

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.175

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



磁流变阻尼器拟静力力学特性及力学模型

张香成, 毋贵斌, 赵军

(郑州大学 力学与安全工程学院, 郑州 450001)

摘要:为研究磁流变阻尼器(MRD)在拟静态作用下的力学性能,制作了一个四线圈剪切阀式MRD,在不同电流和不同位移幅值下采用三角位移加载制度对MRD进行了拟静态试验,研究了MRD的力学性能随电流和位移幅值的变化规律,分析了阻尼力波动现象产生的原因;根据试验结果提出了一种拟静态作用下修正的力学模型,对模型参数进行了识别,对力学模型进行了验证。结果表明:所用阻尼器在拟静态试验过程中阻尼力波动现象显著,无电流时阻尼力随着位移幅值增加而略微减小,有电流时阻尼力随着位移幅值增加而稍微增大;阻尼力随电流的增大明显增大,当电流超过1.5 A时,MRD达到磁饱和状态,阻尼力增幅明显降低;提出的力学模型能够较好地描述拟静力下阻尼力随电流和位移的改变而产生的变化特性。

关键词:磁流变阻尼器;拟静态试验;力学模型;参数识别

中图分类号:TU352.11 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)03-0046-08

Quasi-static mechanical properties and mechanical model of MRD

Zhang Xiangcheng, Wu Guibin, Zhao Jun

(School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, P. R. China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of Magnetorheological Damper (MRD) under quasi-static action, a four-coil shear valve MRD was fabricated. A quasi-static test was carried on the MRD by using the triangular displacement loading system under different currents and displacements. In the test, the variation of the mechanical properties of MRD with the changes of current and displacement was studied, and the causes of the damping force fluctuation phenomenon were analyzed. Based on the test results, a modified mechanical model under quasi-static loading was proposed, the parameters of the model were identified, and the mechanical model was verified. The results show that the damping force of MRD fluctuates remarkably during the quasi-static test process. The damping force decreases slightly with the increase of displacement amplitude when there is no current, and increases slightly with the increase of displacement amplitude when there is current. The damping force increases obviously with the increase of current, and when the current exceeds 1.5A, MRD reaches magnetic saturation and the increase of

收稿日期:2019-08-01

基金项目:国家重点研发计划(2016YFE0125600);河南省高等学校重点科研项目(19A560007)

作者简介:张香成(1983-),男,副教授,主要从事磁流变材料与装置、结构震动控制研究,E-mail:xczhang@zzu.edu.cn。

赵军(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:zhaoj@zzu.edu.cn。

Received:2019-08-01

Foundation items:National Key Research and Development Program (No. 2016YFE0125600); Key Research Program of Higher Education Institutions in Henan Province (No. 19A560007)

Author brief:Zhang Xiangcheng (1983-), associate professor, mainly research interests: magnetorheological materials and devices, structural vibration control, E-mail: xczhang@zzu.edu.cn.

Zhao Jun (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhaoj@zzu.edu.cn.

damping force decreases obviously. The mechanical model proposed in this paper can well describe the variation of damping force with the change of current and displacement under quasi-static force.

Keywords: magnetorheological damper; quasi-static test; mechanical model; parameter identification

磁流变阻尼器(Magnetorheological damper, MRD)是一种可调节阻尼的减振控制装置,具有结构简单、出力大、阻尼力连续可调且控制效果好的优点,在土木工程减振防灾方面展现出了良好的应用前景,已成为目前结构振动控制的重要装置^[1-7]。近年来,学者们对 MRD 做了大量研究,梅真等^[8]对 MRD 进行了动力学试验,建立了双曲正切滞回模型和 BP 神经网络正向、逆向力学模型,并对这两种模型进行验证;杜成斌等^[9]对 MRD 在低频下力学性能进行研究,并对非线性滞回双粘性模型进行了修正;张香成等^[10]基于米氏方程提出了米氏模型,并通过试验加以验证。

对设置 MRD 的结构(或结构构件)进行拟静力试验是研究其力学性能、耗能性能和二者相互作用机理的经济、可靠手段,然而,关于 MRD 拟静力性能的研究较少,因此,在研究设置 MRD 结构(或结构构件)的力学性能之前,应当先对 MRD 的拟静力性能进行研究。Zekeriya 等^[11]采用准静态分析的方法研究了 MRD 中的非牛顿流动,并对 MRD 进行了计算流体动力学分析;Mohammad 等^[12]对 MRD 中的磁流变流体流动进行了准静态分析,说明了磁流变流体惯性产生的影响,但这些研究并未描述 MRD 的拟静力学性能。

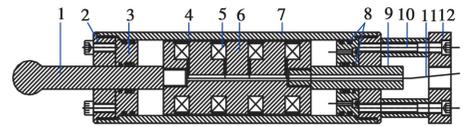
笔者采用位移加载方式,利用三角波加载函数在低速下对自制的 MRD 进行拟静态加载,得到不同工况下 MRD 的阻尼力-位移曲线。通过对结果进行对比分析,研究 MRD 在不同位移幅值、不同电流下的力学性能,分析试验中 MRD 阻尼力波动等现象出现的理论原因。基于试验结果提出一种拟静力作用下修正的 MRD 阻尼力计算模型,并对力学模型中的参数进行了识别。

1 阻尼器拟静态试验

1.1 阻尼器结构

采用四线圈剪切阀式阻尼器,阻尼器多级活塞材料为电工纯铁,其余部分为 45 号钢,其结构如图

1 所示。基座连接板利用螺栓将阻尼器与下方基座连接,线圈导线从 MRD 多级活塞和活塞杆中心的圆柱形孔道引出。阻尼器各部分参数见表 1。



注:1.球头活塞杆 2.压紧螺母 3.导向套 4.阻尼间隙 5.线圈 6.多级活塞 7.缸筒 8.密封体 9.活塞杆 10.连接螺栓 11.线圈导线 12.基座连接板

图 1 多线圈剪切式 MRD 结构构造图

Fig. 1 Structural chart of multi coil MRD

表 1 多线圈剪切式 MRD 参数

Table 1 Parameter of MRD

行程/mm	线圈电阻/ Ω	线圈槽深/mm	活塞杆直径/mm
± 35	4×8.5	24	96.8
阻尼间隙/mm	缸筒内径/mm	缸筒外径/mm	线圈匝数($n \times \text{turns}$)
1.6	100	120	4×840

阻尼器内部填充的磁流变液采用自制方法获得,其组分为碳基铁粉、硫酸钠、液体石蜡、皂土、石墨以及甲基硅油等,其中,碳基铁粉占 60%、甲基硅油占 28%(质量分数)。磁流变液的相关性能在中国科学技术大学智能材料与振动控制实验室测定,在磁场强度为 0.44 T 时,当剪切速率分别为 0.01、0.34/ s^{-1} 时,磁流变液的剪切应力分别为 9 456.2、9 492.2 Pa,二者相差 0.38%;当剪切速率为 100/ s^{-1} 时,磁流变液在不同磁场下的剪切应力见表 2。

表 2 磁流变液磁场-剪切应力关系

Table 2 Field-shear stress relationship of magnetorheological fluid

磁场强度/T	剪切应力/Pa	磁场强度/T	剪切应力/Pa
0	486.07	0.6	18 931
0.1	4 079.6	0.7	19 149
0.2	8 813.5	0.8	19 190
0.3	14 046	0.9	19 274
0.4	16 866	1.0	19 218
0.5	18 475		

1.2 试验加载

试验通过作动器进行位移控制,作动器的最大出力为 100 kN,采用拟静态下的三角波对阻尼器进行位移加载;基座连接板和基座中心均开有圆孔,线圈导线穿过圆孔后从基座侧面引出,并与直流电源连接;试验过程中,MRD 由稳压直流电源供电,且 MRD 4 个线圈中的电流等级保持一致,电流等级从小到大依次为 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.3、2.6 A,在每个电流等级下,均采用图 2 所示的加载制度对 MRD 进行加载,共进行了 7 次加载试验,未进行重复性试验,试验装置见图 3。

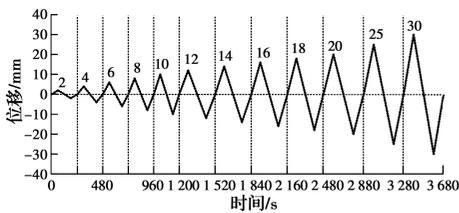


图 2 阻尼器拟静态加载制度

Fig. 2 Quasi-static loading system of dampers

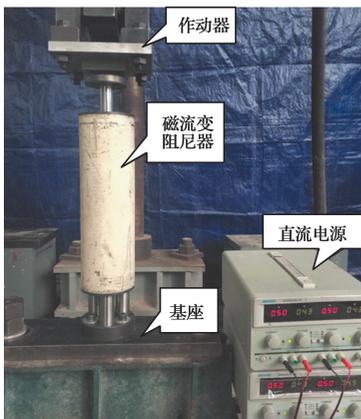


图 3 阻尼器试验照片

Fig. 3 Test photo of MRD

2 试验结果分析

试验通过改变加载电流、阻尼器位移和加载时间,测得阻尼器在不同工况下的试验数据,通过 MATLAB 软件绘制,得到相关的阻尼力-位移曲线。由于图 2 中 MRD 试验的最小、最大加载速度分别为 0.03、0.33 mm/s,与之对应的阻尼间隙处磁流变液的剪切速率在该剪切速率范围内,磁流变液的剪切应力相差极小,因此,在 MRD 试验结果分析中忽略速率的影响。

2.1 力学性能随位移幅值的变化规律

MRD 在电流为 0、1.5、2.6 A 时,不同位移幅值下的试验结果分别如图 4、图 5 和图 6 所示。

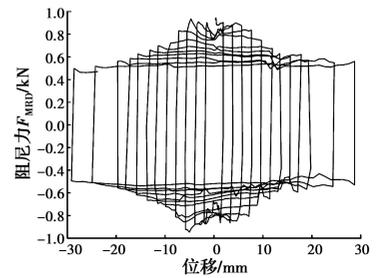


图 4 不同位移幅值阻尼器试验曲线 (0 A)

Fig. 4 Test curves of MRD with different displacement amplitude (0 A)

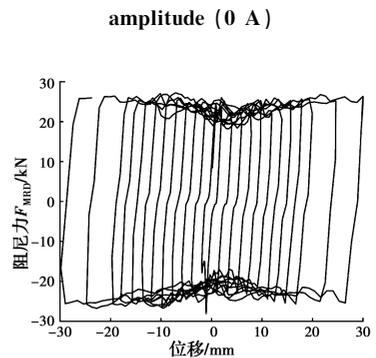


图 5 不同位移幅值阻尼器试验曲线 (1.5 A)

Fig. 5 Test curves of MRD with different displacement amplitude (1.5 A)

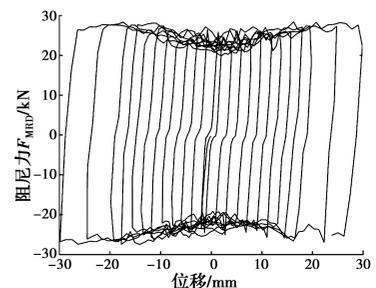


图 6 不同位移幅值阻尼器试验曲线 (2.6 A)

Fig. 6 Test curves of MRD with different displacement amplitude (2.6 A)

从图 4 可以看出,当 MRD 通电电流为 0 A 时,在 MRD 位移幅值较小时,阻尼器所提供的阻尼力值约为 0.8 kN。随着 MRD 位移幅值的增加,MRD 所提供的阻尼力逐渐降低。当 MRD 位移幅值为 30 mm 时,MRD 所提供的阻尼力值约为 0.5 kN。此时,MRD 在较小位移幅值下阻尼力较大,而在较大位移幅值时阻尼力较小。

从图 5、图 6 可以看出,随着 MRD 通电电流增

加,阻尼器所提供的阻尼力也随之增加。在通电的情况下,当位移幅值较小时,MRD的阻尼力也较小;随着MRD位移幅值的增加,阻尼力也会增加。此外,由图5、图6可以看出,阻尼力迅速上升至最大值后,会在一定区间内不断波动。

Spencer等^[13]在Bingham模型基础上提出修正公式

$$F_{MRD} = F_{\tau} + F_f + F_n + C\dot{u} \quad (1)$$

式中: F_{τ} 为磁流变液的剪切力; F_f 为阻尼器内部摩擦力; F_n 为磁流变液的挤压力; C 为与电流有关的磁流变液粘滞阻尼系数; \dot{u} 为活塞相对于钢套筒的运动速度。

由于MRD试验为静力加载,其速度极慢,速度所产生的粘滞力很微小,可忽略不计;在低电流时,磁流变液本身剪切强度低,剪切力与挤压力也较小。此时,MRD内部摩擦力占主导地位。

摩擦力主要由活塞杆与密封圈(MRD采用O型圈密封)间相对滑动提供,摩擦力大小的变化可分为两个阶段:启动阶段活塞杆开始运动,摩擦力逐渐增大,直到达到O型圈启动摩擦力,由于在达到相对滑动前,O型圈会产生预位移,密封圈自身产生变形,所提供摩擦力较最大静摩擦力更大;之后为滑动阶段,此时活塞杆开始稳定运动,O型圈处于滑动状态,预位移得到释放,O型圈与摩擦杆之间的摩擦力趋于稳定,此时为滑动摩擦,摩擦力比最大静摩擦力要小。在MRD位移幅值较小时,阻尼器活塞的运动速度极慢,密封圈与活塞杆之间一直处于静摩擦-滑动摩擦-静摩擦不断交替的状态^[14],此时的摩擦力以静摩擦为主,摩擦力较大;在MRD位移幅值增加后,阻尼器活塞运动速度变快,密封圈与活塞杆之间稳定处于动摩擦状态,摩擦力较小。因此,在低电流时,摩擦力在阻尼力中处于主导地位,出现了小位移幅值下阻尼力较大而在大位移幅值时阻尼力较小的现象。

由式(1)可知,阻尼力部分包括挤压力 F_n ,而 F_n 与活塞移动位移成正比^[15]。当阻尼器线圈通电流后,磁流变液抗压屈服强度迅速增加,此时,随着活塞移动位移的增加,挤压力也随之增加,进而导致阻尼力随着位移的增加而增加。

2.2 力学性能随电流的变化规律

不同电流下阻尼器的工作状况如图7和图8所示。当电流较小时,MRD所提供的阻尼力也较小;随着电流的增加,阻尼力也在不断增加;电流达到1.5 A后,阻尼力增加不再明显,说明MRD已经达到磁饱和状态。

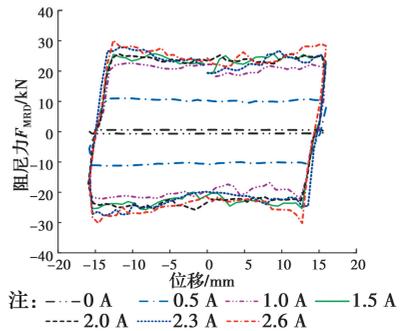


图7 不同电流阻尼器试验曲线(16 mm)

Fig. 7 Test curves of MRD with different current (16 mm)

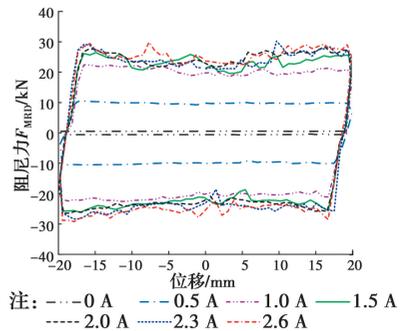


图8 不同电流阻尼器试验曲线(20 mm)

Fig. 8 Test curves of MRD with different current (20 mm)

2.3 阻尼力波动现象成因分析

试验采用剪切阀式阻尼器,由式(1)可知,在线圈通上一定电流后,磁流变液剪切力将成为阻尼力的主要部分。

由阻尼力的试验曲线可以看出,在MRD活塞杆的运动过程中,阻尼力没有稳定地保持在某一数值上,而是在某一区间内上下波动。

这种现象出现的原因是:如图9(a)所示,磁流变液中的磁性粒子在磁场的作用下整齐排列成链^[16],在活塞与缸体产生相对滑动时,阻尼通道中的磁流变液层间也会产生相对滑动,且随着剪切速率增加,颗粒链的倾斜角也随之增加,如图9(b)所示。在外界磁场和剪切作用的共同作用下,颗粒链将不断断裂重组,直至达到动态平衡状态^[17]。由于磁流变液并非完全匀质,且拟静力加载下,剪切

速率低,加载时间长,磁性粒子间的动态平衡无法保持完全稳定,随着活塞运动,打乱、破坏的磁性粒子链数量也在变化。因此,在磁性粒子链不断被打乱、重组的过程中,阻尼力也在小范围内不断波动。

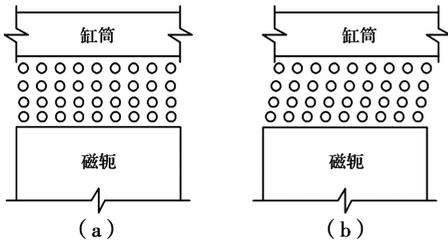


图9 磁性粒子在剪切作用下的结构演化

Fig.9 Structural evolution of magnetic particles under shear

3 力学模型及参数识别

3.1 阻尼器计算模型

由于在拟静态加载方式下,阻尼器活塞相对运动速度低, $C\dot{u}$ 可忽略不计;MRD的挤压阻尼力 F_n 与活塞移动位移 u 成正比。即

$$F_n = ku \quad (2)$$

因此,阻尼力计算公式可简化为式(3)。

$$F_{MRD} = F_\tau + F_f + ku \quad (3)$$

3.2 计算模型参数识别

首先确定 F_f 。在电流为0 A时,无外加磁场,磁流变液呈现低粘度的牛顿流体特性,此时,磁流变液剪切力 F_τ 和挤压力 F_n 均为0,MRD的阻尼力由摩擦力 F_f 提供。由此可得出,在各循环时,MRD摩擦力 F_f 的大小如表3所示。

表3 参数 F_f 识别结果

Table 3 Identification results of parameter F_f

位移/mm	F_f /kN	位移/mm	F_f /kN
2	0.809	14	0.643
4	0.805	16	0.624
6	0.815	18	0.587
8	0.779	20	0.548
10	0.735	25	0.535
12	0.667	30	0.506

根据 F_f 识别结果,利用最小二乘法对 F_f 进行拟合,得到 F_f 的拟合公式

$$F_f = 0.8934e^{-0.02157u} \quad (4)$$

在拟静态加载下,加载速度极低,MRD剪切阻尼力 F_τ 的大小只与磁流变液剪切屈服强度有关,因此,在相同电流下,MRD剪切阻尼力 F_τ 不变。

将求得的摩擦力及不同工况下试验结果带入式(3)中,通过非线性拟合,可得到不同电流下的系数 k ,以及不同加载电流下MRD的剪切阻尼力 F_τ ,如表4、表5所示。

表4 参数 k 识别结果

Table 4 Identification results of parameter k

电流/A	系数/ 10^{-3}	电流/A	系数/ 10^{-3}
0	0	2.0	252.6
0.5	31.21	2.3	275.6
1.0	134.0	2.6	296.8
1.5	261.8		

表5 参数 F_τ 识别结果

Table 5 Identification results of parameter F_τ

电流/A	F_τ /kN	电流/A	F_τ /kN
0	0	2.0	21.33
0.5	11.58	2.3	22.73
1.0	18.33	2.6	22.39
1.5	20.24		

由于 F_τ 是MRD在不同磁感应强度下的屈服应力,与MRD的位移幅值和激励频率无关,只与电流强度有关。 F_n 是MRD在不同磁感应强度下的挤压应力,只与磁场强度以及活塞与筒壁距离有关,式(2)中, u 为活塞移动位移,而磁场强度与电流强度正相关,故 k 为与电流强度有关的系数。

从图10、图11可以看出, F_τ 与 k 随电流增加呈指数关系,故将模型参数表示为^[18]

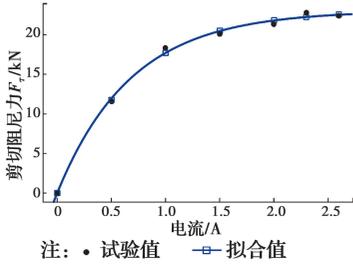
$$F_\tau = F_{\tau 0} - F_{\tau 0}e^{-aI} \quad (5)$$

$$k = k_0 - k_0e^{-bI} \quad (6)$$

采用非线性最小二乘法,根据式(5)、式(6)对 F_τ 和 k 进行非线性拟合,可得式中各参数值分别为: $F_{\tau 0}=23.03$ 、 $a=1.464$ 、 $k_0=561.4$ 、 $b=0.3041$ 。图10、图11分别为参数 F_τ 和 k 的试验值和拟合值之间的对比。以图10为例,在电流分别为0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.3、2.6 A时,试验测得 F_τ 分别为0、11.58、18.33、20.24、21.33、22.73、22.39 kN,相应电流下的拟合值为0、11.95、17.70、20.47、21.79、22.23、22.51 kN,试验值和拟合值非常接近。

3.3 模型对比验证

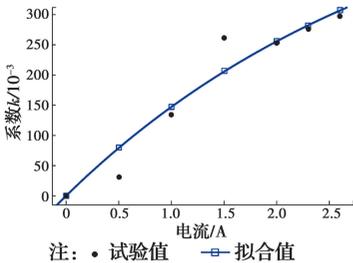
为了验证模型精度,将得到的模型结果与试验所得滞回曲线进行对比,如图 12、图 13 所示。同时,通过试验数据中实测位移计算各数据点对应的模型值,与实测的阻尼力进行比较计算,取平均值得到了相应电流下试验测得阻尼力与模型计算阻尼力的平均误差,见表 6、表 7。



注: • 试验值 — 拟合值

图 10 F_r 试验值和拟合值

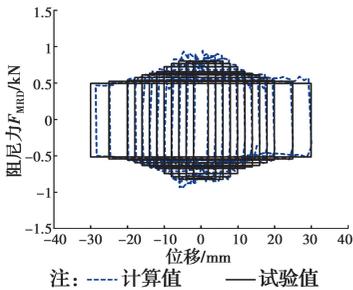
Fig. 10 Testvalue and fitting value of F_r



注: • 试验值 — 拟合值

图 11 系数 k 试验值和拟合值

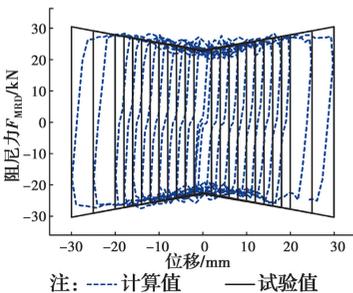
Fig. 11 Test value and fitting value of k



注: ---- 计算值 — 试验值

图 12 模拟曲线与试验曲线对比 (0 A)

Fig. 12 Comparison of simulation and test curves (0 A)



注: ---- 计算值 — 试验值

图 13 模拟曲线与试验曲线对比 (2.0 A)

Fig. 13 Comparison of simulation and test curves (2.0 A)

表 6 实测阻尼力与模型计算阻尼力的平均误差 (0 A)

Table 6 Average error value between measured damping force and model calculated damping force (0 A)

位移/mm	平均误差/%	位移/mm	平均误差/%
2	6.43	14	3.52
4	4.71	16	3.24
6	4.77	18	2.59
8	3.55	20	3.15
10	3.42	25	3.84
12	2.98	30	3.89

表 7 实测阻尼力与模型计算阻尼力的平均误差 (2.0 A)

Table 7 Average error value between measured damping force and model calculated damping force (2.0 A)

位移/mm	平均误差/%	位移/mm	平均误差/%
2	4.85	14	5.00
4	4.56	16	4.39
6	7.23	18	4.99
8	6.07	20	4.14
10	4.73	25	4.39
12	4.81	30	4.50

从图 12 和图 13 可以看出,所得力学模型与试验结果较吻合,不仅能很好地描述出 MRD 在拟静态加载制度下阻尼力随电流的增加而增加的特征,也能够模拟阻尼力在不同电流下随位移幅值变化的特性,即:在无电流时,阻尼力随着位移幅值的增加而减小;在通电流时,阻尼力随着位移幅值的增加而增加。但是,该模型不能描述 MRD 静态试验时阻尼力随着活塞的运动而产生的上下波动情况。

从表 6 和表 7 可以看出,24 组数据中共有 21 组误差小于等于 5%;误差较大的 3 组数据:电流 0 A 时,位移幅值 2 mm,电流 2.0 A 时,位移幅值 6、8 mm,均为较小位移幅值时的工况。由于 MRD 在制作时无法保证磁流变液完全填满缸筒内部,会在磁流变液中存在气泡,这种情况在位移幅值较小时会导致模型误差相对较大。而在位移幅值较大的工况中,这一模型误差所造成的影响将会降低,因此,试验数据与力学模型间的误差也更小。

4 结论

1) 拟静态试验下,无电流时,小位移值下阻尼力

较大,而在大位移时阻尼力较小;有电流时,小位移值下阻尼力较小,而在大位移时阻尼力较大。

2)MRD所提供的阻尼力随着电流的增加而增加;当电流达到1.5 A以后,阻尼力增加不再明显,说明MRD已经达到磁饱和状态。

3)在拟静态试验过程中,MRD的阻尼力会产生明显的波动现象。

4)利用试验数据对提出的拟静态加载下修正的力学模型进行参数识别,结果表明,提出的力学模型能够较好地描述拟静力下MRD阻尼力随电流和位移的改变而产生的变化特性。

由于课题组试验样本不够丰富,力学模型还不能与MRD的基本参数(如表1中的线圈匝数、活塞杆直径等,表2中的剪切应力)进行关联,并且该模型不具备普适性,因此,不能直接预测其他MRD的拟静力力学性能,在以后的研究中需要以此为目标进行改进。

参考文献:

[1] FERDAUS M M, RASHID M M, HASAN M H, et al. Optimal design of magneto-rheological damper comparing different configurations by finite element analysis [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(9): 3667-3677.

[2] 胡国良, 张佳伟. 磁流变阻尼器结构优化设计研究现状[J]. *机床与液压*, 2019, 47(1): 145-150.

HU G L, ZHANG J W. State of the art review on structural optimization design of magnetorheological damper [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2019, 47(1): 145-150. (in Chinese)

[3] CHOOI W W, OYADIJI S O. Design, modelling and testing of magnetorheological (MR) dampers using analytical flow solutions [J]. *Computers & Structures*, 2008, 86(3/4/5): 473-482.

[4] DAVIS L C. Model of magnetorheological elastomers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 85(6): 3348-3351.

[5] SHOU M J. Dynamic behavior of magnetorheological energy absorber under impact loading [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(1): 72.

[6] LI R, ZHOU M J, WU M J, et al. Semi-active predictive control of isolated bridge based on

magnetorheological elastomer bearing [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2019, 24(1): 64-70.

[7] GURUBASAVARAJU T M, KUMAR H, MAHALINGAM A. An approach for characterizing twin-tube shear-mode magnetorheological damper through coupled FE and CFD analysis [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, 40(3): 139.

[8] 梅真, 高毅超, 郭子雄. 磁流变阻尼器动力性能测试与建模[J]. *振动. 测试与诊断*, 2017, 37(3): 553-559, 632.

MEI Z, GAO Y C, GUO Z X. Dynamic testing and modeling of a magnetorheological damper [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(3): 553-559, 632. (in Chinese)

[9] 于国军, 杜成斌. 一种复合磁流变阻尼器的设计及性能试验[J]. *力学季刊*, 2014, 35(1): 131-138.

YU G J, DU C B. Design and experimental studies on composite magneto-rheological damper [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2014, 35(1): 131-138. (in Chinese)

[10] 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 X C, XU Z D, WANG S A, et al. Michaelis-menten model of magnetorheological damper and test verification [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(3): 251-255. (in Chinese)

[11] PARLAK Z, ENGIN T. Time-dependent CFD and quasi-static analysis of magnetorheological fluid dampers with experimental validation [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2012, 64(1): 22-31.

[12] ZOLFAGHARIAN M M, KAYHANI M H, NOROUZI M, et al. Parametric investigation of twin tube magnetorheological dampers using a new unsteady theoretical analysis [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2019, 30(6): 878-895.

[13] SPENCER B F J, DYKE S J, SAIN M K, et al. Phenomenological model for magnetorheological dampers [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1997, 123(3): 230-238.

- [14] 马春红, 白少先, 康盼. 氟橡胶 O 型圈低压气体密封黏滞摩擦特性实验[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(2): 160-164.
MA C H, BAI S X, KANG P. Experiment of viscous friction characteristics of fluorine rubber O-rings at low gas seal pressure [J]. Tribology, 2014, 34(2): 160-164. (in Chinese)
- [15] 姚军, 张进秋, 贾进峰, 等. 挤压式磁流变减振器力学模型研究[J]. 中国工程机械学报, 2015, 13(6): 497-503.
YAO J, ZHANG J Q, JIA J F, et al. Study on mechanics model of squeeze flow type of magnetorheological fluid damper [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2015, 13(6): 497-503. (in Chinese)
- [16] 朱俊涛, 徐赵东, 张香成. 磁流变弹性体主链吸附模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(2): 342-346.
ZHU J T, XU Z D, ZHANG X C. Main chain adsorption model of magnetorheological elastomer [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(2): 342-346. (in Chinese)
- [17] 阮晓辉. 磁流变液力学性能及其应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
RUAN X H. Study on the mechanical properties and applications of magnetorheological fluid [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
- [18] 张香成, 何尚文, 李倩, 等. 铅-磁流变阻尼器的试验及计算模型[J]. 工程力学, 2016, 33(10): 123-128.
ZHANG X C, HE S W, LI Q, et al. Test and mathematic model of lead magnetorheological damper [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(10): 123-128. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)