

# 光纤陀螺环热扩散延迟响应模型及补偿技术研究

闫晗, 杨远洪\*, 杨福铃

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

**摘要** 基于热扩散机理,研究了光纤陀螺中光纤环热扩散非互易相位误差导致的零漂的延迟响应特性,发现了延迟时间的温度相关性,获得了光纤环零漂延迟补偿模型。搭建高精度光纤陀螺实验系统,在不同温度段,采用近似“方波”形台阶温变激励,验证了热致非互易性相位误差的延迟特性,并获得了实验光纤环的模型参数。进行了光纤陀螺全温变零偏测试,实验结果表明采用改进模型可获得更好的零偏补偿效果,验证了新建模型的正确性和有效性。

**关键词** 光通信; 热扩散; Shupe 效应; 温度补偿; 响应时间

**中图分类号** V241.5

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201946.0106003

## Response Model and Compensation Technology of Thermal Diffusion Delay in Fiber Optic Gyro Coil

Yan Han, Yang Yuanhong\*, Yang Fuling

School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract** The delay response characteristics of bias drift caused by the non-reciprocity phase errors of a fiber coil in the fiber optic gyroscope (FOG) are investigated. The correlation between temperature and delay time is revealed and the modified temperature drift compensation model is established. In addition, the high-precision FOG experimental system is built. The delay characteristics of the non-reciprocity phase errors are verified using the approximate "square wave" temperature variation at different temperature ranges, and the model parameters of the experimental fiber coil are obtained as well. The test of FOG bias drift in full-temperature is carried out. The experimental results show that the modified model can be used to achieve a better compensation effect based on the thermal diffusion mechanism, and the correctness and validity of the new model are verified.

**Key words** optical communications; thermal diffusion; Shupe effect; temperature compensation; response time

**OCIS codes** 060.2800; 290.6815; 060.2300; 120.6780

## 1 引 言

光纤陀螺(FOG)因具有无运动部件、精度覆盖面广、动态范围大等优点。经过 40 余年的研究与发展,FOG 已在海、陆、空、天等领域得到广泛应用<sup>[1]</sup>。陀螺的性能除了与本身的结构有关之外,与周围环境也有十分密切的关系。其中,影响最大的是光纤环周围温度场的变化,时变的温度场所引起的非互易性相移会使光纤陀螺的零偏产生漂移,即 Shupe

效应<sup>[2]</sup>。Shupe 效应是光纤陀螺实际应用的主要误差源,被认为是光纤陀螺向高精度发展的最后障碍。

国内外研究学者采用多种方法来抑制 Shupe 误差。Mohr<sup>[3]</sup>建立了实用性好和可信度高的温度模型并证实了四极对称绕法是抑制热引起的相位误差的最佳方案;文献[4]证明了四极对称绕法可使 Shupe 误差减少三个数量级;文献[5]证实改善光纤陀螺结构和组成部件,采用绝缘材料包围的光纤,设计传感器的金属外壳可进一步减小误差;光纤陀螺电

**收稿日期:** 2018-08-13; **修回日期:** 2018-08-30; **录用日期:** 2018-09-25

**基金项目:** 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ04081504)、国家自然科学基金(61227902)、国家自然科学基金(U1637106)、航空科学基金(20140851012)、创新团队发展计划(IRT1203)、区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放基金(2016GZKF001)

\* **E-mail:** yhyang@buaa.edu.cn

路部分各器件发热不同,会影响陀螺工作的热平衡状态;文献[6]提出了一种基于分级控制、分段控制和闭环控制思想的温控方案,取得了较好的误差抑制效果;除上述方法之外,对光纤陀螺温度特性进行实验研究,建立温度漂移模型并实施温度补偿也是工程上解决光纤陀螺温度漂移问题的有效手段<sup>[7-8]</sup>。

本文主要在光纤陀螺光纤环 Shupe 效应产生机理的基础上,基于热扩散原理,建立光纤环热致非互易性相移误差分析模型,分析 Shupe 效应产生的非相移误差与热扩散延迟响应时间、外界环境温度的相关性,建立基于光纤环热扩散延迟响应时间的温度补偿模型。搭建高精度光纤陀螺实验系统,在不同温度下,引入近似“方波”台阶温变激励,测试相移误差的延迟和温度相关性,验证模型的准确性并获得不同温度下的温度补偿模型参数。进行全温变实验,对比分析传统温度补偿模型与本文新建模型的误差补偿效果。

## 2 光纤环热致非互易相位误差模型

图 1 为光纤环展开示意图,光纤环采用对称(如四极对称)绕环技术绕制,长度为  $L$ ,  $J$  为分光点,  $M$  为环中点,光纤环关于线段  $JM$  对称。在温度场

中,光纤环对称部分经历的温度近似相同,如图 1 中颜色梯度所示。  $A$  和  $A'$  段为光纤环中任意一对对称的光纤段,长度为  $d_z$ ,以  $J$  点为起点,沿顺时针方向,  $A$  和  $A'$  段的位置分别为  $z$  和  $L-z$ ,  $\dot{T}(z)$  和  $\dot{T}(L-z)$  为  $A$  和  $A'$  点在相同时刻的温变速率,在光纤环中由这两段对称光纤产生的热致非互易性相位误差为<sup>[2]</sup>

$$d\varphi_e = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \alpha_{\text{SiO}_2} + n \frac{dn}{dT} \right) \frac{L-2z}{c_v/n} [\dot{T}(z) - \dot{T}(L-z)] dz, \quad (1)$$

式中:  $\alpha_{\text{SiO}_2}$  为石英材料的热膨胀系数,一般为  $0.5 \times 10^{-6}/\text{C}$ ;  $c_v$  为光速;  $n$  为光纤有效折射率;  $dn/dT$  表示折射率随温度变化的系数;  $\lambda$  为工作波长。(1) 式为经典型 Shupe 效应模型。目前,相关的误差补偿模型都集中在(1)式的温度变化因子  $[\dot{T}(z) - \dot{T}(L-z)]$  上,由此开发了热致非互易性相位误差的模型补偿算法。但是,光纤环实际还存在热应力效应<sup>[9]</sup>,光纤环材料热扩散等参数可能与作用温度值相关,温度及温度变化会引起  $dn/dT$ 、热膨胀系数  $\alpha_{\text{SiO}_2}$  的改变。为获得更准确的补偿模型,基于热扩散理论,对光纤环热致非互易性相位特性进行研究。

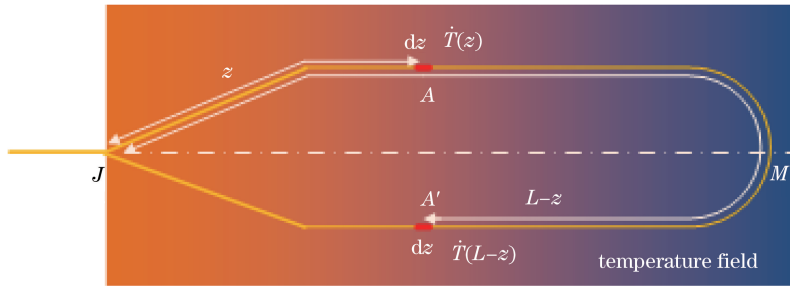


图 1 光纤环展开示意图  
Fig. 1 Schematic of fiber coil expansion

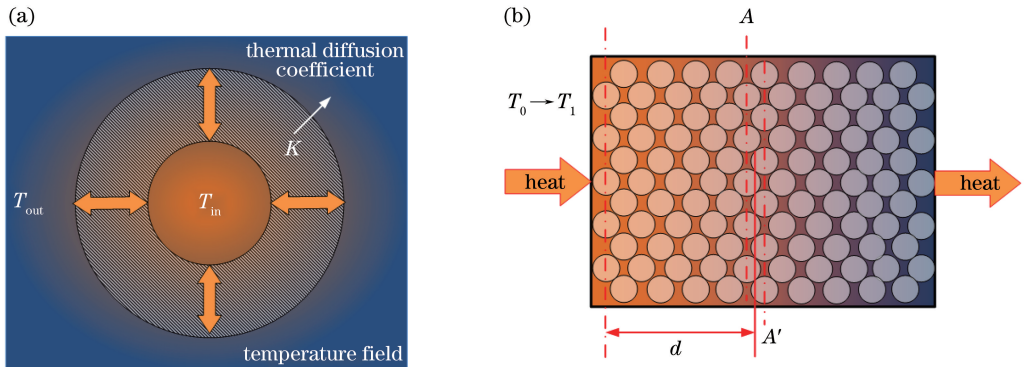


图 2 光纤环温度分布图。(a)整体分布;(b)等效半无限热扩散模型

Fig. 2 Temperature distribution of fiber coil. (a) Overall distribution; (b) equivalent semi-infinite thermal diffusion model

一般情况下,可认为光纤环内外的温度场是均匀的,如图 2(a)所示,阴影部分代表四极对称缠绕的光纤环,热扩散方向可能是由外往里或由里向外。为了简化模型,可认为环内等直径位置处温度相等。温度沿环径向外扩散,光纤环可等效为半无限的热扩散模型,如图 2(b)所示。设图 1 中 A 和 A' 光纤段对应图 2(b)中扩散深度为  $d$  的位置,基于热扩散理论,热传导方程可表示为<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases} \frac{\partial T(d,t)}{\partial t} - K \frac{\partial^2 T(d,t)}{\partial d^2} = 0, \\ T(0,t) = T_0 \end{cases}, \quad (2)$$

$$K = \frac{r}{c_0 \rho}, \quad (3)$$

式中,  $T_0$  为环境初始温度,  $K$  为材料的热扩散系数,  $r$  为材料的导热系数,  $\rho$  为材料的密度,  $c_0$  为比热容。  $t$  时刻扩散深度为  $d$  处的温度分布为

$$T(d,t) = T_0 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{d}{2\sqrt{Kt}}\right), \quad (4)$$

式中,误差函数为

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} \exp(-y^2) dy. \quad (5)$$

由(4)式可知,光纤环内的温度变化为非线性响应,且与热扩散系数  $K$  有关。设  $t=0$  时,环境温度由  $T_0$  变化至  $T_1$ , 光纤环内  $d$  位置的归一化温度值与时间  $t$  的关系可表示为

$$T(d,t) - T_0 = (T_1 - T_0) \left[ 1 - \operatorname{erfc}\left(\frac{d}{2\sqrt{Kt}}\right) \right]. \quad (6)$$

定义  $\tau_c = d^2/K$  为环中位置  $d$  处扩散时间参数,表示该点温度变化为设定温度的一半时所需要的时间。

一般情况下,材料的导热系数、比热容等参数都与材料本身温度相关,导致材料的热扩散系数随材料温度的变化而变化,即材料扩散系数  $K$  不但与材料导热特性相关,还与材料的工作温度相关。文献[11]测量了不同温度下石英材料的导热系数,结果表明,石英材料的温度越高,热扩散系数越大。设光纤环在不同温度条件下的热扩散系数分别为  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ , 且  $K_1 > K_2 > K_3$ , 以光纤材料的热扩散系数为输入,基于(6)式,可仿真光纤环中位置  $d$  处温度的变化曲线,如图 3 所示。由图 3 可知,外界环境温度由  $T_0$  阶跃变化至  $T_1$  时(蓝色方波实线),光纤环内部的温度变化为非线性响应( $T_{-K_i}$  表示热扩散系数为  $K_i$  时的响应曲线),存在明显延迟,而且延

迟时间与环境温度、光纤环热扩散系数密切相关,热扩散系数  $K$  越大,时间常数  $\tau_c$  越短。

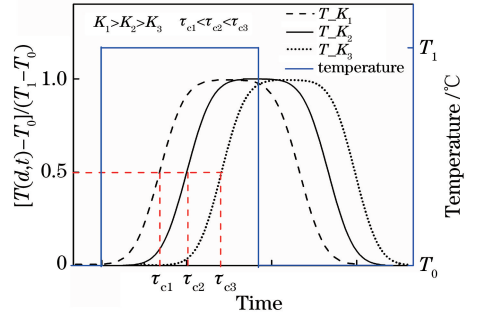


图 3 不同扩散系数下光纤环位置  $d$  处的温度变化示意图  
Fig. 3 Schematic of temperature change at position  $d$  in fiber coil under different diffusion coefficients

(1)式中  $\dot{T}(z)$  和  $\dot{T}(L-z)$  为 A 和 A' 点在相同时刻的温变速率,实际的温度补偿技术中,无法直接测到光纤环结构内的温度,需要通过测量环外温度并建立数学模型进行补偿。目前,大部分温度补偿的建模思路都是基于 IEEE 标准(IEEE Std 952-1997)给出的单轴光纤陀螺仪输入角速率与陀螺仪输出之间的模型方程<sup>[12]</sup>

$$D = c_T \cdot T + c_{\dot{T}} \cdot \dot{T}, \quad (7)$$

式中:  $D$  为由环境温度变化引起的零偏漂移;  $T$  为环境温度;  $\dot{T}$  表示温变速率,即为  $dT/dt$ ;  $c_T$ 、 $c_{\dot{T}}$  分别为温度敏感系数与温变速率敏感系数。为获得更精确的实用温度补偿模型,一般将光纤陀螺零偏与温度近似为线性关系,并加入环境温度与温变速率的交叉项<sup>[13]</sup>,形成实际应用的模型方程:

$$D'(t) = [aT(t)\dot{T}(t) + bT(t) + c\dot{T}(t) + d] \cdot D_0(t), \quad (8)$$

式中,  $D_0$  为陀螺零偏的实测值,  $D'$  为陀螺零偏的估计值,  $T(t)$  为  $t$  时刻陀螺温度,  $\dot{T}(t)$  为  $t$  时刻的温变速率,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  为模型参数。

显然,这些模型补偿技术未考虑光纤环温度响应的非线性和时间延迟,很难实现好的补偿效果。(6)式和图 3 表明,光纤环的温度变化属于热扩散过程,环内温度变化存在明显的延迟,温变引起的陀螺漂移相对环外温度变化也存在延迟。设陀螺零漂与环外温度变化的延迟时间为  $\tau_d$ ,在光纤环中由图 1 两对称光纤产生的热致非互易性相位误差可重写为

$$d\varphi_e(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \alpha_{\text{SiO}_2} + n \frac{dn}{dT} \right) \times \frac{L-2z}{c_v/n} [\dot{T}(z, t - \tau_d) - \dot{T}(L-z, t - \tau_d)] dz, \quad (9)$$

式中  $\dot{T}(z)$  和  $\dot{T}(L-z)$  为由(6)式根据环外温度计算得到的 A 和 A' 点的温变速率。对应的温度补偿模型[(8)式]也可重写为

$$D'(t) = [aT(t - \tau_d) + bT(t - \tau_d) + c\dot{T}(t - \tau_d) + d] \cdot D_0(t). \quad (10)$$

在实际光纤陀螺测试实验中,光纤环内位置  $d$  处的温度及温度的变化率很难用类似(6)式的表达式精确计算,实际的延迟时间常数  $\tau_c$  和延迟时间  $\tau_d$  以及模型系数  $a, b, c, d$  需通过温度实验的测试数据拟合获得。

### 3 温度补偿模型验证及参数标定

为验证上述算法模型,并对不同温度下的温度误差模型参数进行标定,搭建实验系统进行近似“方波”形温度激励实验。实验系统结构框图和照片如

图 4 和图 5 所示,实验系统为光电分离的高精度光纤陀螺结构,由信号处理单元(SPU)和 Sagnac 光纤环路单元(SIA)组成。SPU 包括宽带光源、耦合器、检测器、数字闭环信号检测模块、温度测量模块和用于数据采集和分析的计算机;SIA 由多功能集成光学调制器(MIOC)、保偏光纤环(PMFC)和 Pt 温度传感器组成,光纤环采用四极对称放式进行缠绕,长度约为 3 km,平均直径为 150 mm,SIA 被封装在一个圆形铝盒中。SIA 通过光电混合缆与 SPU 连接,形成光电分离闭环光纤陀螺系统。实验时,只有 SIA 盒被安装在带温箱的高精度转台上。实验过程中,在  $-45 \sim 65 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内,分别选取低、中、高三个温度段,进行温度激励。具体变温过程为  $-25 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow -45 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow -25 \text{ }^\circ\text{C}, 10 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow -10 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 10 \text{ }^\circ\text{C}, 45 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 65 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 45 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

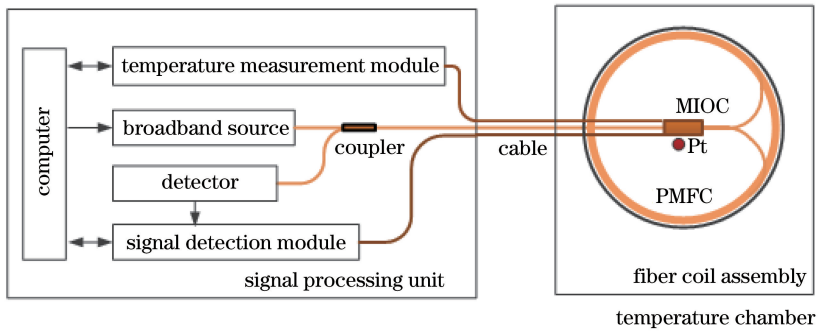


图 4 实验系统结构框图

Fig. 4 Structural diagram of experimental system

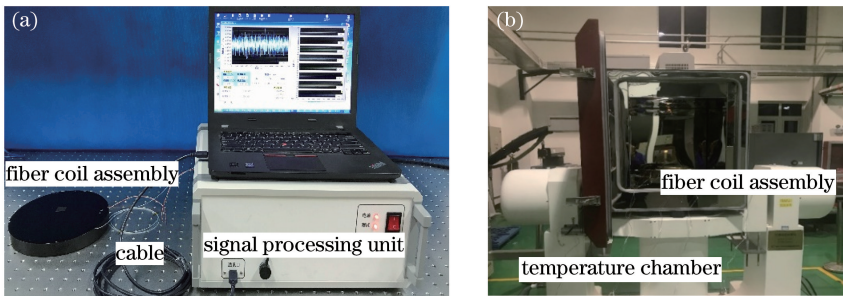


图 5 实验照片。(a)系统照片;(b)带温箱转台安装照片

Fig. 5 Experimental photos. (a) System photo; (b) installation photo of turntable with temperature chamber

在变温实验,即进行  $-25 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow -45 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow -25 \text{ }^\circ\text{C}$  近“方波”温度激励实验时,温箱温度变化程序为  $(-25 \text{ }^\circ\text{C}, 180 \text{ min}) \rightarrow (-25 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow -45 \text{ }^\circ\text{C}, 20 \text{ min}) \rightarrow (-45 \text{ }^\circ\text{C}, 180 \text{ min}) \rightarrow (-45 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow -25 \text{ }^\circ\text{C}, 20 \text{ min}) \rightarrow (-25 \text{ }^\circ\text{C}, 180 \text{ min})$ 。在升降温过程中温箱温变速率约为  $1.0 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ,在高、低温段保持恒温时间较长,均为 3 h,以获得稳态时的实验数据。在整个实验过程中,温箱上电工作,但转台不

上电,避免转台激磁电流引起的磁场对陀螺零偏的影响。实时同步记录光纤陀螺的输出和 SIA 盒外环境和盒内光纤环温度,采样率为 1 Hz。根据高精度光纤陀螺的数据处理和测试规范,对输出数据进行 100 s 平滑。测试曲线如图 6 所示,在同一曲线图中,显示设定(温箱)温度  $T_s$  (蓝色点划线)、SIA 盒内光纤环温度  $T_c$  (橘色虚线)、陀螺输出  $\Omega_B$  (黑实线)、盒内温度的微分  $\dot{T}_c(t)$  (粉色点线)和拟合后带

延迟的温度微分  $\dot{T}_C(t - \tau_d)$  (绿色短虚线)。

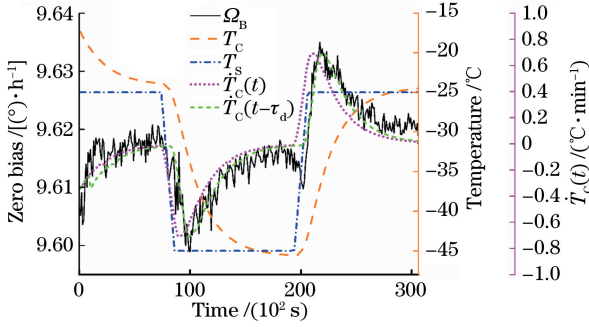


图6 -25 °C → -45 °C → -25 °C, 陀螺输出结果图

Fig. 6 Output diagrams of FOG for -25 °C → -45 °C → -25 °C

表1 无延迟模型参数值

Table 1 Parameter values of no-delay model

$T / ^\circ\text{C}$	$a$	$b$	$c$	$d$
-25 → -45 → -25	$-4.89 \times 10^{-6}$	$-3.08 \times 10^{-5}$	-0.000293	0.99998
10 → -10 → 10	$-6.12 \times 10^{-6}$	$-1.29 \times 10^{-5}$	-0.000278	1.00012
45 → 65 → 45	$-1.24 \times 10^{-5}$	$-3.22 \times 10^{-5}$	-0.000531	1.00141
Average value	$-7.80 \times 10^{-6}$	$-2.53 \times 10^{-5}$	-0.000367	1.00017

表2 有延迟模型参数值

Table 2 Parameter values of delay model

$T / ^\circ\text{C}$	$a$	$b$	$c$	$d$	$\tau_d / (10^2 \text{ s})$	$\tau'_d / (10^2 \text{ s})$
-25 → -45 → -25	$-5.11 \times 10^{-6}$	$-3.45 \times 10^{-5}$	-0.000328	1.00031	8.63	8.12
10 → -10 → 10	$-7.66 \times 10^{-6}$	$-1.94 \times 10^{-5}$	-0.000362	1.00043	5.47	5.24
45 → 65 → 45	$-1.95 \times 10^{-5}$	$-3.75 \times 10^{-5}$	-0.000678	1.00102	3.09	3.21
Average value	$-1.08 \times 10^{-5}$	$-2.87 \times 10^{-5}$	-0.000456	1.00059		

为了能够将此模型运用在工程上,将三个温度段内的模型参数  $a, b, c, d$  取平均值后作为实验光纤环通用模型参数 ( $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}$ ),重新拟合不同温度段内的延迟时间  $\tau'_d$ 。以表2中平均参数 ( $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}$ ) 和延迟时间  $\tau'_d$  作为有延迟补偿模型参数来计算补偿后的陀螺零漂,作为对比,对无延迟模型数据也做同样的处理,将表1中平均参数 ( $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}$ ) 作为无延迟模型补偿的参数来计算陀螺零漂。图7为利用无延迟模型和有延迟模型补偿图6陀螺输出的结果,图7中  $\Omega_B$  (黑色实线) 为陀螺的原始输出、 $\Omega_C$  (蓝色点线) 为无延迟模型补偿输出、 $\Omega_D$  (红色虚线) 为有延迟模型补偿输出。计算得到的标准偏差分别为 0.0071, 0.0037, 0.0023 (°)/h。显然,加入延迟时间后,模型补偿的结果最好。不同温度段内补偿前后的陀螺零漂如表3所示。

由表3可知,在不同温度段,热扩散延迟时间与温度成反比关系;不同温度段采用平均模型参数和各自延迟时间进行补偿后,陀螺零漂相比无延迟模型有明显改善。 $\tau_d$  与实验温度段平均温度的关系

盒内温度的微分  $\dot{T}_C(t)$  为第  $t + \Delta t$  时刻的温度与第  $t$  时刻温度的差值与时间  $\Delta t$  之比,计算方程为

$$\dot{T}_C(t) = \frac{T_C(t + \Delta t) - T_C(t)}{\Delta t} \quad (11)$$

分别以(8)式和(10)式为目标函数进行拟合,获得无延迟模型系数  $a, b, c, d$  和有延迟模型系数  $a, b, c, d, \tau_d$ ,如表1和表2所列。采用同样的实验步骤和数据处理方法,获得其他两个温度段的模型参数,拟合得到的模型参数在表1和表2中列出。由表1和2可知,在同种情况下,模型系数  $a, b, c, d$  在量级上是一致的,模型参数具有较好的一致性。

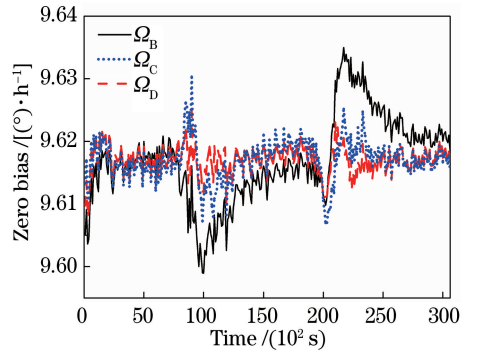


图7 -25 °C → -45 °C → -25 °C, 陀螺原始零偏和补偿后零偏

Fig. 7 Original zero bias and compensated zero bias of gyro for -25 °C → -45 °C → -25 °C

如图8所示,为使模型简单,可近似为线性关系。由图8可知,温度越高,热扩散系数越大,延迟响应时间越短,结论与文献[11]一致。

将三个不同温度段下的热扩散延迟响应时间进行线性拟合,可得到延迟时间与温度的线性模型:

$$\tau_d = \tau_{d0} - 0.0549 \times T \quad (12)$$

式中,  $\tau_{d0}$  为 0 °C 时的延迟时间, 为 583.9 s, 0.0549 为灵敏系数, 单位为  $10^2$  s/°C。

表 3 补偿前后的陀螺零漂

Table 3 Zero biases of gyro before and after compensation

T /°C	Original bias	Bias drift	Bias drift
	drift $\Omega_B$ / [ (°)·h <sup>-1</sup> ]	without delay $\Omega_C$ / [ (°)·h <sup>-1</sup> ]	with delay $\Omega_D$ / [ (°)·h <sup>-1</sup> ]
-25 → -45 → -25	0.0071	0.0037	0.0023
10 → -10 → 10	0.0042	0.0030	0.0021
45 → 65 → 45	0.0113	0.0055	0.0031

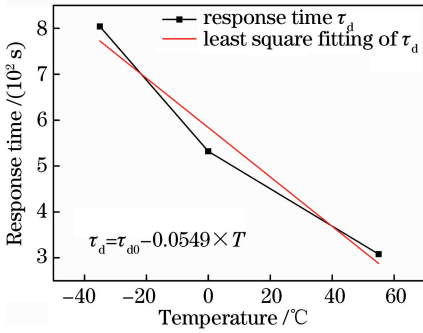


图 8 热扩散延迟响应时间与温度关系曲线图

Fig. 8 Relationship between thermal diffusion delay response time and temperature

## 4 全温变实验验证

为了进一步对上述理论模型和算法进行验证, 进行了 -45 ~ 65 °C 的全温变光纤陀螺零偏漂移测试和补偿实验, 采用相同的实验装置, 将 SIA 盒安装在带温箱的高精度转台上, 温箱温度变化程序为 (-25 °C, 60 min) → (-25 °C → -45 °C, 40 min) → (-45 °C, 120 min) → (-45 °C → 65 °C, 220 min) → (65 °C, 120 min) → (65 °C → 25 °C, 80 min) → (25 °C, 30 min)。在升降温过程中温箱温速率约为 0.5 °C/min, 在 -45 °C 和 65 °C 的恒温时间设置为 2 h, 以验证恒温时的补偿效果。在整个实验过程中, 实时同步记录光纤陀螺的输出和 SIA 盒外环境温度温度和盒内光纤环温度, 采样率为 1 Hz, 同样对输出数据进行 100 s 平滑, 测试曲线如图 9 所示。

分别以传统温度补偿模型和本研究提出的有延迟补偿模型对陀螺原始输出进行补偿, 其中模型参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  分别采用表 1 和表 2 中计算的平均值  $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ 、 $\bar{c}$ 、 $\bar{d}$ , 有延迟补偿模型中的不同温度下的延迟时间由(12)式计算。补偿得到的零偏漂移曲线如图 10 所示, 图 10 中  $\Omega_B$  (黑色实线) 为陀螺的原始输出、 $\Omega_C$  (蓝色点线) 为传统无延迟模型补偿输出、 $\Omega_D$

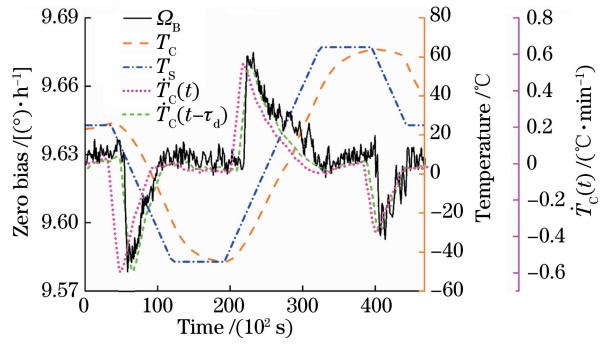


图 9 全温段内陀螺输出结果图

Fig. 9 Gyroscope output in full-temperature

(红色虚线) 为有延迟模型补偿输出。计算得到的标准偏差分别为 0.0198, 0.0093, 0.0046 (°)/h。

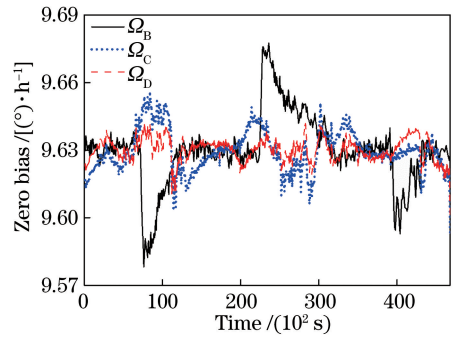


图 10 全温段原始陀螺输出与补偿后陀螺输出

Fig. 10 Original gyro output and compensated gyro output in full temperature

实验证明, 热扩散延迟响应时间与温度呈相关性, 带有热扩散延迟响应时间的模型算法可将 3 km 的光纤环的零漂控制在 0.005 (°)/h 以内。带有热扩散延迟响应时间的补偿模型能够更好地补偿温变引入的零漂误差。

## 5 结 论

通过将热扩散机理引入光纤环温度响应过程中, 研究了光纤陀螺中光纤环热致非互易相位误差导致的零偏漂移的延迟响应特性, 发现了延迟时间的温度相关性, 改进了光纤环零漂延迟补偿模型, 提出了基于多项式拟合的带有热扩散延迟响应时间的零偏温度漂移补偿技术。搭建高精度光纤陀螺实验系统, 并进行三种不同温度下的“方波”台阶激励实验, 通过非线性拟合得到不同温度下的热扩散延迟响应时间, 完成了最优模型参数和不同温度下延迟时间的辨识。进行了 (-45 ~ 65 °C, 0.5 °C/min) 的全温变实验验证, 对比了传统模型与新建模型的补偿效果, 实验结果验证了新建模型的正确性和有效性, 同时表明采用新建模型可获得更好的零偏补偿

效果,可将 3 km 的光纤环的零漂控制在 0.005 (°)/h 以内,为高精度光纤陀螺提供了实用有效的温度误差补偿技术。

## 参 考 文 献

- [1] Bergh R, Lefevre H, Shaw H. An overview of fiber-optic gyroscopes [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1984, 2(2): 91-107.
- [2] Shupe D M. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(5): 654-655.
- [3] Mohr F. Thermo-optically induced bias drift in fiber optical Sagnac interferometers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(1): 27-41.
- [4] Lofts C M. Investigation of the effects of temporal thermal gradients in fiber optic gyroscope sensing coils[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(10): 2856.
- [5] Tirat O F J, Euverte J M. Finite element model of thermal transient effect in fiber optic gyro [J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2837: 230-239.
- [6] Kato H, Saito H, Sakai S I. Shupe effect compensation of temperature controlled fiber optical gyroscope [C] // 2010 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC), March 21-24, 2010, Nagaoka, Niigata, Japan. New York: IEEE, 2010: 262-267.
- [7] Zhao J H, Xu F, Li F. Simulation of Shupe effect in fiber optic gyroscope fiber coil with inclinometer while drilling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0506001.  
赵建辉, 徐帆, 李帆. 随钻测斜仪中光纤陀螺光纤环 Shupe 效应仿真 [J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0506001.
- [8] Li X Y, Ling W W, Xu Z L, *et al.* Effect of double-cylinder winding on temperature performance of interferometric fiber optic gyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0806003.  
李绪友, 凌卫伟, 许振龙, 等. 双柱型绕法对干涉式光纤陀螺温度性能的影响 [J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0806003.
- [9] Minakuchi S, Sanada T, Takeda N, *et al.* Thermal strain in lightweight composite fiber-optic gyroscope for space application [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2658-2662.
- [10] Mohr F. Bias error in fiber optic gyroscopes due to elasto-optic interactions in the sensor fiber [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5502:410-413.
- [11] Jin T Q. Determination of thermal conductivity of quartz glass [J] *Journal of Jilin Institute of Technology*, 1991, 12(1): 39-42.  
金太权. 测定石英玻璃的导热系数 [J]. *吉林工业大学学报*, 1991, 12(1): 39-42.
- [12] IEEE Std 952-1997. IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis interferometric fiber optic gyroscopes[S]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 1997
- [13] Liu G F, Xing Y L, Zhang S X. Investigation on the modeling of fiber optic gyro bias instability [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2001, 9(3): 48-52.  
柳贵福, 邢艳丽, 张树侠. 光纤陀螺零偏稳定性的数据建模方法研究 [J]. *中国惯性技术学报*, 2001, 9(3): 48-52.