

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514232

基于对称复合半桥式机构的高精度非对称微夹钳设计*

陈晓东¹, 谭惠丰², 魏永合¹, 田凤杰¹, 陈雪岩²

(1. 沈阳理工大学机械工程学院 沈阳 110000; 2. 哈尔滨工业大学航天学院 哈尔滨 150080)

摘要:微夹钳作为微操作系统的末端执行器,决定着微操作任务能否成功。平行四边形机构因其平行夹持特性通常作为微夹钳的末级放大机构,然而平行四边形机构旋转运动过程中会产生寄生位移。故基于对称复合半桥式机构提出一种二级放大非对称微夹钳,驱动方式采用压电驱动。压电致动器置于机构内部,作用于左右两侧复合半桥式机构的输入端,进而带动平行四边形机构完成夹持动作。机构工作时,左右两侧复合半桥式机构的输出端输出力作用于平行四边形机构的输入端,平行四边形机构左右两侧受力相同。基于柔性梁理论和坐标转换法得出机构的力学模型,分别通过有限元分析和实验验证得出微夹钳性能。针对平行夹持特性,传统微夹钳平行四边形机构输出端的旋转的角度为 $2.1 \times 10^{-4}^\circ$,所提微夹钳平行四边形机构输出端的旋转的角度为 $1.15 \times 10^{-4}^\circ$,输出端期望运动方向的寄生位移降低了45.28%,输出端的平行夹持性能有了显著提升;针对位移放大特性,传统微夹钳的放大倍率为12.6,所提微夹钳的放大倍率为14.3,输出端位移放大性能提升了13.5%。针对输出端寄生位移问题,传统微夹钳输出端的寄生位移为30.7 nm,基于对称复合半桥式机构设计的微夹钳输出端寄生位移为10.8 nm,寄生位移降低了64.8%。可以得出,相较于传统微夹钳,所提微夹钳性能优越。

关键词:微操作;半桥式机构;平行四边形机构;寄生位移;夹持精度;柔顺机构

中图分类号: TH112.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.15

Design of high-precision asymmetric microgripper based on symmetrical compound half-bridge mechanism

Chen Xiaodong¹, Tan Huifeng², Wei Yonghe¹, Tian Fengjie¹, Chen Xueyan²

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110000, China;

2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: As the end effector of the micromanipulation system, the microgripper determines the success of the micromanipulation tasks. The parallelogram mechanism is usually used as the final amplification mechanism of the microgripper because of its parallel clamping characteristics. However, the parasitic displacement occurs during the rotation of the parallelogram mechanism. Based on this, this paper proposes a two-stage amplification asymmetric microgripper based on a symmetrical composite half-bridge mechanism driven by a piezoelectric actuator. The piezoelectric actuator is placed inside the mechanism and acts on the input ends of the compound half-bridge mechanism on the left and right sides, thereby driving the parallelogram mechanism to complete the clamping action. During operation, the output force of the left and right composite half-bridge mechanism serves as the input end of the parallelogram mechanism, ensuring equal force application on both sides. Based on the flexible beam theory and coordinate transformation method, the mechanical model of the mechanism is obtained. The performance of the microgripper is obtained by finite element analysis and experimental verification respectively. In terms of parallel clamping characteristics, the rotation angle of the output end of the parallelogram mechanism in the traditional microgripper is $2.1 \times 10^{-4}^\circ$, while in the proposed design, it is reduced to $1.15 \times 10^{-4}^\circ$. This corresponds to a 45.28% reduction in parasitic displacement along the desired motion direction, significantly improving parallel clamping performance. Regarding displacement amplification, the traditional microgripper has a magnification of 12.6, while the proposed microgripper achieves a magnification of 14.3, representing a 13.5% improvement in the displacement amplification performance of the output end. For the issue

收稿日期: 2025-07-06 Received Date: 2025-07-06

* 基金项目: 国家自然科学基金 (12202118) 项目资助

of parasitic displacement at the output end, the traditional microgripper exhibits a parasitic displacement of 30.7 nm, whereas the microgripper designed based on the symmetrical compound half-bridge mechanism in this study reduces this to 10.8 nm, corresponding to a 64.8% reduction. In conclusion, compared with the traditional microgripper, the microgripper presented in this paper demonstrates superior overall performance.

Keywords: micro-operation; half-bridge mechanism; parallelogram mechanism; parasitic displacement; clamping accuracy; compliant mechanism

0 引言

引近年来,随着微纳米科技等高新科技的迅速发展,传统精密刚性传动机构已经无法满足实际工作需求,基于柔顺机构的微纳米操作技术受到了广泛关注^[1]。微纳米操作技术广泛应用于微机电系统,光纤芯对接,细胞操作,显微手术,微纤维操作等前沿领域中^[2-6],作为微纳米操作末端执行器的微夹钳起着不可替代的重要作用^[7]。微夹钳常用的致动器包括压电驱动器^[8]、电热致动器^[9]、静电致动器^[10]、电磁致动器^[11]、形状记忆合金致动器^[12]、气动致动器^[13]等。压电致动器以其位移分辨率高,响应速度快等优点被广泛应用^[14]。柔顺位移放大机构与压电致动器组成的微夹钳是重要的研究方向,能够实现较高的夹持精度和较大放大倍率。

微夹钳的运动精度分为夹持位移精度和平行夹持精度,夹持位移精度主要与致动器的选取有关,通过对压电致动器进行闭环控制可以解决压电陶瓷的迟滞和蠕变问题^[15]。平行夹持精度指夹持位移方向为期望运动方向。常见的夹持方式为角夹持和平行夹持,Shi 等^[16]基于角夹持设计了一种高放大倍率微夹钳。然而,当操作物为球形、圆柱形或不规则形状,角夹持容易造成应力集中进而破坏操作物。此外,角夹持产生的寄生位移较大。Das 等^[17-18]应用平行四边形机构设计了三级放大微夹钳,实现了平行夹持。然而,忽略了平行四边形机构因左右两侧受力不均会导致输出端在运动过程中,其夹持位移方向与期望运动方向存在角度偏差,影响平行夹持精度。

受限于压电陶瓷的微尺度输出特性,其通常需与位移放大机构联合使用以满足宏观操作需求。放大机构分为单级放大机构和多级放大机构,多级放大机构由多个单级放大机构组成^[19]。常见的单级放大机构包括利用三角形放大原理的桥式机构和菱形机构,基于杠杆放大原理的杠杆机构和平行四边形机构^[20]。当前学者对提高微夹钳位移放大倍率的方法主要通过优化设计改变结构尺寸参数和提高放大机构级数。Das 等^[21-22]基于有限元分析软件对机构的结构尺寸参数进行优化设计,成功提升了机构的性能。Chen 等^[23-24]通过将放大机构的级数提升到四级,成功设计的四级放大机构,放大倍率性能优越。然而,对其他提高机构放大倍率的方法较少。

综上所述,本研究给出一种基于对称复合半桥式机构的高精度非对称微夹钳。一方面,左右两侧复合半桥式机构同时对平行四边形机构施加水平向右的力,保证了平行四边形机构均匀受力,使实际运动方向更加接近于期望运动方向,提高了机构的夹持精度;另一方面,左右两侧复合半桥式机构同时对平行四边形机构施加水平向右的力,有效降低平行四边形机构对复合半桥式机构的阻抗数值,提高机构的放大倍率。

1 微夹钳设计

1.1 同向力二级放大机构设计

图 1 为同向力二级放大机构设计图,可以看出,传统微夹钳由压电致动器驱动第 1 级机构,第 1 级机构驱动第 2 级机构,进而实现位移放大和夹持动作。本研究给出的同向力微夹钳由压电致动器驱动两个结构尺寸相同的第 1 级机构,其输出端输出力的运动方向相同,再由两个第 1 级机构同时驱动第 2 级位移放大机构。两个第 1 级机构置于第 2 级机构两侧,左侧第 1 级机构对第 2 级机构施加水平向右的推力,右侧第 1 级机构对第 2 级机构施加水平向右的拉力,进而实现位移放大和夹持动作。

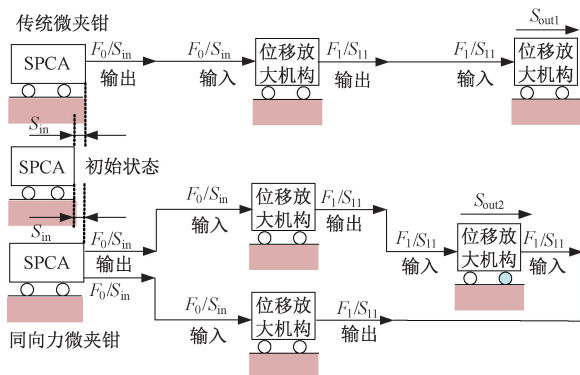


图 1 同向力二级放大机构设计

Fig. 1 Schematic diagram of coaxial force two-stage amplification mechanism

1.2 对称复合半桥式机构设计

图 2 为对称复合半桥式机构设计图,图 2(a)传统二级放大微夹钳,由一个第 1 级机构驱动一个第 2 级机构,利用平行四边形的平行夹持特性,理想状态下,可以

$$V = U - Q = \frac{EA_1 u_1^2}{2l_1} + \frac{24EI_1 v_1^2}{l_1^3} \left(1 + \frac{12EI_1}{G\kappa A l_1^2} \right) - F_{Dy} u_1 - F_{Dx} v_1 \quad (10)$$

因此:

$$\frac{\partial V}{\partial u_1} = \frac{EA_1 u_1}{l_1} - F_{Dy} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial V}{\partial v_1} = \frac{48EI_1 v_1}{l_1^3} \left(1 + \frac{12EI_1}{G\kappa A l_1^2} \right) - F_{Dx} = 0 \quad (12)$$

因此, 柔性铰链在水平和竖直方向的变形量分别为:

$$u_1 = \frac{F_{Dy} l_1}{EA_1} \quad (13)$$

$$v_1 = \frac{F_{Dx} l_1^3}{48EI_1 \left(1 + \frac{12EI_1}{G\kappa A l_1^2} \right)} \quad (14)$$

平行四边形机构输出端的实际运动方向与期望运动方向的夹角 γ 为:

$$\gamma = \frac{l_{FG} - l_{CE}}{l_{EG}} = \frac{F_{Dy} l_1}{EA_1 l_{EG}} \quad (15)$$

2.2 微夹钳放大倍率建模

图 5 为矩形柔性铰链, 因其左端固定, 当广义力 F_i 作用于点 O_i 时, 在此处必然会产生相应的广义位移 S_i 。

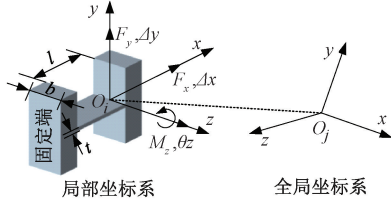


图 5 局部坐标系转换为全局坐标系

Fig. 5 Converting local coordinate system to global coordinate system

平面内广义力 F_i 与广义位移 S_i 的关系, 表达如式(16)所示。

$$S = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \theta_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & C_{23} \\ 0 & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ M_{z1} \end{bmatrix} = CF \quad (16)$$

当广义力和广义位移由坐标系 O_{i-xy} 转换到坐标系 O_{j-xy} 时, 根据转换关系, 可以求得点 O_j 相对于固定端的刚度为:

$$C_{oj} = T_i^T C_{oi} (T_i)^T \quad (17)$$

$$T_i^T = R_i^T P_i^T = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ p_y & -p_x & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: θ 为局部坐标系到全局坐标系的转动角度; R_i^T 和 P_i^T

分别为由坐标系 O_{i-xy} 转换到坐标系 O_{j-xy} 的旋转矩阵和平移矩阵; 向量 $[p_x, p_y]$ 为点 O_i 在坐标系 O_{j-xy} 中的坐标。

如图 6 所示, 上、下柔性杆在 B 点的柔度矩阵如式(19)~(20)所示。

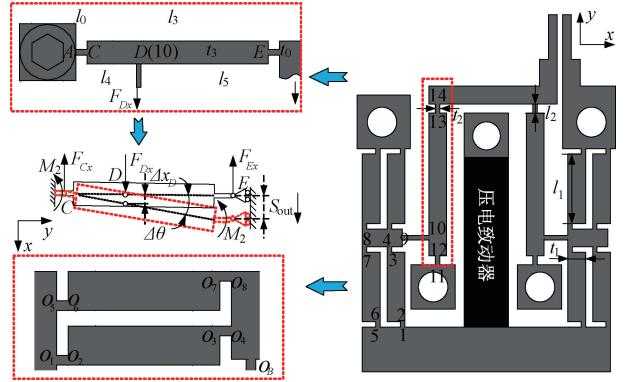


图 6 微夹钳受力分析

Fig. 6 Force analysis of microgripper

$${}_{down}C_{down-B} = T_{02}^B C_P (T_{02}^B)^T + T_{03}^B C_P (T_{03}^B)^T + T_{04}^B C_P (T_{04}^B)^T \quad (19)$$

$${}_{down}C_{top-B} = T_{06}^B C_P (T_{06}^B)^T + T_{07}^B C_P (T_{07}^B)^T + T_{08}^B C_P (T_{08}^B)^T \quad (20)$$

式中: C_P 表示柔性梁的柔性矩阵。

$${}_{down}C_B = ({}_{down}C_{down-B}^{-1} + {}_{down}C_{top-B}^{-1})^{-1} \quad (21)$$

复合半桥式放大机构为对称结构, 其 B 点处的柔度矩阵为:

$$C_B = [({}_{down}C_B)^{-1} + (R_y(\pi) {}_{down}C_B R_y(\pi)^T)^{-1}]^{-1} \quad (22)$$

式中: R_y 表示从复合半桥式放大机构的下部到上部的变换矩阵。

应用力平衡理论和柔度矩阵法:

$$\Delta x = \frac{1}{2} C_B(1,1) F_{in} + \frac{1}{2} C_B(1,2) F_{out} + C_B(1,3) M_z \quad (23)$$

$$\Delta y = \frac{1}{2} C_B(2,1) F_{in} + \frac{1}{2} C_B(2,2) F_{out} + C_B(2,3) M_z \quad (24)$$

$$\Delta \theta = \frac{1}{2} C_B(3,1) F_{in} + \frac{1}{2} C_B(3,2) F_{out} + C_B(3,3) M_z \quad (25)$$

式中: F_{in} 是输入力; F_{out} 是复合半桥式放大机构的输出力; M_z 是等效力矩。

B 点的旋转为 0, 则:

$$\Delta \theta_z = 0 \quad (26)$$

取平行四边形机构的左半部分进行受力分析, 输入端的驱动力为 F_{Dx} 。水平变形为 $2S_{out}$ 。

对柔性臂 CE 进行受力分析,得出以下平衡方程:

$$F_{Dx} = F_{Cx} + F_{Ex} \quad (27)$$

$$M_2 = [F_{Dx}l_4 - F_{Ex}(l_4 + l_5)]/2 \quad (28)$$

基于力矩平衡方程,沿 CE 距离点 C, x 处的力矩由下式给出:

$$M_{CE} = (F_{Dx}l_4 - F_{Cx}l_6)/2 - F_{Cx}x \quad (29)$$

式中: $l_6 = l_4 + l_5$ 。

基于卡氏第二定理:

$$\Delta x_D = \int_0^{l_0} \frac{M_{CE}(x)}{EI_4} \frac{\partial M_{CE}(x)}{\partial F_x} dx +$$

$$\int_0^{l_4 - \frac{l_0}{2}} \frac{M_{CE}(x)}{EI_5} \frac{\partial M_{CE}(x)}{\partial F_x} dx \quad (30)$$

将式(27)和(29)代入式(30),即:

$$\Delta x_D = \frac{F_{Dx}l_0}{2EI_4} \left[(2l_4 - l_6)^2 - \frac{l_0^2}{3} - 2l_0l_4 + \frac{l_0l_6}{2} \right] + \frac{F_{Dx}(l_4 - l_0)}{4EI_5} \left[(2l_4 - l_6)^2 - \frac{(l_4 - l_0)^2}{3} - (l_4 - l_0) \cdot \left(2l_4 - \frac{l_6}{2} \right) l_5^2 + \frac{l_5l_6}{2} \right] \quad (31)$$

$$\Delta x_E = l_6 \Delta \theta = \frac{M_2 l_6}{k_{\theta CE}} = \frac{F_{Dx} l_4 l_6 (2l_4 - l_6)}{2EI_{AC}} \quad (32)$$

平行四边形机构左侧上部和下部的柔度矩阵表示为:

$$\mathbf{C}_{left-top} = \mathbf{T}_{013}^D \mathbf{C}_F (\mathbf{T}_{013}^D)^T + \mathbf{T}_{014}^D \mathbf{C}_F (\mathbf{T}_{014}^D)^T \quad (33)$$

$$\mathbf{C}_{left-down} = \mathbf{T}_{012}^D \mathbf{C}_F (\mathbf{T}_{012}^D)^T \quad (34)$$

平行四边形机构左侧的柔度矩阵表示为:

$$\mathbf{C}_{left} = (\mathbf{C}_{left-top}^{-1} + \mathbf{C}_{left-down}^{-1} + (\mathbf{C}_B(2,2))^{-1})^{-1} \quad (35)$$

因此:

$$\Delta y = F_{out} \mathbf{C}_{left} \quad (36)$$

则:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\mathbf{C}_B(2,1) + \mathbf{C}_B(2,2)d_1 + 2\mathbf{C}_B(2,3)d_2}{\mathbf{C}_B(3,1) + \mathbf{C}_B(3,2)d_1 + 2\mathbf{C}_B(3,3)d_2} \quad (37)$$

$$\frac{\Delta x_E}{\Delta x_D} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (38)$$

联立式(11)~(14)和(24),微夹钳的放大倍率为:

$$R_{amp} = R_{amp1} R_{amp2} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \frac{\Delta x_E}{\Delta x_D} \quad (39)$$

3 有限元分析

3.1 尺寸优化设计

为了提高微夹钳的工作性能,基于有限元法对其进行多目标响应曲面优化。设计变量如表1所示,并在图6中进行了标注。

表 1 优化后参数

Table 1 Optimized dimensions

尺寸符号	名称	数值/mm
l_0	平行四边形机构中矩形铰链尺寸	1.00
l_0	平行四边形机构中矩形铰链尺寸	0.28
l_2	桥式放大机构中矩形铰链尺寸	0.60
l_2	桥式放大机构中矩形铰链尺寸	0.55
l_4	杠杆短臂的尺寸	2.50
l_5	杠杆长臂的尺寸	16.50

子集 $[S_1, D_1]$ 为目标函数, S_1 为夹持位移, D_1 为第一阶谐振频率。多目标优化问题总结于下列数学模型中,即:

$$\text{最大化:} \begin{cases} S_1 = f_1(x) \\ D_1 = f_2(x) \end{cases} \quad (40)$$

$$x = [l_0, t_0, l_2, t_2, l_4, l_5] \quad (41)$$

$$\text{参数:} \begin{cases} 0.28 \leq l_0 \leq 1, & 0.28 \leq t_0 \leq 1 \\ 0.28 \leq l_2 \leq 2, & 0.28 \leq t_2 \leq 1 \\ 1 \leq l_4 \leq 6, & 5 \leq l_5 \leq 16.5 \end{cases} \quad (42)$$

优化过程在 Ansys 软件中进行,如图7所示,包括参数化建模,静态、动态分析和响应曲面优化,优化后尺寸如表1所示。

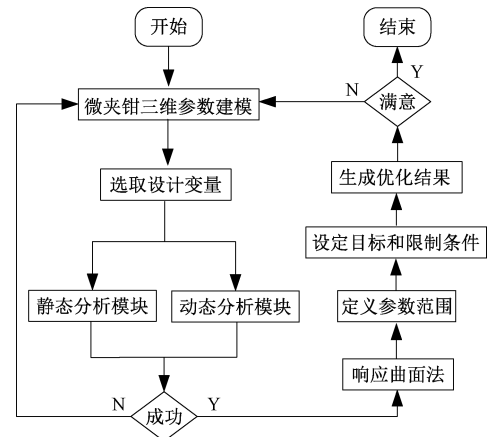


图 7 微夹钳优化流程

Fig. 7 Flowchart for microgripper optimization

3.2 性能对比分析

基于 Ansys 软件对两种微夹钳进行仿真分析,在微夹钳输入端施加 $10 \mu\text{m}$ 位移,钳口的输出位移如图8所示,传统微夹钳的放大倍率为 12.6,基于对称复合半桥式机构设计的微夹钳的放大倍率为 14.3,输出端位移放大性能提升了 13.5%。钳口的寄生位移如图9所示,传统微夹钳平行四边形机构输出端左右两侧的数值差为 $0.053 \mu\text{m}$,旋转的角度为 $2.1 \times 10^{-4}^\circ$ 。基于对称复合半桥式机构设计的微夹钳平行四边形机构输出端左右两侧的

数值差为 $0.029\ \mu\text{m}$, 旋转的角度为 $1.15 \times 10^{-4}^\circ$ 。可以得出微夹钳平行四边形机构输出端期望运动方向的寄生位移降低了 45.28%, 平行四边形机构的平行夹持性能有了显著提升。传统微夹钳输出端的寄生位移为 $30.7\ \text{nm}$, 基于对称复合半桥式机构设计的微夹钳输出端寄生位移为 $10.8\ \text{nm}$, 寄生位移降低了 64.8%。在微夹钳输入端施加 $1\ \mu\text{m}$ 位移, 传统微夹钳钳口水平方向的输出力为 $0.62\ \text{N}$, 基于对称复合半桥式机构设计的微夹钳钳口水平方向的输出力为 $1.22\ \text{N}$, 输出力性能提升了 96.8%。

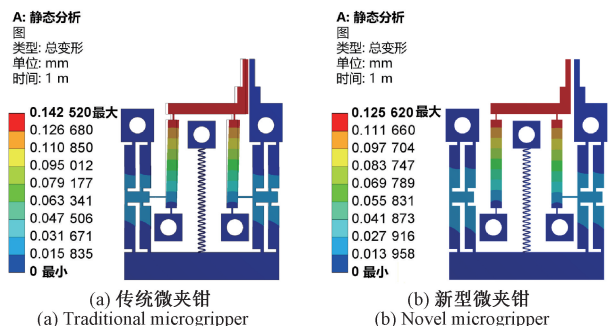


图 8 微夹钳输出位移

Fig. 8 Output displacement of microgripper

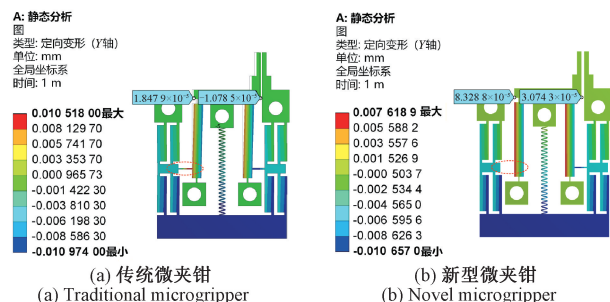


图 9 微夹钳寄生位移

Fig. 9 Parasitic displacement of microgripper

4 实验

在之前的建模、优化和仿真过程中, 对所提出的微夹钳的性能进行了分析和改进。为了进一步验证其工作能力, 对微夹钳进行了实验研究。该装置是通过对 Al-7075 材料版进行慢走丝线切割加工制作的。图 10 展示了微夹钳性能测试的详细实验装置。为保证压电致动器竖直运动且与预紧螺栓紧密相连, 将压电致动器与预紧螺栓连接处涂抹双组分胶, 约束输入端, 确保其竖直方向运行。实验装置包括: 模块化压电控制器、测微仪、动态测位移、表面粘贴应变片的压电致动器。



图 10 实验装置

Fig. 10 Experimental setup

图 11(a) 和(b) 为压电致动器在开环和闭环控制下的位移变化曲线, 可以看出, 在开环控制下, 压电致动器表现出迟滞和非线性特性; 在闭环控制下, 位移变化曲线的线性度显著提升, 实际位移和理想位移最大偏差为 1.78%。

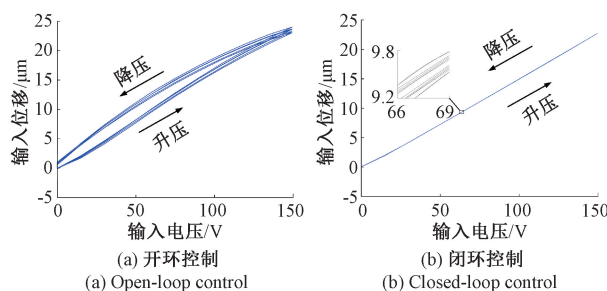


图 11 实验结果

Fig. 11 Experimental results

图 12(a) 展示了微夹钳通过 3 种方法 (理论、仿真、实验) 获得的输入/输出位移变化趋势, 3 种不同方法得出的数值接近。通过实验得出微夹钳的位移放大倍率为 13.9, 理论计算结果为 15.2, 仿真分析结果为 14.25, 可以看出, 不同方法得出的结果存在一定误差。理论数值偏高, 主要由于计算时忽略了部分柔性杆的变形。仿真数值和实验数值存在偏差, 主要由于试件的加工误差和

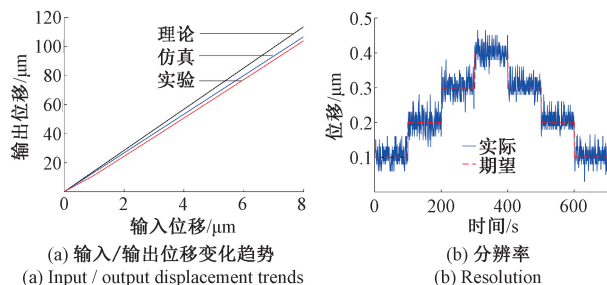


图 12 机构位移变化趋势

Fig. 12 Displacement change trend of mechanism

实验的测量误差造成。图 12(b)为致动器的位移分辨率测试,其最小位移响应为 0.1 μm。

表 2 为微夹钳性能对比。该结果表明,与现有的设计相比,所提出的微夹钳具有更高的位移放大倍率。此外,其输出端具有更低的寄生位移和平行度差值,表明文章提出的微夹钳具有更高的夹持精度。

表 2 性能对比			
Table 2 Performance comparison			
类别	单边放大倍率	寄生位移/nm	平行度差值/μm
传统微夹钳	12.56	30.7	0.053
文章给出微夹钳	14.25	10.8	0.029

5 结 论

本研究报道一种基于对称复合半桥式放大机构设计的高精度非对称微夹钳。相较于传统微夹钳,其钳口输出端寄生位移降低了 64.8%,增加了微零件抓取的准确性。平行四边形机构输出端左右两侧的数值差为 0.029 μm,与传统微夹钳对比,具有更高的平行夹持精度,提高了钳口抓取的稳定性。输出端位移放大性能提升了 13.5%,位移放大效果显著提升,寄生位移降低了 64.8%,具有更高的定位精度。该微夹钳的位移分辨率为 0.1 μm,在半导体封装、生物医疗等场景中,0.1 μm 的分辨率可确保夹钳能稳定到达目标夹持位置,避免因定位偏差导致工件装配失效或功能损坏。寄生位移为 10.8 nm,位移放大倍率为 13.9。文章提出的对称复合半桥式放大机构,为同类微夹钳的研究提供了有益参考。

参考文献

[1] CHEN W L, KONG CH W, LU Q H, et al. Nonlinear analysis, optimization, and testing of the bridge-type compliant displacement amplification mechanism with a single input force for microgrippers[J]. Precision Engineering, 2022, 73: 166-182.

[2] ZHANG X SH, KWON K, HENRIKSSON J, et al. A large-scale microelectromechanical-systems-based silicon photonics LiDAR[J]. Nature, 2022, 603(7900): 253-258.

[3] 黄涛,王迎斌,林志成,等. 多压电驱动机构机电耦合动力学建模与过驱动控制[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(4): 346-354.

HUANG T, WANG Y B, LIN ZH CH, et al. Electro-mechanical coupling dynamics modeling and over-actuation control of multi-piezoelectric drive mechanism[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(4):

346-354.

[4] 杨奕,郭科,夏诗蕴,等. 中心开窗结构的 GFSP 磁耦合机构轻量化设计[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(8): 185-197.

YANG Y, GUO K, XIA SH Y, et al. Lightweight design of the GFSP magnetic coupling mechanism featuring a center-window structure[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025,46(8):185-197.

[5] FANG G, CHOW M C K, HO J D L, et al. Soft robotic manipulator for intraoperative MRI-guided transoral laser microsurgery [J]. Science Robotics, 2021, 6 (57): 5575.

[6] 雷英俊,许桢英,李瑞君. 三维等灵敏度低耦合弹性机构的设计和优化[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(11): 47-55.

LEI Y J, XU ZH Y, LI R J, et al. Design and optimization of 3D iso-sensitive, low-coupling elastic mechanisms[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(11): 47-55.

[7] ALGOOS Y, LENZ W B, KHAN F, et al. An electrostatically actuated MEMS microgripper with high amplification for precision manipulation[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 378: 115800.

[8] LYU Z K, XU Q S. Recent design and development of piezoelectric-actuated compliant microgrippers: A review[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 331: 113002.

[9] ROY A, NABI M, RAHMAN N. Finite element compatible matrix interpolation for parametric model order reduction of electrothermal microgripper[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2021, 8(6): 1622-1635.

[10] HAO Y C, WANG CH G, SUN ZH, et al. Rotatory microgripper based on a linear electrostatic driving scheme[J]. Microelectronic Engineering, 2021, 248: 111601.

[11] DESPA V, CATANGIU A, IVAN I A, et al. Modeling and control of a microgripper based on electromagnetic actuation[J]. Scientific Bulletin of Valahia University Materials & Mechani, 2014, 9: 131-136.

[12] YOUN J H, KOH J S, KYUNG K U. Soft polymer-actuated compliant microgripper with adaptive vibration-controlled grasp and release[J]. Soft Robotics, 2024, 11(4): 585-595.

[13] ZHAO Y, WU H, ZHENG L L, et al. Advanced pneumatic microgripper for versatile biomedical micromanipulation [J]. Precision Engineering, 2024, 88: 223-234.

- [14] XU Q Q, GAO X Y, ZHAO S F, et al. Construction of bio-piezoelectric platforms: From structures and synthesis to applications[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(27): 2008452.
- [15] CHEN W L, ZHANG X M, LI H, et al. Nonlinear analysis and optimal design of a novel piezoelectric-driven compliant microgripper [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, 118: 32-52.
- [16] SHI CH Y, DONG X Y, YANG ZH. A microgripper with a large magnification ratio and high structural stiffness based on a flexure-enabled mechanism [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, 26(6): 3076-3086.
- [17] DAS T K, SHIRINZADEH B, GHAFARIAN M, et al. Design, analysis and experimental investigations of a high precision flexure-based microgripper for micro/nano manipulation[J]. *Mechatronics*, 2020, 69: 102396.
- [18] 林超, 李坪洋, 沈忠磊, 等. 压电驱动微夹持器特性分析[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(7): 224-232.
LIN CH, LI P Y, SHEN ZH L, et al. Characteristic analysis of the micro gripper driven by piezoelectric actuator[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(7): 224-232.
- [19] CHEN W L, KONG CH W, LU Q H, et al. Nonlinear analysis, optimization, and testing of the bridge-type compliant displacement amplification mechanism with a single input force for microgrippers[J]. *Precision Engineering*, 2022, 73: 166-182.
- [20] ZHANG D P, ZHANG ZH T, GAO Q, et al. Development of a monolithic compliant SPCA-driven micro-gripper[J]. *Mechatronics*, 2015, 25: 37-43.
- [21] DAS T K, SHIRINZADEH B, AL-JODAH A, et al. Computational parametric analysis and experimental investigations of a compact flexure-based microgripper [J]. *Precision Engineering*, 2020, 66: 363-373.
- [22] LYU Z K, XU Q S. Novel design of a piezoelectrically actuated compliant microgripper with high area-usage efficiency[J]. *Precision Engineering*, 2022, 76: 1-11.
- [23] CHEN X D, DENG Z L, HU S Y, et al. Design of a compliant mechanism based four-stage amplification piezoelectric-driven asymmetric microgripper[J]. *Micro-machines*, 2019, 11(1): 25.
- [24] Haghshenas Gorgani H, SHABANI S, HONARMAND M. A novel optimized design of a piezoelectric-driven 4-stage amplified compliant microgripper using a 2-step multi-objective algorithm [J]. *SN Applied Sciences*, 2022, 4(4): 124.

作者简介



陈晓东(通信作者),2024 年于哈尔滨工业大学获得博士学位。现为沈阳理工大学副教授。当前研究包括柔顺机构学、机器人及其控制技术。

E-mail: cxdhit@163.com

Chen Xiaodong (Corresponding author)

received his Ph. D degree from Harbin Institute of Technology in 2024. He is currently an associate professor at Shenyang University of Technology. His research interests include compliant mechanisms, robotics and its control technologies.



谭惠丰,1991 年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1994 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,1997 年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为哈尔滨工业大学教授,主要研究方向为柔性材料和结构的新技术。

E-mail: tanhf@hit.edu.cn

Tan Huifeng received his B.Sc., M.Sc., and Ph.D. degrees all from Harbin Institute of Technology in 1991, 1994, and 1997, respectively. He is currently a professor at Harbin Institute of Technology. His main research interests include new technologies of flexure materials and structures.