

文章编号:1671-6833(2018)02-0044-06

铅-磁流变阻尼器在减震结构中的位置优化

张香成¹, 陈 娜¹, 罗 芳², 赵 军¹, 徐赵东³

(1. 郑州大学 力学与工程科学学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州财经学院, 河南 郑州 450000; 3. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 铅-磁流变阻尼器(LMRD)是一种能有效减小建筑结构地震响应的新型阻尼器,为提高 LMRD 受控结构的减震效果,以撤掉阻尼器产生的结构最优二次型性能指标损失量为优化目标,在结构中对 LMRD 进行位置优化. 结果表明:以撤掉 LMRD 产生的结构最优二次型性能指标损失量为优化目标时,阻尼器在结构中的最优位置取决于结构自身特性及参数,与地震波关系不大;LMRD 对地震作用下结构的水平位移响应控制效果较为明显,但对加速度响应控制效果不明显.

关键词: 铅-磁流变阻尼器; 位置优化; 钢筋混凝土框架; 二次型性能指标; 动力响应

中图分类号: TU352 **文献标志码:** A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.02.010

0 引言

铅-磁流变阻尼器(lead magnetoheological damper, LMRD)是本课题组研发的一种半主动控制装置,阻尼力可调,耗能能力强,所需电源较少,控制系统相对简单,可靠性高^[1-2]. 研究表明:结构的半主动减震控制效果既与装置的力学性能和控制算法有关又与装置的位置有关. 近年来,国外关于磁流变半主动控制装置优化布置的研究已取得一些成果^[3-5]. 国内徐龙河等对磁流变阻尼器在结构中的位置进行了优化^[6],贝伟明等基于改进遗传算法对磁流变阻尼器在高层建筑结构中的位置进行了优化^[7],阎石等对磁流变阻尼器位置优化方法进行了对比研究^[8],展猛等在空间桁架模型中对不同数量的阻尼器进行了位置优化^[9],闫维明等对不规则结构中阻尼器的参数和位置进行了优化^[10].

为更好地实现加入 LMRD 的减震效果,以撤掉 LMRD 产生的受控结构最优二次型性能指标损失量作为优化目标,在 El-Centro 波、Taft 波和人工波作用下,采用 MATLAB 软件,对钢筋混凝土框架结构在 LMRD 最优布置、任意布置和未布置多种工况下进行编程和仿真分析,最后将计算

结果进行对比分析.

1 LMRD 结构及半主动控制算法

1.1 LMRD 减震结构的运动微分方程

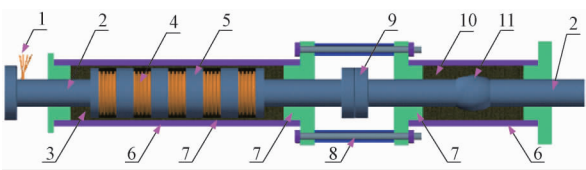
在地震作用下,LMRD 受控结构的动力学方程为:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\ddot{x}_g(t) - HF(t),$$
(1)

式中: M 为结构的质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; $\ddot{x}(t)$ 为结构的位移列阵; $\ddot{x}_g(t)$ 为地震加速度; I 为单位列向量; $F(t)$ 为阻尼器的控制力列阵; H 为阻尼器的位置矩阵.

1.2 半主动控制算法

结构中拟设置的 LMRD 如图 1 所示.



1. 导线; 2. 活塞杆; 3. 磁流变液; 4. 线圈; 5. 活塞; 6. 缸桶; 7. 盖板; 8. 钢管; 9. 连接法兰; 10. 金属铅; 11. 轴凸

图 1 LMRD 结构装配图

Fig.1 Structure assembly diagram of LMRD

在频率为 0.1 Hz, 振幅 10 mm 的正弦波激励

下,LMRD 在 0、0.6、1.2、1.8、2.4 A 5 级电流下的最大阻尼力测试值分别为 124.22、194.90、249.38、278.19 和 284.49 kN。

采用线性二次型调节器算法^[11-12]计算结构中 LMRD 的最优控制力 $U(t)$,

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{Z}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) + \mathbf{W}\ddot{\mathbf{x}}_g(t), \mathbf{Z}(t_0) = \mathbf{Z}_0, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{Z}(t) = [\mathbf{x}(t) \quad \dot{\mathbf{x}}(t)]^T$ 为受控系统的状态向量; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{n \times n} & \mathbf{I}_{n \times n} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$ 为受控系统的

状态矩阵; $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{n \times 1} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{H} \end{bmatrix}_{2n \times 1}$ 为控制装置位置指示矩阵; $\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{n \times 1} \\ -\mathbf{I}_{n \times 1} \end{bmatrix}_{2n \times 1}$ 为地震作用列向量。

定义系统的二次型性能指标最小为控制目标,

$$J = \frac{1}{2} \int_0^t [\mathbf{Z}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{Z}(t) + \mathbf{U}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{U}(t)] dt + \frac{1}{2} \mathbf{Z}^T(t_f) \mathbf{Q}_0 \mathbf{Z}(t_f), \quad (3)$$

式中: \mathbf{Q}_0 为对角半正定矩阵; $\mathbf{Q} = \alpha \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{M} \end{bmatrix}$ 为半正定矩阵; $\mathbf{R} = \beta \mathbf{I}$ 为正定矩阵。 $\mathbf{U}(t)$ 利用变分法求得:

$$\mathbf{U}(t) = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{Z}(t) = \mathbf{G} \mathbf{Z}(t), \quad (4)$$

式中: \mathbf{G} 为增益矩阵; \mathbf{P} 由 Riccati 方程求出:

$$\mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0. \quad (5)$$

最优控制的结果与 \mathbf{Q} 、 \mathbf{R} 中 α 、 β 的取值有关。

由于 LMRD 阻尼力具有一定范围。因此,需对式(4)的最优控制力 $\mathbf{U}(t)$ 进行调整,以第 i 个 LMRD 为例,

$$F_i = \begin{cases} \text{sgn}(u_i) F_{i,\max}, & U_i \cdot u_i > 0 \text{ 且 } |U_i| < F_{i,\max} \\ U_i, & U_i \cdot u_i > 0 \text{ 且 } F_{i,\min} < |U_i| \leq F_{i,\max} \\ \text{sgn}(u_i) F_{i,\min}, & |U_i| \leq F_{i,\max} \text{ 或 } U_i \cdot u_i \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: F_i 为 LMRD 的控制力; $F_{i,\min}$ 为 LMRD 的最小阻尼力; $F_{i,\max}$ 为最大阻尼力; U_i 为最优阻尼力; u_i 为 LMRD 两端的位移。

2 优化目标

将式(4)代入式(2)和式(3)得:

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{G})\mathbf{Z}(t) + \mathbf{W}\ddot{\mathbf{x}}_g(t), \quad (7)$$

$$J = \frac{1}{2} \int_0^t [\mathbf{Z}^T(t) (\mathbf{Q} + \mathbf{Q}_0 + \mathbf{G}^T \mathbf{R} \mathbf{G}) \mathbf{Z}(t)] dt, \quad (8)$$

式(7)可以分解为:

$$\mathbf{Z}(t) = \psi \mathbf{Z}(0) + \int_{t_0}^t \psi(t - \tau) \mathbf{W} d\tau, \quad (9)$$

$$\psi = \exp[(\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{G})t], \quad (10)$$

当撤掉第 i 个阻尼器时,位置指示矩阵 \mathbf{B} 将产生一损失量 $\Delta \mathbf{B}_i$,同时导致二次型性能指标产生损失量 ΔJ_i ,根据泰勒展开式,略去高阶微量,可以求得撤掉第 i 个阻尼器时受控结构的二次型性能指标损失量为:

$$\Delta J_i = -\text{tr}[(\mathbf{R}_0 + \mathbf{P}) \mathbf{S}_m \Delta \mathbf{B}_i \mathbf{G}], \quad (11)$$

式中: $\mathbf{S}_m = \int_0^\infty t \psi^T (\mathbf{Q} + \mathbf{Q}_0 + \mathbf{G}^T \mathbf{R} \mathbf{G}) \psi dt$;

$$\mathbf{R}_0 = \mathbf{Z}(0) \mathbf{Z}^T(0); \mathbf{P} = \int_0^\infty \mathbf{W} \mathbf{W}^T d\tau.$$

式(11)反映了第 i 个 LMRD 对结构最优控制的灵敏度。 ΔJ_i 越小,说明撤掉的第 i 个 LMRD 对受控结构最优控制不敏感或不重要,反之则越敏感或越重要。因此可根据撤掉阻尼器时得到的 ΔJ_i ,对每个 LMRD 在受控结构中的重要性进行排序。此外,从式(11)可以看出, ΔJ_i 是在假定受控结构处于弹性状态,并且撤掉 LMRD 后受控结构最优反馈增益矩阵 \mathbf{G} 不变的条件下得到的。

3 算例及优化过程

采用一栋十二层钢筋混凝土一榀框架对 LMRD 进行位置优化。结构 1~2 层柱截面尺寸为 0.7 m × 0.7 m; 3~8 层柱截面尺寸为 0.6 m × 0.6 m; 9~12 层柱截面尺寸为 0.5 m × 0.5 m; 边跨长 7.2 m,梁截面尺寸为 0.3 m × 0.6 m; 中间跨长 5.4 m,梁截面尺寸 0.25 m × 0.5 m,结构层高见图 2,柱底与基础刚性连接。

地震波选用 El-Centro 波(1940 年南北向)、Taft 波(1952 年东西向)两条强震记录和人工波,均持时 20 s,地震加速度峰值为 400 gal。人工波采用三角级数法合成,功率谱密度函数采用金井清模型^[13],模型参数 $\omega_g = 15$ 、 $\zeta_g = 0.6$ 、 $S_0 = 74.4$,合成的波形见图 3。

4 优化结果分析

用 MATLAB 编制了未控及受控结构的弹性时程分析程序,选用 Wilson- θ 法求解结构的动力学方程,并取 $\theta = 1.4$ 。通过程序试算,在 3 条地震波下,控制算法 \mathbf{Q} 、 \mathbf{R} 矩阵中 $\alpha = 100$ 、 $\beta = 3 \times 10^{-6}$ 。

在上述 3 条地震波下依次撤掉各层 LMRD,然后根据式(11)计算 ΔJ_i ,并根据计算结果绘制

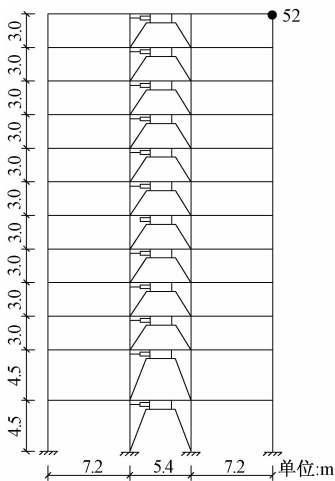


图2 LMRD在钢筋混凝土框架结构中的位置

Fig.2 Location of LMRD in reinforced concrete frame structure

不同地震波下各层阻尼器对结构最优控制的灵敏

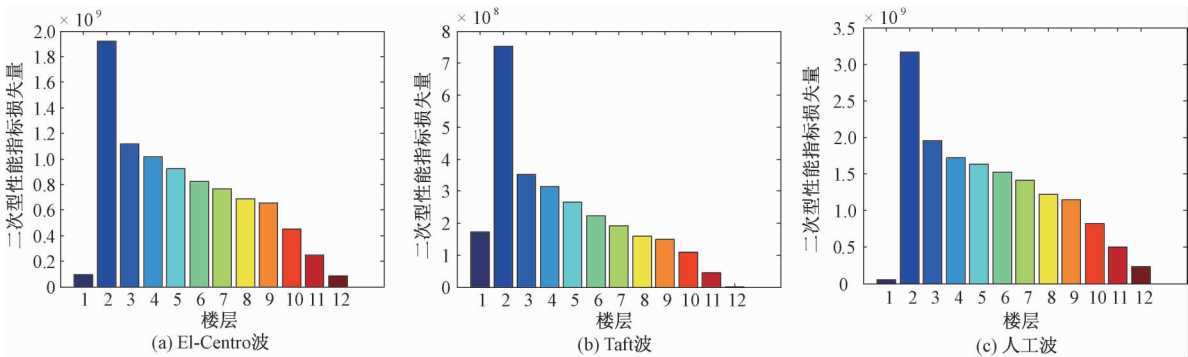


图4 不同地震波下阻尼器对结构最优控制的灵敏度

Fig.4 The sensitivity of damper on structural optimal control under different seismic waves

此外,在 El-Centro 波作用下,撤掉各层 LMRD 时受控结构二次型性能指标损失量从大到小顺序是:2 层、3 层、4 层、5 层、6 层、7 层、8 层、9 层、10 层、11 层、1 层、12 层. 在 Taft 波和人工波作用下,除 1 层外,撤掉其他层 LMRD 时受控结构二次型性能指标损失量大小顺序与 El-Centro 波作用下的顺序相同. 阻尼器对受控结构最优控制的敏感性大致规律为:除 1 层外,结构下部的阻尼器对受控结构最优控制的灵敏度较大,结构上部的阻尼器对受控结构最优控制的灵敏度较小. 这是因为在地震作用下,框架结构以剪切变形为主,下部结构的剪切变形一般大于上部结构的剪切变形,因此位于结构下部的阻尼器能更好地起到耗能减震作用,其对受控结构最优控制的灵敏度也就越大. 由于算例假定 1 层柱底与基础刚性连接,因此 1 层结构的剪切变形计算结果偏小,进而导致该层阻尼器对受控结构最优控制的灵敏度变小.

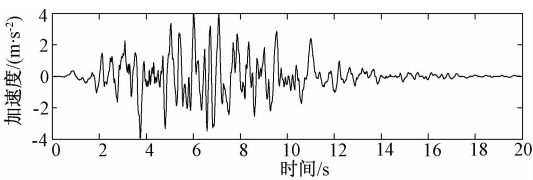


图3 合成的人工地震波

Fig.3 The synthesis of artificial seismic wave

度柱状图,如图 4.

从图 4 中可以看出,当撤掉同一阻尼器时,虽然受控结构在不同地震波激励下得到的二次型性能指标损失量的大小相差很大,但在同一地震波下 LMRD 对结构最优控制的敏感性顺序基本相同. 这是因为不同地震波在整个频率段内的能量密度有所差异,它输入到特定受控结构的能量有多有少,并且结构振动能量的总体分布跟结构自身参数有关,并不因地震波的不同而发生较大改变.

5 优化结果验证

根据优化结果,按表 1 列出的工况在结构中布置 LMRD,每种工况阻尼器的个数均为 6 个. 在上述 3 条地震波激励下对结构在阻尼器最优布置、任意布置 1、任意布置 2 和未布置(工况 4)工况下进行时程分析,并将计算结果进行了对比分析.

表 1 不同工况下 LMRD 的布置位置

Tab.1 Location of LMRD in structure for different conditions							
工况	工况名称	设置阻尼器的楼层					
1	最优布置	2	3	4	5	6	7
2	任意布置 1	1	2	3	4	5	6
3	任意布置 2	1	2	4	5	6	7

图 5 ~ 图 7 分别为 El-Centro 波、Taft 波和人工波激励时,结构在不同工况下顶层 52 号节点的水平位移和加速度时程响应曲线.

从图 5(a) ~ 图 7(a)可以看出,在整个地震

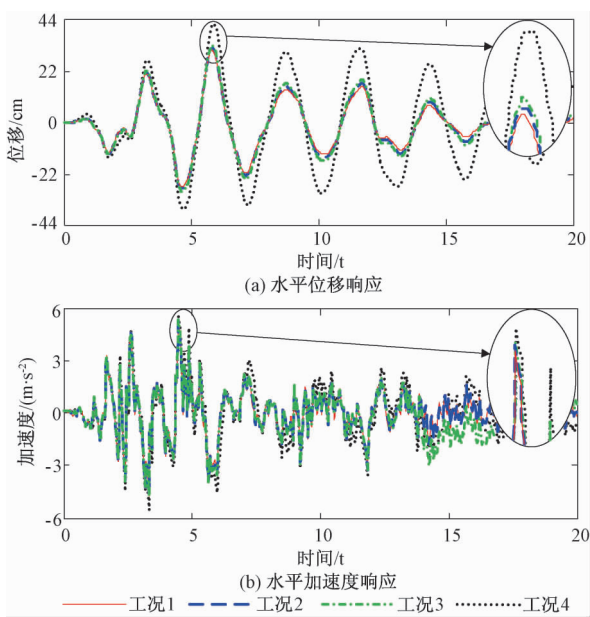


图 5 El-Centro 波下结构顶层 52 号节点的动力响应

Fig. 5 Dynamic responses of the No. 52 node on top-floor under El-Centro wave

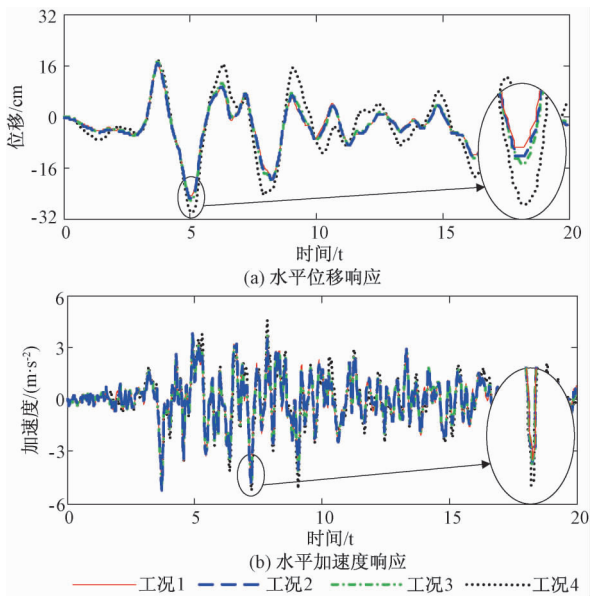


图 6 Taft 波下结构顶层 52 号节点的动力响应

Fig. 6 Dynamic responses of the No. 52 node on top-floor under Taft wave

持续时间内,设置 LMRD 结构顶层 52 号节点的水平位移较无控结构明显减小. 在设置 LMRD 的结构中,按工况 1 布置 LMRD 时结构顶层 52 号节点的水平位移响应在整个地震持续时间内最小,然后分别是工况 2 和工况 3. 在 El-Centro 波作用下,工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 对应的 52 号节点最大位移响应分别为 31.00、31.94、33.15 和 41.80 cm. 在 Taft 波作用下,工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 对应的 52 号节点最大位移响应分别为

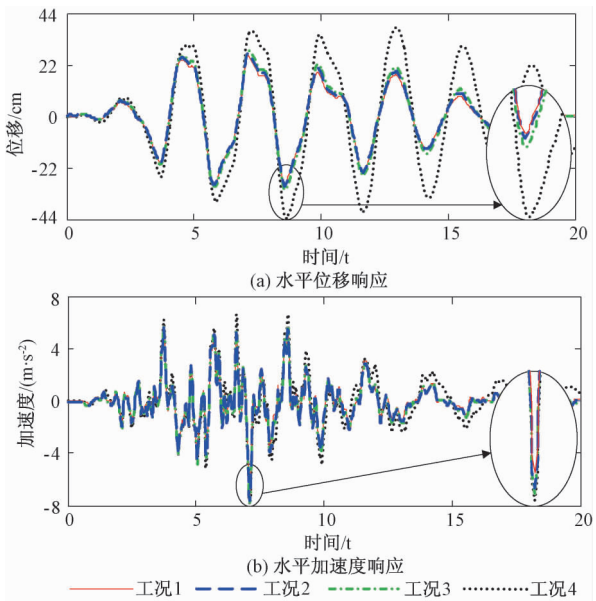


图 7 人工波下结构顶层 52 号节点的动力响应

Fig. 7 Dynamic responses of the No. 52 node on top-floor under Artificial wave

25.06、25.54、26.27 和 30.34 cm. 在人工波作用下,工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 对应的 52 号节点最大位移响应分别为 29.07、30.24、32.05 和 43.55 cm. 这说明按优化结果在结构中布置 LMRD 可以使顶层 52 号节点的位移时程响应获得最优的减震控制效果.

从图 5(b) ~ 图 7(b) 可以看出,在整个地震持续时间内,所有工况对应的结构顶层 52 号节点的水平加速度基本相同. 在 El-Centro 波作用下,工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 对应的 52 号节点最大加速度响应分别为 5.16、5.23、5.22 和 5.56 m/s^2 . 在 Taft 波作用下,工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 对应的 52 号节点最大加速度响应分别为 5.27、5.23、5.23 和 5.24 m/s^2 . 在人工波作用下,工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 对应的 52 号节点最大加速度响应分别为 7.33、7.55、7.65 和 7.95 m/s^2 .

表 2 ~ 表 4 分别为 El-Centro 波、Taft 波和人工波激励时,不同工况对应的楼层最大位移和加速度. 可以看出,在 El-Centro 波、Taft 波和人工波作用下,与未控结构(工况 4)相比,加入 LMRD 后结构各层的最大位移均得到不同程度的降低,其中,工况 1 对应的结构每层最大位移响应降幅最大,其次结构每层最大位移响应降幅较大的分别是工况 2 和工况 3. 这说明按优化结果在结构中布置 LMRD 可以使结构的位移响应获得最优的减震控制效果. 此外,从表 2 ~ 表 4 中还可以看出:在 3 条地震波作用下,与未控结构(工况 4)相

比,加入 LMRD 后结构各层的最大加速度响应变化并不明显,且无规律可循.

表 2 El-Centro 波下不同工况对应的楼层最大动力响应

Tab.2 The maximum dynamic responses of each floor in different conditions under El-Centro wave								
楼层	最大位移/cm				最大加速度/(m·s ⁻²)			
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
1	2.63	2.69	2.75	3.55	3.35	3.50	3.61	3.40
2	7.47	7.60	7.85	10.03	5.41	5.75	5.55	5.65
3	10.60	10.77	11.24	14.21	5.41	5.64	5.64	5.59
4	13.35	13.53	14.13	17.89	4.83	4.89	5.02	4.95
5	15.84	16.01	16.66	21.10	4.47	4.58	4.75	5.19
6	18.17	18.31	19.03	23.85	4.97	4.95	4.98	4.98
7	20.48	20.69	21.49	26.88	5.06	5.03	5.03	5.19
8	22.97	23.39	24.30	30.66	4.85	4.86	4.85	5.16
9	25.74	26.35	27.37	34.63	4.49	4.47	4.44	4.61
10	28.12	28.88	29.98	37.91	4.17	4.26	4.25	4.62
11	29.90	30.76	31.94	40.33	4.73	4.80	4.79	5.23
12	31.00	31.94	33.15	41.80	5.16	5.23	5.22	5.56

表 3 Taft 波下不同工况对应的楼层最大动力响应

Tab.3 The maximum dynamic responses of each floor in different conditions under Taft wave								
楼层	最大位移/cm				最大加速度/(m·s ⁻²)			
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
1	2.52	2.60	2.69	3.10	1.67	1.90	1.62	1.70
2	6.93	7.08	7.33	8.49	4.28	4.23	4.13	4.35
3	9.76	9.86	10.25	11.79	4.99	4.98	5.07	5.21
4	12.07	12.24	12.71	14.60	4.85	4.86	5.02	5.21
5	14.15	14.35	14.86	17.07	4.98	4.94	5.00	4.88
6	16.09	16.28	16.81	19.34	5.02	5.01	5.03	4.97
7	17.91	18.13	18.67	21.49	4.89	4.89	4.87	4.95
8	19.65	19.97	20.54	23.58	4.89	4.86	4.84	4.97
9	21.52	21.91	22.51	25.82	4.99	5.01	5.12	5.07
10	23.11	23.54	24.17	27.82	5.13	5.16	5.17	5.15
11	24.30	24.76	25.44	29.36	5.23	5.22	5.23	5.17
12	25.06	25.54	26.27	30.34	5.29	5.24	5.25	5.33

表 4 人工波下不同工况对应的楼层最大动力响应

Tab.4 The maximum dynamic responses of each floor in different conditions under Artificial wave								
楼层	最大位移/cm				最大加速度/(m·s ⁻²)			
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
1	3.04	3.25	3.38	4.84	1.97	1.99	1.93	1.98
2	8.32	8.85	9.29	13.27	4.32	4.34	4.26	4.24
3	11.44	12.23	12.86	18.33	5.64	5.68	5.63	5.61
4	13.87	14.69	15.62	22.38	6.13	6.21	6.20	6.26
5	15.73	16.62	17.70	25.57	5.65	5.75	5.79	5.92
6	17.10	17.93	19.14	28.23	5.31	5.23	5.23	5.69
7	19.33	20.05	21.50	31.46	5.01	4.98	5.01	5.41
8	22.04	22.53	24.04	34.45	4.46	4.55	4.59	5.05
9	24.76	25.29	26.64	37.49	4.45	4.61	4.59	5.01
10	26.79	27.39	28.92	40.11	5.23	5.23	5.27	5.72
11	28.13	29.01	30.82	42.19	6.35	6.45	6.53	6.93
12	29.07	30.24	32.05	43.56	7.33	7.55	7.65	7.95

6 结论

(1)LMRD 对地震作用下结构的水平位移响应控制效果较为明显,但对加速度响应控制效果不明显.

(2)以撤掉 LMRD 产生的结构最优二次型性能指标损失量作为优化目标时,LMRD 在结构中的最优位置取决于结构自身参数,与地震波类型关系不大.

(3)与任意布置相比,LMRD 采用最优布置(工况 1)时,可以最大限度降低结构的水平位移响应,说明优化结果准确、有效.

参考文献:

[1] ZHANG X C, XU Z D. Testing and modeling of a CLEMR damper and its application in structural vibration reduction [J]. Nonlinear dynamics, 2012, 70 (2): 1575 – 1588.

[2] 张香成,张旭,徐赵东,等. 配有铅-磁流变阻尼器的高层 RC 框架结构非线性动力分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(4): 119 – 125.

[3] TAKEWAKI I. Optimal damper placement for minimum transfer function[J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 1997, 26(11): 1113 – 1124.

[4] POHORYLES D A, DUFFOUR P. Adaptive control of structures under dynamic excitation using magnetorheological dampers: an improved clipped-optimal control algorithm[J]. Journal of vibration and control, 2015,

21(13): 2569 – 2582.

[5] ASKARI M, LI J C, SAMALI B. Cost-effective multi-objective optimal positioning of magnetorheological dampers and active actuators in large nonlinear structures[J]. Journal of intelligent material systems and structures, 2017, 28(2): 230 – 253.

[6] 贝伟明,李宏男. 磁流变阻尼器在结构减震控制中的位置优化研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(3): 73 – 78.

[7] 滕军. 相邻结构间控制器位置及控制律的降阶优化方法研究 [J]. 建筑结构学报, 2003, 24 (4): 17 – 24.

[8] 阎石,宁欣,王宁伟. 磁流变阻尼器在受控结构中的优化布置 [J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24 (3): 175 – 178.

[9] 展猛,王社良,朱熹育,等. 空间桁架模型压电摩擦阻尼器半主动优化控制 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35(8): 50 – 56.

[10] 闫维明, 杲晓龙, 谢志强. 基于复杂三维有限元模型和鱼群算法的平面不规则结构中位移型阻尼器参数和位置的优化方法 [J]. 工程力学, 2016, 33 (9): 155 – 163.

[11] 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.

[12] 刘本学, 蔺超云, 郭沛东, 等. 基于 MATLAB 的汽车线性最优控制主动悬架仿真研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(5): 72 – 76.

[13] 彭凌云, 周锡元, 李小军. 对已有强震地面运动功率谱模型的改进 [J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(3): 388 – 394.

Position Optimization of Lead Magnetroheological Damper
in Energy Dissipation Structural

ZHANG Xiangcheng¹, CHEN Na¹, LUO Fang², ZHAO Jun¹, XU Zhaodong³

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou Institute of Finance and Economics, Zhengzhou 450000, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In this paper, Lead Magnetroheological damper, LMRD, was taken as a kind of new damper designed to reduce effectively the seismic response of structures. The position optimization of LMRD in structure was to improve the damping effect of controlled structure in LMRD, and it was taken the optimal structural quadratic performance index loss produced from removing damper as optimization goal at the same time. The result showed that the optimal position of LMRD in structure was depended on the structural properties and parameters, which had little relevance to the type of seismic wave, when considering the loss of structural optimal quadratic performance index without LMRD as the optimization objective. Also, LMRD could control the horizontal displacement response of structure, under the seismic load, effectively, rather than the acceleration.

Key words: lead magnetroheological damper; optimal placement; reinforced concrete frame structure; quadratic performance index; dynamic response