

# 差分吸收光谱法在 线监测烟气 SO<sub>2</sub> 浓度的直接反演法

李亚飞, 蔡小舒

(上海理工大学颗粒与两相流测量技术研究所, 上海市 杨浦区 200093)

## A Direct Inverse Method to Measure SO<sub>2</sub> Concentration in Flue Gas With Differential Optical Absorption Spectroscopy

LI Yafei, CAI Xiaoshu

(Institute of Particle and Two-phase Flow Measurement, University of Shanghai for Science and Technology,  
Yangpu District, Shanghai 200093, China)

**ABSTRACT:** For monitoring emission from utility boilers, the accuracy of differential optical absorption spectroscopy (DOAS) method is strongly affected by high concentration of dust and droplets in flue gas. Experiments were carried out in lab to simulate the real conditions in chimney. Absorption spectrums of SO<sub>2</sub> were measured in different conditions, such as high concentration of dust and/or droplets, lower light intensity. Then, measured spectrums were analyzed with wavelet transform method. It was found that coefficients of wavelet transform in some wavelengths kept nearly constant in different conditions. Based on these experimental results, the new method of measuring concentration of SO<sub>2</sub> was presented in this paper. Our aim is to establish the function relationships by means of using the relationships between these coefficients and the concentration of SO<sub>2</sub>, which can be used to determine the concentration of SO<sub>2</sub> directly in DOAS method. Experiments proved this method. For the advantage of eliminating the interference of dust and droplets, reducing the measurement error, the new technique presented in this work is suitable for on-line monitoring emission from utility boilers.

**KEY WORDS:** flue gas; differential optical absorption spectroscopy (DOAS); SO<sub>2</sub>; wavelet transform; emission monitoring

**摘要:** 差分吸收光谱法(differential optical absorption spectroscopy, DOAS)用于锅炉排放烟尘烟气直接在线监测时, 易受烟尘水汽等的干扰影响, 造成测量误差较大。在实验室模拟真实烟道中的烟气监测环境, 研究在光源发光强度大幅度衰减、存在高浓度水汽和烟尘情况下不同浓度 SO<sub>2</sub> 吸收光谱的特性。在对 SO<sub>2</sub> 吸收光谱进行小波分解后, 发现即使受到高浓度烟尘颗粒、水汽、光源大幅度衰减等的影响, 在某些波长处的小波系数变化仍较小, 与未受干扰的 SO<sub>2</sub> 吸收光

谱的小波系数基本相同。因此, 提出一种差分吸收光谱法测量 SO<sub>2</sub> 浓度的新算法, 即利用这些波长点的小波分解系数与浓度的关系, 建立相应的函数关系, 由吸收光谱经小波分解后的小波系数直接得到 SO<sub>2</sub> 的浓度。实验证明该方法可以消除烟尘水汽等的干扰影响, 测量误差较小, 可以满足排放监测要求。

**关键词:** 烟气; 差分吸收光谱法; SO<sub>2</sub>; 小波变换; 排放监测

## 0 引言

我国目前每年新增发电容量 1 亿千瓦左右, 2009 年底装机容量达到了 8.74 亿千瓦, 其中火电容量达 6.52 亿千瓦。这些电厂每年排放了大量的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、烟尘等污染物, 成为我国大气污染的最重要来源, 因此, 迫切需要对固定污染源的烟气排放实施在线监测, 以便进行有效控制和治理。目前的烟气连续排放监测装置(continuous emission monitoring system, CEMS)主要采用采样法, 包括直接采样和稀释采样 2 类。近年来差分吸收光谱法(differential optical absorption spectroscopy, DOAS)因可以实现无须采样的直接在线监测, 越来越受到重视<sup>[1-6]</sup>。

DOAS 方法的基本原理是根据 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 等分子在某些光波段有特殊的吸收特性, 研究这些特征吸收特性和 SO<sub>2</sub> 等污染气体浓度间的关系测量这些污染气体的浓度<sup>[7-8]</sup>, 该方法已成功用于大气环境监测, 但在固定污染源的烟气排放监测中, 由于受烟气中高浓度烟尘、水汽等的影响, 应用 DOAS 法测量时, 虽然也可得特征吸收谱的基本结构, 但得到

的特征吸收谱因受烟尘和水汽光散射等的干扰影响会发生较大程度的扭曲变形,使测量结果产生很大误差。

为克服烟尘、水汽等的影响,以及光谱测量仪器的谱线漂移、温度变化、电子噪声等因素的影响,许多研究者做了大量研究,提出了一些 DOAS 法的信号处理方法<sup>[9-15]</sup>;但在现场烟气排放在线监测时,还不能很好解决烟尘、水汽 Mie 散射等的干扰,以及光源长时间应用后发光强度大幅度降低等因素的影响,使得基于 DOAS 原理的 CEMS 没有得到很好的应用。

为解决 DOAS 法在线监测排放烟气存在的问题,本文对不同情况下 SO<sub>2</sub> 在 280~320 nm 波段的特征吸收谱线进行了实验研究,并应用小波变换对测得的 SO<sub>2</sub> 的特征吸收谱线进行分析,为消除烟尘、水汽等的影响,提高 DOAS 法的测量精度提供了一种新的方法。

## 1 差分吸收光谱法简介

图 1 为 SO<sub>2</sub> 在 280~320 nm 波长段的特征吸收谱线和相应的差分吸收谱。从图中可知,SO<sub>2</sub> 在该波段存在有规律的吸收谱,该吸收谱的幅值或差分吸收截面的大小与被测 SO<sub>2</sub> 的浓度有关,可用式(1)表示:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-LC_{\text{SO}_2} \sigma_{\text{SO}_2}(\lambda)) \quad (1)$$

式中:  $I(\lambda)$  和  $I_0(\lambda)$  分别为透射光强和入射光强;  $C_{\text{SO}_2}$  为 SO<sub>2</sub> 浓度;  $L$  为光程长;  $\sigma_{\text{SO}_2}$  为 SO<sub>2</sub> 的标准吸收系数,是波长  $\lambda$  的函数,可在光谱数据库查出,或通过实验室对标准气体的测量得到。因此,测得入射光强和透射光强的光谱,就可以测得 SO<sub>2</sub> 的浓度。

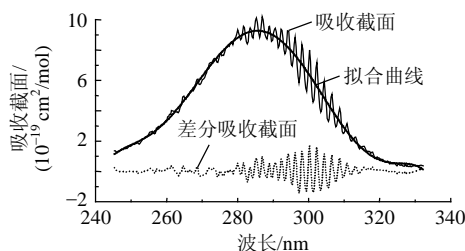


图 1 SO<sub>2</sub> 在 280~320 nm 的吸收截面及差分截面

Fig. 1 Absorption section and differential section of SO<sub>2</sub> in waveband 280~320 nm

在排放的烟气中,除有 SO<sub>2</sub> 外,还存在烟尘、水汽等,此时,透射光强的衰减是 SO<sub>2</sub> 吸收及烟尘和水汽等的吸收及散射共同作用的结果:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-L(C_{\text{SO}_2} \sigma_{\text{SO}_2}(\lambda) +$$

$$C_p \varepsilon_p(\lambda, D_p, \eta_p) + C_w \varepsilon_w(\lambda, D_w, \eta_w)] \quad (2)$$

式中:  $C_p$  和  $C_w$  分别为烟尘颗粒和水汽(细小水滴)的浓度;  $\varepsilon_p(\lambda, D_p, \eta_p)$  和  $\varepsilon_w(\lambda, D_w, \eta_w)$  分别为烟尘和水汽的消光系数,是光波长  $\lambda$ 、烟尘颗粒粒径  $D_p$  和折射率  $\eta_p$ 、水滴粒径  $D_w$  和折射率  $\eta_w$  的函数,可以根据 Mie 的光散射理论计算得到<sup>[16]</sup>。图 2 为烟尘颗粒和水汽的消光系数曲线,其中  $K_{\text{ext}}$  为消光系数、 $\alpha$  为无量纲参量,从图中可知烟尘颗粒和水汽的消光系数存在精细结构,并且是波长的函数。烟尘颗粒和水汽的光散射效应与 SO<sub>2</sub> 的吸收效应相叠加,会造成测得的 SO<sub>2</sub> 吸收光谱发生畸变,图 3 为在烟道中测得的真实烟气的吸收光谱。比较图 3 与图 1 可见,存在烟尘和水汽的真实烟气中,在 280~320 nm 波段的 SO<sub>2</sub> 的吸收光谱与标准吸收光谱差别很大。因此,如果直接对测得的 SO<sub>2</sub> 吸收光谱进行数据处理,得到的结果将会有很大误差。虽然已有许多文献提出了许多不同的去噪数据处理方法来消除烟尘和水汽的影响,但由于真实烟气中烟尘成分和粒度的变化很大,折射率会发生很大变化。由光散射理论可知<sup>[17-18]</sup>,在颗粒折射率不同和粒度不同的情况下,消光系数的变化很大,从而造成叠加在 SO<sub>2</sub> 特征吸收谱线的消光系数发生变化。这些去噪数据处理方法很难适应消光系数变化的情况,这是 DOAS 法用于排放监测时效果不佳的主要原因。

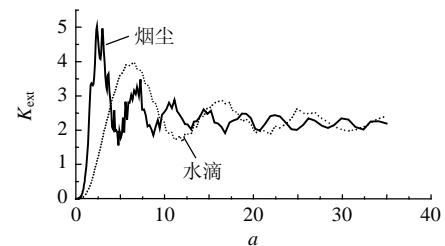


图 2 烟尘和水汽的消光系数曲线

Fig. 2 Light extinction coefficients of dust and water droplets

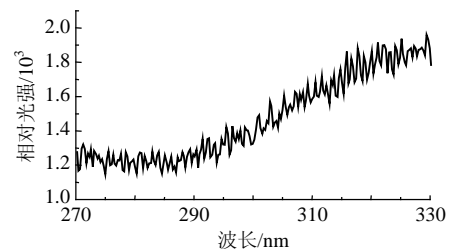


图 3 真实烟气的吸收光谱

Fig. 3 Absorption spectrum of real flue gas

## 2 实验装置

为研究真实烟气中烟尘和水汽等因素对 DOAS

测量准确性的影响,笔者在实验室中模拟真实烟道中的测量环境,搭建了实验台。图4是实验系统的示意图。实验中氙灯发出紫外光经透镜准直,进入样品池和测量区,被在测量区另一端的透镜汇聚后由接收光纤送到光纤光谱仪,光谱仪信号则由计算机进行分析处理。样品池长度260 mm、直径40 mm,两侧装有透紫外可见光的石英玻璃窗,另有接口与标气瓶、零气瓶以及真空泵相连。通过控制样品池内的标气压力,可以控制池中SO<sub>2</sub>的质量浓度。烟尘发生器和水汽发生器分别模拟烟气中的烟尘和水汽的环境。烟尘发生器通过燃烧熏香来产生真正的烟尘,而水汽则是由超声雾化器产生的粒径为5 μm左右的水滴。调节超声强度或熏香的数量,可以控制水汽浓度或烟尘浓度。由于石英窗表面反射等原因,在光路中增加石英玻璃窗会造成光强的衰减而不改变测量光谱的特性,实验中采取加在光路中加不同数目的石英透镜来模拟光源光强的衰减。

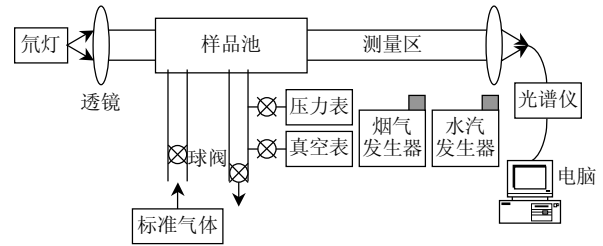


图4 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic of experimental setup

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 实验工况

实验分别进行了光源衰减,光源衰减同时存在水汽,或同时存在烟尘,或所有影响因素同时存在等共计15种不同情况,SO<sub>2</sub>浓度变化从42 mg/m<sup>3</sup>到1943.5 mg/m<sup>3</sup>共6种,共计90组实验。表1是所有实验工况汇总。还对部分浓度进行了改变水汽浓度和烟尘浓度的实验。

表1 实验工况汇总  
Tab. 1 List of experiments

$\rho(\text{SO}_2)/(\text{mg}/\text{m}^3)$	无干扰因素	光强衰减1(约9%)	光强衰减2(约21%)	光强衰减3(约29%)	水汽	光强衰减1+水汽	光强衰减2+水汽	光强衰减3+水汽	烟尘	光强衰减1+烟尘	光强衰减2+烟尘	光强衰减3+烟尘	光强衰减1+水汽+烟尘	光强衰减2+水汽+烟尘	光强衰减3+水汽+烟尘
42	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
93	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
556	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
1020	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
1483	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
1944	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y

注: Y表示做了该工况实验。

#### 3.2 原始光谱

图5给出了无任何干扰因素、光强衰减、有水汽、有烟尘和光强衰减与水汽及烟尘共同作用时的

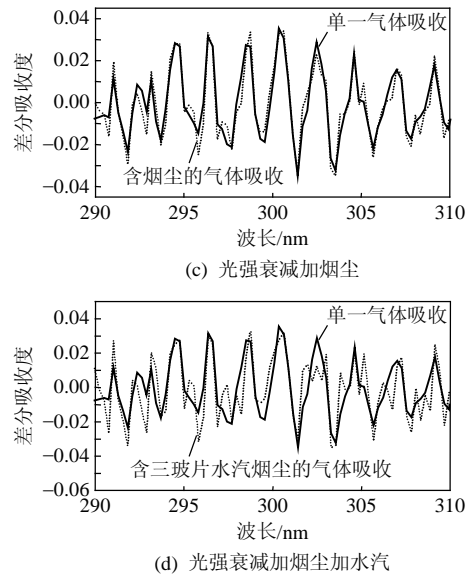
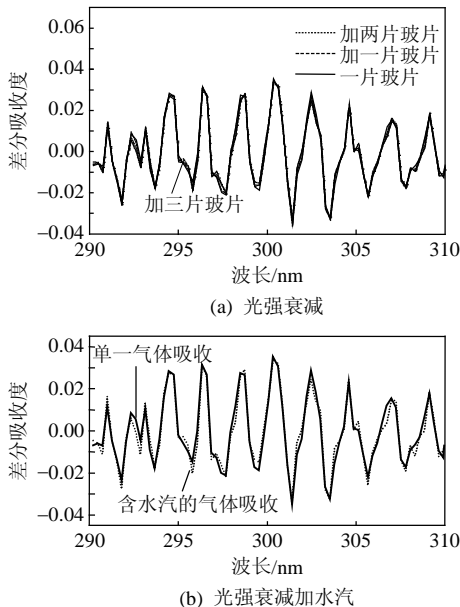


图5 不同条件下SO<sub>2</sub>吸收光谱对比变化

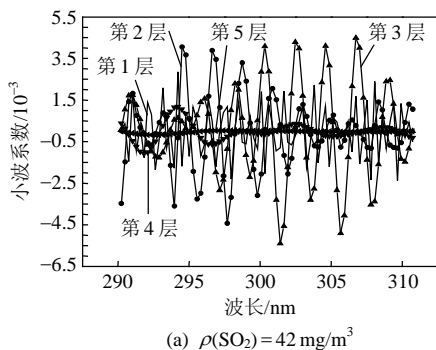
Fig. 5 Absorption spectrums of SO<sub>2</sub> in different conditions  
SO<sub>2</sub>差分吸收谱。从图中可见,光强衰减确实对SO<sub>2</sub>差分吸收谱形状的影响很小,水汽对SO<sub>2</sub>差分吸收

谱形状的影响也不大。原因是水的折射率较小，其消光系数比较光滑，精细结构较小。但烟尘对 SO<sub>2</sub> 的差分吸收光谱有较大影响，这是因为烟尘的折射率较大，它的消光系数有较强烈的精细结构，叠加在 SO<sub>2</sub> 的差分吸收谱上造成了 SO<sub>2</sub> 吸收谱的畸变。当三者共同作用时，SO<sub>2</sub> 的差分吸收光谱则发生很大的畸变，并且这种畸变程度随烟尘浓度的增加会加剧。

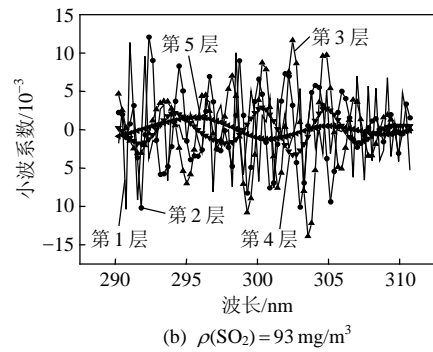
### 3.3 小波变换处理

为消除烟尘、水汽等造成的噪声，许多研究者采取小波变换去噪的方法<sup>[12,19]</sup>。一般烟尘和水汽光散射特性中精细结构的频率与 SO<sub>2</sub> 的吸收光谱不同，先用小波变换对测得的 SO<sub>2</sub> 吸收光谱进行分解去噪，然后重构 SO<sub>2</sub> 的吸收光谱，再对重构的 SO<sub>2</sub> 吸收光谱进行处理，得到 SO<sub>2</sub> 的浓度。在这种方法中，小波去噪的阈值选取很重要，噪声水平不同，阈值的选取也不同。合适的阈值可以很好地消除噪声，在重构时达到有效的降噪目的，而不丢失特征信息。过大或过小的阈值都不能得到很好的结果。但在排放烟气中，烟尘颗粒的成分和粒度会随煤种的不同以及燃烧状态的不同而变化，水汽浓度也会随着燃煤的含水量不同以及排烟温度的变化而不同<sup>[20-21]</sup>。这就意味着小波去噪的阈值应该随燃烧状态等的改变而变化，但这在实际的在线监测排放污染物浓度时是不可能做到的。

对试验结果进行小波变换去噪的研究证实，要在不同情况都得到有效的去噪效果，需要改变小波系数的阈值。图 6 是采用小波变换对 42 mg/m<sup>3</sup> 和 93 mg/m<sup>3</sup> 浓度 SO<sub>2</sub> 吸收光谱信号进行 5 层小波分解的结果。从图中可见，存在干扰因素时，各层的小波分解系数确实有所变化，不能直接用来进行数据处理。但仔细分析各层的小波信号，可以发现第 3 层小波系数在某些波长处即便在较大干扰影响因素的情况下，依然和无干扰 SO<sub>2</sub> 吸收光谱的 3 层小波系数有较好的重合，可认为这些波长点的小波系



(a)  $\rho(\text{SO}_2) = 42 \text{ mg/m}^3$



(b)  $\rho(\text{SO}_2) = 93 \text{ mg/m}^3$

图 6 SO<sub>2</sub> 吸收光谱的 5 层小波变换系数

Fig. 6 Wavelet coefficients of 5 levels of SO<sub>2</sub> absorption spectrum

数受光强衰减、烟尘和水汽干扰影响很小，如图 7 所示。而这些点的小波系数幅值又与 SO<sub>2</sub> 的浓度存在着单值关系，据此可将它们的幅值和对应浓度进行拟合，得到两者的关系式，从而建立一种新的浓度直接反演方法。

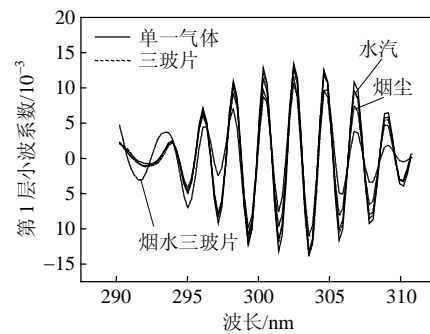


图 7 不同干扰下 SO<sub>2</sub> 吸收光谱的第 3 层小波系数

Fig.7 3rd level of wavelet coefficients of SO<sub>2</sub> in different conditions

### 3.4 实验结果

将表 1 给出的 6 种浓度 15 种工况共计 90 组实验数据整理，首先对每一浓度下同一波长 15 个工况下的小波系数进行统计处理，得到标准偏差最小的几组数据以及对应的波长，然后将不同浓度下得到的各组数据汇总，求出在各个浓度下相同波长下小波系数标准偏差均较小的波长点，根据这些数据就可以拟合出小波系数与 SO<sub>2</sub> 的浓度关系式。图 8 给出了其中 2 个波长的试验数据和拟合曲线，从图中可见小波系数随浓度基本上呈 2 次曲线增加。

为验证这种方法的可靠性和准确性，取实验测得的各浓度下各组 SO<sub>2</sub> 吸收光谱，对其进行小波变换，得到对应的第 3 层小波系数，分别将其代入拟合的函数关系式，求出 SO<sub>2</sub> 浓度均值。表 2 和表 3 给出了反演计算结果。从表中可见，在不同工况下的测量误差大多在 10% 以内，少数工况下的测量误差大于 10%。但对于不同分辨率的光谱仪，因测得

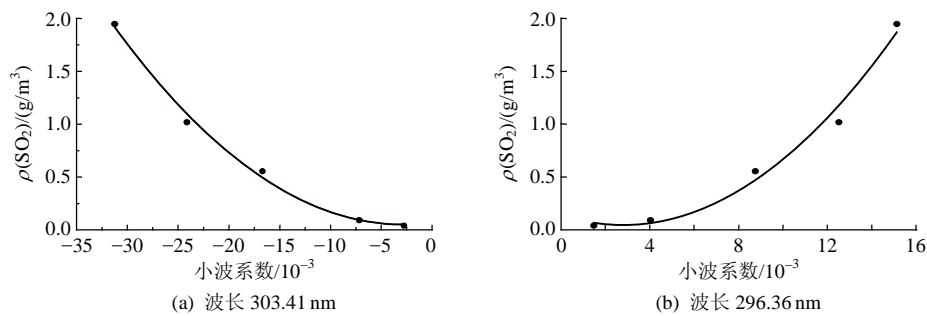


图8 不同波长的拟合曲线

Fig. 8 Experimental data and charts

表2  $\rho(\text{SO}_2)=93 \text{ mg/m}^3$  时的测量结果及误差Tab. 2 Measurement results and errors of  $\text{SO}_2$  in  $93 \text{ mg/m}^3$  concentration

项目	无干扰因素	光强衰减 1(约9%)	光强衰减 2(约21%)	光强衰减 3(约29%)	水汽	光强衰减 1+水汽	光强衰减 2+水汽	烟尘	光强衰减 1+烟尘	光强衰减 2+烟尘	光强衰减 3+烟尘	光强衰减 1+水汽+ 烟尘	光强衰减 2+水汽+ 烟尘	光强衰减 3+水汽+ 烟尘
测量结果/ ( $\text{mg/m}^3$ )	89.39	95.19	94.46	98.77	97.27	104.46	97.89	76.43	85.23	82.75	79.37	91.79	99.060	101.05
误差/%	-3.88	2.36	1.57	6.20	4.60	12.33	5.26	-17.82	-8.35	-11.02	-14.66	-1.33	6.522	8.65

表3  $\rho(\text{SO}_2)=556 \text{ mg/m}^3$  时的测量结果及误差Tab. 3 Measurement results and errors of  $\text{SO}_2$  in  $556 \text{ mg/m}^3$  concentration

项目	无干扰因素	光强衰减 1(约9%)	光强衰减 2(约21%)	光强衰减 3(约29%)	水汽	光强衰减 1+水汽	光强衰减 2+水汽	烟尘	光强衰减 1+烟尘	光强衰减 2+烟尘	光强衰减 3+烟尘	光强衰减 1+水汽+ 烟尘	光强衰减 2+水汽+ 烟尘	光强衰减 3+水汽+ 烟尘
测量结果/ ( $\text{mg/m}^3$ )	453.03	444.41	438.41	463.74	464.71	491.02	509.65	541.93	531.99	525.24	513.57	517.52	534.34	534.76
误差/%	-18.52	-20.07	-21.15	-16.59	-16.42	-11.69	-8.34	-2.53	-4.32	-5.53	-7.63	-6.92	-3.89	-3.82

的光谱有所不同,需重新用标气进行标定,得到最合适的波长点,再拟合得到  $\text{SO}_2$  浓度和小波系数的函数关系。

研究结果表明该方法在各种情况下只要测得  $\text{SO}_2$  的吸收光谱,直接对其进行小波分解,就可以得到其浓度,而不用再考虑烟尘、水汽或其他噪声的影响,可以满足电厂等的实时在线排放监测要求。要进一步减少测量误差,可以先改进拟合曲线方程和实验室标定精度。

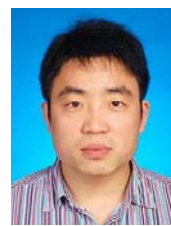
#### 4 结论

与目前常用的各种差分吸收光谱气体浓度反演计算方法相比,本文提出的  $\text{SO}_2$  浓度反演算法通过多层小波分解,建立起小波系数与  $\text{SO}_2$  浓度间的显式关系式,可直接对浓度进行反演计算,不仅较好地解决了在线监测过程中烟尘、水汽等颗粒物的干扰问题和噪声问题,以及光源发光强度大幅度变化带来的影响,而且数据处理方便,适合实时在线监测,但须注意的是这种方法与光谱仪的分辨率直接相关,当采用不同分辨率光谱仪时,必须对关系式重新拟合。

#### 参考文献

- [1] Weibring P, Edner H, Svanberg S, et al. Monitoring of volcanic sulphur dioxide emissions using differential absorption lidar (DIAL), differential optical absorption spectroscopy (DOAS), and correlation spectroscopy (COSPEC)[J]. *Applied Physics B*, 1998, 67(4): 419-426.
- [2] Morales J A, Treacy J, Coffey S. Urban ozone measurements using differential optical absorption spectroscopy[J]. *Anal Bioanal Chem*, 2004, 379(1): 51-55.
- [3] Xie Pinhua, Liu Wenqing, Fu Qiang, et al. Intercomparison of  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , and aromatic hydrocarbons measured by a commercial DOAS system and traditional point monitoring techniques[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21(2): 211-219.
- [4] McGonigle A J S, Thomson C L, Tsanev V I, et al. A simple technique for measuring power station  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_2$  emissions[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(1): 21-25.
- [5] 许利华. 烟气 DOAS 法测量实验研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2008.  
Xu Lihua. Experimental study on measurement of flue gas with DOAS[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2008(in Chinese).
- [6] 肖雪, 段静波, 刘文清, 等. 烟道污染气体  $\text{SO}_2$  的差分光学吸收光谱测量[J]. *大气与环境光学报*, 2008, 2(3): 121-124.  
Xiao Xue, Duan Jingbo, Liu Wenqing, et al. Differential optical absorption spectroscopy measurement for flue gas  $\text{SO}_2$ [J]. *Journal of*

- Atmospheric and Environmental Optics, 2008, 2(3): 121-124(in Chinese).
- [7] 翁燕波, 赵建平, 奕扬. 差分光谱法连续监测空气中 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、苯、甲苯方法探讨[J]. 中国环境监测, 2004, 20(3): 33-35.  
Weng Yanbo, Zhao Jianping, Yi Yang. Study on differential optical absorption spectrometer for SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, benzene and toluene[J]. Environmental Monitoring in China, 2004, 20(3): 3-35(in Chinese).
- [8] 汤光华, 许传龙, 孔明, 等. 基于差分光谱法的燃煤锅炉烟气浓度反演算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(11): 6-10.  
Tang Guanghua, Xu Chuanlong, Kong Ming, et al. Inversion algorithm study on concentration measurement of flue gas from coal-fired boiler based on differential optical absorption spectrometer [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(11): 6-10(in Chinese).
- [9] 齐锋, 刘文清, 周斌, 等. 利用人工神经网络方法提高差分光学吸收光谱系统测量精度研究[J]. 光学学报, 2002, 22(11): 1345-1349.  
Qi Feng, Liu Wenqing, Zhou Bin, et al. Improving DOAS system measurement precision with artificial neural network method[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(11): 1345-1349(in Chinese).
- [10] Platt U, Stutz J. Differential optical absorption spectroscopy-principles and applications[M]. Berlin: Springer, 2008: 135-158.
- [11] 毛万朋, 蔡小舒, 程智海, 等. 傅里叶变换滤波-差分吸收光谱法在烟气 SO<sub>2</sub> 在线监测中的应用研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(增刊): 205-208.  
Mao Wanpeng, Cai Xiaoshu, Cheng Zhihai, et al. Fourier transform filtering-the application of differential optical absorption spectroscopy in the on-line SO<sub>2</sub> monitoring system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(S): 205-208(in Chinese).
- [12] 邵理堂, 汤光华, 许传龙, 等. 利用小波变换消除颗粒物 Mie 散射对 DOAS 技术的影响[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(3): 444-448.  
Shao Litang, Tang Guanghua, Xu Chuanlong, et al. Eliminating Mie scattering influence of particles on DOAS technique using wavelet transform[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38(3): 444-448(in Chinese).
- [13] 汤光华, 许传龙, 邵理堂, 等. 差分吸收光谱法在线测量烟气浓度实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(2): 244-249.  
Tang Guanghua, Xu Chuanlong, Shao Litang, et al. Experimental study on in-situ measurement of flue gas concentration based on DOAS[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(2): 244-249(in Chinese).
- [14] 刘前林, 王立世, 黄新建, 等. 傅里叶变换在差分吸收光谱技术气体浓度计算中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(12), 2830-2834.  
Liu Qianlin, Wang Lishi, Huang Xinjian, et al. Using Fourier transform to calculate gas concentration in DOAS[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(12), 2830-2834(in Chinese).
- [15] 张学典, 黄显, 徐可欣. 差分吸收光谱反演方法在环境监测系统中的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(11): 2367-2370.  
Zhang Xuedian, Huang Xian, Xu Kexin. Novel analysis algorithms for differential optical absorption spectroscopy for pollution monitoring[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(11): 2367-2370(in Chinese).
- [16] Stutz J, Platt U. Numerical analysis and estimation of statistical error of differential spectroscopy measurement with least-squares methods [J]. Applied Optics, 1996, 35(30): 6041-6053.
- [17] Van de Hulst. Light scattering by small particles[M]. Washington: Wiley, 1957: 3-40.
- [18] 王乃宁, 蔡小舒, 郑刚, 等. 颗粒粒径的光学测量技术及应用[M]. 北京: 原子能出版社, 2001: 212-233.  
Wang Naining, Cai Xiaoshu, Zheng Gang, et al. Optical particle sizing and applications[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2001: 212-233(in Chinese).
- [19] 李素文, 谢品华, 李玉金, 等. 基于小波变换的差分吸收光谱数据处理方法[J]. 光学学报, 2006, 26(11): 1601-1604.  
Li Suwen, Xie Pinhua, Li Yujin, et al. Wavelet transform based differential optical absorption spectroscopy data processing[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(11): 1601-1604(in Chinese).
- [20] 赵延军, 王式民, 穆宁, 等. 光散射平均值法在线监测颗粒排放物浓度的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 217-221.  
Zhao Yanjun, Wang Shimin, Mu Ning, et al. Online continuous measurement of dust concentration in the exhaust duct by laser scattering mean method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 217-221(in Chinese).
- [21] 孙晓刚, 唐红, 原桂彬. 可见/红外光谱区烟尘浓度测量问题的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(10): 2268-2272.  
Sun Xiaogang, Tang Hong, Yuan Guibin. Research on the measurement of flue-dust concentration in Vis, IR spectral region[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(10): 2268-2272(in Chinese).



李亚飞

收稿日期: 2010-02-21。

作者简介:

李亚飞(1983), 男, 硕士研究生, 研究方向为烟气排放监测, liyafei319@163.com;

蔡小舒(1955), 男, 教授, 博士生导师, 本文通讯作者, 研究方向为两相流测量, 汽轮机热力系统, 燃烧排放检测诊断等, usst\_caixs@163.com。

(责任编辑 王庆霞)