

文章编号:1671-6833(2005)04-0039-05

巨一子型控制结构体系风振的半主动控制研究

张 洵 安, 谢 霄, 连业达

(西北工业大学力学与土木建筑学院,陕西 西安 710072)

摘 要:研究了利用磁流变阻尼器对巨一子型控制结构体系风振反应进行半主动控制的分析方法,建立了随机脉动风荷载下结构体系的振动控制方程,利用随机振动理论对脉动风荷载进行了计算机模拟,并采用基于经典最优控制理论的限界Hrovat 最优半主动控制算法对结构体系风振反应的控制进行了研究.算例分析表明:采用磁流变阻尼器对巨一子型控制结构体系进行半主动控制后,主结构顶层的位移和加速度控制的减振率 V_{AR} 分别为 29.65%和 68.09%,第 2 个子结构和第 3 个子结构顶层加速度控制的减振率 V_{AR} 分别为 40.18%和 70.05%,有效地减小了结构体系的风振反应.

关键词:磁流变阻尼器;巨一子型控制结构体系;风振反应;半主动控制

中图分类号:P 315.966;TU 352.2 **文献标识码:**A

0 引言

巨一子型控制结构体系是由一般巨型结构与结构被动控制原理结合所构造的一种新的结构体系形式,它利用各个子框架的巨大的质量调频作用所形成的一种具有自控制功能的结构体系^[1].随着建筑高度的不断增加,结构体系在外部载荷下的反应也会随之增大,如何进一步的改进该结构体系在正常使用载荷(如随机风载)及极端载荷作用下的反应,仍是一个值得进一步讨论和研究的问题.大量研究表明,风振对人的心理和生理影响起决定作用的是加速度值^[2].

在巨一子型控制结构体系中交叉使用其它结构振动控制技术为上述问题的解决开辟了新的解决方案.其中半主动控制以其所需外部能源少,控制过程依赖于结构反应信息或外干扰力信息,能获得很好的控制效果,成为近年来振动控制研究的热点之一,磁流变阻尼器是一种典型的半主动控制元件.国内外学者已对磁流变阻尼器在汽车悬挂系统^[3]、高层建筑^[4]、桥梁斜拉索^[5]以及海洋平台^[6]等减振方面的应用进行了广泛的研究并得到了初步的应用,这些研究论证了磁流变阻尼器在结构振动控制中应用的有效性.我们把这种装

置引入到巨一子型控制结构体系的风振控制中去,探讨其对风振控制的作用效果.

首先建立随机脉动风激励下巨一子型控制结构体系的振动方程,运用随机振动理论对结构体系的广义脉动风荷载进行计算机模拟,然后利用基于 Hrovat 控制律改进了的限界 Hrovat 最优半主动控制算法对结构体系的风振反应进行控制.结合算例计算验证磁流变阻尼器和半主动控制策略对巨一子型控制结构体系风振控制的有效性和实用性.

1 巨一子型控制结构体系风振控制的基本方程

1.1 巨一子型控制结构体系的振动方程

图 1 所示的巨一子型控制结构体系,主结构为 N 层,子结构为 N_1 个,其中每个子结构的自由度为 n ,在子框架顶层与主结构之间设置有若干个磁流变阻尼器,计算简图如图 1(a),计算模型如图 1(b) 所示,其振动控制方程为

$$MX + CX + KX = F(t) + B_s U(t) \quad (1)$$

式中: M, C, K 分别为结构体系的质量、阻尼和侧移刚度阵; $X = [x_p^T, x_1^T, x_2^T, \dots, x_{N_1}^T]^T$, x_p^T, x_i^T ($i = 1, 2, \dots, N_1$) 分别为结构体系主结构和子结

收稿日期:2005-06-07;修订日期:2005-10-12

基金项目:西北工业大学研究生创业种子基金资助项目(Z200534)

作者简介:张洵安(1959-),男,陕西西安人,西北工业大学教授,博士生导师,主要从事结构抗震、结构风振分析及控制研究工作.

构相对地面的位移; $F(t)=[f_p^T(Z,t),0^T]^T$,
 $f_p^T(Z,t)$ 为作用在主结构上的随机脉动风荷载向量
量^[7]; B_s 为控制力作用位置矩阵; $U(t)$ 为结构体
系上的控制力向量矩阵.

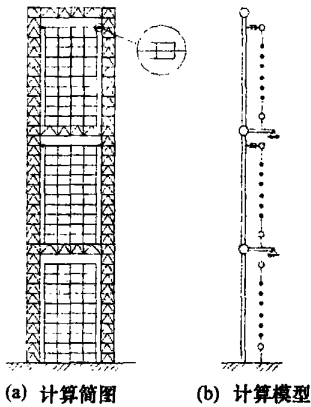


图 1 巨-子型控制结构体系

Fig. 1 Mega-sub controlled structural system

1.2 脉动风荷载的模拟计算

脉动风可以看作是零均值的高斯平稳随机
过程,其互功率谱密度函数 $S_F(\omega)$ 具有如下形式:

$$S_F(\omega)=[S_p]S_f(\omega) \tag{2}$$

式中 $[S_p]$ 为结构脉动风荷载向量互功率谱系数
矩阵; $S_f(\omega)=\frac{2c^2}{3\alpha(1+c^3)^{4/3}}$,其中 $c=\frac{600\omega}{\pi v_{10}}$, v_{10} 为
结构所在地 10m 高度处的平均风速.

根据多维随机过程样本模拟的理论,采用随
机模拟的方法可以模拟出结构体系的脉动风荷
载.常用的模拟技术有:基于一列三角函数的加
权、快速 Fourier 变化法和多次回归法.本文采用
三角函数加权法来模拟巨-子型控制结构体系的
脉动风荷载,主结构第 i 个质点($i=1,2,\dots,p$) 上
的脉动风荷载为^[9]

$$F_i(t)=\sum_{j=1}^i\sum_{k=1}^N|H_{ij}(\omega_k)|\sqrt{2\Delta\omega}\cdot \cos[\omega_k t+\phi_k+\alpha_j(k)] \tag{3}$$

其中: $\Delta\omega$ 为频率增量, $\Delta\omega=(\omega_i-\omega)/N$, ω_i 和
 ω 分别为频率域的上下限, N 为等分数; $\omega_k=\omega$
 $+(k-\frac{1}{2})\Delta\omega(k=1,2,\dots,N)$; ϕ_k 是在 $[0,2\pi]$ 上
均匀分布的随机数; $\alpha_j(k)=\arctan\frac{\text{Im}H_{ij}(\omega_k)}{\text{Re}H_{ij}(\omega_k)}$ 为两
个不同作用点之间的相位角; $H_{ij}(\omega_k)$ 是互功率谱
密度矩阵 $S(\omega)$ 分解后下三角矩阵 $H(\omega)$ 中当
 $\omega=\omega_k$ 时的元素.

1.3 磁流变阻尼器的恢复力模型

磁流变液 Magnetorheological Fluid, 简称 MRF)
主要由非导磁性液体和均匀分散于其中的高磁导
率、低磁滞性的微小软磁性颗粒组成.在无磁作用
时表现为牛顿流体的特性,剪切应力与剪切速率
呈线性关系.在磁场作用下,MRF 可以在毫秒级
的时间内快速、可逆地由流动性良好的牛顿流体
转变为高黏度、低流动性的 Bingham 塑性固体,稳
定流动下的 MRF 具有类似 Bingham 体的本构特
征,其本构关系可以近似描述为^[9]

$$\tau=\tau_s\text{sgn}(\dot{\gamma})+\eta\dot{\gamma} \tag{4}$$

式中: τ 为剪应力; $\dot{\gamma}$ 为剪切应变速率; τ_s 为由磁
场引起的剪切屈服应力; η 为流体的表观粘度.

若采用常用的剪切阀式磁流变阻尼器,如图 2
所示,其基于简化的平行板模型的恢复力公式为

$$\begin{cases} f(t)=f_\eta+f_\tau \\ f_\eta=\frac{12\eta A_p}{\pi D h^3}A_p\dot{x}_d \\ f_\tau=\frac{3L\tau_s}{h}A_p\text{sgn}(\dot{x}_d) \\ A_p=\frac{\pi}{4}(D_0^2-d^2) \end{cases} \tag{5}$$
$$\tag{6}$$

式中 $f(t)$ 为阻尼器的恢复力; f_η 类似普通流体而
产生的粘滞阻尼力,仅与流体流速和阻尼器的几
何参数有关,是不可调节或控制的; f_τ 是磁流变阻
尼器的可调部分,调节或控制的过程可以根据某
种半主动控制算法,调节输入电压或电流、改变阻
尼器的磁场强度,从而改变磁流变液的剪切屈服
强度,实现控制算法期望的控制力; L 为阻尼器活
塞长度; D 为缸体内径; D_0 为活塞的直径; d 活
塞杆直径; h 为活塞与缸体间的间隙; A_p 为活
塞的有效面积; \dot{x}_d 为活塞与缸体间的相对速度.

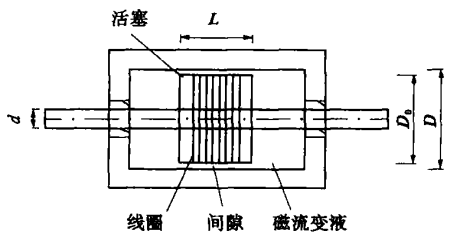


图 2 剪节阀式磁流变阻尼器构造

Fig. 2 The configuration of MR damper

2 磁流变阻尼器对结构体系风振反应的
半主动控制

对于式 (1) 所示的振动控制方程,可以表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{Z}(t) + \mathbf{D}\mathbf{F}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) \\ \mathbf{Z}(t_0) = \mathbf{Z}_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{Z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{X}(t) \\ \dot{\mathbf{X}}(t) \end{bmatrix}$, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}$,
 $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_s \end{bmatrix}$, $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{D}_s \end{bmatrix}$.

采用线性二次型(LQR)经典最优控制,系统的二次型性能泛函为

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty [\mathbf{Z}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{Z}(t) + \mathbf{U}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{U}(t)] dt \quad (8)$$

式中: \mathbf{Q} 为对称半正定矩阵; \mathbf{R} 为对称正定矩阵, \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 分别为 $\mathbf{Z}(t)$ 和 $\mathbf{U}(t)$ 的权矩阵,用以调整结构反应和控制力两者之间的相对重要程度.应用最优控制理论,使得目标函数的最优控制力为

$$\begin{cases} \mathbf{U}(t) = -\mathbf{G}\mathbf{Z}(t) \\ \mathbf{G} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} \end{cases} \quad (9)$$

式中, \mathbf{P} 是如下形式的Riccati 矩阵代数方程的解:

$$-\mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} - \mathbf{Q} = 0 \quad (10)$$

半主动控制算法的基本思路是:参照主动最优控制力向量 $\mathbf{U}(t)$,考虑磁流变阻尼器能实现控制力的实际情况,运用半主动控制律尽可能地使磁流变阻尼器的控制力 $\mathbf{U}_s(t)$ 接近主动最优控制力 $\mathbf{U}(t)$.因此,根据上述最优控制理论由式(9)计算出主动最优控制力向量 $\mathbf{U}(t)$ 后,应按半主动控制律计算出控制力向量 $\mathbf{U}_s(t)$,它与磁流变阻尼器实际实现的库仑力 $\mathbf{U}_d(t)$ 具有以下关系^[10]:

$$\mathbf{U}_s(t) = -\mathbf{U}_d(t) \quad (11)$$

式中, $\mathbf{U}_d(t)$ 的各个分量 u_d 可由式(11)求解.

在目前几种主要的半主动控制算法中,限界Hrovat 最优控制算法能够取得较好的效果^[11],表达式如下:

$$u_d = \begin{cases} c_d \dot{x} + f_{dy \max} \operatorname{sgn}(\dot{x}) & (\omega \dot{x} < 0 \text{ 且 } |\dot{u}| > u_{d \max}) \\ |\dot{u}| \operatorname{sgn}(\dot{x}) & (\omega \dot{x} < 0 \text{ 且 } |\dot{u}| < u_{d \max}) \\ c_d \dot{x} + f_{dy \max} \operatorname{sgn}(\dot{x}) & (\omega \dot{x} \geq 0) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $u_{d \max} = c_d |\dot{x}| + f_{dy \max}$ 是磁流变阻尼器相应于主动最优控制力 u 可能实现的最大阻尼力; \dot{x} 为磁流变阻尼器的相对速度.

3 算例仿真

为了验证本文说明的控制方案对巨一子型控制结构体系风振控制的有效性,本文将以图3所

示的结构体系为研究对象,本结构体系主结构为3层,子结构有3个,其中每个子结构均为10层,参照其他巨型结构—日本TC 大厦的设计资料,结构平面尺寸为32 m×33 m,且在结构体系第2,3个子结构顶部均设有磁流变阻尼器,阻尼器的设计参数参数如表1所示.本算例取50年一遇的基本风压为 $W_0=0.65 \text{ kN/m}^2$,地面粗糙系数 $\alpha=0.16$,风载体型系数 $\mu_{s \text{左}}=0.8$, $\mu_{s \text{右}}=-0.5$,梯度风高度 $H_T=350 \text{ m}$,重现期调整系数 $\mu=1.1$.

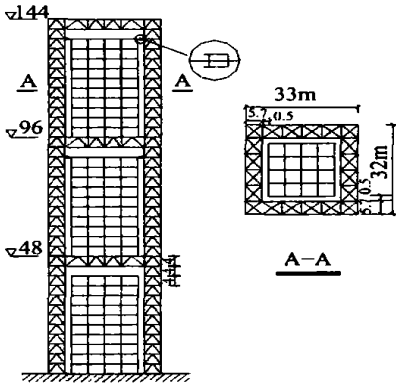


图3 算例构体系示意
Fig.3 The structural system of the computational example

在随机模拟的脉动风荷载作用下,本文运用时程分析法对结构体系在无控和半主动控制状态下的风振响应进行了对比分析.为了进行受控结构和无控结构体系风振响应的对比分析研究,定义减振率 V_{AR} 为

$$V_{AR} = \frac{Z_{nc} - Z_{co}}{Z_{nc}} \quad (13)$$

式中: Z_{nc} 和 Z_{co} 分别为结构体系在无控状态和受控状态下的风振响应.

图4给出了主结构顶层的脉动风荷载时程曲线,图5~图8给出了结构体系在半主动控制下与无控状态下风振响应的比较曲线,图中的虚线和实线分别代表无控状态和半主动控制下的风振响应,表2列出了结构体系几个代表层的最大风振响应值.从结构体系的风振响应时程曲线和表2可见,相对于无控状态,半主动控制下结构体系的风振响应均得到了明显的减小,主结构顶层的位移和加速度控制的减振率 V_{AR} 分别为29.65%和68.09%,第2个子结构和第3个子结构顶层加速度控制的减振率 V_{AR} 分别为40.18%和70.05%.

表 1 磁流变阻尼器的设计参数
Tab.1 The design parameters of MR damper

缸体内径 D/mm	活塞杆直径 d/mm	缝隙间距 h/mm	活塞有效长度 L/mm	最大剪切屈服应力 τ_{\max}/kPa	最小剪切屈服应力 τ_{\min}/kPa	液体表观粘度 $\eta/(\text{Pa}\cdot\text{s})$
200	60	2	350	10	1	1.3

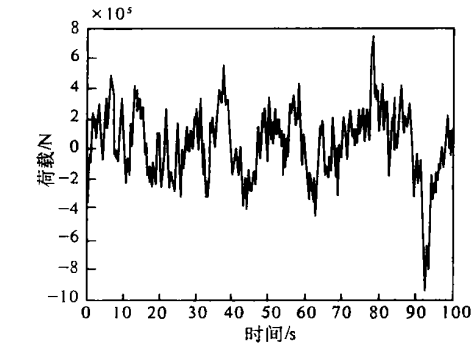


图 4 主结构顶层脉动风荷载时程曲线
Fig.4 Time history of fluctuating wind load at the top mega floor

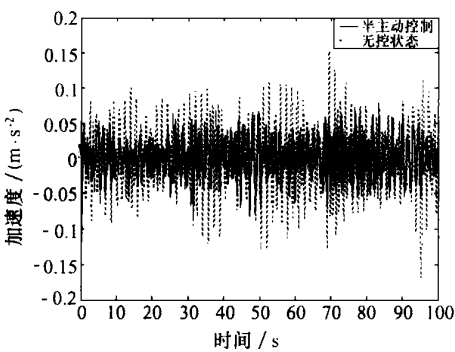


图 7 第 2 个子结构顶层加速度响应时程曲线
Fig.7 Time history acceleration responses at the top floor of the second substructure

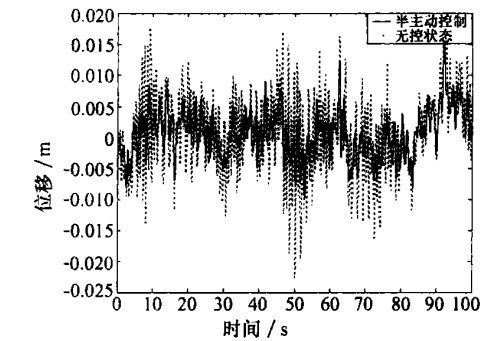


图 5 主要结构顶层位移响应时程曲线
Fig.5 Time history deformation responses at the top mega floor

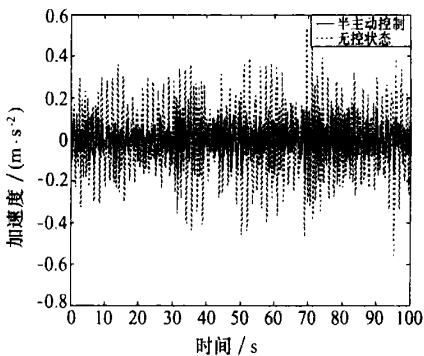


图 8 第 3 个子结构顶层加速度响应时程曲线
Fig.8 Time history acceleration responses at the top floor of the third substructure

表 2 结构体系的风振最大响应
Tab.2 The maximal response values of the wind-excited structural system

结构形式	主结构顶层位移/m	主结构顶层加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	第 2 个子结构顶层加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	第 3 个子结构顶层加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
无控结构	0.017 2	0.688 8	0.152 3	0.537 9
半主动控制结构	0.012 1	0.219 8	0.091 1	0.161 1

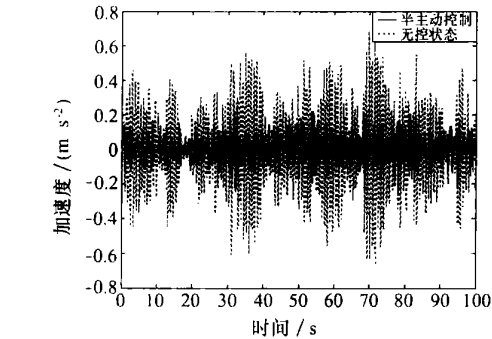


图 6 主结构顶层加速度响应时程曲线
Fig.6 Time history acceleration responses at the top mega floor

4 结论

本文结合具体算例,利用限界 Hovat 最优半主动控制算法计算了磁流变阻尼器对巨一子型控制结构体系风振反应的控制效果,通过与结构体系在无控状态下的响应比较,结果表明本文提出的控制方案对本结构体系有很好的控制效果,研

究结果为巨一子型控制结构体系的合理设计提供了理论应用基础.

参考文献:

[1] FENG M Q, CHAI W. Design of a mega-sub-controlled building system under stochastic wind loads[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1997, 12(3): 149~162.

[2] 李春祥, 黄金枝. 高层钢结构建筑TMD 风振舒适度控制设计[J]. 振动与冲击, 2000, 19(2): 17~19.

[3] YAO G Z, YAP F, CHEN G, et al. MR damper and its application for semi-active control of vehicle suspension system[J]. Mechatronics, 2002, 12(7): 963~973.

[4] N Y Q, YING Z G, WANG J Y, et al. Stochastic optimal control of wind-excited tall buildings using semi-active MR-TLCDs [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2004, 19(3): 269~277.

[5] LOU W J, N Y Q, KO J M. Modal damping and stepping-switch control of stay cables with magnetorheological fluid dampers[J]. Smart Structures and Materials, 2001, 43, 354~365.

[6] 管友海, 黄维平. MR 阻尼器在海洋平台半主动振动控制中的应用[J]. 中国海洋平台, 2002, 17(3): 25~28.

[7] 张洵安, 张建霖, 姜节胜. 子结构刚度对巨型框架减振结构体系的动态特性影响[J]. 西北工业大学学报, 2004, 22(1): 59~63.

[8] 胡卫兵, 何建. 高层建筑与高耸结构抗风计算及风振控制[M]. 中国建材工业出版社, 2003.

[9] PHILIPS R W. Engineering applications of fluids with variable yield stress [D], Berkely: University of California, 1969.

[10] 欧进萍. 结构振动控制—主动、半主动和智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[11] 周云, 吴志远, 邓雪松. 高层建筑磁流变阻尼器风振半主动控制系统的优化[J]. 振动与冲击, 2003, 20(1): 1~5.

[12] 张洵安, 汪宁. 非平移地震作用下巨型一子控制结构体系反应分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2005, 26(1): 42~46.

Semi-active Control for Wind-induced Vibration of Mega-sub Controlled Structural System

ZHANG Xun-an, XIE Xiao, LIAN Ye-da

(School of Mechanics and Civil Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract : In this paper, an analysis method of semi-active control using magnetorheological (MR) damper for the new structural configuration, that is, the mega-sub controlled structural system presented recently, is investigated under random wind excitations. The dynamic equations of this new structural system are derived based on complex modal analysis theory, and the practical fluctuating winds are simulated, then, the semi-active control law based on the classical LQR theory is further developed to investigate the controlling effectiveness of this new structural system. The numerical analysis indicates that the MR damper by using semi-active control algorithm can reduce or control the structural response evidently, the corresponding reducing amounts of the deformation response and the acceleration response at the top mega floor being 29.65% and 68.09% respectively, and the reducing amounts of the acceleration responses at the top floor of the second and the third substructure being 40.18% and 70.05% respectively.

Key words : MR damper; mega-sub controlled structural system; wind-induced vibration response; semi-active control