

文章编号: 1002-2082 (2020) 01-0220-08

高精度光纤陀螺零位误差的磁温特性研究

周闻青¹, 费宇明², 洪桂杰², 应光耀³, 叶欣¹

(1. 浙江省计量科学研究院, 浙江 杭州 310013; 2. 浙江大学 德清先进技术与产业研究院, 浙江 德清 313200;
3. 国网浙江省电力有限公司 电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 介绍了高精度光纤陀螺零位误差的形成原理, 并就温度和磁场对高精度光纤陀螺零位误差的影响进行了详细的理论分析。仿真结果表明: 由于温度引起的零偏峰值漂移为 0.06°/h。最后, 对交变温度场和径向静磁场交联作用下的情况建立了理论模型并进行了实验研究, 实验结果表明: 在径向磁场和不同温度作用下, 光纤陀螺由于交联耦合效应产生的径向磁场灵敏度变化, 即交联耦合度 < 1%, 这和理论模型具有较高的一致性。

关键词: 光纤陀螺; 零位误差; 温度; 磁场

中图分类号: TN256

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0108001

Research on magnetic temperature characteristics of zero error on high precision fiber-optic gyro

ZHOU Wenqing¹, FEI Yuming², HONG Guijie², YING Guangyao³, YE Xin¹

(1. Zhejiang Institute of Metrology, Hangzhou 310013, China; 2. Deqing Institute of Advanced Technology and Industrialization, Zhejiang University, Deqing 313200, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The formation principle of zero error on high precision fiber-optic gyro was introduced, and the impact of temperature and magnetic field on the zero error of high precision fiber-optic gyro was analyzed in detail. The simulation results show that the zero-bias peak value drift caused by temperature is 0.06°/h. Finally, the theoretical model and experimental research were carried out under the cross-linking condition of alternating temperature field and radial static magnetic field. The experimental results show that under the action of radial magnetic field and temperature, the maximum drift value of the fiber-optic gyro generated by the cross-linking coupling effect is about 1% order of the sensitivity of the radial magnetic field, which is consistent with the theoretical model.

Key words: fiber-optic gyroscope; zero error; temperature; magnetic field

引言

光纤陀螺是一种无运动和磨损部件的新型全固态仪表, 具有成本低、寿命长、质量轻、体积小、结构简单、灵敏度高、动态范围大、精度覆盖面广、启动时间短、电磁兼容性好、无加速度敏感项及耐振动冲击等优点^[1-4]。

光纤陀螺的作用是测量绕其安装轴输入的角速度, 进而推算出载体转动的角度以及实时的姿态角。光纤陀螺用于转角测量的优势在于, 光纤

陀螺无需外部参考坐标和定位, 可以实现自助式测角, 同时无需保证输入轴和被测转轴的同轴度, 故安装对准方便。启动速度快, 可适应不同的测角环境。因此高精度的转角测量装置可以考虑运用光纤陀螺作为惯性传感器。

引起高精度测角误差的一个重要因素就是光纤陀螺的零偏指标^[5]。为了降低光纤陀螺零偏对测角系统的影响, 本文对高精度光纤陀螺零位误差的磁温特性进行了研究, 分析了温度和磁场对光纤陀螺零偏影响。

收稿日期: 2019-05-31; 修回日期: 2019-09-29

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFF0200601); 浙江省自然科学基金 (Y19F050039)

作者简介: 周闻青 (1965-), 女, 教授, 主要从事几何测量及光纤陀螺应用技术研究。Email: zhouwq13588155809@163.com

1 零值漂移概述

光纤陀螺在理想工作状态下, 没有输入时候, 光纤陀螺的输出应为零, 但实际中由于元器件和陀螺设计上的诸多原因, 光纤陀螺存在非互易性相移^[6], 它对应一定的虚假转速, 引起零位漂移, 即常值漂移。引起高精度光纤陀螺线圈漂移误差的原因有很多, 由 Shupe 提出的单纯温度非互易引起的相位误差, 由随时间变化并且相对光纤线圈中整个光纤长度中点非对称的温度场引起^[7-9]。同时, 由于温度变化必然伴随着热应力的变化, 所以与 Shupe 效应类似, 处于温度和磁场环境中的光纤线圈在随时间变化并且相对光纤线圈中整个光纤长度中点非对称的应力场的作用下, 必然存在相位误差^[10-11]。此外, 在光纤线圈中传输光存在偏振交叉耦合的情况下, 若由于热应力、弯曲等因素导致的单模光纤双折射同时存在^[12], 由于发生干涉的两束光经历的光程不同, 将在输出端产生振幅型误差。虽然单模光纤陀螺中在线圈中沿相反方向传输的两束光进出线圈处分别有一个去偏器, 但由于去偏器的非理想性, 此误差在实际中仍然存在。最后, 对于去偏陀螺而言, 去偏器的去偏能力对整个陀螺的各种性能都至关重要, 但若热应力、弯曲等因素导致单模线圈具有起偏能力, 去偏器的去偏能力将被大大削弱, 严重影响光纤陀螺的各项性能。所以单模光纤线圈在温度场和磁场环境下由弯曲等因素导致的起偏能力间接增大了光纤陀螺线圈的零位误差^[13]。

2 温度对光纤环的影响

温度对光纤陀螺影响的主要因素是光纤环, 当陀螺的环境温度变化时, 在线圈直径方向或轴向产生空间温度梯度, 热量将从光纤环的高温部分向低温部分传播, 光纤长度方向上不同点的温度变化率可能不同。由于光纤固有折射率随温度变化, 温度变化率的差异产生 Shupe 误差^[14]。产生的 Shupe 误差为

$$\Delta\varphi_e = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{dn}{dT} \int_0^L \frac{dT}{dt} (z, t) \frac{L-2z}{v} dz \quad (1)$$

式中: $\frac{dn}{dT}$ 为光纤的折射率随温度的变化率; $\frac{dT}{dt}$ 为温度随时间的变化率; T 为温度; n 为光纤的折射率; λ 为传播光的波长; L 为光纤的长度; v 为光纤中光波的速度; z 为光纤环上一点距离分束器一端的距离。

通过采用如图 1 所示的四极子对称绕制方法,

可以大幅度减小 Shupe 误差。

但当光纤环绕制成如图 1 所示的绕制方法时, 当温度变化时, 光纤环的每层光纤将产生复杂的应力, 这种应力的存在产生一附加双折射, 该附加双折射叠加在保偏光纤固有双折射上, 使得保偏光纤固有双折射产生微小改变。当存在磁场时, 磁场产生的圆双折射与叠加后的光纤中的双折射相互作用, 光在光纤中传播时, 其偏振态发生一定的偏振演化, 产生一定的漂移, 这种漂移就是热应力产生的附加双折射和固有双折射叠加在一起与磁场产生的圆双折射相互作用的结果。该漂移是温度产生的漂移与磁产生的漂移的代数和与两种物理场同时存在时产生的漂移的差值, 称为磁温交联耦合漂移。

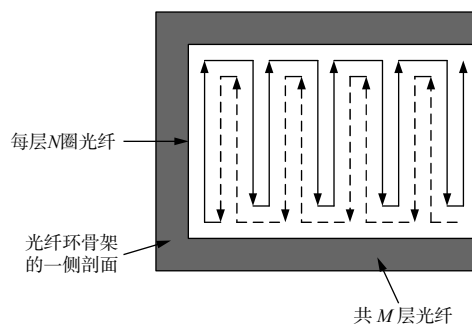


图 1 四级子对称绕法光纤环

Fig. 1 Four-stage sub-symmetric winding fiber ring

如图 2 所示的光纤环, 放置在加热块上, 加热块为热源, 光纤环一个面与热源接触。光纤环直径为 100 mm, 光纤环骨架采用铝材料加工而成, 光纤环上光纤的长度为 1 100 m, 光纤采用长飞公司 PM1550/80-18/165 型号光纤。图 3 是对光纤环进行热分析的有限元模型。图 4 是升温速率为 6 °C/h, 起始温度为 -20 °C 条件下, 经过 8 286.5 s 后光纤环上的温度分布的有限元仿真结果。图 5 是升温速率为 6 °C/h, 起始温度为 -20 °C 条件下, 经过 3 000 s 后光纤线圈上的应力分布, 图 6 是升温速率为 6 °C/h,

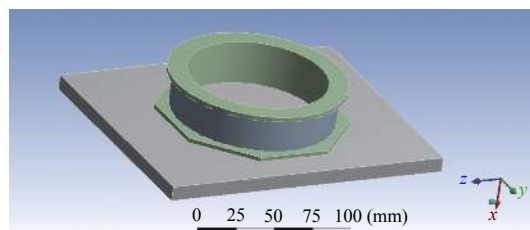


图 2 光纤环的热仿真模型

Fig. 2 Thermal simulation model of fiber ring

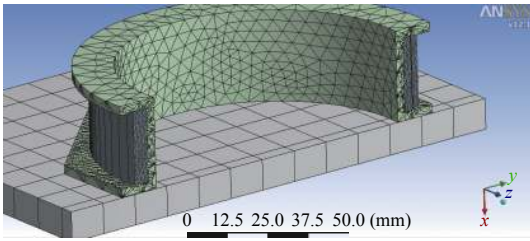


图3 光纤环的有限元划分模型

Fig. 3 Finite element division model of fiber ring

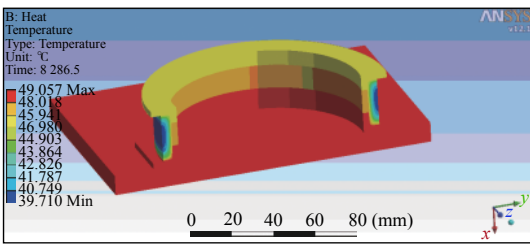


图4 加热过程某一时刻光纤环上温度的分布

Fig. 4 Distribution of temperature on fiber ring at a certain time in heating process

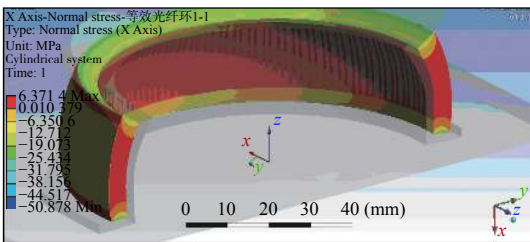


图5 加热过程某一时刻光纤线圈上的应力分布

Fig. 5 Distribution of stress on fiber coil at a certain time in heating process

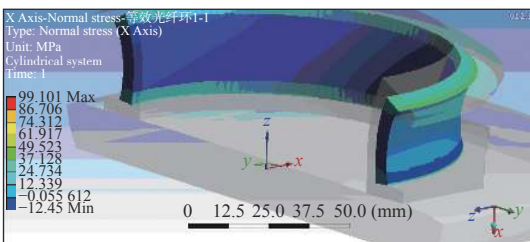


图6 加热过程某一时刻光纤线圈上的应力分布

Fig. 6 Distribution of stress on fiber coil at a certain time in heating process

起始温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,经过 $9\ 000\ \text{s}$ 后光纤线圈上的应力分布。

弹光效应是指由机械应力引起的介质折射率的变化。当物体处于振动环境中时,物体内部结构将会产生应变,如果给定某约束限制应变的产生,那么将会产生应力。对于单模光纤环,光纤纤

芯、涂覆层、包层与光纤环骨架的材料不同,具有不同的杨氏模量与泊松比,在实际应用中,单模光纤环不可避免地受到外界的约束。因此,在振动场中,单模光纤环与骨架,不同层光纤之间的相互挤压拉伸会产生机械应力,从而造成光纤折射率的变化。

光纤受到横向正交应力引起的折射率差为

$$\Delta n_{r1} = \Delta n_2 - \Delta n_1 = -\frac{n^3}{2E}(1+\nu)(p_{11} - p_{12})(P_v - P_h) \quad (2)$$

式中: E 为杨氏模量; n 为光纤纤芯的折射率; ν 为泊松比; p_{11} 、 p_{12} 为光弹张量; p_v 、 p_h 分别为光纤两个正交横方向之间的应力。

由此可计算光纤受到两个正交横方向时的线双折射:

$$\begin{aligned} \Delta\beta_{r1} &= \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \left[-\frac{n^3}{2E}(1+\nu)(p_{11} - p_{12})(P_v - P_h) \right] \\ &= -\frac{\pi n^3}{\lambda E}(1+\nu)(p_{11} - p_{12})(P_v - P_h) \quad (3) \end{aligned}$$

式中 λ 为光波长。(3)式即为光纤受到横向正交应力时产生的线双折射。该线双折射与光纤受到的横向应力差成正比。对于绕制成环的光纤,该应力差是指某一处光纤沿光纤环敏感轴方向的应力(轴向应力)与沿光纤环半径方向的应力(径向应力)之差。

根据弹光效应把以上应力分布转换成双折射分布,可以得到图7的结果,即温升速率为 $6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$,初始温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,不同时刻光纤线圈上的应力分布。将该应力分布记为 $\Delta\sigma(Z_i, t)$,其中 Z_i 是将整个光纤长度 L 分成 M 段后第 i 段上光纤的长度, $\sum_{i=1}^M Z_i = L$, t 为从 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始(即0时刻)加热经过的时间。

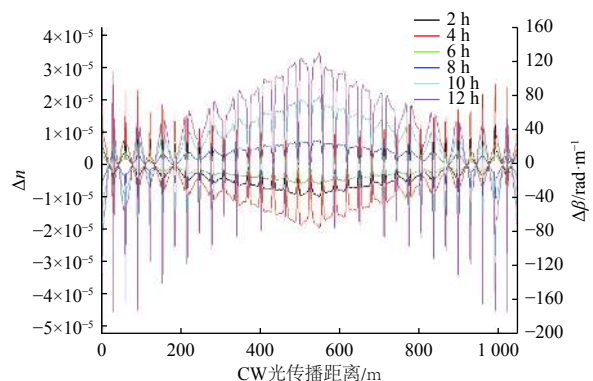


图7 光纤线圈上的双折射分布($6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 加热过程)

Fig. 7 Birefringence distribution on fiber coil ($6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ heating process)

3 光纤陀螺温度变化对零偏的影响

仿真分析了光纤陀螺敏感部件启动过程中的温度变化过程^[15], 仿真结果如图 8~11 所示。

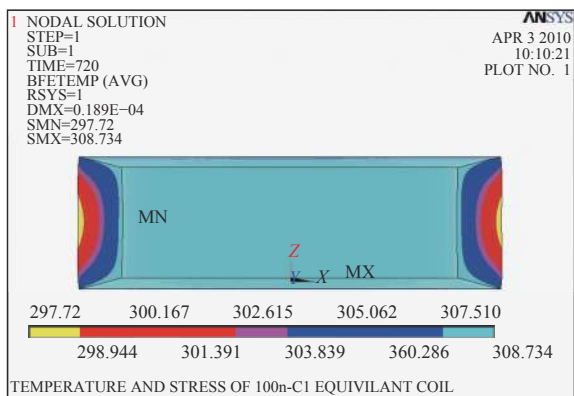


图 8 在 720 s 时刻光纤陀螺线圈截面温度场分布图

Fig. 8 Temperature field distribution on fiber optic gyro coil section at 720 s

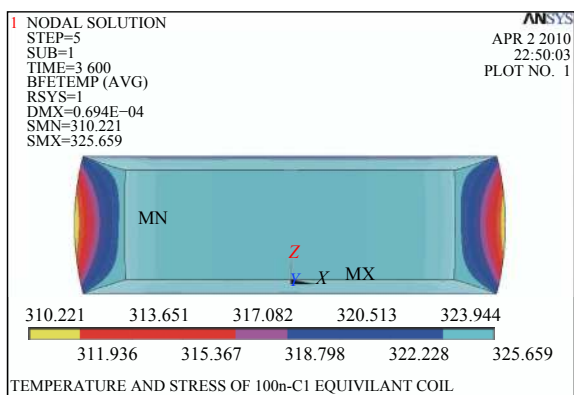


图 9 在 3600 s 时刻光纤陀螺线圈截面温度场分布图

Fig. 9 Temperature field distribution on fiber optic gyro coil section at 3600 s

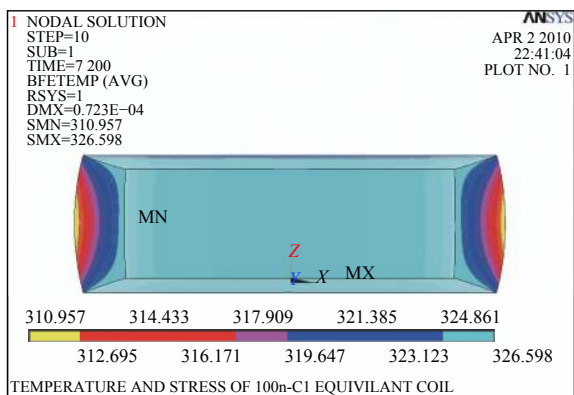


图 10 在 7200 s 时刻光纤陀螺线圈截面温度场分布图

Fig. 10 Temperature field distribution on fiber optic gyro coil section at 7200 s

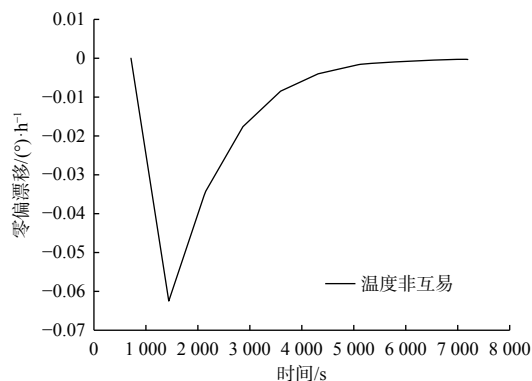


图 11 温度非互易引起光纤线圈温度漂移曲线

Fig. 11 Temperature drift curve of non-reciprocity causing fiber coil temperature

通过以上分析仿真, 可以知道, 由于温度引起的零偏峰值漂移为 $0.06^\circ/\text{h}$ 。

4 相位差分析及实验结果

去偏光纤陀螺系统示意图如图 12 所示。其中集成电光调制器等效为一个理想的起偏器。 $l_1 \sim l_4$ 是 4 段线双折射为 $\Delta\beta_{PM}$ 的保偏光纤, 组成 2 个消偏器, 熔接点 1 和熔接点 2 是两个 45° 熔接角 (实际角度为 θ_1 和 θ_2)。dz 是光纤线圈上的一段光纤微元, 光纤线圈上的光纤总长为 L , 共分为 $m = L/dz$ 段, 光纤线圈位于磁场和温度变化场中, 磁场方向 B_r 方向如虚线箭头所示, 平行于光纤线圈平面, 即垂直于光纤线圈敏感轴。

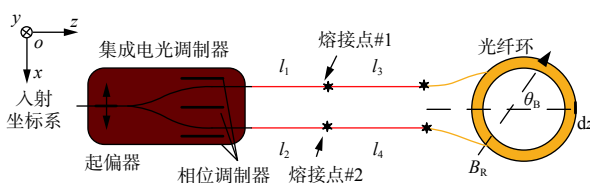


图 12 去偏光纤陀螺系统非互易光路示意图

Fig. 12 Schematic diagram of non-reciprocal optical path of depolarized optical fiber gyro system

当光纤线圈处于时变的温度场中, 变化的温度会引起光纤线圈上的折射率和双折射发生变化, 温度变化引起的折射率改变, 根据 Shupe 效应, 带来的 Shupe 误差为

$$\begin{aligned} \Delta\phi_n(T(t)) &= \sum_{i=1}^m (\bar{\beta}_{cc,i} dz) - \sum_{i=m}^1 (\bar{\beta}_{c,i} dz) \\ &= \frac{\beta_0}{c} \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^L \dot{T}(z,t) (L-2z) dz \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\partial n/\partial T$ 为折射率的温度系数; $\dot{T}(z,t)$ 为光纤线

圈上各点的温度变化率。可以看出, Shupe 误差和磁场不存在交联耦合。

温度变化同时引起光纤双折射的改变, 与光纤本身不理想及绕制光纤线圈时引入的线双折射, 扭转引起的圆双折射一样, 都影响传播光的偏振态, 但这些影响对于正反两束光是相同的, 产生较小的非互易相位差, 而磁场的存在, 改变了该互易性^[16-18], 使得已经综合的非互易性重新显露出来, 并随着温度的改变, 产生不同的非互易误差, 引起光纤陀螺产生较大的漂移^[19-21]。为了便于推导, 假设在温度 T 时温度引起的第 i 段光纤上的双折射为 $\Delta\beta_T(i, T)$, 第 i 段光纤上固有的双折射为 $\Delta\beta_I(i)$, 第

i 段光纤上光纤的扭转为 $\varphi(i)$, 综合的线双折射为 $\Delta\beta(i) = \Delta\beta_T(i, T) + \Delta\beta_I(i)$ 。

为了描述光纤中光的传播特性, 下面利用琼斯矩阵, 从光波第一次经过起偏器开始建模并进行公式推导。 $T(\Delta\beta_{PM}l) = \begin{bmatrix} \exp(-j\Delta\beta_{PM}l/2) & 0 \\ 0 & \exp(j\Delta\beta_{PM}l/2) \end{bmatrix}$ 是线双折射为 $\Delta\beta_{PM}$ 、长度为 l 的保偏光纤的琼斯矩阵。 $C(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$ 是熔接点 1 和熔接点 2 处的旋转矩阵。第 i 段光纤微元的传输矩阵为 $\exp(-j\bar{\beta}_{c,i}dz) \cdot u_{c,i}(\Delta\beta, \varphi, \xi)$, 其中 $\bar{\beta}_{c,i}$ 为光纤微元上的平均传播常数,

$$u_{c,i} = \begin{bmatrix} \cos(\eta_{c,i}dz) - j\frac{\Delta\beta(i)}{2\eta_{c,i}} \sin(\eta_{c,i}dz) & -\frac{[\varphi(i) + \zeta(i)]}{\eta_{c,i}} \sin(\eta_{c,i}dz) \\ \frac{[\varphi(i) + \zeta(i)]}{\eta_{c,i}} \sin(\eta_{c,i}dz) & \cos(\eta_{c,i}dz) + j\frac{\Delta\beta(i)}{2\eta_{c,i}} \sin(\eta_{c,i}dz) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\zeta(i) = BV \sin(\theta_B - i \times dz/r)$ 为径向磁场 B 产生的圆双折射; θ_B 是磁场正方向与水平方向的夹角; $\eta_{c,i} = \sqrt{[\Delta\beta(i)/2]^2 + [\varphi(i) + \zeta(i)]^2}$ 为光纤中总的双折射效应, 则整个光纤线圈的传输矩阵可以记为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ -B^* & A^* \end{bmatrix} = \prod_{i=m-1}^0 u_{c,i} \circ \text{因此, 顺时针光通过整个非互易光路的传输矩阵可以化简为 } U_c = \begin{bmatrix} \Gamma_c & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ 其中}$$

$$\Gamma_c = e^{\frac{-j\Delta\beta_{PM}(l_1+l_2)}{2}} \cdot e^{-j\sum_{i=m}^1(\bar{\beta}_{c,i}dz)} \cdot f_0 \cdot e^{j\phi_{cw}} \quad (6)$$

$$f_0 = abs \begin{pmatrix} A \cos\theta_1 \cos\theta_2 e^{\frac{-j\Delta\beta_{PM}(l_3+l_4)}{2}} & -B \sin\theta_1 \cos\theta_2 e^{\frac{j\Delta\beta_{PM}(l_3-l_4)}{2}} \\ -B^* \cos\theta_1 \sin\theta_2 e^{\frac{-j\Delta\beta_{PM}(l_3-l_4)}{2}} & -A^* \sin\theta_1 \sin\theta_2 e^{\frac{j\Delta\beta_{PM}(l_3+l_4)}{2}} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\phi_{cw} = angle \begin{pmatrix} A \cos\theta_1 \cos\theta_2 e^{\frac{-j\Delta\beta_{PM}(l_3+l_4)}{2}} & -B \sin\theta_1 \cos\theta_2 e^{\frac{j\Delta\beta_{PM}(l_3-l_4)}{2}} \\ -B^* \cos\theta_1 \sin\theta_2 e^{\frac{-j\Delta\beta_{PM}(l_3-l_4)}{2}} & -A^* \sin\theta_1 \sin\theta_2 e^{\frac{j\Delta\beta_{PM}(l_3+l_4)}{2}} \end{pmatrix}$$

同理, 对于逆时针光, 整个光纤线圈的传输矩阵可以记为 $\begin{bmatrix} C & D \\ -D^* & C^* \end{bmatrix} = \prod_{i=0}^{m-1} u_{cc,i}$, 逆时针光在整个非互易光路的传输矩阵可以表示为 $U_{cc} = \begin{bmatrix} \Gamma_{cc} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, 其中

$$\Gamma_{cc} = e^{\frac{-j\Delta\beta_{PM}(l_1+l_2)}{2}} \cdot e^{-j\sum_{i=1}^m(\bar{\beta}_{cc,i}dz)} \cdot f'_0 \cdot e^{j\phi_{ccw}} \quad (8)$$

$$f'_0 = abs \begin{pmatrix} C \cos\theta_1 \cos\theta_2 e^{\frac{-j\Delta\beta_{PM}(l_3+l_4)}{2}} & -D \sin\theta_2 \cos\theta_1 e^{\frac{-j\Delta\beta_{PM}(l_3-l_4)}{2}} \\ -D^* \cos\theta_2 \sin\theta_1 e^{\frac{j\Delta\beta_{PM}(l_3-l_4)}{2}} & -C^* \sin\theta_1 \sin\theta_2 e^{\frac{j\Delta\beta_{PM}(l_3+l_4)}{2}} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\phi_{ccw} = angle \begin{pmatrix} C \cos\theta_1 \cos\theta_2 e^{\frac{-j\Delta\beta_{PM}(l_3+l_4)}{2}} & -D \sin\theta_2 \cos\theta_1 e^{\frac{-j\Delta\beta_{PM}(l_3-l_4)}{2}} \\ -D^* \cos\theta_2 \sin\theta_1 e^{\frac{j\Delta\beta_{PM}(l_3-l_4)}{2}} & -C^* \sin\theta_1 \sin\theta_2 e^{\frac{j\Delta\beta_{PM}(l_3+l_4)}{2}} \end{pmatrix}$$

根据上述可以得到, 光纤陀螺的干涉输出光强可以表示为

$$I = \text{Re}[(\Gamma_c + \Gamma_{cc}) \cdot (\Gamma_c + \Gamma_{cc})^*] = f_0^2 + f_0'^2 + 2f_0 f_0' \cos\left(\phi_{cw} - \phi_{ccw} + \sum_{i=1}^m (\bar{\beta}_{cc,i} dz) - \sum_{i=m}^1 (\bar{\beta}_{ci,i} dz)\right) \quad (10)$$

所以去偏光纤陀螺, 在磁场、温度场下, 顺时针光和逆时针光之间的相位差为

$$\Delta\phi_{MT} = \phi_{cw} - \phi_{ccw} + \sum_{i=1}^m (\bar{\beta}_{cc,i} dz) - \sum_{i=m}^1 (\bar{\beta}_{ci,i} dz) = \Delta\phi_{bif}(B, T) + \Delta\phi_n(T) \quad (11)$$

式中的第一项 $\Delta\phi_{bif}(B, T)$ 是由双折射引起的非互易误差, 包含磁光法拉第效应引起的圆双折射和热应力引起的线双折射; 第二项 $\Delta\phi_n(T)$ 是由折射率随温度变化带来的非互易误差, 如(4)式所示。

因此, 时变温度场与磁场对光纤陀螺产生的非互易误差可以表示为

$$\Delta\phi_{MT}(t) = \Delta\phi_{bif}[T(t), B] + \frac{\beta_0}{c} \frac{\partial n}{\partial T} \times \int_0^L \dot{T}(z, t)(L - 2z) dz \quad (12)$$

根据以上的分析进行磁温耦合实验, 磁温实验系统框图如图 13 所示, 图中除实验桌及实验桌上的设备外, 其他设备和装置处于温控箱内。

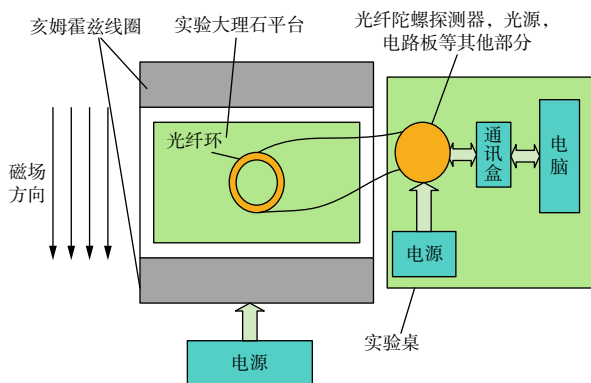


图 13 磁温实验系统框图

Fig. 13 System block diagram of magnetic temperature experiments

将光纤环安装固定在实验大理石平台上, 大理石平台两端分别放有亥姆霍兹线圈, 利用外部电源给亥姆霍兹线圈通电, 通电后的亥姆霍兹线圈产生磁场在实验大理石平台上, 实验桌上的数据采集设备采集数据上传到上位机进行后续处理。本次实验中用于给亥姆霍兹线圈供电的电源为 Agilent 电源, 型号为 6643A。所用的温控箱为广州五所环境仪器有限公司生产的温控箱, 型号为 QW0270W15S, 其技术参数见表 1。

表 1 温控箱技术参数

Table 1 Technical parameters of temperature control box

温变速度	温度波动率	温度范围	温度波动度	温度偏差
15 °C/min	<0.2 °C	-70°C~150 °C	优于±1 °C	<1 °C

对于光纤长度为 1 093 m, 光纤环直径为 100 mm, ASE 光源的中心波长为 1 561 nm 的光纤陀螺系统, 将光纤环放置于磁温实验系统, 将磁场方向与光纤陀螺径向磁敏感轴大致平行, 此时的磁场灵敏度在 3°/h/10 Gauss 的量级, 在温度范围为 -20 °C ~ +55 °C, 温变速率为 6 °C/h, 磁场大小为 10 Gauss 的径向静磁场交联环境下, 测量光纤陀螺的交联耦合漂移与温度, 温度变化率及磁场的关系, 图 14 是实验过程中的升温温度曲线。

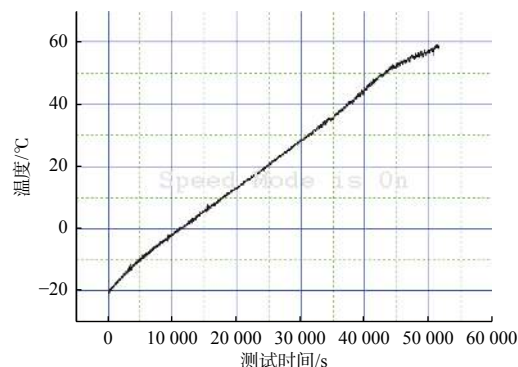


图 14 温度计采样得到的温度曲线

Fig. 14 Temperature curve obtained by thermometer sampling

不同温度条件下光纤陀螺的磁温耦合度如图 15 所示、磁场灵敏度如表 2 所示。设常温条件下光纤陀螺的磁场灵敏度为 S_{20} , 温度 T 下的磁场灵敏度为 S_T , 则磁温交联耦合度为 $(S_{20} - S_T)/S_{20}$, 计算得

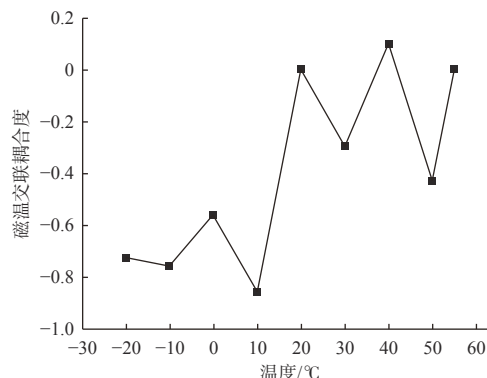


图 15 不同温度条件下光纤陀螺的磁温耦合度

Fig. 15 Magnetic temperature coupling degree of fiber optic gyroscope under different temperature conditions

表2 不同温度下径向磁场灵敏度实验结果

Table 2 Experimental results of radial magnetic field sensitivity at different temperatures

温度/°C	陀螺零偏/(°/h)		磁场灵敏度/ (°/h/10 Guass)	交联耦合度/%
	无磁场	10 Guass 磁场		
-20	7.770	4.762	3.008	-0.726
-10	7.769	4.762	3.007	-0.759
0	7.779	4.766	3.013	-0.561
10	7.780	4.776	3.004	-0.858
20	7.878	4.848	3.030	0.000
30	7.811	4.790	3.021	-0.297
40	7.793	4.760	3.033	0.099
50	7.940	4.923	3.017	-0.429
55	7.863	4.833	3.030	0.000

到磁温交联耦合度。从表2及图15中可以看到,在径向磁场和不同温度作用下,光纤陀螺由于交联耦合效应产生的径向磁场灵敏度变化,即交联耦合度<1%,这和理论模型具有较高的一致性。

5 结论

本文根据高精度光纤陀螺的零偏形成原理,分析了温度和磁场对光纤陀螺零偏的影响。通过仿真分析得到:由温度引起的零偏峰值漂移为0.06°/h。最后,建立了基于交变温度场和径向静磁场交联作用的理论模型,并进行了相应的实验研究。实验结果表明:在径向磁场和不同温度作用下,光纤陀螺由于交联耦合效应产生的漂移最大值在径向磁场灵敏度的1%量级左右,实验结果和理论模型具有较高的一致性。

参考文献:

- [1] CHEN Saiqi, YUAN Dongli, YAN Jianguo, et al. An overview of fiber-optic gyroscopes[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2005(6): 4-7.
陈塞崎, 袁冬莉, 闫建国, 等. 光纤陀螺综述[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2005(6): 4-7.
- [2] JING Min. Optical fiber palstance sensor-optical fiber peg-top[J]. *Mechanical Management and Development*, 2009, 24(1): 27-28.
景敏. 光纤角速度传感器: 光纤陀螺[J]. *机械管理开发*, 2009, 24(1): 27-28.
- [3] ZHANG Xingzhou. Sagnac effect optical fiber gyro[J]. *Journal of Transducer Technology*, 1998, 17(1): 59-62.
张兴周. Sagnac效应光纤陀螺[J]. *传感器技术*, 1998, 17(1): 59-62.
- [4] JIN Jie, WANG Yuqin. An overview of fiber-optic gyroscopes[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2003(6): 4-7.
金杰, 王玉琴. 光纤陀螺研究综述[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2003(6): 4-7.
- [5] ZHANG Chao, ZENG Qingke, OU Qibiao, et al. Overview of the working principle and characteristics of fiber optic gyroscope[J]. *Guangxi Physics*, 2010, 31(4): 26-29.
张超, 曾庆科, 欧启标, 等. 光纤陀螺工作原理及特性综述[J]. *广西物理*, 2010, 31(4): 26-29.
- [6] WANG Shumin, LIU Cheng, MU Xudong, et al. Study on nonreciprocal phase error in depolarized gyros[J]. *Laser & Infrared*, 2002, 32(5): 336-338.
王淑敏, 刘承, 牟旭东, 等. 消偏光纤陀螺的非互易性相位误差的研究[J]. *激光与红外*, 2002, 32(5): 336-338.
- [7] LI Yongfan. Analysis of thermally induced nonreciprocity in fogs and sensing of temperature distribution in the optical fiber coil[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2004.
李永范. 光纤陀螺热致非互易性分析及光纤环温度分布传感[D]. 长春: 长春理工大学, 2004.
- [8] XU Hongjie, AN Minghua, XU Xiaobin, et al. Thermal induced non-reciprocity of fiber coil in differential interference fiber optic gyroscope[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(3): 304-308.
徐宏杰, 安明花, 徐小斌, 等. 双干涉光纤陀螺光纤环温度致非互易性分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2014, 40(3): 304-308.
- [9] LYU Chengang, ZHANG Ruifeng, WU Xing, et al. A theoretical and experimental study on thermal-induced non-reciprocity noise of fiber optical coil[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(6): 798-802.
吕辰刚, 张瑞峰, 武星, 等. 光纤环的热致非互易性噪声理论与实验研究[J]. *传感技术学报*, 2009, 22(6): 798-802.
- [10] HAN Baodong. Research on characteristic parameters of optical fiber ring adhesive based on thermal-stress coupling field[J]. *China Science and Technology Information*, 2016(24): 66-67.

- 韩宝栋. 基于热-应力耦合场的光纤环胶黏剂特征参数研究[J]. *中国科技信息*, 2016(24): 66-67.
- [11] LYU Xinwei, WU Junyong, SUN Liyan. Thermal stress birefringence simulation of single mode optic fiber loop[J]. *Navigation and Control*, 2015(3): 94-97.
- 律新伟, 武俊勇, 孙丽艳. 单模光纤环热应力双折射仿真分析[J]. *导航与控制*, 2015(3): 94-97.
- [12] LI Jing, LIN Heng, DU Xinzheng. Thermally-induced birefringence of polarization optical fiber on gyro[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(12): 1322-1326.
- 李璟, 林恒, 杜新政. 基于光纤陀螺的保偏光纤热致双折射[J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31(12): 1322-1326.
- [13] ZHANG Chunmei. Temperature characteristic analysis and compensation of fiber optic gyroscopes[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- 张春梅. 光纤陀螺温度特性分析与补偿[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [14] ZHANG Guicai, YANG Qingsheng. Study on temperature characteristics of interferometric fiber-optic gyro[J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2001(1): 17-22.
- 张桂才, 杨清生. 干涉式光纤陀螺的温度特性研究[J]. *光电子技术与信息*, 2001(1): 17-22.
- [15] WAN Xun, XIE Liangping. Temperature field analysis and structure redesign of fiber optic gyroscope[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(3): 353-358.
- 万洵, 谢良平. 光纤陀螺温度场仿真分析与陀螺外罩结构优化设计[J]. *应用光学*, 2016, 37(3): 353-358.
- [16] ZHANG Dengwei, SHU Xiaowu, MOU Xudong, et al. Theoretical study on radial magnetic field in fiber-optic depolarized gyro[J]. *Journal of Translucation Technology*, 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.
- [17] WANG Xiazhen, QIN Wei, YU Jia, et al. Theoretical study on geometric axial magnetic sensitivity of fiber optic gyro preserving fiber rings[J]. *Advances in Laser and Optoelectronics*, 2014, 51(12): 94-99.
- 王夏霄, 秦伟, 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): 94-99.
- [18] WANG Xiaoxiao, FENG Zhifang, QIN Yi, et al. Study on the axial magnetic field sensitivity in optical fiber coil of fiber optic gyroscope[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 171-176.
- 王夏霄, 冯志芳, 秦伟, 等. 光纤陀螺光纤环轴向磁敏感性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 171-176.
- [19] CHEN Yiping, LIANG Cui, ZHANG Dengwei, et al. Magnetic-temperature coupling effect of a fiber optic gyroscope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(5): 153-158.
- 陈一平, 梁瑾, 张登伟, 等. 光纤陀螺磁温耦合效应[J]. *光子学报*, 2018, 47(5): 153-158.
- [20] GAO Z X, GAO W, ZHANG Y G. Theoretical model and experimental verification of thermal strain distribution in quadrupolar fibre coil[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(19): 1382-1384.
- [21] GAO Zhongxing. Research on environmental error of fiber-optic gyroscope and suppressing method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- 郜中星. 光纤陀螺环境误差机理与抑制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.