

文章编号 1004-924X(2017)05-1142-07

润滑油膜厚度的光学相干层析成像测量

秦玉伟*

- (1. 渭南师范学院 数理学院, 陕西 渭南 714099;
(2. 陕西省 X 射线检测与应用研究开发中心, 陕西 渭南 714099)

摘要: 为了对滑动轴承的润滑油膜厚度进行精确测量, 搭建了光纤结构的谱域光学相干层析成像(OCT)检测系统。该检测系统通过谱域 OCT 对油膜进行高分辨率成像, 根据一维深度图像和二维层析图像中油膜和轴承表面的相对位置得到油膜厚度。分析了 SD-OCT 的检测原理, 并对油膜厚度进行了测量, 通过干涉光谱解耦法减小噪声对测量结果的影响。实验结果表明, 该系统的测量误差小于 $2\ \mu\text{m}$, 具有良好的重复性和可靠性。该测量方法能够对油膜进行快速准确测量, 有望应用于机械设备轴承运行状况的在线监测。

关键词: 光学相干层析成像; 润滑油膜; 厚度测量; 谱域; 解耦

中图分类号: TP274.5; TH117.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172505.1142

Thickness measurement of lubricant film by optical coherence tomography

QIN Yu-wei*

- (1. School of Mathematics and Physics, Weinan Normal University, Weinan 714099, China;
2. Shaanxi Research Center of X-Ray Detection and Application, Weinan 714099, China)
* Corresponding author, E-mail: qinyuwei@163.com

Abstract: In order to measure lubricant film thickness of sliding bearing accurately, a fiber-based spectral-domain optical coherence tomography (SD-OCT) detection system was constructed. The detection system could perform high-resolution imaging to lubricant film with SD-OCT, and the lubricant film thickness was determined according to the relative location of lubricant film and bearing surface in one-dimensional depth image and two-dimensional tomography image. The measuring principle of the SD-OCT was detailed and performed in a film thickness measuring experiment, in which the interference spectrum decouple method was used to reduce the effect of noise on measurement results. Experimental result shows that the system with the measuring error lower than $2\ \mu\text{m}$ exhibits good repeatability and reliability, thus realizing rapid and accurate measurement of lubricant film. The system is expected to be applied in on-line monitoring of bearing operation of mechanical equipment.

Key words: Optical Coherence Tomography (OCT); lubricant film; thickness measurement; spectral-domain; decouple

收稿日期: 2016-12-01; 修订日期: 2017-01-18.

基金项目: 国际合作项目(No. 2017KW-032); 陕西省教育厅科研计划资助项目(No. 15JK1252, No. 15JK1380); 渭南师范学院研究项目(No. 15ZRRC08, No. JG201603)

1 引言

高速流体动压滑动轴承是大型机械设备的主要基础零部件,广泛应用于高速机床、高速离心机、汽轮发电机组等大型机械设备中。滑动轴承既是机械设备的重要支撑零件,又是保证完成旋转运动的关键摩擦副。在机械设备运行过程中,轴承的摩擦和磨损是引起设备故障的主要原因之一。润滑油膜能够承受重量,减小摩擦和降低磨损,提高机械零件的耐久性^[1-2];同时,还能够传递机械零件的热量,防止腐蚀,阻止污物和灰尘入侵。润滑油膜的状态很大程度上能够反映设备的运行状态,因此有必要对它进行在线监测。润滑油膜的厚度测量是一个极具挑战性的技术难题,常用的油膜厚度测量方法主要有电气测量法^[3-4]、超声测量法^[5]和光学干涉测量法^[6]等。其中,电气测量法需要机械元件与接触面之间存在完全的电气隔离,或者在接触表面安装传感器^[3-4]。杨道业等^[3]利用电容层析成像法测量滑动轴承的润滑油膜厚度,该方法需要在轴瓦外侧安装电极阵列,用碳刷作为中心电极(转子)的引线。然而,转轴长时间的高速运转会使碳刷产生磨损,造成接触不良,引起测量误差。黄蕾等^[4]利用多个电涡流传感器对油膜厚度进行测量,但由于电涡流传感器的非线性特性,测量精度较低。超声测量法利用超声波作用在润滑油膜上产生的反射信号推断出薄膜厚度,但校正过程限制了测量精度,难以实现在线测量^[7]。光学干涉测量法可以达到纳米级的分辨率,但是测量范围小^[8]。

新型光纤传感技术与计算机技术相结合,使轴承运行状况的在线监测成为可能。陈玉平等^[9]利用光纤位移传感器对滑动轴承润滑油膜进行测量,但受光源和环境变化等工作条件的影响,测量系统需要进行不定期的校准,并且输入和输出的非线性关系导致数据处理过程复杂,测量精度低。光学相干层析成像(Optical Coherence Tomography, OCT)是一种新型的光学成像技术,具有非接触、非侵入、无损伤和分辨率高等优点^[10],在生物医疗、芯片检测、指纹识别和材料检测等方面的应用前景广阔^[11-17]。由于谱域光学相干层析成像(Spectral-domain OCT, SD-OCT)的成像速度、信噪比和灵敏度明显优于传统的时

域 OCT^[18-19],因而获得了广泛的应用^[20-21]。

本文介绍了基于 SD-OCT 的润滑油膜厚度测量方法,并对图像噪声消除方法进行了研究。该方法为润滑油膜厚度的动态监测提供了一种有效手段,可以应用于大型旋转机械的状态监测与故障诊断中。

2 OCT 检测原理

2.1 谱域 OCT 原理

SD-OCT 利用频谱干涉原理^[20],系统主要由宽带光源、光纤迈克尔逊干涉仪、光纤光谱仪、反射镜等部分构成,如图 1 所示。

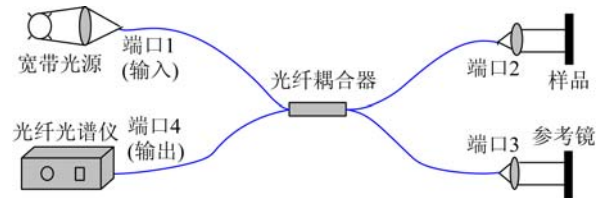


图 1 光纤结构谱域 OCT 原理图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber-based SD-OCT

在光纤迈克尔逊干涉仪中,宽带光源发出的光束经输入端口 1 进入光纤耦合器后被分成两部分:一部分入射到参考镜,称为参考光束;另一路到达被测物体,称为样品光束。参考光束被参考镜反射后和样品后向散射光束经光纤耦合器重新汇合,当两束光的光程差匹配时发生干涉,由端口 4 输出后被光纤光谱仪采集。在光栅的分光作用下,光谱仪探测器阵列上得到按波长均匀分布的干涉光谱,表现为高对比度的干涉条纹。干涉光谱可以表示为:

$$I(k) = I_{dc}(k) + I_{ac}(k) + I_{cc}(k), \quad (1)$$

式中: $I_{dc}(k)$ 是常数,表现为直流噪声; $I_{cc}(k)$ 为互相关项,含样品的轴向结构信息; $I_{ac}(k)$ 为自相关项,为样品不同深度处后向散射的所有子波之间的干涉,表现为自相关噪声。它们分别表示为:

$$I_{dc}(k) = S(k)(T_s T_r), \quad (2)$$

$$I_{ac}(k) = S(k)(T_s T_r) \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} R(h)R(h') \cdot \exp[i2kn(h-h')] dh dh', \quad (3)$$

$$I_{cc}(k) = 2(T_s T_r) S(k) \int_0^{\infty} R(h) \cos(2knh) dh, \quad (4)$$

其中: $S(k)$ 为光源的光谱密度; $R(h)$ 为散射势, 含物体的微观结构信息; $k=2\pi/\lambda$, 为波数; n 为样品的平均折射率。本质上, 干涉光谱是参考光源发出的波数为 k 的单色平面光波与样品内次级光源发出的功率谱为 $(T_s T_r) S(k) R(h)$ 、波数为 k 的单色平面光波干涉的叠加。干涉光谱的包络线正比于光源的输出功率谱, 样品的整个轴向深度信息都被调制并叠加在光源功率谱上的干涉条纹的空间频率上。

对式(1)进行傅里叶逆变换得:

$$\text{IFT}[I(k)] \propto \text{IFT}[S(k)] \otimes \{\delta(h) + [R(h) + R^*(-h)] + A\}, \quad (5)$$

式中: \otimes 表示卷积, $\delta(h)$ 为直流噪声, A 为自相关噪声, $\text{IFT}[S(k)]$ 为光源光谱的傅里叶逆变换, $R^*(-h)$ 为物体散射势的镜像。可以看出, 干涉光谱经过傅里叶逆变换后, 除了得到真实的微观结构信息外, 还伴有镜像噪声、直流噪声和自相关噪声等原理噪声。这些噪声会降低图像质量, 引起测量误差。

2.2 干涉光谱噪声消除方法

实际采集的干涉光谱伴有模式噪声和暗噪声, 表示为:

$$I(k) = I_{dc}(k) + I_{ac}(k) + I_{cc}(k) + I_d, \quad (6)$$

式中: I_d 为模式噪声和暗噪声。模式噪声和暗噪声经过傅里叶逆变换后表现为某一个(某些)固定光程差处的高强度噪声信号。

针对干涉光谱存在的噪声, 本文通过参考臂和样品臂的实时独立通断控制, 分别获取实际干涉光谱、样品臂和参考臂单独返回的光谱以及两臂同时遮断时返回的光谱。然后利用干涉光谱解耦法进行光谱运算, 以消除原理噪声、暗噪声和模式噪声, 获取只含样品深度信息的互相干光谱。

设解耦后的干涉光谱 $I_{\text{decouple}}(k)$ 为:

$$I_{\text{decouple}}(k) = I_s(k) - I_{ds}(k) - I_{dr}(k) + I_d, \quad (7)$$

式中: $I_s(k)$ 为实际干涉光谱; $I_{ds}(k)$ 为参考光路遮断时样品臂单独返回的光谱, 包含自相关项 $I_{ac}(k)$ 、探测器模式噪声和光路中的暗噪声; $I_{dr}(k)$ 为样品光路遮断时参考臂单独返回的光谱, 包含表示直流噪声的参考光 $I_{dc}(k)$ 、探测器模式噪声和光路中的暗噪声; I_d 为参考光路和样品光路同时遮断时光谱仪采集的噪声, 包含探测器模式噪声和光路中的暗噪声。其中, I_d 能够补偿干涉光谱中重复减去的模式噪声和暗噪声。

分别获取光谱 $I_s(k)$, $I_{ds}(k)$, $I_{dr}(k)$ 和 I_d 代入式(7), 对干涉光谱 $I_s(k)$ 进行解耦处理, 得到只含样品微观结构信息的互相关项 $I_{cc}(k)$ 。对 $I_{\text{decouple}}(k)$ 进行傅里叶逆变换, 得到:

$$\text{IFT}[I_{\text{decouple}}(k)] \propto [R(h) + R^*(-h)]. \quad (8)$$

将参考镜的虚像位置置于样品表面, 增加固定光程差偏移, 使样品的结构图像和镜像在空间位置分开, 在消除共轭项 $R^*(-h)$ 后, 就能够得到含润滑油深度信息的散射势 $R(h)$ 。因此, 利用低相干光源极短的相干长度可以实现对油膜厚度的高精度监测。

3 润滑油膜厚度测量系统

当转轴旋转时, 润滑油被带入缝隙, 造成油的加压, 最后使转轴被抬起。根据滑动轴承的动态特性和润滑油膜的形成机理, 润滑油膜厚度可通过转轴表面和润滑油表面之间的距离来测定, 滑动轴承润滑油膜厚度测量系统如图 2 所示。

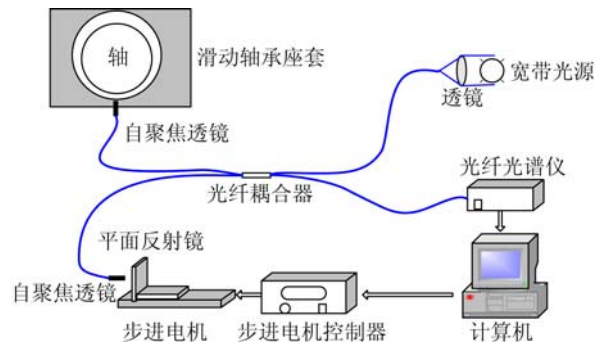


图 2 光纤谱域 OCT 润滑油膜厚度测量系统

Fig. 2 Fiber-based SD-OCT measuring system of lubricant film

系统主要由一个双跨四支撑的转子实验台、分光比为 70/30 的单模光纤耦合器、宽带光源、光纤光谱仪、光纤准直器、自聚焦透镜、计算机、步进电机平移台及控制器、反射镜等部分组成。光源为荷兰爱万提斯公司(Avantes Inc.)的风冷型卤钨灯 Avalight-HAL, 光功率为 20 W, 波长覆盖 360~2 500 nm, 中心波长 λ_0 约为 1 285 nm, 半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM) $\Delta\lambda$ 为 535 nm, 因此该谱域 OCT 系统在空气中的理论轴向分辨率为 1.36 μm 。光谱仪使用荷兰爱万提斯公司(Avantes Inc.)的制冷型高灵敏度近红外光纤光谱仪(AvaSpec-NIR512-1.7TEC), 光谱采样间隔为 1.64 nm, 因此系统的理论探测深度

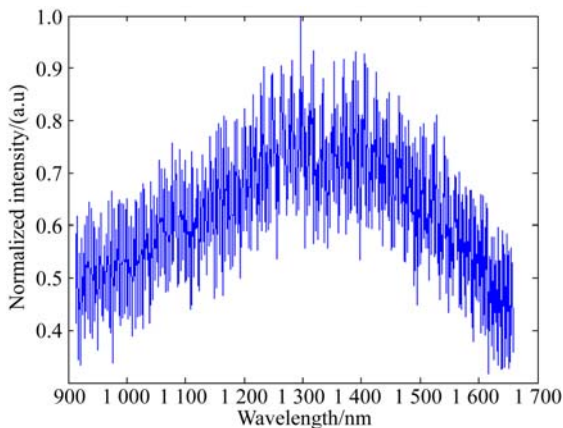
约为 $200\ \mu\text{m}$ 。光滑转轴作为样品, 形成反射面。自聚焦透镜与光纤迈克尔逊干涉仪的传感臂相连, 置于滑动轴承套的外表面底部, 另一自聚焦透镜和高反射透镜组成干涉仪的参考臂。干涉仪的输出端接光纤光谱仪, 信号处理单元将光纤光谱仪采集的干涉光谱转化为油膜的厚度信息。

对卤钨灯光源的实际功率谱进行傅里叶变换, 根据点扩散函数可知, 该谱域 OCT 实验平台的轴向分辨率约为 $1.4\ \mu\text{m}$ 。

4 实验结果和讨论

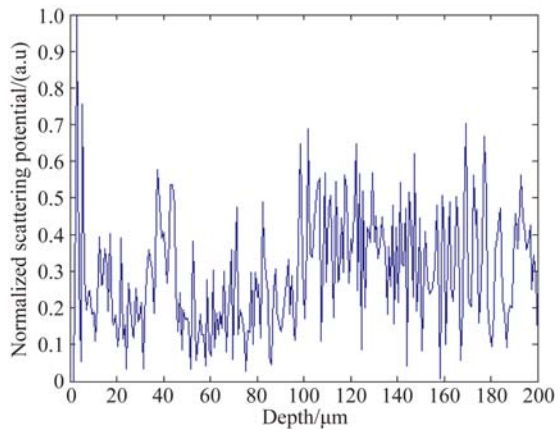
测量实验分为静态和动态两种状态, 在静态试验中, 转子实验台的转子(轴)保持静止, 而在动态试验中, 转子被驱动旋转。对谱域 OCT 实验系统的干涉仪光路进行调整, 使参考光与润滑油膜返回的后向散射光发生干涉, 得到干涉光谱, 如图 3(a)所示。

如图 3(a)所示, 干涉光谱的调制信号幅度较小, 并含有较强的高频噪声。将干涉光谱数据由波长空间映射到波数空间, 通过三次样条插值法在波数空间进行均匀采样, 并对重采样后的干涉光谱数据进行傅里叶逆变换, 得到轴承表面润滑油膜的一维深度图像, 即油膜的散射势曲线, 如图 3(b)所示。可以看出, 一维深度图像伴有极强的直流噪声和自相关噪声, 并且在不同横坐标处还存在较弱的其他噪声, 这表示润滑油膜表面的散射势峰值与噪声互相混合, 含有用信息的散射势峰值较小, 被湮没在噪声中, 图像的信噪比较低, 无法分辨润滑油膜的表面和界面。



(a) 干涉光谱图

(a) Interference spectrum

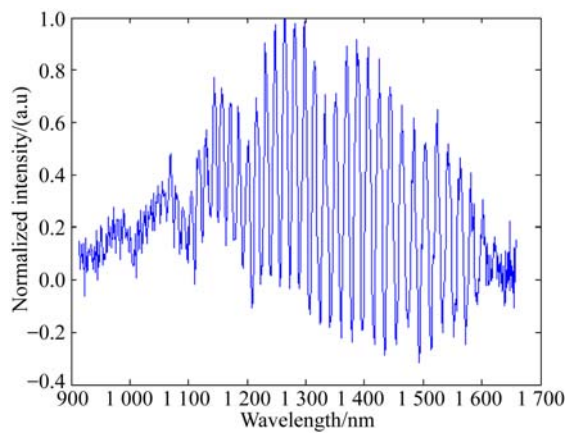


(b) 一维深度图像

(b) 1D depth image

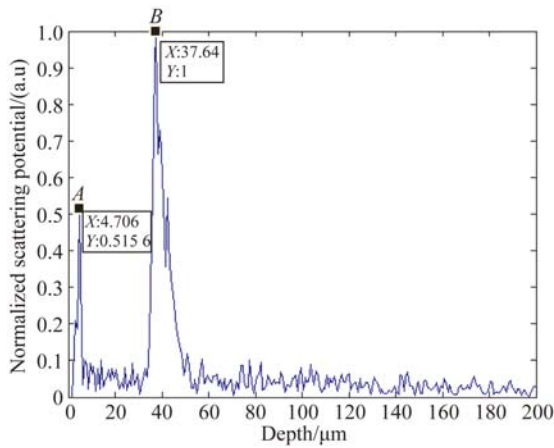
图 3 消除噪声前润滑油膜的干涉光谱和一维深度图像
Fig. 3 Interference spectrum and 1D depth image of lubricant film before noise elimination

分别遮断样品臂和参考臂光路, 采集参考臂单独返回的参考光谱和样品臂单独返回的样品光谱, 以及样品臂和参考臂光路同时遮断时的暗噪声和模式噪声。按式(7)进行光谱运算, 消除干涉光谱噪声, 以提高信噪比和测量精度, 得到消除噪声后的干涉光谱, 如图 4(a)所示。可以看出, 干涉光谱是以光源光谱为包络的余弦调制信号, 与理论表达式(1)吻合。消除噪声后, 干涉光谱中的高频噪声成分得到有效抑制, 调制信号的幅度有了较大程度的提升, 有助于油膜厚度的测量和轴承表面微观信息的获取。



(a) 干涉光谱图

(a) Interference spectrum



(b)一维深度图像

(b)1D depth image

图 4 消除噪声后润滑油膜的干涉光谱和一维深度图像
Fig. 4 Interference spectrum and 1D depth image of lubricant film after noise elimination

对干涉光谱进行傅里叶逆变换,得到润滑油膜的散射势曲线,如图 4(b)所示。可以看出,噪声消除后的散射势曲线中,信噪比得到显著提高,散射势曲线明显存在两个主要峰值 A 和 B。峰值 A 表示润滑油膜表面;峰值 B 表示轴承表面,即轴承与润滑油膜的界面。峰值 A 和 B 的横坐标分别为 $4.71 \mu\text{m}$ 和 $37.65 \mu\text{m}$,根据两个主要峰值的横坐标可以得到润滑油膜的厚度约为 $33 \mu\text{m}$ 。

对润滑油膜的厚度进行多次测量,得到多个测量值,如图 5 所示。

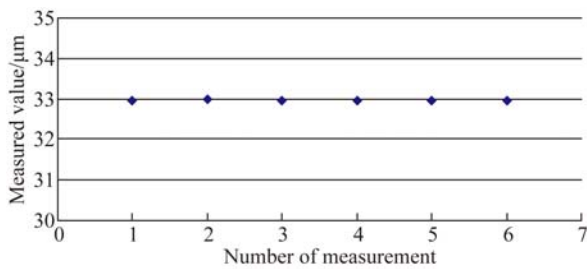


图 5 轴承润滑油膜的多次测量结果

Fig. 5 Repeated measurement of lubricant film

由测量值曲线可以看出,膜厚的多次测量结果基本保持一致,重复性和可靠性好,从而验证了该测量方法的可行性。驱动转子旋转,对润滑油膜进行动态测量,采集多个连续的干涉光谱曲线,对它们进行傅里叶逆变换,得到多个油膜位置临近点的散射势曲线。将散射势曲线赋灰度值,得

到油膜的二维层析图像,如图 6 所示。

图 6 中,亮线 1 表示润滑油膜表面;2 表示润滑油膜;3 表示轴承表面,即轴承与润滑油膜的界面;4 表示轴承。由二维层析图像不仅可以得到润滑油膜的厚度,还能观察到轴承的表面形貌,实现对轴承运行状况的监测。

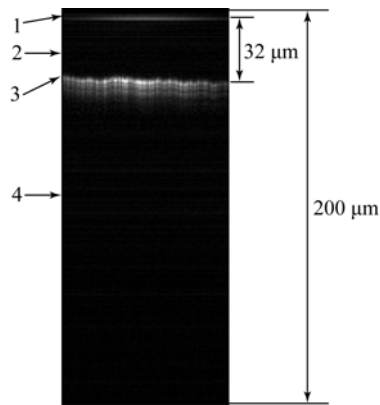


图 6 轴承润滑油膜的二维层析图像

Fig. 6 2D cross-sectional image of lubricant film

为测量不同厚度的润滑油膜,将两盖玻片叠放在一起,并在其中一端放置薄垫片,使盖玻片之间形成厚度不同的气隙,然后在两盖玻片之间充满润滑油,以形成不同厚度的润滑油膜。测量装置如图 7 所示。

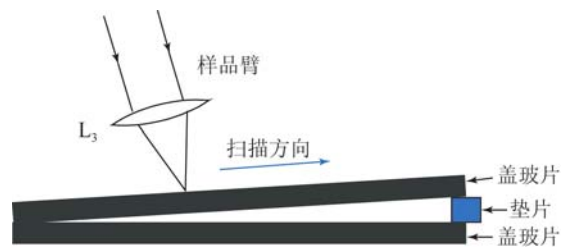


图 7 不同厚度润滑油膜的测量装置

Fig. 7 Measuring devices for lubricant film with gradually varied thicknesses

利用搭建的 SD-OCT 实验系统对两盖玻片之间的润滑油膜厚度进行测量,并将测量结果与理论计算值进行对比,结果如图 8 所示。可以看出,SD-OCT 测量法得到的实际测量值略大于理论计算值,测量误差小于 $2 \mu\text{m}$ 。除少数测量值与理论值偏差较大外,测量结果与理论计算值基本保持一致,说明该谱域 OCT 实验平台的测量精度高,测量结果准确、有效。

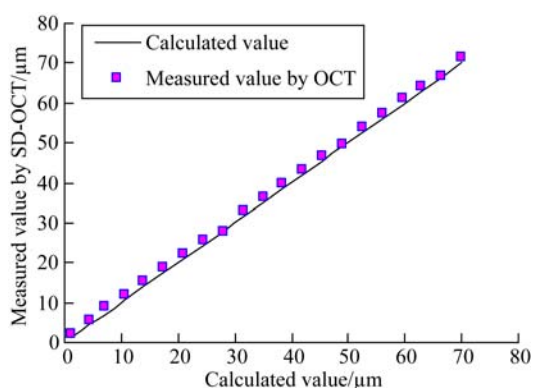


图8 SD-OCT 测量值与理论计算值对比

Fig. 8 Comparison between measured and theoretical values of SD-OCT

由于光谱仪 AvaSpec-NIR512-1.7TEC 的最短积分时间为 $20 \mu\text{s}$, 因此该实验平台的轴向扫描速率最高可达 50 kHz 。对于高散射样品来说, 允

参考文献:

- [1] DWYER-JOYCE R S, DRINKWATER B W, DONOHOE C J. The measurement of lubricant-film thickness using ultrasound [J]. *Proceedings of the Royal Society of A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2003, 459(2032): 957-976.
- [2] ZHANG J, DRINKWATER B W, DWYER-JOYCE R S. Acoustic measurement of lubricant-film thickness distribution in ball bearings [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 119(2): 863-871.
- [3] 杨道业, 郭瑞, 王晓荣, 等. 电容层析成像在滑动轴承润滑油膜测量中的应用 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(5): 99-104.
YANG D Y, GUO R, WANG X R, et al.. Application of electrical capacitance tomography on lubricating oil film in journal bearings [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(5): 99-104. (in Chinese)
- [4] 黄蕾, 滕勤, 孙军. 多功能滑动轴承试验台测控系统设计 [J]. *机械设计与研究*, 2013, 29(3): 92-96.
HUANG L, TENG Q, SUN J. Design of measurement and control system for multi-functional journal bearing test bed [J]. *Machine Design and Research*, 2013, 29(3): 92-96. (in Chinese)
- [5] ZHANG J, DRINKWATER B W, DWYER-JOYCE R S. Calibration of the ultrasonic lubricant-film thickness measurement technique [J]. *Measurement Science and Technology*, 2005, 16(9): 1784-1791.
- [6] LUO J B, WEN S Z, HUANG P. Thin film lubrication. Part I. Study on the transition between EHL and thin film lubrication using a relative optical interference intensity technique [J]. *Wear*, 1996, 194(1-2): 107-115.
- [7] REDDYHOFF T, DWYER-JOYCE R S, ZHANG J, et al.. Auto-calibration of ultrasonic lubricant-film thickness measurements [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(4): 045402.
- [8] 刘海超, 郭峰, 赵国奎. 润滑膜厚测量的双色光干涉强度调制方法 [J]. *摩擦学学报*, 2015, 35(3): 282-287.
LIU H CH, GUO F, ZHAO G L. A dichromatic interference intensity modulation approach to lubricating film thickness measurement [J]. *Tribology*, 2015, 35(3): 282-287. (in Chinese)
- [9] 陈玉平, 张小栋, 王祥林. 应用光纤位移传感器的润滑油膜厚度检测方法的研究 [J]. *润滑与密封*, 2004, 29(6): 72-74.
CHEN Y P, ZHANG X D, WANG X L. Study for the application of fiber-optical displacement sensor in measurement of the lubricating film state [J]. *Lubrication Engineering*, 2004, 29(6): 72-74. (in Chinese)
- [10] HUANG D, SWANSON E A, LIN C P, et al.. Optical coherence tomography [J]. *Science*, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- [11] ANNA T, SHAKHER C, MEHTA D S. Simultaneous tomography and topography of silicon inte-

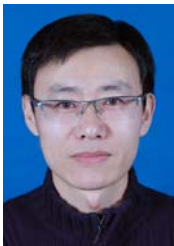
许光谱仪以较短的积分时间采集光谱, 因此使用高功率光源, 并减少光谱仪的积分时间, 能够实现对样品的快速成像和高精度测量。

5 结 论

本文利用 SD-OCT 技术进行了滑动轴承油膜厚度测量实验, 获得了油膜的散射势曲线和二维层析图像, 并消除了图像噪声, 提高了测量精度。通过分析散射势曲线中油膜和轴承表面的相对位置, 得到了油膜的厚度值。通过实验对不同厚度的油膜进行了测量, 得到的测量误差小于 $2 \mu\text{m}$, 结果证明了谱域 OCT 测量方法的可行性。该测量方法能够实现油膜厚度和转轴表面缺陷的检测, 有望应用于大型机械设备轴承运行状况的在线监测。

- grated circuits using full-field swept-source optical coherence tomography [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2009, 11(4): 045501.
- [12] DUBEY S K, MEHTA D S, ANAND A, *et al.*. Simultaneous topography and tomography of latent fingerprints using full-field swept-source optical coherence tomography [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2008, 10(1): 015307.
- [13] TARGOWSKI P, IWANICKA M. Optical coherence tomography: Its role in the non-invasive structural examination and conservation of cultural heritage objects-A review [J]. *Applied Physics A*, 2012, 106(2): 265-277.
- [14] TOMLINS P H, WANG R K. Theory, developments and applications of optical coherence tomography [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2005, 38(15): 2519-2535.
- [15] YADAV R, AHMAD K, YOON G. Scanning system design for large scan depth anterior segment optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11): 1774-1776.
- [16] WIESAUER K, PIRCHER M, GÖTZINGER E, *et al.*. En-face scanning optical coherence tomography with ultra-high resolution for material investigation [J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 1015-1024.
- [17] 张建英, 谢文明, 曾志平, 等. 光声成像技术的最新进展[J]. *中国光学*, 2011, 4(2): 111-117.
- ZHANG J Y, XIE W M, ZENG ZH P, *et al.*. Recent progress in photoacoustic imaging technology [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(2): 111-117. (in Chinese)
- [18] DE BOER J F, CENSE B, PARK B H, *et al.*. Improved signal-to-noise ratio in spectral-domain compared with time-domain optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(21): 2067-2069.
- [19] LEITGEB R, HITZENBERGER C K, FERCHER A F. Performance of Fourier domain vs. time domain optical coherence tomography [J]. *Optics Express*, 2003, 11(8): 889-894.
- [20] TARGOWSKI P, WOJTKOWSKI M, KOWALCZYK A, *et al.*. Complex spectral OCT in human eye imaging in vivo [J]. *Optics Communications*, 2004, 229(1-6): 79-84.
- [21] FERCHER A F, HITZENBERGER C K, KAMP G, *et al.*. Measurement of intraocular distances by back-scattering spectral interferometry [J]. *Optics Communications*, 1995, 117(1-2): 43-48.

作者简介:



秦玉伟(1979—),男,山东诸城人,博士,副教授,2007年于华南师范大学获得硕士学位,2014年于西安交通大学获得博士学位,主要从事传感器应用、频谱 OCT 技术、光学低相干干涉测量等方面的研究。E-mail: qinyuwei@163.com