

基于柔性四杆机构的大行程微夹持器的设计与实现

郝 珂^{1*}, 刘 瑛¹, 崔良玉^{1,2#}

¹天津职业技术师范大学机械工程学院, 天津

²天津市高速切削与精密加工重点实验室, 天津

收稿日期: 2024年11月5日; 录用日期: 2024年11月28日; 发布日期: 2024年12月9日

摘要

针对微夹持器在实际应用中对较大夹持范围的需求, 提出了一种基于柔性铰链四杆机构的微夹持器结构。首先, 对微夹持器进行结构设计和理论分析, 通过运动学分析, 得到柔性四杆机构能够实现超大放大倍数的理论公式, 为微夹持器的设计提供了理论依据。然后利用ANSYS仿真软件对微夹持器的放大倍数进行了仿真分析与验证, 通过对比仿真结果与理论公式计算值, 进一步验证了理论分析的正确性。最后, 通过搭建实验平台, 对微夹持器进行实验验证, 结果表明, 夹持器的位移放大倍数可以达到32.24倍, 并且具备0~644.8 μm的夹持范围。该微夹持器有效解决微夹持器行程小的问题, 具有一定的应用前景和可行性。

关键词

放大机构, 柔性铰链, 压电陶瓷驱动, 微夹持器, 有限元分析

Design and Implementation of a Large-Stroke Microgripper Based on a Flexible Four-Bar Mechanism

Ke Hao^{1*}, Ying Liu¹, Liangyu Cui^{1,2#}

¹School of Mechanical Engineering, Tianjin of Technology and Education, Tianjin

²Tianjin Key Laboratory of High Speed Cutting and Precision Processing, Tianjin

Received: Nov. 5th, 2024; accepted: Nov. 28th, 2024; published: Dec. 9th, 2024

*第一作者。

#通讯作者。

Abstract

To address the need for a larger gripping range in practical applications of microgrippers, a microgripper structure based on a flexible hinge four-bar mechanism has been proposed. Initially, structural design and theoretical analysis of the microgripper were conducted. Through kinematic analysis, theoretical formulas were obtained that demonstrate the four-bar mechanism's ability to achieve an ultra-large magnification ratio, providing a theoretical foundation for the design of the microgripper. Subsequently, ANSYS simulation software was used to simulate and verify the magnification ratio of the microgripper. By comparing the simulation results with the calculated values from the theoretical formulas, the correctness of the theoretical analysis was further validated. Finally, an experimental platform was set up to experimentally verify the microgripper. The results indicated that the displacement magnification ratio of the gripper could reach 32.24 times, with a gripping range of 0 to 644.8 μm . This microgripper effectively solves the problem of limited travel in microgrippers and has potential application prospects and feasibility.

Keywords

Amplification Mechanism, Flexible Hinge, Piezoelectric Ceramic Drive, Micro-Holder, Finite Element Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着微电子和精密测量技术的发展，对微操作的精确度与效率的需求日益提升。鉴于微操作对象正逐步向更微小的尺度发展，微操作的难度也在不断增加，微夹持器作为精密微操作系统中的关键组件，在执行操作过程中发挥着核心作用。为了适应多样化的微操作和微装配任务需求，微夹持器必须具备高放大倍数的位移能力、多自由度、高固有频率以及结构紧凑等特性。

压电陶瓷与柔性铰链是微夹持器工作的关键部件，由于压电陶瓷驱动器输出位移较小，通常在几微米到几十微米，因此，为了满足大位移应用场合，一般需借助放大机构来扩大其输出位移。国内外学者对于微夹持器中的放大机构进行了相关研究。Wang 等人[1]研究了一种将桥式和杠杆式结合的三级柔性放大机构，并对关键结构参数进行了优化，该微夹爪可以实现快速的抓取操作。林苗[2]提出一种具有菱形放大机构和杠杆放大机构的二级位移放大机构和位移导向机构的微夹持器，实现了压电驱动器输入位移的放大。Shi 等人[3]提出了一种将两个桥式放大机构和一个杠杆机构串联的微夹持器，该夹持器具有良好的线性度、较广的工作带宽和较大的力输出能力。赵大明等人[4]应用了等腰梯形簧片柔性铰链并结合直圆形柔性铰链设计了一种压电驱动微夹钳。Qian 等人[5]研究了一种杠杆 - 桥臂 - 杠杆式压电驱动柔顺微夹钳，实现了微小易碎物体的高性能抓取，对整个夹紧操作过程的运动学和动态行为进行精准预测。宋帅官等人[6]采用双叶型桥式机构和平行四边形机构设计了一种微夹持器，该机构通过压电驱动带动桥式放大机构变形运动，从而带动平行四边形机构摆动，实现夹持。Chen 等人[7]提出了一种具有位移补偿特性的对称平行四边形机构，解决了平行四边形机构转动产生的寄生位移对微夹钳的夹持精度影响问题。Wu 等人[8]设计了两种改进的两级放大器并集成了三种不同的柔性铰链，实现了位移放大和运动引导，并且提高了动态性能。Xu 等人[9]设计了一种输出位移大且可调的新型压电驱动微夹持器，实现微夹持器

的大输出位移，提高微夹持器的输出精度。Guo 等人[10]提出了一种新型压电驱动柔顺微夹持器，微夹持器可以获得较大的位移放大比和较宽的运动行程，并且实现并行夹持。Ni 等人[11]设计了一种基于三级放大机构的双臂驱动柔顺压电微夹持器，该微夹持器可同时感知夹持位移和夹持力，具有优异的静态和动态性能。综上所述可知，目前国内外的学者们通过结合不同类型的放大机构，设计出了具有较大行程的微夹持器。然而，这些微夹持器的行程仍旧存在局限性。

针对微夹持器存在放大倍数较小、行程有限的问题，本文基于柔性铰链四杆机构设计了一种微夹持器，首先对微夹持器进行结构设计和理论分析，通过对四杆机构的设计与分析得到放大倍数的理论公式。然后，利用 ANSYS 仿真软件对微夹持器的放大倍数进行了仿真分析与验证，通过对比证实了理论分析的正确性。最后进行实验验证，新型放大结构能够有效解决微夹持器行程小的问题。

2. 微夹持器的结构设计

2.1. 微夹持器的结构设计

为了设计一款结构紧凑且具备大行程的微夹持器，本文采用了直梁型柔性铰链作为微夹持器主体结构的设计方案，如图 1 所示。该微夹持器的总体结构由基于柔性铰链的四杆机构主体框架、压电陶瓷致动器以及预紧螺栓构成，其主体结构尺寸约为 $40 \times 55 \times 5$ mm。压电陶瓷致动器被嵌入中心槽中，并通过底部螺栓对平行四杆柔性梁施加压力，以实现对压电陶瓷致动器的预紧。柔性铰链主要分布在夹持臂与基座以及压电陶瓷致动器之间，采用直梁型设计以确保较大的转角和变形能力。在压电陶瓷致动器和预紧螺栓的协同作用下，夹持臂能够展开，对称分布的柔性梁将压电陶瓷致动器的线性伸长转化为夹持臂的转角运动。通过调节电压的大小，可以获得不同的夹持角度，从而实现微纳米级别的精确夹持。

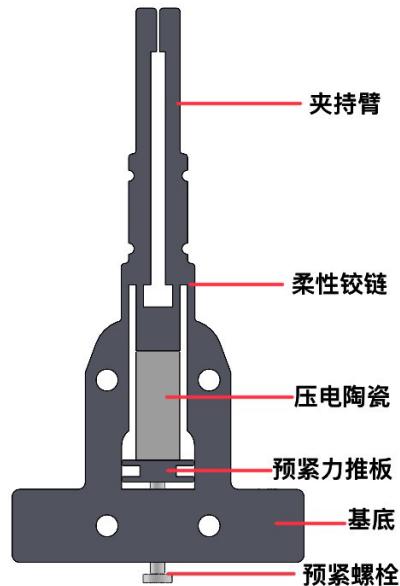


Figure 1. Structure of the microgripper
图 1. 微夹持器的结构图

2.2. 柔性四杆机构设计

如图 2(a)中所示的曲柄滑块机构是典型的四杆机构，若将转动铰链 A、B、C 用柔性铰链替代，如图 2(b)，滑块的移动通过压电陶瓷致动器来实现线性驱动，则可实现连杆 AB 及连杆 BC 的转动。

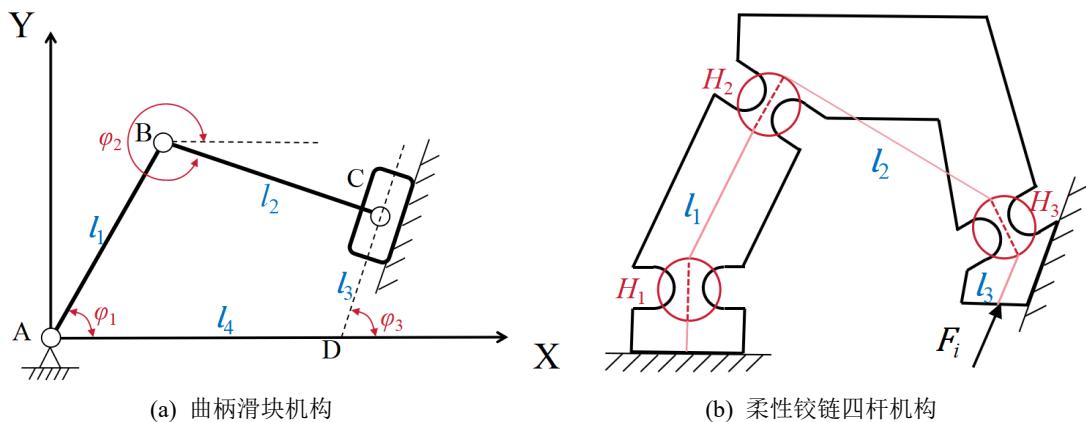


Figure 2. Schematic diagram of four-bar mechanism
图 2. 四杆机构原理图

通过柔性铰链的相关知识可知，柔性铰链在不同方向的刚度具有较大差别，在进行拉伸或压缩时，轴向方向刚度显著大于径向方向弯曲刚度，因此对于具有串联特性的四杆机构，柔性铰链的布置对于四杆机构的力学特性有较大的影响。以典型的直圆形柔性铰链为例，柔性铰链的四杆机构布置方案如图 2 所示，柔性铰链 H_1 、 H_2 负责连杆 l_1 、 l_2 的转角；当柔性铰链 H_3 轴向与压电陶瓷致动器推力方向一致时，压电陶瓷致动器的推力作为柔性铰链的轴向压力，可使得柔性铰链获得最大的轴向位移，因此此时效率最高。

3. 微夹持器的结构设计与分析

3.1. 柔性四杆机构运动学分析

对图 2(a)所示的四杆机构，建立坐标系，求得各矢量的投影方程：

$$\begin{cases} l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 = l_3 \cos \varphi_3 + l_4 \\ l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 = l_3 \sin \varphi_3 \end{cases} \quad (1)$$

ω_1 、 ω_2 为连杆 AB、BC 的旋转速度， ϑ_3 为滑块的移动速度。运动学方程对时间求导数，可得到速度方程(2)。

$$\begin{cases} l_1 \omega_1 \sin \varphi_1 + l_2 \omega_2 \sin \varphi_2 = \vartheta_3 \cos \varphi_3 \\ l_1 \omega_1 \cos \varphi_1 + l_2 \omega_2 \cos \varphi_2 = \vartheta_3 \sin \varphi_3 \end{cases} \quad (2)$$

在柔性铰链传动中， ω_1 、 ω_2 、 ω_3 可看做是柔性铰链 A、B、C 的旋转位移， ϑ_3 为滑块的移动位移。当 $\varphi_3 = 90^\circ$ 时，此时，各铰链的旋转位移 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 ，如公式(3)、(4)、(5)所示。

$$\omega_1 = \frac{-\vartheta_3 \sin \varphi_2}{l_1 (\cos \varphi_2 \sin \varphi_1 - \cos \varphi_1 \sin \varphi_2)} \quad (3)$$

$$\omega_2 = \frac{\vartheta_3 \sin \varphi_1}{l_2 (\cos \varphi_2 \sin \varphi_1 - \cos \varphi_1 \sin \varphi_2)} \quad (4)$$

$$\theta_{BC} = \omega_3 = \omega_2 - \omega_1 \quad (5)$$

P 点在 X 轴上的位置如式(6)所示。

$$X_P = l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cos(\varphi_3 + \varphi_2) \quad (6)$$

P 点在 X 轴上的位置变化量如式(7)所示。其中 l_5 为夹持臂的长度, φ_5 为夹持臂与连杆 l_2 延长线的夹角。

$$\begin{aligned} |\Delta X_P| &= \left| -\omega_1 l_1 \sin \varphi_1 - \omega_2 l_2 \cos \varphi_2 + \omega_2 l_5 \sin(\varphi_5 + \varphi_2) \right| \\ &= \frac{\vartheta_3 l_5 \sin \varphi_1 \sin(\varphi_5 + \varphi_2)}{l_2 (\cos \varphi_2 \sin \varphi_1 - \cos \varphi_1 \sin \varphi_2)} \end{aligned} \quad (7)$$

P 点在 Y 轴上的位置如式(8)所示。

$$Y_P = l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 + l_5 \sin(\varphi_5 + \varphi_2) \quad (8)$$

P 点在 Y 轴上的位置变化如式(9)所示。

$$\begin{aligned} |\Delta Y_P| &= \left| \omega_1 l_1 \cos \varphi_1 + \omega_2 l_2 \cos \varphi_2 + \omega_2 l_5 \cos(\varphi_5 + \varphi_2) \right| \\ &= \vartheta_3 \left(1 + \frac{l_5 \sin \varphi_1 \cos(\varphi_5 + \varphi_2)}{l_2 (\cos \varphi_2 \sin \varphi_1 - \cos \varphi_1 \sin \varphi_2)} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

P 点在 X 轴上的放大倍数 δ_x 计算公式如公式(10)所示。 P 点在 Y 轴上的放大倍数 δ_y 计算公式如公式(11)所示。由于 P 点在 Y 轴上的位置变化对整体位置变化影响很微小, 所以着重考虑 P 点在 X 轴上的位置变化。

$$\delta_x = \frac{|\Delta X_P|}{\vartheta_3} = 1 + \frac{l_5 \sin \varphi_1 \cos(\varphi_5 + \varphi_2)}{l_2 (\cos \varphi_2 \sin \varphi_1 - \cos \varphi_1 \sin \varphi_2)} \quad (10)$$

$$\delta_y = \frac{|\Delta Y_P|}{\vartheta_3} = \frac{l_5 \sin \varphi_1 \sin(\varphi_5 + \varphi_2)}{l_2 (\cos \varphi_2 \sin \varphi_1 - \cos \varphi_1 \sin \varphi_2)} \quad (11)$$

3.2. 柔性四杆机构运动学分析

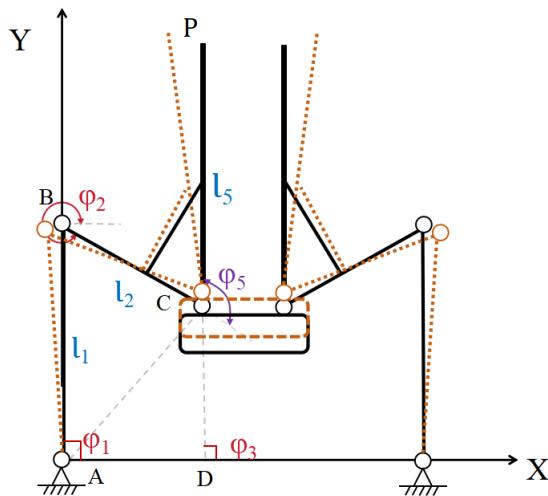


Figure 3. Equivalent schematic diagram of the microgripper
图 3. 微夹持器等效原理图

可将图 1 的微夹持器结构图等效成如图 3 所示的原理图。其中连杆 2 的长度 $l_2 = 2.26 \text{ mm}$, 夹持臂的长度 $l_5 = 38.50 \text{ mm}$, 连杆 1 的转角 $\varphi_1 = 90^\circ$, 连杆 2 的转角 $\varphi_2 = -14^\circ$, 夹持臂的转角 $\varphi_5 = 101.50^\circ$ 。由上述数据公式(13), 可得出理论值中的 X 轴单边放大倍数 $\delta_x = 17.54$, 夹持器 X 轴方向的位移放大倍数

为 35.08。由上述数据公式(14), 可得出理论值中的 Y 轴单边放大倍数 $\delta_y = 1.77$, 夹持器 Y 轴方向的位移放大倍数为 3.54。

4. 有限元分析

通过运动学分析, 建立了压电陶瓷输入位移与夹持臂形变位移之间的计算模型, 并得到了微夹持器的位移放大倍数公式。为了验证上述计算模型的准确性, 借助 ANSYS 仿真软件进行分析验证。

4.1. 放大倍数分析验证

通过有限元分析软件 ANSYS 研究微夹持器在压电陶瓷致动器驱动作用下的变形及应力。微夹持器材料选用铝合金 7075, 微夹持器主要发生弹性变形, 设置材料相关特性参数如下: 弹性模量为 E=72 GPa, 泊松比为 0.33, 密度 2810 kg/m³。设定驱动位移为 20 μm 时, 微夹持器末端的最大变形为 644.82 μm, 夹持范围达到 0~644.82 μm, 位移放大倍数达 32.24 倍。X 轴的单侧位移放大倍数为 16.12, 夹持器 X 轴方向的位移放大倍数为 32.24。Y 轴的单侧位移放大倍数为 1.86, 夹持器 Y 轴方向的位移放大倍数为 3.72。

通过有限元分析如图 4(a)所示, 夹持器 X 轴方向的位移放大倍数理论值结果与夹持器 X 轴方向的位移放大倍数有限元分析值结果的相对误差为 8.80%。通过有限元分析如图 4(b)所示, 夹持器 Y 轴方向的位移放大倍数理论值结果与夹持器 Y 轴方向的位移放大倍数有限元分析值结果的相对误差为 4.83%。由于 ANSYS 网格划分精度以及加载位置的偏差, 导致计算结果出现误差。与有限元法相比公式计算值的相对误差在 10% 以内, 公式所得的结果与有限元分析结果基本一致, 进一步证实了公式的正确性。由此可得, 夹持器的位移放大倍数理论值在误差允许范围内, 上述公式成立。

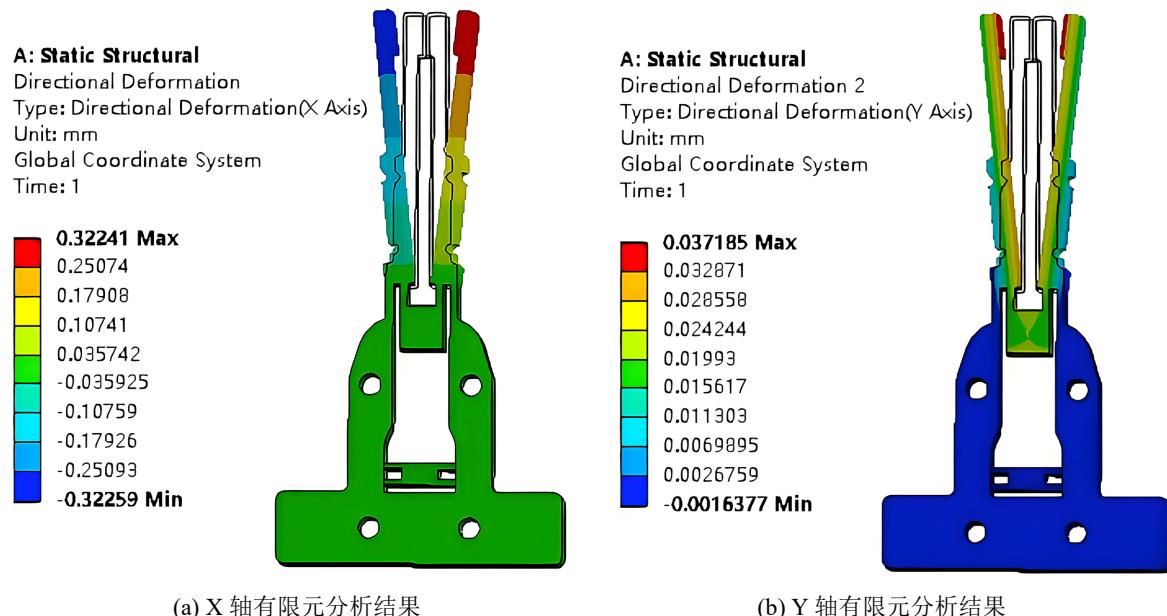


Figure 4. Finite element analysis results
图 4. 有限元分析结果

4.2. 应力仿真

设定驱动位移为 20 μm, 微夹持器柔性铰链处的最大应力为 96.66 MPa, 远小于铝合金 7075 材料的许用应力(328 MPa), 20 μm 驱动位移作用下应力分布如图 5 所示。

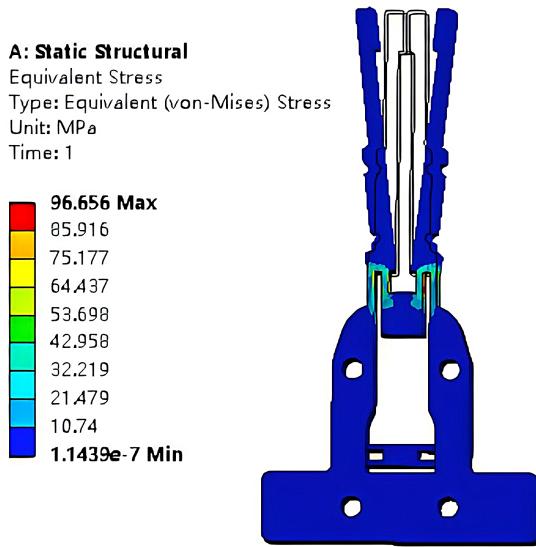


Figure 5. Deformation distribution cloud map under 10 μm driving displacement
图 5. 10 μm 驱动位移作用下变形分布云图

5. 实验

搭建的实验平台包括 Contoldesk 计算机、MicroLabBox、芯明天 ED01 电压放大器、电容位移传感器、电阻应变测力计、主动隔振台、显微镜相机、微夹持器和芯明天 PSt150 压电陶瓷致动器。其中，MicroLabBox 具备实时处理、信号调理和数据采集功能，适合控制和原型设计。CPL290 电容位移传感器通过电容变化测量位移，将距离变化转换为电信号。

如图 6 所示，为了降低结构和机构振动导致的数据误差，将主动隔振台固定于光学隔振平台之上，并利用虎台夹紧固微夹持器，将其安置在主动隔振台上。实验中，输入信号由 Dspace 生成，并送入电压放大器进行放大处理，随后输出至压电陶瓷致动器。同时，电容位移传感器被用来测量微夹持器双臂的位移，相应的电压数据和位移数据被记录并传输至 Dspace 进行进一步处理。

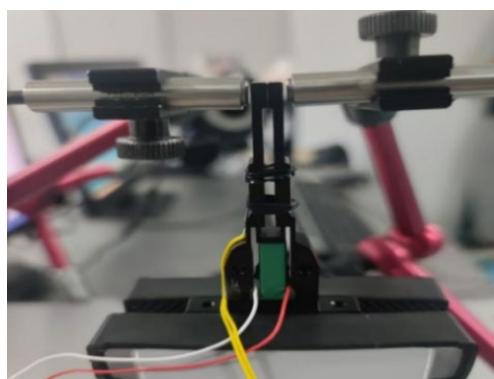


Figure 6. Experimental process diagram
图 6. 实验过程图

在实验中，给压电陶瓷致动器输入 0~150V 的电压，施加 20 μm 的输入位移，微夹持器的单臂输出位移为 0~320.31 μm ，夹持端张开的行程为 0~640.62 μm 。通过实验可得，微夹持器位移的放大倍数为 32.03。由于夹持器 Y 轴的放大倍数对于总体放大倍数来说，影响甚微，故只考虑 X 轴方向的位移放大倍

数。夹持器位移放大倍数的理论值与实验值的相对误差为 9.52%，夹持器位移放大倍数的仿真值与实验值的相对误差为 0.66%，均在误差允许范围内。(图 7)

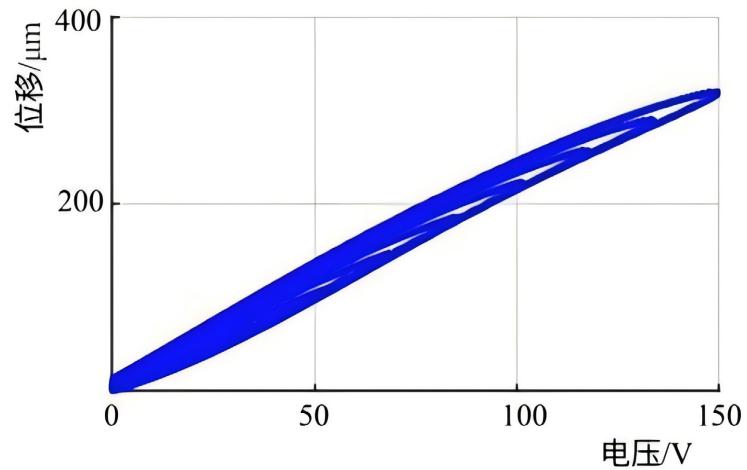


Figure 7. Displacement curve of micro gripper
图 7. 微夹持器位移变化曲线

6. 结语

基于柔性铰链的四杆机构设计了一个结构紧凑、放大倍数较大的微夹持器结构。对柔性四杆机构进行运动学分析，并建立了放大倍数的理论模型，分析得出，在施加 $20 \mu\text{m}$ 的输入位移的情况下，夹持器在 X 轴上的理论放大倍数为 35.08，在 Y 轴上的理论放大倍数为 3.54。通过有限元分析可得，夹持器在 X 轴上的放大倍数仿真分析结果为 32.24，夹持器在 Y 轴上的放大倍数仿真分析结果为 3.72，对理论分析进行验证，夹持器位移放大倍数相对误差分别为 8.80%、4.83%，均在误差允许范围内。实验结果表明，微夹持器的位移放大倍数可以达到 32.03 倍，具备 $0\sim640.62 \mu\text{m}$ 的夹持范围。故该微夹持器能有效解决微夹持器行程小的问题，具有一定的应用前景和可行性。

基金项目

天津市计量科技项目(2024TJMT048)，天津市教委科研计划项目(2023KJ189)。

参考文献

- [1] Wang, F., Liang, C., Tian, Y., Zhao, X. and Zhang, D. (2016) Design and Control of a Compliant Microgripper with a Large Amplification Ratio for High-Speed Micro Manipulation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **21**, 1262-1271. <https://doi.org/10.1109/tmech.2016.2523564>
- [2] 林苗, 孟刚, 盛永健, 等. 柔性结构微夹持器的分析及优化[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2021, 47(3): 96-104+128.
- [3] Shi, C., Dong, X. and Yang, Z. (2021) A Microgripper with a Large Magnification Ratio and High Structural Stiffness Based on a Flexure-Enabled Mechanism. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **26**, 3076-3086. <https://doi.org/10.1109/tmech.2021.3052806>
- [4] 赵大明, 高兴军, 王月, 等. 基于两种柔性铰链压电陶瓷柔顺微夹钳性能分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2022, 42(1): 64-69.
- [5] Qian, J., Yan, P. and Liu, P. (2021) Position/Force Modeling and Analysis of a Piezo-Driven Compliant Micro-Gripper Considering the Dynamic Impacts of Gripping Objects. *Smart Materials and Structures*, **30**, Article 075036. <https://doi.org/10.1088/1361-665x/ac05dc>
- [6] 宋帅官, 杨依领, 吴高华, 等. 压电柔顺 xy 微夹持器的设计与分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41(10): 154-161.

-
- [7] Chen, X., Xie, Z., Tai, K. and Tan, H. (2024) Design of Low Parasitic Motion Microgripper Based on Symmetrical Parallelogram Mechanism. *Sensors and Actuators A: Physical*, **367**, Article 115072. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115072>
 - [8] Wu, Z., Wang, Y., Chen, M. and Ding, B. (2024) Design, Analysis, and Experimental Investigations of an Asymmetrical Under-Actuated Micro-Gripper. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **35**, 960-970. <https://doi.org/10.1177/1045389x241246827>
 - [9] Xu, D., Yang, F., Yu, S., Xu, C., Liu, X., Zhao, Z., et al. (2023) A Three-Stage Amplification Piezoelectric-Actuated Micro-Gripper with Adjustable Output Displacement: Design, Modeling, and Experimental Evaluation. *Smart Materials and Structures*, **32**, Article 095033. <https://doi.org/10.1088/1361-665x/aceae4>
 - [10] Guo, Z., Ma, H., Li, Q., Li, Y., Liu, Z. and Song, Q. (2023) Design and Analysis of a Compliant Microgripper with a Large Amplification Ratio. *Microsystem Technologies*, **29**, 1333-1341. <https://doi.org/10.1007/s00542-023-05505-x>
 - [11] Ni, L., Chen, G., Hong, K. and Wang, G. (2023) Design and Development of a Compliant Piezoelectric Microgripper Based on Three-Stage Amplification. *Microsystem Technologies*, **29**, 939-952. <https://doi.org/10.1007/s00542-023-05488-9>