

巨型钢框架 MR 智能减震结构的地震反应分析 Seismic Response Analysis of Vibration-Reduction Steel Mega-Frame Structure with MR Intelligent Dampers

麦庆元, 韦树英

MAI Qing-yuan, WEI Shu-ying

(广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004)

(Institute of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China)

摘要:采用 wilson- Θ 法求解巨型钢框架 MR 智能减震结构运动方程, 提出基于最优主动控制算法(LQR 算法)的双出杆剪切阀式 MR 阻尼器的半主动控制算法, 并选择普通巨型钢框架结构(主结构 3 层, 次结构 3 层)和巨型钢框架, 用 LQR 算法和半主动控制算法分析最大地震反应及控制效果. 结果表明, 巨型钢框架 MR 智能减震结构比普通的巨型钢框架结构优越, MR 阻尼器能够有效地减小主结构的地震反应.

关键词:巨型钢框架 MR 阻尼器 半主动控制

中图分类号: TU352.12; TU311.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2007)01-0070-04

Abstract: The wilson- Θ method is used to solve basic vibration equations of the vibration-reduction steel mega-frame structure with MR intelligent dampers. The semi-active control algorithm of the double pole shear valve mode MR damper is proposed, which is based on the optimal active control algorithm (LQR). The uncontrolled steel mega-frame structure (3 stories in main structure, 3 stories insub-structure) and the vibration-reduction steel mega-frame structure with MR intelligent dampers are analyzed. The LQR algorithm and the semi-active control algorithm are separately employed to compute the maximal seismic responses and the vibration-reduction effect of the vibration-reduction steel mega-frame structure. The results of simulated computation imply that the vibration-reduction steel mega-frame structure with MR intelligent dampers is much better than the uncontrolled steel mega-frame. The MR dampers can significantly reduce the seismic response of the main structure in the steel mega-frame structure.

Key words: steel mega-frame, MR damper, semi-active control

巨型框架结构体系是适应高层建筑的发展而出现的一种新型的结构体系, 是未来高层, 超高层建筑结构体系发展和应用的主要方向之一. 一般情况下, 巨型钢框架结构由主框架和次框架组成, 主框架是一种大型的跨层框架, 每隔若干层设置一根巨型框架梁, 每隔 3~4 个开间设置一根巨型框架柱. 主框架巨型梁之间的楼层另设置柱网尺寸较小的次框架, 主框架承担水平荷载和由次框架传来的竖向荷载, 次框架只承担本身几个楼层的竖向荷载, 并传递给主框架. 巨型框架结构由于结构体型庞大, 因而在地震作用下将承受着巨大的水平地震作用.

采用连续化方法获取的巨型钢框架 MR 智能减

震结构的运动方程^[1]为:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = -[M]\{S_g\}\ddot{x}_g(t) + [S]\{F_d(t)\}, \quad (1)$$

式中: $[M]$, $[C]$ 和 $[K]$ 分别为结构的质量矩阵, 阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{x(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$ 和 $\{\ddot{x}(t)\}$ 分别为结构节点相对于地面的位移, 速度和加速度向量; $\ddot{x}_g(t)$ 为水平向地面运动加速度; $\{S_g\}$ 为水平向地面运动加速度作用位置向量; $\{F_d(t)\}$ 为 MR 阻尼器的控制力向量; $[S]$ 为 MR 阻尼器的作用位置矩阵. 本文采用 wilson- Θ 法^[2]求解运动方程(1), 并提出基于最优主动控制算法(LQR 算法)的双出杆剪切阀式 MR 阻尼器的半主动控制算法.

1 求解 MR 智能减震结构的运动方程

主结构的单元质量矩阵和单元刚度矩阵分别采

收稿日期: 2006-09-04

作者简介: 麦庆元(1977-), 女, 讲师, 主要从事结构振动控制研究.

用弯曲单元^[3]的一致质量矩阵和刚度矩阵. 主结构每个节点的位移为 3 个: 水平位移 u , 垂直位移 v 和转角 θ . 次结构的单元质量矩阵和刚度矩阵分别采用弯曲单元的集中质量矩阵和刚度矩阵. 次结构每个节点的位移为 2 个: 水平位移 u 和垂直位移 v . 结构的阻尼矩阵采用 Reyleigh 阻尼.

$$[C] = a[M] + b[K], \quad (2)$$

$$a = \frac{2\omega_1\omega_2(\zeta_1\omega_2 - \zeta_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}, b = \frac{2(\zeta_2\omega_2 - \zeta_1\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}, \quad (3)$$

式中: ω_1 和 ω_2 分别为第一, 第二阶振型的频率; ζ_1 和 ζ_2 为相应振型的阻尼比.

若令状态向量:

$$\{Z(t)\} = [\{x(t)\}^T \quad \{\dot{x}(t)\}^T]^T, \quad (4)$$

则有状态方程:

$$\{\dot{Z}(t)\} = [A]\{Z(t)\} + [B]\{F_d(t)\} + [E]\ddot{x}_g(t), \quad (5)$$

式中:

$$[A] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} [0] \\ -[M]^{-1}[S] \end{bmatrix}, \{E\} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ -\{S_g\} \end{Bmatrix}. \quad (6)$$

2 MR 阻尼器的力学模型

双出杆剪切阀式 MR 阻尼器的构造原理如图 1 所示.

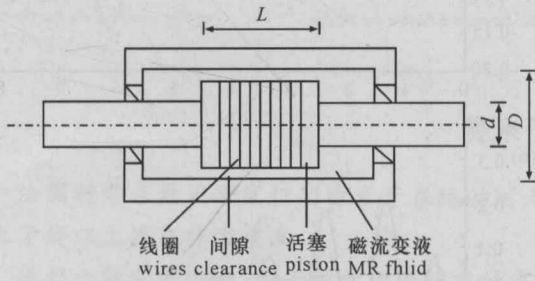


图 1 MR 阻尼器的基本结构

Fig. 1 The model of MR damper

这种 MR 阻尼器构造简单, 除了活塞之外没有其它运动的部件. 外缸同时是磁路的一部分. 在活塞的外径和内缸之间的环状空间是有效的磁流变液体的流动间隙. 当活塞内部的线圈在电流的作用下, 将在缸体与活塞的间隙内产生沿活塞半径的径向磁场. MR 阻尼器的活塞和缸体相对运动时, 活塞挤压液体流过缸体与活塞间的间隙, 液体在磁场作用下, 由牛顿流体转变为粘塑性体, 使流体的流动阻力增加, 通过调整线圈中的电流强度来调整磁场强度, 从而改变流体的阻力.

MR 阻尼器的简化力学模型^[4]可表示为:

$$F_d(t) = C_d \dot{x}_d(t) + f_{dy} \text{sgn}[\dot{x}_d(t)], \quad (7)$$

式中: C_d 为粘滞系数; f_{dy} 为摩擦力.

MR 阻尼器的阻尼力的具体表达式:

$$F_d(t) = \frac{12\eta_0 L A_p}{\pi D h^3} A_p \dot{x}_d(t) + \frac{3L\tau_y}{h} A_p \text{sgn}[\dot{x}_d(t)], \quad (8)$$

$$A_p = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2), \quad (9)$$

式中: L 为活塞的有效长度; D 为缸体的内径; d 为活塞直径; h 为活塞与缸体间的间隙; η_0 为磁流变液体的表观粘度系数; τ_y 为磁流变液体的剪切屈服应力; $\dot{x}_d(t)$ 为活塞与缸体间的相对运动速度.

3 MR 智能减震结构的控制策略

当采用经典的 LQR 控制算法^[5]时, 其性能指标:

$$J = \int_0^{t_f} [Z^T(t)QZ(t) + U^T(t)RU(t)]dt, \quad (10)$$

式中: t_f 为地震作用持续时间; Q 和 R 分别为半正定和正定的权系数矩阵, 最优控制力 $U(t)$ 由下式求得:

$$U(t) = -\frac{1}{2}R^{-1}B^T PZ(t) = -KZ(t), \quad (11)$$

式中: K 为增益矩阵, P 由以下的 Riccati 方程求得:

$$PZ + A^T P - PBR^{-1}B^T P + ZQ = 0. \quad (12)$$

MR 阻尼器所提供的阻尼力是在一定范围内变化的, 式(7)中的第一项相当于被动的粘滞的阻尼器, 不具有可调性. 当所加磁场使磁流变液达到屈服剪应力 τ_{ymin} 时, 阻尼器产生的可调阻尼力为最小值 f_{dymin} ; 当所加磁场使磁流变液达到屈服剪应力 τ_{ymax} 时, 阻尼器产生的可调阻尼力为最大值 f_{dymax} . MR 阻尼器所能提供的可调阻尼力 f_{d1} 的变化范围为:

$$f_{d1} = \left[-f_{dymax} \frac{1 - \text{sgn}(\dot{x}_d)}{2} + f_{dymin} \frac{1 + \text{sgn}(\dot{x}_d)}{2}, -f_{dymin} \frac{1 - \text{sgn}(\dot{x}_d)}{2} + f_{dymax} \frac{1 + \text{sgn}(\dot{x}_d)}{2} \right]. \quad (13)$$

当考虑 MR 阻尼器的不可调的粘滞阻尼力部分后, MR 阻尼器所提供的阻尼力范围如下:

$$F_d = \left[f_1 \frac{1 + \text{sgn}(\dot{x}_d)}{2} - f_2 \frac{1 - \text{sgn}(\dot{x}_d)}{2}, f_2 \frac{1 + \text{sgn}(\dot{x}_d)}{2} - f_1 \frac{1 - \text{sgn}(\dot{x}_d)}{2} \right], \quad (14)$$

式中: f_1, f_2 分别为 MR 阻尼器所提供的最小和最大阻尼力, 即在 f_{d1} 的基础上加上不可调的粘滞阻尼力.

为了使 MR 阻尼器实现的半主动控制效果尽量地接近 LQR 控制的效果, 同时由保证 MR 阻尼器更多地耗能, 我们采用了半主动控制算法:

$$F_d = \begin{cases} f_1, (u_d < f_1), \\ u_d, (f_1 < u_d < f_2), \\ f_2, (f_2 < u_d), \end{cases} \quad (15)$$

式中： u_d 为根据 LQR 算法计算出的最优主动控制力。

4 地震反应分析

选择一个主结构 3 层, 次结构 3 层的普通巨型钢框架和如图 2 所示的 MR 智能减震结构(基本参数和阻尼器尺寸分别见表 1 和表 2), 分别输入 ElCentro 波和天津波, ElCentro 波的加速度峰值 341.7gal, 地震持续时间 8s. 天津波的加速度峰值 200gal, 地震持续时间 11s, 半主动控制的采样时间步长为 0.02s. 巨型钢框架主结构的最大地震反应及控制效果, 最大控制力分别如表 3, 表 4 和图 3 所示。

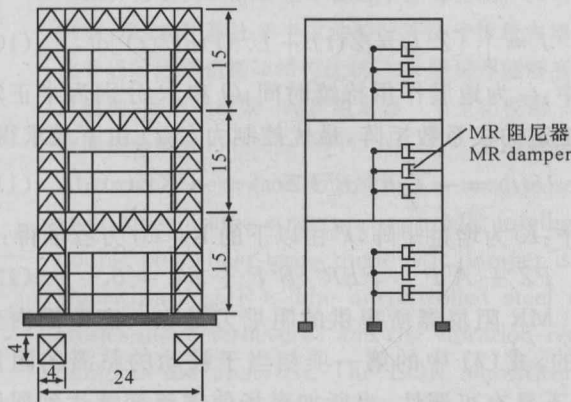


图 2 巨型钢框架 MR 智能减震结构

Fig. 2 The vibration-reduction steel mega-frame structure with MR intelligent dampers

表 1 巨型钢框架结构的基本参数

Table 1 The parameters of steel mega-frame structure

构件 Member	截面尺寸 Size (mm)	截面面积 Area (mm ²)
巨型柱 Mega-column	□700×700×60×60	153600
巨型柱斜支撑 Inclined support of mega-column	H350×350×19×25	23200
巨型柱水平支撑 Horizontal support of mega-column	H350×350×19×25	23200
巨型梁 Mega-beam	H1000×450×28×36	58384
巨型梁竖杆支撑 Vertical support of mega-beam	H350×350×19×25	23200
巨型梁斜杆支撑 Inclined support of mega-beam	H350×350×19×25	23200
次框架柱 Column of sub-frame	H400×400×20×20	23200
次框架梁 Beam of sub-frame	H1000×450×16×28	40304
巨梁内次梁 Sub-beam in main-structure	H1000×450×16×28	40304

表 2 MR 阻尼器的参数

Table 2 The parameters of MR damper

L (m)	D (m)	d (m)	h (m)	η_0 (Pa·s)	τ_{ymin} (kPa)	τ_{ymax} (kPa)
0.4	0.2	0.1	0.002	1.0	0	15

表 3 巨型钢框架主结构的地震反应及控制效果

Table 3 The seismic response and vibration-reduction effect in main-structure of steel mega-frame

算法 Control algorithm	层序 Storey	最大位移(m) Peak displacement (m)		控制效果(%) Controlled effect (%)	
		ElCentro 波 ElCentro	天津波 Tianjinbo	ElCentro 波 ElCentro	天津波 Tianjinbo
无控制 Uncontrolled	1	0.0658	0.0927		
	2	0.1525	0.2073		
	3	0.1908	0.2580		
LQR 控制 LQR control	1	0.0383	0.0531	41.79	42.72
	2	0.0876	0.1267	42.56	38.88
	3	0.1081	0.1579	43.34	38.80
半主动控制 Semi-active control	1	0.0515	0.0727	21.73	21.57
	2	0.1176	0.1634	22.88	21.18
	3	0.1448	0.1997	24.11	22.60

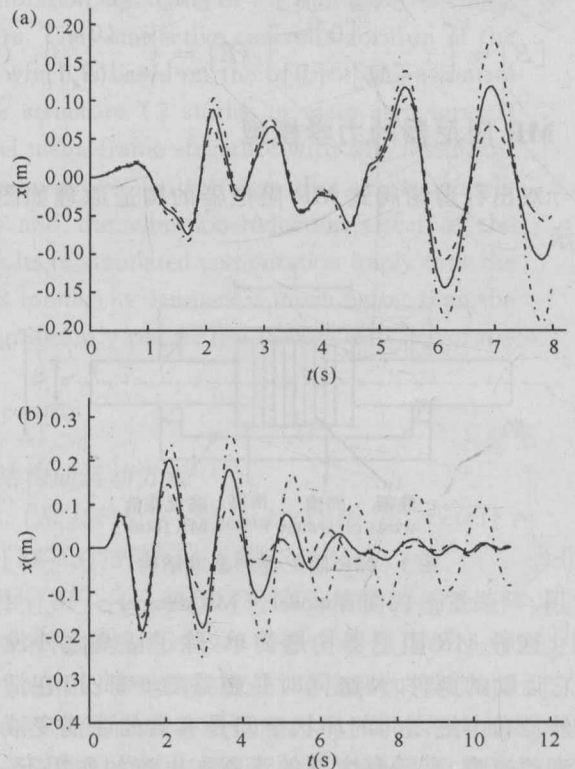


图 3 巨型钢框架主结构顶层位移时程曲线

Fig. 3 The time-history curves of the top storey in main-structure of steel mega-frame structure

(a) ElCentro 波 ElCentro; (b) 天津波 Tianjinbo
 - · - · - : 无控制; --- : LQR 控制; — : 半主动控制
 - · - · - : Uncontrolled; --- : LQR; — : Semi-active

表 4 MR 阻尼器的最大控制力

Table 4 The maximal control force of MR damper

层序 Storey	MR 阻尼器 序号 Number of MR damper	ElCentro 波 ElCentro(kN)		天津波 Tianjinbo(kN)	
		LQR 控制 LQR control	半主动控制 Semi-active control	LQR 控制 LQR control	半主动控制 Semi-active control
1	1	331.6	307.8	284.1	352.0
	2	523.5	436.9	658.8	407.1
	3	795.9	449.4	1057.9	448.1
2	1	225.3	268.3	314.1	297.9
	2	571.0	363.4	798.5	361.3
	3	930.9	397.4	1297.7	421.5
3	1	78.0	90.8	123.2	141.6
	2	126.9	207.8	174.0	281.3
	3	236.8	272.4	337.2	290.7

从表 3 和图 3 可以看出,巨型钢框架 MR 智能减震结构同原结构相比,主结构各层位移反应明显减小,ElCentro 和天津波分别作用下,MR 阻尼器的半主动控制对结构的顶层位移反应的控制效果分别达到 24.11% 和 22.60%。从表 4 可以看出,在两种地震波作用下,半主动控制的 MR 阻尼器的最大阻尼力基本小于 LQR 控制算法的主动控制力,说明本文提出在巨型钢框架的主框架与次框架之间设置 MR 阻尼器的方法,能够有效地减小主结构的地震反应,巨型钢框 MR 智能减震结构比普通的巨型钢框架结构优越。

5 结论

MR 阻尼器是一种性能优秀的半主动控制装置,它具有装置简单,所需外加能源极小和容易实现的特点,它所需的花费不大,但却可有效地抑制结构的地震反应。

本文提出在巨型钢框架的主框架与次框架之间设置 MR 阻尼器的方法,能够有效地减小主结构的地震反应,巨型钢框 MR 智能减震结构比普通的巨型钢框架结构优越。

参考文献:

- [1] 郑廷银,赵惠麟. 高层钢结构巨型钢框架体系的二阶位移实用计算[J]. 东南大学学报:自然科学版,2002,32(5):794-798.
- [2] 陈以新. Matlab 在结构动力分析中的应用[J]. 福建建筑,1999(2):44-47.
- [3] 赵更新. 土木工程结构分析程序设计[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.
- [4] 隋莉莉,欧进萍. 半主动磁流变减振驱动器的工作原理及应用[J]. 哈尔滨建筑大学学报,2002,35(3):9-13.
- [5] 隋莉莉,欧进萍. MR 减振驱动器用于结构振动控制的算法研究[J]. 应用力学学报,2002,19(3):144-148.

(责任编辑:邓大玉)

费米子运动时存在排斥

法国科学家最近研究证明费米子在运动时无法保持很近的距离,费米子运动时存在排斥。这对于在量子尺度上了解以上现象非常重要。

很长一段时间以来,量子力学理论规定特定的粒子——费米子无法以非常近的距离保持运动。例如,在一束全同粒子束中,理论上假设粒子之间的距离总是要大于给定值的,我们称之为“相关长度”。

法国科学家使用相同的包含了两个氦同位素的系统进行实验来比较了费米子和玻色子的行为。在同样的条件下,玻色子由于量子干涉导致它们呈现出相反的性质——“聚束”性,也就是发现两个接近粒子的几率变大了。粒子之间相互排斥,尽管它们间的相互作用几乎可以忽略不计。事实上,这一“反聚束”是由量子干涉引起的,它保证了找到两个很接近的粒子的几率为零。

这项研究结论包含了我们对于探测原子之间相互作用能力的提高,因此未来我们或许可以进一步了解物质在量子尺度下的各种行为。

(据科学网)