

NGY-2型纳米级润滑膜厚度测量仪*

黄平 雒建斌 邹茜 温诗铸

(清华大学摩擦学国家重点实验室 北京 100084)

摘要 近30年来,人们在利用光学方法测量润滑膜的厚度方面进行了许多研究,并且提出了一些膜厚测量方法.但是,这些方法在测量纳米级润滑薄膜时却都不同程度地存在着分辨率和精度都低等缺点.因此,根据光干涉法测量膜厚的基本原理提出了相对光强原理,并且经过特定的光路设计,研制了一种NGY-2型纳米级润滑膜厚度测量仪.在给定条件下的测试结果表明,这种测量仪具有膜厚测量分辨率和精度都高,以及抗外界光场变化能力强等优点.

关键词 光干涉法,相对光强原理,纳米级润滑膜厚度测量

1 前言

在许多低速、重载、高温条件下工作或采用低粘度润滑介质的机械设备和超精密机械中,摩擦副(特别是点、线接触的摩擦副)常处于几到几十纳米厚的薄膜润滑状态.但是,由于测试技术上的困难,这种状态的润滑机理却尚未得到充分的认识.这不仅制约了人们在理论上对其摩擦学性能的了解,而且对弹流润滑向边界润滑的转化和润滑失效的原因等也都无法作出令人满意的解释.因此,薄膜润滑研究近年来已经成为摩擦学领域中的研究热点之一,而其中的关键就是膜厚的测量.

自本世纪六十年代以来,人们在利用光学方法测量润滑膜的厚度方面进行了许多试验研究,并且已经提出了一些膜厚测量方法^[1-6].目前,这些方法在测量润滑膜的厚度方面都得到了广泛的应用.但是,当利用它们测量纳米级润滑薄膜时却都不同程度地存在着分辨率和精度都低等缺点.

本文根据光干涉法基本原理提出了相对光强原理,经过特定的光路设计研制了一种纳米级润滑膜厚度测量仪.本仪器适用于摩擦偶件之一是透光的,而且润滑膜也是透光的膜厚之测量.它在分辨率和精度上都高于原有的测膜方法.实际应用表明,这种仪器对纳米级润滑薄膜厚度的测量是有效的.

2 相对光强原理

光干涉法测量膜厚的基本原理如图1所示.

当光束入射时,一部分光在玻璃盘下部之铬膜(半透半反膜)表面发生反射形成光束I,另一部分光透过铬膜并穿过润滑油膜在钢球表面发生反射而形成光束II.两束光由于光程不同将产生干涉形成干涉图像.当光垂直入射时,任一点的干涉光强与两束反射光的

* 国家自然科学基金资助项目

1993-01-02 收到初稿,1993-11-15 收到二修稿

本文通讯联系人雒建斌

强度及该点润滑膜厚度之间的关系为^[1]:

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos(4\pi \cdot n \cdot h/\lambda + \varphi), \quad (1)$$

式中 I ——对应膜厚点处的光强, I_1 ——光束 I 的光强, I_2 ——光束 II 的光强, λ ——单色仪输出光的波长, φ ——由于镀膜和钢球等引起的相位差, h ——对应于 I 点的润滑膜厚度, n ——润滑介质的折射率.

由于钢球与玻璃盘之间各点的油膜厚度不同, 干涉光强也不相同. 反射光强 I_1 和 I_2 可以用干涉图像中的极大、极小光强 I_{max} 和 I_{min} 来确定(设 $I_1 \geq I_2$):

$$I_1 = (I_{max} + I_{min})/4 + \sqrt{I_{max} \cdot I_{min}}/2, \quad (2)$$

$$I_2 = (I_{max} + I_{min})/4 - \sqrt{I_{max} \cdot I_{min}}/2. \quad (3)$$

以往的光干涉法测膜厚仅利用了光的不同频率(即颜色)或光的绝对强度, 因而分辨率较低或是外界光场变化对其测量结果的影响很大. 利用相对光强原理则可以有效地改变这种状况. 光强的相对光强度 $\bar{I} = 2(I - I_0)/I_d$. 其中, 平均光强 $I_0 = (I_{max} + I_{min})/2$, 最大

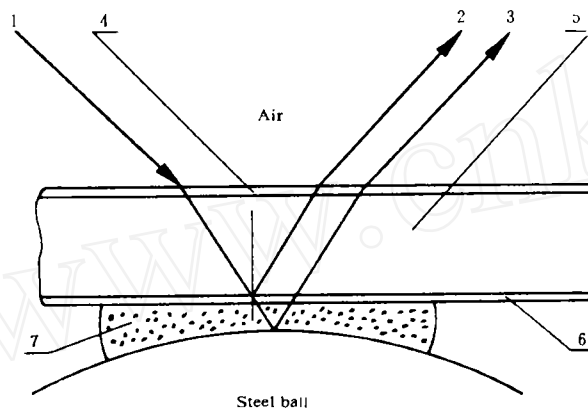


Fig. 1 Schematic diagram of light interference method for measuring the thickness of film

1. Beam 0, 2. Beam I, 3. Beam II, 4. Anti-reflection coating, 5. Glass disc,
6. Semi-reflective Cr layer, 7. Lubricating oil film.

图1 光干涉法测膜示意图

1. 光束 0, 2. 光束 I, 3. 光束 II,
4. 抗反射涂层, 5. 玻璃盘, 6. 半反射铬膜, 7. 润滑油膜.

光强差 $I_d = I_{max} - I_{min}$. 可知 $-1 \leq \bar{I} \leq 1$. 将式(2)和式(3)代入式(1), 并化成相对光强, 整理后取反余弦, 可得膜厚与光波长、折射率及相对光强等的关系式为:

$$h = \lambda [\arccos(\bar{I})/(4n \cdot \pi) - \lambda \cdot \varphi/(4n \cdot \pi)]. \quad (4)$$

当利用标定得到零膜厚时的相对光强 \bar{I}_0 以后, 再代入上式确定出 φ 便可以最终得到膜厚的计算公式为:

$$h = \lambda [\arccos(\bar{I}) - \arccos(\bar{I}_0)]/(4n \cdot \pi). \quad (5)$$

由于图像处理中光强的最小分辨率为一个灰度等级, 所以按照上式计算膜厚的分辨率可以用两相邻极值间的膜厚差除以两极值的光强差, 即有:

$$\text{膜厚分辨率} = \lambda/(4n \cdot \pi \cdot I_d) = \text{单位光强所反映的膜厚值.}$$

由上式可以看出, I_s 越大, 测量时的膜厚分辨率越高. 本仪器的分辨率可以小于 1nm. 另外, 由于采用了相对光强原理, 因而可以很容易地消除因光场平移(强弱变化)或线性变化(光场倾斜)等引起的测量误差. 这是利用绝对光强测膜法难以做到的.

3 仪器结构与测量结果

3.1 仪器结构

按照以上所阐述的相对光强原理, 设计研制了一种 NGY-2 型纳米级润滑膜厚度测量仪. 这种仪器的结构简图如图 2 所示.

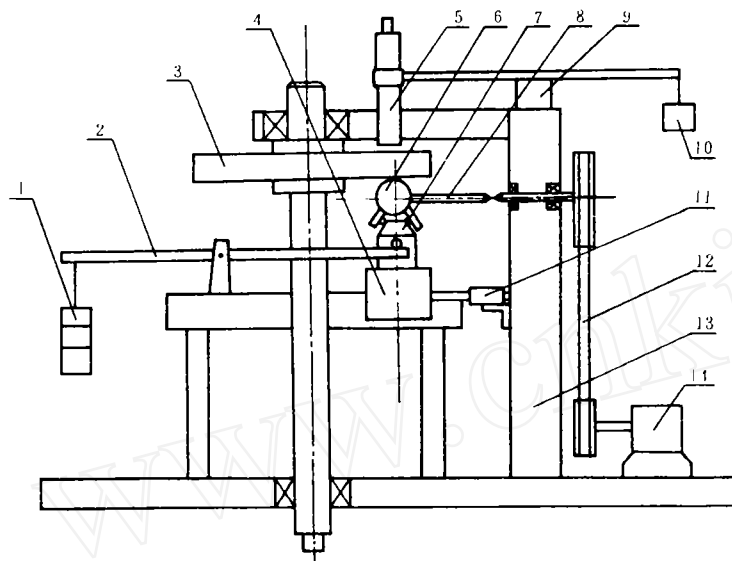


Fig. 2 Schematic diagram of equipment construction for measuring

1. load, 2. Lever, 3. Glass disc, 4. Mount, 5. Microscope,
6. Steel ball, 7. Ball mount, 8. Driving shaft,
9. Three-dimensional working bench,
10. Equipollent load, 11. Micrometer,
12. Belt, 13. Mount wall, 14. Motor.

图 2 仪器结构示意图

1. 载荷, 2. 杠杆, 3. 玻璃盘, 4. 支
座, 5. 显微镜, 6. 钢球, 7. 钢球支承, 8. 主传动轴,
9. 三维工作台, 10. 平衡块, 11. 千分尺, 12. 传动带, 13. 支承座, 14. 电机.

超精密加工的钢球(6)与镀有铬膜的玻璃盘(3)之间为待测的润滑膜. 电机(14)通过传动带(12)带动与钢球连接的主轴(8)转动. 主轴通过一柔性轴和活套与钢球主轴连接. 支承(7)通过杠杆(2)实现浮动和加载功能. 千分尺(11)可带动支座(4)、支承及钢球一起沿径向移动或定位. 显微镜(5)与三维工作台(9)连接.

3.2 测量结果

润滑膜厚度的测量结果如图 3 和图 4 所示. 可以看出, 润滑膜在 Hertz 区内的膜厚是随着速度的增加而增大, 中心区的膜厚增大比较快, 这与弹流理论相符.

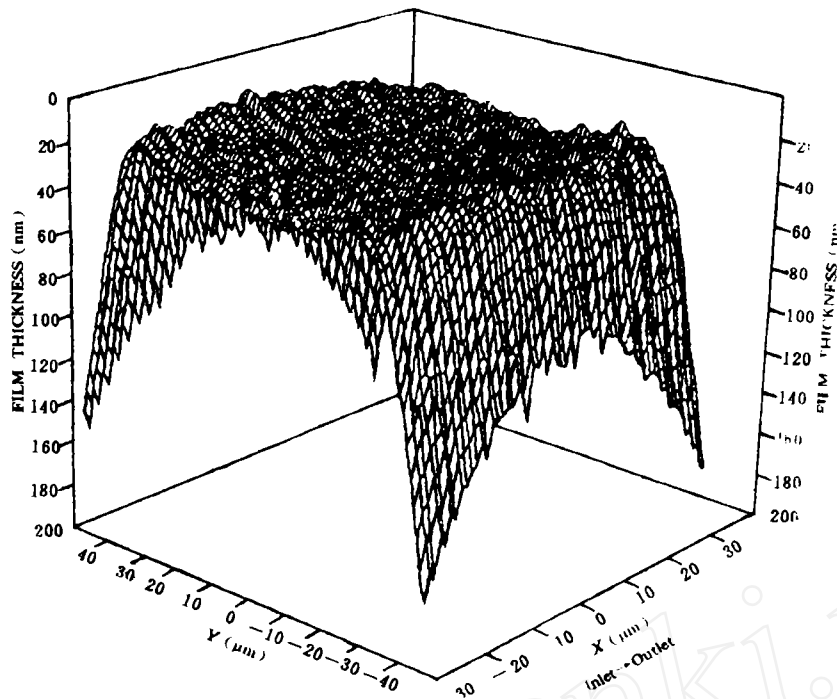


Fig. 3 Film thickness in Hertz region

Lubricant: 13602, temperature: 25°C, load: 4N, rolling speed: 18.6 mm/s.

图3 Hertz区内润滑膜厚度图

润滑剂: 13602, 温度: 25°C, 载荷: 4N, 转动线速度: 18.6mm/s.

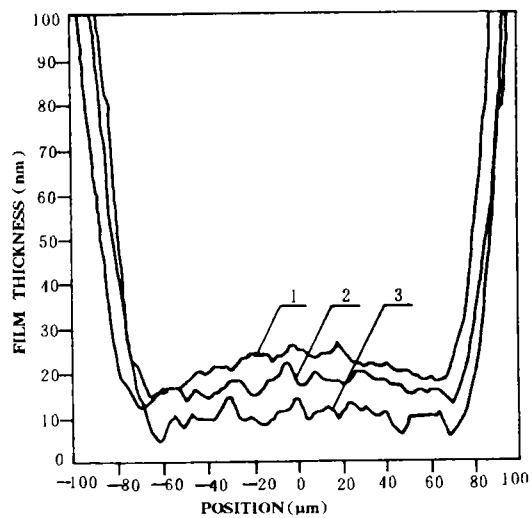


Fig. 4 Film thickness in central cross section of Hertz region

Lubricant: 13604, temperature: 25°C, load: 4N,

rolling speed: 1. 16.55mm/s, 2. 11.53mm/s, 3. 3.12mm/s.

图4 Hertz区中心横截面上润滑膜厚度图

润滑剂: 13604, 温度: 25°C, 载荷: 4N, 转动线速度: 1. 16.55mm/s, 2. 11.53mm/s, 3. 3.12mm/s.

4 结论

利用光干涉法和相对光强原理设计研制了一种 NGY-2 型纳米级润滑膜厚度测量仪, 在给定条件下对纳米级薄膜的厚度测量表明, 其膜厚测量的分辨率和精度均已达到纳米级薄膜润滑研究的要求。

参 考 文 献

- [1] Goher R, Cammeron A. The mapping of elastohydrodynamic contact. ASLE Trans. , 1967, 10 : 215—225.
- [2] Israelachvili J N. Thin film studies using multiple-beam interferometry. J. of Colloid and Interface Sci. , 1973, 44 : 259—271.
- [3] Homola A M, Israelachvili J N. Proceedings of the 5th International Congress on Tribology, Finland, 1989. 28—49.
- [4] Liang X , Linqing Z . A new method for the experimental investigation of contacts in mixed lubrication . Wear , 1989, 132 : 221—233.
- [5] Spikes H A, Guangteng G. Proceedings of 14th Leeds-Lyons Symp. on Trib. , Leeds-Lyons, 1988. 275—279.
- [6] Johnston G J, Wayte R, Spikes H A. The measurement and study of very thin lubricant films in concentrated contact. Trib. Trans. , 1991, 34 : 187—194.
- [7] Born M, Wolf E. Principle of Optics. 5th ed. London: Pergamon Press, 1975. 257—270.

NGY-2 Interferometer for Nanometer Lubrication Film Thickness Measurement

Huang Ping Luo Jianbin Zuo Qian Wen Shizhu

(National Tribology laboratory Tsinghua University Beijing 100084 China)

Abstract For the past three decades, many optical methods for the measurement of lubrication film thickness have been widely studied, and some methods have been developed. However, the methods usually are not of enough resolution and precision if they are used for measurement of nanometer lubrication film. According to the basic principles of the optical interference, the present paper proposed a method for nanometer lubrication film thickness measurement by using relative light intensity principle, and had developed a NGY-2 interferometer with a special design in light route. The measured results under the given working conditions show that the meter is of advantages with high resolution and precision, and with high resistance to the variation of the outside light field as well.

Key words optical interferometric method, relative light intensity principle, nanometer lubrication film thickness measurement