effects of current, displacement amplitude and excitation frequency on mechanical property, and nonlinear hysteresis behavior of the LEMR damper.

Key words: lead magnetorheological damper; property test; Michaelis-Menten model; nonlinear hysteresis behavior; parameter identification

磁流变阻尼器具有响应速度快、所需能量小以及良好的温度稳定性, 并且磁流变阻尼器可根据结构在外部激励下的响应调整阻尼力的大小, 因而具有广阔的应用前景^[1-2]。

尽管国内已成功将磁流变阻尼器用于桥梁斜拉索的振动控制^[3-5], 但由于土木工程结构质量、体积庞大, 因而实际用于结构振动控制的大吨位磁流变阻尼器还很少。虽然已研制成功的磁流变阻尼器的最大阻尼力已经接近或超过 20 t^[6-10], 但其磁

路结构过于复杂, 线圈过多, 这无疑大大增加了电源的数量及电流控制系统的复杂性, 并且造价高昂。此外, 只有当结构的加速度或位移响应大于规范的限值或特定的要求时才需要进行控制, 而此时结构所需的外部阻尼力往往并不是很小, 因而对于工程结构而言, 磁流变阻尼器在小阻尼力范围内的连续可调意义并不是很大。此外, 磁流变阻尼器依靠电源和控制器来调节阻尼力的大小, 一旦电源或控制器失效, 磁流变阻尼器将完全失去耗能能力。

收稿日期: 2015-03-25; 修改日期: 2015-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408555); 中国博士后科学基金项目(2014M552014); 郑州大学青年教师专项基金项目(F0000270)

通讯作者: 张香成(1983-), 男, 河南郟城人, 讲师, 博士, 从事结构减震与控制研究(E-mail: xc Zhang@zhu.edu.cn).

作者简介: 何尚文(1983-), 男, 河南舞阳人, 讲师, 博士, 从事摩擦减振控制研究(E-mail: hsw2013@zhu.edu.cn);

李倩(1962-), 女, 广东化州人, 教授, 博士, 博导, 从事材料与结构力学研究(E-mail: qianli@zhu.edu.cn);

徐赵东(1975-), 男, 安徽潜山人, 教授, 博士, 博导, 从事土木结构防灾减灾研究(E-mail: xzsubmission@163.com).

这无疑限制了磁流变阻尼器在土木工程中的应用。为此,作者设计制作了铅-磁流变阻尼器(LMRD)(专利号: CN200620073602.0),有效地解决了磁流变阻尼器的上述缺点。

本文首先介绍了 LMRD 的构造与特点,并根据试验结果,提出了 LMRD 的 Michaelis-Menten 模型,并对模型参数进行了识别。与试验结果相比,Michaelis-Menten 模型的计算结果能很好的描述 LMRD 随电流、位移幅值、激励频率的变化特性。

1 LMRD 的构造与特点

LMRD 是由铅挤压阻尼器和磁流变阻尼器^[11]串联而成,其构造图如图 1 所示,详细尺寸见表 1。

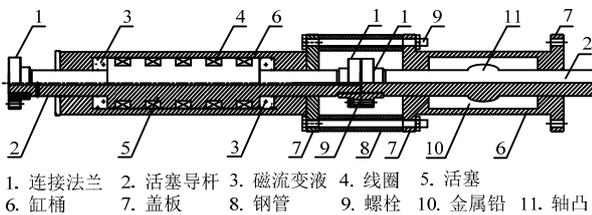


图 1 LMRD 的结构图

Fig.1 Structure diagram of LMRD

表 1 LMRD 的结构尺寸

Table 1 Structure size of LMRD

参数	尺寸	参数	尺寸
冲程/mm	±50	活塞直径/mm	156
缸桶外径/mm	194	间隙/mm	2
缸桶内径/mm	160	轴凸高度/mm	5
活塞杆直径/mm	80	轴凸长度/mm	70
电流范围/A	0~3	总长/mm	1800

LMRD 具有以下性能特点: 1) 理论上, LMRD 的阻尼力等于铅挤压阻尼器和磁流变阻尼器阻尼力之和, 因此 LMRD 具有更大的阻尼力和耗能能力; 2) 通过改变电流可以调整 LMRD 阻尼力的大小, 因而 LMRD 的阻尼力具有可调性; 3) 即使 LMRD 的外部电源或控制系统失效, 该阻尼器仍具有一定的阻尼力和耗能能力; 4) 所需电源较少, 控制系统相对简单, 造价较为低廉。由此可见, LMRD 适用于工程结构的振动控制。

2 LMRD 试验及结果分析

图 2 是 LMRD 现场试验照片。在对阻尼器进行试验时, 采用的外加电流为 0 A、0.6 A、1.2 A、1.8 A、2.1 A、2.4 A, 位移幅值为 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm, 激励频率为 0.1 Hz、0.2 Hz、0.5 Hz、1.0 Hz, 试验中作动器采用正弦位移函数控制:

$$u = A \sin(2\pi ft) \tag{1}$$

式中: A 为位移幅值; f 为激励频率; t 为时间。

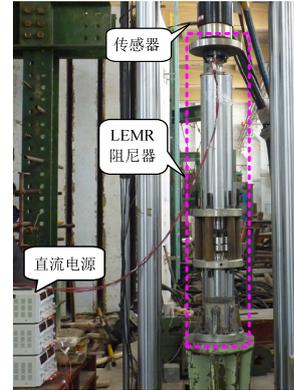
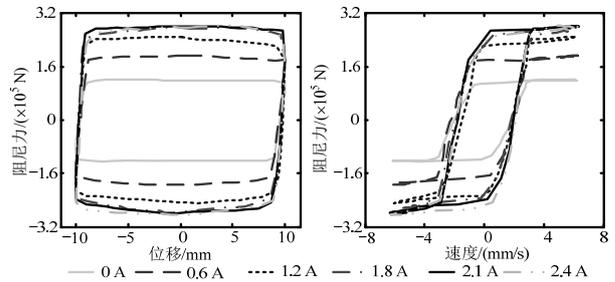


图 2 LMRD 的试验照片

Fig.2 Test photo of LMRD



(a) 阻尼力-位移曲线 (b) 阻尼力速度曲线

图 3 不同电流下 LMRD 的试验曲线(0.1 Hz, 10 mm)

Fig.3 Experimental curves of LMRD at different electricity (0.1 Hz, 10 mm)

图 3 为 LMRD 在不同电流下的试验曲线。可以得出: 1) 在电流分别为 0 A、0.6 A、1.2 A、1.8 A、2.1 A、2.4 A, 位移幅值为 10 mm 时, 测得的最大阻尼力分别为 124.22 kN、194.90 kN、249.38 kN、278.19 kN、281.35 kN、284.49 kN, 在电流较小时, 阻尼力随电流的增加显著增大, 当电流超过 1.8 A 时, 阻尼力增幅较小, 这是由于磁饱和原因造成的; 2) 阻尼器的可调系数为 1.29; 3) 阻尼力-速度 ($F-\dot{u}$) 曲线具有明显的非线性滞回特性; 4) $F-\dot{u}$ 曲线在低速时滞回区域的宽度与电流无关或关系极小, 在低速时曲线的斜率由于阻尼力的增加而不断增大。

图 4 为 LMRD 在不同位移幅值下的试验曲线。可以得出: 1) 在位移幅值为 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm, 电流为 1.2 A 时, 测得的最大阻尼力分别为 235.13 kN、249.38 kN、258.49 kN、266.95 kN, 说明最大阻尼力随位移幅值增加而小幅增大; 2) 随位移幅值或速度幅值的增大, $F-\dot{u}$ 曲线在低速时滞

回区域的宽度不断增加、斜率不断减小。

图 5 为 LMRD 在不同频率下的试验曲线。可以得出: 1) 在频率为 0.1 Hz、0.2 Hz、0.5 Hz、1.0 Hz, 电流为 1.2 A 时, 测得的最大阻尼力分别为 248.25 kN、261.99 kN、279.84 kN、296.51 kN, 说明阻尼力随频率增加而小幅增大; 2) 随频率或速度幅值的增大, $F-\dot{u}$ 曲线在低速时滞回区域的宽度不断增加、斜率不断减小。

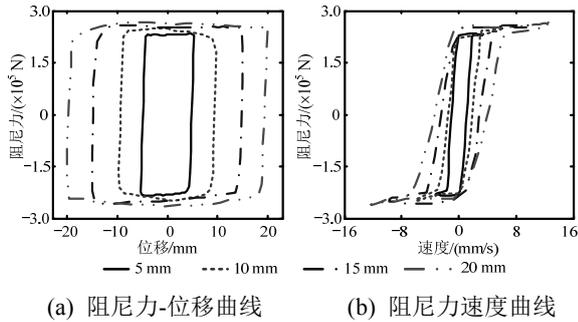


图 4 不同位移幅值下 LMRD 的试验曲线(0.1 Hz, 1.2 A)
Fig.4 Experimental curves of LMRD at different displacement (0.1 Hz, 1.2 A)

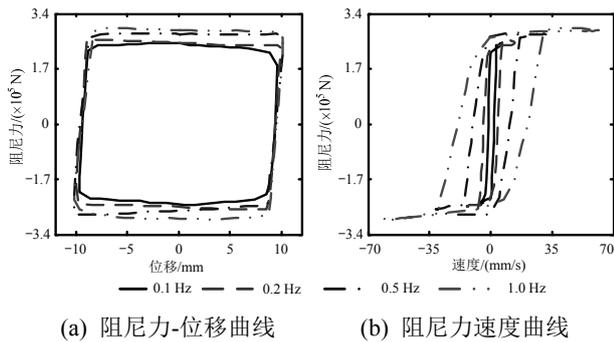


图 5 不同频率下 LMRD 的试验曲线(10 mm, 1.2 A)
Fig.5 Experimental curves of LMRD at different frequency (10 mm, 1.2 A)

应当指出, 在图 4、图 5 中位移幅值或频率增大的同时, 速度幅值也随之增大, 因此不能简单地认为位移幅值或频率是造成阻尼力和滞回曲线变化的原因。图 6 给出了不同速度幅值下试验曲线,

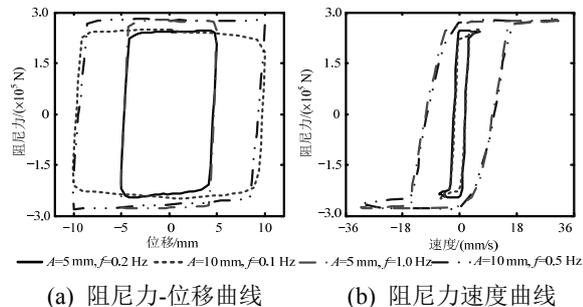


图 6 不同速度幅值下 LMRD 的试验曲线(1.2 A)
Fig.6 Experimental curves of LMRD at different velocity (1.2 A)

可以看出: 当速度幅值相同时, 即使位移幅值和频率都不同, 不同工况测得的最大阻尼力几乎相等, 且 $F-\dot{u}$ 曲线几乎重合, 说明速度幅值是导致阻尼力、 $F-\dot{u}$ 曲线滞回区域的宽度和斜率变化的原因。

3 计算模型及参数识别

3.1 计算模型

阻尼器的计算模型应能描述阻尼力的幅值特性和 $F-\dot{u}$ 曲线的非线性滞回特性。根据 LMRD 的构造与特点, 假定 LMRD 的阻尼力等于铅挤压阻尼器和磁流变阻尼器的阻尼力之和, 忽略阻尼器活塞杆、缸筒之间的摩擦力和活塞杆惯性力的影响, 则 LMRD 的阻尼力幅值可表示为:

$$F_{\max} = F_y + F_{\text{MRD}} = F_y + F_\tau + C_0 \dot{u}_{\max} \quad (2)$$

其中: F_y 和 F_{MRD} 分别为铅挤压阻尼器和磁流变阻尼器的最大阻尼力; F_τ 为磁流变阻尼器在不同电流下的屈服应力; C_0 为磁流变阻尼器粘滞阻尼系数; \dot{u}_{\max} 为每个试验工况对应的速度幅值。

为描述 $F-\dot{u}$ 曲线的非线性滞回特性, 首先基于 Michaelis-Menten 方程提出函数^[12]:

$$y = \frac{\dot{u}}{k + |\dot{u}|} \quad (3)$$

式(3)为一条单分支“S”形曲线函数, 且 $\lim_{\dot{u} \rightarrow -\infty} y(\dot{u}) = -1$, $\lim_{\dot{u} \rightarrow +\infty} y(\dot{u}) = 1$ 。然而, LMRD 的 $F-\dot{u}$ 曲线包含两条“S”形分支曲线, 并且滞回区域的宽度随位移幅值和激励频率的增大而增大, 因此引入能确定 $F-\dot{u}$ 曲线上、下分支并连续变化的滞后速度 $\sin(2\pi ft)$, 式(3)可表示为:

$$y = \frac{\dot{u} + \lambda \sin(2\pi ft)}{k + |\dot{u} + \lambda \sin(2\pi ft)|} \quad (4)$$

其中: k 为控制低速区域下 $F-\dot{u}$ 曲线斜率的系数; λ 为控制 $F-\dot{u}$ 曲线上、下分支曲线间宽度的系数。

合并式(2)和式(4), 即可得到 LMRD 在不同速度下的阻尼力表达式:

$$F = (F_y + F_\tau) \frac{\dot{u} + \lambda \sin(2\pi ft)}{k + |\dot{u} + \lambda \sin(2\pi ft)|} + C_0 \dot{u} \quad (5)$$

式(5)即为本文提出的 Michaelis-Menten 模型。

3.2 参数 F_y 、 F_τ 、 C_0 识别

由式(2), LMRD 的阻尼力幅值包括 F_y 、 F_τ 和 $C_0 \dot{u}_{\max}$, 因此可得:

$$F(i)_{\max} = F_y(i) + F_\tau + C_0 A(i) \omega(i) \quad (6)$$

式中: $A(i)$ 和 $\omega(i)$ ($\omega(i) = 2\pi f(i)$) 分别为同一电流下

的不同位移幅值和激励圆频率。 $F_y(i)$ 为同一电流、不同位移幅值和激励频率下铅阻尼器的最大阻尼力。

由式(2)可知, LMRD 的耗能通过粘滞阻尼力、铅阻尼器阻尼力和磁流变阻尼器屈服力实现。因采用正弦位移加载, 各部分耗能可表示为^[13]:

$$\begin{cases} W_c = \int_{u(t_1)}^{u(t_2)} C_0 \dot{u} du = C_0 A^2 \omega (\pi + 2) \\ W_F = 4AF_y \\ W_\tau = 4AF_\tau \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可得相同电流、不同位移幅值和激励频率下的耗能 $W(i)$ 可表示为:

$$W(i) = 4A(i)[F_y(i) + F_\tau] + A^2(i)\omega(i)(\pi + 2)C_0 \quad (8)$$

联立式(6)和式(8)可得:

$$\begin{cases} F(i)_{\max} = F_y(i) + F_\tau + C_0 A(i)\omega(i) \\ W(i) = 4A(i)[F_y(i) + F_\tau] + A^2(i)\omega(i)(\pi + 2)C_0 \end{cases} \quad (9)$$

由于 F_τ 是磁流变阻尼器在不同磁感应强度下的屈服应力, 且与位移幅值和激励频率无关, 因此假定当电流为0 A时, $F_\tau = 0$ 。将0 A电流、不同位移幅值和激励频率下的试验数据代入式(9), 可得铅阻尼器在不同速度幅值下产生的阻尼力 $F_y(i)$ 。由于 $F_y(i)$ 是铅阻尼器的最大阻尼力, 因此 $F_y(i)$ 不随电流改变。将任一电流下激励频率为0.1 Hz时不同位移幅值下的4组试验数据及 $F_y(i)$ 代入式(9), 即可得到各电流对应的 $F_\tau(i)$ 和 $C_0(i)$ 。图7、图8和图9分别为参数 F_y 、 F_τ 和 C_0 的识别结果, 可以看出 F_y 随速度幅值呈指数函数关系递增, F_τ 和 C_0 随电流增加呈指数函数关系递增, 最终趋向饱和, 为使模型在改变位移幅值、激励频率和电流时仍然有效, 将模型参数表示为:

$$\begin{cases} F_y = \alpha(V_{\max})^\beta = \alpha(2\pi Af)^\beta \\ F_\tau = F_{\tau 0} - F_{\tau d} e^{-aI} \\ C_0 = C_{c0} - C_{cd} e^{-bI} \end{cases} \quad (10)$$

根据式(10)对 F_y 、 F_τ 和 C_0 进行非线性拟合, 可得式(10)中各参数的值分别为 $\alpha = 8.830 \times 10^4$ N、 $\beta = 0.166$ 、 $F_{\tau 0} = 17.96 \times 10^4$ N、 $F_{\tau d} = 17.96 \times 10^4$ N、 $C_{c0} = 478.6$ N·s/mm、 $C_{cd} = 422.3$ N·s/mm、 $a = 0.831$ A⁻¹、 $b = 0.45$ A⁻¹。

图7、图8和图9分别为参数 F_y 、 F_τ 和 C_0 的试验值与拟合值之间的对比。以图8为例, 在电流

分别为0 A、0.6 A、1.2 A、1.8 A、2.1 A和2.4 A时, 试验测得的磁流变阻尼器的屈服应力 F_τ 分别为0 kN、68.74 kN、118.14 kN、141.14 kN、147.99 kN和151.50 kN, 相应电流下的拟合值分别为0、70.50、113.31 kN、139.23 kN、148.20 kN和155.11 kN, 试验值和拟合值非常接近。

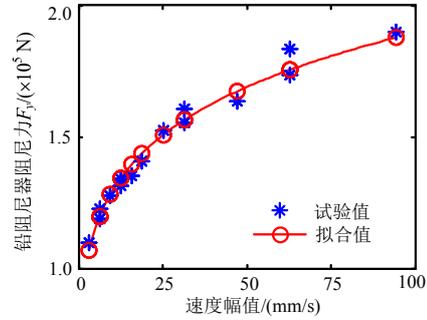


图7 F_y 试验值及拟合曲线

Fig.7 Experimental value and matched curve of F_y

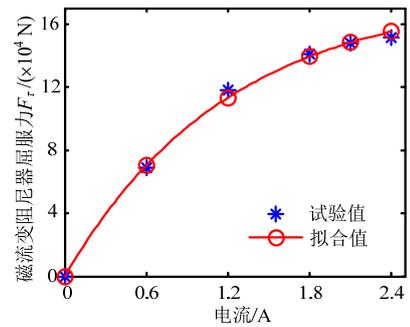


图8 F_τ 试验值及拟合曲线

Fig.8 Experimental value and matched curve of F_τ

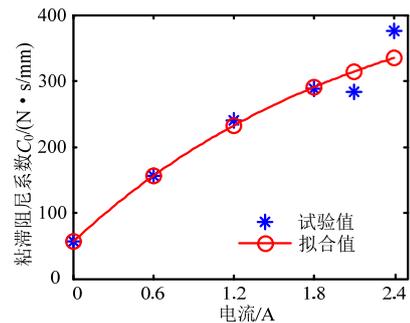


图9 C_0 试验值及拟合曲线

Fig.9 Experimental value and matched curve of C_0

3.3 参数 λ 、 k 识别

为消除阻尼力幅值对低速区域 $F - \dot{u}$ 曲线斜率的影响, 先将 $F - \dot{u}$ 曲线进行归一化, 此时阻尼力为0时对应的速度值近似等于 λ ; 然后任取 $F - \dot{u}$ 曲线低速区域内两组以上试验数据, 代入式(4)可确定参数 k 。图10为参数 k 、 λ 随速度幅值的变化关系。可以看出 k 、 λ 与速度幅值为线性关系^[14]:

$$\begin{cases} k = k_1 + k_2 V_{\max} = k_1 + k_2 (2\pi f A) \\ \lambda = \lambda_1 + \lambda_2 V_{\max} = \lambda_1 + \lambda_2 (2\pi f A) \end{cases} \quad (11)$$

根据式(11)对不同位移幅值和激励频率下的 k 、 λ 进行拟合, 可得 $k_1 = -0.074$ 、 $k_2 = 0.069$ 、 $\lambda_1 = 0.169$ 、 $\lambda_2 = 0.309$, 结果如图 10 所示。

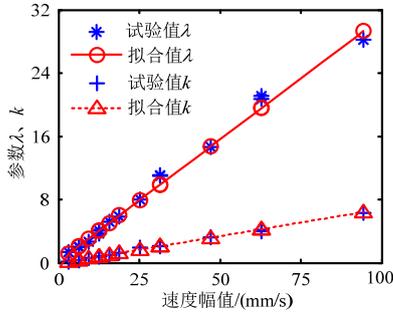


图 10 k 、 λ 试验值及拟合曲线

Fig.10 Experimental value and matched curve of k , λ

4 试验验证

为验证模型的有效性, 将未用于参数识别的试验数据与模型计算结果进行对比, 如图 11~图 13 所示。

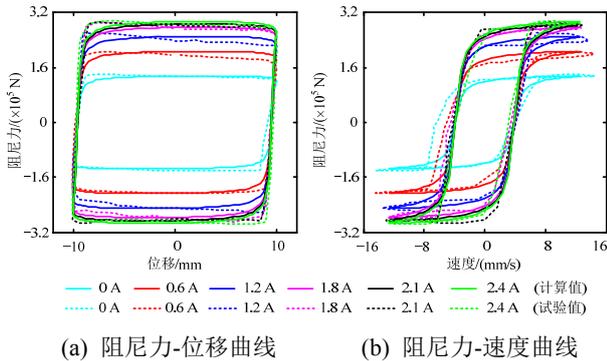


图 11 不同电流下模拟曲线与试验曲线对比 (10 mm, 0.2 Hz)

Fig.11 Comparison of experimental curves and simulate curves at different electricity (10mm, 0.2Hz)

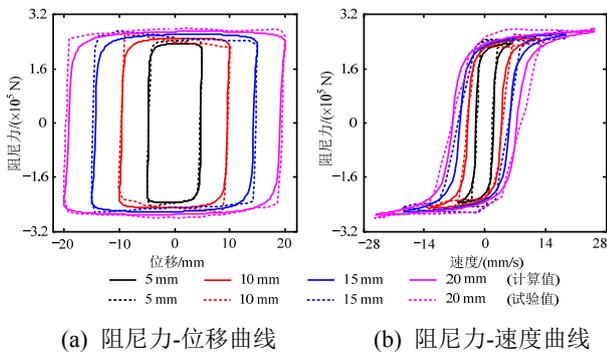


图 12 不同位移下模拟曲线与试验曲线对比(0.2 Hz, 1.2 A)

Fig.12 Comparison of experimental curves and simulate curves at different displacement (0.2Hz, 1.2A)

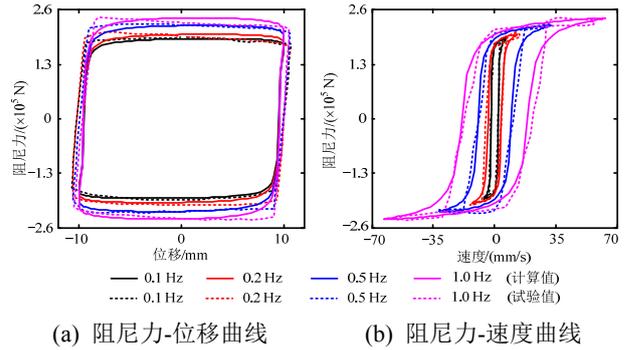


图 13 不同频率下模拟曲线与试验曲线对比(10 mm, 0.6 A)
Fig.13 Comparison of experimental curves and simulate curves at different frequency (10 mm, 0.6 A)

从图中可以看出, 所提模型不仅能模拟阻尼力随电流、位移幅值和激励频率增加而增大的特性, 同时还能模拟 $F - \dot{u}$ 曲线的非线性滞回特征。此外, 所提模型能较好的模拟低速时 $F - \dot{u}$ 曲线斜率和非线性滞回区域宽度随位移幅值和激励频率变化的特性。因此, Michaelis-Menten 模型能很好的描述 LMRD 随电流、位移幅值和激励频率的变化特性, 并可用于 LMRD 的振动控制分析。

5 结论

根据 LMRD 性能试验结果, 建立了该阻尼器的非线性力学模型, 并对模型进行了验证, 得出以下结论:

- (1) LMRD 的阻尼力在较大的阻尼力范围内具有连续可调性, 并随电流、位移幅值、激励频率和速度幅值的增大而增大;
- (2) $F - \dot{u}$ 曲线具有明显的非线性滞回特性, 并且 $F - \dot{u}$ 曲线低速区域的宽度随位移幅值、激励频率的增大而增大。
- (3) 即使电源或控制器失效, LMRD 仍具有很大的阻尼力和耗能能力。
- (4) Michaelis-Menten 模型能很好的描述 LMRD 随电流, 位移幅值和激励频率的变化特性, 且模型中各参数物理意义明确, 易于识别, 可用于 LMRD 的振动控制分析。

参考文献:

[1] 关新春, 黄永虎, 李惠, 等. 自适应磁流变控制系统仿真计算研究[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 103—111.
Guan Xinchun, Huang Yonghu, Li Hui, et al. Simulation of adaptive damper based control system [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 103—111. (in Chinese)

[2] 吕杨, 徐龙河, 李忠献, 等. 磁流变阻尼器优化设计及

- 结构地震损伤控制[J]. 工程力学, 2012, 29(8): 94—100.
- Lü Yang, Xu Longhe, Li Zhongxian, et al. Optimal design of MR dampers and seismic damage control of structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(8): 94—100. (in Chinese)
- [3] 欧进萍. 结构振动控制—主动、半主动和智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 347—360.
- Ou Jinping. *Structural vibration control—active, semi-active and intelligent control* [M]. Beijing: Science Press, 2003: 347—360. (in Chinese)
- [4] 禹见达, 陈政清, 曹宏, 等. 永磁调节式 MR 阻尼器试验研究及工程应用[J]. 振动工程学报, 2006, 19(4): 532—536.
- Yu Jianda, Chen Zhengqing, Cao Hong, et al. Experimental study and implementation of the adjustable permanent magnet MR damper [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2006, 19(4): 532—536. (in Chinese)
- [5] 彭剑, 赵珧冰, 孙测世, 等. 磁流变阻尼器-斜拉索控制系统中的时滞效应[J]. 工程力学, 2014, 31(4): 155—159.
- Peng Jian, Zhao Yaobing, Sun Ceshi, et al. Time delay effects in MR dampers-stay cable control systems [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(4): 155—159. (in Chinese)
- [6] Carlson J D and Spencer B F. Magneto-rheological fluid dampers for semi-active seismic control [C]// Chiba, Proceedings of the Third International Conference on Motion and Vibration Control, 1996: 35—40.
- [7] 关新春, 李金海, 欧进萍. 足尺磁流变液耗能器的性能与试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 207—211.
- Guan Xinchun, Li Jinhai, Ou Jinping. Experimental study of full-scale magnetorheological fluid damper performance [J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(6): 207—211. (in Chinese)
- [8] Fujitani H, Sodeyama H, Tomura T, Hiwatashi T, Shiozaki Y, Hata K, Sunakoda K, Morishita S, Soda S. Development of 400 kN magnetorheological damper for a real base-isolated building [C]// San Diego, Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2003, 5052: 265—276.
- [9] 瞿伟廉, 秦顺全, 涂建维, 等. 武汉天兴洲公铁两用斜拉桥主梁和桥塔纵向列车制动响应智能控制的理论与关键技术[J]. 土木工程学报, 2010, 43(8): 63—72.
- Qu Weilian, Qin Shunquan, Tu Jianwei, et al. Theory and crucial technologies of intelligent control for responses in deck and towers of Wuhan Tianxingzhou cable-stayed bridge subjected to train braking [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(8): 63—72. (in Chinese)
- [10] 邹明松, 侯保林. 两种大吨位磁流变阻尼器的功耗比较与参数优化[J]. 南京理工大学学报, 2008, 32(6): 719—723.
- Zou Mingsong, Hou Baolin. Power consumption comparison and parameter optimization of two large tonnage MR dampers [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2008, 32(6): 719—723. (in Chinese)
- [11] Xu Z D, Jia D H, Zhang X C. Performance tests and mathematical model considering magnetic saturation for magnetorheological damper [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2012, 23(12): 1331—1349.
- [12] 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.
- Zhang Xiangcheng, Xu Zhaodong, Wang Shaoan, et al. Michaelis-Menten model of magnetorheological damper and test verification [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(3): 251—255. (in Chinese)
- [13] 施亮, 何琳. 磁流变阻尼器参数辨识方法研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(1): 131—133.
- Shi Liang, He Lin. Study on parameter identification for magnetorheological dampers [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(1): 131—133. (in Chinese)
- [14] Zhang X C, Xu Z D. Testing and modeling of a CLEMED damper and its application in structural vibration reduction [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2012, 70(2): 1575—1588.