

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905029

压电驱动微夹持器特性分析*

林超,李坪洋,沈忠磊,余江,郑山

(重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400030)

摘要:针对微夹持器的大行程、低耦合等要求,采用桥式机构和杠杆机构设计了一种新型三级放大微夹持器。根据柔性机构学、弹性力学和动力学原理,优化了桥式机构的固定位置提高微夹持器的动态特性,建立了微夹持器的理论位移放大模型、耦合误差模型和动力学模型,获得了微夹持器的输出位移特性与动态特性。应用3D打印和线切割加工技术加工出微夹持器实体,通过理论、仿真和实验数据对比验证了理论模型的正确性,微夹持器的位移放大倍数达到了19.7倍,固有频率为223 Hz,与实验数据的误差均在10%以内波动,工作行程达到了750 μm 同时耦合误差仅为工作行程的0.35%,实现了微夹持器大行程、高精度、低耦合和良好的动态特性。

关键词:微夹持器;固定约束;耦合误差;大行程;3D打印

中图分类号: TH112.5 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.25

Characteristic analysis of the micro gripper driven by piezoelectric actuator

Lin Chao, Li Pingyang, Shen Zhonglei, Yu Jiang, Zheng Shan

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The micro gripper requires large stroke and low coupling. To fulfil these requirements, a novel flexure-based micro gripper is designed with three-stage amplifier. The bridge-type mechanism and lever-type mechanism are also utilized. Based on the principle of flexible mechanics, elastic mechanics and dynamics, the dynamic features of micro gripper are improved by optimizing the fixed position of the bridge-type mechanism. Moreover, the theoretical displacement amplification model, coupling error model and dynamic model of micro gripper are formulated. The output displacement feature and dynamic feature of the micro gripper are obtained. The micro gripper is manufactured by the combination of 3D printing and wire cut electrical discharge machining. The correctness of the theoretical model is verified by comparing the theoretical, simulation and experimental data. The displacement amplification of the proposed micro gripper is 19.7, and the natural frequency is 223 Hz. All the errors with experimental data fluctuate within 10%. The working stroke of micro gripper is 750 μm while the coupling error is only 0.35% within the working stroke. The micro gripper has the features of large stroke, high precision, low coupling and good dynamics.

Keywords: micro gripper; fixed constrain; coupling error; large stroke; 3D printing

0 引言

随着科学技术的不断深入发展,微纳米级操作技术成为科学研究的重要方向^[1],微纳米级操作技术广泛地应用在了微机电系统^[2-3]、微装配^[4]和生物细胞操作^[5-6]等前沿领域中,作为微纳米操作末端执行器的微夹持器起着不可替代的重要作用。柔性铰链由于无装配误差、

无摩擦等优点被微夹持器广泛使用^[7],柔性铰链构成的柔性位移放大机构与压电陶瓷驱动器(piezoelectric actuator, PZT)组成的微夹持器是重要的研究方向,能够实现较高的运动精度和大工作行程^[8-9]。

不同微夹持器的静动态特性也存在较大的差异。Sun等^[4]设计了一种SR机构和杠杆机构组成的新型柔性微夹持器,位移放大比达到了15.5倍。Ai等^[10]根据SR放大机构设计了一种新型二级放大微夹持器,结构简

收稿日期: 2019-04-23 Received Date: 2019-04-23

* 基金项目: 国家自然科学基金(51675060)、重庆大学大学生创新研究项目(CYB18023)资助

单且位移放大比达到了 22.2 倍,夹持器的固有频率为 70 Hz。Xiao 等^[11]提出了一种实现平行移动的微夹持器,位移放大比达到了 10 倍且最大输出位移为 300 μm ;同时为了精准地控制测量夹持力的大小,在结构设计中将传感器与夹持器一体化设计。胡俊峰等^[12]设计了一种集成力传感器的微夹持器,并对驱动电压和夹持力进行了标定。杨依领等^[1]提出了集成力/位移传感器的桥式压电微夹持器,放大倍数为 16.4 倍,夹持器固有频率为 157.5 Hz。高群等^[13]设计了一种非对称式的压电驱动微夹持器,应用平行四杆机构实现夹钳末端的平行移动,位移放大比为 5.6 倍。柔性压电驱动微夹持器已经成为微纳米操作的主要研究方向,但依旧存在放大倍数小、综合性能不理想、工作范围有限等应用难题^[14-15]。

本文提出了一种新型的压电驱动多级放大微夹持器,解决了微夹持器大工作行程、低耦合和良好动态特性的问题,介绍了平台的结构和运动学原理;根据运动学原理和弹性梁理论建立了微夹持器的位移放大比模型与耦合误差模型,同时应用拉格朗日方程建立了微夹持器的动力学模型,采用 3D 打印和线切割技术加工微夹持器实体,搭建实验系统对输出位移、耦合误差、动态响应进行测试,通过有限元仿真分析和实验对比验证了理论模型的正确性;实验结果对比分析表明该微夹持器实现了大行程、高精度和动态特性良好的要求,同时低耦合误差保证了输出端的运动精度。

1 机械结构设计

根据微夹持器高精度、大行程的工作要求以及不同类型柔性铰链的基本特性,在新型柔性微夹持器的结构设计中选择直角型柔性铰链,该铰链刚度较小、变形行程较大;同时为了达到大行程的工作要求,将杠杆放大机构、平行四边形机构和桥式机构叠加使用在输出位移放大机构中,达到大工作行程与良好解耦特性的平衡。

除此之外,不同的固定位置对于微夹持器的输出特性存在一定的影响,因此在第一级桥式放大机构的设计中,通过不同的固定位置对比分析位移放大机构的整体性能,同时将传统型桥式机构与双桥式机构纵向对比分析,综合选择性能最优的第一级位移放大机构,具体结构如图 1 所示。

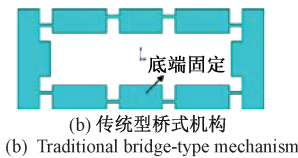
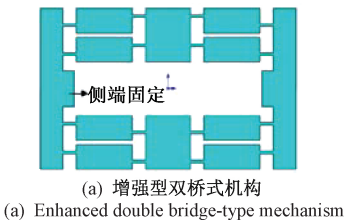


图 1 桥式放大机构结构

Fig.1 Structure of the bridge-type amplifier

针对不同结构进行有限元模态分析,图 1(a)为增强型的双桥式放大机构,图 1(b)为传统的桥式放大机构,综合分析不同结构与固定位置对于机构动态特性的影响,有限元模态仿真数据如表 1 所示。

表 1 桥式机构模态分析

Table 1 Model analysis of the bridge-type amplifier

模态阶数		1	2
传统型/Hz	底端固定	190. 11	352. 25
	侧端固定	159. 99	765. 62
增强型/Hz	底端固定	378. 44	593. 40
	侧端固定	348. 92	751. 81

当传统桥式机构底端固定时,该机构在输出方向上的固有频率为 2 阶频率(352. 25 Hz),当桥式机构侧端固定时,在输出方向上的固有频率为 2 阶频率(765. 62 Hz);同理可得,增强型桥式机构在输出方向上的固有频率分别为 378. 44 Hz 和 751. 81 Hz。

综上所述可得,将桥式机构的固定位置从底端变换为侧端时,桥式机构在输出方向上的固有频率提高了大约 1 倍,具有明显的优化效果;双桥式机构与传统桥式机构动态特性相差不大,考虑微夹持器结构的紧凑性,因此在微夹持器中选择侧端固定的传统型桥式机构作为第一级放大机构。

将优化后的传统桥式机构与杠杆机构组成混合三级放大柔性微夹持器,采用压电陶瓷驱动,PZT 的输出位移经过第一级桥式机构后实现输出位移的放大与输出方向的改变,然后输出给两级杠杆放大机构,最后一级杠杆放大机构结合平行四边形运动,有效地减小微夹持器末端在其他自由度运动中的耦合误差,同时确保运动的精确性。整个微夹持器通过三级位移放大机构实现末端的大工作行程与解耦特性,具体结构设计如图 2 所示。

2 微夹持器特性分析

2.1 伪刚体建模

根据伪刚体模型建模原理,每一个柔性铰链都可以看成一个理想的带扭转弹簧的单轴旋转接头,由于微夹

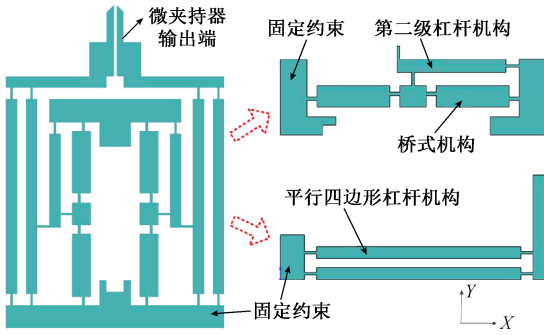


图2 微夹持器机械结构

Fig.2 Mechanical structure of micro gripper

持器结构对称布置,因此在运动学分析过程中一般只选取1/2部分建模分析,可将该微夹持器简化为如图3所示的伪刚体模型,图3中a、b、c、d等代表微夹持器中的柔性铰链,ab、bc、cd等表示模型中的刚性杆件,并对1/2模型进行运动学分析。

在微夹持器中,第一级桥式机构侧端固定,压电陶瓷产生Y向的输入位移和输入力 F_{in} ,产生X向的输出位移与作用力,然后带动两级杠杆机构实现工作位移的放大与低耦合;为了准确分析柔性铰链的变形情况,将每一部分刚性杆件单独受力分析,具体如图4所示。桥式机构为对称结构设计,取1/4部分受力分析,3个柔性铰链的受力分析如图3所示;同理,第二级杠杆机构和第三级平行四边形杠杆机构中刚体部件的受力分析如图4所示。

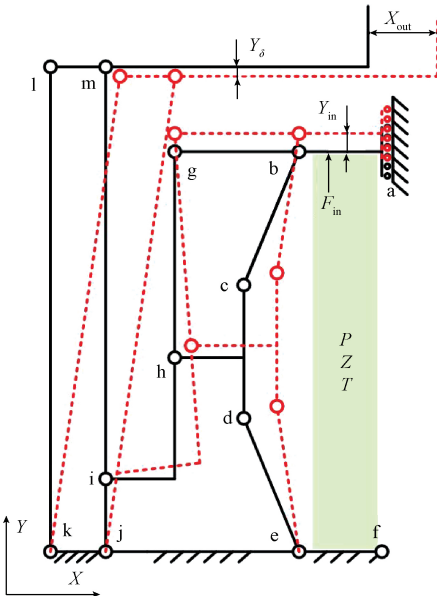


图3 微夹持器运动分析

Fig.3 Kinematics analysis of micro gripper

根据图3所示的微夹持器刚体运动关系可得,当PZT输入一定位移 Δx_{in} 时,不同柔性铰链对应的角度变

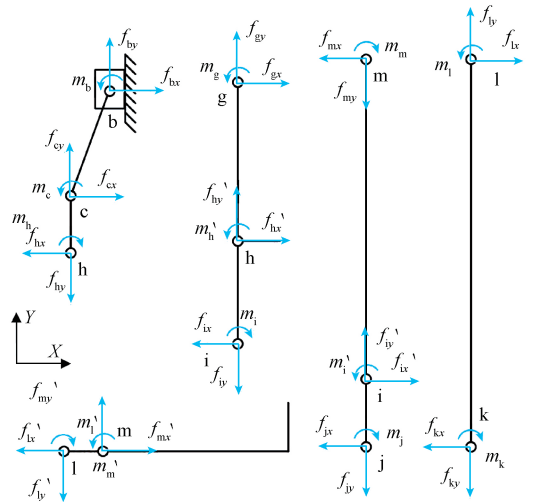


图4 微夹持器受力分析

Fig.4 Force analysis of micro gripper

化可表示为如下关系式。

$$\theta_j = \theta_k = \theta_l = \theta_m = \frac{l_{gi} \cdot \Delta x_{in} \cdot \lambda_b}{l_{gh} \cdot l_{ij}} \quad (1)$$

$$\theta_g = \theta_h = -\frac{\Delta x_{in} \cdot \lambda_b}{l_{gh}} \quad (2)$$

$$\theta_i = \theta_g - \frac{\Delta x_{in} \cdot \lambda_b}{\cot \gamma_i \cdot l} = -\frac{\Delta x_{in} \cdot \lambda_b}{l_{gh}} - \frac{\Delta x_{in} \cdot \lambda_b}{\cot \gamma_i \cdot l} \quad (3)$$

式中: λ_b 为第一级桥式机构的位移放大比; $\cot \gamma_i$ 为两柔性铰链i、j中心形成的夹角,且 $\cot \gamma_i = \frac{2l_{ij}}{l}$;l表示柔性铰链的长度, l_{gi} 、 l_{gh} 、 l_{ij} 分别表示刚性杆件gi、gh、ij的长度;负号表示杆件绕逆时针方向转动,其角度值用负号表示。

根据柔性铰链的转角运动分析,结合图4的受力分析以及柔性铰链的弹性梁理论,可得不同刚性杆件中的直角型柔性铰链在外力作用下的受力变形,即X/Y方向上对应的位移变形,铰链的变形具体如图5所示。

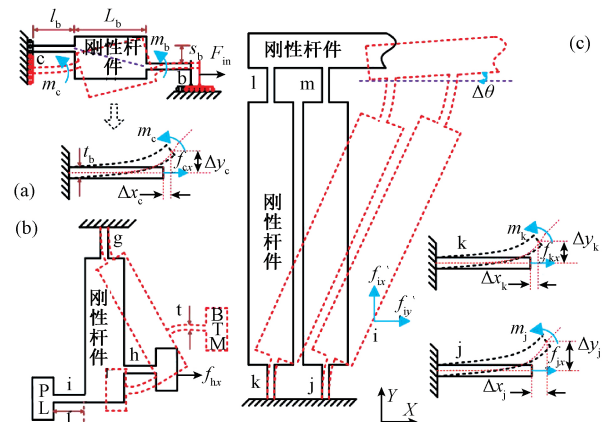


图5 微夹持器受力变形分析

Fig.5 Forced deformation analysis of micro gripper

第一级桥式放大机构 1/4 模型中柔性铰链的受力与变形如图 5(a) 所示,在输入力作用下柔性铰链发生拉伸、弯曲变形;图 5(b) 表示第二级杠杆机构中刚性杆件与柔性铰链的运动与变形;第三级平行四边形杠杆机构中,刚性杆件在力的作用下驱动微夹持器输出端运动,同时输出 X/Y 向位移,铰链 j, k 受力存在微小的差异,导致微夹持器输出端在运动过程中存在 $\Delta\theta$ 的角度误差,如图 5(c) 所示,由于该误差较小,因此在微夹持器的工作位移分析中通常被忽略,即可表示为 $\theta_j = \theta_k = \theta_l = \theta_m$ 。

根据图 5 所示的柔性铰链的受力变形与柔性铰链的变化角度可得不同柔性铰链在 X/Y 方向上的位移模型,因此通过柔性铰链 j, m 的变形量来分析计算微夹持器在 X 轴的工作位移与 Y 轴的耦合位移,柔性铰链 j 的变形量如式(4)所示。

$$\begin{cases} \Delta x_m = \Delta x_j = \frac{f_{jx}}{k_l} = \frac{2\theta_j k_\theta}{l \cdot k_l} \\ \Delta y_m = \Delta y_j = \frac{m_j l}{2k_\theta} = \frac{\theta_j k_\theta \cdot l}{2k_\theta} = \frac{\theta_j l}{2} \end{cases} \quad (4)$$

根据杠杆机构的受力变形可得微夹持器刚性杆件 m_j 在 X/Y 方向的位移量如式(5)所示。

$$\begin{cases} \Delta x_1 = 2\Delta y_j + \sqrt{l_{jm}^2 + s^2} \cdot \theta_j \cdot \cos\theta_j = 2\Delta y_j + l_{jm} \cdot \theta_j \\ \Delta y_1 = 2\Delta x_j + \sqrt{l_{jm}^2 + s^2} \cdot \theta_j \cdot \sin\theta_j = 2\Delta x_j + s \cdot \theta_j \end{cases} \quad (5)$$

在耦合误差的分析建模中,耦合位移变形量较小,需要考虑输出端的角度误差 $\Delta\theta$ 的影响,误差如图 5(c) 所示,根据式(1)~(5)推导可得微夹持器的工作位移与耦合位移误差模型,具体表达式如式(6)所示。

$$\begin{cases} X_{out} = (l_{jm} + l) \cdot \frac{l_{gi} \cdot \Delta x_{in} \cdot \lambda_b}{l_{gh} \cdot l_{ij}} \\ Y_\delta = \left(\frac{4k_\theta}{l \cdot k_l} + s \right) \cdot \frac{l_{gi} \cdot \Delta x_{in} \cdot \lambda_b}{l_{gh} \cdot l_{ij}} \cdot \frac{l'}{l_{lm}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: k_l 与 k_θ 分别是柔性铰链的拉伸刚度与弯曲刚度; l_{lm} 表示平行四边形机构中刚性杆件的长度, l' 表示输出端钳臂的长度。

桥式机构作为第一级位移放大机构,输出端外接两级杠杆机构,杠杆机构的阻碍作用导致桥式机构的输出放大效果衰减。考虑该阻碍因素的作用,根据机构刚度可得实际输出特性,桥式机构与杠杆机构的刚度表达式如式(7)所示。

$$\begin{cases} k_{b-out} = \frac{2k_\theta}{(l_b + L_b)^2} \\ k_l = \frac{5k_\theta}{2l_{mj}^2} \lambda_{23}^2 + \frac{3k_\theta}{2l_{gh}^2} \\ \lambda_{23} = \frac{l_{gi} \cdot (l_{jm} + l)}{l_{gh} \cdot l_{ij}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: k_{b-out} 为第一级桥式机构的输出刚度; k_l 为第二、三级杠杆机构的整体刚度; λ_{23} 为第二、三级杠杆机构的位移放大比。

根据公式(7)中的刚度表达式可得第一级桥式机构的实际位移放大比,代入参考文献[16]中桥式机构的位移放大比公式,可得桥式机构实际工作中的位移放大比模型:

$$\lambda_b = \frac{3k_{b-out}}{(k_{b-out} + k_l)} \cdot \frac{s_b(L_b + l_b)}{l_b^2 + 3s_b^2} \quad (8)$$

将式(8)代入到微夹持器工作位移与耦合误差模型中,可得式(9)。

$$\begin{cases} X_{out} = (l_{jm} + l) \cdot \frac{l_{gi} \cdot \Delta x_{in}}{l_{gh} \cdot l_{ij}} \cdot \frac{3k_{b-out}}{(k_{b-out} + k_l)} \cdot \frac{s_b(L_b + l_b)}{l_b^2 + 3s_b^2} \\ Y_\delta = \left(\frac{l^2}{3l} + s \right) \cdot \frac{l_{gi} \cdot \Delta x_{in}}{l_{gh} \cdot l_{ij}} \cdot \frac{3k_{b-out}}{(k_{b-out} + k_l)} \cdot \frac{s_b(L_b + l_b)}{l_b^2 + 3s_b^2} \cdot \frac{l'}{l_{lm}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: s_b, L_b, l_b, t_b 为桥式机构中柔性铰链的基本结构参数; t, l, s 为第三级平行四边形放大机构中柔性铰链的基本参数。

2.2 动力学建模分析

微夹持器在静力学特性分析中忽略了很多误差因素,柔性铰链的柔性非线性导致难以用静力学伪刚体模型描述系统的实际运动状态,因此根据拉格朗日方程对微夹持器进行动力学分析,讨论微夹持器的动态特性。

压电陶瓷驱动器可以看作一个等效质量为 m_p 、线性刚度为 k_p 的无阻尼质量弹簧系统,柔性铰链在运动过程中无摩擦力,几乎没有阻尼,只考虑铰链的刚度影响,柔性铰链相当于扭转弹簧,将其他部分视为刚体,可以获得如图 6 所示的基于挠曲柔性变形的微夹持器等效动力学模型。

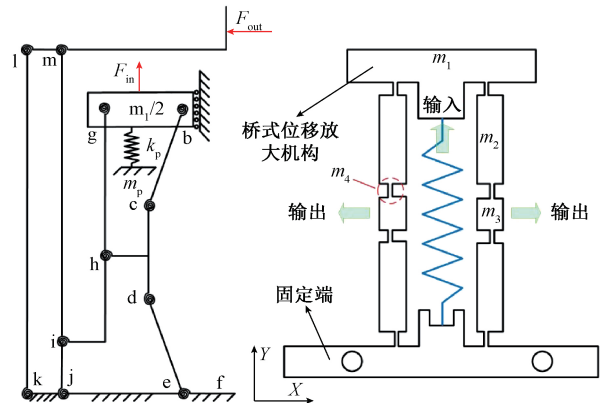


图6 微夹持器动力学模型

Fig.6 Dynamic model of micro gripper

对于该无阻尼的保守力微夹持器动力学系统,根据拉格朗日方程建立微夹持器的动力学模型,拉格朗日方程如式(10)所示。

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right)-\frac{\partial T}{\partial q_i}+\frac{\partial V}{\partial q_i}=F_i, i=1,2,\cdots,n$$

(10)

式中: T 、 V 为微夹持器整体的动能与势能; q_i 为微夹持器系统的广义坐标系; n 为广义坐标系的数量,在微夹持器中一般等同于运动自由度; F_i 为作用于整体系统的外力。

微夹持器仅有一个工作自由度,即输出端的 X 向平移,因此在该柔性微夹持器中只考虑工作自由度的动态特性。

首先分析桥式机构的动力学特性,在无阻尼自由振动的情况下,将拉格朗日方程代入到桥式机构中,桥式机构的 T_b 和 V_b 可分别如下表示。

$$\begin{cases} T_b = \frac{1}{2}m_1(\Delta\dot{x}_{in})^2 + 2 \times \frac{1}{2}m_3(\Delta\dot{y})^2 + 4 \times \\ \frac{1}{2}J(\Delta\dot{\alpha})^2 \\ V_b = 8 \times \frac{1}{2} \times k_{\theta} \cdot \Delta\alpha^2 \end{cases}$$

(11)

式中: Δx_{in} 、 Δy 为桥式机构的输入位移与输出位移; $\Delta\alpha$ 为桥式机构刚性臂的倾斜角度,且 $\Delta\alpha = \Delta y / (L + l)$; J 为桥式机构刚性臂的转动惯量。

根据式(11)可以推导出桥式机构的等效质量 m_b 和等效刚度 k_b 为:

$$\begin{cases} m_b = \frac{m_1}{\lambda_{amp}^2} + 2m_3 + \frac{4J}{(L_b + l_b)^2} \\ k_b = \frac{8k_{\theta}}{(L_b + l_b)^2} \end{cases}$$

(12)

根据拉格朗日方程和桥式机构的等效质量、等效刚度分析微夹持器的动力学特性,即沿 X 向运动的动力学模型,整个系统具体的动能、势能表示如式(13)所示。

$$\begin{cases} T = \frac{1}{2}m_b \cdot \Delta\dot{x}_{in}^2 + \left(J_{gi}\dot{\theta}_{gi}^2 + J_{mj}\dot{\theta}_{mj}^2 + \right. \\ \left. J_{kl}\dot{\theta}_{kl}^2 + \frac{1}{2}m_r\Delta\dot{y}^2\right) \times 2 \\ V = 2 \times \sum_{o=g}^m \frac{1}{2} \times k_r \cdot \theta_o^2 + \frac{1}{2}k_b\Delta x_{in}^2 \end{cases}$$

(13)

式中: J_{gi} 、 J_{mj} 、 J_{kl} 为杆件 gi 、 mj 、 kl 的转动惯量; θ_{gi} 、 θ_{mj} 、 θ_{kl} 为杆件 gi 、 mj 、 kl 的转动角度; m_r 为单个微夹持器钳臂的质量。

在动力学分析中忽略微夹持器输出端的耦合误差,杆件 mj 、 kl 的动能与势能相同,则可得整个系统的等效质量与等效刚度:

$$\begin{cases} m_e = \frac{m_b}{\lambda_{amp}^2} + \frac{4J_{gi} \cdot \lambda_b^2}{l_{gh}^2 \lambda_{amp}^2} + \frac{4(J_{mj} + J_{kl}) \cdot l_{gi}^2 \lambda_b^2}{l_{gh}^2 l_{ij}^2 \lambda_{amp}^2} \\ k_e = \frac{k_b}{\lambda_{amp}^2} + \frac{8k_{\theta} l_{gi}^2 \lambda_b^2}{l_{gh}^2 l_{ij}^2 \lambda_{amp}^2} + \frac{4k_{\theta} \lambda_b^2}{l_{gh}^2 \lambda_{amp}^2} + \frac{k_{\theta} (2l_{ij} \lambda_b + l_{gh} \lambda_b)^2}{2l_{ij}^2 l_{gh}^2 \lambda_{amp}^2} \end{cases}$$

(14)

因此,根据式(14)可以求出整个系统的固有频率,如式(15)所示。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

(15)

微夹持器的固有频率越大越好,同时提高电压驱动器与桥式机构的等效刚度能够有效地提高微夹持器的动态响应并隔离外部振动。

3 有限元仿真 & 实验分析

为了验证第 2 节理论模型的正确性,通过分析软件 ANSYS Workbench 15.0 对柔性微夹持器进行有限元仿真分析验证。有限元仿真中所需要微夹持器的材料参数和几何结构参数在表 2、3 中被全部列出;在有限元分析过程中,为了满足有限元仿真结果的准确性和收敛性,采用微夹持器自适应网格划分同时将仿真结果的收敛性测试设定在 5% 的范围之内。在输出位移仿真分析中,微夹持器底面作为固定面,将 $0-X_{in}$ 的位移负载施加在桥式机构的输入端,可以获得不同输入位移情况下微夹持器输出端在 X/Y 方向上的形变位移,当 PZT 沿 X 轴方向输入端为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 时,微夹持器的有限元仿真结果如图 7 所示,图 7(a)是微夹持器输出端在 Y 方向的工作位移大小,图 7(b)是微夹持器输出端在 X 方向上的耦合误差位移。

表 2 钛合金材料参数

Table 2 Material parameters of TC4

弹性模型 E/GPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	抗拉强度 σ_b/MPa
107.8	0.34	4.51	539

表 3 微夹持器基本结构参数

Table 3 The fundamental parameters of micro gripper

参数	t	s	l	t_b	s_b
数值/mm	0.8	0	4	1	1.5
参数	l_b	l'	L_b	l_{gi}	l_{gh}
数值/mm	3	33	22	34.4	30
参数	l_{ij}	l_{jm}	l_{lm}	—	—
数值/mm	25.6	68	7	—	—

应用 3D 打印技术中的激光熔融烧结成型机(EOS M280)加工微夹持器,材料选择为 TC4 钛合金,材料的基

本参数在表 2 中列出。加工成形的微夹持器通过电火花线切割方法(WEDM)从材料中分离出来,通过慢走丝切割加工确保微夹持器的加工精度。

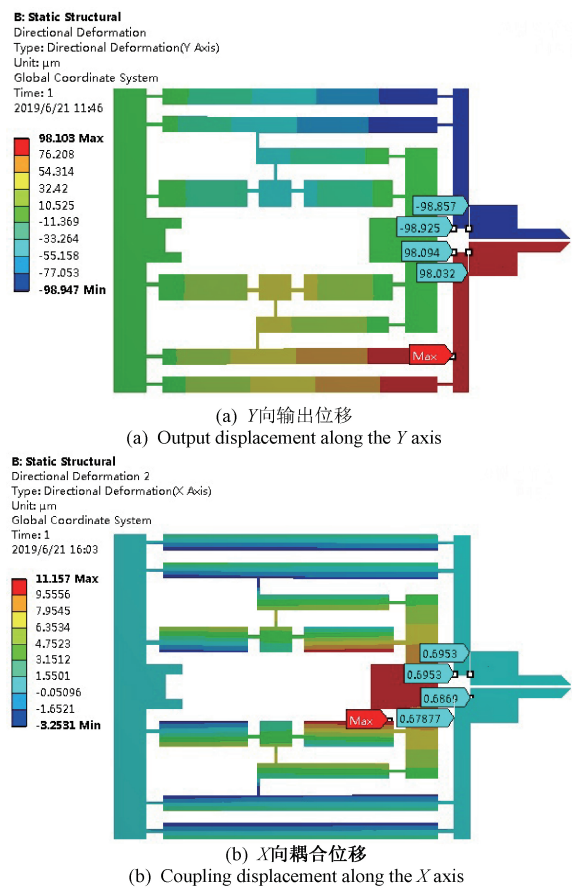


图 7 微夹持器有限元分析

Fig.7 Finite element analysis of micro gripper

在实验系统搭建中,将微夹持器的底端通过固定螺母固定在精密定位平台中,驱动器选择型号为 PSt-40VS15 的压电陶瓷驱动器,该型号 PZT 在驱动电压为 120 V 下最大的输出位移为 38 μm ,PZT 在桥式放大机构中通过螺钉预紧。同时采用电容位移传感器实时检测微夹持器的输出位移,该型号位移传感器(CS5, MICRO-EPSLION, Inc.)测量范围为 5 mm,测量精度能够达到 100 nm。整个微夹持器实验装置如图 8 所示,电容传感器通过磁力基座固定在 X/Y 方向上,分别测量微夹持器输出端的工作位移与耦合误差。

图 8 中紫红色部分为精密定位平台,即微夹持器的固定平台,该定位平台能够固定微夹持器,通过定位平台六自由度的运动实现微夹持器在姿态和位置上的精密定位,是微夹持器外部微调运动中不可或缺的一部分。

微夹持器实验测量中的误差因素较多,外部环境

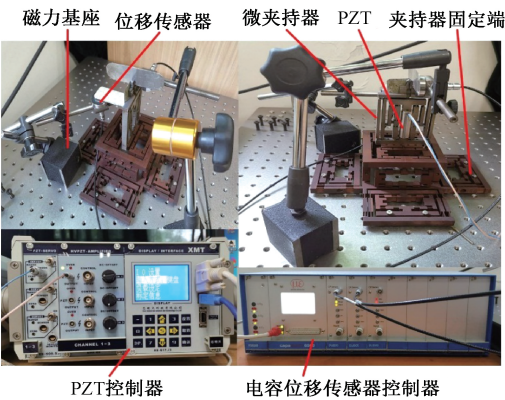
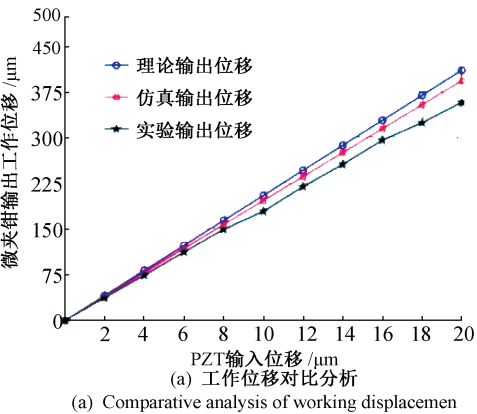


图 8 实验装置安装

Fig.8 Installation diagram of experimental setup

误差因素如振动、噪音等对实验结果影响较大,且该微夹持器由 3D 打印和线切割技术加工制造,存在一定的加工制造误差,导致实验结果误差较大;同时有限元仿真分析考虑了材料的变形与受力,且在收敛性分析仿真中有限元结果精度较高,因此将有限元仿真结果作为数据对比分析的基准值,提高微夹持器的分析精度与可靠性。

综合理论、有限元仿真与实验数据,工作输出位移、耦合误差结果如图 9 所示,微夹持器在 X 向的工作输出位移理论值与有限元仿真值之间误差最大为 4.35%,其余均在 4% 上下浮动,Y 向耦合误差理论值与仿真值误差在 4.17%~4.36% 之间波动,证明了位移放大模型和耦合误差理论模型的正确性;微夹持器在 X 向工作位移理论放大比为 20.55 倍,有限元仿真结果为 19.7 倍,当输入位移为 20 μm 时最大工作位移为 393.91 μm ;微夹持器输入位移确定时,有限元仿真中微夹持器输出端耦合位移最大为 1.376 μm ,耦合误差为工作输出位移的 0.35%,Y 向耦合误差小且理论与仿真数值误差较小,证明了本文中所推导理论模型的计算精度较高,数据误差均保持在 10% 的合理误差范围以内。



(a) Comparative analysis of working displacement

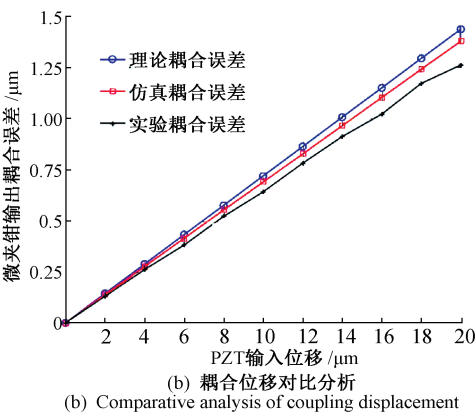


图 9 位移数据对比分析

Fig.9 Comparative analysis of displacement results

在 X 向工作位移输出中,根据实验结果与仿真数据的对比分析可知, X 向工作位移的最大的误差为 9%, Y 向耦合位移误差全部在 5.45%~8.43% 之间上下波动,其误差都在 10% 以内,属于合理误差范围,具体如图 10 所示。

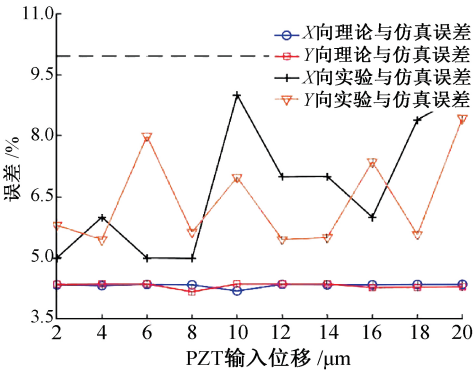


图 10 位移数据误差分析

Fig.10 Error analysis of displacement results

应用 ANSYS 软件分析微夹持器的动态特性,同时对 PZT 驱动器施加一个快速正弦扫频信号,通过 FFT 双通道分析仪分析微夹持器的固有频率响应,微夹持器的模态仿真与实验数据如表 4 所示。

表 4 微夹持器动态特性分析对比

Table 4 Analysis and comparison of dynamic features of micro gripper

	理论值	仿真值	实验值
1 阶/Hz	—	232.01	—
2 阶/Hz	261.6	245.07	223

通过微夹持器的动态响应实验可得微夹持器的固有频率为 223 Hz,其中理论计算值和仿真模态分析值分别为 261.6 和 245.07 Hz,理论值与仿真值、实验值与仿真值之间的误差分别为 6.75% 和 9%,且在合理的误差范围之内,误差主要来源于微夹持器的制造加工误差,线切割慢走丝加工尺寸精度相对较低。

将该微夹持器与参考文献中微夹持器对比分析,分别讨论夹持器的位移放大比、固有频率等特性参数,可得表 5 所示数据。

表 5 微夹持器特性对比

Table 5 Comparison of features of micro gripper

名称	放大比	固有频率/Hz	参考文献
桥式	16.4	157.5	[1]
非对称式	4.16	—	[3]
多级放大	22.2	70	[10]
本文结构	19.7	223	—

根据表 5 所示的不同微夹持器的基本特性参数对比分析可得,在保持大工作行程的基础上,改变微夹持器第一级桥式放大机构的固定位置能够有效提高整体机构的动态特性,相比于参考文献[1]中的微夹持器,位移放大比提高了约 1.2 倍,动态特性提高了约 1.5 倍,证明了新型压电驱动微夹持器的优异特性。

4 结 论

本文提出了一种新型柔性压电驱动微夹持器,从理论仿真、实验 3 个方面对微夹持器进行了分析,根据弹性梁理论和拉格朗日方程建立了输出位移、耦合误差理论模型和动力学模型,通过优化桥式机构的固定位置提高动态特性。理论数据与仿真、实验数据的误差均在 10% 以下波动,最大误差为 X 向工作位移与实验数据的 9% 误差,证明了理论模型的正确性与高精度。微夹持器的工作输出位移放大到达了 19.7 倍,在压电陶瓷型号确定的情况下工作行程能够达到 750 μm ,输出端的耦合误差仅为工作位移的 0.35%,保证了微夹持器的运动精准度,同时微夹持器优化后的固有频率达到了 223 Hz,实现了微夹持器的大工作行程、低耦合和良好动态特性的要求,具有一定的理论和实践价值。

参考文献

[1] 杨依领,傅雷,田埂,等.集成位置/力传感器的桥式压电微夹持器[J]. 机器人, 2015, 37(6): 655-662.

- YANG Y L, FU L, TIAN G, et al. A bridge-type piezoelectric microgripper with integrated positioning/force sensors [J]. *Robot*, 2015, 37(6): 655-662.
- [2] LIN CH, SHEN ZH L, WU ZH H, et al. Kinematic characteristic analysis of a micro-/nano positioning stage based on bridge-type amplifier [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 271: 230-242.
- [3] XING Q S. Design of asymmetric flexible micro-gripper mechanism based on flexure hinges [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, 7(6): 1-8.
- [4] SUN X T, CHEN W H, TIAN Y L, et al. A novel flexure-based microgripper with double amplification mechanisms for micro/nano manipulation [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(8): 085002.
- [5] LIN CH, REN Y H, JI J X, et al. The bond graph method for analysis of the micro-motion characteristics of a micro gripper [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 62(9): 494-502.
- [6] CHEN T, WANG Y Q, YANG ZH, et al. A PZT Actuated Triple-Finger Gripper for Multi-Target Micromanipulation [J]. *Micromachines*, 2017, 8(2), 33.
- [7] 徐方超, 魏恒志, 孙凤, 等. 压电驱动串级菱形位移放大微定位平台的设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(1): 52-61.
- XU F CH, WEI H ZH, SUN F, et al. Design of piezo-driven micro positioning platform with cascaded rhombus displacement magnifying mechanism [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(1): 52-61.
- [8] 杨晓京, 李庭树, 刘浩. 压电超精密定位平台的动态迟滞建模研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(10): 2492-2499.
- YANG X J, LI T SH, LIU H. Dynamic hysteresis modeling of piezoelectric ultra precision stage [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(10): 2492-2499.
- [9] DEMAGHSI H, MIRZAJANI H, GHAVIFEKR H B. A novel electrostatic based microgripper (cellgripper) integrated with contact sensor and equipped with vibrating system to release particles actively [J]. *Microsystem Technologies*, 2014, 20(12): 2191-2202.
- [10] AI W J, XU Q S. New structural design of a compliant gripper based on the Scott-Russell mechanism [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2014, 11: 192.
- [11] XIAO SH L, LI Y M, ZHAO X H. Design and analysis of a novel micro-gripper with completely parallel movement of gripping arms [C]. *IEEE Conference on Industrial Electronics & Applications*. IEEE, 2011: 2127-2132.
- [12] 胡俊峰, 蔡建阳, 郑昌虎. 一种具有力传感的微夹持器设计与标定 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(3): 407-415.
- HU J F, CAI J Y, ZHENG CH H. Design and calibration of a micro-gripper with force sensing [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(3): 407-415.
- [13] 高群, 周鹏骥, 王晓东. 一种非对称式压电驱动微夹持器 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2014, 12(6): 435-440.
- GAO Q, ZHOU P J, WANG X D. An asymmetric micro-gripper actuated by piezoelectric ceramics [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2014, 12(6): 435-440.
- [14] 吕银杰, 朱建军, 梁景然, 等. 四自由度平台条件下的六自由度水声测试技术 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(4): 65-70.
- LYU Y J, ZHU J J, LIANG J R, et al. Six degree of freedom underwater acoustic measurement technology under four degree of freedom platform [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(4): 65-70.
- [15] 宫金良, 贾国朋, 张彦斐. 基于约束置换的双驱动微夹持器刚度分析 [J]. *机械工程学报*, 2018, 54(5): 202-209.
- GONG J L, JIA G P, ZHANG Y F. Rigidity analysis of the double actuations micro-gripper based on constraint substitution [J]. *Journal of Mechanical Engineering*,

2018, 54(5): 202-209.

[16] QI K Q, XIANG Y, FANG CH, et al. Analysis of the displacement amplification ratio of bridge-type mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 87: 45-56.

作者简介



林超(通信作者),分别于1988年、1996年和2002年获得重庆大学机械制造与设备自动化学士学位,机械学硕士学位和机械设计与理论博士学位。现为重庆大学机械设计及理论专业教授,主要研究方向为微纳米传动平台理论。

E-mail: linchao@cqu.edu.cn

Lin Chao (Corresponding author) received his B. Sc. degree in machine manufacturing and equipment automate, M. Sc. degree in mechanics and Ph. D. degree in mechanical design and

theory from Chongqing University in 1988, 1996 and 2002, respectively. He is currently a professor of mechanical design and theory at the Chongqing University. His research interests include micro/nano- transmission stage and the transmission theory.



李坪洋,2017年于中南林业科技大学获得学士学位,现为重庆大学机械工程学院硕士研究生,主要研究方向为智能结构、柔性机构和精密定位控制。

E-mail: 20170713098t@cqu.edu.cn

Li Pingyang received his B. Sc. degree from Central South University of Forestry and Technology in 2017. He is currently pursuing his M. Sc. degree in the department of Mechanical Engineering at Chongqing University. His research interests include smart structures, compliant mechanism and precision positioning control.