

激光与光电子学进展

基于直接吸收峰峰值标定的气体浓度反演方法研究

邓瑶^{1,3}, 唐雯², 李峥辉^{1,3}, 钟尚文², 邹丽昌^{1,3}, 卢志民^{1,3}, 林尖², 姚顺春^{1,3*}¹华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640;²广东红海湾发电有限公司, 广东 汕尾 516626;³广东省能源高效低污染转化与工程技术研究中心, 广东 广州 510640

摘要 可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术利用了半导体激光器可调谐和窄线宽的特性,具有高选择性和高灵敏度,可以在气体成分复杂、高温等恶劣环境下准确测量CO₂。基于TDLAS的扫描波长直接吸收(SDAS)技术是常用的气体浓度反演方法,针对该方法反演气体浓度时采用的吸光度积分法需要准确获得频域信息,从而导致系统结构复杂的问题,本文提出了基于直接吸收峰峰值标定的气体浓度反演方法。首先利用HITRAN2016光谱数据库建立CO₂数值仿真模型,并参考电厂尾部烟道内高温和高浓度的CO₂环境,分析了吸收峰峰值随浓度(10%~20%)和温度(298~338 K)的理论变化规律,然后将理论规律作为建立实际吸收峰峰值浓度标定模型和温度修正曲线的参考依据。通过搭建基于TDLAS的CO₂检测实验系统,验证了所提方法应用于浓度测量的可行性。研究结果显示,采用峰值标定法反演得到的CO₂浓度的相对误差均方值为1.08%,验证了利用吸收峰峰值标定的气体浓度反演方法在高浓度CO₂准确测量方面的可行性。

关键词 光谱学; 可调谐半导体激光吸收光谱; 直接吸收; 吸收峰峰值; 浓度反演; 温度修正

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0330002

Gas Concentration Inversion Method Based on Calibration of Direct Absorption Peak Value

Deng Yao^{1,3}, Tang Wen², Li Zhenghui^{1,3}, Zhong Shangwen², Zou Lichang^{1,3}, Lu Zhimin^{1,3}, Lin Jian², Yao Shunchun^{1,3*}¹School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;²Guangdong Red Bay Power Generation Co., Ltd., Shanwei, Guangdong 516626, China;³Guangdong Province Engineering Research Center of High Efficiency and Low Pollution Energy Conversion, Guangzhou, Guangdong 510640, China

Abstract Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) exploits the tunable and narrow linewidth characteristics of a diode laser to improve the selectivity and sensitivity of CO₂ measurements in harsh environments, such as those with complex gas components and high temperature. The scanned-wavelength direct absorption spectroscopy technique based on TDLAS is commonly used for gas concentration inversion. However, the absorbance integral method in gas concentration inversion is applied in the frequency domain, which requires a

收稿日期: 2020-06-24; 修回日期: 2020-06-29; 录用日期: 2020-07-16

基金项目: 广州市科技计划重点项目(201904020017)、广东省能源高效清洁利用重点实验室(华南理工大学)项目(2013A061401005)、中央高校基本科研业务费专项(2018KZ09)

*E-mail: epscyao@scut.edu.cn

complex system to retrieve accurate frequency-domain information. To avoid this problem, the present paper proposed a new gas-concentration inversion method based on calibration of the direct absorption peak value. First, the theoretical changes of absorption peak value with concentration (10%–20%) and temperature (298–338 K) were analyzed in a numerical model of the target gas (carbon dioxide, CO₂), which was established using the HITRAN2016 spectrum database and referring to high temperature and high concentration CO₂ environment in tail flue of the power plant. The theoretical change was used as reference basis for establishing the actual absorption peak value concentration calibration model and temperature correction curve. To verify the feasibility of the method, a custom-built CO₂ detection system based on TDLAS was built. The mean squared relative error of the inversed CO₂ concentration by peak value calibration method was 1.08%, confirming that the gas-concentration inversion method based on direct absorption peak value calibration can accurately measure high concentrations of CO₂.

Key words spectroscopy; tunable diode laser absorption spectroscopy; direct absorption; absorption peak value; concentration inversion; temperature correction

OCIS codes 300.1030; 300.6260; 140.3600

1 引言

CO₂是影响气候变化和生态环境的主要温室气体之一。我国燃煤电厂的CO₂排放量在全国碳排放中的占比超过了30%^[1-2],是主要的固定排放源,也是国家重点控排领域之一。因此,有必要发展可靠的CO₂排放检测技术,为温室气体减排措施的制定和碳排放交易提供技术支持。近几年发展起来的可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术由于半导体激光器的可调谐和窄线宽特性,具有高的气体选择性和测量灵敏度^[3-4],适用于复杂环境下CO₂排放的检测。

基于TDLAS的扫描波长直接吸收(SDAS)技术是常用的气体浓度反演方法,其工作原理是通过改变激光器的工作电流或温度对激光器的输出波长进行调制,获得一条覆盖无吸收段和吸收峰的完整吸收曲线,进而可以通过吸收峰的峰值判断中心频率的位置。一般情况下,在反演气体浓度时,要先得到吸光度曲线在频域上的积分值,然后通过气体浓度表达式进行直接反演得到气体浓度^[5]。实际上,利用扫描波长直接吸收技术得到的测量信号是与时域有关的函数,所以在反演浓度时需要将时域转换成频域。在此过程中,频域的准确性会直接影响积分面积的准确性,进而影响测量精度。实现时域与频域转换的方法一般有两种。其中的一种方法是当一个扫描周期内的吸收曲线包含两个或两个以上的吸收峰时,将吸收峰峰值对应的采样点与吸收谱线频率进行多项式拟合,以此来获得频域信息。然而,该方法无法精准反映频率随时间的变化情况,同时还会受到激光输出波长范围和气体吸收

谱线选择的限制,不具有普适性。另一种更典型的方法是利用标准具或波长计进行转换,通过增加参考光路对激光器输出波长进行实时监测来确保吸光度在积分计算时对应的频域与实际频域一致,但这无疑使得系统更加复杂。为了简化系统,鲁一冰等^[6]将吸光度与采样点进行洛伦兹(Lorentz)拟合,通过标定拟合曲线的积分面积来反演CO浓度,系统的检测限可达0.36 mg/L。贺春贵^[7]通过标定低浓度条件下CO吸光度曲线在时域上的积分值与浓度的线性关系,实现了全检测范围内气体浓度的反演。以上两种方法都是将吸光度曲线与时域进行拟合来获得积分面积的,虽然无需获得频域信息,但容易受到吸收光谱频率漂移的影响。王强^[8]利用双吸收峰峰值差技术检测浓度的方法在降低系统复杂度的同时,达到了10 mg/m³的测量分辨率。周彧^[9]采用扫描波长直接吸收技术对N₂O进行了检测,他们将测量获得的吸收峰值与相同环境下的模拟吸收峰值进行对比后认为,模拟峰值与测量峰值一致时对应的模拟气体浓度就是被测气体浓度;但是该方法完全忽略了实际测量过程中存在的噪声,所以在反演浓度时会引入由系统噪声造成的误差。

针对上述问题,本文提出了基于直接吸收峰峰值标定的气体浓度反演方法。参考电厂尾部烟气环境,通过理论数值模拟,分析了吸收峰峰值随气体浓度和温度的变化规律,并以此作为实际标定模型和温度修正的参考依据;然后通过搭建CO₂的TDLAS检测实验系统,对该方法进行实验验证,为直接吸收技术反演气体浓度的计算提供参考方法。

2 基本原理

2.1 吸收峰峰值标定法反演浓度的原理

当一束单色激光穿过气体介质后,其强度变化满足 Beer-Lambert 定律^[5],即

$$I_t(\nu) = I_0(\nu) \exp(-\alpha_\nu) = I_0(\nu) \exp[-S(T)PXL\phi(\nu)], \quad (1)$$

式中: $I_0(\nu)$ 为透射光强; $I_t(\nu)$ 为入射光强; α_ν 为吸光度; $S(T)$ 为待测气体吸收谱线的强度,它是温度的函数; P 为气体介质的总压; X 为待测气体的浓度; L 为光程; $\phi(\nu)$ 为归一化的线型函数,其在整个频域上的积分为 1,即 $\int_{-\infty}^{+\infty} \phi(\nu) d\nu = 1$ 。

一般情况下,当压力占主要因素时,气体吸收曲线可以用洛伦兹线型来描述^[10],即

$$\phi_{\text{Lorentz}}(\nu) = \frac{1}{\pi} \frac{\frac{\Delta\nu}{2}}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu}{2}\right)^2}, \quad (2)$$

其中,

$$\Delta\nu = P \sum X_B 2\gamma_{A-B}, \quad (3)$$

式中: $\nu - \nu_0$ 为到中心频率的距离; $\Delta\nu$ 为碰撞线宽; A 代表气体的种类; X_B 为碰撞干扰气体的浓度; γ_{A-B} 为碰撞加宽系数。 γ_{A-B} 与温度的关系为

$$2\gamma(T) = 2\gamma(T_0) \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^n, \quad (4)$$

式中: T_0 为参考温度; $\gamma(T_0)$ 为参考温度 T_0 下的碰撞加宽系数; n 为温度系数,其值小于 1。

因此,单根谱线所形成的吸收峰在中心频率 ν_0 处的吸收峰峰值 α_{ν_0} 可表示为

$$\alpha_{\nu_0} = S(T)PXL \frac{2}{\pi\Delta\nu} = \frac{S(T)XL}{\pi \sum X_B \gamma_{A-B}}. \quad (5)$$

当压力、光程、温度和碰撞加宽系数一定时,吸收峰峰值是气体浓度的单变量函数,可以采用标定吸收峰峰值的方法反演气体浓度;但是当待测浓度变化或成分改变导致线宽变化范围较大时,峰值与浓度之间的关系可能会表现出一定的非线性^[11]。因此,有必要通过数值仿真分析来明确待测浓度范围内吸收峰峰值随浓度的变化规律,并以此作为建立实际标定模型的参考依据。考虑到在现场测量过程中,电厂尾部烟道压力一般是常压,而烟气温度是变化的,线强和碰撞加宽系数会随着温度的变化而发生变化,导致吸收峰

峰值也随之改变,因此需要对不同温度下的浓度反演结果进行修正。

2.2 吸收光谱的仿真模拟

通过查询 HITRAN2016 光谱数据库^[12]可以得到 CO_2 、 H_2O 、 O_2 在 $6326.2 \sim 6330.5 \text{ cm}^{-1}$ 范围内吸收谱线的线强,如图 1 所示。由图 1 可知: CO_2 在 $6327.0609 \text{ cm}^{-1}$ (1580.51 nm) 和 $6328.9555 \text{ cm}^{-1}$ (1580.04 nm) 处的谱线线强较大,分别为 $1.275 \times 10^{-23} \text{ cm} \cdot \text{molecule}^{-1}$ 和 $1.403 \times 10^{-23} \text{ cm} \cdot \text{molecule}^{-1}$; O_2 、 H_2O 在上述波段内的吸收谱线少,且 H_2O 和 O_2 吸收谱线线强的最大量级分别为 10^{-26} 和 10^{-31} ,与 CO_2 吸收谱线线强的量级相差较大。这说明可以忽略这两种气体 (O_2 和 H_2O) 对 CO_2 测量的干扰。此外,在实际测量激光吸收过程中,吸收峰并不是单一谱线形成的,所以为了得到更准确的仿真吸收峰峰值,本文在考虑运算时间的前提下,选择线强处于 $10^{-26} \sim 10^{-22} \text{ cm} \cdot \text{molecule}^{-1}$ 范围的 CO_2 吸收谱线进行数值仿真计算^[13]。

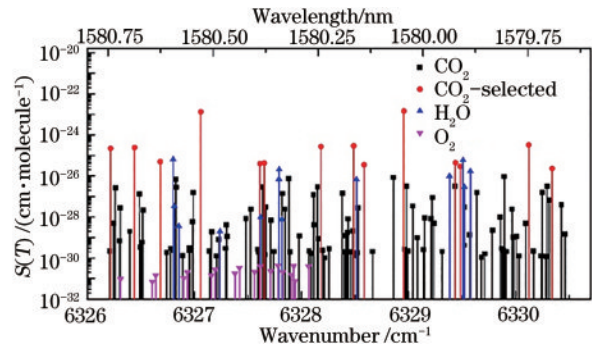


图 1 296 K 温度下 CO_2 、 H_2O 、 O_2 在 $6326.2 \sim 6330.5 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的吸收线强

Fig. 1 Line intensity of CO_2 , H_2O , and O_2 in the range from 6326.2 cm^{-1} to 6330.5 cm^{-1} at 296 K

利用 MATLAB 对所选谱线进行洛伦兹线型仿真,并将各谱线线型进行叠加,获得总的吸收光谱图,该过程的运算时间约为 2 s。在压力为 101325 Pa、温度为 298 K、光程为 20 m、 CO_2 体积分数为 10%~20% (间隔 0.5%) 的条件下,仿真得到的吸收光谱如图 2 所示。由图 2 可见,1#吸收峰的中心波数为 $6327.0609 \text{ cm}^{-1}$, 2#吸收峰的中心波数为 $6328.9555 \text{ cm}^{-1}$ 。

2.3 吸收峰峰值随浓度的变化

由图 2 可知 2#吸收峰的峰值相对较大,因此选择中心波数为 $6328.9555 \text{ cm}^{-1}$ 位置处的吸收峰作为研究对象。由图 3 可知,吸收峰峰值与浓度存在明

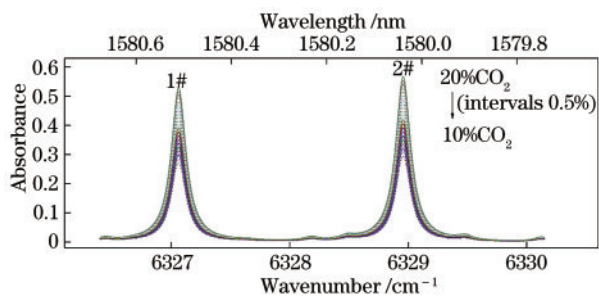


图 2 CO₂在 6326.2~6330.5 cm⁻¹波段的仿真吸收光谱图 (温度 298 K, 压力 101325 Pa)

Fig. 2 Simulated absorption spectra of CO₂ in the range from 6326.2 cm⁻¹ to 6330.5 cm⁻¹ at 298 K and 101325 Pa

显的正相关关系。为了进一步分析两者之间的关系,采用最小二乘法对体积分数为 10%~20% (间隔 0.5%) 的 CO₂ 的仿真吸收峰峰值与浓度进行线性拟合,拟合结果如图 3 所示。

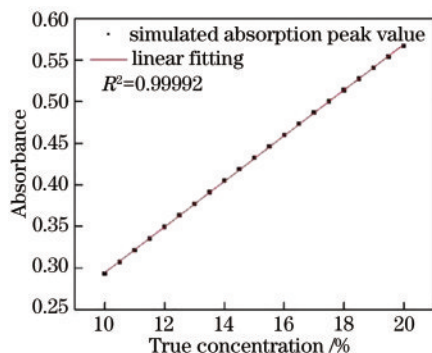


图 3 仿真吸收峰峰值与浓度的线性拟合图

Fig. 3 A linear fitting between simulated absorption peak value and concentration

图 3 所示拟合曲线的相关系数 R^2 达到了 0.99992, 这表明二者之间的线性相关度较高, 能够用简单的线性关系来描述常温常压下尾部烟道中 CO₂ 浓度与吸收峰峰值之间的变化规律。相对于直接吸收法来说, 峰值标定法在反演气体浓度时只需

要吸收峰峰值信息, 无需进行时域与频域转换, 避免了标准具的使用, 简化了系统。

2.4 吸收峰峰值随温度的变化

温度通过影响线强和碰撞加宽系数来改变吸收峰峰值, 因此, 在现场测量中采用峰值标定法反演气体浓度时, 需要对温度的影响进行补偿。本文利用仿真模型对体积分数为 10%~20% (间隔 2%) 的 CO₂ 吸收光谱图中 2# 吸收峰峰值随温度 (298~338 K, 间隔 5 K) 的变化进行了模拟, 并将各浓度下仿真模拟得到的吸收峰峰值与温度进行了线性拟合, 拟合结果如图 4 所示。

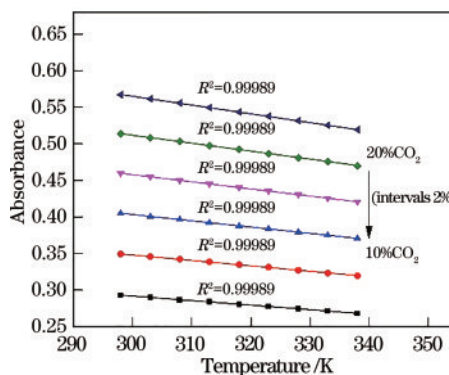


图 4 仿真吸收峰峰值随温度的变化规律

Fig. 4 Variation of simulated absorption peak value with temperature

从图 4 所示的拟合曲线可知: 当 CO₂ 体积分数、压强一定时, 仿真吸收峰峰值随温度的升高而减小; 在相同的体积分数下, 吸收峰峰值随温度的变化满足线性关系, 拟合的 R^2 值为 0.99989, 可作为现场测量中建立温度影响修正曲线的参考依据。

3 实验系统

在实验室搭建了基于 TDLAS 的 CO₂ 检测系统, 实验装置如图 5 所示。系统选用中心波长为

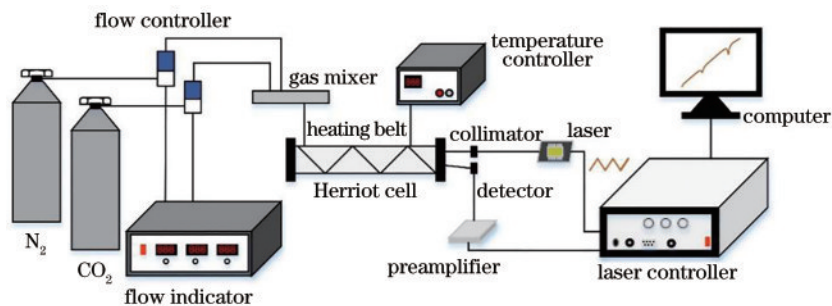


图 5 实验装置图

Fig. 5 Experimental setup

1580 nm 的分布反馈(DFB)激光器。采用激光控制器调节电流和温度使激光器出光,发射的激光经光纤准直器进入 Herriot 多次反射型气体池(光程为 20 m)被 CO₂吸收,出射光由光电探测器接收,并被转换成电信号送给前置放大器,信号被前置放大器放大后进入计算机进行处理,最后获得光谱数据和浓度信息。本实验利用质量流量阀和流量显示仪混合高纯度 N₂(纯度为 99.999%)和高纯度 CO₂(纯度为 99.999%),配制 6 个 CO₂ 浓度梯度的气体(CO₂ 的体积分数分别为 10%、12%、14%、16%、18%、20%)。

实验过程中设置激光器的工作温度为 25 °C,扫描电流为 30~120 mA,扫描频率为 5 Hz。同时,对扫描结果进行 20 次平均,以减小噪声对系统测量结果的干扰。在 101325 Pa 压力条件下,利用扫描波长直接吸收技术分别对 298,308,318,328,338 K 温度下的 CO₂ 进行变浓度测量。利用均匀缠绕在吸收池上的加热带加热 CO₂ 气体,通过温度控制器确保温度波动稳定在 ±0.1 °C。

4 结果讨论与分析

4.1 常温下峰值标定法浓度反演结果

利用扫描波长直接吸收技术对 101325 Pa 压力、298 K 温度下各浓度的 CO₂ 进行测量,获得吸收信号,再采用 MATLAB 对吸收信号进行计算得到吸收光谱图和 CO₂ 浓度。其中,入射光强(基线)通过对吸收信号无吸收段的数据(如图 6 所示)进行三

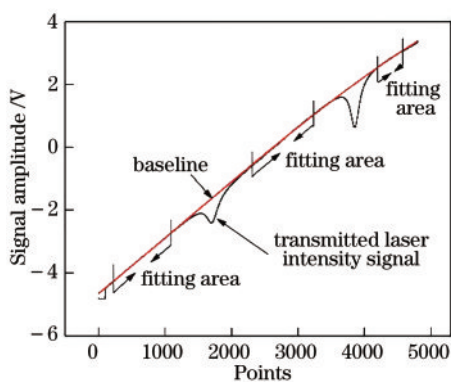


图 6 无吸收区域三次多项式拟合得到的参考光强图
Fig. 6 Reference light intensity obtained by the cubic polynomial of non-absorption area

项式拟合得到^[14],然后将其代入(1)式计算即可得到吸光度曲线。

图 7 为 298 K 温度下测量得到的各浓度下 CO₂

的吸收光谱图,内含两个吸收峰,与图 2 所示的仿真分析结果一致。由于在一个扫描周期内激光器的输出波长随扫描电流的增大而增大,所以吸收信号的频域与时域呈反比关系,故图 7 中的 1# 吸收峰对应的中心波数为 6327.0609 cm⁻¹,2# 吸收峰对应的中心波数为 6328.9555 cm⁻¹。

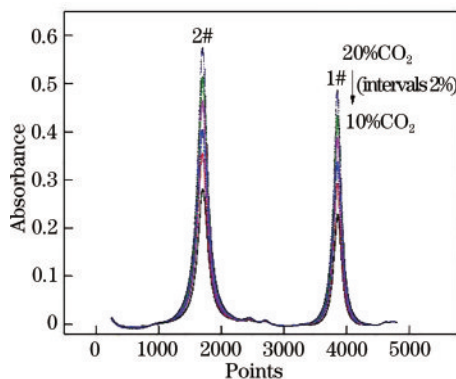


图 7 298 K 温度下测量得到的各浓度 CO₂ 的吸收光谱图
Fig. 7 Measured absorption spectra of each concentration of CO₂ at 298 K

以仿真吸收峰峰值与浓度之间的理论变化规律作为系统标定模型的参考依据,将配制体积分数为 10%、12%、16%、20% 的 CO₂ 的测量吸收峰峰值与浓度进行线性拟合,结果如图 8 所示,拟合系数 R²=0.99576,表明两者之间具有良好的线性关系。得到的浓度标定模型为

$$X = 34.2346P_{v_0} - 0.0337, \quad (6)$$

式中:X 为气体的体积分数;P_{v₀} 为吸收峰峰值。

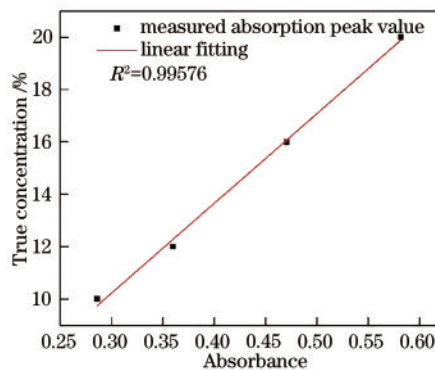


图 8 吸收峰峰值与浓度的标定模型
Fig. 8 Calibration model of absorption peak value and concentration

根据(6)式的标定模型即可获得浓度的反演结果,如表 1 所示。

从表 1 可知,测量结果与配制浓度值的吻合度较

表 1 吸收峰峰值标定模型反演的浓度

Table 1 Concentration inverted by absorption peak value calibration model

True concentration/%	Measured absorption peak value	Measured concentration/%	Absolute error/%	Relative error/%
10	0.2858	9.75	-0.25	-2.47
12	0.3600	12.29	0.29	2.43
14	0.4110	14.03	0.03	0.24
16	0.4706	16.08	0.07	0.49
18	0.5222	17.84	-0.16	-0.86
20	0.5816	19.88	-0.12	-0.61

高。在整个浓度反演范围内,浓度反演的相对误差最大为-2.47%,但其绝对误差仅为-0.25%,最小相对误差为0.24%,相对误差均方值为1.5%。这说明,常温下可以利用峰值标定模型准确反演气体浓度。

4.2 变温工况下峰值标定法浓度反演结果及修正

图 9 是在压力为 101325 Pa 时各浓度 CO₂ (体积分数为 10%~20%, 间隔 2%) 吸收峰峰值与温度之间的关系。将吸收峰峰值与温度进行线性拟合即可得到温度修正曲线, 拟合的 R² 值在 0.991 以上, 说明吸收峰峰值与温度存在很强的线性关系, 可以应用于现场测量的温度修正。

根据浓度标定模型和温度修正曲线, 本文给出了修正前后 CO₂ 浓度的反演结果, 如表 2 所示。可以看出, 随着温度升高, 未经修正的浓度反演结果与配制浓度之间的误差逐渐增大, 而经过温度修正

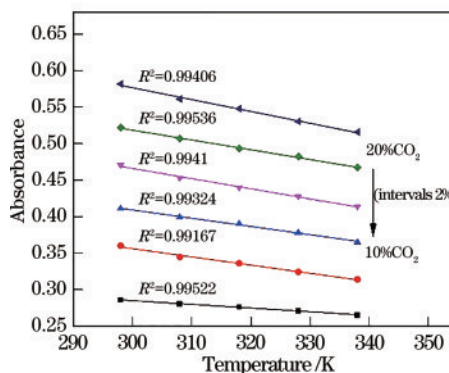


图 9 吸收峰峰值与温度的拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves between absorption peak value and temperature

后的反演结果更接近真实值。这说明变温工况下对浓度反演结果进行温度修正是必要的。

表 2 不同温度下 CO₂ 浓度的反演结果

Table 2 Inversion results of CO₂ concentration at different temperatures

True concentration/%	Measured results/%							
	308 K		318 K		328 K		338 K	
	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
10	9.57	9.78	9.43	9.88	9.25	9.94	9.05	10.00
12	11.78	12.13	11.46	12.13	11.07	12.04	10.72	11.99
14	13.63	14.11	13.34	14.20	12.92	14.16	12.46	14.07
16	15.48	16.08	15.03	16.07	14.62	16.12	14.12	16.05
18	17.31	18.03	16.86	18.10	16.49	18.26	15.96	18.25
20	19.17	20.02	18.73	20.17	18.12	20.14	17.63	20.24

图 10 对比了相同工况下, 吸收峰峰值标定法和吸光度积分法^[15]反演 CO₂ 浓度的相对误差的绝对值。在 298~338 K 温度范围内, 除了 298 K 温度下体积分数为 12% 以及 338 K 温度下体积分数为 18% 这两个测量点, 其余测量点的峰值标定法浓度反演误差均小于积分法。原因在于峰值标定法只需利用吸收峰峰值处单点的吸光度值进行计算, 而积分法则需要得到吸光度曲线在整个频域上的面积, 更容易受到基线选择和积分频域准确性的影响^[16]。由图 10 可知, 在整个浓度反演范围内, 利用峰值标定法得到的反演结果的相对误差均方值为 1.08%, 其中在 298 K 温度下、体积分率分别为 10% 和 12% 时的相对误差绝对值较大, 分别为 2.47% 和 2.43%, 其余测量点反演误差的绝对值均小于 1.5%。

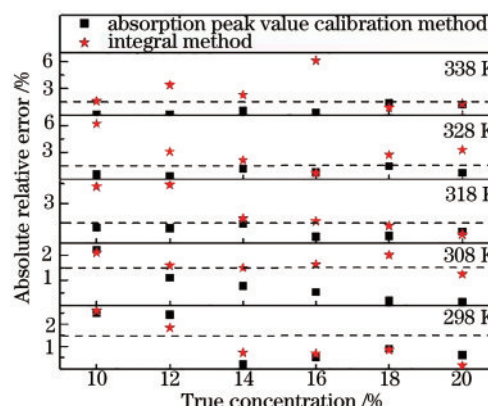


图 10 两种方法反演 CO₂ 浓度的相对误差绝对值的比较

Fig. 10 Comparison of absolute relative error of CO₂ concentration by two methods

实验结果表明,利用吸收峰峰值标定法可以对气体浓度进行准确测量。

5 结 论

本文采用吸收峰峰值标定法对气体浓度进行了反演,反演计算过程中无需进行时域与频域转换,简化了系统结构,通过吸收峰峰值容易判断中心频率的位置,从而避免了频率漂移的影响。在 298~338 K(间隔 10 K)工况下,利用吸收峰峰值标定法对体积分数为 10%~20% 的高浓度 CO₂ 进行了浓度反演,验证了吸收峰峰值标定法的可行性。在常温下,当 CO₂ 体积分数在 10%~20% 范围时,吸收峰峰值与浓度之间满足线性关系,实际标定模型拟合系数 R^2 达到 0.99576;在温度为 298~338 K 时,相同浓度下吸收峰峰值随温度的变化满足线性关系,温度修正曲线的 R^2 在 0.991 以上,浓度反演结果的相对误差的绝对值小于 2.5%。在实际应用中,该方法有望在简化系统的同时降低对设备性能的要求。

参 考 文 献

- [1] Xiao X J. Analysis of coal supply and demand situation in 2018 and prospects for next year [J]. Energy of China, 2019, 41(2): 9-12.
肖新建. 2018 年煤炭供需形势分析及 2019 年展望 [J]. 中国能源, 2019, 41(2): 9-12.
- [2] Zhang K, Yuan J H. China power industry thirteenth five-year coal cap mid-term evaluation and outlook [J]. Energy of China, 2019, 41(7): 18-24.
张凯, 袁家海. “十三五”电力煤控中期评估及展望 [J]. 中国能源, 2019, 41(7): 18-24.
- [3] Li Y F, Liu Z W, Zhang T Y, et al. Development and application of near-infrared laser carbon dioxide gas sensor system [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0514003.
李亚飞, 刘志伟, 张天羽, 等. 近红外激光二氧化碳传感系统的研制及应用 [J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0514003.
- [4] Wang X, Jing C R, Hou K X, et al. Online detection of human-exhaled end-tidal carbon dioxide using tunable semiconductor absorption spectroscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0311002.
王鑫, 荆聪蕊, 侯凯旋, 等. 基于 TDLAS 技术的人体呼气末 CO₂ 在线检测 [J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0311002.
- [5] Lu Y B, Liu W Q, Zhang Y J, et al. A fast calculation method of single spectral absorption integral absorbance and its application [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1214001.
鲁一冰, 刘文清, 张玉钧, 等. 一种单光谱吸收积分吸光度快速计算方法及应用 [J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1214001.
- [6] Lu Y B, Liu W Q, Zhang Y J, et al. Software design of infrared laser absorption spectroscopy CO detection system [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(14): 102-107.
鲁一冰, 刘文清, 张玉钧, 等. 中红外激光吸收光谱 CO 检测系统软件设计 [J]. 电子测量技术, 2018, 41(14): 102-107.
- [7] He C G. Research on portable laser detection technology for CO concentration of SF₆ decomposition gas of GIS [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017: 65-66.
贺春贵. GIS 开关 SF₆ 分解气体 CO 浓度便携式激光检测技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017: 65-66.
- [8] Wang Q. Research on key technologies for near-infrared optical fiber water vapor sensor [D]. Jinan: Shandong University, 2016: 61-68.
王强. 近红外光纤水气传感器的关键技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016: 61-68.
- [9] Zhou Y. N₂O sensing technique based on 7.6 μm quantum cascade laser [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018: 48-50.
周彧. 基于 7.6 μm 量子级联激光的 N₂O 传感技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018: 48-50.
- [10] Zhang Z R, Wu B, Xia H, et al. Study on the temperature modified method for monitoring gas concentrations with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(23): 234204.
张志荣, 吴边, 夏滑, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的气体浓度测量温度影响修正方法研究 [J]. 物理学报, 2013, 62(23): 234204.
- [11] Li N. Research on gas detection and 2D distribution reconstruction by tunable diode laser absorption spectroscopy technique [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008: 83-84.
李宁. 基于可调谐激光吸收光谱技术的气体在线检测及二维分布重建研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008: 83-84.
- [12] Rothman L S. The evolution and impact of the HITRAN molecular spectroscopic database [J].

- Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2010, 111(11): 1565-1567.
- [13] Guan C, Qu Y. Research on absorption line profile of methane changing with environment[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(1): 36-40.
贯丛, 曲艺. 甲烷红外吸收光谱随环境变化关系研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(1): 36-40.
- [14] Zhang Z R, Pang T, Sun P S, et al. Measurement of carbon isotope of methane and analysis of its genesis type using laser absorption spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1211001.
张志荣, 庞涛, 孙鹏帅, 等. 基于激光吸收光谱技术的甲烷碳同位素测量及其成因类型分析[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1211001.
- [15] Li Z H, Yao S C, Lu W Y, et al. Study on temperature correction method of CO₂ measurement by TDLAS [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(7): 2048-2053.
李峥辉, 姚顺春, 卢伟业, 等. TDLAS 测量 CO₂ 的温度影响修正方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(7): 2048-2053.
- [16] Liu J T C, Jeffries J B, Hanson R K. Wavelength modulation absorption spectroscopy with $2f$ detection using multiplexed diode lasers for rapid temperature measurements in gaseous flows [J]. Applied Physics B, 2004, 78(3/4): 503-511.