

双散斑场相移数字干涉计量

郑 文 谭玉山

(西安交通大学机械工程系, 西安 710049)

提 要

本文介绍了一种检测散射表面变形的自动测量系统。将相移和数字图像处理技术应用于数字散斑干涉计量中,毋须中间记录过程,在计算机控制下采集数据和计算相位,产生相位条纹而非相关条纹。用图像处理技术消除散斑随机性引起的噪声。文中给出了面内、离面变形的测量结果。

关键词: 散斑图,干涉计量,相移。

一、前 言

在干涉检测领域中,数字散斑干涉计量已成为一个十分重要的分支,它能对光学粗糙表面的变形作非接触式全场测量,直接用摄像机记录,毋须全息干涉中记录介质的处理、复位再现等繁琐的工作,曝光时间短,抗干扰能力强,可以实时地显示变形或应变的等值条纹,把光信号转变成数字量,用计算机进行处理,非常方便。所以,它是一种实用的很有前途的检测方法。但是受散斑颗粒的影响,一般数字散斑干涉计量条纹的质量都较差,尽管采用了多种图象处理方法,仍存在分析时间长,精度、可靠性低,定量信息少等问题。

相移方法由于其内在的优越性,在全息干涉计量中已有广泛的应用^[1,2]。本文将相移技术应用于双散斑场数字干涉计量,解决了一般数字散斑干涉计量中存在的绝大多数问题,并用试验证明了这种方法的实用价值。

二、相移数字散斑干涉计量

在减模式的数字散斑干涉计量中,分别记录物体变形前后的两幅散斑干涉场,相减并取模,就能得到表征物体变形的相关条纹,设变形前记录的光强 I_b 为

$$I_b(x, y) = I_0 \{1 + m \cos[\varphi_b(x, y)]\}, \quad (1)$$

式中 I_0 为平均光强, m 为调制度, $\varphi_b(x, y)$ 为物散斑场相对参考散斑场的相位。变形后光强 I_a 为

$$\left. \begin{aligned} I_a(x, y) &= I_0 \{1 + m \cos[\varphi_a(x, y)]\}, \\ \varphi_a(x, y) &= \varphi_b(x, y) + \Delta\varphi(x, y), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $\varphi_a(x, y)$ 为变形后的相位, $\Delta\varphi(x, y)$ 为物体变形引起的相位变化。光强相减并取模得

$$I(x, y) = I_a(x, y) - I_b(x, y) = 2mI_0 \left| \sin \left[\varphi_b(x, y) + \frac{\Delta\varphi(x, y)}{2} \right] \right| \left| \sin \left[\frac{\Delta\varphi(x, y)}{2} \right] \right|, \quad (3)$$

(3)式即表征减模式数字散斑干涉计量的相关条纹。 $\left| \sin \left[\varphi_0 + \frac{\Delta\varphi}{2} \right] \right|$ 项表示高频散斑噪声,正是由于这一项的存在,使数字散斑干涉计量条纹质量远不如全息条纹高,难以进行定量分析,从而限制了这种方法的应用范围。

采用相移技术,则可消除上述噪声项的影响。在干涉仪的参考光场中引入一已知的相移量 β ,则记录的光强为

$$I = I_0 \{1 + m \cos[\varphi(x, y) + \beta]\}, \quad (4)$$

取 $\beta = 0, 120^\circ, 240^\circ$ 从中求得

$$\varphi(x, y) = \arctg \frac{\sqrt{3}(I_3 - I_2)}{2I_1 - I_2 - I_3}. \quad (5)$$

用这种方法分别求出变形前后的相位分布 φ_0, φ_a , 则由(2)式即获得物体各点的相位变化值。与通常的数字散斑干涉计量不同,这里参与相减的不再是光强,而是变形前后散斑干涉场的相位。相减的结果与散斑场本身光强及相位分布无关,故可大大减小散斑随机性的影响。一般情况下做反正切运算得出的 φ 值值域为 $(-\pi/2, \pi/2)$, 根据(5)式分子、分母的正负可将其值域扩展为 $(-\pi, \pi)^{[3]}$, 并可量化为 $0 \sim 255$ 灰度级,得到与相关条纹对应的相位条纹。在 $\varphi = \pm\pi$ 处存在差 2π 的间断点,其位置恰好在相关黑条纹的中心,与相移全息干涉一样,通过判断相邻点的相位差进行相位展开(phase unwrap)^[3,4],但因散斑干涉噪声较大。展开时必须首先对相位图进行预处理,阈值的选择也视具体情况而定。求出连续分布的相位 $\Delta\varphi_{cont}$,也就同时获得了它的大小和方向。

由相位变化量可进一步计算位移场。求解面内位移所用的光路及主要设备如图1所示。采用 10 mW He-Ne 激光器,激光束经分束镜 SP 分成两路,分别被反射到两球面反射镜上,扩束形成与物面法线成 θ 角对称分布的两照明光束。计算机通过 D/A 控制压电陶瓷(PZT)的驱动电压,移动 M_1 , 使其中一束获得均匀已知的相移量。这种布置只对两入射光平面内的面内位移敏感,且有

$$d_x(x, y) = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \frac{\Delta\varphi_{cont}}{2\pi}. \quad (6)$$

计算离面位移时,一般采用图2所示的布置。物面 O 和参考面 R 分别被球面反射镜反射的激光束照明。参考面经反射镜 M_3 透过分束镜 SP_2 , 与物面迭加成像于 CCD 靶面,形

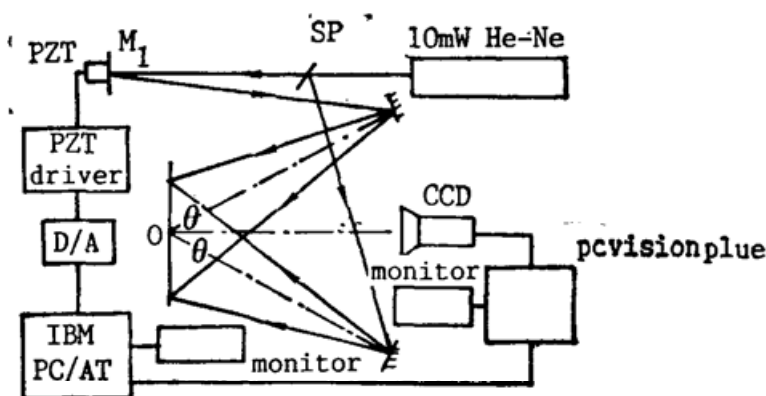


Fig. 1 Schematic diagram of the phasestepping DSPI for measuring in-plane deformation

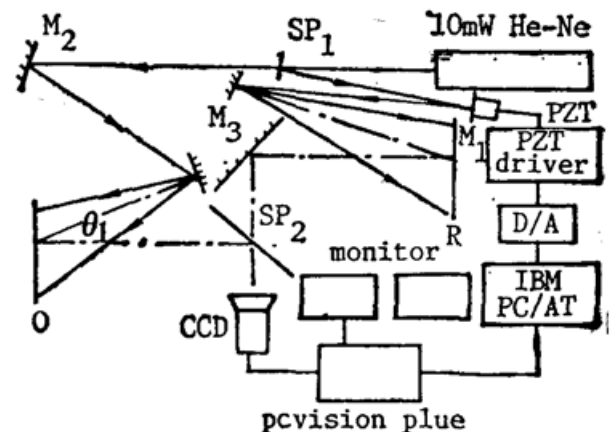


Fig. 2 Schematic diagram of the phasestepping DSPI for measuring off-plane deformation

成双散斑干涉场。 M_1 固定在压电陶瓷上, 作引入相移用。离面位移的计算公式为

$$d_z(x, y) = \frac{\Delta\varphi \cdot \lambda}{2\pi(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)}, \quad (7)$$

式中 θ_1, θ_2 如图 2 所示。

三、实验结果

1. 实验结果

检测系统如图 1、图 2 所示, 各部分由计算机联成一个整体。双散斑干涉场经 CCD 摄像机、povision-plus 图像采集卡数字化为 $256 \times 256 \times 8$ bit 的数字图像存于帧存贮器中。图像卡有两个帧存 ($512 \times 512 \times 8$ bit), 能存放 8 幅图像。所有操作均在计算机控制下自动完成, 处理软件用汇编语言编写。速度很快。实验采用该系统对一直径 10 cm 的金属圆板进行了测量。图 3(a) 为其绕中心轴作刚体面内转动时的相关条纹及相位图。图 3(b) 为受一集中载荷作用时的变形情况。实验结果中给出了减模式的数字散斑干涉计量相关条纹(左上)、计算所得原始相位图(右下)及滤波, 平滑处理后的相位图(右上)。相关条纹的对比度低, 散斑噪声很大, 定量分析困难。图中所示为经线性拉开后的结果。

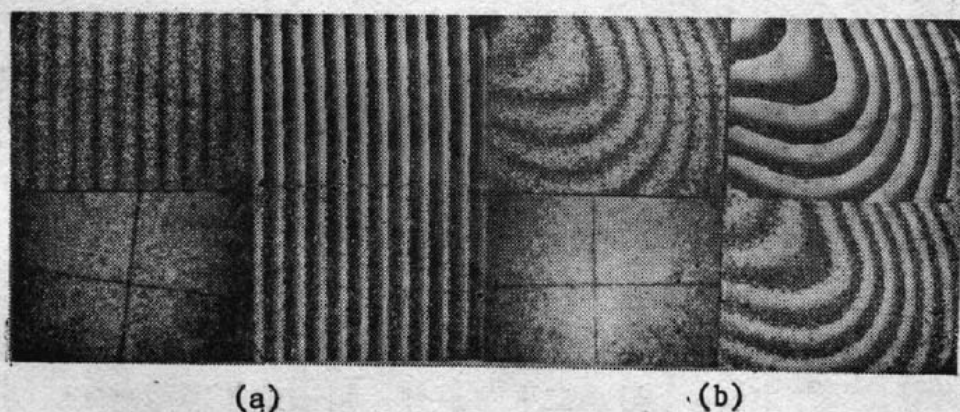


Fig. 3 Fringe pattern of a) in-plane and b) out-of-plane displacement
Left upper: correlation fringes; Right upper: smoothed phase; Left lower: raw speckle pattern; Right lower: raw calculated phase.

原始相位图中由于散斑的影响, 有些噪声点。这些点一般是孤立的, 与周围各点的灰度级相差较大, 因而很容易识别, 并用其邻域平均值代替。另外, 还可用 3×3 或 5×5 中值滤波来减小相位图噪声。滤波处理时, 不能破坏相位图中近 2π 的间断点, 以确保相位展开的正常进行。展开后的相位图还可进行较大窗口的中值滤波和邻域平均。图 4 为所得相应的面内, 离面位移的三维图形。

2. 散斑噪声

在相移散斑干涉计量中, 由于散斑随机性的影响, 相位计算会出现一些奇异点, 使其测量精度比相移全息低, 散斑噪声已成为主要的误差源。散斑噪声主要来源于以下几个方面:

(1) 强度饱和

散斑场中某些点亮度很高, CCD 靶面上对应象元处于饱和状态, 量化灰度级不能反映真实的光强度, 使计算的相位值发生偏离。

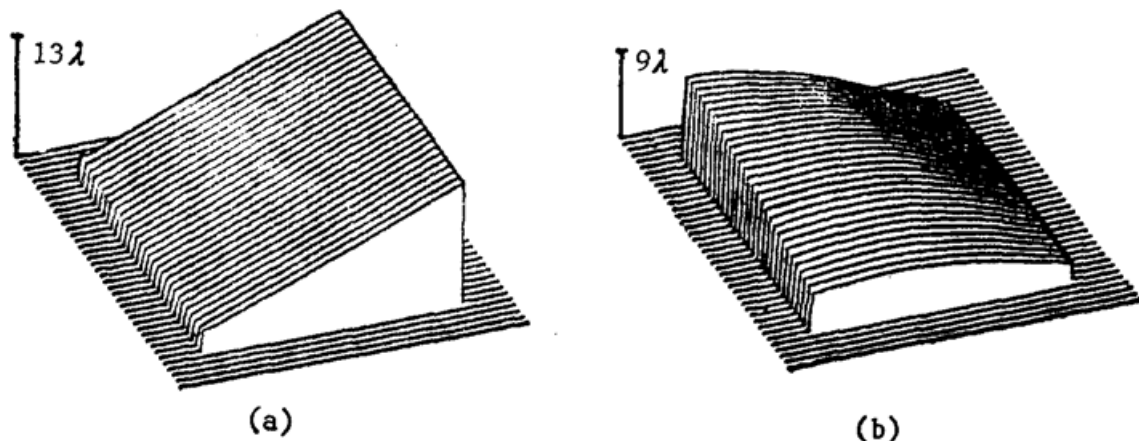


Fig. 4 Three-dimensional display of the a) in-plane and b) off plane displacement

(2) 调制度的降低

探测器象元为有限大小, 所探测的光强可能受几个散斑点的影响, 引入相移时, 各散斑点的光强将发生变化, 而这些象元的光强变化为几个散斑点变化的平均值, 因而使其调制降低, 甚至为零。这种平均效应的影响, 可通过选用小象元探测器来减少^[5]。

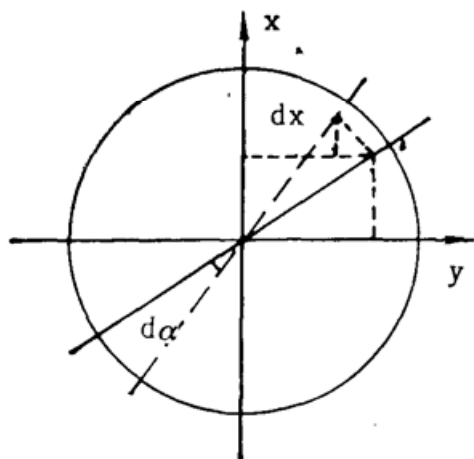


Fig. 5 Tested object

3. 测量精度

采用各种平滑、滤波等图像处理操作, 可以有效地消除这些噪声点, 但它们仍会使测量精度有所降低。通过实验来考查该系统的测量精度。如图 5 所示的金属圆板, 当它绕中心轴转动 $d\alpha$ 角时, 其 x 方向的位移为

$$d_x(x, y) = yd\alpha. \quad (8)$$

这实际上是一个平面方程, 即物体上各点 x 方向的面内位移与 x 、 y 坐标应构成一平面(如图 4(a)所示)。根据最小二乘法原理, 用一理想平面对实际测量结果进行拟合, 并将其做为理论值, 得出测量的最大偏差为 $\pm 1\%$, 说明测量精度还是比较高的。

此外, 与通常数字散斑干涉计量一样, 相移散斑干涉也存在系统参数的选择等问题, 如光圈大小, 摄像机靶面像元尺寸的影响等, 一般通过实验来确定。另外, 由于相移技术的引入, 使测量系统对环境的稳定性要求有所提高。对检测设备和技术也有较高的要求。

四、结 论

将相移技术应用于散斑干涉计量中, 可以快速、可靠、准确、自动地获取物体变形的定量信息。这种方法的主要优点:

(1) 采用低分辨率的记录装置, 只需很短的曝光时间, 使散斑干涉计量毋须中间的照相处理过程, 且抗干扰能力强, 为它的实用化奠定了基础。

(2) 引入相移技术, 能自动获取物体的变形场, 包括大小和方向。

(3) 大大降低了散斑噪声的影响。测量的速度、精度较减模式的数字散斑干涉计量大幅度提高。

总之,相移技术使散斑干涉计量成为定量分析中一个行之有效的方法。

参 考 文 献

- [1] P. Hariharan; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 6 (Mar), 867~880.
- [2] Ming Chang; *Appl. Opt.*, 1985, **24**, No. 22 (Nov), 3780~3783.
- [3] Thomas Kreis, *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1986, **3**, No. 6 (Jun), 847~855.
- [4] William W. Macy; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 23 (Dec), 3898~3901.
- [5] R. Jones C. Wykes; *«Holographic and Speckle Interferometry»*, (Cambridge Univ. Press, 1983), 165~179

Two-speckle-patterns phase-shifting digital interferometry

ZHEN WENG AND TAN YUSHAN

(Department of Mechanical Engineering, Xian Jiaotong University, Xian 710049)

(Received 25 June 1990; revised 24 September 1990)

Abstract

A digital speckle pattern interferometry system for automatic measurement of deformations of a diffuse object is presented by using phase-stepping and digital signal processing technique. Computer is utilized to take data and calculate phase without an intermediate recording step. Phase fringes are produced instead of speckle correlation fringes. Noise data points caused by randomness of the speckle are removed by digital signal processing. Two experimental results for the measurement of in-plane and off-plane deformations are presented.

Key words: speckle pattern, interferometry, phase-shifting.