

抑制光纤陀螺径向磁敏感性研究

刘 军 肖 程* 潘 欣 殷建玲 鲁 军

军械工程学院电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003

摘要 研究了与光纤线圈平面平行的径向磁场作用下光纤陀螺的磁敏感性,分析了径向磁敏感性的主要机理是光纤扭转。基于此提出了利用补偿光纤环来抑制陀螺的径向磁敏感性的方法,通过控制补偿光纤的扭转分布特性,产生一个可控的补偿相位来抵消原有光纤环的径向磁敏感性误差。建立了补偿相位、径向磁敏感度与光纤扭转分布特性关系的数学模型,并对该模型进行了数据模拟和实验验证。通过定义补偿效能评估了径向磁敏感性的抑制效果,实验结果可以看出,径向磁敏感性补偿效能达到了63.76%,综合磁敏感性补偿效能达到了42.83%,表明该方法可以在一定程度上抑制光纤陀螺的径向磁敏感性。

关键词 光纤光学; 光纤陀螺; 光纤扭转; 径向磁敏感性; 补偿效能

中图分类号 O441.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0305005

Research on Inhibiting Radial Magnetic Sensitivity of Fiber-Optic Gyroscope

Liu Jun Xiao Cheng Pan Xin Yin Jianling Lu Jun

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

Abstract The magnetic sensitivity of fiber-optic gyroscope (FOG) in radial magnetic field, which is parallel to optical fiber coil plane, is studied. The optical fiber twist, which is the main mechanism of the radial magnetic sensitivity, is analysed. Based on this mechanism, the use of compensation fiber ring to inhibit FOG radial magnetic sensitivity is proposed. By controlling the twist characteristics of the compensation optical fiber, a controllable phase is introduced to offset the radial magnetic sensitivity error of the original optical fiber ring. The model of the relationship between the compensation phase, radial magnetic sensitivity axis associated and the twist characteristics of optical fiber is established. The data simulation and experiment are carried out. By defining the compensation efficiency, inhibition effect of the radial magnetic sensitivity is evaluated. In experimental results, radial magnetic sensitivity compensation efficiency is 63.76%, and the synthesized magnetic sensitivity compensation efficiency is 42.83%. To a certain extent, this method can inhibit the radial magnetic sensitivity of FOG.

Key words fiber optics; fiber-optic gyroscope; optical fiber twist; radial magnetic sensitivity; compensation efficiency

OCIS codes 060.2800; 160.3820; 230.2240; 220.4840

1 引 言

光纤陀螺法拉第效应是光纤陀螺(FOG)的主要非互易误差源之一,光纤线圈是磁敏感性误差的主要来源^[1]。根据磁场影响光纤陀螺机理的不同,空间任意磁场可以分解为与光纤环平面平行的径向磁场和与光纤环平面垂直的轴向磁场^[2]。法拉第效应是产生光纤陀螺径向磁敏感性的主要原因^[3]。对于消偏陀螺来说,径向磁敏感性是由单模光纤的残余双折射和光纤拉制、光纤环绕制过程中光纤存在扭转带来的圆双折射以

收稿日期: 2014-09-09; 收到修改稿日期: 2014-10-28

基金项目: 国家863计划

作者简介: 刘 军(1962—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光纤陀螺及惯导技术等方面的研究。E-mail: liujun@126.com

* 通信联系人。E-mail: xc_nanking@163.com

及法拉第效应带来的非互易的圆双折射造成的^[4-5];而对于保偏光纤陀螺,径向磁敏感性是由于光纤环绕过程中保偏光纤的扭转量分布周期等于光纤环一匝的部分,在法拉第效应的作用下产生了非互易相位差^[6]。另外,非法拉第效应——磁场模式偏移效应是产生光纤陀螺轴向磁敏感性的主要原因^[7]。光纤环绕制中的弯曲会对光纤陀螺的轴向磁敏感性产生影响^[2],同时也会影响陀螺的标度因数稳定性和随机游走系数的值^[8]。直流和交流磁场都会对光纤陀螺产生法拉第非互易相位差^[9]。另外,法拉第非互易相位差可用于光纤电流互感器^[10],也可用于测试数字闭环光纤陀螺的动态特性^[11]。Hotate等^[12]在验证磁场环境下光纤扭转导致的光纤陀螺磁敏感性误差时,采用了控制外加光纤环扭转分布的方法。本文利用这一方法,引出了“补偿光纤环”的概念。针对光纤陀螺径向磁敏感误差的根源——光纤扭转效应,提出“光纤扭转补偿”控制技术,抑制保偏光纤陀螺径向磁敏感性误差。给出了光纤扭转补偿的模型,包括补偿量、径向磁敏感轴与光纤扭转分布特性的关系,并对理论结果进行了实验验证。

2 抑制径向磁敏感性模型

“光纤扭转补偿”利用光纤环成环过程中产生磁敏感性的扭转成因,引入一个补偿光纤环,通过控制补偿光纤的扭转率分布,产生一个方向确定、量值可控的补偿相位 ϕ_c ,以抵消原有光纤环的磁敏感性误差 ϕ ,即 $\phi_c + \phi = 0$ 。

光纤陀螺的径向磁敏感性误差 ϕ 可以表示为^[13]

$$\phi = \int_0^L \frac{4\tau(z)\zeta(z)}{\Delta\beta} dz, \quad (1)$$

式中 $\Delta\beta$ 为单位长度光纤的双折射, τ 为光纤扭转率, ζ 为法拉第旋转。 $\zeta(z) = \zeta_0 \cdot \sin\left(\frac{z}{r} - \theta_0\right)$, $\zeta_0 = VB$, ζ_0 为单位长度光纤上法拉第磁光旋转, V 为费尔德常数, B_{\perp} 为光纤 z 处光传播方向切向的磁场强度, $B_{\perp} = B \sin\left(\frac{z}{r} - \theta_0\right)$, r 是光纤环半径,如图 1 所示。

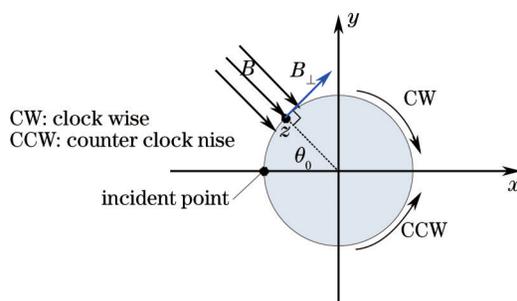


图 1 与光纤环平面 x 轴呈 θ_0 角的径向磁场

Fig.1 Radial magnetic field with angle θ_0 to the x axis of the fiber coil plane

当径向磁场方向一定时,如果光纤扭转率沿光纤长度变化周期等于光纤环的一匝,即周期为 2π 时,会有一个最大的法拉第漂移^[6]。为了利用较短光纤起到补偿作用,补偿光纤扭转周期应为 2π 。这里推导了补偿光纤扭转特性为方波分布产生的补偿量,设扭转分布为

$$\tau(z) = \begin{cases} C_1, & 2(n-1)\pi r < z < \alpha r + 2(n-1)\pi r, \alpha r + (2n-1)\pi r < z < 2n\pi r \\ C_2, & \alpha r + 2(n-1)\pi r < z < \alpha r + (2n-1)\pi r \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $n=1,2,\dots,r$ 表示补偿光纤环的半径, z 表示补偿光纤长度, $\alpha \in [0, \pi]$ 。在补偿光纤环上沿着补偿光纤长度方向 z 从扭转起始点开始,扭转率呈(2)式描述的波形分布。

将(2)式代入(1)式得

$$\begin{aligned} \phi = & \int_0^{\frac{\alpha l}{\pi}} \frac{4\zeta C_1}{\Delta\beta} dz + \int_{\frac{\alpha l}{\pi}}^{\frac{\alpha l}{\pi} + l} \frac{4\zeta \times C_2}{\Delta\beta} dz + \int_{\frac{\alpha l}{\pi} + l}^{2l} \frac{4\zeta C_1}{\Delta\beta} dz + \dots + \int_{(2n-1)l + \frac{\alpha l}{\pi}}^{2nl} \frac{4\zeta C_1}{\Delta\beta} dz = \frac{4\zeta_0(C_2 - C_1)r}{\Delta\beta} \sum_{i=1}^n \cos\left(\frac{2i-1}{r}l - \theta_0 - \alpha\right) + \\ & \frac{4\zeta_0 C_1 r}{\Delta\beta} \sum_{i=1}^n \cos\left(\frac{2(i-1)}{r}l - \theta_0 - \alpha\right) - \frac{4\zeta_0 C_2 r}{\Delta\beta} \sum_{i=1}^n \cos\left(\frac{2i}{r}l - \theta_0 - \alpha\right), \end{aligned} \quad (3)$$

当 $l = \pi r$,

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{4\zeta_0(C_2 - C_1)r}{\Delta\beta} \sum_{i=1}^n \cos[(2i-1)\pi - \theta_0 - \alpha] + \frac{4\zeta_0 C_1 r}{\Delta\beta} \sum_{i=1}^n \cos[2(i-1)\pi - \theta_0 - \alpha] - \frac{4\zeta_0 C_2 r}{\Delta\beta} \sum_{i=1}^n \cos(2i\pi - \theta_0 - \alpha) = \\ &= \frac{8n\zeta_0 r \cos(\theta_0 + \alpha)}{\Delta\beta} (C_1 - C_2) = \frac{4\zeta_0 L \cos(\theta_0 + \alpha)}{\pi \Delta\beta} (C_1 - C_2). \end{aligned} \quad (4)$$

分析(4)式可得:1) 补偿量与补偿光纤长度 L 、单位长度光纤上法拉第磁光旋转 ζ_0 成正比,与单位长度光纤的双折射 $\Delta\beta$ 成反比;2) 只要 $C_1 - C_2$ 差值一定,补偿量就相同,即补偿量与补偿光纤扭转分布函数的偏置无关;3) 当补偿光纤环半径和补偿光纤长度一定,影响补偿量大小的是 $\cos(\theta_0 + \alpha)$,即径向磁场与建模时设定的光纤环平面 x 轴方向夹角 θ_0 和扭转分布项中的 α ,当 $\theta_0 + \alpha = 2k\pi$, $k = 0, 1, 2, \dots$ 时补偿量最大,说明此时径向磁场方向与补偿环的径向磁敏感轴方向平行,且磁敏感轴与 x 轴方向夹角为 θ_0' ,此时有 $\theta_0' = -\alpha + 2k\pi$, $k = 0, 1, 2, \dots$,如图2所示。

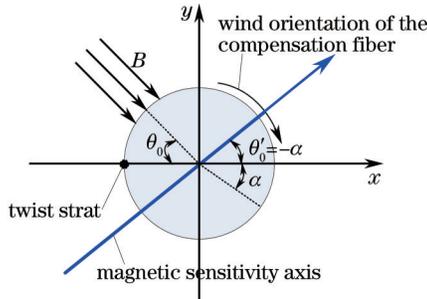


图2 补偿光纤环磁敏感轴

Fig.2 Magnetic sensitivity axis of the compensation fiber ring

3 数据模拟

由于费尔德常数 V 与陀螺光源波长 λ^{-2} 成正比^[14],对于保偏光纤而言,当 $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$ 时, $V = 2 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$,可以导出

$$V = \frac{1.445 \times 10^3}{\lambda^2}. \quad (5)$$

针对光纤陀螺光源波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, V 取值为 $0.0006 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{mT}^{-1}$ 。

对建立的模型进行数据模拟,设 $B=1 \text{ mT}$, $C_1=20 \text{ rad/m}$, $C_2=0 \text{ rad/m}$,补偿光纤环半径 $r=0.05 \text{ m}$,光纤双折射 $\Delta\beta=2000 \text{ rad/m}$,磁场相对光纤环基准轴角度 $\theta_0 = \pi/6 \text{ rad}$, $\alpha = 0$ 。

补偿光纤产生的相位补偿量与补偿光纤的长度呈线性关系,这样易于补偿量的控制,如图3所示。当径向磁场与建模时设定的光纤环平面 x 轴方向夹角为 0° 时,产生的磁敏感性误差最大,如图4所示,即补偿光

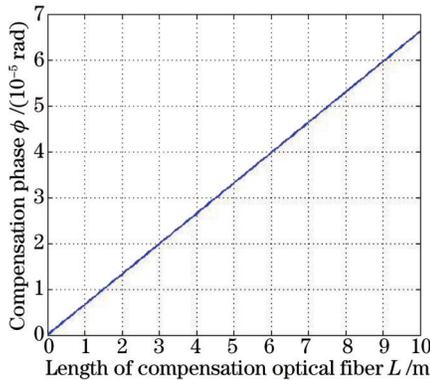


图3 补偿相位差与光纤长度关系

Fig.3 Relation between the compensation phase and the fiber length

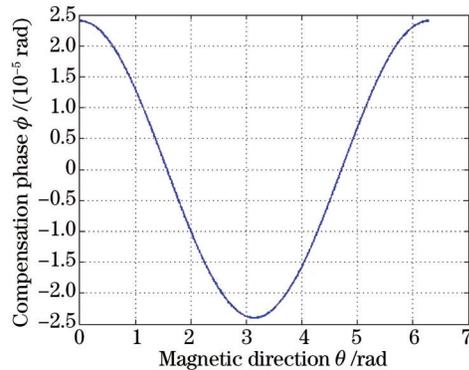


图4 补偿相位差与径向磁场方向关系

Fig.4 Relation between the compensation phase and the radial magnetic direction

纤环的磁敏感轴方向是过扭转起始点所在的直径方向,如图5所示。

根据模拟数据可得:1)“光纤扭转补偿法”对陀螺径向磁敏感性具有确定的抑制作用,能达到的零偏变化补偿量级为 $10^0\sim 10^1(^{\circ})/h$,抑制效果与光纤扭转分布特性密切相关;2)当光纤扭转量分布周期性与光纤环绕制周期相同时,补偿光纤产生的误差补偿量与光纤长度呈线性关系,有利于控制补偿;3)补偿光纤环的径向磁敏感轴方向与光纤扭转分布、扭转起始点有关。

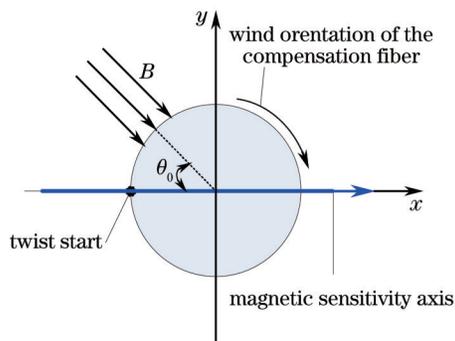


图5 $\alpha=0$ 时补偿光纤环磁敏感轴

Fig.5 Magnetic sensitivity axis of compensation fiber ring at $\alpha=0$

4 实验验证

为了验证光纤扭转方法对陀螺径向磁场磁敏感性误差抑制的可行性及有效性,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,按两两正交方式组合而成,形成三个独立正交的磁场,依据磁场矢量叠加原理,构成空间任意方向的磁场,三维线圈中心有一个大小为 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$,均匀性为1%的匀强磁场区域,如图6所示。

4.1 实验方案

光纤陀螺实验系统选用保偏光纤陀螺技术方案,如图7所示,C1为原光纤环,C2红色光纤环为补偿光纤环,超发光二极管为宽谱光源,PIN作为光电探测器,多功能Y波导作为集成光路(IOC)。

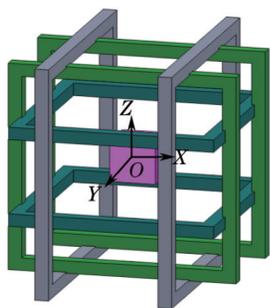


图6 三维亥姆霍兹线圈图

Fig.6 Three dimensional Helmholtz coil

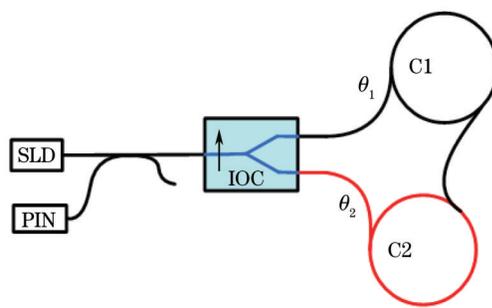


图7 光纤陀螺实验系统

Fig.7 Experiment system of FOG

补偿效能定义为

$$\eta = \frac{|K - K'|}{|K|} \times 100\% , \quad (6)$$

式中 K 为补偿前陀螺磁敏感度, K' 为补偿后陀螺磁敏感度。光纤陀螺磁敏感性误差系数(即陀螺综合磁敏感度)定义为

$$K_m = \sqrt{K_x^2 + K_y^2 + K_z^2} , \quad (7)$$

式中 K_x 是磁敏感度 x 轴分量, K_y 是 y 轴分量, K_z 是 z 轴分量。

磁敏感轴与 x 轴夹角为

$$\theta_x = \arccos \theta \left(\frac{K_x}{K_m} \right) . \quad (8)$$

磁敏感轴与 y 轴夹角为

$$\theta_y = \arccos \theta \left(\frac{K_y}{K_m} \right). \quad (9)$$

磁敏感轴与 z 轴夹角

$$\theta_z = \arccos \theta \left(\frac{K_z}{K_m} \right). \quad (10)$$

实验步骤如下:

- 1) 在无补偿环条件下,将光纤环置于磁场环境中,并在光纤环平面上标注 x, y 坐标轴方向;
- 2) 分别在 x, y, z 方向施加不同强度的磁场,采集陀螺系统的零偏输出值;
- 3) 利用(7)~(10)式,确定光纤陀螺磁敏感度系数 K 及磁敏感轴方向角 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$,从而确定原光纤环 C_1 径向磁敏感轴的方向 k_1 ;
- 4) 在没有磁场的情况下,采集陀螺零偏值 m_1 ;通过三维磁场产生径向磁敏感轴方向,大小为 1 mT 的磁场,采集陀螺的零偏输出值 m_2 ,得到陀螺零偏变化值 $\Delta m = m_2 - m_1$;
- 5) 根据零偏变化值 Δm 得到相位补偿量值,由(4)式计算得光纤扭转量分布值 C ;
- 6) 根据扭转分布值绕制补偿光纤环,标注出补偿环的理论径向磁敏感轴方向 k_2 ;将补偿环熔接入光路中,使 k_1 和 k_2 相反,在原光纤环径向磁敏感轴反方向上进行补偿;
- 7) 再次分别在 x, y, z 方向施加不同强度的磁场,采集陀螺系统的零偏输出值,观察零偏值的变化;
- 8) 结合实验数据,评估补偿效能 η 。

4.2 实验结果分析

在测试无补偿环条件下,分别在 x, y, z 方向施加 $\pm 0.1, \pm 0.5, \pm 1$ mT 不同强度的磁场,陀螺系统的零偏输出结果如图 8 所示。

实验数据具体如下:磁敏感度系数 $K_m = 0.941$;磁敏感度 x 轴分量 $K_x = 0.7997$,与磁敏感轴夹角 $\theta_x = 31.971^\circ$;磁敏感度 y 轴分量 $K_y = -0.2307$,与磁敏感轴夹角 $\theta_y = 104.194^\circ$;径向磁敏感度 $K_{xy} = \sqrt{K_x^2 + K_y^2} = 0.8323$ 。磁敏感度 z 轴分量,即轴向磁敏感度 $K_z = -0.4387$,与磁敏感轴夹角 $\theta_z = 117.793^\circ$ 。

由 K_x, K_y 值可得无补偿光纤环时陀螺的径向磁敏感轴方向,如图 9 所示。

分析图 9 数据可得:1) 光纤陀螺的法拉第效应导致光在光纤中传输时,产生附加相位引起的非互易性误差,从而影响光纤陀螺的零偏值;2) 磁场引起的光纤陀螺零偏变化与磁场大小呈线性关系;3) 光纤陀螺的磁敏感特性,可以由任意三个正交量的磁敏感特性来表示;4) 光纤陀螺的法拉第效应存在一个确定方向的磁敏感轴,不同光纤陀螺磁敏感轴方向具有随机性。

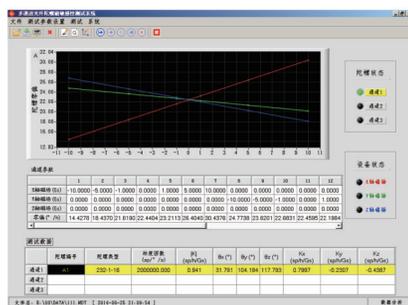


图 8 无补偿环时陀螺零偏

Fig.8 Bias of the FOG without compensation fiber ring

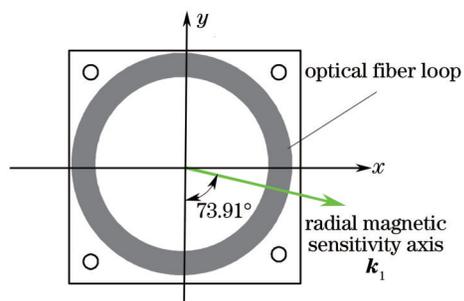


图 9 补偿前径向磁敏感轴

Fig.9 Radial magnetic sensitivity axis before compensation

无磁场的情况下,测得无补偿环时陀螺零偏值为 22.738 ($^\circ$)/h;施加径向磁敏感轴方向,大小为 1 mT 的磁场,测得陀螺的零偏值为 32.015 ($^\circ$)/h,得到陀螺零偏变化值 $\Delta m = 9.277$ ($^\circ$)/h,对应的磁敏感性相位误差 $\phi = 4.6385 \times 10^{-5}$ rad;设定所用补偿光纤长度为 5 m,由(4)式计算得光纤扭转量分布值 $C_1 = 24.287$ rad/m, $C_2 = 0$ 。按照计算值绕制补偿光纤环,从扭转起始点开始,每匝光纤前半长度扭转率为 C_1 ,另一半长度扭

转速为 C_2 , 依次如此保持周期性地扭转分布变化。将绕制完毕的补偿光纤环熔接入陀螺光路, 如图 7 所示。调整补偿环的理论径向磁敏感轴方向 k_2 与 k_1 相反, 如图 10 所示。

在有补偿环条件下, 分别在 x 、 y 、 z 方向施加不同强度的磁场, 陀螺系统的零偏输出结果如图 11 所示。

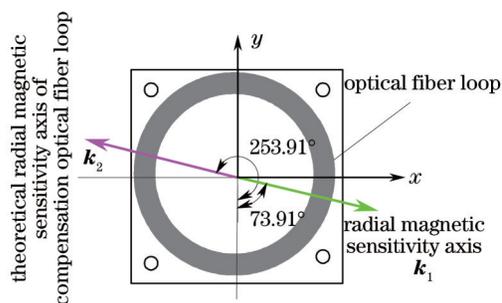


图 10 补偿环径向磁敏感轴

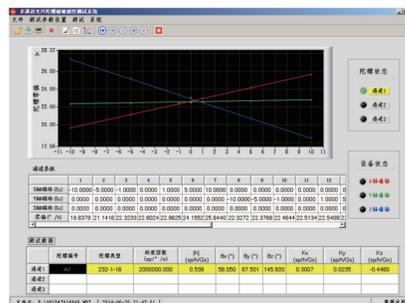


图 11 有补偿环时陀螺零偏

Fig.10 Radial magnetic sensitivity axis of compensation fiber ring

Fig.11 Bias of FOG with compensation fiber ring

实验数据具体如下: 陀螺磁敏感度系数 $K_m=0.538$; 磁敏感度 x 轴分量 $K_x=0.3007$, 与磁敏感轴夹角 $\theta_x=56.05^\circ$; 磁敏感度 y 轴分量 $K_y=0.0235$, 与磁敏感轴夹角 $\theta_y=87.501^\circ$; 径向磁敏感度 $K_r=0.3016$; 磁敏感度 z 轴分量, 即轴向磁敏感度 $K_z=-0.4460$, 与磁敏感轴夹角 $\theta_z=145.933^\circ$ 。

与图 8 中数据对比, 有

- 1) 陀螺径向磁敏感度 K_r 减小幅度较大, 即陀螺的径向磁敏感性降低了, 径向磁敏感性误差补偿效能为 $\eta_{xy} = 63.76\%$;
- 2) 陀螺磁敏感度系数 K_m 减小了, 即陀螺的综合磁敏感性降低了, 综合磁敏感性误差补偿效能 $\eta_m = 42.83\%$;
- 3) 由补偿前、后陀螺径向磁敏感轴可以推导出补偿环的实际径向磁敏感轴, 与理论磁敏感轴相比偏转了 10.89° , 如图 12 所示;
- 4) 补偿后陀螺的径向磁敏感轴发生了变化, 逆时针偏转了 $\theta=20.56^\circ$, 这是由于补偿光纤环的实际磁敏感轴与补偿前的陀螺径向磁敏感轴不平行, 矢量合成后导致陀螺的磁敏感轴发生了一定的偏转, 如图 12 所示。

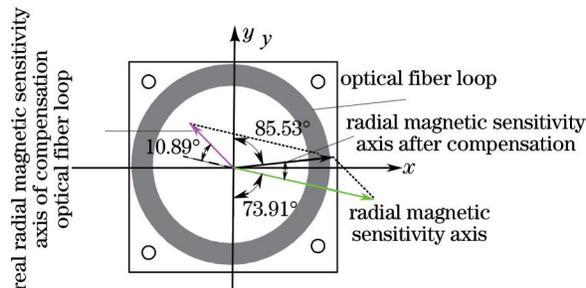


图 12 补偿后径向磁敏感轴

Fig.12 Radial magnetic sensitivity axis after compensation

补偿光纤环对陀螺径向磁敏感性误差具有补偿作用, 但并没有完全消除误差, 分析其原因可总结为: 1) 补偿光纤扭转起始点不易固定, 会导致补偿光纤环的磁敏感轴发生一定变化, 这样会造成补偿方向的偏差; 2) 绕制的补偿光纤环扭转量分布及周期性也存在相应误差, 会导致补偿量达不到理论值; 3) 光纤自身结构特性参数分布的随机性因素。

由于补偿光纤环的光纤长度很短, 因此补偿光纤环的厚度基本可以忽略, 当温度发生变化时, 在补偿光纤环上不存在温度的梯度场, 即温度分布是均匀的, 不会形成热应力, 不会带来附加的零点漂移。

光纤陀螺的原光纤环绕制完成固化后, 其应力分布是固定的。在补偿实验过程中由于考虑操作的方便性, 补偿光纤绕制完成后并没有固化, 所以应力分布随时间会发生一定的变化, 导致没有完全消除径向磁敏感性误差。但是在实际应用过程中, 一旦补偿光纤环也进行固化后, 其应力分布即可确定, 不会带来附加的

零点漂移。因此该方法能够适应环境温度的变化,解决光纤应力随时间变化的问题。

5 结 论

径向磁场对光纤陀螺产生较大影响,影响主要来自于光纤扭转,在法拉第磁光效应作用下产生非互易性相位差。理论分析和实验结果都表明,径向磁敏感性产生的陀螺零偏变化与光纤线圈中光纤的扭转分布特性有关。从产生径向磁敏感性根本机理的角度出发,提出用“光纤扭转补偿环”的方法去抑制陀螺的径向磁敏感性。实验表明,利用补偿光纤环可以在一定程度上减小陀螺径向磁场灵敏度,即能够抑制陀螺径向敏感性误差,改善陀螺零偏的稳定性,对提高陀螺的精度具有意义。但是,补偿光纤环的绕制工艺方法还有待完善,特别是还需解决如何实现补偿光纤特定的扭转分布以及扭转光纤的固定问题。

另外,可以深入研究径向和轴向磁敏感性的联系,综合考虑探究能够利用光纤扭转补偿同时对两者进行补偿的机制,从而进一步提高补偿效能,降低陀螺的磁敏感性。

参 考 文 献

- 1 H Lefevre. The Fiber-Optic Gyroscope[M]. London: Artech House, 1993.
- 2 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, 4(1): 0105004.
- 3 Hu Zongfu, Jiang Runzhi, Zhou Jian. Magnetic error analyzing and suppressing on a polarization-maintaining interferometric fiber-optic gyroscope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0606003.
胡宗福,姜润知,周剑. 保偏光纤干涉型陀螺的磁场误差分析与抑制方法[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0606003.
- 4 Zhang Dengwei, Shu Xiaowu, Mou Xudong, *et al.*. Theoretical study on radial magnetic field in fiber-optic depolarized gyro[J]. Journal of Transduction Technology, 2005, 18(4): 867-870.
- 5 K Bohm, K Petermann, E Weidel. Sensitivity of a fiber-optic gyroscope to environmental magnetic fields[J]. Opt Lett, 1982, 7(4): 180-182.
- 6 K Hotate, K 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.
- 7 V N Logozinskii. Magnetically induced non-Faraday nonreciprocity in fiber-optic gyroscope[J]. Journal of Communications Technology and Electronics, 2006, 51(7): 836-840.
- 8 Wu Changxin, Yang Mingwei, Yang Yuanhong, *et al.*. Effect of fiber bend on interferometric fiber optical gyroscopes performance[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0306005.
吴长莘,杨明伟,杨远洪,等. 光纤弯曲对干涉式光纤陀螺性能的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0306005.
- 9 Tan Xi, Liu Jun, Yin Jianling, *et al.*. Magnetic sensitivity studies of fiber optic gyroscope in direct current and alternating current magnetic fields[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0905006.
谭曦,刘军,殷建玲,等. 光纤陀螺在直流及交变磁场中的磁敏感性研究[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0905006.
- 10 Li Chuansheng, Zhang Chunxi, Wang Xiaoxiao, *et al.*. Analysis and compensation of ratio temperature error for Sagnac fiber-optic current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 102-106.
李传生,张春熹,王夏霄,等. Sagnac型光纤电流互感器变比温度误差分析与补偿[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 102-106.
- 11 Wang Xiaoxiao, Zhang Meng, Li Chuansheng, *et al.*. Research on dynamic model of digital closed-loop fiber-optic gyroscope[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205002.
王夏霄,张猛,李传生,等. 数字闭环光纤陀螺动态模型研究[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205002.
- 12 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.
- 13 Wang Wei. The Technologies of Interference Fiber-Optic Gyroscope[M]. Beijing: Chinese Astronavigation Press, 2010. 176-178.
王巍. 干涉型光纤陀螺仪技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010. 176-178.
- 14 Zhang Guicai. The Principles and Technologies of Interference Fiber-Optic Gyroscope[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. 138-139.
张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 138-139.

栏目编辑: 王晓琰