

结构非线性振动智能控制试验与分析¹⁾

李芦钰²⁾ 宋钢兵 欧进萍

(大连理工大学土木工程学院, 大连 116024)

摘要 在结构动力学与控制领域中, 试验验证对于理论与数值研究是非常重要的. 但是, 目前的模型试验大部分都只考虑结构的线性行为, 所以考虑结构非线性振动的试验模型成为一个研究热点. 采用磁流变旋转阻尼器来模拟结构中的塑性铰, 并通过调整输入到此旋转阻尼器中的电压来实现不同的非线性行为, 然后在不同的非线性行为下验证了动态神经网络观测器和自适应模糊滑模控制算法的有效性. 试验结果表明建立的结构非线性试验模型可以在试验完成后不需要任何代价而恢复到初始状态, 并且能够实现不同的非线性行为, 同时采用的智能控制算法对结构非线性振动也有较好的控制作用.

关键词 结构非线性振动, 试验模型, 磁流变旋转阻尼器, 塑性铰, 智能控制

中图分类号: TU317+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0459-1879(2010)01-0115-07

引 言

结构试验在土木工程中起着非常重要的作用. 对于结构控制而言, 由于加入了传感元件和驱动元件及相应的软硬件, 更加需要通过多次结构试验来验证所采用的控制算法及控制装置的可靠性和有效性.

第一个结构主动控制试验是在美国国家地震工程研究中心由 Chung 等^[1,2] 和 Soong 等^[3] 完成的. 该试验主要经历了 3 个阶段, 分别采用 1:4 模型的单层钢框架、三层钢框架和六层钢框架某一层或某两层设置液压伺服作动器驱动的主动锚索控制系列模拟地震振动台试验. 其中三层模型试验采用“移相法”进行了时滞补偿, 并检验了瞬时最优和模态控制算法的有效性. 六层模型试验还对比了设置主动质量阻尼 (active mass damper, AMD) 控制装置的有效性. 20 世纪 90 年代初, Soong 和 Reinhorn 等^[4,5] 联合在东京的一幢六层对称建筑上进行了主动锚索控制系统的足尺试验, 该结构总重量 600t, 同时设置了双向主动斜撑 (active brace system, ABS) 控制系统和双向 AMD 控制系统, 采用了基于观测器的速度反馈和基于降阶系统的三层速度反馈两种控制策略. Loh 等^[6] 采用基于直接输出反馈的模态控制和 LQR 控制算法, 在台湾地震工程研究中心完成了底层装有 ABS 的三层原型钢框架结构的

主动控制振动台试验研究. 该试验还尝试了变增益控制算法. Wu^[7] 在台湾地震工程研究中心对前述 Loh 试验所用的同一足尺结构进行了大型主动控制振动台试验, 试验采用了基于加速度反馈的改进的滑动模态方法. 田石柱等^[8] 率先在中国开展了结构振动的主动控制试验研究, 完成了五层 1:4 模型框架的拉簧式 AMD 振动控制试验, 该试验中采用的液压驱动 AMD 质量块运动的伺服作动器其最大出力为 2t, 系统的工作需要油泵、蓄能器等配套设备, 这些设备占用了实验室一个独立的操作间. 欧进萍等^[9] 研究了海洋平台振动的 AMD 主动控制技术的可行性和有效性, 进行了原型平台结构冰致振动和地震反应的 AMD 控制仿真分析以及 1:10 模型平台结构 AMD 控制的地震模拟振动台试验. 同时, 张春巍等^[10,11] 还研究了电磁驱动 AMD 系统控制结构地震响应的策略及振动台试验, 验证了该新型系统应用于结构振动控制的有效性和可行性. 李忠献等^[12] 采用磁流变阻尼器的模型结构, 进行了在两种被动控制和 3 种半主动控制等不同控制策略下的振动台试验, 并对控制效果进行了分析. 周福霖等^[13] 采用预测最优控制算法在单层钢框架模型上试验研究了主动变刚度·阻尼控制系统的控制效果. 张微敬等^[14] 采用静态输出反馈, 进行了安装 AMD 控制装置的 1:4 五层模型结构基于 H_∞ 静态输出反馈的主

2008-06-02 收到第 1 稿, 2009-03-23 收到修改稿.

1) 国家重大基础研究计划 (973 计划) 资助项目 (2007CB714204).

2) E-mail: liluyu@yeah.net

动控制试验研究.

以上对于结构振动控制试验的研究都是基于线性结构模型进行的,而在进行结构非线性振动控制试验时,特别是考虑到需要实现材料非线性,每次试验都需要结构进入塑性阶段,这样将导致结构产生一定的损伤及不可恢复的塑性变形.这时如果要将结构恢复到初始的无变形阶段,则需要大量的时间和资金来修复,有时甚至无法将结构修复到最初状态.而如果做多个试验模型来进行结构非线性试验,同样需要大量的时间和资金.由于上述的可重复性及代价限制等因素,修复损伤构件对于结构非线性振动试验模型而言不是一个可行的方法.所以,如何建立一个结构非线性振动模型,使之在一次试验后可以很容易地恢复到初始状态,对于结构非线性振动试验研究具有极其重要的意义. Soong^[15]提出了一种方法,引入主动控制力来抵消结构中的线性响应,从而用来补偿非线性行为. Reynolds 等^[16]采用盘式制动器来模拟结构中的塑性铰,建立一层的标准试验模型,并采用磁流变阻尼器对结构相应进行了控制.目前对于如何建立能够实现不同非线性行为的结构非线性振动试验模型还缺乏必要的研究和分析.本文采用磁流变旋转阻尼器来模拟结构中的塑性铰,进而模拟结构产生的非线性变形,建立结构非线性振动试验模型.并通过调整输入到此旋转阻尼器中的电压来产生不同的非线性行为.最后在此结构非线性振动试验模型的基础上,加入磁流变阻尼器来控制此结构的非线性振动,并通过试验验证所采用的智能控制算法的合理性和有效性.

1 试验模型

本试验建立的结构非线性振动模型的核心部分就是采用磁流变旋转阻尼器来模拟结构中的塑性铰.如图 1 所示就是本文所采用的旋转阻尼器,由 Lord 公司生产,型号为 RD-2087-01.表 1 为此阻尼

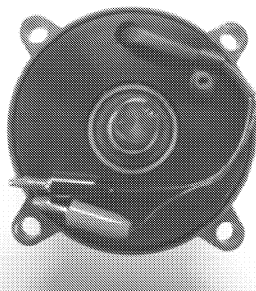


图 1 磁流变旋转阻尼器

Fig.1 Magnetorheological (MR) rotary brake

表 1 磁流变旋转阻尼器的基本参数

Table 1 Basic properties of MR rotary brake

body length /mm	35.7
body diameter/mm	96.6
operating speed /rpm	120 max
torque@1A /nm	4
operating temperature /°C	-35 to +60

器的基本参数.

如图 2 所示为本文所建立的结构非线性振动模型,其中磁流变旋转阻尼器用来模拟塑性铰,激光位移传感器用来测量振动时的位移,角度传感器用来测量在振动过程中旋转阻尼器的转角,也就是塑性铰的转角.应变传感器用来测量应变,并通过力学分析计算得到弯矩.振动台用来产生输入到此非线性结构中的地震波.

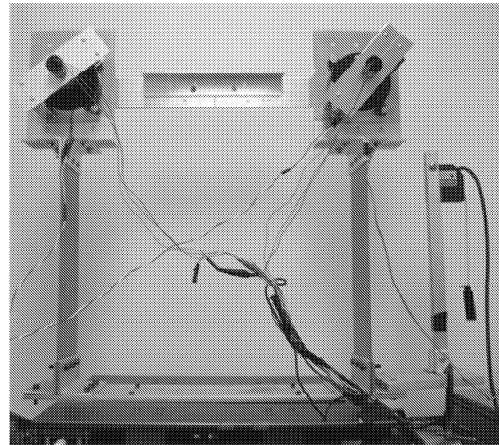


图 2 结构非线性振动试验模型

Fig.2 Nonlinear vibration experimental model of structure

图 3 所示为本试验的系统组成.其中 dSPACE 数据采集系统用于接收和发送数据,计算机用于实现所设计的结构振动控制算法并计算相应的控制力,Agilent 电源放大器用于放大计算机的输出控制信号,

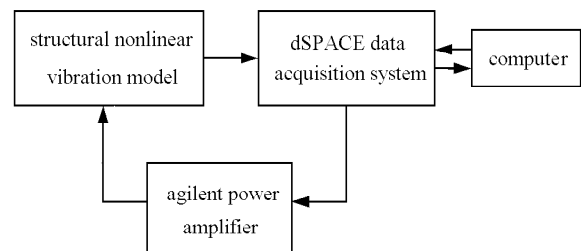


图 3 结构非线性振动控制试验框图

Fig.3 Block diagram of experiment for structural nonlinear vibration

并将其输入到磁流变阻尼器中从而实现对此结构的非线性振动控制。

2 塑性铰实现机理

本试验中塑性铰采用磁流变旋转阻尼器来实现，具体原理如图 4 所示。图 4(a) 表示结构此时处于无变形状态，磁流变旋转阻尼器也处于初始状态，没有任何转动。当结构在一定的输入下开始振动时，如图 4(b) 所示，在小振幅的情况下，处于弹性状态，这时由于结构变形较小，所以施加在磁流变旋转阻尼器上的弯矩没有超过此旋转阻尼器的启动弯矩，不足以使磁流变旋转阻尼器转动，这时塑性铰没有出现，所以并没有产生非线性变形。当振幅较大时，如图 4(c) 所示，施加在磁流变旋转阻尼器上的弯矩超过此旋转阻尼器的启动弯矩，使得磁流变旋转阻尼器开始转动，这时塑性铰出现，并产生了一定的非线性变形，从而实现了结构的非线性振动。

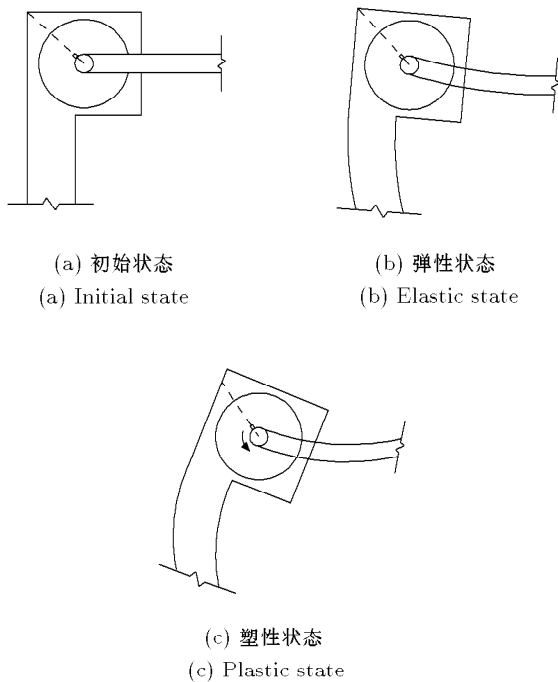


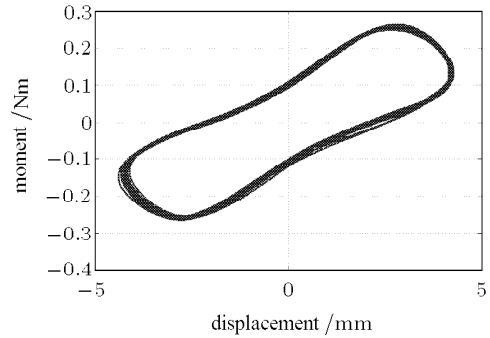
图 4 塑性铰产生机理

Fig.4 Mechanism of plastic hinge

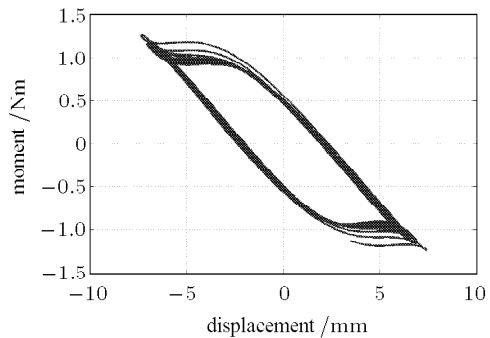
3 不同非线性行为的实现

通过以上的分析知道本文中的结构非线性振动试验模型是用磁流变旋转阻尼器来模拟塑性铰的方式实现的。由于磁流变旋转阻尼器可以通过调节输入电压来改变其阻尼特性，所以可以利用此特性来

实现不同的非线性滞回曲线。本文通过调节旋转式阻尼器的输入电压来实现不同的非线性行为，如图 5 所示为试验测得的此结构非线性振动试验模型在几种不同输入信号下的非线性滞回曲线。从图中的结果可以看出，通过调节磁流变旋转阻尼器的输入，可以实现各种不同的非线性行为。当把输入电压调到最大的时候，如图 6 所示为弯矩位移曲线，这时的弯矩位移曲线基本上为直线，所以此时结构处于



(a) 工况 1
(a) Case 1



(b) 工况 2
(b) Case 2

图 5 不同的非线性滞回曲线

Fig.5 Different nonlinear hysteresis curves

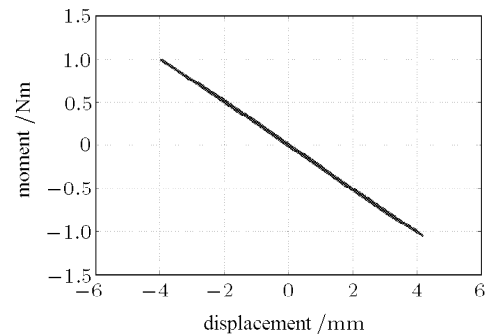


图 6 弹性结构弯矩位移曲线

Fig.6 Moment-displacement curve of elastic structure

弹性状态. 从以上分析可以看出利用此结构不仅可以实现不同的非线性行为, 而且也可以实现结构的线性振动.

4 动态神经网络观测器试验研究

本文采用的动态神经网络观测器^[17]考虑结构非线性振动的状态方程为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{B}_u \mathbf{u}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (1)$$

系统(1)可由动态神经网络完全表示为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{W}^* \mathbf{S}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}\varepsilon(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{B}_u \mathbf{u}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (2)$$

这里 \mathbf{A} 为 $n \times n$ 矩阵, \mathbf{B} 为 $n \times r$ 矩阵, \mathbf{W}^* 为 $r \times L$ 权矩阵, $\mathbf{S}(\mathbf{x})$ 为 L 维向量, $\mathbf{S}(\mathbf{x})$ 中的元素为 $s(x_i)$, 它们是光滑单调的函数, 选用 Sigmoid 函数, 形式为

$$s(x_i) = \frac{\mu}{1 + e^{-lx_i}} + \lambda \quad (3)$$

对所有的 i , 其中 μ 和 l 是有界的参数, λ 是常数, $\varepsilon(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 为模型误差项, 假设在紧集 $\Omega \in R^n$, 有 $|\varepsilon(\mathbf{x}, \mathbf{u})| \leq \theta^*$, θ^* 为未知的常数.

则对系统(2)设计相应的观测器为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}} &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\hat{\mathbf{W}}\mathbf{S}(\hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{L}(\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}) + \mathbf{B}\mathbf{v} + \mathbf{B}_u \mathbf{u} \\ \hat{\mathbf{y}} &= \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

这里选择 \mathbf{L} , 使 $\mathbf{A}_c = \mathbf{A} + \mathbf{L}\mathbf{C}$ 为稳定的矩阵; $\tilde{\mathbf{S}} = \mathbf{S}(\hat{\mathbf{x}}) - \mathbf{S}(\mathbf{x})$, $\tilde{\mathbf{y}} = \hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}$, 并假设 $|\tilde{\mathbf{S}}| < M$, 其中 M 为未知常数.

对于系统(2), 相应的观测器为(4), $\hat{\mathbf{W}}$, $\hat{\theta}$ 的自适应律分别为

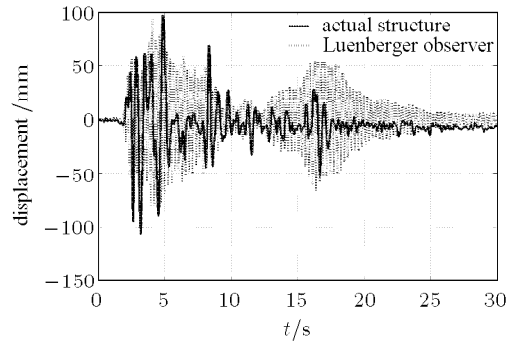
$$\dot{\hat{\mathbf{W}}} = -\gamma \hat{\mathbf{W}} - \mathbf{F}^T \tilde{\mathbf{y}} \mathbf{S}^T(\hat{\mathbf{x}}) \quad (5)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = -\gamma_\theta \hat{\theta} + |\tilde{\mathbf{y}}^T \mathbf{F}| \quad (6)$$

观测器的鲁棒控制项为 $\mathbf{v} = -\hat{\theta} \text{sgn}(\mathbf{F}^T \tilde{\mathbf{y}})$. 这里 γ, γ_θ 为自适应增益, 则 $\mathbf{e}, \hat{\mathbf{W}}, \hat{\theta}$ 最终一致有界. 关于此动态神经网络观测器具体的分析和证明见文献[17].

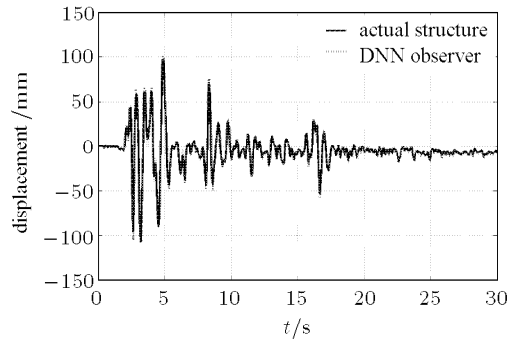
下面通过试验来验证一下前文提出的动态神经网络观测器在结构非线性振动试验模型中的效果, 便于比较, 同时采用了基于线性模型的 Luenberger 观测器. 试验过程主要采用前面的两种非线性滞回曲线(图5). 这里由于是一层结构, 所以采用两个

神经元来观测结构的两个状态, 自适应增益分别为 0.2, 0.05. \mathbf{A} 矩阵选取为结构线性振动模型的状态矩阵, \mathbf{B} 为全 1 向量, 观测器增益矩阵 \mathbf{L} 选取为根据 Luenberger 观测器计算出的增益矩阵. 观测器的输入为结构一层位移, 地震波采用 0.3 倍的 El Centro 地震波. 图 7 和图 8 为 Luenberger 观测器和 DNN 观测器的试验结果.



(a) Luenberger 观测器

(a) Luenberger observer

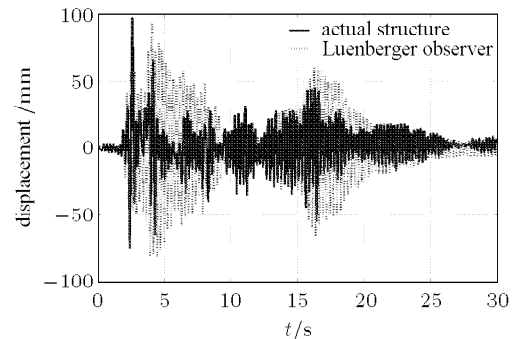


(b) DNN 观测器

(b) DNN observer

图 7 非线性滞回曲线工况 1 状态观测结果

Fig.7 Observer results of case 1 of nonlinear hysteresis curves

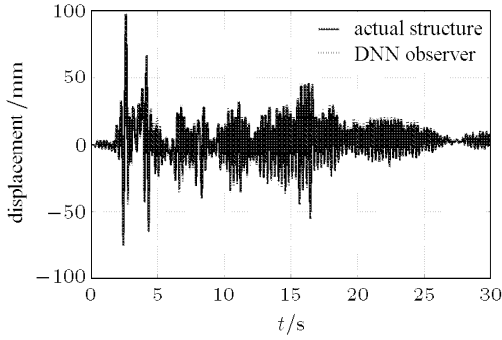


(a) Luenberger 观测器

(a) Luenberger observer

图 8 非线性滞回曲线工况 2 状态观测结果

Fig.8 Observer results of case 2 of nonlinear hysteresis curves



(b) DNN 观测器
(b) DNN observer

图 8 非线性滞回曲线工况 2 状态观测结果 (续)

Fig.8 Observer results of case 2 of nonlinear hysteresis curves (continued)

从以上的试验结果可以看出，在不同的非线性行为下，基于线性模型的 Luenberger 观测器无法估计结构非线性振动时的状态。而基于非线性模型的动态神经网络观测器可以很好地观测结构的实际状态。

5 自适应模糊滑模控制算法试验研究

自适应模糊滑模控制算法的控制力由滑模控制算法得出 [18]，如下式所示

$$\bar{u} = -c_1 \dot{x} - f(x, \dot{x}) - (D + \eta) \text{sgn}(s) \quad (7)$$

然而上述的控制律中非线性系统 $f(x, \dot{x})$ 是未知的，控制器无法使用。为解决此问题，下面用自适应模糊系统 $\bar{f}(x|\theta)$ 来代替 $f(x, \dot{x})$ ，从而实现结构非线性振动的滑模控制，同时用 $\hat{f}(s|\theta_s)$ 去逼近滑模控制律中的符号函数项 $(D + \eta)\text{sgn}(s)$ 以消除滑模控制的抖振现象，则式 (7) 可以改写为

$$\bar{u} = -c_1 \dot{x} - \hat{f}(x|\theta_f) - \hat{f}(s|\theta_s) \quad (8)$$

通过 Lyapunov 稳定性定理，可以推导出相应的自适应律为

$$\dot{\theta}_f = \gamma_1 s \xi(x) \quad (9)$$

$$\dot{\theta}_s = \gamma_2 s \psi(s) \quad (10)$$

下面结合动态神经网络观测器来试验验证一下前面提出的自适应模糊滑模控制器的控制效果。如图 9 所示为加入磁流变阻尼器的结构非线性振动试验模型。针对前面的两种不同的非线性滞回曲线，本文进行了结构非线性振动控制的试验。其中输入

到磁流变阻尼器中的控制信号由计算机根据自适应模糊滑模控制算法计算得到，并利用动态神经网络观测器估计结构的全部状态以实现基于智能控制算法的输出反馈控制。试验中的地震波为 0.3 倍的 El Centro 地震波，如图 10 和图 11 所示为试验结果。

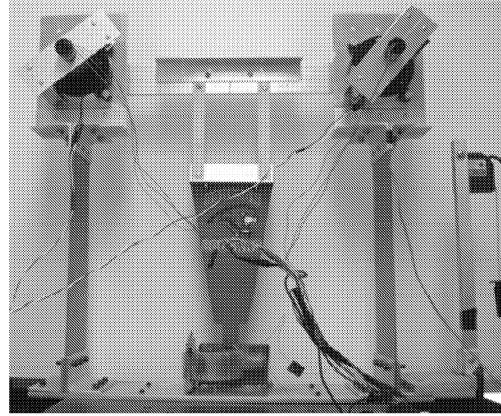
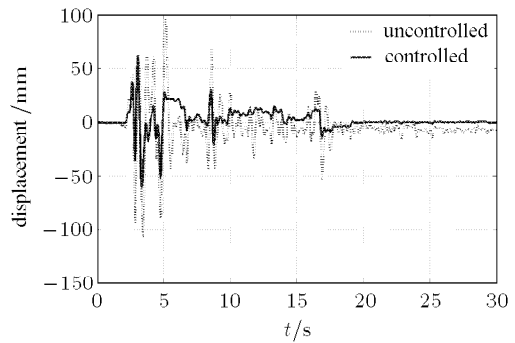


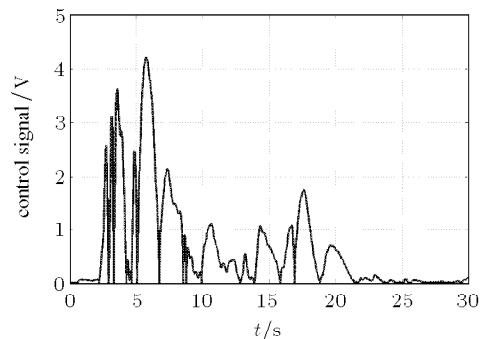
图 9 加入磁流变阻尼器的结构非线性振动模型

Fig.9 Structural nonlinear vibration model with MR damper



(a) 控制效果

(a) Control effect

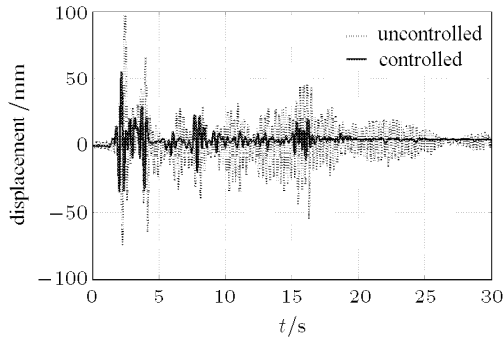


(b) 控制信号

(b) Control signal

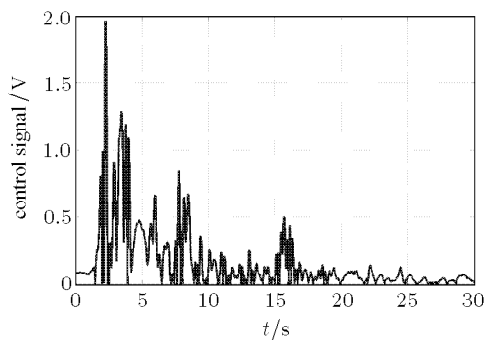
图 10 非线性滞回曲线工况 1 控制结果

Fig.10 Control results of case 1 of nonlinear hysteresis curves



(a) 控制效果

(a) Control effect



(b) 控制信号

(b) Control signal

图 11 非线性滞回曲线工况 2 控制结果

Fig.11 Control results of case 2 of nonlinear hysteresis curves

从上述结果中可以看出自适应模糊滑模控制算法对于不同的非线性行为都有较好的控制效果。

6 结 论

本文利用磁流变旋转阻尼器来模拟结构非线性振动时产生的塑性铰，建立了结构非线性振动试验模型，通过调节输入到磁流变旋转阻尼器中的电压来实现不同的非线性行为，并在此模型上进行了本文采用的智能控制算法的试验分析和验证，得到了如下主要结论：

(1) 采用磁流变旋转阻尼器建立的结构非线性振动模型可以重复地进行结构非线性振动试验，不需要任何代价就可以恢复到结构振动初始状态。并且可以通过调节输入到旋转阻尼器中的电压来实现不同的非线性行为。

(2) 试验验证了本文采用的动态神经网络观测器在不同的结构非线性行为下对于结构非线性振动状态估计都具有较好的观测效果，而基于线性模型提

出的 Luenberger 观测器则无法很好地预测结构非线性振动状态。

(3) 试验验证了本文采用的自适应模糊滑模控制算法对于结构非线性振动控制的有效性。

参 考 文 献

- 1 Chung LL, Reinhorn AM, Soong TT. Experiments on active control of seismic structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 1988, 114: 241~256
- 2 Chung LL, Lin RC, Soong TT, et al. Experiments on active control for MDOF seismic structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 1989, 115(8): 1609~1627
- 3 Soong TT, Reinhorn AM, Yang JN. Active response control of building structures under seismic excitation. In: Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, 1988, 8. 453~458
- 4 Soong TT, Reinhorn AM, Wang YP, et al. Full scale implementation of active control I: design and simulation. *Journal of Engineering Mechanics*, 1991, 117(11): 3516~3536
- 5 Reinhorn AM, Soong TT, et al. Full scale implementation of active control II: installation and performance. *Journal of Engineering Mechanics*, 1993, 119(6): 1935~1960
- 6 Loh CH, Lin PY, Chung NH. Experimental verification of building control using active bracing system. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1999, 28: 1099~1119
- 7 Wu JC. Experiment on a full-scale building model using modified sliding mode control. *Journal of Engineering Mechanics*, 2003, 129(4): 363~372
- 8 田石柱, 刘季. 结构模型的 AMD 主动控制试验. *地震工程与工程振动*, 1999, 19(4): 90~94 (Tian Shizhu, Liu Ji. Active structural control of model with active mass damper. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1999, 19(4): 90~94 (in Chinese))
- 9 欧进萍, 王刚, 田石柱. 海洋平台结构振动的 AMD 主动控制试验研究. *高技术通讯*, 2002, 10: 85~90 (Ou Jinping, Wang Gang, Tian Shizhu. Experimental research on AMD control of structural vibration of offshore platform. *High Technology Letters*, 2002, 10: 85~90 (in Chinese))
- 10 张春巍, 欧进萍. 结构振动的电磁驱动 AMD 系统控制策略与试验. *噪声与振动控制*, 2006, 5: 9~13 (Zhang Chunwei, Ou Jinping. Control strategies and experiments of the electromagnetic mass damper control system for structural vibration. *Noise and Vibration Control*, 2006, 5: 9~13 (in Chinese))
- 11 张春巍, 欧进萍. 电磁驱动 AMD 系统控制结构地震响应的振动台试验. *地震工程与工程振动*, 2006, 26(2): 104~110 (Zhang Chunwei, Ou Jinping. Shaking table tests of electromagnetic mass damper system for control of structural seismic response. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2006, 26(2): 104~110 (in Chinese))
- 12 李忠献, 姜南, 徐龙河等. 不同控制策略下安装磁流变阻尼器的模型结构振动台试验与分析. *建筑结构学报*, 2004, 25(6): 15~21 (Li Zhongxian, Jiang Nan, Xu Longhe, et al. Shaking table

- test and analysis of model structure installed magnetorheological damper under different control strategies. *Journal of Building Structures*, 2004, 25(6): 15~21 (in Chinese))
- 13 周福霖, 谭平, 阎维明. 新型半主动控制系统的理论与试验研究. 中国科技论文在线, 2007, 2(9): 621~628 (Zhou Fulin, Tan Ping, Yan Weiming. Experimental and theoretical study on a new semi-active control system. *Sciencepaper Online*, 2007, 2(9): 621~628 (in Chinese))
- 14 张微敬, 欧进萍. 多层结构基于静态输出反馈的主动控制试验研究. 振动与冲击, 2007, 26(8): 158~161 (Zhang Weijing, Ou Jinping. Experiments on active control of multi-story structure using static output feedback. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(8): 158~161 (in Chinese))
- 15 Soong TT. Experimental simulation of degrading structures through active control. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1998, 27: 143~154
- 16 Reynolds WE, Christenson RE. Bench-scale nonlinear test structure for structural control research. *Engineering Structures*, 2006, 28: 1182~1189
- 17 Li LY, Ou JP. Dynamical neural network observer design for the nonlinear vibration model of structure. In: Proceedings of the 4th China-Japan-US Symposium of Structural Control and Monitoring, Hangzhou, China, 2006
- 18 李芦钰, 欧进萍. 结构非线性振动的自适应模糊滑模控制. 振动工程学报, 2006, 19(3): 96~103 (Li Luyu, Ou Jinping. Adaptive fuzzy sliding mode control for nonlinear vibration reduction of structure. *Journal of Vibration Engineering*, 2006, 19(3): 96~103(in Chinese))

(责任编辑: 陶彩军)

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL ANALYSIS OF INTELLIGENT CONTROL FOR STRUCTURAL NONLINEAR VIBRATION¹⁾

Li Luyu²⁾ Song Gangbing Ou Jinping

(School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract Experimental verification of structural dynamics and control strategies is essential for theoretical and numerical study, but only the linearity of the structures was studied in the existing model tests. Therefore, recently there has been an increasing interest in research of establishing experimental model for structural nonlinear vibration. In this paper, MagnetoRheological (MR) rotary brake is used to mimic the plastic hinge of structure so as to analyze structural nonlinear vibration. By means of adjusting the input voltage to MR rotary brakes, different nonlinear behaviors can be detected. Moreover, the dynamical neural network and adaptive fuzzy sliding mode control have been experimentally verified under different nonlinear behaviors by incorporating MR damper into this experimental model. Experimental results show that the structural nonlinear vibration model which is established in this paper can be recovered to initial state without any cost after nonlinear vibration tests. In addition, different nonlinear behaviors can be achieved by changing the input voltage to MR rotary brakes. The intelligent control algorithms are experimentally verified to be suitable for control of structural nonlinear vibration.

Key words structural nonlinear vibration, experimental model, MR rotary brake, plastic hinge, intelligent control

Received 2 June 2008, revised 23 March 2009.

1) The project supported by the National Major Fundamental Research Program of China (973 Program) (2007CB714204).

2) E-mail: liluyu@yeah.net