

# 光电工程

## Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊  
Scopus CSCD

### 一种光纤陀螺全温启动漂移补偿方法

姚磊善, 周一览, 赵帅, 黄腾超, 车双良

#### 引用本文:

姚磊善, 周一览, 赵帅, 等. 一种光纤陀螺全温启动漂移补偿方法[J]. *光电工程*, 2024, **51**(5): 240033.

Yao L S, Zhou Y L, Zhao S, et al. A FOG start-up drift compensation method at full temperatures before and after compensation comparison[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, **51**(5): 240033.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240033>

收稿日期: 2024-01-31; 修改日期: 2024-03-22; 录用日期: 2024-03-22

## 相关论文

### 一种应用于光纤陀螺寻北的温度漂移补偿方法

骆金辉, 周一览, 刘承, 舒晓武

*光电工程* 2020, **47**(11): 190681 doi: [10.12086/oe.2020.190681](https://doi.org/10.12086/oe.2020.190681)

### 基于温度和PZT协同控制的激光器频率锁定技术研究

雷明, 于怀勇, 方圆, 向强, 杨怿, 张丽哲

*光电工程* 2020, **47**(9): 190523 doi: [10.12086/oe.2020.190523](https://doi.org/10.12086/oe.2020.190523)

### 基于MEEMD与FLP的光纤陀螺去噪

戴邵武, 陈强强, 刘志豪, 戴洪德

*光电工程* 2020, **47**(6): 190137 doi: [10.12086/oe.2020.190137](https://doi.org/10.12086/oe.2020.190137)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程  
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE\_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.240033

# 一种光纤陀螺全温启动漂移补偿方法

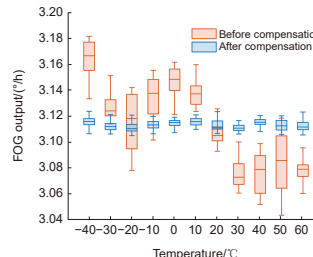
姚磊善<sup>1\*</sup>, 周一览<sup>1</sup>, 赵帅<sup>1,2</sup>, 黄腾超<sup>1</sup>, 车双良<sup>1</sup><sup>1</sup>浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027;<sup>2</sup>浙江大学嘉兴研究院, 浙江 嘉兴 314000

**摘要:** 本文提出了一种光纤陀螺全温启动温度漂移补偿方法。首先, 采用三个惯性传感器内置的温度计信息组成的多维温度变量构建寻北仪内部的温度场, 然后使用支持向量回归 (SVR) 来构建多维温度变量与光纤陀螺温度漂移误差的补偿模型, 最后应用麻雀搜索算法 (SSA) 来调优 SVR 模型核参数来提高温度误差补偿模型的精度和泛化能力。寻北实验验证了所提方法的有效性: 将寻北仪启动阶段的精度从  $0.0209^\circ$  提高到  $0.0101^\circ$ , 使其启动阶段的性能与稳定阶段的性能接近, 并提升了其在不同初始温度下的快速响应能力。

**关键词:** 光纤陀螺寻北仪; 启动漂移; 支持向量机回归; 麻雀优化算法

中图分类号: V241.5

文献标志码: A



姚磊善, 周一览, 赵帅, 等. 一种光纤陀螺全温启动漂移补偿方法 [J]. 光电工程, 2024, 51(5): 240033

Yao L S, Zhou Y L, Zhao S, et al. A FOG start-up drift compensation method at full temperatures before and after compensation comparison[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(5): 240033

## A FOG start-up drift compensation method at full temperatures before and after compensation comparison

Yao Leishan<sup>1\*</sup>, Zhou Yilan<sup>1</sup>, Zhao Shuai<sup>1,2</sup>, Huang Tengchao<sup>1</sup>, Che Shuangliang<sup>1</sup><sup>1</sup>College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;<sup>2</sup>Jiaxing Research Institute, Zhejiang University, Jiaxing, Zhejiang 314000, China

**Abstract:** This paper proposes a novel method of compensating for the fiber optic gyroscope (FOG) temperature drift at full temperatures: the temperature field inside the NFS is constructed by multiple temperature variables, which are composed of the thermometer information built in the three inertial sensors, and then the support vector regression (SVR) is used to describe the relationship between the multiple temperature variables and the temperature drift error of the FOG, and finally the sparrow search algorithm (SSA) is applied to tune the model parameters to improve the accuracy and generalization capability. The experimental results validate the effectiveness of the proposed method, and we improve the accuracy of the NFS start-up stage from  $0.0209^\circ$  to  $0.0101^\circ$ . The performance is closely comparable to that of the stable stage, and improves the fast response capability of NFS at different initial temperatures.

**Keywords:** fiber north finding system; temperature drift of start-up stage; support vector regression; sparrow search algorithm

收稿日期: 2024-01-31; 修回日期: 2024-03-22; 录用日期: 2024-03-22

\*通信作者: 姚磊善, 22130075@zju.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

## 1 引言

在大地测量、隧道挖掘和弹体发射等领域, 物体相对于地理坐标系的方位信息至关重要<sup>[1-2]</sup>。寻北仪是一种能提供真北方位的仪器, 精度和对准时间是寻北仪的两个核心参数, 缩短对准时间可以提高武器和机器的启动速度。光纤陀螺寻北仪由一个光纤陀螺仪和两个石英挠性加速度计组成, 具有可靠性高、成本低、环境要求低等优点。光纤陀螺仪根据 Sagnac 效应感应地球自转的角速度<sup>[3]</sup>, 石英挠性加速度计则根据重力方向感应倾角, 这两个惯性装置组合在一起就能测量出地球的真北方位。然而, 作为光纤陀螺寻北仪的核心部件, 光纤陀螺容易受到温度变化的影响, 尤其是在寻北仪上电后, 内部单元会产生大量热量, 导致热环境发生剧烈变化, 从而引起光纤陀螺输出漂移误差, 这种非平稳漂移误差称为启动误差, 降低了启动阶段的寻北精度<sup>[4-5]</sup>。

通常有两种方法可以改善光纤陀螺的温度特性。一种是从硬件方面着手, 优化光纤陀螺的内部结构, 如光纤环采用对称绕法或采用对温度不敏感的材料<sup>[6-7]</sup>, 但实际使用过程中由于体积限制以及温度场复杂多变, 硬件补偿效果有限; 另一种是运用算法对输出的温度漂移进行补偿。相比于前者, 算法补偿主要是基于数学方法建模和补偿, 更为灵活和精准, 并且不用额外增加硬件。

目前, 研究者们提出了一些算法对光纤陀螺温度漂移进行补偿, 包括多项式模型<sup>[8]</sup>、神经网络<sup>[9-10]</sup>、支持向量机回归 (SVR) 等<sup>[11-13]</sup>。SVR 在小样本上有着出色的精度与泛化能力, 但对于复杂的回归任务处理, 传统 SVR 温度补偿模型的精度还有提升空间。本文主要针对光纤陀螺在全温状态下的启动漂移补偿, 以 SVR 模型为基础, 采用光纤陀螺寻北仪内置三个温度计信息构建多维温度变量作为 SVR 模型的输入, 并使用麻雀优化算法 (SSA) 调优 SVR 的核参数以进一步提高补偿模型的精度与泛化能力。

## 2 温度漂移误差分析

### 2.1 Shupe 效应

光纤陀螺是一种基于 Sagnac 效应感知角速率的惯性器件, 当该器件相对于惯性空间旋转时, 光纤环中相向传输的两束光会产生相位差, 因此由干涉引起的光强的变化可以被光电探测器检测。在光纤陀螺上

电后的几分钟, 内部的各种元器件会产生热量导致光纤的折射率、环长、直径、光纤涂层的热应力等传输特性发生改变, 光纤环受温度影响导致的热致非互易性相位延迟是光纤陀螺温度漂移的主要影响因素。

光束经过时变温度分布的光纤环后相位变化可表示为<sup>[4]</sup>

$$\begin{aligned}\phi(t) &= \int_0^L \beta_0 [n + \Delta n(z, t_z)] dz \\ &= \beta_0 n L + \beta_0 \left( \frac{\partial n}{\partial T} + n\alpha \right) \int_0^L \Delta T(z, t_z) dz, \quad (1)\end{aligned}$$

其中:  $L$  是光纤环中光纤的长度,  $\beta_0$  为传播常数,  $n$  为参考折射率,  $\Delta n(z, t_z)$  表示  $t$  时刻光纤环  $z$  处的折射率差,  $\partial n / \partial T$  折射率的温度系数,  $\alpha$  是热膨胀系数,  $\Delta T(z, t_z)$  为  $t_z$  时刻光纤环  $z$  处的温度变化量。

根据式 (1) 可求出两束相向传播的光由于温变导致的非互异性相位差为

$$\begin{aligned}\Delta\phi_e(t) &= \phi_{ccw}(t) - \phi_{cw}(t) \\ &= \beta_0 \alpha_T \int_0^L \left[ \Delta T\left(z, t - \frac{z}{c}\right) - \Delta T\left(z, t - \frac{L-z}{c}\right) \right] dz \\ &= \frac{\beta_0 n}{c_0} \alpha_T \int_0^L \Delta \dot{T}(z, t) \cdot (L - 2z) dz \\ &= \frac{\beta_0 n}{c_0} \alpha_T \int_0^{L/2} \left[ \Delta \dot{T}(z, t) - \Delta \dot{T}(L - z, t) \right] \cdot (L - 2z) dz, \quad (2)\end{aligned}$$

其中:  $\phi_{cw}(t)$  和  $\phi_{ccw}(t)$  分别表示顺时针和逆时针的光经光纤后相位的变化,  $c_0$  为真空中的光速,  $\Delta \dot{T}(z, t)$  为  $t$  时刻光纤位置  $z$  处温度对时间的导数。

依据 IEEE 对于光纤陀螺温度漂移模型的定义<sup>[14]</sup>:

$$E = D_T \Delta T + D_T \frac{dT}{dt} + \bar{D}_{\nabla \dot{T}} \cdot \frac{d\nabla \dot{T}}{dt}, \quad (3)$$

其中:  $D_T \Delta T$  为温度变化引起的温度漂移项,  $D_T \frac{dT}{dt}$  为温度变化率引起的温度漂移项,  $\bar{D}_{\nabla \dot{T}} \cdot \frac{d\nabla \dot{T}}{dt}$  为温度梯度变化率引起的温度漂移项。从式 (3) 中可以看出, 在不同温度下, 启动过程的热环境不同, 相应的温度参数也不同, 因此启动漂移的特性也不尽相同。

### 2.2 光纤陀螺启动漂移特性分析

寻北仪内部结构十分紧凑, 在寻北仪启动后, 光纤陀螺自身内部元件会产生大量热量, 同时, 寻北仪内部其他元件也会产生热量。因此, 在启动阶段, 光纤陀螺所处的温度场非常复杂。为了更加直观看到光纤陀螺在不同初始温度的启动特性, 在  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  至  $60\text{ }^\circ\text{C}$  每间隔  $10\text{ }^\circ\text{C}$  进行了一次启动实验, 光纤陀螺输出经小波去噪后如图 1 所示, 从中可以看到前 300 s 光纤



陀螺输出急剧下降, 之后的 1500 s 缓慢上升, 这是由于寻北仪启动之初内部温度变化更为剧烈, 随后又趋于平稳。整体启动时间约半小时。启动阶段这种非平稳的温度漂移会极大地影响寻北精度。

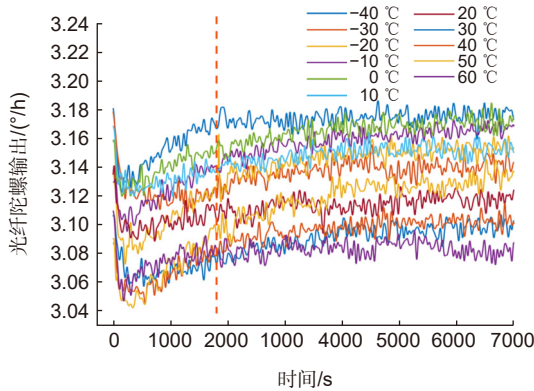


图 1 不同初始温度下光纤陀螺预处理后的输出  
Fig. 1 FOG preprocessing outputs at different initial temperatures

不同初始温度条件下启动, 光纤陀螺输出与温度之间的关系如图 2 所示。可以看出, 在不同的初始温度下, 随着温度的升高, 光纤陀螺启动输出皆呈现先降低后升高的现象, 但输出曲线的细节各不相同。这代表光纤陀螺在不同温度下具有不同的启动特性, 传统单一温度点建模的方式对全温范围内的启动漂移补偿效果有限。寻北仪在初始温度为 25 °C 条件下启动后, 光纤陀螺的输出和内部温度信息如图 3 所示。

图 3(a) 为陀螺原始输出和经小波降噪后的对比。图 3(b-d) 为寻北仪启动后内部温度信息变化情况, 包括温度、温度变化率与温度梯度。从图中可以看出, 由于位置和温度的滞后效应, 这些温度计的信息差别很大, 这表明寻北仪内部热环境较为复杂, 使得光纤陀螺在不同温度下的启动特性不一致。

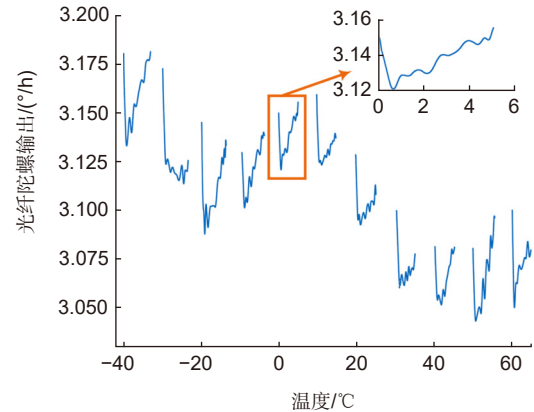


图 2 光纤陀螺不同初始温度启动特性  
Fig. 2 Start-up characteristics of the FOG at different initial temperatures

因此, 为了满足不同温度条件下高精度和快速启动的要求, 本文提出了一种新颖的补偿方法, 以上电半小时后光纤陀螺的输出漂移为补偿对象, 采用寻北仪内部三个惯性传感器内置的温度计信息构建多维温度变量, 包括温度、温度变化率与温度梯度, 作为温

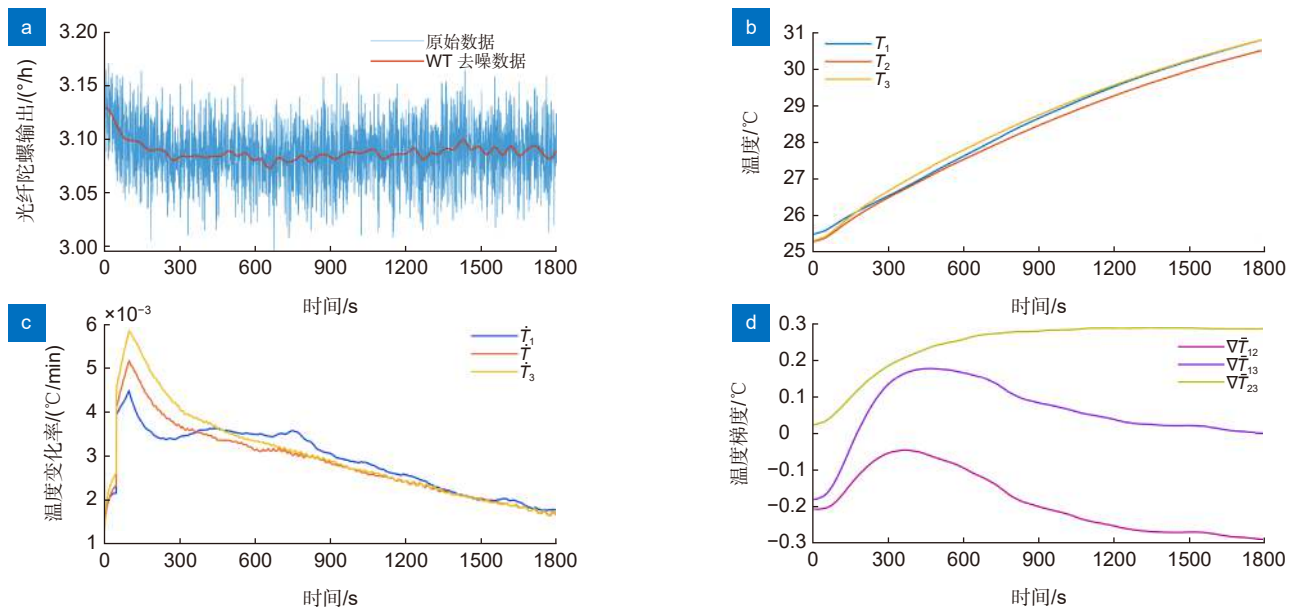


图 3 光纤陀螺输出预处理与寻北仪内部温度信息。(a) 光纤陀螺原始输出与小波预处理后的输出;  
(b) 寻北仪内部温度; (c) 温度变化率; (d) 温度梯度

Fig. 3 FOG preprocessing output and NFS internal temperature information. (a) The original output of the FOG and the denoised signal after preprocessing with WT; (b) NFS internal temperature; (c) Temperature ramp; (d) Temperature gradient

度补偿模型的输入, 多维温度信息更能全面体现复杂温度场特性, 从而提高补偿模型精度。最后设计了不同温度下的寻北实验来验证所提方法的有效性。

### 3 补偿算法

在不同初始温度下, 光纤陀螺具有不同的启动特性, 因此与之对应的温度补偿模型也相对复杂, 本文以 SVR 为温度漂移补偿模型基础, SVR 通过使用核函数而具备很好的处理非线性问题的能力, 但核函数的参数也同时影响模型的精度与泛化能力, 因此本文采用 SSA 对 SVR 的核参数进行优化, 使补偿模型获得最佳性能。相比于其他元启发算法, SSA 在一些问题寻优过程中有更快的收敛速度与更高的精度<sup>[15]</sup>。

#### 3.1 SVR

SVR 是一种基于统计学习理论中结构风险最小化原理的回归方法, 给定一个训练集样本 $\{(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ ,  $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{im}\}$ 是一个  $m$  维的输入向量,  $y_i$  表示与之对应的实际值。训练样本空间的维度为  $n$ 。在本文中,  $x_i$  为输入的多维温度信息, 包含温度、温度变化率与温度梯度,  $y_i$  为光纤陀螺的温度漂移。SVR 的一般表示形式为<sup>[16]</sup>

$$f(x) = w^T \phi(x) + b, \quad (4)$$

其中:  $f(x)$  表示预测值,  $w$  是与每个输入向量  $x_i$  相关的权重矩阵,  $b$  是偏置项,  $\phi(x)$  是将输入空间中的  $x_i$  映射到更高维的非线性变换。

SVR 模型的整体问题就是围绕对  $w$  和  $b$  的求解, 使得训练样本点使得训练样本与不敏感损失函数之间误差最小。由此, 对回归方程求解可转化为凸优化约束问题。式 (4) 可以写成

$$\begin{aligned} \min F(w, b, \xi_i, \xi_i^*) &= \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*), \\ \text{s.t.} \begin{cases} y_i - w^T \phi(x_i) - b \leq \varepsilon + \xi_i \\ b - y_i + w^T \phi(x_i) \leq \varepsilon + \xi_i^* \quad (i = 1, 2, \dots, n), \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

其中:  $C$  为正则化系数, 用于平衡最大化间隔与训练损失,  $\varepsilon$  为不敏感损失函数即容许误差,  $\xi_i$  和  $\xi_i^*$  为松弛因子, 通过引入松弛因子实现软间隔, 使所有处于  $\varepsilon$  管道之外的数据都处于软间隔之中。

采用核函数时, 回归方程  $f(x)$  可表示为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\beta_i - \beta_i^*) \cdot K(x_i, x) + b, \quad (6)$$

其中:  $\beta_i$  和  $\beta_i^*$  是拉格朗日乘数;  $K(x_i, x)$  为核函数, 它可以将数据转换到更高维的空间从而解决非线性问题。本文选择径向基 (RBF) 作为核函数, 其方程可以表示为

$$K(x, x') = \exp\left(-\frac{\|x - x'\|^2}{2\sigma^2}\right), \quad (7)$$

其中,  $\sigma$  是核宽度。

在 SVR 模型中, 正则化系数  $C$  和 RBF 核宽度  $\sigma$  影响着模型精度与泛化能力。 $C$  表示对训练误差的惩罚力度, 越大的  $C$  表示对错误惩罚越严重, 导致过拟合, 相反  $C$  值越小则越容易欠拟合。 $\sigma$  反映着数据映射到高维后的分布, 决定支持向量的个数, 进而影响训练速度和精度。因此在建模时有必要对参数  $C$  和  $\sigma$  进行优化。

#### 3.2 SSA

SSA 是一种模拟麻雀种群觅食和反捕食的群智能优化算法, 在本研究中, 种群里第  $i$  只麻雀代表第  $i$  组待优化的 SVR 核参数  $(C_i, \sigma_i)$ 。种群中的麻雀个体通常分为生产者和觅食者。生产者通常具有较高的能量储备, 负责寻找食物丰富的区域, 并为所有觅食者提供觅食区域和方向。在该算法中, 麻雀的能量储备水平表示其适应度, 与 SVR 训练损失成反比。每次位置更新后, 麻雀的身份都会根据其能量储备发生变化。除此之外它们当中的一部分麻雀还有危险意识以避开捕食者。麻雀种群的位置更新示意图如图 4 所示。

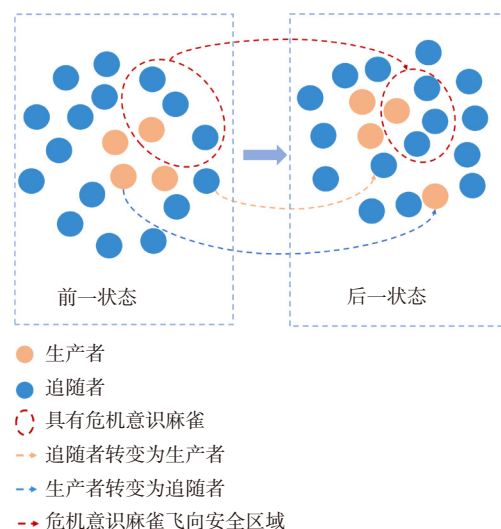


图 4 麻雀种群位置更新  
Fig. 4 The sparrow population position update

在 SSA 中, 生产者有更大的觅食范围, 他们的位置更新描述如下<sup>[17]</sup>:

$$P_i^{t+1} = \begin{cases} P_i^t \cdot \exp\left(-\frac{i}{\alpha \cdot iter_{max}}\right) & \text{if } R < ST \\ P_i^t + Q \cdot L & \text{if } R \geq ST \end{cases}, \quad (8)$$

其中,  $R (R \in [0, 1])$  和  $ST (ST \in [0.5, 1.0])$  分别表示警报值和安全阈值。当  $R < ST$  时, 表示生产者感到当前位置安全时进而广泛搜索; 当  $R \geq ST$  时, 表示生产者意识到危险从而飞向别的区域觅食。

追随者在觅食过程中时刻监控生产者以获得更好的觅食区域, 其位置更新描述如下:

$$P_i^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{P_{worst}^t - P_i^t}{i^2}\right) & \text{if } i > n/2 \\ P_{pbest}^{t+1} + |P_i^t - P_{pbest}^{t+1}| \cdot A^+ \cdot L & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (9)$$

当  $i > n/2$  时, 表示这些追随者有着较低的能量储备并将飞去别处觅食, 其余的追随者将继续追随生产者。

具有危机意识的麻雀随机分布在种群中, 通常占据种群总数的 10% ~ 20%, 它们的位置更新如下:

$$P_i^{t+1} = \begin{cases} P_{best}^t + \beta \cdot |P_i^t - P_{best}^t| & \text{if } f_i > f_{best} \\ P_i^t + K \cdot \left(\frac{|P_i^t - P_{worst}^t|}{(f_i - f_{worst}^t) + \varepsilon}\right) & \text{if } f_i = f_{best} \end{cases}, \quad (10)$$

其中:  $f_{best}$  和  $f_{worst}$  分别表示当前麻雀全局最佳适应度和最差适应度,  $\varepsilon$  是一个以防分母为零的极小常数。

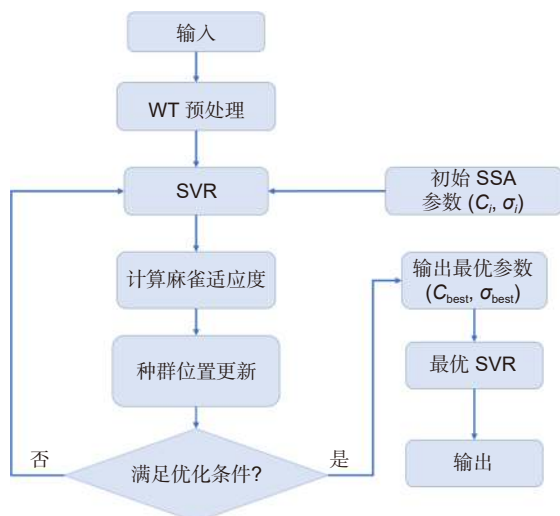


图 5 SSA 调优 SVR 算法流程图  
Fig. 5 SSA tuning SVR algorithm flow chart

$f_i > f_{best}$  表示这些麻雀处于群体的边缘位置, 更容易遇到捕食者。 $f_i = f_{best}$  表示麻雀处于中心位置需要靠近其他麻雀以防被捕食。

算法流程图如图 5 所示。由于光纤陀螺的原始输出包含大量噪声, 将直接影响建模的准确性, 因此需要对数据进行预处理。在本文中, 采用小波变换 (WT) 来消除噪声。然后, 采用多温度变量作为 SVR 的输入, 模型训练误差与麻雀适应度相关, 通过麻雀种群迭代寻找 SVR 温度补偿模型最优核参数。最后以最优核参数训练获得最优温度补偿模型。

## 4 实验

### 4.1 标定实验

实验装置如图 6 所示, 包括一个寻北仪和一个带有单轴转台的温箱。寻北仪由一个光纤陀螺和两个石英挠性加速度计组成。所用的寻北仪使用四位置寻北方法, 常温稳定段寻北精度为 0.012°。

实验温度初始温度为 -40 °C, 每间隔 10 °C 进行一次持续 1 h 的启动实验, 前 50 min 温箱处于保温状态, 寻北仪在第 20 min 开始上电半小时, 最后一个 10 min 寻北仪断电并且温箱升温, 整个循环直至温箱温度为 60 °C。在此过程中, 寻北仪不进行转位动作, 仅采集光纤陀螺静态输出和温度信息。实验步骤如图 7 所示。上述循环实验重复 4 次。

前三个数据集为训练集, 采用 SSA-SVR 算法训练温度漂移模型, 输入变量包括温度、温度斜坡和温

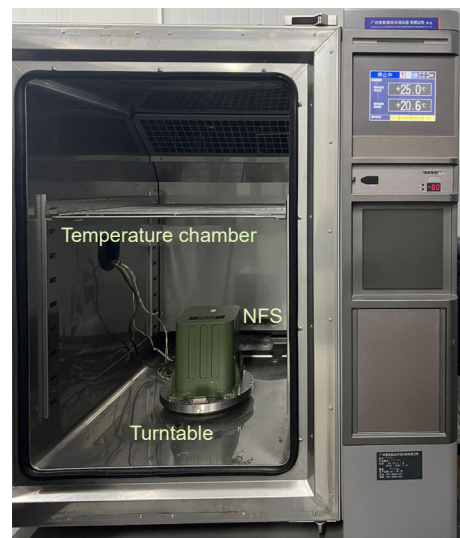


图 6 实验装置  
Fig. 6 Experimental equipment

度梯度, 补偿对象为上电后光纤陀螺半小时的温度漂移。最后一个数据集作为验证测试集。

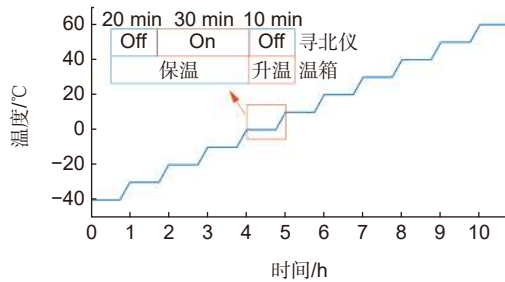


图 7 标定实验过程  
Fig. 7 Calibration experimental progress

图 8 显示了采用所提方法对光纤陀螺漂移进行补偿后的结果, 并与补偿前的数据进行了比较, 从图中可以看出补偿后的数据更为平稳, 这意味着补偿后的光纤陀螺输出更加稳定。表 1 列出了 SVR 的最佳参数。最后, 分别使用 BP 神经网络和未优化的 SVR 算法对光纤陀螺启动漂移进行补偿, 并采用 MAE 和 STD 对补偿后的数据进行评估, 结果如表 2 所示, 本文所提的 SSA-SVR 有着更好的补偿效果。

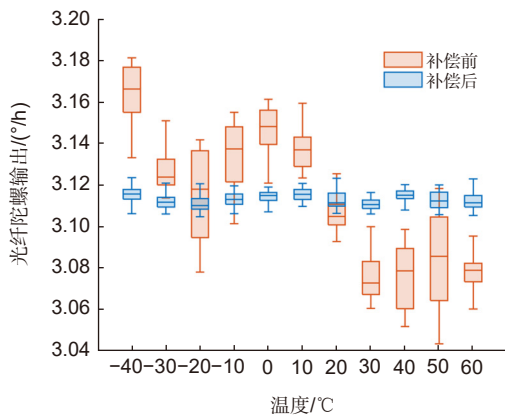


图 8 补偿前后对比  
Fig. 8 Before and after compensation comparison

#### 4.2 验证实验

为了进一步验证所提算法的有效性, 设计了在 7 个随机不同初始温度下的真实寻北实验, 每一个温度点下进行五次寻北, 在实验室条件已知真北条件下, 采用 RMSE 对 5 次寻北结果评估。表 3 列出了寻北实验结果, 可以看出本文提出的方法有效地改善了寻北仪在启动段的性能, 并相比表中其他补偿算法, SSA-SVR 补偿精度更高, 寻北精度从 0.0209° 提升至 0.0101°, 补偿后的启动阶段寻北精度与稳定阶段相当。

表 1 SVR 最优核参数

Table 1 Optimal SVR parameters

最优核参数	值
$C_{best}$	1.0520
$\sigma_{best}$	0.9506

表 2 不同算法补偿结果对比

Table 2 Comparison of compensation results of different methods

算法	MAE	STD/(°/h)
Denoised data	-	0.0134
BP	0.0056	0.0073
SVR	0.0030	0.0035
SSA-SVR	0.0025	0.0031

#### 5 结论

本文提出了一种基于 SSA-SVR 光纤陀螺全温启动漂移补偿方法, 利用由三个惯性传感器内置温度计的信息组成的多个温度变量来构建寻北仪内部的温度场。在温度补偿实验中, 与 BP 和 SVR 相比, SSA-SVR 将光纤陀螺的零偏稳定性分别提高了 57% 和

表 3 不同算法补偿后寻北均方根误差/(°) 对比

Table 3 Comparison of north finding RMSE/(°) of different methods

温度/°C	-32	-16	-5	17	28	43	54	结果均值
补偿前	0.0284	0.0181	0.0216	0.0205	0.0303	0.0171	0.0106	0.0209
BP	0.0284	0.0113	0.0143	0.0137	0.0209	0.0106	0.0100	0.0156
PSO-SVR	0.0146	0.0088	0.0120	0.0144	0.0186	0.0054	0.0060	0.0114
GWO-SVR	0.0110	0.0051	0.0132	0.0093	0.0194	0.0077	0.0096	0.0108
SSA-SVR	0.0113	0.0087	0.0117	0.0131	0.0170	0.0046	0.0045	0.0101



11%。此外, 寻北实验进一步验证了所提算法的有效性, 实验结果表明, 启动阶段的寻北精度  $0.0209^\circ$  提高到了  $0.0101^\circ$ , 性能与稳定阶段接近, 提升了光纤陀螺寻北仪在不同初始温度下的快速响应能力。

## 参考文献

- [1] Bergh R, Lefevre H, Shaw H. An overview of fiber-optic gyroscopes[J]. *J Lightw Technol*, 1984, **2**(2): 91–107.
- [2] Bojja J, Collin J, Kirkko-Jaakkola M, et al. Compact north finding system[J]. *IEEE Sens J*, 2016, **16**(8): 2554–2563.
- [3] Arditty H J, Lefèvre H C. Sagnac effect in fiber gyroscopes[J]. *Opt Lett*, 1981, **6**(8): 401–403.
- [4] Shupe D M. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer[J]. *Appl Opt*, 1980, **19**(5): 654–655.
- [5] He C H, Yang C C, Wang X Y, et al. Enhanced multiposition method to suppress the north finding error caused by bias drift with fiber optic gyroscopes[J]. *Appl Opt*, 2013, **52**(21): 5303–5311.
- [6] Terrel M A, Digonnet M J F, Fan S H. Resonant fiber optic gyroscope using an air-core fiber[J]. *J Lightw Technol*, 2011, **30**(7): 931–937.
- [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]. *J Chin Inertial Technol*, 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] Luo J H, Zhou Y L, Liu C, et al. A temperature drift compensation method applied to fiber optic gyroscope north-seeking[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(11): 190681.  
骆金辉, 周一览, 刘承, 等. 一种应用于光纤陀螺寻北的温度漂移补偿方法[J]. *光电工程*, 2020, **47**(11): 190681.
- [9] Zhu R, Zhang Y H, Bao Q L. A novel intelligent strategy for improving measurement precision of FOG[J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2000, **49**(6): 1183–1188.
- [10] Mao N, Xu J N, Li J S, et al. A LSTM-RNN-based fiber optic gyroscope drift compensation[J]. *Math Probl Eng*, 2021, **2021**: 1636001.
- [11] Cheng J C, Fang J C, Wu W R, et al. Temperature drift modeling and compensation of RLG based on PSO tuning SVM[J]. *Measurement*, 2014, **55**: 246–254.
- [12] Zhao S, Guo C F, Ke C N, et al. Temperature drift compensation of fiber strapdown inertial navigation system based on GSA-SVR[J]. *Measurement*, 2022, **195**: 111117.
- [13] Zhao X X, Chen G, Liu H, et al. A multivariate temperature drift modeling and compensation method for large-diameter high-precision fiber optic gyroscopes[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, **71**: 8502912.
- [14] IEEE. IEEE standard for specifying and testing single-axis interferometric fiber optic gyros: 952–2020[S]. IEEE, 2021. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9353434>.
- [15] Gharehchopogh F S, Namazi M, Ebrahimi L, et al. Advances in sparrow search algorithm: a comprehensive survey[J]. *Arch Comput Methods Eng*, 2023, **30**(1): 427–455.
- [16] Chang C C, Lin C J. LIBSVM: a library for support vector machines[J]. *ACM Trans Intell Syst Technol*, 2011, **2**(3): 27.
- [17] Xue J K, Shen B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. *Syst Sci Control Eng*, 2020, **8**(1): 22–34.

## 作者简介



【通信作者】姚磊善(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事惯性导航技术研究。  
E-mail: 22130075@zju.edu.cn

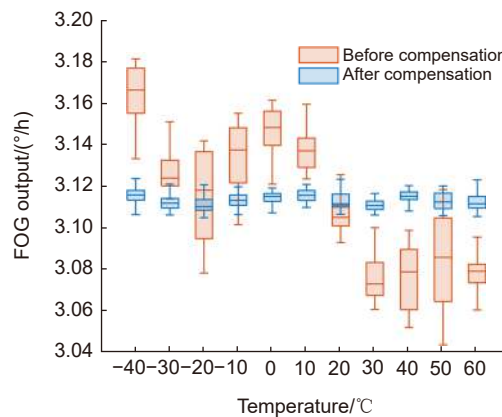


扫描二维码, 获取PDF全文



# A FOG start-up drift compensation method at full temperatures before and after compensation comparison

Yao Leishan<sup>1\*</sup>, Zhou Yilan<sup>1</sup>, Zhao Shuai<sup>1,2</sup>, Huang Tengchao<sup>1</sup>, Che Shuangliang<sup>1</sup>



Before and after compensation comparison

**Overview:** In the areas of geodesy, mining, and missiles, it is critical to obtain information about the orientation of an object with respect to the geographic coordinate system. A north finding system (NFS) is an instrument that can provide real north orientation, and accuracy and alignment time are two essential parameters of NFS. Shortening the alignment time of NFS can improve the starting speed of weapons and machines. With the advantages of high reliability, low cost, and less environmental requirements, NFS with fiber optic gyroscope (FOG) has become an active trend in inertial technology research. Fiber-NFS consists of a fiber optic gyroscope and two quartz flexible accelerometers (QFAs). However, as the core component of NFS, FOG is susceptible in temperature changes, especially during the start-up stage, the internal units of FOG generate a lot of heat leading to drastic changes in the thermal environment, which will cause the drift error in the output of FOG, and this non-zero mean drift error will greatly affect the accuracy of the system. Traditional compensation methods usually focus on modeling the stable working stage of the FOG, which has limited effectiveness in compensating for the temperature drift during the start-up stage.

In order to satisfy the requirements of high accuracy and fast response of NFS at different initial temperatures, a novel temperature drift compensation method is proposed in this paper: We combined the information from the built-in thermometers of the three inertial sensors, using their temperature, rate of change of temperature and temperature gradient as input, which provides a more comprehensive description of the complex temperature field inside the NFS. The wavelet transformation (WT) is used to eliminate the non-temperature noise and extract the temperature drift signal accurately, then SVR is used to describe the relationship between multiple temperature variables and drift errors, and finally the accuracy and generalization ability of the model is improved by using the sparrow search algorithm (SSA). The experimental results validate the effectiveness of the proposed method, and we improve the accuracy of the NFS start-up stage from  $0.0209^\circ$  to  $0.0101^\circ$ . The performance is closely comparable to that of the stable stage.

Yao L S, Zhou Y L, Zhao S, et al. A FOG start-up drift compensation method at full temperatures before and after compensation comparison[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(5): 240033; DOI: [10.12086/oe.2024.240033](https://doi.org/10.12086/oe.2024.240033)

<sup>1</sup>College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China; <sup>2</sup>Jiaxing Research Institute, Zhejiang University, Jiaxing, Zhejiang 314000, China

\* E-mail: 22130075@zju.edu.cn