

# 一种对多层建筑振动半主动控制的新算法

马涌泉, 邱洪兴, 祁永成

(东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 为了有效抑制多层建筑的地震响应, 提出了自适应神经网络控制(MGA\_ANNC)策略. 首先对非确定性和非线性结构的参考轨迹进行了追踪, 并采用径向基函数网络来保证追踪的精度. 然后利用改进的遗传算法(MGA)对结果参数向量的初始值进行了选定. 最后结合改进的剪切最优(MCO)控制算法提出了适合调谐质量-磁流变阻尼器(TM-MRD)的MGA\_ANNC/MCO半主动控制算法. 分别对一座9层框架结构在无控制、MGA\_ANNC/MCO半主动控制、MGA\_ANNC主动控制和LQG主动控制下的各项评价指标值进行了计算. 结果表明: MGA\_ANNC/MCO和MGA\_ANNC的减震效果均比LQG的要显著.

**关 键 词:** 建筑; 神经网络; 振动控制; 改进的遗传算法; Lyapunov 稳定理论

中图分类号: O 328; TU 352.1+1

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)05-0743-05

## A New Semi-active Control Algorithm for Suppressing the Vibration of Multi-storey Buildings

MA Yong-quan, QIU Hong-xing, QI Yong-cheng

(College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China. Corresponding author: MA Yong-quan, E-mail: lemon9143@163.com)

**Abstract:** To effectively suppress the seismic responses of multi-storey buildings, a new adaptive neural network control strategy based on the modified genetic algorithm (MGA\_ANNC) was proposed. First, the reference trajectory of uncertain and nonlinear structures was tracked, and the tracking accuracy was ensured by using the radial basis function network. Next, the initial values of consequent parameter vectors were selected by using the modified genetic algorithm. Finally, the semi-active control strategy MGA\_ANNC/MCO used for TM-MRD was proposed by using the modified clipped optimal (MCO) control algorithm. The various evaluation criteria of a 9-storey frame structure under the non-control, MGA\_ANNC/MCO semi-active control, MGA\_ANNC active control and linear quadratic gaussian (LQG) active control were calculated, respectively. The results indicated that the seismic reduction effects of both MGA\_ANNC/MCO and MGA\_ANNC are obviously superior to those of LQG.

**Key words:** building; neural network; vibration control; modified genetic algorithm (MGA); Lyapunov stability theory

半主动控制凭借其兼备主动控制的自适应性和被动控制的稳定性等优势, 在多层建筑振动控制领域中得到普遍应用<sup>[1]</sup>. 当前神经网络(NN)中的前馈控制主要采取反向传播的形式<sup>[2]</sup>, 然而这种形式为了调谐每个网络权重需要进行繁琐的学习, 导致计算效率低下. 对此本文在前馈控制中引入径向基函数网络(RBFN)<sup>[3]</sup>, 该网络只需一

个隐层, 隐层的传递函数是一个非线性半仿射函数, 因此RBFN的学习效率要明显快于反向传播网络, 且RBFN可以逼近任意非线性连续函数, 并能消除局部最小化.

本文基于MGA提出了自适应神经网络控制(MGA\_ANNC)策略, 并设计了适合MRD的MGA\_ANNC/MCO半主动控制策略. 分别采用

收稿日期: 2013-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078077); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAJ14B00).

作者简介: 马涌泉(1984-), 男, 山东安丘人, 东南大学博士研究生; 邱洪兴(1962-), 男, 江苏无锡人, 东南大学教授, 博士生导师.

MGA\_ANNC/MCO, MGA\_ANNC 和 LQG 对一座 9 层钢筋混凝土框架结构进行了振动控制,得出了一些结论,可为类似结构的减震设计提供参考.

## 1 控制装置与受控结构的力学模型

### 1.1 控制装置的力学模型

本文采用调谐质量-磁流变阻尼器(TM-MRD)作为半主动控制装置,采用 S-Bouc-Wen 模型<sup>[4]</sup>模拟 MRD 的力学性能.

TM-MRD 的控制力向量  $U$  由 MRD 的阻尼力向量  $F_b$  与弹簧的弹性恢复力向量  $F_c$  组成,即:

$$U = F_b + F_c = F_b + k_t x_t. \quad (1)$$

式中:  $k_t$  为弹簧的恢复刚度;  $x_t$  为 TM-MRD 与主结构的相对位移向量.

### 1.2 受控结构的力学模型

受控多层剪切型框架结构的运动方程为

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\omega\ddot{x}_g + U(t). \quad (2)$$

式中:  $M$ ,  $C$  和  $K$  分别为质量、阻尼和刚度矩阵;  $\ddot{x}$ ,  $\dot{x}$  和  $x$  分别为加速度、速度和位移向量,且  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ ;  $\omega$  是影响系数矩阵;  $\ddot{x}_g$  为地震加速度向量;  $U(t)$  为控制力向量.

将式(2)两边都除以  $M$  可得

$$\ddot{x}(t) = f(t) + g(t) + u(t). \quad (3)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} f(t) &= -(1/M) \{ C\dot{x}(t) + Kx(t) \}, \\ g(t) &= -\omega\ddot{x}_g, \\ u(t) &= (1/M)U(t). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

## 2 MGA\_ANNC 算法的设计

### 2.1 非线性动力系统的参考模型

单输入/单输出的  $n(n \geq 1)$  阶系统可表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1} &= x_n, \\ \dot{x}_n &= p(x) + h(x)u + d(t), \\ y &= x_1. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中:  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbf{R}^n$  为系统的状态向量;  $u \in \mathbf{R}$  为控制信号;  $p(x)$  和  $g(x)$  均为光滑非线性函数;  $d(t)$  为有界的外部干扰.

对输出进行  $n$  次微分,直到控制输入  $u$  出现,此时可获得式(5)的输入/输出形式为

$$y^{(n)} = p(x) + h(x)u + d(t). \quad (6)$$

假设 1  $h(x)$  为越过紧集  $\eta \subset \mathbf{R}^n$  且远离 0 的

有界函数,即:

$$|h(x)| \geq a > 0, \forall x \in \eta. \quad (7)$$

如果控制目标是让系统输出  $y$  去追踪参考轨迹  $y_r$ ,那么参考控制输入  $r$  可表示为

$$r = y_r^{(n)} + \varphi_{n-1}y_r^{(n-1)} + \varphi_{n-2}y_r^{(n-2)} + \dots + \varphi_1\dot{y}_r + \varphi_0y_r. \quad (8)$$

对于  $\forall x \in S$ ,如果  $p(x)$  和  $h(x)$  已知,假设 1 被满足的话,那么控制律可被定义为

$$u = \frac{-p(x) - d(t) - (\varphi_{n-1}y^{(n-1)} + \dots + \varphi_1\dot{y} + \varphi_0y) + r}{h(x)}. \quad (9)$$

将式(9)代入式(5),则线性化系统可变为

$$\begin{aligned} (y_r^{(n)} - y^{(n)}) + \varphi_{n-1}(y_r^{(n-1)} - y^{(n-1)}) + \dots + \\ \varphi_1(y_r - \dot{y}) + \varphi_0(y_r - y) = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

如果定义  $e = y_r - y$  为追踪误差,那么参考控制输入(式(8))满足以下误差方程:

$$e^{(n)} + \varphi_{n-1}e^{(n-1)} + \dots + \varphi_1\dot{e} + \varphi_0e = 0. \quad (11)$$

### 2.2 光滑控制输入

在滑动模态控制系统<sup>[5]</sup>的开关控制输入中,易出现抖振.本文通过光滑与开关曲面邻近的薄边界层的不连续性,达到消除抖振的目的,其表达式为

$$D(t) = \{x | S(x, t) \leq \mu\}, \mu > 0. \quad (12)$$

式中  $\mu$  为边界层的厚度.

### 2.3 适合非线性系统的 MGA\_ANNC 算法

由于标准遗传算法(GA)<sup>[6]</sup>的局部寻优能力较差,故作者提出的改进遗传算法(MGA)为

$$\tilde{u}(\tilde{w}) = \sum_{k=1}^m \tilde{w}_k R_k(S). \quad (13)$$

式中:  $m$  为隐节点的总和;  $\tilde{w}_k$  为隐节点和输出节点间的可调网络权重,且满足  $|\tilde{w}_k| \leq w_{\max}$ ;  $R(S) = [R_1(S), R_2(S), \dots, R_m(S)]^T$  为径向基函数向量,它被定义为

$$R_k = \frac{\beta_k(S - A_k)}{\sum_{k=1}^m \beta_k(S - A_k)}, \quad (14)$$

$$\beta_k(\|S - A_k\|) = \exp\left(-\left(\frac{\|S - A_k\|}{\lambda}\right)^2\right). \quad (15)$$

式中:  $\beta_k$ ,  $A_k$  和  $\lambda$  分别为第  $k$  个隐单元的径向基函数、中心和宽度.

假设 2 当  $x \in \eta \subset \mathbf{R}^n$ ,存在一个可调参数向量  $\tilde{w} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n]$  允许模糊系统  $\tilde{u}(S, \tilde{w}) = \tilde{w}^T \times R(S)$  被近似为一个连续函数  $u$ ,即:

$$\sup |\tilde{u}(S, \tilde{w}) - u(S)| \leq \varepsilon_{\max}, \forall S \in \eta. \quad (16)$$

$\tilde{w}$  在  $t$  时刻的估计采用  $\hat{w}$  表示,此时可定义控制输出的估计  $\hat{u}(S, \hat{w})$  为

$$\hat{u}(S, \hat{w}) = \sum_{k=1}^m \hat{w}_k R_k(S) = \hat{w}^T R(S). \quad (17)$$

定义参数误差向量为  $w_e = \hat{w} - \tilde{w}$ , 则

$$w_e^T R(S) = \tilde{u}(S, \tilde{w}) - \hat{u}(S, \hat{w}). \quad (18)$$

定义建模误差为

$$\varepsilon = u - \tilde{u}(S, \tilde{w}). \quad (19)$$

进而得到:

$$u = \hat{u}(S, \hat{w}) + w_e^T R(S) + \varepsilon. \quad (20)$$

将式(20)代入式(11)可获得误差动力方程为

$$e^{(n)} + \varphi_{n-1} e^{(n-1)} + \cdots + \varphi_1 \dot{e} + \varphi_0 e = h(x) \times (w_e^T R(S) + \varepsilon). \quad (21)$$

定义增广误差为

$$S_e = \lambda_{n-1} e^{(n-1)} + \cdots + \lambda_1 \dot{e} + \lambda_0 e. \quad (22)$$

选择式(22)中的  $\lambda_{n-1}, \cdots, \lambda_1, \lambda_0$  和式(21)

中的  $\varphi_{n-1}, \cdots, \varphi_1, \varphi_0$ , 使其满足:

$$\hat{M}(l) = \frac{\lambda_{n-1} l^{n-1} + \cdots + \lambda_1 l + \lambda_0}{l^n + \varphi_{n-1} l^{n-1} + \cdots + \varphi_1 l + \varphi_0} = \frac{N(l)}{B(l)}. \quad (23)$$

如果定义  $e_s = [e, \cdots, e^{(n-1)}]^T$  作为式(21)

的状态向量, 则式(17)又可表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{e}_s(t) &= \Omega \cdot e_s(t) + a \cdot [h(x) \cdot (w_e^T R(S) + \varepsilon)], \\ S_e(t) &= d^T e_s(t) \end{aligned} \right\}. \quad (24)$$

式中:

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ -\varphi_0 & -\varphi_1 & -\varphi_2 & \cdots & -\varphi_{n-2} & -\varphi_{n-1} \end{bmatrix}_{n \times n}, \quad (25)$$

$$\left. \begin{aligned} a &= \underbrace{\{0, 0, \cdots, 1\}^T}_{\text{共 } n \text{ 项}}, \\ d &= \underbrace{\{\lambda_0, \lambda_1, \cdots, \lambda_{n-2}, 1\}^T}_{\text{共 } n \text{ 项}}. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

当  $\hat{M}(l)$  为严格正实函数时, 存在对称正定矩阵  $O$  和  $Q$  满足:

$$\left. \begin{aligned} O\Omega + \Omega^T O &= -Q, \\ Oa &= d. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

定义 Lyapunov 候选函数<sup>[7]</sup>为

$$V(e_s, w_e) = \tau \cdot e_s^T O e_s + w_e^T L_{11} w_e. \quad (28)$$

式中:  $w_e = [w_{e1}, w_{e2}, \cdots, w_{em}]^T$ ;  $L_{11} = h(x) \cdot I_{m \times m}$ ;  $\tau$  是表示学习速率的正常数.

如果  $e_s^T O e_s > \mu^2$ , 那么存在:

$$\dot{V}(e_s, w_e) = \tau \cdot (e_s^T O \dot{e}_s + \dot{e}_s^T O e_s) + 2w_e^T L_{11} \dot{w}_e. \quad (29)$$

则可推出  $\dot{w}_e = -\dot{\hat{w}}$ , 进而得到:

$$\dot{V} = \tau \times e_s^T (-Q) e_s + 2\tau \cdot S_e \cdot [h(x) \cdot (w_e^T R(S) + \varepsilon)] + 2w_e^T L_{11} (-\dot{\hat{w}}_e). \quad (30)$$

本文提出的改进自适应律为

$$\dot{\hat{w}} = \tau \cdot |S_e| \cdot R \cdot \text{sat}(S_e/\mu). \quad (31)$$

式中,  $\text{sat}(S_e/\mu)$  为薄边界层函数, 其表达式为

$$\text{sat}(S_e/\mu) = \begin{cases} 1, & (S_e/\mu) > 1; \\ S_e/\mu, & -1 \leq (S_e/\mu) \leq 1; \\ -1, & (S_e/\mu) < -1. \end{cases} \quad (32)$$

将式(32)代入式(31), 则式(31)可变为

$$\dot{V} = -\tau \cdot e_s^T Q e_s + 2\tau \cdot S_e \cdot [h(x) \cdot (w_e^T R(S) + \varepsilon)] - 2\tau \cdot |S_e| \cdot [h(x) \cdot w_e^T R(S)] \cdot \text{sat}\left(\frac{S_e}{\mu}\right). \quad (33)$$

当  $|S_e| > \mu$ , 则

$$\dot{V} = -\tau \cdot e_s^T Q e_s + 2\tau \cdot e_s^T d \cdot (h(x) \cdot \varepsilon) \leq -\tau \cdot \|e_s\| \cdot [\|e_s\| \cdot Q - 2\|d\| \cdot \|h(x) \cdot \varepsilon\|]. \quad (34)$$

如果  $e_s^T O e_s > \mu^2$ ,  $\mu > 0$  和  $\sigma > 0$ , 则有

$$\left\{ \frac{\mu Q}{\sqrt{O}} - 2\|d\| \cdot \|h(x) \cdot \varepsilon\| \right\} > \sigma. \quad (35)$$

由式(34)易推得  $\dot{V} \leq -\tau \cdot \|e_s\| \cdot \sigma$ , 从而得出  $\dot{V} < 0$ . 故在所有的紧集  $\eta$  内,  $V$  将逐渐收敛至 0.

### 3 半主动控制算法的设计

为了解决限幅最优(CO)控制<sup>[8]</sup>的命令电压  $v_i$  只能取 0 或  $\tilde{V}_{\max}$  的弊端, 本文提出了 MCO 半主动控制算法, 其施加于第  $i$  个 MRD 的  $v_i$  可表示为

$$\left. \begin{aligned} v_i &= \tilde{V}_{ci} H[(F_{ci} - F_i) F_i], \\ \tilde{V}_{ci} &= \begin{cases} \zeta_i F_{ci}, & F_{ci} \leq F_{\max}; \\ \tilde{V}_{\max}, & F_{ci} > F_{\max}. \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

式中:  $H(\cdot)$  为 Heaviside 阶跃函数;  $F_i$  为实测控制力;  $\zeta_i$  为电压系数;  $\tilde{V}_{\max}$  为施加到电流驱动器的电压;  $F_{ci}$  为理论控制力;  $F_{\max}$  为 MRD 的最大出力.

### 4 数值分析

#### 4.1 系统参数

以一座 9 层钢筋混凝土框架结构(以下简称结构)为算例, 各楼层质量  $m_j = 843.6 \text{ t}$ , 各楼层刚度  $k_j = 1352.9 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$ . TM-MRD 布置在结构顶层, 质量块的质量  $m_t = 8.216 \times 10^4 \text{ kg}$ ,  $k_t = 9.372 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ . 对于 MRD, 其标定的最大出力  $\bar{F}_{\max}$  和最大冲程  $L$  分别为 1000 kN 和  $\pm 40 \text{ cm}$ .

主动控制装置采用压电陶瓷驱动器 (PCA), 其  $\bar{F}_{\max}$  和  $L$  的取值与 MRD 相同.  $S = d^T e_t = 36e_9 - 0.3e_i + \dot{e}_9 - 0.6\dot{e}_i$ ,  $\hat{w} = [1, 0.86, 0.65, 0.26, 0.06, 0, -0.08, -0.25, -0.38, -0.76, -0.96]$ ,  $\mu = 0.2, \tau = 10, \zeta_i = 1.12$ .

#### 4.2 结果分析

从表 1 可以看出, 无控制结构的弹塑性层间位移角峰值 ( $J_1$ ) 和弹塑性层间位移角均方根 ( $J_2$ ) 均超出了结构的弹性层间位移角限值 ( $1/550 \text{ rad}$ )<sup>[9]</sup>, MGA\_ANNC/MCO 和 MGA\_ANNC 对  $J_1$  和  $J_2$  的控制效果比 LQG 的都要好; MGA\_ANNC/MCO 对结构的加速度峰值 ( $J_3$ )、加速度均方根 ( $J_4$ ) 和基底剪力峰值 ( $J_5$ ) 的控制效果也要比 LQG 的显著; MGA\_ANNC/MCO, MGA\_

ANNC 和 LQG 控制下的结构曲率延性系数峰值 ( $J_6$ )、曲率延性系数均方根 ( $J_7$ )、构件耗能量 ( $J_8$ ) 和塑性铰个数 ( $J_9$ ) 等指标比无控制结构的均要有所降低. MGA\_ANNC/MCO 和 MGA\_ANNC 的控制装置实际最大出力 ( $J_{10}$ ) 都接近其标定的最大出力; MGA\_ANNC/MCO 和 MGA\_ANNC 的控制装置实际冲程 ( $J_{11}$ ) 均分别接近其标定的最大冲程. MGA\_ANNC/MCO 的性能接近 MGA\_ANNC; MGA\_ANNC/MCO 策略的所需外界能量 ( $J_{12}$ ) 比 MGA\_ANNC 和 LQG 的都要少很多; MGA\_ANNC/MCO, MGA\_ANNC 和 LQG 等策略所需的控制装置数目 ( $J_{13}$ ) 相等; MGA\_ANNC/MCO 和 MGA\_ANNC 所需的传感器数目 ( $J_{14}$ ) 比 LQG 的要多; MGA\_ANNC/MCO 和

表 1 无控制与各种有控制结构的评价指标对比  
Table 1 Comparison of criteria between uncontrolled and various controlled structures

评价指标	无控制		MGA_ANNC/MCO		MGA_ANNC		LQG	
	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
$J_1/\text{rad}$	1/178	1/191	1/768	1/775	1/769	1/776	1/492	1/501
$J_2/\text{rad}$	1/193	1/205	1/775	1/782	1/776	1/783	1/507	1/515
$J_3/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	4.23	3.82	0.87	0.75	0.86	0.74	1.48	1.41
$J_4/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	3.97	3.63	0.82	0.69	0.81	0.67	1.36	1.19
$J_5/\text{kN}$	3615	3573	896	864	895	862	1578	1542
$J_6$	6.551	6.195	1.472	1.225	1.471	1.223	2.741	2.451
$J_7$	6.273	5.914	1.303	1.039	1.302	1.038	2.475	2.176
$J_8/\text{kJ}$	693.75	662.58	53.78	51.65	53.74	51.62	148.58	116.46
$J_9$	30	26	0	0	0	0	8	6
$J_{10}/\text{kN}$	—	—	995	986	996	987	923	917
$J_{11}/\text{cm}$	—	—	39.5	39.1	39.6	39.2	37.3	36.6
$J_{12}/\text{kJ}$	—	—	0.908	0.865	2.681	2.569	2.971	2.852
$J_{13}$	—	—	8	—	8	—	8	—
$J_{14}$	—	—	16	—	12	—	6	—
$J_{15}$	—	—	0	—	0	—	20	—

MGA\_ANNC 所需的计算资源量 ( $J_{15}$ ) 均为零.

由图 1 ~ 图 3 可以看出, MGA\_ANNC/MCO 对顶层加速度和弹塑性层间位移角峰值的控制效果要比 LQG 的显著; MGA\_ANNC/MCO 与 MGA\_ANNC 的控制力时程很吻合且均无抖振出现. 由表 2 知, MGA\_ANNC/MCO 和 MGA\_ANNC 控制下的结构响应值均明显小于相应的 LQG 的值, 故前两者的鲁棒性要明显优于后者; MGA\_ANNC 的  $J_{12}$  仍比 MGA\_ANNC/MCO 的要大得多.

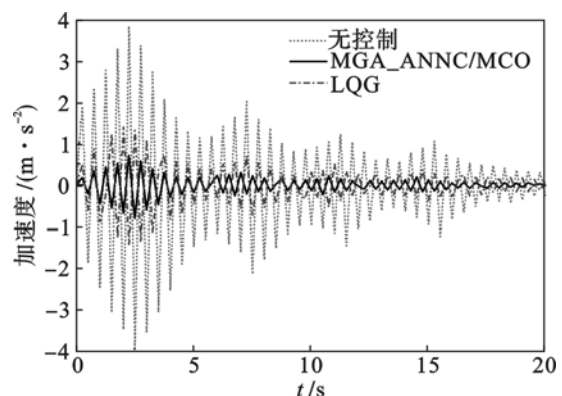


图 1 顶层加速度时程

Fig. 1 Time history of top storey acceleration

表 2 ±30% 刚度扰动下的部分评价指标平均值  
Table 2 Average values of partial evaluation criteria due to ±30% stiffness perturbed

评价指标	+ 30% 刚度扰动			- 30% 刚度扰动		
	MGA_ANNC/MCO	MGA_ANNC	LQG	MGA_ANNC/MCO	MGA_ANNC	LQG
$J_2/\text{rad}$	1/712	1/713	1/474	1/701	1/703	1/433
$J_3/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.81	0.82	1.52	0.86	0.87	1.67
$J_5/\text{kN}$	933	935	1668	947	948	1815
$J_{10}/\text{kN}$	988	989	927	991	992	932
$J_{12}/\text{kJ}$	0.912	2.833	3.098	0.925	2.869	3.294

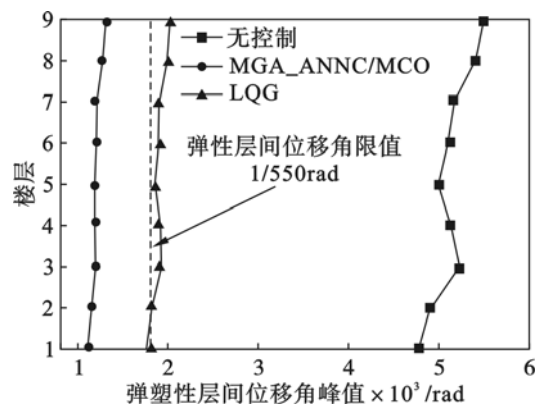


图 2 弹塑性层间位移角峰值

Fig. 2 Peak of elastoplasticity inter-storey drift angles

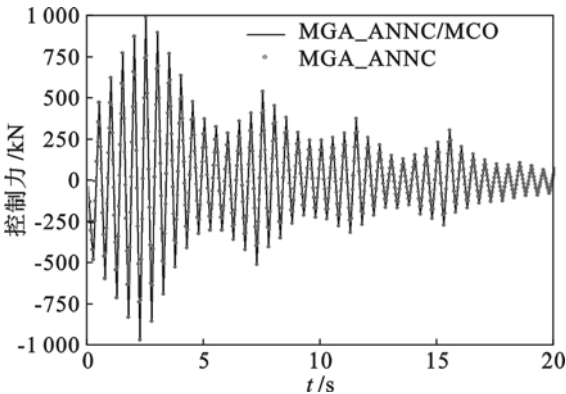


图 3 控制力时程

Fig. 3 Time history of control forces

5 结 语

MGA\_ANNC/MCO 策略的减震效果要明显优于 LQG 策略;MGA\_ANNC/MCO 的实际最大出力和最大冲程均比 LQG 的要大得多,且前者无需任何计算资源;MGA\_ANNC/MCO 的鲁棒性要明显优于 LQG;MGA\_ANNC/MCO 所需的外界能量要比 MGA\_ANNC 的少得多,两者的控制力时程非常吻合且均无抖振发生.

参考文献:

[1] Bitaraf M,Ozbulut O E,Hurlebaus S, et al. Application of semi-active control strategies for seismic protection of buildings with MR dampers [ J ]. *Engineering Structures*, 2010,32( 10 ):3040 – 3047.

[2] Bani-Hani K A,Sheban M A. Semi-active neuro-control for base-isolation system using magnetorheological ( MR ) dampers [ J ]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*,2006,35(9):1119 – 1144.

[3] Qasem S N,Shamsuddin S M. Radial basis function network based on time variant multi-objective particle swarm optimization for medical diseases diagnosis[ J ]. *Applied Soft Computing*,2011,11(1):1427 – 1438.

[4] Zapateiro M,Karimi H R,Luo N, et al. Real-time hybrid testing of semiactive control strategies for vibration reduction in a structure with MR damper[ J ]. *Structural Control and Health Monitoring*,2010,17(4):427 – 451.

[5] Wu L,Zheng W X. Passivity-based sliding mode control of uncertain singular time-delay systems[ J ]. *Automatica*,2009,45(9):2120 – 2127.

[6] Peteghem V V,Vanhoucke M. A genetic algorithm for the preemptive and non-preemptive multi-mode resource-constrained project scheduling problem[J].*European Journal of Operational Research*,2010,201(2):409 – 418.

[7] Diehl M,Amrit R,Rawlings J B. A Lyapunov function for economic optimizing model predictive control [ J ]. *IEEE Transactions on Automatic Control*,2011,56(3):703 – 707.

[8] Yoshida O,Dyke S J. Response control of full-scale irregular buildings using magnetorheological dampers [ J ]. *Journal of Structural Engineering*,2005,131(5):734 – 742.

[9] 中国建筑科学研究院. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范 [ S ]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.  
(China Academy of Building Research. GB 50011 – 2010 Code for seismic design of buildings [ S ]. Beijing: China Architecture and Building Press,2010. )