

基于交叉法绕制的光纤环的槽体设计

李绪友 凌卫伟* 许振龙 魏延辉

哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 建立了一个精确到匝的光纤环有限元模型,基于此对比分析了交叉绕法与四极对称(QAD)绕法环圈瞬态传热性能,得出交叉绕法能更好地改善光纤陀螺温度性能。此外,重新设计了传统四极对称法绕制光纤环的槽体,并分析了在相同温度激励下新旧槽体内嵌交叉绕法光纤环对抑制陀螺温度漂移的影响。结果表明:采用新型槽体的交叉绕法光纤环能充分发挥交叉绕法抑制温漂的性能,能够使热致误差降低一个数量级,与理论分析相符。

关键词 光学器件; 光纤环; 交叉绕法; 槽体; 有限元法; 热致漂移

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0606002

Design of a New Spool for Fiber Coil Based on Cross Winding Pattern

Li Xuyou Ling Weiwei Xu Zhenlong Wei Yanhui

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

Abstract A turn-by-turn quantization thermal-induced bias error model for fiber coil is established. Based on the model, the effects of the fiber coil with cross winding and quadrupole (QAD) winding on the temperature performance of interferometric fiber optic gyroscope are analyzed comparatively, which shows cross winding coil has more wonderful temperature performance than the QAD winding coil. Furthermore, the traditional spool of the QAD winding coil is redesigned for cross winding coil. The thermal-induced bias error of the new and traditional spool with cross winding coil are analyzed under the same temperature gradient. The results show that the new spool has critical influence to complete optimal properties of cross winding coil, and it can lower the thermal-induced rate error of an order of magnitude, which verifies the theoretical analysis.

Key words optical devices; fiber coil; cross winding pattern; spool; finite element method; thermal-induced drift

OCIS codes 060.2800; 060.2370; 140.6810

1 引言

1980年, D M Shupe^[1]首次提出,当环境温度变化时,光纤陀螺的光纤环中每一段光纤都存在时变温度变化,而光纤环线圈中点两侧温度分布的不对称性能引起非互易性相移误差,最终导致陀螺漂移^[2-3]。N Frigo^[4]发现光纤环采用特殊的绕制方法^[5]可以有效地减少这种非互易性相移。因此为了降低光纤陀螺的热敏感性,一些新型的光纤环缠绕方法被不断提出并深入研究,例如:四极对称(QAD)绕法^[6]、八极绕法^[7]、交叉绕法^[8]和 crossover-free 绕法^[9-10]。然而先进的缠绕方法由于技术和成本的限制很难在实际工程中应用,因此很多研究者转入纯粹软件补偿方面的研究,通过大量的实验数据对光纤陀螺进行温度补偿。例如:采用多项式拟合^[11]、小波网络、神经网络、模糊推理等算法对陀螺温度漂移进行补偿^[12-14]。然而这些补偿手段效果有限,例如:多项式拟合难以精确逼近温度漂移中复杂的非线性关系,对抑制光纤陀螺温漂有限。复杂的软件补偿需要分析计算大量的实验数据,计算复杂、在线实时性难以保证,其在工程实际应用中并不多见。基于此现状,本文一方面利用有限元方法对光纤环进行重新建模,并对比分析了交叉绕法与四极对称绕法环圈的瞬态传热性能。另一方面为了充分发挥所用光纤环圈的温度性能,设计了一种新型的光纤环槽体,并做对比

收稿日期: 2015-01-28; 收到修改稿日期: 2015-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(51205074)

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

*通信联系人。E-mail: vpling@hrbeu.edu.cn

分析。利用此方案希望避免设计复杂的温控系统,使热致误差从机理上得到控制。同时使绕制复杂的光纤环在实际工程中能够得到应用。努力使温度与温漂复杂的非线性关系简单化,使复杂的软件算法在高精度光纤陀螺中得到应用^[15]。

2 理论基础

当光纤陀螺光纤环线圈中的一段光纤 l 存在温度扰动时,则沿 l 传播引起的相移 ϕ 可表示为^[4]:

$$\phi(l) = \beta_0 n \cdot l + \beta_0 \left(\frac{\partial n}{\partial T} \cdot \Delta T + n \alpha \cdot \Delta T \right) \cdot l, \quad (1)$$

式中 $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0$ 是真空中传播常数, n 为光纤的有效折射率, $\partial n/\partial T$ 是折射率温度系数, α 是折射率膨胀系数, ΔT 是光纤的温度变化量。把光纤长度扩展到整个光纤环结合 Sagnac 效应,总的热致相移随着温度的变化可表示为:

$$\phi(t) = \beta_0 \int_0^L \left[\left(\frac{\partial n}{\partial T} + n \alpha \right) \dot{T}(l,t) \right] (L - 2l) dl, \quad (2)$$

式中 L 为光纤环中光纤的总长度, $\dot{T}(l,t)$ 为位置 l 处的光纤的温变速率。通常 $\partial n/\partial T$ 大小为 $10^{-5} / ^\circ\text{C}$, $n\alpha$ 比 $\partial n/\partial T$ 至少小一个数量级,所以 $n\alpha$ 可以忽略。在已绕制完成的脱骨架光纤环中,Sagnac 相位差与光纤环的长度 L 、光纤环直径 D 和被测光纤环绕其轴的旋转速率 Ω 有关,关系如下:

$$\phi(t) = \frac{2\pi L D}{\lambda_0 c} \Omega. \quad (3)$$

使 Sagnac 相位移(3)式与热致相位移(2)式相等,可以得到热瞬变过程引起的近似等效旋转速率误差:

$$\Omega_E(t) = \frac{n}{DL} \int_0^L \left[\left(\frac{\partial n}{\partial T} + n \alpha \right) \dot{T}(l,t) \right] (L - 2l) dl. \quad (4)$$

为了计算总的热致误差速率 $\Omega_E(t)$,需要对光纤环进行离散化。为了提高运算效率,使光纤环从三维模型简化为二维模型,总长度为 L 的光纤被分为 M 层,每一层 N 匝,总匝数为 MN 。则(4)式的数字化表达式可表示为^[16]:

$$\Omega_E(t) = \frac{n}{DL} \sum_{i=1}^{MN} \left(\frac{\partial n}{\partial T} + n \alpha \right) \dot{T}(l_i,t) (L - 2l_i) dl_i, \quad (5)$$

式中 l_i 为第 i 匝光纤的起始点坐标长度, dl_i 为第 i 匝光纤的绕制长度, $\dot{T}(l_i,t)$ 为第 i 匝光纤处的温变速率。

3 仿真与实验

3.1 仿真

四极对称绕法是目前应用最广泛的光纤环绕制方法。其绕制工艺相对简单,结合多项式拟合的软件补偿算法,基本能够满足惯性级别的惯导系统应用。要想满足精密级的惯导系统,光纤环相邻层温度差异性以及光纤环的热应力因素^[17-19]将不得不考虑。而交叉绕法的光纤环能刚好解决相邻层温度差异性和热应力分布不对称的问题。为了证明交叉绕法在消除残余 Shupe 误差方面的优势,仿真实验设计如下:仿真参数来源于某型号光纤陀螺,其光纤环采用四极对称绕法。光纤环的内径 R_1 为 0.055 m,外径 R_2 为 0.0605 m,高 H 为 0.0013 m,层数为 40,每一层为 68 匝。光纤环原理示意图如图 1(a)所示。

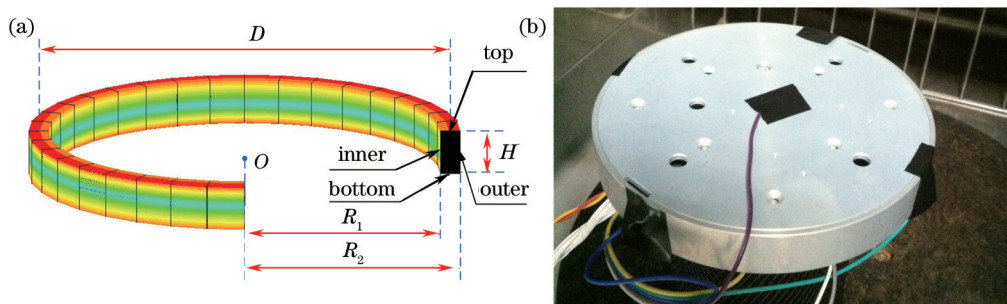


图 1 (a) 光纤环示意图; (b) 光纤环槽体图
Fig.1 (a) Schematic diagram of fiber coil; (b) fiber coil spool

根据光纤环的实际参数分别设计出四极对称绕法和交叉绕法仿真几何参数如表 1 所示。由表 1 可知两种缠绕方法得到的仿真参数基本相同,差异性主要由于缠绕方式不同造成的,是不可避免的。因此不影响仿真对比实验。光纤环的四极对称绕制方法和交叉绕制方法如图 2 所示。图 2 中箭头方向表示光纤环的绕制方向,黄色衬底表示光纤环的粘胶剂,灰色大圆圈表示光纤的包层,白色和蓝色小圆圈表示纤芯,小圆圈中的数字表示离散计算时每一匝的位置序号。表 2 中的参数是用于仿真计算的材料参数。

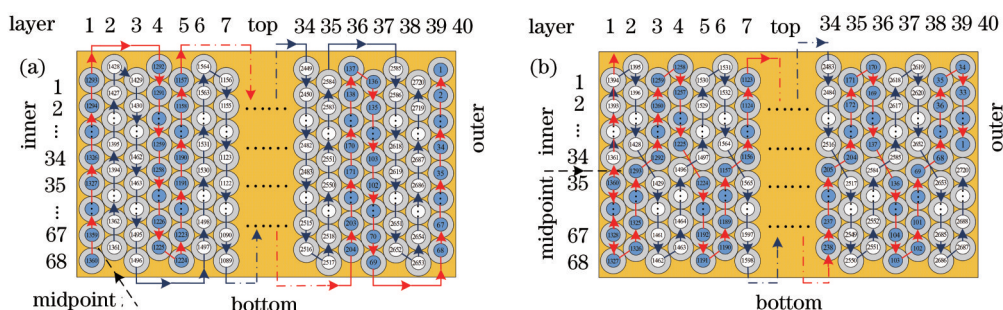


图 2 光纤环的有限元模型。(a) 四极对称绕法; (b) 交叉绕法

Fig.2 Finite element model of fiber coil. (a) QAD winding pattern; (b) cross winding pattern

3.1.1 载荷与边界条件

一个带有绝热头的三角支架放置于温箱内隔震基座上,取一四极对称光纤环水平放置在三个绝缘头。温箱内气流与光纤环表面进行直接对流,靠近光纤环表面处放置一温度传感器测真实光纤环表面温度变化。设定温箱初始温度 20 °C,实验开始前先保温 2 h,实验开始后以 1 °C/min 的温变速率降温至 -40 °C,保温 1 h,然后再以 1 °C/min 的温变速率升温至 60 °C,保温 1 h。实验总时间为 280 min。有限元仿真中,仿真所使用的温度载荷来自于光纤环附近的温度传感器,表面传热系数 $h = 5W/(K \cdot m^2)$ 。仿真参数参考表 1 和表 2。

表 1 光纤环的仿真参数

Table 1 Simulation parameters of the fiber coil

Parameters	QAD winding pattern	Cross winding pattern
Fiber length L /m	992.7987	992.8282
Clockwise fiber length /m	496.37925	496.43105
Anticlockwise fiber length /m	496.41945	496.39715
Number of winding layer	40	40
Number of loop per layer	68	68
Inner radius of the coil R_1 /m	0.055	0.055
Outer radius of the coil R_2 /m	0.0605	0.0605
Coil height H /m	0.0013	0.0013

表 2 计算参数

Table 2 Parameters for calculation

Parameters	Fiber core	Coating	Glue	Cu	Insulating material
Density ρ /[kg/m ³]	2203	1190	970	8900	2520
Specific heat c /[J/(kg·K)]	703	1400	1600	384	2000
Thermal conductivity λ /[W/(K·m ²)]	1.38	0.21	0.21	390	1.6

3.1.2 仿真结果对比

温度曲线和仿真如图 3 所示,测试温度值略微滞后于温箱的温度设定值,这主要是由于热传递特性引起的。按照上述条件和方法进行有限元仿真实验,得出光纤环采用四极对称绕法最大热致误差约为 0.02°/h,而采用交叉绕法最大热致误差仅为 0.002°/h。因此可以说两种绕法在抑制热致误差效果方面不在一个数量级,交叉绕法性能更优。之所以两种绕法有如此大的差异性,其有两方面主要原因:其一,理想的交叉绕法将无需考虑相邻层温度变化的差异性,因其每一层光纤都包含上下对称的顺逆两个方向的光纤,因此纯粹的 Shupe 误差可以被完全抵消;其二,对高精度光纤陀螺来说,光纤环热应力变化不可忽略^[17-19]。因为光纤环的

粘胶剂、包层和纤芯温度系数不同,温度变化引起的挤压力最终作用到纤芯上。如果光纤环中点两侧的热分布不对称,那么这种挤压力对纤芯造成的弹性应变与弹光效应引起的相移无法被完全抵消,最终会引起复杂的热致漂移。

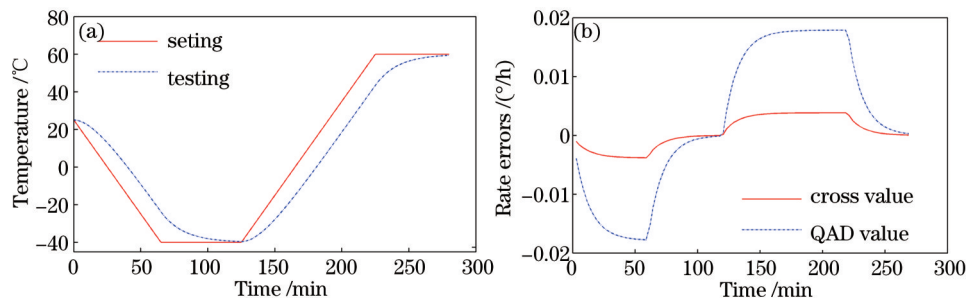


图 3 (a) 设定温度和测试温度; (b) 交叉绕法热致误差与四极对称绕法热致误差

Fig.3 (a) Setting and testing temperature; (b) thermal-induced rate error of cross winding pattern and QAD winding pattern

3.2 实 验

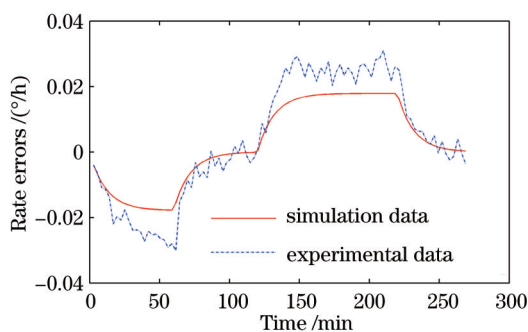


图 4 四极对称绕法热致误差仿真与实验数据

Fig.4 Simulation data and experiment data of QAD winding pattern thermal-induced rate error

为了验证仿真实验的正确性,对温箱中四极对称绕法的光纤环输出的陀螺数据进行计算,得出真实的温漂数据如图 4 中蓝虚线所示,与仿真得到的四极对称绕法的温漂数据(图 4 中红实线)基本相符,验证了温漂模型的正确性。那么基于相同的温度边界条件和几何参数,推测将此模型应用于交叉绕法仿真实验,其仿真结果也可信。因此可以得出结论:保证交叉绕法和四极对称绕法的边界条件相同,交叉绕法在抑制温漂方面的表现比四极对称绕法高一个数量级。因此合理设计放置光纤环的槽体,充分发挥交叉绕法的性能将变至关重要。

4 优化设计

4.1 槽体设计

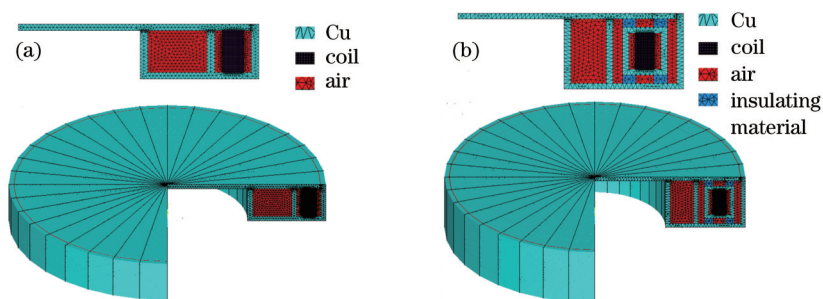


图 5 (a)旧槽体; (b)新型槽体

Fig.5 (a) Old spool; (b) new spool

传统槽体设计[图 1(b)]的目的是固定光纤环和给光纤环提供一个简单均匀的温度环境。但是,光纤环安装后槽体的缝隙及其结构特点给光纤环提供了一个复杂的温度环境。图 1(b)中的槽体设计上侧存在缝隙,

但是能够控制光纤环内外两侧温度差在一定范围内,基本能够满足采用四极对称法绕制的光纤环的温度要求。然而针对采用交叉法绕制的光纤环,由于交叉绕法对光纤环上下温度的对称性提出了苛刻的要求,上侧的缝隙将会严重制约交叉绕法优势的发挥。因此需针对采用交叉法绕制的光纤环的槽体进行重新设计。仅需保证其上下温度对称性而无需给光纤环提供一个均匀的温度环境,即可满足交叉绕法所需的温度环境。最终会使光纤陀螺提高至少一个数量级的精度指标。实验设计如下:把交叉绕法的光纤环分别放置于新旧槽体中做仿真对比实验,载荷和边界条件与第三节相同,所用到的材料参数参考表1和表2。基于此槽体设计如图5所示。图5(a)为图1(b)的结构示意图,其由铜槽和光纤环组成;图5(b)为设计的新型槽体,根据热传导原理,由外到内依次为铜外槽、空气、铜内槽、光纤环。光纤环放置于铜内槽做密封处理,铜内槽与铜外槽之间通过隔热圈进行隔离,避免铜内槽与铜外槽之间进行直接接触传热。

4.2 对比分析

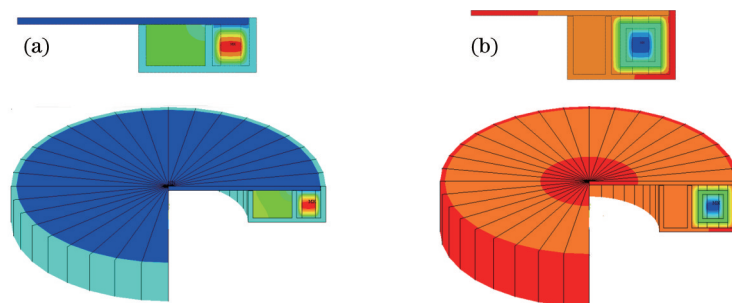


图6 仿真效果图。(a)旧槽体;(b)新槽体

Fig.6 Simulation rendering. (a) Old spool; (b) new spool

基于上文的槽体设计,把交叉绕法的光纤环分别内嵌于新旧槽体中做仿真对比实验,实验效果图如图6所示。图6(a)是旧槽体效果示意图,光纤环上下不完全对称,其原因是由旧槽体结构缺陷导致光纤环上下温度分布不对称;图6(b)是新槽体效果示意图,光纤环对称效果良好,其原因是内外槽体之间通过空气进行热传导过渡,最终能够使光纤环上下完好对称。

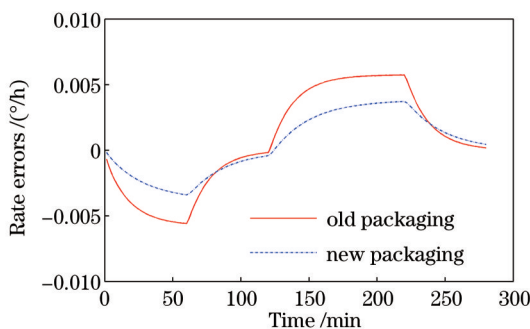


图7 光纤环采用交叉绕法:基于旧槽体热致误差曲线与基于新槽体的热致误差曲线

Fig.7 Fiber coil with cross winding pattern. thermal-induced rate error with the old packaging and thermal-induced rate error with the new packaging

把有限元仿真得到的数据代入(5)式中可以得出,两种槽体中光纤环的热致漂移。由对比结果图7可以看出新型槽体能够充分发挥交叉绕法在抑制温漂作用,与理论分析相符。

5 结 论

设计了一个基于有限元的光纤环数字化模型。在相同的温度及边界条件下,比较了光纤环分别采用交叉绕法与四极对称绕法对光纤陀螺热致误差的抑制作用,计算得出光纤环采用交叉绕法的热致误差仅为采用四极对称绕法的10%,交叉绕法优势明显。为了充分发挥交叉绕法抑制温漂的性能,对承载光纤环的槽体进行重新设计,通过对比分析得出,新型槽体能够充分发挥交叉绕法的性能,与理论分析基本一致。由于光纤陀螺的热致误差机理非常复杂,下一步将通过大量实验来验证仿真结果的正确性。

- 1 D M Shupe. Thermally induced nonreciprocity in the fiber optic interferometer[J]. *Appl Opt*, 1980, 19(5): 654–655.
- 2 Yang Yuanhong, Meng Chenxue. Research on the characteristic of bias error and noise analysis method of fiber optic gyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1206006.
杨远洪, 孟晨雪. 光纤陀螺零偏误差特性及噪声分析方法研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1206006.
- 3 Han Zhengying, Gao Yeheng, Zhao Yao. Quality inspection and assessment technology of fiber optic gyro fiber coil[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s2): S206012.
韩正英, 高业胜, 赵耀. 光纤陀螺光纤环质量检测评估技术研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(s2): S206012.
- 4 N J Frigo. Compensation of linear sources of nonreciprocity in Sagnac interferometers[C]. *SPIE*, 1983, 0412: 268–271.
- 5 Xu Mengrong, Cao Jianqiu, Huang Zhihe, *et al.*. Study of fiber coiling methods and pump light absorption[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s1): S106008.
徐梦荣, 曹涧秋, 黄值河, 等. 不同光纤缠绕方式与抽运光吸收研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(s1): S106008.
- 6 Yan Fengping, Lan Huijuan, Jian Shuisheng. Investigation of 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.
- 7 Gao Zhongxing, Zhang Yonggang, Wang Guochen, *et al.*. Analysis and simulation for the thermal performance of the octupolar fiber coil[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(1): 016114.
- 8 Yu Yongqing, Wang Yuezhe, Ma Lin, *et al.*. Temperature transient model in FOG fiber coil with cross winding [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2013, 21(5): 687–691.
于永清, 王玥泽, 马林, 等. 基于交叉绕法的光纤环圈瞬态传热模型[J]. *中国惯性技术学报*, 2013, 21(5): 687–691.
- 9 Marty Williams. Optical fiber placement for crossover-free fiber optic gyros[C]. *SPIE*, 2006, 6314: 631401.
- 10 Du Shisen, Guan Yueming, Jin Jing, *et al.*. Finite element model of thermal transient effect for crossover-free fiber optic gyros[J]. *Optik*, 2012, 123(8): 748–751.
- 11 Chen Xiyuan, Shen Chong. Study on error calibration of fiber optic gyroscope under intense ambient temperature variation[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(17): 3755–3762.
- 12 Li Jialei, Xu Hualong, He Jing. 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.
- 13 Liu Yuanyuan, Yang Gongliu, Li Siyi. 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.
- 14 Li Jichen, Gao Fengqi, Wang Guanglong, *et al.*. Analysis of dynamic Allan variance for fiber optic gyro 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(9): 0908004.
- 15 O F J Tirat, J M Euvete. Finite element model of thermal transient effect in fiber optic gyro[C]. *SPIE*, 1996, 2837: 230–238.
- 16 F Mohr. Thermo optically induced bias drift in fiber optical Sagnac interferometers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(1): 27–41.
- 17 F Mohr, F Schadt. Bias error in fiber optic gyroscopes due to elasto-optic interactions in the sensor fiber[C]. *SPIE*, 2004, 5502: 410–413.
- 18 S H Her, C Y Huang. Thermal strain analysis of optic fiber sensors[J]. *Sensors*, 2013, 13(2): 1846–1855.
- 19 Zhang Yonggang, Gao Zhongxing, Wang Guochen, *et al.*. Modeling of thermal-induced rate error for FOG with temperature ranging from $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [J]. *Photonics Technology Letters*, Lee, 2014, 26(1): 18–21.

栏目编辑: 韩 峰