

文章编号:1001-5078(2025)01-0046-06

· 激光应用技术 ·

改进径向基函数的激光陀螺温度漂移补偿研究

张孟, 彭冲冲, 冉莹丽

(郑州工业应用技术学院, 河南 郑州 451100)

摘要:当前方法多采用单一传感温度参数完成补偿,没有对各个传感器的不同温度参数进行区分,导致补偿效果差。对此,提出了一种改进径向基函数的激光陀螺温度漂移补偿方法。首先,采用小波分解含有噪声的激光陀螺漂移信号,求出并校正每个尺度的小波系数,得到重构后无干扰温度传感信号;然后,通过脉冲矢量、装配误差矩阵等数值,测量激光陀螺加速计,分辨出各传感器的温度参数。利用自组织特征映射网络分类激光陀螺输出参数,选择径向基函数神经网络转换函数,算出每个温度传感器参数的误差减少率。最后,结合正交最小二乘算法训练径向基函数神经网络,完成激光陀螺温度漂移补偿。通过实验,证明所提方法激光陀螺温度漂移补偿效果佳,输出稳定性,可增强高精度的导航、定位、定向等设备性能。

关键词:激光陀螺;温度漂移补偿;脉冲输出矢量;标度因子

中图分类号:TN249;TM935 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2025.01.007

Research on temperature drift compensation of laser gyroscope with improved radial basis function

ZHANG Meng, PENG Chong-chong, RAN Ying-li

(Zhengzhou University of Industrial Technology, Zhengzhou 451100, China)

Abstract: The current method mostly adopts a single sensing temperature parameter for compensation, without distinguishing the different temperature parameters of each sensor, resulting in a poor compensation effect. In this regard, a temperature drift compensation method for laser gyroscopes with improved radial basis functions is proposed. Firstly, wavelet decomposition is used to decompose the drift signal of the laser gyroscope containing noise, and the wavelet coefficients of each scale are calculated and corrected to obtain the reconstructed non-interference temperature sensing signal. Then, by using values such as pulse vector and assembly error matrix, the laser gyroscope accelerometer is measured to distinguish the temperature parameters of each sensor. The self-organized feature mapping network is used to classify the laser gyro output parameters, and the radial basis function neural network transformation function is selected to calculate the error reduction rate of each temperature sensor parameter. Finally, the radial basis function neural network is trained with the orthogonal least squares algorithm to complete the temperature drift compensation of the laser gyroscope. Through experiments, it is proved that the proposed method for temperature drift compensation of laser gyroscopes has good performance, stable output, and can enhance the performance of high-precision navigation, positioning, orientation and other equipment.

Keywords: laser gyroscope; temperature drift compensation; pulse output vector; scale factor

基金项目:河南省软科学研究项目(No. 222400410149)资助。

作者简介:张孟(1988-),女,硕士,讲师,研究方向为图论与组合优化,数学建模技术。E-mail:yyhhy@163.com

收稿日期:2024-05-09

1 引言

激光陀螺作为高精度的光速敏元件^[1],其输出稳定性对于整个系统的测量精度具有至关重要的影响。特别是在复杂多变的温变环境^[2]中,激光陀螺的物理特性、几何形状和工作气流场等都可能受到介质异常色散效应^[3]的影响,导致标度因数误差与零偏^[4]的改变。通过热环境研究发现,在不同的温度下,陀螺标度因数几乎没有改变,而受温度影响的主要是陀螺零偏,这将严重影响系统的精度。通过深入研究激光陀螺的温度特性,探索温度与零偏之间的内在关系,进而开发出一套有效的温度补偿方法,以减小或消除温度变化对激光陀螺零偏的影响^[5]。

张文^[6]等人以温度、温度梯度为自变量,构建陀螺零偏补偿模型,完成温度补偿。在该方法中,补偿模型没有充分考虑到传感器的个体差异,当系统面临复杂多变的温度环境时,模型的补偿效果会受到影响,导致系统的整体性能下降。赵深^[7]等人提出了基于混沌模拟退火粒子群 BP 神经网络的陀螺温度补偿方法,对网络参数进行优化,实现温度补偿。该方法在构建补偿模型之前,通常需要对数据进行预处理和特征选择。然而,在这一步骤中未考虑到各传感器的不同温度参数,因此输入神经网络的特征未能充分反映每个传感器的独特性能,导致神经网络在训练过程中难以学习到每个传感器对温度变化的独特响应模式,进而影响补偿的准确性。Chen Yanjun^[8]等在噪声机理上常规 Shupe 效应基本被压制的情况下,陀螺中的热相位噪声对温变起着主导作用。为了减小温度的影响,采用了高阶频率调制,实现陀螺温度补偿。然而,该方法在温度补偿模型的构建过程中忽略了各个传感器的不同温度参数,所建立的补偿模型无法准确反映每个传感器在不同温度下的性能变化,导致补偿效果不准确。Niu Y^[9]等利用光功率漂移和环境温度建模的补偿方法。在室温条件 100 s 后,其输出光功率的相对 Allan 误差减小,长期稳定性能得到改善,从而完成温度补偿。然而,该方法在建模过程中未区分各个传感器的不同温度参数,所建立的光功率漂移与环境温度的模型无法准确反映每个传感器独特的温度响应特性。导致模型精度不足,无法为每个传感器提供准确的补偿。

上述方法普遍存在的问题是缺乏对各个传感器不同温度参数的有效区分,因此导致补偿精度不足、效果不佳以及优化难度增加等弊端。对此,本研究提出了改进径向基函数的激光陀螺温度漂移补偿方法,旨在通过有效区分各个传感器的不同温度参数,提高补偿的准确性和有效性。

2 激光陀螺漂移温度传感信号重建

在激光陀螺中,经常会出现高斯白噪声、分形噪声等多种随机噪声^[10]。为了减少这些噪声对激光陀螺性能的影响,采用小波分解对含有噪声的激光陀螺漂移温度信号进行处理。

首先运用小波分解技术对含有噪声的激光陀螺漂移信号进行多尺度分解。接下来,设定一个针对较高尺度的小波系数的门限值。那些幅度小于此门限的小波系数将被设置为 0,以滤除噪声。在滤除噪声的过程中,门限 T 的取值是关键,其直接关联到噪声方差的大小。本研究采用 $\sigma_k = \frac{\text{median}|x|}{0.6745}$ 计算出噪声方差值 σ_k 。基于 E-median 门限重构激光陀螺漂移信号,其详细过程为:

第一步:基于平稳小波变换信号,按比例求出小波系数;

第二步:针对不同的小波系数,分别求出每个尺度的 E-median 门限;

$$t_{l,k} = \frac{\sigma_k \sqrt{2 \log N}}{E_{l,k}}; k = 1, 2, \dots, l \quad (1)$$

式中, $E_{l,k} = \exp(\frac{k}{l})$, k 是小波分解总尺度; l 是任意小波分解总尺度; N 是插值补零算子。

第三步:基于 E-median 门限 $t_{l,k}$,采用软阈值方法 $\delta_l(x) = \text{sgn}(x)(|x| - T)$ 对高频小波系数进行校正。其中, $\delta_l(x)$ 描述的是软阈值; x 描述的是信号。

第四步:利用平稳小波反变换完成信号重建。

3 激光陀螺多传感器温度的参数分辨

激光陀螺加速计的性能极易受到温度变化的影响。温度变化会引发陀螺仪的漂移现象,进而降低其测量精度。因此,为了准确补偿由温度导致的漂移误差,获取各传感器的温度参数变得至关重要。

激光陀螺系统分别包含三个正交激光陀螺与加速度计。重建的激光陀螺漂移温度信号提供了关于陀螺仪在不同温度条件下性能变化的准确数据。参

考重建的激光陀螺漂移温度信号,借助脉冲矢量、装配误差矩阵等数值的测量,建立激光陀螺测量模型:

$$N_g = t_{l,k} K_g (E_g \omega_g + D_g) \quad (2)$$

式中, N_g 描述的是三个激光陀螺在采样期间 τ 内的输出脉冲矢量; E_g 描述的是激光陀螺装配误差矩阵; K_g 描述的是三个激光陀螺标度因子矩阵; ω_g 描述的是三个被测轴角速矢量; D_g 描述的是激光陀螺零偏矩阵。重建的激光陀螺漂移温度信号数据可以用来校准和验证通过脉冲矢量和装配误差矩阵测量得到的传感器输出值。通过比较测量值和校准值,可以评估传感器性能随温度变化的趋势,从而更准确地分辨出各传感器的温度参数。

加速计测量表达式为:

$$N_a = N_g K_a (E_a A_a + D_a) \quad (3)$$

式中, N_a 描述的是三个加速度计在采样期间 τ 内的输出脉冲矢量; K_a 描述的是加速度计标度因子矩阵; E_a 描述的是装配误差矩阵; A_a 描述的是三个被测轴加速度; D_a 描述的是加速度计零偏矩阵。

在利用脉冲矢量和装配误差矩阵进行测量的过程中,需要考虑温度对激光陀螺、加速度计的标度因子、零点的影响。因此,参考重建的激光陀螺漂移温度信号,将温度 T 的变动系数纳入考量,获得表达式:

$$\begin{cases} N_g = K_g(T) (E_g \omega_g + D_g(T)) \\ N_a = K_a(T) (E_a A_a + D_a(T)) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $K_g(T)$ 、 $D_g(T)$ 描述的是陀螺与加速度计的标度因子温度拟合回归矩阵; $K_a(T)$ 、 $D_a(T)$ 描述的是陀螺与加速度计的零偏温度拟合回归矩阵。

重建的激光陀螺漂移温度信号被用作温度拟合回归过程中的关键输入数据。通过对这些数据进行统计分析,可以确定标度因子和零偏与温度之间的函数关系。

4 改进径向基函数下陀螺温度漂移补偿

在激光陀螺系统中,由于温度条件的变化,传感器参数往往会呈现出复杂多变的分布模式。本研究选择了径向基函数神经网络(RBF网络)作为转换函数,利用其局部逼近能力对输入空间的局部区域进行精确拟合。

基于上述得到的陀螺与加速度计的零偏温度拟合回归矩阵,采用改进径向基函数神经网络进行陀螺温度漂移补偿。各传感器的温度参数变化不会造

成 ω_g 、 A_a 变化。从公式(4)可得出 ω_g 、 A_a 的表达式为:

$$\begin{cases} \omega_g = E_g^{-1} [K_g^{-1}(T) N_g - D_g(T)] \\ A_a = E_a^{-1} [K_a^{-1}(T) N_a - D_a(T)] \end{cases} \quad (5)$$

设 e 是要被补偿的对象温度,利用回归模型计算在 e 下陀螺、加速度计的标度因子矩阵 K_g^e 、 K_a^e 与零偏矩阵 D_g^e 、 D_a^e ,将公式(5)分别替换到公式(2)、(3)中,就能获得陀螺和加速度计补偿温度 e 的温度补偿模型:

$$\begin{cases} N_g^e = \omega_g K_g^e [K_g^{-1}(T) N_g - D_g^e - D_g(T)] \tau \\ N_a^e = A_a K_a^e [K_a^{-1}(T) N_a - D_a^e - D_a(T)] \tau \end{cases} \quad (6)$$

式中, N_g^e 、 N_a^e 描述的是陀螺、加速度补偿脉冲输出矢量。

在径向基函数神经网络的学习过程中,需要考虑3个参数:数据中心,归一化常数,以及输出节点权重。改进的径向基函数神经网络方法采用自组织特征映射网对陀螺输出重建信号进行分类,建立新的样本集。用新样本集替代原来的大量样本集。结合正交最小二乘算法选取新样本中心,避免传统径向基函数神经网络的计算量大、数值病态等问题。改进径向基函数神经网络的具体流程为:

第一步:将重建的激光陀螺零偏温度传感信号导入网络,获得采样空间;

第二步:利用自组织特征映射网络分类处理采样数据,并将获得的结果标记,具体的学习方法流程为:

(1)对网络输入层和径向基函数层的权重 w_{ij} 进行随机初始化,设定初始学习速率 $a(0)$ 。其中, $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, m$; n 描述的是输入层节点数目; m 描述的是径向基函数层节点数目。

(2)将 $x(t)$ 输入到网络中, $x(t)$ 描述的是在 t 时 n 维的输入矢量。

(3)将 $x(t)$ 输入到公式(7),获得各输出节点 j 间的距离 d_j :

$$d_j = \sum_{i=1}^n (x_i(t) - w_{ij}(t))^2 (N_g^e + N_a^e) \quad (7)$$

式中, $w_{ij}(t)$ 描述的是 t 时的加权矢量; x_i 描述的是 i 个输入信号矢量。

(4)将距离最小数值设定是获胜的输出节点。

(5)更新加权矢量:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t)d_j + a(t)(x(i)(t) - w_{ij}(t)) \quad (8)$$

式中, $a(t)$ 描述的是在 t 时的学习速率, 随着时间 t 的增大而逐渐降低, $w_{ij}(t+1)$ 描述的是在 $t+1$ 时的加权矢量。

(6) 若 w_{ij} 的变化量是 0 或非常小, 则完成学习, 反之, 回到步骤(2)。

第三步: 把重构后的激光陀螺零偏温度传感信号当做是径向基函数神经网络的初始训练集, 并结合正交最小二乘算法选取所需数据。具体流程为:

(1) 首先, 选择径向基函数神经网络的转换函数 $\phi(x) = \exp(-\frac{x^2}{\sigma^2})$ 与局部感知区域 σ , 设定网络的最大训练数量为 M , 允许参数为 $\rho = \frac{1 - \sigma_n^2}{\sigma_d^2}$,

这里 σ_n^2 是测量噪声的功率, σ_d^2 是预期输出总功率。最后, 选取自组织特征映射网络的 $u \times v$ 个元素作为初始中心, v 是隐含层节点的数目, u 是训练样本的数目。利用转换函数获得隐含层输出的基向量 $P(P \subseteq \xi^{Q \times Q})$, 其中, Q 为隐含层层数。

(2) 通过正交最小二乘算法选取训练中心, 具体流程为:

1) 步: 当竞争层单元输出状态 $k=1$ 。将 $1 \leq i \leq Q$, 假设第一层转换后的隐含层输出基向量 $b_1^{(i)}$ 为:

$$b_1^{(i)} = P_i w_{ij}(t+1) \quad (9)$$

第 i 个中心的误差减少率 $[err]_1^{(i)}$ 表达式为:

$$[err]_1^{(i)} = \frac{(b_1^{(i)T} y_d)^2}{b_1^{(i)T} b_1^{(i)} \times y_d^T y_d} \quad (10)$$

式中, y_d 描述的是学习因子。

搜寻: $[err]_1^{i_1} = \max\{[err]_1^{(i)}, 1 \leq i \leq Q\}$ 。

选取: $b_1 = P_{i_1} [err]_1^{i_1}$ 。

径向基函数的中心是 $c_1 = c_{i_1}$ 。

k) 步: $k \geq 2$ 且 $1 \leq i \leq Q, i \neq i_1, i_2, \dots, i_{k-1}$, 相应的表达式为:

$$a_{jk}^{(i)} = b_1 \frac{b_i^T P_i}{b_j^T b_i}, 1 \leq j \leq k-1 \quad (11)$$

式中, $a_{jk}^{(i)}$ 描述的是非线性转化函数; b_j 描述的是第 j 个节点转换后的隐含层输出基向量;

假设: $b_k^{(i)} = P_i - \sum_{j=1}^{k-1} a_{jk}^{(i)} b_j$, 可以得出:

$$[err]_k^{(i)} = \frac{(b_k^{(i)T} y_d)^2}{b_k^{(i)T} b_k^{(i)} \times y_d^T y_d} \quad (12)$$

搜索: $[err]_k^{i_k} = \max\{[err]_k^{(i)}, 1 \leq i \leq Q, i \neq i_1, i_2, \dots, i_{k-1}\}$ 。

选取: $b_k = b_k^{(i_k)} [err]_k^{i_k}$ 。

这一点的中心为 $c_k = c_{i_k}$ 。

$k+1$) 步: 重复 k) 步, 如果: $1 - b_k \sum_{j=1}^{N_1} [err]_j < \rho$, 那么, 返回到 N_1 终止。

第四步: 根据选定的训练中心训练径向基网络, 使其获得最优的学习效果。在激光陀螺温度漂移补偿中, 以温度、温变速率为输入; 零偏为预期输出。因此, 改进径向基函数神经网络激光陀螺温度漂移补偿模型建立时, 首先选取采样点 N , 构建不同种类样本的自组织特征映射网络, 并以此为初始中心, 利用隐含层输出获得基向量, 再结合正交最小二乘算法最优学习中心训练径向基函数神经网络, 从而获得改进的径向基函数神经网络模型, 实现有效补偿。

5 激光陀螺温度漂移补偿实验

5.1 实验环境

为了验证所提方法的补偿效果, 选用了新型激光陀螺作为实验对象, 该陀螺具有高精度和快速响应的特点, 如图 1 所示。



图 1 激光陀螺

Fig. 1 Laser gyroscope

在实验过程中, 采用了严格的温度控制方法, 确保每个温度点下的数据都是准确可靠的。同时, 对数据采集和处理过程进行了精细化的操作, 以确保实验结果的准确性和可重复性。对不同温度下的加速度计标度因子和零偏值进行对比, 对比结果如图 2、图 3 所示。

在图 2 中, 标度因子随着温度的升高而逐渐增大, 这可能是由于温度变化导致传感器内部材料属性发生变化, 进而影响了其测量尺度。而图 3 则展

示了零偏值随温度的变化情况,可以看到,随着温度的升高,零偏值也发生了明显的偏移,这可能是由于温度引起的传感器内部应力或电荷分布变化所导致的。这种高分辨率的参数分辨能力使得后续过程能够更加深入地了解传感器在不同温度条件下的性能表现。通过对这些数据的分析,可以更准确地确定传感器在不同温度下的误差范围和变化规律,从而为后续的补偿工作提供更有针对性的指导。

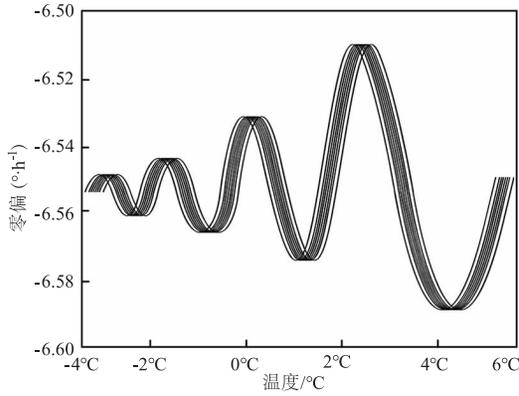


图2 不同温度下的零偏值

Fig. 2 Zero bias values at different temperatures

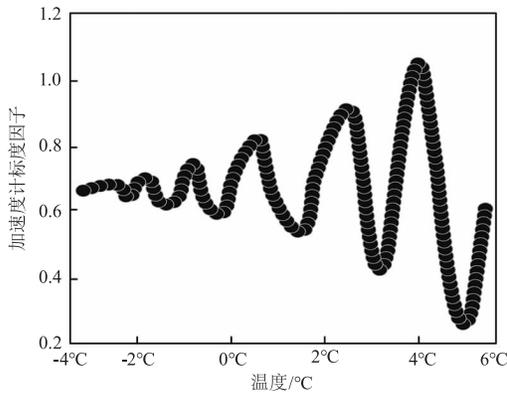


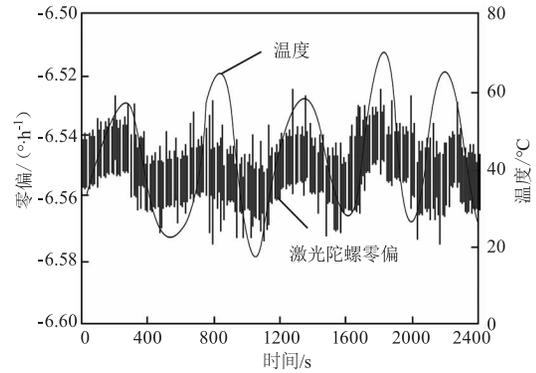
图3 不同温度下的加速度计标度因子

Fig. 3 Scale factors of accelerometers at different temperatures

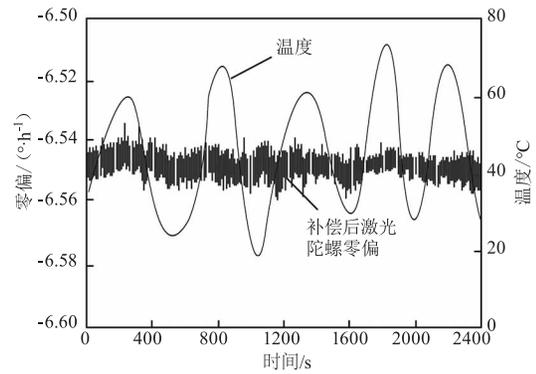
5.2 实验分析

实验一:将某型号的激光陀螺装入惯导系统,将惯导系统置于温箱环境下,进行温度随机变化实验。温度速率为 1 °C/min,进行了一次随机温度变化实验:首先,将惯导系统由 16 °C 降温到 -21 °C 保温 8 h,然后升至 32 °C 保温 8 h后,降至 0 °C 保温 8 h,然后升至 10 °C 保温 8 h,升至 48 °C 保温 8 h,接着,将温度降低到 -6 °C,继续保温 8 h,再升高到 50 °C,同样保温 8 h,再下降到 28 °C 保温,最后关闭恒温箱,维持自然地加热。

在随机温度变化下,陀螺输出与温度之间的关系如下图 4(a),补偿后输出曲线见图 4(b)。



(a) 激光陀螺输出和温度变化



(b) 激光陀螺温度补偿结果

图4 随机温度变化条件

Fig. 4 Random temperature variation conditions

根据图 4 所示的实验结果,补偿后的激光陀螺零偏在随机温度变化条件下虽然未能完全消除,但明显减小,这充分证明了所提方法对激光陀螺温度补偿的有效性。

实验二:在实际使用过程中,随着外界温度的微小改变,惯导系统因元件自身的散热而产生的自然温升,为此,进行自然升温模拟实验。将惯导系统置于一个实验室中,温度为 10 °C,任其自然升温,采集陀螺输出数据,图 5 为陀螺补偿前输出和温度变化,图 6 为激光陀螺温度补偿结果。

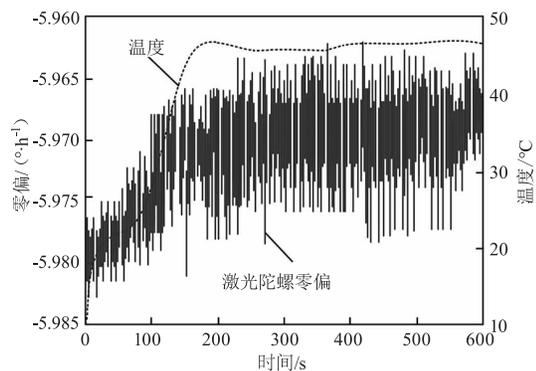


图5 自然升温时激光陀螺输出和温度变化

Fig. 5 Output and temperature changes of laser gyroscope during natural heating

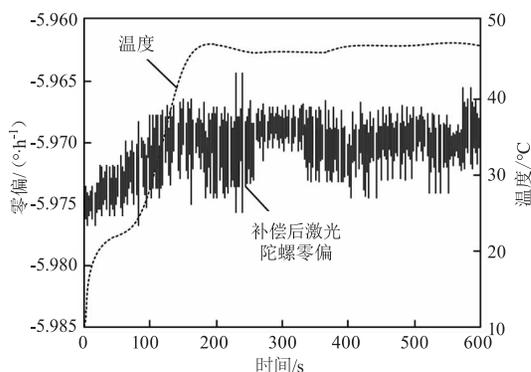


图6 自然升温时激光陀螺温度补偿结果

Fig. 6 Temperature compensation results of laser gyroscope during natural heating

从图5所示,补偿前激光陀螺的输出随着温度的自然上升而呈现出较大的波动。而经过本研究提出的温度漂移补偿方法处理后,激光陀螺的输出波动明显减少,零件稳定性得到了显著提升。

6 结论

本文研究改进径向基函数下的激光陀螺温度漂移补偿方法。首先,利用小波分解技术,对含有噪声的激光陀螺漂移信号进行处理。接着,结合脉冲矢量、装配误差矩阵等数值,对激光陀螺加速计进行了精确测量。通过自组织特征映射网络对激光陀螺输出参数进行分类,选择了径向基函数神经网络作为转换函数,并计算了每个温度传感器参数的误差减少率。最后,结合正交最小二乘算法对径向基函数神经网络进行训练,实现了对激光陀螺温度漂移的有效补偿。通过实验验证,本研究提出的补偿方法不仅能够有效减少激光陀螺温度漂移的影响,还显著提高了其输出的稳定性,能够为相关领域的发展提供有力的技术支持。

参考文献:

[1] Zhai Erjiang, Guo Wenge, Xu Xuedong, et al. Research progress of large laser gyroscope[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(6):705-709. (in Chinese)
翟二江,郭文阁,徐学东,等.大型激光陀螺仪的研究进展[J].*激光与红外*,2021,51(6):705-709.

[2] Huang Yueruihan, Ma Jiajun, Zhang Zipeng, et al. Scale factor compensation technology of laser gyro with total reflection prism[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(2):444-449. (in Chinese)
黄月锐涵,马家君,张子鹏,等.全反射棱镜式激光陀螺标度因数补偿技术[J].*应用光学*,2023,44(2):444-449.

[3] Liang Xiujuan, Ji Haixu. Mechanical vibration suppression technology of laser gyroscope based on variance analysis[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2022, (5):88-91,98. (in Chinese)
梁秀娟,嵇海旭.方差分析法下激光陀螺仪机械振动抑制技术[J].*机械设计与制造*,2022,(5):88-91,98.

[4] Wang Xiaozhang, Jiang Junbiao, Niu Zhen, et al. Effect of unsteady temperature field on the performance of large-length optical fiber ring at start-up[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2022, 42(3):32-36,41. (in Chinese)
王晓章,蒋军彪,牛震,等.启动时非稳态温度场对大长度光纤环性能的影响[J].*弹箭与制导学报*,2022,42(3):32-36,41.

[5] Sun Ning, Xia Yan, Cheng Xingqing. Optimal design of high-precision temperature control system for FOG detection[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(4):910-918. (in Chinese)
孙宁,夏艳,程行清.基于光纤陀螺仪检测的精密温控装置优化设计[J].*兵工学报*,2022,43(4):910-918.

[6] Zhang Wen, Wang Tingjun, Wang Lei, et al. Temperature compensation method of laser gyroscope based on PSO-BP neural network[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2022, 30(5):652-657. (in Chinese)
张文,王庭军,王雷,等.基于PSO-BP神经网络的激光陀螺温度补偿方法[J].*中国惯性技术学报*,2022,30(5):652-657.

[7] Zhao Shen, He Wei, Xin Jingtao, et al. Research on temperature compensation of fiber optic gyroscope based on CSAPSO-BP neural network[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2023, 45(4):589-594. (in Chinese)
赵深,何巍,辛璟焘,等.基于CSAPSO-BP神经网络的光纤陀螺温度补偿研究[J].*压电与声光*,2023,45(4):589-594.

[8] Chen Yanjun, Cao Yuwen, Zhu Lanxin, et al. Suppression of effects of temperature variation by high-order frequency modulation in large fiber-optic gyroscopes[J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 122(14):141102-1-141102-6.

[9] Niu Y, Duan L, Zhang J, et al. Suppression of ambient temperature-caused drift in a laser power stabilization system with a liquid crystal variable retarder in atomic gyroscopes[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(4):043002.

[10] Mao Ning, Xu Jiangning, He Hongyang, et al. Real-time compensation of fiber optic gyroscope zero-drift based on Online-SVR model[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(1):118-124. (in Chinese)
毛宁,许江宁,何泓洋,等.基于Online-SVR模型的光纤陀螺零漂实时补偿[J].*激光与光电子学进展*,2022,59(1):118-124.