

文章编号:1000-582X(2003)08-0027-05

# 差分吸收光谱技术及在大气监测领域中的应用\*

郭永彩, 张天华, 高潮, 郭孝恩

(重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

**摘要:**差分吸收光谱技术(DOAS: Differential Optical Absorption Spectroscopy)是一种光谱监测技术,其基本原理就是利用空气中的气体分子的窄带吸收特性来鉴别气体成分,并根据窄带吸收强度来推演出微量气体的浓度。凭借其低廉且简单的设备装置和出色的监测能力,DOAS技术在大气监测领域内在国外已经被广泛应用。鉴于国内的污染形势的日益严峻及对此新兴技术知识的匮乏,对于DOAS技术的工作原理、浓度反演方法及其在大气研究领域内的应用与发展前景做了较为详细的介绍,为今后在大气监测领域里研究和应用DOAS技术提供了必要的理论知识。

**关键词:**差分吸收光谱(DOAS);大气监测;反演计算

**中图分类号:**0433.5<sup>+</sup>1

**文献标识码:**A

近年来环境污染,尤其大气污染成了人们十分关注的问题。人们对曾发生过的污染物超标及光化学烟雾事件仍记忆犹新。空气污染对人类的生活、生产以及对自然界的损害是十分严重的。因而进行大气污染物的监测、控制与治理具有重要意义。

虽然国内分析仪器发展很快,基本能够满足初级的空气监测需求,但通常取样都是定点采样的,且自动化程度不高。相对而言,光学和光谱学遥感技术正以其特有的技术优势成为环境污染包括大气污染监测的主力军。在这些技术中差分吸收光谱技术,简称DOAS技术(Differential Optical Absorption Spectroscopy),由于出众的测试方法及技术特点而得到了长足发展,下面对该技术及其在大气监测中的应用作一分析和论述。

## 1 DOAS技术的发展现状

在20世纪80年代初,NOXON<sup>[1]</sup>首先提出了DOAS技术的雏形,而Platt<sup>[2-3]</sup>等又将该技术推广应用于对流层大气研究领域。从那时开始,DOAS技术在国外得到了迅猛发展。诸多研究机构根据自己研究领域的特点,应用DOAS技术并设计了仪器。这些应用包括空气污染物监测<sup>[4]</sup>、火山气体分析检测<sup>[5-6]</sup>、臭氧层监测及对流层、平流层气体成分分析研究等领域。

到了80年代末,DOAS技术作为一种空气监测系统在欧盟范围内得到了广泛的认可。在瑞典,OPSIS AB公司成功地升级并确定了DOAS系统的基本结构。此系统首先被应用于Hg分析中(Edner etc. 1986<sup>[7]</sup>)。在美国,热电子公司(Thermo Ltd.)也推出了自己的商业性的DOAS系统。在研究应用中,科学家们在结构、硬件、软件算法上提出了很多想法,并付诸于实施。Axelson<sup>[8]</sup>等首先采用了Cassegrain结构,即收、发装置在同一个望远系统里的设计,简化了装置(1990)。John M. C<sup>[9]</sup>等采用了反射棱镜安置在光路的一端,用来反射传输光束;采用光电二极管阵列(PDA)代替了光电倍增管(PMT),并使测量实现了自动化;在光谱反演中,用实际的光源光谱代替了前人所用的测量光谱的多项式拟合(1992)。Theo Brauers<sup>[10]</sup>等对采用PDA的DOAS进行了改进,提出了DOAS-MCST方法,减小了应用PDA探测器所带来的像元间差别对测量结果的影响(1995)。Stutz<sup>[11]</sup>等对浓度反演方法进行了改进,为了消除光谱的平移、展伸和压缩对测量的影响,采用了线性最小二乘与非线性的Levenberg-Marquardt方法,而摒弃了前人所采用的纯线性算法;这使得测量结果的真实性得到了保证(1996)。Ahilleas<sup>[12]</sup>等提出了一种针对高精度结构光谱的参数反演法,这使得DOAS向红外区扩展有了可能(2000)。在

\* 收稿日期:2003-06-02

作者简介:郭永彩(1963-),女,重庆人,博士,重庆大学教授,主要从事光电技术和信息处理研究。

20多年的研究发展中,不同的结构设计、不同的探测器件、不同的反演算法都得到了研究与应用,从而推动了该技术的发展。

DOAS技术在地理环境检测领域内发挥了很大作用,包括地基、机载、星载DOAS系统。

从所搜集的文献中,笔者发现国内对DOAS的应用很少。目前,只有中科院安徽光机所对DOAS技术进行了研究,包括大气、烟道等检测方面,并研制出了相关系统<sup>[13]</sup>。在国外DOAS技术被广泛应用于各类的气体检测中,但在国内,很少发现有这方面的研究报告或论文。在空气污染、地理环境研究领域内,DOAS技术有很大的优势;因而,我们认为在国内开展DOAS技术的应用与创新是很有必要的。

差分吸收光谱技术是利用空气中的气体分子的窄带吸收特性来鉴别气体成分,并根据窄带吸收强度来推演出微量气体的浓度。差分吸收光谱技术的优点主要有以下几点<sup>[9,11,14]</sup>:1)仪器设计可实现紫外到可见光谱区的扫描,从而用一台仪器可实时检测多种微量气体。2)由于该方法是非接触性测量,因而可以避免一些误差源的影响,比如检测对象的化学变化、采样器壁的吸附损失等。3)差分吸收光谱技术所测得的气体浓度是沿几百米到几公里长的光路上的气体浓度的均值,因而可以消除某些非常集中的污染排放源对测量的干扰,使得检测结果更具有代表性。4)空气中的NO<sub>3</sub>最有效的检测方法就是利用差分吸收光谱技术检测,并且对OH浓度的检测的结果被认为是比其他方法更为可靠的。5)差分吸收光谱技术在揭示空气中尚未发现的成分方面有很大的潜力,这主要依赖于对光谱反演算法中剩余光谱成分的分析。

## 2 差分吸收光谱技术(DOAS)的测量原理

差分吸收光谱技术(DOAS)的理论基础就是著名的Lambert-Beer定律。光源发出的光束( $I_0(\lambda)$ )经过了一系列的衰减过程,包括空气分子( $\sigma_{\text{Ray}}(\lambda)$ )、气溶胶( $\sigma_{\text{Mie}}(\lambda)$ )、大气扰动即湍流( $T(\lambda)$ )造成的衰减及诸多浓度为 $C_i$ ,吸收截面为 $\sigma_i(\lambda)$ 的微量气体的吸收。笔者通过一系列的处理,在测量光谱中提取出由气体分子吸收所造成的窄带光谱。根据Lambert-Beer定律的扩展形式,可得通过光路长为 $L$ 后的光强为:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \times \exp\left(\sum_{i=1}^n (\sigma_i(\lambda) \times C_i \times L) + \varepsilon_{\text{Ray}}(\lambda) + \varepsilon_{\text{Mie}}(\lambda)\right) \times T(\lambda) \quad (1)$$

其中, $\lambda$ :波长(nm); $I_0(\lambda)$ :初始发射光强; $I(\lambda)$ :经过光路衰减的接收光强; $\sigma_i(\lambda)$ :第 $i$ 种气体的吸收截面

( $\text{cm}^2$ ); $C_i$ :第 $i$ 种气体的沿光路的平均浓度( $\text{mol}/\text{cm}^3$ ); $L$ :光程(cm); $\varepsilon_{\text{Ray}}(\lambda)$ :Reileigh散射系数( $\sim \lambda^{-4}$ )<sup>[15]</sup>;  $\varepsilon_{\text{Mie}}(\lambda)$ :Mie散射系数( $\sim \lambda^\alpha$ ,  $\alpha = 2 \sim 4$ )<sup>[15]</sup>;  $T(\lambda)$ :湍流扰动。

应用于大气检测的光谱方法就是为了得到微量气体的浓度而需要把各种衰减作用分离开来。DOAS技术解决了这个问题;它把微量气体的吸收截面分成了随波长低频和高频变化的2个部分:

$$\sigma(\lambda) = \sigma^b(\lambda) + \sigma'(\lambda) \quad (2)$$

其中 $\sigma^b(\lambda)$ 代表了吸收截面的宽带光谱结构,即低频部分, $\sigma'(\lambda)$ 则代表了窄带光谱特性,即高频部分。通过相应的数值滤波处理,可得:

$$I'_0(\lambda) = I_0(\lambda) \times \exp\left(\sum_{i=1}^n (\sigma^b(\lambda) \times C_i \times L) + \varepsilon_{\text{Ray}}(\lambda) + \varepsilon_{\text{Mie}}(\lambda)\right) \times T(\lambda)$$

$$I(\lambda) = I'_0(\lambda) \times \exp\left(\sum_{i=1}^n (\sigma'_i(\lambda) \times C_i \times L)\right) \quad (3)$$

$I'_0(\lambda)$ 包含了光谱的低频成分(除了有宽带吸收结构外,还有散射和大气湍流对光的衰减作用), $I(\lambda)$ 则只包含了窄带吸收结构,而这就是被DOAS用来测量微量气体浓度的。从而有:

$$D' = (O.D.)_\lambda = -\ln\left(\frac{I(\lambda)}{I'_0(\lambda)}\right),$$

$$C_i = D' / (\sigma'_i(\lambda) \times L) \quad (4)$$

(( $O.D.$ ) =  $\ln I_0/I$ ,称为气体分子的光学吸收密度)。Lambert-Beer定律具有线性性质,空气中诸多气体的吸收可以看作是线性叠加,因此

$$(O.D.)_\lambda = \sum_{i=1}^n (C_i \times (O.D.\text{ref})_{i,\lambda}) + \delta \quad (5)$$

$(O.D.)_\lambda$ :在波长 $\lambda$ 下的总的光学密度; $C_i$ :第 $i$ 种气体浓度; $(O.D.\text{ref})_{i,\lambda}$ :第 $i$ 种气体在波长 $\lambda$ 下的参考光学密度; $\delta$ :修正因子。

由于在所研究的光谱谱段上通常会取 $m$ ( $m > n$ )个采样点,所以方程组(5)是超正定的。对于解这一类的方程组,最常用的方法就是最小二乘法<sup>[16]</sup>。令

$$\vec{X} = (C_1 \quad C_2 \quad \dots \quad C_n)^T,$$

$$\vec{b} = ((O.D.)_{\lambda_1} \quad (O.D.)_{\lambda_2} \quad \dots \quad (O.D.)_{\lambda_m})^T$$

$$A = \begin{bmatrix} (O.D.\text{ref})_{1,\lambda_1} & \dots & (O.D.\text{ref})_{n,\lambda_1} \\ \dots & \dots & \dots \\ (O.D.\text{ref})_{1,\lambda_m} & \dots & (O.D.\text{ref})_{n,\lambda_m} \end{bmatrix}$$

则有 $\vec{b} = A\vec{X} + \delta$ 。根据最小二乘原则,可得所要求的气体浓度值:

$$\bar{X} = (A^T A)^{-1} A^T \bar{b} \quad (6)$$

相应的方差为:  $\theta = \hat{\sigma}^2 (A^T A)^{-1}$ , 这里的  $\hat{\sigma}^2$  是  $\bar{b}$  的测量误差, 即  $\varepsilon(\bar{b}) = \hat{\sigma}^2 I$ 。

### 3 DOAS 技术的关键部分

#### 3.1 获取高质量的吸收光谱

对 DOAS 技术而言, 吸收光谱的质量是至关重要的。对参考光谱, 要求它的准确性要高, 这是个基准问题。同样, 测量光谱的质量也要得到保证。由于 DOAS 技术是一种弱光谱检测技术, 要求整个系统对杂散光、各种随机噪声有较好的屏蔽效果。在结构上, 采用大焦距望远系统, 可减小太阳光的干扰; 单色仪采用双 Czerny - Turner 结构减小内部杂散光。探测器这一环节, 保持低温、恒温, 以减小器件的暗泄露电流噪声干扰; 采用快速扫描(探测器为光电倍增管, PMT) 减少扫描时间, 或用光电二极管阵列(PDA) 代替 PMT 同时测定整个谱段光谱, 这样可以减小大气扰动干扰。另外, DOAS 技术采用多次叠加平均的方法来消除各种随机噪声的干扰。

DOAS 技术要求参考光谱是单个系统专用的, 即每个 DOAS 系统, 其应用的参考光谱是由该系统测量得到的; 只有这样才能消除仪器的系统函数对测量结果的影响。

#### 3.2 光谱的反演计算

在 DOAS 技术中, 人们会得到 3 个光谱: 测量光谱(未被处理的接收光谱)、背景光谱(空气散射光谱)和未经衰减作用的光源光谱。为了求得差分吸收光密度(Optical Disinty, (O. D.)), 需要对所得的光谱进行预处理。由于在光谱记录过程中会存在探测器的暗电流的干扰, 所以首先是将这种干扰从这 3 个光谱中去除掉。然后, 在测量光谱和光源光谱中减去背景光谱, 消除背景光的干扰。最后, 用减去了背景光谱的测量光谱除以做了同样处理的光源光谱, 所得的结果就是经过了预处理的光谱了。在很多的 DOAS 应用中, 人们常用测量光谱的  $n$  阶多项式( $n = 3, 4$  或  $5$ ) 拟合来替代光源光谱。但是这样做的效果不如用实际测量的光源光谱那样令人满意<sup>[9]</sup>。

得到预处理光谱后, 对该光谱进行高通的快速傅立叶变换和低通的快速傅立叶变换。从而可以得到两个谱图, 一是平滑后的预处理光谱, 具有精细结构的; 一是预处理光谱的慢变化走势。前者除以后者, 所得结果的对数, 就是我们所需的差分光学密度。这种方法大大地消除了 Mie 和 Rayleigh 散射带来的扰动。从而, 可

以得到式(5)。式(5)的解就是式(6), 即所求气体的浓度。

反演计算对 DOAS 技术来讲是测试成功与否的关键之所在。反演计算中存在的主要问题是光谱的漂移、拉伸或压缩使测量光谱与参考光谱之间不是完全的按波长吻合。在探测器记录光谱时, 波长范围被分割为  $m$  个离散点, 由  $i$  记录编号。每个在一个波长间隔范围内由  $\lambda(i)$  到  $\lambda(i+1)$  的积分, 其积分间隔可由波长 - 离散点的映射  $\Gamma_i$  给出。由离散线性系:  $\Gamma_i: \lambda(i) = \lambda(0) + \gamma_0 \times i$ 。一个离散点的光谱宽度是个常数:  $\Delta \lambda(i) = \lambda(i+1) - \lambda(i) = \gamma_0$ 。一般来讲, 仪器的波长 - 离散点的映射  $\Gamma_i$  可由一个多项式<sup>[11]</sup> 近似给出:

$$\Gamma_i: \lambda(i) = \sum_{k=0}^q (r_k \times i^k) \quad (7)$$

参量  $(r_k)$  决定了由离散点到波长的映射。参数  $r_0$  的变化代表了光谱的频谱漂移,  $r_1$  的变化表示了光谱的拉伸或压缩,  $r_k$  则表示更高次的波长因子。参量  $(r_k)$  常会因测量条件的变化而发生变化(比如温度、大气压强的变化及机械振动等)。光栅光谱仪会因温度变化出现一种温漂, 使得光谱产生漂移; 而压强同样会改变光谱的波长校准。正是由于这些变化, 会使测量光谱与参考光谱之间不是完全的按波长吻合, 而会出现相对的漂移、压缩或拉伸。如果测量光谱与参考光谱的分辨率不同的话, 同样存在这种问题。因而, 在反演计算时, 必须考虑纠正这些影响, 否则会得出完全错误的结果<sup>[11]</sup>。

### 4 差分吸收光谱技术(DOAS)在空气监测方面的应用

SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 是空气中三大主要污染物, 也是空气监测的主要对象<sup>[9, 4, 17-20]</sup>。DOAS 技术对这 3 种气体的检测, 是在不同的谱段: SO<sub>2</sub> 在 260 nm 到 340 nm, NO<sub>2</sub> 在 380 nm 到 440 nm, O<sub>3</sub> 在 250 nm 到 310 nm。在实际检测中, 谱带会有所不同, 但都需要所检测的气体在此谱段有差分吸收结构。从这些研究中, 我们可以很清晰的看出, DOAS 方法所得结果与传统的定点采样检测方法所得结果有很好的一致性, 虽然结果会有出入。对于两种方法所得结果的差异, 根本原因在于测试原理、测试误差造成的。DOAS 是测量的光路上的浓度均值, 而定点则是空间点的浓度值; 同样测量误差也会造成相关性变差。因而, DOAS 技术对于等空气主要污染物检测来讲, 是一种很有前途的测试技术, 并且这也是各方面达成的共识。

NO<sub>3</sub><sup>[9]</sup> 和 OH<sup>[21]</sup> 是在夜间和白天特别重要的基原

子团。它们会氧化具有还原性的物质如烃类和硫化物,并且对对流层臭氧化学研究来讲也是很重要的。DOAS技术对 $\text{NO}_3$ 的检测是目前相对唯一的检测方法;对OH来讲,DOAS的检测精度要优于其他方法。进一步说,DOAS的非接触性测量对 $\text{NO}_3$ 和OH这种化学性质比较活泼的检测对象来讲,本身就是一种优势,可以减少化学反应带来的测量误差。

自从DOAS技术被提出来那时起,就被广泛应用于各种大气成分的检测中。对地面的污染物监测中,除了上述几种外,还有 $\text{NH}_3$ <sup>[22]</sup>、 $\text{HCHO}$ <sup>[9]</sup>、 $\text{CS}_2$ 、汞<sup>[13]</sup>和大多数的芳香烃<sup>[23]</sup>等等。对于地球物理研究领域来讲,在研究对流层和平流层的气体分析研究中,DOAS体现出了它的价值,因为在对<sup>[24]</sup>、 $\text{BrO}$ 流层 $\text{HONO}$ <sup>[25]</sup>、 $\text{ClO}$ 和平流层 $\text{OCIO}$ <sup>[26]</sup>、 $\text{BrO}$ <sup>[26]</sup>的检测中,DOAS发挥了很大的作用<sup>[11]</sup>。

## 5 结 语

通过介绍,可以了解到DOAS技术的基本原理、光谱计算方法及在大气监测方面的应用。作为近20几年来逐渐发展起来的检测技术,DOAS技术由于其独特的方法而成为很有发展前途的测试技术。它可同时监测多种气体,实时的给出具有代表性的测量结果;它的非接触性测量也可减少诸多干扰。

从80年代初至今,国外很多科学家把DOAS技术应用到自己的研究领域,并取得了显著的效果。这也使得DOAS技术的应用受到更为广泛的注意。但是,DOAS作为一项新兴的技术,还有很多问题需要解决,它的检测结果的可靠性仍需要进一步的验证。在反演算法上,如何减少光谱的平移、拉伸或压缩等的影响,即如何更好地将测量光谱与参考光谱进行匹配,如何减少残余光谱等等问题,还需深入思考与研究。另外如何扩展DOAS的检测气体种类,及其扩展到红外光谱区等问题也越来越受到重视和研究。

总的来讲,目前应用的DOAS技术在测量的实时性、测量的精度、可操作性、测量的先进性方面具有巨大的优势,加上它的设备更简单更经济实用,这就使得它在空气质量监测方面会发挥越来越大的作用;同样也会得到更广泛的发展。

### 参考文献:

[1] NOXON J F. Nitrogen Dioxide in the stratosphere and troposphere measurement by ground-based absorption spectroscopy[J]. Science, 1975, 189(4202): 547-549.  
[2] PLATT U, PERNER D. Simultaneous measurements of at-

mospheric  $\text{CH}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$  and  $\text{NO}_2$  by differential optical absorption[J]. J. Geophys Res, 1979, 84: 6329-6335.  
[3] PLATT U, PERNER D. Direct measurement of atmospheric  $\text{CH}_2\text{O}$ ,  $\text{HNO}_2$ ,  $\text{O}_3$  and  $\text{SO}_2$  by differential absorption in the near UV[J]. J Geophys Res, 1980, 85: 7453-7458.  
[4] KOSTAS A, KOURTIDIS, IOANNIS EIOMAS, et al. Benzene, toluene, ozone,  $\text{NO}_2$  and  $\text{SO}_2$  measurements in an urban street canyon in Thessaloniki[J]. Greece Atmospheric Environment, 2002, (36): 5355-5364.  
[5] BO GALLE, CLIVE OPPENHEIMER. A miniaturized ultraviolet spectrometer for remote sensing of  $\text{SO}_2$  fluxes: a new tool for volcano surveillance[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2002, 2516: 1-14.  
[6] WEIBRING P, EDNER H. Monitoring of volcanic sulphur dioxide emissions using differential absorption Lidar (DIAL), differential optical absorption spectroscopy (DOAS), and correlation spectroscopy (COSPEC)[J]. Laser and Optics. Applied Physics, 1998, 67(B): 419-426.  
[7] HANS EDNER, ANDERS SUNESSON. Differential optical absorption spectroscopy system used for atmospheric mercury monitoring[J]. Applied Optics, 1986, 25(3): 403-409.  
[8] AXELSON H, GALLE B. A transmitting/receiving telescope for DOAS measurements using retroreflector technique[C]. Dig Top Meet Opt Remote Sens Atmos Optical Society of America, 1990, (4): 641-644.  
[9] JOHN M C PLANE, CHIA-FU NIEN. Differential optical absorption spectrometer for measuring atmospheric trace gases[J]. Rev Sci Instrum, 1992, 63(3): 1867-1876.  
[10] THEO BRAUERS, MARTIN HANSMANN. Improvement of differential optical absorption spectroscopy with a multi-channel scanning technique[J]. Applied Optics, 1995, 34(21): 4472-4479.  
[11] JOCHEN STATZ, ULRICH PLATT. Numerical analysis and estimation of the statistical error of differential optical absorption spectroscopy measurements with least-squares methods[J]. Applied Optics, 1996, 35(30): 6041-6053.  
[12] AHILLEAS N MAURELLIS, RUDIGER LANG. A new DOAS Parameterization for Retrieval of Trace Gases with High-Structured Absorption Spectra[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(24): 4069-4072.  
[13] 周斌, 刘文清, 齐峰, 等. 差分吸收光谱法测量大气污染物的浓度反演方法的研究[J]. 物理学报, 2001, 50(9): 1819-1822.  
[14] EVANGELISTI F, BARONCELI A. Differential Optical Absorption Spectroscopy for measurement of tropospheric pollutants[J]. Applied Optics, 1995, 34(15): 2737-2744.  
[15] E. J. 麦卡特尼. 大气光学-分子和粒子散射[M]. 北京: 科学出版社, 1988.

- [16] 电子科大应用数学系编. 实用数值计算方法[M]. 北京:高教出版社,2001.
- [17] HAMS EDNER, PAR RAGNARSON. Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) system for urban atmospheric pollution monitoring[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(3):327-333.
- [18] KI-HYUM KIM, MIN-YOUNG KIM. Comparison of an open path differential optical absorption spectroscopy system and a conventional in situ monitoring system on basis of long-term measurement of so<sub>2</sub>, no<sub>2</sub> and o<sub>3</sub>[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, (35):4 059-4 072.
- [19] 庄马展,吴守光,杨青. 差分光谱仪与传统点式仪器测定环境空气质量对比研究[J]. *环境保护*, 2000, (5):25-27.
- [20] HAKAN AXELSSON, HANS EDNER. Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) Measurement of Ozone in the 280-290 nm Wavelength Region[J]. *Applied Spectroscopy*, 1990, 44(10):1 654-1 658.
- [21] PERNER D, EHHALT D H. OH-radicals in the lower troposphere[J]. *Geophys res lett*, 1976, (3):466-468.
- [22] GEORGE H, MOUNT, BRIAN RUMBURG. Measurement of atmospheric ammonia at a dairy using differential optical absorption spectroscopy in the mid-ultraviolet[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36:1 799-1 810.
- [23] HAKAN AXELSSON, ANDERS EILARD. Measurement of aromatic hydrocarbons with the DOAS technique[J]. *Applied Spectroscopy*, 1995, 49(9):1 254-1 260.
- [24] PLATT U, PERNER D. Observation of nitrous acid in an urban atmosphere by differential optical absorption[J]. *Nature*, 1980, (285):312-314.
- [25] HEBESTREIT KAIL, STATZ JOCHEN. DOAS measurements of tropospheric bromine oxide in mid-latitudes[J]. *Science*, 1999, (283):55-57.
- [26] FRIEDER FERLEMANN, NADINE BAUER. Differential optical absorption spectroscopy instrument for stratospheric balloonborne trace-gas studies[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(15):2 377-2 386.

## Differential Optical Absorption Spectroscopy and Applications in Atmospheric Monitoring Studies

GUO Yong-cai, ZHANG Tian-hua, GAO Chao, GUO Xiao-en

(College of Opto-electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** As a monitoring technique with spectroscopy, the differential optical absorption spectroscopy technique (DOAS) uses the narrow molecular absorption bands to identify trace gases and their absorption strength to retrieve concentrations of the trace gases. Due to its cheap and simple instrument and excellent performance, DOAS technique has been widely employed in atmospheric studies overseas. Whereas rising severe pollution and lack of the new technique in home, the article introduces in details the principle of work, concentration deconvolution method and the applications of the DOAS technique in atmospheric studies, and meantime provides essential theory for research and application of DOAS in atmospheric monitoring field for the future.

**Key words:** differential optical absorption spectroscopy (DOAS); atmosphere monitoring; retrieval calculation

(编辑 张志强)