

文章编号 1004-924X(2024)09-1330-08

小型化中红外直接吸收 CO₂ 光谱仪

刘婧怡^{1,2}, 潘越^{1*}, 姚路^{2*}, 于丽婷¹, 李惠¹, 阚瑞峰²

- (1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 中国科学院 合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 二氧化碳 (Carbon Dioxide, CO₂) 是一种关键的温室气体, 对地球气候和生态系统调节有重要作用, 准确检测痕量 CO₂ 浓度对评价温室效应意义重大。一般情况下, 气体分子在中红外光谱范围存在强吸收, 可以实现高灵敏探测, 因此, 以 4.219 μm 中红外波段的带间级联激光器为光源结合可调谐半导体激光吸收光谱技术 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS) 设计了小型化 CO₂ 监测仪器。在不同标气浓度下对仪器进行了标定, 并通过分析 Allan 方差, 得出积分时间在 8.7 s 时对应的最低检测限为 16.6×10^{-9} , 满足温室效应研究对 CO₂ 气体的高灵敏测量需求。采用仪器对大气 CO₂ 连续监测 8 天, 并与商用仪器 LGR 进行对比, 充分验证了小型化 CO₂ 监测仪器的可靠性, 以及中红外光源与 TDLAS 技术相结合的气体浓度检测方法在大气 CO₂ 准确测量方面的可行性。该系统具有结构简单、体积小、功耗低和质量轻的特点, 为建设空基无人机平台的 CO₂ 监测能力提供了技术支持。

关键词: 激光吸收光谱技术; 二氧化碳; 中红外可调谐二极管激光; 直接吸收; 小型化

中图分类号: TN249; TH744.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243209.1330

Mid-infrared laser absorption spectroscopy CO₂ spectrometer

LIU Jingyi^{1,2}, PAN Yue^{1*}, YAO Lu^{2*}, YU Liting¹, LI Hui¹, KAN Ruifeng²

(1. College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China;

2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

* Corresponding author, E-mail: panyue@cust.edu.cn; lyao@aiofm.ac.cn

Abstract: Carbon Dioxide (CO₂), as the most crucial greenhouse gas, significantly influences the regulation of Earth's climate and ecosystems. Accurately detecting trace CO₂ concentrations is vital for assessing the greenhouse effect. Gas molecules exhibit strong absorption in the mid-infrared range, which is advantageous for highly sensitive trace gas detection. This paper describes the design of a compact CO₂ monitoring instrument using an interband cascade laser (ICL) at 4.219 μm as the light source, paired with Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS). The instrument was calibrated with various standard gas concentrations and, using Allan variance analysis, achieved a detection limit of 16.6×10^{-9} with an integration time of 8.7 s, meeting the requirements for sensitive CO₂ measurements in atmospheric monitoring. Additionally, the instrument was employed to monitor atmospheric CO₂ over eight consecutive days and

收稿日期: 2024-01-20; 修订日期: 2024-02-28.

基金项目: 吉林省科技计划资助项目 (No. 20230201052GX)

was benchmarked against the commercial LGR instrument, confirming the reliability of our miniaturized CO₂ monitor and the effectiveness of combining mid-infrared light source with TDLAS technology for precise atmospheric CO₂ measurement. The findings offer a technical reference for high-precision CO₂ concentration detection, while the system's simple structure, compact size, low power consumption, and lightweight design are ideal for developing CO₂ monitoring capabilities on airborne platforms.

Key words: laser absorption spectroscopy; carbon dioxide; mid-infrared tunable diode laser; direct absorption; miniaturization

1 引言

阳光以短波形式穿过大气层进入地球表面,地球吸收后以长波形式辐射回去时,会被大气层中人类活动所排放的二氧化碳、甲烷等气体吸收,使地表温度逐渐上升,此过程称为温室效应。其中,二氧化碳(CO₂)和甲烷(Methane, CH₄)为主要的温室气体^[1]。

目前,温室气体的检测方法有许多,主要包括气相色谱法、非色散红外光谱技术以及化学分析法等。气相色谱法是利用物质的固定相和流动相之间分配函数的不同,由检测器分离与分析该物质各组分的方法。然而,该方法实际操作过程繁琐,需要和质谱或者其他光谱方法联用,才能对物质进行准确的定量分析。非色散红外光谱技术利用气体分子对红外线具有选择吸收来测量气体浓度,但该技术测量精度与准确性方面还存在着诸多不足。化学分析法采用特定的化学反应来测量物质的组成与含量,操作简单方便,通常用于实验室研究和现场分析,但其精度易受操作影响,测量效果不佳。

可调谐二极管激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)技术由于具有检测灵敏度高、抗干扰性强、操作简便等优点^[2-3],目前广泛应用于气体检测领域。1969年,麻省理工学院的Hinkley利用可调谐半导体激光器率先得到了CO₂的气体吸收光谱,大大推动了TDLAS技术在气体浓度检测领域的应用。朱晓睿^[4]利用TDLAS技术,选用中心工作波长为1 580 nm的激光器,在室温及大气常压条件下检测了模拟锅炉烟尘排放的CO₂浓度,采用去峰拟合法和纯N₂线拟合法获得基线后反演出CO₂的浓度,检测限达到136×10⁻⁶,但直接吸收方法的测量灵敏度较低。信丰鑫^[5]将TDLAS技

术第一次应用在大气环境监测中,搭建了完整的TDLAS实验系统测量开放式大气中CO₂的浓度,并利用校准气室进行了标定,通过拟合大气中CO₂的二次谐波曲线,反演出气体浓度,但在实际中需要在已知体系中校准,在强吸收或吸收谱线重叠的环境下,采用标准样品进行校准较为困难。杨舒涵等^[6]采用TDLAS直接测量法获得了O₂吸光度曲线,计算得到空气中O₂浓度为205 600×10⁻⁶,并用波长调制方法优化了调制深度,最终获得了10⁻⁶量级的检测限。赵晓虎等^[7]将直接吸收光谱技术和波长调制光谱技术的优势相结合,完成了高精度、宽量程和免标定多气体检测系统的设计。刘英等^[8]采用腔衰荡激光吸收光谱技术,搭建了一套探测灵敏度低至10⁻⁹的CO₂气体传感装置。

气体分子在中红外光谱范围内存在强吸收,基于此可以实现高灵敏探测,在痕量气体检测中具有很大的优势。袁松等^[9]采用中红外吸收光谱技术,研制了检测限为0.5×10⁻⁶的小型化光谱仪,实现了对温室气体CO₂的高灵敏测量。冯亚楠等^[10]将TDLAS技术与中红外带间级联激光器结合,研制出一种新型大气本底CO气体监测系统,通过标准差分析系统的最低检测限为3.46×10⁻⁶。赵之豪等^[11]发展了一套中红外波长调制激光吸收光谱检测仪,利用多元线性回归法解决了CO₂谱线交叉干扰的问题,NO检测限达到0.12×10⁻⁹。

近年来,随着中红外光源的逐步成熟,基于中红外直接吸收光谱的高精度CO₂浓度监测有望实现。为实现大气CO₂的高灵敏在线监测,并满足无人机平台搭载,建设空基CO₂监测能力,本文选用4.219 μm波段的中红外带间级联激光器,基于TDLAS直接吸收技术,研制了小型化低功耗CO₂监测系统,通过实验分析其最低

检测限为 16.6×10^{-9} , 实现了 CO_2 高灵敏检测, 并对大气 CO_2 进行连续 8 天的长时间监测, 验证了该系统的稳定性, 为今后基于中红外 TDLAS 技术的 CO_2 检测设备的研制提供了技术参考和支持。

2 检测原理

2.1 TDLAS 技术原理

TDLAS 技术基于 Beer-Lambert 定律^[12]对气体进行检测:

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp\left(-\int_0^L k_i(x) dx\right), \quad (1)$$

式中: ν 为红外光的频率, $I(\nu)$ 是出射光的强度, $I_0(\nu)$ 是入射光的强度, L 为经过气体介质的光程长度, k_i 为吸收系数。吸收系数为:

$$k_i = P \sum_{j=1}^J X_j \sum_{i=1}^{N_j} S_{i,j}(T) \phi_{i,j}, \quad (2)$$

式中: P 为气体总压强; X_j 为气体组分 j 的浓度, $S_{i,j}$ 为气体 j 跃迁 i 时的吸收线强; $\phi_{i,j}$ 为气体 j 跃迁 i 时的吸收线型。线强表达式如下:

$$S(T) = \frac{h\nu_0 B_{ij}}{k_B T} \frac{g_i \exp\left(-\frac{hcE''}{k_B T}\right)}{Q(T)} \left[1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_0}{k_B T}\right)\right], \quad (3)$$

其中: ν_0 为以波数单位表示的跃迁中心频率, $B_{i,j}$ 为从跃迁低态 i 到状态 j 的受激吸收的 Einstein 系数, k_B 为波尔兹曼常数, E'' 为跃迁低态能级, g_i 为跃迁低态 i 的总简并度, $Q(T)$ 为分子的内配分函数。

气体的吸收线型包括高斯线型、洛伦兹线型以及 Voigt 线型。高斯线型适用于高温低压的情况, 洛伦兹线型适用于高压低温的情况, 在两种展宽线宽相近时, Voigt 线型为两者的卷积。一般情况下, 线型函数以面积归一化的形式描述, 使得其在频域内的积分结果为 1。

对式(1)相关部分进行有关 ν 的积分, 获得积

分吸光度 A :

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} \ln \frac{I_0(\nu)}{I(\nu)} d\nu = PLXS(T) \times \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(\nu) d\nu = PLXS(T). \quad (4)$$

在已知积分吸光度值 A 、有效吸收光程 L 、气体总压 P 和吸收线强 $S(T)$ 的情况下, 可得到待测气体的体积分数 X 。

2.2 探测波段选取

CO_2 气体分子在波长为 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 的红外区域内的吸收谱线强度如图 1 所示。由此可见, CO_2 气体分子在 $4 \sim 5 \mu\text{m}$ 内吸收强度最大, 其次为 $2.5 \sim 3 \mu\text{m}$ 的区域。

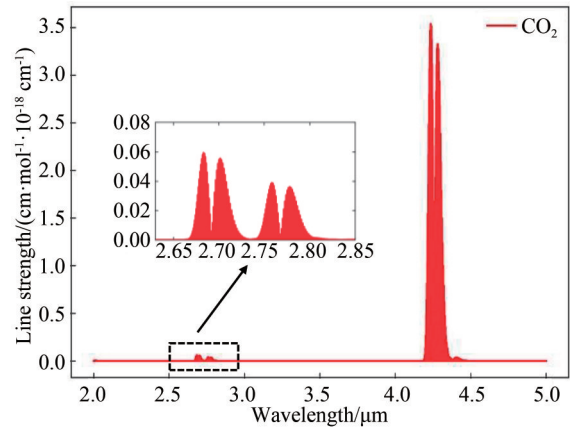


图 1 CO_2 在 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 内的吸收谱线

Fig. 1 Absorption line of CO_2 in range of $2 \sim 5 \mu\text{m}$

在高分辨率透射分子吸收数据库 (HITRAN) 中获取 CO_2 的波长、线强光谱参数信息, 并结合实验室配置情况, 选取 $4.219 \mu\text{m}$ 中红外带间级联激光器为系统光源。表 1 为 CO_2 在 $4.219 \mu\text{m}$ 的吸收谱线参数。

图 2 是在 11.4 cm 光程、 $1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 测量压力、 $0.02 \text{ H}_2\text{O}$, $450 \times 10^{-6} \text{ CO}_2$, $2 \times 10^{-6} \text{ CH}_4$ 条件下模拟的光谱图。从图中可以看出, 11.4 cm 光程下 $450 \times 10^{-6} \text{ CO}_2$ 的峰值吸光度为 1.1, 而在此波长范围内浓度为 2% 的 H_2O 与 2×10^{-6} 的 CH_4

表 1 CO_2 在 $4.219 \mu\text{m}$ 的吸收谱线参数

Tab. 1 CO_2 absorption line parameters at $4.219 \mu\text{m}$

Gas species	Frequency/ cm	Line intensity $S/(\text{cm} \cdot \text{mol}^{-1})$	Air-broadened halfwidth $\gamma_{\text{air}}/(\text{cm} \cdot 10^5 \text{ Pa}^{-1})$	Self-broadened halfwidth $\gamma_{\text{self}}/(\text{cm} \cdot 10^5 \text{ Pa}^{-1})$	Lower state energy E''/cm
CO_2	2 370.224	3.187×10^{-28}	0.066 5	0.077	2 145.290 5

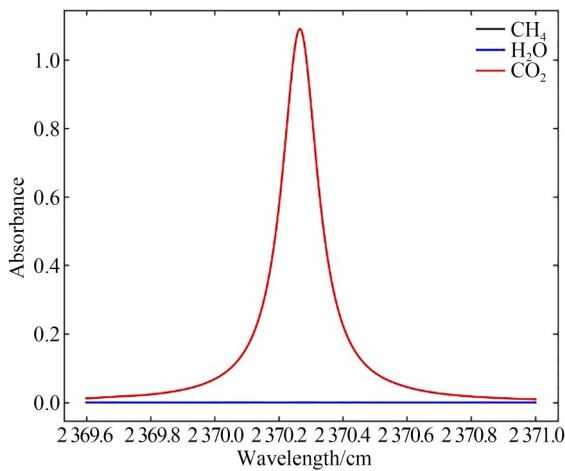


图 2 CO₂,CH₄,H₂O的吸光度曲线

Fig. 2 Absorbance curves of CO₂, CH₄ and H₂O

产生的峰值吸光度为 0.05×10^{-6} ,两者相差近千万倍,所以在测量过程中能够有效避开大气其他组分的干扰,同时较短的光程也大大减小了仪器的质量和体积。

3 系统装置组成

图 3 是大气 CO₂ 检测装置原理。该系统采用德国 Nanoplus 公司生产的中红外连续波、带间级联激光器为系统光源,该光源的物理尺寸为 31.51 mm×17.85 mm×17.52 mm,阈值电流为 40 mA,工作电流上限为 105 mA,典型工作电流为 60 mA,覆盖波段为 2 369.6~2 371.0 cm⁻¹;工作在典型温度和电流时的输出功率为 5 mW,且线宽低于 3 MHz。激光器采用 TO66 封装形式,带有热电制冷器 (Thermoelectric Cooler, TEC) 与负温度系数 (Negative Temperature Coefficient, NTC) 热敏电阻。

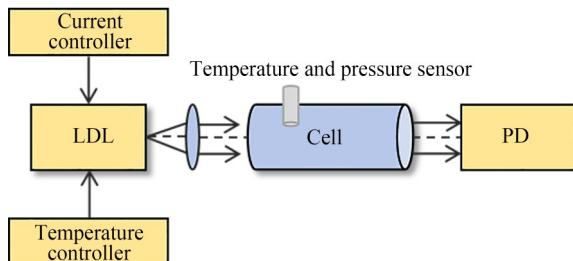
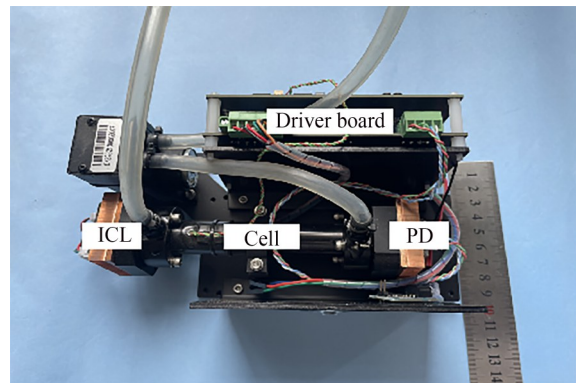


图 3 大气 CO₂检测装置原理

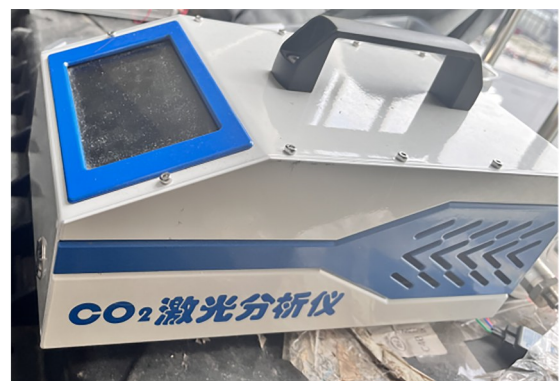
Fig. 3 Schematic diagram of atmospheric CO₂ detection devices

工作过程中,自制的小型化信号发生电路产生 500 Hz 的锯齿扫描信号加载在激光器驱动板上,经压控恒流源电路转换为电流信号后驱动激光器,温控模块调节激光器温度稳定。调制后的激光经过非球面透镜聚焦后进入气体吸收池 ($T=30\text{ }^{\circ}\text{C}, L=11.4\text{ cm}, P=1 \times 10^5\text{ Pa}$),池中安装了高精度温压传感器 (MS8607),用于监测和测量吸收池内部的温度和气压。衰减后激光信号被高灵敏度中红外砷化钢 (InAs) 探测器 (P11120-201) 接收,该探测器采用 3° 楔形蓝宝石窗口防止干涉效应。InAs 探测器含有热电冷却供应系统 (TE cooler supply),提供了足够的电能驱动热电冷却器,并实现冷却或加热的功能,以确保其正常且高效运行。实验系统内部示意图如图 4(a) 所示,系统实物图如图 4(b) 所示。中红外砷化钢探测器上的跨阻放大电路将电流信号转换成电压信号,通过 ADC 对转换后的电压信号进行采集,每一秒的数据进行一次平均,并利用单片机进行运算,经过基线拟合、积分吸光度计算等步



(a) 内部实物图

(a) Internal physical map



(b) 外部实物图

(b) External physical map

图 4 大气 CO₂检测装置

Fig. 4 Atmospheric CO₂ detection devices

骤,最终计算出气体浓度,浓度结果保存至SD卡中。数据处理算法流程如图5所示。

通过集成优化,系统的实物尺寸、质量及功耗指标如表2所示。

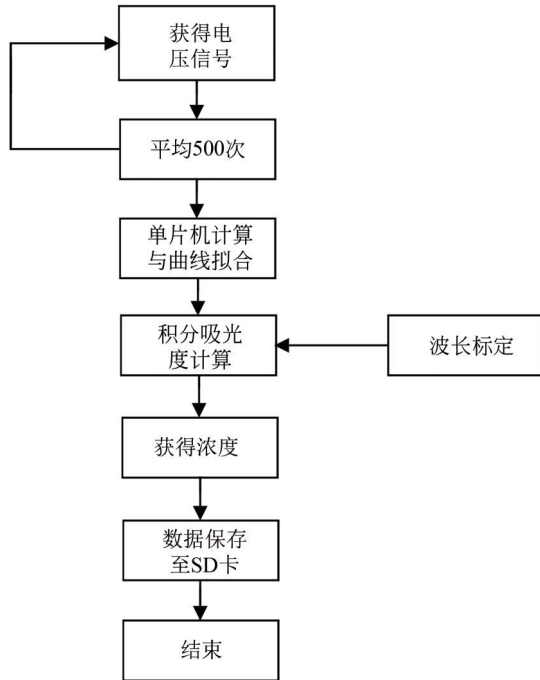


图5 数据处理流程

Fig. 5 Data processing flowchart

表2 大气CO₂检测系统的物理参数

Tab. 2 Physical parameter of atmospheric CO₂ detection system

名称	性能指标
内部机芯尺寸	20 cm × 13 cm × 10 cm
内部机芯质量	3 kg
供电电压	12 V
整机功耗	6.84 W
整机质量	10 kg

4 系统性能分析

4.1 原始光谱分析

在实验室对空气中CO₂进行测量,采集到的原始数据及拟合基线曲线如图6所示。

对原始信号基线进行多项式拟合,其相关系数为0.998,表明二者具有较好的线性关系,计算得到的吸光度曲线如图7所示。通过HITRA-

Nonline数据对吸光度进行voigt线型拟合,得到二者残差在1%左右,拟合效果较好。

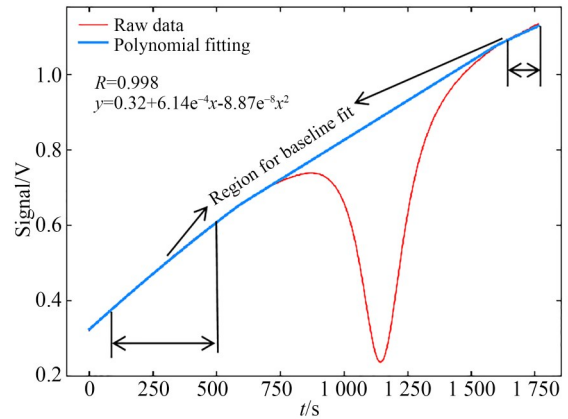


图6 原始信号及其基线拟合

Fig. 6 Raw data and its fitting curve

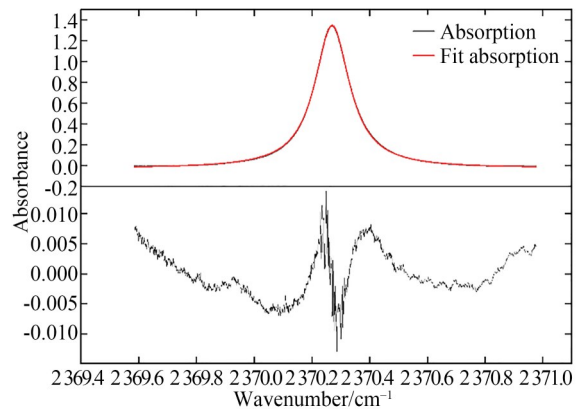


图7 Voigt拟合曲线与吸光度曲线及二者残差

Fig. 7 Voigt fitting and absorbance curves and their residual plots

4.2 系统标定验证实验

为了准确测量大气中的二氧化碳浓度,需要利用已知的气体浓度校准小型化监测系统。将实验室配气系统配置的5种不同浓度的CO₂ (300 × 10⁻⁶, 400 × 10⁻⁶, 500 × 10⁻⁶, 600 × 10⁻⁶, 700 × 10⁻⁶)标准气体注入吸收池,每组标准气体的测量时间为10 min。标定结果如图8所示。

以实验配置的气体浓度为横坐标,实际测得的气体浓度为纵坐标,绘制两者关系如图9所示。其线性拟合系数为R²=0.999 9,表明小型化CO₂监测系统的测量结果具有良好的线性。

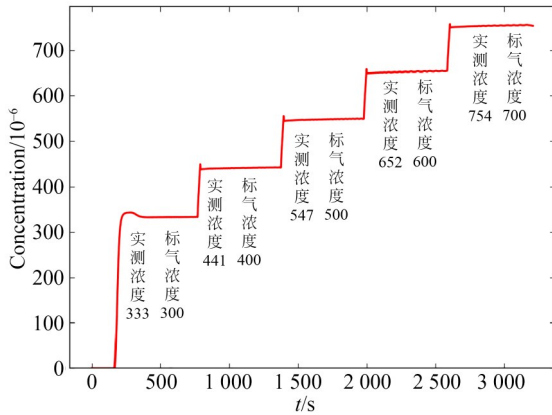


图 8 实测浓度与标定浓度结果

Fig. 8 measured concentration and calibrated concentration results

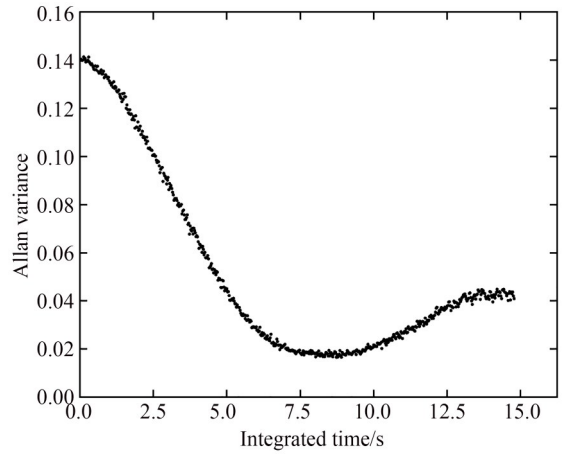


图 10 Allan 方差分析

Fig. 10 Allan variance method

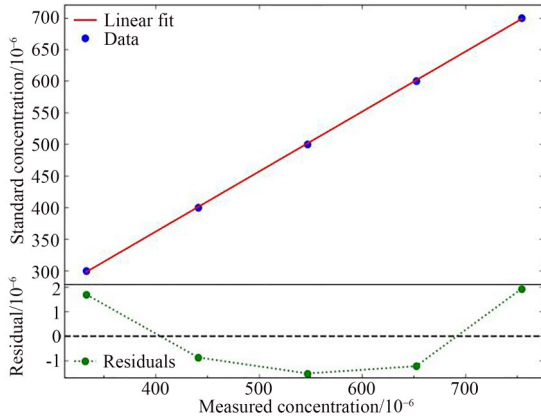


图 9 实测浓度与标定浓度线性关系和残差结果图

Fig. 9 Linear relationship between measured concentration and calibrated concentration and residual results

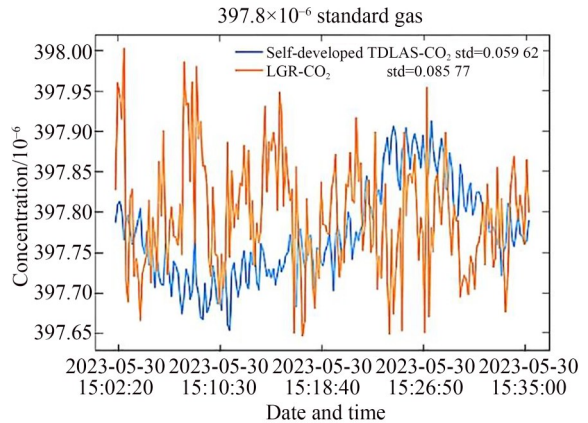


图 11 TDLAS-CO₂自研仪器与商用仪器数据对比

Fig. 11 Comparison of TDLAS-CO₂ self-developed instrument and commercial instrument

4.3 系统检测限分析

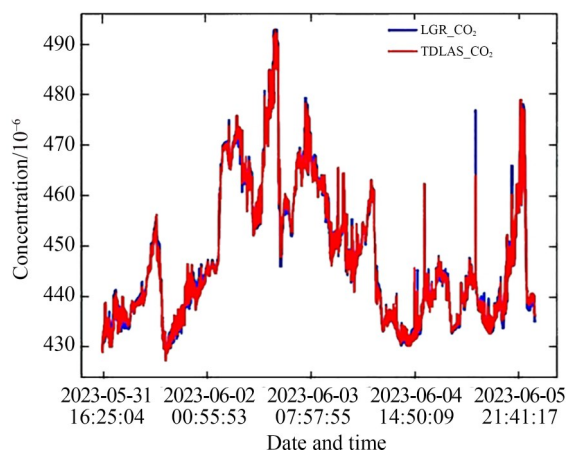
为了评估监测系统的测量精度,系统对浓度为 388×10^{-6} 的 CO₂ 标准气体进行了测量,其 Allan 方差如图 10 所示。由图可知,Allan 方差在 15 s 内随着积分时间先减小,然后趋于平稳,最后再增大。实验结果表明,在积分时间为 8.7 s 时,CO₂ 的检测限最低为 16.6×10^{-9} 。

4.4 系统对比测试

为了验证小型化监测系统的准确性,将自研仪器与商用仪器 LGR(型号 UGGA, $t=10$ s 时检测限为 0.1×10^{-6}) 进行对比。在标气对比过程中,分别向两个仪器中充入 397.8×10^{-6} 浓度的 CO₂ 标准气体(>30 min),结果如图 11 所示。运用标气测量结果计算了双方的测量标准差,通过

以上分析自研小型化监测系统的一倍标准差为 $0.059 62 \times 10^{-6}$,商用仪器 LGR 的一倍标准差为 $0.085 77 \times 10^{-6}$,结果表明自研小型化 CO₂ 监测系统精度较 LGR 仪器高。

为了进一步验证自研小型化监测系统长期测量大气 CO₂ 浓度的准确性,于 2023 年 5 月 31 日至 2023 年 6 月 5 日在中国科学院青藏高原研究所北京部,对小型化监测仪器与商用 LGR 仪器进行了为期 6 天的大气 CO₂ 监测比对,测量过程中两台仪器进气口被捆绑在一起并放置在窗外。长时比对测试结果如图 12 所示,两仪器监测得的 CO₂ 浓度变化趋势基本一致,相关系数 (R^2) 优于 99.99%,证明自研系统具备实现大气 CO₂ 高精度监测能力。

图 12 CO₂仪器浓度对比数据Fig. 12 Comparison data of CO₂ instrument concentration

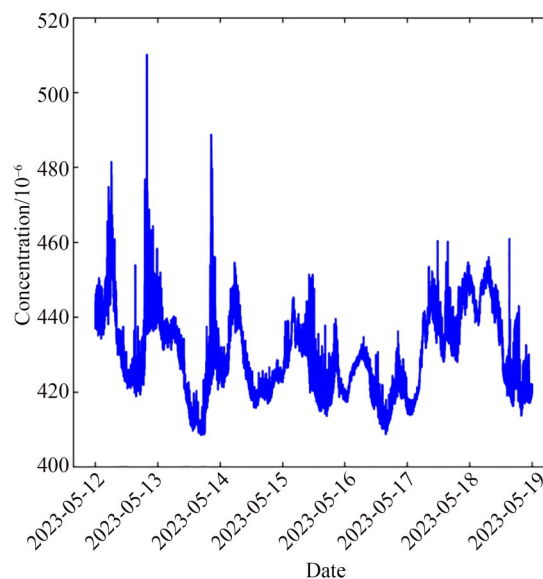
4.5 系统稳定性分析

将系统放置在室外,对系统进行连续8天的测试,获得的CO₂浓度数据如图13所示。测试过程中,昼夜温差较大,天气以晴天和多云为主,偶尔会出现小雨和中雨,晴天时二氧化碳浓度相对较低,阴天与下雨天CO₂浓度相对较高。同时,白天和黑夜的二氧化碳浓度也会变化,一般傍晚较低,清晨含量比较高。

由长时间监测的大气CO₂浓度数据可知,8天内目标气体浓度最高为 510.12×10^{-6} ,浓度最低为 408.55×10^{-6} ,浓度平均值为 429.31×10^{-6} ,测量值最大相差 101.57×10^{-6} ,能有效监测室外大气的CO₂浓度。从实验分析可知,系统整体性能稳定,能够满足室外CO₂浓度的长时间测量要求。

5 结 论

本文设计了中红外TDLAS的CO₂实时监

图 13 八天内大气CO₂浓度Fig. 13 Atmospheric CO₂ concentration over eight-day period

测系统,利用 $4.219 \mu\text{m}$ 的中红外带间级联ICL激光器作为光源,通过自制温控、流控电路板对激光进行调谐。采用下位机程序对原始光谱进行处理获得浓度信息,取代上位机操作和处理过程,实现目标气体浓度的实时监测,最终完成了小型化和便携式系统的开发。该系统在实验室进行了长期的测试实验,并与商业仪器进行对比分析,系统的检测限和稳定性均得到了充分验证,可以满足大气环境中CO₂连续在线监测的要求。系统内部机芯的体积小于 $20 \text{ cm} \times 13 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$,质量低于 3 kg ,整机功耗低于 7 W ,满足大疆DJI FlyCart 30等多个型号无人机的搭载要求,为大气CO₂浓度检测提供了新思路。

参考文献:

- [1] 徐四川,马惜钰. 碳排放CO₂温室效应机制[J]. 云南大学学报,2023,45(2):513-522.
XU S CH, MA X Y. Carbon emissions CO₂ greenhouse effect mechanism [J]. *Journal of Yunnan University*,2023, 45(2): 513-522. (in Chinese)
- [2] POGANY A, OTT O, WERHAHN O, *et al.* Towards traceability in CO₂ line strength measurements by TDLAS at $2.7 \mu\text{m}$ [J]. *Journal of Quantitative*

Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 130 (24): 147-157.

- [3] JIN W, ZHANG H, HU M, *et al.* A robust optical sensor for remote multi-species detection combining frequency-division multiplexing and normalized wavelength modulation spectroscopy [J]. *Sensors-Basel*, 2021, 21:1073.
- [4] 朱晓睿. 基于TDLAS的燃煤电厂温室气体排放检测技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.

- ZHU X R. *Study of Carbon Emission Detection of Flue Gas Based on TDLAS*[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [5] 信丰鑫. 基于TDLAS的大气CO₂监测技术研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2014.
- XIN F X. *Study on Monitoring Technology of Atmospheric Carbon Dioxide Concentration Based on TDLAS*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014. (in Chinese)
- [6] 杨舒涵, 乔顺达, 林殿阳, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度高灵敏度检测研究[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(1): 151-157.
- YANG SH H, QIAO SH D, LIN D Y, *et al.* Research on highly sensitive detection of oxygen concentrations based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Chinese Optics*, 2023, 16 (1) : 151-157. (in Chinese)
- [7] ZHAO X, SUN P. Wide-range multi-gas detection method based on wavelength modulation spectroscopy and direct absorption spectroscopy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 1(52): 1-10.
- [8] 刘英, 胡迈, 王兴平, 等. Ppb级探测灵敏度的CO₂腔衰荡光谱仪[J]. 光学精密工程, 2023, 31(20): 2921-2929.
- LIU Y, HU M, WANG X P, *et al.* Cavity ring-down spectrometer of CO₂ with ppb detection sensitivity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31 (20) : 2921-2929. (in Chinese)
- [9] 袁松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等. 基于可调谐半导体激光光谱大气CO₂监测仪[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1208003.
- YUAN S, KAN R F, HE Y B, *et al.* Tunable diode laser spectroscopy system for carbon dioxide monitoring [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41 (12): 1208003. (in Chinese)
- [10] 冯亚楠, 刘立富, 梁绍昌, 等. 基于TDLAS技术的大气痕量CO监测研究与应用[J]. 中国计量大学学报, 2023, 34(3): 379-388.
- FENG Y N, LIU L F, LIANG SH CH, *et al.* Research and application of atmospheric trace CO monitoring based on TDLAS technology [J]. *Journal of China University of Metrology*, 2023, 34 (3): 379-388. (in Chinese)
- [11] 赵之豪, 陈兵, 邓昊, 等. 基于高灵敏中红外吸收光谱的FeNO检测方法[J]. 光学学报, 2022, 42(21): 220-226.
- ZHAO ZH H, CHEN B, DENG H, *et al.* FeNO detection method based on highly sensitive mid-infrared absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(21): 220-226. (in Chinese)
- [12] HOU Y, HUANG K. Development of high precision CO₂ isotope detection system based on infrared TDLAS technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(4): 73-77.

作者简介:



刘婧怡(1999—),女,安徽宿州人,硕士研究生,2021年于合肥师范学院获得学士学位,主要从事激光光谱气体检测方面的研究。E-mail: panyue0118@163.com

通讯作者:



姚路(1987—),男,河南南阳人,博士,副研究员,2009年于中国科学技术大学获得学士学位,2015年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事激光光谱气体探测技术的研究。E-mail: lyao@aiofm.ac.cn

通讯作者:



潘越(1989—),男,吉林长春人,副教授,博士生导师,2012年、2017年于长春理工大学分别获得学士和博士学位,主要从事光电检测技术与质量控制、光学半实物仿真等方面的研究。E-mail: panyue@cust.edu.cn