

# 光纤陀螺热漂移误差性能评价

张勇刚 李淑婷 郜中星\* 陈小炜

哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 光纤陀螺在实际应用中必须要考虑的一个问题是温度变化速率对其热漂移误差的影响。从理论上分析了温度变化对光纤陀螺热漂移误差的影响。进而设计了一个循环变温实验,得到了光纤陀螺在7种不同变温速率下的热漂移误差大小。根据实验数据,通过选择合适的函数参数,拟合得到了变温速率与光纤陀螺热漂移误差的关系式,并使拟合得到的误差最小。通过该拟合函数,可以得到光纤陀螺在任意变温速率下的热漂移误差大小,并依据拟合的函数参数对光纤陀螺的热性能进行评价。

**关键词** 传感器; 光纤光学; 陀螺仪; 热漂移误差; 温度变化速率

**中图分类号** V245.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.122803

## Evaluation of Thermal Drift Error Performance of Fiber Optic Gyroscope

Zhang Yonggang Li Shuting Gao Zhongxing Chen Xiaowei

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

**Abstract** In practical applications, the effect of the temperature changing rate on the thermal drift error of a fiber optic gyroscope (FOG) can not be ignored fiber optic gyroscope (FOG) due to temperature variation. Effect of temperature variation on thermal drift error of FOG in theory is analyzed. Then a temperature cycling experiment is designed to obtain the thermal drift error in seven temperature rates. Based on experimental data, a function is utilized to describe the relationship between temperature changing rate and thermal drift error of the FOG. With this fitting function, the thermal drift error of a FOG under any temperature changing rate will be obtained, and parameters of the function can be used to evaluate the thermal performance of a FOG.

**Key words** sensors; fiber optics; gyroscope; thermal drift error; temperature changing rate

**OCIS codes** 280.4788; 060.2370; 060.2800; 060.2310

### 1 引言

近年来,光纤陀螺以其精度高、体积小、动态范围大、抗冲击强等优势已经广泛应用于航空航天等领域<sup>[1-3]</sup>。光纤环作为整个陀螺的核心部件,对外界环境温度的变化极其敏感,并会产生相应的非互易相移误差,即 Shupe 误差,Shupe 误差从理论上描述了光纤陀螺温度漂移的产生机理<sup>[4]</sup>,通过四极对称绕法能够显著降低温度变化引起的陀螺误差。然而在实际绕制线圈的过程中,由于绕环机拉应力的不均匀以及涂胶的影响,残余的温度漂移误差仍然不可以忽略<sup>[5]</sup>。

对于光纤陀螺温度特性的研究,主要集中在对光纤陀螺内部的温度场分布进行优化以及通过更加合理的建模方法来仿真光纤陀螺的温度漂移误差<sup>[6-8]</sup>。对于工作在变温环境下的光纤陀螺,不同的温度变化速率会引起不同的漂移误差。但目前尚未有一个统一的指标来衡量光纤陀螺热性能的好坏,这对其温度性能的评价带来一定的困难。

收稿日期: 2015-05-25; 收到修改稿日期: 2015-07-05; 网络出版日期: 2015-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(61001154)、哈尔滨工程大学中央高校基本科研业务费专项基金(HEUCF110431,HEUCF041202)

作者简介: 张勇刚(1981—),男,博士,教授,主要从事高精度光纤陀螺、组合导航等方面的研究。

E-mail: zhangyg@hrbeu.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: zhongxing1141@sina.com

本文在对光纤环温度特性进行理论分析的基础上,设计了7种不同变温速率的温度实验,得到了陀螺温度漂移误差与变温速率的关系,进而通过选择合适的函数拟合得到了两者的关系,并通过选择最优的函数参数,使拟合误差最小。所得的函数参数可用作光纤陀螺热漂移误差性能的评价指标。

## 2 陀螺热漂移误差的理论分析

当光纤环所处的环境发生温度变化时,在环中相向传播的两束光将经历不同的相位变化,这种由温度引起的非互易相移将会使陀螺的输出产生偏置误差,即 Shupe 误差。对一个长度为  $L$  直径为  $D$  的光纤环,其 Shupe 误差为:

$$\Omega_e(t) = \frac{n}{DL} \left( \frac{dn}{dT} + \alpha_n \right) \int_0^L \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} (L-2z) dz, \quad (1)$$

式中  $n$  表示光纤的折射率,  $\frac{dn}{dT}$  表示折射率的温度系数,  $\alpha_n$  表示光纤的热膨胀系数,  $\frac{\partial T(z,t)}{\partial t}$  表示光纤环在位置  $z$  的温度变化速率,  $(L-2z)$  表示位置  $z$  的权系数。对于处在变温环境中的光纤环,其横截面上的温度分布规律  $T(x,y,t)$  符合热扩散方程:

$$\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} = A \left[ \frac{\partial^2 T(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,t)}{\partial y^2} \right], \quad (2)$$

式中  $x$  沿光纤环的径向,  $y$  沿光纤环的轴向,  $A$  表示环内部的热扩散系数。由(1)式可以看出,温度变化速率越大所引起的漂移误差越大,且由于光纤环内部的温度场分布由(2)式给出,使  $\Omega_e(t)$  与环境变温速率的关系呈现非线性的特征。此外,当距光纤环中点对称的位置有相同的温度变化时,  $\Omega_e(t)$  为零。

因此,工程中为减小陀螺的温度漂移,实际的光纤环通常被绕制成四极对称的结构,如图1所示。其中 A、B 分别表示左右两侧供光纤绕制的光纤,依次交替隔两层顺序进行绕制, ABBA 表示四极对称绕法的一个单元。由于四极对称绕法使关于光纤环对称的两点紧紧地靠在一起,因此理论上这样可以有效地抑制光纤陀螺的温度漂移误差<sup>[6]</sup>。然而,即便如此,由于光纤热应力、涂胶的影响以及热传导过程的不均匀性,四极对称光纤环仍然有残余的温度漂移误差,且与变温速率正相关,这可以通过后面的实验结果给出。

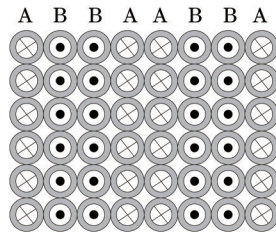


图1 四极对称光纤环示意图

Fig.1 Quadrupolar(QAD) winding coil

## 3 陀螺的变温实验

在前面理论分析的基础上,设计了7组不同的变温实验来研究不同变温速率与光纤陀螺热漂移的关系。所选取的光纤环的绕制参数如表1所示。

表1 光纤环的参数

Table 1 Parameters of the fiber coil

Fiber coil parameters	Values
Length /m	1020
Number of winding layer	32
Number of loop per layer	82
Winding method	QAD method
Inner radius /mm	60

### 3.1 实验步骤

选择某型三轴一体化光纤陀螺作为实验对象,在这里仅以  $z$  轴陀螺的输出作为研究对象,  $x, y$  轴与  $z$  轴类似。将陀螺放入温箱中并固定好,连接好数据接收线,通电后便可以正常采集温度输出数据及陀螺输出数据。

选取温度变化的范围为 20 ℃~60 ℃, 本次实验主要测试陀螺在不同变温速率下的性能, 选取 7 个速率点, 分别为 0.4、0.6、0.8、1、1.2、1.4、1.6 ℃/min。控制陀螺先在 20 ℃ 的温度下保持 1 h, 再分别以不同变温速率达到 60 ℃ 后再高温保持 1 h, 然后以 2 ℃/min 的速率降至 20 ℃, 其整个温度历程如图 2(a) 所示<sup>[7]</sup>。整个变温过程中的陀螺输出数据在图 2(b) 中给出。

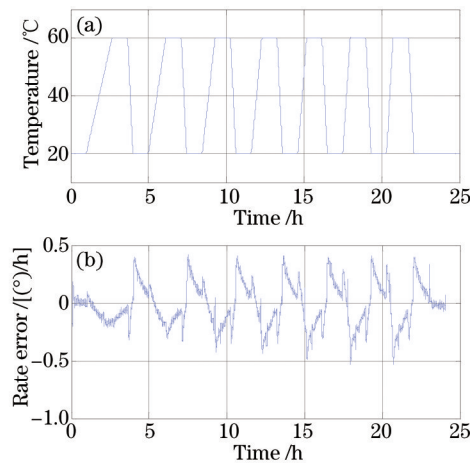


图 2 实验的温度历程及陀螺输出数据

Fig.2 Experimental temperature process and gyroscope rate error

从图 3 可以看出, 光纤陀螺温度漂移误差的峰值随变温速率的增加明显变大, 0.4 ℃/min 和 1.6 ℃/min 的升温过程分别引起最小和最大的温度误差峰值, 分别大约为 0.1 (°)/h 和 0.35 (°)/h。由于降温速率始终为 2 ℃/min, 因此降温过程引起的温度漂移误差峰值始终保持为 0.4 (°)/h 不变, 且始终大于升温过程中引起的误差。

### 3.2 数据处理结果

由于在升温过程中, 升温的瞬间和停止升温的瞬间都会引起陀螺输出<sup>[8]</sup>, 因此可以通过截取图 3 中每一升温过程中两尖峰之间的数据作为陀螺的输出, 计算出这段数据的标准差, 作为不同变温速率所引起光纤陀螺输出误差的评价指标, 结果如图 3 所示。图 3 中的曲线表明随着升温速率的增加, 陀螺的输出误差也逐渐非线性增大且是类似抛物线的形状。因此, 可以通过抛物线类型的函数来拟合得到两者的关系式。

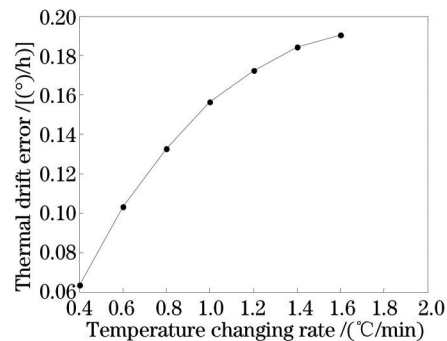


图 3 不同变温速率所引起的陀螺漂移误差

Fig.3 Gyroscope drift error induced by various temperature changing rates

## 4 确定最优拟合指数

从图 3 可以看出, 外界温度变化速率与陀螺热漂移的误差为类似抛物线的非线性关系, 因此需要一个合适的抛物线函数对其进行描述:

$$y = kx^\alpha + b, \quad (3)$$

式中  $y$  表示光纤陀螺的热漂移误差,  $x$  表示变温速率,  $k$ 、 $\alpha$ 、 $b$  为待确定的拟合参数。根据抛物线函数的变化规律, 选择从 0.1、0.2、0.3 至 1 这 10 个指数  $\alpha$  依次进行拟合计算。具体方法为: 首先选定一个确定的指数  $\alpha$ , 然后对  $y$  和  $x^\alpha$  进行一阶线性拟合得到拟合参数  $k$  和  $b$ , 最后计算出 7 个变温速率拟合值与实际值(即图 3)的标准差大小。以此类推, 分别得到了 10 个不同指数进行拟合的拟合误差曲线图, 如图 4 所示。

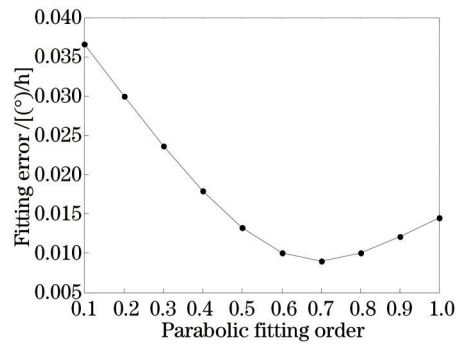


图4 不同指数对应的拟合误差曲线图

Fig.4 Fitting error curve with respect to various indexes

从图4可以看出,当指数选取为0.7时,拟合误差可取得最小值,因此以0.7作为指数时得到的拟合曲线表达式为

$$y = 0.1435x^{0.7} + 0.0027. \quad (4)$$

通过(4)式可以得到在任意变温速率下的光纤陀螺热漂移误差的大小。其中,(3)式中参数 $k$ 的大小可以作为评价光纤陀螺热漂移误差性能的指标,估算出光纤陀螺在给定变温速率环境下热漂移误差的大小。

光纤陀螺的热漂移误差性能评价是一个复杂的问题,本文通过设计一定温度范围内的变温实验给出了一种评价方法。通过扩展温度范围、增加变温时间、增加变温历程可以使得该项指标更加合理准确,但也会带来实验时间增加等问题。如何设计更加合理的实验和更加合理的指标来评价光纤陀螺热漂移误差性能是一个值得继续深入研究的问题。

## 5 结 论

讨论了外界不同变温速率引起的光纤陀螺热漂移误差大小的基本原理,通过7种不同的变温速率实验,得到了陀螺热漂移误差与对应变温速率的关系。并通过选取合适的抛物线函数,得到了使拟合误差最小的拟合参数。利用该最优拟合函数,可以估算出任意变温速率下的光纤陀螺温度漂移误差的大小,其中参数 $k$ 可以作为表征光纤陀螺热漂移误差的指标,从而对光纤陀螺的热性能给出评价。

## 参 考 文 献

- 1 G A Pavlath. Fiber optic gyros past, present, and future[C]. SPIE, 2012, 8421: 842102.
- 2 G A Sanders, B Szafraniec, R Y Liu, *et al.*. Fiber-optic gyro development for a broad range of applications[C]. SPIE, 1995, 2510: 2-11.
- 3 G A Sanders, B Szafraniec, R Y Liu, *et al.*. Fiber optic gyros for space, marine, and aviation applications[C]. SPIE, 1996, 2837: 61-71.
- 4 D M Shupe. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer[J]. Applied Optics, 1980, 19(5): 654-655.
- 5 Meng Zhaokui, Shao Hongfeng, Xu Hongjie, *et al.*. Effect caused by coating adhesive on polarization-maintaining fiber coil [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(8): 958-961.  
孟照魁, 邵洪峰, 徐宏杰, 等. 固胶对保偏光纤环的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(8): 958-961.
- 6 Zhang Wei, Cai Yingbo, Wei Xuetong. Temperature field analysis and structure redesign of fiber optic gyroscope[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(2): 169-172.  
张 伟, 蔡迎波, 魏学通. 光纤陀螺温度场分析及结构优化设计[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(2): 169-172.
- 7 Li Jichen, Gao Fengqi, Wang Guanglong, *et al.*. Analysis of dynamic allan variance for fiber optic under vibration and variable temperature conditions[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0908004.  
李冀辰, 高凤岐, 王广龙, 等. 光纤陀螺振动和变温条件下的DAVAR分析[J]. 中国激光, 2013, 40(09): 0908004.
- 8 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.

栏目编辑: 刘丰瑞