

doi:10.3788/gzxb20154406.0606003

基于光强互相关的保偏光纤定轴仿真

翁晓泉,冯迪,黄怀波,刘振华,宋凝芳

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

摘 要:提出一步定轴法以提高保偏光纤偏振轴定位和对准技术中侧视成像法的定轴效率.一步定轴法通过光强图像与标准图库之间的相关运算实现定轴,定轴过程中不需要旋转光纤.采用光强内插处理以及选择最佳观测平面两种措施提高一步定轴法的定轴准确度.以熊猫型保偏光纤为研究对象,利用光线追迹法仿真计算出不同观测面的光强图像.以相关峰值处的尖锐程度作为定轴准确度的判据,分析内插前后以及不同观测面的定轴准确度.结果表明,这两种措施均可提高定轴准确度,并获得优于 0.3° 的理论定轴准确度.

关键词:保偏光纤;定轴;光线追迹法;偏振轴;互相关

中图分类号:TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)06-0606003-5

Simulation of PM-fibers' Azimuthal Alignment Based on the Image Correlation of Light Intensity

WENG Xiao-Quan, FENG Di, HUANG Huai-bo, LIU Zhen-hua, SONG Ning-fang

(Department of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on side-view imaging, the one-step method was proposed to achieve higher alignment efficiency in the location and alignment of polarization axes of polarization-maintaining fibers. In comparison with side-view imaging, one-step method is not necessary to rotate fibers in alignment process, for azimuth aligning can be realized by operating correlation between light-intensity profiles and the standard library of light-intensity profiles. In order to improve the alignment precision for the one-step method, the interpolation method and optimized observation method were putted forward. To test the reliability of these measures, light-intensity profiles of panda fibers of different observation surfaces were simulated by using ray-tracing method. Then the cross correlations were done among light-intensity profiles of the same observation surfaces. The sharp degree of correlation-curve peak was implemented for the estimation of alignment precision. The alignment precision among different observation position was analyzed with and without interpolation. According to the final result, with these two measures alignment precision is improved substantially and a theoretical precision better than 0.3° is achieved.

Key words: Polarization-Maintaining Fiber; Azimuthal Alignment; Ray-Tracing Technique; Birefringent Axes; Cross Correlation

OCIS Codes: 220.1140; 150.1135; 060.2420; 060.2310

0 引言

保偏光纤(Polarization-Maintaining Fibers, PMF)是一类特殊的单模光纤,具有较强的偏振保持特性,一般这一特性通过在光纤芯向引入应力块(熊猫型、领结型)或非对称纤芯(椭芯型)获得.由于具有这一特性,

保偏光纤广泛应用于光纤陀螺、干涉传感以及相干光通讯等对偏振态具有较高要求的领域.

保偏光纤偏振轴的定位和对准是其应用中的关键技术之一^[1].例如在光纤陀螺中,Y波导保偏尾纤与保偏光纤线圈之间两个熔接点的对轴误差,将导致零偏和零偏稳定性明显变差^[2].

基金项目:国家重大科学仪器专项(No. 2013YQ040877)资助

第一作者:翁晓泉(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为保偏光纤定轴技术. Email: wengxq0614@163.com

导师(通讯作者):冯迪(1972-),男,副教授,博士,主要研究方向为光纤传感及微结构光学. Email: fengdi@buaa.edu.cn

收稿日期:2014-12-29; **录用日期:**2015-04-01

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

按通光和观测方向,保偏光纤的定轴方法可分为纵向与横向两类.纵向法主要有光弹效应法^[3]、消光比法^[4]、白光干涉法^[5]等.该类方法准确度较高,如白光干涉法定轴准确度可达 0.083° ,是目前准确度最高的方法.然而由于纵向法设备复杂、操作难度大,只用在特殊场合.

除背向衍射法^[6]外,横向法主要指侧视成像定轴法,包括(Polarization Observation by Lens-effect Tracing, POL)法^[7-8]、相衬法^[9]、五点特征点法^[10]、五指法^[11]等.虽然这类方法的测量准确度低于纵向法,但是由于装置简单,且适用于各类保偏光纤,因此具有广阔的应用前景.其中POL法已经被应用于保偏光纤熔接机上,是目前应用最多的定轴方法.

然而,侧视成像法的定轴原理限制了其定轴速度,随着光纤陀螺和光纤传感产业的进一步发展,该问题已日渐突出.因此,在侧视成像法的基础上,开发一种新的定轴技术具有很大的应用价值.

为此,本文提出了一种基于光强图像互相关的定轴方法——“一步定轴法”.相比于传统的侧视成像法,该方法的定轴速度更高.

1 定轴算法介绍

1.1 侧视成像法

平行光从侧面垂直照射在裸光纤上,此时的保偏光纤相当于一个柱面透镜,光线经过光纤的折反射作用,最后在距离纤芯为 L 的观测面上可以得到一幅光强图像,如图1.由于保偏光纤内部折射率分布的非圆对称性,当光纤方位角 θ (经过两应力区圆心的直线与光轴的夹角)改变时,光强图像也随之改变.

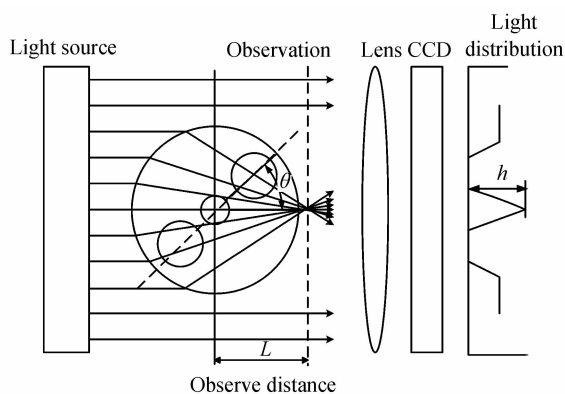


图1 侧视成像法示意图

Fig.1 Principle chart of side-view imaging method

将光纤从初始方位角 θ_0 以固定增量 Δ 旋转一周,根据光强图像的形貌特征提取合适的特征值 c ,获得其随角度变化的曲线,即

$$C(\theta_0) = \{c_0, c_1, \dots, c_N\}, N = 2\pi/\Delta \quad (1)$$

利用特征曲线的对称性和周期性进行傅里叶展开,便可得到起始角度为 0° 的特征值曲线.通过该特征

值曲线内部元素的平移变换得到不同起始方位角的特征值曲线,从而获得标准图库 $C(\theta)$,其中 $0 \leq \theta \leq 2\pi$ 表示光纤起始方位角.

将待测方位角的特征值曲线与标准图库做互相关运算,即

$$C_0[L, C(\theta)] = [N \sum_{i=1}^N l_i c_i(\theta) - \sum_{i=1}^N l_i \sum_{i=1}^N c_i(\theta)] / \{ [N \sum_{i=1}^N l_i^2 - (\sum_{i=1}^N l_i)^2] [N \sum_{i=1}^N c_i^2(\theta) - (\sum_{i=1}^N c_i(\theta))^2] \}^{1/2} \quad (2)$$

极大值所对应的角度即为光纤待测方位角.

1.2 一步定轴法

图1中的摄像机在实际系统中为电荷耦合器(Charge Coupled Devices, CCD)^[12]. CCD是利用光电转化元件将采集到的光强转化为数字图像的器件.由于数字图像的大小由 CCD上的传感器数量决定,因此同型 CCD 输出的光强图像大小相等.受此启发,可以利用光强图像直接做相关求出光纤的方位角.

CCD输出的某条光强图像经过处理可用一个一维数组 $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$ 表示,其中 i_x 表示第 x 个像素的灰度值.由于保偏光纤截面关于慢轴对称,因此,在此只需考虑方位角 θ 在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的情况.将光纤方位角 θ 以角度间隔 Δ ,从 0° 转到 180° ,通过光线追迹法计算得到每个方位角下的光强图像

$$I(\theta, X) = \begin{Bmatrix} i_{0,1} & i_{0,2} & \dots & i_{0,m} \\ i_{\Delta,1} & i_{\Delta,2} & \dots & i_{\Delta,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ i_{\pi,1} & i_{\pi,2} & \dots & i_{\pi,m} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

将其作为标准图库.

将方位角为 φ 的光强图像 I_φ 与标准图库 $I(\theta)$ 做相关运算,得到相关曲线 $C = \{c_0, c_\Delta, \dots, c_\pi\}$,其中 c_δ , ($0^\circ \leq \delta \leq 180^\circ$)表示起始角度为 δ 的光强曲线 I_δ 与 I_φ 的相关度.

计算结果表明,对于同一型保偏光纤,在同一观测平面上,相同方位角的光强图像总是最相似的,即相关度最大.因此相关曲线 C 的极大值 c_{\max} 所对应的方位角即为待测方位角 φ .

为了提高一步定轴法的定轴准确度,本文提出寻找最佳观测面以及对光强图像进行内插处理两种算法.

在工程中求某保偏光纤的方位角.首先借助仿真结果确定最佳观测平面,而后求出其在该位置处的标准图库,并对任意方位角的光强图像和标准图库进行内插处理.最后通过相关运算求出光纤方位角.

传统的侧视成像法基于特征曲线间的互相关运算定轴,在每次定轴时为了得到特征曲线,均需将光纤以一定角度间隔 Δ 旋转一周.而一步定轴法利用光强图像之间做互相关运算定轴,一旦求出标准图库,在每次定轴时不需要转动光纤,只需一步即可完成定轴工作.

相比之下,一步定轴法的定轴时间仅是侧视成像法的 $\Delta/2\pi$ 。

2 计算分析

2.1 建立模型

熊猫型保偏光纤横截面参量模型可表示为^[13]

$$n = \begin{cases} n_1 & x^2 + y^2 \leq r_1^2 \\ n_2 & (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 \leq r_2^2 \\ & \text{或 } (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 \leq r_2^2 \\ n_3 & b^2 \leq (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 \leq r_3^2 \\ & \text{或 } b^2 \leq (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 \leq r_3^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中, n_1, n_2, n_3 分别表示纤芯、应力区、包层的折射率, $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 为两应力区圆心坐标, r_1, r_2, r_3 分别表示纤芯、应力区、包层的半径。

该型光纤具体参量为:纤芯折射率 $n_1 = 1.4672$, 应力区折射率 $n_2 = 1.4470$, 包层折射率 $n_3 = 1.4571$, 纤芯半径 $r_1 = 2.75 \mu\text{m}$, 应力区半径 $r_2 = 11.75 \mu\text{m}$, 包层半径 $r_3 = 40 \mu\text{m}$, 两应力区中心距离 $d = 35.6 \mu\text{m}$ 。

2.2 内插处理

内插处理即对光强图像 $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$ 内部元素进行数学运算,从而得到新的光强分布序列 $\Delta I = \{\Delta i_1, \Delta i_2, \dots, \Delta i_n\}$ 。

本文中

$$\Delta i_x = i_x + i_{x+2} - 2i_{x+1} \quad (x=1, 2, \dots, m-2) \quad (5)$$

在光纤方位角的判定中,测量准确度可由自相关曲线峰值处的尖锐程度来决定^[14]。利用相关度曲线 $C = \{c_0, c_\Delta, \dots, c_\pi\}$ 极大峰值 c_{\max} ($0^\circ \leq \max \leq 180^\circ$) 前后项 $c_{\max-\Delta}, c_{\max+\Delta}$ 的梯度值绝对值之和,作为峰值点尖锐程度 α 的判据,即

$$\alpha = |\text{grad}(c_{\max-\Delta})| + |\text{grad}(c_{\max+\Delta})| \quad (6)$$

经计算可知该光纤的焦平面位于距纤芯 $L = 73 \mu\text{m}$ 的平面上,通过光线追迹法计算得到焦平面处各方位角的光强图像,用不同方位角的光强图像与标准图库做相关运算,最后得到各相关曲线峰的尖锐程度,

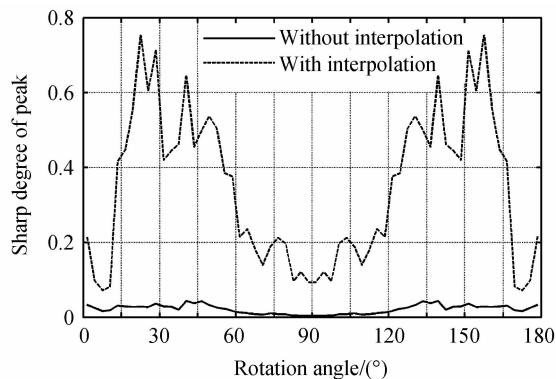


图2 内插前后各方位角相关峰尖锐程度

Fig. 2 Sharp degree of correlation profile with and without interpolation at all azimuths

结果如图2中实线所示。

对焦平面位置处的光强图像做内插处理,得到新的光强分布序列,用内插后不同方位角的光强分布序列与标准图库分布序列做相关运算,得到各相关曲线峰的尖锐程度,结果如图2中虚线所示。

从图2可以看出,内插后(虚线)的尖锐程度远大于内插前(实线),虚线尖锐程度最小值0.08是实线最小值0.005的16倍;尖锐程度最大值0.75是实线最大值0.043的17倍,说明内插处理法使得一步定轴法方位角的定位准确度有了质的提高。

2.3 最佳观测平面

经计算发现,观测平面上的光强图像与光纤方位角 θ 以及观测平面 L 有关;光纤方位角 θ 不变,改变观测平面位置 L ,光强图像将发生变化;固定观测平面位置,旋转光纤,光强图像也将发生变化。由于相关曲线由光强图像直接做相关得到,因此定轴准确度受到光纤方位角与观测平面的影响。

进一步计算结果表明,在观测平面的移动过程中,内插前后各方位角相关峰尖锐程度的变化趋势与图2大致相同,即 90° 附近的尖锐程度明显低于其它方位角,然而在许多应用场合,如制造保偏光纤耦合器和保偏光纤偏振器时,对 90° 的定轴准确度具有较高的要求^[15],为了提高该方位角的定轴准确度,选取 90° 方位角的尖锐程度作为观测平面优劣的判据。

图3表示不同观测平面下,光强图像经过内插处理后, 90° 相关峰尖锐程度的变化情况。从图中可以看出, $L = 102 \mu\text{m}$ 处的尖锐程度最高,达到0.3,因此,将 $102 \mu\text{m}$ 作为最佳观测平面。

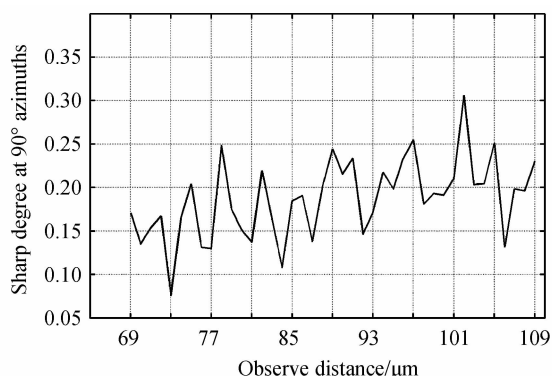


图3 90° 相关峰尖锐程度与观测平面的关系

Fig. 3 The relationship between observe distance and sharp degree of correlation profile at 90° azimuth

图4中,实线表示 $L = 73 \mu\text{m}$ 观测平面(焦平面)时各方位角的尖锐程度,虚线表示 $L = 102 \mu\text{m}$ 观测平面(最佳观测平面)时各方位角的尖锐程度。可看出 $102 \mu\text{m}$ 处各方位角的尖锐程度均不同程度地大于 $73 \mu\text{m}$,说明通过选择最佳观测面使得定轴准确度得到了提高。

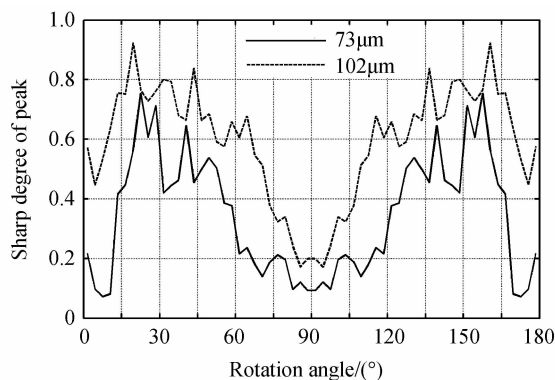


图4 观测平面位于 $73\ \mu\text{m}$ (实线)、 $102\ \mu\text{m}$ (虚线)时峰值尖锐程度的比较

Fig. 4 Comparison of sharp degree between $L=73\ \mu\text{m}$ (solid line) and $L=102\ \mu\text{m}$ (dashed)

2.4 定轴准确度

将光纤方位角 θ 以 0.1° 间隔, 从 80° 旋转至 100° , 利用光线追迹法得到 $L=102\ \mu\text{m}$ 观测平面上各方位角的光强图像. 采用内插法处理光强图像, 随后将每个方位角的光强分布序列与 90° 光强分布序列做相关运算, 得到它们与 90° 光强分布序列的相关度曲线, 如图5.

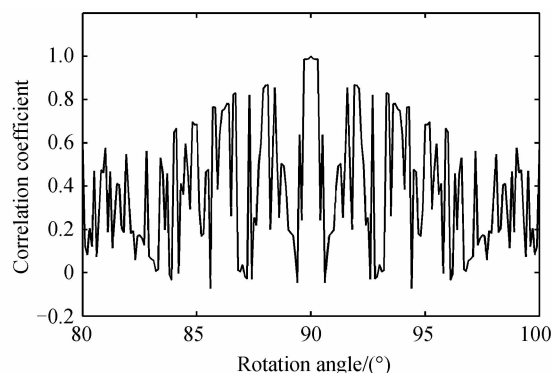


图5 各方位角与 90° 光强曲线之间的相关度曲线

Fig. 5 The correlation profile induced by all azimuths and 90° azimuth intensity curve

从图5中看出, 当方位角在 $89.7^\circ \sim 90.3^\circ$ 之间, 各方位角光强曲线与 90° 光强图像的相关度几乎为1, 然而, 超出这个范围时相关度便剧烈下降. 由此可知, 经过最佳接收面选取及内插处理后, 一步定轴法 90° 方位角的理论定轴准确度为 0.3° . 进一步计算结果表明, 当观测平面位置在 $101 \sim 103\ \mu\text{m}$ 范围内, 90° 方位角可保证 0.3° 的理论定轴准确度. 因此, 该定轴准确度具有较好的稳定性.

然而, 相比于其它方位角, 一步定轴法在 90° 附近的定轴准确度最低. 可以推断, 其它方位角的定轴准确度应大于 0.3° , 因此一步定轴法的理论定轴准确度至少为 0.3° .

3 结论

本文提出了一种新的侧视成像定轴算法——“一步

定轴法”. 该算法基于光强图像做相关定轴, 定轴时间仅是传统侧视成像定轴算法的 $\Delta/2\pi$.

以熊猫型保偏光纤为研究对象, 利用峰值尖锐程度作为判据, 通过选取最佳接收面以及对光强图像进行内插处理, 可以有效地提高一步定轴法的定轴准确度. 通过计算分析, 表明该算法具有优于 0.3° 的理论定轴准确度. 研究可为实际定轴系统提供理论依据和指导.

参考文献

- [1] SHI Wen-jiang, HUANG Shang-lian, LI Zhi-gao, *et al.* Overview of alignment method of birefringent axes of polarization preserving fiber [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 1993, **15**(01): 16-25.
石文江, 黄尚廉, 李志高, 等. 保偏光纤偏振轴方位探测方法[J]. 压电与声光, 1993, **15**(01): 16-25.
- [2] YANG Xue-li, WANG Xue-feng, ZHANG Wei, *et al.* Effect of the principal axes angle-offsets on fiber-optic gyroscope output[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1658-1661.
杨学礼, 王学峰, 张蔚, 等. 对轴误差对光纤陀螺输出的影响[J]. 光子学报, 2009, **38**(7): 1658-1661.
- [3] GAO Hong-yu, CHEN Cai-he, CUI Yu-ming, *et al.* Locating the position of the slow and fast birefringent axes by elastooptic effect[J]. *Chinese Journal of Sensors And Actuators*, 2005, **18**(1): 184-187.
高洪宇, 陈才和, 崔宇明, 等. 光弹效应法测定保偏光纤快慢轴[J]. 传感技术学报, 2005, **18**(1): 184-187.
- [4] LANG Xiao-ping, LI Xiao-ying. Research on polarization measurement method of single-mode PM fiber[J]. *Journal of Beijing Institute of Machinery*, 2005, **20**(1): 25-27.
郎晓萍, 李晓英. 单模保偏光纤偏振测试方法[J]. 北京机械工业学院学报, 2005, **20**(1): 25-27.
- [5] GUO Zhen-wu, YE Wen-ting, ZHANG Hong-xia, *et al.* Analysis and measurement of alignment angle of PMF devices [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2011, **22**(05): 645-648.
郭振武, 叶雯婷, 张红霞, 等. 保偏光纤器件的对轴角度分析和测量[J]. 光电子激光, 2011, **22**(05): 645-648.
- [6] ZHONG Zhen, CHEN Zhe, ZHONG Jin-gang, *et al.* Determination of the azimuth of polarization axes of PANDA fiber based on the image correlation of backward diffractive pattern[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(06): 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**(06): 1409-1413.
- [7] ZHENG Wen-xin. Automated fusion-splicing of polarization maintaining fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **5**(01): 125-134.
- [8] RONG Wei-bin, GAO Jian, CHEN Tao, *et al.* Method optimization and determining polarization direction experiment of ultra-fine polarization maintaining fiber [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(8): 36-41.
荣伟彬, 高健, 陈涛, 等. 细径保偏光纤对轴方法的优化及实验[J]. 光电工程, 2010, **37**(8): 36-41.
- [9] HU Yong-ming, CHEN Zhe, LIAO Yan-biao, *et al.* Computer simulation of phase PANDA fiber of contrast alignment of birefringent axes in matching refractive-index[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1998, **25**(08): 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**(08): 715-721.

- [10] WANG Jin-e, LIN Zhe-hui, WU Yu-lie, *et al.* The auto-alignment technique of PM fiber of MRI [J]. *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**(05): 37-40.
- [11] CHEN Shao-ying, DI Hong-wei, CHEN-Zhe. Azimuthal alignment method for PM fiber based on light intensity distributions with five finger profile [J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(01): 35-38.
陈少英, 狄红卫, 陈哲, 等. 基于五指光强分布的保偏光纤定轴方法[J]. *应用激光*, 2006, **26**(01): 35-38.
- [12] ZHEN Zong-min, YANG Yuan-hong. On-line adjusting axes technology of polarization maintaining fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(09): 1060-1063.
甄宗民, 杨远洪. 保偏光纤在线定轴技术研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(09): 1060-1063.
- [13] WU Yu-lie, ZHENG Yu, WANG Jin-e, *et al.* Research of azimuthal alignment for PANDA fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(07): 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**(07): 1224-1229.
- [14] WANG Dong-yun, LIU Cheng, SHU Xiao-wu, *et al.* Accurate alignment of PM fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(03): 345-348.
王冬云, 刘承, 舒晓武, 等. 保偏光纤精确定位方法的研究[J]. *光子学报*, 2002, **31**(03): 345-348.
- [15] HUANG Lin-sheng, ZHANG Jun, CHEN Zhe, *et al.* Simulation and experiments analysis of azimuth aligning technology for polarization maintaining fiber[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(02): 279-284.
黄林盛, 张军, 陈哲, 等. 保偏光纤定轴技术的仿真及实验分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(02): 279-284.