

文章编号: 1001-3806(2014)05-0623-04

白光干涉技术在球轴承测量中的应用

石 炜¹, 李俊成¹, 韩 军¹, 王建国¹, 王靖禹²

(1. 内蒙古科技大学 机械工程学院, 包头 014010; 2. 坎特伯雷大学 物理科学学院 应用光学系, 坎特伯雷)

摘要: 为了实现球轴承中球体在制造加工中快速准确的测量, 采用白光干涉技术、图像处理技术和信号处理技术组建了一整套的基于迈克尔逊干涉仪的测量系统。对白光干涉技术进行了理论分析, 对轴承球体进行了光学球面半径的高精度测量和粗糙度测量, 取得了光洁度图像和曲率半径图像。在大量实验论证的基础上经过处理和计算得到了精确的计算数据, 光洁度分辨率可达到纳米量级, 曲率也可以计算到微米量级。结果表明, 利用此技术可以对球面进行快速精确的测量, 提高了加工质量和检测速度。

关键词: 激光光学; 全场光学相干层析成像; 相移干涉法; 曲率测量; 粗糙度测量; 鲁棒高斯回归滤波器

中图分类号: TH744; TN247 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.05.010

Ball bearing measurement based on white-light interferometry technique

SHI Wei¹, LI Juncheng¹, HAN Jun¹, WANG Jianguo¹, WANG Jingyu²

(1. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. Department of Applied Optics, School of Physics Science, Canterbury University, Canterbury, United Kingdom)

Abstract: In order to achieve rapid and accurate measurement of sphere bearing ball during manufacturing process, a set of Michelson interferometer measurement system was proposed based on white light interferometer technology, image processing technology and signal processing technology. White light interferometry technique was analyzed theoretically. The precision and roughness measurement of the optical spherical radius of sphere ball bearing were made. The finish resolution image and the curvature radius image were obtained. The accurate calculation data was obtained after processing a large number of experimental data. The finish resolution can reach the nm level and the curvature can be calculated to the μm level. The processing quality and the detection speed are improved.

Key words: laser optics; full-field optical coherence tomography; phase-shifting interferometry; curvature measurement; toughness measurement; robust Gaussian regression filter

引 言

光学相干层析技术 (optical coherence tomography, OCT) 是一种非介入式高分辨率光学成像, 它是基于低相干干涉的测量原理。一般有两种光学相干层析技术, 一种是点扫描 OCT, 另一种是全场 OCT^[1]。一般的扫描成像是使用扫描仪对成像空间的 1 维或 2 维区域进行扫描成像。而全场 OCT 可以使用并行测量的方法同时测量多个横向位置。

一个典型的球轴承组件包括 1 个球、保持架、内圈、外圈。不同的应用程序使用不同的几何形状, 如

深沟或角接触球轴承或滚子、滚针轴承、圆锥滚子、关节、枕块或等速轴承等等。这些轴承广泛应用于飞机、汽车、陀螺仪、燃油系统、机车、风力涡轮机和机床。

光学球面曲率半径测量常见方法有环式球径仪法、牛顿环干涉法、平板横向剪切干涉法、自准直显微镜定位法等方法^[2]。在这里作者引入全场光学相干层析成像 (full-field optical coherence tomography, FF-OCT) 的技术^[3]。它使用一种并行测试技术在全视场下通过白光照射物体通过面阵 CCD 全景成像。FF-OCT 避免了横向扫描成像过程对成像速率的影响。扫描过程引发的机械抖动以及物体运动的拖影现象都会降低成像质量^[4]。在使用的白光光源下, FF-OCT 能够获得大图像尺寸和极小的景深^[5]。本文中的成像对象是反射面。这不同于

作者简介: 石 炜 (1971-), 男, 副教授, 主要研究领域为机电参量测试测量、机械结构优化设计。

E-mail: yanstone8697@sohu.com

收稿日期: 2013-10-11; 收到修改稿日期: 2013-10-30

OCT 测量生物组织的散射,从反射平面得到的光强比从物体内部发出的散射要大很多,因此,在 OCT 图像中物体表面的相对高度是非常明显的。FF-OCT 消除了横向扫描而得到了更高的帧传输速率,提高了传输速率。本文中,作者为 FF-OCT 系统引入延迟测量单元(multiple delay element, MDE),分别对其两种不同的设置方式进行评估分析。成像速率由 CCD 传感器决定,原则上其频率可达几十赫兹。

1 方 法

基于干涉显微镜和光学轮廓,把光学干涉成像技术用于测量轴承中球体的曲率和表面粗糙度。因为高精密球轴承的粗糙度小,采用了最快的速率,最高的精密法,相移干涉与延时干涉相结合。对于测量,使用了一个 $20\times$ 物镜,以测量面积约 $240\mu\text{m} \times 315\mu\text{m}$ 横向分辨率为 670nm 。FF-OCT 系统基于迈克尔逊干涉仪,用一个超亮发光二极管(super light-emitting diode, SLD)作为光源。SLD 的中心波长为 850nm , 带宽为 20nm 。无极性分光镜把入射光均分后,两束光分别摄入目标臂和参考臂。为了补偿色散,放置一个相同的分光镜在参考臂。一个中性密度滤镜在参考臂中平衡干涉仪的返回光的光强,一个色散补偿镜片被放置目标臂中。选用 CCD 相机的帧速率为 17Hz , 分辨率为 $512\text{pixel} \times 512\text{pixel}$, 曝

光时间为 10ms , 读取所需要的时间是 59ms 。参考镜被安装在压电陶瓷上,提供精确的位移,在轴向上提供干涉相移。通过相移干涉法可以消除直流信号,得到相干信号。压电陶瓷周期与相机同步。通过在同一视场中进行测量计算,能够得到重复性和再现性相对较高的多个位置的轮廓测量参量。光学轮廓仪可以在一次测量中,通过全视场的非接触测量方式,得到需测量位置的曲率半径及表面粗糙度。

2 曲率测量原理

表面形状可以通过传统的 B 型扫描(B-scan)和 C 型扫描(C-scan)获得。B-scan 过几幅不同极角得到的图像对物体表面曲率的形状进行计算,C-scan 从不同的深度获得图像的信息,然后对曲面进行重建^[6]。但这两种方法的相同弊端在于耗时较长。一种新的方法可以从一次 C-scan 中推断出球面的极性变化曲率。在测量系统中引入多个延迟单元,把它们设置在 OCT 系统的测量参考臂上,每一个延迟单元都对应一个 C-scan 的扫描轮廓^[7]。从而可以从不同的高度上获取多个表面轮廓信息,并从极角和球体的轴向位置推断出曲率半径。随着加入多个延时单元到测量参考臂,在一次 OCT 成像中,可以得到一个以上的物体轮廓,这种办法能够缩短成像过程提高测量精度。

三相移法干涉信号由下式得到:

$$I(x, y) = \sqrt{\frac{[I_1(x, y) - I_2(x, y)]^2 + [I_2(x, y) - I_3(x, y)]^2 + [I_3(x, y) - I_1(x, y)]^2}{3}} \quad (1)$$

式中, I 为干涉图像像素值强度, I_1, I_2 和 I_3 是每一步所采集的像移图像值。参考镜上位移的步长为光源中心波长的 $1/3$ 。使用三相的相移分别为 $0, \pi/3$ 和 $2\pi/3$, 每 300ms 提取一次采样。

假设如果测量物体轮廓近似为圆(见图 1), 则曲率半径可由下式得到:

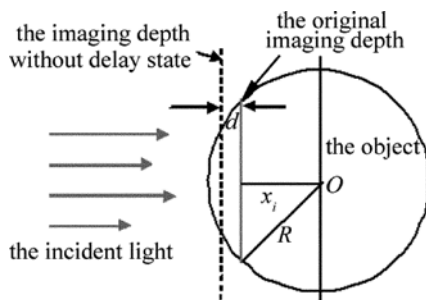


Fig. 1 Geometric contour of sphere object in FF-OCT

$$R = \frac{\sqrt{(X_{i+k}^2 - X_i^2 + k^2 d^2)^2 + 4k^2 d^2 X_i^2}}{2kd} \quad (2)$$

$$d = 2nt \quad (3)$$

式中, X_i 和 X_{i+k} 为成像面上弧线的半径, i 和 $i+k$ 为延时单元(见图 2)的同厚度薄玻璃片数目。其中, d 为常数, 由延迟镜片的折射率 n 以及玻璃片厚度 t 决定。假设两个随机不同的延时 d_p 和 d_q , 数学关系可由下式表示:

$$R = \frac{\sqrt{[X_p^2 - X_q^2 + (d_p - d_q)^2]^2 + 4(d_p - d_q)^2 X_i^2}}{2(d_p - d_q)} \quad (4)$$

控制程序为 VC++6.0 编码。光学系统如图 2 所示。

图 2 中, $L_1 \sim L_6$ 为透镜, 焦距分别为 50mm ,

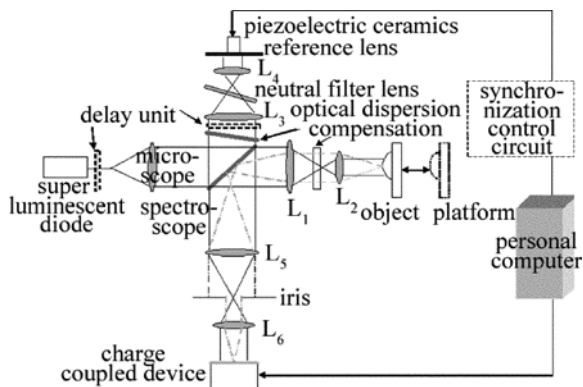


Fig. 2 Schematic diagram of FF-OCT

30mm, 50mm, 30mm, 100mm, 150mm。

由于带有不同延迟的光分别进入干涉仪的两臂,零光差的干涉光会生成中央轮廓,其它的所有轮廓由带有正负光差的干涉光生成。因此它们呈现出较小的亮度。和以前提出的方法相似,轮廓半径越大,图像强度越小。所以,一些大直径的轮廓线可能不可见,如图 3 所示。根据采集到的图像,经过图像处理可以直接计算出球体的曲率半径。

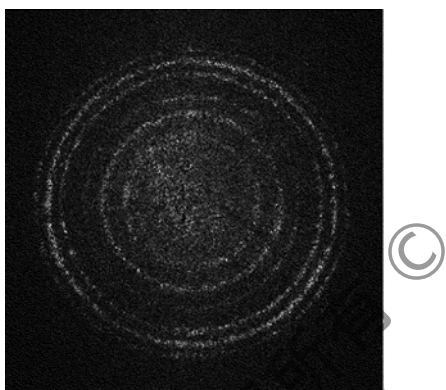


Fig. 3 Image of delay elements introduced into optical path

3 表面纹理(粗糙度)分析

根据图 4 所示的粗糙度测量图片中,分别测量几种尺寸相同但等级规格不同的轴承球体,即 6 级、5 级、4 级和 2 级。它们每个级别的表面粗糙度的最大算数平均值均超过了 200nm。

图 5 中显示了不同级别的轴承球体在干涉测量仪下的纹理特征以及边缘形状。即使表面粗糙度参量是相似的,但其结构组织仍有可能存在较大差异。这些差异的存在仍会影响到轴承的使用功能。所以更好的测量和去除这些纹理特征的手段,可以更好地了解粗糙度的形式,更精确地评估轴承的性能。

普通的轴承滚球体在加工过程中表面会产生加工波纹,这种波纹的存在也有可能是在轴承的轨道

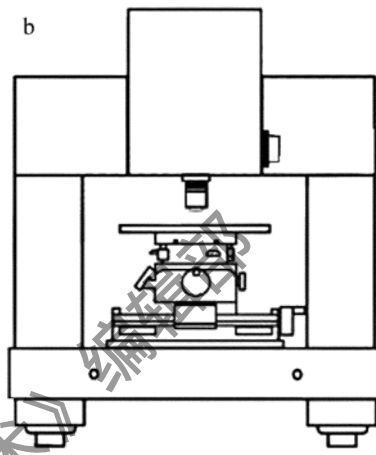


Fig. 4 Roughness measurement of ball bearing
a—testing picture b—testing structure

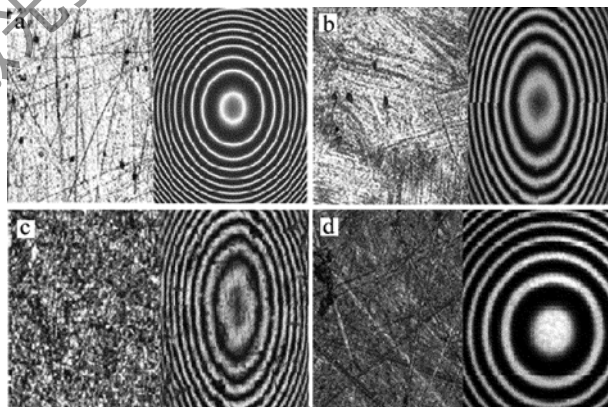


Fig. 5 Interference images of different grades
a—grade 2 b—grade 4 c—grade 5 d—grade 6

中往复运动而产生的,但这不是球体存在的缺陷^[8]。这种波纹是在评估轴承损坏程度坏或测量真实的表面粗糙度需要区分的。通过测量计算去除这些非正常的信号并不困难^[9]。通常是由低通滤波去除剩余的波纹信号,这可能会影响表面纹理或有一定的边缘效应。除去波纹度的最新的趋势是通过使用一种鲁棒高斯回归滤波器(robust Gaussian regression filter, RGRF)^[10]。

图 6 是一个测量实例,测得的球轴承球体(6 级)的实际波纹度与最佳的拟合圆后做减法运算。粗糙度精度为 100nm。此波纹成为粗糙度计算的一

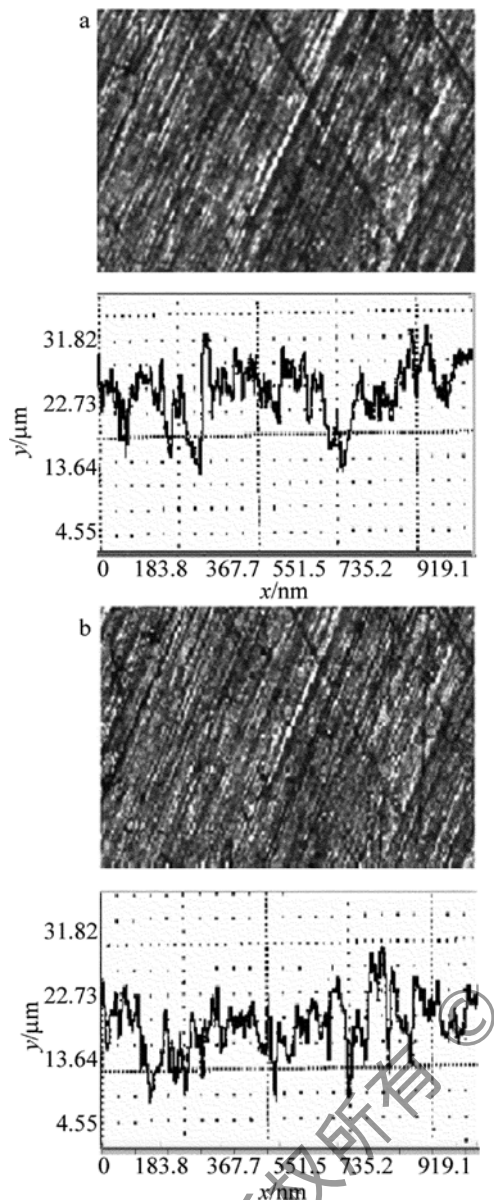


Fig. 6 Image of roughness measurement

a— before the robust Gaussian filter b— after the robust Gaussian filter
部分。为了删减掉这些波纹信号,用傅里叶滤波与高斯窗口以 $50\mu\text{m}$ 的长波长度作截段取窗函数。滤波器很容易消除了波纹信号而没有对边缘信号进行干扰。则剩下的信号(去除了波纹信号)测量精度到达了 30nm 。

4 结论

大多数轴承球体测量分析仪大多使用接触式干涉测量仪器,进行尺寸分形与粗糙度缺陷测量评估。

2 维探针测量只捕获常规化的表面轮廓,除非进行多次扫描,但这样又会使得测量时间显著放缓,这将导致采样时间不足,或者在错误的方向上进行扫描,得到有差异的测量结果。作者提出了一种新的方法来测量球状体的曲率,在测量中使用了多个延时单元相结合,FF-OCT 系统能够在单一的 C-scan OCT 图像中成像多个圆弧轮廓。设置多个(N)个延时单元到光源路径中,可以生成 $2N - 1$ 个轮廓线。在后续的图像信号处理中,使用强大的高斯滤波以去除残留的波状起伏的形式显示,能够进行更精确的计算粗糙度和缺陷的表征。较好的白光干涉测量技术可以提高生产效率,同时提高测量的精度与速度。这种方法存在的缺陷是测量误差取决于延迟单元的误差不同,会导致出现不必要的轮廓线。该系统的横向分辨率、目标图像的尺寸也限制了轮廓的密度。

参考文献

- [1] ZHAO X H, QU X H, YE Sh H. MEMS optical detection method and apparatus [J]. Optical Technique, 2003, 29 (2) :197-200 (in Chinese).
- [2] CHEN X M, LONG Z H. Fringe interference microscope to measure the surface roughness of the automatic processing [J]. Acta Photonica Sinica, 1993, 13 (11) :1040-1044 (in Chinese).
- [3] PLESEA V, PODOLEANU A G. Direct corneal elevation measurements using multiple delay en-face OCT [J]. Journal of Biomedical Optics, 2008, 13 (5) :054054.
- [4] LIU J F. Optical probe surface roughness measurement technique [D]. Tianjin: Tianjin University, 1999:45-46 (in Chinese).
- [5] LI G S, LI Q, CHEN Zh M. Measurement of FBG reflection spectra by white light interferometry [J]. Laser Technology, 2013, 37 (1) :20-23 (in Chinese).
- [6] CHANG S P. Based on size and morphology of white light interference contour method and system for non-contact measurement [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007:37-39 (in Chinese).
- [7] CHENG Y Y, WYANT J C. Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry [J]. Applied Optics, 1985, 24 (18) :3049-3052.
- [8] MURALIKRISHNAN B, RAJA J. Computational surface and roundness metrology [M]. New York, USA: Springer, 2008:155-157.
- [9] LE Y F, SHI Y, JU A S. Design of heterodyne interferometer signal detectors [J]. Laser Technology, 2012, 36 (6) :759-762 (in Chinese).
- [10] BRINKMANN S, BODSCHWINNA H, LEMKE H W. Development of robust Gaussian regression filter for three dimensional surface analysis [C] // Proceeding of the 10th International Colloquium on Surfaces. New York, USA: IEEE, 2000:122-131.