

文章编号 : 0253-2239(2001)10-1203-05

# 时间序列散斑干涉场中相位函数的计算\*

陶 刚 李喜德

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘要: 散斑干涉或电子散斑干涉计量应用于连续运动或变形物体时, 就会产生一个时变的散斑干涉场。通过摄像系统连续地采集这一时变散斑场, 可获得一系列时间序列散斑干涉图。通过对序列散斑图上各点在时间轴上光强值的变化进行分析, 提出了一种基于时间序列的分析方法, 用以提取干涉场的相位值, 进而获得物体全场变形信息。

关键词: 散斑干涉; 电子散斑干涉; 相位测量; 时间域去包裹

中图分类号: O348.12 文献标识码: A

## 1 引 言

在以往的散斑干涉或电子散斑干涉(ESPI)计量中主要是以强度相关条纹的形式来表征所需要测量的位移或变形量<sup>[1,2]</sup>。由于条纹本身的复杂性与随机性, 很难形成统一的条纹处理模式和定量解释方式。因此, 早期的条纹判读主要是依靠人工进行, 如确定条纹中心、为条纹级数赋值等。这种传统的图像处理方法速度慢而且精度低, 条纹的稀疏性和条纹的规则性都会影响判断的准确性。随着计算机图像处理技术的发展, 用计算机可以完成图像的平滑、二值化、细化、条纹跟踪、为条纹级数赋值等, 使条纹图的分析由人工向自动化迈进了一步, 但由于受条纹场的复杂性及噪声水平的影响, 要获得高精度的测量结果需要付出相当的工作量。目前用条纹分析方法仅能获得十分之一波长量级的精度。因此, 以相关条纹场为计量表征模式的电子散斑干涉主要被应用于定性分析。

为了解决定量检测的问题, 引入了相移方法, 即相移电子散斑干涉术(PSESPI)<sup>[3,4]</sup>。该方法能够很容易地对变形场进行定量检测。但这种方法也存在着明显的不足, 它需要同一变形状态下的多幅图进行相位求解, 同时相移装置的引入增加了实验系统的复杂性和对环境噪声的敏感性。因此, 相移方法很难适用于较恶劣环境下的变形检测。另一种方法是在电子散斑干涉装置中引入载波条纹, 也称作载

波电子散斑干涉术(CESPI)<sup>[5,6]</sup>。与相移电子散斑干涉术相比, 载波电子散斑干涉也称为空间相移电子散斑干涉。它利用傅里叶变换技术, 在只需要一幅干涉图的情况下就可以解调出全场相位。所以载波电子散斑干涉可以方便地应用于无法用相移装置的场合, 例如时变场或瞬态变化场等。

不论是从传统的散斑法、电子散斑干涉到现在的相移电子散斑干涉术和载波电子散斑干涉, 位移场的测量都是基于两个状态, 即变形前后的两个状态, 没有考虑到时间参数。但时变场是普遍存在的, 如热变形场、由材料或结构的疲劳破坏引起的蠕变等。这些场通常是基于时间变化并且变形量是比较大的。因此非常需要一种能够定量测量时变场和大变形的办法。90年代中后期, 由于高速 CCD 的出现, 使短时间间隔的数字序列图像的采集成为可能。因而以时间参量为载波的序列场分析被提到日程上来, 并进而对高速变形场的数字化检测产生了推动作用。Joenathan<sup>[7]</sup>提出了一种方法, 称为时变散斑干涉术(TSPI), 他利用计算机控制的旋转台使物体产生连续的变形, 从而引起散斑场强度的时间调制。在物体变形的过程中采集大量的散斑图, 通过傅里叶变换技术提取出全场的相位信息。Li 等<sup>[8]</sup>通过利用常规的电子散斑干涉系统, 提出了一种基于相位扫描的时变散斑干涉方法, 该方法在无需外界提供线性载波, 而只依靠物体自身变形或外载作用下变形产生的散斑场, 获得其相位和变形信息。

事实上, 我们可以称时变散斑干涉术为时间载波电子散斑干涉。此时载波是通过物体的连续变形或移动而产生的。因为要使用傅里叶变换解调技术

\* 国家自然科学基金(10072031)清华大学骨干人才基金资助课题。

来提取相位信息,所以在 Joenathan 方法中需要大量地摄取散斑干涉图,并且要求被测物体的变形或系统提供恰当的时间载波,以便在用傅里叶方法分析时能统一进行旁瓣滤波,而相位扫描时变散斑干涉计量<sup>[9]</sup>,也需要象相移电子散斑干涉术那样,对每一个时刻获得的原理相位图进行去包裹,这需要大量的处理时间。

为了能一次对多幅时间序列散斑图进行全场计量,并借助时间序列获得连续变形分布,我们提出了一种时间域相位求解的方法,并通过这一方法,可直接实现单调变化变形场的计量。

## 2 基本原理

### 2.1 原理相位的求解

时变散斑场的强度函数可表示为:

$$I(x, y, t) = I_0(x, y, t) + I_1(x, y, t) \cos \phi(x, y, t), \quad (1)$$

其中  $I_0(x, y, t)$  为背景光强,即  $t$  时刻左右一段时间内  $(x, y)$  点散斑强度的平均值,  $I_1(x, y, t)$  为强度调制函数,即散斑强度波动的振幅,  $\phi(x, y, t)$  为记录了物体位移或变形信息的相位项。通过解调  $\phi(x, y, t)$ , 便可以获得物体表面发生的位移信息。

考虑到在干涉场中,  $\phi(x, y, t)$  的变化要远快于  $I_0(x, y, t)$  和  $I_1(x, y, t)$ , 即背景光强  $I_0$  和强度调制函数  $I_1$  在一段时间内的变化很小, 因此可以忽略  $I_0$  和  $I_1$  中的时间参数  $t$ , 于是(1)式可简化为

$$I(x, y, t) = I_0(x, y) + I_1(x, y) \cos \phi(x, y, t). \quad (2)$$

在时变场检测时,由摄像机以给定的时间间隔记录物体变形过程中的一系列散斑干涉图,设  $I_i(x, y, t_i)$  为序列散斑图中  $t_i$  时刻的散斑强度。对(2)式不同时刻的散斑场进行时间平均,则有:

$$\left. \begin{aligned} I_0(x, y) &= \left[ \sum_{i=1}^n I_i(x, y, t_i) \right] / n, \\ I_1(x, y) &= I_i(x, y, t_i)_{\max} - I_0(x, y), \end{aligned} \right\} (3)$$

其中,  $I_i(x, y, t_i)_{\max}$  为  $i = 1 \sim n$  时间段中, 对应点散斑场的强度极值, 它是通过对  $I_i(x, y, t_i)$  在  $i = 1 \sim n$  时段  $(x, y)$  点的强度值进行比较而获得。于是, 相应于每一点在  $t_i$  时刻的原理相位值可由(2)式解得:

$$\phi_{0i} = \arccos \frac{I_i(x, y, t_i) - I_0(x, y)}{I_1(x, y)}. \quad (4)$$

由于  $\arccos$  的主值域为  $[0, \pi]$ , 因此(4)式仅给出了序列散斑场的原理相位值。为了获得物体表面的实际变形值, 需要对其进行去包裹处理, 进而获得与变形场对应的连续相位分布。

### 2.2 时间域去包裹算法

对散斑场原理相位图的去包裹有很多方法, 但总体可分为两类, 一类为空间域去包裹算法, 另一类为时间域去包裹算法。空间域去包裹算法由于受到噪声及物体表面几何形状等影响, 仅能适应信噪比较好、形状规则的干涉场<sup>[9-11]</sup>。而对于时间域去包裹, 只有很少的报道, 其中文献[12]的时间域去包裹是在相移的基础上实现的, 而直接利用序列散斑图的强度变化进行去包裹还未见报道。

为了对序列散斑图进行时间域去包裹, 设  $I_1(x, y, t_1)$  为序列散斑干涉图  $t_1$  时刻的强度,  $\phi_{01}(x, y, t_1)$  为此时刻的原理相位, 则根据散斑场强度随时间  $t$  的变化规律, 可得去包裹过程为:

$$\left. \begin{aligned} I_1(x, y, t_1) &\geq I_2(x, y, t_2), \\ \phi_1(x, y, t_1) &= \phi_{01}(x, y, t_1); \\ I_1(x, y, t_1) &< I_2(x, y, t_2), \\ \phi_1(x, y, t_1) &= 2\pi - \phi_{01}(x, y, t_1). \end{aligned} \right\} (5)$$

(5)式中  $\phi_1(x, y, t_1)$  为  $t_1$  时刻的去包裹相位。同理对第  $i$  到  $n-1$  时刻, 有:

$$\left. \begin{aligned} i=2, p=0 \\ I_{i-1}(x, y, t_{i-1}) > I_i(x, y, t_i) > I_{i+1}(x, y, t_{i+1}), \quad \phi(x, y, t_i) = 2p\pi + \phi_0(x, y, t_i); \\ I_{i-1}(x, y, t_{i-1}) < I_i(x, y, t_i) < I_{i+1}(x, y, t_{i+1}), \quad \phi(x, y, t_i) = 2(p+1)\pi - \phi_0(x, y, t_i). \end{aligned} \right\} (6)$$

$I_{i-1}(x, y, t_{i-1}) > I_i(x, y, t_i)$  和  $I_i(x, y, t_i) < I_{i+1}(x, y, t_{i+1})$

$$\left. \begin{aligned} 1) \quad I_{i-1}(x, y, t_{i-1}) > I_{i+1}(x, y, t_{i+1}), \quad \phi(x, y, t_i) = 2p\pi + \phi_0(x, y, t_i); \\ 2) \quad I_{i-1}(x, y, t_{i-1}) < I_{i+1}(x, y, t_{i+1}), \quad \phi(x, y, t_i) = 2(p+1)\pi - \phi_0(x, y, t_i). \end{aligned} \right\} (7)$$

$I_{i-1}(x, y, t_{i-1}) < I_i(x, y, t_i)$  和  $I_i(x, y, t_i) > I_{i+1}(x, y, t_{i+1})$

$$\left. \begin{aligned}
 & p = p + 1 ; \\
 1) & I_{i-1}(x, y, t_{i-1}) < I_{i+1}(x, y, t_{i+1}), \quad \phi(x, y, t_i) = 2p\pi - \phi_0(x, y, t_i); \\
 2) & I_{i-1}(x, y, t_{i-1}) > I_{i+1}(x, y, t_{i+1}), \quad \phi(x, y, t_i) = 2p\pi + \phi_0(x, y, t_i).
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

最后,对第  $n$  时刻:

$$\left. \begin{aligned}
 & I_{n-1}(x, y, t_{n-1}) > I_n(x, y, t_n), \quad \phi(x, y, t_n) = 2p\pi + \phi_0(x, y, t_n); \\
 & I_{n-1}(x, y, t_{n-1}) < I_n(x, y, t_n), \quad \phi(x, y, t_n) = (p + 1)\pi - \phi_0(x, y, t_n).
 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

在实际计算中,考虑到散斑图前后的相关性,取每一点附近一到两个周期里的点来计算散斑强度平均值和振幅,这样计算出来的相位值接近实际值。

### 3 实 验

实验装置如图1所示,是一典型的测量离面位

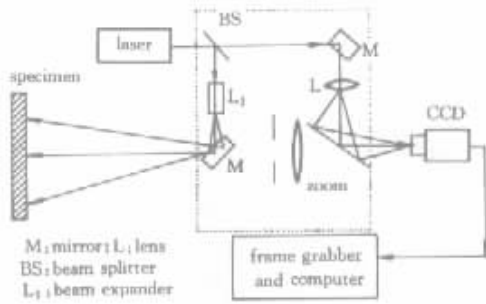


Fig.1 Schematic of the deformation measurement system for temporal speckle pattern interferometry

移的电子散斑干涉系统。物光与光轴夹角近似为  $0^\circ$ ,激光波长为  $0.633 \mu\text{m}$ 。利用该装置,完成了容器漏气引起的离面位移和汽车车灯配光镜表面热变形的全场测量。

#### 3.1 容器离面位移测量

实验中所采用容器为圆柱形腔体,被测的变形表面为周边固定受均匀内压的圆形板壳。该板壳为铝合金材料,半径为  $50 \text{ mm}$ ,厚  $2 \text{ mm}$ 。内部充气后,容器开始缓慢漏气,则圆板表面将会产生一个连续的离面位移。记录漏气过程中的一系列时间序列散斑图,并储存在计算机中。在实验中为了和检测结果进行比较,利用一个精度为  $0.2 \mu\text{m}$ 的位移传感器来测量板壳表面给定点的位移。

图 2(a)为计算出的全场离面位移值;图 2(b)为经过滤波处理后,清除了散斑噪声的全场位移值。图 2(c)与图 2(d)分别给出了离面位移的三维分布及其所对应的等高线图。

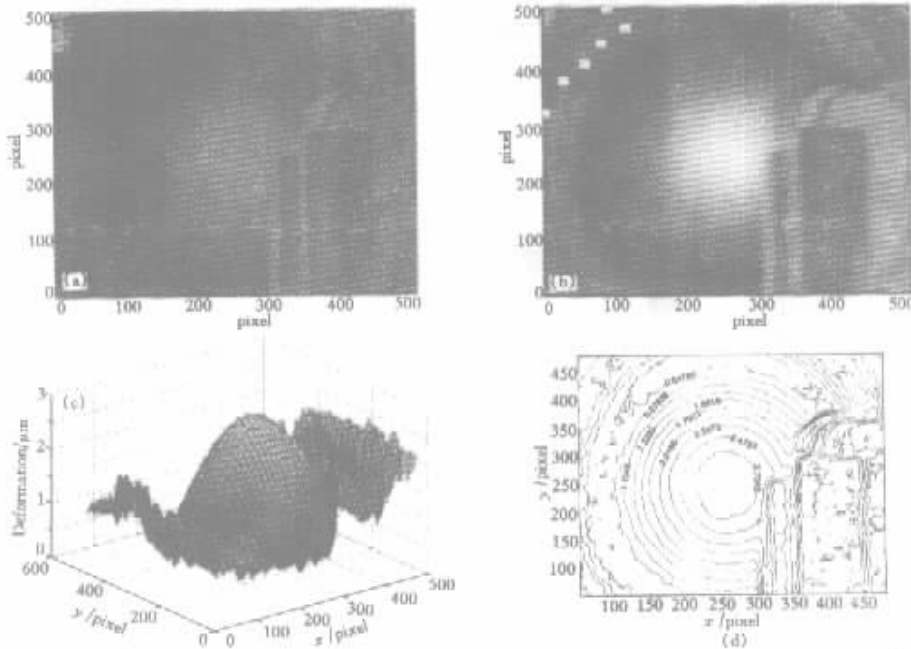


Fig.2 Out-of-plane deformation of a circular plate evaluated by temporal speckle pattern interferometry. (a) Out-of-plane deformation caused by gas escaping;(b) Filtered deformation by removing the speckle noise;(c)(d) 3-D plot of the deformation and its contour map. The noise areas in(c) and(d) are masked

图 3 为理论计算与实际结果的比较。其中坐标位置为通过圆板中心的一条直径。可以看出,除边界区域外,二者吻合得很好。

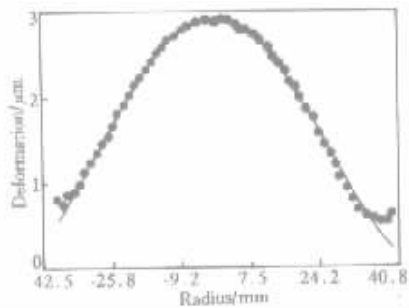


Fig. 3 The slice deformations along the center line of the circular plate by the theoretical calculation and the experimental measurement

### 3.2 汽车车灯配光镜表面热变形检测

将本文方法应用于车灯配光镜镜面的热变形检测。由于车灯配光镜在工作时,会受到光源加热,从

而产生热变形。当这种变形达到一定程度时,重者会引起车灯配光镜出现裂纹而损坏,轻者则导致灯箱的真空环境受到破坏,使水汽、杂物等进入灯箱。

实验中对车灯配光镜在热变形过程中的离面位移进行了测量。其中车灯配光镜表面为三角形壳体,材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),长宽限度分别为  $120\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 。

实验开始时,先用光源对其表面加热,然后在其冷却变形过程中每隔  $40\text{ ms}$  摄取一幅散斑图。图 4(a)给出了本文方法直接解调出的车灯配光镜热变形的全场位移分布;图 4(b)给出了该图在散斑噪声被滤除后的结果。图 4(c)和图 4(d)分别给出了对应于图 4(b)的三维热变形图及对应的等高线图。由测量结果可以看到,用本文方法可以直接测量到大于  $5.8\text{ }\mu\text{m}$  的变形,这是用常规的基于变形前后两个状态的电子散斑干涉或散斑干涉方法所无法达到的测量范围。

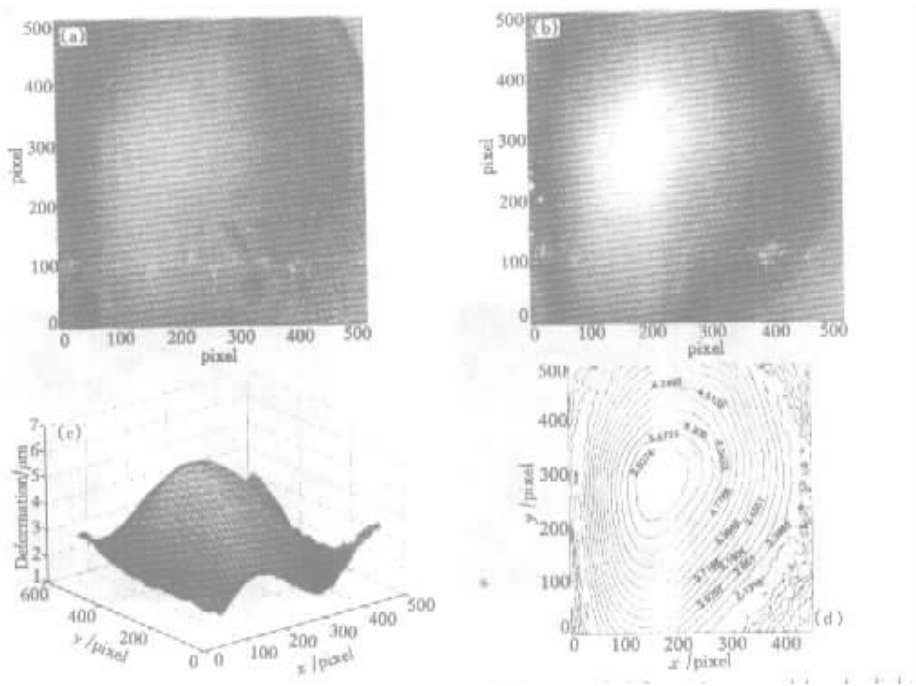


Fig. 4 Thermal deformation measurement of a lens of a car headlight. (a) Thermal deformation caused by the light source; (b) Filtered map of the deformation of (a); (c) and (d) are a 3-D plot of the deformation and its contour plot, respectively. The noise areas in (c) and (d) are masked

## 4 讨 论

如前所述,时间域去包裹将二维空间域相位去包裹转变成一维时间域相位去包裹。由于在时间域中物体表面的几何形状等均不发生变化,因而在时间域相位去包裹中不受这些因素的影响。当然,实

际测量中由于随机噪声的存在,可能得不到理想的余弦曲线,噪声在去包裹计算中会导致伪周期的存在,使得去包裹后的相位图产生跳跃而产生误差。解决这种问题的途径有两种:一是在相位去包裹之前,在时间轴上将散斑强度图进行滤波,利用平滑后的散斑强度值作为判断标准,进行去包裹运算;二是在算法中加入判断修正,根据噪声水平先给出一阈

值,若算出的该点的相位与上一点的差值超出了阈值,则令此点的相位等于上一点的相位,并在修正值上加上这两点的相位差,对于以后的所有的点都要减去这个修正值,以保证以后计算所得到的相位值保持连续。为得到比较满意的结果,本文将两种方法结合使用,在噪声比较小处取比较小的滤波窗,噪声比较大处取较大的滤波窗。

**结论** 本文通过应用散斑干涉计量中时间序列散斑场,完成了原理相位的计算,并在时间域中提出了相位函数的去包裹算法。该方法不仅兼有诸如相移电子散斑干涉术以及载波电子散斑干涉等方法的一些优点,还可以弥补这些方法的不足之处,如可以对时变场和大变形场进行有效的分析,并能得到同相移电子散斑干涉术及载波电子散斑干涉同样的精度,而无需相移或载波装置。该方法基于对实际序列变形场的分析,可以对时变场进行跟踪测量,尤其是能对大变形场进行测量,这对解决实际工程测量中的种种问题,降低检测设备的复杂性,适应较恶劣环境等具有重要的理论意义和工程价值。

### 参 考 文 献

- [1] Erf R K. *Speckle Metrology*. New York: Academic Press, 1978  
 [2] Sirohi R S, editor. *Speckle Metrology*. New York: Marcel

- Decker, 1993  
 [3] Greivenkamp J E. Generalized data reduction for heterodyne interferometry. *Opt. Engng.*, 1984, **23**(4): 350~352  
 [4] Stetson K A, Brohinsky W R. Electro-optic holography and its application to hologram interferometry. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(21) 3631~3637  
 [5] Saldner H O, Molin N E, Stetson K A. Fourier-transform evaluation of phase data in spatially phase-biased TV holograms. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(2) 332~336  
 [6] Pedrini G, Tiziani H J, Zou Y. Digital double pulse-TV-holography. *Opt. Lasers Engng.*, 1997, **26**(2~3):199~219  
 [7] Joenathan C, Franze B, Haible P *et al.*. Speckle interferometry with temporal phase evaluation for measuring large-object deformation. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(13) 2608~2614  
 [8] Li Xide, Yang Yizhang, Tao Gang. Deformation analysis with temporal speckle pattern interferometry. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(2) 310~317  
 [9] Reid G T. Automatic fringe pattern analysis: A review. *Opt. Lasers Engng.*, 1986, **7**(1) 37~68  
 [10] Gniiglia D C, Mastin G A, Romero L A. Cellular-automata method for phase unwrapping. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1987, **4**(1) 267~280  
 [11] Huntlay J M. Noise-immune phase unwrapping algorithm. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(16) 3268~3270  
 [12] Huntley J M, Saldner H. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(17) 3047~3052

## Phase Map Retrieve with Temporal Speckle Pattern Interferometry

Tao Gang Li Xide

(*Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084*)

(Received 29 June 2000; revised 28 September 2000)

**Abstract:** When the speckle interferometry or the electronic speckle pattern interferometry (ESPI) is applied to measure the continuous movement or the deformation of an object, the temporal speckle patterns can be recorded. By analyzing these time-sequence speckle patterns, the continual deformation of the tested object is obtained. A new method is proposed for measuring the object deformation based on analysis the fluctuation of time-sequence speckle patterns. Two experiments have been conducted to demonstrate the performance of the method.

**Key words:** speckle pattern interferometry; electronic speckle pattern interferometry; phase measurement; temporal phase unwrapping