

## 用于应力双折射分布测量的多构型扫描系统设计

岐临凯 李克武 李坤钰 王志斌 李晋华

### Design of multi-configuration scanning system for stress birefringence distribution measurement

QI Linkai, LI Kewu, LI Kunyu, WANG Zhibin, LI Jinhua

引用本文:

岐临凯, 李克武, 李坤钰, 等. 用于应力双折射分布测量的多构型扫描系统设计[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 608–615. DOI: 10.5768/JAO202445.0301003

QI Linkai, LI Kewu, LI Kunyu, et al. Design of multi-configuration scanning system for stress birefringence distribution measurement[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(3): 608–615. DOI: 10.5768/JAO202445.0301003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0301003>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于透镜畸变效应的仿人眼扫描系统设计

Design of retina-like scanning system based on distortion effect of lens

应用光学. 2021, 42(3): 418–422 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301007>

#### 基于空间光调制器的光束大角度扫描技术研究

Large angle range beam scanning control based on crystal spatial light modulator

应用光学. 2020, 41(4): 816–821 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409803>

#### 用于液体传感的高双折射新型光子晶体光纤结构

New photonic crystal fiber structure with high birefringence for liquid sensing

应用光学. 2020, 41(3): 637–644 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0308004>

#### 应用于激光扫描投影仪器的动态聚焦技术研究

Research on dynamic focusing system of laser scanning projection instrument

应用光学. 2018, 39(5): 605–612 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0501003>

#### 基于FPGA的PPM调制可见光图像传输系统

FPGA-based PPM modulated visible light image transmission system

应用光学. 2019, 40(1): 162–166 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0108002>

#### 可用于现场快速检测的小型化多通道光谱测量系统

Portable multi-channel spectral measurement system for rapid on-site detection

应用光学. 2021, 42(2): 310–316 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0203004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 03-0608-08

# 用于应力双折射分布测量的多构型扫描系统设计

岐临凯<sup>1,3,4</sup>, 李克武<sup>1,3,4</sup>, 李坤钰<sup>2,3,4</sup>, 王志斌<sup>2,3,4</sup>, 李晋华<sup>3,4</sup>

(1. 中北大学 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051; 3. 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051; 4. 中北大学 前沿交叉科学研究院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 为了实现对不同构型光学样品进行应力双折射分布测量, 在使用双弹光调制方法的基础上, 设计了一种应用于双折射分布测量的多构型扫描系统。该系统在保证测量的高分辨率的同时, 通过保持激光器静止, 同时使样品进行快速移动, 提高了测量精度与广度。在样品测量方面, 采用 633 nm (1/4) 玻片测试, 测试相对误差的范围为 0.79%~0.95%, 波动范围为 0.12 nm, 标准差为 0.035 2; 采用 BK7 玻璃样品测试, 波动范围为 0.25 nm, 标准差为 0.038 9。在扫描精度方面, 连续扫描精度误差不超过 0.05 mm, 连续寸动扫描精度误差不超过 0.009 mm。对比实验结果可得出, 该多构型扫描系统可有效解决对样品任一区域实现高精度应力双折射测量的问题。

**关键词:** 多构型扫描系统; 弹光调制; 应力双折射; 上位机设计

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0301003

## Design of multi-configuration scanning system for stress birefringence distribution measurement

QI Linkai<sup>1,3,4</sup>, LI Kewu<sup>1,3,4</sup>, LI Kunyu<sup>2,3,4</sup>, WANG Zhibin<sup>2,3,4</sup>, LI Jinhua<sup>3,4</sup>

(1. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. School of Instrumentation and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China; 3. Shanxi Optoelectronic Information and Instrument Engineering Technology Research Center, Taiyuan 030051, China; 4. Institute of Frontier and Interdisciplinary Sciences, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to measure the stress birefringence distribution of optical samples with different configurations, a multi-configuration scanning system for birefringence distribution measurement was designed based on the double elastic light modulation method. The system not only ensured the high resolution of the measurement, but improved the measurement accuracy and breadth by keeping the laser stationary and making the sample move quickly. In terms of sample measurement, the 633 nm (1/4) glass was adopted to test, the relative error of the detection results was 0.79%~0.95%, with a variation range of 0.12 nm, and the standard deviation was 0.035 2. The variation range of the BK7 glass sample was 0.25 nm, and the standard deviation of the experimental results was 0.038 9. For scanning accuracy, the continuous scanning accuracy error does not exceed 0.05 mm, and the continuous inching scanning accuracy error is less than 0.009 mm. According to the above two experimental results, it can be concluded that the multi-configuration scanning system can effectively solve the problem of high precision stress birefringence measurement in any area of the sample.

**Key words:** multi-configuration scanning system; elastic light modulation; stress birefringence; PC computer design

收稿日期: 2023-07-27; 修回日期: 2023-09-19

基金项目: 国家自然科学基金 (62205310); 山西省自然科学基金 (201901D211234)

作者简介: 岐临凯 (1997—), 男, 硕士, 主要从事光电信息检测研究。E-mail: 858515048@qq.com

通信作者: 王志斌 (1966—), 男, 硕士, 教授, 主要从事光电信息物理、测试计量技术及仪器、光电子技术及仪器、光学工程研究。E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn

## 引言

随着技术的不断进步, 光电类武器不断进行升级, 我们正朝着多波段、宽视角、超远程和高分辨率的方向发展<sup>[1]</sup>, 对不同构型的样品进行应力分布测量成为当前的首要解决问题。应力双折射测量的方法主要有干涉法<sup>[2]</sup>、Searnmont 补偿法<sup>[3]</sup>、调制法<sup>[4,5]</sup>等。英国夏普应力工程有限公司的 Searnmont 补偿法偏光应力仪 S-66<sup>[6,7]</sup> 采用钠光灯光源, 实现的测量精度为 0.2 nm; 德国生产的自动应力测试系列产品, 型号为 StrainMatic, 测量精度为  $\pm 0.1$  nm, 但是样品测量范围只有  $36 \times 36$  mm<sup>[8,9]</sup>; 目前国内生产的应力仪主要是基于干涉法和 Searnmont 补偿法的偏振分析原理, 比较有代表性的产品是台偏式应力仪 PSV-702, 该仪器利用 Searnmont 补偿法, 虽然价格低廉, 但在操作过程中需要旋转检偏器, 无法满足对于宽波段光学材料应力测试的要求<sup>[10,11]</sup>。以上所提及的型号产品, 无法保证实现对多构型样品的应力双折射分布测量。

而弹光调制器由于拥有调制频谱宽、调制纯度高、波段范围广的优点, 已被广泛应用于双折射检测、光谱测量等应用领域中<sup>[12,13]</sup>。采用弹光调制器的双折射测量技术, 精度较高, 无需机械转动, 仅需一次测量就可以实现对快轴角以及相位延迟量的测量<sup>[14]</sup>。

针对目前对不同构型样品实现高精度应力分布测量问题, 本文在双弹光调制的基础上设计了

一种应用于双折射分布测量的多构型扫描系统, 在保证高精度的同时设计出不同扫描算法, 实现了对样品任一区域进行快速、准确的应力双折射分布测量, 并进行了实验验证。

## 1 测量原理

如图 1 所示, 将待测样品放置于两个弹光调制器中间, 激光器的激光经此测量系统后, 被探测器接收<sup>[15]</sup>。

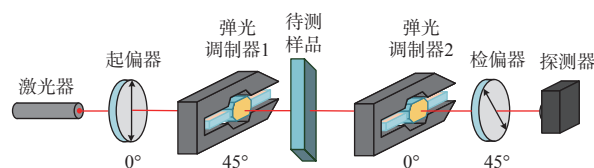


图 1 双折射测量系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of birefringence measurement system

用 Muller 矩阵能够全面反映目标的偏振光学特性。根据所搭建的光路系统, 其 Stokes 参量与 Muller 矩阵关系如下:

$$S_{\text{out}} = M_A M_{\text{PEM2}} M_{\text{sample}} M_{\text{PEM1}} M_P S_{\text{in}} \quad (1)$$

式中:  $M_P$ 、 $M_A$  为起偏与检偏的 Muller 矩阵;  $M_{\text{PEM1}}$ 、 $M_{\text{PEM2}}$  为弹光调制器 1、2 的 Muller 矩阵;  $M_{\text{sample}}$  为光学材料的 Muller 矩阵;  $S_{\text{in}}$  为入射光信号。

待测光学样品的 Muller 矩阵展开式为

$$M_{\text{sample}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\rho) + \sin^2(2\rho)\cos X & \sin(4\rho)\sin^2\left(\frac{X}{2}\right) & -\sin(2\rho)\sin X \\ 0 & \sin(4\rho)\sin^2\left(\frac{X}{2}\right) & \sin^2(2\rho) + \cos(2\rho)\cos X & \cos(2\rho)\sin X \\ 0 & \sin(2\rho)\sin X & -\cos(2\rho)\sin X & \cos X \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $\rho$  表示双折射的快轴方位角;  $X$  则表示相位延迟量。

由于探测器得到的光强仅为 Stokes 矢量的第 1 个分量, 则将各个器件的 Muller 矩阵带入到式 (1) 中即可得到探测器探测的光强为

$$I = \frac{KI_0}{2} [1 + \sin\delta_1 \sin\delta_2 \cos X + \cos\delta_1 \cos\delta_2 \sin(4\rho) \sin^2\left(\frac{X}{2}\right) + \cos\delta_1 \sin\delta_2 \cos(2\rho) \sin X + \sin\delta_1 \cos\delta_2 \sin(2\rho) \sin X] \quad (3)$$

式中:  $K$  为光电常数;  $I_0$  为激光经过起偏器后的光强;  $\delta_1$  和  $\delta_2$  为弹光调制器 1、2 的相位调制幅度, 可进一步表示为

$$\begin{cases} \delta_1 = \delta_{10} \sin w_1 t \\ \delta_2 = \delta_{20} \sin w_2 t \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $w_1$  和  $w_2$  分别表示弹光调制器 1、2 的频率;

$\delta_{10}$  和  $\delta_{20}$  分别表示弹光调制器 1、2 的相位调制幅度。

将式 (4) 反带入式 (3), 并用第一类贝塞尔级数展开得:

$$I = \frac{KI_0}{2} [1 + J_0(\delta_{10}) J_0(\delta_{20}) \sin(4\rho) \sin^2\left(\frac{X}{2}\right) + K + 2J_1(\delta_{10}) J_1(\delta_{20}) \cos(w_1 t - w_2 t) \cos X + \dots + 2J_3(\delta_{10}) J_3(\delta_{20}) \sin(3w_1 t - 2w_2 t) \sin(2\rho) \cos X] \quad (5)$$

得到式 (5) 所示的探测器光强表达式后, 通过数字锁相技术, 得到不同倍频的频率信号, 并据此求出相位延迟量  $\rho$  和快轴方位角  $X$ 。对式 (5) 中的信号幅值进行处理可以得到:

$$\begin{cases} V_{(w_2 - w_1)} = KI_0 J_1(\delta_{10}) J_1(\delta_{20}) \cos X \\ V_{w_1} = KI_0 J_0(\delta_{20}) J_0(\delta_{20}) \sin(2\rho) \sin X \\ V_{w_2} = KI_0 J_0(\delta_{20}) J_1(\delta_{20}) \cos(2\rho) \sin X \end{cases} \quad (6)$$

定义比值 $R_1$ 和 $R_2$ 为

$$\begin{cases} R_1 = \frac{V_{w_1} J_1(\delta_{20})}{V_{(w_2-w_1)} J_0(\delta_{20})} = \sin(2\rho) \tan X \\ R_2 = \frac{V_{w_2} J_1(\delta_{10})}{V_{(w_2-w_1)} J_0(\delta_{10})} = \cos(2\rho) \tan X \end{cases} \quad (7)$$

则快轴方位角 $\rho$ 和相位延迟量 $X$ 可表示为

$$\begin{cases} \rho = \frac{1}{2} \arctan \frac{R_1}{R_2} \\ X = \arctan \sqrt{R_1^2 + R_2^2} \end{cases} \quad (8)$$

最后,根据求得的快轴方位角 $X$ 和入射光波长 $\lambda$ ,可得到双折射的延迟量 $\Delta$ 为

$$\Delta = X \frac{\lambda}{2\pi} \quad (9)$$

由式(9)可以得出,根据弹光调制器的相位调制幅值,通过对不同样品的不同频率幅值进行测量,能够实现对样品单一点同时进行双折射延迟量和快轴方位角的测量。

对于不同构型的待测样品,设计出相应的扫描算法,实现对样品任一区域进行应力双折射分布测量。

## 2 测量系统整体设计

系统整体设计框图如图2所示,将测量光路搭建完毕后,使用弹光驱动电路使两个弹光调制器处于谐振工作状态。借助二维扫描平台,使用可移动导轨固定样品,采用单一点的双折射测量原理,可实现对不同构型样品的面阵式应力双折射分布测量。

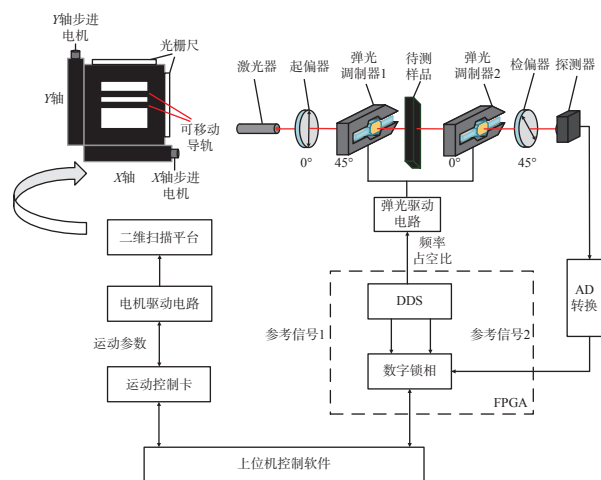


图2 系统整体设计框图

Fig. 2 Block diagram of overall system design

在系统对待测样品进行面阵式测量过程中,二维扫描平台会进行位移,所以位移精度也是测试系统的一个重要参数,该项参数会依据光栅尺返回的位置信息和目标位置信息参考进行对比。在实际测试中,最小的位移单位为mm,所以只需要

保证最大位移误差在0.1 mm即5%内,就不会对应力的测量结果产生影响。

### 2.1 扫描算法设计模块

方形扫描算法的步骤为:首先确定 $x$ 、 $y$ 轴的起始与终点坐标信息,判断出扫描距离与寸动次数; $x$ 轴开始寸动,在到达终点后进行位置判断,确定终点位置坐标信息后, $y$ 轴寸动一次,且 $x$ 轴随即往反方向运动,并进行终点位置判断;在扫描范围内反复循环,直到 $x$ 、 $y$ 轴都运动到终点位置处,完成此次扫描。

圆域扫描算法的步骤为:首先确定待测圆域半径,根据半径推算出扫描起始点以及扫描距离,后续扫描方式与方形扫描方式一致。在该扫描算法运行时,会对圆域的扫描精度进行判断,如果该精度达不到 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ ,则舍去该扫描范围对下一区域进行扫描,该判断条件主要针对于圆形待测样品的圆弧部分。扫描模块流程图如图3所示。

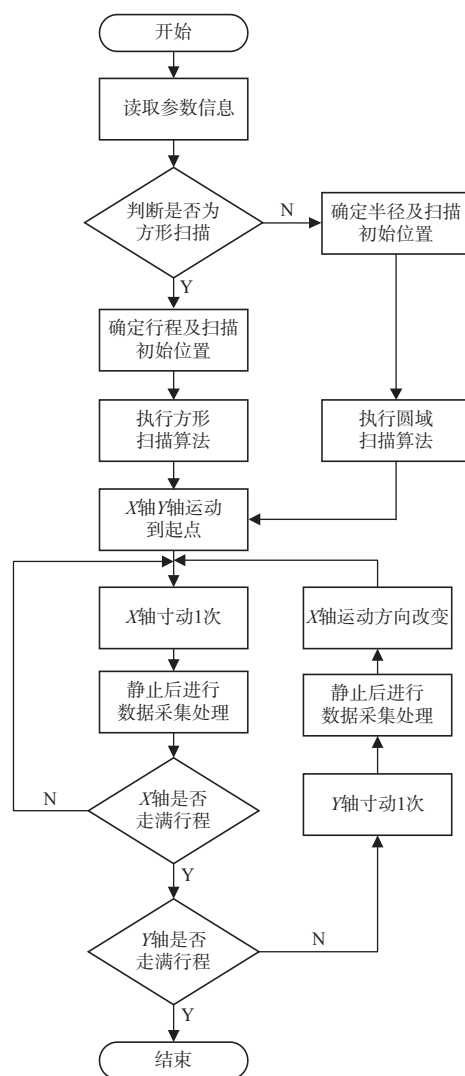


图3 扫描模块流程图

Fig. 3 Flow chart of scanning module



## 2.2 数据处理模块

每次传输时, FPGA 模块会通过 USB 接口向上位机传输一包数据, 上位机拿到数据后根据相关公式和算法对其进行处理。根据每个位置的数据所代表的信息, 进行相应的计算。其中根据上位机获取平移台的实时位置信息, 利用 FPGA 的数字锁相模块找到各倍频项的正余弦值, 然后通过计算得到各倍频项的幅值, 根据测量原理利用得到的幅值做除法运算消除无关项, 最终计算延迟量。数据处理模块流程图如图 4 所示。

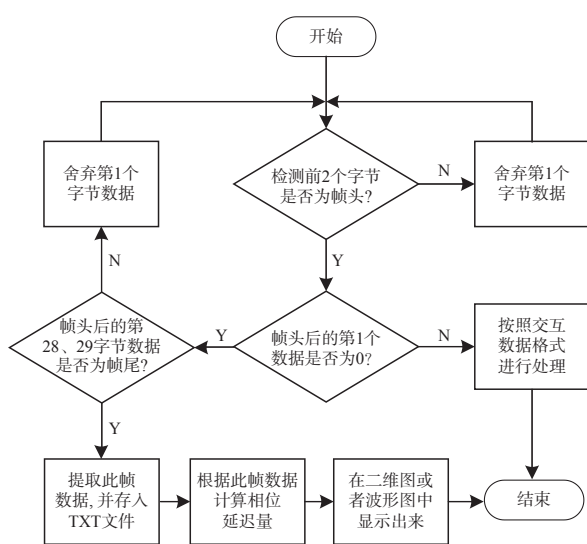


图 4 数据处理模块流程图

Fig. 4 Flow chart of data processing module

## 2.3 显示模块

为了更直观地显示样品应力分布的情况, 上位机根据接收到的样品位置信息和计算出的延迟量、快轴方位角信息, 在二维显示图中进行直观的显示, 其中延迟量用不同的颜色来表示, 快轴方位角由每个格子中心斜线的倾斜度来表示。

上位机通过绘制色列图的方式对其进行显示。色列图的 3 个颜色显示和透明度显示都可以用 0~255 来表示。结合上述颜色显示的机理, 在程序中开辟一个 100×4 位的数组, 其中 100 代表色列图由 100 个色块组成, 4 代表每块色块由 A、R、G、B 这 4 个元素组成。

由 255×色彩系数就等于该原色的真实数值, A 为固定值 255, 表示完全不透明。按照该色列图填色原理, 能得出颜色分布均匀的色列图。当完成含有 100 个色块的色列图后, 只需把计算出的光程差比上探测器的波长即可算出此光程差对应的比例, 数值越大, 颜色越深, 然后根据此比例在色

列图的对应位置找到相应颜色即可。

上位机最终设计界面如图 5 所示, 界面左边为括弹光控制和二维扫描平台控模块以及单点扫描模块; 界面中间为双折射测量的二维分布显示; 界面右边为数据处理模块, 用于显示数据分布及占比情况。

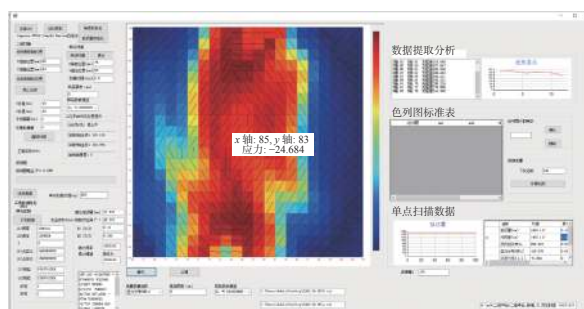


图 5 人机交互界面

Fig. 5 Man-machine interaction interface

## 3 实验验证

为了验证该系统的可行性, 首先对扫描平台进行二维扫描精度测量实验; 其次对不同构型样品进行重复性测试, 分析其精度。

### 3.1 二维扫描精度实验

该部分实验主要从连续扫描误差分析及连续寸动扫描误差分析对该系统的测量精度进行验证。

#### 3.1.1 连续扫描误差分析

本次实验在所搭建的系统框架下, 对扫描平台的  $x$  轴与  $y$  轴进行了各自 150 mm 的连续扫描, 将扫描过程中所得到的实际坐标值与标准坐标值进行误差分析, 误差分析图分别如图 6 和图 7 所示。在连续扫描实验中,  $x$  轴与  $y$  轴的连续扫描误差均小于 0.005 mm, 满足连续扫描步进误差要求。

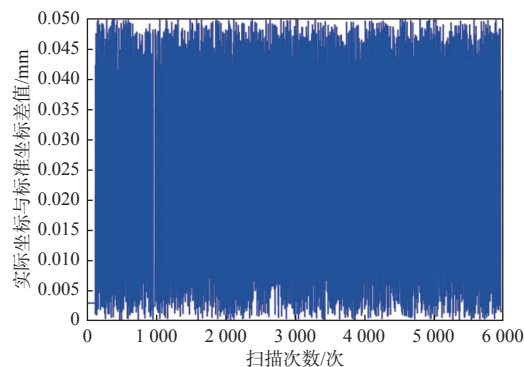


图 6  $x$  轴连续扫描误差

Fig. 6 X-axis continuous scanning error

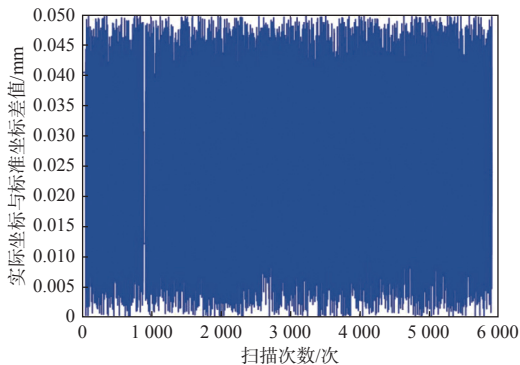


图 7 y 轴连续扫描误差

Fig. 7 Y-axis continuous scanning error

### 3.1.2 连续寸动扫描误差分析

连续寸动扫描时,  $x$  轴与  $y$  轴每次步进 2 mm, 则各自步进 150 mm。记录两轴每次步进的位置, 与标准坐标位置对比并进行误差分析, 误差分析图分别如图 8 和图 9 所示。

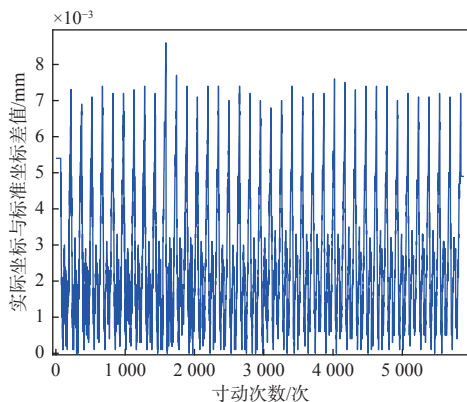


图 8 x 轴连续寸动扫描误差

Fig. 8 X-axis continuous inching scanning error

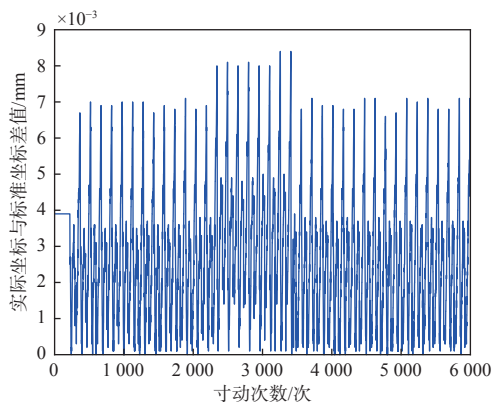


图 9 y 轴连续寸动扫描误差

Fig. 9 Y-axis continuous inching scanning error

在连续寸动扫描实验中,  $x$  轴与  $y$  轴的连续扫描误差均小于 0.009 mm, 满足连续寸动扫描步进

误差要求。

### 3.2 样品扫描及重复性测试

该实验分为延迟量和快轴方位角重复性测试。在测试过程中, 圆形扫描测试样品选择 633 nm (1/4) 玻片, 方形扫描测试样品选择 BK7 玻璃。首先, 对这两种不同构型的样品进行单点扫描, 测试其重复性。其中 1/4 玻片旋转到 164°, 在该点进行单点扫描, 采集 2 500 组左右的数据进行重复性分析; 对 BK7 玻璃样品施加应力, 在其施加应力处进行单点扫描。测试结果如图 10 和图 11 所示。

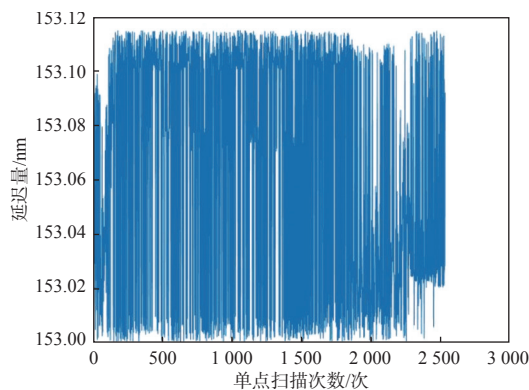


图 10 1/4 玻片延迟量重复性测试结果

Fig. 10 Test results of 1/4 slide retardation repeatability

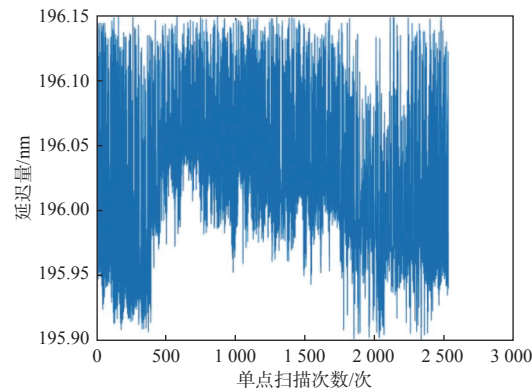


图 11 BK7 玻璃延迟量重复性测试结果

Fig. 11 Test results of BK7 glass retardation repeatability

选取 1/4 玻片的 164° 及 BK7 玻璃的 89° 进行快轴方位角进行重复性测试, 测试结果如图 12 和图 13 所示。不同样品的重复性测量结果如表 1 所示。

对重复性试验所测得数据进行分析, 633 nm (1/4) 玻片的延迟量波动范围为 0.12 nm, 标准差为 0.035 2 nm; 快轴方位角波动范围为 0.13°, 标准差为 0.022 5°。BK7 玻璃样品的延迟量波动范围为 0.25 nm, 标准差为 0.038 9 nm; 快轴方位角波动范

围为 0.13°, 标准差为 0.037 0°, 均满足重复性测试要求且重复性良好。其中, 测量数据产生波动的原因是光源的不稳定会造成数据测试的偏差。

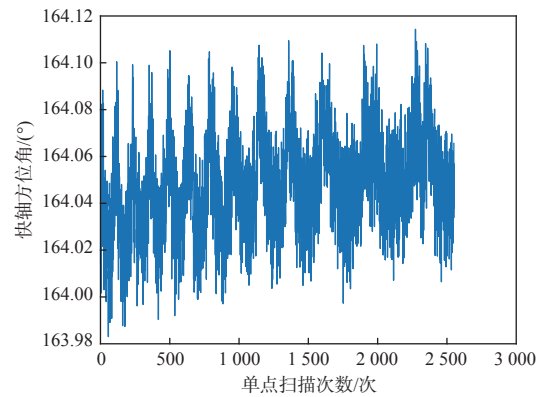


图 12 1/4 玻片快轴方位角重复性测试结果  
Fig. 12 Test results of 1/4 slide fast axis azimuth repeatability

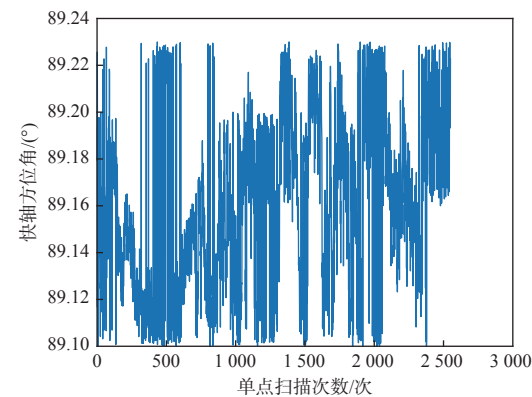


图 13 BK7 玻璃快轴方位角重复性测试结果  
Fig. 13 Test results of BK7 glass fast axis azimuth repeatability

表 1 不同样品的重复性测量结果  
Table 1 Repeatability measurement results of different samples

样品	测量数据类型	波动范围	标准差
633 nm(1/4)玻片	延迟量	0.12 nm	0.035 2 nm
	快轴方位角	0.13°	0.022 5°
BK7玻璃	延迟量	0.25 nm	0.038 9 nm
	快轴方位角	0.13°	0.037 0°

在保证对样品的高精度测量下, 对两个不同构型样品进行面阵式扫描, 扫描结果如图 14 和图 15 所示。

在图 14 和图 15 中, x、y 轴均为样品所在扫描平台的坐标, 扫描平台的 x、y 轴坐标范围均为 0~

150 mm, 不同颜色代表相位延迟量的不同。该测试玻片的允许误差为  $\lambda\%$ , 即测试结果在 152 nm~166 nm 之间即可满足要求。在图 14 所示的测试结果中, 该玻片的延迟量分布普遍在 153 nm 左右, 最大为 164 nm, 满足测量精度要求。

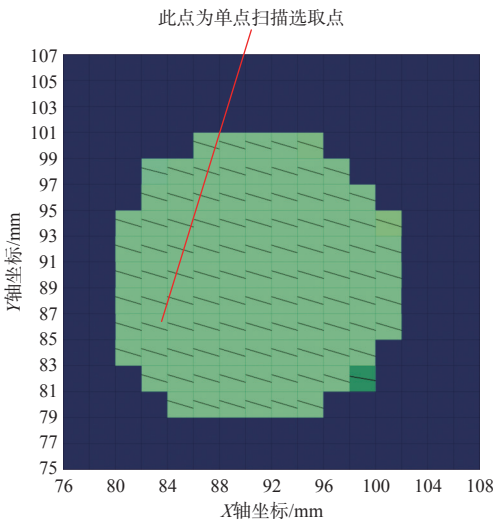


图 14 1/4 玻片扫描结果  
Fig. 14 Scanning results of 1/4 slide

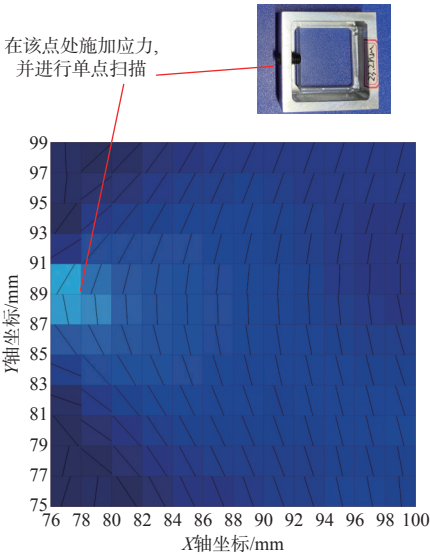


图 15 BK7 玻璃扫描结果  
Fig. 15 Scanning results of BK7 glass

4 结论

本文设计了一种应用于双折射分布测量的多构型扫描系统, 实现了对不同构型样品进行高精度应力双折射分布测量。首先采用单点扫描验证其测量的高精度性, 其次采用面阵式扫描测量其双折射分布。其中, 对圆形样品 633 nm(1/4)玻片

进行测试,测量误差最小为 0.79%,最大误差为 0.95%,单点测量延迟量波动范围为 0.12 nm,标准差为 0.035 2 nm;快轴方位角波动范围为 0.13°,标准差为 0.022 5°。对方形样品 BK7 玻璃样品施加应力进行测试,在 195.94 nm 处进行单点测量,延迟量波动范围为 0.25 nm,标准差为 0.038 9 nm;快轴方位角波动范围为 0.13°,标准差为 0.037 0°。测量精度方面,连续扫描过程中,误差最大为 2.5%,而在连续寸动扫描过程中,最大误差为 0.45%,均远高于允许误差范围。验证了该测量系统的高精度性。此系统的主要优势在于无需转动待测样品或检偏器,并且在保证高精度的同时实现对样品的面阵完整性测量。

#### 参考文献:

- [1] 肖昊苏,张运强,范志刚,等.偏振干涉法测量晶体应力双折射精度分析[J].红外与激光工程,2011,40(2): 271-276.  
XIAO Haosu, ZHANG Yunqiang, FAN Zhigang, et al. Precision analysis of polarization interference method for measuring stress birefringence of crystal[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(2): 271-276.
- [2] 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 Fen, CHEN Lei, XU Chen. Dynamic phase-shifting interferometry for full field retardation distributing of quarter wave plate[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(11): 2296-2299.
- [3] 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, WU Lantuya, 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.
- [4] 王金伟,李克武,景宁,等.波片相位延迟量测量和快轴标定系统[J].红外与激光工程,2019,48(2): 211-216.  
WANG Jinwei, LI Kewu, JING Ning, et al. Phase retardation measurement and fast axis calibration system for wave plate[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(2): 211-216.
- [5] 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.
- [6] 张瑞,陈媛媛,景宁,等.基于双弹光差频调制的中红外波片相位延迟高精度测量[J].光学学报,2019,39(3): 184-190.  
ZHANG Rui, CHEN Yuanyuan, JING Ning, et al. High-precision measurement of mid-infrared waveplate phase retardation based on dual photoelastic difference frequency modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 184-190.
- [7] 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.
- [8] 宋连科,牛明生,韩培高,等.基于电光补偿测量的光相位延迟拓展测量法[J].光学技术,2017,43(3): 199-202.  
SONG Lianke, NIU Mingsheng, HAN Peigao, et al. Optical phase delay expansion measuring method based on electro-optical compensation measurement[J]. Optical Technique, 2017, 43(3): 199-202.
- [9] 李继扬,谈宜东,吴季,等.基于激光回馈效应的液晶双折射特性测量[J].红外与激光工程,2017,46(3): 114-119.  
LI Jiyang, TAN Yidong, WU Ji, et al. Birefringence measurement of liquid crystals based on laser feedback effect[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(3): 114-119.
- [10] 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.
- [11] 马响,邓勇,张书练.激光回馈半钢化玻璃应力双折射测量技术[J].激光技术,2020,44(3): 371-376.  
MA Xiang, DENG Yong, ZHANG Shulian. Stress birefringence measurement technology of heat strengthened glass based on laser feedback[J]. Laser Technology, 2020, 44(3): 371-376.
- [12] 李克武,王黎明,王志斌,等.弹光调制和电光调制联合测剩余双折射[J].中国激光,2016,43(5): 208-215.  
LI Kewu, WANG Liming, WANG Zhibin, et al. Measurement of residual birefringence combined photo-elastic modulation with electro-optic modulation[J]. Chinese



- Journal of Lasers, 2016, 43(5): 208-215.
- [ 13 ] 王爽, 韩燮, 李晓, 等. 弹光调制测椭圆偏参量的数字锁相数据处理[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1314-1321.
- WANG Shuang, HAN Xie, LI Xiao, et al. Digital phase-locked data processing for ellipsometric parameter measurements based on photoelastic modulation[J]. [Optics and Precision Engineering](#), 2018, 26(6): 1314-1321.
- [ 14 ] 刘梓良, 王志斌, 李克武, 等. 一种弹光调制器精确定标微系统设计[J]. 光学技术, 2022, 48(1): 8-13.
- LIU Ziliang, WANG Zhibin, LI Kewu, et al. A precise calibration microsystem for photoelastic modulator[J]. [Optical Technique](#), 2022, 48(1): 8-13.
- [ 15 ] 杜洽伟, 李克武, 王志斌. 基于弹光调制的双折射测试系统数据处理研究[J]. 光学技术, 2023, 49(1): 64-69.
- DU Qiawei, LI Kewu, WANG Zhibin. Study on data processing of birefringence measurement system based on photoelastic modulation[J]. [Optical Technique](#), 2023, 49(1): 64-69.