

自传感式可调谐磁性液体阻尼器特性研究*

杨文荣^{1,2}, 张恒¹, 张雨蒙¹, 芦学辉¹, 薛双¹

(1. 河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津, 300130)

(2. 河北工业大学河北省电磁场与电器可靠性重点实验室 天津, 300130)

摘要 针对半主动阻尼减振系统中附加传感器可能造成系统可靠性低、维护成本高等问题,提出一种自传感式可调谐磁性液体阻尼器。首先,阐述了阻尼器的工作原理并推导出阻尼器的固有频率表达式;其次,对阻尼器进行磁场仿真研究,通过实验测试阻尼器的减振性能和自传感性能。结果表明,阻尼器使结构自由衰减振动响应时间减少 45% 左右,带有阻尼器的结构加速度峰值衰减百分比约为 25%,自传感单元所测频率最大误差不超过 2%;自传感式可调谐磁性液体阻尼器可以根据振动频率改变电流,从而调节阻尼器的固有频率,拓宽了阻尼器减振频带,为集成半主动阻尼减振和传感系统提供了方法。

关键词 磁性液体;调谐阻尼器;固有频率;自传感功能
中图分类号 TH89;TB535

0 引言

环境中的振动会对工程研究中使用的各种设备产生负面影响^[1-2],减小有害振动具有重要意义。阻尼器分为被动式、主动式和半主动式^[3]3 种形式。被动式阻尼器结构简单^[4],调谐液柱阻尼器、调谐质量阻尼器及冲击阻尼器是应用广泛的被动式阻尼器^[5-7]。文献[8-9]对冲击阻尼器进行了优化设计,并通过实验验证了调谐型颗粒阻尼器比调谐质量阻尼器具有更好的鲁棒性。主动式阻尼器利用外部系统计算阻尼器的控制参数,但实际应用所需成本较高^[10-11]。半主动式阻尼器在被动式阻尼器结构的基础上增加了主动控制手段,兼具被动式和主动式的优点^[12-14]。

目前,对半主动阻尼器的研究主要集中在磁控智能材料上,常见的磁控智能材料有磁性液体和磁流变。磁流变的颗粒直径为微米级,容易产生颗粒聚集和沉淀^[15]。磁性液体由表面活性剂、纳米磁性颗粒和基载液组成,较为稳定^[16]。在磁控材料的选择中,兼具固体物质磁性和液体流动性的磁性液体引起了人们的关注^[17-18]。

半主动阻尼减振系统中,振动的状态信息对于减振性能至关重要,但附加的传感器会增加系统的复杂性^[19],而自传感式半主动阻尼器可提高阻尼系

统的可靠性和稳定性。

压电陶瓷在振动传感领域中被广泛使用^[20],本研究将磁性液体与压电陶瓷材料相结合,提出一种自传感式可调谐磁性液体阻尼器(self-sensing tunable magnetic fluid damper, 简称 STMFD),可通过监测振动加速度的频率改变线圈电流,调节固有频率,且调节方式简单,可靠性高,弥补了被动式阻尼器减振频带窄的不足。

1 结构模型和工作原理

STMFD 由阻尼单元和自传感单元组成。阻尼单元中,线圈与外部直流可调电源连接,为磁性液体提供可变磁场,改变磁性液体所受电磁力,从而调整 STMFD 的固有频率。自传感单元内有圆柱形磁铁和杆组成的质量块,在磁铁两端吸附有磁性液体,磁性液体使质量块悬浮在圆柱形外壳的中部,质量块的左端为压电陶瓷,压电陶瓷的外部为带有螺纹的端盖,用以提供预紧力。STMFD 结构模型剖视图如图 1 所示。

STMFD 的工作原理如下:主结构振动时会带动 STMFD 振动,此时自传感单元产生加速度响应,质量块受到惯性力并作用在压电陶瓷上;压电陶瓷受到压力产生输出电荷,输出电荷的大小正比于其

* 国家自然科学基金资助项目(51877066);河北省科技计划资助项目(21567605H)

收稿日期:2023-10-11;修回日期:2023-12-13

其中: $E_{p1,i}$ 为第 i 个 L 型管中磁性液体的重力势能。

E_{p2} 对运动位移 ξ 求导即为 4 个 L 型管中磁性液体所受总电磁力 F_m 。针对第 i 个 L 型管, 任意一点处磁性液体所受电磁力 f_{mi} 为

$$f_{mi} = -\mu_0 \nabla \int_0^H M dH = -\frac{1}{2} \mu_0 \chi \nabla H^2 \quad (6)$$

其中: μ_0 为真空磁导率; ∇ 为哈密顿算子; χ 为磁性液体的磁化率; M 为磁化强度; H 为磁场强度。

将 f_{mi} 对纵向磁性液体柱的体积 V 进行积分, 得到第 i 个纵向磁性液体柱整体所受电磁力 F_{mi} 为

$$F_{mi} = \frac{1}{2} A \mu_0 \chi (H_2^2 - H_1^2) - A \mu_0 \chi H_1 \dot{H}_1 \xi_i \quad (7)$$

其中: H_1 为 L 型管中磁性液体静止液位处的磁场强度; H_2 为 L 型管中纵向磁性液体柱底部位置的磁场强度。

合成 4 个纵向磁性液体柱上的电磁力, 得到磁性液体所受的总电磁力 F_m 为

$$F_m = \sum_{i=1}^4 F_{mi} \cos(\alpha - \theta_i) = \sum_{i=1}^4 -A \mu_0 \chi H_1 \dot{H}_1 \xi \cos^2(\alpha - \theta_i) \quad (8)$$

势能 E_{pot} 对位移 ξ 进行求导, 即

$$\frac{\partial E_{pot}}{\partial \xi} = \frac{\partial E_{p1}}{\partial \xi} + \frac{\partial E_{p2}}{\partial \xi} = \rho g A \xi \sum_{i=1}^4 \cos^2(\alpha - \theta_i) + F_m \quad (9)$$

对 4 个 L 型管中的非保守力求和, 得到阻尼单元非保守力 Q 为

$$Q = \sum_{i=1}^4 Q_i = -\frac{1}{2} A \rho \lambda \eta^2 \sum_{i=1}^4 \cos^2(\alpha - \theta_i) \quad (10)$$

其中: Q_i 为第 i 个管中的非保守力; λ 为损失系数。

将式(4)、式(9)和式(10)代入式(3), 可以得出阻尼单元的运动微分方程为

$$I \ddot{\eta} + \lambda |\eta| \eta + 2 \left[g - \frac{\mu_0}{\rho} \chi H_1 \dot{H}_1 \right] \xi = -b \ddot{p} \quad (11)$$

根据式(11)可得阻尼器的固有频率 f 为

$$f = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{2}{l\rho} \left[\rho g - \mu_0 \chi \left(\frac{NI}{2L} \right)^2 \times \left[\frac{L/2-h}{\sqrt{(L/2-h)^2 + r_{em}^2}} + \frac{L/2+h}{\sqrt{(L/2+h)^2 + r_{em}^2}} \right] \times \left[\frac{r_{em}^2}{[(L/2-h)^2 + r_{em}^2]^{3/2}} - \frac{r_{em}^2}{[(L/2+h)^2 + r_{em}^2]^{3/2}} \right] \right] \right\}^{0.5} \quad (12)$$

3 磁场仿真研究

利用振动样品磁强计测量密度为 1.48 g/cm^3 的煤油基磁性液体的磁化特性曲线, 如图 4 所示。

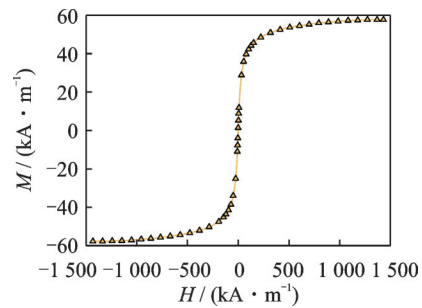


图 4 磁性液体的磁化曲线

Fig.4 Magnetization curve of magnetic fluid

磁化曲线穿过坐标原点, 即磁性液体无剩磁。根据图 4 的磁化特性曲线获得磁性液体的磁特性参数。L 型管的水平长度 $b/2$ 为 60 mm, 管内径为 20 mm, 管高为 130 mm。纵向磁性液体柱高 d 为 60 mm, 线圈直径为 1 mm, 匝数 N 为 1 000, 螺线管线圈的高度 L 为 80 mm。利用仿真软件分析阻尼器中的磁场分布, 仿真材料特性见表 1。

表 1 仿真材料特性

Tab.1 Simulation material characteristics		
名称	参数	数值
磁性液体	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 480
	电导率/($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	5.998×10^7
电磁线圈	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	8 700
	电导率/($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.1
非磁性外壳	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 040
	泊松比	0.4
	介电强度/($\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$)	13.0

输入电流为 2 A 时, 阻尼器内部的磁感应强度分布如图 5 所示。由图可知, STMFD 各个 L 型管中的磁感应强度沿管轴线自下而上先增大后减小, 最大值为 322 Gs。纵向磁性液体柱被磁化, 磁感应强度增大, 即 L 型管中下部磁感应强度较大。

进一步分析得到了不同电流下磁感应强度随磁性液体柱径向半径和阻尼器高度变化的情况, 如图 6 所示。由图可知: 各个输入电流下的磁感应强度分布趋势相同, 磁感应强度最大值的变化范围为 140~450 Gs; 电流在 1~2 A 之间时, 磁感应强度增幅较小; 电流在 2~3 A 之间时, 磁感应强度增幅较大。

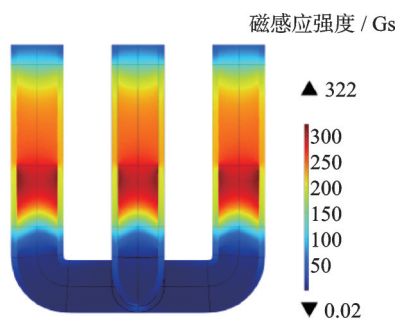


图5 输入电流为2 A时的磁感应强度分布

Fig.5 Magnetic induction intensity distribution when input current is 2 A

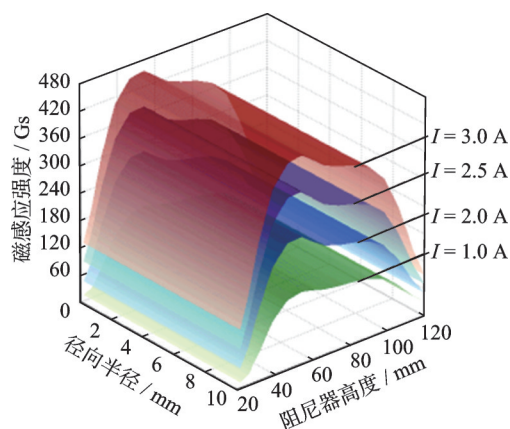


图6 磁感应强度变化情况

Fig.6 Changes in magnetic induction intensity

4 实验研究

4.1 实验平台搭建

笔者通过实验研究了STMFD的减振和自传感性能,实验装置如图7所示。其中:激振系统包括信号发生器、功率放大器和激振器,激振器的前触点与框架结构相连,提供可变振动激励;电荷放大器和示波器组成自传感单元输出电压显示系统;

356A16型压电加速度传感器作为标准传感器用于验证自传感单元测量结果的准确度;位移传感器将振动信号传输给信号接收器并传递到DASP软件系统,该系统可以实时显示位移时程图;直流电源和电磁线圈相连,提供可变磁场。实验中单自由度框架高度可调,通过改变框架的高度可以改变其固有频率。

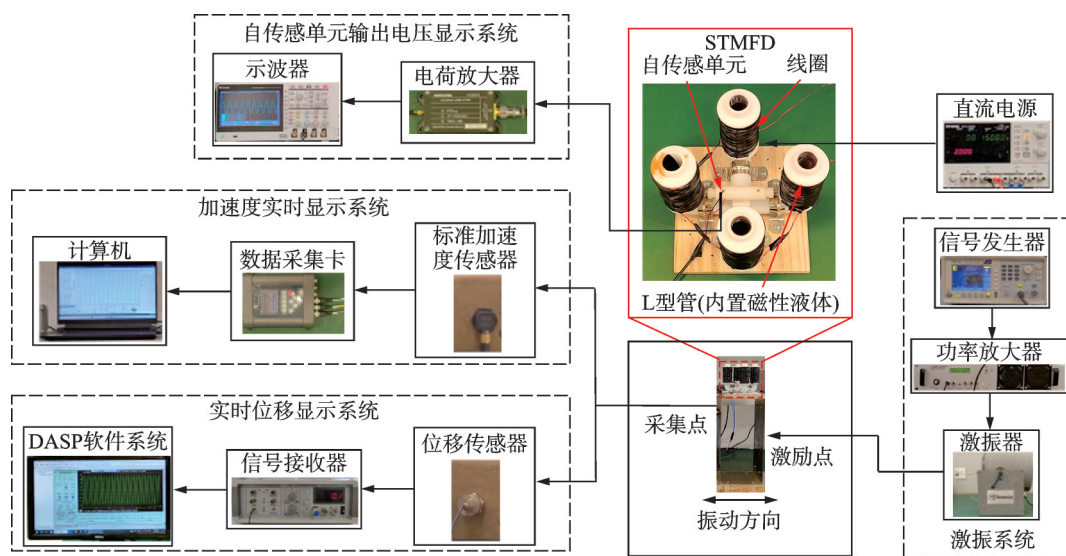


图7 STMFD减振与自传感性能实验装置

Fig.7 Experimental setup for vibration damping and self-sensing performance of STMFD

STMFD中压电陶瓷直径为8 mm,厚度为2 mm,L型管内部装有密度为 1.48 g/cm^3 的煤油基磁性液体。将相关参数代入式(12),可得STMFD的固有频率与电流之间的表达式为

$$f = 0.159 \sqrt{105.28 - 8.96I^2} \quad (13)$$

4.2 减振性能实验及结果分析

4.2.1 自由衰减振动实验结果与分析

电磁激振器施加2 mm的脉冲激励模拟自由衰

减振动实验,实验中单自由度框架固有频率与阻尼器固有频率保持一致。选取电流分别为0、1.0、2.0、2.5和3.0 A,通过式(13)计算出对应的频率理论值。本研究认为振动位移衰减到5%初始位移所用的时间为结构的响应时间,计算无阻尼器和带有STMFD两种情况下振动结构的响应时间来衡量减振效果。自由衰减振动实验结果见表2。

由表2可知,不同频率下阻尼器与结构实现调谐后均可有效减少结构振动响应时间,在1.35 Hz时

表 2 自由衰减振动实验结果
Tab.2 Free attenuation vibration experiment results

<i>I/A</i>	<i>f</i> /Hz		响应时间/s		响应时间 缩减百分 比/%
	理论值	实验值	无阻尼器	STMFD	
0	1.63	1.65	53.36	32.21	39.64
1.0	1.56	1.58	48.55	28.29	41.73
2.0	1.32	1.35	51.62	28.15	45.48
2.5	1.12	1.15	53.84	30.55	43.25
3.0	0.79	0.84	49.67	29.53	40.54

减振效果最佳,响应时间缩减百分比达到 45.48%。
结构顶部自由衰减位移响应曲线如图 8 所示。

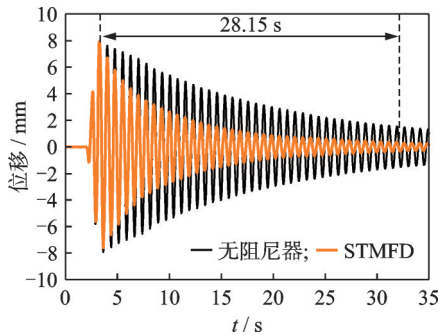


图 8 结构顶部自由衰减位移响应曲线
Fig.8 Free attenuation displacement response curve at struc-
tural top

频率为 1.35 Hz 时,激振器施加的激励位移为 2 mm。单自由度框架与外界激励共振,顶部位移达到 8 mm。STMFD 使结构在 28.15 s 衰减到初始位移的 5%,结构响应时间减少了 45.48%,这表明 STMFD 大大缩减了振动结构到达稳态的时间。采用对数衰减率法计算阻尼比,分析 STMFD 对结构响应位移的抑制程度。阻尼比 D 的计算公式为

$$D = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}}$$

(14)

其中: A_i 为第 i 个周期的结构位移; A_{i+1} 为第 $i+1$ 个周期的结构位移。

不同频率下结构的阻尼比见表 3。由表可知,无阻尼器时的结构阻尼比平均值为 4.27%,带有 STMFD 的单自由度结构阻尼比平均值为 7.48%。相比于无阻尼器时的结构,带有 STMFD 的单自由度结构阻尼比提升了 75% 左右,这表明对阻尼器的固有频率进行调节可以显著提高结构阻尼比。

4.2.2 简谐激励振动实验结果与分析

本研究通过电磁激振器施加频率可调的正弦激励,并分析阻尼器的调谐减振性能。1.35 Hz 下简谐

表 3 不同频率下结构的阻尼比
Tab.3 Damping ratio of the structure at different frequencies

<i>f</i> /Hz	阻尼比/%	
	无阻尼器	STMFD
1.65	4.48	7.79
1.58	4.41	7.71
1.35	4.34	7.60
1.15	4.11	7.21
0.84	4.02	7.08
平均值	4.27	7.48

振动位移和加速度响应曲线如图 9 所示。由图可以看出,带有 STMFD 的结构顶部位移和加速度相比于无阻尼器时位移峰值和加速度峰值衰减百分比分别为 25.6% 和 28.1%,这表明 STMFD 与激振频率实现调谐后具有良好的减振效果。

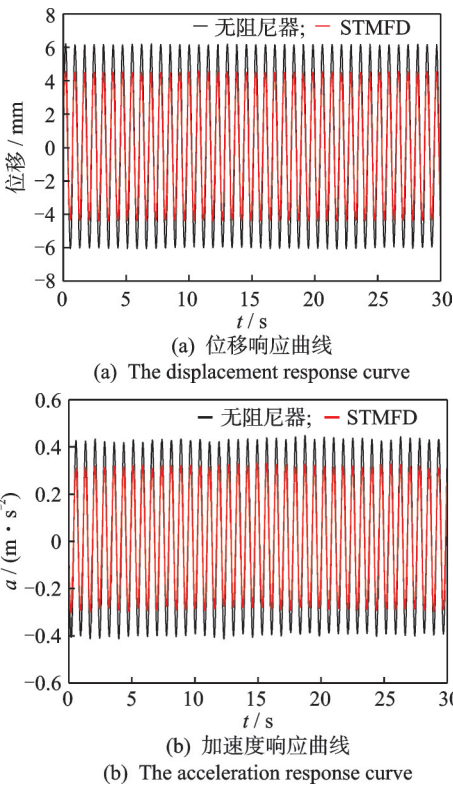


图 9 1.35 Hz 下简谐振动位移和加速度响应曲线
Fig.9 Response curves of displacement and acceleration of
simple harmonic vibration at 1.35 Hz

改变激振频率进行多次实验,STMFD 在不同简谐振动频率下的减振效果见表 4。由表可知,各个频率下,平均位移峰值衰减百分比约为 22%,平均加速度峰值衰减百分比约为 25%。这表明 STMFD 实现调谐后,可以得到良好的减振效果。

表4 STMFD在不同简谐振动频率下的减振效果

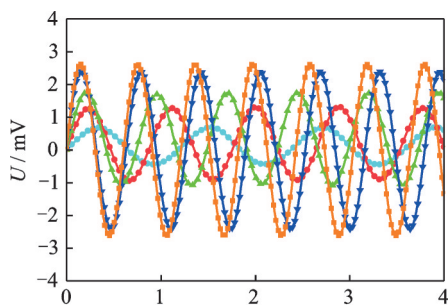
Tab.4 Damping effect of STMFD at different simple harmonic vibration frequencies

激振频率/Hz	位移峰值 衰减百分比/%	加速度峰值 衰减百分比/%
1.65	20.2	20.60
1.58	22.1	25.25
1.35	25.6	28.10
1.15	22.9	25.80
0.84	20.4	22.90

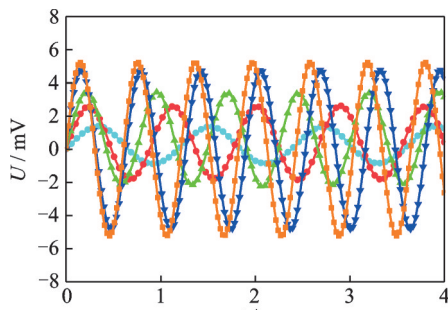
4.3 自传感性能实验及结果分析

采用电磁激振器对STMFD的自传感单元进行简谐振动测试。实验中简谐振动振幅分别为2.5、5.0、7.5和10 mm;频率分别为1.65、1.58、1.35、1.15和0.84 Hz。不同振幅下的自传感单元输出电压波形如图10所示。由图可以看出,自传感单元输出电压呈正弦周期性变化,输出电压频率与施加的激励频率一致。当振幅固定时,输出电压随着激励频率的增加而增加,1.65 Hz频率下的输出电压约为0.84 Hz频率下输出电压的4倍。这是由于简谐振动情况下,振动加速度和振动频率的平方成正比,输出电压大小与振动加速度成正比关系,即激振频率增大时,自传感单元输出电压增大。

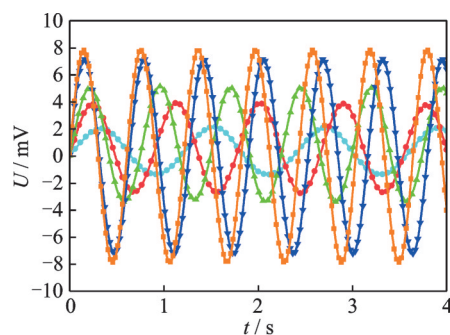
输出电压随振幅的变化情况如图11所示。由



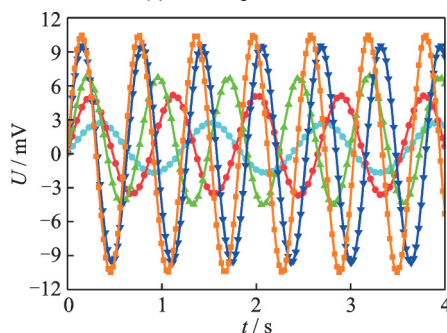
(a) 振幅为2.5 mm
(a) The amplitude is 2.5 mm



(b) 振幅为5.0 mm
(b) The amplitude is 5.0 mm



(c) 振幅为7.5 mm
(c) The amplitude is 7.5 mm



(d) 振幅为10 mm
(d) The amplitude is 10 mm

— 0.84 Hz; — 1.15 Hz; — 1.35 Hz; — 1.58 Hz; — 1.65 Hz

图10 不同振幅下的自传感单元输出电压波形

Fig.10 Output voltage waveforms of self-sensing unit at different amplitudes

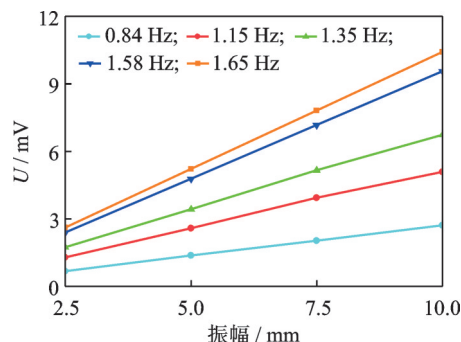


图11 输出电压随振幅的变化情况

Fig.11 Variation of output voltage with amplitude

图可知,自传感单元输出电压与振幅成线性关系。在各个频率下,振幅为10 mm时的输出电压约为振幅为5 mm时输出电压的2倍。

当频率为1.35 Hz、振幅分别为5.0和7.5 mm时,自传感单元和标准传感器所测加速度对比如图12所示。由图可知,自传感单元所测得加速度的频率分别为1.341和1.339 Hz;标准传感器测得的加速度频率为1.35 Hz,相对误差分别为0.67%和0.81%。

不同频率下的实验结果见表5。由表可知,自传感单元和标准传感器所测频率相对误差最大不超过1.5%,即自传感单元的数据能够准确反映振动频率。本研究进行了扫频激励振动实验测试自传感单

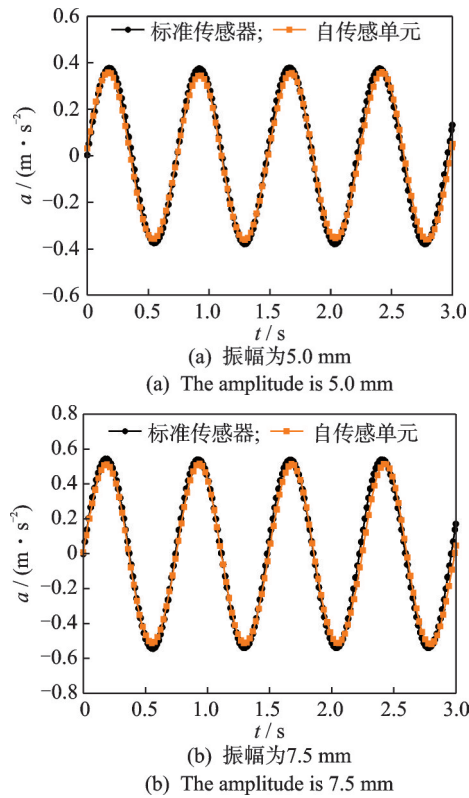


图 12 自传感单元和标准传感器所测加速度对比
Fig.12 Comparison of acceleration measured by self-sensing unit and standard sensor

元在频率变化时的性能。首先将激振器的激励位移设置为 2 mm,然后将信号发生器设置为在 0~50 s 内产生 0.7~1.8 Hz 的正弦扫频信号,使用标准传感器和自传感单元分别测量结构加速度。自传感单元和标准传感器所测加速度响应如图 13 所示。

表 5 不同频率下的实验结果

Tab.5 Experimental results at different frequencies

标准传感器 f/Hz	振幅/mm	自传感单元 f/Hz	相对 误差/%
1.65	5.0	1.638	0.73
	7.5	1.629	1.27
1.58	5.0	1.561	1.20
	7.5	1.570	0.63
1.35	5.0	1.341	0.67
	7.5	1.339	0.81
1.15	5.0	1.142	0.70
	7.5	1.137	1.13
0.84	5.0	0.835	0.60
	7.5	0.833	0.83

由图 13 可以看出:结构加速度呈现出先增大后减小的趋势,这是因为激振频率靠近单自由度框架固有频率 1.35 Hz 时,单自由度框架与外界振动产生共振,结构加速度变大;频率不断变化时,自传感单

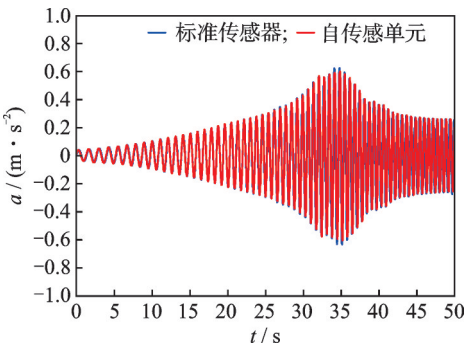


Fig.13 Acceleration response measured by self-sensing unit and standard sensor

元信号可覆盖标准传感器所采集的数据,且频率误差不得超过 2%。这说明利用所提出的方法,自传感单元在外界振动频率变化时能够反映振动的频率,验证了 STMFD 的自传感能力。

5 结 论

- 1) 推导了阻尼器固有频率和电流之间的表达式,通过改变电流来调节阻尼器的固有频率。自由衰减振动实验中 STMFD 使阻尼比提升了 75% 左右,简谐激励振动实验中 STMFD 使加速度峰值衰减了 25% 左右,验证了阻尼器的调谐减振性能。
- 2) 自传感单元与标准传感器所测频率相对误差在简谐振动情况下不超过 1.5%,扫频振动情况下不超过 2%,这表明 STMFD 自传感单元可以准确测量振动加速度的频率。
- 3) 设计了一种自传感式可调谐磁性液体阻尼器,其通过监测振动频率进而调整电流,扩大了减振频带,可达到最佳的减振效果。

参 考 文 献

[1] 崔文辉,朱健强,何媛琦,等.基于最优调谐液柱阻尼器的气浮光学平台稳定性研究[J].光学学报,2021,41(21): 146-154.
CUI Wenhui, ZHU Jianqiang, HE Yuanqi, et al. Stability of air floating optical platform based on optimal tuned liquid column damper[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 146-154.(in Chinese)

[2] 杨毅青,骈亚威,王云飞.内置被动阻尼器减振铣刀的实验测试[J].振动、测试与诊断,2019,39(6): 1177-1182.
YANG Yiqing, PIAN Yawei, WANG Yunfei. Experimental tests of damped milling cutter based on embedded passive damper[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(6): 1177-1182.(in Chinese)

- [3] 鲁正,周超杰,严德裕,等.附加增强型颗粒惯容装置的钢框架结构振动台试验研究[J].建筑结构学报,2023,44(增刊1):48-55.
LU Zheng, ZHOU Chaojie, YAN Deyu, et al. Study on shaking table test of steel frame structure with enhanced particle inerter device[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(S1): 48-55.(in Chinese)
- [4] KONAR T, GHOSH A. A review on various configurations of the passive tuned liquid damper[J]. Journal of Vibration and Control, 2023, 29(9/10): 1945-1980.
- [5] 王梁坤,施卫星,王洪涛,等.自适应TMD减振性能试验[J].振动、测试与诊断,2019,39(4):781-788.
WANG Liangkun, SHI Weixing, WANG Hongtao, et al. An adaptive-passive tuned mass damper system[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(4): 781-788.(in Chinese)
- [6] LU Z, CHEN X Y, LI X W, et al. Optimization and application of multiple tuned mass dampers in the vibration control of pedestrian bridges[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2017, 62(1): 55-64.
- [7] LU Z, WANG Z X, ZHOU Y, et al. Nonlinear dissipative devices in structural vibration control: a review[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 423: 18-49.
- [8] LU Z, LI K, OUYANG Y T, et al. Performance-based optimal design of tuned impact damper for seismically excited nonlinear building[J]. Engineering Structures, 2018, 160: 314-327.
- [9] 鲁正,廖元,吕西林.调谐质量阻尼器和调谐型颗粒阻尼器减震性能对比研究[J].建筑结构学报,2019,40(12):163-168.
LU Zheng, LIAO Yuan, LÜ Xilin. Comparison study of damping performance between tuned mass damper and tuned particle damper[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(12): 163-168.(in Chinese)
- [10] KAYABEKIR A E, NIGDELI S M, BEKDAS G. A hybrid metaheuristic method for optimization of active tuned mass dampers[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2022, 37(8): 1027-1043.
- [11] FITZGERALD B, SARKAR S, STAINO A. Improved reliability of wind turbine towers with active tuned mass dampers (ATMDs)[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 419: 103-122.
- [12] ZHANG Y M, YANG W R, WEI D J, et al. Energy dissipation of tuned magnetic fluid rolling-ball damper in low-frequency vibration[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2023, 59(4): 1-11.
- [13] YANG W R, WEI D J, SU J Z, et al. Numerical simulation analysis and experimental research on damping performance of a novel magnetic fluid damper[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021(1): 6629802.
- [14] 杨晓锐,杨庆新,郭兵,等.活塞式磁性液体减振器的阻尼分析和实验研究[J].仪器仪表学报,2017,38(8):2071-2077.
YANG Xiaorui, YANG Qingxin, GUO Bing, et al. Damping analysis and experiment research of piston magnetic liquid damper[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 2071-2077.(in Chinese)
- [15] 曾泽瑞,张磊,闫明,等.螺杆挤压-旋转式磁流变阻尼器力学特性研究[J].振动、测试与诊断,2022,42(5):937-944.
ZENG Zecui, ZHANG Lei, YAN Ming, et al. The mechanical performance of rotary magneto-rheological damper based on screw structure[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(5): 937-944.(in Chinese)
- [16] YANG W R, ZHANG Y M, YANG X R, et al. Systematic analysis of ferrofluid: a visualization review, advances engineering applications, and challenges[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2022, 24(6): 102.
- [17] HUANG C, YAO J, ZHANG T Q, et al. Damping applications of ferrofluids: a review[J]. Journal of Magnetism, 2017, 22(1): 109-121.
- [18] LI Y W, HAN P D, LI D C, et al. Typical dampers and energy harvesters based on characteristics of ferrofluids[J]. Friction, 2023, 11(2): 165-186.
- [19] GUAN X C, RU Y, HUANG Y H. A novel velocity self-sensing magnetorheological damper: design, fabricate, and experimental analysis[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2019, 30(4): 497-505.
- [20] 姚睿丰,王妍,高景晖,等.压电材料与器件在电气工程领域的应用[J].电工技术学报,2021,36(7):1324-1337.
YAO Ruifeng, WANG Yan, GAO Jinghui, et al. Applications of piezoelectric materials and devices in electric engineering[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(7): 1324-1337.(in Chinese)



第一作者简介:杨文荣,女,1969年7月生,博士、教授。主要研究方向为工程电磁场与磁技术和磁性纳米材料的理论及应用。曾发表《Systematic analysis of ferrofluid: a visualization review, advances engineering applications, and challenges》(《Journal of Nanoparticle Research》2022, Vol.24, No.6)等论文。
E-mail: wryang@hebut.edu.cn