

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

压电薄膜型精密运动平台研究

华顺明,张宏壮,程光明,范尊强,刘建芳

(吉林大学 机械科学与工程学院,吉林 长春 130025)

摘要:提出了一种利用双压电晶片驱动小型平台的研究方案,该平台可实现水平面内的两自由度精密运动。在对粘滑型运动机构的工作原理进行分析的基础上,建立了压电式粘滑机构的动力学模型并进行了仿真分析,设计研制了试验样机,并从运动性能和承载能力两个方面对样机进行了实验研究。实验结果表明,设计的压电薄膜型精密运动平台结构简单、体积小、质量轻、步距稳定且行程大,电压低于30 V驱动时,步距误差不超过 $0.5\ \mu\text{m}$,承载能力约为自身质量的7~8倍。

关键词:压电双晶片;精密运动平台;粘滑效应;微操作;微小机器人

中图分类号:TH703.6 文献标识码:A

Research on precise traveling positioning stage driven by piezoelectric bimorph

HUA Shun-ming, ZHANG Hong-zhuang, CHENG Guang-ming, FAN Zun-qiang, LIU Jian-fang

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

Abstract: Driven by piezoelectric bimorph actuator, a new precise positioning stage run in two directions within a horizontal plane was presented. Based on the analysis of the working principle of stick-slip mechanism, a mathematical model describing its dynamic behavior was set up and simulated, experiments of traveling performance and bearing ability on the prototype were conducted. The results show that the designed stage has the advantages in simple structure, small volume, light weight, stable step size and large working range. As the driving voltage is below 30 V, the step error is less than $0.5\ \mu\text{m}$. The bearing ability of the stage is approximately 7~8 times its own mass.

Key words: piezoelectric bimorph; precise positioning stage; stick-slip effect; micro-manipulation; micro robot

1 引言

近年来,诸如微小图形的修补、细胞的融合与分离等微细操作要求越来越多。这种微细作业是

对微小对象的整体或局部进行操作与处理,主要特征是作业对象微小,用肉眼难以看清其形状、位姿,难以用人手直接处理。因此,微细作业系统除微操作器、显微镜等部分以外,还需要一种移动范围大、定位精度高,并能携带夹具或被操作对象的

收稿日期:2005-07-22;修订日期:2006-06-18.

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);长春市科技局“新星创业计划”资助项目(No. 04-08XC279)。

多自由度精密运动平台^[1]。压电元件具有结构紧凑、响应特性好、位移分辨率高等特点,在精密微动台的研究方向受到广泛关注。

常用的压电元件为压电叠堆和压电双晶片两类。双晶片元件将压电晶片的长度伸缩变形转变为梁的弯曲变形,虽然这种方式输出的力不大,但是因为结构简单,制作容易,成本低,所以在工作载荷不大,以运动输出为主要目的的机构中得到广泛应用,如用作薄片式微型压电泵、管道机器人和惯性冲击驱动器等机构的致动器^[2-8]。另外实验表明,如果将双晶片金属层两端固支,从中部输出力和位移,可在一定程度上改善双晶片出力小的弱点。

本文结合粘-滑原理(Stick-Slip 原理),设计了一种简单的两自由度运动平台。通过测试,证明该装置可以实现精密运动,且具有良好的承载能力。

2 结构及运动原理

根据微细作业的工作要求,精密运动平台在水平面内应可自由运动到任意位置,因此需要具有两自由度以上的运动能力。样机照片如图 1。

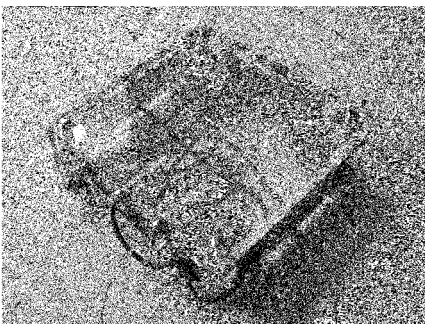


图 1 精密运动平台样机

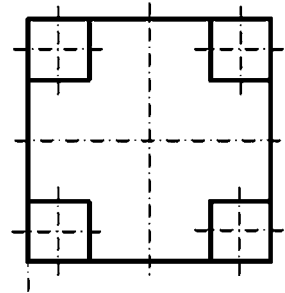
Fig. 1 Sample photo of precise traveling positioning stage

运动平台设计成箱式结构,平台周围分布 4 片压电晶片,相对的 2 片为一组,实现 1 个方向的运动。4 片双晶片均两端固定,中心部位预留凸起和下面的支撑面接触,形成驱动足,平台的运动就由这 4 个驱动足和支承面间的粘滑效应实现。所谓粘滑效应,是指一对摩擦副在静摩擦力作用下保持相对静止而“粘”在一起;动摩擦力作用时相对“滑”动,即通常所说的“爬行”。

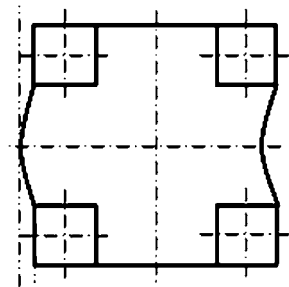
为产生粘滑效应,双晶片的驱动电压波形为锯齿形,即在一个工作周期内,电压既有缓慢变化又有急速变化。约定缓慢上升、快速下降的波形为正锯齿形,缓慢下降、快速上升的波形为倒锯齿形。

运动平台的工作原理说明如下:

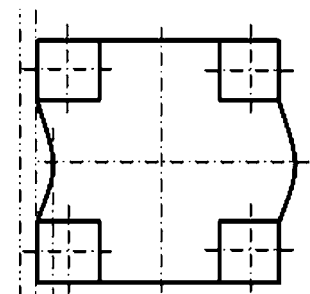
如图 2,(a)为未加电状态;(b)为欲使平台右



(a)未加电状态
(a)Original state



(b)平台右移半步
(b)Half-step forward



(c)跟进滑移一步
(c)One-step sliding

图 2 平台粘滑运动原理分析

Fig. 2 Stage's working principle based on stick-slip effect

移,对左右两双晶片施加正锯齿电压激励。电压缓慢上升阶段,两双晶片同时发生向左的弯曲变形,由于双晶片的凸起和支承面之间有静摩擦力作用,因此驱动足“粘”在支承面上维持不动,反作用力使平台以两个驱动足为支点向右缓慢移动。此时保持驱动足不动的最大静摩擦力即为双晶片加在平台上的推动力;(c)为电压急速下降阶段,双晶片快速恢复变形,并带动平台有相应的向左返回运动趋势。由于双晶片恢复变形速度很快,而平台自身机械惯性相对较大,因此结果是平台回退很小,两个驱动足向右侧快速跟进滑移。此时两个驱动足与摩擦面之间的力为动摩擦阻力。

在锯齿形电压的持续激励下,平台以间歇移动的形式向右运动。同理,欲使平台左移,则对左右两个双晶片施加倒锯齿形电压激励;欲使平台沿上下方向运动,则应对上下两个方向的双晶片施加相应的锯齿形电压激励。

综上所述,平台性能主要取决于两个因素:①驱动足与支撑面之间的最大静摩擦力和动摩擦力之差,是影响工作效率的主要因素;②增大双晶片中心点的变位量,可以提高系统单步位移的距离,改善系统的运动特性。

3 理论分析

压电式两自由度精密运动平台的 2 组双晶片是各自独立的,分别形成 X 向和 Y 向的运动,现取 X 向运动为例,分析粘滑机构的动力学特性。

压电双晶片金属层两端固定到箱体连接块上,并随同平台一同运动,二者构成一个典型的二阶系统。将双晶片在外电场 V 作用下产生的弯曲变形和外力 F_f 作用下产生的弯曲变形分开考虑,用 y 表示电场作用下的挠曲,作为系统中的一个独立环节。据此建立的粘滑运动机构整体的动力学模型如图 3 所示。

根据动力学模型可以建立压电双晶片型粘滑运动机构的动力学方程:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2 x_1}{dt^2} &= k(x - x_1 + y) - c \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx}{dt} \right) + F_f \\ M \frac{d^2 x}{dt^2} &= k(x_1 - x - y) - c \left(\frac{dx}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

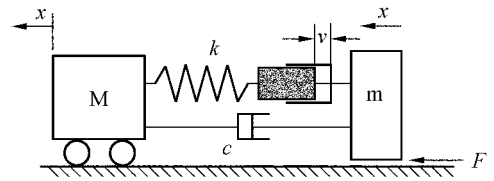


图 3 粘滑机构的动力学模型

Fig. 3 Dynamic model of the stick-slip mechanism

其中:

- M —包括负载在内的粘滑机构整体质量;
- m —压电双晶片质量,同 M 相比很小;
- x, x_1 —机构整体和双晶片各自的位置坐标;
- k —作用在两端固支双晶片上的外力与其挠度的比值;
- c —双晶片的结构阻尼;
- y —在电压 V 作用下双晶片驱动点处的挠度值;
- F_f —振子与支撑面之间的摩擦力。

通过实验测试,双晶片金属层两端固支时驱动点部位的挠度值 y 与驱动电压 U 的线性拟合方程为(2)式,可靠度 R^2 接近 1,说明方程线性很好。

$$\begin{aligned} y &= 0.4753U - 1.7449 \\ R^2 &= 0.9891, \end{aligned} \quad (2)$$

通过解析方法,可求得作用于两端固支双晶片凸起上的外力与相应的挠曲变形的比值 k 为:

$$k = 16 \times \left\{ 2E_p b \left[\left(\frac{h_c}{2} + h_p \right)^3 - \left(\frac{h_c}{2} \right)^3 \right] + \frac{E_c b h_c^3}{4} \right\} / L^3, \quad (3)$$

式中, E_p 为压电晶片的弹性模量, E_o 为金属片的弹性模量, L 为双晶片的长度, h_p 、 h_c 分别为压电晶片和铜片的厚度, b 为压电晶片和铜片的宽度。

当振子与支撑面间相对速度不为零时,摩擦力 F_f 为:

$$F_f = \mu(\dot{x}) F'_n, \quad (4)$$

式中, F'_n 为支撑面对驱动足作用力的法向分力。 μ 为驱动足与支撑面之间的摩擦系数,可以表示为振子驱动点与支撑面之间相对速度 \dot{x} 的连续函数:

$$\mu(\dot{x}) = (\mu_s - \mu_k) \exp\left(-\frac{\dot{x}}{x_0}\right) + \mu_k, \quad (5)$$

式中, \dot{x}_0 为特定速度值,反映了滑动速度对摩擦系数 μ 的影响。 μ_s 为最大静摩擦系数, μ_k 为滑动摩擦系数。由上式可以看出,随着滑动速度的增大,摩擦系数趋近最小值 μ_k ;当速度接近零时,摩擦系数接近最大值 μ_s 。

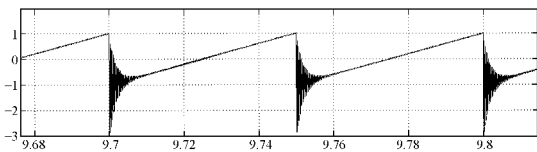
振子与支撑面间相对速度为零时,摩擦力等于作用在振子上其它外力合力的水平分力值 F_h ,但不超过最大静摩擦力,即

$$F_f(t) = \begin{cases} F_h, & F_h < F' \mu_s \\ F' \mu_s, & F_h \geq F' \mu_s \end{cases}, \quad (6)$$

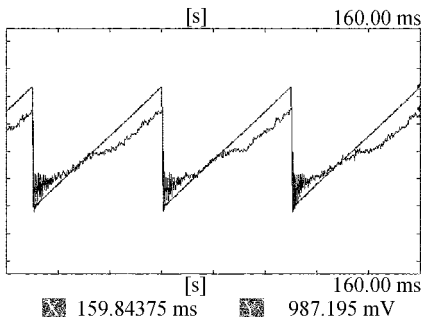
根据以上分析,在 Matlab7.0 下利用 4 阶 Runge-Kutta 计算方法,对粘滑型精密运动机构的动力学特性进行仿真分析。

图 4 为在安装条件下,对锯齿电压激励的仿真结果(a)和实验结果(b)的对比,二者时间常数基本一致。

接下来考察平台的工作情况。图 5 为平台运动时,步进位移的仿真结果(a)和实验结果(b)对比。位移的变化趋势大体一致,说明所建模型的参数设置是基本合理的。



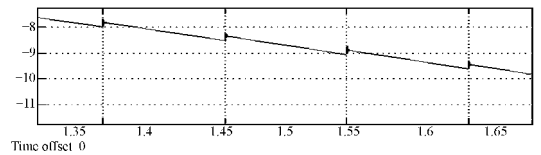
(a) 仿真结果
(a) Simulation results



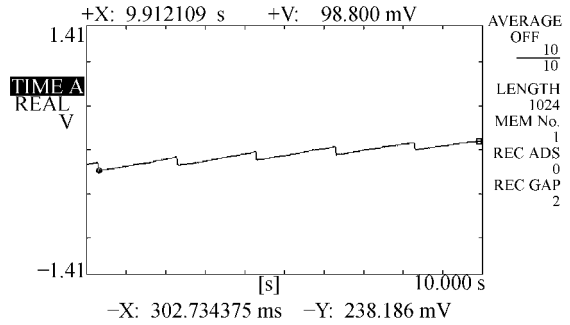
(b) 实验结果
(b) Testing results

图 4 双晶片响应锯齿激励的仿真和试验对比

Fig. 4 Contrast between simulation and testing results response to the ramp V



(a) 仿真结果
(a) Simulation results



(b) 实验结果
(b) Testing results

图 5 平台工作时步进位移的仿真和试验对比

Fig. 5 Contrast between simulation and testing results of the stage's movement step by step

4 试验研究

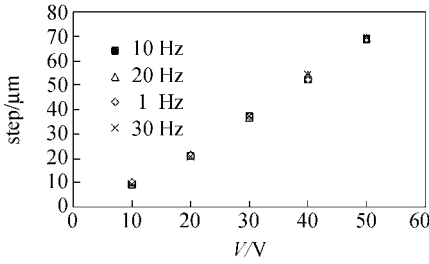
对试制的样机在室温环境下的运动能力、承载能力分别进行了实验研究。运动平台 X、Y 两方向的位移用激光测位仪分别测量,由于两个方向的振子完全独立,无相互干扰,实际测试结果一致性较好。结果的差异是由振子性能分散和装配差异所致,下面以 X 方向的测试结果为例说明精密运动平台的性能。

4.1 平台运动性能测试

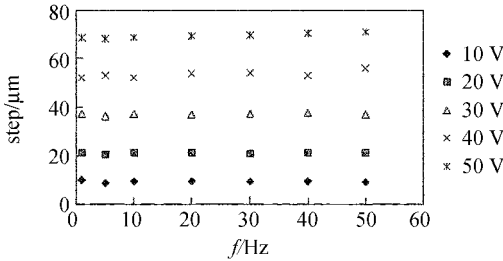
图 6(a)为激励电压和平台运动步距的测试曲线。可以看出,在较低频率下,电压-步距曲线的线性度良好,因此可以通过改变电压来调整平台精密运动时步距的大小,如果将结构做得更小,并进一步提高加工、装配精度和压电片的粘结质量,可以实现高分辨率的精密运动。

图 6(b)为平台步距-频率曲线。实验中测试了激励频率在 1 Hz 到 50 Hz 范围内变化时,平台步距的波动情况。可见,电压 30 V 以内,步距误差大致在 $0.5 \mu\text{m}$ 左右;30 V 以上,步距误差在 $2 \mu\text{m}$ 以内。说明平台低频工作时步距基本稳定

且随电压线性可调。



(a) 平台步距-电压关系
(a) Step vs voltage



(b) 平台步距-频率关系
(b) Step vs. frequency

图 6 平台运动能力测试

Fig. 6 Moving ability of the stage

实测表明,随着驱动频率的上升,锯齿的上升沿也将逐渐变陡,该阶段双晶片缓慢推动平台运动的作用也逐渐被削弱。频率到达一定值时,双晶片将来不及充分推动机构运动就发生跟进滑移,宏观上平台在原地小幅剧烈摆动。对于试验样机,空载情况下大约在 0.7~0.8 kHz 频率时出现上述情况。

4.2 平台驮负能力测试

图 7 为以步距作为评价指标考察平台驮负能力的测试结果。实验条件:驱动电压 30 V,频率 1 Hz→50 Hz,载荷 0 N→290 N,摩擦条件为 A3 钢淬硬发黑表面,平台自身质量 26 g。

由图 7 知,平台步距随负载的增加逐渐减小,载荷在 100 N 以内时,步距呈线性缓慢下降,负载的变化对步距影响较小。载荷达到 290 N 以后,

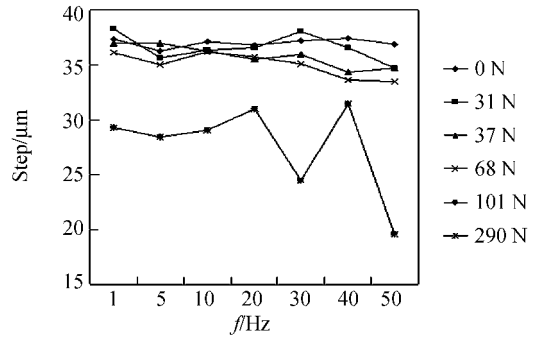


图 7 平台承载能力测试

Fig. 7 Performance under various vertical loads

步距开始急剧减小且随驱动频率的变化而大幅波动。最大承载能力约为自身质量的 7~8 倍。

造成平台步距线性减小的原因有两个方面:①作用在双晶片上的摩擦力随驮负载荷的增大而增大,造成双晶片弯曲变形量减小;②动摩擦力也随载荷相应增大,造成双晶片跟进滑移过程中造成的平台回退量也加大。

试验结果表明:利用粘滑效应致动的压电双晶片经过适当的结构设计,能够可靠地驱动小型平台实现 2 自由度精密运动。

5 结 论

本文设计了一种新的压电薄膜型精密运动平台,该运动平台以压电双晶片作驱动器,将电能转换为机械运动。分析了粘滑型机构的运动原理,建立了粘滑机构的动力学模型并进行了仿真分析,通过对试制样机的试验测试,理论分析结果和试验结果基本相符。实验结果表明,所设计的压电薄膜型精密运动平台具有以下几个特点:①往复运动的一致性良好,克服了压电叠堆型粘滑机构前进、后退速度不一致的弱点;②平台自身质量小,驮负载荷能力强;③结构简单,易于实现轻量化、集成化。因此在微小机器人、微细作业等领域具有较好的应用前景。

参考文献:

[1] 杨宜民,程良伦. 微细作业系统的现状、构成及应用[J]. 机器人,1998,20(1):32-36.
 [2] 孙立宁,刘品宽,吴善强,等. 管内移动微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] 吴一辉,王立鼎,马建旭. 新型微变位致动器的发展与应用[J]. 光学精密工程,1996,4(2):7-13.
WU Y H, WANG L D, MA J X. Development and application of new micro-motion actuators[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996, 4(2):7-13. (in Chinese)
- [4] 程光明,杨志刚,曾平,等. 压电式移动机构的研究[J]. 压电与声光,2003,25(2):106-109.
CHENG G M, YANG ZH G, ZENG P, *et al.* Piezoelectric traveling mechanism[J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 2003, 25(2):106-109. (in Chinese)
- [5] CAPPELLERI D J, FRECKER M I, SIMPSON T W, *et al.* Design of a PZT bimorph actuator using a meta-model-based approach [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2002, 124(6):354-357.
- [6] YANG R, MUSA J, RUDOLPH S. Design and characterization of a low-profile micro-positioning stage [J]. *Precision Engineering*, 1996, 18(1):20-29.
- [7] VEL S S, BATRA R C. Analysis of piezoelectric bimorphs and plates with segmented actuators [J]. *Thin-Walled Structures*, 2001, 39(1):23-44.
- [8] MORITA T, YOSHIDA R, OKAMOTO Y, *et al.* Three DOF parallel link mechanism utilizing smooth impact drive mechanism [J]. *Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 2002, 26(3):289-295.

作者简介:华顺明(1972—),男,吉林大安人,吉林大学讲师,博士研究生,主要研究方向为压电驱动与控制技术和微小机械,参与承担国家 863 项目 1 项、国家自然科学基金项目 1 项、其它省部级科研项目 2 项,已发表论文 9 篇,申报专利 2 项(批准 1 项)。E-mail:hua797@sohu.com