

基于 MRE 的变频 TMD 竖向振动控制

涂建维,赖方鹏,张家瑞,汪伯潮

(武汉理工大学道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室,湖北 武汉 430070)

摘要 目的 研发一种基于新型智能材料磁流变弹性体(MRE)的变频调谐质量阻尼器(TMD),为弥补传统 TMD 的频率不可调提供理论依据.方法 研究 MRE 剪切模量与施加电流之间的关系,采用希尔伯特-黄变换(HHT)和随机减量技术(RDT)相结合的方式对主结构频率进行精确识别,完成了变频 TMD 对固支梁竖向振动控制的仿真计算,分析了不同质量比对变频 TMD 和传统 TMD 减振控制的影响.结果 在自行研发的变频 TMD 中,MRE 的剪切模量会随着外加电流的增强而增大,在 1.8 A 左右接近饱和值.利用 HHT 和 RDT 相结合的方法对频率识别方法是精确有效的.固支梁竖向振动的仿真结果表明,变频 TMD 能够在固支梁频率发生变化时仍保持良好的减振效果,固支梁频率与传统 TMD 自振频率相差越大,在达到同样减振效果时所需要的变频 TMD 质量比就越小.结论 基于 MRE 的变频 TMD 能够实时与主结构频率保持一致,在主结构频率发生改变时仍具备良好的减振效果,并且变频 TMD 在减小 TMD 质量比方面也具有较大的优势.

关键词 磁流变弹性体;变频 TMD;磁路分析;RDT;竖向振动

中图分类号 TU112.59;TB535

文献标志码 A

Vertical Vibration Control of Variable Frequency TMD Based on MRE

TU Jianwei, LAI Fangpeng, ZHANG Jiarui, WANG Bochao

(Key Laboratory of Hubei Province of Roadway Bridge and Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, China, 430070)

Abstract: In this paper, a variable frequency tuned mass damper (TMD) based on a new type of smart material magnetorheological elastomer (MRE) is developed in order to make up for the shortage of traditional TMD, the frequency of which is non-adjustable. The relationship between the shear modulus of MRE and the applied current is studied, the frequency of main structure is accurately identified by the combination of Hilbert Huang Transform (HHT) and random decrement technique (RDT), the simulation of vertical vibration control of fixed beam with variable frequency TMD is carried out, and the influence of different mass ratio on variable frequency TMD and tradi-

收稿日期:2017-12-10

基金项目:国家自然科学基金面上项目(81478372);湖北省创新群体项目(2016CFA020);武汉理工大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017-zy-055)

作者简介:涂建维(1975—),男,教授,博士,主要从事结构振动控制和无机纤维筋混凝土方面研究.

tional TMD vibration control is analyzed. The result shows that the shear modulus of MRE increases with the increase of applied current, and it is close to the saturation value when the current reaches about 1.8 A in the developed variable frequency TMD. The method of frequency identification which is combination of HHT and RDT is accurate and effective. The simulation results of vertical vibration of fixed beam show that when the frequency of fixed beam changes, variable frequency TMD can also maintain good damping effect, the greater the difference between the frequency of main structure and the natural frequency of TMD is, the smaller the mass ratio of the required variable frequency TMD is under the premise of the same vibration reduction effect. The conclusion of this paper is that the variable frequency TMD based on MRE can keep the same frequency with the main structure in real time and it has good vertical vibration reduction effect in a certain frequency range of the main structure, which has a great advantage in reducing the mass ratio of TMD.

Key words: magnetorheological elastomer; variable frequency TMD; magnetic circuit analysis; RDT; vertical vibration

在人行荷载、车辆荷载等动力作用下,大跨度楼板、大跨度桥梁等结构的竖向振动是较为常见的振动形式.随着结构日趋复杂,新型轻盈材料的出现使得结构越来越柔,振动响应越来越大,减振理论和方法也不断更新^[1-4].对于大跨度桥梁和楼盖等刚度较小的结构,采用调谐质量阻尼器(TMD)进行竖向振动控制具有良好的减振效果^[5].然而,TMD对受控结构的自振频率有较高要求,需要与受控结构的自振频率相一致才能得到较好的减振效果,这给结构竖向振动控制带来较大的局限性.然而,建筑结构经过长期服役后会发生刚度退化^[6],在满载和空载情况下人行天桥的自振特性也会发生巨大变化^[7],这都会引起受控结构的频率改变而大大降低传统TMD的减振效果.针对此类问题研究学者们提出可以采取增加TMD质量^[8-9]和利用多重调谐质量阻尼器(MTMD)^[10-11]来提高减振效果,但这将导致成本增加,安装空间会受到限制,并且这些技术都难以让TMD的自振频率跟随主结构频率的变化.磁流变弹性体(Magnetorheological Elastomer, MRE)是一种新型智能材料,它由橡胶基体、硅油和铁粉组成,其剪切模量在变化的磁场作用下会发生可逆可控的变化^[12-13].为此,笔者基于智能材料MRE提出并设计了一种新型变频TMD,对变频TMD进行物理特性分析

和磁路分析,并将其应用于固支梁的竖向振动控制中.通过在固支梁跨中处施加不同质量块使自身频率发生变化,利用变频TMD变刚度机理使TMD频率与固支梁频率保持一致,最后比较了变频TMD与传统TMD的减振效果差异.

1 变频 TMD 的物理特性

基于 MRE 的剪切式变频 TMD 结构如图 1 所示.

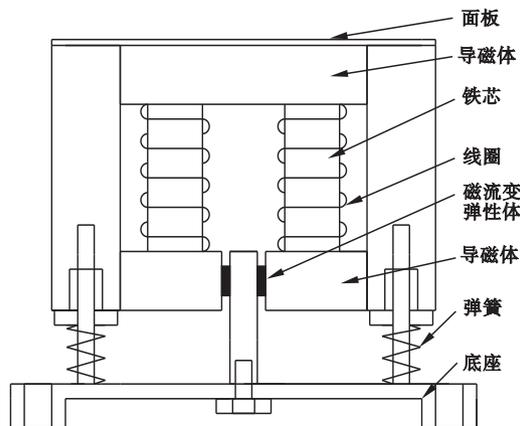


图 1 基于磁流变弹性体的变频 TMD 装置

Fig. 1 Variable frequency TMD device based on magnetorheological elastomer

TMD 装置主要由上导磁体、下导磁体、左右两块铁芯、线圈和磁流变弹性体构成,其中磁流变弹性体采用硅橡胶 15%,硅油 15%,铁粉 70% 制备而成^[14],左右两块铁芯

都绕制线圈. 变频 TMD 的质量由导磁体、铁芯和箱体面板来提供, 阻尼由磁流变弹性体提供, 刚度由弹簧和磁流变弹性体提供. 磁场变频 TMD 的刚度变化由改变磁流变弹性体的剪切模量来实现, 通过在线圈中通入不同大小的电流来控制磁流变弹性体周围的磁场强度大小, 进而使其剪切模量发生变化从而达到改变刚度的目的^[15].

为了掌握变频 TMD 的频率变化与磁场之间的关系, 对变频 TMD 进行 ANSYS 磁路分析^[16] (见图 2). 从图 2(a) 可以看出, 铁芯周围以及磁流变弹性体周围的磁感应强度较大. 从图 2(b) 可以看出, 在施加 2 A 电流强度的条件下, 磁流变弹性体区域的磁感应强度分布较均匀, 达到了 0.65 T.

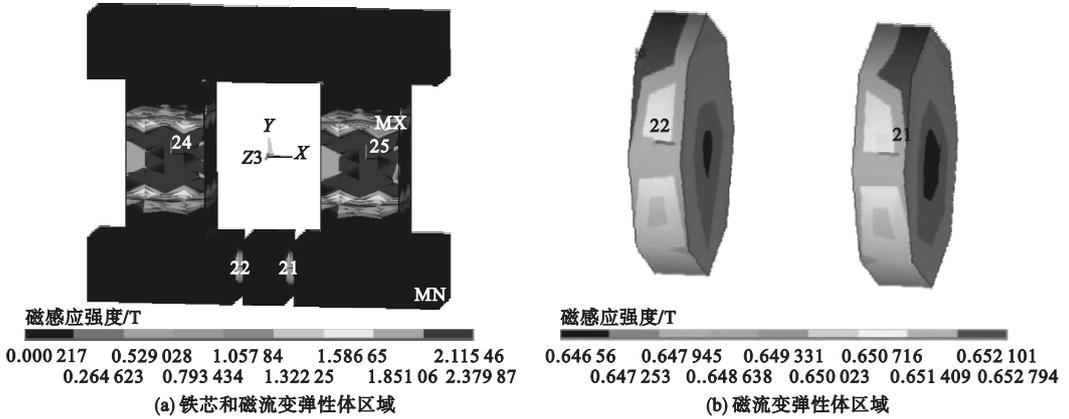


图 2 2 A 电流情况下变频 TMD 的磁感应强度分布

Fig. 2 Magnetic induction intensity distribution of variable frequency TMD with 2 A current

在线圈中逐步施加不同的电流大小情况下, 得到磁流变弹性体区域不同的磁感应强度值, 得到磁感应强度 - 电流变化 (见图 3).

系曲线再经拟合可以得到外加电流与 MRE 剪切模量的关系曲线 (见图 4).

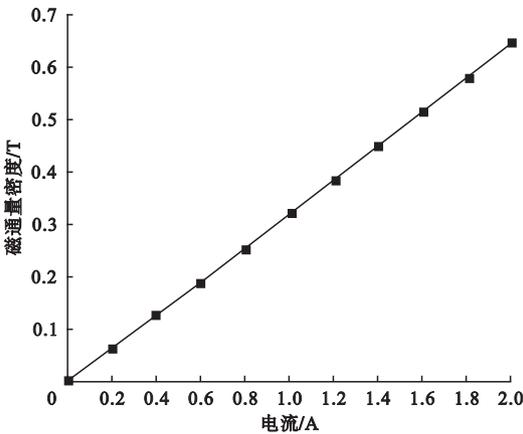


图 3 磁场强度与电流的关系

Fig. 3 The relationship between magnetic field intensity and current

图 3 中显示磁流变弹性体区域的磁感应强度与电流大致成正比关系. 然后结合磁流变弹性体的磁感应强度与 MRE 剪切模量关

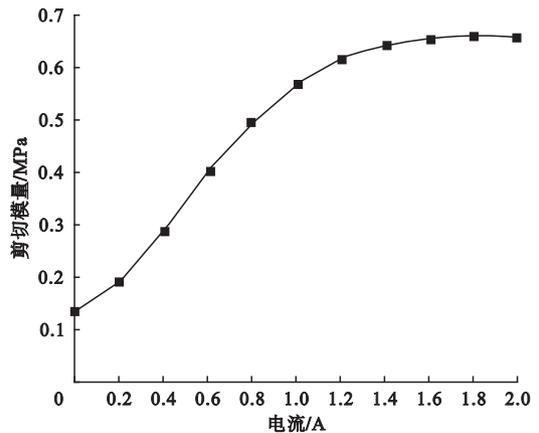


图 4 剪切模量与电流的关系

Fig. 4 The relationship between shear modulus and current

从图 4 中可以看出, MRE 的剪切模量随着外加电流的增强而增大, 在 0 到 1 A 剪切模量的增量较大, 电流大于 1 A 时, 剪切模量增加较缓慢, 到 1.8 A 左右接近饱和值. 因此, 笔者设计的变频 TMD 参数如表 1 所示.

表1 变频TMD参数

Table 1 Parameters of variable frequency TMD

静质量/ kg	动质量/ kg	输入电 流/A	零电流 刚度/(N·m ⁻¹)	最大刚度/ (N·m ⁻¹)
0.435 6	2.138 7	0~2.0	7 120	34 976

2 变频TMD的竖向振动控制算法

2.1 主结构自振频率的识别

TMD取得良好减振效果的必要条件就是TMD的振动频率需要与主结构的自振频率保持一致.为了使变频TMD实时达到此要求,需要对主结构的频率进行识别并实时调整变频TMD的刚度,以达到变频TMD与主结构频率相一致的目的.在环境激励下,主结构产生了非平稳、非线性的随机响应信号,利用常规频率识别方法难以达到较高的精度要求.涂建维等^[17]采用希尔伯特-黄变换(HHT)和自然激励技术(NExT)相结合的方法进行模态识别,但这种方法需要设置多个传感器以提供测点和参考点数据,且比较依赖参考点的设置标准与数量,在识别精度方面受到诸多不确定性因素的影响,在此基础上进一步采用傅里叶变换(FFT)、希尔伯特-黄变换(HHT)和随机减量技术(RDT)相结合的方法对主结构进行频率识别^[18],该方法仅需采集主结构一个位置的位移或加速度响应数据,对频率识别的精度较高.

设 $X(t)$ 为主结构在环境激励下传感器采集某个位置的位移响应信号,首先对 $X(t)$ 进行FFT变换以估计其第 i 阶频率 ω_i ,然后通过频率为 $\omega_{i1} < \omega_i < \omega_{i2}$ 的带通滤波器得到第 i 阶频率的时间序列 $X_i(t)$,对 $X_i(t)$ 进行经验模态分解(EMD)得到第 i 阶本征模态函数(IMF) $\chi_i(t)$, $\chi_i(t)$ 平稳随机信号为

$$\chi_i(t) = \chi_i(0)D(t) + \dot{\chi}_i(0)V(t) + \int_0^t h(t-\tau)f(\tau)d\tau. \quad (1)$$

式中: $D(t)$ 为单位初位移产生的自由振动响

应; $V(t)$ 为单位初速度产生的自由振动响应; $h(t)$ 为系统单位脉冲响应函数; $f(\tau)$ 为均值为零的平稳随机激励;系统振动响应 $\chi_i(t)$, $\dot{\chi}_i(t)$ 的均值为零.

在零到最大振幅之间取一合适的固定位移值 A 截取 $\chi_i(t)$,可得到 N 个不同的交点,以这些交点为起始时刻点,将会得到 N 个已 A 为初位移的子样本响应信号,设第 j 个样本响应信号为 $\chi_{ij}(t)$, $\dot{\chi}_{ij}(0)$ 为第 j 个样本响应信号的初速度,则

$$\chi_{ij}(t) = AD(t) + \dot{\chi}_{ij}(0)V(t) + \int_0^t h(t-\tau)f(\tau)d\tau. \quad (2)$$

对 $\chi_{ij}(t)$ 取统计均值,在 N 足够大的情况下

$$x_i(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \chi_{ij}(t) \approx E[AD(t) + \dot{\chi}_{ij}(0)V(t) + \int_0^t h(t-\tau)f(\tau)d\tau] = AD(t) + E[\dot{\chi}_{ij}(0)]V(t) + \int_0^t h(t-\tau)E[f(\tau)]d\tau = AD(t). \quad (3)$$

$x_i(t)$ 即为 $X(t)$ 第 i 阶对应以初位移为 A 的自由衰减响应信号,进行Hilbert变换

$$H[x_i(t)] = \frac{PV}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x_i(\tau)}{t-\tau} d\tau. \quad (4)$$

式中: PV 为柯西主值.

由此可以得到一个解析信号

$$z_i(t) = x_i(t) + jH[x_i(t)] = A_i(t)e^{j\varphi_i(t)}. \quad (5)$$

其中,相位函数 $\varphi_i(t) = \arctan \frac{H[x_i(t)]}{x_i(t)}$.由此得到主结构的瞬时频率为

$$\omega_i(t) = \frac{d\varphi_i(t)}{dt}. \quad (6)$$

对 $\omega_i(t)$ 取均值,可得到第 i 阶频率为 $\omega_i = E[\omega_i(t)]$.

2.2 变频TMD对主结构自振频率的实时跟踪

变频TMD的振动控制原理与传统TMD相同,因此变频TMD需要以传统TMD为基础进行参数设计.根据TMD基于加速

度的最优参数设计方法,在确定质量比 μ 、主结构质量 M 和主结构频率 f 的情况下,可以得出 TMD 的最优刚度和最优阻尼设计式^[19].

$$k = \frac{\mu M f^2}{1 + \mu}, \quad (8)$$

$$\xi = \sqrt{\frac{3\mu}{4(1+\mu)(2+\mu)}}. \quad (9)$$

变频 TMD 对主结构自振频率的跟踪过

程如图 5 所示. 主结构频率发生变化的时候, 传感器接收到的信号经过主结构的频率识别过程可获取自振频率 f , 根据最优刚度设计式(8)可获取 TMD 所需的刚度, 结合刚度与电流之间的关系来调整变频 TMD 中线圈中的电流使变频 TMD 达到最优设计刚度, 而由式(9)可知, 最优阻尼只与质量比相关, 因此变频 TMD 的初始阻尼选取应根据式(9)来确定, 以呈现最佳减振效果.

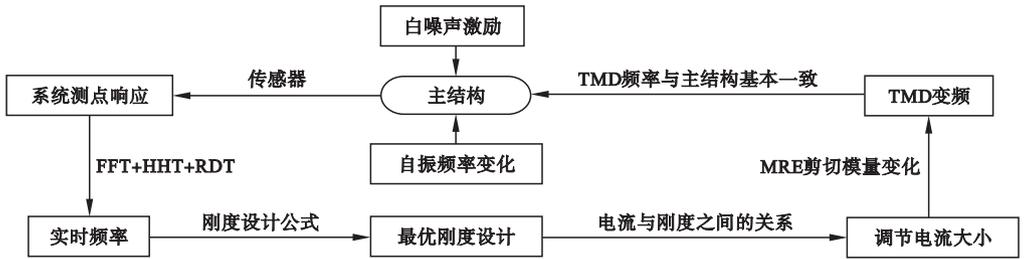


图 5 变频 TMD 对频率的实时跟踪

Fig. 5 Real time frequency tracking of variable frequency TMD

3 变频 TMD 对固支梁的竖向振动控制

选用长宽高为 2.5 m × 0.2 m × 0.02 m 固支钢梁模型, 通过在跨中施加 1 至 8 个不同数量的质量块实现主结构频率的改变, 图 6 为模型示意图. 为了研究变频 TMD 的竖向振动控制效果, 以主结构跨中施加 4 个质量块为基准, 对应的一阶频率为 $f = 15.6161$ Hz; 一阶模态质量 $M = 45.9347$ kg; 初始质量比为 $\mu = 0.05$. 代入式(8)和式(9)中, 可以得到 TMD 的初始刚度为 $k = 21058$ N/m, 阻尼比 $\xi = 0.132$.

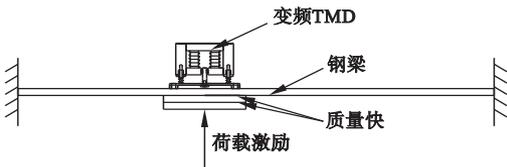


图 6 变频 TMD 对固支钢梁的竖向振动控制

Fig. 6 Vertical vibration control of fixed supported steel beam by variable frequency TMD

运用 HHT 与 RDT 相结合的方法对固支梁主结构的第一阶频率进行识别. 图 7 显示

了高斯白噪声激励下固支梁 1/3 位置处的位移时程响应信号, 然后对该响应信号进行傅立叶变换, 傅立叶分析结果如图 8 所示, 可以知道第 1 阶频率大概在 15 Hz 到 20 Hz, 通过带通滤波器以及经验模态分解可得到第一阶本征模态如图 9 所示, 经过 RDT 处理提取可得到第一阶模态自由衰减信号, 最后采用 Hilbert 变换可求取主结构的瞬时频率, 第一阶瞬时频率如图 10 所示. 对瞬时频率曲线求均值可得到主结构的第一阶频率为 17.15 Hz, 利用有限元模态分析结果为 17.10 Hz, 二者相差 0.29%, 说明采用 HHT 和 RDT 相结合的方式对主结构进行频率识别具有很高的精度.

图 11 显示了改变固支梁质量后频率变化的识别结果, 其变化范围为 17.1498 ~ 13.8764 Hz, 根据不同的一阶频率值可以得到对应变频 TMD 的刚度. 笔者建立 8 个频率值的主结构 - 传统 TMD 系统和主结构 - 变频 TMD 系统, 在跨中施加幅值为 1 N 的对应频率的正弦荷载竖向激励, 使其发生竖向振动, 分别提取传统 TMD 控制下和变频

TMD控制下主结构跨中相应的加速度幅值,得到的结果如图12所示.结果显示,当主结构频率发生变化时,在变频TMD的竖向振动控制下的加速度幅值要明显低于传统TMD控制下时的加速度幅值.

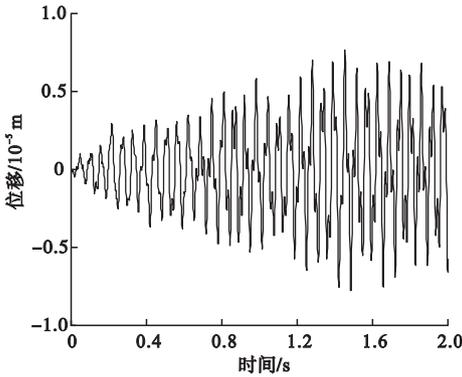


图7 白噪声激励下位移响应信号

Fig. 7 Midspan displacement response signal under white noise excitation

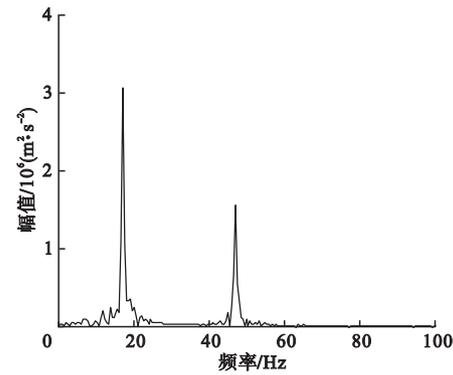


图8 傅立叶分析结果

Fig. 8 Fourier analysis results

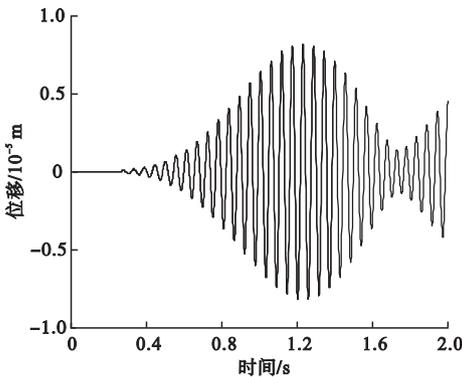


图9 第一阶本征模态函数

Fig. 9 1st order intrinsic mode function

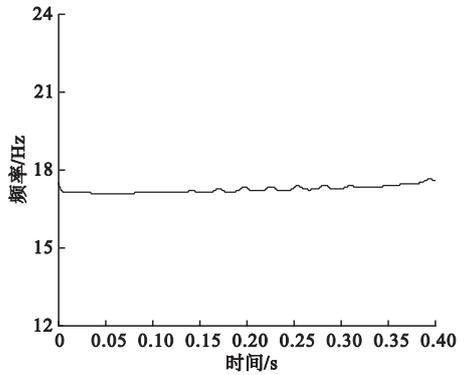


图10 第一阶瞬时频率

Fig. 10 1st order instantaneous frequency

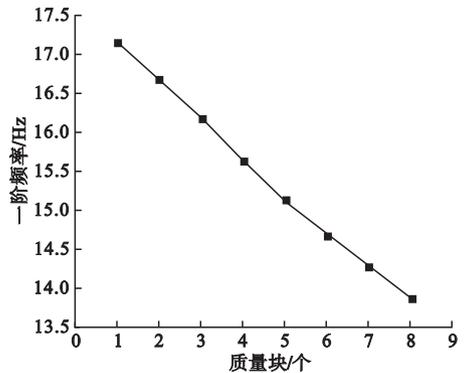


图11 一阶频率与施加质量块数量关系

Fig. 11 The relationship of 1st order frequency and the quantity of mass applied

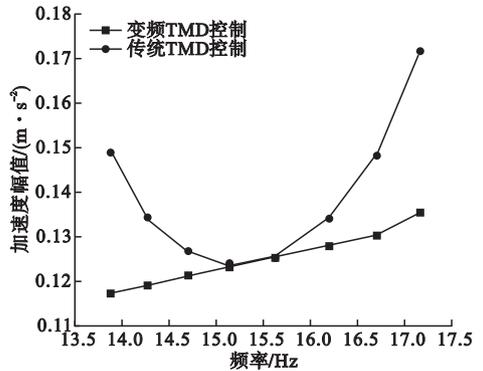


图12 变频TMD和传统TMD减振效果对比

Fig. 12 Comparison of vibration reduction effect between variable frequency TMD and traditional TMD

在实际工程结构中,通常TMD与主结构的质量比值越大,减振效果越好,但是对于庞大的土木工程结构而言,较大的质量比几乎无法实现.变频TMD与传统TMD相同,

减振效果与质量比的选取有较大的关系,针对不同质量比的变频 TMD 分别在 13.876 4 Hz、14.266 8 Hz、14.680 8 Hz、15.129 7 Hz、15.616 1 Hz、16.177 8 Hz、16.677 1 Hz 及 17.149 8 Hz 的 8 个频率值进行了竖向振动控制仿真测试,提取 13.876 4 Hz、15.616 1 Hz 和 17.149 8 Hz 3 个频率值下的跨中加速度幅值,得到各个频率值下加速度幅值与质量比的关系拟合曲线(见图 13),结果显示在质量比为 0.01 到 0.05,变频 TMD 的减振效果与质量比大致呈指数的关系.图 14 显示的是在不同频率下达到传统 TMD 质量比为 0.05 的减振效果时,所需要的变频 TMD 的质量比值.从图 14 中可以看出,当主结构频率与 TMD 自振频率同时为 15.616 1 Hz 时,所需要的变频 TMD 质量比值与传统 TMD 相同,均为 0.05;当主结构频率与 TMD 自振频率相差越大,达到同样减振效果的前提下,所需变频 TMD 的质量比就越小,这更体现了变频 TMD 在质量比方面的优势.

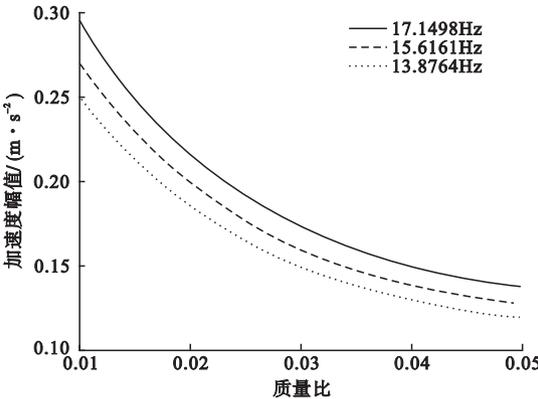


图 13 变频 TMD 控制下加速度幅值与质量比的关系

Fig. 13 Relationship of acceleration amplitude and mass ratio under variable frequency TMD control

4 结论

(1)研发了一种基于新型智能材料磁流变弹性体的变频 TMD,通过磁路分析研究了磁流变弹性体剪切模量随电流变化的关系,

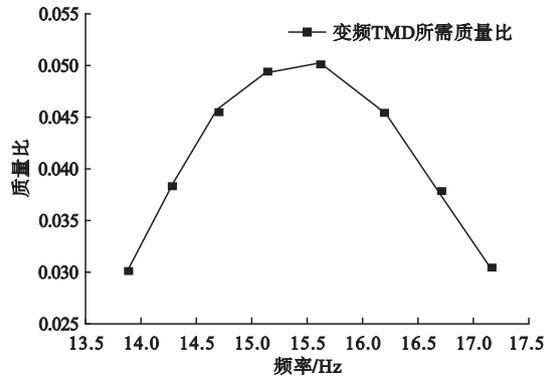


图 14 同样减振效果下的变频 TMD 所需质量比
Fig. 14 The mass ratio required of the variable frequency TMD under the equal vibration reduction effect

可以通过控制外加电流来调节变频 TMD 的刚度,从而改变其频率.

(2)采用 HHT 与 RDT 相结合对主结构频率识别具备较高的精度,识别后可以让变频 TMD 对主结构频率进行实时跟踪.

(3)通过将变频 TMD 对固支梁竖向振动控制仿真分析表明,当固支梁频率发生改变时变频 TMD 同样能够获得较好的减振效果,并且变频 TMD 相对于传统 TMD 能够利用更小的质量比来达到同样的减振效果.

参考文献

[1] 牛林. 结构振动控制理论和计算方法[M]. 北京:中国科学技术出版社,2016.
(NIU Lin. Theory and calculation method of structural vibration control [M]. Beijing: Chinascience and technology press,2016.)

[2] TUBINO F, PICCARDO G. Tuned Mass Damper optimization for the mitigation of human-induced vibrations of pedestrian bridges [J]. Meccanica, 2014, 50(3) :1 - 16.

[3] YUN Y, LI Y. A general dynamics and control model of a class of multi-DOF manipulators for active vibration control [J]. Mechanism & machine theory, 2011, 46(10) :1549 - 1574.

[4] XU J, SUN Y. Experimental studies on active control of a dynamic system via a time-delayed absorber [J]. Acta mechanica sinica, 2015, 31 (2) :229 - 247.

[5] SALVI J, RIZZI E. Closed-form optimum tuning formulas for passive tuned mass dampers under benchmark excitations [J]. Smart structures & systems, 2016, 17(2) :231 - 256.

[6] 朱红兵,赵耀,李秀,等. 疲劳荷载作用下钢筋

- 混凝土梁的刚度退化规律及计算公式[J]. 土木建筑与环境工程,2014,36(2):1-5.
(ZHU Hongbing, ZHAO Yao, LI Xiu, et al. Reinforced concrete beam's stiffness degeneration regulation and its calculation formula under the action of fatigue load[J]. Journal of civil architectural & environmental engineering, 2014,36(2):1-5.)
- [7] 李泉,樊健生,聂建国. 多人随机行走激励下人行桥振动分析[J]. 计算力学学报,2010,27(5):815-821.
(LI Quan, FAN Jiansheng, NIE Jianguo. Vibration response analysis of long-span footbridge to random walking loads generated by crowds[J]. Chinese journal of computational mechanics, 2010,27(5):815-821.)
- [8] 刘兴彦. 调谐质量阻尼器结构减震性能及影响因素研究[J]. 工业建筑,2016,46(7):124-128.
(LIU Xingyan. Research on damping performance and factors of TMD structure[J]. Industrial construction, 2016,46(7):124-128.)
- [9] HASHIMOTO T, FUJITA K, TSUJI M, et al. Innovative base-isolated building with large mass-ratio TMD at basement for greater earthquake resilience[J]. Future cities & environment, 2015,1(1):9.
- [10] 陈广生. MTMD对钢结构人行天桥的振动控制研究[D]. 南京:南京林业大学,2015.
(CHEN Guangsheng. The research of MTMD for vibration control of steel pedestrian bridge[D]. Nanjing: Nanjing forestry university, 2015.)
- [11] ZHOU X Y, LIN Y J, GU M. Optimum properties of MTMD for large-span roof subjected to wind loads[J]. Journal of vibration engineering, 2015,28(2):277-284.
- [12] 黄炼,查长松. 磁流变弹性体的磁致性能[J]. 材料科学与工程学报,2016,34(1):139-141.
(HUANG Lian, ZHA Changsong. Mechanical properties of magnetorheological elastomers[J]. Journal of materials science and engineering, 2016,34(1):139-141.)
- [13] 余森,居本祥. 磁流变弹性体剪切式动态力学性能测试[J]. 功能材料,2011,42(11):1939-1942.
(YU Miao, JU Benxiang. Dynamic mechanical properties testing for shear mode of magnetorheological elastomer[J]. Journal of functional materials, 2011,42(11):1939-1942.)
- [14] 李剑锋,龚兴龙,张先舟,等. 硅橡胶基磁流变弹性体的研制[J]. 功能材料,2006,37(6):1003-1005.
(LI Jianfeng, GONG Xinglong, ZHANG Xianzhou, et al. Research on magnetorheological elastomer based on silicone rubber[J]. Journal of functional materials, 2006,37(6):1003-1005.)
- [15] TU Jianwei, WANG Bochao. The frequency adjustable tuned mass damper device based on magnetorheological elastomers[J]. Earthquake engineering & engineering dynamics, 2015,5:356-361.
- [16] 涂建维,任伟,吴平. 叠层型磁流变弹性体智能隔震支座及其磁场有限元分析[J]. 噪声与振动控制,2010,30(5):169-172.
(TU Jianwei, REN Wei, WU Ping. Magnetic finite element analysis of the intelligent laminated MRE isolator[J]. Noise and vibration control, 2010,30(5):169-172.)
- [17] 涂建维,汪伯潮. 基于磁流变弹性体的调频TMD减振装置[J]. 地震工程与工程振动,2015,1(5):29-34.
(TU Jianwei, WANG Bochao. The frequency adjustable tuned mass damper based on magnetorheological elastomers[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2015,1(5):29-34.)
- [18] 韩建平,李林,王洪涛,等. 基于Hilbert-Huang变换和随机减量技术的模态参数识别[J]. 世界地震工程,2011,27(1):72-77.
(HAN Jianping, LI Lin, WANG Hongtao, et al. Modal parameter identification based on Hilbert-Huang transform and random decrement technique[J]. World earthquake engineering, 2011,27(1):72-77.)