

压电微夹钳钳指位移与夹持力的自感知研究

薛飞,崔玉国,梁冬泰,邱磊

(宁波大学 机械工程与力学学院,浙江 宁波 315211)

摘要:采用双晶片型压电执行器,对微夹钳进行了结构设计。根据压电陶瓷晶体变形的本质是极化及极化与表面电荷的关系,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 的压电悬臂梁静态模型,建立了钳指位移与夹持力的自感知数学模型。实验结果表明,静态或低频情况下,自感知的钳指位移同传感器获得的钳指位移具有很好的一致性;自感知方法所获得的夹持力(最大值为 0.072 N)大于微量电子天平的测量结果(最大值为 0.052 N),通过对自感知夹持力曲线进行相应的系数修正,自感知方法所获得的结果能很好地反映夹持力的真实大小。

关键词:微夹钳;压电执行器;自感知;积分电荷

中图分类号:TN384 **文献标识码:**A

Self-sensing for Displacement and Force of Finger of Piezoelectric Micro-gripper

XUE Fei, CUI Yuguo, LIANG Dongtai, QIU Lei

(The Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: A new micro-gripper based on piezoelectric bimorph was designed. Inspired by the fact that the substance of piezoelectric crystal deformation is polarization and the relation between polarization and induced surface charge, the gripping force and displacement self-sensing method based on integral charge was proposed, and the mathematical models of gripping force and displacement referring to the Smits' piezoelectric cantilever static model was established. The results show that the displacement obtained by self-sensing method and by independent sensor had good consistency in the case of static or low frequency. By using electronic micro balance, experimental results verified the effectiveness of the self-sensing gripping force method. Although the gripping force obtained by self-sensing method (the maximum was 0.072 N) was greater than the one by electronic micro balance (the maximum was 0.052 N), the self-sensing force results could well reflect the true gripping force by coefficient correcting of the force.

Key words: micro-gripper; piezoelectric actuator; self-sensing; integral charge

0 引言

微夹钳是微机电系统(MEMS)中实现微零件装配、生物医学工程中实现细胞微操作的关键微执行器之一^[1]。在微操作系统中,应用微夹钳进行操作时,需外加传感器,通常通过粘贴在钳体上的电阻应变片来感知夹钳的夹持力,但此方法影响了夹钳的工作特性。有的系统受空间限制,要求传感器应微型化,甚至无法安装传感器,这也同样增加了系统的设计难度。

目前,国内外正在研究的微夹钳形式多种多样,

按能量供给和驱动方式可分为真空吸附式^[2]、静电式^[3]、形状记忆合金式^[4]、电热式^[5]、压电式^[6]。相对于其他形式的微夹钳,压电微夹钳具有位移分辨率高,输出力大,响应速度快,结构刚度大,不发热,可微小化等优点,从而使其应用前景更加广阔。本文在对压电微夹钳进行结构设计的基础上,基于所提出的自感知方法来感知钳指位移与夹持力,以省掉外部传感器。

1 微夹钳的结构设计

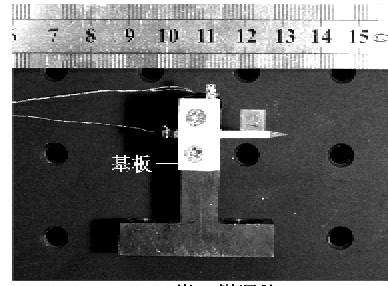
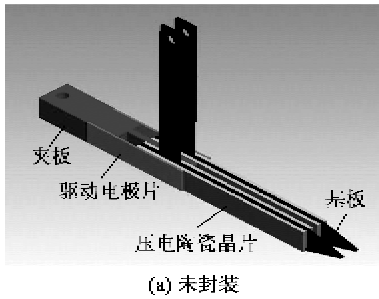
图1为本文所设计的微夹钳结构,它由钳指、夹

收稿日期:2013-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175271);教育部留学回国人员科研启动基金资助项目;宁波市自然科学基金资助项目(2011A610138)

作者简介:薛飞(1988-),男,浙江温州人,硕士生,主要从事微/纳米定位技术研究。E-mail: xuefei0577@126.com。崔玉国(1971-),男,吉林农安人,教授,博士生导师,主要从事微/纳米定位技术、精密测量技术研究。

板、驱动电极片及压板构成,每个钳指是由两片压电陶瓷晶片及黄铜基板构成的。压电陶瓷晶片材料为 PZT52,尺寸为 $17.5\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$;基板同时也是地电极,所用材料为紫铜,厚为 0.3 mm ;用来保证两钳指的初始间隙,所用材料为 45 号钢,这里该初始间隙取为 0.5 mm ;为便于驱动电极线和地电极线的引出,以及避免因二者相接触而引起的短路,将用于引出地线的部分基板设计成同夹板相垂直的形式;基板和夹板的尾部均开有一小圆孔,这是为了便于焊接电极线;驱动电极片为黄铜箔;压板可在预紧螺钉的作用下,使钳指产生一定的预紧力,为使微夹钳同其前端的执行机构相绝缘,压板所用材料为聚四氟乙烯。所设计的微夹钳整体外形尺寸为 $32\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 。



(b) 微夹钳照片

图 1 微夹钳结构

2 钳指位移与夹持力的自感知

2.1 钳指位移与夹持力的自感知原理

图 2 为描述钳指输入输出关系的结构模型。本文中作为微夹钳钳指的压电双晶片执行器在驱动电压 U 与外力(即夹持力) F 的作用下会发生变形(即钳指位移) δ (见图 2),这一变形过程实质上是其发生电极化的过程,因此,在其表面产生电荷 Q 。 δ 、 F 、 U 、 Q 之间的关系可通过 Jan G. Smits 的压电悬臂梁静力模型^[7]获得。该模型由一层压电晶片与一层硅基板推导得出。根据 Jan G. Smits 的结果,本文将黄铜基板与钳指中的一片压电陶瓷晶片看做一个整体,将其等效为 Smit 模型中的硅基板,便可获得 δ 、 F 、 U 、 Q 之间的关系为

$$\begin{pmatrix} \delta \\ Q \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2Al_p^2(3l_c - l_p) + 6Al_p(l_c - l_p)(2l_c - l_p)}{Kw} + \frac{4s_{11}^e(l_c - l_p)^3}{wh_c^3} & -\frac{6ABl_p d_{31}(2l_c - l_p)}{K} \\ -\frac{6ABl_p d_{31}(2l_c - l_p)}{K} & \frac{2l_p w}{h_p} \left[\epsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2 h_{cp}(s_{11}^e h_p^3 + s_{11}^e h_{cp}^3)}{K} \right] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} F \\ U \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中

$$A = s_{11}^e s_{11}^e (s_{11}^e h_{cp} + s_{11}^e h_p) \quad (2)$$

$$B = \frac{h_{cp}(h_{cp} + h_p)}{s_{11}^e h_{cp} + s_{11}^e h_p} \quad (3)$$

$$h_{cp} = h_c + h_p \quad (4)$$

$$K = (s_{11}^e)^2 (h_{cp})^4 + 4s_{11}^e s_{11}^e h_{cp} (h_p)^3 + 6s_{11}^e s_{11}^e (h_{cp})^2 (h_p)^2 + 4s_{11}^e s_{11}^e h_p (h_{cp})^3 + (s_{11}^e)^2 (h_p)^4 \quad (5)$$

$$s_{11}^e = \frac{s_{11}^e s_{11}^e (s_{11}^e h_c + s_{11}^e h_p)(h_c + h_p)^2}{k} \quad (6)$$

$$k = (s_{11}^e)^2 (h_p)^4 + 4s_{11}^e s_{11}^e h_c (h_p)^3 + 6s_{11}^e s_{11}^e (h_c)^2 (h_p)^2 + 4s_{11}^e s_{11}^e h_p (h_c)^3 + (s_{11}^e)^2 (h_c)^4 \quad (7)$$

式中: l_p 、 l_c 分别为压电陶瓷晶片与黄铜基板的长度; w 为压电陶瓷片的宽度; h_p 、 h_c 分别为压电陶瓷片和黄铜基板的厚度; s_{11}^e 、 s_{11}^e 分别为压电陶瓷晶片

与黄铜基板的弹性柔顺系数; d_{31} 为压电陶瓷晶片的压电常数; ϵ_{33}^T 为压电陶瓷晶片的介电常数; h_{cp} 、 s_{11}^e 分别为黄铜基板与压电陶瓷晶片作为一个整体后的平均厚度和平均弹性柔顺系数。在式(1)中, U 为已知,而晶片表面的 Q 可通过对流过压电陶瓷晶片的电流进行积分获得,于是便可获得压电微夹钳的 δ 与 F 。

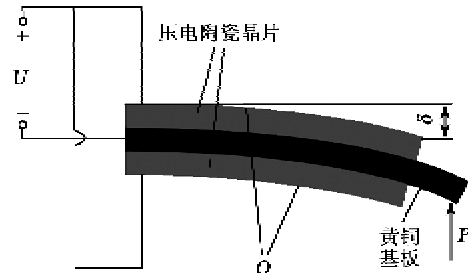


图 2 压电执行器的输入量与输出量

2.2 非夹持状态下的位移自感知

2.2.1 静态位移自感知实验

给微夹钳指施加步长为 0.2 V、最大值为 200 V 的三角波驱动电压,并用积分电路来获取钳指中压电陶瓷晶片表面的电荷,为了作比较,同时用电涡流位移传感器来测量钳指的位移,测量结果如图 3 所示。由图可知,采用自感知电路所获得的电荷曲线同采用传感器所测得的钳指位移曲线波形基本一致,这表明所提出的自感知方法有效。

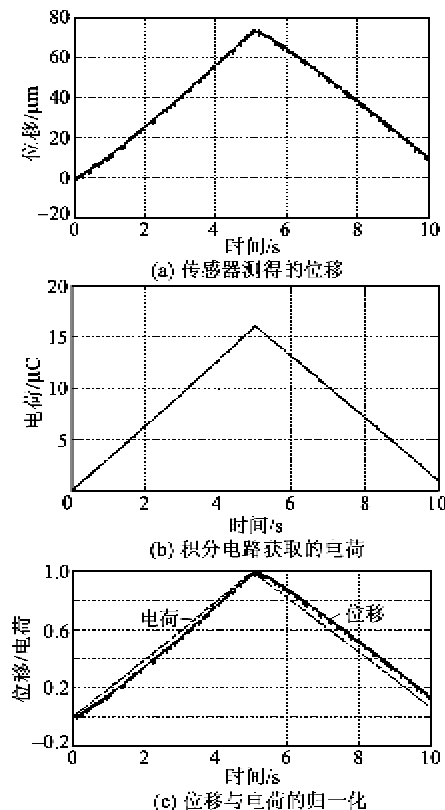


图3 传感器测得的钳指位移与积分电路获取的电荷

不过,自感知电路所获得的电荷曲线基本为直线。实际上,由于压电陶瓷晶片的变形同其电极化程度之间为迟滞非线性关系,而晶片表面的电荷又是其电极化程度的直接反映,所以晶片表面电荷同其变形之间也应为迟滞非线性关系。而自感知电路所获得的电荷之所以为直线,是由于该电荷仅直接反映了实际作用在晶片两端的电压大小,而这二者之间为 $Q=C_p u_p$ (其中 C_p 为压电晶片的等效电容, u_p 为作用于压电晶片上的驱动电压),为线性关系。

2.2.2 动态位移自感知实验

为验证所提出自感知方法在动态情况下的有效性,首先给压电微夹钳施加了幅值为 15 V,频率分

别为 1 Hz、5 Hz、10 Hz 的正弦波交流驱动电压,测试结果如图 4 所示。由图可知,当驱动电压频率为 1 Hz、5 Hz 时,采用自感知电路所获得的电荷曲线同采用传感器所测得的钳指位移曲线波形上基本一致。但当驱动电压频率为 10 Hz 时,电荷曲线明显失真,这是由于该频率超过了自感知电路的无失真传输频率,从而引起其输出电荷的幅值失真和相位失真;且这时的电荷曲线明显上扬,这是由于驱动电压频率太高,致使自感知电路中的线性定常电容 C 还没有彻底放电便开始充电。

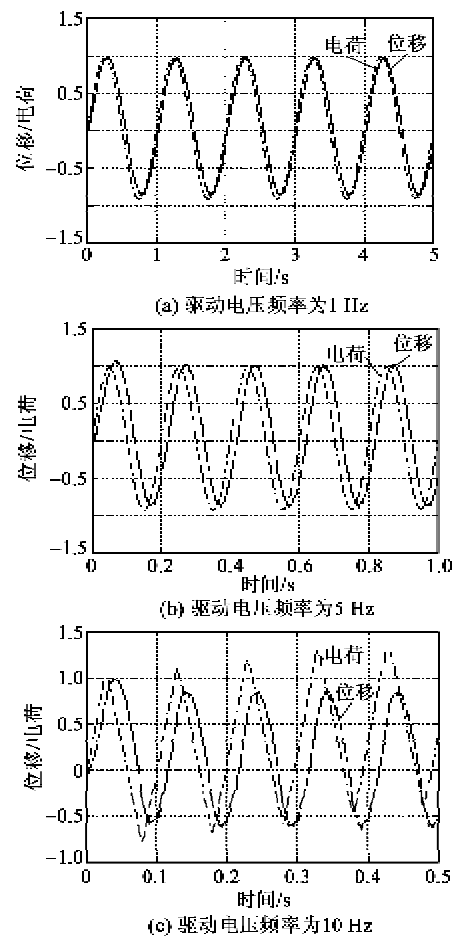


图4 不同频率正弦波驱动电压下传感器测得的钳指位移与积分电路获取的电荷归一化后的结果

2.3 夹持状态下的力感知

2.3.1 自感知夹持力的获取

当微夹钳夹持对象时,便要受到微对象的反力作用,这时微夹钳在驱动电压作用下所产生的位移 δ 会转换为 F 。当被夹持微对象尺寸一定时,随着 U 的增大,由钳指位移变形所转换而来的 F 也增大。当钳指中压电陶瓷晶片表面的自由电荷通过本文所提出的自感知方法获得后,微夹钳夹持对象时

δ 与 F 的大小由式(1)求得。图 5 为钳指位移为 0 时根据式(1)获得的 F 同 U 的关系。由图可知,通过自感知方法所获得的 F 同 U 之间呈线性关系,在 200 V 最大 U 作用下的最大自感知夹持力为 0.072 N。

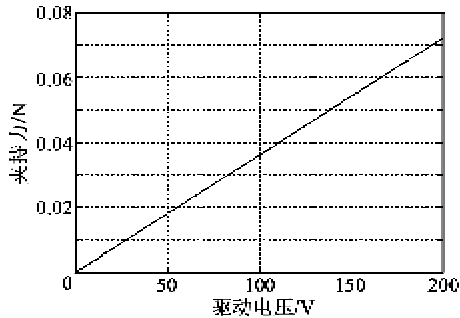


图 5 钳指位移为零时夹持力同驱动电压的关系

2.3.2 自感知夹持力的实验验证

通过微量电子天平来验证所自感知的 F 的有效性,其实验过程如下:调节微夹钳钳指使指尖同微量电子天平的载物台正好接触,然后给微量电子天平的输出置 0,接着通过压电陶瓷执行器驱动电源给微夹钳施加相应的驱动电压,同时通过微量电子天平的 LED 显示屏读取夹持力的大小。

给微夹钳施加 0~200 V、间隔为 1 V 的三角波驱动电压,由微量电子天平所测得的微夹钳夹持力如图 6 所示。由图可知,在最大驱动电压作用下,钳指的最大夹持力约 0.052 N,该值小于自感知所获得的量值。这是由于给出的压电陶瓷晶片的弹性柔顺系数、介电常数、压电常数等机电参数不准确的缘故。比较图 5、6 可知,在不考虑升回程迟滞的情况下,由自感知所获得的夹持力曲线与由微量天平所测得的夹持力曲线,二者仅是斜率不同,但这可通过修正自感知夹持力曲线的斜率来使其更准确地反映实际夹持力。这进一步表明本文所提出的自感知方法是有效的。

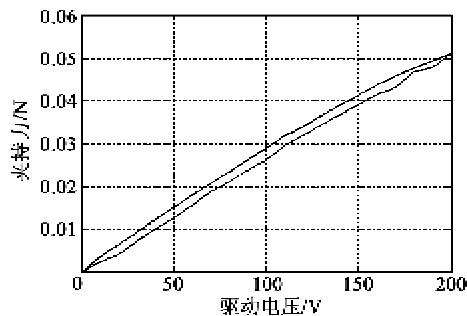


图 6 微夹钳的夹持力

3 结束语

本文首先采用压电双晶片执行器对微夹钳进行了结构设计,所设计的微夹钳易于夹钳安装与拆卸、易于电极线引出及绝缘;接着采用所提出的基于积分电荷的自感知方法对钳指位移与夹持力进行了自感知研究,实验结果表明,静态或低频情况下,自感知方法所获得的结果能很好地反映钳指位移与夹持力的真实大小。

参考文献:

- [1] 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(1):1-8.
WANG Xiaodong, LIU Chong, WANG Liding. New aspects in microgrippers[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2004, 10(1): 1-8.
- [2] PETROVIC D, POPOVIC G, CHATZITHEODORIDIS E, et al. Gripping tools for handling and assembly of microcomponents[C]//Nis; Yugoslavia Proceedings of 23rd International Conference on Microelectronics, 2002, 1: 247-250.
- [3] 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 Ligu, LIU Baixu. Development of hybrid-type MEMS microgripper[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(8): 1928-1934.
- [4] KYUNG J H, KO B G, HA Y H, et al. Design of a microgripper for micromanipulation of microcomponents using SMA wires and flexible hinges[J]. Sensors and Actuators A, 2008, 141(1): 144-150.
- [5] 褚金奎,郝秀春,王立鼎. 电热驱动镍微夹钳的设计及制作[J]. 机械工程学报,2007,43(5):116-121.
CHU Jinkui, HAO Xiuchun, WANG Liding. Design and fabrication of electrothermal nickel microgripper [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(5): 116-121.
- [6] 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):55-64.
CAI Jianhua, HUANG Xinhuan, LV Xiadong, et al. A micro-force sensing integrated piezoelectric microgripper[J]. Robot, 2006, 28(1): 55-64.
- [7] SMITTS J G, CHOI Weishung. The constituent equations of piezoelectric heterogeneous bimorphs [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1991, 38(3): 256-270.