

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.01.15

二维并联跨尺度压电精密位移驱动平台研制

潘成亮, 吴家豪, 张婷, 蒋衡, 李维诗, 夏豪杰*

(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: 多自由度跨尺度精密位移驱动平台在光学计量检测、半导体制造、生物医学工程等诸多领域具有广泛的应用需求。针对串联多自由度压电驱动平台结构厚重的问题, 结合压电柔性铰链机构和冲击驱动原理, 研制了一款结构紧凑的二维并联跨尺度压电精密位移驱动平台。通过有限元仿真和实验测试验证其性能, 结果表明: 压电柔性铰链定子的静态位移为 $7.95 \mu\text{m}$, 固有频率为 11.80 kHz 。低频步进位移和高频平滑运动测试表明: 原理样机的步进位移分辨力为 100 nm , 平滑运动速度为 4.96 mm/s , 负载力达到 100 mN 以上。原理样机基本满足多自由度跨尺度精密位移驱动的技术要求, 在微纳光学检测等系统中具有良好的应用价值。

关键词: 压电平台; 并联机构; 冲击驱动; 柔性铰链; 步进位移; 平滑运动

中图分类号: TB9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2023)01-0154-07

Development of two-dimensional parallel cross-scale piezoelectric precision displacement driving platform

PAN Chengliang, WU Jiahao, ZHANG Ting, JIANG Heng, LI Weishi, XIA Haojie*

(Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Multi-degree-of-freedom (multi-DOF) cross-scale precision displacement driving platform has a wide range of applications in optical metrology and detection, semiconductor manufacturing, biomedical engineering, and many other fields. In view of the heavy structure of the serial multi-DOF piezoelectric driving platform, a compact two-dimensional parallel cross-scale piezoelectric precision displacement driving platform is developed, which is based on the piezoelectric flexure hinge mechanism and impact driving principle. The results of finite element simulation and experimental test show that the piezoelectric flexure hinge stator has a static displacement of $7.95 \mu\text{m}$ and a natural frequency of 11.80 kHz . The low frequency step displacement and high frequency smooth movement tests show that the principle prototype has a step displacement resolution of 100 nm and a smooth movement speed of 4.96 mm/s . The load force reaches above 100 mN . The principle prototype meets the basic technical requirements of multi-DOF cross-scale precision displacement drive, and shows good application value in micro and nano optical detection systems.

Key words: piezoelectric platform; parallel mechanism; impact drive; flexure hinge; step displacement; smooth movement

收稿日期: 2022-11-07; 修回日期: 2022-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(51775157, 51975179); 中央高校基本科研业务费项目(PA2021GDSK0099)

引用格式: 潘成亮, 吴家豪, 张婷, 等. 二维并联跨尺度压电精密位移驱动平台研制[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 154-160.

Citation: PAN C L, WU J H, ZHANG T, et al. Development of two-dimensional parallel cross-scale piezoelectric precision displacement driving platform[J]. Metrology and measurement technology, 2023, 43(1):154-160.



0 引言

微纳精密位移驱动技术广泛应用于光学计量检测、半导体制造、生物医学工程等领域，这些应用往往要求精密位移驱动装置具有亚微米级以上的位移分辨力、毫米级/秒的运动速度、厘米级的跨尺度行程^[1-3]、多运动自由度以满足复杂任务需求。相较传统电磁电机和新型智能材料驱动器，压电宏微驱动器和各类压电马达在上述应用中表现出更好的竞争优势^[4-6]。然而，现有压电驱动装置的原理和构造形式各有优劣^[7-8]，仍未有理想的设计方案可完全满足日益提高的应用需求。因此，研究结构紧凑、响应迅速、运动灵活、性能稳定的多自由度跨尺度精密位移驱动技术一直是微纳领域的前沿课题^[9]。

压电驱动往往需要配合机械结构使用，柔性铰链机构可放大压电叠堆的微小位移，提供数百微米的运动行程和纳米级的位移分辨力，并可构造结构紧凑的多自由度位移驱动机构，在微纳领域获得了广泛的应用^[10-11]，如德国PI公司的P-612压电陶瓷纳米定位系统^[12]，采用并联构造形式，整体尺寸为60 mm×60 mm×18 mm，且具有20 mm×20 mm的通光孔径，X、Y方向的位移分辨力达到5 nm，但行程只有100 μm×100 μm，不具备跨尺度的运动能力。在跨尺度的压电驱动机构中，压电冲击驱动机构因结构简单、控制灵活、分辨力高、易于集成等优点而获得了广泛应用^[13-14]，如德国SmarAct公司的XY-SLC系列二维定位系统^[15]，通过两个SLC系列线性压电马达叠加而成，单个平台的典型尺寸为60 mm×24 mm×10.5 mm，具有35 mm的行程、20 mm/s的运动速度和1 nm的位移分辨力，二维定位系统的整体尺寸为65 mm×52 mm，采用串联构造形式导致高度方向的尺寸大大增加，同时X、Y方向的负载差异导致运动控制难度提高，限制了实际的应用效果。

为解决目前市场上串联多自由度压电驱动平台产品整体结构厚重，无法满足微纳系统狭小空间的位移驱动需求的问题^[17]，结合压电并联柔性铰链机构和冲击驱动原理，研制了一款结构紧凑的二维并联跨尺度压电精密位移驱动平台^[16]。

1 结构设计和驱动原理

二维并联跨尺度压电精密位移驱动平台的结构设计如图1所示，其中定子采用方形对称设计思路，中心框架的四边分别通过横向和纵向的柔性铰链与四角的基座相连，定子四边分别安装压电叠堆，通过激励压电叠堆推动柔性铰链变形，使中心框架产生X、Y方向的位移^[18]。基座固定安装在底座上，中心框架的四角球窝内安装摩擦小球，定子放置在摩擦小球上，通过定子球面和动子底面的摩擦耦合产生冲击驱动。底座中心安装磁铁并置于中心框架的通孔内，动子内部安装铁片，利用磁铁和铁片之间的吸引作用产生摩擦耦合所需的预压力。

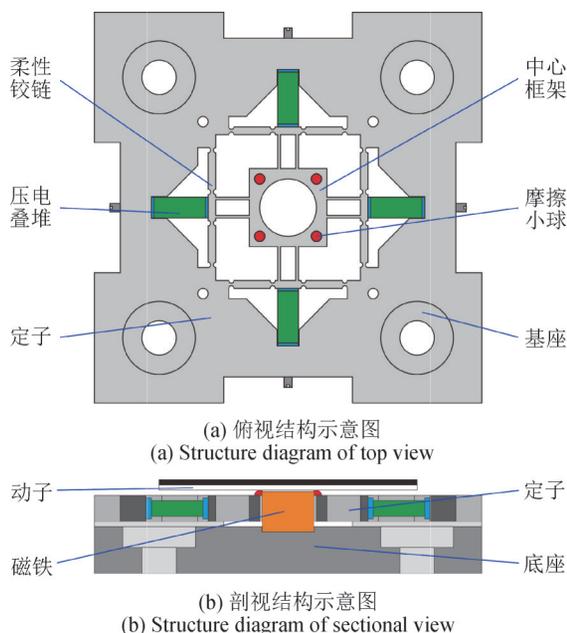


图1 压电精密位移驱动平台的结构示意图

Fig.1 Structural diagram of piezoelectric precision displacement driving platform

以X方向运动为例，该平台的工作原理如图2所示。图2(b)红线表示用于激励左侧压电叠堆的激励电压，蓝线表示用于激励右侧压电叠堆的激励电压。在初始 t_0 时刻，采用最大电压 U_m 激励左侧压电叠堆，而右侧压电叠堆的激励电压为0V，左侧压电叠堆伸长并推动中心框架位于最右侧。之后，左右两侧压电叠堆激励电压分别缓慢减小和增大，中心框架向左缓慢位移， t_1 时刻中心框架处于平衡位置， t_2 时刻右侧压电叠堆在最大电压 U_m

激励下推动中心框架处于最左侧。在 $t_0 \sim t_2$ 过程中，中心框架运动缓慢，动子在较小的静摩擦力作用下即可“粘”附在中心框架上，同步左移产生位移 x_1 。在 $t_2 \sim t_3$ 过程中，左侧压电叠堆的激励电压迅速增大至 U_m ，而右侧压电叠堆的激励电压也恢复到 0 V，中心框架快速返回到最右侧，此时耦合界面不足以提供动子跟随运动的摩擦力，动子在滑动摩擦力的作用下仅向右“滑”行位移 x_2 。经过上述的“粘”、“滑”工作过程，动子向左移动步进位移 Δx 。改变激励电压的方向，动子将产生向右的步进位移，在连续锯齿波激励下重复上述工作过程，动子将产生持续的步进位移。当工作频率持续增加，上述“粘-滑”的工作过程可转变为“滑-滑”的驱动模式，由于 $t_0 \sim t_2$ 以及 $t_2 \sim t_3$ 过程中滑动摩擦力的作用时间不等，动子将产生单方向的平滑运动。因此，冲击驱动在低频激励下可产生高分辨力的步进位移，在高频激励下可产生高速的平滑运动，以满足不同任务需求。

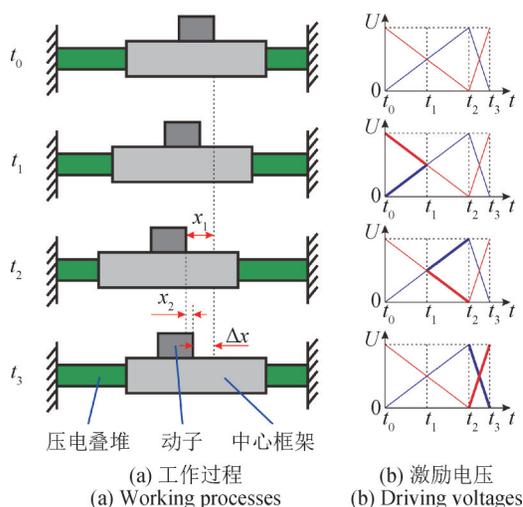


图2 压电精密位移驱动平台的工作原理
Fig.2 Working principle of piezoelectric precision displacement driving platform

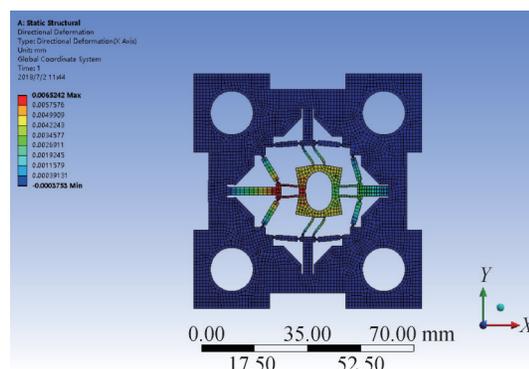
2 柔性铰链定子仿真分析

为了分析柔性铰链定子的驱动特性，利用有限元仿真软件 ANSYS 建立定子的基本结构模型并进行静动态仿真，了解并联结构的静态位移和固有频率情况。定子的边长为 75 mm，厚度为 5 mm，中心框架的边长为 15 mm，压电叠堆的长度为 10 mm，截面为 3 mm × 3 mm，压电叠堆和柔性铰链的材料参数如表 1 所示。

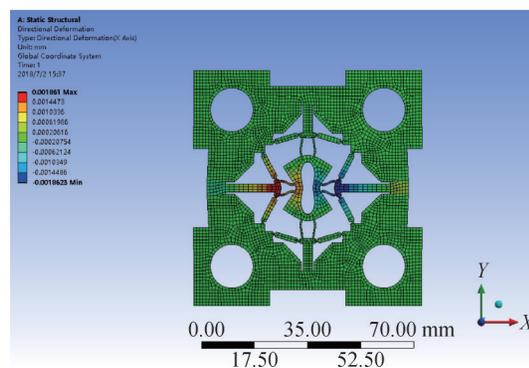
表 1 材料参数

材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比
压电叠堆	7550	33.5	0.33
柔性铰链	7820	198	0.28

柔性铰链定子的静态位移如图 3 所示。左侧压电叠堆在 160 V 的最大激励电压下，可产生 153 N 的驱动力，使中心框架向右产生平均 5.4 μm 的位移；左右两侧压电叠堆同时施加 80 V 激励电压时，中心框架处于平衡状态。在 $t_0 \sim t_2$ 的工作过程中，由于左右两侧压电叠堆的叠加作用，中心框架可产生 10.8 μm 的位移，具有较大的静态位移能力。



(a) 左侧压电叠堆施加激励电压
(a) Applying driving voltage to the left piezoelectric stack



(b) 两侧压电叠堆施加激励电压
(b) Applying driving voltage to the both side piezoelectric stacks

图3 柔性铰链定子的静态位移
Fig.3 Static displacements of the flexure hinge stator

如图 3 所示，虽然中心框架在压电叠堆的作用下存在一定形变，导致 4 个摩擦小球所在位置相对未施加电压状态的偏移量存在差异，但由于定子结构的对称性，仿真结果表明在 $t_0 \sim t_2$ 工作过程中 4

个位置的位移量是相同的^[16]，保证4个摩擦小球在冲击驱动下提供一致的摩擦耦合作用。

柔性铰链定子的典型振动模态如图4所示。第1振动模态表现为柔性铰链的上下垂直振动；第2振动模态表现为面内扭转振动；第3和第4振动模

态表现为正交方向的面内直线振动，分别与 X 、 Y 方向的静态位移对应。仿真结果表明：该柔性铰链定子具有较高的固有振动频率，面内直线振动模态的固有频率高达12.06 kHz，使得准静态下的冲击驱动具有较大的工作带宽。

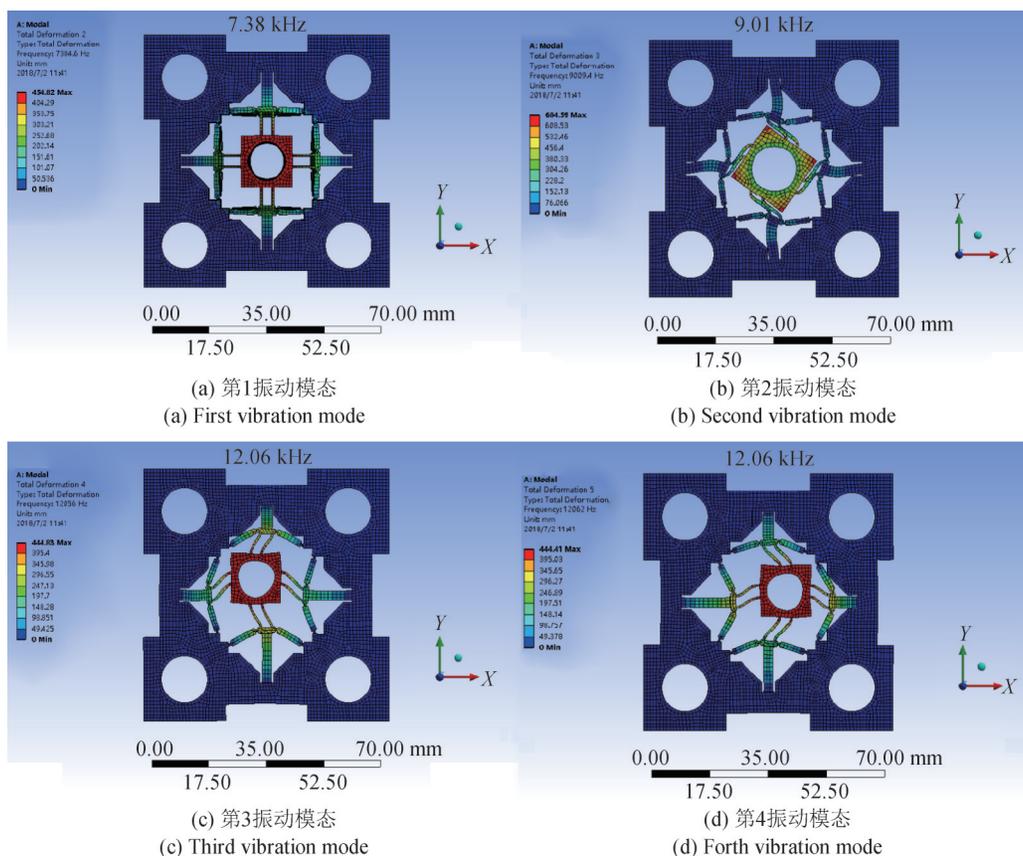


图4 柔性铰链定子的振动模态

Fig.4 Vibration modes of the flexure hinge stator

定子结构的静态位移和固有频率主要由柔性铰链的刚度和中心框架的质量决定。提高柔性铰链的刚度有助于提高定子的固有频率，但降低了中心框架的静态位移。中心框架采用中空结构，这样可降低质量，从而提高固有频率，但同时结构强度也将降低，因此需要综合考虑静态位移和工作频率的要求，优化定子结构并确定尺寸参数。

3 实验测试与结果分析

3.1 原理样机

装配完成的原理样机如图5所示。原理样机采用苏州攀特陶瓷提供的压电叠堆产品（型号为PTJ1500303101），其标称位移为10 μm ，在两侧粘贴有厚度为1 mm的氧化铝陶瓷垫片，防止预紧螺钉损坏压电叠堆。柔性铰链采用65锰钢，使用线

切割慢走丝一体加工而成。4个氧化铝摩擦小球使用DP460环氧树脂胶粘贴在中心框架的球窝内。定子由氧化铝陶瓷片和Q235铁片粘结而成，尺寸为50 mm \times 50 mm \times 2 mm，运动范围可达20 mm \times 20 mm。磁铁采用钕铁硼永磁体，放置在中心框架的通孔内，并使用环氧树脂胶粘贴在底座上。

3.2 测试平台

原理样机的测试平台如图6所示。利用信号发生器输出锯齿波电压信号，经功率放大器获得压电叠堆所需的激励电压幅值。直流电压源为功率放大器供电并提供压电叠堆的偏置电压，示波器用于监测驱动电路的电压信号，使用激光位移传感器测量原理样机在不同激励电压和频率下的定子位移和动子运动情况，利用计算机进行数据处理和分析，从而了解原理样机的位移驱动特性^[19]。

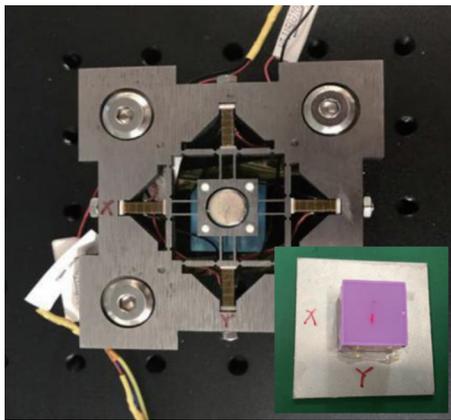


图5 原理样机

Fig.5 Principle prototype

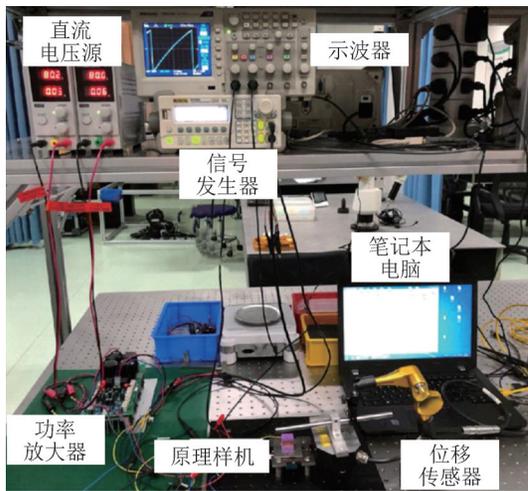


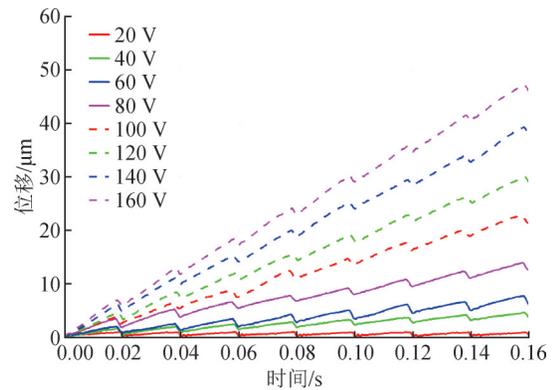
图6 测试平台

Fig.6 Testing platform

3.3 实验结果

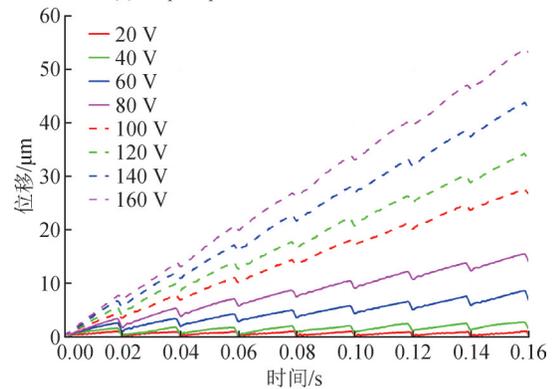
定子位移测试结果表明在 160 V, 100 Hz 的激励电压下, 中心框架在 X, Y 方向分别可以产生 7.15 μm 和 7.95 μm 的平均位移^[20]。阻抗测试结果表明定子的最小谐振频率发生在 11.80 kHz, 为横向振动的固有频率。定子的静动态实验结果与结构仿真结果基本一致, 表明原理样机的定子达到了预期的驱动能力。

原理样机在 50 Hz 激励电压下的位移曲线如图 7 所示。在低频激励电压下, 原理样机表现出离散的步进位移, 随着激励电压的提高, 步进位移逐渐增大。当激励电压低于 20 V 时, 原理样机不能产生稳定的冲击运动; 当激励电压为 20 V 时, 动子在 X, Y 方向可产生最小 100 nm 的步进位移; 在 160 V 最大激励电压下, X, Y 方向的最大步进位移分别为 5.76 μm 和 6.64 μm 。原理样机步进位移的



(a) X方向步进位移曲线

(a) Step displacement curves in X direction



(a) Y方向步进位移曲线

(a) Step displacement curves in Y direction

图7 50 Hz 激励电压下的步进位移曲线

Fig.7 Step displacement curves with driving voltages at 50 Hz

分辨力可达 100 nm, 运用定子自身的形变位移, 扫描驱动下原理样机, 其位移分辨力可达到纳米级。

在 160 V, 50 Hz 激励电压下, 动子在不同负载下的步进位移如图 8 所示。原理样机的步进位移随着负载的增大而减小, 无负载下的步进位移约为 6.0 μm , 在 120 mN 负载下, X, Y 方向的步进位移分别减小至 1.22 μm 和 0.59 μm , 两个方向的最大

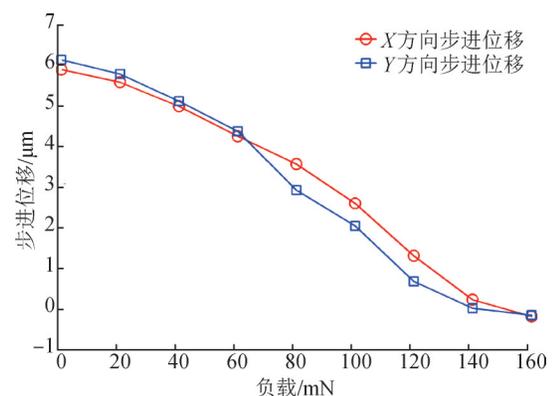


图8 160 V, 50 Hz 激励电压下步进位移的负载特性

Fig.8 Load characteristics of step displacement under driving voltage of 160 V at 50 Hz

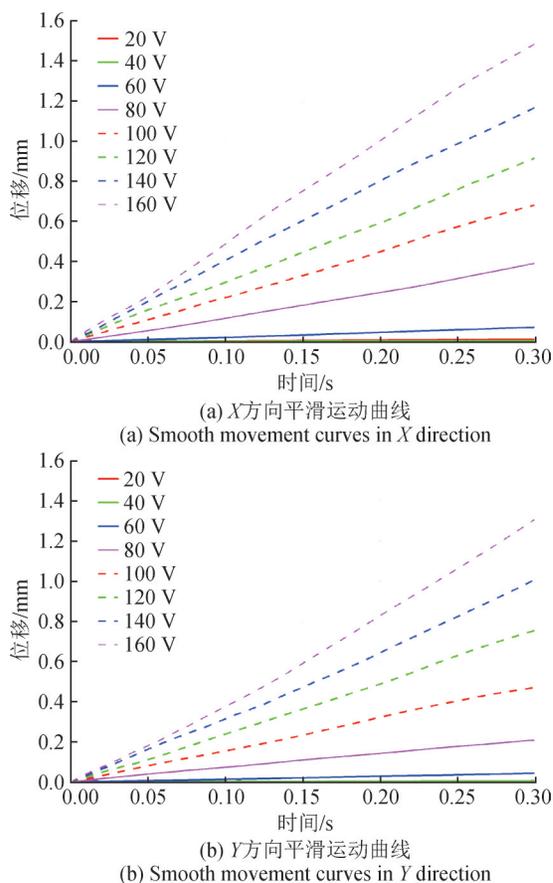


图9 1 kHz激励电压下的平滑运动曲线

Fig.9 Smooth movement curves with driving voltages at 1 kHz

负载力约为140 mN。

原理样机在1 kHz激励电压下的运动曲线如图9所示。在高频激励电压下，原理样机表现为连续的平滑运动，随着激励电压的提高，运动速度逐渐增大，且近似呈线性关系。在160 V最大激励电压下，X、Y方向的最大运动速度分别为4.96 mm/s和4.36 mm/s。

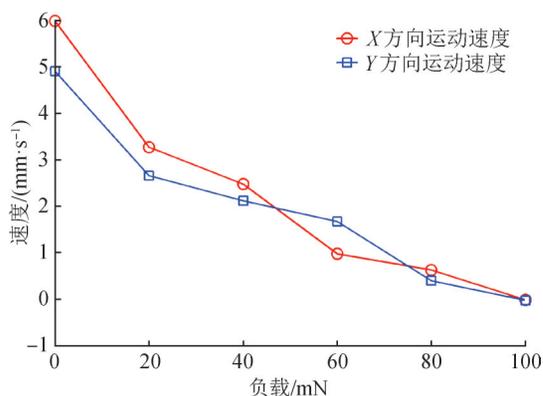


图10 160 V, 1 kHz激励电压下运动速度的负载特性

Fig.10 Load characteristics of moving speed under driving voltage of 160 V at 1 kHz

在160 V, 1 kHz激励电压下，动子在不同负载下的运动速度如图10所示。原理样机的运动速度随着负载的增大而减小，无负载下的运动速度约为5.5 mm/s，在80 mN负载下，X、Y方向的运动速度分别减小到0.63 mm/s和0.40 mm/s，两个方向的最大负载力约为100 mN。

4 结论

结合压电并联柔性铰链机构和冲击驱动原理，设计了一款二维并联跨尺度压电精密位移驱动平台，并制作了原理样机，之后测试了低频和高频冲击驱动下的位移和运动特性。该精密位移驱动平台的整体尺寸为75 mm × 75 mm × 18 mm，运动范围达到20 mm × 20 mm，在低频冲击驱动下，可产生最小100 nm的步进位移，负载力达到140 mN；在高频冲击驱动下，可产生最大4.96 mm/s的平滑运动，负载力达到100 mN。相较于SmarAct等公司推出的多自由度串联位移平台，高度方向的尺寸大大降低，可满足微纳光学检测等系统狭小空间的应用需求。

参考文献

[1] RU C H, LIU X Y, SUN Y. Nanopositioning technologies: fundamentals and applications[M]. Springer, 2016.

[2] 吴博达, 鄂世举, 杨志刚, 等. 压电驱动与控制技术的发展与应用[J]. 机械工程学报, 2003, 39 (10): 79 - 85.

WU B D, E S J, YANG Z G, et al. Development and application of piezoelectric actuation and control [J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2003, 39 (10): 79 - 85. (in Chinese)

[3] 李强, 任冬梅, 兰一兵, 等. 用于纳米级表面形貌测量的光学显微测头[J]. 计测技术, 2022, 42(2): 91 - 96.

LI Q, REN D M, LAN Y B, et al. Optical microscope probe for the measurement of nano-scale topography [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (2): 91 - 96. (in Chinese)

[4] OUYANG P R, TJIPTOPRODJO R C, ZHANG W J, et al. Micro-motion devices technology: the state of arts review [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2008, 38: 463 - 478.

[5] 节德刚, 刘延杰, 孙立宁, 等. 一种宏微双重驱动精密定位机构的建模与控制[J]. 光学精密工程, 2005, 13 (2): 171 - 178.

JIE D G, LIU Y J, SUN L N, et al. Modeling and control

- of a macro-micro dual-drive ultra-precision positioning mechanism[J]. Optics and precision engineering, 2005, 13(2): 171 - 178. (in Chinese)
- [6] 李华丰, 朱振宇, 兰一兵, 等. 可调姿态一维运动平台[J]. 计测技术, 2015, 35 (3): 27 - 29.
LI H F, ZHU Z Y, LAN Y B, et al. Posture variable one-dimension platform[J]. Metrology and measurement technology, 2015, 35(3): 27 - 29. (in Chinese)
- [7] ZHANG Y L, ZHANG Y, RU C H, et al. A load-lock-compatible nanomanipulation system for scanning electron microscope[J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2013, 18(1): 230 - 237.
- [8] DENG J, LIU S H, LIU Y X, et al. A 2-DOF needle insertion device using inertial piezoelectric actuator [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2022, 69 (4): 3918 - 3927.
- [9] MOHITH S, UPADHYA A R, NAVIN K P, et al. Recent trends in piezoelectric actuators for precision motion and their applications: a review[J]. Smart materials and structures, 2021, 30(1): 13002.
- [10] YONG Y K, APHALE S S, MOHEIMANI S O R. Design, identification, and control of a flexure-based XY stage for fast nanoscale positioning[J]. IEEE transactions on nanotechnology, 2009, 8(1): 46 - 54.
- [11] 林盛隆, 张宪民, 朱本亮. 高带宽两自由度并联柔顺精密定位平台的优化设计与实验[J]. 光学精密工程, 2019, 27 (8): 1774 - 1782.
LIN S L, ZHANG X M, ZHU B L. Optimal design and experiment of a high-bandwidth two-degree-of-freedom parallel nanopositioning stage[J]. Optics and precision engineering, 2019, 27(8): 1774 - 1782. (in Chinese)
- [12] P-612. 2XY piezo nanopositioning system[EB/OL]. <https://www.physikinstrumente.nl/en/products/nanopositioning-piezo-flexure-stages/xy-piezo-flexure-stages/p-6122-xy-piezo-nanopositioning-system-201740>.
- [13] 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 B W, WANG Z H, CHEN L G, et al. Current development of trans-scale precision positioning technology based on the stick-slip effect[J]. Piezoelectrics and acousto-optics, 2011, 33(3): 479 - 485. (in Chinese)
- [14] MAZEIKA D, VASILJEV P, BORODINAS S, et al. Small size piezoelectric impact drive actuator with rectangular bimorphs [J]. Sensors and actuators A: physical, 2018, 280(1): 76 - 84.
- [15] XY-SLC24: 60[EB/OL]. <https://www.smaract.com/en/pre-defined-systems/product/xy-slc-2460>.
- [16] 张婷. 二维并联压电冲击驱动平台运动特性研究[D]. 安徽: 合肥工业大学, 2019.
ZHANG T. Study on motion characteristics of a two-dimensional parallel piezoelectric impact drive platform[D]. Anhui:Hefei University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [17] 范光照, 李瑞君. 三坐标测量机微纳探头的设计与验证[J]. 计测技术, 2018, 38 (3): 60 - 81.
FAN K C, LI R J. Design and verification of micro/nano-probes for coordinate measuring machine [J]. Metrology and measurement technology, 2018, 38 (3): 60 - 81. (in Chinese)
- [18] 张世忠, 荣伟彬, 台国安, 等. 基于黏滑运动原理的单自由度纳米定位台设计与动力学分析[J]. 机械工程学报, 2012, 8 (19): 29 - 34.
ZHANG S Z, RONG W B, TAI G A, et al. Designing and dynamic modeling of 1D nanopositioner based on stick-slip motion principle[J]. Journal of mechanical engineering, 2012, 8(19): 29 - 34. (in Chinese)
- [19] 金家楣, 时运来, 李玉宝, 等. 新型惯性式直线超声压电机的运动机理及实验研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16 (12): 2371 - 2377.
JIN J M, SHI Y S, LI Y B, et al. Research on novel inertial linear ultrasonic piezoelectric motor[J]. Optics and precision engineering, 2008, 16(12): 2371-2377. (in Chinese)
- [20] 陶继增, 王中宇, 李程. 压电叠堆在正弦电压激励下振动位移特性的研究[J]. 计测技术, 2006, 26 (6): 20 - 22.
TAO J Z, WANG Z Y, LI C. Research on vibration displacement characteristic of piezoelectric ceramics under sine voltage excitation [J]. Metrology and measurement technology, 2006, 26(6): 20 - 22. (in Chinese)

(本文编辑:刘圣晨)



第一作者: 潘成亮 (1983—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为微纳精密位移驱动和传感技术。



通讯作者: 夏豪杰 (1979—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为仪器精度理论和微纳光学精密测量技术。