

# 多轴 DOAS 断层扫描技术重构工业排放空间分布

李素文 韦民红 戴海峰 王江涛

淮北师范大学物理与电子信息学院, 安徽 淮北 235000

**摘要** 针对工业烟囱排放污染气体空间分布难以实时获取的问题,开发了基于多轴差分吸收光谱(DOAS)断层扫描系统,结合重构算法,可形成可视化的工业气体烟羽垂直断面浓度的空间分布图。该方法是在烟羽两边分别放置一台定时多轴扫描 DOAS,同时在扇形光束射线几何模式下,对烟羽的同一垂直断面扫描。以精确反演的线积分浓度为投影向量,基于平滑基函数最小算法,重构烟羽空间分布,给出重构烟羽断面数值模拟图,并讨论断层重构装置的使用范围。将该系统应用到外场实验中,重构了电厂排放 NO<sub>2</sub> 烟羽空间分布。

**关键词** 大气光学;多轴扫描差分吸收光谱;断层;重构;工业排放;空间分布

中图分类号 O433.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0401003

## Reconstruction of Spatial Distributions of Industrial Emissions Based on Scanning Multi-Axis DOAS Tomography

Li Suwen Wei Minhong Dai Haifeng Wang Jiangtao

School of Physics and Electronic Information, Huaibei Normal University, Huaibei, Anhui 235000, China

**Abstract** The spatial distributions of industrial emissions are difficult to get to reconstruct emissions of industrial chimneys in real time. A method is developed to reconstruct spatial distributions of emissions of industrial chimneys based on timing scanning multi-axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS), combined with computed tomography. Visual spatial distribution of concentrations of industrial gas plume vertical section is formed in this paper. The scanning MAX-DOAS are placed on each side of industrial chimneys. The beam ray geometry configuration and line integral concentrations for projection are used to reconstruct spatial distribution of industrial emissions, based on algorithm of smooth basis function minimization(SBFM). The simulated distributions of the plume are given. The applied fields of reconstruction device are also discussed. Finally, this system is used to reconstruct emissions of NO<sub>2</sub> of power plant the in field campaign.

**Key words** atmosphere optics; scanning multi-axis differential optical absorption spectroscopy; tomography; reconstruction; industrial emissions; spatial distributions

**OCIS codes** 010.0280 ; 010.1120 ; 300.1030 ; 100.6950

### 1 引言

以太阳散射光为光源的被动差分吸收光谱(DOAS)技术作为一种光学遥测手段,因其高的灵敏性和大范围多种气体同时监测功能已经成为监测人类污染、火山释放、对流层、平流层化学成分的重要工具<sup>[1-2]</sup>。被动多轴扫描 DOAS(MAX-DOAS)系统可以多视角扫描测量区域,在每一个扫描方向收集痕量气体吸收谱,再利用反演算法获得痕量气体柱浓度<sup>[3-5]</sup>。在工业点源的下风口放置两台 MAX-DOAS 系统,结合重构算法,可以形成可视化的工业排放污染气体烟羽垂直断面浓度的空间分布图<sup>[6]</sup>。该方法不仅可以自动进行工业点源气体排放的常规分布监测,还可以进行释放源排放通量的估计。另外,重构数据还可以用来验证点源排放气体扩散模型。

断层技术和光学遥感技术有机结合可以获得大气污染气体的空间分布,数值模拟和外场实验均已证明

收稿日期:2014-10-10;收到修改稿日期:2014-11-10

基金项目:国家自然科学基金(41275027,41475017)、安徽高校省级自然科学研究重大项目(KJ2012ZD06)

作者简介:李素文(1968—),女,博士,教授,主要从事光学遥感监测技术方面的研究。E-mail: swli@chnu.edu.cn

该方法的可行性和有效性<sup>[7-11]</sup>。平滑基函数最小(SBFM)算法、代数重建算法、同时迭代重建算法等几种算法被提出用于精确重构测量结果,其中平滑基函数最小算法是非线性重构算法,该算法通过把浓度分布的非线性参数转化为一组连续的具有特殊参数的基函数,再利用全局的最优化算法来确定最佳拟合测量数据,能够很好地拟合全光程积分浓度,其特点是噪声小、重构结果唯一。本文利用两台 MAX-DOAS 断层扫描,结合 SBFM 算法,重构了工业烟囱排放 NO<sub>2</sub> 气体的空间分布。

## 2 MAX-DOAS 断层扫描系统

MAX-DOAS 断层扫描系统测量基本装置包括两台 MAX-DOAS,其构成结构详细介绍参见文献[12]。图 1 为 MAX-DOAS 断层扫描系统测量烟羽空间分布结构示意图,系统采用扇形光束射线扫描,结合适当的重构算法,可实现工业排放烟羽的空间分布的重构。1997 年 Todd 等<sup>[13]</sup>已数值模拟了断层重构的几何布局。数值模拟结果表明,两台 DOAS 仪器要相距适当的距离,以获取两个截然不同的烟羽投影。仪器相距的最大值应该是可以观测到烟羽两边干净的背景空气,这样能够掌握烟羽的扩散范围。烟羽断层重构的分辨率受限于在测量地点能够采用的几何结构。另外,在每次扫描时间内,测量投影角度数量所需时间要比烟羽移动时间慢。这样获得的光束投影数量是有限的,重构方程一般是病态的。因此要实现重构,一些前期假设是必须的。

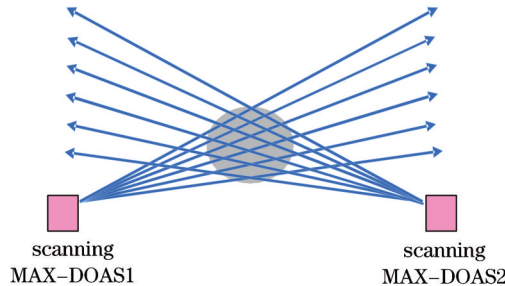


图 1 MAX-DOAS 断层扫描系统测量烟羽示意图

Fig.1 Schematic view of scanning MAX-DOAS tomography system for the gas plume

重构烟羽空间分布的主要限制是有限数量的投影。因为要保障系统的一个扫描周期快于烟羽移动,这意味着不是所有的烟羽形状都能够正确重构,而是只有在仪器要能观测到烟羽的整体特征时才能重构。如果烟羽在水平或者垂直断面上很窄,将不能正确重构烟羽形状。在图 1 中,若采用更多的测量设备将增加获得的烟羽投影数量,这样可以获得更加精确的结果,也将能够正确重构水平方向很窄的或者有小的水平分支的烟羽的空间分布。

## 3 重构算法和数值模拟

在大气中痕量气体的分布通常描述为连续的浓度分布  $c(r)$ ,假设浓度分布是已知的,DOAS<sup>[14-16]</sup>系统沿测量光路斜柱密度表达式为

$$d_i = \int dr c(r), i = 1, 2, \dots \quad (1)$$

如果有  $m$  束光,则可得到由  $m$  个测量数据  $d_1 \sim d_m$  组成的数据矢量  $d$ ,  $n$  个参数  $s_1 \sim s_n$  描述状态模型的浓度分布,用矢量  $s$  表示,

$$d = (d_1, d_2, \dots, d_m)^T \in D, \quad (2)$$

$$s = (s_1, s_2, \dots, s_n)^T \in S, \quad (3)$$

式中  $D$  称为数据空间,  $S$  称为状态空间,一个离散的状态模型能通过  $n$  个基函数 ( $b_j, j \in \{1, \dots, n\}$ )。因此模型的浓度分布  $c(s, r)$  可表示为基函数  $b_j(r)$  和状态矢量  $s_j$  的线性组合,即

$$c(s, r) = \sum s_j b_j(r) = s \times b(r). \quad (4)$$

基函数必须是线性无关的。那么对于每一个连续浓度分布  $c(r)$ ,有唯一的状态矢量  $s$  使  $\|c(r) - s \times b(r)\|$  最小。

进行断层重构的第一步是确定一个要计算浓度分布区域,在这个平面里面进行测量。由于感兴趣是烟羽,应选择一个包括烟羽的区域。通过从扫描器方向沿烟羽的边沿划线找到烟羽的边界,如图2所示。如果选择太窄的区域,重构将不能再现测量值。针对 DOAS 断层扫描系统固有的大尺度、少投影、光路扇形几何模式的特点,选用平滑基函数最小算法,该算法能够很好地拟合全光程积分浓度,并且噪声小、重构结果唯一。为了验证该重构算法,数值模拟了一个污染物烟羽断面空间分布图,模拟结果如图3所示,烟羽位于中间位置时,误差最小。

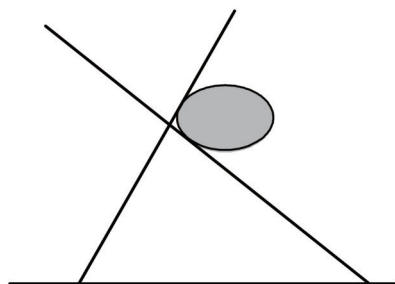


图2 烟羽扫描几何图

Fig.2 Scanning geometrical view of the plume

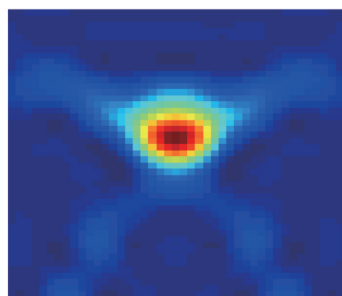


图3 数值模拟烟羽分布图

Fig.3 Simulated distribution of the plume

### 4 实验结果

在一个燃煤电厂进行外场实验,该电厂位于淮北市东南部(经度:116.80E,纬度:33.90N)。利用 MAX-DOAS 扫描系统在固定位置测量。其中,MAX-DOAS 断层扫描系统利用海洋 S2000 光谱仪,波段范围为 280~427 nm,光谱分辨率为 0.6 nm,时间分辨率为 1 s。借助计算机控制步进电机,望远镜扫描范围在 180°。两台光谱仪在烟羽下方同时从不同视场方向每隔 1° 收集光谱。从两台 MAX-DOAS 扫描系统获得信息用来重构烟羽二维断面信息。两台 MAX-DOAS 仪器分别位于烟羽的下风向,烟囱两边 319、221 m 处,烟囱高度为 212 m,测量烟羽位置如图4所示。收集太阳光使用的望远镜的视场角为 1°,烟羽测量空间分辨率约为 8 m,仪器扫描烟羽的同一个垂直断面,与烟羽扩散方向正交。通过设置光谱采集程序,定时设定两台仪器连续同时自动采集烟羽吸收光谱。

NO<sub>2</sub> 柱浓度反演波段为 352~380 nm,分辨率为 0.6 nm,图5为 NO<sub>2</sub> 拟合谱图。图5中,NO<sub>2</sub> 的斜柱浓度是 2.64×10<sup>17</sup> mol/cm<sup>2</sup>。基于拟合残差<sup>[7]</sup>,NO<sub>2</sub> 柱密度的探测极限约为 1.58×10<sup>16</sup> mol/cm<sup>2</sup>。选择相对稳定的气象条件下,每隔 1° 采集一条谱,一个扫描循环大约需要 5~10 min。基于测量数据,重构电厂排放的 NO<sub>2</sub> 的空间分布,图6和图7分别为重构烟羽示例和两台 MAX-DOAS 测量的 NO<sub>2</sub> 斜柱浓度。

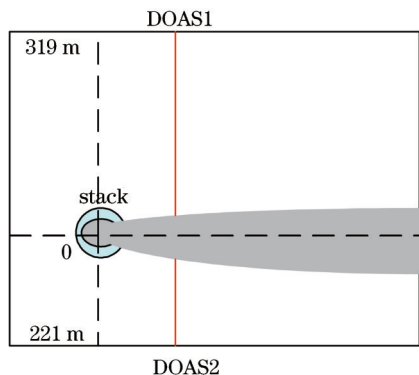


图4 测量烟羽位置图

Fig.4 Measurement site of the plume

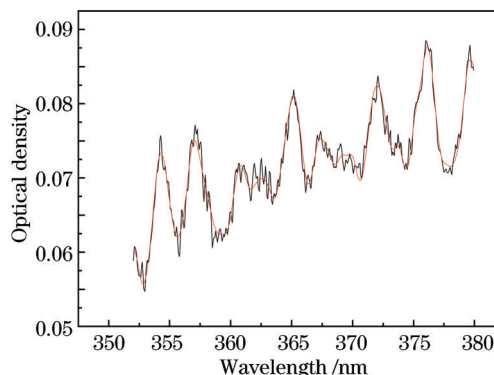


图5 NO<sub>2</sub> 拟合谱图

Fig.5 Fitting spectrum of NO<sub>2</sub>

### 5 结 论

研究了结合两台 MAX-DOAS 获取数据,利用断层重构算法,重构气体烟羽垂直断面气体浓度分布的方

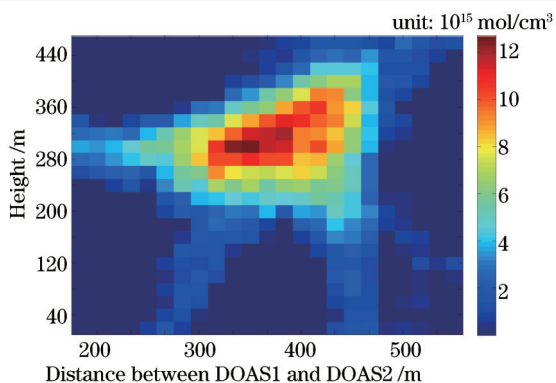


图6 重构的烟羽示例

Fig.6 Reconstruction of the plume example

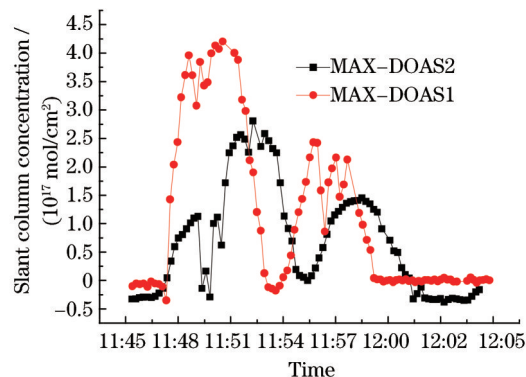


图7 系统获得NO<sub>2</sub>斜柱浓度

Fig.7 Slant column concentration of the measured data of NO<sub>2</sub>

法。模拟和外场实验结果表明,该技术能够重构单个、高架点源排放气体烟羽在一个断面的二维浓度分布。讨论了断层重构的条件和装置的局限性,并把该系统应用到外场实验中,重构了电厂排放NO<sub>2</sub>烟羽的空间分布。

### 参 考 文 献

- 1 G Mejia, J Manuel, S C Isakina, *et al.*. Development of a passive DOAS system to retrieve atmospheric pollution columns in the 200 to 355 nm region [J]. Iranian Journal of Environmental Health Sciences & Engineering, 2013, 10(8): 1-9.
- 2 Wang Yang, Li Ang, Xie Pinhua, *et al.*. Measuring tropospheric vertical distribution and vertical column density of NO<sub>2</sub> by multi-axis differential optical absorption spectroscopy [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(20): 200705.  
王 杨, 李 昂, 谢品华, 等. 多轴差分吸收光谱技术测量NO<sub>2</sub>对流层垂直分布及垂直柱浓度[J]. 物理学报, 2013, 62(20): 200705.
- 3 X Li, T Brauers, M Shao, *et al.*. MAX-DOAS measurements in southern China: retrieval of aerosol extinctions and validation using ground-based *in-situ* data [J]. Atmos Chem Phys, 2010, 10(5): 2079-2089.
- 4 Liu Jin, Si Fuqi, Zhou Haijin, *et al.*. Measurement of atmospheric water vapor column density passive differential optical absorption spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0801002.  
刘 进, 司福祺, 周海金, 等. 被动差分吸收光谱技术测量大气中水汽垂直柱浓度[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0801002.
- 5 I Pundt, K U Mettendorf. Multibeam long-path differential optical absorption spectroscopy instrument: a device for simultaneous measurements along multiple light paths [J]. Appl Opt, 2005, 44(23): 4985-4994.
- 6 M Johansson, B Galle, C Rivera, *et al.*. Tomographic reconstruction of gas plumes using scanning DOAS [J]. Bulletin of Volcanology, 2009, 71(10): 1169-1178.
- 7 E Frins, N Bobrowski, U Platt, *et al.*. Tomographic multi-axis differential optical absorption spectroscopy observations of Sun-illuminated targets: a technique providing well-defined absorption paths in the boundary layer [J]. Appl Opt, 2006, 45(24): 6227-6240.
- 8 D Pöhler, H Andreas, U Platt. Determination of continuous trace gas distribution maps for e.g. NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> and SO<sub>2</sub> in a city using tomographic LP-DOAS measurements [J]. Geophysical Research, 2011, 13: 11611.
- 9 M G Yost, A J Gadgil, A C Drescher, *et al.*. Imaging indoor trace gas concentrations with computed tomography: experimental results with a remote sensing FTIR system [J]. Am Ind Hyg Assoc J, 1994, 55(2): 395-402.
- 10 M L Fischer, P N Price, T L Thatcher, *et al.*. Rapid measurements and mapping of tracer gas concentrations in a large indoor space [J]. Atmos Environ, 2001, 35(16): 2837-2844.
- 11 P N Price, M L Fischer, A J Gadgil. An algorithm for real-time tomography of gas concentrations, using prior information about spatial derivatives [J]. Atmos Environ, 2001, 35(16): 2827-2835.
- 12 Li Ang, Xie Pinhua, Liu Wenqing, *et al.*. Monitoring of total emission volume from pollution sources based on passive differential optical absorption spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(9): 1537-1542.  
李 昂, 谢品华, 刘文清, 等. 被动差分光学吸收光谱法监测污染源排放总量研究 [J]. 光学学报, 2007, 27(9): 1537-1542.
- 13 L A Todd, R Bhattacharyya. Tomographic reconstruction of air pollutants: evaluation of measurement geometries [J]. Appl Opt,

- 1997, 36(30): 7678-7688.
- 14 Zheng Nina, Xie Pinhua, Ling Liuyi, *et al.*. Detection of atmospheric SO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> optical fiber coupling long-path differential optical absorption spectroscopy system with UV light emitting diodes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0301007.  
郑尼娜, 谢品华, 凌六一, 等. 紫外 LED 光纤耦合长程 DOAS 系统监测大气 SO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 的研究 [J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0301007.
- 15 Zhu Jin, Sun Dongmei, Chen Ling. Study of concentration retrieving algorithm for ammonia based on differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0230004.  
朱 靳, 孙冬梅, 陈 玲, 等. 基于差分吸收光谱技术的 NH<sub>3</sub> 浓度反演算法研究 [J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0230004.
- 16 Si Fuqi, Jiang Yu, Jiang Qingwu, *et al.*. Design of fore optical system in space-borne differential optical absorption spectrometer for atmospheric trace gas monitoring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0322002.  
司福祺, 江 宇, 江庆五, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪前置光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0322002.
- 17 J Stutz, U Platt. Numerical analysis and estimation of the statistical error of differential optical absorption spectroscopy measurements with least-squares methods [J]. *Appl Opt*, 1996, 35(30): 6041-6053.

栏目编辑: 史 敏