

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.01.05

用于微球球度测量的双 SPM 测头对准系统

半梦, 丁鹏翔, 方传智, 王超群, 陈丽娟, 黄强先

(合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

摘要: 压电微音叉与钨探针结合, 构成 SPM(扫描探针显微镜)的扫描测头。将双测头对称置于微球的赤道圆截面处, 构成微球球度差动测量系统。通过视觉引导系统对双测头进行粗对准, 用视频显微镜对微球和测头分别聚焦, 拍摄多组照片, 然后对对准图像进行小波分析边缘检测及多图像融合处理, 再将图像处理结果反馈到系统进行精确对准。在实际实验中, 获得了该对准方法下微球赤道圆截面的测量结果, 并分析了对准误差对系统测量结果带来的影响。

关键词: 扫描测头; 差动测量; 对准系统; 小波分析; 图像融合

中图分类号: TB9; TH71; TH89

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)01-0020-04

Dual SPM Probe Alignment System for Measuring Sphericity of Microspheres

MI Meng, DING Pengxiang, FANG Chuazhi, WANG Chaoqun, CHEN Lijuan, HUANG Qiangxian

(Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The piezoelectric tuning fork is combined with tungsten probe to form a scanning probe of SPM. The double probe is symmetrically placed at the equatorial circle cross section of the microsphere to form a microsphere sphericity differential measurement system. The dual probes are roughly aligned by a visual guidance system. The microsphere and probes are focused by video microscopy, and multiple groups of photos are taken. Then the aligned images are processed by wavelet analysis edge detection and multi-image fusion, and the image processing results are fed back to the system for accurate alignment. In the actual experiment, the measurement results of the equatorial circle cross section of the microsphere under the alignment method are obtained, and the influence of alignment error on the system measurement results is analyzed.

Key words: scanning probe; differential measurement; alignment system; wavelet analysis; image fusion

0 引言

在微纳技术领域, 微球的使用越来越广泛, 例如微纳米三坐标的测头, 其直径在数百微米之内, 球度也要求控制在数十纳米甚至更高精度之内。目前微球球度测量仍处在探索阶段, 还没有非常成熟的技术^[1]。本文提出一种针对球径在数百微米量级的微球球度测量方法, 在测量系统内, 利用两个对称置于被测球赤道圆截面的 SPM(扫描探针显微镜)测头, 实现差动测量。其中, 测头的对准由视觉对准系统实现, 此系统包括视觉对准装置(硬件)及图像的边缘检测与融合处理算法(软件)。目前边缘检测的方法有很多, 传统的边缘检测算法有 Robert 算法、Prewitt 算法、Sobel 算法和 Laplace 算法等, 这些算法相对简单有效, 但是也存在一些不足的地方, 比如对噪声比较敏感等^[2-3]。对于图像边缘检测, 小波变换在检测图像细节部分有更多的优势^[4]。因此, 本文提出的系统采用基于多尺度

分析的小波变换实现测头对准图像的边缘检测。

1 实验原理

1.1 测量系统原理

测量系统原理如图 1 所示, 扫描测头由大长径比钨探针粘接在石英音叉上面构成, 通过机械结构将测头固定到微动工作台, 测头的位移信息由微位移传感器得到。实际测量过程中, 双测头对称放在被测微球的赤道圆两侧, 信号发生器提供的正弦电压激励使测头在谐振状态下振动, 微动台驱动测头逼近被测微球到一定距离时, 测头的谐振幅值会减小, 通过检测电路将测头的幅值信号采集到计算机中, 通过振幅反馈控制微动工作台的运动状态, 当测头幅值降低到参考值时, 微动工作台会停止运动。此时记录测头的位置, 得到该位置点的信息。通过旋转结构角度分度盘, 将被测微球进行多角度旋转, 得到多组被测微球表面轮廓参数, 实现对被测微球的三维测量, 再通过计算得

到被测微球的球度。

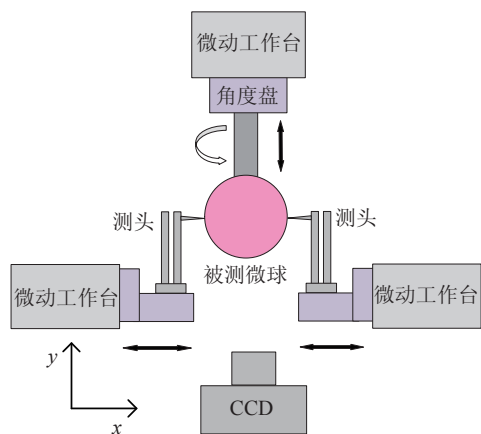


图1 测量结构示意图

1.2 视觉对准误差分析

在每次测量时，双测头均沿着球的赤道圆测量，从而保证球度数据的准确性。当测头不完全沿着赤道圆移动时，就会在测量方向上产生误差。视觉对准形成误差的原理如图2所示。

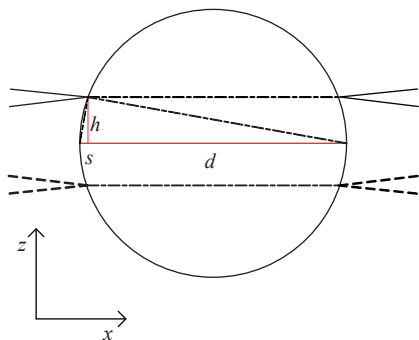


图2 视觉对准误差原理示意图

在图2中， d 为被测微球的直径， h 为对准时测头探针尖偏离赤道圆截面的纵向距离， s 为由于偏移 h 在横向测量方向上形成的测量误差。假设直径 d 为 $300\ \mu\text{m}$ ，由偏移形成的测量误差为 $10\ \text{nm}$ ，按图2中几何关系 $h^2 = s(d - s)$ ，由于 $s \ll d$ ，故可得 $h \approx \sqrt{s \cdot d}$ 。计算得到的偏移距离 h 约为 $1.73\ \mu\text{m}$ ，所以在对准时只要保证两扫描测头探针在 $\pm 1.73\ \mu\text{m}$ 的误差范围内，即可以保证测量误差在 $10\ \text{nm}$ 范围内。

2 视觉对准实验

2.1 视觉对准装置

测头的粗对准由精密位移手调三维平台实现，其

行程分辨力为 $10\ \mu\text{m}$ ，可保证测头偏离测量赤道面的距离在微米数量级，相应的测量误差可以控制在小于几十纳米的范围内。对CCD拍摄的图像进行边缘检测得到对准结果。显微镜的分辨力已在微米级，因此基于显微镜视觉引导的方法是可行的^[5]。图3是实际搭建的视觉对准测量系统。对粗对准情况下拍摄的图片进行图像处理，将处理结果反映的对准情况反馈到对准系统，如果有差别，则通过精密位移台和微动台进行精对准补偿，获得误差允许范围内的对准效果。

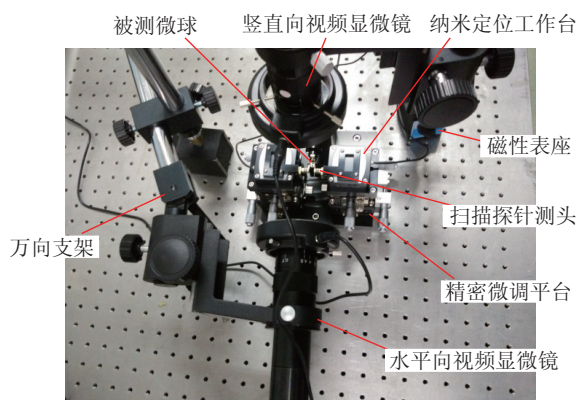


图3 视觉对准结构实物图

2.2 图像获取与合成

在视觉对准时，由于测头探针和被测微球不能同时处在同一个聚焦平面，故对双探针和被测微球进行不同深度的聚焦，用视频显微镜分别拍摄多幅图像，之后对多幅原始图片进行图像融合，以获得更全面的图像信息。

图像融合是指将多源信道所采集到的关于同一目标的图像数据经过图像处理和计算机技术等，最大限度的提取各自信道中的有效信息，最后综合成高质量的图像。本文利用Zerene Stacker软件，对拍摄的探针和微球的不同深度聚焦的图片分别进行图像融合，得到较清晰的探针和微球的图像，再将分别将合成后的探针和微球图像进行小波边缘检测处理，分析得出对准效果。

3 实验结果与分析

3.1 小波分析边缘检测

小波多尺度边缘检测是利用一个平滑函数，在不同的尺度下平滑所要检测的图像，通过计算图像平滑后的小波变换系数模的一阶或二阶导数，找出像素灰度的突变点。当把小波函数看作某一平滑函数的一阶

导数时, 信号小波变换模的局部极值点就是信号的突变点; 当把小波函数看作某一平滑函数的二阶导数时, 信号小波变换模的过零点就是信号的突变点。因此, 图像的边缘就可采用检测小波变换系数模的过零点和局部极值点的方法得出^[6]。

图像可以用平面坐标系的二次函数 $f(x, y)$ 表示, $\psi_a(x, y)$ 为多尺度小波函数, 则图像在尺度 a 下的小波变换可表示为

$$W_a f(x, y) = f(x, y) \cdot \psi_a(x, y) \quad (1)$$

选择高斯函数一阶导数作为小波函数是比较成熟和高效的计算方式, 所以本文也采取高斯函数作为小波平滑函数。高斯函数表达式定义为

$$\theta(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x^2+y^2)} \quad (2)$$

又因为

$$\iint_{R^2} \theta(x, y) dx dy = \iint_{R^2} \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x^2+y^2)} dx dy = 1 \quad (3)$$

因此 $\theta(x, y)$ 可以用作小波平滑函数。令两个基本小波函数为

$$\psi_1(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial x} \quad (4)$$

$$\psi_2(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y} \quad (5)$$

引入尺度 a 后, 有

$$\theta_a(x, y) = \theta\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{a}\right) \quad (6)$$

$$\psi_{1a}(x, y) = \frac{\partial \theta_a(x, y)}{\partial x} = \frac{1}{a^2} \psi_1\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{a}\right) \quad (7)$$

$$\psi_{2a}(x, y) = \frac{\partial \theta_a(x, y)}{\partial y} = \frac{1}{a^2} \psi_2\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{a}\right) \quad (8)$$

原始图像在高斯函数尺度 a 下, 沿 x, y 方向进行小波变换的结果可表示为

$$W_{1a} f(x, y) = f(x, y) \cdot \psi_{1a}(x, y) \quad (9)$$

$$W_{2a} f(x, y) = f(x, y) \cdot \psi_{2a}(x, y) \quad (10)$$

变换后的模值和幅角分别为

$$M_a f(x, y) = \sqrt{|W_{1a} f(x, y)|^2 + |W_{2a} f(x, y)|^2} \quad (11)$$

$$A_a f(x, y) = \arctan \left| \frac{W_{1a} f(x, y)}{W_{2a} f(x, y)} \right| \quad (12)$$

模 $M_a f(x, y)$ 在 $A_a f(x, y)$ 方向上的最大值点的集合即是图像的边缘。

尺度参数 $a = 2^j (j = 1, 2, 3)$, 图像大小为 $[M, N]$, 小波多尺度边缘检测的程序流程如图 4 所示。

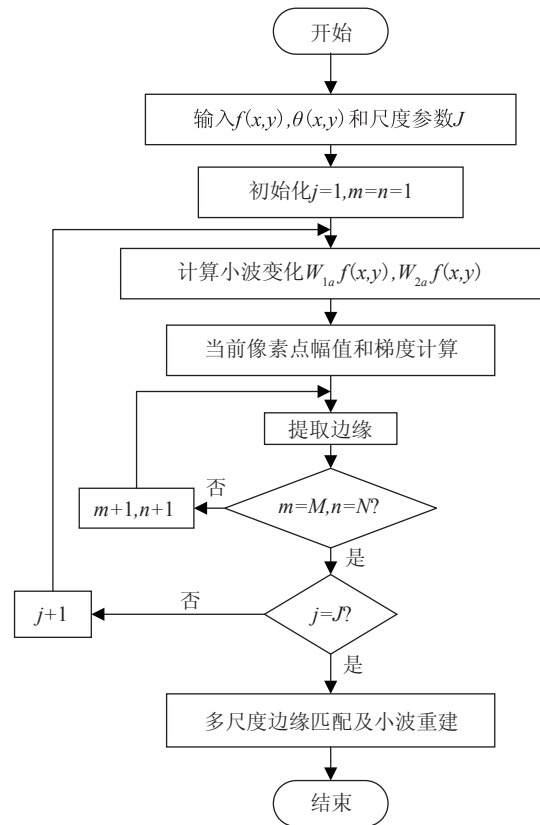
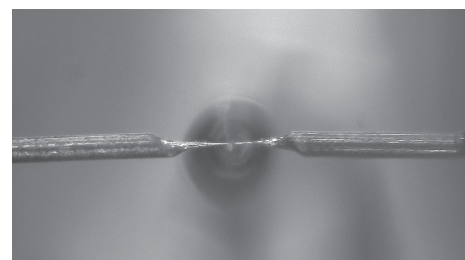


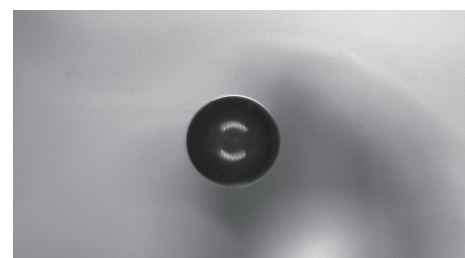
图 4 多尺度小波边缘检测程序流程框图

3.2 测量结果与分析

在不同深度聚焦情况下, 分别拍摄了探针和微球的多幅原始图像。图 5(a) 和图 5(b) 为多幅原始图像中的两幅。



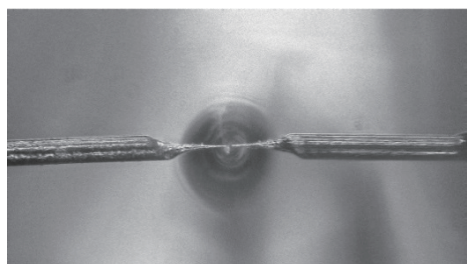
(a) 多幅探针图像中的一幅



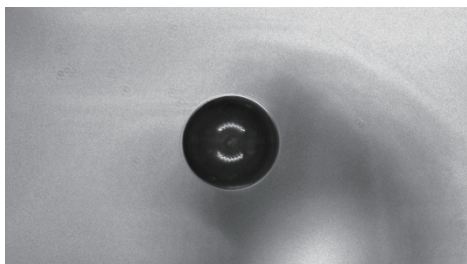
(b) 多幅微球图像中的一幅

图 5 原始拍摄图像

由多幅探针和微球原始拍摄照片分别合成的探针和微球图像如图 6 所示。探针和微球照片合成后，边缘检测的结果如图 7 所示。



(a) 合成后的探针图像



(b) 合成后的被测微球图像

图 6 图像合成结果

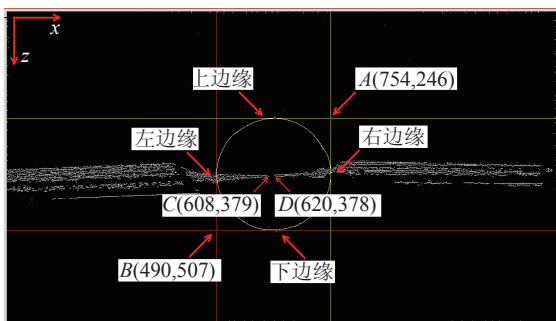


图 7 边缘检测结果

图 7 的边缘检测结果是基于小波变换获得的，由于小波变换基于多尺度分析进行，所以边缘检测结果能有效的反应图像的灰度变化，且尽可能的避免了噪声干扰。图 7 中的边缘检测结果像素大小为 1280×760 (长 \times 宽)。定义图片左上角为像素坐标的原点，图中横向为 X 轴，纵向为 Z 轴，图中 A, B 分别为检测圆轮廓的两条十字形测量线的坐标，测量时，两对十字测量线分别与圆轮廓边缘相切。 A, B 两点的 X 坐标差为 264 像素， Z 坐标差为 261 像素，以圆直径近似为 $270 \mu\text{m}$ (此为后续微球赤道圆截面测量结果) 计算，图中单像素长度约为 $1.1 \mu\text{m}$ 。 $C(608, 379), D(620, 378)$ 两点分别为左右探针测头的顶尖坐标，以 A, B 两点的 Z 坐标计算此圆的正中直径 Z 坐标为 377，所以 C

点纵向偏离正中直径 2 像素约 $2.2 \mu\text{m}$ ， D 点纵向偏离正中直径 1 像素约 $1.1 \mu\text{m}$ ，以偏离正中 $2.2 \mu\text{m}$ 代入计算，则测头顶尖纵向偏离正中直径造成的横向测量误差约为 18 nm ，符合测量要求。

4 结论

研制了用于测量直径数百微米的微球球度的扫描探针显微镜双测头对准系统。在搭建好双视频显微镜、精密位移台和压电驱动微动台等实验装置后，进行双扫描测头的粗对准，对粗对准情况下分别聚焦拍摄的探针和微球的多图像进行小波边缘检测以及图像融合处理，再将得到的处理结果反馈到系统进行精确对准。经实验证明，此方法所引起的测量误差在允许的误差范围之内，符合测量要求，证明该对准方式是有效的。

未来，一则可进一步改进实验装置，使用更加精密的测头及部件，以提高测量的准确性；二则可继续深入研究图像获取及处理方法，减小测量误差的同时提升测量效率。

参 考 文 献

- [1] 黄强先, 胡小娟, 卞亚魁, 等. 微球球度测量技术的研究进展[J]. 中国机械工程, 2016, 27(9): 1271 - 1277.
- [2] 刘蕊. 数字图像中边缘检测算法的研究[D]. 江苏: 江苏科技大学模式识别与智能系统系, 2009.
- [3] 张肃, 王文生, 徐春云. 低对比度环境下运动目标光学光学相关检测技术[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 319 - 325.
- [4] Kumar K, Mustafa N, Li J P, et al. Image edge detection scheme using wavelet transform [C]// International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing. IEEE, 2015: 261 - 265.
- [5] 卞亚魁. 微球球度测量机械系统研制[D]. 安徽: 合肥工业大学精密仪器及机械系, 2017.
- [6] Ren Hong, Xu Xiyang, Zhu Meng, et al. A new kind of image edge detection based on the theory of the adaptive lifting wavelet and morphology [J]. Journal of Information Technology Research, 2018, 11(3): 90 - 104.

收稿日期: 2018 - 08 - 28

作者简介



牟梦(1994 -), 女, 硕士研究生, 2016 年获工学学士学位, 本硕就读于合肥工业大学, 主要研究方向为微纳测量技术及系统。