

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108960

NO₂ 双通道光谱成像定量监测技术研究

吴靖, 张朋朋, 黄峰, 孔迪

(福州大学机械工程及自动化学院 福州 350108)

摘要:二氧化氮(NO₂)是危害环境和人类健康的主要污染气体之一,需要对其排放进行监测以实现更好的治理。现有成像监测方法具有大范围实时的优点,但存在重建背景准确性和适用性不足的问题。本文提出了一种利用双通道光谱图像对气体浓度进行定量监测的方法,通过405和470 nm双通道光谱图像反演NO₂浓度,开展了以下理论与实验研究:进行了理论推导,得到气体柱浓度与双通道光强比之间的关系式;分析了双通道曝光时间对标定公式的影响,比较了采集的双通道光强比值与理论值,两者相差0.26%;采集了北纬26.08°不同气象条件的太阳散射辐射光谱,给出了不同太阳天顶角下的双通道光强比经验值;对探测相机系统性能进行了分析,探测限为19.6×10⁻⁶ m;浓度标定与反演实验给出了标定函数,反演了扩散中的气体浓度二维分布图,验证了双通道光谱成像方法定量检测气体浓度的可靠性。

关键词:双通道;成像监测;NO₂气体;太阳天顶角;探测限

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Research on quantitative monitoring technology of NO₂ dual-channel spectral imaging

Wu Jing, Zhang Pengpeng, Huang Feng, Kong Di

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: As a main pollution gas, the emission of NO₂ is endangering to the environment and human health, which should be monitored to achieve better governance. The existing imaging detection methods possess the advantages of a wide application range and good real-time performance, while accuracy and applicability are concerned in the reconstruction background. A method for quantitatively monitoring gas concentration using images of dual-channel target gas is proposed in this study. The NO₂ concentration is retrieved from the ratio of 405 and 470 nm dual-channel light intensity, and the following theoretical and experimental research is carried out. Specifically, the relationship between gas column concentration and dual-channel light intensity ratio is obtained according to theoretical derivation. The effect of the dual-channel exposure time on the calibration equation is analyzed. The collected dual-channel light intensity ratio is compared with the theoretical value, and the difference between them is 0.26%. The optimal value of dual-channel light intensity ratio under different solar zenith angles is measured by collecting the solar scattered radiation spectra at 26.08° north latitude under various meteorological conditions. The performance of the detection camera is analyzed, and the detection range is 19.6 ppm m. Concentration calibration and retrieval experiments give a calibration function, retrieve the two-dimensional distribution of gas concentration in diffusion, and validate the reliability of the dual-channel spectral imaging method for quantitative detection of gas concentration.

Keywords: dual-channel; imaging monitoring; NO₂ gas; sun zenith angle; detection limitation

0 引言

随着中国产业升级的不断进行,我国工业发展日

新月异,取得了重大的进步。然而,工业的粗犷发展也产生了很多环境问题,其中大气污染问题非常严峻,这与环境保护及人们的健康息息相关。在各种污染气体中,二氧化氮(NO₂)是对人类的生产生活影响较大的有

毒有害气体之一。除天然排放外,人工排放 NO_2 主要来源于燃料燃烧和汽车尾气排放,过量的排放会形成酸雨和光化学烟雾等现象,对生态环境和人类健康造成危害。为更好地治理 NO_2 污染,有必要对其排放情况进行监测。

常用的气体检测方法有传感器直接测量^[1-2]和远距离遥测的光学成像检测。现有的气体光学检测方法根据光源形式的不同可分为被动式和主动式,被动式检测方法包含高光谱成像技术(hyperspectral imaging, HSI)、多光谱成像技术(multispectral imaging, MSI)和热成像技术(thermal imaging, TI)等^[3-4],主动式检测方法包含差分吸收激光雷达技术(DIAL)、差分吸收光谱技术(DOAS)、可调谐二极管激光吸收光谱技术(TDLAS)和傅里叶变换红外光谱技术(FTIR)等^[5-7]。通过不断的研究及发展,上述几种方法凭借其各自优势已经逐步应用于各类场景下的气体检测。但是,这些方法大都使用了光谱仪,致使系统结构复杂、不便维修,且时间分辨率或空间分辨率较低。

2006年,Mori等^[8]首次提出了一种利用简单成像系统定量监测气体浓度的方法,相较于传统的气体监测系统,该类系统结构简单,仅由探测相机、滤光片和镜头组成,组装方便、易于操作,其时间分辨率和空间分辨率较高,非常适用于气体排放的即时监测,已经被应用于火山气体监测^[9-11]和污染源气体排放监测^[12]。这种技术根据气体柱浓度与光学厚度的关系实现气体浓度监测,为计算目标气体的光学厚度,背景光强的获取必不可少。通常获取背景光强的方法分为两种:1)通过拍摄目标气体附近图像来近似背景光强,该方法适用于低太阳天顶角和背景均匀的无云环境。然而,由于瑞利散射和米氏散射的相位函数均非球对称,不同观察方向采集的背景图像会产生不同的强度分布,在高太阳天顶角下这种差异更为明显。2)利用气体周围的光强对目标气体图像背景进行插值,以实现背景光强的重建^[13]。这种方法的优点是不需要移动探测相机的观察方向,对于高频率的目标气体图像采集是有利的。然而,当目标气体几乎充满探测器视场时,该方法不适用,且当背景复杂时插值的结果准确性较差,应用条件有限。

上述方法仅近似地获取背景光强,这不仅增加了图像采集与处理的复杂程度,也给目标气体浓度的反演带来了诸多不确定性。本文提出一种气体浓度定量监测方法,仅需采集双通道目标气体图像便可计算出其二维浓度分布,既简化了图像采集过程,又可以提高测量精度。通过研究各种测量因素对标定过程和现场监测的影响,为精确进行气体浓度反演提供理论依据。

1 气体双通道光谱成像定量监测技术原理

气体成像监测技术基于 Lambert-Beer 定律,这一定律描述物质对某一波长光的吸光度与其浓度和有效光程成正比。根据这一原理,双通道成像监测技术利用两个探测相机接收的不同光强来定量检测气体浓度。

首先,选择目标气体具有较强光谱吸收的波段作为信号通道(标记为A)。其次,在探测相机的视场中,不仅只有目标气体的存在,还有气溶胶、颗粒物、其他气体分子等的干扰,为尽量减小这些因素的影响,同时考虑到气溶胶消光系数在可见光范围内随波长缓慢变化,选择目标气体几乎没有吸收或吸收较小的波段作为参考通道(标记为B)。以A通道为例,当探测相机视场中没有目标气体的存在时,到达相机每个像素的光强 $I_{0,A}$ 由太阳散射辐射强度 $I_{s,A}(\lambda)$ 、探测器量子效率 $Q_A(\lambda)$ 和滤光片透过率 $T_A(\lambda)$ 决定:

$$I_{0,A} = \int_{\lambda} I_{s,A}(\lambda) \cdot Q_A(\lambda) \cdot T_A(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

当探测相机视场中存在目标气体时,探测器接收到的光强 I_A 按照 Lambert-Beer 定律衰减:

$$I_A = \int_{\lambda} I_{0,A} \cdot \exp[-\sigma_A(\lambda) \cdot S(\lambda) - \sigma'_A(\lambda) \cdot S'(\lambda)] d\lambda \quad (2)$$

其中, $\sigma_A(\lambda)$ 为 NO_2 气体分子在通道A处的吸收截面, $S(\lambda)$ 为柱浓度, $\sigma'_A(\lambda)$ 为其他气体分子吸收截面, $S'(\lambda)$ 为其他气体分子柱浓度。

同理,可以获得通道B有无目标气体存在时的 I_B 和 $I_{0,B}$ 。将通道A、B采集到的信号光强相除,可以得到:

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{\int_{\lambda} I_{0,A}(\lambda) \exp[-\sigma_A(\lambda) \cdot S(\lambda) - \sigma'_A(\lambda) \cdot S'(\lambda)] d\lambda}{\int_{\lambda} I_{0,B}(\lambda) \exp[-\sigma_B(\lambda) \cdot S(\lambda) - \sigma'_B(\lambda) \cdot S'(\lambda)] d\lambda} \quad (3)$$

当信号通道的探测带宽足够小时,认为目标气体的吸收截面、柱浓度与波长无关,且其他干扰物的吸收截面在探测范围内随波长变化较小,式(3)可以简化为:

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{\int_{\lambda} I_{0,A}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} I_{0,B}(\lambda) d\lambda} \exp[-(\sigma(\lambda_A) - \sigma(\lambda_B)) \cdot S] \quad (4)$$

对于每一个滤光片和探测相机,其在工作波长范围内的透过率和量子效率都是定值,可令双通道光强比 $\delta =$

$$\frac{I_A}{I_B}, \text{光强系数 } a = \frac{\int_{\lambda} I_{0,A}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} I_{0,B}(\lambda) d\lambda}, \text{等效吸收截面 } b \approx \sigma(\lambda_A) -$$

$\sigma(\lambda_B)$, 则式(4)可以写成:

$$\delta = a \cdot \exp(-b \cdot S) \quad (5)$$

以如图1所示的NO₂吸收光谱为例,其在390~410 nm波段范围内具有较强的光谱吸收,选择405 nm附近的探测波段作为信号通道,探测带宽10 nm。选择470 nm作为参考通道,探测带宽同样取为10 nm。

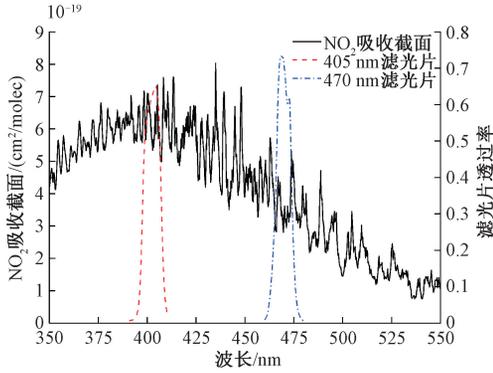


图1 NO₂ 的吸收截面和双通道滤光片 A、B 的透过曲线

Fig. 1 Absorption cross-section of NO₂ and transmission curves of dual-channel filters A and B

由上述公式可知,仅需标定两通道的光强比 δ 与目标气体柱浓度之间的关系,在现场检测中便可无需背景图像,而仅凭405和470 nm双通道的NO₂气体图像反演出其空间浓度的二维分布。在整个检测过程中,浓度标定是极其重要的一部分,下面将研究各种因素对标定结果的影响,为现场检测提供可靠的依据。

2 实验装置

为进行安全可控的NO₂气体浓度标定和反演实验,设计制造气室舱并搭建浓度标定与反演系统。气室舱主体为耐腐蚀和抗氧化的不锈钢材质,在端面 and 侧面设置石英玻璃窗口,气室舱两端的有效光程为300 mm,侧面的有效光程为80 mm,可在不同光程下进行NO₂浓度反演。标定系统的主要部分如图2所示,氮气(N₂)和NO₂气体在气罐中混合均匀后持续通入气室舱,气室舱出口连接NO₂电化学传感器,传感器示数的稳定值即为气室舱内气体稳定后的浓度值。氙灯前安装漫散射板形成均匀的散射光。使用单相机采集图像,相机镜头前装有滤光片轮,滤光片轮上安装双通道带通滤光片。

使用的标定系统包括背照式制冷型sCMOS探测相机(Pco Edge 4.2 bi UV),其量子效率可达95%,其采样频率较高,可满足对气体排放的连续监测;分光元件为带通滤光片,带宽10 nm,中心波长分别为405和470 nm;

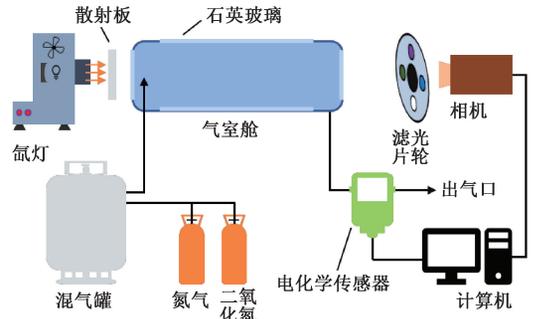


图2 标定系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of the calibration system

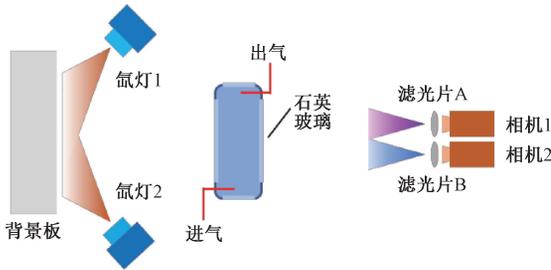
NO₂ 电化学传感器精度 $\leq \pm 2\%$ FS, 响应时间为30 s; 以可见光范围内光谱近似于太阳散射辐射光谱的氙灯作为光源,光源可准直出射直径48 mm的光线;使用高分辨率光纤光谱仪(Ocean Insight Maya2000Pro)进行光谱采集,光谱分辨率为0.9 nm。仪器的部分性能参数如表1所示。

表1 仪器参数

Table 1 Instrument parameters

仪器	特征	参数
光谱仪	光谱分辨率/nm	0.9
	光谱范围/nm	165~1 100
	狭缝/ μm	5
	信噪比	450:1
探测相机	光谱范围/nm	190~1 100
	分辨率	2 048×2 048
	像元尺寸/ μm	6.5×6.5
	量子效率/%	95
	传感器制冷/ $^{\circ}\text{C}$	-25
电化学传感器	暗电子数/ $e^-/\text{pixel/s}$	0.2
	精度/% FS	$\leq \pm 2$
	响应时间/s	30
	重复性/% FS	$\leq \pm 1$
滤光片 A	中心波长/nm	405
	半峰全宽/nm	10
滤光片 B	中心波长/nm	470
	半峰全宽/nm	10

图3所示为反演NO₂气体浓度分布实验的系统示意图,主要包括两台相同的氙灯、双通道探测系统、气室舱和聚四氟乙烯(poly tetra fluoroethylene, PTFE)背景板。

图3 NO₂ 气体浓度分布反演装置示意图Fig. 3 Schematic diagram of NO₂ gas concentration distribution retrieval device

3 实验内容及结果

3.1 曝光时间的影响

图4展示了太阳的部分散射辐射光谱,其在NO₂信号通道(405 nm)的光谱强度小于在参考通道(470 nm)的光谱强度,滤光片的透过率和探测相机的量子效率在这两个波段处也不同。当两个探测相机使用相同的曝光时间采集图像时,信号通道的图像光强显著低于参考通道的图像光强,导致其图像噪声增大,这对气体浓度标定和反演将产生不利的影响。此外,在现场监测时,不同太阳天顶角及不同天气的天空基础光强是不同的,致使探测相机在双通道采集的图像光强也不相同,需调整曝光时间以减小噪声的影响。因此,通常在双通道采用各自最佳的曝光时间,使光强达到探测相机最大饱和度的70%左右。因此,需要研究双通道曝光时间和不同基础光强对光强系数的影响。

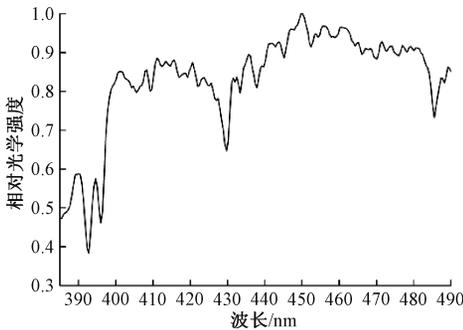


图4 光谱仪采集的太阳光谱

Fig. 4 The spectrum of the sun collected by the spectrometer

首先对充满纯氮气的气室舱进行成像采集,将双通道探测相机设置成相同的曝光时间,然后分别在多个曝光时间下采集图像,获得多个曝光时间下的光强系数。如图5所示,随着曝光时间的增加,光强系数趋于稳定,稳定值约为0.2273。低曝光时间下的光强系数与稳定值相差较大,这可能是低曝光时间下采集的图像信噪比较低造成的。

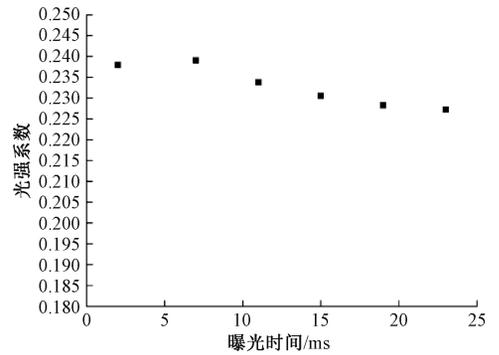


图5 光强系数随曝光时间的变化

Fig. 5 The intensity coefficient changes with the exposure time

向气室舱中通入一系列不同体积浓度(200×10⁻⁶~1500×10⁻⁶)的NO₂气体,双通道探测相机分别设置6组不同的曝光时间采集气室舱内浓度的气体图像,利用式(5)分别对每一组曝光时间下的浓度图进行标定,拟合得到相应的光强系数。如图6所示,光强系数*a*与双通道的曝光时间比值成线性关系,其斜率为0.2295,与图5中相同曝光时间下的光强系数稳定值相差0.97%。

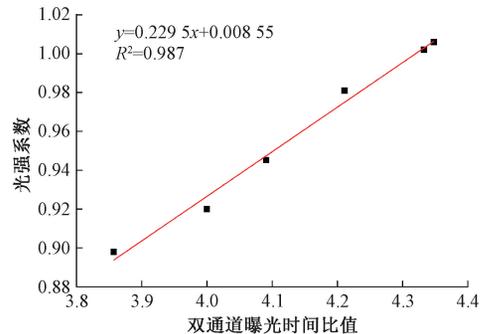


图6 不同双通道曝光时间比值下的光强系数标定值

Fig. 6 The calibration value of light intensity coefficient under different ratios of dual-channel exposure time

图7所示为高分辨率光谱仪测得的部分氙灯光谱,结合图1中的滤光片透过率曲线以及探测相机的量子效率,根据式(6)光强系数的计算公式得到理论值为0.2267,与图5中双通道曝光时间相同时的光强系数相差0.26%,与图6中双通道曝光时间不同时拟合直线斜率相差1.22%,这说明标定结果真实可靠。

$$a = \frac{\int_{\lambda} I_{0,A}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} I_{0,B}(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_{\lambda} I_{s,A}(\lambda) \cdot Q_A(\lambda) \cdot T_A(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} I_{s,B}(\lambda) \cdot Q_B(\lambda) \cdot T_B(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

根据以上分析,使用本系统进行现场检测时,将双通道曝光时间之比乘以光强系数即可获得自校准的值,这增加了探测系统的环境适应性,对于双通道都采用最佳的曝光时间是有利的。

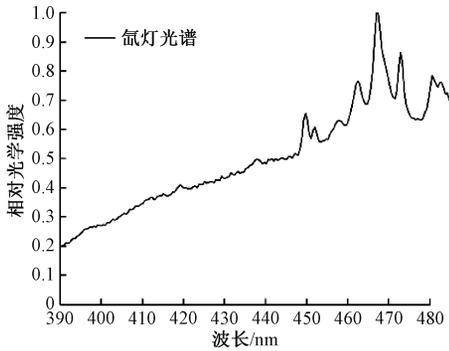


图 7 部分氙灯光谱

Fig. 7 Partial xenon lamp spectrum

对于标定公式中的等效吸收截面 b , 由于其只与气体分子的性质有关, 可以将标定值直接用于现场检测中。

3.2 太阳天顶角的影响

到达地球表面的散射辐射光谱取决于太阳天顶角 (solar zenith angle, SZA), 此外, 臭氧含量、空气溶胶消光厚度、相对空气质量和地表反射率等都会对光谱线型产生影响, 且波长越短, 光谱受影响越大。根据光强系数的表达式可知, 对于气体成像监测系统, 其值是由双通道的光谱强度比值决定的, 即为采集的光强在滤光片带宽范围内的积分比值。因此, 需要研究用于校准太阳散射辐射光谱的即时校准光强系数, 为现场测量提供依据。

图 8 展示了在福州 (北纬 26.08°) 晴朗天气下用光谱仪测量的部分太阳散射辐射光谱, 太阳天顶角范围在 30°~90°, 以测量范围内的最大波长强度对光谱曲线进行归一化处理, 得到光谱的相对光强。由图可知, 随着太阳天顶角的增加, 在 405 nm 波长附近的光强变化较大, 而 470 nm 波长附近的光强变化较小。

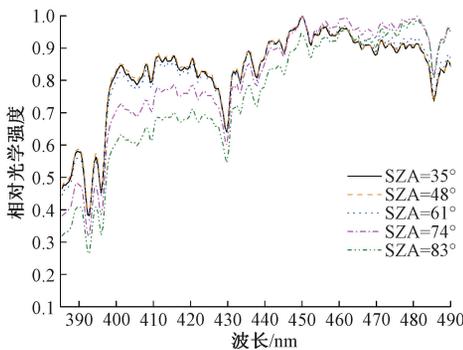


图 8 在不同的太阳天顶角下测量的太阳散射辐射光谱

Fig. 8 Measured spectra of scattered solar radiation for different solar zenith angles

在晴朗、少云、多云、阴天等不同的气象条件下分别采集相同太阳天顶角下的太阳散射辐射光谱, 根据式(6)计算出北纬 26.08°地区的光强系数, 拟合后如图 9

所示。图 9 中可以看出, 在太阳光直射为主的晴朗和少云气象条件下, 光强系数在低太阳天顶角时较大, 并随着太阳天顶角的提高总体呈快速下降趋势; 而在多云和阴天的气象条件下, 即气溶胶浓度较大时, 太阳光以散射为主, 光强系数较小且变化不大。在实际监测应用中, 可在事前对当地不同气象条件和太阳天顶角的条件下测量太阳散射辐射光谱, 并拟合出相应光强系数进行计算, 以减小气象条件的影响, 提高气体成像检测精度。若要进一步提高检测精度, 可在探测系统中增设光谱仪实时获得当前测量环境下的光强系数, 完成对标定函数的实时更新, 从而实现对气体浓度的精确测量。

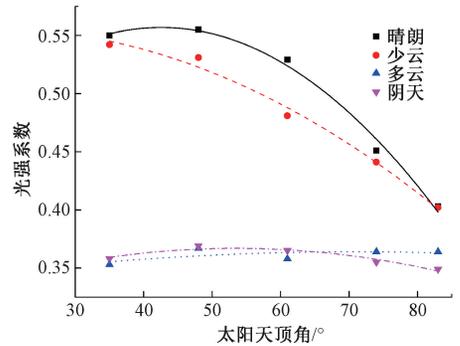


图 9 北纬 26.08°地区不同气象条件下的光强系数

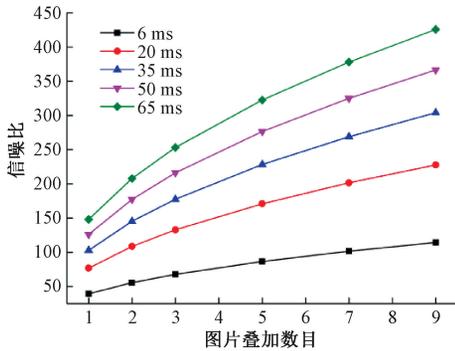
Fig. 9 Light intensity coefficient under different meteorological conditions in area of 26.08° north latitude

3.3 NO₂ 双通道光谱成像系统探测限

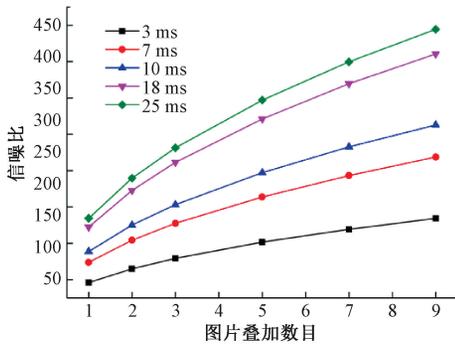
探测限指的是探测系统能监测到的最小气体柱浓度, 是评价检测性能的重要参数之一。探测相机对于 NO₂ 气体的响应和相机灵敏度共同决定了探测限。由于 NO₂ 在通道 A 和 B 处都有吸收, 所以需要两个通道的性质都进行研究。为了分析相机灵敏度, 在晴朗的天空背景下用相机同时采集连续的双通道图像, 对于每一个通道, 从小到大设置不同的曝光时间采集图像, 最大达到相机最大饱和度的 70% 左右。通过将两个连续图像 I_1 、 I_2 按照式(7)计算得到相机测量光强的标准偏差:

$$\omega = \text{std}\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \left(\frac{I_1(p)}{I_2(p)} - \left\langle \frac{I_1}{I_2} \right\rangle\right)^2} \quad (7)$$

其中, ω 用于衡量图像强度比的噪声水平, N 为像素总数, $I(p)$ 代表像素 p 处的光强, $\langle I_1/I_2 \rangle$ 为 N 个像素的平均强度比率。假设信号为 1, 信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 可近似为标准偏差的倒数^[14]。可通过连续叠加单通道图像的方式来提高信噪比, 对于单个通道, 分别将采集的单数图像、偶数图像叠加, 然后利用叠加后的图像按照式(7)计算, 获得新的标准偏差和信噪比。不同曝光时间下双通道的信噪比随图片叠加数目的变化如图 10 所示。



(a) A通道信噪比
(a) SNR of channel A



(b) B通道信噪比
(b) SNR of channel B

图10 双通道信噪比

Fig. 10 SNR of double channels

图10中,在单通道相机采集图像的曝光时间较低,即图像较暗的情况下,计算的信噪比较低,且信噪比随着曝光时间的增加而上升。对于每个通道采集的一系列连续图像,当叠加5张图像时,信噪比大约提升了一倍,且图片叠加数目与信噪比之间呈非线性关系,具体表现为随着叠加数目的增加,信噪比提升效果逐渐减小。

通常情况下,图像导出的光学深度大于纯噪声时,便能检测到气体分子的存在,可以将噪声水平除以系统对 NO_2 的响应因子来获得相机系统对 NO_2 的探测限,一般采用标准偏差表示纯噪声^[15]。同理,也可通过叠加采集的图片来降低相机系统的探测限。图11展示了双通道均采用最佳曝光时间时探测限随图片叠加数目的变化情况,使用单张图片计算时,A和B通道的探测限分别为11.9 ppm m和19.6 ppm m。当叠加5张图像时,两个通道的探测能力提高约一倍。对于双通道成像系统,探测限取较高通道探测限的值。

3.4 NO_2 气体浓度标定与反演

在气室舱内对光强比和 NO_2 柱浓度之间的关系进行标定,首先,设置探测相机在两个通道的曝光时间,使其光强达到最大饱和度的70%左右。然后,分别向气室舱中通入不同体积浓度的 NO_2 气体,依次转换滤光片采集双通道

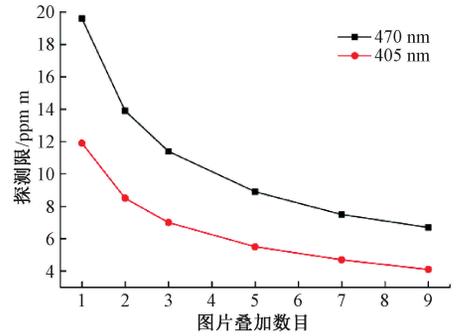


图11 双通道相机的探测限

Fig. 11 Detection limitation of dual-channel cameras

图像并提取光强信息。根据式(5)得到的标定曲线如图12所示,横坐标为 NO_2 气体柱浓度,纵坐标为双通道图像光强比值,拟合曲线线性相关系数 $R^2=0.99$,均方根误差 $RMSE=3.324\times 10^{-3}$,表明数据的相关性良好。

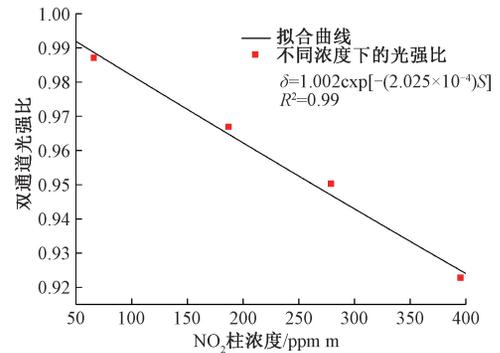


图12 NO_2 柱浓度与双通道光强比值的标定结果

Fig. 12 Calibration result of NO_2 column concentration to light intensity ratio of dual-channel

基于以上理论与实验研究,在气室舱内对 NO_2 浓度进行反演。分别向气室舱内通入并充满体积浓度为 460×10^{-6} 、 600×10^{-6} 、 810×10^{-6} 、 970×10^{-6} 的 NO_2 气体,使用图2所示装置采集双通道目标气体图像,从相机视场中选取像素大小为 139×120 的中间区域进行分析,并根据上述标定曲线对气室舱内的 NO_2 气体柱浓度分布进行反演,共用一个颜色条可明显区分浓度梯度分布,结果如图13所示。图13中(a)~(d)的柱浓度分别约为 140×10^{-6} 、 185×10^{-6} 、 240×10^{-6} 、 290×10^{-6} m,反演值与真实值最大误差为2.8%。

向气室舱内通入并充满体积浓度为 900×10^{-6} 的 NO_2 气体,首先在光程为300 mm时采集双通道图像,然后将气室舱旋转 90° ,在光程为80 mm时采集图像。浓度分布反演结果如图14所示,(a)的柱浓度约为 270×10^{-6} m,(b)的柱浓度约为 75×10^{-6} m,柱浓度之比与光程比相差4%。

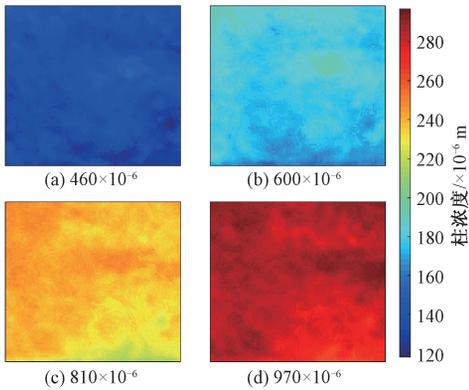


图 13 不同体积浓度的 NO₂ 反演结果

Fig. 13 Retrieval results of NO₂ at different volume concentrations

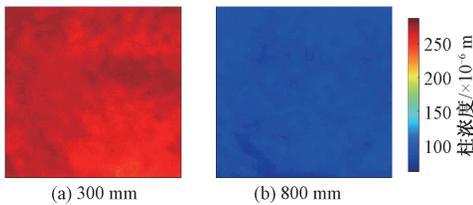


图 14 体积浓度为 900×10^{-6} 的 NO₂ 在不同光程的反演结果

Fig. 14 Retrieval results of NO₂ with a volume concentration of 900×10^{-6} at different optical path lengths

为了进一步验证上述方法的可靠性,使用图 3 所示装置反演扩散中的气体浓度变化,首先使用纯氮气冲洗气室舱足够长的时间,使气室舱中充满氮气,并重新调整双通道相机的曝光时间, A 通道为 195 ms, B 通道为 65 ms。然后向气室舱中持续通入体积浓度为 1% 的 NO₂ 气体,一段时间后使用双相机采集连续图像,分别选取间隔 2.9 s 的 3 对双通道图像反演 NO₂ 浓度,每张图像截取像素大小为 113×714 的气体区域进行分析。结果如图 15 所示(箭头指示气体进出口所在位置,图中间矩形区域为气室舱侧面结构杆),可以清晰观察到 NO₂ 气

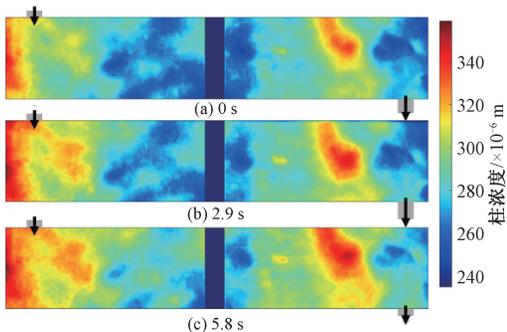


图 15 不同时刻的 NO₂ 浓度反演结果

Fig. 15 Retrieval results of NO₂ concentration at different times

体随时间的浓度扩散过程,区域内气体柱浓度在 $235 \times 10^{-6} \sim 360 \times 10^{-6}$ m 之间。

4 结 论

本文提出了一种利用双通道目标气体光谱图像来实现气体浓度定量监测的方法,理论推导了光强比与气体柱浓度之间的关系。针对现场监测时光源变化带来的影响,首先分析了曝光时间对光强系数的影响,结果显示需要在应用中根据双通道曝光时间即时调整标定公式中的光强系数。然后给出了北纬 26.08° 不同气象条件下的经验光强系数,为了提高气体浓度反演准确度,可采集监测现场的光源光谱,即时更新光强系数。分析了探测系统的性能,使用单张图像计算双通道检测限时,405 nm 通道的检测限为 11.9×10^{-6} m, 470 nm 通道的检测限为 19.6×10^{-6} m, 当叠加 5 张图像时,图像信噪比和系统检测限均提高一倍。采集四种 NO₂ 气体浓度下的双通道光强数据,拟合出标定函数,并据此反演扩散中的 NO₂ 气体柱浓度,结果在 $235 \times 10^{-6} \sim 360 \times 10^{-6}$ m 之间,能从结果图中清晰观察到 NO₂ 气体的扩散变化。

下一步,将基于上述方法设计一套 NO₂ 气体浓度成像监测系统,分析其在工作中的性能表现,并研究使用手机相机传感器的监测效果,探索搭建低成本的成像监测系统。

参考文献

[1] 谭光韬, 张文文, 王磊. 气体传感器阵列混合气体检测算法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7): 95-102.
TAN G T, ZHANG W W, WANG L. Research on mixed gas detection algorithm of gas sensor array [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(7): 95-102.

[2] 祝连庆, 徐荣靖, 张健, 等. 纳米材料修饰的光纤气体传感器研究进展 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 1-16.
ZHU L Q, XU R J, ZHANG J, et al. Research progress of nanomaterial-modified optical fiber gas sensors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 1-16.

[3] JIANG J B, RAN W W, XIONG K N, et al. A spectral-spatial approach for detection of single-point natural gas leakage using hyperspectral imaging [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2020, 103(3): 103181.

[4] NAM H, KIM J, KIM H J, et al. Development of a radiative transfer model for the determination of toxic

- gases by Fourier transform-Infrared spectroscopy with a support vector machine algorithm [J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2019, 47(3): 264-277.
- [5] JAN-MARCUS N, PHILIPP G E, DENIS P H, et al. Recent improvements of long-path DOAS measurements: Impact on accuracy and stability of short-term and automated long-term observations [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, 12(8): 4149-4169.
- [6] TOON G C, LIEBE C C, NEMATI B, et al. Solar occultation ftir spectrometry at mars for trace gas detection; A sensitivity study[J]. *John Wiley & Amp; Sons, Ltd*, 2019, 6(5): 836-860.
- [7] 贾军伟, 李伟, 柴昊, 等. 基于 TDLAS 的气体检测技术算法 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48 (5): 202-208.
JIA J W, LI W, CHAI H, et al. Gas detection technology algorithm based on TDLAS[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 202-208.
- [8] MORI T, BURTON M. The SO₂ camera: A simple, fast and cheap method for ground-based imaging of SO₂ in volcanic plumes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(24): L24804.
- [9] CAMPION R, DELGADO-GRANADOS H, MORI T. Image-based correction of the light dilution effect for SO₂ camera measurements [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, 300: 48-57.
- [10] KERN C, KICK F, LÜBCKE P, et al. Theoretical description of functionality, applications, and limitations of SO₂ cameras for the remote sensing of volcanic plumes[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, 3(3): 733-749.
- [11] WILKES T C, MCGONIGLE A J, PERING T D, et al. Ultraviolet imaging with low cost smartphone sensors: Development and application of a raspberry pi-based uv camera[J]. *Sensors (Basel)*, 2016, 16(10): 1649.
- [12] 武魁军, 熊远辉, 罗中杰, 等. SO₂ 气体排放的紫外成像遥感监测 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(4): 1289-1296.
- WU K J, XIONG Y H, LUO ZH J, et al. Ultraviolet imaging remote sensing monitoring of SO₂ emission[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40 (4): 1289-1296.
- [13] OSORIO M, CASABALLE N, BELSTERLI G, et al. Plume segmentation from uv camera images for SO₂ emission rate quantification on cloud days[J]. *Remote Sensing (Basel, Switzerland)*, 2017, 9(6): 517.
- [14] KERN C, LÜBCKE P, BOBROWSKI N, et al. Intercomparison of SO₂ camera systems for imaging volcanic gas plumes [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, 300: 22-36.
- [15] 张英华. 污染源气体分布的紫外可见成像技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
ZHANG Y H. Study on ultraviolet visible imaging technology of pollution source gas distribution[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.

作者简介



吴靖, 2009 年于北京航空航天大学获得学士学位, 2016 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为福州大学副教授, 主要研究方向为光学流动成像、人工智能图像处理。
E-mail: wujing@fzu.edu.cn

Wu Jing received his B.Sc. degree and Ph.D. degree both from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 2009 and 2016, respectively. He is currently an associate professor at Fuzhou University. His main research interests include optical flow imaging and artificial intelligence image processing.



黄峰 (通信作者), 2004 年于陆军工程大学获得学士学位, 2010 年于陆军工程大学获得博士学位, 现为福州大学教授, 主要研究方向为光电探测成像。
E-mail: huangf@fzu.edu.cn

Huang Feng (Corresponding author) received his B.Sc. degree and Ph.D. degree both from Army Engineering University of PLA in 2004 and 2010, respectively. He is currently a professor at Fuzhou University. His main research direction is photodetection imaging.