

文章编号 1004-924X(2008)01-0082-05

改变正压力的惯性式压电旋转机构

温建明,程光明,曾平,杨志刚

(吉林大学机械科学与工程学院,吉林长春130025)

摘要:提出了通过机械方式控制压电移动机构和支撑面之间摩擦力的有序变化来形成有规律的新型惯性式压电旋转机构的研究方案。设计了旋转机构的结构模型,分析了机构的运动原理,建立了机构的动力学模型。应用现代控制理论,利用 Matlab 对机构进行了运动学仿真,得到了机构位移和速度仿真曲线。设计、制作了旋转机构样机,并进行了相关的性能测试。试验结果表明,研制的旋转机构能实现大行程(360°)、高分辨率($15\ \mu\text{rad}$)、高转速($0.26\ \text{rad/s}$)且运动性能稳定。该旋转机构在精密运动、微操作、光学工程、精密定位等精密工程中有广阔的应用前景。

关键词:压电旋转机构;惯性驱动;摩擦;微驱动器

中图分类号:TP273;TN384 **文献标识码:**A

Inertial piezoelectric rotary actuator based on changing positive pressure

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

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

Abstract: By controlling the ordered changes of the PZT moving mechanism and positive pressure between supporting faces in mechanical way, a new kind of inertial piezoelectric rotary actuator was proposed. The structural model of a rotary actuator was designed, the moving principle and the performance of the actuator were analyzed and a dynamic formulation of inertial actuator was established using Matlab software. Based on modern control theory, the kinetic simulation of the actuator was carried out to get the displacement and speed simulation curves of the actuator, and the prototype of new inertial piezoelectric rotary actuator was designed and manufactured. The experimental results show that the developed actuator is characterized by large travel (360°), good resolution ($15\ \mu\text{rad}$), high speed ($0.26\ \text{rad/s}$), and work stability. It can be applied in the field of micromanipulation and precision engineering, such as precision driving and positioning, optics engineering, etc.

Key words: piezoelectric rotary actuator; inertial driving; friction; microactuator

收稿日期:2007-04-16;修订日期:2007-07-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50475010);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20050183020)

1 引言

近些年来,在光电产品装配、精密器件微制造和表面原子级测量等领域,以压电元件为核心的高精度定位驱动器得到了广泛的应用^[1-8]。其中,利用压电元件动态特性的惯性式驱动器在精密驱动领域已经发展为一项独特的驱动形式。例如:超真空用精密位移装置、微型机器人手臂、扫描隧道显微镜和铅笔大小的放电装置。基于惯性原理的产品化装置如:微机械的自动装配装置、医用细胞操作装置。

目前国内外研制的惯性驱动器普遍采用压电叠堆位驱动元件,通过施加非对称波形信号(锯齿波)来实现驱动元件的快速伸长和缓慢缩短,从而使机构连续运动。这种驱动器所需信号产生电路复杂,不易于控制。

本文在分析了目前惯性式压电驱动机构研究现状的基础上,提出了通过控制移动机构和支撑面之间的摩擦力来形成一种新型的惯性式压电旋转机构的方法。该驱动机构结构简单,驱动原理新颖,驱动信号采用对称性波形,易于产生和控制。

2 结构原理

理论上讲,只要机构的惯性力不通过机构的质心,机构就会产生偏转力矩,推动机构转动。但在实际应用时,必须解决两个问题:一是机构如何获得足够大的惯性力矩,使得机构克服摩擦力矩产生运动;二是如何保持机构的平衡和运动方向的单一性。基于以上考虑,在进行旋转机构设计时,选取两个压电叠堆对称布置,新型惯性式压电旋转机构的结构模型见图 1。

旋转机构工作时,在对称电信号的激励下,压电叠堆产生快速变形,由于压电叠堆的安装位置和地面呈一定角度(由三角块调整,如图 1 所示),压电叠堆产生的惯性冲击力 F ,可以分解为水平驱动力 $F_1 = F \sin \alpha$ 和垂直压力 $F_2 = F \cos \alpha$,两个压电叠堆在水平面的投影方向相反,于是水平冲击力形成转矩,垂直压力将改变驱动机构和支撑面之间的摩擦力,通过水平冲击力和垂直压力两者有序结合,将使机构形成单方向的旋转运动。

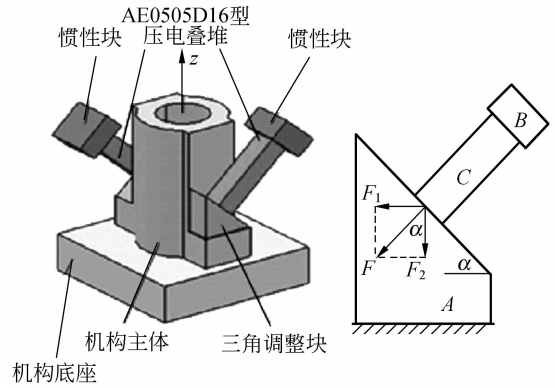


图 1 旋转机构结构简图

Fig. 1 Sketch of the rotary actuator

3 动力学模型

为了能够定量的分析驱动器的动态特性,根据惯性压电旋转机构的运动机理,建立了如图 2 所示的动力学模型。

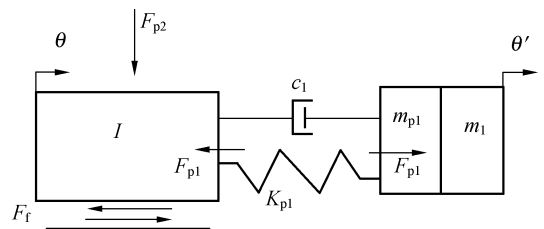


图 2 惯性旋转机构的动力学模型

Fig. 2 Dynamic model of inertial actuator

根据动力学模型,建立了惯性压电旋转机构的动力学方程:

$$\begin{cases} (m_1 + m_p) L \frac{d^2 \theta'}{dt^2} = k_{p1} (\theta L - \theta' L) - c_1 L \left(\frac{d\theta'}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \right) + F_{p1} L \\ I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = k_{p1} (\theta' L - \theta L) - c_1 L \left(\frac{d\theta}{dt} - \frac{d\theta'}{dt} \right) + F_f L - F_{p1} L \end{cases} \quad (1)$$

式中: I —机构主体的惯性矩;

m_{p1} —压电元件 C 的等效质量;

m_1 —惯性块 B 的质量;

k_{p1} —压电元件 C 的等效刚度;

c_1 —压电元件 C 的阻尼;

F_f —机构主体与底座之间的摩擦力;

θ, θ' —机构主体 A 的位移、速度;

F_{p1}, F_{p2} —压电元件 C 的激励力水平、垂直分力。

压电元件的激励力可由式(2)给出:

$$F_p = k_{pl} \alpha d_x U_p(t), \quad (2)$$

式中: α —压电元件的线性伸缩系数;

$U_p(t)$ —压电元件信号;

d_x —压电常数。

4 动力学仿真

4.1 状态方程

由式(1)可以得出系统的状态方程:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{X} —系统的状态矢量;

\mathbf{u} —系统的输入矢量;

\mathbf{A} —系统的状态矩阵;

\mathbf{B} —系统的输入矩阵;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_{pl}}{m_1 + m_p} & -\frac{c_1}{m_1 + m_p} & \frac{k_{pl}}{m_1 + m_p} & \frac{c_1}{m_1 + m_p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_{pl}L}{I} & \frac{c_1L}{I} & -\frac{k_{pl}L}{I} & -\frac{c_1L}{I} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_1 + m_p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{L}{I} & 0 & \frac{L}{I} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{u} = [0 \quad F_{pl} \quad 0 \quad F_f];$$

$$\mathbf{X} = [\theta' \quad \dot{\theta}' \quad \theta \quad \theta'];$$

4.2 系统的摩擦力模型

根据驱动机构的工作原理,惯性块快速伸缩产生的惯性力的大小和方向不断变化,机构主体与支撑面之间的摩擦力也随之变化。当机构主体与支撑面之间相对滑动速度不为零时,摩擦力为滑动摩擦力。机构主体与支撑面之间相对速度为零时,摩擦力为静摩擦力,静摩擦力的大小与其它外力的合力、最大静摩擦力等有关。但在采用数值方法进行分析运算时,无法得到机构主体与支撑面之间相对滑动速度为零的点,因此采用了 Karnopp 摩擦力模型,即给出一个极小的速度值 $\Delta\dot{x}$ 作为判定机构主体与基础面相对速度是否为零的界限,这样仿真时摩擦力可以按式(4)计算:

$$F_i = \text{sgn}(\dot{x}) F_n' \left[(\mu_s - \mu_k) \exp\left(-\frac{\dot{x}}{x_0}\right) + \mu_k \right] \quad |\dot{x}(t)| \geq \Delta\dot{x}$$

$$F_i(t) = \begin{cases} -F_h, & F_h < F' \mu_s \\ \text{sgn}(F_n) F' \mu_s, & F_h \geq F' \mu_s \end{cases} \quad |\dot{x}(t)| \leq \Delta\dot{x}, \quad (4)$$

式中: F_n' —底座对机构主体作用力的法向分力;

\dot{x}_0 —特定速度值,反映了滑动速度对摩擦因数的影响;

μ_s —最大静摩擦因数;

μ_k —滑动摩擦因数;

F_h —作用在机构主体上外力的合力。

利用 Matlab 采用 4 阶 Runge-Kutta 运算方法,依据状态方程(3)对惯性压电驱动机构的动力学进行仿真分析。系统仿真采用的参数值与样机结构参数相同,性能参数如表 1 所示。

表 1 惯性驱动机构动力学模型参数表

Tab. 1 Parameters of dynamic equation

刚度系数 $k/\text{N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	阻尼系数 $c/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	线性伸缩常数 α	压电常数 d_x
0.65×10^6	0.3	0.98	1.24×10^{-7}

5 旋转机构样机及实验系统

制作了惯性式压电旋转机构样机,对不同驱动条件下旋转机构的性能进行了实验测试。

5.1 旋转机构样机及结构尺寸

惯性式压电旋转机构样机如图 3 所示。

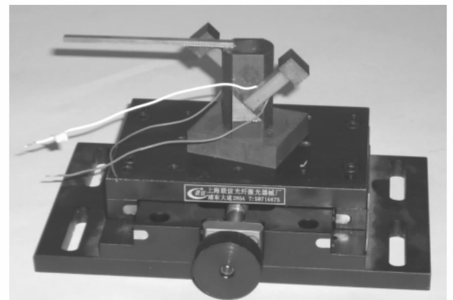


图 3 旋转驱动机构样机

Fig. 3 Actuator prototype

图 3 为旋转驱动机构样机。驱动单元:底座尺寸为 $36 \text{ mm} \times 36 \text{ mm} \times 9.5 \text{ mm}$,材料为 45 钢,质量为 96.4 g ,机构主体质量为 60 g ,叠堆尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,质量为 4.9 g ,惯性质量块尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,质量为 6 g ,

45°三角块质量为 3.6 g。

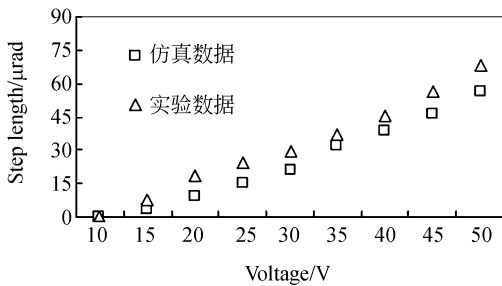
5.2 实验测试系统组成

由 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。

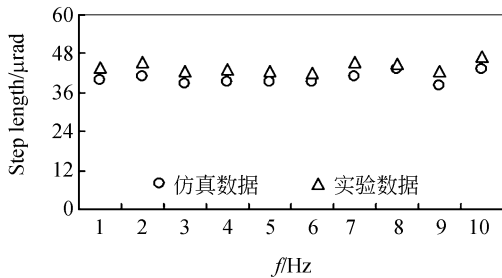
6 实验和仿真结果分析

6.1 旋转机构分辨率的实验测试

旋转机构在 4 Hz、不同电压方波信号和 40 V、不同频率方波信号激励下的旋转步长的实验测试和仿真分析结果如图 4 所示。



(a) 旋转机构步长与驱动电信号电压的关系
(a) Step length vs. voltage



(b) 旋转机构步长与驱动电信号频率的关系
(b) Step length vs. frequency

图 4 旋转机构步长与驱动电信号电压和频率的关系
Fig. 4 Rotary step affected by applied voltage and frequency

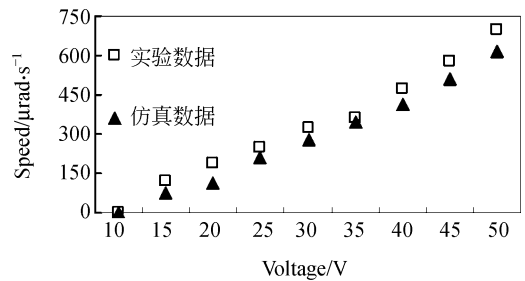
旋转机构电压-旋转步长关系曲线如图 4(a) 所示。从实验与仿真的结果可知,随着驱动电压的增加,旋转步长也增加,与电压呈近似线性关系。

旋转机构的频率-步长关系曲线如图 4(b)所

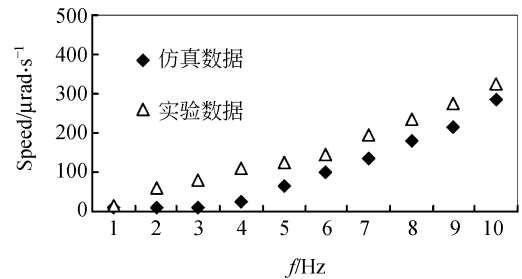
示。从实验与仿真的结果可知,随着频率的增加,旋转驱动机构旋转步长基本保持不变。而旋转步长随着激励信号电压的增大而增大,这是因为压电叠堆的位移量仅随电压的增加而增加,随频率的变化基本保持不变。在 8~10 Hz 曲线出现波动,是由摩擦表面加工精度以及实验条件所致。

6.2 旋转机构转速的实验测试

在空载状态下,对旋转机构在 10 Hz、不同电压方波信号和 30 V、不同频率方波信号激励下旋转速度进行了实验测试与仿真分析,如图 5 所示。



(a) 旋转机构转速与驱动电信号电压的关系
(a) Speed vs. voltage



(b) 旋转机构转速与驱动电信号频率的关系
(b) Speed vs. frequency

图 5 旋转机构转速与驱动电信号电压和频率的关系
Fig. 5 Rotary speed affected by applied voltage and frequency

从图可知,随驱动电压的增加,旋转驱动机构转速逐渐增加,具有近似的线性关系,这是因为压电叠堆的位移量随所加电压的增加而增大,并且随驱动信号频率的增加,旋转驱动机构转速逐渐增加,具有近似的线性关系。

7 结 论

(1) 提出了通过机械控制方式改变旋转机构

与接触面之间的摩擦力来实现旋转运动的方法。该方法为研制精密驱动/定位装置提供了新的思路。

(2) 建立了旋转机构的动力学模型,对旋转机构动态性能的仿真分析,研制了以压电叠堆为驱动元件的惯性式旋转机构并进行了试验测试。

该旋转机构行程为 360° , 旋转步长分辨为 $15 \mu\text{rad}$, 最高转速为 0.26 rad/s 。

(3) 该驱动机构行程大,分辨率高,运动性能稳定,随驱动信号电压和频率变化线性度较好,所以既可通过定频调压也可通过定压调频方式控制驱动机构。

参考文献:

- [1] WU T, PAUL I R. Dynamic peak amplitude analysis and bonding layer effects of piezoelectric bimorph cantilevers [J]. *Smart Materials and Structure*, 2004,13(1):203-210.
- [2] YAN SH Z,ZHANG F X. A 3-DOF mobile robot driven by a piezoelectric actuator smart materials[J]. *Structure*, 2006,15:7-13.
- [3] LIU Y T,TOSHIRO H. Precision positioning device utilizing impact force of combined piezo-pneumatic actuator [J]. *Asmetransations on Mechatronics*,2001,6(4):467-473.
- [4] KIMSC, KIMSH. A precision linear actuator using piezoelectrically driven friction force [J]. *Mechatronics*, 2001, 11(11):969-985.
- [5] LIU Y T,TOSHIRO H,FUNG R F. A novel precision positioning table utilizing impact force of spring-mounted piezoelectric actuator-part I: experimental design and results[J]. *Precision Engineering*,2003, 27(1):14-21.
- [6] WU T, PAUL I R. Dynamic peak amplitude analysis and bonding layer effects of piezoelectric bimorph cantilevers [J]. *Smart Materials and Structure*, 2004, 13(1): 203-210.
- [7] 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, DING G Q. Inertial-friction based 4-DOF microactuator driven by PZT[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001,9(2):135-138. (in Chinese)
- [8] LIU Y T,TOSHIRO H. Precision positioning device utilizing impact force of combined piezo-pneumatic actuator [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2001,4(6):467-473.

作者简介:温建明(1980—),男,博士研究生,研究方向为压电驱动与控制技术。E-mail:wjming1999@tom.com

程光明(1957—),男,教授,博士生导师,研究方向为压电驱动与控制技术。E-mail:cgm@jlu.edu.cn