

建筑结构基于 RBF 神经网络的离散滑模控制研究*

李志军¹ 邓子辰^{1,2}

(1. 西北工业大学工程力学系, 西安 710072) (2. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023)

摘要 抖振问题是离散滑模控制在实际系统中应用的突出障碍. 根据神经网络控制的优点, 采用一种基于 RBF 神经网络的离散滑模控制方法对地震作用下建筑结构的振动控制问题进行了研究. 根据离散系统建模技术, 得到了离散时间形式的状态方程, 同时给出了确定切换面的方法, 并推导了控制律的表达式. 以一个三层剪切型建筑结构模型为例来验证所提出的离散滑模控制方法的有效性. 算例分析结果表明: 本文所提出的控制方法能够有效地减小结构的地震峰值响应, 同时达到了削弱控制系统抖振的目的.

关键词 离散滑模控制, 神经网络, 抖振, 结构振动

引言

滑模控制是一种新型控制理论, 具有对被控对象参数变化及扰动不敏感, 降阶去耦作用强, 控制算法简单等特点, 故被广泛应用于系统控制中. 在实际工程中, 计算机实时控制均为离散系统, 离散系统滑模控制的研究与设计成为滑模控制理论与应用的一个重要组成部分. 在 20 世纪 80 年代后期, 离散滑模控制迅速发展起来, 并在工程领域得到了一系列的应用^[1,2]. 离散系统滑模控制方法的缺点在于当状态轨迹到达滑模面后, 难于严格地沿着滑模面向着平衡点滑动, 而在滑模面两侧来回穿越, 从而产生抖振. 抖振问题是离散滑模控制在实际系统中应用的突出障碍^[3].

美国学者 J. N. Yang 等^[4-7] 率先将滑模控制方法引入到土木工程结构的振动控制问题中, 并利用 Lyapunov 直接方法设计控制律. 文献[8,9] 基于离散指数趋近律方法方法设计了控制律, 较好地控制了抖振, 但对趋近律的参数有较高的要求. 参数 ε 的作用非常大, ε 值减小, 可减小系统的抖振. 但 ε 值太小, 将影响系统到达切换面的趋近速度. 而且当系统参数变化比较大或系统存在比较大的不确定性时, 为了确保滑动模态的存在, 必须选取较大的趋近律参数 ε 值, 选取大的 ε 值必然使系统的抖振增加, 从而影响系统的性能. 径向基函数 (radial basis function, RBF) 神经网络是由 J. Moody 和 C.

Darken 在 20 世纪 80 年代提出的一种神经网络, 它是具有单隐层的三层前馈网络, 它的学习速度比 BP 神经网络快 $10^3 \sim 10^4$ 倍, 且有极好的泛化能力. 由于它模拟了人脑中局部调整、相互覆盖接受域的神经网络结构, 因而是一种局部逼近网络, 已证明它能任意精度逼近任意连续函数^[10]. RBF 神经网络结构如图 1 所示.

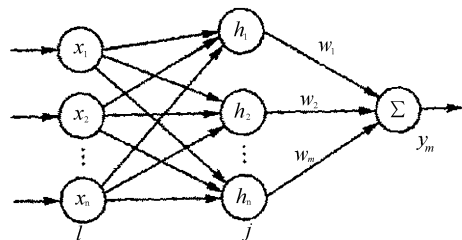


图1 RBF 神经网络结构

Fig. 1 The structure diagram of RBF neural network

为了较好地解决抖振问题, 本文根据神经网络控制技术的优点, 采用了一种基于 RBF 神经网络的离散滑模控制方法对地震作用下建筑结构的振动控制问题进行了研究, 同时利用 Matlab 语言编制了相应的程序, 完成了相应的算例分析.

1 控制系统的离散运动方程

对于一个自由度数为 n 的层间剪切型受控建筑结构, 设地面运动的加速度分量为 $\ddot{x}_g(t)$, 其运动方程可表示为

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = Du(t) - m\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

2006-11-01 收到第 1 稿, 2006-12-08 收到修改稿.

* 国家自然科学基金(10572119), 教育部新世纪优秀人才计划(NCET-04-0958), 河南省自然科学基金(0511011800)及大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室开放基金资助项目

其中: $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为 n 维位移列向量 (x_i 为第 i 层相对于地面的位移); $M = \text{diag}[m_1, m_2, \dots, m_n]$ 和 $m = [m_1, m_2, \dots, m_n]^T$ 分别为 $(n \times n)$ 维结构的质量矩阵和 n 维的质量列向量 (m_i 为第层的集中质量); $u(t)$ 为 r 维控制力列向量; D 为 $(n \times r)$ 维控制力位置矩阵; $\ddot{x}_g(t)$ 为输入到结构的地震加速度; C 和 K 分别为 $(n \times n)$ 维结构阻尼和刚度矩阵.

将式(1)化为状态方程

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) + Bu(t) + E\ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

式中

$$Z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & I_n \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}D \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}m \end{bmatrix}$$

其中: $Z(t)$ 是 $2n$ 维状态列向量; A 是 $(2n \times 2n)$ 维系统矩阵; B 是 $(2n \times r)$ 维矩阵; E 是 $(2n \times 1)$ 维矩阵.

根据文献[11], 方程(2)解的离散化形式为

$$Z[(k+1)T] = e^{AT}Z(kT) + \int_{kT}^{(k+1)T} e^{A[(k+1)T-\tau]} Bu(kT) d\tau + \int_{kT}^{(k+1)T} e^{A[(k+1)T-\tau]} E\ddot{x}_g(kT) d\tau \quad (3)$$

式中, T 为采样周期.

令 $\eta = (k+1)T - \tau$, 则式(3)变为

$$Z[(k+1)T] = e^{AT}Z(kT) + \int_0^T e^{A\eta} Bu(kT) d\eta + \int_0^T e^{A\eta} E\ddot{x}_g(kT) d\eta \quad (4)$$

令

$$A_d = e^{AT}, B_d = \int_0^T e^{A\eta} B d\eta, E_d = \int_0^T e^{A\eta} E d\eta \quad (5)$$

于是, 结构控制系统的离散状态方程可表示为

$$Z(k+1) = A_d Z(k) + B_d u(k) + E_d \ddot{x}_g(k) \quad (6)$$

式中, $Z(k)$ 和 $Z(k+1)$ 分别表示控制系统第 k 步 (对应时间为 $t = kT$) 和第 $k+1$ 步 (对应时间为 $t = kT + T$) 的状态反应; $u(k)$ 是第 k 步的主动控制力; $\ddot{x}_g(k)$ 是第 k 步的地震输入.

2 系统切换面的确定

假设结构切换函数具有如下线性形式

$$S(k) = \Theta Z(k) \quad (7)$$

其中: $S(k) = [S_1(k), S_2(k), \dots, S_r(k)]^T$ 为 r 维列向量, $S_i(k)$ 是滑移变量. Θ 为 $(r-2n)$ 维待确定矩阵.

确定切换面的方法有很多, 如: 极点配置法, 二次型最优配置法等. 具体详见文献[1, 12], 本文在此不再赘述.

3 滑模控制器的设计

离散滑模控制的结构框图如图2所示.

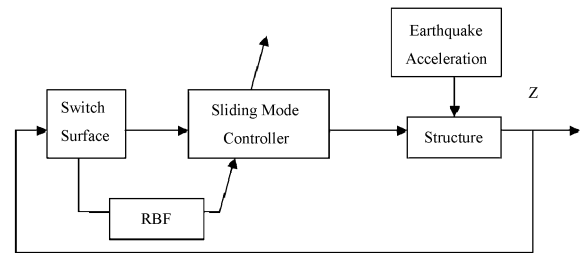


图2 离散滑模控制器结构

Fig. 2 The structure diagram of the discrete-time sliding mode controller

3.1 等效滑模控制器设计

在滑模到达理想状态时^[1], 有

$$S(k+1) = S(k) \quad (8)$$

将式(6)、(7)代入式(8), 可得

$$S(k+1) = \Theta [A_d Z(k) + B_d u(k) + E_d \ddot{x}_g(k)] \quad (9)$$

根据式(6)、(7)和式(8), 得

$$u_{eq}(k) = -(\Theta B_d)^{-1} [\Theta (A_d - I) Z(k) + \Theta E_d \ddot{x}_g(k)] \quad (10)$$

总的控制律为

$$u(k) = u_{eq}(k) + u_n(k) \quad (11)$$

其中 $u_n(k)$ 为 RBF 神经网络的输出.

3.2 RBF 神经网络滑模控制器的设计

设 $X_i = [S_i(k), S_i(k) - S_i(k-1)]^T$ 为网络输入, $H_i = [h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{ij}, \dots, h_{im}]^T$ 为网络隐含层输出, h_{ij} 为由高斯函数.

$$h_{ij} = \exp\left(-\frac{\|X_i - C_{ij}\|}{2b_{ij}^2}\right) \quad \begin{matrix} i=1, 2, \dots, r \\ j=1, 2, \dots, m \end{matrix} \quad (12)$$

其中 $C_{ij} = [c_{ij1}, c_{ij2}]^T$, C_{ij} 和 b_{ij} 分别为高斯函数参数的初始权值. m 为确定第 i 层控制力所对应的隐含层个数.

$$W_i = [w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{ij}, \dots, w_{im}]^T \quad (13)$$

其中 W_i 为网络初始权值.

网络的输出为

$$u_{ni}(k) = w_{i1}h_{i1} + w_{i2}h_{i2} + \dots + w_{im}h_{im} \quad (14)$$

选择 RBF 神经网络学习指标为

$$E_i(k) = \frac{1}{2}S_i(k)^2 \quad (15)$$

根据式(6)和式(7),有

$$\frac{\partial S_i(k)}{\partial u_{ni}(k)} = (\Theta B_d)_i \quad (16)$$

式中 $(\Theta B_d)_i$ 为 Θ 的第 i 行与 B_d 第 i 列对应元素的乘积。

根据梯度下降法,神经网络学习算法为

$$\Delta w_{ij} = -\frac{\partial E_i(k)}{\partial w_{ij}} = -S_i(k) \frac{\partial S_i(k)}{\partial u_{ni}(k)} \frac{\partial u_{ni}(k)}{\partial w_{ij}} = -S_i(k) (\Theta B_d)_i h_{ij} \quad (17)$$

$$w_{ij}(k) = w_{ij}(k-1) + \eta \Delta w_{ij} + \alpha [w_{ij}(k-1) - w_{ij}(k-2)] \quad (18)$$

$$\Delta b_{ij} = -\frac{\partial E_i(k)}{\partial b_{ij}} = -S_i(k) \frac{\partial S_i(k)}{\partial u_{ni}(k)} \frac{\partial u_{ni}(k)}{\partial b_{ij}} = -S_i(k) (\Theta B_d)_i w_{ij} h_{ij} \frac{\|X_i - C_{ij}\|^2}{2b_{ij}^3} \quad (19)$$

$$b_{ij}(k) = b_{ij}(k-1) + \eta \Delta b_{ij} + \alpha [b_{ij}(k-1) - b_{ij}(k-2)] \quad (20)$$

$$\Delta c_{ijl} = -\frac{\partial E_i(k)}{\partial c_{ijl}} = -S_i(k) \frac{\partial S_i(k)}{\partial u_{ni}(k)} \frac{\partial u_{ni}(k)}{\partial c_{ijl}} = -S_i(k) (\Theta B_d)_i w_{ij} h_{ij} \frac{\|X_{ijl} - C_{ijl}\|^2}{2b_{ij}^2} \quad (21)$$

$$c_{ijl}(k) = c_{ijl}(k-1) + \eta \Delta c_{ijl} + \alpha [c_{ijl}(k-1) - c_{ijl}(k-2)] \quad l=1,2 \quad (22)$$

其中 η 为学习速率, $\eta > 0$; α 为动量因子, $0 \leq \alpha < 1$ 。

4 算例分析

为验证本文所提方法的有效性,现采用图 3 所示的三层剪切型建筑结构模型进行数值分析。结构参数如下:结构各层集中质量为 $m_i = 1000 \text{ kg}$;水平

刚度为 $k_i = 980 \text{ kN/m}$; 阻尼系数为 $c_i = 1.407 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ ($i = 1 \sim 3$)。分别输入两种地震动:(1) El Centro 地震动,持续时间为 8 秒,最大地面运动加速度调整为: $(\dot{x}_g(t))_{\max} = 0.35g$; (2) Kobe 地震动,持续时间为 20 秒,最大地面运动加速度为 $(\dot{x}_g(t))_{\max} = 0.85g$ 。假定结构各层都安装有位移传感器和速度传感器,在结构第一层安装有主动支撑(ABS)作为作动器,当采用线性二次型(LQ)最优控制方法^[1,12]确定切换面和进行计算时,取增益矩阵 $Q = \text{diag}(10^4, 10^3, 10^2, 1, 1, 1)$,此时可求得切换面为: $S = 35.3782x_1 - 3.5862x_2 + 3.999x_3 + \dot{x}_1 + 0.5069\dot{x}_2 + 0.3567\dot{x}_3$ 。网络结构取 2-6-1,网络学习参数取 $\eta = 0.65, \alpha = 0.05$ 。网络的初始权值及高斯函数参数的初始权值均取随机值。

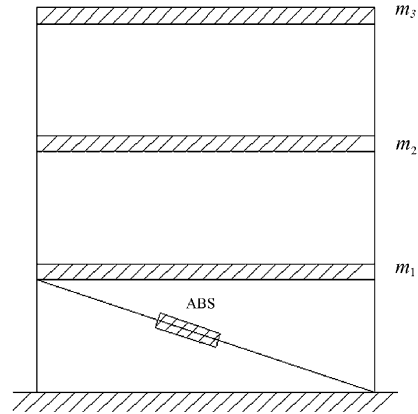


图 3 结构模型

Fig. 3 Structural model

考虑全状态反馈,在地震动作用下,当无控制作用和采用本文的离散滑模控制方法时,结构各层最大层间位移、最大加速度(相对地面而言)和所对应的最大控制力如表 1 所示,表中括号内的数值表示有控状态下结构峰值反应相对于无控状态减小的百分比。

表 1 结构层间位移与加速度峰值反应 ($x/\text{cm}, \ddot{x}/\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)

Table 1 Maximum response quantities ($x/\text{cm}, \ddot{x}/\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)

Floor	El Centro earthquake				Kobe earthquake			
	No control		With control $u_{\max} = 12.27 \text{ kN}$		No control		With control $u_{\max} = 36.86 \text{ kN}$	
	x	\ddot{x}	x	\ddot{x}	x	\ddot{x}	x	\ddot{x}
1	4.17	922.9	0.45 (89.2%)	295.8 (67.9%)	12.10	2271	0.96 (92.1%)	330.8 (85.4%)
2	3.18	1354.7	0.22 (93.1%)	549.4 (59.4%)	9.82	6482	1.04 (89.4%)	688.2 (89.4%)
3	1.67	1767.8	0.67 (60.0%)	857.6 (51.5%)	5.50	11938	1.49 (72.9%)	1206.1 (89.9%)

从表 1 中可以看出,与未采用滑模控制相比,本文所提出的控制方法,可以降低结构的峰值

响应,控制效果非常明显。

图 4 和图 5 分别是输入 El Centro 地震动和 Ko-

be 地震动后,采用本文所提的离散滑模控制方法与未采用滑模控制时,结构底层的加速度和位移(相对于地面)反应时程.从图中可以直观地看出,采用本文所提出的离散滑模控制方法有效地减小了结构的地震峰值响应,具体的峰值响应值详见表 1.

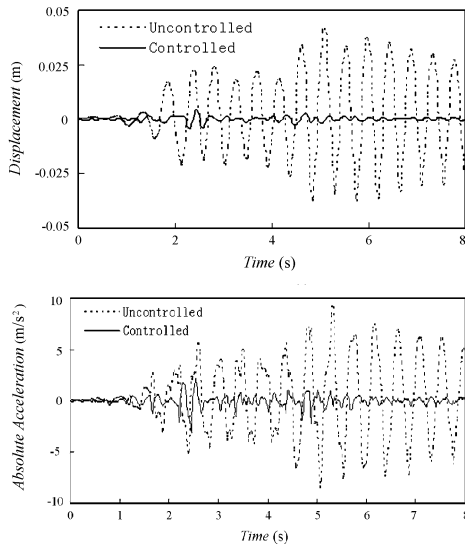


图 4 结构底层加速度和位移

反应时程(a) 位移,(b) 加速度(El Centro 地震动)

Fig. 4 Responses of the first storey unit (El Centro earthquake)

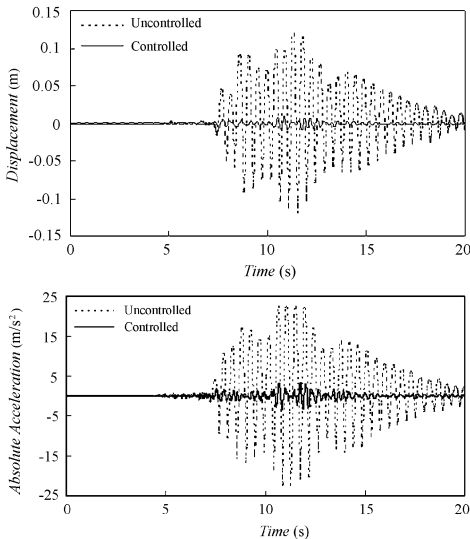


图 5 结构底层加速度和位移

反应时程(a) 位移,(b) 加速度(Kobe 地震动)

Fig. 5 Responses of the first storey unit (Kobe earthquake)

图 6 是分别输入 El Centro 地震动和 Kobe 地震动后,结构控制力时程.从图中可以明显地看出,采用本文所提出的离散滑模控制方法时,控制系统的抖振很小,从而保证了控制系统具有稳定的性能.

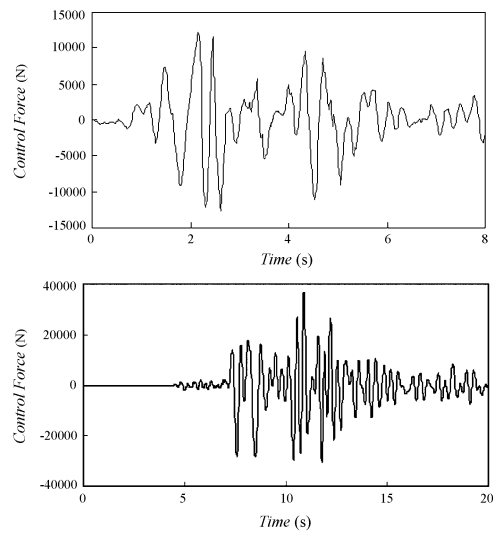


图 6 控制力反应时程(a) El Centro 地震动,(b) Kobe 地震动

Fig. 6 Control - force time histories of the first story unit

5 结论

针对文献[8,9]所提出的滑模控制方法应用于建筑结构的振动控制中可能存在的问题,本文根据神经网络控制的优点,采用了一种基于 RBF 神经网络的离散滑模控制方法对地震作用下建筑结构的振动控制问题进行了研究.为了验证所提出的控制方法的有效性,本文以一个三层剪切型建筑结构模型为例,完成了相应的算例数值分析.算例结果表明,本文所提出的离散滑模控制方法,控制效果明显,能有效地减小建筑结构的峰值响应,且控制系统的抖振很小.另外,对于非线性结构,本文所提出的方法同样也是适用的.

参 考 文 献

- 1 高为炳.变结构控制的理论及设计方法.北京:科学出版社,1996(Gao WB. Theory and design methods of variable structure control. Beijing: Science Press, 1996 (in Chinese))
- 2 刘金琨.滑模变结构控制 MATLAB 仿真.北京:清华大学出版社,2005(Liu JK. MATLAB simulation for sliding mode control. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (in Chinese))
- 3 姚琼荟,宋立忠,鄢圣茂.离散变结构控制理论研究现状与展望.海军工程大学学报,2004,16(6):23~29(Yao

- QH, Song LZ, Yan SM. Evolution and prospect of discrete variable structure control theory. *Journal of Naval University of Engineering*, 2004, 16(6): 23 ~ 29 (in Chinese))
- 4 Yang J N. Sliding mode control for nonlinear and hysteretic structures. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 1995, 121(12): 1330 ~ 1339
- 5 Yang J N. Sliding mode control for seismically excited linear structures. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 1995, 121(12): 1386 ~ 1390
- 6 Yang J N. Control of sliding-isolated building using sliding-mode control. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 1996, 122(2): 179 ~ 186
- 7 Yang J N. Experimental verifications of and sliding-mode control for seismically excited buildings. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 1996, 122(1): 69 ~ 75
- 8 赵斌, 吕西林. 结构振动的离散变结构控制方法. 振动工程学报, 2001, 14(1): 85 ~ 89 (Zhao B, Lu XL. Discrete variable structure control method for vibration control of building structures. *Journal of Vibration Engineering*, 2001, 14(1): 85 ~ 89 (in Chinese))
- 9 Cai G P. Discrete-time variable structure control method for seismic-excited building structures with time delay in control. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002, 31(4): 1347 ~ 1359
- 10 孙增圻. 智能控制理论与技术. 北京: 清华大学出版社, 1997 (Sun ZQ. Theory and technique of intelligent control. Beijing: Tsinghua University Press, 1997 (in Chinese))
- 11 王划一, 杨西侠, 林家恒. 现代控制理论基础. 北京: 国防工业出版社, 2004 (Wang HY, Yang XX, Lin JH. Basic theory of modern control. Beijing: National Defense Industry Press, 2004 (in Chinese))
- 12 欧进萍. 结构振动控制—主动、半主动和智能控制. 北京: 科学出版社, 2003 (Ou JP. Vibration control of structures. Beijing: Science Press, 2003 (in Chinese))

DISCRETE-TIME ADAPTIVE SLIDING MODE CONTROL OF BUILDING STRUCTURE USING NEURAL NETWORKS*

Li Zhijun¹ Deng Zichen^{1,2}

(1. Department of Engineering Mechanics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract Based on the advantage of RBF neural network control method, a new discrete-time adaptive sliding mode control method, which is one of the active control algorithms, was applied for seismically excited building structures. The undue chattering effect and the major disadvantage of conventional sliding mode controller have been removed by introducing RBF neural network controller to suppress parameter vibrations and perturbations greatly. This paper proposed several ways to get the switch surface and to design the feedback controller. For numerical application, a three-story shear building model subjected to ground excitations was considered. The ground accelerations recorded in two different earthquake events were used to evaluate the effectiveness of the control algorithm for varied disturbances. The simulation results show preliminarily that our new discrete-time adaptive sliding mode control method is quite effective; not only can it reduce the peak-response of the ground motion, but also it can keep the chattering effect sufficiently low so as to ensure the system stable.

Key words discrete-time sliding mode control, neural networks, chattering effect, structural vibration

Received 1 November 2006, revised 8 December 2006.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10572119); Programme for New Century Excellent Talents of Education Ministry of China (NCET-04-0958); Natural Science Foundation of Henan Province of China (0511011800) and Open Foundation of State Key Labora-