

引用格式：刘元元, 冯文帅, 张晚琛, 等. 光纤陀螺保偏光路温度性能提升与评价技术[J]. 时间频率学报, 2025, 48(4): 262-270.

# 光纤陀螺保偏光路温度性能提升与评价技术

刘元元<sup>1</sup>, 冯文帅<sup>1,2</sup>, 张晚琛<sup>1</sup>, 王惜康<sup>3</sup>, 王腾<sup>1</sup>

1. 北京航天时代光电科技有限公司, 北京 100094;
2. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100076;
3. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600

**摘要:** 光纤陀螺保偏光路的温度性能不但受到单个光学器件的影响, 而且受到器件尾纤和保偏熔接点的影响。随着光纤陀螺精度不断提高, 后者的影响逐渐显现。对器件尾纤提出了低应力处理技术, 保证尾纤受外力小且均匀。对保偏熔接点提出了熔接参数精确调控技术, 保证对轴角度小且熔接损耗低, 从而提高保偏光路的温度性能。为了评价其温度性能, 搭建了保偏光路温度测试系统, 并给出了评价指标: 全温零偏极差和补偿后零偏稳定性。实验结果表明, 器件本身不变的情况下, 对保偏光路的尾纤和熔接点进行优化处理, 对比优化前后的评价指标, 全温零偏极差降低了 22%~60%, 补偿后零偏稳定性提高了 1.4~2 倍。实验结果充分验证了, 保偏光路尾纤低应力处理和熔接参数精确调控技术对保偏光路温度性能提升的有效性, 为高精度光纤陀螺的生产提供指导意义。

**关键词:** 光纤陀螺; 保偏光路; 温度测试; 指标评价

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2025-04-0262-09

## Temperature performance improvement and evaluation technology about the fiber optic gyroscope polarizing path

LIU Yuan-yuan<sup>1</sup>, FENG Wen-shuai<sup>1,2</sup>, ZHANG Wan-chen<sup>1</sup>, WANG Xi-kang<sup>3</sup>, WANG Teng<sup>1</sup>

1. Beijing Aerospace Times Optical-Electronic Technology Co., Ltd, Beijing 100094, China;
2. Beijing Institute of Aerospace Control Instruments, Beijing 100076, China;
3. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China

**Abstract:** The temperature performance of the fiber optic gyroscope (FOG) polarizing path is influenced not only by the single optical device but also by the treatment methods on the fiber pigtailed and polarization preserving fusion points. With the improvement of FOG precision, the latter effect is gradually becoming apparent. To address the problem, a low stress treatment technique is proposed for the device pigtailed to ensure that the pigtailed are subjected to small and uniform external forces, and a precise splicing parameter control technique is proposed for the polarization preserving fusion points to ensure its small axial angle and low welding loss, thereby improving the temperature performance of the FOG polarizing path. To evaluate this, a

收稿日期: 2025-06-03; 接受日期: 2025-08-05

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFF0615701)

temperature measurement system of polarizing path is built, and evaluation indexes are given in this paper: full temperature range and zero bias after compensation. With the device itself unchanged, the temperature range of polarizing path is decreased by 22%~60% before and after optimization, and the zero bias after compensation is increased by 1.4~2 times. This proves that the low stress treatment technique and precise splicing parameter control technique is effective to improve the temperature performance of the FOG polarizing path. This method has important guiding significance for the production of high precision FOG.

**Keywords:** fiber optic gyroscope (FOG); polarizing path; temperature test; index evaluation

光纤陀螺作为新一代惯性器件，具有可靠性高、寿命长、启动时间短、动态范围大等优点，已经广泛应用在惯性导航系统中<sup>[1]</sup>。光纤陀螺核心器件对温度较为敏感，当环境温度变化时，产生温度漂移，成为影响陀螺全温精度的重要因素<sup>[2]</sup>。

目前，针对光纤陀螺的温度性能，更多是关注光纤环、铌酸锂多功能集成光学器件（简称：Y波导）单一光学器件的温度特性。文献[3-4]通过建立光纤环温度测试与评价系统，判断光纤环的温度性能。文献[5]建立高精度光波导全温筛选测试方法，进行Y波导集成光学器件的温度性能。通过筛选温度性能好的光纤环和Y波导，搭建光纤陀螺的保偏光路，期望得到温度性能好的光纤陀螺。光纤环和Y波导，代表了光纤陀螺受温度性能影响最大的两个光学器件。但随着光纤陀螺的精度不断提高，发现保偏光路的温度性能不但受到单个光学器件的影响，而且受到器件尾纤和保偏熔接点的影响<sup>[6]</sup>。为了实现好器件成为好产品，因此研究保偏光路温度性能提升技术，尤其是开展器件尾纤处理和保偏熔接参数的精确调控技术。同时，对保偏光路温度性能进行有效的测试与评价。

器件的尾纤处理，包括尾纤路径、尾纤固定等操作。低应力处理技术涉及尾纤操作的各个环节，总的要求是光纤顺畅，无交叉，无扭转。保偏熔接参数，包括切割角度、对轴角度、熔接点损耗。熔接参数精确调控技术，总的要求是对轴角度误差小、熔接点损耗低。

本文采用器件尾纤低应力处理技术和熔接参数精确调控技术，对保偏光路进行处理，并搭建保偏光路组件温度测试与评价系统，根据评价指标，正向回馈到技术优化中。实验结果表明，温度性能提升技术的有效性，为高精度光纤陀螺的生产提供指导意义。

## 1 保偏光路

光纤陀螺的原理如图1，光源发出的光经过光纤耦合器，进入Y波导、光纤环，最后经探测器转换为电信号。在闭环电路中对电信号进行解算，实现对角速度的测量。其中光纤环、Y波导、光纤环双端尾纤、Y波导双端尾纤及两个保偏熔接点，构成保偏光路组件。

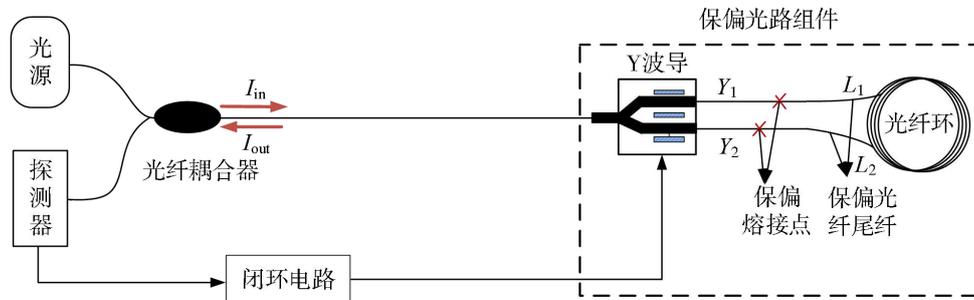


图1 光纤陀螺原理框图

在保偏光路组件中，设进入的光信号  $I_{in}$ ，输出的光信号  $I_{out}$ ，前者是低偏振光信号，后者是干

涉信号，该干涉信号的光强大小，随着外界角速率大小的变化而变化。由此，光纤陀螺将输入角速率

转化为干涉光光强信号, 探测器的输入光强为

$$I = \frac{I_{\text{out}}}{2} (1 + \cos \Delta \phi_R) \quad (1)$$

式(1)中:  $I_{\text{out}}$  为探测器的输入光强,  $\Delta \phi_R$  为光纤环旋转引起的相位差。

根据 Sagnac 效应, 光纤环旋转引起的相位差与环长度、环半径和被测环绕其轴的旋转速率的关系为

$$\Delta \phi_R = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega \quad (2)$$

式(2)中:  $L$  为光纤环长度,  $D$  为光纤环直径,  $\lambda$  为光波波长,  $c$  为真空中的光速,  $\Omega$  为输入角速率。

实际应用中, 光纤陀螺的相位差  $\Delta \phi_{\text{实际}}$  受到很多因素的影响, 其中最棘手的是温度漂移。

## 2 保偏光路性能提升技术

1980 年, Shupe<sup>[2]</sup> 推导出了两束干涉光分别沿着顺时针和逆时针方向传输时, 光纤环温度变化产

$$\begin{aligned} \Delta \phi(t) = \Delta \phi_1(t) + \Delta \phi_s(t) + \Delta \phi_3(t) = & \\ & \frac{\beta_0}{c_m} \cdot \frac{\partial n}{\partial T} \cdot \int_0^{L_1+Y_1} T'(z,t)(L+L_1+L_2+Y_1+Y_2-2z)dz + \\ & \frac{\beta_0}{c_m} \cdot \frac{\partial n}{\partial T} \cdot \int_{L_1+Y_1}^{L+L_1+Y_1} T'(z,t)(L+L_1+L_2+Y_1+Y_2-2z)dz + \\ & \frac{\beta_0}{c_m} \cdot \frac{\partial n}{\partial T} \cdot \int_{L+L_1+Y_1}^{L+L_1+Y_1+L_2+Y_2} T'(z,t)(L+L_1+L_2+Y_1+Y_2-2z)dz \quad (4) \end{aligned}$$

如果提高保偏光路的温度性能, 需要降低  $\Delta \phi_1(t)$ 、 $\Delta \phi_s(t)$  和  $\Delta \phi_3(t)$ 。 $\Delta \phi_s(t)$  降低的方法是光纤环内部采用多级对称、低应力光纤绕环机绕制而成<sup>[2,8]</sup>。同理,  $\Delta \phi_1(t)$  和  $\Delta \phi_3(t)$  也需要对称性、低应力处理。如果应力过大或不均匀, 会带来比较大的 Shupe 误差<sup>[9]</sup>。

器件的尾纤处理, 包括尾纤盘绕、尾纤固定等操作。低应力处理技术串联尾纤操作的各个环节, 总的要求是光纤顺畅, 无交叉、无扭转, 减小光纤应力集中点。

生的热致非互易性相位延迟为

$$\Delta \phi_s(t) = \frac{\beta_0}{c_m} \cdot \frac{\partial n}{\partial T} \cdot \int_0^L T'(z,t)(L-2z)dz \quad (3)$$

式(3)中,  $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0$  为光在真空中的传输常数,  $c_m = c/n$  为光在光纤中的光速,  $\partial n/\partial T$  为光纤折射率随温度的变化率,  $T'(z,t)$  为光纤在  $z$  处温度分布的变化量。

在 Shupe 误差的推导中,  $L$  为光纤环长度, 实际上  $L$  可以拓展为光纤环长度、光纤环尾纤长度、Y 波导尾纤长度。结合 Shupe 误差, 尾纤距离干涉仪中点的最远端,  $L-2z$  的加权最大, 尾纤处理不当引入的温度误差不可忽略。

### 2.1 尾纤低应力处理技术

保偏光路组件中的尾纤指光纤环的尾纤  $L_1$  和  $L_2$ , Y 波导的尾纤  $Y_1$  和  $Y_2$ 。各自尾纤长达几米, 距离干涉仪中点的最远端, 且没办法进行多级对称盘绕, 因此, 尾纤的低应力处理很重要。

考虑尾纤后的 Shupe 误差<sup>[7]</sup>可表示为

### 2.2 熔接参数精确调控技术

保偏光路组件如图 2 所示, 除了器件和器件尾纤, 还有两个保偏熔接点。设两个熔接点为  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ 。顺时针的光, 先后经历两个熔接点  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ 。逆时针的光, 先后经历两个熔接点  $\alpha_2$  和  $\alpha_1$ 。

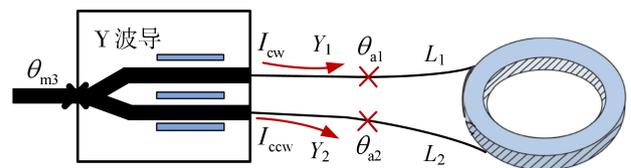


图 2 保偏光路组件熔接点示意图

经过推导, 因熔接点对轴引起的相位误差为

$$\Delta \phi_e(t) \approx \frac{2\varepsilon^2 \left(1 + \frac{1-d}{1+d}\right) \cdot \tan \theta_{a1} \cdot \tan \theta_{a2}}{\left(1 + \frac{1-d}{1+d} \cdot \tan^2 \theta_{m3}\right) \cdot \cos^2 \theta_{m3} \cdot \left(1 + \tan^2 \theta_{a1} \cdot \tan^2 \theta_{a2}\right)} \quad (5)$$

$\theta_{a1}$  为熔接点 $\alpha_1$ 的对轴误差,  $\theta_{a2}$  为熔接点 $\alpha_2$ 的对轴误差,  $\theta_{m3}$  为 Y 波导与保偏光纤的耦合误差。 $d$  为光的偏振度。 $\varepsilon$  为 Y 波导的偏振抑制比。当 Y 波导与保偏光纤的耦合误差是理想的, 即  $\theta_{m3}$  为 0, 则式 (5) 简化为

$$\Delta\phi_e(t) \approx \frac{2\varepsilon^2(1 + \frac{1-d}{1+d}) \cdot \tan\theta_{a1} \cdot \tan\theta_{a2}}{(1 + \tan^2\theta_{a1} \cdot \tan^2\theta_{a2})} \quad (6)$$

目前, 光纤环采用 60  $\mu\text{m}$  的超细径光纤, Y 波导采用 80  $\mu\text{m}$  的细径光纤, 对熔接参数要求更加精确。如果外界环境存在温度变化, 熔接引入的相位误差随着温度的变化而变化<sup>[10]</sup>。因此要提高保偏光路的温度性能, 需要对熔接参数进行精确调控, 降低  $\Delta\phi_e(t)$  对实际检测相位  $\Delta\phi_{\text{实际}}$  的影响。

综上可得, 实际检测相位差为

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{\text{实际}} &= \Delta\phi_R + \Delta\phi(t) + \Delta\phi_e(t) + \dots = \\ &\Delta\phi_R + \Delta\phi(t) + \Delta\phi_s(t) + \\ &\Delta\phi_3(t) + \Delta\phi_e(t) + \dots \end{aligned} \quad (7)$$

从式 (7) 可以看出, 系统检测的相位差除了光纤环旋转引起的相位差  $\Delta\phi_R$ , 还包含  $\Delta\phi(t)$ 、 $\Delta\phi_s(t)$ 、 $\Delta\phi_3(t)$  和  $\Delta\phi_e(t)$  等误差项。光纤陀螺的零偏输出, 通过对相位差进行解调得到, 因此这些误差项都会反映到陀螺输出中, 当外界存在温度变化

时, 误差项的影响变大, 能够更清晰地表现在陀螺的输出中。通常对其施加温度激励, 判断误差项的大小。

### 3 保偏光路温度性能测试与评价

通过对尾纤低应力处理和熔接参数精确调控技术, 提高保偏光路的温度性能。下面对保偏光路的温度性能进行测试与评价, 才能评判优化前后的有效性。为此, 搭建保偏光路的温度性能测试与评价系统。

#### 3.1 保偏光路温度性能测试

保偏光路测试系统中光纤环与 Y 波导, 进行预定轨迹的盘纤和熔接后, 连同测试工装一起放入带有隔振地基的温箱内, 其他电路部分及光源、光纤耦合器、光电探测器都放在温箱外。保偏光路测试系统如图 3 所示。为排除其他器件及温箱对测试结果的影响, 需要进行常温、恒定温度点的测试。前者测试光纤陀螺电路、光路的噪声水平, 要求陀螺的常温零偏稳定性 (100 s, 1  $\sigma$ ) 达到一定的精度<sup>[8]</sup>。后者既测试了光纤陀螺电路、光路的噪声水平, 又测试了温箱的抗振性能, 要求陀螺的恒温零偏稳定性达到一定的水平。

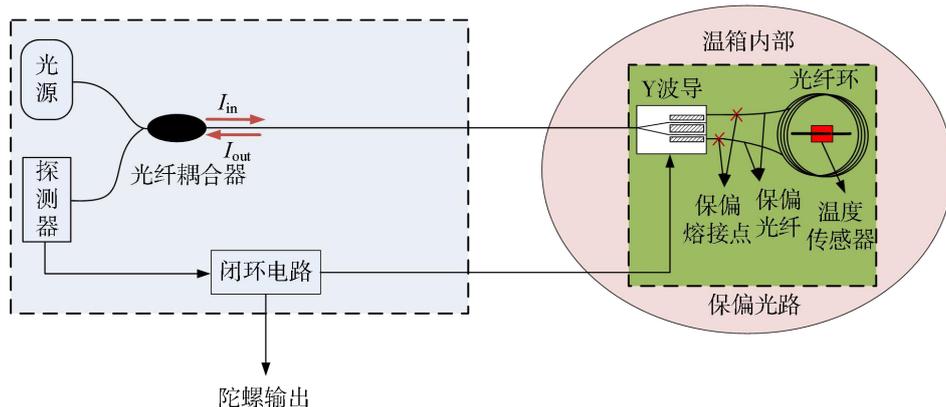


图3 保偏光路温度测试系统

#### 3.2 保偏光路温度性能指标评价

设光纤陀螺的输出信号为  $B$ , 采样时间为  $t$ 。则 100 s 平滑后的数据为

$$\begin{aligned} B_{-100}(i) &= \text{mean}(B((i-1) \times \frac{1}{t} \times 100 + 1), \dots, \\ &B(i \times \frac{1}{t} \times 100)) \end{aligned} \quad (8)$$

式 (8) 中:  $i$  代表数据的个数,  $\frac{1}{t} \times 100$  代表 100 s 内采集到的总数据个数。 $\text{mean}()$  代表对括号里面所有数据求平均值。用最大值  $\max(B-100)$  与最小值  $\min(B-100)$  相减, 作为保偏光路全温零偏极差。

设温度信号为  $T$ , 时间间隔为  $\Delta t$ , 则温度变化率为

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T(t) - T(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (9)$$

以温度信号为基础的衍生信号  $T$ 、 $\frac{dT}{dt}$ 、 $T^2$ 、 $T \cdot \frac{dT}{dt}$ ，依次设为变量  $x_1, x_2, x_3, x_4$ 。则多元线性回归模型记为

$$B = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \varepsilon \quad (10)$$

式(10)中， $\beta_0, \dots, \beta_1, \beta_4$  是 5 个未知数。利用最小二乘估计，得到

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (11)$$

则样本回归模型为

$$\hat{B} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_3 x_3 + \hat{\beta}_4 x_4 + \varepsilon \quad (12)$$

补偿后的数据为  $\bar{B} = B - \hat{B}$ 。对  $\bar{B}$  进行 100 s 平滑为  $\bar{B}_{100}$ ，标准差为  $\text{std}(\bar{B}_{100})$ ，作为保偏光路补偿后零偏稳定性。

全温零偏极差，反映了保偏光路的互易性。由 Shupe 误差可知，在温度环境下，若两束光经历的路程关于绕制中点不互易，将产生零偏漂移。若两束光经历的路程关于绕制中点互易，零偏漂移将被抵消。全温极差的大小，主要反映了零偏漂移的大小，反映了光路的互易性。

补偿后零偏稳定性，反映了保偏光路的可补偿性。在温度激励下，通常用温度补偿模型，对保偏光路的零偏输出进行补偿，有的能够补偿，有的不

能补偿。补偿性好的光路，说明温度的影响可以通过模型进行抑制，光路可正常使用。补偿性不好的光路，说明温度的影响不能通过模型进行抑制，光路需要调整。

全温零偏极差和补偿后零偏稳定性两个指标，作为保偏光路的评价指标。两者从不同的层面评价了保偏光路的优劣。

## 4 实验测试结果与分析

### 4.1 测试系统的检测

本文通过设计温箱内外光纤陀螺的零偏稳定性实验，对比零偏稳定性指标，进行测试系统的检测。温箱外部常温测试，指的是保偏光路组件放在大理石平台上进行测试，目的是检测保偏光路组件的整体性能。温箱内部恒定温度点测试，指的是保偏光路组件放在温箱内进行测试，目的是检测温箱的性能。

测试条件为：测试时间 2 h，采样频率 1 Hz。温箱内恒定温度点设置为 +20℃、-40℃、+60℃。温箱在设置温度点保温 2 h，然后对温箱进行断电（如图 4）。温箱外部常温测试结果如图 5 所示，温箱内部恒定温度点测试结果如图 6 至图 8 所示，表 1 为测试系统的检测结果，可以看出 4 个补偿后零偏稳定性的差值小于 0.001°/h，反映了测试系统的检测水平，能够用于后续保偏光路的评价。

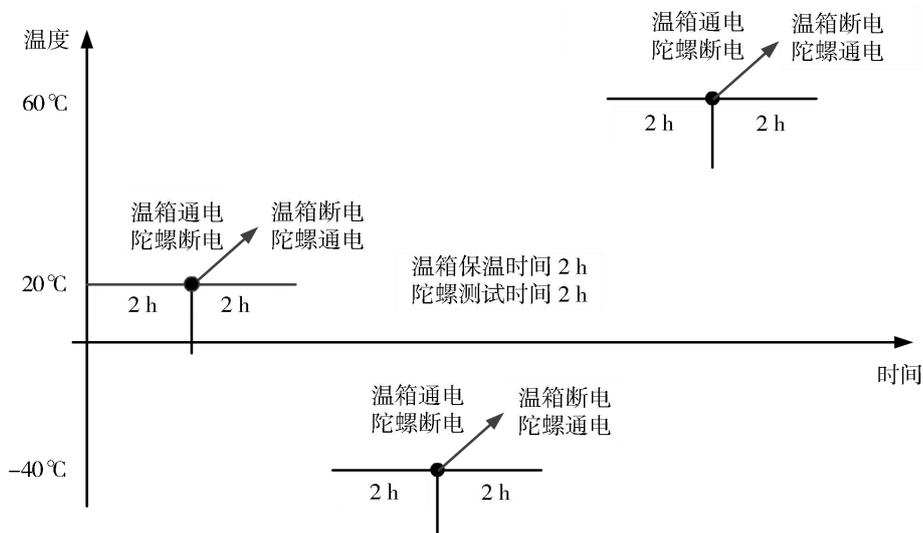


图 4 温度条件

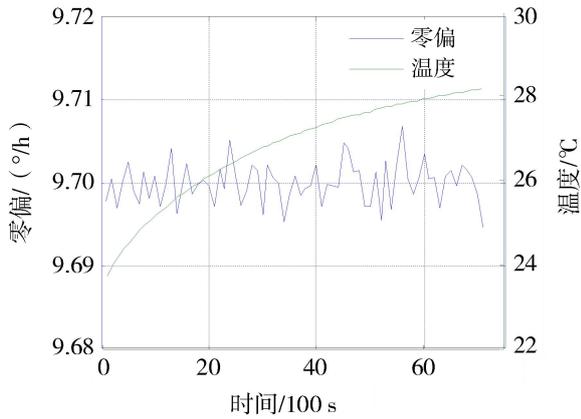


图5 温箱外部保偏光路常温测试结果

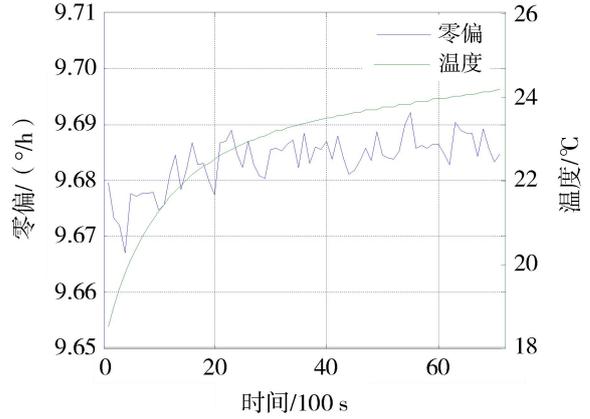


图6 温箱内部保偏光路+20℃保温测试结果

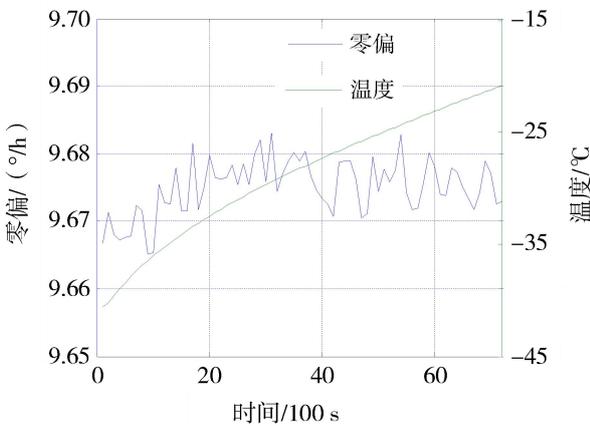


图7 温箱内部保偏光路-40℃保温测试结果

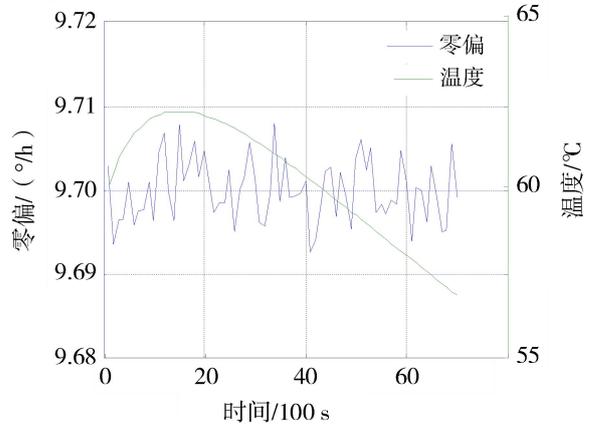


图8 温箱内部保偏光路+60℃保温测试结果

表1 测试系统的检测结果

光路场景	温度点/℃	补偿后零偏稳定性 (100 s, 1σ) / (°/h)	补偿后零偏稳定性之间的差值 / (°/h)
温箱外部常温测试	常温	0.002 4	
	+20	0.002 7	<0.001
温箱内部恒定温度点	-40	0.003 4	
	+60	0.003 1	

### 4.2 保偏光路性能的检测

保偏光路性能的检测测试条件：温度范围-40℃~+60℃，温度变化率1℃/min，高低温保持时间3h(如图9)。采用的光纤环和Y波导器件一致，仅改变尾纤处理和熔点控制参数，分别是光路1，

2, 3, 优化前后状态如表2所示。光路1只对尾纤进行处理，更改 $\Delta\phi_1(t)$ 和 $\Delta\phi_2(t)$ 的大小。光路2只对熔接点进行处理，更改 $\Delta\phi_c(t)$ 的大小。光路3同时对尾纤和熔接点处理，更改 $\Delta\phi_1(t)$ 、 $\Delta\phi_2(t)$ 和 $\Delta\phi_c(t)$ 的大小。

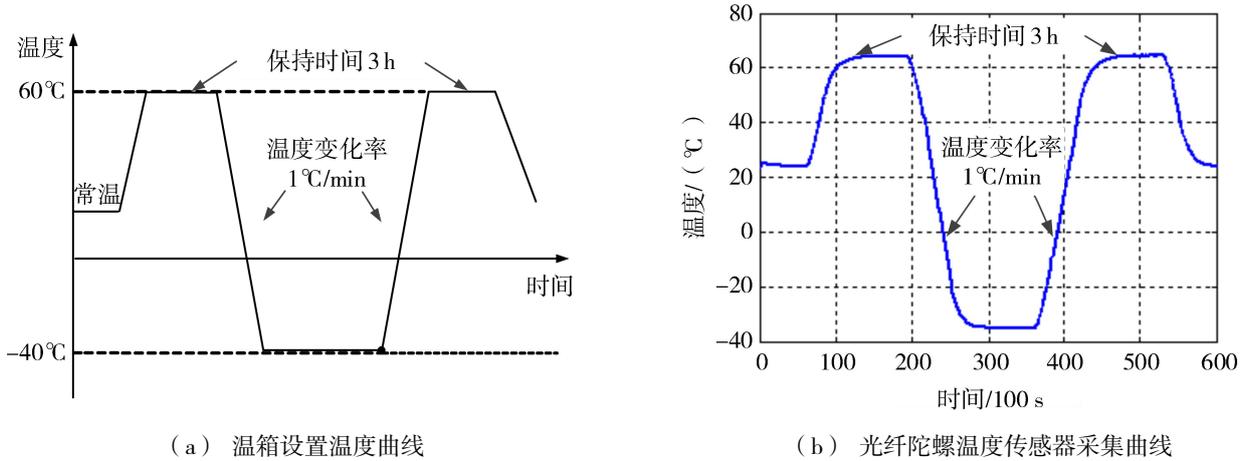


图 9 温度条件

表 2 保偏光路组件状态

光路状态	尾纤状态	尾纤应力	熔接损耗/dB	熔接参数控制	影响误差项	
光路 1	优化前	尾纤多处交叉、多处扭转	大	熔接损耗 0.02	精确	$\Delta\phi_1(t)$ $\Delta\phi_2(t)$
	优化后	尾纤无交叉、无扭转	小	熔接损耗 0.02	精确	
光路 2	优化前	尾纤无交叉、无扭转	小	熔接损耗 0.10	非精确	$\Delta\phi_2(t)$
	优化后	尾纤无交叉、无扭转	小	熔接损耗 0.02	精确	
光路 3	优化前	尾纤多处交叉、多处扭转后胶固	大	熔接损耗 0.10	非精确	$\Delta\phi_1(t)$ $\Delta\phi_2(t)$
	优化后	尾纤无交叉、无扭转后胶固	小	熔接损耗 0.01	精确	

对优化前后的保偏光路组件进行测试，并对测试数据进行 100 s 平滑，数据曲线如图 10 至图 15。熔接点不变，只更改尾纤处理：光路 1 优化前尾纤多处交叉、多处扭转，光路 1 优化后尾纤无交叉、无扭转，经测试优化前后，全温零偏极差降低了 22%，补偿后零偏稳定性提高了 2 倍。尾纤处理不变，只更改熔接点：光路 2 优化前熔接参数精确控制，光路 2 优

化后熔接参数非精确控制，经测试优化前后，全温零偏极差降低了 33%，补偿后零偏稳定性提高了 1.4 倍。同时进行更改尾纤处理和熔接点：光路 3 优化前尾纤多处交叉、多处扭转，熔接参数非精确控制，光路 3 优化前尾纤无交叉、无扭转，熔接参数精确控制，优化前后经测试，全温零偏极差降低了 60%，补偿后零偏稳定性提高了 1.6 倍。具体见表 3。

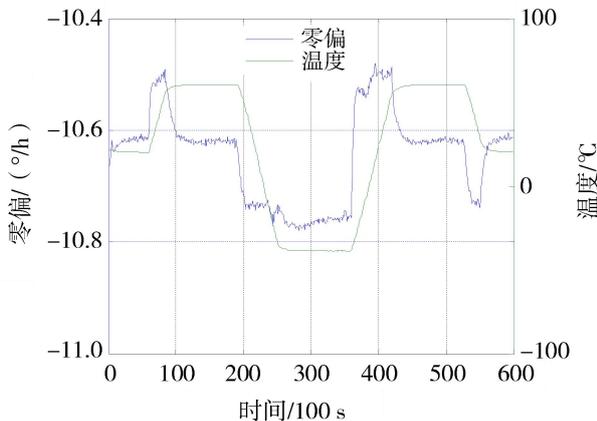


图 10 优化前保偏光路 1 全温测试曲线

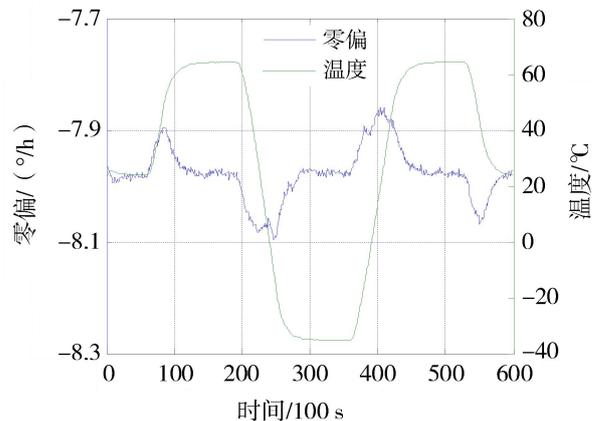


图 11 优化后保偏光路 1 全温测试曲线

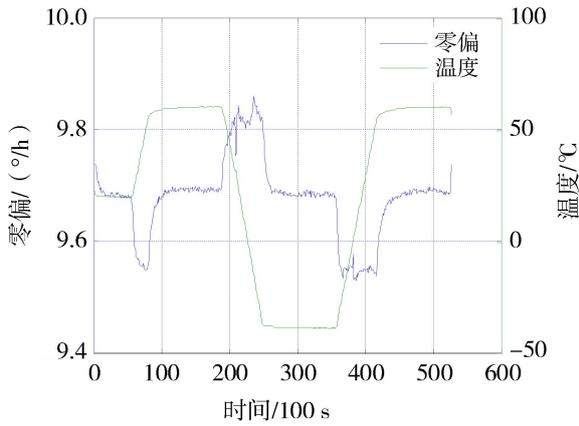


图 12 优化前保偏光路 2 全温测试曲线

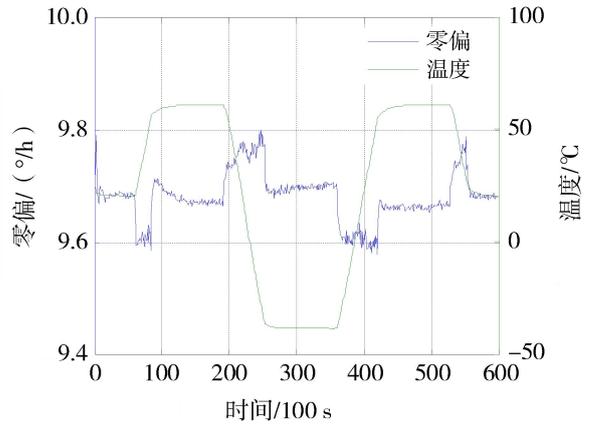


图 13 优化后保偏光路 2 全温测试曲线

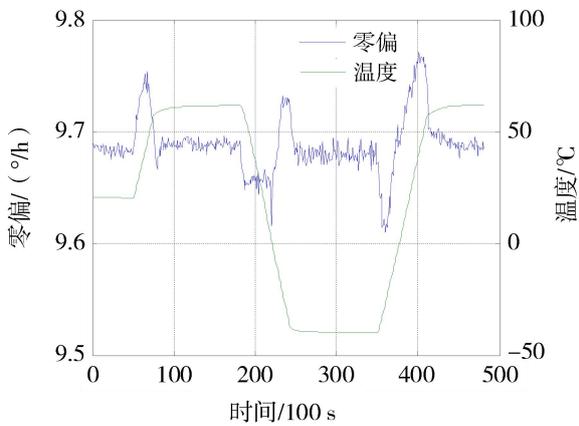


图 14 优化前保偏光路 3 全温测试曲线

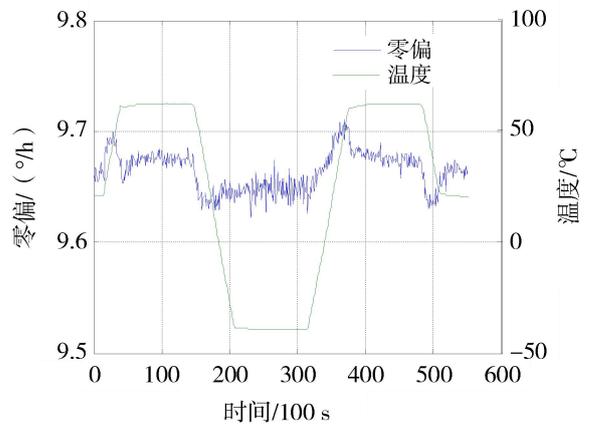


图 15 优化后保偏光路 3 全温测试曲线

表 3 保偏光路温度性能测试结果

光路状态	温度极差/(°/h)	改善效果	补偿后零偏稳定性(°/h)/(100 s, 1σ)	改善效果	
光路 1	优化前	0.28	降低了 22%	0.02	提升了 2 倍
	优化后	0.22		0.01	
光路 2	优化前	0.3	降低了 33%	0.015	提升了 1.4 倍
	优化后	0.2		0.011	
光路 3	优化前	0.15	降低了 60%	0.013	提升了 1.6 倍
	优化后	0.06		0.008	

### 5 结论

本文在光纤环和 Y 波导器件保持一致的情况下,对构成保偏光路组件中的尾纤和熔接点进行研究。发现尾纤低应力处理和熔接参数精确调控对保

偏光路的温度性能有影响。搭建了保偏光路测试系统,设计了 2 组实验对系统完成了检测。并给出了保偏光路的评价指标:全温零偏极差和补偿后零偏稳定性。设计了 3 组不同状态光路的实验,光路 1,通过只调整尾纤应力,全温零偏极差降低了 22%,

补偿后零偏稳定性提高了 2 倍。光路 2, 通过只控制熔接参数, 全温零偏极差降低了 33%, 补偿后零偏稳定性提高了 1.4 倍。光路 3, 同时调整尾纤应力和熔接参数, 全温零偏极差降低了 60%, 补偿后零偏稳定性提高了 1.6 倍。实验结果表明, 尾纤处理和熔接参数控制对保偏光路温度性能的影响不可忽视, 能够为后续高精度光纤陀螺的生产提供指导意义。

### 参考文献:

- [1] MEAD D, MOSOR M. Progress with interferometric fiber optic gyro at Honeywell[J]. *Optical Waveguide and Laser Sensors*, 2020: 140509(1-16).
- [2] SHUPE D M. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(5): 654-655.
- [3] 范运强, 黄继勋, 李晶. 干涉光路装配应力对称性对 Shupe 误差的影响[J]. *光学学报*, 2021, 41(21): 125-130.
- [4] 孙媛, 陈昊, 敖晓辉, 等. 光纤陀螺仪光纤尾纤装配动力学建模仿真与应力计算方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2024, 32(9): 1-20.
- [5] 刘福民, 黄韬, 李瑞龙, 等. 外应力对 Y 波导器件尾纤消光比的影响[J]. *光子学报*, 2011, 40(11): 1636-1640.
- [6] 王晓丹, 杨盛林, 张宇, 等. 扭转角度对 Shupe 误差的影响及绕环工艺的优化[J]. *中国惯性技术学报*, 2024, 32(10): 1035-1042.
- [7] 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.
- [8] 张天乐, 温坤华, 张翔, 等. 光纤陀螺光路热致零漂误差产生机理与抑制方法综述[J]. *弹箭与制导学报*, 2024, 44(5): 14-24.
- [9] 许保祥, 熊智, 黄继勋. 光纤固定胶粘剂对光纤陀螺低温零偏误差的影响[J]. *兵工学报*, 2021, 42(6): 1223-1229.
- [10] 吴庆哲, 李萌, 徐丹, 等. 保偏光纤内外涂层应力对光纤双折射的影响分析[J]. *光子学报*, 2024, 53(6): 0606002(1-11).