

考虑竖向地震作用的振动控制及其优化研究¹⁾

张延年* 董锦坤** 朱朝艳** 范鹤† 李艺†

*(沈阳建筑大学土木工程学院, 沈阳 110015) ** (辽宁工学院土木建筑系, 锦州 121001)

†(东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110004)

摘要 目前, MRD 结构的分析通常只考虑水平地震动而不考虑竖向地震动的影响, 地面的水平运动和竖向运动具有相关性, 从而影响控制效果. 因此对双向地震耦合作用下 MRD 结构的理论进行研究, 建立动力分析模型并得出运动微分方程. 以 8 层 MRD 结构为例进行地震反应分析, 研究表明, 考虑和不考虑竖向地震作用, MRD 对结构均有良好的控制作用, 但是竖向地震作用的存在, 使结构各层的层间位移峰值有不同程度的增加, 其增量随着竖向地震作用的增加而增加, 因此建议在高烈度地区的建筑物考虑竖向地震作用对结构的影响. 建立 MRD 结构优化设计模型, 采用 IHGA 程序对结构进行优化设计. 结果表明, MRD 结构在各种工况下的各项地震反应均得到更好的控制.

关键词 半主动控制, MRD, 地震耦合作用, 结构优化, 遗传算法

SEISMIC RESPONSE CONTRAL OF STRUCTURES WHEN THE EFFECT OF VERTICAL EARTHQUAKE IS CONSIDERED AND ITS OPTIMIZATION

ZHANG Yannian* DONG Jinkun** ZHU Chaoyan** FAN He† LI Yi†

*(School of Civil Engineering, Shenyang Architecture University, Shenyang 110015, China)

** (Department of Civil Engineering, Liaoning Institute of Technology, Jinzhou 121001, China)

†(School of Resource & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract Only the action of horizontal earthquake was considered generally when structure with MRD was analyzed. The correlation of movements in horizontal and vertical directions was not well studied. This paper considers the structure with MRD under bidirectional coupling earthquake. The dynamic analysis model is set up, kinetic differential equations are obtained, and dynamic time history analysis is made. Taking an 8-story structure with MRD for example, the results show that the seismic responses of the structure with MRD increase in some extent under the action of earthquake in vertical direction. Therefore, it is highly recommended that the influence of vertical earthquake action on such structures should be taken into account in high-intensity earthquake regions. The optimal model for structures with MRD is set up. The various earthquake responses of structures with MRD under various loading conditions can be better controlled after the optimization with IHGA.

Key words semi-active control, MRD, restoring model, coupling effect of earthquake, structural optimization, improved genetic algorithm, hybrid genetic algorithm

近年来, 结构振动控制的研究取得很大进展^[1], 其中半主动控制所需外部能源少, 并能够获得很好的控制效果^[2], 尤其是智能材料的出现使其成为国际上近年来研究的一个热点^[3]. 磁流变液

(MRF) 是在 1948 年由 Rabinow 发明的一种智能材料, 具有强度高、黏度低、能量需求小、温度稳定性好、对通常在制造过程中引入的杂质不敏感等特点^[4]. 由其制成的磁流变阻尼器 (MRD) 是当今最

2005-04-21 收到第 1 稿, 2005-11-09 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金项目 (0508008) 和辽宁省博士启动基金项目 (20041014) 资助.

新的半主动控制装置，除性能安全可靠，制造成本较低外^[5]，还具有体积小、功耗少、耐久性好、机构简单、可靠性强、适用面大、响应速度快、动态范围广、频率响应高、阻尼力大且连续可调等特点，特别是它能根据系统的振动特性产生最佳阻尼力，因而在智能结构领域具有广阔的应用前景^[6~9]。

目前，MRD 结构的分析通常只考虑水平地震动而不考虑竖向地震动的影响，有关多向地震动及其相关性的研究很少。水平地面运动和竖向地面运动具有相关性，从而影响控制效果，尚需进一步研究。MRD 结构中的一个重要问题就是确定 MRD 的数目和位置，以最少的数目、最佳的位置实现控制目的。而目前国内这方面的研究较为薄弱，需要进一步研究。

1 动力分析模型建立

假定同一层各构件的上下移动量基本相同，采用层间剪切型分析模型，墙体的质量各集中于各层，整个结构建立在刚性地基上，不考虑基础的提高，不考虑土与结构的相互作用。以 n 层 MRD 结构为例，MRD 恢复力模型采用平行板模型^[10]，建立多向地震耦合作用下的动力分析模型如图 1 所示。 $m_1 \sim m_n$ 分别为上部结构各层质量； $k_{v,1} \sim k_{v,n}$ ，

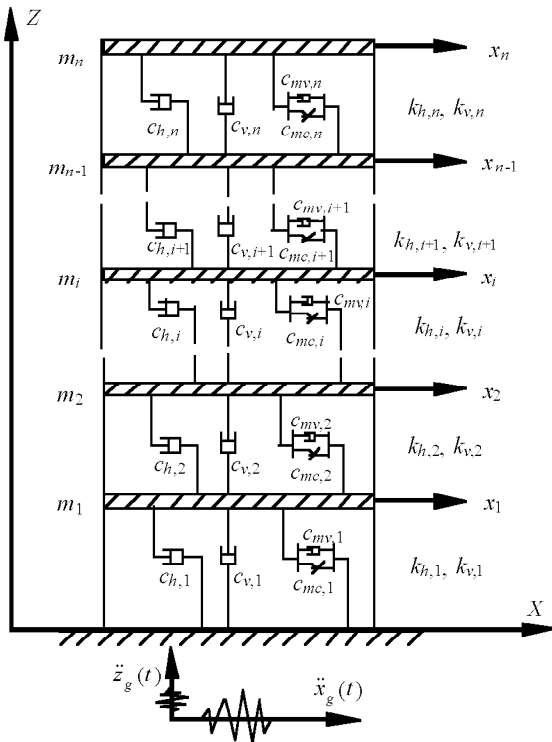


图 1 MRD 结构的动力分析模型

$k_{h,1} \sim k_{h,n}$ 分别为上部结构各层竖向和水平刚度； $c_{v,1} \sim c_{v,n}$ ， $c_{h,1} \sim c_{h,n}$ 分别为上部结构各层竖向和水平阻尼； $c_{mc,1} \sim c_{mc,n}$ ， $c_{mv,1} \sim c_{mv,n}$ 分别为各层 MRD 提供的库仑阻尼和黏滞阻尼； $\ddot{x}_g(t)$ ， $\ddot{z}_g(t)$ 分别为水平和竖向加速度时程。

2 竖向运动微分方程的建立

由于在水平与竖向地震同时输入时，结构竖向运动是独立的。从 MRD 结构中取有代表性的每一质量层，位移以静力平衡位置作为基准，由于相对于动力体系的静力平衡位置所写的运动方程不受重力影响，所以图中未标出重力，因此 MRD 结构各层的平衡方程为：

首层

$$m_1(\ddot{z}_1 + \ddot{z}_g) + c_{v,1}\dot{z}_1 - c_{v,2}(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + k_{v,1}z_1 - k_{v,2}(z_2 - z_1) = 0 \quad (1)$$

标准层

$$m_i(\ddot{z}_i + \ddot{z}_g) + c_{v,i}(\dot{z}_i - \dot{z}_{i-1}) - c_{v,i+1}(\dot{z}_{i+1} - \dot{z}_i) + k_{v,i}(z_i - z_{i-1}) - k_{v,i+1}(z_{i+1} - z_i) = 0 \quad (2)$$

顶层

$$m_n(\ddot{z}_n + \ddot{z}_g) + c_{v,n}(\dot{z}_n - \dot{z}_{n-1}) + k_{v,n}(z_n - z_{n-1}) = 0 \quad (3)$$

将各层的平衡方程整理成矩阵形式，则 MRD 结构竖向运动微分方程为

$$[M]\{\ddot{z}\} + [C_v]\{\dot{z}\} + [K_v]\{z\} = [F]\{\ddot{z}_g\} \quad (4)$$

式中 $\{z\}$ ， $\{\dot{z}\}$ ， $\{\ddot{z}\}$ 为 MRD 结构各层竖向相对位移、速度和加速度列向量； $[M]$ ， $[K_v]$ ， $[C_v]$ 为 MRD 结构质量、竖向刚度和阻尼矩阵； $[F]$ 为地面地震加速度转换矩阵。

3 水平运动微分方程的建立

由于水平运动与竖向运动因结构的几何非线性而耦联，第 i 层柱受力如图 2 所示。则柱端剪力为：

$$F_i = k_{h,i}(x_i - x_{i-1}) + \frac{p_i \Delta_i}{h_i} = k_{h,i}(x_i - x_{i-1}) + \frac{p_i(x_i - x_{i-1})}{h_i} \quad (5)$$

式中 h_i 为第 i 层层高； Δ_i 为第 i 层层间位移； p_i 为结构第 i 层含竖向地震影响的轴向力，其表达式

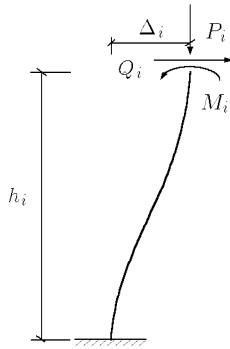


图 2 柱受力图

为

$$p_i = \frac{EA_i}{h_i}(z_i - z_{i-1}) - m_i g \quad (6)$$

MRD 结构各层水平受力如图 6~ 图 8 所示. 根据平衡条件, 可写出结构各层的平衡方程为:

首层

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_{h,1} + c_{h,2}) \dot{x}_1 - c_{h,2} \dot{x}_2 + (k_{h,1} + k_{h,2}) x_1 - k_{h,2} x_2 + \left(\frac{p_1}{h_1} + \frac{p_2}{h_2}\right) x_1 - \frac{p_2}{h_2} x_2 = c_{m,2} - c_{m,1} - m_1 \ddot{x}_g \quad (7)$$

标准层

$$m_i \ddot{x}_i - c_{h,i-1} \dot{x}_{i-1} + (c_{h,i} + c_{h,i+1}) \dot{x}_i - c_{h,i+1} \dot{x}_{i+1} - k_{h,i} x_{i-1} + (k_{h,i} + k_{h,i+1}) x_i - k_{h,i+1} x_{i+1} - \frac{p_i}{h_i} x_{i-1} + \left(\frac{p_i}{h_i} + \frac{p_{i+1}}{h_{i+1}}\right) x_i - \frac{p_{i+1}}{h_{i+1}} x_{i+1} = c_{m,i+1} - c_{m,i} - m_i \ddot{x}_g \quad (8)$$

顶层

$$m_n \ddot{x}_n - c_{h,n} \dot{x}_{n-1} + c_{h,n} \dot{x}_n - k_{h,n} x_{n-1} + k_{h,n} x_n - \frac{p_n}{h_n} x_{n-1} + \frac{p_n}{h_n} x_n = -c_{m,n} - m_n \ddot{x}_g \quad (9)$$

将各层的平衡方程整理成矩阵形式, 则 MRD 结构水平运动微分方程为

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C_h]\{\dot{x}\} + ([K_h] + [K_p])\{x\} = [C_m] + [F]\{\ddot{x}_g\} \quad (10)$$

式中 $\{x\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{\ddot{x}\}$ 分别为 MRD 结构各层水平相对位移、速度和加速度列向量; $[C_h]$, $[K_h]$ 为 MRD 结构的水平阻尼矩阵和水平刚度矩阵; $[K_p]$ 为考虑竖向地震力影响的几何刚度矩阵; $\{\ddot{x}_g\}$ 为地震加速度输入; $[C_m]$ 为 MRD 的总阻尼向量. 如果 MRD 结构每一层都安装 MRD, 问题将容易解决, 但是某些情况下是在 MRD 结构上选择安装 MRD, 并不是在每一层间都安装 MRD. 假设安装 r 个 MRD, 则

需要引入一个 $n \times r$ 控制装置位置矩阵 $[E]$, 这时的 $[C_m]$ 为 r 维 MRD 的总阻尼向量, 可得运动方程为

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C_h]\{\dot{x}\} + ([K_h] + [K_p])\{x\} = [E][C_m] + [F]\{\ddot{x}_g\} \quad (11)$$

如果在每一层均设置 MRD, 那么就很容易得到阻尼系数矩阵, 若并不是在每一层间都设置 MRD, 则得到阻尼系数矩阵就比较复杂, 将 MRD 所产生的总阻尼力向量 $[C_m]$ 分解

$$[C_m] = [C_v] + [U] \quad (12)$$

$[C_v]$, $[U]$ 分别为 MRD 的黏滞阻尼力和库仑阻尼力向量. 一般情况下, MRD 都采用同一型号, 因此, 黏滞阻尼系数均为 c_v , 则:

$$[C_v] = c_v [V] \quad (13)$$

其中, $[V]$ 为各自 MRD 活塞与缸体间的相对速度向量, 它与各楼层的运动速度向量 $[\dot{X}]$ 的关系为

$$[V] = -[E]^T \{\dot{x}\} \quad (14)$$

则运动方程为

$$[M]\{\ddot{x}\} + ([C_h] + c_n [E][E]^T)\{\dot{x}\} + ([K_h] + [K_p])\{x\} = [E][U] + [F]\{\ddot{x}_g\} \quad (15)$$

4 改进混合遗传算法

4.1 标准遗传算法

标准遗传算法^[11](standard genetic algorithm, 简称 SGA) 在整个种群空间内随机搜索, 并且通过选择算子、交叉算子、变异算子的作用使种群不断进化, 从而使问题的结果被不断优化直至达到最优, 详见文献 [12].

4.2 遗传算法的改进

包含转基因算子^[13]的改进遗传算法计算步骤:

- (1) 初始化群体, 种群个体数为 M ;
- (2) 由适应值函数计算每个个体适应值;
- (3) 实施选择操作;
- (4) 以交叉概率 P_c 实施操作;
- (5) 以变异概率 P_m 实施操作;
- (6) 以概率 P_t 实施转基因操作;
- (7) 满足程序终止条件, 结束搜索.

4.3 遗传算法与单向搜索算法的混合

SGA 的缺点基本上都可以得到很好的改善, 但 SGA 的局部搜索能力差和迭代过程缓慢的缺点无法

增加(见表2)。因此,建议在高烈度地区的MRD结构考虑竖向地震作用对结构的影响。使用IHGA对该结构进行优化设计。约束条件为: $[e_s] = 4$, $[e_t] = 8$, $[S] = 3000\text{kN}$, $[\Delta_1] = 10\text{cm}$ 。优化结果

为: $E = [3, 2, 2, 1, 0, 0, 0, 0]$ 。优化后,结构在各种工况下的各项地震反应均得到更好地控制(见表3)。图4~图7分别为MRD结构优化后在工况2下相对加速度、速度、位移、层间剪力时程曲线。

表1 20t足尺MRD主要性能参数

冲程	最大阻尼力	最大最小力比	最大耗电功率	线圈	缸体直径	磁流变液动黏系数	流体最大屈服应力	两极间隙	有效流体体积
±8 cm	200 kN	10.1(v-10 cm/s)	22 W(1A,22V)	3×1 050	20.32 cm	0.6 Pa·s	50 kPa	2 mm	90 cm ³

表2 MRD结构在各种工况下的地震反应比较

	相对加速度峰值/cm·s ⁻²	与工况1进行比较	相对速度峰值/cm·s ⁻¹	与工况1进行比较	相对位移峰值/cm	与工况1进行比较	层间剪力峰值/kN	与工况1进行比较
工况1	350.04	—	38.48	—	7.86	—	2 350.22	—
工况2	371.59	增加 6.61%	40.71	增加 5.80%	8.34	增加 6.10%	2 460.67	增加 4.70%
工况3	400.95	增加 14.54%	44.05	增加 14.47%	9.09	增加 15.65%	2 659.99	增加 13.18%

表3 MRD结构优化前后的地震反应比较

	相对加速度峰值/cm·s ⁻²	与优化前进行比较	相对速度峰值/cm·s ⁻¹	与优化前进行比较	相对位移峰值/cm	与优化前进行比较	层间剪力峰值/kN	与优化前进行比较
优化后工况1	318.98	减小 8.87%	34.56	减小 10.19%	6.98	减小 11.20%	2 114.28	减小 10.04%
优化后工况2	335.69	减小 9.66%	36.39	减小 10.61%	7.38	减小 11.51%	2 212.40	减小 10.09%
优化后工况3	359.88	减小 10.24%	39.27	减小 10.85%	8.01	减小 11.88%	2 371.28	减小 10.85%

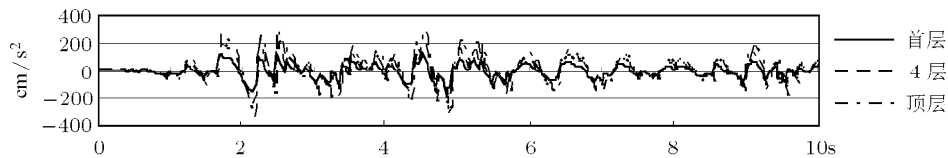


图4 MRD结构加速度时程曲线(优化工况2)

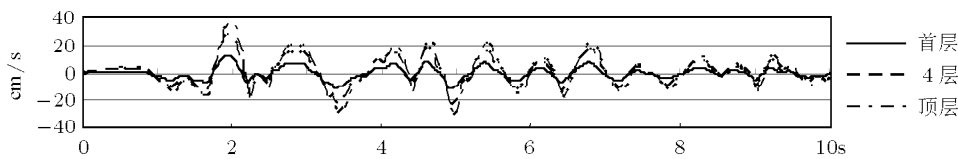


图5 MRD结构速度时程曲线(优化工况2)

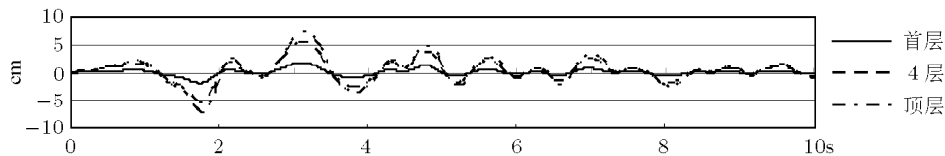


图6 MRD结构位移时程曲线(优化工况2)

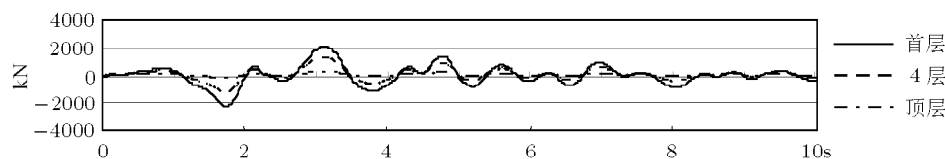


图7 MRD结构层间剪力时程曲线(优化工况2)

7 结 论

本文对双向耦合地震作用下 MRD 结构模型的理论进行研究, 建立其动力分析模型并得出运动微分方程. 以 8 层 MRD 结构为例, 采用 IOC 算法对 MRD 结构进行地震反应分析. 研究表明, 在考虑竖向地震作用的情况下, MRD 结构的地震反应有不同程度的增加, 其增量随着竖向地震作用的增加而增加. 因此, 建议在高烈度地区的 MRD 结构考虑竖向地震作用对结构的影响. 建立 MRD 结构优化设计模型, 采用 IHGA 程序对 MRD 的布局进行优化设计. 结果表明, MRD 结构在各种工况下的各项地震反应均得到更好的控制.

参 考 文 献

- Housner GW. Structural control: past, present, future. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 1997, 123(9): 897~971
- Symans MD, Constantinou MC. Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state of the art review. *Journal of Engineering Structures*, 1999, (21): 469~487
- 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. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(3): 9~13 (Sui LL, Ou JP. Mechanism and application of semi-active MR dampers. *Journal of Harbin University of C E and Architecture*, 2002, 35(3): 9~13 (in Chinese))
- Takesue Naoyuki, Furusho Junji, Kiyota Yuuki. Fast response MR-fluid actuator. *JSME International Journal*, 2004, 47(3): 783~791
- 张延年, 刘剑平, 刘斌. 多向地震耦合作用下 MR 阻尼结构的地震反应分析. 东北大学学报, 2005, 26(9): 897~900 (Zhang Y N, Liu J P, Liu B, et al. Seismic responses of MRD structure under coupling effect of multi-directional earthquake. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2005, 26(9): 897~900 (in Chinese))
- Toshihiko S, Tomoya S, Shin M. Design and performance verification of variable damper using MR fluid. *American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division(Publication) DSC*, 2003, 72(2): 989~994
- Yang GQ, Spencer Jr Billie, Jung Hyung-Jo, et al. Dynamic modeling of large-scale magnetorheological damper systems for civil engineering applications. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(9): 1107~1114
- Xia PQ. An inverse model of MR damper using optimal neural network and system identification. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 266(5): 1009~1023
- Atray Vipul S, Roschke Paul N. Neuro-fuzzy control of rail-car vibrations using semi-active dampers. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2004, 2(19): 81~92
- 周云, 徐龙河, 李忠献. 磁流体阻尼器半主动控制结构的地震反应分析. 土木工程学报, 2001, 34(5): 10~14 (Zhou Yun, Xu Longhe, Li Zhongxian. Seismic responses of semi-control using magnetorheological fluid dampers. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(5): 10~14 (in Chinese))
- 张延年, 刘斌, 朱朝艳. 工程结构优化设计的改进混合遗传算法. 吉林大学学报(工学版), 2005, 35(1): 65~69 (Zhang Yannian, Liu Bin, Zhu Chaoyan. Improved hybrid genetic algorithm for optimum design of engineering structures. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2005, 35(1): 65~69 (in Chinese))
- 张延年, 刘斌, 郭鹏飞. 混合遗传算法在工程结构优化设计中的应用. 工业建筑, 2005, 35(3): 23~26 (Zhang Yannian, Liu Bin, Guo Pengfei. Application of hybrid genetic algorithm to optimum design of engineering structures. *Industrial Construction*, 2005, 35(3): 23~26 (in Chinese))
- 张延年, 刘斌, 董锦坤. 改进遗传算法在建筑结构优化设计中的应用. 东北大学学报(自然科学版), 2004, 25(7): 692~694 (Zhang Yannian, Liu Bin, Dong Jinkun. Application of improved genetic algorithm in optimum design of building structures. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2004, 25(7): 692~694 (in Chinese))
- 张延年, 刘斌, 郭鹏飞. 基于混合遗传算法的建筑结构优化设计. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24(10): 990~993 (Zhang Yannian, Liu Bin, Guo Pengfei. Hybrid genetic algorithm for optimum design of building structures. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2003, 24(10): 990~993 (in Chinese))
- 徐龙河, 周云, 李忠献. 半主动控制装置在受控结构中的优化设置. 地震工程与工程振动, 2000, 20(3): 143~148 (Xu Longhe, Zhou Yun, Li Zhongxian. Optimal placement of semi-active control devices in controlled structure. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2000, 20(3): 143~148 (in Chinese))
- Yang JN, Wu JC, Li Z. Control of seismic-excited buildings using active variable stiffness systems. *Journal of Structure Engineering*, 1996, 18(8): 589~596