

文章编号: 1001-4888(2008)02-0097-06

多个磁流变弹性体自调谐式吸振器的联合控制研究

王莲花, 龚兴龙*, 倪正超, 徐振邦, 张 鲲, 陈海波

(中国科学技术大学 近代力学系, 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: 遗传算法是一种自适应、启发式、全局优化的搜索算法, 在结构振动控制等复杂控制领域得到了广泛的应用, 本文针对磁流变弹性体自调谐式吸振器难以建立准确的控制模型的特点, 通过改进基本遗传算法, 设计和实现了一种同时控制多个吸振器的联合控制算法, 该方法在协调控制时, 根据多个吸振器协调控制对控制量的要求采用指定位交叉产生新个体, 与通过随机位交叉产生的新个体相比, 这样能以较大的概率产生更健壮的新个体, 从而使算法更快收敛。将该算法应用到两个吸振器联合控制的实验系统中, 在吸振器移频范围内, 被减振系统各观测点均有较好的减振效果, 当吸振器与主系统质量比为 1:19.8 时, 减振效果最高约 12dB, 主被动减振效果之差最佳时达 7dB。

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

近年来, 随着工程结构振动控制研究的深入, 人们提出了主动控制、被动控制、半主动控制和混合控制等众多控制方案。半主动控制较其他控制方法具有能耗低和系统稳定性好的特点, 因而受到众多学者的关注, 如 Rustighi 将形状记忆合金应用于半主动吸振器^[1], Shen 等人提出了基于磁流变阻尼器悬架的三种半主动控制方法^[2]。

在控制方法上, 由于工程结构控制的复杂性使得传统的基于模型的控制方法难以取得很好的控制作用, 而神经网络^[3]、遗传算法^[4-6]等智能控制方法更适用于此类复杂系统控制。

磁流变弹性体可调谐式吸振器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。其固有频率与吸振器的工作电流密切相关, 但吸振器固有频率与电流之间准确的映射关系难以确定, 故对于单个吸振器的控制, 本实验室采用了基于遗传算法的优化控制并取得了很好的效果^[7]。本文在单个吸振器控制方法的基础上, 对遗传算法进行改进移植到多个吸振器控制系统中, 对多个吸振器的减振效果进行优化。

1 控制算法的设计

遗传算法是借鉴生物界和群体进化机制形成的一种全局优化算法。遗传算法进行搜索时, 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。因此它适合处理传统算法难以解决的系

* 收稿日期: 2007-12-12; 修订日期: 2008-03-28

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, 博士, 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

统模型不确定和非线性问题。文中为了将遗传算法更好地应用于多个吸振器联合控制系统中,将遗传算法进行了多方面的改进。下面介绍改进后的遗传算法。

1.1 算法设计依据

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,吸振器将取得最佳的减振效果。当吸振器固有频率与外界激励频率相近时,吸振器将取得次佳的减振效果。算法的目标是使吸振器自动跟踪外界激励频率的变化使吸振器固有频率与激励频率相等,从而取得最佳的减振效果。对于单个吸振器,遗传算法能使吸振器取得较好的减振效果,至于多个吸振器的联合控制,若仍采用单点交叉方法产生新个体,遗传算法搜索到全局最优解的时间随着吸振器个数的增加而大大增加;若采用多点交叉产生新个体,遗传算法在世代进化过程中,个体的改变较大,不利于遗传算法的收敛。针对上述情况,在单个吸振器的基础上本文提出了用于多个吸振器的联合控制算法。

1.2 算法设计

首先介绍两个吸振器的联合控制算法,其基本思想如下:假设两个吸振器的编号分别为1和2,通过对吸振器工作原理的分析可知,影响吸振器工作状态的主要因素是吸振器的工作电流。这里首先分别用遗传算法寻找1号和2号吸振器工作在最佳状态和次佳状态的一系列电流值,再在这些电流值的基础上,去寻找使得1号和2号吸振器同时达到最佳状态的电流值组合。通过对单个吸振器的寻优确定进行协调控制的范围,通过指定位交叉实现电流的协调控制。

单个吸振器和两个吸振器联合控制的框图如图1和图2所示。

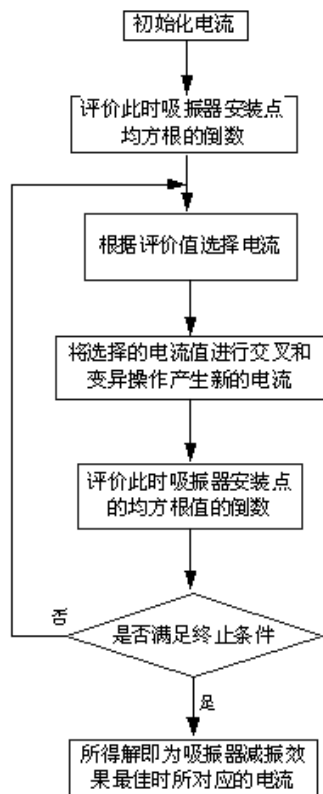


图1 单个吸振器控制算法框图

Fig. 1 The flow chat for controlling single absorber

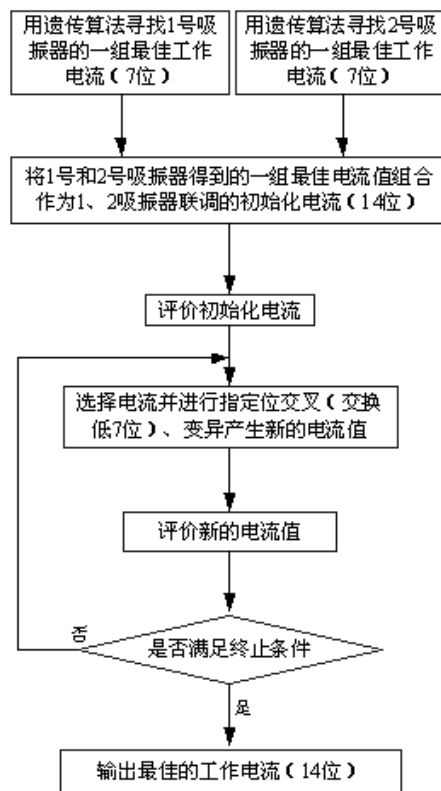


图2 两个吸振器联合控制算法框图

Fig. 2 The flow chat for controlling two absorbers

寻找单个吸振器的最佳和次佳工作状态的电流是实现控制的基础,其具体方法如下:

(1) 确定参数编码

对于单个吸振器,我们选定的个体是吸振器的工作电流,根据电源的精度为0.01可确定二进制编码位是7位。

(2) 确定适应度函数

适应度函数表明个体对环境适应能力的强弱,是遗传算法中最关键的一步,它反映个体被选中的概率。适应度大的个体将会以比较大的概率将基因传给下一代,进化的结果是优秀的个体将被保存下来。根据吸振器的特性,吸振器工作在最佳状态时,观测点信号均方根值将最小,故此处选择的适应度函数是观测点信号均方根的倒数。

(3) 初始种群的确定

为了产生有效的初始种群,我们根据吸振器的移频特性这个先验知识确定算法搜索范围。

(4) 遗传操作

遗传操作主要有选择、交叉和变异三种。这里采用常规的轮盘赌方法选择个体,个体选中的概率与个体适应度有很密切的关系,适应度越大,个体被选中的概率就越大。交叉主要是为了产生新个体,此处采用单点交叉。变异是为了保证产生新个体的多样性,避免出现过早收敛的情况。

与寻找单个吸振器的最佳和次佳工作状态的电流相比,寻找多个吸振器的最佳工作状态电流组合采用如下方法。

(1) 精英保留策略:遗传算法在进行世代进化时采用精英保留策略,即将上一代优秀的个体直接继承到下一代进行进化。

(2) 适应度函数可变:可变的适应度函数可以协调收敛速度和控制精度的关系。由吸振器的工作原理可知,当吸振器固有频率与激励频率相等时,吸振器的减振效果最好,而当固有频率与激励频率偏离时,吸振器的减振效果会偏离减振效果最好点,因此在某一激励频率下,吸振器的工作电流和减振效果在激励频率邻域内有一个极值点。为了使得吸振器找到最佳工作点,在遗传算法进行世代进化的不同代所采用的适应度函数是可变的。在进化初期,为了避免过早收敛,确保足够多的个体参与选择,适应度函数可选择幂次较低的函数,而在进化后期为了区分位于极值点附近的个体,适应度函数可选择幂次较高的函数,这样可确保世代进化时,选择出最好的个体。

与寻找单个吸振器的最佳和次佳工作状态的电流相比,寻找多个吸振器的最佳工作状态的电流组合方法主要有以下不同点:

(1) 参数编码

由于此时寻找的是两个吸振器最佳电流值的组合,此时二进制编码位是14位。

(2) 初始种群的确定

初始种群由两部分组成,一部分是将1号吸振器的最佳和次佳电流值与2号吸振器的最佳电流值组合成14位的个体,另一部分是将1号吸振器的最佳电流和2号吸振器的最佳和次佳电流值组成14位个体。

(3) 遗传操作

此处的交叉不同于单个吸振器的随机位交叉,两个吸振器选用的是指定位交叉,即主要是将单个吸振器的电流值(二进制编码为7位)作为一个整体进行交叉重组。

该算法在单个吸振器寻优的基础上寻找两个吸振器均工作在最佳状态的电流组合时,以合适的种群和世代数进行优化寻优,在保证控制精度和准确性的前提下大大提高算法的收敛速度,从而保证调整时间在可以接受的范围内。

1.3 算法的推广

在两个吸振器联合控制的基础上,我们可将算法推广到 $n(n>2)$ 个吸振器的联合控制。其算法思想如下:先对两个吸振器采用上文介绍的算法,将得到一组最佳电流值(二进制编码为14位),再用单个吸振器控制算法控制另一个吸振器,可得到另一组最佳电流值(二进制编码为7位),对这两组最佳电流值采用类似于两个吸振器联合控制方法中组合电流的方法,可得到一组新的联合控制的初始化电流值(二进制编码为21位),在交叉时采用交换低7位的方法产生新个体,经过世代进化,可得到三个吸振器联合控制的一组最佳电流值。以此相同的方法可将算法推广到 n 个吸振器的联合控制中去。

2 控制算法的实现和结果分析

两个吸振器联合控制算法采用 VC6.0 编写,吸振器采用本实验室研制的磁流变弹性体可调谐式吸振器,其主要特性是吸振器的固有频率与吸振器的工作电流密切相关。实验所用的 1 号和 2 号吸振器均是 10kg 的磁流变弹性体可调谐式吸振器。其移频特性如图 3 和图 4 所示。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 1 号吸振器的工作电流从 0A 增大至 1A 时,吸振器的固有频率从 12Hz 移频至 27Hz,吸振器移频范围达到了 15Hz;当 2 号吸振器的工作电流从 0A 增大至 1A 时,吸振器的固有频率从 13Hz 移频至 27Hz,吸振器移频范围达到了 14Hz。

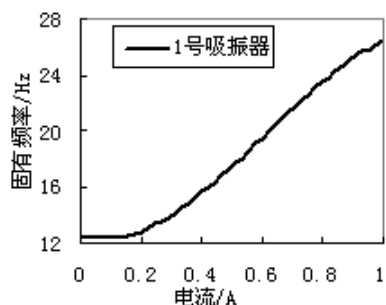


图 3 1号吸振器移频特性

Fig. 3 Frequency-shift property of the first absorber

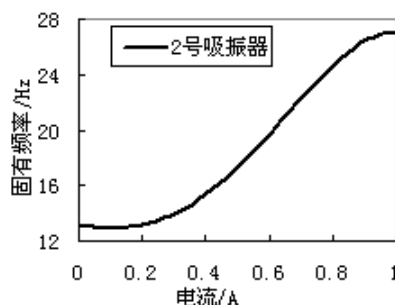


图 4 2号吸振器移频特性

Fig. 4 Frequency-shift property of the second absorber

实验所采用的主系统是双层隔振系统,底层四个隔振器关于中心对称,主系统质量为 198kg,实验系统示意图如图 5 所示,利用正弦扫频测得的各观测点系统特性如图 6 所示。图 5 中 1 表示双层隔振系统(主系统),2 表示激励器,3 表示吸振器,4 表示 2 路输出的程控电源,5 表示加速度传感器,6 表示计算机,7 表示数据采集卡,8 表示电荷放大器。

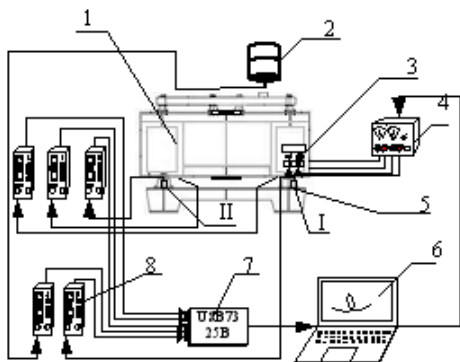


图 5 实验系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental system

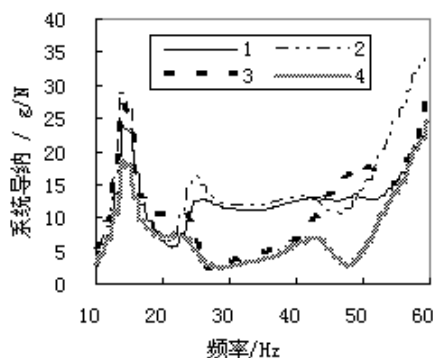


图 6 双层隔振系统特性图

Fig. 6 Characteristics of double-isolation system

实验时观测点为经过下层 4 个隔振器传递到基础上的 4 个犄角处,图 5 是长边的侧面图,图中的 I 所示的位置记为观测点 1,它的里面的对称观测点为观测点 2,II 所示位置为观测点 3,它的里面的对称观测点为观测点 4。实验系统中数据采集卡采集的 5 路信号分别是激励器的输出力信号和 4 个观测点的加速度信号,2 路程控电源分别给两个吸振器提供电流。我们将 1 号和 2 号吸振器安装在观测点 1 和观测点 2 所对应的窗体内,根据文中提出的算法,寻找两吸振器的最佳工作状态,所测得的实验结果如图 7 所示。图中实线为电流恒为零时吸振器作为被动吸振器时的减振效果,虚线为跟踪激励频率时自调谐式吸振器的主动减振效果。其中减振效果为加上吸振器时被减振系统中观测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。根据实验系统特性和实验结果

可知:

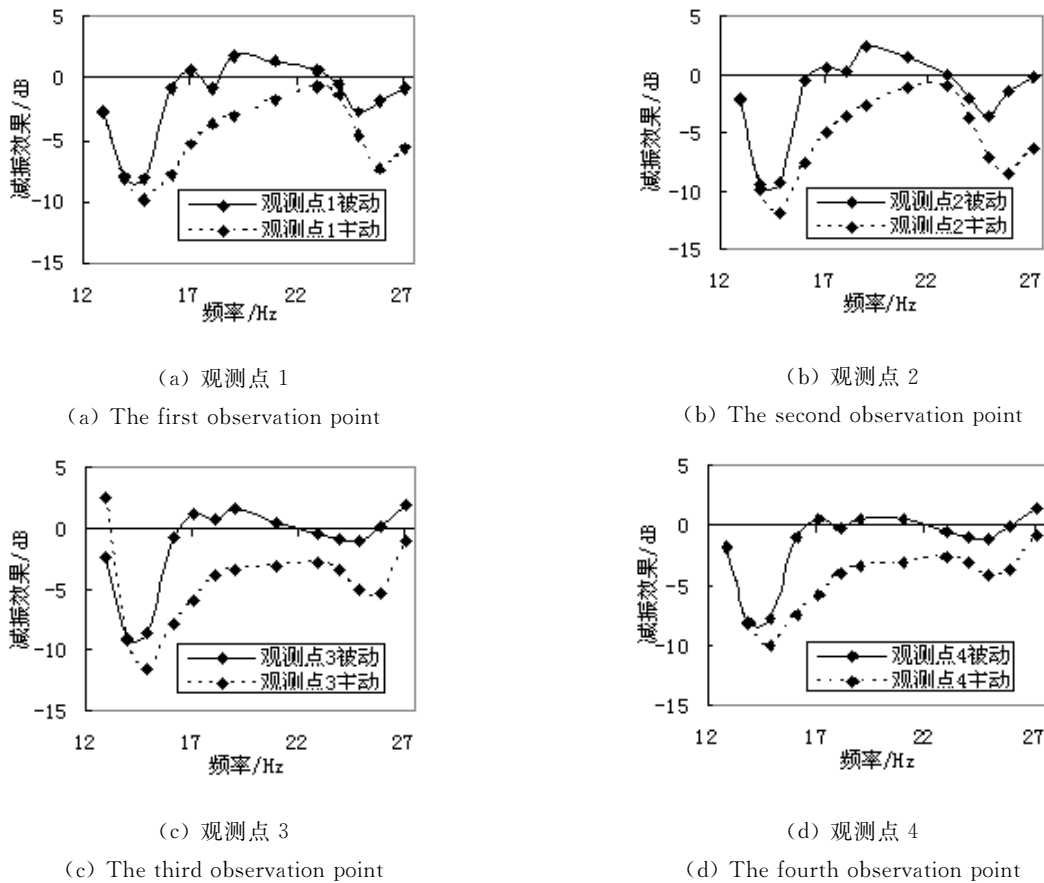


图 7 各观测点减振效果

Fig. 7 The vibration attenuation of the four observation points

(1) 主系统的特性虽然比较复杂,但有一定的对称关系。根据图 6 所示的双层隔振系统的系统特性可知,当外界激励频率在 10Hz 至 18Hz 的范围内,四个观测点具有基本一致的系统特性,它们均在 15Hz 附近处出现了一阶共振峰;当外界激励频率在 18Hz 至 42Hz 的范围内,观测点 1、2 具有基本一致的系统特性,它们在 26Hz 附近处出现了二阶共振峰;观测点 3、4 具有基本一致的系统特性,它们在 25Hz 附近处出现了二阶共振峰;当外界激励频率大于 42Hz 时,系统的频率特性较复杂。由于本实验分析的外界激励频率位于 10Hz 至 30Hz 范围内,经上述分析可知,在此频段范围内,观测点 1、2 基本对称,观测点 3、4 基本对称。

(2) 减振效果在主系统的固有频率处效果比较好。由图 7 可知,在主系统一阶固有频率处,各观测点减振效果均达到了最大值,其中观测点 2 的减振效果达 12dB。

(3) 减振效果具有较强的对称性。由图 7(a)和 7(b)可知,观测点 1、2 的减振效果具有较强的对称性。在吸振器移频范围内,两观测点的主动减振效果较被动减振效果基本均有明显改善,特别是在系统二阶固有频率 26Hz 附近处,观测点 1 主被动减振效果之差达 5dB,观测点 2 主被动减振效果之差达 7dB。由图 7(c)和 7(d)可知,观测点 3、4 的减振效果具有较强的对称性。在吸振器移频范围内,两观测点的主动减振效果较被动减振效果均有明显改善。

(4) 综上所述,利用本文提出的算法能够同时控制两个吸振器并且取得了较好的控制效果,当外界激励频率位于 15Hz 时,最高减振效果约 12dB,当外界激励频率为 26Hz 时,主被动减振效果之差最佳时达 7dB,此时吸振器与主系统的质量比为 1 : 19.8。

3 结论

本文提出了一种基于遗传算法的多个吸振器联合控制算法,该算法通过指定位交叉产生新个体,提高了新个体的健壮性,因而提高了算法的效率。将该算法应用于两个吸振器的联合控制实验系统中,吸振器在移频范围内取得较好的减振效果,当吸振器与主系统质量比为 1 : 19.8 时,最高减振效果约 12dB,主被动减振效果之差最佳时达 7dB。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Shen Y, Golnaraghi M F, Heppler G R. Semi-active Vibration Control Schemes for Suspension Systems Using Magnetorheological Dampers[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2006, 12(1): 3—24.
- [3] Wang D H, Liao W H. Modeling and control of magnetorheological fluid dampers using neural networks[J]. *Smart Materials and Structures*, 2005, 14: 111—126.
- [4] Erbatır F, Hasancebi O, Tutuncu I, et al. Optimal design of planar and space structures with genetic algorithms [J]. *Computers and Structures*, 2000, 75: 209—224.
- [5] Cao Y J, Wu Q H. Optimization of control parameters in genetic algorithms: a stochastic approach [J]. *International Journal of Systems Science*, 1999, 5: 551—559.
- [6] 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))
- [7] 王莲花, 龚兴龙, 邓华夏, 等. 磁流变弹性体自调谐式吸振器及其优化控制[J]. *实验力学*, 2007, 22(3-4): 429—434(WANG Lianhua, GONG Xinglong, DENG Huaxia, et al. Adaptive Tuned Vibration Absorber Based on Magnetorheological Elastomers and its Optimal Control. *Journal of Experiment Mechanics*, 2007, 22(3-4): 429—434(in Chinese))

Joint Control of Multiple Adaptive Tuned Vibration Absorbers Based on Magnetorheological Elastomers

WANG Lian-hua, GONG Xing-long, NI Zheng-chao, XU Zhen-bang, ZHANG Kun, CHEN Hai-bo
(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: Genetic algorithm (GA) is a kind of search algorithm, which is self-adaptive, heuristic and global optimization. It has been widely used in structural vibration control and other areas of complex control. In this paper, a kind of new joint control algorithm based on GA has been proposed and realized. It can also be used to control multiple adaptive tuned vibration absorbers. This algorithm adopts the appointed position crossover to obtain new individual. Compared with the traditional method, this method has a greater probability to obtain more robust individual and enable the calculation to converge faster. The new algorithm was applied to a double absorber joint control experiment system. Within the adaptive absorber's whole working frequency scale, damping effect at every observation point in the primary system is obviously observed. When the mass ratio between absorber and primary system is 1 : 19.8, its best attenuation can reach 12dB, and 7dB higher than that of passive absorber at the best effective frequency.

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