

## 基于等效不对称长度的光纤环温度性能评价方法

范运强\*, 黄继勋, 李晶

北京航天时代光电科技有限公司, 北京 100094

**摘要** 将光纤环接入光纤陀螺系统,用全温零偏极差评价其温度性能是光纤环常用的评价方法。针对全温零偏极差因仅能判断光纤环温度性能而对后期应用指导作用不明显的问题,提出光纤环等效不对称长度的概念和基于此判据的光纤环温度性能评价方法。通过量化分析,明确了等效不对称长度的测试方法,验证了等效不对称长度用于评价光纤环温度性能的可行性以及该参数对应用的指导效果。实验结果显示,光纤环等效不对称长度与全温零偏极差近似线性相关,根据该参数对称性调整 3 只光纤陀螺,在温度变化率为 1 °C/min 和 2 °C/min 下测试时,其温度性能均得到明显改善。由此表明等效不对称长度不仅能准确评估光纤环温度性能,同时对光纤环应用具有较强的指导意义。

**关键词** 光纤光学; 光纤陀螺; 光纤环; 等效不对称长度; Shupe 误差; 评价方法

**中图分类号** V241.5

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/AOS202141.2306002

## Temperature Performance Evaluation of Fiber Coil with Equivalent Asymmetric Length

Fan Yunqiang\*, Huang Jixun, Li Jing

Beijing Aerospace Times Optical-Electronic Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China

**Abstract** Fiber coils are generally evaluated from the aspect of their temperature performance with the full-temperature zero bias range after being connected to a fiber optic gyroscope system. However, the full-temperature zero bias range can only judge the temperature performance of fiber coils but is less effective to guide their applications. To address this problem, this paper proposes the concept of equivalent asymmetric length (EAL) of fiber coils and the way to evaluate their temperature performance based on it. With quantitative analysis, the paper determines the EAL test method and verifies the feasibility of evaluating fiber coils with EAL and the guiding effect of EAL on fiber coil applications. The results show that EAL is approximately linearly correlated with the full-temperature zero bias range, and the temperature performance of three fiber optic gyroscopes whose symmetry is tuned depending on EAL is improved significantly at a temperature change rate of 1 °C/min or 2 °C/min. This indicates that EAL is capable of both accurately estimating the temperature performance of fiber coils and guiding their applications.

**Key words** fiber optics; fiber gyroscope; fiber coil; equivalent asymmetric length; Shupe error; evaluation method

**OCIS codes** 060.2800; 060.2300; 120.5790; 120.6810

## 1 引言

光纤陀螺具有抗冲击、灵敏度高、寿命长、动态范围大、启动时间短等优点,广泛应用于航空、航天、航

海等领域的惯性导航系统中<sup>[1]</sup>。作为光纤陀螺的敏感核心,光纤环的性能直接影响光纤陀螺的工程应用精度,其中温度性能对光纤陀螺零偏误差的影响最为显著,因此光纤陀螺装配前需要对光纤环进行温度筛

收稿日期: 2021-05-13; 修回日期: 2021-06-01; 录用日期: 2021-06-10

基金项目: 装备预研领域基金(61405170307)

通信作者: \*fanyunqiang@126.com

选。最常用的方法是以接入陀螺系统的光纤环全温零偏极差作为评价筛选指标<sup>[2]</sup>；此外，以应力分布作为筛选依据，筛选后的光纤环能满足全温零偏稳定性 0.08 (°)/h 的陀螺需求<sup>[3]</sup>；根据光纤环常温偏振串扰测试曲线的周期性信息，能准确判断光纤环中的应力集中点<sup>[4]</sup>，通过变温环境下光纤环偏振串扰的曲线变化，也能大致反映光纤环的温度性能<sup>[5-7]</sup>。这些评价方法对光纤环温度性能的筛选具有一定的帮助，但对光纤环应用均无指导意义。相关研究表明，根据光纤环自身的温度特征，通过优化其使用方法能有效提升光纤陀螺温度性能<sup>[8-10]</sup>，因此，在工程实践中迫切需要一种对光纤环应用具有指导意义的评价方法。

对称性是光纤环性能的综合体现，该参数受绕制方式、光纤绕制状态、应力分布等多因素影响，不仅是决定光纤环温度性能的关键因素，同时对光纤环应用具有直接指导意义。本文基于光纤环 Shupe 误差机理，提出了光纤环等效中点和等效不对称长度的概念，以等效不对称长度定量评价光纤环对称性，并针对该参数用于评价光纤环温度性能的可行性以及该参数对应用的指导效果进行了实验验证，实验结果表明以等效不对称长度评价光纤环温度性能的方法可行。

## 2 基于 Shupe 误差的等效不对称长度

### 2.1 光纤环 Shupe 误差

光纤折射率易受温度影响，当光纤环非中点处光纤受到温度干扰时，光纤折射率发生变化，光纤环内相向传输的两束光波经过该点的时间不同，因此经过该点产生的光波相位延迟也存在差异，这种由温度引起的相位差所产生的误差称为 Shupe 误差，

其大小可表示为<sup>[11]</sup>

$$\Delta\phi_E(t) = \frac{\beta_0}{c} \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^L \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} (L - 2z) dz, \quad (1)$$

式中： $\Delta\phi_E(t)$ 为  $t$  时刻温度变化引起的相位差； $\beta_0 = 2\pi/\lambda$  为光波的传播常数； $c$  为光波在光纤中的传播速度； $\partial n/\partial T$  为光纤折射率温度系数； $L$  为光纤环光纤总长度。

根据 Sagnac 效应，可知沿光纤环轴向的旋转引起的相位差与光纤环长度  $L$ 、光纤环平均直径  $D$  以及旋转角速率  $\Omega$  的关系可表示为

$$\Delta\phi_E(t) = \frac{2\pi DL}{\lambda c} \Omega(t). \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可知，光纤环热致相位误差引起的角速度误差为

$$\Omega(t) = \frac{n}{DL} \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^L \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} (L - 2z) dz. \quad (3)$$

### 2.2 等效不对称长度

由(3)式可知，光纤环中点两侧对称的光纤在变温环境下产生的角速度误差相反，由于非理想因素的存在，采用四极对称绕制的光纤环温度误差依然存在，这种残余的温度误差为光纤环固有温度误差，其大小可表示为

$$\Omega_0(t) = \frac{n}{DL} \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^{L/2} \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} (L - 2z) dz - \frac{n}{DL} \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^{L/2} \frac{\partial T(L - z,t)}{\partial t} (L - 2z) dz. \quad (4)$$

由 Shupe 误差机理可知，在光纤环内存在等效中点  $M_e$ ，以该点作为光纤环中点进行温度误差计算时，两侧光纤所产生的温度误差可以完全消除，定义光纤环等效中点  $M_e$  与物理中点  $M_0$  的距离  $l_e$  为光纤环的等效不对称长度，如图 1 所示。

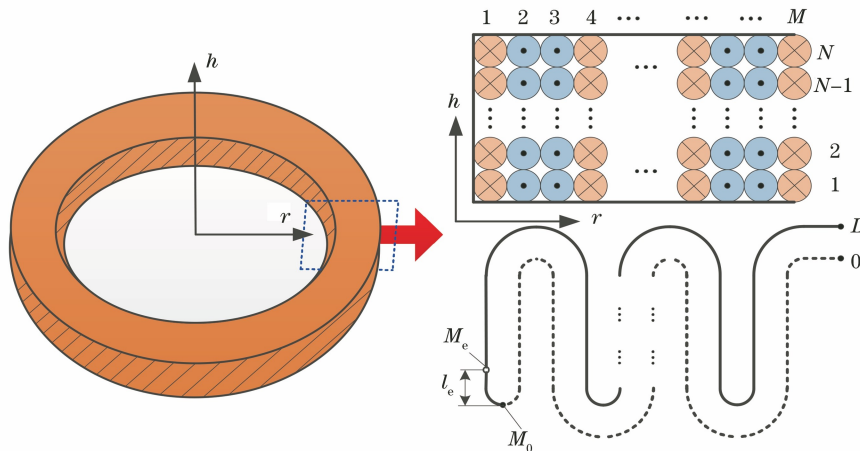


图 1 等效不对称长度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of equivalent asymmetric length

根据 Shupe 误差机理,可知只有当等效中点与物理中点重合时,才能真正实现等效中点两侧光纤受温度引起的零偏误差完全相反。因此,对光纤环

尾纤光路进行补偿,即使距离等效中点较近的一端光纤长度增加  $2l_e$ ,此时等效中点与物理中点重合,如图 2 所示。

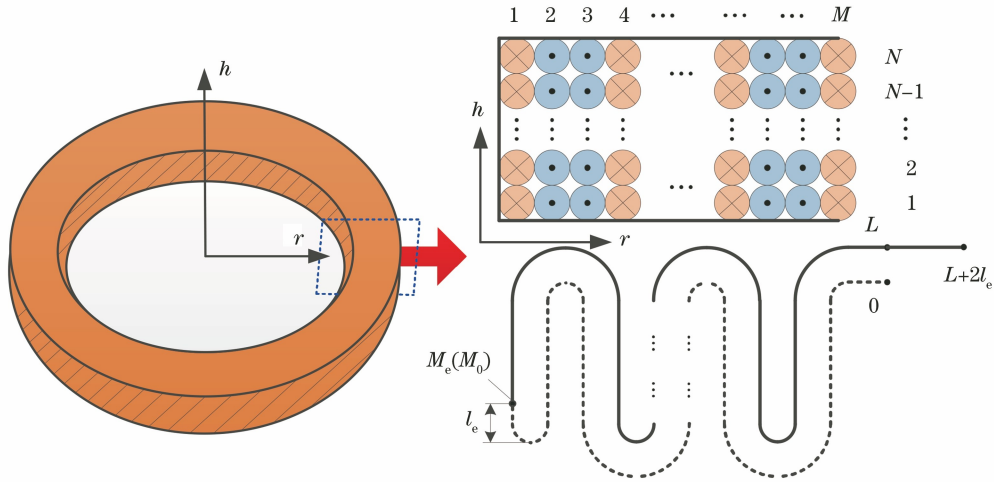


图 2 物理中点变化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of physical midpoint change

光纤环物理中点发生偏移后与等效中点重合,此时,等效中点两侧  $L$  段光纤产生的温度误差能完全抵消, $L$  段光纤的温度误差可表示为

$$\Omega_1(t) = \frac{n}{DL} \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^L \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} (L - 2z) dz + \frac{2l_e n}{DL} \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^L \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} dz \approx 0. \quad (5)$$

将(4)式代入(5)式可知,光纤环的等效不对称长度可表示为

$$l_e = -\Omega_0(t) \cdot \frac{DL}{2n \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^L \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} dz}. \quad (6)$$

由(6)式可知,光纤环等效不对称长度与其固有温度误差线性相关,等效不对称长度越小,光纤环温度性能越好。

### 3 等效不对称长度量化测试

光纤环等效不对称长度与其固有温度误差线性相关,量化测试该指标,需按光纤环测试方法将其接入光纤陀螺系统,测试时将干涉光路放置在温度场内,其余测试器件均放置在温度场外,其测试原理如图 3 所示。

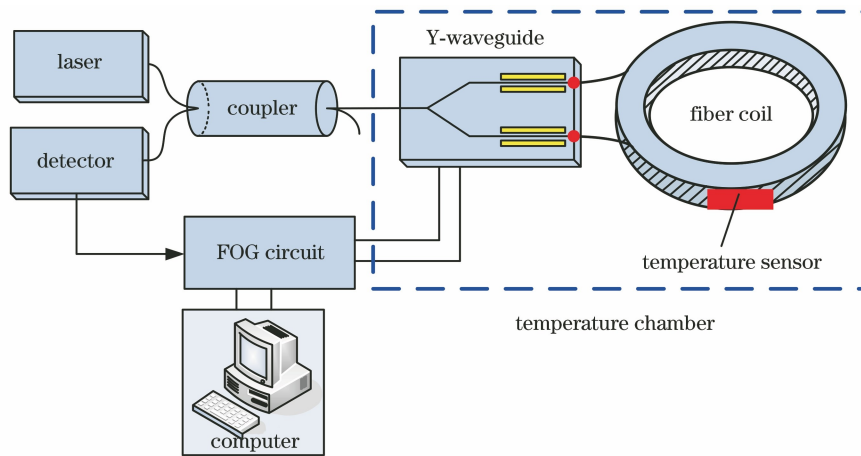


图 3 光纤环测试原理

Fig. 3 Fiber coil test principle

将光纤环一端尾纤接入长度为  $l_x$  的光纤,如图 4 所示,由于接入的光纤长度  $l_x$  较短且测试过程

中光纤盘绕在一起,因此,该段光纤上的温度差异可忽略不计。同时,由  $l_x$  引起的平均直径和长度的乘

积变化也可忽略不计,则光纤环 Shupe 误差可表示为

$$\Omega(t) \approx \frac{n}{DL} \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^{L+l_x} \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} (L+l_x-2z) dz = \Omega_0(t) + \frac{n}{DL} \frac{\partial n}{\partial T} l_x \int_0^L \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} dz - \frac{n}{D} \frac{\partial n}{\partial T} l_x \frac{\partial T(t)}{\partial t}, \quad (7)$$

式中  $\frac{\partial T(t)}{\partial t}$  为  $l_x$  段光纤的温度变化率。

等效不对称长度描述的是光纤环的固有对称性,可用于表示光纤环初始状态的性能,而(7)式中,接入的光纤引入了额外的温度误差,测试等效不对称长度时需要消除该误差的干扰。因此将接入的  $l_x$  光纤放置在恒温装置内,如图 4 所示,恒温装置内光纤的温度恒定,装置内光纤引起的温度误差可忽略不计。(7)式所示的 Shupe 误差可表示为

$$\Omega(t) = \Omega_0(t) + \frac{n}{DL} \frac{\partial n}{\partial T} l_x \int_0^L \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} dz. \quad (8)$$

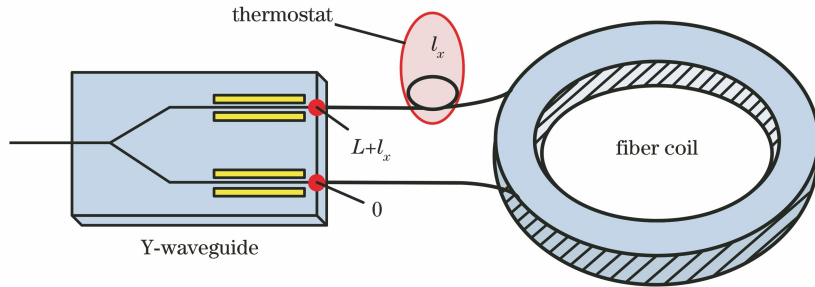


图 4 等效不对称长度测试原理

Fig. 4 Test principle of equivalent asymmetric length

由(6)式和(8)式可知,测试获得的光纤环角速度温度误差为

$$\Omega(t) = \Omega_0(t) \left(1 - \frac{l_x}{2l_c}\right). \quad (9)$$

由(9)式可知,光纤环角速度温度误差与接入的光纤长度  $l_x$  线性相关,当  $l_x$  为等效不对称长度  $l_c$  的 2 倍时,光纤环的理论温度误差为 0,因此可通过该方法定量测试光纤环的等效不对称长度。

选取同一型号的 3 只光纤环,使用可拆除胶将

光纤环粘接在磁屏蔽工装上,光纤环尾纤以自由状态盘绕在工装内,用磁屏蔽罩对光纤环及其尾纤进行封闭。温度范围取  $-40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ , 极限温度点  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  时均保温 3 h, 温度变化率分别为  $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  和  $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ , 依次进行全温零偏极差和等效不对称长度测试,温度曲线如图 5 所示,全温零偏极差测试曲线如图 6 所示,等效不对称长度测试拟合曲线如图 7 所示。

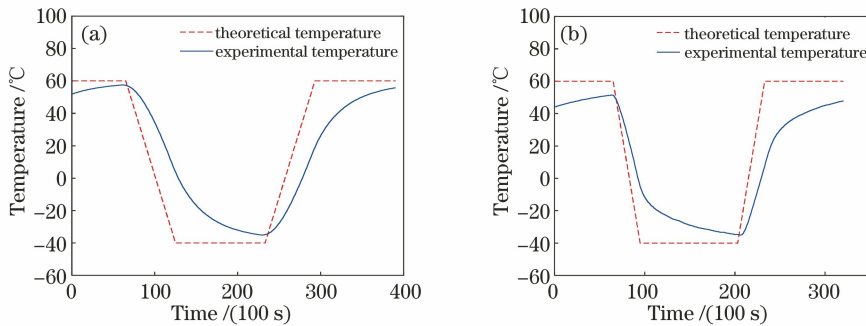


图 5 温度测试曲线。(a)温度变化率为  $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ; (b)温度变化率为  $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$

Fig. 5 Temperature test curves. (a) Temperature gradient of  $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ; (b) temperature gradient of  $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$

当温度变化率为  $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  时,图 6(a)中光纤环的全温零偏极差分别为  $0.2, 0.3, 0.4 \text{ }^\circ/\text{h}$ , 图 7(a)中根据拟合曲线获得的零点坐标分别为  $17.2, 27.8, 35.8 \text{ cm}$ , 对应的等效不对称长度为  $8.6, 13.9, 17.9 \text{ cm}$ ; 当温度变化率为  $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  时,图 6(b)中光纤环的全温零偏极差分别为

$0.31, 0.45, 0.58 \text{ }^\circ/\text{h}$ , 图 7(b)中根据拟合曲线获得的零点坐标为  $16.6, 27.4, 35.2 \text{ cm}$ , 对应的等效不对称长度分别为  $8.3, 13.7, 17.6 \text{ cm}$ 。两种温度变化率下测得的光纤环等效不对称长度基本一致,这说明该参数表示的是与温度变化率无关的固有温度特征。将两种温度变化速率下的光纤

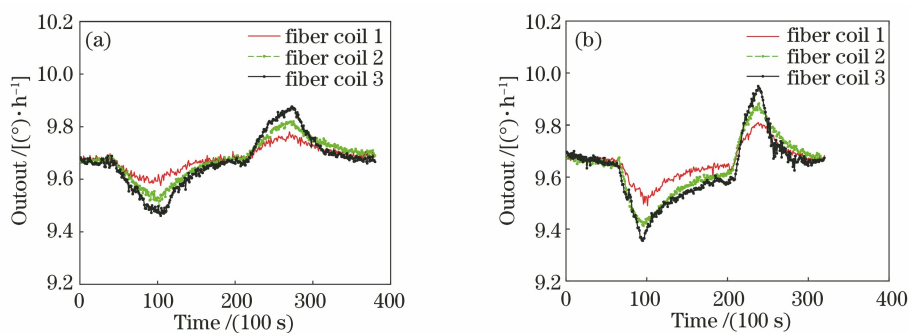


图 6 光纤环测试曲线。(a)温度变化率为 1 °C/min;(b)温度变化率为 2 °C/min

Fig. 6 Fiber coil test curves. (a) Temperature gradient of 1 °C/min; (b) temperature gradient of 2 °C/min

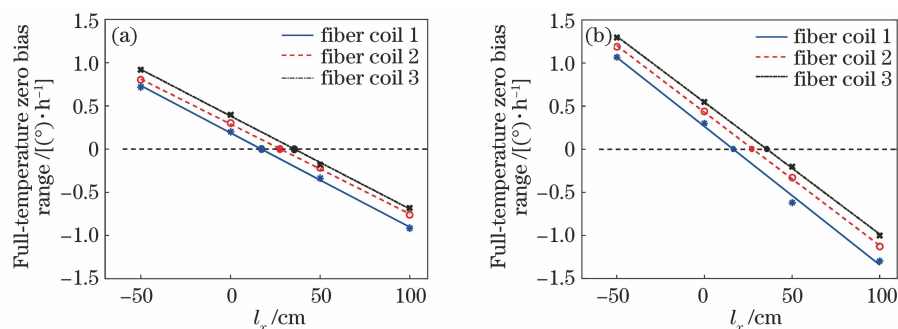


图 7 等效不对称长度测试拟合曲线。(a)温度变化率为 1 °C/min;(b)温度变化率为 2 °C/min

Fig. 7 Fitting curves of fiber coil equivalent asymmetric length. (a) Temperature gradient of 1 °C/min; (b) temperature gradient of 2 °C/min

环等效不对称长度和全温零偏极差进行线性拟合,如图 8 所示。

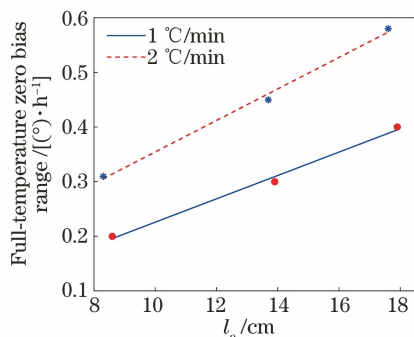


图 8 等效不对称长度与全温零偏极差拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of equivalent asymmetry length and full-temperature zero bias range

由图 8 可知,在同一温度变化率下,等效不对称长度与全温零偏极差近似线性相关,光纤环等效不对称长度越小,其全温零偏极差越小。

#### 4 等效不对称长度对光纤环应用的影响

光纤陀螺温度性能由陀螺干涉光路的对称性决定,陀螺干涉光路包括光纤环环体光路和装配尾纤光路,其中装配尾纤光路由光纤环尾纤和 Y 波导尾

纤共同构成。为验证等效不对称长度对光纤环应用的指导作用,对 3 只光纤环以不同的对称状态进行光路装配。1)装配过程中不进行对称性调整,使干涉光路对称性与光纤环一致,以图 5 中的条件进行全温性能测试;2)装配过程中根据光纤环等效不对称长度,进行对称性调整,使 3 只陀螺干涉光路的物理中点与等效中点重合,同样以图 5 中的条件进行全温性能测试。两种温度变化率下,光纤陀螺对称性调整前后全温性能的测试结果如图 9 和图 10 所示。

图 9 和图 10 中,未进行对称性调整的 3 只光纤陀螺,在温度变化率为 1 °C/min 下测试时,其全温零偏极差分别为 0.2,0.28,0.37 (°)/h;对称性调整后,3 只光纤陀螺全温零偏极差分别为 0.07,0.09,0.08 (°)/h。在温度变化率为 2 °C/min 测试时,陀螺全温零偏极差分别为 0.31,0.41,0.54 (°)/h;对称性调整后,3 只光纤陀螺全温零偏极差分别为 0.1,0.15,0.11 (°)/h。与对称性调整前相比,3 只光纤陀螺温度性能均有明显提升,且对称性调整后的光纤陀螺全温零偏极差与光纤环全温零偏极差不再具有相关性。

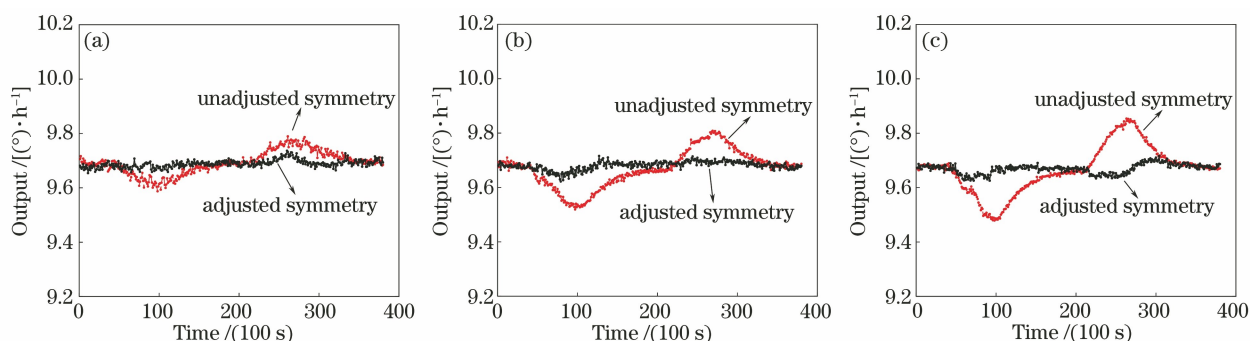


图 9 温度变化率  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  下装配对称性调整前后的测试结果。(a) 光纤陀螺 1; (b) 光纤陀螺 2; (c) 光纤陀螺 3

Fig. 9 Symmetry adjustment effect for assembly at  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . (a) FOG 1; (b) FOG 2; (c) FOG 3

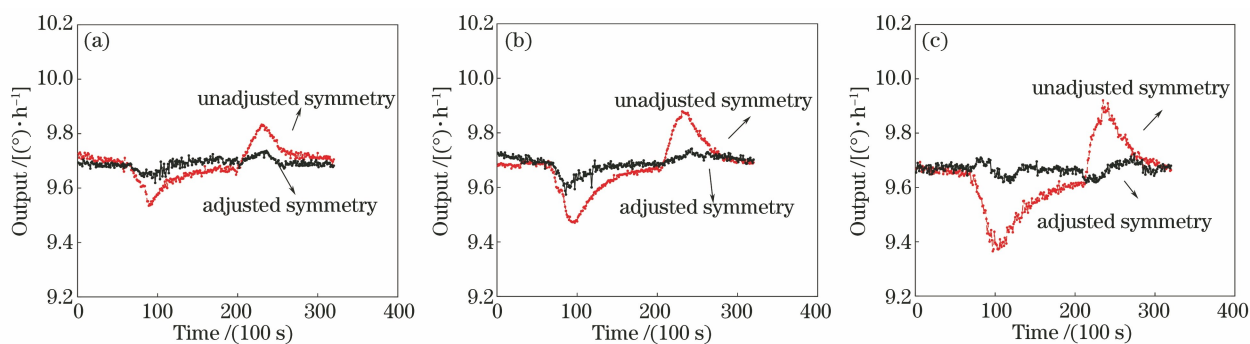


图 10 温度变化率  $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  下装配对称性调整前后的测试结果。(a) 光纤陀螺 1; (b) 光纤陀螺 2; (c) 光纤陀螺 3

Fig. 10 Symmetry adjustment effect for assembly at  $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . (a) FOG 1; (b) FOG 2; (c) FOG 3

## 5 结 论

根据光纤环 Shupe 误差原理及特征,提出了基于等效不对称长度的光纤环评价方法,明确了其量化测试方法,并对该评价方法进行了实验验证。结果显示利用光纤环等效不对称长度表征的是光纤环固有温度特征,与测试温度条件无关,且同一温度条件下等效不对称长度与全温零偏极差近似线性相关。等效不对称长度越短的光纤环对称性越好,且温变环境下产生的非互易性相位误差更小,故具有较好的温度性能。实验结果与理论分析一致。根据光纤环等效不对称长度对光纤陀螺进行对称性调整,干涉光路对称性的提升有助于有效地抑制温度误差,因此光路装配方法优化后的光纤陀螺温度性能得到明显的改善。结果表明该方法能准确地评估光纤环温度性能,同时对光路装配具有直接、有效的指导作用。

### 参 考 文 献

- [1] Li X Y, Zhang C M, Liu H B, et al. Simulation and analysis on temperature performance of fiber ring by 16-polar symmetrical winding method[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(6): 780-785.
- [2] Liu Y Y, Li J, Wang L C, et al. Evaluation method of FOG fiber coil based on Shupe coefficient [J]. Navigation and Control, 2020, 19(6): 90-97.
- [3] Han Z Y, Gao H, Gao Y S, et al. Effect of strain distribution measurement of fiber coil on FOG performance [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(12): 4128-4132.
- [4] Yang J, Yuan Y G, Yu Z J, et al. Optical coherence domain polarimetry technology and its application in measurement for evaluating components of high precision fiber-optic gyroscopes [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328007.
- [5] Li Z Z, Li Z H, Yao X T, et al. Research on influence of polarization crosstalk on the zero drift and

李绪友, 张春梅, 刘华兵, 等. 光纤环十六极对称绕法温度性能的仿真与分析[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(6): 780-785.

[2] Liu Y Y, Li J, Wang L C, et al. Evaluation method of FOG fiber coil based on Shupe coefficient [J]. Navigation and Control, 2020, 19(6): 90-97.

刘元元, 李晶, 王利超, 等. 基于 Shupe 系数的光纤陀螺光纤环评价方法 [J]. 导航与控制, 2020, 19(6): 90-97.

[3] Han Z Y, Gao H, Gao Y S, et al. Effect of strain distribution measurement of fiber coil on FOG performance [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(12): 4128-4132.

韩正英, 高涵, 高业胜, 等. 光纤环应力分布测试对光纤陀螺性能的影响 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 4128-4132.

[4] Yang J, Yuan Y G, Yu Z J, et al. Optical coherence domain polarimetry technology and its application in measurement for evaluating components of high precision fiber-optic gyroscopes [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328007.

杨军, 苑勇贵, 喻张俊, 等. 光学相干域偏振测量技术及其在高精度光纤陀螺器件测量中的应用 [J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328007.

[5] Li Z Z, Li Z H, Yao X T, et al. Research on influence of polarization crosstalk on the zero drift and

- random walk of fiber optic gyroscope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1206001.
- 李子忠, 李志宏, 姚晓天, 等. 偏振串扰对光纤陀螺零漂及随机游走影响的研究 [J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1206001.
- [6] Xie Z, Yang Y H, Yan H, et al. Estimation of distributed polarization coupling error in optical fiber coil of fiber optic gyroscope [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1006004.
- 谢泽, 杨远洪, 闫晗, 等. 光纤陀螺光纤环分布偏振耦合误差预估 [J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1006004.
- [7] Wang X Q, Zhang T, Liang L J, et al. Testing technique of polarization-coupling distribution of fiber coil and beat length of used fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(23): 230602.
- 王学勤, 张彤, 梁兰菊, 等. 光纤环偏振耦合分布及绕环光纤拍长测试技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(23): 230602.
- [8] Fan Y Q, Huang J X, Li J. Fiber optic gyroscope temperature error suppression method with local optical path temperature control [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2020, 28(6): 809-813.
- 范运强, 黄继勋, 李晶. 基于局部光路温度控制的光纤陀螺温度误差抑制方法 [J]. *中国惯性技术学报*, 2020, 28(6): 809-813.
- [9] Zhang Y H, Zhang Y G, Gao Z X. Thermal-induced phase-shift error of a fiber-optic gyroscope due to fiber tail length asymmetry [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(2): 273-277.
- [10] Li Z H, Meng Z, Liu T G, et al. A novel method for determining and improving the quality of a quadrupolar fiber gyro coil under temperature variations [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 2521-2530.
- [11] Yan H, Yang Y H, Yang F L. Response model and compensation technology of thermal diffusion delay in fiber optic gyro coil [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0106003.
- 闫晗, 杨远洪, 杨福铃. 光纤陀螺环热扩散延迟响应模型及补偿技术研究 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0106003.