

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107454

三维微组装多气体传感器测试仪^{*}

李张倩^{1,2} 张锐浩^{1,2} 马银鸿^{1,2} 洪应平^{1,2} 张会新^{1,2}

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室 太原 030051; 2. 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: 针对在地震等自然灾害及遮蔽空间范围传感器体积受限制和对周围环境参数感知问题,设计了三维微组装多气体传感器测试仪,结合设计的GPSO-BP算法,该测试仪可以在高温高湿的环境下实现实时对有毒气体浓度以及压力的多参数测量,并对其进行温湿度补偿,具有高性能、小型化、准确度高的特点。测试结果表明,在湿度为80%RH,温度为50℃的环境下测量不同气体,经过温湿度补偿后,该测试仪的准确对度至少提高到2.2%以上,稳定性较强,对于地震等恶劣环境下的环境参数感知具有重大的意义。

关键词: 多气体检测;温湿度补偿;小型化;GPSO-BP算法

中图分类号: TN919 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3010

Three-dimensional micro-assembled multi-gas sensor tester

Li Zhangqian^{1,2} Zhang Ruihao^{1,2} Ma Yinong^{1,2} Hong Yingping^{1,2} Zhang Huixin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Testing, Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In this paper in the natural disasters such as earthquakes and shelter space range sensor volume restricted and parameters on the surrounding environment perception problem, a gas sensor for a three-dimensional micro assembly tester, combining with the design of GPSO-BP algorithm, the tester can realize real time under high temperature and high humidity environment to the concentration of toxic gases and pressure of multi-parameter measurement, and the temperature and humidity compensation, with high performance, miniaturization, high accuracy characteristics. The test results show that in the humidity of 80%RH, temperature of 50℃ environment measurement of different gases, after the temperature and humidity compensation, the accuracy of the tester is improved to at least 2.2% above, strong stability, for earthquake and other harsh environment of environmental parameters perception is of great significance.

Keywords: multi-gas detection; temperature and humidity compensation; miniaturization; GPSO-BP algorithm

0 引言

近几年来,随着气体传感器应用的日益广泛,人们对气体传感器的研究和检测也越来越重视。多气体检测在煤矿、火灾、地震环境中的检测十分重要。目前,气体检测大多采用的是单气体检测,即每检测一种气体需要一种气体传感器测量设备,因此研究出一种小型化、多参数的传感器测试仪是大势所趋^[1]。

在多参数气体传感器测试仪中,传感器的精度受温湿度的影响,仪器的误差会增大,气体传感器的温湿度补偿可分为硬件和软件补偿。硬件补偿是在负载电路上并联或串联热、湿敏电阻^[2]。这种方法的原理及电路简单,但是对所选择的电阻要求比较高,实际应用中比较难做到。软件补

偿是利用算法对数据进行融合处理。文献[3]提出了一种基于反向传播(back propagation, BP)神经网络进行温度补偿,收敛速度慢,精确度不高。文献[4]采用线性回归的方法对气体传感器进行温湿度补偿,忽略了交互性、非线性和因素不可控性,不能被广泛使用。文献[5]提出了一种粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)结合BP神经网络进行温湿度补偿,但补偿精度较低,容易出现早熟的现象,对极端环境的补偿误差较大,无法适应地震环境工作精度要求的问题。

为提高在地震等环境中气体传感器的准确度和稳定性,本文提出了一种基于遗传算法(genetic algorithm, GA)与粒子群算法(PSO)相结合来优化BP神经网络的算法(GPSO-BP),与传统的BP神经网络相比,优化后的BP神

收稿日期:2021-07-31

^{*} 基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(51705475)项目资助

经网络可以跳出局部收敛、且收敛速度更快、稳定性和准确度更高。

1 系统整体设计

本系统以 STM32F103C8T6 为主控核心,首先气体传感器采集到的信号转化为电信号,由于传感器输出的电信号比较微弱,通过传感器的调理电路将其放大、滤波成标准电压,然后经 STM32 内部的 12 位 ADC 模块进行 A/D 采集转换,同时温湿度传感器将采集到的数据经过 I²C 接口发送到主控。通过程序对气体传感器的数据进行温湿度补偿,最后通过 USART 与上位机通信,将分析处理数据后的结果显示在上位机。系统整体设计电路如图 1 所示。

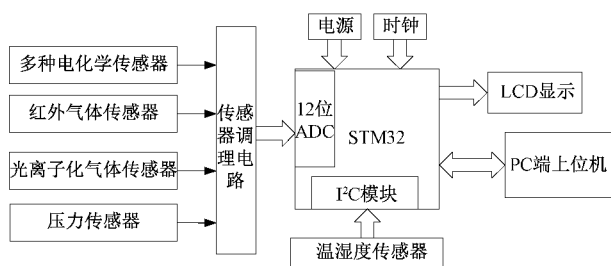


图1 系统整体设计电路

2 多参数气体检测依据

2.1 主要技术指标

检测对象: SO_2 、 Cl_2 、 CO 、 CH_4 、 VOC 、 O_2 温湿度、压力。

检测量程: 压力: 1~2 MPa; 温度: $-100\text{ }^\circ\text{C}$ ~ $200\text{ }^\circ\text{C}$; 湿度: 1%~90%RH; SO_2 : 1~2 000 mg/L; CO : 1~10 000 mg/L; Cl_2 : 1~500 mg/L; CH_4 : 1~10 000 mg/L; VOC : 1~10 000 mg/L; O_2 : 1~10 000 mg/L。

检测精度: 压力: $\pm 0.3\text{ FS}$; SO_2 、 CH_4 、 CO 、 VOC 、 O_2 :

1 mg/L; 温度: 1/10 B, 湿度: $\pm 0.5\text{ \%RH}$ 。

2.2 检测原理

本文选择了红外气体传感器、电化学传感器和光离子气体传感器对 CH_4 、 SO_2 、 Cl_2 、 CO 、 O_2 、 VOC 6 种气体进行检测,其中 CH_4 采用的是红外传感器检测,其原理是利用物质对红外电磁辐射具有选择性吸收的特性来对物质进行定性或定量分析的方法^[6]。当红外光通过气体时,气体分子吸收光能量,在相应的波长处就会产生光强的衰减,衰减程度与气体浓度大小有关。 SO_2 、 Cl_2 、 CO 、 O_2 采用的是电化学气体传感器检测,电化学传感器通过与被测气体发生氧化还原反应并产生与气体浓度成正比的电信号来工作。光离子化传感器测试原理待测气体吸收紫外灯发射的高于气体分子电离能的光子,被电离成正、负离子,在外加电场的作用下离子偏移形成微弱电流^[7-8]。

3 硬件电路设计

3.1 气体传感器采样电路设计

本文对光离子气体传感器进行电路设计介绍,光离子气体传感器是一种光电传感器,其电流信号易受到传感器内部和外部噪声的干扰,不能抑制噪声干扰会影响传感器的精确度和稳定性。由于 VOC 气体传感器的测量信号是一个微弱的电流信号,设计出可以稳定放大 pA、nA 级的调理电路,提高了其传感器的测试精度同时降低了噪声影响。本设计选择双运算放大器 LMC6082 芯片作为 I/V 转换放大电路的运放,该运放具有精确的双偏置电压、高电压增益,低输出阻抗。 VOC 调理电路如图 2 所示,一级放大电路是 I/V 转换电路,将 pA、nA 级电流放大到 mV 级的电压,其中放大电阻采用的是 T 型网络。二级放大电路是电压放大电路,调节传感器的测量精度和量程,减小阻容带来的噪声影响,最后采用二阶低通滤波电路,减小电路的整体噪声。

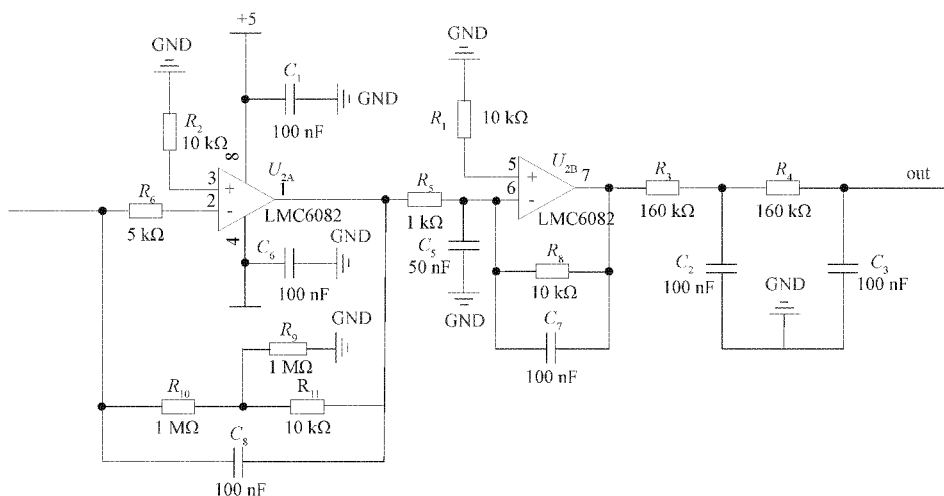


图2 光离子调理电路

3.2 温湿度信号采集

本设计采用了具有 I²C 总线接口,温湿度集于一体的数字式温湿度传感器 SHT35,并在同一芯片上与 12 位的 A/D 转换器以及串行接口电路实现连接^[9-10]。SHT35 提供二线数字串行接口 SCL 和 SDA,SCL 用于同步微控制器和传感器之间的通信,SDA 引脚用于与传感器之间来回传输数据。传感器由微处理器 STM32F103C8T6 驱动,其传感器的驱动时钟信号线 SCK 接 STM32 的 PB6 引脚;传感器的数据信号线接 STM32 的 PB7 引脚;传感器电源 VDD 接系统电源 3.3 V;传感器地线接于系统公共地。温湿度采集如图 3 所示。

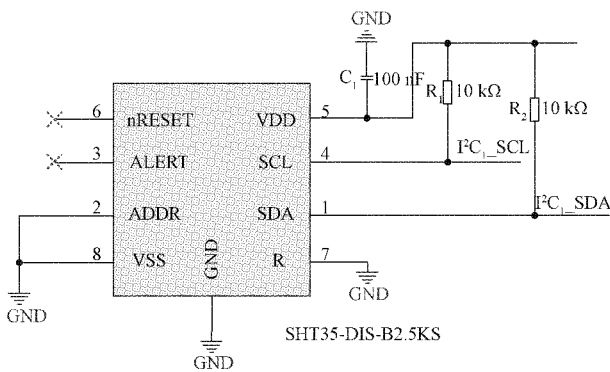


图 3 温湿度采集模块

4 软件设计

1)BP 神经网络算法

反向传播(BP)神经网络是一种按照误差逆向传播数据算法来训练的多层前馈神经网络^[11],由输入层、隐含层和输出层 3 部分构成。BP 神经网络的本质是求解目标结果最优化时所对应的网络权值,通过比较网络输出和期望输出之间的误差,构建相应的误差函数;通过不断修正调整相应的网络权值,并重新返回到输入层进行相应计算,直至网络的整体误差值减小到误差限内输出结果。BP 神经网络结构如图 4 所示,具体计算步骤如下。

(1)首先进行网络初始化,计算得出隐含层输出值 A_j 和输出层的输出值 B_k 。

$$A_j = f(\sum_{i=1}^n C_{ij}x_i - c_j), j = 1, 2, \dots, l \quad (1)$$

$$B_k = \sum_{j=1}^l A_j D_{jk} - d_k, k = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

其中,输入层和隐含层之间的权值为 C_{ij} ; 隐含层和输出层之间的权值 D_{jk} ; 隐含层阈值 c_j ; 输出层阈值 d_k ; n 为输入层的节点数; l 为隐含层的节点数; $l = \sqrt{n+m} + e$, e 为 0~10 之间的值,本文选取 e 为 2; m 为输出层节点数; $f(x)$ 为隐含层的激励函数,本文的激励函数为 $f(x) = 1/(1 + \exp(-x))$ 。

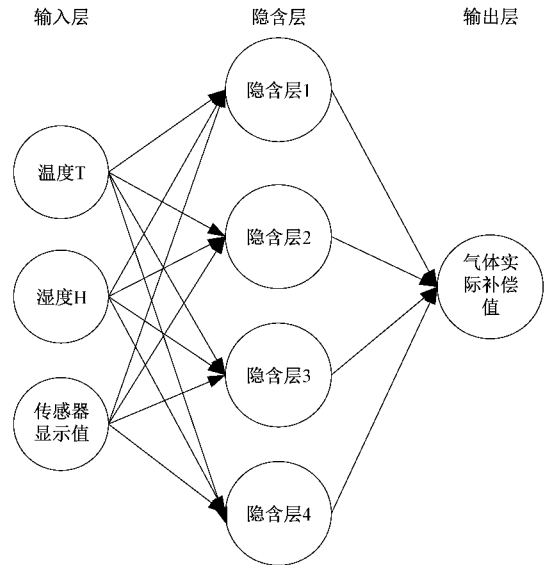


图 4 BP 神经网络结构

(2)计算预测值与实际值之间的误差 e_k 。

$$e_k = Y_k - T_k, k = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

其中, Y_k 为实际值。

(3)反向更新各层权值阈值 C'_{ij} 、 D'_{jk} 、 c'_j 、 d'_k , 得到补偿后的气体浓度值 T'_k 。

$$T'_k = \sum_{j=1}^l f(\sum_{i=1}^n C'_{ij}x_i - c'_j)D'_{jk} - d'_k \quad (4)$$

2)GPSO 混合算法优化 BP 神经网络

遗传算法(GA)是一种借鉴生物进化理论产生的自适应、随机的全局搜索算法,将生物进化过程中的自然选择和遗传变异引入到选择的空间从而得出最优解^[12]。粒子群算法(PSO)通过模拟鸟群觅食行为而发展起来的一种基于群体协作的随机搜索算法^[13]。它是随机初始化一群粒子,这群粒子为所求问题的一组解,该粒子的特征可以用速度、位置和适应度值来表示^[14]。由于 GA 算法和 PSO 算法各自有优点和不足,本文采用 GA 算法来弥补 PSO 的早熟现象,然后用改进的 GPSO 对 BP 神经网络的权值和阈值进行全局寻优,避免了在寻优过程中陷入局部极值、易早熟和收敛的现象。GPSO 算法不断更新空间内粒子的最优速度($gbest$)和位置($pbest$),该算法得到的全局最优解就是 BP 神经网络最优的权值与阈值。重新进行多次学习训练,使其输出的误差平方和达到最小。GPSO-BP 的优化算法流程如图 5 所示。其中粒子更新自己的速度和位置为:

$$v_{i+1} = \omega * v_i + c_1 r_1 (pbest_i - x_i) + c_2 r_2 (gbest_i - x_i) \quad (5)$$

$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1} \quad (6)$$

其中, ω 为惯性权重因子; c_1 和 c_2 为学习因子; r_1 和 r_2 为 0~1 之间的均匀随机数。

计算样本预测值与实际输出值的误差的绝对值平方

来构建 BP 神经网络的适应度函数^[15]。

$$f = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \|Y_k - T_k\|^2 \quad (7)$$

其中, f 为适应度函数; M 为训练样本本次数; Y_k 为改善后的神经网络预测值; T_k 为实际输出值, 其中 $M = m \times (n + 1) + m + 1$ 。

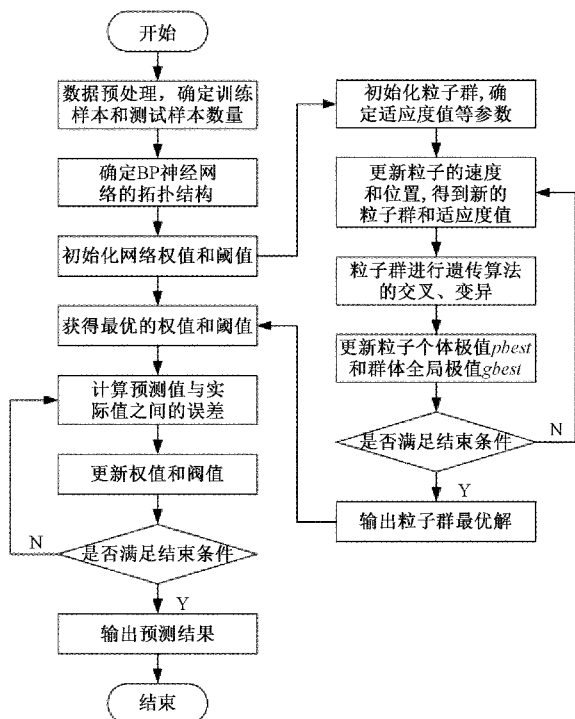


图 5 GPSO-BP 的优化算法流程

5 测试

5.1 测试系统搭建

本系统是在 KEIL5 开发环境, 包括建立工程、编程、通过 JTAG 接口进行 RAM 调试, 最终烧录至 FLASH 运行。软件编程协调各模块硬件正常运行, 首先对传感器进行信号的采集, 进入循环系统, 持续采集多种气体的浓度电压、环境温湿度、气压, 对多种气体的浓度电压进行温湿度补偿, 最后计算出气体浓度, 通过 USART 上传数据给上位机。实物如图 6 所示。

5.2 测试及分析

在标准大气压下, 相同的环境湿度 55%RH, 不同的温度, 对传感器测试仪分别通入 250 mg/L CO、150 mg/L SO₂、300 mg/L CH₄、90 mg/L VOC 和 5 mg/L Cl₂, 实验结果如图 7 所示。

本文选用 VOC 作为温湿度检测对象, 选择 30 °C、40 °C、50 °C 3 个温度为检测点, 30%RH、70%RH、80%RH 3 个湿度为检测点, 测得实验数据如图 8 所示。实测值为室温下温度 24 °C, 湿度 56%RH。

根据所测得数据得出气体传感器在高温高湿环境下

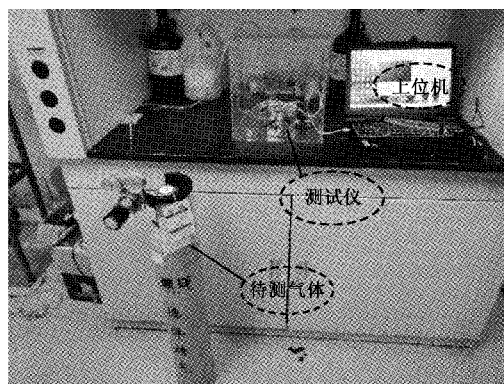


图 6 整体实物图

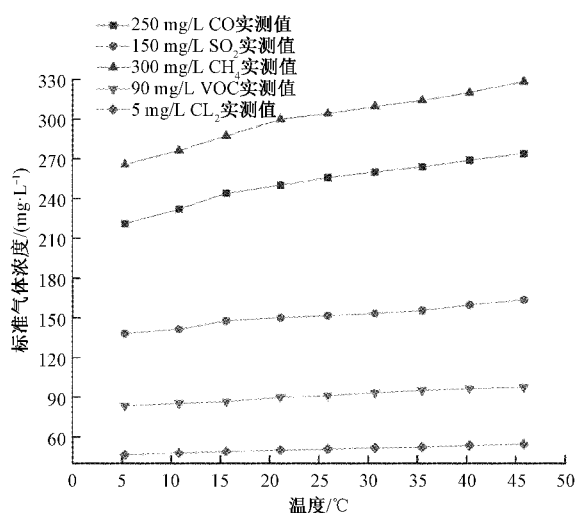


图 7 传感器所测浓度值

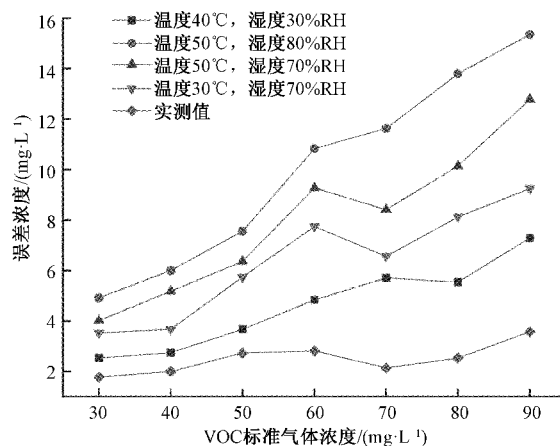


图 8 不同温湿度下 VOC 浓度测试

会有较严重的失真。在相同湿度下, 测量误差会随着温度的增加而增加。在相同温度下, 测量误差会随着湿度增加而增加。本文通过 GPSO-BP 算法对温度为 50 °C, 湿度为 85%RH 的各种气体实测值进行温湿度补偿。补偿结果如图 9 所示。

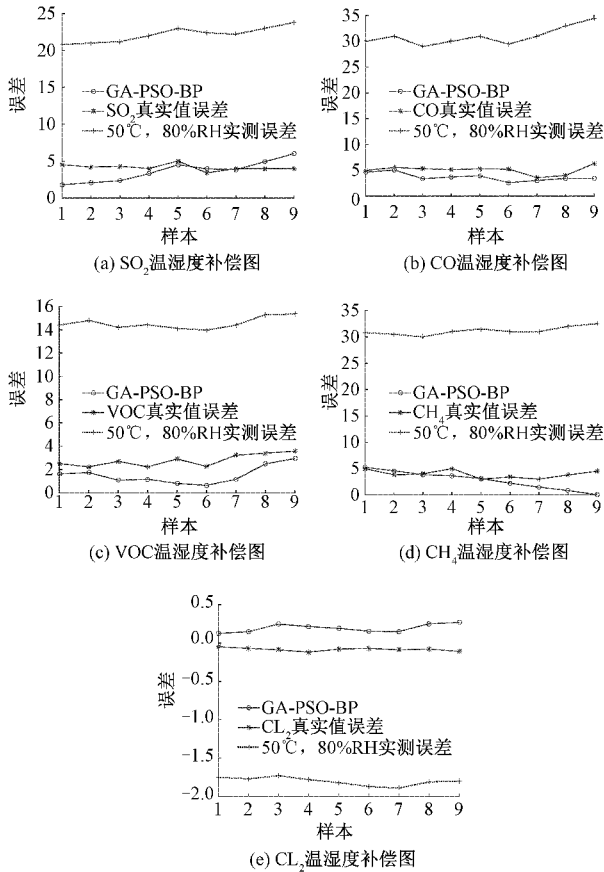


图 9 温湿度补偿仿真图

由测试结果可以得出 GPSO-BP 算法在不同温湿度环境下可以对气体传感器进行温湿度补偿,效果较好,准确度有了很大的提高。表 1 所示的 90 mg/L VOC 气体在湿度为 80%RH,温度为 50 °C,GPSO-BP 算法补偿后准确度提高到 2.30%,CL₂ 提高到 2.20%,SO₂ 提高到 2.35%,CO 提高到 2.12%,CH₄ 提高到 2.15%。

表 1 不同气体测量值 (mg/L)

序号	测量值 (室温)	80%RH, 温度 50 °C	补偿后 的值
5 mg/L CL ₂	4.93	2.87	4.89
90 mg/L VOC	91.73	108.34	92.07
150 mg/L CO	152.34	174.82	153.08
250 mg/L SO ₂	252.31	281.43	255.89
300 mg/L CH ₄	301.98	339.56	306.47

6 结 论

本文设计的三维微组装多气体传感器测试仪,将多个气体传感器集合在一起,解决了地震等自然灾害及遮蔽空间范围测量传感网络体积受限问题,具有小型化、多功能、准确度高的特点。本研究实现了对温度、湿度、气压和有

毒气体的检测,但是在高温高湿下会影响其性能,通过改进的 GPSO-BP 神经网络算法对多种气体进行了温湿度补偿,提高了气体传感器检测的准确度。但是存在多种气体交叉干扰的问题,需要进一步完善提高传感器的准确性。

参考文献

- [1] 柴寿臣,蔡春丽,张枫. 密闭环境多体传感器检测方法研究[J]. 仪表技术与传感器,2012(4):76-78.
- [2] 吴新忠,陈昌,耿柯,等. 基于 IFWA-BP 神经网络的线风速数据融合研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(5):16-23.
- [3] 彭基伟,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.
- [4] 朱恒军,郭赢. 基于温湿度补偿算法的汽车尾气检测仪设计[J]. 仪表技术与传感器,2017(2):47-50.
- [5] 徐顺,卢文科,左锋. 基于 PSO-BP 神经网络的光纤压力传感器温度补偿研究[J]. 仪表技术与传感器,2016(10):1-5,9.
- [6] 李成兵,毛熙皓. 基于 AABC-BP 算法的红外气体传感器温度补偿[J]. 传感技术学报,2018,31(10):1472-1477.
- [7] 刘若愚,胡泓. 一种 VOC 气体检测的光离子化传感器设计[J]. 仪表技术与传感器,2020(7):1-5.
- [8] 罗翠线,闫雯,孙永娇,等. 基于 Fe₂O₃@In₂O₃ 空心球的高灵敏度异丙醇气体传感器[J]. 仪器仪表学报,2021,42(7):58-65.
- [9] 金玲玲,王新君,孙威. 基于 STM32 的频率合成及其存储设计研究[J]. 国外电子测量技术,2020,39(5):115-121.
- [10] 陆荣鑑,李品,孙周. SHT10 传感器在温湿度监测系统中的应用[J]. 传感器与微系统,2012,31(9):136-138,145.
- [11] 程洋,李柏林,欧阳,等. 引入粒子生存值的 SPSO-BP 气体传感器补偿算法[J]. 传感器与微系统,2020,39(8):134-137.
- [12] 刘子骐,杨留方. 基于 BP 人工神经网络的气体传感器温度补偿[J]. 仪表技术与传感器,2017(4):10-12.
- [13] 杜鸿飞,谢光忠. 基于优化的 GA-BP 网络算法的混合气体识别[J]. 电子元件与材料,2019,38(12):69-79.
- [14] 唐朝国. 引入粒子群方差条件的 PSO 气体传感器温度补偿[J]. 电子元器件与信息技术,2020,4(1):152-154.
- [15] 毛琪波,余震虹,王相淳. 基于改进 PSO 算法的红外气体传感器温度补偿[J]. 红外技术,2016,38(6):499-504.

作者简介

李张倩,硕士研究生,主要研究方向为电路与系统。

E-mail: 1825831904@qq.com

张会新,博士,副教授,主要研究方向为动态测试技术与仪器。

E-mail: zhanghx@nuc.edu.cn