

利用遗传算法的磁流变阻尼器结构 含时滞半主动控制

薛晓敏¹, 孙清², 张陵¹, 伍晓红¹

(1. 西安交通大学航天航空学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学土木工程系, 710049, 西安)

摘要: 为解决磁流变阻尼器控制系统中普遍存在的时滞问题,提出一种基于遗传算法的磁流变阻尼器结构含时滞半主动控制策略. 该策略以含时滞微分动力学方程为依据,采用先进的并行算法对结构控制力进行优化,然后将结果代入磁流变阻尼器的电流与阻尼力关系式中优化出相应的电流,最终将该电流施加给振动系统从而获得理想的控制效果. 为了验证该策略的有效性,选用一个在底部安有磁流变阻尼器的3层平面框架为控制对象,通过该策略的优化过程得出了一系列仿真结果,证明该半主动控制策略控制效果明显.

关键词: 结构振动控制;磁流变阻尼器;时滞;遗传算法;多目标控制

中图分类号: P315.966 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)09-0122-06

Structural Semi-Active Control Based on Genetic Algorithm Using Magnetorheological Damper with Time Delay

XUE Xiaomin¹, SUN Qing², ZHANG Ling¹, WU Xiaohong¹

(1. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Referring to the time delay in magnetorheological (MR) damper control systems, an efficient structural semi-active control strategy based on genetic algorithm (GA) is proposed for controlling a time-delay system and regulating its behavior under different objectives. A mechanical model for the MR damper is constructed to deduce the relationship between damper force and applied current, and a novel control algorithm with GA is also proposed for mitigating the response of dynamical systems efficiently. A numerical example of a three-floor frame with damper is given to verify the feasibility and efficiency of the proposed strategy.

Keywords: structural vibration control; magnetorheological damper; time delay; genetic algorithm; multi-objective control

结构振动控制可以有效地提高结构的抗震性能,减轻其在动力作用下的反应和损伤. 近年来,基于磁流变阻尼器结构的半主动控制装置在结构振动控制中表现出巨大潜能,得到了大力发展. 但是,由于磁流变阻尼器是一种高度非线性的控制装置,要建立与之相适应的控制系统,首要的问题是建立能够精确描述磁流变阻尼器动力特性的模型. 目前,

Bouc-Wen 模型^[1-2]是一种应用广泛的模型,它能够较好地描述各种非线性系统的力学特性,但缺点是参数过多,控制量隐含在微分方程组内,很难对电压/电流控制量求解. 为了有效利用该模型并将其运用到半主动控制算法中,必须选用一种高效并行的算法来解决模型的参数识别问题.

对磁流变阻尼器结构系统的控制效果除了依赖

于阻尼器模型的精度之外,还依赖于控制算法的有效性^[3].为了使磁流变阻尼器达到较好的半主动控制效果,国内外学者提出了许多控制算法,如:Leitmann^[4]应用 Lyapunov 方法设计了半主动控制算法;Dyke 等人^[5]提出了 Clipped optimal 算法,利用力的回馈曲线得到近似的最优控制力;孙清等人^[6]采用滑模变结构的半主动控制算法,对一安装有磁流变阻尼器的框架结构进行了振动控制的试验研究,表明该控制算法可有效地控制框架的地震反应;欧进萍^[7]将限界 Hrovat 最优控制算法运用到渤海某平台结构的磁流变阻尼器隔振体系中,并通过冰振反应获得了明显的控制效果.以上控制算法都表明其控制效果优于被动控制中电流或电压为 0 时的状况,但却未必优于被动控制中电流为最大值时的情况,尤其是系统的加速度响应更难获得理想的控制效果.由于控制系统中不可避免地存在时滞,会导致控制力产生滞后,控制效率下降,甚至可使控制系统失稳^[8],为此许多学者提出了一系列时滞补偿方法,如移相技术、状态预估、鲁棒控制、滑模控制及模糊控制等控制算法^[9-10].

本文在上述研究的基础上,提出一种新型的半主动控制策略——基于遗传算法的磁流变阻尼器结构含时滞半主动控制策略.该策略以结构动力学理论中的时滞微分方程为研究对象,运用遗传算法优化出时滞项的反馈控制增益,然后代入 Bouc-Wen 模型参数与电流的关系式,反算出磁流变阻尼器所需的电流并施加给半主动控制系统,最终实现半主动控制的目的.

1 磁流变阻尼器

磁流变液体是一种新型的智能材料,由其制成的磁流变阻尼器具有结构简单、阻尼力连续可调、反应迅速(毫秒级)、耗电功率小等优点,已经成为新一代的结构半主动控制装置.磁流变阻尼器作为半主

动控制装置的工作原理是:通过改变电磁场环境(一般通过改变电流)来影响磁流变液的本构特性,继而产生相应的阻尼力,最终达到控制整个动力系统的目的.由于磁流变阻尼器的动力特性十分复杂,滞回特性随电压而变,因此,首要的问题就是建立能真正反映其滞回特性的动力模型,因为动力模型的准确与否将直接关系到磁流变阻尼器的应用效果.

本研究设计制作了一种双出杆磁流变阻尼器(见图 1),其最大输出电流为 3 A.图 2 是 MTS 试验机测得的磁流变阻尼器的部分响应结果,外激励为频率 0.5 Hz、振幅 0.01 m 的简谐振动信号.从图 2 可以看出,磁流变阻尼器表现出了强非线性滞回特性,位移滞回曲线为丰满的椭圆形,而速度滞回曲线的形状类似于梭形曲线,其滞回环显示该阻尼器存在剪切滞回效应.

2 磁流变阻尼器的力学模型

由于磁流变阻尼器具有复杂的非线性特性,其滞回特性随电压(电流)而改变,因此关键问题是建立能够真实反映其滞回特性的动力学模型.Spencer 等人^[1]基于振动台试验提出了一种磁流变阻尼器的改进 Bouc-Wen 滞回动力模型,能用来准确地描述阻尼器的各种力学特性.模型的表达式如下

$$\left. \begin{aligned} f &= c\dot{x} + kx + \alpha z + f_0 \\ z &= \delta \dot{x} - \beta \dot{x} |z|^{n-1} - \gamma \dot{x} |z|^{n-1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

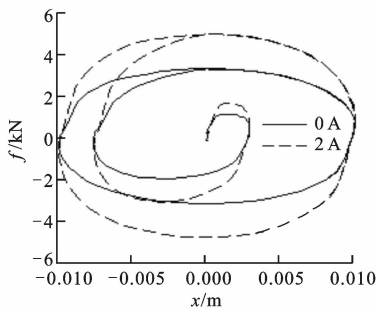
式中: f 为磁流变阻尼器产生的阻尼力; z 为与滞回形状相关的归一化变量; x 、 $\dot{x}$ 分别为阻尼器的位移和速度; c 、 k 、 f_0 、 α 、 δ 、 β 、 γ 、 n 为模型的未知参数.Bouc-Wen 模型的参数识别是一个典型的并行求解问题,本文采用具有强大并行计算能力的遗传算法来完成参数识别的工作.

2.1 遗传算法

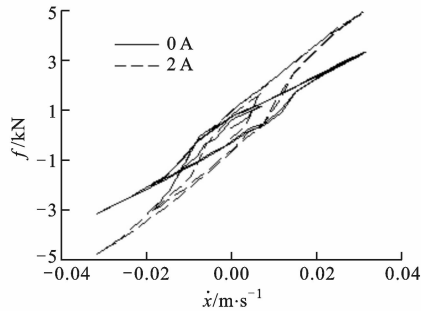
遗传算法运行的步骤主要有染色体编码与解码、个体适应度函数评估、遗传算子及各种运行参数



图 1 磁流变阻尼器实物图



(a) 阻尼力-位移曲线



(b) 阻尼力-速度曲线

图 2 磁流变阻尼器的力学特性($\nu=0.5$ Hz, $A=0.01$ m)

的确定等. 针对 Bouc-Wen 模型的参数识别问题, 本文采用的遗传算法中染色体结构和适应度函数的设定如下.

2.1.1 染色体结构 染色体结构是根据求解或优化的问题决定的, 由于 Bouc-Wen 模型涉及到 8 个未知参数需要进行识别, 因而该问题的染色体结构可以设定为

$$\Theta_i = \{c_i, k_i, f_i, \alpha_i, \delta_i, \beta_i, \gamma_i, n_i\}, \quad i = 1, \dots, N \quad (2)$$

式中: N 为染色体种群数量; i 为个体的序号.

2.1.2 适应度函数 在遗传算法中, 除了确定控制目标(染色体)之外, 另外一个关键点是确定适应度函数. 适应度函数是根据目标函数确定的, 用于区分群体中个体的好坏. 本文将适应度函数和目标函数定义为同一种函数, 即控制目标函数, 选用仿真阻尼力和试验阻尼力的均方差公式

$$E_{ms} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (f_{sim,i} - f_{exp,i})^2 \quad (3)$$

式中: m 是数据点数; 下角标 sim 和 exp 分别表示仿真值和试验值.

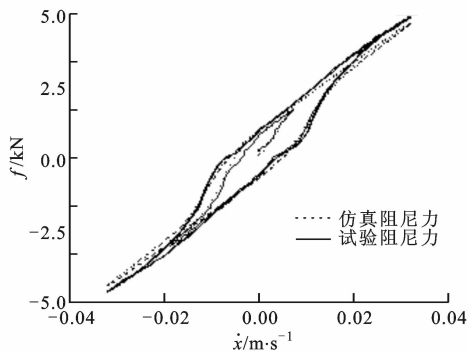
根据以上对参数识别问题的描述, 遗传算法的主要参数设置如下: 每个染色体包含 8 个变量, 每个变量均采用 20 位的二进制代码; 群体总共有 60 个染色体, 每个染色体变量包含 20 个基因; 遗传算法过程采用轮盘赌的方法, 交叉率和变异率分别为 0.85 和 0.01. 在遗传算法的迭代进程中, 设置了迭代终止规则: 当 $E_{ms} < 0.01 \text{ kN}^2$ 时, 优化迭代终止.

2.2 磁流变力学特性的数值计算

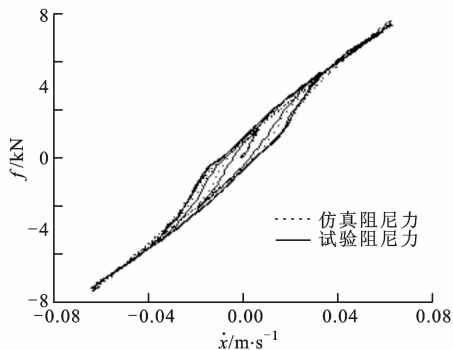
选取几组试验数据(频率为 0.5 和 1.0 Hz 的正弦波激励, 电流为 0~3 A, 振幅为 0.01 m)对磁流变阻尼器进行参数识别, 然后将优化的结果进行归类统计, 再利用一次或二次多项式拟合方法对统计结果进行拟合, 得到各参数与电流之间关系的表达式如下

$$\left. \begin{aligned} c &= -0.0082 I^2 + 0.0384 I + 0.0901 \\ k &= 0.0028 I + 0.002 \\ f_0 &= 0.0115 I + 0.0862 \\ \delta &= 0.0124 I + 0.0514 \\ \alpha &= 1.0104 I + 21.7195 \\ \beta &= -0.2925 I + 5.1743 \\ \gamma &= 0.2472 I + 1.2154 \\ n &= -0.0501 I^2 + 0.1499 I + 1.2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

半主动控制算法需要对磁流变阻尼器发送指令, 输入相应大小的电流或电压值, 继而产生一定的阻尼控制力. 式(4)反映了磁流变阻尼系统的电流与阻尼力的数学关系, 它的精确度将部分决定半主动控制算法的精度. 为了验证式(4)的精度, 随机选取几组不同的电流值代入式(4), 然后将求解的参数值再代入方程(1), 即可获得重建模型的阻尼力数据, 如图 3 所示, 重建模型计算的阻尼力与试验阻尼力非常接近, 拟合效果良好, 目标(适应度)函数的整体精度 E_{ms} 均小于 0.02 kN^2 .



(a) $\nu=0.5 \text{ Hz}$, $I=1.2 \text{ A}$, $A=0.01 \text{ m}$



(b) $\nu=1.0 \text{ Hz}$, $I=1.2 \text{ A}$, $A=0.01 \text{ m}$

图3 重建模型计算的阻尼力与试验结果的对比

3 GA 控制器

设计一套合理有效的控制算法, 对磁流变阻尼结构系统半主动控制的有效性尤为重要. 本节重点介绍适用于时滞受控制系统的半主动控制算法.

3.1 时滞微分方程

研究一个受地震作用力的 3 层平面框架结构系统, 假设控制力的施加存在时间 λ 的滞后, 则该系统的动力学微分方程可以表述如下

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = HU(t - \lambda) + M\ddot{X}_g(t) \quad (5)$$

式中: $\ddot{\mathbf{X}}_g(t)$ 为地面加速度; $\mathbf{X}(t)=[x_1(t), x_2(t), x_3(t)]^T$, $\dot{\mathbf{X}}(t)=[\dot{x}_1(t), \dot{x}_2(t), \dot{x}_3(t)]^T$, $\ddot{\mathbf{X}}(t)=[\ddot{x}_1(t), \ddot{x}_2(t), \ddot{x}_3(t)]^T$ 分别为上部结构各楼层相对于地面的位移、速度、加速度列向量; $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 分别为建筑结构的质量、阻尼和刚度矩阵; $\mathbf{U}$ 为控制力矩阵; λ 为相应的时滞; $\mathbf{I}$ 为相应维数的单位列向量; $\mathbf{H}$ 为控制力位置矩阵。

为了讨论问题方便, 定义状态向量 $\mathbf{Z}(t)=[\mathbf{X}(t), \dot{\mathbf{X}}(t)]^T$, 则由方程(5)得到其状态方程

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{Z}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t - \lambda) + \mathbf{E}\ddot{\mathbf{X}}_g(t) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{J} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{H} \end{bmatrix}$, $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{I} \end{bmatrix}$, 其中 $\mathbf{0}$ 表示相应维数的零矩阵或零向量, $\mathbf{J}$ 是相应维数的单位矩阵。

采用零阶保持器, 即

$$\mathbf{U}(t) = \mathbf{U}(k), \quad kT \leq t < (k+1)T \quad (7)$$

则式(6)可离散为

$$\mathbf{Z}(k+1) = \mathbf{P}\mathbf{Z}(k) + \mathbf{R}\mathbf{U}(k-l) + \mathbf{D}\ddot{\mathbf{X}}_g(k) \quad (8)$$

式中: $\mathbf{P} = e^{\mathbf{A}T}$; $\mathbf{R} = \int_0^T e^{\mathbf{A}\eta} d\eta \mathbf{B}$; $\mathbf{D} = \int_0^T e^{\mathbf{A}\eta} d\eta \mathbf{E}$ 。

由于时滞的不可避免性和外激励的不可预测性, 因而本文引出一个关于时滞项的反馈控制增益 $\mathbf{G}$, 于是含有时滞的控制力表达式可以写为

$$\mathbf{U}(k-l) = \mathbf{G}\mathbf{Z}(k-l) \quad (9)$$

假设不考虑外激励, 将式(9)代入式(8)即可得出系统的动力学方程为

$$\mathbf{Z}(k+1) = \mathbf{P}\mathbf{Z}(k) + \mathbf{R}\mathbf{G}\mathbf{Z}(k-l) \quad (10)$$

3.2 GA 控制器的设计

在现代控制理论中, 二次型线性最优控制是最为常用的一种控制方法。本文从动力系统的时滞微分方程出发, 提出一种 GA 控制器, 通过将不同控制目标变量作为性能指标, 优化出时滞条件下的反馈控制增益。

观察方程(10), 可见系统的动力响应取决于时滞项的反馈控制增益 $\mathbf{G}$ 。因此, 将反馈控制增益作为优化目标, 相应的遗传算法的染色体结构随之可以表示如下

$$\Theta_i(k) = \mathbf{G}_i = \{g_1, g_2, \dots, g_p\}, \quad i = 1, \dots, N \quad (11)$$

式中: N 是染色体种群数量; i 表示种群个体序号; p 表示增益矩阵或向量的维数。

在遗传算法中, 除了确定控制目标(染色体)之外, 另外一个关键问题是确定适应度函数。本文将适应度函数和目标函数定义为同一种函数, 即控制目标函数

$$R_{\text{obj}} = \alpha \sum_{k=1}^q x_i(k)^2 + \beta \sum_{k=1}^q \ddot{x}_i(k)^2 \quad (12)$$

式中: $x_i(k)$ 为第 i 结构层在第 k 数据点时刻的位移响应; $\ddot{x}_i$ 为第 i 结构层的加速度响应; α 、 β 分别为位移和加速度响应控制权重; q 为离散数据点总数。

3.3 GA 控制器的数值计算

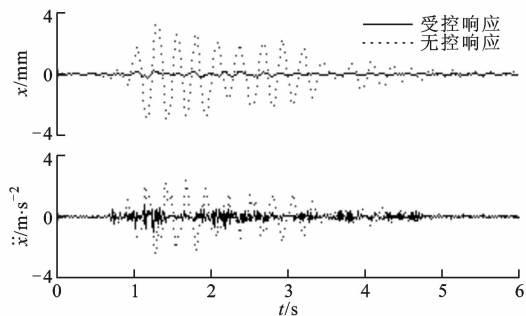
为了验证本文所设计的控制器对建筑结构地震反应控制的有效性, 同时考察时滞对结构振动控制效果的影响, 对一个 3 层框架结构的动力响应进行数值仿真研究。分析模型的结构参数为: $m_1=1\,000\text{ kg}$, $m_2=1\,020\text{ kg}$, $m_3=1\,020\text{ kg}$, $k_1=3\,399\text{ kN/m}$, $k_2=2\,845\text{ kN/m}$, $k_3=2\,845\text{ kN/m}$, 受控结构的阻尼矩阵为其质量矩阵和刚度矩阵的线性组合, 结构的前 2 阶振型阻尼比 $\xi_1=0.05$, $\xi_2=0.04$, 控制力作用在底层。仿真中采用 EI Centro 和 Taft 两种地震波, 其中 EI Centro 波的幅值调整为 1.6 m/s^2 , Taft 波的幅值调整为 2.3 m/s^2 , 采样时间为 0.01 s 。

仿真结果表明, 当以底层位移为控制目标时 ($\alpha=1, \beta=0$), 底层位移峰值的控制效率可达到最大值(对于 EI Centro 波为 94.55% , 对于 Taft 波为 94.85%)。同样, 当控制目标为底层加速度响应时, 可获得底层加速度峰值反应的最有效的控制效率(对于 EI Centro 波为 74.45% , 对于 Taft 波为 71.39%)。此外, 还可以设置位移和加速度响应的组合值作为控制目标。

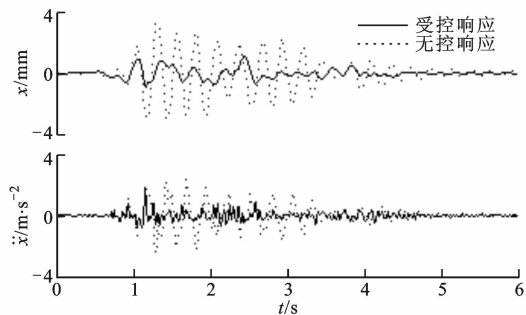
对于含时滞的控制系统, 也进行了数值仿真, 当时滞量取值范围为 $0\sim0.1\text{ s}$ 时, 底层位移控制效率可保证在 50% 以上, 加速度控制效率可达 30% 以上, 表明本文所设计的控制器对含时滞受控系统也能进行有效的控制。无时滞和含时滞的控制时程响应如图 4 所示。

4 GA 控制器的半主动控制策略

磁流变阻尼器的半主动控制是一种结构运动状态的反馈控制。要有效地对一个安装有磁流变阻尼器的结构进行有效控制, 必须首先解决两个问题: 一是磁流变阻尼器的力学模型问题; 二是控制算法的设计问题。本文第 2 节和第 3 节分别解决了这两个问题, 本节将详细介绍如何将它们进行有机结合, 以形成有效的半主动控制策略。



(a) 无时滞



(b) 时滞为 0.1 s

图4 采用本文 GA 控制器的结构振动控制效果 (EI Centro 地震波)

本文提出的半主动控制策略的思路如下:①将 GA 控制器计算出的理想控制力假设为磁流变阻尼器可提供的阻尼力;②将理想控制力代入式(1),求出为了达到该阻尼力所需的参数值并代入式(4),得出相应的电流值;③电流值是通过一系列的数值获得的,因而必须转换为可实现的电流值(本文的磁流变阻尼器的电流值为 0~3 A);④将计算所得的电流施加于磁流变阻尼器,以达到控制系统振动的目的。

控制电流变量隐含在微分方程中,传统方法是直接进行逆求解,然而这种方法容易产生分段函数的复根,将使有效可用电流值的分离变得非常困难。本文的方法是抛开这些复杂的数学关系,采用 GA 来完成对电流的求解,所用的染色体结构、适应度函数如下

$$\Theta = \{I\}, \quad 0 \text{ A} \leq I \leq 3 \text{ A} \quad (13)$$

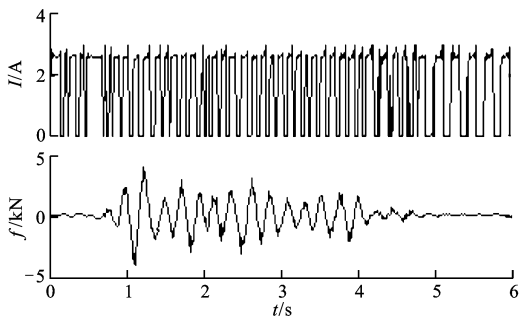
$$R_{\text{obj}} = (f_1 - f_R)^2 \quad (14)$$

式中: I 为求解的电流,其求解范围为 0~3 A; f_1 为理想控制力,即 GA 控制器解出的控制力; f_R 为实际输出的阻尼力,即经过 GA 电流优化后的可实现的阻尼力。

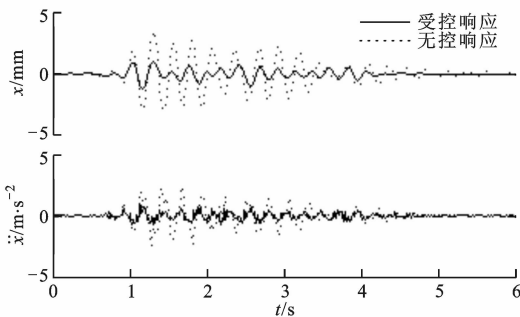
为了验证此策略的有效性,对底层装有一个磁

流变阻尼器的平面框架进行了仿真计算,并假定该阻尼器的时滞为 0.1 s,外激励分别选用上述两种地震波。计算结果表明,采用 GA 控制策略之后,结构底层位移和加速度响应的控制效率分别大于 70% 和 60%,其中对应 EI Centro 波的底层位移和加速度响应的控制效率分别为 70.58% 和 61.74% (控制效果见图 5),对应 Taft 波的控制效率分别为 71.66% 和 60.23%。

此外,还计算了输入为 EI Centro 地震波、控制电流为 0 和 3 A 两种情况下的被动控制情况。当电流为 0 A 时,底层的位移和加速度响应控制效率分别为 52.94% 和 52.85%;当电流为 3 A 时,控制效率分别为 67.65% 和 51.62%。通过对比得出,GA 控制策略利用适当的外部能量就可以得到优于控制电流为 0 和 3 A 的被动控制的效果。



(a) 控制电流和阻尼力时程图



(b) 无控制和半主动控制的底层结构响应

图5 EI Centro 地震波作用下结构振动半主动控制的响应效果

5 结 论

本文从磁流变阻尼器的动力特性试验出发,研究了一种基于 GA 的半主动控制策略。此控制策略主要包含两个关键内容:一是磁流变阻尼器力学模型的建立,即首先选用较为精确的 Bouc-Wen 模型模拟磁流变阻尼器的力学特性,然后运用遗传算法

对该模型进行参数识别,以此获得阻尼器在动力荷载下阻尼力与电流的数学关系;二是 GA 控制器的设计,即以时滞动力学微分方程为依据,对系统在外激励下的动力响应进行优化控制,求解出不同时滞条件下的最优控制力。最后,结合以上磁流变阻尼器的力学模型和控制算法,建立了一套高效的磁流变阻尼器结构的半主动控制策略,通过算例证明了该策略具有较高的可靠性,控制效果比较明显,具有一定的应用前景。

参考文献:

- [1] SPENCER B F, DYKE S J, SAIN M K, et al. Phenomenological model for magnetorheological dampers [J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, Albuquerque, 1997, 123(3):230-238.
- [2] KWOK N M, HA Q P, NGUYEN M T, et al. Bouc-Wen model parameter identification for a MR fluid damper using computationally efficient GA [J]. ISA Transactions, 2007, 46(2):167-179.
- [3] DYKE S J, SPENCER B F, SAIN M K, et al. An experimental study of MR dampers for seismic protection [J]. Smart Materials & Structures, 1998, 7(5):693-703.
- [4] LEITMANN G. Semiactive control for vibration attenuation [J]. Journal of Intelligent Material Systems and

Structures, 1994, 5(6):841-846.

- [5] DYKE S J, SPENCER B F, SAIN M K, et al. Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction [J]. Smart Materials & Structures, 1996, 5(5):565-575.
- [6] 孙清,史庆轩,张可,等. 半主动变阻尼结构的振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(6):11-17.
SUN Qing, SHI Qingxuan, ZHANG Ke, et al. The shaking table test of semi-active varying damping structure [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(6):11-17.
- [7] 欧进萍. 结构振动控制:主动、半主动和智能控制[M]. 北京:科学出版社, 2004:340-346.
- [8] HU Haiyan, WANG Zaihua. Dynamics of controlled mechanical systems with delayed feedback [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2002:272-273.
- [9] XU Shenyuan, LAM J. Robust H -infinity control for uncertain discrete-time-delay fuzzy systems via output feedback controllers [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2005, 13(1):82-93.
- [10] NIU Yugang, HO D W C, LAM J. Robust integral sliding mode control for uncertain stochastic systems with time-varying delay [J]. Automatica, 2005, 41(5):873-880.

(编辑 葛赵青)