

# 基于深度学习的高温环境下 QCM 湿度传感器 温度补偿模型

冯俊一, 崔健敏, 温连鹏, 王国华, 聂晶\*

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 为减小高温低湿环境下温度漂移对传感器测量结果的影响, 以基频 4 MHz 的石英晶体为基片, 使用滴注法将氧化石墨烯(Graphene Oxide, GO)沉积在基片上, 研制出一种基于石英晶体微天平(Quartz Crystal Microbalance, QCM)的湿度传感器。AT切石英晶片以及氧化石墨烯材料在高温环境中的温度漂移现象显著, 导致传感器的频率输出发生漂移, 因此使用深度学习对温度漂移进行修正, 在不同的绝对湿度条件下, 测试了反向传播(Back Propagation, BP)神经网络修正模型对 QCM 湿度传感器的适应特性。实验结果表明, 通过深度学习得到的修正模型能够有效提高 QCM 湿度传感器的灵敏度、稳定性以及响应速度, 对于研究温湿度耦合条件下的 QCM 湿度传感器的频率修正技术具有重要意义。

**关键词:** 石英晶体微天平; 深度学习; 频率修正; 湿度检测

中图分类号: TB9; TH837

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)05-0024-07

## A temperature compensation model for QCM humidity sensor in high temperature environment based on deep learning

FENG Junyi, CUI Jianmin, WEN Lianpeng, WANG Guohua, NIE Jing\*

(School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** To reduce the impact of temperature drift on sensor measurement results in high temperature and low humidity environments, a humidity sensor based on quartz crystal microbalance (QCM) was developed by using a quartz crystal with a fundamental frequency of 4 MHz as a substrate and depositing graphene oxide (GO) on the substrate using a drop-on-demand method. The temperature drift phenomenon of AT-cut quartz crystal wafers and graphene oxide materials in high temperature environments is significant, resulting in frequency output drift of the sensor. Therefore, a deep-learning method was used to correct the temperature drift. The adaptability of the back propagation (BP) neural network correction model to the QCM humidity sensor was tested under different absolute humidity conditions. The experimental results show that the correction model obtained through deep learning can effectively improve the sensitivity, stability, and response speed of the QCM humidity sensor. It is of great significance for studying the frequency correction technology of QCM humidity sensors under temperature and humidity coupling conditions.

**Key words:** quartz crystal microbalance (QCM); deep learning; frequency correction; humidity detection

收稿日期: 2023-10-11; 修回日期: 2023-10-30

基金项目: 国家“十四五”计量技术基础科研项目(JSJL2022601A001)

引用格式: 冯俊一, 崔健敏, 温连鹏, 等. 基于深度学习的高温环境下 QCM 湿度传感器温度补偿模型[J]. 计测技术, 2023, 43(5): 24-30.

**Citation:** FENG J Y, CUI J M, WEN L P, et al. A temperature compensation model for QCM humidity sensor in high temperature environment based on deep learning[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(5): 24-30.



## 0 引言

QCM是一种基于石英晶体压电效应制成的表面敏感型高灵敏度质量分析工具,具有纳克级的灵敏度,能够实时反映石英晶振表面的质量变化。由于其具有结构简单、灵敏度高、可进行在线检测等优点<sup>[1]</sup>,在化学、生物、医学等需要进行微量物质检测的领域得到了广泛的应用。

近年来,新型湿敏材料不断问世,QCM湿度传感器的研究也得到了很大的发展<sup>[2-4]</sup>。电子科技大学的毛坤磊等人提出了一种将纳米纤维素晶体作为湿敏薄膜的QCM湿度传感器<sup>[2]</sup>,其灵敏度最高能达到54.1 Hz/%RH。上海大学的沈兵等人提出了以羟基磷灰石为湿敏材料,采用溶胶凝胶法制备的新型QCM湿度传感器<sup>[3]</sup>。浙江大学的何朝梁等人设计了一种基于GO敏感膜的QCM呼吸传感系统<sup>[4]</sup>,将响应时间缩短至0.4 s,恢复时间缩短至1.2 s。在这些新型湿敏材料中,GO具有高亲水性和大表面体积比等优点<sup>[5]</sup>,更适合用于高温低湿环境下的湿度测量。使用GO敏感膜作为QCM湿度传感器的敏感材料,能够有效提高传感器的灵敏度<sup>[6]</sup>、重复性、稳定性<sup>[7]</sup>,缩短响应、恢复时间<sup>[8]</sup>。QCM湿度传感器尽管拥有诸多优点,但和其他湿度传感器一样,其输出特性仍存在非线性、温度漂移等问题,这些问题限制了QCM湿度传感器的精度。

随着深度学习技术的发展,其在图像处理、自然语言处理等领域有着愈发重要的作用,已开始广泛应用于传感器技术领域。深度学习是一种自主学习识别方法,即对数据特征进行由低层到高层的逐步抽象和概念化<sup>[9]</sup>。因此,通过深度学习的方法能够更好地捕捉信号特征,便于进一步处理传感器误差补偿问题。目前应用较多的深度神经网络有卷积神经网络、BP神经网络等。西北大学的彭钰哲等人设计了一种基于改进的BP神经网络进行温度补偿的尘埃监测系统,补偿后系统输出稳定度可达到 $\pm 1 \times 10^{-6}$ <sup>[10]</sup>。但在高温湿度检测领域,仍未见到此技术在温度补偿上的应用。本文设计了一种新型差分式QCM湿度传感系统,并用深度学习技术对传感器温度漂移进行补偿,进一步减少温度变化对测量结果带来的影响。

## 1 传感器及系统设计

### 1.1 传感机理

QCM湿度传感器的探测部分主要由石英晶片、金电极、湿敏薄膜、引线和基座组成,结构如图1所示。石英晶体有多种切型,其中,AT切石英在室温附近受温度影响频率变化最小,且在较宽温度范围内有着较小的温度漂移<sup>[11]</sup>,因此常见的QCM湿度传感器采用AT切石英为基片作为接收器和能量转换器,进行传感及能量转换。

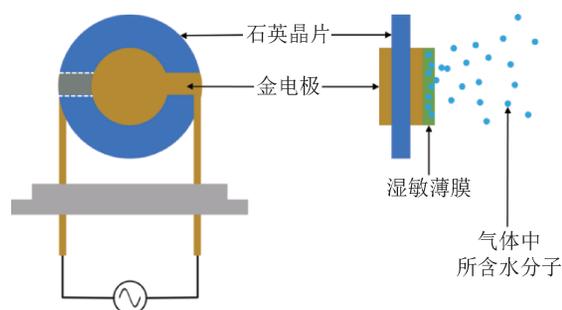


图1 QCM湿度传感器探测部分结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of QCM humidity sensor detection section structure

QCM湿度传感器的传感机理是:利用附着在石英晶片电极上的GO敏感膜作为湿敏材料,传感器暴露在待测空气环境中时,待测空气中的水分子会吸附到GO敏感膜上。当待测空气的湿度发生变化时,GO敏感膜吸附的水分子的量也会随之增加或者减少,从而导致QCM表面的质量发生变化。对于QCM来说,薄膜质量的改变会引起石英晶固有频率的改变,待测气体的湿度信号通过QCM转换成了频率信号。通常使用Sauerbrey方程<sup>[12]</sup>描述固有频率偏移与质量变化之间的关系,即

$$\Delta f = -\Delta m \cdot \frac{2f^2}{A\sqrt{c'_{66} \cdot \rho}}$$

式中: $\Delta f$ 为石英晶体的频移, $\Delta m$ 为晶体电极表面的质量变化, $f$ 为石英晶体的基频, $A$ 为晶振两面电极的相对面积, $c'_{66}$ 为石英晶体的弹性刚度系数, $\rho$ 为石英晶体的密度。

### 1.2 传感系统设计

QCM湿度传感器主要由三个部分组成:传感器、振荡电路以及基于现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)的信号检测

电路<sup>[13]</sup>，系统框图如图2所示。其中，传感器负责感知探头所在区域的湿度变化，振荡电路以石英晶体振荡器为主体，QCM传感器与振荡电路之间通过数据线相连，共同组成晶振电路。振荡电路产生的信号经过放大整形电路整形为方波并且放大，再通过基于FPGA的信号检测电路进行测量，之后，利用通用异步收发器(Universal Asynchronous Receiver / Transmitter, UART)将频率数据传送至软件。

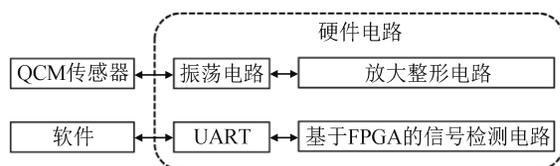


图2 QCM湿度传感器系统框图  
Fig.2 QCM humidity sensor system diagram

QCM传感器检测信号有两种主流方法<sup>[14-16]</sup>，一种是直接检测，另一种是通过差分计算差频处理后进行间接检测。直接检测法难以消除QCM自身对温度、压强、湿度等环境因素的影响，且检测的灵敏度较低，难以实现测量微小频率的相对变化量。因此本文使用差分石英晶体微天平测量法，即在传感器部分增设一个没有附着GO敏感膜的石英晶振作为参照，以减小环境和电路引发的误差。

### 1.3 实验平台搭建

本实验搭建的实验平台如图3所示，利用气体发生器生成绝对湿度确定的气体，绝对湿度误差控制在 $\pm 0.04 \text{ g/m}^3$ ，生成的气体通过不锈钢管道通入实验腔，实验腔为长度150 mm、直径100 mm的柱状腔体。控温模块由加热丝和PID控制器组成，加热丝直径3 mm，以30 mm的间隔均匀缠绕在实验

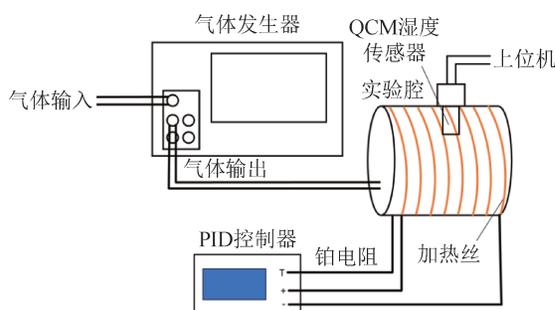


图3 实验平台示意图  
Fig.3 Schematic diagram of experimental platform

腔外围，PID控制器的测温铂电阻安装在实验腔内部，通过控制加热丝间接控制实验腔内部的温度，控温稳定性达到 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。QCM湿度传感器通过实验腔侧壁管道安装在实验腔内部。

### 1.4 传感器温漂现象

石英晶体根据切割的方位不同，可以分为AT切、BT切、CT切等多种切型，不同切型的石英温频特性相差很大，如图4所示。其中AT切石英晶片的温漂较小，且压电活力高，因此常用作QCM传感器的基片。

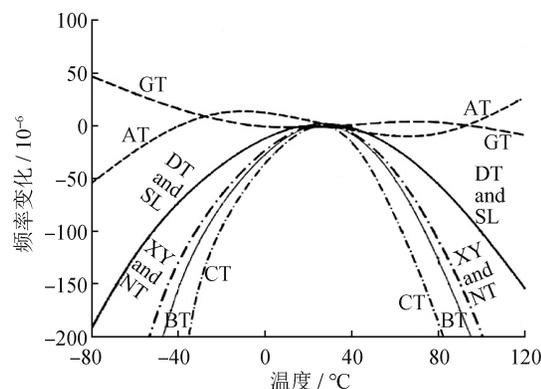


图4 不同切型石英晶体温频特性图  
Fig.4 Temperature frequency characteristics of quartz crystals with different cut shapes

将发生器输出气体的温度设定为 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ，绝对湿度设定为 $1.15 \text{ g/m}^3$ ，实验腔温度由室温 $24.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 加热至 $110.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ，QCM传感器频差随温度变化曲线如图5所示。

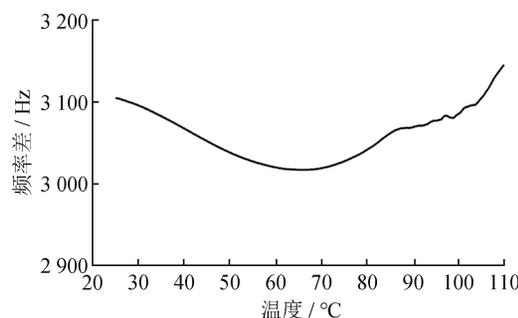


图5 QCM传感器频差随温度变化曲线  
Fig.5 Curve of QCM sensor frequency difference variation with temperature

由图5可以看出，在高温环境中AT切石英晶体的温频特性不是线性的，有较为明显的温度漂移现象。GO膜作为传感器湿敏感膜，其工作的温度上限难以超过 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ，所以市面上少见能在 $70 \text{ }^\circ\text{C}$

以上工作的QCM湿度传感器。因此，研究一种对在高温环境下工作的QCM湿度传感器的温度漂移进行有效补偿的方法，具有重要意义。本文提出了一种基于深度学习的修正方法，能够实现在高温环境下对基频为4 MHz的QCM湿度传感器的输出频率进行有效修正，补偿后的均方误差不超过 $5 \times 10^{-5}$ 、最大误差不超过 $1 \times 10^{-4}$ 。

## 2 基于BP神经网络的QCM温度补偿

### 2.1 深度学习理论

神经网络<sup>[17]</sup>在数据拟合、特征恢复、信号补偿等领域有着广泛的应用。其网络模型由输入层、若干隐藏层以及输出层构成，可以实现从输入到输出的非线性映射，其网络结构如图6所示。

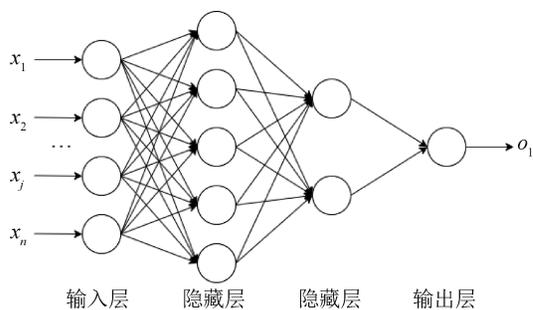


图6 神经网络基本结构图  
Fig.6 Basic structure diagram of deep neural network

在神经网络模型中，输入层与输入维度保持一致，输出层维度与输出维度保持一致，隐藏层可根据具体问题与环境自由搭建，层与层之间能够相互连接，但同一层中的各个神经元之间无直接连接关系。

神经网络针对未知映射关系的输入-输出模型具有较好的拟合能力，尤其是针对非线性映射，只需有足够数量的输入-输出数据进行多次迭代训练，即可得到输入到输出的拟合模型。

每一次迭代都要经历以下步骤：①前向传播，即从前到后逐层运算，最终得到网络的输出；②计算代价函数；③反向传播，即从输出层开始，到第一隐藏层为止，逐层计算各层的梯度；④更新参数，利用上一步中得到的梯度，将神经网络中的所有参数进行更新<sup>[18]</sup>。重复上述步骤，直至梯度的变化量低于阈值，此时停止计算，得到训

练完成的神经网络模型。

在本文设计的系统中，QCM振荡产生的频差与环境温度之间为非线性关系，BP神经网络模型作为目前应用最广泛的深度神经网络，具有很强的非线性映射能力，能够对系统输出的频率值进行温度补偿。

### 2.2 实验方案

制作实验所需的包含频差信号与温度信号在内的数据集。数据集中包含实测的频差信号以及由理论计算得到的绝对湿度信息。QCM湿度传感器的频差信号与绝对湿度相关，因此理论上二者会保持相同的变化趋势。分别对1.4节实验所得的1924组频差信号以及绝对湿度信号进行归一化处理，并将数据集分为两组：80%作为训练集，20%作为测试集。利用训练集完成QCM湿度传感器温度补偿模型对频差以及绝对湿度信号特征的学习，利用测试集检验QCM温度补偿模型的性能。

### 2.3 实验环境

本实验的硬件环境：Apple M2芯片内置GPU（10核）；本实验的软件环境：操作系统为64位的macOS Ventura 13.2.1，开发环境为Python 3.11 + PaddlePaddle 2.5。

### 2.4 结果与讨论

#### 2.4.1 基于BP神经网络的QCM温度修正实验

本实验使用的神经网络模型为四层BP神经网络模型，输入层维度为4，第一隐藏层维度为12，第二隐藏层维度为8，输出层维度为1，为Linear全连接层，网络结构如图7所示。

本实验中输入参数为温度信号、理论得到的

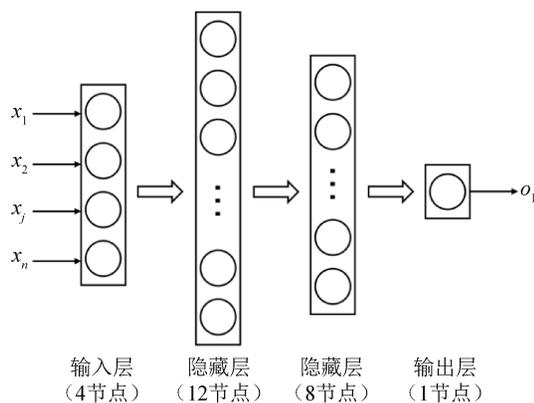


图7 BP神经网络结构图  
Fig.7 Structure diagram of BP neural network

绝对湿度信号、频差信号以及气体发生器的绝对湿度信号，输出参数为对频率信号的补偿值与补偿前频率的极差之比。训练时设置学习率0.001，batch\_size为20，训练次数为1500次，训练时间为(6.6±0.9)s，损失函数为输出参数的均方误差，训练过程如图8所示。从图8可以看出，经过1500次训练，损失函数逐渐减小，模型趋于收敛。

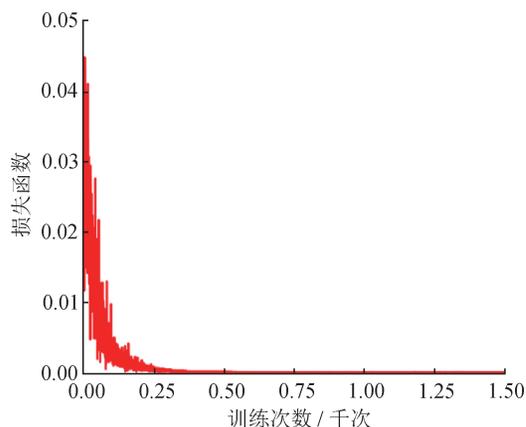


图8 模型训练过程  
Fig.8 Model training process

### 2.4.2 补偿效果分析

将实测的频差信号以及由理论计算得到的绝对湿度信息输入到训练好的QCM湿度传感器温度补偿模型中，进行基于有限测点数据的模型温度补偿效果分析实验，补偿效果如图9所示。其中，横坐标为理论实际补偿值与补偿前频率的极差之比，纵坐标为经过模型计算得到的补偿值与补偿前频率的极差之比，其均方误差为 $2.3 \times 10^{-5}$ ，最

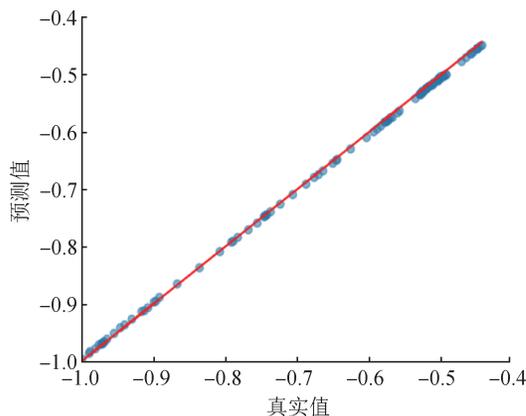


图9 模型补偿结果与理论结果对比图  
Fig.9 Comparison between model compensation results and theoretical results

大误差为 $6.2 \times 10^{-5}$ ，满足QCM湿度传感器温度补偿的指标要求。

将补偿后的频率差值与补偿前对比，能够明显看出经过温度补偿后整体频差的变化趋势与绝对湿度变化趋势更接近，如图10~11所示。

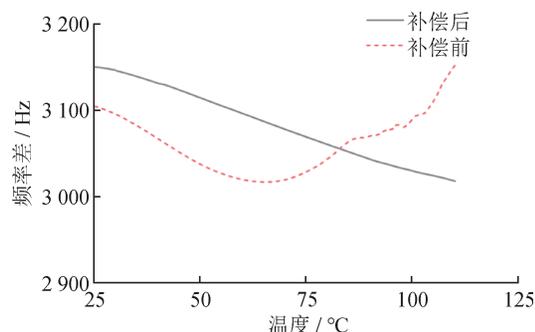


图10 补偿前后频差趋势对比图

Fig.10 Comparison of frequency difference trends before and after compensation

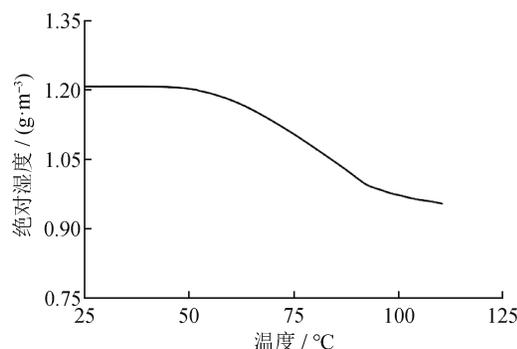


图11 绝对湿度随温度变化趋势图

Fig.11 Absolute humidity trend chart with temperature change

## 3 结论

综上所述，本文提出了一种基于深度学习方法的高温环境下QCM湿度传感器的温度补偿模型，通过使用多层BP神经网络有效提取频率信号和温度信号的动态特征以及相关性特征，对不同温度下系统输出的频率值进行温度补偿，实现了对以GO膜作为湿敏感膜的QCM湿度传感器的频差及温度的依赖特征向高阶信息抽象的深度学习。在基于有限测点数据的定绝对湿度的变温动态试验中，修正后的频差曲线和模拟曲线平均误差为 $2.3 \times 10^{-5}$ ，满足修正指标。该方法能够有效提高QCM湿度传感器的灵敏度，且成本低、适应性强、稳定性好，有很大的发展空间，为未来研究温湿

压耦合条件下的QCM湿度传感器的频率修正技术提供了一定的理论基础与技术支持。

### 参考文献

- [1] 邓凡霏. QCM传感器气体检测系统设计及其在鸡蛋品质检测中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- DENG F F. Design of QCM sensor gas detection system and its application in egg quality detection [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [2] 毛坤磊. 基于功能化纤维素的高灵敏QCM湿度传感器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- MAO K L. Research on highly sensitive QCM humidity sensor based on functionalized cellulose [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [3] 沈兵, 徐甲强, 王炉煜, 等. 基于羟基磷灰石的QCM湿度传感器研究[J]. 电子元件与材料, 2022, 41(1): 53-58.
- SHEN B, XU J Q, WANG L Y, et al. Research on QCM humidity sensors based on hydroxyapatite [J]. Electronic Components and Materials, 2022, 41(1): 53-58. (in Chinese)
- [4] 何朝梁, 金浩, 陶翔, 等. 基于氧化石墨烯的QCM呼吸传感器及系统[J]. 仪表技术与传感器, 2020(12): 1-5.
- HE C L, JIN H, TAO X, et al. QCM respiratory sensor and system based on graphene oxide [J]. Instrument Technology and Sensors, 2020(12): 1-5. (in Chinese)
- [5] VASILJEVIC D Z, AIDA M, LUCA A, et al. Performance analysis of flexible ink-jet printed humidity sensors based on graphene oxide [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(11).
- [6] 李晓钰. 基于氧化石墨烯复合物的新型气湿敏传感器研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- LI X Y. Research on a novel gas humidity sensor based on graphene oxide composite [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [7] DIKIN A D, STANKOVICH S, ZIMNEY J E, et al. Preparation and characterization of graphene oxide paper [J]. Nature: International Weekly Journal of Science, 2007, 448(7).
- [8] JIN H, TAO X, FENG B, et al. A humidity sensor based on quartz crystal microbalance using graphene oxide as a sensitive layer[J]. Vacuum, 2016, 140.
- [9] 王鑫. 基于生成对抗网络模型的数据填补技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- WANG X. Research on data filling technology based on generative adversarial network model [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [10] 彭钰哲. 基于QCM的尘埃检测系统[D]. 西安: 西北大学, 2022.
- PENG Y Z. QCM based dust detection system [D]. Xi'an: Northwest University, 2022. (in Chinese)
- [11] 肖光华. QCM湿度传感器测量系统的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- XIAO G H. Development of QCM humidity sensor measurement system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [12] DICKERT F L, MICHAEL J, LIEBERZEIT P A, et al. QCM-sensors of bioparticles from nano to micro - from bio to plastics - from Sauerbrey to not Sauerbrey[J]. Sensoren und messsysteme, 2008.
- [13] 孙登强, 赵玉龙, 李波, 等. 高精度石英振梁谐振式传感器测试系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2018(6): 5-10.
- SUN D Q, ZHAO Y L, LI B, et al. Design of a high-precision quartz vibrating beam resonant sensor testing system [J]. Instrument Technology and Sensors, 2018(6): 5-10. (in Chinese)
- [14] 徐晶. QCM传感器检测系统的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
- XU J. Research on QCM sensor detection system [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009. (in Chinese)
- [15] 郑俊褒, 汪亚明, 王玉平, 等. 基于单片机的石英晶体微天平气体检测系统设计[J]. 测试技术学报, 2009, 23(4): 313-318.
- ZHENG J B, WANG Y M, WANG Y P, et al. Design of a quartz crystal microbalance gas detection system based on a microcontroller [J]. Journal of Testing Technology, 2009, 23(4): 313-318. (in Chinese)
- [16] 徐晶, 骆英. QCM振荡频率检测平台的建立及其稳定性探讨[J]. 传感技术学报, 2008(5): 791-794.
- XU J, LUO Y. Establishment and stability exploration of

QCM oscillation frequency detection platform[J]. Journal of Sensing Technology, 2008 (5): 791-794. (in Chinese)

[17] ZHAN S G, CHAO L, YAN S W, et al. Design and experimental research of a temperature compensation system for silicon-on-sapphire pressure sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(3).

[18] 刘后胜, 陶健林. 基于Keras的CNN的垃圾短信分类研究[J]. 沧州师范学院学报, 2022, 38(1): 38-43.

LIU H S, TAO J L. Research on garbage SMS classification based on Keras CNN [J]. Journal of Cangzhou Normal University, 2022, 38 (1): 38-43. (in Chinese)

(本文编辑: 刘宇轩)



**第一作者:**冯俊一(2000—),男,硕士研究生,山东聊城人,主要研究方向为温湿压耦合条件下的QCM湿度传感器频率修正技术。



**通讯作者:**聂晶(1985—),男,副研究员,博士生导师,工学博士,主要研究方向为精密测量与特种传感技术等;发表学术论文70余篇,授权发明专利15项,第一完成人获省部级科技进步二等奖2项;现为中国仪器仪表学会高级会员、中国湿度与水分专业委员会副秘书长。