

文章编号: 1001-4888(2007)03 &04-0429-06

磁流变弹性体自调谐式吸振器及其优化控制^{*}

王莲花, 龚兴龙, 邓华夏, 倪正超, 孔庆合

(中国科学技术大学 力学和机械工程系, 中国科学院材料力学行为与设计重点实验室, 安徽合肥 230027)

摘要: 本文研制了一种基于磁流变弹性体的自调谐式吸振器, 它利用磁流变弹性体这种新型智能材料作为吸振器的弹性元件和阻尼元件, 通过外加磁场控制磁流变弹性体的剪切模量来改变吸振器的固有频率, 实现吸振器的移频。并将遗传算法改进移植到吸振器, 对其进行优化控制。实验结果表明, 这种遗传算法具有全局搜索和快速收敛的特点, 它能使吸振器快速找到吸振器减振效果最佳点, 并且经过优化控制的磁流变弹性体自调谐式吸振器在移频范围内具有很好的减振效果, 减振效果最高可达 25dB。

关键词: 磁流变弹性体; 动力吸振器; 振动控制; 遗传算法

中图分类号: O34; X593 **文献标识码:** A

0 引言

动力吸振器自 1911 年问世以来^[1], 在实践中得到了广泛的应用。它通过在需要减振的结构(称为主系统)上附加子结构, 改变系统的振动能量的分布和传递特性, 使振动能量转移到附加的子结构上, 从而达到控制主系统振动的目的。传统的动力吸振器多属被动控制, 它对于主系统的窄带响应有着良好的吸振效果, 但由于其吸振带宽不可调节, 对于宽频激励引起的主系统的振动, 吸振效果不是很理想。

近年来, 对于主动吸振器的大量研究表明, 主动吸振器可以根据主系统的振动状态, 自动调节自身的结构参数或振动状态, 实现宽频吸振, 提高了吸振器减振效果, 大大拓宽了吸振器的应用范围。根据吸振器自动调节机理的不同, 主动吸振器可分为全主动式吸振器和半主动式吸振器。全主动式吸振器是根据主系统的振动状态反馈调节吸振器的振动状态, 使其对主系统的动态作用力与主系统的振动加速度反相, 从而实现主系统实时宽频振动控制。Tewanim 等人首先将主动振动控制技术与动力吸振器结合起来, 提出了主动动力吸振器^[2]。很多研究都表明全主动式吸振器对宽频振动确实可起到很好的控制作用^[3~6], 但它也不可避免地存在耗能大、系统易出现不稳定等问题。半主动式吸振器则融合了被动吸振器和全主动式吸振器的优点, 它通过调整动力吸振器的结构参数, 使之跟踪主系统的外界干扰频率, 最大限度地抑制主系统的振动, 其结构相对简单, 耗能低, 且能实现宽频吸振。目前半主动式吸振器多为刚度连续可调结构, 如机械式^[7]、电液式^[8]、电磁式^[9]等, 而将新材料如压电^[10]、记忆合金^[11]和磁流变弹性体^[12]等用于半主动式吸振器的设计也成为当今研究的热点。

本文在前期工作的基础上, 以磁流变弹性体作为智能变刚度单元, 改进设计了一种自调谐式吸振器(A TVA), 将遗传算法改进移植到吸振器上, 对其减振性能进行优化控制。

1 磁流变弹性体自调谐式吸振器

1.1 吸振器的工作原理

图 1 是磁流变弹性体自调谐式吸振器的结构示意图, 图 2 是其实物图。图中 1 表示基座, 2 表示导

^{*} 收稿日期: 2007-04-12

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目; 国家自然科学基金(10672154); 高等学校博士学科点专项科研基金(20050358010)

通讯作者: 龚兴龙(1966-), 男, 教授, 博士生导师。主要从事电磁流变材料和振动控制的研究。E-mail: gongxl@ustc.edu.cn

杆组,3 表示支撑弹簧,4 表示线性轴承,5 表示铜制安装基,6 表示上轴线圈,7 表示盖板,8 表示上轴铁芯,9 表示导磁侧板,10 表示侧轴线圈,11 表示侧轴铁芯,12 表示剪切片,13 表示磁流变弹性体。上轴线圈、上轴铁芯、导磁侧板、侧轴线圈和侧轴铁芯等组件与磁流变弹性体构成闭合磁回路,这些组件安装在铜制安装基上,构成了吸振器的动子。吸振器的基座上安装有四根导杆,以保证吸振器工作在剪切模式下。导杆外套有支撑弹簧,这些支撑弹簧主要用来支撑动质量,从而消除了原来作用在磁流变弹性体中的静变形量。分析可知,

$$f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{GA}{\eta hm}} \quad (1)$$

式中 f 是吸振器的固有频率; G 为磁流变弹性体剪切模量; A 为磁流变弹性体发生剪切的面积; h 为磁流变弹性体厚度; m 为振子的质量。根据磁偶极子模型^[13],磁流变弹性体中的铁磁性颗粒在磁场作用下被磁化,磁化后颗粒之间的磁场作用力导致剪切模量的增加。由(1)式可知,当磁流变弹性体的外加磁场改变时,磁流变弹性体的剪切模量将发生改变,因而在剪切方向上的剪切刚度也随之发生改变,最终引起吸振器的固有频率的改变。这样,通过改变磁场强度便可控制改变吸振器的固有频率,使之跟踪主系统的外界干扰频率。

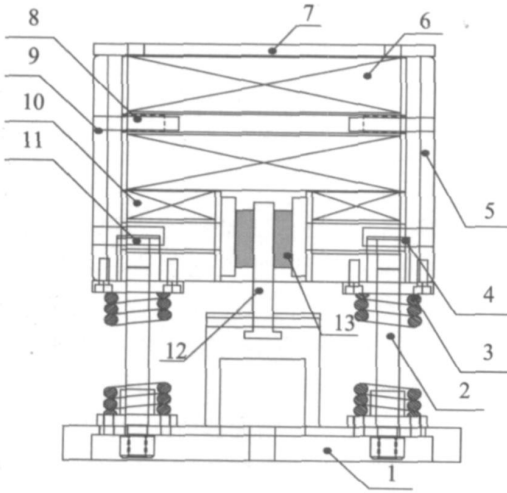


图 1 吸振器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the developed ATVA

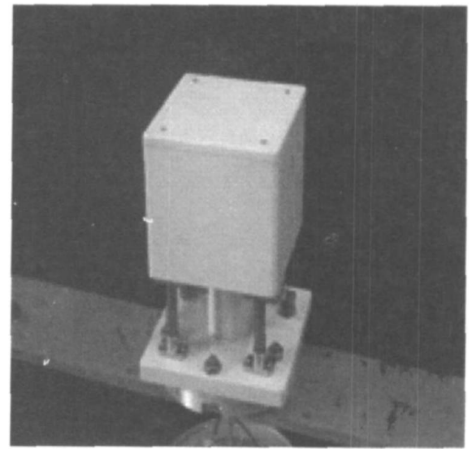


图 2 吸振器实物图

Fig. 2 Photograph of the developed ATVA

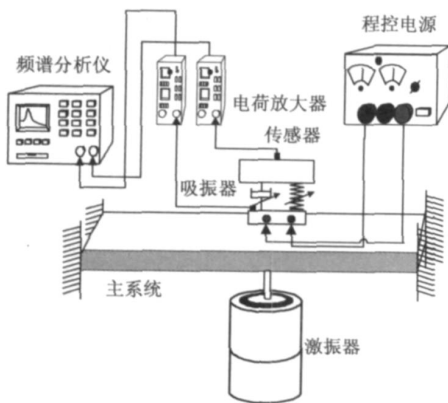


图 3 吸振器移频特性测试系统

Fig. 3 The evaluation system for frequency-shift property

1.2 吸振器的动力特性

为了测试吸振器移频特性,建立了如图 3 所示的测试系统,根据振动理论中模态分析法的峰值检测法,我们用加速度传感器测量基础激励与吸振器的响应信号,再通过频谱分析仪可得到响应信号与基础激励传递函数的相关信息,如传递函数的幅值和相位,进而得到吸振器的固有频率。改变与吸振器相连的程控电源的电流可得到不同电流下吸振器的固有频率,进而得到其移频曲线。测试系统中所用各仪器的型号为:江苏联能电子科技有限公司生产的 JZK-10 型激励器,基础激励为白噪声随机信号;江苏联能电子科技有限公司生产的 YE5858A 型电荷放大器;美国 PCB 公司的 M353B18 型加速度传感器;美国迪飞

公司的 Signal Calc ACE 型动态信号分析仪。

图 4 是所测得的吸振器移频特性图,其横坐标是激励频率,纵坐标是传递函数。从图中可看出,随着电流的增大,传递函数曲线向右移动。这是因为,电流的逐渐增大导致加在磁流变弹性体上的磁场逐

渐增强,磁场的增强提高了磁流变弹性体的剪切模量进而提高了吸振器的固有频率。提取图 4 中电流与吸振器的固有频率关系得到图 5 所示曲线。图中横坐标为吸振器工作电流大小,纵坐标为吸振器固有频率,从图中可看出,当吸振器的工作电流从 0A 增大至 1A 时,吸振器的固有频率从 24 Hz 移频至 50 Hz,吸振器移频范围达到了 26 Hz,当所加电流超过 1A 时,由于磁流变弹性体达到磁饱和状态,吸振器的固有频率保持在 50 Hz。

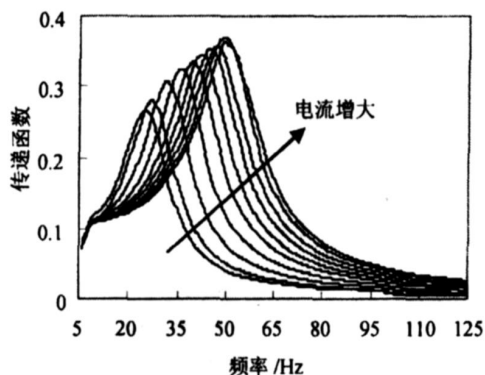


图 4 吸振器移频特性

Fig.4 The transfer function versus exciting frequency

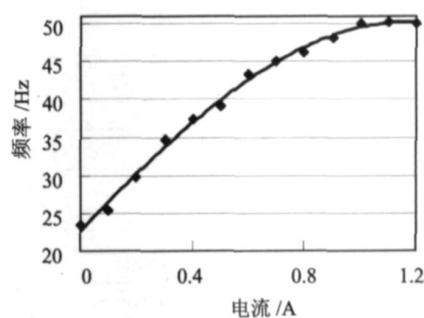


图 5 吸振器固有频率与电流的关系

Fig. 5 The relationship between resonance frequency and applied current

2 磁流变弹性体自调谐式吸振器的控制系统

根据吸振器的工作原理,当吸振器固有频率与外界激励频率相等时,吸振器减振效果最佳。磁流变弹性体自调谐式吸振器控制系统的目标是吸振器能自动跟踪外界激励的变化使吸振器固有频率与激励频率相等,但在实际使用中,吸振器固有频率与电流的准确定量关系难以确定,目前也是通过实验方法提取出大概的趋势图。故在本控制系统中,并不直接判断吸振器固有频率与激励频率是否相等,而是通过吸振器安装点的减振效果判断吸振器是否工作在最佳状态,即当吸振器安装点的减振效果最好时,吸振器工作在最佳状态。因此如何准确且快速寻找到吸振器最佳工作状态是很关键的问题。

遗传算法是以达尔文的生物进化论和孟德尔遗传变异理论为基础,模拟生物界进化过程,它是一种自适应、启发式、全局优化的搜索算法。它依赖于概率,又不同于随机算法,把启发性指导与随机算法有机结合,使其更具有鲁棒性;它的另一个特点是始终保持一组可能的结果,从而保证在全局范围内搜索,得到全局最优解。另外,遗传算法在进化搜索时基本不利用外部信息,仅以适应度函数为依据,利用种群中每个个体的适应度值进行搜索。这种算法适合处理传统方法难以解决的复杂问题和非线性问题。如高峰等人成功地用遗传算法解决了动力吸振器优化设计的非线性多维离散问题^[14]。本文改进了遗传算法,将其移植到吸振器的控制,确且快速找到其最佳工作状态。

2.1 硬件设计

控制系统如图 6 所示,主要由上位机、数据采集卡和程控电源组成。由于吸振器采用磁流变弹性体作为智能刚度元件,其响应时间是毫秒量级的,为了提高整个系统的控制时间,对程控电源性能提出了很高的要求,考虑电源的响应时间和精度我们选用了朝阳市电源有限公司生产的 4NIC-CK-HL 的一体化程控电源,它采用 RS232 接口进行通讯。结合上位机和控制系统对采集信号的要求,我们选用北京

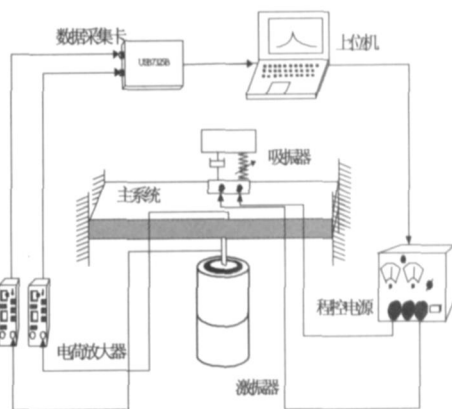


图 6 磁流变弹性体自调谐式吸振器控制系统图

Fig. 6 The control system of ATVA

中泰研创公司 USB7325B 型号的数据采集模块,本模块采用双端输入,程控触发,批量采集,从 FIFO 读取采集数据。

2.2 软件设计

软件设计的主要思路是先对激励信号采样并进行傅立叶变换,提取激励频率,然后用改进的遗传算法进行全局搜索,寻找此时吸振器的最佳工作状态时所对应的输入参数。遗传算法流程图如图 7 所示,其中图 7(a)是遗传算法原始流程图,图 7(b)是控制系统中对应的遗传算法流程图。

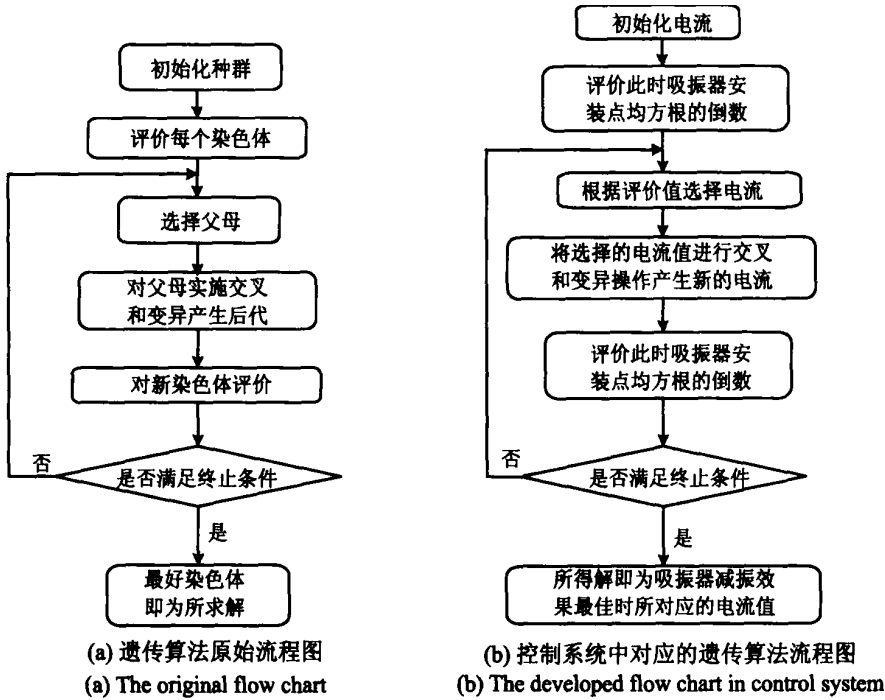


图 7 遗传算法流程图

Fig. 7 The flow chart of genetic algorithms

遗传算法的改进之处在于在初始化种群时,将实验测得的激励频率所对应的电流值或附近电流值作为其中一条染色体,其他染色体随机产生。与随机产生的大部分染色体相比,这条染色体的健壮性优于其他染色体。这样遗传算法能更快地找到最优解。

遗传算法适应度函数选用吸振器安装点信号均方根的倒数。当吸振器达到最佳工作状态时,吸振器减振效果最好,此时信号均方根应最小,则信号均方根的倒数即个体适应度最大,而遗传算法所寻找的最优解即为个体适应度最大的个体。

2.3 控制减振效果

根据图 6 所示的系统测试吸振器的减振特性,决定控制系统中遗传算法的输入参数如表 1 所示:

表 1 控制系统中遗传算法输入参数

Tab. 1 Input parameters of genetic algorithms in control system

种群大小	染色体长度	最大进化代数	交叉概率	变异概率
10	7	4	0.55	0.05

吸振器的减振效果为加上吸振器时被减振系统中吸振器安装点的激励响应与在相同激励下不加吸振器时被减振系统中同一点的激励响应的幅值之比。图 8 所示为当激励频率为 46 Hz 时,遗传算法寻找吸振器最佳减振效果的曲线图,其中每个个体所用的搜索时间为 2i 秒(i 为搜索个体的序号)。从图中可知在遗传算法第一代(10 秒)时,吸振器已经找到吸振器最佳减振效果点。由于遗传算法是全局搜索,在算法收敛之前,它会在规定范围内寻找全局最优解,当算法中的电流远离最优解时,吸振器的减振效果将会恶化。在第 3 代(48 秒)时吸振器已基本达到稳定状态,该实验结果表明,经改进的遗传算法能快速寻找到吸振器减振效果最佳点,并使其快速达到稳定工作状态。图 9 给出了磁流变弹性体自

调谐式吸振器在不同激励频率下的减振效果图。其中横坐标为激励频率,纵坐标为吸振器对应激励频率下的减振效果。为电流恒为零时吸振器作为被动吸振器时的减振效果,为跟踪激励频率时自调谐式吸振器的减振效果。由图可知,在吸振器移频范围内,由于磁流变弹性体自调谐式吸振器能跟踪激励频率的变化,其减振效果明显好于被动减振效果。当激励频率为 50 Hz 时,主动减振效果达到了 25 dB,此时吸振器与主系统的质量比为 5 : 8。

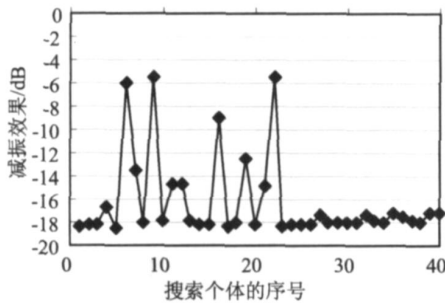


图 8 激励频率为 46 Hz 时遗传算法寻找减振效果最佳点曲线

Fig. 8 search progress when exciting frequency is 46 Hz

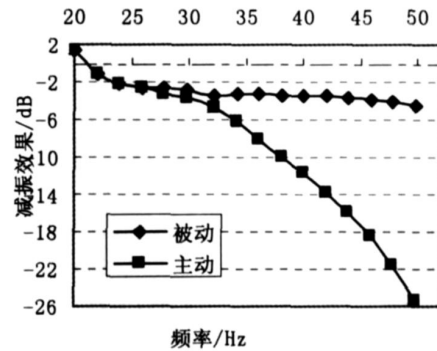


图 9 吸振器减振效果图

Fig. 9 The vibration attenuation of absorbers

3 结论

本文设计了一种磁流变弹性体自调谐式吸振器,并用经过改进的遗传算法对其进行优化控制。实验结果表明,这种遗传算法具有全局搜索和快速收敛的特点,它能使吸振器快速找到吸振器减振效果最佳点,并且经过优化控制的磁流变弹性体自调谐式吸振器在移频范围内具有很好的减振效果,减振效果最高可达 25 dB。

参考文献:

- [1] Frahm H. Device for damping vibrations of bodies: United States, 989958[P]. 1911-04-18.
- [2] Tewanim S G, Walcott B L, Rouch K E. Active optimal vibration control using dynamic absorber[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1991, 2: 1182 ~ 1187.
- [3] Margolis M. Retrofitting active control into passive vibration isolation systems[J]. Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME, 1998, 120: 104 ~ 110.
- [4] Filipovic D, Schroder D. Vibration absorption with linear active resonators: continuous and discrete time design and analysis[J]. Journal of Vibration and Control, 1999, 5: 685 ~ 708.
- [5] Jalili N, Olgac N. A sensitivity study of optimum delayed feedback vibration absorber[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement & Control-Transactions of the ASME, 2000, 121: 314 ~ 321.
- [6] Seung B C, Sung R H. Active vibration control of a flexible structure using an inertial type piezoelectric mount[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16: 25 ~ 35.
- [7] 李剑锋, 龚兴龙, 张先舟, 等. 主动移频式动力吸振器及其动力特性的研究[J]. 实验力学, 2005, 20(4): 507 ~ 514(LI Jianfeng, GONG Xinglong, ZHANG Xianzhou, et al. Study of adaptive tuned vibration absorber and its dynamic properties. Journal of Experiment Mechanics, 2005, 20(4): 507 ~ 514(in Chinese))
- [8] 李敏霞, 刘季. 电液式变刚度结构振动控制系统的稳定性分析[J]. 振动与冲击, 1999, 18(2): 81 ~ 83(LI Minxia, LIU Ji. Study on stability of the vibration control system with variable-stiffness structure. Journal of Vibration And Shock, 1999, 18(2): 81 ~ 83(in Chinese))
- [9] 孙志卓, 王全娟, 王付山. 一种主动电磁式动力吸振器的研究与设计[J]. 振动与冲击, 2006, 25(3): 198 ~ 201(SUN Zhizhuo, WANG Quajuan, WANG Fushan. Study and design of an active electro-magnetic dynamic vibration absorber. Journal of Vibration And Shock, 2006, 25(3): 198 ~ 201(in Chinese))
- [10] Davis C L, Lesieutre G A. An actively tuned solid-state vibration absorber using capacitive shunting of

- piezoelectric stiffness[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 232(3): 601 ~ 617.
- [11] Williams K A, Chiu G T C, Bernhard R J. Dynamic modelling of a shape memory alloy adaptive tuned vibration absorber[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 280: 211 ~ 234.
- [12] DENG Huaxia, GONG Xinglong, WANG Lianhua. Development of an adaptive tuned vibration absorber with magnetorheological elastomer[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15: N111 ~ N116.
- [13] Shiga T, Okada A, Kurauchi T. Magnet-rheoelastic behavior of composite gels[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1995, 58(4): 787 ~ 792.
- [14] 高峰, 沈亚鹏, 李录贤. 利用遗传算法进行振动吸振器的优化设计[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(5): 84 ~ 88 (GAO Feng, SHEN Yapeng, LI Luxian. Vibration absorber design for reducing structural sound level using genetic algorithms. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(5): 84 ~ 88 (in Chinese))

Adaptive Tuned Vibration Absorber Based on Magnetorheological Elastomers and its Optimal Control

WANG Lian-hua, GONG Xing-long, DENG Hua-xia, NI Zhen-chao, KONG Qing-he

(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Mechanics and Mechanical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: A kind of adaptive tuned vibration absorber (ATVA) based on magnetorheological elastomers (MRE) is presented. MRE has controllable shear modulus when it is exposed to an external magnetic field. It is used as a controllable elastic and damping element here. When the applied current is changed, the magnetic field through MRE will change, then the resonance frequency of the ATVA will shift. In order to control this kind of shift optimally, the genetic algorithms is improved, and migrated into the ATVA. Experiment results show that this kind of genetic algorithms has characteristics of global search and rapid convergence. It makes ATVA to find the best working ability quickly. Furthermore, the developed ATVA has good vibration absorption capacity in whole working frequency scale. When the mass ratio between ATVA and primary system is 5:8, its best attenuation can reach 25dB.

Key words: magnetorheological elastomers (MRE); dynamic vibration absorber; vibration control; genetic algorithms