

文章编号 1004-924X(2019)10-2192-07

## 磁流变液控制式惯性压电旋转驱动器

温建明\*, 鲍慧璐, 沈德助, 马继杰, 文科权, 李建平

(浙江师范大学 工学院 精密机械与智能结构研究所, 浙江 金华 321004)

**摘要:**为改善惯性压电驱动器的输出性能,提高驱动器的稳定性,本文提出了一种利用压电惯性驱动与磁流变液控制共同作用,将固体-固体摩擦转换为固体-液体/固体-类固体摩擦形成定向运动的新型磁流变液控制式惯性压电旋转驱动器。分析了压电旋转驱动器的工作机理,设计制作了试验样机,搭建了试验系统并与机械控制式压电惯性驱动器进行了回退率、线性度、重复性对比试验测试。结果显示:在 1 Hz, 15 V 方波信号激励下,驱动器平均角位移为 0.46 mrad;磁流变液控制式驱动器回退率为 5.6%,机械控制式驱动器回退率为 72.2%;磁流变液控制式十步位移线性度决定系数为 0.998,残差平方和为 15.359;机械控制式决定系数为 0.985,残差平方和为 20.872;磁流变液控制式和机械控制式重复标准差分别为 0.136, 0.475。试验结果表明,磁流变液控制式惯性压电旋转驱动器回退性能、线性度、重复性均优于机械控制式压电驱动器。

**关键词:**压电驱动器;磁流变液;非对称夹持;回退率

**中图分类号:** TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192710.2192

## Piezoelectric inertial rotary actuator based on magnetorheological fluid control

WEN Jian-ming\*, BAO Hui-lu, SHEN De-zhu, MA Ji-jie, WEN Ke-quan, LI Jian-ping

(*Institute of Precision Machinery and Intelligent Structure, College of Engineering  
Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: wjming@zjnu.cn*

**Abstract:** To improve the output performance and stability of an inertial piezoelectric actuator, a novel inertial piezoelectric rotary actuator was proposed by combining piezoelectric inertial actuation and magnetorheological control technology to convert solid-solid friction into solid-liquid/solid-like-solid friction. The working principle of a piezoelectric rotary actuator was analyzed and two types of actuators are designed and fabricated. An experimental system was built to evaluate and compare the output performance of the actuators in terms of drawback rate, linearity, and repeatability. The results show that the average angular displacement of a magnetorheological controlled inertial piezoelectric rotary actuator is 0.46 mrad under an exciting voltage of 1 Hz, 15 V. Compared to a mechanical controlled piezoelectric actuator, the magnetorheological controlled inertial piezoelectric rotary actuator reduced the drawback rate from 72.2% to 5.6%. In addition, the coefficient of

**收稿日期:** 2019-03-11; **修订日期:** 2019-04-29.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No. 51507154); 浙江省自然科学基金资助项目 (No. LY18E050012, No. LY19E050010); 国家级大学生创新创业训练项目 (No. 201710345034)

determination, linearity residual sum of squares, and repeatability standard deviation are 0.9981, 15.359, and 0.136 for the actuator using a novel friction mechanism, respectively, and 0.9856, 20.872, and 0.475 for the actuator using mechanical friction, respectively. In conclusion, the drawback rate, linearity of ten-step displacement, and repeatability for the actuator using a novel magnetorheological fluid control mechanism are superior to that using mechanical friction.

**Key words:** piezoelectric actuator; magnetorheological fluid; asymmetrical clamping; drawback rate

## 1 引言

压电精密驱动器具有分辨率高、响应速度快、无电磁干扰等优点<sup>[1]</sup>,在超精密测量定位、微型机器人、精密机械加工等领域得到广泛应用。其中,惯性压电驱动器因其结构简单、行程大、易于集成化等独特优势,成为压电精密驱动领域的重要组成部分<sup>[2]</sup>。

惯性压电驱动器根据控制方式的不同,可分为电信号控制式<sup>[3-4]</sup>、机械控制式<sup>[5-6]</sup>。电信号控制式通过非对称电信号使压电振子产生非对称的惯性冲击力,与摩擦力配合实现驱动器的定向运动。机械控制式在对称电信号激励下,通过非对称的机械结构使压电振子产生非对称的惯性冲击力实现驱动器的定向驱动。2011年 Q. S. Zhang 等提出一种具有各向异性摩擦表面的新型黏滑式压电驱动器,在各向异性摩擦表面上,驱动器向前、向后运动的回退率分别为 49.9% 和 78.3%,在各向同性摩擦表面上,驱动器的回退率为 66.0%,驱动器最大输出力矩  $0.475 \text{ N} \cdot \text{mm}$ <sup>[7]</sup>。2015年程光明等提出一种机械控制式惯性压电旋转驱动器,非对称式与变摩擦力式压电驱动器的回退率分别为 73.19% 和 65.67%,非对称式与变摩擦力式的线性度残差平方分别为 0.031 与 0.063<sup>[8]</sup>。2016年陈康等提出一种具有偏置结构的非对称惯性压电旋转驱动器,其研制的驱动器回退率为 61.5%,最大输出角速度  $5.39 \text{ rad/s}$ ,最大输出力矩  $3.62 \text{ N} \cdot \text{mm}$ <sup>[9]</sup>。上述驱动器在输出力矩、步距位移、承载能力等方面具有较好的性能。但现有压电惯性驱动器定子和动子之间普遍为固体-固体接触表面,摩擦不均匀,磨损严重,回退率大,线性度和重复性有待进一步提高,尚不能直接应用于大行程高精度定位要求场合。

磁流变液具有响应迅速、无刚性冲击,粘度连续可调、易于控制等优点,被广泛地应用在离合

器、制动器、变速器、软起动等传动装置中<sup>[10-14]</sup>。陈松等结合磁流变液的流变特性以及形状记忆合金的感温特性,提出了磁流变液与形状记忆合金复合传动的原理和方法,实现了对高温减小转矩的补偿<sup>[12]</sup>。Wiltsie N 等采用永磁体开发了一种基于磁流变效应的爬行机器人<sup>[13]</sup>。Shahrivar K 等对不锈钢摩擦表面之间在磁流变效应作用下摩擦系数和磨损变化效果进行研究,结果表明磁流变液具有较好减磨效果<sup>[14]</sup>。不同于现有的压电惯性驱动器的结构和原理,本文提出了一种利用压电惯性驱动与磁流变液控制共同作用,将驱动器定子与转子接触表面间固体-固体摩擦转换为固体-液体/固体-类固体摩擦形成机构定向运动的新方法,来解决压电惯性驱动器摩擦不均匀,磨损严重,回退率大,重复性不足等缺点。设计制作了磁流变液控制式惯性压电旋转驱动器样机,搭建实验测试系统,对磁流变液控制式惯性压电旋转驱动器进行了频率特性、回退率、线性度及重复性实验测试并与机械控制式驱动器进行了对比分析。

## 2 结构设计及工作原理

磁流变液控制式惯性压电旋转驱动器结构如图 1 所示。驱动器由旋转主体、标尺、外挡板、连接板、旋转轴、轴承、轴承盖、基座底板、螺栓、钢板、摩擦盘、磁流变液及永磁铁组成。主轴与摩擦盘连接在一起;轴承盖下方的方形腔内,装有一定浓度的磁流变液,方形腔两侧钢板由导磁材料加工制作;永磁铁对称布置在方形腔两侧,连接板分别与永磁铁和轴承外圈固定,螺栓一端与轴承内圈固定,另一端与外挡板螺纹连接。压电双晶片采用非对称夹持为驱动器提供非对称的惯性冲击力矩,实现驱动器的定向旋转运动<sup>[15]</sup>。磁流变液调摩擦机构主要利用磁流变液流变效应,通过螺栓调节永磁铁到方形腔的距离改变腔内磁场强

度,进而改变磁流变液剪切应力,达到调节驱动器摩擦力的目的。此外也可以通过改变磁铁种类、尺寸及磁流变液的浓度来调节摩擦力。

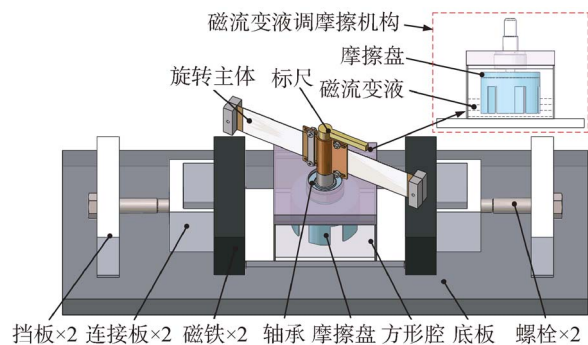


图 1 惯性驱动器结构图

Fig. 1 Structure sketch of actuator

### 3 驱动器理论分析

根据悬臂式非对称夹持压电双晶片振子的结构组成及工作原理,建立了振子驱动力矩的力学模型方程;根据磁流变液的 Bingham 宏观力学模型,建立了摩擦力矩的力学模型方程。对上述力学模型方程进行整合,计算得出驱动器输出力矩的力学模型方程。

#### 3.1 驱动器输出力矩理论分析

压电双晶片振子的力学分析图如图 2 所示。O 点表示驱动器的旋转中心;A 点表示压电双晶片铍青铜基板与主体块侧面边缘线的交点;B、C 两点分别是压电双晶片振子向上、向下摆动时的支撑点; $l_A, l_B$  分别是夹持块的长度; $l_1, l_2$  分别是压电双晶片振子向上、向下摆动时的悬臂长度;相应地, $\theta_1, \theta_2$  和  $y_1, y_2$  分别是压电双晶片向上、向下摆动时的幅值角度和幅值位移。

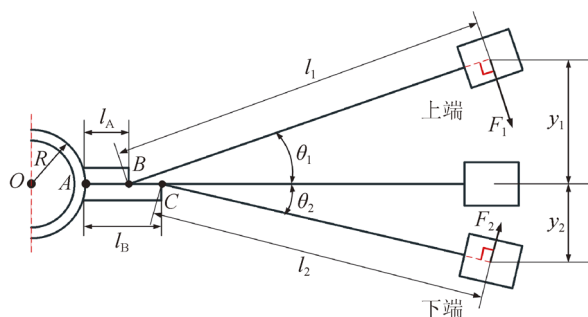


图 2 压电振子力学分析图

Fig. 2 Mechanical analysis of piezoelectric vibrator

悬臂式压电双晶片振子在弯曲过程中产生的惯性冲击力幅值为<sup>[16]</sup>:

$$F_i = \frac{9E_p I_c d_{31} V}{2tL_i} \cdot \frac{(1+B)(2B+1)}{\frac{L_i}{l_c} AB^3 + 3B^2 + 3B + 1} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{m\omega^2}{k_i}\right)^2 + \frac{c^2}{k_i^2} \omega^2}} \right] \quad (i=1, 2), \quad (1)$$

式中: $E_p$  为压电陶瓷的弹性模量; $I_c$  为压电双晶片截面惯性矩; $d_{31}$  为压电常数; $V$  为周期性电场的电压值; $t = t_m + 2t_p$ ,  $A = E_m/E_p$ ,  $B = t_m/2t_p$ ;  $t_m$  为铍青铜基板厚度; $t_p$  为压电层厚度; $E_m$  为铍青铜基板的弹性模量; $l_c$  为压电层的长度; $m$  为质量块的总质量; $\omega$  为激励信号频率; $k_i$  为压电振子运动至上下端的等效刚度系数; $c$  为压电双晶片阻尼系数。

当压电双晶片振子运动至最上端时,端部产生的惯性冲击力为  $F_1$ , 将其等效至 B 点, 可得力  $F'$  和驱动力矩  $M'$ :

$$F' = F_1, \quad (2)$$

$$M'_1 = F_1 \cdot l_1. \quad (3)$$

力  $F'$  形成的驱动力矩  $M''_1$  可表示为:

$$M''_1 = F_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot (l_A + R). \quad (4)$$

另外, 根据角度关系可得:

$$\sin \theta_1 = \frac{y_1}{l_1}, \cos \theta_1 = \frac{\sqrt{l_1^2 - y_1^2}}{l_1}, \quad (5)$$

$$\sin \theta_2 = \frac{y_2}{l_2}, \cos \theta_2 = \frac{\sqrt{l_2^2 - y_2^2}}{l_2}. \quad (6)$$

综合上述式(2)~式(6), 压电双晶片振子运动至最上端产生的驱动力矩为:

$$\begin{aligned} M_1 &= 2 \cdot (M'_1 + M''_1) = \\ &= 2F_1 \cdot [\cos \theta_1 \cdot (l_A + R) + l_1] = \\ &= 2F_1 \cdot \left[ \frac{\sqrt{l_1^2 - y_1^2}}{l_1} \cdot (l_A + R) + l_1 \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

同理, 压电双晶片振子运动至最下端产生的驱动力矩为:

$$M_2 = 2F_2 \cdot \left[ \frac{\sqrt{l_2^2 - y_2^2}}{l_2} (l_B + R) + l_2 \right], \quad (8)$$

则:

$$\begin{aligned} M_i &= 2F_i \cdot \left[ \frac{\sqrt{l_i^2 - y_i^2}}{l_i} (l_X + R) + l_i \right] \\ & \quad (i=1, X=A; i=2, X=B). \end{aligned} \quad (9)$$

#### 3.2 磁流变液调摩擦装置摩擦力矩理论分析

由宾汉流体模型可得磁流变液在外磁场作用下产生的剪切应力如下:

$$\tau_B = \tau_0 + \eta_B \frac{dv}{dy}, \quad (10)$$

其中:  $\tau_B$  表示在磁场作用下的剪切应力;  $\tau_0$  表示剪切屈服应力;  $\frac{dv}{dy}$  表示剪切速率;  $\eta_B$  表示磁场作用下流体的黏度。

本文在试验过程中采用多种不同形状的摩擦盘,为进行摩擦力矩分析,将摩擦盘简化为一个高为  $h$ ,直径为  $d$  的圆柱体的模型,  $M_f$  为驱动器的摩擦力矩,则:

$$dM_f = r\tau_B dA, \quad (11)$$

$$M_f = \pi d^2 h \tau_B / 2. \quad (12)$$

综上所述根据  $M_1, M_2, M_f$  的大小关系,可得到驱动器不同的运动状态:

(1)当  $M_1 > M_2 > M_f$  时,在电信号激励下,驱动器先向前运动一大步,而后回退一小步。

(2)当  $M_1 > M_f > M_2$  时,在电信号激励下,驱动器实现无回退的步进运动。

(3)当  $M_f > M_1 > M_2$  时,在电信号激励下,驱动器无法克服摩擦力而停止运动。

## 4 驱动器试验测试系统及样机

### 4.1 试验测试系统

惯性压电旋转驱动器的试验测试系统如图 3 所示。整个试验系统包括安捷伦 33522A 型任意波形发生器(频率范围  $1 \mu\text{Hz} \sim 30 \text{MHz}$ )、德国 PI 公司的 E-472.20 功率放大器(功率 550 W、频带 3 kHz)、基恩士公司生产的 LK-H500 激光位移传感器和 LK-H080 型激光测量头(测量范围为  $\pm 18 \text{mm}$ ,重复精度为  $0.1 \mu\text{m}$ )、DVID 精密气浮隔振台、计算机、试验样机等。在  $20^\circ\text{C}$  恒温条件下,任意波形发生器产生激励电信号,经功率放大器放大作用于试验样机,使其产生定向旋转运动。激光传感器用于测量驱动器的位移,并将位移信号发送至计算机分析处理。

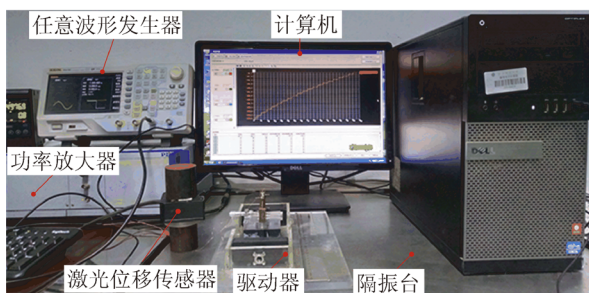
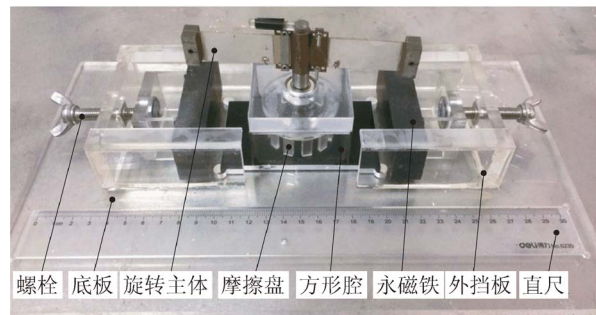


图 3 压电驱动器测试系统  
Fig. 3 Test system of actuator

### 4.2 驱动器样机

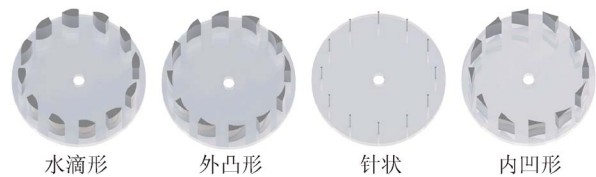
磁流变液控制式惯性压电旋转驱动器样机如图 4(a)所示,驱动器的驱动部分主要由旋转主体、旋转轴等组成,旋转主体采用非对称夹持,夹持差为  $3 \text{mm}$ <sup>[15]</sup>,质量块对称布置在压电双晶片两侧,为驱动器提供往复不同的惯性冲击力矩。螺栓用于调节永磁铁与方形腔的距离,外挡板用于限制磁铁运动的方向,直尺用于观察磁铁与方形腔的距离。方形腔内放置磁流变液,性能参数如表 1 所示,压电振子参数如表 2 所示。

为了研究不同形状的摩擦盘对驱动器输出性能的影响,设计了水滴形、外凸形、针状及内凹形摩擦盘如图 4(b)所示。此外,为了对比分析磁流变液控制的效果,设计了相同参数的机械控制式压电惯性驱动器样机如图 4(c)所示。采用微分头与弹簧控制定子与转子间固-固接触表面摩擦力。



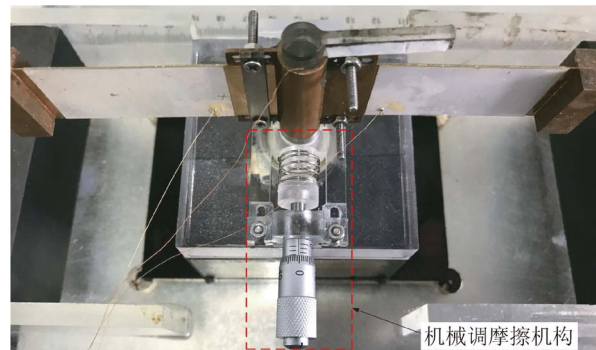
(a)磁流变液控制式驱动器样机

(a)Prototype of actuator with magnetorheological control



(b)摩擦盘

(b)Friction plate



(c)机械控制式驱动器样机

(c)Prototype of actuator with mechanical control

图 4 驱动器样机

Fig. 4 Prototype of actuators

表 1 磁流变液性能参数

Tab. 1 Performance parameters of magnetorheological fluid

产品型号	SG-MRF2035
沉降情况	软性沉降
基液	二甲基硅油
密度/( $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ )	3.09
质量固含量/%	81.24
使用温度/ $^{\circ}\text{C}$	-40~180
表观黏度/( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )	240
剪切屈服强度(1.0T)/kPa	55

表 2 压电振子参数

Tab. 2 Performance parameters of piezoelectric vibrators

元件	数量	尺寸/mm	材料
压电晶片	4	40×20×0.2	PZT-5H
铍青铜基板	2	60×20×0.2	铍青铜
质量块	4	20×8×5	黄铜
轴	1	$\Phi 8 \times 65$	45 <sup>#</sup> steel

## 5 驱动器性能试验分析

### 5.1 摩擦盘试验

夹持差为 3 mm, 激励电压频率为 1 Hz, 幅值为 30 V 的方波信号下, 驱动器分别在凹形、水滴形、外凸形、针状形的摩擦盘时对驱动器旋转位移进行了测试, 其结果如图 5 所示。结果显示, 4 种不同类型的摩擦盘均有优良的减回退效果。在激励电压频率为 1 Hz, 幅值 30 V 的方波信号下, 凹形的摩擦盘在水平沿波动最小, 驱动器振动小、性能稳定, 故实验中采用凹形摩擦盘。

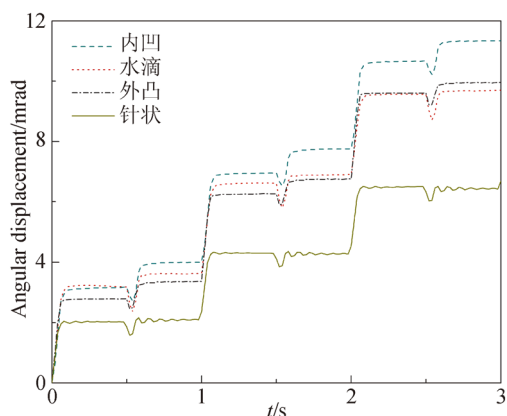


图 5 不同摩擦盘驱动器旋转位移对比

Fig. 5 Displacement comparison of rotary actuators

### 5.2 驱动器频率特性

在夹持差为 3 mm, 激励电压幅值为 15 V 的方波信号, 磁流变调摩擦机构为凹形摩擦盘条件下, 探究激励电信号频率对驱动器输出步距的影响, 进行了试验测试, 其结果如图 6 所示。随着激励电压频率的波动, 驱动器出现了两个峰值, 分别在 6 Hz 和 19 Hz 处; 驱动器输出单位角位移最大值在 19 Hz 条件下取得, 为  $1\ 364.5 \mu\text{rad}$ 。如果应用高转速要求场合, 激励电压频率可选用 19 Hz, 驱动器单位角位移达到最大; 如果应用在运动稳定精度高要求场合, 激励电压频率可选用 1 Hz, 此时驱动器分辨率高, 性能稳定。

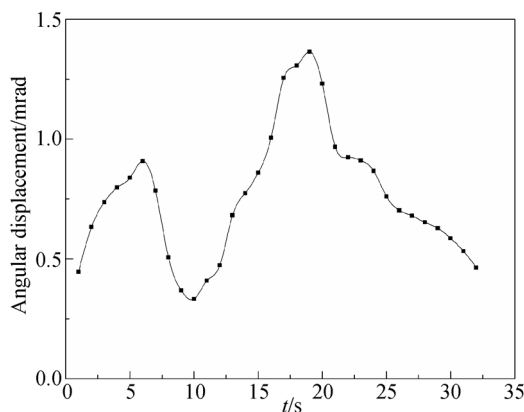


图 6 驱动器频率特性曲线

Fig. 6 Frequency-dependent characteristics

### 5.3 驱动器回退特性

回退率是压电惯性驱动器的重要性能参数, 计算方式为  $n = \text{后退位移} / \text{前进位移}$  (一个方波周期信号内); 为定量地分析不同类型摩擦对驱动器回退性能的影响, 固定夹持差为 3 mm, 固定激励电压为频率 1 Hz, 幅值 15 V 方波信号; 在磁流变调摩擦机构 (液体-固体/固体-类固体摩擦) 和固-固摩擦的作用下, 对驱动器的旋转位移进行了测试, 其结果如图 7 所示。结果表明, 与机械控制式驱动器相比, 磁流变控制式驱动器具有较大的输出位移, 回退率明显减小, 有利改善驱动器的输出性能。通过对数据进行整理计算得出: 磁流变液控制式回退率  $n_1 = 5.6\%$ ; 机械控制式回退率  $n_2 = 72.2\%$ 。

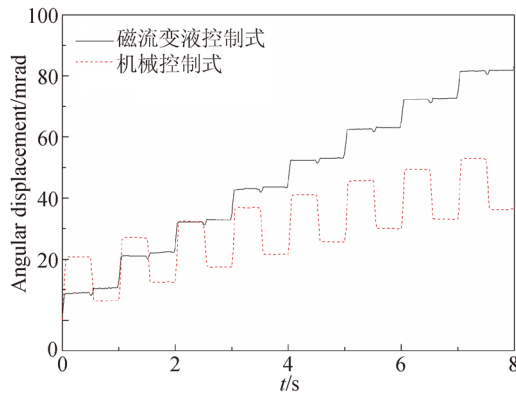


图 7 驱动器旋转位移对比

Fig. 7 Angular displacement of actuators

### 5.4 驱动器线性度

线性度是衡量驱动器输出性能的重要指标之一。固定夹持差为 3 mm,激励电压为频率 1 Hz、幅值 15 V 的方波信号,对两种驱动器分别进行了旋转位移测试,得到驱动器在运动 10 步时的旋转位移曲线,如图 8 所示。对实验数据进行回归线性分析,得到磁流变液控制式 10 步位移线性度决定系数为 0.998,残差平方和为 15.359;机械控制式决定系数为 0.985,残差平方和为 20.872。结果表明,与机械控制式相比,磁流变液控制式驱动器有更好的线性度。

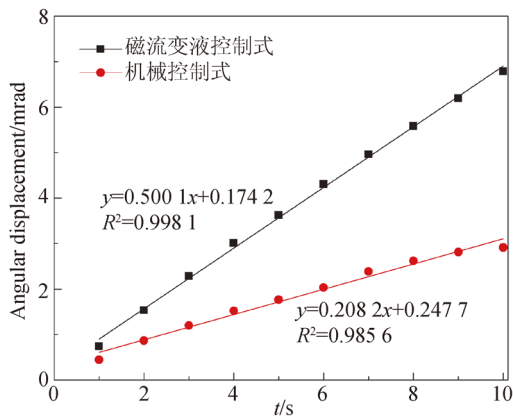


图 8 驱动器单步线性度曲线

Fig. 8 Linearity curves of singular displacement

### 5.5 驱动器重复性

固定夹持差为 3 mm,激励信号为频率 1 Hz,幅值 15 V 的方波信号,对两种驱动器输出单步位移重复测量 8 次,如图 9 所示。可以看出,相比于机械控制式驱动器,磁流变液控制式驱动器有更

稳定的位移输出,平均角位移为 0.46 mrad。

为评价驱动器重复性,可用公式(13)计算重复性标准偏差:

$$x_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i - \bar{X}}{n-1}} \quad (13)$$

经计算得到,磁流变液控制式驱动器重复性标准偏差为 0.136;机械控制式驱动器重复性标准偏差为 0.475。由此可知,基于磁流变摩擦控制式驱动器的重复性优于机械控制式驱动器。

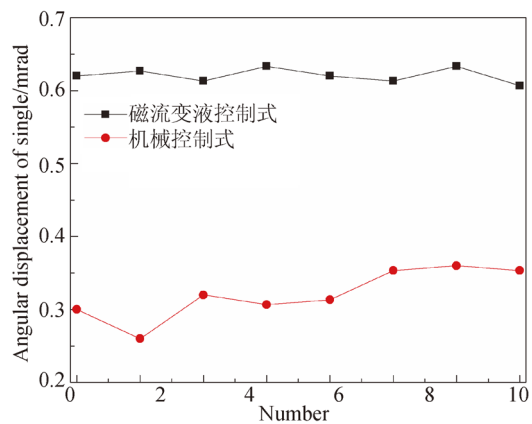


图 9 驱动器重复性测试

Fig. 9 Repeatability characteristics of actuator

## 6 结 论

为改善惯性压电驱动器的输出性能,提高驱动器的稳定性,发挥磁流变液与压电陶瓷两种智能材料的各自优势,提出了一种利用压电惯性驱动与磁流变液控制共同作用,将固体-固体摩擦转换为固体-液体/固体-类固体摩擦形成定向运动的新型磁流变液控制式惯性压电旋转驱动器。设计制作了一种磁流变液控制式和机械控制式惯性压电旋转驱动器样机,搭建实验测试系统并进行了对比测试分析。实验结果显示,与机械控制式驱动器相比,磁流变液控制式驱动器能有效减小驱动器的回退率(由 72.2%减少到 5.6%),提高驱动器的线性度和重复性。这表明磁流变液具有较好的阻尼和减磨效果,降低压电振子振动过程中的刚性冲击,有效降低磨损,提高驱动器稳定性和可靠性,为通过不同智能材料结合提高驱动器输出性能提供了新思路。

## 参考文献:

- [1] BOSSAVIT A. On modelling electrets and piezoelectric actuators [J]. *International Journal of Numerical Modelling Electronic Networks Devices and Fields*, 2014, 27(3):444-449.
- [2] 胡意立. 摩擦力可调式非对称惯性压电旋转驱动器的研究 [D]. 杭州:浙江师范大学, 2015.  
HU Y L. *Research on an Asymmetrical Piezoelectric Inertial Rotary Actuator with An Adjustable Friction Function* [D]. Hangzhou: Zhejiang Normal University, 2015. (in Chinese)
- [3] MAZEIKA D, VASILJEV P. Linear inertial piezoelectric motor with bimorph disc [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 36(1):110-117.
- [4] CHEN W M, LIU T S. Modeling and experimental validation of new two degree-of-freedom piezoelectric actuators [J]. *Mechatronics*, 2013, 23(8):1163-1170.
- [5] HE L G, ZHANG Q, PAN C L, *et al.*. Piezoelectric motor based on synchronized switching control [J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2013, 197(1):53-61.
- [6] 程光明, 陈康, 温建明, 等. 具有偏置结构的非对称惯性压电旋转驱动器 [J]. *光学 精密工程*, 2016, 24(9):2208-2216.  
CHENG G M, KANG C, WEN J M, *et al.*. Asymmetrical inertial piezoelectric rotary actuator with bias unit [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016. (in Chinese)
- [7] ZHANG Q S, CHEN X B, YANG Q, *et al.*. Development and characterization of a novel piezoelectric-driven stick-slip actuator with anisotropic-friction surfaces [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 61(9-12):1029-1034.
- [8] 程光明, 邢春美, 温建明, 等. 机械控制式惯性压电旋转驱动器 [J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(12):3364-3370.  
CHENG G M, XING CH M, WEN J M, *et al.*. Mechanical controlled piezoelectric inertial rotary actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(12):3364-3370. (in Chinese)
- [9] CHEN K, WEN J, CHENG G, *et al.*. An asymmetrical inertial piezoelectric rotary actuator with the bias unit [J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2016, 251:179-187.
- [10] SATO Y. Power-saving magnetizing device for magnetorheological fluid control using permanent magnet [J]. *Magnetics IEEE Transactions on*, 2014, 50(11):1-4.
- [11] 杨健健, 晏华, 代军, 等. 磁流变液材料的性能与应用综述 [J]. *化工进展*, 2017, 36(1):247-260.  
YANG J, YAN Y, DAI J, *et al.*. A review on magnetorheological fluid: properties and applications [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017. (in Chinese)
- [12] 陈松. 热效应下磁流变液与形状记忆合金复合传动理论分析及应用 [D]. 重庆:重庆大学, 2014.  
CHEN S. *Analysis and Application of Composite Transmission Theory of MR Fluid and Shape Memory Alloy under Thermal Effect* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [13] WILTSIE N, LANZETTA M, IAGNEMMA K. A controllably adhesive climbing robot using magnetorheological fluid [C] *IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications*. IEEE, 2013:91-96.
- [14] SHAHRIVAR K, ORTIZ A L, VICENTE J D. A comparative study of the tribological performance of ferrofluids and magnetorheological fluids within steel-steel point contacts [J]. *Tribology International*, 2014, 78(4):125-133.
- [15] 张海滨. 变摩擦式非对称夹持惯性压电旋转驱动器研究 [D]. 兰州:兰州交通大学, 2014.  
ZHANG H B. *Research on Piezoelectric Inertial Rotary Actuator Utilizing Asymmetrical Gripper with Variable Friction* [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [16] 程光明, 李新辉, 张海滨, 等. 悬臂式压电双晶片振子夹持长度变化对其动态特性的影响 [J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(5):1296-1303.  
CHENG G M, LI X H, ZHANG H B, *et al.*. Effect of different clamping lengths of cantilever bimorph on its dynamic characteristics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5):1296-1303. (in Chinese)

## 作者简介:



温建明(1980—),男,河北承德人,博士,副教授,2003年、2006年、2009年于吉林大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事压电驱动和控制技术研究。E-mail: wjming@zjnu.cn



鲍慧璐(1996—),男,浙江金华人,硕士研究生,2018年于浙江师范大学获得学士学位,主要从事压电驱动和控制技术研究。E-mail: huilubao@163.com