

## 圆偏场瞬时光弹相移法的波长失配误差及补偿

万新军\*, 高阳, 韦晓孝, 王臻磊, 汪嘉欣

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

**摘要** 利用偏振相机实现瞬时相移获取光弹条纹的方法缺乏定量误差及补偿分析。圆偏场瞬时光弹相移法的误差主要是 1/4 波片与光源波长不匹配造成的。首先, 基于 Stokes 矢量和 Mueller 矩阵, 从理论上推导了光弹特性的误差及补偿方程, 讨论了样品应力方向角和相位延迟量的误差分布。结果表明: 等差线条纹误差正比于失配值; 等倾线条纹误差是非线性的, 但正比于失配值的余弦, 反比于两个光强之差。然后, 分析了光源谱线宽度对补偿效果的影响, 结果显示谱宽的限制与波长成正比, 与失配误差成反比。最后, 结合对径受压圆盘的模拟和实验验证了误差分析及补偿方法的正确性, 并论述了等倾线应力方向分离的问题。

**关键词** 测量; 光弹; 相移法; 误差分析

中图分类号 TN209

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2112002

## Wavelength Mismatch Error and Compensation Analysis of Instantaneous Photoelastic Phase-Shifting Method in Circularly Polarized Field

Wan Xinjun\*, Gao Yang, Wei Xiaoxiao, Wang Zhenlei, Wang Jiixin

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

**Abstract** When a polarized camera is used to realize instantaneous phase-shifting and obtain photoelastic fringes, quantitative error and compensation analysis is often ignored. The error of the instantaneous photoelastic phase-shifting method in a circularly polarized field is primarily caused by a mismatch between the wavelength of the quarter-wave plate and the light source. Based on the Stokes vector and Mueller matrix, this paper theoretically derives the error and compensation equations of the photoelastic properties, and discusses the error distribution of the stress direction angle and phase retardation of samples. The results show that the isochromatic fringe error is directly proportional to the mismatch value. In addition, the isoclinic fringe error is nonlinear, but it is in direct proportion to the cosine of the mismatch value and inverse proportion to the difference between two light intensities. Furthermore, the paper analyzes the influence of the spectral width of the light source on the compensation effect, and finds that the spectral width is directly proportional to the wavelength and inversely proportional to the mismatch error. Finally, the correctness of the error analysis and compensation method is verified through the simulations and experiments of the diameter-stressed disk, and the isoclinic separation in the stress direction is discussed.

**Key words** measurement; photoelastic; phase-shifting method; error analysis

## 1 引言

光弹法作为一种可直观研究结构体全场应力分布的实验性光学测量手段, 在应力检测、岩土探测和生物力学等方面具有重大的优势<sup>[1-4]</sup>。近年来, 随着偏振相机制造技术的成熟, 光弹性应力分析的发展方向围绕着瞬时相移法<sup>[5]</sup>。利用偏振相机完成光弹性分析的基

本方式有线偏光场和圆偏光场<sup>[6-9]</sup>。这两种方式在原理与实现形式上具有一致性, 由于圆偏光场没有方向性, 故在实际使用中更具优势<sup>[10-11]</sup>。在圆偏场光弹相移法中需要用到 1/4 波片, 但通常 1/4 波片只在某一范围内的光源波长中才真正延迟了 1/4 个波长, 若超出此范围, 波片延迟量会超过或不及 1/4 波长<sup>[12-13]</sup>。圆偏光场中 1/4 波片与光源波长的失配误差会直接影响测

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2022-04-21; 录用日期: 2022-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(61505107)、上海市科技创新行动计划(19511104600)

通信作者: \*xinjun.wan@usst.edu.cn

量精度,决定了测量的光弹图像能否正确反映应力分布。当需要改用不同波长时,如利用多波长法相位展开时,失配误差将不可避免,故圆偏场瞬时光弹相移法的误差特性分析尤为重要。在误差特性分析的基础上还需找到合适的改进方法,以消除或减轻误差影响。消除误差的方式可分为两种:第一种是旋转合理的波片角度搭配出一种新光路,最终使误差项不存在于计算公式之中,为此已有多位学者提出了不同的办法<sup>[14-15]</sup>;第二种为补偿法,本文通过改变光弹性计算公式实现,即对含有误差项的等倾线、等差线计算公式进行进一步处理,加入补偿项以减少误差。第一种方法在不增加光路的基本结构下将不可避免地旋转波片,故无法实现瞬时光弹。虽然第二种方法往往都会面临补偿公式中包含真实相位差或方向角这一矛盾,但是圆偏光场下可避免和解决这一矛盾,从而可找到准确的补偿公式<sup>[16]</sup>。

为论述 1/4 波片对瞬时光弹法的影响,本文推导出含有误差项的应力测量表达式,绘制出误差关于样品应力方向角和相位延迟量的曲线图,结果表明圆偏光场获取的等差线图对误差和干扰有较高的容忍度,而等倾线变化较大。推导出相对误差计算公式后发现:等差线误差正比于失配值,误差在一定范围内为线性;等倾线误差是非线性的,但恰好正比于失配误差的余弦,反比于两个光强之差。考虑到光源输出的光波具有一定的光谱宽度,会影响补偿效果,故需要对光谱

宽度加以限制。本文通过分析发现谱宽限制与波长成正比,与失配值成反比,并绘制出了不同失配误差下谱宽限制与波长的关系图。

为验证所提误差补偿公式对等差线、等倾线测量精度的提升效果,本文利用弹性力学相关理论得出对径受压圆盘的全场应力分布,模拟出光弹图样进而计算得到相应的含有误差的等倾线、等差线分布,以此直观展示误差对测量结果的影响。最后,利用偏振相机实际采集了一块应力冻结圆盘的光强图像。结果表明,计算出的等倾线和等差线图与模拟结果相符,验证了误差和补偿分析的正确性。

## 2 基本原理

### 2.1 偏振相机

偏振相机利用像素偏振片阵列对光束的偏振状态进行像素化的空间调制,使得 4 个方向上的偏振信息可以被同时捕获<sup>[17-18]</sup>。偏振片阵列由 4 个线偏振片单元以  $2 \times 2$  周期排布的方式构成,从偏振片阵列中分别提取 4 个方向上的偏振信息可获取 4 幅偏振图。图 1 为偏振相机原理示意图,以  $0^\circ$  偏振方向为例,显示出偏振信息的获取过程。本文采用的偏振相机型号为 MER-502-79U3M POL,分辨率为  $2448 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ ,帧率为  $79 \text{ frame} \cdot \text{s}^{-1}$ ,传感器型号为 2/3" Sony IMX250MZR,像素尺寸为  $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$ 。

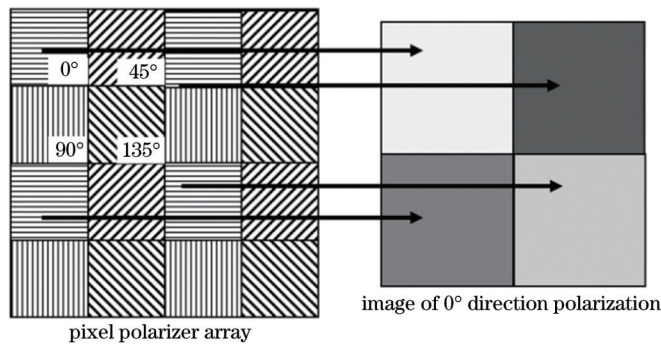


图 1 偏振相机原理图

Fig. 1 Schematic diagram of polarization camera

### 2.2 圆偏场瞬时光弹法原理

光路原理如图 2 所示,光源发出的自然光  $S_0$  经过一块透振方向为  $y$  轴的线偏光起偏器  $P_0$  到一快轴

方向与  $P_0$  透振方向成  $45^\circ$  角的 1/4 波片  $Q$  后形成圆偏振光,最后透过样品  $M$  到达偏振相机  $P_1$  获得光强信号。

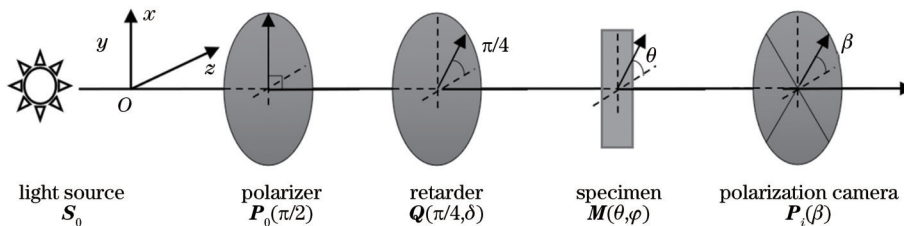


图 2 光路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of optical path

对整个光路运用斯托克斯矢量和 Mueller 矩阵表示法推导的过程如下。当入射光强为  $I_0$  时,  $S_0 = I_0[1000]^T$ , 起偏后得  $S_1 = I_0[1100]^T$ , 理想状态下产生的圆偏光场的矢量为

$$S_2 = QS_1 = I_0[1001]^T, \quad (1)$$

与  $x$  轴的夹角为  $\theta$ 、相位延迟量为  $\varphi$  的待测样品的 Mueller 矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\theta) + \sin^2(2\theta)\cos\varphi & (1 - \cos\varphi)\sin(2\theta)\cos(2\theta) & -\sin(2\theta)\sin\varphi \\ 0 & (1 - \cos\varphi)\sin(2\theta)\cos(2\theta) & \sin^2(2\theta) + \cos^2(2\theta)\cos\varphi & \cos(2\theta)\sin\varphi \\ 0 & \sin(2\theta)\sin\varphi & -\cos(2\theta)\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}, \quad (2)$$

检偏器(偏振相机)分为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$  4 个检偏方向, 其矩阵形式为

$$P_i = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\beta_i) & \sin(2\beta_i) & 0 \\ \cos(2\beta_i) & \cos^2(2\beta_i) & \sin(2\beta_i)\cos(2\beta_i) & 0 \\ \sin(2\beta_i) & \sin(2\beta_i)\cos(2\beta_i) & \sin^2(2\beta_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中:  $i = 1, 2, 3, 4$ ;  $\beta_i = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 。经过检偏器后, 出射光的斯托克斯矢量可表示为

$$I_i = P_i M Q P_0 S_0, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (4)$$

由斯托克斯矢量的定义可知, 出射光矢量的第一行式子即为偏振相机检测到的光强  $I_i$ 。由此可知, 圆偏光场应力的表达式为

$$\varphi = \arcsin \sqrt{\frac{(I_3 - I_1)^2 + (I_2 - I_4)^2}{(I_1 + I_3)(I_2 + I_4)}}, \quad (5)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{I_3 - I_1}{I_2 - I_4} \right). \quad (6)$$

### 3 误差与补偿分析

#### 3.1 光源波长与 1/4 波片的失配误差分析

当 1/4 波片与光源波长不匹配时, 相位延迟量为  $\delta$  的波片  $Q$  输出的光场可表示为

$$S'_2 = I_0[1 \quad \cos\delta \quad 0 \quad \sin\delta]^T, \quad (7)$$

将式(7)代入式(4)中可得到圆偏光场各偏振方向的光强表达式为

$$\begin{cases} I'_1 = \frac{I_0}{4} - \frac{I_0}{4} \left\{ \cos\delta [\cos^2(2\theta) + \sin^2(2\theta)\cos\varphi] - \sin\delta \sin\varphi \sin(2\theta) \right\} \\ I'_2 = \frac{I_0}{4} + \frac{I_0}{4} [\cos\delta (1 - \cos\varphi) \sin(2\theta)\cos(2\theta) + \sin\delta \sin\varphi \cos(2\theta)] \\ I'_3 = \frac{I_0}{4} + \frac{I_0}{4} \left\{ -\cos\delta [\cos^2(2\theta) + \sin^2(2\theta)\cos\varphi] + \sin\delta \sin\varphi \sin(2\theta) \right\} \\ I'_4 = \frac{I_0}{4} - \frac{I_0}{4} [\cos\delta (1 - \cos\varphi) \sin(2\theta)\cos(2\theta) + \sin\delta \sin\varphi \cos(2\theta)] \end{cases}. \quad (8)$$

根据式(4)可计算得到含有误差项的圆偏光场的应力表达式为

$$\sin\varphi' = \sqrt{[\sin\delta \sin\varphi - \cos\delta \cos\varphi \sin(2\theta)]^2 + \cos^2\delta [1 - \sin^4(2\theta)]}, \quad (9)$$

$$\tan(2\theta') = \frac{\sin\delta \sin\varphi \sin(2\theta) - \cos\delta [\cos^2(2\theta) + \sin^2(2\theta)\cos\varphi]}{\sin\delta \sin\varphi \cos(2\theta) + \cos\delta (1 - \cos\varphi) \sin(2\theta)\cos\varphi}, \quad (10)$$

式中:  $\varphi'$  为测量得到的相位延迟量;  $\theta'$  为测量得到的应力方向角。

若波片误差为零, 则式(9)和式(10)与原方程式(5)和式(6)相同。为方便观察影响情况, 可以将应力方向角作为纵坐标、相位延迟量作为横坐标来绘制二维误差图。图 3 为存在误差时, 根据式(9)和式(10), 在  $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$  和  $\varphi \in [0, 4\pi]$  范围内计算得到的不同失配值下的应力方向角对比图和相位延迟量相位展开对比图, 其中  $\epsilon$  表示误差。图 3(a) 表明当  $\delta \leq 100^\circ$

时, 相位延迟量分布是准确的, 没有发生非线性变化。图 3(b) 表明圆偏场瞬时光弹法在误差的影响下不能反映出物体真实的应力方向。

为进一步分析不同主应力方向和主应力差对求取主应力角的影响, 可在二维图中截取水平和竖直线各一条, 分析单个变量的影响情况, 如图 4 所示。其中,  $\theta$ - $\epsilon$  曲线在  $\varphi = \pi/2$  处取得,  $\varphi$ - $\epsilon$  曲线在  $\theta = \pi/4$  处取得。

从误差曲线可以看出, 波片误差越大, 求取的主应力角和主应力差越大, 成正比关系。两参量的误差分

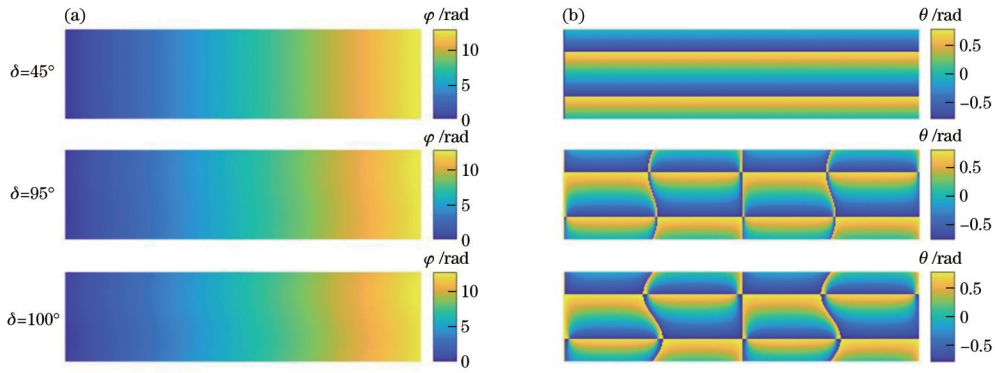


图 3 二维失配误差图。(a)等差线二维误差对比图( $\varphi-\epsilon$ );(b)等倾线二维误差对比图( $\theta-\epsilon$ )

Fig. 3 Two-dimensional mismatch error diagrams. (a) Two-dimensional error comparison of isochromatic lines ( $\varphi-\epsilon$ ); (b) two-dimensional error comparison of isoclinic lines ( $\theta-\epsilon$ )

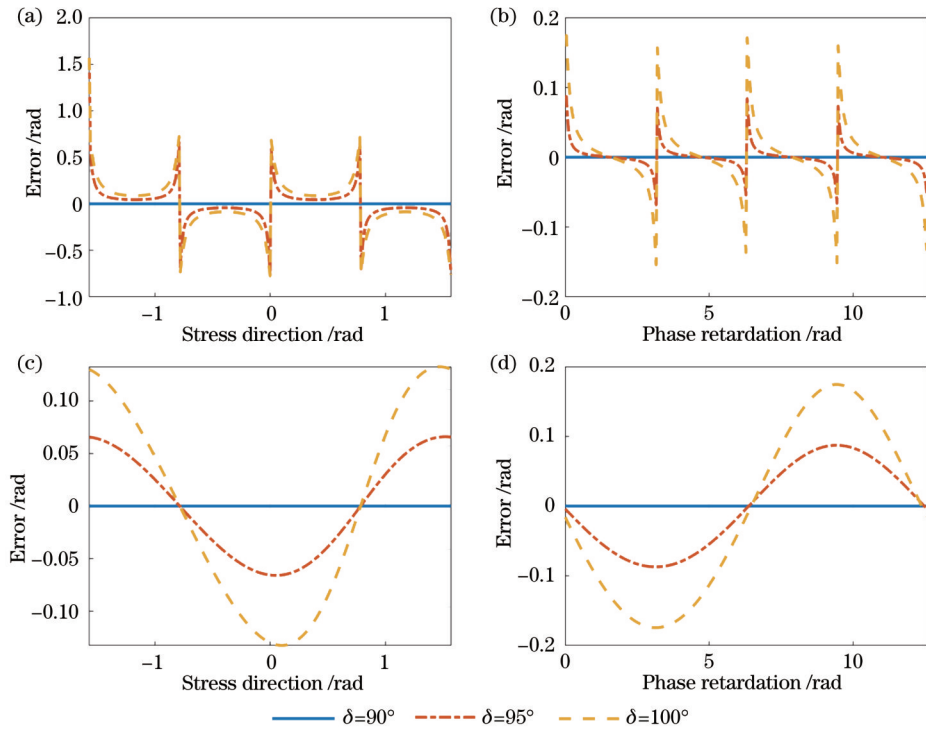


图 4 一维失配误差曲线。(a)应力方向与等倾线的误差曲线 [ $\theta-\epsilon(\theta)$ ];(b)相位延迟量与等倾线的误差曲线 [ $\varphi-\epsilon(\theta)$ ];(c)应力方向与等差线的误差曲线 [ $\theta-\epsilon(\varphi)$ ];(d)相位延迟量与等差线的误差曲线 [ $\varphi-\epsilon(\varphi)$ ]

Fig. 4 Plots of one-dimensional mismatch error curves. (a) Error curve of stress direction with isoclinic line [ $\theta-\epsilon(\theta)$ ]; (b) error curve of phase retardation with isoclinic line [ $\varphi-\epsilon(\theta)$ ]; (c) error curve of stress direction with isochromatic line [ $\theta-\epsilon(\varphi)$ ]; (d) error curve of phase retardation with isochromatic line [ $\varphi-\epsilon(\varphi)$ ]

布都呈周期性分布,但周期大小不同。图 4(c)、(d)显示主应力差的周期达到了对应变量的最值,变化较缓慢,且对误差曲线的积分结果为零,故总误差小。图 4(a)、(b)显示主应力角误差周期小,变化较剧烈,且周期边缘处误差大,积分结果不为零,尤其是图 4(a)中显示出  $\theta-\epsilon(\theta)$  误差比其他误差高出一个量级,故等倾线整体变化较大。

### 3.2 光源波长与 1/4 波片失配误差的补偿分析

从式(9)和式(10)中可以看出,求取的主应力角与主应力差受到误差项  $\delta$ 、真实应力方向角和真实相位

延迟量共同影响,这表明一般来说没有确切的换算公式可将测量的包含误差的应力信息恢复成真实的应力场。然而,针对该圆偏光场实时相移法的研究发现,可用计算方程推导出含有误差参数与不含误差时的理论关系式,从而得到补偿方程。

#### 3.2.1 光源波长与 1/4 波片失配的误差补偿公式

##### 1) 等差线相对误差

当  $\delta \rightarrow 90^\circ$  时,  $\cos \delta$  为无穷小量,记作  $\cos \delta = o(\delta)$ , 则有



$$\sin \varphi' = \lim_{\cos \delta \rightarrow 0} \sqrt{(\sin \delta \sin \varphi - \cos \delta \cos \varphi)^2} + o(\delta) + o^2(\delta) = \text{abs} \left[ \sin \left( \varphi - \delta + \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad (11)$$

式中:  $\text{abs}(\cdot)$  为取绝对值函数。

由式(11)可知, 相位延迟量显示出较高的误差容忍性的原因是在一定误差范围内相对误差  $\Delta\varphi = \varphi - \varphi' = \delta - \pi/2$  为常量, 故在所测相位上通过整体平移

来进行补偿即可获得真实的相位分布。误差相对较大时测量相位延迟量与理论相位延迟量应满足

$$\begin{cases} \varphi = k \left( \varphi' - \delta + \frac{\pi}{2} \right) \\ k = \frac{\pi}{2} / (\pi - \delta) \end{cases} \quad (12)$$

2) 等倾线的相对误差  
等倾线的相对误差的表达式为

$$\Delta \tan(2\theta) = \tan(2\theta) - \tan(2\theta') = 0.5 \frac{\cos \delta}{\cos \delta (1 - \cos \varphi) \sin(2\theta) \cos(2\theta) + \sin \delta \sin \varphi \cos(2\theta)} = 0.5 \frac{\cos \delta}{I_2' - I_4'} \quad (13)$$

由式(13)可知, 此圆偏光场等倾线相对误差的最终结果正比于  $\delta$  的余弦, 反比于两个光强之差。因此, 等倾线的误差可通过两幅光强图进行补偿, 即

$$\theta = 0.5 \arctan \left[ \tan(2\theta') + 0.5 \frac{\cos \delta}{I_2' - I_4'} \right] \quad (14)$$

### 3.2.2 光谱宽度限制下的补偿分析

考虑到光源实际输出的是具有一定光谱宽度的光波。设波长为  $\lambda$ , 光源谱宽为  $\Delta\lambda$ , 则实际输出波长范围可表示为  $\lambda + \Delta$ , 其中  $\Delta \in (-\Delta\lambda/2, \Delta\lambda/2)$ , 此时 1/4 波片延迟量可表示为

$$\delta' = \delta \frac{\lambda}{\lambda + \Delta} \quad (15)$$

对于等差线, 由图 3(a) 中的对比可知, 当  $\delta' \leq 100^\circ$  且满足式(11)时, 可将  $\delta'$  代入式(15)中, 则谱线宽度需

要满足的限制为

$$\Delta\lambda \leq \frac{(\delta - 100)\lambda}{50} \quad (16)$$

图 5(a) 为光源与波片失配误差为  $90^\circ, 94^\circ, 98^\circ$  时, 波长在  $400 \sim 800 \text{ nm}$  范围内与光谱宽度的关系图。可以看出, 光谱宽度与波长成正比, 与失配误差  $\delta$  成反比。由于光谱宽度产生的影响是积分的结果, 故可由式(12)推导出谱宽限制下的相对误差公式

$$\frac{\Delta\varphi'}{\varphi} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \ln \left( \frac{\lambda + \Delta\lambda/2}{\lambda - \Delta\lambda/2} \right) - 1 \quad (17)$$

根据式(17)绘制在  $20 \text{ nm}$  光谱宽度限制下的误差曲线图, 如图 5(b) 所示。结果显示, 在波长大于  $400 \text{ nm}$  后, 等差线误差不超过  $0.25\%$ 。

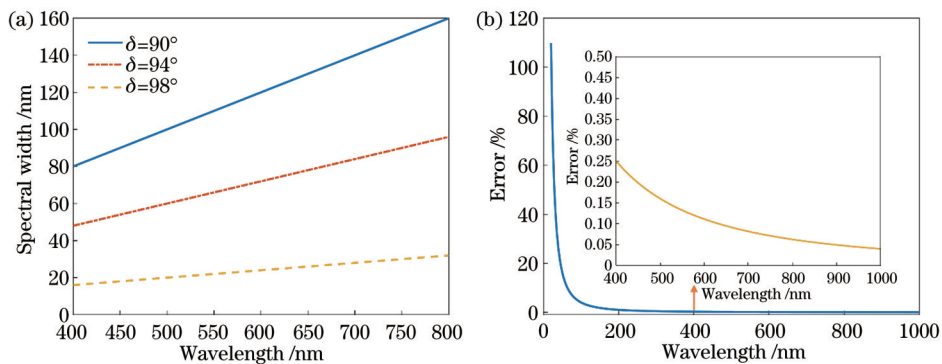


图 5 光谱宽度特性图。(a) 不同失配误差下波长与光谱宽度的对应关系; (b) 谱宽等于  $20 \text{ nm}$  时的误差曲线

Fig. 5 Plot of spectral width characteristic. (a) Correspondence between wavelength and spectral width under different mismatch errors; (b) error curve under spectral width of  $20 \text{ nm}$

对于等倾线, 由于在推导过程中并未假设  $\delta \rightarrow 90^\circ$ , 故等倾线的补偿具有普适性。根据式(13)可推导出谱宽限制下的等倾线相对误差可表示为

$$\frac{\Delta\theta'}{\theta} \leq \frac{(\Delta\lambda)^2}{\lambda^2 - (\Delta\lambda/2)^2} \quad (18)$$

由式(18)可知, 在  $20 \text{ nm}$  光谱宽度限制下, 在波长大于  $400 \text{ nm}$  后, 等倾线误差不超过  $0.025\%$ 。

## 4 对径受压圆盘模拟

对径受压圆盘的应力分布有理论上的精确解, 可

模拟含有误差时的真实应力场。为进一步验证第 2 章中误差和补偿分析的正确性, 采用弧度制单位对径受压圆盘对圆偏光场进行模拟, 此时圆盘直径为  $50 \text{ mm}$ , 圆盘厚度为  $10 \text{ mm}$ , 对径压力为  $800 \text{ N}$ , 误差项为  $\delta = 95^\circ$ 。

图 6(a) 为模拟的等倾线条纹图, 从中明显观察到中间部分已经被分为多块区域, 是测量误差的显著特征, 这是误差项的周期性造成的, 故测量结果不能作为真实应力分布的依据。同时, 图 6(a) 表明应力方向角对偏振方向角和 1/4 波片的误差敏感, 如果不进行补

偿,要获取正确的应力方向角分布,就必须严格匹配波片与光源波长,这将会限制瞬时光弹法的应用。

图 7(a)为补偿后的等倾线,可以看出周期性分布的误差已经被消除,证明了补偿公式的正确性。然而,此时等倾线上、下两端存在相位跳变的现象,发生跳变的原因是应力方向角耦合了第一主应力和第二主应力。研究发现,等倾线的相位跳变实际上可视为相位解包裹问题,将等倾线条纹值放大 4 倍以满足解包裹

条件,解完包裹后再缩小成 1/4 即可,相应的表达式为

$$\theta_1 = u(\theta \times 4) / 4. \quad (19)$$

式中: $u$ 代表相位解包裹算法,本文采用基于可靠性排序的二维相位展开算法<sup>[19]</sup>。注意,此时得出的方向角是第一主应力或者第二主应力,究竟是哪个主应力取决于解包裹原始种子点的方向角属性。由于两个方向角正交,故得出一方即可。由于等倾线的补偿没有取极限值作近似,故得到的是精确解 $\theta_1$ ,如图 7(b)所示。

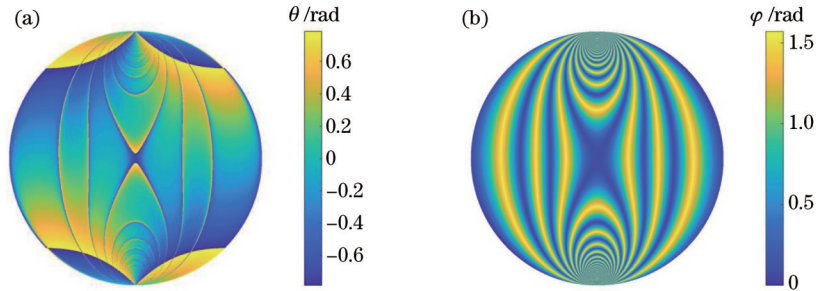


图 6 对径受压圆盘模拟图。(a)含有误差的等倾线条纹图;(b)含有误差的等差线条纹图

Fig. 6 Simulation diagram of diameter-stressed disk. (a) Fringe pattern of isoclinic lines with error; (b) fringe pattern of isochromatic lines with error

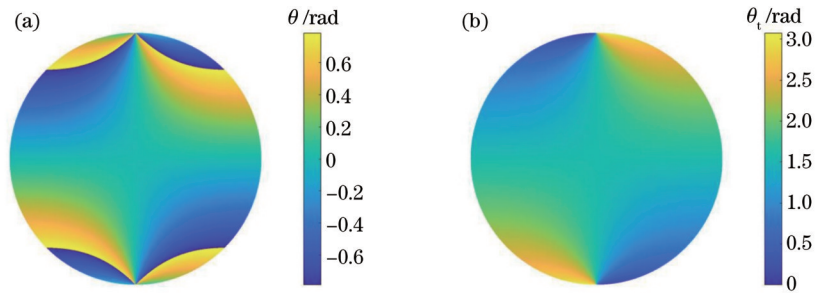


图 7 模拟的等倾线图。(a)补偿后的等倾线;(b)分离主应力方向后的等倾线

Fig. 7 Patterns of simulated isoclinic lines. (a) Pattern of isoclinic lines after compensation; (b) pattern of isoclinic lines after separating principal stress direction

图 6(b)显示了模拟的等差线条纹图,等差线条纹越密集应力越集中,符合应力分布情况。由于包含误差项的等差线条纹图在整体上变化不大,故截取一条水平中位线来展示补偿前后的相位变化,如图 8 所示。

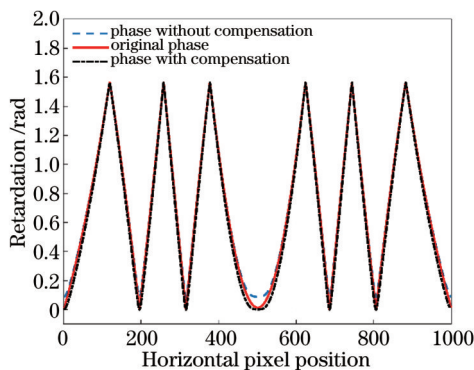


图 8 补偿前后等差线对比图

Fig. 8 Comparison of isochromatic lines before and after compensation

可以看出,虽然加入误差前后的相位特征一致,但是加入误差后相位的幅值下降,根据式(12)的计算结果可合理地补偿幅值下降。

## 5 噪声模拟与实验验证

考虑到实际拍摄图像会受到噪声影响,在模拟过程中分别加入高斯、椒盐和乘性噪声,结果发现椒盐噪声对等差线的影响较小,对等倾线补偿效果影响最大的是高斯噪声。图 9(a)为加入高斯噪声后的等倾线圆盘模拟图。从图 9(b)可以看出,添加的噪声影响了补偿效果,不能完全消除误差,在误差周期的边界处最为明显,这是因为在这些位置处 $I_2' - I_1'$ 太小,此时数值计算陷入了无定义的范围中,但补偿后应力方向角分离的结果仍然是可信的。

为了验证所提方法的正确性,选取一块冻结应力较大的试件进行实验。采集 4 幅偏振图像,利用式(5)和式(6)计算得到的等倾线条纹和等差线条纹如图 10(a)、(b)所示。

利用式(17)处理后得到的等倾线如图 10(c)所

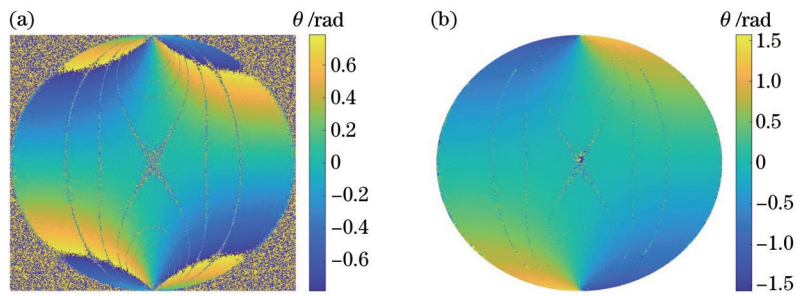


图 9 模拟的含有噪声的等倾线图。(a)等倾线噪声污染图;(b)补偿后的应力方向分离结果

Fig. 9 Simulated isoclinic lines containing noise. (a) Fringe pattern of isoclinic lines with noise contamination; (b) stress direction separation pattern after compensation

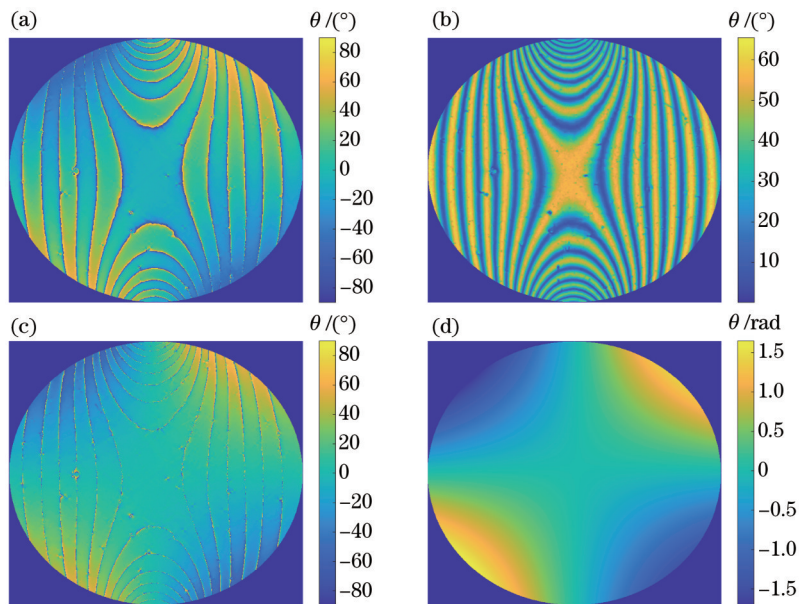


图 10 实验中的圆盘光弹条纹图。(a)等倾线条纹图;(b)等差线条纹图;(c)补偿后的等倾线条纹图;(d)去除离群数据后的应力方向角

Fig. 10 Disk photoelastic fringes in experiment. (a) Fringe pattern of isoclinic lines; (b) fringe pattern of isochromatic lines; (c) fringe pattern of isoclinic lines after compensation; (d) stress direction angle after removing outlier data

示,可以看出等倾线呈周期分布的误差明显减小,实验结果中的等倾线补偿结果与含有高斯噪声的模拟结果一致。实际上噪声主要来自光源照度的不均匀,而照度不均匀引起的误差是高斯性质的,为尽量减少周期性误差:一方面在测量过程中应选择合适的曝光时间和增益,且尽量控制光源照度的均匀性,避免相机长时间工作;另一方面可对获取的光弹图像进行一定处理以抑制噪声,再对补偿后的等倾线进行进一步处理,去除离群数据后得到的处理结果如图 10(d)所示。

## 6 结 论

将理论分析和数值模拟相结合,研究了 1/4 波片与光源波长的失配情况对圆偏场实时光弹相移法的影响,并得出以下结论:1)等差线对 1/4 波片误差的容忍性高,条纹图样稳定性好;2)等倾线对 1/4 波片误差较敏感,条纹图样产生明显的非线性周期变化;3)光弹条纹误差大小正比于 1/4 波片的误差;4)等差线补偿适

用于线性方程,等倾线的补偿是非线性的,但可用两个光强之差来表示,即等差线、等倾线都存在确切的补偿公式;5)光源的光谱宽度会影响所提补偿方法的效果,谱宽的限制与波长成正比,与失配误差成反比,可根据失配值的大小来选取相应光谱宽度的光源(当谱宽小于 20 nm、波长大于 400 nm 时,失配误差小于 0.25%);6)利用对径受压圆盘的模拟和实验验证了误差分析的正确性,实验结果表明在实验过程中存在的噪声主要是高斯噪声,滤波去除离群数据后得到的结果较为理想。这些结论对正确评价光弹应力分析结果起到积极的指导作用,可推进光弹相移法的发展。

## 参 考 文 献

- [1] Ramesh K, Sasikumar S. Digital photoelasticity: recent developments and diverse applications[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 135: 106186.
- [2] 肖石磊, 李斌成. 光学元件残余应力无损检测技术概述[J]. 光电工程, 2020, 47(8): 190068.



- Xiao S L, Li B C. Residual stress measurement methods of optics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(8): 190068.
- [3] 刘志帆, 蔡燕民, 步扬, 等. 基于有限元分析方法的深紫外波段熔石英应力双折射分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1226001.
- Liu Z F, Cai Y M, Bu Y, et al. Stress birefringence analysis in fused silica at deep ultraviolet waveband based on finite element simulation method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1226001.
- [4] 齐乃杰, 袁晓东, 张丽娟, 等. 激光损伤残余应力三维检测技术[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1004001.
- Qi N J, Yuan X D, Zhang L J, et al. Three-dimensional detection technology of laser damage residual stress[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1004001.
- [5] 黎海育, 李抄, 李校博, 等. 基于偏振相机的全斯托克斯偏振仪优化研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(3): 0326001.
- Li H Y, Li C, Li X B, et al. Optimization of polarization-camera-based full Stokes polarimeter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0326001.
- [6] Guo E H, Liu Y G, Han Y S, et al. Full-field stress determination in photoelasticity with phase shifting technique[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(4): 045208.
- [7] Magalhães P A A, Jr, Magalhães C A, Magalhães A L M A. Computational methods of phase shifting to stress measurement with photoelasticity using plane polariscope[J]. *Optik*, 2017, 130: 213-226.
- [8] Lane C, Rode D, Rösger T. Optical characterization method for birefringent fluids using a polarization camera[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 146: 106724.
- [9] Chang H J, Mao Z F, Su Z M, et al. Using recognizable fuzzy analysis for non-destructive detection of residual stress in white light elements[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(4): 1550.
- [10] 毛灵涛, 安里千, 袁则循, 等. 平面偏振光场光弹性实时相移法的误差分析[J]. *光学技术*, 2008, 34(4): 626-629, 632.
- Mao L T, An L Q, Yuan Z X, et al. Error analysis to photoelasticity real-time phase-shifting method in plane polariscope[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(4): 626-629, 632.
- [11] 左芬, 陈磊, 徐晨. 1/4波片相位延迟分布的动态测量[J]. *光子学报*, 2008, 37(11): 2296-2299.
- Zuo F, Chen L, Xu C. Dynamic phase-shifting interferometry for full field retardation distributing of quarter wave plate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(11): 2296-2299.
- [12] Liang H R. The error analysis of quarter wave plate on different polarization shifting algorithm[D]. Taiwan: National Chung Hsing University, 2001: 6-30.
- [13] Ramji M, Prasath R G R. Sensitivity of isoclinic data using various phase shifting techniques in digital photoelasticity towards generalized error sources[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(9/10): 1153-1167.
- [14] 陶波. 热压玻璃透镜里的残余应力研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013: 29-35.
- Tao B. Study of residual stresses in compression molding of precision glass lenses[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013: 29-35.
- [15] 张丽娜. 三维数字光弹性基本方法的研究和应用[D]. 天津: 天津大学, 2008: 15-20.
- Zhang L N. Study of the 3D digital photoelasticity method and its application[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008: 15-20.
- [16] Ramji M, Prasath R, Ramesh K. A generic error simulation in digital photoelasticity by Jones calculus[J]. *Journal of the Aeronautical Society of India*, 2009, 61(4): 475-481.
- [17] 陈伟. 基于光学偏振的玻璃应力测量仪研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019: 5-18.
- Chen W. Research on glass stress measuring instruments based on optical polarization[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019: 5-18.
- [18] 姜兆祥. 像素偏振成像技术及其在数字全息显微中的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020: 9-109.
- Jiang Z X. Pixelated polarization imaging technique and its application in digital holographic microscopy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020: 9-109.
- [19] Herráez M A, Burton D R, Lalor M J, et al. Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(35): 7437-7444.