

# MRE耗能阻尼器力学性能及半主动控制分析\*

杜永峰<sup>1,2</sup>, 屠旭松<sup>1</sup>, 韩博<sup>1</sup>

(1.兰州理工大学防震减灾研究所 兰州,730050)

(2.兰州理工大学土木工程减震隔震技术研发甘肃省国际科技合作基地 兰州,730050)

**摘要** 根据磁流变弹性体(magnetorheological elastomer,简称MRE)的可调力学特性提出了基于MRE的新型耗能阻尼器,并对制备完成的硅橡胶基磁流变弹性体及阻尼器分别进行力学性能试验。利用Matlab/Simulink对各层均装有MRE阻尼器的7层框架结构进行建模仿真分析,将被动控制与基于半主动控制策略的经典最优控制和序列最优控制进行比较。力学测试结果表明:MRE在0~500 mT磁感应强度下其剪切模量变化值达到132.43 kPa,磁流变效应约提高274%;增大加载幅值和加载速率,均能提高MRE阻尼器的力学性能;对阻尼器施加电流激励,在0~10 A增大过程中其等效刚度和阻尼可以实现连续可调。仿真结果表明:基于MRE阻尼器的半主动控制系统可以有效减小结构在地震作用下的响应,3种控制均能对结构动力响应起到良好的控制效果,其中序列最优控制算法的控制效果最为显著且精确度更高;系统在实际测试中需考虑多方面因素影响,尽可能减小误差。

**关键词** 阻尼器;振动控制;磁流变弹性体;变刚度变阻尼;半主动控制策略

**中图分类号** TU352.1+1;TU375.4;TH145.9

## 引言

磁流变弹性体作为一种新型智能材料,因其稳定性高、响应迅速及可控性强,被广泛运用到振动控制领域中<sup>[1]</sup>。MRE克服了磁流变液中磁性粒子易沉降、密封性能差和稳定性低等缺点<sup>[2]</sup>,被国内外学者作为核心耗能元件应用于减隔震装置中。

Behrooz等<sup>[3]</sup>设计出一款刚度、阻尼均可调的隔震支座,通过缩尺试验验证其良好的隔震效果。Li等<sup>[4]</sup>设计了含有永磁铁的MRE叠层隔震器,通过优化磁通路径大大提升了内部磁场可控性,实现装置良好的刚度可调性。涂建维等<sup>[5]</sup>设计了一种基于MRE的可调刚度黏弹性阻尼器并对其进行力学试验,当外加电流逐渐增大时,阻尼器力学性能有显著提高。Yarra等<sup>[6]</sup>设计出应用于公路桥梁的变刚度叠层磁流变弹性体-钢板支座,通过设立外加电流、应变幅值和加载频率等工况评估其力学性能。

随着磁流变装置的深入应用,各种半主动控制算法也被广泛研究。Lara等<sup>[7]</sup>对装有磁流变阻尼器的二层框架进行建模计算,结果表明,半主动控制能够显著降低结构的动力响应,且控制效果优于被动控制。黄学功等<sup>[8]</sup>搭建了基于MRE隔振器的变刚度半主动隔振系统,运用遗传算法对模糊控制器参数进行优化,优化后的减震控制效果提升10%

以上。

笔者基于磁流变弹性体的磁滞性能,设计了一种新型的MRE耗能阻尼器,对其性能进行研究分析,并借助控制算法得到其在建筑结构中的减震效果。

## 1 基于MRE阻尼器的设计

### 1.1 阻尼器构造说明

图1为MRE阻尼器示意图,其主要由导磁低碳钢构件、不锈钢钢板、通电线圈、高强螺杆和MRE组成。阻尼器左右部分的L型连接件利用MRE(II)左右相互连接,与导磁厚钢板通过高强螺杆相连,形成阻尼器的外围部分。将导磁薄钢板与不锈钢钢板焊接相连,并将相连后的组合板与导磁厚钢板通过焊接连接,在内部相邻导磁薄钢板间置入MRE(I)。阻尼器两侧焊接T型不锈钢连接件,便于安装到建筑结构当中。在每个L型连接件槽部各缠绕一个线圈,对4个线圈均通入电流,使阻尼器左右部分产生磁场,改变通入线圈的电流方向及大小来调节磁场特性。由于不锈钢的阻磁特性以及与L型连接件处MRE(II)对磁路的阻断,阻尼器左右部分会产生完整闭合且方向相反的2个磁路。在不同

\* 国家自然科学基金资助项目(51778276)

收稿日期:2022-01-26;修回日期:2022-04-13

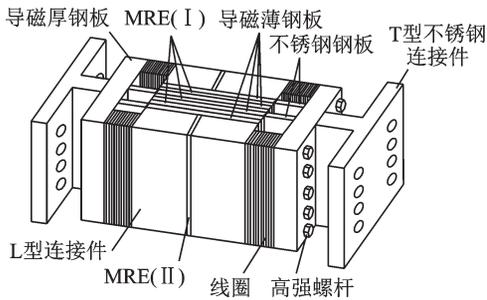


图1 MRE阻尼器示意图

Fig.1 Schematic diagram of MRE damper

大小电流激励下,夹在导磁薄钢板中的MRE(I)会在磁场作用下发挥不同程度的磁流变效应,从而使阻尼器具有可调力学性能。其中,阻尼器内部MRE(I)尺寸大小为 $140\text{ mm}\times 160\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ ,MRE(II)尺寸大小为 $47\text{ mm}\times 160\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 。

设计的MRE阻尼器属于性能可调装置,结合被动控制和主动控制的优点,适用于半主动减震控制系统。阻尼器构造简单,便于在建筑结构中拆卸安装且内部线圈方便更换;所需能量少,在能源中断的情况下仍可以依靠MRE自身的黏弹性力学性能进行有效耗能,具有良好的可靠性和鲁棒性。值得注意的是,阻尼器需要通电线圈提供磁场,而通电线圈的持续发热会影响阻尼器的力学性能,故在后续研究中需要考虑温度变化对阻尼器性能的影响并进行优化。

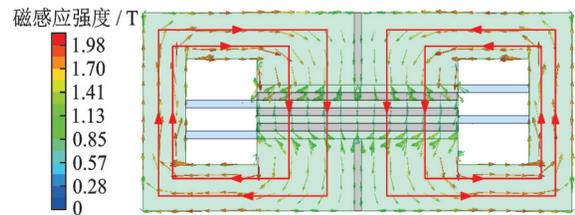
## 1.2 电磁仿真及磁路分析

采用电磁仿真软件ANSYS Maxwell对阻尼器主体进行三维电磁场分析。MRE阻尼器电磁仿真分析如图2所示。阻尼器中线圈匝数为1300,线圈通入电流依次为0.5,1,1.5和2 A,直至阻尼器出现磁饱和。当匝数为2600时,阻尼器主体已经出现磁饱和,磁路分布如图2(a)所示,阻尼器的左右部分各出现一个闭合磁路,且磁力线能够均匀穿过MRE(I),达到预期设计效果。MRE磁感应强度分布如图2(b)所示,核心区域MRE(I)处的磁感应强度值最大约为0.68 T,满足MRE实现性能可调的工作环境要求。

## 2 MRE的制备及力学性能测试

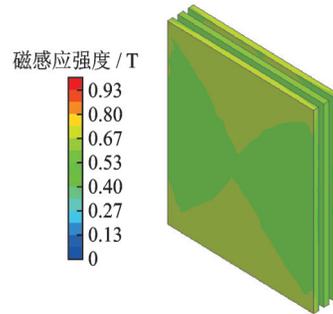
### 2.1 MRE的制备

MRE主要由橡胶基体、磁性粒子和辅助添加剂3种成分组成,所组成的混合物经外加磁场作用固化得到各向异性MRE,其内部磁性颗粒在磁场作用下形成有序结构,拥有更好的力学性能。笔者制备MRE选用的基体材料为704硅橡胶,磁性颗粒为羰



(a) 阻尼器磁路分布

(a) Distribution of damper magnetic circuit



(b) MRE磁感应强度分布

(b) MRE magnetic induction intensity distribution

图2 MRE阻尼器电磁仿真分析

Fig.2 Electromagnetic simulation analysis of MRE Damper

基铁粉(颗粒直径为 $5\sim 8\text{ }\mu\text{m}$ ),添加剂选用二甲基硅油,按照质量分数比为15%:70%:15%搅拌均匀,放在2块强力钕磁铁中固化制得。用特斯拉计测得相邻2块钕磁铁产生的最大磁感应强度约为700 mT,材料中的铁磁性颗粒受磁场影响呈现链状分布,进而增强MRE抵抗变形的能力,发现在此条件下的磁流变效应最强<sup>[9]</sup>。在常温下固化48 h后从模具中取出,即可制得MRE,所制成的MRE厚度为5 mm,长为140 mm,宽为90 mm。

### 2.2 MRE的静态剪切性能测试

本次性能测试在型号为WDW-100的微机控制电子万能试验机上进行,该系统主要由加载夹具、力传感器、位移传感器、数据采集与控制系统等设备组成。取尺寸大小为 $30\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的MRE固定在2块长条形铝板之间作为试验样品,共设置15组测试样品。MRE剪切性能测试装置如图3所示。

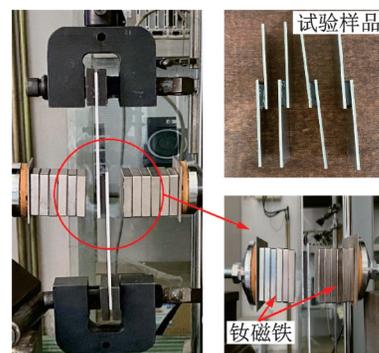


图3 MRE剪切性能测试装置

Fig.3 Shear performance test of MRE

在试样左右两端放置强力钕磁铁产生附加磁场,并改变钕磁铁之间的距离,使磁感应强度在0~500 mT范围内变化,磁感应强度值由特斯拉计测得。MRE剪切性能试验工况如表1所示。加载过程中设置5种工况,每种工况对3组样品进行测试并取平均值。

表 1 MRE剪切性能试验工况

**Tab.1 Shear performance test conditions of MRE**

工况	加载速率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	加载幅值/ mm	磁铁间距/ mm	磁感应 强度/mT
1	3	1.5	19	500
2	3	1.5	24	450
3	3	1.5	41	300
4	3	1.5	69	150
5	3	1.5	—	0

图4为MRE样品性能测试结果。由图4(a)可知,剪切应变为30%时,无磁场加载的剪应力为15.24 kPa;在450 mT磁感应强度下,剪应力为50.48 kPa,剪应力共增大35.24 kPa,变化率达到231%。MRE在剪应变为25%时<sup>[10]</sup>,由图4(b)可知,磁感应强度为500 mT,MRE的剪切模量达到最大,较零磁场时增大132.43 kPa,磁流变效应达到约274%。对MRE性能测试结果分析可知,所制备的MRE磁致效应明显,可以作为可调力学性能元件应用到半主动控制阻尼器中。

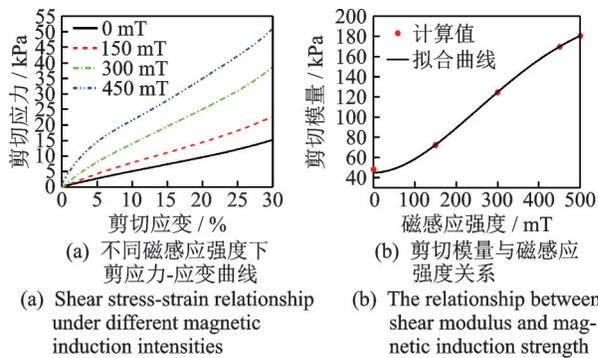


图 4 MRE样品性能测试结果

Fig.4 The test results of MRE sample

### 3 阻尼器性能试验

#### 3.1 试验阻尼器及加载方案

采用50 t电液伺服作动器对加工成型后的阻尼器进行力学性能试验,MRE阻尼器加载试验如图5所示。试验加载模式为位移控制,循环加载3次,在室温为20℃的环境中进行,并考虑加载幅值、加载速率和电流激励对阻尼器力学性能的影响。MRE阻尼器试验工况如表2所示。采用直流电源(10 A\

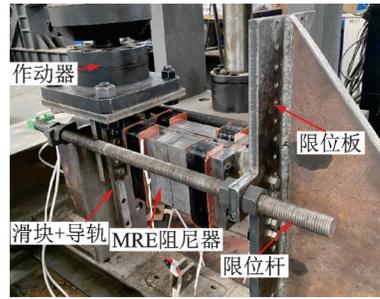


图 5 MRE阻尼器加载试验

Fig.5 Test loading of MRE damper

表 2 MRE阻尼器试验工况

**Tab.2 MRE damper test conditions**

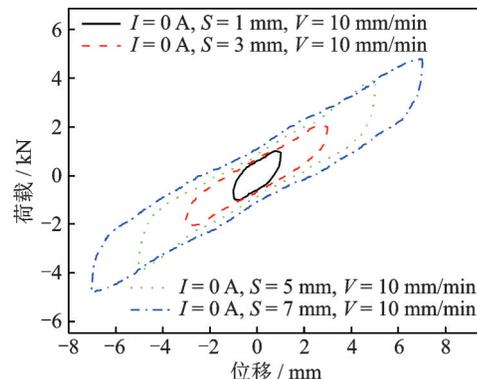
工况	外加 电流/A	加载速率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	加载幅 值/mm	温度/ ℃	加载循 环次数
1	0	10	1,3,5,7	20	3
2	0	10,30,50,70	3	20	3
3	0,2.5,5, 7.5,10	30	3	20	3

150 V)对阻尼器施加电流激励模拟半主动控制。考虑阻尼器某些部位会出现漏磁现象,调节外加电流分别为0,2.5,5,7.5和10 A,则单个线圈最大输入电流为2.5 A。

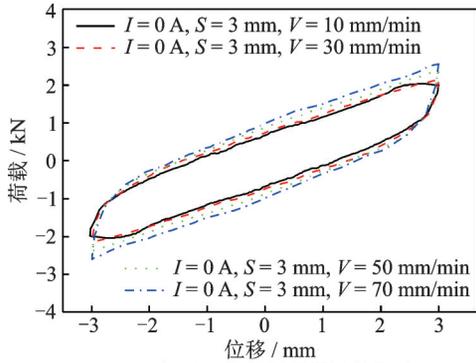
#### 3.2 试验结果及分析

通过设定的工况对阻尼器进行剪切试验,阻尼器内的MRE除了表面出现细微裂缝外,其残余变形不明显。图6为MRE阻尼器动态测试结果。从图6(a)可以看出,工况1下阻尼器表现出稳定的力学特性以及良好的耗能能力。随着加载幅值的增大,阻尼器的最大荷载从0.94 kN增加至4.79 kN。如图6(b)所示,工况2下随加载速率增加,阻尼器的耗能能力不断增大,且最大荷载从1.98 kN增加至2.59 kN。

工况3下电流激励对MRE阻尼器性能影响如图7所示。可见,MRE阻尼器的耗能能力随着电流的增大而提高,在电流从0~10 A的变化过程中,最大荷载由2.13 kN增大至4.90 kN。



(a) The effect of loading amplitude on the performance of dampers



(b) 加载速率对阻尼器性能影响  
(b) The effect of loading rate on the performance of dampers

图6 MRE阻尼器动态测试结果

Fig.6 Test results of dynamic testing of MRE damper

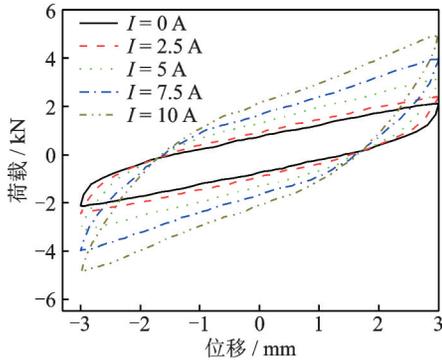


图7 电流激励对MRE阻尼器性能影响

Fig.7 Effect of current excitation on performance parameters of MRE damper

表3为工况3下MRE阻尼器性能参数。试验结果表明,加载速率和加载幅值均对阻尼器的力学性能影响较大,在一定范围内阻尼器耗能能力会随着两者的增大而提高,且外加电流激励大小也同样影响阻尼器的性能。

表3 工况3下MRE阻尼器性能参数

Tab.3 Performance parameters of MRE damper at the working condition 3

电流/ A	输出力/ kN	等效刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	变化率/ %	等效阻尼/ (kNs·mm <sup>-1</sup> )	变化率/ %
0	2.13	0.71	—	1.07	—
2.5	2.40	0.80	12.68	1.26	17.76
5	3.15	1.05	47.89	1.74	62.62
7.5	3.98	1.33	87.32	2.15	100.93
10	4.90	1.63	129.58	2.63	145.79

## 4 基于MRE阻尼器的半主动减震系统

### 4.1 地震作用下基于MRE减震系统的动力模型

图8为基于MRE阻尼器半主动结构示意图。

结构层间产生的相对位移及速度会使阻尼器内部弹性体发生剪切耗能。设结构的自由度数为 $n$ ,则该模型在地震作用下的运动方程为

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -ME\ddot{x}_g(t) + Du(t) \quad (1)$$

其中: $M, C, K$ 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $x(t)$ 为结构位移响应; $\ddot{x}_g(t)$ 为地震加速度; $u(t)$ 为外加控制力向量; $D$ 为控制力作用位置矩阵。

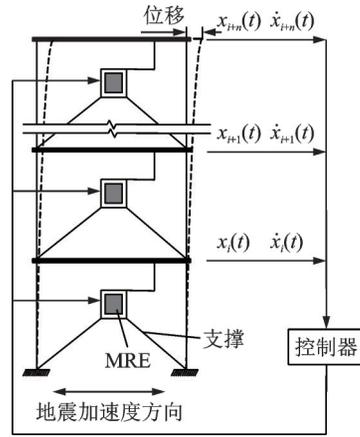


图8 基于MRE阻尼器半主动结构示意图

Fig.8 Schematic diagram of semi-active structure based on MRE damper

将式(1)转换为状态方程,令 $U(t) = (x(t), \dot{x}(t))^T$ ,则

$$\dot{U}(t) = AU(t) + Bu(t) + H\ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

其中: $A = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} \\ M^{-1}D \end{bmatrix}; H = \begin{bmatrix} 0_{n \times 1} \\ -\delta \end{bmatrix}; \delta = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$ 。

工况3下MRE阻尼器的等效刚度及阻尼的可控性能强,其力学模型的环境分为未加磁场和施加磁场2个部分,得到阻尼器模型的计算公式为

$$F = k_{MRE}x + c_{MRE}\dot{x} = (k_0 + \Delta k)x + (c_0 + \Delta c)\dot{x} \quad (3)$$

其中: $F$ 为阻尼器产生的阻尼力; $k_0, c_0$ 分别为阻尼器的初始刚度和初始阻尼; $\Delta k, \Delta c$ 为施加磁场后阻尼器的刚度及阻尼变化量。

### 4.2 控制算法

MRE阻尼器提供的阻尼力主要与结构层间速度和位移有关,且最优控制算法得到的控制力须在阻尼器荷载范围内。结合Hrovat界限最优控制算法<sup>[11]</sup>,得到半主动策略下的控制力表达式为

$$u_i(t) = \begin{cases} F_i(I_{\max}) & (u_i\dot{x}_i < 0; |u_i| > F_i(I_{\max})) \\ |u_i|\text{sgn}(\dot{x}_i) & (u_i\dot{x}_i < 0; F_i(I_{\min}) \leq |u_i| \leq F_i(I_{\max})) \\ F_i(I_{\min}) & (u_i\dot{x}_i \geq 0) \end{cases} \quad (4)$$

其中: $u_i(t)$ 为第*i*层的控制力; $F_i(I_{\max})$ 和 $F_i(I_{\min})$ 为第*i*层阻尼器的最大和最小阻尼力; $u_i$ 为通过控制算法求出第*i*层阻尼器的最优控制力; $\dot{x}_i$ 为阻尼器产生的相对速度;sgn为符号函数。

4.2.1 线性二次型经典最优控制

在该控制中,通过构造目标函数并选取最优控制力向量,使其数值为最小,即

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} [U^T(t)QU(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (5)$$

其中: $t_f$ 为地震持续时间; $Q$ 为权矩阵,表示控制效果权值; $R$ 为权矩阵,表示控制力权值。

通过极值条件得到使目标函数最小时的最优控制力为

$$u(t) = -GU(t) = -R^{-1}B^T PU(t) \quad (6)$$

其中: $G$ 为反馈增益矩阵,通过Riccati方程求解。

将 $u(t)$ 代入式(2),得到结构动力响应为

$$\dot{U}(t) = (A - BG)U(t) + H\ddot{x}_g(t) \quad (7)$$

4.2.2 序列最优控制

在序列最优控制算法<sup>[12]</sup>求解中,将目标函数分解到每个时间步长上。利用过去时刻激励和控制力对结构的累积响应,计算本时间步长上振动响应的初值,用该时刻的响应构造目标函数。通过构造Lagrange函数获得极值,并引用泛函极值条件和状态转移算法,得到结构在某一时刻 $t_A$ 的最优控制力

$$u(t_A) = \Delta I_{RU}(m)U(t_A) + (\Delta t)^2 E_{RU}(m)\ddot{x}_g(t_A) \quad (8)$$

其中: $I_{RU}(m) = I_Q(m)^{-1}R_Q(m)$ ;  $E_{RU}(m) = I_{RU}(m)E$ ;  $I_Q(m) = I - (\Delta t)^2 R_Q(m)B$ ;  $R_Q(m) = R^{-1}B^T Q_A(m)$ ;  $m$ 为当前时刻距结束时刻的时间步数; $I_{RU}(m)$ 为增益矩阵; $E_{RU}(m)$ 为开环前馈增益向量。

4.2.3 半主动控制系统建立

研究上述2种最优控制算法求出的最优控制力存在理想化,在实际情况中需结合半主动控制策略并通过调节电流,使阻尼器输出更为合理的控制力。笔者将最优控制算法与半主动控制策略结合,图9为实际工程应用中半主动控制系统反馈示意图。

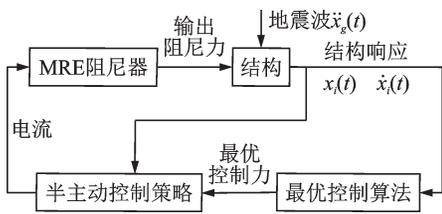


图9 半主动控制系统反馈示意图

Fig.9 Semi-active control system feedback diagram

4.3 仿真分析

笔者以某7层钢筋混凝土住宅楼作为分析对

象,研究基于MRE阻尼器半主动控制系统的减震效果。该建筑抗震设防烈度为8度,建筑基本参数如表4所示。假设各层都安装MRE阻尼器,将经典最优控制和序列最优控制与半主动控制策略相结合,对在El Centro波、Taft波和人工波作用下的结构动力响应进行仿真研究,并与无控制和被动控制下的结构响应进行对比。

表4 建筑基本参数

Tab.4 Building basic parameters

层数	质量/ $10^5$ kg	层间剪切刚度/ $(10^6 \text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
1	8.38	8.72
2	7.89	11.14
3	7.89	11.14
4	7.89	11.14
5	7.89	11.14
6	7.89	11.14
7	6.92	11.14

阻尼器的初始刚度设为 $3.62 \times 10^8$  N/m,初始阻尼设为 $8.9 \times 10^7$  Ns/m,根据两者与电流之间的变化趋势得到变化范围,在被动控制时假设阻尼器保持最大刚度和阻尼。结构阻尼按照Rayleigh阻尼计算,地震波采样时间为0.02 s,加速度峰值为 $4 \text{ m/s}^2$ 。3种地震波加速度时程曲线如图10所示。根据结构运动方程在Matlab中编写各控制算法及半主动控制策略程序,图11为Simulink仿真建模示意图,对比分析4种状态下结构的动力响应。

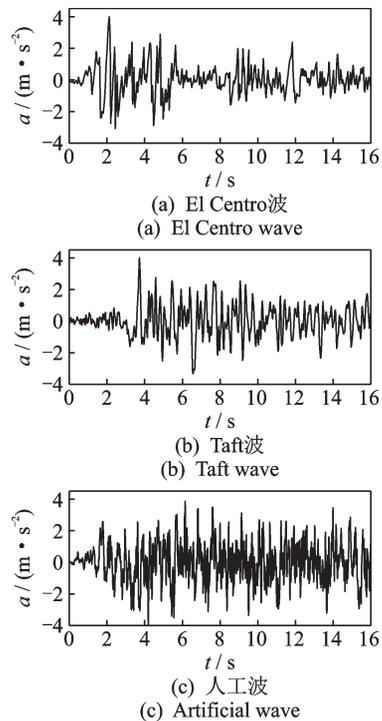


图10 地震波加速度时程曲线

Fig.10 Seismic wave acceleration time history curve

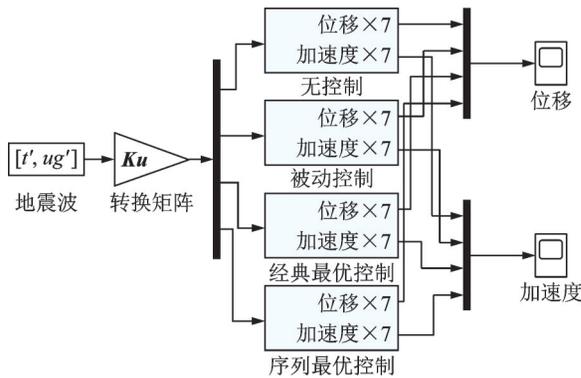
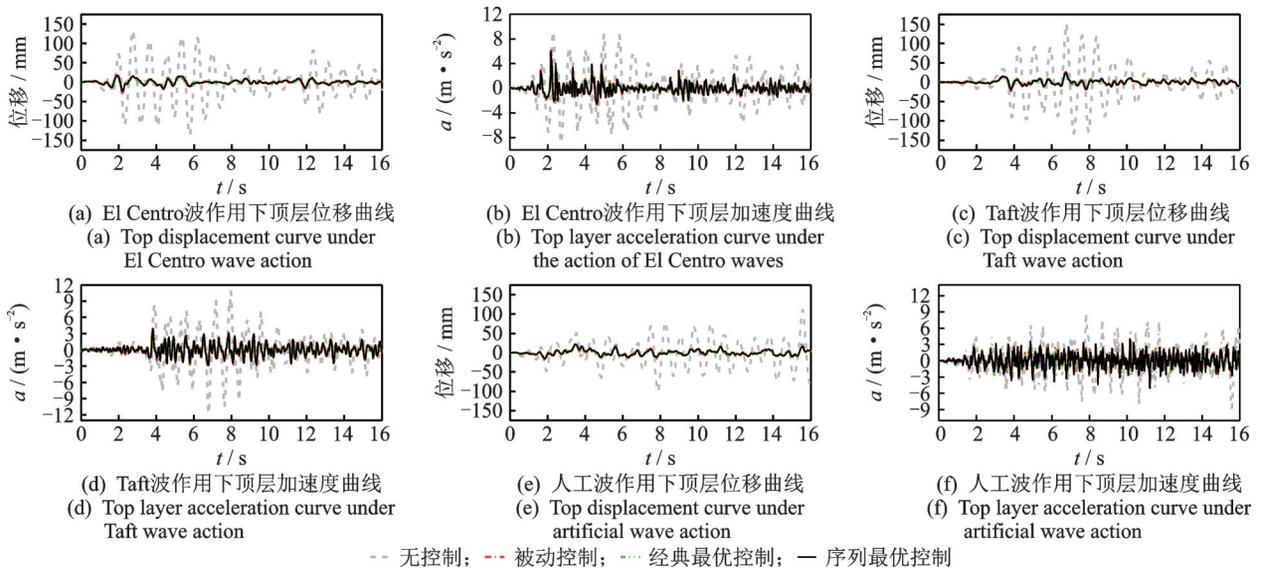


图11 Simulink仿真建模示意图

Fig.11 Simulink simulation modeling diagram

图12为地震波作用下结构顶层动力响应。

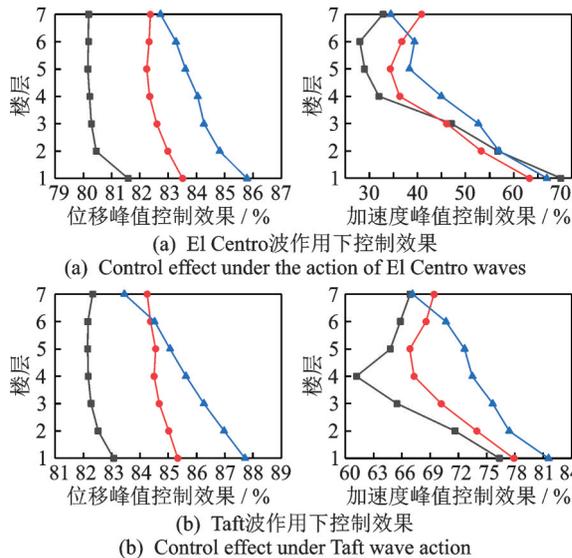


-- 无控制; ··· 被动控制; -·-· 经典最优控制; — 序列最优控制

图12 地震波作用下结构顶层动力响应

Fig.12 The dynamic response of the top layer of the structure under the action of seismic waves

仿真分析验证了基于MRE阻尼器半主动控制系统具有良好的减震性能,但在实际测试中会受到各种因素影响。一方面由于阻尼器经历多次测试,



(b) Taft波作用下控制效果

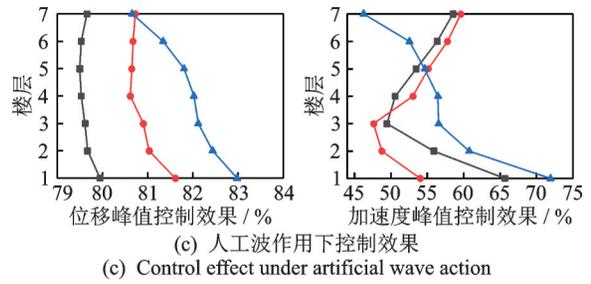


图13 地震波作用下控制效果对比

Fig.13 Comparison of control effects under the action of seismic waves

其内部MRE受到损伤,导致其耗能能力下降;另一方面阻尼器所需能量(即电流)提供不稳定,阻尼器线圈长时间通电引起发热量上升,从而影响阻尼器的耗能。这些因素均会导致阻尼器性能与仿真时所设定的要求不符而使控制效果出现误差,故在实际测试中需进行相应调整。

## 5 结 论

1) 所制得MRE磁流变效应显著,随着外加磁场增大,其剪切模量较初始状态增大了约274%,说明制备的MRE磁致性能良好,适用于半主动控制阻尼器。

2) 提出基于MRE的耗能阻尼器,通过电磁仿真模拟阻尼器内部磁场分布,得到MRE处的磁感应强度最大达到0.68 T,满足正常工作对环境要求。试验结果表明,随着加载幅值和速率的增加,阻尼器的耗能能力逐渐增大。在电流激励的作用下,阻尼器具有变刚度变阻尼的特性,可通过改变外加电流对MRE阻尼器的力学性能进行调节。

3) 对7层钢筋混凝土框架进行建模仿真分析,对比无控制、被动控制、经典最优半主动控制和序列最优半主动控制下的控制效果,验证基于MRE阻尼器在半主动控制系统中的适用性。3种控制条件均能对地震作用下结构各层的响应峰值起到较好的控制效果。2种最优半主动算法的控制效果均优于传统的被动控制。序列最优控制对结构响应峰值的整体控制效果最好,且该算法除本身误差外在精确度上更高。另外,在实际测试中需考虑内外因素影响,尽可能减小与仿真分析之间的误差。

## 参 考 文 献

- [1] DÍEZ A G, TUBIO C R, ETXEBARRIA J G, et al. Magnetorheological elastomer-based materials and devices: state of the art and future perspectives [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2021, 23(6): 2170023.
- [2] 宋伟志,姚永玉,赵海军,等.基于新型材料的吸振器设计及电流控制方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2018, 38(5): 1009-1013.  
SONG Weizhi, YAO Yongyu, ZHAO Haijun, et al. Design of broadband vibration absorber and current control method [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2018, 38(5): 1009-1013. (in Chinese)
- [3] BEHROOZ M, WANG X, GORDANINEJAD F. Modeling of a new semi-active/passive magnetorheological elastomer isolator [J]. *Smart Materials & Structures*, 2014, 23(4): 045013.
- [4] LI S, WATTERSON P A, LI Y, et al. Improved magnetic circuit analysis of a laminated magnetorheological elastomer device featuring both permanent magnets and electromagnets [J]. *Smart Materials & Structures*, 2020, 29(8): 085054.
- [5] 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 Vibration*, 2014, 34(1): 230-236. (in Chinese)
- [6] YARRA S, GORDANINEJAD F, BEHROOZ M, et al. Performance of a large-scale magnetorheological elastomer-based vibration isolator for highway bridges [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, 29(20): 3890-3901.
- [7] LARA L A, BRITO J L V, Valencia Y. Comparative analysis of semi-active control algorithms applied to magnetorheological dampers [J]. *Ingeniare Revista Chilena De Ingeniería*, 2017, 25(1): 39-58.
- [8] 黄学功,刘涛,马伟佳,等.基于MRE隔振器的变刚度半主动隔振系统分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(8): 27-36.  
HUANG Xuegong, LIU Tao, MA Weijia, et al. Analysis of variable stiffness semi-active vibration isolation system based on MRE isolator [J]. *Journal of Hunan University Natural Sciences*, 2021, 48(8): 27-36. (in Chinese)
- [9] 毕凤荣,曹荣康, WANG X, 等.基于MRE的变刚度变阻尼减振器设计研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(3): 192-198.  
BI Fengrong, CAO Rongkang, WANG X, et al. Variable stiffness and damping shock absorber design based on MRE [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(3): 192-198. (in Chinese)
- [10] DARGAHI A, SEDAGHATI R, RAKHEJA S. On the properties of magnetorheological elastomers in shear mode: design, fabrication and characterization [J]. *Composites Part B-Engineering*, 2019, 159: 269-283.
- [11] 全伟,李宏男.曲线桥多维多点地震激励半主动控制分析[J]. *工程力学*, 2009, 26(3): 79-85.  
QUAN Wei, LI Hongnan. Semi-active control of curved bridge under multi-component and multi-support earthquake [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(3): 79-85. (in Chinese)
- [12] 李喜梅,杜永峰.水平双向地震激励下基于序列最优控制算法曲线梁桥控制分析[J]. *振动与冲击*, 2015(10): 6-11, 33.  
LI Ximei, DU Yongfeng. Curved girder bridges' control based on sequential optimal control algorithm under two-directional horizontal earthquake [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015(10): 6-11, 33. (in Chinese)



**第一作者简介:**杜永峰,男,1962年3月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为结构减震控制与结构健康监测等。曾发表《基于监测数据的隔震结构模态参数异变分析》(《振动、测试与诊断》2018年第38卷第3期)等论文。

E-mail: dooyf@lut.edu.cn

**通信作者简介:**屠旭松,男,1997年8月生,硕士生。主要研究方向为结构减震控制。

E-mail: soongtx@163.com