

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.08.002

# 多级线圈驱动的磁流变弹性体夹层梁结构设计与实验

王伟<sup>a,b</sup>, 高凡<sup>a,b</sup>, 段西蓉<sup>a,b</sup>, 李旺<sup>a,b</sup>, 浮洁<sup>a,b</sup>

(重庆大学 a. 光电工程学院; b. 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 梁结构存在于建筑桥梁、飞机壁板等多种工程中, 由于其低刚度、低阻尼特性, 易产生低频大幅振动, 造成结构疲劳损伤甚至破坏。针对传统夹层梁的结构参数固定、自适应性差等问题, 提出基于磁流变弹性体的磁控智能夹层梁结构, 能够在磁场作用下根据外界激励的变化, 自适应调整结构的刚度和阻尼, 实现振动的有效抑制。首先, 针对传统夹层梁磁场施加困难、在空气中磁场衰减大等问题, 提出内置多级线圈驱动的磁控夹层梁结构; 其次, 基于磁流变弹性体材料特性, 分析了器件减振机理。最后, 通过 COMSOL 仿真对磁控夹层梁进行磁场仿真, 发现在 3 A 电流的作用下夹层梁的一阶固有频率由 6.22 Hz 变为 9.16 Hz, 阻尼比增大 64.4%, 验证了磁流变弹性体夹层梁的变刚度、变阻尼特性。通过多个频率激励实验验证了内置多级线圈驱动的磁控夹层梁的宽频隔振性能。

**关键词:** 磁流变弹性体; 夹层结构; 阻尼比; 振动分析

中图分类号: TB535

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)08-018-08

## Design and experimentation of magnetorheological elastomer sandwich beam structure driven by multistage coil

WANG Wei<sup>a,b</sup>, GAO Fan<sup>a,b</sup>, DUAN Xirong<sup>a,b</sup>, LI Wang<sup>a,b</sup>, FU Jie<sup>a,b</sup>

(a. College of Optoelectronic Engineering; b. Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems Under Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Beam structures are prevalent in various engineering applications, such as building bridges and aircraft wall panels. Due to their low stiffness and low damping characteristics, these structures are prone to low-frequency large vibrations, resulting in structural fatigue or damage. To solve the problems of fixed structural parameters and poor adaptability of traditional sandwich beams, this study proposes a magnetically controlled intelligent sandwich beam structure based on magnetorheological elastomers. This structure can adaptively adjust its stiffness and damping according to changes in external excitation under the influence of a magnetic field, effectively suppressing vibrations. Firstly, to overcome the challenges of difficult magnetic field application and significant magnetic field attenuation in the air for traditional sandwich beams, a magnetron sandwich beam structure driven by a built-in multistage coil is proposed. Secondly, the vibration damping mechanism of the

收稿日期: 2024-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875056)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51875056).

作者简介: 王伟(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事振动控制研究, (E-mail)202208021085t@cqu.edu.cn。

通信作者: 浮洁, 女, 教授, (E-mail) fujie@cqu.edu.cn。

device is analyzed based on the material properties of magnetorheological elastomers. Then, the magnetic field simulation of the magnetron sandwich beam using COMSOL shows that the first-order natural frequency of the sandwich beam changes from 6.22 Hz to 9.16 Hz under a 3 A current, and the damping ratio increases by 64.4%, verifying the variable stiffness and damping characteristics of the magnetorheological elastomer sandwich beam. Finally, the broadband vibration isolation performance of the magnetron sandwich beam driven by a multistage coil is verified through multiple frequency excitation experiments.

**Keywords:** magnetorheological elastomers; sandwich structure; damping ratio; vibration analysis

航空航天飞行器、桥梁、房屋、船舶等使用的许多结构件可简化为悬臂或简支的梁模型<sup>[1-4]</sup>。在外界宽频时变扰动作用下,会发生剧烈的低频振动,对工程机械的结构稳定性和安全性等造成严重的影响,引起结构材料的疲劳损害,降低结构的使用年限。为了减少梁的振动和噪声,工程上常通过附加黏弹性材料以提高系统阻尼比<sup>[5]</sup>。但传统的黏弹性材料无法实时调节系统刚度和损耗因子,在受到宽频振动激励时,难以满足夹层梁的减振需求。以磁流变弹性体(magnetorheological elastomer, MRE)为代表的新型智能材料在振动控制领域的广泛应用<sup>[6-7]</sup>,提供了新思路。

作为一种适用范围广泛的新型智能材料,MRE具有优异的磁控变刚度力学特性,储能模量可随外加磁场的增大而增大,表现出明显的磁流变效应<sup>[8]</sup>。在未施加磁场时,MRE保留了传统橡胶材料的黏弹性特征,具有较大的黏性和弹性。而在外加磁场下,其剪切模量与损耗模量可以实现瞬时可控的可逆变化<sup>[9]</sup>。基于MRE的磁控特性,研究人员借鉴传统工程减振降噪中的黏弹性约束阻尼结构,将MRE作为智能内芯,设计了MRE夹层结构用于柔性梁和薄板的阻尼减振<sup>[10-12]</sup>。

MRE夹层梁作为磁控智能减振器件,磁场的分布和施加形式会影响MRE夹层结构的减振效果与实际应用。目前的励磁装置主要分为永磁式和电磁式。永磁式的励磁方式大部分通过将永磁体放置在夹层梁的两侧<sup>[13-15]</sup>再通过人为改变磁铁与夹层梁的间距改变磁场的大小。以永磁体作为励磁装置的方式难以实现磁场的连续调节,由于外置磁场的非接触式布置会使得空气作为磁路的一部分造成磁场的大幅衰减。电磁式励磁装置可在外部电流作用下通过励磁线圈产生连续可变磁场,具有响应快、控制方便等优势,是常用的励磁方式。Dyniewicz等<sup>[16]</sup>在悬臂梁的自由端附加磁流变弹性体,将2个电磁铁黏接在弹性体的两侧,产生垂直于MRE的电磁场。王文煜等<sup>[17]</sup>从结构、功能一体化的设计角度出发,在MRE表面缠绕铜线,得到由线圈层、铝合金层和MRE组成的夹层梁结构。然而,这种在MRE表面黏接线圈的方式会使夹层梁结构变得复杂并且会增大夹层梁的厚度与体积,从而影响夹层梁的结构特性。

为了解决上述问题,文中提出了一种内置四级线圈驱动的磁控MRE夹层梁结构,对该结构进行减振机理的分析。使用COMSOL仿真对设计的磁控MRE夹层梁进行磁场仿真以及谐响应研究,验证该结构的变刚度、变阻尼特性。最后,通过多个频率激励实验验证该结构的宽频隔振性能。

## 1 磁控MRE夹层梁结构设计与减振机理分析

### 1.1 四级线圈驱动的磁控MRE夹层梁的结构设计

四级线圈驱动的磁控MRE夹层梁由金属层、MRE层以及内置线圈组成,其结构示意图如图1所示。内置四级线圈驱动的磁控MRE夹层梁是在MRE层中均匀布置线圈,通过选定每个线圈的绕向使得磁场在线圈的外部产生叠加。当夹层梁受到外部振动激励时,通过控制输入线圈电流的大小,调节施加在MRE层上的磁场强度,实现对夹层梁的刚度和阻尼的实时调节,达到减振的目的。该结构不仅解决了外置磁场安装空间大的局限性,还克服了永磁式励磁装置难以实现连续、精准控制的难点,并且内置的四级线圈结构不会明显增加夹层梁的厚度与体积,改变夹层梁的结构特性,保证磁控MRE夹层梁单元具有足够大的磁场。

在内置四级线圈驱动的磁控MRE夹层梁的制作中,选择400 mm × 40 mm的矩形纯铁作为金属层,预留出5 mm高的MRE层空间。考虑到过多的线圈会影响夹层梁本身的结构特性并增加结构的复杂性,过少的

线圈则会使得MRE层中产生的磁场太低。因此,在长400 mm的铁板范围内,以80 mm间距均匀铺设4个外直径为40 mm、内直径为4 mm、线径为0.48 mm的铜线圈。选用外层裹有热熔性聚氨酯材料的铜线作为线圈制作材料,使用3D打印机制作外径为 $\Phi 40$  mm、内径为 $\Phi 4$  mm、总高度为5 mm、材料厚度为1 mm的线圈骨架,每一个线圈缠绕130匝。缠绕完成后,利用热风枪将线圈定型后拆装,并测试线圈电阻为 $1.78 \Omega$ 。最后,将制作完成的4个线圈等间距摆放,如图2所示,通电后即可在整个夹层梁中得到相对均匀的磁场。

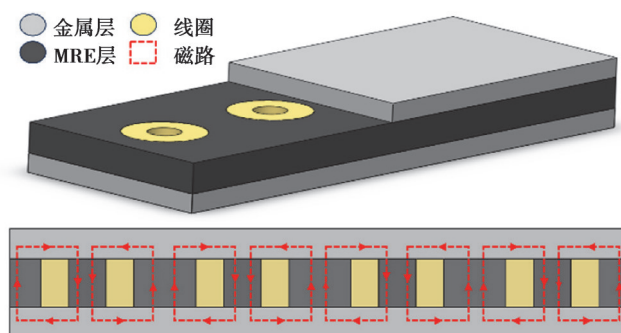


图1 MRE夹层梁结构及横截面磁路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of MRE sandwich beam structure and magnetic circuit

在磁流变弹性体的制备过程中,将175 g的羰基铁粉颗粒倒入容器中,添加37.5 g的A组份硅橡胶,进行充分地搅拌混合,再加入37.5 g的B组份硅橡胶进行搅拌直至均匀无气泡;然后,将混合液体倒入模具中,经过室温下24 h的固化制作完成弹性体,羰基铁粉、A组份硅橡胶、B组份硅橡胶的质量分数比为7:1.5:1.5。最后,制备该MRE样品进行材料测试,结果如图3所示。

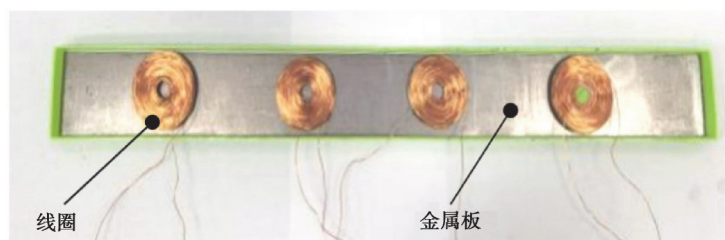


图2 夹层梁内部线圈摆放位置实物图

Fig. 2 The position of the coil inside the sandwich beam and the mold diagram of the sandwich beam

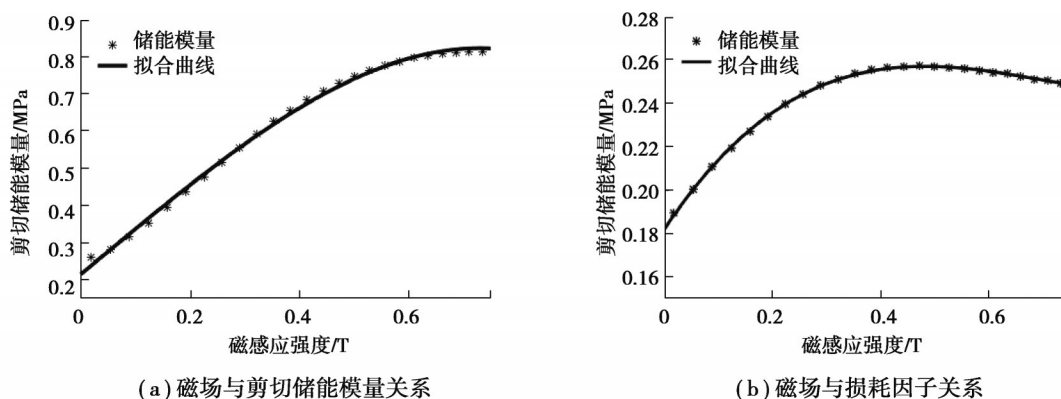


图3 拟合曲线

Fig. 3 Fitted curves

可以看出,MRE的剪切储能模量会随着磁场的增加而增大直至饱和,损耗因子会随磁场的增加先增大后减小。说明在磁场的作用下,MRE具有很好的磁控特性,可以将MRE材料作为智能内芯,实现夹层梁的磁控特性。

### 1.2 磁控 MRE 夹层梁结构的减振机理分析

磁控 MRE 夹层梁各层之间的变形关系,如图 4 所示。

图中虚线是各层的中性面,各几何参数的意义如下: $w$  为磁控 MRE 夹层梁的  $y$  向位移; $\theta$  为梁的转角; $\alpha$  为 MRE 层的剪切应变; $x_a, x_M, x_b$  分别为上金属层、MRE 层和下金属层中性面的  $x$  向位移; $x_1, x_2$  分别表示 MRE 层上表面和下表面的  $x$  向位移。

依据夹层梁各层之间的运动学关系建立 MRE 夹层梁的有限元模型并进行减振机理的分析<sup>[18]</sup>。首先,对局部 MRE 变刚度结构梁采用三层结构组成的一维两节点梁单元进行建模,每个节点有 4 个自由度( $w, \theta, x_a, x_b$ )。单元中任意点的位移可以通过梁单元节点位移的形函数插值来表示:

$$\Delta = [w \ \theta \ x_a \ x_b]^T \quad (1)$$

根据悬臂梁约束条件和有限元单元组装方法将单元的质量矩阵、刚度矩阵和外力矩阵组装后得到夹层梁的动力学方程为

$$M\ddot{\Delta} + K\Delta = R \quad (2)$$

式中: $\Delta$  为梁单元节点位移矢量; $M$  为质量矩阵; $K$  为刚度矩阵。对式(2)进行求解得到夹层梁的固有频率  $f$  和结构阻尼比  $\zeta$  的表达式为

$$\begin{cases} f = \frac{\sqrt{Re[(\omega)^2]}}{2\pi}, \\ \zeta = \frac{Im[\omega]}{Re[\omega]} \end{cases} \quad (3)$$

通过改变 MRE 的损耗因子和剪切储能模量,改变夹层梁的刚度矩阵,最终使得梁的固有频率和结构阻尼比发生变化。

## 2 磁控 MRE 夹层梁的仿真分析

### 2.1 磁控 MRE 夹层梁的磁场仿真

设计的磁控 MRE 夹层梁的材料和结构参数如表 1 所示。根据表中的材料与结构参数,利用 COMSOL 进行三维建模,并施加磁场进行仿真。根据材料的耐受性,选择 3 A 作为电流的最大值,得到如图 5 所示的多切面磁通密度图。从图 5 可以看出,磁场会沿着夹层梁轴向的法线方向产生,依次穿过夹层梁的金属层、MRE 层和金属层。在线圈中心区域,磁通量可以达到 10~35 mT,而在相邻两线圈的中间位置,会产生磁场的叠加。

表 1 MRE 夹层梁结构的材料和结构参数

Table 1 Material and structural parameters of MRE sandwich beam structures

材料属性	金属层	MRE 层
杨氏弹性模量/GPa	80.650 0	0.000 4
质量密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 870	1 060
泊松比	0.291	0.495
厚度/mm	1	5
长度/mm	400	400
宽度/mm	40	40

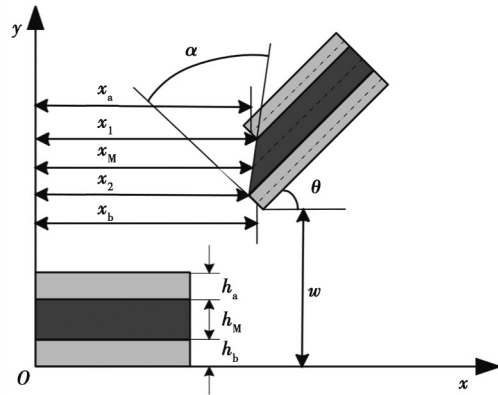


图 4 磁控 MRE 夹层梁各层变形关系

Fig. 4 Deformation relationship of each layer of magnetron MRE sandwich beam



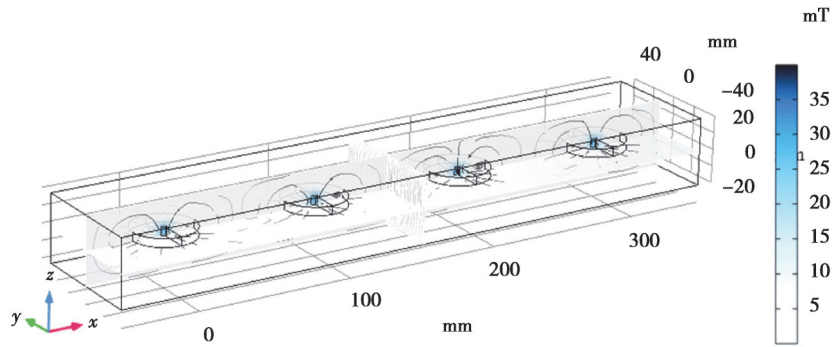


图5 MRE夹层梁内置磁场的多切面磁通密度图

Fig. 5 Multi-slice magnetic flux density diagram of a built-in magnetic field in an MRE sandwich beam

## 2.2 磁控MRE夹层梁的谐响应仿真分析

为定量描述磁控MRE夹层梁的振动衰减效果,采用COMSOL的固体力学模块进行谐响应仿真分析。仿真中MRE材料参数设置如表1所示,在磁控MRE夹层梁的自由端施加正弦谐波外力载荷,夹层梁发生受迫振动,得到MRE夹层梁在施加电流前后的振动响应曲线,如图6所示。

根据施加电流前后悬臂梁的频响曲线得出通电前后的一阶固有频率 $f_n$ ,使用半功率带宽法<sup>[9]</sup>求出施加电流前后的系统阻尼比。在施加电流前后,取半功率处的2个频率点 $f_1$ 和 $f_2$ 使得:

$$\frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta \frac{f}{f_n}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{\max}, \quad (4)$$

式中: $V_{\max}$ 为最大响应加速度幅值; $f_n$ 为系统的一阶固有频率; $\zeta$ 为阻尼比。对式(4)进行化简计算得出阻尼比表达式为

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1}. \quad (5)$$

具体数据如表2所示。

表2 悬臂梁在通电前后的阻尼比与固有频率

Table 2 The damping ratio of the cantilever beam before and after energizing to the natural frequency

电流/A	$f_1$ /Hz	$f_2$ /Hz	$f_n$ /Hz	$\zeta$
0	5.78	6.62	6.22	0.067 7
3	8.06	10.08	9.16	0.111 3

由磁控MRE夹层梁的仿真分析可知,根据扫频实验的频响曲线和半功率法辨识出零场时系统的阻尼比为0.067 7,固有频率为6.22 Hz;3 A电流时,系统阻尼比为0.111 3,固有频率为9.16 Hz。验证了内置四级线圈驱动的磁控MRE夹层梁结构能够在电流作用下产生较大磁场并且改变夹层梁结构的刚度与阻尼,说明该结构具有变刚度、变阻尼特性。

## 3 磁控MRE夹层梁的减振性能分析

通过仿真分析可以发现,内置四级线圈驱动的磁控MRE夹层梁具有变刚度和变阻尼特性,需要通过实验验证其在控制电流作用下的宽频隔振性能。实验时,将制备好的含内置线圈的磁流变弹性体夹层梁的一

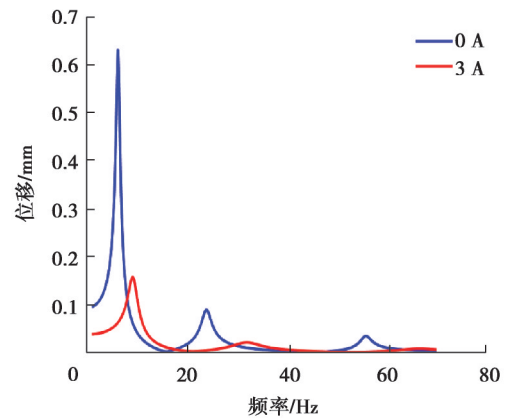
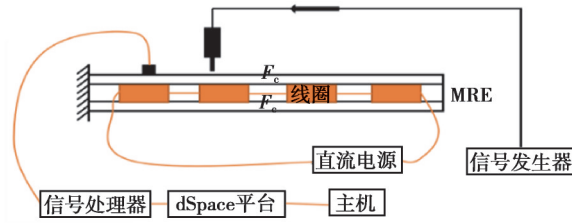


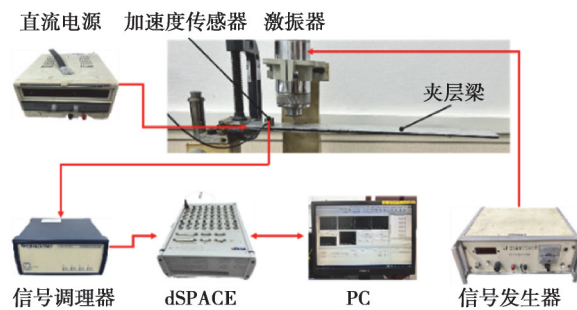
图6 施加电流前后夹层梁的频响曲线

Fig. 6 Frequency response curves of sandwich beams before and after current application

端在实验台上固定夹紧,另一端呈自由状态,形成悬臂梁结构。图 7(a)所示为实验系统原理结构图,包括传感器、振动信号发生器、直流电源、传感器信号处理器、dSPACE 半仿真平台,实物图如图 7(b)所示。



(a) 系统结构图



(b) 系统实物图

图 7 实验系统图

Fig. 7 Experimental system diagram

信号发生器用于产生激励信号,通过激振器给予悬臂梁 1 个振幅稳定的正弦信号。置于悬臂梁左上方的传感器用于实时接收悬臂梁垂直方向的振动幅值信号,通过信号处理器转换,由 dSPACE 平台传入主机中显示出来。直流电源给内置线圈通电,产生磁场,观察磁流变弹性体在磁场作用下的效果。内置线圈通过直流电源通电产生磁场,该磁场的方向为垂直梁表面的方向。改变直流电源输出的电流大小就可以改变内置磁场强度的大小。

可以看出,在电流作用下磁控 MRE 夹层梁除了一阶固有频率处峰值下降以外,对夹层梁的二阶和三阶固有频率处的共振峰值也有大量的衰减,考虑到夹层梁的主要工作频带范围,设置激励信号的振幅为  $0.15 \text{ m/s}^2$ ,频率为  $40\sim 100 \text{ Hz}$ ,以  $20 \text{ Hz}$  间隔递增。通过直流电源向内置线圈通入  $2 \text{ A}$  的电流,观察在有无内置磁场的作用下,不同振动频率下的磁控 MRE 夹层梁的减振效果,计算其加速度均方根与衰减率结果如表 3 所示。

表 3 不同频率下通电 2 A 前后系统振动加速度及衰减率

Table 3 Vibration acceleration and attenuation rate of the system before and after power-on 2 A at different frequencies

圆频率/ $(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	频率/Hz	加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$		衰减率/%
		0 A	2 A	
251	40	0.344 8	0.146 7	57.45
376	60	0.528 7	0.244 2	53.81
502	80	0.802 1	0.295 3	63.18
628	100	0.850 8	0.281 9	66.87

图 8 分别为  $40$ 、 $60$ 、 $80$ 、 $100 \text{ Hz}$  时,施加  $2 \text{ A}$  电流前后,系统在  $0.5 \text{ s}$  内的加速度对比。可以看出,在  $40\sim 100 \text{ Hz}$  范围内,衰减率可以达到  $50\%\sim 60\%$ ,随着频率的增大,衰减率呈上升趋势。

对比不同频率下施加电流前后系统的响应加速度,可以看出系统在磁场作用下能够达到  $50\%\sim 60\%$  的衰

减率,表明四级内置线圈在直流作用下形成的垂直于磁控MRE夹层梁的磁场,使得磁控MRE夹层梁改变其自身的刚度和阻尼比,达到较好的减振效果。

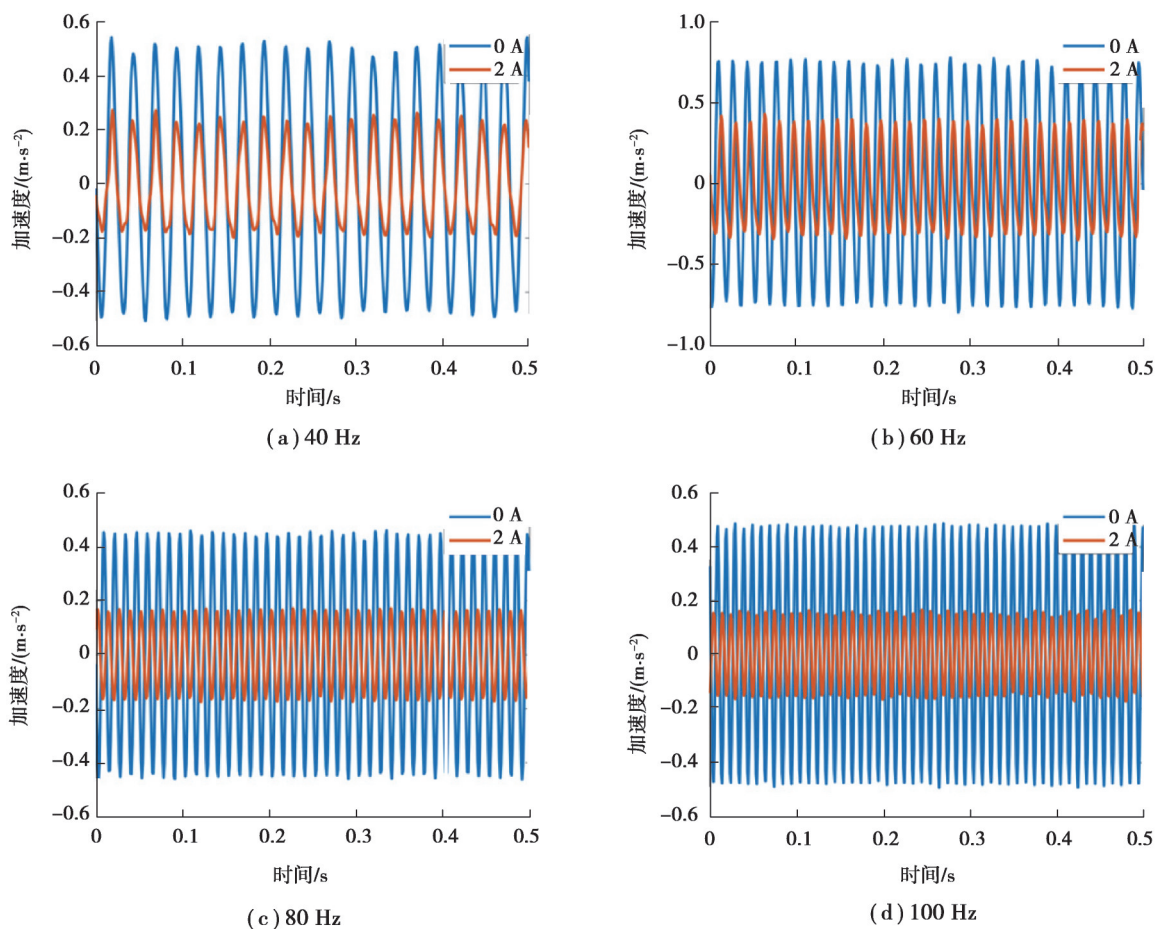


图8 不同频率下通电2 A前后系统响应加速度

Fig. 8 The system response acceleration before and after power-on 2 A at different frequencies

## 4 结 论

针对传统夹层梁的刚度阻尼无法变化、结构无法实现自适应性等缺点,设计了内置四级线圈驱动的磁控MRE夹层梁结构。COMSOL磁路仿真分析结果表明,在3 A电流的作用下,线圈中心区域的磁通量最高可达35 mT,夹层梁的一阶固有频率由6.22 Hz变为9.16 Hz,阻尼比由0.067 7变为0.111 3。表明该结构在电流的作用下具有变刚度、变阻尼特性。最后,进行响应分析实验,在2 A电流下频带为40~100 Hz正弦振动的衰减率可达50%~60%,验证了该种结构能够通过控制电流有效抑制梁的宽频振动。

## 参考文献

- [1] 蒋燕芳, 蒋伟, 刘纲, 等. 运营环境下混凝土简支梁桥裂缝的非线性损伤识别[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(5): 59-66.  
Jiang Y F, Jiang W, Liu G, et al. Nonlinear damage identification of cracks of the concrete simply-supported bridge under operational environment[J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(5): 59-66.(in Chinese)
- [2] 赵旭东, 谈立, 张富宾, 等. 冷弯薄壁型钢增强复合材料夹层梁的受剪性能[J]. 材料科学与工程学报, 2021, 39(5): 838-842, 854.  
Zhao X D, Tan L, Zhang F B, et al. Shear behavior of GFRP-cold formed steel composite sandwich beam[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2021, 39(5): 838-842, 854.(in Chinese)

- [ 3 ] Sharif U, Sun B B, Hussain S, et al. Dynamic behavior of sandwich structures with magnetorheological elastomer: a review[J]. *Materials*, 2021, 14(22): 7025.
- [ 4 ] 王毅红, 赵小琴, 姚圣法等. 高强变肋钢筋与混凝土间粘结锚固性能梁式试验[J]. *重庆大学学报*, 2020, 43(9): 32-40.  
Wang Y H, Zhao X Q, Yao S F, et al. Experiments on the performance of bond anchorage between high strength variable rib reinforcement and concrete[J]. *Journal of Chongqing University*, 2020, 43(9): 32-40. (in Chinese)
- [ 5 ] 陈彦明, 石慧荣. 局部黏弹性被动约束阻尼梁的振动分析[J]. *机械设计与制造*, 2009(5): 103-105.  
Chen Y M, Shi H R. Vibration analysis of beams with partial constrained layer damping treatment[J]. *Mechanical design and manufacturing*, 2009(5): 103-105. (in Chinese)
- [ 6 ] Fu J, Liu J, Lai J J, et al. Robustness analysis of magnetorheological elastomer-based vibration isolation system with optimal fuzzy controller[J]. *Smart Materials and Structures*, 2023, 32(3): 035018.
- [ 7 ] 杨毅, 冷鼎鑫, 徐凯, 等. 磁流变调谐质量阻尼器在海上风机振动控制中的应用[J]. *重庆大学学报*, 2022, 45(3): 20-30.  
Yang Y, Leng D X, Xu K, et al. Application of magnetorheological TMD in vibration control of offshore wind turbine[J]. *Journal of Chongqing University*, 2022, 45(3): 20-30.(in Chinese)
- [ 8 ] 高宇, 杨伟, 范家浩, 等. 颗粒链取向对磁流变弹性体磁致剪切模量的影响[J]. *重庆大学学报*, 2022, 45(3): 41-48.  
Gao Y, Yang W, Fan J H, et al. Effect of particle chain orientation on MRE magneto-induced shear modulus[J]. *Journal of Chongqing University*, 2022, 45(3): 41-48. (in Chinese)
- [ 9 ] Jung H J, Eem S H, Jang D D, et al. Seismic performance analysis of a smart base-isolation system considering dynamics of MR elastomers[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2011, 22(13): 1439-1450.
- [ 10 ] 胡国良, 李丙丙, 江敏, 等. MRF和MRE磁流变夹层梁振动控制性能测试分析[J]. *机床与液压*, 2018, 46(11): 101-105, 180.  
Hu G L, Li B B, Jiang M, et al. Analysis of vibration control performance of magnetorheological sandwich beam based on MRF and MRE materials[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2018, 46(11): 101-105, 180.(in Chinese)
- [ 11 ] Poojary U R, Hegde S, Kiran K, et al. Dynamic response of a MRE sandwich structure under a non-homogenous magnetic field[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2021, 79(9): 864-873.
- [ 12 ] Ahobal N, Jakkamputi L P, Gnanasekaran S, et al. Dynamic behavior modeling of natural-rubber/polybutadiene-rubber-based hybrid magnetorheological elastomer sandwich composite structures[J]. *Polymers*, 2023, 15(23): 4583.
- [ 13 ] Kozłowska J, Boczkowska A, Czulak A, et al. Novel MRE/CFRP sandwich structures for adaptive vibration control[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(3): 035025.
- [ 14 ] Choi W J, Xiong Y P, Sheno R A. Vibration characteristics of sandwich beams with steel skins and magnetorheological elastomer cores[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2010, 13(5): 837-847.
- [ 15 ] Asadi Khanouki M, Sedaghati R, Hemmatian M. Multidisciplinary design optimization of a novel sandwich beam-based adaptive tuned vibration absorber featuring magnetorheological elastomer[J]. *Materials*, 2020, 13(10): 2261.
- [ 16 ] Dyniewicz B, Bajkowski J M, Bajer C I. Semi-active control of a sandwich beam partially filled with magnetorheological elastomer[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015(60/61): 695-705.
- [ 17 ] 王文煜, 周娜, 吕海宇, 等. 填充MRE的纤维金属混杂复合材料梁阻尼减振性能研究[J]. *噪声与振动控制*, 2020, 40(2): 23-26.  
Wang W Y, Zhou N, Lv H Y, et al. Research on damping and vibration reduction performance of a fiber-metal laminate beam filled with MRE core layer[J]. *Noise and Vibration Control*, 2020, 40(2): 23-26.(in Chinese)
- [ 18 ] Fu J, Gao F, Zhong C, et al. Magnetic-control variable stiffness and damping tail support for a wind-tunnel aircraft model[J]. *AIAA Journal*, 2024, 62(4): 1318-1329.
- [ 19 ] 王娇, 王明杰, 张曰浩. 敷设黏弹性层舱室的振动特性仿真分析与试验[J]. *舰船科学技术*, 2022, 44(2): 59-63.  
Wang J, Wang M J, Zhang Y H. Simulation analysis and experiment on vibration characteristics of cabin with viscoelastic layer[J]. *Ship Science and Technology*, 2022, 44(2): 59-63.(in Chinese)