

文章编号:1002-2082(2018)03-0366-07

# 基于 RBF 神经网络气压补偿的非色散红外 SF<sub>6</sub> 气体传感器

裴 显<sup>1</sup>, 陈远鸣<sup>1</sup>, 卞晓阳<sup>1</sup>, 赵勇毅<sup>1</sup>, 赵正杰<sup>1</sup>, 常建华<sup>1,2</sup>

(1. 南京信息工程大学 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏南京 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, 江苏南京 210044)

**摘要:**非色散红外 SF<sub>6</sub> 气体传感器具有测量范围广、灵敏度高、抗干扰能力强等优点, 在电力系统中具有广泛的应用。在实际检测过程中, 环境气压的变化对气体传感器的检测精度有较大的影响, 提出利用 RBF 神经网络建立气体传感器气压补偿模型, 运用其泛化和非线性映射能力对环境气压波动引起的测量误差进行补偿。实验结果表明:采用气压补偿模型后的气体传感器在气体浓度 3 260 mg/m<sup>3</sup>~9 781 mg/m<sup>3</sup>, 气压 100 kPa~120 kPa 范围内, 最大测量误差由  $\pm 646 \text{ mg/m}^3$  降为  $\pm 52 \text{ mg/m}^3$ , 测量精度为  $\pm 0.53\% \text{ FS}$ 。该方法相比于拟合法和硬件电路补偿法具有更高的测量精度和稳定性, 降低了传感器的体积和成本。

**关键词:**非色散红外; 气体传感器; RBF 神经网络; 气压补偿

中图分类号:TN215

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201839.0302004

## Non-dispersion infrared SF<sub>6</sub> gas sensor with air pressure compensation based on RBF neural network

Pei Yu<sup>1</sup>, Chen Yuanming<sup>1</sup>, Bian Xiaoyang<sup>1</sup>, Zhao Yongyi<sup>1</sup>, Zhao Zhengjie<sup>1</sup>, Chang Jianhua<sup>1,2</sup>

(1. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, 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)

**Abstract:** Non-dispersive infrared SF<sub>6</sub> gas sensor has many advantages, such as wide measurement range, high sensitivity, strong anti-interference ability and so on. It has been widely used in power system. However, in the actual detection process, the change of the ambient pressure has a great impact on the detection accuracy of the gas sensor. Aiming at this, an air pressure compensation model of gas sensor was established by using radial basis function (RBF) neural network, and its measurement error is compensated by the good generalization and non-linear mapping ability. The experimental results show that when the designed air pressure compensation model of gas sensor is in the gas concentration of 3 260 mg/m<sup>3</sup>~9 781 mg/m<sup>3</sup>, and the air pressure is in the range of 100 kPa~120 kPa, the maximum measurement error is reduced from  $\pm 646 \text{ mg/m}^3$  to  $\pm 52 \text{ mg/m}^3$ , the measurement accuracy is  $\pm 0.53\% \text{ FS}$ . Compared with the empirical formula method and the constant air pressure compensation, this method has higher measurement accuracy and stability, and reduces the volume and cost of the sensor.

收稿日期:2017-08-06; 修回日期:2017-11-22

基金项目:国家自然科学基金(11374161);江苏省重点研发计划(BE2016756);江苏高校优势学科Ⅱ期建设工程、江苏省高校品牌专业建设工程资助项目;国家级大学生实践创新训练计划项目(201610300030;201710300015Z)

作者简介:裴显(1990—),男,江苏南通人,南京信息工程大学本科生,主要从事光电传感与应用技术方面的研究。

E-mail:384115079@qq.com

**Key words:** non-dispersive infrared; gas sensor; RBF neural network; air pressure compensation

## 引言

六氟化硫(SF<sub>6</sub>)气体以优异的化学稳定性以及良好的绝缘和灭弧性能,使其成为继空气和绝缘油之后理想的绝缘和灭弧介质,广泛地应用在断路器、变压器等高压电力设备中,有效减小了设备的体积及故障率<sup>[1]</sup>。然而,在高压电力设备运行过程中,SF<sub>6</sub>气体在高温电弧、火花放电等作用下易发生分解反应,生成多种有毒、有害物质,对电力设备的金属材料有腐蚀作用,会加速其绝缘劣化过程,降低绝缘强度,影响设备的电气性能,严重时甚至会危及电力维护人员的生命安全<sup>[2]</sup>。因此,准确、快速、方便地对SF<sub>6</sub>气体浓度进行实时测量,有利于维护电力设备安全运行,保障操作人员生命安全。

当前,针对SF<sub>6</sub>气体浓度进行检测的手段主要有电子捕获法、激光成像法、高压负电晕法、电化学法、紫外电离法及非色散红外吸收法等<sup>[3-5]</sup>。其中,基于红外原理的非色散红外气体检测技术利用SF<sub>6</sub>气体分子在红外波段10.55 μm处的特征吸收峰,结合朗伯-比尔定律实现SF<sub>6</sub>气体浓度的定量检测,该技术具有使用寿命长、稳定性好、检测精度高、检测速度快等优势。然而,非色散红外SF<sub>6</sub>气体传感器在实际使用过程中,其检测精度易受周围环境气压的影响,导致测量精度下降。目前,为了消除环境气压波动对非色散红外SF<sub>6</sub>气体传感器造成的影响,主要采用如下2种补偿方案:一是拟合公式法,即采用最小二乘迭代方法确定拟合公式的相关系数,建立数学公式模型,实现对SF<sub>6</sub>气体传感器的气压补偿。但是,此方法是在数据采集后利用系数标定的方法进行气压补偿,计算过程繁杂、使用局限性大;二是恒压补偿法,即采用硬件电路模块使检测环境气压保持动态平衡,消除气压变化引起的气体传感器测量误差,但是此方法是在系统中添加了硬件电路,不仅增加了功耗和制造成本,而且降低了设备的可靠性。

本文提出利用非线性映射关系好、泛化能力强、通用性高的径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络对非色散型SF<sub>6</sub>气体传感器进行气压补偿,减小了环境气压波动较大情况下的气体传感器测量误差,降低了检测设备的制造成本

和后期维护成本,有利于缩减传感器的体积<sup>[6]</sup>。

## 1 基本原理

### 1.1 非色散红外检测原理

大量非对称双原子和多原子气体分子的振、转谱线位于红外波段,当不同波长的红外辐射穿过待测气体介质时,气体分子将对特定波段的能量进行选择性吸收,若该能量恰好等于该气体分子的2个能级之差时,则会引发相应的能级跃迁,并在特征谱上出现相对应的吸收峰<sup>[7-9]</sup>。查阅 HITRAN 数据库可知,SF<sub>6</sub>气体在波数947 cm<sup>-1</sup>(对应波长10.55 μm)处具有强烈的吸收性,其吸收谱线如图1所示。

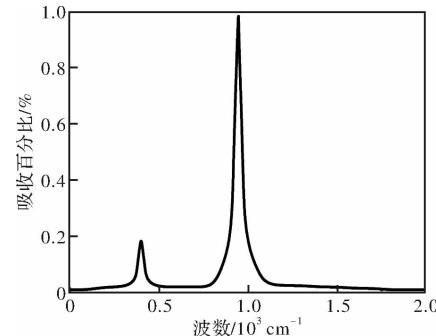


图1 SF<sub>6</sub>气体吸收光谱

Fig. 1 SF<sub>6</sub> gas absorption spectrum

### 1.2 朗伯-比尔定律

基于红外光谱吸收法的气体检测模型示意图如图2所示。当一束波长为λ、初始光强为I<sub>in</sub>的平行红外光线通过待测气体介质时,气体分子与红外光相互作用造成红外光光强衰减为I<sub>out</sub>,且光强衰减量遵循朗伯-比尔吸收定律(Lambert-Beer law)<sup>[10]</sup>,其表达式为

$$I_{\text{out}}(\lambda) = I_{\text{in}}(\lambda) e^{-\mu CL} \quad (1)$$

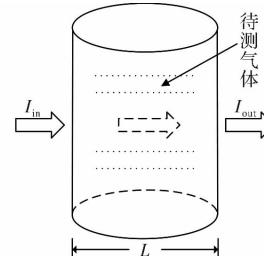


图2 气体检测模型示意图

Fig. 2 Gas detection model diagram

分析(1)式可知,当L为定值,摩尔吸光系数μ为常量时,通过测量红外光的入射强度与出射强度间的关系,间接计算出待测气体的浓度C。

## 2 气体传感器系统设计

### 2.1 SF<sub>6</sub> 气体传感器光路设计

气体传感器的性能与采用的光路结构密切相关,它直接影响传感器的测量精度<sup>[11]</sup>。为此,本文采用的光路结构为单气室双波长,其示意图如图 3 所示。当宽光谱红外光源发射的红外辐射通过分析气室内待测 SF<sub>6</sub> 气体后,分别经过通光中心波长为  $\lambda_1 = 3.95 \mu\text{m}$  的参比滤光片和通光中心波  $\lambda_2 = 10.55 \mu\text{m}$  的测量滤光片滤光,由双元热释电探测器(PYS3228TC/G7.4/G20)进行接收和分析。SF<sub>6</sub> 气体对波长为  $I(\lambda_1)$  的红外辐射无吸收作用,其输出电信号的强度不携带 SF<sub>6</sub> 气体浓度信息。SF<sub>6</sub> 气体对波长为  $I(\lambda_2)$  的红外辐射具有强烈的吸收,其输出电信号的强度与 SF<sub>6</sub> 气体浓度紧密相关。

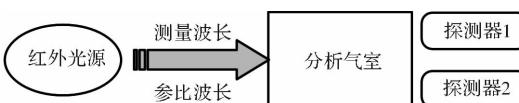


图 3 光路设计

Fig. 3 Light path design

由于测量光路与参比光路处于同一分析气室、同一检测环境中,因此参比光路的引入能够在一定程度上减少光源抖动、光源发散、分析气室内壁粗糙等问题引起的测量误差,提高气体传感器测量结果的精度和稳定性<sup>[12-14]</sup>。

### 2.2 差分检测模型

本文采用的单光路双波长光路结构如图 4 所示,红外宽光谱光源发出波长为  $\lambda$  的红外光,其初始强度为  $I_0(\lambda)$ ,经过 2 个光通道以及一定距离的传输后,光谱的强度和结构会由于气体分子的吸收而发生相应的改变,其强度改变为  $I_{\text{out}}(\lambda)$ 。本文采取 2 种波长的光路通过待测 SF<sub>6</sub> 气体,其中  $\lambda_1$  为测量光路波长,  $\lambda_2$  为参比光路波长。2 种不同波长的红外光通过 SF<sub>6</sub> 气体时,输出光强分别为

$$I_{\text{out}}(\lambda_1) = I_{\text{in}}(\lambda_1) \exp[-\mu(\lambda_1) C_{\text{SF}_6} L] \quad (2)$$

$$I_{\text{out}}(\lambda_2) = I_{\text{in}}(\lambda_2) \exp[-\mu(\lambda_2) C_{\text{SF}_6} L] \quad (3)$$

在实际操作中,假设 2 种波长的红外光初始光强近似相等,即  $I_{\text{in}}(\lambda_1) \approx I_{\text{in}}(\lambda_2)$ 。此时,将两式相除,整理得待测 SF<sub>6</sub> 气体浓度的数学模型:

$$C_{\text{SF}_6} = \frac{1}{[\mu(\lambda_2) - \mu(\lambda_1)]L} \ln \frac{I_{\text{out}}(\lambda_1)}{I_{\text{out}}(\lambda_2)} \quad (4)$$

分析(4)式可知,差分检测技术能够具备消除光源和光路不稳定等干扰因素的能力,提高传感器的

检测精度。

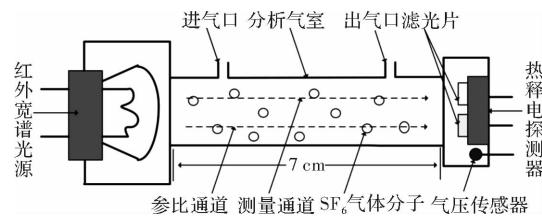


图 4 差分检测模型

Fig. 4 Differential detection model

### 2.3 RBF 神经网络气压补偿模型

非色散红外 SF<sub>6</sub> 气体传感器的测量精度受环境气压的影响主要体现在以下 2 个方面:首先,理想气体状态方程:

$$pv=nRT \quad (5)$$

式中: $P$  为理想气体的压强; $V$  为理想气体的体积; $n$  为理想气体的物质的量; $R$  为理想气体常数; $T$  为理想气体的绝对温度。待测 SF<sub>6</sub> 气体分子物质的量会随着  $P$  的改变而出现变化,从而造成气体浓度测量的失准;另一方面,气压的波动会造成红外光源发光波长覆盖范围的改变,影响光源发光强度,造成传感器测量误差。

我们采用非线性映射能力强、泛化能力好的 RBF 神经网络对气体传感器采集数据进行气压补偿,其原理是从人脑的组织结构和运行机制出发,运用大量相互连接的处理单元来模拟和探索人脑结构及功能的智能技术<sup>[15]</sup>。RBF 算法由 3 部分组成:第 1 层为输入层,第 2 层为隐含层,其节点数根据所描述问题的需要决定。第 3 层为输出层,输出向量为  $Y$ ,即为经过神经网络处理后的传感器预测值。

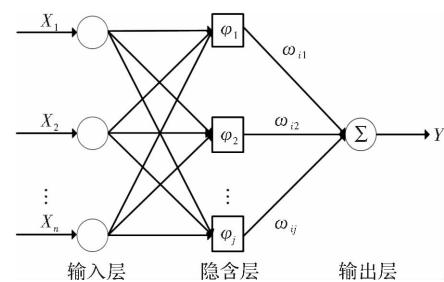


图 5 RBF 神经元模型结构

Fig. 5 RBF neuron model structure

选用高斯函数作为 RBF 神经网络的激励函数,表达式为

$$R(\|dist\|) = \exp\left(-\frac{1}{2\delta^2} \|x_p - c_i\|^2\right) \quad (6)$$

式中: $\delta$  为高斯函数的方差; $x_p$  为神经网络输入样本; $c_i$  为网络隐含层结点的中心; $\|x_p - c_i\|$  为欧氏范数。采用正交最小二乘算法作为 RBF 神经网

络的训练算法,通过逐步增长法对网络隐含层的节点个数进行确定,隐含层节点由高斯激活函数构成。第  $j$  个节点的输出函数表示为

$$\varphi(j) = \exp\left(-\frac{1}{2\delta^2} \|x_p - c_i\|^2\right) \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

最终,将结构确定好的 RBF 神经网络模型应用于 SF<sub>6</sub> 气体传感器的气压补偿中。其数学函数表达式为

$$y_i = \sum_{j=1}^m \varphi(j) W_{ij} \quad (8)$$

式中: $m$  为隐含层节点数,通过实验法确定为 15; $W_{ij}$  为隐含层到输出层的连接权值。

### 3 实验及数据分析

#### 3.1 实验方案

实验采用电调制宽光谱红外光源(EMIRS200),其波段覆盖范围  $2 \mu\text{m} \sim 16 \mu\text{m}$ ,为了能够获得较高的辐射强度,采用 1Hz 低频脉冲进行调制。通过将高纯度 N<sub>2</sub> 与 SF<sub>6</sub> 气体混合,配比出实验所需浓度的 SF<sub>6</sub> 气体,并在恒定温度 25℃ 条件下对气体传感器进行零点和量程标定。输入样本数据对于建立 RBF 神经网络模型的结构起着至关重要的作用,样本数据的好坏直接影响 RBF 神经网络模型的预测准确性。因此,为了更好地调整网络参数以及防止畸形数据破坏原始实验数据的规律性,需要对样本数据预先进行归一化处理。

与此同时,为了提高 RBF 神经网络预测的准确性,需对实验中所获取的实验数据进行分类,将其中一部分作为 RBF 神经网络的训练数据,另一部分作为测试数据。RBF 神经网络气压补偿模型的各项参数由 MATLAB 神经网络工具箱进行设定,其中输入层设定为 3,输出层设定为 1,隐含层的个数从较低的情况下开始对 RBF 神经网络进行训练学习,通过不断增加隐含层个数,将不同向量组合所产生的误差平方和与给定误差标准进行比较,当两者误差满足精度设定要求时,即确立了 RBF 神经网络的最佳结构模型。图 6 为 RBF 神经网络训练误差曲线图。从图 6 中可以看出,当隐含层个数为 15 时,网络训练的期望误差达到  $10^{-6}$  量级,满足设定的检测精度。最终确定 RBF 神经网络模型为 3—15—1,即输入层节点为 3,隐含层节点为 15,输出层节点为 1,将此网络模型用于非色散型 SF<sub>6</sub> 气体传感器的气压补偿中。

为了能够直观地比较气体传感器气压补偿的效果,本文分别做了 2 组对比实验。在恒定温度 25℃ 条件下,第 1 组测量没有使用任何气压补偿方法,第 2 组测量使用 RBF 神经网络方法进行气压补偿。两组对比试验分别选取了 3 260 mg/m<sup>3</sup>、4 890 mg/m<sup>3</sup>、6 521 mg/m<sup>3</sup>、9 781 mg/m<sup>3</sup> 4 组不同浓度的 SF<sub>6</sub> 气体作为参考。非色散气体传感器气压补偿实验在恒压箱中进行,调节检测环境气压分别为 100 kPa、105 kPa、110 kPa、115 kPa、120 kPa 情况下依次向气体传感器分析气室内通入上述浓度的 SF<sub>6</sub> 气体,1 min 后待 SF<sub>6</sub> 气体完全充满分析气室后,对双元热释电探测器的测量通道电压以及参比通道的电压值进行记录,之后每隔 30 s 记录 1 次电压值,每个浓度点测量 10 次,并将各浓度点的测量均值作为最终测量值。在第 2 组测量中,RBF 神经网络的输入向量为  $X = (X_1, X_2, X_3)$ ,其中  $X_1$  为双通道热释电探测器测量通道的输出电压值, $X_2$  为双通道热释电探测器参比通道的输出电压值, $X_3$  为气压传感器的输出信号值。最终网络的输出层的输出值为经过 RBF 神经网络气压补偿后的传感器测量值。

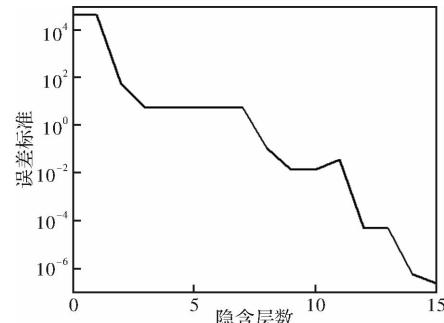


图 6 网络训练误差曲线

Fig. 6 Network training error curve

#### 3.2 实验结果分析

补偿前后的实验结果对比分析如图 7 所示。从图 7(a)中可以看出,在未对非色散 SF<sub>6</sub> 气体传感器进行气压补偿时,在气压 100 kPa 条件下的气体各个浓度点的测量值与真实值保持基本一致,当检测环境气压偏离 100 kPa 时开始逐渐产生测量误差,且测量误差随着气压差的增大而增大。当气体浓度为 9 781 mg/m<sup>3</sup> 时,在气压 100 kPa 条件下传感器测量误差为 -1.48%,当气压环境变为 120 kPa 时,传感器测量误差增大到 5.38%,说明在实际测量气体浓度时,基于非色散红外检测技术的 SF<sub>6</sub> 气体传感器检测精度易受检测环境气

压变化的影响,产生较大的测量误差,并且该现象在气体浓度值越大时表现的越明显。

从图 7(b)可以看出,经过 RBF 神经网络气压补偿后的气体浓度测量值与真实值的误差明显减小,在各浓度下获得的测试曲线近乎为一条直线,说明传感器具有较强的一致性,并且传感器在整个浓度范围内的测量误差不超过±65 mg/m<sup>3</sup>,说明经过气压补偿后的气体传感器测量值保持基本平稳状态,检测误差显著降低。对比图 7(a)和图 7(b)可以看出,当气体浓度为 9 781 mg/m<sup>3</sup>时,在气压 100 kPa 条件下传感器测量误差为 0.153%,当气压环境变为 120 kPa 时,传感器测量误差为 0.584%,表明采用 RBF 神经网络对气体传感器进行气压补偿取得了非常理想的效果。受实验条件限制,本文的输入样本数据仅为 20 组,若有足够多的样本数据,采用 RBF 神经网络对非色散型气体传感器进行气压补偿将会得到更高的测量精度。

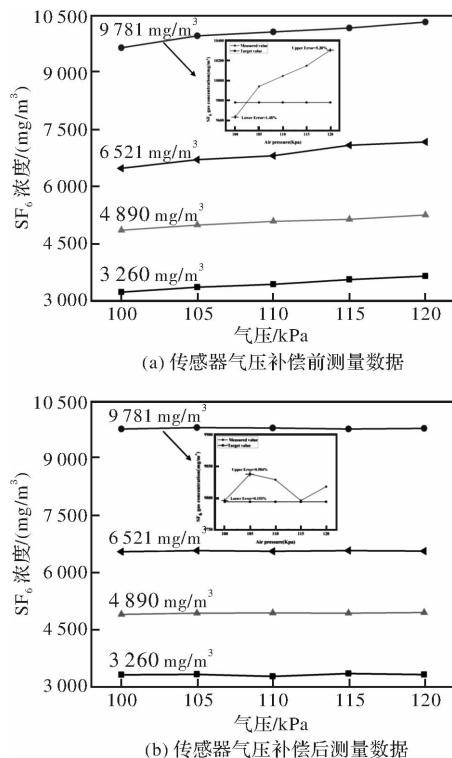


图 7 补偿前后的实验结果对比分析

Fig. 7 Comparison of compensation experimental results

在分析气体传感器气压补偿前后测量误差的基础上,我们对气体传感器的重复性进行了测试分析。实验中将 SF<sub>6</sub> 气体传感器放置于恒温 25℃、恒压 100 kPa 的实验箱中。利用浓度为 4 890 mg/m<sup>3</sup> 的 SF<sub>6</sub> 气体对气体传感器输出结果的重复性进行监测分析,表 1 给出了重复性测试结果。分析该表可知,

传感器的测量输出结果波动较小,浓度误差小于±65 mg/m<sup>3</sup>,表明该传感器具有较好的重复性。

表 1 重复性实验数据

Table 1 Data of repetitive experiment

次数	1	2	3	4	5
测量值/mg/m <sup>3</sup>	4 903	4 871	4 916	4 864	4 943

除此以外,我们还对气体传感器进行了稳定性测试。将气体传感器放置于恒压实验箱中(初始气压设定为 100 kPa)。利用 3 260 mg/m<sup>3</sup> 和 6 521 mg/m<sup>3</sup> 两种浓度的 SF<sub>6</sub> 气体分别对气体传感器输出结果的稳定性进行监测分析。图 8 给出了两种浓度 SF<sub>6</sub> 气体 150 min 的稳定性测试结果。通过分析图 8 可知,对于两种不同浓度的 SF<sub>6</sub> 气体,传感器的测量输出结果波动较小,误差均小于±417 mg/m<sup>3</sup>,表明该传感器具有较好的稳定性。

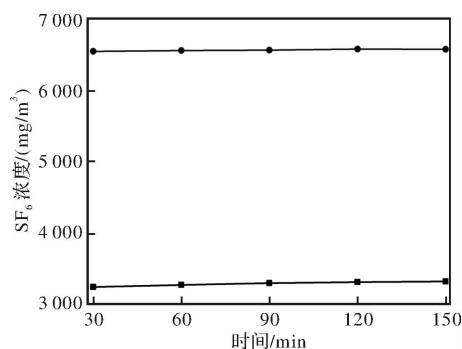


图 8 气体传感器稳定性测试

Fig. 8 Gas sensor stability test chart

在传感器的重复性和稳定性指标达到预期设计要求的基础上,我们测试了气体传感器的误差范围,本实验采用相对标准偏差作为性能指标,根据测试结果绘制的误差分布图如图 9 所示。从图 9 中可以看出,经过 RBF 神经网络气压补偿后的气体传感器系统的测量误差在±1% FS(气体传感器的检测误差与传感器满量程的百分比)以内,满足设计指标,达到了预期效果。

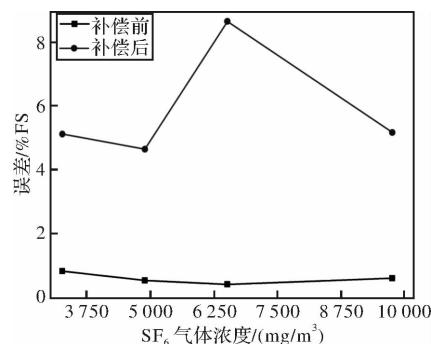


图 9 误差分布图

Fig. 9 Error distribution

## 4 结论

本文采用 RBF 神经网络方法对非色散型 SF<sub>6</sub> 气体传感器进行了气压补偿。由于 RBF 神经网络能够根据输入样本来解析系统内的规律性,完成泛化关系,具有预测精度高、学习能力强等特点,提高了传感器的测量可靠性及准确性。相较于硬件电路补偿方法,该补偿方法有利于传感器的小型化和低成本。实验结果表明,基于该补偿方法的气体传感器在气体浓度 3~260 mg/m<sup>3</sup>~9~781 mg/m<sup>3</sup>、气压 100 kPa~120 kPa 范围内,测量精度小于±0.53%FS,检测精度小于±52 mg/m<sup>3</sup>,说明使用该方法对气体传感器气压补偿,能够有效减小气压对气体传感器测量精度的影响。

### 参考文献:

- [1] 周艺环,叶日新,任明,等.基于电化学传感器的 SF<sub>6</sub> 分解气体检测技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37 (9): 2133-2139.  
ZHOU Yihuan, YE Rixin, RENG Ming, et al. Research on SF<sub>6</sub> gas decomposition detection method based on electrochemical sensors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 (9): 2133-2139.
- [2] CAI T, WANG X P, HUANG Y G, et al. Infrared spectrum analysis of SF<sub>6</sub> and SF<sub>6</sub> decomposition [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30 (11): 2967-2970.
- [3] TACHIKAWA H, YAMANO T. A full dimensional direct ab initio dynamics study of the electron capture by SF<sub>6</sub> [J]. Chemical Physics, 2001, 264(1):81-89.
- [4] KUHN K, PIGNANELLI E, SCHUTZE A. Versatile gas detection system based on combined NDIR transmission and photoacoustic absorption measurements [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(3):813-816.
- [5] ROBINJOUAN P, YOUSFI M. New breakdown electric field calculation for SF<sub>6</sub> high voltage circuit breaker applications [J]. Plasma Science and Technology, 2008, 9(6):690-694.
- [6] LLIYAS S, ELSHAFEI M, HABIB M, et al. RBF neural network inferential sensor for process emission monitoring [J]. Control Engineering Practice, 2013, 21: 962-970.
- [7] TAN Q, TANG L, YANG M, et al. Three-gas detection system with IR optical sensor based on NDIR technology [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 74:103-108.
- [8] 刘永平,王霞,李帅帅,等.基于红外技术的气体浓度检测方法研究 [J]. 光子学报, 2015, 44 (1): 189-195.  
LIU Yongping, WANG Xia, LI Shuaishuai, et al. Gas concentration detection method based on infrared absorption spectroscopy technology [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(1):189-195.
- [9] 张学典,王业生,伍雷,等.基于非色散红外 CO<sub>2</sub> 浓度测量的温度补偿研究[J]. 激光与红外, 2015, 45 (4): 412-414.  
ZHANG Xuedian, WANG Yesheng, WU Lei, et al. Research on temperature compensation for CO<sub>2</sub> concentration measurement based on NDIR [J]. Laser&Infrared, 2015, 45(4):412-414.
- [10] VINCENT T A, GARDNER J W. A low cost MEMS based NDIR system for the monitoring of carbon dioxide in breath analysis at ppm levels [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 236: 954-964.
- [11] 吴国忠,王迪,李栋,等.开放光路 TDLAS 气体检测系统光路接收组件设计[J]. 应用光学, 2017, 38(6): 877-883.  
WU Guozhong, WANG Di, LI Dong, et al. Optical receiver design of open-path TDLAS detectionsystem for gas [J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(6): 877-883.
- [12] GOBRECHT A, BENDOULA R, ROGER J M, et al. Combining linear polarization spectroscopy and the representative layer theory to measure the beer-lambert law absorbance of highly scattering materials [J]. Analytica Chimica Acta, 2015, 853 (1): 486-494.
- [13] 荆耀秋,江毅,肖尚辉,等.一种差分吸收式光纤瓦斯传感系统 [J]. 光子学报, 2014, 43(4): 0428002.  
JING Yaoqiu, JIANG Yi, XIAO Shanghui, et al. A differential absorption based optical fiber methane gas sensing system [J]. Acta Photonica Sinica , 2014, 43(4): 0428002.
- [14] YANG R, ER P V, WANG Z, et al. An RBF neural network approach towards precision motion system with selective sensor fusion [J]. Neurocomputing, 2016, 199:31-39.
- [15] 孙友文,刘文清,汪世美,等.非线性吸收对多组分气体分析的影响及其修正方法[J].光学学报, 2012, 32(9):302-309.  
SUN Youwen, LIU Wenqing, WANG Shimei, et al. Influence of nonlinear absorption on simultaneous multi-gas analysis and its modification method [J].

- Acta Optica Sinica, 2012, 32(9):302-309.
- [16] YASUDA T, YONEMURA S, TANI A. Comparison of the characteristics of small commercial NDIR CO<sub>2</sub> sensor models and development of a portable CO<sub>2</sub> [J]. Measurement Device Sensors, 2012, 12 (3):3641-3655.
- [17] SKLORZ A, JANSSEN S, LANG W. Detection limit improvement for NDIR ethylene gas detectors using passive approaches [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2012, 175(12):246-254.
- [18] 赵正杰,刘东旭,张记龙,等.电调制非分光红外瓦斯传感系统设计[J].光谱学与光谱分析,2011, 31(2): 570-573.  
ZHAO Zhengjie, LIU Dongxu, ZHANG Jilong, et al. Design of non-dispersed infrared (NDIR) methane gas sensor [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(2):570-573.
- [19] GUDER C, WAGNER W. A reference equation of state for the thermodynamic properties of sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) for temperatures from the melting line to 625 K and pressures up to 150 MPa [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2009, 38(1):33-94.
- [20] CALAZA C, SALLERAS M, SABATE N, et al. A MEMS-based thermal infrared emitter for an integrated NDIR spectrometer [J]. Microsystem Technologies Micro and Nanosystems Information Storage and Processing Systems, 2012, 18(7):1147-1157.
- [21] MOUMEN S, RAIBLE I, KRAUSS A, et al. Infrared investigation of CO<sub>2</sub> sorption by amine based materials for the development of a NDIR CO<sub>2</sub> sensor [J]. Sensors and Actuators B:Chemical, 2016, 236: 1083-1090.
- [22] 黄阳,王春雨,牛锦川,等.长焦红外光学系统焦距的高精度测量技术 [J].应用光学,2017, 38 (6), 995-998.  
HUANG Yang, WANG Chunyu, NIU Jingchuan, et al. High precision measurement of focal length for long focus infrared optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2017,38(6),995-998.