

文章编号 1004-924X(2025)20-3252-13

宏-微-纳跨尺度粘滑型压电驱动器动力学 建模与试验评价

云浩^{1,2*}, 陈延龙¹, 原路生³, 李京顺¹, 张登攀¹

(1. 河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454003;

2. 叶县先进制造业开发区科技研发中心, 河南 平顶山 467212;

3. 南京航空航天大学 航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了满足微纳电子制造领域中晶圆检测系统及扫描电子显微镜光学系统内部的精密驱动需求, 本研究提出了一种具有宏-微-纳跨尺度驱动的粘滑型压电驱动器。首先, 详细阐述了该驱动器的动、定子结构设计及其驱动原理, 通过有限元仿真方法对定子结构尺寸参数进行了优化。然后, 构建了驱动器的动力学模型, 进一步分析其步进特性。动力学仿真结果表明, 该驱动器具备微观步进位移能力。最后, 制作了驱动器的原理样机, 并搭建试验系统对其输出性能进行了评价。试验结果表明: 驱动器最大空载速度为 20.3 mm/s, 最大步进位移为 15.82 μm , 定位分辨率可达 70 nm, 最大负载为 2.2 N, 能够满足宏观大行程连续移动、微米级步进位移及纳米级高精定位的跨尺度驱动需求。本研究为粘滑型压电驱动器在扫描电镜光学系统内部光阑板驱动中以及晶圆检测平台中的应用提供了重要的理论与实验依据。

关键词: 粘滑型压电驱动器; 跨尺度; 精密定位; 动力学建模

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253320.3252

CSTR: 32169.14.OPE.20253320.3252

Dynamic modeling and experimental evaluation of Macro-Micro-Nano cross-scale stick-slip piezoelectric actuators

YUN Hao^{1,2*}, CHEN Yanlong¹, YUAN Lusheng³, LI Jingshun¹, ZHANG Dengpan¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University,
Jiaozuo 454003, China;

2. Science and Technology R&D Center of Yexian Advanced Manufacturing Development Zone,
Pingdingshan 467212, China;

3. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

* Corresponding author, E-mail: yunhao@hpu.edu.cn

Abstract: To meet the precision driving requirements of wafer inspection systems and the internal optical systems of scanning electron microscopes (SEMs) in the field of micro-nano electronics manufacturing, a

收稿日期: 2025-07-09; 修订日期: 2025-08-09.

基金项目: 河南省科技攻关项目 (No. 252102221010); 河南省高等学校重点科研项目 (No. 25A460010); 河南省高校基本科研业务费专项资金资助

stick-slip piezoelectric actuator with Macro-Micro-Nano cross-scale drive was proposed in this study. First, the structural design of the slider and stator of the actuator and its driving principle were elaborated in detail, and the dimensional parameters of the stator structure were optimized by finite element simulation method. Then, the dynamic model of the actuator was constructed to analyze its stepping characteristics. The simulation results showed that the actuator was capable of micro-stepping displacement. Finally, the prototype of the actuator was fabricated, and the experimental system was built to evaluate its output performance. The experimental results indicate that the proposed actuator exhibits a maximum no-load speed of 20.3 mm/s, a maximum step displacement of 15.82 μm , a positioning resolution of 70 nm, and a maximum load of 2.2 N, which can meet the cross-scale driving requirements of macro large-stroke continuous movement, micro-scale step displacement, and nano-scale high-precision positioning. This study provides an essential theoretical and experimental basis for the application of stick-slip piezoelectric actuators in critical scenarios such as the alignment of aperture plates in SEM optical systems and wafer inspection platforms.

Key words: stick-slip piezoelectric actuator; cross-scale; precision positioning; dynamic modeling

1 引言

近年来,随着微纳电子制造领域的快速发展,对更先进的精密驱动技术的需求也变得日益迫切,尤其是在大规模集成电路加工^[1]过程中晶圆检测系统及所用扫描电子显微镜光学系统内部,需要依托具有宏-微-纳跨尺度大行程驱动、微秒级响应速度、控制系统简单及结构灵活紧凑等性能指标的驱动装置对材料和设备进行精确的控制和操作。压电驱动器是一种基于压电驱动技术的新型微特电机^[2],凭借其精度高、响应快、无电磁干扰、断电自锁以及能够在真空环境下工作等优势^[3-5],为超精密加工^[6]、光学检测系统^[7]、微/纳操控系统/机器人^[8-9]、武器装备引信系统解保^[10]等高端装备领域的发展需求提供了技术支持。

根据振动条件的不同,压电驱动器可分为共振型和非共振型。共振型压电驱动器又称超声电机,具有高速、大推力等输出性能^[11],但是其只能在共振频率下工作且存在过热及磨损等问题^[12]。非共振压电驱动器具有更高的稳定性与定位精度,主要分为直接驱动型^[13]、尺蠖型^[14]、粘滑型^[15]以及行走型^[16]四种类型。Tang等人^[17]提出了一种直接驱动型压电驱动器,实现了纳米级的定位分辨率,然而行程有限,只有几十微米;Tian等人^[18]开发了一种尺蠖型压电驱动器,其最大推力达到了189.7 N,但结构及控制系统较为复杂;德国PI公司生产了一种行走式压电驱动器

N-331,实现了大行程,无后退运动以及纳米级定位精度等性能。然而,该驱动器需要至少8个极化方向不同的压电陶瓷作为驱动单元,这导致了较高的制作成本以及复杂的控制系统。

与上述驱动方法相比,粘滑型压电驱动器具有结构紧凑、控制系统简单、高精度大行程等优势,更加契合微纳电子制造领域中精密驱动的性能指标。Zhang等人^[19]研发了一种基于三角弹性机构的粘滑型压电驱动器,其结构紧凑,能够实现46.67 mm/s的最大速度,40 N的最大负载以及40 nm的定位分辨率。然而,该驱动器在实现纳米级定位分辨率的同时,也伴随回退位移较大、步进效率偏低等问题;李建平等^[20]采用具有相位差的双定子粘滑型驱动器来减少回退现象,其最小回退率可达2.26%,最大速度为2.4 mm/s。但该双定子结构相对复杂,且定位分辨率偏低,仅为240 nm;Yang^[21]等人提出了一种特定弧形弯曲铰链结构,并通过改变初始间隙抑制了粘滑型驱动器的回退运动。然而这种具有特殊弯曲铰链的定子加工难度较大。

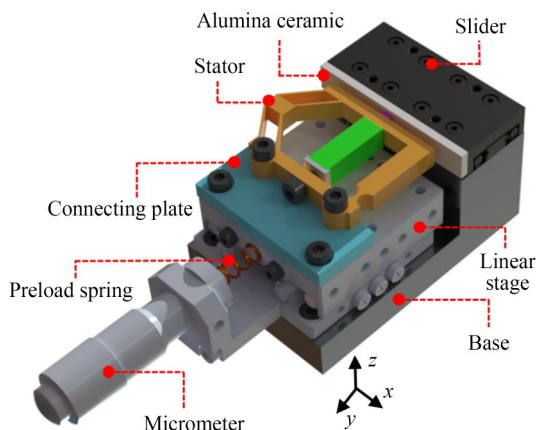
针对现有粘滑型压电驱动器高定位分辨率与低回退特性相矛盾、定子加工难度大等问题,本文提出了一种宏-微-纳跨尺度粘滑型压电驱动器。该驱动器设计特点在于其定子结构紧凑,由弹性框架、压电叠堆以及半圆柱形驱动足三部分组成;控制系统简单,在不同频率锯齿波电压信号与阶梯信号的协同作用下,能够实现宏观大行

程连续移动-微米级步进位移-纳米级无回退高精度定位的跨尺度驱动。此外,本驱动器允许在动子运动方向上并排设置多个定子,同时对动子进行驱动,以提升驱动力和减少回退现象。所设计的粘滑型压电驱动器在晶圆检测平台、扫描电镜光学系统内部等精密驱动领域具有良好的应用前景。

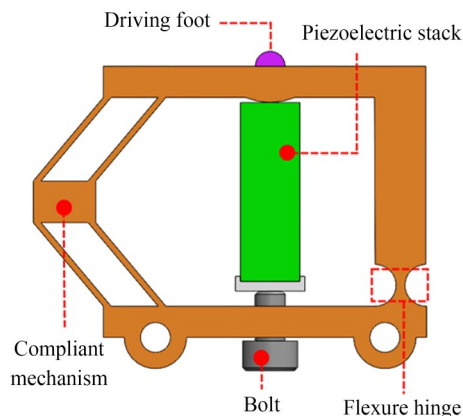
2 结构设计与工作原理

2.1 结构设计

本研究所设计的粘滑型压电驱动器整体结构如图 1(a) 所示,该驱动器主要由定子、导轨



(a) 驱动器整体结构
(a) Overall structure of the actuator



(b) 定子结构
(b) Stator structure

图 1 粘滑型压电驱动器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the stick-slip piezoelectric actuator

滑块、连接板、滑台以及预压弹簧和微分尺构成的预压机构组成。其中,定子结构如图 1(b) 所示,主要由具有柔性铰链的弹性框架、压电叠堆、垫块、预紧螺栓以及半圆柱形驱动足构成。压电叠堆利用预紧螺栓和垫块固定在弹性框架内,驱动足通过环氧树脂粘接在弹性框架表面。定子的整体尺寸为 $40\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,通过连接板以螺栓连接方式与滑台固定。预压机构由微分尺与预压弹簧构成,用于提供和调整动定子之间的预压力。动子结构采用导轨滑块与氧化铝摩擦材料组合设计,用于输出沿 x 方向的直线运动。所有部件均集成装配在基座上。

2.2 工作原理

基于压电材料的逆压电效应,当对驱动器定子的压电叠堆施加激励电压信号时,叠堆将产生对应位移输出,促使弹性框架发生变形,进而引起驱动足处的运动轨迹变化。由于弹性框架采用非对称结构设计,致使该机构的刚度不同,因此在压电叠堆的作用下,驱动足可同时产生轴向和水平方向上的驱动力,最终推动滑块实现直线运动。在锯齿波驱动电压激励下,单个驱动周期可分为三个阶段:初始阶段、缓慢驱动阶段和快速恢复阶段。具体工作原理如图 2 所示。

(a) 初始阶段:在 t_0 时刻,驱动电压为零。压电叠堆保持原长,驱动足在预压力的作用下与动子接触,此时滑块处于静止状态。

(b) 缓慢驱动阶段:在 t_0 到 t_1 时刻,驱动电压缓慢上升,压电叠堆缓慢伸长使得弹性框架发生变形,在驱动足处产生斜向运动,该运动可分解为 x 和 y 两方向上的运动。此时,滑块在静摩擦力的作用下,沿着 x 方向前进一段位移 x_1 。

(c) 快速恢复阶段:在 t_1 到 t_2 时刻,电压快速下降直至零,压电叠堆迅速收缩到初始长度,弹性框架也会快速恢复至初始状态。由于惯性力作用,弹性框架与滑块会发生相对滑移,两者之间产生的滑动摩擦力使得滑块沿着 x 方向后退一段位移 x_2 ($x_2 < x_1$)。因此,在一个驱动周期内,驱动器的步进位移 Δx 可以表示为:

$$\Delta x = x_1 - x_2. \quad (1)$$

通过重复上述三个阶段,所提出的粘滑型压

电驱动器能够实现连续步进运动。当对压电叠堆施加反向锯齿波电压信号时(驱动电压先快速增大后缓慢减小),即可实现反向运动。此外,通过改变锯齿波电压信号的频率以及选取大行程的直线导轨,动子能够实现宏观上连续快速运动(高频)以及微米级步进运动(低频)。

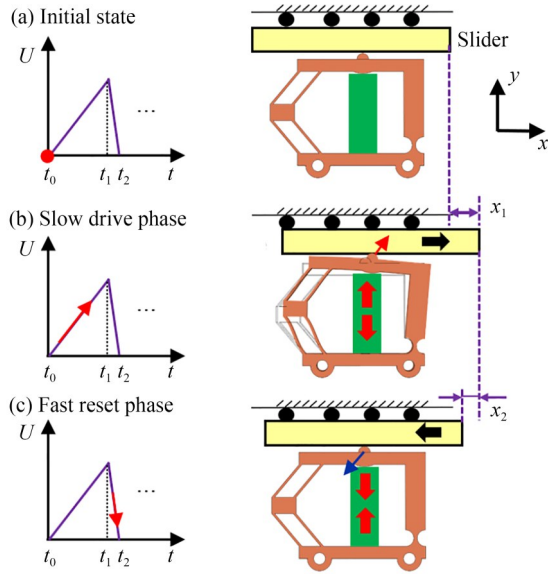


图 2 驱动器工作原理

Fig. 2 Working principle of the actuator

2.3 结构优化

基于上述工作原理可知,驱动器的输出特性和稳定性与定子驱动足处的耦合运动有关。驱动足的总输出位移可分解为 x, y 方向上的两个分量:其中 x 向位移直接影响动子的步进运动,而 y 向位移决定动、定子之间的正压力。为实现结构尺寸的优化,本研究利用有限元仿真方法,系统探究了弹性框架中三角梁角度 θ 、厚度 L_1 以及柔性铰链厚度 L_2 对驱动足处输出位移与弹性框架最大等效应力的影响规律。仿真采用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件,其边界条件设置及网格划分如图 3(a)所示:弹性框架选用 7075-T6 铝合金材料,底部两个螺栓孔处设置为固定约束,在压电叠堆与弹性框架的接触面施加 $15 \mu\text{m}$ 的指定位移(该驱动器所使用的 PSt150/5×5/20L 型压电叠堆在 100 V 驱动电压下的理论输出位移约为 $15 \mu\text{m}$);网格划分时,首先采用自动划分方法建立初步网格模型,再对柔性铰链部分的网格尺寸进行局部细

化以提高仿真精度。

图 3(b)、图 3(c)和图 3(d)所示为参数 θ, L_1, L_2 对驱动足总位移与等效应力的影响规律。在相同输入位移条件下,驱动足处的总位移随三角梁角度 θ 和厚度 L_1 的增加呈显著下降趋势;而随着柔性铰链厚度 L_2 的增大,驱动足总位移几乎不发生明显变化;弹性框架所受最大等效应力在 85~110 MPa 范围内波动,始终小于 7075-T6 铝合金材料的屈服强度。

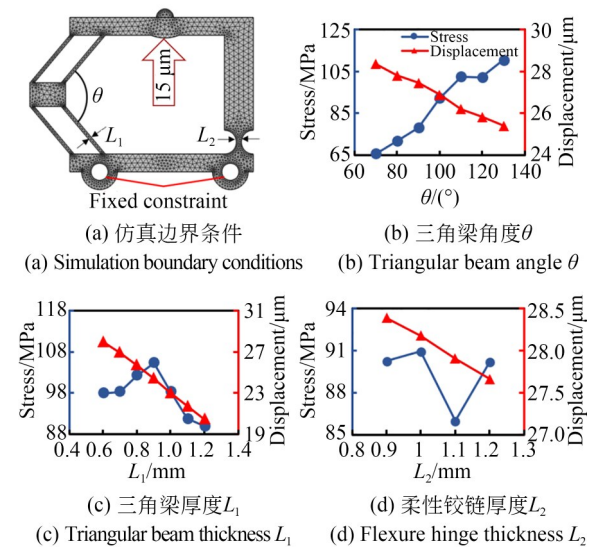


图 3 参数 θ, L_1 以及 L_2 对总位移与等效应力的影响

Fig. 3 Effects of the parameters θ, L_1 and L_2 on the total displacement and equivalent stress

参数 θ, L_1 以及 L_2 对驱动足 x, y 向输出位移的影响规律如图 4(a)、图 4(b)所示。由图可知,随着 θ, L_1, L_2 的增加, x 向位移的变化趋势与总位移基本一致,均呈下降趋势,而 y 向位移几乎保持不变。

综合上述仿真结果,本研究以最大化驱动足输出位移、减小所受应力为优化目标,最终确定三个主要结构参数为: $\theta=100^\circ, L_1=0.6 \text{ mm}, L_2=0.9 \text{ mm}$ 。此外,为确保驱动足与动子能够有效接触,设定半圆柱形驱动足的半径为 1.5 mm、高度为 5 mm;而定子厚度、高度以及其他相关参数则是结合所使用的压电叠堆尺寸($5 \times 5 \times 18 \text{ mm}^3$),同时兼顾定子整体结构小型化的设计要求与便于加工原则综合确定的,其整体结构参数如图 5 所示。

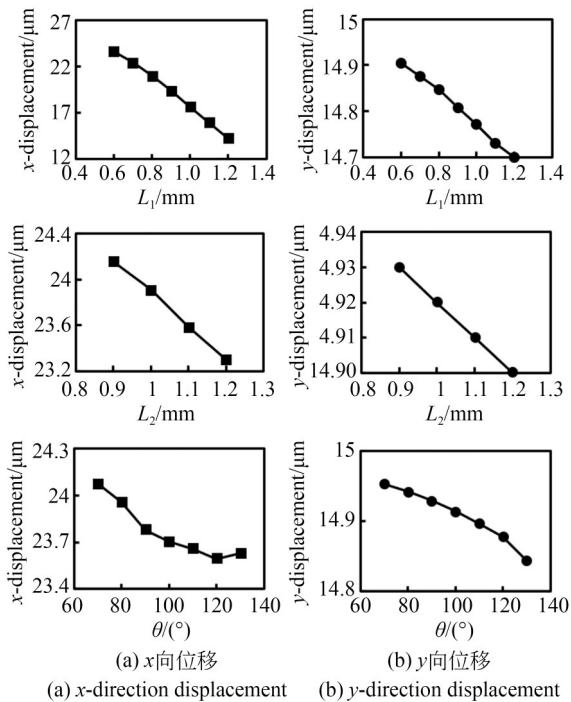


图 4 参数 θ , L_1 以及 L_2 对 x , y 向输出位移的影响
Fig. 4 Effects of the parameters θ , L_1 and L_2 on the x and y -direction displacement

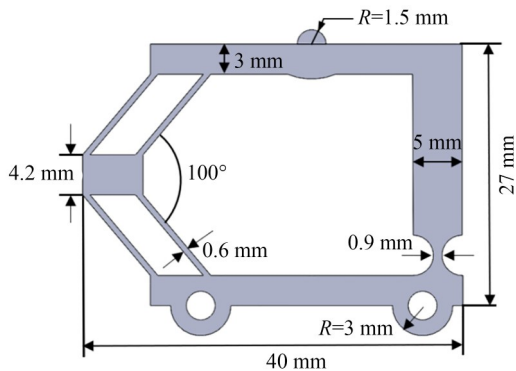


图 5 定子整体结构参数
Fig. 5 Overall structural parameters of the stator

然后,对优化后的定子结构进行了仿真验证,结果如图 6 所示:当对定子施加 $15 \mu\text{m}$ 的指定位移时,驱动足最大输出位移为 $28.39 \mu\text{m}$,弹性框架最大等效应力为 90.25 MPa ,远小于材料的屈服强度 480 MPa ,由此说明了上述尺寸参数的合理性。该定子结构参数为后续动力学建模中相关参数的设定以及驱动器定子原型的制作提供了参考依据。

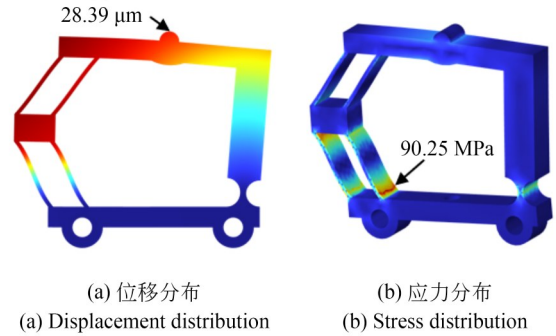


图 6 定子结构静力学仿真
Fig. 6 Static simulation of the stator structure

2.4 模态分析

在驱动器工作过程中,定子若发生共振现象,不仅会导致机械结构产生应力集中,严重时甚至可能引发断裂失效;而且会使驱动足处的冲击振形产生畸变,影响粘滑作用效果。为防止实验过程中共振现象对结果产生的影响,本研究进一步对驱动器定子的模态进行了仿真分析。仿真结果如图 7 所示,驱动器定子的前四阶模态的固有频率分别为 2852.5 , 5354.2 , 7118.1 , 10508 Hz 。由于本研究在实验过程中所施加的电压频率远小于一阶固有频率,故可认为实验结果不受共振现象影响。

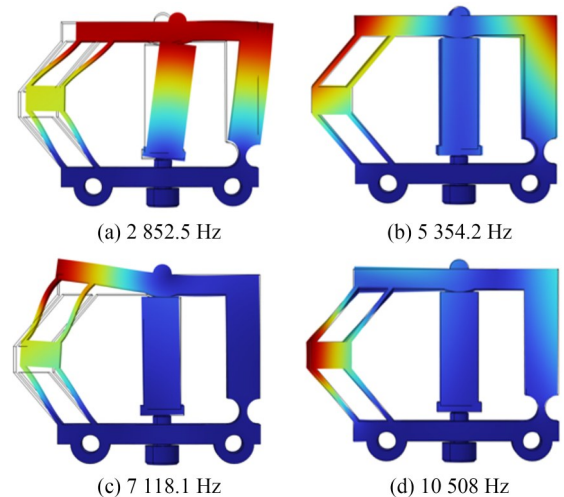


图 7 定子前四阶共振模态
Fig. 7 First four resonance modes of the stator

3 动力学建模

为进一步分析所提出粘滑型压电驱动器的

运动特性,本文基于质量-弹簧-阻尼系统构建了驱动器动力学模型,并进行了力学分析,如图 8 所示。

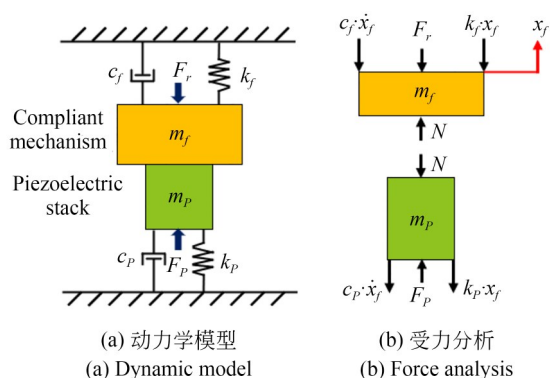


图 8 驱动器动力学建模

Fig. 8 Dynamic modeling of the actuator

该动力学模型的力学方程可描述为:

$$m_p \ddot{x}_f + c_p \dot{x}_f + k_p x_f = F_p - N, \quad (2)$$

$$m_f \ddot{x}_f + c_f \dot{x}_f + k_f x_f = N - F_r, \quad (3)$$

其中: m_p , k_p 和 c_p 分别表示压电叠堆的质量、等效刚度和等效阻尼, m_f , k_f 和 c_f 分别表示弹性框架的质量、等效刚度和等效阻尼, F_p 为压电叠堆的输出力, N 为弹性框架与压电叠堆之间的相互作用力, F_r 代表动子对定子产生的反作用力, x_f 为驱动足的输出位移。

压电叠堆的输出力 F_p 可表示为:

$$F_p = n d_{33} V_p k_p, \quad (4)$$

其中: n , d_{33} 和 k_p 分别为压电叠堆的层数、压电常数和等效刚度, V_p 表示施加在压电叠堆上的电压。

定子受到的反作用力 F_r 可表示为:

$$F_r = F_N \sin \alpha + F_f \cos \alpha, \quad (5)$$

其中: F_N 为驱动足对动子产生的正压力, F_f 为动定子之间的摩擦力, α 为弹性框架三角梁与驱动足所构成的耦合角, 如图 9 所示。

驱动足与动子之间的摩擦模型如图 10 所示, 其动力学方程可表示为:

$$F_f = m_s \ddot{x}_s, \quad (6),$$

其中, m_s , $\ddot{x}_s$ 分别为动子的质量和加速度。

本研究选用 LuGre 摩擦模型对动定子之间的摩擦力进行分析, 原因在于该模型能够更好地

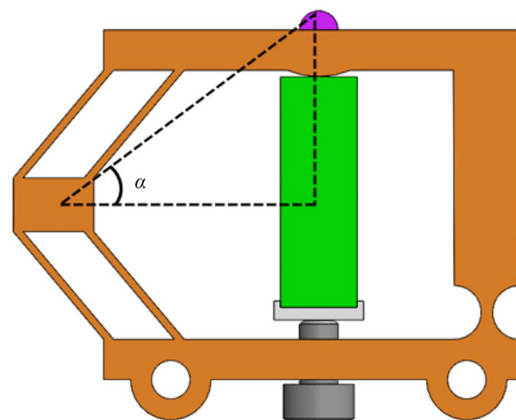


图 9 耦合角 α 的定义

Fig. 9 Definition of coupling angle α

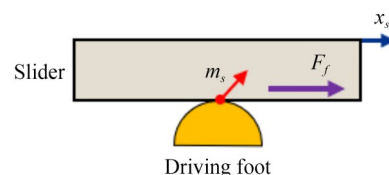


图 10 动定子之间的摩擦模型

Fig. 10 Friction model between the stator and the slider

描述黏性摩擦与滑动摩擦之间的转换过程。其表达式如下:

$$F_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 v_r, \quad (7)$$

$$\dot{z} = v_r - \sigma_0 \frac{|v_r|}{g(v)} z, \quad (8)$$

$$g(v) = f_c + (f_s - f_c) e^{-\left(\frac{v_r}{v_s}\right)^2}, \quad (9)$$

其中: σ_0 , σ_1 和 σ_2 分别表示鬃毛的刚度系数、阻尼系数与黏性阻尼系数, z 为接触面刚毛平均变形量, $g(v)$ 为 Stribeck 效应函数, f_c , f_s 分别表示库伦摩擦力和静摩擦力, v_r , v_{st} 分别为接触面相对滑动速度和 Stribeck 速度。

库伦摩擦力和静摩擦力可以表示为:

$$f_c = \mu_c F_N, \quad (10)$$

$$f_s = \mu_s F_N, \quad (11)$$

其中, μ_c 和 μ_s 分别代表库伦摩擦系数和静摩擦系数。

在驱动器工作过程中, 驱动足对动子产生的正压力 F_N 呈周期性变化。当驱动足位移 x_f 已知时, 该力可通过赫兹接触理论进行计算。驱动器赫兹接触模型如图 11 所示, 将滑轨视为一个刚

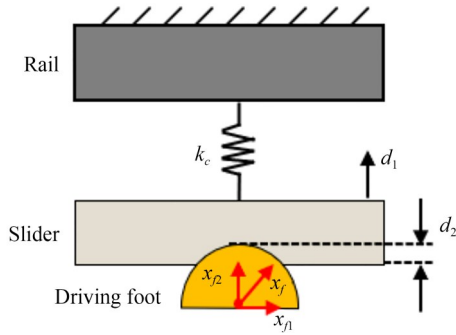


图 11 赫兹接触模型

Fig. 11 Hertz contact model

体,驱动足的纵向位移 x_{j2} 会引发动子与滑轨之间的变形 d_1 以及驱动足与动子接触区域的变形 d_2 , 其关系可表示为:

$$x_{j2} = d_1 + d_2 = x_j \sin \alpha. \quad (12)$$

根据胡克定律与赫兹接触理论,上述两部分的接触变形可描述为:

$$F_N = k_c d_1 = \frac{\pi}{4} E^* L d_2, \quad (13)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}, \quad (14)$$

其中: k_c 为动子与滑轨之间的等效接触刚度, E^* 为动定子接触对的等效杨氏模量, L 为动定子接触区域的接触长度, E_1 和 ν_1 分别表示弹性框架的杨氏模量和泊松比, E_2 和 ν_2 分别表示动子的杨氏模量和泊松比。

基于上述分析,本研究进一步利用 MATLAB/Simulink 模块建立驱动器的动力学模型,并对其步进特性进行仿真分析。模型中各参数取值详见表 1,这些数值主要通过试验测量和参考现有文献^[22-23]获得。

在仿真过程中,输入电压信号波形采用锯齿波波形,电压幅值分别设置为 72 V, 86 V 和 100 V,频率固定为 1 Hz。驱动器步进特性的仿真结果如图 12 所示。分析表明:驱动器能够实现步进位移,且单次步进位移量随电压的增大而增大,对应位移大小分别为 9.56 μm , 12.38 μm 和 15.58 μm 。

上述步进特性的理论计算值将与第 4 节的试验结果进行比较分析,以验证所建立动力学模型的可行性。

表 1 动力学模型主要参数

Tab. 1 Main parameters of the dynamic model

Parameter	Value	Parameter	Value
n	180	μ_c	0.11
d_{33}	$6.35 \times 10^{-10} \text{ m/V}$	μ_s	0.15
k_P	$65 \times 10^6 \text{ N/m}$	v_{st}	0.001 m/s
k_f	$28 \times 10^6 \text{ N/m}$	m_s	0.3 kg
c_P	40 Ns/m	θ	36°
c_f	60 Ns/m	E_1	206 GPa
m_P	0.003 kg	E_2	206 GPa
m_f	0.007 kg	ν_1	0.33
σ_0	10^5 N/m	ν_2	0.33
σ_1	$10^{5/2} \text{ Ns/m}$	L	0.005 m
σ_2	0.3 Ns/m	k_c	$1.33 \times 10^5 \text{ N/m}$

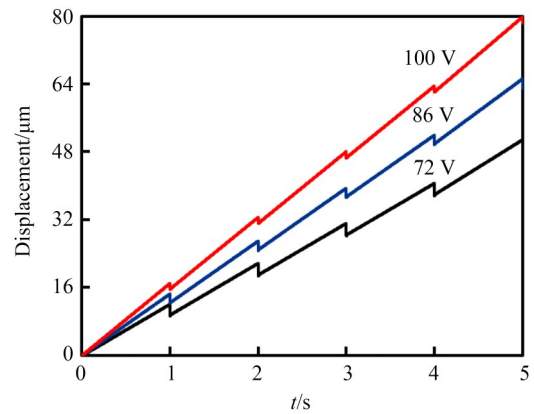


图 12 驱动器步进位移的动力学仿真结果

Fig. 12 Simulation results of the stepping displacement of the actuator

4 试验评价

为系统评估所提出粘滑型压电驱动器的输出性能,本研究研制了原理样机并搭建试验测试系统,如图 13 所示。驱动器定子结构中的弹性框架选用 7075 铝合金材料,通过慢走丝线切割工艺加工而成,以保证其兼具良好的弹性性能与较高的刚度。压电叠堆选用哈尔滨芯明天科技有限公司 PSt150/5×5/20L 型号,具体尺寸为 5×5×18 mm³,由 180 片压电陶瓷片与电极层堆叠共烧而成。在 150 V 驱动电压下,该叠堆的输出位移约为 18 μm ,其材料特性如表 2 所示。为提升摩擦性能,动、定子的摩擦材料均选择氧化铝陶瓷。导轨滑块 (VRT1045) 来自日本 THK 公司,长度

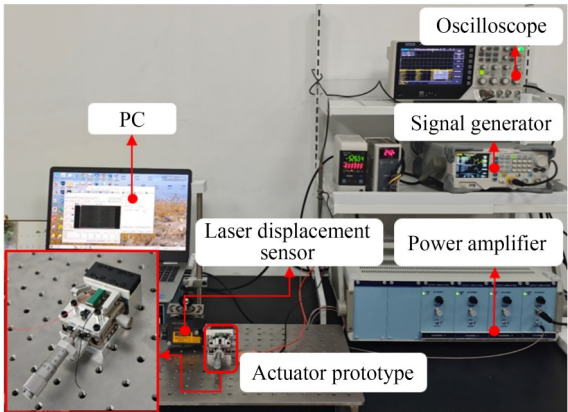


图 13 试验测试系统
Fig. 13 Experimental system

表 2 压电叠堆的材料特性

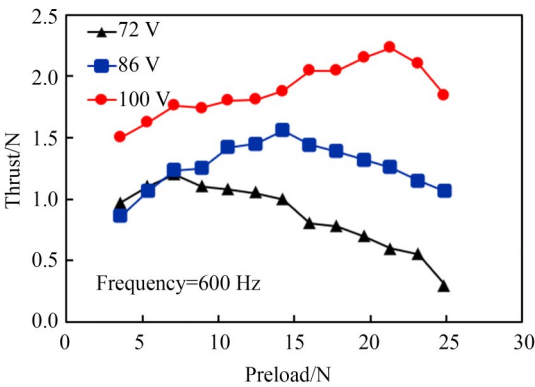
Tab. 2 Material properties of the piezoelectric stack	
Properties	Value
Piezoelectric constant d_{33}	635 pm/V
Relative dielectric constant	5 400
Elasticity constant	$18 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$
Electromechanical coupling coefficient K_{33}	0.68

为 45 mm,最大行程 25 mm。

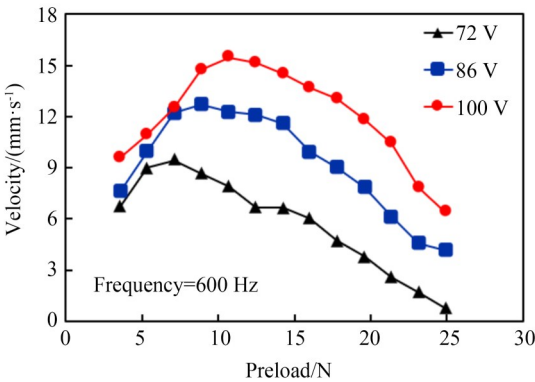
信号发生器(DG1022Z,普源精电科技股份有限公司,中国)用于产生锯齿波电压信号,经功率放大器(E00. A4-04,哈尔滨芯明天科技有限公司,中国)放大后施加至压电叠堆。激光位移传感器(LK-G10,基恩士有限公司,日本)用于测量驱动器的步进位移、速度以及定位分辨率。此外,示波器(DSO4104B,青岛汉泰有限公司,中国)与计算机用于电压波形显示和数据处理。

4.1 预压特性测试

为探究预压力对粘滑型压电驱动器输出特性的影响,本研究开展了不同预压力下推力和速度性能测试,试验结果如图 14(a)、图 14((b)所示。测试过程中,驱动电压分别设置为 72V,86V 和 100 V,驱动频率固定为 600 Hz,预压弹簧刚度为 8.9 N/mm。可以看出,驱动器的推力与速度随预压力增加呈现先升后降的变化趋势。在 100 V 驱动电压下,当预压力达到 20.5 N 时,驱动器最大输出推力为 2.3 N;当预压力为 10.6 N 时,驱动器最大速度为 15.5 mm/s。因此,上述两种预压力值被确定为推力和空载速度性能所对应的最佳预压力,用于后续驱动器性能测试。



(a) 预压力与推力之间的关系
(a) Relationship between preload and thrust



(b) 预压力与速度之间的关系
(b) Relationship between preload and speed

图 14 不同预压力下推力与速度测试结果

Fig. 14 Test results of thrust and speed under different preloads

4.2 频率特性测试

为探究驱动器的最大空载速度,本研究测试了 200~1 700 Hz 频率范围内的输出速度特性,结果如图 15 所示。在 100 V 的驱动电压以

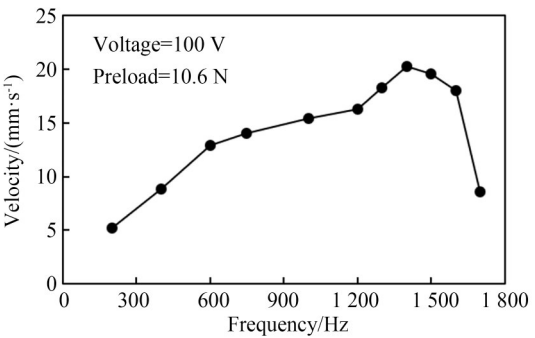


图 15 驱动器频率特性

Fig. 15 Frequency characteristics of the actuator

及 10.6 N 的预压力条件下,驱动器空载速度随着驱动频率的增加先增大后减小。当频率为 1 400 Hz 时,速度达到峰值 20.3 mm/s。该测试结果表明,驱动器能够实现宏观直线运动。

4.3 步进特性测试

粘滑型驱动器的步进特性是衡量其输出性能的重要指标。本研究在不同驱动电压下对驱动器的步进位移进行了测试,并与动力学计算结果进行对比分析,如图 16 所示。试验过程中,驱动电压分别设置为 72 V、86 V 以及 100 V,驱动频率设置为 1 Hz。测试结果表明:驱动器能够实现微观步进运动,且步进位移随着驱动电压的升高而增大,对应分别为 9.71 μm 、12.67 μm 和 15.82 μm 。此外,驱动器步进运动规律的动力学计算结果与实验结果基本一致,理论计算与实验测量的单次步进位移量最大误差仅为 2.3%。该误差产生的原因可以认为是:(1) 动力学模型中涉及参数较多,受模型简化与仿真条件影响,其取值与实际值存在一定偏差。(2) 驱动器装配过程中的机械误差以及仪器测量环节的系统误差可能对试验结果产生影响。

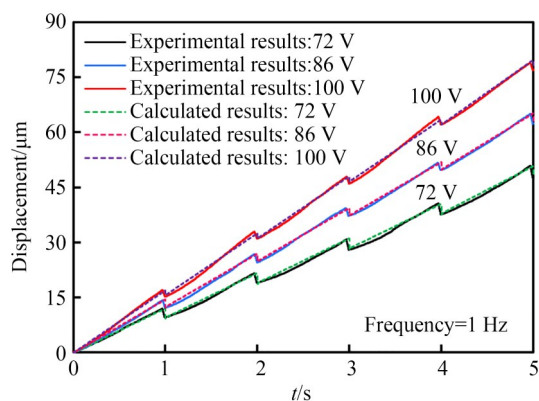


图 16 驱动器步进位移理论与实验结果比较

Fig. 16 Comparison between theoretical and experimental results of the actuator's stepping displacement

为探究测量误差对实验结果的影响,本研究选取 72 V、86 V 以及 100 V 三种驱动电压,分别对动子的步进位移开展 10 次重复测试,相关结果如图 17 所示。可以看到,在同一驱动电压条件下,驱动器单次步进位移大小基本保持稳定,且三种电压对应的最大测量误差均控制在 2.5% 以

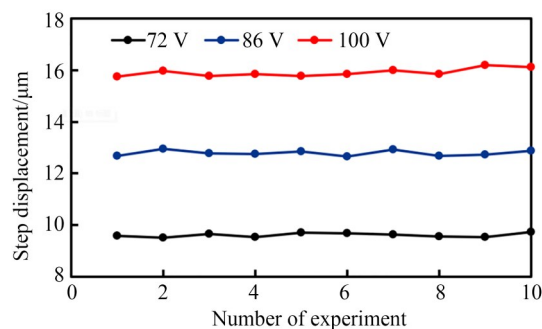


图 17 步进位移重复测试

Fig. 17 Repeat test of the step displacement

内,这验证了样机在工作过程中运动的稳定性和误差的一致性。

本研究进一步测试了驱动器在不同驱动频率下的位移曲线,结果如图 18 所示。在 10~100 Hz 低频范围内,其步进特性较为明显,且随着频率的升高,回退现象逐渐减弱,驱动器整体位移增大,如图 18(a) 所示。图 18(b) 所示为 300~1500 Hz 频率下的位移特性曲线,可以看到,高频下驱动器的位移曲线更加平滑。这是因为随着动子速度的增加,其动量随之增大,从而更容易抑制回退运动。

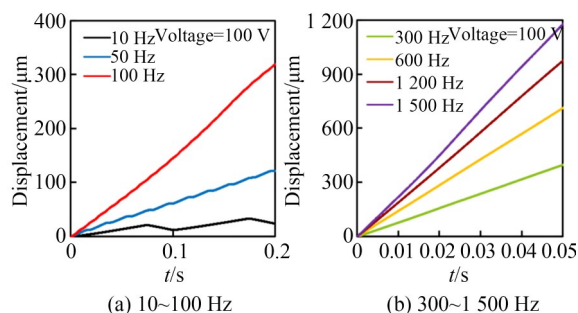


图 18 不同频率下驱动器的位移特性

Fig. 18 Displacement characteristics of the actuator at different frequencies

图 19 所示为不同频率下单次步进位移的变化曲线。结果表明,在 200~600 Hz 频率范围内,驱动器的步进位移基本保持稳定;而当频率大于 600 Hz 时,步进位移大小呈下降趋势。这可以认为是频率过高,导致压电叠堆的伸缩响应速度与激励电压信号之间产生了相对滞后,且在粘滞阶段也可能出现打滑现象,从而影响了驱动器的步进位移。

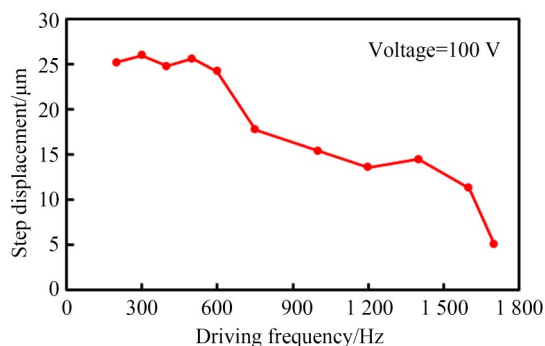
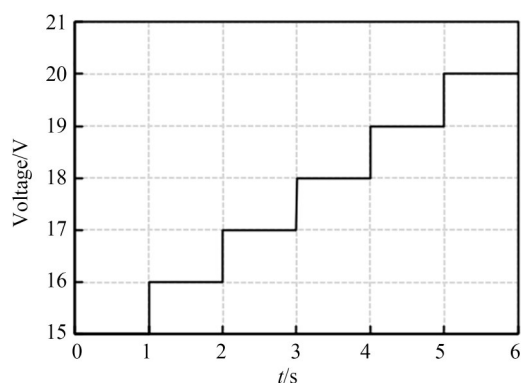


图19 不同频率下驱动器单次步进位移的变化

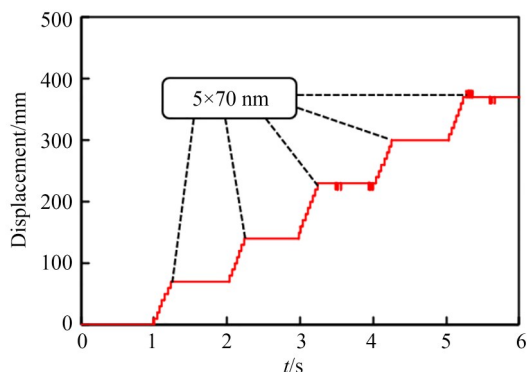
Fig. 19 Changes in the one-step displacement of the actuator at different frequencies

4.4 定位分辨率测试

为评估所设计的粘滑型压电驱动器的精密定位特性,本研究对其进行了最小定位分辨率测试,激励电压信号与试验结果如图20所示。测试



(a) 阶梯电压信号
(a) Stepped voltage signal



(b) 测试结果
(b) Test result

图20 驱动器最小定位分辨率

Fig. 20 Minimum positioning resolution of the actuator

采用阶梯电压信号,从15 V增至20 V,每次阶梯变化1 V(经验证,小于1 V时步进效果不稳定),频率设定为0.2 Hz。试验数据显示,该驱动器的定位分辨率达到70 nm,且无回退现象。测量过程中存在10 nm的误差波动,经分析认为主要由实验环境干扰以及测量误差所导致的,对动子运动影响不大。上述结果表明,该驱动器具备纳米定位能力,可有效应用于精密驱动与定位领域。

4.5 负载特性

在本研究中,采用细绳-滑轮-负载系统对粘滑型压电驱动器的速度-负载特性进行测试,测量结果如图21所示。当驱动电压为100 V,频率为1 400 Hz,预压力为20.5 N时,驱动器的输出速度随着负载的增大呈降低趋势。当负载大于2.2 N时,速度为零,这表明驱动器所能承受的最大负载为2.2 N。

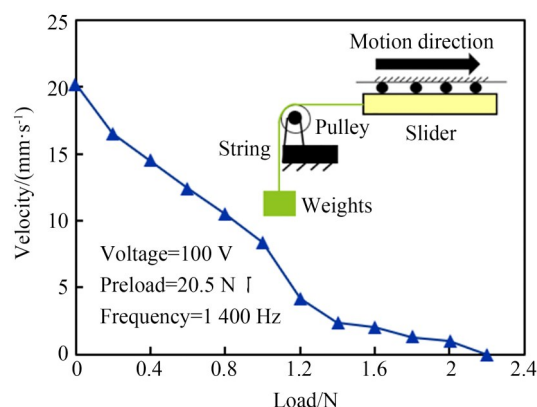


图21 驱动器负载特性

Fig. 21 Load characteristics of the actuator

4.6 性能比较

本研究对所提出的粘滑型压电驱动器与现有同类型驱动器输出性能进行了比较,结果如表3所示。文献^[19]所报道的基于三角弹性机构的粘滑型驱动器,具备较高的速度、负载能力以及定位分辨率。然而,该驱动器虽能在最小锯齿波启动电压作用下获得纳米级定位分辨率,但同时也伴随着较大的回退位移。相较于文献^[24-25]中的驱动器,本文所设计的压电驱动器在相同驱动电压下能够实现更高的输出速度以及更大的负载,同时驱动频率也相对较高。文献^[26]中提出的粘滑型驱动器尽管能够承受较大的负载,但是输出速

表 3 驱动器性能比较

Tab. 3 Performance comparison with existing actuators

Reference	[19]	[24]	[25]	[26]	This work
Voltage/V	80	100	100	100	100
Frequency /Hz	3 500	700	275	700	1 400
Maximum Velocity /(mm•s ⁻¹)	46. 67	4. 6	1. 2	18. 4	20. 3
Resolution /nm	40	680	217	89	70
Load/N	40	0. 9	0. 6	2. 7	2. 2

度相对较低。此外,本文所提出的粘滑型驱动器在阶梯电压信号作用下,可实现 70 nm 的定位分辨率且无回退现象,在晶圆检测、扫描电镜光学系统内部等精密驱动领域展现出良好的应用前景。

5 结 论

本文提出了一种具备宏-微-纳跨尺度驱动能力的粘滑型压电驱动器,详细阐述了驱动器的动定子结构及粘滑驱动原理,并通过动力学建模对驱动器步进特性进行理论分析。为评价驱动器的输出特性,制作了原理样机并搭建实验平台进行试验测试。试验结果表明:驱动器最大空载速

度为 20.3 mm/s,步进位移最大为 15.82 μm,定位分辨率为 70 nm,所能承受的最大负载为 2.2 N,能够满足宏观大行程连续移动、微米级步进位移与纳米级无回退高精定位的跨尺度驱动需求。进一步对驱动器进行结构优化和产品改进后,有望应用到扫描电镜光学系统内部光阑板驱动对中以及晶圆检测平台中。

作者贡献声明:

云 浩:驱动器结构的提出,论文构思和撰写;
陈延龙:试验测试及数据整理与分析;
原路生:论文审核与编辑写作;
李京顺:实验数据分析;
张登攀:理论指导。

参考文献:

[1] DENG J, LI J, YAN K, *et al.* Development of a miniature piezoelectric robot with high stability and strong load capacity based on hexapod of radial layout[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2024, 29(1): 754-766.

[2] TIAN X Q, LIU Y X, DENG J, *et al.* A review on piezoelectric ultrasonic motors for the past decade: Classification, operating principle, performance, and future work perspectives [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 306: 111971.

[3] 胡意立, 胡影, 李建平, 等. 具有“前进-前进”运动模式的惯性压电驱动器[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(6): 1356-1364.

HU Y L, HU Y, LI J P, *et al.* Piezoelectric inertial actuator with “forward-forward” motion mode [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29 (6) : 1356-1364. (in Chinese)

[4] LI J P, HUANG H, MORITA T. Stepping piezo-electric actuators with large working stroke for nano-

positioning systems: a review[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 292: 39-51.

[5] 刘英想, 邓杰, 常庆兵, 等. 压电驱动技术研究进展与展望[J]. *振动测试与诊断*, 2022, 42(6): 1045-1061, 1239.

LIU Y X, DENG J, CHANG Q B, *et al.* Progress and prospects in piezoelectric actuation technologies [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2022, 42(6): 1045-1061, 1239. (in Chinese)

[6] 王瑞锋, 王亮, 贾博韬, 等. 单相驻波驱动的旋转型超声电机结构设计与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(7): 227-236.

WANG R F, WANG L, JIA B T, *et al.* Structural design and experimental studies of rotating ultrasonic motor driven by single-phase standing wave [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(7) : 227-236. (in Chinese)

[7] 杨超, 朱咸昌, 金川, 等. 光刻投影物镜中动镜 X-Y 向柔性调节机构设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(4): 249-257.

- YANG C, ZHU X C, JIN C, *et al.* Design of X-Y flexible adjustment mechanism for moving mirror in lithographic projection objective[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(4): 249-257. (in Chinese)
- [8] 吴彤, 杨依领, 吴高华, 等. 二自由度大行程无耦合压电粘滑定位平台[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(1): 62-72.
- WU T, YANG Y L, WU G H, *et al.* Two-DOF piezoelectric stick-slip positioning platform with large strokes and no coupling[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(1): 62-72. (in Chinese)
- [9] LIU P B, YAN P, HITAY Ö. Design and trajectory tracking control of a piezoelectric nano-manipulator with actuator saturations[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 111: 529-544.
- [10] 王旭建, 王新杰, 李峰. 引信用双工形压电驱动器的设计及其驱动特性[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2024, 56(8): 135-144.
- WANG X J, WANG X J, LI F. Design and driving characteristics of duplex piezoelectric actuator for fuze[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2024, 56(8): 135-144. (in Chinese)
- [11] 黄卫清, 杨成龙, 沈兆琛, 等. 低压驱动V形直线超声电机的设计[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(1): 91-99.
- HUANG W Q, YANG C L, SHEN Z C, *et al.* Design of V-shaped linear ultrasonic motor driven with low-voltage[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(1): 91-99. (in Chinese)
- [12] WU J, WANG L P, DU F X, *et al.* A two-DOF linear ultrasonic motor utilizing the actuating approach of longitudinal-traveling-wave/bending-standing-wave hybrid excitation[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 248: 108223.
- [13] 康升征, 王浩文. 面向细胞微操作的柔性并联压电定位台设计与实验[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(2): 220-235.
- KANG S Z, WANG H W. Design and experiments of a flexible parallel piezoelectric micro-positioning stage for cell micromanipulation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(2): 220-235. (in Chinese)
- [14] 孟令臣, 闫鹏, 刘鹏博, 等. 面向柔性钳位型尺蠖致动器提速驱动的协同切换控制[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(1): 96-106.
- MENG L C, YAN P, LIU P B, *et al.* Collaborative switching control for improved-speed driving of flexible clamp-type inchworm actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(1): 96-106. (in Chinese)
- [15] 孟令伟, 杨依领, 吴高华, 等. 三自由度并联压电粘滑运动平台[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(3): 427-437.
- MENG L W, YANG Y L, WU G H, *et al.* Three-degree-of-freedom parallel piezoelectric stick-slip platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(3): 427-437. (in Chinese)
- [16] YUN H, AOYAGI M. Performance evaluation of a walking-type piezoelectric actuator with compliant mechanism for wide-range speed driving and high-precision positioning[J]. *Precision Engineering*, 2024, 85: 113-125.
- [17] TANG H, LI Y M. Development and active disturbance rejection control of a compliant micro-/nanopositioning piezostage with dual mode[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(3): 1475-1492.
- [18] TIAN X Q, ZHANG B R, LIU Y X, *et al.* A novel U-shaped stepping linear piezoelectric actuator with two driving feet and low motion coupling: Design, modeling and experiments[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 124: 679-695.
- [19] ZHANG Y K, PENG Y X, SUN Z X, *et al.* A novel stick - slip piezoelectric actuator based on a triangular compliant driving mechanism[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(7): 5374-5382.
- [20] LI J P, HE L D, CAI J J, *et al.* A walking type piezoelectric actuator based on the parasitic motion of obliquely assembled PZT stacks[J]. *Smart Material Structures*, 2021, 30(8): 085030.
- [21] YANG Z X, ZHOU X Q, HUANG H, *et al.* On the suppression of the backward motion of a piezo-driven precision positioning platform designed by the parasitic motion principle[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(5): 3870-3878.
- [22] WANG J R, HUANG H, WANG Z X, *et al.* Development and analysis of a dynamic model for parasitic motion principle piezoelectric actuator[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021,

- 147: 107079.
- [23] ZHANG X Q, CUI Y G, YANG Y L, *et al.* Design, analysis, and experiment of a piezoelectric stick - slip rotary actuator with asynchronous-driven dual stators[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 200: 110524.
- [24] LI J P, CAI J J, WEN J M, *et al.* A parasitic type piezoelectric actuator with the asymmetrical trapezoid flexure mechanism[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 309: 111907.
- [25] XU Z, YANG Z X, WANG K F, *et al.* A bionic inertial piezoelectric actuator with improved frequency bandwidth [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 156: 107620.
- [26] XU Z, HUANG H, DONG J S. A stick-slip piezoelectric actuator with measurable contact force [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 144: 106881.

作者简介:



云 浩(1994—),男,河南焦作人,博士,讲师,2017年、2020年于河南理工大学分别获得学士学位与硕士学位,2023年于日本室兰工业大学获得博士学位,主要从事精密压电驱动方面的研究。E-mail: yunhao@hpu.edu.cn