浙江科技学院学报，第 30 卷第 3 期，2018 年 6 月
Journal of Zhejiang University of Science and Technology
Vol. 30 No. 3, Jun. 2018

doi：10.3969/j.issn.1671-8798.2018.03.013

基于 MATLAB 的磁流变减振器模型参数辨识及验证

周安江，杨礼康，叶万权，杜嘉鑫
（浙江科技学院 机械与能源工程学院，杭州 310023）

摘　要：为探讨简单实用的磁流变减振器动力学性能模型，根据磁流变减振器的动力学性能试验结果，基于 MATLAB 分别针对修正后 Bingham 模型的系数和修正后 Dahl 模型的系数进行参数辨识，并用另一组试验数据对辨识结果进行了验证及对比。结果表明，此方法简化了磁流变减振器模型参数辨识，而且还可用于其他非线性动力学模型的参数辨识。

关键词：磁流变减振器；修正的 Bingham 模型；修正的 Dahl 模型；参数辨识
中图分类号：U463.335.1　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1671-8798(2018)03-0251-07

Parameter identification and verification of magnetorheological damper model based on MATLAB

ZHOU Anjiang, YANG Likang, YE Wanquan, DU Jiaxin
(School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: In order to explore the simple and practical dynamic performance model of the magnetorheological damper, parameters of the modified Bingham model and the modified Dahl model were identified by employing MATLAB, according to the experimental results of its dynamic performance, and the identification results were verified and compared with another set of experimental data. The results show that the proposed method has simplified the parameter identification process of magnetorheological damper model, which can also be used for parameter identification of other nonlinear dynamic models.

Keywords: magnetorheological damper; modified Bingham model; modified Dahl model; parameter identification

---

收稿日期：2017-09-11
基金项目：国家自然科学基金项目(51175474)；浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)(2016R415004)
通信作者：杨礼康(1971—　)，男，山西省闻喜人，教授，博士，主要从事磁流变减振器研究。E-mail：104019@zust.edu.cn。

车辆悬架系统的主要阻尼元件是减振器，其性能对车辆行驶平顺性和操纵稳定性的影响非常直接。在当前汽车市场的车辆悬架系统中，半主动悬架系统以其减震效果较好、生产成本较低的优点，在现代汽车悬架的应用方面有着广阔的发展前景，其中磁流变减振器作为典型的半主动减振器，虽具有广阔的应用前景，但急需研究其实用的动力学模型。而在实际的磁流变阻尼减振器模型研究中，针对模型的参数辨识通常要通过试验数据进行大量的运算，比较繁琐。

目前，国内外对磁流变阻尼器参数化模型的研究主要有修正的 Bingham 模型和修正的 Dahl 模型[1]，以及修正的 Bouc-Wen 模型[2]等。其中，Stanway 等提出的 Bingham 模型[3]能够较好地模拟阻尼力-位移响应，但是不能很好地拟合力-速度的非线性响应，尤其是在速度很小并且位移和速度同向的情况下[4]。周强等提出的修正的 Bingham 模型[1]考虑了滞后特性，却没考虑由于阻尼器的前屈服特征[5]，而修正的 Dahl 模型采用 Dahl 模型来模拟库伦摩擦力，可以克服 Bouc-Wen 模型需要确定的参数过多的缺点[6]和 Bingham 模型的不足。施亮等提出用能量积分的方法对磁流变阻尼器修正的 Dahl 模型进行参数辨识，取得了不错的效果，但是计算有些繁琐[7]。张莉洁等提出通过最小二乘法对试验数据进行拟合并用双曲正切函数进行参数辨识的方法[8]。刘永强等提出用遗传算法来对磁流变阻尼器的模型参数进行辨识，并用曲线拟合参数值和电流之间的特征曲线来提高辨识的精度[9]。这些方法对辨识结果的可靠性带来了一定的帮助，但对过程要求很高，且也存在过程繁琐的问题。因此有必要对简化参数辨识过程进行研究。

1 基于 MATLAB 的模型参数辨识

1.1 修正的 Bingham 模型参数辨识

修正的 Bingham 模型由 Bingham 单元和弹簧单元串联起来组成。

$$F(t)=C_{\mathrm{d}}\dot{e}+F_{\mathrm{d}}(E)\mathrm{sgn}(\dot{e})-f_0。\tag{1}$$

式(1)中：C_{d} 为模型的黏滞阻尼系数；$F_{\mathrm{d}}(E)$为可控库仑阻尼力，大小与电流强度相关；e 为 Bingham 单元位移；f_0 为阻尼器的输出力偏差[1]2。

$$C_{\mathrm{d}}=C_{\mathrm{ds}}+C_{\mathrm{dd}}u,\tag{2}$$

$$F_{\mathrm{d}}=F_{\mathrm{ds}}+F_{\mathrm{dd}}u。\tag{3}$$

式(2)～(3)中：C_{ds}和 F_{ds}分别为无电场强度下的黏滞阻尼系数和库仑阻尼力[1]2；u 为内变量，在常电流情况下通常取电流值[7]。

根据试验分别得到 0、0.5、0.6、0.8、1.0 A 5 种输入电流情况下的力、位移、速度的值。

输入电流为 0 A 时的力-速度关系如图 1 所示。

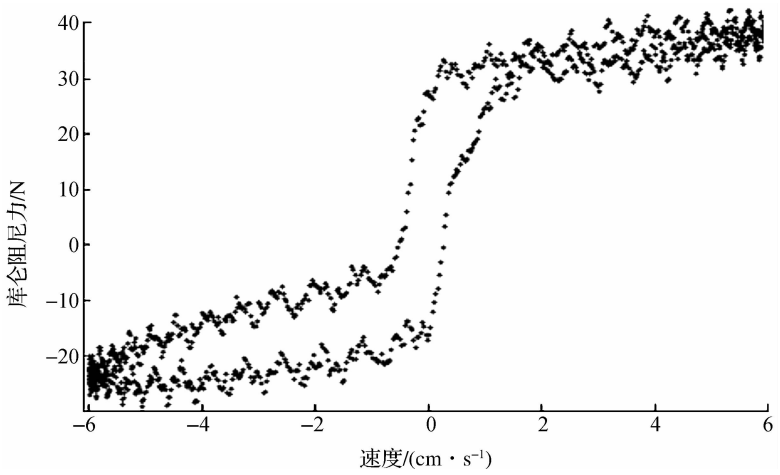

图 1 输入电流 0 A 时的力-速度关系

Fig. 1 Relation of force-velocity with input current 0 A

运用式(1)拟合 C_d、F_d 的过程如图 2 所示，其中 a 为 C_d，b 为 f_d，c 为 f_0，得到 $C_d=2.654$，$F_d=16.11$ N，$f_0=-7.733$ N，拟合效果如图 3 所示。

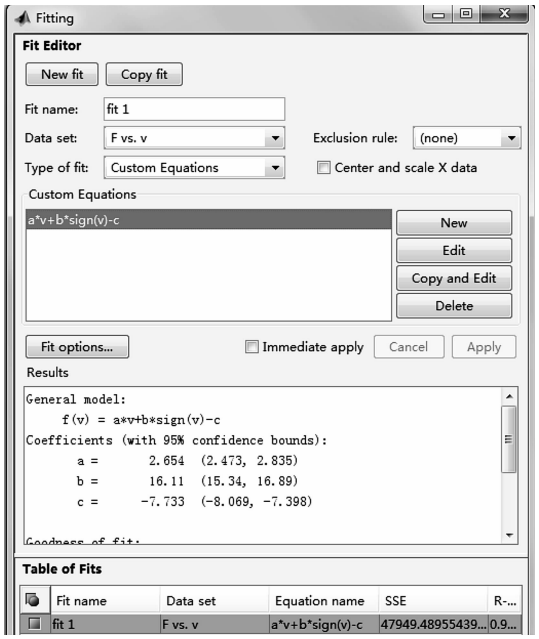

图 2　C_d、F_d 拟合过程

Fig. 2　The fitting process of C_d and F_d

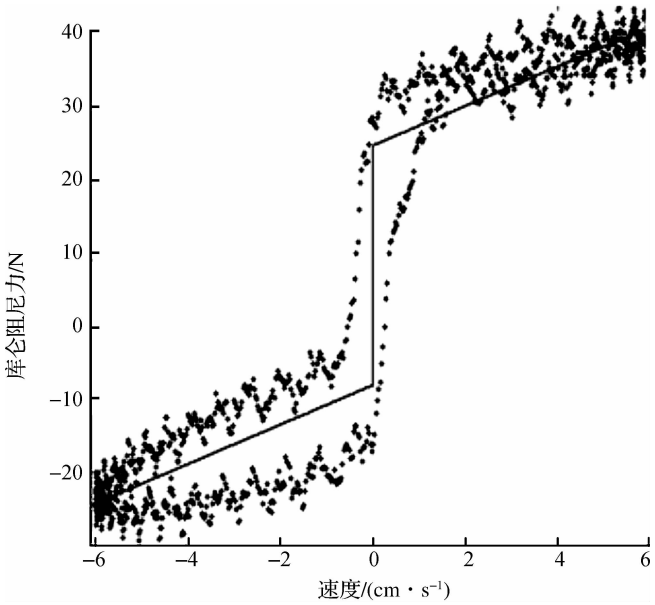

图 3　C_d、F_d 拟合效果

Fig. 3　The fitting effect of C_d and F_d

用同样的方法得到以下 4 组拟合数据：输入电流为 0.5 A 时，$C_d=28.71$，$F_d=107.8$ N；输入电流为 0.6 A时，$C_d=34.81$，$F_d=120.2$ N；输入电流为 0.8 A 时，$C_d=42.79$，$F_d=140.6$ N；输入电流为 1.0 A 时，$C_d=48.97$，$F_d=146.8$ N。

将式(2)和式(3)相结合，得到 0、0.5、0.6、0.8、1.0 A 5 种输入电流情况下，C_d 分别为 2.654、28.710、34.810、42.790 和 48.970，F_d 分别为 16.11、107.8、120.2、140.6、146.8 N，u 分别为 0、0.5、0.6、0.8 和 1.0。

在 MATLAB 中运用 cftool 对 C_{ds}、C_{dd} 的拟合过程及效果如图 4、图 5 所示，拟合结果为：$C_{ds}=4.178$，$C_{dd}=47.26$；由图 5 可以看出，拟合线与实际散点之间的误差较小，表明所得结果比较可靠。

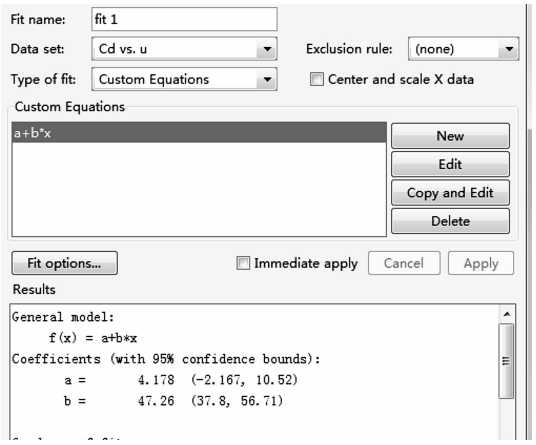

图 4　C_{ds}、C_{dd} 拟合过程

Fig. 4　The fitting process of C_{ds} and C_{dd}

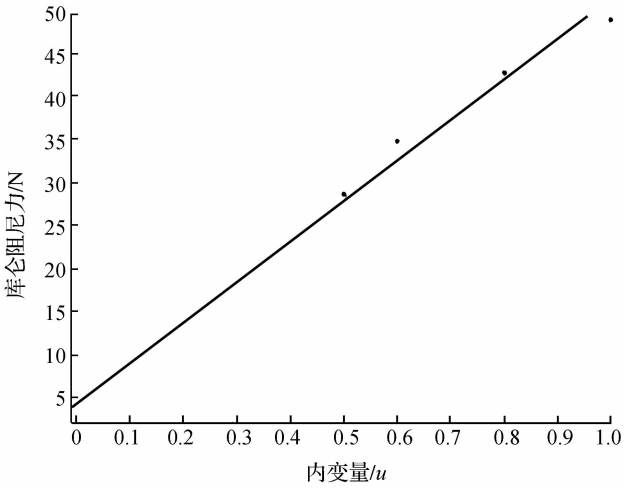

图 5　C_{ds}、C_{dd} 拟合效果

Fig. 5　The fitting effect of C_{ds} and C_{dd}

图 6 为 F_{ds}、F_{dd}的拟合过程，拟合的结果为 $F_{ds}=27.65$ N，$F_{dd}=135.6$ N，图 7 为 F_{ds}、F_{dd}的拟合效果。

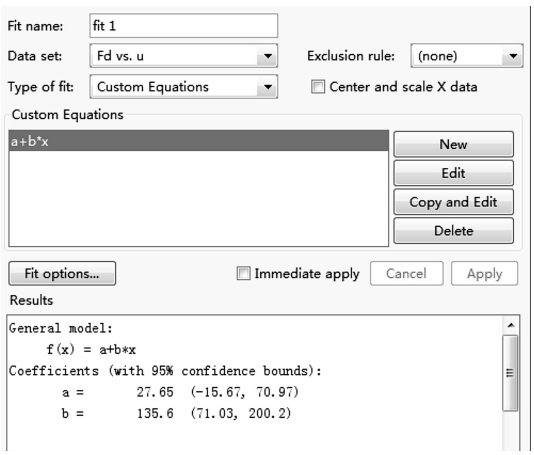

图 6 F_{ds}、F_{dd}拟合过程

Fig. 6 The fitting process of F_{ds} and F_{dd}

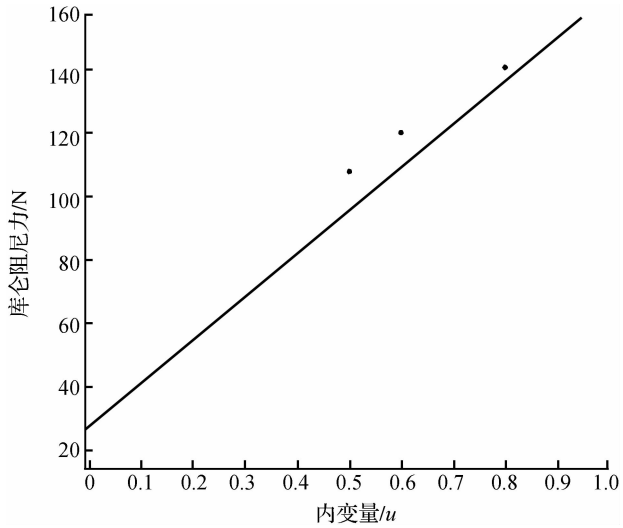

图 7 F_{ds}、F_{dd}拟合效果

Fig. 7 The fitting effect of F_{ds} and F_{dd}

Bingham 模型拟合结果为 $f_0=-7.733$ N，$C_{ds}=4.178$，$C_{dd}=47.26$，$F_{ds}=27.65$ N，$F_{dd}=135.6$ N。

1.2 修正的 Dahl 模型参数辨识

当活塞运动速度相对较小时，磁流变阻尼器的力与速度关系是一个滞回环[10]，周强等提出的修正的 Dahl 模型，库仑摩擦力是利用 Dahl 模型来模拟实现的，其阻尼器输出的力表示为：

$$F=K_0x+C_0\dot{x}+F_dZ-f_0。\tag{4}$$

式(4)中：K_0为刚度系数；C_0为黏滞阻尼系数；F_d为可调库仑摩擦力，大小依电流而变化；x为阻尼器位移；f_0为初始力；Z为无量纲滞回量[1]4。

$$\dot{Z}=\sigma\dot{x}[1-Z\mathrm{sgn}(\dot{x})]。\tag{5}$$

式(5)中：σ参数用来表示控制滞回曲线的形状[1]4。

$$C_0=C_{0s}+C_{0d}u,\tag{6}$$

$$F_d=F_{ds}+F_{dd}u。\tag{7}$$

式(6)～(7)中：C_{0s}、F_{ds}分别为无电场强度下的黏滞阻尼系数和库仑阻尼力；在常电流的情况下通常取电流值。

用输入电流 0 A 时的数据结合式(5)进行拟合，在不加电情况下不考虑可控库仑摩擦力。此时将式(5)变形成：

$$1=\frac{\dot{z}}{\sigma\dot{x}}+Z\mathrm{sgn}(\dot{x})。\tag{8}$$

拟合得到参数 $\dot{Z}=0.020\ 62$，$\sigma=21.24$，$Z=-0.008\ 727$。

利用式(5)将式(4)变形成：

$$F=K_0x+C_0\dot{x}+F_d\left[\frac{1-\frac{Z}{\sigma\dot{x}}}{\mathrm{sgn}(\dot{x})}\right]-f_0。\tag{9}$$

将输入电流为 0.5 A 时的数据代入 sftool 中进行拟合，得到的结果为 $K_0=4.798$，$C_0=28.93$，$F_d=106.8$ N，$f_0=-22.4$ N，图 8 是从侧面力-位移的角度来观察拟合效果，图中将拟合所得的试验面简化为一条线，同时也能看出，拟合结果能够对试验的曲线变化规律进行较好的模拟。图 9 将拟合效果展示为力-位移-速度的拟合结果面，其中 x 轴坐标表示位移，单位是 mm，y 轴坐标表示速度，单位是 cm/s，z 轴坐标表示阻尼力，单位为 N。

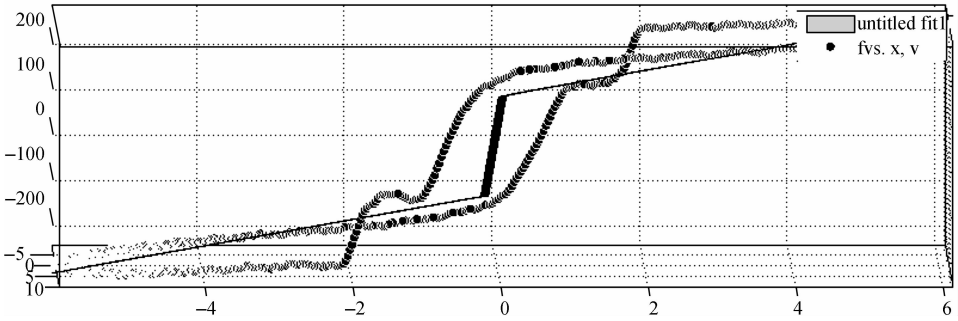

图 8　K_0、C_0 拟合效果图

Fig. 8　The fitting effect of K_0 and C_0

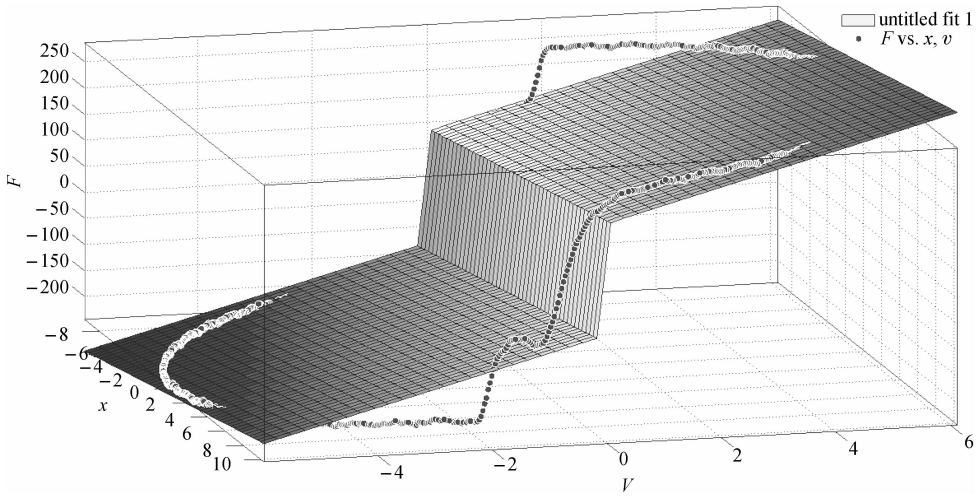

图 9　K_0、C_0 拟合效果立体图

Fig. 9　The fitting effect stereogram of K_0 and C_0

用同样的方法拟合输入电流为 0.6、0.8、1.0 A 时的情况，得到数据如下：输入电流为 0.6 A 时，$K_0=5.841$，$C_0=35.15$，$F_d=119.1$ N，$f_0=-20.24$ N。输入电流为 0.8 A 时，$K_0=7.28$，$C_0=43.15$，$F_d=139$ N，$f_0=-62.23$ N。输入电流为 1.0 A 时，$K_0=8.054$，$C_0=49.57$，$F_d=144$ N，$f_0=-35.08$ N。得到的 5 组数据，结合式(6)、式(7)，可以拟合出 C_{0s}，C_{0d}，F_{ds}、F_{dd}，其中：C_0 分别为 2.651、28.93、35.13、43.15、49.57，u 分别为 0、0.5、0.6、0.8、1.0。通过拟合所得结果为 $C_{0s}=4.149$，$C_{0d}=47.82$，图 10 为拟合效果。F_{ds}、F_{dd}结合 cftool 的拟合得到的结果为 $F_{ds}=15.09$ N，$F_{dd}=149.5$ N，图 11 为拟合效果。

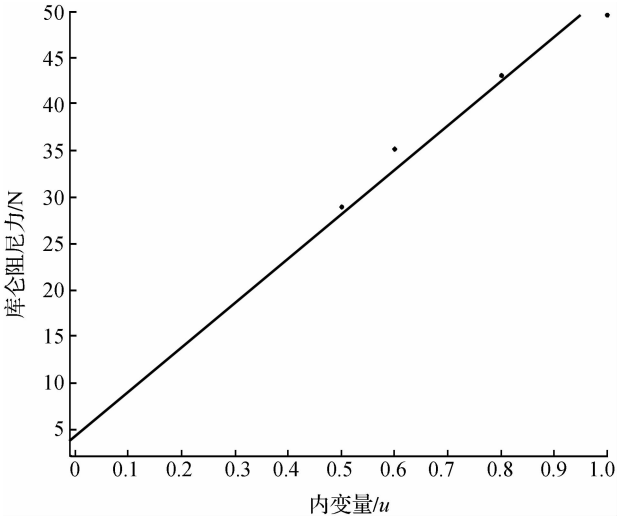

图 10　C_{0s}、C_{0d}拟合效果

Fig. 10　The fitting effect of C_{0s} and C_{0d}

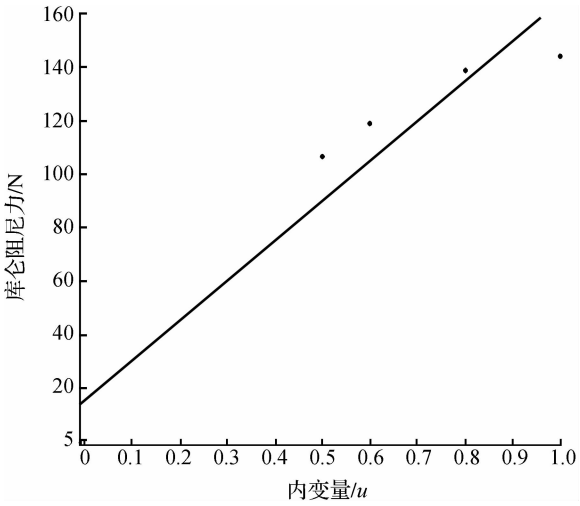

图 11　F_{ds}、F_{dd}拟合效果

Fig. 11　The fitting effect of F_{ds} and F_{dd}

Dahl 模型拟合结果展示为：$f_0=-22.4$ N，$C_{0s}=4.149$，$C_{0d}=47.82$，$F_{ds}=15.09$ N，$F_{dd}=149.5$ N。

2 试验验证及对比

为了对拟合结果进行有效的检验，针对 RD-8041-1 磁流变阻尼器又进行了多组与拟合阶段不同的频率、振幅及电流的分组试验，试验设备包括数据采集及处理软件、恒流源、激励装置、磁流变减振器及减振器试验台。

以 Lord 公司研制的 RD-8041-1 磁流变阻尼器为对象，根据式(1)～(3)及 Bingham 模型拟合出的结果参数，整理得到 Bingham 模型的参数模型式(10)，同理得到 Dahl 模型的参数模型式(11)。

$$F=(4.178+47.26\,u)\times\dot{x}+(27.65+135.6\,u)\times\mathrm{sgn}(\dot{x})+7.733, \tag{10}$$

$$F=K_0x+(4.149+47.82\,u)\times\dot{x}+(15.09+149.5\,u)\times(-0.008727)+22.4。 \tag{11}$$

式(10)～(11)中：u 在常电流情况下一般取电流值；x 为位移；K_0 为刚度系数，结合不同情况给出相应的数值。

利用式(10)、式(11)分别对处在不同频率、振幅和电流下的磁流变阻尼器进行参数验证，如图 12、图 13 分别给出了输入电流为 0.5 A、振幅为 2 mm、频率为 2 Hz 时，以及输入电流为 1.5 A、振幅为 8 mm、频率为 1 Hz 时的 Bingham 模型和 Dahl 模型中力的计算值与实际值之间的差异，图中按最高高度依次向下分别是 Dahl 模型阻尼力计算值曲线、Bingham 模型阻尼力计算值曲线和阻尼力实际值曲线。

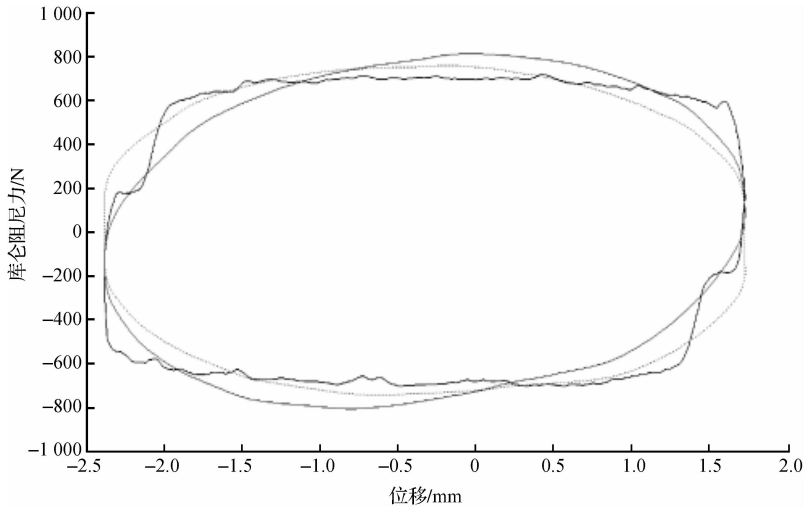

图 12 输入电流为 0.5 A 时不同模型力-位移对的比

Fig. 12 Contrast of force-displacement of different models when input current is 0.5 A

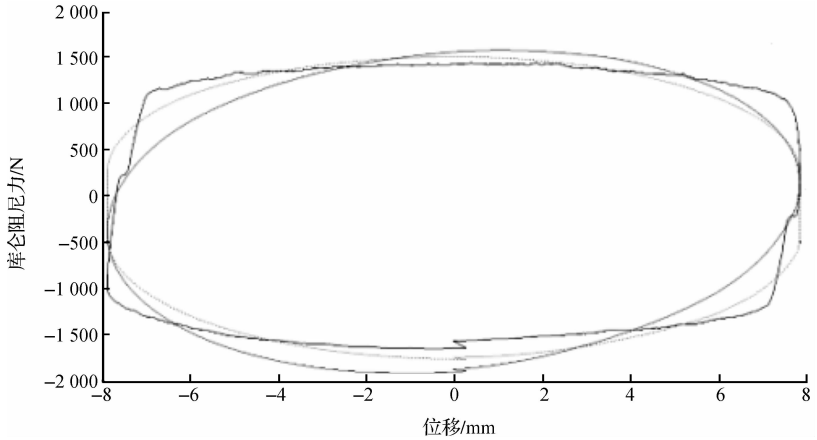

图 13 输入电流为 1.5 A 时不同模型力-位移的对比

Fig. 13 Contrast of force-displacement of different models when input current is 1.5 A

由图 12 和图 13 可以看出，该阻尼器的阻尼特性拟合结果与试验结果趋势一致，误差较小。在电流增大后，阻尼器输出的阻尼力会增大，拟合出的修正后的 Bingham 模型在阻尼器起步阶段和减速阶段对阻尼力的拟合效果更好且阻尼力峰值更接近实际值；而拟合出的修正后的 Dahl 模型在阻尼器起步和减速阶段，当输出阻尼力随位移增大而上升缓慢时，对阻尼力的拟合效果更接近实际值。

3　结　论

本研究通过对 Lord 公司研制的型号为 RD-8041-1 的磁流变减振器进行的实际性能试验，针对周强等提出的修正的 Bingham 模型和修正的 Dahl 模型两种模型，通过 MATLAB 中的 cftool 和 sftool 进行参数辨识，并通过试验对结果进行验证，发现拟合出的修正的 Dahl 模型与修正的 Bingham 模型都能对阻尼力有一个良好的计算效果，同时拟合出的 2 种模型在阻尼器启动和减速阶段对阻尼力的计算都各有长处。利用 MATLAB 中 sftool 及 cftool 对磁流变阻尼器的 2 种模型进行参数辨识是一种直接有效的拟合方法，而且所用方法将繁琐的参数辨识过程进行了简化，从而对磁流变阻尼减振器的深入研究提供了一定的参考。

参考文献：

[1]　周强，瞿伟廉. 磁流变阻尼器的两种力学模型和试验验证[J]. 地震工程与工程振动，2002，22(4)：144.

[2]　YI F，DYKE S J，CAICEDO J M，et al. Experimental verification of multiinput seismic control strategies for smart dampers[J]. Journal of Engineering Mechanics，2001，127(11)：1152.

[3]　STANWAY R，SPROSTON J L，STEVENS N G. Non-linear modeling of an electro-rheological vibration dampers [J]. Journal of Electrostatics，1987，20(2)：167.

[4]　JR B F S，DYKE S J，SAIN M K，et al. Phenomenological model of a magnetorheological damper[J]. Journal of Engineering Mechanics，1997，123(3)：230.

[5]　邢海军，杨绍普，郭树起，等. 一种磁流变阻尼器动态阻尼力模型[J]. 振动与冲击，2010，29(7)：105.

[6]　周云，谭平. 磁流变阻尼控制理论与技术[M]. 北京：科学出版社，2007：81.

[7]　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.

[8]　张莉洁，王炅，钱林方. 冲击载荷下磁流变阻尼器动态特性分析及模型参数辨识[J]. 机械工程学报，2009，45(1)：211.

[9]　刘永强，杨绍普，廖英英，等. 基于遗传算法的磁流变阻尼器 Bouc-Wen 模型参数辨识[J]. 振动与冲击，2011，30(7)：261.

[10]　李宏男，杨浩，李秀领. 磁流变阻尼器参数化动力学模型研究进展[J]. 大连理工大学学报，2004，44(4)：616.

[11]　薛晓敏，孙清，伍晓红，等. 磁流变阻尼器滞回模型参数的敏感性分析及其简化模型[J]. 西安交通大学学报，2013，47(7)：102.

[12]　王修勇，龚禹，孙洪鑫，等. 磁流变阻尼器滞回参数模型研究[J]. 土木工程学报，2014，47(增刊 1)：113.

[13]　胡海刚，胡敏，陈跃华，等. 磁流变阻尼器双曲正切模型参数辨识方法[J]. 船舶工程，2017(5)：31.

[14]　周治江，廖昌荣，谢磊，等. 硅基磁流变粘弹性流体制备方法与流变学特性研究[J]. 功能材料，2013，44(17)：2554.

[15]　孔祥东，李斌，权凌霄，等. 磁流变液阻尼器 Bingham-多项式力学模型研究[J]. 机械工程学报，2017，53(14)：179.