

# 实时偏振相移干涉技术及其应用

戴嘉彬\* 秦玉文

(天津大学力学系, 天津 300072)

**摘 要** 提出一种实时偏振相移干涉技术, 该方法具有光路简单, 不需防震、可明室操作、易于实现相移、便于计算机自动分析条纹, 从而实现实时高精度自动化测量等优点。文中对该方法给出了严格的理论推导和实验验证。

**关键词** 实时, 偏振相移, 剪切干涉计量术。

物体三维形状和位移的光学非接触性测量是非常重要的研究领域, 因为在高速在线检测、质量控制、机器人、医学诊断、计算机视觉及一些生产行业中都需要表面形状的信息。随着现代光测力学的迅速发展, 人们已经把激光全息干涉法成功地用于三维形状和位移测量<sup>[1]</sup>。近十几年发展起来的电子散斑干涉术(ESPI)也实现了三维物面形状的测量<sup>[2,3]</sup>。其它光测方法如非相干光投影格栅法等也相继有报道<sup>[4,5]</sup>。但是, 全息干涉法需要在暗室的防震台上进行实验; 电子散斑干涉术需要移动光源或旋转物体; 投影格栅法虽克服了以上缺点, 但需要投影设备和格栅。本文将偏振相移、错位干涉及计算机图像处理技术结合起来, 实现了实时偏振相移干涉技术, 该方法栅频可根据测量范围灵活地调节。由于采用了相移位相检测技术, 从而可以很容易地实现全自动测量。因为光路简单, 所以易于实现仪器化。

## 1 理论分析

实时偏振相移干涉光路及图像处理系统如图1所示。一束激光被扩束镜扩束后照明到被测物体上。从激光器出射的平面偏振光经45°放置的1/4波片 $Q_1$ 后形成圆偏振光, 圆偏振光经 $L_1$ 扩束后入射到渥拉斯顿棱镜上, 形成两束振动方向相互垂直的平面偏振光。两束光分别通过45°放置的检偏镜 $P$ 后, 偏振方向相同, 光强相等, 合成后从而在 $P$ 后的空间形成干涉条纹。1/4波片 $Q_2$ 的放入是为了实现相移, 进行干涉条纹的自动分析。 $L_2$ 为准直镜, 通过调节 $L_2$ 可以灵活地改变投影到待测物体表面的干涉条纹的空间频率。

设从渥拉斯顿棱镜出射的两平面偏振光的复振幅为:

$$E_o = k \exp [j(\omega t - mL_o)], \quad E_e = k \exp [j(\omega t - mL_e)]. \quad (1)$$

式中  $m = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为光波波长,  $L_o$  和  $L_e$  分别为 o 光和 e 光传播的距离。两束光入射到 1/4 波

\* 河北工程技术高等专科学校经贸系, 沧州 061001。

收稿日期: 1994年6月17日; 收到修改稿日期: 1994年10月10日

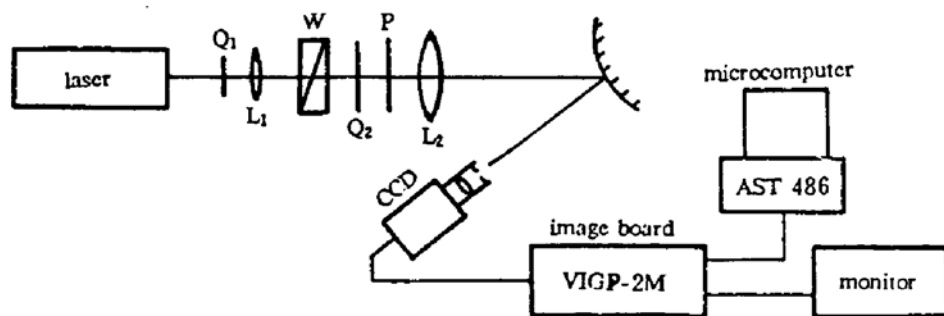


Fig. 1 Schematic diagram of a real-time polarization phase-shifting interferometer

片  $Q_2$  后分别沿其快慢轴分解(见图 2)。

$$\begin{aligned} E_{of} &= (k/\sqrt{2}) \exp [j(\omega t - mL_0)], & E_{os} &= (k/\sqrt{2}) \exp [j(\omega t - mL_0)], \\ E_{ef} &= (k/\sqrt{2}) \exp [j(\omega t - mL_e)], & E_{es} &= (k/\sqrt{2}) \exp [j(\omega t - mL_e)] \end{aligned} \quad (2)$$

光束从  $1/4$  波片出射时,慢轴方向上的光分量比快轴方向上的光分量滞后  $\pi/2$ ,最后光通过检偏镜 P 后,各光分量沿其主轴方向分解并合成:

$$\begin{aligned} E_o &= (k/\sqrt{2}) \exp [j(\omega t - mL_0 - \alpha')], \\ E_e &= (k/\sqrt{2}) \exp [j(\omega t - mL_e + \alpha')]. \end{aligned} \quad (3)$$

$$I = k^2 \{1 + \cos [m(L_0 - L_e) + 2\alpha']\}. \quad (4)$$

从上式可见,光强函数随  $(L_0 - L_e)$  和  $\alpha'$  变化,通过 P 旋转  $\alpha'$  角,光强函数产生  $2\alpha'$  的位相移动。把待测物体放在干涉空间里,则在物体表面投影形成干涉条纹。由于物体表面上各点的位相  $m(L_0 - L_e)$  随其形状变化,从而光强中包含了物体表面形状的信息,所以可以从干涉条纹中求得物体表面形状的数据。

设 CCD 摄像机放在与光传播方向成  $\alpha$  角的方向上,建立如图 3 所示的坐标系。xyz 经渥拉斯顿棱镜 W 和透镜  $L_2$  后,振动方向互相垂直的两束偏振光聚焦成两个光点  $S_1$  和  $S_2$ ,它们分开的距离为  $d = 2\delta f_2$ , (其中  $f_2$  为透镜  $L_2$  的焦距,  $\delta$  为渥拉斯顿棱镜分开的两束光夹角的一半) 点源  $S_1$ 、 $S_2$  的位置为  $(d/2, 0, 0)$  和  $(-d/2, 0, 0)$ 。则物体上任一点  $p(x, y, z)$  的位相为

$$\varphi(x, y, z) = 2\pi(ps_2 - ps_1)/\lambda, \quad (5)$$

从而导出 
$$\varphi(x, y, z) = 4\pi dxz/\lambda(2z^2 + x^2 + y^2). \quad (6)$$

由上式解出  $z$  为 
$$z = x(2\pi d/\lambda\varphi \pm \sqrt{(2\pi d/\lambda\varphi)^2 - 2})^{-1}. \quad (7)$$

为了便于求出物面形状,建立另一坐标系  $o'x'y'z'$ , 则可推得

$$z' = \{k(x', y')d_0 + [k(x', y')\sin \alpha + \cos \alpha]x'\} / [k(x', y')\cos \alpha - \sin \alpha], \quad (8)$$

$$k(x', y') = \begin{cases} 2\pi d/\lambda\varphi - \sqrt{(2\pi d/\lambda\varphi)^2 - 2}, & \varphi > 0 \\ 2\pi d/\lambda\varphi + \sqrt{(2\pi d/\lambda\varphi)^2 - 2}, & \varphi < 0 \\ 0, & \varphi = 0 \end{cases} \quad (9)$$

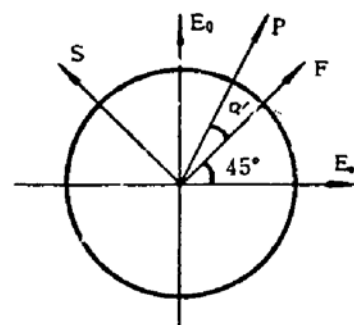


Fig. 2 Resolution of the light components as entering the quarter-wave plate

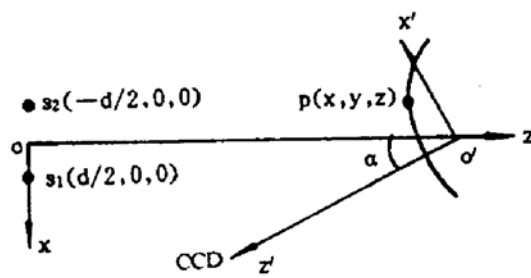


Fig. 3 The principle diagram

需要说明,两个坐标下的  $y' = y$ 。 $x'$  和  $y'$  可在条纹图上对应的像素位置准确得到,从而该点的  $z'$  则可由(8)式唯一确定。

## 2 实验及结果

从以上分析可知,可以实时地采集到物体表面形成的、由物体表面信息所调制的干涉条纹图。图 4 所示为照射到一斜面物体上的实时干涉条纹图。另外还可将物体表面和参考平面的两组条纹图(或大变形前后的两组条纹图)进行相减运算,直接得到实时的物面形状(或变形)的等高线。图 5 所示即为采用实时减法对一大变形物体离面位移测量的实验结果。



Fig. 4 Fringe pattern of a slope object by projection

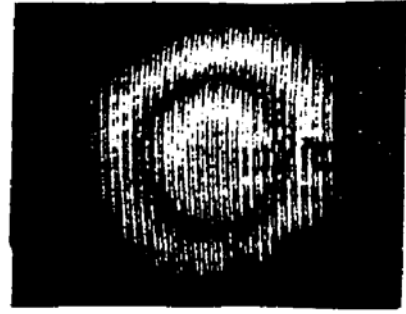


Fig. 5 Contour of out-of-plane displacement by real-time subtraction

### 2.1 物面形状测量

物面形状测量在质量控制、医学诊断和一些工程实际中是一个非常重要的方面。本文旨在验证偏振相移干涉技术的可靠性,对一斜面物体进行了一次投影法实验,并采用相移技术进行数据自动分析。图 6 为相移的四幅干涉条纹图,图 7 为经相移计算得到的包裹位相图和去包裹位相图<sup>[6]</sup>。

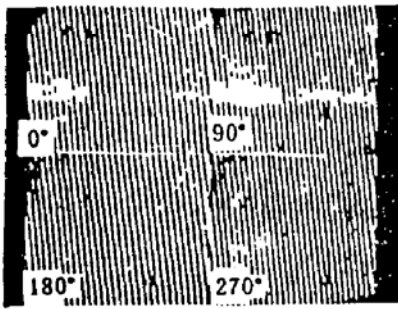


Fig. 6 Phase-shifted fringe patterns of a slope object

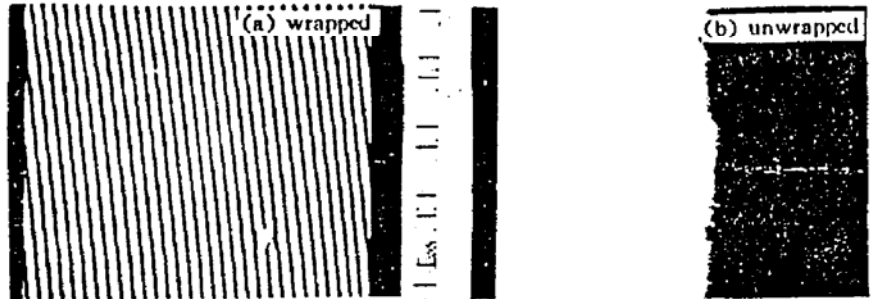


Fig. 7 Phase map of a slope object  
(a) wrapped (b) unwrapped

从去包裹的位相数据可计算出全场物面形状的高度值,其三维表征如图 8 所示。其中最大高度值为 4.9 mm,实际高度为 5.0 mm,相对误差为 2%。

### 2.2 大变形物体离面位移测量

实验中,对一周边固支的圆形橡胶板受均匀分布气压荷载的大变形离面位移进行了验证实验。采用图 1 所示的系统,进行实时相减运算并结合相移技术得到变形等高线条纹如图 9 所示。计算机图像处理后的位相图如图 10 所示,由去包裹位相数据计算出全场离面位移数据,结果见图 11。其中离面位移最大值为 1.55 mm,其理论最大值为 1.60 mm,相对误差为 3%。

**结 论** 本文提出实时偏振相移干涉技术并成功地应用于三维物面形状测量和大变形物体离面位移的测量。该方法具有光学测量装置简单、不需防震、可明室操作、不用照相处理、测量范围和灵敏度灵活可调等优点。由于结合相移位相检测技术和图像处理技术,可实现自动化测量。该技术易于实现仪器化,并在工程测试中具有广泛的应用前景。

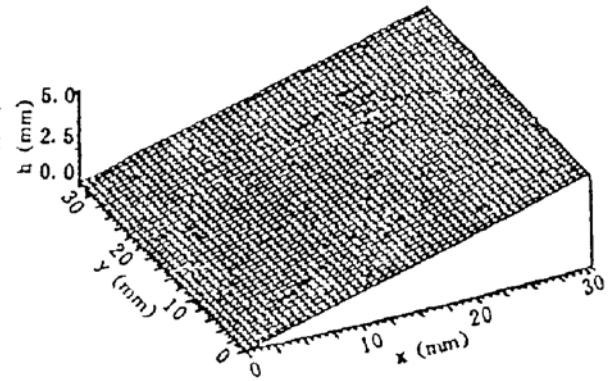


Fig. 8 Shape of the slope object

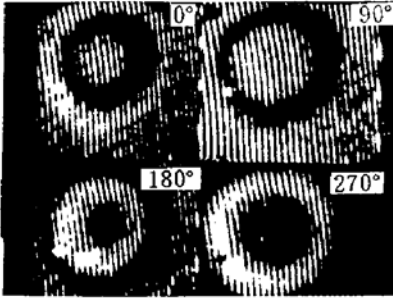


Fig. 9 Phase-shifted fringe patterns of out-of-plane displacement

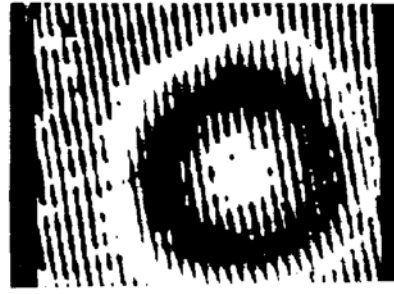


Fig. 10 Phase map of out-of-plane displacement

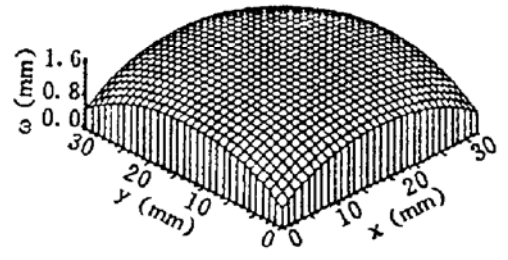


Fig. 11 Out-of-plane displacement of whole field

### 参 考 文 献

- [1] D. Paolett, G. Schirripa, P. Carelli, Automatic holographic contours for surface defects. *Proc. SPIE*, 1989, **1136**: 156~167
- [2] C. Joenathan, B. Pfister, H. J. Tiziani, Contouring by electronic speckle pattern interferometry employing dual-beam illumination. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(13): 1905~1911
- [3] 何世平, 汪柳生, 伍小平, 电子散斑干涉和 video 全息干涉. *实验力学*, 1990, **5**(4): 387~395
- [4] 常刚, 续伯钦, 用非相干光相移——投影格栅法测量三维物体表面轮廓. *实验力学*, 1992, **7**(2): 159~165
- [5] 衡伟, 何小元, 徐铸, 以栅线投影中自动提取物体表面三维形状信息的计算机处理方法. *实验力学*, 1993, **8**(3): 248~253
- [6] 戴喜彬, 王金起, 秦玉文, 电子剪切散斑图像处理的相移技术. *实验力学*, 1992, **7**(2): 153~158

## Shearing Interferometry with Real-Time Polarization Phase-Shifting Technique

Dai Jiabin      Qin Yuwen

(Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 17 June 1994; revised 10 October 1994)

**Abstract** Based on the principle of projected grating, a new real-time polarization phase-shift shearing interferometry is proposed and discussed. The method can be used for measuring shapes of 3-D diffuse objects and displacement of large deformation automatically. Some experiments were demonstrated to verify the validity of the present technique.

**Key words** real-time, polarization phase-shifting, shearing interferometry.