

保偏光纤偏振特性测试系统的光路研究

李彦,冯丽爽,徐宏杰,张春熹

(北京航空航天大学光电技术研究所,北京 100083)

摘要: 光纤陀螺是干涉型传感器,光的偏振特性影响该传感器的精度,因此需要对光纤的偏振态进行精确的测试。目前国外有些公司出售检偏系统,但所给的指标并不高,而且价格也非常昂贵,国内使用的测试系统一般都为自制,精度普遍不高,实际测量的消光比小于系统的理论消光比。有偏振特性系统的设计和测试结果,却没有系统误差原因的详细分析。针对这一问题,在给出了高精度保偏光纤偏振测试系统的光路结构基础上,对系统中影响消光比的光路误差进行了分析和计算。通过理论分析和计算机模拟计算,得到本系统的消光比在给定的误差范围内可以达到 55 dB,能够满足高精度的测量。同时,在计算中得到了 e 光和 o 光的透射率,计算结果中棱镜 e 光的透射率比以往的结果精确 2.34 %。

关键词: 保偏光纤; 偏振特性; 消光比; 透射率

中图分类号: O434.19 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)04-0430-04

Light route research on optical fiber polarization characteristics test system

LI Yan, FENG Li-shuang, XU Hong-jie, ZHANG Chun-xi

(Institute of Opto-Electronics Technology, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Fibe-optic gyroscope is an interferometric sensor, and the characteristic of polarization influences its precision, therefore the polarization state of the fiber need to be tested. At the present, the system of polarization testing is soled abroad, but its index is low, and its price is very high. Accordingly, the testing system used in home is made by ourselves, but its precision is not high universally. At the same time, the tested extinction ratio is smaller than its theoretic value. The design and tested result are given by some companies, yet the reason of the system's errors has not analyzed in detail. For this reason, in this article, based on the optical structure of high precision PM fiber polarization detection system, the optical errors that affect the extinction ratio are analyzed and calculated. After theoretically analyzing and calculating by computer simulation, in the range of given errors the extinction ratio can reach 55 dB, which fulfills the high precision measurement. And the transmission ratios of e rays and o rays are obtained by calculation. The transmission ratio of e rays is 2.34% higher than the past results.

Key words: PM optical fiber; Polarization characteristics; Extinction ratio; Transmission ratio

收稿日期:2004-09-08; 修订日期:2004-10-20

作者简介:李彦(1975-),女,河北灵寿县人,博士生,主要从事光纤陀螺方面的研究。

0 引言

光纤陀螺(FOG)是干涉型传感器,光的偏振特性影响该传感器的精度^[1]。在很多应用中,都需要对光纤^[1]的偏振态进行精确的测试。目前国外有些公司出售检偏系统,但所给的指标并不高,而且价格昂贵,因此国内对消光比的测试进行了研究,自制测试系统^[2,3],精度普遍不高。孟洲等人制作的光纤偏振参数自动测试仪测到的消光比在 38 dB 左右^[4];毛彩虹等人制作的光学器件偏振特性测试系统消光比高达 55 dB,但测试 3 m 长熊猫型保偏光纤的最大消光比是 24.6 dB^[5];徐宏杰等人^[6,7]设计制作的偏振测试系统对于 2 m 长的短光纤其消光比在 50 dB 左右;郝爱福等人研制的光纤偏振自动测试系统的消光比理论值为 55 dB,但实际只能测到 45 dB 左右^[8,9]。从以上结果可以看出,虽然系统的消光比可以达到 55 dB,但是实际测量的消光比往往要比系统的理论消光比小。各单位给出了偏振特性系统的设计和测试结果,却没有对系统的误差原因进行详细的分析。

针对这一问题,本文在给出偏振测试系统的工作原理和结构图的基础上,对系统中影响消光比的主要光学原因进行了分析和计算机模拟计算。

1 消光比的定义

消光比和偏振串音经常被混淆,但严格地讲,它们的物理意义是不同的。消光比被定义为:

$$ER=10 \lg(P_{\max}/P_{\min}) \quad (1)$$

式中 P_{\max} 和 P_{\min} 分别是光功率的最大值和最小值,所以消光比为正值,其单位为 dB。

偏振串音是指光功率从一个偏振模串扰到另一个偏振模的比例,定义为:

$$CT=10 \lg(P_{\min}/P_{\max}) \quad (2)$$

由于公式(1)同(2)相比只相差一个符号,所以偏振串音为负值。

2 检偏系统的工作原理和结构图

检偏系统主要是由准直透镜、检偏棱镜和光探测

器组成。其工作原理是:从光纤出射的光经准直透镜后变成平行光,再经棱镜变成线偏振光;从检偏棱镜出射的光再经过准直透镜会聚到大面积光电探测器上,由探测器测量光功率值。旋转检偏棱镜,得到光功率的最大值和最小值,根据公式(1)即可计算出被测光纤的消光比。光路结构如图 1 所示,图中虚线是系统的对称轴。

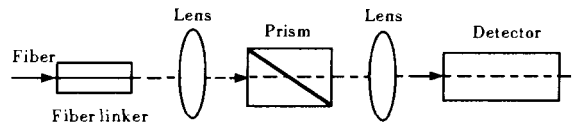


图 1 检偏系统的光路结构

Fig.1 Structure of polarization detection

3 系统的光路分析

理想情况下,系统的消光比应该是无穷大。但由于棱镜和透镜的材料以及制作工艺等原因,使系统的消光比为 55 dB,此值是检偏棱镜的理论消光比。然而在实际测量中,得到的消光比小于 55 dB。这主要是由于系统中准直透镜和检偏棱镜的装配误差以及透镜和棱镜的本身误差引起的。例如,偏振棱镜以对称轴为中心旋转,如果偏振棱镜的入射面不垂直于系统的中心轴,或者它的中心轴与光路中心轴不重合,那么棱镜旋转一周,出射的光斑就会偏移透镜的焦平面,造成光线不能平行于透镜光轴入射到透镜。

3.1 准直透镜的光路分析

理想情况下,光纤的出射端位于透镜的焦点(F)处,且系统光轴与透镜光轴重合,这样光线经透镜后将平行射出。此时,从透镜出射的光,对系统的消光比不会产生影响。但在装配时,由于装配误差使透镜跟系统的光轴之间有一定的偏差。例如透镜的光轴相对系统的光轴有平行或垂直的移动,以及两者之间有一定的偏离角。下面就这两种情况分别进行讨论。

当准直透镜的光轴相对系统的光轴有平行或垂直的移动时,光路如图 2 所示。图中 T_c 是透镜平-凸面之间的厚度, T_e 是透镜平透镜部分的厚度, f 是焦距, f_0 是焦点 F 到平面的距离。设平行移动后的偏离为 Δx ,垂直移动后的偏离为 Δy ,此时光线经透镜后将不再平行于系统的光轴射出,出射光线与系统光轴有一个偏离角度,把这个角度记作 α 。

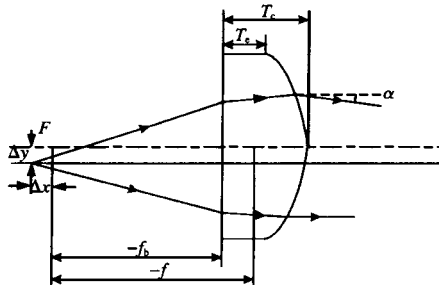


图 2 透镜光轴相对系统光轴有平行或垂直移动时的光路图
Fig.2 Light route of lens' axis parallel or vertical moving from system's axis

因为光纤的孔径角是 9.2069° ，所以在求取 Δx 、 Δy 和 α 关系的过程中采用大 L 计算公式^[10]。通过精确计算后得到的结果如表 1 所示。

表 1 Δx 、 Δy 与 α 的关系
Tab.1 Relationship among Δx 、 Δy and α

$\Delta x/\text{mm}$	$\Delta y/\text{mm}$	$\alpha/^\circ$
0	0.002	0.0125
0.002	0.004	0.0230
0.004	0.006	0.0334
0.005	0.008	0.0449
0.01	0.01	0.0523
0.1	0.1	0.519

系统中透镜的装配误差 Δx 和 Δy 最大值分别为 0.01 mm。从表中可以得出，当它们同时达到最大值 0.01 mm 时，出射光线与系统光轴的夹角是 0.0523° 。另一种情况是在装配中，系统的光轴与透镜的光轴有一定的偏离角，记为 θ 。因此光线经透镜后的出射光线与系统光轴成 γ 角，光路如图 3 所示。

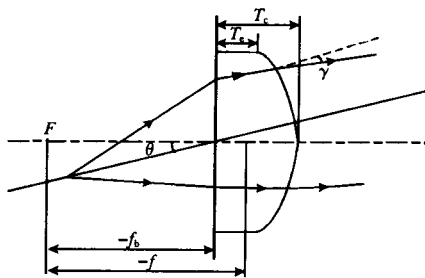


图 3 透镜的光轴与系统的光轴偏离
Fig.3 Departure of lens' axis from system's axis

通过理论分析和计算，得到输出角度 γ 与偏离角 θ 的关系，如图 4 所示。

从图中可以看到，它们之间基本上呈线性关系。实际装配时，最大偏离角为 0.1° ，它所造成的输出光线偏离系统光轴的偏离角度是 0.0129° ，不是很大。

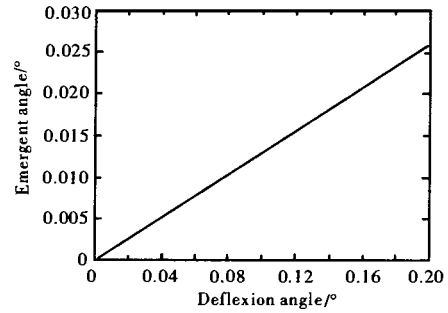


图 4 透镜偏转角与出射角的关系
Fig.4 Relationship between deflexion angle and emergent angle of lens

从以上分析得知，当透镜的光轴跟系统的光轴有平行或垂直移动，以及透镜的光轴相对系统的光轴有偏转角两种情况同时存在时，输出的光线相对系统光轴的偏转角最大不会超过 0.1° 。

3.2 棱镜的光路分析

在检偏系统中，入射光线只有在理想情况下才会垂直入射到棱镜表面。但是透镜中出现的误差产生的偏转角以及棱镜本身装配时的偏转，都可造成入射光线斜入射到棱镜表面的现象，这将使得棱镜的消光比下降。具体原因分析如下^[8]。

因为棱镜为方解石，是各向异性晶体，所以光入射到里面会产生双折射，产生寻常光(o光)和非寻常光(e光)，光路如图 5 所示。

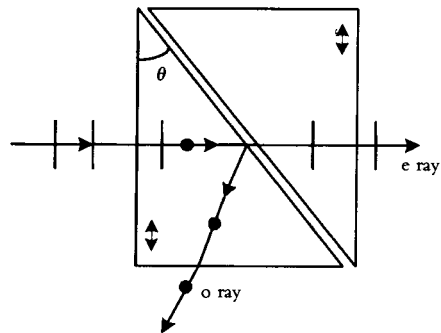


图 5 棱镜的光路图
Fig.5 Light route of prism

理想情况下,入射光线垂直入射到棱镜表面。由于棱镜的顶角 $\theta=38.5^\circ$, 大于 o 光的临界角 37.629° , 因此 o 光在第一个斜面全反射, 只有 e 光透射过去, 根据消光比(ER)的定义:

$$ER=10 \lg(P_{\max}/P_{\min})=10 \lg(T_e/T_o) \quad (3)$$

式中 T_e 为 e 光的总透射率; T_o 为 o 光的总透射率。因为 $T_o=0$, 所以棱镜的消光比 ER 趋于无穷大。

实际上,入射光线很可能是斜入射到棱镜表面上。当 o 光在第一个斜平面上的人射角小于它的临界角 37.629° 时,就会有 o 光透射过去,从而在棱镜的最后一面有 o 光出射。通过分析计算得到 o 光在第二面发生全反射时,在棱镜第一面的入射角是 1.4272° , 当第一面入射的角度大于 1.4272° 时,就会有 o 光从棱镜中透射出去。

当光线斜入射到棱镜的第一面时,通过理论计算,可以得出 e 光和 o 光经棱镜后的透射率在不同入射角时的最大值和最小值,如表 2 所示。

从表 2 看出,当光线的人射角小于 1.4272° 时, o 光的透射率是 0, 此时只有 e 光透过。根据定义,棱镜的消光比应该趋于无穷大。

但由于棱镜材料以及制造和装配等原因,使得它本身的消光比为 55 dB。因此当棱镜的入射角度小于 1.4272° 时,系统的消光比就可以达到 55 dB, 能够满足高精度测量的要求。通过计算比较,棱镜 e 光的透射率要比以往结果精确 2.34 %。

表 2 透射率与入射角的关系

Tab.2 Relationship between transmission ratio and incidence

Incidence/ $^\circ$	$T_e(\max)/\%$	$T_e(\min)/\%$	$T_o(\max)/\%$	$T_o(\min)/\%$
1.4	84.83	84.44	0	0
1.4271	84.73	84.33	0	0
1.4272	84.73	84.33	0	0
1.4273	84.73	84.33	1.55e-005	0
1.43	84.72	84.32	6.27e-4	0

4 结论

综上所述,对于偏振特性测试系统,在允许的误

差范围内,得到从透镜入射到棱镜上的光偏离系统光轴的角度小于 0.1° 。另外透镜的对称轴偏离系统光轴的最大角度约为 0.1° 。这两个条件成立时,可使棱镜的最大入射角远远小于 1.4272° 。

因此,在从光纤输出的光的偏振消光比大于 55 dB 以及棱镜入射角小于 1.4272° 前提下,旋转棱镜得到光功率的最大值和最小值,根据公式(1)计算出的被测光纤的消光比就等于棱镜本身的消光比 55 dB。

在实际的测量过程中,消光比只有 45 dB 左右。产生这种情况的主要原因是:

(1) 光源输出功率波动的影响;

(2) 透镜与棱镜在制造和装配过程中受到挤、压应力的作用,从而改变了它们本身的性能;

(3) 光纤夹紧机构压力大小的影响。

参考文献:

- [1] Lefèvre H C;ZHANG Gui-cai,WANG Wei.The Fibe-Optic Gyroscope[M].Beijing:National Defence Industry Press(Lefèvre H C ;张桂才,王巍.光纤陀螺仪.北京:国防工业出版社,2002.1.
- [2] LI Guo-hua,ZHAO Ming-shan,WU Fu-quan,et al.Testing instruments of high extinction ratio[J].Chinese Journal of Lasers(李国华,赵明山,吴福全,等.高消光比测试仪器的研究.中国激光),1990,17(1): 51-53.
- [3] HUANG Jian-yu,JI Jia-rong.Measurement of extinction ratio of polarizer using interference method of polarization [J].Applied Laser(黄建余,季家熔.偏振干涉法用于偏振器消光比的测量.应用激光),1996,16(3):267-268.
- [4] MENG Zhou,HU Yong-ming,CHEN Zhe,et al.The automatic measurement instrument for the polarization parameters of 1.3 μm wavelength optical fiber[J].Acta Photonica Sinica(孟洲,胡永明,陈哲,等.1.3 μm 波长光纤偏振参数自动测试仪.光子学报),1999,28(11):1002-1004.
- [5] MAO Cai-hong,SHU Xiao-wu,LIU Cheng,et al.Theoretical and experiment research on polarization parameters test system of fiber-optic gyroscopes[J].Laser & Infrared(毛彩虹,舒晓武,刘承,等.光纤陀螺仪的光学器件偏振特性测试方法研究.激光与红外),2002,32(4):279-281.
- [6] XU Hong-jie,QIN Bing-kun,CHEN Shu-fen.Measurement for extinction ratio of fibe-optic polarizer[J].Optical Technique(徐宏杰,秦秉坤,陈淑芬.光纤型偏振器消光比测试方法研究.光学技术),2002,28(5):419-421.

(下转第 463 页)

背景的缓慢变化进行了较大的抑制。而 Sobel 模板算子法由于算法本身的局限,对复杂图像的边缘提取效果就差一些。此外由于红外图像是复杂的野外背景下的,因此使得对图像目标边缘的提取变得更加困难。Sobel 模板算子法由于对复杂背景极为敏感,所以提取的目标边缘在很大程度上都陷入了背景噪声中,无法区分目标和背景。

4 结论

针对红外图像存在噪声大、目标和背景之间的灰度差较小、边缘较模糊的特点,基于随机噪声的 Gauss 概率模型,建立了统计学意义下的红外图像的边缘检测法。利用概率模型的分析,本文证明了只要边缘处的差分值大于一定的值,就能以较大的概率有效地分离出边缘,并且边缘处的提取值大于一般的噪声处的值。通过对梯度法噪声误差影响的分析发现,本文建立的统计边缘提取法的噪声抑制能力要比梯度法高。在和常用 Sobel 模板算子法的红外图像边缘检测结果进行实际对比后发现,本文提出的统计法对红外图像的目标边缘检测取得了良好的结果,并且具有算法简单的优点。同时也发现这种方法提取的边缘线条较粗,需要进一步研究探讨。

参考文献:

- [1] BAO Zong-fan, LI Hong-hua. Improvement of Laplace operator on edge detection[J]. Journal of China Institute of Metrology (鲍宗范, 李红华. 关于图像边缘检测的 Laplace 算子的改进. 中国计量学院学报), 2000, 11(2): 169-172.
- [2] ZHOU Xin-ming, LAN Sai, XU Yan. Comparison of the edge detection algorithms in image processing [J]. Modern Electric Power (周心明, 兰赛, 徐燕. 图像处理中几种边缘检测算法的比较. 现代电力), 2000, 17(3): 65-69.
- [3] WU Jian-feng, LIN Qiang. An edge-detecting method of images [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science) (吴剑锋, 林强. 一种图像边缘检测的新算法. 福州大学学报(自然科学版)), 2000, 28(4): 26-28.
- [4] XIA Liang-zheng. Digital Image Processing [M]. Nanjing: Southeast University Press (夏良正. 数字图像处理. 南京: 东南大学出版社), 1999.
- [5] XIA De-shen, FU De-sheng. Modern Image Processing Technology and Application [M]. Nanjing: Southeast University (夏德深, 傅德胜. 现代图像处理技术与应用. 南京: 东南大学出版社), 1997.
- [6] ZHANG Rong, CHENG Xing-wu, ZHUO Hong-yan, et al. Detection algorithm for moving infrared point target in the sky [J]. Infrared and Laser Engineering (张蓉, 陈兴无, 卓红艳, 等. 空中红外运动点目标检测算法. 红外与激光工程), 2003, 32(5): 472-475.
- [7] LV Ming-ai, WANG Chun-hong, LI Mei. Study on methods for inhibiting random noise of wavefront sensor used in low light level [J]. Opto-Electronic Engineering (吕明爱, 王春鸿, 李梅. 抑制微波前传感器随机噪声的方法研究. 光电工程), 2002, 29(6): 1-4.
- [8] LIU Wei, YANG Wan-hai. New detection algorithm for small targets in IR image [J]. Infrared and Laser Engineering (刘伟, 杨万海. 红外图像中小目标检测的新算法. 红外与激光工程), 2003, 32(3): 264-266.
- [7] XU Hong-jie, HE Jun, QIN Bing-kun, et al. Design of high precision optical fiber polarization measuring system [J]. Optical Technique (徐宏杰, 何珺, 秦秉坤, 等. 高精度保偏光纤偏振测试系统的设计. 光学技术), 2003, 29(2): 208-210.
- [8] HAO Ai-fu, FENG Li-shuang, XU Hong-jie, et al. Manufacture and exploitation of optical fiber polarization characteristics auto-measuring system [J]. Optical Technique (郝爱福, 冯丽爽, 徐宏杰, 等. 保偏光纤偏振特性自动测试系统的研制与开发. 光学技术), 2004, 30(3): 378-380.
- [9] ZOU Xue-feng, FENG Li-shuang, MA Ying-jian. Design and realization of the auto-measuring system of optical fiber polarization characteristics based on DSP technology [A]. 1st Academic Forum for Graduate Students at Beihang University [C]. Beijing: Beihang University (邹雪峰, 冯丽爽, 马迎建. 基于 DSP 的保偏光纤偏振特性自动测试系统的设计与实现. 首届研究生学术论坛文集. 北京: 北京航空航天大学), 2004. 485.
- [10] YU Dao-yin, TAN Heng-ying. Engineering Optics [M]. Beijing: Mechanical Industry Press (郁道银, 谈恒英. 工程光学. 北京: 机械工业出版社), 2002.

(上接第 433 页)