

# 基于磁粉离合的变惯质阻尼器理论及试验研究<sup>\*</sup>

孙洪鑫<sup>†</sup> 贺杜鹏

(湖南科技大学 土木工程学院,湘潭 430112)

**摘要** 针对超长斜拉索振动主模态区间多变的特点,磁粉离合惯质阻尼器作为半主动变惯质阻尼器对比被动惯质阻尼器更具优势.根据已有研究发现,仅向磁粉离合惯质阻尼器输入直流电并不能实现阻尼器惯质系数恒值可调的功能,本文通过输入简谐电流的方法实现该功能.首先,介绍了磁粉离合惯质阻尼器基本原理及其力学特性,从磁粉离合器双轴相对运动状态来分析磁粉离合器在不同电流工况下的力学性质,进而研究实现阻尼器变惯质功能的输入电流控制算法.然后,综合阻尼器基本构造建立了其力学模型,从而得出阻尼器在稳态激励条件下的等效惯质系数表达式,阐明了阻尼器在输入控制电流下的等效惯质系数与控制电流幅值呈二次线性关系.最后,通过实验对阻尼器惯质系数的可调性进行了验证.

**关键词** 振动控制, 磁粉离合惯质阻尼器, 控制算法, 减振器

**中图分类号**:U441+.3

**文献标志码**:A

## The Theory and Experimental Research of Adjustable Inertial Damper Based on Magnetic Particle Clutches<sup>\*</sup>

Sun Hongxin<sup>†</sup> He Dupeng

(Department of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 430112, China)

**Abstract** In light of the changeable primary mode interval of ultra-long stay cable vibration, the inertial damper of magnetic particle clutch has greater advantages as a semi-active inertial damper than as a passive inertial damper. Existing research, however, indicates that simply injecting direct current into the magnetic particle clutch's inertial damper would not be sufficient to realize the Constant-value regulated function of the damper's inertial coefficient. This function will be accomplished in this study by inputting harmonic current. First, the fundamental operation and mechanical features of the magnetic particle clutch's inertial damper are described. From the relative motion state of the two magnetic particle clutch axes, the mechanical characteristics are evaluated, and the control method for the input current to realize the adjustable function of the inertial coefficient of the damper is explored. The equivalent inertial coefficient of the damper under steady-state excitation is then expressed, and the mechanical model of the damper is developed based on the damper's fundamental structure. The equivalent inertial coefficient of the damper under input control current and the amplitude of the control current are eventually shown to have a quadratic linear relationship. Lastly, the inertial coefficient of the damper's adjustability was verified experimentally.

**Key words** vibration control, inertial damper of magnetic particle clutch, control algorithm, shock absorber

2022-11-09 收到第 1 稿,2023-03-22 收到修改稿.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(52078210),湖南省杰出青年科学基金项目(2021JJ10003),National Natural Science Foundation of China(52078210) and Science Fund for Distinguished Young Scholars of Hunan Province(2021JJ10003).

<sup>†</sup> 通信作者 E-mail:cehxsun@hnust.edu.cn

## 引言

在斜拉索振动问题解决上,被动负刚度阻尼器显著提升了斜拉索的减振效果,并可在一定程度上改善传统被动阻尼器在斜拉索上安装位置过低而引起的嵌固效应,但不足在于当,负刚度过大时,可能诱发减振系统稳定性问题<sup>[1,2]</sup>.而具有两节点惯质单元“inertor”的被动惯质阻尼器不仅实现了结构被动负刚度控制<sup>[3-5]</sup>,且不会因为负刚度过大诱发斜拉索减震系统的稳定性问题<sup>[6]</sup>.联合惯质单元的阻尼器在斜拉索振动控制上表现良好;Lu等<sup>[3]</sup>和 Shi等<sup>[4]</sup>对惯性质量黏滞阻尼器(VIMD)斜拉索减振系统开展了仿真分析和参数优化研究,结果表明,VIMD可以实现斜拉索减振效果的大幅提升;Lazar等<sup>[5]</sup>的仿真分析表明,调谐惯性质量阻尼器(TID)可显著提升斜拉索目标调谐模式的减振效果.在斜拉索极限长度日益见长的背景下,斜拉索各阶模式所需的阻尼器最优参数存在差异,仅通过被动控制措施难以同时实现斜拉索多阶模式振动的最优控制<sup>[6,7]</sup>.

半主动控制方式结合了主动和被动两种控制方式的优点,其只需外界提供少量的能量便能达到实时控制优化的效果<sup>[8-10]</sup>.Hrovat<sup>[11]</sup>在1983年首次提出将半主动控制技术应用到土木工程领域.Ni等<sup>[12]</sup>不仅提出斜拉索半主动控制LQG算法,同时引入了神经网络的控制算法.基于参数可调阻尼器的半主动控制技术已逐渐成为提升斜拉索减振效果的重要手段<sup>[13-15]</sup>.Li等<sup>[14]</sup>指出MR阻尼器半主动控制卓越的减振性能主要得益于负刚度特性放大了阻尼器的位移.定量分析的结果表明<sup>[15]</sup>:呈现负刚度控制特征的阻尼器半主动控制可将斜拉索的最优附加模式阻尼比提高至常规被动线性黏滞阻尼器的2倍以上,且可以较好地实现斜拉索多阶模式最优控制.

受上述文章启发,为应对斜拉索振动的新特征,本文设计了一种新型的半主动惯质阻尼器—磁粉离合惯质阻尼器.该装置实现变惯质功能主要基于两点惯质元件、滚珠丝杠的动力传递机制和磁粉离合器传递扭矩连续可调的功能.其中,磁粉离合器是一种激磁电流-传递扭矩特性函数基本呈线性、滑差状态下传递扭矩稳定和扭矩调节响应迅速<sup>[16]</sup>的自动控制元件,本文将将其作为惯质元件与

滚珠丝杠的连接元件和阻尼器惯质系数的调节元件,试验中可以通过控制离合器输入电流来调节其传递扭矩大小,从而达到调控阻尼器惯性输出力的目的.为了探究磁粉离合惯质阻尼器变惯质功能的可行性,本文建立了阻尼器的力学模型,明确阻尼器惯质系数的表达式,并设计试验装置进行试验,验证了力学模型的准确性和展示了装置负刚度的可调性.

## 1 构造与工作原理

磁粉离合惯质阻尼器(图1)主要由滚珠丝杠、磁粉离合器以及飞轮构成.滚珠丝杠模组为气缸型模组,由滚珠丝杠与模组外壳构成,滚珠丝杠由杆套(6)、丝杆(11)以及滚珠螺帽(12)构成,将端部(7)的直线外激励以转动形式传递给旋转端联轴器(10),滚珠丝杠通过滑轨(5)、限位孔(13)以及轴承与模组外壳相连接.模组外壳连接装置外套筒通过端头(1)共同固接于固定端.磁粉离合器外壳固定于装置外套筒上,通过旋转端联轴器(10)来连接输入轴(3)与滚珠丝杠的丝杆端,通过刚性联轴器(2)来连接输出轴(4)与飞轮(8).磁粉离合器主要通过线圈(9)来提供电磁场以及由磁粉室(14)来储存磁粉.对于磁粉离合器而言,当励磁线圈中未通入电流时,磁粉室内磁粉处于松散状态,磁粉离合器不传递扭矩;当励磁线圈通入电流时,根据通入电流的大小,磁粉室内的磁粉形成不同数量、连结程度的磁粉链,当输入轴与输出轴产生相对运动时便可传递对应扭矩.

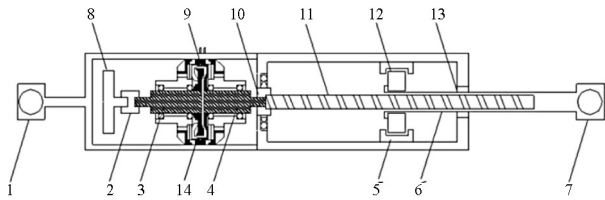


图1 磁粉离合惯质阻尼器构造图

Fig.1 Construction diagram of the inertial damper of magnetic particle clutch

结合阻尼器内部构造,利用磁粉离合器以摩擦力形式传递扭矩的特性和三角函数具有轴对称与轴反对称的几何性质,推断出输出轴飞轮部分作简谐运动的必要性条件为它的速度曲线周期与输出轴保持一致,且其峰值点位于输入轴速度曲线上.利用输出轴飞轮组成部分速度与加速度的导数关系、磁粉离合器激磁电流-允许传递扭矩关系 $T(i)$

以及离合器滑差工作状态,推算出输出轴飞轮部分作简谐运动时不同幅值  $I$  交流控制电流需要的相位差  $\varphi$ , 相位差  $\varphi$  为控制电流滞后于外激励加速度的相位. 使得离合器传递了一种幅值由输入电流幅值  $I$  控制与外激励具有相位差  $\varphi$  的扭矩, 通过滚珠丝杠传导机制将扭矩转变为输出力进行输出. 因此, 可以通过控制输入电流来实现装置等效惯容系数调控功能.

## 2 磁粉离合器惯质阻尼器变惯质性能研究

### 2.1 磁粉离合器特性

磁粉离合器励磁电流与转矩传递之间近似为线性关系, 在线性区以外还存在一定的饱和区和弱激磁区. 经过多点测量后可得到如图 2 所示的特性曲线<sup>[17]</sup>. 由图可知, 在电流上升与下降曲线之间存在着很窄的磁滞回路, 且观察到其具有较宽的电流线性控制段. 从图 2 可知, 可以将磁粉离合器励磁电流与转矩传递之间良好的线性关系作为磁粉离合器惯质阻尼器力学性能分析的主要依据. 对于电流上升与电流下降之间很窄的磁滞回路, 为了便于研究分析进行近似处理. 将磁粉离合器线性部分允许传递扭矩表达通式总结为:

$$T(i) = a_1 + a_2 |i|, \quad |i| \geq i_0 \quad (1)$$

其中,  $a_1$  与  $a_2$  为常数,  $i_0$  表示激磁电流-极限传递扭矩函数关系的函数变化电流节点值.

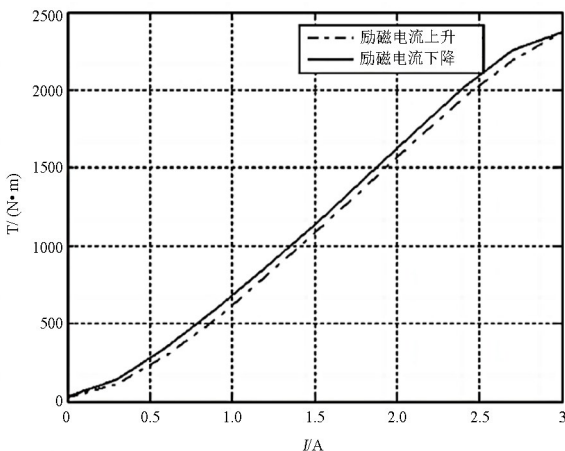


图 2 激磁电流-传递扭矩函数关系特性曲线<sup>[17]</sup>  
Fig.2 Characteristic curves of the excitation current-transfer torque function<sup>[17]</sup>

### 2.2 磁粉离合器双轴相对运动状态分析

磁粉离合器惯质阻尼器在稳态简谐激励  $X_1$  下

通过磁粉离合器摩擦传动, 趋使其输出轴与飞轮组成部件(简称输出轴组件)运动, 组成部件由于惯性又通过摩擦扭矩的形式反作用于离合器输入轴, 经过滚珠丝杠特殊传动机制产生输出力, 装置系统中磁粉离合器双轴相对运动状态分析图如图 3 所示, 其中,  $X_0$  为固定端位移,  $I_1$  表示阻尼器在未通电状态下的初始惯质,  $I_2$  表示输出轴组件惯质,  $\theta_1$  表示磁粉离合器输入端角度,  $\theta_2$  表示磁粉离合器输出端角度,  $M_1$  表示磁粉离合器传递扭矩.

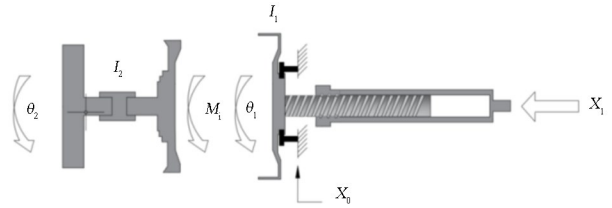


图 3 双轴相对运动状态分析图  
Fig.3 Analysis diagram of the biaxial relative motion

根据公理可知, 摩擦力作为一种物体间的相互作用力, 产生条件为物体间有相对滑动或存在滑动趋势. 因此, 该阻尼装置力学性质必须由双轴的运动状态分析来确定. 结合图 3 磁粉离合器双轴相对运动状态示意简图进行分析, 在稳态简谐激励  $X_1$  下, 磁粉离合器双轴存在两种相对运动状态. 第一种状态: 当两轴之间存在相对滑动时,  $\dot{\theta}_1$  不等于  $\dot{\theta}_2$ , 摩擦力表现为滑动摩擦力, 此时摩擦力大小等于极限静摩擦大小. 第二种状态: 当两轴之间相对静止但具有相对加速度时, 由于条件不同双轴将展现出两种不同运动状态: (1) 由于相对加速度产生的惯性力小于极限静摩擦力时, 两轴之间通过静摩擦力同步运动, 此时,  $\dot{\theta}_1$  与  $\dot{\theta}_2$  相等, 静摩擦力大小等于惯性力大小; (2) 当相对加速度产生的惯性力大于极限静摩擦力时,  $\dot{\theta}_1$  大于  $\dot{\theta}_2$ , 两轴之间产生滑差运动, 此时摩擦力为滑动摩擦力.

当阻尼器的离合器双轴相对滑动时, 它们在相互摩擦作用下展现出了相对速度趋近性, 因此, 保持输出轴速度大小小于输出轴或输出轴速度方向滞后于输出轴时, 离合器将持续提供滑动摩擦力. 下一节的控制算法将在离合器双轴滑差运动基础上展开讨论.

### 2.3 阻尼器实现变惯质的电流控制算法

假设稳态外激励为  $X_1 = -A \cos(\omega_0 t)$ , 由变惯

质装置结构简图确定离合器输入端角度、角速度以及角加速度分别为 $\theta_1(t)$ 、 $\omega_1(t)$ 和 $\alpha_1(t)$ ,离合器输出端角度、角速度以及角加速度分别为 $\theta_2(t)$ 、 $\omega_2(t)$ 和 $\alpha_2(t)$ ,结合阻尼器内部构造,根据滚珠丝杆位移转换机理可知:

$$\theta_1(t) = \frac{2\pi}{L_1} X_1(t) \quad (2)$$

$$\omega_1(t) = \frac{2\pi}{L_1} v_1(t) \quad (3)$$

$$\alpha_1(t) = \frac{2\pi}{L_1} a_1(t) \quad (4)$$

$$F = \frac{2\pi}{\eta L_1} T \quad (5)$$

其中, $\eta$ 为滚珠丝杆的机械传递效率, $L_1$ 为滚珠丝杆导程。

在2.1节中论述的磁粉离合器激磁电流-传递扭矩函数关系为近似线性关系,该函数关系表达式简化为:

$$T(i) = k |i(t)| \quad (6)$$

其中, $k$ 为关系比例值。

结合2.2节磁粉离合器双轴相对运动状态分析做出的总结,为了使得磁粉离合器双轴保持滑差运动状态,提供给阻尼器一个相位滞后于外激励加速度且频率与其相等的简谐电流:

$$i(t) = I \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (7)$$

其中, $I$ 为简谐电流幅值, $\omega_0$ 为简谐电流圆频率, $\varphi$ 为简谐电流滞后相位,取值范围为 $(0 \sim \pi/2)$ 。

磁粉离合器双轴保持滑差运动状态,传递扭矩方向与双轴相对速度方向一致,结合公式(6)和(7)可得磁粉离合器传递扭矩为:

$$T(t) = k |I \cos(\omega_0 t + \varphi)| \cdot \text{sgn}(\omega_1 - \omega_2) \quad (8)$$

正弦、余弦函数既是中心对称函数,又是轴对称函数,它们的对称轴是过函数图像的最高(低)点且垂直于 $x$ 轴的直线,对称中心是图像与 $x$ 轴的交点,其公式表达形式为:

$$f(t + T/2) = -f(t) \quad (9)$$

通过公式(9)可知,简谐函数上相差半个周期两点的函数值互为相反数。

假设:磁粉离合器输出轴运动速度为与输入轴为频率相同而幅值较小的简谐运动(这样可以忽略非线性效应),如果当输出轴简谐运动滞后于输出

轴相位 $\varphi$ 时,输出轴运动速度如下所示:

$$\omega_2(t) = \frac{2\pi A \omega_0 \alpha}{L_1} \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (10)$$

其中, $\alpha$ 为磁粉离合器双轴速度幅值比值。

使输出轴运动速度 $\omega_2(t)$ 第一个极值点落在输入轴运动速度曲线上,根据公式(9)可知,预期相差半个周期的第二个极值点也位于输入轴运动速度曲线上,得:

$$\text{sgn}[\cos(\omega_0 t + \varphi)] = \text{sgn}[i(t)] = \text{sgn}(\omega_1 - \omega_2) \quad (11)$$

注意到, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数,由此,可得磁粉离合器传递扭矩为:

$$T(t) = k |I \cos(\omega_0 t + \varphi)| \cdot \text{sgn}[i(t)] = k I \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (12)$$

通过简谐函数对称性与反对称性可知,当输入电流与外激励保持一定的相位差时,可以实现电流对输出力的控制。

当输入交流电流幅值达到某一临界值时,阻尼装置离合器双轴同步运动,计算得到稳态激励下磁粉离合器传递扭矩等于输出轴组件惯性扭矩的临界交流电幅值 $I_m$ 如下:

$$I_2 \alpha_1(t) = k I_m \cos(\omega_0 t) \quad (13)$$

$$\frac{2\pi I_2 A \omega_0^2}{L_1} \cos(\omega_0 t) = k I_m \cos(\omega_0 t) \quad (14)$$

$$I_m = \frac{2\pi I_2 A \omega_0^2}{k L_1} \quad (15)$$

其中,为输出轴组件惯性矩,为当前工况下临界交流电流幅值,式(13)~(15)表示推导过程。

公式(12)表示的传递扭矩,对应输出轴组件运动速度如下:

$$\omega_T(t) = \frac{2\pi A \omega_0}{L_1} \frac{I}{I_m} \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (16)$$

通过推导得到的公式(16)等价于公式(10),并展示了公式(10)中比值系数 $\alpha$ 具体表达形式,因此第二个假设成立,比值系数 $\alpha$ 如下式所示:

$$\alpha = \frac{A_{\theta 2}}{A_{\theta 1}} = \frac{I}{I_m} = \frac{k L_1 I}{2\pi I_2 A \omega_0^2} \quad (17)$$

根据公式(9)可得输出轴峰值速度点位于输入轴速度曲线上,得:

$$\varphi(I) = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{k L_1 I}{2\pi I_2 A \omega_0^2}\right) \quad (18)$$

综上所述,构造出了阻尼器在稳态激励下,磁粉离合器激磁电流-传递扭矩满足理想线性关系的

控制电流形式,如公式(7)和(18)所示.此时,阻尼器的磁粉离合器传递一个简谐规律的扭矩,如公式(8)和(18)所示.

## 2.4 磁粉离合惯质阻尼器的力学模型

通过上一节对阻尼器输入电流进行控制,结合磁粉离合器力学特性,构造了一个幅值可控的简谐扭矩,通过滚珠丝杆的传动机制将扭矩转化为输出力进行振动控制,磁粉离合惯质阻尼器拓扑结构如图4所示.

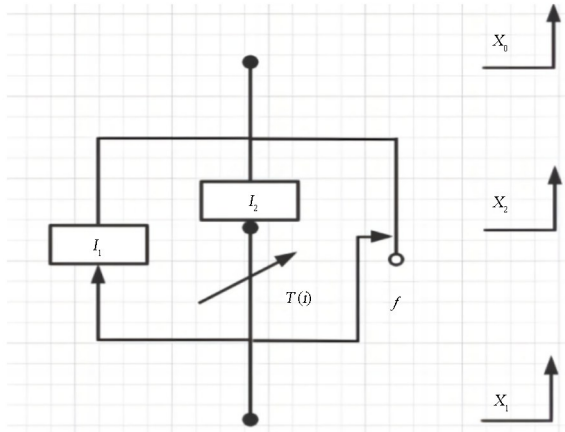


图4 磁粉离合惯质阻尼器拓扑结构图  
Fig.4 Topology diagram of the inertial damper of magnetic particle clutch

磁粉离合惯质阻尼器简化为了两个自由度机构,  $X_0$  表示固定端位移,  $X_1$  表示外激励位移,  $X_2$  表示输出轴组件位移,  $I_1$  表示阻尼器在未通电流状态下的初始惯质,  $I_2$  表示输出轴组件惯质,  $T(i)$  为磁粉离合器传递扭矩,  $f$  为阻尼器初始摩擦力.

磁粉离合惯质阻尼器力学模型如下:

$$F_{\text{output}} = \frac{I_1}{\eta} \left( \frac{2\pi}{L_1} \right)^2 \ddot{X}_1 + \frac{2\pi T(|i(t)|)}{\eta L_1} \text{sgn}[i(t)] + f \text{sgn}(\dot{X}_1) \quad (19)$$

$$I_2 X_2 = \frac{2\pi T(|i(t)|)}{\eta L_1} \text{sgn}[i(t)] \quad (20)$$

其中,  $\eta$  为滚珠丝杆的机械传递效率.本章分析力学模型时,考虑离合器工作状态为滑差状态,因此,  $\ddot{X}_2 < \ddot{X}_1$ .式(19)可以完整地表达阻尼器在滑差状态下的力学性能.

公式(19)中第二项为依据滑差原理磁粉离合器部分贡献给阻尼器的输出力  $F_{\text{clutch}}$ ,根据式(5)和(12)可得:

$$F_{\text{clutch}} = \frac{2\pi}{\eta L_1} k I \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (21)$$

$$F_{\text{clutch}} = \frac{2\pi}{\eta L_1 A \omega_0^2} k I \cos(\varphi) X_1 + \frac{2\pi}{\eta L_1 A \omega_0} k I \sin(\varphi) \dot{X}_1 \quad (22)$$

根据公式(18)、(19)和(22),得到阻尼器等效惯质系数和等效阻尼系数表达显式如下:

$$F_{\text{output}} = m_{\text{eq}} \ddot{X}_1 + c_{\text{eq}} \dot{X}_1 + f \text{sgn}(\dot{X}_1) \quad (23)$$

$$m_{\text{eq}} = \frac{I_1}{\eta} \left( \frac{2\pi}{L_1} \right)^2 + \frac{1}{\eta I_2} \left( \frac{k I}{A \omega_0^2} \right)^2 \quad (24)$$

$$c_{\text{eq}} = \frac{2\pi}{\eta L_1 A \omega_0} k I \sin(\varphi) \quad (25)$$

根据以上公式推导做出总结:(1)增大磁粉离合惯质阻尼器驱动电路输入交流电流幅值  $I$  时,等效惯质系数  $m_{\text{eq}}$  随之以二次函数关系进行增长,如公式(24)所示,在理论上实现了阻尼器惯质系数调节的功能.当激磁电流达到临界交流电幅值  $I_m$  时,等效惯质系数存在最大值为  $\frac{(I_1 + I_2)}{\eta} \left( \frac{2\pi}{L_1} \right)^2$ . (2)通过利用磁粉离合器滑差工作特点使得离合器传递扭矩等于其每个时刻输入电流对应的极限传递扭矩,产生滑差即耗能,伴随产生了与输入电流幅值变化对应的装置阻尼等效系数  $c_{\text{eq}}$ ,如公式(25)所示.

## 3 磁粉离合惯质阻尼器近似模型仿真与实验

### 3.1 试验装置组成及参数介绍

磁粉离合惯质阻尼器试验装置如图5所示,该装置主要包括:滚珠丝杆、铝合金联轴器、磁粉离合器、飞轮、SPWM数字驱动电路系统(SPWM单片机、直流电源)、套筒.滚珠丝杆是作为直线运动转化为旋转运动的主要构件,本论文采用的滚珠丝杆模组型号为VLACT55;飞轮主要提供转动惯量;磁粉离合器作为飞轮输出惯性力控制器,采用磁粉离合器型号为FL6A-1.磁粉离合惯质阻尼器的力学试验部分是在湖南科技大学MTS实验室,通过采用MTS-810Landmark电液伺服试验机系统进行.

磁粉离合惯质阻尼器力学试验的主要环节可以概括为:通过MTS试验机对磁粉离合惯质阻尼器施加频率和振幅可调的正弦激励,通过SPWM数字驱动电路系统对磁粉离合惯质阻尼器施加频

率和振幅可调的电流激励,通过上机位程序控制驱动电路系统启停,并通过 MTS 试验机配套的信号采集系统对试验力、位移、时间信号进行采集,通过采集的信号对磁粉离合惯质阻尼器进行力学性能分析.其中,SPWM 数字驱动电路相对于模拟电路输出交流电抗干扰性较强,频率与幅值通过程序可实现快速且稳定的调节<sup>[18]</sup>.

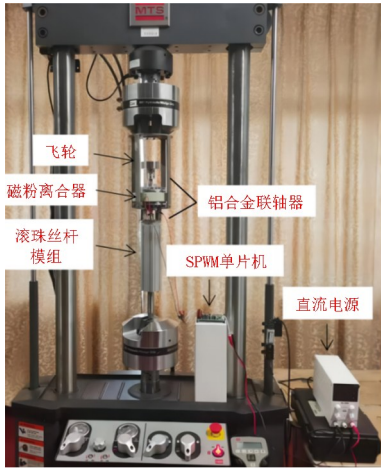


图 5 磁粉离合惯质阻尼器试验装置  
Fig.5 Test device for the inertial damper of magnetic particle clutch

磁粉离合惯质阻尼器相关参数如表 1~3 所示:

表 1 VLACT55 参数值

Table 1 Parameter values of type VLACT55

参数	数值	参数	数值	参数	数值
丝杆轴径	12 mm	丝杆长度	296 mm	最大速度	310mm/s
丝杆导程	6 mm	总质量	2.2 kg	行程	100 mm
芯杆直径	25 mm	钢球直径	6.32 mm	行进寿命	5000km

表 2 磁粉离合惯质阻尼器参数

Table 2 Parameters of the inertial damper of magnetic particle clutch

参数名称	符号	参数值
导程	$L_1/m$	0.006
滚轴丝杆	转化率	$\eta$
	转动惯量	$I_g/mg \cdot m^2$
磁粉离合器	额定力矩	$M/N \cdot m$
	额定电流	$i/A$
	力矩力臂	$l/m$
	输入轴转动惯量	$I_1/mg \cdot m^2$
	输出轴转动惯量	$I_2/mg \cdot m^2$
阻尼器初始摩擦力	$f/N$	39
质量块	质量	$m/kg$
质量块	转动惯量	$I_b/mg \cdot m^2$

表 3 磁粉离合器装置参数

Table 3 Parameters of magnetic particle clutch

参数	数值	参数	数值	参数	数值
额定扭矩	$6 N \cdot m$	线圈电阻	$13.3 \Omega$	线圈电感	$17.6 mH$
额定电流	2 A	最高转速	3600 rpm	总长度	0.132 m
额定电压	24 V	重量	3.36 kg	最大半径	0.102 m
输出轴转动惯量	0.0009 $kg/m^2$	滑差功率	750 W	滑差功率(连续)	150 w
输入轴转动惯量	0.00135 $kg/m^2$	响应时间	2ms		

根据第 2 节对磁粉离合惯质阻尼器力学性能的理论分析,为了简化实验控制与方便模型计算,对离合器台架实验测试得到的磁粉离合器激磁电流-传递扭矩特性函数进行近似处理,将其简化为一个比例函数,如公式(6).根据式(26)、式(27)特性函数可知磁粉离合器简化特性函数比例系数  $k = 1.58694$ .

$$T(i) = \begin{cases} -0.47398 + 1.58694i, & i \geq 0.5 \\ 0.32514i - 1.49089i^2 + 4.23579i^3, & 0 \leq i < 0.5 \end{cases} \quad (26)$$

### 3.2 力学模型仿真值与试验值对比

通过图 6 可知,在频率为 2Hz,振幅为 0.3mm (选择较小的外激励幅值在于消除滚珠丝杆带来的非线性干扰)的稳态正弦外激励下,通过变化装置输入交流电幅值(交流电幅值变化如图中图例所示)进行磁粉离合惯质阻尼器力学性能分析.由图可知,随着输入交流电幅值的增加,阻尼装置的最大输出力逐渐增加,由 980N 增加至 1520N.图中虚线所表示的斜率倾斜度明显,磁粉离合惯质阻尼装置负斜率越大,阻尼装置负刚度特征越明显.这反映了输入交流电幅值影响阻尼装置的负刚度,随着输入交流电幅值增加,负刚度也增大.其中,仿真图像呈现出椭圆状,这是由阻尼装置中的磁粉离合器滑差工作时摩擦耗能引起的.图 7 为在频率为 2Hz,振幅为 0.3mm 的稳态正弦外激励下,通过 MTS 数据采集系统得出阻尼装置输入不同幅值交流电时的输出力滞回曲线.将装置实验输出力滞回曲线图 7 与仿真输出力滞回曲线图 6 作比较,实验数据曲线拟合虚线斜率同样地随着输入电流变化而明显变化,但在各组电流工况下,其滞回曲线饱满度以及输出力最大值不如图 6.因此,选择其中一

组电流工况进行分析。

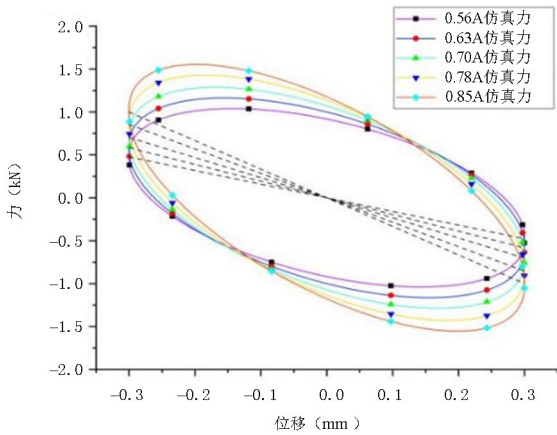


图6 不同幅值交流电下流磁粉离合惯质阻尼器仿真输出力滞回曲线

Fig.6 The output hysteresis curves of simulations of the inertial damper of magnetic particle clutch under alternating current with the different amplitude

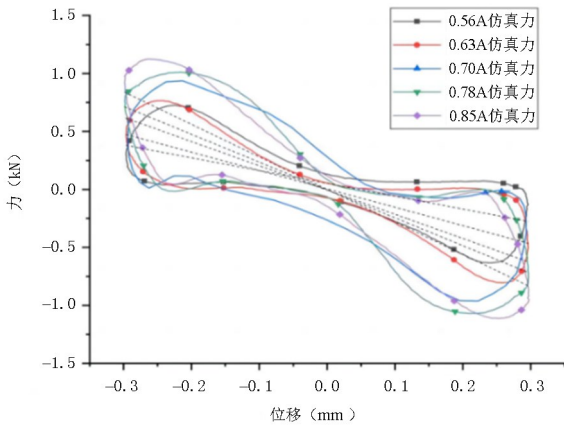


图7 不同幅值交流电下磁粉离合惯质阻尼器试验输出力滞回曲线

Fig.7 The output hysteresis curves of experiments of the inertial damper of magnetic particle clutch under alternating current with the different amplitude

如图8所示,对磁粉离合惯质阻尼器施加频率2Hz、幅值0.3mm的稳态正弦外激励并输入0.78A幅值交流电时,通过MTS数据采集系统得出装置输出力-位移滞回曲线和力的时程曲线。其中,图8(a)为输入交流电幅值为0.78A下的磁粉离合惯质阻尼装置力-位移滞回曲线的试验值和仿真值的对比,分析可得不同输入交流电幅值下实验与仿真的滞回曲线存在相似的负刚度趋势,但耗能效果相差较大。图8(b)为磁粉离合惯质阻尼装置力的时程曲线的试验值和仿真值的对比,试验装置输出力最大值为1020N,明显小于仿真数据最大输出力1360N,试验值明显表现出近零值区间,使得曲线呈现出不同于简谐规律的变化,这是磁粉离合器激

磁电流-传递扭矩特性在低电流段存在弱磁效应引起的非线性所导致的。因此,应根据离合器真实力学性质来对磁粉离合惯质阻尼器理论模型进行修正。

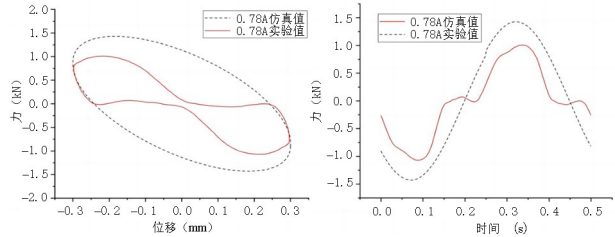


图8 在0.78A幅值交流电下力学模型仿真值与试验值对比  
Fig.8 Comparison between simulating force and experimental force under alternating current with an amplitude of 0.78 A

### 3.3 阻尼器力学模型的修正

通过公式(26)可知,磁粉离合器激磁电流-传递扭矩函数关系为由两个多项式构成的分段函数,输入交流电使得该函数变为具有周期性的复合函数。根据第2节的控制电流算法,可得到含非线性因素阻尼器力学模型的输入电流滞后相位为:

$$\varphi'(I) = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{T_1(I)L_1}{2\pi I_1 A \omega_0^2}\right) \quad (27)$$

将公式(5)、(6)以及式(24)~式(26)代入以下式,得到阻尼器修正力学模型:

$$F'_{\text{output}} = \frac{I_0}{\eta} \left(\frac{2\pi}{L_1}\right)^2 X_1 + \frac{2\pi |T_1(t)| \operatorname{sgn}[i(t)]}{\eta L_1} + f \operatorname{sgn} \cdot \dot{X}_1 \quad (28)$$

### 3.4 阻尼器修正力学模型的检验

磁粉离合惯质阻尼器在振幅为0.3mm、频率为2Hz的简谐激励下,通过阻尼器修正力学仿真模型得出的输出力仿真值与试验值对比在输入不同幅值控制电流时两者的相似性来对模型的准确性进行验证,主要从负刚度和滞回曲线面积两方面进行分析。

#### (1) 负刚度对比分析

图9展示了在振幅为0.3mm、频率为2Hz的简谐激励下,通过调节控制电流幅值磁粉离合惯质阻尼器对应输出力峰值和滞回曲线负刚度变化趋势。由图9(a)可知,电流幅值为0.56A,阻尼器轴向力为683N;电流幅值为0.63A,阻尼器最大轴向力为748N;电流幅值为0.70A,阻尼器最大轴向力为

875N;电流幅值为 0.78A,阻尼器最大轴向力为 992N;电流幅值为 0.85A,阻尼器最大轴向力为 1115N;由图 9(b)可知,电流幅值为 0.56A,阻尼器轴向力为 556N;电流幅值为 0.63A,阻尼器最大轴向力为 722N;电流幅值为 0.70A,阻尼器最大轴向力为 869N;电流幅值为 0.78A,阻尼器最大轴向力为 1002N;电流幅值为 0.85A,阻尼器最大轴向力为 1128N.由此可知,随着输入控制电流幅值的增加,阻尼器轴向力逐渐增大.此外,由图 9 中负刚度曲线可知,随着输入控制电流幅值的增加,阻尼器滞回曲线负刚度曲线有明显的增加,这反映了阻尼器负刚度也与控制电流幅值有关.

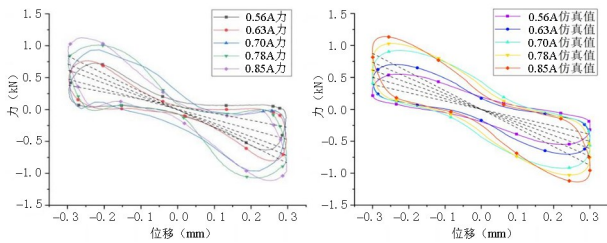


图 9 不同幅值交流电下修正力学模型仿真值与试验值对比  
Fig.9 Comparison between corrective simulating force and experimental force under alternating current with the different amplitude

负刚度即为输出力滞回曲线的斜率,本文通过 Origin 软件拟合分析求得理论负刚度与实测负刚度是将理论数据与实测数据<sup>[7]</sup>.由表 4 所示,输入不同电流幅值的阻尼装置试验负刚度实测值与修正力学模型负刚度理论值偏差基本维持在 5%左右,虽有轻微的变化,但与理论模型基本吻合.这主要是因为试验装置制机械误差与试验实际操作有关.

表 4 仿真数据与实测数据滞回曲线的负刚度对比

Table 4 Comparison of negative stiffness of hysteresis curves of simulated data and measured data

电流幅值 (A)	理论负刚度 (kN/mm)	实测负刚度 (kN/mm)	偏差 (%)
0.56	-1.29809	-1.10520	14.8
0.63	-1.67355	-1.58298	5.4
0.70	-2.04892	-2.09025	1.2
0.78	-2.45778	-2.40153	5.6
0.85	-2.91921	-2.80516	3.9

### (2)滞回曲线面积对比分析

图 10(a)展示了当施加 0.63A 幅值交流电时,磁粉离合惯质阻尼器在振幅为 0.3mm、频率为 2Hz 的简谐激励下,通过阻尼器修正力学仿真模型

得出的输出力仿真值与试验值的对比,理论面积与实际面积偏差为 7.5%.图 10(b)展示了当施加 0.70A 幅值交流电时,磁粉离合惯质阻尼器在振幅为 0.3mm、频率为 2Hz 的简谐激励下,通过阻尼器修正力学仿真模型得出的输出力仿真值与试验值的对比,理论面积与实际面积偏差为 9.6%.图 10(c)展示了当施加 0.85A 幅值交流电时,磁粉离合惯质阻尼器在振幅为 0.3mm、频率为 2Hz 的简谐激励下,通过阻尼器修正力学仿真模型得出的输出力仿真值与试验值的对比,理论面积与实际面积偏差为 1.9%.由表 5 可以看出,输出力仿真值与试验值在不同幅值交流电下的滞回曲线面积偏差基本不超过 10%,验证了所建立的磁粉离合惯质阻尼器修正力学模型的有效性.由图 10(a)~(c)可以看出,实测值滞回曲线不如理论仿真滞回曲线圆滑,这与滚珠丝杆内部钢珠机械运行机制相关.

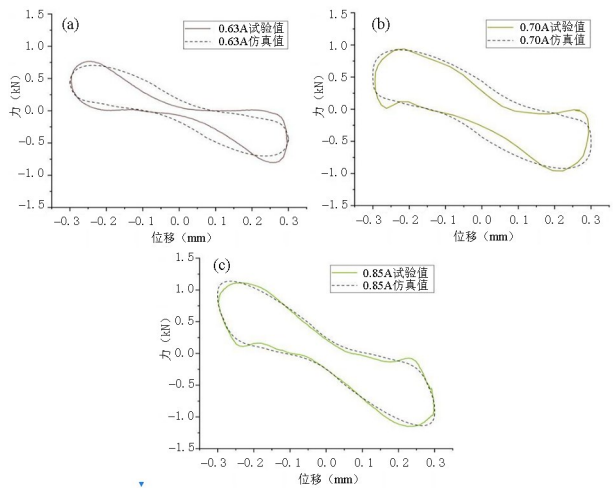


图 10 不同幅值交流电下修正力学模型仿真值与试验值对比  
Fig.10 Comparison of simulated and experimental values of modified mechanical model under different amplitude of alternating current

表 5 仿真数据与实测数据滞回曲线面积对比

Table 5 Comparison of hysteresis curve area between simulated data and measured data

电流幅值 (A)	理论面积 (N·mm)	实测面积 (N·mm)	偏差 (%)
0.56	205.3	249.1	17.6
0.63	289.0	267.3	7.5
0.70	458.5	414.5	9.6
0.78	448.7	411.7	8.2
0.85	432.4	440.9	1.9

## 4 总结

(1)通过对磁粉离合惯质阻尼器输入电流进行



控制,在理论上实现其变惯质的功能.该阻尼器通过磁粉离合器连接飞轮与滚珠丝杠,并利用磁粉离合器的滑差工作原理,使得连接飞轮与滚珠丝杠的两轴差速运转.并在该阻尼器已有的力学研究的基础上,结合磁粉离合器双轴运动特性分析,研究了一种输入电流控制算法,控制电流输入,使磁粉离合器在稳态激励下反馈受控简谐力.综合磁粉离合器阻尼器内部构造,建立了其力学模型,经分析得到在稳态激励下阻尼器等效惯质系数与控制交流电幅值呈二次线性关系,证明了电流算法控制下阻尼器等效惯质系数的可调性.

(2)通过磁粉离合惯质阻尼装置输入不同幅值交流电时,需控制输入电路相位差实现离合器全滑差工作理论分析作为指向,通过控制驱动电路频率与开启时间进行阻尼装置在不同工况下真实状态,得出了理论值和真实值在惯质(负刚度)变化上是一致的结论,但耗能效应有较大差距.通过对阻尼装置的磁粉离合器组件力学性能进行分析,对理论力学模型作出修正,并通过数据对比验证了理论模型的有效性.

## 参考文献

- [1] CHEN L, SUN I M, NAGARAJAIAH S. Cable with discrete negative stiffness device and viscous damper: passive realization and general characteristics [J]. *Smart Structures and Systems*, 2015, 15(3):627-643.
- [2] ZHOU P, LI H. Modeling and control performance of a stiffness damper for suppressing stay cable vibrations [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2015, 23(4):761-782.
- [3] LU L, DUAN Y F, SPENCER B F, et al. Inertial mass damper for mitigating cable vibration [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2017, 24(10):e1986.
- [4] SHI X, ZHU S Y. Dynamic characteristics of stay cables with inerter dampers [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 423:287-305.
- [5] LAZAR L F, NEILD S A, WAGG D J. Vibration suppression of cables using tuned inerter dampers [J]. *Engineering Structures*, 2016, 122:62-71.
- [6] 汪志昊, 郜辉, 许艳伟, 等. 惯性质量对斜拉索阻尼器减振增效作用试验研究 [J]. *振动工程学报*, 2019, 32(3):377-385.
- [7] WANG Z H, GAO H, XU Y W, et al. Experimental study on the improving effect of inertial mass on vibration control of stay cables with dampers [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2019, 32(3):377-385.(in Chinese)
- [7] 王佳鹏. 电磁惯质阻尼器的力学模型及对斜拉索减振研究 [D]. 湘潭:湖南科技大学, 2018.
- [8] WANG J P. Mechanical model of electromagnetic inerter damper and study on vibration reduction of stay cable [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2018.(in Chinese)
- [8] 杨绍普, 李韶华. 磁流变阻尼力建模及主共振研究 [J]. *动力学与控制学报*, 2004(4):64-68.
- [8] YANG S P, LI S H. Primary resonance reduction of a single-degree-of-freedom system using magneto-rheological fluid dampers [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2004(4):64-68.(in Chinese)
- [9] 郎君, 申永军, 杨绍普. 半主动控制接地式动力吸振器参数优化及性能比较 [J]. *动力学与控制学报*, 2019, 17(2):168-177.
- [9] LANG J, SHEN Y J, YANG S P. Parameter optimization and performance comparison of semi-active ground-hook control DVAS [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2019, 17(2):168-177.(in Chinese)
- [10] 朱云, 邹鸿翔, 魏克湘. 自供能智能减震器自耦合控制研究 [J]. *动力学与控制学报*, 2021, 19(5):53-58.
- [10] ZHU Y, ZOU H X, WEI K X. Self-coupling control of self-powered intelligent shock absorber [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2021, 19(5):53-58.(in Chinese)
- [11] HROVAT D. Semi-active versus passive or active tuned mass dampers for structural control [J]. *Journal of Engineering Mechanics*. 1983, 109(3): 691-705.
- [12] NI Y Q, CHEN Y, KO J M, et al. Neuro-control of cable vibration using semi-active magneto-rheological dampers [J]. *Engineering Structures*. 2002, 24(3): 295-307.
- [13] 王浩, 李爱群, 谢静, 等. 台风作用下超大跨度斜拉桥抖振响应现场实测研究 [J]. *土木工程学报*, 2010, 43(7):71-78.
- [13] WANG H, LI A Q, XIE J, et al. Field measurement of the buffeting response of a super-long-span cable-stayed bridge under typhoon [J]. *China Civil*

- Engineering Journal, 2010, 43(7):71-78.(in Chinese)
- [14] LI H, LIU M, OU J P. Negative stiffness characteristics of active and semi-active control systems for stay cables [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2008,15(2):120-142.
- [15] WEBER F, BOSTON C. Clipped viscous damping with negative stiffness for semi-active cable damping [J]. Smart Materials and Structures, 2011,20(4):045007.
- [16] 王程. 高性能车用磁粉离合器的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.  
WANG C. Study on magnetic powder clutch with high performance for vehicle [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [17] 周凯, 杨嵇森. 磁粉离合器自调整模糊 PID 励磁控制技术 [J]. 电机与控制学报, 2017, 21(2):87-93.  
ZHOU K, YANG J S. Excitation control technique of magnetic powder clutch based on self-tuning fuzzy PID [J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(2):87-93.(in Chinese)
- [18] 邢娅浪, 赵锦成, 孙世宇. 基于 STC 系列单片机的 SPWM 波形实现 [J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(12): 51-53,56.  
XING Y L, ZHAO J C, SUN S Y. Design of SPWM control waveform based on STC single chip [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2009, 28(12): 51-53,56.(in Chinese)