

双探头三维表面轮廓测量系统

郭 利 周雅各 张冬仙 章海军

(浙江大学光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 提出了一种将原子力显微(AFM)探头与位置敏感探测器测距探头相结合的双探头三维表面轮廓测量新方法, 可在获取样品表面轮廓的同时, 测定样品局部形貌。搭建了双探头三维表面轮廓测量系统, 阐述了系统的工作原理, 并对其结构组成包括双探头、步进扫描台和计算机控制平台进行了说明。用 2000 line/mm 的光栅进行了扫描实验, 对系统的测量范围进行了标定。以外径 8 mm、内径 4 mm 的金属垫圈为样品, 进行了整体三维表面轮廓与局部表面形貌测量实验, 给出了垫圈表面图和局部三维形貌图。结果表明, 该系统能满足不同尺寸和材质的样品的测量要求, 即可实现对样品轮廓的大范围扫描测量, 又可对样品局部进行高精度形貌测量。

关键词 三维轮廓测量; 双探头; 激光三角法; 原子力显微探头; 步进扫描台

中图分类号 TH742 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0249

A Dual-probe Three-Dimensional Profile Measurement System

Guo Li Zhou Yage Zhang Dongxian Zhang Haijun

(State Key Laboratory of Modern Optical Instruments, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027)

Abstract A new three-dimensional (3D) profile measuring method which combines the atomic force microscopic (AFM) probe with the position sensitive detector (PSD) range probe is proposed. This method can obtain both the large size 3D profile and micro morphological character of a point on the sample. A dual-probe 3D profile measuring system is developed. The working principle is elaborated and the three parts of the system, the dual-probe, the step-controlled scanning stage and the computer controlling center are illuminated. The measuring range of the system is demarcated by measuring a known grating of 2000 line/mm. The 3D surface profile images in local morphology and entire profile of an annular gasket with inside and external diameter of 4 mm and 8 mm are given respectively. The experimental results show that this system is expected to be utilized both in large range measurement and local three-dimensional reconstruction with high-precision for samples which are of different sizes and materials.

Key words 3D profile measurement; Dual-probe; laser triangulation; AFM probe; step-controlled scanning stage

1 引 言

三维表面轮廓测量技术是获取物质表面形态特征的重要手段。与传统的利用摄影机、照相机、扫描仪等检测出的物体二维图像相比, 物体的三维结构可更加真实地反映客观物体, 提供丰富而准确的信息^[1]。三维表面分析统计特性好、误差小, 更接近真实表面, 因而在材料科学、生命科学、环境科学、纳米科学等研究领域以及机械制造、信息电子等现代工业领域具有极大的应用价值和研究意义^[2~4]。原子力显微(AFM)探头具有纳米级分辨率, 在三维表面形貌测量中有广泛应用^[5], 但当探头与样品表面的距离达纳米尺度时, 易造成探头的损坏及样

品的污染, 而且其扫描范围仅有十几微米, 只适合做微小面积点的测量^[6]。基于激光三角法的位置敏感探测器(Position sensitive detector, PSD)测距探头可进行大范围扫描得到样品的三维表面轮廓, 具有非接触、测量速度快的优点, 但受激光光斑尺寸限制, 不能满足精度要求较高的表面测量^[7]。一些精密零件以及在特殊环境(高温、极地)下使用特种材料制造的元器件、设备材料常常既要测量整体轮廓又要获取局部的分子甚至原子级三维形貌, 为了同时满足这两种测量要求, 本文提出了将 AFM 探头与 PSD 测距探头相结合的双探头三维表面轮廓测量的新方法, 并研制了可同时进行大范围三维表

作者简介: 郭 利(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: lydia.guo.1985@gmail.com

导师简介: 章海军(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电检测及纳米技术方面的研究。E-mail: zhanghj@zju.edu.cn

面轮廓测量和样品表面点的三维形貌测量的系统。

2 原理与方法

双探头三维表面轮廓测量系统的测量原理包括两方面。AFM 探头：其基本原理是基于微探针与样品之间的原子力作用机制^[8]。当微探针在纵向逼近样品表面时，针尖的原子与样品原子之间产生原子间作用力，造成微悬臂的形变，微探针被固定在

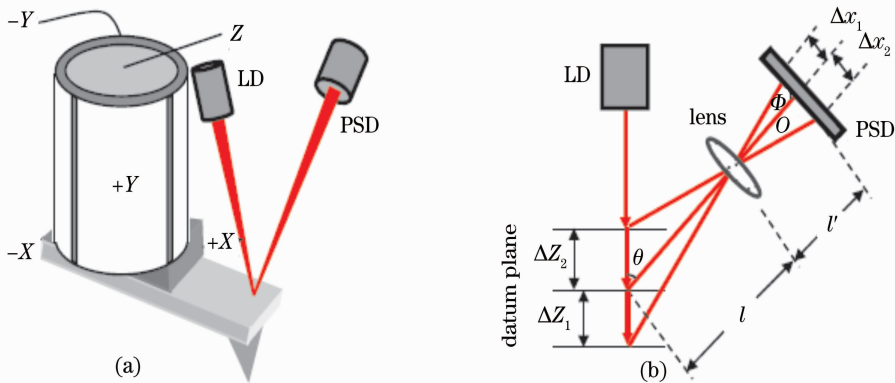


图 1 双探头测量原理。(a) AFM 探头；(b) PSD 测距探头

Fig. 1 Principle of the two-probe measurement. (a) AFM probe; (b) PSD ranging probe

PSD 测距探头：其测量原理如图 1(b) 所示，激光束垂直入射样品表面，产生漫反射，与入射光成 θ 角的透镜汇聚反射光，投射在光电探测器 PSD 上形成像点。探测面上的像点位置的变化 Δx_1 、 Δx_2 分别反映了物体相对于基准面的上下移动 ΔZ_1 、 ΔZ_2 。 $\theta = 45^\circ$ 时，像点在光电探测面上的移动量 Δx 较小，可得到位置变化量 ΔZ 与 Δx 的近似线性关系 $\Delta Z = (2^{1/2} \Delta x / \beta) \sin \Phi$ ， β 为光学系统的横向放大

率， Φ 为 PSD 光敏面与光轴的夹角。在测得 Δx 后，就可得到 ΔZ ，经扫描得到数据矩阵后，由软件处理得到样品三维表面轮廓。

3 测量系统的研制

本系统由双探头测量子系统、电控扫描子系统和计算机控制子系统组成，其框图如图 2 所示。

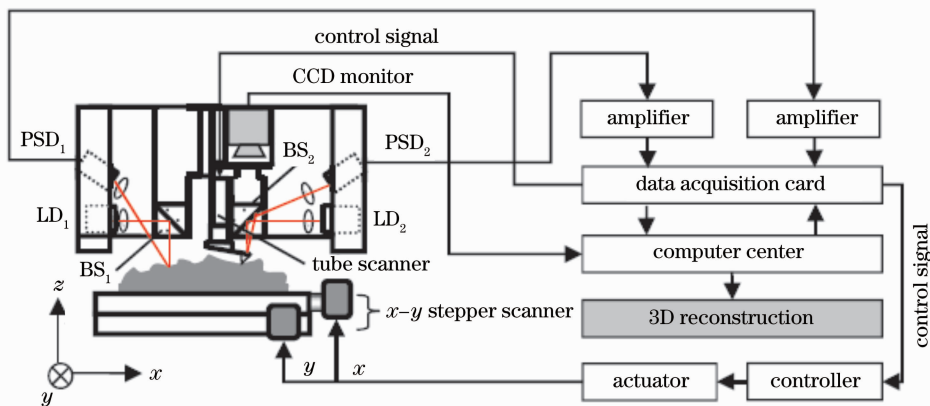


图 2 双探头三维轮廓测量系统框图

Fig. 2 Block diagram of the dual-probe 3D measurement system

3.1 双探头子系统

双探头子系统包括两个模块：激光器 LD_1 ，分束镜 BS_1 ，以及 PSD_1 构成 PSD 测距探头模块；

LD_2 ， BS_2 、 PSD_2 和四象限压电陶瓷单管扫描器、美国 DI 公司生产的 NP-S 型 Si_3N_4 原子力微探针构成 AFM 探头模块。系统工作时，首先由计算机控

制进行大范围三维轮廓测量,先将 AFM 探头升起,向步进电机发出控制信号,PSD 测距探头在样品表面进行扫描,LD₁ 发出的激光经 BS₁ 转折光路并被样品反射后,由 PSD₁ 感应光斑质心信号,PSD₁ 引脚的电流信号经前置放大和信号处理后由数据采集卡采集信号。需要对样品进行局部测量时,可通过控制单管压电扫描器来控制 AFM 探头对样品表面进行扫描测量。CCD 监视器用来监控扫描过程和探针情况。

3.2 电控扫描子系统

电控扫描子系统由步进电机控制器、驱动器以及微动扫描台组成。微动扫描台采用一维电控微位移平台在 X 方向和 Y 方向上叠加搭建而成。该平台由步进电机驱动,经精密丝杠传动,将微转动转化为微平动。由于采用了电流细分技术,微动扫描台达到了 1 μm 的高分辨率。步进电机控制器由数据采集卡的两路数/模(D/A)通道输出信号,对步进电机速度和方向进行控制。采用森创 SH-20403 两相混合式步进电机细分驱动器,根据控制器发出的信号对电机进行电流细分驱动。

3.3 计算机控制子系统

计算机控制子系统是整个系统的数据处理中心与控制中心,包括数据采集卡、计算机数据采集与控制单元以及三维重建软件单元。计算机控制单元可对探头、扫描范围、偏移量、扫描时间以及数据量进行设置,再通过数据采集卡的 D/A 口输出扫描台控制信号,以控制扫描的启停和路径。数据采集卡分配四个模/数(A/D)口采集两个探头的测量数据。PSD 采集到的信号经过前置放大和信号运算处理后,进入数据采集卡,由软件计算获得测量点高度 Z,结合测量点坐标(X,Y),生成该测量点数据(X,Y,Z),测量点数据组成矩阵[X_i,Y_i,Z_i],三维重建软件利用采集到的数据矩阵,通过 B-Rep 法^[9,10]对样品表面轮廓进行三维重建。利用 OpenGL 模拟光照的强度和角度,用亮度信息和颜色信息表示高度信息,构造出样品的三维表面轮廓。

4 实验结果及分析

将系统的光路校准,各子系统调试好后,分别以光栅和外径 8 mm、内径 4 mm 的金属垫圈为样品,进行了测量范围标定实验和系统功能验证实验。

4.1 测量范围的标定

实验中所用的标准光栅为 2000 line/mm。用 AFM 探头扫描光栅以对测量范围进行标定。实验设定扫描范围为 3000 nm×3000 nm,实际测得的扫描数据经计算机处理,得到如图 3 所示的光栅表面三维形貌图。因光栅栅距为 500 nm,图 3 中光栅条纹数为 6,证实横向扫描范围为 3000 nm×3000 nm。

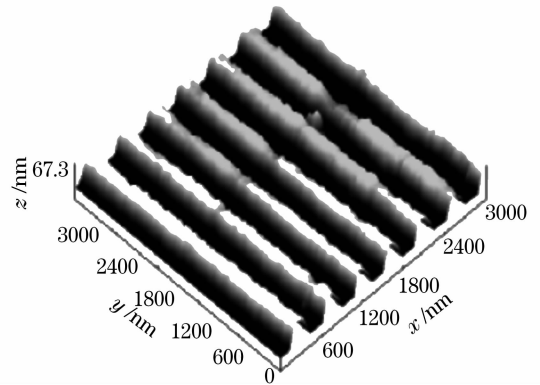


图 3 标准光栅的三维表面形貌

Fig. 3 Three-dimensional morphology of standard grating

4.2 垫片三维表面轮廓及局部表面形貌测量实验

以垫片为样品进行整体三维表面轮廓与局部表面形貌测量的可行性实验。首先扫描整体三维表面轮廓:将垫片固定到样品台,采用 PSD 测距探头扫描,根据垫片的大小设定扫描范围为 10 mm×10 mm,相邻采样点间距 100 μm,用计算机软件系统得到如图 4(a)所示的三维表面轮廓图,可得垫片的外径为 8.651 mm,内径为 4.232 mm,垫片轮廓平均高度为 925.6 μm。

然后对样品进行局部表面形貌测量。移动扫描台,使待测样品处于 AFM 探头的微探针下方,当探针逼近样品到原子力工作距离时开启控制系统,驱动压电陶瓷管进行扫描,设定扫描范围为 3200 nm×3200 nm,得到图 4.2(b)所示的垫圈局部点的三维表面形貌图,其表面平均粗糙度为 382.6 nm。扫描控制软件可在扫描的同时绘制表面形貌图,也可在扫描完成系统保存数据后再行绘图。

比较图 4(a),(b),图 4(a)中垫片的三维表面轮廓比较平滑,没有明显缺陷,但图 4(b)显示的垫片局部三维形貌表明,垫片表面存在一些凹痕和台阶,使表面显得非常粗糙。可见该系统能实现对一定样品的整体三维轮廓测量及其局部点的三维形貌测量。

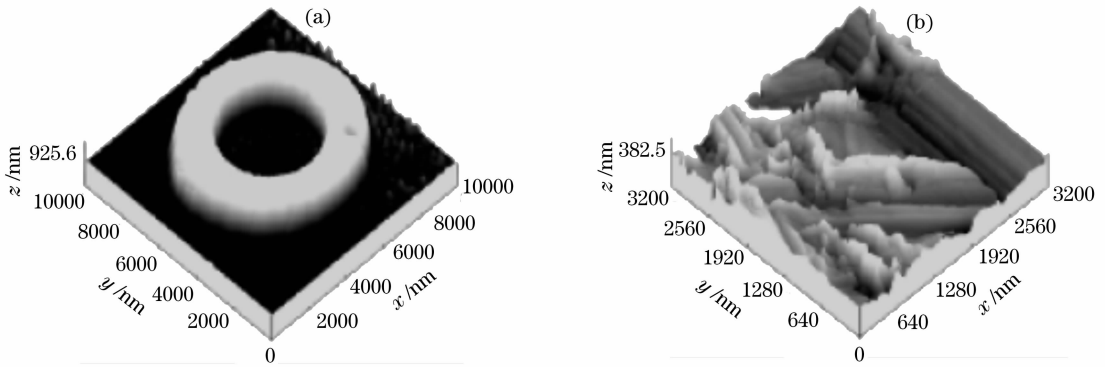


图 4 环形垫圈表面三维轮廓图。(a) 整体三维轮廓;(b) 局部点三维形貌

Fig. 4 Three-dimensional profile maps of the annular gasket. (a) entire profile; (b) local morphology

5 结 论

通过集成 AFM 探头和 PSD 测距探头, 结合计算机控制平台与微动扫描平台, 可实现样品表面三维轮廓测量以及局部三位形貌的测量, 构成了性能良好的双探头三维轮廓测量系统。该系统工作稳定, 对扫描样品的电学和物理学性能限制小, 能满足不同尺寸和材质的样品的测量要求, 可望在材料研究、工件检测等诸多领域中得到应用。通过电流细分技术细分步进电机的步长以及改用最小步长更小的步进电机, 可获得更高的横向分辨率。通过设计更加紧凑和精密的结构, 对系统进行进一步优化, 继续增强软件功能, 系统的实用价值将会有更大提高。

参 考 文 献

- 1 Sun Changku, Ye Shenghua. Laser Measurement Technology [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2001, 129~131
孙长库, 叶声华. 激光测量技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2001, 129~131
- 2 Jiang Xiangqian, L. Blunt. Advance in the three-dimensional surface metrology[J]. *J. Engineering Design*, 2000, (4): 98~100
蒋向前, L. Blunt. 三维表面测量的发展[J]. 工程设计, 2000, (4): 98~100
- 3 Ph. Contet, J. F. Ville. Surfascan 3D- An industrial 3D surface

texture characterization instrument[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1995, **35**(2): 151~156

- 4 Bennett J M. Recent development in surface roughness characterization[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1992, **3**(8): 1119~1127
- 5 Zhang Dongxian, Zhang Haijun. A new type of atomic force microscope and its applications[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(1): 51~54
张冬仙, 章海军. 一种新型原子力显微镜及其应用[J]. 光子学报, 2002, **31**(1): 51~54
- 6 Shi Yang, Zhang Haijun. Study on a novel atomic force microscope with large scanning range [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(6): 30~33
施洋, 章海军. 新型大扫描范围原子力显微镜的研究[J]. 光电工程, 2004, **31**(6): 30~33
- 7 Feng Junyan, Feng Qibo, Kuang Cuifang. Present status of high precision laser displacement sensor based on triangulation[J]. *J. Appl. Opt.*, 2004, **25**(3): 33~36
冯俊艳, 冯其波, 匡萃方. 高精度激光三角位移传感器的技术现状[J]. 应用光学, 2004, **25**(3): 33~36
- 8 Zhang Yiyi, He Jie, Shang Guangyi *et al.*. An atomic force microscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(1): 112~116
张亦奕, 贺节, 商广义等. 原子力显微镜[J]. 光学学报, 1995, **15**(1): 112~116
- 9 Idesawa M. A system to generate a solid figure from three views [J]. *Bulletin of the JSME*, 1973, **16**(92): 216~225
- 10 Qing Xujia, Ji Fengxin, Gao Zhaofa. Realistic representation of B-Rep Model-Based 3D solid [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2001, **20**(2): 283~285
秦绪佳, 纪凤欣, 高兆法. 基于 B-Rep 模型的三维实体的真实感显示[J]. 机械科学与技术, 2001, **20**(2): 283~285