

# 颗粒物与气体浓度同步测量方法研究

陈慈伟, 周宾\*, 祝仰坤, 王一红, 梁伟灿

东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096

**摘要** 针对燃煤电厂颗粒物超低浓度排放在线检测的需求, 在激光散射法的基础上提出了利用光强调制技术的颗粒物浓度在线测量方法。结合波长调制技术提出了气体与颗粒物浓度同步测量的方法, 同时建立了波长调制下散射光信号的数学模型。理论分析及仿真结果表明: 气体浓度与归一化二次谐波幅值的峰值成正比, 颗粒物浓度与消除气体吸收后的散射光信号的一次谐波幅值成正比。利用 1392 nm 的近红外激光器对蚊香燃烧时产生的颗粒物与水蒸气浓度进行同步测量。实验结果表明: 测量的水蒸气浓度值与温湿度传感器测量值之间的偏差小于 3%, 颗粒物浓度的特征值与粉尘仪测量值具有高度线性关系, 拟合因子为 0.9973, 实现了基于波长调制技术的颗粒物与气体浓度的同步测量。

**关键词** 散射; 波长调制; 浓度; 同步测量

**中图分类号** O433.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201939.0612008

## Synchronous Measurement Methods for Particulate Matter and Gas Concentrations

Chen Ciwei, Zhou Bin\*, Zhu Yangkun, Wang Yihong, Liang Weican

School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

**Abstract** To satisfy the online detection requirements of the ultralow emission of particulate matter in a coal-fired power plant, this paper proposes the online detection method by the light intensity modulation technique based on the laser-scattering method. In addition, the wavelength modulation technique is combined to propose the synchronous measurement method of gas and particle concentrations. Meanwhile, a mathematical model of the scattered-light signal under wavelength modulation is built. The theoretical analysis and simulation results show that the gas concentration is proportional to the height of the normalized second harmonic amplitude peak and that the particulate matter concentration is proportional to the amplitude of the first harmonic of the scattered-light signal from which the gas absorption has been subtracted. A 1392-nm near-infrared laser is used to simultaneously measure the particulate matter and water vapor concentrations during mosquito coil combustion. The experimental results show that the deviation between the measured water vapor concentration value and that by the temperature-humidity sensor is less than 3%. Moreover, the characteristic value of particle concentration has a high linear relationship with the measured value by the dust meter and the fitting factor  $R^2$  is 0.9973. The synchronous measurement of particulate matter and gas concentrations is successfully confirmed based on the wavelength modulation technique.

**Key words** scattering; wavelength modulation; concentration; simultaneous measurement

**OCIS codes** 290.2558; 290.4020; 300.6380

## 1 引 言

随着燃煤电厂颗粒物排放浓度的不断降低, 对颗粒物的粒径分布、浓度实现精准测量的重要性日益凸显<sup>[1]</sup>。在线检测可以确定颗粒物浓度是否达到

排放要求, 而通过检测获得的颗粒物粒径分布及浓度也能对除尘器进行反馈调节, 使其能更经济、高效地运行<sup>[2]</sup>。基于颗粒物对光的散射和吸收作用, 已经开发出了一系列光学方法来测量颗粒物参数。其中, 激光散射(LS)法因具有操作方便、原理简单等

**收稿日期:** 2019-01-17; **修回日期:** 2019-02-16; **录用日期:** 2019-03-21

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFB0603204)、国家自然科学基金(50976024)、国家自然科学基金青年科学基金(50906013)

\* **E-mail:** zhoubinde@seu.edu.cn

优点,而被广泛应用于燃煤电厂烟气监测、大气环境监测等方面<sup>[3-4]</sup>。

在对颗粒物粒径及浓度测量的研究中,Lorenz-Mie 理论通常被用来解释颗粒物对激光的散射效应<sup>[5-6]</sup>。在对粒径分布的研究方面,多种反演算法已经得到了广泛应用<sup>[7-9]</sup>。Wang 等<sup>[10]</sup>利用光散射数据结合改进的正则化算法,反演得到了颗粒的粒径分布,并通过实验验证了算法的可行性。He 等<sup>[11-12]</sup>结合改进的人工蜂群算法,采用多角度光散射测量方法得到了气溶胶的粒径分布,并提出了基于灵敏度分析和主成分分析的信号优化选择原则,提高了检测结果的准确性。在颗粒物浓度的研究方面,Buaparthoom 等<sup>[13]</sup>对多重散射条件下的颗粒物浓度与散射光强的关系进行了研究,开发了多角度光散射系统,并在单分散和多分散悬浮液中进行了实验验证,但所测量的颗粒物浓度较高。胡森等<sup>[14]</sup>建立了 PM<sub>2.5</sub>(颗粒直径小于 2.5 μm、大于 0.1 μm 的颗粒物)浓度与后向散射光强的数学模型,并提出了基于电荷耦合器件(CCD)后向散射激光雷达的实时 PM<sub>2.5</sub>浓度测量方法,但相较于前向散射光,后向散射光光强较弱,无法满足超低排放燃煤电厂的颗粒物检测需求。Yu 等<sup>[15]</sup>研制了基于激光散射技术的粉尘浓度测量系统,并通过实验验证了系统的可靠性和抗干扰性。吴金雷等<sup>[16]</sup>搭建了大气颗粒的近前向散射光测量实验装置,结合理论与实验分析了颗粒物粒径分布对颗粒物浓度测量的影响,同时测量了大气环境气溶胶的质量浓度。上述颗粒物测量装置均采用定光强激光光源,在颗粒物浓度极低时,散射光强极小,且外部光源光强的波动、探测器低频噪声等均会对探测信号造成干扰<sup>[17]</sup>,从而使得信噪比不能满足超低排放燃煤电厂对颗粒物浓度检测的需求。

本文提出了基于光强调制(LIM)技术的颗粒物光散射测量方法,使用高频调制信号对激光器输出的光强进行周期性调谐,通过提取调制频率分量上的强度信息,降低背景噪声对测量的影响,从而获得高信噪比的散射光信号。当采用波长调制光谱(WMS)技术时,可实现对气体浓度的测量<sup>[18-21]</sup>。本文结合颗粒物与气体浓度测量的特点,提出了基于波长调制及光散射(WMS-LS)技术的低浓度颗粒物与气体浓度同步测量的方法。将气体与颗粒物测量光路进行耦合,选用中心波长在 1392 nm 的分布反馈(DFB)激光器实现了气体与颗粒物浓度的同步测量。

## 2 颗粒物与气体浓度同步测量的基本原理

波长调制光谱法是在低频扫描信号的基础上叠加高频调制信号,再对 DFB 激光器的注入电流进行调谐。当采用 DFB 激光器进行波长调制时,其波数与光强随时间同时发生变化<sup>[22]</sup>:

$$\nu(t) = \bar{\nu} + a \cos(2\pi ft), \quad (1)$$

$$I_0(t) = I_1 \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} k_n \cos(n \cdot 2\pi ft + \varphi_n) \right], \quad (2)$$

式中: $\nu(t)$ 为波数; $\bar{\nu}$ 为激光器的中心波数; $a$ 为激光器出光波长的调制深度; $f$ 为调制频率; $t$ 为相对时间; $I_0(t)$ 为调制后激光器的光强; $I_1$ 为未加调制时激光器的光强; $k_n$ 为第  $n$  次光强调制的傅里叶系数; $\varphi_n$ 为第  $n$  次光强调制的初始相位差。

一束波数为  $\nu(t)$ 、光强为  $I_0(t)$  的激光通过某一均匀介质,当介质中仅存在待测气体时,其透射光强  $I_1(t)$  可以用 Beer-Lambert 定律表示:

$$I_1(t) = I_0(t) \exp[-PS(T)\Phi(\nu)X_{\text{gas}}L], \quad (3)$$

式中: $P$ 为气体的总压强; $T$ 为气体温度; $X_{\text{gas}}$ 为待测气体的体积分数; $L$ 为光程; $\Phi(\nu)$ 为线型函数,一般采用 Voigt 线型函数描述<sup>[23]</sup>,是 Lorenz 线型函数和 Gauss 线型函数的卷积。跃迁谱线的线强为

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \exp\left[-\frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \frac{1 - \exp[-hcv_0/(kT)]}{1 - \exp[-hcv_0/(kT_0)]}, \quad (4)$$

式中: $h$ 为普朗克常数; $c$ 为光速; $E''$ 为吸收谱线的低能级能量; $k$ 为玻尔兹曼常数; $T_0$ 为参考温度; $\nu_0$ 为气体吸收谱线的中心波数; $Q(T)$ 为配分函数,可按文献<sup>[24]</sup>的方法计算得到。

当介质中仅存在待测颗粒物时,根据 Mie 散射理论,其散射光信号光强为<sup>[25]</sup>

$$I_s(t) = \frac{3VX_{\text{particle}}}{4\nu^2\pi^2r^2\rho} I_0(t) \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{f_r(D)}{D^3} [i_1(\theta, \nu, D, m) + i_2(\theta, \nu, D, m)] dD, \quad (5)$$

式中: $V$ 为待测烟气的体积; $\theta$ 为散射角; $r$ 为观察点与散射颗粒的距离; $\rho$ 为被测烟气中颗粒物的密度; $X_{\text{particle}}$ 为颗粒物的质量浓度; $i_1(\theta, \nu, D, m)$ 和  $i_2(\theta, \nu, D, m)$ 为散射强度函数; $D$ 为颗粒物直径; $f_r(D)$ 为粒径分布函数; $D_{\min}$ 、 $D_{\max}$ 分别为颗粒粒径的下限和上限; $m$ 为颗粒物的折射率。

当介质中同时存在待测气体与颗粒物时,某一角度  $\theta$  上所测得的散射光信号光强为

$$I_{sc}(t) = \frac{3VX_{\text{particle}}}{4\nu^2\pi^2r^2\rho} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{f_r(D)}{D^3} [i_1(\theta, \nu, D, m) + i_2(\theta, \nu, D, m)] dD \cdot \exp[-PS(T)\Phi(\nu)X_{\text{gas}}L] I_0(t) = K[t, f_r(D), m, \theta] \frac{VX_{\text{particle}}}{r^2\rho} \exp[-PS(T)\Phi(\nu(t))X_{\text{gas}}L] I_0(t), \quad (6)$$

式中:  $K[t, f_r(D), m, \theta]$  为散射系数项。

具有调制信号的激光经光纤分束器分为 3 束: 一束穿过含有待测气体与颗粒物的测量区域, 被光电探测器接收, 得到散射光信号光强  $I_{sc}^M(t)$ ; 一束经过光学标准具后被光电探测器接收, 得到标准具信号光强  $I_\nu(t)$ , 用来确定 DFB 激光器的时间频率响应特性  $\nu(t)$ ; 一束光信号直接被光电探测器接收, 得到背景信号光强  $I_0^M(t)$ 。

当颗粒物粒径分布、折射率不发生变化时, 某一角度上的散射系数项  $K[t, f_r(D), m, \theta]$  可以简化

为  $K(t)$ <sup>[25]</sup>, 其均值定义为常数  $\bar{K}$ 。选取中心波数为  $7185.59 \text{ cm}^{-1}$  的激光穿过颗粒物粒径为  $2.5 \mu\text{m}$ 、折射率为 1.33、质量浓度为  $5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、水蒸气体积分数为 2% 的区域, 得到散射角为  $15^\circ$  时的散射光信号, 利用数字锁相-低通滤波方法<sup>[22]</sup> 得到其一、二次谐波信号, 如图 1 所示。比较用常数  $\bar{K}$  和  $K(t)$  计算所得的一、二次谐波信号, 发现它们幅值的最大偏差分别为 0.0037 % 和 0.0064 %。而用激光散射法测量产生的误差要远大于其最大偏差<sup>[26]</sup>, 因此可将散射系数项  $K(t)$  简化为常数  $\bar{K}$ 。

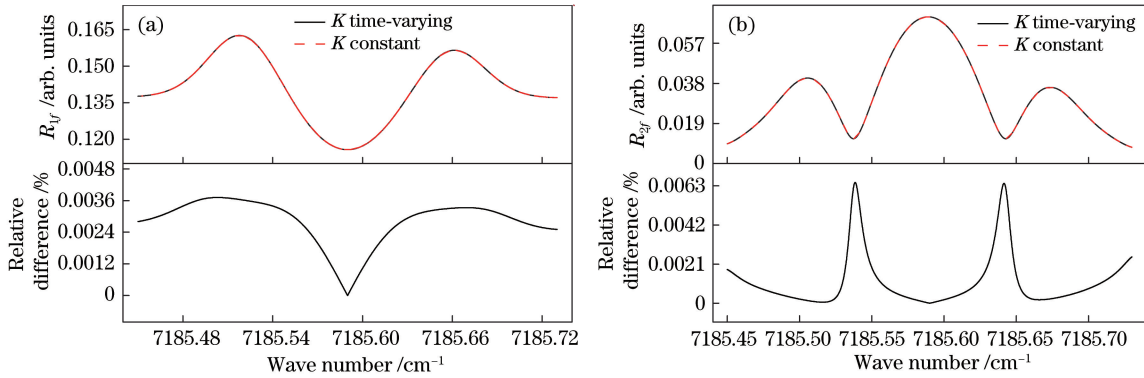


图 1 散射系数项对谐波信号的影响。(a) 一次谐波信号; (b) 二次谐波信号

Fig. 1 Effect of scattering coefficient term on harmonic signal. (a) First harmonic signal; (b) second harmonic signal

对散射光信号进行傅里叶分析, 可得其  $n$  ( $n=1, 2$ ) 次谐波信号的  $X$  和  $Y$  方向分量及其谐波幅值:

$$X_{nf} \approx \frac{1}{2} \bar{K} \frac{VX_{\text{particle}}}{r^2\rho} GI_1 \left\{ H_n + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} [H_{n+j} + (1 + \delta_{nj}) H_{|n-j|}] k_j \cdot \cos(\varphi_j - j \cdot \varphi) \right\}, \quad (7)$$

$$Y_{nf} \approx \frac{1}{2} \bar{K} \frac{VX_{\text{particle}}}{r^2\rho} GI_1 \left\{ \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} [H_{n+j} - (1 + \delta_{nj}) H_{|n-j|}] k_j \cdot \sin(\varphi_j - j \cdot \varphi) \right\}, \quad (8)$$

$$R_{nf} = \sqrt{X_{nf}^2 + Y_{nf}^2}, \quad (9)$$

式中:  $G$  为探测器增益系数;  $H_n$  为透过率  $\tau$  的傅里叶级数展开的  $n$  阶系数;  $\delta_{nj}$  为克罗内克函数。当  $n=j$  时,  $\delta_{nj}=1$ ; 当  $n \neq j$  时,  $\delta_{nj}=0$ 。

消除背景信号后的归一化二次谐波信号幅值为

$$R_{2f/1f} = \sqrt{\left(\frac{X_{2f}}{R_{1f}} - \frac{X_{2f}^0}{R_{1f}^0}\right)^2 + \left(\frac{Y_{2f}}{R_{1f}} - \frac{Y_{2f}^0}{R_{1f}^0}\right)^2}, \quad (10)$$

式中:  $R_{1f}$  和  $R_{1f}^0$  分别为散射光信号和背景信号的一

次谐波幅值。归一化二次谐波信号消除了颗粒物浓度波动对信号光强的影响, 在谱线中心  $\nu_0$  处的峰值  $P_{2f/1f}$  与气体体积分数  $X_{\text{gas}}$  相关。对于通过实验测量得到的信号, 在温度已知的条件下, 根据 HITRAN2016 光谱数据库 (<https://hitran.org/>) 仿真得到不同气体浓度下的归一化二次谐波峰值  $P_{2f/1f}^{\text{simulate}}$ , 经插值计算后得到待测气体的体积分数  $X_{\text{gas}}$ <sup>[27]</sup>。

消除了气体吸收后的散射光信号光强为

$$I_s(t) = \frac{I_{sc}(t)}{\tau(\nu)} = \frac{\bar{K} \frac{VX_{\text{particle}}}{r^2\rho} \exp[-PS(T)\Phi(\nu)X_{\text{gas}}L] I_0(t)}{\exp[-PS(T)\Phi(\nu)X_{\text{gas}}L]} = \bar{K} \frac{VI_0(t)}{r^2\rho} X_{\text{particle}}, \quad (11)$$

式中： $\tau(\nu)$ 为透过率。采用数字锁相-低通滤波法对  $I_s(t)$  进行处理,得到其一次谐波信号幅值为

$$R_{1f}^s = \frac{GI_1}{2} k_1 \frac{\overline{KV}}{r^2 \rho} X_{\text{particle}} \quad (12)$$

由(12)式可知消除气体吸收后的散射光信号一次谐波幅值  $R_{1f}^s$  与颗粒物的质量浓度  $X_{\text{particle}}$  线性相关。

### 3 数值仿真

为验证颗粒物与气体浓度同步测量方法的可靠性和准确性,以颗粒物及含水蒸气的空气为研究对象,选取中心波数为  $7185.6 \text{ cm}^{-1}$  的激光进行数值仿真,光谱参数<sup>[22]</sup>包括线强  $S_0$ 、自展宽系数  $\gamma_{\text{self}}$ 、碰撞展宽系数  $\gamma_{\text{air}}$ ,如表 1 所示。仿真参数包括扫描频率  $f_{\text{scan}}$ 、调制频率  $f_m$ 、扫描深度  $a_{\text{scan}}$ 、调制深度  $a_m$ 、待测烟气体积  $V$ 、散射角  $\theta$ 、颗粒物密度  $\rho$ 、颗粒物直径  $D$ 、颗粒物折射率  $m$ 、观察点与散射颗粒的距离  $r$ 、气体温度  $T$ 、气体总压力、气体测量光程  $L$ ,如表 2 所示。

表 1 296 K 下谱线的光谱参数

Table 1 Measured spectroscopic parameters at 296 K

$\nu_0 / \text{cm}^{-1}$	$S_0 / (\text{cm}^{-2} \cdot \text{MPa}^{-1})$	$\gamma_{\text{self}} / (\text{cm}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1})$	$\gamma_{\text{air}} / (\text{cm}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1})$
7185.60	0.192	2.02	0.434

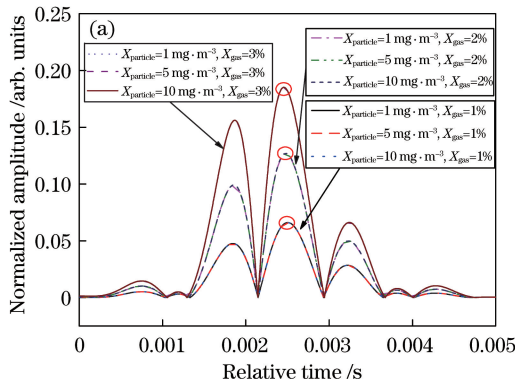


表 2 气体与颗粒物浓度同步测量的仿真参数  
Table 2 Parameters for gas and particle concentration synchronously simultaneous measurement

Parameter	Value
Scanning frequency / Hz	100
Modulation frequency / kHz	10
Scanning depth / $\text{cm}^{-1}$	0.28
Modulation depth / $\text{cm}^{-1}$	0.08
Smoke volume / $\text{m}^3$	$5 \times 10^{-4}$
Scattering angle / ( $^\circ$ )	15
Particle density / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	500
Particle diameter / $\mu\text{m}$	2.5
Particle refractive index	1.33
Scattering distance / m	0.1
Gas temperature / K	298
Total gas pressure / MPa	0.1
Path length / m	0.4

通过改变颗粒物以及气体的浓度,仿真得到其散射光信号,并通过数字锁相-低通滤波法处理得到归一化的二次谐波信号幅值,如图 2(a)所示。由图 2(a)可知,谱线中心  $\nu_0$  处的峰值  $P_{2f/1f}$  与颗粒物浓度无关,与气体浓度正相关。测量所得气体浓度与其实际值之间的关系如图 2(b)所示,可知,颗粒物浓度的变化对气体浓度测量结果的影响可以忽略。

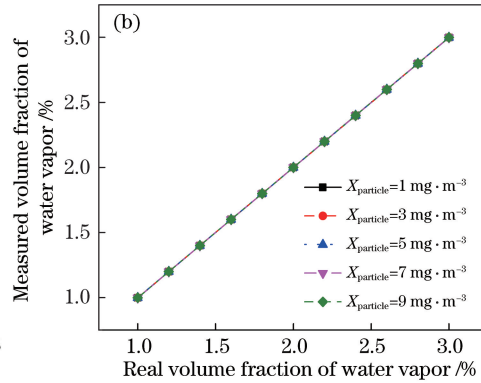


图 2 仿真信号及气体浓度。(a) 归一化的二次谐波信号;(b) 气体测量浓度与真实浓度间的关系

Fig. 2 Simulated signal and gas concentration. (a) Normalized second harmonic signal;

(b) relationship between measured gas concentration and real concentration

利用测得的气体浓度,由(11)式可得消除气体吸收后的散射光信号光强  $I_s(t)$ ,采用数字锁相-低通滤波法对其进行处理,得到其一次谐波幅值  $R_{1f}^s$ ,如图 3(a)所示。由图 3(a)可知,幅值与气体浓度无关,与颗粒物浓度正相关。取  $R_{1f}^s$  的均值  $M_{1f}^s$ ,得到

其与颗粒物浓度之间的关系,如图 3(b)所示。由图 3(b)可知,气体浓度的变化对  $M_{1f}^s$  的影响可以忽略,颗粒物浓度的变化与  $M_{1f}^s$  线性相关。

仿真结果表明,WMS-LS 法能实现气体与颗粒物浓度的同步测量。

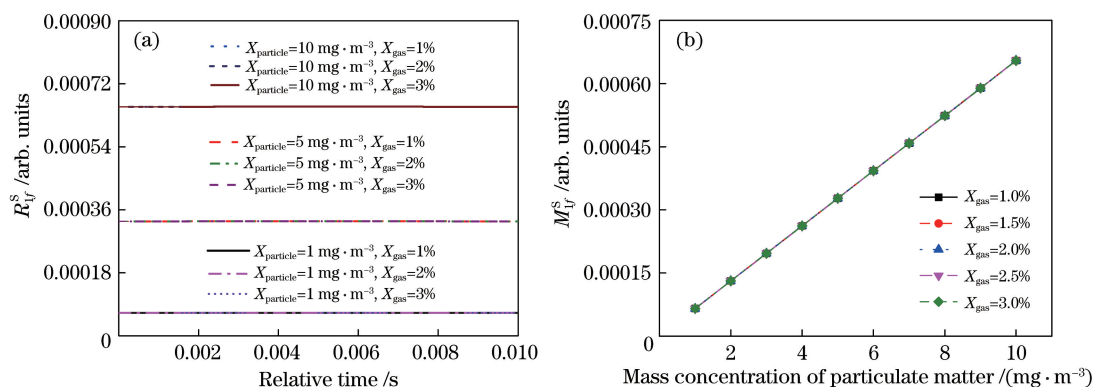


图 3 消除气体吸收后的仿真信号及颗粒物浓度。(a) 一次谐波幅值; (b) 幅值均值与颗粒物浓度的关系  
Fig. 3 Simulated signal and particle concentration after eliminating gas absorption effect. (a) First harmonic amplitude; (b) relationship between the mean of amplitudes and the mass concentration of particulate matter

## 4 实验与结果分析

### 4.1 光强调制技术的实验验证

#### 4.1.1 实验方案

针对蚊香燃烧时产生的颗粒物,分别采用具有调制光信号的光源及定光强光源进行颗粒物浓度测量,实验方案如图 4 所示。当采用具有调制光信号的光源进行实验时,函数发生器(DG1062Z, RIGOL, China)将 2 kHz 的正弦调制信号输入到温度电流控制器(LPT-MLDTEC650, LIGHTPROMTECH, China)中,通过温度电流控制器对中心波数约为  $1538.5 \text{ cm}^{-1}$  (波长为 650 nm) 的激光器(FU-650LD-30Q, FULASER, China)的输出光强进行调制。激光器输出的激光经准直透镜进入测量区域。散射光信号分别被光电探测器(PDA36A-EC, Thorlabs, USA)接收并转换为电信号,通过 BNC (bayonet nut connector) 线传输至高速数据采集卡(PXIe-5170R, NI, USA)中。当采用定光强光源进行实验时,关闭函数发生器,通过温度电流控制器输出的恒定电流对激光器输出光强进行控制,将其置于相同条件下进行实验。

测量区域中有准直透镜、光电探测器、盘式蚊香、粉尘仪(DR-800, DURAG, Germany)。在蚊香燃烧阶段,颗粒物浓度逐渐升高,每隔 10 s 记录粉尘仪示数,同时使用 PXI 高速采集卡采集每一时刻的散射光信号。将两路散射光信号的特征值与粉尘仪读数进行对比。

#### 4.1.2 实验结果与分析

测量得到的原始信号如图 5 所示。由图 5 可知,用定光强光源测量的信号光强  $I_s^C(t)$  因受外部光源噪声影响而呈周期性变化;用具有调制光信号

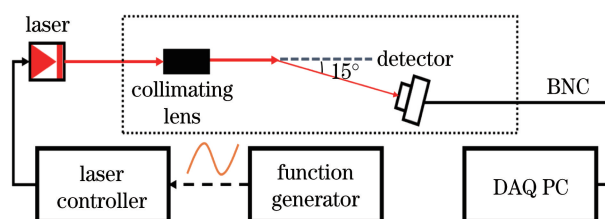


图 4 光强调制技术实验验证系统示意图  
Fig. 4 Schematic of experimental verification system based on light intensity modulation

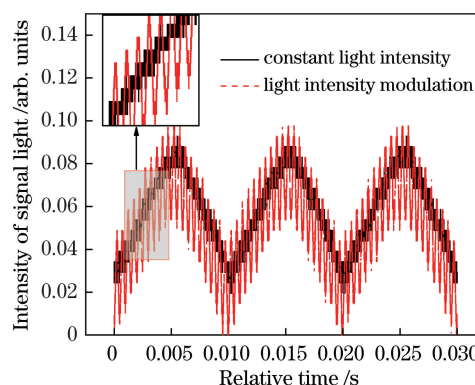


图 5 测量所得原始信号

Fig. 5 Measured original signal

的光源测量的信号光强  $I_s^M(t)$  同时受外部光源噪声及 2 kHz 高频调制信号的影响。对  $I_s^M(t)$  进行快速傅里叶变换(FFT),得到其频谱图(图 6),其信号主要由低频噪声及高频调制信号组成。对  $I_s^M(t)$  进行数字锁相-低通滤波处理,得到其一次谐波信号如图 7(a)所示,可知,一次谐波幅值的波动主要是由测量区域内颗粒物浓度的波动造成的,取其均值  $M_{1f}^S$  作为颗粒物测量的特征值;对于  $I_s^C(t)$  取其 1 s 内的均值  $M^C$  作为颗粒物测量的特征值。将两者测量的特征值与粉尘仪测量值进行对比,结果如图 7(b)所示。由图 7(b)可知,采用 LIM 技术所得

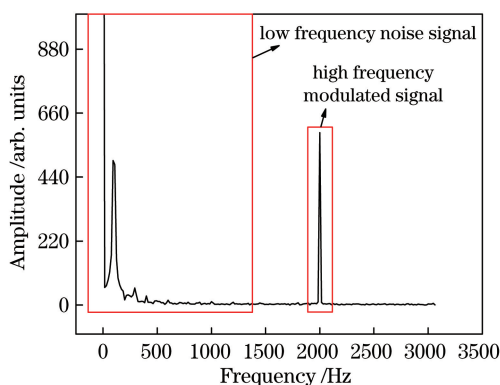


图 6 LIM 技术测量值的频谱图  
Fig. 6 Spectrum measured by LIM

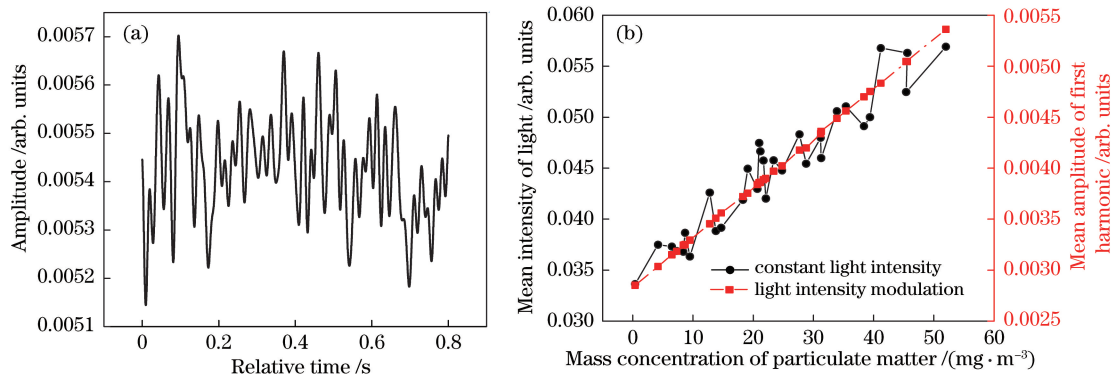


图 7 实验测量结果。(a) LIM 测得的一次谐波信号;(b) 特征值与粉尘仪测量值的对比  
Fig. 7 Experimental measurement results. (a) First harmonic signal measured by LIM;  
(b) comparison of eigenvalue and value measured by dust meter

实验装置图如图 8 所示,实验参数列于表 3 中。函数发生器(DG1062Z, RIGOL, China)将扫描叠加调制信号输入到激光控制器(LDC501, Stanford Research System, USA)中,利用温度电流控制器对中心波长在  $7185.6 \text{ cm}^{-1}$  附近的 DFB 激光器(NEL NLK1E5GAAA, NTT Electronics Company, Japan)的输出波长进行调谐。DFB 激光器输出的激光经两个光纤分束器分成 3 束:一束经过光功率放大器(BOA1036S, Thorlabs, USA)后,由激光发射端进入测量区域,带气体吸收信号的散射光被光电探测器(PDA-10CS-EC, Thorlabs, USA)接收并转换为电信号,通过 BNC 线传输至高速数据采集卡(PXIe-5170R, NI, USA);一束经过马赫-曾德尔干涉仪后被光电探测器接收,得到标准具信号,用来确定 DFB

的测量值相较于采用定光光源所得的测量值具有更高的线性度。这是由于 LIM 技术仅提取高频调制频率分量上的信号,消除了外部光源光强波动、探测器  $1/f$  噪声等低频噪声的干扰,有效地提高了颗粒物测量信号的信噪比。

## 4.2 颗粒物与气体浓度同步测量系统实验验证

### 4.2.1 实验方案

蚊香燃烧时所产生的颗粒物主要集中在亚微米态(粒径小于  $1 \mu\text{m}$ )<sup>[28]</sup>,与燃煤电厂电除尘器出口的颗粒物粒径一致<sup>[29]</sup>。利用蚊香燃烧时同时产生颗粒物与水蒸气的特性,同步测量颗粒物与水蒸气的浓度。

激光器的时间频率响应特性  $v(t)$ ;一束直接被光电探测器接收得到背景信号。

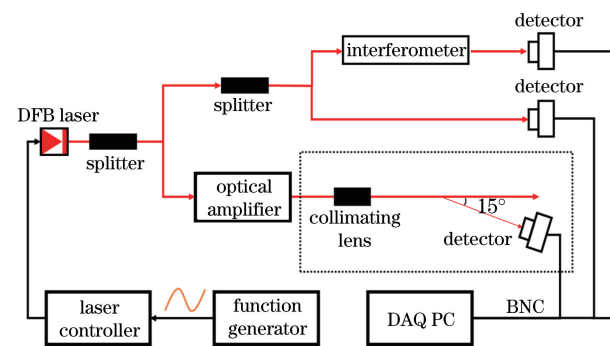


图 8 气体与颗粒物浓度同步测量实验系统示意图  
Fig. 8 Schematic of experimental system for synchronous measurement of gas and particle concentrations

表 3 气体与颗粒物浓度同步测量实验参数

Table 3 Experimental parameters for synchronous measurement of gas and particle concentrations

Scanning frequency /Hz	Sweep voltage /V	Modulation frequency /kHz	Modulating voltage /V	Sampling frequency /( $\text{MSa} \cdot \text{s}^{-1}$ )
100	0.7	10	0.5	1

测量区域由激光发射端、光电探测器、盘式蚊香、粉尘仪 (DR-800, DURAG, Germany) 以及温湿度传感器 (HMT330, VAISALA, Finland) 组成。在蚊香燃烧阶段, 水蒸气与颗粒物浓度逐渐增加, 每隔 10 s 记录粉尘仪及温湿度传感器示数, 同时使用 PXI 高速数据采集卡采集每一时刻的散射光信号。将处理所得结果分别与粉尘仪及温湿度传感器读数进行对比。

#### 4.2.2 实验结果与分析

在室温 (294.9 K) 下, 按上述实验方案进行实验。根据焓湿图查询温湿度传感器测量所得温度及相对湿度对应的水蒸气分压, 从而得到水蒸气的体积分数。

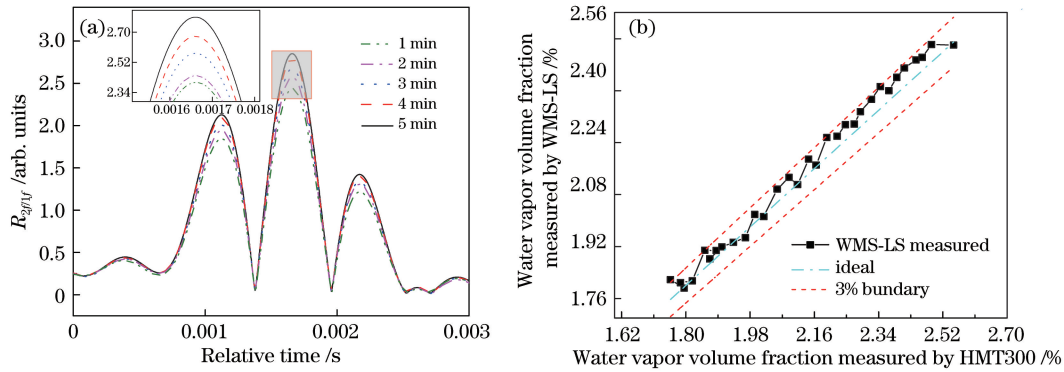


图 9 WMS-LS 实验结果及验证。(a) 归一化二次谐波幅值; (b) WMS-LS 测量的水蒸气体积分数与温湿度传感器测量值的对比

Fig. 9 Experimental and verification results of WMS-LS method. (a) Normalized second harmonic amplitude; (b) comparison of water vapor volume fraction measured by WMS-LS with that by temperature-humidity sensor

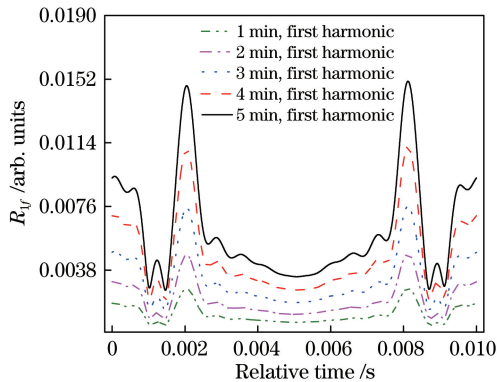


图 10 散射光信号的一次谐波幅值  $R_{1f}$

Fig. 10 Amplitudes of first harmonic  $R_{1f}$  of scattered light signals

由(11)式可得消除气体吸收后的散射光信号光强  $I_s(t)$ , 并利用数字锁相-低通滤波法得到其一次谐波信号幅值  $R_{1f}^s$ , 如图 11(a) 所示。在图 11(a) 中, 区域 1 中  $R_{1f}^s$  的变化主要来自于水蒸气浓度的测量偏差, 而气体吸收对区域 2 中  $R_{1f}^s$  的影响极小,

利用数字锁相-低通滤波技术对所测得的散射光信号光强  $I_{sc}(t)$  进行解调, 得到其各次谐波的 X 分量与 Y 分量, 由(10)式提取归一化二次谐波幅值峰值  $P_{2f/1f}$ , 并利用 DFB 激光器的时间频率响应特性  $v(t)$  来计算气体浓度, 结果如图 9 所示。由图 9(a) 可知, 归一化二次谐波信号消除了颗粒物浓度变化对散射光信号的影响; 将 WMS-LS 测得的水蒸气体积分数与温湿度传感器所测值进行对比, 结果如图 9(b) 所示, 可见, 除第一个点外, 两者的误差均在 3% 误差限内。由(9)式提取散射光信号的一次谐波信号幅值  $R_{1f}$  (图 10)。由于水蒸气在整个区域内对光信号均有吸收, 从而造成了一次谐波信号的波动,  $R_{1f}$  与颗粒物浓度及水蒸气浓度均相关。

$R_{1f}^s$  的大小与颗粒物浓度成正比, 取该区域内  $R_{1f}^s$  的均值  $M_{1f}^0$  作为颗粒物浓度的特征值。将提取的  $M_{1f}^0$  与粉尘仪所测值进行对比后可以发现, 两者具有高度的一致性, 如图 11(b) 所示。按(12)式对其进行线性拟合, 得到线性关系式为  $X_{particle} = 1.49 \times 10^4 \times M_{1f}^0 - 6.10$ , 拟合因子  $R^2$  为 0.9973。

由图 9~11 可知: 通过 WMS-LS 法测得的水蒸气浓度与温湿度传感器测量值之间的偏差小于 3%; 测得颗粒物浓度的特征值与粉尘仪的测量值之间高度线性相关, 且测量结果稳定, 不受外部光强波动、探测器低频噪声的影响。

## 5 结 论

提出了一种基于光强调制技术的颗粒物浓度检测方法, 有效避免了外部光强波动、探测器 1/f 噪声等低频噪声对测量结果的影响。与传统定光光源的测量方法相比, 光强调制技术能提高颗粒物浓度检测的信噪比, 在测量低浓度颗粒物时具有更高

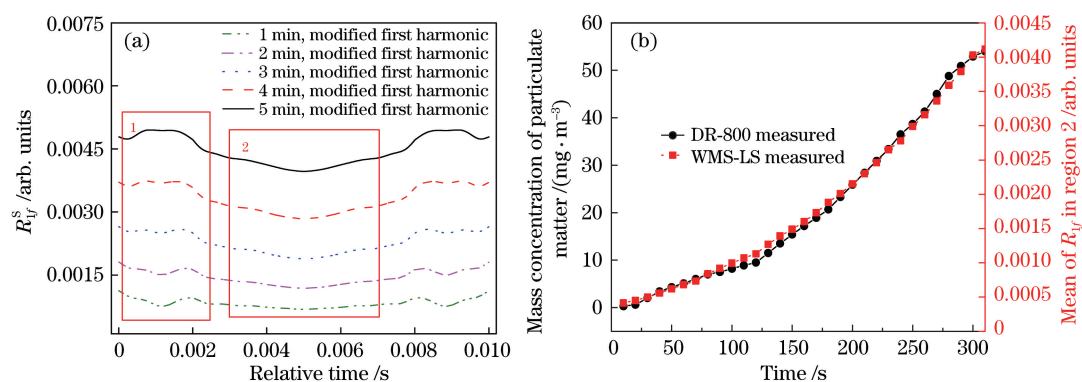


图 11 消除气体吸收后的 WMS-LS 实验结果及验证。(a) 一次谐波幅值；  
(b) WMS-LS 测得颗粒物质量浓度与粉尘仪测量值的对比

Fig. 11 Experimental and verification results of WMS-LS method after eliminating gas absorption effect. (a) Amplitude of first harmonic; (b) comparison of mass concentration of particulate matter measured by WMS-LS with that by dust meter

的准确率。此外,结合波长调制技术以及光散射的特点,将气体测量光路与颗粒物测量光路进行耦合,实现了颗粒物与气体浓度的同步测量。仿真模拟及实验验证结果表明:该同步测量系统具有较高的测量准确性和稳定性。

### 参 考 文 献

- [1] Xu R L. Light scattering: a review of particle characterization applications[J]. *Particuology*, 2015, 18: 11-21.
- [2] Xu Y S, Liu X W, Cui J, *et al.* Mass concentration measurements of the coal-derived fly ash particles via light extinction method[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(7): 1496-1502.  
徐义书, 刘小伟, 崔江, 等. 激光全散射法测量燃煤颗粒物浓度的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(7): 1496-1502.
- [3] Tao J, Zhang L M, Ho K, *et al.* Impact of PM<sub>2.5</sub> chemical compositions on aerosol light scattering in Guangzhou: the largest megacity in South China[J]. *Atmospheric Research*, 2014, 135/136: 48-58.
- [4] Qu S, Li M, Huang Y H, *et al.* Applicability of light scattering instruments in ambient air particulate matter monitoring[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(12): 5934-5938.  
曲松, 李媚, 黄玉虎, 等. 光散射颗粒物监测仪在环境空气监测中的适用性[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(12): 5934-5938.
- [5] Zhou Y, Chen J, Yang H N, *et al.* Influence of spheroidal particle shape on particle size characterization by multi-wavelength light extinction method[J]. *Results in Physics*, 2018, 10: 22-27.
- [6] Zhai M R, Lü Q N, Zhang H X, *et al.* Coated sphere scattering by geometric optics approximation[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2014, 31(10): 2160-2169.
- [7] Du J K, Sun W C, Wang X D, *et al.* Experimental study on combustion and particle size distribution of a common rail diesel engine fueled with GTL/diesel blends[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 70(1): 430-440.
- [8] Mishchenko M I, Videen G, Babenko V A, *et al.* T-matrix theory of electromagnetic scattering by particles and its applications: a comprehensive reference database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2004, 88(1/2/3): 357-406.
- [9] Zhao J Q, Li J N. Analytical transform techniques to retrieve non-spherical particle size distribution[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 129: 287-297.
- [10] Wang Y M, Liang G B, Pan Z D. Inversion of particle size distribution from light-scattering data using a modified regularization algorithm[J]. *Particuology*, 2010, 8(4): 365-371.
- [11] He Z Z, Liang D, Mao J K, *et al.* Simultaneous estimation of aerosol optical constants and size distribution from angular light-scattering measurement signals[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(5): 059101.
- [12] He Z Z, Mao J K, Han X S. Application of an improved artificial bee colony algorithm to inverse problem of aerosol optical constants from spectral measurement data[J]. *Optik*, 2017, 145: 316-329.
- [13] Buaprathoom S, Pedley S, Prins A D, *et al.* High concentration measurement of mixed particle suspensions using simple multi-angle light scattering system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8439: 843923.
- [14] Hu M, Xie J L, Wu D F, *et al.* Measurement of



- PM<sub>2.5</sub> concentration based on the charge-coupled device backward scattering lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0201002.
- 胡森, 谢家亮, 吴端法, 等. 基于 CCD 后向散射激光信号的 PM<sub>2.5</sub> 测量研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0201002.
- [15] Yu X Y, Shi Y B, Wang T, *et al.* Dust-concentration measurement based on Mie scattering of a laser beam[J]. *PLOS ONE*, 2017, 12(8): e0181575.
- [16] Wu J L, Zhang J B, Zhang L, *et al.* Near forward light scattering characteristics of airborne particles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0529001.
- 吴金雷, 张金碧, 张莉, 等. 大气颗粒物近前向光散射特性研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0529001.
- [17] Li K, Zhong L, Zhang H Q, *et al.* Review of smoke concentration measurement method[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, 32(2): 8-11.
- 李昆, 钟磊, 张洪泉, 等. 烟尘浓度测量方法综述[J]. *传感器与微系统*, 2013, 32(2): 8-11.
- [18] Stritzke F, Diemel O, Wagner S. TDLAS-based NH<sub>3</sub> mole fraction measurement for exhaust diagnostics during selective catalytic reduction using a fiber-coupled 2.2- $\mu$ m DFB diode laser[J]. *Applied Physics B*, 2015, 119(1): 143-152.
- [19] Qu Z C, Werhahn O, 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.
- [20] Wang B B, Zhou B, Wang H, *et al.* Study on calibration-free measurement method for gas concentration based on triangular wave modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0930003.
- 汪步斌, 周宾, 王浩, 等. 基于三角波调制的免标定气体浓度测量方法研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0930003.
- [21] Xiong Y Q, Zhou B, Wang Y H, *et al.* Calibration-free one-line method based on wavelength modulation spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0930002.
- 熊涌泉, 周宾, 王一红, 等. 基于波长调制光谱技术的免标定单线测量法[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0930002.
- [22] Sun K, Chao X, Sur R, *et al.* Wavelength modulation diode laser absorption spectroscopy for high-pressure gas sensing[J]. *Applied Physics B*, 2013, 110(4): 497-508.
- [23] Liu Y Y, Lin J L, Huang G M, *et al.* Simple empirical analytical approximation to the Voigt profile[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2001, 18(5): 666-672.
- [24] Gamache R R, Kennedy S, Hawkins R, *et al.* Total internal partition sums for molecules in the terrestrial atmosphere[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2000, 517/518: 407-425.
- [25] Yu T Z, Yang B, Wang T, *et al.* Design of on-line measurements system of low concentration dust based on angle scattering[J]. *Optical Instruments*, 2018, 40(1): 8-12.
- 于天泽, 杨斌, 王婷, 等. 角散射低质量浓度烟尘在线测量系统设计[J]. *光学仪器*, 2018, 40(1): 8-12.
- [26] Zhang C Y. The study of dust concentration measurement using light scattering[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- 张宸瑜. 烟尘浓度光散射测量技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [27] Rieker G B, Jeffries J B, Hanson R K. Calibration-free wavelength-modulation spectroscopy for measurements of gas temperature and concentration in harsh environments[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(29): 5546-5560.
- [28] Liu W L, Zhang J F, Hashim J H, *et al.* Mosquito coil emissions and health implications[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2003, 111(12): 1454-1460.
- [29] Wu Y F, Chen J H, Jiang J K, *et al.* Size distribution characteristics of fine particles from a coal-fired power plant[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(8): 1174-1183.
- 武亚凤, 陈建华, 蒋靖坤, 等. 燃煤电厂细颗粒物排放粒径分布特征[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(8): 1174-1183.