

双柱型绕法对干涉式光纤陀螺温度性能的影响

李绪友¹ 凌卫伟^{1*} 许振龙¹ 魏延辉¹ 杨汉瑞²

¹哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

²东北电力大学自动化工程学院, 吉林 长春 132012

摘要 通过深入分析光纤陀螺敏感环的特点,提出了一种工艺简单的双柱型(D-CYL)绕法。通过有限元方法仿真分析了双柱型绕法环圈瞬态传热性能,对比分析了在相同变温条件下双柱型绕法与交叉绕法对陀螺性能的影响。结果表明,在对称的温度环境下,双柱型绕法在抑制陀螺温度漂移方面的效果与交叉绕法相当,两者漂移误差均低于 $0.01 (^{\circ})/h$,与理论分析相符。

关键词 光纤光学; 双柱型绕法; 有限元法; 光纤环; 隔热腔体; 热致漂移

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0806003

Effect of Double-Cylinder Winding on Temperature Performance of Interferometric Fiber Optic Gyroscope

Li Xuyou¹ Ling Weiwei¹ Xu Zhenlong¹ Wei Yanhui¹ Yang Hanrui²

¹ College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

² School of Automation Engineering, Northeast Dianli University, Changchun, Jilin 132012, China

Abstract By deeply analyzing the characteristics of interferometric fiber optic gyroscope sensitive ring, a double-cylinder (D-CYL) winding method with a simple process is proposed. Simulation by finite element method is conducted to analyze the transient heat transfer performance of the D-CYL winding coils and a comparative analysis is made to find out the different effects of D-CYL and cross winding methods on fiber optic gyroscope under the same variable temperature. The results show that, under a symmetry temperature environment, the D-CYL winding method shows almost the same performance in suppressing phase drift error as the cross winding method, and both errors are within $0.01 (^{\circ})/h$, which is consistent with that from the theoretical analysis.

Key words fiber optics; double-cylinder winding method; finite element method; fiber coil; heat-off spool; thermally induced drift

OCIS codes 060.2800; 060.2370; 140.6810

1 引 言

温度漂移是光纤陀螺中最棘手且不可避免的一个问题,研究者们不断地研究新方法以降低其影响。Frigo 等^[1-3]深入研究了光纤环绕法,从机理层面分析了温漂产生的原因,并给出了可能采取的抑制手段。在理想情况下,光纤环采用交叉绕法^[3]和立体绕法^[4]都能够满足光纤环的对称性要求,从而减弱温度造成的漂移影响。然而,采用交叉绕法需不断进行交叉缠绕,采用立体绕法需精准地放置光纤。在这些苛刻条件下,这两种绕法能否投入实际应用仍需验证。Dzhashitov 等^[14]提出对光纤陀螺进行精确的温度控制并进行补偿,实验效果良好,但是实际造价过高。随着处理器芯片处理能力的增强,一些智能补偿算法^[15-18],如神经网络、遗传算法等得到了深入研究,但这些算法一般都是基于离线状态下的数值仿真,无法投入到实时应用中。

收稿日期: 2016-03-14; **收到修改稿日期:** 2016-04-01

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、光纤测量技术方面的研究。

E-mail: lixuyou@hrbeu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: vvling@hrbeu.edu.cn

2015年,本研究团队基于交叉绕法提出了一种新型的隔热腔体^[19],仿真效果良好,但是利用交叉法绕制光纤的过程太过复杂,张力和角度很难把控。结合光纤环圈的绕制特点和所设计的隔热腔体的结构特点,使光纤环保持轴对称和上下面对称的温度分布较易实现,但难以保证光纤环绕制的空间对称性。本文提出了一种采用双柱型(D-CYL)绕法的光纤环;通过有限元方法,仿真分析了双柱型光纤环圈和交叉型光纤环圈的瞬态传热性能。仿真结果表明,两种方案对光纤陀螺的温漂都有好的抑制效果。

2 光纤环圈热值误差数学模型

在光纤陀螺的光纤环中,当存在温度扰动时沿相反方向传输的两束光会经历不同的相移,这种相移与旋转产生的相移很难区分。因此为了保证光纤陀螺精度,需采取技术手段降低这种非互易性相移。假设光纤陀螺的光纤环线圈中一段光纤存在温度扰动,则相移 ϕ 可表示为^[1]

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

式中 β_0 为真空中的传播常数且 $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 为光在真空中的波长; n 为光纤的有效折射率; $\partial n/\partial T$ 为折射率温度系数; l 为光纤长度; α 为折射率膨胀系数; ΔT 为光纤的温度变化量。将光纤长度扩展到整个光纤环,结合Sagnac效应,总的热致相移随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, $\dot{T}(l,t)$ 为长度为 l 的光纤片段的温变速率。通常 $\partial n/\partial T$ 的大小为 $10^{-5}/^\circ\text{C}$,而 $n\alpha$ 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 、光纤环的直径 D 和被测光纤环绕其轴的旋转速率 Ω 之间的关系为

$$\phi(t) = [2\pi LD/(\lambda_0 c)] \Omega, \quad (3)$$

式中 c 为真空中的光速。由(2)、(3)式,可以得到热瞬变过程引起的近似等效旋转速率误差为

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

为了提高运算效率,将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

$$\begin{aligned} \Omega_E(t) = \frac{n}{DL} \frac{\partial n}{\partial T} \left\{ \int_{l_1}^{l_1+d_1} \dot{T}(l_1,t) (L - 2l) dl + \int_{l_2}^{l_2+d_2} \dot{T}(l_2,t) (L - 2l) dl + \dots + \right. \\ \left. \int_{l_{MN-1}}^{l_{MN-1}+d_{MN-1}} \dot{T}(l_{MN-1},t) (L - 2l) dl + \int_{l_{MN}}^{l_{MN}+d_{MN}} \dot{T}(l_{MN},t) (L - 2l) dl \right\}, \quad (5) \end{aligned}$$

式中 l_1, l_2, \dots, l_{MN} 为各匝光纤起点与光纤环起始端的距离, d_1, d_2, \dots, d_{MN} 为各匝光纤的长度。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处理,则(5)式的数字化表达式可表示为^[2]

$$\Omega_E(t) = \frac{n}{DL} \sum_{i=1}^{MN} \left(\frac{\partial n}{\partial T} + nd \right) \dot{T}(l_i,t) (L - 2l_i - d_i) d_i, \quad (6)$$

式中 l_i 为第 i 匝光纤的起始点距离光纤环起始端的长度, d_i 为第 i 匝光纤的绕制长度, $\dot{T}(l_i,t)$ 为第 i 匝光纤的温变速率。

3 双柱型绕法的有限元传热模型及其对热致误差的抑制效果

3.1 双柱型绕法的有限元传热模型

交叉绕法绕制的环圈示意图如图1(a)所示,图1(b)为此处提出的双柱型绕法。对比可知,两种绕法都能使中点两侧环圈呈空间对称,但双柱型绕法的绕制工艺更简单。图1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合剂,灰色大圆圈表示光纤包层,白色和蓝色小圆圈表示纤芯。光纤环采用四极对称绕法,内径 R_1 为 0.055 m,外径 R_2 为 0.0605 m,高 H 为 0.013 m,层数 M 为 40,每一层的匝数 N 为 68。根据光纤环的实际参数分别设计出的交叉绕法和双柱型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,差异性主要是缠绕方式不同造成的,但不影响仿真对比实验。

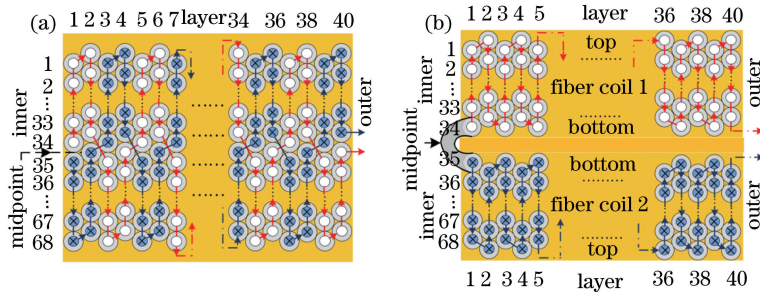


图 1 光纤陀螺绕法示意图。(a)交叉绕法;(b)双柱型绕法

Fig. 1 Schematic diagram of fiber optic gyroscope winding. (a) Cross winding; (b) D-CYL winding

表 1 光纤环的仿真参数

Table 1 Simulation parameters of fiber coils

Category	L / m	Clockwise Anticlockwise		M	N	R_1 / m	R_2 / m	H / m
		fiber length / m	fiber length / m					
D-CYL winding pattern	992.4935	496.2346	496.2589	40	68	0.055	0.0605	0.013
Cross winding pattern	992.8282	496.43105	496.39715	40	68	0.055	0.0605	0.013

为了定量分析双柱型绕法对热值误差的抑制效果,利用 ANSYS 有限元分析软件对采用双柱型绕法绕制的光纤环圈进行精确的仿真分析。由双柱型绕法的绕制特点可知,中点两侧的光纤具有很好的空间对称性,但其自身几乎没有克服轴向非对称温度扰动的能力。因此必须借助外部设备为其提供对称的温度环境以充分发挥其性能。通过研究发现,此前设计的隔热腔体 [图 2 (a)]^[19]符合外部隔热设备的要求。铝合金良好的导热性能能够使外侧壁热流得到初步均化,而相邻层的空气层能够降低热流对内侧壁的刺入量,通过内侧壁的铝合金材料进一步对温度场进行均化,最终为光纤环提供一个动态对称的温度环境。基于此,仿真实验可设计为隔热腔体配合两种绕法的光纤环,并且对腔体四周同时加载图 3 所示的时变温度载荷,复杂温度环境下仿真效果如图 2(b)所示。由图 2(b)可知,新型腔体能够为光纤环提供对称的温度环境。用于仿真计算的材料热参数如表 2 所示^[9-10]。

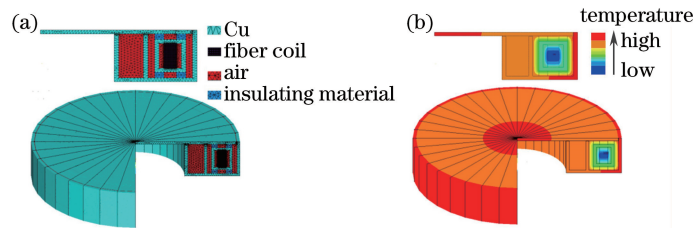


图 2 (a)隔热腔体;(b)仿真效果图

Fig. 2 (a) Heat-off spool; (b) simulation drawing

表 2 计算参数

Table 2 Parameters for calculation

Category	Fiber core	Coating	Glue	Al alloy	Insulating material
Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2203	1190	970	2740	2520
Specific heat $c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	703	1400	1600	896	2000
Thermal conductivity $K / (\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	1.38	0.21	0.21	221	1.6

实验的温度载荷边界条件为:初始温度为 20 °C,保温 30 min,载荷温度在 -40 ~ 60 °C 之间变换,在

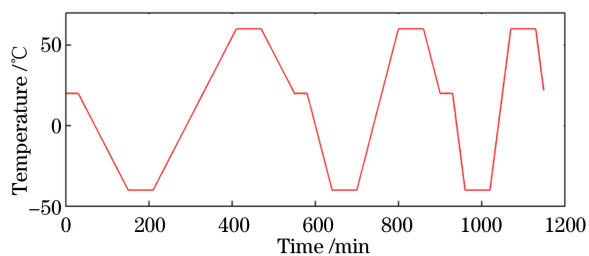


图 3 仿真实验载荷曲线

Fig. 3 Load curve in simulation experiment

-40 °C 和 60 °C 两个温度点分别保持 60 min, 进行温变速率分别为 $\pm 0.5, \pm 1, \pm 2$ °C/min 的变温仿真实验。表面传热系数 h 设置为 $5 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。为了更细致地反映腔体内部光纤环截面的温度场, 以仿真载荷起始时间为起点, 分别截取时间 $t = 1.08 \times 10^4 \text{ s}$ 和 $t = 3.84 \times 10^4 \text{ s}$ 时的腔体内部光纤环热场分布, 如图 4 所示。

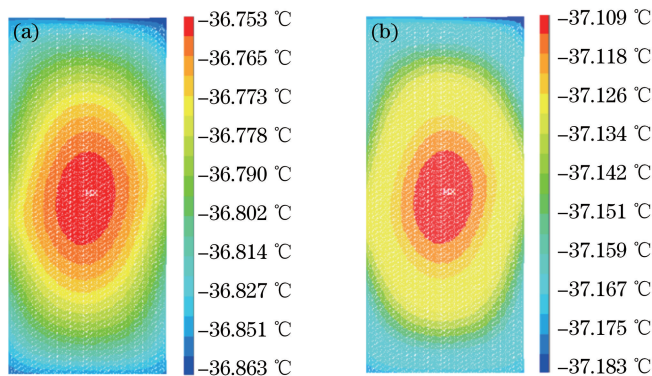


图 4 光纤环横截面的时变温度图。(a) $t = 1.08 \times 10^4 \text{ s}$; (b) $t = 3.84 \times 10^4 \text{ s}$

Fig. 4 Time-varying thermal distribution maps of cross section of fiber coils.

(a) $t = 1.08 \times 10^4 \text{ s}$; (b) $t = 3.84 \times 10^4 \text{ s}$

3.2 双柱型绕法对热致误差的抑制效果

由图 3 可知, $t = 1.08 \times 10^4 \text{ s}$ 和 $t = 3.84 \times 10^4 \text{ s}$ 为温度载荷分别以 -0.5 °C/min 和 -1 °C/min 温变速率快速降温至 -40 °C 的两个时间节点。因此处于这两个时间点上的光纤环温度场最为复杂且具有代表性, 同时这两个时间点的选取也能反映不同温变速率对光纤环温度场分布的影响。由图 4 可知, 在复杂的温度环境下, 隔热腔体能够维持光纤环上下面对称的温度场分布, 同时隔热腔体的隔热性能能够延缓不同外界温变速率对光纤环本身的影响。计算出各匝光纤温度随时间变化的温变速率, 结合双柱型绕法和交叉绕法中各匝的位置因子并代入(6)式^[20], 即可得到两种绕法绕制的光纤环圈对热致误差的抑制效果, 如图 5 所示。

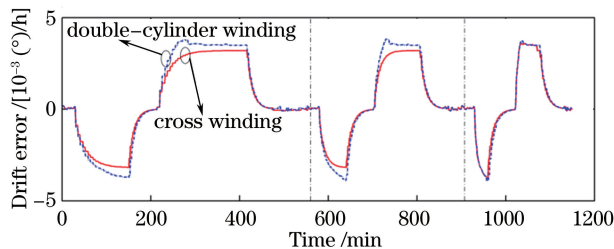


图 5 两种绕法的热致漂移误差

Fig. 5 Thermally induced drift error in two winding methods

3.3 双柱型绕法光纤环制备方法

双柱型绕法光纤环由两个几何参数相同、绕线方向相反的小柱型光纤环组成, 其绕环机制如图 6(a) 所示, 两个小柱型光纤环沿相反方向同时开始绕制, 绕制完成后将骨架脱去, 然后对两个光纤环进行背靠背粘接, 使其由两个光纤环变为一个光纤环, 如图 6(b) 所示。

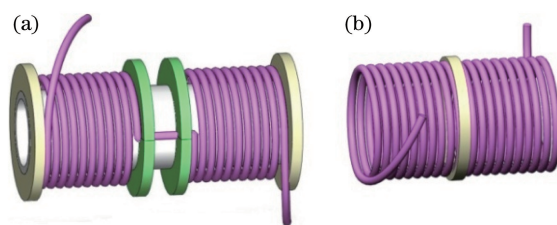


图 6 双柱型绕法的(a)绕环机制和(b)拼接示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of (a) winding mechanism and (b) coil splicing of D-CYL winding

4 讨 论

由图 5 可知,基于两种绕法制备的光纤陀螺热漂移值都低于 $0.01 (^{\circ})/h$ 。两种绕法在抑制温漂方面效果如此显著,主要有两方面原因:其一,隔热腔体的结构特点能够为光纤环提供一个上下面对称的温度环境;其二,两种绕法都能够实现光纤环中点两侧光纤环圈在空间上的对称性分布。但双柱型绕法是从光纤环一端沿一个方向绕制,无需进行跨层或交叉,而交叉绕法需要不断地进行交叉绕制,因此双柱型绕法的优点是实现了复杂问题的转移,即通过简单的双环工艺,最大程度地实现了光纤中点两侧光纤段在空间上的对称性分布。

5 结 论

提出了一种工艺简单的双柱型绕法的光纤环制备方法,通过对比实验验证了双柱型绕法在抑制光纤陀螺热致误差方面的效果与交叉绕法几乎相同。简单的制备工艺使双柱型绕法更易实现批量化生产,有助于光纤陀螺达到较高的精度。

参 考 文 献

- 1 Frigo N J. Compensation of linear sources of non-reciprocity in Sagnac interferometers[C]. SPIE, 1983, 412: 268-271.
- 2 Mohr F. Thermooptically induced bias drift in fiber optical Sagnac interferometers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(1): 27-41.
- 3 Yu Yongqing, Wang Yueze, 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.
- 4 Du S S, Guan Y M, Jin J, *et al.* Finite element model of thermal transient effect for crossover-free fiber optic gyros[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2012, 123(8): 748-751.
- 5 Chen X Y, Shen C. Study on error calibration of fiber optic gyroscope under intense ambient temperature variation[J]. Applied Optics, 2012, 51(17): 3755-3762.
- 6 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.
- 7 Her S C, Huang C Y. Thermal strain analysis of optic fiber sensors[J]. Sensors, 2013, 13(2): 1846-1855.
- 8 Gao Z X, Zhang Y G, Wang G C, *et al.* Analysis and simulation for the thermal performance of the octupolar fiber coil [J]. Optical Engineering, 2014, 53(1): 016114.
- 9 Zhang Y G, Gao Z X, Wang G C, *et al.* Modeling of thermal-induced rate error for FOG with temperature ranging from -40°C to 60°C [J]. IEEE Photonic Technology Letters, 2014, 26(1): 18-21.
- 10 Li X Y, Ling W W, Wei Y H, *et al.* Three-dimensional model of thermal-induced optical phase shifts in rotation sensing [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(9): 090603.
- 11 Ling W W, Li X Y, Xu Z L, *et al.* Thermal effects of fiber sensing coils in different winding pattern considering both thermal gradient and thermal stress[J]. Optics Communications, 2015, 356: 290-295.
- 12 Lu Lin, Yang Yuanhong, Li Hongying. Study of polarization-maintaining photonic crystal fibers with zero birefringent temperature sensitive coefficient[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1006006.

- 陆 林, 杨远洪, 李红颖. 零双折射温度敏感系数保偏光子晶体光纤研究[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1006006.
- 13 Han Zhengying, Gao Yesheng, 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.
- 14 Dzhashitov V E, Pankratov V M. Control of temperature fields of a strapdown inertial navigation system based on fiber optic gyroscopes[J]. Journal of Computer and Systems Sciences International, 2014, 53(4): 565-575.
- 15 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.
- 16 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.
- 17 Chen X Y, Song R, Shen C, *et al.* Application of a genetic algorithm Elman network in temperature drift modeling for a fiber-optic gyroscope[J]. Applied Optics, 2014, 53(26): 6043-6050.
- 18 Zhang Y S, Wang Y Y, Yang T, *et al.* Dynamic angular velocity modeling and error compensation of on-fiber fiber optic gyroscope (OFFOG) in the whole temperature range[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 32(2): 025101.
- 19 Li Xuyou, Ling Weiwei, Xu Zhenlong, *et al.* Design of a new spool for fiber coil based on cross winding pattern[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0606002.
李绪友, 凌卫伟, 许振龙, 等. 基于交叉法绕制的光纤环的槽体设计[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0606002.
- 20 Song Ningfang, Guan Yueming, Jia Ming. Analysis of multi-parameters effect on Shupe error in fiber optic gyroscope fiber coil[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(5): 569-573.
宋凝芳, 关月明, 贾 明. 光纤陀螺光纤环 Shupe 误差的多参数影响仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(5): 569-573.