文章编号：1006-1355(2015)06-0026-05+51

基于压电摩擦阻尼器的自调整模糊控制

纪秉岳[1]，展 猛[2]，王社良[2]

（1. 华陆工程科技有限责任公司，西安 710065；
2. 西安建筑科技大学 土木工程学院，西安 710055）

摘 要：通过压电驱动器的出力性能标定试验，建立压电摩擦阻尼器的最大摩阻力表达式；采用基于解析表达式的自适应模糊控制方法，设计含有四个调整因子的规则自调整模糊控制器；综合运用MATLAB语言、GUI工具以及SIMULINK工具箱建立输电塔模型结构无控和模糊控制时的数值模拟系统，分析结构在不同工况下的地震响应和控制效果。结果表明：自调整模糊控制系统能够根据模型结构的动力反应实时改变压电摩擦阻尼器的控制力，且相比传统模糊控制表现了更好的控制效果；自调整模糊控制后，除一层的速度峰值略有放大外，模型结构其余各层的位移和速度峰值响应都得到较好地抑制，且在结构层间变形较大的第三层表现最好的控制效果，位移峰值减小44.64 %，速度峰值减小37.96 %。

关键词：振动与波；压电摩擦阻尼器；自调整模糊控制器；SIMULINK工具箱；数值模拟；调整因子
中图分类号： **文献标识码**：A DOI编码：10.3969/j.issn.1006-1335.2015.06.006

Self-tuning Fuzzy Control Based on Piezoelectric Friction Dampers

JI Bing-yue[1], *ZHAN Meng*[2], *WANG She-liang*[2]

(1. Hualu Engineering & Technology Co. Ltd., Xi'an 710065, China;
2. School of Civil Engineering Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract : Through the calibration test of the output performance of a piezoelectric actuator, the expression of the maximum friction force of the piezoelectric friction dampers was established. Based on the self-tuning fuzzy control principle with analytical expressions, a regular self-tuning fuzzy controller with four adjustment factors was designed. Using MATLAB code, GUI tool and SIMULINK toolbox, the numerical simulation models of a transmission tower structure in the conditions of non-control and fuzzy control was established respectively. The seismic response and control effect of the structure in different operation conditions was analyzed. The simulation results show that the self-tuning fuzzy control system can change the control force of the piezoelectric friction damper in real-time according to the dynamic response of the model structural, and has better control effect than the traditional fuzzy control method. Except for the slight enlargement of the peak velocity of the first layer of the structure, the peak displacement and peak velocity response of the other layers are well suppressed after using the self-tuning fuzzy control. In addition, the third layer with large interfacial distortion has the best control effect. The peak displacement decreases by 44.64 % and the peak speed reduces by 37.96 %.

Key words : vibration and wave ; piezoelectric friction damper ; self-tuning fuzzy controller ; SIMULINK toolbox ; numerical simulation ; adjustment factor

普通摩擦耗能器构造简单、性能稳定，但一旦安装到结构中，摩擦力不可调节，适应性差。压电陶瓷驱动器具有响应快、耗能小而出力大的优点，但其驱动位移很小，不宜直接作用于结构。将普通摩擦耗能器与压电陶瓷驱动器结合制成的压电摩擦阻尼器兼具二者的优点，仅需少量的能量输入便可以巧妙地利用结构的相对变形或相对速度实现阻尼器的滑动摩擦耗能。将压电陶瓷驱动器与Pall摩擦阻尼器结合，欧进萍和杨飏[1]设计制作了T型压电变摩擦阻尼器并对其出力性能和滞回性能进行了研究分析；Chen等[2-4]对压电摩擦阻尼器进行了性能试验，并通过数值分析和试验研究验证了其对建筑结构振动控制的有效性；胡卫兵等[5]设计了一种新型压电

收稿日期：2015－04－16
基金项目：国家自然科学基金（51178388）；
陕西省教育厅专项科研项目（14JK1420）
作者简介：纪秉岳(1980－)，男，陕西榆林人，工程师，主要研究方向：结构智能控制。
E-mail: zhanyi313@163.com

摩擦阻尼器PALL支撑，并通过ANSYS有限元分析给出了其含电压参数的双线性本构模型。

模糊控制是模糊数学与控制理论相结合的产物，它起源于美国加利福尼亚大学电气工程系教授扎德（L. A. Zadeh）1965年提出的“模糊集合”概念。1974年，英国伦敦大学教授马丹尼(E. H. Mamdani)首先将模糊控制器成功地应用于蒸汽机的控制，实现了应用模糊控制器处理实际系统的控制问题，标志着模糊控制技术的诞生[6]。发展至今，模糊控制已被广泛用于土木工程结构振动控制领域。Fujitani和Midorikawa等[7]进行了结构地震响应的模糊控制数值模拟分析和振动台试验；张永兵等[8]采用模糊控制算法对地震激励下的20层钢框架进行了非线性仿真分析；李宏男等[9]利用Takagi-Sugeno型模糊逻辑调节作用在半主动摩擦阻尼器上的正压力实现了对偏心结构的振动控制。

但是，传统的模糊控制主要是根据专家经验或现场操作人员的经验知识及操作数据确定控制规则，其模糊控制系统一般均为比较复杂的非线性函数，且在专家经验缺乏时很难建立完善的控制规则。文中设计了一种基于解析表达式的规则自调整模糊控制器，在压电驱动器的出力性能试验的基础上，综合运用MATLAB语言、GUI工具以及SIMULINK仿真工具箱[10]建立了输电塔模型结构模糊控制时的计算机仿真模型，分析了结构在不同工况下的地震响应和控制效果。

1　压电摩擦阻尼器

1.1　阻尼器的设计

压电摩擦阻尼器的示意图与实物图如图1所示。顶座、底座、半球支撑以及套筒构成阻尼器的活塞；压电陶瓷驱动器的两端均设置垫片，以保证压电驱动器上下受力均匀，防止压电陶瓷局部受压破坏；复位弹簧可使阻尼器用于绳索式连接中，增加了阻尼器的连接安装方式。所设计的压电摩擦阻尼器精密小巧，适用于输电塔等杆式结构，将压电摩擦阻尼器替换或附加为结构中的某一杆件，当地震作用时，作动杆往复运动，带动活塞与阻尼器小箱底面及顶盖产生滑动摩擦耗能，根据地震激励时结构的动力反应，通过稳压电源调节压电陶瓷驱动器的电压值，预紧螺钉通过限制压电陶瓷驱动器的形变改变活塞与阻尼器外壳之间的正压力，从而实现摩擦力的半主动实时调节。

1.2　出力性能试验

1.2.1　试验装置

试验仪器主要有直流稳压电源、压力传感器、开关、钢板架等，试验装置如图2。通过钢板上的螺栓来提供阻尼器的预压力，通过开关来控制压电陶瓷驱动器参与工作的数量。在给定的预压力已知的情况下，逐级施加电压，观测压力传感器上数值的变化，即可得到常电压下压电陶瓷驱动器的出力性能曲线。由厂家提供的压电陶瓷驱动器零约束下的电压－位移测试曲线如图3所示。

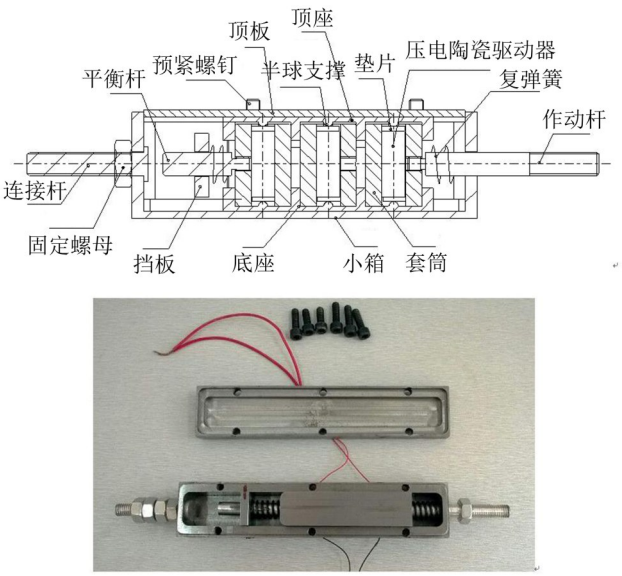


图1　压电摩擦阻尼器的设计图

图2　出力性能试验装置图

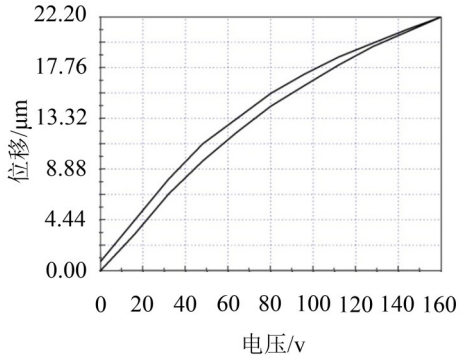


图3　压电陶瓷驱动器电压—位移测试曲线

1.2.2　摩擦系数测定

在不施加电压的情况下，测量预压力分别为50 N、100 N、150 N、200 N、250 N、300 N时阻尼器的起滑力，具体测试方法为：一个压力传感器测试正压力的大小，另一个压力传感器与阻尼器作动杆连接并

对作动杆施加推力，待滑动时同时记下两个压力传感器的数值。表1为阻尼器测试时的记录数据，可以看出，阻尼器的摩擦系数稳定，2个摩擦面的总摩擦系数约为0.48。

表1 阻尼器摩擦系数的测试结果

预压力	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N
实测N/N	51	103	151	204	250	306
实测F/N	24	49	73	99	121	146
摩擦系数μ	0.471	0.476	0.483	0.485	0.484	0.477

1.2.3 试验结果分析

调节钢板上的螺栓对阻尼器施加不同的预压力，分别为50 N、100 N、150 N、200 N、250 N、300 N，调节稳压电源间隔30 V逐级加卸载电压，范围为[0，150 V]，进行压电陶瓷驱动器的出力性能实验。由于后文仿真分析与振动台试验的阻尼器均装有2块压电陶瓷驱动器，这里仅给出2块压电驱动器下阻尼器的正压力随电压的变化曲线，如图4所示。可以看出，随着输入电压的增加，正压力呈线性逐渐提高，且压电陶瓷驱动器的出力与预压力的关系不大；根据压电陶瓷驱动器的电压—位移特性测试曲线知，电压卸载过程中零应力下驱动器的位移有一定损耗，故正压力略有减小，但可忽略不计。对试验所得的正压力－输入电压关系曲线线性拟合，可得压电摩擦阻尼器的最大摩擦阻尼力表达式为

$$F=\mu\left(N_0+1.6U\right)\qquad U\geqslant 0 \tag{1}$$

式中F为绝对最大摩阻力，$F=|f|$；μ为摩擦系数，取为0.48；N_0为压电摩擦阻尼器的初始预压力；U为输入电压。取N_0为200 N时进行下文的仿真分析与试验研究，此时阻尼器可实现的控制力$|f|$为[96 N，211.2 N]。

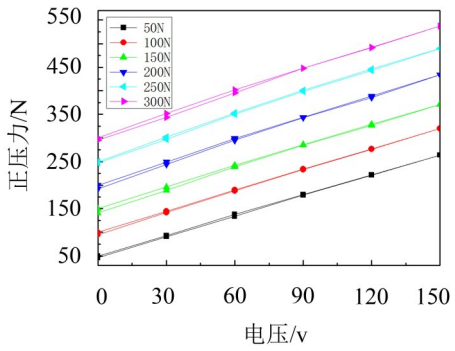


图4 压电摩擦阻尼器的正压力—输入电压关系曲线

2 规则自调整模糊控制

常用的模糊控制器一般是采用控制误差e和误差变化率ec作为输入变量，从输入输出的映射关系可以看出，模糊控制器实际为将输入信号e和ec映射到控制输出μ的一种运算。以专家经验建立的模糊控制系统一般均为比较复杂的非线性函数，且在专家经验缺乏时很难建立完善的控制规则，如果抛开专家知识，仅从函数形式上考虑模糊控制规则的实现，则控制规则可写成如下简单的线性表达式[11]

$$U=-\lfloor\alpha E+(1-\alpha)EC\rfloor \tag{2}$$

式中，运算符号“[ ]”表示正向或负向取整运算，依运算数的正负而定；α为调整因子，它决定了模糊控制器的两个输入中误差和误差变化率的权重分配。

考虑到调整因子与误差的大小关系紧密，如果把调整因子设计成误差的函数，则不仅可以解决各段调整因子需要人为事先确定的问题，又可以提高模糊控制器的自适应能力。故可设计如下调整因子为误差函数的模糊控制器

$$\begin{cases}U=-\lfloor\alpha E+(1-\alpha)EC\rfloor\\ \alpha=\dfrac{1}{N}(\alpha_s-\alpha_0)|E|+\alpha_0 \qquad 0\leqslant\alpha_0\leqslant\alpha_s\leqslant 1\end{cases} \tag{3}$$

其中，N为误差的量化等级，即$E=\{0,\pm1,\pm2,\cdots\cdots,\pm N\}$；$\alpha_0$、$\alpha_s$为参数。

上述规则中调整因子α在参数α_0和α_s之间随误差绝对值$|E|$的大小呈线性变化，且有N个取值，即每一个误差等级上均有对应的调整因子取值，调整因子分段足够细，有利于提高控制性能，且调整因子的函数形式简单，有利于用计算机在线控制的实现。参数α_0和α_s需预先设定，一般满足0.1$\leqslant\alpha_0\leqslant$0.5，0.5$\leqslant\alpha_s\leqslant$1时，才能兼顾对误差和误差变化率的控制权重，使控制系统具有较好的适应性。

3 模糊控制仿真与分析

3.1 输电塔模型结构的建立

以比例为1:10的输电塔模型结构为研究对象，经合理简化模型示意如图5所示。呼高1.8 m，总高2.96 m，塔头宽度0.56 m，根开0.9 m，塔腿部分1层，塔身部分3层，塔头部分2层，共6层。所有杆件截面均为20 mm×20 mm×3 mm等边角钢，钢材均采用Q 235，弹性模量为206 GPa，泊松比为0.3，密度为7 800 kg/m^3。输电塔模型共有个60节点，196杆件。ANSYS建模过程中选取LINK8杆单元，认为杆单元之间为铰接，每个节点仅有x、y、z三个方向的自由度。压电摩擦阻尼器的控制效果主要与阻尼器两端的相对位移有关，分析研究[12]表明塔身部分变形较大，且横担部分杆件密集、活动空间较小，难以安装控制装置。因此，可沿输电塔塔身节点层平面内方向设置6根压电半主动杆件，以斜向支撑方式与相

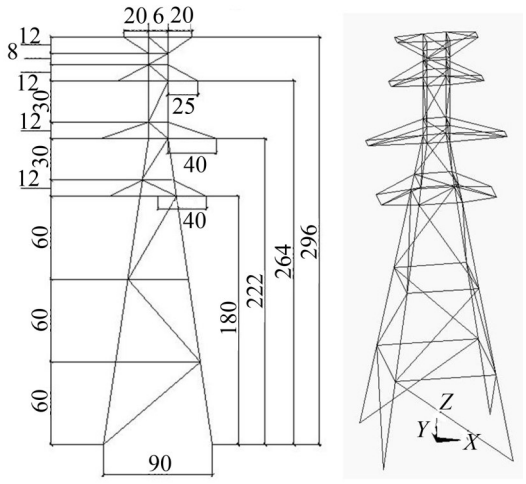


图 5 输电塔模型结构示意图 (单位/cm)

邻节点层连接，在阻尼器控制力矩阵的形成过程中考虑了阻尼器与结构各节点层之间的夹角对控制力的影响，具体的形成过程见文献 [13]。ANSYS 提取质量矩阵 $\boldsymbol{M}$ 和刚度矩阵 $\boldsymbol{K}$ 时，忽略节点刚度的影响，采用集中质量矩阵，且忽略阻尼器对结构的影响。计算阻尼时采用瑞利阻尼，即 $\boldsymbol{C}=\alpha[\boldsymbol{M}]+\beta[\boldsymbol{K}]$。

3.2 模糊控制器设计

对于结构地震响应控制，理想的控制效果是完全消除地震响应，所以认为位移的给定值为零，则采集到的位移值可对应为误差，而速度是位移的导数，可对应为误差变化率 [14]。这里以压电半主动杆件所对应的层间位移(dis)和层间速度(vel)为模糊控制器的输入，压电陶瓷驱动器的控制电压(vol)为输出。位移和速度的物理论域取无控时结构动力时程分析所得的最大地震响应范围，输出电压的物理论域可以根据压电陶瓷驱动器的性能指标和无控时压电半主动杆件的内力来确定，考虑到负的控制力在仿真中的实现，规定电压可以取为负值。输入和输出变量的模糊论域都取为[－3，3]，划分为7个模糊子集，分别为[NB、NM、NS、O、PS、PM、PB]，隶属函数选用高斯函数，如图6所示。不考虑噪声干扰，采用单点模糊集合进行模糊化，解模糊选用重心法。模糊推理 [15]采用 Mamdani 模糊模型，模糊蕴含运算采用最小运算 R_c，图形推理过程如图7所示。

尺度变换采用线性变换，假如实际输入量为 x'，其变换范围是 $[x'_{\min}, x'_{\max}]$，模糊论域为 $[x_{\min}, x_{\max}]$，则

$$x=\frac{x_{\max}+x_{\min}}{2}+k\left(x'-\frac{x'_{\max}+x'_{\min}}{2}\right)$$
$$k=\frac{x_{\max}-x_{\min}}{x'_{\max}-x'_{\min}} \tag{4}$$

式中 x 为模糊输入量，k 为量化因子。比例因子的求法与量化因子相同但是反向进行。

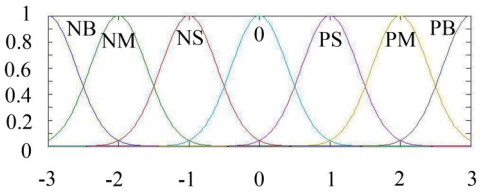


图 6 模糊变量的隶属度函数

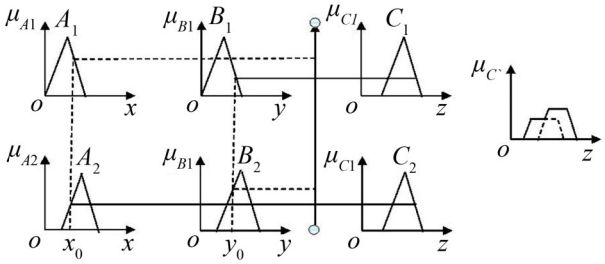


图 7 输入为模糊单点且采用 R_c 时的模糊推理计算

借鉴控制专家和操作人员的经验知识可以建立如表2所示的模糊控制规则表。取 α_0 =0.35，α_S = 0.8，根据式(3)计算得 α_1 =0.35，α_2 =0.5，α_3 =0.65，α_4 =0.8，则可得控制规则调整后的模糊控制规则表，如表3所示。

表 2 传统模糊控制规则表

vol		dis						
		NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
vel	NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	O
	NM	PB	PM	PM	PS	PS	O	NS
	NS	PM	PM	PS	PS	O	NS	NS
	O	PM	PS	PS	O	NS	NS	NM
	PS	PS	PS	O	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	O	NS	NS	NM	NM	NB
	PB	O	NS	NS	NM	NM	NB	NB

3.3 仿真结果与分析

输入的地震波选取 EL Centro 波，持时 20 s，时间间隔为 0.02 s，沿结构 X 向单向加载，加速度峰值调幅为 200 gal。基于 MATLAB 中的 SIMULINK 仿真工具箱建立模型结构无控和模糊控制时的数值模拟系统，模糊控制状态下的仿真系统示意图如图8所示。电压输出后，即可以利用压电摩擦阻尼器的最大摩阻力公式将其转化为控制力施加给结构，从而完成模型结构的模糊振动控制仿真。

结果分析时在模型结构每层各取一节点。表4给出了结构各层的位移和速度峰值以及相应的控制效果。可以看出，除一层的速度峰值略有放大外，其余各层的位移和速度峰值响应都得到了较好地抑制，且在结构层间变形较大的第三层表现了最好的控制效果，位移峰值减小了 44.64 %，速度峰值减小了 37.96 %，表明所设计的压电摩擦阻尼器和自调整

表 3 自调整模糊控制规则表

vol		dis						
		NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
vel	NB	PB	PM	PM	PM	PS	O	NM
	NM	PB	PM	PM	PS	PS	NS	NM
	NS	PB	PM	PS	PS	O	NS	NM
	O	PM	PS	PS	O	NS	NS	NM
	PS	PM	PS	O	NS	NS	NM	NB
	PM	PM	PS	NS	NS	NM	NM	NB
	PB	PM	O	NS	NM	NM	NM	NB

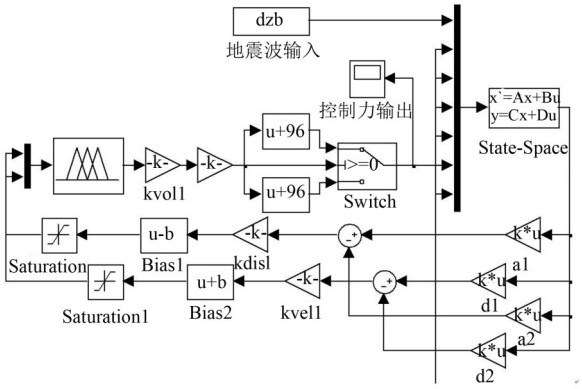


图 8 模糊控制仿真系统示意图

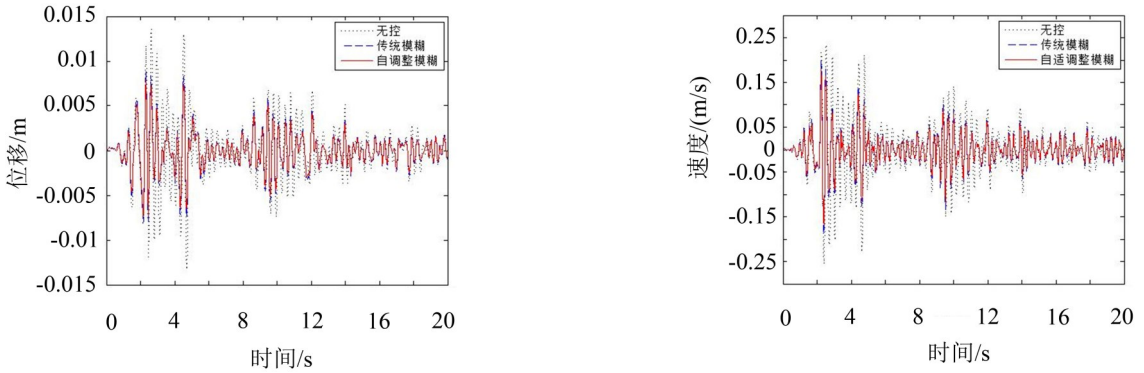


图 9 结构顶层的位移和速度时程曲线

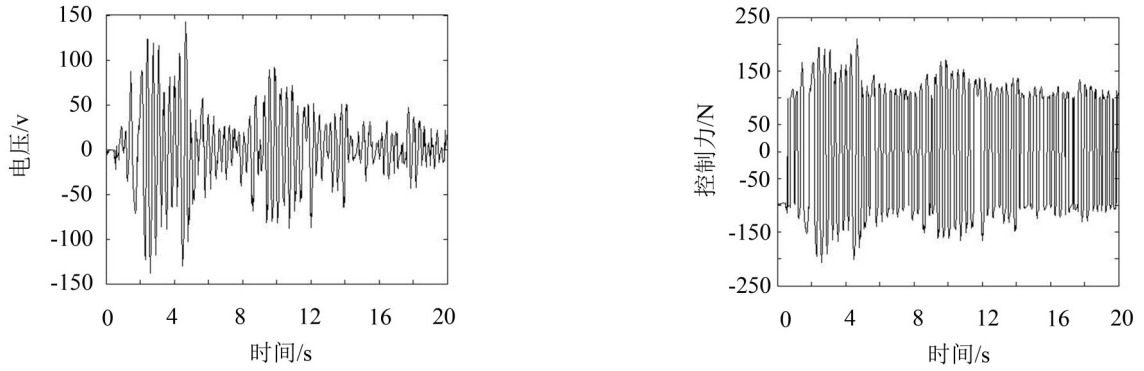


图 10 结构第三层阻尼器的电压和控制力输出曲线

模糊控制器能够有效抑制结构的地震峰值响应。

图9给出了模型结构顶层58节点在无控、模糊控制以及自调整模糊控制时的速度和位移时程对比曲线。从图中也可以看出，自调整模糊控制可以有效降低模型结构的动力反应，且表现了相对传统模糊控制更好的控制效果。

图10给出了模型结构第3层一个阻尼器的电压输出与控制力输出时程曲线。可以看出，自调整模糊控制可以根据结构的动力响应实时改变阻尼器的控制力，从而实现结构的半主动控制。

4 结 语

利用设计的压电摩擦阻尼器，在其最大摩阻力表达式的基础上，基于MATLAB中的SIMULINK仿真工具箱对输电塔模型结构进行了振动控制数值模拟分析主要结论如下：

表 4 模型结构地震波作用下的峰值响应与控制效果

楼层（节点）	位移峰值/m			速度峰值/(m/s)		
	无控	自调整	β/%	无控	自调整	β/%
一（6）	0.001 3	0.001 0	23.68	0.025 2	0.026 4	-4.92
二（9）	0.004 2	0.002 5	40.98	0.076 9	0.049 5	35.57
三（14）	0.008 6	0.004 8	44.64	0.157 1	0.097 4	37.96
四（26）	0.011 3	0.006 6	41.49	0.209 9	0.138 2	34.16
五（38）	0.013 1	0.007 7	41.29	0.246 1	0.171 3	30.39
六（58）	0.013 5	0.007 9	41.10	0.255 0	0.179 5	29.60

（下转第51页）