

班鑫磊, 谢丽宇, 薛松涛, 等. 拉索式旋转电涡流阻尼器的理论模型及频域响应分析[J]. 地震工程学报, 2018, 40(5): 941-945. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.941

BAN Xinlei, XIE Liyu, XUE Songtao, et al. Theoretical Model and Analysis of the Frequency Response of a Rotational Eddy Current Damper with Cable Bracing[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(5): 941-945. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.941

拉索式旋转电涡流阻尼器的理论模型 及频域响应分析

班鑫磊¹, 谢丽宇¹, 薛松涛^{1,2}, 张瑞甫¹

(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)

摘要: 惯容器是一种新型的振动控制装置, 该装置可以将螺杆的轴向运动转换为黏滞材料和旋转质量的高速旋转运动, 使阻尼器的阻尼效应和质量效应得到放大。基于惯容器原理以及电涡流原理, 提出一种新型的拉索式旋转电涡流阻尼器, 为结构被动控制提供了新的设计思路。为研究这种新型惯容系统的减振机理, 对安装拉索式旋转电涡流阻尼器单层框架的力学模型进行了探讨。推导出了配置惯容系统单质点体系的动力表达式, 并基于此表达式探讨在频域内该惯容系统关键参数对单质点体系位移、速度和加速度响应的影响。结果表明: 这种拉索式旋转电涡流阻尼器可以起到放大质量的效果, 惯容系统可以有效地减少单质点体系的位移、速度和加速度响应幅值。

关键词: 电涡流阻尼器; 惯容系统; 参数分析; 频响函数

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)05-0941-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.941

Theoretical Model and Analysis of the Frequency Response of a Rotational Eddy Current Damper with Cable Bracing

BAN Xinlei¹, XIE Liyu¹, XUE Songtao^{1,2}, ZHANG Ruifu¹

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai 982-8577, Japan)

Abstract: An inerter is a novel mechanical element that translates linear motion to high-speed rotational motion. In this work, we propose a novel passive vibration control system based on the inerter and eddy current principle. First, to study the damping mechanism of this new system, a mechanical model of a single-degree-of-freedom system with an inerter is derived. Next, the influences of key parameters of the inerter system on the structural response in the frequency domain are discussed. The results show that the eddy current damper can amplify the quality and that the inerter system can effectively reduce the displacement, velocity, and acceleration response of the

收稿日期: 2017-08-20

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)

第一作者简介: 班鑫磊(1992-), 女, 博士生。E-mail: 1610229@tongji.edu.cn。

通信作者: 谢丽宇(1978-), 男, 讲师, 硕士生导师。

structure.

Keywords: eddy current damper; inerter system; parameter analysis; frequency response function

0 引言

为减轻结构在地震等动力荷载下的响应,传统的被动耗能装置如粘滞阻尼器和粘弹性阻尼器已被广泛应用于建筑结构中。根据日本隔震协会(JS-SI) 2012年的统计^[1],超过950栋的建筑采用了消能减震控制技术。目前,国内的建筑因高强混凝土和高强钢筋的采用,结构向更高、更柔的方向发展,为控制地震或风振引起的结构振动,消能减震技术的应用日趋广泛,应用前景也十分广阔。传统的减震装置主要通过三种基本力学元件:质量块、弹簧和阻尼单元来控制结构的动力响应。TMD是广泛应用的控制装置,但受附加于主体结构中的质量块的质量限制,TMD的应用得到了约束。质量块是悬挂在结构上的单节点惯性单元,剑桥大学学者Smith^[2]首先提出惯容的概念,并给出了实现装置——齿轮齿条惯容器和滚珠丝杠惯容器,为结构控制提供了一种两节点的惯性单元。随后,日本学者^[3-4]对此进行了大量开创性的奠基工作,将惯容器应用到了土木工程的结构控制中。Saito等^[5]利用滚珠螺杆原理,提出了调谐粘滞质量阻尼器(TVMD)。Ikago等^[6-7]提出了配置TVMD的单层和多层结构体系的设计方法,表明这种TVMD的等效质量可达其实际质量的数千倍。因此,在设计时,其实际尺寸可以相对较小,有利于设备的安装与使用。

本文结合惯容器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,提出了一种新型的惯容系统——拉索式旋转电涡流阻尼器。该阻尼器由阻尼单元、惯容单元以及弹簧单元组成,其中阻尼单元为电涡流阻尼。近年来,利用电涡流阻尼效应制成的电涡流阻尼器开始应用于振动控制领域。这种阻尼器具有非接触、无机械性摩擦和损耗少、使用寿命长等优点^[8]。本文对配置惯容系统的单质点体系在白噪声激励下的响应进行了深入研究。

1 配置惯容系统的单质点体系

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,处在外加磁场中的通电导线会受到安培力的作用,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。

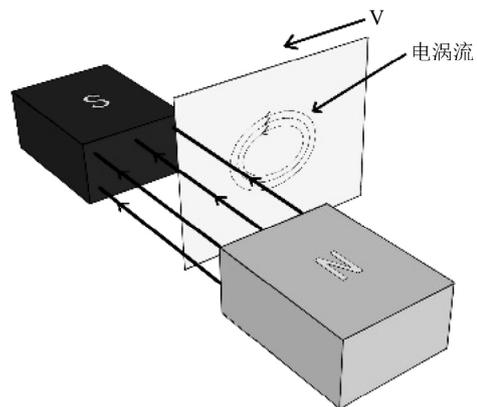


图1 电涡流阻尼原理示意图

Fig.1 Principle of the eddy current damper

由于图示的磁铁分别位于导体板的两侧,其工作模式受到很大程度地限制,本文提出的拉索式旋转电涡流阻尼器的工作模式如图2所示。在旋转电涡流阻尼单元中,永磁体提供工作磁场,铜板作为

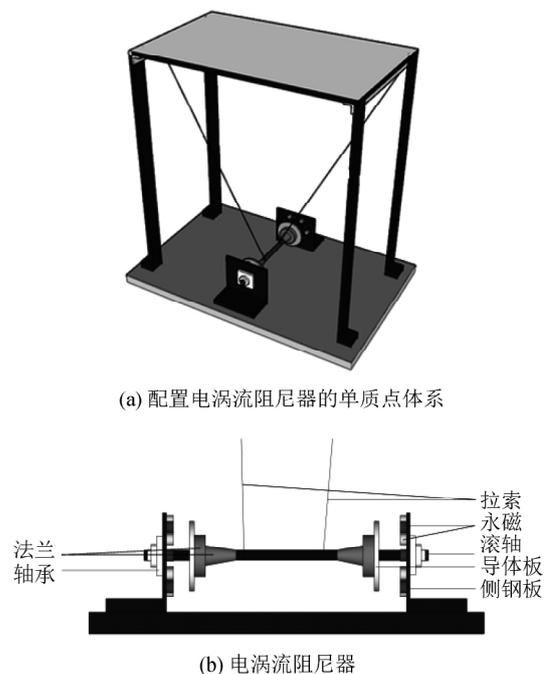


图2 配置惯容系统的单质点体系

Fig.2 The SDOF system configured with inerter system

导体板形成电涡流,电涡流阻尼器的永磁体在侧板上的布置如图 3 所示。

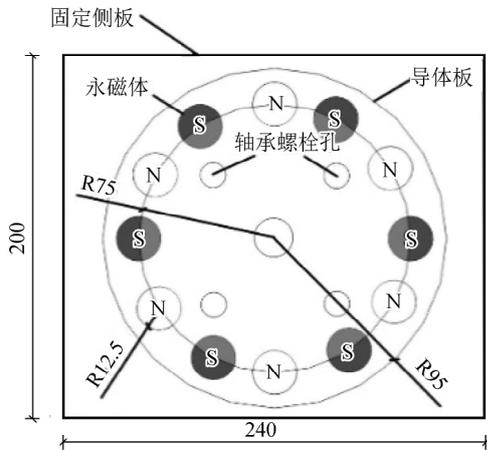


图 3 永磁体布置图

Fig.3 Layout of permanent magnet

2 拉索式旋转电涡流阻尼器的力学模型

拉索的轴向变形与框架层间相对位移间的关系如图 4 所示。图中 δ 为拉索轴向变形, φ 为惯容系统转动的角度, L 为拉索长度, 拉索与水平面的夹角为 θ , r_0 为滚轴半径, u 为框架层间相对位移。框架与转子间的变形协调关系如图 4 所示。拉索的轴向变形与框架层间相对位移间的关系为:

$$\delta = u \cos \theta - \varphi r_0 \quad (1)$$

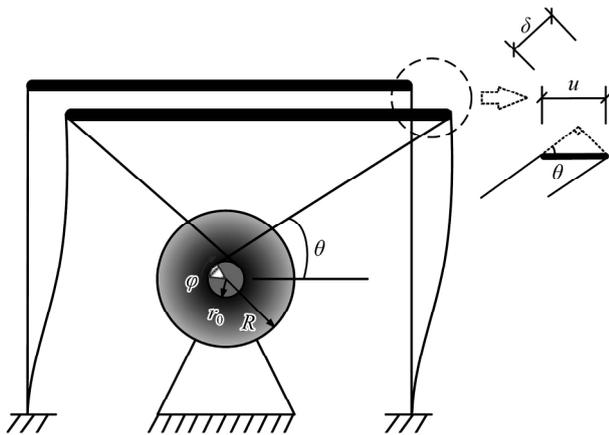


图 4 拉索变形与层间位移关系图

Fig.4 Relation between cable deformation and story drift

由于惯容系统中质量、阻尼和摩擦 3 部分的位移相同, 作用力相互独立, 故可将惯容系统的力学模型简化为并联连接的质量、阻尼单元和摩擦单元。将惯容系统与拉索串联, 可使其对主体结构起到调谐作用。图 5 为配置惯容系统的单质点体系的理想

力学模型。在该惯容系统中, 阻尼主要来源于以下 3 部分: 初始结构、电涡流阻尼效应以及摩擦。为简化力学模型, 在之后的理论分析中我们忽略摩擦的影响。由图 5 可知, 配置惯容系统的单质点体系在随机地震激励下的运动方程如下:

$$\begin{cases} m\ddot{u}(t) + c_0\dot{u}(t) + ku(t) + k_b(u(t)\cos\theta - \varphi(t)r_0)\cos\theta = -ma_g(t) \\ m_d\ddot{\varphi}(t)r_0^2 + c_d\dot{\varphi}(t)r_0^2 = k_b(u(t)\cos\theta - \varphi(t)r_0)r_0 \end{cases} \quad (2)$$

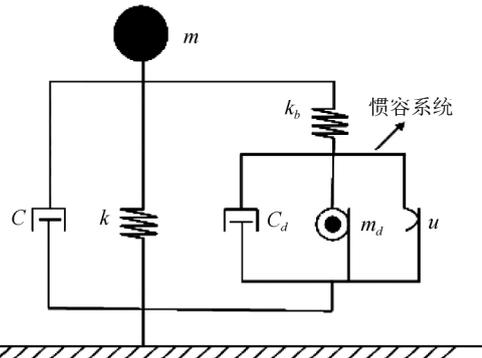


图 5 配置惯容系统的单质点体系的分析模型

Fig.5 Analysis model of the SDOF system configured with inerter system

3 拉索式旋转电涡流阻尼器的参数分析

该电涡流阻尼器的等效惯性质量 m_d 为:

$$m_d = \frac{J \cos^2 \theta}{r_0^2} \quad (3)$$

为研究惯容系统对结构动力响应的减小程度, 进行了电涡流阻尼器的参数 (μ, ξ, κ) 分析。将式 (2) 转化为无量纲的形式:

$$\begin{cases} \ddot{u}(t) + 2\zeta\omega\dot{u}(t) + \omega^2 u(t) + \kappa\omega^2(u(t)\cos\theta - \varphi(t)r_0)\cos\theta = -a_g(t) \\ \mu r_0^2 \ddot{\varphi}(t) / \cos^2 \theta + 2\xi\omega\dot{\varphi}(t)r_0 = \kappa\omega^2(u(t)\cos\theta - \varphi(t)r_0)r_0 \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) 的拉普拉斯变换形式为:

$$\begin{cases} s^2 U(s) + 2\zeta\omega s U(s) + \omega^2 U(s) + \kappa\omega^2(U(s)\cos\theta - \psi(s)r_0)\cos\theta = -A_g(s) \\ \mu s^2 r_0 \psi(s) / \cos^2 \theta + 2\xi\omega s \psi(s) r_0 = \kappa\omega^2(U(s)\cos\theta - \psi(s)r_0) \end{cases} \quad (5)$$

公式中各符号的含义详见下表 1。解式 (5) 得 $U(s), \psi(s)$:

表 1 符号说明

Table 1 Explanation of symbols

符号	定义	符号	定义
t	时间	$\mu = m_d/m$	单质点体系的等效附加质量比
m	单质点体系的质量	$\xi = c_d/(2m\omega)$	惯容系统的附加阻尼比
c_0	单质点体系的阻尼系数	$\kappa = k_b/k$	惯容系统的相对刚度
k	单质点体系的刚度	a_g	地震动加速度
$\omega = \sqrt{k/m}$	单质点体系的圆频率	u	单质点体系的相对位移
$\zeta = c_0/(2m\omega)$	单质点体系的固有阻尼比	φ	惯容系统的转动位移
m_d	惯容系统的等效惯性质量	J	惯容器的转动惯量
c_d	惯容系统的阻尼系数	$U(s), \psi(s), A_g(s)$ 分别为 $u(t), \varphi(t), a_g(t)$ 的拉普拉斯变换	
k_b	惯容系统的串联弹簧刚度		

$$U(s) =$$

$$\frac{-(s^2\mu + 2\xi\omega s \cos^2\theta + \kappa\omega^2 \cos^2\theta)A_g(s)}{[s^4\mu + 2s^3(\xi\omega \cos^2\theta + \zeta\omega\mu) + s^2(\kappa\omega^2 \cos^2\theta + 4\xi\zeta\omega^2 \cos^2\theta + \omega^2\mu + \kappa\mu\omega^2 \cos^2\theta) + 2s(\zeta\omega^3 \kappa \cos^2\theta + \omega^3 \xi \kappa \cos^4\theta + \xi\omega^3 \cos^2\theta) + \kappa\omega^4 \cos^2\theta]}$$

(6)

$$\psi(s) = \frac{\kappa\omega^2 \cos^3\theta}{[\mu s^2 r_0 + 2\xi\omega s r_0 \cos^2\theta + \kappa\omega^2 r_0 \cos^2\theta]} U(s)$$

(7)

则位移响应的传递函数为:

$$H_U(i\Omega) = \frac{U(s)}{A_g(s)} \Big|_{s=i\Omega}$$

(8)

$$H_U(i\Omega) =$$

$$\frac{-(s^2\mu + 2\xi\omega s \cos^2\theta + \kappa\omega^2 \cos^2\theta)}{[s^4\mu + 2s^3(\xi\omega \cos^2\theta + \zeta\omega\mu) + s^2(\kappa\omega^2 \cos^2\theta + 4\xi\zeta\omega^2 \cos^2\theta + \omega^2\mu + \kappa\mu\omega^2 \cos^2\theta) + 2s(\zeta\omega^3 \kappa \cos^2\theta + \omega^3 \xi \kappa \cos^4\theta + \xi\omega^3 \cos^2\theta) + \kappa\omega^4 \cos^2\theta]}$$

(9)

分析模型为 $\zeta = 0.509\%$ 的有阻尼单质点体系,以惯容系统的名义将阻尼比 ξ 、刚度比 κ 以及附加惯容系统的等效质量比 μ 为变量进行参数研究。白噪声激励下单质点体系的传递函数见图 6。

$$H_\psi(i\Omega) = \frac{\psi(s)}{A_g(s)} \Big|_{s=i\Omega}$$

(10)

$$H_\psi(i\Omega) =$$

$$\frac{-\kappa\omega^2 \cos\theta}{[s^4\mu r_0 + 2s^3(\xi\omega r_0 + \zeta\omega\mu r_0) + s^2(\kappa\omega^2 r_0 + 4\xi\zeta\omega^2 r_0 + \omega^2\mu r_0 + \kappa\mu\omega^2 r_0 \cos^2\theta) + 2s(\kappa\zeta\omega^3 r_0 + \omega^3 \xi r_0 + \kappa\xi\omega^3 \cos^2\theta r_0) + \kappa\omega^4 r_0]}$$

(11)

由图 6(a)(b)(c)可知,在位移频响函数中,当质量比 μ 为定值 0.9,阻尼比 ξ 为 0.02,刚度比从 1 增长到无穷时, κ 为 100 时的位移放大倍数接近刚度比为无穷时的放大倍数。由此可知,刚度比为 100 时,惯容系统已经可以充分发挥作用。因此,接下来分析了刚度比为 100,阻尼比和质量比这两个参数对位移、速度和加速度的影响[见图 6(d)~(i)]。所以综合可知,质量比的变化引起的位移幅值减小最为显著;比起质量比和刚度比,附加阻尼比

的变化引起的速度幅值和加速度幅值的降低程度最显著。

4 结论

本文对配置惯容系统的单质点体系进行了频域内的参数研究。结果表明:这种拉索式旋转电涡流阻尼器可以起到放大质量的效果。附加阻尼比的变化对速度幅值和加速度幅值减少效果最为显著,质量比的变化对位移幅值减少效果最为明显。这种惯

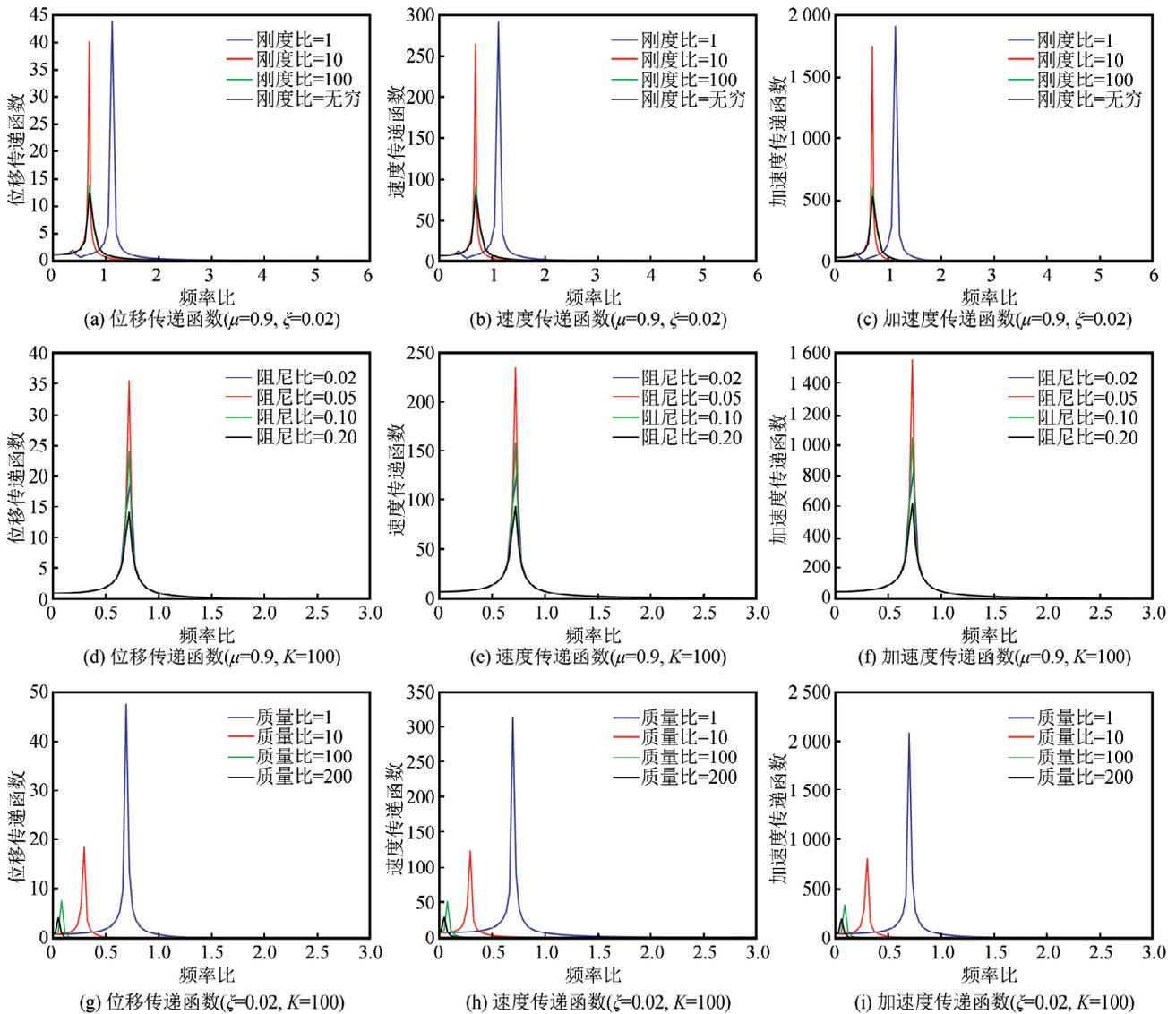


图 6 单质点体系的传递函数

Fig.6 Transfer function of the SDOF system

容阻尼器可以有效地减少单质点体系的位移、速度和加速度响应幅值。

参考文献 (References)

[1] JSSI.Report of Response-controlled Buildings [R].Japan Society of Seismic Isolation(JSSI) Investigation Committee, Tokyo.2012.
 [2] SMITH M C.Synthesis of Mechanical Networks: The Inerter [J].IEEE Transactions on Automatic Control,2002,47(10): 1648-1662.
 [3] SAITO K,KURITA S,INOUE N.Optimum Response Control of 1-DOF System Using Linear Viscous Damper with Inertial Mass and Its Kelvin-type Modeling[J].Journal of Structural Engineering,2007,53:53-66.
 [4] IKAGO K,SAITO K,INOUE N.Seismic Control of Single Degree-of-freedom Structure Using Tuned Viscous Mass Damper[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2012,41(3):453-474.
 [5] SAITO,KENJI.Vibration Tests of 1-Story Response Control

System Using Inertial Mass and Optimized Soft Spring and Viscous Element[C]//Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering.2008.

[6] IKAGO K, SAITO K, INOUE N. Seismic Control of Single-Degree-of-freedom Structure Using Tuned Viscous Mass Damper[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012,41(3):453-474.
 [7] IKAGO K, SUGIMURA Y, SAITO K, et al. Modal Response Characteristics of a Multiple-degree-of-freedom Structure Incorporated with Tuned Viscous Mass Dampers[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering,2012,11(2):375-382.
 [8] 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 (Natural Science),2016,39(4):499-502.