

偏振相位偏移电子散斑干涉术 及其应用于变形测量

金 观 昌

(清华大学 工程力学系, 北京)

唐 寿 鸿

(奥克兰大学 机械工程系, 美国)

提 要

本文叙述了一种用于测量漫射表面变形的使用偏振相位偏移技术的电子散斑干涉术。由于采用共光路光学相位偏移技术, 因而具有较高的稳定性; 用计算机图像处理可精确地获得相位图; 用去包裹技术 (unwrapping) 可直接得到表面变形的精确数据。

关键词: 偏振; 相位测量; 变形测量; 电子散斑干涉术。

一、方法原理

采用共光路的、偏振相移器的电子散斑干涉光路示于图1。一束激光经分光镜 B_1 分为两束, 其中一束经物体反射后, 通过线性偏振片 P_1 , 成像透镜 L_3 后经分光镜 B_2 与参考光汇合。线偏振片 P_1 的放置, 与原始激光束在方向上成 90° 角; 参考光与原始激光的方向一致。汇合后的两束激光经偏振相移器后进入电视摄像管, 摄像管把光信号转换成电信号输到计算机图像处理系统。偏振相移器由 45° 方向放置的四分之一波片和放在其后的偏振片

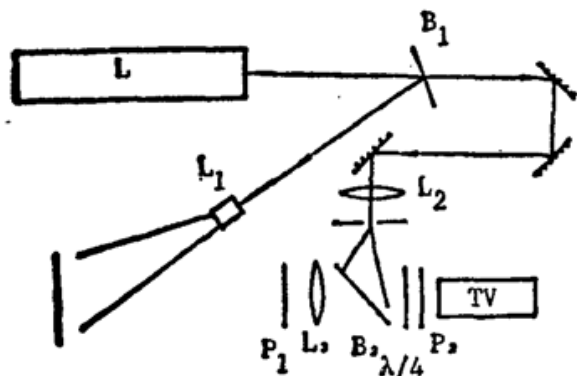


Fig. 1 Optical scheme of E. S. P. I. with polarization phase-shifter

L —laser, B_1, B_2 —beam splitter, L_1, L_2, L_3 —lens; P_1, P_2 —polaroid; $\lambda/4$ —quarterwave plate, TV —camera

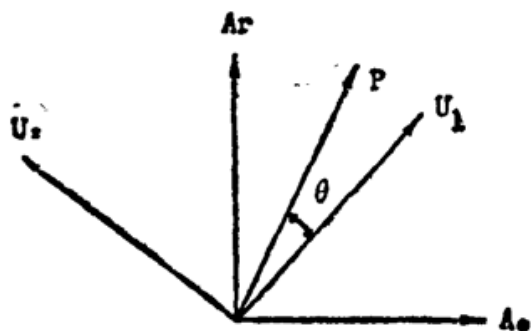


Fig. 2 Vector diagram of polarization phase-shifter

A_r —reference beam, A_0 —object beam, P —polaroid, U_1 —fast axis, U_2 —slow axis, θ —angle between polaroid and fast axis

P_2 组成。两束正交的线性偏振光通过四分之一波片后, 将产生两束圆偏振光, 随后经过旋转偏振片成为同一偏振方向的光束。转动偏振片, 干涉光场的相位将随之改变。表示偏振光方向关系的矢量图示于图 2。

设 $A_r(x, y)\exp(i\phi_r)$ 和 $A_o(x, y)\exp(i\phi_o)$ 分别为参考光和物光束的光波复振幅, $A(x, y)$ 和 $I(x, y)$ 分别为两光束经相移器后的合成光波复振幅和光强, 由图 2 所示的几何关系可得:

$$\left. \begin{aligned} A(x, y) &= A_r(x, y)\exp[i(\phi_r - \theta)] + A_o(x, y)\exp[i(\phi_o + \theta)], \\ I(x, y) &= I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos(\phi + 2\theta). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

当物体变形后, 其光强为

$$I'(x, y) = I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos(\phi + \Delta\phi + 2\theta). \quad (2)$$

其中 $\phi = \phi_o - \phi_r$, $\Delta\phi$ 是物体变形引起的相位改变, θ 为偏振片 P_2 转动的角度。当电子散斑干涉仪或计算机图像处理装置把两个条纹光强相减取模平方后, 二次条纹函数为

$$I_n = \langle I \rangle \sin^2(\Delta\phi/2 + \theta_n), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

方程式(3)表明: 当 θ_n 改变 π , 光强或条纹图案改变 2π , 即从暗到暗, 或从亮到亮。根据(3)式, 在物体变形后可分别取四幅像 $\theta_n = 0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ 的相移干涉条纹图 $I_1 \sim I_4$ 。

由四幅相移干涉条纹图求得物体变形的相位图的原理是很清楚的。众所周知, 一个条纹图案可表示为: $I(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[\phi(x, y)]$ 。引入相位偏移时则为: $I(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[\phi(x, y) + \theta]$ 。由于存在检测元件(如电视摄像管)的非线性, 我们加一个二次项, 即

$$I(x, y) = K\{a(x, y) + b(x, y)\cos[\phi(x, y) + \theta] + c(x, y)\cos^2[\phi(x, y) + \theta]\}. \quad (4)$$

当 θ 分别为 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 时,

$$\left. \begin{aligned} I_1(x, y) &= K\{a(x, y) + b(x, y)\cos[\phi(x, y)] + c(x, y)\cos^2[\phi(x, y)]\}, \\ I_2(x, y) &= K\{a(x, y) - b(x, y)\sin[\phi(x, y)] + c(x, y)\sin^2[\phi(x, y)]\}, \\ I_3(x, y) &= K\{a(x, y) - b(x, y)\cos[\phi(x, y)] + c(x, y)\cos^2[\phi(x, y)]\}, \\ I_4(x, y) &= K\{a(x, y) + b(x, y)\sin[\phi(x, y)] + c(x, y)\sin^2[\phi(x, y)]\}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由(5)式可得

$$\left. \begin{aligned} I_4(x, y) - I_2(x, y) &= 2Kb(x, y)\sin[\phi(x, y)], \\ I_1(x, y) - I_3(x, y) &= 2Kb(x, y)\cos[\phi(x, y)]. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由(6)式可得:

$$\phi(x, y) = \arctan\{[I_4(x, y) - I_2(x, y)]/[I_1(x, y) - I_3(x, y)]\}. \quad (7)$$

通过上述运算来求相位图具有下列优点:

- (1) 背景项 $a(x, y)$, $b(x, y)$ 的影响自动消除;
- (2) 检测器的非线性及常数项的影响也被消除。

由偏振相移获得的光强经摄像管转换成电信号后, 输入计算机进行(7)式运算, 即可得到相位分布图。

因反正切函数的定义域为 $-\pi$ 到 π , 所以所得相位图是一个断续函数(也称为“包裹相位图”Wrapping phase map), 通过“去包裹”处理(unwrapping)便可把断续的相位转变为连续的相位数据, 从而自动给出条纹级数, 自动判别增减方向, 自动得到位移数据。Maey^[5]

给出一种简单的“去包裹”算法： $\phi'(x_j, y) = \text{AMOD}[\phi(x_j, y) - \phi'(x_{j-1}, y) + 201\pi, 2\pi] + \phi'(x_{j-1}, y) - \pi$ 。其中 $\phi'(x_j, y)$ 为“去包裹”相位，AMOD 是 FORTRAN 程序中求余数的算符。以上是一维“去包裹”。如果条纹图是封闭曲线，则应当采用二维“去包裹”处理。

二、偏振相移电子散斑干涉仪用于变形测量

我们用上述偏振相移器的电子散斑干涉仪对一周边固定、中心加集中载荷的矩形平板做了验证实验。先将一个未加载荷的散斑图存入 E. S. P. I 装置或计算机图像板的存储器中。然后与加载后变形物体的散斑图相减得到第一个干涉条纹图(I_1)，分别使偏振相移器的 P_2 转动 45° 、 90° 、 135° ，得到 $I_2 \sim I_4$ 干涉条纹图并存入计算机，然后按(7)式进行处理得到相位图(见图 3(b))。经“去包裹”处理后直接得到表示位移分布的曲线(图 3(a))。全部处理工作可在带有图像板的 IBM PC/XI 或 AT 机上完成。从图 3(b)看到：相位图可以完全除去散斑干涉图中的噪声。当把照明光的角度及波长参数输入计算机后，一个物体变形的精确数值测量就可以得到了。

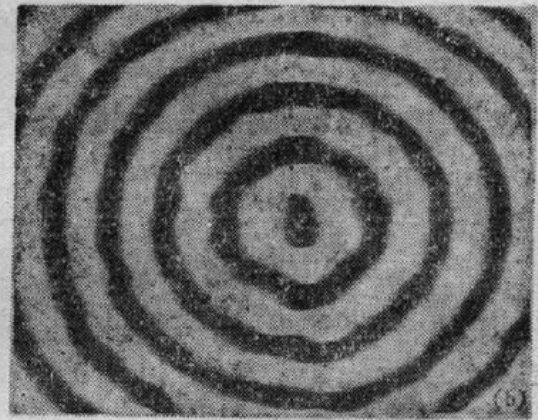
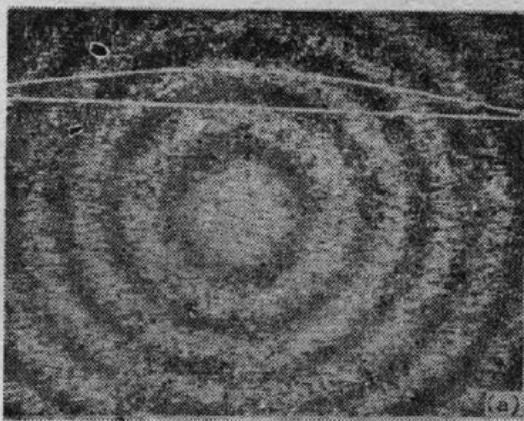


Fig. 3

(a) E. S. P. I. fringe pattern and distribution curve of displacements;
(b) phase map

三、结 论

本文提出的偏振相位偏移电子散斑干涉术，解决了利用光学干涉进行精密测量($\lambda/1000$)及自动数据处理的难题，改变了靠从条纹位置中心细分条纹(插值、拟合)等方法，尤其对质量差的散斑干涉条纹的处理更具意义。由于用偏振方法改变相位，故装置简单，比压电陶瓷 PZT 更易于推广应用。且对多幅图像处理还可以清除光接收元件的非线性。除了用于散斑外，偏振相移还可以用于全息、光弹、错位散斑等条纹处理。除用普通偏振片外，也可用电光晶体元件组成电子偏振相移器，使测量过程完全自动化。

参 考 文 献

- [1] Suezou Nakadate and Hiroyoshi Saito; *Appl. Opt.*, 1985, **24**, No. 14 (Jul), 2172~2181.
- [2] Katherine Creath; *Appl. Opt.*, 1985, **24**, No. 18 (Sep), 3053~3058.
- [3] Mahendra P. Kothiyal and Clande Delisle; *Appl. Opt.*, 1985, **24**, No. 24 (Dec), 4439~4442.

- [4] Hiroshi Kadono, Nobukatsu Takai, and Toshimitsu Asakura; *Appl. Opt.*, 1987, **26**, No. 5 (Mar), 898~904.
- [5] W. W. Macy; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 23 (Dec), 3898~3901.

Electronic speckle-pattern interferometry with polarization phase-shifting technique and it's application to deformation measurements

JIN GUANCHANG

(*Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing*)

TANG SHOUHONG

(*Department of Mechanical Engineering, Oakland University, U.S.A.)*

(Received 7 March 1989; revised 10 July 1989)

Abstract

An E. S. P. I. with polarization phase-shifting technique for the deformation measurements of diffused surface is presented. The high stability is obtained by adopting the common-path optical phase-shifting technique. A phase map can be precisely obtained from computer image processing technique. The precise data of surface deformation are extracted directly by unwrapping technique.

Key words: polarization; phase measurement; deformation measurements; electronic speckle-pattern interferometry.