

文章编号 1004-924X(2015)05-1372-08

压电微夹钳钳指位移与夹持力的检测

崔玉国*, 朱耀祥, 娄军强, 冯锋义

- (1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;
2. 浙江省零件轧制成型技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为避免在利用压电微夹钳夹持微对象过程中可能造成微对象的损伤或脱落, 提出用电阻应变片来检测压电微夹钳的钳指位移与夹持力。采用柔性杠杆放大机构设计了微夹钳, 该微夹钳结构微小且紧凑、钳指可平动、指尖夹持灵敏度高。基于悬臂梁弯曲变形理论及有限元方法, 分析了用于检测钳指位移与夹持力的微夹钳弹性敏感单元的应变特性。分析结果表明: 敏感单元的最大应变部位靠近其底端, 钳指位移与夹持力同敏感单元的应变成正比; 实验标定了钳指位移与夹持力同弹性敏感单元应变的关系, 标定结果表明两种关系均为线性关系; 最后实验测试了钳指位移与夹持力的大小。结果表明: 在 150 V 的最大电压下, 不夹持微对象时钳指的最大位移为 78.35 μm , 夹持 $\Phi 0.3$ mm、长 8 mm 的微轴时钳指的夹持力为 9.24 μN 。

关键词: 压电微夹钳; 钳指位移; 夹持力; 电阻应变片

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152305.1372

Detection of finger displacement and gripping force of piezoelectric micro-gripper

CUI Yu-guo*, ZHU Yao-xiang, LOU Jun-qiang, FENG Feng-yi

- (1. *The Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;*
2. *Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)*

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

Abstract: To avoid damage or drop of micro objects in the gripping processing by a piezoelectric micro-gripper, the finger displacement and gripping force of the piezoelectric micro-gripper were detected by a resistance strain gauge. A novel gripper was presented by using flexible lever magnifying mechanism. The gripper has advantages of compact structure, integrated gripper body, translational motion of fingers, and the high sensitivity of fingertips. Based on bending theory of cantilever beam and finite element method, the strain characteristics of the elastic sensitive cell of the gripper were analyzed, the conclusion shows that the maximum strain part of the sensitive cell is closed to the bottom of the finger, and the displacement and gripping force of the fingers are proportional to the

收稿日期: 2014-11-21; 修订日期: 2014-12-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51175271); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目; 浙江省高等学校中青年学科带头人学术攀登计划资助项目 (No. Pd2013091)

strain of the elastic sensitive cell. Then, relationships between the finger displacement, gripping force and the strain of the elastic sensitive cell were calibrated by experiments. The calibrating results show that both the two relationships are linear. Finally, the actual finger displacement and gripping force of the gripper were tested, and the tested results show that when a maximal voltage of 150 V is applied to the piezoelectric actuator, the maximal displacement of finger is 78.35 μm in no-load condition, and the gripping force of the fingers is 9.24 μN for holding a micro shaft with $\Phi 0.3$ mm and length of 8 mm.

Key words: piezoelectric micro-gripper; finger displacement; gripping force; resistance strain gauge

1 引言

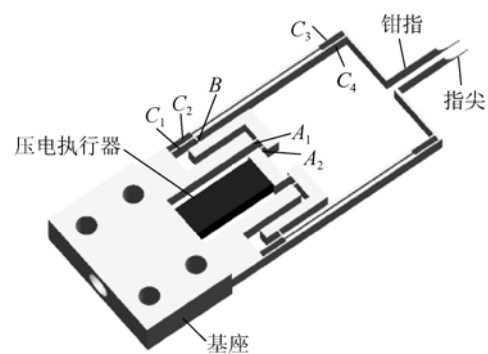
微夹钳是微零件装配及细胞微操作过程中重要的末端执行器^[1-3]。如在 MEMS 领域中,微夹钳可用于将微轴、微齿轮等微零件装配成微部件^[4-5];在生物工程领域,微夹钳可用于抓取细胞,与微探针结合,还可向细胞注入或从细胞中提取某种成分^[6]。为保证微装配和微操作过程的可靠性,在夹持微对象的过程中,往往需要检测钳指位移(指同微对象相接触的指端部分的位移)的大小,以避免钳指同微对象接触时发生碰撞而损伤钳指或微对象;也需要检测钳指夹持力(指同微对象相接触的指端部分对微对象产生的夹持力)的大小,以避免造成微对象的脱落或损伤。关于钳指位移与夹持力的检测,常采用电阻应变片^[7-10]、压电薄膜(PVDF)^[11]、电容传感器^[12]、显微视觉^[13-15]、激光力传感器^[16]、原子显微镜(AFM)^[17]等方式。在这些检测方式中,电阻应变片成本低,结构简单,应用方便,但对粘贴工艺要求较高;PVDF 柔韧性好,动态灵敏度高,但用于静态时需要较好的压电电荷保持技术;电容传感器精度与分辨率高,但对环境要求苛刻,且价格昂贵;显微视觉及激光力检测为非接触测量,且具有高精度与高分辨率,但其结构与调试过程复杂,价格昂贵;AFM 具有极高的精度与分辨率,但其调试过程复杂,价格昂贵。

本文采用柔性杠杆放大机构设计微夹钳,在分析其用作检测钳指位移与夹持力的弹性敏感单元应变特性的基础上,采用电阻应变式传感器来探索钳指位移与夹持力的检测方法。最后实验验证了本文方法的有效性。

2 微夹钳的结构设计及运动原理

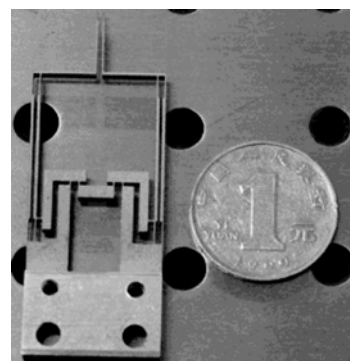
基于钳体一体化、钳指可平动、指尖夹持灵敏

度高以及易于粘贴应变片来检测钳指位移与夹持力的要求来设计微夹钳。钳体一体化可减小装配误差;钳指平动可避免夹持时钳指与微零件之间产生滑动。图 1 所示为微夹钳的结构,钳体由矩形柔性铰链、连杆、钳指、指尖及基座等构成。其中,矩形柔性铰链 A_1 、 A_2 大小相同, C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 大小相同,可被看作能够发生弹性变形的扭转弹簧,钳指也可发生弹性变形,其他部分不发生变形。



(a) 三维模型

(a) Three-dimensional mode



(b) 实物照片

(b) Real photo

图 1 微夹钳结构

Fig. 1 Structure of micro-gripper

微夹钳运动的实现过程如图 2 所示,在驱动

力(来自于压电执行器)的作用下,连杆 $A_1 A_2 B$ 绕铰链 A_2 逆时针转动,使铰链 B 向右移动,带动连杆 $C_1 C_4$ 绕铰链 C_1 顺时针转动。由于连杆 $C_1 C_4$ 、 $C_2 C_3$ 、 $C_1 C_2$ (即基座)、 $C_3 C_4$ 构成平行 4 连杆机构,而连杆 $C_3 C_4$ 与作为基座的连杆 $C_1 C_2$ 平行,所以连杆 $C_3 C_4$ 平动,从而使钳指平动。

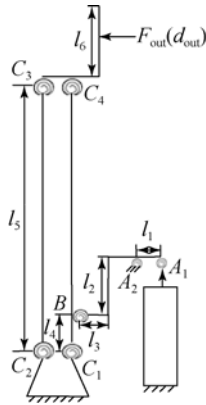


图 2 微夹钳运动原理

Fig. 2 Motion principle of micro-gripper

考虑到 7075 铝合金具有质量轻、弹性及韧性好、强度适中等优点,故采用 7075 铝合金作为微夹钳钳体材料。

3 弹性敏感单元传感特性分析

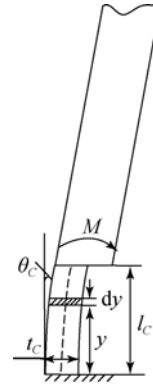
在图 1(a)中,矩形柔性铰链 C_2 、 C_3 在驱动力(来自于压电执行器)的作用下发生弹性变形,而 C_2 受力变形时所产生的应变要远远大于 C_3 ;另外,钳指在夹持微对象时受微对象反作用力也将发生弹性变形。这样,便可将矩形柔性铰链 C_2 与钳指作为弹性敏感单元,并在其上粘贴应变片来分别检测钳指位移与夹持力。

3.1 位移传感特性分析

矩形柔性铰链 C_2 受弯矩 M 作用发生偏转,如图 3(a)所示, C_2 可看作悬臂梁,其变形可看作纯弯曲,取其一段微元 dy 进行分析,如图 3(b)所示,取梁的轴线为 y 轴,横截面的对称轴为 x 轴,中性层为 z 轴,虚线代表弯曲梁的中性层。微段梁的纵向应变跟梁截面上距中性层距离有关,距中性层 x_0 处的纵向应变为:

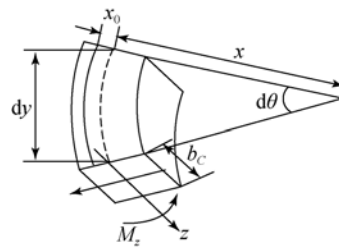
$$\epsilon = \frac{x_0 d\theta}{dy}, \quad (1)$$

式中: $d\theta$ 为取出的微元 dy 的弯曲角度。



(a) 整体变形

(a) Overall deformation



(b) 微段变形

(b) Infinitesimal section deformation

图 3 矩形柔性铰链 C_2 的受力变形

Fig. 3 Deformation of flexure hinge C_2

而中性层的曲率为:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dy} = \frac{M_z}{EI_z}, \quad (2)$$

式中: ρ 为矩形柔性铰链 C_2 弯曲变形时其中性层 x_0 的曲率半径, M_z 、 I_z 分别为矩形柔性铰链 C_2 截面的弯矩、对 z 轴的惯性矩, E 为材料的弹性模量。

则柔性铰链 C_2 表面的应变为:

$$\epsilon = \frac{t_C M_z}{2EI_z}, \quad (3)$$

式中: I_z 、 M_z 分别为:

$$I_z = \frac{b_C t_C^3}{12}, \quad (4)$$

$$M_z = k_C \theta_C, \quad (5)$$

其中: k_C 、 θ_C 分别为:

$$k_C = \frac{Eb_C t_C^3}{12l_C}, \quad (6)$$

$$\theta_c = \frac{d_{out}}{l_5} \quad (7)$$

输出位移(即钳指位移) d_{out} 与柔性铰链 C_2 应变 ϵ 之间的关系为:

$$d_{out} = \frac{2l_c l_5}{t_c} \epsilon \quad (8)$$

可见,钳指在自由状态时,其位移与矩形柔性铰链 C_2 的应变之间呈线性关系。当 ϵ 一定时,增加柔性铰链的长度 l_c ,减小柔性铰链的厚度 t_c ,增大平行 4 连杆机构的长度 l_5 ,可提高钳指的位移输出。

通过 ANSYS 来进一步分析柔性铰链 C_2 的位移传感特性。图 4 所示为采用 ANSYS 分析微夹钳在 $5 \mu\text{m}$ 输入位移作用下未夹持微零件时沿 y 方向产生应变的结果。柔性铰链 C_2 沿 y 轴正方向发生应变,而钳指未发生应变。图 5(a)所示为柔性铰链 C_2 外侧面纵向中线 C_{21}, C_{22} 上的应变有限元分析结果。应变主要发生在柔性铰链 C_2 中段,且基本上呈均匀分布,最大应变为 $126 \mu\epsilon$,中段下端的应变稍大于中段上端,但上、下两端的应变均急剧降低。

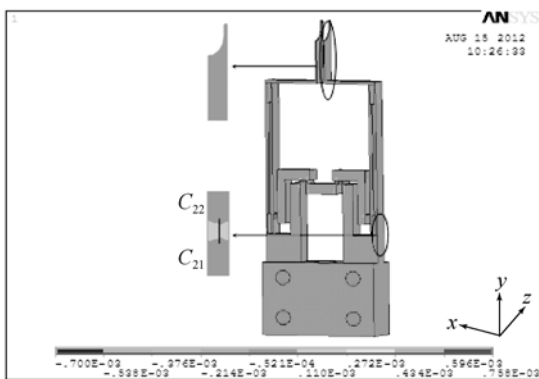
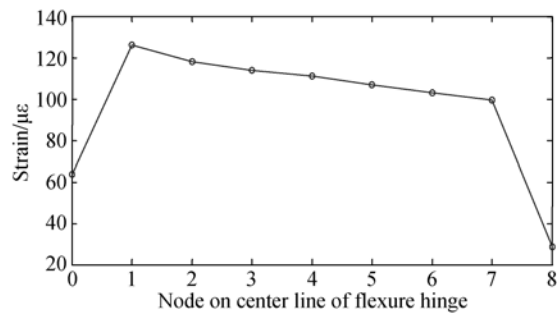


图 4 微夹钳沿 y 方向的应变

Fig. 4 Strain of micro-gripper in y direction

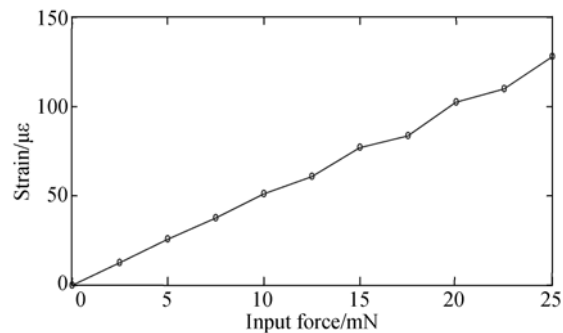
为确定柔性铰链 C_2 的应变同输入力的关系,取柔性铰链 C_2 的最大应变处(即图 5(a)中的节点 1)进行有限元分析。由图 5(b)分析的结果可知,随着微夹钳输入力的增大,最大应变呈线性增大。

为确定柔性铰链 C_2 的应变同钳指位移的关系,同样取柔性铰链 C_2 的最大应变处进行有限元分析。由图 5(c)的分析结果可知,随着钳指位移的增大,柔性铰链 C_2 处的最大应变呈线性增大。



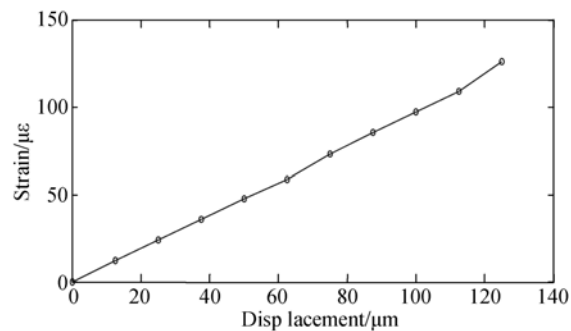
(a) 全部节点的应变

(a) Strain of all nodes



(b) 最大应变同输入力的关系

(b) Relation between maximum strain and input force



(c) 最大应变同钳指位移的关系

(c) Relation between maximum strain and finger displacement

图 5 柔性铰链外侧面纵向中线的应变

Fig. 5 Strain of longitudinal centre line on outer side of flexure hinge

由上述分析结果可知,输入力、柔性铰链 C_2 的应变、钳指位移之前为线性关系,因此可在柔性铰链 C_2 外侧面粘贴应变片来检测钳指位移。

3.2 钳指夹持力传感特性分析

当钳指夹持住微零件后,随着夹持力的增大,钳指发生弯曲变形,钳指夹持住微零件处的位移为 0,钳指按相应的绕曲线变形。为求解方便,将钳指夹持微零件的力学模型简化为钳指下端约束、上端自由的悬臂梁受弯矩 M 作用,如图 6 所

示。同上述推导钳指位移同应变的关系一样,可得输出力(即夹持力) F_{out} 与钳指表面线应变 ϵ 的关系为:

$$F_{out} = \frac{Eb_f}{2l_6} \epsilon, \quad (9)$$

式中 b_f 为钳指厚度。

可见,钳指夹持微零件时,夹持力 F_{out} 与钳指表面线应变 ϵ 呈线性关系。在夹持力 F_{out} 一定的情况下,增大钳指的长度 l_6 ,减小钳指厚度 b_f ,选择弹性模量更小的材料,可增大钳指表面线应变,从而提高检测钳指夹持力的灵敏度。

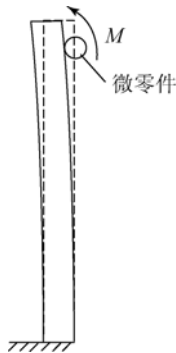


图 6 钳指的受力变形
Fig. 6 Deformation of finger

通过 ANSYS 来进一步分析钳指的夹持力传感特性。图 7 给出了微夹钳在 $5 \mu\text{m}$ 输出位移作用下夹持微轴时的钳指应变。由图 7 可知,钳指沿 y 轴负方向发生应变。图 8(a) 给出了钳指外侧面纵向中线 $M_1 M_2$ 上的应变变化分析结果,可知钳指的应变(绝对值)从钳指上端往下呈线性增大,最大应变发生在接近钳指底端,为 $-123 \mu\epsilon$,接近底端时应变迅速下降。

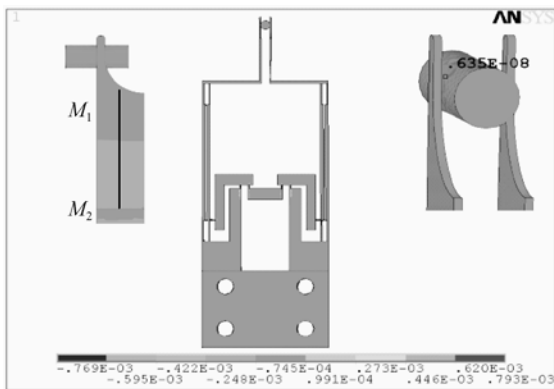
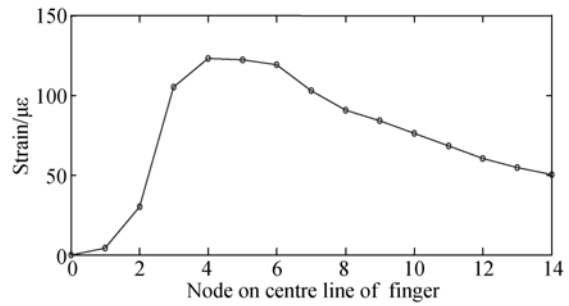


图 7 微夹钳夹持状态下的应变
Fig. 7 Strain of micro-gripper in gripping micro-shaft

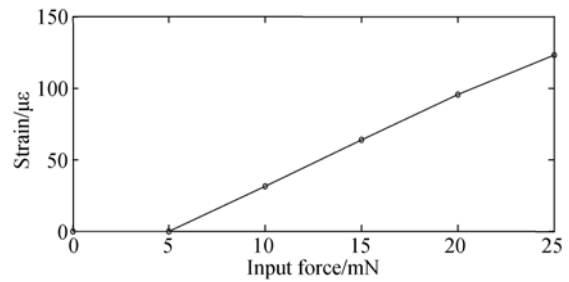
为确定钳指应变与输入力的关系,取钳指最大应变处进行有限元分析,由图 8(b)可知,当微夹钳的输入力增大到 5 mN 时,钳指开始夹持住小轴,之后随着输入力的增大,钳指的最大应变呈线性增大。

为确定钳指应变与夹持力的关系,同样取钳指最大应变处进行有限元分析,由图 8(c)的分析结果可知,随着微夹钳夹持力的增大,最大应变呈线性增大。



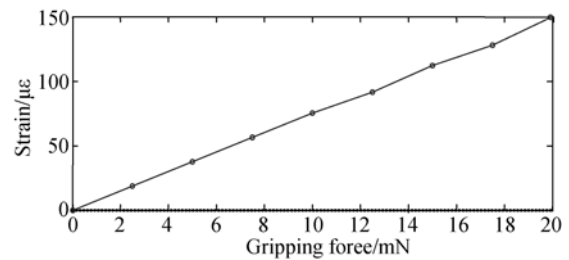
(a) 全部节点的应变

(a) Strain of all nodes



(b) 最大应变同输入力的关系

(b) Relation between the maximum strain and input force



(c) 最大应变同夹持力的关系

(c) Relation between maximum strain and finger displacement

图 8 钳指外侧面纵向中线的应变

Fig. 8 Strain of longitudinal centre line on outer side of finger

由上述分析结果可知,输入力、钳指应变、钳指夹持力之间呈线性关系,因此可在钳指外侧面粘贴应变片来检测钳指夹持力。

4 钳指位移与夹持力测试

4.1 钳指位移与矩形柔性铰链 C₂ 之间关系的标定

图 9 所示为标定压电微夹钳钳指位移与矩形柔性铰链 C₂ 应变之间关系的实验系统,由压电执行器驱动电源、压电微夹钳、电涡流位移传感器、万用表、金属电阻应变片和动态电阻应变仪等构成。压电执行器驱动电源输出电压给压电执行器,微夹钳发生变形而使钳指输出位移,该位移由电涡流位移传感器感知并通过万用表读取,同时,矩形柔性铰链 C₂ 处的应变由应变片感知并经动态电阻应变仪传输到计算机。

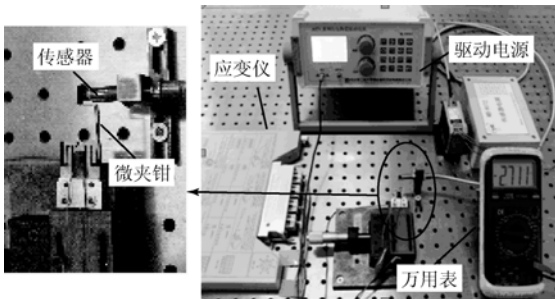


图 9 标定钳指位移与矩形柔性铰链应变之间关系的实验系统

Fig. 9 Experimental system for calibrating relation between finger displacement and strain of rectangular flexible hinge

图 10 所示为钳指位移与柔性铰链 C₂ 应变之间关系的 10 次升回程实测平均值及拟合值。钳指位移与矩形柔性铰链 C₂ 的应变之间成线性关系,为 0.766 7 μm/με。

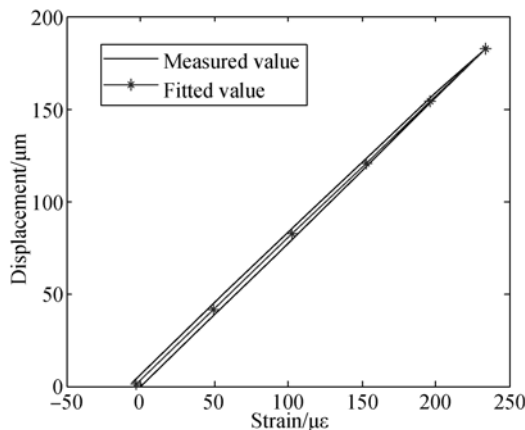


图 10 钳指位移与矩形柔性铰链应变之间的关系

Fig. 10 Relation between finger displacement and strain of rectangular flexible hinge

4.2 钳指位移的测试

在不夹持微对象时,给压电执行器施加 0~150~0 V 的三角波驱动电压(本文中压电执行器所能承受的最高驱动电压为 150 V),测量结果如图 11 所示,左、右两钳指的最大位移分别为 78.35 μm 和 59.23 μm。右钳指的位移之所以小于左钳指,是由于位于右侧矩形柔性铰链 C₂ 处的应变片粘贴得过于靠近 C₂ 下端,而由上述分析结果可知,C₂ 中段的应变较大,而中段上、下两端的应变则迅速减小。

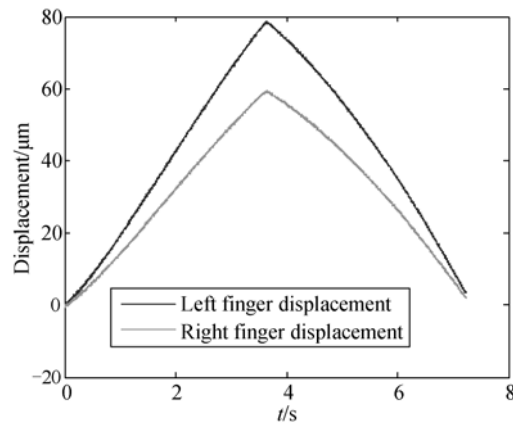


图 11 不夹持微对象下钳指的位移与夹持力

Fig. 11 Displacement and gripping force of finger without gripping micro-part

4.3 钳指夹持力与钳指应变关系的标定

图 12 所示为标定压电微夹钳钳指夹持力与钳指应变之间关系的实验系统,由手动平移台、驱动电源、压电执行器、微夹钳、应变片和动态电阻应变仪、电子天平等构成。首先通过手动平移台调节微夹钳,使钳指同微量电子天平的载物台表面接触,并给微量电子天平的输出置零,接着通过驱动电源给压电执行器施加电压,使微夹钳发生变形,该变形转化为钳指夹持力,力由微量电子天平测得,同时,钳指发生的应变由应变片及应变仪测得。

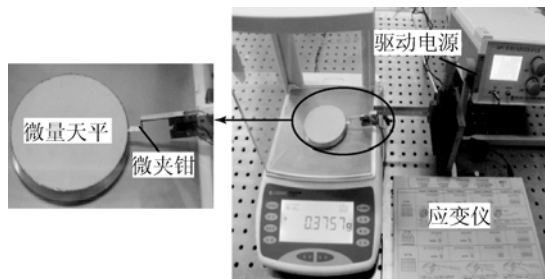


图 12 标定钳指夹持力与钳指应变之间关系的实验系统

Fig. 12 Experimental system for calibrating relation between gripping force and strain of finger

图 13 所示为钳指夹持力与钳指应变之间关系的 10 次升回程实测平均值及拟合值。钳指夹持力与钳指应变之间呈线性关系,二者之间的关系为 $-0.1229 \text{ mN}/\mu\epsilon$ 。

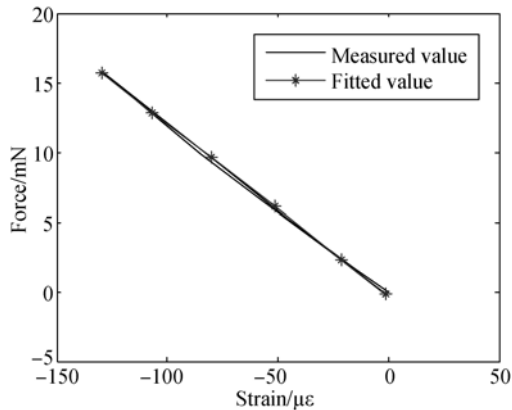


图 13 钳指夹持力与钳指应变之间的关系

Fig. 13 Relation between gripping force and strain of finger

4.4 钳指夹持力的测试

给压电执行器施加 $0 \sim 150 \sim 0 \text{ V}$ 的三角波驱动电压,使微夹钳夹持 $\Phi 0.3 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的微轴,测量结果如图 14 所示,矩形柔性铰链 C_2 发生正应变,钳指发生负应变,进一步验证了上述有限元分析的正确性;钳指同微轴接触后钳指位移继续增大,是因为柔性铰链 C_2 仍继续发生应变。

由图 14 还可以看出,左、右钳指的最大夹持力分别为 8.02 mN 和 9.24 mN ,左钳指的夹持力小于右钳指,其原因是由于左钳指处的应变片粘贴得过于靠近钳指的底端,而由有限元分析结果可知,钳指底端所发生的应变很小;夹持力在最初 0.86 s 以及最后 0.65 s 的时间段内为 0,这是由于钳指还未同微轴接触(最初 0.86 s 内)以及已同微轴脱离(最后 0.65 s 内),钳指无变形,粘贴

于其上的应变片无输出。

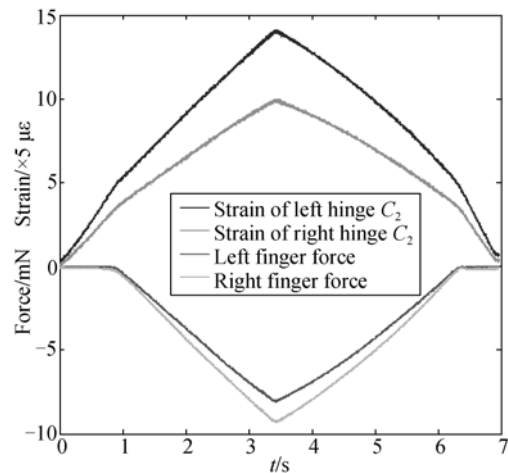


图 14 夹持状态下钳指的位移与夹持力

Fig. 14 Displacement and gripping force of finger with gripping micro-part

5 结 论

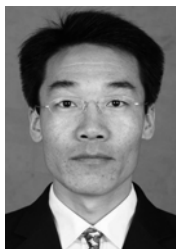
本文基于柔性杠杆放大机构设计了一种压电微夹钳,所设计的微夹钳结构紧凑、钳体一体化、钳指可平动、指尖夹持灵敏度高。分析了用于检测钳指位移与夹持力的弹性敏感单元的传感特性,理论和有限元分析结果表明:敏感单元的最大应变部位靠近其低端,钳指位移与夹持力同弹性敏感单元的应变成正比。采用金属电阻应变片测试了钳指位移与夹持力的大小,实验结果表明:在 150 V 的最大电压下,不夹持微对象时钳指的最大位移为 $78.35 \mu\text{m}$,夹持 $\Phi 0.3 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的微轴时钳指的夹持力为 $9.24 \mu\text{N}$ 。本文结果为压电微夹钳钳指位移与夹持力的检测提供了有益参考。

参考文献:

- [1] VOLLAND B E, HEERLEIN H, RANGELOW I W. Electrostatically driven microgripper [J]. *Microelectronic Engineering*, 2002, 61-62: 1015-1023.
- [2] 陈立国, 刘柏旭. 复合式 MEMS 微夹持器的研制 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8): 1928-1934. CHEN L G, LIU B X. Development of hybrid-type MEMS microgripper [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17 (8): 1928-1934 (in Chinese)
- [3] ALOGLA A, SCANLAN P, SHU W M, REUBEN R L. A scalable syringe-actuated microgripper for biological manipulation [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 10(202): 135-139.
- [4] 李路明, 任延同, 王立鼎. 微夹钳技术发展现状及应用研究 [J]. *光学精密工程*, 1997, 5(4): 8-13. LI L M, REN Y T, WANG L D. Development of

- microgripper technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5 (4): 8-13. (in Chinese)
- [5] 张培玉, 武国英, 郝一龙, 等. 微夹钳研究的进展与展望[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(3): 292-296. ZHANG P Y, WU G Y, HAO Y L, *et al.*. The progress and prospect of micro-gripper researching [J]. *Opt. Precision Eng.* 2000, 8(3):292-296. (in Chinese)
- [6] 王晓东, 刘冲, 王立鼎. 微型夹钳的最新研究[J]. *功能材料与器件学报*, 2004, 10 (11): 1-8. WANG X D, LIU CH, WANG L D. New aspects in microgrippers [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2004, 10 (11): 1-8. (in Chinese)
- [7] FAHLBUSCH S, FATIKOW S. Micro force sensing in a micro robotic system [J]. *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2001, 4: 3435-3440.
- [8] 吕退东, 黄心汉, 蔡建华. 具备多操作手协调的微装配机器人系统[J]. *华中科技大学学报:自然科学版*, 2006, 34(11): 70-73. LÜ X D, HUANG X H, CAI J H. A microassembly robot system with multi-manipulation or cooperation [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition*, 2006, 34(11): 70-73. (in Chinese)
- [9] 王家畴, 荣伟彬, 孙立宁, 等. 新型集成三维微力检测微夹持器[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4): 550-556. WANG J CH, RONG W B, SUN L N, *et al.*. A novel micro-gripper integrating micro tri-axial force sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (4): 550-556. (in Chinese)
- [10] 余大海, 吴文荣, 罗敏, 等. 适用于ICF靶夹持的多用微夹持器[J]. *强激光与粒子束*, 2012(1): 115-118. YU D H, WU W R, LUO M, *et al.*. Multi-purpose microgripper for ICF targets [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012(1): 115-118. (in Chinese)
- [11] KIM D H, KIM B, KANG H. Development of a piezoelectric polymer-based sensorized microgripper for microassembly and micromanipulation [J]. *Microsystem Technologies*, 2004, 10: 275-280.
- [12] SUN Y, WAN K T, ROBERTS K P. Mechanical property characterization of mouse zona pellucida [J]. *IEEE Transactions on Nanobioscience*, 2003, 2(4): 279-286.
- [13] 张然, 褚金奎, 王海祥. 具有三层结构的SU-8胶V形微电热驱动器[J]. *光学精密工程*, 2012, 20 (7): 1500-1508. ZHANG R, ZHU J K, WANG H Y. SU-8 chevron electrothermal micro-actuator with three-layer structures [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20 (7): 1500-1508. (in Chinese)
- [14] 郝永平, 董福祿, 张嘉易. 基于MEMS机构装配的微夹持器研究[J]. *中国机械工程*, 2014, 25 (5): 596-601. HAO Y P, DONG F L, ZHANG J Y. Study on micro-gripper based on MEMS mechanism assembly [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25 (5): 596-601. (in Chinese)
- [15] 包丽雅, 周炯. 用于微装配的二级放大微夹持器的设计与实验[J]. *机械设计与研究*, 2014, 30 (1): 47-49. BAO L Y, ZHOU X. Design of micro-gripper with two-stage amplifier for micro-assembly and its experimental research [J]. *Machine Design & Research*, 2014, 30(1): 47-49. (in Chinese)
- [16] MOKRANE B, MARCELO G F, YANN L G, *et al.*. An output feedback LPV control strategy of a nonlinear electrostatic microgripper through a singular implicit modeling [J]. *Control Engineering Practice*, 2014, 28: 97-111.
- [17] NELSON B J, ZHOU Y, VIKRAMADITYA B. Sensor-based microassembly of hybrid MEMS devices [J]. *IEEE Communications Magazine*, 1998, 18: 35-45.

作者简介:



崔玉国(1971—),男,吉林农安人,教授,博士生导师,1999年于吉林工业大学(现吉林大学)获得硕士学位,2004年于大连理工大学获得博士学位,主要从事微/纳米定位技术、精密测试技术方面的研究。E-mail: cuiyuguo@nbu.edu.cn



朱耀祥(1985—),男,河南尉氏人,硕士研究生,主要从事微/纳米定位技术研究。E-mail: zhuyaoxiang@163.com