

# 新型磁流变隔震支座的力学动态性能研究

周亚东, 葛爱迪, 闫敏杰, 张彦, 张奥钦

(天津城建大学天津市建筑结构防护与加固重点实验室, 天津 300384)

**摘要:** 永磁体可对磁流变隔震支座提供一个初始磁场, 设计一种利用永磁体和电磁线圈形成混合磁场功能的新型隔震支座, 线圈产生的磁场调节永磁体的磁场以改变磁流变弹性体层的刚度, 实现隔震支座的可变刚度性能。利用 ANSYS Electronics 软件对隔震支座进行仿真分析, 模拟出不同电流强度下试验装置内部的磁感应强度、绘制其磁通量密度云图并计算其饱和点。制备羰基铁粉体积分分数为 23% 的磁流变弹性体, 研究隔震支座试验过程中励磁电流强度、剪切幅值及激振频率对其剪切性能的影响。结果表明: 隔震支座的刚度随控制线圈电流增强而实时降低, 实现磁流变弹性体隔震支座的变刚度特性; 刚度软化条件下励磁电流强度、剪切幅值及激振频率对磁流变弹性体隔震支座等效刚度及等效阻尼具有显著影响。

**关键词:** 永磁体; 隔震支座; 磁流变弹性体; 刚度软化

中图分类号: TB381

文献标识码: A

## Study on mechanical dynamic performance of new magnetorheological isolation bearing

ZHOU Yadong, GE Aidi, YAN Minjie, ZHANG Yan, ZHANG Aoqin

(Tianjin Key Laboratory of Building Structure Protection and Reinforcement, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** The permanent magnet can provide an initial magnetic field for the magnetorheological isolation bearing. A new type of isolation bearing is designed by using the permanent magnet and the electromagnetic coil to form a mixed magnetic field function. The magnetic field generated by the coil adjusts the magnetic field of the permanent magnet to change the stiffness of the magnetorheological elastomer layer, and realizes the variable stiffness performance of the isolation bearing. Using ANSYS Electronics software to simulate and analyze the isolation bearing, simulate the magnetic induction intensity inside the test device under different current intensities, draw its magnetic flux density cloud map and calculate its saturation point. The magnetorheological elastomer with 23% carbonyl iron powder was prepared. The effects of excitation current intensity, shear amplitude and excitation frequency on the shear performance of the isolation bearing were studied. The results show that the stiffness of the isolation bearing decreases in real time with the increase of the control coil current, and the variable stiffness characteristics of the magnetorheological elastomer isolation bearing are realized. Under the condition of stiffness softening, the excitation current intensity, shear amplitude and excitation frequency have significant influence on the equivalent stiffness and equivalent damping of magnetorheological elastomer isolation bearing.

**Key words:** permanent magnet; isolation bearing; magnetorheological elastomer; stiffness softening

收稿日期: 2022-11-19; 修回日期: 2023-04-21

基金项目: 天津市自然科学基金项目(18JJCZDJC10010, 18JCYBJC22600)

作者简介: 周亚东(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事智能材料与智能结构方面的研究。E-mail: zyd476300@126.com

通讯作者: 张彦(1980—), 女, 硕士, 主要从事地震工程等方面的研究。E-mail: zy\_801010@tcu.edu.cn

## 0 引言

随着材料制备工艺的成熟和建筑减隔震需求的增加,新型智能材料发展迅速,磁流变弹性体作为一种可以通过磁场实时改变剪切模量和阻尼特性<sup>[1-2]</sup>的新一代磁流变材料,近年来受到研究学者的广泛关注。磁流变弹性体兼顾磁流变材料在磁场作用下连续、迅速和可逆等流变特性<sup>[3-4]</sup>的同时,还克服了磁流变液团聚和沉降稳定性差的缺点<sup>[5]</sup>,因其优异的材料形态和材料特性,磁流变弹性体在变刚度变阻尼的基础隔震器设计或吸震系统设计中具有广阔的应用前景。

在磁流变弹性体研究方面,BELLAN 等<sup>[6]</sup>使用有限元分析方法计算了磁流变弹性体的力学特性,研究了磁流变弹性体在静态和动态模式下的力学性能,得出了不同磁场强度和不同体积比下磁流变弹性体的剪切应变与剪切应力、剪切应变和储能模量之间的关系。邹岸新等<sup>[7]</sup>通过掺杂碳纳米管对天然橡胶基磁流变弹性体进行补强,提高天然橡胶基磁流变弹性体的力学强度和磁致特性,并对制备的磁流变弹性体样品进行了静、动态力学特性测试,测试结果显示,少量的碳纳米管能够提升磁流变弹性体的磁致特性,同时提高其拉伸强度。LI 等<sup>[8]</sup>、梁雅君等<sup>[9]</sup>设计了一种混合铁磁系统,该装置线圈产生的电磁场调节系统整体磁场以改变磁流变弹性体的等效刚度,实现磁流变弹性体等效刚度软化性能。试验结果表明,随电流从-0.45 A 增加到 0.9 A,磁流变弹性体样品的等效刚度都随电流的增加而减小,且其等效刚度值在 0.9 A 时降至最低,有效地实现了其刚度软化的特性。在磁流变弹性体应用方面,目前国内外学者利用磁流变弹性体具有的响应速度快、刚度和阻尼可控等特性<sup>[10-11]</sup>在新型自适应基础隔震器开发方面做了一系列的研究工作。耿海东<sup>[12]</sup>根据常见的磁流变弹性体材料的本构模型,建立了一个磁流变弹性体隔震体系。结果表明,磁流变弹性体隔震体系的等效刚度在 0~24 V 的电压下最高提升了 65%。LI 等<sup>[13]</sup>借鉴商业叠层橡胶支座的设计,将具有出色垂直承载能力的多层结构应用到磁流变弹性体隔震支座中,开发了一个 47 层磁流变弹性体自适应基础隔震器。KIM 等<sup>[14]</sup>设计了一种可调谐减振器,使用永磁线圈和电磁线圈共同产生磁场,通过施加正负电流,整体磁场可以向永磁体产生的现有磁场方向增强或减弱。当设备需要一定的刚度来维持结构的可用性和稳定性时,这种设计尤其有价值。YANG 等<sup>[15]</sup>、SUN 等<sup>[16]</sup>设计的混合磁体磁流变弹性体自适应隔震器实现了刚度软化特性,在正常使用寿命中保持无电稳定,在地震事件中实现了有效的基础隔震。

当前研究成果更多关注磁流变弹性体的特性,将磁流变弹性体应用于减隔震体系,依靠电磁线圈为设备提供磁场,对线圈连续供电时会产生大量热能,并产生显著的能量消耗问题<sup>[17-19]</sup>。在基础隔震器或桥梁支座的应用中,需要更高的横向刚度来抵抗小扰动,设备线圈应连续供电。针对这些问题,本文利用体积分数为 23% 的羰基铁粉制备磁流变弹性体,设计了一种可变刚度的智能隔震支座,通过 ANSYS Electronics 有限元软件对试验装置的磁路进行了模拟分析,验证隔震支座设计的合理性,试验中通过提高线圈产生的磁场强度降低磁流变弹性体层的刚度,实现隔震支座的变刚度性能。试验装置中永磁体为磁流变弹性体提供初始磁场,使得磁流变弹性体处于刚度较大的状态,减小线圈需提供的磁场和线圈体积,克服传统隔震器线圈需持续通电以及发热的弊端,提高试验装置使用的可靠性,增强其应用于实际基础隔震工程的可行性。分别研究了电流强度、剪切幅值及激振频率对磁流变弹性体剪切性能的影响,以为后续基础隔震器设计研究提供了依据。

## 1 支座的结构参数和磁路仿真

### 1.1 结构参数

新型隔震支座的主体采用 LI 等<sup>[20]</sup>的设计,器件构型参照传统橡胶支座设计为叠层结构,由多层磁流变弹性体薄板粘合在多层薄钢片上组成层压结构,试验装置的结构示意图如图 1 所示。内部钢片提供垂直承载力和刚度,并防止橡胶横向膨胀。磁流变弹性体板材具有良好的剪切变形能力,在外加磁场作用下,能够在磁流变弹性体层之间产生良好的磁场水平。在器件内部,九层磁流变弹性体薄板和九层薄钢片交替层压并粘接在厚度为 5 mm、直径为 100 mm 的永磁体两侧,并且保证钢片附在永磁体的 2 个极面,所有钢片和磁流变弹性体层都是 1 mm 厚。层压磁流变弹性体结构和线圈之间的空间充足,可以保证隔震支座具有 26 mm 的最大变形,相当于 27.7% 的最大允许剪切应变。顶板和轭架之间的气隙厚度为 5 mm,允许水平移动。磁流变弹性体核心与顶部板和底部板相接处分别放置 2 个高 37 mm 的圆柱形钢块。隔震支座内部环绕布设 10 个单个线圈匝数为 3 500 匝的线圈,堆叠并联到外加电源上。磁流变弹性体隔震支座结构参数如表 1 所示。

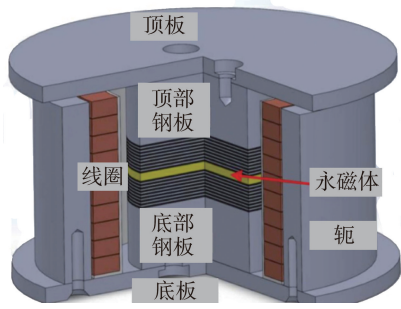


图1 新型隔震支座结构示意图

Fig.1 New isolation bearing structure diagram

表1 磁流变弹性体隔震支座的结构参数

Table 1 Structural parameters of magnetorheological elastomer isolation bearing

部件名称	材料	数量	轴向高度/mm	直径/mm
钢芯	10F 钢	2	37	100
顶盖	10F 钢	2	10	250
钢扼	10F 钢	1	110	180(内) 220(外)
钢片	10F 钢	18	1	100
磁流变弹性体片	磁流变弹性体	18	1	100
永磁体	N40NdFeB	1	5	100

1.2 磁路设计与仿真分析

为了简化计算,验证试验装置结构与磁路设计的合理性,利用有限元仿真软件进行磁场大小计算及分布分析,建立了磁流变弹性体隔震支座的二维轴对称有限元模型,该模型由叠层主体、铁芯、线圈和气隙形成完整的闭合磁通路。通过 ANSYS Electronics 有限元分析软件中的 Maxwell 3D 模块对不同电流作用下磁流变弹性体隔震支座的静态磁场分布进行分析,得出磁通密度分布云图,便于查看分析,磁场仿真分析在试验前进行,对试验方案设定具有指导意义。ANSYS Electronics有限元分析软件假设所有材料的渗透率均为各向同性,解决了磁矢势的方位分量问题。铁芯选用饱和磁感应强度高、机械加工和焊接性能好的 10F 钢。假设 N40 钕铁硼磁体在第二象限具有线性  $B-H$  曲线,剩磁  $B = 1.25\text{ T}$ ,在不考虑边缘效应的情况下矫顽力  $H_c = 9.5 \times 10^5\text{ A/m}$ ,网格划分结果如图 2 所示。

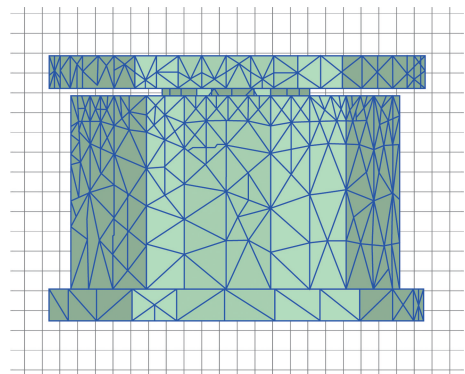
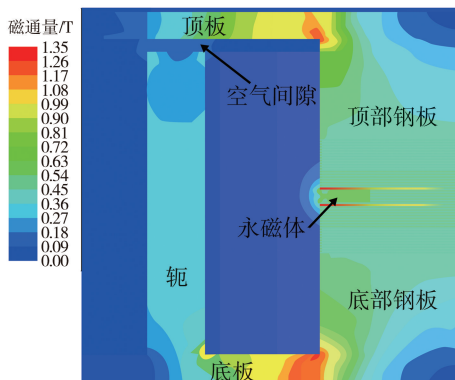


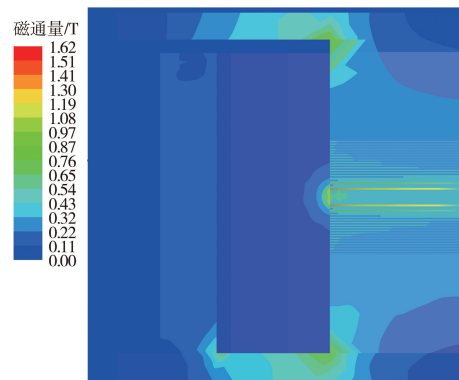
图2 隔震支座模型的网格划分

Fig.2 Grid division of isolation bearing model

为隔震支座分别施加  $I$  为 0、0.571、1.143、1.357 A 的电流,磁通密度云图如图 3 所示。由图可知,在第一层和第二层钢片中分别观察到 1.04 T 和 0.70 T 的沿钢层径向泄露的边缘磁通,厚度为 1 mm 的磁通路径较窄,因此,少量的边缘磁通会产生较高的径向磁通密度分量,这有助于在钢层中产生较高的总磁通密度值。在每个磁共振辐射片内,磁通量密度几乎都是纵向的,整个层的振幅接近均匀。然而,在钢片中,高磁导率允许磁通通过低磁阻径向路径到达钢片边缘,尤其是对于第一和第二钢片,允许磁通通过短泄漏磁通路径到达永磁体的另一侧。外加电流为零时磁场分布如图 3(a)所示,磁力线分布均匀且穿过磁流变弹性体的磁力线超过了 95%,故装置漏磁可忽略不计,此时由永磁体提供全部磁场源,磁流变弹性体的磁感应强度达到 0.8 T;当外加电流为  $I = 1.357\text{ A}$  时磁场分布如图 3(d)所示,磁流变弹性体样品周围磁感应强度减弱至 0.03 T 左右,此时,磁流变弹性体隔震支座的抗剪等效刚度最小。说明试验装置磁路设计能够实时有效调节磁感应强度大小,符合设计要求,验证了该试验装置结构与磁路设计的合理性。



(a)  $I = 0\text{ A}$  时的磁通量密度云图



(b)  $I = 0.571\text{ A}$  时的磁通量密度云图

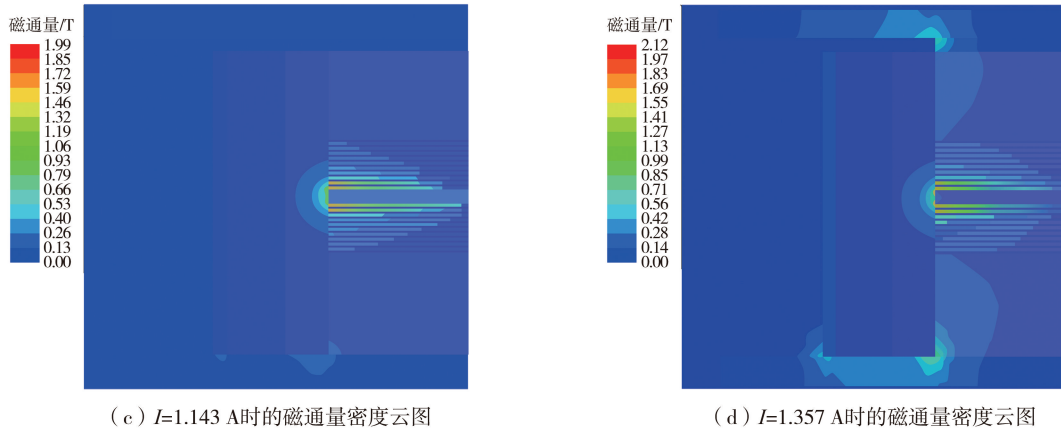


图 3 不同电流作用下的磁通密度云图

Fig. 3 Magnetic flux density cloud under different current

## 2 材料制备及试验方案

### 2.1 磁流变弹性体材料制备

新型磁流变弹性体隔震支座中,磁流变弹性体和钢片组成的叠层结构组件是核心结构部件。磁流变弹性体制备以道康宁 DC184 硅橡胶/SYLGARD 和硅油为基体,硅橡胶与硅油的体积分数比例为 1:1,添加平均直径约为 5  $\mu\text{m}$  的羰基铁粉。具体制备过程如下:室温下称取相应质量的硫化型硅橡胶、硅油和体积分数为 23% 的羰基铁粉依次放入烧杯充分搅拌混合,随后在超声波清洗机中清洗 15 min 去除混合物中的气泡,随后将混合物转移到直径 100 mm,厚 1 mm 的模具中,并使用真空泵在干燥器中脱气,以去除残留的气泡。最后在加热板上加热 4 h 固化成形。制成的磁流变弹性体样品如图 4 所示。



图 4 磁流变弹性体样品

Fig. 4 Sample of magnetorheological elastomer

### 2.2 试验方案

为研究磁流变弹性体隔震支座在正弦荷载激励下阻尼力-位移和阻尼力-速度的滞回曲线,分析磁流变支座的阻尼滞回特性,探究磁流变支座的动态性能随电流强度、剪切幅值及激振频率的变化规律。设计试验装置能够允许的最大剪切幅值为 4 mm,频率在 0.1~3 Hz 之间逐渐增加,外加电流在 0~1.357 A 之间变化,采样频率为 200 Hz。为了减少振动台启动初期,机器运行不稳定对试验数据造成的不利影响,所以每种工况循环加载 8 个循环。具体工况如表 2 所示,试验装置布置如图 5 所示。

表 2 动态性能试验工况

Table 2 Dynamic performance test condition	
试验指标	试验工况
剪切位移/mm	2, 3, 4
波动输入	正弦激励
振动频率/Hz	0.1, 1, 2, 3
MRE 层电流 I/A	0, 0.571, 1.143, 1.357
试验结果记录	力-位移曲线

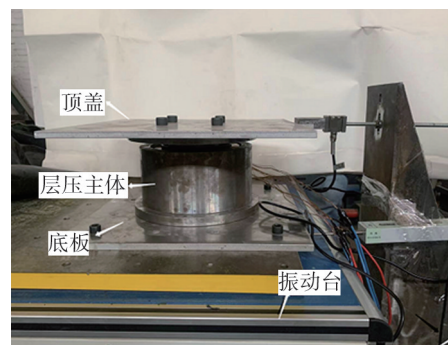


图 5 试验装置布置图

Fig. 5 Layout diagram of test device

### 3 试验结果分析

#### 3.1 等效刚度和等效阻尼

在反向消磁条件下研究电流强度、剪切幅值和激振频率对支座等效刚度和等效阻尼的影响。等效刚度和等效阻尼是评价隔振耗能效果的重要参数。

磁流变弹性体等效刚度<sup>[9,11]</sup>可表示为

$$K_{\text{eff}} = \frac{F_{\text{dmax}} - F_{\text{dmin}}}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}} \quad (1)$$

式中： $K_{\text{eff}}$ 为磁流变弹性体隔震支座的等效刚度； $F_{\text{dmax}}$ 为循环数据最大正位移( $X_{\text{max}}$ )处的正力； $F_{\text{dmin}}$ 为循环数据最小负位移( $X_{\text{min}}$ )处的负力。

使用等效黏性阻尼系数,检验磁流变弹性体隔震器的能量耗散性能。磁流变弹性体隔震器的等效黏性阻尼系数<sup>[9]</sup>表示为

$$C_{\text{eq}} = \frac{\text{EDC}}{2\pi^2 f X_{\text{max}}^2} \quad (2)$$

式中：EDC为每个循环消耗的能量或磁滞回曲线围成的面积； $f$ 为加载频率； $X_{\text{max}}$ 为外部激励的最大位移。

#### 3.2 剪切应力与励磁电流的关系

试验通过改变线圈电流强度及方向,线圈产生与永磁体反向的磁场,改变装置整体磁场强度大小,以实现反向消磁特性。试验分别设置不同电流强度大小来验证其对磁流变弹性体剪切性能的影响。试验条件为剪切幅值 $\Delta$ 为2、3、4 mm,激振频率 $f$ 为0.1、1、2、3 Hz,羰基铁粉体积分数为23%,外加电流强度 $I$ 为0、0.571、1.143、1.357 A。

在施加外加电流时,当单个线圈中的电流强度达到1.357 A时,由线圈和永磁体共同调控的混合磁场完全抵消,实现反向消磁,此时输出的阻尼力最小为 $F_{\text{min}}$ ,并且电流保持在1.357 A水平时,力-位移关系近似为椭圆,力-速度关系近似为线性。随着电流强度的减小,如图6(a)所示的应变加强现象逐渐明显,分析应变加强的原因是普通橡胶聚合物链在试验中的可扩展性有限。当电流水平施加于磁流变弹性体时,除橡胶基体的电阻外,铁磁颗粒之间会产生吸附力,使得链结构的可扩展性更小,这解释了在磁场抵消为零情况下应变加强最小,但在非零磁场情况下应变加强明显的情况。等效刚度随电流强度的变化情况如图7所示,对于给定频率和幅值时,分别施加不同强度的电流,等效刚度随外加电流的增大呈非线性下降趋势,当加载频率增加时,等效刚度稍有增加,增量较小。当加载频率为 $f=2$  Hz,电流强度 $I=0$  A时,磁流变弹性体隔震支座的等效刚度值达到最大。当施加电流从0.0 A增加到1.357 A时,等效刚度相对减小91.1%~164.3%。等效阻尼系数随加载频率的增加而减小,随外加电流的增加而稍有减少,当施加电流在0 A到1.357 A变化时,等效阻尼的相对变化幅度在73.8%~248.2%之间,如图8所示。

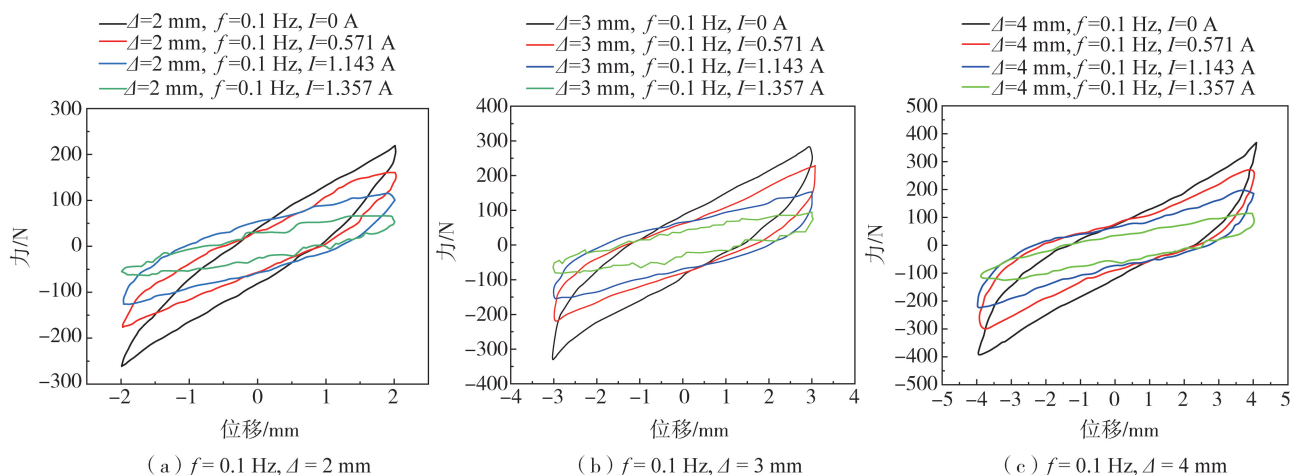


图6 磁流变弹性体隔震支座随电流变化的力-位移滞回曲线

Fig. 6 Force-displacement hysteretic curves of magnetorheological elastomer isolation bearing varying with current

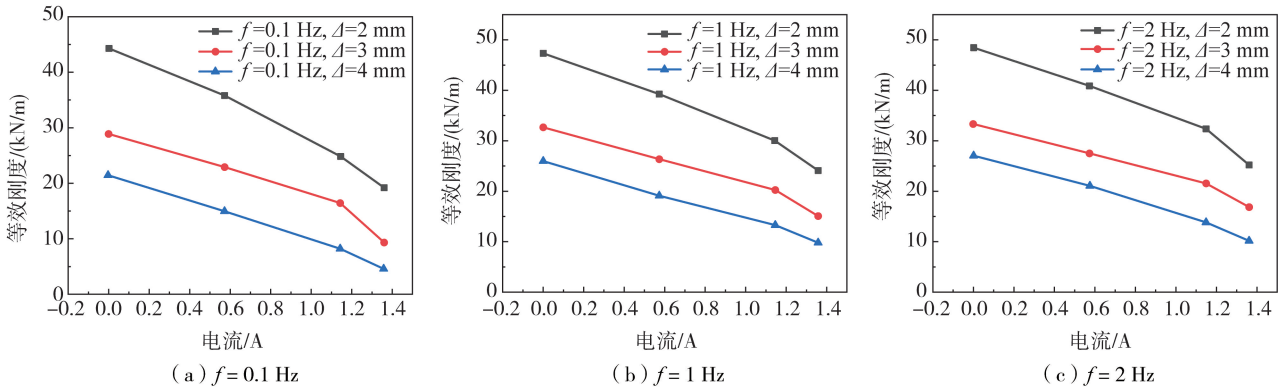


图 7 磁流变弹性体隔震支座等效刚度随电流的变化

Fig. 7 Variation of equivalent stiffness of magnetorheological elastomer isolation bearing with current

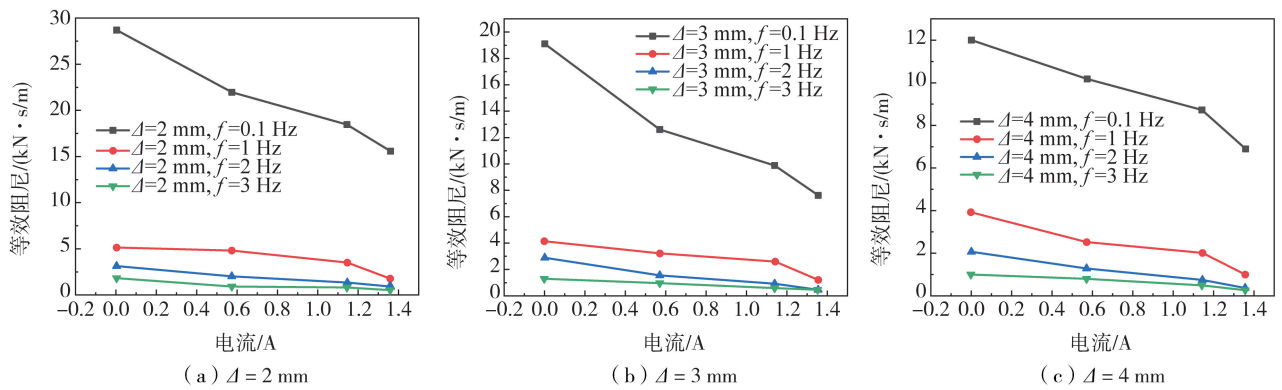


图 8 磁流变弹性体隔震支座等效阻尼随电流的变化

Fig. 8 Variation of equivalent damping of magnetorheological elastomer isolation bearing with current

### 3.3 剪切应力与剪切幅值的关系

幅值的大小即为磁流变弹性体隔震支座的剪切位移。为磁流变弹性体隔震支座施加不同剪切幅值,研究其在剪切幅值影响下的动态性能变化规律,由图 9 可知,在其他加载条件不变时,磁流变弹性体隔震支座输出的阻尼力随着剪切幅值的增大而增大。

在固定的加载频率下,比较不同剪切位移的等效刚度值,小的剪切位移产生较大的等效刚度。这是由于磁流变弹性体材料表现出应变软化行为。如图 10 所示,施加激励频率为  $f=2$  Hz,电流  $I=1.143$  A,剪切幅值从 2 mm 增加到 4 mm 时,磁流变弹性体隔震支座的等效刚度由 32.51 kN/m 减小为 13.88 kN/m,减小幅度为最大 57.31%。图 11 在控制其他因素不变的条件下,验证剪切幅值对磁流变弹性体隔震支座等效阻尼的影响。对于施加激励条件为恒定频率  $f=0.1$  Hz 时,外加电流为  $I=0$  A 时,剪切位移从 2 mm 增加到 4 mm 时,磁流变弹性体隔震支座的等效阻尼系数由 28.79  $kN \cdot s/m$  减小为 12.01  $kN \cdot s/m$ ,为等效阻尼最大变化幅度。当剪切幅值变化时,等效阻尼的变化幅度在 34.2%~139.71%之间。

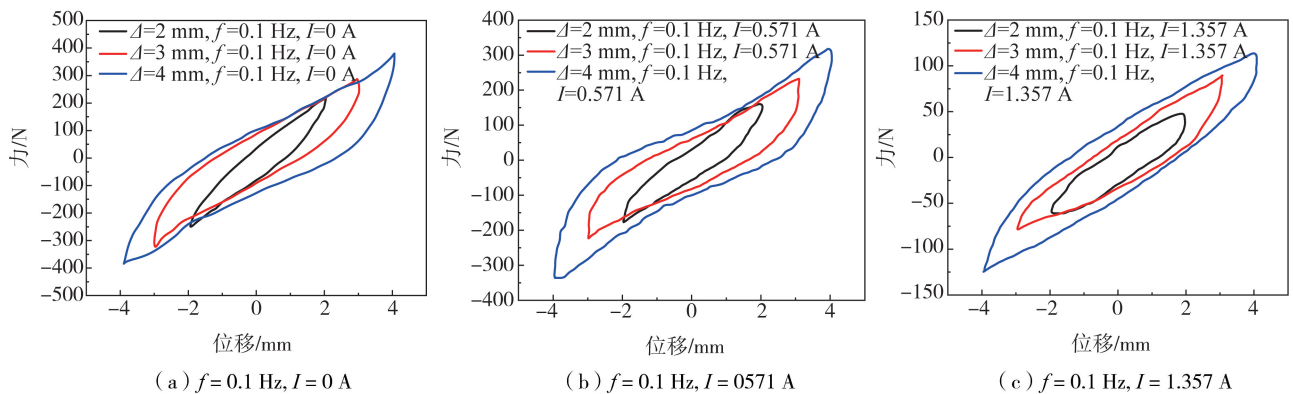


图 9 磁流变弹性体隔震支座随剪切幅值变化的力-位移滞回曲线

Fig. 9 Force-displacement hysteretic curves of magnetorheological elastomer isolation bearing varying with shear amplitude

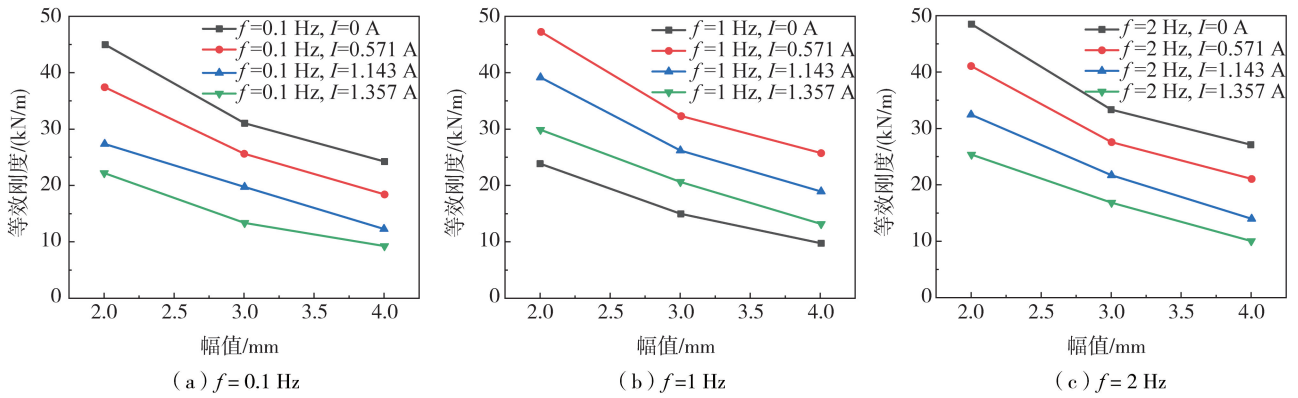


图 10 磁流变弹性体隔震支座等效刚度随剪切幅值的变化

Fig. 10 Variation of equivalent stiffness of magnetorheological elastomer isolation bearing with shear amplitude

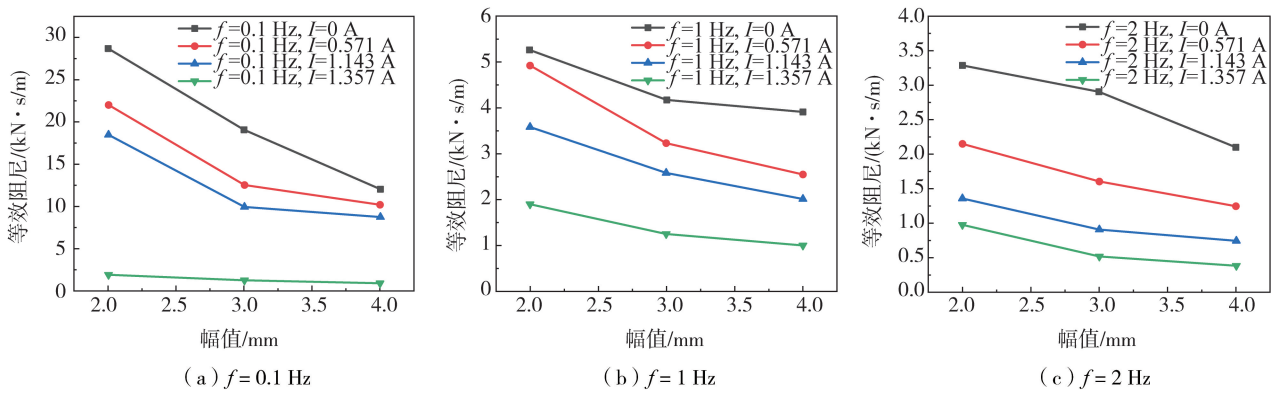


图 11 磁流变弹性体隔震支座等效阻尼随剪切幅值的变化

Fig. 11 Variation of equivalent damping of magnetorheological elastomer isolation bearing with shear amplitude

### 3.4 剪切应力与激振频率的关系

振动台可以产生不同频率的正弦波, 试验选取激振幅值  $\Delta$  分别为 2、3、4 mm, 羰基铁粉体积分数为 23%, 励磁电流  $I$  分别为 0、0.571、1.357 A, 激振频率  $f$  分别为 0.1、1、2、3 Hz, 进行激振频率对磁流变弹性体隔震支座力学性能影响的试验分析, 试验结果如图 12 所示。当加载频率较低时, 例如在 0.1 Hz 试验工况下会出现应变硬化, 随着加载频率的增加, 在低磁场情况下的应变硬化效应逐渐消失, 应变硬化效应的出现是因为普通橡胶中复杂的聚合物链的有限延展性对于场依赖型磁流变弹性体产生作用。

磁流变弹性体隔震支座等效刚度和等效阻尼随频率的变化如图 13 和图 14 所示。由图可知, 在施加不同的激振频率时, 基础隔震器的等效刚度随着加载频率的增加而稍有增加。由试验数据可知, 随着激振频率的增加, 磁流变弹性体隔震支座的等效阻尼值逐渐减小, 在施加频率为 0.1 Hz 时磁流变弹性体隔震支座的等效阻尼值远大于较高频率下的等效阻尼值, 且较高频率时等效阻尼值变化幅度相对较小。

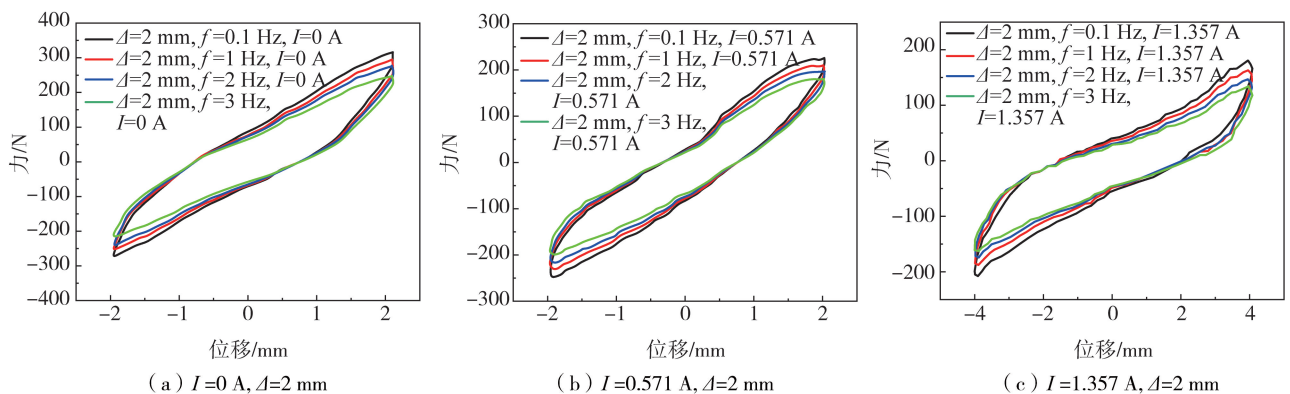


图 12 磁流变弹性体隔震支座随频率变化的力-位移滞回曲线

Fig. 12 Force-displacement hysteric curves of magnetorheological elastomer isolation bearing varying with frequency

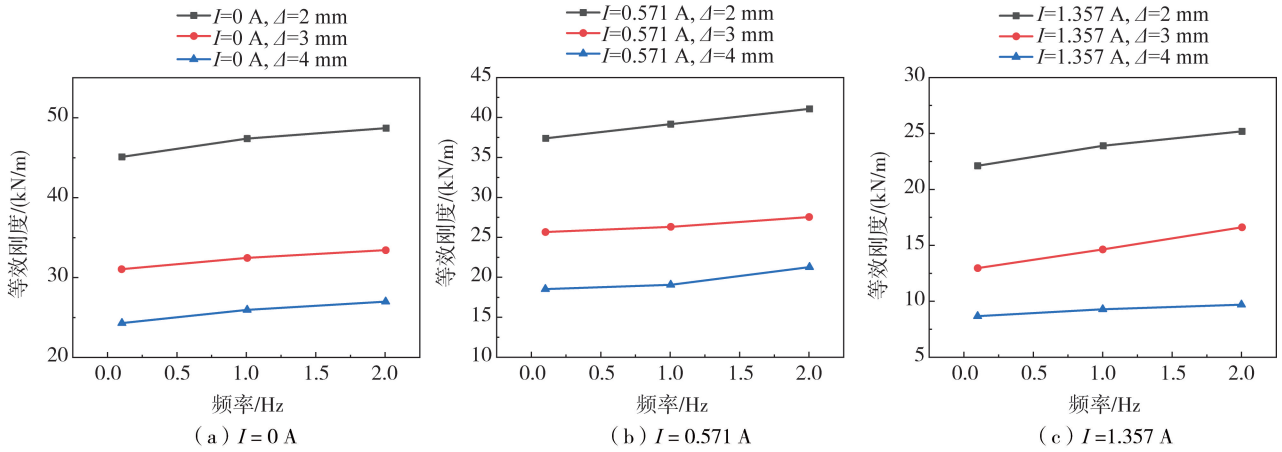


图 13 磁流变弹性体隔震支座等效刚度随频率的变化

Fig. 13 Variation of equivalent stiffness of magnetorheological elastomer isolation bearing with frequency

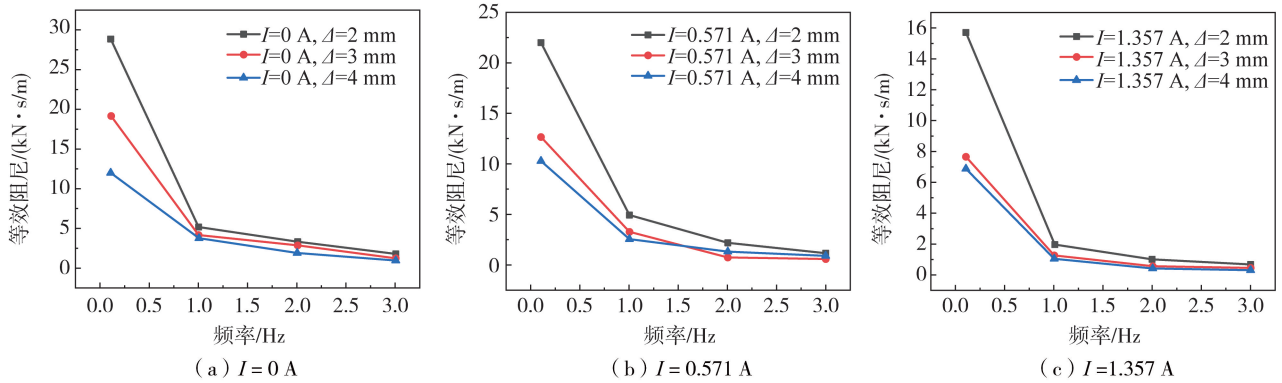


图 14 磁流变弹性体隔震支座等效阻尼随频率的变化

Fig. 14 Variation of equivalent damping of magnetorheological elastomer isolation bearing with frequency

### 4 结论

本文基于对自主设计的新型磁流变隔震支座的仿真分析,采用制备的磁流变弹性体对其进行力学动态性能试验,探讨了激励电流强度、剪切幅值和激振频率对新型磁流变隔震支座剪切性能的影响,主要结论如下:

1) 通过改变磁流变弹性体隔震装置的外加电流,可以改变磁流变弹性体隔震支座的整体出力情况。反向消磁条件下,在外加电流增加时,磁流变弹性体隔震支座的出力明显降低,滞回环曲线的面积也急剧减小;剪切幅值增加时,力-位移滞回环曲线表现出力的增加;在施加不同的激振频率时,磁流变弹性体隔震支座的出力变化影响较小,因此激振频率对磁流变弹性体隔震支座的影响不大。在电流影响下,磁流变弹性体隔震支座具有更大的可调范围。

2) 在固定的加载频率下,比较施加不同电流时的等效刚度值,外加电流的增加,磁流变弹性体隔震支座的等效刚度值减小,在单个线圈施加电流为 1.357 A 时,等效刚度值降到最小。等效刚度值随剪切幅值的变化趋势是非线性的,较小的剪切幅值能够产生较大的等效刚度,即等效刚度值随剪切幅值增大而减小。等效刚度随着电流和幅值的增加而减小,随着加载频率的增加而稍有增加。线圈电流强度从 0 A 增加到 1.357 A 的过程中,磁流变弹性体的刚度降低 164.3%,阻尼变化率达 122.3%,可有效地实现磁流变弹性体刚度软化特性。

3) 在不同的加载条件下,磁流变弹性体隔震支座的等效阻尼随频率变化的幅度较大,在其他激励条件不变的情况下,频率从 0.1 Hz 逐渐增加到 3 Hz 时,磁流变弹性体隔震支座的等效阻尼值急剧下降,影响最为明显。等效阻尼值随电流和剪切幅值的增加都有所减少。当频率为 0.1 Hz,剪切幅值为 2 mm, I = 0 A 时,磁流变弹性体隔震支座的等效阻尼值达到最大值。等效阻尼可有效地表征新型磁流变弹性体隔震支座的阻尼特性。

## 参考文献:

- [1] LI H P, CHEN F, LIU C H, et al. Error analysis and optimization of shear yield stress model for magnetorheological fluid[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, 44(9): 7779-7787.
- [2] Kelly J M. The current state of base isolation in the United States[C]//*Proceedings of the Second World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan. 1999, 1: 1043-1052.
- [3] 涂建维, 余杨, 黄龙. 新型可调刚度黏弹性阻尼器的设计制作、性能试验和力学模型[J]. *地震工程与工程振动*, 2014, 34(1): 230-236. TU Jianwei, YU Yang, HUANG Long. Design, performance testing and macroscopic model of a new-type viscoelastic damper with adjustable stiffness[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2014, 34(1): 230-236. (in Chinese)
- [4] 王宇飞, 何琳, 杨雪, 等. 磁流变弹性体的研究现状及工程应用[J]. *材料科学与工程学报*, 2010, 28(4): 633-636, 632. WANG Yufei, HE Lin, YANG Xue, et al. Progress in magnetorheological elastomers and applications in engineering[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2010, 28(4): 633-636, 632. (in Chinese)
- [5] 浮洁, 居本祥, 余淼, 等. 磁流变弹性体的厚度对其力学性能的影响[J]. *功能材料*, 2013, 44(9): 1277-1280, 1284. FU Jie, JU Benxiang, YU Miao, et al. Influence of thickness of the sample on the mechanical properties of magnetorheological elastomers[J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44(9): 1277-1280, 1284. (in Chinese)
- [6] BELLAN C, BOSSIS G. Field dependence of viscoelastic properties of MR elastomers[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2002, 16(17/18): 2447-2453.
- [7] 邹岸新, 徐禄文, 綦松, 等. 碳纳米管增强天然橡胶基磁流变弹性体的制备及性能研究[J]. *化工新型材料*, 2019, 47(10): 96-100. ZOU Anxin, XU Luwen, QI Song, et al. Preparation and property of MRE based on carbon nanotubes reinforced natural rubber[J]. *New Chemical Materials*, 2019, 47(10): 96-100. (in Chinese)
- [8] LI S, LIANG Y, LI Y, et al. Investigation of dynamic properties of isotropic and anisotropic magnetorheological elastomers with a hybrid magnet shear test rig[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(11): 114001.
- [9] 梁雅君, 周亚东, 李见春, 等. 磁流变弹性体刚度软化剪切性能试验研究[J]. *磁性材料及器件*, 2021, 52(1): 32-37. LIANG Yajun, ZHOU Yadong, LI Jianchun, et al. Experimental study on shear properties under stiffness softening of magnetorheological elastomer[J]. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2021, 52(1): 32-37. (in Chinese)
- [10] 贾娇娇. 基于改进遗传算法的摩擦滑移基础隔震系统优化设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018. JIA Jiaojiao. Optimization design of friction and slip base isolation system based on improved genetic algorithm[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018. (in Chinese)
- [11] MORGAN T A. The use of innovative base isolation systems to achieve complex seismic performance objectives[M]. Berkeley: University of California, 2007.
- [12] 耿海东. 基于磁流变弹性体的智能隔震设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2018. GENG Haidong. The design of smart isolation based on magnetorheological elastomer[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [13] LI Y C, LI J C, LI W H, et al. Development and characterization of a magnetorheological elastomer based adaptive seismic isolator[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(3): 035005.
- [14] KIM Y K, KOO J H, KIM K S, et al. Developing a real time controlled adaptive MRE-based tunable vibration absorber system for a linear cryogenic cooler[C]//2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Budapest, Hungary. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 287-290.
- [15] YANG J, SUN S S, DU H, et al. A novel magnetorheological elastomer isolator with negative changing stiffness for vibration reduction[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(10): 105023.
- [16] SUN S S, DENG H X, YANG J, et al. An adaptive tuned vibration absorber based on multilayered MR elastomers[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(4): 045045.
- [17] RIZZO R, MUSOLINO A, LAI H C. An electrodynamic/magnetorheological clutch powered by permanent magnets[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, 53(2): 1-7.
- [18] SATO Y, UMEBARA S. Power-saving magnetization for magnetorheological fluid control using a combination of permanent magnet and electromagnet[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(11): 3521-3524.
- [19] YU M, ZHAO L J, FU J, et al. Thermal effects on the laminated magnetorheological elastomer isolator[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(11): 115039.
- [20] LI Y C, LI J C, TIAN T F, et al. A highly adjustable magnetorheological elastomer base isolator for applications of real-time adaptive control[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(9): 095020.