

## A Nonlinear Correction Method for Humidity Sensor Temperature Compensation\*

CHEN Weiming ZENG Zhezhao\* LIAO Zhenzhong MAO Yazhen

(College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

**Abstract:** The compound correction model based on Laguerre polynomials was proposed on humidity nonlinear correction and temperature compensation for the problem of humidity sensor easily affected by temperature. The parameters of the composite compensation model were determined through fitting humidity calibration values using the recursive least square (RLS) algorithm. The method can calculate the actual humidity with high accuracy according to the measured values of humidity sensor and environment temperature. The simulation results showed that the maximum relative error is less than  $4.5576 \times 10^{-4}\%$ . Therefore the proposed method has good nonlinear correction and temperature compensation effect and has important theoretical and application value in the field of humidity detection.

**Key words:** humidity sensor; temperature compensation; Laguerre polynomials; curve fitting; recursive least squares  
EEACC: 7230; 7320R doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2017.05.018

## 一种湿度传感器温度补偿的非线性校正方法\*

陈韦名, 曾喆昭\*, 廖震中, 毛亚珍

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410076)

**摘要:** 针对湿度传感器易受温度影响的问题, 提出了基于 Laguerre 多项式的湿度非线性校正和温度补偿的复合校正模型, 采用递推最小二乘法对标定湿度进行拟合以确定复合补偿模型的参数。该方法根据湿度传感器的测量值和环境温度即可高精度计算出实际湿度。仿真结果表明, 补偿后的最大相对误差不超过  $4.5576 \times 10^{-4}\%$ , 具有良好的非线性校正和温度补偿效果, 在湿度检测领域具有重要的理论和应用价值。

**关键词:** 湿度传感器; 温度补偿; Laguerre 多项式; 曲线拟合; 递推最小二乘法

中图分类号: TP274

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2017)05-0742-04

气象观测的一个重要参数就是空气湿度, 然而在实际观测过程中, 高低温环境下湿度的测量难以满足测量精度要求, 因此, 补偿温度产生的非线性影响, 成了科研工作者最为关心的问题。为了解决温度对湿度传感器引起的非线性影响, 国内外学者从硬件补偿和软件补偿两方面做了大量研究工作<sup>[1-5]</sup>。由于电子元器件受温度漂移等因素影响, 使得测量系统可靠性差、精度低, 难以实现全程补偿, 因而硬件补偿方法在实际应用过程受到限制。现有软件补偿方法主要包括: 多维回归分析法<sup>[6]</sup>、基于 BP 神经网络的湿度传感器温度补偿方法<sup>[7-9]</sup>、基于 RBF 神经网络与最小二乘相结合的融合算法实现湿度传感器的温度补偿方法<sup>[10]</sup>、基于三次样条插值的温度补偿方法<sup>[11-12]</sup>、最小二乘支持向量机

(LS-SVM) 的温度补偿方法<sup>[13-14]</sup>以及基于自适应神经模糊推理系统(ANFIS)的温度补偿方法等<sup>[15]</sup>。

本文提出了一种基于 Laguerre 多项式曲线拟合的非线性校正方法。该方法使用 Laguerre 多项式曲线模型来拟合湿度传感器在各种环境温度时所有标定点下的湿度, 通过递推最小二乘法确定多项式曲线模型的参数, 从而实现在各种环境温度时将湿度测量值与环境温度值作为自变量, 通过已拟合的多项式曲线模型进行非线性校正和温度补偿, 从而得到相应环境温度时的湿度补偿值。

### 1 Laguerre 多项式曲线拟合模型

#### 1.1 Laguerre 多项式定义

当  $x \in [0, \infty)$  时, Laguerre 多项式定义为:

项目来源: 电子科学与技术湖南省重点学科项目

收稿日期: 2016-10-26 修改日期: 2016-12-22

$$L_n(x) = (2n-1-x) L_{n-1}(x) - (n-1)^2 L_{n-2}(x) \quad (1)$$

$$(n=2, 3, \dots)$$

式中:  $L_0(x) = 1$ ,  $L_1(x) = 1-x$ 。

## 1.2 湿度传感器的温度湿度复合补偿模型

为了便于分析,取文献[10]中表1所示的样本组队数据进行温度湿度复合补偿模型的建模。首先将文献[10]中表1所示的第1组样本数据重新列出,如表1所示。其中  $x_k$  是湿度测量值(%RH)、 $y_{dk}$  是湿度标准值(%RH)、 $t_k$  是环境温度值(°C)。

表1 第1组样本数据及补偿结果

干扰量 $t_k/^\circ\text{C}$	湿度/(%RH)			
	$y_{dk}$	$x_k$	$y(x_k, t_k)$	相对误差/1e-10%
20.01	23.55	23.071 5	23.550 0	0.037 6
19.86	23.55	22.653 5	23.550 0	0.011 3
24.58	25.05	24.225 2	25.050 0	0.299 9
25.02	25.06	23.809 5	25.060 0	0.013 0
29.98	25.95	24.477 4	25.950 0	0.064 2
30.06	26.45	24.386 3	26.450 0	0.065 9
38.89	27.80	24.485 3	27.800 0	1.955 1
40.12	27.70	24.854 7	27.700 0	0.443 2
50.00	29.30	25.116 8	29.300 0	2.458 2
51.21	29.25	24.755 3	29.250 0	4.165 2

以表1的环境温度  $t_k$  和湿度测量值  $x_k$  作为非线性校正模型的输入,以湿度标准值  $y_{dk}$  作为拟合样本数据,以  $y(x_k, t_k)$  作为非线性校正模型的输出,则基于Laguerre多项式曲线拟合的非线性校正模型表示为:

$$y(x_k, t_k) = \sum_{j=0}^n a_j L_j(x_k) + \sum_{j=0}^m b_j L_j(t_k) \quad (2)$$

式中:  $a_j$  与  $b_j$  是拟合曲线的模型参数。为了便于分析,设:  $W = [a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m]^T$ ,  $A(k; \cdot) = [1, L_1(x_k), \dots, L_n(x_k), 1, L_1(t_k), \dots, L_m(t_k)]$ , 则式(2)可改写为:

$$y(x_k, t_k) = A(k; \cdot) W \quad (3)$$

## 1.3 最优模型参数更新算法

下面讨论使用式(3)对表1所示的测量数据进行拟合,以获得最优拟合模型参数,具体方法如下:

设温度与湿度非线性补偿误差为:

$$e(k) = y_{dk} - A(k; \cdot) W \quad (4)$$

式中:  $y_{dk}$  是表1所示的第  $k$  个湿度标准值。

性能指标为:

$$J = 0.5 \sum_{k=1}^M e^2(k) \quad (5)$$

为了使性能指标  $J$  最小,即  $\min J$ ,采用递推最小二乘法来确定模型参数向量  $W$ ,具体算法描述如下<sup>[16]</sup>:

$$Q^k = \frac{P^k A^T(k; \cdot)}{\lambda + A(k; \cdot) P^k A^T(k; \cdot)} \quad (6)$$

$$W^{k+1} = W^k + Q^k e(k) \quad (7)$$

$$P^{k+1} = \frac{1}{\lambda} [I - Q^k A(k; \cdot)] P^k \quad (8)$$

式中: 初始协方差阵  $P^0 = \alpha I \in R^{(n+m+2) \times (n+m+2)}$ ,  $\alpha = 10^6 \sim 10^{16}$ 。 $\lambda$  是遗忘因子,通常取  $0.96 \leq \lambda \leq 1$ 。当参数变化快时,  $\lambda$  取小点;变化慢时,取大点。当  $\lambda = 1$  时,该递推公式成为基本递推最小二乘算法。

根据式(4)~式(8)对表1所示的所有样本数据进行迭代训练后,可以获得一组最优的多项式模型参数,使式(2)所示的Laguerre多项式模型逼近表1所示的湿度传感器在标定点的值。

## 2 仿真试验

为了验证本文方法的有效性,以文献[10]的表1所示的5组测量数据作为试验对象,在仿真试验中,取  $\alpha = 10^6$ 、 $\lambda = 1$ 。

仿真实验1 以表1数据作为仿真对象,取  $n = 10$ ,  $m = 11$ ,仿真结果分别如表1和图1所示。由表1可知,基于Laguerre多项式曲线拟合的湿度传感器温度湿度非线性校正方法具有较高的校正精度,最大相对误差小于  $4.165 \times 10^{-10}$ 。

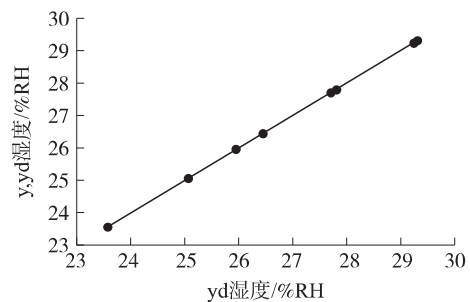


图1 湿度传感器温度湿度非线性校正

仿真实验2 取文献[10]的第2组数据,如表2所示。取  $n = 10$ ,  $m = 11$ ,仿真结果分别如表2和图2所示。

表2 第2组样本数据及补偿结果

干扰量 $t_k/^\circ\text{C}$	湿度/(%RH)			
	$y_{dk}$	$x_k$	$y(x_k, t_k)$	相对误差/1e-6%
20.01	48.25	45.879 0	48.250 0	0.940 6
19.86	48.60	45.472 5	48.600 0	0.516 0
24.58	48.00	46.710 0	48.000 0	0.940 8
25.02	47.80	45.748 4	47.800 0	0.184 4
29.98	50.75	47.020 0	50.750 0	2.197 2
30.06	50.70	46.516 8	50.700 0	0.214 1
38.89	51.60	46.097 9	51.600 0	0.062 4
40.12	51.65	46.801 0	51.650 0	0.064 2
50.00	52.10	46.652 1	52.100 0	0.161 2
51.21	52.10	45.883 7	52.100 0	1.379 2

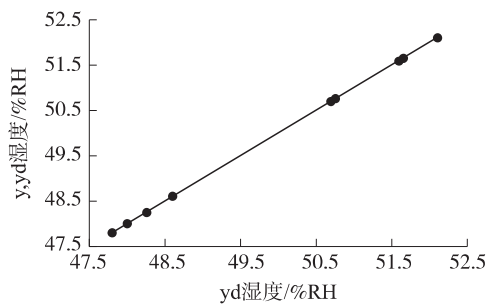


图 2 湿度传感器温度湿度非线性校正

由表 2 可知,基于 Laguerre 多项式曲线拟合的湿度传感器温度湿度非线性校正方法具有较高的校正精度,最大相对误差小于  $1.379\ 2\times 10^{-6}$ 。

仿真实验 3 取文献[10]的第 3 组数据,如表 3 所示。取  $n=9$ ,  $m=11$ ,仿真结果分别如表 3 和图 3 所示。由表 3 可知,基于 Laguerre 多项式曲线拟合的湿度传感器温度湿度非线性校正方法具有较高的校正精度,最大相对误差小于  $4.5576\times 10^{-4}$ 。

表 3 第 3 组样本数据及补偿结果

干扰量 $t_k/^\circ\text{C}$	湿度/(%RH)			
	$y_{dk}$	$x_k$	$y(x_k, t_k)$	相对误差/( $1\text{e-}4\%$ )
20.01	71.25	68.584 5	71.250 2	2.416 9
19.86	71.20	67.546 5	71.200 0	0.138 6
24.58	70.56	67.976 3	70.560 0	0.266 9
25.02	72.02	69.432 7	72.020 0	0.168 3
29.98	73.15	68.903 7	73.150 0	0.137 9
30.06	73.75	68.278 9	73.749 7	4.557 6
38.89	73.05	66.290 0	73.050 0	0.075 4
40.12	72.90	67.305 8	72.900 0	0.025 7
50.00	74.30	68.150 0	74.299 9	1.149 7
51.21	74.40	67.352 8	74.400 0	0.007 0

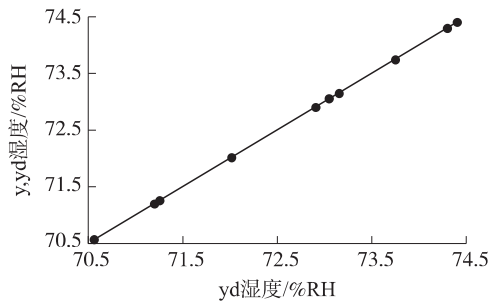


图 3 湿度传感器温度湿度非线性校正

仿真实验 4 取文献[10]的第 4 组数据,如表 4 所示。取  $n=9$ ,  $m=11$ ,仿真结果分别如表 4 和图 4 所示。

表 4 第 4 组样本数据及补偿结果

干扰量 $t_k/^\circ\text{C}$	湿度/(%RH)			
	$y_{dk}$	$x_k$	$y(x_k, t_k)$	相对误差/ $1\text{e-}6\%$
20.01	92.30	88.757 5	92.300 0	1.717 8
19.86	90.35	85.623 5	90.350 0	0.287 5
24.58	82.05	78.739 5	82.050 0	0.174 7
25.02	83.15	77.943 6	83.150 0	0.527 2
29.98	88.65	81.037 4	88.650 0	1.523 5
30.06	93.66	86.582 6	93.660 0	1.586 1
38.89	93.55	85.467 9	93.550 0	0.641 7
40.12	93.60	86.882 1	93.600 0	0.077 7
50.00	95.15	87.946 8	95.150 0	3.425 6
51.21	95.15	86.573 2	95.150 0	0.042 8

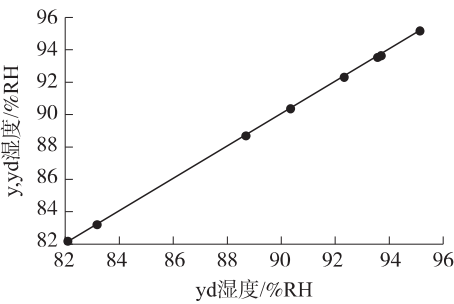


图 4 湿度传感器温度湿度非线性校正

由表 4 可知,基于 Laguerre 多项式曲线拟合的湿度传感器温度湿度非线性校正方法具有较高的校正精度,最大相对误差小于  $3.4256\times 10^{-6}$ 。

仿真实验 5 取文献[10]的第 5 组数据,如表 5 所示。取  $n=5$ ,  $m=11$ ,仿真结果分别如表 5 和图 5 所示。由表 5 可知,基于 Laguerre 多项式曲线拟合的湿度传感器温度湿度非线性校正方法具有较高的校正精度,最大相对误差小于  $4.5954\times 10^{-6}$ 。

表 5 第 5 组样本数据及补偿结果

干扰量 $t_k/^\circ\text{C}$	湿度/(%RH)			
	$y_{dk}$	$x_k$	$y(x_k, t_k)$	相对误差/( $1\text{e-}6\%$ )
20.01	96.50	88.757 5	96.500 0	0.233 7
19.86	97.60	85.623 5	97.600 0	0.000 8
24.58	96.92	78.739 5	96.920 0	0.045 1
25.02	97.88	77.943 6	97.880 0	0.008 0
29.98	94.80	81.037 4	94.800 0	0.012 6
30.06	97.35	86.582 6	97.350 0	0.003 2
38.89	96.75	85.467 9	96.750 0	0.533 0
40.12	95.05	86.882 1	95.050 0	0.268 9
50.00	95.45	87.946 8	95.450 0	4.595 4
51.21	95.00	86.573 2	95.000 0	4.095 5

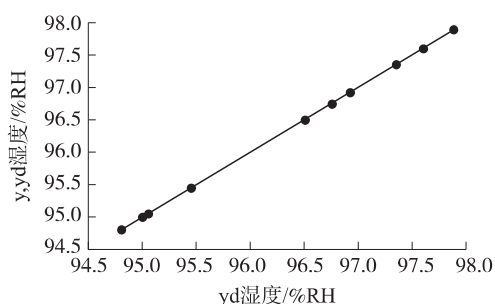


图5 湿度传感器温度湿度非线性校正

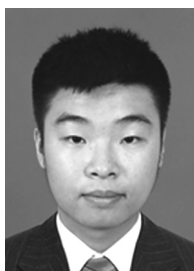
### 3 结论

论文提出了基于Laguerre多项式的湿度传感器的温度湿度复合补偿模型,使用递推最小二乘法对Laguerre多项式复合曲线模型参数进行优化计算。仿真结果表明,温度湿度的优化曲线模型完整刻画了湿度传感器的温度-湿度特性的函数关系,根据被测的湿度和环境温度即可高精度计算出湿度传感器的实际湿度值,为湿度测量领域的非线性温度和湿度校正提供了良好的理论方法。

#### 参考文献:

- [1] 杨红霞,曹新亮.湿度传感器温度补偿法的研究[J].传感器与微系统,2007,26(5):18-20.
- [2] 于进,冯钊,张洪泉.具有环境温度自补偿功能的微湿度传感器设计[J].传感器与微系统,2009,28(10):70-72.

- [3] Dempsey G L, Alig J G, Alt N L, et al. Control Sensor Linearization Using Artificial Neural Networks [J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 1997, 13(3): 321-322.
- [4] 张盛福,张鹏.提高湿敏电容测量精度的方法[J].仪表技术与传感器,2003(8):34-35.
- [5] 严洁,赵研,张俊利.基于BP神经网络的称重传感器静态非线性误差补偿研究[J].传感技术学报,2008,21(6):1025-1028.
- [6] 孙德敏,张利,王永,等.基于乘积型最小二乘法的传感器特性拟合[J].传感技术学报,2002,15(4):293-297.
- [7] 司端峰,常炳国,刘君华.基于BP神经网络的传感器特性补偿新算法的研究[J].仪表技术与传感器,2000(1):11-14.
- [8] 张永怀,刘君华.采用BP神经网络及其改进算法改善传感器特性[J].传感技术学报,2002,15(3):185-188.
- [9] 卢智远,周永军,李卫军.传感器非线性误差校正的BP神经网络方法研究[J].传感器技术,2005,24(2):11-12.
- [10] 行鸿彦,彭基伟,吕文华,等.一种湿度传感器温度补偿的融合算法[J].传感技术学报,2012,25(12):1711-1716.
- [11] 江东,单慧,刘绪坤,等.函数拟合法力敏传感器的非线性和温度补偿[J].传感器与微系统,2016,35(2):16-19.
- [12] 王冰冰,李淮江.基于三次样条插值的硅压阻式压力传感器的温度补偿[J].传感技术学报,2015,28(7):1003-1007.
- [13] 乔爱民,何博侠,张炜.基于LS-SVM及嵌入式技术的力敏传感器温度补偿[J].传感技术学报,2013,26(5):637-642.
- [14] 辛守乔,肖立业,马玉鹏.巨磁阻传感器输出非线性与温漂的补偿[J].高压技术,2013,39(5):1178-1183.
- [15] 谢苗,刘治翔,毛君.基于改进型ANFIS的磁致伸缩液位传感器温度补偿[J].传感技术学报,2015,28(1):49-56.
- [16] 曾喆昭,黄创霞,周富照.数值计算方法与应用[M].北京:科学出版社,2013.



陈韦名(1991-),男,湖南长沙人,硕士研究生,研究方向为智能计算与智能控制,283651245@qq.com;



曾喆昭(1963-),男,湖南永州人,博士,教授,电路与系统学科负责人,电子科学与技术一级学科主要负责人,主要研究方向为智能检测与智能控制,508984293@qq.com;



廖震中(1991-),男,湖南长沙人,硕士研究生,研究方向,智能检测与智能控制,cs0076@sina.com。