

# 地震作用下高层建筑结构的分散模糊迭代学习控制研究

汪 权\*, 王建国, 裴阳阳

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009)

**摘 要:**针对地震作用下高层建筑结构的模糊半主动振动控制方法进行研究,引入分散控制的策略,将模糊逻辑理论与迭代学习控制算法原理相结合,提出分散模糊迭代学习控制 DFILC(Decentralized Fuzzy Iterative Learning Control)算法,并应用于高层结构地震反应振动控制中。对某 20 层钢结构 Benchmark 结构模型进行数值计算与分析,结果表明,采用分散控制策略的 DFILC 算法可以有效地抑制结构地震反应,相对于集中控制的单一失效分散控制系统的可靠性更强且数据实时处理效率大为提高;同时,模糊逻辑理论的运用解决了模型的不确定性和外扰的非线性。

**关键词:**地震作用;高层建筑;集中控制;分散控制;模糊迭代学习

**中图分类号:**TP181;TP273+.22 **文献标志码:**A

## 1 引 言

现阶段土木工程结构半主动振动控制所采用的方法一般都是集中控制策略<sup>[1]</sup>,其原理是利用传感器分散采集系统状态数据,由中央控制器集中控制,向各控制装置发出控制指令。此策略对于自由度较少的结构是可行的,但随着高层建筑的兴起,结构层数的增加必然导致中央控制器实时处理的数据增多,而且一旦信息传输过程中发生故障很容易造成中央控制器的故障,进而导致整个控制系统的失效。

20 世纪 70 年代出现的分散控制策略为解决集中控制策略在高层、超高层建筑结构的振动控制问题中的实时性、可靠性和经济性提供了新途径。分散控制典型的特点是状态信息交换的离散化,被控结构被划分成一系列子系统,每一个子系统使用局部信息独立地控制。土木工程结构相关的分散控制问题研究出现较晚,相应的研究也相对较少。Lynch 等<sup>[2]</sup>通过对一高层结构的数值分析比较了分散控制算法下结构的反应,结果表明,采用分散控制算法可获得较好的控制效果。文献<sup>[3,4]</sup>针对大尺度结构系统,将结构分解成若干个子系统,提

出了地震荷载作用下高层框架结构振动问题的分散化控制算法。Loh 等<sup>[5]</sup>针对建筑结构地震作用下振动控制,采用 MR 阻尼器作为半主动控制装置,讨论了集中和分散控制策略。Kim 等<sup>[6,7]</sup>采用 MR 阻尼器基于线性矩阵不等式,设计了一组模态基模糊控制器,有效地减少地震作用下结构的振动反应。Wu<sup>[8]</sup>针对大尺度互联的动力系统问题,提出了一类局部的迭代学习控制方法,分散的局部构造迭代学习控制器能够保证每一个子系统期望的局部输出与实际的局部输出之间误差的渐近收敛性。

土木工程结构振动问题的复杂性表现为系统的非线性与模型结构不确定性,传统的控制方法难以满足这类系统的控制需要。模糊控制理论的产生与发展,为土木工程结构振动控制提供了新的方法<sup>[9,10]</sup>。模糊控制不需要知道控制对象的数学模型,就能克服非线性等因素的影响。

本文针对高层建筑结构地震反应的半主动控制,引入分散控制策略,提出分散模糊迭代学习控制确定迭代学习律的方法,有效的控制高层建筑结构地震反应,提高了迭代学习控制的鲁棒性和系统的可靠性。

## 2 基本理论

### 2.1 高层建筑结构集中控制系统

考虑  $n$  层高层建筑结构剪切型模型,假定结构设置了  $r$  个控制器,则受控系统运动微分方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = -\mathbf{M}\{1\} \ddot{x}_g + \mathbf{E}\mathbf{U} \quad (1)$$

收稿日期:2011-05-06;修改稿收到日期:2011-09-22.

基金项目:国家自然科学基金(11172087);土木工程防灾减灾安徽省工程技术研究中心(教秘[2007]368号);中央高校基本科研业务费专项(2010HGBZ0605;2011HGQC1030)资助项目.

作者简介:汪 权\*(1981-),男,博士,讲师  
(E-mail: wqhut@163.com).

式中  $\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$  为结构各层相对地面的位移 ( $x_1$  为结构顶层, 即自由度依次从上往下编号),  $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{K}$  为分别结构质量、阻尼和刚度矩阵, 维数均为  $n \times n$ ,  $\{1\}$  为元素全为 1 的列向量, 维数为  $n \times 1$ ,  $\ddot{x}_g$  为输入地震波,  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{U}$  为控制器位置矩阵和相应的控制力向量, 维数为  $n \times r$  和  $r \times 1$ 。

将式(1)写为状态方程的形式:

$$\dot{\mathbf{Z}} = \mathbf{AZ} + \mathbf{BU} + \mathbf{D}\ddot{x}_g, \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}_0\mathbf{Z} \quad (2)$$

$$\text{式中 } \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \dot{\mathbf{X}} \end{bmatrix}_{2n \times 1}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E} \end{bmatrix}_{2n \times r}, \quad \mathbf{D} = -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{M} \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{1\} \end{Bmatrix}_{2n \times 1}$$

式中  $\mathbf{y}$  为输出向量,  $\mathbf{C}_0$  为输出观测矩阵。

假设系统全部状态均能观测到, 由文献[1]可得线性二次型(LQR)控制算法的最优控制力为

$$\mathbf{U}(t) = -\mathbf{GZ}(t) = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}(t) \quad (3)$$

式中  $\mathbf{G}$  为控制力增益矩阵,  $\mathbf{P}$  由如下 Riccati 矩阵方程求解得

$$\mathbf{PA} + \mathbf{A}^T\mathbf{P} - \mathbf{PBR}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad (4)$$

式中  $\mathbf{Q}$  和  $\mathbf{R}$  分别为半正定和正定权矩阵。

## 2.2 高层建筑结构分散控制系统

假定将原结构分解为 3 个子系统(分解数目可以任意), 子系统采用从上往下的编号方式, 则每个子系统的位移和控制器向量如下。

$$\mathbf{X}_1 = [x_1 \ \dots \ x_{n_1}]_{n_1 \times 1}^T, \quad \mathbf{U}_1 = [u_1 \ \dots \ u_{r_1}]_{r_1 \times 1}^T$$

$$\mathbf{X}_2 = [x_{i+1} \ \dots \ x_j]_{n_2 \times 1}^T, \quad \mathbf{U}_2 = [u_{i+1} \ \dots \ u_m]_{r_2 \times 1}^T$$

$$\mathbf{X}_3 = [x_{j+1} \ \dots \ x_n]_{n_3 \times 1}^T, \quad \mathbf{U}_3 = [u_{m+1} \ \dots \ u_r]_{r_3 \times 1}^T \quad (5)$$

式中  $x_i$  和  $u_i$  为第  $i$  层的相对位移和控制力,  $n_i$  和  $r_i$  为第  $i$  个子系统的层数及控制器数目。由此, 式(1)运动方程可以写为分块形式:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{M}_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{X}}_1 \\ \ddot{\mathbf{X}}_2 \\ \ddot{\mathbf{X}}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12} & 0 \\ \mathbf{C}_{21} & \mathbf{C}_{22} & \mathbf{C}_{23} \\ 0 & \mathbf{C}_{32} & \mathbf{C}_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_1 \\ \dot{\mathbf{X}}_2 \\ \dot{\mathbf{X}}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} & 0 \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} & \mathbf{K}_{23} \\ 0 & \mathbf{K}_{32} & \mathbf{K}_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \mathbf{X}_3 \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{22} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{1} \\ \mathbf{1} \\ \mathbf{1} \end{Bmatrix} \ddot{x}_g + \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{11} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{E}_{21} & \mathbf{E}_{22} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E}_{32} & \mathbf{E}_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_3 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

由式(1)可求出  $\mathbf{M}_{ij}$ 、 $\mathbf{K}_{ij}$ 、 $\mathbf{C}_{ij}$  和  $\mathbf{E}_{ij}$ , 同理, 将

式(6)写为状态方程形式:

$$\dot{\mathbf{Z}}_1 = \mathbf{A}_1\mathbf{Z}_1 + \mathbf{B}_1\mathbf{U}_1 + \mathbf{D}_1\ddot{x}_g + \mathbf{A}_{12}\mathbf{Z}_2$$

$$\dot{\mathbf{Z}}_2 = \mathbf{A}_2\mathbf{Z}_2 + \mathbf{B}_2\mathbf{U}_2 + \mathbf{D}_2\ddot{x}_g + \mathbf{A}_{21}\mathbf{Z}_1 + \mathbf{A}_{23}\mathbf{Z}_3 + \bar{\mathbf{B}}_{21}\mathbf{U}_1$$

$$\dot{\mathbf{Z}}_3 = \mathbf{A}_3\mathbf{Z}_3 + \mathbf{B}_3\mathbf{U}_3 + \mathbf{D}_3\ddot{x}_g + \mathbf{A}_{32}\mathbf{Z}_2 + \bar{\mathbf{B}}_{32}\mathbf{U}_2 \quad (7)$$

一般情况下, 若将结构分解为  $N$  个子系统, 第  $i$  个子系统层数为  $n_i$ , 则该子系统状态方程为

$$\dot{\mathbf{Z}}_i = \mathbf{A}_i\mathbf{Z}_i + \mathbf{B}_i\mathbf{U}_i + \mathbf{D}_i\ddot{x}_g + \sum_{j \neq i} \mathbf{A}_{ij}\mathbf{Z}_j + \bar{\mathbf{B}}_{i,i-1}\mathbf{U}_{i-1}$$

$$\mathbf{y}_i(t_i) = \mathbf{C}_0\mathbf{Z}_i \quad (8)$$

式中

$$\mathbf{Z}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_i \\ \dot{\mathbf{X}}_i \end{bmatrix}_{2n_i \times 1}, \quad \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}_{ii}^{-1}\mathbf{K}_{ii} & -\mathbf{M}_{ii}^{-1}\mathbf{C}_{ii} \end{bmatrix}_{2n_i \times 2n_i}$$

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{ii}^{-1}\mathbf{E}_{ii} \end{bmatrix}_{2n_i \times r_i}, \quad \mathbf{D}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}_{ii}^{-1}\mathbf{M}_{ii}\{1\} \end{bmatrix}_{2n_i \times 1}$$

$$\mathbf{A}_{ij} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}_{ii}^{-1}\mathbf{K}_{ij} & -\mathbf{M}_{ii}^{-1}\mathbf{C}_{ij} \end{bmatrix} \text{为第 } j \text{ 个子结构对第 } i$$

个子结构的影响矩阵,  $\bar{\mathbf{B}}_{i,i-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{ii}^{-1}\mathbf{E}_{i,i-1} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{U}_i$  为该子结构的控制力向量,  $\mathbf{U}_{i-1}$  为紧邻的上一个子结构的控制力向量,  $\mathbf{C}_0$  为输出矩阵。

## 2.3 高层建筑结构分散迭代学习控制系统

同集中控制策略类似可得第  $i$  子控制器的线性二次型最优控制力为

$$\mathbf{U}_i(t_i) = -\mathbf{R}_i^{-1}\mathbf{B}_i^T\mathbf{P}_i(t_i) = -\mathbf{G}_i\mathbf{Z}_i(t_i) \quad (9)$$

式中  $\mathbf{G}_i$  为第  $i$  子结构的控制力增益矩阵,  $\mathbf{P}_i$  可由 Riccati 方程求解。

在分散迭代学习控制设计中, 将式(9)求得的控制力作为子控制器迭代学习初始控制力  $\mathbf{U}_{i,1}(t_i)$ , 相应的输出变量  $\mathbf{y}_{i,1}(t_i)$  作为迭代初始状态。

由式(8)可知, 第  $i$  子控制器迭代运行  $k$  次的状态变量表达式为

$$\dot{\mathbf{Z}}_{i,k}(t_i) = \mathbf{A}_i\mathbf{Z}_{i,k}(t_i) + \mathbf{B}_i\mathbf{U}_{i,k}(t_i) + \mathbf{D}_i\ddot{x}_g(t_i) + \sum_{j \neq i} \mathbf{A}_{ij}\mathbf{Z}_{j,k}(t_i) + \bar{\mathbf{B}}_{i,i-1}\mathbf{U}_{i-1,k}(t_i)$$

$$\mathbf{y}_{i,k}(t_i) = \mathbf{C}_i\mathbf{Z}_{i,k}(t_i) \quad (10)$$

由式(10)得到子控制器误差模型为

$$\Delta \dot{\mathbf{Z}}_{i,k}(t_i) = \mathbf{A}_i\Delta \mathbf{Z}_{i,k}(t_i) + \mathbf{B}_i\Delta \mathbf{U}_{i,k}(t_i) + \sum_{j \neq i} \mathbf{A}_{ij}\Delta \mathbf{Z}_{j,k}(t_i) + \bar{\mathbf{B}}_{i,i-1}\Delta \mathbf{U}_{i-1,k}(t_i)$$

$$\mathbf{e}_{i,k}(t_i) = \mathbf{C}_i\Delta \mathbf{Z}_{i,k}(t_i) \quad (11)$$

式中  $\Delta \mathbf{Z}_{i,k}(t_i) = \mathbf{Z}_{i,k}(t_i) - \mathbf{Z}_d(t_i)$

$$\Delta \mathbf{U}_{i,k}(t_i) = \mathbf{U}_{i,k}(t_i) - \mathbf{U}_{op}(t_i)$$

$$\mathbf{e}_{i,k}(t_i) = \mathbf{y}_{i,k}(t_i) - \mathbf{y}_d(t_i)$$

由式(11)得到状态方程:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{Z}}}_{i,k}(t_i) &= \mathbf{A}_i \tilde{\mathbf{Z}}_{i,k}(t_i) + \mathbf{B}_i \tilde{\mathbf{U}}_{i,k}(t_i) + \\ &\sum_{j \neq i} \mathbf{A}_{ij} \tilde{\mathbf{Z}}_{j,k}(t_i) + \bar{\mathbf{B}}_{i,i-1} \tilde{\mathbf{U}}_{i-1,k}(t_i) \\ e_{i,k}(t_i) &= \mathbf{C}_i \tilde{\mathbf{Z}}_{i,k}(t_i) \end{aligned} \quad (12)$$

式中  $\tilde{\mathbf{Z}}_{i,k}(t_i) = \mathbf{Z}_{i,k+1}(t_i) - \mathbf{Z}_{i,k}(t_i)$   
 $\tilde{\mathbf{U}}_{i,k}(t_i) = \mathbf{U}_{i,k+1}(t_i) - \mathbf{U}_{i,k}(t_i)$

以下设计模糊控制器来确定迭代学习律,即确定每次迭代学习控制力增量。

### 2.4 高层建筑结构分散模糊迭代学习控制系统

分散模糊迭代学习控制是在模糊控制器的基础上,对每一个子系统均增加一个迭代学习控制环节,利用模糊控制来确定子系统迭代学习控制力增量,第  $i$  个子系统模糊迭代学习原理如图 1(a) 所示。

图 1(a) 的二维模糊控制器,输入变量为误差  $e_i$  及误差的变化  $\Delta e_i$ ,  $e_i$  由式(11)确定,  $\Delta e_i$  为误差的求导,输出变量为迭代学习控制量增量  $\tilde{U}_{i,k}(t_i)$ ,简记为  $\Delta u$ ,其中关键是模糊控制器的设计,本文采用自整定模糊控制器,如图 1(b) 所示。

自整定模糊控制器增加了一个自调整因子  $\alpha$ ,自调整因子的引入极大地提高了模糊控制器非线性映射的平滑度,使得控制效果得以改进。图 1(b) 中  $G_{e_i}$  和  $G_{\Delta e_i}$  分别为子系统输入误差及误差变化的量化因子,  $E$  和  $EC$  分别为误差和误差变化经过模糊化后得到的模糊变量,  $U$  和  $A$  分别为经过模糊推理后的输出模糊变量,  $G_u$  为输出迭代学习控制力增量的比例因子。以下给出自整定模糊控制器具体设计步骤。

(1) 模糊子集及模糊论域。定义模糊变量  $E$ 、 $EC$  和  $U$  的模糊子集为  $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$  即  $\{\text{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}\}$ , 定义模糊变量  $A$  的模糊子集为  $\{ZE, VS, S, SB, MB, B, VB\}$  即  $\{\text{零, 很小, 小, 小大, 中大, 大, 很大}\}$ 。输入变量  $e_i, \Delta e_i$  和输出变量  $u$  的模糊子集的隶属函数被定义在归一化区间  $[-1, +1]$ , 变量  $\alpha$  的模糊子集的隶属函数被定义在区间  $[0, +1]$ 。

(2) 隶属度函数。图 2(a) 为  $E$ 、 $EC$  和  $U$  模糊子集的隶属函数, 图 2(b) 为自整定因子  $A$  模糊子集的隶属函数。考虑论域的覆盖程度, 控制系统稳定性和计算量除  $NB$ 、 $PB$  和  $ZE$ 、 $VB$  采用梯形的隶属函数外, 其余模糊子集均采用简单的三角形隶属函数。

(3) 量化因子和比例因子。通过归一化增益, 量化因子  $G_{e_i}$  和  $G_{\Delta e_i}$  使实际输入的变量值映射到  $[-1, +1]$  区间。对于传统的模糊控制器, 比例因子  $G_u$  使控制器的输出映射到对应的实际输出值, 而对于本文的自整定模糊控制器, 选取的比例因子是  $G_u \cdot \alpha$ 。图 3 所示各变量关系如下。

$$e_N = G_{e_i} \cdot e_i, \Delta e_N = G_{\Delta e_i} \cdot \Delta e_i, \Delta u_i = (G_u \cdot \alpha) \cdot u_N \quad (13)$$

式(13)中 3 个增益参数因子需要确定。不失一般性, 对于第一次迭代学习, 由于初始轨迹与期望轨迹均在前文确定, 误差绝对值的最大值  $|e_{i,0m}|_{\max}$  可测, 从而确定  $G_{e_i}$ 。然而, 误差变化绝对值的最大值  $|\Delta e_{i,m}|_{\max}$  无法提前确定, 需在第一次迭代学习结束之后得到所需数据方可确定  $G_{\Delta e_i}$ , 输出因子  $G_u$  的选

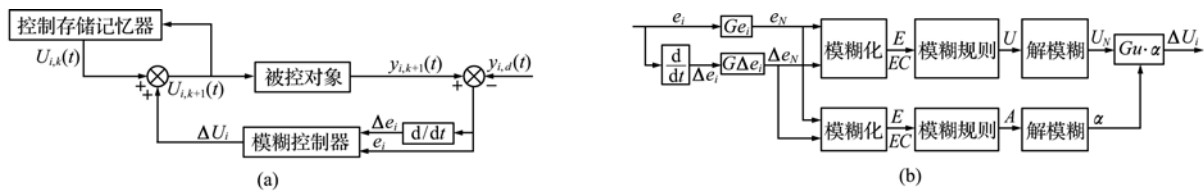


图 1 分散模糊迭代学习控制原理及自整定模糊控制器  
 Fig. 1 Decentralized fuzzy ILC control principle & Auto-tuning fuzzy controller

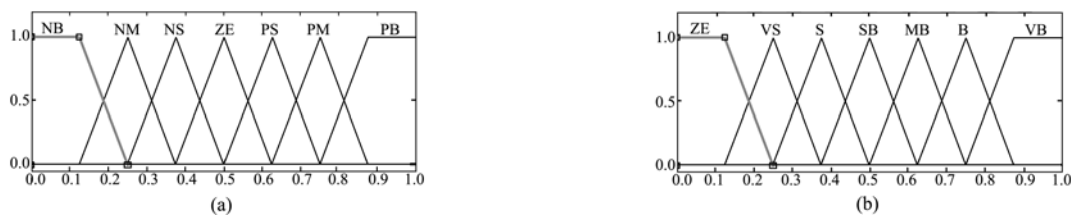


图 2 模糊子集隶属度函数  
 Fig. 2 Membership functions of fuzzy subsets

表 1  $u_N$  的推理规则表Tab. 1 The fuzzy reasoning rules of  $u_N$ 

$e$	$\Delta e$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	VB	VB	VB	B	SB	S	ZE
NM	VB	VB	B	B	MB	S	VS
NS	VB	MB	B	VB	VS	S	VS
ZE	S	SB	MB	ZE	MB	SB	S
PS	VS	S	VS	VB	B	MB	VB
PM	VS	S	MB	B	B	VB	VB
PB	ZE	S	SB	B	VB	VB	VB

取需要考虑控制作用的实际可行和系统的稳定性。综上所述,增益因子选取如下。

$$\begin{aligned}
 Ge_i &= L/|e_{i,0m}|_{\max}, G\Delta e_i = 1, 0 \\
 Gu &= 1/Ge_i^*|U_1|_{\max} \quad (k=1) \\
 Ge_i &= L/|e_{i,m}|_{\max}, G\Delta e_i = CL/|\Delta e_{i,m}|_{\max} \\
 Gu &= 1/\max[Ge_i, G\Delta e_i]^*|U_1|_{\max} \quad (k=2, 3, \dots)
 \end{aligned} \tag{14}$$

式中  $L$  和  $CL$  分别为误差和误差变化的讨论范围的上限,  $|U_1|_{\max}$  由式(9)确定。

(4) 模糊规则的确定。迭代学习控制是人对于事物学习的一种形式,推理规则依据专家经验确定,  $u_N$  和自整定因子  $\alpha$  的推理采用如下规则形式: if  $e$  is  $E$  and  $\Delta e$  is  $EC$  then  $u_N$  is  $U$ , if  $e$  is  $E$  and  $\Delta e$  is  $EC$  then  $\alpha$  is  $A$ 。模糊规则由模糊推理表 1 和表 2 来描述。

(5) 反模糊化(解模糊)。采用 Mamdani 型模糊控制器,模糊化关系合成运算采用取大-取小法,用相应的输入量模糊集合求输出量的模糊集合,采用面积重心法清晰化计算得到模糊集合的清晰值。

### 3 算 例

本文选取的 20 层 Benchmark 模型是按美国加利福尼亚州规范(SAC)设计的抗震钢结构,模型平立面见文献[1]。结构采用剪切型模型,计算假定及楼层质量、刚度、频率和阻尼比参数详见文献[11]。地震激励选用 El Centro(N-S, 1940)波,峰值调整为  $5 \text{ m/s}^2$ , 持时  $50 \text{ s}$ , 采样步长  $0.02 \text{ s}$ 。针对该模型,采用两种分解策略,其一将模型分解为 3 个子系统,依次为第 14 层~20 层、第 7 层~13 层和第 1 层~6 层,记为 7-7-6,其二将模型分解为 4 个

表 2  $\alpha$  的推理规则表Tab. 2 The fuzzy reasoning rules of  $\alpha$ 

$e$	$\Delta e$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PM	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

子系统,依次为第 16 层~20 层、第 11 层~15 层、第 6 层~10 层和第 1 层~5 层,记为 5-5-5-5。为了简化分析,每层均设置控制装置。

为分析本文所提 DFILC 算法对地震作用下高层结构的地震反应控制的有效性,利用 Matlab 编程序进行数值计算,并与结构无控、全状态反馈的集中线性二次型最优控制(CLQR)、全状态反馈的分散线性二次型最优控制(DLQR)、集中线性二次型最优迭代学习控制<sup>[11]</sup>(COILC)方法进行比较。CLQR 一般要求位移达到 30% 以上的控制效果,CLQR 控制中权矩阵  $Q = \alpha \times [K \ 0; 0 \ M]$ ,  $R = \beta I$ ,其中  $K$  和  $M$  分别为结构刚度和质量矩阵,  $I$  为单位矩阵,通过试算权矩阵系数取  $\alpha = 1, \beta = 2 \times 10^{-8}$ ,子控制器中权矩阵系数同 CLQR 方法。各子系统迭代学习控制期望轨迹取零轨迹反应。CFILC 可理解为结构分散模糊迭代学习控制的特例,即分解为一个子系统,其数值结果列入表 3。

表 3 给出了各工况下结构的位移、加速度反应峰值比较。由表 3 可知,CLQR 位移控制效果达到 32%~62%,加速度控制效果达 3%~24%。DLQR(7-7-6 分解)位移控制效果达到 36%~64%,加速度控制效果达 14%~33%。DLQR(5-5-5-5 分解)位移控制效果达到 38%~66%,加速度控制效果达 18%~36%。COILC 方法在迭代次数为 10、50、100 时,位移控制效果依次达到 38%~85%、64%~94%、76%~98%,加速度控制效果依次达到 5%~26%、11%~30%、19%~37%。CFILC 方法在迭代次数为 10、50、100 时,位移控制效果依次达到 35%~84%、47%~91%、64%~97%,加速度控制效果依次达到 3%~24%、8%~28%、15%~34%。

表3 各工况下结构位移、加速度反应峰值比较  
Tab.3 Comparison of displacement & acceleration peak

算法工况	迭代次数 <i>k</i>	层间位移峰值(cm)						加速度峰值(m/s <sup>2</sup> )						
		1层	6层	7层	13层	14层	20层	1层	6层	7层	13层	14层	20层	
无控		2.66	3.57	3.47	3.30	2.71	2.94	5.12	5.82	5.40	6.20	5.67	5.94	
CLQR		1.82	2.18	2.09	1.84	1.72	1.12	4.87	5.64	5.19	5.01	4.73	4.50	
DLQR	7-7-6	1.71	2.04	1.96	1.73	1.61	1.05	4.31	4.99	4.59	4.43	4.18	3.98	
	5-5-5-5	1.64	1.96	1.88	1.66	1.55	1.01	4.14	4.80	4.41	4.26	4.02	3.83	
COILC	10	1.65	1.97	1.89	1.64	1.53	0.42	4.77	5.53	5.09	4.91	4.64	4.41	
	50	0.96	1.14	1.10	0.94	0.86	0.18	4.47	5.19	4.77	4.61	4.35	4.14	
	100	0.63	0.75	0.72	0.61	0.56	0.06	4.06	4.69	4.32	4.18	3.94	3.74	
CFILC	10	1.74	2.07	1.99	1.73	1.61	0.47	4.87	5.64	5.19	5.01	4.73	4.50	
	50	1.40	1.66	1.60	1.37	1.25	0.26	4.62	5.36	4.93	4.76	4.50	4.27	
	100	0.95	1.13	1.09	0.92	0.85	0.09	4.25	4.93	4.54	4.38	4.14	3.93	
DFILC	7-7-6	10	1.68	2.00	1.92	1.66	1.55	0.45	4.68	5.43	4.99	4.81	4.55	4.32
		50	1.37	1.62	1.56	1.34	1.23	0.26	4.48	5.18	4.78	4.60	4.35	4.14
		100	0.94	1.12	1.07	0.91	0.83	0.09	4.15	4.80	4.42	4.26	4.03	3.83
	5-5-5-5	10	1.53	1.82	1.74	1.52	1.41	0.40	4.25	4.94	4.54	4.38	4.13	3.93
		50	1.24	1.47	1.41	1.23	1.11	0.23	4.07	4.71	4.34	4.18	3.96	3.77
		100	0.85	1.01	0.98	0.83	0.75	0.08	3.77	4.36	4.02	3.87	3.66	3.48

本文方法在迭代次数为 10、50、100 时,结构在按 7-7-6 分解时,位移控制效果依次达到 37%~85%、48%~91%、65%~97%,加速度控制效果依次达到 7%~27%、11%~30%、17%~36%;结构在按 5-5-5-5 分解时,位移控制效果依次达到 43%~86%、53%~92%、68%~97%,加速度控制效果依次达到 15%~34%、19%~37%、25%~41%。在地震反应的控制效果上,CFILC 方法比 COILC 稍差,而 DFILC

方法优于 CFILC,且分解为 5-5-5-5 子系统比 7-7-6 子系统控制效果更好。

地震作用下的结构模型(分解为 5-5-5-5)在迭代学习过程中的位移反应时程曲线如图 3~图 8 所示,图中期望轨迹为零轨迹反应,CLQR 最优控制输出反应作为初始轨迹;可以看出,本文方法能够对高层建筑结构地震反应进行有效控制。

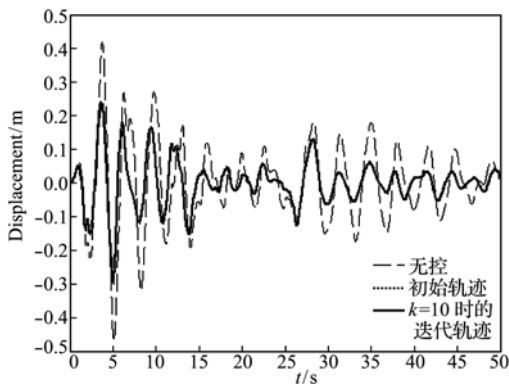


图3 结构顶层第10次迭代时的位移反应  
Fig.3 Displacement response on 10th iteration

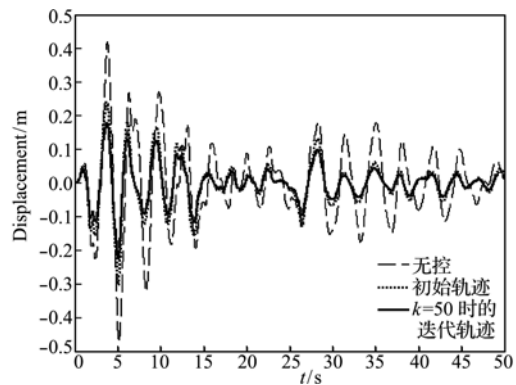


图4 结构顶层第50次迭代时的位移反应  
Fig.4 Displacement response on 50th iteration

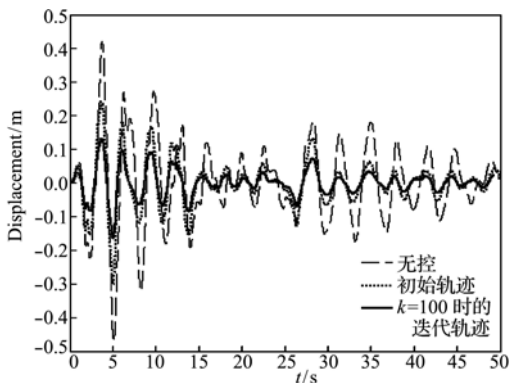


图5 结构顶层第100次迭代时的位移反应  
Fig.5 Displacement response on 100th iteration

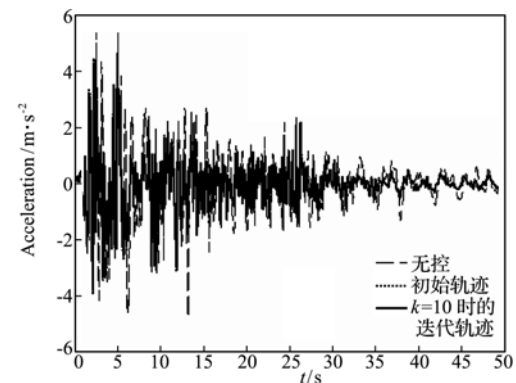


图6 结构顶层第10次迭代时的加速度反应  
Fig.6 Acceleration response on 10th iteration

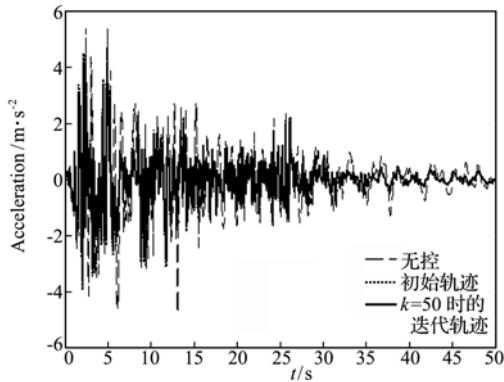


图7 结构顶层第50次迭代时的加速度反应  
Fig. 7 Acceleration response on 50th iteration

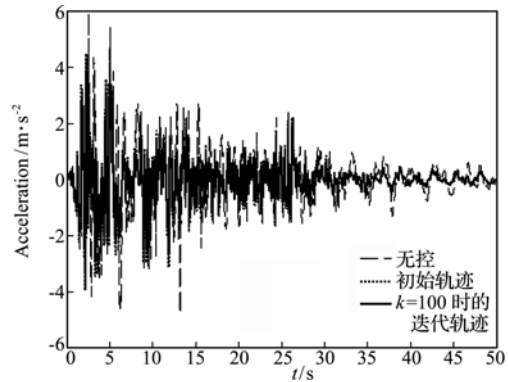


图8 结构顶层第100次迭代时的加速度反应  
Fig. 8 Acceleration response on 100th iteration

## 4 结论

分散控制策略能够很好地解决高层多自由度结构控制数据处理速度及单一失效的问题,大大提高了系统的可靠性。本文结合模糊逻辑和迭代学习控制的基本思想及优点,提出自整定模糊控制确定分散模糊迭代学习律的方法,适用于具有模型不确定性和外扰非线性的土木工程实际结构。这种模糊控制方法需要确定的模糊控制器参数仅为三个归一化增益,操作简单实用,应用范围广。

仿真模拟结果表明,该方法能够有效地控制选取的 Benchmark 模型的地震反应,说明本文模糊迭代学习控制方法应用于多自由度高层建筑结构半主动振动控制领域是有效的,也验证了分散控制方法在结构地震反应振动控制领域中的应用价值。

## 参考文献(References):

- [1] 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. (OU Jin-ping, *Structural Vibration Control-Active, Semi-Active and Intelligent Control*[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))
- [2] Lynch J P, Law K H. Decentralized control techniques for large-scale civil structural systems[A]. Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference[C]. Los Angeles. Bellingham; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2002.
- [3] Ma T W, Xu N S, Tang Y. Decentralized robust control of building structures under seismic excitations[J]. *Earthquake Engng Struct Dyn*, 2008, **37**(1): 121-140.
- [4] Wang Y, Lynch J P, Law K H. Decentralized  $H_{\infty}$  controller design for large-scale civil structures[J]. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 2009, **38**(3): 377-401.
- [5] Loh C H, Chang C M. Application of centralized and decentralized control to building structure: analytical study[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2008, **134**(11): 970-982.
- [6] Kim Y, Hurlebaus S, Langari R. Model-based multi-input, multi-output supervisory semi-active nonlinear fuzzy controller[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2010, **25**(5): 387-393.
- [7] Kim Y, Langari R, Hurlebaus S. Control of a seismically excited benchmark building using linear matrix inequality-based semiactive nonlinear fuzzy control[J]. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 2010, **136**(8): 1023-1026.
- [8] Wu H S. Decentralized iterative learning control for a class of large scale interconnected dynamical systems[J]. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2007, **327**(1): 233-245.
- [9] 邹立华, 黄昆. 基于磁流变阻尼器的多单体组合隔震结构模糊控制研究[J]. 计算力学学报, 2007, **24**(3): 365-384. (ZOU Li-hua, HUANG Kun. Study on combined multi-unit isolated structures with Magneto-rheological dampers by fuzzy control[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2007, **24**(3): 365-384. (in Chinese))
- [10] 金 娇, 周 晶. 半主动 TLCD 对偏心结构的离散模糊变结构控制[J]. 计算力学学报, 2007, **24**(1): 50-56. (JIN Qiao, ZHOU Jing. TLCD semi-active control methodology for eccentric buildings using discrete-time fuzzy variable structure law[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2007, **24**(1): 50-56. (in Chinese))
- [11] 汪 权, 王建国, 张鸣祥. 结构地震反应线性二次型最优迭代学习控制[J]. 应用科学学报, 2010, **28**(2): 197-202. (Wang Quan, Wang Jian-guo, Zhang Ming-xiang. Optimal control of structure seismic response using linear quadratic performance function and iterative learning[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2010, **28**(2): 197-202. (in Chinese)) (下转第 709 页)

- al Physics*, 2009, **26**(6):813-820. (in Chinese))
- [11] Liu Y, Nie YF. Optimization of node placement and parallel computation in meshless method[A]. ICCES MM'08[C]. Suzhou, 2008.
- [12] 樊祥阔, 聂玉峰, 常升. 局部网格生成中初始探索圆半径的搜索算法[J]. 计算力学学报, 2008, **25**(2): 188-193. (FAN Xiang-kuo, NIE Yu-feng, CHAN Sheng. Searching algorithm for initial exploring circle radius in NLMG[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2008, **25**(2): 188-193. (in Chinese))
- [13] 李永红, 华一新. 一种快速判断线段相交的方法[J]. 测绘通报, 2003(7):30-31. (LI Yong-hong, HUA Yixin. A method to quickly assessing the intersection of line segments[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2003(7):30-31. (in Chinese))
- [14] Persson P O, Strang G. A simple mesh generator in MATLAB[J]. *SIAM Review*, 2004, **46**(2):329-345.

## A fast local mesh generation method about high-quality node set

CHEN Wei-wei, NIE Yu-feng\*, ZHANG Wei-wei, WANG Lei

(School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Node-based local mesh generation method with high quality and efficiency is the key point of parallel algorithm of the node-based local finite element method. The nodes placement method with bubble simulation can develop a good-quality nodes set without manual intervention even if the domain is complex. Therefore, a high efficiency local mesh generation method based on this nodes placement method, called Bubble-type Local Mesh Generation (BLMG) method, is presented. BLMG method makes full use of the nodes set and adjacent chain which are provided by the nodes placement method. Avoiding the establishment of barrel data structure and the local searching of nodes, BLMG uses the circumscribed circle standard of Delaunay to eliminate the rare non-satellite nodes from the adjacent chain to develop a local mesh rapidly, which makes it of higher efficiency than the existing local mesh generation methods. Experimental results show that BLMG can generate local meshes which are consistent with the whole mesh generated by Delaunay triangulation and with high efficiency.

**Key words:** nodes placement method with bubble simulation; adjacent chain; local mesh generation; Delaunay triangulation

(上接第 686 页)

## Decentralized fuzzy iterative learning control of tall buildings under earthquakes

WANG Quan\*, WANG Jian-guo, PEI Yang-yang

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Methods for fuzzy semi-active vibration control of tall buildings under earthquakes is studied. By introducing the decentralized control strategy and combining the Fuzzy control and Iterative Learning Control (ILC), an algorithm named Decentralized Fuzzy Iterative Learning Control (DFILC) has been presented for the decentralized seismic response control of tall buildings. A typical 20-storey seismically excited building is used for comparing the performance of the two control strategies. The results indicate that the DFILC strategy could effectively mitigate structural seismic response as well as the traditional centralized control strategy but is superior in enhancing the reliability and more efficient in the data real-time processing of the control system. It is also more suitable for the control system with model uncertainty and external disturbance nonlinearity thanks to the fuzzy logic theory.

**Key words:** seismic action; tall building; centralized control; decentralized control; fuzzy iterative learning