High Precision Control of Fiber Bragg Grating Pressure Sensor Error Considering Lag Compensation

SHI Yude*
(Comprehensive Testing Center of Fucheng County, Hengshui Hebei 053700, China)

Abstract: Fiber Bragg grating sensors are affected by temperature and may experience hysteresis errors, resulting in measurement results deviating from the true values and making it difficult to accurately reflect pressure changes. Therefore, a high-precision error control method considering hysteresis compensation is proposed. The least squares method is introduced to perform nonlinear correction of the forward and backward stroke outputs of fiber Bragg grating pressure sensors to eliminate errors caused by hysteresis. According to the coupling mode theory of fiber Bragg grating, the wavelength shift of the reflected wave Bragg is calculated. The thermal optical coefficient of the fiber is introduced to describe the effect of temperature on the refractive index of the fiber core. Temperature is set as the sensor error control target, and the hysteresis error compensation result is used as the input of the artificial fish swarm algorithm optimized least squares support vector machine to obtain the compensated measurement value and achieve high-precision control of pressure sensor error. Experimental results show that at the temperature of 55 ℃, the proposed method makes the zero temperature coefficient and sensitivity temperature coefficient of the fiber Bragg grating pressure sensor only 2.29×10^{-7}/℃ and 1.99×10^{-6}/℃, respectively, effectively suppressing the interference of temperature on the sensor.

Key words: fiber grating pressure sensor; automatic error control; lag error compensation; artificial fish school algorithm; least squares support vector machine
EEACC: 7220; 7230E **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.016

考虑滞后补偿的光纤光栅压力传感器误差高精度控制

史玉德*
(河北省衡水市阜城县综合检验检测中心,河北 衡水 053700)

摘 要:光纤光栅传感器受温度影响,会出现滞后误差,导致测量结果偏离真实值,难以准确反映压力变化,为此提出考虑滞后补偿的误差高精度控制方法。引入最小二乘法对光纤光栅压力传感器正反行程输出进行非线性校正,消除滞后引起的误差;根据光纤布拉格光栅耦合模理论,计算反射波布拉格波长偏移量,引入光纤热光系数描述温度对纤芯折射率的影响,设定温度为传感器误差控制目标,将滞后误差补偿结果作为人工鱼群算法优化最小二乘支持向量机的输入,获取补偿后测量值,实现压力传感器误差高精度控制。由实验结果可知,在温度为 55 ℃时,所提方法使光纤光栅压力传感器的零点温度系数和灵敏度温度系数分别仅为 2.29×10^{-7}/℃和 1.99×10^{-6}/℃,有效地抑制了温度对传感器的干扰。

关键词:光纤光栅压力传感器;误差自动控制;滞后误差补偿;人工鱼群算法;最小二乘支持向量机
中图分类号:TP212 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-9490(2026)04-0817-06

光纤光栅压力传感器是一种基于光纤光栅技术的高精度测量装置[1],其独特设计使其能够在各种环境条件下实现极为灵敏的压力监测。与传统压力传感器相比,高灵敏度光纤光栅压力传感器利用光纤的光栅效应,将压力变化转化为光信号变化,具有非接触、高精度等优点。然而,实际应用中这些传感器面临的主要挑战包括输出信号的非线性和滞后误差,以及环境温度变化对性能产生的显著影响。传统的温度补偿方法难以精确校正这些误差,导致测量精度受限且稳定性不足。因此,对误差进行深入分析并提出有效控制措施,对于高灵敏度光纤光栅压力传感器的使用具有重要意义。

聂梦笛等[2]在恒定温度环境下,同时部署一个高精度的光纤布拉格光栅压力传感器和一个作为基准的参考传感器。通过监测这两个传感器在温度变化下的腔长调整量,建立一种温度误差补偿机制,实时补偿压力传感器温度误差,实现误差控制。该方法依赖于参考传感器的准确性和稳定性,提供的温度信息不准确,会影响到压力传感器的温度误差补偿效果。段松凯等[3]标定高灵敏度光纤光栅压力传感器,通过温度传感器监测工作温度,基于支持向量回归构建压力传感器温度补偿模型,并采用麻雀搜索算法优化模型超参数,利用优化后模型实现误差控制。但支持向量回归可能受到过拟合或欠拟合

收稿日期:2024-07-05 **修改日期**:2024-08-07

的影响,如果训练数据无法很好地表征实际工作环境,那么模型的泛化能力可能会受到限制。Zhao 等[4]利用收敛因子改进灰狼优化算法,并将权重向量和权重调整系数集成到最小二乘法的残差函数中,以最大全量程误差为适应度函数,通过改进灰狼优化算法持续优化最小二乘法,构建基于改进灰狼优化算法的高灵敏度光纤光栅压力传感器误差补偿方法,实现误差控制。但加入收敛因子以及集成权重向量、权重调整系数等改进措施,会增加算法复杂性。Li 等[5]基于 L-M 算法分析高灵敏度光纤光栅压力传感器数据,构建多 BP 神经网络误差补偿模型,实现误差控制。但 L-M 算法是一种迭代算法,需要多次迭代计算以找到最优解。因此,该方法在实时性要求较高的应用中可能会受到限制。

因此,提出高灵敏度光纤光栅压力传感器误差自动控制方法。

1 传感器滞后误差补偿方法

1.1 滞后误差补偿

光纤光栅压力传感器的工作原理基于光栅的布拉格波长随压力的变化而变化。然而,在实际应用中,这种变化往往不是完全线性的,特别是在较大的压力范围内。而传感器在压力增加和减少过程中,输出信号与实际压力变化之间存在的时间延迟或不一致性,即产生滞后误差。滞后误差不仅影响测量的精度,导致实际值与测量值之间存在偏差,还影响系统的响应速度,降低系统的性能。通过实施滞后误差补偿,为后续的控制提供更为准确可靠的数据支持,确保系统的正常运行和性能优化。

为了减轻高灵敏度光纤光栅压力传感器在测量过程中因滞后和非线性特性造成的偏差,采用多次测量并计算平均值的技术手段,构建正行程与反行程的实验曲线[6]。利用最小二乘法对这两条曲线进行线性化处理,使两者能够重合,从而补偿滞后误差。斜率为 a、截距为 b 的曲线线性化处理表达式为:

$$Y=ax+b \tag{1}$$

式中:Y 表示响应变量,x 表示自变量。计算 a 和 b 的公式如下:

$$\begin{cases} a=\dfrac{\sum_{i=1}^{n}x_i^2\sum_{i=1}^{n}\bar{y}_i-\sum_{i=1}^{n}x_i\sum_{i=1}^{n}x_iy_i}{n\sum_{i=1}^{n}x_i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}x_i\right)^2} \\ b=\dfrac{\sum_{i=1}^{n}x_i\bar{y}_i-\sum_{i=1}^{n}x_i\sum_{i=1}^{n}\bar{y}_i}{n\sum_{i=1}^{n}x_i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}x_i\right)^2} \end{cases} \tag{2}$$

式中:n 表示采样点总数,x_i 表示采样点 i 压力值,y_i 表示采样点压力输出值,$\bar{y}_i$ 表示该采样点输出均值。

利用最小二乘法[7]对高灵敏度光纤光栅压力传感器正行程和反行程输出非线性校正,将校正后数据分别记作 $y_{正}$ 和 $y_{反}$,并对校正后输出数据作差,得到差值 $\Delta y=y_{正}-y_{反}$。再次通过最小二乘法拟合 Δy,以消除滞后效应带来的测量误差,推导用于校正反行程曲线滞后现象的补偿方程,其具体表达式如下:

$$y_{\mathrm{comp}}=Y\cdot f(\Delta y) \tag{3}$$

式中:y_{comp} 表示经过滞后补偿后的输出值,f 表示基于最小二乘法拟合得到的补偿函数,Y 为响应变量,即采样点输出的压力值。

基于上式,实现高灵敏度光纤光栅压力传感器的非线性校正和滞后误差补偿。

1.2 误差分析

采用最小二乘法校正高灵敏度光纤光栅压力传感器输出信号的非线性和滞后误差,虽然能够在一定程度上提升测量精度,然而在实际操作环境中,传感器仍因多种复杂因素的作用而产生测量偏差。因此,在实际应用中,除了采用最小二乘法等校正技术外,还需对误差产生原因深入分析。

以光纤布拉格光栅耦合模理论为基础,反射波布拉格波长受栅距和纤芯折射率有效值的影响,可得到反射波布拉格波长 λ_B[8]。当温度变化而应力保持不变时,反射波布拉格波长偏移量 $\Delta\lambda_B$ 如下所示:

$$\Delta\lambda_B=\lambda_B[\alpha_f\Delta T+(1-Q_e)\varepsilon] \tag{4}$$

式中:ΔT 表示光纤所处环境温度的变化量,α_f 表示单位温度变化下光纤长度的相对变化量,Q_e 表示单位应变变化下光纤折射率的相对变化量,ε 表示应变。

当只存在轴向应力时,反射波布拉格波长的偏移量 $\Delta\lambda_B$ 与应变的关系由式(5)给出:

$$\Delta\lambda_B=\lambda_B\left\{1-\frac{n_{\mathrm{eff}}^2}{2}[Q_{12}-\alpha(Q_{11}+Q_{12})]\right\}\Delta\varepsilon=\lambda_B\Delta\varepsilon(1-Q_e) \tag{5}$$

式中:Q_{11} 和 Q_{12} 表示光纤在不同方向上的形变程度,α 表示泊松比即减小与纵向拉伸量之间的比例[9],$\Delta\varepsilon$ 表示应变变化量,n_{eff} 表示纤芯折射率有效值。

但在实际应用中,温度和应力往往同时存在,并共同作用于传感器。因此,考虑温度和应力的共同影响,通过引入光纤热光系数来描述温度对纤芯折射率的影响,$\Delta\lambda_B$ 如下所示:

$$\Delta\lambda_B=\lambda_{B0}[(1-Q_e)\Delta\varepsilon+(\alpha_f+\gamma)\Delta T] \tag{6}$$

式中:λ_{B0} 表示当前环境中自由波长,γ 表示光纤热光系数。

由式(7)可见,为了得到准确的压力值,不仅需

要关注应变的变化,更需要有效地消除温度对反射波布拉格波长偏移量的影响。这意味着在后续的误差自动控制系统中,需要设计合适的温度补偿策略。

2　传感器温度误差自动控制

温度变化会影响光纤光栅的布拉格波长,从而影响压力传感器的输出。通过对温度误差补偿,可以提高传感器的整体测量精度。为了解决高灵敏度光纤光栅压力传感器在实际应用中面临的非线性和滞后误差问题,提出了误差自动控制策略。传统的温度补偿方法虽然能够一定程度上减小误差,但因其无法精确校正由温度变化引起的误差,且容易陷入局部最优,导致测量结果的稳定性不足。因此,以温度为主要误差控制目标,并以滞后误差补偿结果作为输入,构建经过人工鱼群算法优化后的最小二乘支持向量机(LS-SVM)作为温度误差补偿模型。该策略通过将传感器输出值和温度值转化为电压信号输入到 LS-SVM 模型中[10-11],输出补偿后的压力测量值,从而实现了对高灵敏度光纤光栅压力传感器误差的精确控制。

对于任意输入值 x_i,对应权重为 w,其非线性回归问题可通过最小二乘支持向量机表示为下式形式:

$$y(x)=w^{\mathrm{T}}\varphi(x_i)+\beta+(e_i+\Delta\lambda_B) \tag{7}$$

式中:x 表示最小二乘支持向量机接收的输入向量,$\varphi(\cdot)$表示非线性特性数学映射函数,β 表示额外输入的偏置向量,e_i 表示实际输出值 y_i 与最小二乘支持向量机输出值 $y(x)$(即补偿后的压力测量值)之间的偏差。此时,可构建下式的最小二乘支持向量机优化目标:

$$\begin{aligned}&\min H(w,\beta,e):\\&\min H(w,\beta,e)=\frac{1}{2}\left(\|w\|^2+\tau\sum_{i=1}e_i^2\right)\end{aligned} \tag{8}$$

式中:e 表示全部偏差构成的向量,τ 表示惩罚因子,$\tau>0$。引入拉格朗日乘子 α_i[12],将约束优化问题转化为无约束问题,并据此构建了与给定方程相对应的拉格朗日函数 $L(w,\beta,e,\alpha)$,如下所示:

$$\begin{aligned}L(w,\beta,e,\alpha)=&H(w,\beta,e)-\\&\sum_{i=1}\alpha_i[w^{\mathrm{T}}\varphi(x_i)+\beta+e_i-y_i]\end{aligned} \tag{9}$$

式中:α 表示全部拉格朗日乘子构成向量,

求解上式并选取 RBF 核函数 $K(x,x_i)$ 计算更高维空间内积[13],假设核函数中心为 x_c,宽度参数为 σ,则可得到下式的最小二乘支持向量机非线性回归模型:

$$\begin{cases}y(x)=L\sum\limits_{i=1}\alpha_iK(x,x_i)+\beta\\K(x,x_i)=\exp\left(-\dfrac{\|x_i-x_c\|^2}{2\sigma^2}\right)\end{cases} \tag{10}$$

通过最小二乘支持向量机补偿高灵敏度光纤光栅压力传感器温度误差时,惩罚因子 τ 和宽度参数 σ 直接影响模型性能,因此,引入人工鱼群算法迭代寻优一组空间向量(τ,σ)[14-15],人工鱼群算法具体步骤如下所示:

①初始化相关参数。

②随机生成人工鱼 M 条,每条人工鱼代表一组 LS-SVM 参数(包括惩罚因子和宽度参数),同时确定了种群的大小,即种群规模 M,此外,还指定了迭代次数 $k=1$,使其能够开始在解空间中探索并逐渐收敛到最优解。

③对于种群中的每条人工鱼(即每组 LS-SVM 参数),使用这些参数构建一个 LS-SVM 模型,并用该模型对高灵敏度光纤光栅压力传感器的输出数据进行温度误差补偿。适应度函数 F 如下所示:

$$F=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}[y_i-y(x)]^2 \tag{11}$$

式中:m 表示输入数据总数,y_i 表示高灵敏度光纤光栅压力传感器压力实际值,$y(x)$表示压力预测值,可依据式(11)得到。

④若满足迭代结束条件,转至步骤⑦,反之执行下一步。

⑤确定是否对人工鱼执行聚群算子和追尾算子,如下所示:

A. 觅食算子

处于 X_i 位置的人工鱼在其视野范围 v 内选取另一处于任意位置 X_j 的人工鱼,对比两者适应度值 F_i 和 F_j,若 $F_j<F_i$,则前者朝后者方向前进一步,反之前者在视野范围内断续移动选取新的人工鱼,并判断是否前进,若经过 t 次试探后仍未移动,则令处于 X_i 位置的人工鱼随机移动一步,并更新其位置,该过程如下所示:

$$X_i^{\mathrm{next}}=\begin{cases}X_i+\mathrm{rand}()\times s\times\dfrac{X_j-X_i}{\|X_j-X_i\|} & F_j<F_i\\X_i+\mathrm{rand}()\times s & \text{otherwise}\end{cases} \tag{12}$$

式中:X_i^{next} 表示处于 X_i 位置的人工鱼更新后位置,rand()表示(0,1)内随机数,s 表示移动步长。

B. 聚群算子

假设一个人工鱼个体位于特定空间的位置 X_i,在其感知范围 v 内,探测到数量为 m_f 的同伴,这些同伴聚集的中心位置 X_c 被标识出来,而该中心位置

的适应度值 F_c 也被评估并记录。设置拥挤度因子为 ξ，当 $F_c/m_f<\xi F_i$ 时，表示同伴中心位置较为优异且不拥挤，该人工鱼朝 X_c 位置前进一步，反之执行觅食算子，该过程如下所示：

$$X_i^{\text{next}}=X_i+\text{rand}(\,)\times s\times\frac{X_c-X_i}{\|X_c-X_i\|} \tag{13}$$

C. 追尾算子

假设处于 X_i 位置的人工鱼在 v 范围内最优同伴位置为 X_b，对应适应度值为 F_b，当 $\frac{F_b}{m_f}<\xi F_i$ 时，表示最优位置周边较为稀疏，该人工鱼向 X_b 位置前进一步，反之执行觅食算子，该过程如下所示：

$$X_i^{\text{next}}=X_i+\text{rand}(\,)\times s\times\frac{X_b-X_i}{\|X_b-X_i\|} \tag{14}$$

⑥更新算法最优解，在每次迭代后，记录当前种群中适应度值最小的人工鱼位置，即最优的 LS-SVM 参数组合。

⑦当算法运行至预设的最大迭代次数 K 时，将识别并输出一组最优参数 (τ,σ)。这组参数随后被应用于构建一个经过优化的最小二乘支持向量机，并通过式(11)实现高灵敏度光纤光栅压力传感器温度误差补偿；反之令 $k=k+1$，返回步骤⑤重复执行。

通过上述步骤，不仅可以找到最优的 LS-SVM 参数组合，避免陷入局部最优解的问题，而且能够实现高灵敏度光纤光栅压力传感器误差自动控制。

本研究通过采用最小二乘法对光纤光栅压力传感器的滞后误差进行补偿，并通过深入分析误差产生原因，提出基于人工鱼群算法优化 LS-SVM 的温度误差补偿模型，能够有效解决高灵敏度光纤光栅压力传感器在实际应用中面临的非线性和滞后误差问题，提高传感器的测量精度和稳定性。

3 实验与结果

为了验证高灵敏度光纤光栅压力传感器误差自动控制方法整体有效性，需要进行实验测试。

设置高灵敏度光纤光栅压力传感器布拉格波长为 1 554.158 6 nm，利用活塞式压力计作为压力输入装置，通过螺纹将待测高灵敏度光纤光栅压力传感器连接至压力计输出接口。实验现场如图 1 所示。

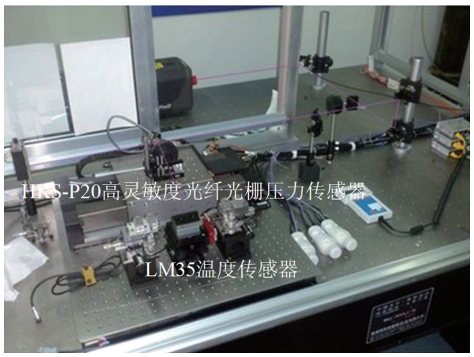

图 1 实验现场图及相关设备

高灵敏度光纤光栅压力传感器与温度传感器对应的参数如表 1 所示。

表 1 实验设备相关参数

HKS-P20 高灵敏度光纤光栅压力传感器		LM35 温度传感器	
参数	数值	参数	数值
量程/MPa	10	固定孔/mm	3
分辨率/(FS)	≤0.05%	孔距/mm	15
温度漂移系数/(℃$^{-1}$)	≤0.05%	芯片	LM35D
光栅中心波长/nm	1 528~1 563	电压/V	5
光栅反射率	≥85%	端口	模拟量电平
工作温度范围/℃	−30~+80	接口	插针接口
外径尺寸/mm	Φ27×88	温度范围/℃	−50~+150
安装方式	M20×1.5 螺纹安装	灵敏度/(mV·℃)	10
封装方式	铠装		

为了检验人工鱼群算法在最小二乘支持向量机温度误差补偿模型中的寻优性能，将其与传统的对比方法梯度下降法加以比较，对比两者在参数寻优中的效果，如图 2 所示。

由图 2 可以看出，梯度下降法在寻优最小二乘支持向量机温度误差补偿模型参数过程中出现了陷入局部最优解的问题，且收敛速度较慢，而所提方法能够有效避免这些问题，在相同的迭代次数下，所提方法能够找到更优的解，并且收敛速度更快。这意味着，当使用人工鱼群算法来优化 LS-SVM 温度误差补偿模型时，可以获得更准确的预测结果，并且能够在更短的时间内完成参数寻优过程。实验验证了人工鱼群算法在最小二乘支持向量机温度误差补偿模型中的有效性和优越性。

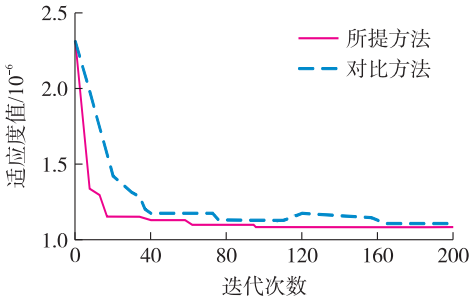

图 2　不同方法优化最小二乘支持向量机效果对比

实验过程中通过恒温箱模拟环境温度变化,设置 8 个不同的温度状态:20 ℃、25 ℃、30 ℃、35 ℃、40 ℃、45 ℃、50 ℃、55 ℃,并在每个温度下从 0 MPa 开始,通过向中央平台逐个增加砝码控制压力变化,每次施加压力为 0.5 MPa,直到达到 6 MPa。

实验以文献[3]提出的支持向量回归方法和文献[4]提出的改进灰狼优化方法作为对比,设置所提人工鱼群优化方法中最小二乘支持向量机空间寻优范围$(\tau,\sigma)\subset[2^{-10},2^{10}]$;人工鱼群算法 $M=30$、$s=0.1$、$K=200$、$\xi=0.618$、$v=2.5$、$t=20$。记录不同方法控制下测得的压力值,不同温度下的压力结果如图 3 所示。

通过对比图 3 中的曲线,可以清晰地看到所提方法控制下的高灵敏度光纤光栅压力传感器表现更为出色。在所提方法控制下,温度对传感器的干扰得到了有效抑制,输入压力与输出电压关系曲线的发散情况得到了显著减弱。这意味着,即使在不同的温度条件下,传感器仍能保持较高的测量精度和稳定性。相比之下,支持向量回归方法和改进灰狼优化方法仍然受到温度的明显影响,其测量精度和稳定性较差。这一实验结果充分证明了所提方法在高灵敏度光纤光栅压力传感器误差自动控制方面的有效性。所提方法将人工鱼群算法与最小二乘支持向量机相结合,能够有效地对传感器在温度变化下的误差进行精准校正,使得传感器能够在各种温度环境中保持高水平的测量准确性和稳定性,从而确保了其在实际应用中的可靠性和一致性。

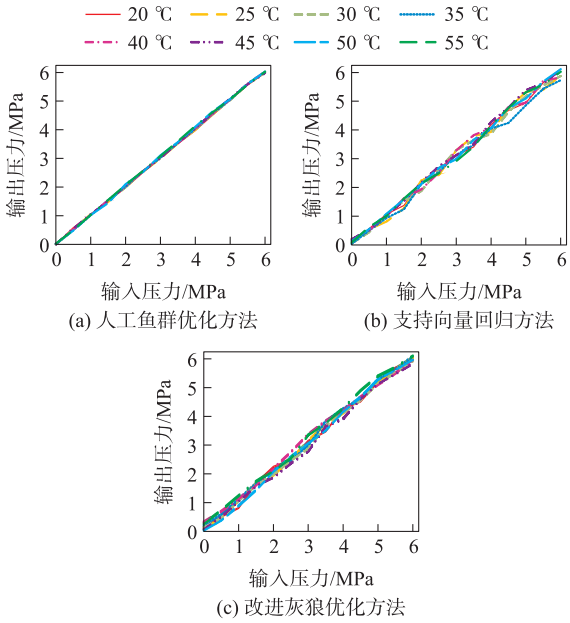

图 3　输入-输出关系对比

为了更客观地对比不同方法控制下高灵敏度光纤光栅压力传感器的测量性能,引入零点温度系数 α_0 和灵敏度温度系数 α_x 作为评价指标,零点温度系数和灵敏度温度系数越小,则对应方法控制下压力传感器可靠性越高,在压力传感器测量范围 ΔT 内,α_0 和 α_x 计算公式如下所示:

$$\begin{cases}\alpha_0=\dfrac{|\Delta P_{0\max}|}{P_{FS}\cdot\Delta T}\\ \alpha_x=\dfrac{|\max(\Delta P)|}{P_{FS}\cdot\Delta T}\end{cases}\tag{15}$$

式中:$\Delta P_{0\max}$ 表示压力传感器零点漂移最大值,ΔT 表示压力传感器能够正常工作并满足规定性能要求的温度区间,$\max(\Delta P)$ 表示在测量范围内任一差压等级(即输入压力的变化量)下,传感器输出信号的最大变化量。

通过上式计算不同方法的零点温度系数和灵敏度温度系数,结果如表 2 所示。

表 2　不同方法零点温度系数和灵敏度温度系数对比　　单位:$℃^{-1}$

温度/℃	所提方法		支持向量回归方法		改进灰狼优化方法	
	α_0	α_x	α_0	α_x	α_0	α_x
20	2.20×10^{-7}	1.92×10^{-6}	6.15×10^{-7}	4.70×10^{-6}	5.56×10^{-7}	4.12×10^{-6}
25	2.28×10^{-7}	1.94×10^{-6}	6.10×10^{-7}	4.65×10^{-6}	5.52×10^{-7}	4.08×10^{-6}
30	2.23×10^{-7}	1.93×10^{-6}	6.20×10^{-7}	4.75×10^{-6}	5.58×10^{-7}	4.15×10^{-6}
35	2.26×10^{-7}	1.95×10^{-6}	6.18×10^{-7}	4.72×10^{-6}	5.53×10^{-7}	4.10×10^{-6}
40	2.27×10^{-7}	1.96×10^{-6}	6.12×10^{-7}	4.69×10^{-6}	5.55×10^{-7}	4.13×10^{-6}
45	2.24×10^{-7}	1.97×10^{-6}	6.17×10^{-7}	4.73×10^{-6}	5.57×10^{-7}	4.11×10^{-6}
50	2.22×10^{-7}	1.98×10^{-6}	6.14×10^{-7}	4.71×10^{-6}	5.51×10^{-7}	4.07×10^{-6}
55	2.29×10^{-7}	1.99×10^{-6}	6.21×10^{-7}	4.77×10^{-6}	5.59×10^{-7}	4.14×10^{-6}

实验结果分析强调了所提方法在高灵敏度光纤光栅压力传感器误差控制方面的显著成效。在零点温度系数的稳定性评估中,所提方法有效地抑制了温度变化对传感器零点输出的影响,其零点误差波动远低于支持向量回归和改进灰狼优化方法,这表明在不同工作温度下,传感器能够维持一个更为稳定的零点基准,从而大幅减少了零点漂移带来的测量误差。在灵敏度温度系数方面,所提方法同样实现了对灵敏度随温度变化的有效控制,其灵敏度误差在温度波动下的变化幅度明显小于其他两种方法,确保了传感器在各种温度条件下都能提供一致且可靠的测量响应。这种对温度相关误差的精准控制,不仅提升了传感器的整体测量精度,而且增强了其在复杂温度环境中的适应性和可靠性。

4 结束语。

为了解决目前存在的零点温度系数和灵敏度温度系数较大问题,提出高灵敏度光纤光栅压力传感器误差自动控制方法,采用最小二乘法和函数校正法补偿高灵敏度光纤光栅压力传感器非线性和滞后误差,通过人工鱼群算法优化后最小二乘支持向量机构建温度误差补偿模型,实现误差自动控制。该方法能够有效地降低零点温度系数和灵敏度温度系数,为高灵敏度光纤光栅压力传感器在相关领域中更广泛应用提供改进思路。

参考文献:

[1] 于璐瑶,赵强,杜大伟,等. 膜片式带温补结构的光纤光栅压力传感器[J]. 光子学报, 2022, 51(3): 245-253.

[2] 聂梦笛,郑刚,张雄星,等. 调频连续波干涉光纤压力传感器的温度漂移补偿[J]. 激光与光电子学进展, 2022,59(7):348-356.

[3] 段松凯,刘守兵. 基于 SSA-SVR 的光纤压力传感器温度补偿研究[J]. 电子器件,2023,46(5):1268-1274.

[4] Zhao X,Chen Y,Wei G,et al. A Comprehensive Compensation Method for Piezoresistive Pressure Sensor Based on Surface Fitting and Improved Grey Wolf Algorithm[J]. Measurement,2023,207:112387.

[5] Li F,Fang S,Shen Y,et al. Research on Graphene/Silicon Pressure Sensor Array Based on Backpropagation Neural Network[J]. Electronics Letters,2021,57(10):419-421.

[6] 王朋朋,赵士伟,孟文蓉,等. 基于最小二乘法的海洋温度传感器动态响应特性测量不确定度研究[J]. 计量学报,2023,44(6):886-892.

[7] 秦明峰,胡丽格. 一种基于伪距残差加权的最小二乘定位算法[J]. 计算机仿真,2022,39(12):44-48.

[8] 庄炜,辛璟焘,张旭,等. 预写入标尺实现光纤光栅布拉格波长精确控制[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 137-143.

[9] 宫晓博,刘宇鸿,于昌利,等. 不同泊松比蜂窝结构抗冲击性能数值分析[J]. 中国舰船研究,2023,18(2): 38-47.

[10] 盛文娟,娄海涛,彭刚定. 基于最小二乘支持向量机和多参考光栅的可调谐滤波器解调误差动态补偿[J]. 光学学报,2023,43(7):35-45.

[11] 梁军,李哲宇,张星,等. 智能车横向跟踪控制模式切换策略及评价方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2024,45(3):257-264.

[12] 罗敏,张家树. 基于拉格朗日乘子 SSMD 和 SSA 的通信信号降噪方法[J]. 微电子学与计算机, 2022, 39(9):115-124.

[13] 丁茜,赵晓东,吴鑫俊,等. 基于 RBF 核的多分类 SVM 滑塌易发性评价模型[J]. 中国安全科学学报,2022, 32(3):194-200.

[14] 谢俊标,江峰,杜军威,等. 基于改进人工鱼群算法与 RBF 神经网络的股票价格预测[J]. 计算机工程与科学,2022,44(11):2080-2090.

[15] 张笑华,吴圣斌,方圣恩,等. 采用 Pareto 人工鱼群算法的结构健康监测传感器位置多目标优化[J]. 振动工程学报,2022,35(2):351-358.

史玉德(1977—),男,汉族,河北衡水人,本科,高级工程师,研究方向:检定、校准、检测的智能化和自动化,dingsonglong2021@163.com。