

文章编号: 0253-2239(2009)09-2458-05

超光谱成像差分吸收光谱系统烟羽测量研究

司福祺 谢品华 刘宇 窦科 徐晋 刘文斌 刘文清

(中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 研究一种测量污染气体(如 SO_2 , NO_2) 二维分布的光学遥感方法, 即采用超光谱成像差分吸收光谱(DOAS)系统在扫描转台上对污染源排放烟羽进行扫描测量, 利用被动差分吸收光谱处理方法对采集到太阳散射光谱进行处理获得柱浓度, 结合转台扫描, 最终实现污染气体的二维成像解析。着重描述了基于成像差分吸收光谱仪、紫外镜头及扫描转台的超光谱成像差分吸收系统, 并利用该系统对热电厂烟羽排放进行了外场测量, 该技术为污染源实时成像测量提供了一种简便的方法。

关键词 测量; 被动差分吸收光谱; 成像光谱仪; 烟羽; 二维成像

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092909.2458

Determination of Plume by Hyperspectral Imaging Differential Optical Absorption Spectroscopy

Si Fuqi Xie Pinhua Liu Yu Dou Ke Xu Jin Liu Wenbing Liu Wenqing

(Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract An optical remote sensing method for measuring the air pollutants (such as SO_2 , NO_2) emitted from sources is studied by use of a hyperspectral imaging differential optical absorption spectroscopy (DOAS) instrument to scan the plume from pollution source on a scan table. The column density of air pollutant is retrieved from processing of the scattered sun light spectra collected by the instrument by means of the spectral analysis method of passive DOAS. Combing with the scan table during the measurement, the map of trace gases can be estimated. The hyperspectral imaging differential optical absorption spectroscopy system consisted of imaging DOAS spectrometer, UV lens and scan table is described in detail, which was carried to scan the plume from a fossil power plant in a field measurement. This technique provides a simple and quick method for imaging the air pollutants.

Key words measurement; passive differential optical absorption spectroscopy; imaging spectrometer; plume; imaging of two dimension

1 引言

大气环境监测领域, 调查大气污染的原因、程度及结果是大气环境研究、治理的基础, 这些调查的目的为监测各种污染源(自然界、人为)及这样污染源的分布情况。在污染源监测中, 污染气体的二维成像测量对评价、确定工厂泄漏或鉴别突发事件的发生地点的过程中是非常有用的。目前, 污染源气体实时成像测量已经通过气体一相关光谱和傅里叶变换光谱在红外光谱区域实现^[1]。近年来, 德国海德

堡大学的研究人员对基于被动差分吸收光谱(DOAS)原理的光学遥感技术监测污染气体进行了研究, 成功的实现了对可见烟羽, 如工厂烟囱、火山排放等的二维成像解析^[2,3], 实验中, 海德堡大学研究人员利用基于面阵 CCD 的光谱采集系统, 结合反射镜扫描装置及单片镜片实现对污染气体的二维测量。在这里, 介绍自行研发的利用扫描转台、紫外镜头及面阵 CCD 的超光谱成像 DOAS 系统实现对污染源气体的成像测量, 2 种系统相比, 主要为采用的

收稿日期: 2008-10-31; 收到修改稿日期: 2009-01-07

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z109)和国家自然科学基金(40805015)资助课题。

作者简介: 司福祺(1977—), 男, 助理研究员, 主要从事光谱法测量污染物方面的研究。E-mail: sifuqi@aiofm.ac.cn

扫描装置不同,采用扫描转台代替的扫描镜,使得扫描过程及扫描对象更加清楚;二是紫外镜头的采用,相比单片镜片在成像质量上有很程度的提高。

采用紫外、可见波段散射光、基于 DOAS 原理的大气痕量气体解析方法通常被称为“被动”DOAS 技术^[4],这种命名是相对于采用人工光源(如氙灯等)的“主动”DOAS 技术而言的^[5-9]。近些年,随着全球臭氧测量系统^[10](GOME)、大气探测扫描差分吸收光谱系统^[11,12](SCIAMACHY)以及天底观测光谱仪全球 O₃ 监测系统^[13,14](OMI)等星载大气成分探测系统的发射、运行成功,被动 DOAS 技术取得了长足的发展。

司福祺等^[16],介绍了以基于成像光谱仪、“推扫”工作方式的超光谱 DOAS 系统的构成,反演算法,并报道了实验室样品池测量与城市道路上空 NO₂ 气体等的测量实验。本文将在前面工作的基础上,改进测量装置,实现对电厂烟羽中 NO₂, SO₂ 的成像测量。以期在扩展该技术应用领域的同时,为污染源气体可视化测量提供可靠的光学遥感^[15]测量手段。

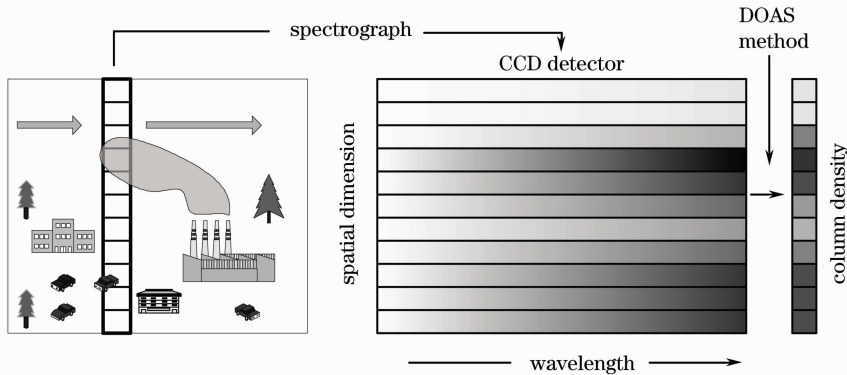


图 1 超光谱成像测量原理

Fig. 1 Hyperspectral imaging measurement method

2.2 DOAS 反演算法

DOAS 技术基于痕量气体的“指纹”吸收原理反演痕量气体浓度,操作中将大气光学厚度分为“快变化”与“慢变化”部分,通过多项式拟合等去除由于瑞利散射、米散射等造成的“慢变化”部分,并将余下的由痕量气体造成“快变化”部分与标准截面进行拟合,得到痕量气体浓度。

DOAS 系统接收到的光谱信号,根据朗伯-比尔(Lambert-beer)吸收定律,有

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left[-\sum_i \sigma_i(\lambda) f_{\text{SCD}_i}\right] g(\lambda), \quad (1)$$

其中 $I(\lambda)$ 为经过大气吸收后的接收光强, $\sigma_i(\lambda)$ 是第 i 种气体分子的吸收截面, f_{SCD_i} 是第 i 种气体分

2 测量原理

2.1 超光谱成像

司福祺等^[16]已经对测量原理等进行了较为详细的叙述,在这里进行简单的概述。一般物体成像包含二维空间信息,而超光谱成像在包含空间信息的基础上同时记录了像元随波长变化而变化的辐射强度信息,像元具有三维的信息,即空间维 x, y 与光谱维 λ 。

目前通常采用二种技术获取超光谱成像,因获取三维信息的时间序列不同而有所区别。基于线阵探测器的“摆扫”方式一次只能获取单个空间像元的信息,剩下的二维信息均需要扫描来获取,这种工作方式的时间分辨率较低;利用面阵探测器的“推扫”方式,一次可将一个空间方向成像,如图 1 所示的垂直方向,只需要对剩下的一维方向进行扫描(图中的水平方向)就可以完成超光谱成像测量,大大减少了总的测量时间。

子的斜柱浓度, $g(\lambda)$ 代表大气中的瑞利散射、米散射以及光学系统等造成的光强衰减。

DOAS 光谱探测技术核心是采用“差分”的思想。将痕量气体分子的吸收截面变为随波长作慢变化的部分 $\sigma_b(\lambda)$ 和快变化部分 $\sigma'_i(\lambda)$

$$\sigma_i(\lambda) = \sigma_b(\lambda) + \sigma'_i(\lambda), \quad (2)$$

因此(1)式可以表示为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left\{-\sum [\sigma'_i(\lambda) f_{\text{SCD}_i} + \sigma_b(\lambda) f_{\text{SCD}_i}]\right\} g(\lambda), \quad (3)$$

定义变量 $I'_0(\lambda)$ 表示接收光强中的慢变化部分

$$I'_0(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left\{-\sum [\sigma_{i,b}(\lambda) f_{\text{SCD}_i}]\right\} g(\lambda), \quad (4)$$

那么,差分光学厚度 D' (快变的光学厚度)

$$D' = \ln[I'_o(\lambda)/I(\lambda)] = - \sum [\sigma'_i(\lambda)f_{\text{scd}i}], \tag{5}$$

通过数字滤波去除随波长作慢变化的宽带光谱结构,保留光谱中的快变化部分,并与气体分子的标准参考光谱进行非线性最小二乘法拟合,从而得到各种气体的斜柱浓度(即污染气体沿光程的积分浓度)。

在被动 DOAS 技术中,采用太阳散射光作为光源,需对太阳辐射的特征结构、大气效应等进行处理,以获取准确的污染气体斜柱浓度。被动 DOAS 技术中主要考虑的是太阳光夫琅禾费结构与大气的 Ring 效应,在这里,采用用 Fish^[17] 推荐的方法进行处理。

3 实验系统

超光谱成像 DOAS 烟羽系统结构如图 2 所示,系统由 C-T 结构的光谱仪、面阵探测器、紫外镜头、扫描转台及计算机等组成。相比前一系统^[16],在这里采用扫描转台代替之前的扫描镜,使得扫描过程及扫描对象更加清楚;同时,将可见镜头升级到现在自行设计的具有像差校正功能的紫外镜头,使 SO₂ 的监测成为可能。太阳散射光被紫外镜头接收,在镜头内完成汇聚、像差校正后成像于入射狭缝上,后经过入射狭缝进入光谱仪中,最终成像在面阵 CCD 上(512 pixel×2048 pixel),完成光信号到电信号转换及数字化后传输到计算机中,同时该计算机具有控制扫描、改变积分时间等功能。

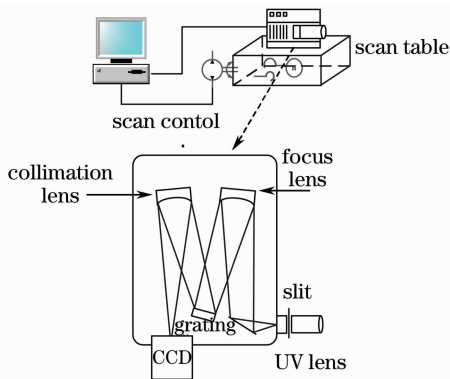


图 2 超光谱成像 DOAS 烟羽监测系统结构示意图

Fig. 2 Instrument for measuring plume by hyperspectral imaging DOAS system

为了实现对紫外光谱的收集、汇聚,同时完成各种像差的校正工作,系统采用不同材料的正负透镜组(为了加工方便,正透镜为氟化钙材料)校正球差、

色差,同时结合光阑完成对彗差,场曲等的校正工作。图 3 为系统设计的紫外镜头光学结构图,整个系统总长度为 35.66273 mm。

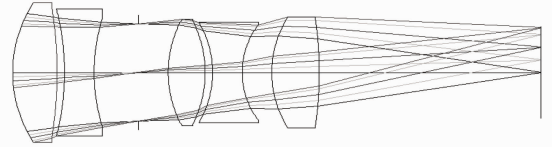


图 3 紫外镜头光学结构图

Fig. 3 Optical frame for UV lens

图 4 为紫外镜头系统的传递函数,通过该光学传递函数可以发现,系统设计的镜头具有很好的分辨率和明锐度,满足地基紫外系统的需求。

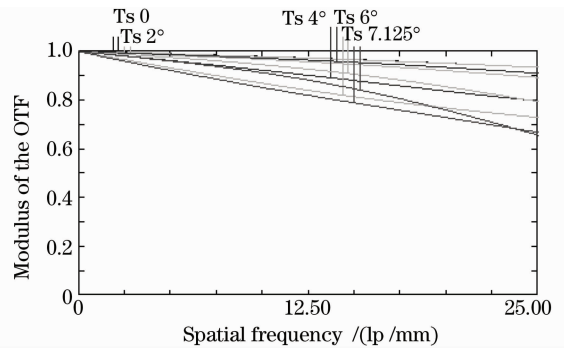


图 4 紫外镜头的传递函数

Fig. 4 UV lens transfer function

紫外镜头视场角为 15°,系统垂直方向为 512 pixel,对应最小垂直分辨率为 0.03°,使用 10 个像素平均以增加信噪比,因此,仪器垂直分辨率为 0.3°;而仪器的水平分辨率由扫描电机的步距决定,步距为 1.8°。

4 结果与讨论

2008 年 3 月 25 日到 3 月 27 日,超光谱成像 DOAS 系统对淮南洛河电厂烟囱所排烟羽进行了监

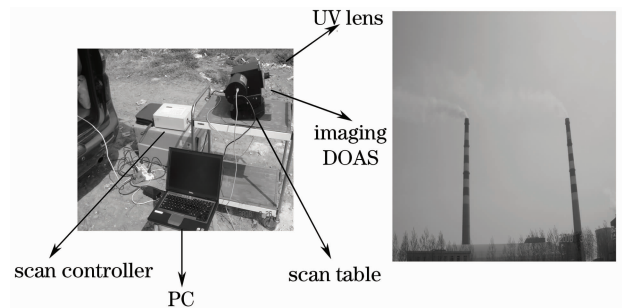


图 5 超光谱成像 DOAS 烟羽监测系统组成及所测烟羽图片

Fig. 5 Photos of hyperspectral imaging DOAS system and plume

测。系统及烟羽照片如图 5 所示。

实验中,仪器位于淮河大堤的缓坡上,测距机测定系统距烟囱 395 m,烟囱顶端 447 m,经计算烟囱到仪器所在平面约 200 m;仪器测量仰角为 45° ,测量范围为 167 m,如图 6 所示。

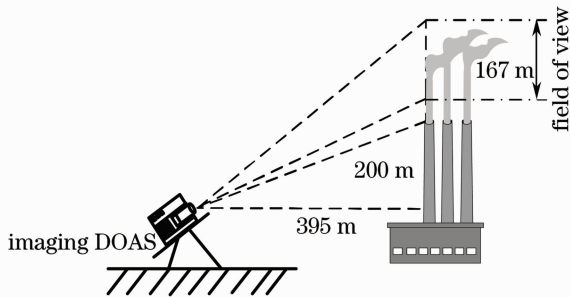


图 6 超光谱成像 DOAS 测量区域示意图

Fig. 6 Measure scale of hyperspectral imaging DOAS system

3月25日,首先对烟羽中 NO_2 进行测量,解析波段为 $400\sim 415\text{ nm}$,积分时间 210 ms,单次测量,并采用最右侧的测量谱作为参考光谱,去除太阳夫朗禾费线的影响。实验中,对应的分辨率为 $3.3\text{ m}\times 20\text{ m}$ (垂直 \times 水平),由于转台电机的限制,系统得到为不连续的二维图,这里系统用前一次的测量结果弥补二次测量间的空缺使图像完整。系统共进行 20 次扫描,因此水平测量距离为 400 m。

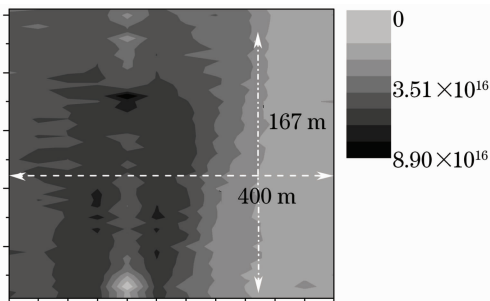


图 7 超光谱成像 DOAS 系统烟羽 NO_2 监测结果

Fig. 7 Visualization of the NO_2 plume of power plant

图 7 为 NO_2 的监测结果,由图 6 可知,系统监测的为烟囱排烟口 28 m 上方的情形。系统位于烟囱的北面,当时风向为北,从图 6 可以看出,烟羽没有向东或向西的扩散趋势,与风向吻合。图上浓度最高的区域为烟囱排烟的重叠区域 $8.87\times 10^{16}\text{ molecule/cm}^2$,对应高度为 3.3 m,则相应的 NO_2 平均混合率为 20.5 mg/m^3 ,而中国规定^[18]的允许排放浓度为 650 mg/m^3 ,监测结果远低于国家标准。一方面因为系统测量区域为烟囱上方 28 m,高浓度的烟羽在空气中已经进行了稀释;另一方面

也说明我国在治理火电厂排污方面所做的努力已有成效。同时可估算出烟羽的高度约为 158 m,这对研究烟羽排放上升规律,进而确定污染物地面浓度分布具有重要意义。

3月26日,系统在相同位置对 SO_2 进行测量,解析波段为 $315\sim 325\text{ nm}$,积分时间 2 s,单次测量,系统进行 8 次扫描,水平测量距离为 160 m。

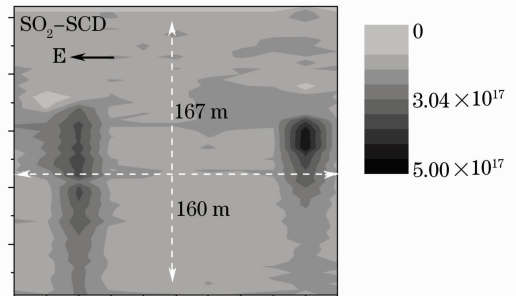


图 8 超光谱成像 DOAS 系统烟羽 SO_2 监测结果

Fig. 8 Visualization of the SO_2 plume of power plant

图 8 为 SO_2 的监测结果,系统位于烟囱的北面,当时风向为西,从图上可以看出,烟羽有向东扩散趋势,与风向吻合,同时可估算出烟羽的高度约为 143 m。图上浓度最高的区域 $4.8\times 10^{17}\text{ molecule/cm}^2$,对应高度为 3.3 m,则相应的 SO_2 平均混合率为 154 mg/m^3 ,而中国规定^[18]的允许排放浓度为 2100 mg/m^3 。

5 结 论

本文介绍了基于成像光谱仪的超光谱成像 DOAS 系统的原理及构成,采用紫外镜头的超光谱成像 DOAS 系统结合扫描转台实现了对电厂烟羽中 NO_2 和 SO_2 的二维成像测量,通过实验验证了该系统对污染气体的二维成像解析功能。通过本研究,促进了超光谱被动 DOAS 系统的发展,为污染源环境监测提供实时、有效的光学遥感方法。

同时,超光谱成像 DOAS 系统在遥感测量领域有着较为广泛的应用,如工厂、设备泄漏的测量;烟羽的扩散和传播的复杂结构的研究;火山,地热装置,森林火灾或煤矿等释放出的痕量气体的烟羽的测量;在已知风廓线的情况下,点源、面源污染气体排放通量的精确解析;机载、星载遥感测量等。

参 考 文 献

- 1 J. Sandsten, P. Weibring, H. Edner *et al.* Real-time gas-correlation imaging employing thermal background radiation[J]. *Opt. Express*, 2000, 6(4): 92~103
- 2 L. Falko, H. Gerd, P. Ulrich. Ground-based imaging

- differential optical absorption spectroscopy of atmospheric gases [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(24): 4711~4717
- 3 N. Bobrowski, G. Honninger, F. Lohberger *et al.*. IDOAS: A new monitoring technique to study the 2D distribution of volcanic gas emissions [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2006, **150**(4): 329~338
- 4 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
- 5 Peng Fumin, Xie Pinhua, Zhang Yinghua *et al.*. Effect of spectra resolution on measurement of trace gases in atmosphere by differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1643~1648
彭夫敏, 谢品华, 张英华 等. 分辨率对大气中痕量污染气体的 DOAS 测量性能影响研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1643~1648
- 6 Zhou Bin, Liu Wenqing, Qi Feng *et al.*. Error analysis in differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 957~961
周 斌, 刘文清, 齐峰 等. 差分吸收光谱法测量大气污染的测量误差分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 957~961
- 7 Y. Yoshii, H. Kuze, N. Takeuchi. Long-path measurement of atmospheric NO₂ with an obstruction flashlight and a charge-coupled-device spectrometer [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(21): 4362~4368
- 8 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
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
- 9 Shen Yi, Zhou Bin, Wang Shansha *et al.*. Measurement of NO₂ in cigarette main smoke by differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1934~1937
沈 轶, 周 斌, 王珊珊 等. 差分光学吸收光谱法研究卷烟主流烟气 NO₂ [J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1934~1937
- 10 I. B. Kononov, M. Beekmann R, J. P. Vautard *et al.*. Comparison and evaluation of modelled and GOME measurement derived tropospheric NO₂ columns over Western and Eastern Europe [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2005, **5**(1): 169~190
- 11 H. Bovensmann, J. P. Burrows, M. Buchwitz *et al.*. SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1999, **56**(2): 127~150
- 12 J. Skupin, S. Noël, M. W. Wuttke *et al.*. SCIAMACHY solar irradiance observation in the spectral range from 240 to 2380 nm [J]. *Adv. Space Res.*, 2005, **35**: 370~375
- 13 J. K. Louisa, J. L. Roland, J. R. John *et al.*. Comparison of OMI and ground-based in situ and MAX-DOAS measurements of tropospheric nitrogen dioxide in an urban area [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**: D16S39
- 14 R. Dirksen, M. Dobber, R. Voors *et al.*. Prelaunch characterization of the ozone monitoring instrument transfer function in the spectral domain [J]. *Appl. Optics*, 2006, **45**(17): 3972~3981
- 15 Wang Shaolin, Xie Jun, Cao Kaifa *et al.*. Monitoring O₃ in atmosphere by Raman-differential absorption method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 739~743
汪少林, 谢 军, 曹开法等. 拉曼差分吸收探测大气中的臭氧 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 739~743
- 16 Si Fuqi, Xie Pinhua, Klaus-Peter Heue *et al.*. Hyperspectral imaging differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, **57**: 6018~6023
司福祺, 谢品华, Klaus-Peter Heue 等. 超光谱成像差分吸收光谱技术研究 [J]. *物理学报*, **57**: 6018~6023
- 17 S. Solomon, A. L. Schmeltekopf. On the interpretation of zenith sky absorption measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**: 8311~8319
- 18 Ministry of Environmental Protection of The People's Republic of China. GB13223-2003 Emission Standard of Air Pollutants for fossil power plants [S]. Beijing: Standards Press of China, 2003. 214
中华人民共和国环境保护部. GB13223-2003 火电厂大气污染物排放标准. [J]. 北京: 中国标准出版社, 2003. 214