

# 在线检测丙酮的温度调制 SnO<sub>2</sub> 传感器识别方法

聂嘉浩, 李明昊, 孟凡利, 郭晨昊, 周俊驰, 李启琰

(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819)

**摘要:** 为使糖尿病检测实现无创、准确、便捷, 需寻求一种高效的糖尿病检测方法。丙酮作为糖尿病的标志物, 可作为糖尿病检测的依据。选择合适的半导体气体传感器结合周期性改变传感器加热温度的动态温度调制方法, 对呼出气中丙酮进行检测, 从而有效增加响应信号的信息量。再利用卷积神经网络, 实现准确测量呼出气体中丙酮的浓度, 并以此为依据实现糖尿病的检测。丙酮浓度的检测准确率高达 98.99%, 表明传感器检测丙酮并结合神经网络进行糖尿病检测具有可行性。

**关键词:** 糖尿病; 半导体气体传感器; 丙酮; 动态温度调制; 卷积神经网络

中图分类号: TP212.2 文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2025.06.004

## Temperature Modulation SnO<sub>2</sub> Sensor for Online Acetone Detection

NIE Jiahao, LI Minghao, MENG Fanli, GUO Chenhao, ZHOU Junchi, LI Qiyan

(Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** To achieve non-invasive, accurate, and convenient detection, an efficient diabetes detection method is required. Acetone, a biomarker for diabetes, can serve as a basis for diabetes detection. A suitable semiconductor gas sensor is combined with a dynamic temperature modulation technique, where the sensor's heating temperature is periodically adjusted, to detect acetone in exhaled breath. This method effectively increases the information content of the sensor's response signal. A convolutional neural network (CNN) is then employed to accurately measure acetone concentration in exhaled breath, forming the basis for diabetes detection, the detection accuracy of acetone concentration can reach up to 98.99%. These findings demonstrate the feasibility of combining sensor-based acetone detection with a neural network for diabetes diagnosis.

**Key words:** diabetes; semiconductor gas sensor; acetone; dynamic temperature modulation; convolutional neural network

传统的糖尿病检测方法主要依赖于血液检测, 需在人体空腹的前提下进行血液采集, 进行血糖检测, 这种方法具有侵入性, 并且对实验室设备和技术要求较高, 成本高, 局限性大。健康人群呼出气体中的丙酮含量通常不超过 0.8 ppm, 而糖尿病患者呼出气体中丙酮含量往往高于 1.8 ppm<sup>[1-2]</sup>, 通

过检测患者呼出气体中丙酮的浓度, 可以实现糖尿病的诊断, 该方法具有无创、便捷等诸多优势。然而, 目前国内对此方法的研究较少。

半导体传感器具有响应速度快、灵敏度高等优点, 在挥发性有机物 (VOCs) 检测方面表现优异。采用动态温度调制方法<sup>[3-5]</sup> 对半导体传感器

施加周期性可变的加热电压,使其表面的氧负离子处于非平衡状态<sup>[6]</sup>,氧负离子与目标气体匹配反应时会在传感器响应曲线上产生特征峰,从而使传感器能够获得更多信息。目前研究使用的调制波形以矩形波<sup>[7-8]</sup>为主。

卷积神经网络(CNN)在特征提取方面表现突出,CNN使用多个卷积核不断地对数据进行卷积操作,能够提取数据中的深层特征,尤其是CNN模型在处理时序和多维数据表现出色,能够有效提取特征和捕捉复杂模式,同时CNN还具有较好的泛化能力和训练效率<sup>[9]</sup>。

本文将动态温度调制的SnO<sub>2</sub>传感器应用于丙酮气体的检测中,并将CNN应用于丙酮响应信号的处理中。研究结果对采用半导体传感器检测丙酮浓度具有重要意义,同时为传感器应用在医学疾病诊断方面提供新思路。

## 1 检测装置与静态测试

### 1.1 检测装置

丙酮检测装置如图1所示。反应气室设有进气和排气口,进气口使用注射器通丙酮气体,气瓶中贮存有干燥洁净的合成空气,用于将测试室内的测试气体通过排气口吹出。传感器的工作电压以及电阻丝上的加热电压均通过电脑完成设置,响应数据存储存储在电脑上。

临床检测中采用化学方法去除干扰物,如使用碱改性的活性炭实现对乙醇、CO<sub>2</sub>气体的吸收<sup>[10-11]</sup>,使用CaCl<sub>2</sub>实现对水蒸气的吸收而不影响丙酮气体的含量。呼出气体除去干扰气体后,进入反应气室并通过动态温度调制的传感器进行检测。响应数据自动传输至计算机,生成图像并输入卷积神经网络进行浓度预测。随后,气瓶吹出上一轮气体,新一轮气体进入反应气室,循环此过程,实现实时、连续监测。

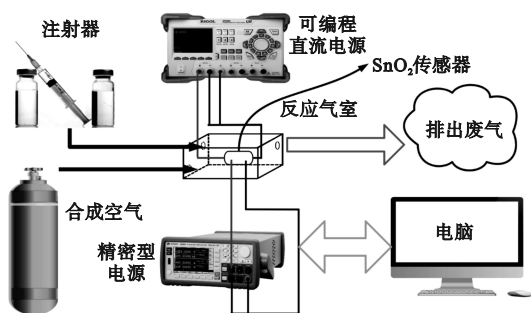


图1 丙酮检测装置

Fig. 1 Acetone detection device

### 1.2 静态测试

为获得传感器的基础数据,首先进行静态测试。SnO<sub>2</sub>传感器的气敏响应 $S$ 为

$$S = \frac{R_{\text{air}}}{R_{\text{gas}}} = \frac{I_{\text{gas}}}{I_{\text{air}}} \quad (1)$$

式中: $R_{\text{air}}$ 、 $R_{\text{gas}}$ 分别表示半导体传感器在空气中和待测气体丙酮中的电阻值; $I_{\text{air}}$ 、 $I_{\text{gas}}$ 分别表示半导体传感器在空气中和待测气体丙酮中的电流值<sup>[12]</sup>。

测试丙酮在不同温度下的气敏响应,以及丙酮在最佳工作温度下的静态响应曲线,结果如图2所示。

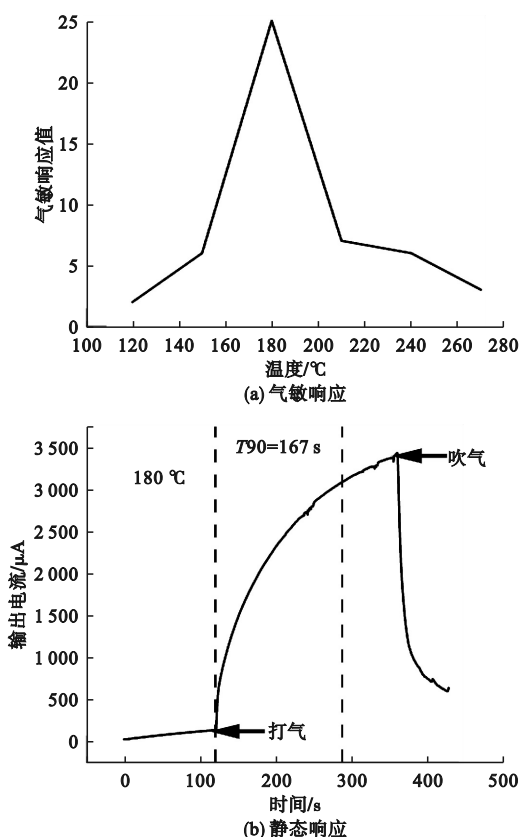


图2 丙酮在不同温度下的气敏响应以及丙酮在最佳工作温度下的静态响应曲线

Fig. 2 Gas sensing response of acetone at different temperatures and the static response curve of acetone at the optimum operating temperature

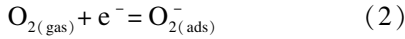
由图2(a)可知,丙酮气体的最佳工作温度为180℃。定义传感器的响应时间 $T_{90}$ 为 $I_{\text{air}}$ 上升到平衡信号值 $I_{\text{gas}}$ 的90%所需要的时间。由图2(b)可得,丙酮的响应时间( $T_{90}$ )为167s。

## 2 动态温度调制

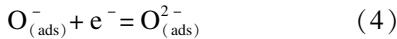
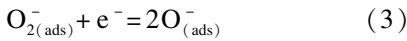
### 2.1 动态温度调制机理

动态温度调制机理可用表面控制型敏感材料

的传感机理来解释。当 SnO<sub>2</sub> 作为气敏材料接触丙酮时,丙酮会在 SnO<sub>2</sub> 表面进行吸附和脱附过程,这个过程伴随着电子的交换,从而引起 SnO<sub>2</sub> 电导率变化。具体来说,SnO<sub>2</sub> 表面主要存在 O<sub>2</sub><sup>-</sup>、O<sup>2-</sup> 和 O<sup>-</sup> 三种吸附态离子。室温或较低温度时,SnO<sub>2</sub> 表面主要吸附 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 形态的氧离子,反应式为



当传感器处于加热工作状态时,温度升高,吸附态氧会夺取电子从 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 转变为 O<sup>2-</sup> 与 O<sup>-</sup> 等形态,反应式为



经过上述反应之后,SnO<sub>2</sub> 表面产生正电荷层并使势垒宽度变窄,电导率上升。此时若有 VOCs 存在,VOCs 分子与这些吸附态的氧离子反应,进一步释放电子,使势垒宽度继续变窄,电导率快速上升。待吸附过程平衡后,电导率稳定<sup>[13-14]</sup>。

影响电导率的主要因素有气体种类、浓度大小、传感器温度。不同种类气体的 VOCs 具有不同的化学性质和分子结构,其与气敏材料表面相互作用的能力不同,具有较强还原性的 VOCs 在气敏材料表面更容易发生氧化反应,释放出电子。在一定范围内 VOCs 的浓度越高,吸附在气敏材料表面的气体分子越多,发生电子交换越频繁,电导率的变化越大。温度对气敏材料性能的影响非

常显著,在不同温度下,气体在气敏材料表面的吸附、脱附速率以及化学反应速率均不同。

温度调制是通过周期性改变传感器的工作温度,打破固定温度下氧离子吸附的动态平衡,使晶界势垒宽度  $L$  呈周期性变化,表面吸附的氧离子形态也随之周期性改变。不同态的氧离子与目标气体匹配反应时会在传感器响应曲线上产生特征峰,SnO<sub>2</sub> 传感器的响应不再局限于一个静态温度点,而是扩展为随温度和时间变化的动态响应曲线,增加了数据的维度和输出信息量,从而提高了传感器对丙酮的检测能力。

## 2.2 矩形波温度调制参数的选择

基于静态测试下传感器在 180 °C 时对丙酮的灵敏度最高,选择使用占空比为 50%、温度范围为 60 ~ 300 °C 的矩形波进行动态温度调制<sup>[15]</sup>,丙酮浓度为 100 ppm,得到不同周期矩形波的动态响应信号,如图 3 所示。

由图 3(a) 可见,在响应波形上没有发现明显特征来区分丙酮浓度。随后将矩形波周期调整为 50 s,占空比和温度范围保持不变,结果如图 3(b) 所示,可见有明显的特征峰出现。继续保持占空比和温度范围不变,增加周期至 60 s,动态响应信号如图 3(c) 所示,与图 3(b) 相比,特征峰减少,最终确定选用周期 50 s 的矩形波作为加热波形<sup>[16-18]</sup>。

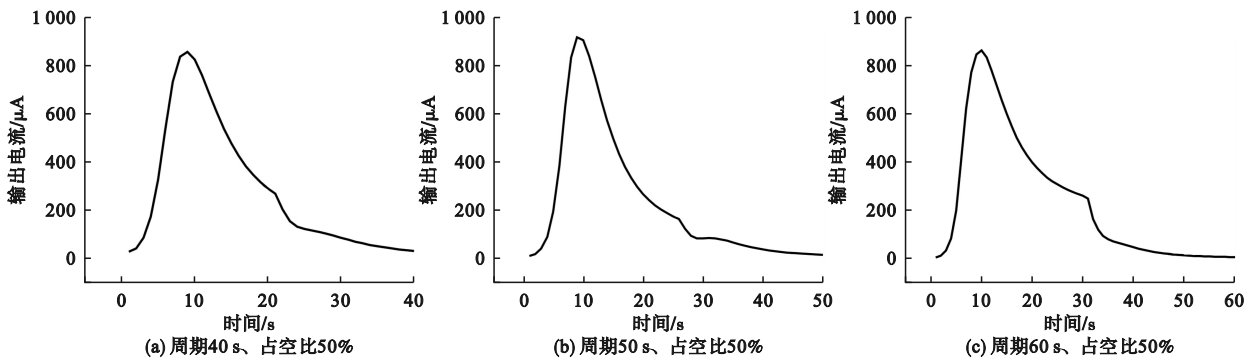


图 3 不同周期矩形波的动态响应信号

Fig. 3 Dynamic response signal of rectangular waves with different period cycle

对占空比进行选择,得到不同占空比的矩形波动态响应信号,如图 4 所示。由于在上述占空比 50% 的情况下,波形的最高峰值已经出现,无需再增加占空比,将占空比降低到 40%,结果如图 4(a) 所示,可以看到特征峰显著减少,最终选择 50% 占空比的矩形波作为加热波形。

研究工作温度范围对动态响应信号的影响,首先对低温段进行分析,在周期为 50 s、占空比

50% 的矩形加热波的基础上,保持高温段 (300 °C) 不变,分别测试低温段为 40 °C 和 80 °C 时的动态响应信号;然后对高温段进行选择,在周期为 50 s、占空比 50% 的矩形加热波的基础上,保持低温段 (60 °C) 不变,分别测试高温段为 280 °C 和 320 °C 时的动态响应信号。得到不同温度范围的矩形波的动态响应信号,结果如图 5 所示。

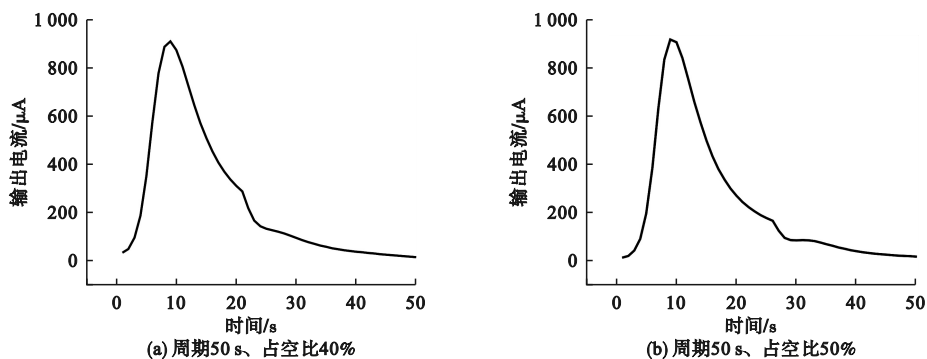


图4 不同占空比的矩形波动态响应信号

Fig. 4 Dynamic response signal of rectangular waves with different duty cycle

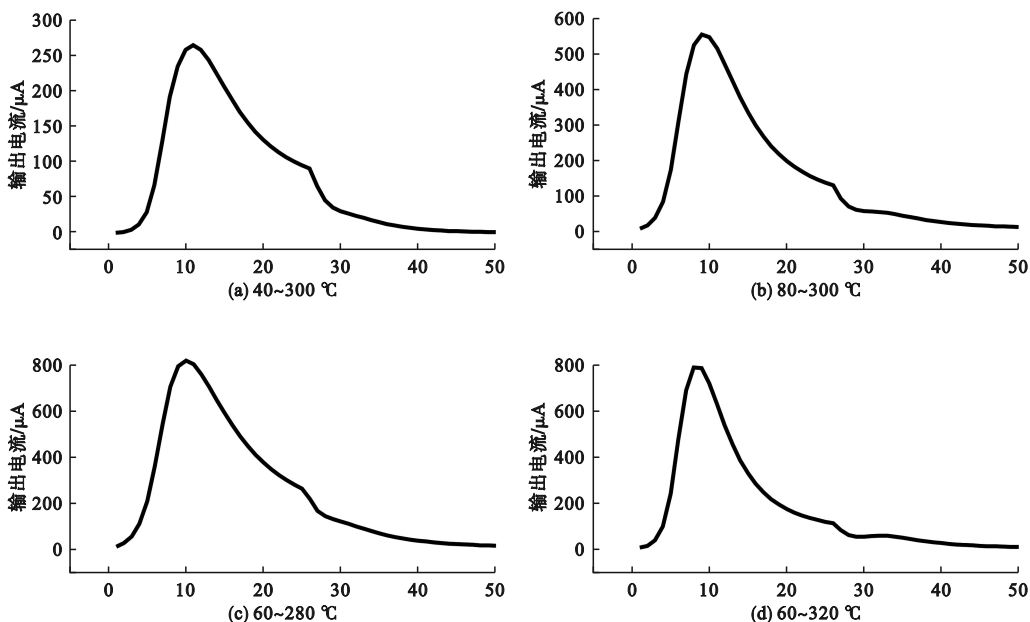


图5 不同温度范围矩形波动态响应信号

Fig. 5 Dynamic response signals of rectangular waves in different temperature ranges

由图5(a)和图5(b)可见,40℃时特征峰数量明显减少,80℃时无明显变化,出于降低功耗的考虑,低温段仍选择60℃进行动态测试。由图5(c)和图5(d)可见,动态响应信号中的最高峰没有明显变化,同时特征峰也没有增加,基于节约功耗的考虑,最终确定温度范围为60~300℃<sup>[19]</sup>。

选择最佳调制参数,对SnO<sub>2</sub>传感器的电阻丝施加周期50s、占空比50%、温度范围60~300℃的矩形波电压,检测丙酮气体在0.3~75ppm不同浓度的动态响应信号,结果如图6所示。

从图6中可以看出,随着浓度的增大,丙酮气体的响应曲线呈现有规律的变化,曲线峰值逐渐升高。波形的最高点、特征峰出现的位置以及形状等都是后续判断丙酮浓度的重要特征<sup>[20-22]</sup>。

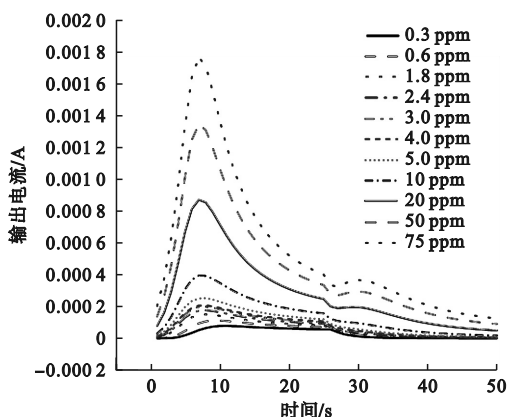


图6 不同浓度丙酮气体的动态响应信号

Fig. 6 Dynamic response signals of acetone gas with different concentrations

### 3 信号处理

#### 3.1 网络结构

选用卷积神经网络(CNN)对响应信号的图像进行回归预测。CNN是一种以卷积和池化运算为核心的深度学习模型,通过在卷积层中使用多个可训练滤波器对图像的局部区域进行滑动检测,从而自动捕捉到信息。选择在ImageNet上预训练的EfficientNetB0作为骨干网络,并去除原有的分类层,同时冻结骨干卷积层的预训练参数,避免过拟合并提升训练效率。

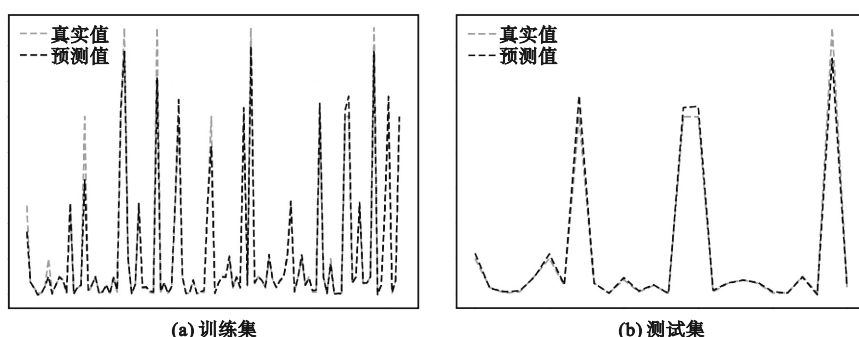


图7 卷积神经网络在训练集和测试集上的预测结果

Fig. 7 Prediction results of convolutional neural network on training set and test set

由图7可知,模型预测的准确率高达98.99%。据此,可以根据输出的丙酮浓度值进行糖尿病的诊断。若呼出气体中丙酮浓度小于0.8 ppm,可认为该呼气者未患有糖尿病;若呼出气体中丙酮浓度大于1.8 ppm,可认为该呼气者患有糖尿病。

### 4 结论

本文首先对SnO<sub>2</sub>气敏材料动态温度调制机理进行解释,然后对SnO<sub>2</sub>传感器进行了静态测试,并以此为基础得出最佳动态温度调制参数,最后构建并训练卷积神经网络对响应信号进行浓度检测,结论如下。

1) 静态测试下,当加热温度为180℃时,SnO<sub>2</sub>传感器对丙酮的气敏响应最高。

2) 选择周期50 s、占空比50%、温度范围60~300℃的矩形波电压对SnO<sub>2</sub>传感器进行动态温度调制时,SnO<sub>2</sub>传感器对丙酮气体有最佳响应信号。

3) 卷积神经网络对丙酮动态响应信号的浓度预测准确率高达98.99%,表明该方法可用于糖尿

病的诊断。为了进一步提取特征并避免过拟合,在骨干网络输出后进行全局平均池化,池化操作在保留主要特征的基础上进一步缩减维度,提取到更为紧凑且具有判别力的特征。然后加入全连接层和Dropout层,进一步强化高层特征提取并有效减少过拟合风险。充分利用预训练模型的代表能力,显著提高了模型的拟合精度,从而实现了丙酮浓度的准确回归预测。

#### 3.2 结果分析

卷积神经网络在训练集和测试集上的预测结果如图7所示。

病的诊断。

#### 参考文献(References):

- [1] 吴昊坪,李磊,曾睿,等. 糖尿病呼出气体检测与分析研究进展[J]. 化学进展,2024,36(4):601-611.  
WU H P, LI L, ZENG R, et al. Progress in the study of exhaled gas fingerprinting in diabetes[J]. Progress in Chemistry, 2024, 36(4): 601-611. (in Chinese)
- [2] 吴振岭,宗小淇. 基于气敏传感阵列的人体呼出气体检测与疾病诊断研究[J]. 传感技术学报,2020,33(6):830-839.  
WU Z L, ZONG X Q. Research into exhaled gas detection and disease diagnostic model based on gas sensing array[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2020, 33(6): 830-839. (in Chinese)
- [3] 孙晶,赵寒涛. 基于小波特征提取的气体传感器温度调制模式研究[J]. 传感器与微系统,2019,38(12):40-42,46.  
SUN J, ZHAO H T. Research on temperature modulation mode of gas sensor based on wavelet feature extraction[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(12): 40-42, 46. (in Chinese)
- [4] 何爱香,唐祯安,魏广芬,等. 基于温度调制的气体传感器动态信号识别研究[J]. 传感器与微系统,2015,34(6):24-26.  
HE Aixiang, TANG Zhenan, WEI Guangfen, et al. Study on dynamic signal recognition of gas sensor based on temperature modulation[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(6): 24-26. (in Chinese)
- [5] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decom-

- position[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531–544.
- [6] YAN D P, CAO H, ZHANG P P, et al. Fuzzy linguistic odor cognition for robotics olfaction[J]. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2019, 11(2): 234–243.
- [7] DURÁN C, BENJUMEA J, CARRILLO J. Response optimization of a chemical gas sensor array using temperature modulation[J]. Electronics, 2018, 7(4): 54.
- [8] 安文, 魏广芬, 杨春英. 气体传感器温度调制信号的瞬态频谱分析[J]. 传感技术学报, 2012, 25(6): 782–788.  
AN W, WEI G F, YANG C Y. Instantaneous spectrum analysis of temperature modulated gas sensor signals[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(6): 782–788. (in Chinese)
- [9] 李钰雯, 田悦芃, 戚晓玲, 等. 基于卷积神经网络的呼吸变化趋势预测模型[J]. 航空科学技术, 2025, 36(1): 33–38.  
LI Y W, TIAN Y P, QI X L, et al. Prediction model of respiratory trend based on convolutional neural networks[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(1): 33–38. (in Chinese)
- [10] 郭志, 李力成. 活性炭表面改性对丙酮、甲苯气体吸附性能影响的研究[J]. 中国新技术新产品, 2023(7): 5–8.
- [11] 陈益清, 高晓洋, 伍健威, 等. 碱改性活性炭对 VOCs 的吸附性能[J]. 化工环保, 2019, 39(2): 202–207.  
CHEN Y Q, GAO X Y, WU J W, et al. Adsorption performance of alkali modified activated carbon to VOCs[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2019, 39(2): 202–207. (in Chinese)
- [12] 梅馨跃, 蒙欣然, 孟凡利, 等. 光催化和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  修饰对  $\text{CdSnO}_3$  基传感器性能的影响[J]. 沈阳理工大学学报, 2024, 43(5): 69–76.  
MEI X Y, MENG X R, MENG F L, et al. Effect of photocatalysis and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  doping on the performance of  $\text{CdSnO}_3$ -based sensor[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2024, 43(5): 69–76. (in Chinese)
- [13] 陈志芸. 基于 BP 神经网络的 VOCs 混合气体检测研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2017.
- [14] WEI G F, LI G, ZHAO J, et al. Development of a LeNet-5 gas identification CNN structure for electronic noses[J]. Sensors, 2019, 19(1): 217.
- [15] 李金义, 樊鸿清, 余子威, 等. 非合作目标 TDLAS 室内二氧化碳遥测[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 229–236.  
LI J Y, FAN H Q, YU Z W, et al. Standoff detection of indoor  $\text{CO}_2$  using TDLAS with non-cooperative targets[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 229–236. (in Chinese)
- [16] 孟凡利, 季瀚洋, 苑振宇, 等. 二氧化锡传感器对挥发性有机物的动态测试方法研究[J]. 自动化学报, 2022, 48(3): 926–934.  
MENG F L, JI H Y, YUAN Z Y, et al. Study on dynamic testing method of volatile organic compounds by tin dioxide sensor[J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(3): 926–934. (in Chinese)
- [17] 孟凡利, 祝学斌, 张华, 等.  $\text{SnO}_2$  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  $\text{SnO}_2$  gas sensor's temperature modulation and signal processing method for volatile organic compounds[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 85–94. (in Chinese)
- [18] 季瀚洋. 基于半导体气体传感器的温度调制动态测试方法[D]. 沈阳: 东北大学, 2020.
- [19] JI H Y, MI C J, YUAN Z Y, et al. Multicomponent gas detection method via dynamic temperature modulation measurements based on semiconductor gas sensor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(6): 6395–6404.
- [20] JI H Y, YUAN Z Y, ZHU H M, et al. Dynamic temperature modulation measurement of VOC gases based on  $\text{SnO}_2$  gas sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(15): 14708–14716.
- [21] MENG F L, MI C J, LUAN X, et al. Detection of drug-producing chemicals based on gas sensor array with dynamic temperature modulation[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(8): 8109–8119.
- [22] ZHANG S W, YUAN Z Y, KONG L, et al. Drift-like effect compensation for the cyclic temperature operation of semiconductor gas sensor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(2): 2140–2149.

(责任编辑: 徐淑姣)