

文章编号:1673-5005(2014)06-0140-08

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2014.06.021

一种对高层建筑振动半主动控制的新策略

马涌泉, 邱洪兴

(东南大学土木工程学院, 南京 210096)

摘要:为了解决调谐质量阻尼器(TMD)的有效工作频域较窄和主动质量阻尼器(AMD)的控制力存在时滞效应的问题,提出在TMD中嵌入磁流变阻尼器(MRD)的新型半主动控制装置——TMMRD。采用模糊控制器取代传统滑动模态控制(SMC)的不连续“开关”式控制和等效控制的不确定性规则,基于Lyapunov函数设计自适应模糊控制律,结合改进的限幅最优(MCO)控制算法提出适合TMMRD的自适应模糊滑动模态半主动控制(ASMC/MCO)策略。运用TMD被动控制、ASMC/MCO半主动控制、ASMC主动控制和线性二次型高斯(LQG)主动控制分别对一座30层钢框架结构进行地震响应分析。研究表明:提出的ASMC控制策略的鲁棒性明显优于LQG;ASMC/MCO控制和ASMC控制下的减震效果明显优于TMD控制和LQG控制;ASMC/MCO的半主动控制力与ASMC的主动控制力吻合很好。

关键词:高层建筑; 调谐质量阻尼器; 磁流变阻尼器; 自适应模糊控制; 滑动模态控制; Lyapunov函数

中图分类号: O 328; TU 973.31 **文献标志码:** A

引用格式: 马涌泉, 邱洪兴. 一种对高层建筑振动半主动控制的新策略[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2014, 38(6):140-147.

MA Yongquan, QIU Hongxing. New semi-active control strategy for vibration suppression of high-rise building[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(6):140-147.

New semi-active control strategy for vibration suppression of high-rise building

MA Yongquan, QIU Hongxing

(College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A new semi-active control device TMMRD, which was constructed by embedding the magneto-rheological damper (MRD) into tuned mass damper (TMD), was proposed, in which the problems of both narrow frequency-domain of effective work in TMD and time-lag of control force in active mass damper (AMD) could be solved well. The discontinuous switching type of control laws of traditional sliding mode control (SMC) and uncertainty terms of equivalent control were replaced by fuzzy controller, the adaptive fuzzy control law based on the Lyapunov function was designed, the adaptive fuzzy sliding mode control (ASMC) was integrated with a modified clipped optimal (MCO) control algorithm, and then the semi-active control strategy ASMC/MCO for TMMRD was proposed. The seismic responses of a 30-storey steel frame structure with TMD, ASMC/MCO semi-active controller, ASMC active controller and linear quadratic Gaussian (LQG) active controller were computed, respectively. Computation results indicate that the robustness of ASMC controller is obviously superior to that of LQG controller. The reduction effects on seismic responses under ASMC/MCO control and ASMC control are obviously superior to those of TMD control and LQG control. The control force of ASMC/MCO controller is almost the same as that of ASMC controller.

Key words: high-rise building; tuned mass damper; magneto-rheological damper; adaptive fuzzy control; sliding mode control; Lyapunov function

收稿日期:2013-12-27

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

作者简介:马涌泉(1984-),男,博士研究生,从事结构振动及控制研究。E-mail:lemo9143@163.com。

调谐质量阻尼器(TMD)对建筑结构的振动有一定的抑制效果^[1-2],但 TMD 中的阻尼器不具备可调性,导致 TMD 仅能对某一特定频率起作用,严重降低了其工程应用价值。主动质量阻尼器(AMD)虽可在较宽的频域内工作,但存在能耗高、易溢出和稳定性差等不足,并且控制机构的驱动存在时滞,严重影响了其减振效果。不同的控制算法对控制系统的性能有较大影响^[3]。目前关于控制理论的研究集中在线性二次型高斯(LQG)算法^[4]和极点配置(PP)算法^[5]。高层结构在强震作用下会进入非线性阶段,线性控制算法已不再适应,对此学者们提出了一些考虑结构非线性和荷载不确定性的交替控制算法(模糊逻辑控制^[6]、自适应控制^[7]和滑动模态控制^[8])。传统的模糊逻辑控制器(FLC)很难确定隶属度函数和控制规则;遗传算法(GA)^[9]和神经网络(NN)^[10]虽被用于提高 FLC 的性能,但是当不同类型或不同水平的输入荷载出现时,GA 的优化结果和 NN 训练便不再适用。滑动模态控制(SMC)能提供卓越的鲁棒性应对外界的不确定因素,此外通过 Lyapunov 稳定性理论^[11]可以开展稳定性分析,这些都优于传统的 FLC。笔者将 ASMC 与改进的限幅最优控制(MCO)相结合,提出适合 TMMRD 的 ASMC/MCO 半主动控制策略,运用此策略对一座 30 层钢框架结构进行振动控制数值分析,并将其计算结果与 TMD、ASMC 及 LQG 等控制策略的结果进行对比。

1 TMMRD 的力学模型

TMMRD 中采用的 MRD 用于控制系统的调节机构,可通过改变磁场强度调节其力学阻尼特性,抑制结构地震响应。该装置中的 MRD 采用并联的形式分别与质量块和主结构连接,其力学模型如图 1 (其中 m_i 为质量块的质量, k_i 为弹簧提供的恢复刚度)所示。

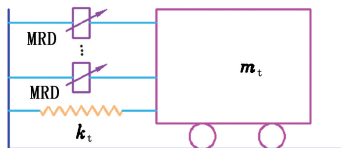


图 1 TMMRD 的力学模型

Fig.1 Mechanical model of TMMRD

MRD 的力学模型采用 ZapateiroM 等^[12]提出的 S-Bouc-Wen 模型,该模型能很好地模拟 MRD 在不同运动状态和外部电流下的输出阻尼力情况,其力学模型见图 2,数学表达式为

$$\begin{cases} F = \alpha\lambda + \sigma_0(\dot{x}_f - \dot{x}_a) + \delta_0(x_f - x_a) + \delta_1(x - x_0), \\ \dot{\lambda} = -\gamma |\dot{x}_f - \dot{x}_a| |\lambda| |\lambda|^{d-1} - \beta(\dot{x}_f - \dot{x}_a) |\lambda|^d + A(\dot{x}_f - \dot{x}_a), \\ \dot{y} = \frac{\alpha\lambda + \sigma_0\dot{x}_f + \delta_0(x_f - x_a)}{\sigma_0 + \sigma_1}. \end{cases} \quad (1)$$

式中, F 为 MRD 的阻尼力; λ 为 Bouc-Wen 模型的滞迟量; δ_1 为蓄能器的刚度, σ_0 为较高速度下获得的黏滞阻尼; σ_1 为低速环境下包含阻尼器的模型发生衰减而产生的阻尼系数试验值; δ_0 为较高速度下的控制刚度; x_0 为保证蓄能器的刚度为 δ_1 且输出标识阻尼力时须产生的初始位移; α 、 γ 、 β 、 A 和 d 均为 MRD 的性能参数。

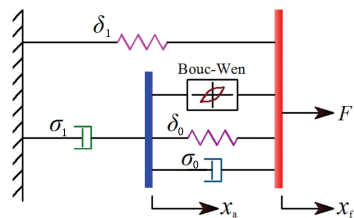


图 2 MRD 的力学模型

Fig.2 Mechanical model of MRD

由于黏滞阻尼系数随着命令电压 v 的不同而发生线性变化,则功能依赖性方程可表示为

$$\begin{cases} \alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u, \\ \sigma_0 = \sigma_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u, \\ \sigma_1 = \sigma_1(u) = c_{1a} + c_{1b} u. \end{cases} \quad (2)$$

MRD 的磁流变液在达到流变平衡时涉及的动力学特性采用如下的一阶滤波器表述:

$$\dot{u} = -\eta(u - v). \quad (3)$$

式中, u 为一阶滤波器的输出; $1/\eta$ 为一阶滤波器的时间常数。

新型控制装置 TMMRD 的控制力向量 \tilde{F} 由多个 MRD 的阻尼力向量组合值 F_z 与弹簧的弹性恢复力向量 F_c 组成,即

$$\tilde{F} = F_z + F_c = F_z + k_i x_i. \quad (4)$$

式中, x_i 为 TMMRD 与楼层的相对位移向量。

2 ASMC 算法

单自由度非线性建筑结构在地震激励下的运动方程可表示为

$$M\ddot{x}(t) + C(x, \dot{x}) + K(x, \dot{x}) = -Mr\ddot{x}_g(t) + U(t). \quad (5)$$

式中, M 为质量矩阵; \ddot{x} 为结构的加速度向量; $C(x, \dot{x})$ 和 $K(x, \dot{x})$ 分别为阻尼力向量和刚度恢复力向量; r 为影响系数矩阵; $\ddot{x}_g(t)$ 为地震加速度向量; U

(t)为控制装置提供的控制力向量。

式(5)也可记为

$$\ddot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{X}) + \mathbf{g}(t) + \mathbf{u}(t). \tag{6}$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{X} = [\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}]^T, \\ \mathbf{f}(\mathbf{X}) = -(1/M) \{ \mathbf{C}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{K}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) \}, \\ \mathbf{g}(t) = -\ddot{\mathbf{x}}_e(t), \\ \mathbf{u}(t) = (1/M)\mathbf{U}(t). \end{cases} \tag{7}$$

定义 \mathbf{e} 为测量输出 \mathbf{X} 与期望输出 \mathbf{X}_d 的差值, 满足 $\mathbf{e} = \mathbf{X} - \mathbf{X}_d = [e, \dot{e}]^T$ 。

滑动面可表示为

$$\mathbf{S}(\mathbf{X}) = k_1 \mathbf{e} + \dot{\mathbf{e}} = k_1 \mathbf{x} + \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{K}\mathbf{X}. \tag{8}$$

式中, $k_1 > 0, \mathbf{K} = [k_1, 1]$ 。

驱动轨迹进入滑动面的临界律可表示为

$$\mathbf{S} \cdot \dot{\mathbf{S}} \leq -\mu |\mathbf{S}|, \mu \geq 0. \tag{9}$$

依据以上描述, 分别导出两种类型的控制律。

当 $\mathbf{S} = 0$ 和 $\dot{\mathbf{S}} = 0$ 时, 迫使系统停留在滑动面上的等效控制律 \mathbf{u}_{eq} 可表示为

$$\mathbf{u}_{eq} = -\mathbf{f}(\mathbf{X}) - k_1 \dot{\mathbf{x}} - \mathbf{g}(t). \tag{10}$$

当 $\mathbf{S}(\mathbf{X}) \neq 0$ 时, 为了满足式(9)规定的滑动面条件, 开关式控制规则 \mathbf{u}_{sw} 必须被添加, 此时 SMC 的控制律可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{u}_{eq} - \mathbf{u}_{sw} = -\mathbf{f}(\mathbf{X}) - k_1 \dot{\mathbf{x}} - \mathbf{g}(t) - \\ &\mu_\Delta \text{sgn}(\mathbf{S}) = -\mathbf{f}(\mathbf{X}) - k_1 \dot{\mathbf{x}} - \mathbf{q}(\mathbf{S}). \end{aligned} \tag{11}$$

其中, $\mathbf{q}(\mathbf{S}) = \mathbf{g}(t) + \mu_\Delta \text{sgn}(\mathbf{S})$, 且 $|\mathbf{g}(t)| \leq G, \mu_\Delta \geq \mu > 0$ 。

用于描述多输入单输出 (MISO) 系统的模糊 IF-THEN 规则可表示为

Rule^(j): IF x_1 is A_1^j and \dots and x_n is A_n^j , THEN y is B^j .

式中, $\mathbf{X}_F = [x_1 x_2 \dots x_n] \in R^n$ 和 $y \in R$ 分别为 FLC 系统的输入和输出; A_i^j 和 B^j 分别为模糊集 R^n 和 R 的模糊标签; j 为控制规则数。

模糊推理机执行从模糊集 R^n 到模糊集 R 的映射。当单个模糊化方法、产品推理及中心平均去模糊化被应用时, 对应的模糊系统的输出为

$$y = \frac{\sum_{j=1}^m y^j \left[\prod_{i=1}^n \xi_{A_i^j}(x_i) \right]}{\sum_{j=1}^m \left[\prod_{i=1}^n \xi_{A_i^j}(x_i) \right]}. \tag{12}$$

式中, $\xi_{A_i^j}(x_i)$ 为语言变量 x_i 的隶属度函数; y^j 为 ξ_{B^j} 的最大值点; m 为规则总数。

引入模糊基函数分量 $\varphi^j(\mathbf{X}_F)$, 式(12) 可表示为

$$\mathbf{y} = \boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{X}_F). \tag{13}$$

此时

$$\varphi^j(\mathbf{X}_F) = \prod_{i=1}^n \xi_{A_i^j}(x_i) / \sum_{j=1}^m \left[\prod_{i=1}^n \xi_{A_i^j}(x_i) \right]. \tag{14}$$

其中, $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{X}_F) = [\varphi^1(\mathbf{X}_F), \dots, \varphi^m(\mathbf{X}_F)]^T$ 和 $\boldsymbol{\theta} = [y^1, \dots, y^m]^T$ 为模糊基函数向量, 它属于递减的通用近似型向量。

在 $\varphi^j(\mathbf{X}_F)$ 中的所有参数均可以在模糊基函数扩展程序的最开始阶段得到确定, 剩余的设计参数仅有 y^j 和 $\boldsymbol{\theta}$, 可以通过自适应律的推导得到。

当 $\mathbf{f}(\mathbf{X})$ 和 $\mathbf{g}(t)$ 未知时, 通过式(11) 获得控制律是困难的。一种合理的近似是采用模糊逻辑系统 $\tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{X}_F)$ 和 $\tilde{\mathbf{q}}(\mathbf{X}_Q)$ 分别取代 $\mathbf{f}(\mathbf{X})$ 和 $\mathbf{q}(\mathbf{S})$, 其中 \mathbf{X}_F 和 \mathbf{X}_Q 均为 FLC 系统的输入向量。这种近似允许传统 SMC 中的不连续控制律 \mathbf{u}_{sw} 发生衰减。

通过引入自适应技术可以大致获得模糊规则数据库, 此时式(11) 可变为

$$\mathbf{u}(t) = -\tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{X}_F) - k_1 \dot{\mathbf{x}} - \tilde{\mathbf{q}}(\mathbf{X}_Q). \tag{15}$$

定义 $\boldsymbol{\theta}_f$ 和 $\boldsymbol{\theta}_q$ 分别为 $\tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{X}_F)$ 和 $\tilde{\mathbf{q}}(\mathbf{X}_Q)$ 的可更新参数, 通过在线调整这两个参数可以使得最小近似误差 $\boldsymbol{\omega}$ 取最小值。

式(15) 也可记为

$$\mathbf{u}(t) = -\tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{X}_F | \boldsymbol{\theta}_f) - k_1 \dot{\mathbf{x}} - \tilde{\mathbf{q}}(\mathbf{X}_Q | \boldsymbol{\theta}_q). \tag{16}$$

其中

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{X}_F) = \tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{X}_F | \boldsymbol{\theta}_f) = \boldsymbol{\theta}_f^T \boldsymbol{\rho}(\mathbf{X}_F), \\ \tilde{\mathbf{q}}(\mathbf{X}_Q) = \tilde{\mathbf{q}}(\mathbf{X}_Q | \boldsymbol{\theta}_q) = \boldsymbol{\theta}_q^T \boldsymbol{\rho}(\mathbf{X}_Q). \end{cases} \tag{17}$$

$\boldsymbol{\rho}(\mathbf{X}_Q)$ 也为模糊基函数向量, 其分量的表达式与式(14) 相同。

定义自适应模糊系统的优化参数如下:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\theta}_f^* = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}_f \in \Omega_f} \left[\sup_{\mathbf{X} \in R^2} |\tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{X}_F | \boldsymbol{\theta}_f) - \mathbf{f}(\mathbf{X})| \right], \\ \boldsymbol{\theta}_q^* = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}_q \in \Omega_q} \left[\sup_{\mathbf{S} \in R} |\tilde{\mathbf{q}}(\mathbf{X}_Q | \boldsymbol{\theta}_q) - \mathbf{q}(\mathbf{S})| \right]. \end{cases} \tag{18}$$

式中, Ω_f 和 Ω_q 分别为 $\boldsymbol{\theta}_f$ 和 $\boldsymbol{\theta}_q$ 的约束集。

定义最小近似误差 $\boldsymbol{\omega}$ 为

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{f}(\mathbf{X}) - \tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{X}_F | \boldsymbol{\theta}_f^*) + \mathbf{q}(\mathbf{S}) - \tilde{\mathbf{q}}(\mathbf{X}_Q | \boldsymbol{\theta}_q^*). \tag{19}$$

根据通用近似理论^[13] 可知, 自适应模糊系统中的 $\boldsymbol{\omega}$ 为逼近 0 的非常小的值。

结合式(16)、(17) 和(19), 可得 \mathbf{S} 在 t 时刻的一阶导数为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{S}} &= \mathbf{u}(t) + \mathbf{f}(\mathbf{X}) + k_1 \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{g}(t) = \boldsymbol{\psi}_f^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{X}_F) + \\ &\boldsymbol{\psi}_q^T \boldsymbol{\rho}(\mathbf{X}_Q) + \boldsymbol{\omega} - \mathbf{q}(\mathbf{S}) - \mathbf{g}(t). \end{aligned} \tag{20}$$

其中

$$\boldsymbol{\psi}_f = \boldsymbol{\theta}_f^* - \boldsymbol{\theta}_f, \boldsymbol{\psi}_q = \boldsymbol{\theta}_q^* - \boldsymbol{\theta}_q.$$

为探究控制器的稳定性, 假设 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} \left[S^2 + \frac{1}{\varepsilon_1} \psi_f^T \psi_f + \frac{1}{\varepsilon_2} \psi_q^T \psi_q \right]. \quad (21)$$

V 在 t 时刻的一阶导数为

$$\begin{aligned} \dot{V} = & S\dot{S} + \frac{1}{\varepsilon_1} \psi_f^T \dot{\psi}_f + \frac{1}{\varepsilon_2} \psi_q^T \dot{\psi}_q = \frac{1}{\varepsilon_1} \psi_f^T \dot{\psi}_f + \frac{1}{\varepsilon_2} \psi_q^T \dot{\psi}_q + S [\psi_f^T \varphi \\ & (X_F) + \psi_q^T \rho (X_Q) + \omega - q(S) - g(t)] = \frac{1}{\varepsilon_1} \psi_f^T [\varepsilon_1 S \varphi \\ & (X_F) + \dot{\psi}_f] + \frac{1}{\varepsilon_2} \psi_q^T [\varepsilon_2 S \rho (X_Q) + \dot{\psi}_q] + S \omega + S [-q(S) + \\ & g(t)]. \end{aligned} \quad (22)$$

其中

$$\dot{\psi}_f = -\dot{\theta}_f, \dot{\psi}_q = -\dot{\theta}_q.$$

因此自适应律可表示为

$$\begin{cases} \dot{\theta}_f = \xi_1 S \varphi (X_F), \\ \dot{\theta}_q = \xi_2 S \rho (X_Q). \end{cases} \quad (23)$$

式中, ξ_1 和 ξ_2 均为正常量。

将式(23)和 $q(S) = g(t) + \mu_\Delta \text{sgn}(S)$ 代入式(22)可得

$$\dot{V} = S\omega + S [-q(S) + g(t)] S\omega - S\mu_\Delta \text{sgn}(S) = S\omega - \mu_\Delta |S|. \quad (24)$$

根据通用近似理论, $S\omega$ 可以被忽略, 进而 $\dot{V} = -\mu_\Delta |S| \leq 0$ 。

以上推导基于单自由度系统, 但是本文中提出的 ASMC 策略可以推广至高层结构这样安装有多个控制装置的多自由度系统, 对此在 ASMC 策略中引入了分散控制理论^[14]。该分散控制策略将控制系统划分为多个子系统, 根据各子系统的速度和位移对各子系统进行分散控制。

3 半主动控制律设计

由于传统的限幅最优(CO)控制^[15]的命令电压 v_i 只能取 0 或 V_{\max} , 当受控系统的主导频率较低时, 施加于结构的控制力发生电压差值较大的切换易放大结构的加速度反应。对此, 提出了改进的限幅最优(MCO)半主动控制算法。该算法中的控制电压 V_{ci} 可以在 $0 \sim V_{\max}$ 间任意调节, V_{ci} 可以通过外加电压与 MRD 最大出力间的线性关系确定。当依据 ASMC 策略算得的控制力理论值 F_{ci} 大于 MRD 的最大出力 F_{\max} 时, 则对 MRD 施加电压 V_{\max} 。MCO 算法的示意图见图 3。应用该算法施加于第 i 个 MRD 的命令电压 v_i 可表示为

$$\begin{cases} v_i = V_{ci} H [(F_{ci} - F_i) F_i], \\ V_{ci} = \begin{cases} \zeta_i F_{ci}, & F_{ci} \leq F_{\max}; \\ V_{\max}, & F_{ci} > F_{\max}. \end{cases} \end{cases} \quad (25)$$

式中, $H(\cdot)$ 为 Heaviside 阶跃函数; F_i 为测得的 MRD 控制力(输出阻尼力); ζ_i 为与控制力相关的电压系数; V_{\max} 为施加到电流驱动器的电压, 且该驱动器与 MRD 的磁流变效应饱和度相对应。

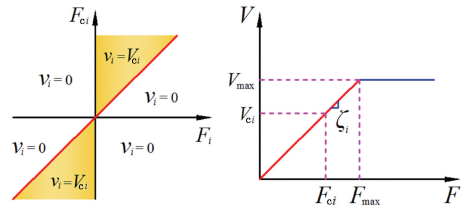


图 3 MCO 算法的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of MCO algorithm

4 数值分析

选取一座 30 层钢框架结构(简称结构)为研究对象, 抗震设防烈度为 8 度, 各楼层的质量 m_j 和刚度 k_j 的取值见表 1。层高均为 3.0 m。TMMRD 的质量块质量 $m_1 = 8.635 \times 10^4$ kg, 弹簧提供的恢复刚度 $k_1 = 9.556 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。对于 MRD, 其铭牌标定的最大出力 F_{\max} 和最大冲程 L 分别为 1.2 MN 和 ± 45 cm, 电压系数 $\zeta_i = 1.12$ 。主动控制装置采用压电陶瓷驱动器(PCA), 其 F_{\max} 和 L 的取值与 MRD 的相同。

通过对 S-Bouc-Wen 模型进行性能试验, 得到 MRD 的 14 个最优化参数, 即: $\alpha_a = 145 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-1}$, $\alpha_b = 650 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$, $\gamma = \beta = 370 \text{ cm}^{-2}$, $A = 300$, $d = 2$, $\eta = 198 \text{ s}^{-1}$, $c_{0a} = 20.15 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$, $c_{0b} = 3.50 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$, $\delta_0 = 46.8 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-1}$, $c_{1a} = 291 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$, $c_{1b} = 2.96 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$, $\delta_1 = 4.95 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-1}$, $x_0 = 14.80 \text{ cm}$ 。

表 1 结构的计算参数

Table 1 Calculation parameters of structure

楼层 i	质量 m_i/t	刚度 $k_i/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-1})$	楼层 i	质量 m_i/t	刚度 $k_i/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-1})$
30	313	332.6	15	359	595.4
29	319	360.4	14	359	613.2
28	325	373.7	13	359	639.0
27	328	385.4	12	359	651.5
26	342	417.5	11	367	665.3
25	342	437.9	10	367	699.3
24	342	453.8	9	367	712.9
23	351	462.9	8	367	737.9
22	351	481.6	7	372	742.3
21	351	499.6	6	372	759.2
20	351	508.3	5	379	787.9
19	351	529.2	4	379	815.2
18	351	543.6	3	386	831.3
17	359	572.2	2	392	845.9
16	359	587.9	1	398	864.8

将 MRD 两端的相对位移和相对速度作为

ASMC 的输入, 结构模型采用 S-function/MATLAB 程序编写。构建的应用于 MRD 的 ASMC/MCO 半主动控制算法的 SIMULINK 流程见图 4。运用 ASMC 主动控制策略抑制结构振动的流程见图 5。

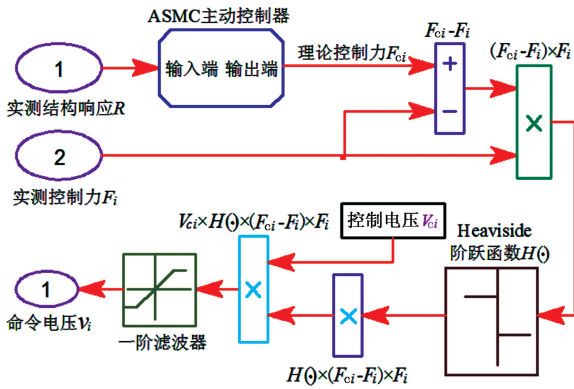


图 4 应用于 MRD 的 ASMC/MCO 控制算法框图

Fig. 4 Block diagram of ASMC/MCO control algorithm for MRD

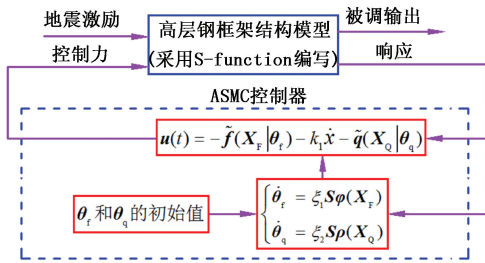


图 5 采用 ASMC 控制器抑制高层结构振动的流程

Fig. 5 Process of ASMC controller used for reducing vibration of high-rise structure

采用两个输入变量(相对位移 x 和速度 \dot{x}) 和一个输出变量设计模糊逻辑系统 $\tilde{f}(X_F)$, 每个变量有 7 个隶属度函数, 选择的输入和输出变量的归一化隶属度函数呈现三角形, 如图 6 所示。采用两个输入变量(滑动表面 $S = k_1 x + \dot{x}$ 和它的一阶导数 \dot{S}) 和一个输出变量设计另一个模糊逻辑系统 $\tilde{q}(X_Q)$, 每个变量有 5 个隶属度函数, 选择的输入和输出变量的归一化隶属度函数见图 6。 $\tilde{f}(X_F)$ 和 $\tilde{q}(X_Q)$ 分别由 49 个和 25 个控制规则构成。控制器的参数为: $k_1 = 16$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 120$; 输入变量域为: $x = [-0.16, 0.16]$, $\dot{x} = [-1.6, 1.6]$, $S = [-5, 5]$, $\dot{S} = [-20, 20]$; 输出变量域为: $\tilde{f}(X_F) = [-10 \times 10^5, 10 \times 10^5]$, $\tilde{q}(X_Q) = [-1.9 \times 10^5, 1.9 \times 10^5]$ 。控制器中 θ_t 和 θ_q 的初始值分别为 49×1 和 25×1 向量。 $\tilde{f}(X_F)$ 和 $\tilde{q}(X_Q)$ 的初始模糊控制规则分别见表 2、3。

TMMRD 在高层结构的布置位置如图 7 所示。选取 El Centro、Golden Gate Park、Ninghe-Tianjin 和 Kobe 波等 4 条强震加速度记录为地震激励。按照

规范^[16]要求将 4 条地震波的峰值加速度统一调至 $0.25 g$ 。对比分析结构在无控制、TMD 被动控制、ASMC/MCO 半主动控制、ASMC 主动控制和 LQG 主动控制下的评价指标值。采用的评价指标为 $J_1 \sim J_{15}$ 。表 4 为无控制(原结构)、TMD 控制、ASMC/MCO 控制、ASMC 控制和 LQG 控制下的各指标对比。

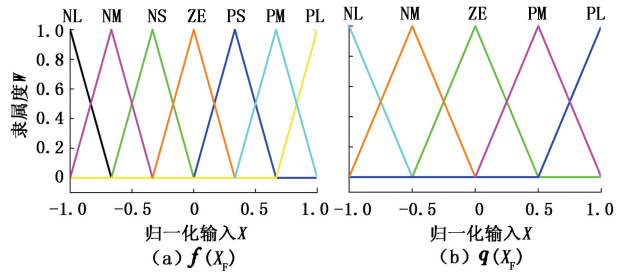


图 6 $\tilde{f}(X_F)$ 和 $\tilde{q}(X_Q)$ 的隶属度函数

Fig. 6 Membership functions of $\tilde{f}(X_F)$ and $\tilde{q}(X_Q)$

表 2 $\tilde{f}(X_F)$ 的初始模糊控制规则

Table 2 Initial fuzzy control rules of $\tilde{f}(X_F)$

x/\dot{x}	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	PL	PL	PM	PM	PM	PS	PS
NM	PL	PL	PM	PM	PS	PS	ZE
NS	PL	PM	PS	ZE	NS	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PM	PS	PS	ZE	NS	NM	NM
PM	ZE	NS	NS	NM	NM	NM	NM
PL	NS	NS	NM	NM	NM	NL	NL

表 3 $\tilde{q}(X_Q)$ 的初始模糊控制规则

Table 3 Initial fuzzy control rules of $\tilde{q}(X_Q)$

S/\dot{S}	NL	NM	ZE	PM	PL
NL	PL	PL	PM	PM	ZE
NM	PL	PM	PM	ZE	ZE
ZE	PM	PM	ZE	NM	NM
PM	ZE	ZE	NM	NL	NL
PL	ZE	NM	NM	NL	NL

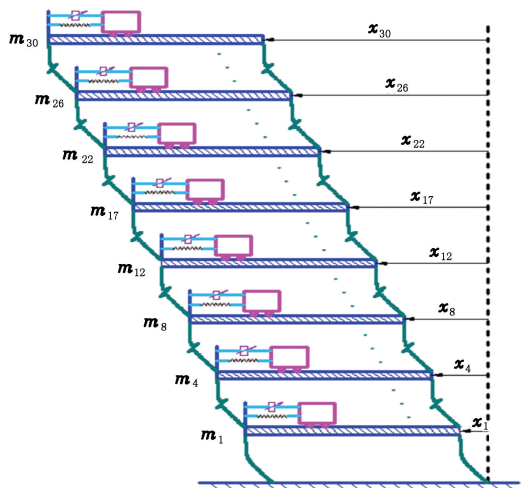


图 7 TMMRD 在高层结构的布置位置

Fig. 7 Layout location of TMMRD in high-rise structure

表 4 中的最大值和平均值分别定义为

$$\begin{cases} J_{\max} = \max_{\substack{\text{El-Centro} \\ \text{Golden Gate Park} \\ \text{Ninghe-Tianjin} \\ \text{Kobe}}} \{J_1 \sim J_{15}\}, \\ J_{\text{ave}} = \text{ave}_{\substack{\text{El-Centro} \\ \text{Golden Gate Park} \\ \text{Ninghe-Tianjin} \\ \text{Kobe}}} \{J_1 \sim J_{15}\}. \end{cases} \quad (26)$$

由表 4 可以看出,无控制与 TMD 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 均超出了钢框架结构的弹性层间位移角限值 (1/550),结构进入了塑性变形阶段。对于 J_2 的平均值,ASMC/MCO 的控制效果分别比 TMD 和 LQG 的控制效果提升了 39.1% 和 14.3%,ASMC/MCO

和 ASMC 的控制效果非常接近;ASMC/MCO 对结构的水平向加速度峰值 J_3 、水平向加速度均方根 J_4 和基底剪力峰值 J_5 等指标的控制效果也要比 TMD 和 LQG 的显著。对于 J_5 的最大值,ASMC/MCO 的控制效果分别比 TMD 和 LQG 的控制效果提升了 49.5% 和 17.6%,ASMC/MCO 和 ASMC 的控制效果非常接近,前者仅比后者小 0.1%。可见本文中提出的 ASMC/MCO 半主动控制器和 ASMC 主动控制器在抑制结构地震响应方面的性能均比 TMD 与 LQG 优越,并且 ASMC/MCO 的控制效果逼近 ASMC 主动控制。

表 4 无控制与有控制结构的评价指标对比

Table 4 Evaluation criteria comparison between uncontrolled structure and various controlled structures

评价指标	J_1/rad	J_2/rad	$J_3/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$J_4/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	J_5/kN	J_6	J_7	J_8/kJ	J_9	J_{10}/kN	J_{11}/cm	J_{12}/kJ	J_{13}	J_{14}	J_{15}
无控制	最大值	1/158	1/162	4.16	3.91	3529	6.823	6.539	786.81	26	—	—	—	—	—
	平均值	1/170	1/173	3.78	3.65	3481	6.451	6.164	752.67	22	—	—	—	—	—
TMD	最大值	1/261	1/269	2.69	2.52	2613	4.575	4.336	459.51	18	—	—	—	—	—
	平均值	1/282	1/285	2.35	2.28	2579	4.186	3.938	428.73	14	—	—	—	—	—
ASMC/MCO	最大值	1/768	1/779	0.87	0.79	865	1.537	1.363	55.89	0	1194	44.6	0.915	8	16
	平均值	1/794	1/798	0.73	0.66	838	1.276	1.085	53.65	0	1186	44.1	0.873	8	16
ASMC	最大值	1/769	1/781	0.86	0.79	862	1.536	1.361	55.82	0	1195	44.7	2.686	8	12
	平均值	1/796	1/799	0.71	0.64	836	1.274	1.082	53.59	0	1187	44.3	2.574	8	12
LQG	最大值	1/455	1/462	1.37	1.28	1486	2.862	2.587	156.74	6	1125	42.5	2.963	8	6
	平均值	1/474	1/480	1.19	1.12	1453	2.557	2.271	125.85	4	1118	41.7	2.846	8	6

TMD 被动控制、ASMC/MCO 半主动控制、ASMC 主动控制和 LQG 主动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) 等结构损伤类指标比无控制结构的均要有所降低。其中 ASMC/MCO 与 ASMC 控制下各损伤指标的降幅最明显,且 J_9 为零。对于 J_7 的平均值,ASMC/MCO、ASMC 的降幅分别比 TMD 和 LQG 的降幅减小了 46.3%、46.4% 和 19.2%、19.3%。可见 ASMC/MCO 和 ASMC 控制下的结构进入塑性(延性)阶段的程度较小,结构基本保持在弹性阶段,因此结构的塑性(延性)耗能量较小。

ASMC/MCO 和 ASMC 的控制力峰值 (J_{10}) 均接近足尺 MRD 和 PCA 铭牌标定的输出阻尼力峰值 (1200 kN),而 LQG 的 J_{10} 离 PCA 的出力峰值还有较大差距。ASMC/MCO 和 ASMC 控制下的控制装置冲程 (J_{11}) 均接近 MRD 和 PCA 的最大冲程 (± 45 cm),而 LQG 的 J_{11} 离 PCA 的冲程峰值还有较大差距。可见本文中提出的 ASMC/MCO 半主动控制器和 ASMC 主动控制器的性能均要比 LQG 的优越,前

两者比后者更利于控制装置性能的充分发挥。同时,ASMC/MCO 半主动控制器的性能也非常接近 ASMC 主动控制器。

ASMC/MCO 策略需要外界供给的能量 (J_{12}) 比 ASMC 策略和 LQG 策略的要小很多。ASMC 策略比 LQG 策略需要的外界能量要少,可见 ASMC 策略要比 LQG 策略节能。ASMC/MCO、ASMC 和 LQG 三种策略所需的控制装置数目 (J_{13}) 相同,但 ASMC/MCO 和 ASMC 所需的传感器数目 (J_{14}) 比 LQG 的要多,尤其是 ASMC/MCO 所需的 J_{14} 最多。这是因为 ASMC/MCO 和 ASMC 都采用了分散控制理论,故所需的 J_{14} 比 LQG 的要多;又由于 ASMC/MCO 需要对依据 ASMC 算得的最优控制力向量施以改进的 CO 半主动控制律,故前者所需的 J_{14} 比后者要多。在结构振动控制过程中,ASMC/MCO 和 ASMC 所需的计算资源量 (J_{15}) 皆为零,而 LQG 却需要较多的计算资源,故前两种策略可避免由控制器运算造成的时滞。

图 8 为 El Centro 波激励下无控制和有控制结构的顶层层间位移和加速度时程。ASMC/MCO 和

ASMC 对层间位移的控制效果比 TMD 和 LQG 的都要显著, ASMC/MCO 的控制效果分别比 TMD 和

LQG 的提升了 35.2% 和 8.6%。

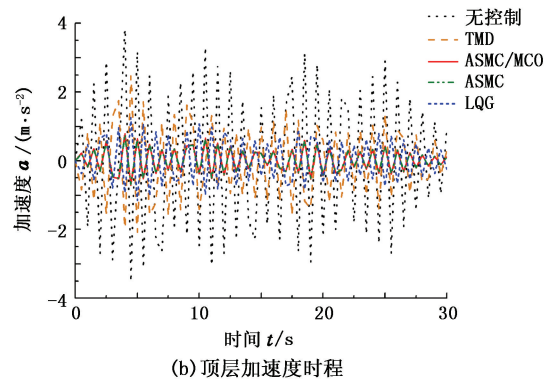
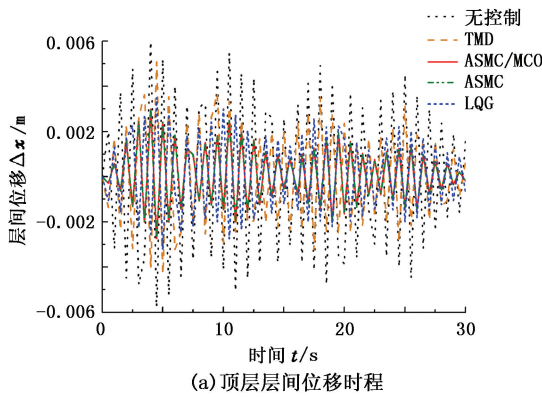


图 8 无控制和有控制结构的层间位移时程对比

Fig. 8 Inter-story displacements time history comparison between uncontrolled structure and various controlled structures

图 9 为 Golden Gate Park 波激励下无控制和有控制结构的弹塑性层间位移角和各楼层底部剪力峰值对比(弹塑性层间位移角限值 $\theta = 1/550$ rad)。从图 9 中可以看出, ASMC/MCO 和 ASMC 的控制效果

比 TMD 和 LQG 的都要显著。对于结构剪力峰值(各楼层底部剪力峰值的最大值), ASMC/MCO 的控制效果分别比 TMD 和 LQG 的提升了 49.8% 和 17.5%。

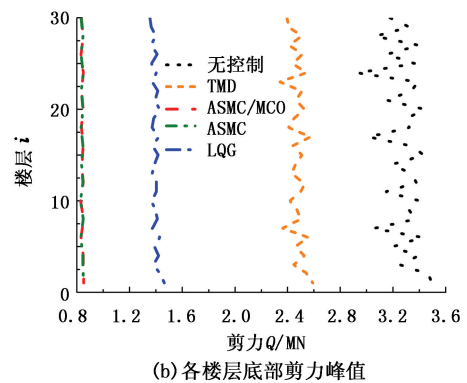
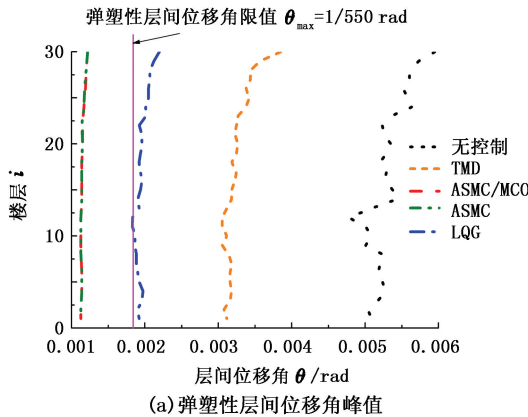


图 9 无控制和有控制结构的地震响应峰值对比

Fig. 9 Peak seismic responses comparison between uncontrolled structure and various controlled structures

图 10 为 El Centro 波作用下的 ASMC/MCO 和 ASMC 策略的输出控制力对比时程。从图 10 中可看出, 两者的控制力时程曲线很吻合, 且两者的控制力曲线非常光滑, 未出现抖振现象, 可见 ASMC 控制器的性能明显优于传统的 SMC 控制器。

控制器的鲁棒性要明显优于 LQG 控制器。

通过对比 ASMC 控制结构和 LQG 控制结构的初始刚度在发生 $\pm 30\%$ 变化时的各评价指标平均值来对比 ASMC 和 LQG 的鲁棒性。两种控制策略下的各指标平均值见表 5。由表 5 可以看出, ASMC 控制的各评价指标平均值都明显小于相应的 LQG 控制的各指标平均值。可见在结构刚度存在不确定性时, ASMC 控制器的性能要明显优于 LQG, 故 ASMC

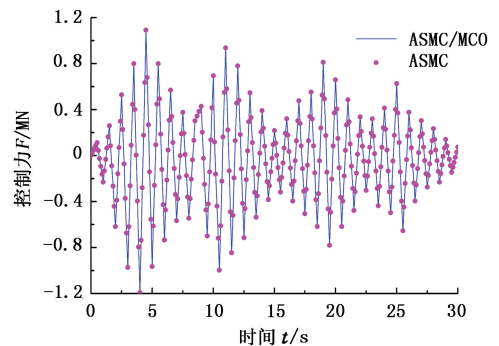


图 10 控制力时程

Fig. 10 Time history of control force

表5 $\pm 30\%$ 刚度扰动下的各评价指标平均值Table 5 Average values of various evaluation criteria due to $\pm 30\%$ stiffness perturbed

评价指标	J_1/rad	J_2/rad	$J_3/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$J_4/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	J_5/kN	J_6	J_7	J_8/kJ	J_9	J_{10}/kN	J_{11}/cm	J_{12}/kJ	J_{13}	J_{14}	J_{15}	
+30%	ASMC	1/719	1/722	0.77	0.71	922	1.406	1.194	59.12	0	1189	44.5	2.839	8	12	0
	LQG	1/436	1/441	1.31	1.22	1578	2.776	2.465	136.64	6	1127	42.1	3.092	8	6	20
-30%	ASMC	1/711	1/713	0.79	0.73	934	1.423	1.208	59.76	0	1190	44.6	2.872	8	12	0
	LQG	1/427	1/432	1.45	1.34	1729	3.046	2.706	149.28	6	1131	42.5	3.391	8	6	20

5 结 论

(1)新提出的 ASMC/MCO 和 ASMC 控制策略对结构地震响应的控制效果均要明显优于 TMD 被动控制和 LQG 主动控制;采用 ASMC/MCO 和 ASMC 控制的结构均比 TMD 和 LQG 控制的结构进入塑性(延性)阶段的程度小得多;ASMC 和 ASMC/MCO 策略的控制装置实际出力最大值和冲程最大值均比 LQG 策略的大得多。

(2)提出的 ASMC/MCO 和 ASMC 控制策略无需任何计算资源,可有效地降低控制器运算产生的时滞;ASMC/MCO 半主动控制器的控制效果逼近 ASMC 主动控制器,两者的控制力时程曲线光滑且几乎完全吻合,并无任何抖振现象发生,两者的性能要优于传统的 SMC 策略;ASMC 控制器的鲁棒性要明显优于 LQG 控制器。

参考文献:

[1] MAJCHER K, WOJCICKI Z. Parametric vibration of TMD installed in tall building during seismic excitation [J]. Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, 2010,10(1):189-190.

[2] ANGELIS M D, PERNO S, REGGIO A. Dynamic response and optimal design of structures with large mass ratio TMD [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2011,40(3):257-271.

[3] CHA Y J, ZHANG J, AGRAWAL A K, et al. Comparative studies of semi-active control strategies for MR dampers: pure simulation and real-time hybrid tests[J]. Journal of Structural Engineering, 2013,139(7):1237-1248.

[4] XU Y L, ZHANG W S. Closed-form solution for seismic response of adjacent buildings with linear quadratic gaussian controllers [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002,31(2):235-259.

[5] CASCIATI F, RODELLAR J, YILDIRIM U. Active and semi-active control of structures-theory and applications: a review of recent advances [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2012,23(11):1181-1195.

[6] GUCLU R, YAZICI H. Fuzzy logic control of a non-linear structural system against earthquake induced vibration

[J]. Journal of Vibration and Control, 2007,13(11):1535-1551.

- [7] BITARAF M, HURLEBAUS S, BARROSO L R. Active and semi-active adaptive control for undamaged and damaged building structures under seismic load[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2012,27(1):48-64.
- [8] MOON S J, BERGMAN L A, VOULGARIS P G. Sliding mode control of cable-stayed bridge subjected to seismic excitation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002,129(1):71-78.
- [9] WONGPRASERT N, SYMANS M D. Application of a genetic algorithm for optimal damper distribution within the nonlinear seismic benchmark building[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004,130(4):401-406.
- [10] YE H K, CHEN C W, LO D C, et al. Neural-network fuzzy control for chaotic tuned mass damper systems with time delays [J]. Journal of Vibration and Control, 2012,18(6):785-795.
- [11] POLYAKOV A, POZNYAK A. Lyapunov function design for finite-time convergence analysis: "twisting" controller for second-order sliding mode realization[J]. Automatica, 2009,45(2):444-448.
- [12] 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.
- [13] ARTEAGA C, MARRERO I. Universal approximation by radial basis function networks of Delsarte translates [J]. Neural Networks, 2013,46(10):299-305.
- [14] LEI Y, WU D T, LIU L J. A decentralized structural control algorithm with application to the benchmark control problem for seismically excited buildings[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2013,20(9):1211-1225.
- [15] 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.
- [16] GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

(编辑 沈玉英)