

基于压电陶瓷的摩擦可调粘滑定位平台

杨飞雨, 潘 鹏, 徐 伟, 汝长海

(苏州大学 江苏省先进机器人技术重点实验室 & 苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215000)

摘 要: 为了提高粘滑式纳米定位台对不同负载, 尤其是大质量负载的适用性, 设计了驱动模块化的粘滑定位平台。将质量块、柔性铰链及铰链架一体制造, 将压电陶瓷致动器、预紧垫块及预紧螺钉安装在铰链架上, 共同组成一个独立的驱动模块, 安装在底座的槽内, 在调节螺钉的作用下可调整垂直方向的位置, 改变与载物台接触面间的摩擦力。对粘滑驱动平台建立动力学模型并进行仿真分析, 研究摩擦力对平台性能的影响。实验结果表明, 负载 200 g 时, 平台的最小步长为 8.84 nm, 最大速度为 3.727 mm/s, 行程约 20 mm; 2 kg 负载下, 未调节摩擦时最大速度为 2.373 mm/s, 调节摩擦力后最大速度为 3.063 mm/s。实验证明, 该设计能同时满足小尺寸、高精度、高速度、大行程及适应大负载的要求。

关键词: 纳米定位; 压电陶瓷; 摩擦力; 粘滑驱动; 动力学模型

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Friction Adjustable Stick-slip Positioning Stage Based on Piezoelectric Ceramics

YANG Feiyu, PAN Peng, XU Wei, RU Changhai

(Jiangsu Provincial Key Lab. of Advanced Robotics & Collaborative Innovation Center of
Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215000, China)

Abstract: A stick-slip nano-positioning stage with drive modular is designed to improve the applicability of different load, especially large load. A mass block, a flexure hinge, a frame are integrated manufactured. A piezoelectric ceramic actuator, a preload block, a preload screw are installed in the frame, which constitute the drive module together. The drive module is installed in a groove of the base. The vertical position of the drive module can be adjusted by rotating adjustment screw to change the friction between the contact surface of the object stage. The kinetic model of stick-slip positioning stage is established and simulated to analyze the influence of friction on the performance of stage. The experimental results show that the positioning stage has minimum step size of 8.84 nm, maximum velocity of 3.727 mm/s and the stroke of about 20 mm with 200 g load. After adjusting friction, the stage has a maximum velocity of 3.063 mm/s with 2 kg load, which is 2.373 mm/s without adjustment. The experiment verifies that the design can meet the requirements of small size, high precision, large velocity, large stroke and large load.

Key words: nano-positioning; piezoelectric ceramics; friction; stick-slip driving; kinetic model

0 引言

随着纳米技术的发展, 在生物、微机电系统 (MEMS)、超精密加工及机械微组装等技术领域, 微操作技术的研究是国内、外研究的热点^[1]。在对微纳米级对象进行操作时, 通常需借助电子显微镜 (EM) 为基础的操作系统^[2]来实现对对象的观察、识别和操作。然而 EM 的真空腔空间狭小, 要求微纳操作器尺寸小, 且不能受电磁场影响。采用以压

电驱动器作为驱动机构的微纳操作器是必然的选择^[3]。粘滑式压电驱动定位平台以压电陶瓷为驱动源, 柔性铰链为传动件, 具有结构紧凑, 速度快, 精度高, 行程大, 不需要润滑等优点^[4], 广泛应用于微纳操作装置。目前, 国内、外已有一些研究成果。张世忠等研制出的单自由度压电纳米定位台, 尺寸 24 mm × 24 mm × 17 mm, 分辨率 8 nm, 行程 50 mm, 最大负载质量 66 g^[5]。Attocube System 公司的 ANPx101 单自由度定位台, 尺寸 24 mm ×

收稿日期: 2017-01-15

基金项目: 国家重大科研仪器设备研制专项基金资助项目 (61327811); 苏州市科学发展计划纳米技术专项基金资助项目 (ZXG201433)

作者简介: 杨飞雨 (1991-), 男, 江苏苏州人, 硕士生, 主要从事微纳操作方面的研究。通信作者: 汝长海 (1976-), 男, 黑龙江鹤岗人, 教授, 博士生导师, 主要从事生物微操作、纳米定位与技术的研究。E-mail: rzhs@suda.edu.cn。

24 mm×11 mm,最小步进 10 nm,行程 5 mm,最大速度 3 mm/s,负载 1 N^[6]。但由于目前的粘滑定位台摩擦机构不可调节,通常负载较小,运动性能受负载影响较大。在实际应用中,定位台上要安装用于进行纳米操作的装置,装置的质量不同,定位台负载过小会限制其应用。

本文设计了驱动模块化的粘滑式驱动定位平台,驱动模块可在垂直方向调整位置,从而调整粘滑运动的摩擦力,在保证定位平台拥有小尺寸、高精度、高速度及大行程的同时,提高了可承受的负载。

1 定位平台的结构设计

1.1 粘滑驱动原理

本文基于粘滑驱动原理设计的定位平台,图 1 为粘滑驱动原理图。致动器产生驱动位移;质量块与致动器一端固定,将驱动位移传递至末端执行器;滑块是末端执行器。

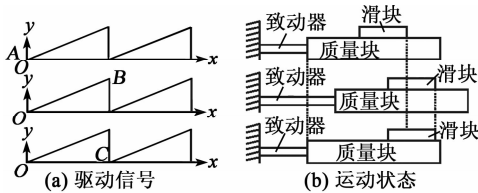


图 1 粘滑驱动原理

对致动器施加驱动信号(见图 1(a)),定位平台产生如下运动:

1) AB 段对致动器的供电电压处于缓慢上升状态,致动器缓慢伸长,相对于此时的速度,滑块与质量块间存在的摩擦力足够大,能使滑块与质量块间相对静止,因此滑块也会前进相应的位移。

2) BC 段对致动器的供电电压处于阶跃下降状态,致动器急速缩短,相应的质量块也会急速回撤,而由于此时的速度非常快,滑块本身的惯性力远大于受到的摩擦力,因此,滑块与质量块间相对滑动,此阶段滑块几乎保持静止。

3) 整个 ABC 阶段,滑块向前运动了一段距离,连续重复 ABC 阶段的驱动信号,便能使滑块不停的向前运动,同理,只要输出反向的驱动信号,就能实现反向的运动。

1.2 单自由度水平定位平台的结构设计

本文选择叠堆压电陶瓷致动器作为驱动源,该致动器外形尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm,标称位移 4 μm,150 V,零位移推力 330 N,150 V,刚度 80 N/μm,静电容量 0.14 μF,谐振频率 300 kHz。导轨选用交叉滚子导轨长度 30 mm,行程约 20 mm。

图 2 为单自由度水平定位平台的结构模型。装

配好的尺寸为 30 mm×16 mm×20 mm。压电陶瓷致动器、质量块、载物台(包含陶瓷片)分别对应图 1 中的致动器、质量块、滑块。

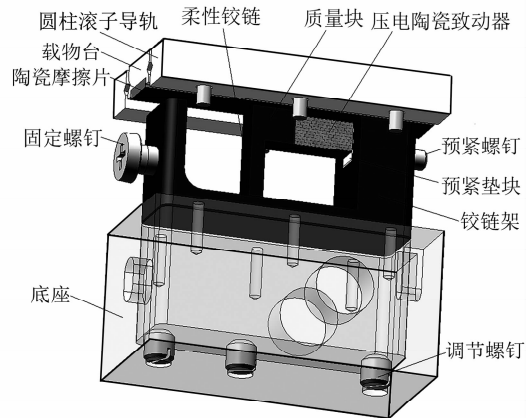


图 2 定位平台结构

图 2 中,质量块、柔性铰链、铰链架一体制造,压电陶瓷致动器、预紧垫块、预紧螺钉安装在铰链架上,共同组成一个驱动模块,预紧螺钉和调节螺钉均为内六角螺钉,可作微小调节。该驱动模块安装在底座的槽内,在调节螺钉的作用下可调整垂直方向的位置。载物台底部安装有表面光滑的氧化铝陶瓷摩擦片,摩擦片与质量块接触,对压电陶瓷输入驱动电压信号时,压电陶瓷致动器会带动质量块一起运动,粘滑现象发生在质量块和摩擦片间,使载物台产生位移输出。

2 定位台动力学模型与仿真

2.1 动摩擦模型选择

粘滑驱动定位平台理论上的关键因素是摩擦力,致动器的伸长量在微纳米级别,微尺度效应与宏观现象差异很大^[7],因此,选取一个能精确描述粘滑运动的摩擦力模型很关键。考虑到摩擦模型的描述精确性及模型本身的复杂性,本文采纳了 LuGre 模型, LuGre 模型的精确性^[8-9]已足够用来描述本文中的摩擦力,即

$$\begin{cases} \dot{f} = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 v \\ \dot{z} = v - |v| \cdot \sigma_0 \cdot z / g(v) \\ g(v) = [F_C + (F_s - F_C) \cdot e^{-(v/v_s)^2}] / \sigma_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_0 为鬃毛刚度; σ_1 为微位移时摩擦阻尼系数; σ_2 为黏性摩擦阻尼系数; v 为相对运动速度; z 为鬃毛平均形变; F_C 为库伦摩擦力; F_s 为最大静摩擦力; v_s 为系统发生 Stribeck 效应时刻的速度。 $F_C = \mu_C F_N$, $F_s = \mu_s F_N$, 其中, F_N 为作用在摩擦面间的正压力, μ_C 为动摩擦系数, μ_s 为静摩擦系数。

2.2 一体化动力学模型与仿真

除摩擦力外,还有许多因素也会影响到定位平台的性能,包括预紧力,柔性铰链的质量、刚度、阻尼,质量块的质量,负载质量,驱动信号的幅值、频率、阶跃时间等。想要通过理论推导或实验来分析这些因素很难。目前,较有效的方法是建立动力学模型且利用计算机仿真分析。

驱动电压首先作用在压电陶瓷上,经由压电陶瓷的机电转换后,产生力和位移的输出,经压电陶瓷和柔性铰链的刚度、阻尼、质量共同作用的传递,得到了质量块的位移输出,再通过质量块和载物台间的摩擦力作用,将位移在粘滑运动的过程中传递给载物台,实现了载物台的运动。根据力学和自控原理知识,建立动力学模型如图3所示。图中, l_0 为压电陶瓷机电转换的位移输出, m_p 、 c_p 、 k_p 为压电陶瓷致动器的等效质量、阻尼及刚度, m_{mf} 、 c_f 、 k_f 为柔性铰链(包含质量块)的等效质量、阻尼、刚度, F 为压电陶瓷致动器内部产生的推力, F_i 为质量块与压电陶瓷致动器的相互作用力, m_s 为载物台的质量, F_f 为载物台和质量块间的摩擦力, x 为质量块的位移, x_s 为载物台的位移。

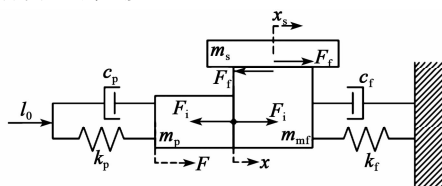


图3 定位平台动力学模型

致动器、质量块和载物台的运动方程为

$$\begin{cases} m_p \ddot{x} + c_p \dot{x} + k_p x = F - F_i \\ m_{mf} \ddot{x} + c_f \dot{x} + k_f x = F_i - F_f \\ m_s \ddot{x}_s = F_f \end{cases} \quad (2)$$

式(1)中 f 即为式(2)中的 F_f ,将式(1)、(2)联立后,利用 Matlab/Simulink 仿真,可得载物台和质量块的位移输出。本文对摩擦力大小的影响进行仿真分析,结果如图4所示。

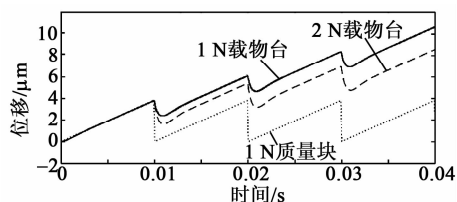


图4 不同正压力下载物台位移

由图4可看出,驱动电压信号幅值为150 V,频率为100 Hz,阶跃时间为80 μ s,负载质量为115 g。两次仿真分别施加1 N、2 N的正压力,质量块位移

1 N与2 N下几乎无差异。因此,只显示1 N下质量块位移。由图还可看出,正压力越大,每一个步进的位移越小,当正压力足够大时,载物台将无法输出位移。而负载增大时,正压力也必然增大。减小正压力和摩擦力,可提高定位平台的负载上限。

3 定位台性能测试

测定定位平台性能,利用 Labview API 和 C++ 编写程序,通过 NI 公司的 PCI-6221 数据采集卡产生驱动信号。测量采用 Ploytec 公司的单点激光测振仪,3.2 μ m/V 档位,量程-10~+10 V。本次实验驱动信号阶跃时间均为60 μ s,实验时在载物台上装有200 g的砝码作为负载。

3.1 最小步长测试

对粘滑定位平台施加频率10 Hz、幅值2.3 V的驱动电压信号,定位台输出可观测辨别的最小步进位移,由于尺度极小,信号略受干扰。图5为步进模式最小步长。由图可看出,平台以10 Hz频率振动匀速前进和后退,符合粘滑运动特征及信号频率。前进的最小步长为8.84 nm,后退的最小步长为8.92 nm。

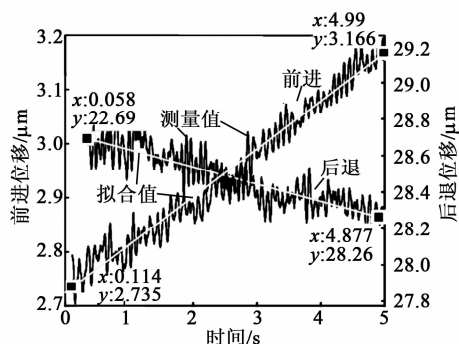


图5 步进模式最小步长

3.2 位移测试

输出电压信号为幅值110 V、频率100 Hz时的位移如图6所示。定位台的前进与后退的运动,符合理论分析和仿真结果特征,前进速度约为0.324 mm/s,后退速度约为0.343 mm/s,具有较好的位移对称性,且线性度较高。读取其中连续的15个步长,如图7所示。

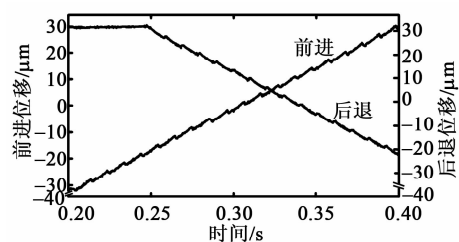


图6 位移测试

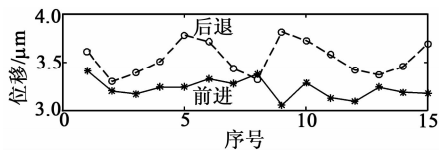


图7 步长重复性

前进方向的步长极差为 $0.354 \mu\text{m}$, 平均值为 $3.228 \mu\text{m}$, 方差为 $0.092347 \mu\text{m}$ 。后退方向的步长极差为 $0.518 \mu\text{m}$, 平均值为 $3.543 \mu\text{m}$, 方差为 $0.167764 \mu\text{m}$ 。

3.3 最大运动速度

幅值、频率及速度越大, 考虑压电陶瓷驱动电源的性能, 在测试最大速度时驱动电压信号幅值为 150 V 、频率 1 kHz , 结果如图8所示。前进速度可达 3.577 mm/s , 后退速度可达 3.727 mm/s 。由于频率高, 速度快, 载物台惯性大, 回程位移不明显。

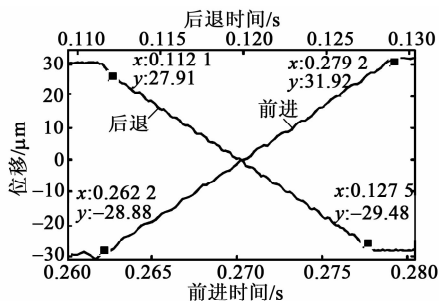


图8 最大运动速度

3.4 减小摩擦后的运动变化

为观察大负载下减小摩擦力的调整效果, 实验时驱动电压信号为幅值 150 V 、频率 1 kHz 及负载为 2 kg 的砝码。

因为前进和后退方向位移对称性较好, 本次实验只选取前进方向的位移进行对比, 如图9所示, 放置负载后不调整摩擦, 此时速度为 2.373 mm/s , 对比图8中的最大运动速度, 衰减明显; 减小摩擦后, 速度为 3.063 mm/s , 且曲线无异常变化。此结果与前文改变正压力的仿真结果相符。减小摩擦力, 能提高定位平台的速度, 改善大质量负载带来的不良影响, 进而提高可承受的负载质量。

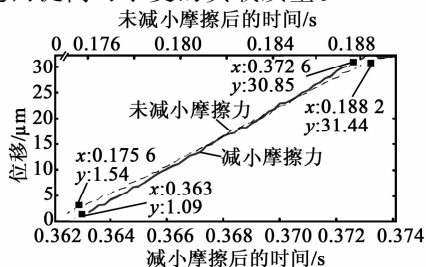


图9 减小摩擦后的运动变化

4 结束语

设计了摩擦可调、负载更大的定位平台, 将其驱动部分设计为一个可调整位置的独立模块, 实现了对粘滑运动摩擦力的调节功能。该定位台尺寸为 $30 \text{ mm} \times 16 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 行程约 20 mm 。

通过实验, 测定定位台负载为 200 g 时性能, 前进、后退最小步长分别为 8.84 nm 、 8.92 nm , 最大运动速度分别为 3.577 mm/s 、 3.727 mm/s , 线性度、对称度高, 重复性、稳定性好。前进方向上, 2 kg 负载时, 未减小摩擦力时最大速度为 2.373 mm/s , 减小摩擦力后最大速度为 3.063 mm/s 。

实验证明了模块化设计的优势, 在保证小尺寸、高精度、高速度、大行程的同时, 能调节摩擦力, 改善大质量负载带来的负面影响, 提高定位台负载。

目前调节摩擦力的设计不完善, 调节摩擦力需要借助工具, 无法做到便捷地量化调节摩擦力大小。

参考文献:

- [1] 刘锦勇, 杨湛, 陈涛, 等. 面向三维组装的微纳平台设计与研究[J]. 压电与声光, 2016, 38(4): 548-552.
LIU Jinyong, YANG Zhan, CHEN Tao, et al. Design and research of the micro-nano system for 3D micro-assembly[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2016, 38(4): 548-552.
- [2] FUKUDA T, ARAI F, NAKAJIMA M. Micro-nano-robotic manipulation systems and their applications [M]. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 163-196.
- [3] 李勇滔, 韩立, 殷伯华, 等. 基于 SEM 的压电式微纳操纵系统[J]. 压电与声光, 2010, 32(5): 782-785.
LI Yongtao, HAN Li, YIN Bohua, et al. Piezoelectric micro-nano manipulating system based on SEM[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2010, 32(5): 782-785.
- [4] 钟博文, 王振华, 陈立国, 等. 基于粘滑驱动跨尺度精密定位技术的研究现状[J]. 压电与声光, 2011, 33(3): 479-485.
ZHONG Bowen, WANG Zhenhua, CHEN Liguang, et al. Current development of trans-scale precision positioning technology based on the stick-slip effect[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2011, 33(3): 479-485.
- [5] 张世忠, 荣伟彬, 台国安, 等. 基于黏滑运动原理的单一自由度纳米定位台设计与动力学分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(19): 29-34.
ZHANG Shizhong, RONG Weibin, TAI Guoan, et al. Designing and dynamic modeling of 1D nanopositioner based on stick-slip motion principle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(19): 29-34.

(下转第 833 页)