

变质量动力吸振器及其减振性能

高 强¹, 房祥波¹, 赵艳青¹, 段晨东²

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064;

2. 长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:针对传统动力吸振器“窄带”缺陷,提出了一种新的基于变质量调谐的自适应动力吸振器。与目前国内外学者通常采用的通过改变系统刚度或阻尼调整吸振器固有频率的方法不同,给出的吸振器中引入一个液体箱作为变质量单元,通过向箱中注入或抽出液体改变质量,从而调节吸振器固有频率,使之随主系统激励力频率的变化而变化。对变质量动力吸振器原理进行了分析,利用 Simulink 软件和试验对其减振性能进行了仿真和试验研究。结果表明:相比于传统吸振器,新的变质量动力吸振器具有更宽的有效频带,在试验中对主系统实现了最大约 29 dB 的振动衰减,减振效果非常明显;这种宽频、高效特性对于吸振器的工程应用具有重要意义。

关键词:机械工程;振动控制;动力吸振器;自适应动力吸振器

中图分类号:TP 273

文献标志码:A

Variable mass dynamic vibration absorber and its performance of vibration reduction

GAO Qiang¹, FANG Xiang-bo¹, ZHAO Yan-qing¹, DUAN Chen-dong²

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Aimed at the defect of narrow band of traditional dynamic vibration absorber (DVA), a novel adaptive dynamic vibration absorber based on variable mass was proposed in order to obtain the wide band DVA. Different from other adaptive dynamic vibration absorbers based on stiffness or damping modification suggested by other researchers, a variable mass element, i. e. a liquid box was introduced in the new DVA. By means of injecting liquid into or drawing liquid out the box, the DVA mass could be changed, while its natural frequency could be adjusted too. The performance of the new DVA in vibration reduction on a primary system was studied via simulation and some experiments. The results show that the proposed DVA can reduce the vibration of the primary system over a much wider band comparing with a traditional one, and the maximal vibration attenuation in an experiment is about 29 dB. The vibration reduction is obvious. The variable mass DVA is of great significance for effective wide band vibration reduction. 1 tab, 5 figs, 12 refs.

Key words: mechanical engineering; vibration control; dynamic vibration absorber; adaptive dynamic vibration absorber

0 引言

动力吸振器(Dynamic Vibration Absorber, DVA)是一种广泛应用于机械制造、交通运输、航空航天相关设备减振和降噪的装置。传统动力吸振器可视为一个附加在主系统上的质量-弹簧-阻尼系统,当其固有频率与外界激振力频率相同时,能够明显降低主系统振动。但当激振力频率发生偏移时,吸振器处于失谐状态,减振效果急剧下降。主动吸振器是克服传统动力吸振器“窄带”缺陷的主要方法。通过作动器施加反向力,理想情况下主动吸振器可以使主系统在很宽的频带上振动为零。但主动吸振器存在结构过于复杂、能耗巨大且可能出现不稳定的缺点,其工程应用受到较大的限制^[1]。半主动吸振器,又称自适应动力吸振器,通过调整自身结构参数,使固有频率总是与外界激振力频率相一致,从而保证了最佳吸振效果。因其结构较简单、能耗低、稳定性好得到国内外学者的广泛重视。Walsh 等提出了一种利用双叶片弹簧实现变刚度的机械式动力吸振器,通过改变 2 个叶片弹簧之间的距离调节弹簧刚度^[2];Nagaya 等设计了一种借助于改变悬臂梁支撑位置调节刚度的吸振器^[3];Hill 等提出了通过机械结构调节刚度的吸振器^[4];近几年,智能材料也被应用于自适应动力吸振器的研究。Williams 提出一种应用形状记忆合金的吸振器,通过形状记忆合金金相状态的改变调节吸振器刚度;Holdhusen 等相继提出了基于磁流变材料的自适应动力吸振器^[5-6]。在中国,胡海岩等提出一种新型的基于刚度分段线性的自适应动力吸振器,通过调节弹性元件的间隙使吸振器刚度发生变化,并根据基波平衡原理导出了使主系统近似完全消振所需的控制规律^[7];王莲花等研制了一种基于磁流变弹性体的自适应吸振器^[8];靳晓雄等提出了一种通过改变空气弹簧内压力来跟踪外界激振频率的吸振器^[9];徐振邦等提出一种机械式频率可调吸振器^[10];张小龙等设计了一种滚珠式多向动力吸振器^[11]。

到目前为止,几乎所有的自适应动力吸振器研究,不管机械式、电磁式还是使用新型智能材料,都采用改变吸振器刚度或阻尼的方法来调整系统固有频率。与上述方法不同,本文提出了一种新的基于变质量调谐的自适应动力吸振器,通过对吸振器质量的调整,获得宽频、高效的吸振效果。

1 变质量动力吸振器原理

在机械系统中,质量通常是一个恒定量,变质量

系统很少被提及。当前所见国内外文献中,为了得到较大的有效吸振带宽,动力吸振器多采用改变刚度或阻尼的方法。本文提出了一种新型变质量自适应动力吸振器(Variable Mass Adaptive Dynamic Vibration Absorber, VM ADVA)。在这种吸振器中,通过引入一个变质量单元,实现对质量的调节,其模型如图 1 所示。图中 m_1 、 k_1 、 x_1 分别为主系统质量、刚度和位移; k_2 、 x_2 分别为吸振器刚度和位移; $F_0 \sin(\omega t)$ 为主系统所受外界激振力。吸振器质量包括一个恒定质量 m_2 和附加的可变质量 m_v 。系统运动微分方程为

$$M\ddot{X} + KX = F \quad (1)$$

$$\text{式中: } M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 + m_v \end{bmatrix}; K = \begin{bmatrix} -k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix};$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}; F = \begin{bmatrix} F_0 \sin(\omega t) \\ 0 \end{bmatrix}。$$

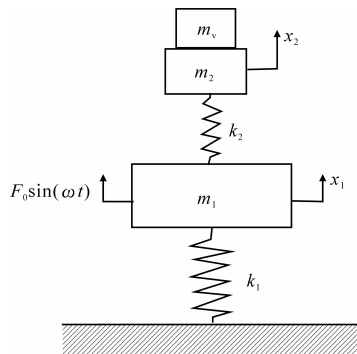


图 1 变质量动力吸振器模型

del of variable mass dynamic vibration absorber

求解方程,得主系统振幅为

$$|x_1| = \frac{[k_2 - (m_2 + m_v)\omega^2]F_0}{(k_1 + k_2 - m_1\omega^2)[k_2 - (m_2 + m_v)\omega^2] - k_2^2} \quad (2)$$

由式(2)可知,当角频率 $\omega = \sqrt{k_2/(m_2 + m_v)}$ 时,即吸振器固有频率与外界激振力频率相等时,主系统可达到完全消振(振幅为 0)。传统吸振器具有固定的质量和刚度,无 m_v 项,因此固有频率不可变。当激振力频率变化时,减振效果迅速下降,此“窄带”特性严重影响了传统吸振器的工程应用。

为了实现质量可变功能,在吸振器中引入一个液体箱作为变质量单元,通过向箱中注入或抽出液体,就可以改变其质量。 m_v 最小取值为 0,最大值为 m_{vmax} 。由公式 $\omega = \sqrt{k_2/(m_2 + m_v)}$ 可知,当 m_v 在最小值与最大值之间变化时,动力吸振器可以在 $[\sqrt{k_2/(m_2 + m_{vmax})}, \sqrt{k_2/m_2}]$ 频带范围内实现明显的减振。当激振力频率 $\omega_i \in [\sqrt{k_2/(m_2 + m_{vmax})}, \sqrt{k_2/m_2}]$ 时,液体箱质量取

$$m_v=(k_2/\omega_i^2)-m_2 \tag{3}$$

可以获得很好的吸振效果。调整 m_v 与 m_2 的比例,则可以获得较大的吸振器有效带宽^[12]。

2 变质量动力吸振器性能仿真

为了分析变质量动力吸振器减振性能,对图 1 所示主系统——吸振器二自由度系统,利用 Matlab 中 Simulink 工具进行建模和仿真。由于实际系统中阻尼总是存在的,因此考虑系统阻尼,设主系统阻尼为 c_1 ,吸振器阻尼为 c_2 。仿真参数见表 1。

表 1 Simulink 仿真模型参数

参数	数值
m_1	1
k_1	4
c_1	0.005
m_2	0.06
m_{vmin}	0
m_{vmax}	0.04
k_2	0.1
c_2	0.000 5

在无吸振器、吸振器可变质量取最小值及最大值,即 $m_v=0$ 和 $m_v=0.04$ 时,主系统振动频率响应函数如图 2 所示。

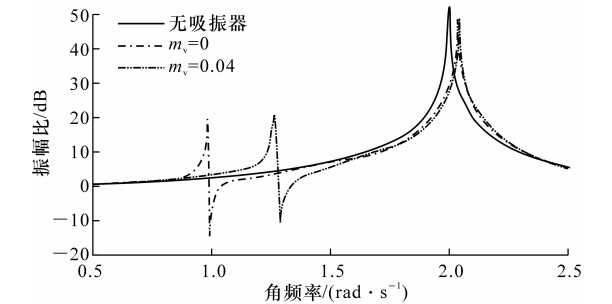


图 2 Simulink 仿真得到的主系统频率响应函数

Fig. 2 Frequency response functions of primary system by Simulink

从图 2 中可以看到,未安装动力吸振器时,主系统固有频率约为 2 rad/s。安装吸振器后,当 m_v 取最大值 0.04 时,吸振器在 1 rad/s 处使主系统振幅大幅降低,最大振动衰减约为 15 dB,但有效频带非常窄,当激振力频率稍稍偏离时,减振效果明显降低。当 m_v 取最小值 0 时,主系统频率响应函数在 1.29 rad/s 附近出现最小值,振动衰减约为 12 dB,减振效果明显。由于液体质量可以在最大与最小值之间连续变化,可以调节液体质量,使吸振器固有频率在 1.00~1.29 rad/s 之间随着外界激振力频率的变化而连续变化,从而获得与先前相比频带大幅拓宽、减振效果非常好的动力吸振器。

3 试验研究

为了研究变质量动力吸振器实际减振性能,搭建了试验系统,如图 3 所示。试验系统由激振器、传感器、主系统和吸振器四部分组成。其中激振器 1 采用 B&K 公司生产的电磁激振器,通过信号发生器、功率放大器进行驱动;S1、S2 为振动加速度传感器;主系统由钢板弹簧 2 和传感器 S2 组成(分别为弹性元件和质量);在钢板弹簧末端,用较软较小的弹性悬臂梁 3、玻璃小瓶 4 和配重组成为动力吸振器。传感器 S1 采集主系统输入振动(即激振器振动)状态,传感器 S2 采集主系统在激振器和吸振器作用下的振动。这里用水作为变质量介质,通过改变玻璃小瓶中的水量,改变吸振器质量。吸振器最小质量为 13.97 g,最大质量为 17.89 g。

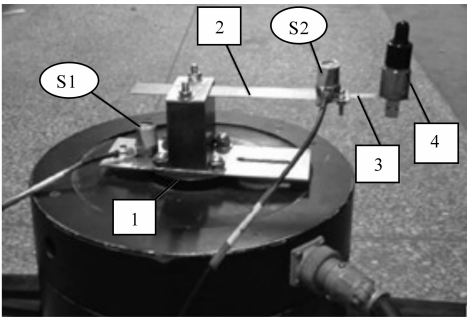


图 3 试验装置

Fig. 3 Experiment system

通过试验测得激振频率在 8~28 Hz 范围内,无吸振器、吸振器玻璃瓶空和玻璃瓶加满水 3 种状态下的主系统频率响应函数,如下页图 4 所示。从图 4 中可以看出,主系统固有频率约为 21.5 Hz 处。安装吸振器后,该二自由度系统二阶固有频率向右移动,即固有频率变大。在吸振器取最小质量和最大质量时,可以分别在 13.6 Hz 和 12.2 Hz 处获得 29.4 dB 和 26.7 dB 的振动衰减,减振效果非常明显。尽管对于定参数状态(即吸振器取最小质量或最大质量)时,有效频带还是非常窄,但当吸振器质量在最大及最小值间连续变化时,其实际性能如下页图 5 所示。图 5 中 C、D 点分别为吸振器可变质量取最大值和最小值时主系统频率响应函数的最低点。C 点左边可变质量取最大值,D 点右边取最小值,CD 点之间质量按式(3)计算。由图 5 可知,通过变质量控制,可以获得 12.2~13.6 Hz 之间约 1.4 Hz 的有效带宽,频域性能大大提高。该试验结果与前面 Simulink 仿真结果的趋势完全相同,从 2 个方面验证了通过调整吸振器质量以跟踪外界激振力频率,可以达到吸振器宽频带减振的目的。

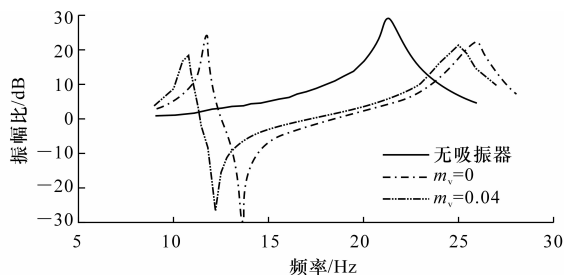


图4 主系统频率响应函数

Fig. 4 Frequency response functions of primary system

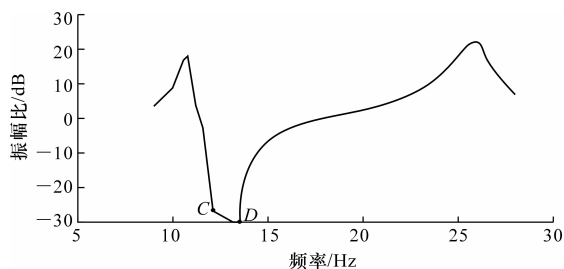


图5 变质量控制后主系统频率响应函数

Fig. 5 Frequency response functions of primary system when variable mass was applied

4 结 语

(1)通过引入变质量单元,本文提出了一种基于改变质量调节吸振器固有频率,从而跟踪外界激励力频率变化的动力吸振器。

(2)利用 Matlab 中 Simulink 进行的仿真和试验研究均表明,与传统吸振器相比,变质量动力吸振器能够在更宽的频带上明显减小主系统振动,并且可以通过对变质量单元参数的调整,达到所需的有效带宽,是一种高效、大带宽的动力吸振器。

(3)在后续研究中,如何对吸振器质量进行快速、精确、高鲁棒性的控制,如何消除因安装动力吸振器引起的主系统共振,以及如何减小液体箱中高度非线性的流体力对吸振器性能的影响等都是本文今后要深入探讨的课题。其中,利用磁流变液新型智能材料作为变质量介质,通过磁场变化调整其固液转化,从而减小流体力对吸振器减振效果的影响是一个较好的研究方向。这些后续问题的研究,对于变质量动力吸振器在工程领域的应用具有重要意义。

参考文献:

References:

[1] Williams K, Chiu G, Bernhard R. Adaptive-passive absorbers using shape-memory alloys [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 249(5): 835-848.

[2] Walsh P L, Lamancusa J S. A variable stiffness vibration absorber for the minimization of transient vibra-

tions[J]. Journal of Sound and Vibration, 1992, 158(2): 195-211.

[3] Nagaya K, Kurusu A. Vibration control of a structure by using a tunable absorber and an optimal vibration absorber under autotuning control [J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 228(4): 773-792.

[4] Hill S G, Snyder S D. Design of an adaptive vibration absorber to reduce electrical transformer structural vibration [J]. Journal of Vibration and Acoustics Transactions of the ASME, 2002, 124(4): 606-611.

[5] Holdhusen M H. The state-switched absorber used for vibration control of continuous systems[D]. Athens: Georgia Institute of Technology, 2005.

[6] Deng H X, Gong X L, Wang L H. Development of an adaptive tuned vibration absorber with magnetorheological elastomer[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(5): 111-116.

[7] 胡海岩, 金栋平. 基于分段线性吸振器的振动半主动控制[J]. 振动工程学报, 1997, 10(2): 125-130.

HU Hai-yan, JIN Dong-ping. A semi-active vibration control strategy based on piecewise-linear vibration absorbers[J]. Journal of Vibration Engineering, 1997, 10(2): 125-130. (in Chinese)

[8] 王莲花, 龚兴龙, 邓华夏. 磁流变弹性体自调谐式吸振器及其优化研制[J]. 实验力学, 2007, 22(34): 429-434.

WANG Lian-hua, GONG Xing-long, DENG Hua-xia. Adaptive tuned vibration absorber based on magnetorheological elastomers and its optimal control [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(34): 429-434. (in Chinese)

[9] 靳晓雄, 肖 勇. 空气弹簧半主动式动力吸振器的研究[J]. 中国工程机械学报, 2007, 5(3): 253-257.

JIN Xiao-xiong, XIAO Yong. Study of air-spring-based semi-driving dynamic vibration absorber[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2007, 5(3): 253-257. (in Chinese)

[10] 徐振邦, 龚兴龙. 机械式频率可调动力吸振器及其减振特性[J]. 振动与冲击, 2010, 29(2): 1-6.

XU Zhen-bang, GONG Xing-long. Mechanical vibration absorber with tunable resonant frequency and its vibration attenuation characteristics[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(2): 1-6. (in Chinese)

[11] 张小龙, 东亚斌, 张晓钟. 新型滚珠式多向动力吸振器的理论研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(1): 1-4.

ZHANG Xiao-long, DONG Ya-bing, ZHANG Xiao-zhong. A new ball type dynamic multi-direction vibration absorber [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(1): 1-4. (in Chinese)

[12] Gao Q, Zhang W F, Liu B C, et al. An adaptive tuned vibration absorber based on variable mass[J]. Noise Control Engineering Journal, 2011, 59(5): 491-496.