

光纤陀螺光纤环轴向磁敏感性研究

王夏霄¹ 冯志芳^{1*} 秦 祎¹ 于 佳¹ 吕江涛²

¹北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

²中国航天科工集团公司第九总体设计部, 湖北 武汉 430040

摘要 磁敏感性是光纤陀螺(FOG)的主要误差源之一,而光纤环是主要的敏感源。在外界磁场作用下,光纤陀螺中会产生一个非互易相位差,影响陀螺的精度。相关实验表明保偏(PM)光纤环中轴向磁敏感性比径向磁敏感性更显著。主要从三个方面研究了轴向磁场对光纤陀螺的影响机理,包括轴向磁场平行分量引起的光纤随机扭转法拉第磁场漂移、光纤几何扭转引起的法拉第非互易相位差以及轴向磁场垂直分量引起的非法拉第非互易相位差。对理论结果进行了仿真分析和实验验证,结果表明:由垂直分量磁场引起的非互易相位差是光纤陀螺轴向磁敏感性的主要原因,其大小与光纤环骨架半径密切相关;骨架半径越小的光纤环,轴向磁敏感性越强。

关键词 光纤光学; 轴向磁敏感性; 光纤陀螺; 法拉第效应; 扭转; 保偏光纤环

中图分类号 TN25

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0805005

Study on the Axial Magnetic Field Sensitivity in Optical Fiber Coil of Fiber Optic Gyroscope

Wang Xiaoxiao¹ Feng Zhifang¹ Qin Yi¹ Yu Jia¹ Lü Jiangtao²

¹School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

²The Ninth Overall Design Department, China Aerospace Science & Industry Corp, Wuhan, Hubei 430040, China

Abstract The magnetic field sensitivity is the main source of errors in fiber optic gyroscope (FOG) and the optical fiber coil is a major sensitive source. In an external magnetic field, a nonreciprocal phase error will be generated in a FOG and decrease the gyro precision. Related experimental results show that the axial magnetic field sensitivity in the polarization maintaining (PM) fiber coils is more obvious than the radial magnetic field sensitivity. The axial magnetic field sensitivity is studied, including Faraday shift caused by fiber random twist, Faraday nonreciprocal phase caused by geometry twist and non-Faraday nonreciprocal phase caused by vertical component magnetic field. Theoretical results are simulated and verified by the experiments. Results show that nonreciprocal phase caused by vertical component magnetic field is the main reason for axial magnetic field sensitivity and closely related to the fiber coil's skeleton radius. Furthermore, the smaller the skeleton radius is, the greater the axial magnetic field sensitivity will be.

Key words fiber optics; axial magnetic field sensitivity; fiber optic gyroscope; Faraday effect; twist; polarization maintaining fiber coil

OCIS codes 060.2310; 060.2420; 060.2800

1 引 言

光纤陀螺(FOG)是基于Sagnac效应的光学角速率传感器^[1],广泛应用于各种飞行器、舰船、定位定向以及地质、石油勘探等领域。轻小型光纤陀螺具有体积小、质量轻、成本低等优点,成为陀螺的发展方向^[2-3]。陀螺轻小型化使得光纤环径向尺寸逐步缩小,而轴向尺寸逐步增大,由此导致轴向磁场对陀螺精度的影响增大,已经成为主要误差源之一,直接影响陀螺的零偏稳定性^[4]。

收稿日期: 2015-03-10; 收到修改稿日期: 2015-04-08

作者简介: 王夏霄(1977—),男,博士,高级工程师,主要从事光纤陀螺及光纤电流传感技术等方面的研究。

E-mail: wangxiaoxiao@buaa.edu.cn

*通信联系人。E-mail: 1028466317@qq.com

采用高导磁金属材料磁屏蔽罩是减小陀螺磁敏感性最简单的方法,但这种方法会增加FOG的重量和成本,不利于FOG小型化发展。受外界磁场影响,FOG磁敏感参数不能达到规定要求。如何减小外界磁场对FOG精度的影响是FOG发展中面临的难题之一。光纤环是磁场的主要敏感源,通过实验发现,保偏光纤环轴向磁场敏感性大于径向磁场敏感性。因此,FOG轴向磁敏感性不容忽视。本文就FOG轴向磁敏感性展开研究,对于提高小型陀螺的精度有着重大意义,为今后对FOG磁敏感性的优化提供理论基础。

2 光纤陀螺轴向磁敏感性理论推导

光纤陀螺受到外界磁场作用时会产生非互易相位差,而由法拉第效应引起的非互易相位差是陀螺磁敏感性的主要原因。在光纤环上,空间磁场 \mathbf{H} 分解为轴向磁场 \mathbf{H}_A 和径向磁场 \mathbf{H}_R ,其中 \mathbf{H}_A 与陀螺敏感轴平行, \mathbf{H}_R 与陀螺敏感轴垂直;光纤螺旋缠绕产生的螺旋角使 \mathbf{H}_A 分解为垂直分量 $\mathbf{H}_{A\perp}$ 和平行分量 $\mathbf{H}_{A\parallel}$,其中 $\mathbf{H}_{A\perp}$ 与光传播方向垂直, $\mathbf{H}_{A\parallel}$ 与光传播方向平行^[5],如图1和图2所示。由径向磁场 \mathbf{H}_R 与平行分量磁场 $\mathbf{H}_{A\parallel}$ 引起的磁场漂移都是由于磁光法拉第效应引起的^[6-7];而垂直分量 $\mathbf{H}_{A\perp}$ 对陀螺产生的磁场漂移主要是由模式场偏移结合光纤弯曲引起的^[8-9]。

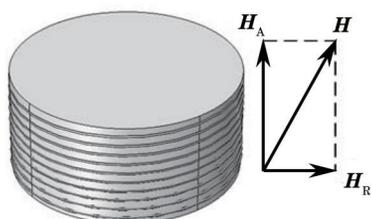


图1 光纤环中空间磁场的分解

Fig.1 Decomposition of a space magnetic field in optical fiber coil

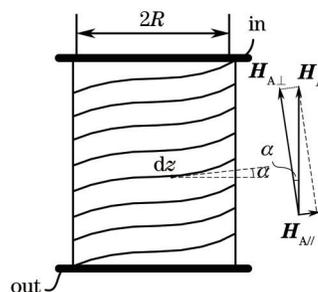


图2 轴向磁场分解

Fig.2 Decomposition of axial magnetic field

2.1 随机光纤扭转引起的轴向法拉第漂移

理论上,保偏光纤中输入的是线偏振光,法拉第相位误差为零。而实际应用中,保偏光纤预制棒经受高应力后会形成一个螺旋状的应力棒,使得高双折射保偏光纤的主轴方向在拉制过程中缓慢旋转。由于光纤双折射轴残余扭转,使得光纤中光的偏振态发生变化,在保偏光纤中的法拉第效应不完全为零。

通过建立扭转光纤模型和耦合模方程,采用有限元分析方法^[10-11],得到光纤随机扭转法拉第磁场漂移为

$$\phi = \frac{8\pi m V H_A}{\Delta\beta} \sum_{j=1}^n \left[\tau \sin \alpha_j \sqrt{R_j^2 + \left(\frac{p_j}{2\pi}\right)^2} \right] \cdot (-1)^j, \quad (1)$$

式中 m 为每层光纤匝数, $\Delta\beta$ 为线双折射, V 为维尔德常数, τ 为单位长度光纤偏振轴扭转率, α_j 为第 j 层光纤螺旋角, R_j 螺旋半径, p_j 为螺距。对于保偏光纤,认为光纤随机扭转引起的 τ 沿光纤是均匀的,取 0.1rad/m 。由于相邻两层光纤间的螺旋半径差很小,所以,螺旋角 α_j 的变化很小。可以认为随机扭转产生的相位差主要是由光纤环中相邻光纤层之间的长度差引起的。对不同骨架半径的光纤环进行仿真计算,其中参数 $V=0.84\text{rad}/(\text{m}\cdot\text{T})$,1号光纤环骨架半径 $R_0=0.0280\text{m}$, $m=87$, $n=32$;2号光纤环骨架半径 $R_0=0.0165\text{m}$, $m=64$, $n=40$,光纤直径均为 $165\mu\text{m}$ 。当轴向磁场强度 $H_A=1\text{Guass}$ 时,由该相位差引起的陀螺零偏为 $10^{-3}\text{ }^\circ/\text{h}$ 量级,对于精度为 $0.1\sim 0.5\text{ }^\circ/\text{h}$ 的小型陀螺可忽略。

2.2 光纤几何扭转引起的法拉第非互易相位差

光纤几何旋光效应会使沿非平面曲线传输的线偏光的偏振面发生旋转,如果光纤的几何扭转率不为零,则会在空间几何光纤环路中引入圆双折射,其大小与应力无关,仅由环路的几何形状决定,具有很好的稳定性^[12-13]。由几何扭转产生的圆双折射使光纤环中两束异向光波的偏振态不同,产生的几何轴向法拉第相位差为^[14]

$$\phi = \frac{8\pi m V H_A}{\Delta\beta} \sum_{j=1}^n \left[\tau_j \sin \alpha_j \sqrt{R_j^2 + \left(\frac{p_j}{2\pi}\right)^2} \right], \quad (2)$$

式中 τ_j 为第 j 层光纤的几何扭转率。

分别对 1、2 号光纤环进行仿真分析,当轴向磁场强度为 $H_A=1$ Gauss 时,光纤几何螺旋缠绕引起的陀螺零偏分别为 $0.0267^\circ/\text{h}$ 和 $0.2066^\circ/\text{h}$ 。仿真结果表明几何法拉第相位差随光纤环骨架半径减小而增大。

2.3 光纤环垂直分量磁场引起的非互易相位差

在平直光纤中,两束异向传输的光波在垂直分量磁场 $H_{A\perp}$ 的作用下,形成与磁场强度成比例的非对称模式场偏移,利用麦克斯韦方程和光纤模式场理论计算模式场偏移量 δx ^[8],得

$$\delta x = \frac{3VH_A}{2\pi^2} \left(\frac{\lambda}{n}\right)^2, \quad (3)$$

式中 n 为光纤纤芯折射率, λ 为光波长。 H_A 是指垂直分量磁场 $H_{A\perp}$, 由于光纤螺旋缠绕的螺旋角很小, 可以用轴向磁场 H_A 近似代替 $H_{A\perp}$ 。

模式场偏移导致异向光波在光纤平面传播路径分离, 在平直光纤中, 由于两束异向传输的光程差为零, 所以两束光相位差为零。但在光纤环中, 两束光走的光程差为 $\Delta L = N \cdot 2\pi \cdot 2\delta x$, 所以两束光波间的相位差为

$$\phi = 4\pi N \beta \delta x = \frac{12H_A V \lambda N}{n}. \quad (4)$$

假设(4)式中 $\beta \approx kn$, k 表示真空中的波数, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, N 为光纤环总匝数。这种由垂直分量磁场引起的非法拉第非互易相位差仅与光纤环的总匝数成正比, 与光纤环尺寸和形状无关。利用光纤陀螺中 Sagnac 效应引起的相位差与角速度转换公式为

$$\Omega = \frac{\lambda c}{4\pi R L} \phi, \quad (5)$$

式中 R 为光纤环等效半径, L 为光纤环总长度, $L = N \cdot 2\pi R$, 将 L 及(4)式代入(5)式中, 并将角速度单位转换为 $^\circ/\text{h}$, 得到由该相位差引起的光纤陀螺零偏为

$$\Omega = \frac{3H_A V \lambda^2 c}{2n(\pi R)^2} \cdot \frac{3600 \times 180}{\pi}. \quad (6)$$

(5)式是在理想情况下推导出来的, 理论计算结果是最大值, 实际结果应在一个范围内, 介于零和最大理论值之间。对(6)式进行仿真计算, 其中 $\lambda = 1310 \text{ nm}$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m}$, $n = 1.5$, 当轴向磁场强度 $H_A=1$ Gauss, 得到 1、2 号光纤环由垂直分量磁场引起的陀螺零偏分别为 $0 \sim 1.153^\circ/\text{h}$ 和 $0 \sim 3.320^\circ/\text{h}$ 。

3 实验验证

3.1 光纤陀螺轴向磁敏感性实验

利用如图 3 所示的光纤陀螺光路方案测量待测光纤环的轴向磁敏感性。超辐射发光二极管(SLD)光源发出的光经耦合器后, 到达 Y 波导, 形成两束线偏振光。这两束线偏振光分别沿顺时针和逆时针经过处于轴向磁场中的光纤陀螺光纤环, 携带相位信息的两束偏振光返回到 Y 波导并发生干涉, 最后经过耦合器耦合到光电探测器(PIN)中。

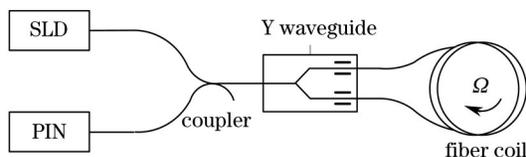


图 3 光纤陀螺光路

Fig.3 Optical path of FOG

分别对 1、2 号光纤环进行轴向磁敏感性实验, 将光纤环置于亥姆霍兹线圈中央, 调节轴向磁场 H_A 为 0、0.5、1、2、3、5、10 Gauss 时, 分别测量 FOG 输出, 实验结果如图 4 和图 5 所示。最终得 1、2 号光纤环由轴向磁场 H_A 引起的 FOG 轴向总零偏分别为 $0.340^\circ/(\text{h} \cdot \text{Gauss})$ 、 $0.865^\circ/(\text{h} \cdot \text{Gauss})$ 。

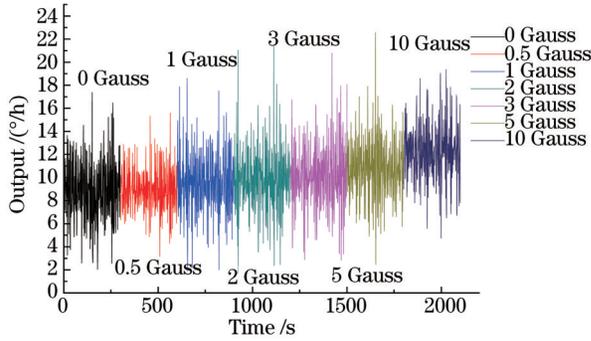


图4 1号环不同轴向磁场对FOG输出影响

Fig.4 FOG (No.1 coil) output in different axial magnetic fields

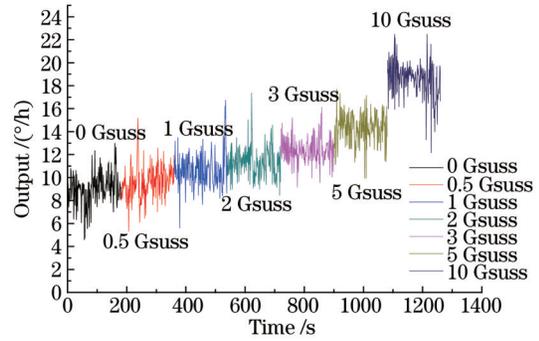


图5 2号环不同轴向磁场对FOG输出影响

Fig.5 FOG (No.2 coil) output in different axial magnetic fields

3.2 光纤陀螺垂直分量磁场磁敏感性实验

为了测量光纤环垂直分量磁场磁敏感性,本文提出了一种新的实验方案,光路部分如图6所示。

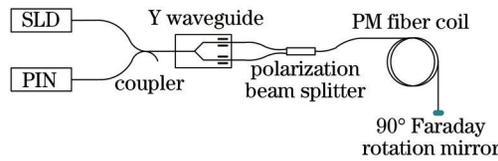


图6 垂直分量磁敏感性实验方案

Fig.6 Experimental scheme of orthogonal component magnetic field sensitivity

光路原理:光源SLD发出的光通过耦合器,到达Y波导,形成两束线偏振光。偏振分束器使得一束线偏振光的偏振方向旋转90°后与另一束偏振光以正交模式在保偏光纤中传输。经过处于轴向磁场中的光纤环,两束正交的线偏振光之间产生相位差。经90°法拉第旋光反射镜反射后,两束线偏振光的偏振模式互换(沿保偏光纤X轴传输的光变成沿Y轴传输,沿Y轴传输的光变成沿X轴传输)。再次经过光纤环后,相位差加倍。两束正交模式的线偏光反向经过偏振分束器后,分成两束平行模式传输的线偏光,到达Y波导处发生干涉,最后经过耦合器耦合到探测器中。由于 $H_{A//}$ 对正、反向传输的光产生的法拉第相位差相同,而 $H_{A\perp}$ 对异向传输的光产生的模式场偏移不同。并且在光路传输中,两束偏振光先后都经过了保偏光纤的X轴和Y轴。所以该实验方案检测到的非互易相位差只是由垂直分量磁场产生的,不含光纤随机扭转和几何扭转对陀螺的影响。该光路具有良好的互易性,能有效地抑制外界干扰。

将1、2号光纤环分别用图6所示方案进行实验,测量在不同轴向磁场作用下陀螺的输出,实验结果如图7和图8所示。最终得1、2号光纤环由垂直分量磁场引起的陀螺零偏分别为 $0.436^\circ/(\text{h}\cdot\text{Gauss})$ 、 $0.875^\circ/(\text{h}\cdot\text{Gauss})$ 。

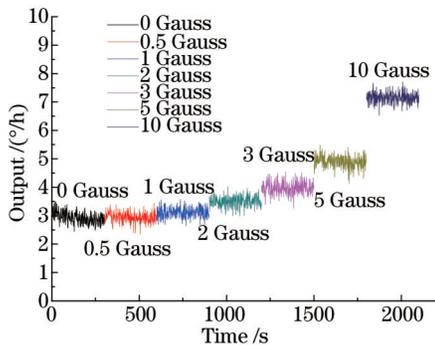


图7 1号环不同垂直分量磁场对FOG输出的影响

Fig.7 FOG (No.1 coil) output in different vertical component magnetic fields

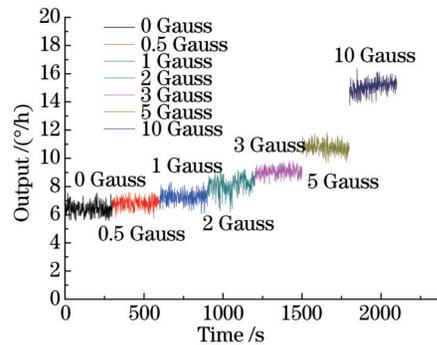


图8 2号环不同垂直分量磁场对FOG输出的影响

Fig.8 FOG (No.2 coil) output in different vertical component magnetic fields

不同光纤环的仿真结果和实验结果如表1所示。

从表1可以看出,FOG轴向磁敏感性主要来源于 $H_{A\perp}$ 磁场引起的非互易性和与 $H_{A//}$ 磁场有关的光纤几何扭转引起的法拉第非互易性,而由 $H_{A\perp}$ 引起的陀螺垂直分量零偏比轴向磁场 H_A 引起的总零偏要大,证明 $H_{A\perp}$ 磁场

是 FOG 轴向磁敏感性的主要原因。垂直分量零偏的实验结果在仿真结果范围之内,符合理论分析。而垂直分量零偏与光纤几何扭转引起的零偏之和比轴向总零偏大,原因是无法确定实际光纤环的光纤旋向,所以实际的几何扭转引起的零偏可能为负值。实验结果显示光纤环骨架半径较小的 FOG 受到轴向磁场的影响更大。

表 1 不同光纤环的仿真和实验结果

Table 1 Simulation and experimental results of different optical fiber coils

Fiber No.	Skeleton radius/m	Experimental result $[/math>/(h·Gauss)]$		Simulation result $[/math>/(h·Gauss)]$	
		Total zero offset	Vertical zero offset	Geometry zero offset	Vertical zero offset
1	0.0280	0.340	0.436	0.0267	0~1.153
2	0.0165	0.865	0.875	0.2066	0~3.320

4 结 论

从三个方面研究了轴向磁场对光纤陀螺的影响机理,并对理论结果进行了仿真分析和实验验证。研究结果表明光纤随机扭转引起的法拉第磁场漂移来自于光纤环相邻光纤层之间的长度差,其值很小,对于精度为 $0.1\sim 0.5^\circ/h$ 的小型陀螺可忽略。由光纤几何扭转引起的法拉第相位误差来源于几何旋光效应在光纤环中引入的圆双折射,对于小型光纤陀螺,其影响不能忽视。实验验证了垂直分量磁场引起的非法拉第非互易相位差是 FOG 轴向磁敏感性的主要原因,而且骨架半径越小的光纤环,轴向磁敏感性越大。因而,随着小型化陀螺的应用需求,采取相应措施来抑制轴向磁场误差,具有较高的工程应用价值。

参 考 文 献

- Zhang Guicai. The Principles and Technologies of Fiber-Optic Gyroscope[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008.
张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- Sheng Zhongyan, Zhou Kejiang, Ye Wei. The miniaturization techniques of fiber optic gyro(FOG)[J]. Laser & Infrared, 2000, 30(1): 53-55.
盛钟延, 周柯江, 叶 炜. 光纤陀螺(FOG)小型化技术[J]. 激光与红外, 2000, 30(1): 53-55.
- Wu Junwei, Miao Lingjuan, Xu Gang, *et al.*. Technology of miniature tri-axis FOG[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(5): 950-953.
吴军伟, 缪玲娟, 许 刚, 等. 微小型三轴光纤陀螺技术[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 950-953.
- Wang Lihui, Xu Xiaosu, Liu Xixiang, *et al.*. Investigation on modeling methods of axial magnetic field error characteristics in small fiber optic gyroscope[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012, 20(1): 84-89.
王立辉, 徐晓苏, 刘锡祥, 等. 小型化光纤陀螺的轴向磁场误差特性建模方法探讨[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(1): 84-89.
- Zhang Dengwei, Dong Dandan, Chen Kan, *et al.*. Research on the vertical magnetic drift in fiber optical gyroscope[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0105004.
张登伟, 董丹丹, 陈 侃, 等. 光纤陀螺正交磁漂移研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0105004.
- Kazuo Hotate, Kunio Tabe. Drift of an optical fiber gyroscope caused by the Faraday effect: Influence of the earth's magnetic field[J]. Appl Opt, 1986, 25(7): 1086-1092.
- Zhang Dengwei, Shu Xiaowu, Mou Xudong, *et al.*. Theoretical study on radial magnetic field in fiber-optic depolarized gyro[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2005, 18(4): 867-870.
张登伟, 舒晓武, 牟旭东, 等. 消偏光纤陀螺径向磁场问题的理论研究[J]. 传感技术学报, 2005, 18(4): 867-870.
- V N Logozinskii. Magnetically induced non-Faraday nonreciprocity in a fiber-optic gyroscope[J]. Journal of Communications Technology and Electronics, 2006, 51(7): 836-840.
- Dengwei Zhang, Yuxiang Zhao, Xiaowu Shu, *et al.*. Magnetic drift in single depolarizer interferometric fiber-optic gyroscopes induced by orthogonal magnetic field[J]. Optical Engineering, 2013, 52(5): 054403.
- Jingren Qian, Weiping Huang. Coupled-mode theory for LP modes[J]. Journal of Lightwave Technology, 1986, 4(6): 619-625.
- Wang Xiaoxiao, Song Ningfang, Zhang Chunxi, *et al.*. Experimental 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试验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(10): 1116-1120.

- 12 Li Chuansheng. Investigation on Analysis and Suppression Technique for Polarization Errors of Sagnac Interferometer-Type Fiber-Optic Current Transformer[D]. Beijing: Beihang University, 2013.
李传生. Sagnac型光纤电流互感器偏振误差分析与抑制技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2013.
- 13 Xisheng Fang, Zongqi Lin. Field in single-mode helically-wound optical fibers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1985, 33(11): 1150-1154.
- 14 Wang Xiaoxiao, Qin Yi, Yu Jia, *et al.*. Study on geometrical axial magnetic field sensitivity in PM optical fiber coil of fiber optic gyroscope[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 120601.
王夏霄, 秦 祎, 于 佳, 等. 光纤陀螺保偏光纤环几何轴向磁敏感性理论研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 120601.

栏目编辑: 史 敏