

Dimension Measurement Based on MEMS Micro Tactile Probe and Nanomeasuring Machine*

LI Yuan^{1,2}, ZOU Zi-ying¹, FU Yun-xia¹, FU Xing^{2*}, LI Da-chao², HU Xiao-tang²

(1. Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China;
2. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: According to dimension measurement requirement of micro structure, a measurement system combined by MEMS micro tactile probe and nanomeasuring machine is constructed. On basis of performance verification of probe's output, a series of tests are done. The standard deviations of measurement in same vertical, same transverse direction, and opposite transverse direction are 41.755 2 nm, 6.05 μm , 6.16 μm separately. The standard deviation of difference between trace and retrace in scanning test is 23.088 nm.

Key words: MEMS; micro tactile probe; dimension measurement; nanomeasuring machine
EEACC: 2575

基于 MEMS 微触觉测头和纳米测量机的特征尺寸测量*

李源^{1,2}, 邹子英¹, 傅云霞¹, 傅星^{2*}, 栗大超², 胡小唐²

(1. 上海市计量测试技术研究院, 上海 201203; 2. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 针对微小结构几何量测量的需求, 通过集成 MEMS 微触觉测头和纳米测量机构建了高精度的测量系统。在验证测头性能的基础上, 完成了一系列判断测头测量分辨率和精度的实验, 在轴向、同向横向、异向横向三个方向测量的标准偏差分别为 41.755 2 nm, 6.05 μm , 6.16 μm , 同时, 在扫描实验中进程回程扫描差值的标准偏差为 23.088 nm。

关键词: 微机电系统; 微触觉测头; 尺寸测量; 纳米测量机

中图分类号: TB92

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)12-2097-04

近些年微加工技术的发展对器件、结构的特征几何量测量和表征提出了更高的要求, 而以三坐标测量机为代表的传统测量方法通常会受到测量精度和分辨率的限制, 而原子力显微镜等纳米级的测量仪器会受到测量对象和测量范围的限制, 所以, 针对微米量级器件和结构测量的方法和装置是当前高精度测量领域的一个研究热点^[1]。主要的研究工作集中在微坐标测量机及与之配套的测头的研究上^[2-3], 以实现对器件和结构精确的尺寸测量, 以及结构的表面形貌表征。

本文通过将一种自主开发的 MEMS 微触觉测头^[4]与纳米测量机(Nanomeasuring machine, NMM)^[5]相结合, 构建了高精度的几何量测量平

台。在验证测头输出性能的基础上, 开展一系列判断测头测量分辨率和精度的实验, 包括轴向、同向横向、异向横向三个方向的尺寸测量, 以及对表面形貌的扫描实验。

1 微触觉测头的工作原理

如图 1 所示, 三维 MEMS 微触觉测头由测杆、悬挂系统、封装结构、连接结构几部分组成。测头在进行测量的过程中, 测杆用来将检测到的位移变化传递到悬挂系统中, 悬挂系统的敏感梁发生弯曲, 并通过表面扩散的压阻检测应力的变化。通过惠斯通电桥及后续放大调理电路处理, 输出与被测几何量成正比的电压信号, 从而实现对微位移或微力的高

基金项目: 国家质检总局科技计划资助(D00RJ0704)“纳米测量机在半导体领域的应用”

收稿日期: 2008-06-03 修改日期: 2008-08-25

精度检测^[6]。其中测头的测杆和测端采用超精密加工技术制成。中心连接体和敏感梁构成的悬挂系统采用标准 MEMS 体硅工艺加工。

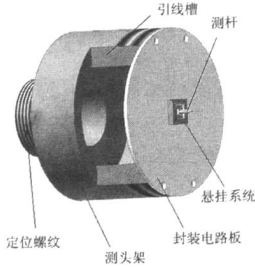


图1 测头装配于 NMM

2 测量系统的构建

三维尺寸测量系统采用了纳米测量机(NMM)作为高精度的定位和测量平台,NMM通过 x 、 y 、 z 方向测量轴上的3个激光干涉仪对定位过程进行实时测量^[7],在 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 范围内实现分辨力为 0.1 nm 的三维定位功能。NMM可以通过特定的接口与微触觉测头的硬件和软件连接和通讯。

在微触觉测头与 NMM 的安装过程中,需要注意 NMM 使用了零膨胀玻璃 Zerodur 作为测头的支撑框架,为了进一步减少测头对温度的敏感程度。测头的相关连接部件也使用了膨胀系数较少的 Fe-Ni36 合金(钢钢)和铝,同时也减小了测头的重量。测头与 NMM 的连接除了需要遵从 Abbe 原则外,也需要考虑 NMM 的预留空间,如图 2 所示。

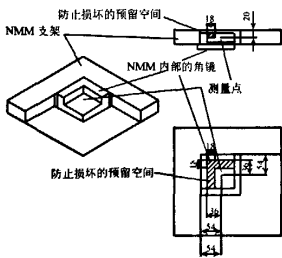


图2 NMM 中测头的工作空间

考虑到 NMM 的固定结构和测试平台之间狭小的空间,整个测头的体积应该限制在 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的范围内。测头架应该方便与测量机的连接和拆装;同时能够引出电路板上的导线;采用热膨胀系数小的材料加工等。基于以上的要求,设计的连接结构实物照片如图 3 所示。

为了检测测头 z 方向上的输出特性是否能够满足纳米测量机对微触式测头的线性要求,因此开展了测头在该方向的输出特性验证实验。实验中首先

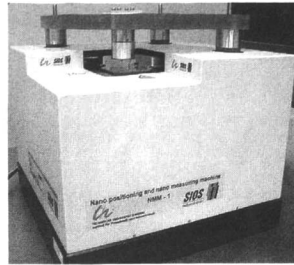
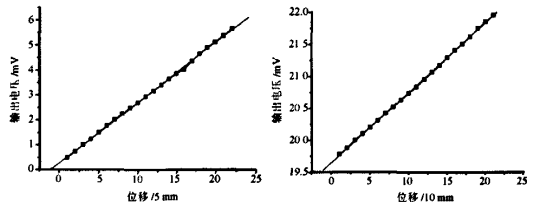


图3 测头装配于 NMM

设定测量机以较大的步距粗动,使得载物台上的加力中心连接体靠近测头的测量端,当通过监视器看到测头即将与被测物体接触时,则缩小步距,以便寻找接触零点。找到后设定纳米测量机载物台从接触零点开始,以 5 nm 为步距给测量端施加 z 向力,通过数据采集器和上位机软件记录测头在 z 方向的输出电压。测得的测量曲线和拟合直线如图 4 (a)所示, 5 nm 分辨力测试的线性拟合直线为: $y=0.2742+0.24147x$,回归标准偏差为 0.0395 。电路检测分辨力为 $0.049\ 038\ 095\ 238\ 1\text{ mV/nm}$ 。

利用同样的测量方法,设定 NMM 载物台按 x 方向移动,步距为 10 nm ,选择测量点后做出该方向的测量和拟合线如图 4(b)所示。图中拟合得到的直线方程为: $y=19.65513+0.10952x$,回归标准偏差为 0.01238 。电路平均检测分辨力为 0.0109667 mV/nm 。



(a) 轴向测头输出特性 (b) 横向测头输出特性

图4 测头在不同方向下的输出特性

3 测量结果及误差分析

在完成上述对测头输出线性的验证实验后,又开展了一系列判断测头对轴向、同向横向、异向横向三个测量分辨率和精度的测量实验,以及对器件表面形貌的扫描实验,并分析测量过程中引起误差、偏差的原因。

3.1 轴向测量精度实验

图 5 所示为测量系统开展标准台阶高度测量的照片,台阶扫描曲线如图 6 所示。

为了更好地定量分析测头在轴向测量中的精度,对 2 mm 标准台阶的基准面和测量面进行了多次重复性实现,结果如表 1 所示。

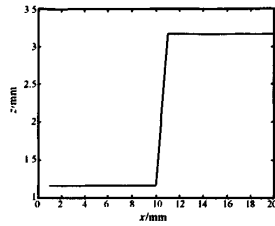
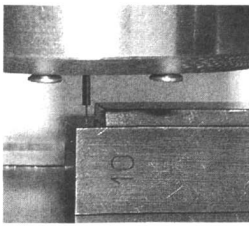


图 5 台阶高度扫描

图 6 台阶高度扫描曲线

表 1 台阶高度测量值 单位:mm

次数	基准面位置	测量面位置	台阶高度
1	1.165 191	3.165 239	2.000 05
2	1.165 211	3.165 184	1.999 98
3	1.165 195	3.165 206	2.000 02
4	1.165 207	3.165 148	1.999 94
5	1.165 210	3.165 181	1.999 97

求得测量平均值: 1.999 996 mm, 标准偏差为 41.755 2 nm。

3.2 横向测量精度实验

图 7 所示为测量系统对标准台阶高度的测量实验, 通过将不同高度的标准量块研和在一个大量块表面, 构成了一个横向台阶。表 2 为相应的测量结果。

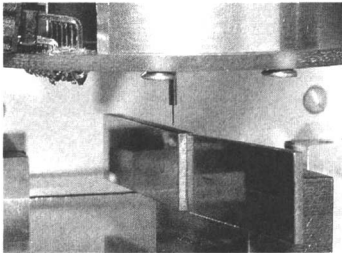


图 7 台阶宽度扫描

表 2 同向台阶宽度的测量值 单位:mm

次数	基准面位置	测量面位置	台阶宽度
1	16.216 19	17.222 53	1.006 34
2	16.216 63	17.222 35	1.005 72
3	16.216 05	17.222 73	1.006 68
4	16.217 06	17.222 31	1.005 25
5	16.216 43	17.222 71	1.006 28

测量的平均值为 1.006 05 mm, 标准偏差 566.286 nm, 测量的误差值为 6.05 μm。通过前面的分析可以看到, 测头在横向和轴向的分辨力的差异不超过 5 倍, 但是测量结果显示的差别却大得多, 经过分析, 发现主要原因在于测头和样品的定位问题, 因为测头与纳米测量机的定位缺乏严格正交方向精度保证, 所以上述策略值并不一定是实际的台阶高度差。如图 8 所示, 当被测物摆放方向偏离正交方向 φ 时, 测得的台阶高度为 D, 这与台阶实际高度 d 之间有较大的差距, 除了被测物与正交方向

的偏离外, 测量点的位置也是导致这个误差的主要原因。从图 8 可以得到以下关系:

$$D = d_1 + d_2 + d_3 = l_1 \cdot \cos\varphi + l_2 \cdot \cos\varphi + d \cdot \cos\varphi$$

其中, l_1, l_2 分别是台阶上下表面接触点与台阶边缘的位置偏差。

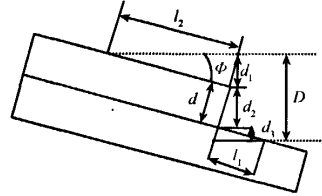


图 8 正交方向定位误差对测量结果的影响

图 9 为测头对标准量块宽度的测试, 这个实验与图 7 实验的主要区别在于: 在上面的实验中, 测头只是从同一个方向横向接触被测物, 而下面的实验需要测头从两个方向接触被测物体, 所以实测值是标准物宽度与测头直径之和。测量结果如表 3 所示。

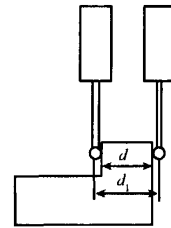


图 9 标准量块宽度测量

表 3 异向台阶宽度的测量值 单位:mm

次序	基准面位置	测量面位置	台阶宽度
1	16.216 19	18.523 15	2.306 96
2	16.216 33	18.522 07	2.305 74
3	16.216 75	18.522 41	2.305 66
4	16.217 04	18.524 17	2.307 13
5	16.216 11	18.521 42	2.305 31

测量平均值为 2.306 16 mm, 标准偏差为 826.105 nm, 减去测头的直径 0.3 mm 后, 得到的 2.006 16 mm, 误差为 6.16 μm, 这个测量结果的误差比上面的横向测量误差还要大, 通过多次对测头的两侧进行接触, 在位移负载完全一致的情况下, 输出电压有 0.185 mV 左右的偏差, 因为自身的电路检测灵敏度限制^[8], 说明测杆自身的偏差约有 15~20 nm, 这主要是因为测杆底部的胶不均匀, 导致测杆相对倾斜造成的。同时, 测端红宝石的加工精度也会影响测量结构, 实验中采用的测端球度偏差小于 0.25 μm, 表面平整度小于 0.013 μm。

选取量块作为测量对象是受到测头可视化装置和测端直径的限制, 我们正在采用新的光学观

察系统,开发具有更小测端的测头,并进一步开展针对更细微结构的测量评价实验。针对横向测量过程中的精度较差的问题,拟开展精密合理的夹具设计来改善测量结果,同时开展器件结构侧向的形貌扫描实验。

3.3 扫描实验

通过引入测头的输出信号反馈到纳米测量机,开展了针对 GCr15 钢抛光表面的扫描,扫描结果如图 10 所示。

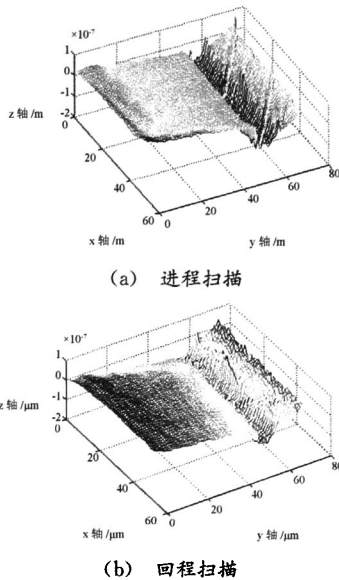


图 10 结构表面扫描实验

上述扫描结果分为进程扫描和回程扫描两个部分,通过计算可以得到各个扫描点差值的标准偏差为 23.088 nm。同时,从上述的扫描曲线可以看到,扫描曲线的边缘远低于扫描曲线的中央部分,类似原子力显微镜中的卷积现象,这是由于红宝石测端是一个 300 μm 球状物体,不同于传统的针式测端,所以在起始接触点就会存在进程回程曲线的异常变化。



李源(1979-),男,博士后,在上海市计量测试技术研究院从事微米纳米计量的研究工作,承担国家质检总局科技计划、上海市博士后基金重点项目、国家科技部公益性行业专项等多项科研项目,发表文章 20 余篇,liyuan@simt.com.cn

4 结论

本文通过结合 MEMS 微触觉测头和纳米测量机构建了针对微结构特征几何量的高精度测量系统。在验证测头输出性能的基础上,完成了一系列判断测头测量分辨力和精度的实验,轴向、同向横向、异向横向三个方向测量的标准偏差 41.755 2 nm, 6.05 μm , 6.16 μm , 进程回程扫描插值的标准偏差为 23.088 nm。

下一步的工作包括对夹持系统的改进设计,开发更小测端的测头和新的光学观察系统,从而拓展测量对象范围、进一步提高测量精度。

参考文献:

- [1] H N Hansen, K Carneriro, H Haitjema, L De Chiffre. Dimensional Micro and Nano Metrology [J]. Annals of the CIRP. 2006, 55, 1-23.
- [2] A Weckenmann, G Peggs, J Hoffmann. Probing Systems for Dimensional Micro-and Nano-Metrology[J]. Meas. Sci. Technol. 2006, 17, 504-509.
- [3] Mike Holmes a RHDT. The Long-Range Scanning Stage; a Novel Platform for Scanned-Probe Microscopy[J]. Precision Engineering. 2000, 24, 191-209.
- [4] 李源, 栗大超, 胡小唐等. 横向负载下的三维 MEMS 微接触传感器力学模型[J]. 纳米技术精密工程. 2007, 5(1), 6-10.
- [5] Jager G, Schott W, manske E, etc. Nanomeasuring Technology-Nanomeasuring Machine[C]// ASPE 2001 Annual Meeting. 2001, 1-10.
- [6] 李源. MEMS 压阻式三维微触觉测头及其在纳米测量机上的应用研究[D]. 2007. 天津大学博士论文.
- [7] Schmidt, T Hausotte, U Gerhardt, et al. Investigation and Calculations into Decreasing the Uncertainty of a Nanopositioning and Nanomeasuring Machine (NPM-Machine). Meas Sci Technol. 2007, 18, 482-486.
- [8] 赵大博, 栗大超, 李源. 三维微触觉传感器的校准系统和方法. 传感技术学报 2006, Vol. 19 (5), 1516-1519.



傅星(1957-),男,博士后,在上海市计量测试技术研究院从事微米纳米计量的研究工作,承担国家质检总局科技计划、上海市博士后基金重点项目、国家科技部公益性行业专项等多项科研项目,发表文章 20 余篇。

基于MEMS微触觉测头和纳米测量机的特征尺寸测量

作者: [李源](#), [邹子英](#), [傅云霞](#), [傅星](#), [栗大超](#), [胡小唐](#), [LI Yuan](#), [ZOU Zi-ying](#), [FU Yun-xia](#), [FU Xing](#), [LI Da-chao](#), [HU Xiao-tang](#)

作者单位: [李源, LI Yuan \(上海市计量测试技术研究院, 上海, 201203; 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津, 300072\)](#), [邹子英, 傅云霞, ZOU Zi-ying, FU Yun-xia \(上海市计量测试技术研究院, 上海, 201203\)](#), [傅星, 栗大超, 胡小唐, FU Xing, LI Da-chao, HU Xiao-tang \(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津, 300072\)](#)

刊名: [传感技术学报](#) **ISTIC** **PKU**

英文刊名: [CHINESE JOURNAL OF SENSORS AND ACTUATORS](#)

年, 卷(期): 2008, 21(12)

引用次数: 0次

参考文献(8条)

- [H N Hansen, K Cameriro, H Haitjema, L De Chiffre](#) [Dimensional Micro and Nano Metrology](#) 2006
- [A Weekenmann, G Peggs, J Hoffmann](#) [Probing Systems for Dimensional Micro-and Nano-Metrology](#) 2006
- [Mike Holmesa RHD](#) [The Long-Range Scanning Stage:a Novel Platform for Scanned-Probe Microscopy](#) 2000
- [李源, 栗大超, 胡小唐](#) [横向负载下的三维MEMS微接触传感器力学模型](#) 2007(1)
- [Jager G, Schott W, manske E](#) [Nanomeasuring Machine](#) 2001
- [李源](#) [MEMS压阻式三维微触觉测头及其在纳米测量机上的应用研究](#) 2007
- [Schmidt, T Hausotte, U Gerhardt](#) [Investigation and Calculations into Decreasing the Uncertainty of a Nanopositioning and Nanomeasuring Machine \(NPM-Maehine\)](#) 2007
- [赵大博, 栗大超, 李源, 傅星, 胡小唐](#) [三维微触觉MEMS传感器测试校准的方法与系统\[期刊论文\]-传感技术学报](#) 2006(5)

相似文献(3条)

- 期刊论文 [李源, 孙薇斌, 邵力, 傅星, 栗大超, 胡小唐, Li Yuan, Sun Weibing, Shao Li, Fu Xing, Li Dachao, Hu Xiaotang](#) [基于MEMS微触觉测头和纳米测量机的扫描测量平台-仪器仪表学报](#)2009, 30(3)
 将自主开发的基于MEMS工艺的微触觉测头与纳米坐标测量平台相结合, 构建高性能的扫描测量平台, 提高了微结构和器件扫描测量的精度和分辨力。基于微触觉测头的测量原理, 研究了微触觉测头应用于纳米坐标测量平台的反馈控制方法以及控制转换参数的标定方法, 讨论了扫描平台不同扫描方式对测量的影响。实验进行了相对平整表面和非平整表面形貌的扫描测量, 结果表明, 相对平整和非平整表面回程回程重复扫描差值的标准偏差分别为15.519 nm和23.088 nm, 系统具有较高的测量重复性。
- 期刊论文 [李源, 傅星, 谢初南, 沈瑶琼, 安兆亮, 栗大超, 胡小唐, LI Yuan, FU Xing, XIE Chu-nan, SHEN Yao-qiong, AN Zhao-liang, LI Da-chao, HU Xiao-tang](#) [MEMS三维微触觉测头的低频振动测试系统-天津大学学报](#)2009, 42(3)
 针对一种MEMS三维微触觉测头, 构建了基于Suss Microtec三维微定位器和PZT压电陶瓷的动态测试装置, 对测头的动态性能进行了表征。分别测试了测头在轴向和横向负载下对不同幅度低频振动信号的响应情况, 研究了测量过程的短时重复性能。结果表明, 压电陶瓷位移-电压曲线的非线性误差在轴向测量模式下小于0.102%, 横向测量模式下小于0.507%。
- 学位论文 [李源](#) [MEMS压阻式三维微触觉测头及其在纳米测量机上的应用研究](#) 2007
 本文针对微小结构和器件对大范围、高精度的坐标测量方法和装置的需求, 研究了一种基于压阻检测原理的MEMS三维微触觉式测头, 并基于纳米测量机(NMM)构建了相应的几何量测量系统。论文完成了以下主要工作: 1. 设计了一种采用由测杆和悬挂系统组成的压阻式微触觉测头, 并基于结构矩阵分析和材料力学原理, 创建了测头的力学分析模型。计算了测头的整体刚度、敏感梁的应力分布、测头灵敏度、变形范围和线性范围等参数, 建立了测端位移与压阻敏感单元应力变化之间的对应关系; 研究了测量过程中测头和样品之间静态力、动态力等受测头结构参数和坐标测量机运动参数的影响机理; 同时建立了测头压阻敏感单元的三维检测模型, 分析了敏感梁的应力分布状况, 确定了压阻单元的敏感方向、类型、压阻数目、网络排布方式和结构尺寸。 2. 建立了测头有限元仿真模型并进行测头结构的优化。模拟计算了测头的应力分布、刚度、机械强度、疲劳极限、共振频率等性能参数, 选择合适的测头悬挂系统拓扑结构和测杆结构, 并在工艺实现的基础上, 创新性地提出了微尺度下的测杆与中心连接体的定位和对准方法和装置, 实现了测头各单元之间的精密装配; 基于测头力学模型确定结构参数的大概范围, 根据测头的梁、中心连接体、测杆等结构参数对性能影响程度, 选择了测头各单元最优化的结构形式和参数; 基于理论分析的结论, 与优化参数的仿真数据进行了的对比和验证。 3. 研究了微触觉测头的工艺加工技术。设计了测头悬挂系统的MEMS版图, 研究了加工过程中有关压阻、凸角补偿等关键工艺, 制定工艺流程, 并与北大微电子所合作加工了测头悬挂系统; 基于超精密加工技术, 实现了测杆及其顶端触觉小球的制造, 并根据NMM对测头工作空间的要求, 研究测头的封装方式和固定方法, 实现和外围处理电路的电连接。 4. 开展了微触觉测头的性能测试。首次创建了基于NMM的微触觉测头的性能测试系统, 研究了压阻检测电桥输出微弱电信号的滤波、放大等方法, 设计了压阻信号采集调理电路中及相应的软件功能模块; 开展了对测头的线性、灵敏度、迟滞、和耦合特性的测试; 利用精密压电陶瓷驱动器, 构建测头低频振动测试平台, 考察和测量了测头对低频信号的响应情况, 分析了测头性能的稳定性和耦合特性。 5. 结合NMM平台, 实现对被测结构的三维高精度几何量测量。通过给NMM引入测头输出的反馈信号, 实现NMM的运动控制功能; 利用NMM的计量学功能, 实现了对被测物的高精度几何量测量, 通过对被测物的线扫描分析和表面形貌扫描, 研究了测头的扫描测量的性能; 最后, 分析了测量过程中测头自重、磁性、振动等因素对测量过程造成的误差影响。

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_cgjsxb200812029.aspx

下载时间: 2010年4月15日