

润滑油膜双色光干涉测量系统的特性研究

周广梅¹ 郭峰¹ 李宏升^{1,2}

(¹ 青岛理工大学机械工程学院, 山东 青岛 266033)
² 清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 基于多光束干涉理论和摄像系统的光谱响应特性,建立了润滑油膜彩色光干涉测量的色度学模型,以红绿双色光干涉测量为例设计了计算机程序复现了油膜厚度测量的干涉图像。双色光干涉的理论计算和实验测量取得了很好的一致性。进一步的计算表明,润滑油膜双色光干涉图像的彩色主要受光源双色光的半峰全宽、析光膜厚度、垫层厚度及润滑介质特性的影响。在所设定的计算参数条件下,双色光的半峰全宽较窄,析光膜厚度为 4~10 nm 和垫层厚度较薄时图像的对比如较高。

关键词 测量;颜色复现;色度学模型;双色光干涉测量术;润滑油膜

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0312006

Dichromatic Interferogram of Lubricant Film Measurement

Zhou Guangmei¹ Guo Feng¹ Li Hongsheng^{1,2}

(¹ School of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266033, China)
² Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The multi-beam interference and the CCD camera spectral response, a colorimetric model is established for the interference measurement of lubricating-film thickness. A computation program is built for rendering the interferograms generated by a dichromatic light source in the lubricating-film measurement. For a static ball-glass disc contact, the results of theoretical simulation and experiment of the red-green dichromatic interferograms are agreed. Analyses show that the dichromatic interferogram is mainly influenced by the full width of half maximum (FWHM) of the green-red filter, the thickness of the beam splitter, the spacer thickness and the lubricants. A small FWHM, 4~10 nm of the beam splitter thickness and low spacer thickness can lead to high contrast of interference fringes.

Key words measurement; color reproduction; colorimetric model; dichromatic interferometry; lubricant film

OCIS codes 120.3180; 100.2960; 330.1730

1 引言

光干涉技术是测量微纳米润滑薄膜厚度的有效的方法之一,20 世纪 50 年代 Cohar 等^[1]将其应用于弹性流体动压润滑(弹流润滑)的研究,形成了光弹流研究领域。依照所用的光源,弹流的光干涉测量可分为单色光干涉、白光干涉和双色光干涉^[2]。近年,随着计算机图像处理技术的发展,光弹流技术在测量精度和效率方面都得到了发展和完善。弹流

油膜的单色光干涉通过光强的变化级次获得油膜厚度,人工观察分辨率可达到 50~100 nm。应用数字图像技术,分辨率得到了大大的提高,如 Luo 等^[3]提出的相对光强法、Guo 等^[4]提出的多光束干涉强度分析方法等。因为单色光干涉拥有很好的干涉条纹可见度,最大可检测油膜厚度达 5 μm ^[5]。白光干涉法是通过对于干涉图像进行光谱功率分析或色度分析来测量油膜厚度,如 Johnston 等^[6]提出的附加垫

收稿日期: 2011-08-03; **收到修改稿日期:** 2011-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(50875136)和国家 973 计划(2011CB706602)资助课题。

作者简介: 周广梅(1979—),女,硕士研究生,主要从事润滑实验及理论方面的研究。E-mail: zgmno.1@163.com

导师简介: 郭峰(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事润滑实验及理论等方面的研究。

E-mail: meguof@yahoo.com.cn(通信联系人)

层法、Gustafsson 等^[7]提出的 HSI 颜色空间方法以及 Hartl 等^[8]的 CIE Lab 颜色空间方法,都可以实现纳米量级的膜厚测量。相对单色光干涉,白光干涉可产生更多不同色彩的条纹,测量中避免了复杂的干涉级次计数,容易实现三维测量。但白光干涉由于在高膜厚下产生干涉条纹对比度的衰减,可检测膜厚比单色光要小得多,一般不超过 1 μm。双色光干涉法^[9]折中了以上两种方法,在分辨率和最高可测油膜厚度方面均可获得令人满意的效果。长期以来,对润滑油膜彩色光干涉测量的研究多集中于技术应用和系统集成两方面,而对其光学基础理论的研究很少。本文基于光学薄膜的多光束干涉理论和光谱色度学分析理论,建立了润滑油膜厚度测量的彩色光干涉的色度学模型,并对红绿双色光干涉技术的成像特性和影响因素进行了分析。

2 润滑油膜彩色光干涉测量的理论模型

2.1 干涉强度的计算

在润滑油膜的测量中,产生的干涉色彩取决于各波长分量的光在被测膜厚下产生干涉的强度。如图 1 所示,油膜厚度测量系统是一个 5 层介质系统,即玻璃、析光层(通常为铬膜)、垫层(通常为 SiO₂)、润滑油和金属钢,分别标编号 0~4。对于油膜测量,仅考虑垂直入射的情况。

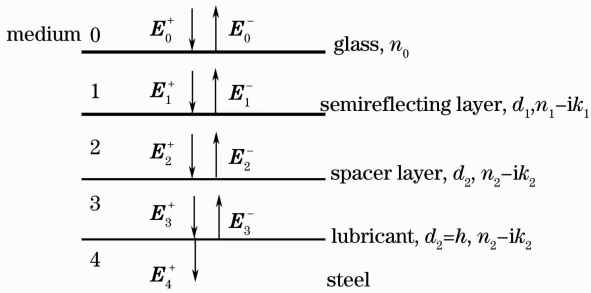


图 1 润滑油膜干涉测量

Fig. 1 Interferential measurement of lubricant film

在 q 层和 $q+1$ 层介质的分界处 ($q=0\sim 3$),所有的光反射电矢量和光透射电矢量按其传播方向分成两种,记作 E_q^+ 和 E_q^- ,上标加号或减号代表传播方向。 E_q^+ 是油与钢分界处向钢传播的电矢量。 E_0^+ 代表入射光的电矢量, E_0^- 代表出射干涉光的电矢量,下标表示光传播于其中的介质层编号(如 0 为玻璃)。考虑到介质对光的吸收性,介质 q 的折射率 \bar{n}_q 是复数,可表示为

$$\bar{n}_q = n_q - ik_q, \quad q = 0, 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

其中 n_q 为折射率实部, k_q 为衰减系数。对于光学透

明介质,衰减系数为零。在 q 和 $q+1$ 层介质的交界处,有效反射系数写作

$$\bar{R}_q = \frac{E_q^-}{E_q^+}, \quad q = 0, 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$\bar{R}_{q-1} = \frac{\bar{r}_{q-1} + \bar{R}_q \exp(-i2\bar{\delta}_q)}{1 + \bar{r}_{q-1}\bar{R}_q \exp(-i2\bar{\delta}_q)}, \quad (3)$$

式中 \bar{R}_q 是反射系数, $\bar{\delta}_q = 2\pi\bar{n}_q d_q/\lambda$, d_q 是介质层 q 的厚度, λ 是入射光的波长, \bar{r}_{q-1} 是非涅耳反射系数。在第 3 和第 4 层的交界处, $\bar{R}_3 = \bar{r}_3$,由(3)式获得 \bar{R}_2 ,然后依次是 \bar{R}_1 和 \bar{R}_0 。分层系统的反射比或干涉强度,定义为反射光辐射能与入射光辐射能的比值,或反射光与入射光的强度比,反射光强为

$$I = |\bar{R}_0|^2. \quad (4)$$

2.2 润滑油膜彩色光干涉的颜色计算

干涉图像的计算机颜色复现是基于三原色的加法混色法则的^[10]。任意颜色的光都是由单色光组成的,根据混色原理可计算出该色光的三刺激值

$$\begin{cases} R = \int_{\lambda} k\varphi(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \\ G = \int_{\lambda} k\varphi(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda, \\ B = \int_{\lambda} k\varphi(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (5)$$

式中 k 为归一化系数^[11]。 $\varphi(\lambda)$ 为颜色刺激函数,根据混合色的不同而定义不同^[12]。 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ 为对应于 CIE 1931 规定的标准色度观察者的光谱三刺激值。在图像输入系统中, $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ 应换为红绿蓝通道的光谱功率响应 $S_R(\lambda)$ 、 $S_G(\lambda)$ 、 $S_B(\lambda)$ 。

润滑油膜厚度测量系统干涉图像是入射光源经过分层介质的反射、折射和透射后干涉形成的,可等效于反射物体色:

$$\varphi(\lambda) = S(\lambda)\tau(\lambda), \quad (6)$$

式中 $S(\lambda)$ 为光源的光谱功率分布, $\tau(\lambda)$ 为(4)式定义的分层介质的反射比。

以图像输出系统进行干涉色彩的重现,其输入信号对应于加法混色中三原色的混合量。颜色复制采用“红绿蓝”色彩系统,作图时通过三原色的值设置一种混合颜色值为图形着色,格式为混合颜色值等于红色值、绿色值和蓝色值三者之积。这里的“红色值”、“绿色值”和“蓝色值”均为整数,取值范围为 0~255,代表混合颜色中每一种原色的强度。在色彩重现时,需要将响应量 R 、 G 、 B 进行线性处理,变成能为计算机所接受的颜色代码。这样,就生成了

一套完整的润滑油膜厚度彩色光干涉的色度学模拟算法^[13]。

3 球盘接触的双色光干涉的成像特性

3.1 理论计算与实验测量

为验证上述色度学模型的正确性,计算模拟了弹流测量系统中的球盘静态干接触的光干涉图像并进行了实验测量^[14]。钢球直径为 25.4 mm,载荷为 2 N,玻璃盘为 K9 玻璃,工作面加镀铬膜与二氧化硅,铬膜厚度为 5 nm,二氧化硅厚度 145 nm。入射光为滤光片过滤后的红绿光,其光谱功率分布如图 2 所示。干涉图像经过 CCD、图像采集卡后进行显示。CCD 型号为 SONY-ICX204AK。图 3 和图 4 分别为模拟和实验测量的结果。可以看到,模拟结果和实验测量在初相变和条纹颜色分布等方面表现出很好的一致性。因为入射光为红绿光,所以干涉

图像中的蓝色分量几乎为零。进一步分析表明,模拟和实验均显示双色光干涉图像的红、绿分量随膜厚的变化偏离对称分布,即相长干涉对应的膜厚并不与两侧相邻的相消干涉对应的膜厚等距间隔。Foord 等^[2,15]也报道了类似的现象。

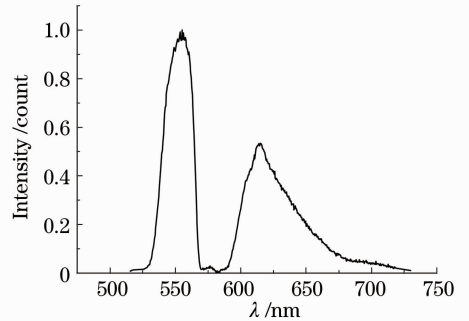


图 2 经红绿滤光片过滤后的入射光光谱功率分布
Fig. 2 Spectral power distribution of the incident dichromatic light filtered by a green-red filter

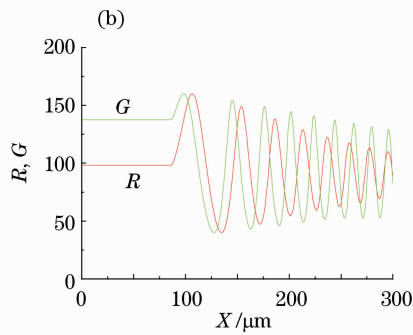
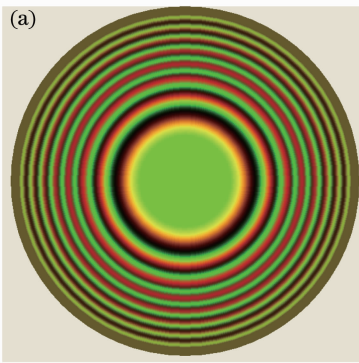


图 3 球盘接触(a)模拟干涉图像和(b)红绿色值的分布

Fig. 3 (a) Simulated interferogram and (b) red and green components of a ball-disk contact

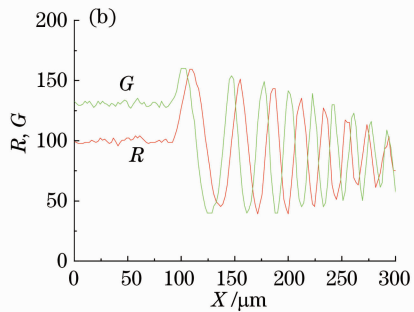
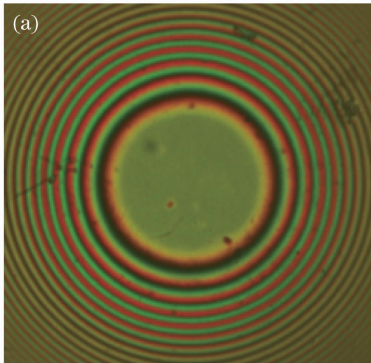


图 4 球盘接触(a)实验测量干涉图像和(b)红绿色值

Fig. 4 (a) Measured interferogram and (b) red and green components of a ball-disk contact

理论和实验还显示,随着介质间隙厚度的增加,红绿分量值波动的振幅发生不同程度的衰减,其中 R 值的衰减程度明显大于 G 值,这是因为系统采用的光源所致,如图 2 所示,绿光和红光的半峰全宽

(FWHM)分别约为 25 nm 和 40 nm,远超过窄带滤光片的 FWHM(10 nm),发生了明显的波动衰减。红光的 FWHM 大于绿光的,所以波动衰减更为突出。

定义 h 为膜厚, I_i 为 i 层膜的测量光强, 即系统分辨率

$$R_{es} = \frac{\partial I_i}{\partial h}, \quad i = R, G \quad (7)$$

因为强度随膜厚的变化不是线性的, 所以分辨率 R_{es} 不是一个常数。而且, 膜厚变化值越小, 分辨率越低。以 R 为例, 计算膜厚与分辨率的对应关系, 如图 5 所示, 取 Cr 膜厚度为 5 nm, 空气膜, 无垫层。可以看到, 相长干涉点或相消干涉点的分辨率是很差的, 因为在这两类干涉点光强对膜厚的微分为 0, 即膜厚变化不引起光强的变化, 或者说单位光强的变化对应的膜厚变化为无穷。在相长干涉点和相消干涉点之间的厚度上有很好的分辨率, 并且因为伪周期数不同, 分辨率也不同。因为红绿分量随着膜厚的变化存在衰减, 即当膜厚增加周期数增加时, 相同的膜厚变化对应的强度变化变小, 其分辨率也会变小。

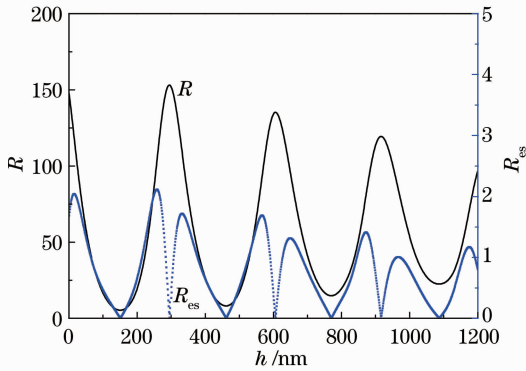


图 5 系统分辨率与空气膜厚度的关系

Fig. 5 System resolution R_{es} versus air film thickness

3.2 不同铬膜厚度的影响

光弹流测量大都采用球盘接触, 为了获得较高的干涉条纹对比度, 通常在透明玻璃盘的负荷侧镀一层铬作为析光膜。图 6 为析光铬膜厚度对球盘干涉接触的双色光干涉图像影响的模拟结果, 无垫层, 其余条件与上一节相同。其中 h_{Cr} 为铬膜厚度, 分别为 0、1、5、10、20 nm。可以发现, 在 0~50 nm 范围内, 随着铬膜厚度的增加, 干涉图像对比度经过了清晰、模糊、清晰和模糊的转变过程。图 6 中不同铬膜厚度下 RG 值随干涉半径的变化。计算显示, 在目前系统中, 当铬膜厚度为 4~10 nm 的时候, 干涉图像对比度最高。这与 Glovnea 等^[16]的描述一致。在文献[7]中, 则推荐使用 20 nm 厚的铬膜厚度。但是由于铬膜的制作工艺不同, 折射率往往也不相同, 因此最优厚度也不同。

干涉图像的对比度 C 很大程度上取决于玻璃-铬-介质界面的反射率。镀铬玻璃盘置于空气中, 入

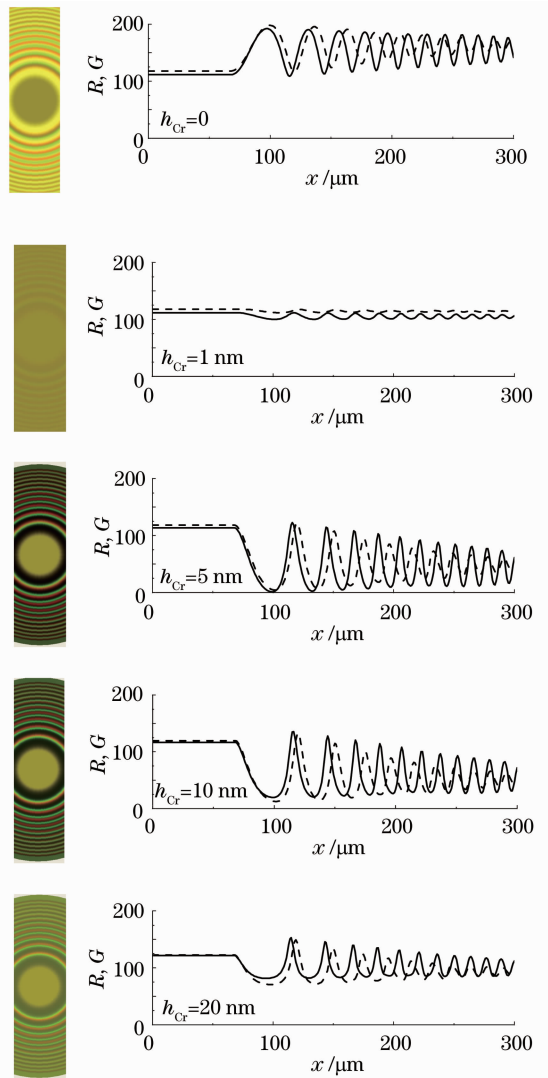


图 6 模拟得到的不同铬膜厚度下的干涉图像和红绿色值

Fig. 6 Simulated interferograms and red and green components with different Cr film thicknesses
射光的反射率会随铬膜厚度的增加而发生非单调性的变化, 如图 7 所示。在铬膜厚度为 1~2 nm 时, 玻

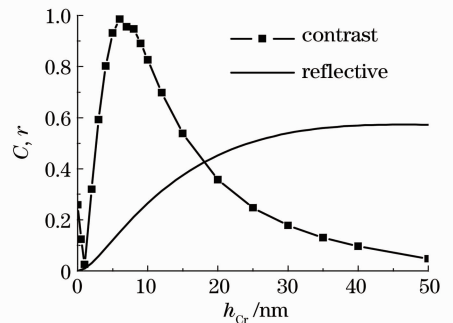


图 7 反射率 r 和对比度 C 随铬膜厚度的变化
Fig. 7 Reflectance r and contrast C versus Cr-film thickness h_{Cr}

玻璃-铬-介质界面的反射率 r 是一个极小值。因此可以解释图 6 所示干涉图像的变化情况。

3.3 光源的影响

因为系统采用的光源带宽较大,所以导致膜厚

增加时,波动振幅衰减,对比度下降。但是如果采用带宽较窄的双色光源,如图 8 所示的两束红绿激光,便可以消除这一弊端。

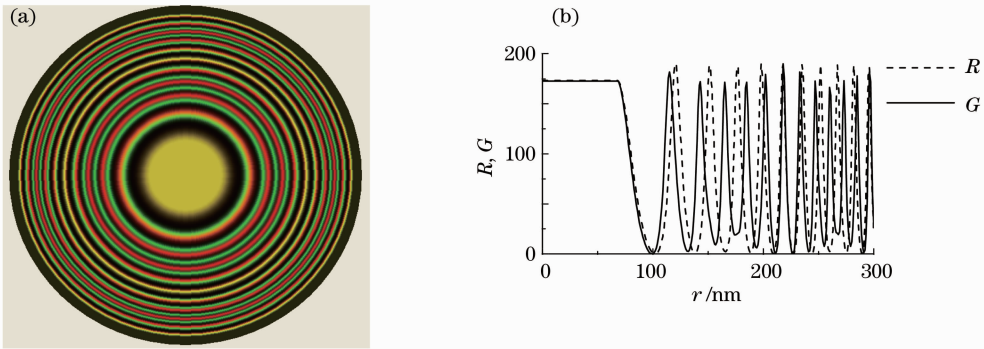


图 8 激光光源产生的(a)模拟干涉图像和(b)红绿色值

Fig. 8 (a) Simulated interferogram and (b) red and green components by red and green lasers

3.4 垫层厚度的影响

分析玻璃-铬-二氧化硅-空气-钢球的光弹流系

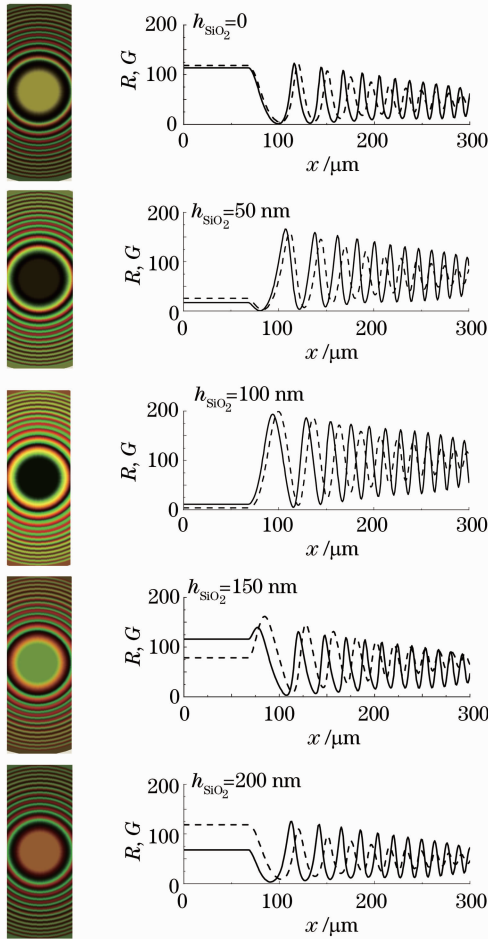


图 9 不同 SiO₂ 垫层厚度下的干涉图像
Fig. 9 Interferogram with different SiO₂ layer thicknesses

统,将铬膜厚度固定为 5 nm,其他条件与 3.2 节相同,发现垫层二氧化硅厚度的变化直接影响红绿色值的初相变和大小,从而影响色彩,如图 9 所示。二氧化硅层的增加意味着膜厚的增加,因此初相变会发生改变;而入射光在玻璃-铬-二氧化硅-介质界面的反射率随着二氧化硅厚度的增加而呈周期性变化,因此红绿色值的大小和对比度就会发生变化。

3.5 润滑介质的影响

假定空气、水和普通润滑油的折射率分别为 1.0、1.33 和 1.5,利用上述色度学模型,分别模拟不同润滑介质下球盘接触的数字干涉图像,将铬膜厚度固定为 5 nm,无垫层,其他条件与 3.1 节相同,模拟结果显示,在相同的干涉半径内,空气、水和润滑油对应的条纹数依次增加,如图 10 所示,以红色值为例,比较不同润滑介质对干涉图像的影响。

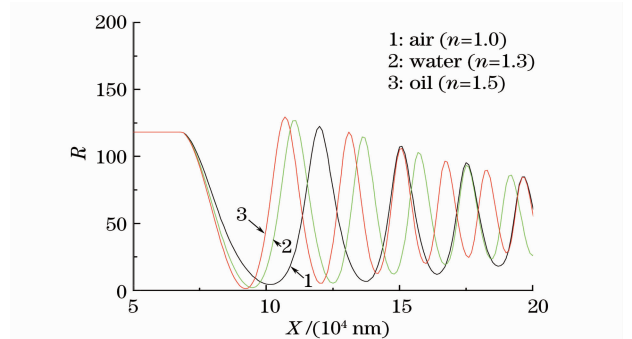


图 10 不同润滑介质对应的干涉图像的红色值变化
Fig. 10 Red values of interferograms corresponding to different lubrication medium

4 结 论

建立了润滑油膜厚度光干涉测量的色度学模型,设计计算机程序以复现油膜厚度测量的数字干涉图像。完成了球盘静态接触的双色光干涉的理论模拟和实验,两者有较好的一致性,证明了理论模型的正确性。通过模拟分析润滑油膜双色光干涉测量系统的成像特性和影响因素。结果表明光源光谱功率特性、析光膜厚度和垫层厚度均会影响图像的色彩和对比度。在设定的计算参数下,当色光带宽窄、Cr膜厚度为4~10 nm时会形成较好的干涉图像。

参 考 文 献

- 1 R. Gohar, A. Cameron. Optical measurement of oil film thickness under elastohydrodynamic lubrication [J]. *Nature*, 1963, **200**(4905): 458~459
- 2 C. A. Foord, L. D. Wedeven, F. J. Westlake *et al.*. Optical elastohydrodynamics [J]. *Proc. Inst. Mech. Engng.*, 1969, **184**(1): 487~505
- 3 J. Luo, S. Wen, P. Huang. 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
- 4 F. Guo, P. L. Wong. A multi-beam intensity-based approach for lubricant film measurements in non-conformal contacts [J]. *Proc. Inst. Mech. Engng., Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2002, **216**(5): 281~291
- 5 Wang Xuefeng, Guo Feng, Yang Peiran. A film measuring system for elastohydrodynamic lubrication from nano to micro thickness [J]. *Tribology*, 2006, **26**(2): 150~154
王学锋, 郭峰, 杨沛然. 纳/微米弹流油膜厚度测量系统 [J]. *摩擦学学报*, 2006, **26**(2): 150~154
- 6 G. J. Johnston, R. Wayte, H. A. Spikes *et al.*. The measurement and study of very thin lubricant films in concentrated contacts [J]. *STLE Tribology Transactions*, 1991, **34**(2): 187~194
- 7 L. Gustafsson, E. Hoglund, O. Marklund *et al.*. Measuring lubricant film thickness with image analysis [J]. *Proc. Inst. Mech. Engng., Part J: Journal of Engineering Tribology*, 1994, **208**(J3): 199~205
- 8 M. Hartl, I. Krupka, R. Poliscuk *et al.*. Thin film colorimetric interferometry [J]. *STLE Tribology Trans*, 2001, **44**(2): 270~276
- 9 M. Kaneta, H. Nishikawa, T. Kanada *et al.*. Abnormal phenomena appearing in EHL contacts [J]. *Tribology*, 1996, **118**(4): 886~892
- 10 Liu Haoxue, Zheng Lan, Dai Li *et al.*. Color characterization of LCD based on spectral additive properties [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1233002
刘浩学, 郑岚, 代黎等. 基于光谱叠加特性的液晶显示器颜色特征化方法研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1233002
- 11 Yu Daoyin, Tan Huanying. *Engineering Optics (2nd Edition)* [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 74~103
郁道银, 谈恒英. *工程光学(第2版)* [M]. 北京:机械工业出版社, 2006. 74~103
- 12 Hu Wejie, Tang Shunqing, Zhu Zhengfang. *Mordem Color Science and Application* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007. 172~303
胡威捷, 汤顺清, 朱正芳. *现代颜色技术原理及应用* [M]. 北京:北京理工大学出版社, 2007. 172~303
- 13 Liu Zhaodong, Bian Jiang, Wang Jun *et al.*. Computer simulation and application of white light interference color [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(S1): 303~307
刘兆栋, 边疆, 王军等. 白光干涉色的计算机仿真及应用 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(S1): 303~307
- 14 Pan Weiqing, Lu Wei. Double wavelength one-shot in-line digital holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 352~357
潘卫清, 鲁伟. 基于双色光照明的单曝光同轴数字全息技术 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 352~357
- 15 M. Hartl, I. Krupka, M. Liska. Differential colorimetry: tool for evaluation of chromatic interference patterns [J]. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(9): 2384~2391
- 16 R. P. Glovnea, A. K. Forrest, A. V. Olver *et al.*. Measurement of sub-nanometer lubricant films using ultra-thin film interferometry [J]. *Tribology Lett.*, 2003, **15**(3): 217~230

栏目编辑: 何卓铭