

保偏光纤陀螺横向磁场误差的温度依赖性

李绪友, 刘攀*, 光星星, 郭衍达, 孟庆文, 李光春

哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 针对无骨架光纤环的保偏光纤陀螺中横向磁场误差的温度依赖性研究发现,保偏光纤线双折射以及 Verdet 常数固有的温度依赖性可以导致横向磁场误差随着温度变化而变化。利用琼斯矩阵方法推导了保偏光纤陀螺横向磁场误差与温度的关系,并进行了实验验证。实验结果表明,对于长度为 1 km,半径为 6 cm,光纤线双折射为 $2027 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-1}$,最大扭转率为 $0.382 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-1}$ 的无骨架光纤环,在 1 mT 横向磁场以及 $-40\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 温度场作用下,光纤陀螺的横向磁场误差由 $26.51\text{ }^\circ\cdot\text{h}^{-1}$ 增加到 $30.43\text{ }^\circ\cdot\text{h}^{-1}$ 。

关键词 光纤光学; 光纤陀螺; 琼斯矩阵; 磁场误差; 法拉第效应; 温度依赖性

中图分类号 V241.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0106006

Temperature Dependence of Transverse Magnetic Error in a Polarization Maintaining Fiber Optic Gyroscope

Li Xuyou, Liu Pan, Guang Xingxing, Guo Yanda, Meng Qingwen, Li Guangchun

College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract An investigation of the temperature dependence of transverse magnetic error in the polarization maintaining fiber optic gyroscope (PM-FOG) with non-skeleton coil is presented. It is found that the transverse magnetic error changes with the temperature, which can result from the temperature dependence of linear birefringence and Verdet constant of polarization maintaining fiber (PMF). Based on Jones matrix method, the relationship between the transverse magnetic error and temperature in PM-FOG is deduced, and the experimental verification is carried out. The experimental results show that for the non-skeleton coil with length of 1 km, radius of 6 cm, linear birefringence of $2027 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-1}$, and maximum twist rate of $0.382 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-1}$, the transverse magnetic error changes from $26.51\text{ }^\circ\cdot\text{h}^{-1}$ to $30.43\text{ }^\circ\cdot\text{h}^{-1}$, under 1 mT transverse magnetic field and the temperature range of $-40\text{ }^\circ\text{C}$ to $60\text{ }^\circ\text{C}$.

Key words fiber optics; fiber optic gyroscope; Jones matrix; magnetic field error; Faraday effect; temperature dependence

OCIS codes 060.2310; 060.2800; 060.2420; 230.2240

1 引 言

光纤陀螺(FOG)是一种基于 Sagnac 效应的角速度传感器,通过检测在光纤环中相向传输的两束光波的非互易性相移来测量角速度。由于其具有全固态设计、启动快、重量轻、动态范围大、结构灵活等特点,被广泛应用于各种军用及民用惯性导航领域^[1]。经过近四十年发展,光纤陀螺研制技术逐步成熟,目前研究工作主要集中在小型化^[2]、低成本^[3]、新型结构^[4]和高精度^[5]等方面。为研制出高

精度光纤陀螺,需要对多物理场(温度、磁场、应力等)作用下光纤陀螺的误差产生机理进行深入的研究和探索。

目前针对单一的磁、热物理场对光纤陀螺的影响已有大量报道。当磁场方向与光纤环敏感轴垂直时,保偏光纤因扭转与法拉第效应引起的圆双折射使得光波由线偏振态演变为椭圆偏振态,进而导致横向磁场误差产生^[6]。横向磁场误差与光纤的线双折射、扭转、弯曲、Verdet 常数、长度等参数相关。常见的横向磁场误差抑制方案有:在光纤环外添加磁屏

收稿日期: 2017-06-19; 收到修改稿日期: 2017-09-10

基金项目: 中国国防科技预研项目(A0420132202)、国家自然科学基金(51309059)

作者简介: 李绪友(1964—),男,博士,教授,主要从事光纤陀螺、光纤测量技术方面的研究。E-mail: lixuyou@hrbeu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: liupan003@hrbeu.edu.cn

蔽罩^[7],将常用的保偏光纤替换为光子带隙光纤^[8],添加补偿光纤环^[9],软件补偿^[10],以及光学补偿^[11-13]等。另一方面,当环境温度发生变化时,保偏光纤的折射率会发生变化。由于光纤环中的 Shupe 效应以及热应力效应,光纤陀螺会产生温度漂移^[14-17]。

在实际应用中,磁场与温度场对光纤陀螺的影响是同时存在的。研究显示,在 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,由于光纤环骨架与光纤材料的热膨胀系数不同,热应力导致保偏光纤的线双折射变化值可达到 $500\text{ rad}\cdot\text{m}^{-1}$,进而导致光纤陀螺的横向磁场误差随温度变化而变化^[18]。当磁、热物理场同时存在时,带骨架光纤陀螺的横向磁场误差存在温度依赖性。

实际上,为了减小光纤环与光纤环骨架之间的热应力,当光纤环绕制成型后可以取出骨架而制得无骨架光纤环。研究无骨架光纤环中横向磁场误差与温度的关系对提高光纤陀螺的环境适应性具有一定的理论指导意义。本文利用琼斯矩阵的方法建立

了无骨架光纤陀螺的横向磁场误差与温度的关系模型,并实验验证了该模型的合理性。研究表明,无骨架光纤陀螺的横向磁场误差会随着温度的不同而发生变化,产生这种现象的原因是保偏光纤的线双折射和 Verdet 常数固有的温度依赖性^[19-21]。

2 理论与仿真

保偏光纤陀螺系统结构如图 1 所示。该结构由宽带光源、3 dB 耦合器、多功能集成光学芯片(MIOC)、保偏光纤环、光电探测器和信号调制解调电路构成。光源出射的光经过 MIOC 中的起偏器起偏后,通过分束器分为两束相向传输的光进入光纤环。当光纤环旋转时,光纤环内沿顺时针和逆时针方向传播的两束光波之间产生一个与旋转角速率成正比的相位差,当两束光再次在分束器处会合时发生干涉。干涉后的光波通过探测器转换为电信号,并经过电路的调制解调,最终输出角速率信号。

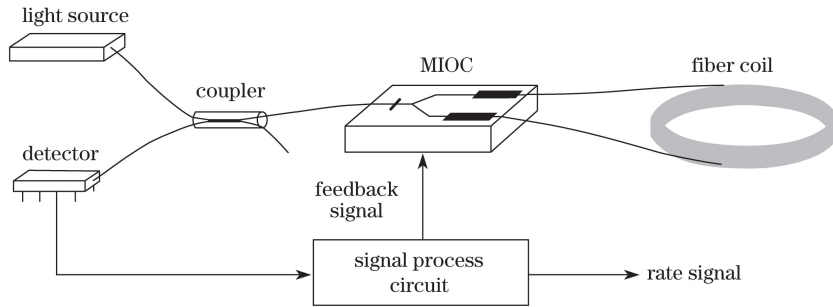


图 1 保偏光纤陀螺系统结构图

Fig. 1 Schematic configuration of polarization maintaining FOG

光纤环是光纤陀螺中产生磁场误差以及温度漂移的主要误差源。如图 2(a)所示,对于作用在光纤环上的任意磁场 B ,可以将磁场 B 分解为与光纤环角速率敏感轴垂直的横向磁场 B_T ,以及与光纤环角速率敏感轴平行的轴向磁场 B_A 。横向磁场 B_T 对光纤环的影响与光纤的位置 z 相关。如图 2(b)所示,

横向磁场 B_T 可分解为与光波传播方向垂直的分量 B_{\perp} 和与光波传播方向平行的分量 B_{\parallel} 。平行分量磁场 $B_{\parallel} = B_T \sin(z/r - \theta)$, r 为光纤环半径, θ 为横向磁场 B_T 与坐标轴 x 的夹角。平行分量磁场 B_{\parallel} 将会引起法拉第效应,而轴向磁场 B_A 和垂直分量磁场 B_{\perp} 则不会引起法拉第效应。

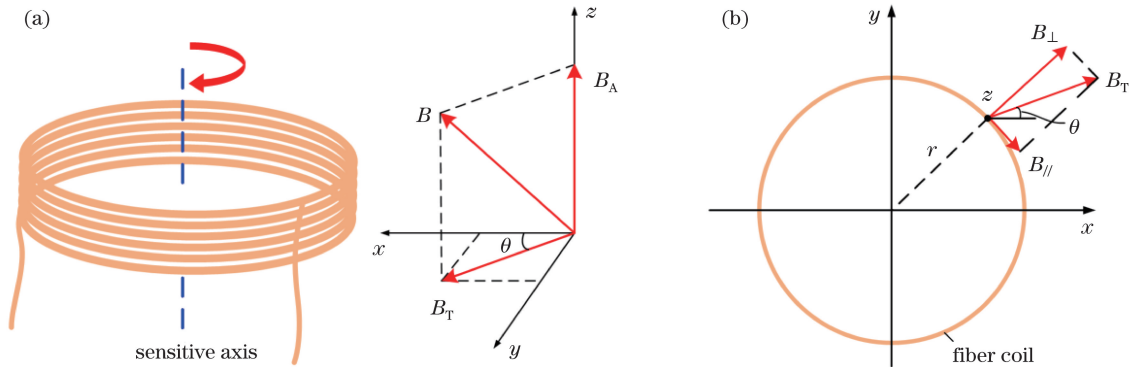


图 2 (a)空间磁场作用下的光纤环;(b)横向磁场分解

Fig. 2 (a) Fiber coil under the effect of space magnetic field; (b) decomposition of transverse magnetic field

如图 3 所示,当横向磁场作用在光纤环上时,可将长度为 L 的光纤环微分为 n 段。琼斯矩阵方法是计算光纤陀螺中零偏误差的常用方法^[22]。假设

每段长度为 dz 的微分光纤的扭转是均匀分布的,则第 i 段微分单元中顺时针光波的琼斯矩阵可表示为^[6]

$$U_+ = \begin{bmatrix} \cos \eta_+ dz - j \frac{\Delta\beta}{2\eta_+} \sin \eta_+ dz & -\frac{\xi_i + t_i}{\eta_+} \sin \eta_+ dz \\ \frac{\xi_i + t_i}{\eta_+} \sin \eta_+ dz & \cos \eta_+ dz + j \frac{\Delta\beta}{2\eta_+} \sin \eta_+ dz \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $\eta_+ = [(\Delta\beta/2)^2 + (\xi_i + t_i)^2]^{0.5}$, $\Delta\beta$ 是光纤固有的线双折射, ξ_i 和 t_i 分别是由法拉第效应以及扭转引起的圆双折射。 $\xi_i = VB_T \sin(z/r - \theta)$, V 是光纤的 Verdet 常数。

同样,第 i 段微分单元中逆时针光波的琼斯矩阵可表示为

$$U_- = \begin{bmatrix} \cos \eta_- dz - j \frac{\Delta\beta}{2\eta_-} \sin \eta_- dz & -\frac{\xi_i - t_i}{\eta_-} \sin \eta_- dz \\ \frac{\xi_i - t_i}{\eta_-} \sin \eta_- dz & \cos \eta_- dz + j \frac{\Delta\beta}{2\eta_-} \sin \eta_- dz \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\eta_- = [(\Delta\beta/2)^2 + (\xi_i - t_i)^2]^{0.5}$ 。

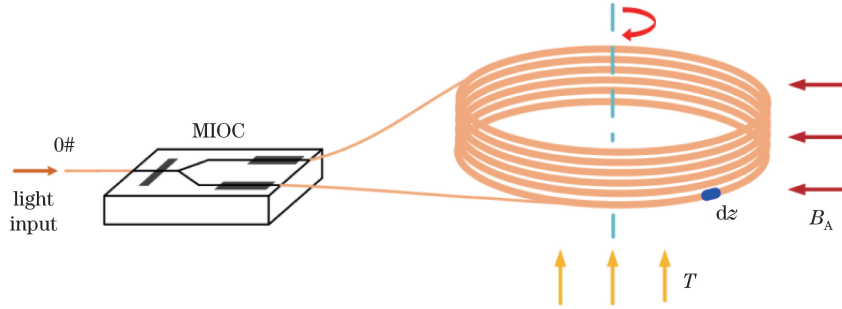


图 3 横向磁场和温度场作用下的光纤环

Fig. 3 Fiber coil under the action of transverse magnetic field and temperature field

从端口 0# 入射的光波沿着光纤环传播一圈后再从端口 0# 射出。整个光路中顺时针光波的电场分量为 E_+ , 逆时针光波的电场分量为 E_- 。将每段微分单元中的顺时针和逆时针光波分别用(1)式和(2)式表示,则 E_+ 和 E_- 可表示为

$$E_+ = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \prod_{i=1}^n U_+ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} E_0 \exp(-j\phi), \quad (3)$$

$$E_- = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \prod_{i=n}^1 U_- \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} E_0, \quad (4)$$

式中 $\phi = \phi_s + \Delta\phi(t)$, ϕ_s 表示 Sagnac 效应引起的相位差, $\Delta\phi(t)$ 是数字闭环系统的调制相位, E_0 是光纤环中光波强度。这里值得说明的是,即使起偏器具有有限的消光比,(1)式和(2)式中的反对角元素对光纤陀螺的横向磁场误差也不产生影响^[22]。因此,光电探测器的检测信号 I_{pd} , 以及顺时针和逆时针光波产生的横向磁场相位差 ϕ_F 可表示为

$$I_{pd} = 2E_0^2 (\phi + \phi_F), \quad (5)$$

$$\phi_F = \frac{4VB_T}{\Delta\beta} \int_0^L t(z) \sin\left(\frac{z}{r} - \theta\right) dz. \quad (6)$$

对应的横向磁场误差 Ω_F 可表示为

$$\Omega_F = \frac{\lambda c VB_T}{\pi r \Delta\beta L} \int_0^L t(z) \sin\left(\frac{z}{r} - \theta\right) dz, \quad (7)$$

式中 λ 是光波波长, c 是光波在真空中的传播速度 ($c = 3 \times 10^8$ m/s)。由(7)式可得,光纤陀螺的横向磁场误差与扭转、Verdet 常数、以及线双折射相关。在制作光纤和绕制光纤环过程中引入的扭转是随机的,因此不同光纤环的横向磁场误差也具有随机性。对于已成型的光纤环,扭转是一定的,因此横向磁场误差在恒定温度下与横向磁场强度呈线性关系。

当温度场作用在光纤环时,熊猫型光纤的纤芯材料性能和纤芯区所受的应力会随着温度变化,进而导致光纤双折射 Δn 随温度增加而线性减小^[23]。光纤线双折射 $\Delta\beta = 2\pi\Delta n/\lambda$, 在不同温度 T 下光纤的线双折射可表示为^[24]

$$\Delta\beta = \Delta\beta(T_0) + \frac{d\Delta\beta}{dT} (T - T_0), \quad (8)$$

式中 $\Delta\beta(T_0) = 2027$ rad·m⁻¹, $T_0 = 20$ °C, $d\Delta\beta/dT = -2.838$ rad·(m·°C)⁻¹。

此外,光纤的 Verdet 常数与温度的关系可表示为^[20]

$$V = V(T_0) + \frac{dV}{dT} (T - T_0), \quad (9)$$

式中 $V(T_0) = 6 \times 10^{-4} \text{ rad} \cdot (\text{m} \cdot \text{mT})^{-1}$, $dV/dT = 4.2 \times 10^{-8} \text{ rad} \cdot (\text{m} \cdot \text{mT} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。

光纤的线双折射和 Verdet 常数的温度依赖性如图 4 所示。在 $-40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内,线双折射变化值达到 $283.8 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$,Verdet 常数变化值达到 $4.2 \times 10^{-6} \text{ rad} \cdot (\text{m} \cdot \text{mT})^{-1}$ 。

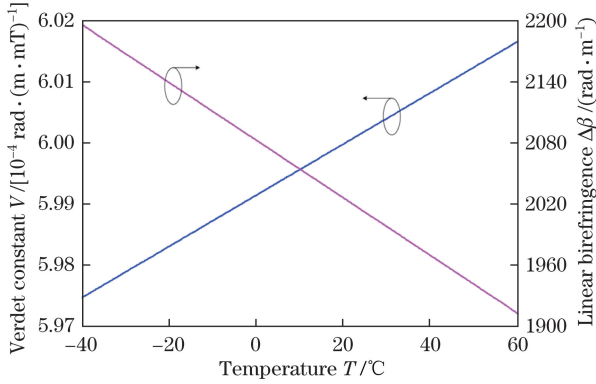


图 4 Verdet 常数与线双折射的温度依赖性

Fig. 4 Temperature dependence of Verdet constant and linear birefringence

将(8)式和(9)式代入(7)式可知,光纤陀螺的横向磁场误差也会随着温度变化,而且线双折射的温度依赖性对这种现象的产生起主导作用。利用 k 来反映横向磁场误差随温度的变化率,即

$$k = \frac{\Omega_F(T) - \Omega_F(T_0)}{T - T_0} \quad (10)$$

对于波长 λ 为 1550 nm ,长度 L 为 1000 m ,半径 r 为 0.06 m ,横向磁场与 x 轴夹角 θ 为 0° ,扭转分别为 $t_1 = 0.2 \sin(z/r)$ 、 $t_2 = 0.3 \sin(z/r)$ 、 $t_3 = 0.4 \sin(z/r)$ 的光纤环,在 1 mT 的横向磁场 B_T 作用下,横向磁

场误差与温度的关系如图 5 所示。由图 5 可知,横向磁场误差会随着光纤的扭转发生变化。此外,横向磁场误差随着温度增加而增加,且两者近似呈线性关系。对于扭转为 $0.4 \sin(z/r)$ 的无骨架光纤环,当温度由 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 上升到 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,横向磁场误差由 $27.67 (^\circ) \cdot \text{h}^{-1}$ 增加到 $32 (^\circ) \cdot \text{h}^{-1}$,对应的变化率 $k = 0.043 (^\circ) \cdot (\text{h} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。

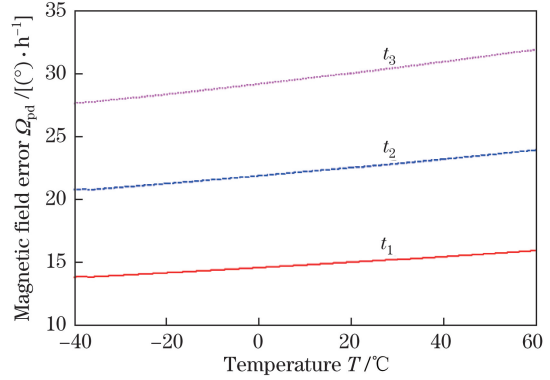


图 5 横向磁场误差与温度的关系

Fig. 5 Relationship between the transverse magnetic field error and the temperature

3 实验结果与分析

为了验证上述理论分析的合理性,依据图 1 中结构搭建了保偏光纤陀螺系统。系统采用波长为 1550 nm ,带宽为 70 nm 的放大自发辐射(ASE)光源。熊猫型保偏光纤长度为 1000 m ,包层直径为 $80 \mu\text{m}$,线双折射为 $2024 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$ 。光纤环采用四极子对称绕法绕制,并且在绕制成型后进行脱骨架处理,如图 6(a)所示。无骨架光纤环的平均半径为 6 cm ,系统采用阶梯波闭环调制。

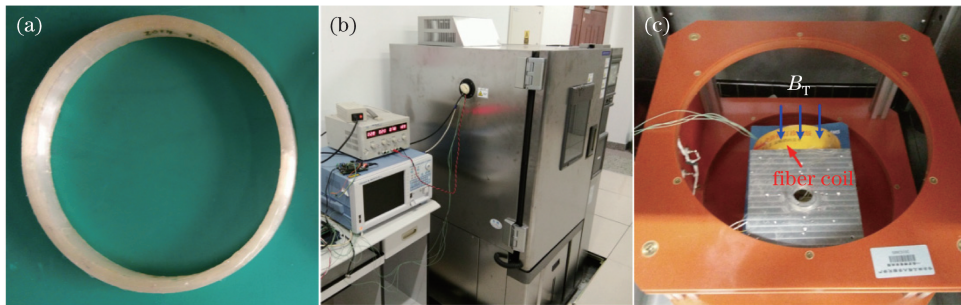


图 6 实验系统图。(a)无骨架光纤环;(b)温箱;(c) Helmholtz 线圈与光纤环

Fig. 6 Experimental system. (a) Non-skeleton coil; (b) temperature chamber; (c) Helmholtz coil and fiber coil

如图 6(b)和 6(c)所示,匀强磁场在 Helmholtz 线圈中心区域产生,光纤环被放置在该中心区域,并且光纤环的角速率敏感轴与磁场方向垂直。光纤环和 Helmholtz 线圈被放置在温箱内,温箱的设置温度如图 7 中蓝色虚线所示。设定的温变速率为

$\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$,并且分别在 $-40, -20, 0, 20, 40, 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 6 个温度点保温 3 h 。实验过程中,通过温度传感器来实时检测光纤环表面的温度值,温度传感器的输出数据如图 7 中红色实线所示。当光纤环温度稳定在设置的 6 个温度点时,通过调节 Helmholtz 线圈

中的电流改变磁场强度,并记录光纤陀螺的输出数据。

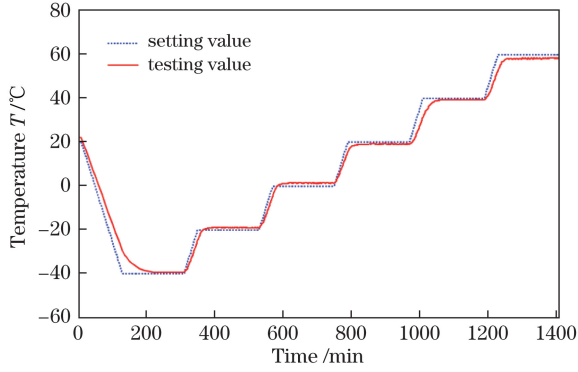


图 7 温度设定值与测量值

Fig. 7 Setting and testing temperature

为了消除 Helmholtz 线圈的温度依赖性,一个带温度补偿的磁场传感器被用来实时检测光纤环周围的磁场强度。在 1 mT 横向磁场作用下,光纤陀螺的横向磁场误差与温度的关系如图 8 所示。图 8 中红色实线代表拟合曲线,蓝色菱形点代表实验结果。由图 8 可知,当磁场强度不变时,横向磁场误差随着温度的增加而增加。温度为 20 °C 时,横向磁场误差为 $28.78 (^{\circ}) \cdot h^{-1}$ 。当温度由 $-40^{\circ}C$ 上升到 $60^{\circ}C$ 时,横向磁场误差由 $26.51 (^{\circ}) \cdot h^{-1}$ 增加到 $30.43 (^{\circ}) \cdot h^{-1}$,对应的变化率 k 为 $0.041 (^{\circ}) / (h \cdot ^{\circ}C)$ 。经过拟合可得,光纤环的最大扭转率为 $0.382 \text{ rad} \cdot m^{-1}$,实验结果与理论预测相符。

由于上述实验需要在不同温度点进行,温度变化引起的温度漂移可能会对实验结果产生影响。实验中采用四极子对称绕法制作光纤环,并且在恒定的温度点测量横向磁场误差(温度变化速率近似为 $0^{\circ}C \cdot min^{-1}$),因此 Shupe 效应引起的温度漂移可以忽略。此外,图 8 中的横向磁场误差是在光纤环的温度稳定时光纤陀螺在 1 mT 磁场强度作用下和未加磁场时的输出值之差,因此热应力

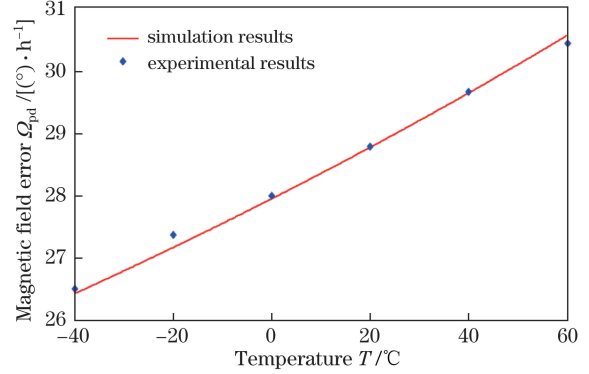


图 8 不同温度点下的横向磁场误差实验结果

Fig. 8 Experimental results of transverse magnetic field error under different temperatures

引起的温度漂移不会影响到横向磁场误差。综上所述,经过合理的实验设计,温度漂移不会影响到图 8 中的实验结果。

为了验证温度漂移对图 8 中的实验结果不会产生影响,设计了第 2 组实验。将光纤陀螺的环境温度由 $59.4^{\circ}C$ 自然降温 10 h 至 $39.7^{\circ}C$,温度传感器和光纤陀螺的输出分别如图 9(a)和 9(b)所示,图中的积分时间为 1 min。由图 9(a)可知,第 2 组实验过程中的温度变化速率在 $-0.06^{\circ}C \cdot min^{-1}$ 至 $-0.02^{\circ}C \cdot min^{-1}$ 范围内,大于第 1 组实验中测量横向磁场时的温度变化速率,因此第 2 组中的 Shupe 效应误差也会大于第 1 组实验中 Shupe 效应误差。从图 9(b)可以看出,当温度由 $59.4^{\circ}C$ 下降到 $39.7^{\circ}C$ 时,由 Shupe 效应和热应力效应引起的温度漂移小于 $0.05 (^{\circ}) \cdot h^{-1}$ 。因此可以推断,在第 1 组实验中温度由 $40^{\circ}C$ 变化到 $60^{\circ}C$ 时,光纤陀螺产生的温度漂移小于 $0.05 (^{\circ}) \cdot h^{-1}$ 。由图 8 可知,在 $40 \sim 60^{\circ}C$ 温度范围内,横向磁场误差变化值为 $0.77 (^{\circ}) \cdot h^{-1}$,因此温度漂移对横向磁场误差变化值产生的影响可以忽略。

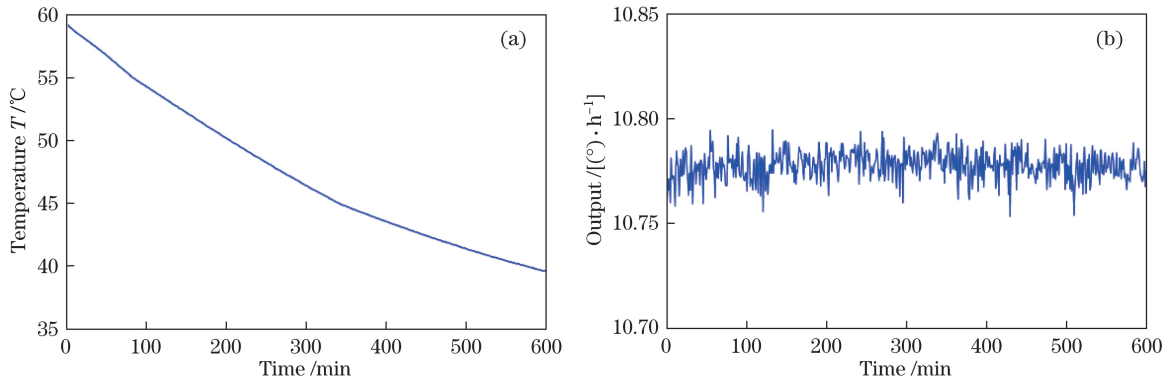


图 9 温度漂移实验结果。(a)温度输出;(b)光纤陀螺输出

Fig. 9 Experimental results of thermal-induced bias drift. (a) Temperature output; (b) output of the polarization maintaining FOG

由以上的分析可知,采用无骨架光纤环的保偏光纤陀螺的横向磁场误差存在温度依赖性。文献[18]中指出横向磁场误差的温度依赖性产生原因是光纤环与光纤环骨架之间的热应力产生的线双折射会随着温度发生变化,本次实验发现保偏光纤的线双折射和 Verdet 常数固有的温度依赖性也能导致横向磁场误差的温度依赖性。此外,与无骨架光纤环相比,带骨架光纤环的线双折射对温度变化更加敏感。

4 结 论

分析与研究了无骨架保偏光纤陀螺横向磁场误差的温度依赖性。由于保偏光纤线双折射和 Verdet 常数固有的温度依赖性,当环境温度发生变化时,光纤陀螺的横向磁场误差会随着温度变化而变化。在考虑横向磁场误差的抑制措施时,如软件补偿和添加补偿光纤环等,也需要考虑到温度对横向磁场误差的影响,避免补偿措施的失效。另外,在进行温度漂移算法补偿时,尽量减小磁场误差的影响,提高补偿效率。后期将探索一种有效的横向磁场误差抑制措施,使光纤陀螺在温度变化的情况下仍然能够高效地抑制横向磁场误差。

参 考 文 献

- [1] Zhang G C. The principles and technologies of fiber-optic gyroscope[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008: 1-4.
张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 1-4.
- [2] Wang L H, Xu X S, Liu X X, *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.
- [3] Sanders G A, Sanders S J, Strandjord L K, *et al.* Fiber optic gyroscope development at Honeywell[C]. International Society for Optics and Photonics, 2016: 985207.
- [4] Xu H J, Zhang W Y, Xu X B, *et al.* Polarization bias error model and simulation of fiber-optic gyroscope with double optical length[J]. Acta Optic Sinica, 2014, 34(10): 1006002.
徐宏杰, 张文艳, 徐小斌, 等. 双光程光纤陀螺偏振误差模型与仿真[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1006002.
- [5] Lefèvre H C. The fiber-optic gyroscope: Challenges to become the ultimate rotation-sensing technology[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(6): 828-832.
- [6] Hotate K, Tabe K. Drift of an optical fiber gyroscope caused by the Faraday effect: Influence of the earth's magnetic field[J]. Applied Optics, 1986, 25(7): 1086-1092.
- [7] Li J T, Fang J C. Magnetic shielding method and experiment study of inertial measurement unit based on high precision fiber-optic gyroscope[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(11): 2106-2116.
李金涛, 房建成. 高精度光纤 IMU 的磁屏蔽方法及实验研究[J]. 航空学报, 2011, 32(11): 2106-2116.
- [8] Wen H, Terrel M A, Kim H K, *et al.* Measurements of the birefringence and Verdet constant in an air-core fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(15): 3194-3201.
- [9] Liu J, Xiao C, Pan X, *et al.* Research on inhibiting radial magnetic sensitivity of fiber-optic gyroscope[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0305005.
刘军, 肖程, 潘欣, 等. 抑制光纤陀螺径向磁敏感性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0305005.
- [10] Zhou Y, Zhao Y, Tian H, *et al.* Theory and compensation method of axial magnetic error induced by axial magnetic field in a polarization-maintaining fiber optic gyro[J]. Optical Engineering, 2016, 55(12): 126106.
- [11] Hu Z F, Jiang R Z, Zhou J. 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.
- [12] Liu P, Li X Y, Guang X X, *et al.* Drift suppression in a dual-polarization fiber optic gyroscope caused by the Faraday effect[J]. Optics Communications, 2017, 394: 122-128.
- [13] Liu P, Li X Y, Guang X X, *et al.* Bias error caused by the Faraday effect in fiber optical gyroscope with double sensitivity[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(15): 17012677.
- [14] Song N F, Guan Y M, Jia M. Analysis of multi-parameters effect on Shupe error in fiber optic gyroscope fiber coil[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 31(5): 569-573.
宋凝芳, 关月明, 贾明. 光纤陀螺光纤环 Shupe 误差的多参数影响仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(5): 569-573.
- [15] Li J L, Xu H L, He J. Temperature compensation of

- start-up drift for fiber optic gyroscope based on wavelet network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0506005.
李家垒, 许化龙, 何靖. 基于小波网络的光纤陀螺启动漂移温度补偿[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0506005.
- [16] Liu Y Y, Yang G L, Li S Y. Application of BP-AdaBoost model in temperature compensation for fiber optic gyroscope bias[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(2): 235-239.
刘元元, 杨功流, 李思宜. BP-AdaBoost 模型在光纤陀螺零偏温度补偿中的应用[J]. *北京航空航天大学学报*, 2014, 40(2): 235-239.
- [17] Li X Y, Ling W W, Xu Z L, *et al.* Design of a new spool for fiber coil based on cross winding pattern[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0606002.
李绪友, 凌卫伟, 许振龙, 等. 基于交叉法绕制的光纤环的槽体设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0606002.
- [18] Zhang D W, Zhao Y X, Fu W L, *et al.* Nonreciprocal phase shift caused by magnetic-thermal coupling of a polarization maintaining fiber optic gyroscope[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(6): 1382-1385.
- [19] DeI R E, Zenteno L A, Starodumov A N, *et al.* All-fiber absolute temperature sensor using an unbalanced high-birefringence Sagnac loop[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(7): 481-483.
- [20] Williams P A, Rose A H, Day G W, *et al.* Temperature dependence of the Verdet constant in several diamagnetic glasses[J]. *Applied Optics*, 1991, 30(10): 1176-1178.
- [21] Zhao H, Chen M, Li G. Temperature dependence of the PER in PM-PCF coil[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(10): 100603.
- [22] Andronova I A, Malykin G B. Physical problems of fiber gyroscopy based on the Sagnac effect[J]. *Physics-Usppekhi*, 2002, 45(8): 793-817.
- [23] Xu X, Teng F, Zhang Z, *et al.* Analysis and simulation of a fiber optical gyroscope with Shupe error compensated optically[J]. *Journal of Modern Optics*, 2014, 61(11): 931-937.
- [24] Kim D H, Kang J U. Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity[J]. *Optics Express*, 2004, 12(19): 4490-4495.