

光纤环和Y波导调制器直接耦合偏振轴测量

甄洪旭 杨德伟 姚天龙 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 提出一种保偏光纤环和Y波导调制器直接耦合偏振轴测量方法。设计并搭建了偏振轴在线检测系统, 通过将检测光路插入到直接耦合工艺过程中, 使空间中平行的Y波导和光纤组件端面同时清晰成像于CCD像面; 通过图像处理判断两端面边缘相互平行关系获取两者偏振轴的角度偏差。实验结果表明, 搭建的系统用于Y波导和保偏光纤偏振轴对准时, 系统实测值与理论值能较好地吻合, 且系统测量精度在 1° 之内, 对应于偏振轴角度误差产生的尾纤输出串音优于 -35 dB, 证明了方法的可行性。

关键词 集成光学; 偏振轴对准; 在线测量; 端面成像

中图分类号 TN252

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1112004

Polarization Axis Measurement in Direct Coupling of Y Waveguide Modulator to the Polarization-Maintaining Fiber Coil

Zhen Hongxu Yang Dewei Yao Tianlong Song Ningfang

School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China

Abstract A measuring method for the alignment of polarization axis in direct coupling of Y waveguide modulator to the polarization maintaining fiber (PMF) coil is presented. For precisely measuring the polarization axis, an on-line measurement system including an optical path and an image processing unit is designed and accomplished. End-view image of the two paralleled component-Y waveguide and fiber component will be imaged to CCD target surface by inserting the detected path into the direct-coupled process. The process system is used to judge the parallel relationship between the two end edges in the captured image and acquire angle deviation of polarization axis. The waveguide-PMF alignment experimental result shows that the measured data fit the calculated line well. And the measurement error is less than 1° , which means that the polarization crosstalk of the coil pigtail is better than -35 dB caused by the angular error of polarization axis. It is confirmed that the accuracy of the end-view measurement method is feasible for alignment of polarization axis indirect coupling of Y waveguide modulator to the PMF coil.

Key words integrated optics; alignment of polarization axis; online measurement; end-view

OCIS codes 130.3120; 060.2370; 060.2800

1 引言

保偏光纤(PMF)环和Y波导的直接耦合是为了满足高精度光纤陀螺的发展需求而提出的, 相对于现有光路方案, 省去了Y波导和保偏光纤环之间的两个熔接点, 使波导输出通道中的偏振交叉耦合得以减弱, 有利于提高系统的检测精度和可靠性^[1-2]。直接耦合的技术难点是波导偏振轴与保偏光纤环光纤工作轴的对准^[3]。而到目前为止, 国内外还未见相关的研究报道, 也没有实际可行的方法来解决该问题。现在通常采用的

收稿日期: 2015-07-03; 收到修改稿日期: 2015-07-20

基金项目: 国家重大仪器设备开发专项(2013YQ040877)

作者简介: 甄洪旭(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事集成光学、图像处理方面的研究。E-mail: zhx_buaa1990@163.com

导师简介: 杨德伟(1957—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事集成光学、光纤传感和光电子技术等方面的研究。

E-mail: dewei yang@buaa.edu.cn

光纤陀螺光路方案首先是Y波导芯片与带保偏尾纤的光纤组件耦合,其偏振轴对准是通过测量尾纤输出偏振串音判断偏振轴的角度差调整保偏光纤轴向角度使其最佳^[4-5]。但这一方法用于直接耦合存在两个问题:当光纤环第一尾纤组件与Y波导输出端面对准时,由于光纤环退偏导致输出端监测的分辨率较低,影响偏振轴对准精度;当光纤环第二尾纤组件与Y波导输出端面对准时,由于光路闭合导致输出端偏振串音无法检测。

为了解决现有技术中存在的对轴精度低、无法实时监测等问题,本文提出一种基于端面成像的偏振轴在线测量方法。设计带有反射光学元件的偏振轴检测光路,使空间中平行的Y波导和光纤组件端面同时清晰成像在CCD像面上;通过图像处理判断两端面边缘相互平行关系检测两者偏振轴的角度差。该方法能够实时监测偏振轴对准精度,并对偏振轴对准的最终状态做出定量评价,是一种更加客观的偏振轴检测和对准的方法。

2 系统组成与工作原理

2.1 系统组成

偏振轴在线测量系统结构如图1所示,包括检测光路、图像采集界面及图像处理模块。采集界面用于实时获取拍摄的端面图像,同时调用存储于计算机的图像处理单元对采集的图像进行处理,识别并显示两端偏振轴之间的角度偏差。检测光路用于获取高质量的组件端面图像,其成像系统包括镀有高反射膜的直角棱镜、单个物镜和CCD。棱镜的两个直角面镀有高反射率膜层,用于将相应的端面图像反射到物镜。成像系统搭建时,物镜光轴垂直于棱镜底面,以保证CCD像面与棱镜底面平行;直角棱镜两个反射面分别与Y波导端面和光纤组件端面成45°角;Y波导端面与表面交线平行于棱镜顶棱。光路采用同轴反射式照明^[6],故还需在同轴光入口处安装点光源。通过同轴光的照射,两组件端面的图像由相应的棱镜工作面反射到物镜,物镜对接收到的端面图像进行放大,使两端面同时清晰成像于CCD像面。

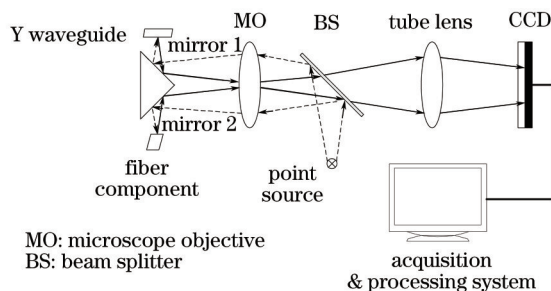


图1 偏振轴在线测量系统结构示意图

Fig.1 Structure of polarization axis online measurement system

2.2 工作原理

系统工作原理如图2所示。由于光纤陀螺用Y波导调制器采用X切Y传LiNbO₃质子交换光波导,其偏振轴平行X轴方向,因此平行于波导端面与表面交线。常规的熊猫保偏光纤偏振轴平行(慢轴)或垂直(快轴)于两猫眼的切线,制作光纤组件时保偏光纤定轴保证两猫眼的切线平行或垂直于光纤组件端面与表面交线,因此保偏光纤偏振轴平行或垂直于此交线。如果Y波导端面与表面交线和光纤组件端面与表面交线在空间平行或垂直,则认为保偏光纤偏振轴垂直或平行于波导的偏振轴。

使用测量系统时,首先需要将其插入到直接耦合工艺装置中,即平行移动光纤组件使空间中平行的两组件端面A和B保持适当距离,并将直角棱镜推进到两个组件之间。其次,根据系统工作要求,调整棱镜使两个反射面D和E与相应端面的夹角为45°;同时保证波导端面与表面交线P₁P₂平行于棱镜顶棱A₁A₂。

假设Y波导和光纤组件端面形状均为矩形,理想情况下的成像效果如图3所示。图3中,波导交线P₁P₂平行于顶棱A₁A₂且端面图像A'和B'均为矩形。偏振轴检测时首先获取端面图像所在区域,之后通过图像预处理、边缘检测及轮廓分割提取待拟合的边缘点^[7-9],采用最小二乘直线拟合得到亚像素级别的直线特征位置。检测出的图像中波导交线P₁P₂的角度值α代表空间中波导偏振轴方向。同时,由于保偏光纤偏振轴平行于光纤组件边线Q₁Q₂,获取图像中组件边线Q₁Q₂的角度β后,通过平行关系的传递就可确定空间中保

偏光纤工作轴的方向。因此,测量所得图像中两条交线 $P_1'P_2'$ 和 $Q_1'Q_2'$ 之间的夹角值 $(\beta - \alpha)$ 就是空间中两组件之间的轴向偏差角,即波导偏振轴与保偏光纤工作轴之间的角度差。

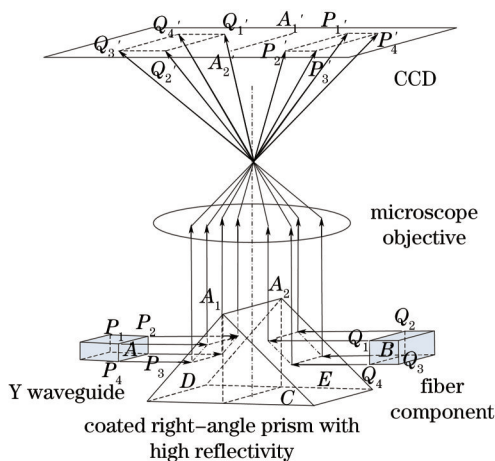


图2 系统工作原理图

Fig.2 Schematic diagram of working principle

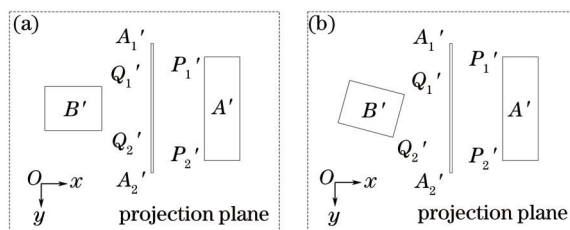


图3 组件位姿处于理想状态下的端面成像效果图。(a) 对准状态;(b) 未对准状态

Fig.3 Imaging effect diagram of ends with components' attitude to the ideal state.(a) Alignment;(b) misalignment

3 系统实现与验证

3.1 偏振轴在线测量系统

本系统在直接耦合工艺装置基础之上搭建,主要包括检测光路、计算机及相应的图像处理单元,系统装置如图4所示。经分析,系统所需物镜的放大倍率应在 $1 \sim 2 \times$,分辨率为 $10 \mu\text{m}$ 左右。据此选取日本 Myutron 公司型号为 TL10C-65R 的远心镜头,该物镜放大倍率为 $1 \times$,分辨率为 $12.4 \mu\text{m}$,并带有同轴光接口。相机选用大恒(集团)有限公司北京图像视觉技术分公司型号为 MER-310-12UC(-L)的相机,该相机像面尺寸为 $1/2''$,像元大小为 $3.2 \mu\text{m} \times 3.2 \mu\text{m}$,能满足物镜视场和分辨率的要求。此外,该相机通过 USB 2.0 接口与上位机连接,能够实现图像的采集、传输和存储。系统所用棱镜的基底为北京欧普特科技有限公司的 GP12-K9 高精度直角棱镜,该棱镜的表面面型为 $\lambda/4@632.8 \text{ nm}$,角度误差为 $\pm 30''$ 。棱镜两个直角面镀有高反射率膜层。

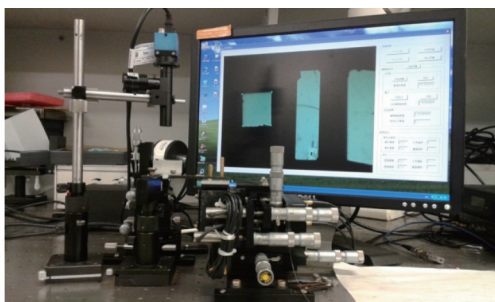


图4 偏振轴在线测量系统装置实物图

Fig.4 Experimental setup for polarization axis online measurement system

3.2 检测光路的调整

系统选用远心镜头作为物镜,成像过程的几何解释为:以棱镜工作面作为反射平面,对处于参考坐标系下的组件端面进行反射变换;再通过沿光轴方向的正交投影将其变换到 CCD 像面^[10-11]。当波导空间状态满足系统工作要求时,空间中波导交线 P_1P_2 与其中间反射像 $P_{1R}P_{2R}$ 平行;根据正交投影的平行不变性,此时图像中对应的两条直线 $P'_1P'_2$ 和 $P'_{1R}P'_{2R}$ 互相平行,如图 5(a)和(b)所示。如果波导端面绕轴向旋转,端面图像中直线 $P'_1P'_2$ 和 $P'_{1R}P'_{2R}$ 的平行关系遭到破坏,如图 5(c)所示。因此可以通过判断图像中波导交线与中间反射像的平行状况评价光路调整结果的好坏。

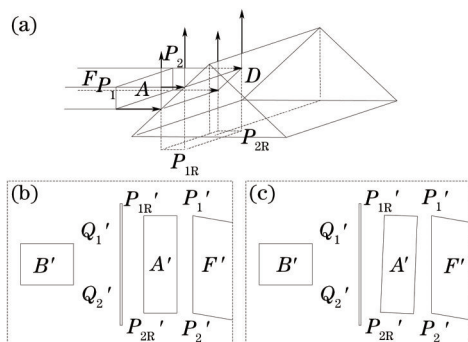


图 5 (a) 反射示意图; (b) 理想情况下的成像效果图; (c) 端面旋转后的成像效果图

Fig.5 (a) Schematic diagram of reflection; (b) imaging effect of the waveguide intersection in ideal state; (c) imaging effect of the waveguide intersection after rotating

按照图 1 搭建系统光路后,由于直角棱镜不可能达到理想的加工精度,同时装置的机械结构存在几何误差,导致棱镜空间状态一般不能较好地满足系统工作要求。根据图 5 分析的方法重复装调光路所得结果如表 1 所示。由表 1 可知,在保持波导和光纤组件空间状态不变的情况下,选取的两个可调最大角度的重复性测量结果均在 0.5° 之内,说明采用上述方法调整的实验光路能够较好地满足系统工作要求,可以用于轴向偏差角的测量。

表 1 光路调整重复性测量结果

Table 1 Reproducible deviations of optical path adjustment

Measurement time	1	2	3	4	5
Min value /($^\circ$)	-4.465	-4.417	-4.120	-4.359	-4.407
Max value /($^\circ$)	4.436	4.393	4.689	4.507	4.500

3.3 实验结果和分析

实验前,首先设定采集系统的参数以减小图像的噪声。经过多次试验,将互补金属氧化物半导体(CMOS)相机的增益设置为 8,曝光时间设置为 60 ms。同时,为了避免端面图像的光强变化影响系统测量结果,需要合理地选择光源功率以获取高质量的原始图像。图 6 为 Y 波导和光纤组件端面的原始图像。该图像的对比度非常高,而且两个端面图像的边缘均比较清晰。但是由于棱镜工作面反射率的不均匀、损坏和污染导致端面光强的均匀性较差,使得算法检测的难度增大。

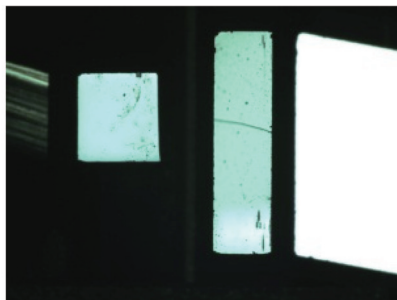


图 6 Y 波导和光纤组件端面原始图像

Fig.6 Raw end-view images of Y waveguide and fiber component

对于偏振轴测量而言,最重要的参数是空间中两组件的轴向偏差角。实验时,通过沿轴向旋转光纤组

件来改变两组件之间的轴向偏差角。针对已装夹完成的同一Y波导和光纤组件,采用设计的系统对选取的5个位置点重复测量10次来评价系统的一致性。重复测量过程中,要求每次测量前重新手动对焦、棱镜重新定位。以连续100次测量所得轴向偏差角的均值作为系统实测值,一致性测量结果如表2所示。由表2可知,系统测量极限误差在0.2°之内,说明该系统能够满足保偏光纤环和Y波导直接耦合过程中偏振轴在线检测的需求。

表2 系统一致性测量结果[单位:(°)]

Table 2 Measurement compatibility result of the designed system[unit:(°)]

Sample No.	1	2	3	4	5
Average value	2.031	0.9524	0.0375	0.9819	2.006
Standard deviation	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04

将本系统应用于Y波导和保偏光纤对准过程中的偏振轴检测,通过测量尾纤输出偏振串音验证系统测量准确度。表3给出了选取的9个位置点的系统实测值及相应的尾纤输出偏振串音。

表3 Y波导和保偏光纤对准实验测量结果

Table 3 Experimental results of alignment of polarization axis between Y waveguide and PMF

Sample No.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Measured value / (°)	-2.77	-2.07	-1.41	-0.66	0	0.89	1.58	2.26	3.02
Polarization crosstalk/dB	-25.5	-27.8	-30.5	-34.5	-39.3	-37.6	-32.4	-29.3	-26.7

系统绝对测量误差分布如图7所示。实线为尾纤输出偏振串音与波导横电(TE)模和保偏光纤工作轴之间夹角的关系曲线。图7中,测量值与理论值能较好地吻合,而且各位置点的测量误差均在1°之内,证明了方法的可行性。

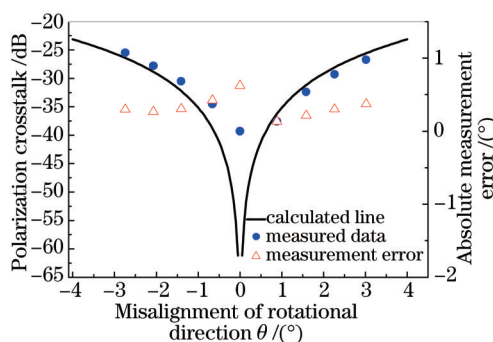


图7 系统绝对测量误差分布

Fig.7 Distribution map of absolute measurement error

4 结 论

提出并实现了一种保偏光纤环和Y波导直接耦合偏振轴在线测量方法。采用两个直角面镀有高反射膜的直角棱镜作为反射光学元件进行光轴转折;通过单个物镜对Y波导和光纤组件端面同时清晰成像,使系统结构更加简单,减小了后续算法开发的难度;通过将系统光路插入到直接耦合工艺装置中,能够实现偏振轴对准状态的实时监测。将搭建的系统应用于Y波导和保偏光纤偏振轴对准时,系统测量准确度在1°之内,证明了方法的可行性。后续工作可分析系统几何误差对两端面成像形态的影响,确定偏振轴对准精度与两端面成像形态的关系,为系统设计和优化提供依据。

致谢 感谢北京世维通科技发展有限公司为本研究提供了耦合实验平台和装置,感谢顿婷婷工艺师完成了耦合工艺流程。

参 考 文 献

1 Li Chuansheng, Zhang Chunxi, Wang Xiaoxiao, *et al.*. White light interferometry for pigtail polarization crosstalk of Ti-diffused LiNbO₃ integrated optic phase modulator[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0508003.

- 李传声, 张春熹, 王夏霄, 等. 钛扩散 LiNbO₃ 相位调制器尾纤偏振串音的白光干涉测量方法[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0508003.
- 2 Li Zizhong, Li Zhihong, Steve Yao, *et al.*. Research on influence of polarization crosstalk on the zero drift and random walk of fiber optic gyroscope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1206001.
- 李子忠, 李志宏, 姚晓天, 等. 偏振串扰对光纤陀螺零漂及随机游走影响的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1206001.
- 3 LuoYongfeng. Research on Alignment Technology of Direct-Coupling IOC with Fiber Coil for High Precision FOG[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009: 1-15.
- 罗永峰. 高精度光纤陀螺光纤环直接耦合对轴技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2009: 1-15.
- 4 Liu Yin, Qiao Haiyan, Huang Jian, *et al.*. Coupling technology of Y-waveguide integrated optical devices[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(2): 245-248.
- 刘 隐, 乔海燕, 黄 建, 等. Y波导集成光学器件的耦合技术[J]. 半导体光电, 2010, 31(2): 245-248.
- 5 Xu Xiaobin, Yi Xiaosu, Yang Dewei. A method for alignment of proton-exchange LiNbO₃ waveguide and polarization-maintaining pigtail [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(9): 1852-1855.
- 徐小斌, 伊小素, 杨德伟. 一种质子交换铌酸锂波导与保偏尾纤对轴的方法[J]. 光子学报, 2008, 37(9): 1852-1855.
- 6 Zhang Yimo. Applied Optics(3rd Edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- 张以谟. 应用光学(第3版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- 7 You Jianmin, Tao Lin. Image identification algorithm on polarization axis of panda polarization maintaining fiber[J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(2): 247-250.
- 游建民, 陶 林. Panda型保偏光纤偏振轴图像识别算法[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(2): 247-250.
- 8 R C Gonzalez, R E Woods. Digital Image Processing(3rd Edition)[M]. United States: Prentice Hall, 2007.
- 9 Yang Bo, Duan Ji'an. High-precision linear fitting of edges in alignment of fiber and waveguide[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(11): 16-22.
- 阳 波, 段吉安. 光纤和波导对准过程中边缘高精度线性拟合[J]. 光电工程, 2011, 38(11): 16-22.
- 10 Liang Weiyun. Modeling and Compensating for System Errors of Crankshaft Measuring Machine[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013: 18-20.
- 梁伟云. 曲轴影像测量系统精度与误差补偿技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 18-20.
- 11 D Hearn, M P Baker. Computer Graphics with OpenGL(3rd Edition)[M]. United States: Prentice Hall, 2003.

栏目编辑: 何卓铭