

基于迈克尔逊干涉仪的高精度微球圆度测量系统

李瑞君¹, 段刘辉, 赵文楷

(合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为实现对直径介于几百微米至几毫米微球的高精度测量, 研制了一套基于迈克尔逊干涉仪的高精度微球圆度测量系统。系统由微型迈克尔逊干涉仪、弹性机构、旋转机构、调整机构和上位机软件组成, 利用建立的数学模型从测量结果中分离主轴回转误差, 得到各测量点对应的真实半径。对标称直径 300 μm 、圆度 250 nm 的商用红宝石球赤道圆周进行了 5 组重复测量, 并通过最小区域法进行圆度评定。结果表明, 被测微球的平均半径为 149.848 μm , 圆度为 280 nm, 标准差为 2 nm。系统具有高精度、低成本、快速测量的特点, 能够分离主轴回转误差获得真实半径, 可广泛应用于如微圆柱体、微球等具有圆截面特征工件的高精度测量中。

关键词: 圆度测量;干涉仪;微球;误差分离

Michelson interferometer based High precision microsphere roundness measurement system

Li Ruijun, Duan Liuhui, Zhao Wenkai

(Hefei University of Technology, Hefei, 230009, China)

Abstract: A high-precision microsphere roundness measurement system based on Michelson interferometer was developed to achieve high-precision measurement of microspheres with diameters ranging from a few hundred microns to a few millimeters. The system consists of a miniature Michelson interferometer, an elastic mechanism, a rotating mechanism, an adjustment mechanism, and upper computer software. Using the established mathematical model to separate the spindle rotation error from the measurement results, the true radius corresponding to each measurement point is obtained. Five sets of repeated measurements were performed on the equatorial circumference of a commercial ruby sphere with a nominal diameter of 300 μm and a circularity of 250 nm, and the circularity was evaluated by the minimum area method. The results

作者简介:李瑞君(通信作者),男,内蒙古和林格尔人,合肥工业大学教授、博士生导师。主要研究方向为微纳测量技术与系统、光电检测技术与系统及精密控制技术与系统。E-mail: rj-li@hfut.edu.cn

show that the average radius of the measured microspheres is 149.848 μm , the circularity is 280 nm, and the standard deviation is 2 nm. The system has the characteristics of high precision, low cost, and fast measurement, and can separate the spindle rotation error to obtain the true radius, which can be widely used in the high precision measurement of workpieces with circular cross-sectional features such as micro cylinders and microspheres.

Keywords:Roundness measurement; Michelson interferometer; Microsphere; Shaft error

1 设计背景和应用价值

1.1 设计背景

随着微纳技术的快速发展,微型器件越来越被广泛地应用在精密轴承、微型机械、MEMS 器件、医疗检测设备^[1-3]等场合,对微型三坐标测量机(Micro-CMM)的测量精度要求越来越高。Micro-CMM 所用探头系统通常具有高深宽径比以实现微孔、微槽等特征的测量,其 所用测球的直径一般小于 1 mm,且自身赤道圆周的圆度会直接影响到测量机的精度和工作性能^[4]。目前,国内外许多研究学者对于微球圆度的高精度测量提出了各种不同的方法。美国劳伦斯·利弗莫尔实验室(LLNL)与通用原子公司在 90 年代开发了集成精密轴系和 AFM 系统的第一代微球轮廓测量仪,实现了对微球表面缺陷的高精度测量^[5]。2004 年哈尔滨工业大学孙涛、赵学森等人^[6]将扫描探针显微镜(SPM)和原子力探针结合,配合精密回转气浮轴系实现对待测试件进行转位的测量方法。戴昌盛、陈厚瑞等人^[7-8]基于透视投影原理利用显微视觉技术,实现了对微球半径、圆度的无损检测。瑞士联邦计量局^[9]提出了一种三球互测法,可以获得其表面各圆周的圆度,精度可以达到纳米级。北京理工大学赵维谦等人^[10]利用激光差分共聚焦显微镜实现了靶丸内轮廓的高精度、无损、自动、快速测量及靶丸回转偏心的自动快速调整。上述的各种测量方法主要可分为非接触式和接触式两类:非接触式测量方法具有无损测量、无接触应力、测量效率高等优势,但易受到测量环境、光学极限、材料特性等影响,且部分方法精度较低,不易实现微米级小球的高精度测量;接触式测量方法精度可以达到纳米级,但是存在成本高、测量效率低、测量数据少、难以实现微米级小球测量等问题。因此,迫切需要开发出具有高精度、低成本、快速测量特点的微球圆度测量系统。

1.2 应用价值

Micro-CMM 的探头微球主要用于微型器件的精密接触测量,其直径通常在数十至数百微米之间,且要求圆度控制在数十纳米甚至几纳米量级^[11-12];随着测球尺寸越来越小,加工

难度越来越大，圆度的测量逐渐成为关键环节。通过所研系统将微球各测量点半径精确的测量出来，对 Micro-CMM 的测量结果进行补偿，为 Micro-CMM 实现对高深宽径比微型器件更高精度的测量提供了可能，进一步推动 Micro-CMM 的发展。微球的高精度测量作为 Micro-CMM 实现微型器件高精度测量的关键，对促进微纳技术的快速发展具有重要价值和意义。

2 创新点与优势

(1) 高精度、低成本；

采用自主研发的高精度干涉仪作为传感器，保证较高的精度的同时兼具低成本。

(2) 快速测量、连续采样；

测量一组圆周数据仅需 12 s，采样点数为 1200 点/圈。

(3) 可分离主轴回转误差；

测量原理采用两点法，能够分离主轴回转误差，因此系统不依赖高精度转台。商用圆度仪一般采用单测头，不能分离转轴偏差，测量精度依靠高精度转台。

(4) 低接触力测量；

接触测球的结构采用平面镜，并且利用自主设计的弹性机构，将动态扫描测量力降低到微牛级别，与采用探针进行感测的圆度仪相比，降低了对微球表面造成的损伤。

(5) 通过真实半径获得圆度；

利用建立的微球半径测量模型，得到各测量点的真实半径，通过最小区域法更加准确的评定圆度。

3 实现方案简介

3.1 测量原理

微球圆度测量系统主要由微型迈克尔逊干涉仪、弹性机构、旋转机构、调整机构和 CCD 相机组成。系统测量原理示意图如图1所示。

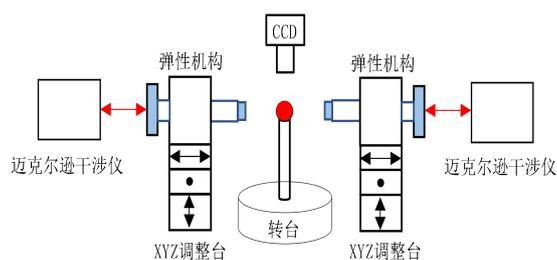


图1 微球圆度测量系统示意图

Fig 1 Schematic diagram of microsphere roundness measurement system

两套干涉仪面对面放置，转台安装于两干涉仪之间，并将待测微球固定在转台上。弹性机构安装在调整装置上，其两边均贴有平面镜，一面用作测量镜，另一面用于接触待测球。待测球随转台旋转时，其径向变化、安装误差和转轴偏差等因素共同作用，推动弹性机构及测量镜运动，最后由干涉仪解得相应的位移值。

3.2 实验装置及过程

微球圆度测量系统实物如图 2 所示，采用自主研发的微型迈克尔逊干涉仪作为传感器，干涉仪光源采用波长 632.8 nm 的氦氖激光器，通过光纤耦合器及一分二光纤将光束耦合成两束，再分别接入两套干涉仪系统。干涉仪以及调整装置固定在高精度气浮转台上，且下方由大理石底座支撑以隔绝外部环境振动的干扰。自主设计的弹性机构的弹性系数为 2.81 mN/mm，且弹性机构移动杆的滑动摩擦力为 7.04 mN。当通过 CCD 将偏心调整至 10 μm 以内后，由偏心和微球半径变化引起的弹性机构动态力变化量在微牛 (μN) 级别，对测量造成的影响可以忽略。

为验证半径评定圆度较直径评定圆度方法的精度提升，对同一颗 Renishaw 公司生产的直径 300 μm 、标称圆度 250 nm 的商用红宝石球 (A-5000-7800) 进行了 5 组重复测量实验。

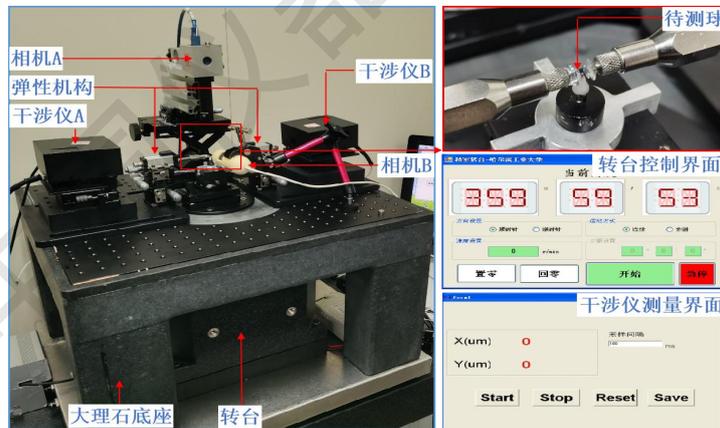


图2 微球圆度测量系统实物图

Fig 2 Microsphere roundness measurement system physical picture

测量前须先调节两干涉仪测量光束同轴，并保证测量时待测球球心位于测量光轴上。可通过配套的调整台调节待测球心与干涉仪光轴同轴，并借助CCD视觉辅助系统尽可能减小测球安装偏心。测量过程可分为三个步骤：首先，先调节两平面镜接触，并将此时两干涉仪读数置0。其次，将两接触镜拉开，安装待测球，并调整接触镜夹持微球。此环节可借助CCD

相机等视觉辅助设备，尽可能减小安装误差。最后，待测微球随转台匀速旋转一周，记录两干涉仪的读值并计算结果。利用建立的微球半径测量模型计算出各测量点的半径值，通过最小区域法评定微球圆度。

4 实验结果及结论

测量过程中控制转台以5 r/min的速度匀速旋转，并通过自主开发的软件对微球截面轮廓进行1200点/圈均匀连续采样。对1200点/圈的五次重复测量测量数据进行处理，平均半径及圆度评定结果如表1所示。根据测得半径绘制的微球截面轮廓如图3所示，被测微球五次测量的平均半径为 149.848 μm ，圆度和标准差分别为280 nm、2 nm。

表1 平均半径及圆度评定结果

Table 1 Average radius and roundness evaluation results

次数	半径/ μm	圆度/nm
1	149.846	278
2	149.845	283
3	149.847	278
4	149.850	282
5	149.851	280
平均值	149.848	280
标准差(nm)	3	2

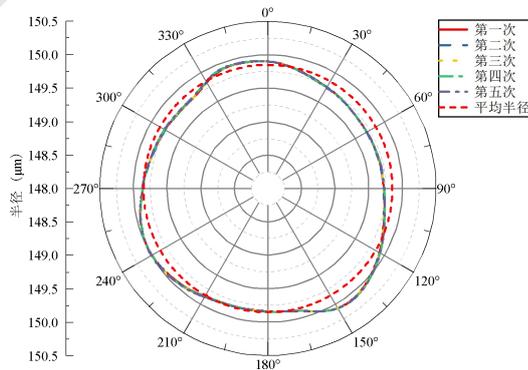


图3 微球截面轮廓

Fig.3 Microsphere cross-section profile

实验结果表明，系统能够实现微米级小球赤道圆度的高精度测量，测量结果准确可靠。

系统采用差动测量法,转动待测球时的转轴偏差和半径变化使得弹性机构产生位移,经由数学模型可自动分离出各个角度时的偏心及半径变化。并且可以消除系统的主轴回转误差,能够降低圆度测量对旋转台的精度要求。

参考文献:

- [1] 郝永平,董福禄,张嘉易,等.基于 MEMS 机构装配的微夹持器研究[J]. 中国机械工程,2014,25(05):596-601.
- [2] Knauss W G, Chasiotis I, Huang Y. Mechanical measurements at the micron and nanometer scales[J]. Mechanics of Materials, 2003, 35(3-6):217-231.
- [3] Firebaugh S L, Charles H K, Edwards R L, et al. Optical deflection measurement for characterization of microelectromechanical systems (MEMS)[J]. Instrumentation & Measurement IEEE Transactions on, 2004, 53(4):1047-1051.
- [4] 黄强先,胡小娟,卞亚魁,梅隼,张连生,陈丽娟.微球球度测量技术的研究进展[J].中国机械工程,2016,27(09):1271-1277.
- [5] Cook R, Overturf III G E, Buckley S R, et al. Production and characterization of doped mandrels for inertial confinement fusion experiments[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 1994, 12(4): 1275 1280.
- [6] Xue Sen Zhao, T. Sun, Yong Da Yan, et al. Measurement of Roundness and Sphericity of the Micro Sphere Based on Atomic Force Microscope. 2006, 549:796-799.
- [7] 戴昌盛.基于显微视觉的微球质量检测与筛选方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2016
- [8] 陈厚瑞,蔡潇雨,魏佳斯,等. 基于显微视觉的微球圆度测量方法研究 [J].计量学报, 2019,40(05):770-775.
- [9] K \ddot{u} ng, A, Meli F, Thalmann R. Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe[J]. Measurement Science & Technology, 2005, 18(2):58790S-58790S-8.
- [10] Longxiao W, Lirong Q, Weiqian Z, et al. Laser differential confocal inner-surface profile measurement method for an ICF capsule[J]. Optics Express, 2017, 25(23):28510-.
- [11] Michihata M, Takaya Y, Hayashi T. Development of the Nano -Probe System Based on the Laser Trapping Technique [J] . Annals of the CIRP, 2008, 57 (1):493-496
- [12] Claverley J D, Leach R K. Development of a Three-Dimensional Vibrating Tactile Probe for MiniatureCMMs [J] . Precision Engineering, 2013, 37(2): 491-499.