文章编号：1007-2780(2026)07-0962-08

基于液晶器件相位补偿的光学玻璃残余应力测量

王海丽，姚　海，祁文皓，李　想，李业秋，乌日娜*
（沈阳理工大学 理学院，辽宁 沈阳 110159）

摘要：光学玻璃中的残余应力会引起应力诱导双折射效应，导致偏振光产生相位延迟，该相位延迟是实现残余应力定量表征的重要参数。针对传统偏振相位反演方法在较大相位延迟范围内存在相位判定不稳定的问题，提出了一种基于液晶器件相位补偿的光学玻璃残余应力偏振成像测量方法。在偏振光路中引入液晶器件，通过驱动电压连续调节补偿相位，实现液晶补偿量与待测玻璃相位延迟的匹配；以成像灰度与背景灰度差值作为评价指标，通过最小灰度差值确定最佳补偿状态，从而获得光学玻璃相位延迟，并结合应力光学关系实现残余应力反演。实验结果表明，当驱动电压为3.8 V时系统达到最佳补偿状态，对应残余应力为36.235 nm/cm，与标准偏振相位反演方法测得的34.128 nm/cm相比，相对偏差为6.17%，两者结果具有较好一致性，验证了所提方法的有效性。

关　键　词：光学玻璃；残余应力；相位延迟；液晶器件；相位补偿；偏振成像
中图分类号：O753.2　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.37188/CJLCD.2026-0104　　**CSTR：**32172.14.CJLCD.2026-0104

Residual stress measurement of optical glass based on liquid crystal device phase compensation

WANG Haili, YAO Hai, QI Wenhao, LI Xiang, LI Yeqiu, WU Rina*

(*School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang* 110159, *China*)

Abstract: Residual stress in optical glass induces stress-induced birefringence, resulting in phase retardation of polarized light. The phase retardation is an important parameter for quantitative residual stress characterization. To address the instability of phase determination in conventional polarization phase retrieval methods over a large phase retardation range, a polarization imaging measurement method for optical glass residual stress based on liquid crystal device phase compensation is proposed. A liquid crystal device is introduced into the polarization optical path, and the compensation phase is continuously adjusted by the driving voltage to achieve phase matching between the liquid crystal compensation and the phase retardation of the tested optical glass. The difference between the image grayscale and the background grayscale is used as the evaluation metric, and the optimal compensation state is determined by minimizing the grayscale difference, thereby the phase retardation of the optical glass is obtained. The residual stress is then determined

收稿日期：2026-06-08；**修订日期：**2026-06-18.
基金项目：辽宁省教育厅科研项目（No. LJ212410144010，No. LJ212510144036）；沈阳理工大学光选科研团队建设项目
Supported by Scientific Research Project of the Education Department of Liaoning Province (No. LJ212410144010, No. LJ212510144036); Optical Selection Research Team Development Project of Shenyang Ligong University

*通信联系人，E-mail：wurina2007@126.com

based on the stress-optic law. Experimental results show that the optimal compensation state is achieved at a driving voltage of 3.8 V, corresponding to a residual stress of 36.235 nm/cm. Compared with the result obtained using the standard polarization phase retrieval method (34.128 nm/cm), the proposed method exhibits a relative deviation of 6.17%, indicating good consistency between the two results and validating the effectiveness of the proposed method.

Key words: optical glass; residual stress; phase retardation; liquid crystal device; phase compensation; polarization imaging

1　引　　言

光学玻璃在熔融、退火及机械加工过程中易产生残余应力，该应力破坏光学各向同性，使折射率空间分布不均并引发应力诱导双折射效应[1]。偏振光通过受应力作用的光学玻璃时，不同偏振分量的传播速度不同，从而产生相对相位延迟并引起偏振态变化。基于偏振测量可获取相位延迟分布，并通过应力-双折射关系实现应力反演[2-3]。随着高性能光学系统的发展，光学元件在成像质量、波前精度及偏振稳定性等方面的要求不断提高，对光学玻璃残余应力的准确表征提出了更高要求[4]。相位延迟作为连接偏振测量与残余应力反演的关键物理量，其准确判定是实现残余应力可靠反演的重要前提。

在残余应力检测中，传统光弹性法利用偏振干涉实现应力可视化，具有非接触与全场测量的优势。Sénarmont法[5]、Babinet补偿法虽可实现较高精度测量，但依赖人工调节与条纹判读，难以满足复杂应力场条件下的高效检测需求。随着偏振成像与数字图像处理技术的发展，数字光弹性法及相移光弹性法等逐渐被用于应力场定量分析。苏飞等结合像素偏振相机实现多方向偏振信息同步采集，但存在不解相位包裹时量程较小的缺点[6]。Dhiraj K. Singh等实现了低应力三维可视化，但系统结构较复杂，难以完成完整应力定量反演[7]。Ren等通过亮暗场图像实现全场定量测量，但结果仍受条纹分辨与采样误差影响[8]。总体而言，上述方法推动了光弹法数字化发展，但相位信息仍依赖光强间接求解，在较大相位范围内易出现条纹级次判定困难及误差累积问题。

针对传统数字光弹法在相位测量中的局限性，相位补偿技术及液晶调制器件逐渐应用于偏振测量领域，以提高相位延迟测量精度。高阳等基于固定1/4波片实现透明元件的相位延迟测量，但补偿范围受限[9]。随后，基于液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)的相移光弹性方法被提出。Xing等利用LCD面板实现偏振调制并结合12幅图像解算相位，测量效率较传统六步相移法有所提高[10]。陈昱志等研制了双波长大口径液晶光弹性测量仪，实现了30 cm量级光学玻璃的全自动应力测量[11]。此外，作为另一类液晶调制器件，液晶空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)凭借灵活的空间相位调制能力，在数字全息重建、波前整形等精密光学领域得到广泛应用，为复杂光场调控提供了有效的技术手段[12]。然而，现有基于补偿器件或液晶调制的偏振测量方法主要围绕特定补偿方式或调制模式展开，在相位调节连续性、补偿范围以及测量流程简化等方面仍存在一定限制，尚难满足复杂应力场测量中对灵活相位补偿的需求。

在连续偏振调控与高精度相位测量需求的推动下，液晶可变相位延迟器(Liquid Crystal Variable Retarder, LCVR)因具有连续电控调节相位延迟的能力，在偏振调制与相位补偿领域得到广泛关注。国外相关研究主要围绕LCVR电压-相位关系标定、驱动特性优化以及测量精度提升展开。Schnoor等基于共路干涉结构实现LCVR相位延迟的高精度标定，并通过函数拟合提高电压-相位关系的稳定性与重复性[13]。Yang等提出了基于Wollaston棱镜的LCVR电压-相位特性快速标定方法，实现了电压-相位关系的高精度、高效率测量[14]。Qi等从误差来源与测量一致性角度对标定过程进行了分析，为复杂条件下的精度控制提供了参考[15]。胡冬梅[16]及黄威[17]等同样针对LCVR电压-相位特性建模及驱动响应特性开展了研究，为液晶相位调制技术在精密光学测量中的应用奠定了基础。然而，现有研究主要聚焦于液晶

器件自身的相位调制性能、标定方法及偏振调制应用，对于液晶器件在光学玻璃残余应力测量中的应用研究仍相对不足。特别是在待测玻璃相位延迟范围较大时，如何利用液晶器件实现相位延迟的直接补偿，并建立基于补偿状态的残余应力反演方法，仍缺少系统研究。

针对上述问题，本文引入液晶器件作为相位调制与补偿单元，构建了一种基于偏振补偿机制的光学玻璃残余应力测量方法。首先建立液晶器件电压-相位延迟标定关系，并利用液晶器件的电控双折射特性对待测光学玻璃产生的相位延迟进行连续补偿；随后根据达到最佳补偿状态时对应的驱动电压确定光学玻璃的相位延迟，并结合应力-双折射关系实现残余应力的定量反演。相比固定波片补偿及传统多步相移方法，所提方法无需机械旋转光学元件即可实现相位调节，简化了相位补偿过程，提高了相位匹配的灵活性，为光学玻璃残余应力测量提供了一种基于电控相位补偿的新方法。

2 实验原理

2.1 偏振成像相位延迟反演原理

光学玻璃内部残余应力会引起局部折射率各向异性，使入射偏振光沿快、慢轴方向传播时产生相位延迟。该相位延迟可通过偏振成像系统中的透射光强变化进行表征[18]。在正交偏振条件下，系统透射光强表示为：

$$I(x,y,\alpha)=\frac{I_0}{4}\left[1-\cos\delta(x,y)\right]\sin^2\left[2\theta\left(x,y\right)-2\alpha\right]. \tag{1}$$

采用极值测量方法消除 α 影响后，相位延迟可表示为：

$$\delta\left(x,y\right)=2\arcsin\sqrt{\frac{2\left[I_{\mathrm{P}}\left(x,y\right)-I_{\mathrm{v}}\left(x,y\right)\right]}{I_0}}, \tag{2}$$

其中，$I_{\mathrm{v}}\left(x,y\right)$、$I_{\mathrm{p}}\left(x,y\right)$ 为透射光强在一个周期内的极小值和极大值。

相位延迟与光程差之间满足如下关系：

$$\Delta\left(x,y\right)=\frac{\lambda}{2\pi}\delta\left(x,y\right). \tag{3}$$

根据应力-光学效应，材料内部残余应力引起光程差变化[19-20]，因此可通过相位延迟表征残余应力状态。

2.2 液晶器件相位补偿原理

平行排列液晶器件具有电控双折射特性，其相位延迟受驱动电压调制[21]。在正交偏振条件下，当系统仅包含液晶器件时，透射光强由相位延迟决定。在最优调制条件（液晶分子指向矢与偏振方向夹角为45°）下，其透过率可表示为：

$$T=\sin^2\left(\frac{\delta_{\mathrm{LC}}(V)}{2}\right). \tag{4}$$

在相位延迟单调区间（$0<\delta<\pi$）内，可由透过率反演得到液晶器件相位延迟：

$$\delta_{\mathrm{LC}}(V)=2\arcsin\left(\sqrt{T}\right). \tag{5}$$

当液晶器件与待测光学玻璃共同置于偏振光路中时，玻璃残余应力产生的相位延迟与液晶器件引入的相位延迟共同作用于系统，其总相位延迟表示为：

$$\delta_{\mathrm{total}}=\delta+\delta_{\mathrm{LC}}(V), \tag{6}$$

其中：δ_{total} 为系统总相位延迟，δ 为光学玻璃残余应力引入的相位延迟。

如图1所示，液晶器件作为可调相位补偿单元，通过改变驱动电压连续调节系统相位状态。当液晶器件引入的相位延迟逐渐接近待测光学玻璃残余应力产生的相位延迟时，系统总相位延迟逐渐接近正交偏振条件下的消光状态，透射光强随之减小。当液晶器件产生的相位延迟与待测光学玻璃的相位延迟达到最佳补偿时，系统透射光强达到最小值。由于互补金属氧化物半导体（Complementary Metal-Oxide-Semiconductor，CMOS）成像单元所获取的图像灰度与透射光强具有对应关系，因此图像灰度极小值对应最佳相位补偿状态，其对应驱动电压可用于确定液晶器件的相位延迟，并作为待测光学玻璃相位延迟的表征量，进而实现残余应力的定量测量。

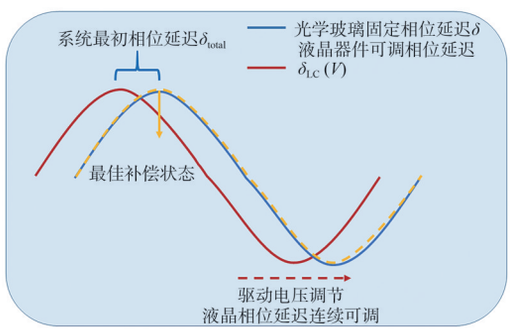


图1 系统相位延迟示意图

Fig. 1 Schematic diagram of system phase retardation

3　实验光路搭建

3.1　偏振成像相位延迟测量与反演

构建基于正交偏振结构的测量系统，其光路结构如图2所示。该系统由632.8 nm的氦氖激光器（GY-10，天津市港东科技发展有限公司）、扩束器、孔径光阑、起偏器、检偏器以及CMOS成像单元（MER-031-860U3M，中国大恒（集团）有限公司）组成。

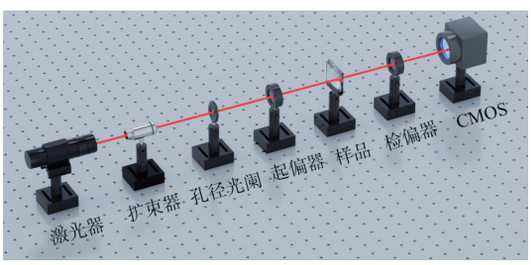


图2　光学玻璃相位延迟测量系统光路图

Fig. 2　Schematic optical path of the phase retardation measurement system for optical glass

待测光学玻璃置于起偏器与检偏器之间，通过同步旋转两偏振器，在0°～360°范围内以10°为间隔进行周期性扫描。利用CMOS采集不同方位角下的透射光强图像，形成完整的偏振调制图像序列。

如图3所示，有效成像区域划分为1 cm×1 cm子区域，并选取其中第3区域作为典型研究对象。在该区域内建立6行×7列规则网格用于数据提取与分析。

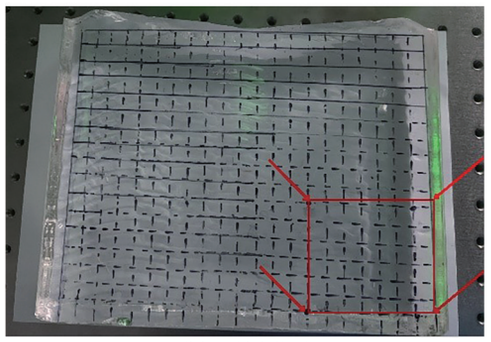
基于背景图像生成有效区域掩膜，提取不同方位角条件下的灰度曲线，并进行正弦拟合获取光强极值。结合第2.1节光强极值与相位延迟之间的关系，实现相位延迟反演与残余应力计算。

3.2　液晶器件相位调制特性测量

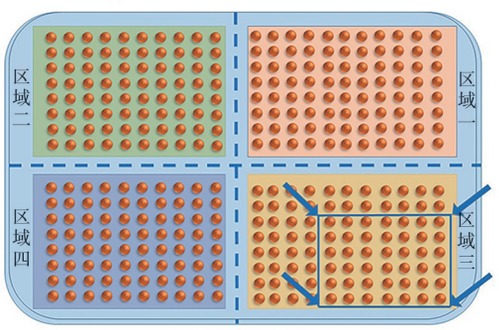
液晶器件相位调制特性测量光路在前述测量系统基础上进行调整：以DDZS-3051液晶材料（南京乐遥科技有限公司，$n_e=1.828$，$n_o=1.528$）制备的平行排列液晶器件替代待测光学玻璃，并加载驱动电压，同时采用功率能量计（LPE-1A，北京物科光电技术有限公司）代替CMOS成像单元，用于测量透射光强变化，如图4所示。

完成偏振系统的消光校准后，引入液晶器件并调整偏振器角度，使系统达到最大透射状态，以确定液晶器件光轴与偏振方向之间的相对关系。通过信号发生器（AFG3011C，泰克科技有限公司）施加0～10 V、1 kHz方波电压并采集透射光强，归一化后获得电压-光强曲线。

该液晶器件由两块尺寸为20 mm×25 mm×1.1 mm的氧化铟锡（Indium Tin Oxide，ITO）透明导电玻璃基板封装而成，上下基板均采用连续ITO透明导电电极，为非像素化连续驱动液晶器件。由于采用连续电极结构，驱动电场作用于整个液晶层区域，可实现对有效通光区域相位延迟的整体调制。液晶盒有效通光区域约为20 mm×



(a) 分析区域实物图
(a) Photograph of the analysis region



(b) 分析区域示意图
(b) Schematic diagram of the analysis region

图3　相位延迟分析区域

Fig. 3　Analysis region for phase retardation analysis

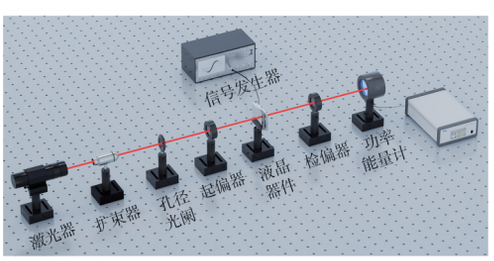


图4　液晶器件相位调制特性标定光路图

Fig. 4　Optical setup for calibrating the phase modulation characteristics of the liquid crystal device

19 mm。实验中利用光阑将测量光束限制为约10 mm×10 mm，使光束完全位于液晶器件有效通光区域内进行测量。

基于正交偏振透过率与相位延迟关系反演液晶器件相位延迟，并通过周期展开方法对原始相位δ_0实现连续重构：

$$\delta_k = 2k\pi + (-1)^k\delta_0, k = 0, 1, 2\cdots . \quad (7)$$

最终获得液晶器件相位延迟-电压标定曲线。

3.3 基于液晶器件的电控相位补偿测量

在完成上述液晶器件调制特性标定后，将待测光学玻璃置于液晶器件前端，保留液晶调制结构并恢复CMOS成像单元，如图5所示。

玻璃残余应力产生的相位延迟与液晶器件可调相位延迟共同作用于系统。对液晶器件施加0～10 V方波驱动电压(步长0.05 V)，并由CMOS相机同步采集透射图像。

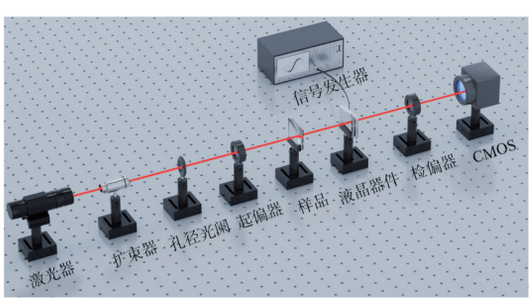


图5 液晶器件电控相位补偿光路图

Fig. 5 Optical setup for electrically controlled phase compensation using the liquid crystal device

电压扫描完成后，采集样品双折射图像及正交偏振消光条件下的背景图像。基于背景图像确定成像区域，并在双折射图像中选取感兴趣区域(Region of Interest，ROI)，在相同区域内进行一致性分析[22]。对ROI灰度进行统计[23]，并结合灰度梯度信息剔除边缘及灰度突变区域，仅保留灰度变化平缓的有效区域用于后续分析。

以背景灰度为参考构建灰度电压关系，计算灰度差值并确定其最小值对应的驱动电压为最佳补偿电压。结合液晶器件电压-相位标定关系获得相位延迟，进而得到光学玻璃相位延迟，并基于应力-双折射关系计算残余应力。

4 结果与分析

4.1 相位延迟反演结果与测量点分析

选取图3相位延迟区域中选定的6行×7列区域内第3行1～7号测量单元作为分析对象，其灰度随偏振方位角变化的实验数据及正弦拟合结果如图6所示。

从图6可以看出，各测量单元灰度随偏振角变化均呈现明显的周期性变化特征。对实验数据进行正弦函数拟合后，各测量单元的拟合优度R^2分别为88.86%、92.95%、94.53%、88.77%、

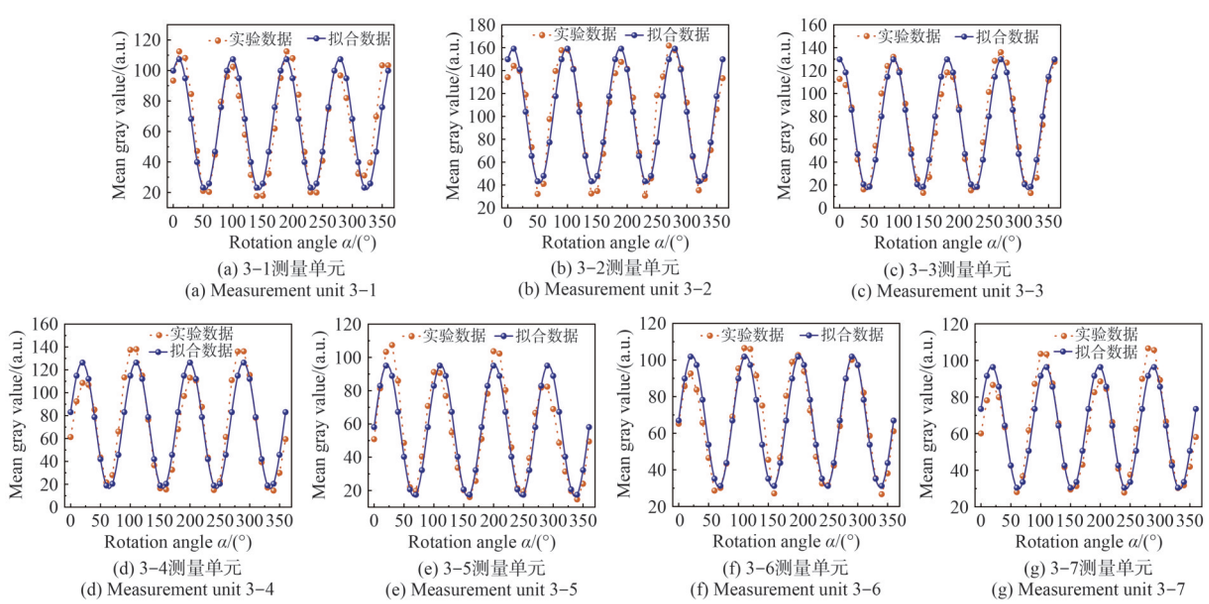


图6 第3行测量单元光强随偏振方位角的变化及拟合结果

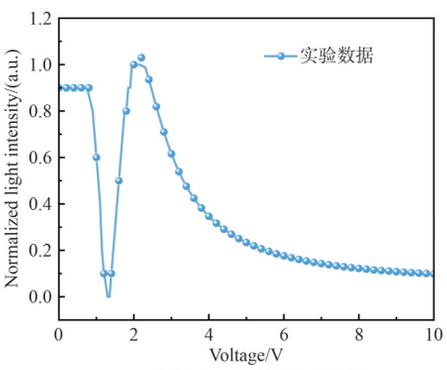
Fig. 6 Intensity variation with polarization azimuth angle and fitting results of measurement units in the third row

89.20%、92.27% 和 89.27%，表明该模型能够较好地描述光强随偏振角的变化规律。

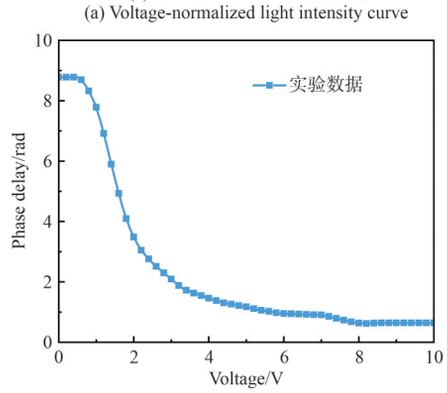
基于该拟合结果进一步反演得到各测量单元对应的残余应力分别为 37.767 nm/cm、50.908 nm/cm、48.722 nm/cm、46.966 nm/cm、35.662 nm/cm、34.410 nm/cm、34.128 nm/cm。结果表明，该测量行对应区域在整块玻璃中位于由边缘高应力向中心低应力逐渐衰减的空间梯度带内，应力沿空间方向呈连续衰减分布特征。其中 3—7 测量单元位于该整体梯度的过渡区，因此选取该测量位置作为后续液晶电控补偿分析的研究对象。

4.2　液晶电控补偿结果与分析

以 3—7 测量位置为补偿对象开展液晶相位补偿实验。根据该测量位置的相位补偿范围，选用厚度为 3 μm 的平行排列液晶器件作为相位补偿单元。按照 3.2 节所述方法完成液晶器件电压-相位延迟标定，获得归一化透射光强曲线及相位延迟曲线，如图 7 所示。



(a) 电压-归一化透过光强曲线
(a) Voltage-normalized light intensity curve



(b) 电压-相位延迟曲线
(b) Voltage-phase delay curve

图 7　3 μm 平行排列液晶器件的调制特性曲线

Fig. 7　Modulation characteristics of the 3 μm parallel-aligned liquid crystal device

图 7(a)表明，透射光强随电压呈非线性变化，在低电压区间变化较为显著，随后逐渐趋于平缓，表明液晶分子在电场作用下逐步趋于稳定取向。图 7(b)表明，相位延迟随驱动电压增加单调减小，说明该液晶器件具有连续电控相位调制能力。需要指出的是，液晶层厚度是影响液晶器件相位调制特性的重要参数，其变化会导致液晶器件初始相位延迟、最大可调相位范围以及电压-相位延迟特性的改变。因此，对于不同厚度的液晶器件，需分别建立对应的电压-相位延迟标定曲线。

在完成标定后，对不同驱动电压条件下的图像进行统一 ROI 分析。图 8 给出了 ROI 区域灰度随驱动电压的变化关系。图 9 所示为补偿过程中的典型透射图像，其中背景图像定义为在正交偏振条件下未放置待测光学玻璃及液晶器件时采集到的参考图像，此时系统处于接近理想消光状态；未补偿图像为仅放置待测光学玻璃但未引入液晶器件时的成像结果；最优补偿图像为引入液晶器件并调节驱动电压至最佳补偿状态时的成像结果。

图 8 表明，随着驱动电压的增加，ROI 区域灰度逐渐向背景参考灰度收敛，并在 3.8 V 时达到最小差值，对应最佳补偿状态。与此同时，图 9(c)所示的最优补偿图像与背景图像具有较高一致性，说明系统在该状态下已接近消光条件，实现了待测光学玻璃相位延迟的有效补偿。

结合标定结果，最优补偿电压 3.8 V 对应的相位调制量为 1.546 rad。由应力-光学关系计算得到该位置残余应力为 36.235 nm/cm。与前期相位反演方法结果 34.128 nm/cm 相比，两者相对偏差为 6.17%，具有较好一致性。

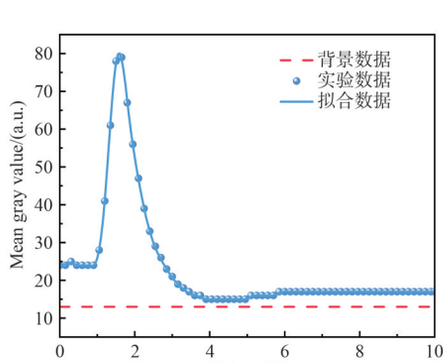
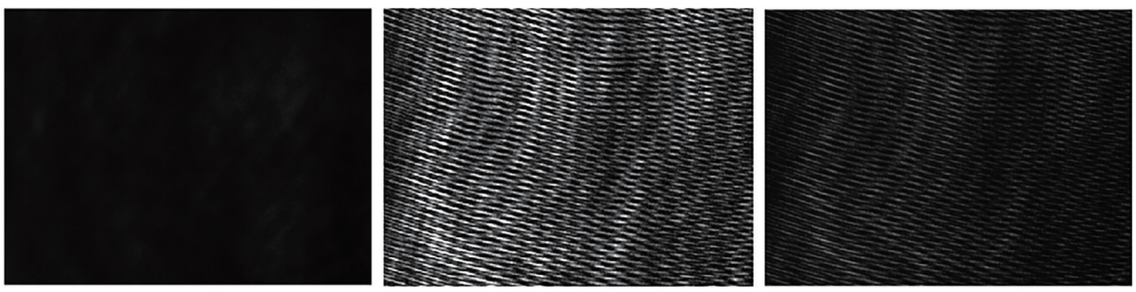


图 8　感兴趣区域灰度随驱动电压的变化关系

Fig. 8　Grayscale response of ROI as a function of driving voltage



(a) 背景图像
(a) Background image

(b) 样品未补偿透射图像
(b) Uncompensated transmittance image of the sample

(c) 最优补偿图像
(c) Optimal compensation image

图 9　补偿过程中的典型透射图像

Fig. 9　Typical transmission images during the compensation process

5　结　　论

本文提出一种基于液晶器件相位补偿的光学玻璃残余应力测量方法，并通过实验验证了其有效性。结果表明，在正交偏振测量体系中，液晶器件引入的相位延迟随驱动电压变化，使系统总相位延迟逐渐接近消光条件，透射光强随之降低；当系统达到最佳补偿状态时，CMOS 图像灰度达到极小值，该现象可作为相位补偿判据。基于该判据获得的测量结果与标准偏振相位反演方法相比，相对偏差为 6.17%，验证了所提方法的有效性。该方法利用液晶器件实现电控相位补偿，无需机械旋转光学元件即可完成相位匹配过程，为光学玻璃残余应力检测及偏振光学相位测量提供了一种新的技术途径。

参　考　文　献：

[1] EFFERZ L, DIX S, SCHULER C, *et al*. Optical anisotropy effects in laminated tempered glass [J]. *Glass Structures & Engineering*, 2025, 10(1): 3.

[2] ZHANG H J, JIA S H, WEN B, *et al*. Advancing instantaneous photoelastic method with color polarization camera [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 172: 107868.

[3] NAKAMINE K, YOKOYAMA Y, WORBY W K A, *et al*. Flow birefringence of cellulose nanocrystal suspensions in three-dimensional flow fields: revisiting the stress-optic law [J]. *Cellulose*, 2024, 31(12): 7405-7420.

[4] CHEN B Q, LI C, LI X X, *et al*. SiC diffractive waveguides for augmented reality: single-layer, full-color, rainbow-artifact-free display with vision correction [J]. *eLight*, 2025, 5(1): 21.

[5] MORI A, TOMITA R. Semi-automated Sènarmont method for measurement of small retardation [J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2015, 43(4): 379-389.

[6] 苏飞，毋少华，刘云鹏. 基于像素偏振相机的新型光弹技术应用[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(8)：2432-2438.
SU F, WU S H, LIU Y P. Application of new photoelastic technology based on pixelated polarization camera [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, 50(8): 2432-2438. (in Chinese)

[7] SINGH D K. Orthogonal photoelastic imaging for three-dimensional stress estimation in a transparent cubical block [J/OL]. *arXiv*, 2025: 2511.11868.

[8] REN Z Y, XIE H M, JU Y. Quantification of photoelastic fringe orders using polarized light camera and continuous loading [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106263.

[9] 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.
GAO Y, WAN X J, XIE S P. Stress measurement of transparent elements based on polarized camera [J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(2): 284-290. (in Chinese)

[10] XING T L, VEETIL S P, LIN Q, *et al*. Elliptically polarized light photoelasticity based on LCD [J]. *Optics Express*, 2023, 31(17): 28161-28173.

[11] 陈昱志，邢童璐，林强，等. 双波长大口径液晶光弹性测量仪研制[J]. 中国激光，2024，51(13)：1304008.
CHEN Y Z，XING T L，LIN Q，*et al*. Development of dual-wavelength，large-diameter，liquid-crystal photoelasticity-measuring instrument [J]. *Chinese Journal of Lasers*，2024，51(13)：1304008.（in Chinese）

[12] 雷俊阁，孙国斌，张锦，等. 基于液晶空间光调制器的全息再现像设计[J]. 中国光学，2025，18(4)：771-783.
LEI J G，SUN G B，ZHANG J，*et al*. Design of holographic reproduction images based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Chinese Optics*，2025，18(4)：771-783.（in Chinese）

[13] SCHNOOR N P，NIEMEIER R C，WOODS A L，*et al*. Calibration of liquid crystal variable retarders using a common-path interferometer and fit of a closed-form expression for the retardance curve [J]. *Applied Optics*，2020，59(34)：10673-10679.

[14] YANG R，MA F Y，DOU W T，*et al*. High-accuracy and high-efficiency calibration method for determining voltage-phase characteristics of LCVR based on a Wollaston prism [J]. *Optics Communications*，2023，546：129771.

[15] QI X H，FAN W，HUANG D J，*et al*. Analysis of factors affecting delay accuracy of subfemtosecond liquid crystal variable retarders [J]. *Applied Optics*，2020，59(23)：6984-6991.

[16] 胡冬梅，刘泉，于林韬，等. LSSVM模型下的LCVR相位延迟特性标定方法[J]. 红外与激光工程，2016，45(5)：0517004.
HU D M，LIU Q，YU L T，*et al*. LCVR phase retardation characteristic calibration method using the LSSVM model [J]. *Infrared and Laser Engineering*，2016，45(5)：0517004.（in Chinese）

[17] 黄威，林佳本，侯俊峰，等. 空间用液晶可变相位延迟器相位延迟测试系统的电子学设计[J]. 液晶与显示，2022，37(7)：849-860.
HUANG W，LIN J B，HOU J F，*et al*. Electronic design of space-based LCVR measurement system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*，2022，37(7)：849-860.（in Chinese）

[18] 国家市场监督管理总局，中国国家标准化管理委员会. GB/T 36405-2018 平板玻璃应力检测方法[S]. 北京：中国标准出版社，2018.
State Administration for Market Regulation，Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 36405-2018 Test method for stress in flat glass [S]. Beijing：Standards Press of China，2018.（in Chinese）

[19] GAO G H，MAO D B，JIANG R K，*et al*. Investigation of photoelastic property and stress analysis for optical polyimide membrane through stress birefringence method [J]. *Coatings*，2020，10(1)：56.

[20] GAO W X，CHEN H，SHI A K，*et al*. Polarization imaging for residual stress analysis in optically transparent materials：a review [J]. *Optics & Laser Technology*，2025，192：113642.

[21] 王萧. 液晶光调制器件的制备及其性能研究[D]. 沈阳：沈阳理工大学，2024.
WANG X. Study on the preparation and performance of liquid crystal light modulators [D]. Shenyang：Shenyang Ligong University，2024.（in Chinese）

[22] BOUHY J，ROY N，DEKONINCK A，*et al*. Unsupervised topological analysis of polarized light microscopy：application to quantitative birefringence imaging [J]. *Applied Optics*，2024，63(5)：1188-1195.

[23] WANG J，HE J F，LI H，*et al*. Qualitative characterization of residual stress of injection molded polycarbonate goggles based on photoelasticity and digital image processing technique [J]. *Frontiers in Materials*，2023，10：1242721.

作者简介：



王海丽，女，硕士研究生，2024年于郑州航空工业管理学院获得学士学位，主要从事现代激光与应用方面的研究。E-mail：A1924293944@126.com



乌日娜，女，博士，教授，2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位，主要从事液晶物理与器件方面的研究。E-mail：wurina2007@126.com