

单色光干涉面接触润滑膜厚在线测量*

白清华^{1,2}, 郭峰², 韩素立², 黄柏林³

(1. 青岛理工大学计算机工程学院 青岛 266520; 2. 青岛理工大学机械工程学院 青岛 266520;
3. 香港城市大学机械与生物医学工程系 香港 999077)

摘要:提出了滑块-玻璃盘形成的面接触润滑油膜厚度光干涉在线测量方法。以单色激光为光源,根据油膜厚度变化引起平行干涉条纹平移的物理特征,基于光流和动态时间规整技术构造复合算法,测量干涉图像相邻帧空间域上一维光强曲线的位置,从而得到相邻帧之间的油膜厚度差。从零速度开始记录每一帧干涉图像对应的膜厚变化,实时计算出当前帧对应的膜厚,实现了膜厚的在线测量。当前算法的测量结果与离线膜厚测量结果进行了对比,验证了该系统的测量准确性。进行了阶跃载荷、匀加速及匀减速工况下的膜厚测量,揭示了膜厚变化规律。

关键词:光干涉;油膜厚度;面接触;在线测量

中图分类号: TH741 TH117.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.15

On-Line measurement of lubricant film thickness in a flat-on-flat contact by monochromatic interferometry

Bai Qinghua^{1,2}, Guo Feng², Han Suli², Huang Bolin³

(1. School of Computer Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 2. School of Mechanical Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 3. Department of Mechanical and Biomedical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: This paper mainly proposes an on-line interference measurement approach of the film thickness in slider-on-disc conformal contact. With a monochromatic laser, the physical characteristic of the parallel straight interference fringes translation induces by variation of the film thickness. Based on optical flow calculation and dynamic time wrapping technique, a hybrid algorithm is introduced to calculate the displacement of an one-dimensional intensity curve across the parallel fringes between two adjacent frames, therefore, the corresponding film thickness change can be obtained. From the start of the test rig, the film thickness variation of each frame is recorded and the on-line film thickness measurement is achieved. The film thickness by the presented approach is validated by its good correlation with that by the old off-line method. With the new measurement system, the transient film thickness is measured in real time under conditions of step loads, uniform acceleration and deceleration, and some characteristics of film building are demonstrated.

Keywords: optical interferometry; lubricant film thickness; conformal contact; on-line measurement

0 引言

从大型机械到微机电系统及各类精密机械,相对运动的摩擦副之间形成一定厚度的流体润滑膜是减小摩擦阻力,降低磨损的重要手段。精密表面间的流体润滑膜的厚度一般在几十纳米到数微米之间。摩擦副在相对运

动过程中受到载荷、温升和速度等外部因素的影响,流体润滑膜的厚度也在不断变化。因此研制实验装置测量摩擦副运动过程中的油膜厚度,对判断摩擦副的润滑效果、润滑状态及润滑油性能尤为重要。

光干涉技术被广泛应用于微纳米尺度测量。人们在光学测量领域成功研制了多种纳米级膜厚测量仪器^[1-4],比如激光外差干涉仪、X光干涉仪^[5]等,均有很高的测量

分辨率和量程。Gohar R 等人^[6]和 Cameron A 等人^[7]首次将光干涉技术引入球盘接触弹流润滑实验^[8],经多年的发展和完善,确立了由玻璃盘、分光层、垫层、润滑油膜及钢球组成的摩擦副测量结构^[9-10]。根据所用光源的不同,膜厚测量技术和分析方法也有所不同,目前主要有如下几种测量方案。

以白光为光源,通过光谱分析和比色法测量膜厚。光谱分析法由 Johnston G. J. 等人^[11]提出, Cann P. M. 等人^[12]使用垫层成像法 (spacer layer imaging method, SLIM) 技术和色度学分析,实现了膜厚的纳米级测量, Glovnea R. P. 等人^[13]结合多光束分析理论,进一步发展了 Johnston G. J. 等人的技术。Gustafsson L 等人^[14]、Hartl M 等人^[15-17]结合比色法和计算机图像处理技术,实现了膜厚的实时测量。白光干涉色彩丰富,测量分辨率和效率都很高,但是当膜厚较高时,干涉图像由于色彩饱和导致测量精度下降,所以白光光源一般应用于 800 nm 以下的膜厚测量。

以两种波长的光为光源,可扩大膜厚测量范围。Foord C. A. 等人^[18]用赫兹接触对红绿双色光源干涉条纹进行标定,给出了膜厚和干涉条纹颜色之间的对应关系; Kaneta M 等人^[19-21]应用双色光源对球盘接触弹流膜厚进行了大量实验; Guo L 等人^[22]、Liu H. C. 等人^[23]用红绿激光为光源,发现特定颜色的干涉条纹和膜厚具有对应关系,膜厚低于 4 μm 时,通过单张干涉图片就可以测出膜厚,提高了测量效率,但是双色光光源合成系统复杂,对每种光的波长和输出功率稳定性要求较高,并且双色光光源及彩色图像采集系统的造价也比较高。

以单色光为光源,可根据干涉光强和干涉级次来分析膜厚。单色光形成的干涉图像对比度高,适合大量程的膜厚测量。相对光强法^[24]和多光束干涉技术^[25]的提出使单色光干涉测量分辨率达到 nm 级。目前,单色光膜厚测量,需要进行干涉级次计数的离线数据分析,效率较低、测量过程复杂,但是单色光量程大、精度高,并且光源和图像采集系统成本较低,有利于推广,因此很有必要研制基于单色光的在线膜厚测量系统。不难发现,现有润滑油膜的光干涉测量大部分是基于球-盘点接触系统完成^[8-21,24]。钢球和玻璃盘形成的点接触几何状态较容易控制,油膜压力高,膜厚一般在 μm 级以下。而对于工程中另一种常见的面接触,油膜压力低、膜厚范围大。由于面接触副几何形态调整和保持的困难,实验研究进展缓慢。近年来,马冲等人^[26]和 Guo F 等人^[27]在面接触的油膜厚度测量方面进行了探索,研制了滑块-玻璃盘构成的面接触润滑油膜测量仪。该系统以单色光为光源,通过记录停机后滑块下降过程中某点的光强变化来计算膜厚,需要实验数据的离线处理。需要指出的是该方法仅对稳态条件下的油膜厚度进行测量,不适用于时变的油膜厚度测量。针对这一问题,在不改变硬件配置的前提

下,运用光流和动态时间规整算法,结合计算机图像处理技术,实现了面接触润滑油膜厚度的在线测量。

1 面接触油膜厚度在线测量原理

面接触润滑油膜测量系统工作原理如图 1 所示,滑块和玻璃盘构成面-面接触滑动摩擦副,滑块相对玻璃盘的倾角为 α ,其大小通过调节螺栓调整。在一定载荷下,当玻璃盘以一定速度旋转时,与滑块之间可形成流体动压润滑油膜。红色 (波长为 653 nm) 或绿色 (波长为 532 nm) 激光透过旋转毛玻璃,经半反半透镜、玻璃盘、Cr 膜分光层和油膜照射到滑块下表面。滑块与玻璃盘之间的微小夹角 α 可以由楔形间隙形成的干涉条纹计算。干涉条纹图像由电荷耦合元件 (charge-coupled device, CCD) 实时读取,然后经过图像卡采集到计算机并且实时显示在屏幕上,截取的部分干涉图像如图 2 所示。

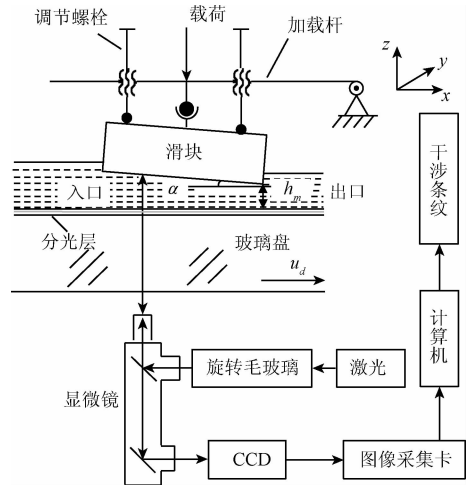


图 1 面接触油膜测量系统原理

Fig. 1 Schematic illustration of flat-on-flat contact film thickness measurement system

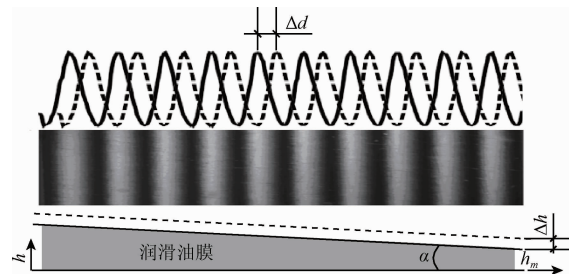


图 2 干涉条纹与出口处膜厚对应关系

Fig. 2 Relationship between film thickness at the outlet and the interference fringe

如图 2 所示,与干涉条纹垂直方向的干涉光强曲线呈周期性偏余弦分布^[24],如果滑块出口处膜厚上升 Δh ,

干涉光强曲线相应会右移 Δd , 与 α 之间的关系为:

$$\Delta h = \Delta d \times \alpha \quad (1)$$

式中: α 为玻璃盘与滑块之间的夹角, 规定干涉条纹右移时 Δd 取正, 左移取负。

玻璃盘旋转速度的变化会导致滑块上升或下降, 只要能捕获干涉光强曲线的位移 Δd , 就可以计算出膜厚的瞬时变化量 Δh 。玻璃盘静止时, 滑块出口处膜厚为 0, 则玻璃盘运行过程中, 滑块出口处的膜厚 h_m 可用式(2)表示。

$$h_m = \sum \Delta h_i = \sum \alpha \cdot \Delta d_i \quad (2)$$

玻璃盘旋转过程中, 与滑块之间的夹角 α 会产生微小的变动, 因此必须能实时获得夹角 α 的值才能准确测量膜厚, 对干涉光强曲线进行离散傅里叶变换, 通过频率估计可以实时计算出倾角 α [28], 用式(3)表示。

$$\alpha = \frac{\lambda \beta}{2nB} \quad (3)$$

式中: λ 为入射光波长, β 为滑块与玻璃盘产生的干涉条纹数, n 为润滑膜的折射率, B 为滑块沿玻璃盘运动方向上的宽度。

将式(3)代入式(2)即可实时计算滑块出口处的膜厚 h_m , 解决问题的关键是求出干涉图像位移量 Δd 。CCD 读取干涉图像的帧率一般可以达到 30 帧/s 以上, 前后两帧干涉图像的时间间隔很短, 油膜厚度的变化量一般也很微小, 所以前后两帧干涉图像的位移量 Δd 也比较小, 理论上可以通过追踪干涉图像来获得 Δd 。目前, 对普通视频中特定目标追踪技术已经比较成熟, 比如 Kalal Z 等人 [29] 提出的比较著名的跟踪-学习-检测 (tracking-learning-detection, TLD) 算法, 综合检测和跟踪算法及在线学习机制, 实现了普通视频中目标的长时间跟踪; Nebehay G 等人 [30] 提出的基于一致性的匹配和跟踪 (consensus-based matching and tracking, CMT) 算法, 基于图像被追踪区域多数特征点在不同的缩放比例下相对于中心的距离的不变性实现了目标跟踪; 但是由于面接触油膜测量系统的干涉条纹图像呈周期性分布, 上述 TLD、CMT 及目前图像处理领域很多种图像追踪算法无法确定目标位置, 经验证无法应用。面接触油膜测量系统干涉条纹呈平行周期性分布, 垂直于干涉条纹方向某条直线上光强曲线的位移量与干涉图像的位移量是相同的, 因此, 研究该一维光强曲线前后相邻帧产生的位移, 比在二维图像上的追踪算法大大减少计算量。

如果曲线在不同时刻仅产生 x 轴方向上的平移 Δd , 且 Δd 很小时, 如图 3 所示, 可以用 $\Delta \tilde{d}$ 近似表示 Δd , 如式(4)所示。用 Lucas D 等人 [31] 提出的针对一维情况的 LK (Lucas-Kanade) 光流算法来计算 Δd , 如式(5)所示。

$$\Delta d \approx \Delta \tilde{d} = (G(x) - F(x)) / F'(x) \quad (4)$$

$$\Delta d \approx \frac{\sum_{k=1}^N F'(x_k) [G(x_k) - F(x_k)]}{\sum_{k=1}^N [F'(x_k)]^2} \quad (5)$$

式中: 为与干涉条纹方向垂直的一条直线上 (记作 L_1) 的像素数量, $F(x_k)$ 、 $G(x_k)$ 分别为当前帧和前一帧沿 L_1 上第 k 个像素点的光强值, x_k 为 L_1 上第 k 个像素点的横坐标, $F'(x_k)$ 为 x_k 点的光强曲线的导数, 可用式(6)计算。

$$F'(x_k) = [F(x_{k+1}) - F(x_k)] / (x_{k+1} - x_k) \quad (6)$$

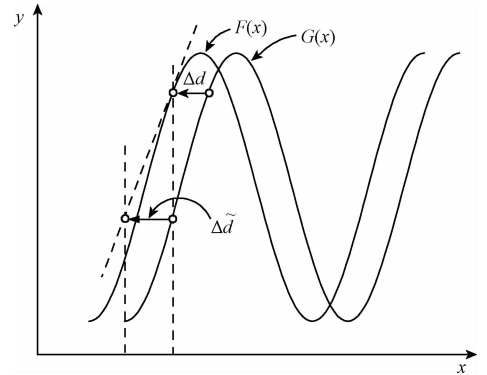


图3 光强曲线平移量计算原理

Fig. 3 Schematic diagram of calculating intensity curve translation

当前后两帧干涉图像对应的油膜厚度变化较小时, 用式(5)计算的 Δd 比较精确。但是如果膜厚变化较大, Δd 的计算结果误差较大, 所以仅用 LK 算法来计算 Δd 并不可靠。另外, 在玻璃盘转动过程中, 滑块与玻璃盘的相对夹角不可能保持绝对一致, 干涉条纹会出现轻微的疏密变化, 导致 L_1 上对应光强曲线出现伸缩。动态时间规整 (dynamic time warping, DTW) 算法 [32] 主要用来衡量两个长度不同的时间序列的相似度, 在孤立词语的语言识别 [33]、眼球跟踪 [34]、数据挖掘 [35]、人体动作识别 [36] 等领域得到了成功应用, 特别适合于比较曲线形状相同, 而数据个数不同的两组数据的相似度。因此提出基于 LK 光流计算和 DTW 技术的综合算法计算 Δd , 计算流程如下:

1) 用文献 [28] 方法计算前一帧 L_1 上对应的光强曲线的变化周期数, 记作 β_1 , 从 L_1 中间位置开始, 提取 1 个变化周期的光强值数据, 记作 $T = \{T(1), T(2), \dots, T(i), \dots, T(M)\}$, M 为像素数量;

2) 在当前帧用式(5)粗略计算位移量 $\Delta \tilde{d}$;

3) 计算当前帧 L_1 上对应的光强曲线的变化周期数, 记作 β_2 , 计算当前帧 L_1 对应光强曲线上将要与 T 对比较的像素数量 $N = \beta_1 \cdot M / \beta_2$ (当光强曲线无伸缩时 $M = N$);

4) 从当前帧相对于前一帧 $\Delta \tilde{d}$ 位置左和右数个 (≤ 5) 像素范围内, 从左至右依次提取 L_1 上对应的一组光强

变化数据,记作 $R = \{R(1), R(2), \dots, R(i), \dots, R(N)\}$;

5) 生成匹配距离矩阵 $D_{M \times N}$, 矩阵元素记作 $d(i, j)$, 计算方法如式(7)所示;

$$d(i, j) = |T(i) - R(j)|$$

$$i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, N \quad (7)$$

6) 生成累积距离矩阵 $G_{M \times N}$, 其元素记作 $g(i, j)$, 取 $g(0, 0) = 0$, 基于匹配距离矩阵 $D_{M \times N}$ 使用动态规划算法计算 $g(i, j)$, 如式(8)所示, $g(m, n)$ 的值就是 T 和 R 的最小动态规划距离;

$$g(i, j) = \min \begin{cases} g(i-1, j) + d(i, j) \\ g(i-1, j-1) + 2d(i, j) \\ g(i, j-1) + d(i, j) \end{cases} \quad (8)$$

7) 找出和步骤 4) 所有组的最小动态规划距离的最小值, 根据该最小值所对应的位置, 即可求出 L_1 光强曲线前后帧之间的位移量 Δd ;

8) 将当前帧视作前一帧, 从步骤 1) 循环计算每组前后相邻帧的 Δd , 用式(2)即可实时计算出出口处油膜厚度 h_m 。

2 测量结果与讨论

2.1 膜厚测量精度分析

为了验证本文算法的精度, 以绿色激光(波长为 532 nm)做光源, 选用黑白 CCD, K9 玻璃盘表面镀 Cr 膜和 SiO₂ 膜, 表面粗糙度 $Ra = 4$ nm。滑块材料为 GCr15 轴承钢, 滑块接触副尺寸为 4 mm × 4 mm, 表面粗糙度 $Ra = 8$ nm。载荷固定为 8 N, 不同速度下在线测量油膜厚度 (On-line), 与离线测量 (Off-line) 的结果相比较。文献[27]报道了离线测量的具体方法, 与本文的在线测量方法原理不同, 并通过与理论的对比较验证了离线测量结果的可信性。实验条件如表 1 所示, 将每种速度下在线和离线测量的膜厚求平均值, 结果如图 4 和表 2 所示。可以看出, 在线测量和离线测量结果差别很小, 相对测量误差小于 10%, 这主要是由于玻璃盘驱动系统的轴向跳动等因素引起膜厚的波动, 导致了在线和离线两种测量方法的差别。

表 1 实验条件

Table 1 Experimental settings

润滑油-PAO8 参数	数值	测试条件	数值
粘度 $\eta(20^\circ\text{C})/\text{mPa} \cdot \text{s}$	107	滑块倾角/rad	5.69×10^{-4}
折射率(20°C)	1.463	温度/°C	20 ± 0.5
-	-	湿度/%	41

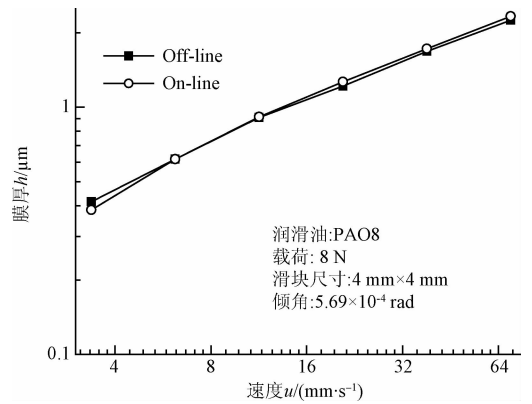


图 4 膜厚随速度变化曲线

Fig. 4 Film thickness vs. speed

表 2 单色光在线和离线测量结果对比

Table 2 The comparison of film thickness between on-line and off-line measurements

速度/(mm · s ⁻¹)	膜厚/nm		相对误差/%
	Off-line	On-line	
3.37	414.37	383.77	7.38
6.18	615.31	616.50	0.19
11.33	907.20	912.10	0.54
20.79	1 215.25	1 265.83	4.16
38.15	1 681.66	1 720.77	2.338
70.00	2 248.45	2 331.25	3.68

2.2 阶跃载荷油膜厚度测量

使玻璃盘以恒定速度 11.3 mm/s 运转, 初始时施加 4 N 载荷, 然后将载荷跃变为 8、12 和 16 N, 再将载荷跃变回 4 N, 系统在每种载荷下平稳运行一段时间, 在线测量油膜厚度的变化情况, 如图 5 所示, 可以看出本文算法能够适用于阶跃载荷下的膜厚在线测量, 并且在相同速度相同载荷下, 测得的膜厚数据重复性较好。比较膜厚从 4 ~ 8 N 的变化、8 ~ 12 N 以及 12 ~ 16 N 的变化, 发现膜厚的变化量并不相同, 而是逐渐减小。这是由于对于同样的倾角, 在一定范围内, 膜厚越小, 承载量对膜厚变化率越大。

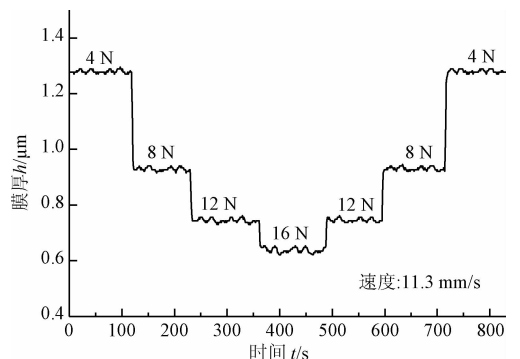
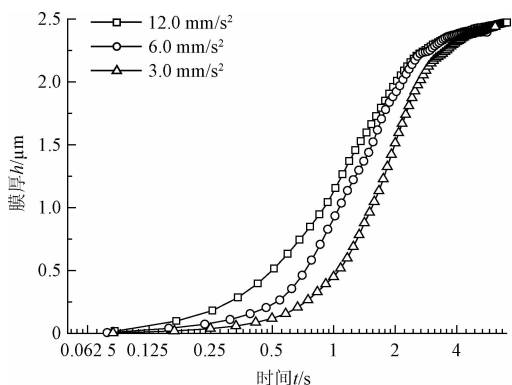


图 5 膜厚随载荷变化曲线

Fig. 5 Film thickness vs. load

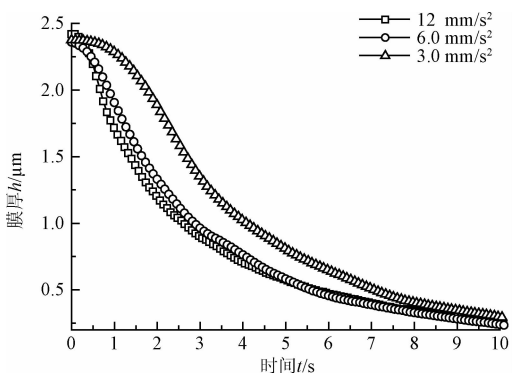
2.3 匀加速和减速过程中的膜厚测量

摩擦副在启动和停机过程中膜厚不断变化,测量这个过程的膜厚变化一直比较困难。用本文的膜厚在线测量方法,可以实时记录油膜厚度,因此可以较为容易测量启动和停机过程中膜厚变化。实验润滑油为 PAO40, 20℃时粘度 $1.05 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 固定载荷 4 N , 滑块倾角 $5.69 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 。将玻璃盘从速度 0 mm/s 匀加速上升到 6 mm/s , 匀速运行一段时间后,再匀减速到 0 mm/s , 来模拟启动和停机过程,分别设定加减速为 $3.0, 6.0, 12 \text{ mm/s}^2$, 得到匀加速过程膜厚随时间变化曲线,如图 6(a)所示,匀减速过程膜厚随时间变化曲线,如图 6(b)所示。从图 6(a)可以看出,启动过程加速度越大,膜厚滞后越大,当加速度较小时,膜厚滞后情况减小,可以预测当加速度小到一定值时,膜厚会和速度同时达到极值,而匀减速过程情况则不同,无论以何种减速度停机,均存在不同程度的膜厚变化滞后现象^[37],这是因为载荷不变情况下,滑块下落过程中,同时受到动压和挤压效应所致。



(a) 匀加速过程膜厚随时间变化

(a) Film thickness vs. time at different uniform accelerations



(b) 匀减速过程膜厚随时间变化

(b) Film thickness vs. time at different uniform decelerations

图6 匀加减速过程中的膜厚变化规律

Fig. 6 Film thickness variations during uniform accelerations and decelerations

3 结 论

基于光干涉技术,以单色光为光源,基于光流和动态时间规整技术构造了复合算法,对一维干涉光强曲线进行追踪,实现了面接触摩擦副润滑油膜厚度的在线测量。

该系统不仅适用于在线测量稳态情况下油膜厚度,还能适用于测量阶跃载荷、加减速等动态过程的膜厚变化,为研究滑动摩擦副动态过程润滑规律提供了有效实验手段。

参考文献

- [1] BOBROFF N. Recent advances in displacement measuring interferometry[J]. *Measurement Science & Technology*, 1993, 4(9):907-926.
- [2] PEGGS G N, YACOOT A. A review of recent work in sub-nanometre displacement measurement using optical and X-ray interferometry[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 2002, 360(1794):953-968.
- [3] 孙艳, 孙锋, 杨玉孝, 等. 光纤频谱仪测试膜厚的新技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2003, 24(5):543-546.
SUN Y, SUN F, YANG Y X, et al. Research on new technology of thickness measurement through optical fiber spectrometer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, 24(5):543-546.
- [4] 陈本永, 李达成. 纳米测量技术的挑战与机遇[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(5):547-550.
CHEN B Y, LI D CH. Challenges and opportunities of nanomeasurement technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(5):547-550.
- [5] CHETWYND D G, KRYLOVA N O, SMITH S T. Metrological X-ray interferometry in the micrometer-region[J]. *Nanotechnology*, 1999, 7(1):1-12.
- [6] GOHAR R, CAMERON A. Optical measurement of oil film thickness under elasto-hydrodynamic lubrication[J]. *Nature*, 1963, 200(490):458-459.
- [7] CAMERON A, GOHAR R. Theoretical and experimental studies of the oil film in the lubricated point contact[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1966, 291(1427):520-536.
- [8] MA L R, LUO J B. Thin film lubrication in the past 20 years[J]. *Friction* 2016, 4(4):280-302.
- [9] WESTLAKE F J, CAMERON A. A study of ultra-thin lubricant films using an optical technique[J]. *Proceedings*

- of the Institution of Mechanical Engineers, 1967, 182 (7):75-78.
- [10] FOORD C A, HAMMANN W C, AMERON A. Evaluation of lubricants using optical elastohydrodynamics [J]. ASLE Transactions, 1968, 11(1): 31-43.
- [11] JOHNSTON G J, WAYTE R, SPIKES H A. The measurement and study of very thin lubricant films in concentrated contacts [J]. Tribology Transactions, 1991, 34(2): 187-194.
- [12] CANN P M, SPIKES H A, HUTCHINSON J. The development of a spacer layer imaging method (SLIM) for mapping elastohydrodynamic contacts [J]. Tribology Transactions, 1996, 39(4): 915-921.
- [13] GLOVNEA R P, FORREST A K, OLVER A V, et al. Measurement of sub-nanometer lubricant films using ultrathin film interferometry [J]. Tribology Letters, 2003, 15(3): 217-230.
- [14] GUSTAFSSON L, HÖGLUND E, MARKLUND O. Measuring lubricant film thickness with image analysis [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J Journal of Engineering Tribology, 1994, 208(J3): 199-205.
- [15] HARTL M, KRUPKA I, LISKA M. Differential colorimetry: Tool for evaluation of chromatic interference patterns [J]. Optical Engineering, 1997, 36(9): 2384-2391.
- [16] HARTL M, KRUPKA I, LISKA M. Elastohydrodynamic film thickness mapping by computer differential colorimetry. Tribology transactions, 1999, 42(2): 361-368.
- [17] HARTL M, KRUPKA I, POLISCUK R, et al. An automatic system for real-time evaluation of EHD Film thickness and shape based on the colorimetric interferometry [J]. Tribology Transactions, 1999, 42(2): 303-309.
- [18] FOORD C A, WEDEVEN L D, WESTLAKE F J, et al. Optical elastohydrodynamics [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1969, 184(1): 487-505.
- [19] KANETA M, CAMERON A. Effects of asperities in elastohydrodynamic lubrication [J]. Journal of Tribology, 1980, 102(3): 374-379.
- [20] KANETA M, NISHIKAWA H, KAMEISHI K. Observation of wall slip in elastohydrodynamic lubrication [J]. Journal of Tribology, 1990, 112(3): 447-452.
- [21] KANETA M, KANADA T, NISHIKAWA H. Optical interferometric observations of the effects of a moving dent on point contact EHL [J]. Tribology, 1997, 32(4): 69-79.
- [22] GUO L, WONG P L, GUO F, et al. Determination of thin hydro-dynamic lubricating film thickness using dichromatic interferometry [J]. Applied Optics, 2014, 53(26): 6066-6072.
- [23] LIU H C, GUO F, GUO L, et al. A dichromatic interference intensity modulation approach to measurement of lubricating film thickness [J]. Tribology Letters, 2015, 58(1): 1-11.
- [24] LUO J B, WEN S Z, HUANG P. Thin film lubrication part I: Study on the transition between EHL and thin film lubrication using relative optical interference intensity technique [J]. Wear, 1996, 194(1-2): 107-115.
- [25] GUO F, WONG P L. A multi-beam intensity-based approach for lubricant film measurements in non-conformal contacts [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2002, 216(5): 281-291.
- [26] 马冲, 郭峰, 付忠学, 等. 微型滑块面接触润滑油膜测量系统 [J]. 摩擦学学报, 2010, 30(4): 419-424.
- MA CH, GUO F, FU ZH X, et al. Measurement of lubricating oil film thickness in conformal contacts [J]. Tribology, 2010, 30(4): 419-424.
- [27] GUO F, WONG P L, FU Z, et al. Interferometry measurement of lubricating films in slider-on-disc contacts [J]. Tribology Letters, 2010, 39(1): 71-79.
- [28] 白清华, 郭峰, 刘海超, 等. 面接触润滑油膜测量系统滑块倾角的快速计算 [J]. 摩擦学学报, 2015, 35(5): 517-524.
- BAI Q H, GUO F, LIU H C, et al. A robust approach to determining the slider inclination in a slider-on-disc conformal-contact lubricating [J]. Tribology, 2015, 35(5): 517-524.
- [29] KALAL Z, MIKOLAJCZYK K, MATAS J. Tracking-Learning-Detection [J], IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2012, 34(7): 1409-1422.
- [30] NEBEHAY G, PFLUGFELDER R. Consensus-based matching and tracking of keypoints for object tracking [C]. IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, 2014: 862-869.
- [31] LUCAS D, KANADE T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision [C]. IJ-CAI81, 1981: 674-679.
- [32] SAKOE H, CHIBA S. Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition [J], IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing,

- 1978, 26(1):43-49.
- [33] RABINER L R, ROSENBERG A E, LEVINSON S E. Considerations in dynamic time warping algorithms for discrete word recognition [J]. *IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing*, 1978, 26(6): 575-582.
- [34] MOKHTAR N B, AROF H, IWAHASHI M. Real time eyeball tracking via derivative dynamic time warping for human-machine interface [J]. *International Journal of Innovative Computing Information & Control*, 2011, 7(7): 4335-4346.
- [35] 傅颖, 郭晶云. 基于动态时间规整的人体动作识别方法 [J]. *电子测量技术*, 2014, 37(3):69-72.
FU Y, GUO J Y. Dynamic time warping-based human action recognition [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, 37(3):69-72.
- [36] BERNDT D, CLIHORD J. Using dynamic time warping to find patterns in sequences [C]. *Working Notes of the Knowledge Discovery in Databases Workshop*, 1994: 359-370.
- [37] GLOVNEA R P, SPIKES H A. Elastohydrodynamic film collapse during rapid deceleration. Part I-experimental

results [J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 2001, 123(2): 254-261.

作者简介



白清华, 1996 年于合肥工业大学获得学士学位, 2006 年于青岛理工大学获得硕士学位, 现为青岛理工大学讲师, 主要研究方向为摩擦学测试及计算机控制技术。

E-mail: flyingqd@126.com

Bai Qinghua received his B. Sc. degree from HeFei University of Technology in 1996, received his M. Sc. degree from Qingdao University of Technology in 2006. Now he is a lecture in Qingdao University of Technology. His main research interests include optical interferometry of lubrication films, and computer control technology.



郭峰(通讯作者), 分别在 1991 年和 1998 年于青岛建筑工程学院获得学士学位和硕士学位, 2003 年于香港城市大学获得博士学位, 现为青岛理工大学教授, 主要研究方向为摩擦学测试。

E-mail: mefguo@163.com

Guo Feng (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Qingdao Institute of Architecture and Engineering in 1991 and 1998, respectively, and received his Ph. D. degree from City University of Hong Kong in 2003. Now he is a professor in Qingdao University of Technology. His main research interest is tribology test.