

文章编号 1004-924X(2023)13-1933-08

亚纳米驱动分辨力的六自由度微动台

黄强先, 程保林, 张弛斌, 张帆, 张连生*

(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:微位移工作台是实现高精度定位的关键部件,传统的工作台自由度少且分辨力不高,不能满足应用需求,因此提出一种六自由度高精度微位移工作台结构方案并验证了其性能。在整体结构上采用“串并联混合驱动”的方式和中空结构,将六个自由度的运动合理地分布在平动层,转动层和支撑层三层结构中,并设计开发了工作台的运动控制系统以及一套可搭配使用的运动控制软件。实验结果表明, X, Y, Z 轴线位移分别优于 $20, 20$ 和 $37\ \mu\text{m}$,角位移行程分别优于 $39'', 33''$ 和 $27''$;线位移分辨力均优于 $0.7\ \text{nm}$,角位移分辨力均优于 $0.1''$ 。所提出的六自由度微位移工作台相比于传统工作台具有自由度高、极高分辨力等优点,有望在超精密加工、微电子制造等领域中获得广泛的应用。

关键词:微动工作台;亚纳米分辨力;六自由度;运动控制系统

中图分类号:TH122 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20233113.1933

Development of 6-DOF micro-driving stage with sub-nano driving resolution

HUANG Qiangxian, CHENG Baolin, ZHANG Chibin, ZHANG Fan, ZHANG Liansheng*

(Anhui Province Key Laboratory of Measurement Theory and Precision Instruments,
School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei 230009, China)

* Corresponding author, E-mail: lszhang@hfut.edu.cn

Abstract: The micro-driving stage is the key component of high-precision positioning. The traditional work stage has few degrees of freedom (DOFs) and a low resolution; it struggles to adapt to the development needs of precision measurement and other fields. Thus, this paper presents a 6-DOF high-precision micro-driving stage and its experimental performance. The overall structure is hollow and is based on the series-parallel hybrid drive method. The movement of the six DOFs is distributed reasonably in the translational, rotating, and supporting plates. We also designed and developed a motion-control system for the micro-driving stage and motion-control software that can be used with it. Experimental results indicated that the linear displacement ranges of the X -, Y -, and Z -axis are better than $20, 20$, and $37\ \mu\text{m}$, respectively, and the angular range is better than $39'', 33'', 27''$ in the pitch, roll, and yaw directions, respectively. The linear displacement resolution is better than $0.7\ \text{nm}$, and the angular displacement resolution is better than $0.1''$. Compared with the traditional work stage, the proposed 6-DOF micro-driving stage has

收稿日期:2022-12-15;修订日期:2023-01-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51875163);国家重点研发计划资助项目(No. 2019YFB2004901)

the advantages of more DOFs and a higher resolution; thus, it is expected to be widely used in ultra-precision machining and lithography equipment.

Key words: micro-driving stage; resolution with sub-nano; 6-DOF; motion control system

1 引言

微位移工作台作为精密工程和精密仪器的关键部件之一,在微电子制造、超精密加工、精密测量等众多前沿科技领域有着广泛的应用^[1-2],其技术指标更是各国精密、超精密领域发展水平的重要体现^[3]。

近年来,针对微位移平台的高精度、多自由度、大行程等要求^[4],许多学者和研究机构开展了大量研究^[5-6]。Wu 等设计了一种压电致动器(PZT)驱动的堆叠式XY平台,XY运动台并联连接,两个自由度的分辨力只能达到7 nm^[7]。Tian 等研制了一种压电致动器(PEA)驱动的XYZ平台,并行XY平台和Z轴平台串联,最高能达到131.3 μm 的行程,但三轴分辨力只能达到8 nm^[8]。Chen 提出了一种采用柔性铰链搭配压电致动器驱动的XYZ θ 平台,结构上以并联的形式连接四个一自由度的平台,其中线位移分辨力最高只能达到1 nm,角位移分辨力为4.13"^[9]。以上微位移平台的自由度较少,Chen 提出基于混合机构和弯曲铰链的六自由度微位移平台,该平台将六个自由度分配到三个串联的子级当中,结构相对复杂,且各个自由度存在较大的干扰,其工作空间为1 mm $\times$ 1 mm $\times$ 1 mm $\times$ 600" $\times$ 600" $\times$ 600",分辨力为0.5 μm $\times$ 0.5 μm $\times$ 1 μm $\times$ 0.5" $\times$ 0.5" $\times$ 0.5"^[10]。德国PI公司研制的以音圈驱动器(PIMag)驱动的六轴压电位移平台H-860,其六个运动轴两个为一组以并联的方式均匀地分布在平台的支座上,X,Y,Z轴的线位移行程和角位移行程最高可以达到15 mm和4°,但是线位移分辨力和角位移分辨力最高只能达到1 μm 和1.8"^[11]。以上工作台行程很大但分辨力较低。本文提出的微位移工作台在整体结构上采用“串并联混合驱动”的方式和中空结构,将六个自由度的运动合理地分布在平动层,转动层和支撑层三层结构中。X,Y,Z向的行程及其绕轴转角优于20 μm $\times$ 20 μm $\times$ 37 μm $\times$ 39" $\times$ 33" $\times$

27",且线位移分辨力均优于0.7 nm、角位移分辨力均优于0.1",同时开发出一套配合微位移工作台实现运动控制的多功能人机交互软件,提高了工作台的可操作性。

2 结构设计

本文研制的六自由度微位移工作台通过“串并联混合驱动”的方式,将六个自由度的运动合理地分布在三层结构中,通过“柔性铰链+压电陶瓷”的方式对微位移工作台进行驱动,如图1所示。图中,最上层是平动板,是X-Y二维共平面平台,有两个自由度;平动层下方是转动板,形成绕Z轴的转动,有一个自由度;三个支撑板形成Z向微动以及绕X,Y轴的转动,有三个自由度。

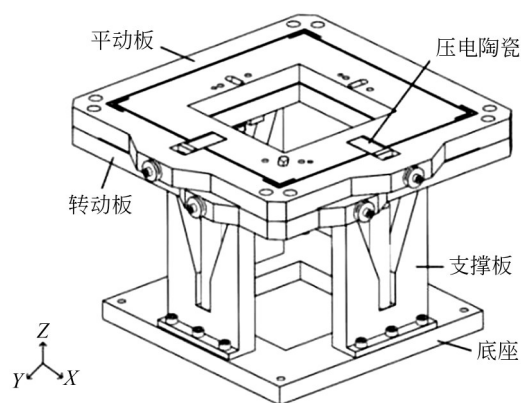


图1 微位移工作台机械结构

Fig. 1 Mechanical structure of micro-driving stage

图2所示为微位移工作台平动板结构,平动板内部的中空部分尺寸为110 mm $\times$ 110 mm,整体尺寸为260 mm $\times$ 260 mm。其中,压电陶瓷选用芯明天公司生产的NAC-2023H30,垂直分布在平动板上的两个压电陶瓷可实现工作台沿X轴、Y轴方向上的平动。

转动板的整体尺寸为260 mm $\times$ 260 mm,内部中空部分尺寸为110 mm $\times$ 110 mm,压电陶瓷

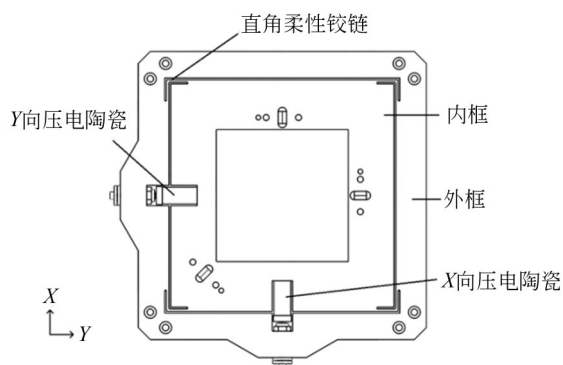


图2 平动板结构

Fig. 2 Structure of translational plate

选用攀特电陶公司生产的 PTJ1501414201,如图3所示。对称分布于转动板上的4个压电陶瓷可实现工作台绕Z轴的转动。

图4为微位移工作台支撑层结构,底座整体尺寸为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$,内部中空尺寸为 $110\text{ mm} \times 110\text{ mm}$ 。3个支撑板的高度为 131 mm ,其中压电陶瓷选用芯明天公司生产的 PSt150/10/80VS15,分布于“支撑层”中的3组压电陶瓷驱动器通过“并联驱动”的方式使得微位移工作台实现沿Z轴的平动以及绕X轴、Y轴的转动。

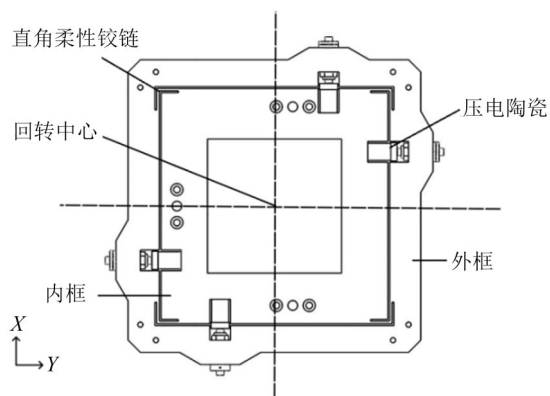


图3 转动板结构

Fig. 3 Structure of rotating plate

“支撑层”通过支撑板与转动板的内框相连,转动板外框与平动板外框刚性连接,通过这些连接机构最终将微位移工作台六个自由度的运动传递到载物台上,未来也可以搭配大行程平台进一步提升工作台的工作空间。

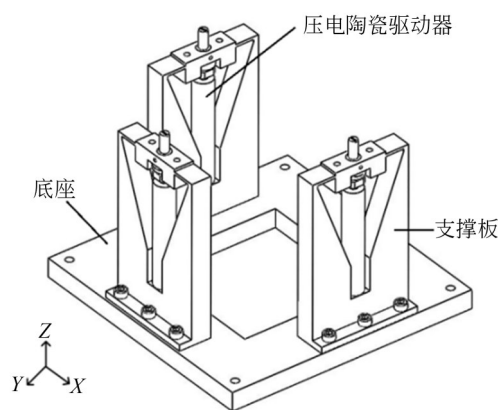


图4 支撑板结构

Fig. 4 Structure of supporting plate

3 驱动及控制系统设计

微位移工作台通过压电陶瓷驱动^[12]来实现各个自由度的运动。本文设计的压电陶瓷控制系统主要由软件和硬件系统两部分组成,控制流程如图5所示。软件部分主要包括上位机人机交互软件和下位机微处理器驱动控制软件两部分;硬件部分主要包括ARM主控电路、信号处理电路和线性放大电路三部分。

上位机软件下达控制指令,发送指令到主控电路微处理器中,解析指令将任务分配到信号处理电路,微处理器分析任务,驱动D/A转换芯片,使它输出 $0 \sim 5\text{ V}$ 的电压信号,再经过低通滤波器限制带宽。线性放大电路主要实现电压放大和功率放大,放大电路自带限流保护措施。

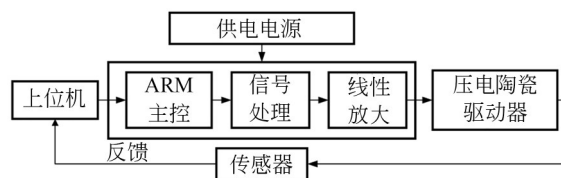


图5 控制系统原理

Fig. 5 Schematic diagram of control system

3.1 硬件组成

硬件电路主要由以下3个部分构成:

(1)ARM主控电路。压电陶瓷控制器选用意法半导体公司生产的基于ARM构架

STM32F407 芯片,该芯片作为核心微处理器在
主控电路中用来与上位机实时通信。

(2)信号处理电路由 STM32F407 最小系统,
信号处理模块以及电源模块 3 个部分组成,其主
要作用是将从微处理器获取的数字信号转换为
模拟信号并进行放大和滤波处理。

(3)线性放大电路主要由高压运放电路和功
率放大电路两个部分组成。高压运放电路将信
号处理电路输出的直流电压进一步放大以满足
驱动电压范围需求。高压运放电路的噪声约为
0.6 mVpp,带宽为 1 kHz,最大输出电流为
0.5 A,电压输出为 0~120 V。

3.2 软件设计

微位移工作台驱动及控制系统的软件部分
主要由上位机软件和下位机软件组成,上位机软
件主要负责与人交互,实现与下位机通信的参数
设置以及运动控制,完成对压电陶瓷驱动方案的
传送;下位机软件主要是微处理器程序,完成接
收上位机的驱动方案并进行解析和输出电压信
号的任任务。

3.2.1 上位机软件设计开发

基于 C++ 的 Qt 图形化界面开发框架开发
上位机软件,Qt 以跨平台框架著称,提供统一、直
观、强大 API 的库函数集合,可以提高软件的可
移植性和通用性。上位机软件主要是发送对微
动台控制器的主控芯片 STM32F407 的指令。控
制主控芯片定性定量输出电压值驱动压电陶瓷,
从而实现微动台沿 X、Y、Z 轴的平动以及绕 X、
Y、Z 轴的转动。上位机软件的功能设计和布局
如图 6 所示。



图 6 上位机软件界面

Fig. 6 Interface of upper computer software

为更好地与控制器进行数据交互,上位机软
件在与控制器通信成功后,开启接收串口缓冲
区数据的线程,不断地去读取控制器传输回来
的数据并进行解析,直到完成整个测量。具体
流程如图 7 所示。

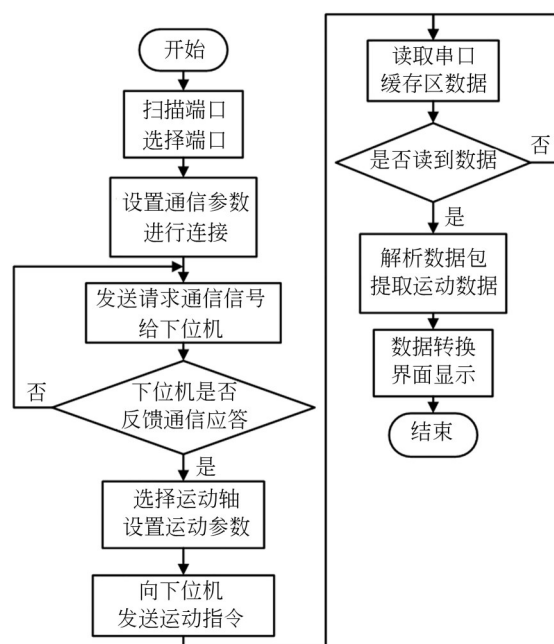


图 7 上位机控制程序流程

Fig. 7 Flowchart of upper computer control program

3.2.2 下位机软件设计开发

下位机软件写入控制微处理器 STM32F407
芯片的具体控制方案,主要任务是接收上位机发
送的控制方案指令,验证指令的有效性后解析指
令,根据解析后得到的事务,将它分配到对应的
信号处理板,信号处理板上的微处理器分析任
务,控制 DAC 输出对应驱动压电陶瓷的电压进
而控制微动台产生微小位移。具体流程如图 8
所示。

3.2.3 上、下位机软件通信协议制定

微位移工作台控制系统需要上位机软件和
下位机软件的相互配合才能实现对整个系统的
驱动控制,这就需要制定上位机和下位机的通
信协议。

上位机软件将传输的指令根据通信协议打
包成数据包,通过界面设置参数传输数据包给
下位机,下位机的微处理器根据制定的串口通信

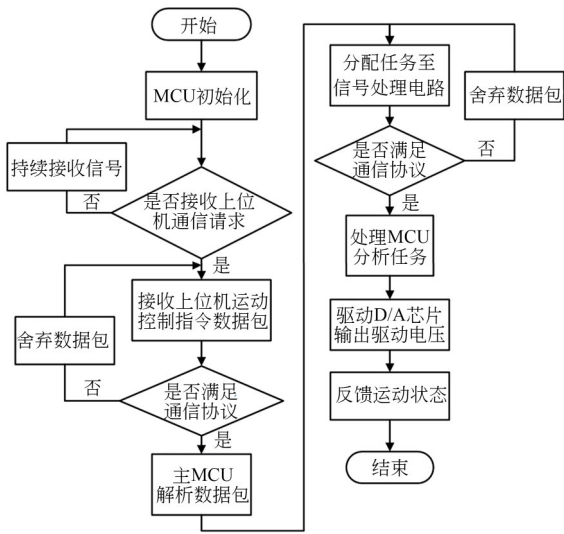


图8 下位机控制程序流程

Fig. 8 Flowchart of lower computer control program

议,判断是否满足通信协议,满足则开始处理这些数据,不满足则继续等待下一条指令,覆盖错误数据。微处理器处理完数据,通过SPI通信把输出的电压值以数字量的形式发送给数模转换芯片AD5791,并输出对应的电压信号,进而控制微动台进行指定运动。

4 测试实验与结果

通过开发的软硬件控制系统对研制的六自由度微位移工作台进行实验测试,工作台底座与气浮光学平台刚性连接,测试系统外部设有防尘罩,可以大幅阻隔外部气流扰动,实验室环境温度为 $(20\pm0.5)^{\circ}\text{C}$,环境湿度为55%RH左右。

4.1 微位移工作台线位移行程和分辨力测试

以X轴测试为例,首先上位机选择测试的运动类型,发送运动控制指令给下位机,下位机控制压电陶瓷控制器输出对应的驱动电压信号,压电陶瓷致动器在驱动电压的作用下推动六自由度微动台发生微小的线位移,电容式传感器用于检测微动台的位移变化并反馈给上位机。实验测试系统如图9所示,测试使用的传感器为安徽见行科技有限公司研制的C202电容式传感器,量程为500 μm。探头与测量目标的距离在100

μm左右,在10 Hz采样率时,噪声水平约为0.4 nm。最终工作台的分辨力测试结果如图10所示。

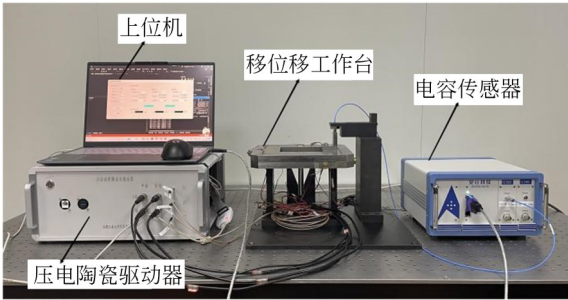


图9 线位移实验测试系统

Fig. 9 Photo of line displacement test system

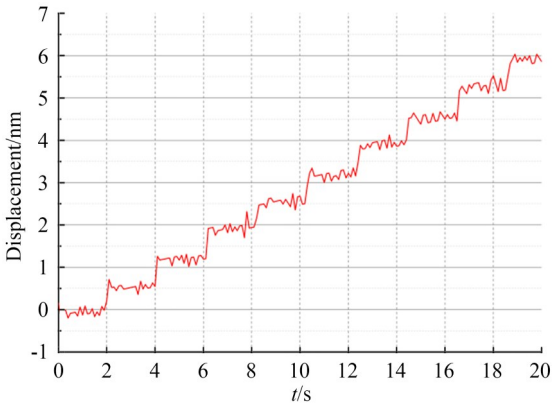


图10 X轴位移分辨力测试结果

Fig. 10 Test result of X-axis displacement resolution

图10中,每一段阶梯保持2 s,对每一段阶梯保持时间内的数值取平均值作为每一段的位移,相邻阶梯的位移作差,最后对所有的差值取平均值作为最后的分辨力结果。Y和Z轴的测试流程与X轴类似,最终的测量结果如表1所示,X,Y,Z轴线位移行程分别为20.72,20.02和37.60 μm,分辨力分别为0.65,0.68和0.63 nm。

表1 线位移测试结果

Tab. 1 Test results of line displacement

平动方向	行程/μm	分辨力/nm
X轴	20.72	0.65
Y轴	20.02	0.68
Z轴	37.60	0.63

4.2 微位移工作台角位移行程和分辨力测试

以 X 轴测试为例,首先上位机选择需要测试的运动类型,发送运动控制指令给下位机,下位机控制压电陶瓷控制器输出对应的驱动电压信号,压电陶瓷致动器在驱动电压的作用下推动六自由度微动台发生微小的角位移,激光干涉仪用于检测微动台的位移变化并反馈给上位机。实验测试系统如图 11 所示。

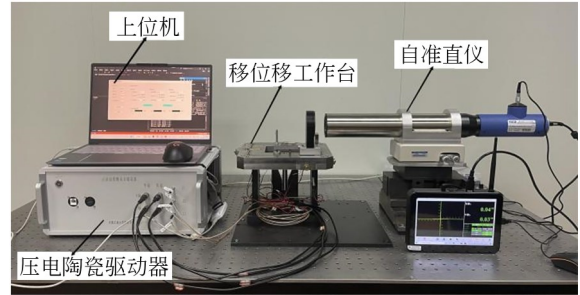


图 11 角位移实验测试系统

Fig. 11 Photo of angular displacement test system

测试使用的传感器是 AutoMAT 公司研制的 ULTRA-5050HR 自准直仪,测量行程为 $\pm 100''$,测量分辨力可达 $0.01''$,噪声水平在 $0.02''$ 以内,工作台的分辨力测试结果如图 12 所示。

图 12 中,每一段阶梯保持两秒,对每一段阶梯保持时间内的数值取平均值作为每一段的角位移,然后相邻阶梯的角位移值作差,最后对所有差值取平均值作为分辨力结果。Y 和 Z 轴的测试流程和 X 轴类似,测量结果如表 2 所示,X, Y,

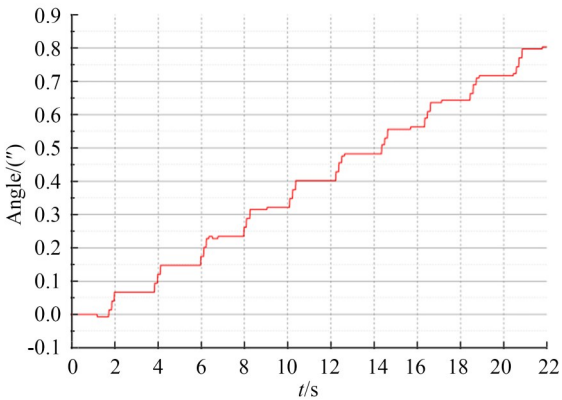


图 12 绕 X 轴角分辨力测试结果

Fig. 12 Test result of X-axis angular resolution

Z 轴的角位移行程分别为 $39.0''$, $33.8''$ 和 $27.9''$,分辨力分别为 $0.078''$, $0.063''$ 和 $0.084''$ 。

表 2 角位移测试结果

Tab. 2 Test results of angular displacement

转动方向	行程/($''$)	分辨力/($''$)
X 轴	39.0	0.078
Y 轴	33.8	0.063
Z 轴	27.9	0.084

在性能测试完成后,将所研制的工作台与其他微位移工作台的性能进行了对比,如表 3 所示。可以发现,所研制的工作台在分辨力方面有较大的提高。

表 3 本文研制的工作台与其他工作台的性能比较

Tab. 3 Comparison between proposed stage and previous works

工作台	驱动方式	自由度	行 程	分辨力
文献[7]	PZT	2	$212.5\text{ }\mu\text{m} \times 219.2\text{ }\mu\text{m}$	$7\text{ nm} \times 7\text{ nm}$
文献[8]	PEA	3	$128.1\text{ }\mu\text{m} \times 131.3\text{ }\mu\text{m} \times 17.9\text{ }\mu\text{m}$	$8\text{ nm} \times 8\text{ nm} \times 8\text{ nm}$
文献[9]	PZT	4	$321.5\text{ }\mu\text{m} \times 321.5\text{ }\mu\text{m} \times 42.2\text{ }\mu\text{m} \times 27.4''(Y)$	$5\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m} \times 1\text{ }\mu\text{m} \times 4.13''(Y)$
文献[10]	PZT	6	$1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ $600'' \times 600'' \times 600''$	$0.5\text{ }\mu\text{m} \times 0.5\text{ }\mu\text{m} \times 1\text{ }\mu\text{m}$ $0.5'' \times 0.5'' \times 0.5''$
PI H-860	PIMag	6	$15\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ $4^\circ \times 4^\circ \times 4^\circ$	$1\text{ }\mu\text{m} \times 1\text{ }\mu\text{m} \times 1\text{ }\mu\text{m}$ $1.8'' \times 1.8'' \times 1.8''$
本文	PZT	6	$20.72\text{ }\mu\text{m} \times 20.02\text{ }\mu\text{m} \times 37.60\text{ }\mu\text{m}$ $39.0'' \times 33.8'' \times 27.9''$	$0.65\text{ nm} \times 0.68\text{ nm} \times 0.63\text{ nm}$ $0.078'' \times 0.063'' \times 0.084''$

5 结 论

本文研制了一种六自由度高精度微位移工作台并且设计开发了一套控制系统。工作台的整体结构采用“串并联混合驱动”的形式以及中空结构,通过“压电陶瓷+柔性铰链”的驱动方式将三层结构中的六个自由度的运动传递到载物台上,通过这种新型结构设计实现了多自由度和高分辨力的微位移运动。通过搭建测试系统并

且搭配控制软件对微位移工作台进行了测试,实验结果表明,该工作台可以实现在 X, Y, Z 方向上的线位移分辨力均优于 0.7 nm ;在绕 X, Y, Z 轴转动的角位移分辨力均优于 $0.1''$ 。

本文所研制的工作台解决了传统工作台自由度少,分辨力较低等问题,对于微位移工作台的构型设计具有指导意义,但是工作台存在压电陶瓷迟滞等不足,未来会在闭环控制以及运动精度等方面开展进一步的研究。

参考文献:

- [1] 胡逸凡,章海军,倪凯佳. 三角放大型压电陶瓷微纳米驱动机构[J]. 光学精密工程, 2022, 30(17): 2094-2099.
HU Y F, ZHANG H J, NI K J. Mini-piezo-element drive microactuator based on triangular amplification [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(17): 2094-2099. (in Chinese)
- [2] 张揽宇,高健. 高速大行程宏微复合运动平台的振动抑制与精密定位方法研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(11): 131.
ZHANG L Y, GAO J. Vibration reduction mechanism and precision positioning method for high-speed large-stroke macro-micro composite motion stage [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(11): 131. (in Chinese)
- [3] 李冲,童玉健,梁康,等. 压电驱动微型精密夹持机构设计与实验研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(11): 1302-1308, 1385.
LI CH, TONG Y J, LIANG K, *et al.* Design and experimental study of piezoelectric actuated micro precision clamping mechanisms[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(11): 1302-1308, 1385. (in Chinese)
- [4] 韩世泽,杨栋,胡晓宁,等. 基于涡旋光与平面波干涉的微位移测量[J]. 光学精密工程, 2022, 30(17): 2058-2066.
HAN SH Z, YANG D, HU X N, *et al.* Micro-displacement measurement based on interference of vortex beams and plane wave [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(17): 2058-2066. (in Chinese)
- [5] CHEN F. Design and test of a compact large-stroke dual-drive linear-motion system[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 180: 109438.
- [6] CHEN N, LIU X F. Dynamic modeling and attitude decoupling control for a 3-DOF flexible piezoelectric nano-positioning stage based on ADRC[J]. *Micromachines*, 2022, 13(10): 1591.
- [7] WU Z, XU Q. Design, optimization and testing of a compact XY parallel nanopositioning stage with stacked structure[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, 126: 171-188.
- [8] TIAN Y, MA Y, WANG F, *et al.* A novel XYZ micro/nano positioner with an amplifier based on L-shape levers and half-bridge structure [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 302: 111777.
- [9] CHEN X G, LI Y M, XIE Y L, *et al.* Design and analysis of new ultra compact decoupled XYZ θ stage to achieve large-scale high precision motion [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 167: 104527.
- [10] CHEN F X, DONG W, YANG M, *et al.* A PZT actuated 6-DOF positioning system for space optics alignment[C]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. September 20, 2019, IEEE, 2019: 2827-2838.
- [11] H-860 六轴运动六足位移台 [Z/OL]. https://www.pi-china.cn/zh_cn/products/parallel-kinematic-hexapods/h-860-high-dynamics-motion-hexapod-700891, 2021.
H-860 six-axis motion hexapod stage [Z/OL]. https://www.pi-china.cn/zh_cn/products/parallel-kinematic-hexapods/h-860-high-dynamics-motion-hexapod-700891, 2021.

hexapod-700891, 2021. (in Chinese)

- [12] 王耿, 魏维宁, 代军, 等. 线性偏摆复合型压电微动平台[J]. 光学精密工程, 2022, 30(9): 1058-1070.

WANG G, WEI W N, DAI J, *et al.* Linear yaw compound piezoelectric micro-motion platform[J].

Optics and Precision Engineering, 2022, 30(9): 1058-1070. (in Chinese)

作者简介:



黄强先(1968—),男,山东青岛人,教授,博士生导师,1990年、1993年、1998年于合肥工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要研究方向为微纳米三维测量技术、仪器精度理论等。E-mail:huangqx@hfut.edu.cn

通讯作者:



张连生(1986—),男,山东莘县人,副教授,硕士生导师,2015年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事微纳米测量技术与系统、压电精密驱动与应用的研究工作。E-mail: ls-zhang@hfut.edu.cn