

文章编号:1673-9469(2025)02-0060-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.02.008

## 基于 EIMD 的桥梁半主动控制与地震自复位性能研究

石晓东<sup>1</sup>, 孙龙攀<sup>1</sup>, 李沐远<sup>1</sup>, 刘晓航<sup>1</sup>, 郭进<sup>1,2\*</sup>

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 为了验证电磁惯质阻尼器(EIMD)应用于桥梁结构半主动控制的可行性,对其进行了试验研究,验证了其力学模型的准确性与参数敏感性。提出了一种新型控制算法,并以此为基础设计了EIMD-连续梁桥控制系统。以一个实际工程连续梁桥为研究对象,通过数值模拟的方法对地震作用下桥梁结构墩梁相对位移的控制效果进行评价,并开展了该控制系统在桥梁自复位性能方面的研究,结果表明:与传统被动控制方法相比,桥梁结构墩梁相对位移的绝对值显著减小,说明提出的控制系统减震效果显著;提出的新型控制算法对桥梁结构自复位功能有着明显的提升效果。

**关键词:** 电磁惯质阻尼器;新型控制算法;自复位功能;半主动控制

中图分类号:U441

文献标识码:A

## Research on Semi-active Control System of Bridge and Seismic Self-centering Performance Based on Electromagnetic Inertial Mass Damper

SHI Xiaodong<sup>1</sup>, SUN Longpan<sup>1</sup>, LI Muyuan<sup>1</sup>, LIU Xiaohang<sup>1</sup>, GUO Jin<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control, Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

**Abstract:** To verify the feasibility of applying the Electromagnetic Inertia Mass Damper (EIMD) to the semi-active control of bridge structures, an experimental study was conducted to verify the accuracy of its mechanical model and the sensitivity of its parameters. A new control algorithm was proposed and an EIMD-continuous girder bridge control system was designed. Taking an actual engineering continuous girder bridge as the object, the control effect of the relative displacement of the bridge structure's piers and girders under earthquake action was evaluated through numerical simulation methods, and the research on the self-resetting performance of the bridge structure was carried out. The results show that compared with the traditional passive control methods, the absolute value of the relative displacement of the bridge structure's piers and girders is significantly reduced, which shows excellent shock absorption effect. The proposed new control algorithm has a significant improvement effect on the self-resetting function of the bridge structure.

**Key words:** electromagnetic inertial mass damper; new control method; self-resetting performance; semi-active control

桥梁减隔震技术的出现为桥梁结构抗震设计提供了新思路,被认为是最有吸引力的抗震策略<sup>[1]</sup>。在减隔震系统设计的早期阶段,人们对桥

梁结构的自复位功能并不重视,因为减隔震设备早期主要为铅芯叠层支座,在地震发生之后铅芯可以提供水平方向的恢复力,因此该支座可以提

收稿日期:2023-08-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178493);河北省省级科技计划资助项目(21375402D,216Z6101G);河北省自然科学基金资助项目(E2022210028)

第一作者:石晓东(2000—),男,河北保定人,硕士研究生,从事桥梁抗震方面的研究。

\*通信作者:郭进(1985—),男,湖北黄冈人,博士,教授,从事桥梁韧性抗震、桥梁减隔震技术方面的研究。

供给桥梁结构一定的自复位能力<sup>[2]</sup>。由于土木工程领域的不断发展,出现了一些新型减隔震装置,如利用塑性耗能的钢阻尼器、液体阻尼器、摩擦/滑动支座等,这些新装置可以有效提升减隔震效果,但它们并不具备自复位功能<sup>[2]</sup>。在实践中发现,应用了减隔震系统的桥梁在地震中破坏大多是由于产生了过量的位移,因此,人们对减隔震系统的自复位能力越来越重视<sup>[3-4]</sup>。

相比于传统的阻尼装置,电磁惯质阻尼器 (Electromagnetic Inertial Mass Damper, EIMD) 具有构造简单、体积较小、可提供的阻尼力大、易于控制等优点,具有良好的减震性能,相关学者进行了一系列研究,验证了其应用于土木工程结构控制领域的有效性<sup>[5-7]</sup>。但是,目前关于 EIMD 的半主动控制研究并不充分,其自复位功能也有所欠缺。常见的控制方法如线性二次型 (Linear Quadratic Optimal Regulator, LQR) 最优控制一般以结构的地震响应为控制目标<sup>[8-10]</sup>,在结构自复位功能方面的应用较少。因此,在进行基于 EIMD 的半主动控制系统设计时,需提出一种新型控制算法,将设计重点放在桥梁结构自复位功能的研究上。

为了研究 EIMD 在桥梁结构半主动控制方面的可行性,本文对 EIMD 进行试验研究,验证力学模型的准确性及半主动控制的有效性。基于新型三态控制算法,设计了 EIMD-桥梁结构控制系统,并以一个实体桥梁为例进行数值模拟研究,研究了该控制系统对桥梁结构地震响应与自复位功能的影响。

## 1 EIMD 力学模型研究及控制系统介绍

### 1.1 EIMD 构造及力学模型

EIMD 是在传统的电磁阻尼器的基础上引入“惯质”这一新概念发明而成的新型阻尼装置<sup>[11]</sup>,构造图见图 1。其工作原理为结构的水平位移通过传力构件引起滚珠螺母的水平位移,通过滚珠装置引起滚珠丝杆的高速旋转,带动惯性飞轮及电机的转子转动,惯性飞轮及电机转子的转动分别会给阻尼器提供惯性力与电磁粘滞阻尼力<sup>[5]</sup>,因此可以达到振动控制的效果。当阻尼器工作时,传力构件发生水平位移,通过滚珠螺母带动滚珠丝杆旋转,原理如图 2 所示。由图 1 与图 2 可推导出 EIMD 的轴向力-位移关系式:

$$F = \frac{1}{\eta} \cdot \left(\frac{2\pi\alpha}{L}\right)^2 \left\{ (I_g + I_f) \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{K_e K_f}{R + R_a} \cdot \frac{dx}{dt} \right\} +$$

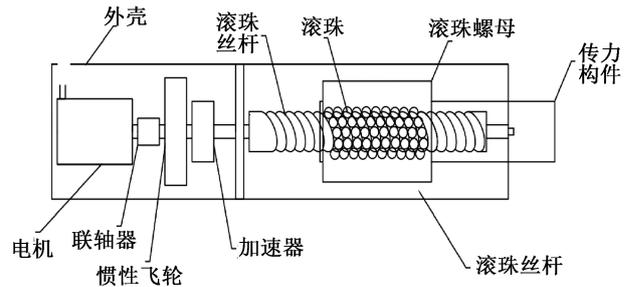


图 1 电磁惯质阻尼器构造图

Fig. 1 Construction diagram of electromagnetic inertial damper

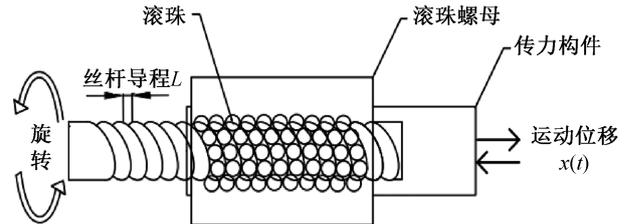


图 2 电磁惯质阻尼器工作原理图

Fig. 2 Schematic diagram of operating principle of electromagnetic inertial damper

$$f \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}) = m_e \ddot{x} + c_d \dot{x} + f \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (1)$$

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

$$c_d = \frac{1}{\eta} \cdot \left(\frac{2\pi\alpha}{L}\right)^2 \frac{K_e K_f}{R + R_a} \quad (3)$$

式中, $x$  为杆件位移, $m$ ;  $t$  为时间, $s$ ;  $m_e$  为 EIMD 的等效惯性质量,  $\text{kg}$ , 惯性力的大小与杆件的加速度成正比;  $c_d$  为 EIMD 的电磁阻尼系数,  $\text{N}/(\text{m}/\text{s})$ ; 电磁阻尼力与杆件的速度成正比;  $f$  为电磁惯质阻尼器内部存在的摩擦力,  $\text{N}$ ;  $L$  为滚珠丝杆机构的导程,  $\text{m}$ ;  $\eta$  为滚珠丝杆模组的传动效率;  $I_f$  与  $I_g$  分别为飞轮与电机的转动惯量, 单位均为  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ;  $\alpha$  为加速器的放大倍数;  $K_e$  为电机的转矩常数,  $\text{Nm}/\text{A}$ ;  $K_f$  为电机的反电动势常数,  $\text{V}_s/\text{rad}$ ;  $R$  为电机的内阻,  $\Omega$ ;  $R_a$  为电机外接电路的电阻,  $\Omega$ ;  $\dot{x}$  与  $\ddot{x}$  分别为 EIMD 杆件终端运动的速度 ( $\text{m}/\text{s}$ ) 与加速度<sup>[12]</sup> ( $\text{m}/\text{s}^2$ )。由式(1)可知,电磁惯质阻尼器阻尼力主要由惯性力、电磁阻尼力以及摩擦力三部分构成。

### 1.2 EIMD-桥梁结构系统介绍

本文桥梁结构采用某实际工程的钢筋混凝土连跨桥,全长 547 m,跨径组合  $4 \times 30 \text{ m} + (80 + 140 + 80) \text{ m} + 2 \times 30 \text{ m}$ ,其结构示意图见图 3。取其中某一桥墩,并将相应附属部分桥面简化为单自由度体系,如图 4 所示。

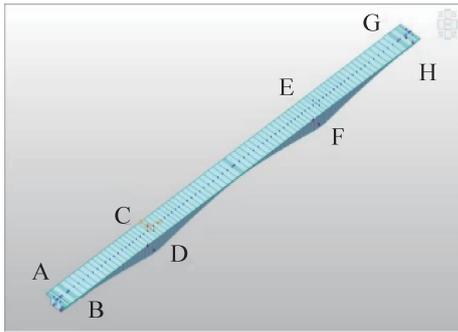


图3 桥梁结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of bridge structures

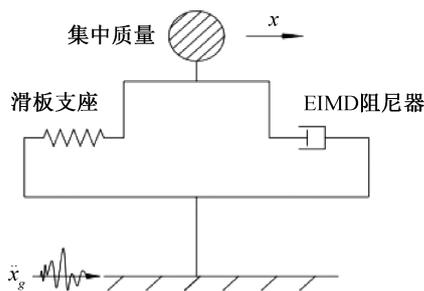


图4 单自由度体系示意图

Fig. 4 Schematic diagram of single-degree-of-freedom systems

地震作用下,图4单自由度体系的平衡方程可写为

$$f_i + f_s + f_d = 0 \quad (4)$$

式中 $f_i$ 、 $f_s$ 和 $f_d$ 分别为惯性力、恢复力和阻尼力,单位均为N。分别将其计算公式代入,可得该单自由度体系的总体平衡方程:

$$(m + m_e)\ddot{x} + (\mu mg + f) \cdot \text{sgn}(\dot{x}) + c_d \dot{x} = -m\ddot{x}_g \quad (5)$$

式中, $m$ 为集中质量,取为 $1.7764 \times 10^7$  kg; $\mu$ 为桥梁滑板支座之间的摩擦系数,取为0.01; $g$ 为重力加速度,取值为 $9.806$  m/s<sup>2</sup>; $c_d$ 为EIMD装置的阻尼系数,N/(m/s)。

### 1.3 半主动控制方法介绍

针对以上所示的结构系统,本文给出具有自复位功能的三态控制方法。本研究控制方法将墩梁的相对位移状态分为了6个区域并进行编号,见图5。

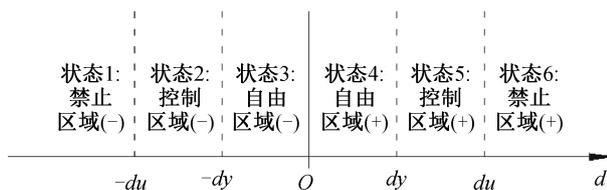


图5 相对位移状态示意图

Fig. 5 Schematic diagram of relative displacement state

由式(3)可知,可以通过调节外电路电阻改变阻尼器阻尼系数,但传统调节方法存在电阻阻值限制及调节反应过慢的问题。沈文爱等<sup>[13]</sup>提出了通过改变EIMD外电路极短时间内通路所占的时间比例(通路比 $D$ ),来改变电路等效电阻的方法,该方法控制电路的等效电磁阻尼 $c_e$ 为

$$c_e = c_d \cdot D \quad (6)$$

本文所提三态控制方法具体控制策略如表1所示。

表1 EIMD控制策略

Tab. 1 Control strategy of electromagnetic inertial mass damper

状态编号	阻尼力符号	墩梁相对位移绝对值的变化趋势	通路比
1	$\geq 0$	减小	$D=0$
	$< 0$	增大	$D=1$
2	$\geq 0$	减小	$D=0$
	$< 0$	增大	$D = \frac{ d  - dy}{du - dy}$
3	$\geq 0$	减小	$D=0$
	$< 0$	增大	$D=0$
4	$\geq 0$	增大	$D=0$
	$< 0$	减小	$D=0$
5	$\geq 0$	增大	$D = \frac{ d  - dy}{du - dy}$
	$< 0$	减小	$D=0$
6	$\geq 0$	增大	$D=1$
	$< 0$	减小	$D=0$

## 2 EIMD力学试验研究

### 2.1 EIMD力学模型验证及参数敏感性分析

组装EIMD,阻尼器惯性质量为197.15 kg,外电路通路时阻尼系数为2360.48 N/(s/m),阻尼器摩擦力为20 N。分别加载频率0.5 Hz+幅值10 mm与频率0.5 Hz+幅值15 mm的正弦位移信号,验证式(1)所提的力学模型在不同加载条件下的准确性,阻尼力-位移滞回曲线对比结果如图6、图7所示。

由图6、图7可知,阻尼器实际加载产生的力-位移滞回曲线和力学模型输出的吻合程度较高,在相同的加载条件下,EIMD输出力和模型计算力基本相同,可证明式(1)所提力学模型的准确性。

### 2.2 EIMD参数敏感性分析

由式(3)可知,改变EIMD外电路中电阻的大小,可以改变阻尼器电磁阻尼系数,达到半主动控

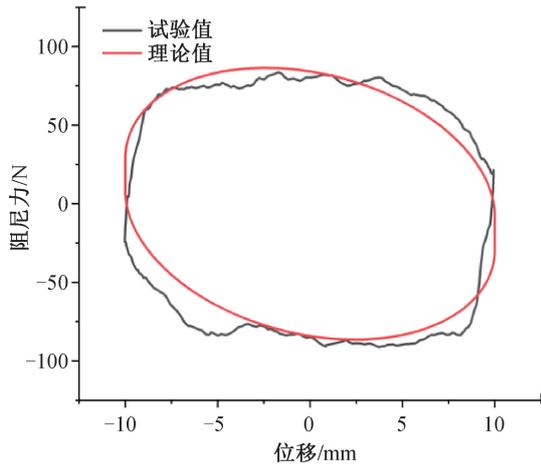


图 6 频率 0.5 Hz+幅值 10 mm 加载对比

Fig. 6 Comparison between analytical and experimental results in the case of frequency 0.5 Hz+10 mm amplitude loading

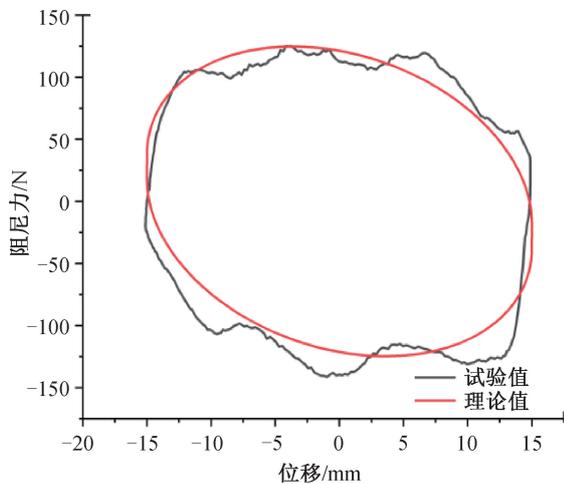


图 7 频率 0.5 Hz+幅值 15 mm 加载对比

Fig. 7 Comparison between analytical and experimental results in the case of frequency 0.5 Hz Magnitude+15 mm amplitude loading

制的目的。在此基础上设计试验,均加载频率 0.8 Hz+幅值 10 mm 的正弦位移信号,调整外电阻大小,探究 EIMD 参数敏感性,试验结果如图 8 所示。

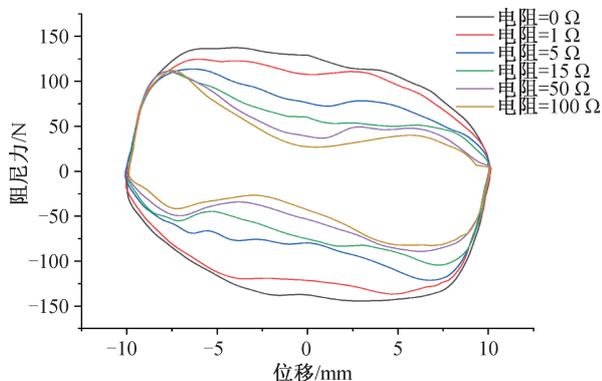


图 8 外接不同电阻力-位移滞回曲线

Fig. 8 External resistance force-displacement hysteresis curves with different external resistances

计算阻尼力-位移滞回曲线的面积,阻尼器外接 0 Ω 电阻时滞回曲线面积为 4 510.18 N · mm,比外接 100 Ω 电阻时的滞回曲线面积 1 953.04 N · mm 增大了 130.93%。经过对比可知:本文组装的 EIMD 对外电阻变化敏感度较高,可以用于半主动控制领域。

### 3 仿真结果分析

#### 3.1 结构位移响应分析

选择 El Centro-NS 波作为 1.2 节单自由度结构的水平地震动输入。EIMD 采用 2.1 节所用阻尼器,经过试算,阻尼器放大倍数设置为 1 500。

为了评价本文给出的三态控制算法的效果,对所示简化单自由度模型计算 4 种工况:

工况 1:不设置 EIMD,此时只有摩擦耗能。

工况 2:设置 EIMD,基于本文给出的三态控制算法的电磁惯质控制系统,以工况 1 结构响应为依据对系统参数进行设置, $dy = 5 \text{ cm}$ , $du = 10 \text{ cm}$ ,此时属于半主动控制。

工况 3:设置 EIMD,根据工况 2 中阻尼器的耗能  $W$  进行试算,使其通路比  $D = 0.455$ ,此时阻尼器耗能与工况 2 相同,属于被动控制。

工况 4:设置 EIMD,使 EIMD 外电路通路比  $D = 1$ ,属于被动控制。

数值模拟结果见图 9,从计算结果可以得出:

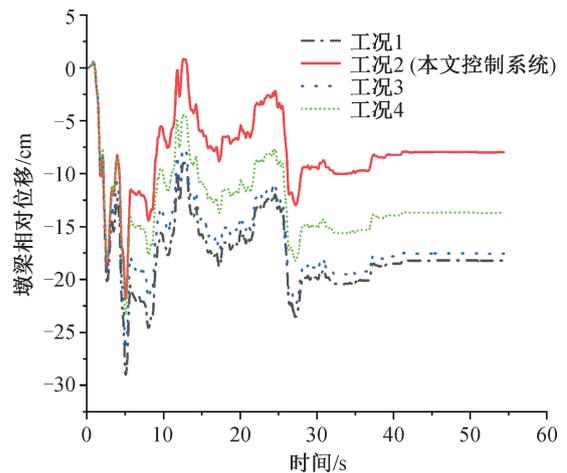


图 9 墩梁相对位移

Fig. 9 Relative displacement of pier beams

(1)工况 2 与工况 1、工况 3 相比,墩梁相对位移绝对值最大值  $d_{\text{max}}$  分别减少了 20.42%、12.91%,说明本文设计系统减隔震效果明显,符合理论预测。

(2)工况2与工况4相比,墩梁相对位移绝对值相差不大,但残余位移值 $d_r$ 减小了28.41%。说明本文所提控制方法可以在不损失减震能力的前提下,提升结构的自复位能力。

(3)由工况2与工况3相比可知,本文设计的基于三态控制算法的EIMD半主动控制策略与传统的被动控制在耗能相等的前提下,可以更加有效地控制地震过程中墩梁的相对位移与地震后桥梁结构的残余位移,体现出半主动控制的优越性,具有更优的减隔震效果与自复位功能。

### 3.2 结构剪力分析

由于对墩梁相对位移的控制,在地震过程中桥墩结构所受到的剪力会不可避免地增大,因此对本文所提系统应用在桥墩结构所受剪力的时程曲线进行评价,判断其是否处于合理区间。在简化的单自由度体系中,连续梁桥中上部结构传递到地面的力可等效为桥墩所受的剪力,为滑板支座摩擦力与阻尼器阻尼力之和。各工况下桥墩所受剪力时程如图10—图13所示。

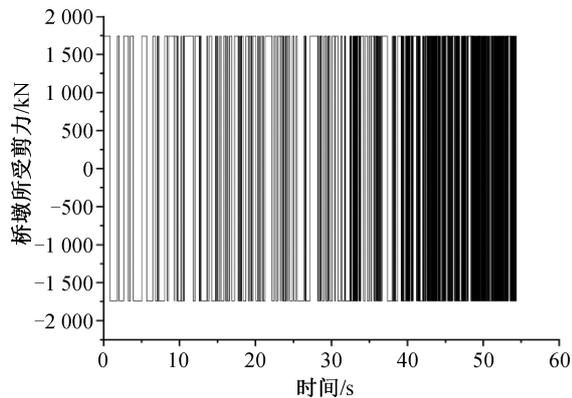


图10 工况1剪力图

Fig. 10 Shear force diagram for case 1

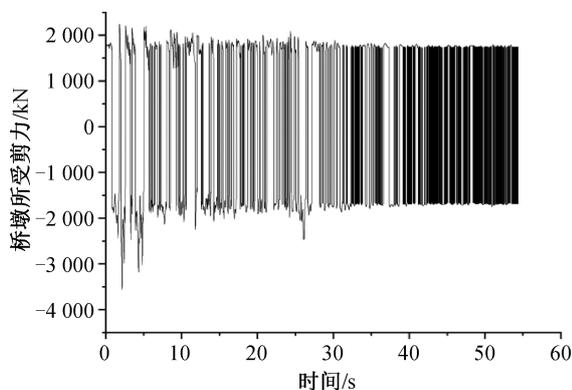


图11 工况2剪力图

Fig. 11 Shear force diagram for case 2

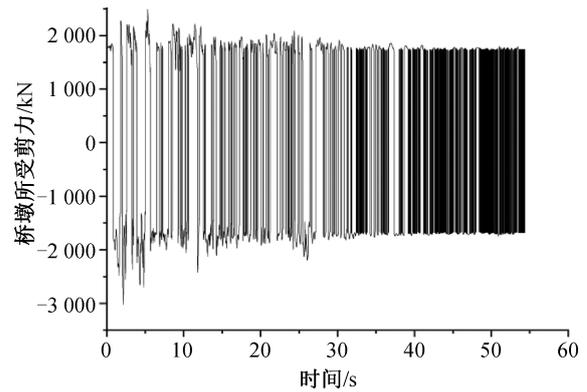


图12 工况3剪力图

Fig. 12 Shear force diagram for case 3

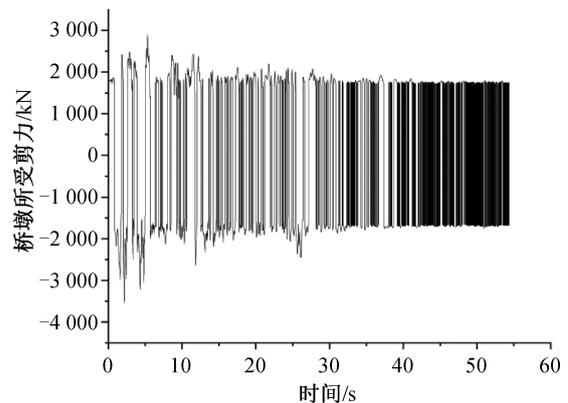


图13 工况4剪力图

Fig. 13 Shear force diagram for case 4

从图10—图13可以看出:(1)4种工况下桥墩所受剪力均未超出其抗剪强度设计值14 483.08 kN;(2)工况1—工况4桥墩所受剪力主要由滑板支座的摩擦力组成,阻尼器的阻尼力所占比例较小;(3)工况2对墩梁相对位移的控制效果最好,桥墩所受剪力也最大,符合理论预期;(4)工况1—工况4桥墩剪力的最大值 $F_{\max}$ 分别为1 741.94、3 563.92、3 023.18、3 536.70 kN,在使用阻尼器的工况中,相比于工况3、工况4,工况2桥墩剪力最大值增加了17.89%、0.7%,增幅可以接受。

### 3.3 多条地震波对比分析

为了避免仅一条地震波输入进行模拟分析存在的偶然性,本文选择三条地震波输入,进行模拟分析,分别对各个工况下墩梁相对位移绝对值最大值 $d_{\max}$ 、残余位移 $d_r$ 、桥墩所受最大剪力 $F_{\max}$ 以及阻尼器耗能 $W$ 进行统计,统计结果如图14所示。

由图14可知:(1)本文设计的基于EIMD的新型半主动控制系统可以明显地提升桥梁结构的自复位能力,且与传统的被动控制相比,位移减少

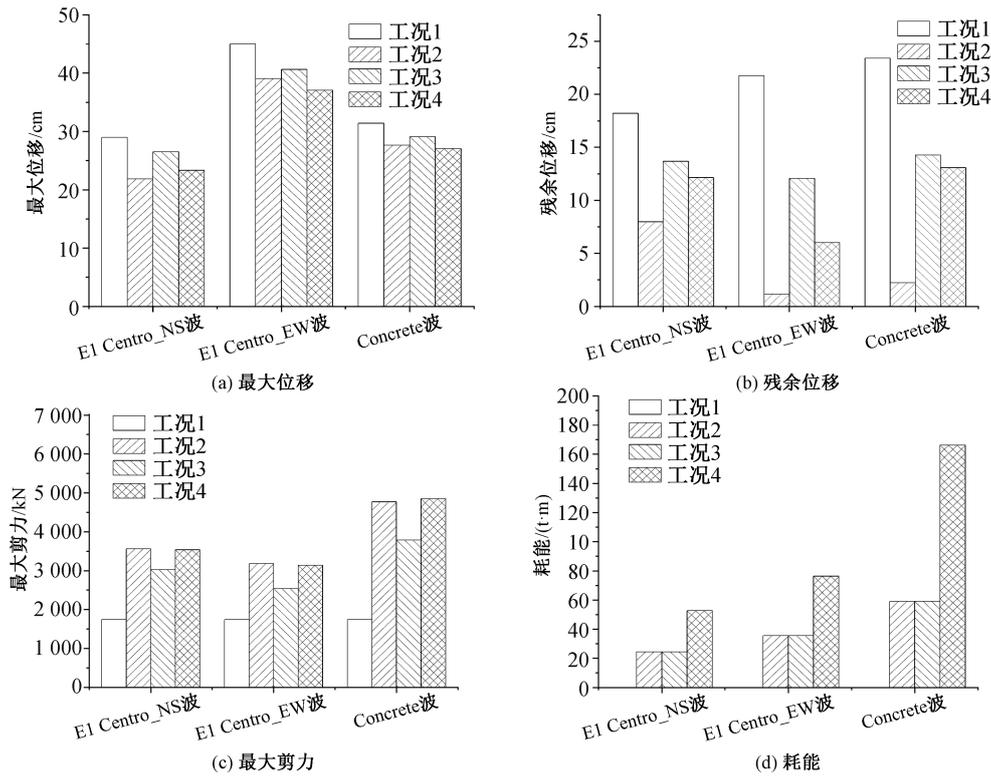


图 14 多地震波不同工况对比

Fig. 14 Comparison of different working conditions of multiple seismic waves

导致的桥墩剪力的增加幅度较小,具有优良的减隔震效果;(2)在不同地震波激励下,本文设计的半主动控制系统具有理想的减隔震效果与自复位功能,且具有一定的有效性与稳定性。

#### 4 结论

1)推导出电磁惯质阻尼器的力学模型,并通过试验验证该力学模型的准确性。对电磁惯质阻尼器开展参数试验,研究其参数敏感性以验证其应用于桥梁结构半主动控制领域的可行性。

2)提出了一种新型控制方法,与一般的控制方法相比,本文控制方法原理简单,易于操作,控制细节与减隔震概念明确对应,能够充分发挥减隔震作用,自复位效果明显。

3)对本文所提减隔震控制系统的减隔震效果和自复位功能开展了数值模拟进行验证。数值对比分析结果表明,采用本文减隔震系统的桥梁结构,在不同地震波的激励之下,墩梁相对位移均显著减小,具有一定的稳定性,并且震后的残余变形得到了有效控制。与其他使用电磁惯质阻尼器的工况相比,桥墩剪力增加幅度在可接受范围(20%)之内。

#### 参考文献:

- [1] 范立础,王志强. 桥梁减隔震设计[M]. 北京:人民交通出版社,2001:6-7.
- [2] MEDEOT R. Re-centering capability evaluation of seismic isolation systems based on energy concepts[C]//Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper. 2004,3106.
- [3] MEDEOT R. Self-centering mechanism in elastic-plastic bridge isolators[C]. Post SMiRT Seminar on Isolation, Energy Dissipation and Control of Vibrations in Structures,1993.
- [4] BRAUN C, MEDEOT R. New design approaches to reduce seismic risk[J]. Mitigation of Seismic Risk-Support to Recently Affected European Countries,2000,27(3): 89-93.
- [5] NAKAMURA Y, FUKUKITA A, TAMURA K, et al. Seismic response control using electromagnetic inerter mass dampers[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2014,43(4):507-527.
- [6] HIRAMOTO K, MATSUOKA T, SUNAKODA K, et al. Bang-bang type semiactive control of civil structures: APrediction-based approach[J]. Journal of System Design and Dynamics,2010,4(1):103-114.
- [7] 孙洪鑫,邓军军,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.
- [8] 陈水生. 高架桥梁地震响应磁流变阻尼器(MR)半主动控制[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(6):40-43.
- [9] 陈水生. 大跨度斜拉桥拉索的振动及被动、半主动控制[D]. 杭州:浙江大学, 2002.
- [10] 雷海涛. 偏心结构基于 EIMD 的半主动控制研究[D]. 西安:西安工业大学, 2019.
- [11] 孙洪鑫,罗一帆,杨国松,等. 电磁集能式调谐质量阻尼器的结构减震及能量收集分析[J]. 振动与冲击, 2017,36(15):51-56.
- [12] 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+250.
- [13] 沈文爱,朱宏平,孙子航. 电磁惯性质量阻尼器的自供能半主动控制电路及控制方法:CN112596368A [P]. 2021-04-02.
- (责任编辑 王利君)

(上接第 59 页)

- [7] 孙佳程,廖少明,孙连勇,等. 土岩复合地层盾构滚刀冲击荷载及振动响应分析[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(5):167-176.
- [8] 朱建才,邓智宝,袁逢逢,等. 盾构穿越复合地层机体振动影响因素研究[J]. 浙江工业大学学报, 2022, 50(4):435-443.
- [9] 李舜酩,郭海东,李殿荣. 振动信号处理方法综述[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8):1907-1915.
- [10] 张声辉,高文学,刘江超,等. 基于 EMD 分解的爆破振动信号主成分提取与分析[J]. 工程爆破, 2022, 28(6):8-14.
- [11] 张义平,李夕兵,赵国彦. 基于 HHT 方法的爆破地震信号分析[J]. 工程爆破, 2005, 11(1):1-7.
- [12] 曹晓立,高文学,吕洪涛,等. 爆破振动信号的 Hilbert-Huang 变换分析与应用研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(S2):107-113.
- [13] 杨智广,费鸿禄,胡刚. 隧道掘进爆破振动对围岩影响的 HHT 分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(9):121-127.
- [14] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series, 1998, 454(1971):903-995.
- (责任编辑 王利君)