

文章编号 1004-924X(2015)07-1996-09

## 压电自感知微夹钳

崔玉国\*, 郑军辉, 马剑强, 蔡成波

- (1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;
2. 宁波大学 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:** 研制了不需要外部附加微位移与微力传感器、采用自感知方法来获取压电微夹钳的钳指位移与夹持力的压电自感知微夹钳。根据压电陶瓷晶片在驱动电压与外力作用下发生变形会在其表面产生电荷的思想, 提出了基于积分电荷的钳指位移与夹持力的自感知方法; 基于 Jan G. Smits 的压电悬臂梁弯曲变形理论, 给出了钳指位移与夹持力的自感知表达式, 即用钳指上压电陶瓷晶片表面的电荷来表达钳指位移与夹持力。设计了获取晶片表面电荷的积分电路, 给出了其平衡条件为晶片电容与其绝缘电阻之积同积分电容与反馈电阻之积相等。自感知验证实验结果表明: 修正后在  $31.59 \mu\text{m}$  最大钳指位移范围内的自感知位移最大偏差为  $0.78 \mu\text{m}$ ; 在  $35.91 \text{ mN}$  最大钳指夹持力范围内的自感知夹持力的最大偏差为  $0.24 \text{ mN}$ 。实验结果验证了所提自感知方法是有效的。

**关键词:** 压电微夹钳; 钳指位移; 夹持力; 自感知; 积分电荷

**中图分类号:** TN384; TH703.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152307.1996

## Self-sensing piezoelectric micro-gripper

CUI Yu-guo\*, ZHENG Jun-hui, MA Jian-qiang, CAI Cheng-bo

- (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:** A self-sensing method was utilized to acquire the finger displacement and gripping force of a piezoelectric micro-gripper without micro-displacement and micro-force sensors. As the surface of piezoelectric ceramic wafer will generate free charges when it deforms under the external voltage and external force, a self-sensing method based on integral charges was proposed for sensing the finger displacement and gripping force. According to Jan G. Smits's piezoelectric cantilever bending deformation theory, the self-sensing formulas of the finger displacement and gripping force were derived, namely, the free charges on the surface of the piezoelectric ceramic wafer were used to represent the finger displacement and gripping force. Then an integral circuit was designed to acquire the surface free charges. The balance condition of self-sensing circuit was derived, which was that the product of

**收稿日期:** 2014-11-14; **修订日期:** 2015-01-04.

**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)

the equivalent capacitance and leakage resistance of the piezoelectric crystals should be equal to that of the integrating capacitor and balancing resistor. Self-sensing experimental results indicate that the maximum error of modified self-sensing displacement is  $0.78 \mu\text{m}$  for the finger displacement of  $31.59 \mu\text{m}$ . The maximum error of modified self-sensing gripping force is  $0.24 \text{ mN}$  for the gripping force of  $35.91 \text{ mN}$ . Those experimental results show that the proposed self-sensing method is effective to detect the finger displacement and the gripping force.

**Key words:** piezoelectric micro-gripper; finger displacement; gripping force; self-sensing; integral charge

## 1 序 言

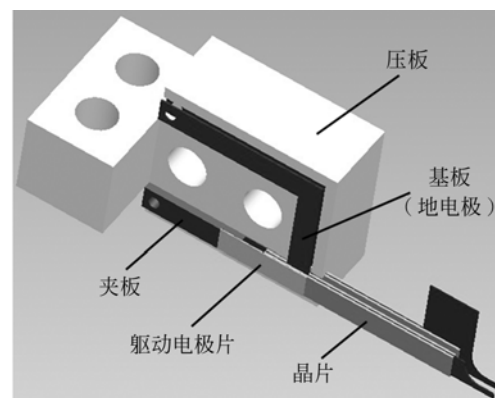
随着微/纳米技术的发展,微机电系统(Micro-electro-mechanical System, MEMS)和生物工程等领域的研究对象正朝着微细化方向发展。微夹钳作为 MEMS 中微零件装配与生物工程中细胞微操作过程的末端执行器,对微装配与微操作任务的实现起到至关重要的作用<sup>[1]</sup>。压电微夹钳具有结构紧凑、位移精度高、结构刚度大、响应速度快、可微小化、成本低等优点,在 MEMS 和生物工程中的应用尤为广泛<sup>[2]</sup>。

微夹钳在工作过程中,需要感知钳指的位移,以避免钳指同夹持对象接触时造成碰撞;也需要感知夹持力的大小,以避免夹持力太小造成夹持对象脱落,或夹持力太大造成微夹钳或夹持对象损坏<sup>[3]</sup>。目前,检测钳指位移与夹持力通常采用外部传感器,如应变式<sup>[4-6]</sup>、电容式<sup>[7-8]</sup>、压电式<sup>[9-10]</sup>、激光力式<sup>[11]</sup>、原子力(AFM)式<sup>[12-13]</sup>等传感器。这些微位移与微力传感器往往价格比较昂贵,致使微装配与微操作系统的成本很高,如 MEMS 中微装配的成本占 MEMS 产品成本的  $60\% \sim 80\%$ <sup>[1]</sup>。另外,在某些微装配与微操作系统中,受空间限制,往往无法安装传感器,从而增加了系统的设计难度。由此可见,研制不需要外部传感器而是通过材料本身特性来感知钳指位移与夹持力的微夹钳,即自感知微夹钳,对于促进微装配与微操作系统的集成化与微型化、减小系统的重量与体积、降低系统的设计难度与成本、推进 MEMS 与生物工程技术的发展具有重要意义。

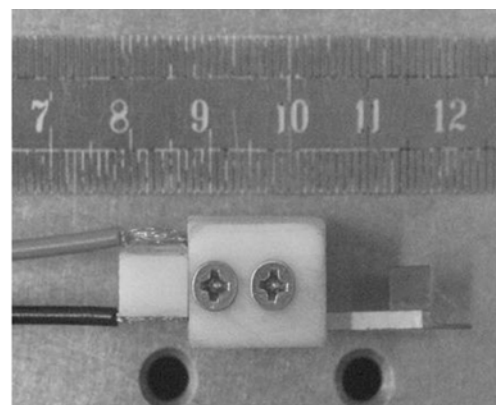
本文采用压电双晶片结构来设计微夹钳,基于积分电荷方法来探索钳指位移与夹持力的自感知,从而省掉了外部微位移与微力传感器。

## 2 微夹钳结构设计及工作原理

本文设计的压电微夹钳由两钳指、夹板、驱动电极片、压板构成。钳指为压电双晶片结构,即在每个钳指基板的两侧粘贴压电陶瓷晶片,如图 1



(a) 结构示意图  
(a) Structure schematic



(b) 实物照片  
(b) Photo

图 1 微夹钳

Fig. 1 Micro-gripper

所示。采用双晶片是为了增大钳指的输出。压电陶瓷晶片材料为 PZT5。基板材料为黄铜，它同时作为地电极，其前端设计成细长形，可提高夹持灵敏度，便于夹持微对象；而其后端设计成折角形，可使电极线的布置更加整齐，其中一侧钳指基板末端突出的约为  $5 \times 5 \text{ mm}$  的正方形部分，用来作电涡流位移传感器的测量面(该传感器仅用来验证自感知钳指位移的正确性)。夹板材料为 45 号钢，它用来保证两钳指的初始间隙，同时用作驱动电极。压板材料为聚四氟乙烯，它用来封闭、安装、固定微夹钳。整个微夹钳结构紧凑，其整体尺寸为  $35 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。

微夹钳的工作原理如图 2 所示。给钳指施加图中所示的驱动电压，当作用于上侧晶片的电场  $E$  方向与晶片电极化强度  $P$  方向相反时，晶片伸

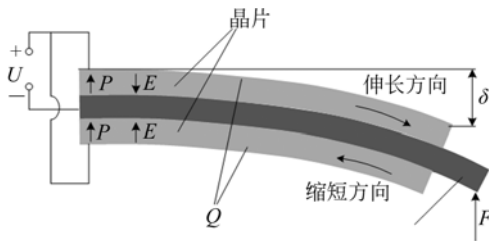


图 2 微夹钳工作原理图

Fig. 2 Principle schematic of micro-gripper

长;作用于下侧晶片电场  $E$  方向与晶片电极化强度  $P$  方向相同时，晶片缩短，于是使整个钳指向下偏转;另一个钳指极化方向与图中所示相反，当施加相同的驱动电压时，钳指便向上偏转，从而实现夹持操作。

### 3 钳指位移与夹持力的自感知原理

由电解质物理学可知，作为电解质材料的压电陶瓷晶片在驱动电压  $U$  与外力(因夹持力与外力大小相等、方向相反，故本文所说的夹持力即外力)  $F$  作用下发生变形(该变形对应一定的钳指位移  $\delta$ )的实质是发生电极化，而极化会在晶片表面产生电荷  $Q$ ，如图 2 所示。这表明电荷  $Q$  中包含了钳指位移  $\delta$  与夹持力  $F$  的信息。如果能够确定  $\delta, F, U, Q$  之间的关系，其中驱动电压  $U$  为已知，那么再设法获得  $Q$  并用它来表达  $\delta, F$ ，便可无需外部微位移与微力传感器，从而实现钳指位移与夹持力的自感知。

$\delta, F, U, Q$  之间的关系可由 Jan G. Smits 的压电单晶片悬臂梁弯曲理论<sup>[14]</sup>求得。这里将黄铜基板与一片压电陶瓷晶片视作一个整体，并等效为 Jan G. Smits 压电单晶片中的硅基板<sup>[15]</sup>，于是由压电单晶片悬臂梁弯曲理论可得：

$$\begin{bmatrix} \delta \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2Al_p^2(3l_c - l_p) + 6Al_p(l_c - l_p)(2l_c - l_p)}{K\omega} + \frac{4s_{11}^p(l_c - l_p)^3}{\omega h_c^3} & -\frac{6d_{31}ABl_p(2l_c - l_p)}{K} \\ -\frac{6d_{31}ABl_p(2l_c - l_p)}{K} & \frac{2l_p\omega}{t_p} \left( \epsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2 h_{cp}(s_{11}^p h_p^3 + s_{11}^c h_{cp}^3)}{K} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ U \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中：

$$A = s_{11}^p s_{11}^c (s_{11}^p h_{cp} + s_{11}^c h_p);$$

$$B = \frac{h_{cp}(h_{cp} + h_p)}{s_{11}^p h_{cp} + s_{11}^c h_p};$$

$$h_{cp} = h_c + h_p;$$

$$K = (s_{11}^p)^2 (h_p)^4 + 4s_{11}^p s_{11}^c h_{cp} (h_p)^3 + 6s_{11}^p s_{11}^c \times (h_{cp})^2 (h_p)^2 + 4s_{11}^p s_{11}^c h_p (h_{cp})^3 + (s_{11}^c)^2 (h_{cp})^4;$$

$$s_{11}^{cp} = \frac{s_{11}^p s_{11}^c (s_{11}^p h_c + s_{11}^c h_p) (h_c + h_p)^3}{k};$$

$$k = (s_{11}^c)^2 (h_p)^4 + 4s_{11}^p s_{11}^c h_c (h_p)^3 + 6s_{11}^p s_{11}^c (h_c)^2 \times (h_p)^2 + 4s_{11}^p s_{11}^c h_p (h_c)^3 + (s_{11}^p)^2 (h_c)^4;$$

$d_{31}$ ， $\epsilon_{33}^T$  分别为压电晶片的压电常数与介电常数； $l_p$ ， $l_c$  分别为压电陶瓷晶片与黄铜基板的长度， $\omega$

为钳指的宽度； $h_p$ ， $h_c$  分别为压电陶瓷晶片与黄铜基板的厚度； $s_{11}^p$ ， $s_{11}^c$  分别为压电陶瓷晶片与黄铜基板的弹性柔顺系数； $h_{cp}$ ， $s_{11}^{cp}$  分别为黄铜基板与压电陶瓷晶片作为一个整体后的总厚度与平均弹性柔顺系数。钳指各部分的几何尺寸、压电陶瓷晶片及黄铜基板的相应参数分别如表 1、表 2 所示。

表 1 钳指各部分的几何尺寸

Tab. 1 Geometric sizes of each part in finger

(mm)				
$l_p$	$l_c$	$h_p$	$h_c$	$\omega$
17.5	17.5	0.2	0.15	2

表2 晶片与基板的参数

Tab.2 Parameters of wafer and substrate

$s_{11} / (\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	$s_{11} / (\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	$d_{31} / (\text{m} \cdot \text{V}^{-1})$	$\epsilon_{33}^T$
$1.65 \times 10^{-11}$	$0.926 \times 10^{-11}$	$-1.37 \times 10^{-10}$	850

为方便推导,将式(1)改写成如下形式:

$$\begin{bmatrix} \delta \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ U \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:等式右端  $2 \times 2$  矩阵各元素与式(1)中等式右端  $2 \times 2$  矩阵一一对应。根据表1、表2中的参数可得: $a_{11} = 9.2911 \times 10^{-4}$ ,  $a_{12} = a_{21} = 5.0614 \times 10^{-7}$ ,  $a_{22} = 2.2555 \times 10^{-8}$ 。然后根据式(2)来推导用电荷  $Q$  表达的钳指位移  $\delta$  与夹持力  $F$  的自感知表达式。

当钳指不夹持微对象(这时  $F=0$ )而仅受驱动电压  $U$  作用时,由式(2)可得钳指位移  $\delta$ 、晶片表面电荷  $Q$  与驱动电压  $U$  之间的关系分别为:

$$\delta = a_{12}U, \quad (3)$$

$$Q = a_{22}U. \quad (4)$$

进一步可得钳指位移  $\delta$  与晶片表面电荷  $Q$  之间的关系为:

$$\delta = \frac{a_{12}}{a_{22}}Q. \quad (5)$$

这便是钳指不夹持微对象时钳指位移的自感知表达式。

当钳指在驱动电压  $U$  作用下夹持微对象且微对象沿钳口方向的尺寸与两钳指间的初始间隙正好相等时,钳指位移全部转化为夹持力,即  $\delta=0$ ,于是由式(2)可得夹持力  $F$ 、晶片表面电荷  $Q'$  与驱动电压  $U$  之间的关系为:

$$F = -\frac{a_{12}}{a_{11}}U, \quad (6)$$

$$Q' = (a_{22} - \frac{a_{12}a_{21}}{a_{11}})U, \quad (7)$$

式(7)中  $a_{12}a_{21}/a_{11}$  仅为  $a_{22}$  的 1.22%,这表明在同一驱动电压作用下钳指不夹持微对象时的晶片表面电荷  $Q$  与钳指夹持微对象时的晶片表面电荷  $Q'$  几乎相等,于是用  $Q$  代替  $Q'$ ,进而由式(6)、式(7)可得:

$$F = \frac{a_{12}}{a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22}}Q. \quad (8)$$

这便是钳指位移全部转化为夹持力(即  $\delta=0$ )时夹持力的自感知表达式。

当钳指在驱动电压  $U$  作用下夹持微对象且

微对象沿钳口方向的尺寸小于两钳指间的初始间隙时,设两钳指与微对象之间的间隙均为  $\delta_0$ ,这时钳指先输出位移  $\delta_0$  并保持  $\delta_0$  不变,然后将其余位移转化为夹持力  $F$ 。由式(2)可得:

$$\delta = a_{11}F + a_{12}U, \quad (9)$$

$$Q = a_{21}F + a_{22}U. \quad (10)$$

而由式(9)可得:

$$U = \frac{\delta - a_{11}F}{a_{12}}. \quad (11)$$

将式(11)代入式(10),整理后可得:

$$Q = \frac{a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22}}{a_{12}}F + \frac{a_{22}}{a_{12}}\delta. \quad (12)$$

由式(12)可知,在驱动电压作用下钳指产生变形,使其与微对象之间的间隙为零,此时  $\delta=\delta_0$ ,由式(5)可得:

$$\delta_0 = \frac{a_{12}}{a_{22}}Q_0, \quad (13)$$

式中  $Q_0$  为  $\delta_0$  所对应的电荷。

将式(12)中的  $\delta$  用式(13)的  $\delta_0$  来表达,可得:

$$F = \frac{a_{12}}{a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22}}(Q - Q_0). \quad (14)$$

这便是钳指位移未全部转化为夹持力(即  $\delta=\delta_0$ )时夹持力的自感知表达式。比较式(14)和式(8)可知,式(8)是式(14)在  $Q_0=0$  时的特例。

#### 4 钳指位移与夹持力自感知的实现

由式(5)、式(8)和式(14)可知,只要获得压电陶瓷晶片表面的电荷  $Q$ ,便可实现钳指位移与夹持力的自感知。而晶片表面电荷  $Q$  可通过对流过压电陶瓷晶片中的电流进行积分来获得,如图3所示。在图3中,虚线所框部分  $C_p, R_p$  分别为晶片的电容与绝缘电阻;  $A$  为高阻抗放大器;  $C, R$  分别为精密电容与精密可变电阻,用于积分与反馈;  $C_b, R_b$  分别为平衡电容与平衡电阻,  $A, C, R, C_b, R_b$  构成积分电路,以获取晶片上的电荷。  $K$  为手动开关,  $R_k$  为限流电阻,二者构成放电回路,用来对电容  $C$  进行放电,以保证每次积分前  $C$  上的电荷为零。  $u_0$  为作用于晶片上的驱动电压,  $i_p, i_c, i_r$  分别为通过晶片、电容  $C$ 、电阻  $R$  的电流,  $u_0$  为高阻抗放大器  $A$  的输出。

在图3中,高阻抗放大器  $A$  的输出  $u_0$  为:

$$u_0 = -\frac{1}{C} \int i_c dt = -\frac{1}{C} \int (i_p - i_r) dt. \quad (15)$$

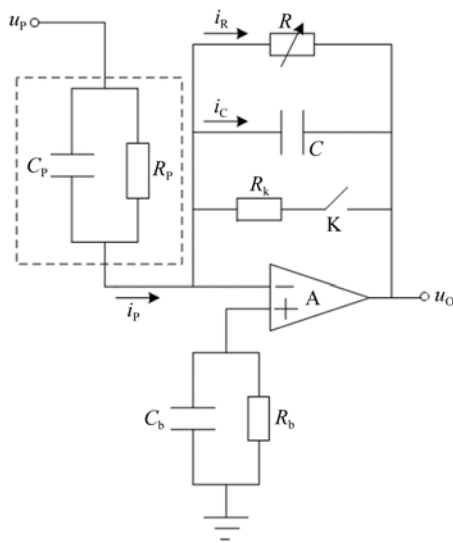


图 3 微夹钳的自感知电路

Fig. 3 Self-sensing circuit of micro-gripper

而  $i_p, i_R$  分别为:

$$i_p = \frac{u_p}{R_p} + C_p \frac{du_p}{dt}, \quad (16)$$

$$i_R = -\frac{u_o}{R}. \quad (17)$$

于是可得:

$$u_o = -\frac{1}{C} \int \left( \frac{u_p}{R_p} + \frac{u_o}{R} \right) dt - \frac{C_p}{C} u_p. \quad (18)$$

若式(18)等号右端积分项为零,则有:

$$C_p u_p = -C u_o. \quad (19)$$

这表明,若式(18)等号右端的积分项为零,则晶片表面的电荷  $C_p u_p$  与电容  $C$  上的电荷  $C u_o$  相等,换言之,可通过电容  $C$  来获得晶片上的电荷。

要使式(18)等号右端积分项为零,必须满足:

$$\frac{u_o}{u_p} = -\frac{R}{R_p}. \quad (20)$$

而由式(19)可得:

$$\frac{u_o}{u_p} = -\frac{C_p}{C}, \quad (21)$$

于是有:

$$C_p R_p = CR. \quad (22)$$

这便是通过图 3 所示电路获取晶片表面电荷进而实现钳指位移与夹持力自感知的平衡条件。

## 5 钳指位移与夹持力的自感知验证

### 5.1 钳指位移的自感知验证

图 4 为测试钳指位移与获取积分电荷的实验

系统,它由计算机、多功能数据卡、驱动电源、压电微夹钳、自感知电路和电涡流位移传感器(它仅用来验证自感知钳指位移的有效性)构成。其工作过程如下:计算机将相应波形的控制电压通过多功能数据卡上的 A/D 转换器输出给驱动电源,驱动电源施加电压给钳指上的晶片,由传感器测得钳指位移,同时由自感知电路获取晶片表面电荷,然后由多功能数据卡上的 D/A 转换器将两信号采集到计算机。驱动电源与传感器的主要指标分别如表 3、表 4 所示。

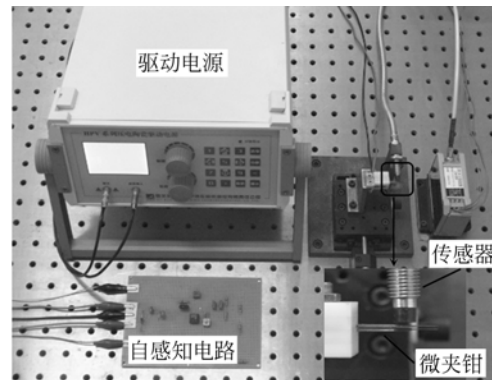


图 4 测试钳指位移与获取积分电荷的实验系统

Fig. 4 Experimental system for measurement of finger displacement and integral charges

表 3 驱动电源的主要指标

Tab. 3 Characteristics of driver

分辨率	纹波	稳定性
6 mV	$\leq 10$ mV	$\leq 0.1\%FS/8$

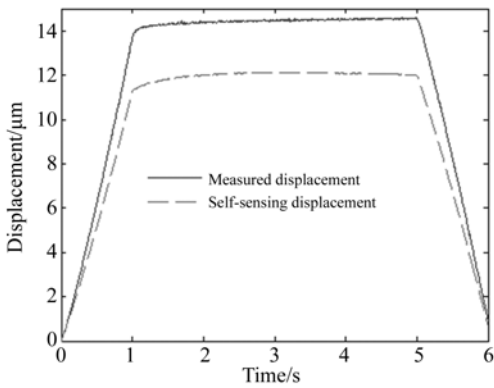
表 4 传感器的主要指标

Tab. 4 Characteristics of sensor

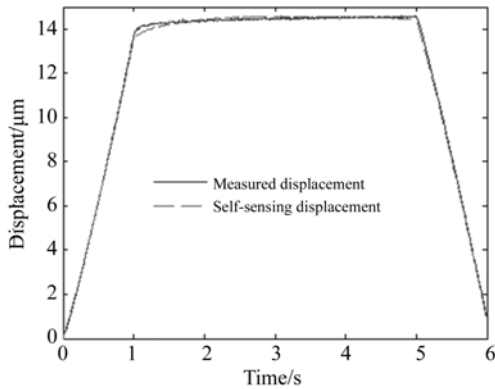
线性区	非线性度	分辨率
0.23~0.73 mm	0.8%	0.1 $\mu$ m

为使自感知电路平衡,给微夹钳施加上升与下降时间各为 1 s、平坦时间为 4 s(即驱动电压频率为 1/6 Hz,该频率在自感知电路的频响 0~5 Hz 内<sup>[15]</sup>)、平坦期间幅度为 30 V 的梯形波驱动电压,反复调节电路中的可变电阻  $R$ ,直至平坦期间电容  $C$  上的电荷  $C u_o$  也平坦。由图 5 给出的测量结果可知:在梯形波电压的作用下,自感知电路所测得的钳指位移在平坦期间也是平坦的,这表

明自感知电路已平衡,同时也表明所提出的钳指位移自感知方法是有效的。



(a) 实测位移与自感知位移  
(a) Measured and self-sensing displacements

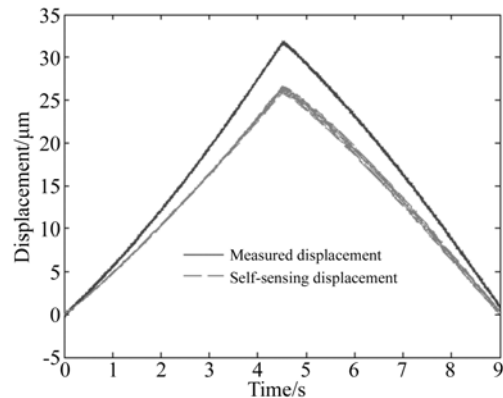


(b) 实测位移与自感知位移的归一化  
(b) Normalized self-sensing displacement

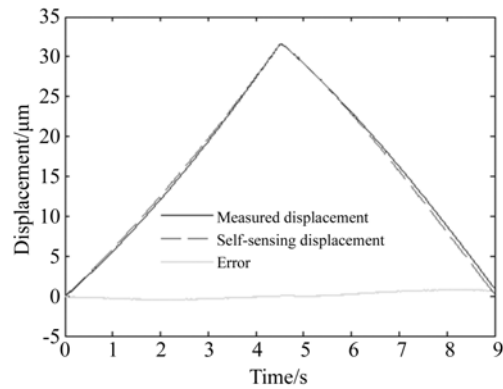
图 5 自感知电路的平衡调节

Fig. 5 Balance adjustment of self-sensing circuit

为进一步验证钳指位移自感知方法的有效性,在自感知电路平衡后,给微夹钳施加上升与下降时间各为 4.5 s、最大值为 60 V(压电陶瓷晶片所能承受的最大驱动电压)的三角波驱动电压。图 6(a)给出了在三角波电压作用下,由传感器与自感知电路分别测得的 10 次位移。由图 6 可知,传感器所测得的钳指位移与自感知电路测得的钳指位移具有很好的一致性。根据 10 次测量结果的平均值修正自感知位移,即将平均值乘以传感器所测得位移与自感知位移的比值。由图 6(b)的修正结果可知,在 31.59 μm 的钳指最大位移范围内,修正后自感知位移的最大偏差仅为 0.78 μm,这进一步说明所提出的钳指位移自感知方法是有效的。



(a) 实测位移与自感知位移  
(a) Measured and self-sensing displacements



(b) 实测位移与自感知位移的归一化  
(b) Normalized self-sensing displacement

图 6 三角波驱动电压下钳指的位移

Fig. 6 Displacement of finger under triangle wave driven voltage

### 5.2 钳指夹持力的自感知验证

图 7 为测试钳指夹持力的实验系统,它由计算机、多功能数据卡、驱动电源、压电微夹钳、微量电子天平和 RS232 接口构成。其工作原理为:先调节钳指,使其同微量电子天平的载物台正好接触(以使钳指位移全部转化为夹持力,即  $\delta=0$ )或使其与载物台之间留有适当的微小间隙(以使钳指位移不全部转化为夹持力,即  $\delta=\delta_0$ );接着由计算机通过多功能数据卡上的 A/D 转换器将控制电压输出给驱动电源,驱动电源施加电压给钳指,钳指将其位移转换为夹持力;该夹持力由微量电子天平测得,并通过 RS232 数据线及接口被采集到计算机。微量电子天平的主要指标如表 5 所示。

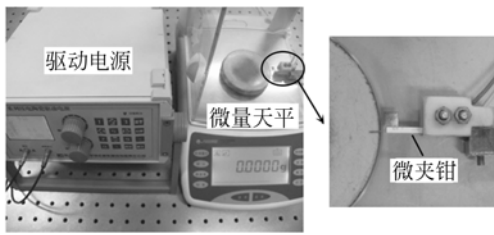


图 7 测试钳指夹持力的实验系统

Fig. 7 Experimental system for measuring gripping force of finger

表 5 微量电子天平的主要指标

Tab. 5 Characteristics of electric microbalance

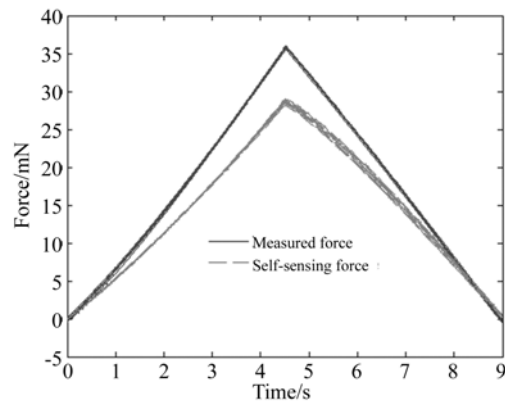
量程	分度值	最大偏差
0~200 g	0.1 mg	0.5 mg

图 8 为在与图 6 相同的驱动电压作用下, 钳指同载物台正好接触时由微量电子天平所测得的 10 次钳指夹持力与由式(8)得到的 10 次自感知夹持力。由图 8(a)可知, 天平测得的夹持力与自感知夹持力的升程曲线具有很好的相似性, 均略下凸; 但二者的回程曲线相差较大, 自感知夹持力曲线上凸, 而天平所测夹持力曲线则基本为直线。

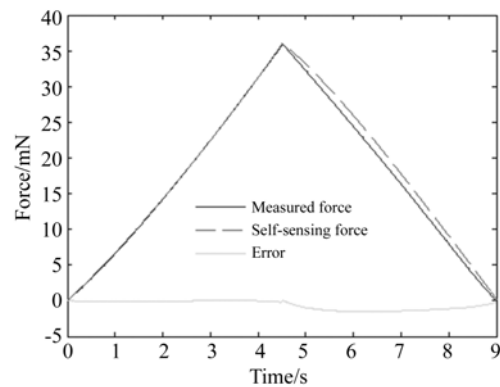
造成天平所测夹持力曲线升程下凸而回程为直线的原因如图 9 所示。在整个升程过程中, 钳指同天平始终接触并将其位移时时转换成对天平的压力, 该压力便是钳指夹持力的反映; 由于天平的响应速度略慢于钳指的响应速度, 致使回程时钳指不再同天平接触, 天平便从最大输出线性回到零点, 这时天平的输出已不是钳指夹持力的反映。鉴于此, 在后面的分析中不对比回程中天平所测夹持力与自感知夹持力。

根据 10 次测量结果的平均修正自感知夹持力, 即将其乘以升程时天平所测夹持力与自感知夹持力的比值。由图 8(b)的修正结果可知, 升程时天平所测夹持力与自感知夹持力具有很好的一致性, 在 35.91 mN 的钳指最大夹持力范围内, 自感知夹持力的最大偏差仅为 0.24 mN, 这表明夹持力自感知方法是有效的。

图 10 给出了在与图 6 相同的驱动电压作用下, 钳指与载物台之间有  $\delta_0 = 10 \mu\text{m}$  间隙时由微量电子天平测得的钳指夹持力与由式(15)得到的



(a) 实测夹持力与自感知夹持力  
(a) Measured and self-sensing force



(b) 实测夹持力与自感知夹持力的归一化  
(b) Normalized self-sensing force

图 8 无初始间隙下实测与自感知的钳指夹持力  
Fig. 8 Measured and self-sensing gripping forces of finger without initial gap

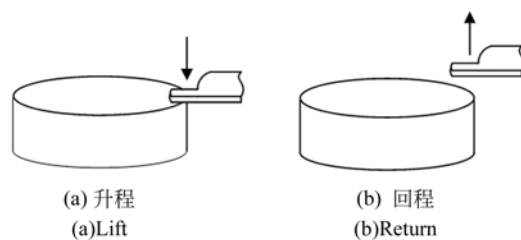


图 9 天平测量升回程过程

Fig. 9 Lift and return of balance during measurement

自感知夹持力(均为 10 次平均后的结果)。由图 10(a)可知, 即使钳指位移未全部转化为夹持力, 两种方法所得到的夹持力波形在升程时仍具有很好的相似性。用与图 8 相同的系数修正图 10(a)的自感知夹持力, 由图 10(b)的修正结果可知, 在

$\delta = \delta_0$ 时,两种方法所得到的夹持力升程过程同样具有很好的 consistency,这进一步表明所提夹持力自

感知方法是有效的。图 10 中三角波的起止点不对称是由压电陶瓷材料的迟滞非线性造成的。

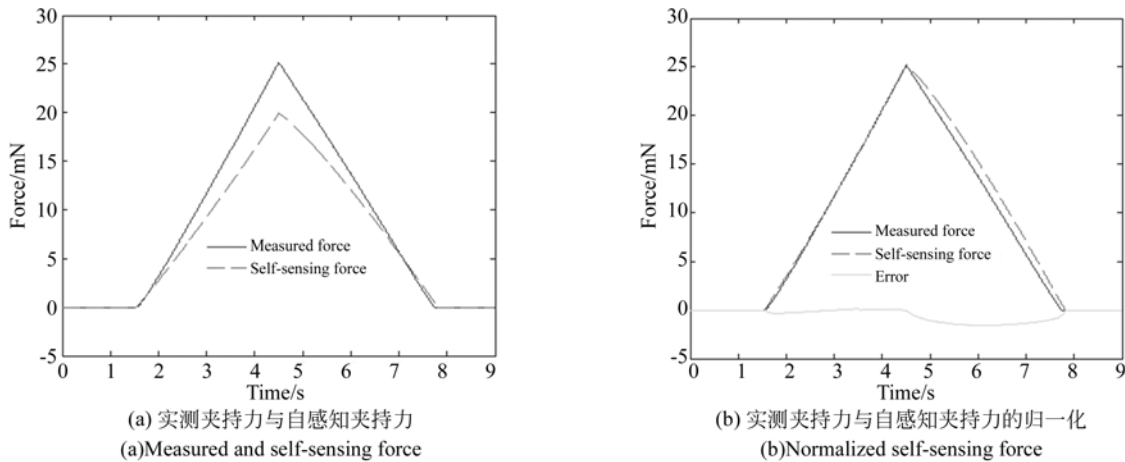


图 10 有初始间隙时实测与自感知的钳指夹持力

Fig. 10 Measured and self-sensing gripping forces of finger with initial gap

## 6 结 论

本文采用压电双晶片结构设计了微夹钳,该夹钳结构紧凑,指尖灵敏度高,电极线布置整齐,便于安装和固定,整体尺寸为  $35 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。然后,基于 Jan G. Smits 压电悬臂梁弯曲变形理论给出了钳指位移与夹持力的自感知表达式,它表明钳指位移与夹持力均可用钳指上压

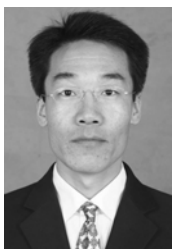
电陶瓷晶片表面的电荷来表达,并据此设计了获取晶片表面电荷的自感知电路,给出了其平衡条件,即晶片电容与其绝缘电阻之积和积分电容与反馈电阻之积相等。实验结果显示:在  $31.59 \mu\text{m}$  的最大钳指位移范围内,修正后自感知位移的最大偏差为  $0.78 \mu\text{m}$ ;在  $35.91 \text{ mN}$  的最大钳指夹持力范围内,修正后自感知夹持力的最大偏差为  $0.24 \text{ mN}$ 。由此表明所提自感知方法是有效的。

### 参考文献:

- [1] 孙立宁,陈立国,荣伟彬,等. 面向微机电系统组装与封装的微操作装备关键技术[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 13-19.  
SUN L N, CHEN L G, RONG W B, *et al.*. Key techniques of micromanipulation devices for MEMS assembling and packaging[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(11): 13-19. (in Chinese)
- [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] 郝永平,董福祿,张嘉易,等. 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, *et al.*. Study on micro-gripper on MEMS mechanism assembly [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(5): 596-601. (in Chinese)
- [4] 蔡建华,黄心汉,吕遐东,等. 一种集成微力检测的压电式微夹钳[J]. 机器人, 2006, 28(1): 59-64.  
CAI J H, HUANG X H, LU X D, *et al.*. A micro-force sensing integrated piezoelectric microgripper [J]. *Robot*, 2006, 28(1): 59-64. (in Chinese)
- [5] XU Q. A new compliant microgripper with integrated position and force sensing[C]. *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2013 IEEE/

- ASME International Conference on, IEEE, 2013: 591-596.
- [6] 余大海, 吴文荣, 罗敏, 等. 基于有限元分析的 ICF 靶半自动装配系统的微夹钳设计[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(4): 120-123.  
YU D H, LUO W R, WU M, *et al.*. Design of the micro-gripper used for semi-automatic assembly system of ICF targets based on finite element analysis [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30(4): 120-123. (in Chinese)
- [7] 吴俊杰, 李源, 李东升, 等. MEMS 电容式三维微触觉侧头设计及校准[J]. 光学精密工程, 2013, 20(12): 3087-3094.  
WU J J, LI Y, LI D SH, *et al.*. Design and calibration of 3D micro tactile probe based on MEMS capacitance sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 20(12): 3087-3094. (in Chinese)
- [8] RAKOTONDRABE M, IVAN I A. Development and force/position control of a new hybrid thermo-piezoelectric microgripper dedicated to micromanipulation tasks[J]. *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on*, 2011, 8(4): 824-834.
- [9] 席文明, 钟辉. 电磁力驱动的微夹持技术[J]. 纳米技术与精密工程, 2008, 6(3): 195-198.  
XI W M, ZHONG H. Micro-tweezer technology driven by electromagnetic force[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2008, 6(3): 195-198. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] ZHOU Y, NELSON B J. The effect of material properties and gripping force on micrograsping [C]. *Proceedings of the 2000 IEEE National Conference on Robotics and Automation*, 2002: 1115-1120.
- [12] 赵学增, 周法权, 李宁, 等. 一种消除 AFM 中悬臂梁横向扭转串扰误差的修正技术[J]. 纳米技术与精密工程, 2011, 9(2): 121-126.  
ZHAO X Z, ZHOU F Q, LI N, *et al.*. Correction of cross-talk caused by torsion of cantilever in AFM[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2011, 9(2): 121-126. (in Chinese)
- [13] NELSON B J, ZHOU Y, VIKRAMADITYA B. Sensor-based microassembly of hybrid MEMS devices [J]. *IEEE Communications Magazine*, 1998, 18: 35-45.
- [14] SMITS JAN G, WSH CHOI. The constituent equations of piezoelectric heterogeneous bimorphs [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1991, 38(3): 256-270.
- [15] 邱磊. 基于积分电荷的压电自感知微夹钳研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2012.  
QIU L. *Research on Piezoelectric Self-sensing Micro-gripper Based on Integrator*[D]. Ningbo: Ningbo University, 2012. (in Chinese)

#### 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、精密测试技术等方面的研究。E-mail: cuiyuguo@nbu.edu.cn



郑军辉(1989—),男,河南临颖人,硕士研究生,主要从事微/纳米定位技术的研究。E-mail: 15257499162@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)