

Temperature Compensation of the CO Electrochemical Gas Sensor Based on RBF Neural Network *

ZHANG Xiaojun, ZHANG Minglu*, LI Xiaohui

(School Of Mechanical Engineering, Hebei University Of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: The output precision of the CO electrochemical gas sensor is easy to be influenced by the ambient temperature. In view of this shortcoming, the paper proposes a new temperature compensation method based on RBF(Raesine Basic Function) neural network, and has done the experimental study by using the designed gas gathering system. The experiment results indicate that the biggest error of the sensor outputs may be up to 20.0% without carrying on any temperature compensation, and is 1.44% by adopting the temperature compensation method based on BP neural network, even down to 0.12% after using the method based on RBF neural network. Therefore this method may be effectively used in temperature compensation for the CO electrochemical gas sensor and make the sensor possess the higher measuring accuracy and the temperature stability.

Key words: RBF neural network; CO electrochemical gas sensor; temperature compensation
EEACC: 7230

基于 RBF 神经网络的电化学 CO 气体传感器的温度补偿 *

张小俊, 张明路*, 李小慧

(河北工业大学机械学院, 天津 300130)

摘要: 针对电化学 CO 气体传感器的输出精度易受环境温度影响的缺点, 提出了一种基于 RBF 神经网络的温度补偿方法, 并借助所设计的气体采集系统进行了实验研究。实验结果表明, 未进行温度补偿时传感器输出最大误差为 20.0%, 基于 BP 神经网络温度补偿方法的误差为 1.44%, 而采用 RBF 神经网络进行温度补偿后最大误差可达到 0.12%, 故该方法可有效的用于电化学 CO 气体传感器的温度补偿, 令传感器具有更高的测量精度和温度稳定性。

关键词: RBF 神经网络; 电化学 CO 气体传感器; 温度补偿

中图分类号: TP212

文献标识码: A **文章编号:** 1004-1699(2009)01-0011-04

电化学气体传感器利用气敏电极或者气体扩散电极等构成一系列电池测量各种气体含量, 如 O₂、CO、CO₂、SO₂、NH₃、H₂S、HF 等气体。它具有体积小, 结构简单, 选择性好, 响应快等特点, 已被广泛应用于气体泄漏检测或环境监测^[1]。但由于气体传感器对温度有一定的敏感度, 当工作环境温度发生变化时, 致使传感器的零点和灵敏度发生变化, 从而造成输出值随环境温度变化, 导致测量出现附加误差, 因此温度补偿问题一直是传

感器技术中的关键环节之一^[2]。传感器的温度补偿有两种方法, 即硬件补偿和软件补偿。硬件补偿主要采用硬件电路来消除其影响, 但难以做到全额补偿, 且存在补偿电路硬件漂移、调试困难、精度低, 通用性差等缺点, 不利于工程实际应用。软件补偿主要有数值分析法(最小二乘曲线拟合法和多段折线逼近法)和人工智能法(专家系统、神经网络、遗传算法和模糊系统)。目前应用较广泛的是利用误差反传(Back-Propagation, BP)神经

基金项目: 国家 863 项目资助(2006AA04Z221); 河北省自然科学基金项目资助(E2007000069)

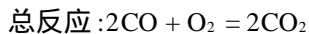
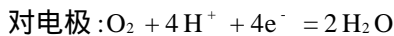
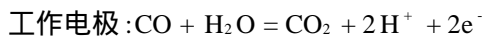
收稿日期: 2008-08-25 修改日期: 2008-10-21

网络方法实现温度漂移软件补偿^[3]。虽然BP神经网络具有很强的函数逼近能力,被人们用来进行传感器的各种非线性误差补偿,然而其存在着收敛速度慢、易陷入局部极小等缺点^[4]。因此本文提出了一种基于RBF神经网络的温度补偿方法,借助所设计的气体采集系统,对电化学CO气体传感器的温度补偿进行了实验研究,并与基于BP神经网络方法的温度补偿结果进行了比较。结果表明:RBF网络在学习速度、对传感器期望输出的逼近能力及鲁棒性等方面均优于BP网络,能够使气体传感器具有更高的测量精度和温度稳定性。

1 系统设计

1.1 电化学CO气体传感器工作原理

电化学气体传感器由工作电极、对电极、参比电极、电解质、液体保持材料、过滤干扰气体物质、贵金属引线、接线柱等组成,使用的典型电极材料包括铂、金、银、铑、碳、钨、钽等^[5],传感器信号通过引线传导到外部电路,通过放大等处理进行显示。根据外部恒电位电路,传感器工作电极保持一个稳定的工作电位,一氧化碳气体传感器基本工作原理如下面公式所示:



这样电化学气体传感器根据电化学反应电子转移,从而定性并定量地检测出被测气体。参比电极主要作用是保持工作电极维持电化学反应的稳定工作电压,工作电极与对电极之间因电化学反应形成的电流与被测气体浓度成线性关系。

1.2 系统组成

所设计的CO气体采集系统结构如图1所示,整个系统由电化学CO气体传感器、温度传感器、信号调理电路、单片机、微型采样泵及PC机组成。

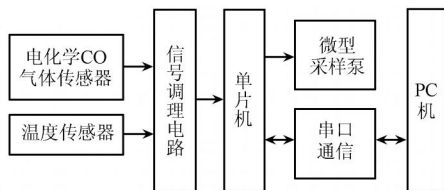


图1 系统结构

系统采用C8051F020芯片作为微处理器,C8051F020单片机是完全集成的混合信号系统级芯片,具有与8051兼容的高速CIP-51内核,片内集成了数据采集和控制系统中常用的模拟、数字外设及其它功能部件。信号调理电路负责把气体传感器和

温度传感器的信号进行滤波、放大,调整到0到3.3V范围内输入给单片机内置的12位模数转换器ADC0。传感器信号在单片机内进行模数转换后,经串口发送给PC机。在PC机内可以完成所设计的温度补偿算法、数据存储、显示等功能。根据人的嗅觉系统工作原理,把传感器系统封装在一个方形壳体中,令气体传感器置于一个密闭的气室中,通过单片机控制微型采样泵把被测环境中气体吸入气室内,与传感器充分接触,从而使气体传感器达到最佳性能。

2 基于RBF神经网络的温度补偿

2.1 RBF神经网络

RBF神经网络是径向基函数(Radial Basis Function Neural Network)神经网络的简称,是以函数逼近理论为基础构造的一类前向网络,由J. Moody和C. Darken于20世纪80年代末提出,基本的网络结构如图2所示。目前已经证明,径向基网络也能够以任意精度逼近任意连续函数^[6]。

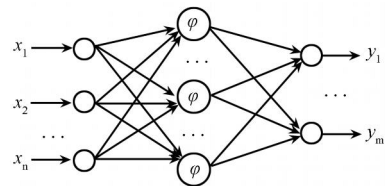


图2 RBF神经网络结构图

径向基函数网络(简称网络)是在借鉴生物局部调节和交叠接受区域知识的基础上提出的一种采用局部接受域来执行函数映射的人工神经网络,具有最优逼近和全局逼近的特性。隐含层采用的是高斯径向基函数

$$i(x) = \exp(-x - c_i^2 / 2i^2) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中, $i(x)$ 为隐层节点 i 的输出,且 $i(x) \in [0, 1]$, c_i 是高斯核函数的中心值, i 是标准化常数, n 是隐层节点数。输出层采用线性激活函数

$$y_j = \sum_{i=1}^n w_{ij} i(x) - \theta_j \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

其中, y_j 为输出层节点 j 的输出, w_{ij} 为隐层节点 i 连接输出层节点 j 的权值, θ_j 为输出层节点阈值。因此,当确定了RBF网络的聚类中心 c_i 、权值 w_{ij} 以后,就可以求出给定某一输入时网络对应的输出值。理论和数值分析表明,RBF神经网络的性能主要由隐层的中心决定而不管隐层神经元究竟用什么样的径向基函数,即RBF网络的结构特点主要由隐层的中心位置和个数决定^[7]。因此,建立RBF网络模型的关键在于正确的选择合适的RBF中心。采用k均值

聚类算法来确定中心,利用最小二乘法(LMS 算法)求出权值 w_{ij} 。

2.2 RBF 神经网络温度补偿原理

利用神经网络进行温度补偿就是利用神经网络的基本特性,使传感器具有复杂的非线性映射、自组织、自学习及推理的自适应能力^[8]。神经网络法不必建立传感器输出随温度变化的具体模型,而只需要训练样本,通过学习、训练便可以模拟出输入输出的内在联系。在 Microsoft Visual C++ 6.0 环境下,建立了 RBF 神经网络模型,对电化学 CO 气体传感器进行有效的温度补偿,并得到了较高的补偿准确度。温度补偿原理框图如图 3 所示。补偿原理为电化学气体传感器接触浓度 C 的气体后,产生的电流 I 和温度传感器的测量值 T ,作为 RBF 神经网络模型的输入。经过 RBF 网络的学习、训练,消除环境温度 T 的影响后,输出修正后的电流 I' 或气体浓度值 C' 。

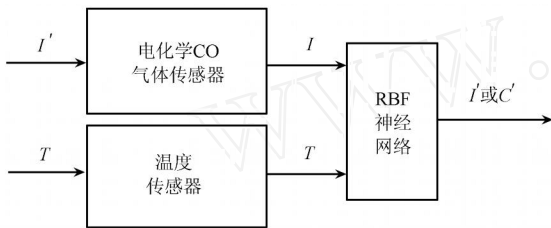


图 3 温度误差补偿原理框图

当传感器放置或使用一段时间后,输入输出特性发生了漂移,此时可通过对神经网络进行重新训练,使测量系统仍保持良好的性能。显然,利用神经网络建立传感器的输入输出模型后,降低了对传感器性能的要求,扩大了温度工作范围,即使因受环境温度的影响而使其特性呈现非线性时,也可以灵活地实现有效的补偿。

3 实验

3.1 样本数据的准备

系统选用英国城市技术公司生产的 4 系列 CO 气体传感器(4CF Ci Tice1),量程为 $0 \sim 500 \times 10^{-6}$ (ppm),工作温度范围为 $-20 \sim 50$ 。该传感器的输出-温度特性曲线如图 4 所示。图中将 20 (室温下)传感器的 100% 输出设定为标准输出值,其他各个温度点的输出值为标准输出值的百分比数。

在不同温度下令系统采集 200×10^{-6} (ppm) CO 标准气体,得到对应的传感器电流输出值如表 1 所示,采集 500×10^{-6} CO 标准气体的对应输出值如表 2 所示,可以看出这些数据的分布符合传感器温度特性曲线,说明了所设计采集系统的可靠性。采

用 20 时的测量数据作为传感器的标准输出,把表 1 中的数据作为 RBF 网络的训练样本,表 2 中的数据作为 RBF 网络的测试样本。

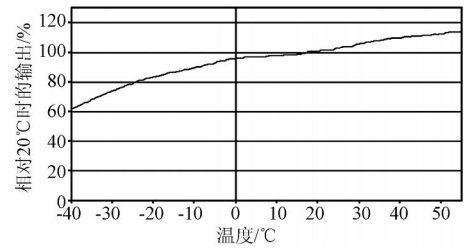


图 4 电化学 CO 气体传感器温度特性曲线图

表 1 传感器在 200×10^{-6} 时各温度点对应的输出电流

T/	I/ μ A	T/	I/ μ A	T/	I/ μ A
- 20	11.5136	5	13.2205	30	15.5708
- 15	11.7904	10	13.5422	35	16.1705
- 10	12.0862	15	13.6957	40	16.5200
- 5	12.4174	20	14.0000	45	16.7022
0	12.8002	25	14.7269	50	16.8000

表 2 传感器在 500×10^{-6} 时不同温度点对应的输出电流

T/	I/ μ A	T/	I/ μ A	T/	I/ μ A
0	32.0050	20	34.9580	40	41.3000
10	33.8555	30	38.9270	50	42.0000

3.2 样本数据的处理

为加快训练速度便于计算,采用以下公式(3)对样本数据进行归一化^[8]:

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

将表 1 中的样本数据进行归一化处理后就建立了神经网络标准样本,如表 3 所示。

表 3 神经网络标准样本

T/	I/ μ A	T/	I/ μ A	T/	I/ μ A
0.0000	0.0000	0.3571	0.3229	0.7143	0.7675
0.0714	0.0524	0.4286	0.3837	0.7857	0.8809
0.1429	0.1083	0.5000	0.4128	0.8571	0.9470
0.2143	0.1710	0.5714	0.4703	0.9286	0.9815
0.2857	0.2434	0.6429	0.6078	1.0000	1.0000

3.3 结果及分析

将表 3 中标准样本数据输入程序训练 RBF 网络,最后得到 RBF 网络模型为:输入层、隐含层及输出层的神经元数目依次为 2、2、1。输入层至隐含层的权值和阈值分别为:

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0.906851 & 0.18241 \\ 0.906851 & 0.18241 \end{bmatrix} \quad b_1 = \begin{bmatrix} 7.99602 \\ 7.99602 \end{bmatrix}$$

隐含层至输出层的权值为:

$$W_2 = [0.236837 \quad 0.236837]$$

将表 2 中的测试样本经归一化处理后输入到训练好的 RBF 网络进行误差修正,并将修正后的结果

与基于BP网络温度补偿后的结果进行了比较,如表4所示。

表4 温度补偿实验结果

温度 $T/$	未补偿的		经BP网络 补偿后		经RBF网络 补偿后	
	显示值	误差	显示值	误差/ %	显示值	误差/ %
0	32.005	8.56 %	34.668	0.95	35.020	0.06
10	33.856	3.33 %	34.830	0.49	35.019	0.06
20	35.000	0.00 %	34.963	0.11	35.006	0.02
30	38.927	11.2 %	35.208	0.59	35.041	0.12
40	41.300	18.0 %	35.389	1.11	35.039	0.11
50	42.000	20.0 %	35.504	1.44	34.972	0.08
网络设定的误差指标			0.001		0.0001	
训练次数			3689		22	

从表4中可以看出,未进行温度补偿时的最大误差20.0%,采用BP网络进行温度补偿后的最大误差为1.44%,而采用RBF网络进行温度补偿后其误差更小,达到0.12%,与实际期望值非常接近,且误差收敛,精度远高于BP网络。作出补偿前后的传感器输出—温度特性曲线进行比较,如图5所示。由图5也可以看出,RBF网络能够较好的完成温度补偿任务,从而大大降低了传感器在工作过程中所受的温度干扰。经过多次重复试验,所得结果几乎完全相同表明了该方法具有较强的鲁棒性。

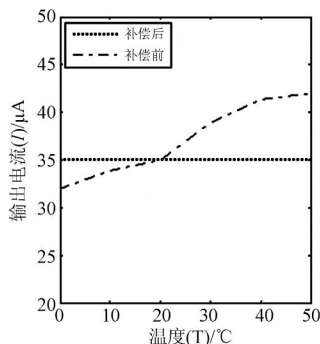


图5 传感器在500 ppm时输出(I)—温度(T)特性曲线

4 结论

借助所设计的CO气体采集系统,对电化学CO气体传感器的温度补偿问题进行了研究。采用RBF神经网络温度补偿方法较好的克服了温度等非目标参量对气体传感器测量精度和稳定性所带来的不利影响,最大误差可达0.12%。实验结果表明,该方法比采用BP神经网络方法具有更高的精度和较快的收敛速度。此外,该补偿方法还具有较强的鲁棒性、简单性和通用性,也可以用于其它类型气体传感器的温度误差补偿。

参考文献:

- [1] 胡茜,葛思攀,王伊卿,李伟. 电化学气敏传感器的原理及其应用[J]. 仪表技术与传感器, 2007, (5): 77-78.
- [2] 史雪飞,冯淑红. DS1820芯片在电化学传感器温度补偿中的应用[J]. 工业计量, 2006, 2(1): 1-14.
- [3] 李国玉,孙以材,潘国峰. 基于网络的压力传感器信息融合[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(2): 168-171.
- [4] 梁伟锋,汪晓东,梁萍儿. 基于最小二乘支持向量机的压力传感器温度补偿[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(12): 2235-2238.
- [5] 孙宇峰,黄行九,刘伟,孟凡利,刘锦淮. 电化学CO气体传感器及其敏感特性. 传感器技术, 2004, 23(7): 14-17.
- [6] Simon Haykin. 神经网络原理[M]. 叶世伟,史忠植,译. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [7] CHEN S, Grant Merle. Orthogonal Least Squares Learning Algorithm for Radial Basis Function Networks [J]. IEEE Transaction on Neural Network, 2003(2): 302-309.
- [8] 张朋,陈明等. 基于BP神经网络的振动筒压力传感器的温度补偿[J]. 传感技术学报, 2007, 10(3): 55-66.



张小俊(1980-),男,2006年于河北工业大学获硕士学位,现为博士研究生. 主要研究方向为机器人嗅觉、信号采集与处理, zxjun_80@163.com



张明路(1964-),男,教授、博士生导师, 1997年于天津大学获博士学位,现为河北工业大学机械工程学院院长,从事机器人技术、多传感器信息融合等方面的研究, zhangml@hebut.edu.cn