

文章编号 1004-924X(2025)23-3723-14

压电纤维驱动的粘滑式跨尺度微夹持器

魏 炜, 杨依领*, 陈静如, 崔玉国

(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)

摘要: 针对微操作与微装配技术领域对大行程、高精度、快速反应和平动夹持的需求, 采用单个压电纤维片致动柔顺机构以实现对称粘滑驱动, 从而设计兼具厘米级宏行程、纳米级分辨率且双臂平动的跨尺度微夹持器。其中, 细长柔性驱动足可以储存与释放弹性势能, 可利用弹性恢复平衡反向摩擦力, 从而抑制粘滑回退。压电纤维驱动的单步位移较大, 微夹持器可以在低频驱动下实现快速运动, 减少摩擦磨损。利用有限元法建立柔顺驱动单元的静力学模型, 并对其输出位移和固有频率进行了仿真分析。最后, 搭建实验测试系统验证相关性能。实验结果表明, 粘滑式微夹持器单步内运动时, 400、600 和 800 V 驱动电压下的输出位移分别为 52.31、82.86 和 124.68 μm , 运动分辨率为 9.6 nm; 在连续运动时, -400~800 V 驱动电压下的单步位移可达 163.35 μm , 步进分辨率为 7.8 nm, 夹持行程为 14.4 mm; 此外, 所设计微夹持器在 5 Hz 的低驱动频率下, 运动速度可达 1.25 mm/s, 在 600 V 梯形波电压下, 夹持力为 0~167 mN。实验测试验证了所设计微夹持器的有效性和输出性能。

关键词: 微操作系统; 压电驱动; 粘滑运动; 柔顺机构; 微夹持器

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253323.3723

CSTR: 32169.14.OPE.20253323.3723

Stick-slip cross-scale microgripper driven by macro fiber composite

WEI Wei, YANG Yiling*, CHEN Jingru, CUI Yuguo

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

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

Abstract: To meet the requirements of large stroke, high precision, high speed, and translational clamping in micro-operation and micro-assembly, a symmetric stick-slip actuation mechanism is realized by employing a single macro fiber composite (MFC) to drive a compliant mechanism. This configuration enables the design of a cross-scale microgripper that combines centimeter-level travel with nanometer-scale resolution and dual-arm translational motion. An elongated compliant driving foot is used to store and release elastic potential energy, and its elastic recovery is exploited to counteract reverse friction, thereby suppressing stick-slip backlash. At the same time, the large single-step displacement of the MFC allows the microgripper to achieve high-speed motion at low driving frequencies, effectively reducing frictional wear. A static mechanical model of the compliant driving unit is established using the finite element method, and its output displacement and natural frequency are numerically analyzed. An experimental setup is

收稿日期: 2025-05-07; 修订日期: 2025-06-04.

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资助项目 (No. 2024Z163)

then constructed to evaluate the performance of the proposed system. Experimental results indicate that the output single-step displacements of the stick-slip microgripper are 52.31 μm , 82.86 μm , and 124.68 μm under driving voltages of 400 V, 600 V, and 800 V, respectively, with a motion resolution of 9.6 nm. Under continuous operation with a driving voltage range of -400-800 V, the single-step displacement reaches up to 163.35 μm , with a step resolution of 7.8 nm and a clamping stroke of 14.4 mm. In addition, the designed microgripper achieves a motion speed of 1.25 mm/s at a low driving frequency of 5 Hz. The clamping force ranges from 0 to 167 mN under an 800 V trapezoidal wave voltage. These experimental results confirm the effectiveness and high-performance output characteristics of the proposed stick-slip microgripper.

Key words: micro-operation system; piezoelectric actuation; stick-slip motion; compliant mechanism; microgripper

1 引言

目前,微操作系统广泛应用于微创手术、光纤精密对准和扫描探针显微检测等高精密领域^[1-3]。作为微操作系统的末端执行器,微夹持器通常需要完成“夹持-保持-释放”及搬运等操作^[4]。在微创手术领域,微夹持器既要高精度地移动数微米大小的血管、成骨细胞等微组织,又要夹持毫米乃至厘米级大小的结节或肿瘤。在光纤对准领域,微型与单模光纤直径低至 1 μm ,多模及大直径光纤直径又横跨数百微米,光纤中心对准精度也在亚微米或者纳米级。因此,微夹持器需要具备大夹持范围、高精度、快速反应、平动夹持和结构紧凑等优点,以面对形状不规则、尺寸大和易被损坏的被操作对象,满足复杂微操作任务的需求^[5]。

微夹持器通常由压电驱动器直接致动,并利用拓扑优化或柔顺放大机构增幅输出位移,但操作行程常为数十至数百微米,难以应用在跨尺度微操作任务中^[6-7]。为了增加压电驱动行程,相继发展出多种步进驱动类型,如超声波型、尺蠖型和粘滑型。其中,超声波型速度高,但驱动力不足、摩擦损耗及热效应显著^[8];尺蠖型驱动力大,但控制复杂,往往需要多组驱动器和柔性机构协同作用,速度较慢^[9]。相较而言,粘滑型驱动原理简单、结构紧凑、分辨率高且速度快,因而备受关注^[10]。

在进行夹持操作时,夹持臂以相对方式(即彼此趋近或远离)同步移动,本质上属于对称驱动。然而,传统粘滑驱动常使用单个定子甚至多

个定子驱动一个动子,以产生向前或向后运动^[11]。若要实现对称运动,往往需要两个串联或并联的定子分别驱动两个反向运动的动子,或采用复杂传动机构(如柔顺导向机构或齿轮齿条副等)将单方向运动转化为线性对称运动,该方法导致结构和驱动较为繁琐,也不利于微夹持系统的小型化和集成化。

粘滑驱动速度取决于工作频率和单步位移,然而,高频驱动会加剧系统摩擦磨损^[12]。因此,增大单步位移是在较低驱动频率下实现快速粘滑运动的关键。虽然目前已出现多种带有位移放大机构的粘滑致动器,但是位移放大机构使得这些粘滑致动器的结构相对复杂^[13]。与压电叠堆驱动器相比,压电纤维复合材料(Macro Fiber Composite, MFC)得益于极薄片状结构,无需位移放大机构即可实现显著的单步位移输出,且有望提升结构紧凑性^[14]。

为了保证微操作任务的质量和效率,微夹持器需要平动夹持,以防止夹持臂与被操作物体接触时发生相对滑移^[15]。同时,粘滑驱动也存在位移回退现象,降低运动速度和精度^[16]。所以,常采用定子协同^[17]、动摩擦平衡^[18]和接触间隙调节^[19]等方法来消除回退。综上所述,设计具有宏行程、高精度、快速反应、平动夹持以及结构紧凑的微夹持器仍存在诸多挑战亟待解决。

本文提出了一种压电纤维驱动粘滑式跨尺度微夹持器,通过单片压电纤维与柔顺驱动机构结合形成驱动-结构一体式,并采用粘滑驱动产生左、右夹持臂工作所需的双向对称运动输出,且无需额外使用复杂传动机构。该夹持器具有两方面

特点:一方面,利用柔性驱动足的弹性恢复抑制粘滑回退,保证系统运动精度;另一方面,压电纤维驱动下的单步位移大,易于实现低频快速粘滑运动,并可减少摩擦磨损。

2 结构设计及工作原理

2.1 结构设计

压电粘滑式微夹持器的结构如图 1 所示,主要由底座、柔性驱动单元、T 型摩擦片、交叉滚柱滑轨、夹持臂和预紧螺钉等组成。柔性驱动单元由 MFC 粘接于柔性驱动机构内侧构成,作为粘滑驱动定子。柔性驱动单元的结构主要包括驱动梁、圆弧铰链、预紧梁和柔性驱动足。夹持臂与 T 型摩擦片分别配置于滑轨前后两端,组成压电粘滑式微夹持器的动子。

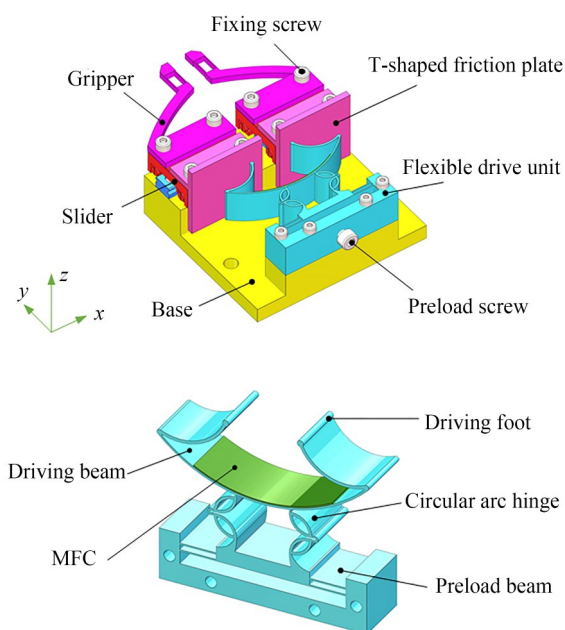


图 1 粘滑式微夹持器及其柔性驱动单元
Fig. 1 Stick-slip microgripper and flexible driving unit

与压电陶瓷片不同,MFC具有三层结构,由环氧胶与聚酰亚胺薄膜封装,受湿度影响较小。动子的 x 方向运动由柔性驱动单位的驱动足与 T 型摩擦片之间的摩擦实现,利用底部预紧螺钉和预紧梁可调节接触界面的法向预紧力。当 MFC 作用时,驱动足在 x 方向产生主输出位移,在 y 方向上产生寄生运动。寄生运动进一步增大了正压力,从而形成夹紧力自增强效应,提升摩擦驱动力。图 2 给出

了柔顺驱动机构的主要结构参数。其中, $l_1 \sim l_6$, $R_1 \sim R_4$, $t_1 \sim t_4$ 和 α 分别表示柔性铰链的长度、半径、厚度与角度, b 是驱动机构的厚度。

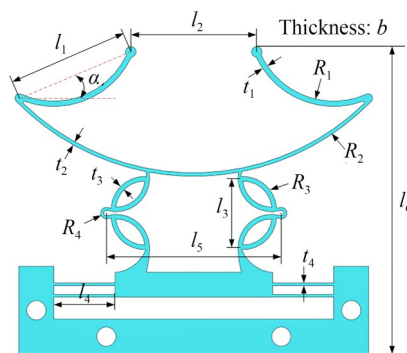


图 2 驱动机构关键尺寸
Fig. 2 Key dimensions of driving mechanism

2.2 工作原理

由于驱动机构左右对称,图 3 给出了粘滑位移变化示意图。

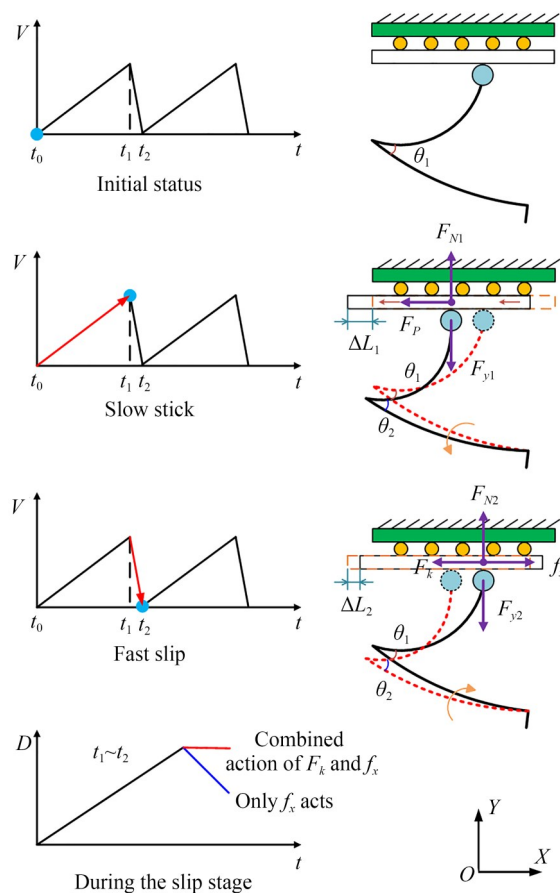


图 3 粘滑运动原理
Fig. 3 Stick-slip motion principle

在初始阶段,即 t_0 时刻,驱动电压为 0,压电纤维片处于初始状态,调节预紧螺钉使驱动足与动子接触。此时,驱动足与驱动梁之间的夹角为 θ_1 ,驱动足发生轻微弹性变形,存储弹性势能。

在粘贴阶段,即 $t_0 \sim t_1$,驱动电压缓慢升高,柔性驱动机构在 MFC 作用下变形,带动驱动梁逆时针旋转,同时向动子提供水平驱动力和垂直法向压力。因此,驱动足通过静摩擦 F_f 带动滑块在 x 方向移动 ΔL_1 距离。驱动足的寄生位移增加了定、动子之间的静摩擦,增强了驱动力。由于动子在 y 方向受刚性约束,在动子的反作用力 F_{y1} 下,驱动足与驱动梁之间的夹角变为 θ_2 ,弹性势能进一步增大。

在滑移阶段,即 $t_1 \sim t_2$,驱动电压迅速降低,驱动足快速回弹至初始状态。与此同时,储存在驱动足中的弹性势能被释放出来,产生克服滑动摩擦力 f_x 的弹性恢复力 F_k 。在 F_k 和 f_x 的共同作用下,动子产生 x 向位移 ΔL_2 。因此,经过单个步进周期,动子的有效位移为 $\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2$ 。

此外,由于 MFC 的高分辨率,粘滑驱动可以在一个电压周期内实现纳米级的运动精度。通过不断重复粘滑运动过程,动子产生连续输出位移,最终实现大范围宏运动。

3 理论建模

为了方便分析参数变化对驱动单元输出性能的影响,采用有限元法进行理论建模^[20-21]。柔性铰链和刚性连杆均视为柔性单元,柔性驱动单元被划分成多个节点并依次相连,如图 4 所示。

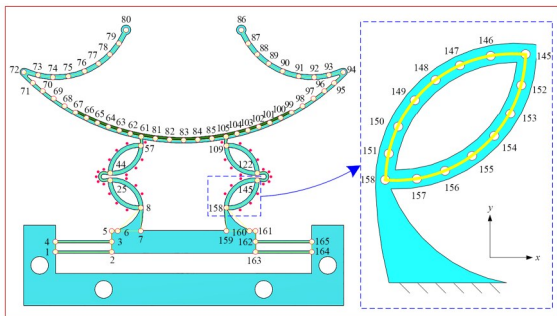


图 4 柔性驱动单元有限元模型

Fig. 4 Finite element model of flexible driving unit

3.1 线性刚度

局部坐标系下柔性单元的刚度矩阵 K_a^b 为:

$$K_a^b = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: E, A, I 和 l 分别表示柔性单元的弹性模量、截面面积、惯量矩和长度。

MFC 通过粘贴的方式与驱动机构结合,所以单元 $b_{61-62}, b_{62-63}, b_{63-64}, b_{64-65}, b_{65-66}, b_{66-67}, b_{61-81}, b_{81-82}, b_{82-83}, b_{83-84}, b_{84-85}, b_{85-105}, b_{99-100}, b_{100-101}, b_{101-102}, b_{102-103}, b_{103-104}$ 和 $b_{104-105}$ 包含两层,即 MFC 层和驱动梁层。因此,局部坐标系下节点 61-67, 81-85 和 99-105 的刚度矩阵表示为:

$$\begin{cases} K_{61-62}^b = K_{61-62}^Q + K_{61-62}^M \\ \vdots \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} K_{66-67}^b = K_{66-67}^Q + K_{66-67}^M \\ K_{61-81}^b = K_{61-81}^Q + K_{61-81}^M \\ \vdots \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} K_{85-105}^b = K_{85-105}^Q + K_{85-105}^M \\ K_{99-100}^b = K_{99-100}^Q + K_{99-100}^M \\ \vdots \\ K_{104-105}^b = K_{104-105}^Q + K_{104-105}^M \end{cases}, \quad (4)$$

其中: K_i^Q 表示驱动梁单元刚度矩阵, K_i^M 表示 MFC 单元刚度矩阵。

局部坐标系下的单元刚度矩阵 K_a^b 变换为全局坐标系下的单元刚度矩阵 K_T^b , 表示为:

$$K_T^b = T(\alpha) K_a^b T(\alpha)^T. \quad (5)$$

柔性单元的整体刚度矩阵 K_T^b 划分为 4 个子模块, 表示为:

$$K_T^b = \begin{bmatrix} k_{i,i(1,1)}^b & k_{i,j(1,2)}^b \\ k_{j,i(2,1)}^b & k_{j,j(2,2)}^b \end{bmatrix}. \quad (6)$$

将固定节点 1-7 和 159-165 去除,得到简化后的全局刚度矩阵 $\bar{K}_T^e$ 。

驱动单元的全局力矩阵与位移矩阵 $\bar{D}^e$ 之间的表达式为:

$$\bar{F}^e = \bar{K}_T^e \bar{D}^e, \quad (7)$$

$$\begin{cases} \bar{F}^e = [\bar{F}_8, \dots, \bar{F}_i, \dots, \bar{F}_m]^T \\ \bar{D}^e = [\bar{D}_8, \dots, \bar{D}_i, \dots, \bar{D}_m]^T \end{cases} \quad (8)$$

其中: $i=8, 9, \dots, m-1, m$ 等于 158。

3.2 非线性刚度

柔性铰链变形较大时,难免存在几何非线性。此时,刚度矩阵的计算取决于结构变形的几何形状和单元的内力。由于节点位移是未知数,无法解析求解平衡方程组,需要运用 Newton-Raphson 等迭代法进行处理^[22]。

几何非线性问题其刚度矩阵、节点载荷均为位置的函数,广义刚度方程式为:

$$k(d) \cdot d - p(d) = 0. \quad (9)$$

令:

$$\phi(d) = \phi_e(d) - p(d), \quad (10)$$

其中: $\phi(d)$ 是内、外不平衡力, $\phi_e(d)$ 是节点内力列阵, $\phi_e(d) = k(d)d$ 。

若位移节点列阵是刚度方程(9)的解,则有:

$$\phi(d) = \phi_e(d) - p(d) = 0. \quad (11)$$

因而,必须精确解出 d^* , 才能使得不平衡力 $\phi(d^*)$ 为零。这就必须有一个迭代的过程,构造一组逼近序列 $d^{(0)}, d^{(1)} \dots d^{(n)}$, 当 $n \rightarrow \infty$ 时,使 $d^{(n)} \rightarrow d^*$, 从而 $\phi(d^*) \rightarrow \phi(d^*)$ 。

采用 Newton-Raphson 法构造迭代序列,设 $d^{(n)}$ 已知,则不平衡力列阵 ϕ 近似为:

$$\phi = \phi^{(n)} + k_\tau^{(n)}(d - d^{(n)}), \quad (12)$$

其中: $\phi^{(n)}$ 是 $d^{(n)}$ 处的不平衡节点力列阵, $k_\tau^{(n)}$ 是 $d^{(n)}$ 处的切线刚度矩阵。

在满足不平衡力为零的条件下,利用式(12)求新的逼近值 $d^{(n+1)}$, 则有:

$$\phi^{(n)} + k_\tau^{(n)}(d^{(n+1)} - d^{(n)}) = 0. \quad (13)$$

由此,可得到构造线性逼近序列的公式:

$$\begin{cases} k_\tau^{(n)} \cdot \Delta d^{(n)} = -\phi^{(n)} \\ d^{(n+1)} = d^{(n)} + \Delta d^{(n)} \end{cases} \quad (14)$$

根据 Taylor 展开,切线刚度矩阵的形式

如下:

$$k_\tau^{(n)} = \frac{\partial \phi}{\partial d} \bigg|_{d=d^{(n)}} = \left(\frac{\partial \phi_e}{\partial d} - \frac{\partial P}{\partial d} \right) \bigg|_{d=d^{(n)}}. \quad (15)$$

列式方法不同,切线刚度矩阵 $k_\tau^{(n)}$ 的形式也不同。由于更新拉格朗日列式法的第 $n+1$ 次迭代以第 n 次迭代位形为参照位形,其切线刚度矩阵由两部分组成,即:

$$k_\tau^{(n)} = k_l^{(n)} + k_\sigma^{(n)}, \quad (16)$$

其中: $k_\tau^{(n)}$ 是弹性刚度矩阵, $k_\sigma^{(n)}$ 是几何刚度矩阵。

3.3 输出位移

MFC 通过逆压电效应带动整个柔性驱动单元运动,在节点 67 和 99 处施加的力向量分别为:

$$\begin{cases} \bar{F}_{67}^c = [0, 0, F_{ml}t_2]^T \\ \bar{F}_{99}^c = [0, 0, -F_{ml}t_2]^T \end{cases} \quad (17)$$

其中: t_2 为驱动梁的厚度, F_{ml} 为 MFC 产生的机械力,且其与输入电压 $u(t)$ 的关系为^[23]:

$$F_{ml} = sd_{33}k_{pzt}u(t), \quad (18)$$

其中: s, d_{33} 和 k_{pzt} 分别是压电层数、系数和刚度。

驱动足的左侧输出位移 x_t 为:

$$x_t = \sqrt{D_{80}(x)^2 + D_{80}(y)^2}, \quad (19)$$

其中: $D_{80}(x)$ 和 $D_{80}(y)$ 为节点 80 在 x 和 y 方向的输出位移。

3.4 固有频率

局部坐标下柔性驱动单元的质量矩阵 M_a^b 为:

$$M_a^b = \frac{\rho A l}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22l & 0 & 54 & -13l \\ 0 & 22l & 4l^2 & 0 & 13l & -3l^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13l & 0 & 156 & -22l \\ 0 & -13l & -3l^2 & 0 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

其中 ρ 为柔性驱动单元的密度。

局部坐标系下的单元质量矩阵 M_a^b 转化为全坐标系的质量矩阵 M_T^b , 即:

$$M_T^b = T(\alpha) M_a^b T(\alpha)^T. \quad (21)$$

根据全局坐标下的刚度矩阵和质量矩阵,得到模态方程:

$$(K_T^S - h_j^2 M_T^b) \phi_j = 0, \quad (22)$$

其中 ϕ_j 为模态振型。

驱动单元的固有频率可通过以下方程获得：

$$|K_T^S - h_j^2 M_T^b| = 0, \quad (23)$$

$$f_n = \frac{h_0}{2\pi} = \frac{\min(h_j)}{2\pi}, \quad (24)$$

其中： f_n 表示柔性驱动单元的固有频率， h_j 表示方程的第 j 解。

4 参数分析

图5展示了关键参数变化对输出位移和固有频率的影响。随着柔性驱动足长度 l_1 与圆弧铰链高度 l_3 的增加，输出位移增大，固有频率降低，如图5(a)和图5(b)所示。由于驱动梁厚度 t_2 直接影响到驱动单元在驱动电压下的变形程度，其厚度增大会使输出位移减小，固有频率上升，如图5(c)所示。对于图5(d)，输出位移首先减小，然后趋于稳定，固有频率先是增大，然后几乎保持不变，圆弧铰链厚度 t_3 增加到特定值后，对输出位移和固有频率的影响很小。

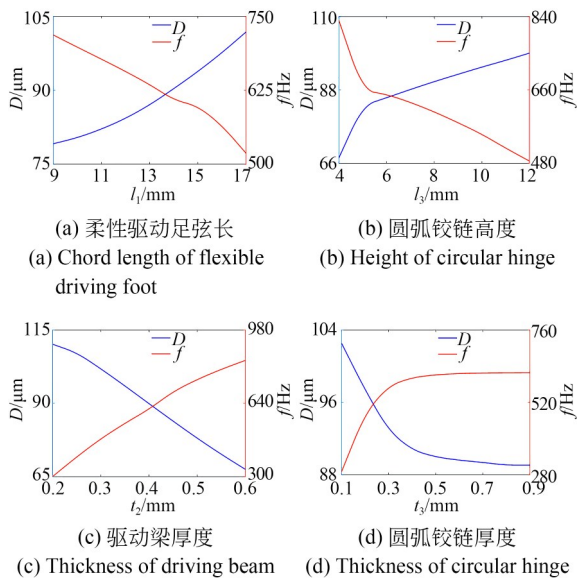


图5 关键结构参数对输出位移和固有频率的影响
Fig. 5 Influences of key structural parameters on output displacement and natural frequency

柔性驱动机构的主要参数对输出位移和固有频率产生很大的影响。因此，调整机构的每个参数以获得输出位移和固有频率的灵敏度，其分析结果如图6所示。图中， D_s 为位移灵敏

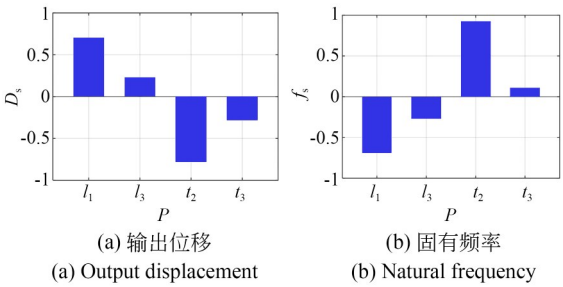


图6 灵敏度分析
Fig. 6 Sensitivity analysis

度， f_s 为频率灵敏度， P 代表参数。可见，驱动单元的柔性驱动足长度和驱动梁厚度变化对输出位移和固有频率影响显著。最后，经过多轮有限元仿真与优化，最终确定的最佳尺寸如表1所示。

表1 驱动机构的关键尺寸			
Tab. 1 Key dimensions of driving mechanism			
Symbol	Value	Symbol	Value
l_1/mm	13.9	R_3/mm	3.6
l_2/mm	14.4	R_4/mm	0.5
l_3/mm	7.8	t_1/mm	0.6
l_4/mm	7.0	t_2/mm	0.4
l_5/mm	20.0	t_3/mm	0.5
l_6/mm	35.0	t_4/mm	0.3
R_1/mm	9.5	b/mm	11.0
R_2/mm	28.0	$\alpha/(\circ)$	22.7

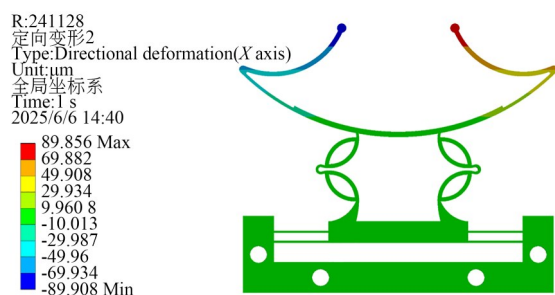
5 仿真分析

通过 ANSYS 软件对粘滑式微夹持器进行仿真。当对 MFC 施加 500 V 电压并考虑几何非线性时，柔性驱动单元左、右驱动足沿 X 轴方向的输出位移为 89.91 和 89.86 μm ，沿 Y 轴方向的输出位移为 13.94 μm ，如图7所示。因此，设计的驱动机构能够为粘滑驱动提供寄生运动。

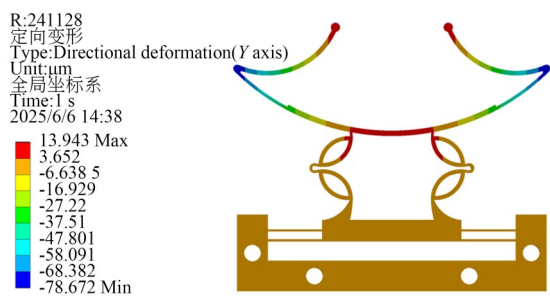
如图8所示，柔性驱动单元的最大应力出现在圆弧铰链上，仅为 33.39 MPa，远小于材料屈服极限。图9给出了柔性驱动单元的模式仿真结果，一阶固有频率为 612.66 Hz，动态特性良好。表2给出了理论计算与有限元仿真的结果对比。

忽略几何非线性时,左、右驱动足输出位移(D_L , D_R)与柔性驱动单元固有频率(f_0)的相对误差分别为 11.70%, 11.56% 和 2.86%。考虑几何非线性后,相对误差变为 9.07%, 9.01% 和 1.95%,计算准确性有所提升。

参考文献[24]~[26],T型摩擦片与柔性驱动足的接触定义为“摩擦”,摩擦系数为 0.3。根据厂家手册及文献^[27],滑块与导轨之间的接触设为“摩擦”,摩擦系数为 0.002。如图 10 所示,对 MFC 施加 500V 的电压时,左、右夹持臂的输出位移分别为 75.99 和 76.20 μm ,仅相差 0.21 μm ,表明微夹持器具有良好的对称性。



(a) X轴
(a) X-axis



(b) Y轴
(b) Y-axis

图 7 柔性驱动单元的输出位移

Fig. 7 Output displacement of flexible driving unit

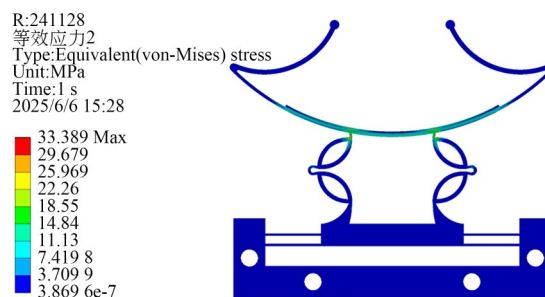


图 8 柔性驱动单元应力

Fig. 8 Stress of flexible driving unit

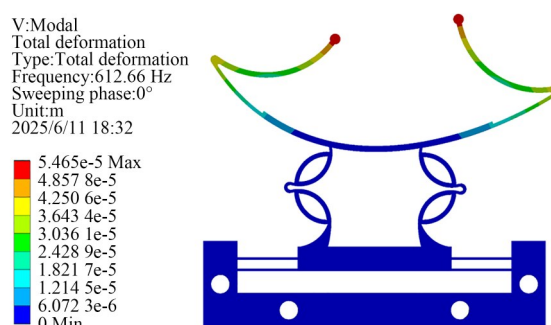


图 9 柔性驱动单元的固有频率

Fig. 9 Natural frequency of flexible driving unit

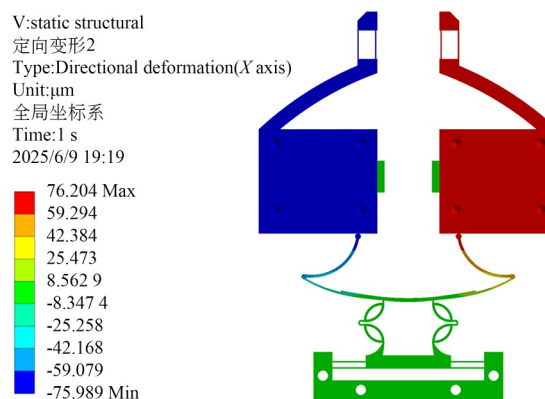


图 10 微夹持器的输出位移

Fig. 10 Output displacements of microgripper

表 2 输出位移和固有频率

Tab. 2 Output displacement and natural frequency

Parameter	Linear			Nonlinear		
	Theory	Simulation	Error	Theory	Simulation	Error
$D_L/\mu\text{m}$	82.97	92.68	11.70%	82.43	89.91	9.07%
$D_R/\mu\text{m}$	82.97	92.56	11.56%	82.43	89.86	9.01%
f_0/Hz	595.41	612.41	2.86%	600.95	612.66	1.95%

6 测试实验与结果

6.1 实验测试系统

为了验证所设计粘滑式微夹持器的性能,搭建的实验测试系统如图 11 所示。柔性驱动机构由 7075 铝合金线切割加工而成,装有 PCI 数据采集卡(NI-6259, 恩艾仪器公司)的工业计算机(IPC-610L, 研华公司)发送 -2.5 V 至 7.5 V 的模拟电压,并经电压放大器(E01. A3, 芯明天科技公司)放大 200 倍后施加于 MFC(M2807-P1, 芯明天科技公司),从而使交叉滚柱滑台(VRT1025A, 日本 THK 公司)在驱动足的作用下产生粘滑运动。微夹持器的输出位移由激光位移传感器(LK-G30, 基恩士公司)和电容传感器(CapacNCDT 6300, 德国米铨公司)测量。

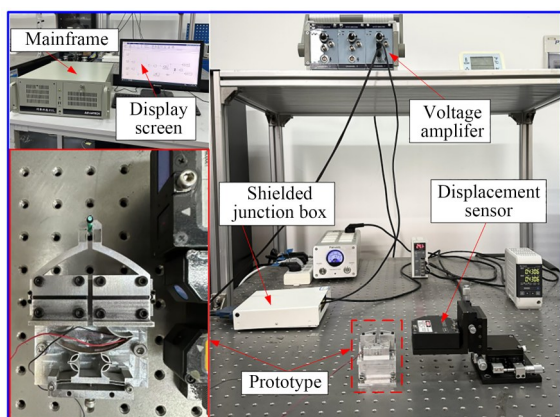


图 11 实验测试系统

Fig. 11 Experimental testing system

6.2 预紧力测试

预紧力是影响粘滑性能的重要因素,但粘滑驱动器完成装配后,驱动足与 T 型摩擦片之间的预紧力很难直接测量,因而可通过测试锁紧力(驱动器在未施加驱动电压时所能承受的最大水平重量)间接获得预紧力^[28-29]。锁紧力表示为 mg , 其中 m 是最大砝码质量, g 为重力常数。之后,预紧力计算为 mg/μ , μ 为驱动足与 T 型摩擦片之间的摩擦系数。

如图 12 所示,利用滑轮水平加载砝码,通过调节预紧螺钉使滑块达到力平衡,并用激光位移传感器测量预紧螺钉拧入的位移量。预紧力过

小会导致粘滑运动不理想,削弱驱动能力。随着预紧力增大,虽然连续运动的平稳性得到保证,但预紧力过大会导致位移回退现象显著^[11]。鉴于图 12 中悬挂 40 g 砝码达到力平衡时,微夹持器各项粘滑性能较好,驱动器的锁紧力设置为 0.4 N ,相应预紧力大小为 1.3 N 。

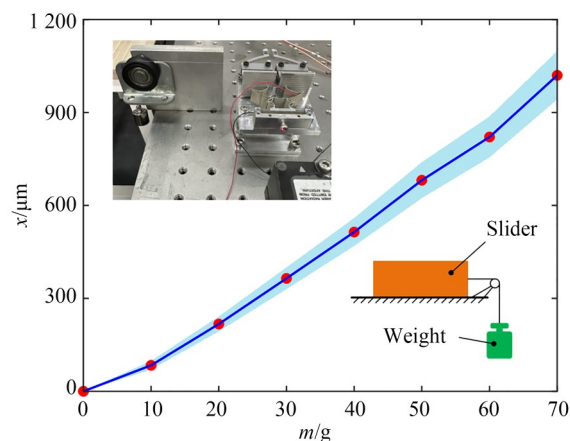


图 12 预紧位移与水平载重

Fig. 12 Preload displacement and horizontal load

6.3 输出位移测试

为了测试微夹持器单步内的输出位移 D ,在驱动频率为 1 Hz 时,先后对 MFC 施加 400, 600 和 800 V 的正弦驱动电压,微夹持器的输出曲线如图 13 所示,最大位移分别为 $52.31, 82.86$ 和 $124.68\text{ }\mu\text{m}$,微夹持器的单步输出位移较大,且运动一致性较好。

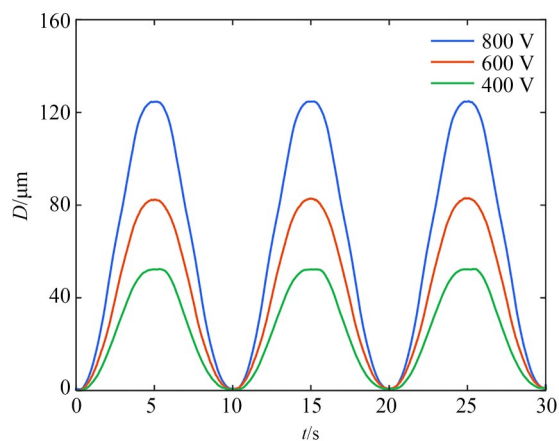


图 13 微夹持器不同电压下的输出位移

Fig. 13 Output displacement of microgripper at different voltages

6.4 动态响应测试

为了验证柔性驱动单元的固有频率,对其施加 100 V 阶跃信号,通过电容传感器测得动态响应,如图 14(a)所示。选取振荡位移并去均值,图 14(b)给出了采用傅里叶变换得到的频谱结果。图中, M 为幅值, f 为频率。因此,柔性驱动单元的一阶固有频率为 533.8 Hz,与有限元仿真的相对误差为 12.83%,差异主要来自柔顺机构加工与 MFC 粘合误差。

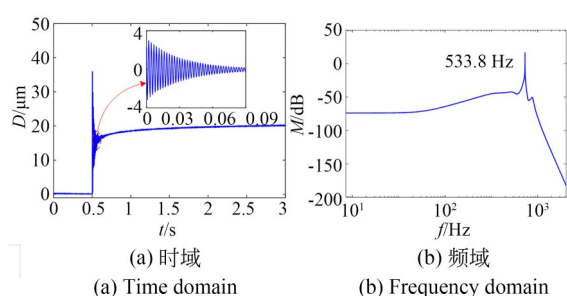


图 14 动态响应测试

Fig. 14 Dynamic response test

6.5 粘滑运动位移测试

为了验证夹持器的步进运动性能,对 MFC 施加 0~800 V, 1 Hz 的锯齿波驱动电压,结果如图 15 所示。微夹持器末端夹持臂在驱动电压作用下相互远离(分离模式),单步位移分别为 21.31, 44.48, 71.78, 96.81 μm 。对 MFC 施加快速上升缓慢下降的锯齿波信号,两夹持臂相互靠近(趋近模式),此时微夹持器单步位移分别为 21.61, 48.93, 74.21, 98.45 μm 。

与仅能承受正电压的压电叠堆不同, MFC 既能承受正电压,也能承受负电压。正电压使得 MFC 整体伸长,负电压使其收缩,在双极性电压

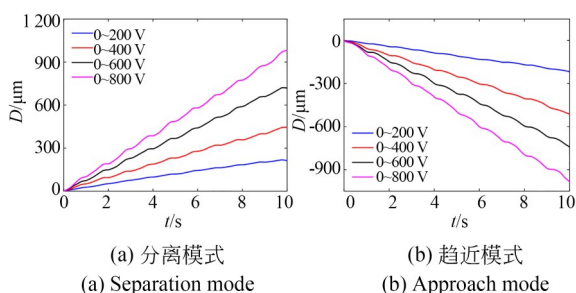


图 15 最小电压为 0 V 时的步进位移

Fig. 15 Step displacement with minimum voltages of 0 V

下 MFC 实现由收缩至伸长的连续形变,从而提供更大的输出位移。利用 MFC 的双极性电压驱动特性,在 -400~800 V 内进行测试,结果如图 16 所示。分离模式下,微夹持器的最大单步位移分别为 72.94, 102.75, 133.24, 163.35 μm ;在趋近模式下,单步位移分别为 73.62, 103.05, 133.40, 161.06 μm 。此外,微夹持器的步进行程取决于左右驱动足之间的距离,夹持范围可达 14.4 mm。

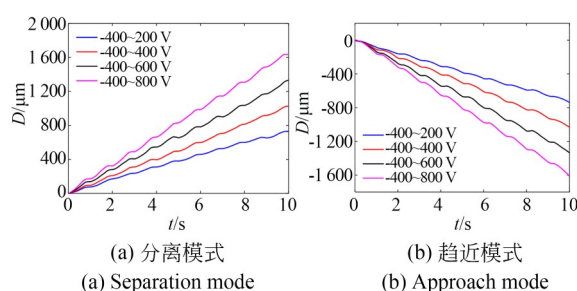


图 16 最小电压为 -400 V 的步进位移

Fig. 16 Step displacement with minimum voltages of -400 V

6.6 运动速度测试

当施加 -400~1 400 V 的锯齿波驱动电压时,不同频率下的微夹持器的运动速度曲线如图 17 所示。由图 17(a)可知,随着驱动频率的增加,回退运动几乎被完全抑制。当驱动频率为 5 Hz 时,夹持臂运动速度可达 1.25 mm/s。因此,该微夹持器可以在低驱动频率下实现快速平滑运动。这是因为粘滑运动速度由驱动电压频率与单步位移共同决定,受益于压电纤维片驱动,所设计的微夹持器具有高输出位移特性。

低频快速驱动能够避免高频驱动时引发的摩擦磨损与发热问题,降低了粘滑驱动时的温

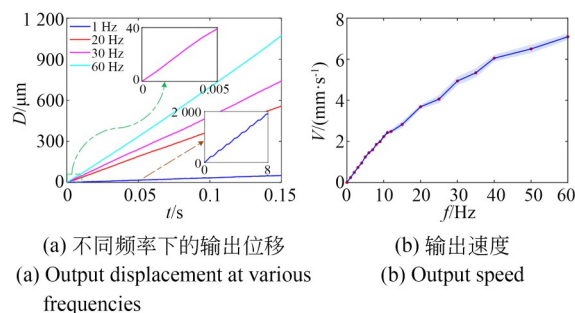


图 17 不同频率下的位移与速度

Fig. 17 Displacement and speed under different frequencies

度。为了进一步提高使用寿命,可对粘滑运动的摩擦界面进行强化,例如在 T 型摩擦片上粘贴氮化硅陶瓷片,或者通过离子渗氮、喷涂等工艺对驱动足表面进行处理,以提升摩擦界面硬度和耐磨性。

6.7 位移分辨率测试

图 18(a)给出了微夹持器在台阶电压信号下利用电容传感器测得的运动位移分辨率。测试时,台阶信号电压阶跃时间间隔设置为 1 s,不断调整驱动电压幅值,在电压幅值为 3 V 时,利用电容传感器对微夹持器进行测试。之后,选取 1~2 s 的测试数据进行定量分析,并绘制其去除均值后的正态分布直方图,如图 18(b)所示。图中, C 表示数目, E 为噪声。鉴于位移测量噪声的 95% 置信区间为 (-0.8 ± 4.8) nm,微夹持器单步内的位移分辨率为 9.6 nm,具有良好的运动分辨率。

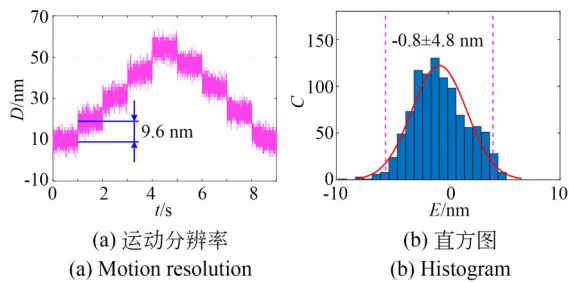


图 18 运动分辨率及直方图

Fig. 18 Motion resolution and histogram

对压电纤维片施加 1 Hz 的锯齿波电压,并逐渐减小电压幅值直至有效位移最小,从而利用电容传感器测试微夹持器的步进分辨率。如图 19 所示,当驱动电压降至 10 V 时,微夹持器仍有位移输出,经过十个步进周期后,分离模式和趋近

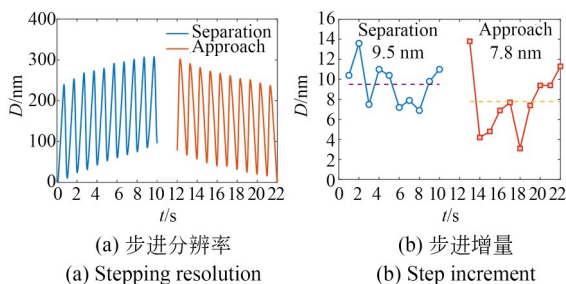


图 19 步进分辨率及步进增量

Fig. 19 Stepping resolution and step increment

模式下的累积步进位移分别为 95 和 78 nm。

6.8 运动重复性测试

为了验证粘滑运动的重复性,在 800 V, 1 Hz 锯齿波电压下连续测试了 5 组输出位移曲线,如图 20 所示。经过 10 个步进周期,位移曲线的最大偏差为 10.35 μm ,平均误差为 0.51%。因此,微夹持器运动稳定,重复性好,并具有平滑的步进特性。

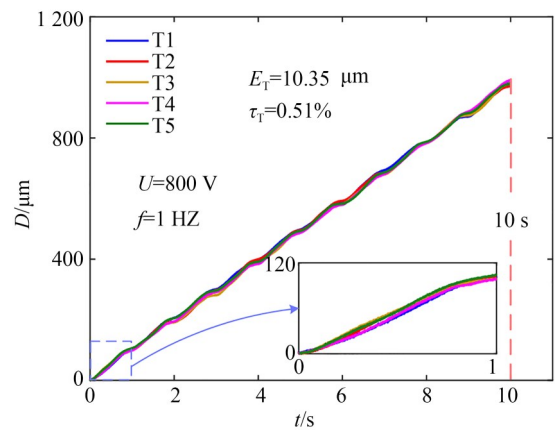


图 20 粘滑运动重复性

Fig. 20 Stick-slip motion repeatability

6.9 微夹持过程测试

在夹持臂末端悬挂标准砝码,并用激光位移传感器测量相应变形量,从而得到夹持臂弹性系数^[30]。之后,采用激光位移传感器同时测量夹持器顶部与末端的输出位移,通过变形位移差计算夹持力。当施加 600 V 的梯形波电压时,微夹持器输出位移和夹持力曲线如图 21 所示。在靠近

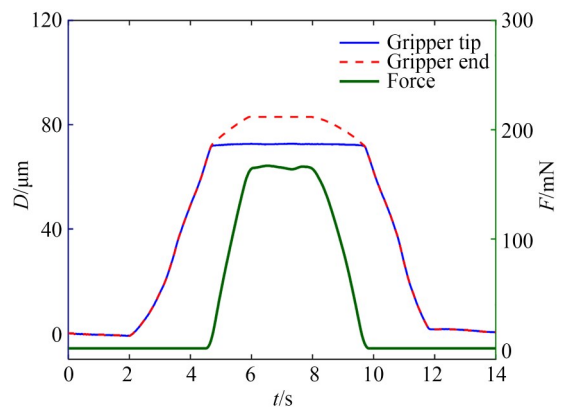


图 21 夹持过程的力-位移曲线

Fig. 21 Force-displacement curve for clamping process

阶段,输出位移逐渐增加,夹持力为0。在接触阶段,夹持臂顶部由于夹紧物体不再移动,末端输出位移和夹持力均逐渐增加。在6~8 s时,夹持力达到峰值 167 mN,之后输出位移和夹持力逐渐减小。在释放阶段,夹持臂顶部脱离被操作对象,夹持力重新变为0。

7 讨 论

为了说明弹性储能-释放驱动方式对抑制粘滑位移回退的有效性,与文献[14]进行了对比,结果如图 22 所示。在相同电压下,所设计的压电粘滑驱动器在粘贴阶段的正向位移更大,而在滑移阶段的反向位移更小。特别地,反向位移相比正向位移数值极小,即回退率极小。因此,压电粘滑式微夹持器可以有效抑制粘滑回退现象。

表 3 总结了压电粘滑式微夹持器的性能。对比可知,所设计粘滑驱动器的单步位移远大于其他压电驱动器,为低频快速运动提供了必要条件,使得微夹持器以 5 Hz 的驱动频率实现了

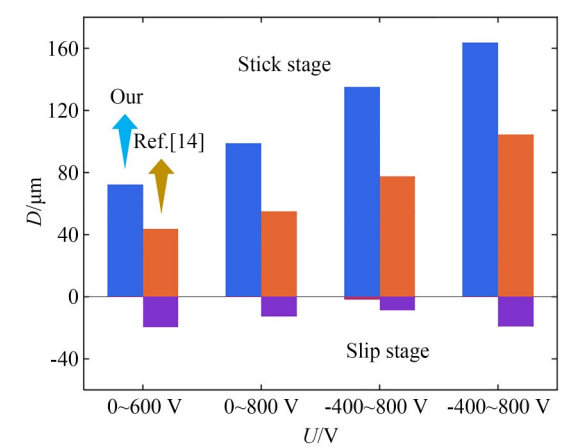


图 22 抑制回退对比
Fig. 22 Comparison of regression suppression

mm/s 级运动速度。由于驱动电压范围广(−400~1 400 V),MFC 无需位移放大机构即可产生显著变形,但是较大的驱动电压其获取高输出位移的必然代价,在实际应用中需采用高压电源。此外,得益于低频驱动和 MFC 的低静电容量(仅为 0.54 nF),MFC 可以使用很小的电流来实现低功耗粘滑驱动。

表 3 与现有压电驱动器的性能对比
Tab. 3 Comparison of performance with existing piezoelectric actuators

Reference	Size(mm ³)	Actuator number	Driving mode	Clamping function	Displacement/μm
[8]	/	1	Ultrasonic	NO	0.1(79.9 kHz)
[9]	72×23×19	2	Inchworm	NO	80(70 Hz)
[31]	67×102×15	2	Stick-slip	NO	7.5(800 Hz)
[32]	67×102×15	1	Stick-slip	NO	5.45(400 Hz)
[33]	125×47×12.2	2	Stick-slip	NO	9.77(1 Hz)
This work	40.9×35×11	1	Stick-slip	YES	163.35(1 Hz)
Reference	Speed/(mm·s ^{−1})	Power/mW	Resolution/nm	Backward ratio	Voltage range/V
[8]	56.1(79.9 kHz)	60009	100	/	0~250
[9]	5.53(70 Hz)	2296	83	/	0~150
[31]	38.19(1300 Hz)	32800	/	0%(≥300 Hz)	0~100
[32]	47.2(2400 Hz)	1620	70	<1%(≥250 Hz)	0~100
[33]	0.27(650 Hz)	91	/	71.4%(10 Hz)	0~150
This work	1.25(5 Hz)	0.1728	9.6	0%(≥1 Hz)	−400~1 400

8 结 论

本文提出了压电粘滑式跨尺度微夹持器,该夹持器仅需单片压电纤维驱动,无需额外传动机

构即可实现左、右夹持臂的对称双向运动,且单步输出位移大。采用有限元法建立柔性驱动机构的静力学模型,并对其输出位移和固有频率进行仿真。最后,通过实验验证了微夹持器的性

能。实验结果表明,当驱动电压为 $-400\sim 800\text{ V}$ 时,分离模式和趋近模式下微夹持器的单步位移分别为 163.35 和 $161.06\text{ }\mu\text{m}$,具有较高的单步位移;当驱动电压幅值为 $-400\sim 1\,400\text{ V}$,频率为 5 Hz 时,微夹持器运动速度为 1.25 mm/s ,实现了低频快速粘滑驱动;微夹持器单步内的位移分辨率为 9.6 nm ,连续步进时的夹持行程为 14.4 mm ,兼具高位移分辨率和宏观夹持范围;微夹持器在 $0\sim 600\text{ V}$ 梯形波电压下的夹持力为

$0\sim 167\text{ mN}$,适于操作众多微小物体。

作者贡献声明:

魏炜:软件设计,实验验证,可视化呈现及初稿写作;

杨依领:论文构思,审核与编辑,获取资助,提供资源;

陈静如:数据分析,软件设计;

崔玉国:获取资助,提供资源和指导。

参考文献:

- [1] PENG C J, SEURRE L, CATTAN É, *et al.* Toward an electroactive polymer-based soft microgripper[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 32188-32195.
- [2] WANG B Q, TAO K Y, HU X P, *et al.* Intravascular optical coherence tomography utilizing a miniature piezoelectric-driven probe[J]. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 2023, 70(12): 3490-3500.
- [3] KOZAKI S, MORITOKI Y, FURUKAWA T, *et al.* Additive manufacturing of micromanipulator mounted on a glass capillary for biological applications[J]. *Micromachines*, 2020, 11(2): 174.
- [4] SUN X T, TANG Z Z, YANG S, *et al.* Design of a large-stroke compliant gripper with position and force sensing for precision grasping[J]. *Smart Materials and Structures*, 2025, 34(3): 035034.
- [5] WANG K, WANG D H, ZHAO J Y, *et al.* A novel piezoelectric-actuated microgripper simultaneously integrated microassembly force, gripping force and jaw-displacement sensors: design, simulation and experimental investigation[J]. *Smart Materials and Structures*, 2022, 31(1): 015046.
- [6] 汪启亮, 刘通, 李永起, 等. 低寄生位移柔性平行微夹持器拓扑优化设计[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(21): 2577-2584, 2591.
WANG Q L, LIU T, LI Y Q, *et al.* Topology optimization design of flexible parallel microgrippers with low parasitic displacements[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(21): 2577-2584, 2591. (in Chinese)
- [7] LYU Z K, XU Q S. Design of a new bio-inspired dual-axis compliant micromanipulator with millimeter strokes[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2023, 39(1): 470-484.
- [8] XIN X D, GAO X Y, WU J G, *et al.* A ring-shaped, linear piezoelectric ultrasonic motor operating in *E01* mode[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(15): 152902.
- [9] YU S M, LIANG J Y, YANG F, *et al.* A novel inchworm piezoelectric actuator using two-stage amplification mechanism with high speed: design, modeling, and experimental evaluation[J]. *Smart Materials and Structures*, 2023, 32(5): 055020.
- [10] 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.
- [11] SHI B C, WANG F J, HAN C C, *et al.* Design of a precise positioning stage actuated by a double-layer stick-slip actuator used for precise assembly[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, 185: 105336.
- [12] HUANG H, XU Z, WANG J R, *et al.* A low frequency operation high speed stick-slip piezoelectric actuator achieved by using a L-shape flexure hinge[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(6): 065007.
- [13] WANG F J, ZHAO X L, HUO Z C, *et al.* A novel large stepping-stroke actuator based on the bridge-type mechanism with asymmetric stiffness[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 179: 109317.
- [14] 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.
- [15] CHEN X D, TAI K, TAN H F, *et al.* Design of a two-stage compliant asymmetric piezoelectrically

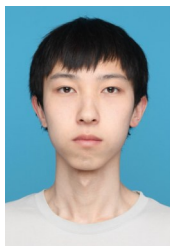
- actuated microgripper with parasitic motion compensation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 208: 110950.
- [16] TANG J Y, FAN H Y, LIU J H, *et al.* Suppressing the backward motion of a stick-slip piezoelectric actuator by means of the sequential control method (SCM)[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 143: 106855.
- [17] 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.
- [18] QIAO G D, NING P, XIA X, *et al.* Achieving smooth motion for piezoelectric stick-slip actuator with the inertial block structure[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69 (4) : 3948-3958.
- [19] WANG X Y, ZHU L M, HUANG H. A dynamic model of stick-slip piezoelectric actuators considering the deformation of overall system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68 (11): 11266-11275.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 孙立宁,董为,杜志江. 基于几何非线性方法的大行程柔性并联机器人位置解[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(10): 71-74.
- SUN L N, DONG W, DU ZH J. Kinematics analysis of a parallel manipulator with long travel range flexure hinges based on geometric nonlinear method [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(10): 71-74. (in Chinese)
- [23] 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)
- [24] 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.
- [25] 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)
- [26] 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)
- [27] 周长光,王晓艺,冯虎田,等. 基于 THK-SHS35V 型号的滚动直线导轨副预紧力精确计算方法研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(3): 208-217.
- ZHOU CH G, WANG X Y, FENG H T, *et al.* Research on an explicit preload calculation method of linear rolling guide THK-SHS35V [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59 (3) : 208-217. (in Chinese)
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] XU Q S. Robust impedance control of a compliant microgripper for high-speed position/force regulation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(2): 1201-1209.
- [31] DUAN Y Z, LING J, RAKOTONDRABE M, *et al.* Achieving high-speed smooth motion for stick-slip piezoelectric motors with impact-enhanced driving mode [J]. *Smart Materials and Structures*, 2025, 34(4): 045022.
- [32] LING J, PENG H T, DUAN Y Z, *et al.* Reducing backward motion of stick-slip piezoelectric actuators using dual driving feet designed by asymmet-

ric stiffness principle[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2024, 203: 105810.

[33] XIE Y L, LI Y M, CHEUNG B C. A new sym-

metrical Z-shaped compliant linear actuator based on parasitic motion principle[J]. *Smart Materials and Structures*, 2022, 31(12): 125017.

作者简介:



魏 炜(2000—),男,浙江宁波人,硕士研究生,2022年于丽水学院获得学士学位,主要从事压电柔顺驱动及微纳米定位技术方面的研究。E-mail: 2311090070@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,主要从事压电驱动及精密控制、智能结构与振动控制方面的研究。E-mail: yangyiling@nbu.edu.cn