

偏振态的可视化及其成像技术的研究

唐珮珺¹ 陈飞虎¹ 唐志列^{1,2}

(¹ 华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510006
² 广东省量子调控工程与材料重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要 提出一种新型偏振态成像法:以物体的偏振态作为成像物理量进行成像,获得成像物体偏振态的空间分布。引入偏振色度值表征偏振态,即将描述偏振态的三个 Stokes 参量转换成三基色 RGB,用 RGB 的色度值(称为偏振色度值)来表征相应的偏振态,实现偏振态与偏振色度值之间以及偏振色度值与像素点之间的一一对应。在此基础上,采用 Stokes 参量测量方法对物体的偏振态进行逐点测量,获得成像物体的 Stokes 参量的空间分布,然后通过偏振色度值的分布来表征物体偏振态的空间分布,从而实现了偏振态成像。实验结果表明:偏振态成像法不但可以测量应力大小分布,还可以测量应力方向分布。

关键词 物理光学;偏振态;偏振态成像;Stokes 参量;偏振色度值

中图分类号 O436.3; O343.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0826002

Visualization of Polarization State and Its Imaging Method

Tang Peijun¹ Chen Feihu¹ Tang Zhilie^{1,2}

(¹ School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China
² Laboratory of Quantum Engineering and Quantum Materials of Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract A new polarization imaging method, based on polarization state, is developed to obtain the spatial distribution of polarization state of object. A measurable physical quantity, called polarized-chromatic value, is introduced to describe the polarization state. The Stokes parameters employed to describe the polarization state are converted to three basic colors RGB, then the chromatic value of the RGB is used to describe the polarization state, therefore there is a one-to-one relationship between the polarized-chromatic value and the polarization state, and the polarized-chromatic value and the pixels. On this basis, the Stokes parameters measurement method is used for object point measurement to obtain the spatial distribution of Stokes parameters of the object. Then through the distribution of polarized-chromatic value, space distribution of the polarization state of the object is characterized, and thus the polarization imaging is realized. The experimental results show that the polarization state imaging method not only can measure the distribution of the stress size, but also measure the distribution of the stress direction.

Key words physical optics; polarization state; polarization state imaging; Stokes parameters; polarized-chromatic value

OCIS codes 260.5430; 260.2130; 330.1720

1 引 言

偏振光成像技术广泛用于矿物、化学、生物医学、材料等学科领域^[1-11]。近年来,偏振光成像技术用于遥感成像方面也取得重要进展^[12-14]。在目标的成像和识别过程中,对于颜色和反射强度相同

但质料不同的目标,其偏振特性往往不同,而且这些目标在单纯的强度成像中基本无法识别。而偏振光成像技术通过提取与物质发生相互作用后的光束的偏振信息来获得物体的偏振特性图像,比单纯的强度成像记录了更多的信息,能够提供关于目标的各

收稿日期: 2013-02-24; **收到修改稿日期:** 2013-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(61178086)、广州市科技计划项目(2012J4300138)

作者简介: 唐珮珺(1991—),女,本科,主要从事光学偏振检测与成像方面的研究。E-mail: 382971181@qq.com

导师简介: 唐志列(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光信息处理和光学成像方面的研究。

E-mail: tangzhl@senu.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

种特性,如颜色、表面取向、折射率、表面电导率、表面粗糙度等,具有独特的辨别能力^[15-16]。然而,传统的偏振光成像技术只是以光的偏振态的某个投影作为成像物理量进行成像,无法获得目标的全部偏振信息,即使在目标完全相同的情况下,由于选取不同的偏振镜或者偏振镜的取向不同,所获得的图像也不相同,因此,无法由图像的变化来判断目标的变化,容易引起误判。

本文提出的偏振态成像法,是以物体的偏振态作为成像物理量进行偏振态成像。由于偏振态记录了物体的全部偏振信息,因此,偏振态成像法比传统的偏振光成像法包含更丰富的信息。然而,由于偏振态是二维(2D)希尔伯特空间的一个态矢量,需要三个实参数才能完备地确定一个偏振态,因此,偏振态与像素点之间不是一一对应。首先引入一个新的可测量物理量——偏振色度值来表征偏振态,即将描述偏振态的三个 Stokes 参量转换成三基色 RGB,并计算出其相应的色度值——定义为偏振色度值,然后用该偏振色度值来表征偏振态。由于偏振色度值完全刻画了偏振状态,而且偏振色度值与像素点之间是一一对应的,因此可以通过偏振色度值的空间分布来表征偏振态的空间分布。在此基础上,采用新型的分振幅 Stokes 参量测量方法,同时测量出物体上各点的三个 Stokes 参量,获得成像物体的偏振色度值的空间分布,从而实现物体的偏振态成像。

2 偏振态的可视化方法及其成像原理

偏振态是二维希尔伯特空间中的一个态矢量,需要三个实参数才能完备地确定一个偏振态,因此,通常在相空间(如庞加莱球)来表达偏振态及其变化。由于描述偏振态的三个实参数与真实空间的点不是一一对应,因此,很难在真实空间表达偏振态的分布,传统的偏振光成像仅仅是用偏振态的某个投影来进行二维成像。为了实现偏振态的空间成像,首先要解决描述偏振态的三个实参数的同时测量问题以及偏振态与空间点之间的一一对应关系问题。为此,采用分振幅 Stokes 参量法进行偏振态的实时测量,然后引入偏振色度值这个可观察物理量来表征偏振态。

2.1 偏振态的 Stokes 矩阵表示

若以 I_0 表示光波的总强度, I_x 、 I_y 、 $I_{-\pi/4}$ 、 $I_{\pi/4}$ 、 I_R 和 I_L 分别表示通过可调偏振片后,透过的 x 、 y 、 $-\pi/4$ 和 $\pi/4$ 方向的线偏振光以及右旋(R)和左旋(L)圆偏振光光强;以 S_0 表示光波的总强度, S_1 表示 x 分量和 y 分量的光强差, S_2 表示 $\pi/4$ 方向线偏

振分量与 $-\pi/4$ 方向线偏振分量的光强差, S_3 表示光波右旋偏振光分量与左旋偏振光分量的光强差,那么,Stokes 矢量可以表示为^[17]

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_x - I_y \\ I_{\pi/4} - I_{-\pi/4} \\ I_R - I_L \end{bmatrix}. \quad (1)$$

2.2 偏振器件的 Muller 矩阵表示

当偏振光入射到偏振器件之后,其偏振态会发生改变,而偏振器件的偏振变换特性可以用一个 4×4 的矩阵来描述,称为 Muller 矩阵^[17]:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

当偏振光通过偏振器件时,出射光的 Stokes 矢量 \mathbf{S}' 与入射光 Stokes 矢量 \mathbf{S} 之间存在线性关系,即偏振器件对偏振态的变换可表示为

$$\mathbf{S}' = \begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \mathbf{MS}. \quad (3)$$

当偏振光通过偏振物体时,由于偏振物体的 Muller 矩阵可以等效于一系列偏振器件的 Muller 矩阵的乘积,因此,出射光的 Stokes 矢量 \mathbf{S}' 与入射光 Stokes 矢量 \mathbf{S} 之间的关系可以表达为

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M}_n \mathbf{M}_{n-1} \cdots \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_1 \mathbf{S} = \mathbf{MS}, \quad (4)$$

式中 M_1, \dots, M_n 分别表示偏振物体的等效 Muller 矩阵。

2.3 偏振态的偏振色度值表征

为了实现偏振态成像,需要在偏振态与像素点之间建立一一对应的关系。引入一个新的物理量——偏振色度值来表征偏振态:将三个 Stokes 参量转换成三基色 RGB,然后用 RGB 的色度值来表征该像素点的偏振态,那么,偏振色度值与偏振态之间以及偏振态与像素点之间实现了一一对应,通过偏振色度值的分布可以表征物体偏振态的空间分布,从而实现偏振态成像。令:

$$S_1 = R, S_2 = G, S_3 = B, \quad (5)$$

由于 Stokes 参量的取值范围在 $[-1, 1]$ 之间,因此把每个 Stokes 参量值分成 256 个灰阶,这样,当偏振态确定以后,其 Stokes 参量值就完全确定,相应地其偏振色度值就完全唯一地确定了。

3 偏振态成像的实验系统

偏振态成像需要同时测量出三个 Stokes 参量 S_1 、 S_2 、 S_3 ，为此，采用分振幅 Stokes 参量测量法实时测量出 4 个 Stokes 参量 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 。

3.1 分振幅 Stokes 参量测量实验系统

偏振态可以由 4 个 Stokes 参量唯一地确定，根据(1)式，只要分别测量出 I_x 、 I_y 、 $I_{-\pi/4}$ 、 $I_{\pi/4}$ 、 I_R 和 I_L ，

则可以确定 Stokes 参量 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 。为此，设计图 1 所示的偏振态 Stokes 参量测量系统。

图 1 中，P、 P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 为偏振片，W 和 W_1 为 $\lambda/4$ 波片，S 为样品，slide 为载玻片分束器，BS 为偏振无关分束镜，L 为凸透镜， D_0 、 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 为 5 个光电探测器。P 和 W 组成偏振态发生器。

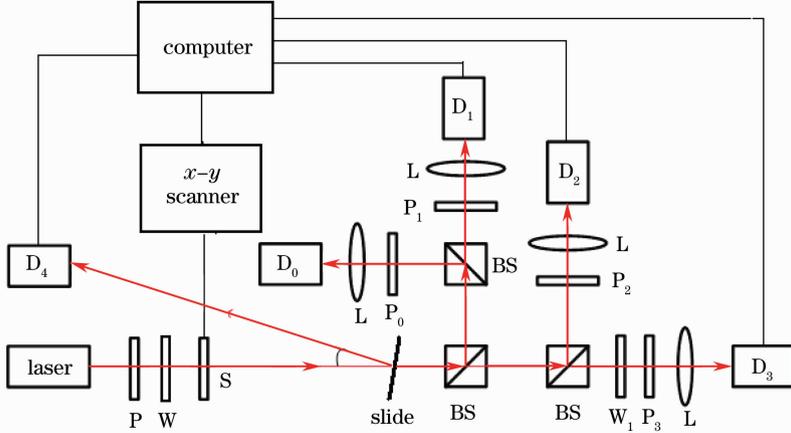


图 1 偏振态 Stokes 参量测量系统

Fig. 1 Measuring system of polarization states based on Stokes parameters

根据偏振光传输理论^[17]，探测器探测得到的光强信号 $i_0 \sim i_3$ 和入射光的 Stokes 参量 $\mathbf{S}(S_0, S_1, S_2, S_3)$ 可写成如下矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \text{ or } \mathbf{I} = \mathbf{A}\mathbf{S}, \quad (6)$$

式中 \mathbf{I} 为光强矩阵， \mathbf{A} 为系统矩阵， \mathbf{S} 为从样品出射的光的 Stokes 矢量。由(6)式可知，只要测量出系统矩阵 \mathbf{A} ，且其行列式值不为零，逆矩阵 \mathbf{A}^{-1} 存在，由 4 个探测器测到光强矩阵 \mathbf{I} ，便可由 $\mathbf{S} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{I}$ 计算得到出射光的偏振态 \mathbf{S} 。

3.2 系统定标法

为了准确测量出系统矩阵 \mathbf{A} ，采用标准的 Equator-Poles 定标法(简称 E-P 法)^[18]，即利用线偏振光和圆偏振光实现系统定标。定标时，为了消除激光器输出功率起伏对测量结果的影响，使用归一化的电信号矢量 $\mathbf{I} = [i_0/i_4 \quad i_1/i_4 \quad i_2/i_4 \quad i_3/i_4]^T$ 来确定系统矩阵。此外，为了消除各个光电探测器的光电响应特性的差异对测量结果的影响，采用“同一化”办法对每个探测器的输出结果进行修正，使各个光电探测器的输出电压修正为同一探测器的输出电压，方法如下。1)首先测量出 5 个光电探测器的光电响应特性

曲线，并求出每个光电探测器的光电响应特性曲线的斜率 k_m ，其中 $m=0, 1, 2, 3, 4$ ；2)以斜率最小的光电探测器 D_0 为基准，其他各个探测器的输出电压作如下修正： $V_m^c = \frac{k_0}{k_m} V_m$ ，其中， V_m^c 为修正电压， V_m 为每个探测器的实际输出电压。这是因为：对于某一光强 i_m ，有 $V_m = k_m i_m$ ，则 $i_m = \frac{V_0}{k_0} = \frac{V_m}{k_m}$ 。以光电探测器 D_0 为基准，使其他各个光电探测器的输出电压修正为同一探测器 D_0 的输出电压： $V_m^c = V_0 = \frac{k_0}{k_m} V_m$ 。那么，修正后的各个光电探测器的输出电压等效于同一个探测器的输出电压，因此完全消除了光电响应特性的差异对测量结果的影响。在此基础上，进行系统定标。定标过程分为两步：1)使用线偏振光，激光经过偏振态发生器后，产生的线偏振光的 Stokes 矢量为 $\mathbf{S} = [1 \quad \cos 2\beta \quad \sin 2\beta \quad 0]^T$ (β 为起偏器的方位角)，在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的范围内，每隔 10° 旋转起偏器，记录 5 个探测器输出的电信号，归一化后，利用最小二乘法求得系统矩阵的前三列共 12 个矩阵元；2)使用圆偏振光，偏振态发生器分别产生右旋和左旋圆偏振光，它们的 Stokes 矢量为 $\mathbf{S}_R = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T$ 和 $\mathbf{S}_L = [1 \quad 0 \quad 0 \quad -1]^T$ ，通过运算求得系统矩阵的最后一列矩阵元。经过多次实验，测

量出系统矩阵 \mathbf{A} 为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.922 & 0.908 & 0.081 & 0.014 \\ 0.945 & 0.015 & -0.928 & 0.144 \\ 1.078 & -1.069 & 0.005 & 0.017 \\ 0.979 & -0.012 & -0.491 & 0.831 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其行列式为 -1.42 , 所以系统的仪器矩阵是非奇异的, 存在逆矩阵:

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} 0.526 & 0.064 & 0.448 & -0.029 \\ 0.528 & 0.047 & -0.486 & 0.007 \\ 0.495 & -1.127 & 0.402 & 0.179 \\ -0.320 & -0.74 & -0.297 & 1.343 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

为了检验系统矩阵的准确性, 采用已知偏振态的检测光, 通过已经标定过的 Stokes 参量测量系统, 测量出检测光的 Stokes 参量值, 然后与已知的 Stokes 参量值进行对比, 即可知道系统矩阵的准确程度。实验中, 由起偏器 P 和 $\lambda/4$ 波片 W 组成的偏振态发生器产生偏振态已知的检测光, 其 Stokes 参量可以由 P 和 W 的方位角准确知道。

设起偏器的 Muller 矩阵为 $\mathbf{M}_p(\beta)$, 其中 β 为起偏器的方位角; $\lambda/4$ 波片的 Muller 矩阵为 $\mathbf{M}_c(\theta)$, 其中 θ 为 $\lambda/4$ 波片的方位角; 激光器输出的是完全非偏振光, 其 Muller 矩阵为 $\mathbf{S}_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$; 激光器输出的激光依次经过起偏器和 $\lambda/4$ 波片, 其出射光的 Stokes 矢量为 \mathbf{S} 。根据偏振光传输理论有

$$\mathbf{S} = \mathbf{M}_c(\theta)\mathbf{M}_p(\beta)\mathbf{S}_0. \quad (9)$$

把起偏器和 $\lambda/4$ 波片的 Muller 矩阵代入(9)式, 整理后得

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos^2 2\theta \cos 2\beta + \sin 2\theta \cos 2\theta \sin 2\beta \\ \sin 2\theta \cos 2\theta \cos 2\beta + \sin^2 2\theta \sin 2\beta \\ \sin 2\theta \cos 2\beta - \cos 2\theta \sin 2\beta \end{bmatrix}. \quad (10)$$

由(10)式可见, 通过准确设定起偏器 P 和 $\lambda/4$ 波片 W 的方位角 β 和 θ , 便可以准确知道偏振态发生器输出的检测光的 Stokes 参量的理论值。然后利用已经标定过的 Stokes 参量测量系统, 测量出检测光的 Stokes 参量的实验值, 并与理论值进行比较。为简化计算和操作, 选取起偏器的方位角 β 为 45° 进行验证, 此时偏振态发生器的出射光的归一化 Stokes 参量仅由 $\lambda/4$ 波片的方位角 θ 来决定, 则(10)式可分别化简为

$$\mathbf{S}(\beta = 45^\circ) = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \sin 2\theta \cos 2\theta \\ \sin^2 2\theta \\ -\cos 2\theta \end{bmatrix}. \quad (11)$$

实验操作时, 将偏振态发生器中起偏器的方位角 β 固定为 45° , 将 $\lambda/4$ 波片旋转 $0^\circ \sim 180^\circ$, 以 10° 为步长, 产生 19 个不同偏振态的入射光, 用 Stokes 参量测量系统测量这些偏振态下的 Stokes 参量, 测量结果分别如图 2 所示。图中的实线为 4 个 Stokes 参

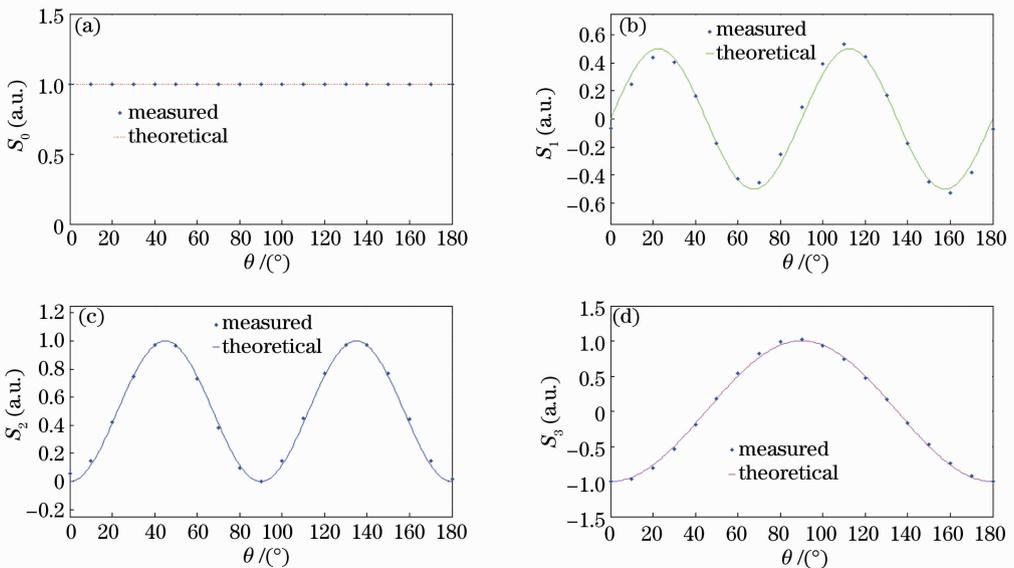


图 2 起偏器方位角 $\beta=45^\circ$ 时 4 个 Stokes 参量的测量值与理论值对比图

Fig. 2 Comparison between measured value and theoretical value of 4 Stokes parameters when the azimuth angle of polarizer $\beta=45^\circ$

量的理论值,点为 Stokes 参量测量值。由图 2 可见,Stokes 参量测量系统的测量值与理论值基本一致,说明本实验测量得到的系统矩阵是准确的。系统矩阵确定后,只要测得 4 个探测器的光强信号,便可根据(6)式,实时求得待测入射光的 Stokes 参量,确定其偏振态。

4 偏振态成像实验结果及分析

根据图 1 所示的实验装置,搭建了如图 3 所示的偏振态成像实验系统。选择各向同性的有机玻璃作为研究样品,有机玻璃为厚度为 4 mm、边长为 36 mm 的正方形薄片,在有机玻璃的两侧利用螺丝对称地施加大小相同方向相反的压力,如图 4 所示。在压力的作用下有机玻璃内部会产生应力双折射,由于其内部的应力分布不均匀,从而导致应力双折射的分布不均匀。当偏振光通过该区域时,出射光的偏振态会发生改变。利用 X-Y 扫描系统对样品进行逐点扫描,扫描间隔为 0.2 mm,逐点测量出样品各点的 Stokes 参量,然后将 Stokes 参量转换成三基色 RGB,用 RGB 的色度值作为该像素点的色度值进行二维成像,从而获得成像物体的偏振态分布图像。

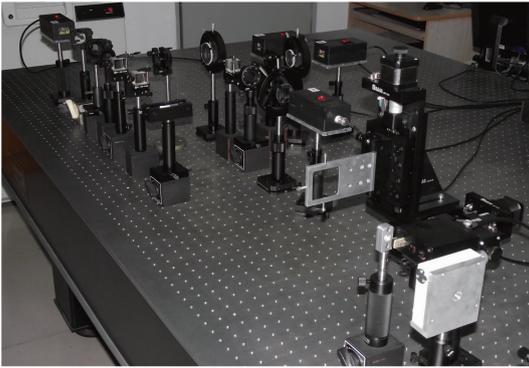


图 3 偏振态成像实验系统

Fig. 3 Experimental system of polarization imaging

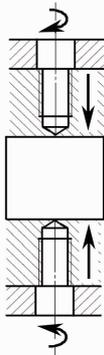


图 4 测试样品装置图

Fig. 4 Setup of sample holder

为了验证该成像方法的可靠性,根据图 1 所示的实验系统,分别用传统的光弹性应力测量法和新的偏振态成像法对同一目标区域同时进行偏振成像,获得了很有意义的研究结果。

4.1 基于分振幅 Stokes 参量测量的光弹性应力分布图像

传统的光弹性应力测量方法是通过测量物体沿两主应力方向的相位差来测量应力分布的。根据传统的光弹性应力测量理论,当一列平面偏振光垂直入射一厚度为 d 、受二向应力作用的光弹性样品时,由于应力双折射效应,沿两主应力方向的偏振分量通过样品后产生的光程差 R 与样品的厚度 d 及主应力差 $\sigma_1 - \sigma_2$ 的关系为

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{R}{Cd}, \quad (12)$$

将光程差 R 换算为相应的相位延迟量 δ ,则有

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\lambda}{2\pi Cd} \delta, \quad (13)$$

(12)式和(13)式中, C 为待测样品的应力光学常数, λ 为入射平面偏振光的波长。显然,通过测量单色平面偏振光经过样品后的相位延迟量 δ ,可测量出样品的应力值。而相位延迟量 δ 与 Stokes 参量之间的关系为

$$\cos \delta = \frac{(S'_3 + S_3)^2 - (S'_2 - S_2)^2 - (S'_1 - S_1)^2}{(S'_3 + S_3)^2 + (S'_2 - S_2)^2 + (S'_1 - S_1)^2}, \quad (14)$$

式中 S_1, S_2, S_3 分别为入射光的 Stokes 参量, S'_1, S'_2, S'_3 分别为透过样品后的出射光的 Stokes 参量。实验中,为了简化实验过程,通常以 45° 线偏振光作为入射光进行测量,而 45° 线偏振光的 Stokes 参量为 $(0, 1, 0)$,则(14)式可简化为

$$\delta = \arccos \frac{S'_3 - (S'_2 - 1)^2 - S_1^2}{S_3^2 + (S'_2 - 1)^2 + S_1^2}. \quad (15)$$

显然,只要测量出出射光的 Stokes 参量 S'_1, S'_2, S'_3 ,便可以测量出相位延迟量 δ ,再通过(13)式计算出样品的应力值。对样品进行 X-Y 方向扫描,逐点测量出样品各点的 Stokes 参量,从而获得有机玻璃的应力分布,实验结果如图 5 所示。由图 5 可见,采用基于分振幅 Stokes 参量的光弹性应力测量法获得的应力分布图像与 Kihara^[4]采用反正切函数解包裹技术获得的原始应力分布图像是完全一样的,说明采用基于分振幅 Stokes 参量的光弹性应力测量法获得的应力分布是可靠的。

4.2 偏振态成像

利用图 1 所示的实验系统,测量出有机玻璃同

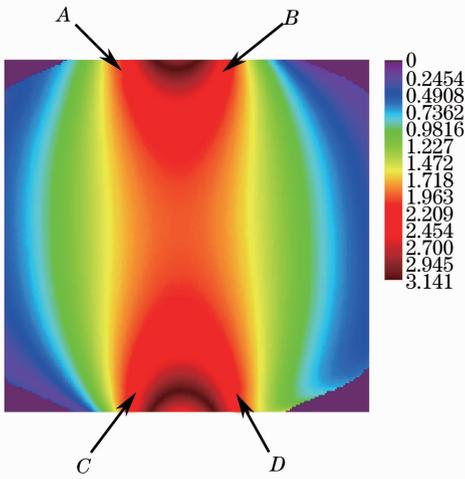


图 5 应力的二维分布

Fig. 5 2D distribution of photoelastic stress

一目标区域的 Stokes 参量 S'_1 、 S'_2 、 S'_3 ，然后把每一点的 Stokes 参量转换成三基色 RGB； $S_1 = R$ ， $S_2 = G$ ， $S_3 = B$ ，并把相应的每个基色分成 256 个灰阶，然后计算出其相应的偏振色度值，再用相应的偏振色度值作为该像素点的色度值进行二维图像重建，从而获得该样品的偏振态二维分布。实验结果如图 6 所示。

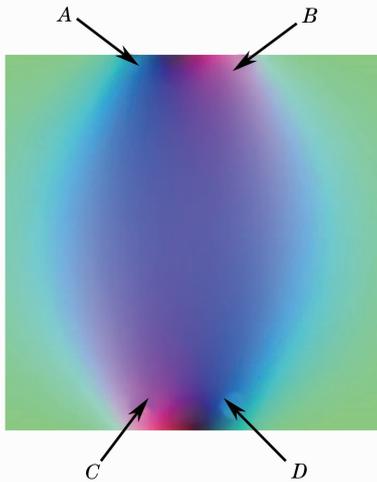


图 6 偏振态的二维分布

Fig. 6 2D distribution of polarization states

4.3 偏振态成像实验结果的分析

1) 由图 5 可见，图像的颜色是左右对称分布的，说明样品所受到的应力大小是左右对称的。但在实验系统中，有机玻璃的应力是通过两个螺丝反向旋转方式施加的(如图 4 所示)，即应力的大小是左右对称，但应力的方向是左右反向的，因而有机玻璃所受到的应力(包括大小和方向)应该是 180° 旋转对称性，但图 5 的实验结果并不能反映应力方向

的变化。说明采用光弹性应力测量法只能获得应力大小的分布图像而无法获得应力方向的分布图像。

2) 从图 6 可见，由偏振态分布图像所测量到的应力分布确实是 180° 旋转对称的，说明偏振态的分布图像既反映了应力的大小分布，也反映了应力的方向分布。这是因为，偏振态的改变不仅与应力的大小有关，还与应力的方向有关。即使在应力大小相同的条件下，只要应力方向不同，其对应的 Stokes 参量也不相同，因而其对应的偏振态图像也不相同。因此，只要测量出偏振态的分布，就可以测量出应力的大小和方向的分布。

3) 比较图 5 和图 6 可见：偏振态分布图像和应力分布图像所反映的信息是不同的。在图 5 中，A、B、C、D 4 个点的颜色相同，说明 A、B、C、D 点的应力大小相同；但在图 6 相应的 A、B、C、D 4 个点中，A 点与 D 点的偏振色度值相同，说明 A 点与 D 点的偏振态完全相同，从而说明 A 点与 D 点的应力大小和方向都相同，这正好反映了 A 点与 D 点实际所受到的应力方向刚好同向这一事实；同样 B 点与 C 点的偏振色度值相同，说明 B 点与 C 点的偏振态完全相同，从而说明 B 点与 C 点的应力大小和方向都相同。这充分说明了偏振态图像比传统的光弹性应力分布图像包含更丰富的信息。此外，从图 6 可见，A 点与 B 点的偏振色度值并不相同，表明 A 点与 B 点的偏振态并不相同，从而说明，尽管 A 点与 B 点的应力大小相同，但其应力方向并不相同，这充分说明了偏振态成像法的优越性。

4) 偏振态成像法可以获得物体偏振态的空间分布图像，无需用相空间来表达偏振态的分布，因而可以非常直观地观察物体表面的偏振态分布，而且偏振色度值相同的点具有相同的偏振态，因而这种偏振态成像方法在表面检测方面具有非常独特的优势。

5 结 论

通过偏振色度值这个物理量，建立了偏振态与像素点之间的一一对应关系，从而可以实现偏振态的可视化及其成像。以物体的偏振态作为成像物理量进行成像，可以获得成像物体偏振态的空间分布。由于偏振态记录了物体的全部偏振信息，因此，偏振态成像法比偏振光成像法包含更丰富的信息。基于分振幅 Stokes 参量测量的偏振态成像法，不仅可以测量应力的大小分布，还可以测量应力的方向分布。

参 考 文 献

- 1 Cao Nianwen, Liu Wenqing, Zhang Yujun. Quantitatively study of improvements of the image contrast and imaging range by the polarization technique [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, 49(1): 62–66.
曹念文, 刘文清, 张玉钧. 偏振成像技术提高成像清晰度、成像距离的定量研究 [J]. *物理学报*, 2000, 49(1): 62–66.
- 2 Cao Nianwen, Liu Wenqing, Zhang Yujun, *et al.*. The circular polarization image and the calculation for the farthest imaging range for underwater objects [J]. *Chinese J Lasers*, 2000, 27(2): 150–154.
曹念文, 刘文清, 张玉钧, 等. 水下目标圆偏振成像及最远成像距离的计算 [J]. *中国激光*, 2000, 27(2): 150–154.
- 3 Zhao Yongqiang, Pan Quan, Chen Yuchun, *et al.*. Clutter reduction based on polarization imaging technology and image fusion theory [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(3): 433–435.
赵永强, 潘泉, 陈玉春, 等. 基于偏振成像技术和图像融合理论杂乱背景压缩 [J]. *电子学报*, 2005, 33(3): 433–435.
- 4 T Kihara. An arctangent unwrapping technique of photoelasticity using linearly polarized light at three wavelengths [J]. *Strain*, 2003, 39(2): 65–71.
- 5 T Kihara. A study of stress analysis for a residual stress model by digital photoelasticity [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2008, 13-14: 59–64.
- 6 W G Egan. Polarization and surface roughness [C]. *SPIE*, 1998, 3426: 144–152.
- 7 Wen Donghai, Jiang Yuesong, Zhang Xuguo, *et al.*. Speckle characteristics of laser radar polarization imaging and despeckling algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0311003.
闻东海, 江月松, 张绪国, 等. 激光偏振成像散斑统计特性和抑制方法研究 [J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0311003.
- 8 Zhang Ruijin, Xian Hao, Rao Changhui, *et al.*. Study on effect of polarization filter for suppressing sky background light in daytime [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0501003.
张锐进, 鲜浩, 饶长辉, 等. 偏振滤波白天抑制天光背景作用分析 [J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0501003.
- 9 Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu, *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0101002.
郝增周, 龚芳, 潘德炉, 等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性 [J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0101002.
- 10 M Vedel, S Breugnot, N Lechocinski. Full Stokes polarization imaging camera [C]. *SPIE*, 2011, 8160: 81600X.
- 11 A G Ushenko, A V Dubolozov, O Yu Novakovska. Multidimensional laser microscopy of polarization-singular structure of phase-inhomogeneous layers for diagnostics and classification of their optical properties [C]. *SPIE*, 2012, 8411: 84110J.
- 12 Lianhua Jin, Kuniharu Takizawa. Stokes parameters of reflected and scattered light by a rough surface [C]. *SPIE*, 2009, 7432: 74320B.
- 13 Zhang Chaoyang, Cheng Haifeng, Chen Zhaohui, *et al.*. The present research and developing trend of polarization remote sensing [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(12): 1237–1240.
张朝阳, 程海峰, 陈朝辉, 等. 偏振遥感的研究现状及发展趋势 [J]. *激光与红外*, 2007, 37(12): 1237–1240.
- 14 Tan Zuojun, Li Jun, Chen Haiqing. Application of polarization measurement in the identification of the space targets [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(3): 200–203.
谭佐军, 李俊, 陈海清. 偏振探测技术在空间目标识别中的应用 [J]. *激光与红外*, 2007, 37(3): 200–203.
- 15 Zhao Yongqiang, Zhang Hongcai, Pan Quan. Object detection through polarization characteristics [J]. *Chinese J Quantum Electronics*, 2003, 20(6): 685–688.
赵永强, 张洪才, 潘泉. 基于偏振特征的目标检测 [J]. *量子电子学报*, 2003, 20(6): 685–688.
- 16 C S L Chun, F A Sadiadi. Polarimetric laser radar target classification [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(14): 1806–1808.
- 17 Liao Yanbiao. *Polarization Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003. 52–61, 243–244.
廖延彪. *偏振光学* [M]. 北京: 科学出版社, 2003. 52–61, 243–244.
- 18 R M A Azzam, A G Lopez. Accurate calibration of the four-detector photopolarimeter with imperfect polarization optical elements [J]. *J Opt Soc Am A*, 1989, 6(10): 1513–1521.

栏目编辑: 张 腾