

文章编号 1004-924X(2026)04-0571-15

压电纤维驱动的二自由度跨尺度粘滑运动平台

莫衍楠¹, 杨依领^{1*}, 孟恬畅¹, 魏燕定², 崔玉国¹

(1. 宁波大学 机械工程与智能制造学院 宁波市微纳运动及
智能控制重点实验室, 浙江 宁波 315211;

2. 浙江大学 机械工程学院 全省高端装备制造及检测技术重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对微操作与微装配领域的多自由度、宏行程以及高精度运动需求,提出压电粘滑驱动的二自由度跨尺度并联式解耦运动平台。采用压电纤维致动柔顺机构,设计驱动-结构一体式拱型驱动单元,实现纳米级运动分辨率、提高单步输出位移并使二维平面运动解耦。然后,利用粘滑驱动原理实现宏行程运动,并采用万向轴承与可调支撑柱提高承载能力。之后,通过有限元法建立平台理论模型,并对其输出位移和固有频率进行仿真分析。最后,搭建实验平台测试相关性能。实验结果表明:连续步进运动时,压电粘滑运动平台沿 x 、 y 向平动的最大单步位移分别为 $249.6\ \mu\text{m}$ 和 $237.3\ \mu\text{m}$,运动范围为 $16.10\ \text{mm} \times 16.08\ \text{mm}$;即使垂直负载为 $30\ \text{N}$ 时,粘滑运动平台仍有 $16.0\ \mu\text{m}$ 的单步输出位移。此外,单步精密运动时,位移分辨率分别为 $6.3\ \text{nm}$ 和 $6.8\ \text{nm}$ 。因此,所设计的压电粘滑运动平台可以满足多维跨尺度微纳运动需求。

关键词:压电驱动;粘滑运动;柔顺机构;二自由度

中图分类号:TH122 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20263404.0571

CSTR:32169.14.OPE.20263404.0571

Two-degree-of-freedom cross-scale stick-slip motion platform driven by macro fiber composite

MO Yannan¹, YANG Yiling^{1*}, MENG Tianchang¹, WEI Yanding², CUI Yuguo¹

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

2. Provincial Key Laboratory of High-end Equipment Manufacturing and Testing Technology, School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

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

Abstract: Regarding the multi-degree-of-freedom, macro-stroke, and high-precision motion requirements in micro-manipulation and micro-assembly fields, a two-degree-of-freedom cross-scale parallel decoupled motion platform with piezoelectric stick-slip actuation was proposed. Macro fiber composites were used to actuate compliant mechanisms to design an integrated drive-structure arch-shaped driving unit, achieving nanometer-level motion resolution, enhancing single-step output displacement, and enabling two-dimensional planar motion decoupling. Subsequently, stick-slip driving principles were utilized to achieve macro-

收稿日期:2025-09-28;修订日期:2025-11-14.

基金项目:国家自然科学基金(No. 52575125, No. U23A20618);宁波市重大科技攻关项目(No. 2024Z163)

stroke motion, while universal bearings and adjustable support were employed to enhance load-bearing capacity. A theoretical model of the platform was established using the finite element method, and simulations were conducted to analyze its output displacement and natural frequency. Finally, an experimental platform was constructed to test the relevant performance. Experimental results show that during continuous stRegarding the multi-degree-of-freedom, macro-stroke, and high-precision motion requirements in micro-manipulation and micro-assembly fields, a two-degree-of-freedom cross-scale parallel decoupled motion platform with piezoelectric stick-slip actuation is proposed. Macro fiber composites are used to actuate compliant mechanisms to design an integrated drive-structure arch-shaped driving unit, achieving nanometer-level motion resolution, enhancing single-step output displacement, and enabling two-dimensional planar motion decoupling. Subsequently, stick-slip driving principles are utilized to achieve macro-stroke motion, while universal bearings and adjustable support are employed to enhance load-bearing capacity. A theoretical model of the platform is established using the finite element method, and simulations are conducted to analyze its output displacement and natural frequency. Finally, an experimental platform was constructed to test the relevant performance. ep motion, the maximum single-step displacements of the piezoelectric stick-slip motion platform along the x and y axes are $249.6\ \mu\text{m}$ and $237.3\ \mu\text{m}$, respectively, with a motion range of $16.10\ \text{mm} \times 16.08\ \text{mm}$. Even under a vertical load of $30\ \text{N}$, the stick-slip motion platform still achieves a single-step output displacement of $16\ \mu\text{m}$. Additionally, the translational displacement resolutions are $6.3\ \text{nm}$ and $6.8\ \text{nm}$ during single-step precision motion, respectively. Therefore, the designed piezoelectric stick-slip motion platform can meet the multi-dimensional, cross-scale micro-nano motion requirements.

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

1 引 言

作为微操作与微装配技术领域的关键部件,跨尺度运动平台广泛应用在半导体制造、MEMS 组装、硅光子对准和生物细胞操作等场合^[1-2]。例如,在半导体加工制造领域,运动平台需要带动检测装置对不同直径大小的晶圆进行精密检测,工作范围为毫米级乃至厘米级,检测步进分辨率又在微米/纳米级。为了满足应用需求,跨尺度运动平台常需具有多自由度运动、宏运动行程以及纳米级位移分辨率等^[3-4]。

跨尺度运动平台常采用压电驱动,虽然压电直接驱动位移分辨率可达纳米级,但其工作行程较小,难以实现宏运动行程。因而,压电步进驱动,如尺蠖驱动、超声驱动和粘滑驱动等,备受青睐^[5]。尺蠖驱动需要多个压电叠堆配合以实现钳位与释放,可以提供很大的输出力,但结构及控制较为复杂,运动速度也较慢^[6];超声驱动速度很高,但驱动频率高达数十 kHz,磨损与发热严重,也较难实现高精度运动^[7]。相比之下,粘滑驱动

采用简单结构与原理,即可实现毫米级乃至厘米级的宏运动行程以及纳米级位移分辨率,且运动速度较快,结构紧凑,因而颇具优势^[8]。

为了实现多自由度运动,跨尺度运动平台大多采用串联式或并联式结构^[9]。串联式运动平台控制简单,各向运动均可单独驱动及运动,但运动惯量较大,且各向输出存在差异,降低了平台动态性能^[10]。并联式运动平台常包含多个与输出平台相连接的运动支链,各向输出性能一致,精度高、惯性小且结构紧凑^[11]。但是,并联式往往存在输出位移耦合,需要设计解耦机构减小或消除运动耦合^[12]。然而,跨尺度运动特性导致其无法采用类似压电微动平台(行程仅为数十或数百微米)的端部约束式解耦机构,运动解耦较为困难。

Li^[13]等利用杠杆式柔性铰链机构以及双层运动机构层叠,设计了串联式二自由度压电粘滑平台, x, y 运动独立,结构较为紧凑,但各向输出不一致, y 向运动惯量很大。同时,柔顺机构放大了压电叠堆致动器(Piezoelectric Stack Actuator,

PSA)的输出,最大单步位移为 $19.1\ \mu\text{m}$, $100\ \text{Hz}$ 驱动频率下的速度为 $1.65\ \text{mm/s}$ 。Zhao^[14]等采用柔性三角与X型铰链结构,设计具有双轴驱动能力的空间寄生运动机构,从而设计了两自由度压电粘滑运动平台,最大单步位移约 $10.7\ \mu\text{m}$, $150\ \text{Hz}$ 驱动频率下的速度为 $1.03\ \text{mm/s}$,位移分辨率为 $18\ \text{nm}$ 。Tian^[15]等采用并联解耦驱动单元与串联导轨,设计了两自由度压电粘滑平台,最大单步位移为 $11.3\ \mu\text{m}$, $120\ \text{Hz}$ 驱动频率下的速度为 $1.54\ \text{mm/s}$ 。

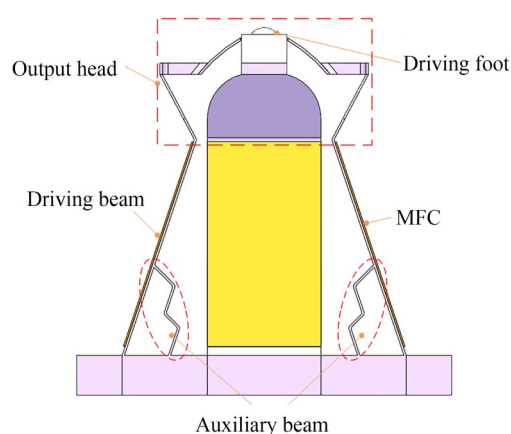
可见,目前两自由度压电粘滑运动平台单步位移较小(通常在 $10\sim 40\ \mu\text{m}$ 之间),实现 mm/s 级运动所需驱动频率高(约为 $13\sim 130\ \text{Hz}$)。因此,通过设计而二自由度驱动-结构一体式拱型驱动单元,提高单步输出位移。然后,建立柔顺驱动单元的理论模型。通过有限元仿真与实验测试对压电粘滑运动平台进行验证。所提出的压电纤维粘滑式二自由度跨尺度运动平台,单步位移为 $249.6\ \mu\text{m}$,运动速度为 $1\ \text{mm/s}$ 所需的驱动频率约为 $3.1\ \text{Hz}$ 时,实现了低频高速运动。

2 结构设计及其工作原理

2.1 结构设计

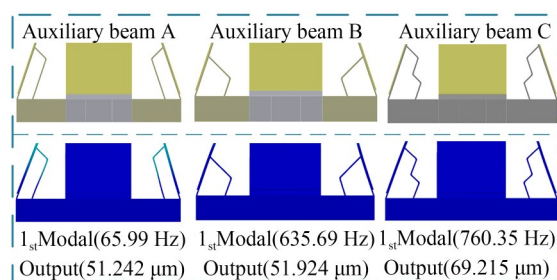
所设计的压电粘滑式二自由度运动平台如图1所示,由拱型驱动单元、柔性支撑、万向轴承、可调支撑柱、上预紧板、输出台和底座等组成。拱型驱动单元如图2(a)所示,包括压电纤维致动器(Macro Fiber Composite, MFC)、驱动梁、输出头、叶型柔性铰链、驱动足和刚性梁。MFC粘贴

在驱动梁上,通过柔性梁与驱动足相连。输出头呈拱型,可以大幅提高驱动单元输出位移^[10]。同时,输出头处设有交叉布置的叶型柔性铰链,减小平动方向的位移耦合,保证输出台在 x, y 向的独立输出。驱动单元在 x, y 向上均采用双片驱动,增大输出位移。此外,驱动足在 z 向也产生寄生位移,增大与输出台之间的接触力,从而提高粘滑性能。此外,辅助梁多次折叠且与驱动梁构成类似平行四边形结构,提高了输出位移和固有频率,如图2(b)所示。



(a) 驱动单元结构图

(a) Structure diagram of driving unit

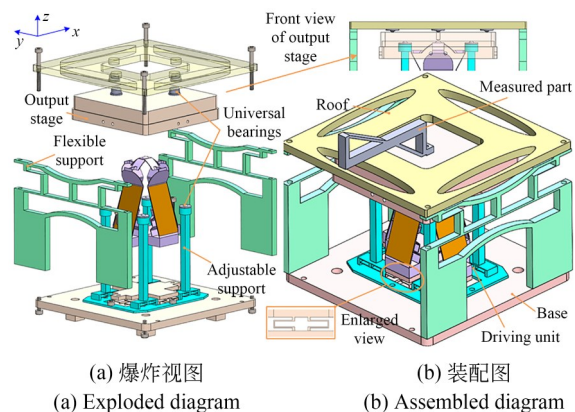


(b) 仿真结果

(b) Simulation result

图2 驱动单元示意图

Fig. 2 Schematic diagram of driving unit



(a) 爆炸视图

(a) Exploded diagram

(b) 装配图

(b) Assembled diagram

图1 粘滑运动平台

Fig. 1 Stick-slip motion platform

对于粘滑运动,驱动单元与输出台之间的预紧至关重要。因此,上预紧板、柔性支撑与底座柔性铰链组合形成运动平台的预紧单元。柔性支撑与上预紧板配合,产生下压力,并与驱动单元和可调支撑柱提供的支撑力,共同作用在输出台上,使输出台保持水平,保证其在 z 向完全被约束。拱形驱动单元周围的可调支撑柱由 7075 铝合金加工而成,以减轻驱动单元受到垂直载荷。

此外,输出台上设有四个不锈钢万向轴承,使其形成滚动接触,避免非驱动摩擦对输出性能的影响。同时,在底座也设有柔性铰链,进一步调节驱动单元与输出台之间的摩擦力。当预紧螺钉上下调节时,拱型驱动单元与输出台之间的接触力减小或增加,从而调节摩擦界面上的摩擦力。

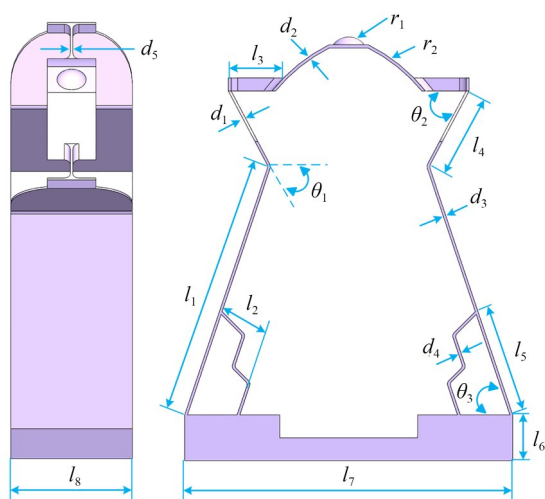


图3 驱动单元主要尺寸参数

Fig. 3 Key parameters of driving unit

通过多次优化驱动梁厚度、长度与倾角以及辅助梁厚度与高度等关键尺寸,得到兼顾拱型驱动单元输出位移与固有频率特性的主要尺寸参数,如表1所示。其中, $l_1 \sim l_8, d_1 \sim d_5, r_1 \sim r_2$ 和 $\theta_1 \sim \theta_3$ 分别为相应结构的长度、厚度、半径和角度,如图3所示。

表1 驱动单元的关键结构尺寸

Tab. 1 Key structural parameters of the driving unit

Parameter	Symbol	Parameter	Symbol
l_1/mm	39.6	d_2/mm	0.45
l_2/mm	7.6	d_3/mm	0.4
l_3/mm	8.4	d_4/mm	0.4
l_4/mm	12.5	d_5/mm	0.4
l_5/mm	16.6	r_1/mm	3.0
l_6/mm	7.0	r_2/mm	25.9
l_7/mm	50.0	$\theta_1/(\circ)$	62.2
l_8/mm	20.0	$\theta_2/(\circ)$	62.2
d_1/mm	0.4	$\theta_3/(\circ)$	71.5

2.2 工作原理

以 x 向运动为例,图4给出了粘滑运动过程,通过施加锯齿波电压,产生粘滞与滑移运动。

(1) 在 t_0 时刻,驱动电压为0,MFC维持原状,驱动单元与输出台保持初始接触。此时,可以调节预紧螺栓,改变接触压力。

(2) $t_0 \sim t_1$ 阶段,驱动电压缓慢升高,MFC变形,带动驱动单元变形,推动输出台沿 x 向运动 x_1 的距离。此时,驱动单元与输出台之间为静摩擦力。

(3) $t_1 \sim t_2$ 阶段,驱动电压迅速下降至0,MFC带动驱动单元恢复原状。驱动单元与输出台之间产生滑动摩擦力。滑移时间很短,输出台最终仍有 x_2 的位移。

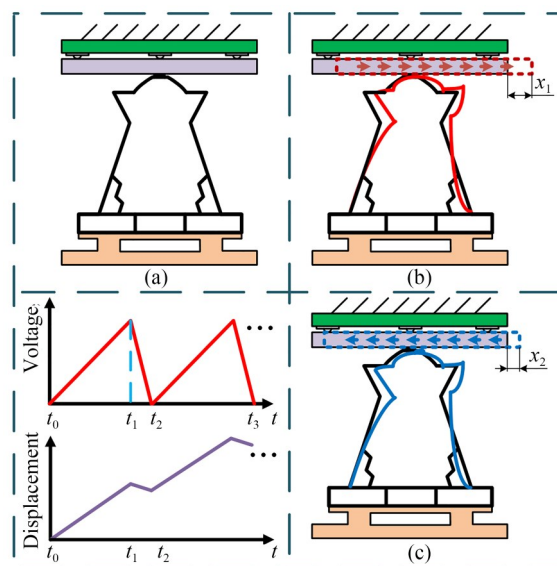


图4 粘滑运动原理

Fig. 4 Stick-slip motion principle

重复上述过程,粘滑平台即可通过连续步进驱动模式实现跨尺度运动。同时,由于MFC具有超高位移分辨率,粘滑运动平台可以在单个电压周期内实现纳米级运动精度,即单步精密运动模式^[16]。

3 理论建模

在压电柔顺结构设计时,理论模型主要用来分析关键参数对输出位移与固有频率性能的影响。常见建模方法有伪刚体法、柔度矩阵法和有

限元法^[17-18]。由于有限元法将所有刚性连杆、梁和柔性铰链都视作两个及以上节点组成的柔性单元,计算精度更为准确^[19]。鉴于驱动单元 x, y 向结构一样且运动解耦,选择 x 向进行建模。将驱动单元划分为多个节点,相邻两个节点表示的柔性单元如图5所示,所有节点依次相连而表示的驱动单元有限元模型如图6所示。

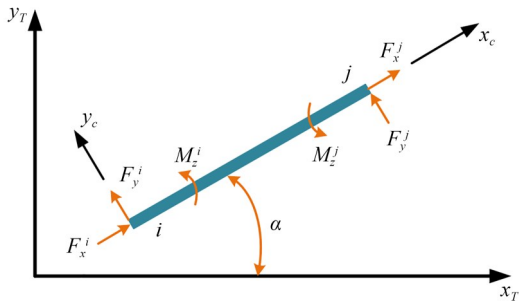


图5 有限元模型的柔性单元

Fig. 5 Flexible element of finite element model

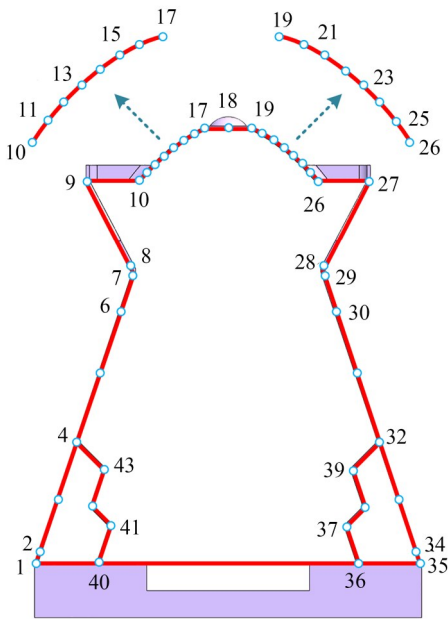


图6 驱动单元有限元模型

Fig. 6 Finite model of driving unit

单元力矢量矩阵 F^e 、刚度矩阵 K^e 和位移矢量矩阵 D^e 之间的关系为:

$$F^e = K^e D^e, \quad (1)$$

$$\begin{cases} F^e = [F_x^i F_y^i M_x^i F_x^j F_y^j M_x^j]^T \\ D^e = [d_x^i d_y^i \theta^i d_x^j d_y^j \theta^j]^T \end{cases}, \quad (2)$$

其中:矩阵上标 e 表示柔性单元, $d_x^i, d_y^i, \theta^i, d_x^j, d_y^j$ 和 θ^i 分别表示节点 i 和 j 在力 F 作用下产生的 x, y 向位移和绕 z 轴转角。

单元力 F^e 与相应位移之间的关系为:

$$\begin{cases} F_x^i = \frac{EA}{l} (d_x^i - d_x^j) \\ F_x^j = -F_x^i \\ F_y^i = \frac{6EI}{l^2} (\theta^i + \theta^j) + \frac{12EI}{l^2} (d_y^i - d_y^j) \\ F_y^j = -F_y^i \\ M_z^i = \frac{2EI}{l} \theta^i + \frac{4EI}{l} \theta^j + \frac{6EI}{l^2} (d_y^i - d_y^j) \\ M_z^j = \frac{4EI}{l} \theta^i + \frac{2EI}{l} \theta^j + \frac{6EI}{l^2} (d_y^i - d_y^j) \end{cases}. \quad (3)$$

局部坐标下柔性单元的刚度矩阵 K_c^e 为:

$$K_c^e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中:矩阵下标 c 表示局部坐标系; E 为柔性单元的弹性模量、 A 为截面面积、 I 为惯性矩、 l 为连杆长度。

节点2~节点7和节点29~节点34处包含了两层,所以节点 $p_{2-3}, p_{3-4}, p_{4-5}, p_{5-6}, p_{6-7}, p_{29-30}, p_{30-31}, p_{31-32}, p_{32-33}$ 和 p_{33-34} 处的局部刚度矩阵为:

$$\begin{cases} K_{2-3}^e = K_{2-3}^B + K_{2-3}^m \\ \vdots \\ K_{4-5}^e = K_{4-5}^B + K_{4-5}^m \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} K_{29-30}^e = K_{29-30}^B + K_{29-30}^m \\ \vdots \\ K_{33-34}^e = K_{33-34}^B + K_{33-34}^m \end{cases}, \quad (6)$$

其中: K^B 为驱动梁的刚度, K^m 为MFC的刚度。

将局部坐标下单元刚度矩阵 K_c^e 变换至全局

坐标,表达式为:

$$\mathbf{K}_T^e = \mathbf{T}(\alpha) \mathbf{K}_c^e \mathbf{T}(\alpha)^T, \quad (7)$$

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

其中:全局刚度矩阵 $\mathbf{K}_T^e$ 中 $\mathbf{T}$ 表示全局坐标系, $\mathbf{T}(\alpha)$ 为局部坐标系到全局坐标系的转换矩阵; α 表示从坐标系变换时转过的角度。

每个柔性单元的全局刚度矩阵 $\mathbf{K}_T^e$ 划分为四个子模块:

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

每个刚度矩阵 $\mathbf{K}_T^e$ 中的子模块,根据节点数 i 和 j 组装成维度为 $(3 \times n) \times (3 \times n)$ 的全局刚度矩阵,其中 n 为节点总数。

由于节点 1, 35, 36 和 40 在驱动单元运动时是静止的,所以其位移为 0。去除掉位移为 0 的节点,可以得到简化后的全局刚度矩阵 $\mathbf{K}_{sT}^a$,其中,矩阵上标 a 表示整个驱动单元, sT 表示全局坐标下的简化。

拱型驱动单元的全局力矩阵 $\mathbf{F}_s^a$ 与位移矩阵 $\mathbf{D}_s^a$ 之间的关系式为:

$$\mathbf{F}_s^a = \mathbf{K}_{sT}^a \mathbf{D}_s^a, \quad (10)$$

式中:

$$\begin{cases} \mathbf{F}_s^a = [\mathbf{F}_{s2}^a, \dots, \mathbf{F}_{si}^a, \dots, \mathbf{F}_{sn}^a]^T \\ \mathbf{D}_s^a = [\mathbf{D}_{s2}^a, \dots, \mathbf{D}_{si}^a, \dots, \mathbf{D}_{sn}^a]^T \end{cases}, \quad (11)$$

其中: n 为 39, 且 i 为位移不为 0 的节点。

MFC 在驱动电压的作用下伸长,从而在节点 2, 节点 7、节点 29 和节点 34 处施加 4 个力向量:

$$\begin{cases} \mathbf{F}_2^a = [0, 0, F_{ml} d_3]^T \\ \mathbf{F}_7^a = [0, 0, -F_{ml} d_3]^T \\ \mathbf{F}_{29}^a = [0, 0, F_{mr} d_3]^T \\ \mathbf{F}_{34}^a = [0, 0, -F_{mr} d_3]^T \end{cases}, \quad (12)$$

其中, d_3 为驱动梁的厚度。

所以,驱动足的输出位移为:

$$x_t = \sqrt{D_{18}^2(x) + D_{18}^2(y)}. \quad (13)$$

局部坐标系下柔性单元的质量矩阵 $\mathbf{M}_c^e$ 为:

$$\mathbf{M}_c^e = \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22l & 0 & 54 & -13l \\ 0 & 22l & 4l^2 & 0 & 13l & -3l^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13l & 0 & 156 & -22l \\ 0 & -13l & -3l^2 & 0 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

其中: $H = \rho A l$, ρ 为柔性单元的密度。

局部坐标系下的单元质量矩阵 $\mathbf{M}_c^e$ 转换至全局坐标系,得到全局质量矩阵 $\mathbf{M}_T^e$:

$$\mathbf{M}_T^e = \mathbf{T}(\alpha) \mathbf{M}_c^e \mathbf{T}(\alpha)^T. \quad (15)$$

结合式(7)和式(15),得到驱动单元的动力学方程:

$$(\mathbf{K}_T^e - u_j^2 \mathbf{M}_T^e) \boldsymbol{\Phi}_j = 0, \quad (16)$$

其中: $\boldsymbol{\Phi}_j$ 为模态振型, u_j 为振动方程的第 j 解,其表达式为:

$$|\mathbf{K}_T^e - u_j^2 \mathbf{M}_T^e| = 0, \quad (17)$$

$$f_j = \frac{u_1}{2\pi} = \frac{\min(u_j)}{2\pi}, \quad (18)$$

其中: f_j 为驱动单元的固有频率, u_1 为方程第 1 解,即固有频率。

4 仿真分析

采用 ANSYS Workbench 对拱型驱动单元和粘滑运动平台进行仿真分析。驱动单元和运动平台材料为 7075 铝合金,密度为 2 810 kg/m³,弹性模量为 71.7 GPa,泊松比为 0.33。MFC 的尺寸为 38 mm × 20 mm × 0.3 mm,弹性模量为 15.857 GPa,电学参数如式(19)~式(21)所示:

$$[\epsilon]^T = \begin{bmatrix} 830 & 0 & 0 \\ 0 & 916 & 0 \\ 0 & 0 & 916 \end{bmatrix} \times 10^{-9} \text{ F/m}, \quad (19)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 12 & 7.5 & 7.5 & 0 & 0 & 0 \\ 7.5 & 12 & 7.5 & 0 & 0 & 0 \\ 7.5 & 7.5 & 11 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.1 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{ N/m}^2, \quad (20)$$

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

其中: ϵ 为介电常数; S 为弹性刚度系数; d 为压电应力常数。

对拱型驱动单元前后两侧的MFC均施加 $-400 \sim 800 \text{ V}$ 的电压,当电压增加至 800 V 时,得到图7(a)所示的输出位移图。此时,前后两侧的MFC分别伸长与收缩,致动拱型驱动单元在 x 向产生 $266.21 \mu\text{m}$ 的输出位移。同理, y 向输出位移为 $265.14 \mu\text{m}$,如图7(b)所示。

T:Static structural
Directional deformation
Type:Directional deformation
Unit: μm
Global coordinate system
Time:1 s
2025/5/25 20:55

266.21 Max
264.42
262.64
260.86
259.07
257.29
255.51
253.72
251.94
250.16 Min

(a) x 方向位移仿真
(a) Displacement simulation of x direction

T:Static structural
Directional deformation 2
Type:Directional deformation
Unit: μm
Global coordinate system
Time:1 s
2025/6/8 12:35

265.15 Max
263.36
261.59
259.81
258.04
256.26
254.48
252.71
250.93
249.16 Min

(b) y 方向位移仿真
(b) Displacement simulation of y direction

图7 驱动单元输出位移仿真

Fig. 7 Displacement simulation of driving unit

同时,对拱型驱动单元进行模态仿真,以预测所设计驱动单元的固有频率。固有频率越高,运动平台越稳定,越不易被外界干扰激起共振,可以通过增大结构输入刚度或减小等效质量来提高固有频率。如图8所示,拱型驱动单元的前四阶频率分别为 760.35 Hz , 765.29 Hz , 908.69 Hz 和 963.37 Hz ,固有频率较高。此外,驱动单元前两阶模态形状与其 x , y 向运动一致,验证了所设计驱动单元的有效性。

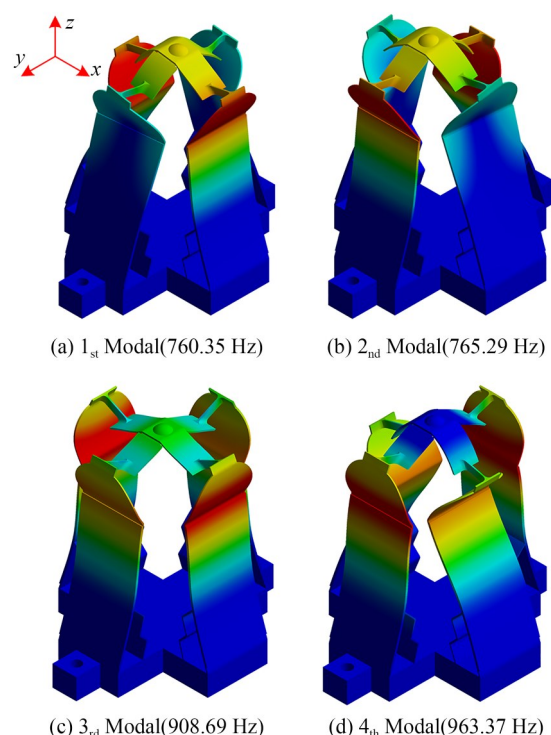


图8 驱动单元模态仿真

Fig. 8 Modal simulation of driving unit

采用公式(13)和公式(18),代入表1中的关键尺寸参数以及材料弹性模量,得到拱型驱动单元输出位移和固有频率的理论值,如表2所示。理论计算时,节点划分不够密集。同时,柔性铰链和刚性连杆都被简化成柔性梁单元,而有限元仿真采用三维四面体单元,而且柔性铰链也难以完全处于假定位置。因此,理论值和仿真值之间存在一定误差。此外,对运动平台施加 $-400 \sim 800 \text{ V}$ 的电压,当电压增加至 800 V 时, x 向的耦合位移为 $1.5948 \mu\text{m}$,耦合比为 0.61% ; y 向的耦合位移为 $1.1503 \mu\text{m}$,耦合比为 0.45% ,实现了二维平面运动解耦。

表 2 输出位移和固有频率

Tab. 2 Output displacement and natural frequency

Parameter	Theory	Simulation	Error/%
f_x/Hz	811.75	760.35	6.33
f_y/Hz	821.27	765.29	6.82
$x_o/\mu\text{m}$	251.42	266.21	5.56
$y_o/\mu\text{m}$	251.42	265.14	5.17

图 9 给出了驱动单元关键参数的灵敏度分析,图中, D_o 表示输出位移, f 为频率, P 为参数。叶型柔性铰链长度 l_3 和驱动梁厚度 d_3 对输出位移和固有频率性能预测的影响最大,两者的参数波动是引起理论值与仿真值之间误差的主要因素之一。此外,理论建模时假定驱动单元对称,而只针对驱动单元的一半进行计算,而仿真时对驱动单元整体进行,难免存在耦合影响。因此,除了网格划分的不同,不同方向上的耦合也影响理论与仿真间的误差。

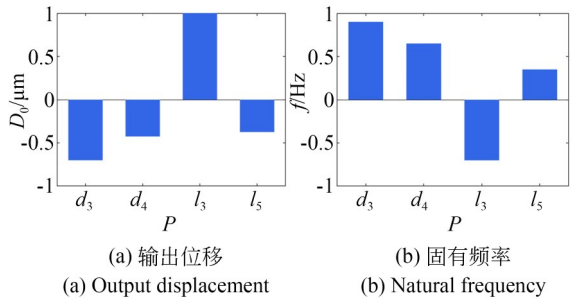


图 9 灵敏度分析
Fig. 9 Sensitivity analysis

对粘滑平台的整体运动进行仿真分析,并将拱型驱动单元与输出台之间的接触定义为“摩擦”,摩擦系数为 $0.3^{[20]}$ 。当驱动电压从 -400 V 逐渐增加至 800 V 时,输出平台 x,y 向输出位移分别为 $259.81\text{ }\mu\text{m}$ 和 $257.15\text{ }\mu\text{m}$,如图 10 所示。因此,粘滑运动平台可以实现平面二自由度运动,且运动性能良好。此外,当施加 30 N 垂直负载,并对压电纤维致动器施加 $1\text{ }000\text{ V}$ 电压时,驱动单元和运动平台仿真得到的等效应力分别为 72.975 MPa 和 69.651 MPa ,远小于 7075 铝合金的屈服极限 503 MPa 。

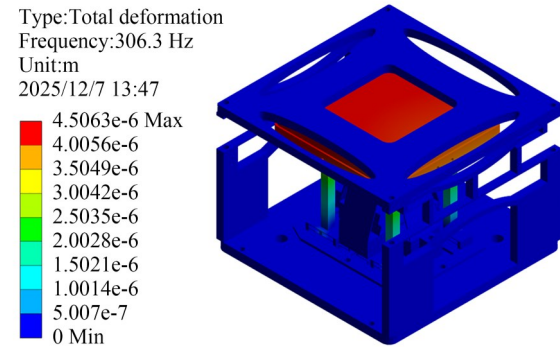
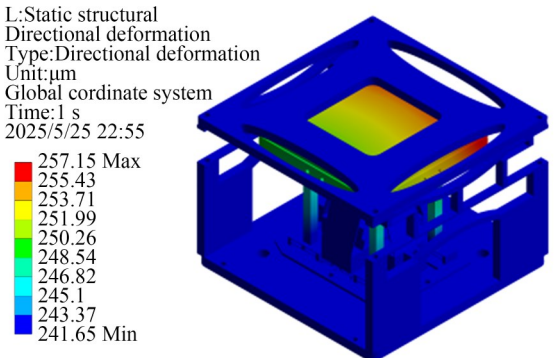
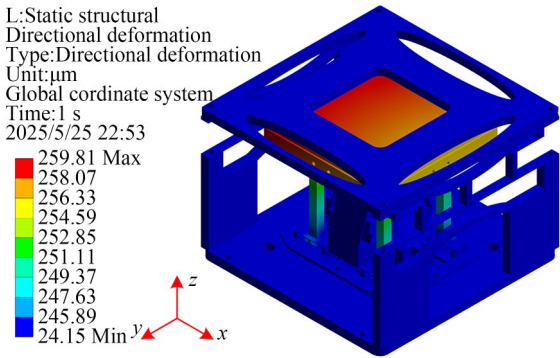


图 10 粘滑运动平台仿真
Fig. 10 Simulation of stick-slip motion platform

5 测试实验与结果

5.1 实验测试系统

压电粘滑平台主体由 7075 铝合金经线切割加工而成,四片 MFC(M2814-P1,哈尔滨芯明天)通过环胶粘贴在拱型驱动单元的驱动梁上,万

向轴承采用米思米公司的BCHA7.5型号。为了避免外界环境振动干扰,实验装置放置于精密隔振平台(JCO1VD,上海镜程仪器有限公司)。MFC耐压范围很大,为 $-500\sim 1\,500\text{ V}$,静电容量仅为 1.4 nF ,工作拉伸应变上限小于 $2\,000\text{ ppm}$,因而驱动力大且变形范围广。此外,为了方便测量平台运动位移,输出台上安装有辅助测量件。

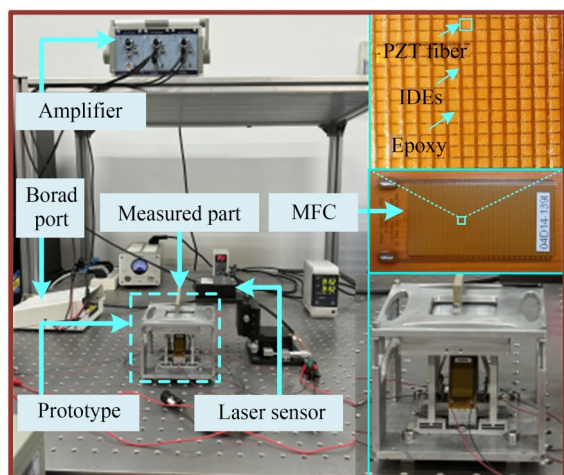


图11 实验测试系统

Fig. 11 Experimental testing system

工业控制计算机通过PCI数据采集卡发出驱动电压,经功率放大器(E01. A3,哈尔滨芯明天)放大后施加至MFC。同时,激光位移传感器(LK-G30,日本基恩士,量程 $\pm 5\text{ mm}$,分辨率 50 nm)和电容传感器(CapaNCDT 6300,德国米铤,量程 $50\text{ }\mu\text{m}$,分辨率 0.5 nm)分别对准测量件以记录运动平台的宏行程位移和纳米分辨率,并经信号调理器和数据采集卡发送至计算机进行显示与分析。

5.2 粘滑位移测试

对MFC施加最小电压为 -400 V 的锯齿波驱动电压,通过激光位移传感器测量得到图12所示的粘滑运动平台的输出位移。图中, D_s 表示为连续输出位移。当驱动电压为 $-400\sim 800\text{ V}$ 锯齿波时, x, y 向的最大单步位移分别为 $249.6\text{ }\mu\text{m}$ 和 $237.3\text{ }\mu\text{m}$ 。 x, y 向单步位移的实验值与仿真值之间误差分别为 3.93% , 7.72% ,验证了仿真结果的有效性。误差产生的主要原因在于有限元仿真采用理想设置,而实验测试时难免受加

工、装配精度以及实际接触等因素影响。单步输出位移随驱动电压的升高而增大,且总运动位移随着时间增长而逐渐累加。因此,所设计的粘滑运动平台单步位移大,且具有良好的位移输出性能。

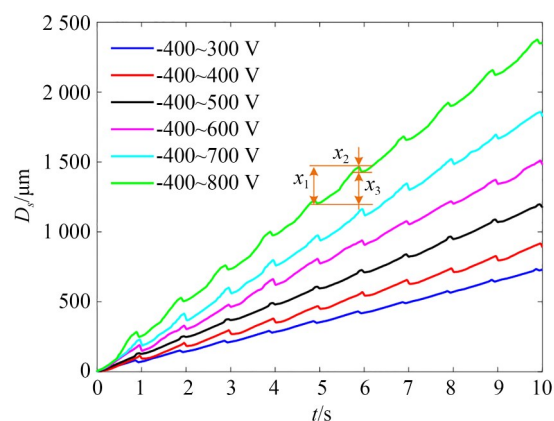
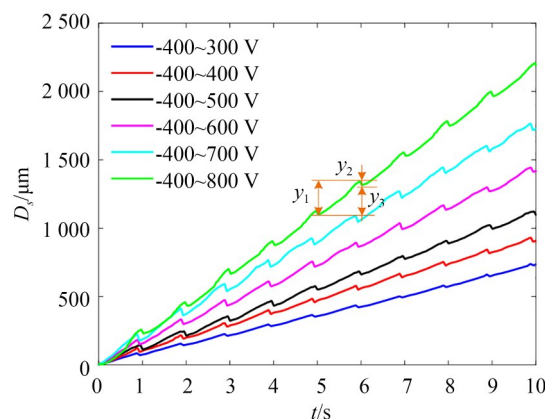
(a) x 方向(a) x direction(b) y 方向(b) y direction

图12 不同电压下的位移曲线

Fig. 12 Displacement curve under different voltage

然后,利用激光干涉仪(SP 2000 DS,德国SIOS Meßtechnik GmbH,量程 100 mm ,分辨率 0.1 nm)测量粘滑平台的运动范围。通过连续施加 $-400\sim 800\text{ V}$ 的锯齿波驱动电压,粘滑平台即可产生持续运动,运动范围为 $16.10\text{ mm}\times 16.08\text{ mm}$,如图13所示,图中 D_x, D_y 分别为 x, y 向的输出位移。运动平台采用压电粘滑驱动,理想情况下其行程不受限制^[21]。实际中,输出台运动与柔性支撑干涉,限制了运动范围。

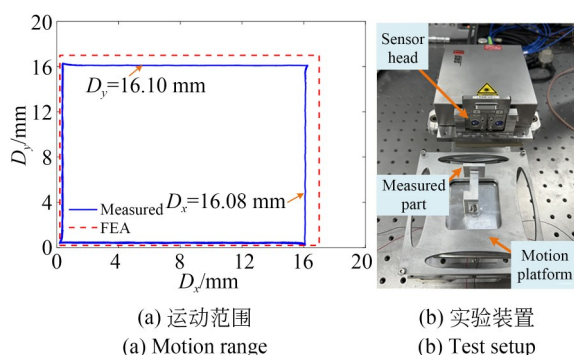


图 13 运动范围测试

Fig. 13 Motion range test

为了验证输出位移数据的重复性,对运动平台施加频率 1 Hz、幅值由 -400 V 增加至 800 V 的锯齿波电压,并重复测试五次,如图 14 所示。从中可知,五组输出位移与其平均值之间的最大误差为 $18.44\text{ }\mu\text{m}$,平均误差占最大输出位移的比值为 0.83% ,粘滑平台输出位移具有良好一致性。

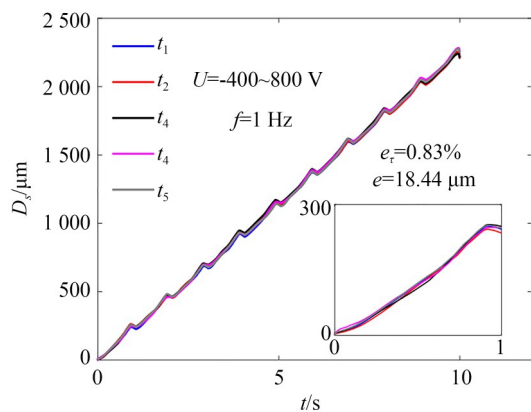


图 14 粘滑运动重复性测试

Fig. 14 Stick-slip motion repeatability test

5.3 负载测试

由于预紧力难以直接测量,采用锁紧力间接衡量预紧力,即预紧力=锁紧力/摩擦系数^[22]。参考文献^[15],并经过多次测试,选择较小锁紧力 (0.3 N) 和较大锁紧力 (2 N) 作为初始锁紧力。如图 15 所示,锁紧力为 0.3 N 时,运动平台空载时的输出位移最大,然后随着水平载重的增加而迅速下降;锁紧力为 1 N 时,运动平台空载的输出位移较 0.3 N 时变小,同时随着水平载重的增加,

位移下降速率也比 0.3 N 时更慢;锁紧力为 2 N 时,运动平台空载的输出位移较 0.3 N 时变小,同时输出位移随着水平载重增加而下降,直至水平载重为 2.2 N 时输出位移接近 0。因此,随着预紧力的增大,运动平台单步位移逐渐减小,而承载能力大幅增强。

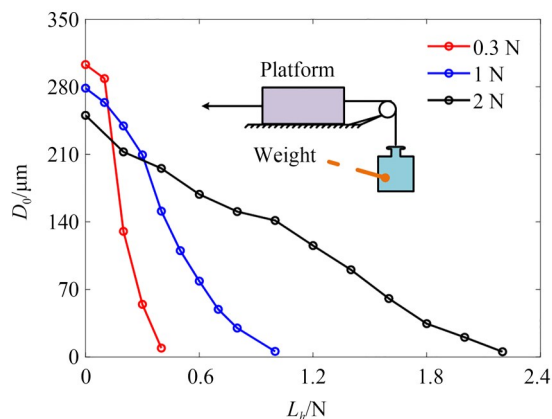


图 15 不同锁紧力下水平载重与单步位移的关系

Fig. 15 Relationship between horizontal load and single-step displacement under different locking forces

在锁紧力 2 N 情况下,对 MFC 施加从 -400 V 增加至 800 V 的驱动电压,通过施加标准砝码以测试垂直负载,如图 16 所示。同时,局部放大视图也给出了垂直负载在 1 N 附近的细分测试结果。图中, L_v 为垂直负载。当垂直负载从 0 N 增加至 30 N 过程中,输出位移先增大再逐渐减小。当垂直负载为 30 N 时,运动平台仍有 $16.0\text{ }\mu\text{m}$ 的

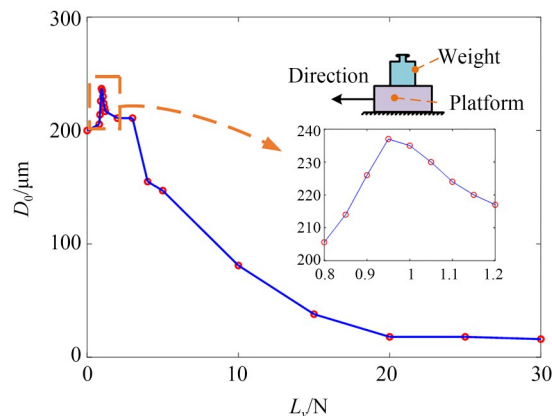


图 16 单步位移与垂直负载关系曲线

Fig. 16 Relationship between the step displacement and the vertical load

单步位移。输出位移起始增加的原因是垂直负载对驱动单元施加了正压力,使得粘滑驱动能力增大。后续垂直负载的持续增加,运动惯量变大,驱动单元与输出台之间的滞后效应加剧,回退变大,导致输出位移变小。

5.4 运动速度测试

为了测试粘滑平台达到1 mm/s速度所需的驱动频率,施加从-400 V增加至800 V的驱动电压,并将频率限制在1~5 Hz低频范围内,通过激光位移传感器测量得到图17所示的速度变化曲线。随着驱动频率增加,粘滑平台的运动速度逐渐增大。当驱动频率约为3.1 Hz时,运动速度可达到1 mm/s。图中, v 为运动速度, f 为驱动频率。因此,得益于单步位移大的优点,可以实现低频快速运动,减少驱动足与输出台间的粘滑摩擦次数,降低磨损,提高寿命^[23]。若要进一步提高使用寿命,可以采用离子渗氮、热喷涂等工艺对驱动足与输出台间的摩擦面进行处理,提高耐磨性。

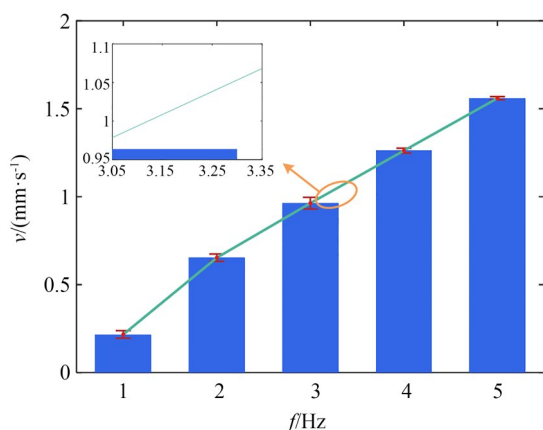


图17 不同频率下的运动速度

Fig. 17 Motion velocity with different driving frequencies

5.5 分辨率测试

在单步精密运动模式下,施加阶梯电压并通过电容传感器测试粘滑平台的位移分辨率。驱动电压的时长为10 s,通过不断调整电压幅值,最终在10 V阶梯电压下测得 x, y 向的位移,如图18(a)和(b)所示。之后,参考文献^[24]选取0.5~1.5 s的数据去除均值,并进行正态分布处理,得到其直方图。图中, n 为噪声, E 为数量。 x, y 向的位移测量噪声的95%置信区间分别为

$(-0.42 \pm 6.3) \text{ nm}$ 和 $(-0.39 \pm 6.8) \text{ nm}$, 因此,所设计的粘滑运动平台在 x, y 向的单步位移分辨率分别为6.3 nm和6.8 nm。

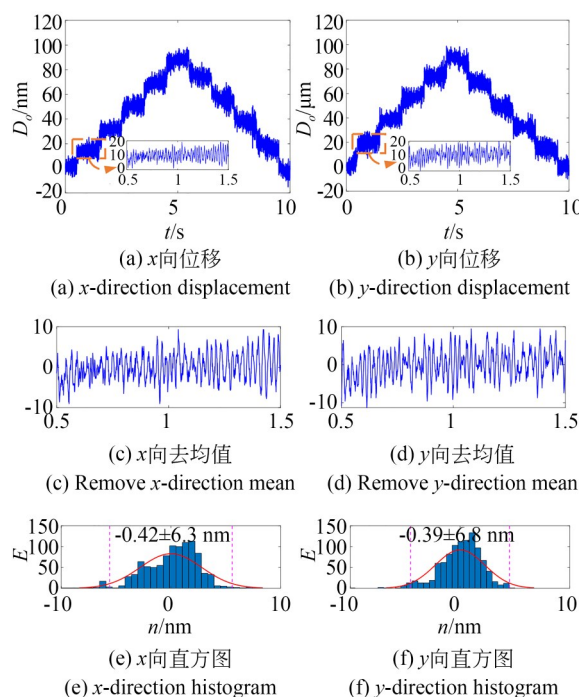


图18 单步精密模式下的位移分辨率

Fig. 18 Displacement resolution for single-step precision mode

在连续步进驱动模式下,对压电粘滑平台施加锯齿波电压,并不断减小电压幅值,通过电容传感器测量,最终得到图19所示的步进运动曲线。可见,10个周期后 x, y 向前进与后退位移分别为50 nm, 55 nm, 66 nm和64 nm。因此,压电粘滑平台的平均步进分辨率分别为5.0 nm, 5.5 nm, 6.6 nm和6.4 nm。

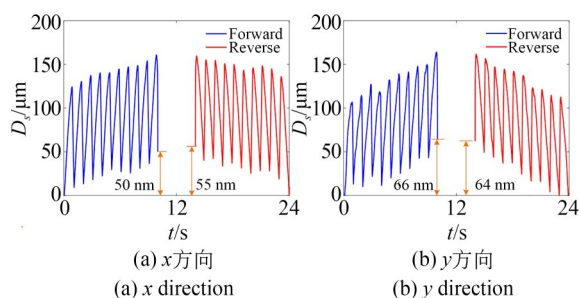


图19 步进驱动模式位移分辨率

Fig. 19 Displacement resolution for stepping driving mode

5.6 粗-精切换控制测试

MFC 致动器主要受滞后非线性和蠕变影响,这会降低轨迹跟踪精度^[25]。为了验证压电粘滑平台宏行程下的精密定位性能,利用激光位移传感器并采用粗-精切换控制进行测试,控制方法如图 20 所示。当运动平台通过连续开环步进达到设定阈值点时,平台运动切换至单步闭环控制,并采用 PID 控制算法跟踪预设轨迹^[23]。

如图 21 和图 22 所示,粘滑平台有效实现了毫米行程下的直线和正弦精密定位,兼具宏行程与高精度。图中, D 为平台运动位移, U 为电压。直线精密定位控制后,输出位移基本不存在蠕

变,如图 21 所示。正弦精密定位在切换至正弦轨迹后,实际输出位移与理想轨迹的误差为 0.23%,有效补偿了迟滞非线性,如图 22 所示,图中 D_a 为实际位移, D_d 为理想位移。

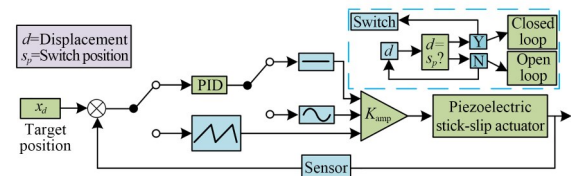


图 20 粗-精切换控制方法

Fig. 20 Coarse-fine switching control method

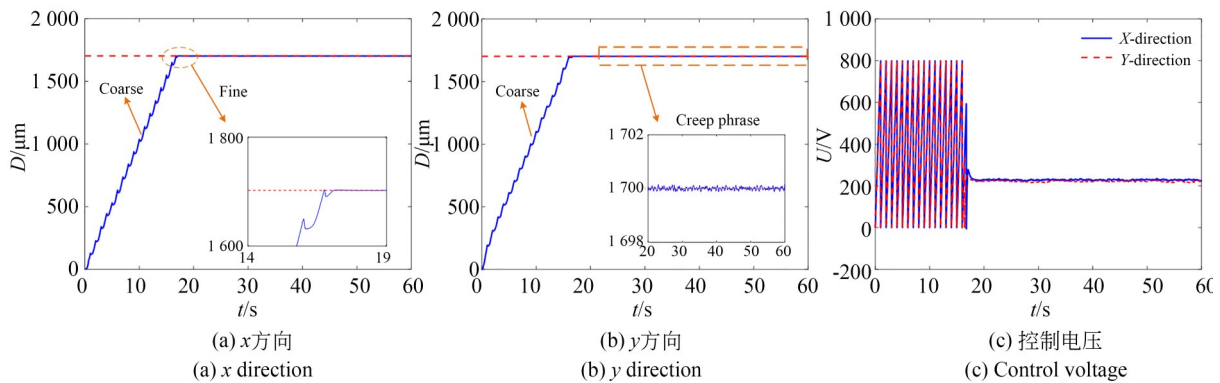


图 21 粗-精直线切换控制测试

Fig. 21 Coarse-fine straight switch control test

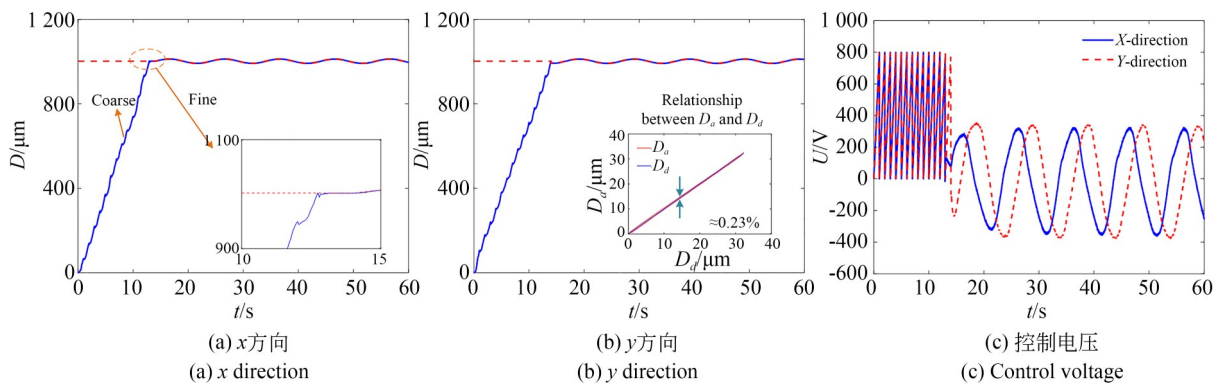


图 22 粗-精正弦切换控制测试

Fig. 22 Coarse-fine sine switch control test

5.7 讨论

表 3 给出了所设计运动平台与现有粘滑平台的对比。从中可知,二自由度粘滑运动平台兼具宏行程与纳米级分辨率特性。同时,平台单步位移高达 249.6 μm ,远远大于现有粘滑平台,使得

平台在低至 3.1 Hz 的驱动频率下速度也能达到 1 mm/s。当垂直负载为 30 N 时,运动平台仍有 16.0 μm 的单步位移,颇具优势。为了综合评估粘滑平台性能,受文献^[26-27]启发,采用综合考量多因素的复合指标:复合指标=(负载 $\times$ 单步位

表 3 粘滑运动平台性能对比
Tab. 3 Comparison of stick-slip motion platforms

Performance	[12]	[14]	[15]	[21]	[23]	PI	Coremorrow	Our
Actuator type	PSA	PSA	PSA	PSA	PSA	PSA	PSA	MFC
Required frequency (for 1 mm/s)/Hz	13	80	100	> 70	40	75	> 500	3.1
DOF number	2	2	2	2	2	2	2	2
Motion range/mm	13×13	/	10×10	/	/	13×13	3.6×3.6	16×16
Step output/μm	37.1	10.7	11.3	13.3	14.2	< 45	< 15	249.6
Vertical load/N	30 (8 μm)	30 (4 μm)	30 (1 μm)	30 (12.5 μm)	/	5 (1 μm)	1 (1 μm)	30 (16 μm)
Resolution/nm	6	18	10	4	780	6	20	6
Frequency/Hz	350	150	180	3440	/	600	1125	306
Response time/ms	5	12	10	0.5	/	3	1.6	6
Composite index	23.1	0.21	0.01	< 0.73	/	< 0.3	< 0.06	40.3

移)/(mm/s速度所需频率×体积×响应时间)×10⁴。可见,由于采用MFC致动拱型驱动单元,所设计的粘滑平台在复合指标方面性能更好。

另一方面,MFC耐压范围更广,远大于常见PSA的150 V,导致MFC驱动电压更大。在高驱动电压下,拱型驱动单元产生输出位移很大。相应地,MFC所需的驱动电源的电压也更大,在应用中需采用专门的高压电源。但是,由于所采用的MFC电容量极小,仅为1.4 nF,其驱动电源功率很小^[19]。此外,拱型驱动单元竖直布置,使得所设计粘滑平台更适用于高度空间不受限的运动场合。

6 结 论

采用压电纤维致动的驱动-结构一体式拱型驱动单元,设计二自由度跨尺度粘滑运动平台,并利用万向轴承与可调支撑柱,提高平台承载能力。然后,通过有限元法对驱动单元进行理论建模,并对其输出位移和固有频率进行仿真。最后,搭建实验系统测试运动平台各项性能。主要结论如下:

(1) 采用-400~800 V的电压连续步进驱动时, x,y 向最大单步位移分别为249.6 μm和237.3 μm,运动范围为16.10 mm×16.08 mm;

两个方向上的平均步进分辨率分别为5.0 nm和6.6 nm。单步精密运动时, x,y 向的平动位移分辨率分别为6.3 nm和6.8 nm。

(2) 当驱动电压频率约为3.1 Hz时,运动平台速度可达1 mm/s,实现了低频快速粘滑驱动。同时,万向轴承与可调支撑柱提高了平台承载能力,即使垂直负载为30 N时,粘滑平台仍有16.0 μm的单步输出位移。

(3) 将期望位置分别设为1 700 μm和1 000 μm,并在切换之后跟踪直线和正弦轨迹,采用粗-精切换控制有效地实现了粘滑运动平台的跨尺度精密定位。

因此,所设计的压电粘滑式二自由度跨尺度运动平台兼具宏行程与纳米分辨率,且单步位移大、低频驱动速度快以及承载能力强等,有望应用于半导体制造、MEMS组装和生物细胞操作等领域。

作者贡献声明:

- 莫衍楠:软件、验证、写作-初稿;
- 杨依领:论文构思、获取资助、提供资源、指导、写作-审核与编辑;
- 孟恬畅:形式分析、软件;
- 魏燕定:指导;
- 崔玉国:获取资助、提供资源。

参考文献:

- [1] LYU Z K, WU Z H, XU Q S. Design and development of a novel piezoelectrically actuated asymmetrical flexible microgripper[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 171: 104736.
- [2] 于海洋, 闫鹏, 孟令臣. 基于主动惯量补偿的高性能压电旋转驱动器[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(10): 1571-1583.
- YU H Y, YAN P, MENG L C. High performance piezoelectric rotary actuator based on active inertia compensation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(10): 1571-1583. (in Chinese)
- [3] ZHU W L, ZHU Z W, GUO P, *et al.* A novel hybrid actuation mechanism based XY nanopositioning stage with totally decoupled kinematics[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 99: 747-759.
- [4] 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)
- [5] LI J P, CAI J J, WAN N, *et al.* A novel bionic piezoelectric actuator based on the walrus motion[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2021, 18(5): 1117-1125.
- [6] LIN Y Q, AN D W, LIN Z Y, *et al.* Progress in high-performance stick-slip piezoelectric actuators: a review[J]. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 2024, 15(3): 652-696.
- [7] XU D M, ZHANG B J, YU S M, *et al.* Review on single-phase driven ultrasonic motors[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2023, 34(5): 525-535.
- [8] DING Z C, DONG J S, ZHOU X Q, *et al.* Achieving smooth motion of stick - slip piezoelectric actuator by means of alternate stepping[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 181: 109494.
- [9] CHANG Q B, CHEN W S, ZHANG S J, *et al.* Review on multiple-degree-of-freedom cross-scale piezoelectric actuation technology[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2024, 6(6): 2300780.
- [10] 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)
- [11] PINSKIER J, SHIRINZADEH B, AL-JODAH A. Design and evaluation of a dual-stage, compensated stick-slip actuator for long-range, precision compliant mechanisms[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 331: 113007.
- [12] 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)
- [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 Materials and Structures*, 2020, 29(1): 015022.
- [14] ZHAO X L, WANG F J, SHI B C, *et al.* A piezo-actuated nanopositioning stage based on spatial parasitic motion principle[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 368: 115124.
- [15] TIAN Y L, HUO Z C, WANG F J, *et al.* A novel friction-actuated 2-DOF high precision positioning stage with hybrid decoupling structure [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 167: 104511.
- [16] WANG C, YANG Y L, CUI Y G, *et al.* Design and control of a macro-micromanipulator using macrofiber composite[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2025, 72(8): 8365-8375.
- [17] 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(5): 3053-3064.
- [18] YAN L L, WANG J R, LIANG T W, *et al.* A dual-mode stick-slip piezoelectric actuator imitating mantis forefoot [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 266: 108985.
- [19] 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 Engineer-*

- ing, 2024, 87: 79-96.
- [20] 闫旭. 7075 铝合金热成形摩擦行为实验及有限元模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- YAN X. *Experimental and Finite Element Simulation Study on Friction Behavior of 7075 Aluminum Alloy During Hot Forming*[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] XU Z, SUN W X, LI X, *et al.* A stick-slip piezoelectric actuator with high assembly interchangeability[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 233: 107662.
- [23] SU Q, SUN J H, DENG J, *et al.* A micro scratching platform with cross-scale plane trajectory tracking capability [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 362: 114629.
- [24] 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 S 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)
- [25] WANG S, YANG Y L, LI G P, *et al.* Microscopic vibration suppression for a high-speed macro-micro manipulator with parameter perturbation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 179: 109332.
- [26] WU Y X, YANG Y L, WU G H, *et al.* A new stick-slip piezoelectric actuator using dual-arch bridge-type compliant mechanisms [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2025, 22: 5226-5237.
- [27] AL-JODAH A, SHIRINZADEH B, GHAFARI-AN M, *et al.* Design, modeling, and control of a large range 3-DOF micropositioning stage [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 156: 104159.

作者简介:



莫衍楠(2000—),男,广西贺州人,硕士研究生,2023年于宁波大学获得学士学位,主要从事压电柔顺驱动及微纳定位技术方面的研究。E-mail: 2311090164@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