

文章编号: 1005-5630(2026)02-0001-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202501240014

偏振器件坐标标定及测量系统研究

李金山, 曹前

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对偏振器件透光轴方向的高精度标定问题, 提出了一种基于径向偏振器的可视化方法, 实现了偏振器件偏振方向与几何方向的精确测量。通过设计算法并结合傅里叶变换提取相位, 计算出偏振器件透光轴的位置, 标定了偏振器件的偏振坐标; 同时, 通过将部分光束照射到偏振器件的边缘位置, 形成切边, 确定了偏振器件的几何坐标。实验通过旋转待测器件, 以 0.04° 为步长进行旋转, 验证了测量精度可达 0.04° 。此外, 设计了一套基于LabVIEW的实时检测系统, 显著提升了测量效率与实用性。该方法为高精度偏振器件标定提供了新的解决方案, 适用于光刻技术、光学通信等领域。

关键词: 偏振器件; 径向偏振器; 偏振坐标; 几何坐标

中图分类号: TH74 **文献标志码:** A

Research on polarization device coordinate calibration and measurement system

LI Jinshan, CAO Qian

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

Abstract: In this study, to address the problem of high-precision calibration of the direction of the transmittance axis of the polarisation device, a visualisation method based on a radial polariser is proposed to achieve the accurate measurement of the polarisation direction and geometric direction of the polarisation device. By designing an algorithm and extracting the phase with Fourier transform, the position of the transmittance axis of the polarization device is calculated, and the polarisation coordinates of the polarisation device are calibrated. At the same time, the geometrical coordinates of the polarisation device are determined by irradiating a part of the light beam to the edge position of the polarisation device to form a tangent edge. The experiment verified that the measurement accuracy could reach 0.04° by rotating the device to be measured in steps of 0.04° . In addition, a LabVIEW-based real-time inspection system is designed in this paper, which significantly improves the measurement efficiency and practicality. The method provides a new solution for high-precision polarisation device calibration, which is suitable for photolithography,

收稿日期: 2025-01-24

第一作者: 李金山(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光学测试。E-mail: 2584555208@qq.com

通信作者: 曹前(1990—), 男, 副研究员, 研究方向为时空光场调控。E-mail: cao.qian@usst.edu.cn

optical communication and other fields.

Keywords: polarization devices; radial polarizers; polarization coordinates; geometric coordinates

偏振器件在众多光学实验中具有广泛的应用。以偏振片为例，其主要功能是将自然光起偏为线偏振光，或改变线偏振光的偏振方向。在光刻技术中，线偏振光被广泛应用于光刻工艺，光刻机中也集成了大量的偏振器件。在实际光刻中，常会出现部分偏振器件的透光轴被前置偏振器件遮挡的情况。若透光轴遮挡比例过高，将导致最终光刻能量不足，致使光刻作业失败。因此，偏振器件透光轴方向的精确标定在光刻技术中具有重要意义。此外，线偏振光偏振方向的精确测量是诸多技术与应用的基础，广泛应用于天空极化导航^[1-2]、生化测量^[3-4]、速度和角速度测量^[5-6]、磁强计^[7-8]等领域。这些技术在实验研究过程中都离不开偏振器件的精确使用，而市面上制造商给出的线偏振片的透光轴精度通常在 1° 的粗略指标(麓邦)，这满足不了需要高精度偏振方向的技术要求。因此，本文的研究重点在于解决偏振器件透光轴方向与器件边缘的定位问题，即实现偏振器件的偏振方向与几何方向的精确标定。基于径向偏振器测量线偏振光偏振方向测量方面的已有研究的测量精度可达到 0.143° ^[3]，但在偏振器件的几何坐标标定方面仍存在欠缺；在透光轴方向测量算法方面，传统方法主要依赖于相关运算^[9]、Radon 变换^[10]、模糊运算^[11]等技术，对滤波处理的依赖性较高。针对上述问题，本文提出了一种基于傅里叶变换提取相位的偏振方向计算方法，该方法具有计算简便的优势。同时，还提出了一种可实时检测的方案，进一步提升了测量效率与实用性。

1 偏振器件的偏振坐标与径向偏振器

偏振器件的偏振坐标即偏振器件的透光轴方向，以偏振片为例，当线偏振光通过偏振器件后，线偏振光的偏振方向变为器件的偏振方向。图 1(a)为径向偏振器的原理示意图。该器件基于马吕斯定律制备，可将入射光的偏振状态转换

为径向偏振态，图 1(a)中箭头表示偏振器的透光方向。径向偏振器还可用于光学通信^[12]、激光加工^[13]、光学成像^[14]等方面。径向偏振器的琼斯矩阵为

$$\begin{pmatrix} \cos^2\varphi & \sin\varphi\cos\varphi \\ \sin\varphi\cos\varphi & \sin^2\varphi \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中， φ 为极角。设偏振器件的偏振方向为 45° 角，当线偏振光通过偏振器件后线偏振光的琼斯矩阵为

$$E_{\text{in}} = \begin{pmatrix} \cos\frac{\pi}{4} \\ \sin\frac{\pi}{4} \end{pmatrix} \quad (2)$$

线偏振光经由偏振器件后，再入射到径向偏振器上，则有

$$E_{\text{out}} = \begin{pmatrix} \cos^2\varphi & \sin\varphi\cos\varphi \\ \sin\varphi\cos\varphi & \sin^2\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\frac{\pi}{4} \\ \sin\frac{\pi}{4} \end{pmatrix} \quad (3)$$

化简后得到

$$E_{\text{out}} = \begin{pmatrix} \cos^2\varphi + \sin\varphi\cos\varphi \\ \sin^2\varphi + \sin\varphi\cos\varphi \end{pmatrix} \quad (4)$$

出射光光强为

$$I = (\cos^2\varphi + \sin\varphi\cos\varphi)^2 + (\sin^2\varphi + \sin\varphi\cos\varphi)^2 \quad (5)$$

如图 1(b)所示， 45° 线偏振光经过径向偏振器传播后，形成了一个蝴蝶形状的光斑。暗轴是指当线偏振光通过径向偏振器时，偏振方向与器件透光轴存在特定几何关系，在某一方位角上光强达到最小值，该方向被称为暗轴，也是线偏振光偏振的方向，但由于径向偏振器的透光轴分布特点，暗轴的方向与偏振器件的透光轴方向相差了 90° 。所以，定标偏振器件的透光轴方向最终是通过计算暗轴方向来实现。

2 暗轴角度计算与找中心对齐

图 2(a)展示了一个标准的蝴蝶光斑，将它

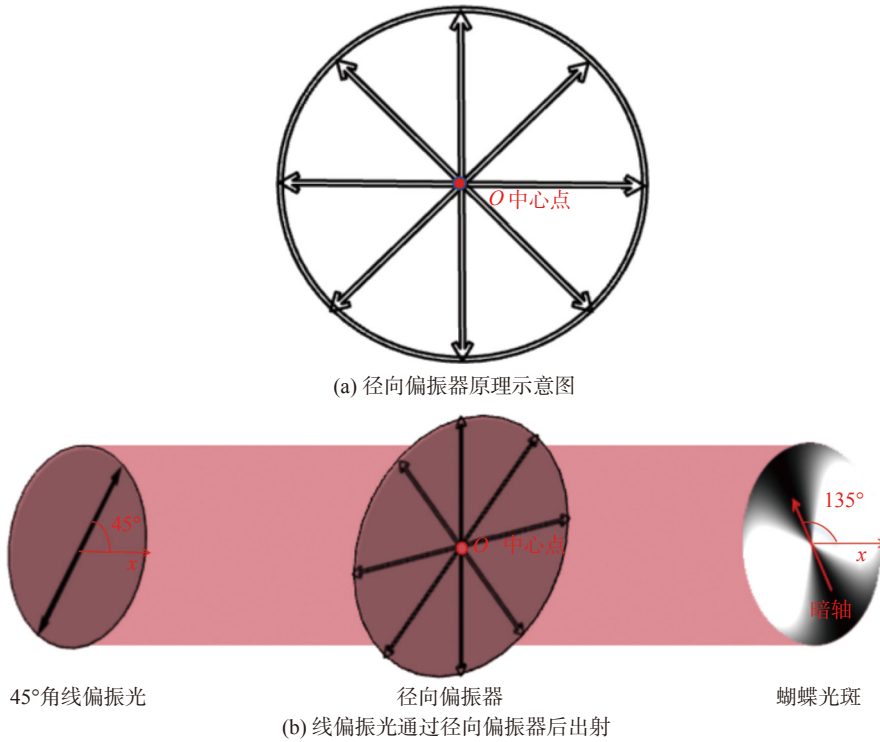


图 1 径向偏振器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the radial polarizer

称为蝴蝶光斑 1, 该光斑是模拟实验时激光光斑质心与径向偏振器中心理想对准时的结果。在得到蝴蝶光斑 1 数据后, 由于径向偏振器的中心坐标在图 2(a)中无法直接获取, 所以在设计的算法中, 本文采用计算获得的光斑质心坐标作为极坐标变换的基准原点。具体而言, 以通过计算得到的蝴蝶光斑 1 的质心坐标为坐标原点, 通过插值算法将图 2(a)的直角坐标系图像转换为极坐标图像, 得到图 2(b)。随后, 对图 2(b)中的数据进行处理, 对每一行进行求和运算, 从而得到光强度与角度的关系曲线, 求和公式为

$$I(\theta) = \int_0^{1000} I(\theta, R) dR \quad (6)$$

图 2(c)为求得的光强曲线, 曲线满足方程

$$I(\theta) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) - 2\varphi \right) \quad (7)$$

式中: $\varphi \in (0, \pi)$, φ 为线偏振光照射到径向偏振器上时的方位角。对式(7)求傅里叶变换得

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\theta) e^{-i\omega\theta} d\theta \quad (8)$$

式(7)中包含了暗轴的角度信息, 对式(8)求相位^[15]得到暗轴角度 φ_{dark} 为

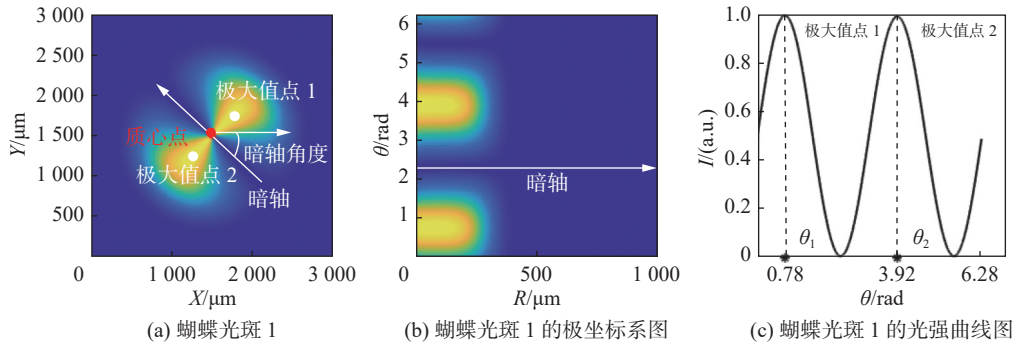


图 2 蝴蝶光斑 1 及其数据处理图

Fig. 2 Butterfly spot 1 simulation and its light intensity profile

$$\varphi_{\text{dark}} = \frac{\int \arg(F(\omega)) \cdot |F(\omega)|^2 d\omega}{\int |F(\omega)|^2 d\omega} \quad (9)$$

如图 2(c) 所示, 极坐标系光强分布曲线中的极大值点 1 和极大值点 2 与蝴蝶光斑图 3(a) 中极大值点 1 和极大值点 2 的强度极大值区域严格对应, 其极角 θ_1 、 θ_2 即为这两个特征点在角度维度上的方位参数; 此时 θ_1 与 θ_2 相差了 π 弧度。

为了进行对比分析, 如图 3(a) 所示, 本文模拟了激光光斑质心与径向偏振器几何中心点未对齐的情况, 得到了蝴蝶光斑 2, 并采用相同的处理方法得到了其光强曲线, 如图 3(b) 所示。在该情况下, 角度差 ($\theta_4 - \theta_3$) 不等于 π 弧度。因此可以判定: 当光强曲线的两个峰值点之间的角度差为 π 弧度时, 光斑质心与径向偏振器中心点对齐。通过对比蝴蝶光斑 1 和蝴蝶光斑 2 的光强曲线, 在相同的 45° 线偏振光入射条件下, 得到的蝴蝶光斑的极大值点角度的理想值为 45° 和 215° 。当光斑质心点与径向偏振器中心点对齐时, 计算得到的极大值点 1 对应的角度 θ_1 与理想值一致; 而当光斑质心点与径向偏振器中心点未对齐时, 极大值点 3 对应的角度 θ_3 会与理想值出现偏差。因为极大值点的位置与暗轴位置是相对的, 因此当极大值点的角度值出现错误时, 根据所设计的算法计算出的暗轴角度也将是错误的。这一结果表明, 光斑质心与径向偏振器中心点的对齐程度对光强曲线的特征和暗轴角度的计算准确度具有显著影响。因此, 在实验中, 确保光斑质心与径向偏振器中心的精确对齐, 是获得准确暗轴角度的关键。

3 实验原理与数据处理

3.1 实验原理

如图 4 所示, 在本实验中, 光源发出的光束首先经过反射镜 1 和反射镜 2 的精确反射。随后, 光线以布鲁斯特角入射至直角棱镜, 以达到起偏的目的, 使反射光成为线偏振光。选择其为主光源, 反射光穿过偏振器件, 其偏振方向会受到偏振器件的影响, 从而发生变化, 变为偏振器件自带的偏振方向。在实验光路中, 透镜的作用

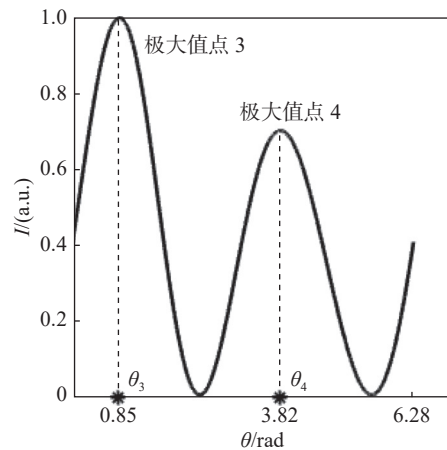
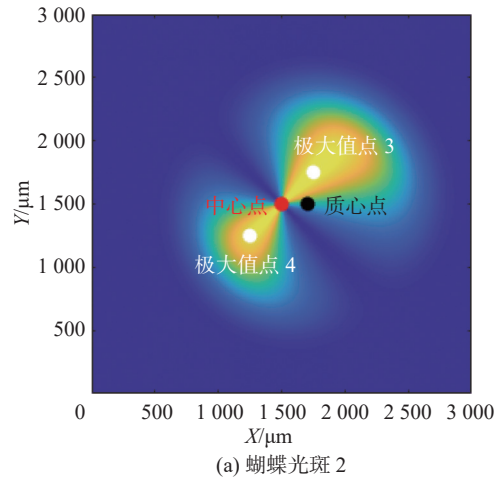


图 3 蝴蝶光斑 2 及其光强曲线图

Fig. 3 Butterfly spot 2 and its light intensity profile

至关重要, 它与径向偏振器、CCD 相机组成一个 $4f$ 成像系统, f 为透镜的焦距, 使得径向偏振器在 CCD 相机上形成清晰的成像, 从而获得清晰、高质量的光强分布图, 为暗轴方向显示、与暗轴角度的计算提供了重要支持。为缩小光学系统的大小, 选择了焦距 $f = 100 \text{ mm}$ 的透镜。数

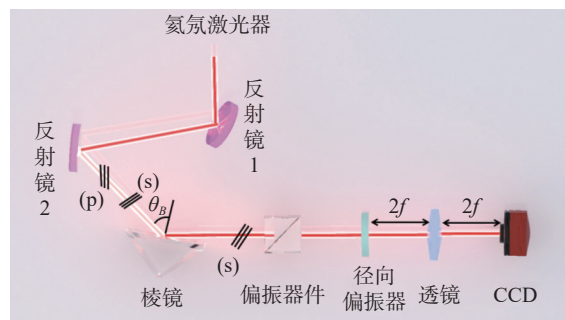


图 4 实验原理图

Fig. 4 Experimental schematic diagram

据将由 CCD 相机采集, 为后续分析提供了可靠的数据支持。

3.2 数据处理

图 5(a)展示了实验数据的结果图。按照第 2 节中描述的数据处理方法, 得到图 5(b)的极坐标系图。如图 5(a)所示, 两瓣光斑在质心坐标处存在轻微的上下错位, 这种错位可能会对最终的计算结果产生影响。为避免这种影响, 本文将极坐标系图的横向坐标 R 分为两个区间: $R_{\min} \in$

$[0 \mu\text{m}, 1106 \mu\text{m}]$ 与 $R_{\max} \in [1107 \mu\text{m}, 3690 \mu\text{m}]$ 两段。以这两段作为求和运算的区间, 并计算暗轴的角度, 得到图 5(c)。由此图 5(c)可看出, 在蓝色框中的积分区间内算出的暗轴的角度值比较稳定, 本文选择限 $R_{\min} = 600 \mu\text{m}$, $R_{\max} = 2400 \mu\text{m}$ 为最优区间, 在此区间内进行求和运算所得到的暗轴角度最为稳定, 且受器件不对称因素的影响最小。通过对图 5(b)在最优区间内进行求和运算得到图 5(d)光强曲线图, 求和公式为:

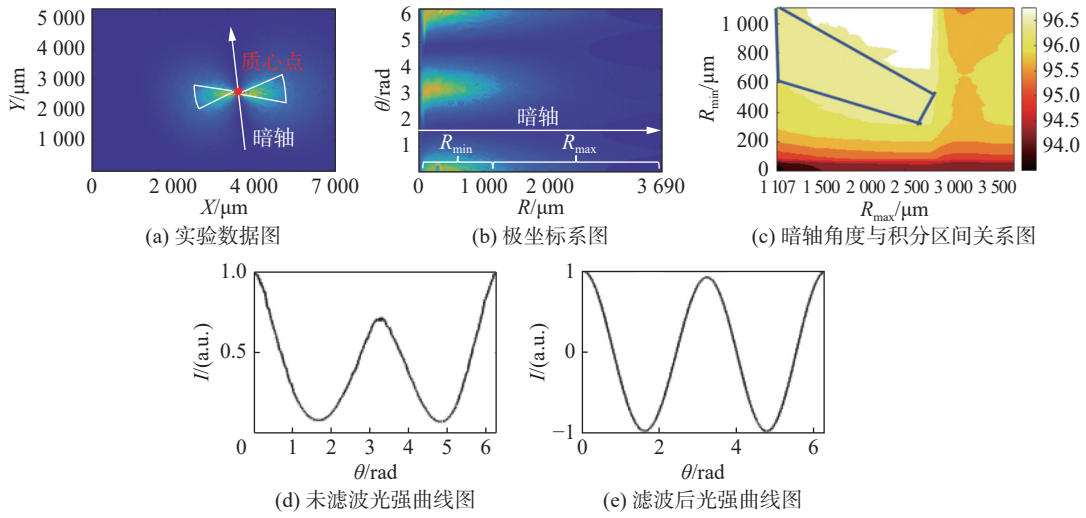


图 5 实验数据及数据处理图

Fig. 5 Experimental data and its data processing figures

$$I(\theta) = \int_{600}^{2400} I(\theta, R) dR \quad (10)$$

然而, 观察光强曲线可以发现, 由于噪声的存在, 曲线并不光滑, 这对暗轴角度的准确性计算产生了不利影响。为解决这一问题, 本文采用傅里叶变换滤波方法去除噪声, 从而得到图 5(e)所示的滤波后光强曲线图。基于式(7)~(10)计算得出实验数据的暗轴角度。

3.3 偏振器件边缘的方位确定

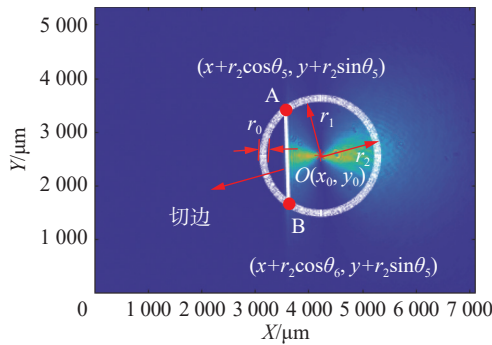
在确定偏振器件的透光轴角度的基础上, 本文还提出了一种辅助定位偏振器件的方法。在实验中, 通过将部分光束照射到偏振器件的边缘位置, 而另一部分光束照射到器件上, 从而使光斑形成一种“切割”状态, 如图 6(a)所示。这种切割状态产生了一条清晰的切边, 该切边即为偏振器件的边缘。为了确定这条切边的方位, 本文

采用以下方法: 选择两瓣光斑之间的一个中间点作为圆心 $O(x_0, y_0)$, 并以此圆心构建一个圆环。圆环的内半径为 $r_1 = 885.6 \mu\text{m}$, 外半径为 $r_2 = 1107 \mu\text{m}$, 圆环的宽度为 $r_0 = 36.9 \mu\text{m}$ 。通过第 2 节中描述计算暗轴角度的方法, 对圆环光强进行处理, 得到其光强曲线, 如图 6(b)所示。在图 6(b)中, 角度 θ_5 和 θ_6 分别对应于图 6(a)中点 A 和点 B 所在的角度。设点 A(x_1, y_1), 点 B(x_2, y_2), 则有

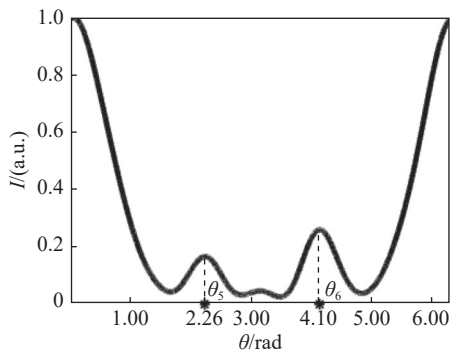
$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 + r_1 \cdot \cos \theta_5 \\ y_1 &= y_0 + r_1 \cdot \sin \theta_5 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} x_2 &= x_0 + r_1 \cdot \cos \theta_6 \\ y_2 &= x_0 + r_1 \cdot \sin \theta_6 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\theta_1 = \arctan \left(\left| \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right| \right) \quad (13)$$



(a) 切边示意图



(b) 切边示意图的光强曲线图

图 6 切边示意图及其光强曲线图

Fig. 6 Schematic diagram of the cut edge and its light intensity profile

在图 6(a)中圆点坐标 $O(4295, 2560)$ ，通过计算得到 $A(3561, 3491)$ ， $B(3609, 1675)$ 。代入计算得线段 AB 的方位角为 $\theta_1=91.51^\circ$ 。通过这种方法，能够实现精确地定位偏振器件的边缘位置，并进一步定位了偏振器件。

4 精度验证以及 LabVIEW 实时检测

4.1 精度验证

本文通过旋转待测器件来改变入射光的偏振方向，进而实现对暗轴角度的精确调控。实验中，以 0.04° 为步长单位对偏振器件进行旋转。每次旋转 0.04° 时，理论上暗轴角度也会相应改变 $\pm 0.04^\circ$ ，将这一变化值作为参考值。每旋转一个步长单位后，实验会进行 16 次数据采集，并计算对应的暗轴角度。随后，对这 16 个暗轴角度值取平均值，并计算其标准差，以评估测量的重复性和精度。整个实验过程共进行了 10 个步

长单位的旋转，累计旋转角度为 $0.4^\circ(10 \times 0.04^\circ)$ 。如图 7 所示，通过对这 10 个平均值进行数据拟合，得到一条斜率约为 1 的直线。即使在 0.04° 这样小的步长下，测量得到的实际值与参考值仍然紧密吻合，充分证明了该方法的高精度^[16-17]。图 7 中显示的误差条主要来源于激光器功率波动以及手动旋转偏振器件时引入的微小误差，这些因素在一定程度上影响了测量的稳定性。

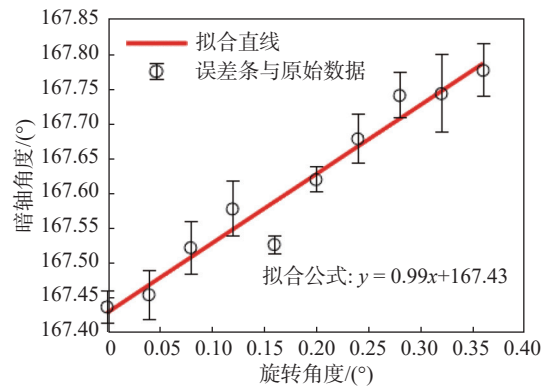


图 7 精度验证图

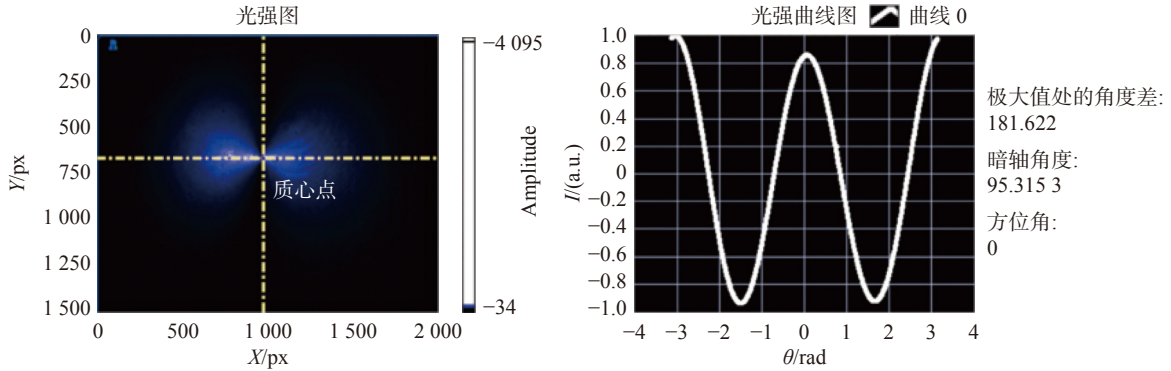
Fig. 7 Accuracy verification figure

4.2 LabVIEW 实时检测

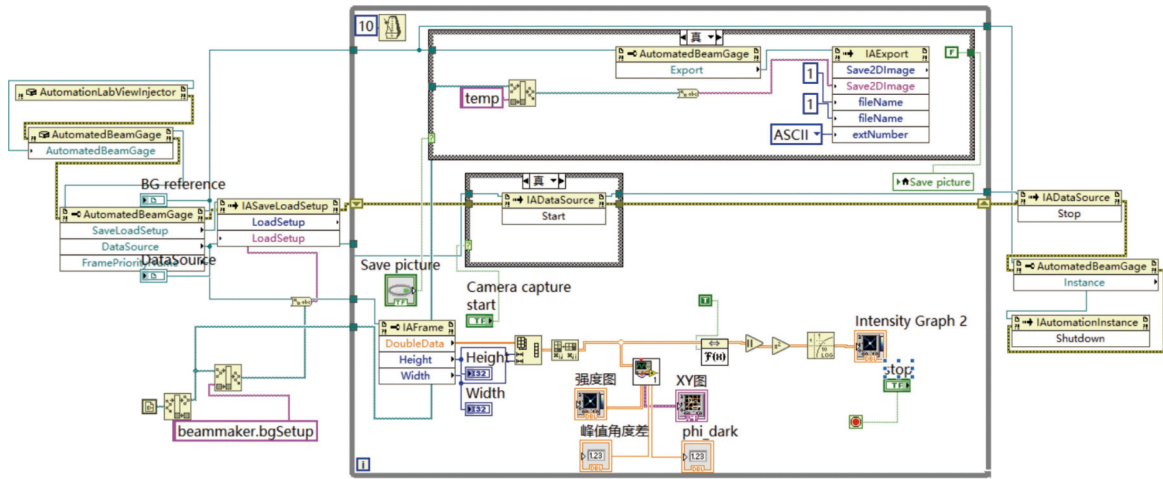
在以往暗轴角度的计算研究中，通常光通过实验采集图像，再对图像进行处理，最后计算得到暗轴的角度。这种方法流程较为繁琐且效率较低。在光刻等实验中，往往需要快速使用偏振器件，且需知道它的透光轴角度，而传统方法响应慢、效率低，难以满足实时测量需求。本文基于 LabVIEW 搭建了一套可以实时检测的测量系统，以提高实验数据的处理速度和测量准确性。该程序的基本操作如下：首先，使用 LabVIEW 程序控制 CCD 相机进行实验数据的实时采集；接着，通过 LabVIEW 调用 MATLAB 接口，将采集到的实验数据直接传递给 MATLAB 接口进行下一步的判定和计算。在设计程序时，在其中增加了许多显示控件，方便实验人员查看，例如，程序可以判定标准峰值处的角度差是否为 π 弧度，同时计算并显示暗轴的角度，以及光强曲线等相关信息。通过这种方式，实验数据的采集与分析不再是独立的环节，而是可以在同一个系统中一体化地进行处理和展示，极大地提升了测量的效率。具体而言，实验数据由 CCD 相机实

时采集后, LabVIEW 程序负责对数据进行处理、传输和实时显示。图 8 所示为 LabVIEW 前面板界面, 包含了测量过程中所需的各种关键

信息, 光强图、暗轴角度、切边的方位角等都包含在内。LabVIEW 程序的程序框图如图 8(b) 所示。



(a) LabVIEW 前面板图



(b) LabVIEW 程序框图

图 8 LabVIEW 前面板图及其程序框图

Fig. 8 LabVIEW front panel diagram and its block diagrams

在实验中, 操作人员可以根据实时显示的强度图中的质心坐标调整激光光斑在径向偏振器上的位置, 方便质心点与径向偏振器中心点对齐, 从而提高测量的效率与准确性。通过这种集成化的数据采集与实时计算检测系统, 成功地打破了传统实验中手动计算和数据分析的瓶颈, 简化了实验过程, 并且大幅提升了实验的效率和准确性。

5 结 论

本文提出了一种基于径向方位角偏振器的线偏振光偏振方向可视化方法, 可用于测量偏振器件的透光轴方向, 实现偏振器件的偏振坐标标

定。此外, 通过将部分激光照射到器件边缘, 形成光的“切割”效果, 从而获得一条清晰的切线, 即偏振器件的边缘。通过计算该切线的方位角, 实现了偏振器件的几何坐标标定。在精度验证方面, 本文采用了通过旋转偏振器件以达到改变暗轴角度的实验方法。将偏振器件旋转 10 次, 每次旋转角度为 0.04°。累计旋转 0.4°, 在每次旋转后, 进行 16 次重复测量以计算暗轴角度, 并求出暗轴角度的平均值与标准差, 再通过数据拟合, 得到一条暗轴角度与旋转精度的线性直线的方法, 验证了该算法的精度可达 0.04°。此外, 本文利用 LabVIEW 软件设计了一套实时检测系统, 显著简化了测量过程, 提高了测量效率, 使其更加便捷、高效。

参考文献:

- [1] ZHANG W J, CAO Y, ZHANG X Z, et al. Angle of sky light polarization derived from digital images of the sky under various conditions[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3): 587 – 595.
- [2] ZHANG W J, ZHANG X Z, CAO Y, et al. Robust sky light polarization detection with an S-wave plate in a light field camera[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(13): 3518 – 3525.
- [3] ZHANG W J, ZHANG Z W. Scanning visible polarization-direction-modulation polarimeter for optically active media measurement[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 286: 119 – 124.
- [4] STARK C, CARVAJAL ARRIETA C A, BEHROOZIAN R, et al. Broadband polarimetric glucose determination in protein containing media using characteristic optical rotatory dispersion[J]. *Biomedical Optics Express*, 2019, 10(12): 6340 – 6350.
- [5] XU Z Y, ZHANG H X, CHEN K, et al. Compact all-fiber polarization coherent Lidar based on a polarization modulator[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(5): 2193 – 2198.
- [6] ZHANG J, WANG M G, TANG Y, et al. Angular velocity measurement with improved scale factor based on a wideband-tunable optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 7003409.
- [7] KLEINT L, GANDORFER A. Prospects of solar magnetometry—from ground and in space[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 210(1): 397 – 426.
- [8] INGLEBY S J, O'DWYER C, GRIFFIN P F, et al. Orientational effects on the amplitude and phase of polarimeter signals in double-resonance atomic magnetometry[J]. *Physical Review A*, 2017, 96(1): 013429.
- [9] WANG F J, LEI B, GAO C, et al. Method for determination of optical rotatory dispersion curve by using a polarization axis finder[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(8): 1965 – 1971.
- [10] WANG W, GAO C, YAN X W, et al. A new polarization direction measurement via local Radon transform and error correction[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2022, 2022(1): 70.
- [11] HUANG S J, LUO S T, YANG Y, et al. Determination of optical rotation based on liquid crystal polymer vortex retarder and digital image processing[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 8219 – 8226.
- [12] YANG S J, YANG J, LIANG J Y, et al. Radial angular polarization multiplexing and wavefront correction in partially coherent vortex optical communication[J]. *Applied Physics B*, 2025, 131(1): 14.
- [13] ZHANG T Y, LI D, PEI S Q, et al. Cylindrical vector beams with an MOPA amplifier based on nonlinear polarization rotation mode-locking[J]. *Photonics*, 2024, 11(11): 1013.
- [14] BAI X Y, ZHU Z M, SCHWING A, et al. Angle of polarization calibration for omnidirectional polarization cameras[J]. *Optics Express*, 2023, 31(4): 6759 – 6769.
- [15] 司召鹏, 毛邦宁, 卜泽华, 等. 基于快速傅里叶变换的分布式振动传感信号解调分析 [J]. *中国激光*, 2023, 50(5): 0506001.
- [16] YUE F Y, AGLIERI V, PICCOLI R, et al. Highly sensitive polarization rotation measurement through a high - order vector beam generated by a metasurface [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(5): 1901008.
- [17] ZHU X Y, DONG Y W, ZHANG B. Compact and single-shot approach to measure the transmission axis orientation of a linear polarizer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(21): 1179 – 1182.

(编辑: 张 磊)