

# 含磁流变阻尼器的框架结构控制研究

周星德<sup>1</sup>, 郜中文<sup>1</sup>, 潘瑞鸿<sup>2</sup>, 杜成斌<sup>1</sup>

( 1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098 ; 2. 南京下关城市建设开发集团有限公司, 江苏 南京 210002 )

摘要 :以框架结构为对象进行振动控制研究. 为保证地震作用下系统半主动控制的顺利实现, 选择了基于系统可控性/可观性的内平衡理论的模型降阶方法. 在考虑结构参数、几何尺寸不确定性, 磁流变阻尼器非线性特征以及实际控制离散性和地震作用随机性因素的基础上, 研究了基于离散状态方程和以控制力为阶跃函数的广义预测控制策略, 提出了一种可用于框架结构振动控制的半主动控制技术, 并通过算例验证了该技术的有效性.

关键词 :框架 ;磁流变阻尼器 ;半主动控制 ;广义预测控制

中图分类号 :TU352      文献标识码 :A      文章编号 :1000-1980( 2007 )01-0035-04

振动半主动控制技术是一种参数控制技术<sup>[1-2]</sup>, 具有控制能耗低、控制方法简单等优点<sup>[3-4]</sup>. 为此, 本文以框架结构为对象, 对磁流变阻尼器的振动控制方法进行了研究, 并提出了一种可用于框架结构振动控制的半主动控制技术. 由于自由度较大、结构参数存在不确定性<sup>[5]</sup>、磁流变阻尼器具有非线性特征<sup>[6]</sup>, 本文引入了内平衡降价理论<sup>[7]</sup>和广义预测控制策略<sup>[8]</sup>.

## 1 系统模型降阶

设含比例阻尼的框架结构有限元模型为

$$\overline{M}\ddot{\overline{d}}(t) + \overline{C}\dot{\overline{d}}(t) + \overline{K}\overline{d}(t) = \overline{b}u(t) + \overline{M}[1]\ddot{x}_g \tag{1}$$

式中 : $\overline{M}$ 、 $\overline{C}$ 、 $\overline{K}$ ——结构的质量、刚度和阻尼矩阵 ; $\overline{d}(t)$ ——结构状态矢量 ; $\overline{b}$ —— $n \times r$  阶影响矩阵,  $n$  为模型阶数,  $r$  为激振器数目 ; $u$ ——激振器所提供的驱动力, 为  $r \times 1$  维向量 ; $\ddot{x}_g$ ——地震加速度 [ 1 ]—— $n \times 1$  维元素均为 1 的向量.

令系统的正则模态为  $\Phi$  ( $n \times n$ ),  $\overline{d} = \Phi d$ , 代入式( 1 )并左乘  $\Phi^T$  可得

$$I\ddot{d} + C\dot{d} + Kd = bu + f\ddot{x}_g \tag{2}$$

$$C = \text{diag}[2\xi\omega_1 \quad \dots \quad 2\xi\omega_n] \quad K = \text{diag}[\omega_1^2 \quad \dots \quad \omega_n^2]$$
$$b = \Phi^T \overline{b} \quad f = \Phi^T \overline{M}[1]$$

式中 : $I$ ——单位矩阵 ; $\xi$ ——阻尼比.

式( 2 )可写为

$$\ddot{d}_i + 2\xi_i\omega_i\dot{d}_i + \omega_i^2d_i = b_iu + f_i\ddot{x}_g \quad ( i = 1, 2, \dots, n ) \tag{3}$$

式中 : $d_i$ 、 $\xi_i$ 、 $\omega_i$ ——模态坐标下状态矢量的第  $i$  个变量、阻尼比和固有圆频率 ; $b_i$ —— $b$  的第  $i$  行元素 ; $f_i$ —— $f$  的第  $i$  个元素.

式( 3 )可表示为下列状态方程和输出方程 :

$$\begin{bmatrix} \dot{d}_i \\ d_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\xi_i\omega_i & -\omega_i^2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{d}_i \\ d_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_i \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} f_i \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{x}_g \quad ( i = 1, 2, \dots, n ) \tag{4}$$

$$y = \sum_{i=1}^n [c_{1i} \quad c_{2i}] \begin{bmatrix} \dot{d}_i \\ d_i \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中:  $y$ —— $m$  维向量;  $c_{1i}$ 、 $c_{2i}$ —— $m \times 1$  阶矩阵. 为达到系统内的平衡, 令

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{d}_i \\ d_i \end{bmatrix} &= \left\{ \frac{b_i b_i^T}{4\zeta_i \omega_i} \right\}^{1/2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \omega_i^{-1} \end{bmatrix} \Pi_1 \Pi_2 q_i \\ \Pi_1 &= \begin{bmatrix} v_{1i} & -v_{2i} \\ v_{2i} & v_{1i} \end{bmatrix} \quad \Pi_2 = \begin{bmatrix} \sigma_{1i}^{-1} & 0 \\ 0 & \sigma_{2i}^{-1} \end{bmatrix} \\ \sigma_{1i}^2 &= g [c_{1i}^T c_{1i} + \omega_i^{-2} c_{2i}^T c_{2i} [1 - 2\zeta_i \gamma_i + 2\zeta_i (1 + \gamma_i^2)^{1/2}]]^{1/2} \\ \sigma_{2i}^2 &= g [c_{1i}^T c_{1i} + \omega_i^{-2} c_{2i}^T c_{2i} [1 - 2\zeta_i \gamma_i - 2\zeta_i (1 + \gamma_i^2)^{1/2}]]^{1/2} \\ g &= \left\{ \frac{(b_i b_i^T)^T}{4\zeta_i \omega_i} \right\}^{1/2} \\ v_{1i} &= [(1 + v_i)/2]^{1/2} \quad v_{2i} = [(1 - v_i)/2]^{1/2} \\ v_i &= \operatorname{sgn}(\gamma_i [1 + \gamma_i^{-2}]^{1/2}) \quad \gamma_i = \omega_i c_{2i}^T c_{1i} / (c_{2i}^T c_{2i}) - \zeta_i \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可得到平衡系统, 记为

$$\dot{q}_i = A_i q_i + B_i u + F_i \quad y = \sum H_i q_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

只要取前  $p$  个可控度较大的模态进行控制即可得到降阶模型.

## 2 磁流变阻尼器计算模型

磁流变流体材料力学性能可用 Bingham 流体模型来描述. 在不同的外加磁场强度下, 磁流变流体材料将出现不同的剪切屈服强度. 因此, 可设计出剪切阀式磁流变阻尼器, 如图 1 所示. 磁流变阻尼出力计算公式为

$$F_{MR}(t) = \frac{12\eta LA_p^2}{\pi D h^3} u(t) + \frac{3L\tau_y}{h} A_p \operatorname{sgn}(u(t)) \quad (8)$$

式中:  $L$ ——活塞的有效长度;  $D$ ——缸体的内径;  $h$ ——活塞与缸体的间隙;  $\eta$ ——磁流变液的表现黏度系数;  $\tau_y$ ——磁流变液的屈服应力;  $u(t)$ ——活塞与缸体间的相对运动速度;  $A_p = \pi(D^2 - d^2)/4$ ,  $d$  为活塞的轴直径.

从式(8)可以看出, 磁流变阻尼器出力可以分为 2 部分: 第 1 部分是速度的线性函数, 属于不可控阻尼力; 第 2 部分是速度的符号函数, 可当作摩擦力. 通过改变阻尼器内液体的剪切屈服强度和磁场强度来改变其大小.

## 3 预测控制

首先将式(7)变成状态方程<sup>[9]</sup>

$$\dot{x} = Ax + Bu + F\ddot{x}_g \quad (9)$$

$$y = Hx \quad (10)$$

式中  $x = [q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_p]^T$ .

对式(9)进行离散化处理, 设离散周期为  $T$ , 可得

$$x(k+1) = A_1 x(k) + B_1 u(k) + P_1 F(k+1) + P_2 (F(k+1) - F(k)) \quad (11)$$

$$y(k) = Hx(k) \quad (12)$$

设预测步长为  $\lambda$ , 定义费用函数为

$$J = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\lambda} [y(k+j)^T Q(j) y(k+j)] + \frac{\lambda-1}{2} u(k)^T R u(k) \quad (13)$$

控制序列采用阶跃函数时,

$$u(k+j) = u(k) \quad (j = 1, 2, \dots, \lambda-1) \quad (14)$$

由式(11)(12)得

$$y(k+j) = HT(j)x(k) + HZ(j)u(k) \quad (15)$$

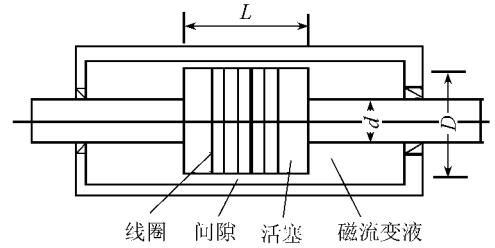


图1 剪切阀式磁流变阻尼器

Fig.1 Shear-valve magnetorheological dampers

式中:  $T(j) = A_1^j$ ;  $I_1$ ——单位矩阵;  $Z(j) = (I_1 + A_1 + A_1^2 + \dots + A_1^{j-1})B_1$ .

令  $\partial J / \partial u(k) = 0$ , 可得控制力为

$$u(k) = -\beta^{-1} \alpha x(k) \tag{16}$$

$$\begin{cases} \beta = \sum_{j=1}^{\lambda} Z^T(j) H^T Q(j) H Z(j) + (\lambda - 1) R \\ \alpha = \sum_{j=1}^{\lambda} Z^T(j) H^T Q(j) H T(j) \end{cases} \tag{17}$$

磁流变阻尼器是通过磁场的强度来调整阻尼器产生的阻尼力的,它不可能任意时刻都满足式(17),只能通过调整磁流变阻尼器的参数使其产生的阻尼力近似地满足式(17).考虑到广义预测控制可以预测下一步的控制力,本文提出一种简单的半主动控制策略,即

$$F_{MR}^i(k) = \begin{cases} \max F_{MR}^i & (F_{MR}^i(k) \times u^i(k) > 0) \\ \min F_{MR}^i & (\text{其他}) \end{cases} \tag{18}$$

式中:  $\max F_{MR}^i$ ,  $\min F_{MR}^i$ ——磁场强度最大和最小时第  $i$  个阻尼器产生的阻尼力;  $u^i(k)$ ——第  $i$  个阻尼器计算的控制力.在设计过程中,取最大预测控制力的一半来设计磁流变阻尼器.

4 数值模拟

以图 2 所示的含磁流变阻尼器的框架结构为研究对象.该结构材料为铝合金,弹性模量为 71 GPa,密度为 2.714 g/cm<sup>3</sup>,泊松比为 0.33.共有 24 个节点,每个节点都存在  $x$ ,  $y$  方向的位移及绕  $z$  轴的转角.自由度有 66 个.系统前 6 阶固有频率分别为 2.728 Hz, 9.607 Hz, 10.114 Hz, 12.115 Hz, 28.009 Hz, 33.596 Hz.假设磁流变阻尼器连接于节点 1 和 21 之间,夹角为  $\theta$ ,则式(1)中的控制影响矩阵  $\bar{b}$  为  $n$  维列向量,第 58 和 59 个元素为  $\sin\theta$  和  $\cos\theta$ ,其余为零.输出位于  $6x$ ,  $13x$  方向,系统各阶阻尼比均取为 0.04.由平衡降价法计算结果可知,前 10 阶模态的可控性排序为 1 2 3 5 7, 10 6 8 9 4.本文控制前 4 阶模态,即选择 1 2 3 5 这 4 个模态,考虑沙龙采样及地震波的采样频率,取离散周期为 0.02 s.

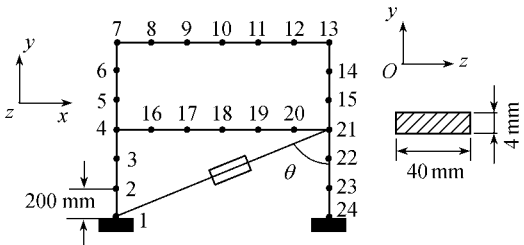


图 2 含磁流变阻尼器的框架结构  
Fig.2 Frame structures with magnetorheological dampers

由式(17)可得

$$\beta^{-1} \alpha = [177.68, -796.82, -149.75, 312.02, -12.39, 5.90, 0.91, -0.58]$$

预测控制的最大控制力为 14.4 N,故磁流变阻尼器需提供最大控制力为 7.2 N,可根据文献[1]的方法设计相应的阻尼器.本文所采用的地震波为 Elcentro 波,广义预测半主动控制结果如图 3 所示.控制力  $F$  与时间  $t$  的关系如图 4 所示.从控制效果来看,本文所提出的控制策略对框架结构来讲是有效的.

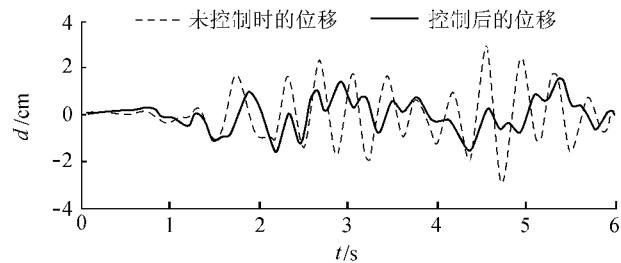


图 3 节点 6 的  $x$  方向的输出位移

Fig.3 Output displacement at node 6 in  $x$  direction

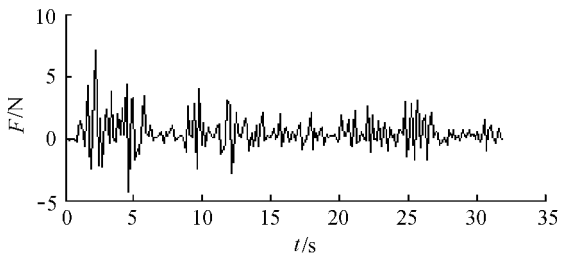


图 4 控制力  $F$  与时间  $t$  的关系

Fig.4 Curve for control force  $F$  vs. time  $t$

5 结束语

本文针对框架结构的特点和实际控制要求,在模型降价方面采用了基于内平衡理论的降价方法,在控制方法上研究了基于离散状态方程的广义预测半主动控制方法,并提出了适合框架结构的半主动控制策略.从

实例分析结果来看,控制效果是显著的.此外,本文预测控制所采用的阶跃控制函数是符合磁流变阻尼器半主动控制特点的.

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李会知, 樊友景. 某高层建筑风致振动惯性力的试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(3): 304-307.
- [3] 欧进萍, 隋莉莉. 结构振动控制的半主动磁流变质量驱动器(MR-AMD)[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(2): 108-114.
- [5] 周云, 徐龙河, 李忠献. 磁流变阻尼器半主动控制结构的地震反应分析[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 10-14.
- [6] DJAJAKESUKMA S L, SAMALI B, NGUYEN H. Study of a semi-active stiffness damper under various earthquake inputs[J]. Earthquake Eng and Structural Dynamics, 2002, 31: 1757-1776.
- [7] XU Y L, QU W L, SHUM K M. Seismic response control of frame structures using magnetorheological/electrorheological dampers[J]. Earthquake Eng and Structural Dynamics, 2000, 29: 557-575.
- [8] GREGORY J C Z. Reduction of large flexible spacecraft models using internal balancing theory[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1984, 7(6): 725-732.
- [9] LOPEZ F A. Model predictive control of structures I: Formulation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120(8): 1743-1760.

## Research on control of frame structures with magnetorheological dampers

ZHOU Xing-de<sup>1</sup>, GAO Zhong-wen<sup>1</sup>, PAN Rui-hong<sup>2</sup>, DU Cheng-bin<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nanjing Xiaguan Urban Construction Development Group Co. Ltd., Nanjing 210002, China)

**Abstract** The study was performed on vibration control of frame structures. For successful realization of semi-active control of the system under the action of earthquakes, a model reduction method was chosen based on the internal balancing theory on the controllability/observability of the system. In consideration of the indeterminacy of structural parameters and geometrical dimensions, the non-linearity of magnetorheological damper, the discrete characteristics in actual control, and the randomness of earthquakes, a generalized predictive control scheme based on the discrete state equation with the control force taken as the step function was studied, and a semi-active control technique for vibration control of frame structures was proposed. Finally, a numerical example was given to verify the effectiveness of the present method.

**Key words** frame; magnetorheological damper; semi-active control; generalized predictive control