

基于差分吸收光谱技术的 NH_3 浓度反演算法研究

朱 靳 孙冬梅 陈 玲

(南京工业大学自动化与电气工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要 将差分吸收光谱法(DOAS)应用于 NH_3 浓度反演。在传统的 DOAS 算法基础上,研究遗传算法、小波变换和卡尔曼滤波三种算法对低浓度 NH_3 反演精度的影响。研究表明,对于信噪比较低的 NH_3 吸收光谱信号,三种算法都具有良好的去噪能力。在 NH_3 浓度低于 7.6 mg/m^3 的情况下,三种算法的反演精度相对于传统的 DOAS 算法明显提高。其中传统的多项式滤波法结合卡尔曼滤波法差分吸光度残差标准差为 0.1341% ,峰峰值为 0.6132% ,反演精度最高,误差在 $\pm 0.3\%$ 以内。

关键词 信号处理;差分吸收光谱;小波变换;遗传算法;卡尔曼滤波

中图分类号 O433 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0230004

Study of Concentration Retrieving Algorithm for Ammonia Based on Differential Optical Absorption Spectroscopy

Zhu Jin Sun Dongmei Chen Ling

(College of Automation and Electrical Engineering, Nanjing University of Technology,
Nanjing, Jiangsu 211816, China)

Abstract The method of differential optical absorption spectroscopy (DOAS) is applied to the retrieval of ammonia concentration. Genetic algorithm, wavelet transform and Kalman filtering are all studied to show the inversion accuracy of low-concentration ammonia based on the traditional DOAS algorithm. The results show that all the three algorithms have good denoise performance for ammonia absorption spectrum with low SNR. In the case of ammonia concentration lower than 7.6 mg/m^3 , the inversion accuracy for three improved algorithms is obviously improved compared with the traditional algorithm. Standard deviation and peak to peak value of the differential absorbance residuals based on Kalman filtering combining traditional polynomial fitting are 0.1349% and 0.6132% , respectively, which shows the best performance. The measurement error is within $\pm 0.3\%$.

Key words signal processing; differential optical absorption spectroscopy; wavelet transform; genetic algorithm; Kalman filtering

OCIS codes 300.6420; 070.4790; 120.4820

1 引 言

目前,火力发电行业是全国节能减排的重点之一,而氮氧化物的减排是重点监控对象。选择性催化还原(SCR)烟气脱硝技术是燃煤电厂氮氧化物减排应用最多的技术。其中脱硝后烟气中的 NH_3 逃逸是该过程控制的关键指标之一^[1]。 NH_3 浓度检测方法主要有电化学方法和光学方法^[2~4]。大部分

便携式仪器采用的是电化学方法,操作方便快捷,但使用寿命短,不能长时间用于高温、高尘和高湿的烟气连续在线监测;相比而言,由于光学法一般具有非接触式、快速和灵敏度高等特点,被广泛应用于工业过程的监测与监控以及工业排放的连续在线监测等,如差分吸收光谱法、可调谐二极管激光吸收光谱法等^[5~11]。由于脱硝后烟气中的 NH_3 浓度极低

收稿日期: 2012-08-23; 收到修改稿日期: 2012-09-11

基金项目: 江苏省博士后科研资助计划(1201012C)资助课题。

作者简介: 朱 靳(1989—),男,硕士研究生,主要从事测量与控制工程与烟气监测分析等方面的研究。

E-mail: zdh_027@163.com

导师简介: 孙冬梅(1975—),女,博士,副教授,主要从事测控技术和智能仪器等方面的研究。

E-mail: sundm75@163.com

(低于 7.6 mg/m^3), 再加上现场的粉尘浓度极高(光透率小于 10%) 等众多因素的存在, 用上述光学方法对 NH_3 浓度进行直接测量存在一定的难度。本文对差分吸收光谱(DOAS)法低浓度 NH_3 测量进行了实验室研究, 在传统多项式滤波的基础上, 分别研究遗传算法、小波滤波和卡尔曼滤波对 NH_3 吸收光谱信号的去噪能力, 从而提出具有较高反演精度的 NH_3 浓度反演算法。

2 差分吸收光谱法

差分吸收光谱技术是在 20 世纪 70 年代末由德国 Heidelberg 大学环境物理研究所的 Platt 等^[12] 提出的, 其基础是 Lambert-Beer 定律, 如图 1 所示, 数学模型可以表示为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-LC\sigma(\lambda)], \quad (1)$$

式中 $I_0(\lambda)$ 为光源发射的原始光强, $I(\lambda)$ 为穿过气体浓度为 C 、厚度为 L 后到达探测器的接收光强, $\sigma(\lambda)$ 为待测气体的吸收截面。

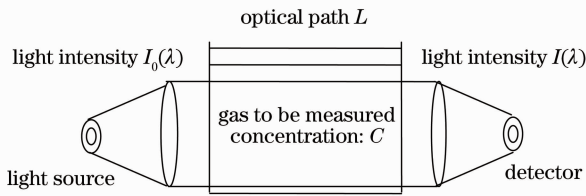


图 1 Lambert-Beer 定律示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Lambert-Beer law

(1)式可变换为

$$C = \frac{\ln[I_0(\lambda)/I(\lambda)]}{\sigma(\lambda)L}, \quad (2)$$

定义待测气体的吸光度为

$$D = \ln[I_0(\lambda)/I(\lambda)], \quad (3)$$

代入(2)式, 得到

$$C = \frac{D}{\sigma(\lambda)L}. \quad (4)$$

若已知光源的原始光强, 即没有任何气体吸收情况下探测器接收到的光强, 通常也称为参考光谱, 再获得穿过被测气体后的透射光强, 则根据(4)式可获得被测气体的浓度。

DOAS 方法是将仪器和光源对波长的依赖特性、烟尘颗粒物引起的 Mie 散射和气体分子引起的 Rayleigh 散射以及气体分子吸收本身的宽带特性归结为“宽带”部分, 而探测到的光谱中的“窄带”特性仅仅来源于气体分子的窄带吸收特性^[12~14]。因此, 将吸收截面分成两部分: 随波长快速变化的窄带吸收截面 σ'_i 和随波长缓慢变化的宽带吸收截面 σ_b ^[12],

即

$$\sigma_i = \sigma'_i + \sigma_b, \quad (5)$$

将(5)式代入(1)式, 经过低阶多项式滤波, 若 $I'_0(\lambda)$ 表示在没有任何差分吸收情况下的透射光强, 可以得到

$$I(\lambda) = I'_0(\lambda) \exp[-L \sum C_i \sigma'_i(\lambda)], \quad (6)$$

因此, 差分光学密度(也称为差分吸光度)定义为

$$D'(\lambda) = \ln \frac{I'_0(\lambda)}{I(\lambda)} = L \sum C_i \sigma'_i(\lambda), \quad (7)$$

式中 i 为气体的种类, 由(7)式可以看出, 差分光学密度 $D'(\lambda)$ 与差分吸收截面 $\sigma'_i(\lambda)$ 在一定浓度范围内是成线性关系的, 利用最小二乘法可求解出待测气体的浓度^[13,14]。

3 NH_3 浓度反演算法

以低浓度 NH_3 为研究对象, 在实验室进行 NH_3 浓度测量实验, 实验数据包含了光谱仪、光学系统和光源的噪声。根据实验数据将传统 DOAS 算法分别结合遗传算法、小波滤波和卡尔曼滤波法反演出 NH_3 浓度, 并对测量结果进行分析和比较。

3.1 小波滤波

3.1.1 小波变换理论

根据小波变换理论^[15,16], 对于任选函数 $f[t \in L^2(\mathbb{R})]$ 的连续小波变换为

$$W_f(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (8)$$

式中 a 为伸缩因子, b 为平移因子, ψ 为一个基小波或母小波, $\psi_{a,b}$ 为 ψ 经过伸缩和平移后得到的小波序列。

为了减小小波变换的系数冗余度, 将小波基函数 $\psi_{a,b} = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的 a, t 限定在一些离散的点上取值, 即可得到离散小波变换函数

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \psi(a_0^{-j}t - kb_0), \quad (9)$$

相应的离散小波变换系数可表示为

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}(t) dt = \langle f, \psi_{j,k} \rangle. \quad (10)$$

3.1.2 光谱信号小波去噪

对多项式滤波后的差分吸收截面和差分吸光度进行小波去噪, 再用去噪后的数据进行 NH_3 的浓度反演。

去噪的过程分为如下三个步骤:

1) 信号的小波分解。选择不同的小波函数会得

到不同的去噪效果。选取了 dbN, symN, coifN 三种小波进行 1~5 层分解计算,结果表明,3~5 层 symN 小波在本实验中去噪效果比其他两种小波更好,本文选用 sym5 小波,分解层数为 5 层。

2) 小波分解高频系数的阈值量化。阈值的选取也是去噪效果好坏的一个关键因素。实验中选取了 rigrsure, heursure, sqtwolog, minimaxi 四种阈值方式,结果表明: heursure, sqtwolog 两种阈值形式去噪效果比另外两种阈值形式更好,本文选取

heursure 阈值形式

3) 小波重构。根据小波分解的最底层低频系数和各层高频系数进行小波重构。

对多项式滤波后的差分吸收截面和差分吸光度进行小波去噪,再用去噪后的数据进行 NH₃ 的浓度反演。7.331 mg/m³ NH₃ 小波去噪前后的差分吸收截面和差分吸光度如图 2 所示。

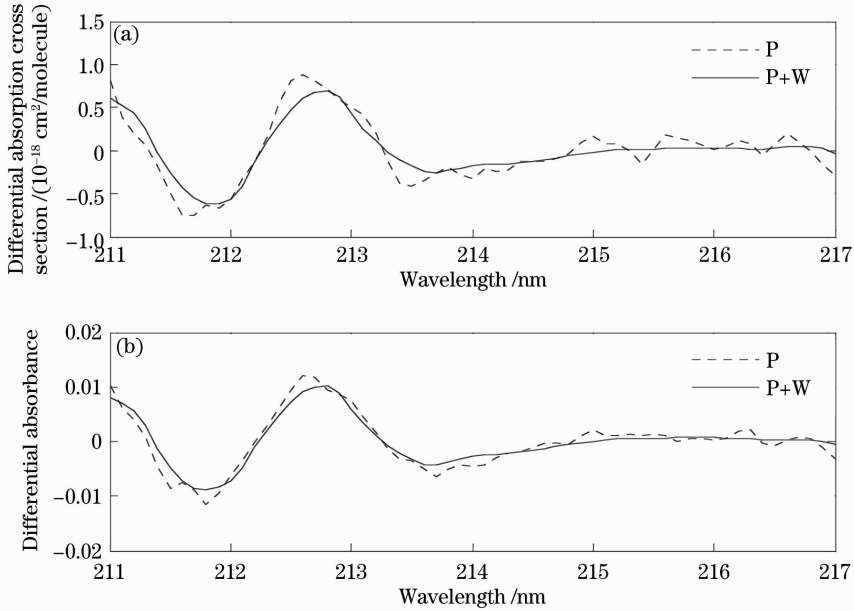


图 2 两种算法下的差分吸收截面曲线和差分吸光度曲线(NH₃: 7.331 mg/m³)。(a)差分吸收截面曲线;
(b)差分吸光度曲线

Fig. 2 Differential absorption cross section curve and differential absorbance curve based on the two algorithms (NH₃: 7.331 mg/m³). (a) Differential absorption cross section curve; (b) differential absorbance curve

图 2 中,P 表示仅采用多项式滤波,P+W 表示先对吸收截面和吸光度进行多项式平滑滤波,然后再对多项式滤波后的差分吸收截面和差分吸光度进行小波变换滤波。由图 2 可以看出,小波滤波效果明显,经过小波去噪后的差分吸收截面曲线和差分吸光度曲线变得更加平滑。

3.2 遗传算法

遗传算法包括选择、交叉和变异三个基本操作。它效法于自然选择的生物进化,从代表问题可能潜在解集的一个种群开始,根据问题域中个体的适应度大小挑选个体,按照适者生存和优胜劣汰的原理,逐代演化产生出越来越好的近似解^[17,18]。

遗传算法充分利用反演波段内所有离散波长点上的光谱数据,选取具有明显差分吸收的 211~217 nm 波段,每隔 0.1 nm 选取一组数据,可表示为

$$\begin{pmatrix} D'(\lambda_1) \\ D'(\lambda_2) \\ \vdots \\ D'(\lambda_n) \end{pmatrix} = L \begin{pmatrix} \sigma'(\lambda_1) \\ \sigma'(\lambda_2) \\ \vdots \\ \sigma'(\lambda_n) \end{pmatrix} C, \quad (11)$$

式中 $D'(\lambda) = \ln \frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)}$, 由实验测量得到, $\sigma'(\lambda)$ 可由实验室测量得到的吸收截面 $\sigma(\lambda)$ 通过多项式滤波得到,光程 L 为已知,各波长点上的差分吸光度 $D'(\lambda)$ 减去对应波长上差分吸收截面与光程和所要求的浓度之积 $L\sigma'(\lambda)C$ 的平方和除以波长点数,将其平方根作为目标函数,即

$$f = \sqrt{\sum_l [D'(\lambda_l) - L\sigma'(l)C]^2 / n}, \quad (12)$$

式中 l 为离散波长次序, n 为离散波长点数,可以看出,在一定的范围内,可以有一个近似最优解 C , 使

得目标函数取得最小值。此时的 C 就是要求的 NH_3 浓度。用遗传算法反演 7.331 mg/m^3 NH_3 时各代适应度函数值如图 3 所示。

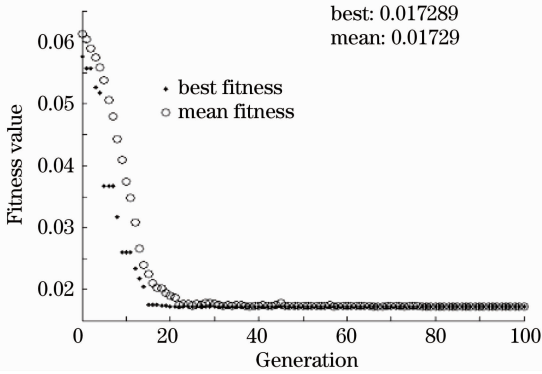


图 3 遗传算法反演 NH_3 浓度时适应度函数值的变化($\text{NH}_3: 7.331 \text{ mg/m}^3$)

Fig. 3 Changes of the fitness function value on the retrieval of ammonia concentration based on GA ($\text{NH}_3: 7.331 \text{ mg/m}^3$)

由图 3 可以看出,开始几代最佳适应度函数值和平均适应度函数值相差很大。20 代之后最佳适应度函数值和平均适应度函数值几乎相等。这表明此时目标函数取得近似最小值。最佳适应度函数值对应 C 的取值就是所要求的 NH_3 的浓度值。

3.3 卡尔曼滤波法

卡尔曼滤波是一种递归的估计,即只要获知上一时刻状态的估计值以及当前状态的观测值就可以计算出当前状态的估计值,因此不需要记录观测或者估计的历史信息。卡尔曼滤波器与大多数滤波器不同之处在于,它是一种纯粹的时域滤波器,它不需要像低通滤波器等频域滤波器那样,需要在频域设计再转换到时域实现。

状态方程和观察方程是卡尔曼滤波的两个基本方程^[19,20]。本文中状态方程为

$$X(k) = AX(k-1), \quad (13)$$

观测方程为

$$Y(k) = HX(k-1) + V(k), \quad (14)$$

式中 $X(k)$ 为 k 点的系统状态,本模型中为第 k 个波长点 NH_3 的浓度值。 A 为系统参数,表示下一个波长点 NH_3 浓度与上个波长点 NH_3 浓度的关系。本实验认为下一个波长点 NH_3 浓度与上个波长点 NH_3 浓度相等。(14)式中, $Y(k)$ 是 k 点的测量值,本模型中为 k 点波长处 NH_3 的差分吸光度。 H 为测量系统的参数,表示测量值 $Y(k)$ 和状态值 $X(k)$ 间的关系。 $V(k)$ 为测量噪声,基本呈白噪声状态。用卡尔曼滤波法反演 7.331 mg/m^3 NH_3 时各波长

点反演浓度值和卡尔曼增益如图 4 所示。

由图 4 可以看到,213.5 nm 波长后的反演浓度值和卡尔曼增益趋于稳定。

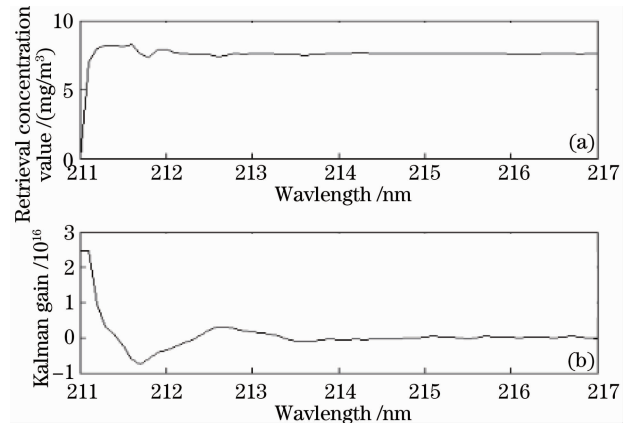


图 4 卡尔曼滤波法反演 7.331 mg/m^3 NH_3 的反演浓度值和卡尔曼增益的变化。(a)反演浓度值的变化; (b)卡尔曼增益的变化

Fig. 4 Changes of retrieval concentration value and Kalman gain on the retrieval of ammonia concentration based on Kalman filter. (a) Changes of retrieval concentration value; (b) changes of Kalman gain

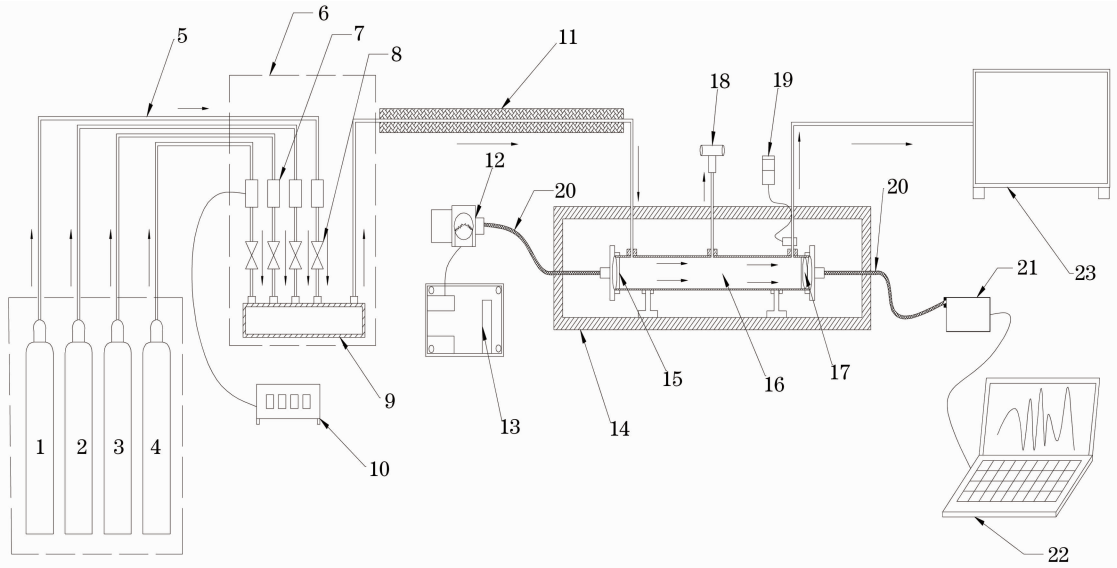
4 实验装置简介

DOAS 法烟气浓度测量试验装置如图 5 所示。整个试验装置分成气路和光路两部分。气路部分主要由气源、配气柜、测量池和废气回收池四部分组成。由钢瓶出来的高纯氮和标准气体经各自单独的管路通过质量流量控制器后进入混合管进行混合,流量可通过流量显示仪上的调节旋钮进行控制并显示。混合后的气体经 12 m 长的伴热管后进入测量池。在经过伴热管的过程中一方面可以进一步增加混合气体的均匀性;另一方面可以有足够的时间将被测气体加热至所需要的温度。测量池的内径为 28 mm,外径为 46 mm,有效长度为 0.5 m,测量池的两端用石英透镜进行密封。在测量池的出口设有 Pt100 热电阻对流过测量池的气体温度进行测量,同时在测量池的中部装有差压计对气体压力进行测量。测量池出来的气体最后进入废气回收池进行吸收。

光路部分由光源模块、光纤、准直聚焦系统、CCD 阵列背照式光谱仪和电脑组成。光谱仪选用的是海洋光谱仪,型号为 Maya2000-Pro,分辨率为 0.3 nm。光源模块是由氙灯和透镜组组成,其作用是将氙灯发射出来的光耦合进入光纤,氙灯的辐射光谱范围为 185~400 nm。光纤的出射光经双凸透

镜准直后变成平行光,穿过被测气体后经聚焦透镜聚焦进入光纤再进入到 CCD 阵列背照式光谱仪,光

谱仪将光信号变成电信号数字化以后通过 USB 通讯送入电脑进行光谱信号的采集和处理。



1: high-purity nitrogen; 2: SO₂ standard gas; 3: NO standard gas; 4: NO₂ standard gas;
5: gas pipeline; 6: gas distribution cabinet; 7: mass flow meter; 8: shut-off valve; 9: mixing pipe; 10: flow indicator;
11: heat-mixed pipe; 12: light source module; 13: light-source power supply; 14: high-temperature chamber; 15: collimating lens;
16: measuring cell; 17: focusing lens; 18: differential pressure meter; 19: temperature controller; 20: optical fiber
21: spectrometer; 22: PC; 23: exhaust gas absorption cell

图 5 差分吸收光谱法气体浓度测量实验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the experimental equipment of gas concentration measurement based on DOAS

该实验系统可以实现在高温流动状态下对 NH₃ 浓度进行测量,本次实验为常温实验。

0.733 mg/m³。用传统的多项式滤波算法分别结合遗传算法、小波去噪和卡尔曼滤波法反演 NH₃ 浓度,并对结果进行 3~4 阶多项式拟合,反演结果和各算法反演误差如表 1 和图 6 所示,其中 P 表示仅采用多项式滤波,P+W 表示多项式滤波结合小波变换,P+GA 表示多项式滤波结合遗传算法,P+K 表示多项式结合卡尔曼滤波。

5 实验结果与分析

利用气体分割器对标气浓度为 7.331 mg/m³ 的 NH₃ 进行等比例分割,对 3.666~7.331 mg/m³ 的 NH₃ 浓度反演进行了实验研究,浓度间隔为

表 1 不同算法反演 NH₃ 浓度值和反演误差

Table 1 Retrieval concentration value and retrieval error of ammonia based on different algorithms

Concentration of the standard gas /(mg/m ³)	P		P+GA		P+W		P+K	
	Retrieved concentration /(mg/m ³)	Error /%	Retrieved concentration /(mg/m ³)	Error /%	Retrieved concentration /(mg/m ³)	Error /%	Retrieved concentration /(mg/m ³)	Error /%
3.666	3.678	0.328	3.669	0.086	3.661	-0.115	3.668	0.056
4.399	4.361	-0.860	4.388	-0.239	4.409	0.238	4.398	-0.027
5.132	5.261	2.514	5.153	0.412	5.116	-0.318	5.143	0.217
5.865	5.694	-2.909	5.840	-0.427	5.879	0.244	5.857	-0.134
6.598	6.652	0.813	6.609	0.171	6.598	-0.005	6.600	0.035
7.331	7.305	-0.356	7.327	-0.051	7.343	0.167	7.333	0.026

由表 1 和图 6 可以看到,其他三种算法的反演精度明显比传统的 DOAS 算法即仅采用多项式滤波的反演精度高,误差均控制在±1%以内。相比于传统算法,上述三种算法中多项式滤波结合卡尔曼滤波反演精度最高,反演误差在±0.3%以内,在低

信噪比光谱信号处理中,表现出良好的去噪效果;其次是多项式滤波结合小波变换,反演误差在±0.4%以内;多项式滤波结合遗传算法的反演效果也很好,反演误差在±0.5%以内。

已知气体反演浓度 C 、光程 L 和差分吸收截面

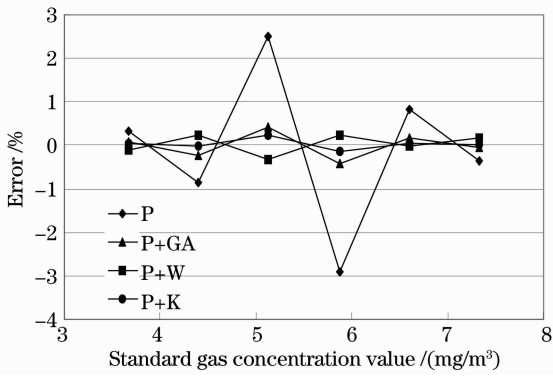


图 6 不同算法反演 NH₃ 浓度误差对比

Fig. 6 Error comparison of the retrieval of the ammonia concentration based on different algorithms

$\sigma'(\lambda)$, 可以计算出差分吸光截面 $D'(\lambda)$

$$D'(\lambda) = C\sigma'(\lambda)L, \quad (15)$$

由实验室测得的差分吸光度减去由公式(15)计算得

表 2 不同算法的差分吸光度残差的标准差和峰峰值(NH₃: 7.331 mg/m³)

Table 2 Standard deviation and peak to peak value of the differential absorbance residuals based on different algorithms (NH₃: 7.331 mg/m³)

Algorithms	P	P+GA	P+W	P+K
Standard deviation of the differential absorbance residuals /%	0.1355	0.1350	0.1435	0.1349
Peak to peak value of the differential absorbance residuals /%	0.6701	0.6666	0.6209	0.6132

由图 7 和表 2 可以看到, 四种算法下的差分吸光度残差变化趋势相同, 其中多项式滤波结合卡尔曼滤波得到的差分吸光度残差具有最小的方差和最小的峰峰值。

6 结 论

给出三种 NH₃ 浓度反演算法均优于传统 DOAS 算法, 其中多项式滤波结合卡尔曼滤波技术可以实现对超低浓度的 NH₃ 进行准确测量, 当浓度在 3.666~7.331 mg/m³ 范围内时, 其反演误差控制在 ±0.3% 以内, 并且其差分吸光度残差的标准差和峰峰值低于其他算法。可以看出, 多项式滤波结合卡尔曼滤波法相对于其他几种算法更适用于低浓度 NH₃ 的反演。

参 考 文 献

1 Environmental Protection Department, State Administration for Quality Supervision and Inspection and Quarantine. Thermal Power Plant Air Pollutant Emission Standards. GB1322-2011 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012-01-01
 环境保护部国家质量监督检验检疫总局. 火电厂大气污染物排放标准. GB13223-2011[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012-01-01
 2 Zheng Jianxu, Guan Yongchuan, Ran Huili *et al.*. Application

到的差分吸光度得到差分吸光度的残差, 各算法的吸光度残差如图 7 所示。

四种算法的差分吸光度残差的标准差和峰峰值列如表 2 所示。

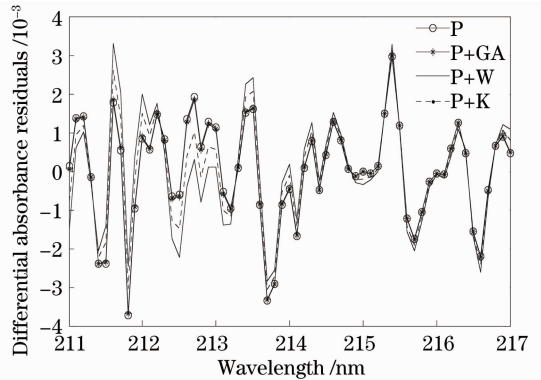


图 7 不同算法的差分吸光度残差(NH₃: 7.331 mg/m³)

Fig. 7 Differential absorbance residuals based on different algorithms(NH₃: 7.331 mg/m³)

and research progress of ammonia sensor [J]. *New Chemical Materials*, 2010, **38**(2): 6~9
 郑建旭, 管永川, 冉慧丽等. 氨气传感器的应用和研究进展[J]. *化工新型材料*, 2010, **38**(2): 6~9
 3 Zhang Chunxiao, Wang Fei, Li Ning *et al.*. Ammonia gas concentration and velocity measurement using tunable diode laser absorption spectroscopy and optical signal cross-correlation method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(10): 2597~2601
 张春晓, 王飞, 李宁等. 可调谐半导体激光吸收光谱技术光信号相关法氨气浓度流速同时测量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(10): 2597~2601
 4 Zhang Qian, Wang Liren, Yang Xianglong. Monitoring procedures of ammonia released from livestock farm [J]. *J. Agro-Environment Science*, 2007, **26**(s): 309~312
 张潜, 王立人, 杨祥龙等. 养殖场氨气检测方法研究现状[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(s): 309~312
 5 Jiang Cheng, Zhao Huijie, Li Na. Improved retrieval algorithm of trace gas from ground-based infrared ultraspectral data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0701002
 江澄, 赵慧洁, 李娜. 改进的地基红外超光谱数据痕量气体反演方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0701002
 6 Luo Dafeng, Yang Jianhua, Zhong Chonggui. Detection technology of methane gas concentration based on infrared absorption spectrum [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(2): 384~386
 罗达峰, 杨建华, 钟崇贵. 基于红外吸收光谱的瓦斯气体浓度检测技术[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(2): 384~386
 7 Gao Nan, Du Zhenhui, Qi Rubin *et al.*. Data preprocessing of broad-spectrum tunable-diode-laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0430004
 高楠, 杜振辉, 齐汝宾等. 宽谱可调谐二极管激光吸收光谱的数

- 据预处理研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(4): 0430004
- 8 Wu Fengcheng, Xie Pinhua, Li Ang *et al.*. Correction of the influence of multiple scattering on NO_2 emission flux during the pollutants source measurement by mobile differential optical absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1101003
吴丰成, 谢品华, 李 昂 等. 利用 O_4 测量去除车载差分吸收光谱测量污染源 NO_2 排放通量计算中多次散射的影响[J]. 光学学报, 2011, **31**(11): 1101003
- 9 Liu Bin, Sun Changku, Zhang Chi *et al.*. Concentration retrieving method of SO_2 using differential optical absorption spectroscopy based on statistics[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(1): 197~200
刘 斌, 孙长库, 张 弛 等. 基于统计量的差分吸收光谱烟气 SO_2 浓度反算方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(1): 197~200
- 10 Wu Jun, Wang Xianhua, Fang Yonghua *et al.*. Ability analysis of spatial heterodyne spectrometer in atmospheric CO_2 detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0101001
吴 军, 王先华, 方勇华 等. 空间外差光谱技术应用于大气二氧化碳探测的能力分析[J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0101001
- 11 Zhou Jiaqi, Lu Weijia, Sun Bangshan *et al.*. Optimization of hollow fiber as absorption cell for gas sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0222008
周佳琦, 陆维佳, 孙帮山 等. 空芯光纤气体传感气室的优化设计[J]. 光学学报, 2012, **32**(2): 0222008
- 12 U. Platt, D. Perner, H. Paetz. Simultaneous measurement of atmospheric CH_2O , O_3 and NO_2 by differential optical absorption [J]. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**(10): 6329~6335
- 13 H. Edner, P. Ragnarson, S. Svanberg. A multi-path differential optical absorption spectroscopy system for urban pollution monitoring[C]. *SPIE*, 1992, **1715**: 322~328
- 14 J. M. C. Plane, C. F. Nien. Differential optical absorption spectrometer for measuring atmospheric trace gases [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(3): 1867~1876
- 15 Zhang Defeng. Wavelet Analysis Based on Matlab[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011. 223~224
张德丰. Matlab小波分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011. 223~224
- 16 Li Bicheng, Luo Jianshu. Wavelet Analysis and Its Application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 9~26
李弼程, 罗建书. 小波分析及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. 9~26
- 17 Gong Chun, Wang Zhenglin. Proficient in Matlab Optimization Calculation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012. 313
龚 纯, 王正林. 精通 Matlab 最优化计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012. 313
- 18 Lei Yingjie. Matlab Genetic Algorithm Toolbox and Its Application[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005. 1~10
雷英杰. Matlab遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005. 1~10
- 19 Wan Jianwei, Wang Ling. Signal Processing Simulation Technology [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2008. 258
万建伟, 王 玲. 信号处理仿真技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2008. 258
- 20 Qin Yongyuan, Zhang Hongyue, Wang Shuhua. The Kalman Filter and Integrated Navigation Principle [M]. Northwestern Polytechnical University Press, 1998. 33~35
秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西北工业大学出版社, 1998. 33~35

栏目编辑: 李文喆