

李志军,张猛,雷海涛,等.不规则高层结构基于新型电磁惯性质量阻尼器的半主动控制[J].地震工程学报,2021,43(1):205-212.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.205
LI Zhijun,ZHANG Meng,LEI Haitao,et al.Semi-active Control of Irregularly Reinforced High-rise Building Structure with Electromagnetic Inertial Mass Dampers[J].China Earthquake Engineering Journal,2021,43(1):205-212.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.205

不规则高层结构基于新型电磁惯性质量 阻尼器的半主动控制

李志军¹, 张 猛¹, 雷海涛¹, 王社良²

(1. 西安工业大学建筑工程学院, 陕西 西安 710032; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为了研究新型电磁惯性质量阻尼器(Electromagnetic Inertial Mass Damper,EIMD)应用于偏心高层结构振动控制工程的可行性,鉴于半主动控制技术的优点,基于 LQR 主动控制算法,提出一种可行的 EIMD-偏心高层结构半主动控制策略,同时研究 EIMD 在结构每层中安装位置不同对于控制偏心高层结构扭转反应的影响。以一个实体 24 层偏心高层结构作为研究对象验证地震作用下所提控制策略的有效性,仿真结果表明:(1)所提半主动控制策略基本能够达到主动控制对于结构振动反应分量的控制效果;(2)当采用半主动控制策略时,调整 EIMD 的安装位置对于偏心高层结构转角和转角加速度反应有着较好的控制效果。

关键词: 电磁惯性质量阻尼器; 偏心高层结构; 半主动控制; 扭转反应; LQR 主动控制

中图分类号: TU311.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)01-0205-09

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.205

Semi-active Control of Irregularly Reinforced High-rise Building Structure with Electromagnetic Inertial Mass Dampers

LI Zhijun¹, ZHANG Meng¹, LEI Haitao¹, WANG Sheliang²

(1.School of Civil & Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, Shaanxi, China;

2.College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: In this paper, a novel electromagnetic inertial mass damper (EIMD) is applied to realize the practical semi-active control of a real-life eccentrically braced high-rise building structure subjected to outward dynamic loads such as earthquake. Then, we present a feasible semi-active control strategy based on a linear quadratic regulator (LQR) active control algorithm. The coupled torsional responses of the structure with EIMDs are analyzed at different EIMD installation positions. Finally, the feasibility and effectiveness of the new control strategy is demonstrated by its application to a real-life 24-story irregularly reinforced concrete frame-shear wall structure with EIMDs, for which the El Centro earthquake records are considered. The simulation results show that (1) the proposed semi-ac-

收稿日期: 2019-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(51678480);陕西省重点研发计划(2019GY-079);陕西省教育厅专项科研计划项目(11JK0543);西安工业大学校长基金重点项目(XAGDXJJ0919)

第一作者简介: 李志军(1975-),男,教授,博士后,硕导,主要从事结构振动控制及健康监测研究。E-mail: lzsjh@aliyun.com。

tive control strategy is effective and feasible compared with the traditional active LQR control method, and (2) the torsional angle and torsional angle acceleration responses of the structure are obviously suppressed by optimizing the installation positions of the EIMDs.

Keywords: electromagnetic inertial mass damper (EIMD); eccentric high-rise structure; semi-active control; torsional response, LQR active control

0 引言

在地震作用下,偏心结构由于质量中心和刚度中心不重合,作用在质心的惯性力对刚心产生扭矩,结构发生扭转耦联振动,并产生较大的扭转变形。历次震灾经验表明,地震作用下结构扭转变形已成为结构破坏的主要因素^[1-2]。李忠献等^[3]对装有黏滞阻尼筒控制系统的三层框架模型进行了振动台模拟试验,试验结果表明,结构在安装黏滞阻尼筒控制系统后,顶层的扭转反应有明显的降低。Yoshida等^[4]对一个偏心多层结构,对比不同控制算法和不同控制装置对扭转反应的减震效果,研究结果显示,对结构控制效果最好的阻尼器为磁流变阻尼器。程光煜等^[5]为了研究不同控制方法对偏心结构扭转效应的控制效果,对比了在偏心结构中设置不同种类阻尼器及支撑的控制效果。李志军等^[6]提出一种新的鲁棒 H_{∞} 控制算法并应用于顶层装有主动质量阻尼器控制装置的偏心多层框架结构,仿真试验结果验证控制方法的有效性。Bigdeli 和 Kim^[7]对装有 TLCD 的平面不规则结构并进行了半主动控制研究,试验结果显示该控制系统在地震作用下对结构位移和加速度的控制作用明显。钱辉等^[8]研制了一种新型自复位形状记忆合金复合摩擦阻尼器,对三

层两跨单向偏心钢框架模型,进行了新型阻尼器-偏心结构平动及扭转耦联震动振动台试验,结果表明新型阻尼器对结构的平动及扭转角位移均有一定的控制效果。

新型电磁惯性质量阻尼器(electromagnetic inertial mass damper,EIMD)是将用于汽车悬架结构的电磁阻尼器和惯性质量阻尼器组合成为一个新的装置,与传统黏滞阻尼器相比,EIMD 具有体积小、重量轻、出力大的特点。EIMD 的主要组成构件包括传动装置、飞轮、滚轴丝杠和电机,其工作原理如图 1 所示,飞轮和电机受到滚轴丝杠旋转运动的影响均发生转动,从而产生惯性力和电磁阻尼力^[9]。将 EIMD 作为一种被动惯性质量阻尼器应用于规则结构,相关研究工作初步显示了其应用于土木工程结构的有效性^[9-11]。被动控制技术不需要外部能量输入,控制效果有限且不灵活;主动控制拥有更好的控制效果,但需要足够的外部输入能量;半主动则具备了近似于主动控制的良好控制效果和被动控制的便利性等优势^[12]。将 EIMD 的电机终端与外接电阻相连,通过变化外接电阻可以控制电磁阻尼力的大小,因此可以将 EIMD 用做半主动控制装置。为了研究新型电磁惯性质量阻尼器对抑制偏心高层结构在地震作用下动力响应的效果,本文基于 LQR

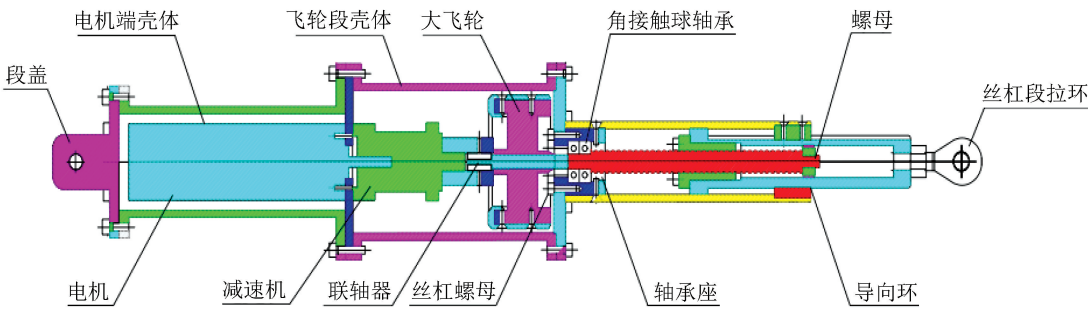


图 1 EIMD 工作原理图
Fig.1 Operating principle of EIMD

主动控制算法,提出了一种可行的 EIMD-偏心高层结构半主动控制策略,同时研究了 EIMD 安装位置对于控制偏心结构扭转反应的影响。以一个 24 层实体结构为例,进行了分析。

1 运动方程

1.1 EIMD 的力学模型

EIMD 的力-位移关系式可表示为^[9]:

$$F = \frac{1}{\eta} \cdot \left(\frac{2\pi}{L} \right)^2 \left\{ (I_f + \alpha^2 I_g) \frac{d^2 \Delta x_d}{dt^2} + \alpha^2 \frac{K_E K_T}{R + R_a} \cdot \frac{d \Delta x_d}{dt} \right\} = m_e \frac{d^2 \Delta x_d}{dt^2} + c_d \frac{d \Delta x_d}{dt} = m_e \ddot{\Delta x_d} + c_d \dot{\Delta x_d} \quad (1)$$

式中

$$m_e = \frac{1}{\eta} \cdot \left(\frac{2\pi}{L} \right)^2 (I_f + \alpha^2 I_g) \quad c_d = \frac{1}{\eta} \cdot \left(\frac{2\pi}{L} \right)^2 \alpha^2 \frac{K_E K_T}{R + R_a} \quad (2)$$

式(1)中第一部分为 EIMD 产生的惯性力,且惯性力与杆端加速度成正比, m_e 为 EIMD 的等效惯性质量;第二部分为 EIMD 产生的阻尼力,且阻尼力与杆端速度成正比, c_d 为 EIMD 的阻尼系数; η 为旋转效率; I_f 和 I_g 分别为飞轮和电机的转动惯量; α 为传动比; K_T 和 K_E 分别为电机的扭矩和电动力常数; R_a 和 R 分别为电机内部阻抗和外接终端阻抗; $\ddot{\Delta x_d}$ 、 $\dot{\Delta x_d}$ 是分别是 EIMD 的相对加速度和相对速度。

1.2 EIMD-偏心结构的运动方程

如图 2 为 EIMD-偏心高层结构的计算模型,考虑偏心结构在 x 方向地震激励下沿 x 方向和扭转的两个自由度振动,假设在结构每层设置两个 EIMD 装置,以达到同时控制结构平动和扭转振动的目的。

将式(1)中 EIMD 的电磁阻尼力作为可调阻尼力考虑,可得 EIMD-偏心高层结构控制系统的运动方程为:

$$(\mathbf{M} + \mathbf{M}_E) \ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C} \dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{X}(t) = -\mathbf{M} \mathbf{E} \ddot{x}_g(t) + \mathbf{B}_s \mathbf{U}_d(t) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{K}$ 和 $\mathbf{C}$ 分别是原偏心高层结构系统的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵,阻尼矩阵 $\mathbf{C}$ 采用

$$\mathbf{M}_E = \begin{bmatrix} m_{e1} + m_{e2} & -m_{e2} & & & & \\ -m_{e2} & m_{e2} + m_{e3} & -m_{e3} & & & \\ & \dots & \dots & \dots & & \\ & & -m_{e(n-1)} & m_{e(n-1)} + m_{en} & -m_{en} & \\ & & & -m_{en} & m_{en} & \end{bmatrix}_{n \times n},$$

控制力作用位置矩阵为

$$\mathbf{B}_s = \begin{bmatrix} 1 & -1 & & & 1 & -1 \\ & 1 & -1 & & & 1 \\ & & \dots & & & \dots \\ & & & 1 & & 1 \\ -e_{y1} & e_{y1} & & & e_{y2} & -e_{y2} \\ & -e_{y1} & e_{y1} & & e_{y2} & -e_{y2} \\ & & \dots & & & \dots \\ & & & -e_{y1} & & e_{y2} \end{bmatrix}_{2n \times 2n},$$

则被控偏心结构的状态方程为:

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{Z}(t) + \mathbf{B} \mathbf{U}(t) + \mathbf{D} \ddot{x}_g(t) \quad (4)$$

式中

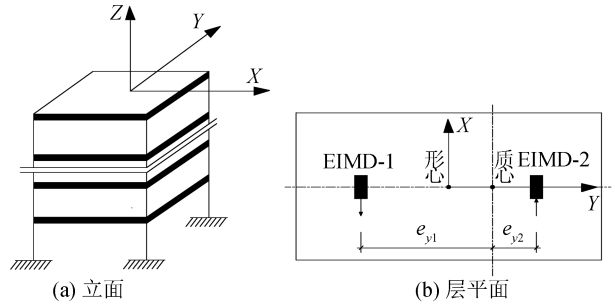


图 2 装有 EIMD 的偏心结构模型

Fig.2 Model of the eccentric high-rise building with EIMDs

Rayleigh 法估计^[13]; $\mathbf{X}$ 、 $\dot{\mathbf{X}}$ 、 $\ddot{\mathbf{X}}$ 分别是 EIMD-偏心高层结构的位移向量、速度向量和加速度向量, $\mathbf{X} = \{\mathbf{x} \ \boldsymbol{\theta}\}^T$ (其中, x_i 为被控偏心高层结构第 i 层相对于地面沿 x 方向的位移向量, θ_i 为被控偏心高层结构第 i 层的转角); $\mathbf{E}$ 为单位列向量; $\mathbf{B}_s$ 为 $2n \times 2n$ 维阻尼器位置矩阵; $\mathbf{U}_d(t)$ 是 $2n \times 1$ 维电磁阻尼控制力列向量, $\ddot{x}_g(t)$ 为地震动输入向量。 $\mathbf{M}_E$ 为 EIMD 的等效惯性质量矩阵。

具体矩阵表达式如下,

$$\mathbf{M}_E = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_e & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_e \end{bmatrix}_{2n \times 2n},$$

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

2 基于 LQR 控制算法的半主动控制策略

本文所采用的半主动控制策略(原理框图如图 3 所示)如下:

- (1) 首先基于 LQR 算法求出被控结构所需要的最优控制力 $U_i(t)$ 。
- (2) 根据所求出的 $U_i(t)$,设置阻尼器能够产生的实际电磁阻尼控制力 $U_{di}(t)$,并使阻尼器的实际控制力尽可能接近主动算法求出最优控制力。

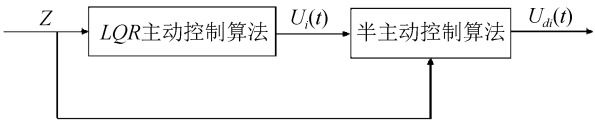
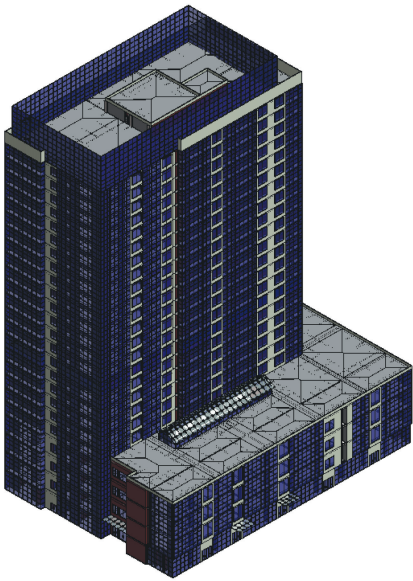


图 3 半主动控制策略原理

Fig.3 Principle of the semi-active control for the high-rise building with EIMDs

电磁惯性质量阻尼器半主动控制算法可以表示为:



(a) 旺景国际大厦模型图

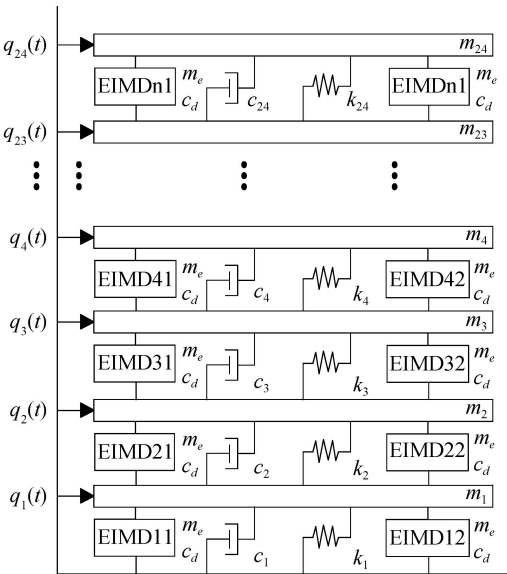
$$U_{di} = \begin{cases} -c_{d\max} \Delta \dot{x}_i, & U_i \Delta \dot{x}_i < 0 \text{ 且 } \left| \frac{U_i}{\Delta \dot{x}_i} \right| \geq c_{d\max} \\ -c_d \Delta \dot{x}_i, & U_i \Delta \dot{x}_i < 0 \text{ 且 } \left| \frac{U_i}{\Delta \dot{x}_i} \right| < c_{d\max} \\ -c_{d\min} \Delta \dot{x}_i, & U_i \Delta \dot{x}_i \geq 0 \end{cases}$$

(5)

式中: $c_{d\max}$ 和 $c_{d\min}$ 分别为阻尼器能提供的最大和最小阻尼系数值; $\Delta \dot{x}_i$ 为第 i 层沿 X 方向层间相对速度。

3 结构减震仿真分析

本文所研究偏心高层结构的对象为西安旺景国际广场。该项目位于西安市经济技术开发区凤城九路,地上总共 24 层,地下 2 层,结构形式为框架剪力墙结构。地上 1~4 层为商业服务网点,平均建筑面积为 4 045.5 m²;5~24 层均是办公楼,平均建筑面积 1 973.29 m²,总建筑高度达 99.4 m,旺景国际广场建筑模型如图 4(a)。为了简化计算,对楼层参数



(b) 偏心高层结构计算模型

图 4 旺景国际大厦模型与偏心高层结构计算模型

Fig.4 Model of the Wangjing International Building and computational model of the eccentric high-rise structure

进行了相应的简化,具体参数值如表 1 所示。EIMD-偏心高层结构计算模型如图 4(b)所示,其中,EIMD 的设计参数见文献[9],设阻尼器最大阻尼系数为 $3.05 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s/m}$,可调倍数为 8 倍。为了验证本文提出的半主动控制策略的有效性,引入 200 gal El Centro 波,采样周期为 0.02 s,持续时间

30 s。借助 matlab 软件编制相应程序实现该控震系统的仿真分析。

如图 2 所示,首先在每层距离质心 e_{y1} 和 e_{y2} 处,分别布置一个 EIMD 装置,不同工况下,结构顶层相对于地面的位移及转角反应时程对比曲线如图 5 和 6 所示。图中,结构中未布置 EIMD 对应“无

控”工况,仅考虑被动等效质量惯性力对应“被动一”工况,采用 LQR 主动控制算法对应“主动”工况,采用本文提出的半主动控制策略对应“半主动一”工况。从图中可以看出,仅考虑被动惯性力作用,结构的位移及转角相对于无控工况控制效果没有明显改

善;当考虑可调的电磁阻尼力时,结构的位移和转角反应量都得到了较好的控制,尤其是对于结构振动反应峰值的控制;与“主动”工况相比,所提半主动控制策略可以很好地逼近主动控制对于结构位移和转角反应量的控制效果。

表 1 偏心高层结构基本参数

Table 1 Basic parameters of the eccentric high-rise structure

楼层	质量 M / $(\times 10^6 \text{ kg})$	转动惯量 J / $(\times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{m}^2)$	刚度 K_{xx} / $(\times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1})$	扭转刚度 K_u / $(\times 10^{12} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	偏心距 e_y/m	
					e_{y1}	e_{y2}
1	6.5	4.3	7.5	5.0	2.4	0.8
2	6.5	4.3	7.5	5.0	2.4	0.8
3	6.5	4.3	6.0	4.0	2.4	0.8
4	6.5	4.3	6.0	4.0	2.4	0.8
5	3.0	1.3	6.5	4.0	1.8	0.6
6	3.0	1.3	6.5	3.0	1.8	0.6
7	3.0	1.3	5.0	3.0	1.8	0.6
8	3.0	1.3	5.0	3.0	1.8	0.6
9	3.0	1.3	5.0	3.0	1.8	0.6
10	3.0	1.3	5.0	3.0	1.8	0.6
11	3.0	1.3	5.0	3.0	1.8	0.6
12	3.0	1.3	4.5	3.0	1.8	0.6
13	3.0	1.3	4.0	3.0	1.8	0.6
14	3.0	1.3	4.0	2.0	1.8	0.6
15	3.0	1.3	4.0	2.0	1.8	0.6
16	3.0	1.3	4.0	2.0	1.8	0.6
17	3.0	1.3	4.0	2.0	1.8	0.6
18	3.0	1.3	4.0	2.0	1.8	0.6
19	3.0	1.3	3.5	2.0	1.8	0.6
20	3.0	1.3	3.5	2.0	1.8	0.6
21	3.0	1.3	3.0	2.0	1.8	0.6
22	3.0	1.3	3.0	2.0	1.8	0.6
23	3.0	1.3	2.0	1.0	1.8	0.6
24	3.5	1.5	2.0	1.0	1.8	0.6

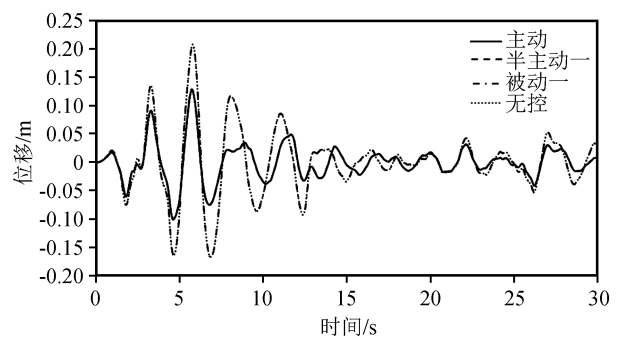


图 5 结构顶层位移(相对于地面)时程对比曲线
Fig.5 Comparison of displacement time-history curves at the top floor of structure (relative to the ground)

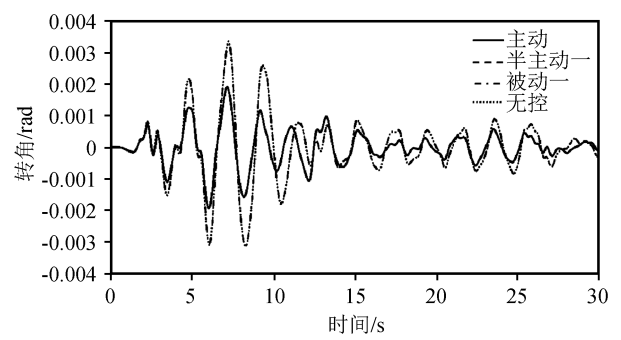


图 6 结构转角(相对于地面)时程对比曲线
Fig.6 Comparison of time-history curves of structural torsional angle (relative to the ground)

保持每层 EIMD 安装位置不变,图 7 给出了上述四种工况下全部楼层的相对位移、转角、加速度、转角加速度峰值对比图。由图中可以看出,被动等效质量惯性力对于结构加速度具有一定的控制效果,而对于结构位移、转角和转角加速度的控制效果

均不明显;与被动等效质量惯性力工况相比,考虑 EIMD 的可调电磁阻尼力后,结构的相对位移、转角、加速度、转角加速度峰值都得到较好的控制,尤其是对于结构位移和转角分量;“半主动一”工况与“主动”工况的控制效果基本相同,所提半主动控制

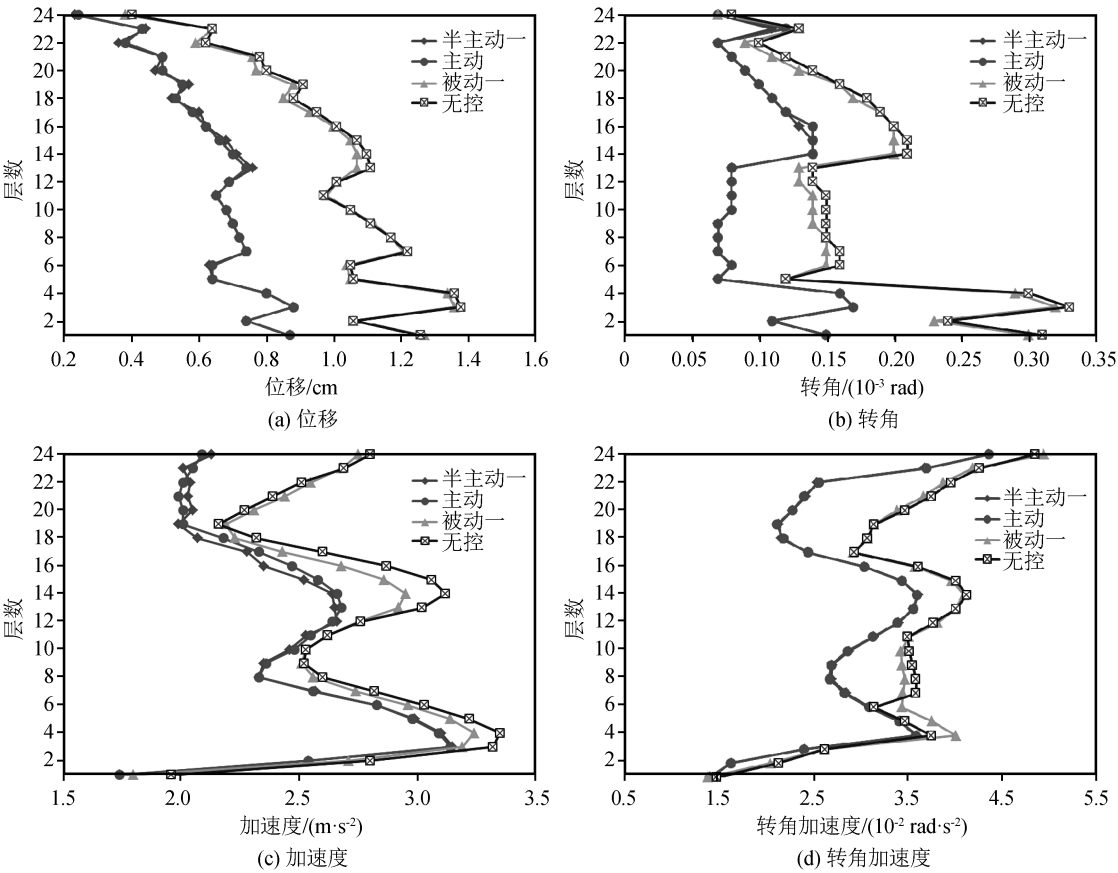


图 7 结构各层状态反应峰值对比

Fig.7 Peak values of structural responses at different floor

策略能够达到主动控制的最优控制效果。

为了更加全面分析所提半主动控制策略对该偏心高层结构的控制效果,尤其是 EIMD 安装位置对于偏心高层结构扭转耦联振动反应分量的控制效果。调整结构每层 EIMD 的安装位置分别为 $5e_{y1}$ 、 $5e_{y2}$ 和 $10e_{y1}$ 、 $10e_{y2}$,不同工况下,结构各层的相对位移、转角、加速度、转角加速度峰值对比如图 8 所示。图中,“无控”“被动一”和“半主动一”工况如前面所述;仅考虑被动等效质量惯性力,且 EIMD 安装位置分别为 5 倍和 10 倍偏心距时分别对应“被动二”和“被动三”工况;采用本文提出的半主动控制策略,且 EIMD 安装位置分别为 5 倍和 10 倍偏心距时分别对应“半主动二”和“半主动三”。从图中可以看出,对比“被动一”“被动二”和“被动三”工况,仅考虑被动等效质量惯性力作用下,调整 EIMD 的安装位置对于偏心高层结构振动反应分量的控制效果没有明显改善;对比“半主动一”“半主动二”和“半主动三”工况,当采用半主动控制策略时,调整 EIMD 的安装位置对于偏心高层结构的转角和转角加速度的峰值反应有着较好的控制效果,且安装位置距离每

层相应的质心越远,对于扭转分量的控制效果越好,但对于偏心高层结构的位移和加速度峰值反应分量的控制效果基本没有改善。

“半主动一”“半主动二”和“半主动三”工况下,结构各层的可调电磁阻尼控制力最大值如图 9 所示。图中,“EIMD1”表示每组中第一类阻尼器在结构相应层位置中提供的最大电磁阻尼力,“EIMD2”表示每组中第二类阻尼器在结构相应层位置中提供的最大电磁阻尼力。从图中可以看出,不同工况下,结构各层中两类阻尼器的最大控制力有一定差异,这主要是由于阻尼器在各层中放置的位置不同引起的;调整 EIMD1 的安装位置后,不同工况下底部 1~4 层阻尼器的最大控制力差异相对较大,而 5~24 层阻尼器的最大控制力差异相对较小,同样,不同工况下结构各层 EIMD2 的最大控制力也存在类似特点。

“半主动一”“半主动二”和“半主动三”工况下,不同工况下,结构顶层相对于地面的位移及转角反应时程对比曲线如图 10 和 11 所示。从图中可以看出,当采用半主动控制策略时,调整 EIMD 的安装

位置对于偏心高层结构的总转角反应有着较好的控制效果,且安装位置距离每层相应的质心越远,对于

扭转角分量的控制效果越好,但对于偏心高层结构位移反应分量的控制效果基本没有改善。

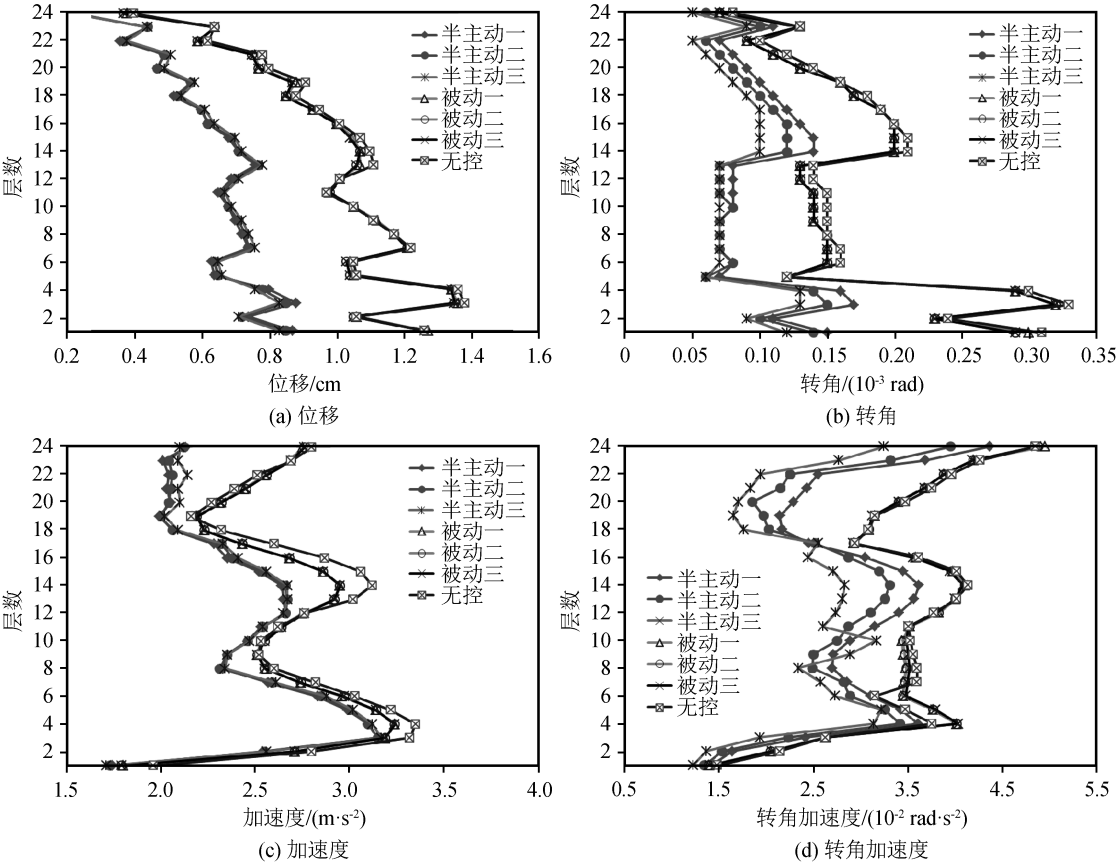


图 8 结构各层状态反应峰值对比

Fig.8 Peak values of structural responses at different floor

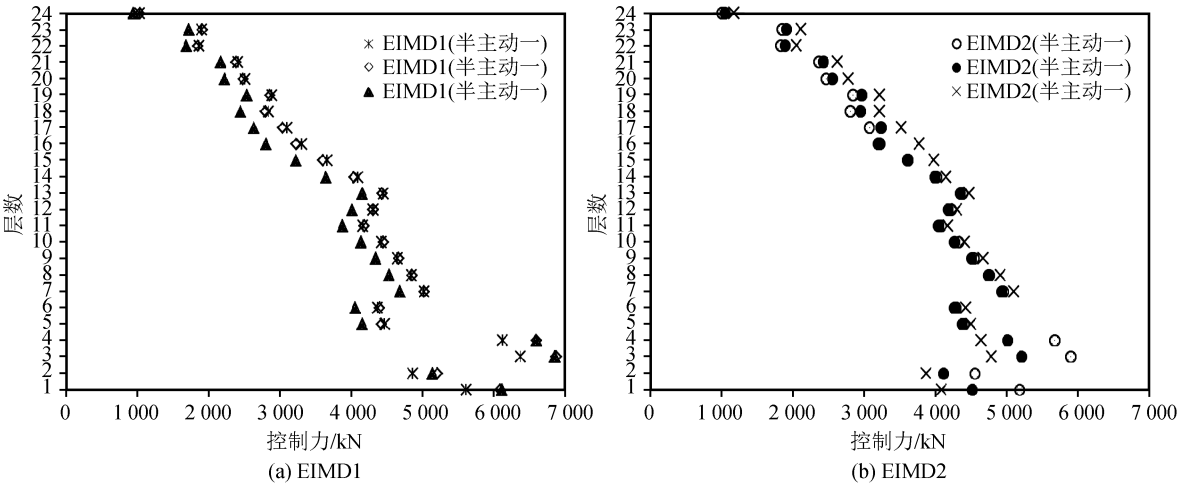


图 9 结构各层的最大控制力

Fig.9 Maximum control force at each story of the structure

4 结论

新型 EIMD 与传统粘滞阻尼器相比,具有体积小、重量轻、出力大的特点,是一种具有广阔应用前

景的控震装置。本文将 EIMD 用做半主动控制装置,同时针对偏心高层结构,提出一种新的基于 LQR 的 EIMD-偏心结构半主动控制策略。以一个 24 层实体偏心高层结构为例,考虑输入 El Centro 波对

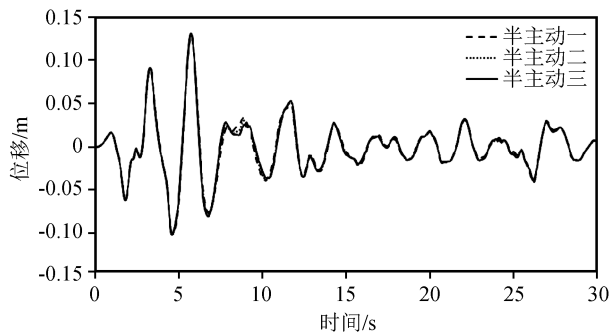


图 10 结构顶层位移(相对于地面)时程对比曲线

Fig.10 Comparison of displacement time-history curves at the top floor of structure (relative to the ground)

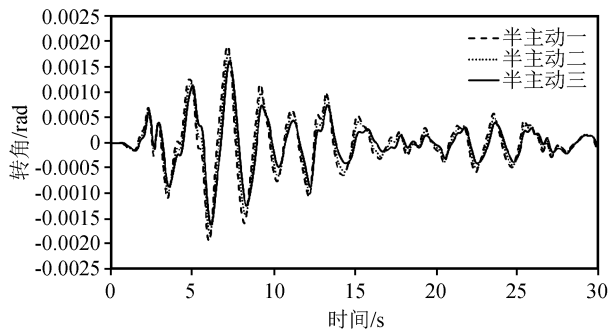


图 11 结构转角(相对于地面)时程对比曲线

Fig.11 Comparison of time-history curves of structural torsional angle (relative to the ground)

EIMD-偏心高层结构进行半主动控制分析。结果表明,(1)所提半主动控制策略可以很好地逼近主动控制对于结构振动反应分量的控制效果;(2)EIMD 控制装置中,被动等效质量惯性力对于结构加速度具有一定的控制效果,而对于结构位移、转角和转角加速度的控制效果均不明显,可调的电磁阻尼力对结构的所有振动反应量都有较好的控制效果,尤其是对于结构振动反应峰值的控制;(3)当采用半主动控制策略时,调整 EIMD 的安装位置对于偏心高层结构的转角和转角加速度的峰值反应有着较好的控制效果,且安装位置距离每层相应的质心越远,对于扭转分量的控制效果越好,但对于偏心高层结构的位移和加速度峰值反应分量的控制效果基本没有改善;(4)仅考虑被动等效质量惯性力作用下,调整 EIMD 的安装位置对于偏心高层结构振动反应分量的控制效果没有明显改善。

参考文献(References)

[1] 刘正洋.偏心结构的弱抖振滑模控制研究[D].西安:西安工业大学,2014.

LIU Zhengyang. Keeping Chattering Effect Sufficiently Low

with Sliding Mode Control for Irregular Building[D].Xi'an:Xi'an Technological University,2014.

[2] 魏勇,崔建文,王秋良,等.地震动输入方向对结构扭转振动的影响[J].大地测量与地球动力学,2018,38(12):1306-1310.

WEI Yong,CUI Jianwen,WANG Qiuliang,et al.The Influence of Input Ground Motion Direction on Structure Torsional Vibration[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2018,38(12):1306-1310.

[3] 李忠献,万家,姜忻良.高层建筑结构扭转耦合地震反应阻尼器控制试验研究[J].振动工程学报,1999,12(2):262-266.

LI Zhongxian,WAN Jia,JIANG Xinliang.Experiment on Damper Control for Torsion Coupled Seismic Responses of Multistory Building Structures[J].Journal of Vibration Engineering,1999,12(2):262-266.

[4] YOSHIDA O,DYKE S J,GIACOSA L M,et al.Experimental Verification of Torsional Response Control of Asymmetric Buildings Using MR Dampers[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2003,32(13):2085-2105.

[5] 程光煜,叶列平,朱兴刚.偏心结构消能减震技术的分析研究[J].工程抗震与加固改造,2006,28(2):78-83.

CHENG Guangyu,YE Lieping,ZHU Xinggang.Analysis on Energy Dissipation Control for Eccentric Structure[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2006,28(2):78-83.

[6] 李志军,刘园园,王社良,等.偏心结构基于 LMI 的鲁棒 H_∞ 控制[J].振动、测试与诊断,2014,34(5):857-863.

LI Zhijun,LIU Yuanyuan,WANG Sheliang,et al.Robust H_∞ Control for Eccentric Buildings Via LMI Approach[J].Journal of Vibration,Measurement & Diagnosis,2014,34(5):857-863.

[7] BIGDELI Y,KIM D.Response Control of Irregular Structures Using structure-TLCD Coupled System under Seismic Excitations[J].KSCE Journal of Civil Engineering,2015,19(3):672-681.

[8] 钱辉,李宏男,郜新军.偏心结构自复位复合摩擦阻尼器平扭耦联震动控制振动台试验研究[J].土木工程学报,2016,49(增刊1):125-130.

QIAN Hui,LI Hongnan,GAO Xinjun.Shaking Table Tests on Eccentric Structure with Re-centering Hybrid Friction Damper for Horizontal-torsional Coupled Seismic Response Mitigation[J].China Civil Engineering Journal,2016,49(Suppl1):125-130.

[9] NAKAMURA Y,FUKUKITA A,TAMURA K,et al.Seismic Response Control Using Electromagnetic Inertial Mass Dampers[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2014,43(4):507-527.

[10] HIRAMOTO K,MATSUOKA T,SUNAKODA K,et al.Bang-bang Type Semi-active Control of Civil Structures: A Prediction-based Approach[J].Journal of System Design and Dynamics,2010,4(1):103-114.

[11] 孙洪鑫,邓建军,王修勇,等.电磁惯质阻尼器在结构中位置优化以及减震分析[J].地震工程与工程振动,2019,39(2):69-78.

(下转第 250 页)

Analysis of Seismic Responses of Conventional and Column-free Metro Station[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(4): 421-427.

[8] NI H, LI M H, ZUO X. SeismicResponse Characteristics of Subway Station Structure[J]. Advanced Materials Research, 2013, 838-841: 1613-1619.

[9] 张海,王雪杰,李雅.地震波输入方向对软土地区车站结构响应的影响[J].世界地震工程, 2014, 30(2): 29-35.

ZHANG Hai, WANG Xuejie, LI Ya. Influence of Input Seismic Wave's Direction on Response of Station Structure in Soft Soil Area[J]. World Earthquake Engineering, 2014, 30(2): 29-35.

[10] 陶连金,李积栋,吴秉林,等.竖向地震动对大跨度高断面 Y 形柱地铁车站地震响应分析研究[J].地震工程学报, 2015, 37(3): 648-654.

TAO Lianjin, LI Jidong, WU Bing. Influence of the Vertical Seismic Wave on the Seismic Response of an Large-span High-section Y-shaped Column Subway Station [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(3): 648-654.

[11] 钟波波,张永彬,李宏.大跨无柱地铁车站地震响应分析[J].地下空间与工程学报, 2015, 11(增刊 1): 317-322.

ZHONG Bobo, ZHANG Yongbin, LI Hong. Analysis of Seismic Response of Large-span Column-free Subway Station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(Suppl): 317-322.

[12] MA C, LU D C, DU X L, et al. Effect of Buried Depth on Seismic Response of Rectangular Underground Structures Considering the Influence of Ground Loss[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 106: 278-297.



(上接第 212 页)

SUN Hongxin, DENG Junjun, WANG Xiuyong, et al. Position Optimization and Damping Analysis of Electromagnetic Inerter Dampers in Structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 39(2): 69-78.

[12] 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.

OU Jinping. Structural Vibration Control-active, Semi-active and Intelligent Control[M]. Beijing: Science Press, 2003.

[13] GOULD P L. Dynamics of Structures: (Theory and Applications to Earthquake Engineering) Anil K. Chopra Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995, 729pp [J]. Engineering Structures, 1995, 17(9): 679.