

新型压电摩擦阻尼器的有限元分析及试验研究^①

朱军强, 张泽鑫, 张仁猛, 李鹏飞

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:利用压电陶瓷的压电效应,研发出一种基于半主动控制的新型压电摩擦阻尼器,介绍其构造和工作原理。建立新型压电摩擦阻尼器的 ABAQUS 有限元模型,得出阻尼器在不同工况下的滞回曲线,并进行其滞回性能试验,用试验值验证阻尼器有限元模型的相似性,两者得到的阻尼器摩擦力变化趋势相近;采用 ANSYS 建立安装有新型压电摩擦阻尼器的输变电塔模型,利用 MATLAB 计算输变电塔模型各层的加速度响应,验证新型压电摩擦阻尼器在实际结构中的摩擦耗能性能,为其工程应用提供理论依据。

关键词:压电陶瓷驱动器;压电摩擦阻尼器;有限元分析;试验研究

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0377-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0377

Finite-element Analysis and Test Study on a New Piezoelectric Friction Damper

ZHU Jun-qiang, ZHANG Ze-xin, ZHANG Ren-meng, LI Peng-fei

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: Using the piezoelectric effect of piezoelectric ceramics, this article developed a new piezoelectric friction damper based on semi-active control theory, and described its structure and working principle. The ABAQUS finite-element model of the new piezoelectric friction damper was established. By the model, the damper hysteresis curve was obtained under different conditions, and a hysteretic damper performance test was conducted. Simultaneously, the finite-element calculations and experimental values of the damper were compared. By comparing the hysteresis curves of the finite-element simulation and the hysteretic damper performance test, the following conclusions could be obtained. The hysteresis curve of the damper which installs one piezoelectric ceramic actuator was full, and the friction energy performance of the new piezoelectric friction damper was good; the hysteresis curve of the damper which installs two piezoelectric ceramic actuators was fuller than installing one piezoelectric ceramic actuator, thus by installing two piezoelectric ceramic actuators, the friction damper could obtain better friction energy performance; the cause of the deviation between the theoretical and experimental values was that the driver displacement of the piezoelectric ceramic actuator was small and was affected by many manufacturing factors; so the actual output of the damper was small. Then, a model of a new piezoelectric friction damper installed on a power transmission tower was established by ANSYS; and the acceleration response of the layers of the power transmission tower model was computed by MATLAB. The friction energy performance of the new piezoelectric friction damper in the actual struc-

① 收稿日期: 2014-06-30

基金项目: 国家青年科学基金项目(51008245)

作者简介: 朱军强(1976—), 男, 陕西人, 副教授, 从事工程结构智能减震与控制技术研究. E-mail: 492145400@qq.com

ture could be verified.The following conclusions could be obtained through the finite-element simulation;the effect of the damping control of the new piezoelectric friction damper installed on a power transmission tower was good,and the new piezoelectric friction damper had good practicality.This article can provide a theoretical basis for the engineering applications of the damper.

Key words: piezoelectric ceramic actuator; piezoelectric friction damper; finite element analysis; test study

0 引言

将阻尼器这种耗能减震装置装设在建筑结构合适部位,可以有效地消耗地震动施加在结构上的能量,减小结构的破坏程度^[1]。目前一些学者已研发出多种形式的阻尼器。欧进萍课题组设计了体积较大压电-T型变摩擦阻尼器^[2],Unsal等^[3]研制了可调摩擦力小自复位压电摩擦阻尼器;吕晖等^[4]对带有调谐液体阻尼器的结构进行了有限元分析,发现其属于被动减震耗能装置。本文在已有理论的基础上,研制一种新型压电摩擦阻尼器,该阻尼器具有体积小,可调摩擦力大,便于工程安装等特点。对其摩擦耗能性能进行有限元分析和试验研究,并分析将阻尼器安装在实际结构上的减震效果以验证摩擦耗能性能。

1 压电陶瓷驱动器

本文在研制新型压电摩擦阻尼器中所用的压电陶瓷驱动器由180片压电片堆叠而成,尺寸为10 mm×10 mm×18 mm,电压最大值为150 V。图1为压电陶瓷的实物图,图2为压电陶瓷驱动器的电压-位移特性曲线,性能指标见表1。



图1 压电陶瓷驱动器实物图

Fig.1 The piezoelectric ceramic actuator

表1 压电陶瓷驱动器的性能指标

Table 1 Performance indexes of the piezoelectric ceramic actuator

型号	刚度	标称位移	0 位移推力/
	/[N/um]	/(um@150 V)(±10%)	(N@150 V)
PT150/10×10/20	250	20	3 600

2 新型压电摩擦阻尼器的构造及工作原理

本文设计了一种基于半主动控制的新型压电摩

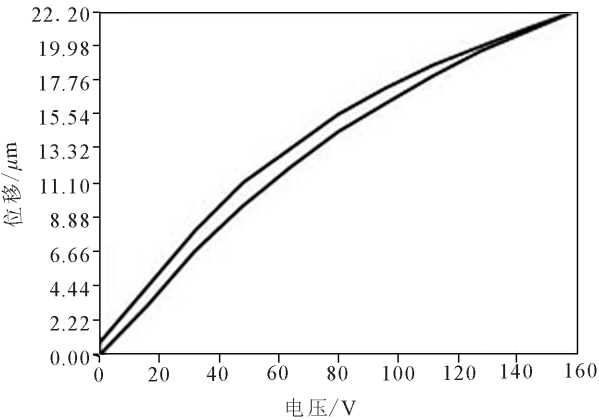


图2 压电陶瓷驱动器电压-位移特性曲线

Fig.2 The aoltage-displacement characteristic curve of piezoelectric ceramic actuator

擦阻尼器,其尺寸为200 mm×40 mm×40 mm,所有约束部件全采用钢材制作,制作精密,构造合理。实物图见图3,内部构造如图4所示,新型压电摩擦阻尼器详细构造图如图5。

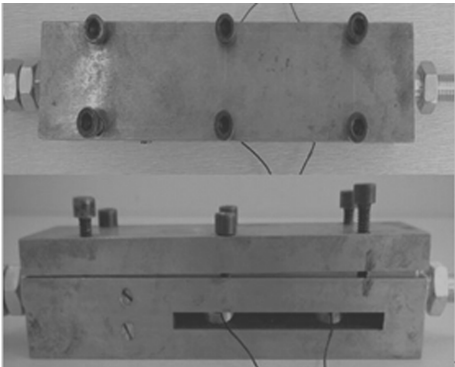


图3 压电摩擦阻尼器实物图

Fig.3 The piezoelectric friction damper

阻尼器内部预设三个压电陶瓷驱动器,可根据实际情况自主调节。在每个驱动器的外部设置了套筒,以保护驱动器不因侧向力而变形。安置在压电陶瓷驱动器上下的钢制垫片作为套筒的上盖和底盖,可以保证驱动器与阻尼器上顶板、底座接触紧密。最外面的套筒与作动拉杆相连,当作动拉杆受力时,拉杆把力传递给套筒上,套筒通过上顶板和底座将力传递给另外两个套筒,以实现阻尼器的滑动。

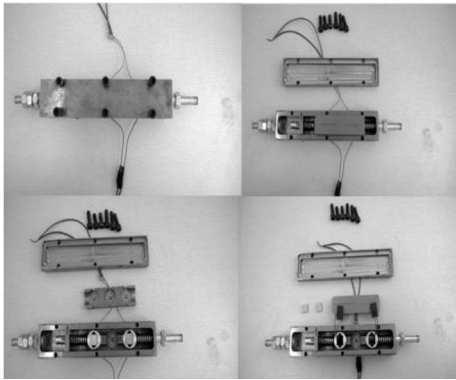


图 4 压电摩擦阻尼器内部构造实物图

Fig.4 The internal structure of piezoelectric friction damper

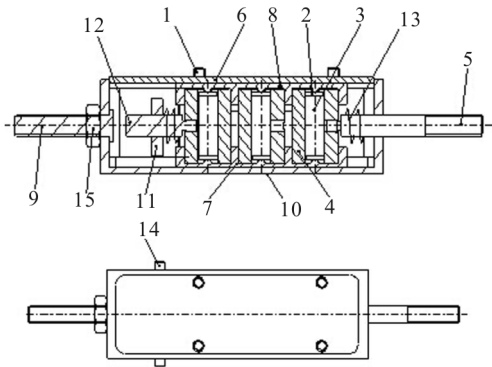


图 5 新型压电摩擦阻尼器详细构造图

Fig.5 The detailed structure of new piezoelectric friction damper

当结构受到外力作用发生变形时,通过预紧螺栓向阻尼器施加预压力,槽体与阻尼器产生的相对运动会产生摩擦,使阻尼器摩擦耗能。压电摩擦阻尼器的半主动控制系统^[5]会根据结构的响应,施加给压电陶瓷相应的电压,根据压电陶瓷所具有的逆压电效应,使压电摩擦阻尼器内部的摩擦力有效增加,利用阻尼器内部本身所产生的摩擦力逐渐消耗能量。

本文设计的新型压电摩擦阻尼器的特点是:(1)设计轻巧、方便,阻尼器出力大,易于在工程上安装使用;(2)压电陶瓷驱动器外设置有套筒,保护其工作时不因受剪而损坏;(3)阻尼器内部的作动拉杆上加入了复位弹簧。当作动杆件受单方向的力作用时,弹簧的弹力可将作动拉杆进行复位,让阻尼器重复受力。

3 新型压电摩擦阻尼器的有限元分析

在进行新型压电摩擦阻尼器的有限元分析时采

用 ABAQUS 软件^[6]。选用 ABAQUS 自带的塑性本构关系,采用实体单元 C3D8R 建立构件模型。在建模过程中,新型压电摩擦阻尼器所使用的钢材为理想弹塑性材料,弹性模量为 505 000 MPa,泊松比为 0.27,图 6 为新型压电摩擦阻尼器的 ABAQUS 有限元模型。为研究阻尼器在通电情形下的响应,完全约束阻尼器底部,在 Step 功能模块中创建两个分析步^[7]。分析步一:在加电情况下施加等效压力荷载;分析步二:按位移加载制度施加往复作用,加载制度如图 7 所示。

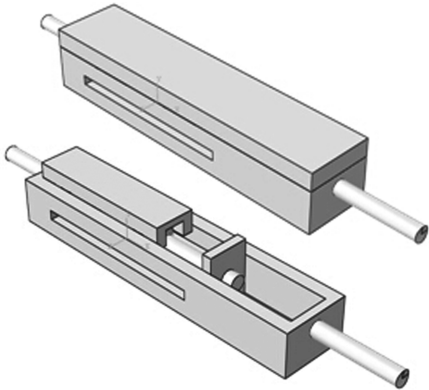


图 6 阻尼器 ABAQUS 有限元模型

Fig.6 ABAQUS finite element model of the damper

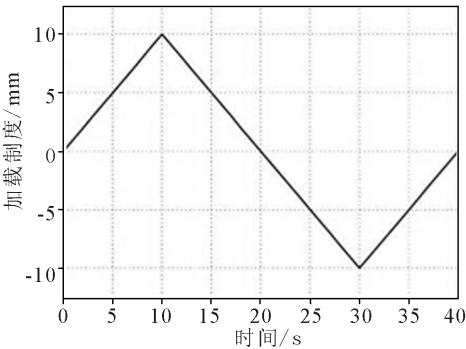


图 7 位移加载制度

Fig.7 Displacement loading system

在两种工况下对新型压电摩擦阻尼器进行加载,得到新型压电摩擦阻尼器在不同电压下的滞回曲线,对比分析摩擦耗能情况。

工况一:在阻尼器里面安装一个压电陶瓷驱动器,在位移加载下分别施加 30 V、60 V、90 V 和 120 V 电压(压电陶瓷堆的极限电压为 150 V),在各个电压下分别进行有限元分析(图 8)。

工况二:在阻尼器里面安装二个压电陶瓷驱动器,在位移加载下,分别施加同工况一相同的电压,在各个电压下分别进行有限元分析,如图 9 所示。

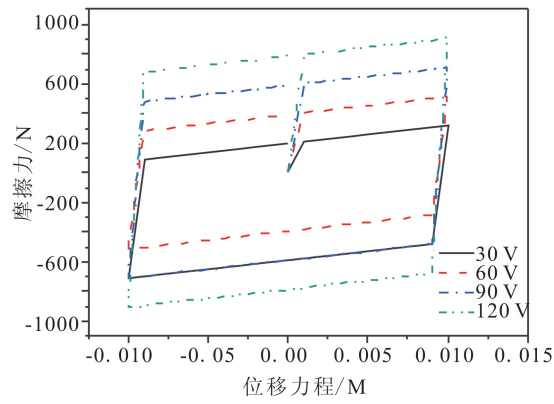


图 8 安装一个驱动器的阻尼器滞回曲线

Fig.8 Hysteresis curve of the damper with one actuator installed

从图 8 可以看出,随着施加在压电陶瓷驱动器上电压的增大,滞回曲线所包含的面积变大,滞回曲线也越饱满,说明新型压电摩擦阻尼器的摩擦耗能性能与加载的电压成正比;该阻尼器的摩擦耗能性能良好。

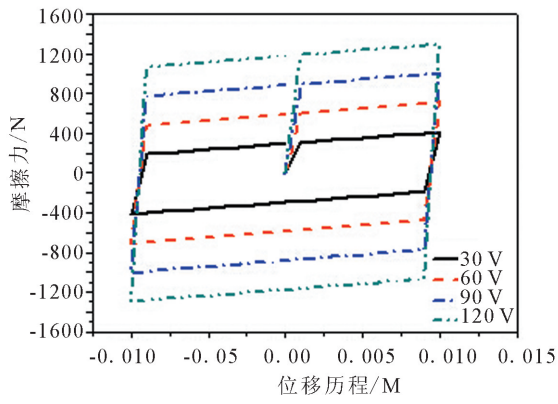


图 9 安装二个驱动器的阻尼器滞回曲线

Fig.9 Hysteresis curve of the damper with two actuators installed

分析图 9 可以得出,电压依次增加,阻尼器的输出力逐渐增大,滞回曲线包络面积更大,摩擦耗能性能更好。对比分析图 8 和图 9 可以得出,在加载电压相同的情况下,安装两个驱动器的阻尼器比安装一个驱动器的阻尼器的输出力大,因此可以证明,前者的摩擦耗能性能比后者更好。随着安装在阻尼器上的压电陶瓷驱动器数量的增加,阻尼器的摩擦力也随之增大,摩擦耗能性能随之改善。

4 新型压电摩擦阻尼器的滞回性能试验

新型压电摩擦阻尼器的滞回性能试验是在西安建筑科技大学工程力学实验室的电子万能试验机上进行的,试验装置如图 10 所示,试验机的性能指标

如表 2 所示。

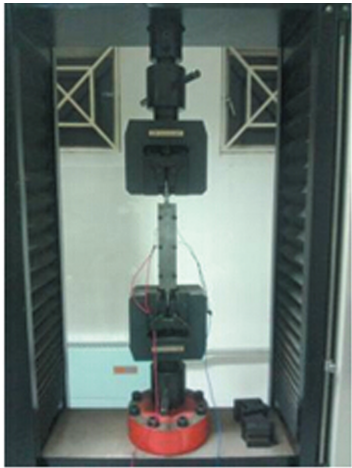


图 10 电子万能试验机

Fig.10 The electronic universal testing machine

表 2 电子万能试验机的性能指标

Table 2 Performance indexes of the electronic universal testing machine

型号 规格	外形尺寸 长×宽× 高/mm	最大试验 力/N	有效试验 行程/mm	位移等速率 调节范围/ (mm·min ⁻¹)
DL-8250	645×360×1 500	2 500	950	0~500

试验开始前,用电子万能试验机上的钢夹将阻尼器两端夹紧,把阻尼器固定在试验机上,然后调整阻尼器的位置,确保试验开始时阻尼器处于平衡位置。试验时采用位移进行控制,位移幅值设为 3 mm,初始预压力为 500 N。试验中的阻尼器安装二个压电陶瓷驱动器,驱动器加载电压分别设为 0 V、30 V、60 V、90 V 和 120 V。在不同的电压下对阻尼器进行加载,每次加载均从阻尼器平衡位置开始,再回到平衡位置,最终得到阻尼器在不同电压下的滞回曲线。利用试验机上的传感器采集新型压电摩擦阻尼器的位移和摩擦力大小,得到安装二个压电陶瓷驱动器的阻尼器滞回曲线(图 11)。

从图 11 可以看出,随着施加电压的增加,滞回曲线的面积变大且曲线也越饱满,新型压电摩擦阻尼器的摩擦力随着电压的增加而增大,证明该阻尼器的摩擦耗能性能良好。对比分析图 9 与图 11 可知,新型压电摩擦阻尼器的试验得到的摩擦力值比软件分析得到的值小,其原因是压电陶瓷驱动器位移变化值影响了阻尼器出力大小,而实际中压电陶瓷驱动器的驱动位移很小,仅有微米级别,且受到阻尼器自身制作和安装影响的因素较多,所以导致阻尼器出力减小。实验中位移还出现了 0.3 mm 左右

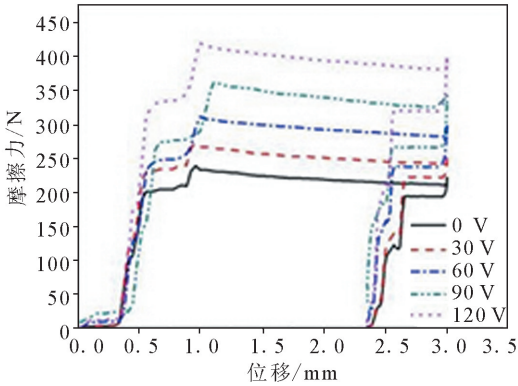


图 11 试验所得安装两个驱动器的阻尼器滞回曲线
Fig.11 Hysteresis curve of the damper installing two actuators through the experiment

的捏拢现象,这是加载接触时机械咬合误差所致,其位移量比较小,可通过增加阻尼器预压力减小这种现象。另外在工程应用中,可通过增加安装在结构上的阻尼器的数量提高阻尼器的摩擦耗能性能。

5 安装有阻尼器的输变电塔模型有限元分析

为验证新型压电摩擦阻尼器在实际结构中的摩擦耗能性能,对安装有本阻尼器的输变电塔模型进行有限元分析。

建立输变电塔模型时采用 ANSYS 软件^[8]。图 12 为输变电塔模型尺寸。选用 Beam188 梁单元,截面尺寸均为 30 mm×30 mm×3 mm×3 mm;材料弹性模量为 2.06×10^{11} MPa,泊松比为 0.3,密度为 7 850 kg/m³。模型共六层,在三、四层安装有带阻尼器的斜杆。在 ANSYS 有限元计算中,阻尼器模型按照图 9 所得二驱动器模式建立,并转化为出力模式。通过 ANSYS 有限元计算,提取 MATLAB 计算中所需结构的质量矩阵、刚度矩阵、阻尼矩阵。输变电塔的 ANSYS 有限元模型见图 13。利用 MATLAB 实现过程半主动控制,在模型的 X 方向上输入 0.2 g 和 0.4 g 的 El-Centro 波,最后得出模型在无控、半主动状态下的加速度反应^[9]。

输变电塔模型结构第二、三、四层的加速度数值结果见表 3。限于篇幅,本文只给出在 0.2 g 地震作用下结构模型第二、三、四层无控和有控时加速度的时程曲线(图 14)。结合表 3 和图 14 可以得出,当 0.2 g、0.4 g 的 El-Centro 波作用在模型结构上时,阻尼器对输变电塔模型的减震控制效果良好,其中结构第三层的减震率最高,效果最明显。由新型压电摩擦阻尼器在输变电塔模型结构上起到的减震效果可以验证,本阻尼器有着良好的摩擦耗能性能,并

且在结构上有良好的有效性。

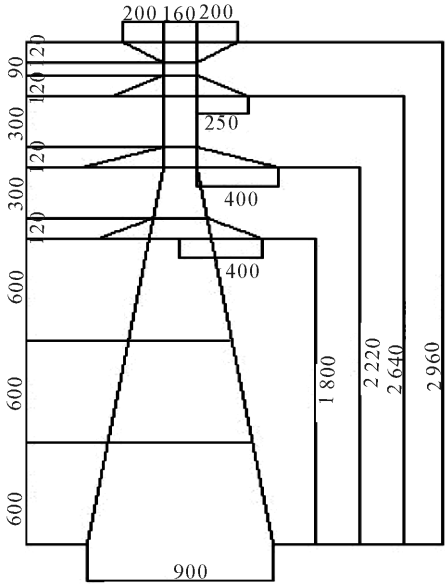


图 12 输变电塔模型尺寸图(单位:mm)
Fig.12 The model size of the power transmission tower (unit:mm)

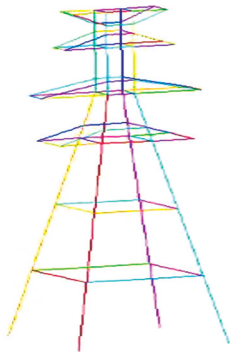


图 13 输变电塔的 ANSYS 有限元模型
Fig.13 ANSYS finite element model of the power transmission tower

表 3 输变电塔模型各层加速度峰值反应和减震率(%)
Table 3 The peak acceleration responses and decreasing amplitude ratios (%) of each layer of the power transmission tower model

地震波	0.2 g			0.4 g		
	无控/g	半主动/g	减震率/%	无控/g	半主动/g	减震率/%
一	0.150 1	0.124 1	17.3	0.286 2	0.259 6	9.3
二	0.231 2	0.184 2	20.3	0.385 1	0.327 3	15.0
三	0.404 0	0.260 2	35.6	0.535 5	0.416 0	22.3
四	0.565 8	0.481 2	15.0	0.596 0	0.546 0	8.4
五	0.593 1	0.519 1	12.5	0.727 3	0.624 7	14.1
六	0.836 0	0.730 1	11.8	1.069 0	1.001 3	6.4

6 结语

本文研制一种新型压电摩擦阻尼器,并且对其

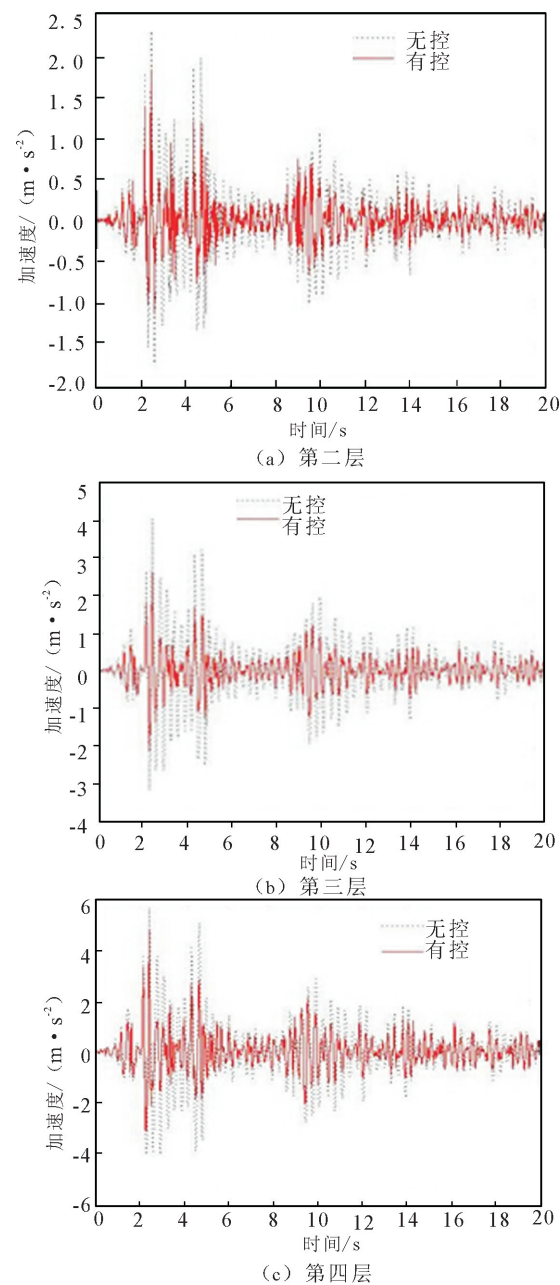


图 14 0.2 g 地震波作用下各层的加速度时程曲线
Fig.14 Acceleration time-history curve of each layer under a seismic wave of 0.2 g

进行有限元分析和试验研究。结果表明,该新型压电摩擦阻尼器拥有良好的摩擦耗能性能,并且可以根据实际情况选择在阻尼器中设置不同数量的压电陶瓷驱动器,以获得不同的摩擦耗能性能。将阻尼器应用于实际结构中,可以对结构产生明显的减震控制效果,具有良好的实用性。

参考文献(References)

[1] 王社良.抗震结构设计[M].武汉:武汉理工大学出版社,2007.
WANG She-liang, Seismic Structural Design[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2007. (in Chinese)

[2] 欧进萍,杨飏.压电-T 型摩擦阻尼器及其性能试验与分析[J].地震工程与工程振动,2003,23(4):172-173.
OU Jin-ping, YANG Yang. Piezo-T Type Friction Damper and Its Performance Tests and Analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(4): 172-173. (in Chinese)

[3] Unsal M, Niegreeki. A New Semi-active Piezoelectric-based Friction Damper[C]//Proceedings of the SPIE. 2003:413-420.

[4] 吕晖.带调谐液体阻尼器结构的有限元模拟分析[J].地震工程学报,2013,35(1):98-99.
LV Hui. Finite Element Simulation of The Structure with Tuned Liquid Damper[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 98-99. (in Chinese)

[5] 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 Jin-ping. Structural Vibration Control——Initiative, Semi-active and Intelligent Control[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)

[6] 戴纳新.基于压电-SMA 变摩擦阻尼器的智能隔震系统试验与理论研究[D].长沙:湖南大学,2012:66.
DAI Na-xin. Experimental and Theoretical Study of Intelligent Isolation System Based on Piezo-SMA Friction Damper[D]. Changsha: Hunan University, 2012:66. (in Chinese)

[7] 赵大海.基于压电摩擦阻尼器的结构振动控制理论与试验研究[D].大连:大连理工大学,2008:34-35.
ZHAO Da-hai. Theoretical and Experimental Investigations of Structure Control Based on Piezoelectric Friction Damper[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008:34-35. (in Chinese)

[8] 王新敏.ANSYS 工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.
WANG Xin-min. ANSYS Numerical Analysis of Engineering Structures[M]. Beijing: People's Communications Press, 2007. (in Chinese)

[9] 唐培培.MATLAB 科学计算与分析[M].北京:电子工业出版社,2012.
TANG Pei-pei. MATLAB Scientific Calculation and Analysis [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012. (in Chinese)