光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20251117001

基于ASWOA-SVR模型的光纤陀螺温度补偿技术

赵浩阳[1*]，仇海涛[1]，石海洋[2]

（1. 北京信息科技大学 高动态导航技术北京市重点实验室，北京 100101；
2. 北京航天时代光电科技有限公司，北京 100094）

摘　要： 为提高光纤陀螺在复杂温度环境下的输出稳定性，文章提出了一种基于自适应螺旋鲸鱼优化算法（ASWOA）优化支持向量回归（SVR）参数的温度补偿模型。该ASWOA算法在标准鲸鱼优化算法的基础上，引入螺旋角自适应机制与收缩边界动态调整策略。通过实验采集光纤陀螺在－40℃～60℃范围内的零偏输出与温度数据，构建以温度和温变率为输入、零偏为输出的SVR模型，并利用ASWOA对模型参数进行全局优化。实验结果表明，利用ASWOA-SVR模型对光纤陀螺进行温度补偿，零偏稳定性和补偿精度与其他对比算法相比提升明显，且该模型对不同样本的补偿表现出优越的泛化能力。

关键词： 光纤陀螺；温度补偿；自适应螺旋鲸鱼优化算法；支持向量回归；零偏稳定性

中图分类号： TP212；V241.5　**文章编号：** 1001－5868(2026)01－0074－07

Temperature Compensation Technology of Fiber Optic Gyroscope Based on ASWOA-SVR Model

ZHAO Haoyang[1], QIU Haitao[1], SHI Haiyang[2]

(1. Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, CHN; 2. Beijing Aerospace Times Optoelectronics Technology Co., Ltd., Beijing 100094, CHN)

Abstract: To improve the output stability of fiber optic gyroscopes in complex temperature environments, this study proposes a temperature compensation model based on the adaptive spiral whale-optimization algorithm (ASWOA) to optimize support vector regression (SVR) parameters. The ASWOA introduces a spiral angle adaptive mechanism and a contraction boundary dynamic adjustment strategy into the standard whale optimization algorithm. By obtaining zero bias output and temperature data of fiber optic gyroscopes in the range of －40℃ to 60℃ through experiments, an SVR model with temperature and temperature rate as inputs and zero bias as output is constructed, and the model parameters are globally optimized using the ASWOA. Experimental results show that using the ASWOA - SVR model for the temperature compensation of fiber optic gyroscopes significantly improves the zero bias stability and compensation accuracy compared with using other comparative algorithms. Additionally, the proposed model exhibits superior generalizability for the compensation of different samples.

Key words: fiber optic gyroscope; temperature compensation; adaptive spiral whale-optimization algorithm; support vector regression; zero-bias stability

收稿日期：2025－11－17.

* **通信作者：**赵浩阳

0　引言

光纤陀螺作为一种基于Sagnac效应的光学传感器[1]，因其高精度、长寿命及强抗冲击能力，已成为现代惯性导航系统的核心部件[2]。然而，光纤陀螺的输出精度极易受到环境温度变化的影响[3]，温度波动会导致光纤折射率、线圈物理尺寸等参数发生变化，引入非互易性相位误差，严重制约了其在极端温度环境下的应用精度与可靠性[4-6]。因此，研究有效的温度误差补偿技术，对提升光纤陀螺的实际性能具有至关重要的意义。

传统的温度补偿方法，如多项式拟合[7-8]或BP神经网络[9-10]，存在拟合精度不足、易陷入局部最优、泛化能力差等问题。支持向量回归（Support Vector Regression，SVR）作为一种优秀的机器学习算法[11]，凭借其结构风险最小化原则和核函数技巧，在解决小样本、非线性回归问题上展现出独特优势[12]，非常适合用于建立高精度的温度误差模型。然而，SVR的预测高度依赖于惩罚因子与核参数的选择[13]，传统参数优化方法易陷入局部最优。

为此，本文提出了一种基于自适应螺旋鲸鱼优化算法（Adaptive Spiral Whale Optimization Algorithm，ASWOA）优化SVR的光纤陀螺温度补偿方法。ASWOA用非线性自适应螺旋角$l(t)$取代原固定随机角，使前期螺旋搜索步长大、后期精细收敛。同时以最优适应度变化率驱动动态收缩边界$\beta(t)$，实时限定鲸鱼在更小且合理的参数邻域内游动，兼顾全局勘探与局部开发。利用ASWOA对SVR的关键参数进行自动全局优化，以构建最优的温度误差预测模型，从而提高光纤陀螺在复杂温度环境下的输出稳定性与补偿精度。

1　光纤陀螺温度误差机理

光纤陀螺中的光学器件如光纤环对温度变化极为敏感。当环境温度改变时，由于光纤环具有一定的物理尺寸，其不同位置会处于不同的温度状态，形成时空分布的温度梯度场。这导致同一时刻在环内反向传播的两束光会经历不同的热致形变，如折射率与长度变化，从而产生一个非互易的附加相位差。该相位差被系统误判为旋转角速度，引起输出漂移，即Shupe效应。

由Shupe效应而产生的非互易相位差可表示为：

$$\Delta\varphi_E=\frac{2\pi n}{\lambda_0 c}\frac{\partial n}{\partial t}\int_0^L\frac{\partial T(z,t)}{\partial t}(L-2z)\mathrm{d}z \tag{1}$$

式中，n为光纤折射率，t表示光纤线圈温度，L为光纤长度，$\frac{\partial n}{\partial t}$为折射率$n$的温度系数，$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t}$表示光纤环在$t$时刻、位置$z$处的温度变化率，$L-2z$则表征位置$z$对应的权系数。Shupe误差主要影响光纤陀螺的零偏，在时变的温度场下，光纤陀螺零偏随时间变化的关系可表示为：

$$\Delta B_0(t)=\frac{n}{LD}\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}T}\int_0^L\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}(z,t)\frac{L-2z}{c}\mathrm{d}z \tag{2}$$

式中，D为光纤环的直径。当温度变化率或梯度增大时，该相位差直接叠加在Sagnac相位上，引起零偏漂移。为抑制温度引发的误差，工程上首先采用对称绕环、恒温罩等硬件方法，使双向光路经历相近的热环境，将Shupe效应显著降低。但硬件方法受工艺限制、温度梯度及环境快速变化影响，难以完全消除误差，仍需通过软件模型对剩余漂移进行补偿。

2　光纤陀螺温度补偿模型的建立

2.1　基于WOA-SVR模型的温度补偿机理分析

光纤陀螺温度补偿是一个在特定领域内具有复杂非线性和高度重要性的回归任务，而回归任务的核心在于构造一个衡量预测值与真实值偏差的损失函数，通过最小化该损失来估计模型参数，进而获得具备预测能力的回归模型。在经典回归任务中，只要观测值与模型输出稍有偏离，损失函数便立即产生惩罚。SVR则引入了一种“宽容带”思想，即事先设定一个不敏感区间，当真实值与预测值之间的绝对偏差落在该区间之内时，认为误差可忽略不计，损失为零。只有当绝对偏差超出这一容忍阈值后，才开始对超出部分累加损失，由此得到所谓的不敏感损失函数：

$$l_\varepsilon(|\Delta|)=\max(0,|\Delta|-\varepsilon) \tag{3}$$

式中，$|\Delta|$表示预测值和真实值的偏差。

根据结构风险最小化原则，SVR的求解表达式为：

$$\min_{w,b}\frac{1}{2}\|w\|^2+C\sum_{i=1}^{m}l_\varepsilon(|\Delta|) \tag{4}$$

式中，C为惩罚因子。用松弛变量ξ_i和ξ_i^*分别代替$l_\varepsilon|\triangle|$去绝对值后的两种情况：$\xi_i=\max(0,y_i-y_i'-\varepsilon)$，$\xi_i^*=\max(0,y_i'-y_i-\varepsilon)$，则公式(4)可变为：

$$\min_{w,b,\xi_i,\xi_i^*}\frac{1}{2}\|w\|^2+C\sum_{i=1}^{m}(\xi_i+\xi_i^*) \tag{5}$$

$$\text{s.t.}\quad \begin{aligned} y_i-y_i'&\leqslant\varepsilon+\xi_i\\ y_i'-y_i&\leqslant\varepsilon+\xi_i^*\end{aligned} \tag{6}$$

$$\xi_i\geqslant 0,\xi_i^*\geqslant 0,i=1,2,\cdots,m$$

由此可将结构风险最小化的问题转化为拉格朗日对偶空间求解问题，通过引入拉格朗日乘子，经过一系列计算，最终可以得到模型的解为：

$$f(x)=\sum_{i=1}^{m}(\alpha_i^*-\alpha_i)\boldsymbol{x}_i^T\boldsymbol{x}+b \tag{7}$$

在构建SVR模型过程中，选用的是高斯核函数，又被称作径向基核函数(RBF)。该核函数通过指数形式的相似度计算，能够把原始有限维的样本特征隐式地映射到一个无限维的高维特征空间，从而有效捕捉复杂的非线性关系。在训练阶段，模型性能主要受三个关键超参数的影响。一是惩罚因子C，它反映模型对样本的约束能力。C值越大，对训练误差惩罚越强，这可能提高拟合精度但会增加过拟合风险；C值越小，会允许更多误差，使模型更简单但可能导致欠拟合。二是高斯核的带宽系数σ，它关系样本在高维空间的线性可分程度。较小的σ会使核函数更平滑，模型泛化性更好；而σ较大则易导致过拟合。三是不敏感系数ε，它控制着模型对误差的容忍程度。ε值越大，允许的预测误差范围越宽，模型会更平滑但可能忽略数据细节；ε值越小，对预测精度要求越严格，能捕捉更细微的变化但也可能增加对噪声的敏感。

这三个超参数之间存在复杂且非线性的交互作用，而鲸鱼优化算法(Whale Optimization Algorithm，WOA)模拟鲸鱼群体的智能觅食行为，通过包围、气泡网螺旋和随机搜索等机制，在全局寻优与局部开发之间实现高效平衡。利用WOA强大的搜索能力和高效的收敛特性，能够自动、精准地寻找到(C,σ,ε)的最佳参数组合，从而提升模型的拟合精度与泛化能力。WOA的建模过程如下：

(1)当$|A|<1$时，将当前最优个体X^*视为“猎物”，其余鲸鱼以线性方式收缩包围圈。

$$D=|C\cdot X^*(t)-X(t)| \tag{8}$$

$$X(t+1)=X^*(t)-A\cdot D \tag{9}$$

(2)鲸鱼沿对数螺旋轨迹向猎物靠近，式中$b=1$控制螺线的疏密，$l\in[-1,1]$决定下一时刻向前还是向后，兼顾搜索幅度与方向。

$$X(t+1)=D'\cdot e^{bl}\cdot\cos(2\pi l)+X^*(t) \tag{10}$$

$$D'=|X^*(t)-X(t)| \tag{11}$$

(3)当$|A|\geqslant 1$时，放弃当前最优，随机挑选个体X_r进行远距探索，防止早熟。

$$D=|C\cdot X_r(t)-X(t)| \tag{12}$$

$$X(t+1)=X_r(t)-A\cdot D \tag{13}$$

在上述迭代过程中，每个鲸鱼的位置向量X即代表一个超参数组合(C,σ,ε)。算法通过评估每个位置对应的模型性能来不断更新种群。通过反复执行这三种智能搜索行为，WOA能够高效地遍历广阔的参数空间，最终引导整个种群收敛至一个性能卓越的超参数配置，从而实现对模型性能的最大化。

2.2 基于ASWOA-SVR模型的温度补偿建模

WOA在解决许多优化问题时效果良好。然而，当问题特别复杂时，其两个固定设置会导致一定的局限性：一是固定的螺旋移动步调在搜索初期可能太大，从而错过优良的解决方案；二是在后期又可能因为搜索范围始终不变，而在没有希望的区域浪费计算资源。ASWOA对此进行了改进：首先允许螺旋移动的步调可以根据搜索阶段智能调整，同时让搜索范围能够自动收缩。这样既保留了原算法的核心思想，又显著提升了搜索的效率和精确度。

在标准WOA中，螺旋移动的幅度l是一个在固定范围内随机生成的数值，这在整个搜索过程中是不变的。但理想的搜索过程应该是：在初期进行大范围粗略探索，而在后期进行小范围精细调整。为了解决这个问题，ASWOA采用公式(14)来自动调整螺旋幅度$l(t)$，该公式与当前的迭代次数相关联：

$$l(t)=\left(1-\frac{t}{T_{\max}}\right)^{\alpha}\sin\left(\pi\frac{t}{T_{\max}}\right) \tag{14}$$

式中，α为螺旋角非线性指数，用来控制螺旋幅度衰减速度。该公式能确保螺旋幅度随时间呈现先增大后减小的趋势：在搜索初期，幅度较小，使种群能快速分散开来；在搜索中期，幅度达到最大，以进行深入的探索；在搜索后期，幅度衰减至接近零，从而自然过渡到对最优解区域的精细搜索。

其次是对搜索边界策略的改进，ASWOA将其改为一个能动态收缩的边界。该策略的核心是监测算法进步的速度：首先，算法在每一代都会计算一个最优适应度变化率$\Delta f(t)$，以反映当前找到的最优解相比上一代的提升幅度。

$$\Delta f(t)=\frac{\left|f_{\text{best}}(t)-f_{\text{best}}(t-1)\right|}{\left|f_{\text{best}}(t-1)\right|+\varepsilon} \tag{15}$$

然后，根据最优适应度变化率的大小，通过公式（16）计算出本代应该采用的“边界收缩系数”$\beta(t)$：

$$\beta(t)=\beta_0\left(1-\frac{1}{1+e^{-\gamma(\Delta f(t)-\Delta f_{\text{th}})}}\right) \tag{16}$$

式中，β_0为初始收缩系数，γ为灵敏度系数，Δf_{th}表示适应度变化率阈值。通过比较连续两代最优解的收缩系数来判断当前所处的阶段，然后根据公式（17）改变边界范围。

$$bound_j(t)=\beta(t)\left(u_j-l_j\right) \tag{17}$$

式中，u_j, l_j分别为原始上下界。当进步很快时，收缩系数很小，边界基本保持不变，为算法提供充分的探索空间；当进步放缓趋于停滞时，收缩系数变大，探索边界会收缩，将搜索集中在当前最优解附近，避免无效搜索。最后，算法会将超出新边界的个体拉回规定的范围内。如图1为基于ASWOA-SVR模型的光纤陀螺温度补偿流程图。

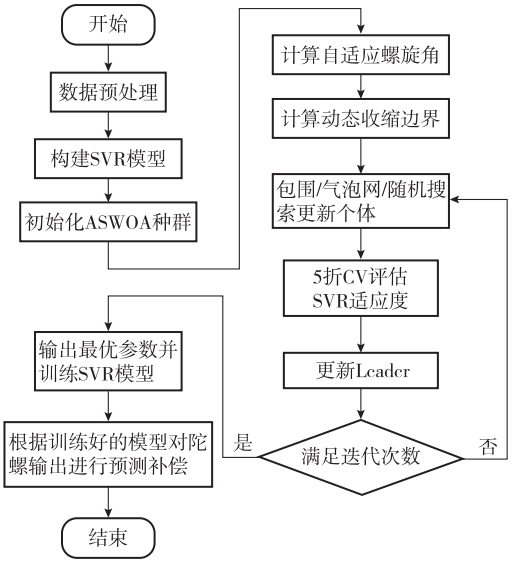


图1　ASWOA-SVR温度补偿模型流程图

通过上述流程对ASWOA-SVR温度补偿模型参数进行选择，所选取的具体参数如表1。

表1　ASWOA-SVR模型参数设置

相关参数	ASWOA-SVR模型
种群规模	5
迭代次数	10
螺旋角非线性指数	0.5
$\beta(t)$灵敏度系数	10
变化率阈值	0.01
初始收缩比例	0.1

3　实验设计与结果分析

3.1　光纤陀螺零偏输出数据采集与处理

为获取光纤陀螺的温度及输出数据，依次对三只同型号光纤陀螺（FOG1，FOG2，FOG3）进行温度测试。温箱首先以室温25℃保温工作1 h后，再以温度变化率为1℃/min匀速上升至60℃并保温工作2 h，然后以温度变化率为－1℃/min匀速降至－40℃，保温工作2 h后升至室温25℃直到光纤陀螺输出稳定。通过陀螺数据采集软件采集实验数据，采样间隔为1 s。通过以上实验条件对光纤陀螺进行实验，得到相应的陀螺温度与输出数据。为了更清晰地分析光纤陀螺温度与输出的变化趋势，将得到的数据进行100 s平滑处理，以FOG1为例，经过处理过后的陀螺输出数据如图2所示。

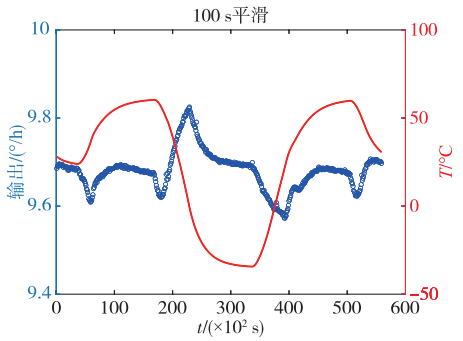


图2　补偿前陀螺的输出-温度曲线

通过分析光纤陀螺的输出-温度曲线图可知，当光纤陀螺工作温度几乎不变时，光纤陀螺的输出较为稳定。而在工作温度不断变化的过程中，光纤陀螺的输出出现明显的漂移，且不同温度时陀螺的输出也存在差异。因此，接下来在对光纤陀螺进行温度补偿研究时，需要将温度与温度变化率作为关键因素进行处理。

3.2　不同模型下的温度补偿效果对比与分析

为对比不同模型的补偿效果，建立了标准SVR模型、WOA-SVR模型、PSO-SVR模型以及本文提出的ASWOA-SVR模型。此外，还建立了一种轻

量级的多项式温度补偿模型。该模型采用温度一阶、温变率二阶的结构，以温度 T(℃)和一阶温变率 $\mathrm{d}T/\mathrm{d}t$(℃/min)为输入，零偏 y[(°)/h]为输出，表达式如下：

$$y=k_1+k_2T+k_3\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}+k_4\left(\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}\right)^2 \tag{18}$$

式中，共含4个未知参数 k_1,k_2,k_3,k_4。利用采集到的光纤陀螺实验数据，采用最小二乘线性拟合一次性求解系数，由此得到完整的多项式补偿模型：

$$y=0.001\,611-0.010\,509T-0.035\,361\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}-0.001\,664\left(\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}\right)^2 \tag{19}$$

将多项式模型、标准SVR模型、WOA-SVR模型、PSO-SVR模型、ASWOA-SVR模型分别载入，得到这几种模型的预测输出，再与陀螺的实际输出进行对比，如图3为所得各模型的输出拟合对比。

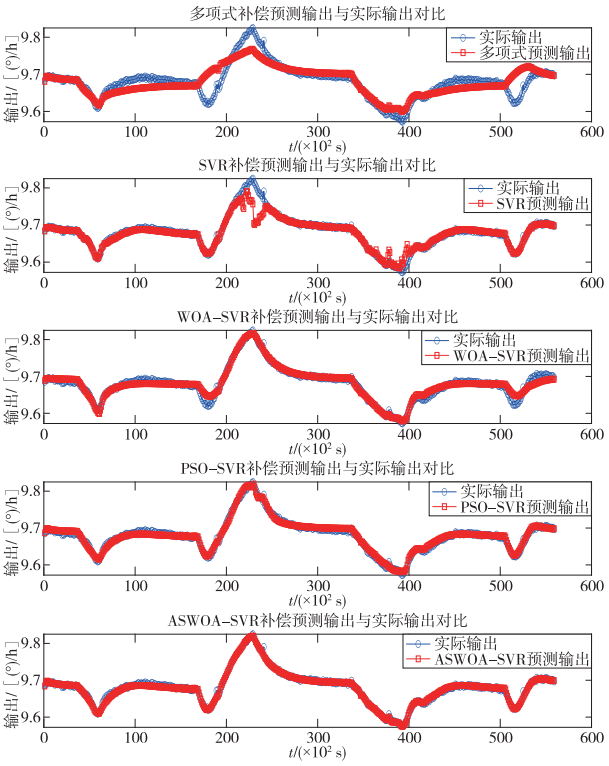


图3 各模型陀螺输出拟合对比图

通过观察五种模型的输出对比图片可知，WOA-SVR模型、PSO-SVR模型与ASWOA-SVR模型的输出拟合程度明显优于多项式模型与标准SVR模型，但WOA-SVR模型与PSO-SVR模型在一些细节之处仍不如ASWOA-SVR模型。为详细对比各模型预测输出与实际输出的拟合效果，引入均方根误差(RMSE)定量验证，各模型补偿前后的RMSE如表2所示。通过表中数据可见，所提出的ASWOA-SVR模型在五个对比模型中表现最为优异，其RMSE值仅为 3.627×10^{-3} (°)/h，明显低于其他所有模型，反映出ASWOA-SVR模型在捕捉光纤陀螺输出-温度间复杂非线性关系方面具有更强的拟合能力。

表2 FOG1补偿前后RMSE

模型	*RMSE*/[(°)/h]
补偿前	$4.430\,7\times10^{-2}$
多项式	$2.491\,5\times10^{-2}$
标准SVR	$1.450\,5\times10^{-2}$
WOA-SVR	8.208×10^{-3}
PSO-SVR	5.262×10^{-3}
ASWOA-SVR	3.627×10^{-3}

然后将各模型预测输出与实际采样序列逐点求差，得到补偿残差序列。对该残差取均值后，再与原序列均值做差即可获得补偿后的零偏估计值。依据此计算方法绘制出的补偿前后零偏对比曲线如图4所示，可直观反映不同模型对温度漂移的抑制能力。

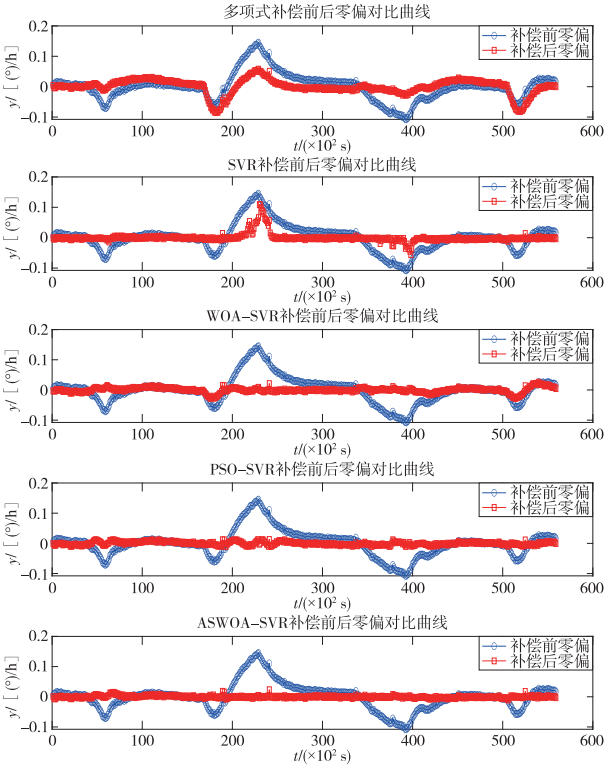


图4 各模型陀螺零偏对比图

通过观察各模型补偿后的零偏对比图可知，经ASWOA-SVR模型补偿后的光纤陀螺零偏最接近

于零。为进一步对比几种模型补偿效果的优劣，分别计算不同模型补偿前后的零偏稳定性，其计算公式为：

$$B_s=\frac{1}{K}\times\left[\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(F_i-\bar{F}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

式中，B_s为零偏稳定性，K为光纤陀螺的标度因数，n代表总采样次数，F_i代表第i次采样时光纤陀螺的输出，$\bar{F}$代表光纤陀螺输出的均值。通过上述计算公式得到五种模型对光纤陀螺补偿前后的零偏稳定性如表3。

表3　FOG1补偿前后陀螺的零偏稳定性

补偿模型	零偏稳定性/[(°)/h]	
	补偿前	补偿后
多项式	0.044 347	0.024 937
标准SVR	0.044 347	0.014 518
WOA-SVR	0.044 347	0.008 208
PSO-SVR	0.044 347	0.005 262
ASWOA-SVR	0.044 347	0.003 627

通过对比FOG1经过五种模型补偿后的陀螺零偏稳定性可以看到，所提出的ASWOA-SVR模型补偿后的零偏稳定性为0.003 627 (°)/h，较未补偿时光纤陀螺温度漂移减小了91.8%。ASWOA-SVR模型相较于多项式补偿模型提升了85.5%，相较于标准SVR模型补偿精度提升了75.0%，相较于WOA-SVR模型补偿精度提升了55.8%，相较于PSO-SVR模型补偿精度提升了31.1%，该实验结果说明了ASWOA-SVR模型在处理FOG1变温实验时的卓越性能。

为进一步验证所提ASWOA-SVR温度补偿模型的泛化能力与工程适用性，后续采用前两组同型号光纤陀螺(FOG2，FOG3)在相同实验条件下采集到的温度-输出数据进行验证分析。通过将ASWOA-SVR模型应用于新的测试数据集，评估其在不同光纤陀螺个体间的补偿一致性及稳定性。

表4展现了在FOG2上应用温补模型后的零偏稳定性补偿效果。ASWOA-SVR模型的补偿效果仍然最好，补偿后的零偏稳定性为0.004 706 (°)/h，零偏漂移比未补偿减小89.5%。与多项式补偿相比，ASWOA-SVR模型的补偿精度提升了81.1%，相较于标准SVR模型补偿精度提升了65.7%，相较于WOA-SVR模型与PSO-SVR模型的补偿精度分别提升了24.9%和26.0%。结果表明，ASWOA-SVR模型在FOG2的温度补偿中表现出色，进一步验证了该模型的稳健性。

表4　FOG2补偿前后陀螺的零偏稳定性

补偿模型	零偏稳定性/[(°)/h]	
	补偿前	补偿后
多项式	0.044 881	0.024 937
标准SVR	0.044 881	0.013 702
WOA-SVR	0.044 881	0.006 264
PSO-SVR	0.044 881	0.006 368
ASWOA-SVR	0.044 881	0.004 706

表5为各模型对FOG3的补偿效果进行对比。结果显示，ASWOA-SVR模型经补偿后的零偏稳定性为0.004 685 (°)/h，与未补偿相比提升了89.1%，比多项式补偿提升了79.4%，比标准SVR补偿提升了67.2%。而与WOA-SVR模型和PSO-SVR模型相比，分别提升了39.4%和40.7%。可以发现，ASWOA-SVR模型在FOG3的温度补偿中依然表现出色，说明该模型面对复杂温度变化具备高度适应性。

表5　FOG3补偿前后陀螺的零偏稳定性

补偿模型	零偏稳定性/[(°)/h]	
	补偿前	补偿后
多项式	0.043 171	0.022 734
标准SVR	0.043 171	0.014 263
WOA-SVR	0.043 171	0.007 732
PSO-SVR	0.043 171	0.007 895
ASWOA-SVR	0.043 171	0.004 685

表6为ASWOA-SVR模型补偿后与各模型零偏稳定性的提升对比。由表可知，ASWOA-SVR模型在单一陀螺补偿和多个陀螺平均补偿中均表现出最优的效果，更好地避免陷入局部最优解，进一步提高了温度补偿的精度。

表6　补偿后陀螺的零偏稳定性提升对比

模型	FOG1	FOG2	FOG3	平均
未补偿	91.8%	89.5%	89.1%	90.1%
多项式	85.5%	81.1%	79.4%	82.0%
SVR	75.0%	65.7%	67.2%	69.3%
WOA-SVR	55.8%	24.9%	39.4%	40.0%
PSO-SVR	31.1%	26.0%	40.7%	32.6%

4　结论

为降低光纤陀螺在变温条件下的输出漂移程度，提升光纤陀螺的精度，本文提出一种自适应鲸鱼优化算法优化SVR的温度补偿模型。实验结果表明，经ASWOA-SVR模型补偿后的光纤陀螺的

预测输出与实际输出拟合效果最好，同时，ASWOA-SVR模型对光纤陀螺零偏稳定性改善均优于多项式模型、标准SVR模型、WOA-SVR模型和PSO-SVR模型，对多组数据表现出强大的泛化能力。

参考文献：

[1] 郭安华，张 帆，杨俊杰，等. 光纤Sagnac环的研究现状及其应用[J]. 光电技术应用，2013，28(6)：18-22.
Guo Anhua，Zhang Fan，Yang Junjie，et al. Research and application of optical fiber Sagnac loop [J]. Electro-Optic Technology Application，2013，28(6)：18-22.

[2] Song N，Xu X，Zhang Z，et al. Advanced interferometric fiber optic gyroscope for inertial sensing：a review [J]. Journal of Lightwave Technology，2023，41(13)：4023-4034.

[3] 张 鹏，朱 纬，董雪明. 光纤陀螺温度影响的补偿方法分析[J]. 中国计量，2025(3)：97-102.
Zhang Peng，Zhu Wei，Dong Xueming. Analysis of compensation method for temperature influence of fiber optic gyroscope[J]. China Metrology，2025(3)：97-102.

[4] 徐沁园，徐 超，孙立霞. 光纤陀螺温度漂移及补偿方法分析[J]. 信息化研究，2023，49(1)：66-70.
Xu Qinyuan，Xu Chao，Sun Lixia. Analysis on temperature drift and compensation method of FOG [J]. Informatization Research，2023，49(1)：66-70.

[5] Zhang Y，Gao Z，Wang G，et al. Modeling of thermal-induced rate error for FOG with temperature ranging from-40 ℃ to 60 ℃ [J]. IEEE Photonics Technology Letters，2014，26 (1)：18-21.

[6] Fei T，Xu X，Zhang Z，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.

[7] 杨智杰，陈国光，朱宜家，等. 干涉式光纤陀螺光纤环互易性温变漂移补偿方法[J]. 导航与控制，2017，16(6)：39-44.
Yang Zhijie，Chen Guoguang，Zhu Yijia，et al. Reciprocal temperature bias drift compensation method for fiber coil of interferometry fiber optical gyroscope [J]. Navigation and Control，2017，16(6)：39-44.

[8] 仇海涛，王 开，石海洋，等. 基于多模型集成算法的光纤陀螺温度补偿及实现[J]. 半导体光电，2024，45(1)：96-100.
Qiu Haitao，Wang Kai，Shi Haiyang，et al. Fiber optic gyroscope temperature compensation and implementation based on multi-model ensemble algorithm [J]. Semiconductor Optoelectronics，2024，45(1)：96-100.

[9] 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.
Zhao Shen，He Wei，Xin Jingtao，et al. Research on temperature compensation of fiber optic gyroscope based on CSAPSO-BP neural network [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics，2023，45(4)：589-594.

[10] 王 开，仇海涛，石海洋. 基于BAS-BP-Bagging模型的光纤陀螺温度补偿[J]. 半导体光电，2023，44(4)：519-524.
Wang Kai，Qiu Haitao，Shi Haiyang. The temperature compensation method of fiber optic gyroscope based on BAS-BP-bagging neural network [J]. Semiconductor Optoelectronics，2023，44(4)：519-524.

[11] 黄春福，李 安，覃方君，等. 基于PSO-SVR的光纤陀螺温度误差建模与实时补偿[J]. 光子学报，2019，48(12)：1206002.
Huang Chunfu，Li An，Qin Fangjun，et al. Temperature error modeling and real-time compensation of fiber optic gyroscope based on PSO-SVR [J]. Acta Photonica Sinica，2019，48(12)：1206002.

[12] 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 Leishan，Zhou Yilan，Zhao Shuai，et al. A FOG start-up drift compensation method at full temperatures before and after compensation comparison [J]. Opto-Electronic Engineering，2024，51(5)：240033.

[13] Wang P，Li G，Gao Y. A compensation method for gyroscope random drift based on unscented Kalman filter and support vector regression optimized by adaptive beetle antennae search algorithm[J]. Applied Intelligence，2023，53 (4)：4350-4365.

作者简介：

赵浩阳(2001—)，男，河北省辛集市人，硕士研究生，主要研究方向为光纤陀螺温度补偿；

仇海涛(1974—)，男，山东省临沂市人，博士，副研究员，主要研究方向为导航与制导。