

## 偏振相机的透明元件应力测量

高阳 万新军 解树平

### Stress measurement of transparent elements based on polarized camera

GAO Yang, WAN Xinjun, XIE Shuping

引用本文:

高阳, 万新军, 解树平. 偏振相机的透明元件应力测量[J]. 应用光学, 2022, 43(2): 284–290. DOI: 10.5768/JAO202243.0203002

GAO Yang, WAN Xinjun, XIE Shuping. Stress measurement of transparent elements based on polarized camera[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(2): 284–290. DOI: 10.5768/JAO202243.0203002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0203002>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于紫外刻写相移光栅的温度应力同时测量传感器

Simultaneous measurement sensor of temperature and stress based on UV lithography phase-shifted grating

应用光学. 2021, 42(1): 200–206 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0108002>

#### 基于偏振衍射色散共焦的光学元件轴向间距测量

Axial spacing measurement of optical elements based on polarization diffraction dispersion confocal method

应用光学. 2021, 42(4): 698–702 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403001>

#### 激光辐照碲镉汞红外焦平面探测器的热应力损伤研究

Thermal-stress damage of MCT infrared focal plane array detector caused by laser irradiation

应用光学. 2018, 39(5): 751–756 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0506003>

#### 异形光窗的微应力、高精度成型加工技术

Micro stress and high precision forming technique for special-shaped light window

应用光学. 2018, 39(6): 880–884 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0605001>

#### 通用工业相机的炸点瞬时位置测量模拟研究

Simulation research on instantaneous position measurement of explosion point of general industrial camera

应用光学. 2021, 42(5): 891–897 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0503003>

#### 基于湍流模型的自适应光学系统响应矩阵测量方法

Measurement method of response matrix for adaptiveoptics systems based on turbulence model

应用光学. 2017, 38(6): 963–967 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0603004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2022) 02-0284-07

# 偏振相机的透明元件应力测量

高 阳, 万新军, 解树平

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘 要:** 应力检测对光学元件的制造和使用意义重大。基于应力双折射原理, 提出了一种利用偏振相机测量应力分布的方法。根据 Stokes 矩阵和 Mueller 矩阵推导出应力值及应力方向计算公式, 并对影响系统测量精度的主要误差进行了理论分析。为验证方法的可行性, 搭建了一台测量应力分布的装置。使用该装置测量一块 633 nm 的四分之一波片, 测得其误差为 0.86 nm。进一步测量, 得出一块车灯透镜的全场应力相位延迟量与应力方向图, 利用所测相位延迟量计算出透镜中心区域的应力双折射值为 9.21 nm/mm、主应力差为 2.45 MPa; 利用符号规则调整了透镜的应力方向, 结果符合应力连续性原则。该方法测量应力分布时无需旋动光学元件, 可实现应力延迟量及应力方向的实时测量。

**关键词:** 应力测量; 应力双折射; 偏振相机; Stokes 矩阵

中图分类号: TN209

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202243.0203002

## Stress measurement of transparent elements based on polarized camera

GAO Yang, WAN Xinjun, XIE Shuping

(School of Optical-electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for  
Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** The stress measurement is of great significance for the manufacture and use of optical elements. Based on the principle of stress birefringence, a method to measure the stress distribution by polarized camera was proposed. The stress value and calculation formulas of stress direction were derived from Stokes matrix and Mueller matrix, and the main errors affecting the measurement accuracy of the system were analyzed theoretically. In order to verify the feasibility of the method, a device for measuring the stress distribution was constructed. A quarter wave plate of 633 nm was measured by this device, and the error was 0.86 nm. The full-field stress phase retardation and stress direction diagrams of headlight lens were obtained by further measurement. The measured phase retardation was used to calculate the stress birefringence value of central region of the lens of 9.21 nm/mm and the principal stress difference of 2.45 MPa. The symbolic rules were used to adjust the stress direction of the lens, and the results accorded with the principle of stress continuity. This method measures the stress distribution without rotating the optical elements, which can realize the real-time measurement of stress retardation and stress direction.

**Key words:** stress measurement; stress birefringence; polarized camera; Stokes matrix

## 引言

光学系统由多个光学元件组成, 其中以各类透

明元件的应用最为广泛。由于光学元件在生产过程中受到制造工艺的制约, 成品会有一定的残余

收稿日期: 2021-08-23; 修回日期: 2021-12-23

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

作者简介: 高阳 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学测量方面的研究。E-mail: gaoylamb@163.com

通信作者: 万新军 (1981—), 男, 博士, 主要从事精密检测系统方面的研究。E-mail: xinjun.wan@usst.edu.cn

应力存在, 致使其在使用过程中产生收缩、变形、翘曲或裂纹。不仅影响制品的表面形状和光学性能, 而且直接关系到产品的使用寿命和产品安全, 因此应力测量对于保证光学元件的强度和光学性能具有重要意义<sup>[1]</sup>。

应力的测量方法主要分为机械法与光学检测法。机械法如钻孔法、取条法, 在测量残余应力时一般将部件切割出来, 然后测量其应力的变化, 从而求出残余应力, 是一种间接测量手段, 会对元件造成一定的损坏; 光学检测法如光弹法、拉曼法及 X 射线衍射法等, 这些方法均属于无损检测, 其中光弹法是对应力导致的双折射相位差的测量, 具有光学关联性更直接、测量精度更高的特点<sup>[2]</sup>。用光弹效应测量相位的方法可分为偏振光调制法<sup>[3-4]</sup>和相移法<sup>[5]</sup>。偏振光调制法一般采用补偿器、四分之一波片等偏振元件作补偿得到相位延迟量, 往往导致测量时间长、测量次数多, 很难按要求的精度来复现各个等差线及等倾线的位置; 相移法又称光强法, 利用待测样品的相位延迟量和出射光的光强之间的关系求解相位延迟。基于这一理论, 近年来研究者们不断提出新的测量系统, 主要包括基于五步相移法获得光弹特征的方法<sup>[6]</sup>, 基于四步相移法并利用自准直光路系统测量玻璃应力的方法<sup>[7]</sup>, 基于六步相移法的红外光弹系统以计算硅片应力分布的方法<sup>[8-9]</sup>。这些方法

都需要旋转检偏器和四分之一波片, 难以实现对应力的实时监控。为了同时获取不同方向上的偏振信息, 有研究者采用分振幅法<sup>[10]</sup>。但由于使用了多个光电传感器, 使得捕获的偏振图像存在采集不同步和图像不匹配的问题。为解决上述问题, 有学者提出可利用偏振相机测量应力<sup>[11]</sup>。偏振相机应用范围广泛, 对于划痕缺陷检测、成像效果增强及应力检测等方面具有显著优势, 因此这一技术得到了越来越多的关注, 但是在应力测量领域的研究仍有不足。

针对上述研究情况, 本文将像素偏振相机应用在应力测量系统中。首先利用 Stokes 矩阵和 Mueller 矩阵求解透明光学元件的相位延迟量分布及应力方向的计算公式, 其次分析了影响系统测量精度的主要因素, 并根据后续分析提出减小误差的方法, 随后搭建出一套测量装置。实验过程简便, 重复性好, 最后通过四分之一波片的标定和车灯透镜应力分布的测量验证了方法的有效性。

## 1 测量原理与方案

### 1.1 光路模型

光路示意图如图 1 所示, 光源沿  $z$  轴出发, 经过一块透光轴为竖直  $y$  方向的起偏器成为线偏振光, 然后垂直入射到待测样品表面, 经透射后其偏振状态发生改变, 最后光强信号由偏振相机接收。

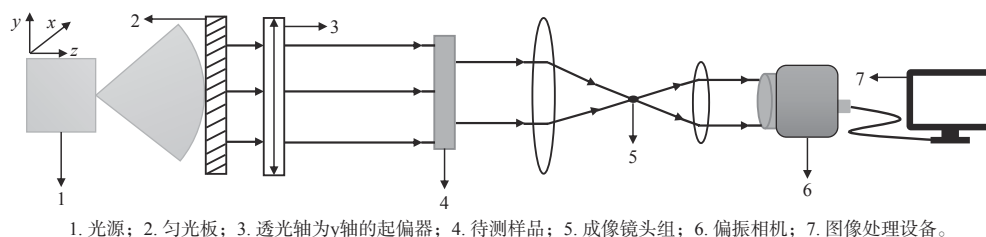


图 1 光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical path

由于偏振相机内置检偏方向为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ , 为方便与偏振相机组合使用, 本文将采用四步相移法求解样品的应力分布。选用线偏光而非圆偏光的原因在于考虑到圆偏光的四步相移法在不涉及到旋转四分之一波片的前提下容易产生波片与光源波长不匹配的情况, 从而影响测量结果<sup>[12]</sup>。

### 1.2 理论推导

光路原理图如图 2 所示, 对整个光路运用 Stokes

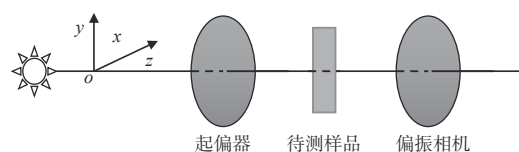


图 2 光路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of optical path principle

矢量和 Mueller 矩阵表示法推导如下:

光强为  $I_0$  的单色光光源  $S_0$  为

$$S_0 = \begin{bmatrix} I_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

主轴方向与  $x$  轴成  $\gamma$  的起偏器  $P_0$  的 Mueller 矩阵为

$$P_0 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\gamma & \sin 2\gamma & 0 \\ \cos 2\gamma & \cos^2 2\gamma & \sin 2\gamma \cos 2\gamma & 0 \\ \sin 2\gamma & \sin 2\gamma \cos 2\gamma & \sin^2 2\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

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

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

与  $x$  轴成  $\beta$  的检偏器分为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  等 4 个检偏方向, 可表示为

$$P_i = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2(\beta + k_i) & \sin 2(\beta + k_i) & 0 \\ \cos 2(\beta + k_i) & \cos^2 2(\beta + k_i) & \sin 2(\beta + k_i) \cos 2(\beta + k_i) & 0 \\ \sin 2(\beta + k_i) & \sin 2(\beta + i) \cos 2(\beta + k_i) & \sin^2 2(\beta + k_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (i = 1, 2, 3, 4; k_i = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ)$$

则经过检偏器后的出射光的 Stokes 矢量可以由 (2) 式推出:

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

根据 Stokes 矢量的定义可知, 出射光矢量第 1 行的式子即为探测器 CCD 检测到的光强, 则:

$$I_1 = \frac{I_0}{4} \left[ 1 + \cos 2(\beta - \gamma) - 2 \sin^2 \frac{\varphi}{2} \sin 2(\theta - \gamma) \sin 2(\theta - \beta) \right] \quad (2)$$

取  $\gamma = 0, \beta = 0$ , 可得:

$$I_1 = \frac{I_0}{2} - \frac{I_0}{2} \sin^2 \frac{\varphi}{2} \sin^2 (2\theta) \quad (3)$$

同理可得  $I_2, I_3, I_4$  为

$$\begin{cases} I_1 = \frac{I_0}{2} - \frac{I_0}{2} \sin^2 \frac{\varphi}{2} \sin^2 (2\theta) \\ I_2 = \frac{I_0}{4} + \frac{I_0}{2} \sin^2 \frac{\varphi}{2} \sin 2\theta \cos 2\theta \\ I_3 = \frac{I_0}{2} \sin^2 \frac{\varphi}{2} \sin^2 (2\theta) \\ I_4 = \frac{I_0}{4} - \frac{I_0}{2} \sin^2 \frac{\varphi}{2} \sin 2\theta \cos 2\theta \end{cases} \quad (4)$$

由 (4) 式可知:

$$\varphi = 2 \arcsin \sqrt{\frac{(I_3 + I_3)^2 + (I_2 - I_4)^2}{4 I_3 (I_1 + I_3)}} \quad (5)$$

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

从 (5) 式、(6) 式可以看出, 该方法在求解相位延迟量  $\varphi$  或应力方向角  $\theta$  时, 只与光强大小相关, 二者互不影响, 能够得到较好的结果。

### 1.3 误差模拟

影响精度的主要因素是器件的方位角误差, 其中偏振相机的 4 个检偏方向可看作严格满足条件, 因此误差主要在于起偏器与光轴夹角和偏振相机与光轴夹角不满足 (3) 式。由于  $\gamma = 0^\circ, \beta = 0^\circ$ , 即起偏器、检偏器与  $x$  轴没有偏差角, 是等式成立的先决条件。当此条件不成立时,  $I_1$  产生的误差可表示为 (2) 式, 其中  $\cos 2(\beta - \gamma)$  为常数项。空测时将  $I_3$  调至光强最小处使得  $\beta - \gamma$  足够小, 可令  $\cos 2(\beta - \gamma) = 1 - \delta$ , 此时  $\sin 2(\beta - \gamma) = (2\delta - \delta^2)^{1/2}$ , 对  $I_2, I_3, I_4$  做同样处理, 可得到以下两种误差。

#### 1) 方位角偏差给相位测量带来的误差

将无偏差角时测量的相位延迟量记作  $\varphi$ , 有偏差角时测量的相位延迟量记作  $\varphi_1$ , 两者之差为  $\Delta\varphi$ , 经运算可得  $\varphi$  的最大误差  $\Delta\varphi/\varphi$  为

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = 1 - \left[ \frac{\sin 2(\theta - \gamma)}{\sin 2(\theta - \beta)} \right]^{1/2} \quad (7)$$

#### 2) 方位角偏差给应力方向测量带来的误差

将无偏差角时测量的应力方向角记作  $\theta$ , 有偏差角时测量的应力方向角记作  $\theta_1$ , 两者之差为  $\Delta\theta$ , 经运算可得  $\theta$  的最大误差  $\Delta\theta/\theta$  为

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = 1 - \frac{\tan 2(\theta - \beta)}{\tan 2\theta} \quad (8)$$

## 2 实验流程

偏振相机是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。使用最为广泛的偏振相机是由4个线偏振片单元、 $2 \times 2$ 周期排布形成的像素偏振片阵列组成<sup>[13]</sup>。从偏振片阵列中可分别提取出4个方向上的偏振信息,组成4幅偏振图像。图3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 $2\,448(H) \times 2\,048(V)$ ,帧率为79帧/s,传感器为2/3" Sony IMX250MZR,像素尺寸为 $3.45\,\mu\text{m} \times 3.45\,\mu\text{m}$ 。

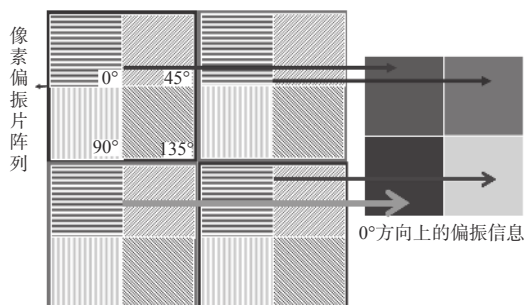
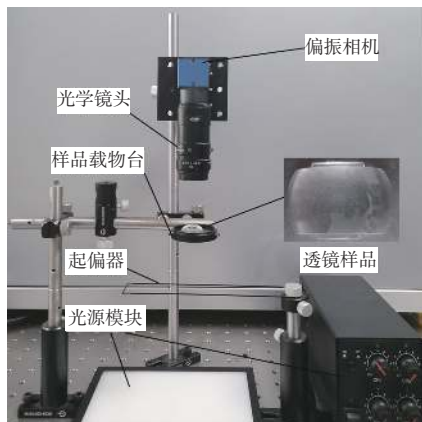


图3 偏振相机原理示意图

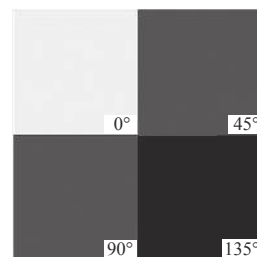
Fig. 3 Schematic diagram of polarized camera principle

参考上述光路及分析计算,设计了一款实验系统,如图4(a)所示。该系统选择波长为620 nm的红光背光源,谱线宽度为5 nm。起偏器为线偏振片,波段为400 nm~700 nm,消光比 $>1\,000:1$ 。载物台用以承载样品,样品以车灯透镜为例。调节光学镜头可使样品的成像质量达到偏振相机的分辨率要求。

使用时先调节光源强度及曝光时间,使得偏振相机接收到的光强落在其线性相应区域;其次调节焦距及光圈大小,使样品能清晰成像;最后旋转起偏器在计算机中显示偏振相机捕获的4幅图像。当代表 $90^\circ$ 方向的 $I_3$ 光最暗、 $0^\circ$ 方向的 $I_1$ 光最亮,代表 $45^\circ$ 、 $135^\circ$ 方向的 $I_2$ 、 $I_4$ 光强相等时,可认为偏差角 $\beta - \gamma = 0^\circ$ 。系统标定如图4(b)所示。



(a) 实验装置



(b) 系统标定示意图

图4 实验装置的搭建与标定

Fig. 4 Construction and calibration of experimental device

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 四分之一波片的测量及分析

选取一块波长为633 nm的四分之一波片并绘制误差曲线,当光源波长为620 nm时,该波片的相位延迟量为 $0.255\lambda$ ,即158.1 nm,精度为 $\lambda/100$ 。图5显示了四分之一波片处于水平中位线上的各点相位延迟量的分布情况,滤波去噪后基本是一条水平线,显示出良好的均一性。

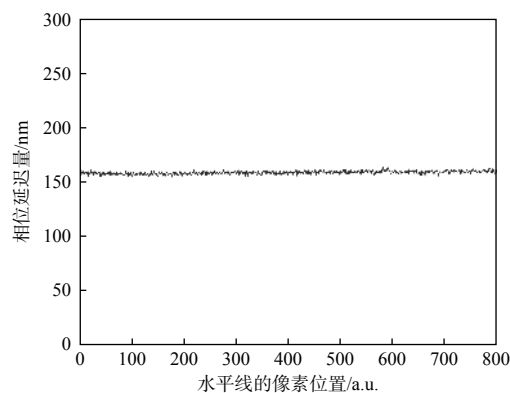


图5 四分之一波片的相位分布测量

Fig. 5 Phase distribution measurement of quarter wave plate

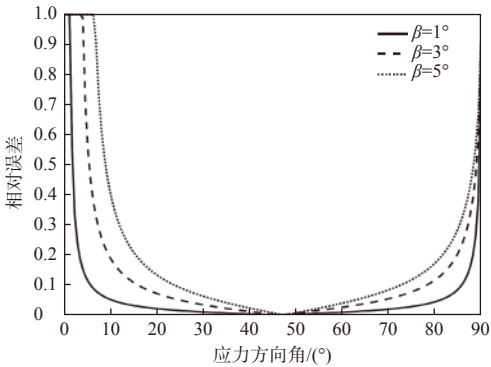
由上述误差的理论仿真及测量结果可知,应力值和应力方向的精度受到系统偏差角的影响且与样品本身的应力方向有关。将波片快轴方向在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 内每 $5^\circ$ 旋转一次,测量误差如表1所示。多次测量的结果显示,精度与快轴方向有关。图6(a)和图6(b)模拟了相位延迟量与应力方向在不同偏差角下的误差曲线。当系统偏差角为 $2^\circ$ 时,模拟得到的理论误差曲线与实验误差曲线对比如图6(c)和图6(d)所示,二者相关系数大于0.85。

误差曲线显示出随着系统偏差角增大,误差会升高,偏差角存在的原因是空测时 $I_3$ 未调至最

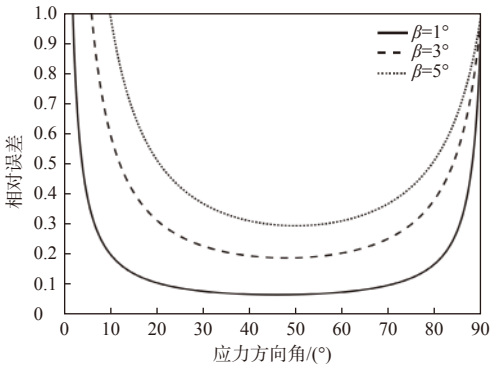
小。由于本例采用的是目测法,故  $I_3$  仍有一定剩余量,使用光功率计调节可降低此误差。此外,注意到图 6(a)和图 6(b)中当快轴方向处于  $40^\circ\sim 60^\circ$  范围内时,波片误差较小,在测量样品时可利用这一特性进一步减小误差。

表 1 四分之一波片的测量分析结果  
Table 1 Measurement analysis results of quarter wave plate

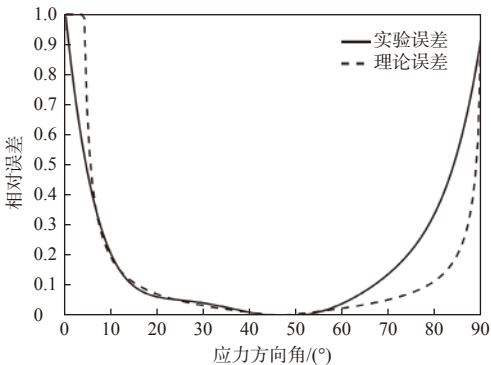
快轴方向/(°)	延迟量/nm	误差/nm
30	151.53	6.57
35	160.41	2.31
45	158.96	0.86
55	159.64	1.54
60	152.65	5.45



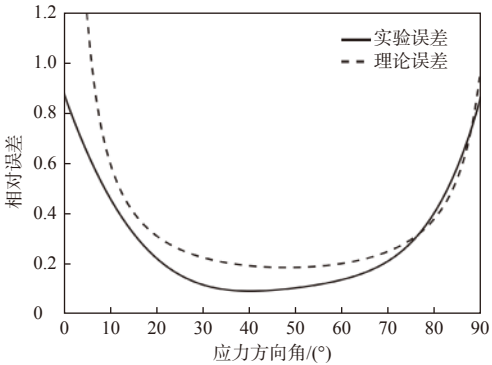
(a) 应力延迟量的理论误差



(b) 应力方向的理论误差



(c) 应力延迟量的理论与实验误差对比



(d) 应力方向的理论与实验误差对比

图 6 四分之一波片的误差曲线图

Fig. 6 Error curves of quarter wave plate

3.2 透镜应力分布的测量及分析

透明元件的应力在各个区域不同,但整体分布是连续的,其应力分布特征影响着光学系统的性能。本文实际测量了一块 LED 车灯透镜,其尺寸规格为  $20\text{ mm}\times 15\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 。图 7 显示了由(5)式计算出的透镜应力相位延迟量分布。从图 7 中可以看出,该透镜的相位延迟在中心菱形区域分布较均匀,选取菱形中心位置处的一点  $P$ ,该点  $\varphi=45^\circ$ 。计算其应力双折射值以此反映该透镜的应力大小。

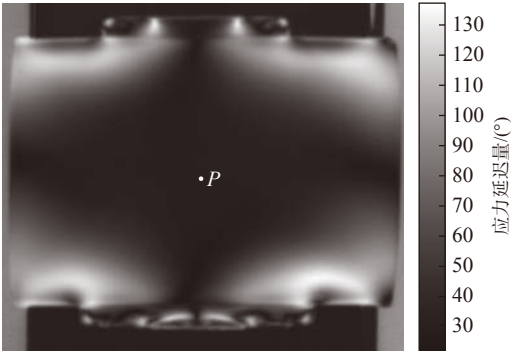


图 7 车灯透镜应力延迟量分布图

Fig. 7 Stress retardation distribution of headlight lens

该透镜由硼硅玻璃制成,其应力光学常数为  $3.8\times 10^{-6}\text{ mm}^2/\text{N}$ 。取中心一小块区域测量多点,延迟量取平均值得  $46.06\text{ nm}$ ,厚度为  $5\text{ mm}$ 。由应力-双折射公式可知<sup>[14]</sup>,该中心区域应力双折射值为  $9.21\text{ nm/mm}$ 、应力值为  $2.45\text{ MPa}$ 。使用德国 ILIS 的 Strain Scope 应力测量仪检测的延迟量为  $44.24\text{ nm}$ ,结果相差在  $2\text{ nm}$  范围以内。

图 8(a)显示的是应力方向的全场测量结果,可以看出有明显的跳变,不满足应力连续性原则。造成这种现象的原因是应力方向角  $\theta$  是由(6)

式反正切函数解出, 反正切函数的值域限制了应力方向角的范围。若要  $\theta \in [0, \pi]$ , 则需:

$$\arctan\left(\frac{I_3 - I_1 + I_2 + I_4}{I_2 - I_4}\right) \in [0, 2\pi] \quad (9)$$

根据参考文献 [15] 中使用的符号规则(1), 处理后得到真实的应力方向角全场分布图, 满足应力连续性原则, 如图 8(b)所示。

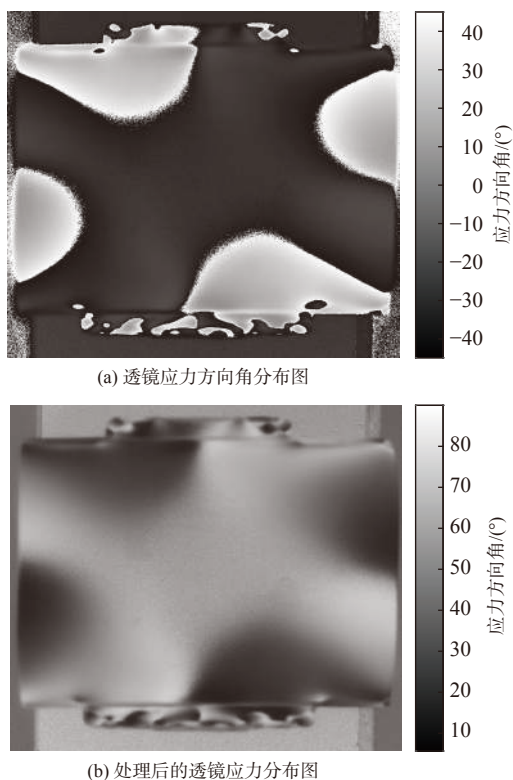


图 8 车灯透镜应力分布图  
Fig. 8 Stress distribution diagram of headlight lens

## 4 结论

使用相移法确定透明元件内部应力的分布, 相比于传统方法, 不需要冻结应力和切片, 符合实际应用的需求。本文基于应力双折射原理, 提出了一种利用偏振相机实现四步相移可快速测量透明元件应力分布的测量方案。提出的理论误差曲线图符合实验误差曲线图, 二者相似系数大于 0.85。四分之一波片的测量结果显示, 测量值为 158.96 nm, 误差小于 1%。对一块车灯透镜的残余应力进行实测, 得出透镜的全场应力延迟量分布, 对测量得到的应力方向信息使用符号规则后得到了连续的应力方向分布图。与德国 ILIS 公司的应力测量仪进行了比较, 结果相差在 2 nm 以内, 验证了该方法的有效性。本文所述方法的主要优势在

于无需旋转偏振元件即可实现全场应力测量, 可适用于应力的实时测量。

## 参考文献:

- [1] 王雷, 许荣国, 阴万宏, 等. 光学元件残余偏振测量方法与装置[J]. 应用光学, 2021, 42(6): 1080-1085.  
WANG Lei, XU Rongguo, YIN Wanhong, et al. Testing method and equipment for residual polarization of optical lens[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(6): 1080-1085.
- [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): 51-61.  
XIAO Shilei, LI Bincheng. Residual stress measurement methods of optics[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(8): 51-61.
- [3] 陈远金, 张猛蛟, 戴放, 等. EMCCD集成偏振-微光一体化成像技术研究[J]. 应用光学, 2020, 41(2): 242-247.  
CHEN Yuanjin, ZHANG Mengjiao, DAI Fang, et al. Research on polarization-low level integrated imaging technology based on EMCCD[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(2): 242-247.
- [4] 古兆兵, 郝淑杰, 王雷, 等. 一种基于旋转1/4波片法的激光偏振度测量仪[J]. 应用光学, 2018, 39(6): 936-941.  
GU Zhaobing, HAO Shujie, WANG Lei, et al. Laser polarimeter based on rotary 1/4 waveplate[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(6): 936-941.
- [5] PATTERSON E A, WANG Z F. Towards full field automated photoelastic analysis of complex components[J]. Strain, 1991, 27(2): 49-53.
- [6] 刘晓蒙, 戴曙光. 相移法获取三维光弹特征相位差的方法[J]. 光学技术, 2016, 42(4): 317-320.  
LIU Xiaomeng, DAI Shuguang. Evaluating characteristic retardation in three-dimensional photoelasticity by phase shifting technique[J]. Optical Technique, 2016, 42(4): 317-320.
- [7] 李金鹏, 陈磊, 乌兰图雅, 等. 基于移相算法的玻璃应力延迟量快速测量方法[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 125-129.  
LI Jinpeng, CHEN Lei, WULAN Tuya, et al. A method based on phase shifting algorithm for fast measurement of stress retardation of optical glass[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 125-129.
- [8] SU F, LI T H. Development of an infrared polarized microscope for evaluation of high gradient stress with a

- small distribution area on a silicon chip[J]. Review of Scientific Instruments, 2019(90): 063108.
- [ 9 ] 李腾辉, 姚瑞霞, 于川, 等. 基于六步相移法的集成化显微红外光弹系统的研制[J]. 实验力学, 2019, 34(1): 64-72.
- LI Tenghui, YAO Ruixia, YU Chuan, et al. Development of an integrated micro-infrared photoelastic system based on six-step phase-shift method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(1): 64-72.
- [ 10 ] 程敏熙, 何振江, 黄佐华. 分振幅法偏振光斯托克斯参量测量系统[J]. 光电工程, 2008(5): 93-97.
- CHENG Minxi, HE Zhenjiang, HUANG Zuohua. Polarimeter system of Stokes parameters based on division-of-amplitude[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008(5): 93-97.
- [ 11 ] REN Z, XIE H, JU Y. Quantification of photoelastic fringe orders using polarized light camera and continuous loading[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 134: 106263.
- [ 12 ] RAMESH K, SASIKUMAR S. Digital photoelasticity: recent developments and diverse applications[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 135: 106186.
- [ 13 ] 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.
- JIANG Zhaoxiang. Pixelated polarization imaging technique and its application in digital holographic microscopy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [ 14 ] 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, 2009.
- ZHANG Lina. Study of the 3D digital photoelasticity method and its application[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [ 15 ] 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.
- CHEN Wei. Research on glass stress measuring instruments based on optical polarization[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.