

时变结构变论域模糊控制试验研究

吕 杨, 梅品彬

(天津城建大学天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室, 天津 300384)

摘要: 传统模糊控制的模糊论域固定, 当被控结构动力特性或外部激励发生变化时, 模糊控制的控制效率会降低。在传统模糊控制算法的基础上增设伸缩因子模糊控制器, 伸缩因子模糊控制以被控对象的误差及误差变化率作为输入, 伸缩因子作为输出, 实现主模糊控制器的模糊论域自适应调整。以一个安装磁流变阻尼器的两层钢框架结构为控制对象, 将结构首层位移和速度作为输入, 在 dSPACE 实时仿真系统中搭建了变论域模糊控制系统。开展了不同强度地震动和不同附加质量工况下结构振动控制的振动台试验, 结果表明: 变论域模糊控制能自适应调节模糊论域, 有效减小结构位移、速度和加速度响应; 当被控结构附加质量和地震动峰值加速度变化时, 变论域模糊控制的控制效果均优于模糊控制和 OFF 被动控制。

关键词: 变论域模糊控制; 时变结构; 振动台试验; 振动控制

中图分类号: TP273; TU311.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2025)04-0785-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2025.04.014

Experimental study on variable universe fuzzy control of time-varying structure

LYU Yang, MEI Pinbin

(Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: The fuzzy domain of traditional fuzzy control is fixed, and the control efficiency will decrease when the dynamic characteristics of the controlled structure or external excitation changes. On the basis of traditional fuzzy control algorithms, a variable universe fuzzy control is designed. The variable universe fuzzy control takes the error and error rate of the controlled structure as input, and the scaling factor as output, achieving adaptive adjustment of the fuzzy domain of the main fuzzy controller. A two-story steel frame structure with a magnetorheological damper as the control device was constructed, and the variable universe fuzzy control system with the displacement and velocity of the first floor as inputs was developed in the dSPACE real-time simulation system. Shaking table tests under different intensities of seismic motion and different additional mass conditions were conducted. The results show that variable universe fuzzy control can adaptively adjust the fuzzy domain, effectively reducing structural displacement, velocity, and acceleration response. When the added mass of the controlled structure and the peak ground acceleration change, the control effect of variable universe fuzzy control is better than that of fuzzy control and OFF passive control.

Keywords: variable universe fuzzy control; time-varying structure; shaking table test; seismic control

结构振动控制技术被广泛应用于机械、航空航天、海洋船舶、土木工程等领域。根据是否需要外部能量输入, 结构振动控制可分为主动控制、半主动控制、被动控制及混合控制^[1], 其中, 半主动控制由于其低能耗、高稳定性等优点, 得到了国内外学者的广泛研究。磁流变(MR)智能材料制作的控制装置, 如磁流变阻尼器、磁流变弹性体支座、磁流变脂阻尼器等是结构半主动控制的常用装置。

在基于磁流变材料的半主动控制算法方面, 现

代经典控制算法有 LQR 控制算法^[2-3]、极点配置控制算法^[4]、 H_2 和 H_∞ 控制算法^[5]、滑模控制等^[6]。例如, 王慧萍等^[7]建立了一种基于可变摩擦阻尼力的斜拉索半主动控制算法, 实现了斜拉索的多模态同步控制; 王楠等^[8]采用频域加权 LQR 算法进行了磁流变阻尼器半主动控制系统设计, 仿真结果表明该方法有效改善了火箭界面在特定频段的振动; 寇发荣等^[9]结合改进果蝇算法和 LQG 算法, 有效抑制了车辆在不同等级路面下的弹簧质量加速度及轮胎动

收稿日期: 2023-07-02; **修订日期:** 2023-09-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178295); 天津市自然科学基金资助项目(24JCZDJ00140); 天津市青年科技人才(第一层次)项目

载荷;贾忠益等^[10]建立了一种具有摩擦补偿的鲁棒 H_{∞} 控制器,仿真结果表明该控制器能在随机干扰下有效抑制座椅悬架的振动。以上经典控制算法需要控制对象精确的数学模型,而实际工程中,控制对象往往是体量大、形式复杂的时变结构体系,因此难以使用经典控制算法进行实际结构振动控制。

越来越多的学者将目光转向模糊控制、神经网络等不依赖被控结构精确模型的智能控制算法,例如李忠信等^[11]在基于经验的模糊偏航控制策略基础上,结合遗传算法,实现了对风过程中偏航系统疲劳载荷的有效抑制,仿真结果表明,相比现有控制策略,所提出的遗传模糊偏航控制策略可明显降低偏航系统疲劳程度;郭军慧等^[12]通过联合应用两个改进的人工神经网络,建立了一种可预测有效控制力的神经网络预测控制策略,数值仿真结果显示,该算法具有比传统 BP 网络高一阶的收敛速度,可较准确地识别结构的动力响应,给出有效控制力;朱敏等^[13]提出一种基于粒子群算法优化的模糊神经网络比例积分微分控制模型, MATLAB 和 AMESim 软件联合仿真结果表明,该模型在调节时间、超调量等性能方面有显著提升,并且表现出更强的鲁棒性和抗扰动能力;潘兆东等^[14]提出了一种自适应学习率径向基神经网络滑模分散控制算法,9 层钢结构 Benchmark 模型数值模拟结果表明,采用该算法控制后的结构首层峰值位移明显小于集中控制;邱志成等^[15]采用长短时记忆(LSTM)神经网络作为预测网络,反向传播(BP)网络作为控制网络,通过仿真与试验验证了神经网络控制器能有效减小结构的振动响应;马天兵等^[16]提出了一种改进滑模变结构控制算法,仿真与试验结果表明,该控制算法能较好地控制加筋板的振动,且控制效果优于传统滑模控制;石运东等^[17]提出了一种基于楼板输入加速度主频的 on-off 半主动控制方法以及相应的频率在线检测方法,建立了一种频率相关的半主动三维楼板隔振系统,试验结果表明,该控制方法能有效降低楼板的振动响应;郭佳等^[18]将磁流变阻尼器模态模糊控制算法引入一个 20 层多自由度结构体系模型,控制后的结构层间位移和速度明显减小;马驰骋等^[19]提出一种模糊 PID 控制器,仿真结果表明,该控制器有效抑制了含变质量单元的柔性梁结构的振动响应;陈宇等^[20]建立了基于桥墩广义水平刚度比的阻尼器出力方案,提出了连续梁桥的非线性地震损伤控制方法;宁响亮等^[21-22]将变论域法与自适应模糊控制算法相结合,针对公路桥梁控制的 Benchmark 问题进行了仿真分析,结果证明该方法的控制效果与主动控制相近。上述智能控制算法虽体现出了良好的控制性能,但大多仅停留于模拟仿真方面,缺乏具体的试验

验证。

工程结构振动控制一般假定控制对象为定常结构,即结构质量、刚度和阻尼等参数均不随时间改变。但实际建筑结构在遭遇地震时或在地震过程中,其结构参数会发生改变,并且结构可能遭受的地震激励无法预测,以结构初始参数设计的最优控制器的控制效果将变差甚至失效。例如传统模糊控制需按照初始结构在选定地震激励下的最大响应确定控制器输入/输出变量的量化因子、比例因子等模糊控制器参数,但当结构特性发生变化或所遭受的地震与选定地震不同时,模糊控制器的输入/输出需求有可能超越模糊论域,无法充分利用模糊规则,导致控制效果变差。

针对上述问题,本文将变论域法引入传统模糊控制中,设计了针对两层框架结构的变论域模糊控制器,并基于 dSPACE 实时仿真系统搭建了控制器参数可实时自适应调节的变论域模糊控制器,开展了不同附加质量和峰值加速度的受控结构振动台试验,对比研究了变论域模糊控制、OFF 被动控制和模糊控制的振动控制效果。

1 控制器设计

1.1 变论域法基本原理

针对传统模糊控制中模糊论域固定而导致控制效果变差这一问题^[23],在模糊论域引入变论域思想,其中, E 表示模糊控制器输入变量的论域边界, α 表示该输入变量的伸缩因子, NB、NM、NS、ZE、PS、PM、PB 表示控制器输入变量各隶属度函数的模糊语言。如图 1 所示,变论域模糊控制的基本原理为:在不改变模糊规则的前提下,当初始模糊论域 $[-E, E]$ 在伸缩因子 α 作用下发生扩展时,对应的隶属度函数随之发生变化,相较于初始状态更加宽扁,使得初始模糊论域 $[-E, E]$ 之外的范围同样分布有模糊规则,增强了模糊规则的适用性;与此相反,当初始模糊论域 $[-E, E]$ 在伸缩因子 α 作用下发生收缩时,隶属度函数也随之变化,转换为更加窄细的状态,模糊规则更加密集,通过实时自适应调节模糊论域范围实现结构振动控制精度的有效提高。

1.2 变论域模糊控制器

设模糊控制第 i 个输入变量为误差 $e_i(t)$, 其模糊论域为 $X_i = [-E_i, E_i]$, 其中, E_i 为论域边界, $\alpha(e_i(t))$ 为伸缩因子。当误差 $e_i(t)$ 增大时,适当增大伸缩因子 $\alpha(e_i(t))$, 从而达到扩大模糊论域、提高控制效果的目的。反之,当误差 $e_i(t)$ 减小时,适当减小

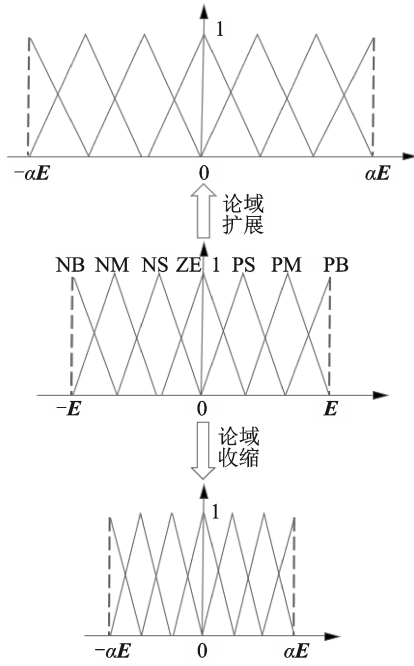


图 1 变论域法基本原理

Fig. 1 Fundamental principle of the variable universe method

伸缩因子 $\alpha(e_i(t))$ 。以两输入一输出的模糊控制为例,调整后的模糊论域为:

$$\begin{cases} X_1 = [-\alpha(e_1(t))E_1, \alpha(e_1(t))E_1] \\ X_2 = [-\alpha(e_2(t))E_2, \alpha(e_2(t))E_2] \\ Y = [-\beta(u(t))U, \beta(u(t))U] \end{cases} \quad (1)$$

式中, X_i ($i=1, 2$) 为第 i 个输入变量的模糊论域; Y 为输出变量的模糊论域; $\alpha(e_i(t))$ ($i=1, 2$) 为第 i 个输入变量的伸缩因子; $\beta(u(t))$ 为输出变量的伸缩因子; E_i ($i=1, 2$) 为第 i 个输入变量的论域边界; U 为输出变量的论域边界。

基于变论域法搭建的变论域模糊控制器结构如图 2 所示,其与传统模糊控制的区别在于增设了伸缩因子模糊控制器。图 2 中, $r(t)$ 表示外部扰动, $u(t)$ 表示控制信号, $y(t)$ 表示结构响应。

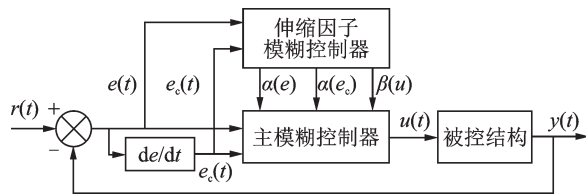


图 2 变论域模糊控制器

Fig. 2 Variable universe fuzzy controller

1.3 伸缩因子设计

伸缩因子的选择方法主要有函数模型法、模糊推理法和误差分级法,本文采用基于模糊推理的方式设计伸缩因子模糊控制器。

设主模糊控制器为两输入一输出,两个输入变

量分别是结构响应误差 $e(t) = y(t) - r(t)$ 及误差变化率 $e_c(t)$, 输出变量是被控对象的控制电流 $I(t)$, 其中模糊控制器的输入变量 $e(t)$ 、 $e_c(t)$ 的模糊子集记作 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}, 可简化为模糊语言 {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}; 输出变量 $I(t)$ 的模糊子集记作 {零, 中小, 小, 中, 小大, 中大, 大}, 可简化为模糊语言 {ZE, SM, S, M, SL, ML, L}; 伸缩因子模糊控制器的输入变量与主模糊控制器一致, 即以主模糊控制器 $e(t)$ 和 $e_c(t)$ 为输入变量, 伸缩因子 $\alpha(e(t))$ 和 $\alpha(e_c(t))$ 为输出变量, 其中伸缩因子 $\alpha(e(t))$ 和 $\alpha(e_c(t))$ 均采用四个模糊子集来描述自身的模糊状态, 记作 {零, 小, 中, 大}, 可简化为模糊语言 {ZE, S, M, L}; 主模糊控制器输出变量 $I(t)$ 的伸缩因子 $\beta(I(t))$ 设置为 $\alpha(e(t))$ 和 $\alpha(e_c(t))$ 的线性组合, 其表达式如下:

$$\beta(I(t)) = \frac{\alpha(e(t)) + \alpha(e_c(t))}{2} + \epsilon \quad (2)$$

式中, ϵ 为一足够小的正数。

$\alpha(e(t))$ 和 $\alpha(e_c(t))$ 的模糊控制规则相同, $\alpha(e(t))$ 的控制规则如表 1 所示, 且具备如下基本原则: 一是当结构第一层相对位移较大, 相对速度也较大, 且二者方向相同时, 说明该时刻结构离平衡位置较远, 并有远离平衡位置的趋势。此时模糊控制器的输入变量有较大可能发生超越模糊论域的现象, 为防止超越模糊论域现象的发生, 此时模糊论域应进行适当的扩展; 二是当结构第一层相对位移较小, 相对速度也较小, 且二者方向相反时, 说明该时刻结构离平衡位置较近, 且有回到平衡位置的趋势。此时为充分利用模糊规则并防止超调, 应使模糊论域进行适当的收缩。

表 1 伸缩因子 $e(t)$ 和 $e_c(t)$ 的控制规则

Tab. 1 The control rules of the scaling factors $e(t)$ and $e_c(t)$

e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	L	L	M	M	M	L	L
NM	L	M	S	S	S	M	L
NS	M	S	S	ZE	S	S	M
ZE	S	S	ZE	ZE	ZE	S	S
PS	M	S	S	ZE	S	S	M
PM	L	M	S	S	S	M	L
PB	L	L	M	M	M	L	L

1.4 变论域模糊控制器的参数设计

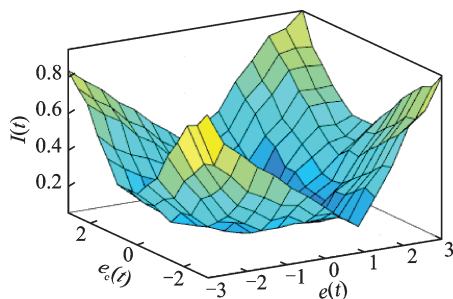
变论域模糊控制器的相关参数设置如表 2 所示, 其中, 模糊推理采用 Mamdani 法, 清晰化过程采用重心法。通常模糊控制器的模糊子集个数可设置

为3~10个,模糊子集个数越多,控制精度越高,但同时求解速度也将降低,为保证控制器在不大幅度降低控制算法速度的前提下还能保证控制算法的精度,将主模糊控制器的输入、输出变量模糊子集个数设置为7个,而两个伸缩因子模糊子集个数设置为4个。考虑到振动控制需要具备较高的灵敏度,因此变论域模糊控制器中各个变量均采用三角形隶属函数。模糊控制器的量化因子、比例因子由结构初始状态下的响应确定,且一经确定后不再更改。图3所示为模糊控制器输出变量 $I(t)$ 的模糊规则。

表2 变论域模糊控制器参数设置

Tab. 2 Variable universe fuzzy controller parameter settings

变量	论域	子集数	隶属函数
$e(t)$	$[-3, 3]$	7	三角形
$e_c(t)$	$[-3, 3]$	7	三角形
$I(t)$	$[0, 1]$	7	三角形
$\alpha(e(t))$	$[0, 1]$	4	三角形
$\alpha(e_c(t))$	$[0, 1]$	4	三角形

图3 模糊控制器输出变量 $I(t)$ 的模糊规则Fig. 3 The fuzzy rules for fuzzy controller output variable $I(t)$

2 试验设计

2.1 试验模型

试验模型结构为两层钢框架,如图4所示。结构横向跨度为600 mm,纵向跨度为400 mm,单层层高为300 mm,其中主梁横截面为30 mm×6 mm,次梁横截面为6 mm×20 mm,框架柱横截面为6 mm×30 mm,单层框架质量为4.14 kg,单块楼面板质量为37.26 kg。结构每层的柱端均焊有法兰,通过螺栓组成整体。每层楼面附加3块25 kg的质量块,共计75 kg。试验用振动台主要性能参数如表3所示。

2.2 磁流变阻尼器

试验所使用的控制装置为Lord公司生产的RD-8041-1型磁流变阻尼器。万能试验机测试得到

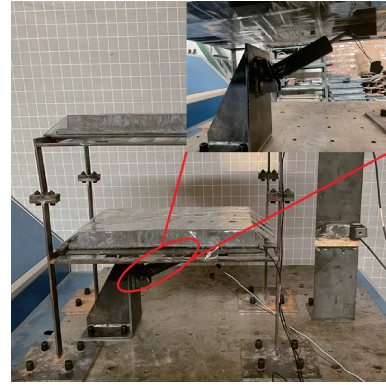


图4 两层框架结构

Fig. 4 The two-story frame structure

表3 振动台主要性能参数

Tab. 3 Main performance parameters of the shaking table

性能参数	取值
最大位移/mm	±50
额定倾覆力矩/(kN·m)	5
最大倾覆力矩/(kN·m)	10
最大加速度/g	2
最大速度/(m·s ⁻¹)	0.9
最大容许载重量/kg	500
最大运行频率/Hz	100
总功率/kW	12.25

阻尼器在频率2 Hz、振幅10 mm的正弦波作用下的力学性能如图5所示。通过试验数据拟合,得到磁流变阻尼器的Bouc-Wen模型参数 k_b 、 c_b 、 α 、 A 、 β 和 γ

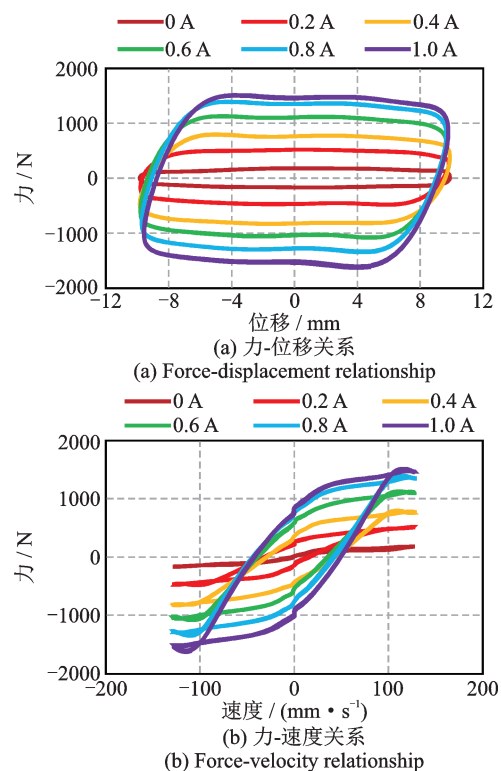


图5 磁流变阻尼器力学性能

Fig. 5 Mechanical properties of the MR damper

分别为:

$$\begin{cases} k_b = 0.2603I^2 - 0.02942I + 1.201 \\ c_b = 1.009I^2 - 0.3946I + 1.675 \\ \alpha = 337.3I^3 - 387.4I^2 + 142.1I - 2.106 \\ A = 23.18I^2 - 44.67I + 31.41 \\ \beta = -0.03969I^2 + 0.01035I - 0.003619 \\ \gamma = 0.3313I^3 - 0.4039I^2 + 0.1391I + 0.009732 \end{cases} \quad (3)$$

采用斜撑的方式将磁流变阻尼器安装在结构首层,即阻尼器上端铰接在结构首层梁板,下端安装在与振动台相连的反力架上。

2.3 控制系统设计

变论域模糊控制系统由 dSPACE1104 控制面板、DS1104 处理器板卡、上位机、传感器、电流驱动器、磁流变阻尼器组成,系统架构如图 6 所示,试验布置如图 7 所示。

分别在结构首层和顶层布设激光位移传感器 (optoNCDT 1420) 和加速度传感器 (PCB333B30),采用 dSPACE1104 采集结构各层位移和加速度。

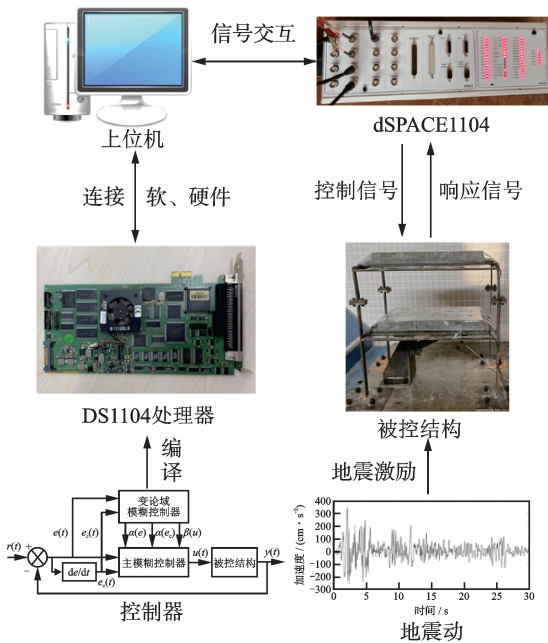


图6 控制系统架构

Fig. 6 Control system architecture



图7 试验布置

Fig. 7 Experimental setup

采集得到的结构振动信息经变论域模糊控制器计算后输出控制信号,并通过 dSPACE 控制电流驱动器对 MR 阻尼器施加控制电流。

以结构首层相对位移作为控制目标,试验设计的变论域模糊控制器为二输入一输出系统,其中输入变量为结构首层位移和速度。位移由激光位移传感器测得,速度通过加速度积分得到。控制系统在 MATLAB/Simulink 平台搭建好后编译到 dSPACE 实时仿真系统中用于试验控制。其中,模糊控制论域由结构首层相对位移和速度响应近似确定,对应工况的地震激励为 0.4g 的 El-Centro 波南北向分量,每层附加质量为 75 kg,控制方法为 OFF 控制。

2.4 试验工况

以 El-Centro 波南北向分量作为地震激励,分别设计了 OFF 控制器、传统模糊控制器和变论域模糊控制器。采用增减附加质量近似模拟结构时变特性,同时考虑地震动峰值加速度的影响,开展 OFF、模糊控制和变论域模糊控制下结构的振动台试验,每种控制方法工况如表 4 所示。

表 4 试验工况

Tab. 4 Experimental working cases

工况	附加质量/kg	峰值加速度/g
1	3×25	0.4
2	2×25	0.4
3	1×25	0.4
4	3×25	0.4
5	3×25	0.3
6	3×25	0.2

3 试验结果分析

3.1 结构动力特性

对无控结构进行白噪声扫频,对结构顶层加速度进行傅里叶变换后得到结构的自振频率为 3.26 Hz,如图 8 所示。结构阻尼比为 1.26%。

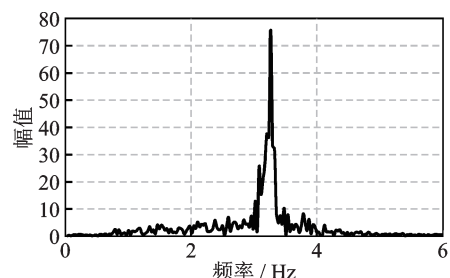


图8 傅里叶变换结果

Fig. 8 Fourier transformation results

3.2 结构质量变化的影响

选取框架结构顶层位移、速度和加速度均方根值作为评价指标,不同附加质量时结构的响应如表5所示。其中,随着结构每层附加质量由3块降低至1块,结构顶层位移减小,各控制器的位移减震率降低,而结构速度和加速度的减震率则先增大后减小。

由于变论域模糊控制能自适应调节论域大小,所有工况中,变论域模糊控制的减震效果均优于传统模糊控制,并且结构附加质量变化对变论域模糊控制的控制效果影响较小,变论域模糊控制相较于传统模糊控制具有更高的稳定性。

附加质量为3块时的初始结构顶层和首层的位移时程如图9所示。OFF、模糊控制和变论域模糊控制下,结构首层和顶层峰值位移分别为9.37、

19.87、6.34 mm和15.04、4.71、11.28 mm;相较于OFF控制,模糊控制对结构首层和顶层峰值位移的控制率分别为32.37%和24.31%,相应的变论域模糊控制的控制率为49.75%和43.26%。

当结构质量发生变化后,以附加质量为1块的工况为例,三种控制器控制下的结构顶层和首层的位移时程如图10所示。OFF控制状态下,结构首层和顶层的峰值位移分别为2.95和6.62 mm;传统模糊控制状态下,结构首层和顶层的峰值位移分别为3.07和6.25 mm;变论域模糊控制状态下,结构首层和顶层的峰值位移分别为2.36和4.80 mm。传统模糊控制存在控制效果差于OFF控制的情况,变论域模糊控制下首层和顶层峰值位移控制率分别为19.77%和27.44%。显然,当附加质量减少为1块

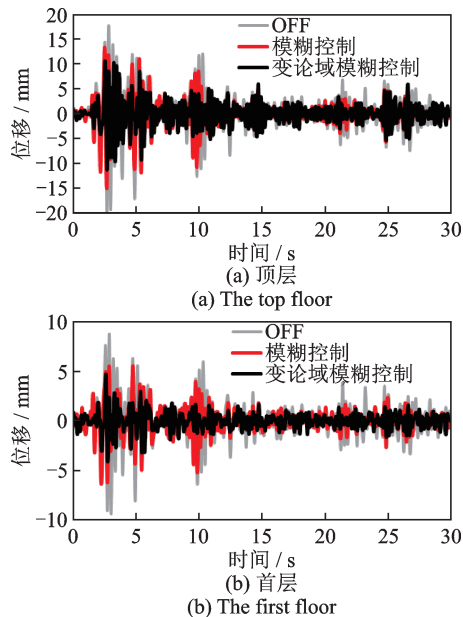


图9 附加质量为3块时的结构位移时程

Fig. 9 The displacement time-history of the structure with three mass blocks

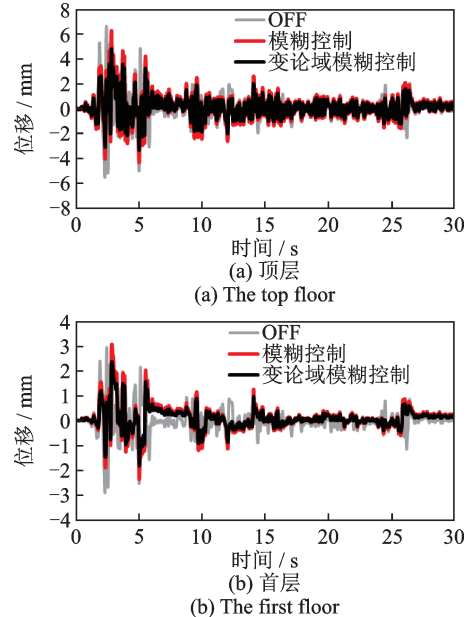


图10 附加质量为1块时的结构位移时程

Fig. 10 The displacement time-history of the structure with a mass block

表5 质量变化下结构顶层动力响应控制效果

Tab. 5 Control effects of dynamic responses of top structure with different mass

质量块数	控制算法	位移响应		速度响应		加速度响应	
		位移均方根/ mm	减震率/ %	速度均方根/ (mm·s ⁻¹)	减震率/ %	加速度均方根/ (mm·s ⁻²)	减震率/ %
3	OFF	3.79	—	72.04	—	1520.00	—
	模糊控制	2.74	27.69	58.58	18.68	1470.00	3.29
	变论域模糊控制	2.33	38.35	55.03	23.61	1571.00	-3.36
2	OFF	2.84	—	59.16	—	1433.60	—
	模糊控制	2.28	19.72	47.12	20.35	1456.24	-1.58
	变论域模糊控制	1.76	38.03	36.24	38.74	1120.19	21.86
1	OFF	1.03	—	23.29	—	734.89	—
	模糊控制	1.01	1.94	26.22	-12.58	1052.62	-43.24
	变论域模糊控制	0.78	24.27	20.17	13.40	809.71	-10.18

时,以附加质量块为3设计的模糊控制器对结构峰值位移的控制效果明显降低,而变论域模糊控制有更好的控制效果。

3.3 峰值加速度的影响

不同峰值加速度时结构的响应均方根如表6所示。以OFF控制为基准,当峰值加速度由0.4g降低至0.2g时,结构顶层位移减小,模糊控制和变论域模糊控制对结构位移的减震率呈现先增后减的趋势;模糊控制对结构速度、加速度的减震率一直在降低,变论域模糊控制则先增后减。同一工况时,变论域模糊控制的控制效果均优于传统模糊控制。当峰值加速度为0.3g时,模糊控制对顶层位移均方根的减震率相较于峰值加速度为0.4g时提高了4.22%,变论域模糊控制对顶层位移均方根的减震率相较于峰值加速度为0.4g时提高了9.17%;当峰值加速度由0.3g降至0.2g时,模糊控制对顶层位移均方根的减震率降低了13.73%,变论域模糊控制对顶层位移均方根的减震率降低了8.73%,由此可知,由于变论域模糊控制在地震动峰值加速度变化的情况下能自适应调节变论域大小,因此在不同峰值加速度激励下均具有较好的控制效果。

以峰值加速度为0.2g的地震动作用下结构振动控制为例,传统模糊控制与变论域模糊控制作用下结构顶层和首层位移响应如图11所示。由图11可知,在整个地震动激励过程,变论域模糊控制下结构首层和顶层位移均小于对应的模糊控制和OFF控制工况,表现出优异的控制效果。

当峰值加速度为0.2g时,OFF控制下,结构首层和顶层峰值位移分别为4.81和10.05 mm;模糊控制下,结构首层和顶层峰值位移分别为0.97和5.26 mm;变论域模糊控制下,结构首层和顶层峰值位移分别为0.72和3.95 mm。模糊控制和变论域模

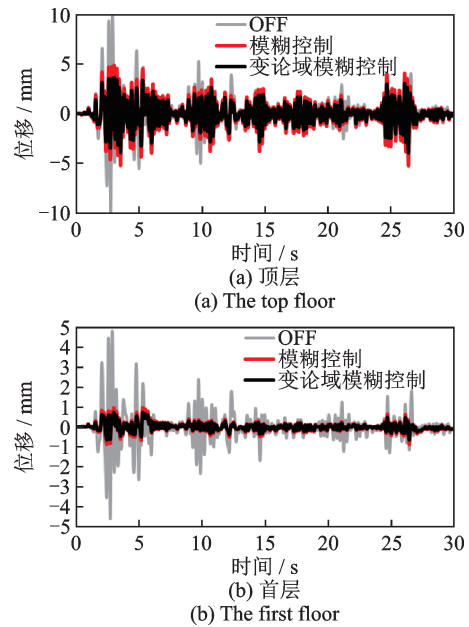


图11 峰值加速度为0.2g时的结构位移时程

Fig. 11 The displacement time-history of the structure at a peak acceleration of 0.2g

糊控制均有效地减小了结构峰值位移响应。

图12为地震动峰值加速度为0.2g时伸缩因子 $\alpha(e(t))$ 的时程曲线。从图12中可以看出,在整个地震动激励过程中,变论域模糊控制伸缩因子 $\alpha(e(t))$ 均小于0.5。原因是模糊控制论域参数以峰值加速度为0.4g的El-Centro地震动设计,当峰值加速度为

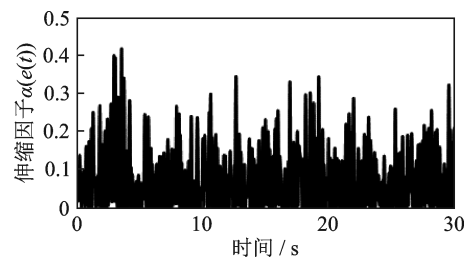


图12 伸缩因子 $\alpha(e(t))$ 时程变化曲线

Fig. 12 The scaling factor $\alpha(e(t))$ time-history change curve

表6 地震动峰值加速度对结构动力响应控制效果的影响

Tab. 6 Control effects of peak ground acceleration on structural dynamic response

峰值 加速度	控制算法	位移响应		速度响应		加速度响应	
		位移均方根/ mm	减震率/ %	速度均方根/ (mm·s ⁻¹)	减震率/ %	加速度均方根/ (mm·s ⁻²)	减震率/ %
0.4g	OFF	3.79	—	72.04	—	1520.00	—
	模糊控制	2.74	27.69	58.58	18.68	1470.00	3.29
	变论域模糊控制	2.33	38.35	55.03	23.61	1571.00	-3.36
0.3g	OFF	2.82	—	52.37	—	1129.95	—
	模糊控制	1.92	31.91	46.67	10.88	1376.55	-21.82
	变论域模糊控制	1.48	47.52	35.90	31.45	1058.89	6.29
0.2g	OFF	1.65	—	30.95	—	687.71	—
	模糊控制	1.35	18.18	36.60	-18.26	1113.33	-61.89
	变论域模糊控制	1.01	38.79	27.45	11.31	835.02	-21.42

0.2g时,控制器通过适当收缩初始模糊论域,达到改善控制效果的目的。在0.2g的El-Centro地震动激励下,变论域模糊控制的伸缩因子在3.53 s左右时取得最大值0.42,此时地震动加速度较大,变论域模糊控制器的输入误差 $e(t)$ 达到最大值,因此伸缩因子取最大值。

4 结 论

以结构初始参数和预估地震强度设计的控制系统,在使用过程中可能会出现被控结构动力特性改变或遭受不可预期地震动激励的情况,此时,控制系统的控制率会降低甚至失效。本文引入了变论域法,基于两层框架结构初始响应设计了变论域模糊控制器,开展了一系列振动台试验,研究得到的主要结论有:

(1)结构质量变化或地震动峰值加速度的变化会降低传统模糊控制器的控制效率,在实际工程中,控制器设计应考虑结构特性和地震动特性的不确定性。

(2)变论域模糊控制器能更有效地降低结构时变特性和地震动不确定性的不利影响。在所开展的研究中,变论域模糊控制器控制效果均优于模糊控制器,并且变论域模糊控制在结构质量变化或峰值加速度变化时具有稳定的控制率。

(3)变论域模糊控制器的伸缩因子能够根据被控时变系统实时调整模糊论域的大小,实现更优越、更稳定的控制效果。

(4)振动台试验验证了所设计变论域模糊控制器的有效性,该控制器控制效率高、鲁棒性强,理论上能运用于实际建筑物的振动控制。具体使用时,将所建立的控制方法写入主控芯片,通过实时采集加速度并经模数转换传递给控制器,控制器计算得到当前状态结构的最优控制力,确定智能控制装置的控制电流,经电流驱动器为磁流变阻尼器等智能装置供电,实现对实际框架结构的减震控制。

参考文献:

[1] 朱宏平,沈文爱,雷鹰,等.结构减隔震控制系统性能监测、评估与提升[J].工程力学,2020,37(1):1-16.
ZHU Hongping, SHEN Wenai, LEI Ying, et al. Performance monitoring, evaluation, and improvement of structural vibration mitigation or isolation systems[J]. Engineering Mechanics, 2020,37(1):1-16.

[2] MOGHADDASIE B, JALAEFAR A. Optimization of LQR method for the active control of seismically excited structures[J]. Smart Structures and Systems,

2019, 23(3): 243-261.

[3] PRASAD L B, TYAGI B, GUPTA H O. Optimal control of nonlinear inverted pendulum system using PID controller and LQR: performance analysis without and with disturbance input[J]. International Journal of Automation and Computing, 2014, 11: 661-670.

[4] 王翼,张凤登,吉妍,等.基于极点配置与最优控制的磁悬浮系统控制器[J].软件,2019,40(7):1-7.
WANG Yi, ZHANG Fengdeng, JI Yan, et al. Magnetic levitation system controller based on pole configuration and optimal control[J]. Computer Engineering and Software, 2019, 40(7): 1-7.

[5] 谢永芳,桂卫华,吴敏.基于线性矩阵不等式的分散 H_2/H_∞ 控制的次优设计[J].自动化学报,2000,26(2):263-266.
XIE Yongfang, GUI Weihua, WU Min. The suboptimal design of decentralized H_2/H_∞ control based on linear matrix inequality[J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(2): 263-266.

[6] YU Y, LI Y C, LI J C. Parameter identification of a novel strain stiffening model for magnetorheological elastomer base isolator utilizing enhanced particle swarm optimization[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2015, 26(18): 2446-2462.

[7] 王慧萍,孙利民,胡晓伦.基于可变摩擦阻尼力的斜拉索半主动控制算法[J].工程力学,2015,32(11):94-99.
WANG Huiping, SUN Limin, HU Xiaolun. Semiactive control strategy study on vibration control of stay cables with variable friction damper force[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(11): 94-99.

[8] 王楠,潘忠文,陈照波.磁流变整星隔振平台频域加权LQR控制研究[J].力学与实践,2018,40(2):173-179.
WANG Lei, PAN Zhongwen, CHEN Zhaobo. Frequency-shaping LQR control of whole-spacecraft vibration isolation platform based on mr damper[J]. Mechanics in Engineering, 2018, 40(2): 173-179.

[9] 寇发荣,高亚威,景强强,等.基于路面等级自适应的主动悬架LQG控制[J].振动与冲击,2020,39(23):30-37.
KOU Farong, GAO Yawei, JING Qiangqiang, et al. LQG control of active suspension based on adaptive road surface level[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(23): 30-37.

[10] 贾忠益,姜陶然,李涛.基于未知输入观测器的主动式座椅悬架鲁棒 H_∞ 控制[J].扬州大学学报(自然科学版),2019,22(1):32-38.
JIA Zhongyi, JIANG Taoran, LI Tao. Robust H_∞ control of an innovative active seat suspension based on unknown observer[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2019, 22(1): 32-38.

[11] 李忠信,王大龙,庄佳才,等.基于遗传模糊控制的风电

- 机组偏航系统疲劳载荷研究[J]. 动力工程学报, 2022, 42(8): 745-752.
- LI Zhongxin, WANG Dalong, ZHUANG Jiakai, et al. Research on fatigue suppression of wind turbine yaw system based on genetic fuzzy control[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(8): 745-752.
- [12] 郭军慧,周岱,李磊,等.空间网壳结构振动问题的改进神经网络控制[J].工程力学, 2008, 25(10): 86-91.
- GUO Junhui, ZHOU Dai, LI Lei, et al. Improved neural network predictive control for dynamic response of spatial reticulated shell structures[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(10): 86-91.
- [13] 朱敏,赵聪聪,臧昭宇.基于改进型模糊神经网络PID阀位控制研究[J].现代制造工程, 2022(1): 125-131.
- ZHU Min, ZHAO Congcong, ZANG Zhaoyu. Research on position control of valve based on improved fuzzy neural network PID[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(1): 125-131.
- [14] 潘兆东,谭平,刘良坤,等.基于自适应RBF神经网络算法的建筑结构递阶分散控制研究[J].土木工程学报, 2018, 51(1): 51-57.
- PAN Zhaodong, TAN Ping, LIU Liangkun, et al. Hierarchical decentralized control of building structure based on adaptive RBF neural network algorithm[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(1): 51-57.
- [15] 邱志成,杜佳豪.基于神经网络的多柔性梁耦合结构振动控制[J].信息与控制, 2021, 50(6): 669-676.
- QIU Zhicheng, DU Jiahao. Vibration control of multiple flexible beams coupling structure based on neural network[J]. Information and Control, 2021, 50(6): 669-676.
- [16] 马天兵,丁威海,周青,等.基于改进滑模变结构的加筋板振动控制研究[J].安徽理工大学学报(自然科学版), 2021, 41(1): 7-12.
- MA Tianbing, DING Weihai, ZHOU Qing, et al. Research on vibration control of stiffened plate based on improved sliding mode variable structure[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 41(1): 7-12.
- [17] 石运东,杜洋,韩庆华,等.半主动控制三维缩尺隔振楼板系统振动台试验研究[J].工程力学, 2021, 38(7): 99-107.
- SHI Yundong, DU Yang, HAN Qinghua, et al. Shaking table testing on a scaled semi-active controlled three-dimensional floor isolation system[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(7): 99-107.
- [18] 郭佳,葛楠.结构振动磁流变阻尼器模态模糊控制算法研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(2): 267-272.
- GUO Jia, GE Nan. Research on fuzzy modal algorithm for vibration control with magnetorheological damper [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2020, 52(2): 267-272.
- [19] 马驰骋,罗亚军,张希农,等.基于模糊PID控制器的变质量-柔性梁结构振动主动控制[J].振动与冲击, 2018, 37(23): 197-203.
- MA Chicheng, LUO Yajun, ZHANG Xinong, et al. Vibration active control of a flexible beam with time-varying mass based on fuzzy PID controller[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(23): 197-203.
- [20] 陈宇,石运东,吕杨,等.应用MR阻尼器的连续梁桥地震损伤控制方法[J].振动与冲击, 2021, 40(3): 103-108.
- CHEN Yu, SHI Yundong, LYU Yang, et al. Seismic damage control method of continuous girder bridge with MR dampers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(3): 103-108.
- [21] 宁响亮,谭平,周福霖.公路桥梁振动控制的变论域自适应模糊控制算法[J].振动工程学报, 2009, 22(3): 262-267.
- NING Xiangliang, TAN Ping, ZHOU Fulin. Vibration control of highway bridge using variable universe adaptive fuzzy control algorithm[J]. Journal of Vibration Engineering, 2009, 22(3): 262-267.
- [22] 宁响亮,谭平,叶茂,等.基于自适应模糊控制算法的公路桥梁MR半主动控制[J].振动与冲击, 2009, 28(1): 32-35.
- NING Xiangliang, TAN Ping, YE Mao, et al. Semi-active control with MR damper for highway bridge based on adaptive fuzzy control algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(1): 32-35.
- [23] LI H X, MIAO Z H, LEE E S. Variable universe stable adaptive fuzzy control of a nonlinear system[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2002, 44(5-6): 799-815.

通信作者: 吕 杨(1984—),男,博士,教授。

E-mail: lvyangtju@163.com