

光纤陀螺在直流及交变磁场中的磁敏感性研究

谭曦 刘军 殷建玲 余伟涛

(军械工程学院光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要 介绍了光纤陀螺的磁敏感性机理并进行了实验研究。利用亥姆霍兹线圈装置和光纤陀螺测试平台,研究了光纤陀螺在直流磁场中的磁敏感性,得到光纤陀螺数据输出与磁感应强度基本呈线性关系,以及轴向磁场和径向磁场影响系数的大小和光纤陀螺磁敏感轴的方向。主要针对 50 Hz 的交流磁场研究交流磁场对光纤陀螺零偏和零漂的影响及其交流磁敏感性,得到交流磁场对零偏的影响可以忽略,但磁感应强度与陀螺零漂值的大小基本呈线性关系。研究了不同频率交流磁场对光纤陀螺输出的影响,说明了光纤陀螺数据输出主要与瞬态的磁感应强度成正比,不同频率交流磁场对光纤陀螺零漂值的影响不同,存在一个频率(或频率范围)对光纤陀螺零漂的影响较大,其频率范围与光纤陀螺输出带宽有关。

关键词 光纤光学;光纤陀螺;磁敏感性;法拉第效应;亥姆霍兹线圈

中图分类号 O441 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.0905006

Magnetic Sensitivity Studies of Fiber Optic Gyroscope in Direct Current and Alternating Current Magnetic Fields

Tan Xi Liu Jun Yin Jianling Yu Weitao

(Department of Optical and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)

Abstract The mechanism of the magnetic sensitivity of fiber optic gyroscope (FOG) is introduced and experimental study is done. The Helmholtz coils equipment and FOG test platform is utilized, the magnetic sensitivity of FOG in direct current (DC) magnetic field is studied, and the linear relation of FOG data output and the magnetic flux density is found. Axial magnetic field and radial magnetic field influence coefficients and the orientation of the magnetic sensitivity axis of FOG are also found. Then the influence on FOG bias and bias stability and the alternating current (AC) magnetic field sensitivity in 50 Hz AC magnetic field are mainly analyzed, finding that the influence of AC magnetic field on the bias can be neglected, but the magnetic flux density and the size of FOG bias stability are almost linear relation. Finally the influence of different frequency AC magnetic fields on the FOG data output is studied, indicating that the data output of FOG is mainly proportional to the transient magnetic flux density, different frequency AC magnetic fields have different influences on the bias of FOG. There is a frequency (or frequency range) with much stronger influence on the bias of FOG, which is related to FOG output bandwidth.

Key words fiber optics; fiber optic gyroscope (FOG); magnetic sensitivity; Faraday effect; Helmholtz coil

OCIS codes 060.2800; 160.3820; 230.2240; 220.4840

1 引言

光纤陀螺(FOG)作为一种新型全固态陀螺,具有可靠性高、动态范围大、响应速度快、抗冲击振动、启动时间短、体积小和成本低等优点^[1]。自 1976 年,经过 30 多年的发展,光纤陀螺已经成为惯性制

导和导航领域的一项关键技术^[2],并在军用和民用领域取得了巨大成就。光纤陀螺磁场敏感性作为光纤陀螺的主要非互易性误差源之一^[3],是评价光纤陀螺性能指标的重要参数。本文通过实验测量三维亥姆霍兹线圈在具有不同强度的直流(DC)和交流

收稿日期: 2012-04-06; **收到修改稿日期:** 2012-05-30

作者简介: 谭曦(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤陀螺的检测与分析技术等方面的研究。

E-mail: tansystorm@yahoo.com.cn

导师简介: 刘军(1962—),男,硕士,副教授,主要从事光纤技术的研究与应用等方面的研究。E-mail: liujun@126.com

(AC)电流下产生的磁场环境,分析其产生的直流磁场与交变磁场的不同特性;并进一步研究光纤陀螺在直流磁场以及交变磁场下的输出数据,分析直流磁场与交变磁场对光纤陀螺的不同影响,从而研究光纤陀螺的磁场敏感性。

2 光纤陀螺磁敏感性机理

光纤陀螺的基本原理是基于 Sagnac 效应^[4], Sagnac 效应主要发生在光纤环中,当闭合光路相对于惯性空间转动时,就会在光纤陀螺中产生一个与角速度成正比的 Sagnac 相移。然而, Sagnac 效应并不是光纤陀螺唯一的非互易性相移,磁光法拉第效应也是光纤陀螺的主要非互易效应^[5]之一,因此研究光纤陀螺磁敏感性对提高光纤陀螺精度具有重大意义。

磁光法拉第效应^[6]是当线偏振光通过处于磁场作用下的透明介质时,其线偏振光的偏振角会发生旋转,是磁场作用下产生的一种旋光现象。由于磁光法拉第效应产生的相位旋转 ω 正比于外加磁场 H ,即 $\omega = VH$,其比例系数 V (维尔德常数)与材料及入射光的波长有关,因此产生的法拉第旋转与磁场的强度和方向相关。

光纤陀螺磁光法拉第效应的本质是作为光纤陀螺传感器的光纤环,在磁场作用下引入一个非互易性的圆双折射,圆双折射受光传输方向的影响并叠加到光纤环中的固有双折射上^[7],使光在光纤环中传输时产生一个非互易相位差,由于这一误差无法与光纤陀螺的 Sagnac 效应区分,因此产生法拉第效应误差。虽然保偏光纤能较好地保持光原有的偏振态,但由于光纤控制和光纤环绕制过程中产生扭转,使光纤陀螺法拉第效应误差不可能为零,因此光纤陀螺不可避免地存在磁敏感性。

3 交直流磁场装置及测量原理

为研究光纤陀螺的磁敏感特性,实验采用三个正方形亥姆霍兹线圈装置构建一个三维均匀磁场装置,如图 1 所示。亥姆霍兹线圈是由一对相同的、共轴的、彼此平行的且各密绕有 N 匝线圈的线圈组成^[8]。该装置有 6 个框架,框架上安装亥姆霍兹线圈,每个框架彼此绝缘。每两个框架为一组,每组彼此垂直放置,任意两组框架轴心线垂直且交于中心点 O ,形成 x 、 y 、 z 轴三维可变匀强磁场。

当将三轴线圈接通直流或交流电时,则分别产生具有直流或交流特性的匀强磁场,而定性分析直

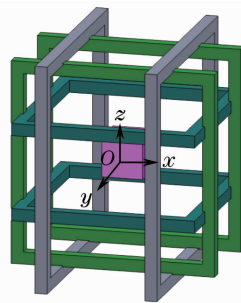


图 1 三维亥姆霍兹线圈
Fig. 1 3D Helmholtz coil

流和交流磁场特性是分析磁场对光纤陀螺影响的前提。因此,实验分别测量了对三轴线圈加 $-6 \sim 6$ A 的直流电流和 $0 \sim 3$ A 的 50 Hz 交流电流时线圈产生的磁感应强度,见图 2 和图 3。

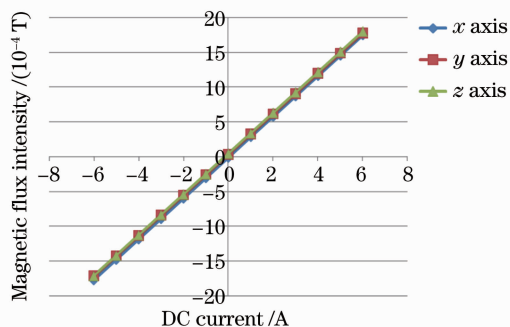


图 2 直流电流与磁感应强度关系

Fig. 2 Relation of DC current and magnetic flux density

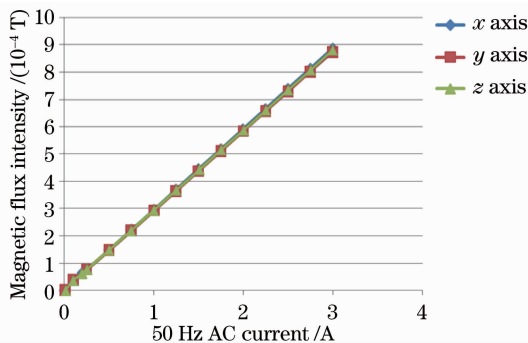


图 3 交流电流与磁感应强度关系

Fig. 3 Relation of AC current and magnetic flux density

由图 2 和图 3 可知, x 、 y 、 z 轴直流和交流磁感应强度曲线分别基本重叠。对 x 、 y 、 z 轴直流和交流磁感应强度数据进行线性拟合,得到:直流 $B_x^{DC} = 2.935I_x - 0.098$, $B_y^{DC} = 2.908I_y + 0.302$, $B_z^{DC} = 2.925I_z + 0.408$, 其中 $-0.098, 0.302, 0.408$ 分别为地磁场在 x 、 y 、 z 轴上的分量;交流 $B_x^{AC} = 2.943I_x + 0.025$, $B_y^{AC} = 2.903I_y + 0.025$, $B_z^{AC} = 2.921I_z + 0.021$ 。

由此得到如下结论:1) x 、 y 、 z 轴产生的直流

(交流)磁感应强度基本一致,符合设计要求;2) 通入相同强度的直流和交流电流产生的磁场强度大小是基本相同的,但因为有地磁场分量的干扰而有所偏差,这说明磁感应强度仅与电流大小呈线性关系,与是否为直流或交流电流无关。

4 光纤陀螺磁敏感性实验数据及分析

为分析光纤陀螺的磁敏感性以及磁敏感轴的方向,利用上面介绍的三维匀强磁场装置和搭建的光纤陀螺测试平台进行数据测量,分析不同特性的直流和交流磁场对光纤陀螺的影响。其实验数据为光纤陀螺的零偏及零偏稳定性(简称零漂)。为明确光纤陀螺磁敏感轴的方向,光纤陀螺在放置时其轴向方位(Z轴)与图1中坐标轴z轴平行,并在陀螺上标注X、Y坐标轴,使其与图1坐标轴中的x、y轴平行。

4.1 直流磁场磁敏感性和磁敏感轴

选用三只232-1型光纤陀螺进行实验,用1号、2号、3号光纤陀螺表示,其标度因数均为 2×10^6 ,分别加上x、y、z轴方向不同强度的磁场,测量x、y、z轴方向的零偏数据,分析其磁场敏感性,实验数据如图4~6所示。

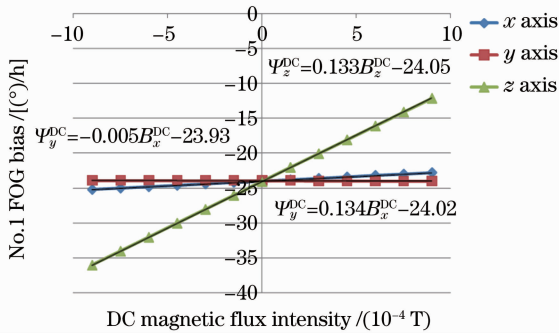


图4 1号光纤陀螺零偏测试数据
Fig. 4 No. 1 FOG bias test data

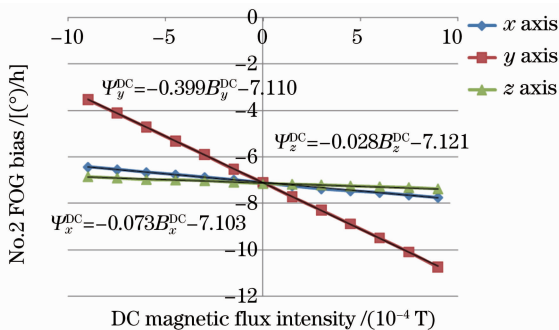


图5 2号光纤陀螺零偏测试数据
Fig. 5 No. 2 FOG bias test data

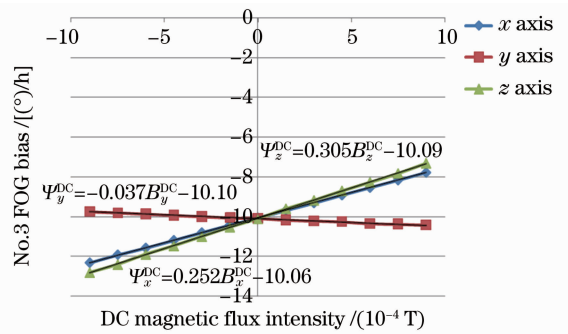


图6 3号光纤陀螺零偏测试数据
Fig. 6 No. 3 FOG bias test data

根据光纤陀螺测试数据可得到:1) 光纤陀螺对磁场敏感,存在特定的磁敏感轴;2) 磁感应强度与光纤陀螺输出数据(零偏)呈线性关系;3) 径向磁场(光纤环平面磁场)和轴向磁场^[9](垂直光纤环平面磁场)都对光纤陀螺有明显影响,影响系数为同一量级;4) 光纤陀螺磁敏感轴的方向为x、y、z轴磁场敏感系数矢量和的方向,即1、2、3号陀螺的磁敏感轴矢量方向分别为空间坐标(0.134, -0.005, 1.333)、(-0.073, -0.399, -0.028)、(0.252, -0.037, 0.305)的方向,因此不同陀螺的磁敏感轴方向不同。

4.2 交流磁场磁敏感性

光纤陀螺的实际工作环境是复杂的,除了地球磁场的干扰,还包括多种电子设备高频和低频磁场干扰^[10],因此,了解光纤陀螺的交流磁场磁敏感性具有十分重要的意义。由于电子设备的高频磁场比较复杂,本文只针对低频磁场^[11]进行研究,且由于1号陀螺z轴的磁场敏感度最高,便于观察和数据分析,故仅以1号陀螺的实验数据为例加以分析。实验采用50 Hz自耦变压器给磁场线圈供电,测得1号陀螺的在50 Hz交变磁场中的零偏数据(见图7)以及其z轴的零漂数据(见图8)。

由图7和图8数据分析可知,50 Hz交变磁场对光纤陀螺零偏影响十分微小,其数据的偏差主要是由

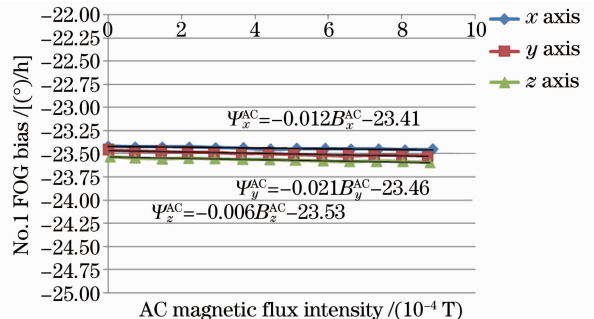


图7 光纤陀螺在50 Hz交变磁场中的零偏
Fig. 7 Bias of FOG in 50 Hz AC magnetic field

于光纤陀螺工作发热引起的温度漂移等误差,而随着磁感应强度的增加,其零漂值也基本呈线性增加。

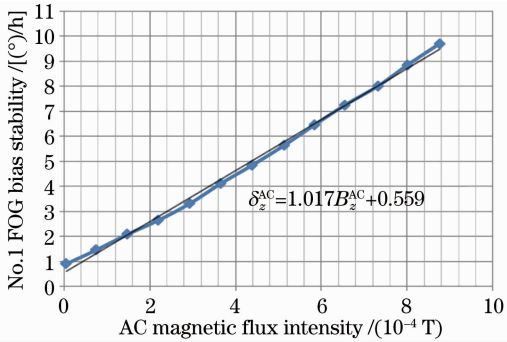


图 8 光纤陀螺在 50 Hz 交流磁场中的零漂

Fig. 8 Bias stability of FOG in 50 Hz AC magnetic field

这一现象说明交流磁场对光纤陀螺的数据输出是有影响的。根据光纤陀螺零偏和零漂的不同计算原理,由于零偏是零输入状态下的输出平均值,而对于正弦交流磁场下多个周期的输出值均值是基本不变的,所以一般情况下可以忽略交流磁场对陀螺零偏的影响。而零漂是陀螺稳态输出值的均方差,说明交流磁场对光纤陀螺数据输出值的影响也基本呈线性规律。

4.3 不同频率交流磁场对光纤陀螺的影响

为进一步分析光纤陀螺交流磁场磁敏感性,研究交流磁场对光纤陀螺数据输出值的影响,现增加

采样频率,对不同频率交流磁场下的光纤陀螺输出数据进行测量。实验采用 EP2500 型功率放大器和信号发生器测量 0.1~100 Hz 交流磁场下的光纤陀螺输出数据,图 9、图 10 分别为 1 号光纤陀螺 z 轴在 10 Hz 与 25 Hz 的相同交流磁场下的输出数据。

由图 9 和图 10 中可以看出,光纤陀螺的输出数据随着交流磁场的变化也呈正弦波形态的数据变化(这里之所以表现为近似对正弦波作关于 x 轴对称的形态是由于陀螺对输出信号作了信号调制),其他频率的磁场也呈现出相同的状况,其数据输出周期由交流磁场频率所决定,但同时要考虑到陀螺的采样频率需与之相匹配^[12]。这表明光纤陀螺数据输出值主要是与瞬态的磁感应强度(幅值)成正比,是对磁感应强度变化的实时响应。

为表明图 9 和图 10 中的光纤陀螺输出数据确实是交变磁场对光路的影响而非对电路影响(如电磁感应)的结果,进行了光纤陀螺光路与电路的分离实验,并对其光路部分做了简单的屏蔽,其零偏的磁屏蔽测试曲线如图 11 所示。

图 11 表明其屏蔽设计对低强度磁场的屏蔽效果较好,且光纤陀螺的输出数据也得到了一定程度的改善(3 号陀螺有 2 个轴对磁场较为敏感),这验证了图 9 和图 10 中的输出数据主要是由于交变磁场对光路的影响。

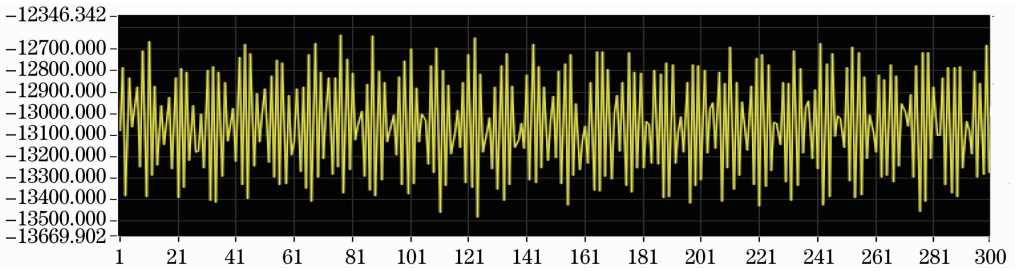


图 9 10 Hz 交流磁场下的输出数据

Fig. 9 Export data in 10 Hz AC magnetic field

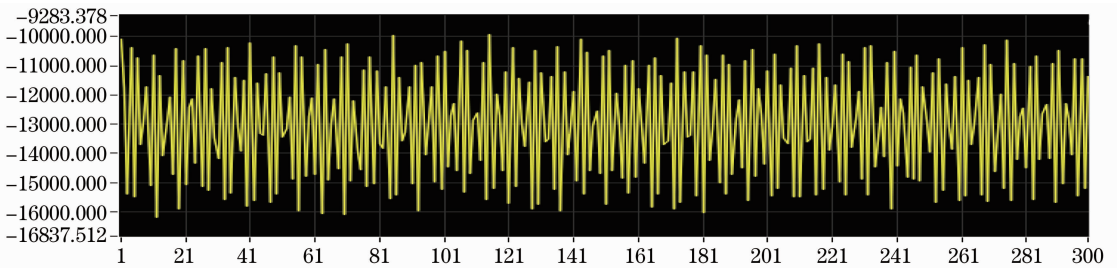


图 10 25 Hz 交流磁场下的输出数据

Fig. 10 Export data in 25 Hz AC magnetic field

图 12 给出了光纤陀螺在不同频率、磁感应强度相同的交流磁场中的零漂值。由于光纤陀螺是一种

角速度敏感器,它输出数据为角速度转化的信号^[13]。对于本实验研究的陀螺,它每 2.5 ms 向计

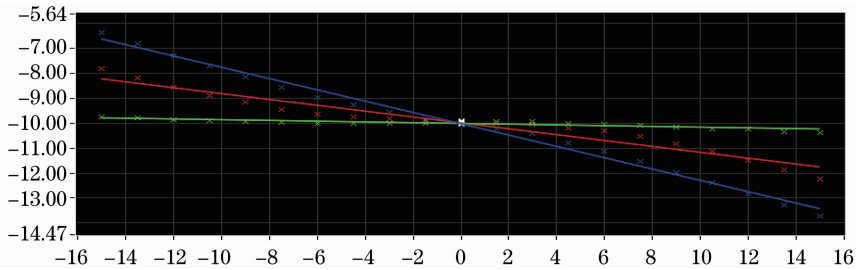


图 11 3号陀螺零偏的磁屏蔽曲线

Fig. 11 Magnetic shielding curves of No. 3 FOG bias

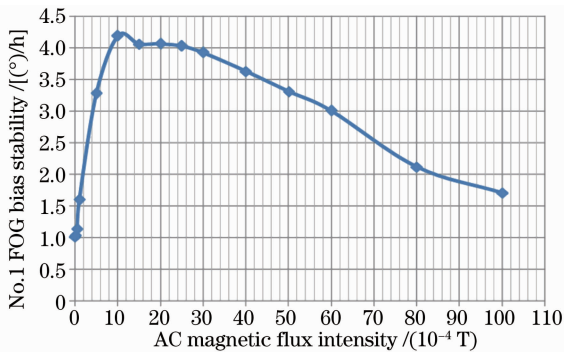


图 12 光纤陀螺在不同频率交流磁场中的零漂

Fig. 12 Bias stability in different AC magnetic fields

计算机发送一个数据,这是由电路本身决定的,即为陀螺的输出频率。而陀螺的采样频率,是指计算机对一定时间内陀螺发送来的数据作平均值处理后向测试软件界面发送数据的频率,本实验为 10 ms。

综上所述,不同频率、磁感应强度相同的交流磁场对光纤陀螺的零偏值影响很小,在实验分析中可以忽略不计;但不同频率交流磁场对光纤陀螺零漂值的影响不同,存在一个频率(或频率范围)对光纤陀螺零漂的影响较大,其频率范围与光纤陀螺输出带宽有关。

5 结 论

基于磁光法拉第效应理论着重研究了光纤陀螺在直流和交变磁场中的磁敏感性。1) 分析了三维正方形亥姆霍兹线圈产生的直流和交流匀强磁场环境及其磁感应强度特性。2) 研究了光纤陀螺在直流磁场中的磁敏感性,得到磁感应强度与光纤陀螺数据输出的线性关系和磁敏感轴的方向,以及不同光纤陀螺对径向磁场和轴向磁场的敏感度差异较大。3) 分析了光纤陀螺在交流磁场中的数据输出及磁敏感性,得到交流磁场对零偏值影响很小,在实验分析中可以忽略不计,但磁感应强度与其零漂值的大小基本呈线性关系。4) 研究了不同频率交流磁场对光纤陀螺输出的影响,说明了光纤陀螺数据

输出主要与瞬态的磁感应强度成正比,不同频率交流磁场对光纤陀螺零漂值的影响不同,存在一个频率(或频率范围)对光纤陀螺零漂的影响较大,其频率范围与光纤陀螺数据输出频率有关。全面分析光纤陀螺的直流和交流磁场磁敏感性,为今后研究减小光纤陀螺的磁敏感性的方法提供了一定的参考。

参 考 文 献

- 1 E. Udd, H. C. Lefevre, K. Hotate. Fiber optic gyros; 20th anniversary conference[C]. *SPIE*, 1996, **2837**: 1
- 2 V. Vali, R. W. Shorthill. Fiber ring interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(5): 1099~1100
- 3 Wang Xiaoxiao, Song Ningfang, Zhang Chunxi *et al.*. Experiment study on magnet sensitivity of fiber optic gyro[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, **31**(10): 1116~1120
王夏霄, 宋凝芳, 张春熹 等. 光纤陀螺磁敏感性的实验研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, **31**(10): 1116~1120
- 4 Wang Wei. Interferometric Fiber Optic Gyroscope Technology [M]. Beijing: Chinese Astronautics Press, 2010. 170~185
王 巍. 干涉型光纤陀螺仪技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010. 170~185
- 5 Li Jian, Ning Tiegang. Research on the drift of optical fiber gyro due to Faraday effect [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(4): 400~403
李 坚, 宁提纲. 干涉型光纤陀螺中磁光 Faraday 效应的研究 [J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(4): 400~403
- 6 K. Hotate, K. Tabe. Drift of an optical fiber gyroscope caused by the Faraday effect; experiment[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1987, **5**(7): 997~1001
- 7 R. A. Bergh, H. C. Lefever, H. J. Shaw. An overview of fiber-optic gyroscopes[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1984, **2**(2): 91~107
- 8 Kuang Xiangjun. Magnetic field of square current-carrying coil [J]. *Phys. & Engng.*, 2006, **16**(1): 19~25
邝向军. 方形载流线圈的空间磁场计算[J]. *物理与工程*, 2006, **16**(1): 19~25
- 9 Zhang Dengwei, Mou Xudong, Shu Xiaowu *et al.*. Theory study on axial magnetic acing on fiber-optic depolarized gyros[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10): 1561~1564
张登伟, 牟旭东, 舒晓武 等. 去偏光纤陀螺轴向磁场问题的理论研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(10): 1561~1564
- 10 K. Bohm, K. Petermann, E. Weidel. Sensitivity of a fiber-optic gyroscope to environmental magnetic fields [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **7**(4): 180~182
- 11 Hong Lingfei, Zhang Chunxi, Feng Lishuang *et al.*. Frequency tracking and locking methods in resonator micro-optic gyro[J].

Chinese J. Lasers, 2011, **38**(9): 0905003

洪灵菲, 张春焘, 冯丽爽等. 谐振式微光学陀螺频率跟踪与锁定技术研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(9): 0905003

- 12 Lin Huizu, Yao Qiong, Hu Yongming. Study on 90° docking error control in polarization maintaining fiber resonator of resonant fiber optic gyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2864~2868

林慧祖, 姚琼, 胡永明. 谐振式光学陀螺保偏光纤谐振腔 90° 对接误差控制研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 2864~2868

- 13 Lin Huizu, Yao Qiong, Hu Yongming. Testing system of fiber polarization coupling based on polarization maintaining structure [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1794~1799

林慧祖, 姚琼, 胡永明. 全保偏结构的光纤偏振耦合测试系统[J]. 中国激光, 2010, **37**(7): 1794~1799

栏目编辑: 何卓铭