

结构振动磁流变阻尼器模态模糊控制算法研究

郭 佳, 葛 楠

(华北理工大学 建筑工程学院, 河北 唐山 063210)

摘要: 提出了磁流变阻尼器模态模糊控制算法, 可以改进磁流变阻尼器半主动控制现有的算法, 同时使所需要的模糊推理数量处于可接受范围之内. 建立了一栋 20 层磁流变阻尼器半主动模态模糊控制的分析模型, 并利用 Matlab 语言编制了求解软件. 计算结果表明: 所提出的算法对层间位移、楼层位移和楼层速度的减震效果较为显著, 只对第一阶振型控制就可收到明显的效果. 磁流变阻尼器的参数指标 f_{dmax} 越大, 层间位移、楼层位移和楼层速度的最大值的减震效率越高, 且沿楼层高度分布均匀可达 60% 左右. 但 f_{dmax} 增大时, 楼层加速度的最大值随之增大, 因此对加速度减震有要求的结构不宜采用此算法.

关键词: MR 阻尼器; 半主动控制; 振型模糊控制; 地震动力反应; 层间位移

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)02-0267-06

Research on fuzzy modal algorithm for vibration control with magnetorheological damper

GUO Jia, GE Nan

(College of Civil and Architecture Engineering, North China University of Science and Technology,
Tangshan 063210, China)

Abstract: Fuzzy mode control algorithm for structural vibration mitigation with magnetorheological damper was suggested to improve present algorithm and to reduce amount of fuzzy reasoning during control process. A 20-layer active vibration fuzzy control structural model was presented and solved with software prepared with Matlab language. Results show that fuzzy control algorithm for magnetorheological damper has relatively notable seismic mitigation efficiency for story drift, storey displacement and storey velocity. It is shown that satisfied efficiency could be expected by applying control action only upon the 1st mode. The larger the parameter index f_{dmax} of the magnetorheological damper is, the more notable the seismic mitigation efficiency, and the damping efficiency is as high as about 60%. Since storey acceleration might be amplified, fuzzy mode control algorithm for magnetorheological dampers are not recommended for application on buildings with necessity of acceleration mitigation.

Key words: magnetorheological damper; semi-active control; fuzzy mode control; seismic dynamic response; interlayer displacement

结构振动半主动控制兼备了主动控制与被动控制的特征, 仅需少量的能量输入即可获得良好的控制效果. 磁流变(MR)阻尼器是磁流变液的流动性随着磁场强度的变化而能够迅速转化的半主动控制装置, 具有构造简易、可逆性强、响应速度快、能耗低、可远程通讯等优点, 在土木工程结构减震领域得到广泛应用.

Hiwatashi T^[1]介绍了一个三层框架结构振动台试验, 验证了磁流变阻尼器作为半主动装置的控制系统和控制效果; Jung H J^[2]分别探讨了半主动控制算法、基于模糊逻辑的控制算法和 MR 阻

尼器的控制系统对结构减震的有效性及适用条件; Choi Kang-Min 等^[3]验证了加入 MR 变阻尼器的半主动模糊控制算法更利于降低地震反应. 董立鞅, 董毅^[4]对三层框架模型分别进行单一及组合系统的七种振动台试验, 结果表明: 基于 MR 阻尼器的控制系统有效, 具有可靠、能源消耗低的特点, 并且与其他控制装置组成的混合控制系统更具抗震性. 张春巍, 欧进萍^[5]论证了针对 MR 阻尼器所提出的两种算法是理想的半主动控制算法, 适用性好、性能优、效率高. 汪建晓等^[6]从多角度研究了 MR 阻尼器随电流和磁场强度变化的动态特

性及应用. 黄剑伟等^[7]对空间结构进行振动模糊控制, 结果表明模糊控制器构造简单, 模糊控制效果显著. 张新刚^[8]分析了磁流变阻尼器的设计原理, 并论证了磁流变阻尼器应用范围广、抗冲击性好的特征. 潘之茂^[9]对磁流变阻尼器控制进行全面的分析和测试, 结果表明: 该控制器的输入和输出直接影响阻尼的性能, 磁流变阻尼器更是一种稳定可靠的智能减震控制装置.

目前, 模糊逻辑、神经网络、遗传算法等人工智能的研究成果已经在结构振动控制领域得到应用. 其共同的特点是不需要精确的结构模型, 具有良好的鲁棒性, 调节简单, 但在算法上还有待融入新的思想. 重要思想是体系的降阶, 即削减模糊推理数量. 从结构振动分析的模态展开法出发, 将振型坐标作为模糊量, 能缩减自由度数目, 即缩减模糊关系运算(模糊推理)时模糊子集的总数, 实现模型降阶, 使结构振动模糊控制推理过程得到进一步简化, 实现振动实时控制. 本文建立一栋 20 层的多自由度结构体系模型, 各层均设置 MR 阻尼器半主动控制装置; 然后根据结构地震动力反应振动控制目标, 制定模糊规则, 并采用 MATLAB 编写求解软件进行计算, 最后分析评价半主动 MR 阻尼器模态模糊控制的减震效果.

1 磁流变阻尼器半主动振动模糊控制原理

1.1 结构模型运动方程

设置 MR 阻尼器的半主动控制装置结构模型, 构造如图 1. MR 阻尼器是通过转换磁流变液的状态来调节阻尼特性, 不需要提供外部能量, 是半主动控制装置的关键. 将 MR 阻尼器与结构构件结合, 利用结构层间的相对位移和相对速度, 使阻尼器活塞产生运动来调整磁场强度产生的阻尼力, 并使其趋于最优控制力. 图 2 是结构分析模型.

1.2 结构运动方程的建立

磁流变阻尼器不仅适用被动耗能减震系统, 也可作半主动控制器. 将 MR 阻尼器与结构构件结合, 利用结构层间的相对位移和相对速度, 调整磁场强度产生的阻尼力. 在外扰力作用下多自由度体系半主动控制的运动方程可表示为^[10-11]:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F + B_s U_s \quad (1)$$

其中 u 是层间位移差; $F = [F_1(t), F_2(t), \dots, F_n(t)]^T$ 是外扰力列向量; $U_s = [U_{d1}, U_{d2}, \dots, U_{dn}]^T$ 是 MR 阻尼器阻尼力列向量, M 、 C 、 K 分别是体系质量矩阵、固有阻尼矩阵和刚度矩阵. B_s 是 MR 阻尼器位

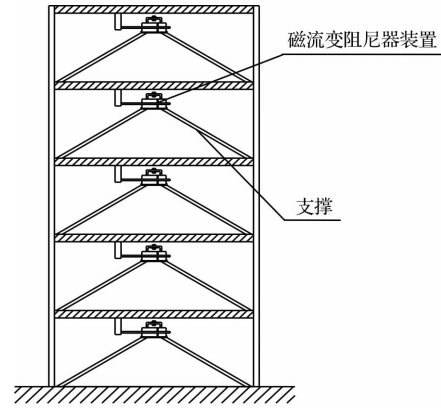


图 1 结构模型

Fig. 1 Structural model

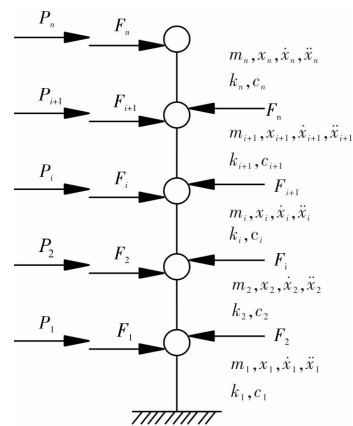


图 2 结构分析模型

Fig. 2 Structural analysis model

置矩阵.

磁流变阻尼器的控制力 $U_{di}(t)$ 可以表示为^[10]:

$$U_{di}(t) = -c_{di}\dot{x}_i(t) - f_{di}(t)\text{sgn}[\dot{x}_i(t)] \quad (2)$$

式中 $\dot{x}_i(t)$ 是楼层 i 阻尼器外套与活塞之间的速度差; c_{di} 和 $f_{di}(t)$ 是磁流变阻尼器的粘滞阻尼系数和可调库仑力, c_{di} 不可调节, 而 $f_{di}(t)$ 可以通过改变阻尼器的输入电压或电流从而改变阻尼器的磁场强度来调节; 这两个参数可以按结构半主动控制算法根据优化设计结果确定, 由于复杂的非线性关系, 不能通过式(1)和式(2)确定最优控制力, 因此通常采用简单 Bang-Bang 或最优 Bang-Bang 控制算法确定阻尼力的大小.

(1)简单 Bang-Bang 磁流变阻尼控制算法可以表示为:

$$U_{di}(t) =$$

$$\begin{cases} c_{di}\dot{x}_i(t) + f_{dy\max}\text{sgn}[\dot{x}_i(t)] & [x_i(t)\dot{x}_i(t) > 0] \\ c_{di}\dot{x}_i(t) + f_{dy\min}\text{sgn}[\dot{x}_i(t)] & [x_i(t)\dot{x}_i(t) \leq 0] \end{cases} \quad (3)$$

(2)最优 Bang-Bang 磁流变阻尼控制算法可以表示为:

$$U_{di}(t) = \begin{cases} c_{di}\dot{x}_i(t) + f_{dymax}\operatorname{sgn}[\dot{x}_i(t)] & [u_i(t)\dot{x}_i(t) < 0] \\ c_{di}\dot{x}_i(t) + f_{dymn}\operatorname{sgn}[\dot{x}_i(t)] & [u_i(t)\dot{x}_i(t) \geq 0] \end{cases} \quad (4)$$

u_i 为最优控制力(可以是闭环 AMD 最优控制或其他类型的最优控制). $U = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T$ 是楼层 i 的控制力. 求最优控制力 U 的要领是, 先由 Riccati 方程求出反馈矩阵后, 再求最优控制力.

再将 $U_s = [U_{d1}, U_{d2}, \dots, U_{dn}]^T$ 代入到运动方程(1)就可以求得半主动控制结构地震动力反应.

1.3 磁流变阻尼器半主动振动模糊控制规则建立

在(3)式及 4(式)用 $U_d = -c_d\dot{x}_i(t) - [f_{dmin} + g(f_{dmax} - f_{dmin})]\operatorname{sgn}[\dot{x}_i(t)]$, 则以上简单 bang-bang 及最优 bang-bang 相当于取 $g=1$ 及 $g=0$ 的情形, 控制判断过于粗糙. 采用模糊控制算法, 将 g 转化为模糊子集, 并与结构体系状态变量之间建立模糊关系, 就可以实现磁流变阻尼器模糊控制.

为了实现降阶, 提出如下的模态模糊控制方法.

(1)确定体系状态变量的论域. 引入模态坐标 q_1 及其导数 \dot{q}_1 代替原来体系的状态变量 X, \dot{X} , 仅取第一阶振型进行控制. 确定位移、速度的论域的方式可以依据无外扰体系最大控制力作为阶跃作用时结构的最大反应来确定或依据结构允许的范围来确定.

(2)将每个变量的论域均划分为 7 个模糊子集, 分别为 NB、NM、NS、ZE、PS、PM、PB, g 的 7 个模糊子集为 G1、G2、G3、G4、G5、G6、G7 采用三角形隶属函数, 则界限点的值分别为 $0.5/7, 1.5/7, 2.5/7, 3.5/7, 4.5/7, 5.5/7, 6.5/7$. 模态坐标 q_1 及其导数 \dot{q}_1 和系数 g 的模糊量共有 $7^3=343$ 种组合, 即为总的模糊关系.

(3)确定模糊控制规则.

建立模糊控制规则时不考虑地震力, 属于闭环控制. 根据总能量最小准则^[10], 即动能和势能的总和最小时各个子集中元素的组合作为控制规则. 在 t_i 时刻, 选取一组控制规则 $(q_1^i, \dot{q}_1^i, g^{i+1})$ 作为输入值, 计算 $t_i + \Delta t$ 时刻的 $(q_1^{i+1}, \dot{q}_1^{i+1})$, 并取对应总能量最小的 $(q_1^i, \dot{q}_1^i, g^{i+1})$ 作为控制规则. $t_i + \Delta t$ 时刻 $(q_1^{i+1}, \dot{q}_1^{i+1})$ 可以按照如下的动力方程计算:

$$\ddot{q}_1^{i+1} + 2\xi\omega_1\dot{q}_1^{i+1} + \omega_1^2q_1^{i+1} = f^{i+1} \quad (5)$$

其中 f^{i+1} 为与 g^{i+1} 对应的磁流变控制力(模糊值). 这种方法确定模糊控制规则具有方法简明、

运算量少, 可以很容易地扩展到多变量系统, 适合将规则编程进行自动提取, 避免主观盲目性, 确保控制系统安全可靠的优点.

1.4 模糊控制实施

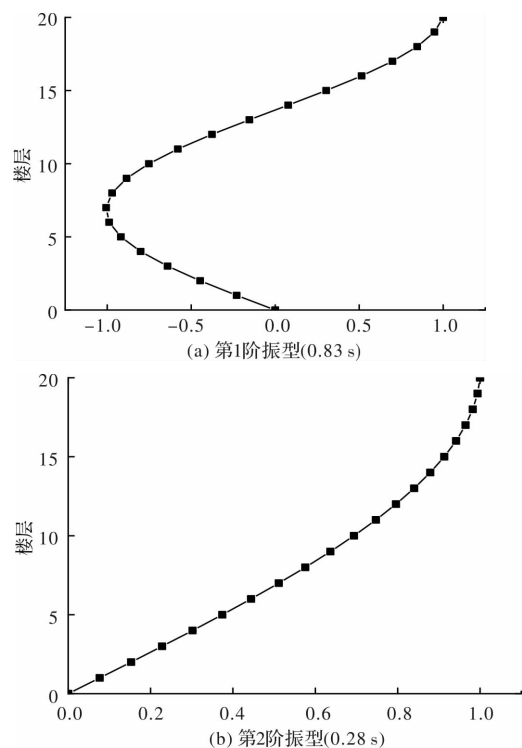
当地震发生时, 即开始实施模糊控制过程, 需要实时测量结构地震动力反应值 X, \dot{X} , 由(5)式计算模态坐标精确值并模糊化, 得到 q_1^i, \dot{q}_1^i , 再根据控制规则表确定 f^{i+1} (实际通过编制软件中 if-then 语句读取), 据此确定所需要的磁场-电流强度, 由控制器向磁流变阻尼器发出指令实现控制过程.

2 控制实例及效果分析

评价模糊控制算法的减震效果, 最可行的办法是采用结构模型振动台试验, 也可以采用数值计算预测的方法, 根据计算结果检验模糊控制规则的减震效果. 为了方便起见, 根据结构动力反应运动方程的预测结果, 评价模态模糊控制的减震效果.

为了验证结构体系 MR 阻尼器半主动减震效果, 以一个 20 层建筑结构为例, 简化成一个 20 个集中质量的离散多自由度系统. 结构基本参数有 $m_i=293.3 \text{ t}$, $k_i=28950000 \text{ kN/m}$, 其前三阶振型如图 3 所示. 阻尼矩阵采用 Rayleigh 阻尼的形式^[12]. 输入 Elcentro 地震波, 最大水平地面加速度为 4.0 m/s^2 . 每层均安装 MR 阻尼器.

模糊控制规则与磁流变阻尼器提供的 c_d, f_{dmax}, f_{dmin} 有关. 其中的一个模糊控制图如图 4 所



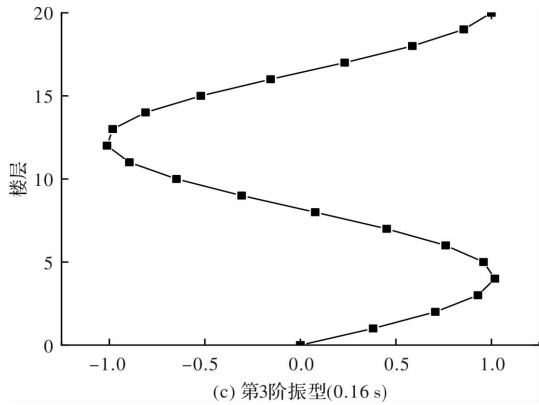


图 3 前三阶振型图

Fig. 3 Mode diagram

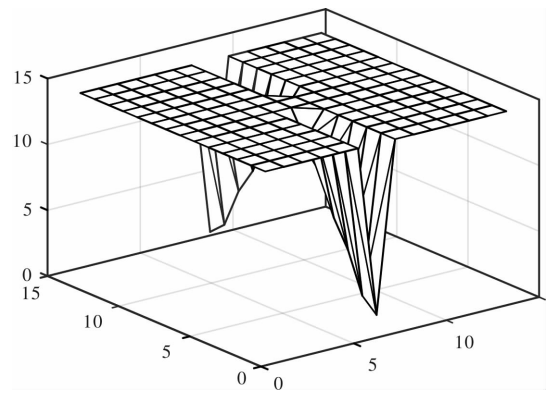


图 4 模糊控制规则图

Fig. 4 Fuzzy control rule diagram

示. 动力反应计算结果如表 1 及图 4-图 6.

表 1 控制方式与地震动力反应

楼层	AMD				磁流变阻尼器模糊控制 $f_{\text{dmax}}=20\ 000\ \text{kN}$				无控制	
	层间位移 /mm	效率 /%	楼层加速度 / $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	效率 /%	层间位移 /mm	效率 /%	楼层加速度 / $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	效率 /%	层间位移 /mm	楼层加速度 / $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
0—1(1)	4.84	79.5	1.60	38.7	9.67	59.1	16.50	—532.6	23.62	2.61
1—2(2)	4.76	79.6	2.51	51.0	9.52	59.2	16.50	—222.4	23.34	5.12
2—3(3)	4.62	79.8	3.18	57.0	9.36	59.1	16.50	—123.1	22.86	7.39
3—4(4)	4.75	78.7	3.79	59.7	9.13	59.0	17.70	—88.0	22.28	9.42
4—5(5)	4.87	77.5	4.06	64.3	8.81	59.3	18.10	—59.3	21.62	11.36
5—6(6)	4.94	76.3	4.34	66.4	8.50	59.2	18.20	—41.1	20.83	12.90
6—7(7)	4.98	74.9	5.52	60.6	8.19	58.7	18.20	—30.1	19.83	13.99
7—8(8)	4.97	73.3	6.37	56.6	7.76	58.3	18.80	—28.0	18.60	14.69
8—9(9)	4.91	71.3	6.47	59.7	7.37	57.0	19.10	—19.0	17.13	16.06
9—10(10)	4.80	69.2	5.41	68.6	6.89	55.7	19.30	—11.9	15.57	17.25
10—11(11)	4.67	66.8	5.06	71.6	6.37	54.7	19.50	—9.4	14.06	17.83
11—12(12)	4.49	65.5	5.43	69.4	5.88	54.8	20.20	—13.8	13.01	17.75
12—13(13)	4.26	65.0	5.91	65.5	5.42	55.5	20.30	—18.6	12.18	17.12
13—14(14)	3.97	64.9	6.34	60.8	4.95	56.2	20.80	—28.6	11.30	16.17
14—15(15)	3.61	64.8	6.55	57.4	4.36	57.5	20.70	—34.8	10.26	15.36
15—16(16)	3.16	64.9	6.47	58.5	3.66	59.4	20.40	—30.9	9.00	15.58
16—17(17)	2.63	65.1	5.95	63.4	2.92	61.2	21.20	—30.4	7.53	16.26
17—18(18)	2.03	65.2	5.46	69.5	2.12	63.7	21.00	—17.3	5.84	17.90
18—19(19)	1.37	65.67	5.88	69.4	1.43	64.2	21.30	—10.9	3.99	19.20
19—20(20)	1.22	39.8	6.25	68.7	0.74	63.3	14.10	29.4	2.02	19.96

3 计算结果分析

由表 1 可知, 当 MR 阻尼器的参数 $f_{\text{dmax}}=20\ 000\ \text{kN}$ 时, 对于建筑层间位移的减震效果显著, 减震效率高达 55%~63%, 且沿结构各楼层的减震效率分布较均匀, 接近 AMD 主动控制的减震效果; 另论楼层加速度方面, 所提出的模态模糊控制对整体结构的减震效果不理想, 效率均呈

现负态且沿楼层变化不均匀. 但随着楼层的增加, 楼层加速度的减震效率有所消减. 这也验证了结构振动半主动控制的特点: 对于刚性结构, 满足位移峰值、速度峰值和加速度峰值同时减小是不可能存在的, 由位移和速度确定结构控制力的大小, 与加速度无关. 因为半主动控制是通过输入少量的能源调节作动器, 使其自动地根据被控结构的侧向位移和速度, 尽可能的达到最优控制力,

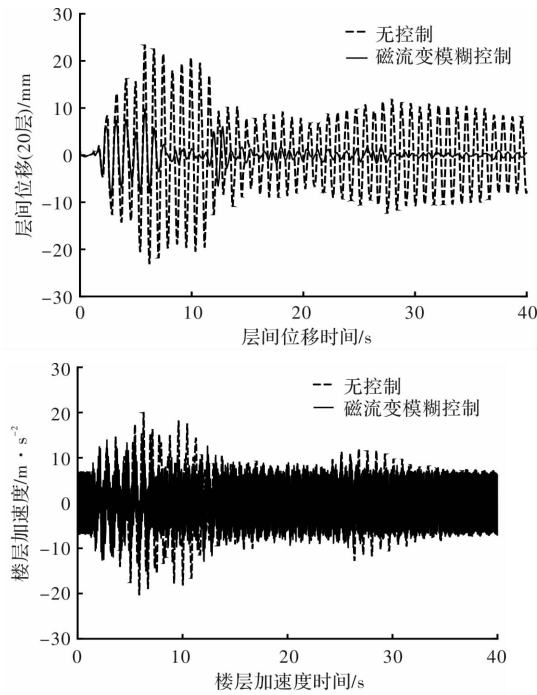
图5 结构地震动力反应时程($fd=20\ 000\ \text{kN}$)

Fig. 5 Time histories of structural seismic dynamic response

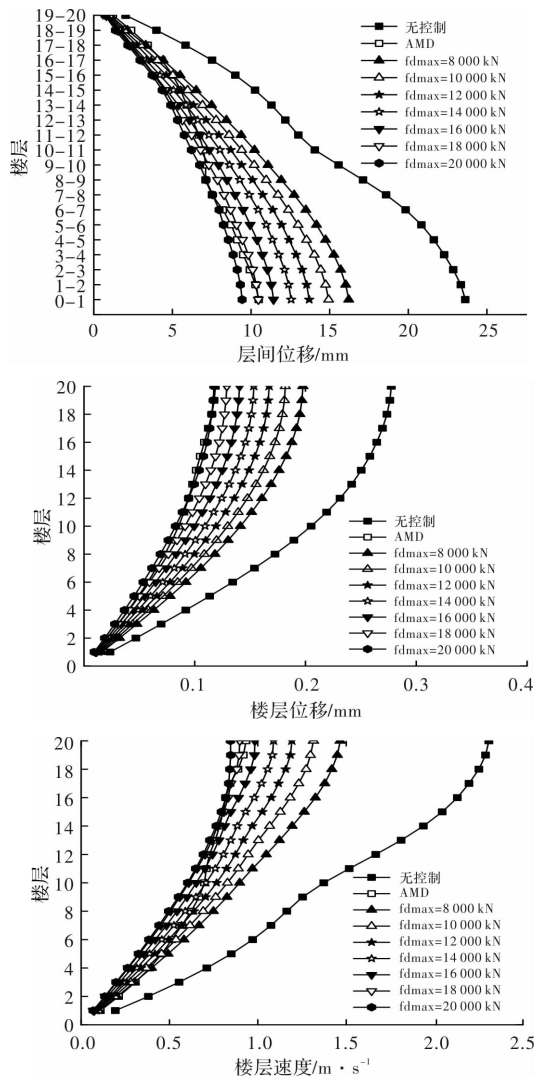


图6 结构地震动力反应

Fig. 6 Structural seismic dynamic response

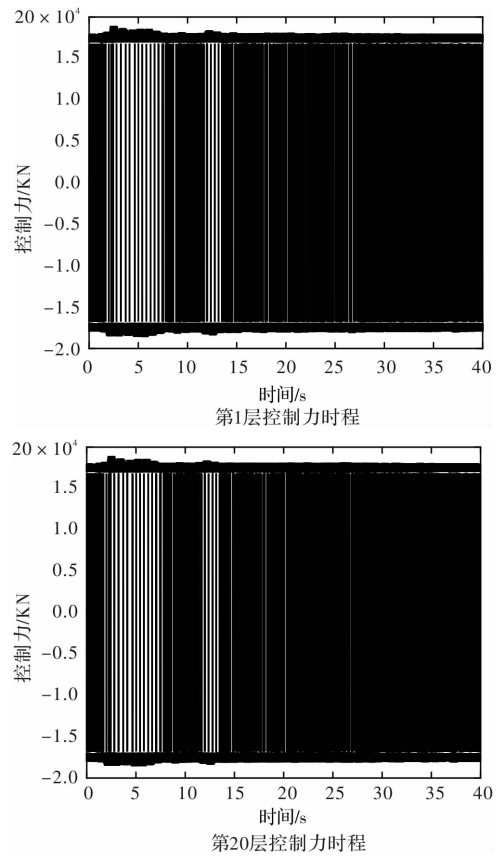


图7 半主动控制力时程

Fig. 7 Time histories for semi-active control forces

与加速度的增加并不矛盾。但对加速度有影响的机构,如展览厅、博物馆及存放精密仪器的房屋等,可能不会满足其要求,建议不宜采用此算法。

由图5可知,此算法对层间位移的控制效果较好,而楼层加速度基本不受控制。

由图6可以看出,AMD主动控制的减震效果最优,其次是利用以上的方法建立模糊控制规则,实施模糊控制也可达到一定的减震效果。除结构体系的楼层加速度外,其他的结构动力反应均被明显控制,下半部分的楼层反而比无控制时加速度值大,这是由半主动控制的特点决定的。在本算法中,由于(1)半主动控制未达到最优控制力;

(2)采用了就近取整的模糊化方法,使模糊量与精确量之间存在稳态误差,因此,模糊控制的效果与AMD最优控制的效果也有差距.采用模糊控制方法有希望改善单纯的简单 bang-bang 以及最优 bang-bang 的只考虑 $g=1$ 和 $g=0$ 的情况. f_{dmax} 与减震效果呈正相关的趋势,但是当 f_{dmax} 增加到较大的数值时,进一步增加其数值对改善减震效果很小.这也说明当采用模糊控制策略时,单方面增大磁流变阻尼器的 f_{dmax} 可能不会提高减震效果.一般情况下,实施控制时,可以根据规范要求的允许值确定各个变量的论域值,通过试算、比较等,再确定磁流变阻尼器的出力值. AMD 主动最优控制需输入大量的外部能源,以达到理想的减震效果,但具有对其控制系统的可靠性要求高,成本高、控制技术繁杂等弊端.对于半主动控制,若要达到与 AMD 控制同样的效果,需具备很大 f_{dmax} ,实际上也是不易实现的.但是半主动控制即融合了主动控制和被动控制的优点,又克服二者的缺点,具有所需外部能源很少、装置简单的特点,也能具有一定的减震效果,但这种控制算法对于楼层加速度的减震效果不理想,因此对楼层加速度要求有要求的结构不建议采用.

4 结论

(1)磁流变阻尼器模糊控制通过调整 f_{dmax} 的大小,对层间位移、楼层位移和楼层速度取得较明显的减震效果,其减震效率高达 60% 左右.

(2)只有对第一阶模态控制就能有明显的减振效果,所需的阻尼力数值较大.

(3)磁流变阻尼器半主动模糊控制对楼层加速度起不到控制作用,故对加速度的减震效果有要求的结构不应采取本控制算法.

参考文献 References

- [1] HIWATASHI T, SHIOZAKI Y, FUJITANI H, Minowa C, Soda S. Shaking table tests on semi-active base-isolation system by magnetorheological fluid damper. Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2003, 5056: 400-11.
- [2] JUNG H J, CHOI K M, SPENCER B F, et al. Application of some semi-active control algorithms to a smart base-isolated building employing MR dampers [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2006, 13(2-3): 693-704.
- [3] CHOI Kang-Min, CHO Sang-Won, JUNG Hyung-Jo, et al. Semi-active fuzzy control for seismic response re-

- duction using magnetorheological dampers[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 33(6):723-736.
- [4] 董立鞞,董毅.基于磁流变阻尼器的多种控制组合振动台研究[J].科学技术与工程,2013, 13(16):4512-4516. DONG Liwei, DONG Yi. Study on a variety of control combined vibration table based on magnetorheological damper [J]. Science, technology and engineering, 2013, 13(16):4512-4516.
- [5] 张春巍,欧进萍.结构磁流变阻尼半主动控制的改进算法与仿真分析[J].世界地震工程,2003,19(1):37-43. ZHANG Chunwei, OU Jinping. Improved semi-active control algorithm and simulation analysis for vibration reduction of structures using MR dampers[J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(1):37-43.
- [6] 汪建晓,孟光.磁流变液阻尼器用于振动控制的理论及实验研究[J].振动与冲击,2001, 20(2):39-15. WANG Jianxiao, MENG Guang. Theoretical and Experimental Study on the Vibration Control by Magneto-rheological Fluid Dampers[J]. Journal of vibration and shock, 2001, 20(2):39-15.
- [7] 黄剑伟,刘红玉,郭军慧,等.基于MR阻尼器的空间网壳结构模糊控制[J].结构工程师,2007,23(5):30-34. HUANG Jianwei, LIU Hongyu, GUO Junhui et al. Fuzzy control of spatial reticulated shell structure based on MR damper[J]. Structural engineers, 2007, 23(5):30-34.
- [8] 张新刚.磁流变阻尼器在结构振动控制中的应用[D].哈尔滨工程大学硕士论文,2004. ZHANG Xingang. Application of MR damper in structure vibration control[D]. Harbin Engineering University, 2004.
- [9] 潘之茂.磁流变阻尼控制器的研制及其性能测试系统设计[D].武汉理工大学硕士论文,2003. PAN Zhimao. Design of magneto-rheological damping controller and its performance test system[D]. Wuhan University of Technology, 2003.
- [10] 欧进萍.结构振动控制[M].北京,科学出版社,2003. OU Jinping. Structural vibration control[M]. Beijing, Science Press, 2003.
- [11] 李锦华,李春祥,陈水生.高架桥结构参数对基于MR阻尼器半主动控制的影响[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2009,41(6):805-810. LI Jinhua, LI Chunxiang, CHEN Shuisheng. Influence of structural parameters of viaduct on semi-active control based on MR damper[J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & tech. (Natural Science Edition), 2009, 41(6):805-810.
- [12] CLOUGH R, W, PENZIEN J, Structural Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 1981.

(编辑 桂智刚)