

文章编号: 0253-2239(2001)01-0064-04

一种用于动态过程测量的实时偏振相移方法

钱克矛 缪 泓 伍小平

(中国科学技术大学力学与机械工程系, 合肥 230027)

摘要: 利用一种特殊的相位龙基光栅和偏振相移技术,可同时获得四幅具有不同相移的干涉图,由此可计算出被测物体的全场相位分布,从而实现对动态过程相位的测量。将该方法应用于马赫-曾德尔干涉系统和散斑干涉系统,分别测量了液体的折射率变化和固体的离面位移,给出了实验结果。

关键词: 动态过程测量; 偏振相移; 龙基光栅; 马赫-曾德尔干涉; 散斑干涉

中图分类号: O436.3 文献标识码: A

利用相移技术可测量物体的全场相位分布,并可计算出对应的被测的量,测量精度、灵敏度和自动化程度高^[1],因而获得了广泛应用。该技术在测量物体某一特定状态的相位分布时需要 3 幅或 3 幅以上具有不同相移的干涉图。如果这些干涉图不是同时得到的[如利用压电陶瓷(PZT)引入相移],则该技术一般局限于对静态或准静态过程的测量。

我们曾报道了利用实时偏振相移方法进行动态变形测量的云纹干涉系统及实验结果^[2],本文则较详细地介绍了偏振相移原理和龙基(Ronchi)光栅的衍射特性,并扩展实时偏振相移方法,将之应用于马赫-曾德尔干涉系统和散斑干涉系统,分别测量了液体的折射率变化和固体的离面位移,给出了实验结果。

文献[3,4]分别提出过利用偏振相移技术进行动态变形测量的散斑干涉系统和剪切散斑干涉系统,但系统结构较复杂;文献[5]与文献[2]类似,是几乎同时独立完成的,它给出了在迈克耳孙干涉系统中的实验结果。

1 偏振相移原理

如图 1,设两束准直光的复振幅分别为 $E_x = ae^{j\varphi_1}$ 和 $E_y = be^{j\varphi_2}$, $\varphi_2 - \varphi_1 = \varphi$,且偏振方向互相垂直。1/4 波片的快轴与 x 轴成 $\pi/4$ 角,透过偏振片的光的偏振方向与 x 轴成 θ 角。设 1/4 波片前光场的琼斯向量为 $\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}$, 1/4 波片和偏振片的琼斯矩阵分别

为 $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin(2\theta)/2 \\ \sin(2\theta)/2 & \sin^2\theta \end{bmatrix}$, 则偏振片后光场的琼斯向量和光强分布为

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin(2\theta)/2 \\ \sin(2\theta)/2 & \sin^2\theta \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$I(x, y) = a^2(x, y) + b^2(x, y) - 2a(x, y)b(x, y)\sin[\varphi(x, y) - 2\theta]. \quad (2)$$

取不同的 θ 角,即可得到具有不同相移的干涉图。设 θ 角分别取 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$, 则

$$\begin{aligned} I_1 &= (a^2 + b^2) - 2ab \sin \varphi \quad (\theta_1 = 0), \\ I_2 &= (a^2 + b^2) + 2ab \cos \varphi \quad (\theta_2 = \pi/4), \\ I_3 &= (a^2 + b^2) + 2ab \sin \varphi \quad (\theta_3 = \pi/2), \\ I_4 &= (a^2 + b^2) - 2ab \cos \varphi \quad (\theta_4 = 3\pi/4), \end{aligned}$$

由此可计算出待测相位分布为

$$\varphi = \arctan[(I_3 - I_1)/(I_2 - I_4)]. \quad (3)$$

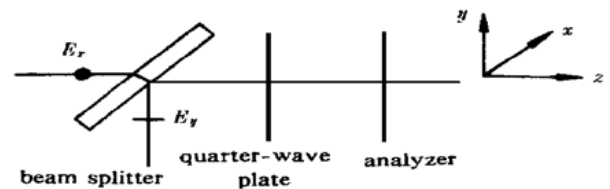


Fig. 1 The polarization phase shifting method

2 相位龙基光栅的衍射特性

设有光波垂直通过相位龙基光栅,入射光场复振幅为 $E_i(x, y)$,通过龙基光栅后光场复振幅为 $E_0(x, y) = E_i(x, y)t(x, y)$,其中 $t(x, y)$ 为龙基光栅的复透射率。以一维相位龙基光栅为例(如图 2 所示),有

$$t(x) = \begin{cases} \exp[jk(n_0h + n_0h_0)] & np - \frac{p}{4} < x < np + \frac{p}{4}, \\ \exp[jk(h + n_0h_0)] & np + \frac{p}{4} < x < np + \frac{3p}{4}, \end{cases} \quad (4)$$

其中 n_0 为龙基光栅材料的折射率, p 为光栅常数, k 为波数, n 为整数。由于 $t(x)$ 是周期函数, 将其展开成傅里叶级数, 有

$$E_0(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} a_m E_i(x, y) e^{j2\pi mx/p}, \quad (5)$$

其中 a_m 为 $t(x)$ 的傅里叶系数,

$$a_m = \begin{cases} \frac{1}{2} [e^{jk(n_0-1)h} + 1] \times e^{jk(h+n_0h_0)} & m = 0, \\ \frac{\sin(m\pi/2)}{m\pi} [e^{jk(n_0-1)h} - 1] \times e^{jk(h+n_0h_0)} & m \neq 0. \end{cases} \quad (6)$$

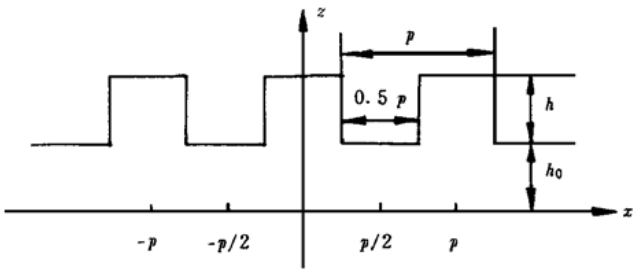


Fig. 2 The Ronchi phase grating

(5) 式和(6)式表明, 通过龙基光栅后, 光场以离散级次衍射。若选择 h 满足 $e^{jk(n_0-1)h} = -1$, 则

$$a_m = \begin{cases} 0 & m = 2q, \\ -2 \times e^{jk(h+n_0h)}/m\pi & m = 4q + 1, \\ 2 \times e^{jk(h+n_0h)}/m\pi & m = 4q - 1, \end{cases} \quad (7)$$

其中 q 为整数。从(7)式可得龙基光栅的如下特点:

- 1) 0 级及偶数级衍射光场消失;
- 2) 奇数级衍射光场的能量比为:

$$I_1 : I_3 : I_5 : \dots = 1 : \frac{1}{9} : \frac{1}{25} : \dots; \quad (8)$$

3) 正负一级衍射光场的能量占入射光场总能量的 80% 左右。

对于正交相位龙基光栅, 可得到 4 个一级衍射光场, 其能量占入射光场总能量的 64% 左右。本文所用的即为正交相位龙基光栅, 由中国科学技术大学同步辐射国家实验室提供^[6]。

3 实时偏振相移马赫-曾德尔干涉系统及对折射率变化的测量

系统结构如图 3 所示, 从激光器出射的线偏振光经偏振分光镜分成两束偏振方向正交的线偏振光, 其中一束通过被测液体。两束光在半透半反镜后会合, 但并不干涉, 只有在通过 1/4 波片和偏振片后才产生干涉光场。偏振片组由 4 块小偏振片组成 (图中的 P_1 至 P_4), 其偏振轴与 x 轴的夹角分别为 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ 。正交相位龙基光栅产生 4 个相同的一级衍射光场并分别通过 4 块偏振片, 从而引入不同相移。透镜 1 将干涉光场成像到漫射屏上, 透镜 2 将漫射屏成像到 CCD 靶面上。也可不用漫射屏而由 CCD 直接接收。CCD 可同时拍摄到 4 幅具有不同相移的条纹图, 利用(3)式可计算反映折射率分布的相位。示意图中未画出激光的扩束。实验中测量的是酒精和水混合液在扩散过程中的折射率变化。液槽后面为石英玻璃, 厚为 2 mm, 中间空腔部分厚 3 mm。测量给出的是液体折射率的分布和随时间的变化。图 4(a)~ 图 4(c) 为顺序采集的 3 组图像, 每组图像包括由 4 个一级衍射像通过不同偏振片形成的 4 幅条纹图, 这 4 幅条纹图同时被 CCD 接收。图 4(d)~ 图 4(f) 为计算出的相位分布。每组图中 4 幅条纹图的位置被重新编辑过, 以使图面更紧凑, 未对原始条纹图和计算出的相位图作任何其他处理。

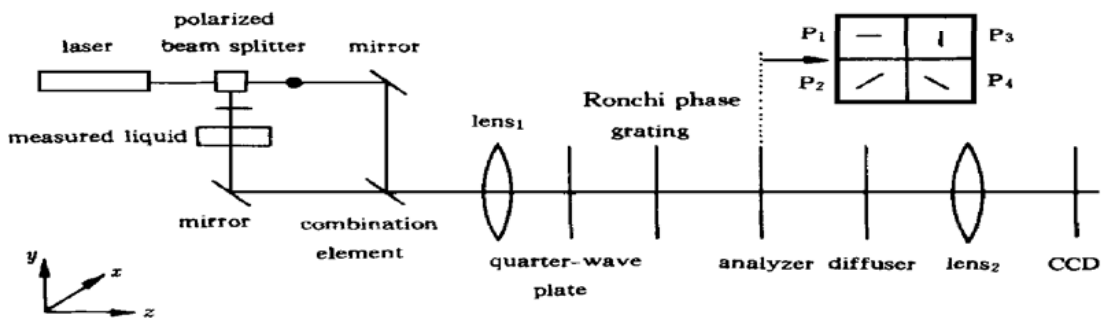


Fig. 3 An optical schematic of a Mach-Zehnder interferometer with polarization phase shifting

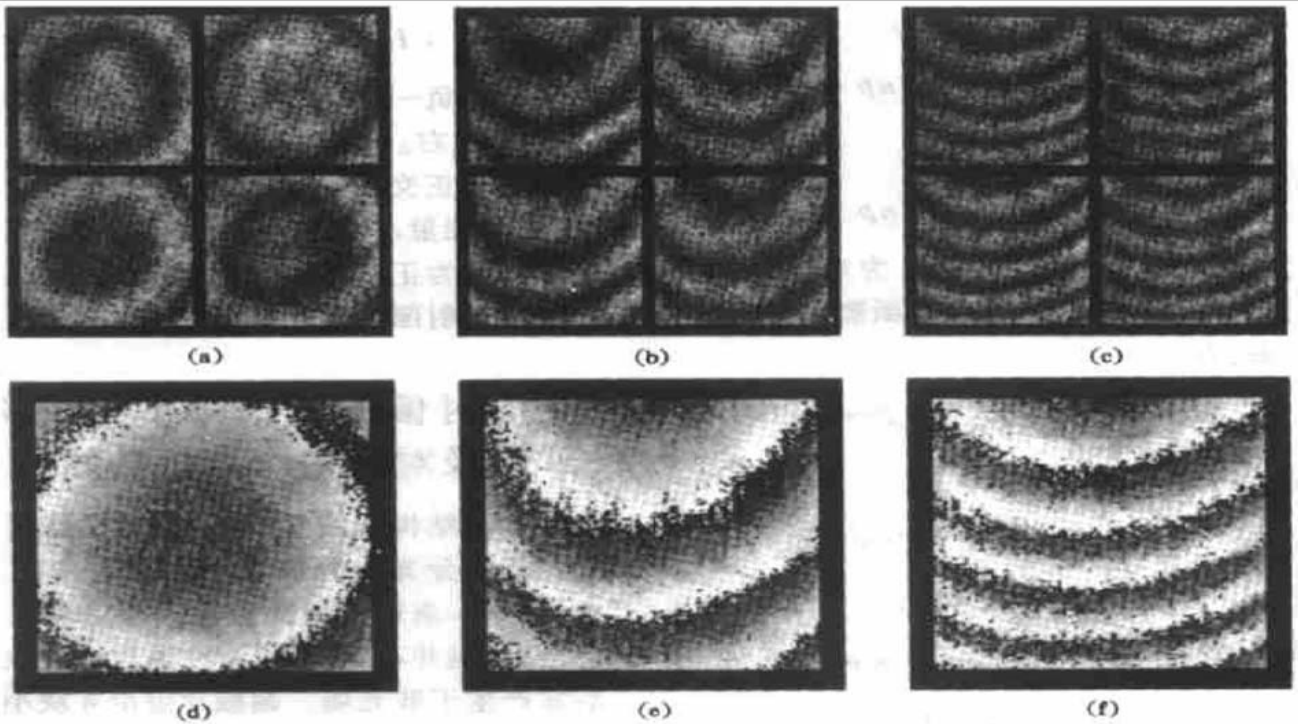


Fig. 4 Sampled Mach-Zehnder interferometric images and their corresponded phases

4 实时偏振相移散斑干涉系统及对离面位移的测量

系统结构如图 5 所示,用普通分光镜把从激光器出射的线偏振光分成两束,不改变偏振方向。两束光分别入射到被测物体和参考物体表面并产生散斑光场。实验中被测物体和参考物体均为表面涂有白漆的有机玻璃板,此时的散斑光场具有各个方向的偏振。由此分别插入两个偏振片,使得透过偏振片后的两个散斑光场的偏振方向互相垂直。两束光在半透半反镜后会合,改变分光镜的分光比可保证半透半反镜后两个散斑光场具有近似相同的光场强度分布。两个透镜将被测物体和参考物体同时成像到 CCD 靶面上,被测物体像和参考物体像重合。龙基光栅放在前面透镜的前焦面上,并在该处放置孔径光阑,构成像方远心光路。其余部分与马赫-曾德尔系统大致相同。该系统可测量物体离面位移。设

变形前偏振片组各偏振轴与 x 轴的夹角均取为 0 , 散斑图分别记为 $I_{01} I_{02} I_{03} I_{04}$, 变形后偏振片组各偏振轴与 x 轴夹角分别取为 $0 \pi/4 \pi/2 3\pi/4$, 散斑图分别记为 $I_1 I_2 I_3 I_4$ 。对散斑图作绝对值相减,记 $F_i = |I_i - I_{0i}| (i = 1, 2, 3, 4)$, 则这些 F_i 形成带有相移并被高频散斑调制的散斑相关条纹图。对于散斑相关条纹图,一般对其先平方再作低通滤波。通过简单推导可得,滤波后的条纹图可表示为

$$F_i = I_0 [1 + \gamma \cos(\varphi + \theta_i)] \quad (i = 1, 2, 3, 4), \quad (9)$$

其中 φ 为与离面位移有关的相位, θ_i 分别为 $0 \pi/2 \pi 3\pi/2$, 因此相位可根据下式计算

$$\varphi = \arctan[(F_4 - F_2)/(F_1 - F_3)], \quad (10)$$

实验中对被测物体加力使之产生离面位移,图 6(a) 为散斑干涉产生的散斑图,图 6(b) 为散斑图绝对值相减形成的散斑相关条纹图,图 6(c) 为根据散斑相关条纹图计算出的相位分布,对应物体的全场离面位移。图 6(c) 还对计算出的相位进行了中值滤波。

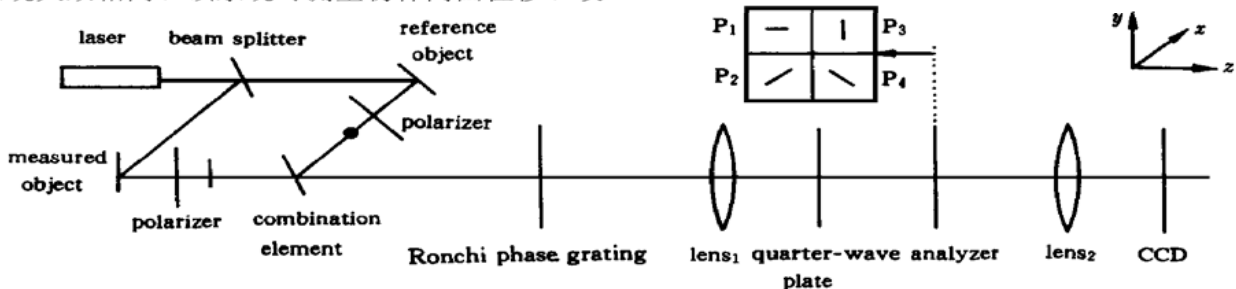


Fig. 5 An optical schematic of a speckle interferometer with polarization phase shifting

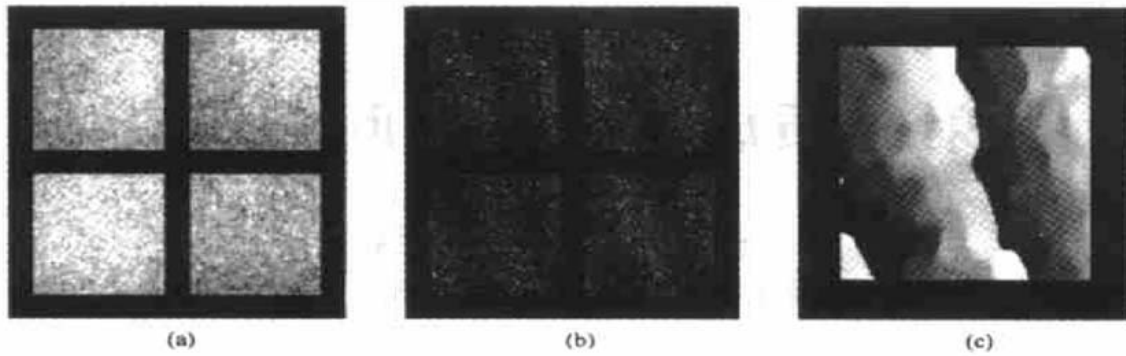


Fig. 6 Sampled speckle interferometric images, calculated speckle fringes and its corresponded phase

讨论与结论 采用相位龙基光栅实现实时偏振相移,同时获得4幅具有不同相移的干涉图,据此计算出被测物体的相位分布,从而实现对动态过程的相位测量。将该方法应用于马赫-曾德尔干涉系统和散斑干涉系统,并给出了实验结果。这些测量系统结构简单,它易于在各种场合应用。

由于该方法一次完成相移,可避免减少空气流动、环境温度变化、振动等的影响^[3]。但另一方面,系统可能对4个一级像带来不同的误差,而且相位计算中,4幅干涉图的位置必须匹配,因此在工程实际应用中,系统的标定是必需的。

参 考 文 献

- [1] Bruning J H, Herriott D R, Gallagher J E *et al.*. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(11): 2693~2703
- [2] 钱克矛, 缪泓, 伍小平. 利用干涉云纹偏振相移技术进行动态变形实时测量的方法研究. 现代力学测试技术(第九届全国实验力学学术会议文集), 1998. 445~448
- [3] van Haasteren A J P, Frankena H J. Real-time displacement measurement using a multicamera phase-stepping speckle interferometer. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(19): 4137~4142
- [4] Weijers A L, van Brug H, Frankena H J. Real-time deformation measurement using a transportable shearography system. *Proc. SPIE*, 1996, **2921**: 76~81
- [5] Kranz J, Lamprecht J, Hettwer A *et al.*. Fiber optical single frame speckle interferometer for measuring industrial surface. *Proc. SPIE*, 1998, **3407**: 328~331
- [6] 傅绍军, 洪仪麟, 陶晓明等. 用离子束刻蚀制作位相 Ronchi 光栅. 量子电子学, 1995, **12**(2): 146~149

A Real-Time Polarization Phase Shifting Technique for Dynamic Measurement

Qian Kemao Miao Hong Wu Xiaoping

(Department of Meachanics and Mechanical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

(Received 21 June 1999; revised 25 October 1999)

Abstract: By using a special Ronchi phase grating and polarization phase shifting method, four phase shifted patterns can be captured simultaneously, and thus the dynamic phenomena can be measured. This technique is used in a Mach-Zehnder interferometer and a speckle interferometer, the refractive index changes and the off-plane displacements are measured respectively, the experimental results are given.

Key words: dynamic phenomena measurement; polarization phase shifting; Ronchi phase grating; Mach-Zehnder interferometry; speckle interferometry