

文章编号: 1005-5630(2014)05-0426-06

光纤陀螺在球面非均匀磁场中的磁敏感性研究

肖 程, 刘 军, 殷建玲, 鲁 军

(中国人民解放军军械工程学院 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要: 磁光法拉第效应是光纤陀螺中存在的非互易效应, 会在陀螺输出零位附加一个固定偏置, 从而影响光纤陀螺的精度。针对陀螺内部电路的辐射磁场为球面非均匀磁场的特点, 建立了球面非均匀磁场的光纤陀螺磁敏感误差模型。采用数值模拟的方法分析了球面非均匀磁场对光纤陀螺磁敏感性的影响并进行了实验验证。实验证明, 球面磁场源距离光纤环越近, 光纤陀螺磁敏感误差越大; 球面磁场源位于光纤环中心轴附近时, 光纤陀螺磁敏感误差较小; 球面磁场源在光纤环内部中心轴向移动时, 光纤陀螺磁敏感误差基本不变。

关键词: 光纤光学; 光纤陀螺; 法拉第效应; 球面磁场; 磁敏感性

中图分类号: TN 253 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2014.05.012

Research on magnetic sensibility of fiber optic gyroscope in the spherical inhomogeneous magnetic field

XIAO Cheng, LIU Jun, YIN Jianling, LU Jun

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

Abstract: Magneto-optic Faraday effect is the reciprocal effect that exists in fiber optic gyroscope (FOG). It adds an additional fixed bias which affects the precision in the output of FOG. Based on the characteristic that the radiation magnetic field of internal circuit of FOG is spherical inhomogeneous magnetic field, a magnetic sensibility error model of FOG in the spherical inhomogeneous magnetic field is established. Magnetic sensibility of FOG in the spherical inhomogeneous magnetic field is analyzed by the numerical simulation and verified by the experiment. Shorter the distance between the spherical magnetic field source and optical fiber ring is, larger FOG magnetic sensibility error is. When the spherical magnetic field source is located in the center of optical fiber ring, FOG magnetic sensibility error is the smallest. When the spherical magnetic field source moves around the axial of the optical fiber ring, FOG magnetic sensibility error almost remain unchanged.

Key words: fiber optics; fiber optic gyroscope; Faraday effect; spherical magnetic field; magnetic sensitivity

引 言

光纤陀螺是一种新型的惯性测量器件, 有着传统陀螺难以比拟的优点。作为一种全固态陀螺, 光纤

收稿日期: 2014-03-04

作者简介: 肖 程(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: xc_nanking@163.com

通讯作者: 刘 军(1962-), 男, 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

陀螺具有动态范围大、响应速度快、体积小、抗冲击振动、启动时间短、工艺简单以及易于大批量生产等优点^[1-2]。光纤陀螺自1976年问世以来,经过30多年的发展,其在军用和民用领域取得了巨大的成就,被公认为取代机械陀螺的下一代陀螺。光纤陀螺磁敏感性误差作为光纤陀螺的主要非互易误差源之一^[3],是评价光纤陀螺性能的重要参数。本文通过分析光纤陀螺内部电路辐射磁场的分布特征,建立了球面非均匀磁场中的光纤陀螺磁敏感误差模型。探讨了球面非均匀磁场对光纤陀螺磁敏感性误差的影响。

1 光纤陀螺磁敏感性机理

磁光法拉第效应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,产生磁场作用下的一种旋光现象^[4-5]。由于磁光法拉第效应,在单模光纤中磁场改变了构成入射线偏振光的左、右圆偏振光的相位,导致两束反向传播的线偏振光的偏振面产生一个夹角,使光在光纤环中传输时产生一个非互易相位差^[6]。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,导致光纤陀螺具有磁敏感性。

2 光纤陀螺内部电路辐射磁场

光纤陀螺的内部磁场主要由陀螺内部电路板产生。利用电磁场分布扫描系统,对光纤陀螺的电路板进行了电磁场辐射特性扫描。

2.1 测试设备

利用瑞典 Detectus 公司生产的 RX644EH 型电磁场分布扫描仪,Agilent 公司的 E4440A 频谱分析仪,以及计算机控制与显示软件构成的电磁场分布扫描系统,对光纤陀螺的电路板进行电磁场辐射特性扫描。图1为电磁场分布扫描系统框图。

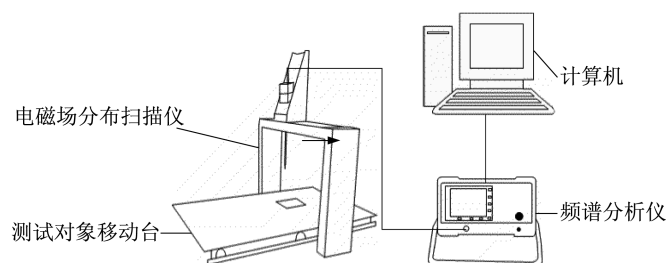


图1 电磁场分布扫描系统框图

Fig. 1 The diagram of electromagnetic field distribution scanning system

针对测试对象,XYZ轴的移动距离(被测设备最大尺寸)为 $600 \times 400 \times 200$ mm,最小移动步径为1 mm,定位精度 ± 0.3 mm。扫描测试时,选择低频磁场探头 LFB-3 进行测试,扫描频带为 $0 \sim 50$ MHz。

2.2 扫描结果与分析

陀螺主控电路正面辐射强度最大的8.761 MHz的辐射特性如图2所示。

从图2可以看出,随着探头与主控电路板上表面之间距离的增加,该电路板辐射强度逐渐下降。这说明电路板辐射磁场分布更接近球面分布,而非强度与探头高度无关的柱面分布的匀强磁场。

3 球面非均匀磁场中的光纤陀螺磁敏感误差模型

若假定光纤环置于平行于光纤环平面的磁感应强度为 B_0 的均匀磁场中, θ 为磁场方向与光纤环所成的角度, θ_0 为磁场方向相对基准轴的角度, $\tau(\theta)$ 为光纤扭转率, V 为费尔德常数, $\Delta\beta$ 为光纤双折射率, r 为光纤环半径, m 为光纤环在横向上缠绕的层数,则该磁场所产生的径向法拉第相位误差可以表示为^[7]:

$$\Delta\phi_t = \int_0^{2m\pi} \frac{4V}{\Delta\beta} \tau(\theta) \cdot B_0 \cdot \sin(\theta - \theta_0) \cdot r \cdot d\theta \quad (1)$$

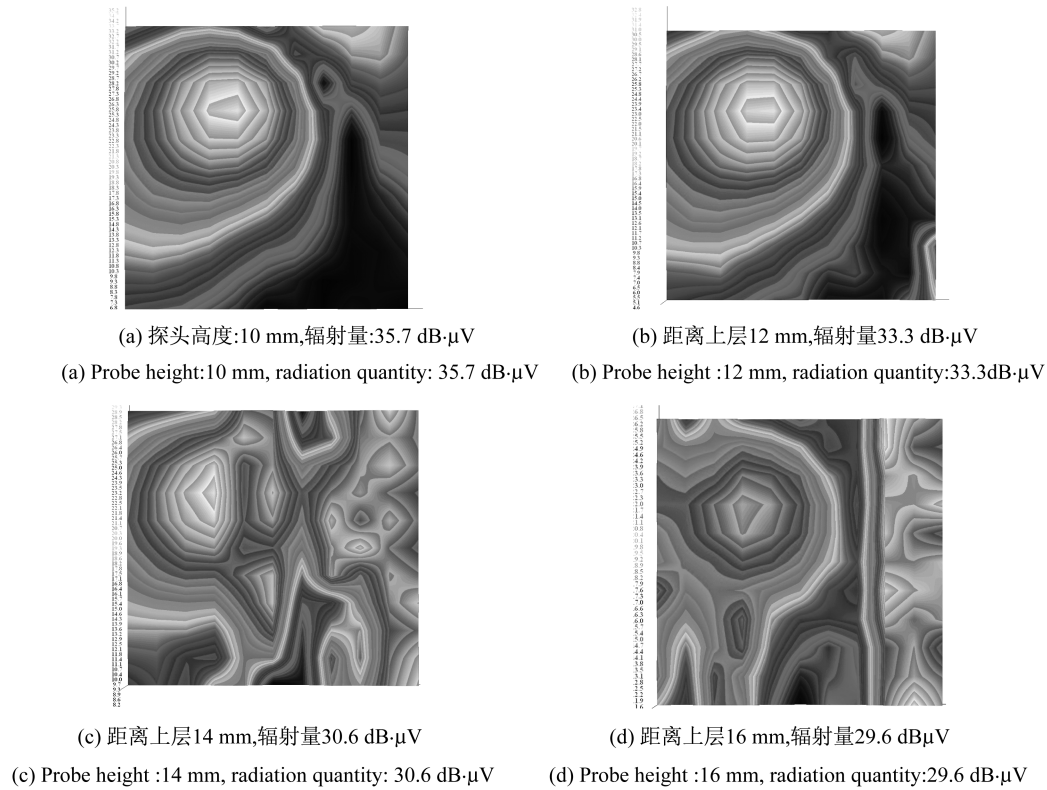


图 2 主控电路正面辐射特性随探头高度的变化图

Fig. 2 Figure of front side of main control circuit radiation characteristics as probe height variation

假设光纤环水平放置,光纤绕线高度为 h_0 ,在纵向上共有 N 层($N=h_0/D_0$, D_0 为光纤直径,最上层为第 1 层),最上层光纤环中心为 O , B'_0 为球面磁源在球心 O' 处的磁场强度, H_0 为场源中心距离光纤环最上层光纤平面的距离, d 为磁场源中心对第 n 层光纤平面垂线的交点 B 与环上某点 A 的距离, $l=\sqrt{d^2+(H_0+h)^2}$ 为场源中心至光纤环上某点 A 的距离, $h=nD_0$ 为第 n 层光纤平面距离最上层光纤平面的距离, D 为直线 OB 与光纤环的交点, ξ 为直线 AO' 与第 n 层光纤平面的夹角。 R 是 BD 的长度, θ 、 ϕ 的定义见图 3(b)。

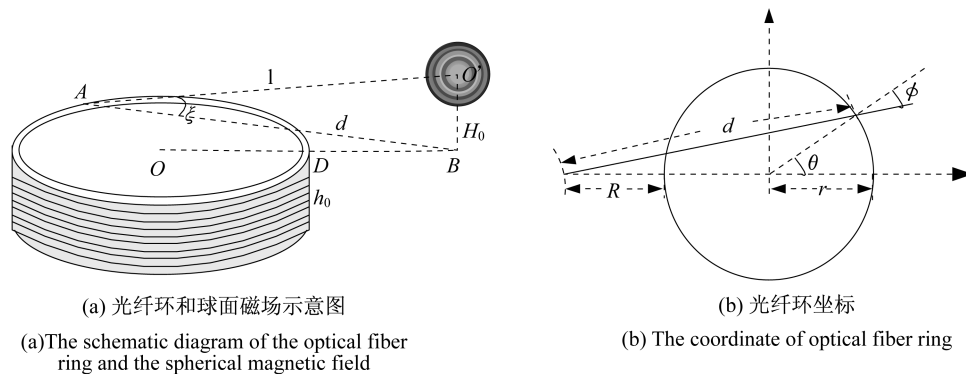


图 3 坐标分布图

Fig. 3 The coordinate distribution chart

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{球} &= \int_0^{2m\pi} \frac{4V}{\Delta\beta} \cdot \tau(\theta) \frac{B'_0}{l} \cdot \cos\xi \cdot \sin\phi \cdot rd\theta = \int_0^{2m\pi} \frac{4V}{\Delta\beta} \cdot \tau(\theta) \frac{B'_0}{d} \cdot \cos^2\xi \cdot \sin\phi \cdot rd\theta \\ &= \sum_{n=1}^N \int_0^{2m'\pi} \cos^2\xi \cdot \frac{4V}{\Delta\beta} \cdot \tau(\theta) \frac{B'_0}{d} \cdot \sin\phi \cdot rd\theta \end{aligned} \quad (2)$$

式中,假设光纤环在横向上缠绕 m' 层,且每层相同。

$$\Delta\phi_{\text{球}} = \sum_{n=1}^N \int_0^{2m'\pi} \frac{d^2}{d^2 + (nD_0 + H_0)^2} \cdot \frac{4V}{\Delta\beta} \cdot \tau(\theta) \frac{B'_0}{d} \cdot \sin\phi \cdot rd\theta \quad (3)$$

当球面磁场位于最上层光纤上侧时, $H_0 > 0$; 当球面磁场位于最上层光纤下侧时, $H_0 < 0$ 。根据三角函数关系

$$d^2 = (R + r + r\cos\theta)^2 + (r\sin\theta)^2 = 2r^2 + R^2 + 2Rr\cos\theta + 2r^2\cos\theta + 2Rr \quad (4)$$

由于

$$(R + r)^2 = d^2 + r^2 - 2dr\cos\phi \quad (5)$$

则:

$$\cos\phi = \frac{(R + r)\cos\theta + r}{d} = \frac{(R + r)\cos\theta + r}{\sqrt{(R + r + r\cos\theta)^2 + (r\sin\theta)^2}} \quad (6)$$

$$\sin\phi = \sqrt{1 - \cos^2\phi} = \frac{(R + r)\sin\theta}{d} = \frac{(R + r)\sin\theta}{\sqrt{(R + r + r\cos\theta)^2 + (r\sin\theta)^2}} \quad (7)$$

代入相位差的表达式可得

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{\text{球}} &= \sum_{n=1}^N \int_0^{2m'\pi} \frac{d^2}{d^2 + (nD_0 + H_0)^2} \cdot \frac{4V}{\Delta\beta} \cdot \tau(\theta) \cdot B'_0 \cdot \frac{(R + r)\sin\theta}{d^2} \cdot rd\theta \\ &= \sum_{n=1}^N \frac{4VB'_0}{\Delta\beta} \int_0^{2m'\pi} \tau(\theta) \frac{r \cdot (R + r)\sin\theta}{(R + r + r\cos\theta)^2 + (r\sin\theta)^2 + (nD_0 + H_0)^2} d\theta \end{aligned} \quad (8)$$

4 数值模拟与分析

对在不同的球面非均匀磁场影响下,光纤环上纵向某一层光纤各点法拉第效应与角度关系的曲线进行了数值模拟,令 $\tau(\theta) = \tau_0 = 10 \text{ rad/m}$, $\Delta\beta = 100 \text{ rad/m}$, $r = 0.1 \text{ m}$ 。模拟结果如图4~图6。

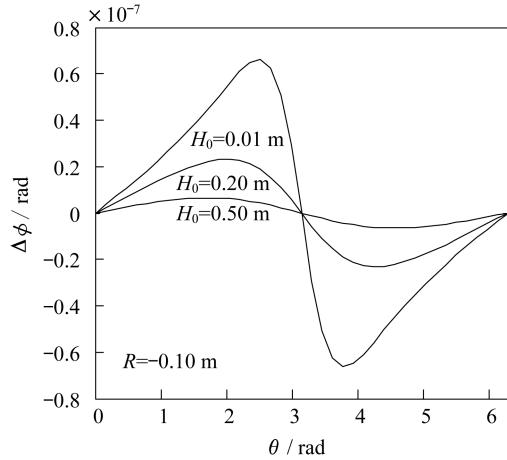


图4 距离光纤环上表面不同高度的球面磁场
Fig. 4 Spherical magnetic field of different heights from the surface of optical fiber ring

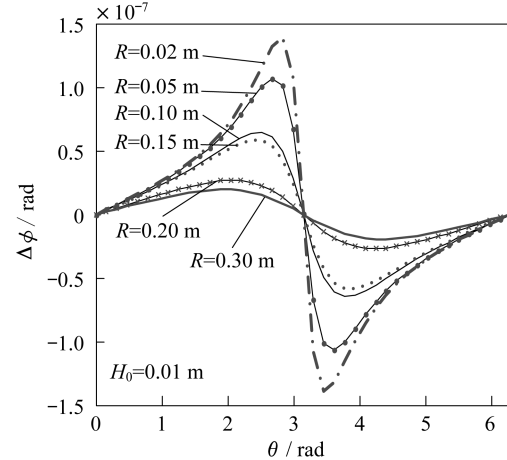


图5 距光纤环右侧边缘不同距离的球面磁场
Fig. 5 Spherical magnetic field of different distances from the right side of optical fiber ring

分析式(8)和图4~图6,可得:

1) 光纤陀螺磁敏感误差与磁场源的位置、大小,以及光纤环的高度、半径有关。磁场源距离光纤环越近,光纤陀螺的磁敏感相位误差越大。

2) 在光纤环外部,光纤陀螺磁敏感误差随着球面磁场距离光纤环上表面高度 H_0 的增大而减小,随着球面磁场距离光纤环侧边缘距离 R 的增大而减小。

3) 当磁场源位于光纤环中心轴附近时, 光纤陀螺磁敏感误差较小。实际上, 由于扭转量不是均匀分布的, 各点产生的法拉第相位效应也不会完全抵消。这个结论说明, 将光纤陀螺内部辐射较大的元件置于光纤环中心轴附近, 可减小其对陀螺输出的影响。

4) 球面磁场源在光纤环内部中心轴向移动时, 光纤陀螺磁敏感误差基本不变。

5 实验结果

通过设置光纤陀螺内部电路距离光纤环上表面的高度, 从而改变球面磁场源距离光纤环上表面的高度, 采集陀螺的输出数据, 如图 7 所示。改变球面磁场源距离光纤环侧边缘的水平距离, 采集陀螺的输出数据, 如图 8 所示。改变球面磁场源处于光纤环内部的高度, 采集陀螺的输出数据, 如图 9 所示。

图 7 表明, 在光纤环外部, 光纤陀螺磁敏感误差与球面磁场距离光纤环上表面高度 H_0 成反比。图 8 表明, 光纤陀螺磁敏感误差与球面磁场距离光纤环侧边缘距离 R 也成反比。图 9 表明, 光纤陀螺的光纤环对于在其内部中心轴向移动的球面磁场源而言, 磁敏感性强度基本不变。分析 3 组实验数据, 发现图 7、图 9 中的陀螺输出数据较小, 说明当磁场源位于光纤环中心轴附近时, 光纤陀螺磁敏感误差较小。实验结果验证了数值模拟分析的正确性, 同时也表明了所建立的球面非均匀磁场中的光纤陀螺磁敏感误差模型的合理性。

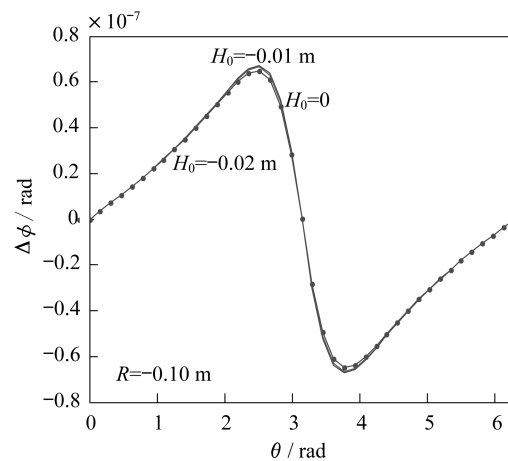


图 6 位于光纤环内不同高度的球面磁场
Fig. 6 Spherical magnetic field of different height in the optical fiber ring

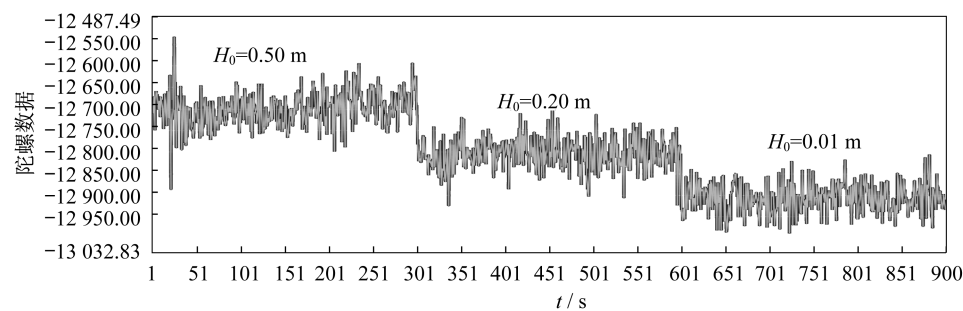


图 7 外部 H_0 的影响

Fig. 7 The influence of external H_0

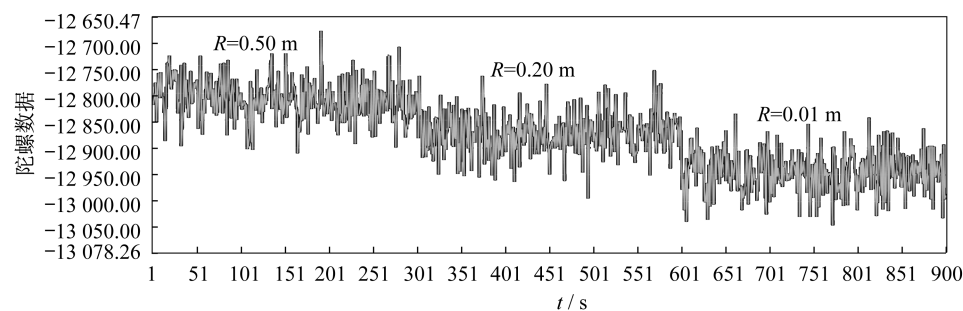
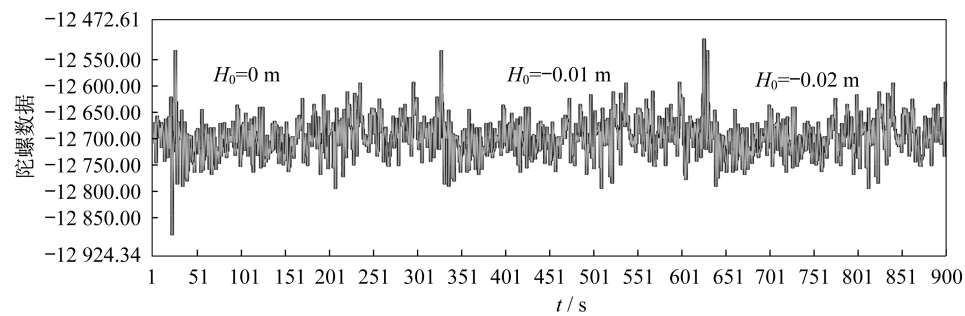


图 8 R 的影响

Fig. 8 The influence of R

图9 内部 H_0 的影响Fig. 9 The influence of internal H_0

6 结论

基于光纤陀螺内部电路辐射磁场的扫描结果及其磁敏感性机理,着重研究了光纤陀螺在球面非均匀磁场中的磁敏感性特征。1)利用电磁场分布扫描系统,得到光纤陀螺内部电路辐射磁场为呈球面分布的非均匀磁场;2)在建立了光纤陀螺在球面非均匀磁场中的磁敏感误差模型的基础上,对处于不同球面非均匀磁场下的光纤环法拉第效应进行了数值模拟分析;3)实验验证了数值模拟分析的正确性。得到球面磁场源距离光纤环越近,光纤陀螺磁敏感误差越大;球面磁场源位于光纤环中心轴附近时,光纤陀螺磁敏感误差较小;球面磁场源在光纤环内部中心轴向移动时,光纤陀螺磁敏感误差基本不变。基于以上结论,为了减小光纤陀螺自身内部电路辐射磁场对光纤环的影响,在设计陀螺内部结构时,应考虑将内部电路的主要辐射磁场源集中于光纤环中心轴附近。全面分析了光纤陀螺在球面非均匀磁场中的磁敏感性特征,为以后光纤陀螺内部结构的优化设计和光纤陀螺磁敏感性抑制方法的研究提供了一定的参考。

参考文献:

- [1] UDD E, LEFEVRE H C, HOTATE K. Fiber optic gyroscope; 20th anniversary conference[J]. *SPIE*, 1996, 2837: 1.
- [2] 谭曦, 刘军, 殷建玲. 正方形亥姆霍兹线圈的磁场均匀性[J]. *光学仪器*, 2012, 34(1): 39-44.
- [3] HOTATE K, TABE K. Drift of an optical fiber gyroscope caused by the Faraday effect; experiment[J]. *Lightwave Technology*, 1987, 5(7): 997-100.
- [4] 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.
- [5] 董宇, 张悦, 华文深, 等. 基于磁致旋光效应的光电装备隐身技术[J]. *光学仪器*, 2012, 34(6): 80-85.
- [6] 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.
- [7] 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.