



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402779

引用格式:赵瑞婷,金福宝,马山刚,等.磁流变弹性体磁致剪切力学性能实验与仿真模拟[J].科学技术与工程,2025,25(4):1488-1495.

Zhao Ruiting, Jin Fubao, Ma Shangang, et al. Experimental and simulation of magneto-shear mechanical properties of magnetorheological elastomer[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1488-1495.

电工技术

磁流变弹性体磁致剪切力学性能实验与仿真模拟

赵瑞婷¹, 金福宝^{1*}, 马山刚¹, 李若冰², 李佳伟¹, 张强¹

(1. 青海大学能源与电气工程学院, 西宁 810016; 2. 国家电网吉林省电力有限公司, 松原供电公司, 松原 138000)

摘要 目前关于磁控智能材料磁流变弹性体(magnetorheological elastomer, MRE)宏观力学滞回模型研究较少,不利于MRE材料应用控制。为提高MRE材料控制效果,基于Bouc-Wen模型对MRE磁致剪切力学性能进行实验研究,分析磁场强度对于MRE力学参数的影响。首先借助Simulink搭建Bouc-Wen仿真模型对MRE进行参数拟合;然后分析刚度、阻尼等材料参数随磁场强度变化规律;最后通过实验检验模型有效性。结果表明:随着磁场强度增加,MRE储能与耗能参数均有不同程度的增加,其中等效刚度与最大阻尼力增幅明显,分别提高了210.61%、205.41%;在0.5~0.7 T磁场范围内参数增长速度较快,在0.7~1.0 T范围内增长趋于饱和;采用Bouc-Wen模型对MRE动态力学性能描述效果较好,特征参数最大误差为4.42%。研究成果为MRE材料优化制备与算法控制提供理论与实验参考。

关键词 磁流变弹性体(MRE); 动态力学性能; Bouc-Wen模型; 实验验证

中图分类号 TM271 TQ317; 文献标志码 A

Experimental and Simulation of Magneto-shear Mechanical Properties of Magnetorheological Elastomer

ZHAO Rui-ting¹, JIN Fu-bao^{1*}, MA Shan-gang¹, LI Ruo-bing², LI Jia-wei¹, ZHANG Qiang¹

(1. Energy and Electrical Engineering College, Qinghai University, Xining 810016, China;

2. Songyuan Power Supply Company, Jilin Electric Power Company, Songyuan 138000, China)

[Abstract] At present, there are fewer studies on the macroscopic mechanical hysteresis model of magnetically controlled smart magnetorheological elastomer (MRE), which is not conducive to the application control of MRE materials. To improve the control effect of MRE materials, an experimental study on MRE's magnetostrophic shear mechanical properties based on the Bouc-Wen model was conducted. The influence of magnetic field strength on the mechanical parameters of MRE was analyzed. Firstly, with the assistance of Simulink to establish the Bouc-Wen simulation model was established for MRE parameter fitting. Then, the stiffness, damping, and other material parameters were analyzed with the magnetic field strength change rule. Finally, through the experiments, the model validity was examined. The results show that with the increase of magnetic field strength, the parameters of MRE energy storage and energy consumption have different degrees of increase, in which the equivalent stiffness and maximum damping force increase significantly, respectively, increase 210.61%, 205.41%. In the range of 0.5~0.7 T magnetic field parameter growth rate is faster in the range of 0.7~1.0 T growth tends to be saturated. The dynamic mechanical properties of MRE are better described by the Bouc-Wen model, and the maximum error of the characteristic parameters is 4.42%. The research results can provide theoretical and experimental references for the optimal preparation and algorithmic control of MRE materials.

[Keywords] magnetorheological elastomer(MRE); dynamic mechanical properties; Bouc-Wen model; experimental verification

磁流变弹性体(magnetorheological elastomer, MRE)是一种具有电磁变刚度特性的新型磁控智能材料,由弹性体基体、磁性颗粒和添加剂组成^[1]。受到磁性颗粒之间电磁应力的影响,MRE力学性能

可以通过外界磁场进行控制。由于具有稳定性强、响应速度快的特点,MRE成为磁流变材料研究的热点,备受振动控制领域青睐^[2,4]。

目前,针对MRE磁致剪切性能的研究主要集中在

收稿日期:2024-04-17; 修订日期:2024-11-27

基金项目:国家自然科学基金(51865049);青海省科技厅基础研究计划(2020-ZJ-708)

第一作者:赵瑞婷(1999—),女,汉族,青海西宁人,硕士研究生。研究方向:变压器振动信号故障识别。E-mail:2818826468@qq.com。

*通信作者:金福宝(1981—),男,回族,青海西宁人,博士,教授。研究方向:高电压绝缘防护。E-mail:jinfubao@163.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

在微观机理与宏观力学模型分析两个方面。在微观机理方面,主要从磁性颗粒分布的角度,对 MRE 进行数值分析,分析其磁致变刚度机理。柳彬等^[5]考虑了磁性颗粒链之间的相互作用,采用均匀化方法建立了 MRE 多链模型。Han 等^[6]考虑了链的形状对 MRE 力学性能的影响,提出了锯齿排布链状结构的 MRE 模型。索思等^[7]考虑磁性颗粒的实际分布建立了磁性颗粒呈现卡方分布的 MRE 模型,弥补了各向同性 MRE 中磁性颗粒“均匀分布”假设的不足。Biller 等^[8]考虑磁性颗粒的磁性和弹性的相互作用,建立了粒子对的双稳定性的构型。

在宏观力学模型方面,主要将黏弹性模型应用于 MRE 力学描述过程中。基于 Kelvin 模型建立了简易的 MRE 三参数黏弹性模型。居本祥^[9]考虑了磁致阻尼,构建 MRE 四参数模型。Nguyen 等^[10]分析了基体与颗粒间的相互作用,建立由分数阶黏弹性模型、磁偶极子模型和自适应光滑库仑摩擦模型三部分组成的非线性 MRE 模型。Nam 等^[11]研究了加载过程中切线模量变化情况,构建 MRE 黏弹性参数模型。汪伯潮等^[12]基于连续介质力学理论,建立各向同性 MRE 动态力学本构模型,并通过实验进行验证。

综上所述,目前 MRE 材料已有丰富的研究成果, MRE 宏观模型逐渐替代微观机理成为研究热点,但仅通过构建 MRE 磁场与模量关系进行振动控制已经无法应对复杂工况下振动控制问题,因此有必要针对 MRE 滞回模型进行分析,以满足智能算法实时控制的需求。钱文博^[13]根据 Prandtl-Ishlinskii 模型构建了 MRE 滞回特性模型,模型准确性较好,但算子数量较大,计算时间较长,不利于实际应用。王鹏等^[14]将广泛应用于阻尼器的 Bouc-Wen 模型应用于天然硅橡胶基 MRE 力学模型中,不仅吻合效果较好,而且有效降低了计算时长。马乾瑛等^[15]在此基础上补充了应变、频率等因素对于 MRE 力学模型的影响,但受到设备等因素限制,测试磁场范围较小,未对各力学表征参数的磁场变化规律进一步分析。

鉴于此,基于 Bouc-Wen 滞回模型,对加成型高温硫化硅橡胶基 MRE 进行磁致剪切滞回模型研究。首先制备 MRE 材料,对其进行动态力学性能测试;然后借助 Simulink 搭建 Bouc-Wen 模型,根据测试结果对 MRE 进行参数拟合,分析力学参数随磁场变化规律,建立刚度参数与磁场强度的关系;最后通过实验检验模型的有效性。为 MRE 应用控制提供实验参考。

1 动态力学性能试验

1.1 磁流变弹性体制备

磁流变弹性体材料主要由基体与磁性颗粒两

部分构成,其中基体材料选用由中蓝晨光化工研究设计有限公司生产的牌号为 R-6040N 双室高温硫化液态硅橡胶,磁性颗粒选用由天一超细金属粉末有限公司生产的牌号为 MRF-R55 羰基铁粉。

制备过程中,首先将等质量 A、B 胶混合搅拌,其次少量多次加入铁粉继续搅拌获得磁流变混合液如图 1 所示,然后对其施加外界磁场进行预结构处理,使其内部磁性颗粒呈现链状分布,增强其磁致力学性能,最后对处理后的混合液进行高温硫化获得磁流变弹性体试样,如图 2 所示,制备所需各个成分比如表 1 所示。

1.2 表征参数计算

基于黏弹性理论选取多个力学表征参数,对 MRE 磁致力学性能进行描述,如图 3 所示。

最大阻尼力 F_{cmax} 的计算公式为



图 1 磁流变混合液

Fig. 1 Magnetorheological mixtures



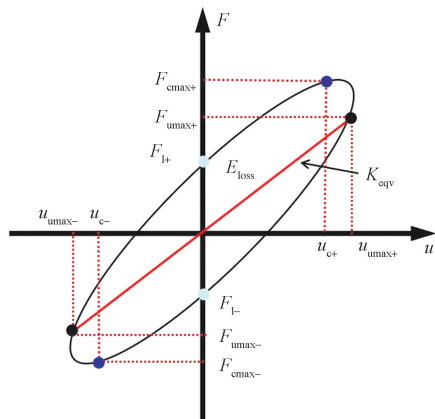
图 2 磁流变弹性体

Fig. 2 Magnetorheological elastomer

表 1 试样组成及其含量

Table 1 Specimen composition and content

成分		质量/g
磁性颗粒	羰基铁粉	120
双组分硫化	A 组分胶	15
硅橡胶	B 组分胶	15



F_{cmax+} 、 F_{cmax-} 为不同方向最大阻力； F 为磁流变弹性体材料测试过程中的剪切力； u 为磁流变弹性体材料测试过程中的位移；+、- 分别表示剪切的方向； K_{eqv} 为等效刚度； E_{loss} 为耗散能； F_{umax+} 、 F_{umax-} 为不同方向下剪切位移最大时的输出力； F_{1+} 、 F_{1-} 为不同方向下循环加载过程中，位移为 0 时对应的输出力； u_{c+} 、 u_{c-} 为不同方向下最大阻力对应的剪切位移； u_{umax+} 、 u_{umax-} 为不同方向下循环加载下磁流变弹性体最大位移

图 3 理想黏弹性材料应力-位移滞回曲线

Fig. 3 Stress-displacement hysteresis curves for ideal viscoelastic materials

$$F_{cmax} = \frac{|F_{cmax+}| + |F_{cmax-}|}{2} \quad (1)$$

式(1)中： F_{cmax+} 、 F_{cmax-} 为循环加载下磁流变弹性体不同方向下最大应力。

等效刚度 K_{eqv} 的计算公式为

$$K_{eqv} = \frac{|F_{umax+}| + |F_{umax-}|}{|u_{umax+}| + |u_{umax-}|} \quad (2)$$

式(2)中： F_{umax+} 、 F_{umax-} 为不同方向下磁流变弹性体位移最大时的输出力； u_{umax+} 、 u_{umax-} 为不同方向下循环加载下磁流变弹性体最大位移。

储能模量 E_1 的计算公式为

$$E_1 = \frac{F_{umax+} h}{i u_{umax+} A'} \quad (3)$$

式(3)中： i 为磁流变弹性体层数； h 为磁流变弹性体的厚度； A' 为磁流变弹性体截面积。

损耗模量 E_2 的计算公式为

$$E_2 = \eta E_1 = \frac{F_{1+} E_1}{F_{umax+}} \quad (4)$$

式(4)中： η 为磁流变弹性体损耗因子； F_{1+} 为正方向剪切加载时，位移为 0 时对应输出力。

耗散能 E_{loss} 的计算公式为

$$E_{loss} = \pi K_1 u_{umax+}^2 = \pi \eta \frac{i A' E_1}{h} u_{umax+}^2 \quad (5)$$

式(5)中： K_1 为磁流变弹性体耗能刚度。

1.3 磁流变弹性体力学性能测试

通过对磁流变弹性体进行动态力学性能测试，

计算力学表征参数，为参数拟合提供数据支撑。图4为 MRE 力学性能测试系统，主要由旋转流变仪、电磁检测配件、计算机以及 MRE 构成，通过调节电磁配件电流输入改变 MRE 区域磁场强度，实现不同磁场强度下，MRE 动态力学性能测试，其中旋转流变仪由奥地利安东帕公司生产，型号为 MCR 301，MRE 试样为直径 20 mm，厚度为 1 mm 圆片。实验测试过程中首先将 MRE 放置于平板上，然后调节轴承与平板间间隙距离，避免 MRE 在测试过程发生滑移，然后改变励磁电流产生实验磁场，最后借助 Physica 软件设置测试参数进行剪切震荡测试，测试参数如表 2 所示。

旋转流变仪配有电磁组件，通过改变磁流变仪电流输入实现磁场强度调节。磁场强度分别设置为 0、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、1 T，在匀强磁场下，使空气轴承保持恒定速率进行剪切测试，其中剪切频率为 1 Hz，剪切幅值为 0.1%，测试方案如表 3 所示。

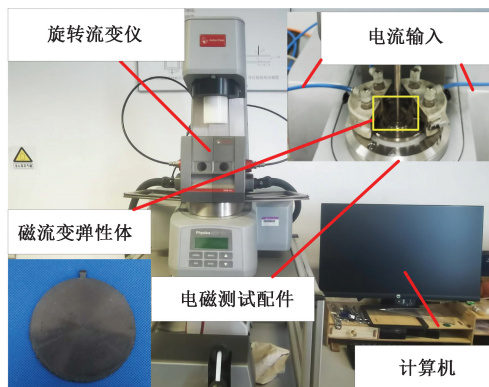


图 4 磁流变弹性体动态力学性能测试系统
Fig. 4 Magnetorheological elastomer dynamic mechanical properties testing system

表 2 材料测试参数

Table 2 Material test parameters

测试条件	数值
法向力/N	9.98
间隙距离/mm	1.013
频率/Hz	1
温度/°C	25

表 3 材料测试方案

Table 3 Material testing plan

序号	测试磁场/T	磁性颗粒含量/%	频率/Hz	幅值/%
1	0			
2	0.4			
3	0.5			
4	0.6	80	1	0.1
5	0.7			
6	0.8			
7	1.0			

1.4 测试结果分析

通过实验测试外加磁场强度对 MRE 动态力学性能的影响, 分析特征参数磁场强度变化规律。在测试过程中保证材料应变幅值与加载频率保持不变, 其中应变幅值为 0.1%, 加载频率为 1 Hz, 分别在不同磁场强度条件下进行测试, 所选测试磁场强度分别为 0、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、1.0 T, 为保证测试结果的准确性, 降低环境对实验结果造成的影响, 每个试样循环加载 5 个周期取其平均数据作为最终结果, 并选取同批次同规格的两个试件进行对比, 检验测试结果的有效性, 检验条件(应变幅值, 加载频率, 磁场强度)分别为 0.5%、1 Hz、0.3 T、0.5%、1 Hz、0.8 T。验证结果如表 4 所示。结果表明, 验证组最大阻尼力, 储能模量及损耗模量最大误差均在 2% 范围内, 实验组数据有效。

图 5 为不同磁场强度下 MRE 滞回曲线, 在刚度变化方面, 可以看出, 随着磁场强度的增加, MRE 滞回曲线的斜率逐渐增大, 等效刚度增加, 这与磁偶极子理论模型相吻合。在材料耗能方面, 从图 5 中可以看出滞回曲线面积随磁场强度逐渐增大, 当磁场强度达到 1 T 时, 曲线面积最大, 样品损耗的能量最多。根据特征参数计算式(1)~式(6)对 MRE 滞回曲线进行量化分析, 计算得出不同磁场强度下材料的各项特征参数, 如表 5 所示。

图 6 为不同磁场强度下 MRE 表征参数测试计算结果, 其中图 6(a)、图 6(b) 表征材料弹性性能。图 6(a) 为磁场强度对材料最大阻尼力与等效刚度的影响, 可以看出, 随着外界磁场的增强, 最大阻尼力在逐渐增加, MRE 抵抗形变的能力增强。最大

阻尼力由 0 T 时的 0.037 N, 提升至 1 T 的 0.113 N, 提高了 204.70%; 等效刚度由 0 T 时的 7.145 3 N/mm, 提升至 1 T 的 22.192 8 N/mm, 提高了 210.35%, 其中当磁场强度为 0.5 T 时, 等效刚度增速最快, 增速为 28.54 N/(mm·T)。

为更加直观表现磁场对 MRE 力学性能的影响, 需对 MRE 磁致模量进行计算, 如图 6(b) 所示。可以看出, 随着磁场强度增加, MRE 磁致模量逐渐提升, 其中 1 T 时磁致模量最大, 最大磁致模量为 0.22 MPa, 磁致模量增量整体呈现先快后慢的趋势, 0.7~1.0 T 时电磁应力已基本达到饱和状态。这是因为外界磁场强度在 0~0.5 T 范围内铁磁粒子磁感应强度与磁场强度呈现线性关系, 粒子之间电磁作用力随磁场变化较快, 随着外界磁场强度增加, 磁性颗粒逐渐趋于饱和, 粒子之间相互作用力趋于稳定, 磁致模量增速减弱。

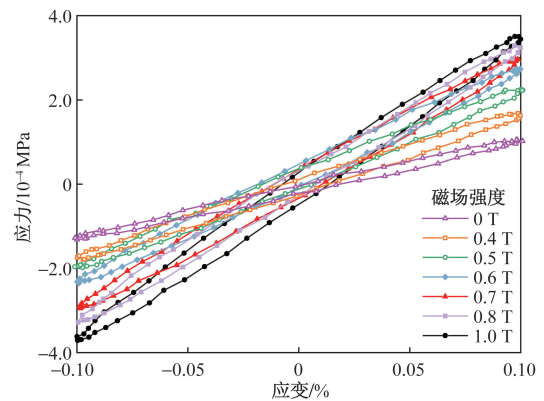


图 5 不同磁场强度下的 MRE 滞回曲线
Fig. 5 Hysteresis curves of MRE at different magnetic field strengths

表 4 实验验证结果

Table 4 Experimental verification results

加载条件	最大阻尼力/N			储能模量/MPa			损耗模量/MPa		
	实验组	验证组	误差/%	实验组	验证组	误差	实验组	验证组	误差/%
0.5% 应变幅值、1 Hz、0.3 T	0.044 6	0.044 5	0.224	0.14	0.141	0.714	0.013 5	0.013 4	0.740
0.5% 应变幅值、1 Hz、0.8 T	0.105 0	0.103 0	1.905	0.35	0.346	1.143	0.034 2	0.034 0	0.585

表 5 材料特征参数

Table 5 Material characteristic parameters

磁场强度/T	耗散能/(N·mm)	损耗模量/MPa	损耗因子	最大阻尼力/N	等效刚度/(N·mm ⁻¹)	储能模量/MPa
0	30.07	0.015	0.081 3	0.037	7.145	0.118
0.4	30.11	0.018	0.103 2	0.055	10.191	0.171
0.5	38.17	0.019	0.103 8	0.063	13.045	0.212
0.6	47.43	0.024	0.106 5	0.078	15.944	0.254
0.7	56.26	0.029	0.108 5	0.085	18.634	0.298
0.8	58.83	0.031	0.109 4	0.103	20.539	0.328
1.0	59.34	0.035	0.109 8	0.113	22.193	0.334

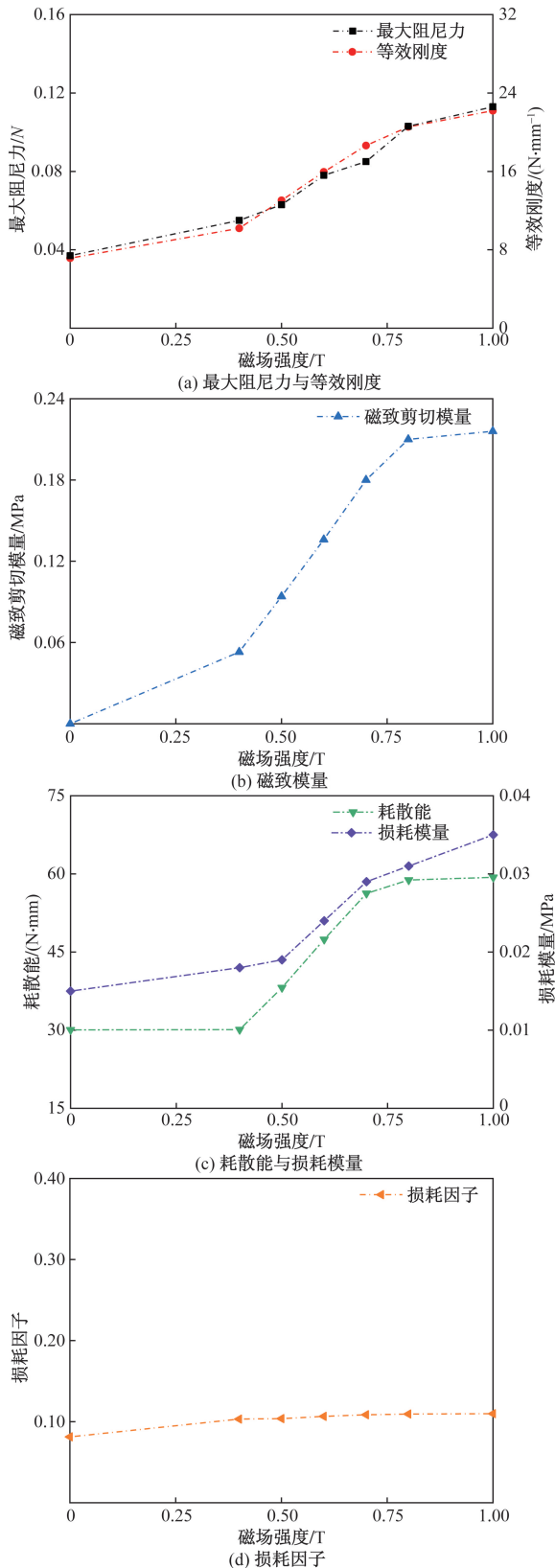


图6 不同磁场强度下的MRE表征参数计算结果

Fig. 6 Calculation results of MRE characterization parameters under different magnetic field strengths

图6(c)、图6(d)表征材料耗能能力,可以看出,耗能模量从0 T的0.015 MPa增加到1 T的

0.035 MPa,提高了133.33%;耗散能从0 T的30.07 N·mm增加到1 T的59.35 N·mm,提高了97.37%;损耗因子从0 T的0.0813增加到1 T的0.1098,提高了37.50%。由此可见,随着磁场强度增加,MRE耗能能力显著增强。这是因为随着磁场增强,颗粒之间相互作用增加,在剪切过程中颗粒与硅橡胶基体之间摩擦增大,MRE损耗能量增加,致使MRE耗能能力增强。

2 MRE力学模型搭建与参数拟合

2.1 解析模型

为更好地描述MRE动态剪切力学性能,基于实验测试结果建立MRE剪切模式下宏观力学模型,将参数化动力模型拟合的结果与实验结果进行对比,验证所建立模型的有效性。由图5可知,MRE滞回曲线呈现较光滑的椭圆形,具有明显的非线性滞回特性,符合Bouc-Wen模型滞回曲线非线性光滑的特点。基于Bouc-Wen模型对MRE进行力学性能描述。图7为Bouc-Wen模型示意图,Bouc-Wen模型由一个刚度元件、一个阻尼元件及滞回单元构成。该模型的计算公式为

$$F = \alpha kx + c\dot{x} + (1 - \alpha)kz \quad (6)$$

$$\dot{z} = A\dot{x} - \beta|\dot{x}||z|^{n-1}z - \gamma\dot{x}|z|^n \quad (7)$$

$$\begin{cases} B = \gamma\dot{x}|z|^n \\ C = \beta|\dot{x}||z|^{n-1}z \\ D = A\dot{x} \\ H = \alpha kx \\ I = c\dot{x} \\ G = (1 - \alpha)kz \end{cases} \quad (8)$$

式中: F 为模型输出力; x, \dot{x} 分别为位移和速度; k, c 分别为刚度和阻尼系数;参数 z 为中间变量; \dot{z} 为 z 关于时间的一阶导数; α 为描述滞回曲线非线性; A, n, β, γ 为量纲统一参数,共同决定滞回曲线的形状和大小,其中,参数 A 影响阻尼力输出, β 和 γ 分别为控制滞回曲线高度和宽度的调节参数, n 控制曲线的光滑程度,同一种材料参数 n 取值差别不大,为简化模型计算,取 $n = 2$ 。

2.2 模型搭建与参数拟合

基于Bouc-Wen模型计算公式,借助Matlab-Simulink搭建MRE宏观力学模型如图8所示,并在此基础上确定各项参数初始值及取值范围,根据MRE实测滞回曲线数据对MRE参数拟合。

主要分析磁场强度对于MRE力学性能的影响,因此测试过程中激励幅值与频率保持不变,激励幅值为0.1%,加载频率为1 Hz,磁场强度分别取0、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、1.0 T。不同磁场条件下

MRE 参数识别结果如表 6 所示。

图 9 为参数识别结果。图 9(a)为参数 A 与参数 α 的识别结果,参数 A 影响系统阻尼力的输出,可以看出,在 $0 \sim 0.5$ T 范围内,随着磁场强度增加,参数 A 逐渐提高,在 $0.5 \sim 1.0$ T 范围内随着磁场强度增加逐渐减低,这表明在 0.5 T 磁场强度时,磁场强度对 MRE 阻尼力增长贡献较大,继续增加外界磁场,阻尼力增长速度减缓。参数 α 为滞变力占总阻

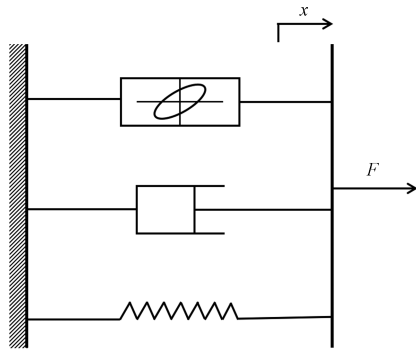
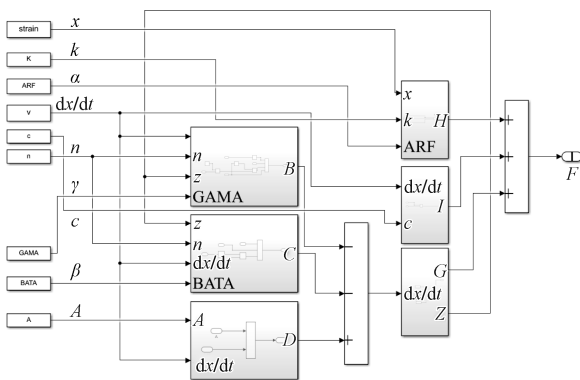


图 7 不同磁场强度下的 MRE 动态力学性能测试结果
Fig. 7 Dynamic mechanical performance test results of MRE under different magnetic field strengths



x 为位移; k 为刚度系数; α 为滞回曲线非线性系数;
 A, n, β, γ 为滞回曲线形状系数,共同决定滞回曲线的形状和大小; F 为模型输出力; A, B, C, D, H, I, G, Z 为中间参数。

图 8 Bouc-Wen 模型结构框图

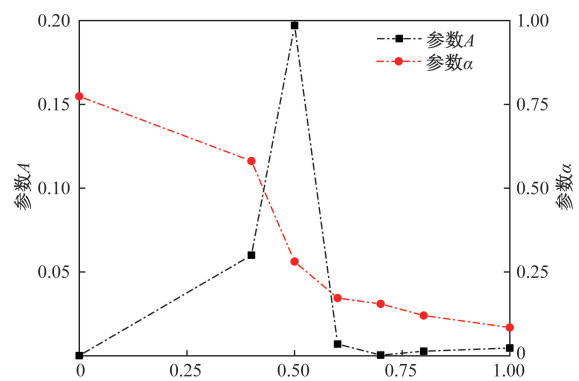
Fig. 8 Block diagram of the Bouc-Wen model structure

表 6 参数识别结果

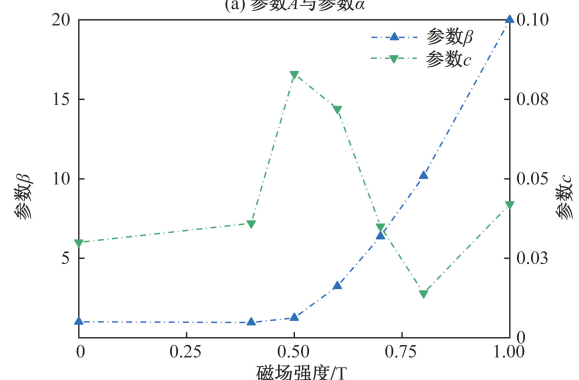
Table 6 Parameter identification results

磁场/T	A	α	β	n	c	γ	k
0	0.000 1	0.774 0	1.003	2	0.030	1.003	0.023
0.4	0.060 0	0.581 0	0.962	2	0.036	12.538	0.046
0.5	0.197 0	0.281 0	1.250	2	0.083	10.013	0.110
0.6	0.007 0	0.172 0	3.246	2	0.072	9.193	0.225
0.7	0.000 4	0.155 0	6.378	2	0.035	8.693	0.300
0.8	0.002 7	0.120 0	10.178	2	0.014	7.355	0.420
1.0	0.004 6	0.084 3	19.991	2	0.042	1.726	0.650

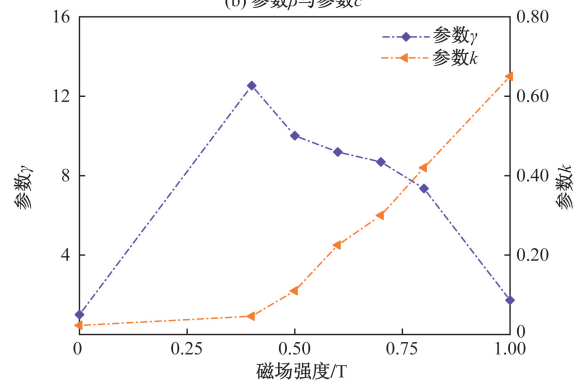
尼力的占比调节因子,可以看出,随着磁场强度增加,参数 α 逐渐降低,滞变力占比逐渐减弱,MRE 对外界磁场强度感应敏感度增强;图 9(b)为参数 β 与参数 c 的识别结果,参数 β 为滞回环高度调节因子,可以看出,随着磁场强度增加,参数 β 逐渐增加,磁场强度为 0.75 T 时增长速度最快;参数 c 为 MRE 阻尼系数,参数 c 与参数 A 随磁场变化规律相同,随着磁场的增强先升高后降低,在 0.5 T 磁场强度时最大;图 9(c)为参数 γ 的识别结果,参数 γ 为滞回环宽度调节因子,可以看出,随着磁场强度增加,参数 γ 逐渐增加,滞回环宽度在 $0 \sim 0.4$ T 范围内逐渐增加,在 $0.5 \sim 1.0$ T 范围内逐渐降低。



(a) 参数 A 与参数 α



(b) 参数 β 与参数 c



(c) 参数 γ 与参数 k

图 9 不同磁场强度下的 MRE 参数识别结果

Fig. 9 Results of MRE parameter identification at different magnetic field strengths

图9(c)为刚度参数 k 的识别结果,建立参数 k 与磁场强度 x 关系,如图10所示。可以看出,随着磁场强度的增加,MRE 刚度逐渐增强,在 0.5 ~ 0.6 T范围内,刚度参数增加速度最快,参数 k 与磁场强度关系可表示为

$$k = 0.015 - 0.200x + 0.852x^2 \quad (9)$$

式(9)中: k 为刚度参数; x 为磁场强度。

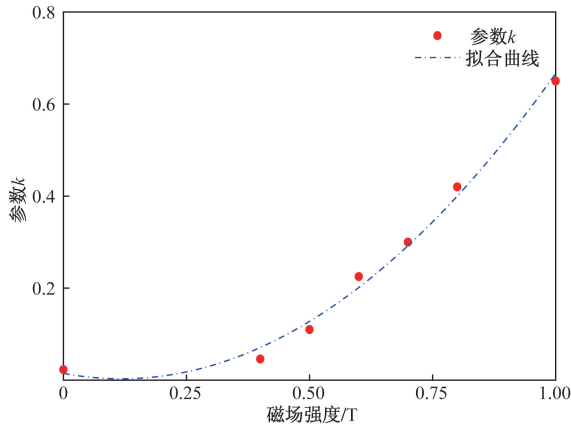


图10 磁场强度与刚度参数 k 拟合结果

Fig. 10 Results of fitting the magnetic field strength to the k

2.3 拟合误差分析

为更好地比较实验和拟合之间的关系,表7给出了实验和拟合所得最大阻尼力、等效刚度、耗散能及其之间的误差。可以看出,在同一工况下,实验和拟合所得各个参数之间的最大误差率均在 4.5%之内,Bouc-Wen 模型能够很好地模拟磁流变弹性体的动态力学性能。

从表7可以看出,随着磁场强度的增大,拟合所得最大阻尼力也逐渐增大,从 0 T时的 0.037 78 N 提高到 1 T时的 0.114 08 N,提高了 202%,相比较实验所得 204%的增速误差仅为 0.9%;拟合所得等效刚度从 0 T时的 7.461 6 N/mm 提高到 1 T时的 22.450 1 N/mm,提高了%,相比较实验所得 204%的增速误差仅为 0.9%;在磁场强度为 0.5 T时,等效刚度的增速最快,随后其增速呈下降趋势,最后呈现饱和状态,此变化趋势同实验所得数据相同;拟合所得耗散能随磁场强度的增大而增大,从 0 T时的 30.661 3 N·mm 增加到 1 T时的 60.579 3 N·mm,增速为 97.5%,误差为 0.3。

模型对应最大阻尼力、等效刚度、耗散能之间最大误差率为 3.81%、4.42%、3.88%,平均误差率为 1.24%、1.80%、1.70%,表明模型对应磁场强度变化时,实验数据拟合效果较好,采用 Bouc-Wen 模型可以准确描述 MRE 滞回特性。

表7 参数拟合误差计算

Table 7 Calculation of parameter fitting error

幅值/ %	频率/ Hz	参数	最大阻尼力/N			
			磁场/T	实测	拟合	误差/%
0.1	1	最大阻尼力/N	0	0.037 22	0.037 78	1.50
			0.4	0.054 54	0.054 32	0.40
			0.5	0.063 21	0.065 62	3.81
			0.6	0.078 20	0.078 47	0.35
			0.7	0.084 71	0.083 17	1.85
			0.8	0.103 21	0.103 39	0.17
			1.0	0.113 41	0.114 08	0.59
			0	7.145 3	7.461 6	4.42
			0.4	10.191 4	10.241 4	0.49
			0.5	13.045 1	13.526 7	3.69
	0.6	15.944 1	16.136 9	1.20		
	0.7	18.633 8	18.732 9	0.53		
	0.8	20.539 2	20.772 8	1.14		
	1.0	22.192 8	22.450 1	1.16		
	0	30.071 8	30.661 3	1.96		
	0.4	30.111 9	30.246 4	0.47		
	0.5	38.166 5	39.647 8	3.88		
	0.6	47.434 5	48.232 3	1.68		
0.7	56.262 0	56.602 4	0.60			
0.8	58.831 6	59.572 1	1.26			

3 结论

针对 MRE 滞回特性研究成果较少,不利于工程实际控制的问题。通过对 MRE 进行磁场作用下的动态剪切力学性能测试、特征参数计算以及 Bouc-Wen 模型仿真,有效表征了 MRE 的磁致力学性能,并通过误差分析检验了仿真结果的准确性。采用 Bouc-Wen 模型对 MRE 滞回特性进行描述,分析力学参数随磁场的变化规律,丰富了关于 MRE 滞回特性方面的研究成果。根据实验与仿真分析结果得到以下结论。

(1)MRE 力学特征参数均与磁场强度呈正相关,随着磁场强度的增大,MRE 储能与耗能性能逐渐增强,在 0.5 ~ 0.7 T 范围内参数增长速度最快,在 0.7 ~ 1.0 T 范围内趋于饱和;当磁场强度增加至 1 T,耗散能、损耗模量、损耗因子、最大阻尼力、等效刚度及储能模量分别提升了 97.34%、133.33%、35.06%、205.41%、210.61%、183.05%。在工程应用中可以根据实际使用的需要确定 MRE 组分配比。

(2)采用 Bouc-Wen 模型有效表征了 MRE 磁致特性与滞回特性。基于 Bouc-Wen 模型参数拟合最大误差为 4.42%,根据模型仿真结果,建立磁场强度与等效刚度的函数关系。为后续以 MRE 作为变刚度元件的动力装置的设计加工与算法控制提供参数与指导。

参 考 文 献

- [1] 李若冰, 马山刚, 金福宝, 等. 预结构装置对磁流变弹性体力学性能影响研究[J/OL]. (2023-09-13)[2024-04-11]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230290>.
Li Ruobing, Ma Shangang, Jin Fubao, et al. Study on the effect of pre-structured devices on the magnetic properties of magnetorheological elastic bodies[J/OL]. (2023-09-13)[2024-04-11]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230290>.
- [2] 王青云, 王芑, 袁姝, 等. 基于磁流变材料的汽车悬架半主动控制[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(1): 133-138.
Wang Qingyun, Wang Peng, Yuan Shu, et al. Semi-active control of automobile suspension based on magnetorheological materials[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(1): 133-138.
- [3] 范伟, 孟江, 杜永飞, 等. 混合式磁流变弹性体隔振器多目标优化设计[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(30): 12866-12871.
Fan Wei, Meng Jiang, Du Yongfei, et al. Multi-objective optimization design of hybrid magnetorheological elastomer vibration isolator[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(30): 12866-12871.
- [4] 尹帅虎, 马山刚, 金福宝, 等. 基于磁流变弹性体的定日镜动力吸振器设计与仿真研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(24): 276-281, 330.
Yin Shuaihu, Ma Shangang, Jin Fubao, et al. Design and simulation of a magnetorheological elastomer-based power absorber for heliostats[J]. Vibration and Shock, 2023, 42(24): 276-281, 330.
- [5] 柳彬, 游世辉, 赵树勋, 等. 基于 Digimat 中 RVE 模型的磁流变弹性体的磁致压缩力学性能的数值模拟[J]. 功能材料, 2018, 49(2): 2086-2092.
Liu Bin, You Shihui, Zhao Shuxun, et al. Numerical simulation of magnetocompressive mechanical properties of magnetorheological elastomers based on the RVE model in Digimat[J]. Functional Materials, 2018, 49(2): 2086-2092.
- [6] Han Y, Hong W, Faidley L A E. Field-stiffening effect of magnetorheological elastomers[J]. International Journal of Solids & Structures, 2013, 50(14/15): 2281-2288.
- [7] 索思, 徐赵东, 许飞鸿. 磁流变弹性体基于卡方分布的磁偶极子模型[J]. 功能材料, 2016, 47(9): 9063-9067.
So Si, Xu Zhaodong, Xu Feihong. Magnetic dipole modeling of magnetorheological elastomers based on the cartesian distribution[J]. Functional Materials, 2016, 47(9): 9063-9067.
- [8] Biller A M, Stolbov O V, Raikher Y L. Modeling of particle interactions in magnetorheological elastomers[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(11): 114904.
- [9] 居本祥. 面向隔振缓结构的磁流变弹性体的研制及其性能表征[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
Ju Benxiang. Development and characterization of magnetorheological elastomers for vibration isolation and retardation structures[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [10] Nguyen X B, Komatsuzaki T, Truong H T. Novel semiactive suspension using a magnetorheological elastomer (MRE)-based absorber and adaptive neural network controller for systems with input constraints[J]. Mechanical Sciences, 2020, 11(2): 465-479.
- [11] Nam T H, Iva P, Bohdana M. Experimental characterization and viscoelastic modeling of isotropic and anisotropic magnetorheological elastomers[J]. Polymer Testing, 2019, 81(5): 106272.
- [12] 汪伯潮, 李颜, 逢浩明, 等. 各向同性磁流变弹性体磁相关非线性动力学行为的本构模型[J]. 中国科学技术大学学报, 2024, 54(1): 58-70.
Wang Bochao, Li Yan, Pang Haoming, et al. An intrinsic model for the magnetically correlated nonlinear dynamic mechanical behavior of isotropic magnetorheological elastomers[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2024, 54(1): 58-70.
- [13] 钱文博. 磁流变弹性体流变特性研究及回滞特性建模[D]. 厦门: 华侨大学, 2022.
Qian Wenbo. Rheological properties of magnetorheological elastomers and modeling of hysteresis[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2022.
- [14] 王鹏, 杨绍普, 刘永强, 等. 一种磁流变弹性体模型参数识别新方法及其应用研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(11): 189-198, 224.
Wang Peng, Yang Shaopu, Liu Yongqiang, et al. A new method of magnetorheological elastomer model parameter identification and its application[J]. Vibration and Shock, 2022, 41(11): 189-198, 224.
- [15] 马乾瑛, 李帅, 高晓敏, 等. 复合橡胶基磁流变弹性体的动力学特性研究与模型验证[J]. 复合材料科学与工程, 2023(9): 5-12, 20.
Ma Qianying, Li Shuai, Gao Xiaomin, et al. Dynamic mechanical characterization and model validation of composite rubber-based magnetorheological elastomers[J]. Composites Science and Engineering, 2023(9): 5-12, 20.