

文章编号 1004-924X(2007)04-0550-07

# 新型集成三维微力检测微夹持器

王家畴, 荣伟彬, 孙立宁, 谢 晖, 陈 伟  
(哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**提出了一种以压阻检测技术为基础, 压电陶瓷为微驱动元件, 具有两级位移放大且集成三维微力传感器的微夹持器。采用有限元软件对微操持器放大机构和传感器弹性体进行分析, 并给出了传感器的标定方法。实验证明, 该传感器具有无耦合、测量分辨率高、线性度好、标定简单的优点, 满足了预计的设计要求, 传感器最大量程为 10 mN, X 向与 Y 向的分辨率均为  $2.4 \mu\text{N}$ , Z 向的分辨率为  $4.2 \mu\text{N}$ ; 同时也验证了所设计的微夹持器的合理性和实用性, 当压电陶瓷驱动电压取 200 V 时, 微夹持器的张合量达到最大值  $274 \mu\text{m}$ 。

**关键词:** 三维微力传感器; 压电陶瓷; 解耦; 微夹持器; 有限元分析

中图分类号: TP212.12 文献标识码: A

## A novel micro-gripper integrating micro tri-axial force sensor

WANG Jia-chou, RONG Wei-bin, SUN Li-ning, XIE Hui, CHEN Wei

(*Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

**Abstract:** A novel micro gripper integrating micro tri-axial force sensor and two-grade displacement amplifier is presented bases on piezoresistive detection and using PZT as its micro driving component. The micro tri-axial force sensor consisting of a flexible cross-structure realized by Deep Reactive Ion Etching (DRIE) is fabricated on a single-crystalline-silicon by MEMS technology. The arms of the cross-structure are connected to a silicon frame and to the central part of the cross-structure. After modeling the amplifier structure of micro gripper and the sensor, Finite Element Method (FEM) is used to analyze the displacement of the micro gripper and the deformation of the elastic cantilever. Then the calibration method of tri-axial sensor based on the microscopic vision and the cantilever beam's principle is proposed. The experimental results show that the major feature of the sensor are the high level of intrinsic decoupling of the signals from strain gauge, high resolutions in all three axes, high linearity, repeatability and simple calibration. In addition, they also show the micro gripper is reasonable and practical. The sensor is capable of resolving forces up to 10 mN with resolution of  $2.4 \mu\text{N}$  in  $x$  axis and  $y$  axis and up to 10 mN with resolution of  $4.2 \mu\text{N}$  in  $z$  axis; the maximal gripping displacement of the micro-gripper is  $274 \mu\text{m}$  under a driving voltage of 200 V.

**Key words:** micro tri-axial force sensor; PZT; decoupling; micro-gripper; finite element method

收稿日期: 2006-11-15; 修订日期: 2007-01-18.

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (No. 2004AA420040); 国家 863 计划基金项目 (No. 2006AA04Z256); 长江学者和创新团队发展计划资助项目

# 1 引 言

微机电系统(MEMS)技术和精密机械工程的成熟化、市场化,极大地促进了微加工技术及微操作技术的进一步发展。微夹持器作为一种典型的微执行机构,不仅可以作为机器人的手爪,而且在微机械零件的加工、装配、生物工程和光学等领域均有很好的应用前景<sup>[1]</sup>。在微操作过程中,不仅需要完成对微小尺寸器件的夹持、搬运、装配等操作而且在整个微操作过程中,还要避免微夹持器对微小器件造成破坏,这就要求在微操作过程中实现接触力的实时检测。目前,各种各样的微夹持器被制造并投入使用。由于微夹持器本身尺寸较小,很难在夹持器上集成微力检测装置,所以目前使用的微夹持器大多数只集成一维微力检测装置,有的甚至没有。这样,在得不到接触力信息反馈的操作过程中,很难实现无损伤操作。针对上述情况,本文采用压电陶瓷(PZT)作为微驱动元件,结合 MEMS 工艺设计了一个具有两级放大的末端集成三维微力检测装置的微夹持器。

# 2 微夹持器建模

图 1 为具有两级位移放大的微夹持器模型。该微夹持器采用 PZT 作为微驱动元件,微位移放大机构采用二级柔性铰链形式。该夹持器主要由夹持臂、微位移放大机构和驱动单元三部分组成。放大机构内置 PZT 驱动器,夹持臂安装在放大机构末端。夹持臂主要由三维微力传感器、探针<sup>[2]</sup>、

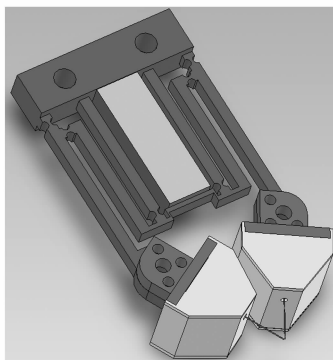
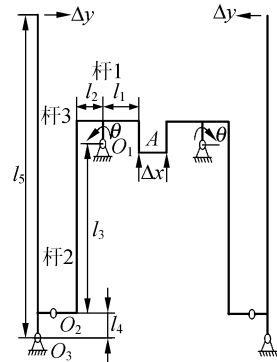


图 1 三维微力检测微夹持器模型

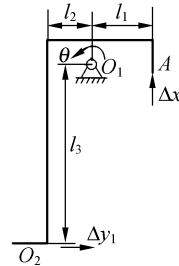
Fig. 1 Structure of micro-gripper integrating tri-axial force sensor

传感器封装壳和一个放大连接体组成。微力检测利用压阻原理,采用十字悬臂梁结构,标定实验结果表明了该传感器分辨率能达到微牛级。

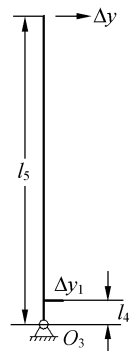
微夹持器采用对称封闭式微位移放大机构,其原理图如图 2 所示。本文采用德国 PI 公司的叠堆形压电陶瓷,外形尺寸为 15 mm×5 mm×3.5 mm,在 200 V 电压下输出量 15 μm。



(a)



(b)



(c)

图 2 微位移放大机构原理图

Fig. 2 Principle of displacement amplifier

微位移放大机构采用二级杠杆放大,如图 2 所示。压电陶瓷在 A 处伸长 Δx,使杆 1、杆 2 绕

$O_1$  旋转角度  $\theta$ 。杆 2 的转动,带动杆 3 绕  $O_3$  转动,从而产生放大器末端的张合运动。转动副  $O_2$  不参与放大。图 2(b)、(c)描述了微位移放大机构的二级分解结构。如果把杆 2 当作刚性杆考虑时,杆 2 的末端的位移量:

$$\Delta y = \Delta y_1 - \Delta y_2, \tag{1}$$

其中:

$$\Delta y_1 = \sqrt{l_2^2 + l_3^2} \cdot \Delta x / l_1;$$

$$\Delta y_2 = \iint \frac{M(x)}{EI} dx dx + Cx + D;$$

所以第一级放大比为:  $k_1 = \Delta y / \Delta x$ , 第二级放大比为:  $k_2 = l_5 / l_4$ , 可以推出微夹持器的理论放大比为:

$$K = \frac{l_5 \times (\Delta y_1 - \Delta y_2)}{l_4 \times \Delta x}, \tag{2}$$

初选各杆件尺寸:  $l_1 = 1 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 2 \text{ mm}$ ,  $l_3 = 18 \text{ mm}$ ,  $l_4 = 1.5 \text{ mm}$ ,  $l_5 = 24 \text{ mm}$  时代入公式计算得  $K = 7$ 。

### 3 微夹持器有限元分析

利用有限元分析软件 ANSYS 对夹持器进行仿真。根据微位移放大机构的实际使用环境确定约束条件:(1)放大机构后端与安装基座连接,工作过程中没有位移;(2)机构末端连接三维 MEMS 传感器,受夹持力作用,作用力很小,认为自由运动;(3)根据运动学分析,第一级铰链处的应力最大,为危险节点,主要考虑该处的应力问题。仿真结果表明,当给陶瓷伸长施加  $15 \mu\text{m}$  的位移限制时,放大器张合量为  $216 \mu\text{m}$ ,单臂运动位移为  $108 \mu\text{m}$ ,张合量满足设计要求,放大倍数

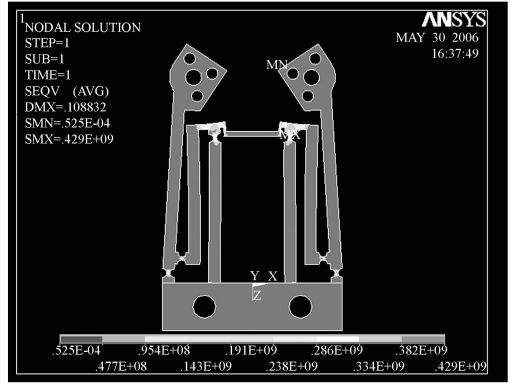


图 4 放大机构应力分布仿真

Fig. 4 Simulation of stress of amplifier structure

为 7.2,符合设计要求;变形抗力 51 N;最大应力 429 MPa,远小于许用应力,满足设计要求。仿真结果如图 3、4 所示。

### 4 微传感器结构及工作原理

图 5 为三维微力传感器结构示意图,该传感器由西安交通大学维纳有限责任公司提供。它采用体硅工艺加工而成,芯片的尺寸为  $4.0 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。芯片中心的质量块由一对十字结构微悬臂梁支撑,在 4 个悬臂梁上利用 MEMS 离子注入工艺共集成 12 个力敏电阻。具体电阻位置分布如图 6 所示。每 4 个压敏电阻组成一个惠斯顿全桥电路<sup>[3]</sup>分别用来检测  $F_x$ 、 $F_y$  以及  $F_z$  方向的受力情况。

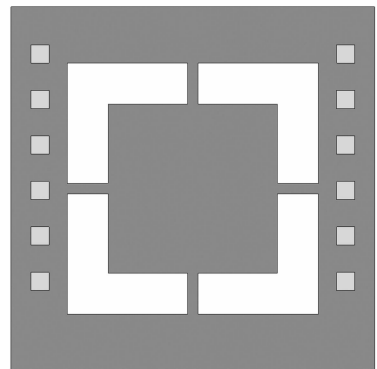


图 5 三维微力传感器结构示意图

Fig. 5 Structure of micro tri-axial force sensor

如图 6 所示,  $R_{x1} \sim R_{x4}$  沿 X 轴轴线方向布置,连接成惠斯顿全桥检测电路,如图 7(a)所示。当  $F_x$  力作用时,  $R_{x1}$  和  $R_{x3}$  受到拉应变,阻值增

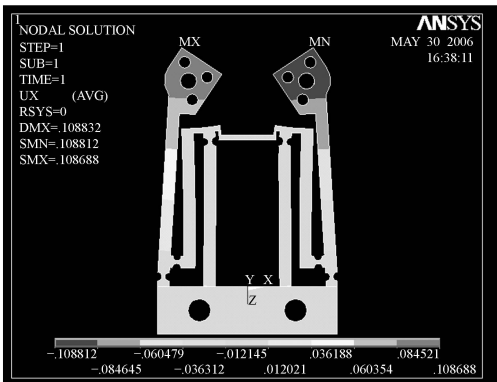


图 3 放大机构张合量仿真

Fig. 3 Simulation of amplifier structure

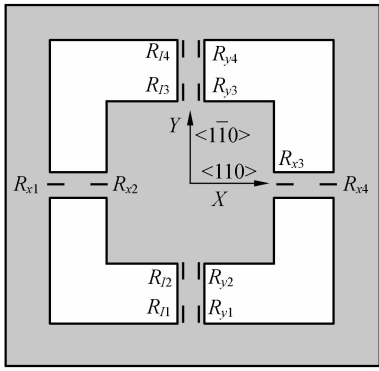


图 6 压阻位置分布简图

Fig. 6 Allocation of piezoresistive strain gauge

大,  $R_{x2}$  和  $R_{x4}$  受到压应变, 阻值减少, 这时检测桥路输出电压  $U_x$ 。当  $F_y$  力作用时,  $R_{x1} \sim R_{x4}$  近似分布在中性层上, 受到的应变近似为零, 所以电阻不变, 这时检测桥路输出  $U_x$  没有变化。当  $F_z$  作用时, 由于结构对称,  $R_{x2}$  和  $R_{x3}$  电阻变化相同,  $R_{x1}$  和  $R_{x4}$  电阻变化相同, 所以检测电桥输出  $U_x$  无变化。综上所述, 检测电路  $C_x$  只对  $F_x$  敏感。

电阻  $R_{y1} \sim R_{y4}$  沿 Y 轴方向布置, 并连接成全桥电路, 如图 7(b) 所示。根据上述相同的分析方法, 可以推出  $C_y$  只对  $F_y$  敏感。

电阻  $R_{z1} \sim R_{z4}$  也是沿 Y 轴方向布置, 并且与  $R_{y1} \sim R_{y4}$  关于 Y 轴轴线对称, 所以  $F_x$  方向作用力对它影响很小, 可以忽略不计。又由于其电桥连接的特殊性, 如图 7(c) 所示,  $F_y$  方向的作用力虽然会造成电桥  $C_z$  有一定电压输出, 但是输出电压非常小, 这里可以忽略不计。但是, 对于高精度、高分辨率的微/纳力检测装置, 应该尽可能解决这一问题, 这也是今后需进一步要做的工作。  $C_x$ 、 $C_y$  和  $C_z$  三路输出电压计算公式如下:

$$U_x = U_0 \times \frac{R_{x1}R_{x3} - R_{x2}R_{x4}}{(R_{x1} + R_{x2})(R_{x3} + R_{x4})}, \quad (3)$$

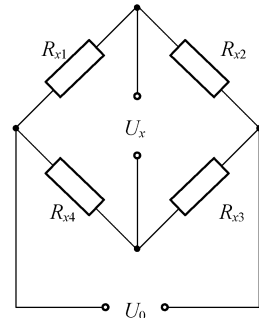
$$U_y = U_0 \times \frac{R_{y1}R_{y3} - R_{y2}R_{y4}}{(R_{y1} + R_{y2})(R_{y3} + R_{y4})}, \quad (4)$$

$$U_z = U_0 \times \frac{R_{z1}R_{z4} - R_{z2}R_{z3}}{(R_{z1} + R_{z2})(R_{z3} + R_{z4})}, \quad (5)$$

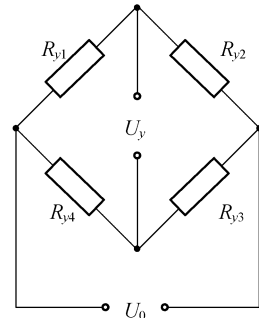
将传感器系统的模型看成一个线性系统, 建立传感器各通道的输出与所对应的作用在传感器坐标系原点上的三维力之间的线性数量关系。此时, 这种数量关系可描述为:

$$\mathbf{F} = \mathbf{C}\mathbf{V}, \quad (6)$$

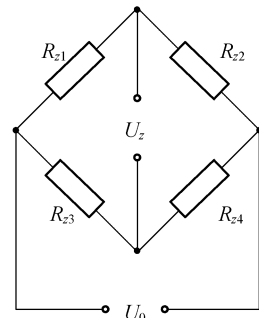
式中:  $\mathbf{C}$  为标定矩阵;



(a)



(b)



(c)

图 7 X、Y 和 Z 向三路检测桥电路

Fig. 7 Bridge circuits to measure the tri-axial forces

$$\mathbf{V} = [U_x \quad U_y \quad U_z]^T;$$

$$\mathbf{F} = [F_x \quad F_y \quad F_z]^T;$$

通过选取与线性无关的三维标定力, 求解线性方程组, 直接求得标定矩阵, 并且当标定力向量组成的矩阵为正交矩阵时, 其条件数达到最小值 1, 此时标定矩阵具有最高的标定精度。由于对加载载荷和传感器输出测量都存在着一一定的误差, 为了减小其对传感器标定结果的影响, 通常还可以采用冗余的标定力向量, 即标定力向量的个数

$k > n$ , 采用最小二乘理论, 求得标定矩阵:

$$C = F \times V^T \times (V \times V^T)^{-1}, \quad (7)$$

则有式(8)可以算出微操作器末端受力情况<sup>[4]</sup>。

$$F_r = MCV, \quad (8)$$

式中:  $M = \text{diag} \left[ \frac{1}{l} \quad \frac{1}{l} \quad 1 \right]^T, \quad (9)$

$$F_r = [F_x \quad F_y \quad F_z]^T, \quad (10)$$

### 5 微传感器有限元分析

ANSYS公司的 ANSYS 软件提供了分析应力、应变的工具。分析过程中以 N 型硅为原材料, 弹性模量  $E$  取 130 GPa, 泊松比 0.28, 悬臂梁厚  $35 \mu\text{m}$ , 宽  $120 \mu\text{m}$ , 长  $450 \mu\text{m}$ 。对传感器弹性悬臂梁进行有限元分析<sup>[5-7]</sup>。图 8 为传感器承受  $Z$  向最大作用力  $F_z = 0.01 \text{ N}$  时微悬臂梁应力分布图, 图 9 为传感器承受  $X$  向最大作用力  $F_x = 0.01 \text{ N}$  时悬臂梁应力分布图。由于  $Y$  向受力情况与  $X$  向一样, 这里就只对  $X$  向进行受力分析。分析表明, 在最大作用力作用下, 最大应力远远小于材料的屈服应力, 微悬臂梁能安全工作。根据分析结果, 结合弹性力学模型确定了压阻形状及分布位置。

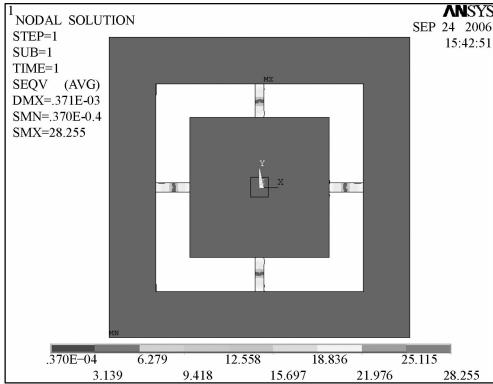


图 8  $F_z = 0.01 \text{ N}$  时传感器应力图

Fig. 8 Stress picture of cantilever by 0.01 N in Z axis

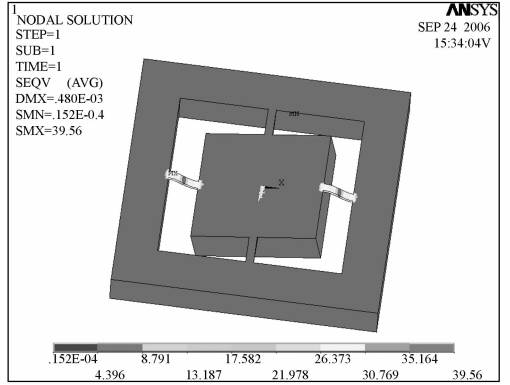


图 9  $F_x = 0.01 \text{ N}$  时传感器应力图

Fig. 9 Stress picture of cantilever by 0.01 N in X axis

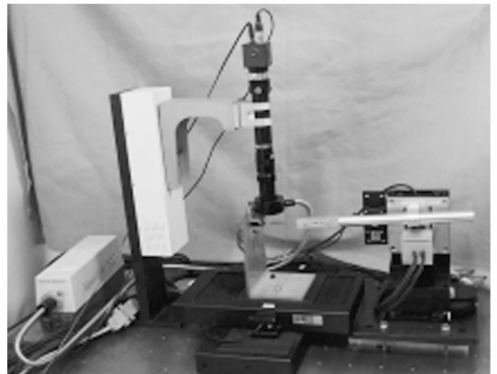


图 10 传感器标定实验台

Fig. 10 Body of calibration equipment

传感器标定实验台是安装传感器并根据标定的具体要求对传感器施加力的装置。 $F_x$  和  $F_y$  加载原理如图 11 所示。

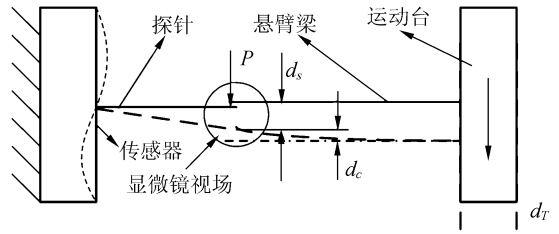


图 11 加载原理图

Fig. 11 Principle diagram of loading

### 6 微传感器的标定

由于微传感器在标定过程中需要加载微牛级的力, 本文利用悬臂梁受力弯曲变形的原理结合显微视觉技术实现了对传感器的标定。图 10 为根据传感器的结构和上述标定方法专门设计的标定试验台。

根据悬臂梁受力弯曲变形原理, 当在一端固定的悬臂梁自由端加一载荷  $P$  时, 悬臂梁将发生弯曲变形, 如图 12 所示。各点的挠度变形可用下式表示:

$$y_x = -\frac{Px^2}{6EJ}(3L-x), \quad (11)$$

式中: $E$ —梁的弹性模量;

$J$ —梁的横截面对其中性轴的惯性矩;

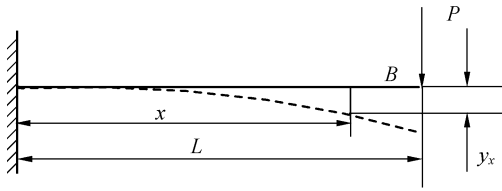


图 12 悬臂梁受力变形图

Fig. 12 Deflection of cantilever under loading

由于悬臂梁的几何参数和物理参数已定,因此,当式(11)中的  $x$  取值为一定时,则该点的挠度位移  $y_x$  与载荷  $P$  成线性关系。因而,如果测出了梁上某点的变形量就可以算出作用力的大小。

标定过程中固定悬臂梁工作台移动位移范围为  $0 \sim 6\,000 \mu\text{m}$ ,平均十等分,实现对传感器的加载,同时显微镜测量传感器探针末端的变形量。加载过程中,工作台从零开始移动到最大位移,然后从最大位移返回,每加载一次取一次数据。图 13~图 15 为传感器的标定曲线图。

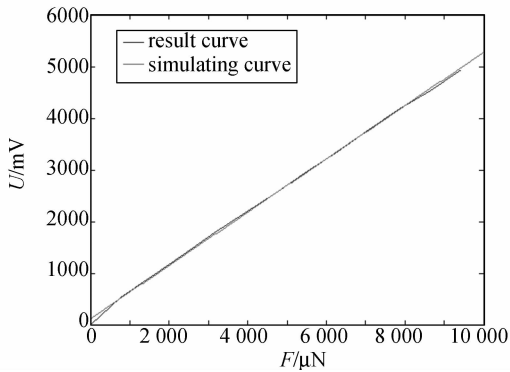


图 13 传感器 X 方向标定曲线

Fig. 13 Calibration curve of X direction

从图 13~图 15 可以看出各轴的实验曲线基本上与理论线性拟合曲线相吻合,输出信号的线性度比较好。标定的结果如表 1 所示。

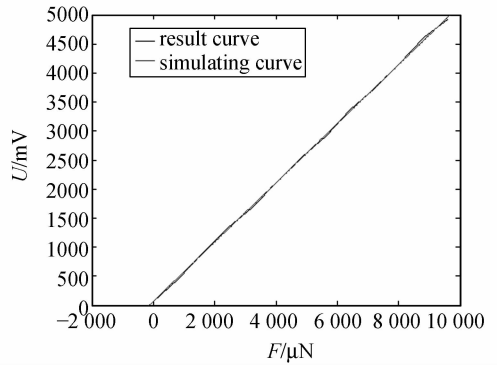


图 14 传感器 Y 方向标定曲线

Fig. 14 Calibration curve of Y direction

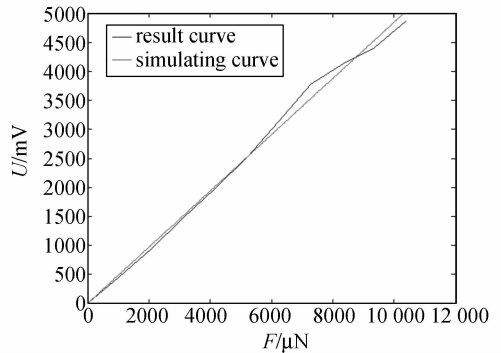


图 15 传感器 Z 方向标定曲线

Fig. 15 Calibration curve of Z direction

表 1 传感器标定结果

Tab. 1 Result of sensor calibration

	X 向	Y 向	Z 向
精度 (%F.S)	0.23	0.25	0.41
量程 (mN)	$\pm 10.7$	$\pm 10.2$	$\pm 10.8$
分辨率 ( $\mu\text{N}$ )	2.4	2.4	4.2
静态耦合率	0.79%	1.30%	1.42%

## 7 结 论

本文提出了一种新型的集成三维微力传感器的微夹持器。与已有的微夹持器相比,该微夹持器采用两级杆杠放大机构,在放大机构末端集成三维微力检测装置,实现夹持过程中对夹持力的实时检测功能。传感器采用 MEMS 工艺,在单晶硅上使用深度反应离子刻蚀(DRIE)技术结合离子注入工艺<sup>[8,9]</sup>制作而成。实验证明,该传感器结构解耦,大大简化了后置解耦电路的设计并降低了成本。各维力都有较高的测量分辨率,线

性度好,适用于微/纳操作。传感器最大量程为 10 mN, X 向与 Y 向的分辨率均为  $2.4 \mu\text{N}$ , Z 向的分辨率为  $4.2 \mu\text{N}$ ; 当压电陶瓷驱动电压取 200 V 时,微夹持器的张合量可达  $274 \mu\text{m}$ 。

### 参考文献:

- [1] CHU Z, SARRO P M, MIDDELHOEK S. Silicon three-axial tactile sensor [J]. *Sensor Actuator*, 1996, A54:505-510.
- [2] RUTHER P, BARTHOLOMEYCZIK J, TRAUTMANN A, *et al.*. Novel 3D piezoresistive silicon force sensor for dimensional metrology of micro components[C]. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference*, 1006-1009.
- [3] 强锡富. 传感器[M]. 北京:机械工业出版社, 2001.  
QIANG X F. *Sensor*[M]. Beijing: China Machine Press, 2001. (in Chinese)
- [4] ARAI F, SUGIYAMA T, FUKUDA T, *et al.*. Micro tri-axial force sensor for 3D bio-micromanipulation[C]. *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics 14 Automation. Detroit, Michigan May 1999*, 2744-2749.
- [5] 刘品宽,孙立宁. 新型二维纳米级微定位工作台的动力学分析[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(2): 143-147.  
LIU P K, SUN L N. Dynamic analysis on a novel nanpositioning stage driven by PZT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(2): 143-147. (in Chinese)
- [6] 戴蓉,谢铁邦. 新型一维位移工作台的设计及特性分析[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3): 428-433.  
DAI R, XIE T B. Design and analysis of 1-DOF nano-positioning stage[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 428-433. (in Chinese)
- [7] 田延岭,张大卫,闫兵. 二自由度微定位平台的研制[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(1): 94-99.  
TIAN Y L, ZHANG D W, YAN B. Development of a 2-DOF micropositioning table[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 94-99. (in Chinese)
- [8] 肖素燕,车录锋,李昕欣,等. 基于柔性 MEMS 皮肤技术温度传感器阵列的研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6): 674-679.  
XIAO S Y, CHE L F, LI X X, *et al.*. A temperature sensor array based on flexible MEMS skin technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 674-679. (in Chinese)
- [9] VAZSONYI E, ADAM M, VIZVARY Z, *et al.* Three-dimensional force sensor by novel alkaline etching technique [J]. *Sensor Actuator*, 2005, A123-124: 620-626.
- [10] 张昱,潘武. 折叠弹簧式 MEMS 水平扭转微镜的设计与分析[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(1): 81-85.  
ZHANG Y, PAN W. Design and analysis of a MEMS horizontal torsion micro mirror with folded springs [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 81-85. (in Chinese)

作者简介:王家畴(1979 —),男,哈尔滨工业大学机器人研究所博士生,从事微纳米定位、驱动技术及微纳操作等方面的研究。E-mail:jiatao\_wang@163.com