

文章编号: 1001-3806(2006)04-0337-03

激光剪切干涉用于在线表面测量的特性分析

刘晓军¹, 高咏生²

(1 华中科技大学 机械科学与工程学院, 武汉 430074; 2 香港科技大学 机械工程系, 香港, 九龙)

摘要: 为探讨和证明双折射晶体激光剪切干涉仪用于在线表面精密测量的可能性, 推导了该干涉仪中光传输和实现表面测量的模型, 分析了其抗振特性, 模拟了相当的振动条件对其抗振特性进行实验测试。分析和实验证明了该干涉仪具有良好的抗振能力, 适合应用于在线表面精密测量。

关键词: 仪器测量与计量; 剪切干涉; 在线; 分析

中图分类号: TH741; TH161 文献标识码: A

Analysis of characteristics of a lateral shear interferometer for on-machine surface measurement

LIU Xiao-jun¹, GAO Yong-sheng²

(1. College of Mechanical Science & Engineering HUST, Wuhan 430074, China; 2. Department of Mechanical Engineering Hong Kong University of Science & Technology Kowloon, Hong Kong, China)

Abstract In order to investigate the possibility of a lateral shear interferometer which is based on a birefringence crystal shear generator to be applied to on-machine surface measurement, optical models of the interferometer for light propagation and surface measurement are derived. Its antivibration characteristics are analyzed, and a vibration table to simulate different vibration conditions is set up, on which many experiments for surface measurement under different vibration conditions are conducted. The analysis and experimental testing verify the advanced antivibration characteristics of the interferometer for on-machine surface measurement.

Key words instrumentation measurement and metrology; shear interference; on-machine analysis

引 言

激光波面干涉方法已用于表面精密测量。然而, 由于其严格的应用环境要求, 普通激光波面干涉仪不可能用于在线表面精密测量^[1]。

不同于普通激光波面干涉仪, 横向剪切干涉仪由于其自干涉特点, 有较强的抗振抗干扰能力^[2]。已有多种不同的横向剪切干涉原理^[3-9]用于光波波前和精密表面测量实验研究, 然而它们不便于剪切量调整和相移操作, 结构上复杂, 稳定性差, 不适合实际应用。为实现在线表面精密测量, 作者基于双折射晶体特殊设计的剪切发生器^[10], 已研究了一种横向剪切干涉仪^[11], 使干涉仪结构上简单紧密, 完全共光路, 能方便实现剪切量调整和准确相移, 非常不敏感于被测表面振动和环境干扰。

本文中建立了该横向剪切干涉仪的光传输和实现

表面测量的数学模型, 对其抗振抗干扰特性作出了分析, 对其实现在线表面精密测量的振动条件进行了推导, 并在模拟的在线振动环境下进行了表面测试实验。分析和实验结果证实了该干涉仪的在线表面测量能力。

1 干涉仪原理

基于双折射晶体剪切发生器的横向剪切干涉仪原理如图 1 所示。SP 是双折射晶体剪切发生器。从激

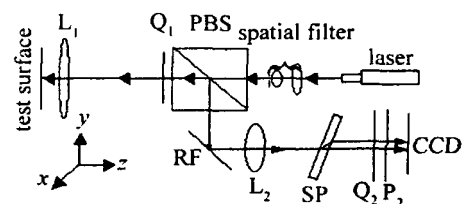


Fig 1 Schematic diagram for lateral shearing interferometer

光器发出的光穿过空间滤波器、偏振分光棱镜 PBS、 $\lambda/4$ 波片 Q_1 和准直棱镜 L_1 , 产生标准的平面光波。该平面光波入射到被测表面, 反射回来成为波前带有被测表面形貌信息的光波。再次通过 L_1 和 Q_1 后, 该光波由 PBS 分光面和反射镜 RF 反射, 经准直镜 L_2 扩束, 进入剪切发生器 SP, 并被沿 y 轴横向剪切分开成相互

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50475136)

作者简介: 刘晓军 (1968-), 男, 副教授, 主要从事测试计量技术与仪器、光学干涉测量、精密工程、质量工程等领域研究。

Email: mexj@tom.com

收稿日期: 2005-07-29; 收到修改稿日期: 2005-09-19

间有一小量侧移、偏振方向互相垂直的两偏振光波，其中一束偏振方向平行纸面，另一束垂直纸面，两光波带有同样的被测表面信息。此两个偏振光波通过 $\lambda/4$ 波片 Q_2 和检偏器 P_2 ，发生横向剪切干涉。由 CCD 相应于 y 方向的剪切干涉特征被获取。同样的，通过沿 z 轴旋转剪切发生器 90° ，相应于 x 方向剪切的剪切干涉特征被获取。获取的双向剪切干涉特征送入计算机进行分析和波前重建，从被测表面反射的光波波前及被测表面形貌被获得。

2 抗振特性分析

根据图 1 中横向剪切干涉仪原理， Q_1 、 Q_2 、PBS 和 RF 只改变光波的传输方向和偏振状态，而不改变其波面形状。因此，其用于平面表面测量的机理可以简化为如图 2 所示。其中， l 是被测表面到透镜 L_1 的距离，

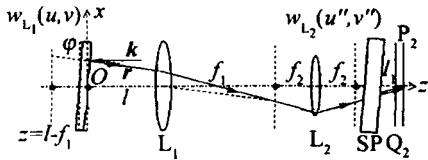


Fig 2 Wave propagation diagram for plane measurement

l_1 是透镜 L_2 的后焦平面到检偏器 P_2 的距离， f_1 和 f_2 分别是透镜 L_1 和 L_2 的焦距。从被测表面反射回来的光波带着被测表面形貌信息穿过透镜 L_1 和 L_2 ，随后被横向剪切切成两剪切光波，并在 P_2 平面发生剪切干涉。通过对干涉特征进行采样、相位恢复和重建，反射光波波前及被测表面形貌被获得。

将被测表面偏离表示为 $z = \delta(x, y)$ 。当被测表面沿与 x 轴成 θ 角度的旋转轴有一小的角度为 φ 的倾斜角时，其可表示为：

$$z(x, y) = \delta(x, y) + (y \cos \theta - x \sin \theta) \tan \varphi \quad (1)$$

在表面上某点 (x, y, z) ，表面面形沿 x 和 y 两方向的偏微分分别是：

$$\begin{cases} z_x = \frac{\partial}{\partial x} \delta(x, y) - \sin \theta \tan \varphi \approx - \sin \theta \tan \varphi \\ z_y = \frac{\partial}{\partial y} \delta(x, y) + \cos \theta \tan \varphi \approx \cos \theta \tan \varphi \end{cases} \quad (2)$$

当一平面波入射到被测表面，反射光波在 L_1 的前焦面上的场分布可表示为：

$$w_{L_1}(u, v) = A \exp\{ik[(l-z) + (l-z-f_1)/\cos 2\varphi]\} \quad (3)$$

式中， A 是波幅度， $k = 2\pi/\lambda$ ， $z = z(x, y)$ 。

由透镜的傅里叶变换特性^[12]，在透镜 L_2 的后焦面上的场分布为：

$$w_{L_2}'(u'', v'') = -\frac{1}{\lambda^2 f_1 f_2} w_{L_1}(-u, -v) \quad (4)$$

式中，

$$\begin{cases} u'' = -\frac{f_2}{f_1} [x + (l-f_1) \sin \theta \tan 2\varphi] \\ v'' = -\frac{f_2}{f_1} [y + (l-f_1) \cos \theta \tan 2\varphi] \end{cases} \quad (5)$$

那么，在 P_2 相应的点 (u'', v'') 上沿 x 方向的剪切干涉相为：

$$\Delta p_x(u'', v'') = k \left\{ [z'(u'', v'') - z'(u'' + s, v'')] \frac{\cos^2 \varphi}{\cos 2\varphi} \right\} = k \left\{ [\delta(x', y') - \delta(x' - \frac{f_1}{f_2} s, y')] \frac{\cos^2 \varphi}{\cos 2\varphi} - \frac{f_1 s}{2f_2} \sin \theta \tan 2\varphi \right\} \quad (6)$$

式中，

$$\begin{cases} x' = -\frac{f_1}{f_2} u'' - (l-f_1) \sin \theta \tan 2\varphi \\ y' = -\frac{f_1}{f_2} v'' - (l-f_1) \cos \theta \tan 2\varphi \end{cases} \quad (7)$$

s 是由剪切发生器产生的剪切量。

由 (7) 式可以看到，剪切干涉相与距离 l 无关，即被测表面沿 z 的振动不会引入任何测量误差。

同时也可看到，角度 φ 可能引起干涉相误差，相对误差大小为 $\frac{\cos^2 \varphi}{\cos 2\varphi}$ 产生相移量为 $\delta p_s = \frac{f_1 s}{2f_2} \sin \theta \tan 2\varphi$ 。

当一直径为 $\varnothing 6.4$ mm 的表面被测量，剪切率为 $s = 0.1$ ，且 $f_1 = 500$ mm， $f_2 = 250$ mm 时，由于倾斜引入的干涉相相对误差如图 3a 所示，相移采样过程中，最大相移误差如图 3b 所示。

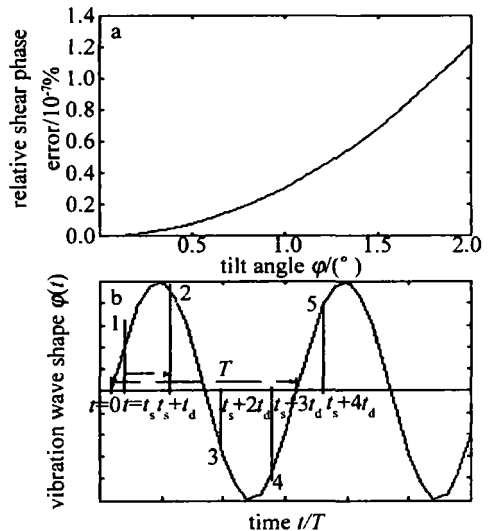


Fig 3 Effect of angular vibration on interferometric phase
a—direct effect b—sampling model

假如被测工件的角振动为 $\varphi(t) = \varphi_m \sin\left(\frac{2\pi}{T_\varphi} t\right)$ 。

由图 3a 当角振动幅度在小于 0.002° 范围内时，由于振动引入的最大相对剪切干涉相误差将小于 $1.2 \times 10^{-7}\%$ ，基本可忽略。然而，由 (7) 式的第 2 项，振动会引入显著的相移误差，从而引起干涉相位恢复误

差,进而引起测量误差。

图 3b 显示该干涉仪 5 步相移采样模式。5 步连续相移采样随机地在被测件振动周期 T 的 t_k 时刻开始,采样时间间隔均匀为 t_b 。根据该采样模式和 (7) 式,由角振动引起的第 k 步相移误差可表示为:

$$\xi_k = \frac{2\pi f_1 s}{\lambda_2} \tan\left\{2\varphi_m \sin\frac{2\pi}{T_\varphi} [t_k + (k-1)t_b]\right\} \quad (8)$$

当具有不同表面偏离的平面表面被测量时,通过分析,获得不同的剪切量情况下,最大测量误差与振动幅度的关系如图 4 所示。

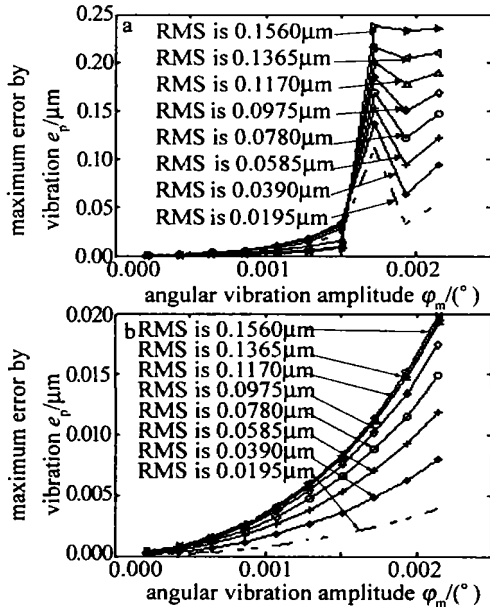


Fig 4 Effect of angular vibration on measurement result
a— $s = 1.648\text{mm}$ b— $s = 0.824\text{mm}$

从图 4 可以看出,当被测表面的面形误差小于 $0.16\mu\text{m}$ (均方根 RMS),且振动幅度小于 0.001° 时,只要将剪切量限制在 1.65mm 内,由角振动引入的测量误差将小于 $0.01\mu\text{m}$ 。测量误差还可通过减小剪切量进一步降低。例如,当剪切量小于 0.82mm 时,测量误差小于 $0.004\mu\text{m}$ 。

3 实验测试

为实验验证干涉仪的抗振特性,建构了一个由直流电机配偏心轮的模拟振动台,如图 5a 所示。当被测工件安装在振动台上时,它能被电机驱动与工作台一起按不同的振动状态振动,其事实振动状态同时可被一个由电容传感器组成的振动监测系统测知。

安装一个直径为 $\varnothing 25.4\text{mm}$ 的样品于工作台上,当激振电机关闭即样品无振动时,由设计的剪切干涉仪采用 $s = 1.51\text{mm}$ 的剪切量进行测量,经过相移采样、相位恢复和波前重建,样品表面测量结果如图 5b 所示。将测量结果与其由标准干涉仪测量结果比较,得到测量结果误差小于 $\lambda/80$ (λ 为激光波长)。

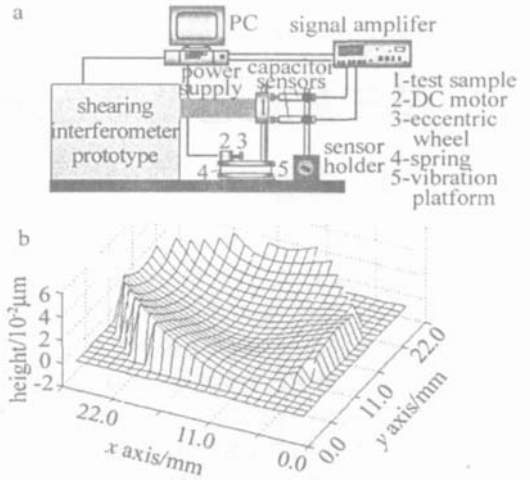


Fig 5 Simulated vibration table and sample measurement result
a—simulated vibration table b—static measurement result

启动直流电机,使其在 0.4V 到 1.0V 的驱动电压下旋转,驱动工作台以不同频率和幅度发生平行和角振动,各振动状况如表 1 所示。在这些不同的振动条件下,

Table 1 Simulated vibration conditions and predicted errors

	I / 0.4V	II / 0.6V	III / 0.7V	IV / 0.8V
frequency / Hz	73	100	117	136
vertical vibration $v_z / \mu\text{m}$	1.2	1.6	2.0	4.0
angular vibration $\varphi / (\circ)$	0.00032	0.00057	0.0015	0.043
predicted max error / μm	0.003	0.006	0.008	0.023

下,分别进行剪切干涉表面测量,并获得各振动条件下测量结果。将各振动条件下测量结果与无振动时测量结果比较,得到由振动引入的实际测量结果误差见图 6

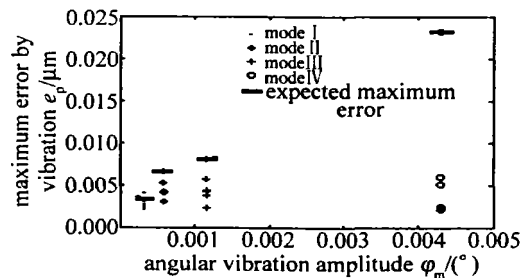


Fig 6 Practical measurement errors with $s = 1.51\text{mm}$

比较这些实际测量结果误差与相应振动条件下分析得到的最大可能误差,可以看出,实测结果误差基本在预计的误差范围内,并且,小的角振动引入较小的测量误差,减小剪切量亦可降低角振动对测量结果的影响。实验结果验证了分析结果。

4 结论

分析和实验验证了采用研究的横向剪切干涉仪实现在线表面精密测量的特性。经分析和实验验证知,被测表面垂直方向的振动不将引入任何测量误差,角振动本身引入很小的测量误差。然而,由于多步相移

(下转第 343 页)

由于物体高度比较大,而 CCD 的景深不够,造成物体底部成像比较模糊,给边界提取带来困难,所以这个区域的高度只有通过插值来得到。

3 结 论

作者提出的彩色组合编码的三维面形测量方法具有两个特点,其一是使得垂直于条纹方向特定长度的颜色序列是唯一的,从而建立了空间位置与颜色的对应关系,其二是相邻条纹的组合具有最大色差,因而具有最大可区分性,易于提取彩色条纹的边界。实验证明,只需要获取两幅图像,就可以恢复出物体的形状。计算过程全部由计算机完成,边界提取是该方法的关键,边界检测的精度受数码相机分辨率,投影仪和摄像机的频谱响应特性和随机噪声等因素影响。如果采用高分辨的投影仪和摄像机,该方法可以获得较高的精度。

参 考 文 献

- [1] CHEN F, BROWN G M, SONG M. Overview of three dimensional shape measurement using optical methods [J]. Opt Engng 2000 39 (1): 10~22

- [2] SU X Y, LI J T. New development of 3-D shape measurement [J]. Physics 1996 25(10): 614~620 (in Chinese).
- [3] DU L B, GAO X H, XIA J J *et al* Research of a novel 3-D laser scanning system [J]. Laser Technology 2005 29(4): 366~369 (in Chinese).
- [4] SU X Y, von BALLY G, VUKICEVIC D. Phase stepping grating profilometry: utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation [J]. Opt Commun 1993 98: 141~150.
- [5] ZHAO H, CHEN W Y, TAN Y Sh. A novel phase measuring profilometry [J]. Acta Optica Sinica 1995, 15(7): 898~901 (in Chinese).
- [6] CASPID, KRYATIN, SHAMIR J Range imaging with adaptive color structured light [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 1998, 20(5): 470~480
- [7] YEH Y H, CHANG I Ch, HUANG Ch L *et al* A new fast and high-resolution 3-D imaging system with color structured light [J]. SPIE, 2002, 4925: 645~654
- [8] HUANG H Q, FENG H J, XU Zh H *et al* 3-D imaging based on color encoded structure light [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2001, 35(6): 588~591 (in Chinese).
- [9] LU W Y, WANG Zh Q. Three dimensional surface profilometry using binary color coded grating method [J]. Journal of Optoelectronics Laser 2000, 11(2): 179~182 (in Chinese).
- [10] LU W Y, WANG Zh Q, MU G G *et al* Color permutation coded grating profilometry [J]. Acta Optica Sinica 2000 20(9): 1218~1223 (in Chinese).

(上接第 339 页)

干涉采样技术的采用,角振动将引入显著的相移误差,从而引起相位恢复误差,并进一步引起测量误差。相移与测量结果误差在很大程度上依赖于剪切量大小和角振动的幅度。当角振动幅度小于 0.001° ,且剪切量小于 0.82mm 时,测量结果误差将小于 $0.004\mu\text{m}$ 。

现有的精密表面加工设备,如 RANK PNEUMO OPTOFORM 300 单点钻石车床通常有好的振动环境,可满足研究的横向剪切干涉仪实现在线表面精密测量所允许的在线振动环境要求。

参 考 文 献

- [1] HARIHARAN P. Interferometric testing of optical surfaces Absolute measurements of flatness [J]. Opt Engng 1997, 36(9): 2478~2481.
- [2] MALACARA D. Optical shop testing [M]. 2nd ed New York: John Wiley & Sons Inc 1992. 123~172.
- [3] EUGEN D G, FRINS M. Phase shifting shearing interferometry with a variable polarization grating recorded on Bacteriorhodopsin [J]. Opt Commun 2004, 241: 309~314.
- [4] LEIBBRANDT G W R, HARBERS G, KUNST P J Wave front analy-

- sis with high accuracy by use of a double grating lateral shearing interferometer [J]. Appl Opt 1996, 35(31): 6151~6161.
- [5] ANGELISM, NICOLO S, FERRARO P *et al* Test of a conical lens using a two-beam shearing interferometer [J]. Opt & Lasers in Engng 2003, 39(2): 155~163
- [6] WATA K, KIKUTA H. Measurement of dynamic flow field by optical computed tomography with shearing interferometers [J]. Optical Review, 2000, 7(5): 415~419
- [7] KIM SW, CHO W J, KIM B C. Lateral shearing interferometer using square prisms for optical testing of aspheric lenses [J]. Measurement Science Technology, 1998, 9(7): 1129~1136
- [8] LI P. A waveplate interferometer and its interference pattern [J]. Journal of Modern Measurement 2001, 9(2): 25~30 (in Chinese).
- [9] HE Y, WANG Q, CHEN J *et al* Triangular shearing interferometer automatic test system [J]. Laser Technology 2003 27(3): 226~228 (in Chinese).
- [10] LU X J, CHANG M, ZHOU L. A new style of shear generator [J]. Chinese Journal of Optics & Precision Engineering 1999, 7(3): 103~108 (in Chinese).
- [11] LU X J, CHANG M, LI Zh. A common-path phase shifting shearing interferometer [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 1999, 27(3): 16~18 (in Chinese).
- [12] GOODMAN J W. Introduction to Fourier optics [M]. 2nd ed New York: McGRAW-HILL Companies 1996. 96~120.