

文章编号: 0253-2239(2008)06-1096-05

集成聚焦式测头的纳米测量机用于台阶高度标准的评价

郭彤 陈津平 傅星 胡小唐

(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 利用集成聚焦式测头的纳米测量机实现了高精度的台阶高度标准评价, 该系统的测量范围可以达到 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。描述了纳米测量机的工作原理, 通过内嵌激光干涉仪和角度传感器的实时测量与反馈, 实现高精度定位与扫描。聚焦式测头只作为零点传感器, 与 3 个激光轴交于一点, 避免了阿贝误差影响。通过将聚焦式测头的输出信号引入到纳米测量机的数字信号控制器中, 实现定位系统的辅助测量, 减小了聚焦式测头的非线性对测量结果的影响。根据 ISO 5436-1:2000 的评价方法对经过标定的台阶高度进行评价, 14 次测量的均方根 (RMS) 偏差为 0.237 nm 。

关键词 测量与计量; 纳米测量机; 聚焦式测头; 台阶高度标准

中图分类号 TH741.4 文献标识码 A

Evaluation of Step Height Standard Using Nano-Measuring Machine Integrated with Focusing Sensor

Guo Tong Chen Jinping Fu Xing Hu Xiaotang

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Evaluation of step height standard with high accuracy is realized using a nano-measuring machine (NMM) integrated with a focusing sensor. The measuring range of the system is up to $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$. The operating principle of the NMM is described. NMM has high accuracy positioning and scanning performance through real-time measurement and feedback of built-in laser interferometers and angular sensors. The focusing sensor is only used as a zero point sensor, intersected at the same point with the three laser beams, which eliminates Abbe error. The output signal of the focusing sensor is introduced into the digital signal processing (DSP) controller of the NMM. The NMM will also measure data in z direction at the same time, which minimizes the influence of the focusing sensor's nonlinearity. According to the international standard of ISO 5436-1:2000, a calibrated step height is measured. The root-mean-square (RMS) deviation of 14 times measurements is 0.237 nm .

Key words measurement and metrology; nano-measuring machine; focusing sensor; step height standard

1 引言

随着纳米技术的发展, 需要在越来越大的范围内测量和操纵越来越小的结构。许多研究机构都在致力于大范围高精度定位与测量仪器的开发^[1~4]。G. Jöger 等^[5]利用微型激光干涉仪实现了一种高精度大范围的定位测量仪器——纳米测量机 (NMM), 通过集成不同类型的光学和机械传感测头, 实现不同方式的测量。光学方法由于其具有快

速、高精度和非接触的优点, 被广泛应用在表面测量中^[6~8]。本文在纳米测量机上集成了聚焦式光学测头, 实现了 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 大范围内的高精度测量, 用于台阶高度标准的评价。

2 纳米测量机的组成

纳米测量机主要由机械和光学系统、电气控制系统和计算机系统组成。其中机械和光学系统组成

收稿日期: 2007-08-07; 收到修改稿日期: 2007-10-22

基金项目: 教育部高校博士点基金(20060056003)和国家 863 计划(2006AA04Z327)资助课题。

作者简介: 郭彤(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事微纳米测试与制造技术等方面的研究。

E-mail: guotong@tju.edu.cn

如图 1 所示。在 x 、 y 和 z 方向的测量轴上分别安装了单频激光干涉仪，它们的光轴交于一点，可以回溯测量数据到米定义上，被测样品放于此处，这里也是传感测头的测量点，这样从原理上消除了阿贝误差的影响。纳米测量机还安装了两个角度传感器，用来记录三个方向上的角度变化，实时修正工作台的偏摆，消除角度误差对测量的影响。考虑到测量系统不同部件之间的不同热膨胀也会对长时间测量产生直接影响，系统通过采用特殊的低膨胀系数的材料减小这项误差。在纳米测量机中激光干涉仪和传感测头的固定部件大部分采用零膨胀玻璃或不胀钢。此外，测量角镜的面形精度也很大程度上决定了测量的不确定度，它的表面形貌会对测量结果产生直接影响，因此通过将测量角镜和标准镜进行比对得到的数据建立起一个模型，对测量结果进行算法修正。电气控制系统中的数字信号处理(DSP)单元是纳米测量机控制技术的核心，采用大量的模/数和数/模转换器监测与控制纳米测量机，将环境参

量、位移值和角度量、测头传感信号、限位信号等接入电气系统，处理之后转化为动态驱动器的控制信号输出，可以在 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 范围内实现分辨力为 0.1 nm 的三维动态实时测量。纳米测量机的系统组成框图见图 2。

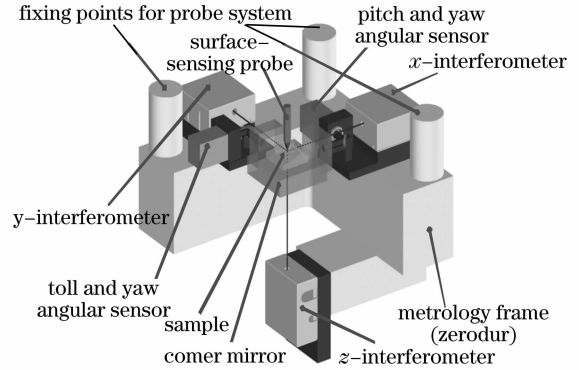


图 1 纳米测量机机械、光学系统组成示意图

Fig.1 Mechanical and optical construction sketch of nano-measuring machine

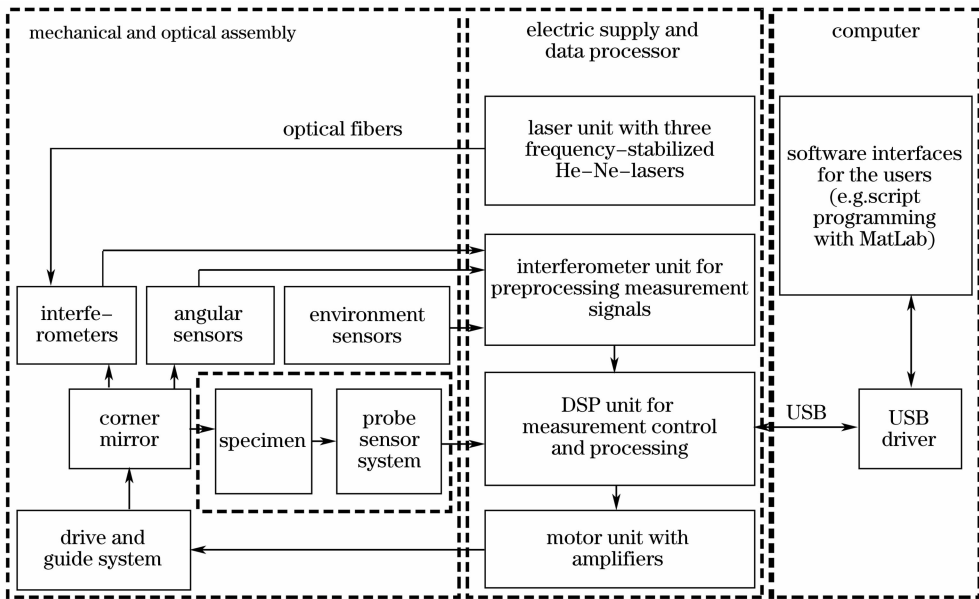


图 2 纳米测量机的系统组成框图

Fig.2 Block diagram of nano-measuring machine

3 纳米测量机的工作原理

纳米测量机的测量功能主要由高精度定位系统和聚焦式测头两大部分实现。聚焦式测头的测量信号接入纳米测量机的数字信号处理控制器，用于实现定位系统的辅助测量，然后通过控制软件对被测样品进行编程测量，得到原始测量数据。利用 Matlab 软件对测量数据进行显示和分析，获得表面形貌信息。由于定位系统在系统中实现了大范围扫

描定位和辅助聚焦式测头测量，因此它的定位性能直接影响了系统的测量结果。

3.1 系统的定位性能

纳米测量机采用电磁驱动，它能够实现高速运动，同时定位精度优于 1 nm 。因为驱动器本身不能自锁，因此需要利用干涉仪的测量值实时反馈控制工作台的位置。纳米测量机在 x 、 y 方向各有一个电磁驱动器，在 z 方向有四个电磁驱动器，这样 x 、 y

方向线性导轨的角度误差可以通过控制系统进行补

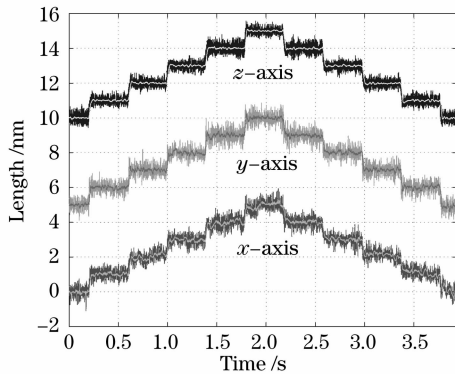


图 3 纳米测量机对 1 nm 步距的响应

Fig. 3 Response to 1 nm step of nano-measuring machine

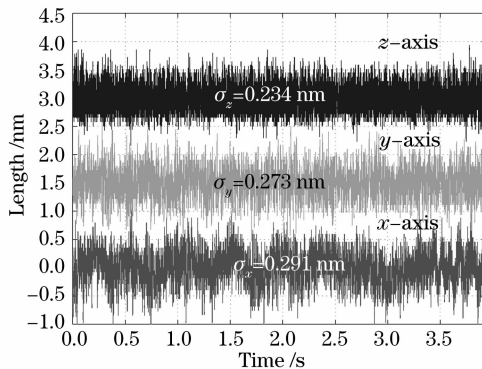


图 4 纳米测量机的定位噪声

Fig. 4 Positioning noise of nano-measuring machine

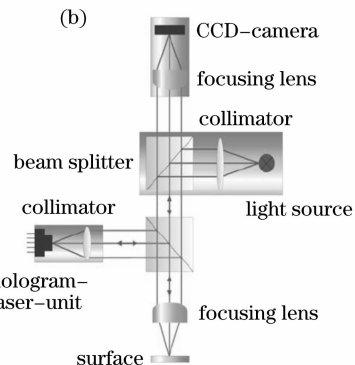
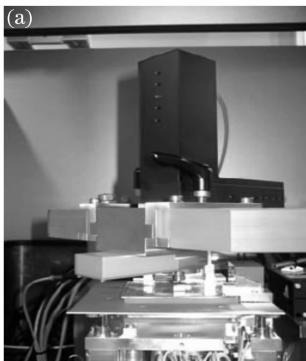


图 5 聚焦式测头图(a)和示意图(b)

Fig. 5 Picture (a) and scheme of focusing sensor (b)

4 实验结果分析

集成了聚焦式测头的纳米测量机可以实现 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 范围内的高精度测量, 本文利用该系统测量了台阶高度标准。

4.1 台阶评价方法

台阶高度评价依据的是国际标准化组织(ISO) 5436-1: 2000 标准, 如图 6 所示, 计算得到

补偿。纳米测量机可以实现三个轴方向的纳米步长运动。图 3 是纳米测量机对 1 nm 步距的响应结果。图 4 是开启驱动器时的定位噪声, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为 x, y, z 轴的标准偏差。实验结果说明了纳米测量机具有高精度的定位能力, 这是内嵌的激光干涉仪、角度传感器和反馈控制系统综合作用的结果, 定位噪声在亚纳米量级, 正是实现纳米级高精度测量的基础。

3.2 聚焦式测头系统

测头系统的一个重要组成部分是全息激光单元, 这个多功能集成单元使得测头实现小型化。整个测头的组成和工作原理见图 5。它利用位置敏感器件接收被测样品表面的反射光, 由于样品表面形貌不同, 反射光在位置敏感器件上的分布发生变化, 通过扫描记录样品表面各点处位置敏感器件的信号变化即可得到被测表面的形貌信息。系统的水平分辨力依赖于激光波长和测头的聚焦孔径, 大约为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 。光学系统的测量范围为 $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$, 利用模/数转换器可以实现小于 1 nm 的测量分辨力。为了能够实时监测所需的区域以及激光点在样品表面的扫描过程, 测头集成了一个 CCD 摄像机, 摄像机的照明来自一个发光二极管(LED), 通过光纤耦合到纳米测量机中, 减小了光源发热的影响。测量前, 需要利用纳米测量机内嵌的单频激光干涉仪对聚焦式测头的特征曲线进行标定。

$$z = \alpha x + \beta + h\delta, \quad (1)$$

式中 z 为垂直方向的测量值, x 为水平方向的测量值, α, β, h 均为为待定参量, 通过最小二乘回归方法确定。用于回归计算的轮廓长度是台阶宽度 ω 的 3 倍, 变量 δ 在 A、B 区域为 -1 , 在 C 区域为 $+1$, 台阶高度 d 是估计值 h 的 2 倍。

为了避免可能的圆角影响, 台阶两边靠近台阶

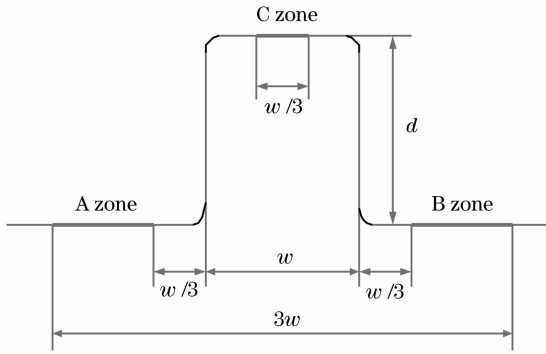


图6 台阶评价方法示意图

Fig. 6 Scheme of step height evaluation method

处的1/3台阶宽度的上表面不参加回归计算,台阶顶部只有中心处1/3台阶宽度的表面参加回归计算。参加评定的部分为图6中的A、B、C部分,应当进行不少于5次的测量,且平均分布在测量标准的测量区域内(避开划伤)。

4.2 测量实验

在使用聚焦式测头进行实际测量前,首先要对其进行标定,得到经过模/数转换的测头信号与真实长度值之间的关系。实验中通过手动调节工作平台使得聚焦式测头达到清晰成像的状态,继续移动工作平台使得传感器的输出信号达到饱和状态(即测头和被测表面之间的距离过近),然后利用纳米测量机自动移动工作台远离测头。同时,聚焦式测头的输出信号被采集存储在纳米测量机中,这样就可以得到测头的饱和状态和工作状态的精确位置信息。在数字信号处理模块中,经过模/数转换器记录的测头测量值通过纳米测量机的软件转换为以长度表示的值,处理模块中有两个模/数转换器,可以同时引入两路测头信号,根据设定测头为不同的类型,处理模块可以对两路信号进行不同的处理,包括求和、求差等,这里只用到了二路模/数信号

$$A_z = k_0 + k_1 S_0 + k_2 S_0^2 + k_3 S_0^3, \quad (2)$$

式中 A_z 为测头输出信号表示的真实长度, S_0 是模/数采集得到的数值; $k_0 \sim k_3$ 为待定系数,需要通过测头的特征曲线以及标定程序来标定得到,再通过软件的设置命令设定,并写入纳米测量机的存储器中。标定的特征曲线见图7,其中需要设定的参量包括了:测量的上限和下限,用于保护测头工作在有效区域;测头的工作点;变换控制器的阈值。需要指出的是,聚焦式测头和其他线性测头不同^[9],它的特征曲线是非线性的,因此标定时只是选取中间线性较好的部分,这样减小了聚焦式测头的工作范围。

但是由于高精度定位系统可以进行辅助 z 向测量,测量结果是将聚焦式测头的测量信号与 z 向激光干涉仪的测量信号相加,因此系统的测量范围并未减小,测量精度将会提高。

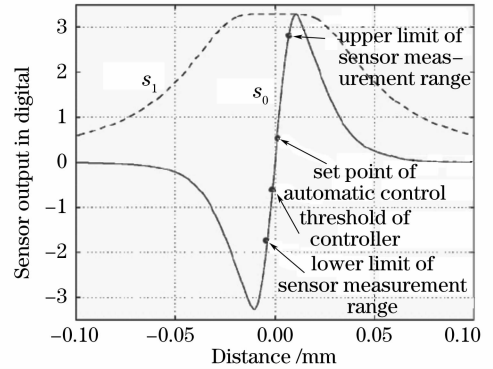


图7 聚焦式测头的标定

Fig. 7 Calibration of focusing sensor

测量样品是台阶高度标准:C26 R26(经德国联邦技术研究院标定:台阶高度294.2 nm;不确定度 $U=2.0$ nm;常量 $k=2$)。对于台阶高度扫描测量了100条轮廓线,对这100个测量值取平均作为台阶高度值。表1为进行14次相同条件下测量的结果,可见测得的平均台阶高度为295.499 nm,均方根(RMS)为0.237 nm。

表1 台阶测量结果

Table 1 Measurement results of steps

Number	Value /nm	Number	Value /nm
1	295.472	8	295.503
2	295.291	9	295.698
3	295.342	10	295.694
4	295.330	11	295.741
5	295.141	12	295.758
6	295.164	13	295.756
7	295.303	14	295.792
Average		295.499	
RMS		0.237	

5 结 论

集成聚焦式测头的纳米测量机实现了非接触快速测量,从原理上避免了阿贝误差影响,测量范围达到 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,高精度激光干涉仪回溯测量数据到米定义,实现了亚纳米级分辨力大范围的表面结构测量,通过定位系统的辅助扫描和测量,减小了聚焦式测头非线性的影响,提高了测量精度,可以用于台阶高度标准的高精度测量。

参 考 文 献

- 1 A. Weckenmann, G. Peggs, J. Hoffmann. Probing systems for dimensional micro- and nano-metrology [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17**(3): 504~509
- 2 R. Leach, J. Haycocks, K. Jackson *et al.*. Advances in traceable nanometrology at the national physical laboratory[J]. *Nanotechnology*, 2001, **12**(1): 1~6
- 3 J. A. Kramar. A nanometre resolution metrology with the molecular measuring machine[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2005, **16**(11): 2121~2128
- 4 S. Cao, U. Brand, T. Kleine-Besten *et al.*. Recent developments in dimensional metrology for microsystem components[J]. 刊名, 2002, **8**(1): 3~6
- 5 G. Jäger, W. Schott, E. Manske *et al.*. Nanomeasuring technology-nano-measuring machine [A]. ASPE 2001 Annual Meeting, Washington D. C., Nov. 2001
- 6 Guo Tong, Hu Chunguang, Chen Jinping *et al.*. Vertical scanning white-light interferometry for dimensional characterization of microelectromechanical system devices[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 668~672
- 郭 彤, 胡春光, 陈津平等. 垂直扫描白光干涉术用于微机电系统的尺寸表征[J]. 光学学报, 2007, **27**(4): 668~672
- 7 Chen Fanxiu, He Xiaoyuan. Instantaneous three-dimensional profile measurement based on temporal wavelet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1803~1806
- 陈凡秀, 何小元. 基于时域小波变换相位提取的三维形貌测量[J]. 光学学报, 2006, **26**(12): 1803~1806
- 8 Hu Xiaodong, Li Dachao, Guo Tong *et al.*. Optical measurement platform for micro-structures characterization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 803~808
- 胡晓东, 栗大超, 郭 彤等. 微结构特性的光学测试平台[J]. 光学学报, 2005, **25**(6): 803~808
- 9 Guo Tong, Fu Xing, Chen Jinping *et al.*. Realization of a large range metrological AFM using NMM [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2005, **26**(1): 1~4
- 郭 彤, 傅 星, 陈津平等. 利用纳米测量机实现大范围的计量型原子力显微镜[J]. 计量学报, 2005, **26**(1): 1~4