

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.09.011

# 改进 GA-SVM 的湿度传感器温度补偿研究\*

姜力<sup>1,2</sup> 贺晓雷<sup>3</sup> 行鸿彦<sup>1,2</sup>

(1. 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 江苏省气象探测与信息处理重点实验室 南京 210044; 3. 中国气象局气象探测中心 北京 100081)

**摘要:**针对地面遥测自动气象站采用的 HMP-45D 湿度传感器测量准确度易受温度影响的问题,通过改进遗传算法(GA)的适应度函数、选择、交叉、变异操作优化支持向量机(SVM)的惩罚函数、径向基核函数、不敏感损失函数,利用不同温湿度条件下的多组实测数据,建立了温度补偿模型,并与传统的 SVM 回归模型补偿结果对比分析。实验结果表明,利用 GA-SVM 模型进行温度补偿最大误差绝对值为 0.1367%,比传统 SVM 温度补偿模型提高了 2.8351%,GA-SVM 算法克服了传统 SVM 补偿算法补偿精度低、处理速度慢的问题,具有全局寻优能力强、收敛速度快、补偿精度高的特点,能够有效地对湿度传感器进行温度补偿。

**关键词:**遗传算法;支持向量机;湿度传感器;温度补偿;GA-SVM

中图分类号: TP274 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

## Research of temperature compensation for humidity sensor based on improved GA-SVM

Jiang Li<sup>1,2</sup> He Xiaolei<sup>3</sup> Xing Hongyan<sup>1,2</sup>

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Atmospheric Observation Technology Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the measurement accuracy of HMP-45D temperature and humidity sensors used in automatic weather station is susceptible to temperature, the fitness function, selection, crossover, mutation in genetic algorithm (GA) is improved, the improved GA is used to optimize the penalty function, radial basis function and insensitive loss function in support vector machine (SVM). Based on the multiple sets of experimental data under different temperature and humidity, this method is used to establish a model and the results are compared with the traditional SVM regression model for temperature compensation. The experimental results show that the absolute error using the GA-SVM model is 0.1367%, reduced by 2.8351% than traditional SVM model. The proposed algorithm overcomes traditional SVM compensation model with low precision, slow process speed and has global optimization, convergence speed, higher compensation accuracy, effectively compensates temperature effect and greatly increases the measurement accuracy.

**Keywords:** humidity sensor; temperature compensation; genetic algorithm; support vector machine; GA-SVM

## 0 引言

空气相对湿度是自动气象站观测业务中一个重要的

数据。自动气象站要求湿度传感器耐天候,长期稳定可靠,但实际运行易受环境影响,尤其高温高湿时实际误差常大于允许最大误差,难以满足业务运行需求。国内综合检定尚属空白,无法正确评估湿度传感器性能和测量

收稿日期:2017-02 Received Date: 2017-02

\* 基金项目:国家自然科学基金(61671248)、江苏省高校自然科学研究重大项目(15KJA460008)、江苏省“六大人才高峰”计划和江苏省“信息与通信工程”优势学科资助项目

准确度。只能从单因素参量入手,找出主要影响因子,采取相关算法补偿,把环境参量对湿度传感器的影响减至最小。目前我国自动气象站测量湿度主要采用维萨拉公司生产的 HMP-45D 温湿度传感器<sup>[1-3]</sup>。HMP-45D 湿度测量元件采用高分子湿敏电容传感器。由湿敏电容原理可知,湿敏电容的介电常数不仅与空气相对湿度有关,雾霾、辐射、温度都会引起介电常数的变化,其中温度影响最为显著<sup>[4]</sup>。

为降低温度对湿度测量的影响,国内外主要采用硬件电路补偿和软件补偿的方法。硬件电路补偿成本高、易受电子元件温漂影响,测量精度低。软件补偿有内插法、多项式拟合法、BP 神经网络法<sup>[4-7]</sup>、支持向量机(SVM)<sup>[8-10]</sup>等方法。内插法精度越高所需数据量越大,计算速度越慢,实际补偿效果差,多项式拟合的振荡现象会产生变态或奇异方程组,导致多项式系数无法求解, BP 神经网络全局寻优能力差,易陷于局部极小,收敛速度慢,支持向量机基于结构风险最小化,泛化能力较好,处理非线性函数拟合表现出特有优势,但参数的选择依赖于经验法和网格寻优法,补偿精度低,系统运行速度慢。

本文对遗传算法(GA)中适应度函数的构造以及对选择、交叉、变异算子优化,以进一步改进遗传算法,用改进的 GA 对 SVM 进行参数寻优,建立 GA-SVM 湿度传感器温度补偿模型,对传感器实测湿度数据进行温度补偿,并与传统 SVM 回归模型对比验证,进一步说明 GA-SVM 在温度补偿上的优越性。

### 1 SVM 温度补偿原理

采用支持向量机补偿模型对 HMP-45D 输出的湿度数据进行非线性补偿,以消除温度影响。温度补偿原理如图 1 所示。

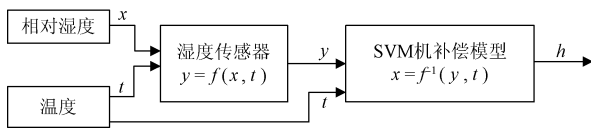


图 1 湿度传感器温度补偿原理

Fig.1 Schematic diagram of temperature compensation for humidity sensor

图 1 中,  $h$  表示经过支持向量机温度补偿后湿度传感器输出值,湿度传感器数学模型为:

$$y = f(x, t) \tag{1}$$

式中:  $x$  为实际环境相对湿度,  $t$  为温度参量,  $y$  湿度传感器输出湿度值。式(1)的反函数为:

$$x = f^{-1}(y, t) \tag{2}$$

SVM 回归模型是通过映射函数将原样本空间内线

性不可分的数据转换成高维特征空间线性可分数据,从而解决原样本空间内非线性回归问题。为提高支持向量的容错能力引入了松弛因子  $\xi_i, \xi_i^*$  及惩罚因子  $C$ , 将非线性回归转化成对式(3)的最优化求解问题。

$$\begin{aligned} & \min \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*) \right\} \\ & \text{s. t. } \begin{cases} [(w \cdot x_i) + b] - y_i \leq \varepsilon + \xi_i \\ y_i - [(w \cdot x_i) + b] \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0, i = 1, \dots, l \end{cases} \end{aligned} \tag{3}$$

式中:  $w$  表示权值向量,  $\varepsilon$  表示不敏感损失函数系数,  $l$  表示样本数。

再利用拉格朗日乘子法将原问题转化为对偶问题的优化求解:

$$\begin{aligned} & \max \left\{ \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j) \right\} \\ & \text{s. t. } 0 \leq \alpha_i \leq C, \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0 \end{aligned} \tag{4}$$

其中,  $K(x_i, x_j)$  为核函数, 本文采用的核函数为服从高斯分布的径向基核函数, 即:

$$K(x_i, x_j) = \exp \left\{ - \|x_i - x_j\|^2 / (2 * \alpha^2) \right\} \tag{5}$$

### 2 GA-SVM 模型

GA<sup>[11-14]</sup>是一种模拟生物自然进化过程求解最优解的启发式智能优化方法,直接操作结构对象,结构简单,鲁棒性好,并行计算,不易陷入局部极小,自适应调整寻优方向,遗传个体经过选择、交叉、变异等遗传算子的操作向适应度更好的方向进化,达到全局寻优的目的。目前主要应用在函数优化、机器学习、优化控制等领域。

SVM 参数的选取直接影响回归预测精度,采用 GA 算法与 SVM 回归算法结合<sup>[15-19]</sup>的目的是通过 GA 算法的全局寻优能力有目的性的选取 SVM 参数。遗传算法初始化种群中每个个体即待优化参数,根据适应度函数计算每个个体的适应度,通过遗传算子操作将种群中最优个体应用到 SVM 回归预测模型中,使用该最优模型对湿度传感器进行温度补偿,使预测湿度值与标准湿度值的均方误差达到最小。

GA-SVM 算法的具体步骤描述如下:

1) 初始化。初始化种群,确定最大迭代代数  $G$ , 交叉验证参数  $v$ , 种群规模  $n$ , 编码长度  $l$ , 最大进化代数  $MAX$ , 交叉概率  $p_c$ , 变异概率  $p_m$ , 以及构成个体的  $(C, g, p)$  3 个参数的取值范围。

2) 计算适应度。将种群中每个个体分别代入 SVM 回归模型,计算适应度值,并记录适应度值最高的个体。

3) 遗传进化。对种群中个体选择、交叉、变异操作,产生新的个体,并将新的个体加入到下一代种群中,重复

计算每个个体的适应度值。

4) 终止条件。达到最大迭代次数或适应度函数值达到预设精度,终止算法,将此条件下的输出作为 SVM 的最优参数进行回归训练;若不满足终止条件,返回3)继续训练,直到满足终止条件,终止算法。具体流程如图2所示。

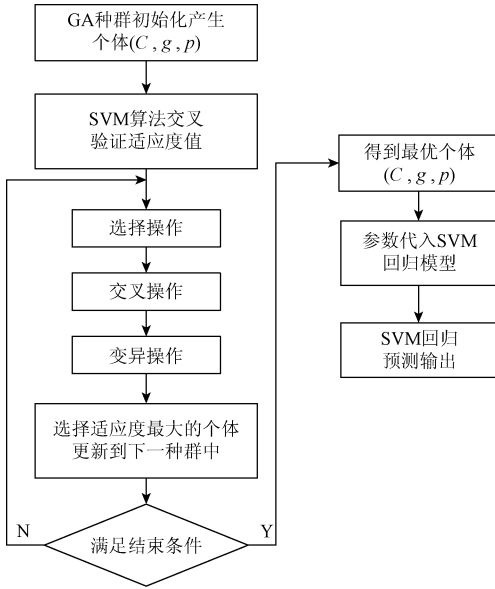


图2 改进遗传算法的SVM流程

Fig. 2 Flow chart of improved GA-SVM

### 3 GA 算法的改进

GA 算法进化过程中父代个体之间的信息趋于一致而使进化停止,陷于局部最优解的问题,即早熟现象。针对这一问题采用适当的适应度函数,对遗传算子及参数进行调整,主要对选择算子、交叉算子、自适应交叉概率  $p_c$ 、变异概率  $p_m$  进行优化和改进。

#### 3.1 适应度函数的选择

适应度函数描述了 SVM 预测的准确度,遗传算法适应度函数的选取决定了算法的进化方向,本文采用 K-CV 交叉验证下的均方误差的倒数作为适应度函数,每个个体的均方误差 (MSE) 函数用式(6)表示,式(7)为 SVM 目标函数。

$$MSE = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (y_o - y_i)^2 \quad (6)$$

$$fitness(i) = 1/MSE \quad (7)$$

式中:  $fitness(i)$  为个体适应度值,  $y_i$  为训练样本集,  $y_o$  为训练样本实际输出,  $l$  为训练样本数。

#### 3.2 遗传算子的确定

##### 1) 选择算子

轮盘赌选择算子操作简单、较好的保持种群多样性,

得到广泛地应用,但随机操作使该算法选择误差大、出现退化现象,本文在传统轮盘赌选择算法的基础上加入精英保存策略及排序操作。首先计算全部个体适应度值并按升序排列,选择种群中适应度值最大的  $5\% \times n$  个体及上一代最优个体,直接保存到下一代,对剩下的个体进行轮盘赌选择得到  $(95\% \times n - 1)$  个个体,进交叉、变异得到下一代全部个体。

##### 2) 交叉算子

交叉算子是影响收敛速度及全局收敛的重要因素,在二进制编码中常采用从父代染色体中随机选择交叉点交换子串得到新染色体的单点交叉方法。该方法忽略父代个体间的相似性,父代个体相似性越大,交叉操作越可能得到与父代个体信息完全相同子代,如图3所示,交叉操作收敛速度慢,种群多样性差,本文基于父代个体间的相似性改进了交叉算子,计算父代个体等位基因相同数量及位置,设定相似性阈值,当相似性小于设定的阈值时,等概率选择交叉位置,当相似性大于设定的阈值时,交叉位置采用改进的方法选取等位基因不同的位置作为交叉点,进行交叉操作,得到子代个体,以保证种群的多样性及交叉操作的有效性。

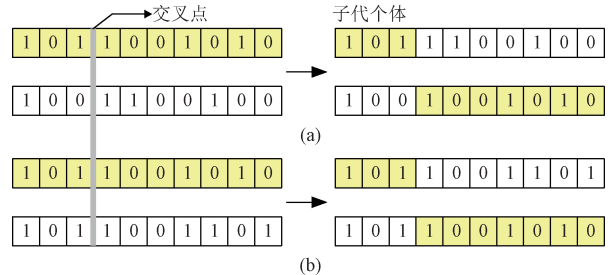


图3 单点交叉操作

Fig. 3 Single point crossover

##### 3) 自适应交叉概率和变异概率

父代个体差异大时需要较小的交叉概率和变异概率以保证父代优良信息的保存,当个体信息趋于一致需较大交叉、变异概率以保存种群多样性,避免陷入局部最优解。此外,还需考虑适应度函数,当适应度函数大时,需要较小的交叉概率和变异概率,当适应度函数较小时需要较大的交叉概率和变异概率。根据个体相似度采用了自适应交叉、变异概率,当  $r > r_0$  时,计算如式(8)、(9)所示。

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} \cdot \left[ \frac{r - r_0}{r} + \frac{f_{max} - f}{f_{max} - f_{avg}} \right], & f \leq f' \\ p_{c2} \cdot \frac{(r - r_0)}{r}, & f_{avg} > f' \end{cases} \quad (8)$$

$$p_m = \begin{cases} p_{m1} \cdot \left[ \frac{r - r_0}{r} + \frac{f_{max} - f'}{f_{max} - f_{avg}} \right], & f_{avg} \leq f' \\ p_{m2} \cdot \frac{(r - r_0)}{r}, & f_{avg} > f' \end{cases} \quad (9)$$

式中： $r$  为待交叉两个父代个体相似度值， $r_0$  为相似度阈值， $f_{max}$  为当前种群适应度最大值， $f'$  为待变异个体适应度值， $f_{avg}$  为当前种群平均适应度值， $f$  为待交叉个体适应度较大值。

### 4 实验仿真

#### 4.1 实验数据的获取及分析

HMP45D 采用电容-电压转换电路,采集放大后输出电压,由软件计算得出相对湿度。其中,0% ~ 90% RH 测量准确度为  $\pm 2\%$  RH,90% ~ 100% RH 测量准确度为  $\pm 3\%$  RH。

实验数据测量在富奇调温调湿箱(温度调节范围:-70 ~ 60 °C,湿度调节范围:0% ~ 100% RH)中进行,标准通风干湿表(测量精度为 0.01% RH)作为标准器,自校式铂电阻数字测温仪(测量精度为 0.01 °C)测量温度,按照精密仪器使用说明做好准备工作,将 HMP-45D、标准通风干湿表、自校式铂电阻数字测温仪放在检点箱内同一高度,开机预热 1 h,达到稳定工作状态。SVM 回归模型的建立需要大量的 HMP-45D 实际输出值和对应测湿点的标准湿度值。实验中,实验选取的温度范围 5 ~ 50 °C,湿度范围为 15% ~ 95% RH,温度间隔为 5 °C,湿度间隔为 5% RH。一个湿度点检定完毕,改变箱内湿度至下个湿度点。测量每个湿度点的湿度值时,每隔 30 min 录取一次数据,共记录 10 次。因实际测量中不可靠因素,所以将 10 次测量均值作为该湿度点测量值,为了更好地进行数据处理和比较分析研究,测量值取至小数点后四位。将标准通风干湿表的实际输出值的均值作为标准湿度值。具体步骤如下:1) 设定实验箱初始温湿度值,待温湿度稳定后测得此条件下湿度值;2) 按湿度间隔逐步增加试验箱湿度值,待湿度稳定后测得此条件下湿度值;3) 按温度间隔逐步增加试验箱温度值,重复步骤 2)。

根据所测实验数据可得图 4 所示不同温度和不同湿度条件下传感器的误差曲线。图 4 定性定量地说明了温度对湿度测量的影响,从图中可以看出,各误差曲线均呈非线性,不同湿度条件下传感器测量误差随温度升高逐步增大,在高温高湿条件下测量误差更大,所以需采用 GA-SVM 算法进行温度补偿减小测量误差。

#### 4.2 湿度传感器温度补偿的实现

根据优化的 GA-SVM 算法,采用图 2 所示步骤对 HMP-45D 湿度传感器进行温度补偿,将不同温湿度条件下的测量数据分为训练样本集和测试样本集。利用训练样本集进行 SVM 温度补偿得到最优化模型,对测试样本进行预测。将温度值和其条件下湿度传感器测量值作为输入,标准湿度值作为输出,利用归一化函数将数据归一化到(-1,1)。

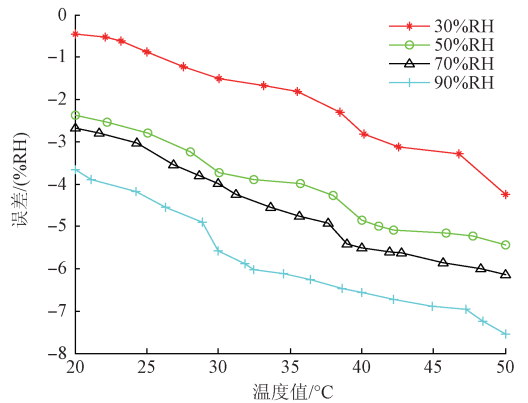


图 4 温度对湿度传感器测量结果的影响

Fig. 4 The influence of temperature on measurement result of humidity sensor

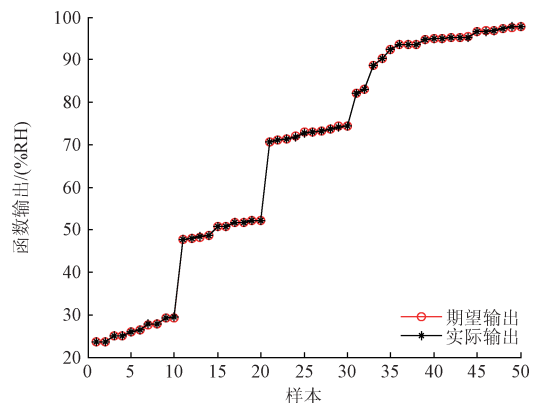
GA-SVM 待优化的参数为惩罚函数  $C$ 、径向基核函数  $\gamma$ 、不敏感损失函数  $\epsilon$ ,分别用  $c, g, p$  表示,GA-SVM 训练得到的最优参数用  $bestc, bestg, bestp$  表示。表 1 为改进 GA-SVM 算法基本参数设置。

表 1 改进 GA-SVM 算法基本参数设置

Table 1 Basic parameters of the improved GA-SVM

项目	参数设置
进化代数	100
种群规模	20
交叉概率初值	0.85
变异概率初值	0.05
相似性阈值	0.80
SVM 参数范围	$c: 0.1 \sim 100, g: 0.01 \sim 100, p: 0.001 \sim 1$

采用 GA-SVM 建立湿度传感器温度补偿模型,将训练样本代入温度补偿模型训练得到最优化 SVM 参数,  $bestc = 50.1625, bestg = 1.5217, bestp = 0.011$ ,保留最优化参数,对测试样本进行测试得到温度补偿后的数据,如图 5 所示,部分数据如表 2 所示。



(a) GA-SVM 预测输出  
(a) Prediction output of GA-SVM

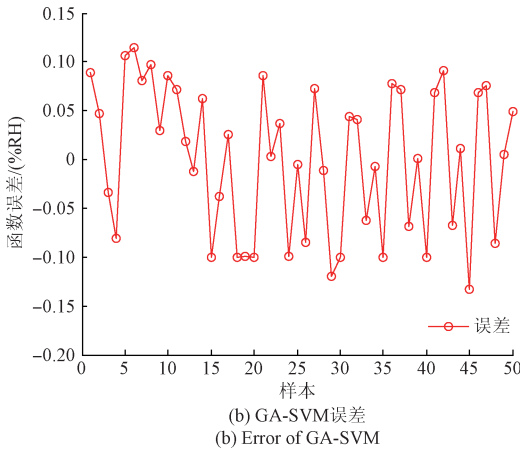


图5 GA-SVM 仿真结果

Fig. 5 Simulation results of GA-SVM

实验结果表明,湿度传感器测量值不进行温度补偿误差较大,无法满足自动气象站业务运行的需求。图5(a)中,星号表示 GA-SVM 补偿模型实际输出,圆点表示对应的期望输出,星号与圆点几乎完全重合,说明 GA-SVM 算法能够以较小的误差预测湿度传感器的真实值,图5(b)可知经过改进的 GA-SVM 温度补偿模型,最大输出误差绝对值为 0.1367% RH,测量精度得到有效提升,满足自动气象站站业务运行需求。

### 4.3 性能对比

将改进的 GA-SVM 算法与传统 SVM 算法进行仿真,将实验仿真结果进行对比。2 种温度补偿模型仿真实验时选用相同的实验样本,将实验样本分为训练样本集和测试样本集,采用相同的训练样本集训练 2 个补偿模型,分别使用测试样本集进行测试,得到 HMP-45D 湿度传感

表2 改进 GA-SVM 模型补偿结果

Table 2 Compensation results of the improved GA-SVM model

环境温度/℃	相对湿度标准值/(% RH)	相对湿度测量值/(% RH)	实测相对误差/(% RH)	GA-SVM 补偿后相对误差/(% RH)	SVM 补偿后相对湿度/(% RH)	SVM 补偿后相对湿度误差/(% RH)
19.86	23.55	22.653 5	-0.896 5	0.088 7	23.891 3	0.341 3
20.01	48.25	45.879 0	-2.371 0	0.081 4	48.377 5	0.127 5
24.58	70.56	67.976 3	-2.583 7	0.012 5	70.481 4	-0.078 6
25.02	47.80	45.748 4	-2.051 6	0.026 1	49.007 0	1.207 0
29.98	25.95	24.477 4	-1.472 6	0.086 2	26.067 1	0.117 1
30.06	73.75	68.278 9	-5.471 1	-0.011 6	73.822 4	0.072 4
38.89	93.55	85.467 9	-8.082 1	-0.007 4	93.456 4	-0.093 6
40.12	51.65	46.801 0	-4.849 0	0.071 7	51.785 7	0.125 7
50.00	29.30	25.116 8	-4.183 2	0.068 2	29.424 1	0.124 1
51.21	52.10	45.883 7	-6.216 3	0.077 5	25.127 2	0.037 2

器经过不同温度补偿模型补偿后的数据,误差对比曲线如图6所示,部分数据对比如表2所示。

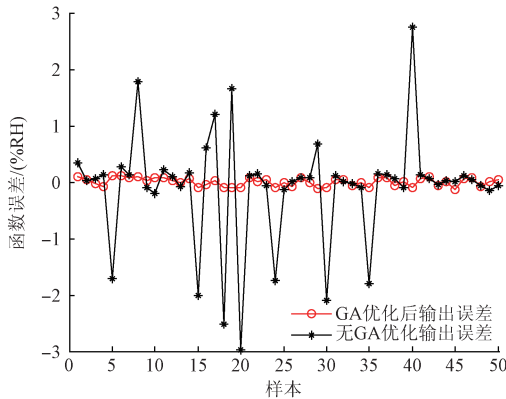


图6 误差对比曲线

Fig. 6 Comparison of errors

加接近标准值,最大误差绝对值为 0.1367% RH,无 GA 优化的 SVM 模型预测最大误差绝对值为 2.9751% RH,GA-SVM 补偿模型比传统 SVM 补偿模型最大误差绝对值最高提高 2.8351% RH。GA-SVM 均方误差明显小于 SVM 的均方误差,说明 GA-SVM 的补偿效果和泛化能力优于 SVM,也进一步说明了 GA-SVM 温度补偿模型测量准确度更高,更适合应用到实际业务中。

## 5 结论

HMP-45D 湿度传感器的测量准确度易受温度因素的影响,尤其是高温高湿环境下最大测量误差高达 8.656 3% RH,无法满足自动气象站业务运行的需求。本文提出了用改进后的遗传算法优化支持向量机回归模型的算法,建立了电容式湿度传感器温度补偿模型,该算法全局搜索能力强,有效避免遗传算法早熟现象和局部收敛问题,更好实现了对 HMP-45D 湿度传感器温度补偿,预测精度比传统 SVM 回归算法最高提高 2.8351%

由表2和图6可以看出不同条件下,GA-SVM 温度补偿算法更加有效地提高了测量准确度,补偿后数据更

RH。该算法有效地提高了湿度传感器测量的准确度和可靠性,补偿效果明显优于传统 SVM 回归算法,完全满足自动气象站观测业务要求。

## 参考文献

- [ 1 ] 付锡桂,朱乐坤. HMP45D 湿度传感器温度特性测试与分析[J]. 气象科技,2009,37(5):584-586.  
FU X G, ZHU L K. Test and analysis of temperature characteristics for HMP45D humidity sensors [ J ]. Meteorological Science and Technology, 2009, 37 ( 5 ): 584-586.
- [ 2 ] 武向娟,陈伟军,张婷婷,等. 三种气象常用湿度传感器比对实验结果分析[J]. 气象水文海洋仪器,2016,33(2):39-41.  
WU X J, CHEN W J, ZHANG T T, et al. Analysis on comparison experiment results of three kinds of commonly used humidity sensors in meteorology [ J ]. Meteorological, Hydrological and Marine Instrument, 2016, 33(2):39-41.
- [ 3 ] 张继光,姜宗元,张敏,等. HMP45D 型温湿度传感器的测量原理与误差分析[J]. 电子世界,2013(7):113-114.  
ZHANG J Y, JIANG Z Y, ZHANG M, et al. Measurement principle and error analysis of HMP45D temperature and humidity sensor[J]. Electronics World, 2013(7):113-114.
- [ 4 ] 陈振林,杨小涛,周庆福. 温度、风速对湿度传感器响应时间影响的研究[J]. 国外电子测量技术,2012,31(6):19-22.  
CHEN ZH L, YANG X, ZHOU Q F. Study on the influence of temperature and wind velocity on the response time of humidity sensor[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2012, 31(6):19-22.
- [ 5 ] 李文博,杨波,颜平江. 高温条件下三种气象用湿度传感器的性能对比分析[J]. 计量与测试技术,2016,43(3):60-62.  
LI W B, YANG B, YAN P J. High air-temperature performance analysis of 3 types of meteorological humidity sensors[J]. Metrology & Measurement Technique, 2016, 43(3):60-62.
- [ 6 ] 行鸿彦,邹水平,徐伟,等. 基于 PSO-BP 神经网络的湿度传感器温度补偿[J]. 传感技术学报,2015(6):864-869.  
XINGF H Y, ZOU SH P, XU W, et al. The temperature compensation for humidity sensor based on the PSO-BP neural network [ J ]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015(6):864-869.
- [ 7 ] 彭继伟,吕文华,行鸿彦,等. 基于改进 GA-BP 神经网络的湿度传感器的温度补偿[J]. 仪器仪表学报,2013,34(1):153-160.  
PENG J W, LV W H, XING H Y, et al. Temperature compensation for humidity sensor based on improved GA-BP neural network [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(1):153-160.
- [ 8 ] 刘浩然,赵翠香,李轩,等. 一种基于改进遗传算法的神经网络优化算法研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(11):1573-1580.  
LIU H R, ZHAO C X, LIU X, et al. Study on a neural network optimization algorithm based on improved genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(11):1573-1580.
- [ 9 ] 王福忠. 改进 PSO-SVM 算法的变压器分接开关故障诊断[J]. 电子测量技术,2016,39(11):190-194.  
WANG F ZH. Tap-changer fault diagnosis of transformer based on improved PSO-SVM [ J ]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(11):190-194.
- [ 10 ] 王健峰,张磊,陈国兴,等. 基于改进的网格搜索法的 SVM 参数优化[J]. 应用科技,2012(3):28-31.  
WANG J F, ZHANG L, CHEN G X, et al. A parameter optimization method for an SVM based on improved grid search algorithm[J]. Applied Science and Technology, 2012(3):28-31.
- [ 11 ] 马永杰,云文霞. 遗传算法研究进展[J]. 计算机应用研究,2012,29(4):1201-1206.  
MA Y J, YUN W X. Research progress of genetic algorithm [ J ]. Application Research of Computers, 2012, 29(4):1201-1206.
- [ 12 ] 秦国华. 基于神经网络与遗传算法的刀具磨损检测与控制[J]. 光学精密工程,2015,23(5):1314-1321.  
QIN G H. Detection and control for tool wear based on neural network and genetic algorithm [ J ], Optics and Precision Engineering, 2015, 23(5):1314-1321.
- [ 13 ] 胡雯,孙云莲,张巍. 基于改进的自适应遗传算法的智能配电网重构研究[J]. 电力系统保护与控制,2013(23):85-90.  
HU W, SUN Y L, ZHANG W. Reconfiguration of smart distribution using improved adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013(23):85-90.
- [ 14 ] 汪济洲,鲁昌华,蒋薇薇. 一种新的基于混合粒子的粒化支持向量机算法[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(4):591-597.  
WANG J ZH, LU CH H, JIANG W W. Novel granular support vector machine algorithm based on mixed granules [ J ], Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2015, 29(4):591-597.
- [ 15 ] 行鸿彦,张强,徐伟. 混沌海杂波背景下的微弱信号检



测混合算法[J]. 物理学报,2015,64(4):52-58.

XING H Y, ZHANG Q, XU W. Hybrid algorithm for weak signal detection in chaotic sea clutter [J]. Acta Physica Sinica, 2015,64(4):52-58.

[16] 高大惟,刘建玲. 湿度传感器的SVM温度补偿研究及软件设计[J]. 仪表技术与传感器,2014(12):7-9,12.  
GAO D W, LIU J L. Software design and study of humidity sensor SVM temperature compensation [J], Instrument Technique and Sensor, 2014(12):7-9,12.

[17] 周绍磊,廖剑,史贤俊. RBF-SVM的核参数选择方法及其在故障诊断中的应用[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(3):240-246.

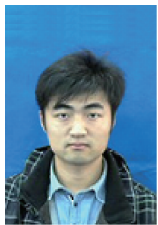
ZHOU SH L, LIAO J, SHI X J. Kernel parameter selection of RBF-SVM and its application in fault diagnosis [J], Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014,28(3):240-246.

[18] ESLAM P, SIAVASH R, REZA G, et al. Application of genetic algorithm-support vector machine (GA-SVM) for prediction of BK-channels activity[J]. European Journal of Medicinal Chemistry,2009, 44 (12) : 5023-5028.

[19] 刘爱国,薛云涛,胡江鹭,等. 基于GA优化SVM的风电功率的超短期预测[J]. 电力系统保护与控制, 2015(2):90-95.

LIU AI G, XUE Y T, HU J L, et al. Ultra-short-term wind power forecasting based on SVM optimized by GA[J]. Power System Protection and Control, 2015 (2):90-95.

作者简介



姜力,1991年出生,2015年毕业于南京信息工程大学,目前为南京信息工程大学研究生,主要研究方向为仪器仪表技术、传感器信号与信息处理。通信地址:江苏省南京信息工程大学电子与信息工程学院。

E-mail: 835715818@qq.com

**Jiang Li** was born in 1991, received B. Sc. from Nanjing University of Information Science and Technology in 2015. Now he is a M. Sc. candidate in Nanjing University of Information Science and Technology. His present research interest includes instrumentation technology, sensor signal and information processing.



**贺晓雷**,1993年于中国计量学院获得学士学位,2007年于北京邮电大学获得硕士学位,现为中国气象局气象探测中心研究员级高级工程师,主要从事气象计量技术研究。

E-mail:hxlao@cma.gov.cn

**He Xiaolei** received B. Sc. from China Jiliang University in 1993 and M. Sc. from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2007, respectively. Now he is senior engineer in Atmospheric Observation Technology Center, China Meteorological Administration. His main research interests include meteorological measurement technology research.



**行鸿彦**(通讯作者),1983年于太原理工大学获得学士学位,1990年于吉林大学获得硕士学位,2003年于西安交通大学获得博士学位,现为南京信息工程大学教授、博士生导师,主要研究方向为气象仪器设计与计量、仪器仪表技术、雷电防护技术等。

E-mail: xinghy@nuist.edu.cn

**Xing Hongyan** (Corresponding author) received B. Sc. from Taiyuan University of Technology in 1983, M. Sc. from Jilin University in 1990 and Ph. D. from Xi'an Jiaotong University in 2003, respectively. Now he is a professor in Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interests are design and metering, instruments technology, and lightning protection.