

文章编号 1004-924X(2013)12-3087-08

MEMS 电容式三维微触觉测头设计及校准

吴俊杰*, 李源, 李东升, 卢歆, 何明轩

(1. 中国计量学院 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018;

2. 上海市计量测试技术研究院 微米纳米计量实验室, 上海 201203;

3. 上海交通大学 微纳科学技术研究院微米/纳米加工技术国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 由于微纳米几何量计量难以以三维方式高精度地测量较大尺寸的器件, 本文基于非硅 MEMS 工艺, 开发了一种可用于微纳米尺度三维尺寸测量的电容式微触觉测头。利用电容频率测量法实现了微弱电容信号的采集。采用宏微结合驱动方式, 设计了运动范围为 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 单轴 $12\text{ }\mu\text{m}$ 范围内定位精度达 1 nm 的三维微位移平台。最后, 对测头的测量范围、线性、迟滞及分辨力进行了测试。结果表明, 测头的轴向测量范围为 $4.5\text{ }\mu\text{m}$, 横向测量范围大于 $5\text{ }\mu\text{m}$, 轴向分辨力优于 10 nm , 横向分辨力优于 25 nm , 线性较好。开发的测头结构简单、分辨力高、体积小、成本低, 可集成到纳米测量定位平台(NMM), 完成具有大范围、亚微米或纳米级精度要求的测量任务。

关键词: 微触觉测头; 微电容传感器; 微机电系统; 校准装置; 纳米测量机

中图分类号: TB92; TP212.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132112.3087

Design and calibration of 3D micro tactile probe based on MEMS capacitance sensor

WU Jun-jie*, Li Yuan, Li Dong-sheng, Lu Xin, He Ming-xuan

(1. *College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;*

2. *Laboratory of Micro/Nano Measurement, Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China;*

3. *State Key Laboratory of Nano/Micro Fabrication Technology, Research Institute of Micro/Nano Science and Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)*

* *Corresponding author, E-mail: wujunjiesimt@gmail.com*

Abstract: It is difficult to measure large size components in higher precision and a 3D mode in the micro-nano geometrical measurement. Therefore, a high resolution, small sized capacitance sensor was fabricated based on non-silicon Micro-electronic-mechanical system(MEMS) technology. By designing the packaging and weak-capacitance acquisition system of the sensor, a capacitance-based micro tactile probe was developed to measure the 3D dimensions in micro/nano scale. Then, a 3D micro displacement platform was designed to test and calibrate the probe. The macro-micro combination drive mode

收稿日期: 2013-07-11; 修订日期: 2013-08-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51075378); 上海市科委纳米专项基金资助项目(No. 11nm0560800)

was used to design the stage and its moving range is $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ and the uniaxial resolution in $12\text{ }\mu\text{m}$ range is 1 nm . Finally, the range, linearity, hysteresis and resolution of the probe were tested. Results show that the axial range is $4.5\text{ }\mu\text{m}$, the lateral range is greater than $5\text{ }\mu\text{m}$, the axial resolution and the lateral resolution of the probe are less than 10 nm and 25 nm , respectively. The experiments show that the probe has a good linearity and its advantages are simple structure, high resolution, small volume and low costs. The probe developed can be integrated to the nano measuring and positioning machine (NMM) to complete required measurement tasks in large ranges and sub-micrometer or nanometer level accuracy.

Key words: micro tactile probe; micro capacitance sensor; Micro-electronic-mechanic system (MEMS); calibration device; nano measuring machine

1 引言

随着器件结构的微型化和复杂化,解决高深宽比、大尺寸器件的高精度测量和表征问题尤为重要^[1]。在生产测量技术领域,集成触觉测头的坐标测量技术已成为行业标准^[2]。目前,测头开发的技术难点主要集中在:被测尺寸越来越小;制造过程中新型柔性材料的使用要求测头具有更低的测量力;低测量不确定度要求等^[3]。根据传感原理不同,触觉传感器可分为电容式、压阻式、压电式、电感式、光电式、应变计式及复合式等,将上述两种或两种以上的传感原理组合即构成复合式触觉传感器^[4]。

英国国家物理实验室的 G. N. Peggs 等^[5-6]研制了一种基于电容传感器的三维微触觉测头,测头分辨力为 3 nm ,被用于“Isara”三维超高精度纳米测量机上。德国联邦物理研究院(PTB)的 U. Brand 等^[7]联合德国不伦瑞克技术大学的 S. Bütetfisch 和 S. Büttgenbach 研制了一种基于 MEMS 的硅薄膜三维微触觉测头,测头横向分辨力为 3 nm ,轴向分辨力为 5 nm 。瑞士联邦计量检定局(METAS)的 Meli 等^[8]开发了一种电磁式微触觉测头,测头 3 个方向测量力相同,分辨力小于 1 nm 。荷兰埃因霍温技术大学(TUE)的 Wouter O. Prii^[9-10]开发了一种基于三角形拓扑梁悬挂结构的压阻测头,经 E. J. C Bos 优化和完善后,测头在各方向的 1D 重复性达到了 2 nm ,后被商业化为 Gannen 系列测头。上述测头虽然都具有较高的分辨力,但 PTB 的薄膜测头应力分布不均匀,膜结构容易断裂;METAS 测头机械结构复杂,体积较大;NPL 和 TUE 测头采用三角悬梁

结构,解耦麻烦,原型制作成本较高。

本文针对目前高精度测量及触觉式测头开发领域存在的问题,设计了一种基于 MEMS 微电容传感器的三维微触觉测头,分析了其轴向和横向负载模型;开发了一种用于微触觉测头校准的三维微位移平台;最后,对测头的轴向和横向性能进行了分析和校准并开展了测头测量范围、线性、迟滞及分辨力测试实验。

2 测头原理和结构设计

2.1 检测模型

电容式传感器具有结构简单、灵敏度高、动态性好以及能实现非接触测量等优点,能感受 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 甚至更小的位移,被广泛应用于多种物理量的测量中^[11]。本文的电容式三维微触觉测头基于变极距型平行板电容器原理。为实现横向位移的测量,将下极板分割成 a、b、c、d 4 块。测头在轴向和横向负载下的检测模型如图 1 所示。

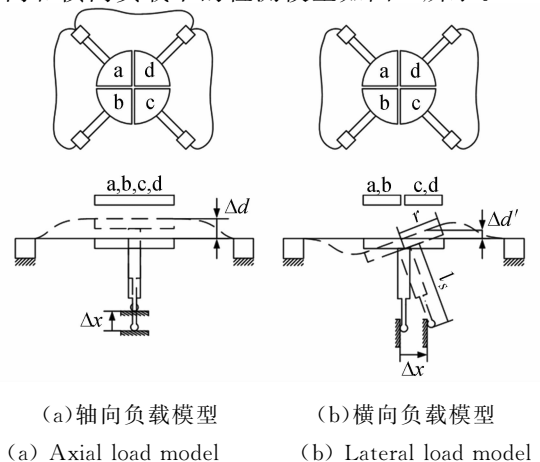


图 1 检测模型

Fig. 1 Detection models

当测量轴向位移时,将下极板 $a、b、c、d$ 相连,被测电容变化为:

$$\begin{aligned} \Delta C_{axial} &= \Delta C_{a+b+c+d} = \frac{\epsilon S}{d_0 - \Delta d} - \frac{\epsilon S}{d_0} = \frac{\epsilon S}{d_0} \left(\frac{\Delta d}{d_0 - \Delta d} \right) \\ &= C_0 \frac{\Delta d}{d_0} \left(1 - \frac{\Delta d}{d_0} \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中: ϵ 为介电常数, S 为电容极板有效相对面积, Δd 为极板间距变化, d_0 为初始间距, C_0 为初始电容。由于 $\Delta d \ll d_0$,式(1)可按 Taylor 级数展开:

$$\Delta C_{axial} = C_0 \cdot \frac{\Delta d}{d_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right) + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \dots \right], \quad (2)$$

略去高次项,得:

$$\Delta C_{axial} \approx C_0 \cdot \frac{\Delta d}{d_0}. \quad (3)$$

当测量横向位移时,将下极板 $a、b$ 相连, $c、d$ 相连(或 $a、d$ 相连, $b、c$ 相连)。此时,上下极板形成 2 个电容,由于上极板偏转引起的电容极距变化量沿着 r 方向是变化的,建立精确的计算模型比较困难。另外,开发的电容式三维微触觉测头在用于实际测量前需进行校准,为简化模型,在理论分析中用 $\Delta d'$ 等效极板偏转后的极距变化,基于平行平板电容计算公式分别计算两个电容的变化量,按 Taylor 级数展开后作差,得:

$$\begin{aligned} \Delta C_{lateral} &= (\Delta C_{c+d}) - (\Delta C_{a+b}) = C_0 \left[\frac{\Delta d'}{d_0} + \left(\frac{\Delta d'}{d_0} \right)^3 + \left(\frac{\Delta d'}{d_0} \right)^5 + \dots \right], \end{aligned} \quad (4)$$

略去高次项,得:

$$\Delta C_{lateral} \approx C_0 \frac{\Delta d'}{d_0}. \quad (5)$$

式(4)中,虽然电容的变化量仍与位移呈非线性关系,但是消除了级数中的偶次项,线性得到了改善。 Δx 与 $\Delta d'$ 的关系较为复杂,与 l_s 及 r 有关,具体数值可通过校准实验得出。测量前,下极板的连接方式可通过电路自由切换。当测针受到横向负载时,上极板发生偏转,电容既有极距的变化,又有极板相对面积的变化。由于偏转角度很小,可忽略极板相对面积的变化。

2.2 MEMS 微电容传感器

高精度电容传感器设计应满足^[12]:(1)尺寸小;(2)采用高介电常数的电介质如聚合物基材料,以使其电容值及变化量在外力作用下达到最大;(3)灵敏度高。微加工工艺中常用的基片是硅片和玻璃,其微细加工技术较成熟,光学、电学和

化学性能较好,有较多的表面键合技术,封装容易。考虑成本因素,设计的微电容传感器采用非硅 MEMS 工艺加工,极板直径为 4 mm。在上极板上以圆周阵列方式设计了 2 圈直径为 300 μm 的圆孔,以减轻上极板重量,防止加工完成后电容上极板的塌陷,提高成品率。微悬臂梁的性能对器件能否按照设计要求工作起着至关重要的作用^[13]。微电容传感器上极板的悬挂采用了 8 根 S 型折叠式微悬臂梁,以增加其抗负载能力。传感器结构如图 2 所示。

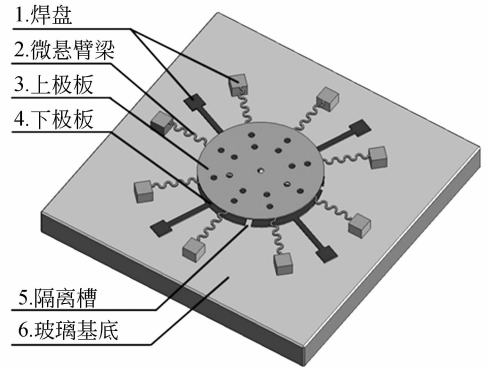


图 2 微电容传感器结构

Fig. 2 Structure of micro capacitance sensor

微电容采用电镀技术加工,主要工艺流程为^[14]:(1)清洗玻璃基底,溅射铜种子层及光刻胶,烘干光刻;(2)反应离子刻蚀,形成下极板隔离通道;(3)掩模版光刻,电镀形成下极板;(4)光刻胶光刻,电镀形成支柱;(5)溅射铜,涂光刻胶,掩模版光刻,电镀形成上极板;(6)用洁净丙酮清洗,通过剥离工艺移除种子层;(7)去除极板间光刻胶,释放电容结构。加工完成的微电容传感器如图 3 所示。

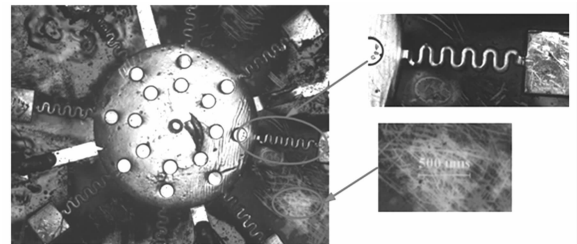


图 3 微电容传感器显微图

Fig. 3 Micrograph of micro capacitance sensor

2.3 测头封装

测头的机械部分主要包括测针、MEMS 微电

容传感器及其固定结构 3 部分。测头的封装主要针对测针与电容上极板的连接及 MEMS 微电容传感器的固定方式进行设计。测针采用 Renishaw 商业化的碳化钨-红宝石测针,测针总长为 6.8 mm。测杆为碳化钨材料,测端球为直径 0.3 mm 的红宝石。测针与电容极板选用环氧树脂粘合。由于碳化钨具有很高的刚度,可忽略测杆由于负载作用产生的变形,认为测端球的位移可以完全传递到电容传感单元。测头封装如图 4 所示。

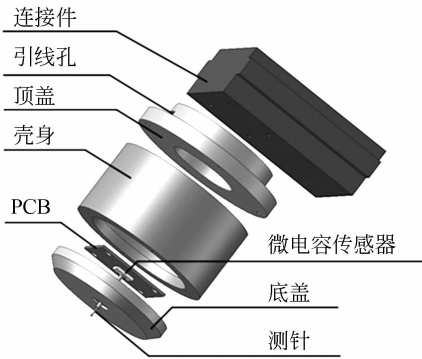


图 4 测头封装示意图

Fig. 4 Assembly diagram of the probe

3 数据采集系统设计

电容检测一般利用激励信号对待测电容进行连续的充放电,形成与电容呈一定关系的电压、电流、频率等信号,从而获得待测电容的电容量^[15]。常用的电容检测方法有电容频率测量法、电容电压测量法和电容数字转换法等。采用电容数字转换法,选用 24 位电容数字转换芯片 AD7747 进行电容量到数字量的转换。AD7747 的测量范围为 ± 8 pF,线性度为 $\pm 0.01\%$,精度为 ± 10 fF,满足微电容传感器输出电容值的采集要求。数据采集系统原理如图 5 所示。

数据采集软件分为下位机和上位机两部分。下位机基于 C8051F 系列单片机,利用 C 语言编程实现对 AD7747 芯片的控制及原始数据的读取。单片机对数据进行预处理后,通过串口发送给上位机。上位机通过 Labview 读取串口数据并对数据作进一步分析及处理。

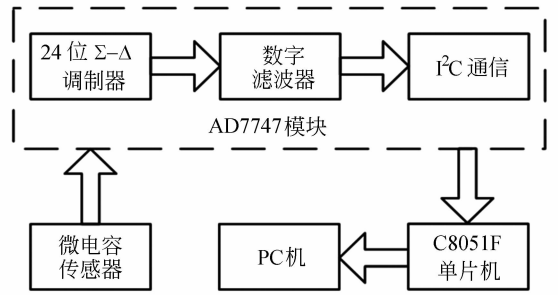
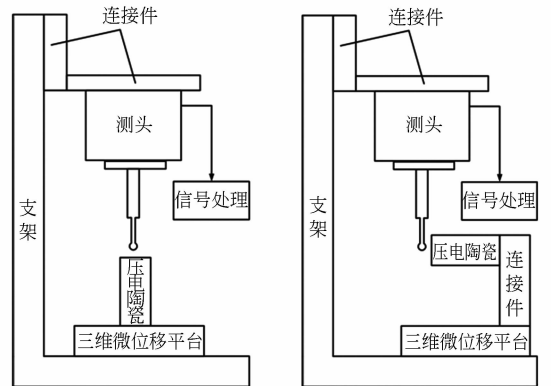


图 5 数据采集系统原理

Fig. 5 Principle of data acquisition system

4 校准装置

校准装置主要由三维微位移平台、单轴压电陶瓷、CCD 监视器及测头固定支架组成,采用宏微双重驱动的精确定位方式^[16-17]。三维微位移平台用于粗定位,其 X、Y 向最大行程为 25 mm,Z 向最大行程为 10 mm,定位分辨力为 $1 \mu\text{m}$ 。压电陶瓷在 $12 \mu\text{m}$ 范围内提供精度 1 nm 的精确定位。CCD 用于辅助观察测针测端球与压电陶瓷表面的接触情况。测头固定支架用于测头的固定及压电陶瓷位移进给方向的调整。校准装置结构如图 6 所示。



(a) 轴向校准模型

(b) 横向校准模型

(a) Axial calibration model (b) Lateral calibration model

图 6 校准装置结构

Fig. 6 Structure of calibration device

根据量值传递准则,校准装置的测量范围、分辨力及精度均应大于测头的测量范围、分辨力及精度。选择高级精度的标准器具时,其误差一般应为被检器具允许总误差的 $1/10 \sim 3/10$ 。根据相关研究,电容传感器的分辨力一般为几纳米

至几十纳米,故搭建的三维微位移平台配合压电陶瓷实现范围 25 mm×25 mm×10 mm,精度为 1 nm 的三维微触觉测头校准装置可以满足测试及校准的需求^[18]。装置实物如图 7 所示。

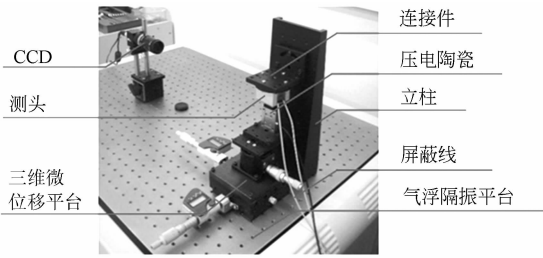


图 7 校准装置实物图

Fig. 7 Photo of calibration device

5 测试及校准结果

5.1 测量范围测试

为完整地表征测头的输入输出特性,需测试其测量范围。当测头的测端小球逼近压电陶瓷表面时,微位移平台以 100 nm 为步距提供位移,测试结果如图 8 所示。

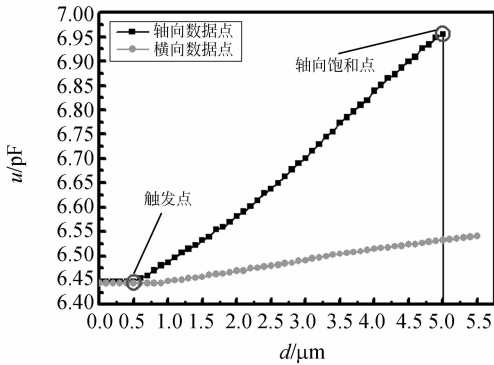


图 8 测量范围测试结果

Fig. 8 Measurement rang test

图 8 中,测头触发点在 0.5 μm 位置,当位移超过 5.0 μm 时,轴向测量范围达到极限(5.0 μm 处电容值显示为 -8 pF,说明上下极板已接触)。因此,确定测头的轴向测量范围为 4.5 μm。由于测头横向测量范围较大,为防止微电容传感器 S 型微悬臂梁损坏,仅在 0~5.5 μm 内对横向测量范围进行测试。结果显示,横向测量范围大于 5 μm。

5.2 线性及迟滞测试

由于传感器自身特性,测头在整个测量范围内随着测量范围的增加非线性也随之增大。取量程的前 3 μm 进行测试,在轴向和横向均以 0.1 μm 为步距测量 30 个数据点,对测得的数据进行直线拟合,结果如图 9 所示。

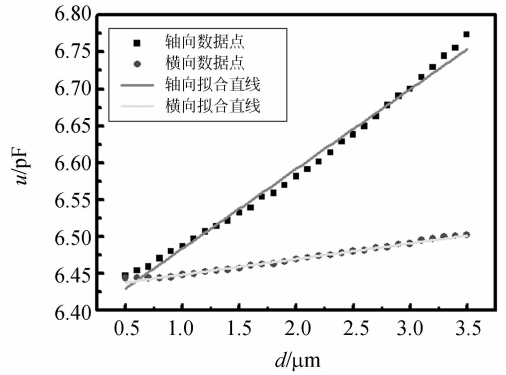


图 9 线性度测试结果

Fig. 9 Results of linearity test

轴向拟合直线为: $C_{axial} = 0.10777 * x + 6.37644$,拟合度 R 为 0.99077,残差平方和为 0.00259;横向拟合直线为: $C_{lateral} = 0.02126 * x + 6.42731$,拟合度 R 为 0.99183,残差平方和为 0.00009。测头具有较好的线性,且横向线性略好于轴向。

迟滞是指传感器在相同工作条件下,正行程特性与反行程特性的不一致程度。迟滞测试结果如图 10 所示。

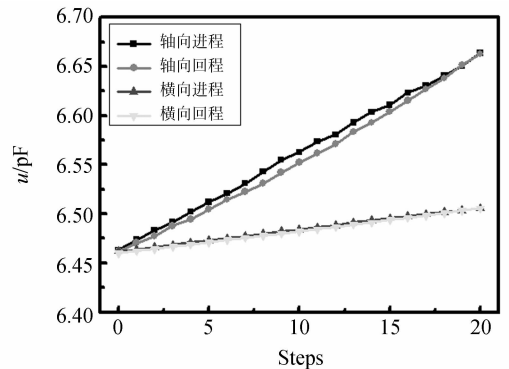


图 10 迟滞测试结果

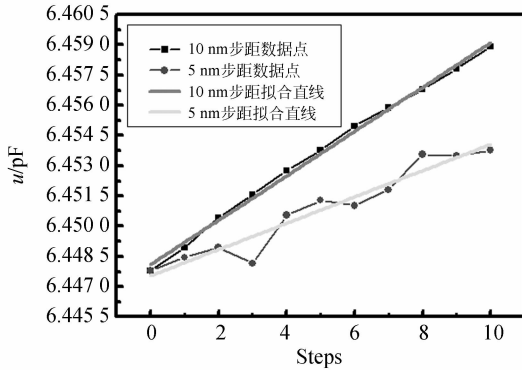
Fig. 10 Results of hysteresis test

测试方法:在线性测试区域随机取起始位置,将压电陶瓷以 0.1 μm 为步距移动 20 个步距,然后以同样步距返回,记录各个点的电容值。实验

测得测头轴向输出最大差值为 0.012 75 pF, 横向输出最大差值为 0.002 24 pF。迟滞较大, 可能是由漂移引起的。

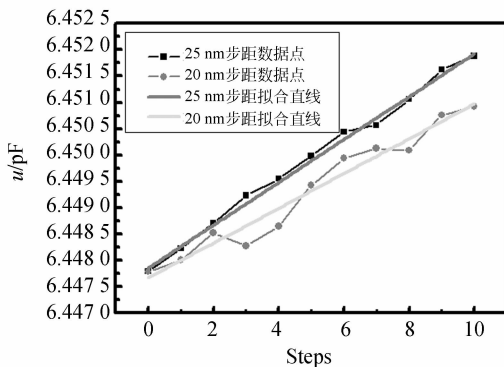
5.3 分辨力测试

分辨力是测头的一个重要指标, 其好坏直接影响测头的探测精度。实验以触发点为起点, 通过设置不同的步距进行测试, 并根据线性确定分辨力。测试结果如图 11 所示。



(a) 轴向分辨力测试

(a) Axial resolution test



(b) 横向分辨力测试

(b) Lateral resolution test

图 11 分辨力测试结果

Fig. 11 Results of resolution test

由图 11 可知, 轴向步距为 10 nm 时的拟合度为 0.996 04, 步距为 5 nm 时的拟合度为 0.925 62; 当横向步距为 25 nm 时的拟合度为 0.996 15, 步距 20 nm 时的拟合度为 0.955 66。通过以上分析, 可以确定测头轴向分辨力优于 10 nm, 横向分辨力优于 25 nm。

6 结 论

本文开发了一种可用于微纳米尺度三维尺寸测量的电容式微触觉测头, 具有结构简单、体积小、制作成本低等优点。基于非硅 MEMS 工艺, 设计了一种微尺寸、高分辨力的微电容传感器。利用电容频率测量法实现了微弱电容信号的采集。通过对测针及传感器的精密装配, 以及传感器与数据采集系统电连接的设计, 开发了横向分辨力优于 25 nm, 轴向分辨力优于 10 nm, 并具有较好线性的三维微触觉测头。测头的轴向测量范围为 $4.5 \mu\text{m}$, 横向测量范围大于 $5 \mu\text{m}$ 。设计了用于测头测试及校准的三维微位移平台, 完成了测头的校准及性能测试。开发的测头可集成到纳米测量及定位平台 (NMM), 用以完成具有大范围、亚微米或纳米级精度要求的测量任务。

本文的后续工作主要集中在: 研究横向负载下位移与等效极距变化量的关系, 建立极板偏转后电容变化量与横向位移之间的精确数学模型; 对测头的重复性、漂移、测量力、零点阈值及测量过程中横向与轴向模型的耦合进行测试; 研究测头的误差及不确定度来源, 实现测头的误差分离及温度补偿。最后, 对测头与纳米测量及定位平台 (NMM) 的集成技术进行研究, 通过相应接口技术和软件的开发, 完成 MEMS 电容式三维微触觉测头与纳米测量及定位平台的集成。

参考文献:

[1] MANSKE E, JÄGER G, HAUSOTTE, *et al.*. Recent developments and challenges of nanopositioning and nanomeasuring technology [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2012, 23(7): 1-10.

[2] PETZ M, TUTSCH R, CHRISTOPH R, *et al.*. Tactile-optical probes for three-dimensional microparts [J]. *Measurement*, 2012, 45(10): 2288-2298.

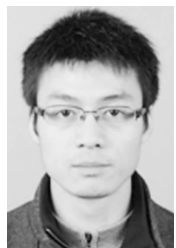
[3] CLAVERLEY J D, LEACH R K. Development of a three-dimensional vibrating tactile probe for miniature CMMs [J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(2): 491-499.

[4] TIWANA M I, REDMOND S J, LOVELL N H, *et al.*. A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 179: 17-31.

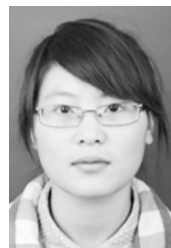
[5] PEGGS G N, LEWIS A J, OLDFIELD S. Design for

- a compact high-accuracy CMM [J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1999, 1(48): 417-420.
- [6] CLAVERLEY J D, LEACH R K. A vibrating micro-scale CMM probe for measuring high aspect ratio structures [J]. *Microsystem Technologies*, 2010, 8-9(16): 1507-1512.
- [7] BÜTEFISCH S, BÜTTGENBACH S, KLEINEBENSTEN T, *et al.*. Micromechanical three-axial tactile force sensor for micromaterial characterisation [J]. *Microsystem Technologies*, 2001, 4(7): 171-174.
- [8] MELI F, FRACHEBOUD M, BOTTINELLI S, *et al.*. High precision, low force 3D touch probe for measurements on small objects [C]. *Proc. of EU-SPEN, Aachen*, 2003.
- [9] PRIL W O. *Development of high precision mechanical probes for coordinate measuring machines* [D]. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2002.
- [10] BOS E J C. *Tactile 3D probing system for measuring MEMS with nanometer uncertainty* [D]. Eindhoven: Graduate University of the Technische Universiteit Eindhoven, 2008.
- [11] 郑银涛. 基于平板式电容的微位移测量系统设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
ZHENG Y T. *Design of micro displacement measuring system based on flat plate capacitance* [D]. Dalian: Graduate University of the Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [12] GIRÃO P S, RAMOS P M P, POSTOLACHE O, *et al.*. Tactile sensors for robotic applications [J]. *Measurement*, 2013, 46(3): 1257-1271.
- [13] 刘双杰, 郝永平. S型折叠式微悬臂梁刚度计算 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 388-393.
- LIU S J, HAO Y P. Calculation for spring constants of folded serpentine micro-cantilevers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 388-393. (in Chinese)
- [14] HE M, LIU R, LI Y, *et al.*. Tactile probing system based on micro-fabricated capacitive sensor [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 194(1): 128-134.
- [15] 盛阳, 赵美蓉, 刘明, 等. 超微力发生系统及其电容采集模块的设计 [J]. *传感技术学报*, 2010, 10(23): 1505-1509.
SHENG Y, ZHAO M R, LIU M, *et al.*. Design of micro force realization system and capacitance acquisition module [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, 10(23): 1505-1509. (in Chinese)
- [16] 节德刚, 刘延杰, 孙立宁, 等. 一种宏微双重驱动精密定位机构的建模与控制 [J]. *光学精密工程*, 2005, 13(2): 171-178.
JIE D G, LIU Y J, SUN L N, *et al.*. Modeling and control of a macro-micro dual-drive ultra-precision positioning mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 171-178. (in Chinese)
- [17] 冯海兵. 一种并联宏/微驱动操作手的工作空间 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 717-723.
FENG H B. Workspace of macro/micro actuated parallel mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 717-723. (in Chinese)
- [18] 卢歆. 三维微触觉测头校准装置的开发 [D]. 杭州: 中国计量学院, 2012.
LU X. *Study on the System for Calibrating 3D Micro Tactile Probes* [D]. Hangzhou: Graduate University of the China Jiliang University, 2012. (in Chinese)

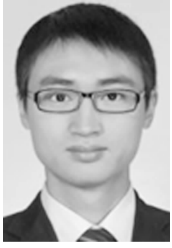
作者简介:



吴俊杰(1989—),男,浙江金华人,硕士,2013年于中国计量学院获得硕士学位,主要从事微米纳米计量及精密仪器方面的研究。E-mail: wujunjiesimt@gmail.com



卢歆(1988—),女,浙江东阳人,硕士,工程师。2012年于中国计量学院获得硕士学位。主要从事微米纳米测量技术的研究。E-mail: luxinxinger@163.com



何明轩(1987—),男,四川南充人,硕士,工程师。2013年3月于上海交通大学获得硕士学位。主要从事 MEMS 的研究。Email: charmingxuan1987@gmail.com

导师简介:



李源(1979—),男,山东莱西人,博士,高级工程师。2002年、2004年、2007年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事微米纳米计量方面的研究。E-mail: liyuan@simt.com.cn



李东升(1957—),男,吉林梨树人,博士,教授、博士生导师。1996年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事超精密工程技术、新型传感技术、现代流量计量仪表技术等方面的研究。E-mail: lidongsheng@cjlu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)