

文章编号: 0253-2239(2008)03-0435-07

# 基于温度激励的光纤陀螺光纤环瞬态特性检测

李茂春 刘铁根 江俊峰 姚晓天 周友伟 侯丽丽

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室光偏振研究中心, 天津 300072)

**摘要** 光纤陀螺基于萨尼亚克效应测量垂直于光纤环平面的敏感轴方向上的旋转分量。光纤环是光纤陀螺的核心部件, 光纤环的缠绕质量直接影响着光纤陀螺的整体性能, 对光纤环的缠绕质量全面检测十分必要。针对目前光纤环检测手段的局限性, 提出了一种基于温度激励的光纤陀螺光纤环瞬态特性检测方法, 全面表征了光纤环的缠绕质量。建立了光纤环柱面坐标三维计算模型, 采用有限元方法定量分析光纤环不对称度和局部温度激励位置精度对光纤环瞬态响应的影响, 同时开展了光纤环温度激励相应实验, 实验结果与光纤环三维物理模型数值计算结果相一致, 在理论和实验上验证了光纤环瞬态特性检测方法的可行性。

**关键词** 光纤陀螺; 瞬态特性; Shupe 效应; 光纤环; 有限元

**中图分类号** V241.533 **文献标识码** A

## Transient Characteristic Testing of Fiber Optic Gyro Fiber Coil Based on Temperature Excitation

Li Maochun Liu Tiegeng Jiang Junfeng X. Steve Yao Zhou Youwei Hou Lili

(College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Optical Polarization Research Center, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** A fiber optic gyro (FOG) uses Sagnac effect in fiber coil to detect rotation component about a sensing axis that is perpendicular to the plane of the fiber coil. The fiber coil is the key component of FOG, and its winding quality affects the integrated performance of FOG directly, so it is necessary to roundly test the fiber coil winding quality. In view of the limitation of present testing methods of FOG fiber coil, a transient characteristic testing method of FOG fiber coil based on temperature excitation was proposed, which could completely represent the winding quality of fiber coil. A computational three-dimensional fiber coil model was established. With finite element analysis technique, numerical simulations were carried out to quantitatively analyze the influence of fiber coil unsymmetry and sectional temperature excitation position accuracy on the transient response of fiber coil. At the meantime, the corresponding temperature excitation experiments were made. The experimental results are in good agreement with numerical simulation results. Finally, the transient characteristic testing method is identified feasible and acceptable by theory and experiment.

**Key words** fiber optic gyros; transient characteristic; Shupe effect; fiber coil; finite element

## 1 引 言

光纤环是光纤陀螺的传感核心, 它的质量好坏直接决定光纤陀螺的精度。当沿着光纤存在着一个随时间变化的温度分布梯度时, 光纤陀螺就会产生热导致的非互易性相位误差, 称之为 Shupe 效应<sup>[1]</sup>。有研究者<sup>[2]</sup>利用这种非互易效应来实现高精

度的温度测量, 但在光纤陀螺中是要尽可能消除这样的非互易效应。理论分析表明, 当距离光纤环中点相同的两段光纤经历同样的温度变化, Shupe 效应将被抵消, 因此光纤环缠绕方式广泛采用对称绕法<sup>[3~5]</sup>, 也有研究人员<sup>[6,7]</sup>提出光纤环随机绕法来实现统计意义上的热对称。

收稿日期: 2007-06-21; 收到修改稿日期: 2007-08-09

基金项目: 天津市应用基础重点项目(06YFJZJC00400)资助课题。

作者简介: 李茂春(1979-), 男, 天津人, 博士研究生, 主要从事光纤陀螺光纤环瞬态特性检测与缠绕质量控制等方面的研究。E-mail: lmctju@gmail.com

导师简介: 刘铁根(1955-), 男, 天津人, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感与光电检测等方面的研究。

E-mail: tgliu@tju.edu.cn

但是上述的对称绕法和现有的绕制工艺无法保证理想的热对称性<sup>[6]</sup>,例如实际所用的保偏光纤<sup>[8]</sup>截面并不是理想的圆、光纤缠绕间隙不一致、爬升现象和抬升现象等都会破坏光纤环的对称性。目前无论半自动绕环还是全自动绕环,均存在众多的光纤环质量影响因素,因此如何检测光纤环的质量进行光纤环的筛选始终是非常重要的一个问题。

本文提出一种基于温度激励的光纤环瞬态特性检测方法直接测量光纤环对称性对陀螺的影响,全面表征光纤环缠绕质量。

## 2 光纤环瞬态特性检测基本原理

### 2.1 光纤环热致非互易数学模型

光经过由温度变化引起光纤传播常量变化和光纤热膨胀变化的一段光程  $L$  (光纤长度) 后,所经历的相位延迟为:

$$\phi = \beta_0 nL + \beta_0 \left( \frac{\partial n}{\partial \vartheta} + n\alpha \right) \int_0^L \Delta \vartheta(l) dl, \quad (1)$$

式中  $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0$  为光在真空中的传播常量,  $n$  为光纤的有效折射率,  $\partial n/\partial \vartheta$  为石英材料的折射率温度系数,  $\alpha$  为热膨胀系数,  $\Delta \vartheta(l)$  为沿光纤温度分布的变化量,  $l$  为距光纤起始端长度。

由热膨胀引起的相位变化要比由折射率变化引起的相位变化小 1 个数量级<sup>[9]</sup>, 因此以后的分析中忽略  $n\alpha$  的影响。

由温度造成的光相位延迟的变化,对光纤陀螺中两束相向传播的光产生的作用就是著名的非互易 Shupe 效应。国内外研究者<sup>[9-13]</sup> 光纤环中热致非互易噪声机理进行了大量研究,逐步建立了更接近于实际情况的光纤环温度分布模型:

$$\phi_E(t) = \frac{\beta_0}{c_0} \cdot \frac{\partial n}{\partial \vartheta} \int_0^L \dot{\vartheta}(l, t) (L - 2l) dl, \quad (2)$$

式中  $\phi_E(t)$  为热致非互易相移,  $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0$  为光在真空中的传播常量,  $c_0$  为真空中光速,  $\partial n/\partial \vartheta$  为石英材料的折射率温度系数,  $\dot{\vartheta}(l, t)$  为沿光纤温度分布的变化率,  $L$  为光纤总长度,  $l$  为距光纤起始端长度。以上模型都是基于(2)式<sup>[9]</sup>演化而来,是将光纤环简化为二维情况进行分析的,因此与光纤环实际绕制情况仍有较大的差距,并且只能分析光纤环间均匀受热情况下的温度瞬态响应。

本文提出光纤环三维温度模型,模型建立在如图 1 所示的三维柱面坐标系下,热致非互易相移表达式见(3)式。此式表明只要能够利用参量  $z, r, \theta$  准

确描述光纤环不同绕法下的各层各圈中的光纤空间几何位置,就能够分析各种类型的光纤环轴向、径向和周向等任意时简不均匀温度变化响应

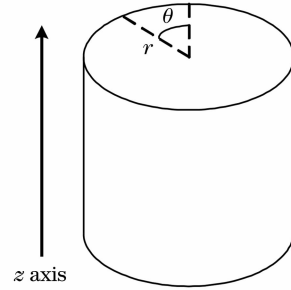


图 1 柱面坐标系

Fig. 1 Cylindrical coordinate system

$$\Delta \phi_E(t) = \frac{2\pi}{L} \cdot \beta_0 \cdot \frac{\partial n}{\partial \vartheta} \cdot \left[ \sum_{i=1}^{N_{CCW}} r_i \int_0^{2\pi} \dot{\vartheta}(r_i, \theta, z_i, t) (r_i \theta + s_{i0}) d\theta + \sum_{j=1}^{N_{CW}} r_j \int_{-2\pi}^0 \dot{\vartheta}(r_j, \theta, z_j, t) (r_j \theta - s_{j0}) d\theta \right], \quad (3)$$

式中  $\tau$  为光纤环的渡越时间,  $i$  和  $j$  分别代表从光纤中点开始绕环逆时针绕制的第  $i$  圈和顺时针绕制的第  $j$  圈,  $N_{CCW}$  和  $N_{CW}$  分别为逆时针总圈数和顺时针总圈数,  $r_i$  和  $r_j$  分别为逆时针第  $i$  圈缠绕半径和顺时针第  $j$  圈缠绕半径,  $z_i$  和  $z_j$  分别为逆时针第  $i$  圈轴向尺寸和顺时针第  $j$  圈轴向尺寸,  $s_{i0}$  和  $s_{j0}$  分别为逆时针第  $i$  圈绕制起点到光纤中点的距离和顺时针第  $j$  圈绕制起点到光纤中点的距离,如图 2 所示  $\theta$  为每圈绕制时与此圈起点之间的张角(逆时针时  $\theta$  变化范围为  $0 \sim 2\pi$ , 顺时针时  $\theta$  变化范围为  $-2\pi \sim 0$ ),  $\dot{\vartheta}(r_i, \theta, z_i, t)$  和  $\dot{\vartheta}(r_j, \theta, z_j, t)$  分别为逆时针第  $i$  圈各

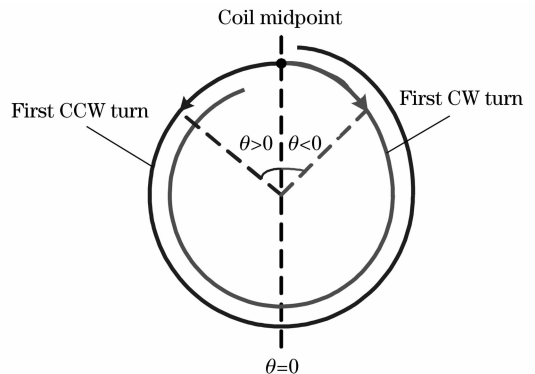


图 2 顺时针缠绕圈与逆时针缠绕圈示意图

Fig. 2 Schematic of fiber clockwise (CW) turn and counter-clockwise (CCW) turn

位置温度分布的变化率和顺时针第  $j$  圈各位置温度分布的变化率。

根据萨尼亚克效应表达(4)式<sup>[1]</sup>,可得热致误差速率  $\Omega_E$  三维关系(5)式,对(5)式进行积分可获得热致误差角度  $\phi_E$  三维关系(6)式。由(6)式可见,热致误差角度决定于起始与终止时刻之间的温度差,与初始的温度场分布无关。

$$\Delta\phi_R = \frac{2\pi LD}{\lambda_0 c_0} \Omega, \quad (4)$$

式中  $\Delta\phi_R$  为萨尼亚克相位差, $D$  为光纤环直径, $\Omega$  为光纤环敏感轴方向上的转动角速度。

$$\Omega_E(t) = \frac{2n}{LD} \cdot \frac{\partial n}{\partial \vartheta} \cdot \left[ \sum_{i=1}^{N_{CCW}} r_i \int_0^{2\pi} \dot{\vartheta}(r_i, \theta, z_i, t) (r_i \theta + s_{i0}) d\theta + \sum_{j=1}^{N_{CW}} r_j \int_{-2\pi}^0 \dot{\vartheta}(r_j, \theta, z_j, t) (r_j \theta - s_{j0}) d\theta \right], \quad (5)$$

$$\phi_E(t) = \frac{2n}{LD} \cdot \frac{\partial n}{\partial \vartheta} \cdot \left[ \sum_{i=1}^{N_{CCW}} r_i \int_0^{2\pi} \Delta\vartheta(r_i, \theta, z_i, t) (r_i \theta + s_{i0}) d\theta + \sum_{j=1}^{N_{CW}} r_j \int_{-2\pi}^0 \Delta\vartheta(r_j, \theta, z_j, t) (r_j \theta - s_{j0}) d\theta \right], \quad (6)$$

式中  $\Delta\vartheta(r_i, \theta, z_i, t)$  和  $\Delta\vartheta(r_j, \theta, z_j, t)$  分别为逆时针第  $i$  圈各位置温度分布的变化量和顺时针第  $j$  圈各位置温度分布的变化量。

从(5)式和(6)式来看,其中的  $s_{i0}$  和  $s_{j0}$  随着光纤环由内层向外层的绕制过程不断增大,这两个参量相当于权值,表明光纤环的外环对温度变化更为敏感。另外,光纤环由内层向外层绕制的过程中光纤环的对称度也将不断累加退化。基于以上两种原因,采用对光纤环外环施加多种温度激励来检测光纤环的瞬态特性。

## 2.2 光纤环热致非互易物理模型

首先根据光纤环的缠绕方式和缠绕工艺,使用专有软件基于光纤彼此之间的几何关系求取光纤环各层各圈光纤计算参量( $r_i, r_j, z_i, z_j, s_{i0}, s_{j0}, \theta$ )。由于下文中的光纤环有限元模型网格划分数量的有限性,无法精确求取光纤环每圈沿光纤连续分布各点的温度信息,同时考虑计算的速度,将各圈参量  $\theta$  离散为 360 个点。

然后利用有限元分析软件 ANSYS 建立光纤环的三维物理模型,根据施加不同的温度类型,数值模

拟光纤环中的各时刻的温度场分布变化。将由以上专有软件求取的每层每圈离散的 360 个点的柱面坐标值下各个时刻的温度信息导出,通过三阶拟合实现各层各圈各个时刻连续温度信息的获取。对于局部温度激励而言,每一圈光纤中温度有较陡的跳变,需要采用高阶拟合。对各个时刻的温度求导获得各个时刻各层各圈的温度变化率,将各层各圈的温度变化率代入(5)式与(6)式可得热致误差速率和热致误差角度。

模型中光纤环轮毂直径为 88.5 mm,光纤长度为 1206 m,光纤外径为 245  $\mu\text{m}$ ,光纤环层数为 32 层,16 极绕法。部分相关计算参量见表 1。

表 1 光纤环参量

Table 1 Parameters of fiber sensing coil

Refractive index	1.46
Density / (kg/m <sup>3</sup> )	1200
Specific heat / [J/(kg · K)]	1302
Thermal conductivity / [W/(m · K)]	0.13
Wavelength / nm	1550

利用光纤环三维物理模型仿真了多种温度激励下光纤环温度响应,为设计光纤环瞬态特性检测专用的时变和空变温度激励装置积累了大量有价值的信息。激励装置从几何形式可分点状、线状、面状加热。从光纤环结构上可分为外环均匀径向加热和上环均匀轴向加热等,另外也设计了多种光纤环局部加热装置。基于以上激励装置充分表征光纤环在径向、轴向和周向抑制热致误差速率的效果,为同样规格的光纤环划分等级。由于文章篇幅所限,只介绍两种温度激励:外环均匀加热与外环线加热。后者是传统光纤环温度分析方法无法实现的。

理论和实验表明,直接尽快将光纤环置于欲设温度下,使温度梯度增大,起到放大光纤环缺陷响应的作用。仿真和实验都是采用此方法进行光纤环瞬态特性分析的。

光纤环温度瞬态特性主要是由光纤环缠绕的对称度决定的,有诸多缺陷会衰退光纤环的对称度,例如间隙不均匀、爬升、交叉和未按光纤中点缠绕等。假设光纤环未按光纤中点缠绕来分析光纤环长度不对称下的温度瞬态响应,在理论上验证基于温度激励的光纤环瞬态特性检测的可行性。光纤环的长度不对称度定义为:光纤环缠绕实际起点距光纤环光纤真正中点的长度与光纤总长度的百分比。

图 3 所示为光纤环外环均匀加热 80  $^{\circ}\text{C}$  时,加热 60 s 后的温度分布情况。图 4 和图 5 分别为在不同

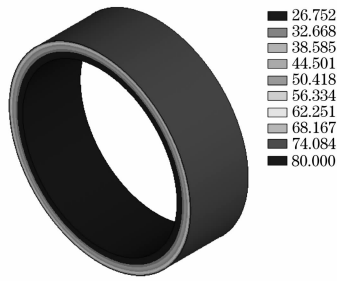


图 3 光纤环外环均匀加热 80 °C 温度分布 ( $t=60\text{ s}$ )  
 Fig. 3 Temperature map of fiber coil with external homogeneous 80 °C heater ( $t=60\text{ s}$ )

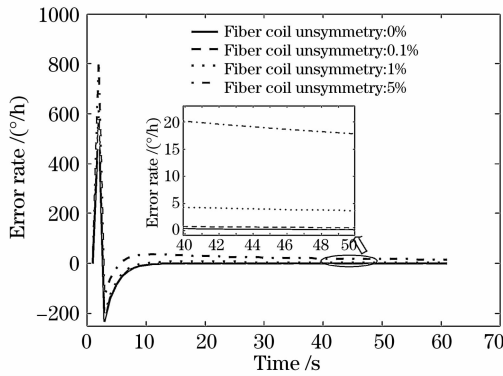


图 4 光纤环不对称度对误差速率的影响  
 (外环均匀加热 80 °C)

Fig. 4 Effect of unsymmetry of fiber coil to the error rate  
 (with external homogeneous 80 °C heater)

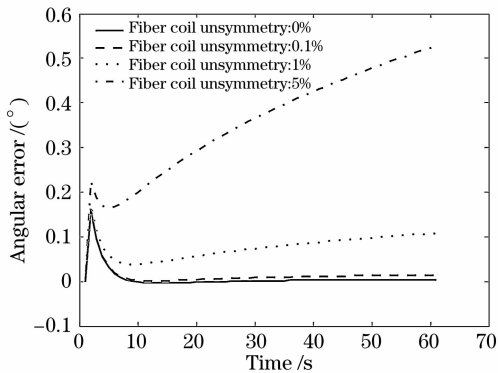


图 5 光纤环不对称度对角度误差的影响  
 (外环均匀加热 80 °C)

Fig. 5 Effect of unsymmetry of fiber coil to the angular error (with external homogeneous 80 °C heater)  
 的光纤环不对称度下(不对称度 0%, 0.1%, 1% 和 5%), 由以上温度激励造成的误差速率和误差角度的对比。

由图 4 可知, 当温度激励刚施加在光纤环上, 温度梯度造成了较大的热致误差速率, 随着热传递的进行光纤环的对称性使沿光纤中点对称的光纤经历大致相同的温度变化, 这将大大抵消了温度剃度对

光纤陀螺输出的影响, 对称性好的光纤环输出将更为平坦, 热致误差速率抑止效果更好。见图 4 当光纤环的不对称度为 0.1% 时, 要比理想的对称条件下产生的热致误差速率大 0.5°/h, 这对中高精度光纤陀螺而言是不可忽视的量, 同时也是陀螺系统能够分辨的量。图 4 和图 5 说明光纤环对称度越差, Shupe 效应抵消效果越不理想, 热致误差速率和热致误差角度也越大。

图 6 为光纤环外环线加热 50 °C 时, 加热 70 s 后的温度分布情况。此线温度激励属于局部温度激励源, 将其施加在光纤环外环不同的部位, 产生的热致误差速率和热致误差角度也将不同。将线温度激励安装在 2.1 节中定义的逆时针圈时  $\theta$  为 180° (也就是顺时针圈时  $\theta$  为 -180°) 的位置, 安装精度为  $\pm 1^\circ$ 。

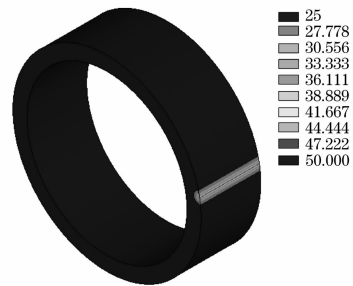


图 6 光纤环外环 50 °C 线加热温度分布 ( $t=70\text{ s}$ )  
 Fig. 6 Temperature map of fiber coil with external 50 °C linear heater ( $t=70\text{ s}$ )

图 7 和图 8 分别为由线温度激励安装位置精度 ( $\pm 1^\circ$ ) 对热致误差速率和热致误差角度的影响。由  $\pm 1^\circ$  位置精度影响造成最大速率偏离为 0.0011°/h。图 9 和图 10 分别为在理想安装位置下不同的光纤环不对称度(不对称度 0%, 0.1%, 1% 和 5%) 对由以上线温度激励造成的误差速率和误差角度影响的对比。图 9 和图 10 说明局部温度激励也可作为辨

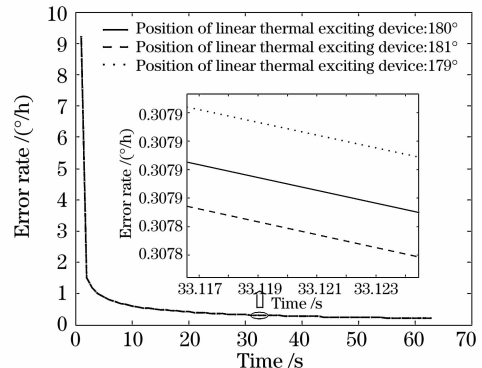


图 7 位置精度对误差速率的影响(外环 50 °C 线加热)  
 Fig. 7 Effect of position accuracy on error rate  
 (with external 50 °C linear heater)

别光纤环对称度的优劣的手段。表 2 是位置精度和光纤环不对称度对热致误差速率影响的对比,由此表可说明线温度激励的安装位置精度 $\pm 1^\circ$ 对光纤环温度瞬态特性检测影响可以忽略。

从以上两种温度激励仿真结果可见,对光纤环施加温度激励,检测热致误差速率和热致误差角度能够判别同种规格的光纤环对称度的相对优劣。

表 2 误差速率对比

Table 2 Comparison of rate error

Parameter	Max difference rate /( $^\circ$ /h)
Position $179^\circ$	0.0011
Position $181^\circ$	0.0011
Unsymmetry 0.1%	0.0192
Unsymmetry 1%	0.7070
Unsymmetry 5%	0.9562

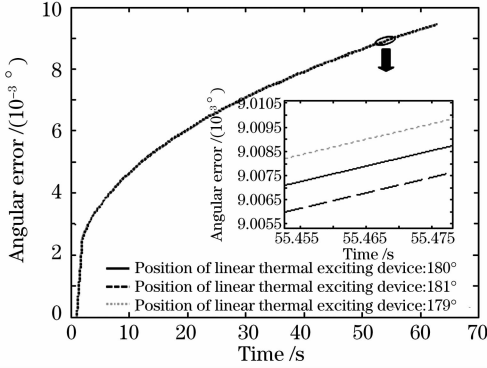


图 8 位置精度对角度误差的影响(外环  $50^\circ\text{C}$  线加热)  
Fig. 8 Effect of position accuracy to the angular error (with external  $50^\circ\text{C}$  linear heater)

### 3 光纤环瞬态特性检测实验研究

光纤环瞬态特性检测系统见图 11,将光纤环置于经过严格标定的光纤陀螺系统中,计算机控制信号发生器、锁相放大器和温度激励源分别实现调制、解调和施加温度激励。

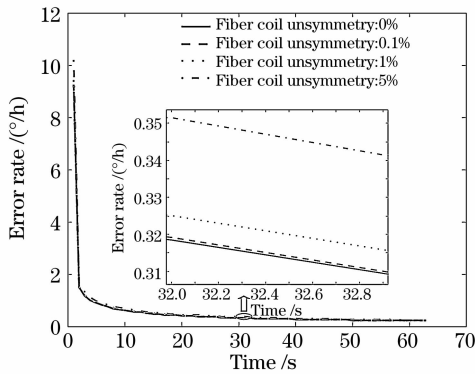


图 9 光纤环不对称度对误差速率的影响(外环  $50^\circ\text{C}$  线加热)

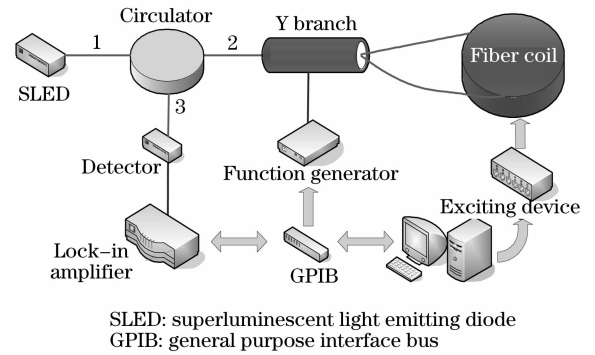


图 11 光纤环温度瞬态特性检测实验系统

Fig. 11 Experimental setup for thermal transient characteristic measurement of fiber coil

采用上述检测系统,分别对光纤环 A 和光纤环 B(光纤环 A 和光纤环 B 参量相同,见 2.2 小节)进行温度激励实验,温度激励源采用上文仿真计算使

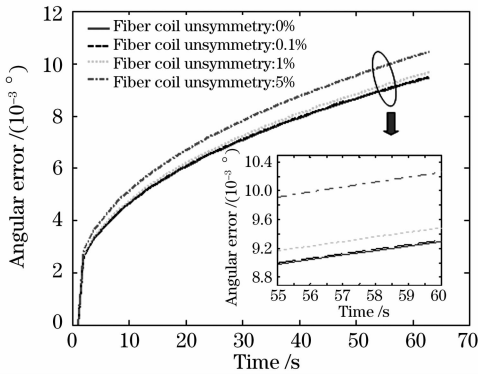


图 10 光纤环不对称度对角度误差的影响(外环  $50^\circ\text{C}$  线加热)

Fig. 10 Effect of unsymmetry of fiber coil to the angular error (with external  $50^\circ\text{C}$  linear heater)

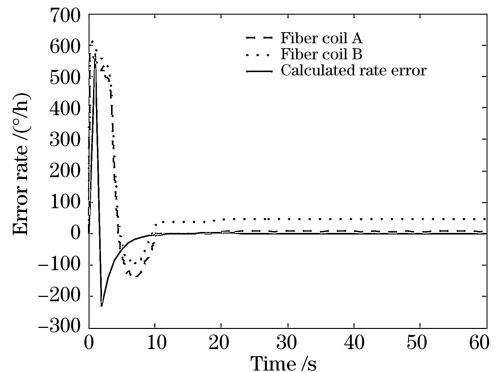


图 12 理论计算和实验误差速率(外环均匀加热  $80^\circ\text{C}$ )  
Fig. 12 Theoretical and experimental error rate (with external homogeneous  $80^\circ\text{C}$  heater)

用的外环均匀加热 80℃ 和外环 50℃ 线加热。

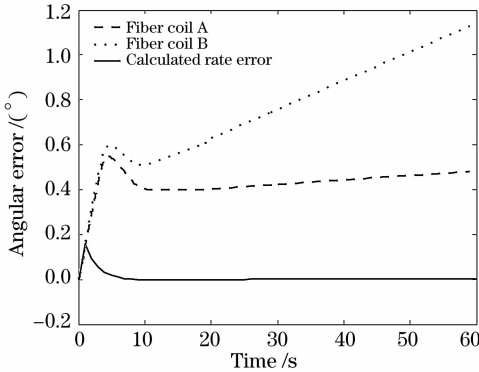


图 13 理论计算和实验角度误差(外环均匀加热 80℃)  
Fig. 13 Theoretical and experimental angular error  
(with external homogeneous 80 °C heater)

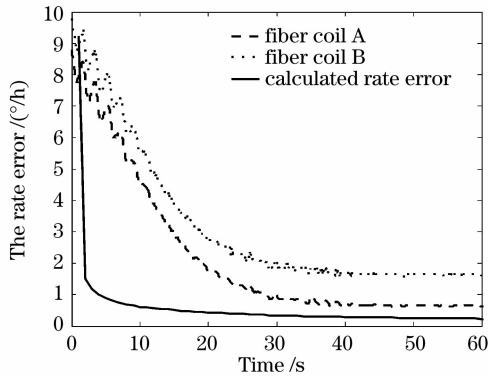


图 14 理论计算和实验误差速率(外环 50℃ 线加热)  
Fig. 14 Theoretical and experimental error rate  
(with external 50 °C linear heater)

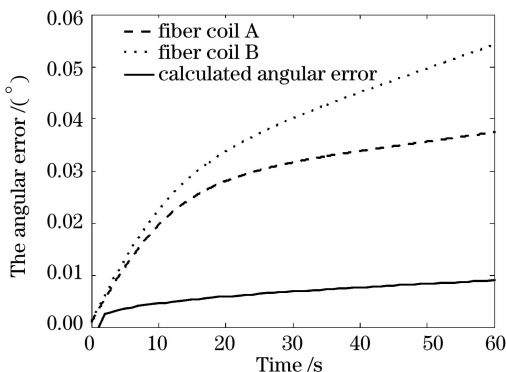


图 15 理论计算和实验角度误差(外环 50℃ 线加热)  
Fig. 15 Theoretical and experimental angular error  
(with external 50 °C linear heater)

图 12 和图 13 分别为激励源采用外环均匀加热时, 光纤环 A 和光纤环 B 的误差速率和误差角度与理论计算的对比情况。图 14 和图 15 分别为激励源采用外环 50℃ 线加热时, 光纤环 A 和光纤环 B 的误差速率和误差角度与理论计算的对比情况。实验结果与理论仿真的逼近程度验证了文中的三维光纤环

模型的正确性。实验曲线与理论仿真曲线之间的差异是由以下原因造成: 1) 无法获悉光纤环确切物理参量; 2) 实验中的误差速率和误差角度输出不完全是由光纤环不对称性造成, 而是由随机耦合、热应力和不对称性等共同作用下的输出。3) 采用温度激励并不理想, 温度有波动, 图 14 中两条实验曲线前一段的锯齿状就是由线激励的温度波动造成的。4) 模型中忽略了光纤环所用胶的影响。

由图 12~图 15 可知, 在两种温度激励下, 同时表明光纤环 A 比光纤环 B 的瞬态特性好。但光纤环 A 的消光比为 17.5 dB, 光纤环 B 的消光比为 18 dB, 按传统光纤环筛选方法, 则认为光纤环 B 优于光纤环 A。可见基于温度激励的光纤环瞬态特性检测方法能够全面表征光纤环的缠绕质量, 能对同等规格光纤环的相对优劣做出合理等级分类, 有利于开发不同精度、面向不同需求的光纤陀螺产品。

## 4 结 论

1) 建立了光纤环热致非互易柱面坐标三维数学模型, 可分析光纤环径向、轴向和周向热致误差速率和热致误差角度。

2) 采用有限元方法对光纤环三维物理模型进行数值仿真, 定量分析由均匀温度激励和局部温度激励造成的热致误差速率和热致误差角度, 仿真结果与实验数据基本一致。

3) 在光纤环三维模型、仿真结果和实验数据的基础上, 提出了基于温度激励的光纤陀螺光纤环瞬态特性检测方法, 全面表征光纤环的缠绕质量。

## 参 考 文 献

- 1 D. M. Shupe. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(5): 654~655
- 2 Yuanhong Yang. Temperature sensor based on PNR in Sagnac interferometer[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(5): 259~261
- 3 K. U. Baron, E. Kiesel. RPM measuring devices utilizing an optical fiber coil and winding method for making the coil[P]. U. S. Patent: 4781461, 1988-11-01
- 4 J. L. Page, D. R. Bina, D. Milliman. Optical fiber coil and method of winding[P]. U. S. Patent: 5841932, 1998-11-24
- 5 R. P. Goettsche, R. A. Bergh. Trimming of fiber optic winding and method of achieving same[P]. U. S. Patent: 5528715, 1996-06-18
- 6 R. B. Dyott. Reduction of the Shupe effect in fiber optic gyros; the random-wound coil[J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(23): 2177~2178
- 7 H. J. Bueschelberger, H. G. Mueller, F. Ruh *et al.*. Fiber optic coil for a fiber optic measuring system and method for producing the same[P]. U. S. Patent: 6707975B2, 2004-03-16
- 8 Ning Tigang, Qin Xi, Pei Li *et al.*. A novel way to measure the temperature characteristic of polarization-maintaining fiber[J].

- Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1078~1080
- 宁提纲, 秦 曦, 裴 丽 等. 新型保偏光纤温度特性的测试方法[J]. 中国激光, 2006, **33**(8): 1078~1080
- 9 F. Mohr. Thermo-optically induced bias drift in fiber optical Sagnac interferometers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 27~41
- 10 Xuhan Dai, Xiaolin Zhao, Bingchu Cai *et al.*. Quantitative analysis of the Shupe reduction in a fiber-optic Sagnac interferometer[J]. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(6): 1155~1156
- 11 C. M. Lofts, M. Parker, C. C. Sung. Investigation of the effects of temporal thermal gradients in fiber optic gyroscope sensing coils[J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(10): 2856~2863
- 12 O. F. J. Tirat. Finite element model of thermal transient effect in fiber optic gyro[C]. *Proc SPIE*, 1996, **2837**: 230~238
- 13 Yan Fengping, Lan Huijuan, Jian Shuisheng. Investigation of the temperature compensated method for fiber optic gyros[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7): 968~974
- 延凤平, 蓝慧娟, 简水生. 光纤陀螺温度补偿方案研究[J]. 光学学报, 1999, **19**(7): 968~974

\*\*\*\*\*

## *Chinese Optics Letters* (《中国光学快报》)“纳米光学”专题 征 稿 启 事

纳米科学与技术的快速发展对许多学科产生了巨大影响,尤其是激光与光学领域。*Chinese Optics Letters* (《中国光学快报》)计划于 2008 年 10 月推出“纳米光学”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“纳米光学”方面原创性的研究论文,旨在集中报道该方面最新的研究成果及研究进展,以引起国内外广大科研工作者的更大关注。

征稿范围包括:

- Quantum dots and nanowires
- Photonic crystals
- Silicon photonics
- Solar cells and solar energy
- VCSELs
- Slow light and fast light
- Plasmonics
- Other

### Feature Editors:

Connie Chang-Hasnain

John R. Whinnery Chair Professor in  
Electrical Engineering and Computer  
Sciences  
University of California

T. P. Lee

Telcordia Technologies (Retired)

截稿日期:2008 年 5 月 15 日

投稿方式以及格式:可直接将稿件电子版发至邮箱:col@mail.shnc.ac.cn(主题标明“纳米光学专题投稿”),或通过网上投稿系统直接上传稿件(投稿类型选择 focus issue submission),详情请参见《中国光学快报》网站:<http://www.col.org.cn>。投稿必须是英文稿,其电子版请使用 Latex 或者 MS-Word 格式。有任何问题请发邮件至 col@mail.shnc.ac.cn 询问。