

亚纳米级高精度六自由度微动工作台研究

张弛斌, 黄强先, 王广谱, 程保林, 张帆, 程荣俊, 张连生*

(1.合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院 测量理论与精密仪器安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要: 本文介绍了一种针对微纳加工及精密测量领域的纳米级定位精度需要的微动工作台。其内部中空, 刚性高、结构简单, 采用串并联混合驱动方式, 由压电驱动器配合柔性铰链实现六自由度精密进给, 并设计了基于ARM的运动控制系统。实验结果表明微动工作台X、Y、Z方向的位移行程分别为20.72 μm 、20.02 μm 和37.60 μm , 分辨力可达约0.5nm; 绕X、Y、Z轴的角位移行程分别为39.0"、33.8"和27.9", 分辨力可达约0.1"。该六自由度微动工作台具有自由度多、分辨力高等优点, 可用于超精密加工、纳米级甚至亚纳米级精确定位和姿态控制。

关键词: 微动工作台; 六自由度; 亚纳米分辨力; 压电驱动器; 纳米定位

Research on 6-DOF Micro-motion Stage With Sub-nano Level Resolution

Chibin Zhang, Qiangxian Huang, Guangpu Wang, Baolin Cheng, Fan Zhang, Rongjun Cheng, Liansheng Zhang*

(Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, School of Instrument Science and Optoelectronics

Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China, lszhang@hfut.edu.cn)

Abstract: A micro-motion stage for the demand of nano-positioning accuracy in ultra precision fabrication and measurement is briefed in this paper. The stage is designed as a high-rigid and simple structure with an internal hollow, adopting series-parallel hybrid driving mode with piezoelectric actuators and flexible hinges to achieve 6-DOF precision feed. The motion control system is based on ARM. The experimental results show that the displacement stroke of the stage in X, Y, Z axis is 20 μm , 20 μm and 37 μm , respectively with a resolution better than 0.5nm; the angular rotation stroke around X, Y, Z axis is 39", 33" and 27", respectively with a resolution better than 0.1". Compared with traditional ones, this stage has more degrees of freedom and higher resolution which accord with the rising requirement in ultra-precision machining, nano level and even sub-nano level positioning and attitude compensation for precision instruments.

Keywords: micro-motion stage; 6-DOF; sub-nano resolution; piezoelectric actuator; nano-positioning

1 研究背景

近年来, 微纳加工及精密测量领域对高精度、高分辨力、快速响应的多自由度微动工作台需求迫切。高精度微动工作台在超精密数控加工中可驱动刀具实现精确微位移, 并补偿进给系统的多自由度运动误差^[1], 还被应用于光刻机与生物工程等领域。

传统工作台精度受限于机械传动的回程间隙以及传动摩擦, 已不适用于高精度工业生产^[2]。压电陶瓷体

积小、出力大、刚度高、分辨率高，而柔性铰链结构无间隙、低摩擦、无磨损、易于一体化设计，二者已广泛应用于微纳米级定位工作台。

近年来，研究人员设计了多种六自由度精密工作台系统。南京航空航天大学^[3]研制的六自由度微动台可调整超精密加工工具姿态，但线位移分辨率为 10 nm；德国 PI 公司研制的商用六自由度微动台 P-587，X、Y、Z 轴线位移分辨力分别为 0.9nm、0.4nm、0.4nm，但其角位移分辨力约 10”，且价格昂贵。本文介绍的六自由度微动工作台采用分体式设计与串并联混合驱动形式，结构简单、易于组装、成本低、稳定性高，可实现六自由度精密定位，满足超精密加工的要求。

2 研究内容

本文介绍的六自由度微位移工作台以压电陶瓷为驱动单元，柔性铰链为传动机构，采用“串并联混合驱动”模式，将六个自由度的运动合理分布在三层结构中，各压电驱动器之间的耦合影响小，搭配自研的多功能运动控制下位机，可操作性强，如 Fig.1 所示。

其中，最上层的平动板控制 X、Y 轴向平动的两个自由度，由两个压电陶瓷分别实现；中间层的转动板控制绕 Z 轴转动的单个自由度，由两对压电陶瓷共同实现；下层的支撑板控制 Z 轴向平动以及绕 X 轴、绕 Y 轴转动的三个自由度，由三个压电陶瓷共同实现。

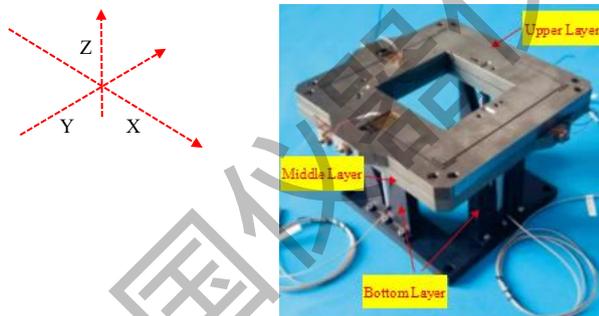


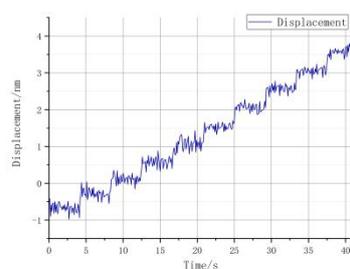
Fig.1. 6-DOF micro-motion stage

工作台六个自由度运动的具体实现方式如下：当支撑层的三个封装式 PZT 驱动电压同步等量变化时，工作台沿 Z 轴平动；当对称分布的两个 PZT 驱动电压同步等量反向变化，而另一 PZT 驱动电压保持不变时，工作台绕 Y 轴转动；当对称分布的两个 PZT 驱动电压同步等量变化，而另一 PZT 驱动电压同步按比例反向变化时，工作台绕 X 轴转动。转动板内框与支撑板的连接处为固定端，PZT 作用于外框产生绕 Z 轴的转动。平动板与转动板的外框连接处为固定端，PZT 作用于内框产生 X、Y 轴向平动。

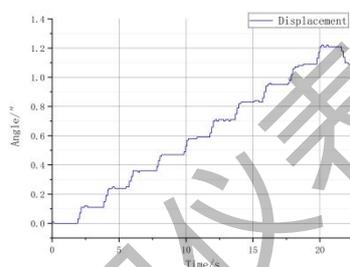
平动板与转动板选用具有良好综合力学机械性能的钛合金 TC4 材料加工。根据 Comsol 软件的仿真分析，在工作过程中，应力集中最大的转动板柔性铰链始终在正常受力范围，不会发生塑性变形或断裂。

基于 ARM 主控的工作台实时运动控制系统主要由 MCU、数模转换、高压放大和电源四个模块构成，能提供稳定、低噪、高分辨力的驱动电压。

六自由度微动工作台的线位移性能指标选用 C202 电容位移传感器（见行科技，合肥）测量，角位移性能指标选用 ULTRA-5050HR 自准直仪（奥特梅尔，天津）测量，测试环境温度为 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ ，湿度约为 55%RH。实验结果表明，X、Y、Z 轴线位移行程分别为 $20.72\ \mu\text{m}$ 、 $20.02\ \mu\text{m}$ 、 $37.60\ \mu\text{m}$ ，分辨力分别为 0.50nm 、 0.47nm 、 0.57nm ；绕 X、Y、Z 轴角位移行程分别为 $39.0''$ 、 $33.8''$ 、 $27.9''$ ，分辨力分别为 $0.11''$ 、 $0.12''$ 、 $0.09''$ 。以 Y 轴为例，如 Fig.2 所示，(a)为线位移测试结果，(b)为角位移测试结果。



(a) Linear displacement



(b) Angular displacement

Fig.2. Linear and angular displacement resolution of Y-axis

受外部环境及工作台自身振动等影响，位移噪声峰峰值约 0.5nm ，而工作台运动控制系统可输出对应线位移幅值小于 0.1nm 的电压阶梯，因此若能改善传感器测头装夹与工作台固定效果，可进一步降低位移信号噪声，系统有潜力实现更高分辨力。

3 结论

本文介绍了一种多层空间分布压电陶瓷驱动器的六自由度微动工作台。该工作台采用分布式设计、串并联混合驱动形式，各压电驱动器耦合影响小，结合柔性铰链，产生等值同向或等值反向的推力实现工作台 X、Y、Z 三轴的线位移和角位移。采用有限元分析软件对工作台进行了强度分析，另设计基于 ARM 主控的工作台实时运动控制系统。性能指标测试结果表明，该工作台 X、Y、Z 三轴的线位移行程均超过 $\pm 10.0\ \mu\text{m}$ 范围，分辨力均优于 0.57nm ；绕 X、Y、Z 三轴的角位移行程均超过 $\pm 13.9''$ 范围，分辨力均优于 $0.12''$ 。

该工作台具有结构新颖、自由度多、分辨力高等特点，可实现纳米级甚至亚纳米级精密定位和姿态控制，有望在超精密加工，微电子制造等领域中获得广泛的应用。在进一步的研究中，通过分析工作台各自由度耦合情况，建立解耦控制模型，可实现更高精度的稳定驱动。

参考文献

- [1] H. Zhan, W. Zhou, L. Ran, H. Yu, B. Peng and R. Hao. A High-Resolution Optical Displacement Detection Method for Piezoelectric Microvibratory Stage[J]. IEEE Trans. Ind Electron, 2020, 67(12): 10897-10904.
- [2] MFM.Sabri, T. Ono, SM.Said, Y. Kawai, and M.Esashi. Fabrication and Characterization of Microstacked PZT Actuator for MEMS Applications[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2015, 24(1): 80-90.
- [3] 季瑞南, 金家楣, 张建辉. 六自由度微位移定位平台的设计与试验[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(6):1264-1270.

中国仪器仪表表学会