

# 基于 TDLAS 的长光程环境大气痕量 CO 监测方法研究

姚 路<sup>1,2</sup> 刘文清<sup>1</sup> 刘建国<sup>1\*</sup> 阚瑞峰<sup>1</sup> 许振宇<sup>1</sup> 阮 俊<sup>1</sup> 戴云海<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** CO作为大气中重要的污染物和煤矿、油田等环境的危险气体,CO浓度的实时监测对生产生活安全具有重要意义。筛选出CO位于2334 nm附近的R(6)吸收谱线,搭建了基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的长光程开放光路大气CO监测系统。采用直接吸收技术,吸收光程为700 m,借助离轴抛物面镜实现了收发同光路;低功耗、小型化的测量控制系统,在单块电路板上实现了激光器驱动、光谱信号处理等功能,单板体积为120 mm×100 mm×25 mm,功耗小于5 W。上位机对光谱数据进行多峰拟合处理,分离出CO和CH<sub>4</sub>的吸收光谱,反演CO浓度。通过分析光谱数据标准差可知,在1 s响应时间下的检测限为0.06×10<sup>-6</sup>。对大气中的CO浓度进行了连续监测,测量结果和CO点式分析仪结果一致性良好,验证了该系统仪器化的可行性。

**关键词** 光谱学;可调谐半导体激光光谱技术;长光程探测;开放光路;大气CO监测

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0215003

## Research on Open-Path Detection for Atmospheric Trace Gas CO Based on TDLAS

Yao Lu<sup>1,2</sup> Liu Wenqing<sup>1</sup> Liu Jianguo<sup>1</sup> Kan Ruifeng<sup>1</sup> Xu Zhenyu<sup>1</sup>

Ruan Jun<sup>1</sup> Dai Yunhai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** As a kind of important pollutant in atmosphere and hazard gas in coal mine or oil field, CO has to be monitored in real-time for the safety of daily life and industrial production. The R(6) absorption line of CO near 2334 nm, without interference of H<sub>2</sub>O absorption, is screened for a tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) system, which is used to monitor the atmospheric CO by long optical path with direct absorption techniques. With the help of off-axis parabolic mirror, an optical path of 700 m is achieved by sending and receiving light on the same path. A miniaturized measuring control system of 120 mm×100 mm×25 mm with power consumption lower than 5 W integrating laser driver, spectral data acquisition and processing on a single board is developed. The CO and CH<sub>4</sub> spectra are separated on host computer by means of nonlinear fitting. By analyzing the standard deviation of spectral data, it can be derived that the system has detection precision of 10<sup>-6</sup> at 1 s respond time. A continuous atmospheric CO monitoring experiment is carried out and the results coincide well with the CO analyzer results, which proves feasibility of the instrumentation of this system.

**Key words** spectroscopy; tunable diode laser absorption spectroscopy; long optical path; open-path; atmospheric CO detection

**OCIS codes** 300.6340; 140.5960; 280.1120; 120.4640

收稿日期: 2014-09-09; 收到修改稿日期: 2014-10-08

基金项目: 国家973计划(2013CB632803)、国家自然科学基金(61108034)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA05040102)

作者简介: 姚 路(1987—),男,博士研究生,主要从事激光光谱测量及光谱诊断技术等方面的研究。

E-mail: lyao@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘文清(1954—),男,中国工程院院士,博士生导师,主要从事光谱学相关的环境监测技术方面的研究。

E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: jgliu@aiofm.ac.cn

## 1 引 言

CO作为重要的大气污染物,其浓度是衡量空气质量的重要指标,我国对空气环境及工作场所中的CO体积分数做出了明确规定,针对不同的环境规定了不同的标准,如煤矿、油气田等工业场合必须严格控制CO浓度,保证生产和人员安全。可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)作为一种重要的气体检测技术,具有无需预处理、选择性强、响应速度快、高灵敏度和高精度等特点,已被广泛应用于气体监测研究中。Tu等<sup>[1]</sup>将TDLAS波长调制技术用于环境质量CO监测,选用CO位于1579.73 nm处的吸收线,对过往汽车尾气中的CO排放进行了连续监测;Wagner等<sup>[2]</sup>选用CO位于2313 nm (4324.4 cm<sup>-1</sup>)处的R20吸收线,利用直接吸收技术研究了层状逆流扩散后的CO分子吸收特征,为利用CO测温提供了参考;Li等<sup>[3]</sup>将热电(TE)制冷的连续波长量子级联激光器(QCL)用于开放环境的TDLAS CO监测中,在1 Hz响应速度下实现了1.41×10<sup>-9</sup>的检测精度,根据爱伦方差估计,在50 s响应速度下可达到0.28×10<sup>-9</sup>的检测精度;Tao等<sup>[4]</sup>根据TDLAS波长调制技术,利用4.5 μm的QCL和16 m光程的多次反射池,在10 Hz响应速度下实现了0.36×10<sup>-9</sup>的检测精度,激光器斜坡扫描和快速调制频率分别为100 Hz和20 kHz,系统采用紧凑型设计,功耗约为50 W,重量为15 kg。

根据已有研究可知,随着半导体激光器工艺的进步,目前可用波段已覆盖了CO的三个吸收频带,由于4.5 μm波段的QCL和探测器工作中需要制冷,集成的系统功耗和体积较大,测量开销较大;1.6 μm波段吸收线强过弱,测量手段大多局限于波长调制技术,其中的锁相检测系统较为复杂,且需要样气标定步骤<sup>[5]</sup>;因此本文选用2.3 μm波段,基于长光程直接吸收TDLAS技术,研制了紧凑的CO监测系统,功耗小于5 W,可长时间工作在无人值守的场合,在工业监测和环境监测中有较为广阔的应用前景。

## 2 TDLAS测量原理和谱线选取

### 2.1 TDLAS测量原理

TDLAS技术作为吸收光谱的一个分支,遵循Beer-Lambert定律。利用窄线宽(小于2 MHz)、波长可调谐的激光器,扫描待测气体某个吸收谱线 $\nu_0$ ,可以得到高分辨、无干扰的某个吸收特征谱线。当强度为 $I_0$ ,频率为 $\nu$ 的光束通过一段气体介质时,气体分子吸收光子后产生能级跃迁,使光强发生衰减。若透射光强为 $I$ ,定义吸光度 $A(\nu)$ 为

$$A(\nu - \nu_0) = \ln \frac{I_0(\nu - \nu_0)}{I(\nu - \nu_0)} = \int_0^L k_\nu(x) dx, \quad (1)$$

式中 $L[\text{cm}]$ 为经过气体介质的光程长度, $k_\nu[\text{cm}^{-1}]$ 为吸收系数,表示所有气体在频率 $\nu$ 处的吸收叠加, $k_\nu$ 常用两种方式表示:

$$k_\nu = \sum_{j=1}^J n_j \sum_{i=1}^{N_i} \sigma_{i,j} = \sum_{j=1}^J n_j \sum_{i=1}^{N_i} S'_{i,j}(T) \phi_{i,j}(\nu - \nu_0), \quad (2)$$

$$k_\nu = P \sum_{j=1}^J X_j \sum_{i=1}^{N_i} S_{i,j}(T) \phi_{i,j}(\nu - \nu_0), \quad (3)$$

(2)式中 $n_j[\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-3}]$ 为第 $j$ 个气体组分的分子数密度; $\sigma_{i,j}[\text{cm}^2]$ 为第 $j$ 个气体组分的跃迁 $i$ 对应的吸收截面;线强 $S'_{i,j}(T)$ 单位为 $\text{cm}^{-1}/(\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2})$ ,是光谱数据库HITRAN采用的单位; $\phi_{i,j}[\text{cm}]$ 为归一化的吸收线型函数,满足 $\int \phi_{i,j}(\nu - \nu_0) d\nu = 1$ ,在大气监测中,通常选用Voigt线型,是高斯线型和洛伦兹线型的卷积。(3)式中 $P[\text{atm}]$ 为气体总压力, $X_j$ 为第 $j$ 个气体组分的浓度,以摩尔分数或者分压比表示, $PX_j$ 即为组分 $j$ 的分压,对于大气中的痕量气体通常以体积分数( $10^{-6}$ )表示; $S_{i,j}[\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}]$ 和 $\phi_{i,j}[\text{cm}]$ 分别为气体组分 $j$ 的跃迁 $i$ 的吸收线强度和线型。两种线强单位可以按理想气体定理进行转换:

$$S[\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}] = \frac{7.339 \times 10^{21} [(\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}) / \text{atm}] S'[\text{cm}^{-1} / (\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2})]}{T[\text{K}]} \quad (4)$$

根据(1)式和(3)式,对一种均匀气体介质的某个吸收线频率 $\nu$ , $k_\nu$ 不依赖于光程路径,可得

$$A(\nu) = P \cdot L \cdot k_\nu(x) = P \cdot L \cdot x \cdot S(T) \cdot \phi(\nu - \nu_0), \quad (5)$$

式中 $\phi(\nu)$ 依赖于测量环境的温度、压力等,在TDLAS直接吸收技术中,激光器波长扫描某根吸收谱线 $\nu_0$ 前后,

可认为其波长范围满足  $\phi(\nu)$  的归一化条件,对吸光度做积分处理即可避开对线型函数自身特征的依赖性。

将(5)式对频率  $\nu$  积分:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} A(\nu) d\nu = P \cdot L \cdot x \cdot S(T) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(\nu - \nu_0) d\nu = P \cdot L \cdot x \cdot S(T). \quad (6)$$

已知吸光度  $A(\nu)$  对频率  $\nu$  的积分面积,吸收光程  $L[\text{cm}]$ ,气体总压力  $P[\text{atm}]$ 和吸收线强  $S(T)[\text{cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}]$ 后,即可得到分子的体积分数  $x^{[6-7]}$ 。

在 TDLAS 直接吸收技术中,当吸收线相对独立、无相邻干扰时,可根据吸收峰附近的无吸收范围拟合出基线,从而求出吸光度曲线,对其直接积分即可求出分子体积分数;当吸收线附近有重叠干扰的其他吸收峰时,需要设定各个吸收峰的参数,如中心频率  $\nu_{0,i}$ ,谱线展宽  $\Delta\nu_{D,i}$  或  $\Delta\nu_{C,i}$  等,根据设定的线型函数对各个吸收峰做非线性拟合,通过多次迭代后得到和原始光谱最接近的各个参数值。本文选用的 Levenberg-Marquardt (L-M)非线性拟合算法是一种阻尼 Gauss-Newton 方法,该算法为梯度算法(或称为最速下降法)和 Gauss-Newton 算法间平滑变动的一种非线性最小二乘算法,在实际应用中比较有效<sup>[8]</sup>。

对待拟合模型  $y = y(x, \mathbf{a})$ ,  $\mathbf{a}$  为拟合参数列矢量,定义优值函数  $\chi^2$  (设  $\sigma_i$  为每个数据点的标准差,对满足正态分布的测量误差可假设所有  $\sigma_i$  相同):

$$\chi^2(\mathbf{a}) = \sum_{i=0}^{N-1} \left[ \frac{y_i - y(x_i, \mathbf{a})}{\sigma_i} \right]^2, \quad (7)$$

$\chi^2$  以参数列矢量  $\mathbf{a}_0$  为中心作 Taylor 展开为

$$\chi^2(\mathbf{a}) \approx \chi^2(\mathbf{a}_0) + (\mathbf{a} - \mathbf{a}_0)^T \nabla \chi^2(\mathbf{a}_0) + \frac{1}{2} (\mathbf{a} - \mathbf{a}_0)^T \mathbf{H} (\mathbf{a} - \mathbf{a}_0) (\mathbf{a} - \mathbf{a}_0), \quad (8)$$

式中  $\mathbf{H}$  为黑塞矩阵,分量形式为  $H_{ij} = \frac{\partial^2 \chi^2}{\partial a_i \partial a_j}$ ,  $\chi^2$  取最小值时梯度  $\nabla \chi^2(\mathbf{a})$  为 0。计算时常引入如下定义(其中  $\alpha_{kl}$  称作曲率矩阵):

$$\alpha_{kl} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \chi^2}{\partial a_k \partial a_l}, \quad \beta_k = -\frac{1}{2} \frac{\partial \chi^2}{\partial a_k}. \quad (9)$$

L-M 方法根据量纲的对应引入了无量纲因子  $\lambda$ ,使得算法可以在最速下降法和 Gauss-Newton 法之间平滑,迭代步长  $\delta \mathbf{a}$  满足

$$\sum_{l=0}^{M-1} \alpha'_{kl} \delta a_l = \beta_k, \quad \alpha'_{kl} = \begin{cases} \alpha_{kl}(1 + \lambda), & k = l \\ \alpha_{kl}, & k \neq l \end{cases}. \quad (10)$$

## 2.2 谱线选取

CO 气体的基频强吸收带、第一泛频吸收带、第二泛频吸收带分别位于 4.6、2.3 和 1.6  $\mu\text{m}$  处,如图 1 所示。早期受商用可调谐半导体激光器的制作工艺限制,TDLAS 技术的 CO 检测系统中只能选用 1.6  $\mu\text{m}$  处的吸收频带<sup>[9-10]</sup>,线强为  $10^{-23}$  量级,近年来随着 2~4  $\mu\text{m}$  波段可调谐激光器的商品化和实用化,选取 2 $\nu$  吸收带作为检测波段成为现实。根据 HITRAN2008 数据库,CO 在 2.3  $\mu\text{m}$  波段的最强吸收位于 2333.7 nm,吸收线强

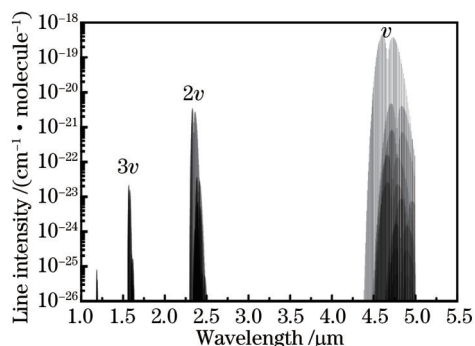


图 1 CO 分子红外吸收光谱

Fig.1 CO infrared absorption spectra

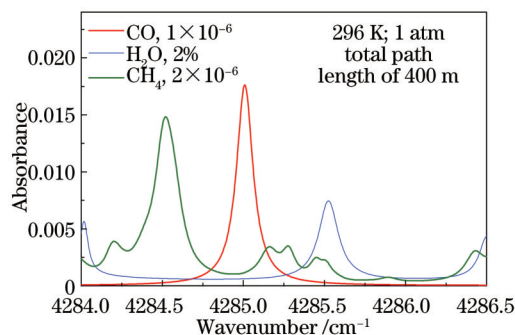


图 2 2334 nm 处的 CO、H<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 吸收系数对比

Fig.2 Comparison of CO、H<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> absorbance at 2334 nm

为  $3.429 \times 10^{-21} \text{ cm}^{-1}/(\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2})$ , 比  $1.6 \mu\text{m}$  处的第二泛频吸收带强两个量级, 为直接吸收技术的信噪比提供了保证。但该波长附近仍然存在  $\text{CH}_4$  和  $\text{H}_2\text{O}$  的吸收干扰, 图 2 模拟了  $T=296 \text{ K}$ 、 $P=1 \text{ atm}$ 、 $400 \text{ m}$  吸收光程时三种气体 ( $\text{CO}$  体积分数为  $1 \times 10^{-6}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  体积分数为  $2\%$ ,  $\text{CH}_4$  体积分数为  $2 \times 10^{-6}$ ) 的吸收系数, 由图 2 可知,  $\text{CO}$  和  $\text{CH}_4$  吸收线位置相隔较明显, 但各自展宽仍存在相互重叠, 这就需要在  $\text{CO}$  吸收峰附近采用多峰拟合, 分离出  $\text{CO}$  和  $\text{CH}_4$  吸收谱线, 同时得出  $\text{CO}$  浓度。

### 3 实验系统及光谱处理方法

研制了基于 TDLAS 直接吸收技术的长光程开放光路  $\text{CO}$  监测系统。结构如图 3 所示, 硬件部分主要分为光学和电子学, 软件部分包括系统工作流程以及光谱数据处理, 其中测量控制及数据处理系统均采用小型化低功耗设计。其中, ARM MCU (核微处理器) 实验测量控制, ADC (模数转换器) 实现光谱数字化, TIA (跨阻放大) 实现光电流到电压的转换, DFB-LD (分布反馈式半导体激光器) 产生测量用激光光源。

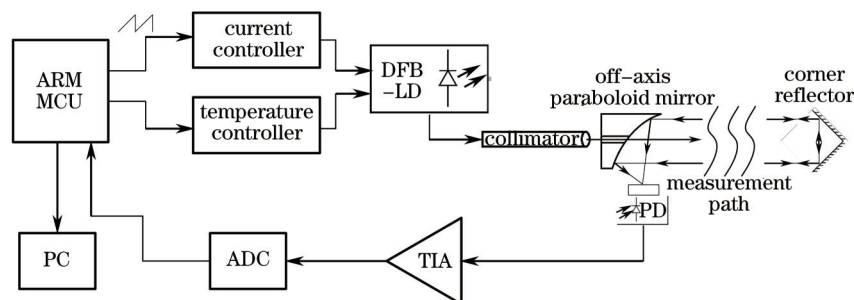


图3 TDLAS 开放光路  $\text{CO}$  监测系统原理框图

Fig.3 Block diagram of TDLAS open-path  $\text{CO}$  monitoring system

#### 3.1 实验系统

光学部分主要由位于发射端的离轴抛物面镜和位于远端的空心角反射镜组成。激光器尾纤出光经反射式准直器 (Thorlabs RC08APC-P01) 准直后, 光束以小发散角 (数值孔径  $NA=0.167$ ) 从离轴抛物面镜中心孔射出, 在大气中传输一定距离后, 以近似平行光形式被角反射镜接收, 光线在相互垂直的反射镜间反射后沿入射光方向返回, 位于发射端的离轴抛物面镜接收该反射光并汇聚到位于焦点处的 InGaAs 探测器 (Judson J23-18I-R01M-2.6) 上, 完成光电信号转换。借助离轴抛物面镜, 实现了收发同光路设计, 便于远距离光路调整, 在发射端通过望远镜辅助光路对准过程。

电子学部分功能包括分布反馈 (DFB) 激光器及其驱动, 探测器信号电流-电压 (I-V) 转换及调理, 光谱信号的转换/采集, 光谱数据的发送等。选用的激光器为中心波长为  $2334 \text{ nm}$  的 DFB 激光器 (NanoPlus GmbH), 最大出光功率为  $2 \text{ mW}$ ; 小型化电流驱动模块基于压控电流源原理设计, 根据输入模拟电压信号生成对应的激光器注入电流, 电流扫描波形为近似锯齿波形的任意波形, 由 MCU 控制  $12 \text{ bit}$  精度的模数转换器 (DAC) 生成, 结合后级模数转换速度和处理器运算能力以及光电转换电路的设计带宽, 为实现较好的光谱信噪比, 选取激光器波长扫描频率为  $500 \text{ Hz}$ <sup>[11]</sup>, 扫描波长范围约为  $1.2 \text{ nm}$  ( $2333.1 \sim 2334.3 \text{ nm}$ ); 温控电路实现对激光器工作温度的精确控制从而稳定其输出波长, 目前最常用的手段为比例积分微分 (PID) 控制, 根据激光器内部封装的热敏电阻阻值实时调整热电制冷器制冷/制热功率, 实现精确控温<sup>[12]</sup>。系统中的温控模块基于模拟 PID 控制环路设计, 温控精度达  $0.001 \text{ }^\circ\text{C}$ , 测量中设置激光器工作温度为  $31 \text{ }^\circ\text{C}$ , 得到中心出光波长为  $2333.7 \text{ nm}$ ; 低噪声跨导放大电路实现对探测器信号的 I-V 转换, 通过信号低通滤波提高光谱信号信噪比; 调理后的光谱信号由  $12 \text{ bit}$ ,  $2.5 \text{ Msps}$  采样率的片上 ADC 完成模数转换, 数字化后的光谱数据送给上位机完成浓度计算。整个测量控制系统以小型化紧凑性设计为出发点, 功耗小于  $5 \text{ W}$ , 可采用锂电池或太阳能电池供电, 便于在偏僻或危险测量场所下的长时监测。

测量控制部分由板上嵌入式系统完成测量控制流程, 如激光器使能, ADC/DAC 控制, 数据发送等, 控制流程如图 4 所示。

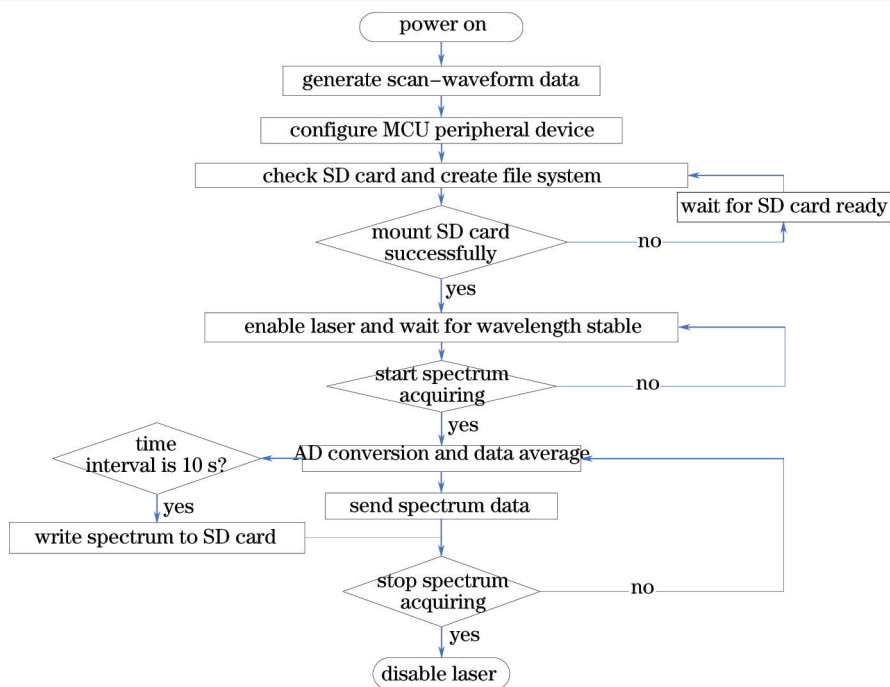


图 4 系统测量控制流程图

Fig.4 Flow chart of measuring control process

### 3.2 光谱处理方法

涉及的非线性拟合算法需要多次迭代,算法耗时较长,受限于控制板上嵌入式平台的运算能力,故光谱处理算法由上位机实现。

由于激光器的注入电流和输出波长并非严格的线性关系,因此采集得到的原始光谱数据点首先需要波长标定,将其从时域转换到频率,才能得到和物理解释一致的吸光度曲线。通常利用已知自由光谱范围的标准具完成激光器出光的波长标定<sup>[13]</sup>,如图 5 所示,利用标准具中的干涉信号峰间距,标定出扫描过程的时间-频率关系曲线,通过该曲线即可将原始光谱曲线转换到频率域,便于后续处理。

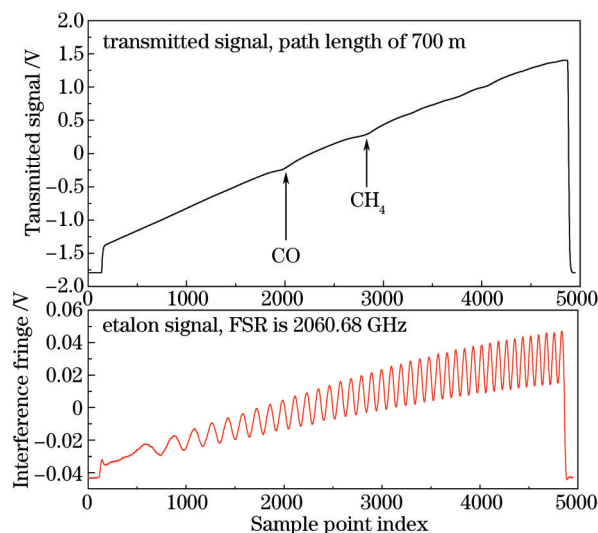


图 5 直接吸收光谱信号和波长标定信号

Fig.5 Direct absorbance signal and etalon signal

上位机接收到有效的光谱数据后,完成基于 L-M 的非线性线型拟合算法,执行流程如图 6 所示。L-M 方法最终收敛的结果以及算法执行收敛所需的迭代次数和初始值的选取有很大关系。针对特定的大气压环境,选用洛伦兹线型作为光谱线型进行拟合,待拟合参数为设置每个吸收峰的中心频率  $\nu_{0,j}$ 、洛伦兹展宽

$\Delta\nu_{c,j}$ 、吸光度面积  $A_i$  和光强慢变背景  $f_{\text{offset}}(\nu)$  中的参数(常数或多项式系数)<sup>[14]</sup>。对相对分离的每个吸收线,初始化参数如下:

- 1) 对吸光度曲线以梯形面积方式计算积分面积,结果作为积分吸光度  $A$  初值;
- 2)  $f_{\text{offset}}$  项选用三次多项式,需拟合 4 个系数,初始化为吸光度曲线的最小值或直接取为 0;
- 3) 按光谱线宽定义,即半谱线峰值对应的宽度,给出吸光度曲线的粗略半峰全宽值(FWHM),取  $\Delta\nu_c$  初值为  $0.85 V_{\text{FWHM}}$ ;
- 4)  $\nu_0$  初始化,  $\nu_0$  初值取为吸光度峰值处对应的频率。

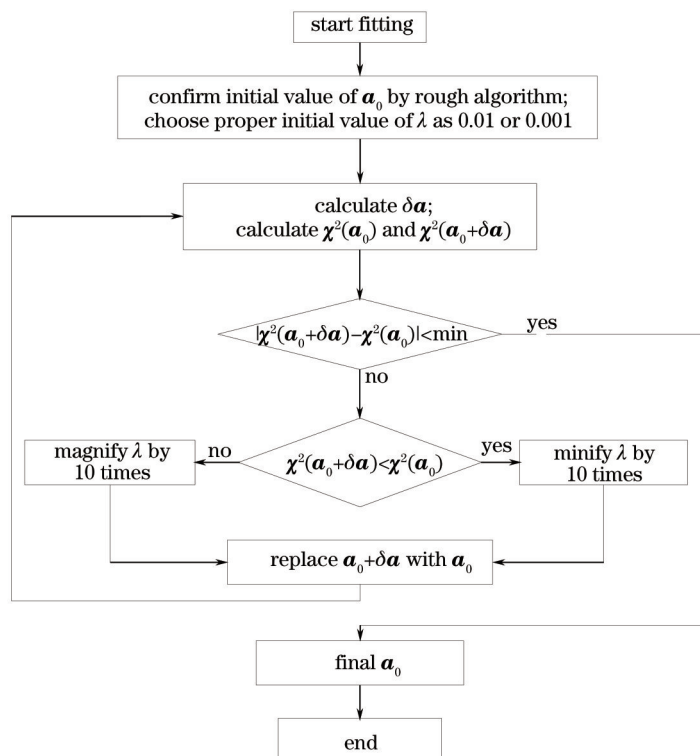


图 6 L-M 计算流程示意图

Fig.6 Flow chart of L-M algorithm

非线性拟合算法中对 5 个吸收峰和慢变背景参数进行迭代,共有 19 个参数,CH<sub>4</sub>和 CO 各自吸收峰的选择如图 7 所示,其中 CH<sub>4</sub> 选取 4 个峰,CO 选取 1 个峰。根据(6)式,拟合结束后得到的 CO 峰拟合参数  $A$  即可用于计算体积分数。

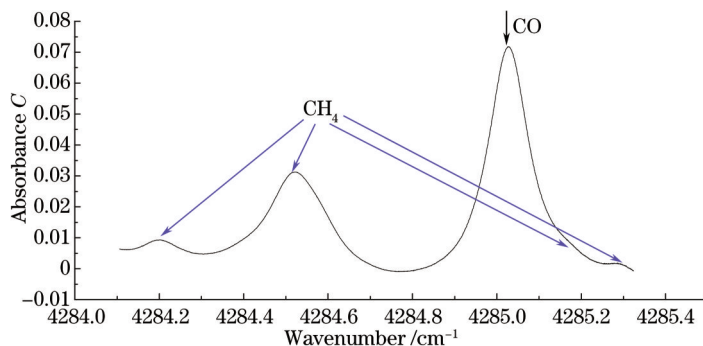


图 7 非线性拟合中选取的 CO 和 CH<sub>4</sub> 吸收峰

Fig.7 CO and CH<sub>4</sub> absorption peaks selected for nonlinear fitting

#### 4 实验结果及分析

系统于 2014 年 5 月 24 日~27 日在合肥市科学岛进行了大气 CO 开放光路连续监测实验,光路布置如图 8

所示,在两座实验楼顶分别布置测量控制主机和空心角反镜,往返光程为700 m。监测过程中连续记录浓度和对应光强数据,不同时段中的典型吸光度如图9所示,分析图中无吸收部分的吸光度标准差约为 $\sigma = 2 \times 10^{-4}$ ,取 $3\sigma$ 为检测限,则在296 K、1 atm、700 m光程下对应的CO浓度检测限为 $0.06 \times 10^{-6}$ 。



图8 测量系统光路布置

Fig.8 Optical-path of the measuring system

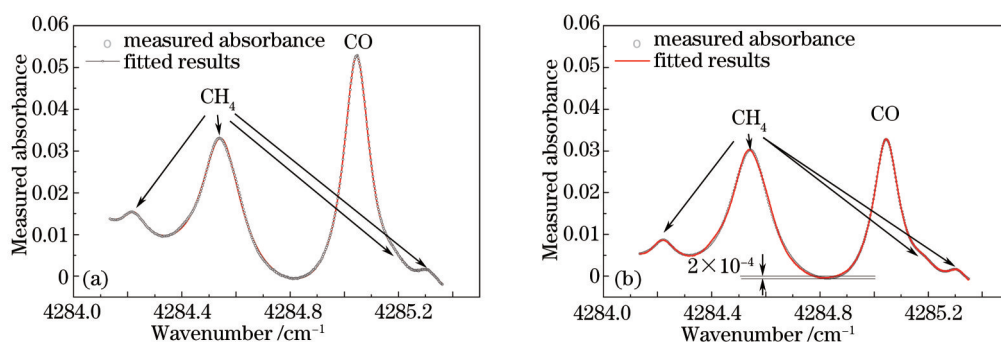


图9 不同时刻的CO和CH<sub>4</sub>吸光度谱线

Fig.9 CO and CH<sub>4</sub> absorbance at different moments

连续监测结果和点式分析仪(NDIR-EC9830)结果对比如图10所示。从图10可知,两者一致性良好,在测量起始段(5月25日之前),由于附近农田有农作物秸秆燃烧现象,使CO浓度一直偏高,5月24日夜间有短时暴雨,使CO浓度迅速下降,此后三天中一直保持在较低状态,为 $0.5 \times 10^{-6}$ 左右。二者数据间出现微小偏差主要是由点式测量和长光程测量的测量范围不同引起的,长光程测量的体积分数值为光路上的平均体积分数,由于CO扩散的不均匀性,造成大尺度下体积分数和点式体积分数的不一致性;另外,由于点式分析仪采用非分散红外原理,需要标准浓度样气进行标定<sup>[15]</sup>,标定气体也可能是误差源之一。

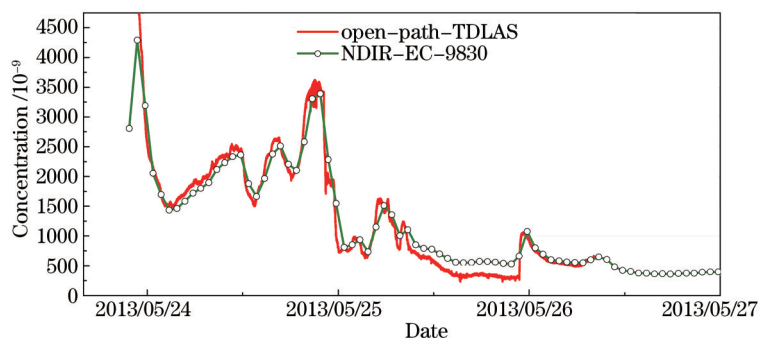


图10 TDLAS系统和点式分析仪结果对比

Fig.10 Comparison of TDLAS system and EC9830 analyzer results

## 5 结 论

利用CO位于2334 nm附近的R(6)吸收线,搭建了基于TDLAS直接吸收技术的长光程开放光路监测系统。设计了低功耗的测量控制系统,包括激光器控制、弱信号处理和光谱信号采集发送等功能,控制系统总

功耗小于 5 W,经长时间工作验证,该系统可稳定地控制激光器工作。基于上位机的 Levenberg-Marquardt 非线性拟合算法可分离出 CO 和 CH<sub>4</sub>各自的吸收峰,选取吸光度面积作为拟合参数之一,根据拟合结果即可计算出 CO 浓度,通过分析光谱数据,得出在 700m 光程下,CO 的检测限为  $0.06 \times 10^{-6}$ 。与点式仪器相比,两者结果一致性良好,也验证了该算法用于多峰拟合的可行性和该系统仪器化的前景。

## 参 考 文 献

- 1 Tu X H, Dong F Z, Feng Q, *et al.*. On-road remote sensing of CO and CO<sub>2</sub> of motor vehicle exhaust emissions in Beijing using a TDLAS system[C]. SPIE, 2005, 5832: 350-358.
- 2 Wagner S, Klein M, Kathrotia T, *et al.*. Absolute, spatially resolved, *in situ* CO profiles in atmospheric laminar counter-flow diffusion flames using 2.3  $\mu\text{m}$  TDLAS[J]. Applied Physics B, 2012, 109(3): 533-540.
- 3 Li J S, Parchatka U, Fischer H, *et al.*. Applications of wavelet transform to quantum cascade laser spectrometer for atmospheric trace gas measurements[J]. Applied Physics B, 2012, 108(4): 951-963.
- 4 Tao L, Sun K, Khan M A, *et al.*. Compact and portable open-path sensor for simultaneous measurements of atmospheric N<sub>2</sub>O and CO using a quantum cascade laser[J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28106-28118.
- 5 Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun, *et al.*. Infrared absorption spectrometer of monitoring ambient methane[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(1): 67-70.  
阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧, 等. 基于可调谐激光吸收光谱的大气甲烷监测仪[J]. 光学学报, 2006, 26(1): 67-70.
- 6 Kan R F, Liu W Q, Zhang Y J, *et al.*. A high sensitivity spectrometer with tunable diode laser for ambient methane monitoring[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(1): 54-57.
- 7 He Junfeng, Kan Ruifeng, Xu Zhenyu, *et al.*. Derivative spectrum and concentration inversion algorithm of tunable diode laser absorption spectroscopy oxygen measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0430003.  
何俊峰, 阚瑞峰, 许振宇, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱氧气测量中的导数光谱处理与浓度反演算法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0430003.
- 8 Press W H, Flannery B P, *et al.*. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing[M]. Texas: Cambridge University Press, 1997.
- 9 Gulluk T, Wagner H E, Slemr F. A high-frequency modulated tunable diode laser absorption spectrometer for measurements of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, and CO in air samples of a few cm<sup>3</sup>[J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(1): 230-239.
- 10 Datta A, Beyrau F, Seeger T, *et al.*. Temperature and CO concentration measurements in a partially premixed CH<sub>4</sub>/air coflowing jet flame using coherent anti-Stokes Raman scattering[J]. Combustion Science and Technology, 2004, 176(11): 1965-1984.
- 11 Chen Jiuying, Liu Jianguo, He Yabai, *et al.*. Scanning frequency optimization of laser absorption spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0230003.  
陈玖英, 刘建国, 何亚柏, 等. 激光吸收光谱技术中扫描频率的选择[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0230003.
- 12 Yuan Song, Kan Ruifeng, He Yabai, *et al.*. Laser temperature compensation used in tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0515002.  
袁 松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱中激光器温度补偿[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0515002.
- 13 Durry G, Pouchet I, Amarouche N, *et al.*. Shot-noise-limited dual-beam detector for atmospheric trace-gas monitoring with near-infrared diode lasers[J]. Applied Optics, 2000, 39(30): 5609-5619.
- 14 Xu Zhenyu. Research on Temperature Measurement and 2D Distribution for Transient Combustion Process by Infrared Absorption Spectroscopy[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012. 49-51.  
许振宇. 瞬态燃烧过程红外激光光谱温度场测量与重构方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012. 49-51.
- 15 Stephens B B, Miles N L, Richardson S J, *et al.*. Atmospheric CO<sub>2</sub> monitoring with single-cell NDIR-based analyzers[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2011, 4(12): 2737-2748.

栏目编辑: 吴秀娟