

磁流变阻尼器设计与性能试验*

冯志敏 伍广彬 张 刚

(宁波大学海运学院, 宁波 315211)

【摘要】 以提高输出阻尼力和减少响应时间为目标,对磁流变阻尼器进行励磁线圈缠绕方法和磁场融合匹配分析,提出了基于反向串联线圈缠绕和活塞-永磁复合体的结构优化方法,并设计了一种磁流变阻尼器件。在DS-100型动静试验平台上进行不同激振频率、激振振幅和控制电流下的综合性能测试。研究表明,优化后磁流变阻尼器的输出阻尼力可提高65%,响应时间最大可减少50%。研究结果为进一步改进磁流变阻尼器性能提供了参考依据。

关键词: 磁流变阻尼器 结构优化 性能试验

中图分类号: U463.33 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)12-0033-06

Mechanical Performance Test of Magnetorheological Damper

Feng Zhimin Wu Guangbin Zhang Gang

(Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract

To improve damping force and reduce response time of magnetorheological (MR) damper, an optimal structure designing method was presented. The structure optimal methods, including reverse series of excitation coils and composed permanent magnets piston structure, was based on the calculation of resultant magnetic field for different excitation coil winding approaches. According to the provided structure optimal method, a MR damper was manufactured and its mechanical performances were tested on type DS-100 fatigue-testing machine with different forcing vibration frequency, vibration amplitude and control current. The experiments showed that the damping force of the proposed MR increased by 65%, and the response time reduces to more than a half at the most. This result provided an important reference to further mechanical property improvement of MR damper.

Key words Magnetorheological damper, Structure optimization, Performance test

引言

磁流变阻尼器是一种优良的半主动控制器件,兼有主动控制可调性和被动控制高可靠性的优点。可调系数、输出阻尼力和响应时间是衡量磁流变阻尼器性能的主要参数。近年来,国内外学者对磁流变阻尼器的工作机理、结构参数优化等进行了大量的理论和应用研究。张红辉等^[1-2]基于有限元方法对磁流变阻尼器磁路设计与性能进行了相关研究;王维锐等^[3]提出了一种改进的 Bouc - Wen 力学模

型并进行了试验研究。冯志敏等^[4]在不同励磁和控制电流下,对磁流变液中磁性微粒沉淀凝聚现象对阻尼器动力学性能的影响进行了试验研究;Koo等^[5-6]在三角波激励下对磁流变阻尼器的响应时间及其影响因素进行了研究;赵晓文等^[7]基于磁性微粒沉淀对一种多自由度磁流变阻尼器进行了研究;徐晓美等^[8]为提高磁流变阻尼器的可调系数和耗能性,研究了一种线圈外置式磁流变阻尼器。

以上研究大多基于单一性能指标进行理论分析与应用,缺乏动力学性能和响应时间的综合优化设

收稿日期: 2012-06-01 修回日期: 2012-07-08

* 国家自然科学基金资助项目(61071198)和浙江省自然科学基金资助项目(Y1101283、LY12F03009)

作者简介: 冯志敏,教授,主要从事状态监测和过程控制研究, E-mail: fengzhimin@nbu.edu.cn

计方法。为了避免追求单一性能指标优化而导致综合性能下降,本文基于励磁线圈缠绕方法和活塞-永磁体复合结构的相对融合研究,对磁流变阻尼器进行双重结构优化,设计一种新型磁流变阻尼器,比较优化前、后磁流变阻尼器的动力学性能和响应时间。

1 结构优化

磁流变阻尼器通过阻尼间隙磁场改变磁流变液的性能以控制输出阻尼力。采用活塞-永磁体复合结构,可使磁流变阻尼器在无控制电流时阻尼间隙存在磁场,增大初始阻尼力,改善动力性能;而不同的励磁线圈缠绕方法,影响磁流变阻尼器的磁场分布、电感与电阻比值,从而影响磁流变阻尼器的输出阻尼力和响应时间。

本文以双线圈活塞式磁流变阻尼器为研究体,假定两励磁线圈各物理参数相同,线圈关于活塞径向中心线对称,两侧翼活塞体长度相等且为中间活塞体长度的一半。双线圈活塞式-永磁体式磁流变阻尼器结构如图 1 所示。

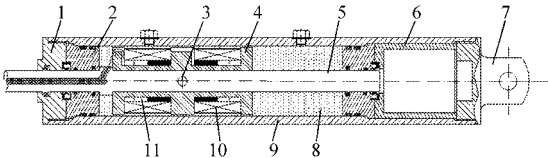


图 1 磁流变阻尼器结构示意图

Fig. 1 Diagram of MR damper

1. 左缸盖 2. 密封体 3. 定位销 4. 活塞 5. 活塞杆 6. 导向管
7. 右缸盖 8. 磁流变液 9. 缸体 10. 励磁线圈 11. 永磁体

1.1 励磁线圈缠绕方法

磁流变阻尼器两励磁线圈缠绕形式有同向串联、反向串联、同侧并联和异侧并联等。反向串联和异侧并联的电流反向,同向串联和同侧并联的电流同向。不同的线圈缠绕方法直接影响控制电路电感与电阻的比值及阻尼间隙的磁场分布,较大改变了磁流变阻尼器的响应时间和输出阻尼力^[9]。

1.1.1 响应时间

控制电路的响应时间与电感和电阻的比值呈正比,即 $t \propto L/R$ ^[10]。若令单个励磁线圈的电阻为 R ,电感为 L ,两励磁线圈产生的互感为 M ,则反向串联和异侧并联的电感与电阻比值为 $k_1 = (L - M)/R$;同向串联和同侧并联的电感与电阻比值为 $k_2 = (L + M)/R$ 。可见,反向串联和异侧并联的电感与电阻比值较小,其响应时间亦小。

1.1.2 磁场分布

磁流变阻尼器正常工作时,两励磁线圈在阻尼间隙处产生的磁场叠加,呈增磁和去磁效应。假设阻尼间隙磁场分布均匀,励磁线圈 1 产生磁场分布

如图 2a 所示,图中磁感线背离活塞体为正。

电流同向时,线圈 2 产生磁场如图 2b 所示,各阻尼间隙处磁感应强度为

$$\begin{cases} B_1 = B_{11} + B_{12} = \frac{NI}{R_m S_1} \left(1 + \frac{R_{02} + R_2}{R_{01} + R_{02} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \right) \\ B_2 = B_{22} - B_{21} = 0 \\ B_3 = -B_{31} - B_{32} = -\frac{NI}{R_m S_1} \left(1 + \frac{R_{02} + R_2}{R_{01} + R_{02} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中 R_{01} ——侧翼阻尼间隙磁阻
 R_{02} ——中间阻尼间隙磁阻
 R_1 ——侧翼活塞体磁阻
 R_2 ——中间活塞体磁阻
 R_3 ——1/2 活塞杆处磁阻
 R_4 ——1/2 缸体处磁阻 R_m ——总磁阻
 B_1, B_2, B_3 ——阻尼间隙 1、2、3 处的磁感应强度
 B_{ij} ——第 $j(j=1, 2)$ 个励磁线圈在第 $i(i=1, 2, 3)$ 个阻尼间隙处的磁感应强度
 N ——励磁线圈匝数 I ——控制电流
 S_1 ——阻尼间隙 1 的磁通面积

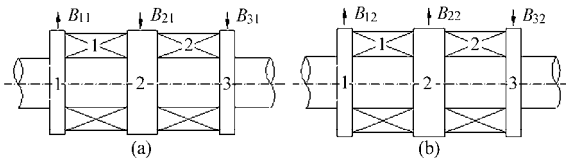


图 2 同向电流磁场分布

Fig. 2 Magnetic field distribution of current in same direction

(a) 励磁线圈 1 (b) 励磁线圈 2

电流异向时,线圈 2 产生的磁场与图 2b 大小相等、方向相反,各阻尼间隙磁感应强度为

$$\begin{cases} B_1 = B_{11} - B_{12} = \frac{NI(R_{01} + R_1 + R_3 + R_4)}{R_m S_1 (R_{01} + R_{02} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4)} \\ B_2 = -B_{21} - B_{22} = -\frac{NI(R_{01} + R_1 + R_3 + R_4)}{R_m S_2 (R_{01} + R_{02} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4)} \\ B_3 = -B_{31} + B_{32} = \frac{NI(R_{01} + R_1 + R_3 + R_4)}{R_m S_1 (R_{01} + R_{02} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4)} \end{cases} \quad (2)$$

式中 S_2 ——阻尼间隙 2 的磁通面积

其中 $R_m = R_{01} + R_1 + R_3 + R_4 + \frac{(R_{02} + R_2)(R_{01} + R_1 + R_3 + R_4)}{R_{01} + R_{02} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$ (3)

比较式(1)、(2)可知,电流同向时,两励磁线圈产生的磁场在两侧翼阻尼间隙处叠加增强,在中间阻尼间隙处叠加减弱;电流异向时,两励磁线圈产生的磁场在两侧翼阻尼间隙处叠加减弱,在中间阻尼间隙

处叠加增强。因此,电流异向可充分利用中间体阻尼间隙,有效避免两侧翼阻尼间隙过早饱和现象,且通过 3 个阻尼间隙的磁通量较大,增大了输出阻尼力。

由于反向串联相对于异侧并联输入电流小,可减轻外界控制电路负担,减少电能消耗。因此,励磁线圈宜采用电流异向的反向串联缠绕形式。

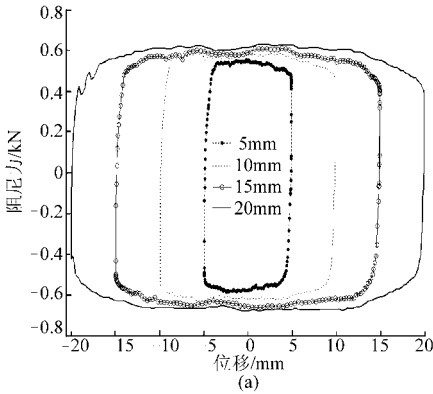
1.2 活塞-永磁体复合结构

在磁流变阻尼器活塞上的复合永磁体,可使阻尼间隙在无控制电流时充满磁场,磁流变液呈半凝固态的 Bingham 流体,增大屈服应力,增大输出阻尼力。此外,磁流变阻尼器内部嵌入永磁体,有效降低了磁流变液沉淀凝聚现象^[11],输出阻尼力动态性趋于稳定。铁氧体与钕铁硼是常用的永磁体,其中后者比前者更具有理想的退磁曲线、较高的磁能积和矫顽力,且性价比较高、机械性能好,在外磁场作用下一般不会发生永久退磁现象。

磁流变阻尼器输出阻尼力时,励磁线圈不断进行充电、放电,永磁体呈充磁和退磁现象。新型磁流变阻尼器嵌入的永磁体为钕铁硼 N42,其主要参数:剩磁为 1.32 T,矫顽力为 11.0 KOe,内禀矫顽力大于等于 12 KOe,最大磁能积为 42 MGOe。为使永磁体与励磁线圈产生的磁场磁性融合匹配,在活塞上选用了磁性相向的 2 个永磁体复合结构。

2 性能试验

为了研究双重结构优化对磁流变阻尼器动力性能和响应时间的影响程度和稳态效果,在 DS-100 型电液伺服动静试验机上进行磁流变阻尼器力学性能和响应时间测试分析。DS-100 型电液伺服动静试验机测试系统采用德国 DOLI 公司生产的 EDC580 型控制器,由工控机进行试验数据采集和分析处理。动力性能试验的激振信号为正弦波,通过改变控制电流、激振频率和激振振幅以测试磁流变阻尼器输



出阻尼力,研究阻尼力与三者的关系。响应时间的激振信号为三角波,在激励作用下,活塞作匀速运动,通过试验数据统计分析阻尼力的变化规律,计算响应时间。试验中通过控制电流通断和改变激振频率或激振振幅,实现电流和速度突变。

3 试验结果分析

3.1 力学性能分析

在有、无控制电流情况下,测试结构优化前、后磁流变阻尼器的动力学参数,以验证新型磁流变阻尼器的动力学性能。

3.1.1 无控制电流

在无控制电流、活塞运动位移曲线为正弦波、激振振幅为 10 mm 时,加载不同激振频率所产生的阻尼力-位移曲线如图 3 所示。每条曲线包围的面积表示磁流变阻尼器活塞往复运行一个周期所消耗的能量,面积越大耗能越强。由图可知,优化后磁流变阻尼器初始阻尼力明显提高,耗能亦有所增大,且激振频率越大,对磁流变阻尼器阻尼力的影响越大。

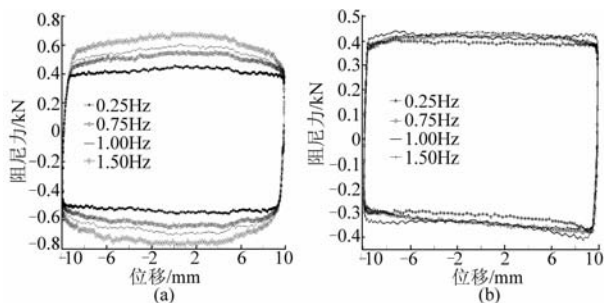


图 3 不同频率下阻尼力与位移关系曲线
Fig. 3 Relation curves of damping vs displacement with different frequencies
(a) 优化后磁流变阻尼器 (b) 优化前磁流变阻尼器

在无控制电流、活塞运动位移曲线为正弦波、激振频率为 0.5 Hz 时,加载不同激振振幅所产生的阻尼力-位移曲线如图 4 所示。两磁流变阻尼器的输

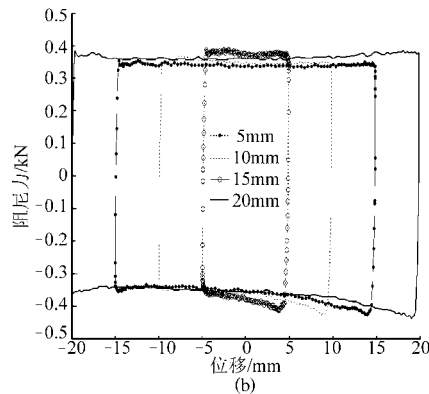


图 4 不同振幅下阻尼力与位移关系曲线

Fig. 4 Relation curves of damping vs displacement with different amplitudes
(a) 优化后磁流变阻尼器 (b) 优化前磁流变阻尼器

出阻尼力随激振振幅变化不大,但优化后磁流变阻尼器阻尼力-位移曲线相对饱满且输出阻尼力明显提高,增力大于 34%。

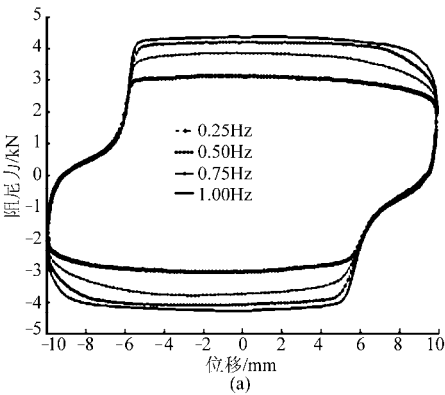
在各种激振频率或激振振幅下,新型磁流变阻尼器的输出阻尼力都显著提高,激振频率或激振振幅越大,减振效果越好。因此,基于双重结构优化的磁流变阻尼器可有效提高无电流输入状态下的减振控制效果,降低了因控制电路故障造成的不安全、不稳定因素。其中初始输出阻尼力增大的主要原因在于阻尼间隙在无电流输入状态下仍存在磁场,磁流变液呈半凝固态的 Bingham 流体,粘度更大。

3.1.2 有控制电流

(1) 正反向控制电流

磁流变阻尼器未嵌入永磁体,通入正、反向控制电流只改变阻尼间隙内磁感线方向,不影响磁感应强度大小,因而不影响输出阻尼力。采用活塞-永磁体复合结构,阻尼间隙充满固定方向的磁场,通入正、反向控制电流时,励磁线圈产生的磁场与原有磁场进行叠加,产生增磁和去磁效应,显著改变磁流变阻尼器的输出阻尼力。一般而言,阻尼间隙磁场增强的控制电流为正向,反之为反向。

优化后磁流变阻尼器在激振频率 1.0 Hz、振幅 20 mm 正弦激励下,加载不同控制电流时的阻尼力-



位移关系曲线如图 5 所示。在相同条件下,正向控制电流的输出阻尼力始终大于反向控制电流输出阻尼力,是因励磁线圈通入正向控制电流时,在阻尼间隙产生的磁场与永磁体叠加产生增强磁场。

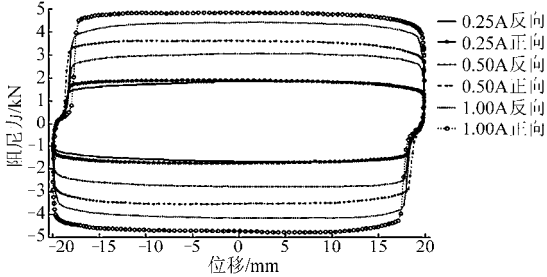


图 5 不同正反电流时阻尼力与位移关系曲线
Fig. 5 Relation curves of damping vs displacement with difference currents

在相同条件下,正向控制电流能输出更大的阻尼力,且阻尼力与电流呈单调函数关系,从而降低了励磁线圈的发热率和电能消耗,易于实现减振控制算法。

(2) 不同激振条件下阻尼力对比

在正向控制电流为 1.0 A、活塞运动为正弦波、激振振幅为 10 mm 时,加载不同激振频率所产生的阻尼力与位移关系曲线如图 6 所示。可见,正向控制电流下,磁流变阻尼器输出阻尼力随激振频率增加而增大。在相同激振频率时,优化后磁流变阻尼器输出阻尼力明显提高。

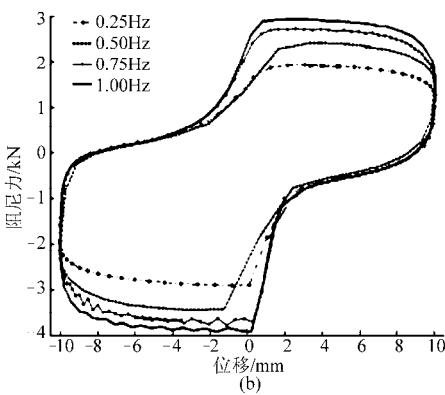


图 6 不同激振频率下阻尼力与位移关系曲线
Fig. 6 Relation curves of damping vs displacement with different frequencies
(a) 优化后磁流变阻尼器 (b) 优化前磁流变阻尼器

在正向控制电流为 0.5 A、活塞运动为正弦波、激振频率为 1 Hz 时,加载不同激振振幅所产生的阻尼力与位移关系曲线如图 7 所示。正向控制电流下,磁流变阻尼器的输出阻尼力随激振振幅变化不大,但在相同振幅下,优化后磁流变阻尼器的输出阻尼力明显增大,其中振幅 5 mm 时增幅最大,提高了 65.5%。

(3) 不同控制电流下阻尼力对比

在激振频率 1.0 Hz、激振振幅 10 mm 正弦激励

下,加载不同控制电流所产生的阻尼力与位移关系曲线如图 8 所示。磁流变阻尼器的输出阻尼力随电流增大而变大,但增加率逐渐减小,并趋于稳定。在相同控制电流下,优化后磁流变阻尼器的输出阻尼力均大于优化前磁流变阻尼器输出阻尼力。

3.2 响应时间分析

控制电流和活塞运动速度对磁流变阻尼器的响应时间产生重要影响。因此,本文对磁流变阻尼器的响应时间测试研究主要考虑以上 2 个因素。

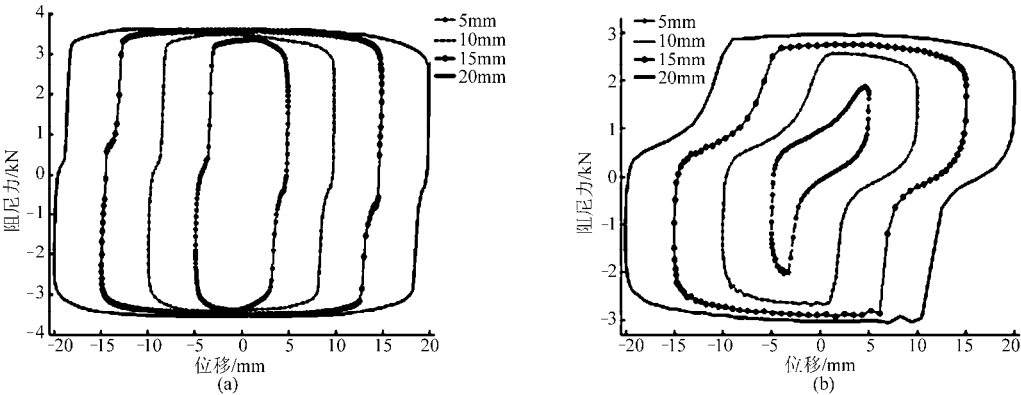


图 7 不同振幅下阻尼力与位移关系曲线

Fig. 7 Relation curves of damping *vs* displacement with different amplitudes

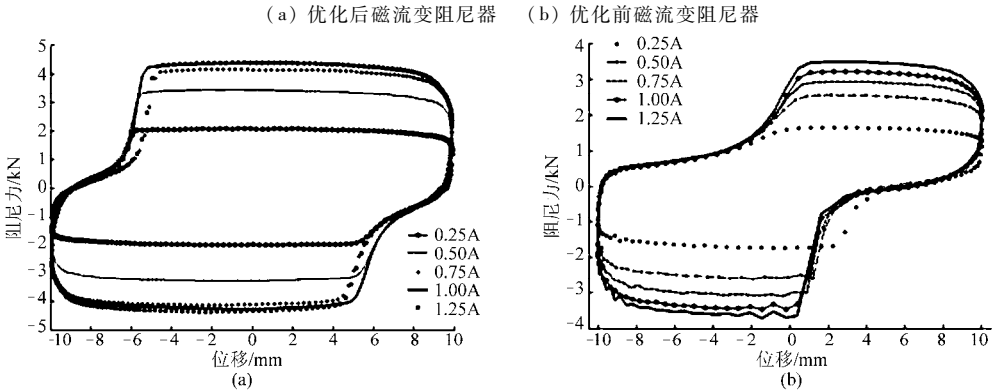


图 8 不同控制电流下阻尼力与位移关系曲线

Fig. 8 Relation curves of damping *vs* displacement with different currents

3.2.1 不同控制电流下响应时间对比

在激振频率为 0.5 Hz 三角波激励下,加载不同控制电流时产生的响应时间与电流关系曲线如图 9 所示。图中,两阻尼器响应时间曲线相似,先随电流增大而迅速增加,随后变缓慢,当电流增至 1.25 A 时,响应时间的变化呈减小趋势。电流较小时,磁流变液性能变化最为明显,但增大到一定值时,磁流变液达到磁性饱和状态,性能相对稳定,且电流越大,达到磁性饱和所需的时间越短。对比可知,优化后磁流变阻尼器的响应时间明显缩短,且激振振幅越小,时间减少越明显,最大可减少 50%。

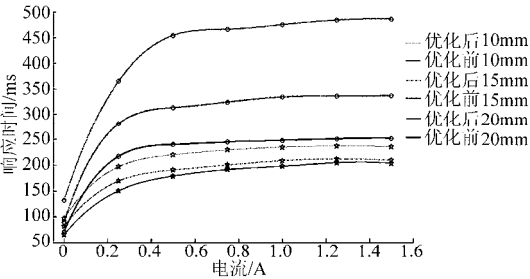


图 9 响应时间与控制电流关系曲线

Fig. 9 Relation curves of response time *vs* current

3.2.2 不同激振频率、振幅下响应时间对比

激振频率和振幅大小反映了磁流变阻尼器活塞

运动速度的快慢。相同条件下,激振频率或激振振幅越大,磁流变阻尼器的活塞运动速度也就越大。

图 10a 为阻尼器在激振振幅为 10 mm 的三角波激励下,加载不同激振频率时产生的响应时间-频率曲线。两阻尼器响应时间的变化趋势相似,随激振频率增大而减小,最终趋于稳定值。但在相同条件下,优化后磁流变阻尼器的响应时间小于优化前磁流变阻尼器的响应时间,且激振频率越小,响应时间减小越明显。

图 10b 为两阻尼器在激振频率为 0.5 Hz 的三角波激励下,不同激振振幅所产生的响应时间-振幅曲线。两阻尼器响应时间的变化相似,随激振振幅增加而减小,其中优化后磁流变阻尼器的响应时间变化较缓。在相同条件下,优化后磁流变阻尼器的响应时间明显减小,且激振振幅越小,时间减少效果越好,最大可减少 50%。

4 结论

(1) 基于励磁线圈反向串联缠绕和活塞-永磁体复合结构的双重结构优化设计是提高磁流变阻尼器阻尼力,减少振动和响应时间的有效方法,满足了改善综合动力性能和稳态工作要求。

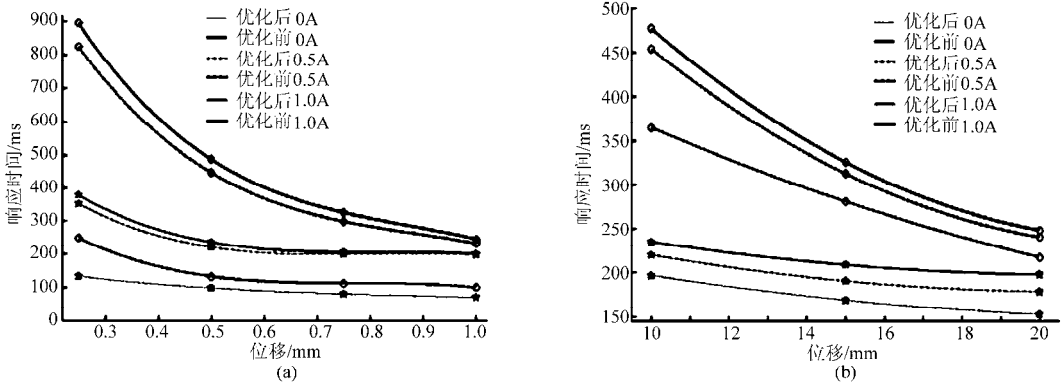


图 10 响应时间与频率、振幅关系曲线

Fig. 10 Relation curves of response time vs frequency and amplitude

(a) 不同激励频率响应时间曲线 (b) 不同激励振幅响应时间曲线

(2)与优化前磁流变阻尼器相比,输出阻尼力明显提高,阻尼力最大可增加 65%,并随控制电流、激振频率和激振振幅的增加而增大。大可减少 50%,并随激振频率和激振振幅的增加而减小,随电流呈磁性饱和状态。同时,激振振幅、频率越小,响应时间减少效果越好。

(3)响应时间远小于优化前磁流变阻尼器,最

参 考 文 献

1 张红辉,廖昌荣,陈伟民. 磁流变阻尼器磁路设计与性能的相关性研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 546 ~ 550.
Zhang Honghui, Liao Changrong, Chen Weimin. The correlation study on magnetic design and performance of MR damper [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(4): 546 ~ 550. (in Chinese)

2 兰文奎,郑玲,李以农,等. 活塞式磁流变液阻尼器磁场有限元分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(4): 142 ~ 145.
Lan Wenkui, Zheng Ling, Li Yinong, et al. FEM analysis of magnetic field of piston-type MR fluids damper [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4): 142 ~ 145. (in Chinese)

3 王维锐,吴参,陈颖,等. 磁流变减振器滞回特性的改进 Bouc - Wen 模型[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 48 ~ 52.
Wang Weirui, Wu Can, Chen Ying, et al. Modified Bouc - Wen model based on hysteretic characteristic experiment of magneto-rheological damper [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 48 ~ 52. (in Chinese)

4 冯志敏,侯振宁,张刚. 磁性颗粒沉淀对磁流变阻尼器动力性能影响研究[J]. 中国航海, 2011, 34(1): 36 ~ 40.
Feng Zhimin, Hou Zhenning, Zhang Gang. Research on the influence of MR damper dynamic performance caused by magnetic particles deposition [J]. Navigation of China, 2011, 34(1): 36 ~ 40. (in Chinese)

5 Koo J H, Goncalves F D, Ahmadian M. A comprehensive analysis of the response time of MR dampers [J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(2): 351 ~ 358.

6 黄曦,余淼,陈爱军,等. 磁流变阻尼器动态响应及其影响因素分析[J]. 功能材料, 2006, 37(5): 808 ~ 813.
Huang Xi, Yu Miao, Chen Aijun, et al. Analysis of dynamic response time of MR damper and its influential factors [J]. Journal of Functional Materials, 2006, 37(5): 808 ~ 813. (in Chinese)

7 赵晓文,侯志明,杜彦亭. 多自由度磁流变阻尼器设计及其阻尼特性研究[J]. 机械设计, 2009, 26(12): 16 ~ 18.
Zhao Xiaowen, Hou Zhongming, Du Yanting. Research on the design of multi degree of freedom magnetorheology damper and its damping characteristics [J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(12): 16 ~ 18. (in Chinese)

8 徐晓美,曾才民,余伟. 线圈外置式磁流变阻尼器阻尼特性理论研究[J]. 煤矿机械, 2010, 31(12): 46 ~ 48.
Xu Xiaomei, Zeng Caimin, Yu Wei. Theoretical researches on damping characteristics of MR damper with exterior coil [J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(12): 46 ~ 48. (in Chinese)

9 伍广彬,冯志敏,张刚. 基于性能最优的磁流变阻尼器励磁线圈缠绕方法研究[J]. 现代科学仪器, 2011(6): 47 ~ 50.
Wu Guangbin, Feng Zhimin, Zhang Gang. Winded method study of excitation coils of magnetorheological damper based on optimal performance [J]. Modern Scientific Instruments, 2011(6): 47 ~ 50. (in Chinese)

10 樊庆利. 磁流变阻尼器响应时间预测研究[D]. 南京:南京理工大学, 2007.

11 侯振宁. 磁流变阻尼器力学性能研究与优化[D]. 宁波:宁波大学, 2011.
Hou Zhenning. Study of the properties of MR damper and optimal design [D]. Ningbo: Ningbo University, 2011. (in Chinese)