

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.03.014

带有磁流变阻尼器的结构振动实时控制试验

杜成斌¹,石平才²,于国军³,孙立国¹

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098 ; 2.福建省永正工程质量检测有限公司,福建 福州 350014 ;
3.江苏中森建筑设计有限公司,江苏 镇江 212009)

摘要 :对一带有 SG-MRD40 磁流变阻尼器的 3 层钢框架模型结构进行了结构减震控制模拟试验,基于 Matlab/Simulink 及 WinCon 编制实时控制软件,将依据 LQG 控制算法的最优控制,通过 Q8 系列 HIL 控制卡输出通道驱动继电器开关,将所需电压施加到阻尼器上,在振动台上进行了 0 ~ 40 Hz 正弦扫频及前 3 阶自振频率的正弦波下 LQG 半主动控制系统的试验.试验结果表明,通过 Matlab/Simulink 调用 WinCon 实时控制软件进行半主动控制是有效的,半主动控制系统能够使模型结构的地震响应得到显著的降低,其中顶层位移响应和绝对加速度响应的峰值减小了近 40% 左右,而所需电源功率只有 10 W 左右.

关键词 :磁流变阻尼器;WinCon 实时控制;LQG 半主动控制;最优控制

中图分类号 :TU352 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2009)03-0308-05

磁流变阻尼器是一种应用前景广阔的半主动控制装置,与其他智能材料,如压电材料^[1-2]等相比,具有控制力大、响应速度快、能耗低、可调范围宽、温度适应性强、结构简单等优点,非常适合在土木工程中应用.半主动控制体系通过动态改变结构参数达到结构减振的目的,具有出力大、输入能量小等优点,克服了主动控制的能量输入问题,并且具有良好的控制效果^[3-5].Yi 等^[6]对装有 4 个磁流变阻尼器的 1 座 6 层钢框架结构模型进行了试验研究,在 2 种激励频率下对原结构、被动控制结构和半主动控制结构的地震响应分析表明,限幅最优的半主动控制效果明显优于被动控制,顶层绝对加速度同原结构相比减小了 62% ;同被动控制结构相比减小了 30% ,而且控制效果总是稳定的.Ribakov 等^[7]对 5 种在不同位置安装磁流变阻尼器的基础隔震结构进行了研究;国内哈尔滨工业大学欧进萍等^[8]利用国产磁流变材料制作了最大阻尼力为 30 kN 的磁流变阻尼器,并将一些研究成果应用于海洋平台结构和大型桥梁斜拉索振动的磁流变阻尼控制.另外,周云等^[9]将 2 个磁流变阻尼器安装到一座 5 层钢混框架上,对原结构、被动控制结构和半主动控制结构的地震响应进行了比较,并于 2001 年对一座安装了 40 个磁流变阻尼器的 40 层钢框架结构进行了风振响应研究^[10].但总体上在半主动控制体系中,将实时控制算法应用于振动结构中的研究并不多,是实际应用中的一大难题.本文尝试采用 Matlab/Simulink 及 WinCon 编制实时控制软件及相应的计算程序,计算出实时最优控制力及其对应的所需电压,通过 Q8 系列 HIL 控制卡及磁流变阻尼器作用于被控制结构中,模型振动台试验表明取得了较好的效果.

1 线性二次高斯(LQG)控制算法及主动控制力

工程结构振动控制系统设计中,关键问题是如何确定控制力,而控制算法是确定控制力的基础,它的目的是寻找最佳的控制参数,使系统达到较好的性能指标,实现对结构的最佳控制.

在一维水平地面加速度 $\ddot{u}_g$ 的作用下,安装有 m 个磁流变减振驱动器的 n 自由度的运动微分方程可表示为

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = EU - M\ddot{u}_g \tag{1}$$

式中 : M 、 C 、 K ——结构的质量、阻尼和刚度矩阵 ; X 、 $\dot{X}$ 、 $\ddot{X}$ ——结构的位移、速度和加速度响应列向量 ; $-M\ddot{u}_g$ ——各时刻施加于各集中质量的地震外激励 ; I ——由 1 组成的列向量 ; E ——由磁流变阻尼器产生

收稿日期 :2008-06-02

基金项目 :江苏省高技术研究计划重大项目(BG2007048) 江苏省第五批六大人才高峰项目(B08041)

作者简介 :杜成斌(1965 —)男,江苏盐城,教授,博士,主要从事工程结构抗震及复合(智能)材料力学性能研究.

的控制力位置矩阵; U ——由磁流变阻尼器产生的控制力列向量; $\ddot{u}_g$ ——地震地面运动加速度。
方程(1)的状态方程可表示为

$$\dot{z} = Az + Bu + H\ddot{u}_g$$

其中

$$z = (x_1, x_2, \dots, x_n, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_n)^T$$

式中: z ——结构的状态响应向量; A ——系统矩阵; B ——控制装置位置矩阵; u ——由 LQG 控制算法求得的控制力; H ——地震作用的 $2n$ 维向量。

LQG 设计选择如下形式的二次型性能指标函数:

$$J_k = \frac{1}{2} \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \int_0^T [z^T Q z + u^T R u] dt \right\}$$

其中

$$Q = \alpha \begin{bmatrix} K & C/2 \\ C/2 & M \end{bmatrix} \quad R = \beta I$$

式中 α, β 是与控制系统期望达到的控制效果有关的参数。当前设计的目的就是寻找最优控制:

$$u = -Gz$$

使目标函数 J_k 达到最小。极小化式(3)可得闭环控制下最优的状态反馈增益矩阵 G 为

$$G = R^{-1} B^T P$$

式中 P 为 Riccati 方程的解^[11]。

本试验使用的 SG-MRD40 磁流变阻尼器是通过调整磁场的强度来改变阻尼器所产生的阻尼力,它不可能在任意瞬时都达到最优控制算法计算出的最优主动控制力,而只能通过调整阻尼器的参数使其阻尼力趋近于最优主动控制力。在实际应用中,SG-MRD40 磁流变阻尼器作为一种半主动控制装置,任一时刻它施加给结构的控制力都是被动产生的,因此,可采用如下的半主动控制律:

$$F = \begin{cases} F_{\max} & |u| > |F_{\max}| \\ u & |F_{\min}| \leq |u| \leq |F_{\max}| \\ F_{\min} & |u| < |F_{\min}| \end{cases}$$

式中: F ——阻尼器实际作用控制力; $F_{\max}, F_{\min}$ ——阻尼器实际作用的最大和最小控制力。

2 WinCon 实时控制软件及 Q8 系列 HIL 控制卡

首先利用半主动控制策略计算出最优实时控制,再通过从加拿大进口的 Q8 系列 HIL 控制卡导出接入磁流变阻尼器,由磁流变阻尼器作为作动器作用于结构中。本试验在 Matlab/Simulink 的平台上建立实时控制模型并编写相应程序,通过调用 WinCon 及 Q8 系列连接模块与实验模型实现相互连接及实时控制。

WinCon 是一种实时的 Windows 2000/XP 应用软件,它允许运行从 Simulink 模型中产生的实时代码,模型参数能够通过 WinCon 控制面板或在 Simulink 中随意改变。自动生成的实时代码组成一个独立于 Simulink 的单机控制器。WinCon 软件包含 2 个部分:WinCon 客户程序和 WinCon 服务器,它们通过 TCP/IP 协议通信。

Q8 系列硬件有 8 个模拟信号输入通道、8 个模拟信号输出通道及 32 个数字 I/O 转换线。同时,WinCon 实时控制软件为用户提供对应于 Q8 系列硬件的仿真模块,方便用户在 Matlab/Simulink 中调用进行仿真建模。

3 模型结构振动台试验

3.1 带有 SG-MRD40 磁流变阻尼器的减震控制系统

SG-MRD40 磁流变阻尼器为浙江宁波杉工结构监测与控制工程中心研制的产品,其最大阻尼力可达 600 N,行程达 ± 30 mm。基于 SG-MRD40 磁流变阻尼器的模型结构减震控制系统如图 1 所示。其工作原理为:加速度传感器测量框架结

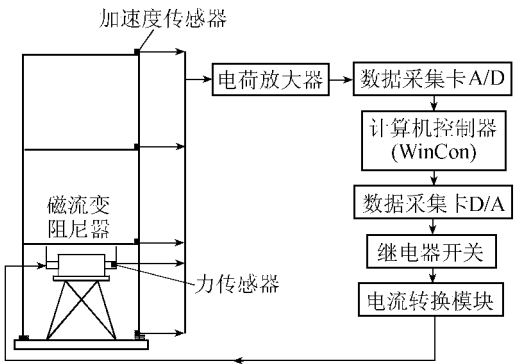


图 1 基于 SG-MRD40 磁流变阻尼器的减震控制系统
Fig. 1 Vibration control system based on SG-MRD40 MR damper

构各层(包括振动台面)的加速度响应值(电压值)控制计算机通过数据采集卡的 A/D 通道按 0.02 s 采样步长采集所测量的电压值,经过电荷放大器的整形和滤波并依据一定的换算准则,将所测量的电压值还原为实际加速度、速度和位移.其中数据采集卡采用东华公司生产的 DH5938 振动测试系统,采样频率为 500 Hz,模拟分辨率为 12 位.然后,控制计算机利用 WinCon 实时控制软件根据 LQG 控制算法计算出控制装置的最优控制,并通过 Q8 系列 HIL 控制卡输出通道驱动继电器开关,将所需要的电压施加到阻尼器上.

3.2 模型结构及其动力参数

模型结构振动试验是在河海大学 DY-300-2 电动振动试验台上完成的,模型结构为 3 层钢框架结构,层高 0.9 m,平面尺寸为 0.48 m×0.38 m,如图 2 所示.模型框架每层附加质量为 15 kg,加上各层板的质量 4.5 kg,可以确定模型结构 1~3 层各层的质量均为 19.5 kg.通过对框架结构进行频率为 5~40 Hz 的扫频,由频谱分析可得前 3 阶自振频率分别为 5.92 Hz、21.70 Hz 和 39.46 Hz.由此可以计算出模型结构的各层层间刚度为 64 kN/m.模型框架的底板通过螺栓与振动台台面相连接,SG-MRD40 磁流变阻尼器的缸筒通过支撑与振动台台面相连接,阻尼器的活塞杆通过球头座连接挡板并与模型结构的首层梁相连接.



图 2 模型结构振动台试验
Fig. 2 Vibration model tests

4 试验结果及分析

利用 Matlab/Simulink 建立实时控制模型并编写相应程序,再运行该模块,生成 WinCon 实时控制代码程序及 WinCon 实时控制窗口. Matlab/Simulink 的实时控制模块如图 3 所示.

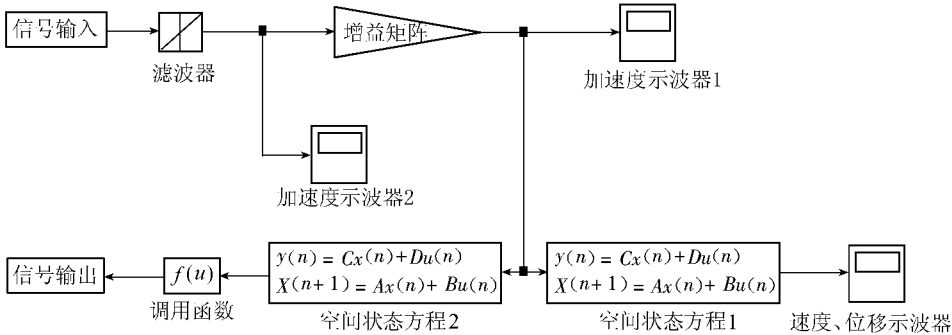


图 3 Matlab/Simulink 的实时控制模块

Fig. 3 Matlab/Simulink real-time control modules

首先进行基础激振为 5~40 Hz 正弦扫频(约 65 s)试验,得到框架结构顶层加速度、位移的控制效果图,如图 4 所示.图中深色为未控制时响应,浅色为控制后的响应.

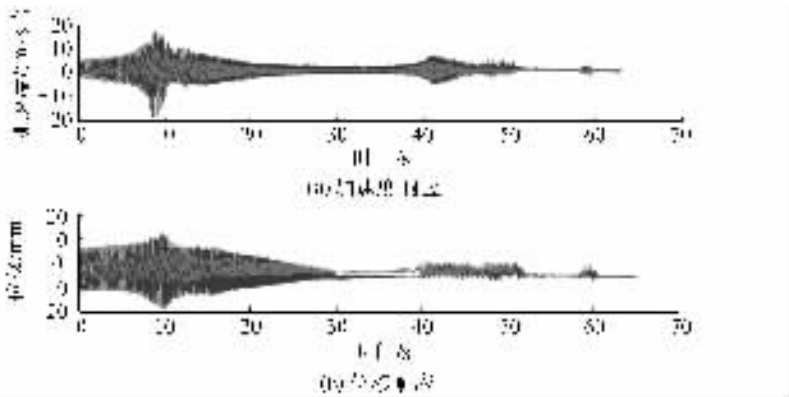


图 4 框架结构顶层 LQG 控制效果

Fig. 4 Acceleration and displacement responses at top floor based on LQG strategy

从响应的绝对值来看,控制后的响应要明显减小,在靠近 10 s 附近,加速度和位移有不同程度的降低.相对来讲,顶层的加速度和位移减小更大,控制后的响应峰值只有控制前的一半还不到.

其次,再分别以框架结构前 3 阶自振频率的正弦波进行试验,得到框架结构顶层的加速度及位移响应结果,第 2 阶自振频率的正弦波试验结果见图 5.

定义控制效率

$$\eta = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100\%$$

(7)

式中 A_1 、 A_2 分别为控制前后的加速度峰值或位移峰值.

表 1 为不同激振频率下框架 1~3 层无控制和 LQG 半主动控制加速度、位移峰值及其控制效率.

表 1 框架结构半主动控制加速度、位移峰值及其控制效率

Table 1 Peak values of acceleration and displacement and control efficiency of frame structure under action with different frequencies

激振频率/Hz	层数	加速度峰值/(m·s ⁻²)		加速度控制效率/%	位移峰值/mm		位移控制效率/%
		无控制	LQG 控制		无控制	LQG 控制	
5.92	3	18.50	10.75	41.89	16.31	11.21	31.26
	2	23.11	15.81	36.59	14.57	10.39	28.67
	1	15.52	9.19	40.79	13.43	9.97	25.79
21.70	3	6.24	4.27	31.57	6.71	4.84	27.83
	2	12.14	8.78	27.68	4.13	3.11	24.75
	1	9.82	7.49	23.73	5.07	3.20	3.20
39.46	3	2.89	2.03	29.76	3.93	3.77	4.16
	2	7.75	6.01	22.45	4.29	3.43	19.98
	1	5.87	6.03	-3.42	3.03	3.11	-2.76

从图 4、图 5 及表 1 可以清楚地看到,运用本文的控制策略,在以第 1 阶自振频率正弦激励时,框架各层加速度控制效率分别为 41.89%、36.59%和 40.79%,各层位移控制效率分别为 31.26%、28.67%和 25.79%;第 2 阶自振频率时,框架各层加速度控制效率分别为 31.57%、27.68%和 23.73%,各层位移控制效率分别为 27.83%、24.75%和 3.20%;第 3 阶自振频率时,框架各层加速度控制效率分别为 29.76%、22.45%和 -3.42%,各层位移控制效率分别为 4.16%、19.98%和 -2.76%.可见,在前 2 阶自振频率附近有较明显的控制效果,而在第 3 阶自振频率时,框架各层加速度和位移控制效率降低.可见,激振频率越高对框架各层的控制效率越低,出现此现象的主要原因是试验所使用的 SG-MRD40 磁流变阻尼器在激振为高频时控制效率降低.在整个振动控制试验中所需的外加电源最大功率只有 10 W.

5 结 语

通过基于 SG-MRD40 磁流变阻尼器的半主动控制算法在框架结构振动控制中的实时试验应用,表明将 Simulink 模型耦合进框架结构振动控制中是可行的,半主动控制算法对框架结构的振动控制效果明显,本试验中,只需加 0~10 W 功率的能源即可实现对模型框架结构振动的有效控制.开发利用 WinCon 实时控制软件于结构的实时控制是可行的,WinCon 实时控制软件提供大量实时控制模块可在 Matlab/Simulink 中方便调用,使得可以像模拟仿真一样在计算机中方便地进行实时控制试验.

利用 MR 阻尼器对结构进行减振控制是近年来兴起的一个崭新研究领域,具有良好的发展前景.但尚有很多问题仍需要深入研究,尤其是理论如何很好地用于工程实际,以及基于更为精确的恢复力模型的控制策略的改进问题等,都还有待于进一步深入研究.

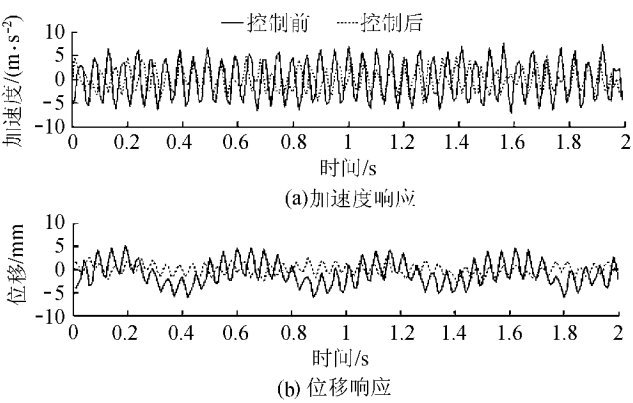


图 5 第 2 阶自振频率(21.70 Hz)时框架顶层振动响应
Fig. 5 Acceleration and displacement responses at top floor under action of sine waves with $f_2 = 21.70$ Hz

参考文献:

- [1] 于国军,杜成斌,艾亿谋.压电陶瓷用于柔性悬臂梁振动控制的试验研究[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(1):55-58.
- [2] 艾亿谋,杜成斌,于国军.压电智能材料在悬臂梁结构振动控制中的应用[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(6):695-698.
- [3] 熊超,郑坚,张进秋,等.磁流变智能阻尼器的工作原理及设计[J].机械设计与研究,2004,20(2):81-90.
- [4] 徐龙河,周云,李忠献.半主动控制磁流变阻尼器控制方法的比较与分析[J].世界地震工程,2000,16(3):107-111.
- [5] 周星德,郝中文,潘瑞鸿,等.含磁流变阻尼器的框架结构控制研究[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(1):35-38.
- [6] YI F, DYKE S J, FRECH S, et al. Investigation of magnetorheological dampers for earthquake hazard mitigation[C]//KOBORI T, INOUE Y, SETO K. Proceedings of the Second World Conference on Structural Control. Wiley:Chichester, 1998:349-358.
- [7] RIBAKOV Y, GLUCK J. Selective controlled base isolation system with magnetorheological dampers[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(6):1301-1324.
- [8] 欧进萍,王刚,田石柱.海洋平台结构振动的AMD主动控制试验研究[J].高技术通讯,2002,10(10):85-90.
- [9] 周云,徐龙河,李忠献.半主动磁流变阻尼器控制结构的地震反应分析[J].地震工程与工程振动,2000,20(2):107-111.
- [10] 周云,吴志远,梁兴文.磁流变阻尼器对高层建筑风振反应的半主动控制[J].地震工程与工程振动,2001,21(4):159-162.
- [11] 于国军.基于磁流变阻尼器技术的结构振动混合控制理论与试验研究[D].南京:河海大学,2007.

Real-time vibration control of frame structures with magneto-rheological dampers

DU Cheng-bin¹, SHI Ping-cai², YU Guo-jun³, SUN Li-guo¹

- (1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Fujian Yongzheng Construction Quality Testing Co., Ltd., Fuzhou 350014, China;
3. Jiangsu Zhongsen Architectural Design Co., Ltd., Zhenjiang 212009, China)

Abstract: Vibration control model tests on a three-story steel frame structure with an SG-MRD40 magneto-rheological (MR) damper were carried out. The real-time control software was compiled based on Matlab/Simulink and WinCon. The optimal control forces were determined based on the LQG algorithm, and the required voltages were applied to the MR damper using the output channel driving relay switches with Q8 series HIL control cards. Model tests on LQG semi-active control systems under the action of sine waves with frequencies from zero to 40 Hz and with first to third order intrinsic frequencies were performed on the vibration table. The test results indicate that the semi-active control is effective using Matlab/Simulink to call the WinCon real-time control software, and the seismic responses can be significantly reduced by the semi-active control system. The peak values of the displacement and acceleration responses at the top floor of the frame structure are reduced by about 40%, while the required electric power is only about 10 W.

Key words: magneto-rheological damper; WinCon real-time control; LQG semi-active control; optimal control