

# 基于主元分析的随机相移散斑图分析算法

侯园园<sup>1,2</sup> 徐建程<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>浙江省光信息检测与显示技术研究重点实验室, 浙江 金华 321004

<sup>2</sup>浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004

**摘要** 剪切散斑相移干涉术需要提取物体加载后的动态相位变化,因此提出一种基于主元分析的随机相移散斑图分析算法。该算法采用相关算法从随机相移散斑图中获得随机相移条纹图,然后利用主元分析算法(PCA)从一组随机相移条纹图中提取动态相位分布。实验结果表明,相关算法处理散斑图所得的随机相移条纹图具有较高信噪比,PCA 提取的相位具有较高的精度和效率。该算法无需迭代计算,对随机相移条纹图的空间载波频率没有严格的要求,适合动态剪切散斑干涉测量。

**关键词** 测量; 剪切散斑相移干涉术; 条纹分析; 主元分析; 相关算法; 散斑图

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1204002

## Random Phase-Shifting Speckle Patterns Analysis Algorithm Based on Principle Component Analysis

Hou Yuanyuan<sup>1,2</sup> Xu Jiancheng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optical Information Detecting and Display Technology of Zhejiang Province, Jinhua, Zhejiang 321004, China

<sup>2</sup>Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

**Abstract** Phase-shifting shearography interferometry needs to extract dynamic phase of the measured object after loading, so the random phase-shifting speckle patterns analysis algorithm based on principle component analysis (PCA) is proposed. By using the correlation method, the fringe patterns with random phase shifts are obtained from the speckle patterns with random phase shifts. Then the dynamic phase distributions are extracted from one set of random phase-shifting fringe patterns by PCA. Experimental results show that the obtained fringe patterns have high signal-to-noise ratio, and the extracted phases are accurate and efficient. The proposed method is non-iterative and has no strict requirement for the spatial-carrier frequency of fringe patterns, so it is suitable for dynamic shearing speckle interferometry.

**Key words** measurement; phase-shifting shearography interferometry; fringe analysis; principle component analysis; correlation method; speckle pattern

**OCIS codes** 120.3180; 120.5050; 260.3160

## 1 引言

剪切散斑干涉测量术具有可直接测量位移空间导数、分辨率高、全场测量、非接触式及抗干扰能力强等优点,广泛应用于应变测量、振动分析、无损检测等领域<sup>[1]</sup>。其结果一般是以散斑条纹图的相位来表示,根据相位信息可以间接获得被测物理量,而被测物理量在加载过程中处于动态变化,因此需要从随机散斑条纹图中获得动态相位信息。常用的傅里叶变换法<sup>[2-3]</sup>可从单帧条纹图中提取相位分布,但该算法要求条纹图具有

收稿日期: 2016-08-19; 收到修改稿日期: 2016-09-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61205163)、欧盟玛丽居里 IIF 项目(301807)

作者简介: 侯园园(1992—),女,硕士研究生,主要从事干涉检测方面的研究。E-mail: hou815196522@126.com

导师简介: 徐建程(1981—),男,博士,副教授,主要从事信息光学和精密光学检测方面的研究。

E-mail: xujiancheng@zjnu.cn(通信联系人)

较高的空间载波频率,若条纹图中有闭合条纹,则会引入较大的误差。相移技术是目前普遍采用的相位提取技术<sup>[4]</sup>。该技术从多帧相移条纹图中提取相位信息,精度高,但对环境扰动比较敏感。剪切散斑相移干涉术主要应用于在线检测,而且需要通过加载使被测物体发生形变,因此会不可避免地引入较大的随机相移误差,从而导致相位测量误差。针对随机相移误差,Wang等<sup>[5]</sup>提出了基于最小二乘迭代的随机相移算法,可从随机相移条纹图中提取相位信息,且精度高,但是该算法计算量较大,不适合剪切散斑干涉术所要求的动态相位提取。本文提出一种基于主元分析(PCA)<sup>[6-10]</sup>的随机相移散斑图分析算法,该算法利用相关算法从随机相移散斑图中得到随机相移条纹图,然后利用主元分析算法从一组随机相移条纹图中快速提取相位信息。该算法无需迭代计算,是一种高效率、高精度的方法,适合动态剪切散斑干涉测量。

## 2 基本原理

### 2.1 采用相关算法获得随机相移条纹图

剪切散斑相移干涉测量过程中采集一系列随机相移散斑图,假设  $i_n(x, y)$  为加载前第  $n$  帧散斑图光强分布,  $i_t(x, y)$  为加载后  $t$  时刻的散斑图光强分布,表达式分别为

$$i_n = a + b \cos(\phi + \delta_n), \quad (1)$$

$$i_t = a + b \cos(\phi + \varphi_t), \quad (2)$$

式中  $a$  和  $b$  分别为背景光强及散斑图调制度分布,  $\phi$  为两束剪切光的光程差,且为随机分布,  $\delta_n$  表示第  $n$  帧散斑图对应的相移量,  $\varphi_t$  为被测物加载形变引入的相位变化。计算  $i_n$  与  $i_t$  的相关系数,可得到反映被测物形变信息的条纹图<sup>[11-12]</sup>,其相关系数表达式为

$$C_n = \frac{\langle (i_t - \langle i_t \rangle_{p \times q}) (i_n - \langle i_n \rangle_{p \times q}) \rangle_{p \times q}}{[\langle (i_t - \langle i_t \rangle_{p \times q})^2 \rangle_{p \times q}]^{0.5} [\langle (i_n - \langle i_n \rangle_{p \times q})^2 \rangle_{p \times q}]^{0.5}}, \quad (3)$$

式中在  $p \times q$  个像素范围内,  $\phi$  为  $[0, 2\pi]$  的随机分布;  $b$  和  $\varphi_t$  是缓变信号,可认为是常数,由散斑统计原理得  $\langle \cos(\phi) \rangle_{p \times q} \cong \langle \cos(\phi + \varphi_t) \rangle_{p \times q} \cong 0$ , 基于这个假设,相关系数可化简为

$$C_n \cong \frac{1 + \cos(\varphi_t + \delta_n)}{2}. \quad (4)$$

当  $\varphi_t + \delta_n = 2k\pi$  时,加载前后散斑图完全相关即相关系数等于1。相反地,如果  $\varphi_t + \delta_n = (2k + 1)\pi$  时,加载前后的散斑图差异最大,相关系数等于0<sup>[1]</sup>。

### 2.2 基于主元分析的随机相移条纹分析

由于剪切散斑干涉测量得到的随机相移条纹图中具有明显的散斑噪声,因此,将(4)式改写为<sup>[13]</sup>

$$I_n = C_n = A + B \cos(\varphi_t + \delta_n) + \eta_n, \quad (5)$$

式中  $\eta_n = \eta_n(x, y)$  为具有零均值高斯分布的噪声项。对(5)式展开得

$$I_n = A + \alpha_{1n} I_c + \alpha_{2n} I_s + \eta_n, \quad (6)$$

式中  $\alpha_{1n} = \cos(\delta_n)$ ,  $\alpha_{2n} = -\sin(\delta_n)$ ,  $I_c = B \cos(\varphi_t)$ ,  $I_s = B \sin(\varphi_t)$ 。

假设随机相移条纹图的背景光强  $u_I = \sum_{n=1}^N \frac{I_n}{N} \approx A$ , 则不含背景光强的  $\bar{I}_n$  可表示为

$$\bar{I}_n = [I_n - u_I] = \alpha_{1n} I_c + \alpha_{2n} I_s + \eta_n. \quad (7)$$

假设  $N_x$  和  $N_y$  是条纹图在  $x$  和  $y$  方向的像素个数,通过像素位置重组,将二维条纹图重组成一列,其长度为  $N_x \times N_y$ ,那么  $N$  帧不含背景光强的条纹图生成的矩阵表示为

$$\bar{\mathbf{I}} = \mathbf{Q}\mathbf{A} + \mathbf{N}, \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{A} = [\alpha_1, \alpha_2]^T, \quad (9)$$

$$\mathbf{Q} = [\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2], \quad (10)$$

式中  $\mathbf{A}$  矩阵尺寸为  $2 \times N$ ,  $\alpha_{1n}$  及  $\alpha_{2n}$  分别对应于  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  的第  $n$  列。 $\mathbf{Q}$  矩阵尺寸为  $N_x N_y \times 2$ ,  $\mathbf{q}_1$  及  $\mathbf{q}_2$  长度均为  $N_x \times N_y$ , 分别由  $I_c$ 、 $I_s$  平铺组成。 $\mathbf{N}$  为噪声矩阵,其尺寸为  $N_x N_y \times N$ , 第  $n$  列对应于  $\eta_n(x, y)$ 。

根据主元分析原理得,  $\bar{I}$  的协方差矩阵  $C$  为

$$C = \mathbf{A}^T \mathbf{Q}^T \mathbf{Q} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{Q}^T \mathbf{N} + \mathbf{N}^T \mathbf{Q} \mathbf{A} + \mathbf{N}^T \mathbf{N}. \quad (11)$$

在 Frobenius 规范意义下, 相对于  $\mathbf{A}^T \mathbf{Q}^T \mathbf{Q} \mathbf{A}$  及  $\mathbf{N}^T \mathbf{N}$  矩阵而言,  $\mathbf{A}^T \mathbf{Q}^T \mathbf{N}$  及  $\mathbf{N}^T \mathbf{Q} \mathbf{A}$  矩阵可忽略不计。故 (11) 式可化简为

$$C \cong \mathbf{A}^T \mathbf{Q}^T \mathbf{Q} \mathbf{A} + \mathbf{N}^T \mathbf{N}. \quad (12)$$

$\mathbf{A} \mathbf{A}^T$  表示为

$$\mathbf{A} \mathbf{A}^T = \begin{pmatrix} \|\mathbf{a}_1\|^2 & \langle \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2 \rangle \\ \langle \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2 \rangle & \|\mathbf{a}_2\|^2 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

式中  $\|\mathbf{a}_1\|^2 = \sum_{n=1}^N \cos^2(\delta_n)$ ,  $\|\mathbf{a}_2\|^2 = \sum_{n=1}^N \sin^2(\delta_n)$ ,  $\langle \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2 \rangle = \sum_{n=1}^N \cos(\delta_n) \sin(\delta_n)$ 。由于  $\mathbf{A} \mathbf{A}^T$  是一个实对称矩阵, 故可进行对角化。  $\mathbf{A} \mathbf{A}^T = \mathbf{P}_A^T \mathbf{D}_A \mathbf{P}_A$ , 其中  $\mathbf{D}_A$  为对角矩阵,  $\mathbf{P}_A$  为正交矩阵。再对  $\mathbf{A}$  进行变换得到新矩阵  $\hat{\mathbf{A}}$ , 该矩阵满足  $\hat{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{A}}^T = \mathbf{I}$ , 表达式为

$$\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{D}_A^{-1/2} \mathbf{P}_A \mathbf{A}, \quad (14)$$

其中

$$\mathbf{D}_A = \begin{pmatrix} \lambda_+ & 0 \\ 0 & \lambda_- \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$$\mathbf{P}_A = \begin{bmatrix} \frac{(\lambda_+ - \|\mathbf{a}_1\|^2)}{\sqrt{\langle \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2 \rangle^2 + (\lambda_+ - \|\mathbf{a}_1\|^2)^2}} & \frac{\langle \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2 \rangle}{\sqrt{\langle \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2 \rangle^2 + (\lambda_+ - \|\mathbf{a}_1\|^2)^2}} \\ \frac{\langle \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2 \rangle}{\sqrt{\langle \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2 \rangle^2 + (\lambda_+ - \|\mathbf{a}_2\|^2)^2}} & \frac{(\lambda_- - \|\mathbf{a}_2\|^2)}{\sqrt{\langle \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2 \rangle^2 + (\lambda_- - \|\mathbf{a}_2\|^2)^2}} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$\lambda_{\pm} = \frac{(\|\mathbf{a}_1\|^2 + \|\mathbf{a}_2\|^2) \pm \sqrt{(\|\mathbf{a}_1\|^2 - \|\mathbf{a}_2\|^2)^2 + 4 \langle \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2 \rangle^2}}{2}, \quad (17)$$

相应地,  $\mathbf{Q}^T \mathbf{Q}$  表示为

$$\mathbf{Q}^T \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \|\mathbf{q}_1\|^2 & \langle \mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2 \rangle \\ \langle \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_1 \rangle & \|\mathbf{q}_2\|^2 \end{pmatrix} = \sum_{x,y} \begin{bmatrix} \cos^2(\varphi_t) & \cos(\varphi_t) \sin(\varphi_t) \\ \sin(\varphi_t) \cos(\varphi_t) & \sin^2(\varphi_t) \end{bmatrix}. \quad (18)$$

假定随机相移条纹图上的条纹根数大于一根, 则  $\mathbf{Q}^T \mathbf{Q}$  可近似表达为

$$\mathbf{Q}^T \mathbf{Q} = \mathbf{D}_Q \cong \kappa \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (19)$$

式中  $\kappa = \sum_{x,y} \cos^2(\varphi_t) \cong \sum_{x,y} \sin^2(\varphi_t)$ 。根据 (12), (14), (19) 式得

$$C \cong \hat{\mathbf{A}}^T \mathbf{D}_A^{1/2} \mathbf{P}_A \mathbf{D}_Q \mathbf{P}_A^T \mathbf{D}_A^{1/2} \hat{\mathbf{A}} + \mathbf{N}^T \mathbf{N}, \quad (20)$$

式中  $\mathbf{D}_Q$  近似为对角矩阵, 其对角上的元素也近似相等, 故可与任意矩阵交换位置。  $\mathbf{P}_A$  为正交矩阵, 满足  $\mathbf{P}_A^T \mathbf{P}_A = \mathbf{P}_A \mathbf{P}_A^T = \mathbf{I}$ , 故 (20) 式可化简为

$$C \cong \hat{\mathbf{A}}^T (\mathbf{D}_A \mathbf{D}_Q + \mathbf{D}_N) \hat{\mathbf{A}}, \quad (21)$$

根据 (12), (14) 式, 可将 (8) 式表示为

$$\bar{\mathbf{I}} \cong \mathbf{Q} (\mathbf{P}_A^T \mathbf{D}_A^{1/2} \hat{\mathbf{A}}) + \mathbf{N} = (\mathbf{Q} \mathbf{P}_A^T) \mathbf{D}_A^{1/2} \hat{\mathbf{A}} + \mathbf{N}. \quad (22)$$

PCA 通过矩阵转换将一组不相关的新变量来代替一组相关的旧变量。 PCA<sup>[14-15]</sup> 第一步就是要获得协方差矩阵  $C = \bar{\mathbf{I}}^T \bar{\mathbf{I}}$ , 其对角化矩阵表示为

$$C = \mathbf{A}^T \mathbf{D} \mathbf{A}, \quad (23)$$

PCA 中  $\varphi_t$  则表示为

$$\varphi_t = \arctan(I_s/I_c) = \pm \arctan(y_2/y_1). \quad (24)$$

定义矩阵变换所得的一组不相关新变量为主元, 其表达式为

$$\mathbf{Y} = \bar{\mathbf{I}} \mathbf{A}^T. \quad (25)$$

观察(21)、(23)式,(21)式中 $\hat{\mathbf{A}}^T$ 及 $(\mathbf{D}_A \mathbf{D}_Q + \mathbf{D}_N)$ 分别对应于(23)式中的 $\mathbf{A}^T$ 及 $\mathbf{D}$ ,故其第一主元 $y_1$ 及 $y_2$ 表示为

$$y_i = \bar{\mathbf{I}} \hat{\mathbf{A}}^T = [(\mathbf{Q} \mathbf{P}_A^T) \mathbf{D}_A^{1/2} + \mathbf{N} \hat{\mathbf{A}}^T]_i, \quad (26)$$

$\hat{\mathbf{Q}}$  定义为

$$\hat{\mathbf{Q}} = \mathbf{Q} \mathbf{P}_A^T, \quad (27)$$

式中 $\mathbf{P}_A^T$ 为 $2 \times 2$ 的正交矩阵,其中 $\theta$ 为调制相位 $\varphi_i$ 的未知相移, $\mathbf{P}_A^T = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$ 。转化后(26)式表示为

$$y_i = \bar{\mathbf{I}} \hat{\mathbf{A}}^T = (\hat{\mathbf{Q}} \mathbf{D}_A^{1/2} + \mathbf{N} \hat{\mathbf{A}}^T)_i. \quad (28)$$

$q_1 = b \cos(\varphi_i)$  及  $q_2 = b \sin(\varphi_i)$  为  $\mathbf{Q}$  的第一列及第二列。那么定义  $\hat{q}_1 = q_1 \cos \theta + q_2 \sin \theta = b \cos(\varphi_i + \theta)$ ,  $\hat{q}_2 = q_1 \cos \theta - q_2 \sin \theta = b \sin(\varphi_i + \theta)$ 。不失一般性,假设 $\theta = 0$ , $\mathbf{P}_A^T$ 为 $2 \times 2$ 的单位矩阵。假设噪声项远小于被测信号,则(24)式表示为

$$\varphi_i = \arctan \left[ \frac{q_1 \lambda_+^{1/2} + (\mathbf{N} \hat{\mathbf{A}}^T)_1}{q_2 \lambda_-^{1/2} + (\mathbf{N} \hat{\mathbf{A}}^T)_2} \right] \cong \arctan \left( \frac{q_1 \lambda_+^{1/2}}{q_2 \lambda_-^{1/2}} \right). \quad (29)$$

### 2.3 误差分析

由(29)式观察可得,若 $\alpha = \lambda_+^{1/2} / \lambda_-^{1/2} \cong 1$ ,则采用PCA可得到精确的相位分布,这为量化误差提供了方法。结合(21)、(23)式,依据 $\mathbf{D} = \mathbf{D}_A \mathbf{D}_Q + \mathbf{D}_N$ ,通过PCA计算可得特征值。考虑到 $\mathbf{D}_N$ 可近似为 $N \times N$ 的对角矩阵,其对角元素等于 $\sigma^2$ ,故特征值表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{D}_{11} = \kappa \lambda_+ + \sigma^2 \\ \mathbf{D}_{22} = \kappa \lambda_- + \sigma^2 \\ \mathbf{D}_{ii} = \sigma^2, \quad i \in [3, n] \end{cases}. \quad (30)$$

通过(30)式可定义相位误差指标 $\gamma$ 。其中 $\gamma_{ps}$ 为相移值不能在 $[0, 2\pi]$ 范围内完全随机分布造成的相位误差,而 $\gamma_n$ 为干涉图存在噪声导致相位提取过程中产生的误差。相位误差指标 $\gamma$ 表示为

$$\gamma = \sqrt{\gamma_{ps}^2 + \gamma_n^2} = \sqrt{\left[ \frac{(\mathbf{D}_{11} / \mathbf{D}_{22}) - 1}{10} \right]^2 + \left( \frac{\mathbf{D}_{33}}{\mathbf{D}_{11} + \mathbf{D}_{22} - 2\mathbf{D}_{33}} \right)^2}. \quad (31)$$

为了验证相位提取的精确性,进行一些数值模拟。假设条纹图的参数 $A = B = 125 \exp[-0.1(x^2 + y^2)]$ ,  $\varphi_i = 14(x^2 + y^2)$ ,其中 $-1 \leq x \leq 1, -1 \leq y \leq 1$ 。相移值取 $\delta_n = 2\pi n / N + (2\pi / N) \xi_n$ ,其中 $N = 25, n \in [1, 25]$ , $\xi_n$ 表示尺寸为 $1 \times 25$ 的矩阵,为 $(-1, 1)$ 之间的随机值。用(5)式模拟生成大小为 $600 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$ 的25帧相移条纹图,在每帧条纹图中增加信噪比为20%的高斯白噪声,图1(a)为其中一帧条纹图。从25帧条纹图中选取前 $K$ 帧干涉图,其中 $10 \leq K \leq 25$ 。利用本文方法从 $K$ 帧条纹图中提取相位分布,通过与参考相位进行比较,得到PCA的相位提取误差,并计算其均方根(RMS)值。同时计算误差指标 $\gamma$ ,其误差指标 $\gamma$ 与相位误差RMS值的关系分别如图1(b)所示。由图1(b)可知,误差指标 $\gamma$ 随

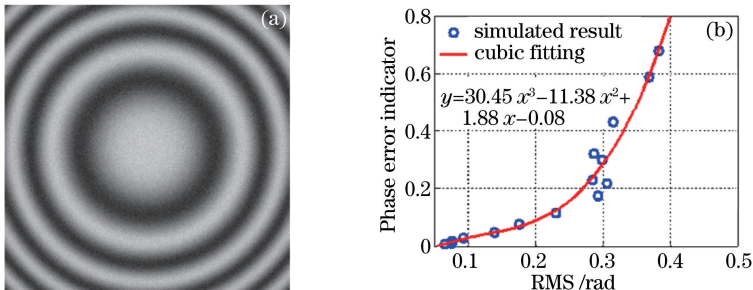


图1 PCA所提取相位的误差分析。(a)条纹图;(b)RMS与误差指标的关系

Fig. 1 Error analysis of extracted phase by PCA. (a) Fringe pattern; (b) relationship between the RMS and error indicator

着相位误差 RMS 值的增大而增大。若对图 1(b)进行三阶多项式拟合, RMS 与误差指标  $\gamma$  的拟合表达式为  $y=30.45x^3-11.38x^2+1.88x-0.08$ 。一般情况下,当误差指标  $\gamma < 0.1$  时,可定义提取的相位分布是精确的。

### 3 实验验证

图 2(a)所示为迈克耳孙结构的剪切散斑相移干涉系统装置,图 2(b)为其系统示意图。实验中被测物为焊接后 Inconel 718 合金,实验采用激光器(波长为 532 nm)扩束照射被测板表面,在被测物加载形变前,调整迈克耳孙装置中倾斜镜引入恰当的剪切量,利用未校准的压电陶瓷引入相移量。利用高速 CCD 采集 4 帧随机相移的散斑图,分别为  $i_1, i_2, i_3, i_4$ ,如图 3(a)所示。对被测板背面进行 1 min 的加热后,用高速 CCD 采集 1000 帧随机相移散斑图。图 3(b)为加载后  $t$  时刻的散斑图  $i_t$ 。

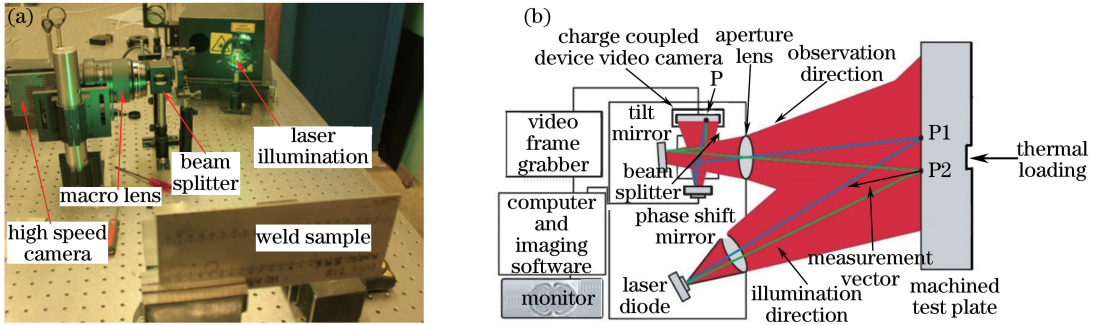


图 2 实验测试装置

Fig. 2 Experimental test equipment

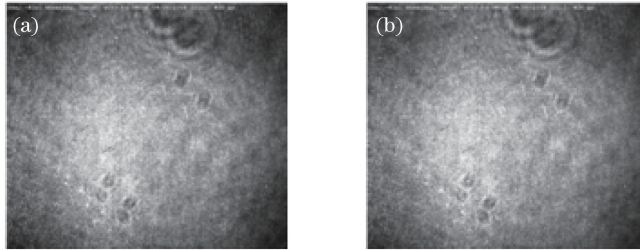


图 3 剪切散斑相移干涉测量术获得的随机散斑图。(a)加载前的散斑图;(b)加载后的散斑图

Fig. 3 Random speckle patterns in phase-shifting shearography. (a)Speckle pattern before loading;

(b) speckle pattern after loading

利用相关法分别计算加载后的散斑图  $i_t$  和加载前的散斑图  $i_1, i_2, i_3, i_4$ ,得到 4 帧随机相移条纹图(要求加载前后的散斑图有较好的相关性,PCA 分析相关法所得条纹图可实现动态相位提取),其结果如图 4 所示。图 4 中条纹图的信噪比为 51.8,若用常规的直接相减法,得到条纹度的信噪比为 21.6,这表明相关算法得到的条纹图具有更高的信噪比。分别采用 PCA 算法和基于最小二乘的迭代算法(5 次迭代)从图 4 中提取相位,其结果分别如图 5(a)和(b)所示。实验结果表明,两种方法求得的相位分布结果基本一致。图中圆圈区域有明显的相位畸变,这表明该 Inconel 718 合金在该区域内有明显的缺陷。从实验结果也可以看出,PCA 算法的精度接近于 5 次迭代算法的精度,PCA 提取的相位误差 RMS 值小于 0.2 及其误差指标  $\gamma$  小于 0.07。但是同样的工作环境下,前者的计算时间是 0.5073 s,而后者的计算时间为 152.7 s,这表明 PCA 具有较高的精度和计算效率。如果将 1000 帧随机相移散斑图按上述同样的方法,则可得到 1000 个相位图,从而得到动态相位分布,观察动态相位分布更容易得到缺陷信息。

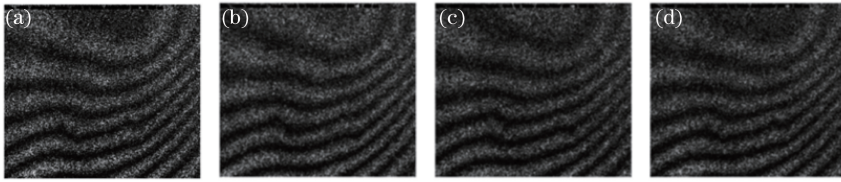


图 4 相关计算法获得的随机相移条纹图

Fig. 4 Random phase-shifting fringe patterns generated by correlation method

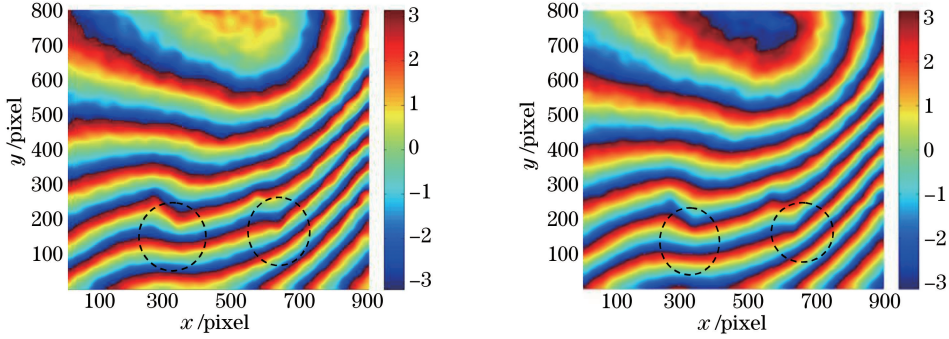


图 5 (a)PCA 提取条纹图中的相位分布;(b)迭代算法提取条纹图中的相位分布

Fig. 5 (a) Phase distribution of fringe pattern extracted by PCA; (b) phase distribution of fringe pattern extracted by iterative algorithm

## 4 结 论

Inconel 718 合金加载形变过程中具有高度瞬时性,为了提取动态相位分布,提出一种基于主元分析的随机相移散斑图分析算法。实验测试结果表明,采用相关计算法处理散斑图所得随机相移条纹图的信噪比高于直接相减法。PCA 分析随机相移条纹图的精度接近于 5 次迭代算法的精度,但是计算时间从迭代算法的 152.7 s 缩短到 0.5073 s。所以本文算法是一种高效率和高精度的算法,可实现动态剪切散斑干涉测量。

## 参 考 文 献

- Hong Youren, He Houpei, He Xiaoyuan. Shearography: An optical measurement technique and application[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(6): 667-688.  
洪友仁, 何浩培, 何小元. 剪切散斑: 一种光学测量技术及其应用[J]. 实验力学, 2006, 21(6): 667-688.
- Su X, Chen W. Fourier transform profilometry: A review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 35(5): 263-284.
- Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. Journal of the Optical Society America, 1982, 72(1): 156-160.
- Tay C J, Quan C, Chen L, *et al.* Phase extraction from electronic speckle patterns by statistical analysis[J]. Optics Communications, 2004, 236(4-6): 259-269.
- Wang Z, Han B. Advanced iterative algorithm for phase extraction of randomly phase-shifted interferograms[J]. Optics Letters, 2004, 29(14): 1671-1673.
- Vargas J, Quiroga J A, Belenguer T. Phase-shifting interferometry based on principal component analysis[J]. Optics Letters, 2011, 36(8): 1326-1328.
- Xu J, Jin W, Chai L, *et al.* Phase extraction from randomly phase-shifted interferograms by combining principal component analysis and least squares method[J]. Optics Express, 2011, 19(21): 20483-20492.
- Xu Jiancheng, Sun Lili. Random phase-shifting algorithm based on principle component analysis[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(6): 1319-1323.  
徐建程, 孙莉莉. 基于主元分析的随机相移算法[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1319-1323.
- Xu Jiancheng, Hou Yuanyuan, Chen Zhao. Phase-shifting calibrating method based on principle component analysis in interferometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(1): 0112001.  
徐建程, 侯园园, 陈 翌. 基于主元分析的干涉仪相移器校准方法[J]. 光子学报, 2016, 45(1): 0112001.

- 10 Chen Zhao, Hou Yuanyuan, Xu Jiancheng. Sign determination and error analysis of phase extraction based on principal component analysis[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(1): 0108002.  
陈 墨, 侯园园, 徐建程. 主元分析相位提取算法的符号确定及误差分析[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0108002.
- 11 Yu Q F, Fu S H, Liu X L, *et al.* Single-phase-step method with contoured correlation fringe patterns for ESPI[J]. Optics Express, 2004, 12(20): 4980-4985.
- 12 Schmitt D R, Hunt R W. Optimization of fringe pattern calculation with direct correlations in speckle interferometry[J]. Applied Optics, 1997, 36(34): 8848-8857.
- 13 Vargas J, Carazo J M, Sorzano C O S. Error analysis of the principal component analysis demodulation algorithm[J]. Applied Physics B, 2014, 115(3): 355-364.
- 14 Vargas J, Quiroga J A, Belenguer T. Analysis of the principal component algorithm in phase-shifting interferometry[J]. Optics Letters, 2011, 36(12): 2215-2217.
- 15 Vargas J, Sorzano C O S. Quadrature component analysis for interferometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(5): 637-641.