

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905449

基于 TDLAS 的烟气中 CO 浓度混合取样式在线监测*

周佩丽¹, 谭文¹, 彭志敏²

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院 北京 102206; 2. 清华大学能源与动力工程系 北京 100084)

摘要:燃煤锅炉烟气中不完全燃烧产物 CO 是燃烧效率监测的重要依据,其存在浓度高、波动剧烈、分布不均匀等特点,采用 TDLAS 技术中波长调制光谱结合稀释法对烟气中 CO 浓度进行了混合取样式在线监测。首先基于谐波理论推导出 4 次谐波与 1 次谐波免标法测量公式,其次对 CO 激光器频率调制和光强调制的相位差及电流调谐系数进行了标定,并采用标准气体结合直接吸收法对赫里奥特池光程进行了测量,然后在此基础上对浓度与谐波比值曲线进行了数值计算和实验验证。最后将该装置应用于燃煤电厂,将省煤器出口烟道分为 6 个区域,各区域安装一个稀释取样探头,在稀释取样过程由于降低了烟气露点无需做除水处理,6 路经过稀释后的烟气混合后进入赫里奥特池后实现免标定高精度测量。该监测装置实现了连续稳定运行,运行中使用 Testo350 便携式分析仪与现场测量数据进行了对比,二者测量结果一致,误差小于 1×10^{-6} 。

关键词: 波长调制光谱学;谐波比值;稀释法;赫里奥特池;混合取样式

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.3025

On-line measurement of CO concentration in flue gas based on TDLAS in mixed sampling mode

Zhou Peili¹, Tan Wen¹, Peng Zhimin²

(1. School of Control & Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: CO as the incomplete combustion product in flue gas of coal-fired unit is an important basis for combustion efficiency monitoring, which has the characteristics of high concentration, strong fluctuation and uneven distribution. In this paper, the mixed sampling on-line measurement of CO concentration in flue gas is carried out using wavelength modulation spectroscopy in TDLAS technology combined with dilution method. Firstly, based on the harmonic theory, the measurement formulas of the fourth harmonic and first harmonic calibration-free method were deduced. Secondly, the phase difference between frequency modulation and light intensity modulation, the current tuning coefficient of the CO laser were calibrated, and the optical path of Herriott cell was measured through standard gas combined with direct absorption method. On this basis, the curve of concentration versus harmonic ratio was numerically calculated and verified in experiment. Finally, the monitoring device was applied in a coal-fired power plant. During installation, the outlet flues of the economizer were divided into six areas, and a dilution sampling probe was installed in each area. During the dilution sampling process, because the dew point of flue gas was reduced, no dewatering was needed. The diluted flue gases in the six channels were mixed and then entered into the Herriott cell to realize the calibration-free and high-precision measurement. The monitoring device realized continuous and stable operation, and in the operation Testo350 portable analyzer was used to make measurement and the measurement results were compared with the measurement data obtained from the field measurement device. The comparison results show that the two measurement results are consistent and the error between them is less than 1×10^{-6} .

Keywords: wavelength modulation spectroscopy; harmonic ratio; dilution method; Herriott cell; mixed sampling mode

0 引 言

目前火电机组燃烧效率监测一般以氧量为依据,然而受到空气中氧气的影响,烟道漏风和仪表漏风会导致氧量测量误差,因此如果将不完全燃烧产物 CO 与氧量结合,能够提高燃烧效率监测的准确性。另外,CO 浓度过高,会造成炉膛管壁结焦、高温腐蚀,因此 CO 浓度监测对电厂正常运行也具有重要意义^[1-4]。烟气中 CO 存在以下特点:1) 浓度高:经核算,以 600 MW 机组为例,倘若每年 1 400 h CO 均值为 1‰,则未完全燃烧造成的煤损失约 924 t,且 CO 浓度与飞灰中碳含量具有正相关性,倘若由于 CO 的产生造成飞灰含碳量增加 2%,每年将浪费约 1 693 t 煤;2) 波动剧烈:浓度变化迅速,2 min 内浓度可由 1×10^{-5} 数量级上升至 1×10^{-3} 数量级再下降至 1×10^{-5} 数量级;3) 分布不均匀:由于炉膛配风不均匀、炉膛老化、火焰倾斜等原因,CO 分布不均匀,需要进行区域分布式测量^[5]。现有的烟气 CO 测量一般采用 CEMS 分析仪,基于非分散红外原理结合取样方式^[6-7],然而该测量仪表取样过程复杂,镜片容易污染,维护量大,而且现有的 CO 测量仪表均采用单点测量方式,代表性差,无法反映 CO 的平均分布情况。

与非分散红外技术采用宽光谱光源不同,可调谐半导体激光吸收光谱学(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)技术采用窄带激光扫描分子吸收谱线,然后通过分析被气体分子吸收后的激光强度得到待测气体参数,该方法选择性好、灵敏度高、抗干扰能力强,可实现非接触式在线测量^[8-9],该技术包括直接吸收光谱和波长调制光谱两种方法。目前国内外有学者基于 TDLAS 技术对烟气中的 CO 浓度测量进行了相关研究,如 Chao 等^[2]在实验室环境下模拟烟气环境,利用 CO 分子 2.3 μm 处谱线结合波长调制光谱二次谐波与一次谐波免标法和直接吸收法对燃烧器内产生的 CO 浓度进行了测量;Ebert 等^[10]利用 CO 分子 2.3 μm 处谱线结合直接吸收法对垃圾焚烧炉中 CO 浓度进行了测量;陈东等^[8]利用 CO 分子 1.58 μm 处谱线结合直接吸收法对烟气中 CO 浓度进行了在线监测。

而在实际工业应用中,直接吸收法和二次谐波与一次谐波免标法都存在各自的优缺点。其中直接吸收法物理概念清晰,采用无吸收区光强作为基线对气体吸收率函数进行测量,但是该方法在测量中容易受到颗粒物浓度、激光强度波动、基线拟合不确定性等因素影响,而烟道属于振动剧烈、高粉尘环境,因此直接吸收法在工业烟气测量中会导致较大误差;二次谐波与一次谐波免标法在测量过程中通过对目标信号进行高频调制,而非目标信号由于没有经过调制在后续的谐波检测过程中被除

去,同时采用一次谐波对二次谐波归一化消除了光强的影响,可以有效地降低测量系统中噪声信号干扰,具有信噪比高、灵敏度高的优点^[11-13],然而二次谐波与一次谐波免标法由于二次谐波背景信号较大,而实际测量中难以实时剔除背景,会对测量带来较大误差。

针对烟气中 CO 浓度高、波动剧烈、分布不均匀等特点以及现有烟气 CO 浓度测量存在的问题,本文采用 TDLAS 中背景信号小的四次谐波与一次谐波比值法结合稀释取样方式对烟气中 CO 进行了混合取样式测量。将烟道分区,每个区域中心位置安装稀释取样探头^[14],经过稀释后的烟气混合后进入赫里奥特池实现 TDLAS 长光程测量。

1 测量原理

在波长调制法中,一束中心频率为 ν_0 的激光经过频率为 ω 的高频正弦信号调制后,激光的瞬时频率 ν 和入射光强 I_0 的表达式^[15-17]如式(1)所示。

$$\begin{cases} \nu = \nu_0 + a \cos(\omega t) \\ I_0 = \bar{I}_0 [1 + i \cos(\omega t + \phi)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: a 为频率调制幅度,单位为 cm^{-1} ; $\bar{I}_0$ 为平均光强; i 为光强线性调制系数; ϕ 为频率调制和光强调制之间的相位差。

根据朗伯比尔定律可知,经过气体吸收后的光强 I_t 与入射光强 I_0 之间满足式(2)。

$$\begin{aligned} \tau(\nu) = \frac{I_t}{I_0} = \exp[-\alpha(\nu)] = \\ \exp[-PS(T)XL\varphi(\nu_0 + a \cos(\omega t))] = \\ \frac{H_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} H_k \cdot \cos[k(\omega t)] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\tau(\nu)$ 为激光透过率函数; $\alpha(\nu)$ 为激光吸收率函数; P 为气体压力; $S(T)$ 为谱线强度; X 为气体浓度; L 为吸收路径长度; $\varphi(\nu)$ 为线型函数; H_k 为激光透过率函数的傅里叶系数,其表达式如式(3)所示。

$$H_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \tau(\nu_0 + a \cos \theta) \cos k\theta \cdot d\theta \quad (3)$$

将式(1)中入射光强表达式代入式(2)中,可得到经过气体吸收后的光强 I_t 表达式为:

$$\begin{aligned} I_t = & \left[\bar{I}_0 \cdot \frac{H_0}{2} + \bar{I}_0 \cdot H_1 \cos(\omega t) + \bar{I}_0 \cdot H_2 \cos(2\omega t) + \dots \right] + \\ & \frac{\bar{I}_0 i H_1}{2} \cos \phi + \bar{I}_0 i \left\{ \frac{H_0}{2} \cos(\omega t + \phi) + \frac{H_2}{2} \cos(\omega t - \phi) + \right. \\ & \left. \frac{H_1}{2} \cos(2\omega t + \phi) + \frac{H_3}{2} \cos(2\omega t - \phi) + \dots + \right. \end{aligned}$$

$$\frac{H_{k-1}}{2} \cos(k\omega t + \phi) + \frac{H_{k+1}}{2} \cos(k\omega t - \phi) \} \quad (4)$$

式(4)中透射光强的各频率分量表达式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{直流项: } \bar{I}_0 \cdot \frac{H_0}{2} + \frac{\bar{I}_0 i H_1}{2} \cos \phi \\ \text{一倍频: } \bar{I}_0 \cdot H_1 \cos(\omega t) + \frac{\bar{I}_0 i H_0}{2} \cos(\omega t + \phi) + \\ \quad \frac{\bar{I}_0 i H_2}{2} \cos(\omega t - \phi) \\ \text{二倍频: } \bar{I}_0 \cdot H_2 \cos(2\omega t) + \frac{\bar{I}_0 i H_1}{2} \cos(2\omega t + \phi) + \\ \quad \frac{\bar{I}_0 i H_3}{2} \cos(2\omega t - \phi) \\ \vdots \\ k \text{ 倍频: } \bar{I}_0 \cdot H_k \cos(k\omega t) + \frac{\bar{I}_0 i H_{k-1}}{2} \cos(k\omega t + \phi) + \\ \quad \frac{\bar{I}_0 i H_{k+1}}{2} \cos(k\omega t - \phi) \end{array} \right. \quad (5)$$

由于分子吸收谱线的对称性,在谱线中心频率处式(3)中的奇数次项均为 0,即 $H_1, H_3, H_5 \dots$ 均为 0。因此,式(5)中一倍频分量和偶数倍频分量可以简化为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{一倍频: } \bar{I}_0 i H_0 / 2 \cdot \cos(\omega t + \phi) + \bar{I}_0 i H_2 / 2 \cdot \\ \quad \cos(\omega t - \phi) \\ \text{二倍频: } \bar{I}_0 \cdot H_2 \cos(2\omega t) \\ \vdots \\ \text{偶数倍频: } \bar{I}_0 \cdot H_k \cos(k\omega t) \end{array} \right. \quad (6)$$

谐波检测时采用参考信号为:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_x = R \cos(k\omega t + k\beta) \\ V_y = R \sin(k\omega t + k\beta) \end{array} \right. \quad (7)$$

式中: R 为参考信号幅值; β 为参考信号初始相位。根据锁相检测原理,将式(7)与(6)相乘,可得到一次谐波表达式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{1f} = \frac{G \bar{I}_0 i}{4} [(H_0 + H_2) \cos \phi \cos \beta + \\ \quad (H_0 - H_2) \sin \phi \sin \beta] \\ Y_{1f} = \frac{G \bar{I}_0 i}{4} [(H_0 + H_2) \cos \phi \sin \beta - \\ \quad (H_0 - H_2) \sin \phi \cos \beta] \end{array} \right. \quad (8)$$

其中 G 为光电放大倍数,一次谐波幅值为:

$$S_{1f} = \sqrt{X_{1f}^2 + Y_{1f}^2} =$$

$$\frac{G \bar{I}_0 i}{4} \sqrt{(H_0 + H_2)^2 \cos^2 \phi + (H_0 - H_2)^2 \sin^2 \phi} \quad (9)$$

各偶数次谐波表达式为:

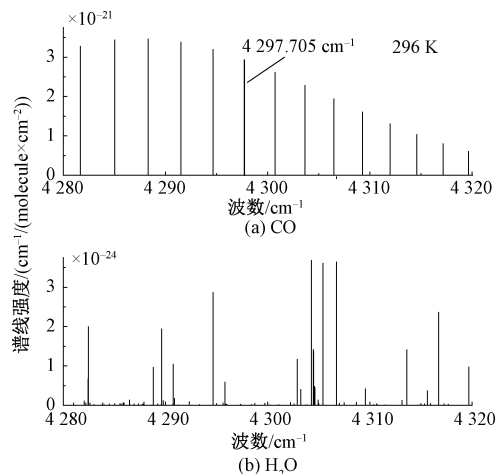
$$S_{kf} = \sqrt{X_{kf}^2 + Y_{kf}^2} = \frac{G \bar{I}_0 i H_k}{2} \quad (10)$$

谐波检测中,一般选择峰值最大的二次谐波进行检测,然而由于激光调制引起的光强的非线性影响,二次谐波背景信号较大,需实时剔除,而目前气体在线监测中难以同时对背景信号进行有效测量。与二次谐波不同,四次谐波幅值虽然略小于二次谐波,但其背景信号远小于二次谐波背景信号,在实际测量中可以忽略,因此在本文测量中选用受非线性影响较小的四次谐波进行测量。四次谐波比一次谐波公式为:

$$\frac{S_{4f}}{S_{1f}} = \frac{2H_4}{i \sqrt{(H_0 + H_2)^2 \cos^2 \phi + (H_0 - H_2)^2 \sin^2 \phi}} \quad (11)$$

2 CO 测量谱线选择

通过 HITRAN 数据库选择 CO 分子吸收谱线,数据库显示在近红外波段 1.6 和 2.3 μm 附近存在较强吸收谱线,其中 2.3 μm 处谱线强度较 1.6 μm 处高约两个数量级,因此选择 2.3 μm 处谱线进行测量。由于烟气中含有高浓度的 H_2O 和 CO_2 ,因此在对 CO 测量过程中应该避免这两种气体的干扰,数据库中 4 280~4 320 cm^{-1} 处 CO、 H_2O 、 CO_2 分子所对应的谱线吸收强度如图 1 所示,该图显示此处 CO_2 分子对应的谱线强度比 CO 分子低约 8 个数量级,其存在不会对 CO 测量造成影响,而 H_2O 分子在此处有较强吸收谱线,为避免其影响,本测量中选用 4 297 cm^{-1} 附近处谱线,该处 CO 分子和 H_2O 分子谱线光谱参数如表 1 所示。从表 1 可以看出 H_2O 分子 4 297.686 cm^{-1} 谱线吸收强度为 10×10^{-27} 量级,CO 分子 4 297.707 cm^{-1} 谱线吸收强度为 10×10^{-21} 量级,以烟气中 H_2O 含量为 8%、CO 浓度为 10×10^{-6} 计算, H_2O 分子吸收率约为 CO 的 8‰,故可以忽略其影响。



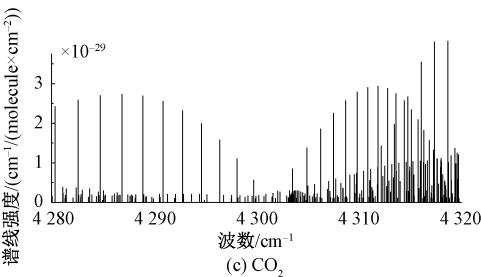


图 1 CO、H₂O、CO₂ 分子吸收谱线强度(4 280~4 320 cm⁻¹)

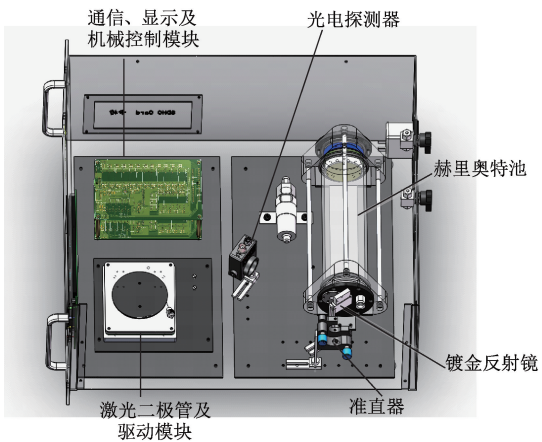


图 3 TDLAS 测量部分结构

Fig.3 Structural of TDLAS measurement section

表 1 CO 和 H₂O 位于 4 297 cm⁻¹附近吸收谱线光谱参数
Table 1 The spectrum parameters of CO and H₂O
absorption spectral lines located near 4 297 cm⁻¹

分子	$\nu_0/$ (cm ⁻¹)	$S(T)/$ (cm ⁻¹ / (molecule×cm ⁻²))	$\chi_{\text{self}}/$ (cm ⁻¹ /atm)	$\chi_{\text{air}}/$ (cm ⁻¹ /atm)	$E'/$ (cm ⁻¹)
CO	4 297. 705	2. 94×10 ⁻²¹	0. 063	0. 057 1	211. 4
H ₂ O	4 297. 686	2. 70×10 ⁻²⁷	0. 300	0. 059	1 521. 517

3 TDLAS 测量装置及验证实验

3.1 TDLAS 测量装置

TDLAS 测量系统原理和测量结构分别如图 2 和 3 所示,主要包括正弦信号发生模块、激光器驱动模块、激光二极管、准直器、赫里奥特池气室、镀金反射镜、光电探测器、数据采集处理模块和通信、显示、机械控制模块。激光驱动模块控制激光二极管发出相应波长的激光并实现高频调制,激光经过准直后进入赫里奥特池气室通光孔,在气室内被多次反射并经过气体吸收后再由通光孔出射,被镀金反射镜反射改变方向由光电探测器接收然后进入数据采集和处理模块进行谐波检测和浓度反演。

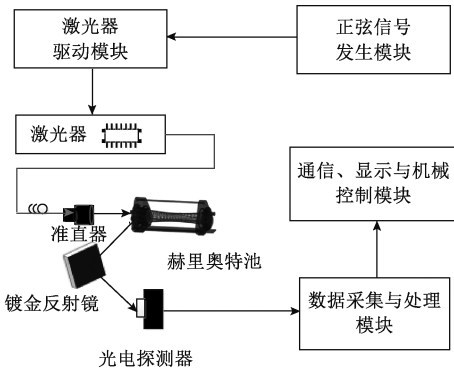


图 2 TDLAS 测量部分原理

Fig.2 Principle of TDLAS measurement section

3.2 激光器参数标定

通过式(11)可以看出,四次谐波与一次谐波比值与频率调制和光强调制的相位差 ϕ 、调制幅度 a 有关,其中 ϕ 随着调制频率的增大而增大,调制幅度 a 为调制电流与电流调谐系数的乘积,电流系数随着调制频率的增大而减小。在该测量中由于光电探测器带宽限制问题,所选用调制频率为 1.25 kHz。激光二极管参数标定实验装置如图 4 所示。

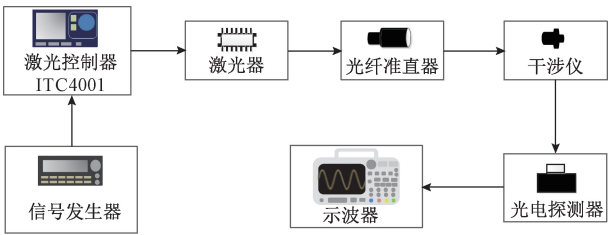


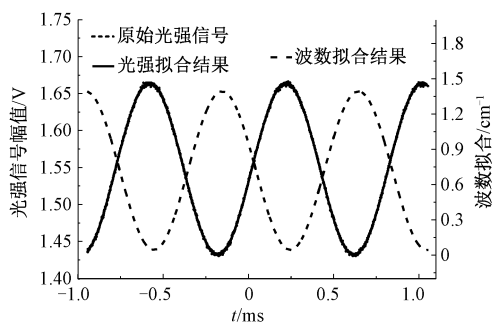
图 4 CO 激光器参数标定实验装置

Fig.4 The experiment device for CO laser parameter calibration

标定过程:信号发生器产生 1.25 kHz 正弦信号加载于激光控制器 ITC4001,驱动激光二极管发出相应波长的激光并实现高频调制,激光进入 F-P 干涉仪后,由光电探测器接收并传输至示波器进行显示和采集(波长信号),同时在同步参考信号控制下,没有经过吸收的激光作为原始光强信号进入光电探测器并进行显示和采集。标定中产生的干涉信号、光强信号及按照式(1)对其进行拟合结果如图 5 所示,频率调制和光强调制相位差为 1.06 π ,电流调谐系数为 0.058 7 cm⁻¹/mA。

3.3 赫里奥特池气室设计及光程标定

赫里奥特池通过使激光在两片曲率半径相同的凹面反射镜间多次反射实现增加光程的目的,进而能够提高测量精度,降低测量下限^[18]。本测量装置中基于赫里奥



(a) 原始光强信号、光强和波数拟合结果

(a) Initial light intensity signal, fitting results of light intensity and wave number

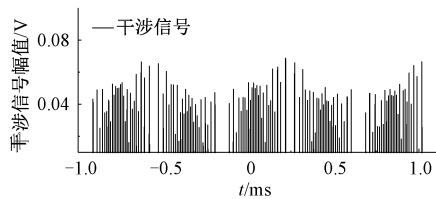
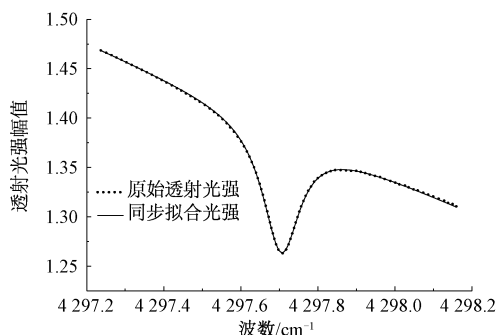
(b) 干涉信号
(b) Interference signal

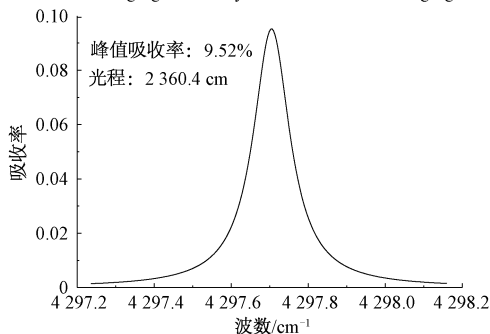
图 5 CO 激光器参数标定结果

Fig.5 Calibration results of CO laser parameters



(a) 原始透射光强和同步拟合光强

(a) Initial transmitting light intensity and simultaneous fitting light intensity



(b) 测量吸收率函数, 赫里奥特池光程为 2 360.4 cm

(b) Measured absorbance function, the Herriott cell optical path is 2 360.4 cm

图 7 基于直接吸收法的赫里奥特池光程测量结果

Fig.7 Herriot cell optical path measurement result based on direct absorption method

特池的气室结构如图 6 所示,两片镀银高反射率凹面镜安装于石英管两侧,此处采用径向密封,其中一片反射镜上设有通光孔,该位置安装透射镜,另一片反射镜外侧安装镜片俯仰和镜片距离调节装置,用于确保两片反射镜的同轴性和调节反射次数,气室两侧分别设有进气口、出气口和压力变送器连接口。图 6 中黑线为采用 Zemax 软件对赫里奥特池光路进行模拟的结果。

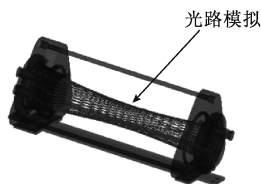


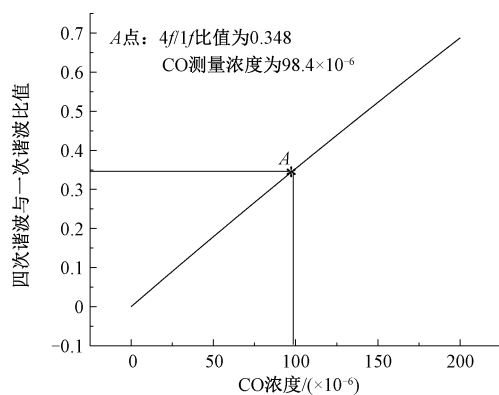
图 6 赫里奥特池的气室结构

Fig.6 Structural of Herriot cell gas chamber

采用直接吸收法对赫里奥特池气室光程进行测量,将气室内充入 100×10^{-6} 浓度 CO 标准气体,压力为 101.325 kPa,温度为 23℃,直接吸收法测量原始光强信号、同步拟合信号和得到的吸收率测量结果如图 7 所示,经计算,该赫里奥特池气室光程为 2 360.4 cm。

3.4 实验验证

将 3.2 节和 3.3 节中标定频率调制和光强调制的相位差 ϕ (1.06π)、光程 L (2 360.4 cm)、调制幅度 a (0.237 cm^{-1})、压力 P (101.325 kPa)、温度 T (23℃)、光强线性调制系数 i (0.047 3)代入式(3)和(11),可以计算出 CO 浓度与 $4f/1f$ 比值曲线如图 8 所示,图 8 显示在

图 8 $4f/1f$ 谐波比值与浓度关系曲线计算结果Fig.8 The relationship curve calculation result of $4f/1f$ ratio vs. CO concentration

$0 \sim 200 \times 10^{-6}$ 浓度范围内二者关系可用线性表达式描述,测量得到的 $4f/1f$ 比值可通过该曲线得到气体浓度。

在室温 (23℃) 条件下,将赫里奥特池内充入 100×10^{-6} CO,压力为 101.325 kPa,在 1.25 kHz、40.4 mV 正弦信号(对应调制幅度为 0.237 cm^{-1})调制下得到的四次谐波 X 轴、Y 轴信号和一次谐波 X 轴、Y 轴信号如图 9 所示,四次谐波与一次谐波比值均值为 0.348,根据图 8 可知此时 CO 测量浓度为 98.4×10^{-6} (对应 A 点),测量浓度与标气浓度误差小于 2%。

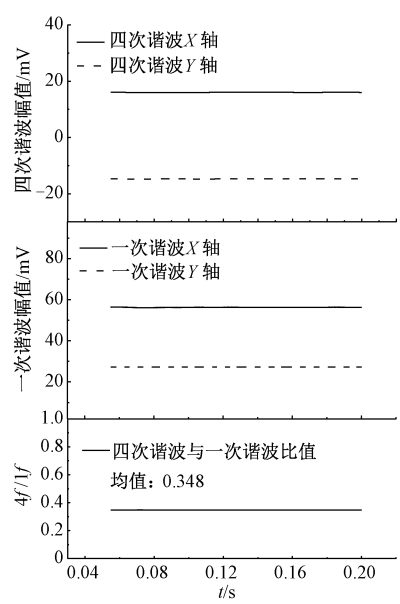


图9 100×10^{-6} CO 谐波与 $4f/1f$ 比值测量结果
Fig.9 Harmonic and $4f/1f$ ratio measurement results
for 100×10^{-6} CO

4 烟气中 CO 混合取样式在线监测

4.1 在线监测装置结构

针对烟气中 CO 特点,监测装置结构如图 10 所示,取省煤器出口后竖直烟道,在水平方向将烟道分为 6 个区域,每个区域中心位置安装一个稀释取样探头,稀释取样探头前端安装有过滤器,烟气经过过滤后进入取样探头从而降低粉尘对测量的影响,稀释取样探头设有定时吹扫装置。通过设置不同长度的管路确保同步测量,在抽气装置作用下,6 路气体汇集至同一管路进入赫里奥特池进行 TDLAS 测量。稀释取样的精髓在于烟气稀释后水浓度降低进而降低了烟气露点,取样过程中无需进行除水和伴热处理,样气进入气室过程简单,维护量小。在该装置中,稀释取样采用音速小孔和文丘里管实现恒流,即当音速小孔的入口和出口压差大于 0.46 倍时,气体流速实现音速确保稀释倍数恒定。测量前采用标准气体对稀释倍数进行了标定,将标准浓度气体通入音速小孔前端,然后对稀释后的浓度进行测量,确定该测量装置稀释倍数为 60。

4.2 对比测试结果

应用现场使用德图 Testo350 便携式分析仪对该仪表进行了对比测试,进一步验证了该装置的测量准确性。德图 Testo350 中 CO 测量采用电化学方法,将赫里奥特池气室出口烟气引入 Testo350,两台仪表测量结果如图 11 所示,该图显示二者测量趋势一致,误差小于 1×10^{-6} (此处对比的是稀释后烟气中 CO 浓度)。

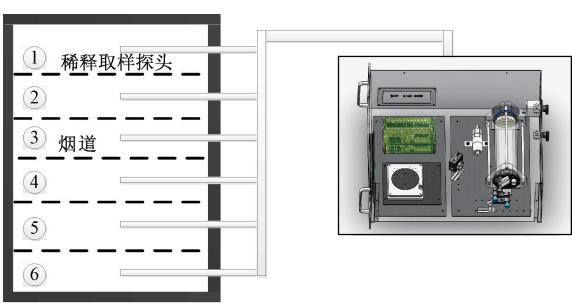


图 10 烟气中 CO 在线监测装置结构
Fig.10 On-line monitoring device structure diagram
of CO in flue gas

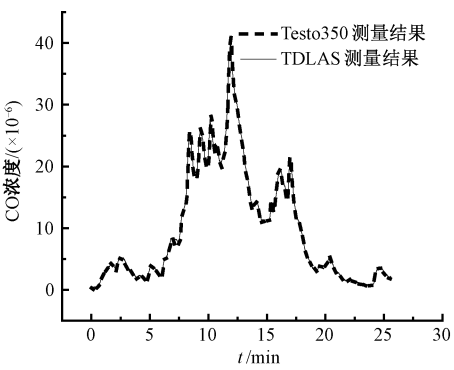


图 11 德图 Testo350 和 TDLAS 装置对稀释后
烟气 CO 浓度对比测试结果
Fig.11 Comparison measurement results of CO concentration
in flue gas after dilution for Testo350 and TDLAS device

4.3 现场运行结果

仪表连续测量结果如图 12 所示,图 12 中曲线为基于 $4f/1f$ 方法测量得到的 55 d CO 浓度,该结果为 TDLAS 测量结果与稀释倍数的乘积。

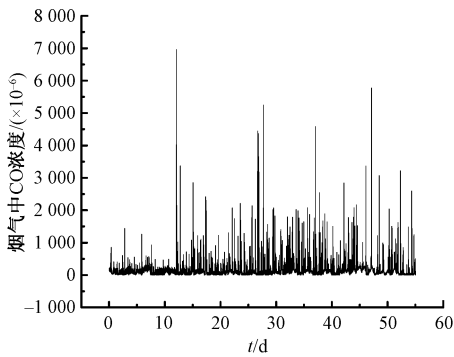


图 12 烟气 CO 连续测量结果(55 d,浓度为 TDLAS
测量结果与稀释倍数的乘积)
Fig.12 The continuous measurement result of CO in flue gas
(55 days, the concentration is the product of TDLAS
measurement result and dilution multiple)

该浓度为 6 个区域的平均值,与单点取样测量相比更具有代表性。通过该测量结果可以发现,此燃煤机组大部分时间段 CO 浓度较低,在每天固定时间段存在较大波动,可将 CO 浓度与氧量结合共同作为风量调节的参考,在确保足够风量的同时降低 CO 排放,从而实现燃烧效率的提高。

5 结 论

本文在分析了烟气中 CO 测量必要性、CO 特点及目前 CO 测量存在的缺陷基础上,研制了基于 TDLAS+稀释取样法的 CO 混合取样测量装置。该装置将省煤器出口烟道分区,各区域烟气进行稀释取样后混合进入赫里奥特池,实现 TDLAS 四次谐波比一次谐波免标定高精度测量。本文首先对 TDLAS 测量部分进行了实验室验证,结果显示测量浓度与标气浓度的误差小于 2%;然后将该装置安装于某燃煤电厂省煤器出口实现了连续稳定运行,运行过程中使用德国 Testo350 分析仪进行了对比测试,二者测量误差小于 1×10^{-6} 。该装置可通过调整稀释比例和赫里奥特池光程拓宽浓度测量范围,根据烟气中 CO 浓度特点,可实现 $10 \times 10^{-6} \sim 10\,000 \times 10^{-6}$ 浓度在线监测。本文实现了燃煤电厂烟气中 CO 混合取样式在线监测,相比传统单点测量方式,本监测装置测量结果更具代表性,未来拟将其应用于火电机组燃烧优化控制及冶金、化工行业 CO 浓度在线监测中。

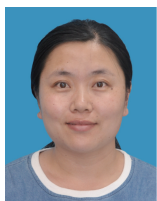
参考文献

- [1] 王超,王飞,邢大伟,等.利用可调谐半导体激光吸收光谱技术对燃烧环境中的 CO 在线测量[J].燃烧科学与技术,2014,20(2):176-180.
WANG CH, WANG F, XING D W, et al. In situ measurements of CO concentration in combustion environment based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014,20(2):176-180.
- [2] CHAO X, JEFFRIES J B, HANSON R K. Absorption sensor for CO in combustion gases using 2.3 μm tunable diode lasers[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(11):115201.
- [3] 李少华,许乐飞,宋东辉,等.基于 BP 神经网络的锅炉烟气中 CO 的测量[J].东北电力大学学报,2014,34(3):85-88.
LI SH H, XU L F, SONG D H, et al. Measurement of carbon monoxide in boiler flue gas based on BP Neural Network [J]. Journal of Northeast Dianli University, 2014,34(3):85-88.
- [4] 王晓丽,刘瑾,周洵.光谱吸收型 CO 气体传感器的研究[J].仪器仪表学报,2009,30(10):226-228.

- WANG X L, LIU J, ZHOU X. Study on spectrum absorptive optical fiber CO gas sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009,30(10):226-228.
- [5] 许传凯.燃煤锅炉燃烧优化技术:烟气中一氧化碳的检测[J].热力发电,1989(2):55-60.
XU CH K. Combustion optimization technology of coal-fired boiler, detection of carbon monoxide in flue gas [J]. Thermal Power Generation, 1989(2):55-60.
- [6] DINH T V, AHN J W, CHOI I Y, et al. Limitations of gas filter correlation: A case study on carbon monoxide non-dispersive infrared analyzer [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017(243):684-689.
- [7] 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.
- [8] 陈东,刘文清,张玉钧,等.基于可调谐半导体激光光谱的烟道 CO 监测系统[J].中国激光,2006,33(Suppl.3):405-407.
CHEN D, LIU W Q, ZHANG Y J, et al. Tunable diode laser system for flue gas CO detection [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006,33(Suppl.3):405-407.
- [9] QU Z C, WERHAHN O and EBERT V. Thermal boundary layer effects on line-of-sight tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) gas concentration measurements [J]. Applied Spectroscopy, 2018,72(6):853-862.
- [10] EBERT V, GIESEMANN C, KOETH J, et al. New room-temperature 2.3 μm DFB-diode lasers: First spectroscopic characterization and CO-detection [C]. Laser Application to Chemical and Environmental Analysis, 2004:TuF9.
- [11] DU Y J, PENG Z M, DING Y J. High-accuracy sinewave-scanned direct absorption spectroscopy [J]. Optics Express, 2018, 26(22):29550-29560.
- [12] 聂伟,阚瑞峰,徐振宇,等.6 611~6 618 cm^{-1} 之间氨气光谱线强的测量[J].物理学报,2017,66(5):136-143.
NIE W, KAN R F, XU ZH Y, et al. Measurements of line strengths for some lines of ammonia in 6 611-6 618 cm^{-1} [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(5):136-143.
- [13] GOLDENSTEIN C S, HANSON R K. Diode-laser measurements of linewidth and temperature-dependent lineshape parameters for H_2O transitions near 1.4 μm using Voigt, Rautian, Galatry, and speed-dependent Voigt profiles [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2015(152):127-139.

- [14] 郑海明, 蔡小舒. 烟气连续监测系统稀释采样比例技术研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(1):163-166.
ZHENG H M, CAI X SH. Study on dilution extractive sampling ratio of continuous emission monitoring system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(1):163-166.
- [15] KLEIN A, EBERT V. VCSEL-based laser hygrometer using rapidly time division multiplexed direct absorption and wavelength modulation spectroscopy [C]. Laser Applications to Chemical, Security and Environmental Analysis, 2014: LTu3D.5.
- [16] 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, 2016(60):132-176.
- [17] PENG Z M, DING Y J, CHE L, et al. Odd harmonics with wavelength modulation spectroscopy for recovering gas absorbance shape [J]. Optics Express, 2012, 20(11):11976-11985.
- [18] HERRIOTT D, KOGLNIK H, KOMPFFNER R. Off-axis paths in spherical mirror interferometers [J]. Applied Optics, 1964, 3(4):523-526.

作者简介



周佩丽, 分别在 2008 年和 2011 年于中北大学获得学士学位和硕士学位, 现为华北电力大学博士研究生, 主要研究方向为基于波长调制光谱技术的吸收率函数测量方法及应用研究。

E-mail: zhoupeili1987@126.com

Zhou Peili received her B. Sc. and M. Sc. degree both from

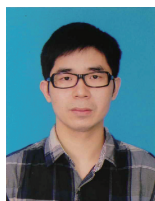
North University of China in 2008 and 2011, respectively. Now, she is a Ph. D. candidate in North China Electric Power University. Her main research interests include absorbance rate function measurement method and its application based on wavelength modulation spectroscopy technology.



谭文, 分别在 1990 年和 1993 年于厦门大学获得学士学位和硕士学位, 1996 年于华南理工大学获得博士学位, 现为华北电力大学教授、博导, 主要研究方向为复杂系统控制理论。

E-mail: wtan@ncepu.edu.cn

Tan Wen received his B. Sc. M. Sc. degree both from Xiamen University in 1990 and 1993, and received his Ph. D. degree from South China University of Technology in 1996. Now, he is a professor and PhD supervisor in North China Electric Power University. His main research direction is complex system control theory.



彭志敏 (通信作者), 2004 年于北京交通大学获得学士学位, 2010 年于中科院力学研究所获得博士学位, 现为清华大学副研究员, 主要研究方向为光谱诊断理论与技术。

E-mail: apspect@tsinghua.edu.cn

Peng Zhimin (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2004 from Beijing Jiaotong University, received his doctoral degree in 2010 from Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Now he is an associate research fellow in Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University. His main research direction is spectral diagnosis theory and technology.