

引用格式: LI Meng, MA Xiuquan, HONG Chunquan, et al. Real-time and High Accuracy Alignment Method of Polarization-maintaining Fiber Based on Back Projection Light through Matching Liquid[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(4):0406002
李萌,马修泉,洪春权,等. 基于匹配液背投光方法实现保偏光纤高精度的实时定轴[J]. 光子学报, 2022, 51(4):0406002

基于匹配液背投光方法实现保偏光纤高精度的实时定轴

李萌¹, 马修泉^{2,3}, 洪春权^{1,2}, 胡畅², 许天宇²

(1 广东国志激光技术有限公司, 广东 东莞, 523000)

(2 华中科技大学 机械科学与工程学院 数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074)

(3 广东省智能机器人研究院, 广东 东莞 523808)

摘要:以熊猫保偏光纤为研究对象,在使用甘油和去离子水配制匹配液的基础上,采用非相干平行光源背投光的方法实现了保偏光纤轴观测的高精度可视化。通过将旋转电机与成像系统相结合,在 Labview 平台上实现直接观测并实时提取含有保偏光纤偏振轴的光强分布信息。通过计算机处理光强分布进一步得出特征区与偏振轴角度的关系,从而实现保偏光纤偏振轴与观察面的实时夹角判别。采集信息经过归一化与二维小波算法重构图像边缘后进一步提高了定轴技术的准确性,偏差率优于 1.32%,定轴精度可达 $\pm 0.3^\circ$ 。

关键词:保偏光纤;实时定轴;归一化;二维小波重构;曲线拟合

中图分类号:TN253

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225104.0406002

0 引言

保偏光纤(Polarization-Maintaining Fiber, PMF)对线性偏振光具有较强且稳定的偏振保持能力,在相干光通信、传感等领域得到了广泛应用^[1-2]。较之普通单模光纤,保偏光纤能维持偏振光的关键在于具有快、慢两个偏振轴。识别、判断保偏光纤快轴和慢轴的方向是制作保偏类光纤器件的首要条件,例如偏振器^[3]、光纤陀螺仪^[4]等,偏振轴的对准会直接影响相关设备和试验,因此关于保偏光纤的各类定轴方法得到了深入的研究和发展。

现有的保偏光纤定轴方法按照观察方向可以分为纵向和横向观测法。纵向观测法^[5-6]需要对保偏光纤末端进行平整处理后再实现对光纤端面快慢轴方向判别,该方法严重限制了保偏光纤的应用场景。横向观测法即侧视成像法,原理是基于保偏光纤的透镜效应,光线在通过保偏光纤时由于内部的包层、应力区、纤芯的折射率各不相同,光线从入射开始经过不同的路径最终在出射端形成了含有保偏光纤内部结构的光强分布。其中最具代表性的为轮廓定轴系统(Profile Alignment System, PAS)^[7]和透镜效应测试法(Polarization Observation by Lens Effect, POL)^[8-9]定轴技术,其他方法如五指型光强分布法^[10]、五点特征值法^[11]、相衬成像法^[12]、背向衍射法^[13]等也为保偏光纤定轴研究提供了新的方向。POL和PAS因其高精度和高稳定的特性成为现阶段较为常见的两种定轴方法,但对于长距离保偏光纤的定轴无突出优势,且对光源和成像面的位置调整有较高的要求。

本文以熊猫保偏光纤为研究对象,改变了对高标准光源和调整成像面的定轴思路,采用与光纤包层折射率接近的匹配液,使保偏光纤边缘位置更加突出,易提取特征值,从而降低对光源和成像面位置的要求^[14]。由此可以使用易获取的LED作为光源,电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)观测端作为成

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(No.2018B090944001)

第一作者:李萌(1995—),女,工程师,硕士,主要研究方向为高功率激光器件与装备。Email:lm19951201@gmail.com

通讯作者:马修泉(1980—),男,研究员,博士,主要研究方向为激光加工过程中激光与材料的作用机理,新型大功率激光器的加工应用,新型材料的激光器定制与工艺创新等。Email:xma@hust.edu.cn

收稿日期:2021-09-10;录用日期:2021-10-19

<http://www.photon.ac.cn>

像面,基于匹配液背投光的方法实现保偏光纤高精度定轴。

1 保偏光纤定轴原理

1.1 定轴理论分析

普通的保偏光纤侧向定轴方法精度较低的原因主要是光纤为球面结构,并且保偏光纤包层折射率 n_1 与应力区折射率 n_2 相差较小,当平行光直接照射光纤时,光纤包层产生一次球差,经过应力轴时会第二次产生球差,经过多次球差的影响,成像质量大幅度下降,直接影应力轴判断的准确性。如图1所示,在现有实验装置上采用POL定轴法,受球差影响较大,成像质量较差,特征值较难提取,增加了后续算法分析的复杂性。引入折射率与光纤包层一致的匹配液,通过平行光的背面照射,减少多次球差的影响,使用较低标准的光源和成像面获得高质量的成像与高精度应力轴位置判断。

作为保偏光纤定轴的匹配液的重要条件为其折射率与光纤包层的折射率尽可能接近,使入射平行光线在包层内仍保持平行传输,成像效果更清晰。使用适量配比的甘油(折射率约为1.47)和去离子水可制备与光纤包层折射率(约为1.46)^[15]一致的匹配液,从而创造与保偏光纤包层相似的理想折射环境,消除掺杂空气和杂质等不利因素。如图2光线传播路径所示,将待测保偏光纤包层完全浸泡于折射率相同的匹配液中,入射光通过匹配液继续进入光纤包层时,由于匹配液和包层具有同样的折射率,入射光在经过应力区之前会保持直线传播。设定纤芯折射率为 n_0 , α_1 为光线进入应力区的入射角, α_2 为入射光的折射角,根据折射定律有

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \quad (1)$$

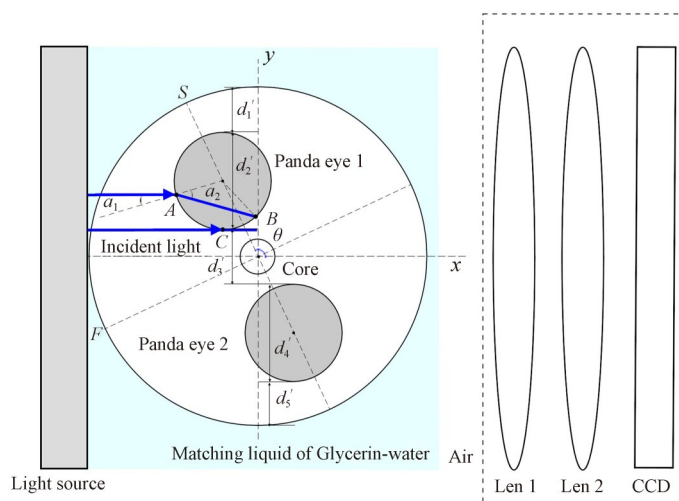


图2 匹配液中的保偏光纤侧视成像示意图

Fig. 2 Side-view imaging of polarization-maintaining fiber in matching liquid

如图2所示,进入应力区内部的入射光会在应力轴边缘位置点A发生折射,通过应力区后,光线会从应力区边缘点B再次发生折射重新进入包层。由式(1)和 $n_1 > n_2$,可知 $\alpha_1 < \alpha_2$,因此光线会向应力轴的两顶端分别偏折,形成了应力轴区域光强分布的梯度。通过CCD聚焦于应力轴平面,可以观察到清晰的图像,从而实现应力轴的位置判断。

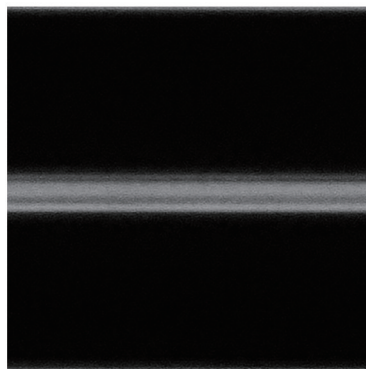


图1 使用现有实验装置通过POL定轴法获取的成像图片
Fig. 1 The imaging picture obtained by the POL method on the existing experimental device

1.2 定轴方法

如图3(b)所示,光纤中间整体呈亮条纹,包层边缘和应力区边缘会产生明显的光强梯度变化,由于熊猫保偏光纤内部结构均匀对称,因此最中央亮条纹附近还会出现另外两个亮条纹,即图3(a)中的两个应力区(Panda eye 1&2),两个应力区在旋转过程中仍保持对称状态,由此分析得知在保偏光纤内部的光强分布可分为五段不同的明暗衍射条纹。在图3(b)中,由上到下第一段 d_1 和第五段 d_5 条纹为包层边缘与应力区边缘的区间,第二段 d_2 和第四段 d_4 条纹为靠近包层外端的应力区边缘与此时相距最近的应力区边缘的区间,受限于CCD成像系统的精度,纤芯的观测较为困难,因此第三段 d_3 条纹为两个应力区靠近纤芯一侧边缘之间的距离或两个应力区区域的重叠部分。通过对光传播路径和观测端图像的分析可知,光纤由CCD端接收的五段衍射条纹间距(d_1, d_2, d_3, d_4, d_5)与图2中光纤内部各结构部分的距离 $d_1', d_2', d_3', d_4', d_5'$ 成比例关系。

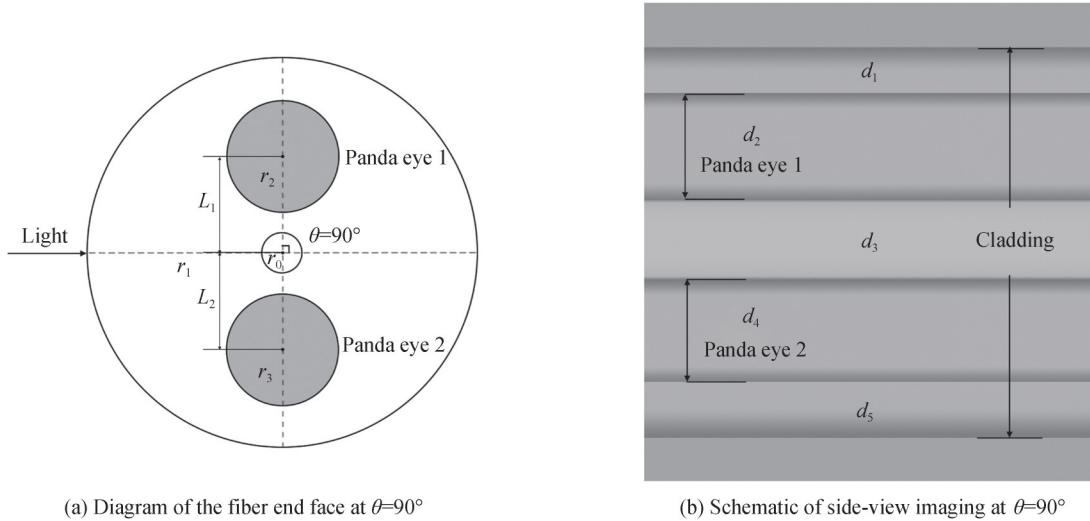


图3 偏振轴为 90° 时保偏光纤示意图
Fig. 3 Schematic of polarization-maintaining fiber at polarization axis of 90°

在观测保偏光纤的旋转变化过程中,可以发现随保偏光纤偏振轴角度 θ 的改变,五段明暗条纹的间距也会随之发生规律性的周期变化。同时观测保偏光纤端面中偏振轴位置变化情况,可以发现位于保偏光纤内部的衍射条纹位置变化与偏振轴方位角度 θ 具有相关性。如图3(b)所示,偏振轴角度 $\theta = 90^\circ$ 时,两个应力区衍射条纹之间的距离 d_3 最远;继续旋转可以发现最中间位置的亮条纹距离 d_3 会由两个应力区边缘之间的距离转变为两个应力区重叠部分的距离;直至旋转偏振轴角度为 $\theta = 0^\circ$ 或 $\theta = 180^\circ$ 时,两个应力区衍射条纹 d_2, d_4 重合。

2 定轴实验验证

2.1 实时定轴系统装置

为探究保偏光纤应力区衍射条纹的间距 d_2, d_3, d_4 与偏振轴角度 θ 的关系,搭建了实时定轴系统来进行检测分析,在定轴系统运行前需搭建以CCD为核心的硬件装置,配合轻量化算法完成高效稳定运行的图像获取系统。实验中使用熊猫保偏光纤(Nufern PLMA-GDF-25/250-M)进行定轴测量实验,根据端面测量结果和光纤出厂报告可知光纤各项参数如下:纤芯半径 $r_0 = 12.5 \mu\text{m}$,包层半径 $r_1 = 121 \mu\text{m}$,应力区半径 $r_2 = r_3 = 34 \mu\text{m}$,纤芯折射率 $n_0 >$ 包层折射率 $n_1 >$ 应力区折射率 n_2 ,应力区圆心至纤芯圆心距离为 $L_1 = L_2 = 70 \mu\text{m}$ 。将保偏光纤固定在旋转电机上,待测量部分两端置于支架上增加稳定性,避免因长距离光纤旋转时导致的抖动影响测量准确性。按照图2搭建实验装置,滴取匹配液直至完全覆盖光纤包层表面,将LED放在平面透镜下方经准直调试后组合成非相干平行光源(也可直接使用平行光源LED)对待测保偏光纤进行轮廓检测。

高清晰度图像的提取对后续使用算法进行边缘检测的准确性至关重要, CCD架于保偏光纤上方焦点位置, 配置高分辨率的连续变倍镜头可提升实时测量时的图像质量, 从而提高定轴技术的精确率。实时图像获取完成后, 可以通过人的主观感知^[16]进行大致的偏振轴角度判断, 此方法常用于目测定轴^[17], 此类对图像的主观评估一般用平均主观得分(Mean Opinion Score, MOS)^[16]表示, 但在重复实验过程中发现此种主观评估受显示设备、光源位置、观看距离、观测者的视觉能力、情绪等因素影响, 无法得出准确的定轴结果。因此定轴算法除了偏振轴角度推算外还需要引进高效精准的图像质量评估(Image Quality Assessment, IQA)^[18]模型以达成自动实时定轴的目的。

2.2 实时定轴系统算法

提取后的包含光信号的图像可以使用图像评估模型进行分析。

旋转保偏光纤 180° 为一周期, 使用CCD图像检测系统对保偏光纤进行全周期多次顺序采样, 这些包含偏振轴角度信息的光信号的图像样本被CCD图像检测系统进行实时捕捉后会上传至计算机。通过计算机预设算法将实时图像样本经二值化处理转化为灰度数字信号。为了加强对边缘的识别, 设置尺度向量和阈值向量后对数据进行分解, 分解后对高频小波系数进行阈值处理, 再进行图像的二维小波重构, 得出如图4(a)的图像样本。

限于CCD精度, 峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)值较低, 为提高信噪比对经图像处理后的数据进行归一化处理^[18]得到图4(b), 图中可以发现五段较为突出的波峰, 其宽度对应五段衍射条纹间距 d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 , 随偏振轴角度变化最为敏感的三段衍射条纹间距 d_2, d_3, d_4 对应中间三段波峰宽度, 即波峰两端处于最小灰度值时横向坐标的差值。

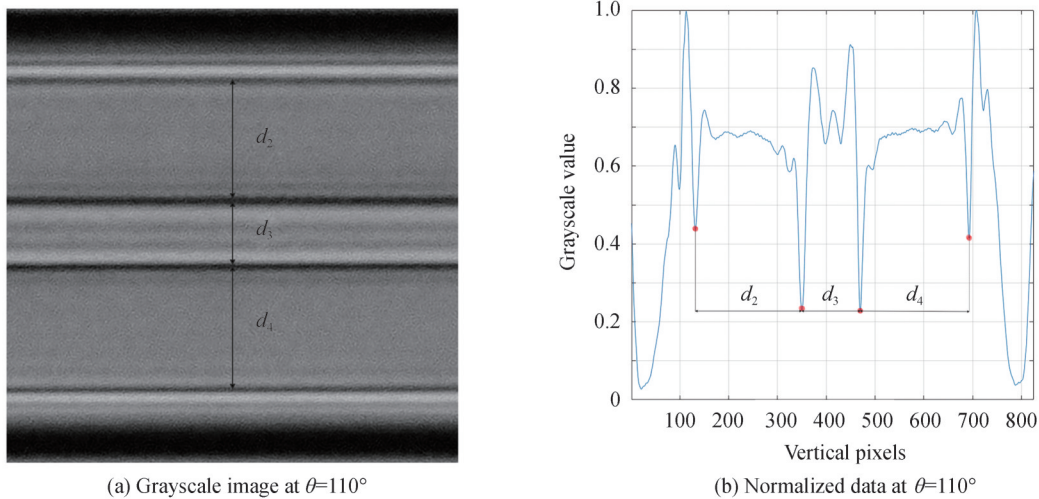


图4 正转 110° 时, CCD截取的部分保偏光纤图像和图像归一化数据

Fig. 4 When rotating forward 110° , part of the polarization-maintaining fiber images captured by the CCD and normalized data

旋转保偏光纤至一些特殊角度(例 $0^\circ, 90^\circ$ 或两个应力区重叠时的某个角度), 成像图出现显著的特征值变化。当 $\theta=0^\circ$ 或 $\theta=180^\circ$ 时, 如图5(a)所示, 两个应力区完全重叠, 成像图中只有三段衍射条纹, 此时 $d_2=d_4=0, d_3$ 的绝对值为应力区直径在图中的成像距离。实际测量时的 d_3 均为正值, 为了区分光纤旋转时两个应力区的重叠情况, 定义当两个应力区处于重叠状态时, 如图5(c)所示, $d_3 < 0$; 当两个应力区处于非重叠状态时, 如图5(b), $d_3 > 0$; 当两个应力区靠近纤芯一侧的边缘重合时, $d_3 = 0$ 。

为进一步对图像样本进行批量处理, 设定数据筛选条件, 包括阈值范围, 波峰宽度参考范围, 波峰突出范围, 最小峰值高度限制, 最小峰值宽度限制等。执行筛选后提取特征值与其对应偏振轴角度得到图6, 可以发现保偏光纤中间三段衍射条纹的间距 d_2, d_3, d_4 与偏振轴角度 θ 具有相关性。

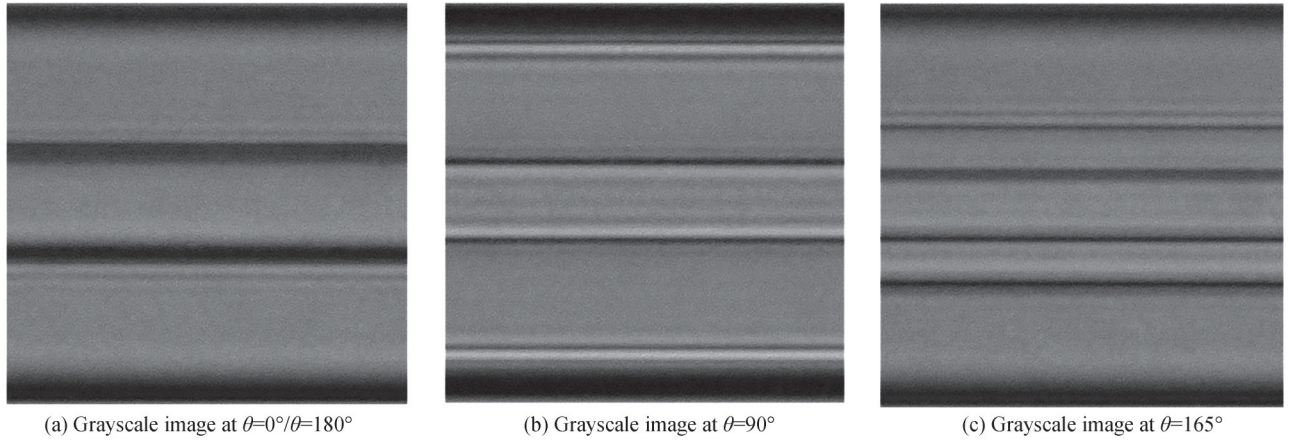


图5 正转至特殊角度时,CCD截取的部分保偏光纤图像

Fig. 5 When rotating to special angles, part of the PM fiber images captured by the CCD

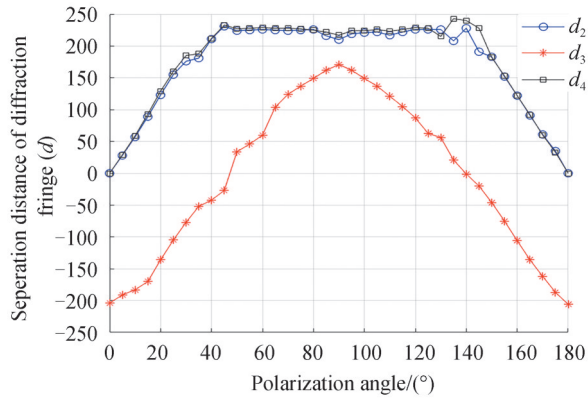


图6 不同角度衍射条纹的相对距离

Fig. 6 Relative distance of diffraction fringes at different angles

如图6所示, d_2 与 d_4 的函数图像接近重合。当 $0^\circ \leq \theta < \arcsin \frac{2r}{L}$ 或 $\pi - \arcsin \frac{2r}{L} < \theta \leq 180^\circ$, $d_3 < 0$, d_2 和 d_4 的值与偏振轴角度为正相关关系; 当 $\theta = \arcsin \frac{2r}{L}$ 时, $d_3 = 0$, $d_2 = d_4$ 且两者处于最大值变化点; 而当 $\arcsin \frac{2r}{L} \leq \theta \leq \pi - \arcsin \frac{2r}{L}$ 时, $d_3 \geq 0$, $d_2 = d_4$ 且为最大值。

根据理论分析, 当 $\theta = 90^\circ$ 时, d_3 为最大值。如图7所示, 偏振轴角度 θ 非 90° 时, d_3 的值仍然与之具有相关性。定义 Δl 为垂直于光线方向上两应力区圆心之间的距离, 已知两应力区圆心的距离 $L = L_1 + L_2$, 应力

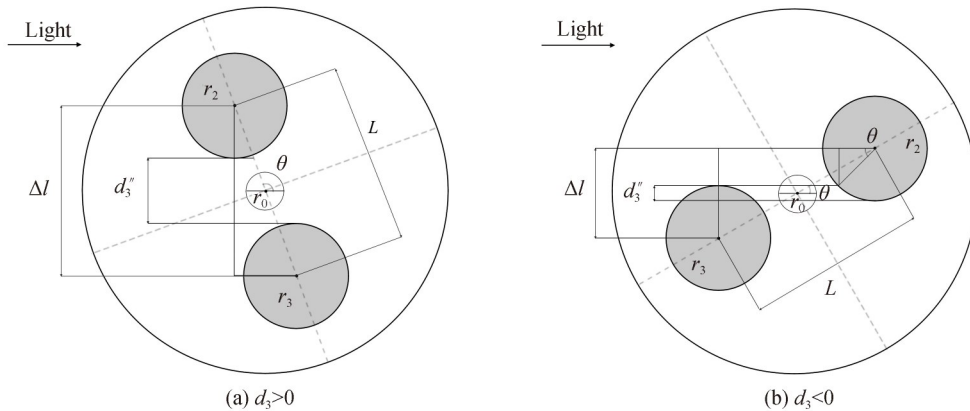


图7 偏振轴角度 θ 与 d_3 的几何关系

Fig. 7 The geometric relationship between the angle of the polarization axis θ and d_3

区半径 $r=r_2=r_3$, 常数 k 为图像尺寸与光纤实际参数的比例系数。

如图 5(a), 当 $d_3 > 0$ 时, 则

$$d_3 = k \times [L \times \sin(\pi - \theta) - 2r] \quad (2)$$

如图 5(b), 当 $d_3 < 0$ 时, 则

$$|d_3| = k \times [(L - 2r) \times \sin\theta] \quad (3)$$

通过实验结果和理论分析, 已知特征值 d_2, d_3, d_4 可以得到偏振轴的角度。检测实验数据发现计算所得偏振轴角度小于记录的偏振轴角度, 原因是采集图像样本时使用目测定轴造成的误差, 用式(2)和(3)纠正实际偏振轴角度和对应的特征值后, 将数据存储至预设数据库中, 以此为基准识别后续偏振轴角度信息。本定轴方法的完整操作过程可以参考图 8, 在进行实时定轴实验时, 由计算机对实时图像分析后的获得特征值与预设数据库的特征值进行对比, 先对比 d_2 和 d_4 的值确认偏振轴角度 θ 的范围后, 再使用式(2)或(3)得出准确的偏振轴角度。

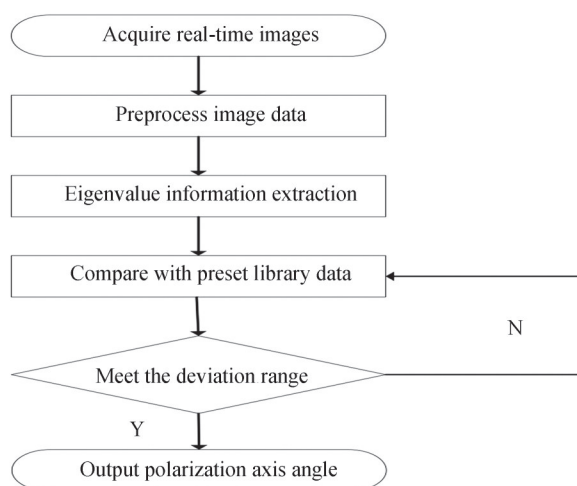


图 8 定轴操作流程

Fig. 8 Operation flow chart of alignment polarization axis

2.3 应力区分布不对称的误差分析

在保偏光纤的制作过程中, 由于拉丝过程中存在工艺缺陷、材料纯度和环境影响, 导致保偏光纤成品出现应力区分布不对称的现象^[6]。如图 9 所示, 图 9(a)为两个应力区半径不一致; 图 9(b)为两个应力区圆心距纤芯圆心的距离不一致; 图 9(c)为两个应力区圆心的连线与纤芯圆心的连线不共线。其中, 因为偏振轴角度是两个应力区圆心连线与入射光线的夹角, 因此偏振轴角度 θ 并不会由于应力区分布不对称而改变。对

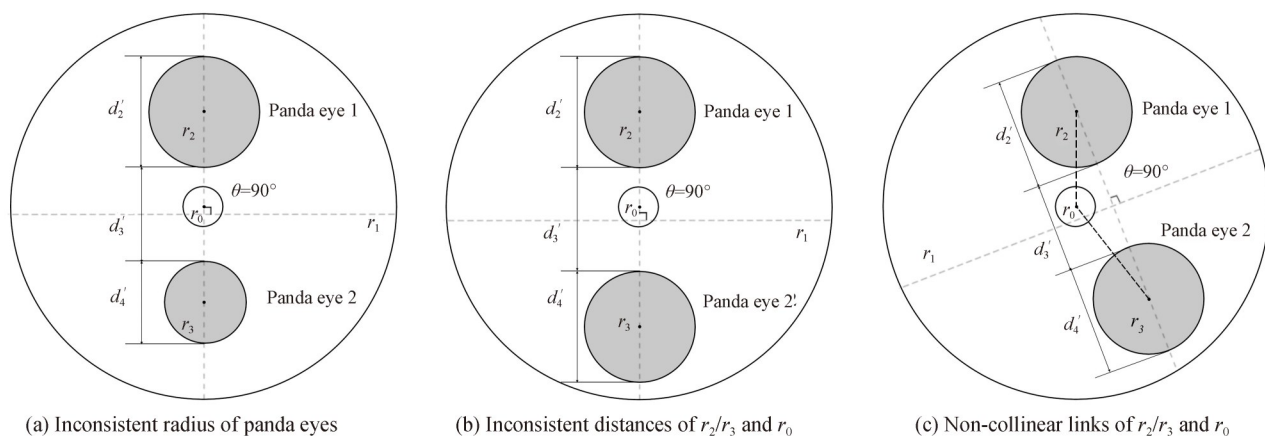


图 9 保偏光纤应力区分布不对称时的三种截面示意图

Fig. 9 Three cross-sectional schematic diagrams when the stress zone distribution of PMFs are asymmetric

比图9(a)与应力区完美对称的保偏光纤可以发现除了测量值 d_3 外,只有两个应力区圆心连线的长度 L 和应力区半径 r_2 或 r_3 发生了改变;对比图9(b)和(c)与应力区完美对称的保偏光纤可以发现除了测量值 d_3 外,只有两个应力区圆心连线的长度 L 发生了改变。

图9(b)和(c)这类应力区分布不对称导致的定轴误差较小,依然符合本文提出的规律。修改受影响的参数 L 后,根据式(1)和(2)对预设库中的特征值 d_3 进行更新,对保偏光纤进行旋转检测,更新预设库的特征值数据 d_2 和 d_4 以消除误差影响,再按照图8的流程进行定轴测试。

图9(a)这类应力区半径不一致的情况会导致较大的定轴误差,出现 d_2 与 d_4 不重合的现象,但对公式进行修正后,特征值 d_2 、 d_3 、 d_4 仍然可以进行精准定轴。定义处于两个应力区重叠时的特征值为负值,如图10所示,当偏振轴角度 $\theta < \theta_1$ 或 $\theta > \pi - \theta_1$ 时, d_3 的值不变,设定此时 $d_3 = a$,使用 d_2 和 d_4 作为主要特征值数据进行定轴;当 $d_2 = d_4$ 时,偏振轴角度 $\theta = 0^\circ$ 或 $\theta = 180^\circ$;当偏振轴角度为 $\theta_2 < \theta < \pi - \theta_2$ 时, d_2 和 d_4 的值不变,使用 d_3 作为主要的特征值数据进行定轴。

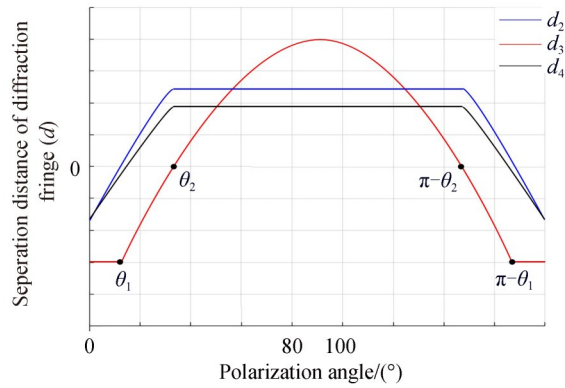


图10 应力区半径不一致时,模拟得到的特征值与偏振轴角度关系

Fig. 10 The simulated relationship between eigenvalues and polarization axis angle when radius of panda eyes are inconsistent

其中, θ_1 或 $\pi - \theta_1$ 为两个应力区刚刚处于完全重叠时的角度,其几何关系为

$$\sin\theta_1 = \sin(\pi - \theta_1) = \frac{r_2 - r_3}{L} \quad (4)$$

θ_2 或 $\pi - \theta_2$ 为两个应力区刚刚处于完全不重叠状态时的角度,其几何关系为

$$\sin\theta_2 = \sin(\pi - \theta_2) = \frac{r_2 + r_3}{L} \quad (5)$$

将图9(a)中的两个半径不等的应力区代入图7的几何分析可得,当 $d_3 > 0$ 时,有

$$d_3 = k \times [L \times \sin(\pi - \theta) - r_2 - r_3] \quad (6)$$

当 $a < d_3 < 0$ 时,则

$$|d_3| = k \times [(L - r_2 - r_3) \times \sin\theta] \quad (7)$$

根据式(6)和(7)对预设库中的特征值 d_3 进行更新,对保偏光纤进行旋转检测,更新预设库的特征值数据以消除误差影响。当 $d_3 = a$ 时,以 d_2 和 d_4 作为主要特征值数据进行定轴;当 $d_3 > a$ 时,以 d_3 作为主要特征值数据进行定轴,再按照图8的流程进行定轴测试。

3 定轴精度分析

预设数据库基准建立完成后进行定轴精度实验测量此定轴方法精度,此处将使用随机采样的方法进行样本检测,检测样本库来自CCD检测系统采集的新图像数据组,数据组包含偏振轴角度为 0° 至 180° 的图像,同样角度的图像为一组,每组应包含50个以上的有效测量值,测量值为待测量保偏光纤图像中间三段衍射条纹的距离 d_2 、 d_3 、 d_4 。

3.1 定轴方法偏差率分析

由于测量图像的偏振轴角度 θ 为已知量,可以直接测量实验图像的特征值,得出每组数据的平均特征值

d_3' ,与预设库中对应偏振轴角度的基准特征值 d_3 对比,得出本文所述定轴方法的偏差率为

$$D(\%) = \frac{d_3 - d_3'}{d_3} \times 100\% \quad (8)$$

如表1所示,由式(8)计算得出五组测量值的平均偏差率约为1.19%。继续计算所有随机样本的特征值,得出定轴算法偏差率约为1.32%。

表1 实时定轴方法偏差率

Table 1 Angle deviation ratio of real-time alignment method

Polarization axis angle $\theta/(\circ)$	Average spacing from preset database d_3	Average spacing from measured database d_3'	Ratio of angle deviation $d/\%$
20	-136.754	-136.499	0.18
50	34.821	35.625	2.31
90	171.57	171.381	0.11
120	105.51	107.063	1.47
140	-20.12	-19.738	1.90

3.2 定轴方法精度分析

同一角度时,使用定轴方法测出偏振轴角度 θ' 与真实偏振轴角度 θ 的差为定轴精度。由式(2)和(3)可以推导出,当 $d_3 > 0$ 时,有

$$\frac{d_3 + 2r}{d_3' + 2r} = \frac{\sin\theta}{\sin\theta'} \quad (9)$$

当 $d_3 < 0$ 时,则

$$\frac{|d_3|}{|d_3'|} = \frac{\sin\theta}{\sin\theta'} \quad (10)$$

根据式(9)和(10)可以计算得出测试数据的偏振轴角度 θ' 和定轴精度 α ,同理可以修改相关参数得出应力区几何非对称的保偏光纤定轴精度测试公式。提取偏振轴角度为 110° 的50个测量值代入至式(9)得出结果并进行正态分布特性检测,检测结果如图11。

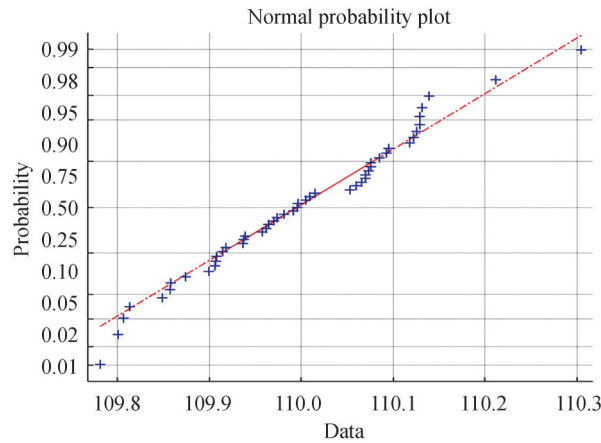


图11 当偏振轴角度 $\theta = 110^\circ$ 时,检查得到的测试数据正态特性

Fig. 11 Detected normal characteristic of the tested data with the polarization angle $\theta = 110^\circ$

计算得出定轴精度测试结果最大值与最小值的差为 0.52° ,标准差 δ 为 0.11° ,定轴精度在 $\pm 0.3^\circ$ 的范围内。进一步分析图11,可以发现定轴测试结果数据较为稳定,无极端偏离值,说明基于匹配液背投光的定轴方法较为精准、稳定。

4 结论

本文在平行光的照射下引入匹配液,实现了保偏光纤应力轴的直接可视化;搭建保偏光纤实时定轴光

学系统,设计计算机编程算法,在目测保偏光纤设备的基础上完成了高精度保偏光纤定轴。实验结果表明,该定轴方法实现了优于1.32%的定轴准确率,定轴精度可达 $\pm 0.3^\circ$ 。与传统定轴法相比,引入匹配液后,降低了对光源等硬件设施的标准以及定轴算法的复杂性,减少了实际操作中对光源等精密设备的大量调试工作,从而优化了定轴系统。对于保偏光纤器件制作装置系统,本文所需定轴装置易获取并可以直接将预设算法兼容到需定轴的保偏光纤器件设备上,也可以对较长距离的一段保偏光纤进行定轴,减少了定轴后再移动导致的误差。

参考文献

- [1] WANG Wei, ZHAO Jian, ZHANG Lin, et al. $4 \times 10\text{Gb/s}$ MIMO-free polarization and mode group multiplexing for data center applications [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(20): 1711-1714.
- [2] WADA A, TANAKA S, TAKAHASHI N. Fast and high-resolution simultaneous measurement of temperature and strain using a Fabry - Perot interferometer in polarization-maintaining fiber with laser diodes [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 36(4): 1011-1017.
- [3] RUAN Tiantian, LI Xia, XIA Jianchun, et al. Cascaded polarizer-PMF-Fabry - Pérot structure with a tunable initial state for ultra-highly sensitive temperature measurement[J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(12): 122002.
- [4] YANG Jun, YUAN Yonggui, YU Zhangjun, et al. Optical coherence domain polarimetry technology and its applications in measurement for evaluating components of high precision fiber-optic gyroscopes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328007.
杨军, 苑勇贵, 喻张俊, 等. 光学相干域偏振测量技术及其在高精度光纤陀螺器件测量中的应用[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328007.
- [5] LIU Zhenhua, FENG Di, HUANG Huaibo, et al. Research on automatic aligning method of panda polarization maintaining fiber with high accuracy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(2): 0206004.
刘振华, 冯迪, 黄怀波, 等. 高准确度熊猫保偏光纤自动定轴技术[J]. *光子学报*, 2015, 44(2): 0206004.
- [6] YAN Jingtao, MIAO Lijun, HUANG Tengchao, et al. Development of method for polarization alignment of PANDA polarization maintaining fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53: 101999.
- [7] ITOH K, YOSHINUMA N, SUZUJI N, et al. Method of fusion-splicing polarization maintaining optical fibers: U. S. Patent 5,013,345[P]. 1991-5-7.
- [8] ZHENG Wenzin. Automated fusion-splicing of polarization maintaining fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(1): 125-134.
- [9] ZHENG Wenzin. Automated alignment and splicing of different PM-fiber types[C]. *Fiber Optic Gyros: 20th Anniversary Conference*, Denver, 1996.
- [10] CHEN Shaoying, DI Hongwei, CHEN Zhe, et al. Azimut hal alignment method for PM fiber based on light intensity distributions with five finger profile[J]. *Applied Laser*, 2006, 26(1): 35-38.
陈少英, 狄红卫, 陈哲, 等. 基于五指型光强分布的保偏光纤定轴方法[J]. *应用激光*, 2006, 26(1): 35-38.
- [11] WANG Jine, LIN Zhehui, WU Yulie, et al. The auto-alignment technique of PM Fiber of MRI [J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, 26(5): 37-40.
王金娥, 林哲辉, 吴宇列, 等. 匹配型保偏光纤自动对轴技术[J]. *应用光学*, 2005, 26(5): 37-40.
- [12] HU Yongming, CHEN Zhe, LIAO Yanbiao, et al. Computer simulation of phase panda fiber of contrast alignment of birefringent axes in matching refractiveindex[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1998, 25(8): 715-721.
胡永明, 陈哲, 廖延彪, 等. 匹配型熊猫光纤的相衬法定轴技术的仿真分析[J]. *中国激光*, 1998, 25(8): 715-721.
- [13] ZHONG Zhen, CHEN Zhe, ZHONG Jingang, et al. Determination of the azimuth of polarization axes of Panda fiber based on the image correlation of back ward diffractive pattern[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6): 1409-1413.
钟振, 陈哲, 钟金钢, 等. 熊猫光纤背向衍射图样的图像互相关定轴方法[J]. *光子学报*, 2009, 38(6): 1409-1413.
- [14] ZHENG Yu. Research on the key technology of manufacturing fused-taper polarization-maintaining fiber coupler [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006: 22.
郑煜. 熔锥型保偏光纤耦合器制造的关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006: 22.
- [15] GU Tingting, HUANG Sujuan, YAN Cheng, et al. Refractive index measurement research for optical fiber based on digital hologram[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(6): 064204.
谷婷婷, 黄素娟, 闫成, 等. 基于数字全息图的光纤折射率测量研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(6): 064204.
- [16] GU K, ZHAI G, YANG X, et al. Deep learning network for blind image quality assessment[C]. *2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2014: 511-515.
- [17] WU Yulie, ZHENG Yu, WANG Jine, et al. Research of azimuthal alignment for PANDA fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(7): 1224-1229.
吴宇列, 郑煜, 王金娥, 等. 熊猫型保偏光纤定轴仿真研究[J]. *光子学报*, 2007, 36(7): 1224-1229.
- [18] BOSSE S, MANIRY D, MÜLLER K R, et al. Deep neural networks for no-reference and full-reference image quality assessment[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, 27(1): 206-219.

Real-time and High Accuracy Alignment Method of Polarization-maintaining Fiber Based on Back Projection Light through Matching Liquid

LI Meng¹, MA Xiuquan^{2,3}, HONG Chunquan^{1,2}, HU Chang², XU Tianyu²

(1 *GZ Photonics Technology Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 523000, China*)

(2 *State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

(3 *Guangdong Intelligent Robotics Institute, Dongguan, Guangdong 523808, China*)

Abstract: The traditional polarization-maintaining fiber alignment method is divided into longitudinal and lateral observation methods. However, both of them have severe defects. For example, the longitudinal observation method limits the application scenarios due to the destruction of the polarization fiber in the detection section. In contrast, the widely used lateral observation method requires high standards for experimental equipment and complex manual operations and alignment algorithms. Regarding the panda polarization maintaining fiber as the research object, instead of the traditional polarization-maintaining fiber alignment thinking of applying a high standard light source and adjusting the imaging surface. Based on applying the matching liquid mixed with glycerin and deionized water, the ideal refraction environment can be created due to the reduced effects of multiple spherical aberrations. Hence, high accuracy visualization can be achieved by projection from the incoherent parallel light sources. Then, applying the rotating motor with a fiber clamp setup and imaging system to form an experimental device, a long-distance section of the polarization-maintaining fiber can be aligned. Additionally, the LabVIEW platform can demonstrate the results of direct observation and real-time extraction of light intensity distribution information, which contains angle information of the polarization axis from the polarization-maintaining fiber. This information can also be called the characteristic value of the high accuracy alignment method, i.e., the three segment diffraction fringe spaces d_2 , d_3 , d_4 , which are sensitive to the polarization axis angle θ inside the polarization-maintaining fiber. According to the internal structure of the polarization-maintaining fiber and the geometric characteristics of the eigenvalue, the geometric relationship between the eigenvalue and the angle of the polarization axis θ of the polarization-maintaining fiber can be deduced theoretically. Furthermore, through computer processing of the experimental data and theoretical analysis of the light intensity distribution, the relationship between the characteristic areas and the angle of the polarization axis was obtained. Thus, real-time alignment between the polarization axis of the polarization fiber and the observation surface could be realized. In the case of the image processing algorithm, the collected information is primarily binarized and converted into gray-scale digital signals, and then the collected data are normalized to improve the signal-to-noise ratio and reconstruct the image edge by the two-dimensional wavelet algorithm. Due to these algorithm techniques, the accuracy of the alignment method has been improved significantly, the deviation ratio is better than 1.32%, and the accuracy of the alignment method is up to $\pm 0.3^\circ$. Moreover, polarization-maintaining fibers might have several process defects, and the primary influencing factors are material purity and environmental impacts during the drawing manufacturing process. All of these defects lead to three typical asymmetries of the panda eyes distribution: the radii of the two panda eyes are inconsistent, the distance between the center of the two panda eyes is inconsistent, and the line of the center of the two panda eyes is not collinear with the line of the center of the fiber core. According to the analysis of geometric theory, the high-precision positioning method is also compatible with the errors caused by the asymmetry of the panda eyes distribution.

Key words: Polarization-maintaining fiber; Real-time alignment of polarization axis; Normalization; Two-dimensional wavelet reconstruction; Curve-fitting

OCIS Codes: 060.2420; 230.2090; 060.2350