

doi: 10.3788/gzxb20164507.0723001

基于 RBF 神经网络的非色散红外 SF₆ 气体传感器

薛宇¹, 常建华^{1,2}, 徐曦¹

(1 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)

(2 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, 南京 210044)

摘 要: 利用波段为 2~20 μm 的电调制红外宽谱光源和中心波长为 3.95 μm 及 10.55 μm 的双通道热释电探测器, 采用单光源双波长光路结构设计了一种新型 SF₆ 气体传感器. 运用径向基函数神经网络对传感器在检测过程中因环境温度变化所带来的测量误差进行补偿, 结果表明: SF₆ 气体传感器在环境温度 10~35 °C、气体浓度 0~0.200% 范围内的检测准确度小于 ±1.5% FS, 相对标准偏差为 1.56%, 可以有效消除在测量气体浓度时环境温度变化引起的非线性影响. 与传统经验公式法和温度控制法相比, 该方法具有良好的测量准确度和稳定性, 且无需增加硬件温度补偿模块, 有利于传感器的小型化和低成本设计.

关键词: 红外物理; 光学传感器; 光电; RBF 神经网络; 六氟化硫; 红外吸收

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)07-0723001-6

Non-dispersive Infrared SF₆ Gas Sensor Based on RBF Neural Network

XUE Yu¹, CHANG Jian-hua^{1,2}, XU Xi¹

(1 Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

(2 Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The ro-vibrational spectra of the gas molecules is located in mid-infrared waveband, and then the information of the gas type and its concentration can be detected with a high precision based on the non-dispersive infrared technology. In this paper, a SF₆ gas sensor was designed with the optical structure of the double light path of a single light, by utilizing a 2~20 μm electrically modulated thermal radiation source and a dual wavelength pyroelectric detector with the central wavelengths of 3.95 μm and 10.55 μm. The method of a radial basis function neural network algorithm was proposed to compensate the detection error caused by the variation of the ambient temperature. The experimental results show that the detection accuracy of this sensor is less than ±1.5% FS within the ambient temperature range of 10 °C to 35 °C and the gas concentrations from 0 to 0.200%. The relative standard deviation is 1.56%. It can effectively eliminate the nonlinear effects caused by the environmental temperature changing in measuring the gas concentration. Compared with the traditional compensation methods with the empirical formula or the temperature control scheme, our method has a better measuring accuracy and stability. Moreover, by using this method, the gas sensor doesn't need any temperature control module, which is beneficial to miniaturize the device size and reduce its cost.

Key words: Infrared physics; Optical sensors; Photoelectricity; Radial basis function networks; Sulfur hexafluoride; Infrared absorption

OCIS Codes: 230.2090; 280.4788; 260.3060; 300.6340; 130.6010

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11374161)和江苏高校优势学科 II 期建设工程项目资助

第一作者: 薛宇 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电传感与应用技术. Email: xueyu_email@126.com

导 师: 常建华 (1976-), 男, 教授, 主要研究方向为光子学与光器件、光电传感与应用技术. Email: jianhuachang@nuist.edu.cn

收稿日期: 2015-12-30; 录用日期: 2016-03-24

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

SF₆ 气体是一种无色、无味的惰性气体,因其具有良好的绝缘性能和灭弧性能而被应用于电力设备中.但 SF₆ 气体在空气中易发生分解反应,产生多种低氟硫化物,这些低氟硫化物遇水和氧会进一步反应生成 HF 和 SO₂ 等有毒化合物,危及工作人员安全,影响大气环境,而且对设备内的金属材料有强腐蚀作用,加速其绝缘劣化.所以为确保正常生产、保障人员安全,对电力设备 SF₆ 气体的泄漏检测尤为重要^[1].

在种类繁多的 SF₆ 气体传感器中,非色散红外(Non-dispersive Infrared, NDIR)型气体传感器利用 SF₆ 气体在波长 10.55 μm 处具有强吸收峰的特性,基于朗伯-比尔吸收定律进行定量检测,具有选择性好、可靠稳定、结构简单、使用寿命长等诸多优点,是电力设备进行 SF₆ 气体泄漏检测的理想传感器^[2].然而,基于 NDIR 检测技术的 SF₆ 气体传感器在测量气体浓度时易受检测环境温度变化的影响,这种非线性影响是该分析方法中难以解决的主要问题之一.目前,消除检测环境温度变化影响的方法主要有两种:一是经验公式法,即采用最小二乘拟合进行迭代,确定经验公式的相关系数,从而补偿因温度变化所带来的测量误差,这种方法在数据采集后利用系数标定进行温度补偿,但计算量较大,且经验公式的使用具有一定的局限性;二是温度控制法,即采用温控模块使检测环境温度保持动态平衡,从而避免因温度变化而产生的测量误差,这种方法利用硬件电路使红外气体传感器处于相对恒温的检测环境,但温控模块增加了红外气体传感器的成本,且不利于小型化^[3-6].

本文提出将具有良好非线性映射关系以及泛化能力的径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络作为消除环境温度变化影响的方法应用于 NDIR 型 SF₆ 气体传感器,可以有效地进行温度补偿,从而减小在不同检测环境温度下的测量误差,且无需增加硬件温度补偿模块,有利于传感器的小型化和低成本设计.

1 基本原理

1.1 朗伯-比尔吸收定律

当红外辐射的能量与气体分子的两个能级之差一致时,气体分子会吸收该红外辐射并引起相应的振动能级或转动能级跃迁.因为不同气体分子对应的能级结构不同,所以不同气体对红外辐射的吸收具有频率选择性^[7].如图 1, SF₆ 气体在波数 947 cm⁻¹,即波长 10.55 μm 处拥有强烈的吸收性,而在其他波段基本没有吸收性.

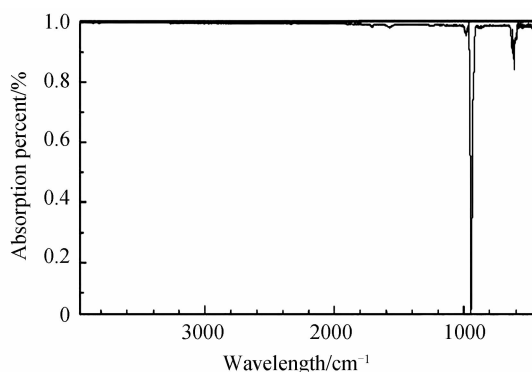


图 1 SF₆ 气体吸收光谱

Fig. 1 SF₆ infrared spectrum

气体对红外辐射的吸收遵循朗伯-比尔吸收定律^[8].朗伯-比尔吸收定律为

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-kLc) \quad (1)$$

式中, I 为红外辐射经气体吸收后的输出光强; I_0 为红外辐射的输入光强; k 为气体的摩尔吸光系数; L 为红外辐射在气体中的传输距离; c 为气体浓度.由式(1)可知,当传输距离 L 一定时,输出光强 I 只与气体浓度 c 有关,即可通过测量红外辐射的输入光强 I_0 和输出光强 I ,反演得到气体浓度 c .

1.2 RBF 神经网络基本原理

RBF 神经网络的基本思想是利用 RBF 作为神经元的传递函数,将低维输入层转换到高维空间内,再通过对隐含层的加权求和得到输出层^[9].RBF 神经网络能够逼近任意的非线性函数,可以处理系统内难以解析的规律性,具有良好的泛化能力.它是一个只有一个隐含层的三层前馈神经网络结构,其与前向神经网络相比,最大的不同在于隐含层的转换函数是局部响应函数,而前向神经网络的转换函数是全局响应函数^[10-11].对于每次输入,全局逼近网络上的每一个权值都要调整,导致网络的学习和训练速度很慢,而局部逼近网络只需要调整某个区域内少数几个权值^[12].正是由于这样的不同,RBF 神经网络所需要的训练时间比传统的前向 BP 神经网络要少,更加适用于 NDIR 型气体传感器的响应需求.RBF 神经网络的神经元模型结构如图 2.

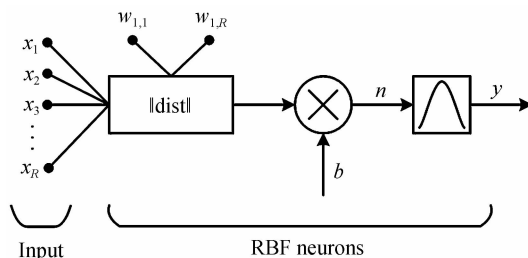


图 2 径向基神经元模型结构

Fig. 2 RBF neural model structure

RBF 神经网络传递函数的原型为

$$R(\| \text{dist} \|) = \exp(-\| \text{dist} \|^2) \quad (2)$$

式中, $\| \text{dist} \|$ 为输入向量和权值向量之间的欧氏距离,通过输入向量和加权矩阵的行向量的乘积得到.

2 系统设计

2.1 光路结构

本文采用单光源双波长光路结构,如图 3,电调制

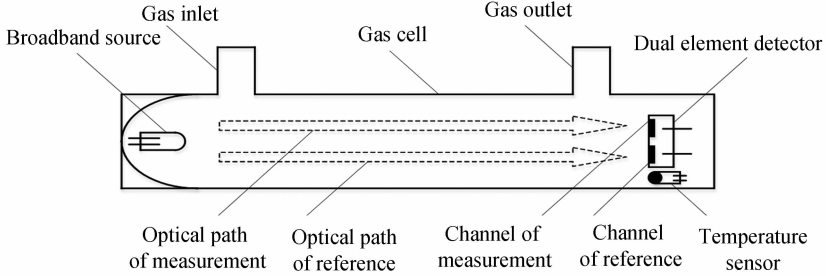


图 3 光路设计

Fig. 3 The design of optical path

是 SF₆ 气体对相应谱段红外辐射的吸收量,这种差分测量方法一定程度上消除了由于电调制红外宽谱光源波动问题所带来的干扰,提高了系统的灵敏度和可靠性^[13-14].

2.2 检测模型

根据朗伯-比尔定律可得双通道热释电探测器测量通道和参比通道的数学模型分别为

$$\frac{I_1}{I_{10}} = \exp(-k_{11} L c_1) \cdot \exp(-k_{12} L c_2) = \exp[-(k_{11} c_1 + k_{12} c_2) L] \quad (3)$$

$$\frac{I_2}{I_{20}} = \exp(-k_{21} L c_1) \cdot \exp(-k_{22} L c_2) = \exp[-(k_{21} c_1 + k_{22} c_2) L] \quad (4)$$

式中, I_1 为测量通道所接收的输出光强; I_{10} 为测量通道所接收的输入光强; k_{11} 为 SF₆ 气体在测量光路上的摩尔吸光系数; k_{12} 为背景气体在测量光路上的摩尔吸光系数; c_1 为 SF₆ 气体浓度; c_2 为背景气体浓度; I_2 为参比通道所接收的输出光强; I_{20} 为参比通道所接收的输入光强; k_{21} 为 SF₆ 气体在参比光路上的摩尔吸光系数; k_{22} 为背景气体在参比光路上的摩尔吸光系数.

由于 SF₆ 气体在参比光路中对红外辐射不产生吸收作用,即 $k_{21} \approx 0$; 背景气体在参比光路和测量光路中对红外辐射均不产生或只存在很小的吸收作用,即 $k_{12} \approx k_{22}$. 由式(4)及上述近似条件,可得

$$k_{22} c_2 \approx k_{12} c_2 = -\frac{1}{L} (\ln I_2 - \ln I_{20}) \quad (5)$$

由式(3)及式(5)可得 SF₆ 气体浓度 c_1 为

$$c_1 = -\frac{1}{k_{11} L} [(\ln I_1 - \ln I_2) + (\ln I_{20} - \ln I_{10})] \quad (6)$$

在实际测量中,输出光强 I_1 和 I_2 分别对应于测量

红外宽谱光源发出的红外辐射经待测气体吸收后,分别到达双通道热释电探测器的参比通道和测量通道. SF₆ 气体在参比光路中对红外辐射不产生吸收作用,只在测量光路中吸收相应谱段的红外辐射. 相应地,背景气体在参比光路和测量光路中对红外辐射均不产生或只存在很小的吸收作用.

由参比通道测得的红外辐射强度信息可推得测量环境的原始值,而参比通道和测量通道测量值之差,便

通道的输出电压 u_1 和参比通道的输出电压 u_2 ; 输入光强 I_{10} 和 I_{20} 分别对应于 $c_1 = 0$ 时,测量通道的输出电压 u_{10} 和参比通道的输出电压 u_{20} . 设与气室长度和气体摩尔吸光系数有关的常量 $A = 1/(k_{11} L)$, 则 SF₆ 气体浓度检测的数学模型为

$$c_1 = -A \ln \left(\frac{u_1}{u_2} \cdot \frac{u_{20}}{u_{10}} \right) \quad (7)$$

2.3 温度补偿模型

在进行 SF₆ 气体浓度测量时,检测环境温度的变化是影响 NDIR 型气体传感器测量准确度的一个重要因素. 在不同的环境温度下,NDIR 型气体传感器的双通道热释电探测器两个电极间会产生温度感应电流,混入测量信号中,从而导致温度漂移产生. 此外, SF₆ 气体在特征吸收峰处的摩尔吸光系数受环境温度的影响较大,即 k_{11} 会随着环境温度的变化而改变,导致测量误差产生^[15-19].

RBF 神经网络算法包含一个输入层、一个隐含层和一个输出层,本文将双通道热释电探测器测量通道和参比通道的输出电压之比以及温度传感器的输出电压作为输入层节点,将 SF₆ 气体浓度作为输出层节点,构成一个双输入单输出的网络结构;选取高斯函数作为 RBF 神经网络的激励函数,表示为

$$R(\| \text{dist} \|) = \exp \left(-\frac{1}{2\delta^2} \| x_p - c_i \|^2 \right) \quad (8)$$

式中, δ 为高斯函数的方差; x_p 为输入样本; c_i 为网络隐含层结点的中心; $\| x_p - c_i \|^2$ 为欧氏范数. 使用 RBF 神经网络的正归化网络模型,采用正交最小二乘算法作为网络的训练算法,通过逐步增长法确定隐含层的节点个数,进而得到整个网络的结构模型并应用于温度补偿中. 基于 RBF 神经网络温度补偿的数学模型为

$$y = \sum_{i=1}^2 w_i \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|x_p - c_i\|^2\right) \quad (9)$$

式中, w_i 为隐含层到输出层的连接权重。

3 实验结果及分析

3.1 实验方案

实验采用波段为 2~20 μm 的电调制红外宽谱光源, 调制频率为 1 Hz, 以及中心波长为 3.95 μm 和 10.55 μm 的双通道热释电探测器, 其中, 参比通道中心波长为 3.95 μm , 可以有效隔离背景气体对检测的影响; 测量通道中心波长为 10.55 μm , 是 SF_6 气体的特征吸收峰. 通过高纯度的 N_2 和 SF_6 气体来配置不同浓度的 SF_6 混合气体, 初始值为 0, 满量程值为 0.200%, 步进值为 0.010%, 在检测环境温度为 25 $^\circ\text{C}$ 的情况下进行零点标定和量程标定。

输入样本数据对于 RBF 神经网络模型的建立起着至关重要的作用, 为提高网络函数逼近的准确性, 本文测量选取了 88 组样本数据用于网络的学习和训练. 同时为避免异常量据覆盖了原始数据的规律性, 影响网络的学习和训练, 需要对样本数据进行预处理, 包括异常量据的辨识、缺失数据的补全和归一化处理。

在 RBF 神经网络建模时, 本文使用正交最小二乘算法作为网络的训练算法, 即将所有输入样本数据作为网络隐含层基函数的中心, 并设置各基宽值相同, 隐含层节点个数从相对较少的情况下开始训练学习, 逐步增加节点数量, 判断不同向量组合所产生的误差平方和, 直至满足给定的误差标准, 从而得到最佳的函数逼近, 确定网络隐含层的节点个数. 其中, 给定的误差标准为 0, 散布常量为 1.2. RBF 神经网络建立过程误差曲线如图 4, 在经过 88 次学习训练后, 即隐含层节点个数达到 88 时, 网络误差已达到 10^{-7} 量级, 满足 SF_6 气体传感器的检测准确度需求. 至此, 得到了一个具有 2-88-1 结构的 RBF 神经网络模型, 并将该网络模型应用于 NDIR 型 SF_6 气体传感器的温度补偿中。

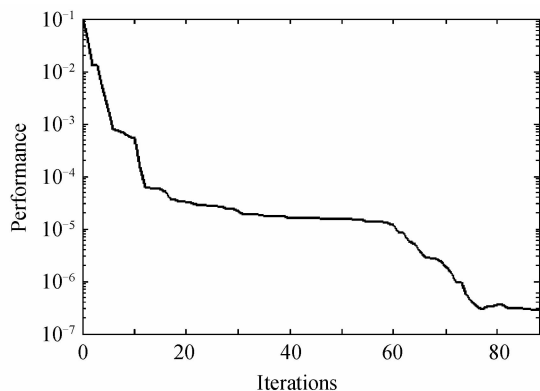


图 4 网络建立过程误差曲线

Fig. 4 The process of establishing the network error curve
为比较温度补偿的效果, 本文做了 3 组对比实验。

在标准大气压力(101 kPa)环境下, 第一组测量没有使用任何温度补偿方法, 第二组测量使用经验公式法进行温度补偿, 第三组测量使用 RBF 神经网络方法进行温度补偿。

3 组对比实验选取 6 个不同的 SF_6 混合气体浓度点作为参考, 分别为 0、0.050%、0.075%、0.100%、0.150%、0.200%。在检测环境温度分别为 10 $^\circ\text{C}$ 、15 $^\circ\text{C}$ 、20 $^\circ\text{C}$ 、25 $^\circ\text{C}$ 、30 $^\circ\text{C}$ 、35 $^\circ\text{C}$ 的情况下, 依次向气室内通入上述浓度的 SF_6 混合气体, 1 min 后记录双通道热释电探测器测量通道和参比通道的输出电压, 并计算其比值. 以后每隔 30s 记录一次测量值, 共 5 次, 取算术平均值作为最终的测量值. 在使用经验公式法进行温度补偿的第二组测量中, 本文采用的计算公式为

$$c = \frac{c_1}{m + k \cdot \Delta T} \quad (10)$$

式中, c 为温度补偿后的测量值; c_1 为温度补偿前的测量值; m, k 为经验公式的待定系数; ΔT 为检测环境温度与标定温度的差值. 该经验公式需分段对测量结果进行温度补偿, 选取 0.050% 浓度点作为低浓度段温度补偿的基准, 选取 0.150% 浓度点作为高浓度段温度补偿的基准。

在使用 RBF 神经网络方法进行温度补偿的第三组测量中, 将经过归一化处理后的探测器测量通道输出电压和参比通道输出电压之比 x_1 以及温度传感器输出电压 x_2 作为 RBF 神经网络输入层的输入向量 $\mathbf{X} = (x_1, x_2)$. 将该检测集通过已经建立好的网络模型预测处理后, 输出层的输出即为温度补偿后的测量值。

最后, 做单次测量的重复性实验分析, 将 NDIR 型 SF_6 气体传感器置于 20 $^\circ\text{C}$ 的检测环境温度中, 向气室内通入 0.060% 的 SF_6 混合气体, 1 min 后记录温度补偿后的测量值, 以后每隔 30 s 记录一次测量值, 共 6 次。

3.2 数据分析

从图 5(a)中可以得出, 在没有使用任何温度补偿方法的第一组测量中, 随着检测环境温度低于或者高于 25 $^\circ\text{C}$ 的标定温度时, NDIR 型 SF_6 气体传感器的测量值逐渐偏离真实值, 且温差越大, 测量误差越大. 说明了基于 NDIR 检测技术的 SF_6 气体传感器在测量气体浓度时易受检测环境温度变化的影响, 会产生较大的测量误差。

对比图 5(a)和(b)可以得出, 在使用经验公式法进行温度补偿的第二组测量中, NDIR 型 SF_6 气体传感器的测量值随检测环境温度变化而偏离真实值的幅度明显减小. 由图 6 可以得出, 在 0.050% 和 0.150% 两个基准浓度点的相对误差小于 $\pm 1.5\% \text{FS}$, 而在其它浓度点的相对误差明显增大, 在整个检测浓度范围内的测量准确度为 2% FS. 这是因为经验公式的系数是由

选取的基准浓度点标定而来,所以对于基准浓度点和非基准浓度点温度补偿的结果不同,而且计算公式并非对每一个系统都具有很好的适配性,这也是使用经验公式法进行温度补偿的劣势。

对比图 5(a)、(b)和(c)可以得出,在使用 RBF 神经网络方法进行温度补偿的第三组测量中,NDIR 型 SF₆ 气体传感器的测量值随检测环境温度变化而偏离真实值的幅度明显减小.由图 6 可以得出,在整个检测浓度范围内的测量准确度小于±1.5%FS,优于使用经验公式法进行温度补偿的第二组测量.对于 RBF 神经网络来说,其能够根据输入样本来解析系统内的规律性,完成泛化关系,所以随着输入样本数量的增加,最

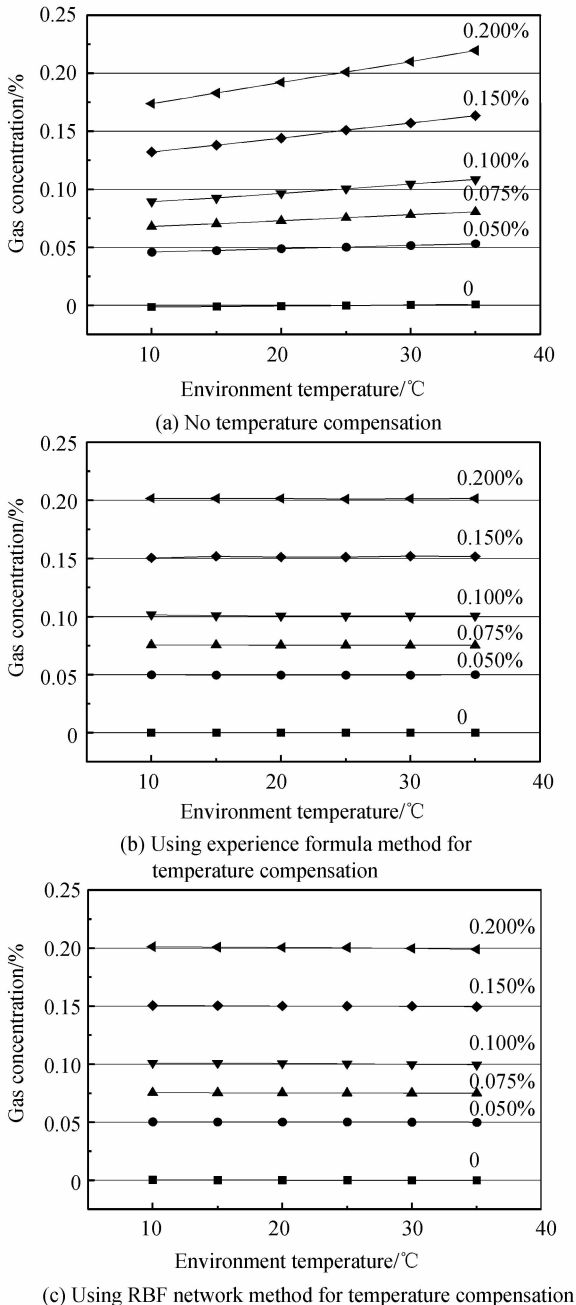


图 5 三组对比实验变化曲线

Fig. 5 The curves of three groups of experiments

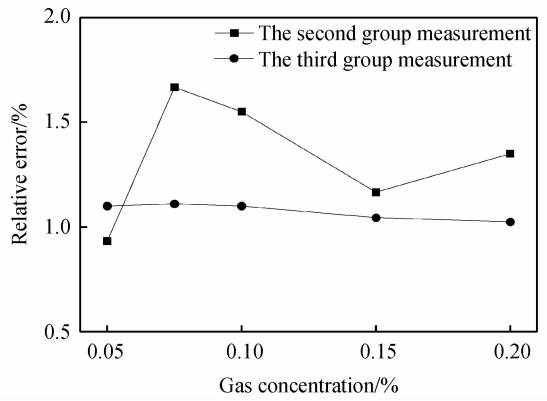


图 6 两种温度补偿方法的相对误差

Fig. 6 The relative error of two kinds of temperature compensation method

终得到的泛化关系越精确,测量准确度越高.此外,使用 RBF 神经网络方法进行温度补偿在整个检测浓度范围内的测量准确度较一致,解决了经验公式法在不同浓度点测量准确度相差较大的问题.这是因为在整个检测浓度范围内的温度补偿都是基于 RBF 神经网络得到的统一泛化关系,不同于经验公式法的分段温度补偿.当然,若要增加经验公式系数标定的基准浓度点个数,可以提高测量准确度,但计算量较大,增加了温度补偿的复杂性,这也是使用 RBF 神经网络进行温度补偿的优势所在。

由表 1 可以得出,相对标准偏差为 1.56%,表明了该 NDIR 型 SF₆ 气体传感器测量结果具有良好的稳定性。

表 1 重复性实验数据

Table 1 The data of repetitive experimental							
Time	1	2	3	4	5	6	Average
Value/%	0.0608	0.0606	0.0589	0.0590	0.0609	0.0607	0.06015

4 结论

本文设计并实现了一种采用单光源双波长光路结构的 NDIR 型 SF₆ 气体传感器,并将 RBF 神经网络作为消除环境温度变化影响的方法应用于该 NDIR 型 SF₆ 气体传感器中,因为 RBF 神经网络具有训练速度快、结构自适应能力强、输出与初始权值无关等特点,相比于经验公式法,简化了温度补偿的过程,且在整个检测浓度范围内稳定性更好.此外,该方法无需增加温度补偿模块硬件,避免了红外气体传感器体积的增加,利于传感器的小型化和低成本.实验结果表明,在环境温度 10~35℃、气体浓度 0~0.200% 范围内,基于 RBF 神经网络温度补偿的 NDIR 型 SF₆ 气体传感器的测量准确度小于±1.5%FS,相对标准偏差为 1.56%,证明了本方法的有效性和稳定性,符合《GB/T 12022-2014 工业六氟化硫》的相关标准。

参考文献

[1] GONDAL M A, BAIG M A, SHWEHDI M H. Laser sensor

- for detection of SF₆ leaks in high power insulated switch gear systems[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2002, **9**(3): 421-427.
- [2] CALAZA C, SALLERAS M, SABATE N, *et al.* A MEMS-based thermal infrared emitter for an integrated NDIR spectrometer[J]. *Microsystem Technologies*, 2012, **18**(7-8): 1147-1154.
- [3] JANE H, RALPH P T. Optical gas sensing: a review[J]. *Measurement Science & Technology*, 2012, **24**(1): 111-123.
- [4] YASUDA T, YONEMURA S, TANI A. Comparison of the characteristics of small commercial NDIR CO₂ sensor models and development of a portable CO₂ measurement device[J]. *Sensors*, 2012, **12**(3): 3641-3655.
- [5] HODGKINSON J, SMITH R, HO W O, *et al.* Non-dispersive infra-red (NDIR) measurement of carbon dioxide at 4.2 μm in a compact and optically efficient sensor[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2013, **186**: 580-588.
- [6] PETER W, FRANZ S, KARL M, *et al.* Near- and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2002, **37**(2-3): 101-114.
- [7] YU Xin, GAO Zong-li, SONG Nan, *et al.* Design and experiment of pocket infrared gas detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 58-63.
于鑫, 高宗丽, 宋楠, 等. 袖珍式红外瓦斯检测仪的设计与实验[J]. *光子学报*, 2014, **43**(1): 58-63.
- [8] ZHANG Y, GAO W, SONG Z, *et al.* Design of a novel gas sensor structure based on mid-infrared absorption spectrum [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2010, **147**(1): 5-9.
- [9] 韩力群. 人工神经网络理论、设计及应用[M]. 化学工业出版社, 2011.
- [10] WANG Hai-rong, ZHANG Wei-you, LIU Dong, *et al.* Back propagation neural network model for temperature and humidity compensation of a non-dispersive infrared methane sensor[J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2013, **41**(6): 608-616.
- [11] 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): 934-940.
- [12] QIAO Jun-fei, HAN Hong-jia. Optimal structure design for RBFNN structure [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(6): 865-872.
乔俊飞, 韩红佳. RBF神经网络的结构动态优化设计[J]. *自动化学报*, 2010, **36**(6): 865-872.
- [13] LIU Yong-ping, WANG Xia, LI Shuai-shuai, *et al.* Gas concentration detection method based on infrared absorption spectroscopy technology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(1): 011202.
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): 011202.
- [14] JING Yao-qiu, JIANG Yi, XIAO Shang-hui, *et al.* A differential absorption based optical fiber methane gas sensing system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4): 0428002.
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.
- [15] ZHANG Xue-dian, WANG Ye-sheng, WU Lei, *et al.* Research on temperature compensation for CO₂ concentration measurement based on NDIR [J]. *Laser & Infrared*, 2015, **45**(4): 412-415.
张学典, 王业生, 伍雷, 等. 基于非色散红外 CO₂ 浓度测量的温度补偿研究[J]. *激光与红外*, 2015, **45**(4): 412-415.
- [16] ZHANG W, TAN Q, LIU J, *et al.* Two-channel IR gas sensor with two detectors based on LiTaO₃ single-crystal wafer [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, **42**(8): 1223-1228.
- [17] PARK J, YI S. Temperature compensated NDIR CH₄ gas sensor with focused beam structure [J]. *Procedia Engineering*, 2010, **5**(3): 1248-1251.
- [18] TAN Q, ZHANG W, XUE C, *et al.* Design of mini-multi-gas monitoring system based on IR absorption [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, **40**(5): 703-710.
- [19] CAO Pei-Jiang, PENG Shuang-jiao, HAN Shun, *et al.* Gas-sensitive property of nano/micro-structured ZnO sensors on Ethanol [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(4): 460-464.
曹培江, 彭双娇, 韩舜, 等. ZnO 纳米/微米结构传感器对乙醇气敏性研究[J]. *发光学报* 2014, **35**(4): 460-464.