

MCS 自适应算法在非线性结构 AMD 控制中的应用*

涂建维, 张妙娴, 汪伯潮

(武汉理工大学 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要: 控制算法决定着振动控制的稳定性和减振效果, 是结构 AMD 主动控制的核心组成部分。将最小控制综合 (MCS) 自适应算法运用于 AMD 控制结构系统, 该算法不要求事先知道受控结构的精确力学模型和参数, 且在受控结构进入非线性状态下也能达到很好的控制效果。利用拉格朗日方程推导了采用 MCS 算法的非线性结构 AMD 系统的控制方程; 在小型振动台上对刚度突变结构进行了控制试验。试验结果表明: 采用 MCS 自适应算法的 AMD 系统可以有效地减小刚度突变结构响应, 并且可让实际结构响应与参考模型预期响应保持一致, 达到满意的减振效果。

关键词: MCS 算法; AMD 系统; 非线性结构; 振动控制; 振动台试验

中图分类号: P315-39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2015)04-0662-06

0 引言

工程结构在地震、强风等灾害荷载作用下, 会进入弹塑性阶段, 结构抗力会发生衰减, 呈现出一系列复杂的非线性问题 (秦荣, 2006)。当结构遭遇较强地震作用时, 结构构件将有可能发生屈服、结构刚度发生退化, 从而使结构响应迅速增大, 甚至造成结构破坏、倒塌 (韩建平等, 2007)。结构 AMD 主动控制技术使得结构在外部动力荷载作用下, 能主动调整结构参数, 从而最优地减小结构振动响应。控制算法作为该技术的核心组成部分, 决定着振动控制的稳定性和减振效果的好坏。因此, 选择合适的控制算法对 AMD 系统能否有效减小非线性结构的振动响应是极为重要的。

最小控制综合 (MCS) 算法最早由 Stoten 和 Benchoubane (1990a, b) 提出, 通过对操纵器、蓄水库装置进行仿真、试验研究, 证明了 MCS 算法在系统参数变化、外部干扰不确定以及系统非线性的情况下也能达到很好的控制效果; Stoten 和 Gomez (2001) 运用 MCS 算法控制振动台, 证明了 MCS 算法通过自适应增益的实时调整, 可以有效地处理振动台运行过程中出现的非线性情况, 提高振动台的精度。

基于以上研究成果, 本文将 MCS 算法应用于 AMD 控制系统中, 系统研究了该控制系统对非线

性结构的控制效果。本文比较了刚度退化结构与线性结构的地震反应; 用 MCS 算法来控制 AMD 系统, 采用拉格朗日法推导了地震作用下结构自适应控制的基本方程; 为了验证 MCS 算法控制 AMD 装置的有效性, 在小型振动台上对安装 AMD 系统的刚度突变结构进行试验研究。

1 非线性结构的地震反应仿真

本文研究对象是安装 AMD 控制系统的单层结构模型, 模型简图如图 1 所示, 具体参数如表 1 所示。

表 1 AMD 装置控制的结构模型参数

Tab. 1 The model parameters of the structure under AMD control

符号	含义	数值	单位
M_f	结构顶部集中质量与导轨质量	1.38	kg
M_c	AMD 装置小车系统总质量	0.65	kg
K_f	结构线性刚度	500	N · m ⁻¹
r_{mp}	小车电机齿轮半径	6.35×10^{-3}	m
K_g	小车齿轮传动比	3.71	
J_m	小车电机转动惯性矩	3.9×10^{-7}	kg · m ⁻²
B_{eq}	等效粘滞阻尼, 可视为电机齿轮阻尼	3.0	N · s/m
R_m	小车电机电阻	2.6	Ω
η_g	小车齿轮传动效率	100	%
η_m	小车机电效率	100	%
K_t	小车电机扭力矩常数	7.67×10^{-3}	N · m/A
K_m	小车反向电动势常数	7.67×10^{-3}	V · s/rad

* 收稿日期: 2014-10-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178368, 51278393, 51478372) 资助.

首先采用理想不退化双线性模型建立结构刚度的退化模型（彭凌云，2004），如图 2 所示。该模型的加载刚度和卸载刚度均为结构初始刚度，结构初

始刚度 $k_1=500\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ ，屈服位移 $x_y=10\text{ mm}$ 。当结构位移 $x\geq x_y$ 时，结构屈服进入弹塑性阶段，刚度退化为 k_2 ，取 $k_2=0.1$ ， $k_1=50\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ 。在 SIMULINK 中对无控结构进行非线性仿真分析，地震波选用压缩后的 El Centro 波，得到结构的滞回曲线和结构刚度随时间的变化如图 3 所示。

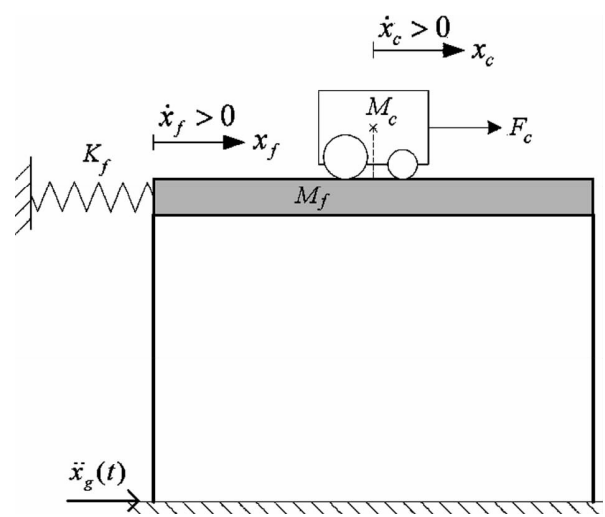


图 1 结构振动的 AMD 主控制模型
Fig. 1 AMD control model of structural vibration

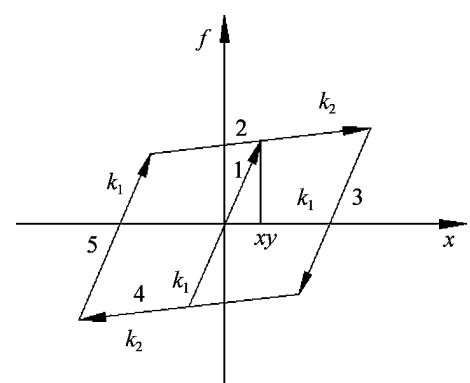


图 2 双线性模型
Fig. 2 Double linear model

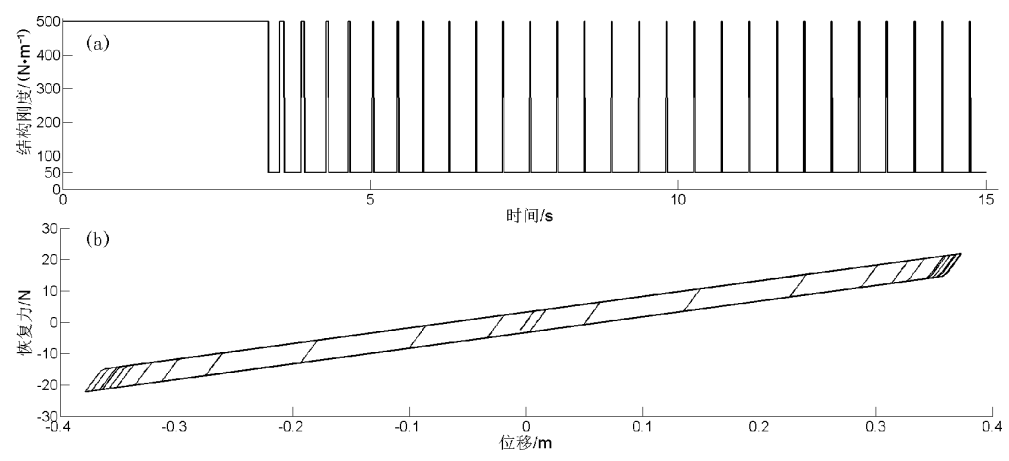


图 3 无控结构刚度的时程曲线 (a) 和滞回曲线 (b)
Fig. 3 The time history (a) and hysteretic (b) curves of uncontrolled structure stiffness

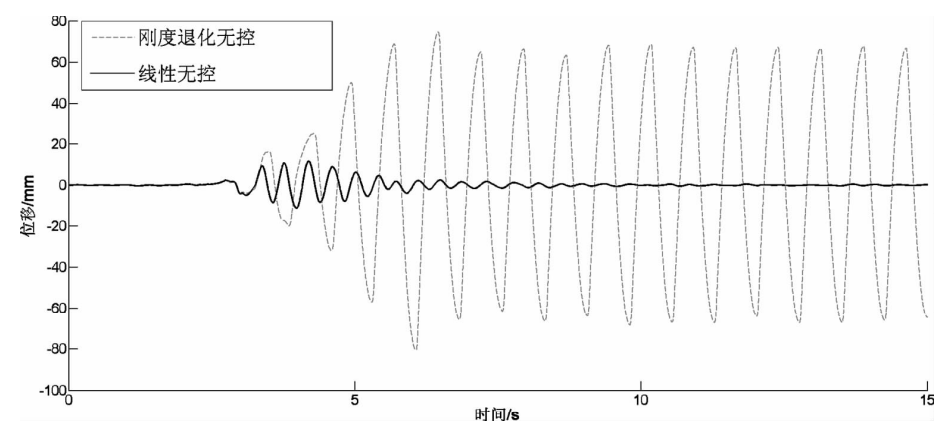


图 4 无控结构位移响应的时程曲线
Fig. 4 The time history of uncontrolled structural displacement response

从图3可以看到,结构恢复力与位移之间表现出明显的不退化双线性恢复力模型,说明仿真过程是准确无误的;图4对比了线性无控与刚度退化时的结构位移响应,从图中可以看到,由于没有减振装置,结构刚度从第三秒开始就处于屈服退化状态,结构响应迅速增大并持续保持在较大范围内波动,这会威胁到结构的安全,需要采取减振措施对结构响应进行控制。

2 基于 MCS 算法的结构 AMD 系统控制方程

首先阐述 AMD 系统控制的原理及公式。结构 AMD 主动控制系统由传感器、控制器和作动器组成,其原理如图5所示。在整个控制过程中,需要实现控制力可以实时改变和受控结构的实际振动响应与参考模型响应保持一致这两个目标(欧进萍,2003),参考模型 MCS 自适应控制算法可以实现上述目标,其原理如图6所示。受控结构在外部激励 $d(t)$ 作用下输出响应为 $X(t)$,参考模型在外部激励 $r(t)$ 作用下输出响应为 $X_m(t)$ 。将 $X_m(t)$ 作为目标响应, $X_e(t)$ 为 $X(t)$ 与 $X_m(t)$ 产生的偏差,它会驱动自适应控制器,计算当前时刻的自适应增益 $K(t)$ 和 $K_r(t)$,从而实时计算出主动控制力 $U(t)$ 。将 $U(t)$ 将施加到受控结构上,会使得结构实际响应跟踪目标响应,即 $X(t) = X_m(t)$,从而实现了控制目标。

在地震作用下,结构振动的 AMD 主动控制模型如图1所示,其拉格朗日方程为(卢圣治,2004)

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_\alpha} - \frac{\partial L}{\partial q_\alpha} = Q_{q_\alpha}. \quad (1)$$

其中, L 为系统的拉格朗日函数, $L = T - V$, V 是系统的势能, T 是系统的动能; q_α 是广义坐标,本文广义坐标取 x_f 和 x_c ; Q_{q_α} 是对应广义坐标上的广义力。

在绝对位移坐标系下,地震作用的地面位移为 $x_g(t)$,由式(1)可以得到:

$$\frac{(M_c r_{mp}^2 + J_m K_g^2) \frac{d^2}{dt^2} x_c}{r_{mp}^2} + M_c \frac{d^2}{dt^2} x_f = F_c - B_{eq} \frac{d}{dt} x_c - M_c \ddot{x}_g(t). \quad (2)$$

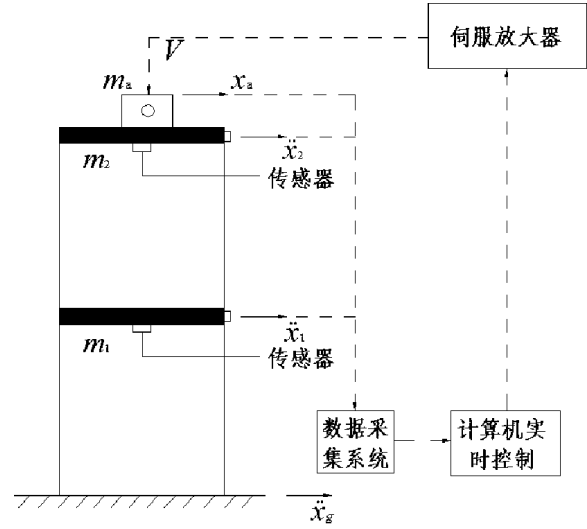


图5 结构 AMD 主动控制系统

Fig. 5 AMD control system of the structure

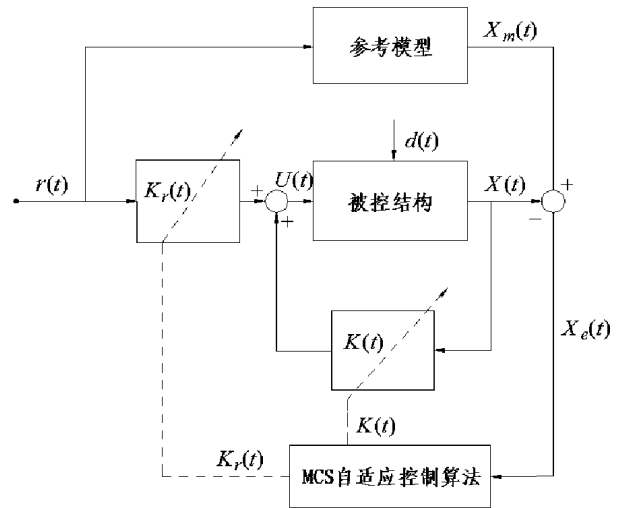


图6 MCS 自适应算法控制流程图

Fig. 6 The control flow chart of MCS adaptive algorithm

$$M_c \frac{d^2}{dt^2} x_c + (M_c + M_f) \frac{d^2}{dt^2} x_f + K_f x_f + C \dot{x}_f = -(M_c + M_f) \ddot{x}_g(t). \quad (3)$$

其中, J_m 为小车电机转动惯性矩; K_g 为小车齿轮传动比; r_{mp} 为小车电机齿轮半径; B_{eq} 为小车等效粘滞阻尼; C 为结构阻尼。

定义结构的主动控制力 $U = F_c$, 状态向量 $X^T = [x_c(t) \ x_f(t) \ \frac{d}{dt} x_c(t) \ \frac{d}{dt} x_f(t)]$, 系统在地震作用下的状态方程可以由式(2)、(3)得到:

$$\dot{X} = AX + BU - D_g \ddot{x}_g(t). \quad (4)$$

其中, $d(t) = \ddot{x}_g(t)$, 对于采用 MCS 控制算法的结构 AMD 控制系统, 主动控制力 U 可由式 (5) 计算得到:

$$U(t) = K(t)X(t) + K_r(t)r(t). \quad (5)$$

其中, $r(t)$ 为参考输入, 取 $r(t) = K_d \cdot d(t) = K_d \cdot \ddot{x}_g(t)$, $0 < K_d < 1$, $K(t)$ 、 $K_r(t)$ 为自适应增益, 可通过式 (6) 计算得到:

$$\begin{aligned} K(t) &= \int_0^t \alpha y_e(\tau) X^T(\tau) d\tau + \beta y_e(t) X^T(t), \\ K_r(t) &= \int_0^t \alpha y_e(\tau) r^T(\tau) d\tau + \beta y_e(t) r^T(t). \end{aligned} \quad (6)$$

其中, 比例因子 $\alpha > 0$, $\beta \geq 0$; $y_e(t)$ 是系统输出误差信号, 可由式 (7~8) 计算得到:

$$y_e(t) = C_e X_e(t). \quad (7)$$

$$X_e(t) = X_m(t) - X(t). \quad (8)$$

其中, C_e 是输出矩阵; $X_e(t)$ 是参考模型输出与被控模型输出的误差; $X_m(t)$ 是参考模型的输出响应。这几个参数可通过以下参考模型的状态方程求得:

$$\dot{X}_m(t) = A_m X_m(t) + B_m r(t); \quad (9)$$

$$C_e = \text{diag}(C_{ei}); C_{ei} = [\omega_i \quad 1]; \quad (10)$$

$$A_{mi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_i^2 & -2\xi\omega_i \end{bmatrix}; B_{mi} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_i^2 \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$A_m = \text{diag}(A_{mi}); B_m = \text{diag}(B_{mi}). \quad (12)$$

其中, ω_i 为结构第 i 阶自振频率 ($i = 1, 2, \dots, n$); ξ 为结构阻尼比。

3 MCS 算法对刚度突变结构的控制试验

该试验在武汉理工大学完成, 试验装置由小型振动台、一层剪切型钢框架结构和 AMD 控制装置组成, 加拿大 Quanser 公司研发了该设备。为了实现结构的刚度突变, 先对结构采用增加橡皮筋斜撑的方法来增加结构刚度, 如图 7 所示。当结构

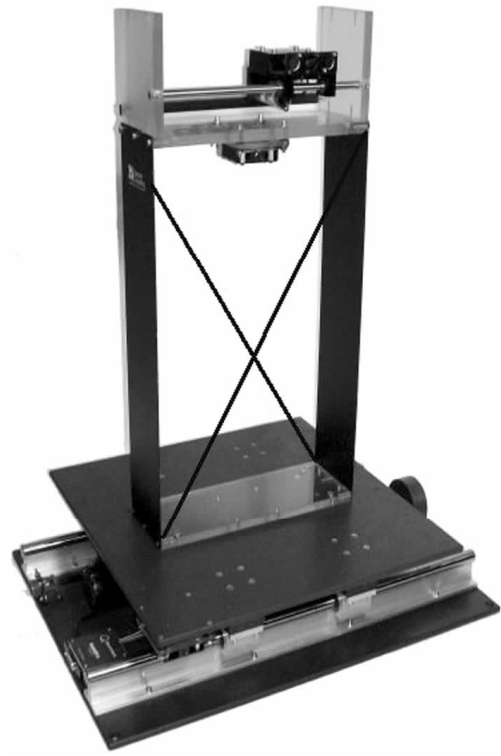


图7 加橡皮筋的试验结构

Fig. 7 Experimental structure of the added rubber bands

在振动过程中突然剪断张紧的橡皮筋, 这样结构的刚度会突然减小以实现结构的刚度突变。剪断橡皮筋后的结构刚度以及其余参数如表 1 所示。

使用压缩后的 El Centro 波作为地震激励驱动小型振动台, 地震波的峰值加速度是 0.5 g , 持续时间是 13.4 s , 取实测台面加速度作为 $d(t)$, 采用降低地震能量方法建立参考模型 (张凯静等, 2010), 地震能量调节增益 $K_d = 0.75$, 采用 MCS 自适应算法对 AMD 装置实施控制, 输出矩阵取 $C_e = [\omega_i \quad 1] = [17.8 \quad 1]$, $\alpha = 100$, $\beta = 10$ 。

图 8 显示了剪断橡皮筋前后结构的位移响应。从图中可以看出, 在地震持续时间为 2.8 s 时, 皮筋被剪断, 结构的刚度从 $643 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 迅速减小到 $500 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, 相对于不剪断皮筋情况结构顶点的最大位移从 13 mm 增大到 20 mm 。特别是在剪断皮筋的瞬间, 结构的最大位移从 9 mm 迅速突变到 20 mm , 增大了约 120% 。图 9 显示了刚度突变情况下无控、MCS 算法控制的结构的位移响应。从图中可以看出, 采用 MCS 算法的 AMD 系统可以有效地减小结构的振动响应, 具体如表 2 所示。其中, x_f 、 \ddot{x}_f 分别是结构顶部相对于地面的位移和加速度; mag_{x_f} 是结构位移傅里叶幅值; $x_{f,\text{RMS}}$ 是结构

位移均方根值,表示在地震作用持续时间内 x_f 各瞬时值的平方的平均值的平方根。在地震持续时间为 2.8 s 皮筋被剪断的瞬间, MCS 算法可以将结构位移从无控状态的 20 mm 减小到 7 mm。这是因为 MCS 自适应算法是根据结构响应与参考模型响应的误差反馈实时地改变控制增益,因此当结构响应发生突变时, MCS 算法也可以迅速增大控制增益来得到较大的控制电压,从而可以很好地减小结构振动响应。

表 2 地震作用下的试验结构振动响应
Tab. 2 The vibration responses of experimental structure under earthquake

工况	x_f/mm	$x_{f,\text{RMS}}/\text{mm}$	mag_{x_f}	$\ddot{x}_f/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	U_{MAX}/V
Uncontrolled	20.23	5.05	5.15	12.74	—
MCS 控制	12.10	2.46	1.27	7.57	7.58

图 10 比较了参考模型输出的位移响应和实际结构的位移响应。从图中可以看到,即使结构刚度发生突变,实际位移也能够很好的逼近参考模型的输出响应,达到预期的减振效果。

4 结 论

研究了 MCS 自适应控制算法对非线性结构的 AMD 主动控制,并完成了刚度发生突变的单自由度结构的振动台试验。仿真和试验结果表明: MCS 算法是一种优良的自适应控制算法,将它应用到结构 AMD 控制系统中,可以有效地减小结构响应。在结构发生刚度突变时, MCS 算法通过自适应参数的实时调整仍能有效地控制 AMD 装置,使结构实际输出响应与参考模型输出保持一致,达到预期的减振效果。

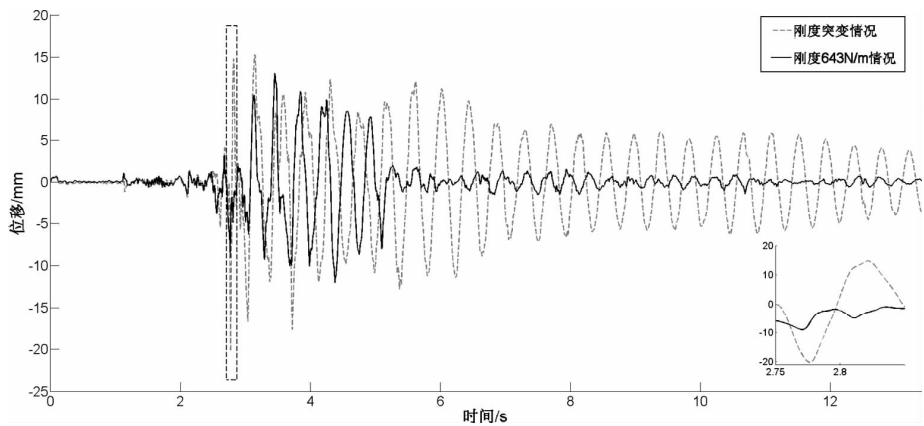


图 8 刚度突变前后的结构位移时程

Fig. 8 The time history of structure displacement before and after stiffness mutation

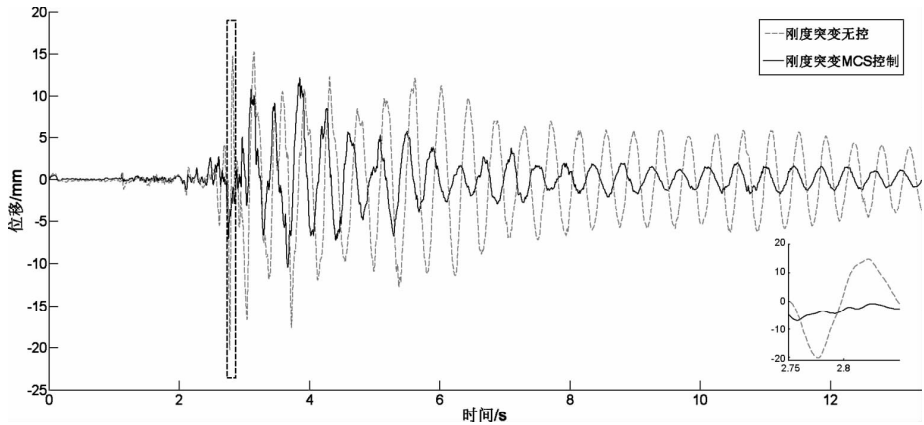


图 9 刚度突变情况下无控和采用 MCS 算法 AMD 控制的结构位移时程

Fig. 9 The displacement time history of structure controlled by AMD using MCS algorithm or without control in the case of stiffness mutation

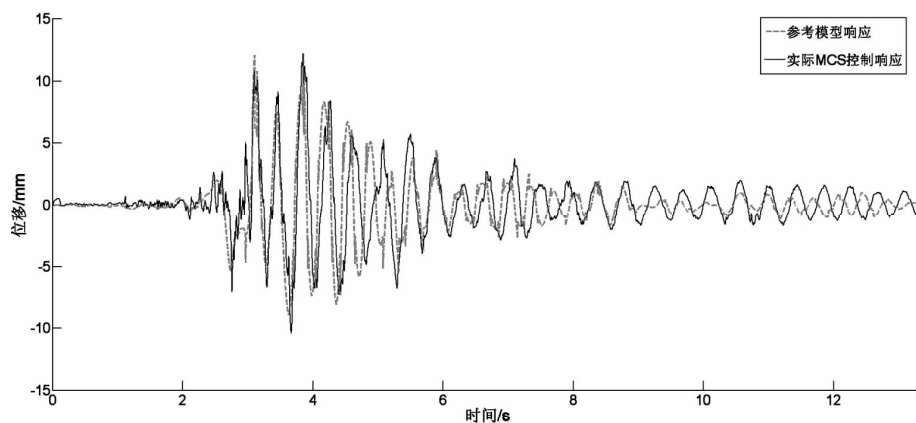


图10 刚度突变情况下参考模型输出位移与实际结构位移时程对比

Fig. 10 Comparison of time histories between output displacement of reference model and displacement of actual structure in the case of stiffness mutation

参考文献:

- 韩建平, 吕西林, 李慧. 2007. 基于性能的地震工程研究的新进展及对结构非线性分析的要求[J]. 地震工程与工程振动, 27(4): 15-23.
- 卢圣治. 2004. 理论力学基本教程[M]. 北京: 北京师范大学出版社.
- 欧进萍. 2003. 结构振动控制[M]. 北京: 科学出版社.
- 彭凌云. 2004. 向心式摩擦阻尼器的理论分析及应用研究[D]. 北京: 北京工业大学.
- 秦荣. 2006. 工程结构非线性[M]. 北京: 科学出版社.
- 张凯静, 周莉萍, 王官磊. 2010. 最小控制合成算法在结构振动控制中的应用[J]. 华中科技大学学报, 27(3): 76-80.
- Stoten D. P., Beanchoubane H. 1990a. Empirical studies of an MRAC algorithm with minimal controller synthesis[J]. International Journal of Control, 51(4): 823-849.
- Stoten D. P., Beanchoubane H. 1990b. Robustness of a minimal controller synthesis Algorithm[J]. International Journal of Control, 51(4): 851-861.
- Stoten D. P., Gomez E. G. 2001. Adaptive control of shaking tables using the minimal control synthesis algorithm[J]. The Royal Society, 359: 1697-1723.

Application of MCS Adaptive Algorithm on Active Control of Nonlinear Structure by AMD System

TU Jian-wei, ZHANG Miao-xian, WANG Bo-chao

(Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge and Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract

The control equation of the AMD system using Minimal Controller Synthesis (MCS) adaptive algorithm for nonlinear structure is deduced by the Lagrangian method. Controlling experiment is carried out for the structure of stiffness mutation on the Shake Table II and the experimental results show that the AMD system using MCS adaptive algorithm can effectively reduce the structural response of stiffness mutation, and make the real structural response keep consistent with the expected response of reference model to achieve the approving damping effect.

Key words: MCS algorithm; AMD system; nonlinear structure; vibration control; shake table test