

文章编号: 0258-2724(2020)02-0317-06 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20170802

拉索式电涡流阻尼器力学模型及性能试验研究

薛松涛^{1,2}, 班鑫磊¹, 谢丽宇¹, 余必龙³

(1. 同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 日本东北工业大学建筑系, 日本 仙台 982-8577; 3. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 提出一种新型的拉索式旋转电涡流减震系统, 该系统由惯容器、弹簧和阻尼单元组成. 为验证该减震系统的减震机理, 建立了装配阻尼器的单层框架力学模型, 分别进行了单层框架、导体盘为 5 mm 铜板、10 mm 铜板、5 mm 铁板、5 mm 铜板与 5 mm 铁板复合时的惯容器和不同材质的导体盘在 10、20、30、40 mm 气隙下带电涡流阻尼器的振动测试, 以分析导体盘与永磁体间的气隙大小、导体盘材质和导体盘厚度对阻尼器附加阻尼比的影响. 试验结果表明: 在铜板后附加铁板, 阻尼增加至铜板的 1.9 倍、铁板的 1.4 倍, 可最大化增加阻尼; 气隙是影响电涡流阻尼的关键因素, 当气隙增大时, 阻尼比会迅速减小, 调节气隙大小是改变结构附加阻尼比最有效和最容易的方法; 阻尼器提供的阻尼比最大可达 15.40%, 证实了该阻尼器具有较强的耗能能力.

关键词: 惯容器; 电涡流阻尼器; 阻尼比; 自由振动试验

中图分类号: TU352.1 文献标志码: A

Theoretical Model and Performance Tests of Rotational Eddy Current Dampers with Cable

XUE Songtao^{1,2}, BAN Xinlei¹, XIE Liyu¹, YU Bilong³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai 982-8577, Japan; 3. CCCF-FHDI Engineering Co. Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: A novel rotational eddy current damper with cable is proposed, which is composed of inerter, spring and damping elements. In order to validate the mechanism for vibration mitigation, a mechanical model of a single-layer frame equipped with the damper is built. A series of vibration tests are carried out in terms of the frame, inerter and eddy current damper to analyze the impacts of air gap dimension between the conductor plate and permanent magnet, the material and thickness of the conductor plate on additional damping ratio. The conductor plates used in the tests include copper plates with the thickness of 5 mm or 10 mm, iron plate with the thickness of 5 mm, and a composite plate made up of a 5 mm thick copper plate and a 5 mm thick iron plate. In the vibration test, the conductor plates of different materials work in the air gaps of 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm. The test results show that the iron plate is added after the copper plate, and the damping is increased to 1.9 times and 1.4 times when the copper plate and iron plate are used alone. The air gap is a critical factor affecting the eddy current damping. When the air gap increases, the damping ratio will decrease rapidly. Adjusting the air gap dimension is the most effective and easiest method to change the damping ratio. The maximum damping ratio provided by the damper is 15.40%, which proves that it has a strong energy dissipation ability.

Key words: inerter; eddy current damper; damping ratio; free vibration test

收稿日期: 2017-11-17 修回日期: 2018-09-20 网络首发日期: 2018-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(51478356, 51778490); 政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0127600)

第一作者: 薛松涛(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为结构抗震与振动控制, E-mail: xue@tongji.edu.cn

引文格式: 薛松涛, 班鑫磊, 谢丽宇, 等. 拉索式电涡流阻尼器力学模型及性能试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(2): 317-322.

(C)1994-XUE Songtao, BAN Xinlei, XIE Liyu, et al. Theoretical model and performance tests of rotational eddy current dampers with cable[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(2): 317-322.

消能减震和隔震装置通过耗散地震输入到结构的能量来减小结构的动力反应,已被广泛应用于新建建筑和抗震加固工程中^[1].

2011年3月11日发生东日本大地震后,日本隔震协会对阻尼器的调查中发现,速度型和非速度型阻尼器均有出现损伤现象的案例,一些隔震结构的隔振垫和消能减震结构的消能器发生了严重的损伤和破坏^[2],文献[3]首次报道了3·11地震中一栋8层钢结构安装在一层的8个油阻尼器油液发生泄漏,处于完全破坏的情况.这些案例表明在极端的情况下阻尼器是具有极限状态的.还有一些阻尼器(如金属阻尼器)进入材料的塑性阶段才能提供附加的耗能能力,而阻尼器的劣化和损坏会影响到整体结构的抗震性能.因此需要确保在每次地震后阻尼器还具有足够的抗震性能,以确保结构达到设计时的性能目标.而电涡流阻尼器不存在黏滞阻尼器易漏油和不易养护的问题,也不会牺牲自我来提供耗能能力,可以最大程度地避免阻尼器发生性能劣化和损坏的情况.

电涡流阻尼单元作为调谐质量减振器(tuned mass damper, TMD)的阻尼单元,很早就结构的振动控制中得到了应用^[4-6],但这些研究都利用外接电源产生磁场,并且阻尼单元出力很小,因而在土木工程领域中的应用受到了限制.陈政清等^[7]发明了板式电涡流阻尼器,由永磁体代替电磁铁,无需外接电源,实现了电涡流阻尼器在大型土木结构上的应用.祝长生^[8-9]将转子系统与电涡流结合在一起,发明了一种新型的转子系统径向电涡流阻尼器,并验证了电涡流效应可以明显地增大系统的阻尼.

本文结合转子系统和电涡流阻尼器的特点,利用带拉索支撑阻尼器易于安装的优点,提出了一种拉索式旋转电涡流阻尼器.它直接依靠结构的振动速度来产生电涡流阻尼力.本文通过振动试验来验证该装置的有效性,并探究阻尼器不同板材和间隙条件对附加阻尼比的影响^[10].

1 一种拉索式旋转电涡流阻尼器

1.1 基本构造

如图1所示,当一块导体板以相对速度 v 在静磁场中做切割磁感线运动时,磁极正下方投影处的导体板磁通量会发生变化,这就是电磁感应现象.感应电动势在导体板内激发感应电流,由楞次定律可知,感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量变化,即导体板始终受到一个抑制其运动的力,即

电涡流阻尼力.电涡流阻尼技术就是根据这种现象把物体运动的机械能转化为导体板中的电能,然后通过导体板的电阻效应耗散系统的振动能量.

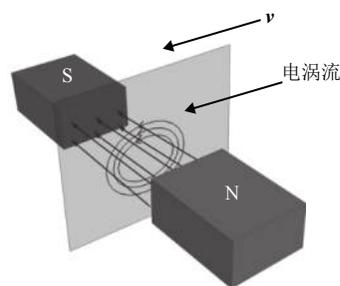
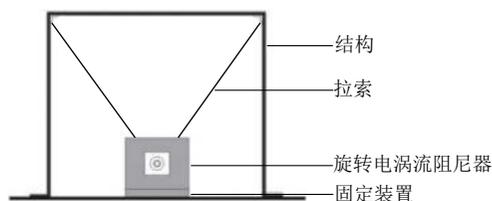


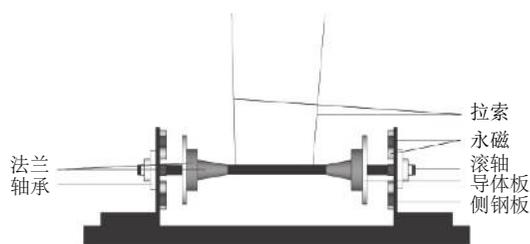
图1 电涡流阻尼原理

Fig. 1 Sketch of eddy current damping

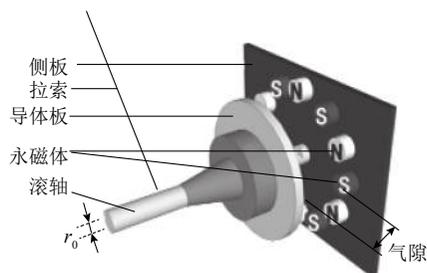
利用该阻尼机制,拉索式旋转电涡流阻尼器的基本构造如图2所示,由定子、转子以及连接装置组成,图中 r_0 为滚轴半径.



(a) 阻尼器概念设计图



(b) 电涡流阻尼器模型



(c) 永磁体布置图

图2 拉索式旋转电涡流阻尼器的基本构造

Fig. 2 Basic structure of rotational eddy current damper with cable bracing

其中定子包括固定在结构上的侧板、用于支撑滚轴旋转的轴承和吸附在侧板上的永磁体;转子包括支承于侧板上的滚轴,导体板以及用于连接导体板和滚轴的法兰,转子部分组成了惯容器,加上侧板

上的永磁体即形成了电涡流阻尼器. 阻尼器与结构之间用钢绞线拉索连接, 用于传递力和位移. 其中, 导体板通常选取导电率高的铜板, 磁场源选取钕铁硼(NdFeB)圆柱形永磁体, 磁极按照相邻磁体磁极相反的原则交错分布, 每侧 12 个.

1.2 带电涡流阻尼器的单层框架动力学模型

在自由振动下, 假设系统离开平衡位置向右运动时, 拉索带动转子顺时针旋转, 右侧的拉索处于伸长状态, 左侧的处于收紧状态, 设: T 为拉索中的拉力; c_0 和 c_g 分别为框架和转子上都是线性黏滞阻尼的阻尼系数; u 、 \dot{u} 、 \ddot{u} 分别为框架层间相对于底板的位移、速度和加速度; φ 、 $\dot{\varphi}$ 、 $\ddot{\varphi}$ 分别为转子转动的角度、角速度和角加速度; θ 为拉索与水平面的夹角, 并忽略其变化, 规定框架水平向右的运动为正, 转子顺时针转动为正. 带电涡流阻尼器单层框架在水平方向上可看作是一个广义单自由度体系. 其框架的运动平衡方程为

$$-m\ddot{u}(t) = c_0\dot{u}(t) + ku(t) + T(t)\cos\theta, \quad (1)$$

对于转子采用刚体转动定律:

$$J\ddot{\varphi}(t) = -c_g\dot{\varphi}(t)R^2 - nc_d\varphi(t)R^2 + T(t)r_0, \quad (2)$$

式中: m 为框架结构的质量; k 为框架抗侧刚度; t 为时间; J 为转子的转动惯量; n 为定子上永磁的个数; R 为导体盘的半径; $c_d\varphi(t)R^2$ 为单个永磁体提供的阻尼力矩; $c_g\dot{\varphi}(t)R^2$ 为惯容器滚轴处的摩擦以及拉索与滚轴连接处的摩擦所带来的阻尼力矩.

框架与转子间的变形协调关系如图 3 所示.

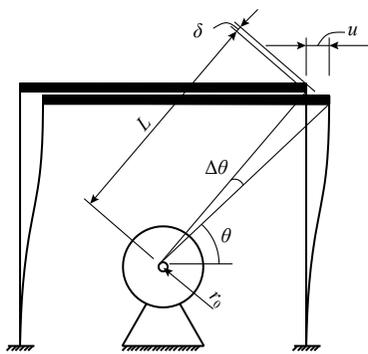


图 3 拉索变形与层间位移关系

Fig. 3 Relation between cable deformation and story drift

拉索位移与框架层间相对位移间的关系为

$$\delta(t) = u(t)\cos\theta, \quad (3)$$

式中: δ 为拉索轴向变形; L 为拉索的长度.

拉索轴向变形与滚轴转角之间的关系为

$$\delta(t) = \varphi(t)r_0, \quad (4)$$

$$r_0\varphi(t) = u(t)\cos\theta. \quad (5)$$

对式(5)分别求一阶导数和二阶导数并联立式(1)~(5)消去未知的拉索拉力 T , 得

$$a_1\ddot{u}(t) + a_2\dot{u}(t) + a_3u(t) = 0, \quad (6)$$

其中 3 个常数分别为

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= m + \frac{J\cos^2\theta}{r_0^2}, \\ a_2 &= \frac{nc_d\cos^2\theta}{r_0^2} + c_0 + \frac{c_g\cos^2\theta}{r_0^2}, \\ a_3 &= k. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(6)为二阶齐次线性微分方程, 在初始条件已知的情况下, 其解唯一. 其中 a_1 包括了框架结构的质量和惯容器的表观质量; a_2 包括了振动系统的固有阻尼系数 c_0 、惯容器提供的阻尼系数 c_g 和电涡流阻尼系数 c_d . $J\cos^2\theta/r_0^2$ 为惯容器的表观质量, 从式(7)可以看出, 惯容器的存在增大了阻尼器的表观质量, 起到了调谐的作用, 同时滚轴及拉索连接处的摩擦增加了阻尼单元的耗能.

2 试验研究

2.1 试验装置

为测试拉索式旋转电涡流阻尼器的阻尼性能, 将其安装在一个单层门式框架中, 楼板采用 10 mm 厚的钢板, 柱子截面选用一字型截面. 柱脚及框架节点均采用角钢连接, 底部通过角钢栓接在大刚度的底板上, 上端由一块大刚度的楼板将门式框架的四臂连接起来. 试验框架的尺寸及材料的基本力学性能见表 1. 导体盘通过法兰固定在转动轴上, 法兰通过螺栓固定在滚轴的不同限位孔上, 可实现不同气隙大小的调节, 方便调节阻尼器的阻尼系数. 试验装置如图 4, 装置各组成部分的材料参数和尺寸见表 1, 其中气隙表示永磁体与导体板的垂直距离.

表 1 框架及拉索式旋转电涡流阻尼器的结构参数

Tab. 1 Parameters of test frame and rotational eddy current dampers

部件	参数说明
框架楼板	长 834 mm, 宽 390 mm, 厚 10 mm, Q235
框架柱	截面 5 mm × 60 mm, 高 1 000 mm, Q235
永磁体	厚度 20 mm, 直径 25 mm, 剩磁 $B_r = 1.2$ T
磁极数	单侧 12 个
导体板	厚度 5、10 mm, 直径 190 mm
固定侧板	240 mm × 200 mm × 12 mm
气隙	10、20、30、40 mm
钢绞线	直径 2 mm, 最大承重 294 kg



图 4 电涡流阻尼器装置

Fig. 4 Photo of eddy current damper

2.2 试验方案

为验证气隙大小、导体板材料和尺寸对阻尼比的影响,分别进行了纯框架系统、惯容器和带电涡流阻尼器的振动测试.由于惯容器提供的惯性力取决于惯容器的转动惯量,即由导体板材质和厚度决定,而与气隙大小无关,故对于某种材质下的惯容器工况试验只需测试一组气隙下的阻尼即可.表 2 为工况参数表,为方便试验记录及处理,工况命名原则为:导体板材质及厚度-阻尼特性-气隙大小.

表 2 工况参数表

Tab. 2 Condition parameters

编号	工况名	编号	工况名
1	Cu5-g-20	12	Fe5-d-10
2	Fe5-g-20	13	Cu10-d-40
3	Cu10-g-20	14	Cu10-d-30
4	Cu5Fe5-g-20	15	Cu10-d-20
5	Cu5-d-40	16	Cu10-d-10
6	Cu5-d-30	17	Cu5Fe5-d-40
7	Cu5-d-20	18	Cu5Fe5-d-30
8	Cu5-d-10	19	Cu5Fe5-d-20
9	Fe5-d-40	20	Cu5Fe5-d-10
10	Fe5-d-30	21	单层框架
11	Fe5-d-20		

为保证框架结构的变形处于弹性范围内,该自由振动试验控制的初始位移选为 8 cm,由于框架柱很柔,人为通过限位器即可控制初始位移.试验过程中框架楼板可认为是刚性楼板,即框架可认为只有一个运动自由度,故在楼板上只需布置沿运动方向的加速度传感器即可.在楼板上沿弱轴方向等间距放置 3 个 PCB333B32 型加速度传感器,灵敏度 100 mV/g,量程 50g,频率范围 0.5 Hz~3 kHz,采样频率取 1 kHz.3 个加速度传感器可以分别采集数据后求平均值,用以减少试验误差.在运动方向上布

置 IL300 激光位移传感器,量程 300 ± 140 mm,如图 5 所示.根据位移衰减曲线(图 6,图中 u_P 和 u_Q 分别为点 P 和点 Q 的位移幅值)可得到振动系统的固有圆频率 ω_0 :选择位移衰减曲线上相隔 n_i 个周期的点 P 和点 Q,其对应的时间点分别为 t_P 和 t_Q ,则

$$\omega_0 = \frac{2n_i\pi}{t_P - t_Q} \tag{8}$$

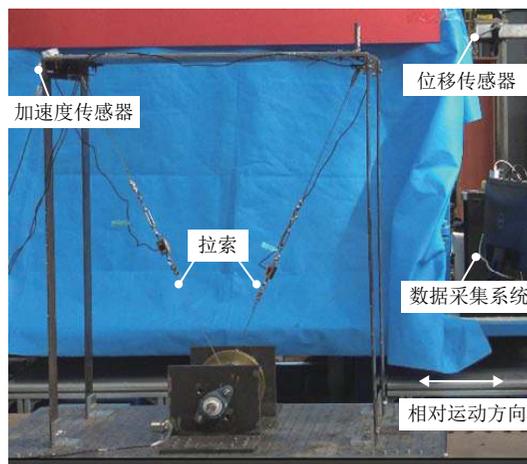


图 5 试验装置

Fig. 5 Schematic diagram of experimental devices

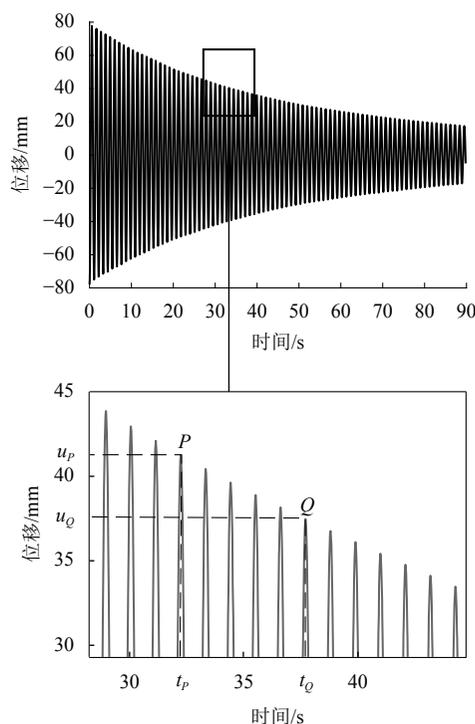


图 6 框架自由振动位移响应曲线

Fig. 6 Displacement response curve of frame in free vibration

由单自由度系统自由振动的衰减曲线和未简化的对数衰减法可得到结构的阻尼比为

$$\zeta_0 = \sqrt{\frac{\delta^2}{\delta^2 + 4\pi^2 n_1^2}}, \quad (9)$$

式中: $\delta = \ln \frac{u_p}{u_Q}$ 为振动的对数衰减率.

选取曲线中几处振幅不同的点 P 、 Q 值,由式(8)和式(9)计算单自由度系统阻尼比 ζ_0 .同理可得惯容器和带电涡流效应下的阻尼比 ζ_g 和 ζ_d .

2.3 试验结果与分析

利用系统的自由衰减曲线可以得到结构在安装惯容器以及电涡流后的阻尼比,见表 3.可以看出:在仅安装惯容器时,相同气隙条件下,导体板材质不同轴承处压力不同,故阻尼比不同,铁板比铜板的阻尼比大;铁板与铜板复合时阻尼比大于铁板和铜板单独使用时的阻尼比;改变导体盘的厚度,可以改变结构的频率,惯容器起到了调谐的作用;气隙为 20 mm 时,由电涡流效应提供的阻尼平均是惯容器提供的阻尼的 1.7 倍;当气隙缩小时,电涡流阻尼系数会大幅增加,而惯容器却不再改变,故适当调节气隙的大小,可以使得电涡流阻尼耗能的效果远高于惯容器所带来的能量消耗.

表 3 自由振动测试结果
Tab. 3 Test results in free vibration

工况	固有圆频率 (rad · s ⁻¹)	阻尼比 /%	电涡流效应 提供的阻尼比/%
纯框架	5.882	0.509	—
Cu5-g-20	4.720	4.950	—
Cu5-d-20	4.900	10.400	5.450
Fe5-g-20	4.640	4.630	—
Fe5-d-20	4.910	12.300	7.670
Cu10-g-20	3.900	4.790	—
Cu10-d-20	4.510	13.400	8.610
Cu5Fe5-g-20	4.150	4.860	—
Cu5Fe5-d-20	4.240	15.400	10.540

注:—表示无电涡流阻尼效应.

电涡流效应增加前后,对比 5 mm 铜作为导体板时的结构位移时程曲线(图 7)可以看出,安装惯容器后,框架的位移衰减得到增快,增加电涡流效应后,这种衰减更加明显,证实了这种拉索式电涡流阻尼器具有非常好的消能减震效果.

永磁体与导体板之间的气隙是影响电涡流阻尼的关键因素,随着气隙的增大,主磁感应强度和

电涡流阻尼系数都迅速降低.对 5 mm 铜、5 mm 铁、10 mm 铜、5 mm 铜 + 5 mm 铁分别在 4 组不同气隙条件下进行试验,结果见图 8.

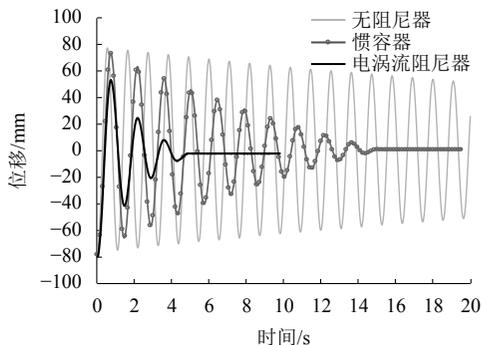


图 7 体系的位移响应

Fig. 7 Displacement response of single degree-of-freedom system

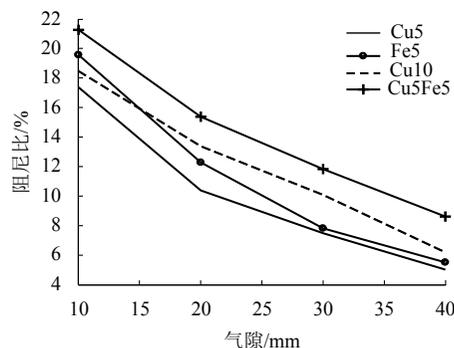


图 8 阻尼比测试值

Fig. 8 Test values of damping ratio

电涡流阻尼比随气隙的增加迅速减小.当气隙较小时,最大的阻尼系数发生在工况 Cu5Fe5 中,故在导体板后附加钢板是电涡流阻尼耗能的最优方案.5 mm 铜作为导体板时,结构在不同气隙条件下的位移响应结果见图 9.可以看出,气隙越小框架的位移响应衰减越快.

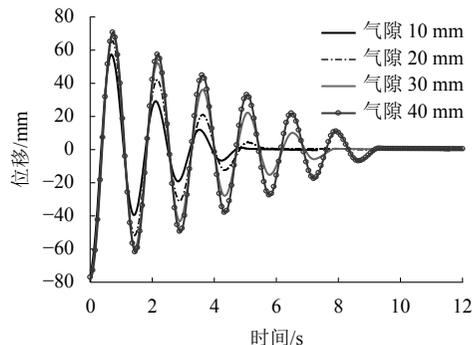


图 9 不同气隙下框架自由振动的时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of

eddy current dampers in free vibration

3 结论

(1) 本文提出了一种拉索式旋转电涡流阻尼器,这种阻尼器具有非接触、无机械性摩擦和损耗、使用寿命长等特点,通过试验证实了该种阻尼器具有较强的耗能能力。

(2) 阻尼器的附加阻尼比随着气隙的增大而不断减小,气隙较小时,在铜板后面放置附加钢板可最大化增加阻尼。

(3) 永磁体与导体板之间的气隙是影响电涡流阻尼的关键因素,在实际工程中,通过调节气隙大小改变附加阻尼比是最有效和最容易的方法。

(4) 电涡流阻尼比与导体板厚度并不严格遵守正比例规律,随着导体板厚度的增大,电涡流阻尼增大的程度略微降低。

参考文献:

- [1] 梅真,郭子雄,侯炜,等. 随机地震动下粘滞阻尼减震结构振动台试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(5): 989-999.
MEI Zhen, GUO Zixiong, HOU Wei, et al. Shaking table test of model structure with viscous dampers subjected to random earthquake ground motions[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(5): 989-999.
- [2] JSSI. Report of response-controlled buildings[R]. Tokyo: Japan Society of Seismic Isolation (JSSI) Investigation Committee, 2012.
- [3] CAO M, TANG H, FUNAKI N, et al. Study on a real 8F steel building with oil damper damaged during the 2011 Great East Japan Earthquake[C]//15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon: [s.n.], 2012: 1-10.
- [4] KIENHOLZ D A, PENDLETON S C, RICHARDS K E, et al. Demonstration of solar array vibration suppression[C]//Proceedings of SPIE Conference on Smart Structures and Materials. Orlando: [s.n.], 1994, 2193: 59-73.
- [5] LAROSE G L, LARSEN A, SVENSSON E. Modelling of tuned mass dampers for wind-tunnel tests on a full-bridge aeroelastic model[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 54: 427-437.
- [6] 方重,吴和霖,楼梦麟. 电磁涡流耗能调谐质量阻尼器研制与性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(6): 752-756.
FANG Chong, WU Helin, LOU Menglin. Development of electromagnetism vortex flow energy dissipation TMD devices and test study on its property[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2001, 29(6): 752-756.
- [7] 陈政清,黄智文. 一种板式电涡流阻尼器的有限元模拟及试验分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(4): 499-502.
CHEN Zhengqing, HUANG Zhiwen. Finite element simulation and experimental test of a plane-type eddy current damper[J]. Journal of Hefei University of Technology (Science and Technology), 2016, 39(4): 499-502.
- [8] 祝长生. 转子系统径向电涡流阻尼器[J]. 中国机械工程, 2007, 18(19): 2269-2272.
ZHU Changsheng. A journal eddy current damper for rotor systems[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(19): 2269-2272.
- [9] 祝长生. 时变磁场下径向电涡流阻尼器的动力特性[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 31-36.
ZHU Changsheng. Dynamic performance of a radial eddy current damper under variable-time magnetic field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 31-36.
- [10] VAR BEEK T A, PLUK K J W, JANSEN J W, et al. Optimization and measurement of eddy current damping applied in a tuned mass damper[C]//2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM). [S.l.]: IEEE, 2014: 609-615.

(中文编辑:唐晴 英文编辑:周尧)