

## 干涉光路装配应力对称性对 Shupe 误差的影响

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** Shupe 误差是影响高精度光纤陀螺工程应用的主要技术瓶颈之一, 针对高精度光纤陀螺装配封装后温度性能劣化的问题, 对光纤陀螺光路进行了温度误差分析, 揭示了干涉光路装配应力对 Shupe 误差的影响机理, 并对不同状态下装配应力引入的温度误差进行了测试, 选取初装全温零偏极差均为  $0.11 (^{\circ})/h$  的 3 只光纤陀螺, 并以粘接光纤环和 Y 波导尾纤的方式控制装配应力对称性, 当尾纤粘接长度为 30 cm 时, 2 只装配应力对称性较差的光纤陀螺全温零偏极差变为  $0.24 (^{\circ})/h$  和  $0.43 (^{\circ})/h$ , 温度性能出现明显劣化, 装配应力对称性较好的光纤陀螺全温零偏极差为  $0.13 (^{\circ})/h$ , 温度性能未出现明显劣化。实验结果表明, 干涉光路装配应力不对称会引起光纤陀螺温度性能出现明显劣化, 且劣化程度与装配应力对称性直接相关, 装配应力对称性越好, 温度性能劣化越小。

**关键词** 测量; 光纤陀螺; 光纤环; 应力对称性; Shupe 误差; 热应力

中图分类号 V241.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2112002

## Effect of Assembly Stress Symmetry of Interference Optical Path on Shupe Error

Fan Yunqiang\*, Huang Jixun, Li Jing

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

**Abstract** Shupe error is one of the major technical bottlenecks affecting the application of high-precision fiber-optic gyroscopes (FOGs). To address the problem that the temperature performance of high-precision FOGs deteriorates after the assembly and packaging of the optical path, this paper analyzed the temperature error of the FOG optical path and revealed the effect of the assembly stress of the interference optical path on Shupe error. Temperature errors caused by the assembly stress under different conditions were tested. Three initially installed FOGs with a full-temperature zero-bias range of  $0.11 (^{\circ})/h$  were chosen and the tail fibers of their fiber coils and Y-waveguides were bonded in different fashions for different assembly stress symmetry. When the bonding length of the tail fibers was 30 cm, the zero-bias ranges of the two FOGs with poor assembly stress symmetry became  $0.24 (^{\circ})/h$  and  $0.43 (^{\circ})/h$ , signifying significant deterioration of FOG temperature performance. In contrast, the one with better assembly stress symmetry became  $0.13 (^{\circ})/h$ , indicating no significant deterioration of FOG temperature performance. The results show that poor assembly stress symmetry of the interference optical path could lead to distinctive deterioration of FOG temperature performance. In addition, the deterioration degree is directly related to the symmetry of assembly stress. More precisely, better assembly stress symmetry results in smaller deterioration.

**Key words** measurement; fiber-optic gyroscope; fiber coil; stress symmetry; Shupe error; thermal stress

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

## 1 引言

光纤陀螺(FOG)是一种基于 Sagnac 效应的全

固态光学陀螺仪, 具有寿命长、启动速度快、动态范围大等优点<sup>[1]</sup>, 已在海、陆、空、天各个领域得到广泛应用<sup>[2-4]</sup>。光纤陀螺零偏误差受环境温度的影响

收稿日期: 2021-03-08; 修回日期: 2021-04-25; 录用日期: 2021-05-17

基金项目: 装备预研项目(41417010101)

通信作者: \*fanyunqiang@126.com

显著,温度引起的光纤折射率变化造成相向传输的两束光之间产生相位误差,这种由温度引起的零偏误差被称为 Shupe 误差<sup>[5]</sup>。为了抑制 Shupe 误差,国内外学者针对光纤陀螺的敏感核心——光纤环做了大量的研究工作,美国学者提出了四极对称绕制方法,即以光纤两端分别作为起点,将一根光纤平均分绕到 A、B 两个放纤轮上,然后以光纤中点为起点由 A、B 两放纤轮放纤绕制成光纤环。首先由 A 放纤轮正向绕制第一层,其次由 B 放纤轮反向绕制第二层和第三层,最后再次由 A 放纤轮正向绕制第四层,以四层为一个周期直至将光纤全部绕制到光纤环骨架上,四极对称绕制方法的提出使 Shupe 误差减小了 3 个数量级<sup>[2]</sup>,由正四极对称和反四极对称构成的八极对称绕法和由正八极对称和反八极对称构成的十六极对称绕法能进一步提升光纤环温度性能<sup>[6-7]</sup>。此外,通过保偏光纤的温度特性筛选,采用折射率系数较小的光纤也能提高光纤环温度性能<sup>[8]</sup>。光纤折射率不仅受温度的影响,同时还受应力的影响<sup>[9-13]</sup>,热应力引起的光纤折射率变化产生的非互易性相位误差也是 Shupe 误差的一部分<sup>[12,14-15]</sup>,通过提高光纤环应力分布对称性同样能提升光纤环温度性能<sup>[16]</sup>。

光纤环是光纤陀螺干涉光路的重要组成部分,通过光纤环技术的提升能提高光纤陀螺干涉光路的对称性,降低全温非互易性相位误差,但光纤环只是光纤陀螺干涉光路的一部分,其他部分干涉光路同样影响光纤陀螺温度性能。工程实践中,存在筛选合格的光纤环经光路装配封装后光纤陀螺温度性能劣化的现象,严重影响了高精度光纤陀螺的工程应用。因此,需要对光路装配过程产生的温度误差机理进行研究。

本文根据 Shupe 误差的机理和光纤陀螺生产工艺过程,将 Shupe 误差分解成光纤环固有温度误差和光路装配过程引入的误差两部分,以温度对光纤折射率的影响机理为基础,对全光路温度误差进行了分析,并通过实验验证了尾纤粘接应力对称性对光纤陀螺温度误差的影响,实验结果显示光纤陀螺装配尾纤粘接应力不对称是造成光纤陀螺温度性能劣化的主要原因,控制装配尾纤粘接应力对称性能避免光纤陀螺在粘接封装过程中出现温度性能劣化。

## 2 误差机理

### 2.1 光纤陀螺 Shupe 误差

因折射率的影响,光波在光纤中传播时会产生一定的相位延迟,相位延迟大小可表示为

$$\phi = \int_0^{\Delta L} \beta_0 n(z) dz, \quad (1)$$

式中: $\phi$  为光波经光纤传播产生的相位延迟; $\beta_0 = 2\pi/\lambda$  为光波的传播常数; $n(z)$  为  $z$  点处光纤折射率; $\Delta L$  为光纤长度。

光波在光纤中传播所产生的相位延迟与光纤折射率直接相关,当折射率发生变化时,经过该段光纤所产生的相位延迟也将发生改变。当光纤陀螺干涉光路非中点处光纤折射率随温度发生变化时,相向传输的两束光波经过该段光纤的时间不同,由(1)式可知,经过该段光纤所产生的相位延迟存在差异,这种由温度引起的相位差与 Sagnac 效应引起的相位差无法区分,因此在光纤陀螺中会产生零偏误差,即 Shupe 误差,其大小可表示为

$$\Delta\phi_E(t) = \frac{\beta_0}{c} \frac{\partial n'}{\partial T} \int_0^L \dot{T}(z,t)(L-2z) dz, \quad (2)$$

式中: $\Delta\phi_E(t)$  为  $t$  时刻温度变化引起的陀螺相位误差; $c$  为光波在光纤中的传播速度; $\partial n'/\partial T$  为光纤折射率随温度的变化率; $L$  为光纤陀螺光路总长度。

光纤折射率受环境温度及应变状态的影响, $z$  点处光纤折射率的大小可表示为<sup>[8]</sup>

$$n(z, T, \epsilon) = n(z, T_0) + \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T(z, T) + \frac{\partial n}{\partial \epsilon} \Delta \epsilon(z, T), \quad (3)$$

式中: $n(z, T, \epsilon)$  为光纤  $z$  点处温度  $T$  时的折射率; $n(z, T_0)$  为  $z$  点处初始温度  $T_0$  下光纤不受力时的折射率; $\partial n/\partial T$  为光纤自身折射率温度系数; $\Delta T(z, T)$  为  $T$  温度时  $z$  点光纤温度变化量; $\partial n/\partial \epsilon$  为光纤折射率应变系数; $\Delta \epsilon(z, T)$  为  $T$  温度时  $z$  点光纤应变变化量。

光纤陀螺是一种全固态陀螺仪,光纤应变状态的改变主要由内部热应力变化引起,因此(3)式可表示为

$$n(z, T, \epsilon) = n(z, T_0) + \left[ \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{\partial n}{\partial \epsilon} \frac{\partial \epsilon(z)}{\partial T} \right] \Delta T(z, T), \quad (4)$$

式中: $\partial \epsilon(z)/\partial T$  为  $z$  点光纤应变温度系数。

将(4)式代入(2)式可知,光纤陀螺 Shupe 误差可表示为

$$\Delta\phi_E(t) = \frac{\beta_0}{c} \left[ \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{\partial n}{\partial \epsilon} \frac{\partial \epsilon(z)}{\partial T} \right] \int_0^L \dot{T}(z,t)(L-2z) dz. \quad (5)$$

### 2.2 装配应力 Shupe 误差分析

光纤陀螺干涉光路由光纤环和 Y 波导构成,如图 1 所示。

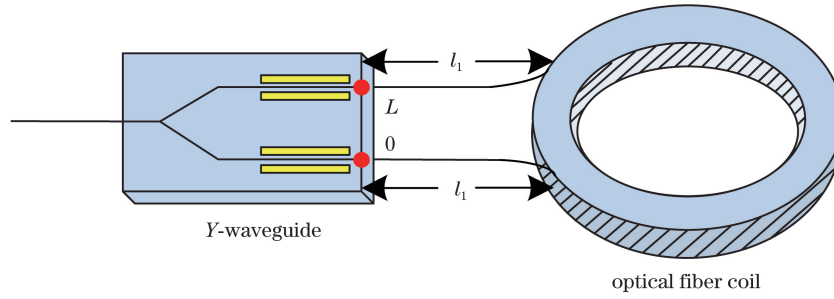


图 1 光纤陀螺干涉光路示意图

Fig. 1 Fiber optic gyro interference optical path diagram

假设光纤环环体光纤长度为  $l$ , 光纤环、Y 波导用于装配的尾纤长度为  $l_1$ , 即  $L = 2l_1 + l$ . 则(5)式中光纤陀螺的 Shupe 误差可表示为

$$\Delta\phi_E(t) = \frac{\beta_0}{c} \left[ \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{\partial n}{\partial \epsilon} \frac{\partial \epsilon(z)}{\partial T} \right] \int_{l_1}^{L-l_1} \dot{T}(z,t)(L-2z) dz + \frac{\beta_0}{c} \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^{l_1} [\dot{T}(z,t) - \dot{T}(L-z,t)](L-2z) dz + \frac{\beta_0}{c} \frac{\partial n}{\partial \epsilon} \int_0^{l_1} \left[ \frac{\partial \epsilon(z)}{\partial T} \dot{T}(z,t) - \frac{\partial \epsilon(L-z)}{\partial T} \dot{T}(L-z,t) \right] (L-2z) dz, \quad (6)$$

$$\Delta\phi_0(t) = \frac{\beta_0}{c} \left[ \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{\partial n}{\partial \epsilon} \frac{\partial \epsilon(z)}{\partial T} \right] \int_{l_1}^{L-l_1} \dot{T}(z,t)(L-2z) dz, \quad (7)$$

$$\Delta\phi_{E1}(t) = \frac{\beta_0}{c} \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^{l_1} [\dot{T}(z,t) - \dot{T}(L-z,t)] (L-2z) dz, \quad (8)$$

$$\Delta\phi_{E2}(t) = \frac{\beta_0}{c} \frac{\partial n}{\partial \epsilon} \int_0^{l_1} \left[ \frac{\partial \epsilon(z)}{\partial T} - \frac{\partial \epsilon(L-z)}{\partial T} \right] \dot{T}(z,t)(L-2z) dz, \quad (9)$$

式中:  $\Delta\phi_0(t)$  为光纤环固有温度误差, 是由光纤折射率温度系数和热应变引起的综合温度误差, 该误差可通过光纤环筛选测试获得;  $\Delta\phi_{E1}(t)$  为干涉光路其他部分光纤折射率温度系数引起的温度误差, 而光纤陀螺光路装配时, 两端尾纤并列盘绕在一起, 对称点温度变化近似相等, 即  $\dot{T}(z,t) \approx \dot{T}(L-z,t)$ , 因此尾纤折射率温度系数引起的误差可忽略不计;  $\Delta\phi_{E2}(t)$  为干涉光路装配应力热应变产生的温度误差, 两端尾纤初始应变具有随机性, 因点胶、固化等过程引入的应力不同, 在相同温变环境下产生的应

力变化也不同. 因此(6)式所示的光纤陀螺 Shupe 误差可表示为

$$\Delta\phi_E(t) = \frac{\beta_0}{c} \left[ \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{\partial n}{\partial \epsilon} \frac{\partial \epsilon(z)}{\partial T} \right] \int_{l_1}^{L-l_1} \dot{T}(z,t)(L-2z) dz + \frac{\beta_0}{c} \frac{\partial n}{\partial \epsilon} \int_0^{l_1} \left[ \frac{\partial \epsilon(z)}{\partial T} - \frac{\partial \epsilon(L-z)}{\partial T} \right] \dot{T}(z,t)(L-2z) dz. \quad (10)$$

由(10)式可知, 光纤陀螺 Shupe 误差主要由光纤环固有温度误差和装配尾纤热应力引起的误差构成, 光纤环固有温度误差可通过筛选测试获得, 为已知温度误差; 尾纤热应力引起的误差与装配应力状态相关, 当距中点对称的光纤应力相等时, 热应力引起的误差可忽略.

### 3 实验验证

以现有的测试手段无法直接测试光纤三维空间应变状态变化, 可用光纤陀螺 Shupe 误差的变化对热应力变化进行间接评估. 选取 3 只温度性能相当的同型号光纤环装配成光纤陀螺, 光纤环参数如表 1 所示, 装配过程中要求两端装配尾纤长度差小于 5 mm, 熔接点损耗小于 0.15 dB, 两熔接点与中点的距离差为 50~55 mm, 对 3 只光纤陀螺以粘接应力对称性不同的方式分别进行粘接, 并对每种粘接状态下的光纤陀螺按图 2 中温度曲线进行全温测试, 其中, 温度测试范围为  $-40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ , 温度变化率为  $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ , 在极限温度  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  下分别进行 3 h 保温, 并以高温  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  为测试起点.

表 1 光纤环参数

Table 1 Fiber coil parameter

Parameter	Fiber length $L$ / m	Diameter $D$ / mm	Width $h$ / mm	Height $B$ / mm	Tail-fiber length $l_1$ / m
Value	1235	82	12.8	7.3	1.5



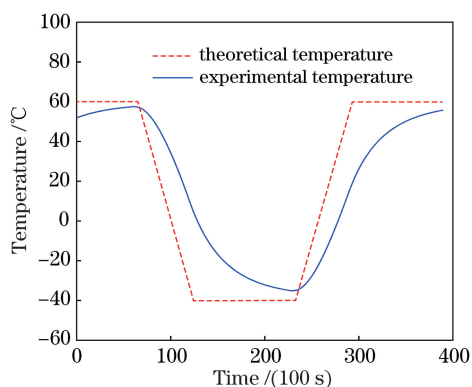


图 2 温度测试曲线

Fig. 2 Temperature test curve

假设尾纤粘接长度为  $l_x$ , 即引入应力的光纤长度为  $l_x$ 。以图 3 所示的方式对 3 只光纤陀螺中的光纤环尾纤分别进行粘接, 其中光纤环 1 两端尾纤并列盘绕在金属平面上, 并同时粘接; 光纤环 2 两端尾纤分别盘绕在光纤环表面和金属平面上, 并同时粘接; 光纤环 3 一端尾纤盘绕至光纤环表面, 另一端自由盘绕在金属平面上, 仅对光纤环表面一端尾纤进行粘接。

实验过程中保持光纤陀螺尾纤及熔接点状态不变, 仅改变光纤粘接长度, 即尾纤、熔接点质量、熔接点位置对光纤陀螺在不同粘接长度下的影响相同。3 只光纤陀螺在粘接长度  $l_x$  取不同值时的全温测试曲线如图 4~6 所示。

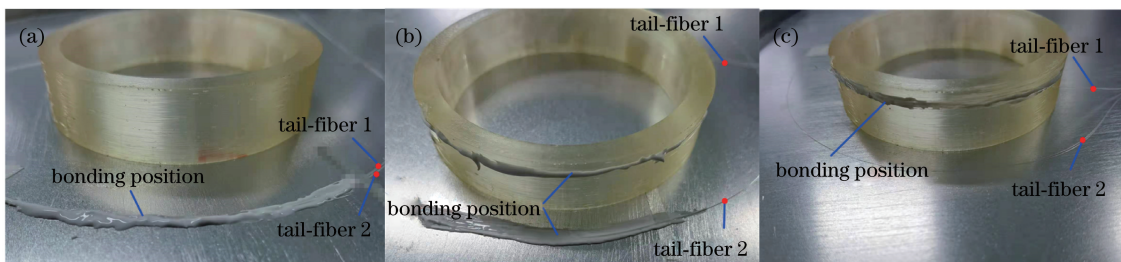


图 3 尾纤粘接状态。(a) 光纤陀螺 1; (b) 光纤陀螺 2; (c) 光纤陀螺 3

Fig. 3 Tail-fiber bonding state. (a) FOG 1; (b) FOG 2; (c) FOG 3

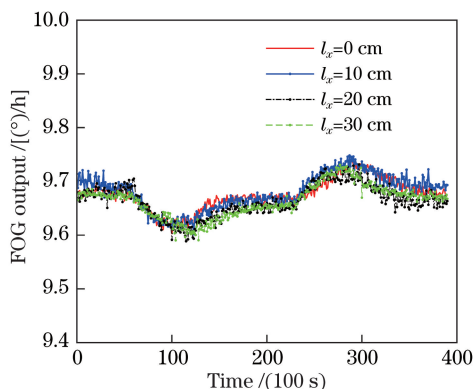


图 4 光纤陀螺 1 输出曲线

Fig. 4 FOG 1 output curve

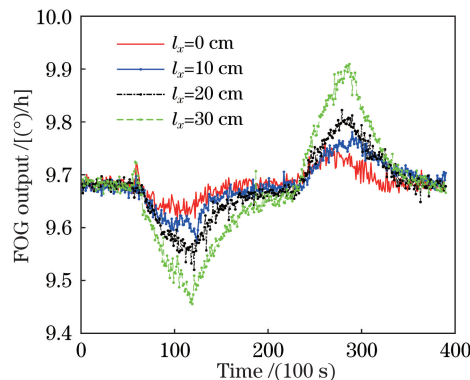


图 6 光纤陀螺 3 输出曲线

Fig. 6 FOG 3 output curve

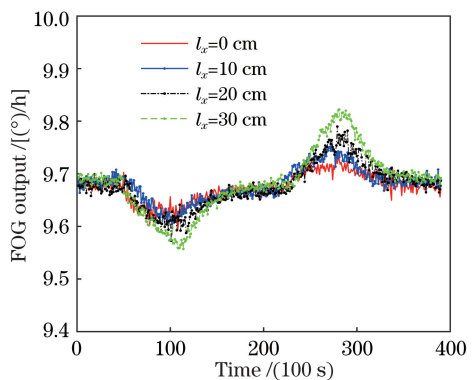


图 5 光纤陀螺 2 输出曲线

Fig. 5 FOG 2 output curve

图 4 中, 光纤陀螺 1 尾纤粘接前, 陀螺全温零偏极差为  $0.11 (^{\circ})/h$ , 保持尾纤盘绕状态不变仅对尾纤进行粘接, 当粘接长度为  $10\text{ cm}$ 、 $20\text{ cm}$  和  $30\text{ cm}$  时, 光纤陀螺零偏极差分别为  $0.12 (^{\circ})/h$ 、 $0.1 (^{\circ})/h$  和  $0.13 (^{\circ})/h$ , 由尾纤应力引入的温度误差分别为  $0.01 (^{\circ})/h$ 、 $-0.01 (^{\circ})/h$  和  $0.02 (^{\circ})/h$ , 粘接长度对光纤陀螺全温零偏极差影响较小, 光纤陀螺温度性能未发生明显劣化。

图 5 中, 光纤陀螺 2 尾纤粘接前, 陀螺全温零偏极差为  $0.11 (^{\circ})/h$ , 保持尾纤盘绕状态不变仅对尾纤进行粘接, 三种粘接长度下光纤陀螺零偏极差分别为  $0.13 (^{\circ})/h$ 、 $0.17 (^{\circ})/h$  和  $0.24 (^{\circ})/h$ , 由尾纤

应力引入的温度误差分别为  $0.02 (^{\circ})/h$ 、 $0.06 (^{\circ})/h$  和  $0.13 (^{\circ})/h$ ，随粘接长度的增加，光纤陀螺温度性能出现劣化现象。

图 6 中，光纤陀螺 3 尾纤粘接前，陀螺全温零偏极差为  $0.11 (^{\circ})/h$ ，保持尾纤盘绕状态不变仅对尾纤进行粘接，三种粘接长度下光纤陀螺全温零偏极差分别为  $0.17 (^{\circ})/h$ 、 $0.26 (^{\circ})/h$  和  $0.43 (^{\circ})/h$ ，由尾纤应力引入的温度误差分别为  $0.06 (^{\circ})/h$ 、 $0.15 (^{\circ})/h$  和  $0.32 (^{\circ})/h$ ，随粘接长度的增加，陀螺全温零偏极差变为粘接前的 4 倍，光纤陀螺温度性能出现明显劣化。

由测试结果可知，装配应力不一致是引起光纤陀螺温度性能劣化的主要原因，对 3 只陀螺全温零偏极差与粘接长度进行拟合，如图 7 所示。

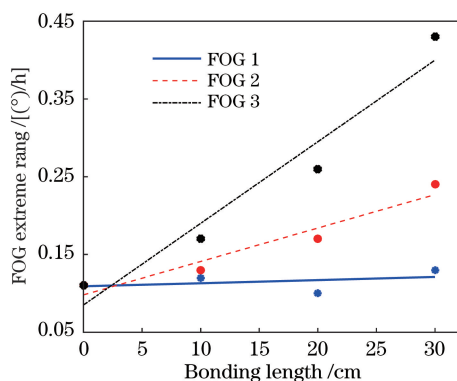


图 7 光纤陀螺零偏极差变化曲线

Fig. 7 FOG zero-bias range change curve

图 7 中，陀螺零偏极差与粘接长度近似呈线性关系，但 3 只陀螺曲线斜率不同，表示三种状态下单位长度光纤粘接应力引入的温度误差不同。光纤陀螺 1 两端尾纤状态完全一致，粘接应力比较接近，引入的温度误差较小，因此曲线斜率接近于零；光纤陀螺 2 两端尾纤状态存在一定差异，粘接应力引入了一定的温度误差，因此曲线斜率较陀螺 1 明显增大；光纤陀螺 3 仅对一端尾纤进行了粘接，两端尾纤状态差异最大，粘接应力引入的温度误差明显，因此光纤陀螺 3 的曲线斜率在 3 只陀螺中最大。

实验结果表明，当两端装配尾纤粘接状态对称时，尾纤应力初始状态接近，温变环境下热应力引入的非互异性相位误差较小；当两端装配尾纤粘接状态不对称时，尾纤应变初始状态存在差异，温变环境下热应力引入的非互异性相位误差较大，且两端尾纤应力状态差异越大，引起的温度误差越明显。

## 4 结 论

本文分析了热应力对光纤陀螺温度误差的影响

机理，通过干涉光路温度误差分析将光纤陀螺 Shupe 误差分解成了光纤环固有温度误差和装配应力温度误差两部分，并通过实验验证了装配应力对称性对光纤陀螺温度性能的影响，结果表明两尾纤装配应力对称性越好，温度引起的应力变化越接近，相向传输的两束光波同一时刻产生的相位延迟越一致，最终引起的 Shupe 误差越小，因此在陀螺光路装配过程中，保证装配应力的对称性能有效避免光纤陀螺封装后温度性能出现劣化。文中对尾纤长度、熔接点质量和熔接点位置均进行了严格的控制，且同一只光纤陀螺在不同粘接长度下的尾纤及熔接状态均未发生变化，因此实验中引起的误差可以忽略，而这些因素在工程实践中对陀螺温度性能均有一定的影响，若要光纤陀螺获得较好的温度性能，在保证装配应力对称性的同时，也需要考虑这些因素。

## 参 考 文 献

- [1] Feng W S, Wang X F, Wang W. Effect of turns' difference in each layer on temperature performance of fiber optic gyroscope [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(4): 487-493.  
冯文帅, 王学锋, 王巍. 光纤环的每层匝数不同对光纤陀螺温度性能影响[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(4): 487-493.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Chen H Y, Zheng Y, Wang X X, et al. Influence of mean wavelength on scale factor of fiber optic gyroscope [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0306002.  
陈和宇, 郑月, 王夏霄, 等. 平均波长对光纤陀螺标度因数的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0306002.
- [5] Shupe D M. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer [J]. Applied Optics, 1980, 19(5): 654-655.
- [6] Wang Y Z, Chen X D, Zhang G C, et al. Effect of

- octupole-winding on temperature performance of fiber optic gyroscope[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2012, 20(5): 617-620.
- 王玥泽, 陈晓冬, 张桂才, 等. 八极绕法对光纤陀螺温度性能的影响[J]. *中国惯性技术学报*, 2012, 20(5): 617-620.
- [7] 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.
- 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.
- [8] Bi C Z, Yang J G, Wu Y J, et al. Temperature sensitivity measurement and analysis of polarization maintaining fiber for FOG [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2014, 22(5): 677-681.
- 毕聪志, 杨纪刚, 吴衍记, 等. 光纤陀螺用保偏光纤温度敏感性测试与分析[J]. *中国惯性技术学报*, 2014, 22(5): 677-681.
- [9] Yuan L B. Effect of temperature and strain on fiber optic refractive index[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(12): 114-118.
- 苑立波. 温度和应变对光纤折射率的影响[J]. *光学学报*, 1997, 17(12): 114-118.
- [10] 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.
- [11] Fei T, Xu X B, Zhang Z C, et al. Modeling and reduction of thermally induced non-reciprocal error in differential interference fiber optic gyroscope sensing coil[J]. *Optik*, 2015, 126(13): 1295-1299.
- [12] Liu J H, Li R C. Analysis of thermal drift in high performance interferometric fiber-optic gyroscopes [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 333-343.
- 刘军号, 李瑞辰. 高精度干涉式光纤陀螺热漂移分析[J]. *中国光学*, 2020, 13(2): 333-343.
- [13] Yu P, Ji M N. Integral method of stress birefringence calculation and fiber design optimization[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0305002.
- 余盼, 季敏宁. 应力双折射光纤的积分计算方法与优化设计[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0305002.
- [14] Minakuchi S, Sanada T, Takeda N, et al. Thermal strain in lightweight composite fiber-optic gyroscope for space application[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2658-2662.
- [15] Osunluk B, Ogut S, Ozbay E. Thermally induced bias error due to strain inhomogeneity through the fiber optic gyroscope coil[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(33): 10416.
- [16] 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.