

文章编号 1004-924X(2021)07-1539-10

TDLAS 一氧化碳浓度检测系统误差分配

潘 云^{1,2}, 李 颀¹, 颜昌翔^{1,3*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 大学材料与光电研究中心, 北京 100049)

摘要:在利用可调谐二极管激光吸收光谱技术测量一氧化碳(CO)气体浓度时,反演精度受光强、温度、压强等的影响,需要对系统的总体误差进行分析与分配。为了提高 TDLAS 的测量精度,降低多项误差对测量的影响,本文提出了对系统各个测量误差的分配方法。首先建立了 CO 浓度反演的误差模型,基于二次谐波测量原理引入了二次谐波峰值、光强、驱动电流、温度、压强和光程几项误差;其次,利用随机化方法分别研究了系统各项误差对浓度误差的影响,并通过数值拟合的方法推导了浓度误差与各项误差的关系,比较了浓度误差对各项误差变化的灵敏度;最后,根据求得的灵敏度关系,综合考虑浓度测量要求以及现有器件的工艺水平,对各项误差进行了合理、有效的分配。利用蒙特卡洛法对本文所提出的各项误差分配方案进行了仿真,仿真结果表明,在 CO 体积分数为 2.5% 时,该误差分配方案可使浓度测量的绝对误差小于 0.025%。在实验室条件下对体积分数为 2.5% 的 CO 进行了测量,其绝对误差小于 0.01%,实现了对 CO 气体浓度的高精度反演。本文的研究结果保证了 TDLAS 浓度检测系统在多项误差影响下的测量精度,同时,可有效降低系统的设计难度和经济成本,对仪器的开发和应用具有重要的指导意义。

关键词:可调谐二极管激光吸收光谱;一氧化碳(CO);浓度反演;误差分配;蒙特卡洛法

中图分类号:O433.1;O657.38 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20212907.1539

Error distribution for TDLAS carbon monoxide concentration measurement system

PAN Yun^{1,2}, LI Yi¹, YAN Chang-xiang^{1,3*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Center of Materials Science and Optoelectrics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: yancx@ciomp.ac.cn

Abstract: The inversion accuracy of carbon monoxide (CO) concentration measurement using tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) technology is affected by various measurement errors, such

收稿日期:2020-12-02;修订日期:2021-01-04.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61805235, No. 61627819, No. 61727818, No. 61875192);国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFF0103603);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20180201012GX);2019-长光复旦-纳米表面结构窄带滤波片及在光谱成像上的应用研究(No. Y9R633A190)

as those pertaining to laser intensity, temperature, and pressure. To improve the measurement accuracy of TDLAS and reduce the influence of multiple errors on measurements, an error distribution method for each measurement error was proposed. First, an error model for CO concentration inversion was established. It included common error terms such as the peak value of the second harmonic, laser intensity, driving current, temperature, pressure, and optical path, based on the second harmonic measurement principle. Second, the influence of various error sources on the measured concentrations was studied separately using a randomized numerical fitting method, enabling the relationship between the concentration error and each error to be derived and the sensitivity of the concentration error to each error to be compared. Lastly, the various errors were effectively distributed by considering the sensitivity relationships, concentration measurement requirements, available devices, and technical complexity. Simulation of the error distribution scheme was performed using the Monte Carlo method. The simulation results show that when the gas volume fraction is 2.5%, the absolute error of concentration measurement is less than 0.025% under the error distribution scheme. Experiments to measure CO with a volume fraction of 2.5% show that the absolute error is less than 0.01%, demonstrating the high inversion accuracy inversion of CO concentration measurement. The results of this research show that the proposed error distribution method ensures high measurement accuracy for a TDLAS concentration detection system under the influence of multiple errors. In addition, the method can effectively decrease the design difficulty and cost of the systems, which is significant for the development and application of such instruments.

Key words: tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS); carbon monoxide (CO); concentration inversion; error distribution; Monte Carlo method

1 引 言

热电厂燃料不完全燃烧产生的一氧化碳(CO)是一种有毒气体,也是间接导致温室效应的气体。研究表明,热电厂在完全燃烧的条件下,CO含量为 $50 \times 10^{-6} \sim 90 \times 10^{-6}$,氧量不足会导致CO含量指数增长,可达1%量级。监测燃烧产生的CO浓度有利于减少有害气体的排放,同时可以从中反映空燃比,调整燃料的用量以达到节能的目的^[1-3]。

为了实现对CO气体浓度的实时监测,利用可调谐二极管激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)技术进行测量。近年来,TDLAS技术由于其高选择性、高灵敏度、高响应速度等优点,广泛应用于气体浓度、温度及速度等参数的测量中^[4-11]。由于TDLAS浓度测量系统存在多种系统误差和随机误差,对于短光程气体浓度的测量精度在1%~5%^[12-14]。为了降低测量误差,李峥辉、李金义等分别对测量过程中的温度、压强变化进行修

正^[15-16],Upadhyay等对光强等激光器自身参数进行实时在线标定^[17],王振等对CO气体分子碰撞展宽等谱线参数进行了标定^[18]。上述研究在气体浓度测量方面取得了一些成果,但是还存在较大的测量误差。而且上述对于TDLAS测量的误差研究大多是针对单项误差的分析和修正,没有对测量系统各项误差及其影响进行全面的分析,也没有给出对系统总体的误差分配。

为了降低多种误差因素的影响及仪器的设计难度和成本,本文提出了一种误差分配方法。根据二次谐波信号反演气体浓度的原理,建立了TDLAS系统的误差模型,利用随机化方法分析了各个误差项对浓度测量的影响,并通过数值拟合的方法比较了浓度误差对各项误差变化的灵敏度;最后根据求得的灵敏度关系,结合热电厂CO浓度的测量需求和现有器件的工艺水平,对系统各项误差进行了合理分配。本文的研究结果对TDLAS浓度测量系统的各项误差分配给出了指导,对于仪器研发具有重要的参考意义。

2 测量原理

2.1 TDLAS系统组成

在TDLAS技术中,根据二极管激光器的波长调谐特性,通过改变二极管激光器的注入电流,扫描被测气体的单个特征吸收谱线,从而对气体浓度进行测量。TDLAS技术包括直接吸收光谱(Direct Absorption Spectroscopy, DAS)技术和波长调制光谱(Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS)技术^[19],其中WMS技术因具有更高的检测精度而受到更广泛的应用。在WMS技术中,激光器波长受低频锯齿波扫描信号和高频正弦波调制信号的共同作用,光束通过气体吸收后,利用锁相放大器对透射光强信号进行谐波检测,获得包含气体吸收的信息。典型的TDLAS浓度检测系统如图1所示,主要包括光源模块、气体吸收模块和信号检测模块。

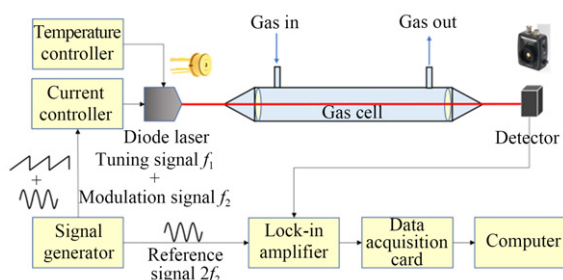


图1 可调谐二极管激光吸收光谱系统组成

Fig. 1 Block diagram of TDLAS system

2.2 浓度测量原理

在WMS技术中,注入高频正弦调制信号(角频率为 ω , $\omega = 2\pi f$)后的激光输出频率-时间响应表示为^[20]:

$$\nu(t) = \bar{\nu} + \nu_m \cos(\omega t), \quad (1)$$

其中: $\bar{\nu}$ 为激光器扫描过的中心频率, ν_m 为激光器波长调制幅度,由激光器调制特性可知其值与正弦波调制电流的幅度 i_m 成正比,其比例系数为 k_i 。

考虑激光器的频率调制-光强调制(FM-IM)相位差,输出的瞬时光强为:

$$I_0(t) = I_0 + I_m \cos(\omega t + \psi), \quad (2)$$

式中: I_0 为扫描过的激光平均光强; I_m 为激光器线性光强调制幅度,其值不随激光扫描光强的变化而变化,而是与波长调制幅度 ν_m 成正比; ψ 为线性

光强调制与频率调制之间的相位差。

当激光通过待测气体时,其透射光强和初始光强满足Lambert-Beer定律,透射光强表示为:

$$I_t(t) = I_0(t) \exp[-PS(T)\phi(\nu)CL] \approx I_0(t)[1 - PS(T)\phi(\nu)CL] = I_0(t)[1 - \alpha(\nu)], \quad (3)$$

式中: P 为混合气体的总压强, $S(T)$ 为温度 T 下的气体吸收谱线的线强, $\phi(\nu)$ 为气体吸收线型函数, C 为待测气体的体积分数, L 为有效光程, $\alpha(\nu)$ 为光谱吸光度。 $\alpha(\nu)$ 可展开为Fourier余弦级数形式,即:

$$-\alpha[\bar{\nu} + \nu_m \cos(\omega t)] = \sum_{k=0}^{\infty} H_k(\bar{\nu}, \nu_m) \cos(k\omega t), \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} H_0(\bar{\nu}, \nu_m) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \alpha(\bar{\nu} + \nu_m \cos \theta) d\theta \\ H_k(\bar{\nu}, \nu_m) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \alpha(\bar{\nu} + \nu_m \cos \theta) \cos(k\theta) d\theta \end{cases} \quad (5)$$

联立式(2)~式(4),可得透射光强的表达式如下:

$$I_t(t) = [I_0 + I_m \cos(\omega t + \psi)] \times \left[1 + \sum_{k=0}^{\infty} H_k(\bar{\nu}, \nu_m) \cos(k\omega t) \right]. \quad (6)$$

吸收谱线的线强表达式如下:

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \frac{\exp\left(-\frac{hc_0 E''}{k_B T}\right)}{\exp\left(-\frac{hc_0 E''}{k_B T_0}\right)} \cdot \frac{1 - \exp\left(-\frac{hc_0 \nu_0}{k_B T}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{hc_0 \nu_0}{k_B T_0}\right)}, \quad (7)$$

其中: $S(T_0)$ 为常温下的线强, $T_0=296$ K, h 为普朗克常数, c_0 为真空中光速, k_B 为玻尔兹曼常数, E'' 为分子跃迁的低态能量, ν_0 为分子吸收谱线的中心频率, $Q(T)$ 为配分函数。 $Q(T)$ 可从HITRAN数据库^[21]得到,它与温度的拟合关系式如下:

$$Q(T) = a + bT^2 + cT^3 + dT^4. \quad (8)$$

气体吸收线型函数采用Lorentzian线型来描述^[22]:

$$\phi(\nu) = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\nu_c}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_c}{2}\right)^2}, \quad (9)$$

其中 $\Delta\nu_c$ 为气体吸收谱线的半高全宽, 其表达式如下:

$$\Delta\nu_c(T, P) = 2\gamma_L(T_0) \left(\frac{T_0}{T}\right)^n P, \quad (10)$$

其中: $\gamma_L(T_0)$ 为压力展宽系数, n 为温度指数, 对于 CO 气体 n 取 0.69。

$$\begin{cases} H_0(x, m) = -\frac{PS(T)CL}{\pi\Delta\nu_c} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{(x + m\cos\theta)^2 + 1} d\theta \\ H_k(x, m) = -\frac{PS(T)CL}{\pi\Delta\nu_c} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\cos(k\theta)}{(x + m\cos\theta)^2 + 1} d\theta \end{cases}. \quad (13)$$

其简化表达式由 Axner 等给出^[23]。

用于提取二次谐波的锁相放大器的参考信号如下:

$$I_{\text{ref}} = \cos(2\omega t). \quad (14)$$

经过锁相放大器及低通滤波器后, 最终采集到的扣除基线的二次谐波信号表达式 X_{2f-0} 如式 (15), 波形如图 2 所示。

$$X_{2f-0} = \left[\frac{1}{2} I_0 H_2 + \frac{1}{4} I_m (H_1 + H_3) \cos \psi \right] \cdot \beta, \quad (15)$$

其中 β 为探测器光电转换系数与锁相放大器增益的乘积。

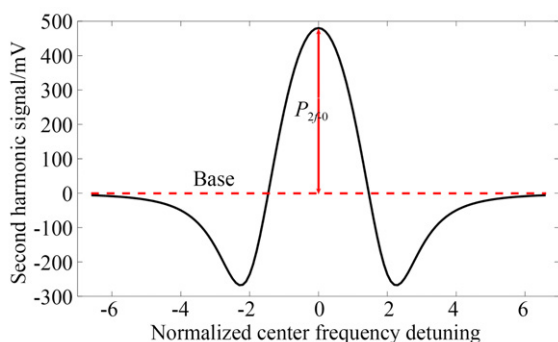


图 2 二次谐波信号波形

Fig. 2 Waveforms of second harmonic signal

当 $x=0$ 时, 二次谐波有最大值 P_{2f-0} , 此时 $H_1=H_3=0$, H_2 表达式如下:

定义两个无量纲参数:

$$x = \frac{\bar{\nu} - \nu_0}{\frac{\Delta\nu_c}{2}}, \quad (11)$$

$$m = \frac{\nu_m}{\frac{\Delta\nu_c}{2}}. \quad (12)$$

其中: x 为归一化中心频率失谐量, m 为调制深度。则式 (5) 可写为:

$$H_2(0, m) = -\frac{PS(T)CL}{\pi \frac{\Delta\nu_c}{2}} \cdot \frac{2}{m^2} \cdot \left(2 - \frac{2+m^2}{\sqrt{1+m^2}} \right). \quad (16)$$

最终得到利用二次谐波峰值反演浓度的表达式如下:

$$C = \frac{P_{2f-0} \cdot \pi \Delta\nu_c}{\beta \cdot I_0 PS(T) L \cdot \frac{2}{m^2} \left(\frac{2+m^2}{\sqrt{1+m^2}} - 2 \right)}. \quad (17)$$

3 系统误差分析与分配

3.1 误差模型建立

从式 (16) 中可以看出, 浓度的误差与 P_{2f-0} , $\Delta\nu_c$, I_0 , P , $S(T)$, L , m 等变量有关, 而由 2.2 节可知, $\Delta\nu_c$ 是温度 T 和压强 P 的函数, $S(T)$ 是温度 T 的函数, m 是波长调制幅度 ν_m 和温度 T 及压强 P 的函数, 而波长调制幅度 ν_m 与电流调制幅度 i_m 成正比, 因此最终影响浓度的误差项可归结为 P_{2f-0} , I_0 , i_m , P , T , L 6 项, 其误差分别记为 ΔP_{2f-0} , ΔI_0 , Δi_m , ΔP , ΔT , ΔL , 由此带来的浓度的绝对误差记为 ΔC 。

$\Delta\nu_c$, $S(T)$ 和 m 引入误差后的表达式分别为:

$$\Delta\nu_c' = 2\gamma_L(T_0) \left(\frac{T_0}{T + \Delta T} \right)^n (P + \Delta P), \quad (18)$$

$$S(T)' = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T + \Delta T)} \frac{\exp\left(-\frac{hc_0}{k_B} \frac{E''}{T + \Delta T}\right)}{\exp\left(-\frac{hc_0}{k_B} \frac{E''}{T_0}\right)} \cdot \frac{1 - \exp\left(-\frac{hc_0}{k_B} \frac{\nu_0}{T + \Delta T}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{hc_0}{k_B} \frac{\nu_0}{T_0}\right)}, \quad (19)$$

$$Q(T + \Delta T) = a + b(T + \Delta T) + c(T + \Delta T)^2 + d(T + \Delta T)^3, \quad (20)$$

$$m' = \frac{\nu_m + \Delta\nu_m}{\frac{\Delta\nu_c'}{2}} = \frac{k_i(i_m + \Delta i_m)}{\gamma_L(T_0) \left(\frac{T_0}{T + \Delta T}\right)^n (P + \Delta P)} \quad (21)$$

式(17)是 $P_{2f-0}, I_0, i_m, P, T, L$ 6个变量的函

$$\Delta C = f(P_{2f-0} + \Delta P_{2f-0}, I_0 + \Delta I_0, i_m + \Delta i_m, P + \Delta P, T + \Delta T, L + \Delta L) - f(P_{2f-0}, I_0, i_m, P, T, L). \quad (24)$$

这6项误差中, $\Delta P_{2f-0}, \Delta P, \Delta T$ 与测量器件精度有关; I_0 项由于受到激光器功率波动、电厂管道灰尘等的影响, 一般采用一次谐波信号对二次谐波信号进行归一化的方法消除其影响^[24], 因此 ΔI_0 与归一化标定误差有关; Δi_m 是调制电流的稳定性; 光程 L 项受管道形变和抖动的影响, 因此 ΔL 是光程的稳定性。

3.2 浓度误差对各项误差的灵敏度分析

浓度误差模型不仅包含线性项, 还包含高次

数, 简化表达式得到:

$$C = f(P_{2f-0}, I_0, i_m, P, T, L). \quad (22)$$

包含误差的浓度表达式为:

$$C' = f(P_{2f-0} + \Delta P_{2f-0}, I_0 + \Delta I_0, i_m + \Delta i_m, P + \Delta P, T + \Delta T, L + \Delta L). \quad (23)$$

因此浓度的绝对误差为:

项和指数项, 直接利用微分法难以推导浓度误差与其他各项误差的关系, 因此本文采取随机化方法对各项误差进行数值拟合。该方法利用随机抽样统计来估算结果, 对于解析法难于求解的问题, 基于样本即可进行统计处理, 得到有关概率分布, 作为问题的解。

固定其他误差项为0, 对要分析的误差项, 设置其极限误差取值从0开始到某个值, 对该区间内的每个取值, 生成一系列正态分布的随机数,

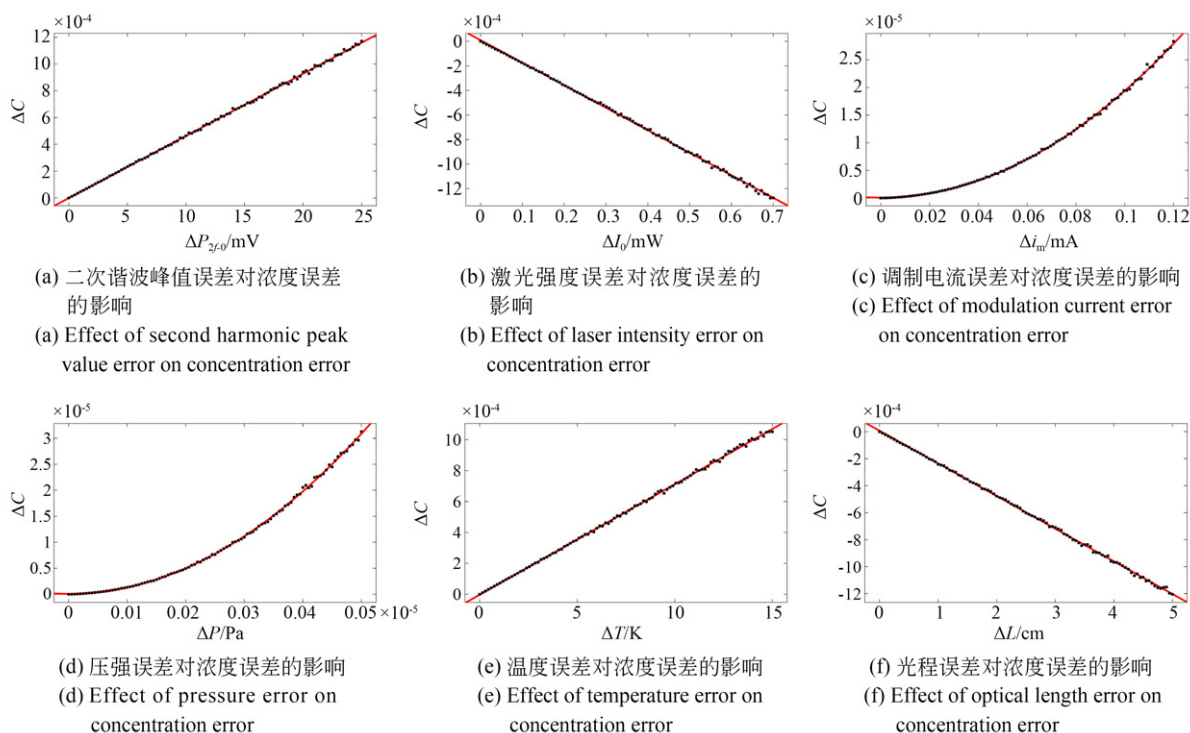


图3 各项误差对浓度的影响

Fig. 3 Effect of each error on concentration error

其均值为 0, 方差为该极限误差的 1/3, 根据式(24)在 Matlab 中计算得到一系列浓度误差, 统计其分布并根据 3σ 准则计算相应的浓度极限误差, 由此得到各误差项取不同极限误差时的浓度极限误差。在计算中, 设置气体浓度为 2.5%, 激光强度为 13.26 mW, 调制电流幅度为 2.5 mA, 气体总压强为 1×10^5 Pa, 温度为 296 K, 光程为 100 cm, β 为 3.785×10^4 V/W, 二次谐波峰值为 508.7 mV。分析各项误差取不同值时的浓度误差并做散点图, 结果如图 3 所示。

对图 3 中浓度误差与各项误差进行数值拟合, 得到:

$$\begin{aligned}\Delta C &= 4.64 \times 10^{-5} \Delta P_{2f-0} - 6.15 \times 10^{-7} \\ \Delta C &= -1.83 \times 10^{-3} \Delta I_0 + 9.68 \times 10^{-6} \\ \Delta C &= 1.93 \times 10^{-3} \Delta i_m^2 - 1.72 \times 10^{-7} \Delta i_m + \\ &\quad 9.49 \times 10^{-8} \\ \Delta C &= 1.23 \times 10^{-2} \Delta P^2 - 5.94 \times 10^{-8} \Delta P + \\ &\quad 7.72 \times 10^{-8} \\ \Delta C &= 7.15 \times 10^{-5} \Delta T - 2.95 \times 10^{-6} \\ \Delta C &= -2.42 \times 10^{-4} \Delta L + 7.20 \times 10^{-6}\end{aligned}\quad (25)$$

由图 3 和式(25)可以看出, 各项误差对浓度的影响形式和程度均不一样。其中, Δi_m 和 ΔP 两项与 ΔC 的拟合式为二次函数, ΔC 在 10^{-5} 量级, 而其他 4 项的拟合式为线性函数, ΔC 可达 10^{-3} 量级。由于 Δi_m 和 ΔP 两个二次项的影响远小于其他 4 项, 在进行灵敏度分析时不予考虑, 而其他 4 项误差的影响用灵敏度来进行比较。对于 4 个线性误差项, 灵敏度定义为:

$$s = |\Delta C / \Delta X|, \quad (26)$$

其中 ΔX 代表各项误差, 可见灵敏度即为一次曲线斜率的绝对值。灵敏度越大, 误差项对浓度误差的影响越大。最终各项误差的灵敏度如表 1 所示。

由表 1 可知, 浓度对各项误差变化的灵敏度由大到小依次为: $\Delta I_0 > \Delta L > \Delta T > \Delta P_{2f-0} > \Delta P >$

表 1 浓度误差对各项误差变化的灵敏度

Tab. 1 Sensitivities of concentration error to each error

误差项	灵敏度
$\Delta C / \Delta P_{2f-0}$	4.64×10^{-5}
$\Delta C / \Delta I_0$	1.83×10^{-3}
$\Delta C / \Delta T$	7.15×10^{-5}
$\Delta C / \Delta L$	2.42×10^{-4}

Δi_m 。各项误差的分配将参考此灵敏度关系进行, 其中 ΔI_0 和 ΔL 的灵敏度最大, 因此主要控制这两项误差, 在保证总体误差达标的情况下其他项可以适当放宽, 以降低仪器的设计难度, 节约成本。

3.3 各项误差分配

基于各项误差的灵敏度、当前工艺水平和经济成本等, 对各项误差进行分配。对体积分数为 2.5% 的气体, 要求测量的绝对误差不超过 0.025%。目前常用的示波器, 如 Tektronix、Keysight、NI、LitePoint 等, 其垂直精度在 0.25%~2.5%^[25], 对 500 mV 左右的信号, 误差在 2 mV 左右可满足要求。对 I_0 的归一化标定的相对误差可小于 1%, 激光器驱动器常用 Wavelength、ILX、Newport、Thorlabs 等品牌, 其电流精度一般在 0.005~4 mA 之间, 根据灵敏度关系, 对电流稳定度的要求可以放低, 此处取 0.02 mA 即可满足要求。压力传感器精度在 0.01%~10% 之间可分为 4 个等级, 常用的压力传感器如 Honeywell、Keller 等, 其精度在 0.05%~0.5%, 由于压强误差对浓度误差的影响较小, 采用常见的精度为 0.5%FS、量程为 1 MPa 的压力传感器, 最大误差为 0.05×10^5 Pa 即可满足要求。常用的电偶式温度传感器精度在 0.1~5 K 之间, 取 1 K。光程误差主要由管道的振动和温度变化引起的形变导致, 热电厂管道由于振动产生的位移在 0.3 cm 左右^[26], 而管道材料通常为钢材, 其热膨胀系数在 $10 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$ /K, 管壁厚度在 2 cm 左右, 温度变化导致的管道形变相比于振动产生的位移小两个数量级, 因此光程稳定性取 0.4 cm。最终各项误差的概率分布及分配的极限误差值如表 2 所示。

表 2 各项误差分配

Tab. 2 Distribution for each error

变量名称	误差分布	误差量
二次谐波峰值误差 ΔP_{2f-0}	正态分布	2 mV
激光强度误差 ΔI_0	正态分布	0.1 mW
调制电流误差 Δi_m	正态分布	0.02 mA
压强误差 ΔP	正态分布	0.05×10^5 Pa
温度误差 ΔT	正态分布	1 K
光程误差 ΔL	正态分布	0.4 cm

4 仿真

4.1 仿真方法

为了综合分析各项误差影响下的浓度误差,在 Matlab 编程环境下用蒙特卡洛法^[27]对上述误差分配方案进行仿真。蒙特卡洛法又称统计试验法,采用随机数对解析法难以求解的问题进行统计模拟。针对 TDLAS 气体检测系统的误差分析,蒙特卡洛法仿真的关键在于对各项误差构造一系列随机数,计算由此产生的一系列浓度的测量误差,统计其概率分布,将概率刚好大于 99.73% 时的浓度误差作为测量的极限误差,仿真流程如图 4 所示。

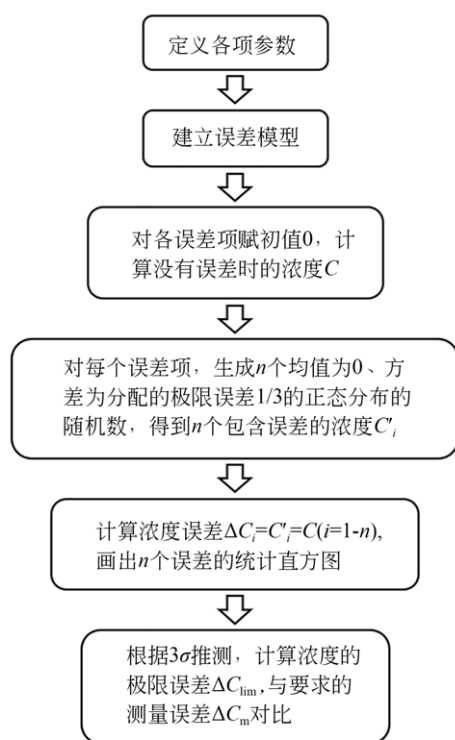


图4 蒙特卡洛法仿真流程

Fig. 4 Flowchart of Monte Carlo simulations

4.2 仿真结果

将表 2 中各项误差因素以正态分布的形式代入式(24)中,利用蒙特卡洛法对浓度误差进行仿真,得到浓度误差的统计直方图,如图 5 所示。

由图 5 中可知,浓度误差统计数量服从正态分布,在 100 000 次仿真结果中,浓度极限误差小于 0.025% 的次数为 99 742 次,概率为 99.74%。

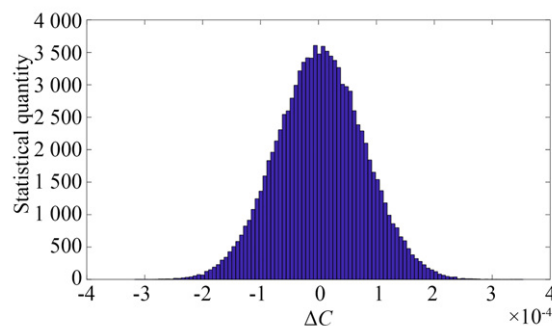


图5 浓度误差的统计直方图

Fig. 5 Histogram of concentration error

根据 3σ 原则,设置置信概率为 99.73% (3σ),在此概率下 ΔC 的取值几乎全部集中在 $(-3\sigma, 3\sigma)$ 区间,仿真得到的置信区间为 $(-0.023\%, 0.023\%)$ 。此由可知,在各项误差分布以及误差值符合表 2 的情况下,浓度的极限误差小于 0.025%,相对误差小于 1%,满足指标要求。

5 实验

5.1 实验装置

图 6 所示为利用 TDLAS 技术测量 CO 浓度的实验装置。系统由一个三通道的直流电源供电 (GW Instek, GP-3323)。采用高精度激光驱动器 (Wavelength, LDTC0520) 来驱动激光器,它包括电流驱动和温度控制两个部分。激光器采用中心波长在 1 566 nm 附近的 DFB 激光器 (Eblana, EP-1566-DM-TP39),光强约为 10 mW。激光经过 1 m 长的不锈钢气体池后,被峰值响应在 1 550 nm 附近的 Ge 光电探测器 (Thorlabs,

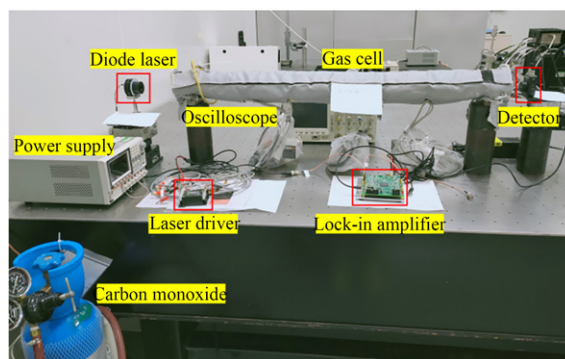


图6 TDLAS 浓度测量实验装置

Fig. 6 Experimental setup of TDLAS concentration measurement

PDA30B2)接收。探测器的输出端与锁相放大电路相接,包括信号发生和锁相放大两个功能。最后采用示波器(Agilent,MSO6104A)与锁相放大电路相连,用于记录二次谐波信号。实验中所用的一氧化碳气体浓度为2.5%,实验温度为296 K,压强为 1×10^5 Pa,各参数均与仿真一致。

5.2 实验结果

实验中对CO浓度进行了10组测量。最终得到的二次谐波峰值和反演的浓度值如表3所示。

从表3中可以看出,浓度的绝对误差均在 $(-0.01\%, 0.01\%)$ 内,相对误差在 $(-0.4\%, 0.4\%)$ 之间,10组测量结果的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为 8.069×10^{-5} 。测量结果显示,浓度极限误差小于0.025%,相对误差小于1%,与仿真结果一致,满足测量要求,而且测量结果的重复性也比较高。

6 结 论

利用TDLAS技术对热电厂管道中CO浓度进行检测时,容易受到光强、温度及压强等的影响,测量浓度存在误差。本文针对系统整体的误差分配问题,首先建立了浓度反演的误差模型,准确引入了各误差项;其次,利用随机化方法分析了各项误差对浓度误差的影响,比较了浓度误差对各项误差变化的灵敏度;最后,根据此灵敏度关系和现有的器件工艺水平对各项误差进行了分配。基于蒙特卡洛法的仿真结果表明,对

表3 实验测量二次谐波峰值和浓度反演数据

Tab. 3 Second harmonic values measured in experiments and concentration inversion data

P_{2f-0}/mV	$C/\%$	$\Delta C/\%$	$\Delta C/C_{\text{true}}$
507.2	2.493	-0.007	-0.267
506.5	2.490	-0.010	-0.417
506.6	2.490	-0.010	-0.394
508.7	2.501	0.001	0.024
507.6	2.495	-0.005	-0.194
510.6	2.510	0.010	0.391
510.1	2.507	0.007	0.300
510.2	2.508	0.008	0.313
507.9	2.497	-0.003	-0.136
510.5	2.509	0.009	0.375

2.5%体积分数CO测量的极限误差为0.023%;实验室测量结果表明,浓度的绝对误差小于0.01%,与仿真结果一致,证明了误差分配方案的有效性,在满足热电厂测量要求的同时降低了仪器成本和设计难度。本文的研究结果可为TDLAS浓度检测系统的设计与误差分析提供关键的理论指导,对仪器的研发与应用具有重要的参考价值。

本文的研究在仪器误差分配和浓度测量方面取得了一些效果,但是在实验方面还存在一些不足之处。本文只对2.5%浓度的CO气体和固定温度压强条件进行了实验验证,适合热电厂在不完全燃烧条件下的应用。为了进一步扩大仪器的应用范围,后续将对低浓度的气体和温度压强等环境条件变化的情况进行实验研究。

参考文献:

- [1] 孙亦鹏,曹红加,张清峰. 电厂烟气CO检测技术的应用[J]. 电站系统工程, 2012, 28(6): 41-43.
SUN Y P, CAO H J, ZHANG Q F. Application of CO detection technology in power plant flue gas[J]. *Power System Engineering*, 2012, 28(6): 41-43. (in Chinese)
- [2] 容奎恩,袁镇福,刘志敏,等. 电站锅炉原理[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
RONG L E, YUAN ZH F, LIU ZH M, *et al.* *Utility Boiler Principle* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007. (in Chinese)
- [3] 张晨浩,苏胜,常寿兵,等. 基于尾部烟道CO在线监测的锅炉燃烧优化[J]. 燃烧科学与技术, 2019, 25(4): 347-352.
ZHANG CH H, SU SH, CHANG SH B, *et al.* Boiler combustion optimization based on online monitoring of CO in flue gas[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2019, 25(4): 347-352. (in Chinese)
- [4] 张志荣,孙鹏帅,庞涛,等. 激光吸收光谱技术在工业生产过程及安全预警标识性气体监测中的应用[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1925-1937.
ZHANG ZH R, SUN P SH, PANG T, *et al.* Application of laser absorption spectroscopy for identi-

- cation gases in industrial production processes and early safety warning[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8): 1925-1937. (in Chinese)
- [5] HOU C C, CHEN H M, ZHANG J C, *et al.* Near-infrared and mid-infrared semiconductor broadband light emitters [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(3): 17170.
- [6] MEI Y, WENG G E, ZHANG B P, *et al.* Quantum dot vertical-cavity surface-emitting lasers covering the 'green gap' [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(1): e16199.
- [7] GAO L, CHEN C, ZENG K, *et al.* Broadband, sensitive and spectrally distinctive SnS₂ nanosheet/PbS colloidal quantum dot hybrid photodetector[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(7): e16126.
- [8] 聂伟, 阙瑞峰, 杨晨光, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术的应用研究进展[J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 0911001.
- NIE W, KAN R F, YANG CH G, *et al.* Research progress on the application of tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0911001. (in Chinese)
- [9] 李明星, 陈兵, 阮俊, 等. 近海大尺度区域二氧化碳的激光在线探测技术[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(7): 1424-1432.
- LI M X, CHEN B, RUAN J, *et al.* On-line detection of carbon dioxide in large scale offshore by laser technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(7): 1424-1432. (in Chinese)
- [10] 袁志国, 马修真, 刘晓楠, 等. 利用可调谐激光吸收光谱技术的柴油机排放温度测试研究[J]. *中国光学*, 2020, 13(2): 281-289.
- YUAN ZH G, MA X ZH, LIU X N, *et al.* Testing on diesel engine emission temperature using tunable laser absorption spectroscopy technology [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 281-289. (in Chinese)
- [11] 刘佩进, 王志新, 杨斌, 等. 结合吸收光谱与互相关法的燃气速度测量方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(2): 532-536.
- LIU P J, WANG ZH X, YANG B, *et al.* Research on measurement method of gas velocity combined absorption spectroscopy technique and cross-correlation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(2): 532-536. (in Chinese)
- [12] 李玖仪, 王飞, 张雅琪. 基于中红外激光吸收光谱的低浓度一氧化氮测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 053002.
- LI M Y, WANG F, ZHANG Y Q. Measurement of nitric oxide with low concentration based on mid-infrared laser absorption spectroscopy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 053002. (in Chinese)
- [13] 李传亮, 蒋利军, 邵李刚, 等. 基于TDLAS平衡差分技术的CO气体检测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(10): 3165-3169.
- LI CH L, JIANG L J, SHAO L G, *et al.* The detection of CO based on TDLAS combined with balanced difference detection technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(10): 3165-3169. (in Chinese)
- [14] GOLDENSTEIN C S, SPEARRIN R M, JEFFRIES J B, *et al.* Infrared laser-absorption sensing for combustion gases [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017, 60: 132-176.
- [15] 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.
- LI ZH H, YAO SH CH, 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. (in Chinese)
- [16] 李金义, 樊鸿清, 田鑫丽, 等. 大气环境条件下波长调制光谱无标测量的压强修正[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(5): 1407-1412.
- LI J Y, FAN H Q, TIAN X L, *et al.* Pressure correction for calibration-free measurement of wavelength modulation spectroscopy in atmospheric environment [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(5): 1407-1412. (in Chinese)
- [17] UPADHYAY A, WILSON D, LENGDEN M, *et al.* Calibration-free WMS using a cw-DFB-QCL, a VCSEL, and an edge-emitting DFB laser with *in situ* real-time laser parameter characterization [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 1-17.
- [18] 王振, 杜艳君, 丁艳军, 等. 基于波长调制-直接吸收光谱方法的CO分子1567 nm处谱线参数高精度标定[J]. *物理学报*, 2020, 69(6): 064204.
- WANG ZH, DU Y J, DING Y J, *et al.* High precision calibration of spectral parameters of CO at 1567 nm based on wavelength modulation-direct absorption spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(6): 064204. (in Chinese)
- [19] ROY A, CHAKRABORTY A L. Intensity modu-

- lation-normalized calibration-free $1f$ and $2f$ wavelength modulation spectroscopy[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(21): 12691-12701.
- [20] YANG C G, MEI L, DENG H, *et al.* Wavelength modulation spectroscopy by employing the first harmonic phase angle method[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12137-12146.
- [21] ROTHMAN L S, GORDON I E, BARBE A, *et al.* The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, 110 (9/10) : 533-572.
- [22] SUN J C, CHANG J, WANG F P, *et al.* Tuning efficiency of distributed feedback laser diode for wavelength modulation spectroscopy [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(21): 9722-9727.
- [23] ARNDT R. Analytical line shapes for lorentzian signals broadened by modulation [J]. *Journal of Applied Physics*, 1965, 36(8): 2522-2524.
- [24] LI H, RIEKER G B, LIU X, *et al.* Extension of wavelength-modulation spectroscopy to large modulation depth for diode laser absorption measurements in high-pressure gases[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(5): 1052-1061.
- [25] 肖双满. 高精度示波器模块硬件电路设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- XIAO SH M. *Hardware Circuit Design of High Precision Oscilloscope Module* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [26] 匡知群, 李立春, 杨威, 等. 锅炉烟道系统振动分析及改造研究[J]. 锅炉制造, 2012(1): 15-20.
- KUANG ZH Q, LI L CH, YANG W, *et al.* Vibration analysis and retrofit research for a boiler flue system[J]. *Boiler Manufacturing*, 2012(1): 15-20. (in Chinese)
- [27] 徐力智, 颜昌翔, 李颀, 等. 航空摆扫成像像移计算与误差分配[J]. 光学精密工程, 2019, 27(10): 2071-2079.
- XU L ZH, YAN CH X, LI Y, *et al.* Image motion calculation and error distribution for aerial whisk-broom imaging[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(10): 2071-2079. (in Chinese)

作者简介:



潘云(1992—),女,江苏南通人,博士研究生,2015年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事激光气体检测方面的研究。E-mail: dongdongtustc@yeah.net

通讯作者:



颜昌翔(1973—),男,湖北洪湖人,博士,研究员,博士生导师,1995年于长春光学精密机械学院获得学士学位,1998年于浙江大学获得硕士学位,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感仪器的光机电一体化技术、多光谱、超光谱空间遥感成像技术及偏振探测技术等方面的研究。E-mail: yanxc@ciomp.ac.cn