

文章编号 1004-924X(2025)03-0427-11

三自由度并联压电粘滑运动平台

孟令伟¹, 杨依领^{1*}, 吴高华², 崔玉国¹, 魏燕定³

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院 宁波市微纳运动及智能控制重点实验室, 浙江 宁波 315211;

2. 湖州师范学院 工学院, 浙江 湖州 313000;

3. 浙江大学 机械工程学院 浙江省先进制造技术重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对细胞穿刺、显微操作以及微装配任务中对宏行程、高精度、大负载和多自由度的性能要求, 利用压电柔顺机构设计了三自由度并联粘滑驱动平台。将压电纤维片粘贴至拱形驱动机构, 构成驱动单元并结合粘滑致动, 实现并联平台的大范围高精度运动。柱形支撑增强了平台承载能力, 万向轴承减小了移动平台的非驱动摩擦, 提高整体运动性能。通过有限元法建立拱形柔顺驱动单元的静力学模型, 并对输出位移和固有频率进行仿真分析。最后, 搭建实验测试系统验证平台性能。实验表明, 在步进模式下, 压电粘滑平台沿 X, Y 向平动的最大单步位移可达 294.7 μm 和 304.5 μm , 绕 Z 轴转动的最大单步转角为 9.96 mrad, 最大垂直负载为 110 N; 在扫描模式下, 平动和转动的位移分辨率分别为 6 nm 和 0.28 μrad 。因此, 所设计的并联压电粘滑平台满足精密微操作任务所需的性能要求。

关键词: 压电驱动; 柔顺机构; 粘滑运动; 三自由度

中图分类号: TN384; TH703.6 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253303.0427 **CSTR:** 32169.14.OPE.20253303.0427

Three-degree-of-freedom parallel piezoelectric stick-slip platform

MENG Lingwei¹, YANG Yiling^{1*}, WU Gaohua², CUI Yuguo¹, WEI Yanding³

(1. Ningbo Key Laboratory of Micro-nano Motion and Intelligent Control,
Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. School of Engineering, Huzhou University, Huzhou 313000, China;

3. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology of Zhejiang Province,
School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

* Corresponding author, E-mail: yangyiling@nbu.edu.cn

Abstract: In addressing the performance requirements associated with macro-stroke applications, such as high precision, substantial load capacity, and multi-degree-of-freedom functionality for tasks involving cell puncture, micro-operation, and micro-assembly, a novel three-degree-of-freedom parallel stick-slip driving platform utilizing piezoelectric compliant mechanisms was proposed. The integration of macro fiber composite with the arch driving mechanism constructed a driving unit that facilitates stick-slip actuation, enabling large-scale, high-precision motion of the parallel platform. Furthermore, the implementation of cylindrical support significantly enhanced the platform's load capacity, while universal bearings mitigate

收稿日期: 2024-10-14; 修订日期: 2024-12-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51805276, No. U23A20618); 宁波市重大科技攻关项目 (No. 2024Z163)

non-driven friction, thereby improving overall motion performance. The finite element method was utilized to establish the static model of the compliant arch driving unit, followed by simulations and analysis of output displacement and natural frequency. An experimental test system was subsequently developed to validate the output performance of the platform. Experimental results indicate that the piezoelectric stick-slip platform, operating in stepping mode, achieves maximum single-step translation displacements of 294.7 μm and 304.5 μm along the X and Y axes, respectively, as well as a maximum single-step rotation angle of 9.96 mrad around the Z axis, with a maximum vertical load capacity of 110 N. In scanning mode, the displacement resolutions for translation and rotation are recorded at 6 nm and 0.28 μrad , respectively. Thus, the designed parallel piezoelectric stick-slip platform effectively satisfies the performance criteria required for precision micromanipulation tasks.

Key words: piezoelectric actuation; compliant mechanism; stick-slip motion; three degrees of freedom

1 引言

目前,高精度运动平台广泛应用在生物医疗^[1-2]、光学制造^[3]以及微纳操作^[4]等技术领域。运动平台有多种驱动类型,如交流电机^[5]、音圈电机^[6]、形状记忆合金^[7]和压电驱动等。其中,压电驱动具有响应速度快、分辨率高、无电磁干扰、负载能力强以及体积小等优点,在高精度运动平台中备受青睐^[8-9]。

高精度运动平台通常要具有宏行程、多自由度和大负载等特点。虽然压电直接驱动可以实现高精度和快速定位,但运动行程较为有限。因此,涌现出可以连续运动的压电步进驱动,如尺蠖式和粘滑式^[10]。尺蠖式输出力大、定位精度高,但安装要求高,运行过程也易发生干涉^[11]。与之相比,粘滑式结构简洁、紧凑,定位精度高,运动范围大,控制也简单^[12]。

目前,粘滑运动平台大多为单自由度或双自由度,自由度数较少,灵活性不强。双自由度平台以串联式为主,由若干个单自由度机构顺序联接,每一个前置机构的输出均作为后置机构的输入,易产生误差累积^[13]。与之相比,并联式由动、定平台利用两个以上独立的运动支链连接形成,避免了误差累计且具有稳定性好、精度高和惯量低等优点,在运动平台设计中颇具优势^[14-16]。

负载能力是运动平台的重要性能指标。然而,目前粘滑平台负载多为数十牛。例如,文献[17-18]中的负载分别为 50 N 和 30 N,均在百牛之内,难以承受重型载荷。负载能力弱,不仅限制平台的应用范围,也影响其稳定性和动态响应。虽然通过增加驱动器数量可以提高负载,但

由于驱动器额外承担负载压力,难免加剧磨损,降低寿命^[19]。另一方面,还可利用辅助支撑机构提高平台负载,并降低驱动器负载,但需避免支撑机构带来的平台结构复杂问题^[20]。

针对上述问题,本文利用压电粘滑并联驱动设计高精度运动平台,实现宏行程与多自由度目标,采用柱形支撑与万向轴承提高平台承载能力。然后,对拱形柔顺驱动单元建模并进行有限元分析。最后,通过实验测试验证所设计运动平台的性能。

2 结构与工作原理

2.1 结构

所设计的压电粘滑平台如图 1 所示,由拱形驱动单元、柱形支撑、万向轴承、柔性支撑、移动平台、调节单元、预紧板、预紧螺栓和底板组成。压电纤维片粘贴至拱形驱动机构两侧,组成驱动单元。4 个驱动单元以中心对称的方式分布在底板上并与移动平台并联连接。

通过调节预紧螺栓,带动预紧板和柔性支撑运动,从而与万向轴承配合,调节移动平台与驱动单元之间的正压力,保证驱动单元与移动平台的接触。底板也设有柔性调节单元,4 个驱动单元均可通过其底端的调节单元独立上下调节,避免 4 个接触点与 3 点确定平面的矛盾性,保证定子与动子接触的一致性和稳定性。拱形结构大大提高了驱动单元的输出位和频率。

为了减轻驱动单元的正压力,提高粘滑平台的负载能力,在 4 个拱形驱动单元之间设置铝合金制成的柱形支撑,如图 1 所示。柱形支撑顶端

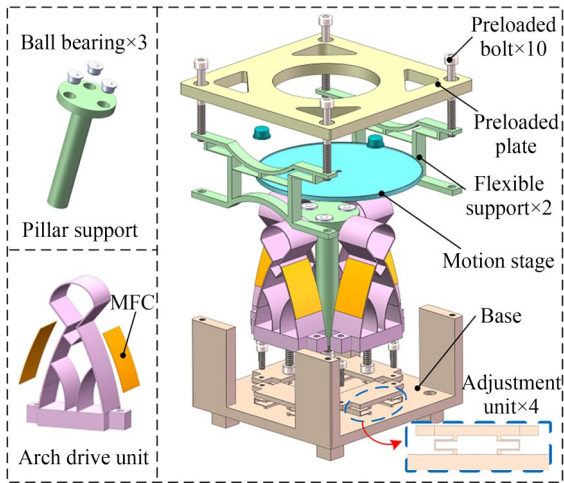


图1 粘滑平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stick-slip platform

设有3个不锈钢制成的万向轴承,形成滚动接触,避免滑动接触产生非驱动摩擦。对长度、宽度、半径和角度等关键尺寸进行多次仿真优化,结果如表1所示。其中, $a_1\sim a_5$, $b_1\sim b_7$, $r_1\sim r_2$ 分别表示柔性梁的厚度、长度和半径,如图2所示。

表 1 拱形驱动机构的主要参数

Tab. 1 Main parameters of arch driving mechanism(mm)

Symbol	Value	Symbol	Value
a_1	0.7	b_1	32.0
a_2	0.4	b_2	7.7
a_3	0.7	b_3	10.0
a_4	0.7	b_4	11.0
a_5	0.4	b_5	17.0
r_1	11.5	b_6	20.0
r_2	25.4	b_7	8.0

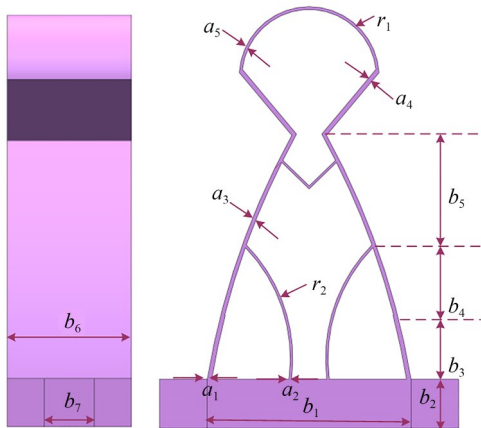


图2 拱形驱动机构的结构参数

Fig. 2 Structural parameters of arch driving mechanism

2.2 工作原理

所设计的压电平台利用粘滑驱动方式运动,以X向移动为例,拱形驱动单元由 A_1, A_2, A_3 和 A_4 排序,并施加锯齿型驱动电压,完整运动过程如图3所示。

在 t_0 时刻,驱动电压为0,所有驱动单元都处于原始状态,此时移动平台静止。

从 t_0 到 t_1 阶段,驱动电压 U_A 缓慢上升,压电纤维片伸长,拱形驱动单元(A_1 与 A_2)利用静摩擦带动移动平台移动,相比初始位置前移 d_1 ,该过程为“粘贴”阶段。

从 t_1 到 t_2 阶段,驱动电压 U_A 由峰值迅速下降归零,拱形驱动单元(A_1 与 A_2)快速回缩到原点,且与移动平台发生相对滑动,移动平台回退后移 d_2 ,该过程为“滑动”阶段。

经过一次上述过程,移动平台前移 $\Delta d(\Delta d = d_1 - d_2)$ 。若循环过程(2)~(3),压电粘滑平台即可连续移动。为了实现纳米级分辨率,粘滑平台还可通过“粘-粘”扫描模式,即在静摩擦力作用下,移动平台在单个步进周期内,利用持续粘贴实现精密运动。在高频驱动时,粘滑运动的“粘”阶段也会出现相对滑动,产生“滑-滑”现象。

图4给出了平台的多自由度运动原理。当沿X向平动时,拱形驱动单元 A_1 与 A_2 承担驱动任务;

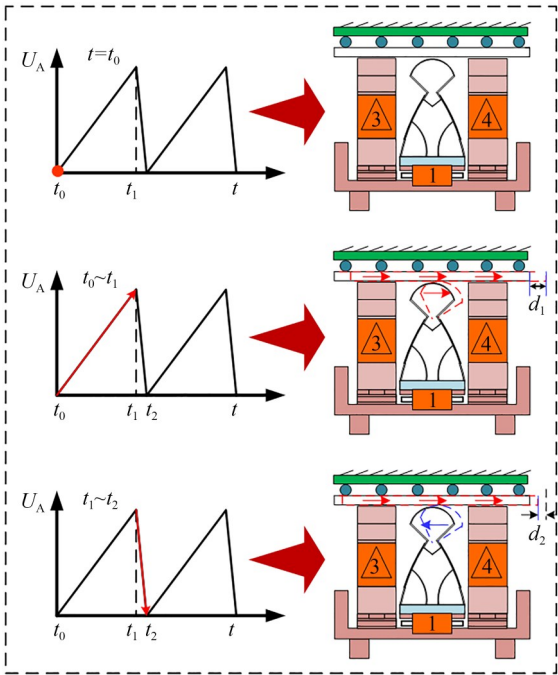


图3 粘滑驱动原理

Fig. 3 Stick-slip driving principle

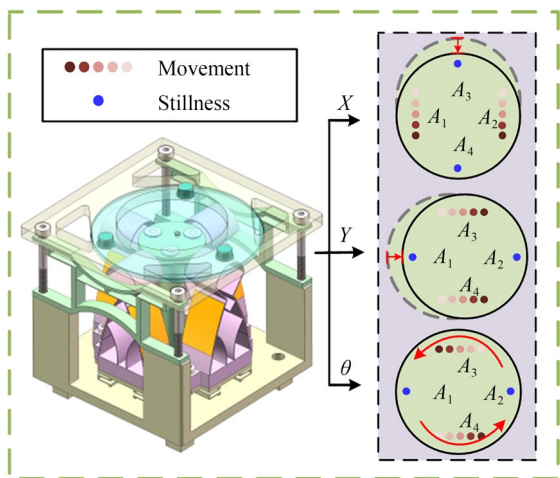


图 4 多自由度运动原理

Fig. 4 Multi-degree-of-freedom motion principle

当沿 Y 轴平动时,拱形驱动单元 A_3 与 A_4 提供动力;当平台绕 Z 轴转动时,拱形驱动单元 A_3 与 A_4 为驱动组,但运动方向相反,从而形成转动力偶。

3 理论建模

采用有限元理论对拱形驱动单元进行建模,驱动单元中的柔性铰链和刚性连杆都视为柔性梁单元。将驱动单元划分为多个节点并依次相连,得到的有限元模型如图 5 所示。

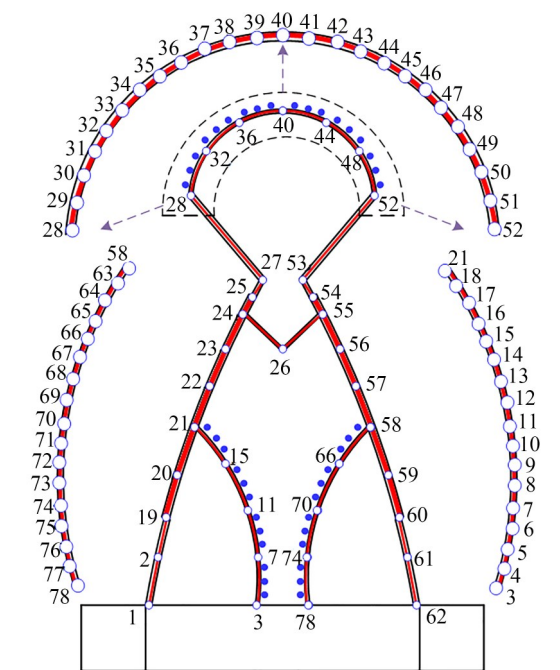


图 5 拱形驱动单元计算节点

Fig. 5 Calculation nodes of arch drive unit

单元力矢量 F_c 、刚度矩阵 K_c 和位移矢量 X_c 之间的关系为:

$$F_c = K_c X_c, \quad (1)$$

$$F_c = [F_x^i \ F_y^i \ M_z^i \ F_x^j \ F_y^j \ M_z^j], \quad (2)$$

$$X_c = [x_x^i \ x_y^i \ \theta_z^i \ x_x^j \ x_y^j \ \theta_z^j], \quad (3)$$

式中: $x_x^i, x_y^i, \theta_z^i, x_x^j, x_y^j, \theta_z^j$ 分别为节点 i 和 j 在 F_c 作用下的 x 向位移、 y 向位移和绕 z 轴转角。

在局部坐标下,柔性单元的刚度矩阵为:

$$K_a^c = \begin{bmatrix} B & 0 & 0 & -B & 0 & 0 \\ 0 & C & G & 0 & -C & G \\ 0 & G & 4B & 0 & -G & 2B \\ -B & 0 & 0 & B & 0 & 0 \\ 0 & -C & -G & 0 & C & -G \\ 0 & G & 2B & 0 & -G & 4B \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: $B=EA/l, C=12EA/l^3, G=6EA/l^2, E, A, I$ 和 l 分别表示柔性单元的弹性模量、截面面积、惯量矩和连杆长度。

压电纤维片通过粘贴的方式与拱形驱动机构结合,所以在 $c_{19-20}, c_{20-21}, c_{21-22}, c_{22-23}, c_{23-24}, c_{24-25}, c_{54-55}, c_{55-56}, c_{56-57}, c_{57-58}, c_{58-59}$ 和 c_{59-60} 包含两层。即在节点 19-25 和 54-60 的局部坐标下的刚度矩阵表达式为:

$$\begin{cases} K_{19-20}^C = K_{19-20}^M + K_{19-20}^G \\ \vdots \\ K_{24-25}^C = K_{24-25}^M + K_{24-25}^G \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} K_{54-55}^C = K_{54-55}^M + K_{54-55}^G \\ \vdots \\ K_{59-60}^C = K_{59-60}^M + K_{59-60}^G \end{cases}, \quad (6)$$

式中: K_i^M 表示压电纤维片的单元刚度矩阵, K_i^G 表示拱形驱动机构的单元刚度矩阵。

将局部坐标系下的刚度矩阵 K_a^c 转化为全局坐标系的刚度矩阵 K_T^c , 即:

$$K_T^c = T K_a^c T^T, \quad (7)$$

式中 T 为局部坐标系到全局坐标系的转换矩阵。其表达式为:

$$T = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: α 表示从全局坐标系到局部坐标系时顺时针转过的角度。

将得到的整体刚度矩阵 $\mathbf{K}_T^C$ 分为4个子块:

$$\mathbf{K}_T^C = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{i,i(1,1)}^C & \mathbf{k}_{i,j(1,2)}^C \\ \mathbf{k}_{j,i(2,1)}^C & \mathbf{k}_{j,j(2,2)}^C \end{bmatrix}. \quad (9)$$

之后,删除固定节点1,3,62和78,得到简化后的全局刚度矩阵 $\bar{\mathbf{K}}_T^R$ 。

在外力 $\bar{\mathbf{F}}$ 的作用下,得到的位移 $\bar{\mathbf{X}}$ 为:

$$\bar{\mathbf{F}} = \bar{\mathbf{K}}_T^R \bar{\mathbf{X}}, \quad (10)$$

式中:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{F}} = [\bar{F}_2, \dots, \bar{F}_i, \dots, \bar{F}_n]^T, \bar{F}_i = [F_x^i, F_y^i, M_z^i]^T \\ \bar{\mathbf{X}} = [\bar{X}_2, \dots, \bar{X}_i, \dots, \bar{X}_n]^T, \bar{X}_i = [x^i, y^i, \theta_z^i]^T \end{cases}, \quad (11)$$

式中 n 为节点总数。

压电纤维片通过逆压电效应带动整个拱形驱动单元,等效对节点19,25,54和60施加外力,即:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{F}}_{19} = [0, 0, F_{ml}t_3]^T \\ \bar{\mathbf{F}}_{25} = [0, 0, -F_{ml}t_3]^T \\ \bar{\mathbf{F}}_{60} = [0, 0, F_{mr}t_3]^T \\ \bar{\mathbf{F}}_{54} = [0, 0, -F_{mr}t_3]^T \end{cases}, \quad (12)$$

式中: t_3 为驱动机构厚度, F_{ml} 和 F_{mr} 分别为左右压电纤维片产生的机械力,且其与输入电压 $u(t)$ 的关系为:

$$F_m = sd_{33}k_{pzt}u(t), \quad (13)$$

其中 s, d_{33} 和 k_{pzt} 分别是压电纤维片的层数、压电系数和刚度。

在外力的作用下,拱形驱动单元的输出位移为:

$$x_p = \sqrt{X_{40}(x)^2 + X_{40}(y)^2}, \quad (14)$$

式中 $X_{40}(x)$ 和 $X_{40}(y)$ 分别表示节点40在 x 和 y 向的输出位移。

在局部坐标下,柔性单元的质量矩阵为:

$$\mathbf{M}_a^C = \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22l & 0 & 54 & -13l \\ 0 & 22l & 4l^2 & 0 & 13l & -3l^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13l & 0 & 156 & -22l \\ 0 & -13l & -3l^2 & 0 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中 ρ 为柔性单元的密度。

将局部坐标系下的单元质量矩阵 $\mathbf{M}_a^C$ 转化为

全局坐标系的质量矩阵 $\mathbf{M}_T^C$, 即:

$$\mathbf{M}_T^C = \mathbf{T}\mathbf{M}_a^C\mathbf{T}^T. \quad (16)$$

根据全局刚度和质量矩阵,得到驱动单元的振动模态方程为:

$$(\mathbf{K}_T^R - c_j^2\mathbf{M}_T^C)\boldsymbol{\Phi}_j = 0, \quad (17)$$

式中 $\boldsymbol{\Phi}_j$ 为模态振型。

最后,驱动单元的固有频率可通过求解以下方程获得:

$$|\mathbf{K}_T^R - c_j^2\mathbf{M}_T^C| = 0, \quad (18)$$

$$f_j = \frac{c_0}{2\pi} = \frac{\min(c_j)}{2\pi}, \quad (19)$$

式中: f_j 表示驱动单元的固有频率, c_j 表示方程的第 j 解。

4 有限元分析

通过 ANSYS(2020R2) 软件对拱形驱动单元和微动平台的性能进行仿真分析。拱形驱动机构采用强度高、耐疲劳和质量轻的铝合金 7075, 密度、泊松比和杨氏模量分别为 2810 kg/m^3 , 0.33 和 $7.17 \times 10^6 \text{ GPa}$ 。压电纤维片的密度和杨氏模量为 5440 kg/m^3 和 30.3 GPa , 弹性刚度系数、压电应力常数及介电常数如下:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 12 & 7.5 & 7.5 & 0 & 0 & 0 \\ 7.5 & 12 & 7.5 & 0 & 0 & 0 \\ 7.5 & 7.5 & 11 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.1 \end{bmatrix} \times 10^{10}, \quad (20)$$

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 15.8 & -5 & -5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12.3 \end{bmatrix} \times 10^{-10}, \quad (21)$$

$$[\boldsymbol{\epsilon}]^T = \begin{bmatrix} 830 & 0 & 0 \\ 0 & 916 & 0 \\ 0 & 0 & 916 \end{bmatrix} \times 10^{-9}. \quad (22)$$

拱形驱动单元具有两种致动形式,对其中一侧压电纤维片施加电压时,为单驱动形式;同时对左、右两侧压电纤维片施加相反电压,即可构成双驱动形式。

图6给出了单驱动形式下拱形驱动单元在 500 V 驱动电压下的输出位移。当左、右侧压电纤维片分别驱动时,输出位移为 $36.43 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $36.64 \text{ }\mu\text{m}$, 相差 $0.21 \text{ }\mu\text{m}$ 。表2给出了有限元仿真与理论计算的结果对比,左、右输出位移与频

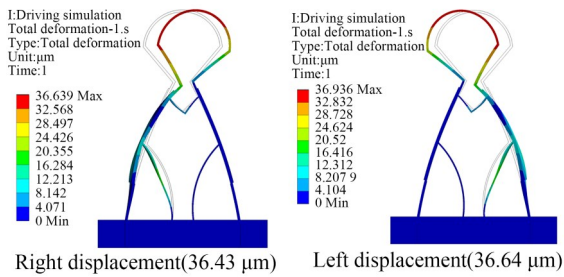


图 6 单驱动形式下驱动单元的输出位移

Fig. 6 Output displacement of driving unit for single driving

率的相对误差分别为 18.1%, 18.7% 和 6.7%。误差产生的主要原因是理论计算中的柔性铰链和刚性连杆均视为柔性梁单元,忽略了弹性变形的非线性。在有限元仿真中,柔性铰链也会偏离目标位置,且网格划分的不同也会影响仿真结果。

然后,对整个粘滑平台的运动性能进行了仿真。平台基体采用铝合金 7075,同时忽略万向轴承和移动平台之间的摩擦力,并参考文献[8]将拱形驱动单元与移动平台之间的摩擦系数设置

表 2 输出位移和固有频率

Tab. 2 Output displacement and natural frequency

Parameter	Theory	Simulation	Error/%
Right displacement	30.85 μm	36.43 μm	18.1
Left displacement	30.85 μm	36.64 μm	18.7
Natural frequency	652 Hz	611 Hz	6.7

为 0.35。粘滑平台的模态分析结果如图 7 所示,前三阶固有频率分别为 364.1, 482.6 和 484.7 Hz。一阶模态为绕 Z 轴转动且在 X, Y 向的频率差值小,平台在 X, Y 向性能类似,且具有良好的动态性能。

如图 8 所示,对拱形驱动单元(A_1 与 A_2)施加 500 V 的驱动电压,得到移动平台 X 向的输出位移为 31.48 μm ;对驱动单元(A_3 与 A_4)施加 500 V 的驱动电压,得到移动平台 Y 向的输出位移为 32.19 μm ;对驱动单元(A_3 与 A_4)异侧压电纤维片施加 500 V 的驱动电压,得到绕 Z 轴的输出转角为 1.26 mrad。

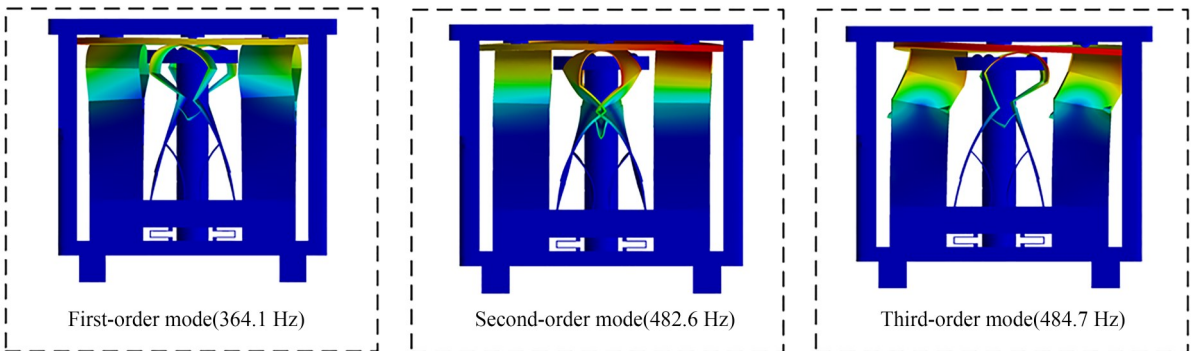


图 7 粘滑平台的固有频率

Fig. 7 Natural frequency of stick-slip platform

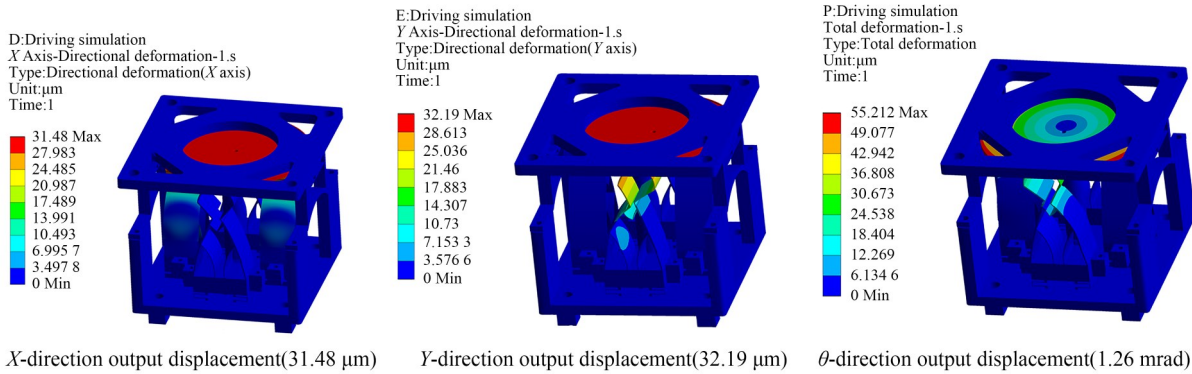


图 8 单驱动形式下平台的输出位移

Fig. 8 Output displacement of platform for single driving

5 实验

平台基体采用铝合金7075材料,并通过线切割加工制成。图9为搭建的粘滑平台性能测试系统,工业计算机(IPC-610L,研华公司)发送模拟电压信号,经数据采集卡(NI-6259,恩艾仪器公司)传输到电压放大器(E01.A3,芯明天科技公司)放大,并施加至压电纤维片(M2814-P1,芯明天科技公司)。激光位移传感器(LK-G30,基恩士公司)和电容传感器(CapaNCDT 6300,德国米铨公司)采集平台运动位移,并传回工控机。实验测试系统放置在精密光学隔振平台(JCO1 VD,上海镜程仪器有限公司)上,避免外界环境振动干扰。系统供电由电源滤波器(P20,Palivens公司)过滤,以降低电气噪声。

图10展示了单、双驱动模式下位移随时间 t 的变化曲线,驱动频率为1 Hz,上升阶段时间占比为99.9%。随着电压升高,平台的输出位移不断增大,在驱动电压为 $-400\sim 1\,400\text{ V}$ 时达到顶峰。双驱动形式下, X 向、 Y 向与绕 Z 轴转动的最大单步位移(D_x, D_y, D_z)分别为 $294.74, 304.5\text{ }\mu\text{m}$ 和 9.96 mrad ;单驱动形式下,3个方向上的最大

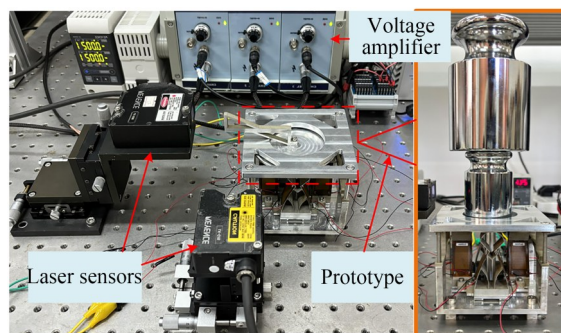


图9 粘滑平台性能测试实验装置

Fig. 9 Experimental setup for performance test of piezoelectric stick-slip platform

单步位移分别为 $148.1, 153.1\text{ }\mu\text{m}$ 和 4.82 mrad 。因此,双驱动形式下平台的输出位移更大。利用连续步进,粘滑平台的平动范围为 $12.8\text{ mm} \times 12.8\text{ mm}$,转动范围为 360° 。

在相同的驱动电压下,实测位移与仿真位移在3个方向上的相对误差分别为13.4%,14.3%和6.6%。误差产生的主要原因在于有限元仿真时使用了理想的结构模型和接触条件,而在实验测试时不可避免地受到加工与装配精度和实际接触条件等因素的影响。

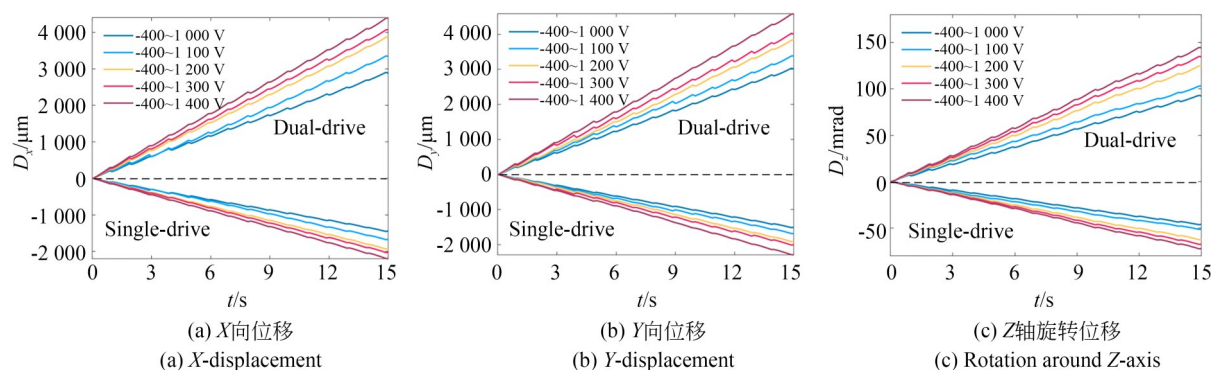


图10 不同电压幅值下的步进位移

Fig. 10 Step displacement under different voltage amplitudes

将标准砝码放置在移动平台中心,通过增减砝码测试粘滑平台在不同垂直负载 G 下的输出位移,如图11所示。在 $-400\sim 1\,400\text{ V}$ 的驱动电压下,当负载在 $0\sim 20\text{ N}$ 时,双驱动形式的转动位移 D_z 和平动位移 D_x 先略微上升后下降,而单驱动形式的输出位移则是随着负载的增加逐渐减小;负载超过 20 N 后,两种形式下的输出位移均减

小。当载重小于 20 N 时,双驱动形式对动子施加的正压力更大,因此随着载重的增加,其位移增加。双驱动与单驱动形式下最大垂直负载分别为 110 N 和 70 N ,双驱动形式下承载能力更强。

以平动为例,图11(c)给出了粘滑平台在负载为 $2, 6$ 和 10 kg 的位移 D_x 随时间的变化曲线。随着负载的增加,回退位移不断增加,有效位移

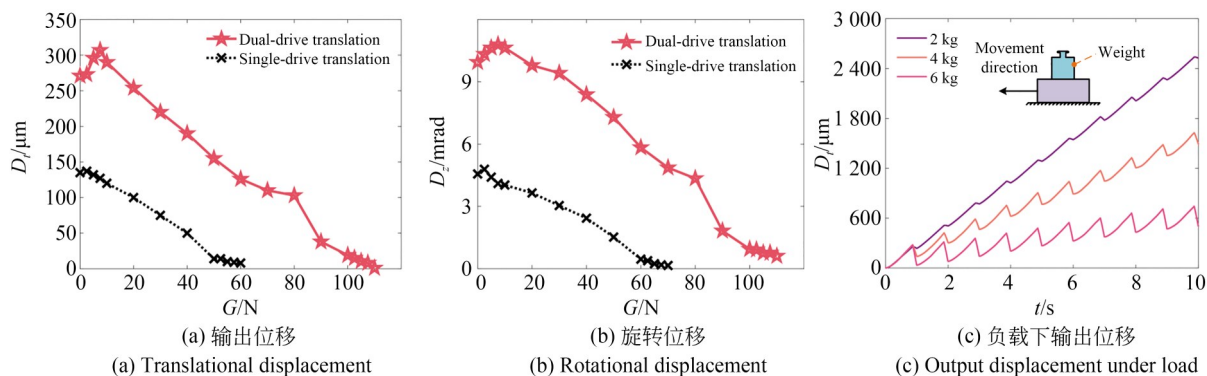


图 11 载重测试

Fig. 11 Load test

不断下降。其原因在于随着负载的增加,驱动单元与移动平台之间的接触黏附增强,摩擦和滞后效应加剧;同时,运动惯量变大,导致位移回退增大。平台在每个周期内的最大输出位移基本不变,输出特性稳定。

在 $-400 \sim 1\,400\text{ V}$ 的双驱动形式下测量平台运动速度,结果如图 12 所示。平动速度 V_x 随频

率的增大而增大,当频率 f 为 300 Hz 时,速度达到最大值 57.929 mm/s ,之后速度不再增加;类似地,平台转动速度 V_z 的最大值为 1.59 rad/s 。与有限元仿真相比,实测频率较有限元仿真少了 20% ,主要原因在于辅助测试件增加了系统的等效质量,同时也受拱形驱动单元和移动平台之间非理性接触的影响。

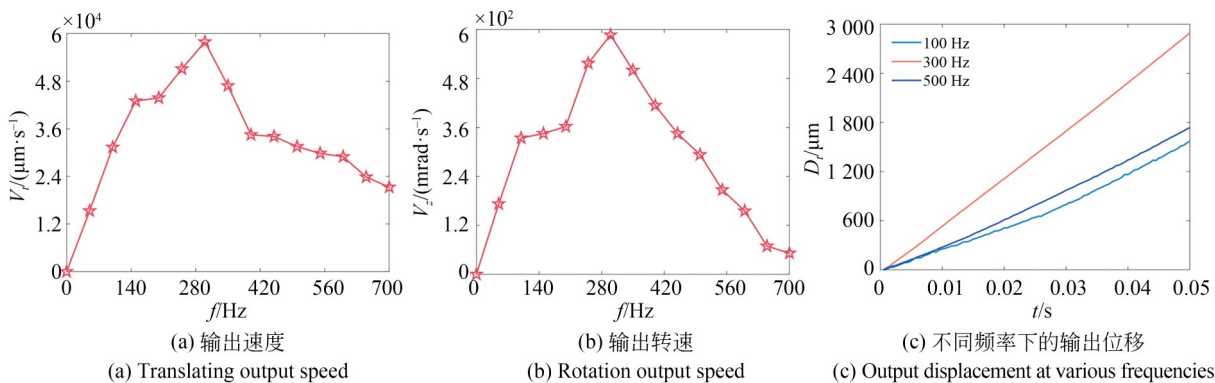


图 12 速度测试

Fig. 12 Speed test

频率对速度的影响存在阈值,在未达到阈值前,速度随频率的增加而增加,而超过阈值后,压电纤维片来不及伸长与缩短,在粘贴阶段也难免产生相对滑动,导致输出速度下降。另一方面,过高的驱动频率导致运动平台的惯性作用更加明显,难以及时响应驱动信号的快速变化。以平动为例,图 12 给出了粘滑平台在 $100, 300$ 和 500 Hz 驱动电压下的位移变化曲线,粘滑平台的高频输出特性较为稳定,且回退位移基本消失,提高了定位精度。

对运动平台施加台阶电压,并利用电容传感器(量程为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 、分辨率为 5 nm)测试运动分辨率,如图 13 所示。当电压阶跃增量或减量为 1 V ,持续时间为 10 s 时,获得平动和转动的位移曲线。在平动方向上选择 $1.5 \sim 2.5\text{ s}$ 时的信号进行统计分析,利用 95% 置信区间得到平动分辨率为 6 nm 。类似地,转动分辨率为 $0.28\text{ }\mu\text{rad}$ 。所以,粘滑平台的位移分辨率高。

表 3 总结了压电粘滑平台的性能,通过对比可知,所设计的粘滑平台的最大负载可达 110 N ,

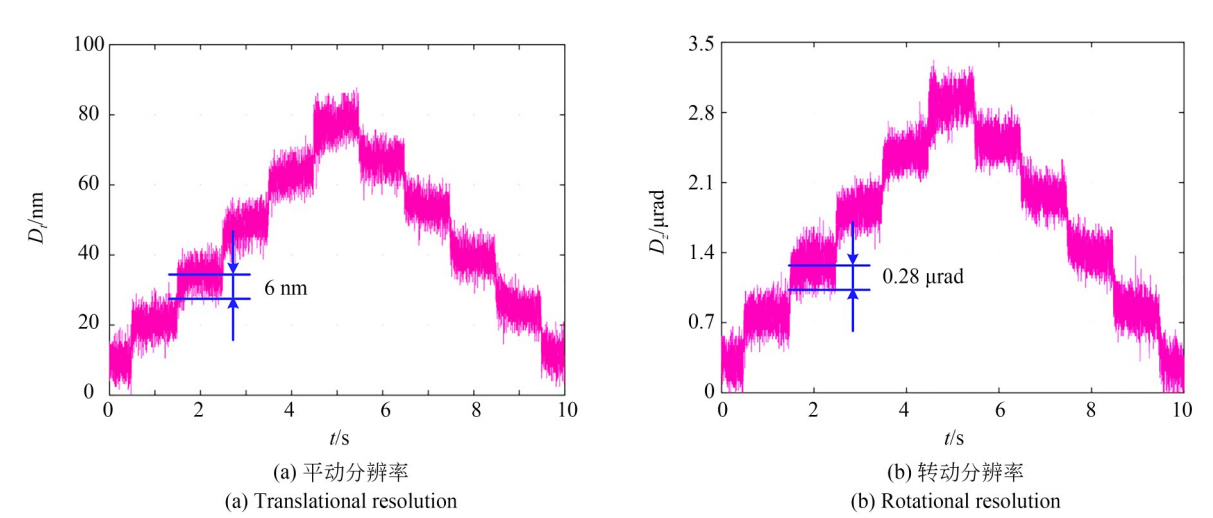


图 13 运动分辨率
Fig. 13 Motion resolution

表 3 现有粘滑运动平台的性能对比

Tab. 3 Performance comparison of existing stick-slip motion platforms

Performance	DOF	Translation range/mm	Rotation range/(°)	Frequency/Hz	Translation speed/(mm·s ⁻¹)	Rotation speed/(rad·s ⁻¹)	Vertical load/N	Step translation/μm	Step rotation/mrad
文献[17]	2	13×13	0	350	13.97	0	50	37.08	0
文献[18]	2	/	0	180	1.54	0	30	11.3	0
文献[19]	2	/	0	3 440	0.86	0	70	13.3	0
Ours	3	12.8×12.8	360	300	57.9	1.59	110	294.7	9.96

远高于其他平台,这是因为柱形支撑大大增强了平台的承载能力。该粘滑平台不仅可以实现三自由度,且具有较大的运动行程、速度和单步位移。

6 结 论

本文采用压电纤维粘滑并联驱动设计运动平台,并采用柱形支撑与万向轴承提高负载能力。然后,利用有限元法建立驱动单元的静力学模型,并对输出位移和固有频率进行仿真。最后,搭建实验测试系统验证平台性能。所设计的压电粘滑平台自由度数多、承载能力强,且兼具宏行程与高精度。在扫描模式下,运动平台平动与转动位移分辨率分别为 6 nm 和 0.28 μrad;利用连续步进,平台平动范围为 12.8 mm × 12.8 mm,转动范围为 360°。因此,所设计的三自由度压电粘滑平台兼具高位移分辨率和宏行程运动

范围。在步进模式下,3个自由度的最大单步位移分别为 294.7 μm,304.5 μm 和 9.96 mrad,平动速度最大为 57.929 mm/s,转动速度最大为 1.59 rad/s,运动平台快速响应能力强。柱形支撑大大提高了平台承载能力,使得平台在步进模式下的最大垂直负载可达 110 N。所以,该压电粘滑平台具有优越的承载性能。

作者贡献声明:

- 孟令伟:测量实验的设计,数据整理和分析,论文构思和撰写;
- 杨依领:论文构思,开发研究用的方法并建立模型、论文审核与编辑写作;
- 吴高华:数据管理和形式分析;
- 崔玉国:项目管理,研究活动的策划,执行,管理和协调;
- 魏燕定:指导,监督和领导研究活动的策划和执行,包括对核心成员以外的人员进行指导。

参考文献:

- [1] LI J X, ZHANG S J, DENG J, *et al.* Development of a multifunction piezoelectric microscopic observation system based on visual feedback [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(9): 11156-11166.
- [2] ZHANG S J, ZHAO H F, MA X F, *et al.* A 3-DOF piezoelectric micromanipulator based on symmetric and antisymmetric bending of a cross-shaped beam [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(8): 8264-8275.
- [3] DU H H, TO S, SZE YIP W, *et al.* Development and assessment of a novel two-degree-of-freedom vibration generator for generating and hiding optical information [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 181: 109470.
- [4] 张旭, 赖磊捷, 李朋志, 等. 电磁驱动柔顺微定位平台闭环频域迭代学习控制 [J]. *光学精密工程*, 2021, 29(9): 2149-2157.
ZHANG X, LAI L J, LI P ZH, *et al.* Closed-loop inverse iterative learning control in frequency-domain for electromagnetic driven compliant micro-positioning platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(9): 2149-2157. (in Chinese)
- [5] SHIRVANI H K, HOSSEINKHANI Y, ERKORKMAZ K. Suppression of harmonic positioning errors in ball-screw drives using Adaptive Feed-forward Cancellation [J]. *Precision Engineering*, 2021, 68: 235-255.
- [6] HSIEH C L, LIU C S. Design of a voice coil motor actuator with L-shape coils for optical zooming smartphone cameras [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 20884-20891.
- [7] ZHEN R, JIANG L, LI H, *et al.* Modular bioinspired hand with multijoint rigid-soft finger possessing proprioception [J]. *Soft Robot*, 2023, 10(2): 380-394.
- [8] 马世坤, 杨依领, 吴高华, 等. 无驱动冗余的纯中心压电黏滑旋转台 [J]. *机器人*, 2024, 46(3): 257-265.
MA SH K, YANG Y L, WU G H, *et al.* Purely central piezoelectric stick-slip rotary stage without driving redundancy [J]. *Robot*, 2024, 46(3): 257-265. (in Chinese)
- [9] 徐斯强, 朱晓博, 刘品宽. 粘滑式压电驱动平台的复合控制 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(12): 2571-2580.
XU S Q, ZHU X B, LIU P K. Composite control of piezo-actuated stick-slip devices [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(12): 2571-2580. (in Chinese)
- [10] WU Y X, YANG Y L, LI G P, *et al.* A non-redundant piezoelectric center-rotation platform with a single-layer structure and a large working range [J]. *Mechatronics*, 2022, 88: 102911.
- [11] MA X F, LIU J K, DENG J, *et al.* A simplified inchworm rotary piezoelectric actuator inspired by finger twist: design, modeling, and experimental evaluation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(12): 12660-12669.
- [12] WU G H, YANG Y L, CUI Y G, *et al.* A novel macro-fiber-composite stick-slip actuator with large single-step displacements [J]. *Precision Engineering*, 2024, 87: 79-96.
- [13] LI X, WANG X Y, SUN W X, *et al.* A compact 2-DOF piezo-driven positioning stage designed by using the parasitic motion of flexure hinge mechanism [J]. *Smart Material Structures*, 2020, 29(1): 015022.
- [14] HAN W W, SHAO S B, ZHANG S W, *et al.* Design and modeling of decoupled miniature fast steering mirror with ultrahigh precision [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 167: 108521.
- [15] KIM J, KANG D, KIM K R, *et al.* Experimental validation of ultra-precision nanopositioning system [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 88931-88941.
- [16] JIANG J G, TAN Q Y, HE T H, *et al.* Safety analysis, design and evaluation of 2-DOF parallel lifting actuator on stereo parking robot [J]. *Actuators*, 2022, 11(7): 181.
- [17] 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)
- [18] TIAN Y L, HUO Z C, WANG F J, *et al.* A novel friction-actuated 2-DOF high precision position-

- ing stage with hybrid decoupling structure [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 167: 104511.
- [19] YU H P, LIU Y X, DENG J, *et al.* A collaborative excitation method for piezoelectric stick-slip actuator to eliminate rollback and generate precise smooth motion [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 170: 108815.
- [20] HUO Z C, TIAN Y L, WANG F J, *et al.* A dual-driven high precision rotary platform based on stick-slip principle [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27: 3053-3064.

作者简介:



孟令伟(2000—),男,山东临沂人,硕士研究生,2022年于山东理工大学获得学士学位,主要从事压电柔顺驱动方面的研究。E-mail: 2211090153@nbu.edu.cn

通讯作者:



杨依领(1987—),男,山东菏泽人,博士,副教授,2016年于浙江大学获得博士学位,主要从事微纳驱动及精密控制、智能结构与振动控制方面的研究。E-mail: yangyiling@nbu.edu.cn