

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104765

# 非色散红外 CO<sub>2</sub> 气体传感器的抗温湿度干扰设计\*

张加宏<sup>1</sup> 朱 涵<sup>1</sup> 顾 芳<sup>2</sup> 刘清倦<sup>1</sup> 裴 昱<sup>1</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 南京 210044;

2. 南京信息工程大学物理与光电工程学院 南京 210044)

**摘要:**为了抑制环境温湿度对非色散红外(NDIR)CO<sub>2</sub>气体传感器测量精度的严重干扰,从硬件补偿的角度出发,为其设计了低湿控制模块与恒温控制模块。采用由聚偏氟乙烯(PVDF)疏水滤膜与3A分子筛构造的气体干燥管过滤CO<sub>2</sub>气体中的水份实现气室降湿,同时采用增量式比例-积分-微分(PID)算法调节包裹在光学气室外的加热片的功率,达到恒温效果。研究分析了温湿度对气体浓度测量精度的影响,对低湿恒温抗干扰设计进行了测试和验证。实验结果表明,基于气体干燥管的低湿控制模块能够将CO<sub>2</sub>气体的湿度降低到8%左右,而恒温控制模块能够将气室温度稳定在40℃。在复杂温湿度环境下,0~2 000×10<sup>-6</sup>气体浓度范围内,具有抗温湿度干扰设计的CO<sub>2</sub>气体传感器的浓度测量平均相对误差为8.38%,显著减小了检测系统的温湿度漂移,研究结果对于研制高性能的NDIR气体传感器有参考价值。

**关键词:**非色散红外;CO<sub>2</sub>气体传感器;恒温模块;低湿模块;抗干扰设计

**中图分类号:**TP219;TN219

**文献标识码:**A

**国家标准学科分类代码:**510.20

## Anti-interference design of temperature and humidity for non-dispersive infrared CO<sub>2</sub> gas sensor

Zhang Jiahong<sup>1</sup> Zhu Han<sup>1</sup> Gu Fang<sup>2</sup> Liu Qingquan<sup>1</sup> Pei Yu<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** In order to suppress the serious influences of environmental temperature and humidity on the measurement accuracy of the non-dispersive infrared (NDIR) CO<sub>2</sub> gas sensor, the low humidity and constant temperature control modules were designed from the perspective of hardware compensation. The gas-drying tube constructed by the polyvinylidene fluoride (PVDF) hydrophobic filter membrane and 3A molecular sieve is used to reduce the humidity of gas chamber, and the proportion integration differentiation (PID) algorithm is applied to adjust the power of the heating plate wrapped the outside of optical gas chamber to achieve a constant temperature effect. The influence of humidity and temperature on the accuracy of gas concentration measurement is studied. At the same time, the anti-interference design of the low-humidity and constant-temperature is tested and verified. Experimental results show that the low humidity control module based on the gas-drying tube can reduce the humidity of CO<sub>2</sub> gas to about 8%, and the constant temperature control module can stabilize the temperature of the gas chamber at 40 °C. In a complex temperature and humidity environment, the average relative error of the concentration measurement of CO<sub>2</sub> gas sensor including the anti-temperature and humidity interference design is 8.38% within the gas concentration range of 0~2 000×10<sup>-6</sup>, which significantly reduces the temperature and humidity drift of the detection system. The research results have certain reference value for the development of high-performance NDIR gas sensors.

**Keywords:** non-dispersive infrared; CO<sub>2</sub> gas sensor; constant temperature module; low humidity module; anti-interference design

收稿日期: 2021-09-27 Received Date: 2021-09-27

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61306138, 41875035)、江苏高校品牌专业建设工程二期项目(电子信息工程)、教育部第二批新工科研究与实践项目(E-SXWLHLX20202612)资助

## 0 引言

温室效应气体 CO<sub>2</sub> 浓度的持续增加已对全球气候环境、生态农业和人类日常生活等领域造成了诸多影响,为了积极应对这些挑战,国家提出了碳达峰与碳中和的目标,而在实际节能碳减排过程中加强对 CO<sub>2</sub> 气体浓度的在线高效监测尤为重要。目前气体浓度检测方法多种多样,其中,非色散红外(non-dispersive infrared, NDIR)技术因为选择性好、灵敏度高、检测范围广、抗干扰能力强<sup>[1-4]</sup>在空气质量监测、农业生产、灾害预报、矿井勘探、医疗卫生等领域得到了广泛应用<sup>[5-10]</sup>。例如,Michael 等<sup>[5]</sup>集成和校准了低成本 NDIR CO<sub>2</sub> 气体传感器,并部署在覆盖瑞士的传感器网络中进行了环境 CO<sub>2</sub> 浓度监测。Heger 等<sup>[6]</sup>利用 NDIR 传感器模块在原位土壤开展 CO<sub>2</sub> 浓度连续监测。Wang 等<sup>[7]</sup>研发了用于温室环境的高灵敏度红外 CO<sub>2</sub> 传感器,对光路部分进行防湿与透气处理,因此适用性较强。Tan 等<sup>[8]</sup>实现了一种复合红外光学检测系统测量 3 种气体(CO、CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub>),可应用于矿井有害气体的检测。Vincent 等<sup>[9]</sup>利用 NDIR 技术设计了一种手持便携式 CO<sub>2</sub> 呼吸分析仪,可以诊断呼吸系统疾病和确定人体代谢率。综上可知,基于 NDIR 技术的气体传感器已经得到了长足的发展,具有巨大的商业价值。尽管如此,在实际 CO<sub>2</sub> 检测过程中,NDIR 气体传感器的测量结果易受环境温湿度的干扰,温湿度等环境因素不仅使测量系统的器件特性发生漂移,而且对气体本身的光谱特性及其吸收效率产生显著影响,滤光片的中心波长也会发生偏移,这必然导致检测到的 CO<sub>2</sub> 气体浓度随之产生较大偏差。

为了解决温湿度干扰气体浓度测量精度和稳定性的问题,人们通常选用硬件或软件补偿方法进行温湿度误差修正。在硬件补偿方面,于震等<sup>[10]</sup>研究了催化气体传感器的恒温检测方法及其在瓦斯检测中的应用,不仅有效削弱了环境温度干扰,而且提升了传感器线性区间。李金义等<sup>[11]</sup>基于可调谐二极管激光吸收光谱技术,研制了单端式非合作目标遥测系统。裴昱等<sup>[12]</sup>在 CO<sub>2</sub> 气体传感器外部增加恒温控制模块,恒定温度后传感器测量误差小于 $\pm 60 \times 10^{-6}$ 。在软件补偿方面,Yi 等<sup>[13]</sup>研制了双椭圆光波导非色散红外 CO<sub>2</sub> 气体传感器,并根据实验结果构建了拟合方程用于传感器的温度误差补偿。为了对红外 CO<sub>2</sub> 气体传感器开展温度动态补偿,常敏等<sup>[14]</sup>设计了一阶受控马尔可夫链温度补偿模型。Wang 等<sup>[15]</sup>采用 BP 神经网络对红外甲烷气体传感器由于环境温湿度所引起的非线性误差进行了补偿研究。为了抑制温度和湿度对 CO<sub>2</sub> 气体传感器测量精度的影响,孙亚飞等<sup>[16]</sup>和顾

芳等<sup>[17]</sup>改进了人工神经网络补偿算法且取得一定的成效。但是补偿效果依然受到样本大小与建模精度等因素的影响。而硬件补偿目前主要围绕的是温度补偿,综合考虑抗温湿度干扰的研究报道较少。为此,本文提出系统性的硬件补偿方案,通过增加低湿控制模块与恒温控制模块,着重研究了不同温湿度环境下抗干扰效果,实验测试结果表明抗温湿度干扰设计较好地削弱了环境温湿度对基于 NDIR 技术的气体传感器测量结果的影响,提高了传感器的测量精度和稳定性。

## 1 系统设计

### 1.1 系统总体设计

基于朗伯-比尔定律的 NDIR 技术主要根据气体分子吸收特定波长的光子,再通过对比吸收光谱强度测算气体浓度。如图 1 所示,带有抗温湿度干扰设计的 NDIR CO<sub>2</sub> 气体传感器主要由光学系统、低湿控制模块、恒温控制模块以及外围电路模块等组成。光学系统模块包括红外光源、采样气室以及探测器。单气室双波长扁锥型采样气室的腔长为 8 cm,探测面直径为 1 cm,锥角为 5°。气室左侧嵌入 IR715EN 红外光源,右侧嵌入 TPS2534 型双通道光电探测器,它的两个光强感应窗口分别封装了中心波长为 4.26 μm 的测量滤光片作为测量通道以及中心波长为 3.95 μm 的参考滤光片作为对比通道<sup>[12,17]</sup>。外围电路的主要模块有电源模块、STM32 单片机、光源驱动电路、恒温控制电路、低湿控制模块、滤波放大电路、A/D 转换器、蓝牙模块、上位机以及手机端。从图 1 中可看出,系统工作时,通过 LM358 光源驱动电路实时调制红外光信号,待测气体经气泵抽入采样气室中会吸收相应波段的红外光导致光强变弱,光线到达探测器后经过对比通道以及测量通道分别进行光电转换。经过滤波放大后再由 AD7794 转换为数字信号发送给 STM32 单片机处理,单片机最终通过串口和蓝牙模块将温湿度和气体浓度等信息发送至上位机和手机端。

### 1.2 低湿恒温抗干扰设计

为了使 NDIR 气体传感器始终处在低湿恒温的状态,保证气体浓度测量精度不受影响,本文进行了低湿恒温抗干扰设计。

一方面,为了消除环境湿度的影响,需要构造气体除湿装置。鉴于 3A 分子筛具有良好的吸水性能,并且可以选择性吸附水分,达到脱水的目的<sup>[18]</sup>,本文通过亚克力材质的气体干燥管存放 3A 分子筛来过滤 CO<sub>2</sub> 气体中的水分子,可达到降低湿度的效果。如图 2(a)所示,CO<sub>2</sub> 气体可以从气体干燥管的左侧入气口进入除湿装置,入气口处封装有 PVDF 聚偏氟乙烯过滤膜,可有效格挡空

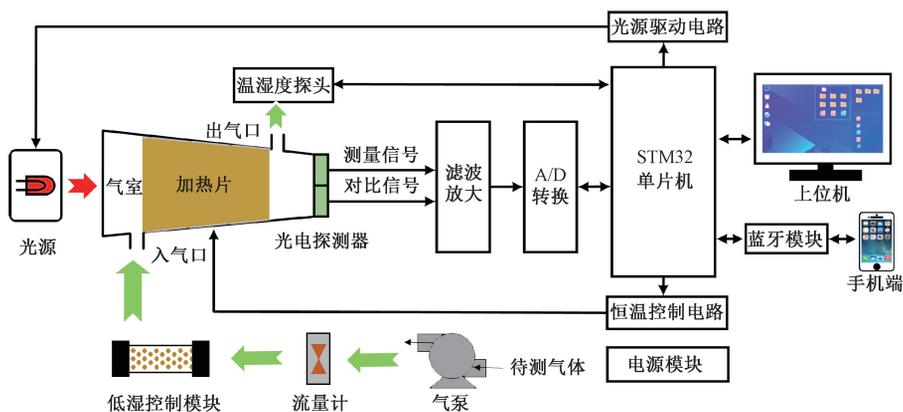


图 1 考虑抗温湿度干扰设计的 CO<sub>2</sub> 红外气体传感器检测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CO<sub>2</sub> infrared gas sensor detection system including anti-temperature and humidity interference design

气中的小水珠,防止液体水进入气体干燥管,同时,气体干燥管内填充 3A 分子筛用于吸附待测气体内的水分子。待测 CO<sub>2</sub> 气体在除湿装置中干燥后再从右侧出气口进入到采样气室。另一方面,对整个采样气室内部进行恒温控制,主要采用比例 (proportion)-积分 (integral)-微分 (derivative) 控制器 (PID) 控制的聚酰亚胺加热片来实现<sup>[12,19]</sup>。如图 2(b) 所示,在实际恒温控制过程中首先将加热片包裹在采样气室金属壳的外层,然后利用出气口处 SHT11 温湿度传感器探头采集气室当前温度值,并将当前温度值与目标温度值的差值作为增量式 PID 算法的输入。PID 控制算法是一个闭环反馈控制系统,STM32 单片机据此动态调控 PWM 波占空比,再经由 TB6612FNG 驱动芯片调整加热片的输出功率,从而完成对气室的温度调节。前期从理论和实验上对不同环境温度下气室内的恒温效果进行了测试验证<sup>[12]</sup>,设定目标温度为 40 °C,通过增量式 PID 算法进行恒温控制误差低于 0.5 °C。

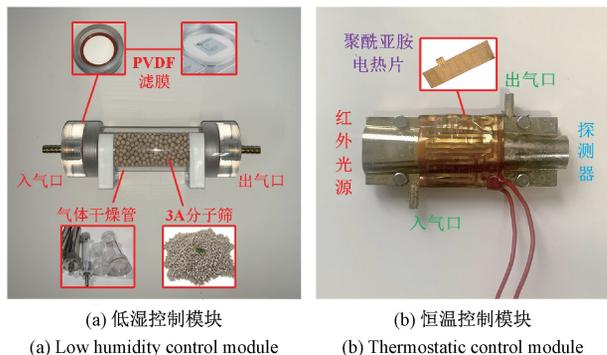


图 2 实物图

Fig. 2 Physical image

为探究气流速度对实际应用中恒温效果与稳定时间的影响,开展了恒温对比实验,通过流量计调节气体流

速,将气体流量分别控制在 0 L/min (无气泵)、2 L/min、3 L/min、4 L/min 进行实验。图 3(a) 为 4 组实验总体恒温曲线,图 3(b) 为 4 组实验恒温过程中实际测量温度与目标温度 40 °C 之间的误差。实验结果表明,气体流速对起始温度变化的影响有较大差异,随后影响相似,总体达到恒温的稳定时间均约 400 s,恒温误差约为 0.2 °C。

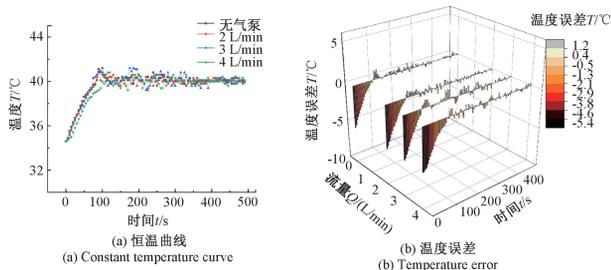


图 3 不同气体流量恒温效果图

Fig. 3 Diagram of constant temperature effect under different gas flow

### 1.3 硬件检测电路设计

良好的外围硬件电路设计是 CO<sub>2</sub> 气体传感器检测精度的保障。如图 4 所示,它包括主控电路、光源驱动电路以及光电探测器调理电路。电源模块为 STM32 单片机,温湿度传感器、加热驱动芯片、蓝牙通信模块等供电。温湿度传感器接口用于连接 SHT11 温湿度传感器,恒温接口用来连接聚酰亚胺加热片,加热驱动芯片 TB6612FNG 是恒温控制模块的核心驱动元件。STM32 输出频率为 0.5 Hz、占空比为 50% 方波脉冲,然后通过 LM358 芯片放大处理后使用 MOS 管通断对红外光源进行控制。光电探测器信号调理电路主要分为信号滤波放大电路与 A/D 转换电路。测量与对比通道的信号作为 ICL7650 芯片运放的正向输入端输入值,再滤波放大后进入 AD7794 实现模数转换,转换后的数据输入给 STM32 单片机处理。

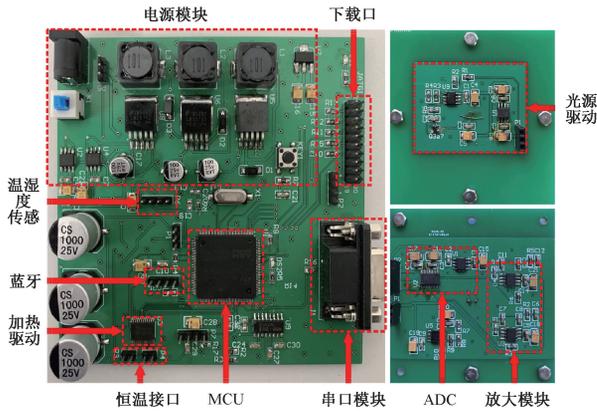


图 4 焊接完成的 PCB 电路板实物图

Fig. 4 The physical picture of the soldered PCB circuit board

## 2 实验测试与结果分析

### 2.1 实验标定与测试平台

图 5 给出了实验标定与抗温湿度干扰测试平台。为了确保标定环境的稳定性,在标定实验过程中,将 NDIR 气体传感器测量系统放置于 C180 温湿度试验箱内,通过试验箱的交换口可接入待测气体的通气管、电源线以及用于收发数据的串口线。

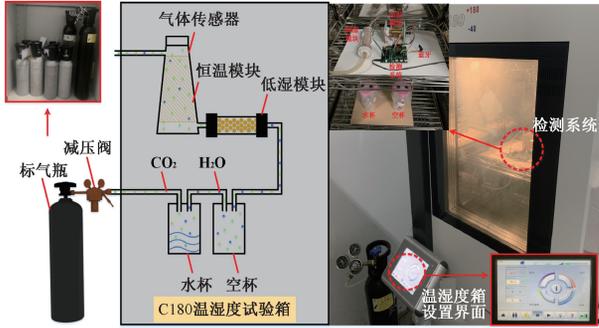


图 5 实验标定与测试平台图

Fig. 5 Experimental calibration and test platform diagram

在标定实验中无需加入图中的湿度控制装置和恒温控制装置,采用高纯度氮气和 8 种不同浓度的 CO<sub>2</sub> 气体作为标气,气体浓度范围在 0~2 003×10<sup>-6</sup>。而在抗温湿度干扰实验测试中,则需要结合湿度控制装置,通过 C180 温湿度试验箱设定温度模拟不同的温湿度环境。从图中可以看到,湿度控制装置主要包括湿度发生装置和低湿控制模块。湿度发生装置由两个密封的杯子组成,它们的密封盖上均设置两个通气孔用于通入导管。水杯通过导管与气瓶连接,杯中放置清水给通入的 CO<sub>2</sub> 气体加湿,气体湿度大小可调节水位高度进行控制。空杯一端与水杯连接,另一端与低湿控制装置连接,用于防止气体在通气过程中因流速过大导致液态小水珠进入采

样气室内<sup>[17]</sup>。实验中将温湿度传感器放置在采样气室出气口用于实时监测气体湿度。

### 2.2 标定实验与误差分析

在研究红外 CO<sub>2</sub> 气体传感器抗温湿度干扰的效果前要进行系统的标定实验,以获得气体浓度与输出的电压信号之间的关系曲线以及标定公式。首先,将 CO<sub>2</sub> 传感器系统装配好,然后将 99.99% 的高纯度氮气通入采样气室排空残余气体,检测出气口气体相对湿度是否为 0%。其次,将 C180 温湿度试验箱温度设置为 40℃,相对湿度尽可能调节到 10% 以下。在实际标定环境中气体通过导管进入采样气室,所以环境相对湿度对采样气室不会产生影响。实验开始后,将待测标准氮气以大于环境空气流速的速度通入采样气室,持续两分钟以确保标定过程中采样气室中仅有待测气体。实验将利用串口调试助手实时重复记录下对比通道与测量通道的电压输出值,将两电压输出值的比值记为  $f$ ,并求出  $f$  的平均值。最后,通入不同标准浓度的 CO<sub>2</sub> 气体重复实验记录上述数据。本文选用浓度为 10×10<sup>-6</sup>, 304×10<sup>-6</sup>, 487×10<sup>-6</sup>, 708×10<sup>-6</sup>, 896×10<sup>-6</sup>, 1 100×10<sup>-6</sup>, 1 516×10<sup>-6</sup>, 2 003×10<sup>-6</sup> 的 CO<sub>2</sub> 混合气体进行标定实验,图 5 给出了气体标定实验的结果。

对应不同标准浓度 CO<sub>2</sub> 气体时的两通道输出电压信号如图 6(a) 所示,不难发现当待测气体浓度发生变化时,探测器对比通道的电压信号幅值变化较小,而测量通道的电压信号幅值则会随着待测气体浓度的升高逐渐降低。因为 CO<sub>2</sub> 气体浓度越高,红外波段的光吸收越多,测量通道电压越小,而参考通道几乎保持不变,这使得比值  $f$  随着浓度增加而增大,如图 6(b) 所示,以电压比值平均值为自变量,待测 CO<sub>2</sub> 气体的标准浓度为因变量,通过多项式函数拟合得到的标定公式为:

$$C = 1.32332 \times 10^6 f^2 - 2.32644 \times 10^6 f + 1.02248 \times 10^6 \quad (1)$$

为了验证标定公式的准确性,将式(1)得到检测浓度与 CO<sub>2</sub> 标准气体浓度进行线性比较,如图 6(c) 所示,反演的 CO<sub>2</sub> 气体检测浓度与标准浓度之间存在明显的线性关系,说明标定公式准确性较好。如图 6(d) 所示,检测浓度值与标准浓度之间也存在一定的绝对偏差,最大误差值约为 50×10<sup>-6</sup>。结合图 6(d) 的数据,根据式(2)可以计算出整体的平均相对误差  $\omega$  为 2.76%。

$$\omega = \sum_{i=1}^n \left| \frac{C_i - C_p}{nC_p} \right| \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\omega$  表示为平均相对误差,  $C_p$  表示为 CO<sub>2</sub> 待测气体的标准浓度值,  $n$  表示为检测次数。

本文选择 487×10<sup>-6</sup>、896×10<sup>-6</sup>、1 516×10<sup>-6</sup> 三组标准浓度气体进行重复性误差实验。每隔 1 min 测量一次数据,连续记录 10 个数据值,图 7(a) 给出了所检测的气体浓度曲线,图 7(b) 为检测浓度误差。

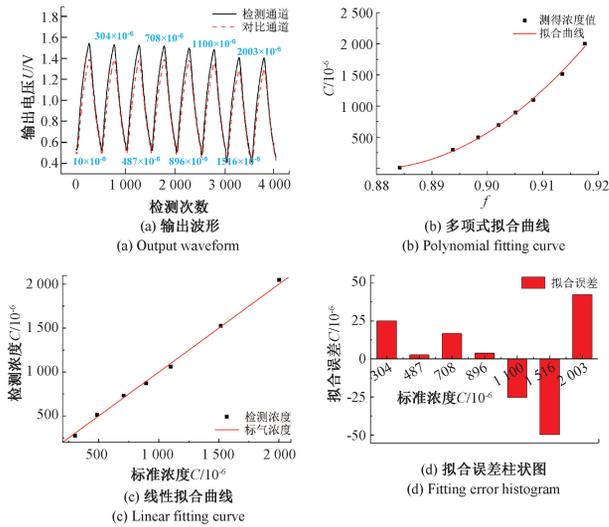


图 6 气体标定实验的结果

Fig. 6 Results of gas calibration experiments

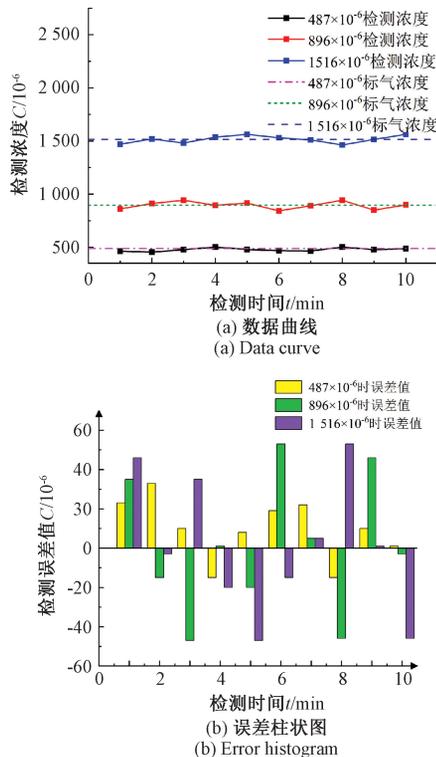


图 7 重复性实验

Fig. 7 Repeatability experiment

从图 7(b) 可以看出, 当待测标准气体浓度相同时, 气体传感器检测系统连续测量的十组浓度值均在其标准气体浓度的  $\pm 50 \times 10^{-6}$  范围内变化。实验选择整个检测范围的相对标准差作为  $\text{CO}_2$  气体传感器检测系统的重复性误差指标, 公式如下:

$$RSD = \frac{1}{\bar{C}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n-1}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $RSD$  表示相对标准差,  $\bar{C}$  表示为 10 次测量的平均值,  $C_i$  表示为 10 次测量值,  $n$  表示为检测次数。

根据式 (3) 可以得到 3 种标准气体浓度下传感器的重复性误差。如表 1 所示, 重复性误差均小于 4%, 说明该传感器的重复性较好。

表 1 重复性实验相对标准差

标准浓度 $C_p/10^{-6}$	$RSD/\%$
487	3.32
896	3.93
1 516	2.32

### 2.3 温湿度影响分析

在实际检测过程中, 基于 NDIR 技术的气体传感器易受环境温湿度的影响, 利用上述的实验测试平台开展温湿度影响实验与分析, 实验过程中不接入低湿控制模块与恒温控制模块。一方面, 在  $40^\circ\text{C}$  的环境温度下, 通过湿度发生装置改变待测  $\text{CO}_2$  气体的湿度。图 8(a) 和 (b) 给出了环境湿度对 NDIR  $\text{CO}_2$  气体传感器测量结果的影响。当待测标准气体浓度相同并且环境湿度范围在 30%~60% 时, 环境湿度越高检测到的  $\text{CO}_2$  气体浓度值越小, 而当待测标准气体浓度相同并且环境湿度范围在 60%~80% 时, 环境湿度越高检测到的  $\text{CO}_2$  气体浓度值越大, 而且实际检测值与标准浓度之间的绝对误差极值达到  $615 \times 10^{-6}$ , 平均相对误差为 37.13%, 说明检测系统存在着严重的湿度漂移现象。这主要是因为采样气室内红外光由于水蒸气存在而产生散射, 并且水蒸气散射系数与湿度之间存在指数增长规律, 进而导致红外光的光强呈现指数衰减<sup>[20]</sup>, 探测器的输出电压会相应发生变化。同时, 进气过程中, 气体携带的水分子与气体分子会发生化学反应从而生成少量的水合物, 它们也会改变待测气体的吸收光谱, 最终导致检测通道的滤光片所接收的红外光的光强信号发生改变, 从而影响了气体浓度测量结果。

另一方面, 在 10% 以下的环境湿度下, 通过 C180 温湿度试验箱改变待测  $\text{CO}_2$  气体的温度。由图 8(c) 和 (d) 可知, 当待测标准气体浓度相同并且环境温度范围在  $-10^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$  时, 环境温度越高检测到的  $\text{CO}_2$  气体浓度值越大, 且实际检测数值与标准浓度之间的绝对误差最高可达到  $1\ 154 \times 10^{-6}$ , 平均相对误差为 23.48%。该结果说明气体检测系统有明显温度漂移, 导致温漂的主要原因有以下几点: 首先, 当环境温度低于  $40^\circ\text{C}$  时, 温度越低,  $\text{CO}_2$  气体的吸收截面越小, 气体分子

活性越弱,对红外光的吸收越弱,导致探测器测量通道所接收到的红外光光强越强,输出电信号比值  $f$  越小,因此得到的气体浓度值越小<sup>[16]</sup>。其次,红外光源发射功率受环境温度影响,甚至引起滤光片的中心波长发生偏移,而硬件电路中的其他电子器件也会受到温度影响。以上这些因为温度引起的变化都会对气体传感器测量结果产生干扰。

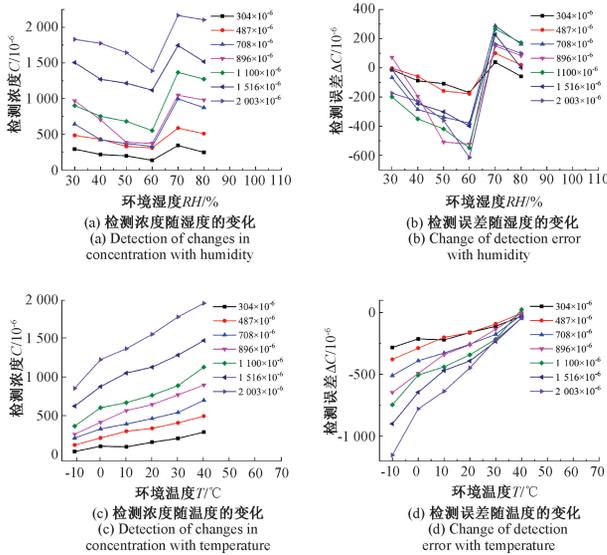


图8 气体检测浓度随湿度和温度变化的数据曲线

Fig. 8 Data curve of gas detection concentration with humidity and temperature

综上所述,为了抑制环境温湿度对非色散红外 CO<sub>2</sub> 气体传感器测量精度的严重干扰,需要开展抗温湿度干扰设计与相关的测试分析研究。

### 2.4 低湿恒温抗干扰效果测试

在抗温湿度干扰实验之前,首先需要研究3A分子筛的降湿能力以及气体干燥管长度对降湿效果的影响,本文选用长度为10和15cm的干燥管进行对比实验。将整个测量系统置于C180温湿度试验箱内,接通电源待测量系统工作稳定后,开启C180温湿度箱,设定温度  $T$  为40℃,当箱内温度趋于稳定时,打开气阀通入99.99%的高纯度氮气使整个测量系统内空气流通。在每次测量中可调节杯中的水位改变气体的湿度,分别调节湿度在30%、40%、50%、60%、70%和80%附近,然后记录两种长度的气体干燥管的降湿情况。如图9所示,10cm长度的气体干燥管可以将气体湿度降低为12%左右,15cm气体干燥管可以将气体湿度降低为8%左右,由此可见,3A分子筛能够对不同环境湿度下的气体进行有效降湿,本系统选用15cm长的气体干燥管降湿。

为了检查低湿控制模块抗湿度干扰的实际效果,在通过调节水位设定不同的环境湿度的条件下,对带有低

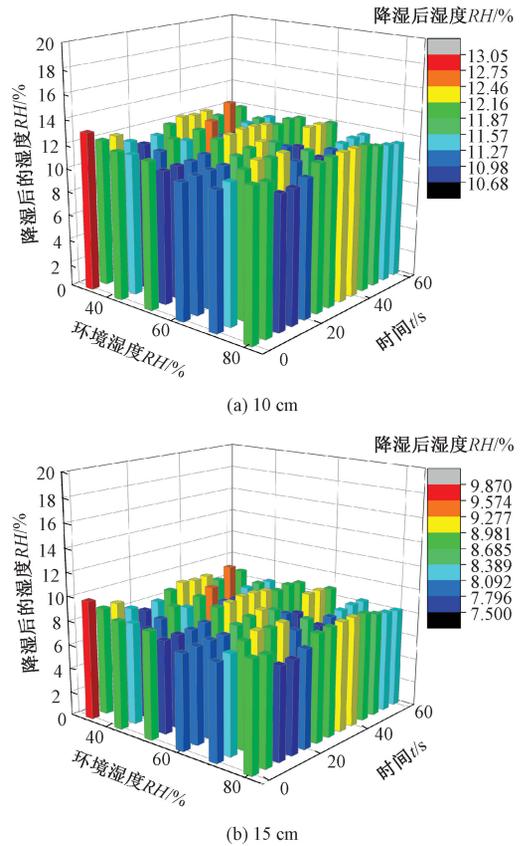


图9 不同长度气体干燥管降湿效果图

Fig. 9 Dehumidification effect diagram of gas drying tubes of different lengths

湿控制模块的 CO<sub>2</sub> 气体传感器进行测量误差研究。设置的环境湿度分别为30%、40%、50%、60%、70%、80%,选用浓度为  $304 \times 10^{-6}$ 、 $487 \times 10^{-6}$ 、 $708 \times 10^{-6}$ 、 $896 \times 10^{-6}$ 、 $1100 \times 10^{-6}$ 、 $1516 \times 10^{-6}$ 、 $2003 \times 10^{-6}$  的 CO<sub>2</sub> 混合气体进行湿度控制分析实验。在相同环境湿度下,改变待测标准气体的浓度,继续重复上述的检测过程,记录所有检测浓度数值,然后将抗湿度干扰实验中所记录的检测浓度和测量误差绘制成曲线,如图10(a)和(b)所示。由图可知,环境湿度范围在30%~80%,并且待测标准气体浓度相同时,经过低湿控制模块降湿处理后的红外 CO<sub>2</sub> 气体传感器的检测浓度基本保持不变,检测浓度与标准浓度之间的绝对误差在  $\pm 85 \times 10^{-6}$ ,平均相对误差为6.55%,明显地减小环境湿度变化导致的测量误差,可见3A分子筛低湿控制模块能够基本解决 CO<sub>2</sub> 气体传感器湿度显著漂移的问题。

为了检查恒温控制模块抗温度干扰的实际效果,采用C180温度试验箱设定不同的环境温度的条件下,对PID恒温控制的 CO<sub>2</sub> 气体传感器进行检测误差研究。PID算法的设定温度需大于正常环境温度,本系统目标温度设定40℃。在恒温控制过程中,设定  $k_p = 2$ ,  $k_i =$

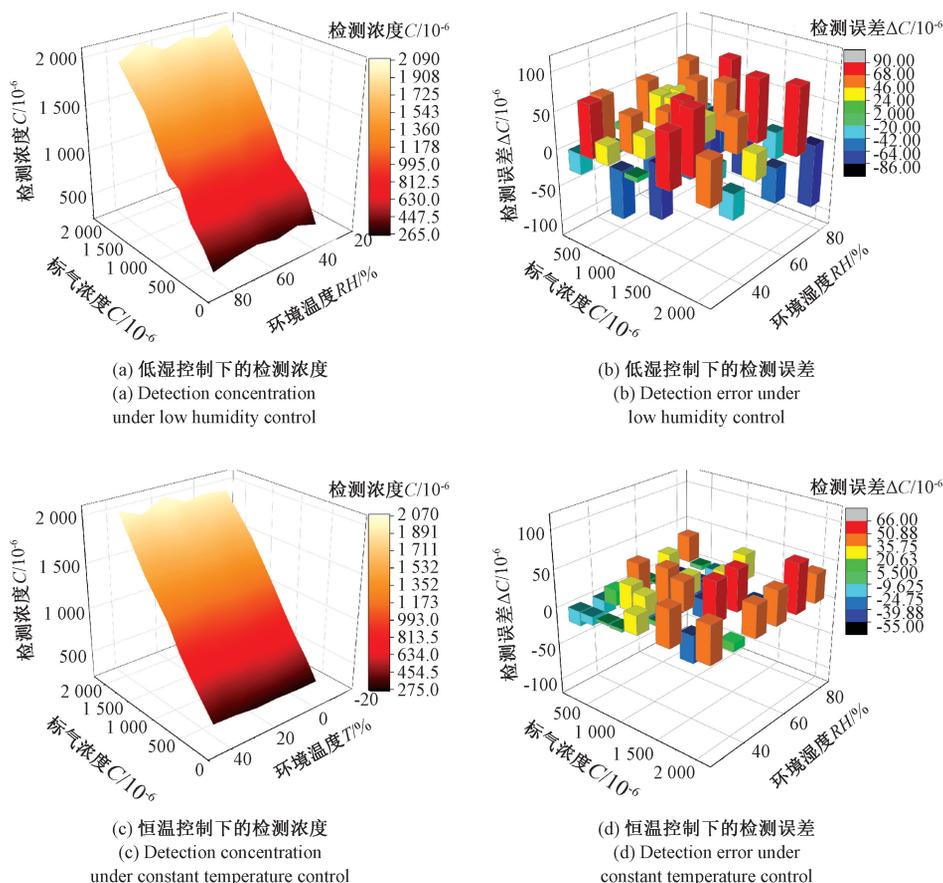


图 10 低湿恒温抗干扰效果

Fig. 10 Low humidity and constant temperature anti-interference effect

0.01,  $k_d = 0.2$ , 将试验箱的温度设置为  $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 。选用浓度为  $304 \times 10^{-6}$ 、 $487 \times 10^{-6}$ 、 $708 \times 10^{-6}$ 、 $896 \times 10^{-6}$ 、 $1\ 100 \times 10^{-6}$ 、 $1\ 516 \times 10^{-6}$ 、 $2\ 003 \times 10^{-6}$  的  $\text{CO}_2$  混合气体进行恒温控制分析实验。在相同环境温度下,改变待测标准气体的浓度,重复上述的检测过程,记录所有检测浓度数值,然后将抗温度干扰实验中所记录的检测浓度和测量误差绘制成曲线,如图 10(c) 和(d) 所示。由图可知,当  $-10\text{ }^\circ\text{C} \sim 40\text{ }^\circ\text{C}$  的环境温度范围内且待测标准气体浓度相同时,经过积分分离 PID 恒温算法所控制的红外  $\text{CO}_2$  气体传感器的检测数值基本保持不变,检测浓度与实际标准浓度之间的绝对误差控制在  $\pm 60 \times 10^{-6}$  左右,平均相对误差为 3.40%。由此可见,本文所提出的带恒温控制的红外  $\text{CO}_2$  气体传感器能够有效地减小环境温度变化导致的检测误差,基本解决了  $\text{CO}_2$  气体传感器温度漂移问题。

基于图 5 中介绍的实验测试平台,通过 C180 温湿度试验箱和水杯控制水位的方式随机设置检测环境的温湿度,在此复杂条件之下通过实验验证红外  $\text{CO}_2$  气体传感器系统的实际抗干扰能力。为了降低温度与湿度同时变化对红外  $\text{CO}_2$  气体传感器检测精度的影响,将恒温控制

模块与低湿控制模块同时组装在红外  $\text{CO}_2$  气体传感器检测设备上,达到控制检测环境温湿度的效果,从而最大程度消除环境温度和湿度变化所造成的检测误差。为了尽可能模拟复杂的现实环境,在随机环境分析实验中设置了 4 种环境状态:低温高湿、低温低湿、高温高湿、高温低湿。首先模拟低温高湿环境,将试验箱温度调至  $5\text{ }^\circ\text{C}$ ,通过调节水杯水位控制相对湿度在 75%,然后依次通入浓度为  $304 \times 10^{-6}$ 、 $487 \times 10^{-6}$ 、 $896 \times 10^{-6}$ 、 $1\ 100 \times 10^{-6}$ 、 $1\ 516 \times 10^{-6}$ 、 $2\ 003 \times 10^{-6}$  的  $\text{CO}_2$  混合气体进行随机环境抗干扰分析实验,并记录检测浓度值。最后调节其他 3 组不同的环境数值重复上述实验步骤,记录下 4 组实验所有检测数值,将实验中所记录的浓度检测数值绘制成曲线如图 11 所示。

由图 11 可知,在随机环境抗干扰分析实验过程中,带有低湿控制模块与恒温控制模块的红外  $\text{CO}_2$  气体传感器的检测数值稳定性较好,检测浓度值与标准浓度之间的绝对误差在  $\pm 105 \times 10^{-6}$  左右,平均相对误差为 8.38%。由此可见,当外界环境的温湿度发生改变时,带恒温控制以及低湿控制功能的红外  $\text{CO}_2$  气体传感器可以较好地减小环境温度湿度变化导致的检测误差。对比抗温湿度干扰

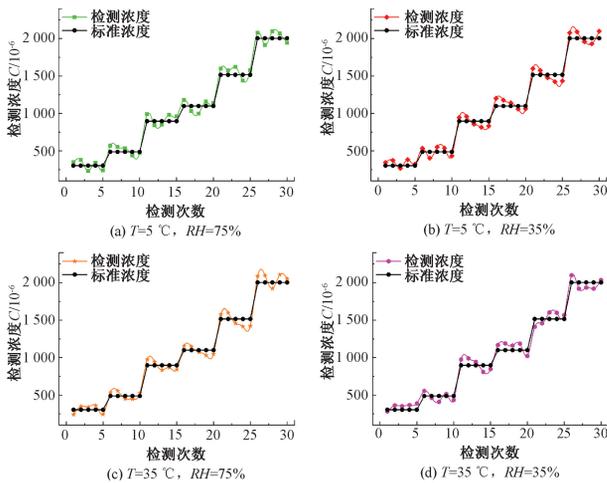


图 11 随机环境抗干扰的检测结果

Fig. 11 Anti-interference test results of random environment

前后红外气体传感器测量时的平均相对误差,不难发现抗干扰后,温湿度对于测量精度的影响明显减小。与单独恒温或者单独恒湿结果相比,恒温低湿控制下的测量误差有所增加,主要归因于温度和湿度的综合影响以及互耦问题。

最后开展长时间户外检测实验。环境温湿度数据如图 12(a)所示,结果表明恒温和低湿装置可以稳定有效地控制温度在 40 °C、相对湿度在 8%。由流量计控制气体流量为 3 L/min,每小时内记录 5 次检测到的环境中 CO<sub>2</sub> 气体浓度值持续 12 h,测量数据如图 12(b)所示。CO<sub>2</sub> 气体浓度值大多在 100×10<sup>-6</sup> 范围内变化,表明系统稳定性较好。

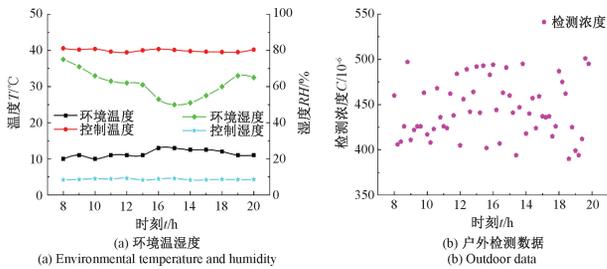


图 12 户外长时间检测结果

Fig. 12 Results of long-term outdoor detection

综上所述,本文所提出的基于 PID 算法的恒温模块和基于 3A 分子筛的低湿控制模块有效抑制 CO<sub>2</sub> 气体传感器温湿度漂移,相关研究结果为研制高性能的 NDIR 气体传感器提供了参考。

### 3 结论

本文基于非色散红外检测技术设计了一种可用于实

时在线检测的 CO<sub>2</sub> 气体传感器。为最大程度降低环境温湿度对检测精度的影响,系统通过硬件补偿方式进行了低湿模块与恒温控制模块设计。通过标定实验确定了 CO<sub>2</sub> 气体浓度标定公式,并开展了误差分析与干扰实验。在 30%~80%的湿度范围和-10 °C~40 °C 的温度范围对低湿恒温效果进行了验证。随机环境抗干扰测试表明,通过硬件补偿后的 CO<sub>2</sub> 气体传感器的检测精度得到了保证,检测误差控制在 ±105×10<sup>-6</sup> 左右,平均相对误差为 8.38%。显著地减小了检测系统的温湿度漂移,有效提升了 NDIR CO<sub>2</sub> 气体传感器实时在线检测时的抗干扰能力。

### 参考文献

[ 1 ] 任丽君, 马斌, 刘国宏, 等. 气体非色散红外传感器研究进展[J]. 分析测试学报, 2020, 39(7):922-928. REN L J, MA B, LIU G H, et al. Research progress of non-dispersive infrared sensor for gas detection [ J ]. Journal of Instrumental Analysis, 2020, 39(7):922-928.

[ 2 ] MOSTAFA V, AMIR A, ALIREZA S, et al. Breakthrough in CO<sub>2</sub> measurement with a chamberless NDIR optical gas sensor [ J ]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69 ( 5 ): 2258-2268.

[ 3 ] DINH T V, CHOI I Y, SON Y S, et al. A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction [ J ]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 231: 529-538.

[ 4 ] 谭光韬, 张文文, 王磊. 气体传感器阵列混合气体检测算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7): 95-102. TAN G T, ZHANG W W, WANG L. Research on mixed gas detection algorithm of gas sensor array [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(7): 95-102.

[ 5 ] MICHAEL M, PETER G, JONAS M, et al. Integration and calibration of non-dispersive infrared ( NDIR ) CO<sub>2</sub> low-cost sensors and their operation in a sensor network covering switzerland [ J ]. Atmospheric Measurement Techniques, 2020, 13: 3815-3834.

[ 6 ] HEGER A, KLEINSCHMIDT V, GRÖNGRÖFT A, et al. Application of a low-cost NDIR sensor module for continuous measurements of in situ soil CO<sub>2</sub> concentration [ J ]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2020, 183 ( 5 ):

- 557-561.
- [ 7 ] WANG J N, ZHENG L J, NIU X T, et al. Design and fabrication of a mid-infrared carbon dioxide sensor for the application in greenhouse environment [ J ]. Optoelectronics Letters, 2016, 12(5) : 379-383.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 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.
- [10] 于震, 张正勇, 徐定钧, 等. 催化气体传感器的恒温检测方法及其在瓦斯检测中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2009, 3(2) : 126-128.
- YU ZH, ZHANG ZH Y, XU D J, et al. Constant temperature catalytic gas sensor detection method and application in gas detection [ J ]. Instrument Technique and Sensor, 2009, 3(2) : 126-128.
- [11] 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, WU H Q, YU Z W, et al. Standoff detection of indoor CO<sub>2</sub> using TDLAS with non-cooperative targets [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10) : 229-236.
- [12] 裴昱, 张加宏, 李敏, 等. 恒温 NDIR 二氧化碳气体传感器研究 [ J ]. 激光与红外, 2021, 51(2) : 189-195.
- PEI Y, ZHANG J H, LI M, et al. Research on constant temperature NDIR carbon dioxide gas sensor [ J ]. Laser & Infrared, 2021, 51(2) : 189-195.
- [13] YI S H. Temperature compensation methods of nondispersive infrared CO<sub>2</sub> gas sensor with dual ellipsoidal optical waveguide[J]. Sensors and Materials, 2017, 29(3) : 243-252.
- [14] 常敏, 刘奔, 张学典. 红外 CO<sub>2</sub> 浓度检测中的温度补偿方法研究 [ J ]. 仪表技术与传感器, 2017, 2: 93-95,101.
- CHANG M, LIU B, ZHANG X D. Research on temperature compensation for CO<sub>2</sub> concentration measurement [ J ]. Instrument Technique and Sensor, 2017, 2: 93-95, 101.
- [15] WANG H R, ZHANG W, YOU L D, et al. Back propagation neural network model for temperature and humidity compensation of a nondispersive infrared methane sensor [ J ]. Instrumentation Science and Technology, 2013, 41(6) : 608-618.
- [16] 孙亚飞, 顾芳, 黄亚磊, 等. 基于 GA-WNN 温度补偿的红外 CO<sub>2</sub> 气体传感器系统研究 [ J ]. 传感技术学报, 2018, 31(10) : 1613-1620.
- SUN Y F, GU F, HUANG Y L, et al. Research on infrared CO<sub>2</sub> gas sensor system with temperature compensation based on GA-WNN [ J ]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(10) : 1613-1620.
- [17] 顾芳, 邢俊, 李玲, 等. 基于 GA-BP 神经网络的红外 CO<sub>2</sub> 传感器湿度补偿研究 [ J ]. 传感技术学报, 2021, 34(6) : 720-727.
- GU F, XING J, LI L, et al. Research on humidity compensation of infrared CO<sub>2</sub> sensor based on GA-BP neural network [ J ]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2021, 34(6) : 720-727.
- [18] 徐春玲, 方世东, 钱焕江. 乙醇脱水 3A 分子筛吸附剂吸附性能的研究 [ J ]. 广州化工, 2018, 46(11) : 41-43.
- XU CH L, FANG SH D, QIAN H J. Study on adsorption performance of ethanol dehydration by 3A molecular sieve adsorbent [ J ]. Guangzhou Chemical Industry, 2018, 46(11) : 41-43.
- [19] 杨天民, 谢晓璐, 张加宏, 等. 一种温控静压头装置的优化设计 [ J ]. 实验室研究与探索, 2020, 39(11) : 71-77.
- YANG T M, XIE X L, ZHANG J H, et al. Optimal design and implementation of a temperature-controlled static pressure head device [ J ]. Research and Exploration in Laboratory, 2020, 39(11) : 71-77.
- [20] 王欢, 曹振松, 汪六三, 等. 水汽分子对 CO<sub>2</sub> 谱线加宽的影响 [ J ]. 强激光与粒子束, 2010, 22(9) : 1982-1986.
- WANG H, CAO ZH S, WANG L S, et al. The influence of water vapor molecules on the broadening of CO<sub>2</sub> spectral line [ J ]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(9) : 1982-1986.

## 作者简介



张加宏, 2009 年于东南大学获得博士学位, 现为南京信息工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为微纳电子机械系统、传感器技术、微能量收集技术等方面的研究。

E-mail: zjhnuist@163.com

**Zhang Jiahong** received his Ph. D. degree from Southeast University in 2009. He is currently an associate professor and master tutor at Nanjing University of Information and Science and Technology. His main research interests include micro-nano electromechanical systems, sensor technology, and micro-energy harvesting technology.



朱涵, 2018 于淮阴师范学院获得学士学位, 现为南京信息工程大学在读硕士研究生, 主要研究方向为气体浓度光学检测技术方面的研究。

E-mail: zhuhan346@163.com

**Zhu Han** received a B. Sc. degree from Huaiyin Normal University in 2018 and is currently a M. Sc. candidate in Nanjing University of Information Science and Technology. Her main research interest includes optical detection technology of gas concentration.



顾芳(通信作者), 2008 于南京理工大学获得博士学位, 现为南京信息工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为大气颗粒物与气体激光检测技术研究。

E-mail: gfnuist@163.com

**Gu Fang** (Corresponding author), received her Ph. D. from Nanjing University of Science and Technology in 2008. She is currently an associate professor and master tutor at Nanjing University of Information Technology. Her main research interests include atmospheric particulate matter and gas laser detection technology.