

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

# 新型惯性式压电驱动机构的研究

曾 平,温建明,程光明,吴博达,杨志刚

(吉林大学 机械科学与工程学院,吉林 长春 130025)

**摘要:**基于控制移动机构和支撑面之间摩擦力的方法,提出了新型惯性冲击式压电陶瓷驱动机构的研究方案。分析了驱动机构的工作原理,驱动电压与驱动力、位移之间的关系,设计、制做了可实现直线往复运动的压电微型驱动器结构,并作了相关的性能测试。实验结果表明,采用简单的对称信号波形能驱动机构运动。直线驱动器最高速度可达 1 mm/s,最大步长分辨率为 20 nm,最大承载能力为 1 000 g。

**关键词:**PZT;压电驱动器;微驱动器;惯性;摩擦

**中图分类号:**TH703.6 **文献标识码:**A

## Research on novel inertial piezoelectric actuator

ZENG Ping WEN Jian-ming CHENG Guang-ming, WU Bo-da, YANG Zhi-gang

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** Based on controlling the orderly changes of the PZT moving mechanism and friction between supporting faces in mechanical way, a kind of inertial piezoelectric actuator was proposed. The relationship between the driving voltage and the driving force and the distance were analyzed, the structure of a new inertial piezoelectric actuator that can realize single dimension reciprocating motion was designed and manufactured. The experimental results show that the simple associated symmetry electrical signal can provide stable stepping movement with the speed of 1 mm/s, high resolution of 20 nm and maximum loading capacity of 1 000 g, it is expected that the proposed actuator will be widely applied to precision industry.

**Key words:** PZT; piezoelectricity actuator; microactuator; inertial drive; friction

## 1 引言

微驱动器作为微机械的核心部件,在微小机器人的关节驱动、微小光盘、磁盘驱动以及微小航天仪器中有着广泛的应用前景,并在一定程度上成为衡量 MEMS 发展水平的重要标志。微驱动

器的驱动方式可分为两种,其一是运用“场”力致动;其二是运用材料本身的性能变化产生的微小变形来驱动。目前微机械采用的驱动方式主要有静电驱动器、压电驱动器、光驱动器、形状记忆合金(SMA)驱动器、电磁驱动器以及热驱动器等。压电驱动的工作原理主要是基于压电体的逆压电效应,即当压电体受电场作用时会产生形变。与

其他类型的驱动方式相比,压电驱动可以实现微米、纳米量级的位移或运动。同时,压电驱动机构具有体积小、位移分辨率及定位精度高、线性好、响应特性好、易于控制等优点。惯性冲击式压电驱动机构具有压电机构的结构特点,同时利用压电元件反应速度快的特性,通过惯性力实现驱动作用,因此受到有关研究人员的关注。

本文在分析了目前惯性冲击式压电驱动机构研究现状的基础上,提出通过控制移动机构和支撑面之间摩擦力的方法,形成新型惯性冲击式压电驱动机构的设想,并设计研制了实验装置,进行了试验研究。

## 2 惯性冲击式压电驱动器分类

惯性冲击式压电驱动器由压电叠堆或单/双压电片致动。按实现方式的不同,可将惯性冲击式压电驱动器分为两类:(1)利用电信号控制实现机构的定向运动。其工作原理是通过电路系统产生的非对称波形(比如锯齿波),使压电移动机构中的压电驱动元件以快速伸长变形(产生较大的惯性冲击力)、缓慢收缩变形(惯性力相对较小);或者缓慢伸长变形、快速缩短变形的运动方式,改变不同运动方向的惯性驱动力(移动机构的驱动力),实现移动机构沿规定方向运动的工作方式。(2)控制移动机构和支撑面之间摩擦力,形成新型惯性冲击式压电移动机构。通过有序改变移动机构和支撑面之间正压力,相应使摩擦力改变,并和惯性冲击力方向的变化有机结合,形成机构的定向移动。

目前国内外关于压电惯性驱动的研究基本都属于第一类驱动器,该类型驱动器所施加的电信号大多数为锯齿波,利用通过改变锯齿波的上升沿与下降沿的时间比来控制驱动元件的快速伸长和缩短,达到控制驱动机构的运动,所以其电源结构复杂,不易于进行控制。本文提出通过机械方式控制机构与支撑面的摩擦力实现运动,所需的电信号为对正弦波或是方波,易于产生和实现控制。该驱动器结构简单,驱动原理新颖,运动性能稳定,具有很高的研究价值及应用前景。

## 3 新型惯性压电驱动机构的理论分析

### 3.1 机构的结构模型和工作原理

提出的压电惯性驱动机构简图如图 1。

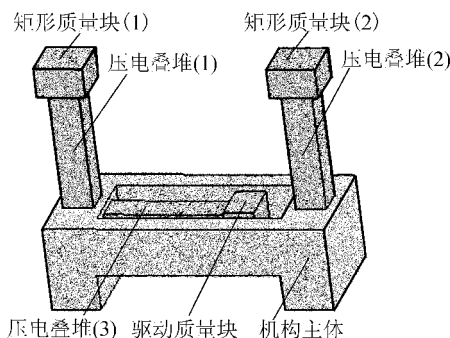


图 1 驱动器的结构简图

Fig. 1 Structure of precision actuator

图 1 中压电叠堆为日本 NEC-TOKIN 公司生产的 AE0505D16 型产品;矩形质量块用来提供改变正压力的惯性冲击力;驱动质量块以提供机构运动的驱动力。

工作时压电叠堆元件(1)、(2)的伸长、缩短运动将改变机构前后支撑足和地面之间的正压力;压电叠堆(3)使机构产生前后方向的惯性力;当机构在压电叠堆的作用下产生向前运动的驱动力时,如压电叠堆元件(1)、(2)使支撑面的正压力减小,相应摩擦力减小,机构将产生前进运动;当机构在压电叠堆的作用下产生向后运动的驱动力时,如压电叠堆元件(1)、(2)使支撑面的正压力增加,相应摩擦力增加,机构将不运动或产生位移很小的后退运动。一个运动周期,机构将产生先前的一个位移,在电信号的不断作用下,机构将产生宏观的前进运动。如果信号相位相反,机构将产生后退运动。

### 3.2 压电叠堆变形量

压电叠堆由多片压电陶瓷组成,在机械上串联,在电路上并联,工作时每片陶瓷上的电压相同。由于极化方向是沿压电叠堆的轴线方向,因此微位移器位移的总变形量  $\Delta l$  相当于所有单片压电陶瓷变形量  $\Delta \delta$  的总和。

$$\Delta l = n \Delta \delta = E d_{33} l, \quad (1)$$

式中  $n$  ——压电陶瓷片数,  $n = l / \delta$

$l$  ——压电叠堆长度

$\delta$ ——压电陶瓷片厚度

$E$ ——场强,  $E=U/\delta$

$U$ ——压电陶瓷片所加电压

$d_{33}$ ——压电常数

### 3.3 压电叠堆等效质量的计算

压电叠堆等效质量是针对压电叠堆在伸缩时等效惯性力而言的。如图 2 所示, 长度为  $l$  的压

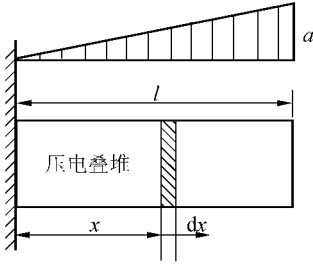


图 2 压电叠堆等效质量计算示意图

Fig. 2 Figure of piezoelectric stack equivalent mass

电叠堆其右端的加速度为  $a$ , 左端为 0, 在长度方向上加速度呈线性分布。叠堆实际质量为  $M$ , 等效质量为  $M_p$ , 则压电叠堆的惯性力为:  $\int_0^l a \frac{M}{l^2} x dx$ , 以等效质量来计算的惯性力为:  $M_p a$ 。

令二者相等, 即:

$$\int_0^l a \frac{M}{l^2} x dx = M_p a, \quad (2)$$

由上式可以解得  $M_p = \frac{1}{2} M$ , 即压电叠堆等效质量为其实际质量的 1/2。

### 3.4 压电机构的运动分析

当压电叠堆施加对称信号正弦波或是方波时, 驱动质量块和压电叠堆(3)产生的冲击力  $F$  为:

$$F = m_F a_F + m_E a_E = (m_F + \frac{1}{2} m_E) a_F, \quad (3)$$

其中  $a_E$ 、 $m_E$  和  $a_F$ 、 $m_F$  分别代表压电叠堆(3)和驱动质量块的加速度、质量, 且  $a_F = \Delta l''_F$ 。

同理, 质量块(1)、压电叠堆(1)和质量块(2)、压电叠堆(2)对驱动器产生的冲击力分别为  $F_1, F_2$ :

$$F_1 = (m_A + \frac{1}{2} m_B) a_B, \quad (4)$$

$$F_2 = (m_C + \frac{1}{2} m_D) a_D, \quad (5)$$

其中  $m_A$ 、 $m_B$ 、 $m_C$ 、 $m_D$  分别代表质量块(1)、压电叠堆(1)和质量块(2)、压电叠堆(2)的质量,  $a_B$ 、

$a_D$  为压电叠堆(1)、压电叠堆(2)的加速度, 且有  $F_1 = F_2$ 、 $a_B = a_D = \Delta l''_B$ 。

设  $\mu$  为驱动器与接触面的摩擦系数,  $m$  为驱动器的总质量, 即  $m = 3m_E + 2m_C + m_F + m_G$ , 所以由式(4)、(5)可知当压电叠堆快速伸长和快速缩短时驱动器对接触面的正压力分别为  $Q_1, Q_2$ :

$$Q_1 = mg + F_1 + F_2 = mg + 2F_1, \quad (6)$$

$$Q_2 = mg - F_1 - F_2 = mg - 2F_1. \quad (7)$$

压电叠堆伸长和缩短时驱动器与接触面的摩擦力为  $f_1, f_2$ :

$$f_1 = \mu Q_1 = \mu(mg + 2F_1), \quad (8)$$

$$f_2 = \mu Q_2 = \mu(mg - 2F_1). \quad (9)$$

根据  $F_1$ 、 $f_1$ 、 $f_2$  值的不同, 驱动器可产生三种运动情况:

(1) 当  $F_1 > f_1, f_2$  时, 机构将产生向前、向后的水平运动;

(2) 当  $f_2 < F_1 < f_1$  时, 机构将从原来的静止位置持续地水平向前或向后运动;

(3) 当  $F_1 < f_1, f_2$  时, 机构的驱动力无法克服摩擦力, 保持静止不动;

那么可以通过选择合适的参数使得  $F_1$ 、 $f_1$ 、 $f_2$  的值满足  $f_2 < F_1 < f_1$ , 此时当压电叠堆(1)、(2)与压电叠堆(3)施加相同相位的对称波形(方波)时, 摩擦力  $f_1, f_2$  对应的驱动叠堆(3)的状态是快速伸长而产生的向前的冲击力、快速缩短产生的向后的冲击力, 由于此时  $f_2 < F_1 < f_1$ , 所以机构水平相后运动; 同理当叠堆(1)、(2)与叠堆(3)施加反向的方波时, 机构水平向前运动。

## 4 惯性压电驱动机构的实验研究

### 4.1 实验设备

AG1200 型四通道可编程信号发生器, LC2400A 型非接触精密激光测位仪, CF5220 多功能快速傅里叶分析仪, 可调式功率放大器和精密气浮隔振台等构成测试系统。

测试系统框图如图 3:

### 4.2 直线驱动样机

图 4 为直线驱动样机照片。机构外形尺寸约为  $46 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ , 总质量为  $38.9 \text{ g}$ , 压电叠堆 3 个, 尺寸  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , 质量为  $4.9 \text{ g}$ , 驱动质量块尺寸  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ , 质量为  $4 \text{ g}$ 。

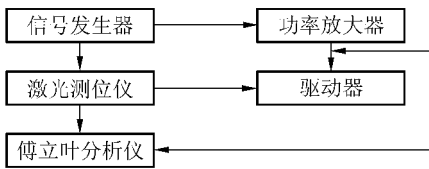


图 3 试验测试系统框图

Fig. 3 Frame of experimental test system

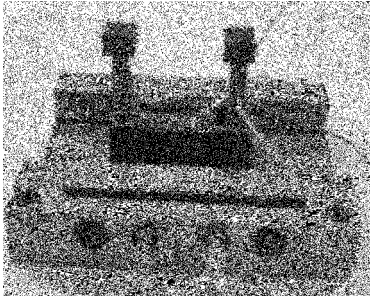
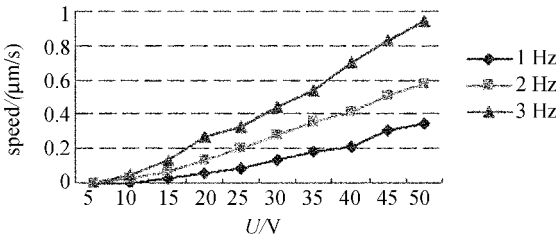


图 4 直线驱动机构照片

Fig. 4 Photograph of precision actuator

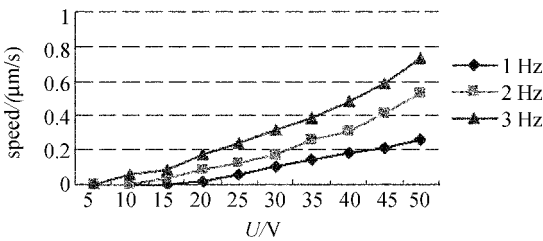
### 4. 3 驱动器正、反向运动速度曲线

从图 5 可以看出,当驱动叠堆和改变正压力



(a) 驱动器正向运动速度与驱动信号电压关系

(a) Relationship between forward movement velocity and applied amplitude



(b) 驱动器反向运动速度与驱动信号电压关系

(b) Relationship between backward movement velocity and applied amplitude

图 5 驱动器速度与电压、频率关系

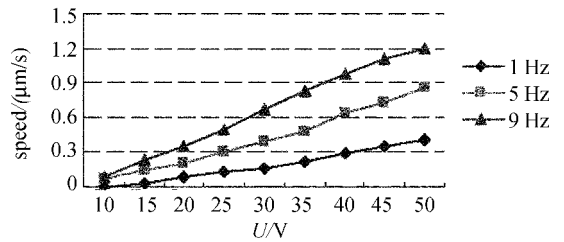
Fig. 5 Movement velocity affected by applied voltage and frequency

叠堆所施加的信号相位差为 180°时,机构正向运动,当所施加的信号相位差为 0 时,驱动器反向运动。

### 4. 4 驱动器速度和电压、频率之间的关系

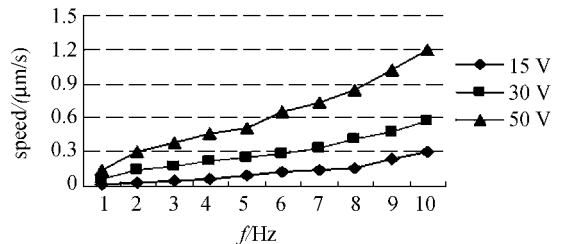
分别测试了驱动器样机在固定驱动电信号电压下,运动速度与驱动信号频率的关系,以及在固定驱动电信号频率下,运动速度与驱动电信号电压之间的关系。

图 6(a)所示为驱动器样机在固定电信号频率下,机构运动速度与驱动电信号电压的关系曲线。由试验结果得出驱动器的运动速度随电压的变化大致成线性关系,即运动速度随电压的增大而增大。



(a) 驱动器运动速度与驱动信号电压关系

(a) Relationship between movement velocity and applied amplitude



(b) 驱动器运动速度与驱动信号频率关系

(b) Relationship between movement velocity and applied signal frequency

图 6 驱动器速度与电压、频率关系

Fig. 6 Movement velocity affected by applied signal voltage and frequency

图 6(b)所示为驱动器样机在固定的电信号电压下,机构的运动速度与驱动电信号频率之间的关系,由试验结果可知驱动器运动速度随驱动电信号的频率的增大也线性增大。

### 4. 5 驱动器样机承载性能测试

图 7 是对驱动器在承载 1 000 g 重物情况下

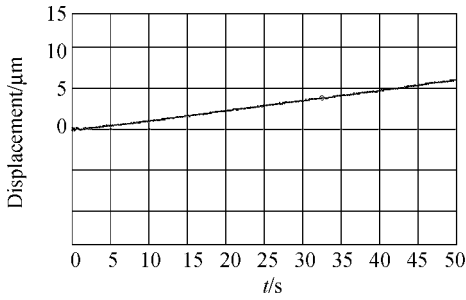


图 7 驱动器承载性能曲线

Fig. 7 Curve of precision actuator loading capacity

的性能测试,试验结果表明该驱动器具有良好的承载能力,同时还能保持平稳的运动精度,其运动

位移曲线直线度很好。

## 5 结 论

提出了通过机械学方式控制移动机构和支撑面之间的摩擦力的方法,形成新型惯性冲击式压电移动机构的研究方法。实验结果总体与理论分析一致,即速度随电压、频率的升高而增加,进而也说明了方案的可行性。

该驱动器性能稳定、步距均匀、承载能力较强,可以应用于不同的场合。

## 参考文献:

- [1] LIU Y T, TOSHIRO H. Precision positioning device utilizing impact force of combined piezo-pneumatic [J]. *Asmetransactions on Mechatronics*, 2001, 6(4): 467-473.
- [2] 孙立宁,刘品宽,吴善强,等. 管内移动微型机器人研究与发展现状[J]. *光学 精密工程*, 2003, 11(4): 326-332.  
SUN L N, LIU P K, WU SH Q, *et al.* Status and development of in-pipe micro robots[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(4): 326-332. (in Chinese)
- [3] KIMSH K. A precision linear actuator using piezoelectrically driven friction force [J]. *Mechatronics*, 2001, 11(11): 969-985.
- [4] ASANO M, MATSUOKA T, OKAMOTO H, *et al.* Study on micromobile machine with piezoelectric driving force actuator[C]. *IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation*, 1995: 2955-2960.
- [5] 华顺明,程光明,阚君武,等. 压电精密位移驱动器的研究进展[J]. *压电与声光*, 2004, 26(3): 192-195.  
HUA SH M, CHENG G M, KAN J W, *et al.* The current research on the piezoelectric actuators for precision displacement [J]. *Piezoelectric and Acoustooptics*, 2004, 26(3): 192-195. (in Chinese)
- [6] TOSHIYUKI M, MOTOMU A, SETSUYA M, *et al.* Improvement of micro mobile machine with piezoelectric driving force actuator[C]. *Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 1995: 211-217.
- [7] LIU Y T, WANG C W. A self-moving precision positioning stage utilizing impact force of spring-mounted piezoelectric actuator [J]. *Sensors and Actuators A*, 2002, 102: 83-92.
- [8] 迟冬祥,颜国正,丁国清. 基于惯性-摩擦原理的 PZT 驱动四自由度微驱动器的研究[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9(2): 135-138.  
CHI D X, YAN G ZH, DIN G Q. Inertial-friction based 4 D. O. F. microactuator driven by PZT [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(2): 135-138. (in Chinese)

作者简介:曾平(1957—),女,吉林长春人,吉林大学机械科学与工程学院,教授,主要研究方向为机械设计、压电驱动与控制技术。