

利用 GWO-LSSVM 算法对光纤压力传感器 进行温度补偿*

李保丰 卢文科 左 锋

(东华大学信息科学与技术学院 上海 201620)

摘要: 光纤压力传感器工作性能受温度影响较大,需进行温度补偿。针对这一问题,提出了灰狼算法与最小二乘支持向量机(GWO-LSSVM)算法相结合的软件补偿方案,利用灰狼算法在指定范围内迭代优化最小二乘支持向量机的惩罚因子 ζ 和核参数 σ 以求构建补偿算法模型。在不同温度环境下,对传感器进行标定试验测得传感器的输入输出数据,分成测试集和训练集。以测试集的预测值计算的均方根误差为适应度函数,将温度补偿问题转化为带约束的凸二次优化问题。结果表明,相较于补偿前,温度补偿后的光纤压力传感器的灵敏度温度系数由 $9.405 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 提升到 $1.2016 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$,温度附加误差相对值由28.215%提升到0.481%,传感器的温度稳定性得到了很大程度的改善。

关键词: 光纤压力传感器;温度补偿;灰狼算法;最小二乘支持向量机

中图分类号: TP212.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Temperature compensation of optical fiber pressure sensor based on GWO-LSSVM

Li Baofeng Lu Wenke Zuo Feng

(College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The optical fiber pressure sensor needs temperature compensation because its performance is greatly affected by temperature. To solve this problem, a software compensation scheme combining grey wolf optimization and least squares support vector machine (GWO-LSSVM) algorithm is proposed. The penalty factor ζ and kernel parameter σ of least squares support vector machine are iteratively optimized by grey wolf optimization algorithm within the specified range to construct the compensation algorithm model. In different temperature situations, the input and output data of the sensor are measured by calibration test and are divided into test set and training set. By taking the root mean square error which is calculated from the predicted values of the test set as the fitness function, the temperature compensation problem is transformed into a convex quadratic optimization problem with constraints. The results show that compared with previous compensation, the sensitivity temperature coefficient of the fiber optic pressure sensor after temperature compensation is increased from $9.405 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ to $1.2016 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$, and the relative value of the additional temperature error is increased from 28.215% to 0.481%. The temperature stability of the sensor is greatly improved.

Keywords: optical fiber pressure sensor; temperature compensation; GWO; LSSVM

0 引言

光纤压力传感器是一种以光信号为载体,光纤为传播媒介,感知和传播外界压力信号的新型传感器,可将输入的压力信号转化为电压信号,具有灵敏度高、抗电磁干扰强、测量速度快、远距离传输损耗小等优点^[1-2]。然而,

光纤压力传感器系统通常存在着对工作环境温度、供电电压等因素的交叉灵敏度。其中温度是影响光纤压力传感器灵敏度和测量结果的首要因素。为了提高光纤压力传感器的抗温度干扰性,需对其进行温度补偿^[3]。

针对传感器的温度补偿方法分为硬件补偿和软件补偿;传统的硬件补偿存在着电路设计和调试过程复杂、成本较高、可移植性差等缺点,而软件补偿方法具有成本低

廉、补偿算法灵活、去交叉灵敏度效果较好等优点,是现阶段研究温度补偿的首要方法^[4]。本文通过使用基于支持向量机的软件补偿方法对传感器测量数据进行模型训练,利用训练后的模型减小传感器测量结果误差,进而达到增强光纤压力传感器抗温度干扰性的目的。经实践证明该温度补偿方法具有较为显著的效果^[5]。

1 光纤压力传感器的原理

光纤型传感器按照其原理大致分为两类:一类是非功能型(non functional fiber),又称为传光型传感器;另一类是功能型(functional fiber),或者称为传感型传感器。其中,非功能型传感器又可以进一步划分为反射式、透射式和光纤微弯式。本文选用的是反射式强度调制型光纤压力传感器,该传感器通过在光纤位移传感器探头前外加一块弹性膜片构成^[6]。其详细工作原理如图 1 所示。

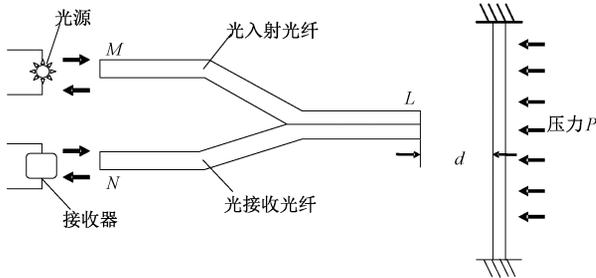


图 1 反射式光纤压力传感器原理

Fig. 1 Theory of reflective fiber optic pressure sensor

图 1 中,两支光纤分别作为光入射光纤和光接收光纤,在右侧端两支光纤合并组成光纤探头,呈现出 Y 结构。首先,左侧光源发出的光通过入射光纤传输到反射片,经反射片反射后进入接收光纤,最后由光敏探测器件接收^[7]。图 1 中右侧所示作用于弹性膜片的压力 P 为被测的输入压力,当无压力施加在膜片上时($P=0$),弹性膜片无形变;当有外力作用时($P>0$),弹性膜片产生形变,施加外力 P 的强度不同使得反射膜片到 L 端的距离 d 发生变化,进而会影响反射后进入接收光纤的光强度,最后通过检测反射后的光强来衡量外部施加压力 P 的大小。

2 GWO-LSSVM 模型温度补偿原理

2.1 灰狼算法

灰狼优化算法(grey wolf optimization, GWO)是澳大利亚学者通过观察自然界中灰狼群体的捕食行为和等级制度后提出的一种新型群体智能算法。

在灰狼算法中,狼群被分为金字塔型的 4 个阶层^[8],

具体如图 2 所示。在金字塔中处于高层的 α 、 β 和 γ 为狼群中的领导者,领导群体相较于 ε 狼能更敏锐地觉察到猎物潜在位置,然后引领狼群搜索、跟踪、靠近猎物^[9]。在用灰狼算法优化参数的过程中, α 、 β 和 γ 当前时刻的位置被定义为迄今为止的前 3 最优解,猎物的位置被定义为搜寻范围内的实际最优解。灰狼算法的优化过程实际上就是基于当前最优解来搜寻范围内最优解的过程。

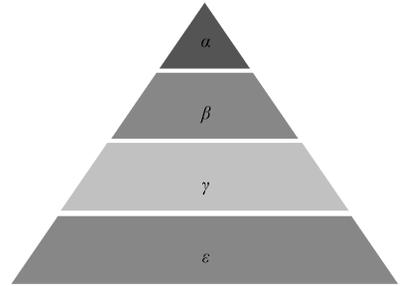


图 2 灰狼等级制度(支配性从上到下递减)

Fig. 2 Hierarchy of grey wolf (decreasing dominance from top to bottom)

在算法过程中,灰狼的捕猎过程分为包围、捕猎、攻击 3 个阶段^[10]。

灰狼的包围过程如式(1)所示:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (1)$$

式中: \vec{D} 表示灰狼个体与猎物之间的距离。

灰狼的位置更新公式如式(2)所示:

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2)$$

其中, t 为当前迭代次数, $\vec{X}_p(t)$ 和 $\vec{X}(t)$ 分别是为猎物和灰狼的位置向量。 \vec{A} 和 \vec{C} 为系数向量,其计算公式如下:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (3)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (4)$$

其中, \vec{a} 是收敛因子,随着迭代次数从 2 线性衰减至 0, \vec{r}_1 、 \vec{r}_2 的模取 $[0, 1]$ 之间的随机数。

灰狼的捕猎过程:种群内的 ε 狼依据 α 、 β 和 γ 狼的位置不断更新迭代自身位置,迭代原理如图 3 所示。

$$\begin{cases} \vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \\ \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}| \\ \vec{D}_\gamma = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\gamma - \vec{X}| \end{cases} \quad (5)$$

式中: \vec{D}_α 、 \vec{D}_β 和 \vec{D}_γ 分别表示 α 、 β 和 γ 与其他灰狼个体

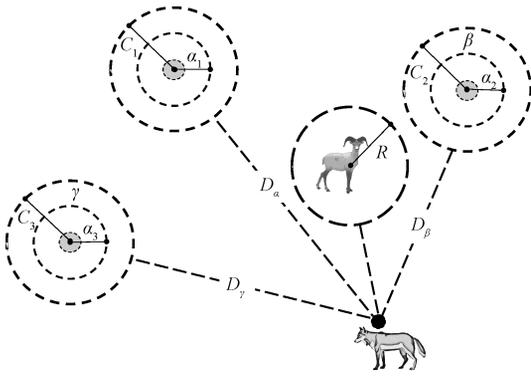


图3 灰狼算法原理

Fig.3 Schematic diagram of Grey Wolf Optimization

之间的距离; $\vec{X}_\alpha, \vec{X}_\beta$ 和 \vec{X}_γ 分别表示 α, β 和 γ 当前所处位置向量; \vec{C}_1, \vec{C}_2 和 \vec{C}_3 是随机向量^[11]。

$$\begin{cases} \vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - A_1(\vec{D}_\alpha) \\ \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - A_2(\vec{D}_\beta) \\ \vec{X}_3 = \vec{X}_\gamma - A_3(\vec{D}_\gamma) \end{cases} \quad (6)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (7)$$

式(6)分别定义了狼群中 ε 狼朝向 α, β 和 γ 前进的步长和方向,式(7)定义了 $t+1$ 代 ε 的最终位置。

灰狼的攻击过程如下:当猎物停止移动时,灰狼通过攻击来完成狩猎。在此过程中 \vec{a} 的值从 2 线性下降至 0, 其对应的 \vec{A} 的值也在区间 $[-a, a]$ 内变化, \vec{A} 的模值对灰狼行为的影响如图 4 所示;当 $|\vec{A}| < 1$ 时,狼群向猎物发起攻击(陷入局部最优);当 $|\vec{A}| > 1$ 时,强迫灰狼与猎物分离^[12], 希望找到更合适的猎物(全局最优)。

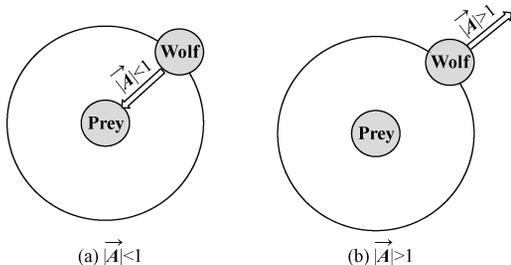


图4 \vec{A} 的模值对灰狼行为的影响

Fig.4 The effect of the modulus of \vec{A} on the behavior of gray wolves

2.2 最小二乘支持向量机

支持向量机(support vector machines, SVM)是基于统计学习理论的一种新型通用机器学习方法,最小二乘支持向量机(least squares support vector machines, LSSVM)是在标准支持向量机基础上提出的新型 SVM 算法,它将标准支持向量机求解的凸二次规划问题转化为求解线性问题^[13]。对于任意以 x_i 为输入, y_i 为输出的非线性回归问题, LSSVM 可以对其进行如下表达:

$$y(x) = \omega^T \phi(x_i) + b + e_i \quad (8)$$

式中: ω 为权重向量, $\phi(x)$ 是可以将 x 映射到更高维空间的函数, b 为偏置值, e_i 为样本已知输出 y_i 和经 LSSVM 预测所得 $y(x)$ 之间的偏差, 此时 LSSVM 的优化对象为:

$$\min J(\omega, b, e) = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + \frac{1}{2} \zeta \sum_{i=1}^m e_i^2 \quad (9)$$

$$\text{s. t. } \omega^T \phi(x_i) + b + e_i = y_i \quad (10)$$

式中: $\zeta (\zeta > 0)$ 为惩罚因子, 起到权衡经验和结构风险的作用^[14]。对上式中每个 x_i, y_i 对应的约束条件引入拉格朗日乘子 α_i , 则 LSSVM 优化函数对应的拉格朗日函数可以写为:

$$\begin{aligned} L(\omega, b, e, \alpha) = \\ J(\omega, b, e) - \sum_{i=1}^m \alpha_i (\omega^T \phi(x_i) + b + e_i - y_i) \end{aligned} \quad (11)$$

对拉格朗日函数进行求解, 并选用适当的核函数 $K(x, x_i)$ 代替更高维空间中的内积运算, 可得 LSSVM 对应非线性回归模型为:

$$y(x) = \sum_{i=1}^m \alpha_i K(x, x_i) + b \quad (12)$$

在算法实现过程中, 核函数选取的合适与否决定着样本能否映射到合适的特征空间。本文中, 通过对光纤压力传感器测量数据进行分析后, 选取 RBF 核函数作为 LSSVM 的核函数^[15]。

2.3 GWO-LSSVM 算法模型的原理

算法具体流程如图 5 所示, 在 LSSVM 算法中, 惩罚因子 ζ 和核参数 σ 在很大程度上决定着算法的适用性。因此, 将惩罚因子 ζ 和核参数 σ 视为猎物, 应用 GWO 算法在规定范围内寻找 LSSVM 核函数中 ζ 和 σ 的最优值^[16]。然后, 将所搜寻参数的最优值导入 LSSVM 模型, 运用此优化后的 LSSVM 模型算法完成光纤压力传感器的温度补偿。

3 光纤压力传感器的温度补偿

本文通过构建一个具有温度自补偿功能的二传感器数据融合智能传感器系统来实现光纤压力传感器的抗温度干扰研究, 具体模型如图 6 所示。其中被补偿的光纤压力传感器为主传感器, 主要用于测量外界输入压力值

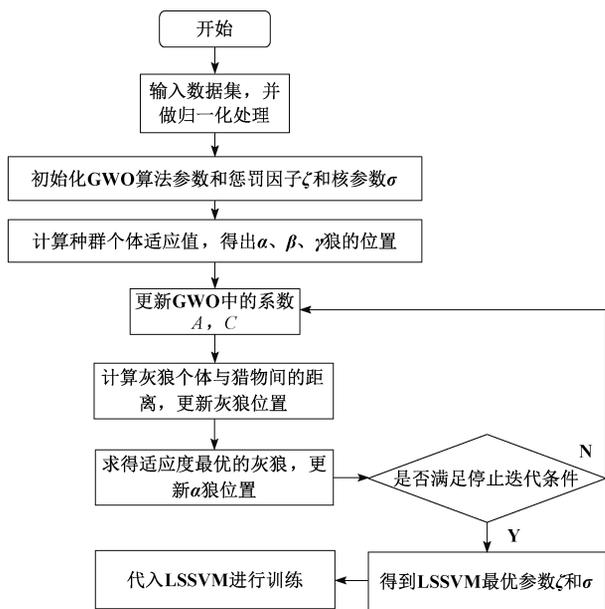


图 5 GWO-LSSVM 算法流程

Fig. 5 Flow chart of the GWO-LSSVM algorithm

P ; LM35 温度传感器为辅助传感器, 用于监测干扰量温度 T 。当监测到输入压力值 P 和外界温度 T 变化后, 相应的传感器将所测物理信号转化为电压信号送至 LSSVM 温度补偿模型, 从而得到最终的预测压力值 P' , 实现对温度的补偿。

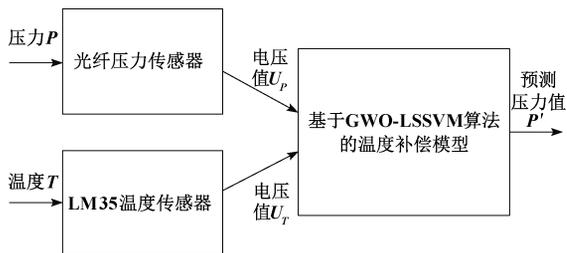


图 6 光纤压力传感器温度补偿框图

Fig. 6 Temperature compensation block diagram of optical fiber pressure sensor

3.1 温度补偿硬件模块设计

GWO-LSSVM 温度补偿算法需要依托硬件电路来实现。硬件结构设计的主要工作包括: 将 GWO-LSSVM 算法模型固化到 STM32F407ZGT6 单片机的 MCU (温度补偿模块) 中; 分别对温度传感器 LM35 和光纤压力传感器的信号进行实时监测, 并把输出信号送入单片机中进行 GWO-LSSVM 算法运行; 最后, 显示出温度补偿后的压力结果^[17-18]。具体硬件结构如图 7 所示。

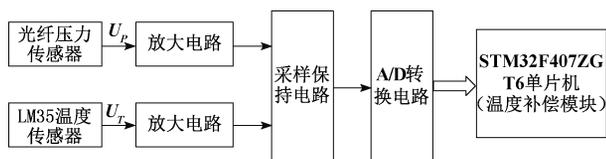


图 7 光纤压力传感器测量系统硬件结构

Fig. 7 Hardware structure diagram of optical fiber pressure sensor measurement system

3.2 二维标定实验

实验采用 THSRZ-2 型传感器系统综合实验装置中的光纤压力传感器, 同时将 LM35 型温度传感器与光纤压力传感器放置于同一温度环境中用于监测环境温度。实验所用光纤压力传感器的量程为 0 ~ 0.1 MPa, 工作所需环境温度为 15 °C ~ 60 °C。为了满足 LSSVM 的训练要求。实验在量程范围内选取 15 个压力值, 在工作允许温度范围内选取 12 个温度点, 共 15 × 12 = 180 个标定用于压力传感器的静态特性测试。为保证标定实验的准确性, 每次改变恒温箱温度后, 等待 25 min 来确保传感器工作环境温度稳定且满足实验需求。同时, 为了减小随机误差对实验结果的影响, 每个标定数据均为相同实验条件下经过 5 次测量后对光纤压力传感器测量结果取平均值得到。实验各标定点的数值如表 1 所示。其中 P 和 U_p 分别是待补偿光纤压力传感器的输入输出, T 和 U_T 为辅助温度传感器的输入输出。

根据表 1 中的标定数据可以绘制出在不同温度标定下, 输入压力值 (P) 和光纤压力传感器的输出电压值 (U_p) 之间的曲线图, 如图 8 所示。图中光纤传感器的工作环境温度从上至下依次递增。

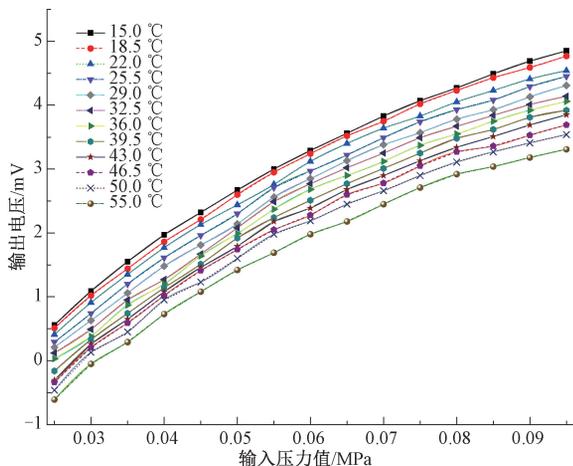


图 8 温度补偿前传感器输入输出静态曲线

Fig. 8 Static curve of sensor input and output before temperature compensation

根据静态特性曲线可知, 在输入压力 P 值相同时, 光

纤压力传感器的输出电压 U_p 的值随着工作环境温度的变化出现明显的波动。且当温度上升时,特性曲线呈现下降趋势。这表明光纤压力传感器出现了较为明显的温度漂移现象。

为了直观地表现温度对传感器的影响,本文选用温度灵敏度系数 α_s 和满量程下温度附加误差的相对值 δ 这两个指数来评价光纤压力传感器的温度稳定性和后续

补偿算法对传感器温度特性的改善程度^[19]。 α_s 和 δ 计算公式如下:

$$\alpha_s = \frac{\Delta y_m}{\Delta T \cdot Y(FS)} \quad (13)$$

$$\delta = \frac{\Delta y_m}{Y(FS)} \times 100\% \quad (14)$$

表 1 光纤压力传感器标定试验数据

Table 1 Calibration test data of fiber optic pressure sensor

P/MPa	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095
$T/^\circ\text{C}$	U_p/mV														
15.0	0.150	0.560	1.090	1.550	1.970	2.320	2.670	3.000	3.290	3.560	3.830	4.070	4.270	4.490	4.850
18.5	0.185	0.510	1.020	1.440	1.860	2.210	2.600	2.950	3.240	3.520	3.750	4.020	4.230	4.430	4.770
22.0	0.220	0.410	0.910	1.350	1.770	2.130	2.440	2.760	3.120	3.400	3.640	3.830	4.050	4.230	4.540
25.5	0.255	0.290	0.740	1.200	1.610	1.960	2.300	2.710	2.970	3.220	3.490	3.740	3.930	4.080	4.450
29.0	0.290	0.210	0.630	1.060	1.480	1.810	2.140	2.560	2.850	3.130	3.380	3.570	3.780	3.930	4.310
32.5	0.325	0.120	0.490	0.950	1.270	1.670	2.080	2.490	2.770	3.020	3.250	3.490	3.670	3.840	4.140
36.0	0.360	0.030	0.380	0.870	1.200	1.640	1.990	2.370	2.680	2.900	3.120	3.370	3.550	3.750	3.920
39.5	0.395	-0.210	0.330	0.740	1.140	1.510	1.920	2.240	2.510	2.770	3.010	3.250	3.480	3.620	3.920
43.0	0.430	-0.306	0.260	0.650	1.080	1.460	1.790	2.180	2.390	2.680	2.900	3.130	3.340	3.510	3.850
46.5	0.465	-0.339	0.210	0.590	1.020	1.410	1.740	2.050	2.280	2.600	2.780	3.050	3.270	3.360	3.690
50.0	0.500	-0.512	0.130	0.450	0.950	1.230	1.600	1.980	2.190	2.450	2.660	2.900	3.110	3.270	3.540
55.0	0.550	-0.608	0.020	0.290	0.730	1.080	1.420	1.690	1.980	2.180	2.450	2.710	2.920	3.040	3.310

式中: ΔT 为传感器工作温度变化范围; $Y(FS)$ 为工作量程, Δy_m 为当温度变化 ΔT 时,某一输入标定值对应输出值随温度漂移的最大值。

由表 1 中数据可知本次实验最大温差 $\Delta T=55-15=40^\circ\text{C}$;量程 $Y(FS)$ 为输出电压 U_p 的变化范围,补偿前其值为 $4.85-(-0.608)=5.458\text{ mV}$ 。传感器在输入压力为 0.095 MPa 时存在最大温度漂移差值 Δy_m 为 $4.85-3.31=1.54\text{ mV}$ 。将各个数据代入公式可得:

$$\alpha_s = \frac{1.54\text{ mV}}{40^\circ\text{C} \times (4.85 + 0.608)\text{ mV}} = 7.054 \times 10^{-3}/^\circ\text{C} \quad (15)$$

$$\delta = \frac{1.54\text{ mV}}{(4.85 + 0.608)\text{ mV}} = 28.215\% \quad (16)$$

从式(15)和(16)可知,本次实验所用光纤压力传感器的温度灵敏度 α_s 和温度附加误差相对值 δ 明显偏大,因此亟需对传感器进行温度补偿。

3.3 优化温度补偿及结果分析

为了改善反射式光纤压力传感器在不同工作温度下的性能,本文使用 MATLAB 对 GWO-LSSVM 温度补偿模型进行仿真。鉴于传感器工作环境温度的多变性,在本次仿真过程中,会预先将所测二维标定数据随机排布来模拟实际场景。然后将 85% 的标定数据用于 GWO-LSSVM 算法模型的训练,余下的 15% 用于检验模型在训练后的性能。在 GWO 算法中设置灰狼算法中的狼群数量为 30,狼群位置迭代次数为 50;同时综合考虑计算资

源以及预期的分类性能等因素,设定狼群对 LSSVM 惩罚因子 ζ 和核参数 σ 的寻优范围分别为 $[0.01, 300]$ 与 $[0.1, 1000]$ 。在 GWO-LSSVM 算法实现过程中,以测试集的预测值计算的均方根误差 (RMSE) 为适应度函数, RMSE 越小,则对应灰狼个体适应度越高。随着狼群中灰狼位置的不断更新,重复计算各个灰狼的适应度,适应度最高的灰狼个体为 α 狼^[20]。当迭代结束时, α 狼的位置即所寻惩罚因子 ζ 和核参数 σ 的最优值。利用最优值构建 LSSVM 模型,并对其进行训练识别特征参数样本集,最终输出温度补偿后压力值 P' 如表 2 所示,对应输入输出压力值特性曲线如图 9 所示。

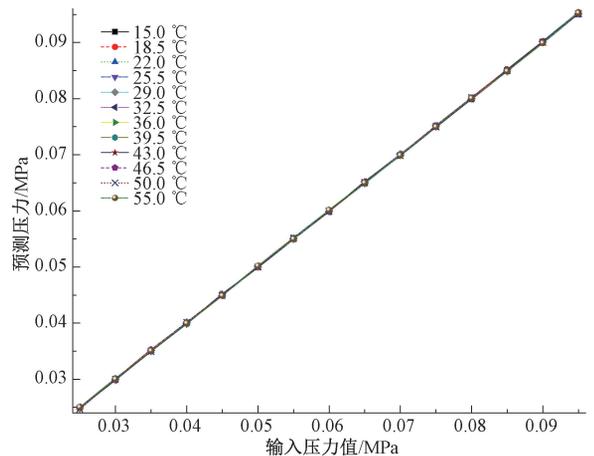


图 9 温度补偿后光纤压力传感器输出特性曲线
Fig. 9 Static curve of sensor input and output after temperature compensation

表 2 温度补偿后的压力预测值

Table 2 The predicted value of pressure after temperature compensation

P/MPa	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	
$T/^\circ\text{C}$ U_T/V	P'/MPa															
15.0	0.150	0.024 91	0.030 07	0.035 15	0.040 13	0.045 08	0.049 97	0.054 93	0.059 99	0.064 90	0.070 00	0.075 09	0.079 95	0.084 91	0.090 16	0.095 15
18.5	0.185	0.024 83	0.029 92	0.03497	0.039 93	0.044 98	0.050 13	0.05519	0.059 93	0.065 11	0.069 89	0.075 16	0.080 21	0.085 20	0.090 21	0.095 40
22.0	0.220	0.025 00	0.030 04	0.035 06	0.040 15	0.045 01	0.049 90	0.054 92	0.060 10	0.065 08	0.070 07	0.074 89	0.079 96	0.084 94	0.08990	0.095 11
25.5	0.255	0.024 92	0.029 84	0.035 01	0.039 87	0.045 08	0.050 05	0.055 19	0.060 12	0.064 91	0.069 96	0.075 22	0.080 12	0.084 88	0.090 22	0.095 40
29.0	0.290	0.024 89	0.029 97	0.035 08	0.040 17	0.044 92	0.049 99	0.054 94	0.059 88	0.065 14	0.070 16	0.074 98	0.079 96	0.084 89	0.090 15	0.095 11
32.5	0.325	0.025 00	0.029 87	0.035 06	0.039 97	0.044 88	0.050 14	0.055 04	0.059 86	0.065 20	0.070 05	0.075 17	0.079 90	0.084 94	0.090 18	0.095 06
36.0	0.360	0.024 94	0.029 99	0.035 14	0.040 04	0.045 17	0.050 00	0.055 12	0.060 02	0.064 99	0.069 86	0.075 18	0.079 99	0.085 19	0.090 08	0.095 08
39.5	0.395	0.024 99	0.030 15	0.034 98	0.039 94	0.045 06	0.050 18	0.055 16	0.059 94	0.064 97	0.070 03	0.075 11	0.080 12	0.084 88	0.090 05	0.095 30
43.0	0.430	0.025 00	0.029 86	0.034 98	0.039 89	0.045 21	0.049 90	0.055 03	0.059 93	0.065 24	0.069 90	0.074 90	0.079 92	0.085 20	0.090 19	0.095 14
46.5	0.465	0.024 86	0.030 02	0.035 27	0.040 07	0.045 08	0.049 99	0.055 02	0.059 94	0.065 08	0.069 92	0.075 18	0.080 12	0.084 95	0.090 14	0.09506
50.0	0.500	0.024 66	0.029 98	0.034 93	0.040 15	0.044 96	0.050 01	0.055 17	0.059 94	0.065 08	0.069 82	0.074 94	0.080 21	0.085 01	0.090 05	0.095 10
55.0	0.550	0.025 00	0.030 01	0.035 08	0.039 97	0.044 89	0.050 20	0.055 00	0.060 14	0.064 99	0.069 90	0.074 98	0.080 09	0.084 92	0.089 94	0.095 29

从表 2 得到的图 9 所示的曲线图发现,在温度补偿之后,光纤压力传感器抗温度干扰性明显改善。不同温度下,同一压力输入 P 对应测量输出基本相同。由表 2 可以计算补偿后的灵敏度温度系数 α_s 和温度附加误差相对值 δ 。此时分子 Δy_m 为输出值 P' 随温度漂移最大时的差值,观察发现当输入压力 P 为 0.095 MPa 时,存在最大漂移差值:0.095 40-0.095 06=0.000 34 MPa。量程 Y (FS) 为输出电压变化范围 0.095 40 - 0.024 66 = 0.070 74 MPa。代入计算公式得:

$$\alpha_s = \frac{0.000\ 34\ \text{MPa}}{40^\circ\text{C} \times (0.095\ 40 - 0.024\ 66)\ \text{MPa}} = 1.201\ 6 \times 10^{-4}/^\circ\text{C} \quad (17)$$

相比于温度补偿之前的 $\alpha_s = 9.405 \times 10^{-3}$,灵敏度温度系数提升了 70 倍之多。温度附加相对误差:

$$\delta = \frac{0.000\ 34\ \text{mV}}{(0.095\ 40 - 0.024\ 66)\ \text{mV}} \times 100\% = 0.481\% \quad (18)$$

相比于温度补偿前的 28.215%,也提升了 50 倍以上。这都表明 GWO-LSSVM 优化算法显著改善了传感器的温度稳定性。

4 结 论

本文针对光纤压力传感器在使用过程中存在的温度漂移问题,提出了一种基于 GWO-LSSVM 的软件补偿算法。该算法以模型预测结果的均方根误差为适应函数,对 LSSVM 算法中的惩罚因子 ζ 和核参数 σ 进行优化。相较于过往的试凑法或遍历优化进行参数选取,此方法效率更高且选取的参数效果更好。在完成参数优化后,运用 LSSVM 算法训练温度补偿模型。实验结果表明,与未经补偿相比,经过此温度补偿方法后,光纤压力传感器

灵敏度温度系数提升了 70 倍,温度附加相对误差提升了 50 倍,传感器温度稳定性得到了大幅改善。本算法的适用性较为广泛,实验证明其综合性能优于传统的温度补偿方法,且具有成本和操作优势,在传感器性能提升领域具有很高的应用价值。后续研究可以着力于灰狼算法中对于狼群搜索路径函数的优化^[21],以求增强算法对于参数 ζ 和 σ 的全局搜索能力,进一步提高算法在传感器性能增强方面的优异表现。

参考文献

[1] 李彩. 光纤传感器的原理及应用[J]. 科技创业家, 2013(3):108.
LI C. Principles and applications of optical fiber sensors[J]. Technological Pioneers, 2013(3):108.

[2] ZHENG H K, ZHAO Y, ZHAO Q, et al. High sensitivity optical fiber pressure sensor based on thin-walled oval cylinder[J]. Sensors and Actuators, B. Chemical, 2020,310.

[3] 王希鑫,赵勇,吕日清,等. 具有温度补偿的拱形增敏微纳光纤磁场传感器[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4):199-205.
WANG X X, ZHAO Y, LYU R Q, et al. Temperature compensated arc-sensitive micro-nano optical fiber magnetic sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4):199-205.

[4] 贺红林,许佳豪,周战洪,等. 压阻式压力传感器温度误差的插值补偿方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021,35(12):1-7.
HE H L, XU J H, ZHOU ZH H, et al. Interpolation compensation method for temperature error of piezoresistive pressure sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(12):1-7.

[5] 周志炜,邓天雨,师亮,等. 压阻式压力传感器的温度

- 补偿及现场校准方法[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(10):145-148.
- ZHOU ZH W, DENG T Y, SHI L, et al. Temperature compensation and on-site calibration method for piezoresistive pressure sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(10):145-148.
- [6] 林金梅, 潘锋, 李茂东, 等. 光纤传感器研究[J]. 自动化仪表, 2020, 41(1):37-41.
- LIN J M, PAN F, LI M D, et al. Research on fiber optic sensors[J]. Process Automation Instrumentation, 2020, 41(1):37-41.
- [7] 李顶顶. 基于光纤位移传感器的位移测量精度研究[D]. 上海: 东华大学, 2021.
- LI D D. Research on displacement measurement accuracy based on fiber optic displacement sensor[D]. Shanghai: Donghua University, 2021.
- [8] 卢纯义, 于津, 余忠东, 等. 基于改进灰狼算法优化 SVR 的混凝土中钢筋直径检测方法[J]. 计算机科学, 2022, 49(11):228-233.
- LU CH Y, YU J, YU ZH D, et al. Reinforcement diameter detection method in concrete based on improved grey wolf algorithm optimized support vector regression[J]. Computer Science, 2022, 49(11):228-233.
- [9] 项贤鹏. 基于主成分分析和灰狼算法优化 LSSVM 的空气质量指数预测研究[D]. 大连: 东北财经大学, 2021.
- XIANG X P. Air quality index prediction based on principal component analysis and grey wolf optimized least squares support vector machine [D]. Dalian: Northeast University of Finance and Economics, 2021.
- [10] 张晓凤, 王秀英. 灰狼优化算法研究综述[J]. 计算机科学, 2019, 46(3):30-38.
- ZHANG X F, WANG X Y. A review of grey wolf optimization algorithm [J]. Computer Science, 2019, 46(3):30-38.
- [11] JOSHI H, ARORA S. Enhanced grey wolf optimisation algorithm for constrained optimiation problems [J]. International Journal of Swarm Intelligence, 2017, 3(2/3):126.
- [12] 杨晓敏. 改进灰狼算法优化支持向量机的网络流量预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(3):211-217.
- YANG X M. Network traffic prediction based on improved grey wolf algorithm optimized support vector machine [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(3):211-217.
- [13] 李静, 徐路路. 基于机器学习算法的研究热点趋势预测模型对比与分析——BP 神经网络、支持向量机与 LSTM 模型[J]. 现代情报, 2019, 39(4):23-33.
- LI J, XU L L. A comparative study on research hotspot trend prediction models based on machine learning algorithms: BP neural network, support vector machine and LSTM model [J]. Journal of Modern Information, 2019, 39(4):23-33.
- [14] QASIM O S, ALGAMAL Z Y. A gray wolf algorithm for feature and parameter selection of support vector classification [J]. International Journal of Computing Science and Mathematics, 2021, 13(1):93.
- [15] 李炬晨, 胡欲立, 高剑, 等. 基于 GWO-LSSVM 的锂离子电池健康状态估算[J]. 水下无人系统学报, 2022, 30(5):550-557, 566.
- LI J CH, HU Y L, GAO J, et al. Health state estimation of lithium-ion battery based on GWO-LSSVM [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2022, 30(5):550-557, 566.
- [16] 金龙, 曾德智, 孟可雨, 等. 基于 GWO-LSSVM 算法的海底管道腐蚀预测模型研究[J]. 石油与天然气化工, 2022(2):70-76.
- JIN L, ZENG D ZH, MENG K Y, et al. Research on the prediction model of submarine pipeline corrosion based on GWO-LSSVM algorithm[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2022(2):70-76.
- [17] 钦志伟, 卢文科, 左锋, 等. 霍尔效应式位移传感器的温度补偿[J]. 传感技术学报, 2019, 32(7):1040-1044.
- QIN ZH W, LU W K, ZUO F, et al. Temperature compensation of Hall-effect displacement sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(7):1040-1044.
- [18] 郭志君. 应变片式力传感器智能化测量系统的研究[D]. 上海: 东华大学, 2020.
- GUO ZH J. Research on intelligent measurement system of strain-gage force sensor [D]. Shanghai: Donghua University, 2020.
- [19] DA SILVA P M, MENDES J P, COELHO L C C, et al. Optical fiber sensors for monitoring cement paste carbonation[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2407.
- [20] TIAN Z. Kernel principal component analysis-based least squares support vector machine optimized by improved grey wolf optimization algorithm and application in dynamic liquid level forecasting of beam pump [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2020, 42(6):1135-1150.
- [21] 宋玉生, 刘光宇, 朱凌, 等. 改进的灰狼优化算法在 SVM 参数优化中的应用[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(9):151-155.

SONG Y SH, LIU G Y, ZHU L, et al. Application of improved grey wolf optimization algorithm in SVM parameter optimization[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(9): 151-155.

作者简介



李保丰, 2021 年于安徽工程大学获得学士学位, 现为东华大学硕士研究生。主要研究方向为智能传感器技术。

E-mail: 1577457035@qq.com

Li Baofeng received his B. Sc. degree from Anhui Polytechnic University in 2021.

Now he is a M. Sc. candidate at Donghua University. His main

research interest includes intelligent sensor technology.



卢文科(通信作者), 2004 年于西安交通大学获得博士学位, 现为东华大学信息科学与技术学院教授, 主要研究方向为声表面波、小波变换、传感器理论及技术研究。

E-mail: luwenke3@dhu.edu.cn

Lu Wenke (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2004. Now he is a professor in Donghua University. His main research interests include surface acoustic wave device, wavelet transform processor, and sensor and instruments.