

### 3 层基准建筑非线性地震反应的智能控制

张永兵<sup>1</sup>, 张永申<sup>2</sup>, 李双蓓<sup>1</sup>, 秦 荣<sup>1</sup>

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2. 平煤集团土建公司, 平顶山 467000)

**摘 要:**近年来,智能驱动材料、控制装置和智能控制算法的研究和发展为土木工程的抗震控制开辟了新的天地。笔者设计制作了一款新型的压电变摩擦阻尼器,并将其作为控制装置,提出了能有效抑制强烈地震激励下高层建筑结构非线性反应的模糊控制算法,并建立了量化因子、比例因子与结构响应之间的关系。对受控的 3 层基准建筑结构进行了非线性地震反应的数值仿真分析,并与其它的控制策略进行比较。结果表明,采用模糊控制算法,能有效抑制建筑结构的非线性地震反应,减少地震对建筑结构的破坏。

**关键词:**基准建筑;非线性地震反应;模糊控制;压电变摩擦阻尼器;振动控制

**中图分类号:**P315.966;TU352.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2009)01-0049-06

### Intelligent Control of the Nonlinear Seismic Response of a 3-Story Benchmark Building

ZHANG Yong-bing<sup>1</sup>, ZHANG Yong-shen<sup>2</sup>, LI Shuang-bei<sup>1</sup>, QIN Rong<sup>1</sup>

(1. Department of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China; 2. Pingdingshan Coal Co., Ltd., Pingdingshan 467000, P. R. China)

**Abstract:** Intelligent materials, control devices and intelligent control algorithm research and development in recent years have opened a new world for seismic resistance and disaster reduction in civil engineering. We designed and fabricated a new piezoelectric friction damper. In our research, we regarded the piezoelectric friction damper as the control device. We proposed a fuzzy control algorithm for reducing nonlinear seismic response of a 3-story benchmark building and established the interactive relationships between structural responses and fuzzifier factors, defuzzifier factor. A numerical simulation is carried out to analyze the nonlinear seismic responses of the controlled 3-story benchmark building. The simulation results are compared to those of other control strategies. The results show that the fuzzy control can reduce the nonlinear seismic response of 3-story benchmark building and minimize the structural damage caused by strong earthquakes.

**Key words:** benchmark building; nonlinear seismic response; fuzzy control; piezoelectric friction damper; vibration control

目前,国内外学者对建筑结构的振动控制的研究主要集中在结构的线性反应。1994 年的 Northridge

和 1995 年的 Kobe 地震灾害中人们发现,在强烈地震作用下结构即使附加了控制措施,其主体构件也将

收稿日期:2008-08-26

基金项目:国家自然科学基金项目(19872020);广西研究生教育创新计划资助项目(2006105930814D05、2008105930814D003)

作者简介:张永兵(1979-),男,广西大学博士研究生,主要从事智能结构分析与设计等方面的研究,(E-mail) zhangbing111@sina.com。

秦荣(联系人),男,广西大学教授,博士生导师,(Tel)0771-2061705;(E-mail)emssi@sina.com。

不可避免地超过弹性极限而产生损伤。因此研究结构非线性状态下控制系统性能的课题摆在了人们面前。1998 年在日本召开的第二届国际结构振动控制会议上提出了非线性结构振动控制的 Benchmark 问题。

智能驱动材料的研究和发展为控制装置的设计开辟了新的天地<sup>[1]</sup>, 多层式压电陶瓷(压电堆)由于其响应速度快、承载力大、能耗低、电场控制相对简单、出力方式灵活等优点而备受人们的关注, 国内外的很多学者已经进行了深入细致的研究。Kamada 等<sup>[2]</sup>应用多层叠片式压电陶瓷驱动器, 研究了一座 4 层钢框架模型的主动控制。欧进萍等<sup>[3]</sup>结合多层式压电驱动器以及 Pall 摩擦阻尼器的特点, 提出了压电变摩擦阻尼器。Chen G D 等<sup>[4]</sup>用压电变摩擦阻尼器对建筑结构地震反应控制的研究取得了较好的进展。瞿伟廉等<sup>[5]</sup>分析了采用压电变摩擦阻尼器对高耸铁塔进行半主动风振控制的效果。

在基准建筑非线性地震反应的控制算法上, 国内外学者进行了深入的研究, OHTORI Y<sup>[6]</sup>等采用 LQG 算法进行了 20 层建筑非线性地震反应的主动振动控制, KIM D H<sup>[7]</sup>等采用最优神经网络控制算法对 3 层基准建筑进行了非线性地震反应的研究, ZHOU Xing-de<sup>[8]</sup>等提出了适用于建筑结构非线性地震反应的主动控制算法, CHEN Chao-qiang<sup>[9]</sup>等对 3 层基准建筑的缩尺模型进行了振动台试验, 并提出了半主动的控制算法, 取得了较好的效果。

在传统的控制理论中, 一种高效的控制算法的建立依赖于控制对象的精确的数学模型, 然而, 土木工程结构在地震作用下具有高度的非线性和不确定性。模糊控制不需要对所分析的对象建立精确的数学模型, 并且具有高度的鲁棒性和非线性, 因此, 近几年来引起了广大学者广泛的关注和研究。WILSON C M D<sup>[10]</sup>采用模糊控制算法对安装磁流变阻尼器的单层结构进行分析, 取得了很好的效果。MOHAMMED Al-Dawod<sup>[11]</sup>等采用模糊控制算法对 3 层基准建筑进行了非线性地震反应的研究, 将各层的加速度作为模糊控制的输入变量, 取得的效果不甚理想。笔者也做了部分工作<sup>[12-13]</sup>, 成功的将模糊控制算法应用到结构的振动控制上。

该文设计制作了一款新型的压电变摩擦阻尼器, 采用压电变摩擦阻尼器作为半主动控制装置, 设计了模糊控制策略, 对地震激励下的 3 层钢框架进行了非线性的分析, 仿真结果证明了模糊控制的有效性。

## 1 3 层基准结构模型

3 层基准结构模型为钢框架结构<sup>[6]</sup>, 其南北向平面框架如图 1 所示, 压电变摩擦阻尼器的安装位置如图所示。

平面尺寸为 36.58 m×54.87 m, 高 11.89 m, 东西向 6 跨, 南北向 4 跨, 每跨跨距均为 9.15 m。模型中质量被简化为集中于各层楼板处, 第 1、2 层质量各为 957 t, 第 3 层(屋顶)质量为 1 040 t, 结构总质量为 2 950 t。分析采用非线性单元模型, 结构梁、柱单元都假定为“平面框架”单元, 结构构件抗弯刚度的非线性特性用双线性滞回模型, 阻尼矩阵由 Rayleigh 正交阻尼导出。

地震动输入采用 4 条实测地震加速度纪录, 两条近场波: El Centro 波和 Hachinohe 波, 两条远场波: Northridge 波和 Kobe 波, 相应的峰值加速度分别为: 3.417 m/s<sup>2</sup>、2.250 m/s<sup>2</sup>、8.268 m/s<sup>2</sup> 和 8.178 m/s<sup>2</sup>。将前两条波加速度峰值分别调整为原来的 0.5、1.0、1.5 倍, 将后两条波的加速度峰值分别调整为原来的 0.5、1.0, 从而得到 10 条用于 Benchmark 分析的地震输入波。

评价指标共有 17 项, 其中  $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_9$  分别反映受控结构所有楼层中的最大的无量纲层间侧移角、最大的无量纲加速度和结构产生节点塑性铰数目的百分比。

$$J_1 = \max_{\substack{\text{El Centro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_{t,i} |d_i(t)|}{\delta^{\max} h_i} \right\}$$

$$J_2 = \max_{\substack{\text{El Centro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{\max_{t,i} |\ddot{x}_{ai}(t)|}{\ddot{x}_a^{\max}} \right\}$$

$$J_9 = \max_{\substack{\text{El Centro} \\ \text{Hachinohe} \\ \text{Northridge} \\ \text{Kobe}}} \left\{ \frac{N_d^C}{N_d} \right\}$$

式中,  $d_i(t)$  为第  $i$  层的层间位移,  $h_i$  为第  $i$  层的层高,  $\delta^{\max}$  为无控结构所有楼层中的最大层间侧移角;  $\ddot{x}_{ai}(t)$  为受控结构第  $i$  层的加速度,  $\ddot{x}_a^{\max}$  为无控结构所有楼层中的最大楼层加速度;  $N_d$  为无控结构的塑性铰个数, 当无控结构在地震波作用下处于线性状态时,  $J_9 = 0$ ,  $N_d^C$  为受控结构的塑性铰个数。

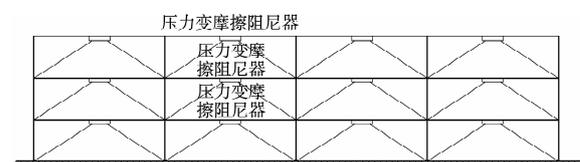


图 1 3 层基准建筑南北向框架图

## 2 压电变摩擦阻尼器

笔者设计了一款新型的压电变摩擦阻尼器,由长孔螺栓节点<sup>[14]</sup>和压电堆构成,长孔螺栓节点主要由主板和副板及高强螺栓组成,平面图如图 2 所示,安装在支撑与梁底之间,其中主板为一块焊接在梁上的有槽孔的钢板,槽孔与受力方向平行,槽孔的长度大于所安装的建筑结构在荷载作用下的最大层间位移。共有两块副板,关于主板对称安装,其中一块副板有两块钢板组成,中间夹持压电堆。在主板和副板间嵌入黄铜作为摩擦片,保持滑动摩擦力均匀稳定。高强螺栓穿过槽孔,螺帽下加设垫圈,保持恒定的螺栓紧固力,如图 3 所示。当作用在节点上的拉力超过摩擦间的最大静摩擦力时,主板相对垫板产生滑动摩擦,耗散能量。

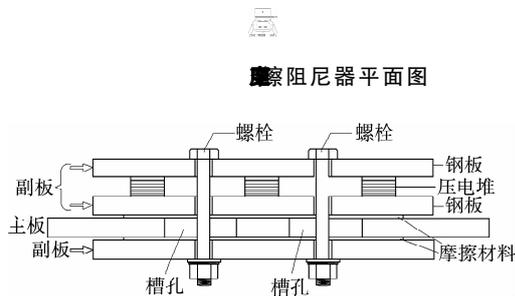


图 3 压电变摩擦阻尼器 1-1 剖面图

压电变摩擦阻尼器的基本原理是利用压电陶瓷的电致变形来改变摩擦片之间的正压力,实现摩擦力的主动实时调节,使摩擦阻尼器具有智能特性。

设  $N_p$  为压电陶瓷驱动器在电场作用下所受的约束力,  $N_b$  为螺栓限制驱动器电场作用下变形而产生的紧固力,则

$$N_p = n\epsilon_p E_p A_p \quad N_b = 4\epsilon_b E_b A_b \quad (1)$$

式中,  $\epsilon_p = \frac{\Delta L_v - \Delta L}{L_p}$ ,  $\epsilon_b = \frac{\Delta L}{L_b}$  其中,  $\Delta L_v = d_{33} V L_p / h$  是驱动器在零应力下,在作用电压为  $V$  时的伸长量;  $\Delta L$  是驱动器受到螺栓限制时,在作用电压  $V$  时的伸长量;  $d_{33}$  是压电陶瓷的轴向压电常数,  $A_p$  是压电陶瓷的横截面积,  $h$  为单层压电陶瓷厚度,  $n$  为压电陶瓷驱动器的个数,  $E_p$  是压电陶瓷的弹性模量,  $L_p$  是压电陶瓷驱动器的轴向高度;  $A_b$  是螺栓的横截面积,  $4$  为螺栓的个数,  $E_b$  是螺栓的弹性模量,  $L_b$  是螺栓的轴向高度;

由  $N_p = N_b$  可得

$$N_p = K \frac{d_{33} V}{h} \quad K = \frac{1}{\frac{1}{nE_p A_p} + \frac{L_b}{4L_p E_b A_b}} \quad (2)$$

压电变摩擦阻尼器的恢复力模型为:

$$f(t) = 2\mu N_p(t) \operatorname{sgn}[\dot{x}(t)] \quad (3)$$

式中,  $\dot{x}(t)$  为楼层间速度;  $2$  表示两个摩擦面,  $\mu$  为摩擦系数。

## 3 非线性地震反应的模糊控制策略

### 3.1 控制系统模型

对于非线性系统控制器的设计,常采用线性化的方法来设计非线性系统的控制器。通过静力缩减—状态降阶的方法获得控制器设计方程<sup>[6]</sup>:

$$\dot{x} = Ax + Bf + E\ddot{x}_g \quad (4)$$

$$y_m = C_m x_r + D_m f + F_m \ddot{x}_g + v \quad (5)$$

$$y_e = C_e x + D_e f + F_e \ddot{x}_g \quad (6)$$

式中,  $x$  为状态矢量,  $y_m$  为量测输出向量,  $y_e$  为受控输出向量,  $A$ 、 $B$ 、 $E$ 、 $C_m$ 、 $D_m$ 、 $F_m$ 、 $C_e$ 、 $D_e$ 、 $F_e$  为相应维数的系数矩阵,  $v$  为测量噪声向量。

### 3.2 模糊控制算法

作为一种基于专家经验的控制方法,模糊控制不需要受控对象的复杂数学模型,特别适合于对复杂结构的控制。模糊控制是以模糊集理论、模糊语言变量和模糊逻辑推理为基础的一种智能控制方法,它的核心是模糊控制器,模糊控制器主要包括 3 个部分:模糊化、模糊推理和解模糊。

在模糊逻辑控制器的模型中,采用双输入单输出的模糊控制器,控制压电堆作用电压的大小,输入变量选取为结构楼层的层间位移的绝对值  $R_D$  和层间速度的绝对值  $R_V$ ,输出变量为作用电压。输入、输出变量选择为三角形的隶属函数,分别如图 4、5 所示。输入、输出语言描述为 5 个语言值: {NB, NS, ZE, PS, PB}。其中:

NB=负大(Negative Big),NS=负小(Negative Small),ZE=零(Zero);

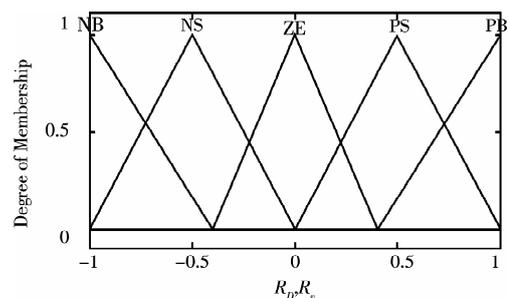


图 4 位移、速度隶属函数曲线图

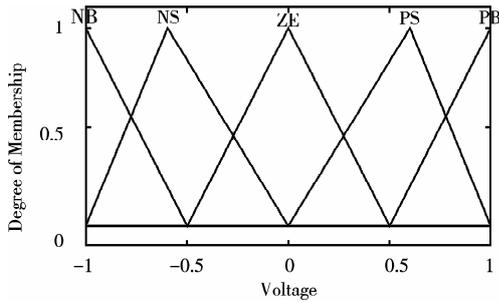


图 5 电压隶属函数曲线图

PS=正小(Positive Small), PB=正大(Positive Big)。

模糊控制规则是模糊控制的核心部分,它的内容是根据专家的经验确定的,不需要建立模型和进行复杂的理论推导,并可以根据专家的经验随时对控制规则进行调整。控制规则如表 1 所示。所采用的模糊控制规则采用“if-then”语句来描述,采用常用的 Mamdani 推理方法进行模糊推理运算,解模糊方法则采用重心法。

在进行模糊化处理及解模糊过程中,须将输入变量从基本论域转换到相应的模糊集的论域,将模糊输出量论域转化为相应的输出变量,位移量化因子  $K_{dis}$  和速度量化因子  $K_{vel}$  分别用于将输入的各楼层最大位移  $R_D$  和最大速度  $R_V$  的绝对值转换到输入的模糊论域中,电压比例因子  $K_{volt}$  用于将模糊控制器的输出量转化为作用电压。位移量化因子、速度量化因子和电压比例因子的大小及其相互关系对模糊控制性能影响极大,Liu 等在文[15]中采用磁流变阻尼器分析桥梁的振动控制中,提出量化因子的计算公式为:

$$K_{dis} = 3/D_{max} \quad K_{vel} = 3/V_{max} \quad (7)$$

由于对安装压电变摩擦阻尼器的建筑结构采用模糊控制时量化因子没有相应的计算公式,笔者经

过大量的试算,当量化因子按下式取值时,可以达到最佳的控制效果。

$$K_{dis} = 1/D_{max} \quad K_{vel} = 1/V_{max} \quad (8)$$

$$K_{volt} = -1\ 000$$

式中,  $D_{max}$ 、 $V_{max}$  分别为各楼层位移的绝对值的最大值和速度的绝对值的最大值。

表 1 模糊控制规则

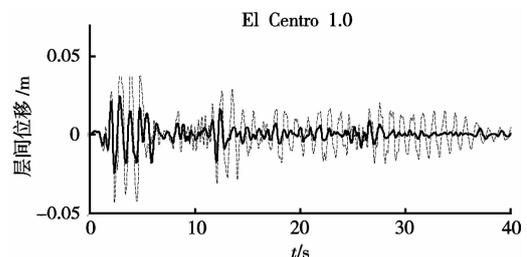
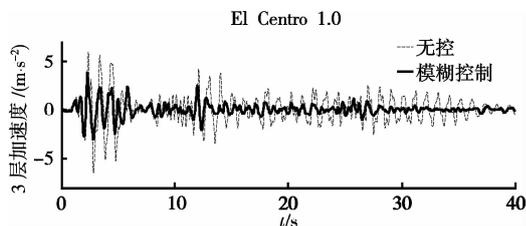
		$R_V$				
		NB	NS	ZE	PS	PB
$R_D$	NB	PB	PB	PB	PS	PS
	NS	PS	PS	PS	ZE	ZE
	ZE	PS	PS	ZE	ZE	NS
	PS	ZE	ZE	NS	NS	NS
	PB	NS	NS	NB	NB	NB

### 4 非线性地震反应分析

为了说明该文所提出的模糊控制策略的有效性,用 MATLAB 语言编制了相关程序,对 3 层基准结构进行了非线性地震反应的时程分析,并与文[7]的计算结果进行了比较。第 1~3 层每层层间分别安装 6 个、1 个、2 个压电变摩擦阻尼器,每个压电变摩擦阻尼器安装 48 块压电堆,每块压电堆由 100 层的压电陶瓷叠合而成,每层压电陶瓷的厚度为 0.20 mm,摩擦材料采用黄铜,假定最大静摩擦力与滑动摩擦力相等,且摩擦系数保持不变,摩擦系数  $\mu=0.4$ 。结构每一个楼层设置一个模糊控制器。该文选取 El Centro 波、Hachinohe 波、Northridge 波和 Kobe 波(强度未调幅),由于无控结构的最大层间位移发生在顶层,结构顶层受控和无控反应分别如图 6、图 7、图 8、图 9 所示。

表 2 压电变摩擦阻尼器的基本参数

螺栓参数				压电陶瓷驱动器		
有效长度	半径	弹性模量	轴向高度	面积	轴向应变常数 $d_{33}$	弹性模量
0.065 m	0.025 m	$2 \times 10^{11}$ Pa	0.02 m	$6.25 \times 10^{-4}$ m <sup>2</sup>	$5.5 \times 10^{-10}$ m/V	$6.0 \times 10^{10}$ Pa



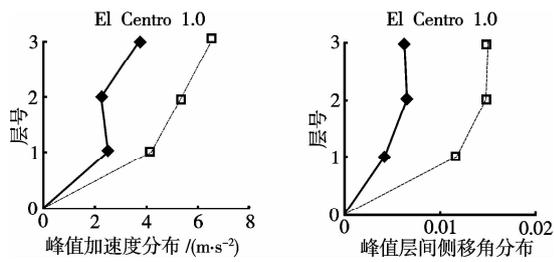


图 6 El Centro 波作用下的地震响应

由图 6 可知,对安装压电变摩擦阻尼器的 3 层钢结构进行模糊控制时,在 El Centro 波作用下,结构顶层的峰值层间位移和峰值加速度分别减少了 57.7%和 42.6%,控制效果明显,各楼层峰值加速度也明显减小;峰值层间侧移角都得到了很好控制。

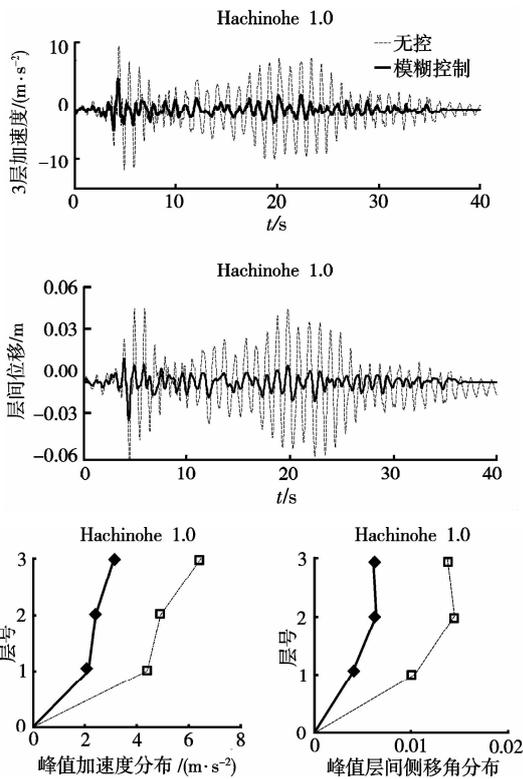


图 7 Hachinohe 波作用下的地震响应

由图 7 可知,在 Hachinohe 波作用下,结构顶层的峰值层间位移和峰值加速度分别减少了 51.1%、55.1%,各楼层的峰值加速度控制效果也明显减小;各楼层的峰值层间侧移角都得到了明显的控制。

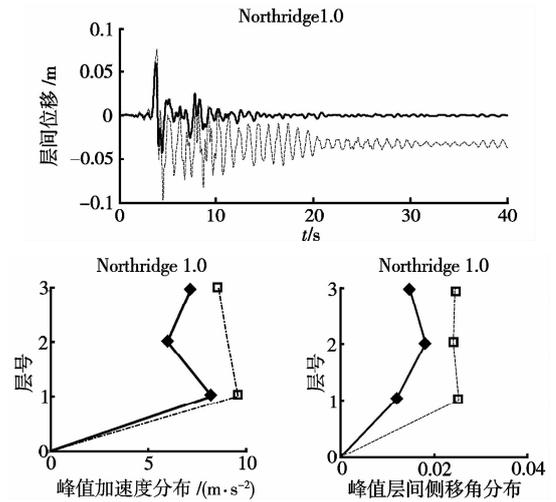
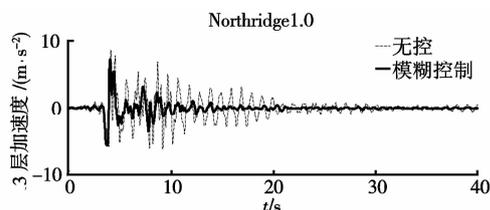


图 8 Northridge 波作用下的地震响应

由图 8 可知,在 Northridge 波作用下,结构顶层的峰值层间位移和峰值加速度分别减少了 15.4%、39.1%,1 层和 3 层的峰值加速度控制效果不如 2 层明显;各楼层的峰值层间侧移角都得到了有效控制。

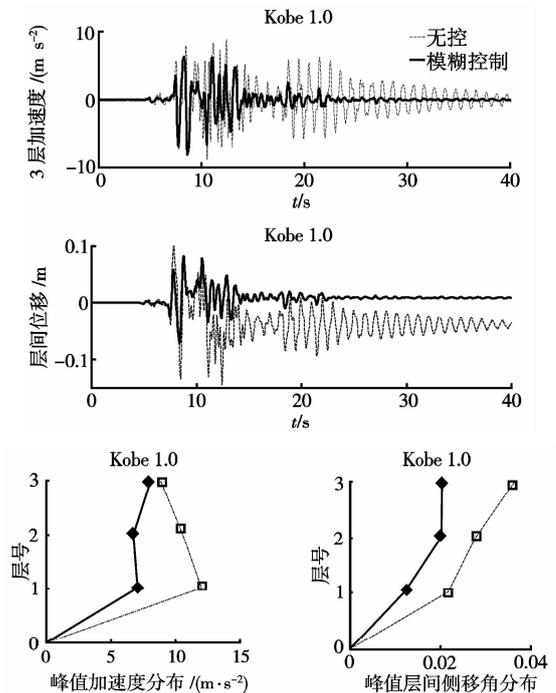


图 9 Kobe 波作用下的地震响应

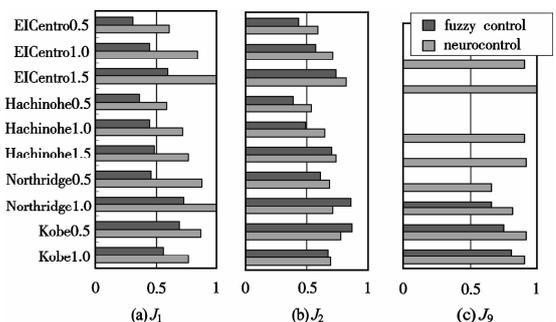


图 10 不同控制策略性能评价指标的对比

由图 9 可知,在 Kobe 波作用下,结构顶层的峰值层间位移和峰值加速度分别减少了 43.9%、8.5%,顶层的峰值加速度控制效果不如 1、2 层明显;而各楼层的峰值层间侧移角都得到了有效控制。

图 10 为不同控制策略性能评价指标的对比,从  $J_1$  可以看出,对于不同幅值的地震波,模糊控制对结构的最大的无量纲层间侧移角的控制效果明显, EI Centro 波、Hachinohe 波作用下,结构楼层的最大无量纲层间侧移角减少至无控结构的 50% 左右,控制效果均优于文献[7]控制策略。

从  $J_2$  可以看出,不同的控制策略使结构楼层的最大的无量纲加速度均得到了明显的减少, EI Centro 波、Hachinohe 波作用下,控制效果优于文献[7]控制策略, Northridge 波、Kobe 波作用下,结构楼层的最大的无量纲加速度比文献[7]中的略大。

$J_3$  表明受控结构与无控结构形成的塑性铰数量的变化。由图上可以看出,模糊控制效果明显优于文献[7]提出的控制策略,工况 EICentro 0.5、EICentro 1.0、EICentro 1.5、Hachinohe 0.5、Hachinohe 1.0、Hachinohe 1.5、Northridge 0.5 作用下,结构未产生塑性铰,极大地减少了结构在地震作用下的受损程度。

## 5 结 论

笔者设计制作了一款新型的压电变摩擦阻尼器,并将其作为控制装置,提出了能有效抑制地震作用下建筑结构非线性地震反应的模糊控制算法,并首次将模糊控制算法应用于压电变摩擦阻尼器的控制电压的输出控制上。位移量化因子、速度量化因子和电压比例因子对控制效果有重大影响,决定着控制力的输出大小,本文总结出量化因子的计算公式,使得对建筑结构的层间侧移和加速度的控制均取得了理想的效果。在地震发生时,应用本文中提出的模糊控制算法,能够有效地减少结构的响应,减少结构塑性铰的产生,抑制建筑结构的非线性地震反应。

### 参考文献:

[1] 秦荣. 智能结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
 [2] KAMADA T, FUJITA T, HATAYAMA T, et al. Active vibration of frame structures of shear and bending type with smart structure using piezoelectric actuator[C]//Proceedings of SPIE, 1997, 3041: 75-86.  
 [3] 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, 2003.  
 [4] CHEN G D, CHEN C C. Behavior of piezoelectric friction damper under dynamic loading[C]//Proc, SPIE Symp. on Smart Structure Materials, Smart systems for Bridges, Structures and Highways Newport Beach,

Calif, 2000, 3988: 54-63.

- [5] 瞿伟廉, 陈朝晖, 徐幼麟. 压电材料智能摩擦阻尼器对高耸钢塔结构风振反应的半主动控制[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(2): 94-99.  
 QU WEI-LIAN, CHEN ZHAO-HUI, XU YOU-LIN. Wind-induced vibration control of high-rise steel-truss tower using piezoelectric smart friction dampers[J]. Earth - quake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(2): 94-99.  
 [6] OHTORI Y, CHRISTENSON R E, SPENCER B F, et al. Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings[J]. Int. J. Struct. Eng. Mech, 2004, 130(4): 366-385.  
 [7] KIM D H, SEO S N, LEE I W. Optimal neurocontroller for nonlinear benchmark structure[J]. Int. J. Struct. Eng. Mech, 2004, 130(4): 424-429.  
 [8] ZHOU XING-DE, CHEN DAO-ZHENG. Active vibration control of nonlinear benchmark buildings[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2007, 28(4): 487-493.  
 [9] CHEN CHAO-QIANG, CHEN GEN-DA. Shake table tests of a quarter-scale three-story building model with piezoelectric dampers[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2004, 11: 239-257.  
 [10] WILSON C M D. Fuzzy control of magnetorheological dampers for vibration reduction of seismically excited structures[D]. Tallahassee: Florida State University, 2005.  
 [11] MOHAMMED AL-DAWOD, BJIAN SAMALI, KENNY KWOK, et al. Fuzzy controller for seismically excited nonlinear buildings[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(4): 407-415.  
 [12] ZHANG YONG-BING, ZHANG YONG-SHEN, LI SHUANG-BEI. Application of self-tuning fuzzy control in seismic resistance of buildings[C]//The 7<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, China, June, 2008: 25-27.  
 [13] 张永兵, 李双蓓, 秦荣. 压电变摩擦阻尼器对结构地震反应的自协调模糊控制[J]. 桂林工学院学报, 2008, 28(3): 330-334.  
 ZHANG YONG-BING, LI SHUANG-BEI, QIN RONG. Buildings self-tuning fuzzy control with piezoelectric friction dampers[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2008, 28(3): 330-334.  
 [14] GRIGORIAN C E, YANG T S, POPOV E P, et al. Slotted bolted connection energy dissipators [J]. Earthquake Spectra, 1993, 9(3): 491-514.  
 [15] LIU Y, GORDANIEEJAD F, EVRENSEL C A, et al. An experimental study on fuzzy logic vibration control of a bridge using fail-safe magneto-rheological fluid dampers[C]//Smart Systems and Materials 2001-Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, Newport Beach, USA, 2001: 281-288.

(编辑 王秀玲)