

彭金强, 刘彦辉, 陈克坚, 等. 新型电磁式涡流阻尼器力学性能研究[J]. 华南地震, 2024, 44(2): 144-152. [PENG Jinqiang, LIU Yanhui, CHEN Kejian, et al. Research on Mechanical Properties of a New Type of Electromagnetic Eddy Current Damper [J]. South China journal of seismology, 2024, 44(2): 144-152]

## 新型电磁式涡流阻尼器力学性能研究

彭金强<sup>1</sup>, 刘彦辉<sup>1,2</sup>, 陈克坚<sup>3</sup>, 戴胜勇<sup>3</sup>, 张志勇<sup>3</sup>, 张颖<sup>1,2</sup>

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510006; 2. 广州大学工程抗震减震与结构安全教育部重点实验室, 广州 510006;  
3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:** 为了改善涡流阻尼器在实际工程中的应用性, 利用了外部电源改变装置内部磁通量大小, 提出了一种新型主动控制式电磁涡流阻尼器(Electromagnetic Eddy Current Damper, 简称EECD)。首先考虑磁回路有效利用磁通量及转动装置放大导体板切割磁感应线的优点, 进行阻尼器的结构设计, 并对其工作原理进行详细地介绍。然后, 利用电磁仿真软件(COMSOL Multiphysics)分析其不同电流大小的情况下所产生的磁通量大小, 并推导出相应磁感应强度理论公式, 分析相同匝数, 不同电流下的工况, 结合实测数据, 对比仿真、理论与试验的磁感应强度, 验证理论的准确度。最后, 推导出该阻尼器在电流稳定时等效阻尼系数, 进而得出其电涡流阻尼力。研究结果表明: 在研究速度范围内, EECD能达到设计目的, 等效阻尼系数、惯质及电涡流阻尼力理论结果与试验结果基本吻合, 且EECD阻尼性能接近线性; 在研究速度范围内, 随着电流的变化, 电磁铁产生的磁通量大小及阻尼力也成正比变化; 该装置滞回性能相对光滑, 重复性较好, 说明新型电磁式阻尼器力学性能稳定, 具有可行性。

**关键词:** 主动控制; 电磁; 涡流阻尼器; 阻尼; 惯质

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)02-0144-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.02.17

## Research on Mechanical Properties of a New Type of Electromagnetic Eddy Current Damper

PENG Jinqiang<sup>1</sup>, LIU Yanhui<sup>1,2</sup>, CHEN Kejian<sup>3</sup>, DAI Shengyong<sup>3</sup>,  
ZHANG Zhiyong<sup>3</sup>, ZHANG Ying<sup>1,2</sup>

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center of Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Resistance and Absorption Engineering & Structure Safety of the Ministry of Education, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 3. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to improve the applicability of eddy current dampers in practical engineering, a new type of actively controlled electromagnetic eddy current damper (EECD) was proposed by using an external power supply to

收稿日期: 2023-12-15

基金项目: 政府间国际科技创新合作(2021YFE0112200); 中国中铁股份公司科技研究开发计划项目(2015-重点-07)联合资助。

作者简介: 彭金强(1997-), 男, 硕士, 主要从事隔震、减震研究方面的研究。

E-mail: PengJinqiang2023@163.com

通信作者: 刘彦辉(1980-), 男, 教授, 博士, 博导, 主要从事隔震、减震研究方面的研究。

E-mail: liuyanhu2012@163.com

change the magnetic flux inside the device. Firstly, considering the advantages of the magnetic circuit effectively using the magnetic flux and the rotation device to amplify the conductor plate to cut the magnetic induction line, the structural design of the damper is carried out, and its working principle is introduced in detail. Then, the electromagnetic simulation software (COMSOL Multiphysics) was used to analyze the magnitude of the magnetic flux generated by the magnetic induction under different currents, and the corresponding theoretical formula of magnetic induction intensity was deduced. The working conditions under different currents with the same number of turns were analyzed, and the magnetic induction intensities in the simulation, theory, and experiment were compared based on the measured data to verify the accuracy of the theory. Finally, the equivalent damping coefficient of the damper under a stable current was derived, and then the eddy current damping force was obtained. The results show that the EECD can achieve the design purpose within the research speed range, the theoretical results of the equivalent damping coefficient, inertial mass, and eddy current damping force are basically consistent with the experimental results, and the damping performance of EECD is nearly linear; within the research speed range, with the change of current, the magnetic flux and damping force generated by the electromagnet also change proportionally; the hysteresis performance of the device is relatively smooth, and the repeatability is good, which indicates that the mechanical properties of the new electromagnetic damper are stable and thus the device is feasible.

**Keywords:** Active control; Electromagnet; Eddy current damper; Damping; Inertial mass

## 0 引言

主动控制、半主动控制<sup>[1]</sup>与被动控制<sup>[2]</sup>,在土木工程领域得到了广泛的研究。目前土木工程结构的振动控制普遍采用设计简单且不依赖外部能源的被动控制技术,可被动控制控制情况相对单一,在一些环境中会达不到理想的控制效果。而主动控制却能很好的解决被动控制中存在的缺点,电磁涡流阻尼器是很好的主动控制装置,其具有无工作流体、非接触、灵敏、可靠、阻尼系数易于调整、对环境无污染等优点。

基于电涡流阻尼器在振动控制领域的良好应用优势,如今越来越受到国内外学者的青睐,在机械、航天等领域得到了广泛的研究<sup>[3]</sup>。如Sodano等<sup>[4-5]</sup>,对电涡流TMD的导体板外侧布置了背铁,使得磁感线穿过导体板的数量增加,以此取得较好的阻尼效果,且认为增加两个器件的相对速度,可以激发更高的阻尼力。李亚峰和李寿英等<sup>[6-7]</sup>,将电涡流阻尼器结构振动的随机方向分解为确定相互垂直的两方向加以控制,并进行了理论性能推导,并综合考虑了气隙、导体板背铁及永磁体数量等条件,制造样机与仿真进行对比,得出的结论都具有可行性。陈政清团队<sup>[8-10]</sup>开发了多种永磁电涡流阻尼器,并系统地给出了其电涡流TMD的阻尼力理论计算公式、有限元仿真分析方法和性能试验方案等。且设计出的电涡流TMD已经成

功应用到多项典型工程中,如绵阳三江大桥、上海中心大厦、人行桥和斜拉桥等<sup>[11-13]</sup>。当然,改善电涡流阻尼器的性能,增大其惯性力与切割磁感线的相对速度,也是我们的关注点之一。惯质<sup>[14-16]</sup>近些年在结构振动控制领域的关注度很高,其本身虽然无法做到减震消能的作用,更多的是依靠阻尼器这种消能装置,进行串并联等类似的连接方式<sup>[17-18]</sup>使用。但可以对惯性力起到一个放大的作用,所以在电涡流阻尼器领域上也广受欢迎。其中,滚珠丝杆<sup>[19-20]</sup>与齿轮齿条<sup>[21]</sup>等利用传动装置更是放大了电涡流阻尼器的优势,不仅使得惯性力得到放大,还可以使得导体板切割磁感线的速度得到放大。

本文为了改善电涡流阻尼器在实际工程应用中的应用性,提出了一种新型主动控制式电磁涡流阻尼器(Electromagnetic Eddy Current Damper,简称EECD)。首先利用了外部电源改变装置内部磁通量大小和传动装置放大导体板与磁感线相对切割速度与惯质的想法进行结构设计,然后对EECD进行了阻尼力理论计算与仿真分析。最后,制作EECD样机,通过力学实验验证其有效性与合理性。

## 1 EECD的构造及原理

EECD的三维构造如图1所示,其包括两个部分:第一部分主要是连接固定板的传动装置,由

复合型齿条、齿轮、轴心杆、轴承组成,其作用主要是放大导体板的转动速度。第二部分主要是安装在支撑长板上的耗能装置,由导体板、外侧背铁板、内侧背铁板与电磁铁组成。

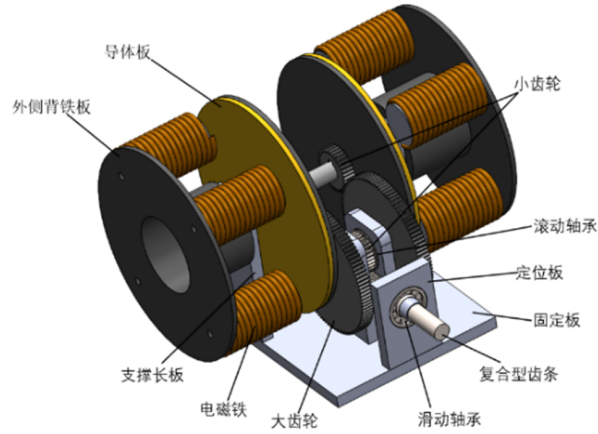


图1 EECD的三维构造图

Fig.1 3D structure diagram of EECD

工作时,EECD通过固定板,固定在结构基础上,并且复合型齿条杆端与结构进行刚性连接。杆端横向运动,通过传动装置相互间作用,转化为背铁板与导体板的转动速度,其中转动装置的作用主要是增加EECD的惯性力与导体板与磁感线切割的相对速度。耗能装置的作用主要是将输入的能量以电涡流阻尼力与摩擦力做功产生热量的形式散发出去。

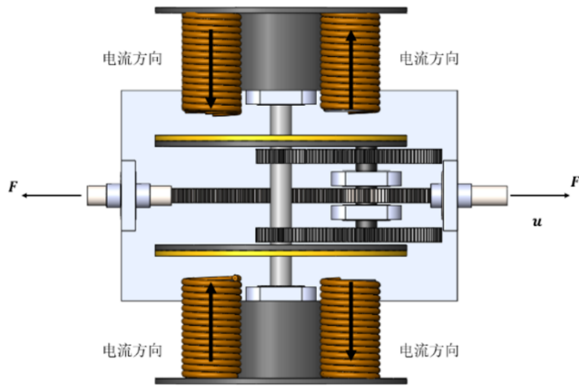


图2 EECD的作用原理

Fig.2 Working principle of EECD

## 2 EECD力学性能理论计算

### 2.1 闭合磁回路磁感应强度计算

传统的永磁式电涡流阻尼器磁感应强度由永

磁铁初始的加工所定,部分学者会利用导体板与永磁铁的间距、导体板与背铁板厚度及永磁铁的对数等,来改变涡流阻尼器的阻尼力大小。而EECD利用外部电源的输入,对设备内的磁通量进行了控制,进而改变电涡流阻尼力。在此过程中,由电流产生磁感应强度大小是可以通过计算得出的,计算过程如下:

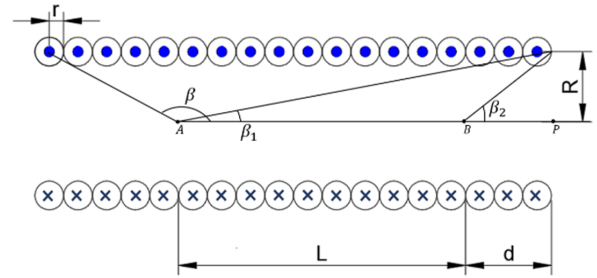


图3 电磁铁线圈布置图

Fig.3 Coil arrangement of electromagnets

如图3所示,先假设BP段仍然布满线圈,先计算出AP段线圈在导体板中心P点产生的磁感应强度 $B_1$ ,再计算BP段线圈在导体板中心P点产生的磁感应强度 $B_2$ ,然后两者相减得出电磁铁映射在导体板上的磁感应强度 $B$ 。值得说明的是,该计算假设的是磁回路是以铁芯材料为介质,且不存在漏磁情况下。这样的假设更利于我们计算电磁铁在背铁作用下的磁感应强度大小。

AP段磁感应强度:

$$B_1 = \int_s dB = \int_{L+d} \frac{uR^2(n_1+n)Id(L+d)}{2(R^2+(L+d)^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

$$= \frac{u_r}{2}(n_1+n)I(\cos\beta_1 - \cos\beta)$$

BP段磁感应强度:

$$B_2 = \int_s dB = \int_d \frac{uR^2n \cdot Id(d)}{2(R^2+d^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

$$= \frac{u_r}{2}(n)I(\cos\beta_2 - \cos\beta)$$

EECD实际线圈中, $\beta \rightarrow \frac{\pi}{2}$ 。即:

$$\cos\beta = 0$$

$$\cos\beta_1 = \frac{L+d}{\sqrt{((L+d)^2 + R^2)}} \quad (3)$$

$$\cos\beta_2 = \frac{d}{\sqrt{(d^2 + R^2)}}$$

结合上述(1)、(2)、(3)式。解得:

$$B = B_1 - B_2$$

$$= \frac{CuI}{4r} \left( \frac{L^2 - d^2}{\sqrt{((L+d)^2 + R^2)}} + \frac{d^2}{\sqrt{(d^2 + R^2)}} \right) \quad (4)$$

由于EECD在实际构造中,  $L > R \gg d$ , 所以该公式该可以简化为:

$$B = \frac{CuIL^2}{4rZ} \quad (5)$$

式(5)中:  $u = u_0 u_r$ ,  $u_0$  是真空磁导率, 取  $4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$ .  $u_r$  是材料的相对磁导率。AB段是实际的电磁铁长度, BP段中距离  $d$  是电磁铁端口与导体板的间距。 $L$  是电磁铁长度,  $r$  是线圈的半径,  $R$  是电磁铁的半径,  $n_1$  是电磁铁实际长度对应的匝数, 由  $L + d/2r$  算出,  $n$  是  $d$  长度所对应的虚拟匝数由  $d/2r$  算出,  $C$  是实际线圈捆的层数,  $u$  是电磁铁铁芯的磁导率,  $Z$  是电磁铁一端圆心到另一端圆外圈斜边长。

由于实际仿真中, 导体板与电磁铁存在着一定的气隙, 这使得磁回路出现了两种介质干扰的情况, 如图4仿真所示, 根据多次仿真, 及相同工况下同步进行实验测得的结果。我们发现磁感应强度在气隙中的强度大概是铁芯中强度的5%左右, 所以在此引入了一种折减系数。最终得出磁感应强度公式:

$$B = \frac{N\varsigma CuIL^2}{4rZ} \quad (6)$$

式(6)中,  $N$  为电磁铁的对数,  $\varsigma$  为实验及COMSOL Multiphysics多次仿真得出的折减系数, 取0.025。

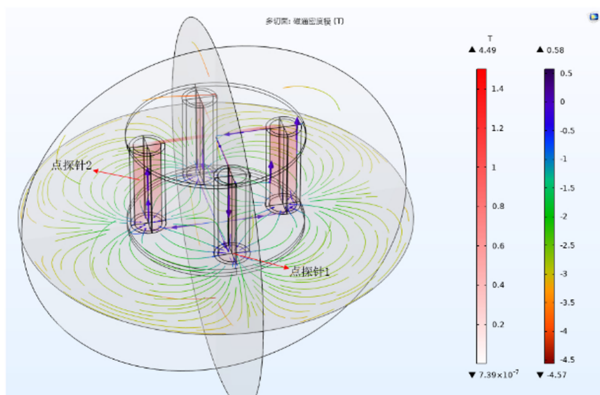


图4 磁场仿真

Fig.4 Magnetic field simulation

如图5所示, 铜板为导体板, 厚度4 mm, A3钢背铁板厚度4 mm, 且背铁材料与铁芯一致, 空

气间隙为4 mm, 电磁铁对数为1对时。结合仿真与实测结果显示, 在电磁铁铁芯及背铁材料不一样时, 其中10号钢相对磁导率为7000, A3钢的相对磁导率为2000, 软铁的相对磁导率为700。未施加转动速度情况下, 不同大小的电流, 不同铁芯的电磁铁在导体板中产生的磁感应强度都不同。利用数显特斯拉计实时检测磁感应强度, 数据整合如表1所示, 实测结果与仿真结果最大偏差在13.35%, 但是理论公式计算整体相对吻合, 最大偏差控制在5.03%。这是因为EECD实际构造外侧背铁板与铁芯并非焊接, 存在气隙, 且材料不同, 加上构造存在其他导磁金属, 对其磁感应产生了一定的影响。而理论的计算公式考虑了这些因素, 所以吻合情况良好。且为了验证线圈不存在铁芯与背铁及存在铁芯与背铁中, 磁感应强度区别, 以单个线圈、电流2.5 A、680匝这一工况仿真分析可得, 如表2所示, 存在铁芯与背铁的磁感应强度相对于通电线圈无铁芯无背铁时的25.24倍, 线圈存在铁芯无背铁情况时的4.26倍。

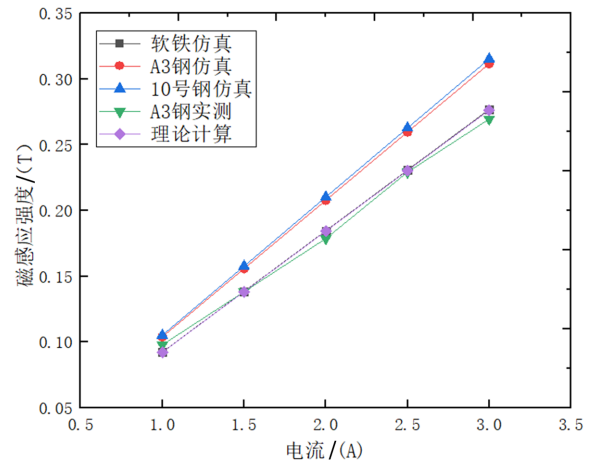


图5 不同电流下磁感应强度

Fig.5 Magnetic induction intensity at different currents

## 2.2 电涡流等效阻尼系数与惯质计算

如图4所示, 电磁铁映射在导体板上的磁场分布并不均匀, 存在一定的差值, 但差距也并不大, 所以仍然作匀强磁场来考虑, 上述推导中, 已经对磁感应强度作出了计算。为了简化计算, 仅考虑一块电磁铁在导体板上作用, 简化模型如图6所示。假设厚度为  $t$ , 电阻率为  $\rho$ , 半径为  $R_d$  的导体板外圆正上方放置一个电磁铁。电磁铁产生的磁感应强度为  $B$ , 导体板以角速度  $\omega$  水平转动。

表1 A3钢磁感应强度仿真与试验值对比

Table 1 Comparison between simulation and experimental values of magnetic induction intensity of A3 steel

工况	A3钢磁感应强度仿真 值/T	A3钢磁感应强度实测 值/T	A3钢磁感应强度解析 值/T	仿真与实测偏差/ (%)	理论与实测偏差/ (%)
1A	0.103 88	0.097	0.092 12	6.62	5.03
1.5A	0.155 81	0.138	0.138 18	11.4	0.02
2A	0.207 75	0.180	0.184 25	13.35	3.39
2.5A	0.259 69	0.229	0.230 31	11.81	0.57
3A	0.311 63	0.269	0.276 35	11.32	2.65

表2 电流2.5 A、680匝不同情况下对比

Table 2 Comparison under different conditions at current of 2.5 A and 680 turns

工况	A3钢磁感应强度仿真值/T
仅线圈	0.010 409
加铁芯	0.044 399
加铁芯与背铁	0.262 75

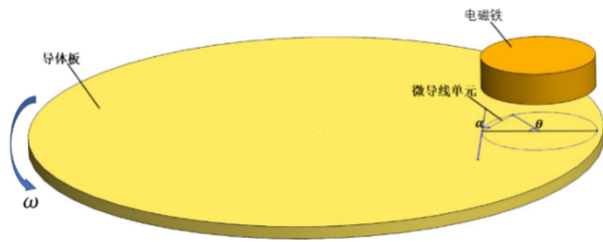


图6 阻尼单元的简化模型

Fig.6 Simplified model of damping unit

在导体板内取一个位于电磁铁正下方的微导线单元,该单元长度为 $l_i$ ,宽度为 $d_a$ ,厚度为 $t$ 。线单元两侧电势差为:

$$d\varepsilon = B\omega R_x l_i \quad (7)$$

根据图中几何关系,由图6可知:

$$l_i = 2R \sin \alpha \quad (8)$$

式(7)、(8)中: $R_x$ 是导体板中心点到电磁铁正下方中心点的间距, $R$ 为电磁铁的半径。

假设电涡流阻尼力达到最大值,则产生的感应电流达到最大,其电阻长度应为 $2l_i$ 。

$$d\Omega = \frac{2\rho l_i}{td_a} \quad (9)$$

式(9)中: $d\Omega$ 为导线单元的内电阻, $\rho$ 为铜的电阻率,取 $1.56 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 。

单个导线单元通过的电流强度 $d_i$ 为:

$$d_i = \frac{d\varepsilon}{d\Omega} = \frac{B\omega R_x t d_a}{2\rho} \quad (10)$$

单个导线单元受到的安培力:

$$dF = B l_i d_i \quad (11)$$

对 $dF$ 积分可得单个线圈对应的电涡流阻尼力:

$$F_w = \frac{2RB^2\omega R_x t}{\rho} \iint \sin \alpha d\alpha da = \frac{8R^2 B^2 \omega R_x t}{\rho} \quad (12)$$

从式(12)中,可以看出,当电磁铁与导体板间距一定时,随着转动角速度的增大,其阻尼力也呈线性变化,符合结构动力学中涡流阻尼在低速情况下呈线性变化这一特点。

进而导体板产生的电涡流阻尼系数为:

$$C_e = \frac{NF_w}{\omega R_x} = \frac{8NR^2 B^2 t}{\rho} = \frac{Nt}{2\rho} \cdot \left( \frac{R\varsigma Cu L^2}{rZ} \right)^2 \quad (13)$$

式(13)中: $N$ 为电磁铁的对数。

假设结构基础的运动速度为 $\dot{u}$ ,通过转动装置相互作用的关系,可以得到导体板与背铁的转动速度。

$$\omega = \frac{r_2}{r_1^2} \dot{u} \quad (14)$$

式(14)中: $r_1$ ,  $r_2$ 分别为小齿轮和大齿轮的半径。

导体板和背铁为实心圆盘,总转动惯量为:

$$J = \frac{1}{2} m (r_3^2) \quad (15)$$

式(15)中: $m$ ,  $r_3$ 分别为导体板和背铁板总的质量和导体板和背铁板的半径,这里导体板与背铁板的半径相同,需要注意的是轴心杆是实心。

最后结合上式可求得惯质为:

$$m_e = J\dot{u}^2 = \frac{1}{2} m \left( \frac{r_2 r_3}{r_1^2} \right)^2 \quad (16)$$

式(16)中:  $i$  为导体板与背铁板的转速与结构基础的运动速度  $\dot{u}$  的比值。

值得一提的是, 转速过快时, 导体板产生的感应电流会变大, 进而会产生与原磁场方向相抵消的磁场, 这时的阻尼系数会出现非线性<sup>[22]</sup>的变化, 针对该类问题还有待后续研究。

3 EECD 的样机试验与分析

3.1 试验工况与方法

为了更好的验证EECD的真实效果, 特制造了一台小型样机。如图7所示, 样机一端由小型振动台水平刚接, 并作往复运动。详细的试验工况参数如表3所示:

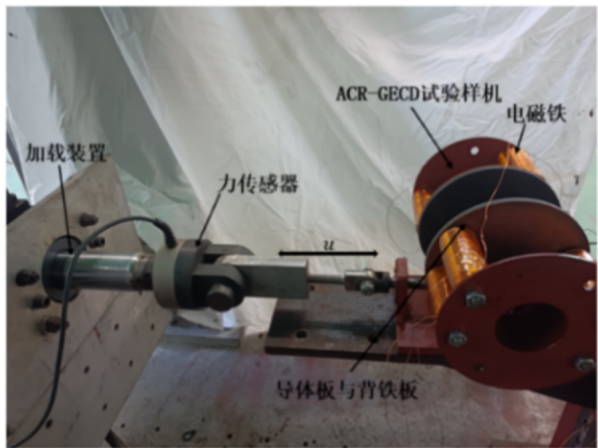


图7 EECD 的试验样机及加载装置  
Fig.7 Experimental prototype and loading device of EECD



图8 EECD 的外部电源连接装置  
Fig.8 External power connection device of EECD

如图7所示, 将EECD固定板与支架用螺栓固定, 右侧与小型振动台刚接, 振动台本身设置了力传感器与位移传感器测量EECD的位移与出力。

外部电源采用韩国KEPCO公司的BOP100 w直流电源装置, 如图8所示, 连接时, 为了保证电磁铁中的电流一致, 采用串联的形式。

表3 标准试验工况的参数  
Table 3 Parameters of standard working conditions in experiment

参数名称	符号	数值
导体板(铜板)厚度/mm	$d_e$	4
背铁板厚度/mm	$d_e$	4
导体板(铜板)半径/mm	$r_3$	92
背铁板半径/mm	$r_3$	92
小齿轮半径/mm	$r_1$	16
大齿轮半径/mm	$r_2$	60
线圈半径/mm	$r$	0.3
背铁质量/kg	$m_1$	0.8
导体板(铜板)质量/kg	$m_2$	0.95
气隙/mm	$d$	5
铜制导体板电阻率/ $\Omega \cdot m$	$\rho$	$1.56 \times 10^{-8}$
电磁铁单边对数	$N$	4
电磁铁线圈匝数	$n$	680
A3钢制铁芯磁导率/ $\mu$	$\mu_0 \mu_r$	$1.2\pi \times 10^{-3}$
A3钢制背铁板磁导率/ $\mu$	$\mu_0 \mu_r$	$1.2\pi \times 10^{-3}$
通电电流/A		0、1

如图2原理图所示, 实验输入正弦波, 位移为  $u$ , 速度和加速度分别为  $\dot{u}$ ,  $\ddot{u}$ 。其中:

$$u = A \sin(2\pi ft)$$

试验中振幅  $A$  取8~45 mm, 频率  $f$  取0.1~0.5 Hz, 可知速度范围为0~0.1414 m/s, 加速度取值范围为0~0.4441 m/s<sup>2</sup>。

电涡流阻尼力实验值需要考虑摩擦力, 结合牛顿第二定律的考虑, 采用李亚峰提出的力学模型<sup>[23]</sup>:

$$F = m_e \ddot{u} + c_e \dot{u} + f_0 \text{sign}(\dot{u}) \tag{17}$$

式(17)中:  $m_e$  为背铁加导体板的惯质,  $c_e$  为等效阻尼系数,  $f_0$  为摩擦力,  $F$  为结构控制力。

为了降低摩擦力对EECD的影响, 对齿轮及轴承等转动构件接触处涂上了润滑油, 但由于EECD运行过程中, 润滑油的滴落, 使得每次工况试验的摩擦力存在点偏差, 但偏差不大。根据几次工况的准静载试验, 得出摩擦力平均值  $f_0$  等于24.5 N。

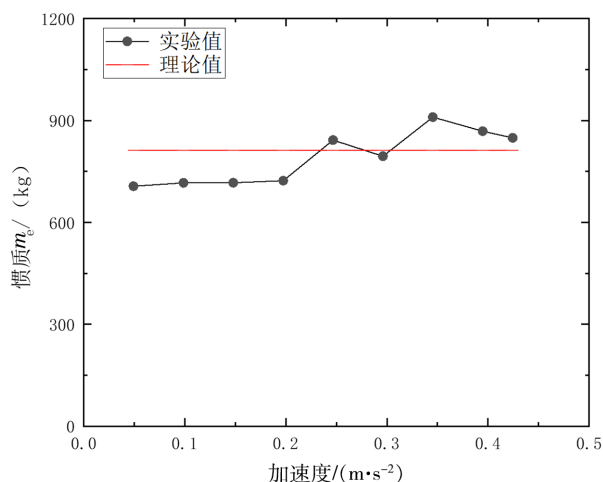
### 3.2 惯质与惯性力

如表1所示,EECD试验样机中,背铁与导体板总质量为3.5 kg。代入式(16)得:

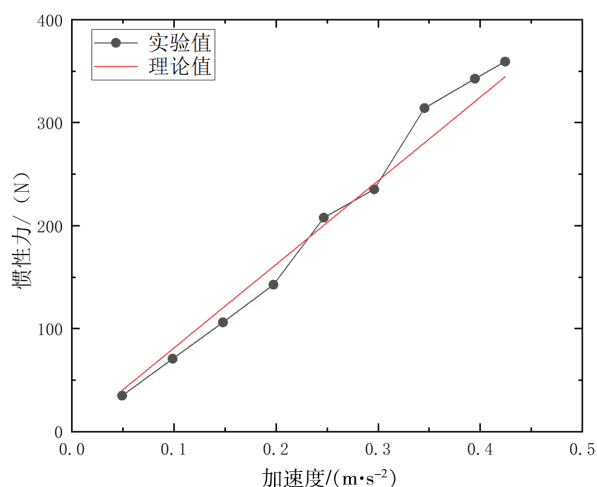
$$m_e = 812.15 \text{ kg} \quad (18)$$

简谐运动前段,由于其惯性力相对较小,对于计算惯质过程中,摩擦力对其的影响较大,如

图9所示,当加速度小于 $0.246 \text{ m/s}^2$ 时,可以发现惯性力其实验值要小于理论值。当加速度处于 $0.246 \sim 0.3454 \text{ m/s}^2$ 时,其实验值与理论值吻合情况良好,而当其加速度大于 $0.3454 \text{ m/s}^2$ 时,实验值开始大于理论值,总体最大相对误差控制在13.07%以内。



(a) 惯质



(b) 惯性力

图9 理论与实验值比较

Fig.9 Comparison of theoretical and experimental values

### 3.3 等效阻尼系数与电涡流阻尼力

图10给出了EECD在简谐运动中不同速度情况下的阻尼力大小。需要强调的是,EECD试验样机在工作时,总共用了4对电磁铁,使得其电阻过大,且直流电源装置电功率只有100 W。因此为更加明显的给出实验规律,本次试验主要以1 A的工况来验证试验与理论的吻合情况。实验过程中,该工况测得的磁感应强度是0.09 T。根据对比可知,速度在 $0 \sim 0.0525 \text{ m/s}$ ,  $0.1175 \sim 0.1405 \text{ m/s}$ 时,理论值大于实验值,而在 $0.0525 \sim 0.1175 \text{ m/s}$ ,实验值大于理论值。总体最大相对误差在10.6%以内。从 $0.1333 \sim 0.1405 \text{ m/s}$ 这一区间可以发现,实验的涡流阻尼力增长已经变得缓慢,根据客观规律来看,可以看出应该已经接近峰值涡流阻尼力,故后面的涡流阻尼力应会呈下降趋势。

### 3.4 EECD的性能研究

图11(a)给出加载频率为0.5 Hz,振幅45 mm

时理论计算,不同电流大小工况,电涡流阻尼力一位移滞回曲线。可以看出,随着电流增大,滞回曲线逐渐饱满,说明其耗能能力也逐渐增强。这符合主动控制下,需要增大外部能源干扰从而增加耗能能力的特点。

图11(b)给出了电流1 A,加载频率为0.5 Hz,振幅45 mm的滞回曲线。通过理论值与实验值的对比,可以发现,在振幅 $-10 \sim 10 \text{ mm}$ 这个范围内,其误差相对较大。这是因为此刻加速度较小,速度较大,惯性力与电涡流阻尼力的总值较小,易于受到摩擦力的影响,而其他区域吻合情况相对较好。整体来看,实验结果因为摩擦力的干扰存在一定的波动性,但总体误差相对较小,说明理论具有可行性。滞回曲线也比较光滑,重复性较好,可以看出样机的工作情况比较稳定。

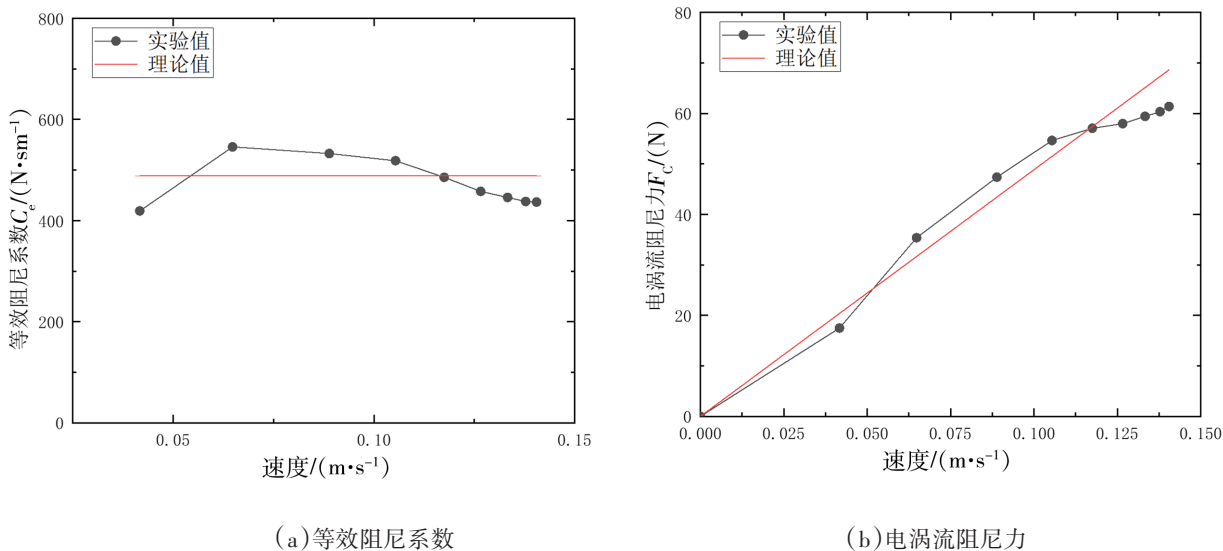


图10 理论与实验值比较当电流1 A时

Fig.10 Comparison of theoretical and experimental values at current of 1 A

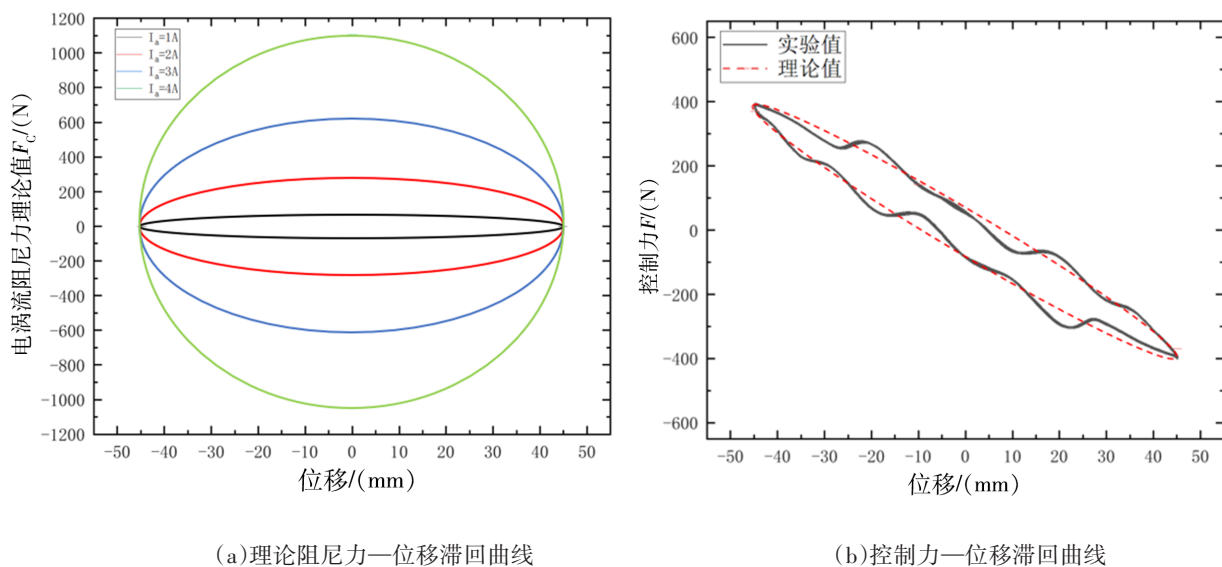


图11 EECD的滞回曲线

Fig.11 Hysteretic curves of EECD

## 4 结论

本研究提出了一种新型主动控制式电磁涡流阻尼器, 通过对其进行力学理论公式推导与样机试验研究, 得到的主要结论如下:

(1) EECD的磁路设计布置合理, 结合试验与仿真表明, 通电线圈存在铁芯与背铁形成良好回路中的磁感应强度相对于通电线圈无铁芯无背铁时的24.24倍, 及存在铁芯无背铁情况时的4.26倍;

(2) 惯性力与电涡流阻尼力理论值与试验结果比较吻合, 符合电涡流阻尼的线性假设, 其平均误

差分别控制在13.07%和10.6%。滞回曲线与理论误差较小, 且实验值普遍小于理论值, 曲线也相对光滑, 未出现卡齿等结构设计问题, 该新型阻尼器构造稳定, 具有可行性;

(3) 从EECD的理论滞回曲线中, 得出随着电流增大, 阻尼力一位移滞回曲线逐渐饱满, 说明其耗能能力也逐渐增强。这符合主动控制下, 增大外部能源干扰从而增加耗能能力的特点。

(4) EECD所提供的电涡流阻尼力虽然较小, 但可以将其与传统永磁式电涡流阻尼器作串联处理, 做到阻尼力在一定范围可调节的作用, 改善了电涡流阻尼器在实际工程中的应用性。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 徐鉴. 振动控制研究进展综述[J]. 力学季刊,2015,36(4):547-565.
- [3] Yan B, Wang Z, Hongye M, et al. A novel lever-type vibration isolator with eddy current damping[J]. Journal of Sound and Vibration, 2021(494):115862.
- [4] Sodano H A, Bae J S, Inman D J, et al. Improved concept and model of eddy current damper[J]. Journal of vibration and acoustics; Transactions of the ASME, 2006(3):128.
- [5] Sodano, H. A. Eddy current damping in structures[J]. Shock & Vibration Digest, 2004, 36(6):469-478.
- [6] 李亚峰. 齿轮齿条式电涡流阻尼装置及其控制效果研究[D]. 长沙:湖南大学,2021.
- [7] 李寿英,霍朝煜,毛伟阳,等. 齿轮齿条式电涡流阻尼墙有限元数值研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2022,49(9):100-107.
- [8] 陈政清,张弘毅,黄智文. 板式电涡流阻尼器有限元仿真与参数优化[J]. 振动与冲击,2016,35(18):123-127.
- [9] 陈政清,田静莹,黄智文,等. 板式电涡流阻尼系数的计算与试验修正方法[J]. 中国公路学报,2016,29(10):46-53.
- [10] 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.
- [11] 陈政清,黄智文,田静莹. 电涡流调谐质量阻尼器在钢-混凝土组合楼盖振动控制中的应用研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(S1):94-99.
- [12] 陈政清,刘光栋. 人行桥的人致振动理论与动力设计[J]. 工程力学,2009,26(S2):148-159.
- [13] 陈政清,黄智文,王建辉,等. 桥梁用TMD的基本要求与电涡流TMD[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2013,40(8):6-10.
- [14] 张瑞甫,曹嫣如,潘超. 惯容减震(振)系统及其研究进展[J]. 工程力学,2019,36(10):8-27.
- [15] Weber F, Huber P, Borchsenius F, et al. Performance of TMDI for tall building damping[J/OL]. Actuators, 2020, 9(4):139[2023-11-01]. <https://doi.org/10.3390/act9040139>.
- [16] Pan C, Jiang J, Zhang R, et al. Closed-form design formulae for seismically isolated structure with a damping enhanced inerter system[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28(12):e2840.
- [17] Deastra P, Wagg D J, Sims N D, et al. Experimental shake table validation of damping behaviour in inerter-based dampers[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2023, 21(3):1389-1409.
- [18] Basili M, Angelis M D, Pietrosanti D. Dynamic response of a viscously damped two adjacent degree of freedom system linked by inerter subjected to base harmonic excitation[J]. Procedia Engineering, 2017(199):1586-1591.
- [19] 汪志昊,程志鹏,王浩,等. 电涡流惯质阻尼器对斜拉索振动控制研究[J]. 土木工程学报,2021,54(12):53-63+115.
- [20] 李亚敏,沈文爱,朱宏平. 电磁惯质阻尼器对超长斜拉索的减振性能分析[J]. 土木工程与管理学报,2020,37(6):93-100.
- [21] 李亚峰,李寿英,王健钟,等. 齿轮齿条式电涡流阻尼器的力学性能研究[J]. 土木工程学报,2020,53(3):44-50.
- [22] Huo Z Y, Khalique C M. Stochastic seismic analysis of structures with nonlinear eddy current dampers[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2023, 42(1):69-79.
- [23] Li Y, Li S, Wang J, et al. A new type of damper combining eddy current damping with rack and gear[J]. Journal of Vibration and Control, 2021, 27(9-10):1087-1097.