

文章编号 1004-924X(2007)06-0812-06

基于棋盘光栅 Ronchi 检验法的微变液面测量

张明照, 王伯雄, 罗秀芝, 刘国忠, 胡柏青
(清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要:提出了基于棋盘光栅 Ronchi 检验法的微变表面形貌测量方法,可同时测量被测表面形貌两个正交方向的斜率,因而可通过一幅变形棋盘光栅图重构被测表面形貌。使用取微分极值的方法可简单有效地实现变形棋盘光栅图两个正交方向信息的分离和提取。根据所提出的测量方法和数据提取算法建立了微变表面形貌测量系统并对静态和动态表面形貌进行了测量。结果表明,所建立系统的分辨率 $<0.1 \mu\text{m}$,测量范围 $>50 \mu\text{m}$,符合有关研究中对微变液面的测量需求。

关键词:棋盘光栅;Ronchi 检验法;表面形貌;图像处理

中图分类号:O436.1;TB92;TP391.4 **文献标识码:**A

Profile measurement for micro-varying liquid surface based on chessboard grating Ronchi test

ZHANG Ming-zhao, WANG Bo-xiong, LUO Xiu-zhi, LIU Guo-zhong, HU Bai-qing

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on chessboard grating Ronchi test, a micro-varying surface profile measurement method was proposed, which can measure the slopes in two orthogonal directions of the surface simultaneously for reconstructing the surface profile by only one deformed chessboard grating pattern. Information of the two orthogonal directions in deformed chessboard grating patterns can be effectively separated and extracted through simple differential operation and extremum tracking. Based on the proposed method and the data extraction algorithm, a micro-varying surface profile measurement system was built up to measure a stationary surface and a varying surface. The results show that the system meets the measurement need of micro-varying liquid surface in some research fields with its resolution less than $0.1 \mu\text{m}$ and measurement range more than $50 \mu\text{m}$.

Key words: chessboard grating, Ronchi test, surface profile, image processing

1 引言

环境温度变化和外界干扰等因素会使液体表面产生不同程度的变形,这种液面变形是动态的,

间接反映了液体浓度、温度和相变等一系列物理化学特性。晶体发生相变时(液态到固态或固态到液态),会伴随着振动和表面张力等因素的改变,液体表面形貌态亦会因之发生变化。因此,对晶体相变过程的了解可以通过对液表面形貌态的

收稿日期:2006-10-19;修订日期:2007-01-08.

基金项目:科技部中德科技合作重点项目(No. 2003DFB00028)

观测实现。

Ronchi 检验法是最简单和常用的光学系统评价和测量方法之一^[1-4]。Ronchi 检验法最初被用于透镜和反射镜的定性检验,后来发展为微变表面形貌的定量测量。Ronchi 检验法的主要光学元件是 Ronchi 光栅,通过分析 Ronchi 检验法中得到的条纹图(有文献称为 Ronchi 图),可以得到被测表面形貌垂直于 Ronchi 光栅栅线方向的斜率。测得相互正交的两个方向的斜率,就可重构表面形貌。为了得到被测表面形貌的相互正交的两个方向的斜率,一种方法是将 Ronchi 光栅旋转 90° ,在旋转前后分别采集一幅 Ronchi 图进行分析计算,显然这种方法只能进行静态测量。有人提出使用两片 Ronchi 光栅重叠交叉(栅线互相垂直)放置的方法,这样只用一幅二维 Ronchi 图就可重构被测表面形貌,这种方法的缺点是得不到栅线重叠处的信息,二维 Ronchi 图中有一半数据是无效的^[5]。为了克服这一缺点,人们又提出了使用棋盘光栅,这种方法的优点是可同时测得正交的两个方向的斜率且不存在无效数据,使用该方法得到的图像分析起来比较复杂。

本文使用棋盘光栅 Ronchi 检测法对液面表面形貌进行动态测量。在对该方法得到的经被测表面形貌调制的变形棋盘图进行分析处理时,提出一种取微分极值的变形棋盘图边缘提取方法。该方法可简单有效地实现两个正交方向上边缘的分离,进而实现两个正交方向上斜率的提取,从而实现从一幅变形棋盘图快速有效地重构被测液面。

2 测量原理

Ronchi 检验法表面形貌测量原理如图 1 所示,用平行光照射被测表面形貌 T ,被测表面形貌 T 反射回来的光束经透镜 L 缩束后将光栅 R 投影在显示屏 S 上, F 为透镜 L 的焦平面。设光轴为 z 轴,坐标系及各光学元件的位置关系如图 1 所示。假设光线在 $y-z$ 平面内,光栅 R 为 Ronchi 光栅且栅线平行于 x 轴,则当被测表面形貌为垂直于入射平行光线的平面时,光栅 R 上的 E 点(可为任意点)被投影在显示屏 S 上的 O 点,而当被测面绕 x 轴有 θ_y 的倾角时,反射光线与 z 轴的夹角为 φ_y ,此时光栅 R 上的 E 点被投影在显示屏 S 上的 O' 点。

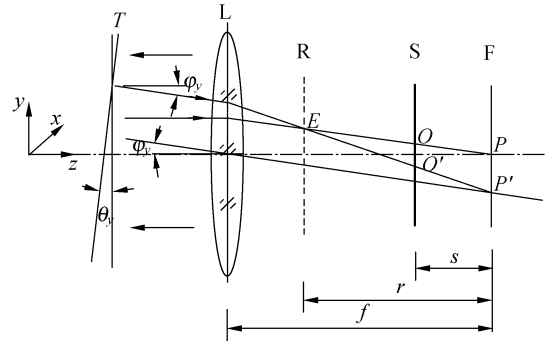


图 1 Ronchi 检验法表面形貌测量原理

Fig. 1 Principle of surface profile measurement based on Ronchi test

根据几何关系,有

$$\varphi_y = 2\theta_y, \quad (1)$$

$$\overline{PP'} = f \tan \varphi_y, \quad (2)$$

$$\frac{\overline{OO'}}{\overline{PP'}} = \frac{r-s}{r}, \quad (3)$$

因此, E 点在 y 方向的投影位移

$$\Delta_y = \overline{OO'} = \left(1 - \frac{s}{r}\right) f \tan \varphi_y. \quad (4)$$

设被测表面形貌用 $T(x, y)$ 表示,则被测表面形貌在 y 方向的斜率为

$$\frac{\partial T(x, y)}{\partial y} = \theta_y = \frac{1}{2} \arctan \frac{\Delta_y}{\left(1 - \frac{s}{r}\right) f}, \quad (5)$$

从式(5)可以看出,被测表面形貌在 y 方向的斜率可通过测得光栅在 y 方向的位移 Δ_y 得到。如果被测表面形貌在 x 方向有斜率 $\frac{\partial T(x, y)}{\partial x}$,且能测得光栅在 x 方向位移 Δ_x ,同样有

$$\frac{\partial T(x, y)}{\partial x} = \frac{1}{2} \arctan \frac{\Delta_x}{\left(1 - \frac{s}{r}\right) f}, \quad (6)$$

得到被测表面形貌在 x, y 方向的斜率后,可以通过二维数值积分得到被测表面形貌 $T(x, y)$ 。使用 Ronchi 光栅只能得到一个方向的斜率,而使用棋盘光栅可以同时得到 x, y 两个方向的斜率。棋盘光栅的形状如图 2 所示,如果光栅的透光部分用 1 表示,不透光部分用 0 表示,则棋盘光栅可以通过将栅线分别平行于 x 方向和 y 方向的两片 Ronchi 光栅进行异或运算得到,或者用如下的公式表达:

$$G(x, y) = \text{sgn} \left[\cos \left(\frac{2\pi}{P} x \right) \times \cos \left(\frac{2\pi}{P} y \right) \right], \quad (7)$$

式中 P 是棋盘光栅中小方格边长的 2 倍, sgn 是符号函数, 当 $x \geq 0$ 时 $\text{sgn}(x) = 1$, 当 $x < 0$ 时 $\text{sgn}(x) = 0$ 。 P 的大小取决于被测表面形貌的空间变化频率、被测区域的大小和测量系统中光栅放置的相对位置等。

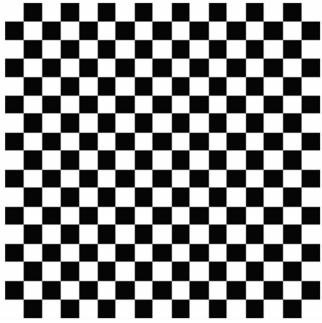


图 2 棋盘光栅图案

Fig. 2 Pattern of chessboard grating

一维 Ronchi 图是一种载波条纹图, 其分析可以使用条纹中心线法^[6](条纹骨架法)或相位分析法。条纹中心线法显然不适于棋盘图的分析。在使用相位分析法分析棋盘图时, 可将其当作一维光栅图处理, 即把棋盘图当作 x 方向和 y 方向的两幅一维光栅图分别处理。对同一幅棋盘图, 沿 x 方向逐行进行相位分析, 可得到被测表面形貌在 x 方向的斜率; 沿 y 方向逐列进行相位分析, 可得到被测表面形貌在 y 方向的斜率。但按这种方法分析变形棋盘图时, 存在两个问题: 一是相邻栅格之间有 $\frac{\pi}{2}$ 的相位跳变; 另一是变形棋盘图单元格的边界处两个方向的信息会互相干扰, 如图 3 所示, 当在 x 方向或 y 方向按箭头所指路径进行处理时, 相位相反的数据夹杂在一起, 使处理结果不正确。在进行棋盘图自动分析时, 上述两个问题很难解决。因此, 对变形棋盘图的分析, 相位分析法也不是一个好的选择。本文提出一种取微分极值的基于边缘提取的方法, 是一种比较可行和有效的分析方法。该方法在某些方面类似于条纹中心线法, 与条纹中心线法不同的是, 它提取的是图像边缘。

通过对变形棋盘光栅图的观察可以看出, 不管是 x 方向还是 y 方向, 其黑白变化的边缘是连续的, 而且两个方向上的边缘互不影响, 是相互独立和可分离的。两个方向的图像边缘提取方法相

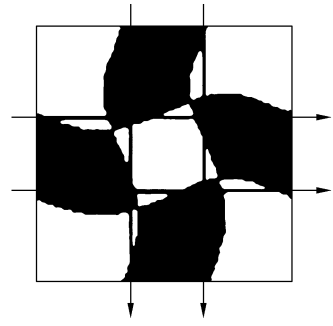


图 3 正交方向信息的相互干扰

Fig. 3 Information interference between the two orthogonal directions

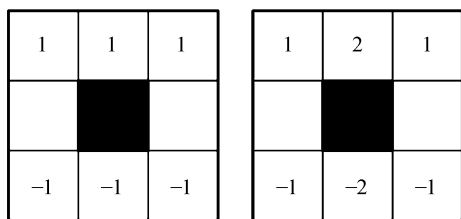
同, 下面以 x 方向图像边缘的提取方法为例进行介绍。

为了提取 x 方向的图像边缘, 计算图像对 y 的微分。因为沿 y 方向, 从黑色区域到白色区域其微分为正, 出现最大值, 而从白色区域到黑色区域其微分为负, 出现最小值, 找出微分的极值即可找到图像的边缘。虽然用该方法沿图 3 中垂向箭头求微分时, 仍然会出现虚假的边缘, 但此时它们只是表现为一些短条纹或杂点, 很容易去除。

对于数字图像, 常用小区域模板卷积来近似计算其微分, 人们已经提出了许多不同的微分算子(模板), 比较常用的有 Prewitt 和 Sobel 算子^[7], 它们都使用 3×3 的模板, Prewitt 和 Sobel 算子计算图像 $I(x, y)$ 在 y 方向的微分 $G_y = \frac{\partial I(x, y)}{\partial y}$ 的模板分别如图 4(a) 和 (b) 所示, 图中黑色方块表示待求微分的像素, 用 $P(i, j)$ 表示, (i, j) 为像素所处位置。以 Sobel 算子为例, 其计算 G_y 的公式为:

$$G_y = \frac{1}{4} [P(i-1, j-1) - P(i+1, j-1) + 2P(i-1, j) - 2P(i+1, j) + P(i-1, j+1) - P(i+1, j+1)], \quad (8)$$

图 5 显示了 x 、 y 方向信息分离的结果。图 5(a) 是一幅仿真的携带表面形貌信息的变形棋盘图(含有随机噪声), 图 5(b) 是对图 5(a) 求 y 方向的微分并求其极值得到的图像, 图 5(c) 是图 5(b) 剔除了短枝和杂点后的结果, 图 5(d) 是对图 5(a) 求 x 方向的微分并求其极值, 然后剔除短枝



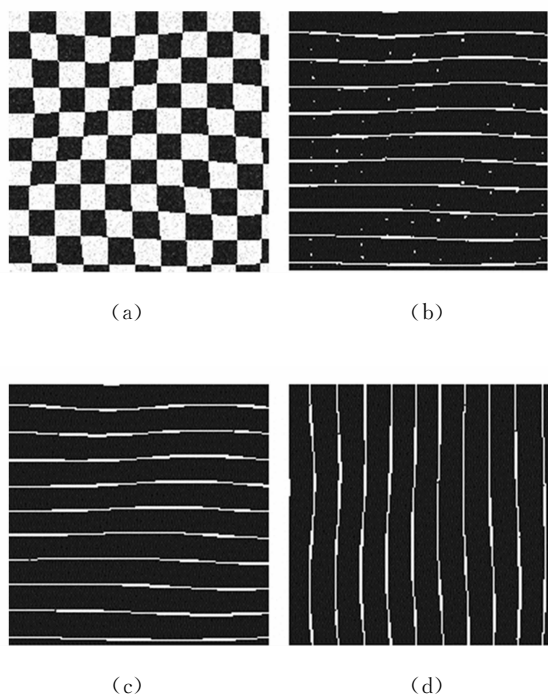
(a)Prewitt

(b)Sobel

图 4 y 方向的微分算子

Fig. 4 Differential operator indirection y

和杂点得到的结果。对图 5(c)和图 5(d)的条纹图进行细化并与变形前棋盘图 x 方向和 y 方向边缘条纹进行比较,就可得到边缘条纹在 y 方向和 x 方向上的位移,这样得到的是变形前棋盘栅格点的 x 方向或 y 方向的位移,使用蒙面法等曲面拟合方法可以得到整幅图各像素点 x 方向和 y 方向的位移,根据式(6)可以得到被测表面形貌各点在 x 方向和 y 方向的斜率,最后通过二维数值积分就可重构被测表面形貌。



(a)

(b)

(c)

(d)

图 5 正交方向信息的分离

Fig. 5 Information separations of two orthogonal directions

3 测量系统及实验

棋盘光栅 Ronchi 检验法液面测量系统的光学系统由激光器、扩束透镜、光阑、分光镜、平面反射镜、准直透镜、棋盘光栅和 CCD 组成,如图 6 所示。光阑放置在扩束透镜和准直透镜共同的焦点处,用于形成点光源,它们三者组成一个扩束系统,激光器产生的小口径平行光经扩束系统扩束准直后成为大口径平行光束。平面反射镜用来转折光路以减小系统空间尺寸。分光镜使入射光和反射光分离。系统的图像采集和处理系统由 CCD、图像采集卡、计算机和有关软件组成^[8]。

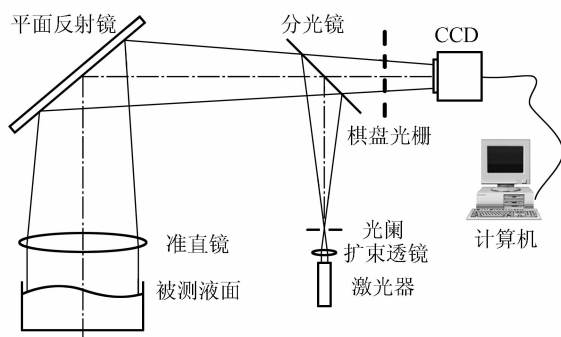


图 6 测量系统组成

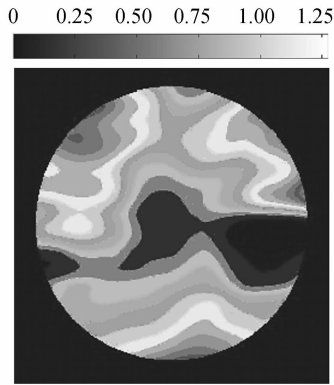
Fig. 6 Optical set-up of measurement system

系统主要组件的部分参数列于表 1 中。

表 1 主要组件及其参数

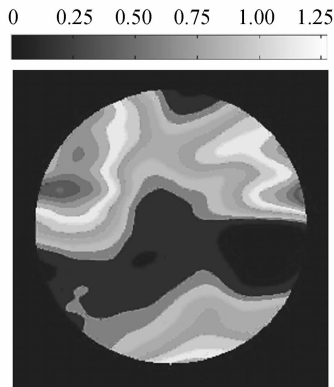
Tab. 1 Main elements and their parameters

元件名称	参数	参数值
激光器	类型	He-Ne
	波长	632.8 nm
	输出功率	25 mW
扩束透镜	类型	显微物镜
	放大倍数	40
	数值孔径	0.65
分光镜	类型	K9
	分光比	1 : 1(45°时)
	光圈数	<15
准直镜	直径	120 mm
	焦距	600 mm
光栅	大小	16 mm×16 mm
	栅格边长	0.25 mm
CCD	型号	Mintron MTV-1181EX
	帧速	25 frame/s
	芯片尺寸	(1/2)"
图像采集卡	型号	Matrox CronosPlus
	位数	8 bit



(a)时刻 1

(a) time 1



(b)时刻 2

(b) time 2

图 7 硅油面轮廓图(单位: μm)Fig. 7 Measured surface profiles of silicon oil(unit: μm)

使用平晶对系统进行标定,再对平晶进行测量以验证测量精度。由于直接用三维表面形貌信息进行统计时数据量太大,实验时以平晶表面形貌起伏的最大值,即平面度来验证系统的测量精度,测量了 30 组数据。理论分析及实验结果表明,本文建立的系统的有效视场 $> \Phi 100 \text{ mm}$,分辨率 $< 0.1 \mu\text{m}$,测量范围 $> 50 \mu\text{m}$ 。使用所建立的系统对硅油的表面形貌进行了测量,硅油表面受外界温度的变化发生微小的变形,图 7(a)和(b)是两个不同时刻测得的用灰度表示的硅油表面轮廓图。

4 结 论

提出了基于棋盘光栅二维 Ronchi 检验法的微变表面形貌测量方法,可同时测量被测表面形貌在两个正交方向的斜率,从而可通过一幅变形棋盘光栅图重构被测微变表面形貌。使用取微分极值的方法可简单有效地实现变形棋盘光栅图两个正交方向信息的分离和提取。根据所提出的测量方法和数据提取算法建立了微变表面形貌测量系统并对静态和动态表面形貌进行了测量。结果表明,所建立系统的有效视场 $> \Phi 100 \text{ mm}$,分辨率 $< 0.1 \mu\text{m}$,测量范围 $> 50 \mu\text{m}$,符合有关研究中对微变液面的测量需求。

参考文献:

- [1] LEE H J, KIM S W. Precision profile measurement of aspheric surfaces by improved Ronchi test [J]. *Opt. Eng.*, 1999, 38: 1041-1047.
- [2] OCHOA N A, MORA-GONZALEZ M, SANTOYO F M. Flatness measurement by a grazing Ronchi test [J]. *Opt. Express*, 2003, 11: 2177-2182.
- [3] 桑新柱, 余重秀, 王葵如, 等. 高非线性光子晶体光纤中布拉格光栅的制作 [J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6): 633-636.
SANG X ZH, YU CH X, WANG K R, *et al.*. Fabrication of Bragg grating in a highly nonlinear photonic crystal fiber [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13 (6): 633-636. (in Chinese)
- [4] 楼俊, 徐向东, 刘颖. 全息平面变间距光栅刻线弯曲程度分析 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(1): 12-15.
LOU J, XU X D, LIU Y. Study on line-profiles of variable line-space plane gratings with holographic recording [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 12-15. (in Chinese)
- [5] 萧晴. 基于二维 Ronchi 光栅的表面形貌测量技术及实验研究 [D]. 北京: 清华大学, 1999.
XIAO Q. *Study of technology and experiments of surface topography measurement based on 2-D Ronchi grating*

[D]. Beijing: Tsinghua University, 1999.

- [6] 戴福隆, 王朝阳. 条纹图象的数字化自动分析处理技术之一: 条纹中心法 [J]. 光子学报, 1999, 28(8):700-706.
DAI F L, WANG ZH Y. Automatic fringe patterns analysis using digital processing techniques: Fringe center method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(8):700-706. (in Chinese)
- [7] 章毓晋. 图像工程(上)—图像处理和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
ZHANG Y J. *Image Engineering (First): Image Processing and Analysis* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. (in Chinese)
- [8] 张明照, 王伯雄, 罗秀芝, 等. 一种高灵敏度阴影法内波显示系统的设计 [J]. 光学精密工程, 2005, 13(6):664-667.
ZHANG M ZH, WANG B X, LUO X ZH, *et al.*. Design of high sensitive shadowgraph system for internal wave visualization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6):664-667. (in Chinese)

作者简介:张明照(1973—),男,安徽人,北京清华大学精密仪器与机械学系博士研究生,主要研究方向为精密仪器与测试、流场显示测量、图像处理和无损检测技术。E-mail:zmz03@mails.tsinghua.edu.cn