

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513975

# 微波氨气传感器频率漂移温湿度补偿方法\*

时国龙<sup>1</sup>, 胡国平<sup>1</sup>, 何怡刚<sup>2</sup>, 孟凡利<sup>3</sup>

(1. 安徽农业大学信息与人工智能学院 合肥 230036; 2. 武汉大学电气与自动化学院 武汉 430072;  
3. 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)

**摘要:** 畜禽养殖、农产品品质检测以及工业环境等重点行业对有害气体的高精度检测提出了迫切需求。然而,室内环境中温湿度的波动会导致气体传感器出现频率漂移现象,进而影响气体检测精度。针对此类问题,通过电磁仿真分析微带谐振器电磁损耗特性,确定气敏材料最佳涂覆位置,进而提升微波传感器对氨气响应灵敏度,进一步分析微波传感器辐射增益与氨气浓度之间的相关性,结合无线功率传输模型,构建了无线氨气检测系统。基于射频识别检测原理,搭建氨气测试系统,开展了不同温湿度条件下传感器测试实验,分析了传感器输出性能。引入反向传输神经网络温湿度补偿算法,并结合皮尔森相关性分析,对不同温湿度条件下传感器的频率漂移进行分析与补偿校正。试验结果表明,温湿度波动对微波氨气传感器频率漂移具有显著影响,补偿后频率漂移幅度减少了14 MHz,误差浓度低至 $6 \times 10^{-8}$ ,相对误差仅为2%,气体检测精度提升了31.11%。相较于基于反向传输神经网络温度补偿模型和支持向量机温湿度补偿模型,具有更好的补偿效果。综上所述,该研究有效提升了微波氨气传感器在复杂温湿度环境中的检测精度,为高精度有害气体检测提供了更有效的测量支撑。

**关键词:** 微波氨气传感器; 频率漂移; 温湿度频率补偿; 射频识别

中图分类号: TP216.1 TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510. 8040

## A temperature and humidity compensation method for microwave ammonia gas sensors experiencing frequency drift

Shi Guolong<sup>1</sup>, Hu Guoping<sup>1</sup>, He Yigang<sup>2</sup>, Meng Fanli<sup>3</sup>

(1. School of Information and Artificial Intelligence, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;  
2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;  
3. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** High-precision detection of harmful gases is urgently required in key sectors, such as livestock farming, agricultural product quality monitoring, and industrial environmental management. However, fluctuations in indoor ambient temperature and humidity can lead to frequency drift in gas sensors, thereby affecting detection accuracy. To address this issue, electromagnetic simulations are conducted to analyze the electromagnetic loss characteristics of the microstrip resonator, thereby identifying the optimal coating position for the gas-sensitive material and enhancing the microwave sensor's sensitivity to ammonia. Furthermore, the correlation between the sensor's radiation gain and ammonia concentration. A wireless ammonia detection system based on a wireless power transmission model is constructed. By utilizing the detection principles of radio frequency identification, an experimental platform is developed to test sensor performance under various temperature and humidity conditions. The back propagation (BP) neural network temperature-humidity compensation algorithm is introduced to the model, analyze, and correct the frequency drift caused by environmental variations, combined with Pearson correlation analysis. Experimental results indicate that temperature and humidity significantly affect the microwave ammonia sensor's frequency stability. After compensation, the frequency drift amplitude is reduced by 14 MHz, the concentration error is decreased to  $0.06 \times 10^{-6}$ , and the relative error is limited to 2%, resulting in a 31.11% improvement in gas detection accuracy. Compared with the temperature compensation model of the BP network or the temperature-humidity compensation

收稿日期: 2025-04-25 Received Date: 2025-04-25

\* 基金项目: 国家自然科学基金(62303018)、合肥市自然科学基金(HZR2413)项目资助

model of the support vector machine, the proposed method demonstrates superior performance. In conclusion, this research effectively enhances the detection accuracy of microwave ammonia gas sensors under complex temperature and humidity environmental conditions. It provides a more robust technical foundation for high-precision harmful gas monitoring.

**Keywords:** microwave ammonia gas sensor; frequency drift; temperature and humidity frequency compensation; radio frequency identification

## 0 引言

氨气作为一种常见的化学挥发物,在环境质量评估和食品安全溯源中具有重要应用价值<sup>[1]</sup>。其溶于呼吸道黏膜或眼结膜后可产生强烈的碱性刺激,增加畜禽对疾病的易感性,诱发呼吸道感染<sup>[2]</sup>;在工业环境中,高浓度氨气对作业人员构成健康威胁,易引发慢性炎症和职业性呼吸系统疾病<sup>[3]</sup>。因此,实现对氨气的高精度检测,已成为环境监测与健康安全领域亟需突破的关键技术之一<sup>[4]</sup>。

目前,国内外学者针对环境中氨气检测开展了相关研究,主要聚焦于通过高光谱技术<sup>[5]</sup>、阻抗电子鼻<sup>[6]</sup>、拉曼光谱<sup>[7]</sup>、光学传感器<sup>[8]</sup>以及气体传感器<sup>[9]</sup>等手段,且均在氨气检测过程中取得了显著进展,但其复杂的样品制备、高昂成本及专业操作需求限制了其在部分场景下的实际应用<sup>[10]</sup>。近年来,微波气体传感器因其高灵敏度、易制备、和无损检测在气体传感领域得到广泛研究<sup>[11-12]</sup>,微波气体传感器在 300 MHz~300 GHz 的频率范围内工作,材料特性的变化会改变电磁场和传感器特性<sup>[13]</sup>。当传感器加载有被测材料时,敏感材料会与被测材料吸附/反应,通过对透射或反射的频率响应变化进行记录,可以实时检测被测气体浓度。目前,微波气体传感器的敏感材料选择与传感性能优化方面取得了显著进展<sup>[14-15]</sup>,但不同环境因素对传感器性能的综合影响仍需进一步探讨<sup>[16]</sup>。

在气体检测领域,环境因素的干扰尤为显著,其中温湿度波动对检测结果的准确性和稳定性影响尤为关键<sup>[17-18]</sup>。因此,如何有效抑制温湿度波动因素的干扰,从而提高传感器的检测精度,成为亟待解决的问题。从气体传感器本身的角度来看,降低湿度影响的常见策略包括采用疏水层或防水封装,以减少水分子在敏感材料表面的吸附<sup>[19]</sup>。温度补偿方面,常见方法包括采用电桥电路或反馈电路进行校正<sup>[20]</sup>。然而,此类方法仍存在气体传感性能降低和传感器整体尺寸增加等问题。团队前期针对半导体气体传感器选择性差,识别率低等问题,引入了温度调制,采用矩形波作为周期加热电压进行温度调制,获得了在不同挥发性有机化合物气体、不同浓度下的动态响应数据,再结合机器学习算法对挥发性有机化合物气体的种类和浓度进行识别<sup>[21-22]</sup>。在气体预测精度方面,分析气体成分间复杂关联关系,构建时空耦合卷积神

经网络模型挖掘气体的时空特征,实现油中溶解气体时间序列预测,且预测拟合优度提高到 0.727<sup>[23]</sup>。结合团队前期研究工作,利用射频识别和皮尔森相关性分析技术从测试数据中挖掘温湿度对气体传感器频率漂移的影响规律,并结合反向传输神经网络(back propagation, BP)补偿算法进行频率校正,从而提升传感器在不同温湿度环境下的检测精度。

## 1 微波氨气传感器检测原理

### 1.1 传感器仿真分析

根据微扰理论,微波传感器敏感区域内的电磁场强度与材料的电磁特性变化密切相关,二者共同作用产生扰动响应,表现为  $S$  参数的谐振频率和幅度变化。因此,将增强的电磁场集中于敏感区域可能会显著提高微波传感器的灵敏度,改善气体检测性能<sup>[24]</sup>。本研究通过模拟和试验分析了电磁场敏感区域的分布及其与气体反应引起的介电损耗变化的相互作用。

通过电磁仿真分析,矩形互补开口谐振环(complementary split-ring resonator, CSRR)外环开口处的电场强度最强,而内环开口处则表现出最强的磁场强度。根据氨气吸附试验表明,当氨气( $\text{NH}_3$ )分子吸附到单壁碳纳米管(single walled carbon nanotubes, SWCNTs)表面时,氨气分子中的电子转移至 SWCNTs 表面,导致表面自由电子的空穴浓度减少,部分电子被束缚或释放,形成电子或空穴的陷阱。在外部电场的作用下,陷阱中的载流子被激发到导带或价带,转变为自由载流子。随着自由载流子的增加,电导损耗的比例上升,从而导致整体介电损耗增大。此外,陷阱态的产生和载流子的激发过程也会导致材料的极化响应变得更加频繁或不稳定,进一步加剧了介电损耗。如图 1(a)所示,当 SWCNTs 负载于电场最强区域时,谐振频率随着介质损耗角正切的增加而逐渐增大,介质损耗角正切值对传输系数( $S_{21}$ )的影响较为显著。如图 1(b)所示,当 SWCNTs 负载于磁场最强区域,谐振频率随磁损耗角正切的变化效果微弱, $S_{21}$  幅度仅略有波动。因此,在微带谐振器的强电场区域涂覆 SWCNTs 能够有效增强检测信号。

### 1.2 传感机理

SWCNTs 作为典型的 p 型半导体,具有较高的空穴传导特性,其空穴密度显著高于电子密度。如图 2 所示为微波氨气传感器的传感机理,当氨气分子吸附到

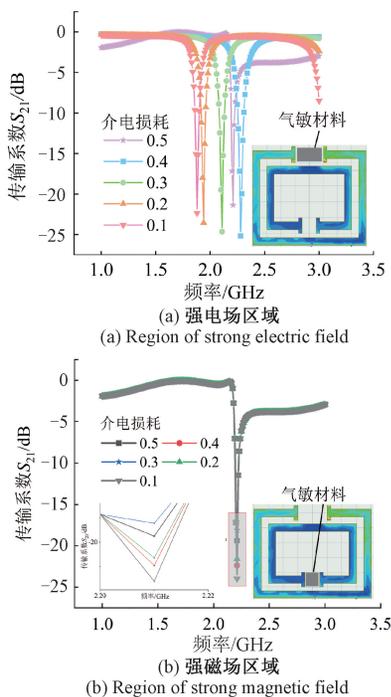


图 1 介电损耗仿真图

Fig. 1 Simulation diagram of dielectric loss

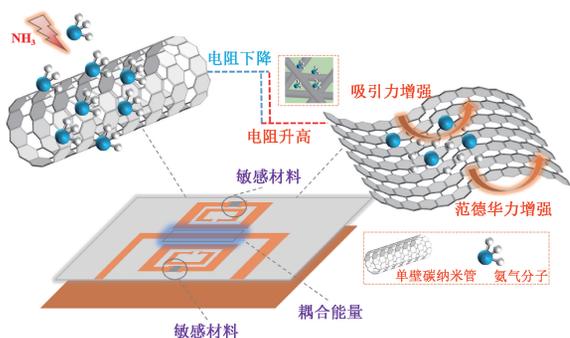


图 2 传感机理

Fig. 2 Sensing mechanism

SWCNTs 表面时,氨气分子中的电子转移至 SWCNTs 表面,导致其表面自由电子的空穴数量减少,进而影响电子结构和导电性能。

氨气分子具有极性,其中氮原子上的孤对电子通过偶极-偶极作用、偶极诱导偶极作用以及  $\pi-\pi$  相互作用与 SWCNTs 表面相互作用,增强了氨气分子与 SWCNTs 的吸附力,使氨气分子稳定地附着在 SWCNTs 表面。此过程中,范德华力和相互吸引力增强,加固了吸附层,使 SWCNTs 的费米能级上升,并扩大了价带与费米能级之间的能隙,形成空间电荷区域,导致导电性显著下降,电阻上升。随着自由电子的转移,SWCNTs 中的空穴浓度下降,使其导电性降低,进一步增加电阻。脱附过程中,

电子回流至氨气分子,导致电阻恢复。微波氨气传感器的阻抗匹配由微带谐振器与气敏材料之间协同作用。根据 SWCNTs 氨气吸附机理,氨气在吸附与脱附过程中引起 SWCNTs 电阻的变化,进而导致阻抗的变化(如式(1)所示)。如式(2)所示,阻抗变化导致微带谐振器与 SWCNTs 之间的阻抗失配,从而增加信号的反射系数,影响传感器的  $S_{21}$  参数值,尤其是在谐振频率和幅度方面。 $S_{21}$  值反映了微波信号的传输效率,且在氨气检测过程中, $S_{21}$  值的变化与 SWCNTs 吸附氨气的程度具有高度相关性。因此,通过精确监测  $S_{21}$  值的变化,可实现对氨气浓度的实时检测和定量分析。

$$Z_{in} = R + jX \tag{1}$$

$$S_{21} = \frac{2Z_0}{Z_{in} + Z_0} \tag{2}$$

其中, $R$  为电阻分量, $j$  为虚数单位, $X$  为电抗分量, $Z_{in}$  为传感器输入阻抗, $Z_0$  为特征阻抗。

## 2 传感性能分析

### 2.1 电气测量

如图 3 所示,实验系统由双通道气体混合装置和气体检测系统组成。

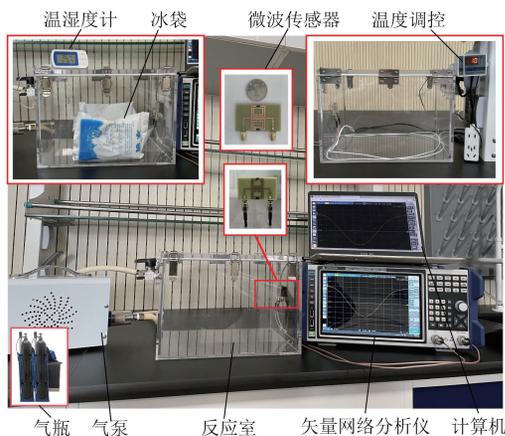


图 3 传感器电气测量

Fig. 3 Sensor electrical measurement

在配气程序的控制下,利用高精度质量流量控制器精确调节标准气体的流量,确保背景气体  $N_2$  与目标气体  $NH_3$  在气体测量室内充分混合,形成设定浓度的目标气体,气体浓度的计算如式(3)所示,气体反应室配备温度控制系统、加湿装置、温湿度计和真空泵。气体检测系统由微波传感器、矢量网络分析仪和计算机组成。温度控制系统能够将反应室温度调节至室温至  $70^{\circ}C$  之间的预设值,加湿装置则使反应室内相对湿度提高至  $80\%$ ,从而为评估传感器在不同温湿度条件下的氨气响应提供支持。

$$C = (V_1 \times C_b) / V \quad (3)$$

其中,  $C$  为目标气体浓度,  $C_b$  为混合装置中储存的试验气体浓度,  $V_1$ 、 $V$  分别为注入气体体积和反应室体积。

实验开始前, 将矢量网络分析仪进行短路、开路和负载校准, 设置测量范围, 连接好微波传感器以及其他装置。实验过程中, 首先将反应室中的干扰气体抽出, 然后将经过预校准的氨气混合物引入反应室, 并通过调节不同的温湿度条件, 测试传感器对不同氨气浓度的检测性能。每次实验结束后, 反应室内的残余气体被抽出, 并重新填充不同浓度的氨气混合物, 实验循环持续进行, 直至完成各种温湿度条件下氨气浓度的测量。

## 2.2 传感器输出分析

根据图3所示的电气测量, 将微波传感器放置于封闭反应室内, 研究了在浓度为  $5 \sim 20 \times 10^{-6}$  的氨气环境下  $S_{21}$  的变化, 氨气吸附传感器输出分析如图4所示。

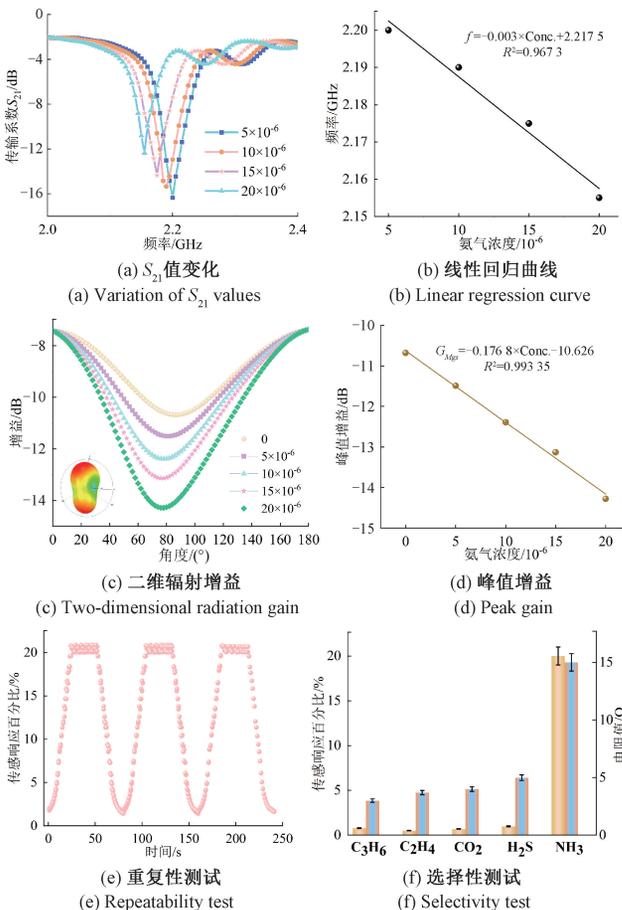


图4 氨气吸附传感器输出分析

Fig. 4 Analysis of the output of the ammonia adsorption sensor

如图4(a)所示, 随着氨气浓度的上升, 微波传感器的  $S_{21}$  值谐振频率逐渐减小, 变化值约为 45 MHz, 灵敏度为 3 MHz/ $10^{-6}$ 。图4(b)显示了微波传感器响应线性拟

合曲线, 表明谐振频率变化与氨气浓度之间存在良好的相关性 ( $R^2 = 0.9673$ ), 进一步验证了氨气吸附和传感器频率变化的关联机制。利用网络分析仪对微波传感器进行远场分析。图4(c)、(d)显示了微波传感器的在不同浓度氨气环境下二维辐射增益、增益峰值图。随着氨气浓度的增加, 阻抗匹配变差, 导致峰值增益降低。因此, 建立辐射增益 ( $G_{Mgs}$ ) 和浓度 ( $Conc.$ ) 之间的关系, 即:

$$G_{Mgs} = a \times Conc. + b \quad (4)$$

其中,  $a$  和  $b$  是微波传感器相关系数。根据氨气浓度与传感器辐射增益相关性研究得出  $a = -0.1786$ ,  $b = -10.626$ 。

为了验证微波传感器的可重复性, 在相同条件下进行3次重复测试, 并测量其在  $10 \times 10^{-6}$  氨气浓度环境中的谐振频率变化。如图4(e)所示, 传感器响应百分比在氨气吸附约 24 s 后稳定在 22%, 而在氨气脱附约 27 s 后恢复至初始值。3次实验结果高度一致, 表明传感器具有良好的重复性。根据式(5)~(7)<sup>[25]</sup> 将测量  $S_{21}$  值转化为传感响应百分比。

$$\% \text{ Sensorresponse} = \frac{|\Delta S_{21}|}{|S_{21, \text{air}}|} \times 100 \quad (5)$$

$$|\Delta S_{21}| = \left\{ [\text{Re}(S_{21})_{\text{air} + \text{NH}_3} - \text{Re}(S_{21})_{\text{air}}]^2 + [\text{Im}(S_{21})_{\text{air} + \text{NH}_3} - \text{Im}(S_{21})_{\text{air}}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$|\Delta S_{21, \text{air}}| = \left\{ [n \text{Re}(S_{21})_{\text{air}}]^2 + [\text{Im}(S_{21})_{\text{air}}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

其中, 空气和氨气环境中的传感器  $S_{21}$  参数的实部、空气中的  $S_{21}$  参数的实部、空气和氨气环境中的  $S_{21}$  参数的虚部以及空气中的  $S_{21}$  参数的虚部分别表示为  $\text{Re}(S_{21})_{\text{air} + \text{NH}_3}$ 、 $\text{Re}(S_{21})_{\text{air}}$ 、 $\text{Im}(S_{21})_{\text{air} + \text{NH}_3}$  和  $\text{Im}(S_{21})_{\text{air}}$ 。空气中的标签  $S_{21}$  值表示为:  $|S_{21}|_{\text{air}}$ , 由氨气吸附引起的标记  $S_{21}$  系数的变化的绝对值表示为  $|\Delta S_{21}|$ 。根据式(5)与传感器响应的百分比直接相关。

此外, 气体选择性是评估传感器实际性能的关键因素。如图4(f)所示, 通过在相同条件下对农业场景下易产生的4种气体 ( $\text{C}_3\text{H}_6$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ ) 进行选择分析<sup>[26]</sup>。利用万用表对不同气体吸附过程中传感器电阻变化情况进行检测, 4种干扰气体的电阻均呈现出微弱的变化。与此同时, 与氨气吸附时的传感响应百分比相比, 干扰气体的传感响应百分比微乎其微。表明传感器对氨气具有良好的选择性, 并且干扰气体的交叉敏感性较弱。

## 3 无线氨气传感模型

### 3.1 无线氨气检测系统

图5显示了基于微波传感器的无线氨气检测系统。该系统包括无线发送模块和接收模块。发射模块由微波

传感器和激励源组成。接收模块由接收天线、频谱分析仪和显示终端组成,如计算机、手机、平板电脑。

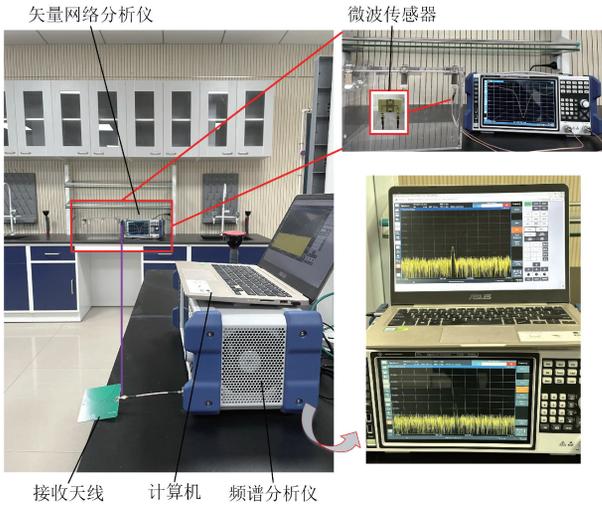


图 5 无线氨气传感系统

Fig. 5 Wireless ammonia sensing system

接收天线工作在 2.1~2.3 GHz 频段,接收机的灵敏度为-80 dBm。当环境氨气浓度发生变化时,基于微波传感器的谐振频率将发生变化,信号将无线传输到接收天线,最终在终端设备上显示。根据自由空间中接收功率  $P_R$  计算,即:

$$P_R = \frac{\lambda^2 P_T G_{MGS} G_R}{16\pi^2 d^2} \quad (8)$$

其中,  $\lambda$  为传输波长,  $P_T$  为发射功率,  $G_R$  为接收天线增益,  $d$  为传输距离。结合式(4)和(8)<sup>[27]</sup>,可推导出无线微波传感器模型:

$$Conc. = \frac{1}{a} \left( \frac{16\pi^2 d^2 P_R}{\lambda^2 P_T G_R} - b \right) \quad (9)$$

### 3.2 温湿度引起的频率漂移分析

为探究环境温湿度与微波气体传感器频率漂移相关性,在模拟环境中进行了为期 7 天的数据采集试验。为降低偶然因素对试验结果影响,连续采集 4 个微波传感器在同一条件下的频率漂移 (No1、No2、No3、No4)。测量的频率漂移为射频电磁波转换成的 S 参数,因此频率漂移单位为 Hz。测量环境均无干扰气体,以避免非目标气体对传感器频率信号的干扰,如图 6 所示为温湿度的干扰分析,数据采集期间的温度变化范围为 5℃~25℃,相对湿度变化范围为 40~80%。

如图 6(a)、(b) 所示,通过控制变量法,描述了温湿度对传感器频率漂移的影响<sup>[28-30]</sup>。实际测量过程中,伴随着温度从常温 25℃ 降至 5℃,相对湿度从 40% 升至 80%,传感器在氨气浓度  $5 \times 10^{-6}$ ~ $20 \times 10^{-6}$  环境中改变了 60 MHz,灵敏度为 4 MHz/ $10^{-6}$ ,相较于室内环境中灵敏

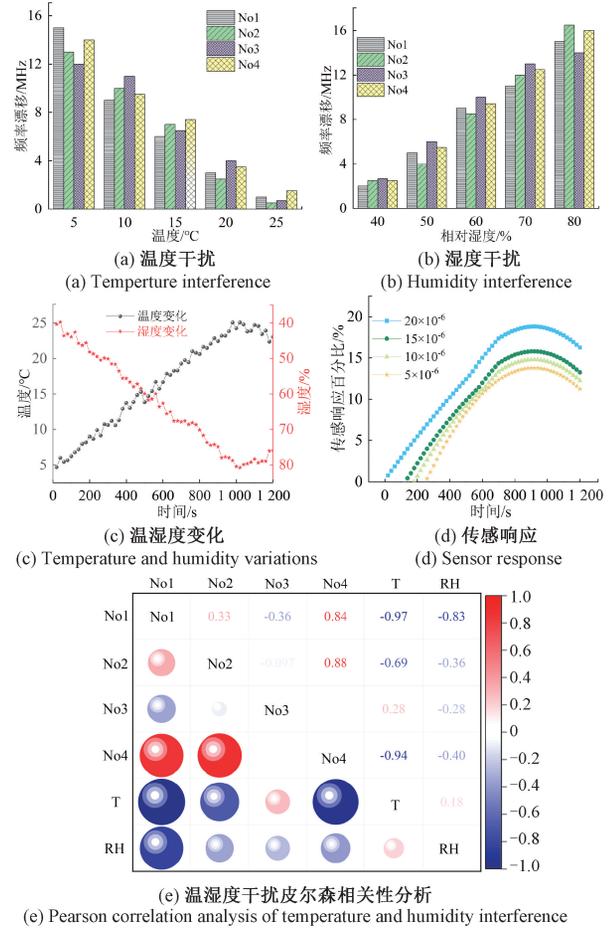


图 6 温湿度干扰分析

Fig. 6 Analysis of temperature and humidity interference

度 (3 MHz/ $10^{-6}$ ),灵敏度误差提升了 1.33 倍。当加载  $20 \times 10^{-6}$  氨气浓度时频率漂移引起的误差浓度为  $4.5 \times 10^{-6}$ 。因此,温湿度导致的传感器频率漂移对氨气检测精度产生了极大干扰。

进一步研究了温湿度快速变化与传感响应之间的相关性。图 3 测试系统中包括温湿度调控装置与温湿度计,用于记录温湿度的快速变化过程。如图 6(c) 和 (d) 所示,通过实时监测反应室内的温度与湿度变化,并利用网络分析仪测量传感器的  $S_{21}$  参数值,结合式(5)~(7),将  $S_{21}$  值转换为传感响应百分比。实验结果表明,随着温湿度的升高,传感响应百分比呈上升趋势,在 20℃ 时达到峰值(由于温度上升增强了气体分子与单壁碳纳米管的相互作用和载流子迁移率)。此后,随着湿度进一步增加,传感响应略有下降(高湿度条件下水分子在单壁碳纳米管表面竞争性吸附,屏蔽了单壁碳纳米管的有效吸附位点,降低了传感器对氨气的敏感性)。

此外,在上述试验基础上,结合皮尔森相关性分析对 No1、No2、No3、No4 这 4 个传感器与温度 (temperature, T)、相对湿度 (relative humidity, RH) 之间的关系进行了

评估,皮尔森相关系数(Pearson correlation coefficient,  $P$ )如图6(e)所示( $|P| < 0.4$ 表示弱相关, $|P| > 0.4$ 表示显著相关)。分析结果表明,4个传感器在温湿度干扰下表现出异向性:No1、No2和No4与温度及湿度均呈负相关关系,而No3则表现为正相关。这种差异可能源于传感器制备过程中的微观结构或工艺误差所致。统计发现,温度干扰的平均相关系数为 $|P| = 0.58$ ,湿度干扰平均相关系数为 $|P| = 0.47$ ,表明温湿度对传感性能均存在较为显著的影响。

## 4 温湿度补偿方法

利用MATLAB中的BP神经网络拟合工具箱,通过列文伯格-马夸尔特算法进行参数训练。训练集的温度范围为 $5^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ ,湿度范围为 $40\% \sim 80\%$ ,由6280个样本组成。测试集的温度范围为 $0^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ ,湿度范围为 $35\% \sim 85\%$ ,由7000个样品组成。根据温湿度干扰研究表明,温度、湿度与氨气检测频率漂移具有显著相关性。BP神经网络作为一种多层前馈神经网络模型,凭借其独特的架构和学习算法,在处理复杂非线性拟合问题时展现出明显优势<sup>[31]</sup>。BP神经网络具有输入层、隐藏层和输出层3层网络结构,输入层至隐藏层,隐藏层至输出层分别采用Sigmoid和Purelin函数连接,通过调整神经元数量与权值,实现BP神经网络对复杂模型的精准拟合。

传感器的输出受温度和湿度影响,导致频率漂移。为消除这种漂移误差,需通过模型估计并修正,从而得到补偿后的理想输出。具体来说,传感器的实际输出是理想输出与漂移误差之和。

$$y = \hat{y} + e \quad (10)$$

其中, $y$ 为受温湿度干扰的传感器输出, $e$ 为漂移误差, $\hat{y}$ 为补偿后的传感器理想输出。

为了训练温湿度补偿模型,需要一个合适的损失函数来衡量模型预测输出与实际输出之间的差异。常用的损失函数是均方误差,通过最小化这个损失函数,模型可以不断优化,以提高预测的准确性,定义为:

$$E(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (11)$$

其中, $E(\theta)$ 是模型的损失函数; $y_i$ 是第 $i$ 个样本的实际输出(带有漂移); $\hat{y}_i$ 是模型对第 $i$ 个样本的预测输出(补偿后的输出); $N$ 是样本数量。

采用BP神经网络建立温湿度与微波传感器频率漂移的非线性数学模型,各项网络参数采用列文伯格-马夸尔特算法训练得到。

$$h_0 = -(\mathbf{J}^T \cdot \mathbf{J} + \lambda \cdot \mathbf{I})^{-1} \cdot \mathbf{J}^T \cdot e^{(k)} \quad (12)$$

其中, $h_0$ 为修正变化量, $\mathbf{J}^T \cdot \mathbf{J}$ 为二阶导数矩阵, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵, $\lambda$ 为阻尼系数, $e^{(k)}$ 为迭代误差。

将温度、湿度作为2个输入层神经元,预测频率漂移作为输出层神经元(如图7(a)所示)。基于温湿度的BP神经网络补偿模型(temperature-humidity BP network compensation model, THBP)所实现的最终传感器输出校准优化效果如图7(b)所示。在实际验证环节中,温湿度因素作用下传感器频率偏移的校正回归结果。经分析,该模型的训练集、测试集以及验证集的相关系数 $R$ 均大于0.969,这一结果充分表明:在THBP中,输入变量(温度、湿度)与输出变量(传感器校准输出)之间存在着高度显著的线性相关性;同时,该模型具备良好的泛化性能,能够有效适配不同数据集,从而确保了该模型在实际应用场景中能够更为精准、稳定且可靠地实现对传感器的温湿度补偿。

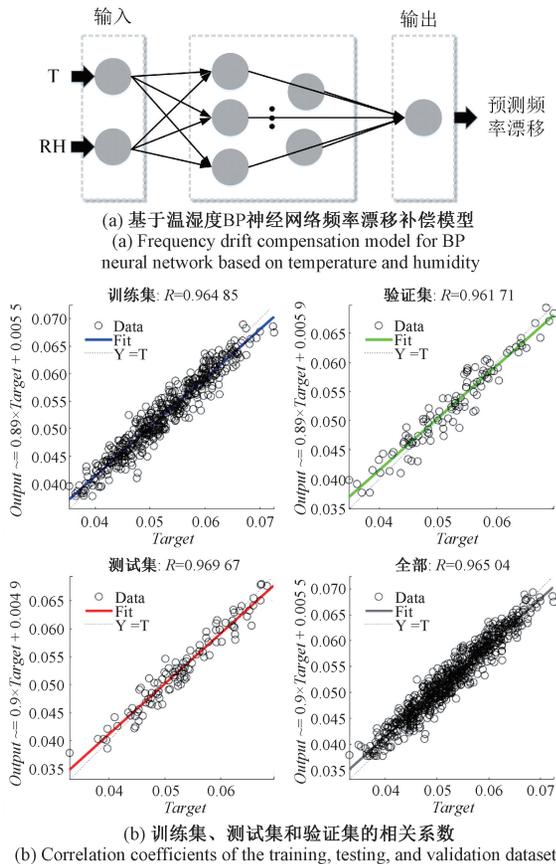


图7 温湿度补偿模型

Fig. 7 Temperature and humidity compensation model

## 5 补偿效果验证

为验证温湿度补偿模型的有效性,将上述数据集作为训练集,选用相同方法采集的2024年12月4日至12月10日的数据集作为测试集,对其补偿效果进行验

证。为探究所提出的基于 THBP 特性,同时计算基于温度的 BP 神经网络补偿模型 (temperature compensation model of BP network, TBP) 以及基于支持向量机的温湿度补偿模型 (temperature-humidity compensation model of support vector machine, THSVM) 补偿后的频率漂移结果。结果如图 8 所示,与原始数据相比,基于 TBP 和基于 THSVM 的补偿效果相对有限,而基于 THBP 补偿后的效果显著,大幅降低了频率漂移的波动幅度。

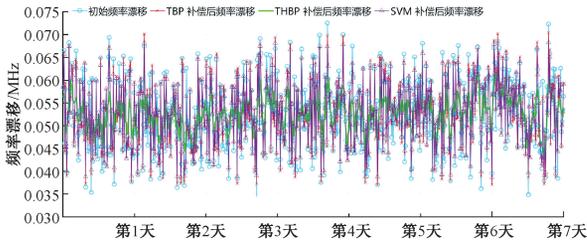


图 8 频率漂移补偿模型效果对比

Fig. 8 Comparison of the performance of the frequency shift compensation model

为了量化该方法的补偿结果,引入均值和标准差两个指标,以衡量各补偿方法的效果。如表 1 中的数据可知,3 种补偿模型均具备一定的补偿能力,在经过补偿后,频率漂移量均得到了一定程度的降低。其中,基于 THBP 展现出更为稳定的补偿效果,补偿后的频率偏移基本稳定在 48 MHz 左右 (标准频率偏移 45 MHz),且波动幅度相较于原始数据降低了 20%,进一步提升了测量的准确性和可靠性。

表 1 不同模型补偿的频率漂移数据特性

Table 1 Characteristics of frequency shift compensation for different models

| 模型    | 均值   | 标准差   | 漂移/MHz |
|-------|------|-------|--------|
| 初始    | 0.05 | 0.027 | 60     |
| TBP   | 0.04 | 0.020 | 55     |
| THSVM | 0.35 | 0.017 | 53     |
| THBP  | 0.23 | 0.011 | 48     |

根据无线微波传感器模型推导出氨气浓度变化,再根据计算机的温湿度补偿模块进行校正 (如图 9 所示),校正后的传感器灵敏度为  $3.07 \text{ MHz}/10^{-6}$ ,误差浓度降低到  $0.06 \times 10^{-6}$ ,检测精度提升了 31.11%。

检测结果显示,所提出的基于 THBP 无线微波氨气传感器不仅具备良好的温湿度补偿效果,有效提升了氨气检测的精度,还支持无线数据传输功能,实现了远程监控与数据获取的便捷性。通过与商用传感器对比测试,

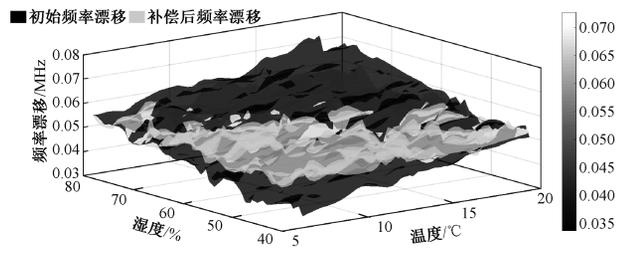


图 9 温湿度补偿热力图

Fig. 9 Temperature and humidity compensation heatmap

随着时间的增长两者均呈现上升趋势,且误差浓度相差不大 (如图 10 所示)。

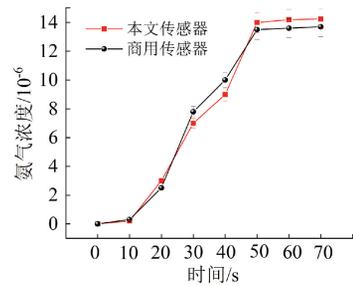


图 10 传感器对比测试

Fig. 10 Sensor comparison test

## 6 结 论

针对微波气体传感器在复杂环境中受温湿度波动干扰而导致频率漂移的问题,并结合射频识别检测技术与信号分析方法,提出了一种基于皮尔森相关性分析与反向传播神经网络相结合的频率漂移补偿算法,用于不同温湿度条件下的建模、分析与校正。试验结果表明,温湿度波动对频率漂移影响显著,严重制约了检测精度。经补偿处理后,频率漂移幅度降低约 20%,检测精度提升了 31.11%。所构建的无线氨气检测系统具备远距离氨气检测,且在复杂温湿度环境中仍具备良好的选择性与重复性。与商用氨气传感器的对比试验进一步验证了本系统的有效性和准确性,两者在相同条件下的检测误差较小。该研究成果可为微波气体传感器在复杂温湿度环境中的应用提供了重要技术支持,有助于提升无损检测结果的精度和检测效率,具有良好的应用前景。

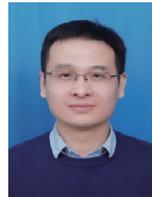
## 参考文献

[ 1 ] ANDRE R S, MERCANTE L A, FACURE M H, et al.

- Recent progress in amine gas sensors for food quality monitoring: Novel architectures for sensing materials and systems[J]. *ACS Sensors*, 2022, 7(8):2104-2131.
- [ 2 ] ISTIF E, MIRZAJANI H, DAĞ C, et al. Miniaturized wireless sensor enables real-time monitoring of food spoilage[J]. *Nature Food*, 2023, 4(5):427-436.
- [ 3 ] TRIPATHY D, KUMAR R, PAREEK P, et al. A copper phosphosulfide-based highly sensitive ammonia gas sensor at room temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(19):29627-29633.
- [ 4 ] 时国龙,沈心怡,辜丽川,等. 面向智慧农业的无芯片射频跨域感知研究进展[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(7):10-23.
- SHI G L, SHEN X Y, GU L CH, et al. Research progress of chipless RF cross-domain sensing for smart agriculture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(7):10-23.
- [ 5 ] DONG K, GUAN Y F, WANG Q, et al. Non-destructive prediction of yak meat freshness indicator by hyperspectral techniques in the oxidation process[J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 17:100541.
- [ 6 ] ANDRE R S, FACURE M H M, MERCANTE L A, et al. Electronic nose based on hybrid free-standing nanofibrous mats for meat spoilage monitoring[J]. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 2022, 353:131114.
- [ 7 ] YANG H B, HOPKINS D L, ZHANG Y M, et al. Preliminary investigation of the use of raman spectroscopy to predict beef spoilage in different types of packaging[J]. *Meat Science*, 2020, 165:108136.
- [ 8 ] 李泽,钱勇,赵九一,等. GIS局部放电光学传感器仿真设计与试验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(8):249-257.
- LI Z, QIAN Y, ZHAO J Y, et al. Simulation design and experimental study of GIS partial discharge optical sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(8):249-257.
- [ 9 ] LASSERRE A, SIMON L, GRZELAK L, et al. Influence of water on the response of a microwave sensor for ammonia detection at room temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(14):22371-22376.
- [ 10 ] ASHIQ J, SAEED U, LI ZH, et al. Advances in meat spoilage detection: A review of methods involving 2D-based nanomaterials for detection of spoiled meat[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2024, 132:106295.
- [ 11 ] XUE SH SH, JIN Q, WANG X L, et al. Microwave gas sensor based on differential planar resonator synergistically loaded with Pd-doped CdSnO<sub>3</sub> for enhanced H<sub>2</sub>S detection[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2025, 46(3):480-483.
- [ 12 ] HASAN M M, ALEV O, GOLDENBERG E, et al. A novel molybdenum disulfide-based high-precision microwave sensor for methanol gas detection at room temperature[J]. *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, 2024, 34(6):691-694.
- [ 13 ] 王思睿,薛严冰,宋智,等. 纸基底印刷无芯片RFID湿度传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(3):150-158.
- WANG S R, XUE Y B, SONG ZH, et al. Inkjet-printed chipless RFID humidity sensor based on paper substrate[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(3):150-158.
- [ 14 ] XUE SH SH, JI Y, XU J H, et al. Electromagnetic enhanced microwave gas sensor for room temperature detection of ammonia[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2024, 73:2001411.
- [ 15 ] HASAN M M, COWEN T, ALEV O, et al. MIMO microwave sensor for selective and simultaneous detection of methanol and ethanol gases at room temperature[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74:9511613.
- [ 16 ] YONG J L, LI P, HE X L, et al. Multifrequency microwave liquid identification sensor based on interdigital split ring resonators[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2025, 74:8001710.
- [ 17 ] SHOOSHTARI M, SALEHI A, VOLLEBREGE S. Effect of humidity on gas sensing performance of carbon nanotube gas sensors operated at room temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(5):5763-5770.
- [ 18 ] LI Y D, YUAN ZH Y, ZHU H M, et al. Study on the impact of minor ambient temperature variations on the gas sensing performance of zinc cobaltate semiconductor metal oxide sensor for toluene detection[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2025, 433:137570.
- [ 19 ] SUEMATSU K, SASAKI M, MA N, et al. Antimony-

- doped tin dioxide gas sensors exhibiting high stability in the sensitivity to humidity changes [J]. *ACS Sensors*, 2016, 1(7):913-920.
- [20] JI H Y, ZHU H M, ZHANG R Z, et al. Semiconductor sensor virtual array: Gas detection strategy in internet of things to suppress humidity interference [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(3):4934-4941.
- [21] 孟凡利, 祝学斌, 张华, 等. SnO<sub>2</sub> 气体传感器对挥发性有机物的温度调制及信号处理方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(12):85-94.
- MENG F L, ZHU X B, ZHANG H, et al. Research on SnO<sub>2</sub> gas sensor's temperature modulation and signal processing method for volatile organic compounds [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(12):85-94.
- [22] 孟凡利, 陈雅茹, 黎子聪, 等. 氧化铜传感器对 VOCs 的动态测试方法研究 [J]. *电子测量技术*, 2020, 43(17):137-142.
- MENG F L, CHEN Y R, LI Z C, et al. Study on dynamic testing method of volatile organic compounds by indium oxide sensor [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(17):137-142.
- [23] 李紫豪, 何怡刚, 周亚中, 等. 计及时空特性的变压器油中溶解气体预测模型 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2025, 39(3):1-12.
- LI Z H, HE Y G, ZHOU Y ZH, et al. Prediction model for dissolved gases in oil considering spatiotemporal characteristics [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2025, 39(3):1-12.
- [24] SUN H M, CAO M, ZHANG P H, et al. Magnetic-field-enhanced H<sub>2</sub>S sensitivity of Cu<sub>2</sub>O/NiO heterostructure ordered nanoarrays [J]. *ACS Sensors*, 2022, 7(7):1903-1911.
- [25] KRUDPUN W, CHUDPOOTI N, LORWONGTRAGOOL P, et al. PSE-Coated interdigital resonator for selective detection of ammonia gas sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(23):11228-11235.
- [26] MATINDOUST S, FARZI G, NEJAD M B, et al. Polymer-based gas sensors to detect meat spoilage: A review [J]. *Reactive & Functional Polymers*, 2021, 165:104962.
- [27] XUAN X W, ZHUANG ZH H, SHI Q, et al. Flexible antenna sensor based on vertical graphene for wireless humidity monitoring and IoT applications [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(10):18099-18110.
- [28] REN Z X, CUI B L, CHENG L N, et al. Temperature and humidity effects on SAW hydrogen sensor and compensation method [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(14):22317-22325.
- [29] LIU C, DUAN Z H, ZHANG B Y, et al. Local Gaussian process regression with small sample data for temperature and humidity compensation of polyaniline-cerium dioxide NH<sub>3</sub> sensor [J]. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 2023, 378:133113.
- [30] ZHANG SH W, YUAN ZH Y, LIU Y, et al. Humidity-counteraction identification of VOCs driven by semiconductor sensor temperature modulation response data [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 74:9500509.
- [31] XU L W, WANG H, GULLIVER T A. Outage probability performance analysis and prediction for mobile IoT networks based on ICS-BP neural network [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(5):3524-3533.

## 作者简介



与信号处理。

E-mail: shigl@ahau.edu.cn

**Shi Guolong** (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Hohai University in 2010, M.Sc. degree from the University of Science and Technology of China in 2013, and Ph.D. degree from Hefei University of Technology in 2019. He is currently an associate professor with the School of Information and Artificial Intelligence at Anhui Agricultural University. His main research interests include intelligent sensing and signal processing.



**Hu Guoping**

received his B.Sc. degree from Suzhou University in 2022. He is currently pursuing his master's degree

**时国龙** (通信作者), 2010 年于河海大学获得学士学位, 2013 年于中国科学技术大学获得硕士学位, 2019 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为安徽农业大学信息与人工智能学院副教授, 主要研究方向为智能感知

**胡国平**, 2022 年于宿州学院获得学士学位, 目前在安徽农业大学攻读硕士学位。主要研究方向为信号处理和射频识别技术。

E-mail: HuGuoPing14@stu.ahau.edu.cn

at Anhui Agricultural University. His main research interests include signal processing and RFID technology.



**何怡刚**, 1992 年于湖南大学获得硕士学位, 1996 年于西安交通大学获得博士学位, 现为武汉大学教授, 主要研究方向为能源装备状态监测、电力电子电路理论及其应用等。

E-mail: yghe1221@whu.edu.cn

**He Yigang** received his M. Sc. degree from Hunan University in 1992, and Ph. D. degree from Xian Jiaotong University in 1996. He is currently a professor at Wuhan University. His main research interests include condition monitoring of energy equipment, power electronic circuit theory and its applications, etc.



**孟凡利**, 2002 年于南京理工大学获得学士学位, 2005 年于中国科学院智能机械研究所取得无机化学硕士学位, 2009 年于中国科学技术大学获得博士学位。现任东北大学信息科学与工程学院教授, 主要从事传感材料与纳米传感器方面的研究。

E-mail: mengfanli@ise.neu.edu.cn

**Meng Fanli** received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2002, M. Sc. degree in Inorganic Chemistry from the Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences in 2005, and Ph. D. degree from the University of Science and Technology of China in 2009. He is currently a professor with the School of Information Science and Engineering at Northeastern University. His main research interest is sensing materials and nanosensors.