

船舶尾气 SO_2 紫外遥感成像监测系统*

张一康 王蕊 吴世城 袁浩宸 周维 武魁军 何微微

(烟台大学物理与电子信息学院 烟台 264005)

摘要:航运业的迅速发展导致船舶尾气污染排放显著增加。船舶烟羽排放具有分布广泛、流动性强的特点,其排放特征隐蔽,不均且多变,对其监管难度极大。鉴于此,设计并研发了一套高精度、高时空分辨率的紫外成像遥感监测设备,用于船舶尾气 SO_2 气体排放的远程实时监测。该设备采用三通道设计,通过 310 和 330 nm 双波长通道剔除干扰,精准捕获 SO_2 信号,并使用光谱通道对比验证其准确性。监测系统集成了 2-IM 天空背景重构法、自定标法和光稀释效应校正算法,实现了光学厚度图像的精确获取与 SO_2 浓度的实时反演。此外,通过排放速率反演算法,将 SO_2 二维浓度数据转化为直观的排放速率信息,进一步增强了监测数据的实用性和可解释性。实验结果表明,自定标技术能够实时拟合定标曲线,误差仅为 2.35%;经光稀释效应校正后,在 623 m 处相机探测极限高达 3.84 ppm·m,而在 1 932 m 处仍能维持 6.24 ppm·m 的高灵敏度,这些数据充分证明设备满足对远距离、低浓度移动污染源监测的性能要求。设备的开发不仅为海上污染物的监测与治理提供了坚实的技术支撑,而且有助于了解船舶排放特性与气体污染物扩散机制。

关键词: 光学设计;环境监测;机器视觉;污染物浓度反演

中图分类号: TN23

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.4035

Ship exhaust SO_2 ultraviolet remote sensing imaging monitoring system

Zhang Yikang Wang Rui Wu Shie Yuan Haochen Zhou Wei Wu Kuijun He Weiwei

(School of Physics and Electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: The rapid development of the shipping industry has led to a significant increase in exhaust emissions from ships. Ship plume emissions are characterized by wide distribution and high mobility. These emissions are often hidden, uneven, and highly variable, making their regulation extremely challenging. In response to this, the present study designed and developed a high-precision, high spatiotemporal resolution UV imaging remote sensing system for the real-time, remote monitoring of SO_2 emissions from ship exhausts. The system employs a three-channel design, utilizing dual-wavelength channels at 310 nm and 330 nm to eliminate interference and accurately capture SO_2 signals, with a spectral channel used for cross-verification of accuracy. The monitoring system integrates the 2-IM sky background reconstruction method, a self-calibration technique, and an optical dilution effect correction algorithm, enabling the precise acquisition of optical thickness images and real-time inversion of SO_2 concentrations. Additionally, through an emission rate inversion algorithm, the 2D SO_2 concentration data are converted into intuitive emission rate information, further enhancing the practicality and interpretability of the monitoring data. Experimental results show that the self-calibration technique can fit calibration curves in real time with an error of only 2.35%. After optical dilution correction, the camera's detection limit reaches 3.84 ppm·m at 623 m, and it still maintains a high sensitivity of 6.24 ppm·m at 1 932 m. These results fully demonstrate that the system meets the performance requirements for monitoring distant, low-concentration, mobile pollution sources. The development of this system not only provides robust technical support for the monitoring and control of marine pollutants but also aids in understanding the characteristics of ship emissions and the diffusion mechanisms of gaseous pollutants.

Keywords: optical design; environmental monitoring; machine vision; pollutant concentration inversion

0 引言

全球经济的快速增长导致船舶航运业的迅猛发展。航运业在驱动经济发展的同时,也引起了严重的空气污染问题^[1]。SO₂ 气体是船舶尾气中最为重要的污染物^[2],过量排放 SO₂ 会严重影响海洋和陆地的气象条件和气候系统,并对人类健康和生态系统构成重大威胁^[3]。

船舶尾气污染物具有实时变化、流动性强、分布广泛且不均匀等特点,使得对其污染排放的监管长期以来一直未能很好解决。国内外科研机构针对船舶尾气污染排放研发的监测手段主要包括无人机嗅探法和光学遥感法^[4-6]。其中嗅探法是通过无人机直接进入羽流后利用多种传感器进行监测,该方法技术相对成熟且监测精度较高,能够同时监测多种气体。然而,嗅探法要求携带传感器的无人机^[7]进入羽流并稳定在最佳采样区域,对操作要求较高,且人力成本大。相比之下,光学遥感原理的船舶尾气监测方法具有简单快速的操作特点,以及远程全方位探测的技术优势。根据信号源的不同,船舶尾气光学遥感方法可以分为主动和被动两种方式。主动遥感方式的典型代表为激光雷达技术^[8-9]及可调谐二极管激光吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)技术^[10],其探测原理均是利用船舶尾气中污染成分的吸收光谱特征实现浓度测量,实时性好、快速准确且精度高。被动遥感方式主要包括紫外差分吸收光谱(differential optical absorption spectroscopy, DOAS)技术^[11]以及红外傅里叶变换光谱技术^[12-13],这些技术改善了监测仪器的便携性,能够进行多成分测量与分析。但上述主动或被动方式的光学遥感方法大多采用点式测量或扫描成像的方式获取尾气的浓度信息,其时间或空间分辨率通常较低,不适用于移动污染源的测量。

紫外相机技术是多光谱成像方法与紫外探测方法相结合的新型光学遥感手段,凭借高时间分辨率与高空间分辨率的优势,其在监测火山烟羽和工业烟囱的 SO₂ 气体污染排放领域得到迅速发展及广泛应用。2019 年,Donne 等^[14]利用紫外相机得到了埃特纳火山的 SO₂ 浓度图像,并测量了该火山 SO₂ 通量。2021 年,Cao 等^[15]利用多波长紫外成像监测系统成功测量了工业烟囱中的 SO₂ 浓度信息。2024 年何微微等^[16]提出使用机器视觉算法对工业烟囱烟羽的 SO₂ 浓度图像进行运动分析,并计算出工业烟囱的 SO₂ 排放速率。

近年来,得益于紫外相机量子效率的提升以及窄带滤光片边带抑制能力的增强和透过率的提高,SO₂ 紫外相机技术逐渐在排放量低且羽流分散的船舶尾气监测领域取得突破性进展。2021 年,Wu 等^[17]研发了紫外相机自校准方法,实现了对船舶羽流这类移动污染源的排放

监测。2022 年,Zhang 等^[2]建立了船舶尾气紫外双波段成像检测分析模型,减少干扰获取准确的 SO₂ 浓度信息。然而,鉴于船舶尾气作为移动污染源的属性,紫外船舶尾气检测技术仍面临若干挑战。首先,传统的定标方法需要频繁调整相机视场,难以满足移动污染源的监测需求^[18-19]。此外,随着船舶逐渐远离,光稀释效应^[18]愈发显著,导致 SO₂ 浓度被明显低估,严重限制了紫外相机的监测能力。其次,船舶移动以及大气湍流使得对船舶羽流 SO₂ 排放速率的精确反演极为困难。

为实现船舶尾气污染排放的精确遥感监测,本文开发了一套“船舶尾气 SO₂ 紫外遥感成像监测系统”。首先,在介绍大气紫外辐射传输特性和光谱成像原理的基础上,阐述了 SO₂ 紫外系统样机的设计构想与核心理念;随后,深入探讨了自定标技术、光稀释效应校正技术的理论基础以及排放速率反演的实现方法;最后新性地将上述先进技术应用用于船舶离港全程数据的处理与分析中,实现了对船舶尾气羽流 SO₂ 浓度的精确测定及 SO₂ 排放速率的准确反演,并论证了本系统的可靠性及准确性。

1 方法

1.1 测量原理

SO₂ 气体在紫外波段和红外波段均有吸收光谱,然而,红外波段的 SO₂ 气体吸收光谱容易受到大气中水蒸气和 CO₂ 的光谱干扰,故常选择紫外波段作为 SO₂ 气体的监测波段。SO₂ 紫外相机基于 Lambert-Beer 定律,利用 SO₂ 气体的紫外吸收特性实现 SO₂ 气体污染物的可视化监测^[20]。

如图 1 所示,SO₂ 气体在 240~320 nm 的紫外波段展现出吸收特征谱(图 1 中实线),其峰值位于 290 nm 附近(HITRAN2020^[21])。然而,由于 O₃ 的吸收作用,达到地球的太阳辐射主要在 300 nm 以上(图 1 中虚线)。鉴于 SO₂ 吸收波段与太阳散射光谱在 300~320 nm 区间存在重叠,特别是在 310 nm 处两者均表现出高强度,因此选定 310 nm 波段作为 SO₂ 监测波段(通道 A)。此外,为消除污染源烟羽中碳黑颗粒物造成的干扰,特选取无 SO₂ 吸收的 330 nm 波段作为参考波段(通道 B)。

根据 Lambert-Beer 定律,紫外相机通道接受到的光强可以表示为:

$$I_A(\lambda) = I_{A0}(\lambda) \exp(-\sigma(\lambda)S(\lambda) - \tau_m) \quad (1)$$

式中: $I_{A0}(\lambda)$ 和 $I_{B0}(\lambda)$ 表示 A、B 两通道穿过烟羽羽流前的光强; $I_A(\lambda)$ 和 $I_B(\lambda)$ 分别表示穿过烟羽羽流后的光强; $\sigma(\lambda)$ 是 SO₂ 的吸收截面; τ_m 是气团中炭黑颗粒物的消光率; $S(\lambda)$ 为 SO₂ 气体柱密度。

船舶尾气烟羽中 SO₂ 气体的光学厚度 τ_{so_2} 可以表

示为:

$$\tau_{\text{SO}_2} = -\ln \frac{I_A(\lambda)}{I_{A0}(\lambda)} + \ln \frac{I_B(\lambda)}{I_{B0}(\lambda)} \quad (2)$$

因此,通过式(2),利用 A、B 两通道采集到的烟羽信号图像和天空背景图像便可得到 SO₂ 光学厚度 τ_{SO_2} 。 τ_{SO_2} 的值与 SO₂ 气体的浓度直接相关,利用定标曲线即可将 SO₂ 的光学厚度图像转换为 SO₂ 的浓度图像。

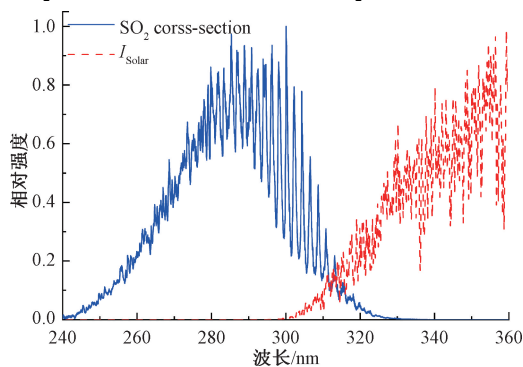


图1 SO₂ 与太阳光谱图像

Fig. 1 The image shows the SO₂ and solar spectra

1.2 自定标原理

获取的 SO₂ 光学厚度信息需借助 SO₂ 定标曲线才能转换为 SO₂ 浓度信息,定标曲线定义了光学厚度与浓度间的函数关系,是精确反演 SO₂ 浓度的关键。SO₂ 相机系统的标定曲线由 SO₂ 光学厚度 τ_{SO_2} 和 SO₂ 浓度线性拟合得到。然而,这一函数关系会随光照条件等外部因素发生变化。因此,在对移动污染源的监测时,需要实时拟合定标曲线。传统定标方法因需要频繁切换相机视场,而难以满足实时定标的要求,使得紫外相机在应用于船舶等移动污染源遥感监测方面受到极大限制。

自定标方法是利用大气辐射传输原理实现及背景图像特征获取光学厚度与气体浓度换算关系的定标方法,其依据 SO₂ 紫外相机自身的测量结果,无需定标泡或者 DOAS 设备,即可实现实时自主定标。

在 300~340 nm 波段范围内,SO₂ 和 O₃ 的特征吸收光谱同时存在。由于大气中 SO₂ 气体含量可忽略不计,紫外相机两通道记录的天空背景图像主要受到 O₃ 吸收作用的影响^[22]。且 A 通道受到 O₃ 的影响要大于 B 通道,因此,通过两通道光强比值即可实现自定标:

$$R = \log \left[\frac{\int_0^\infty L_0(\lambda) \cdot T_A(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty L_0(\lambda) \cdot T_B(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda} \right] \quad (3)$$

式中: $L_0(\lambda)$ 为太阳散射辐射; $T_A(\lambda)$ 和 $T_B(\lambda)$ 分别为 A、B 通道的滤光片透过率; $Q(\lambda)$ 为相机的量子效率。

此时 SO₂ 光学厚度和 SO₂ 浓度之间的物理关系取决

于太阳高度角、O₃ 浓度、滤光片透光率和相机的量子效率。计算公式如式(4)所示。

$$\tau_{\text{SO}_2} = \log \left\{ \frac{\int_0^\infty \theta(\lambda) \cdot T_A(\lambda) d\lambda \times \int_0^\infty L_0(\lambda) \cdot T_B(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty L_0(\lambda) \cdot T_A(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda \times \int_0^\infty \theta(\lambda) \cdot T_B(\lambda) d\lambda} \right\}$$

$$\theta(\lambda) = L_0(\lambda) \cdot \exp \{ - [\sigma_{\text{SO}_2}(\lambda) \cdot C_{\text{SO}_2}(\lambda)] \} \cdot Q(\lambda) \quad (4)$$

式中: σ_{SO_2} 为 SO₂ 的吸收截面; C_{SO_2} 为 SO₂ 的柱浓度。

由式(4)可知,通过计算两个通道的背景图像的比值,即可确定 SO₂ 的定标曲线。

1.3 光稀释效应校正原理

随着船舶渐行渐远,紫外相机的观测距离逐渐增加,大气的“光稀释效应”愈发显著,在导致图像中的烟羽结构逐渐模糊的同时,也使得定标曲线的误差迅速增大,远距离情况下反演得到的 SO₂ 浓度将被严重低估。此现象源于太阳散射光在穿过烟羽抵达相机感光面前,会与空气中的气溶胶发生相互作用,部分穿过烟羽的光子会散射到相机视场之外,而未穿过烟羽的部分光子也可能散射进入相机视场。此双重散射效应共同削弱了入射光的 SO₂ 下标吸收特性,从而影响了浓度反演的准确性。

紫外相机受到光稀释效应的影响可以通过大气消光系数进行量化并进行准确校正,假设大气中只发生单次散射,太阳散射光穿过 SO₂ 烟羽后,达到相机感光面时的辐射强度可表示为:

$$I'_A = I_A \cdot \exp(-\varepsilon_A d) + I_{\text{A sky}}(1 - \exp(-\varepsilon_A d))$$

$$I'_B = I_B \cdot \exp(-\varepsilon_B d) + I_{\text{B sky}}(1 - \exp(-\varepsilon_B d)) \quad (5)$$

式中: I'_A 和 I'_B 分别为 A、B 通道光稀释校正后的光强; I_A 和 I_B 为太阳散射光穿过烟羽后的光强; ε_A 和 ε_B 分别为 A、B 通道的大气消光系数; $I_{\text{A sky}}$ 和 $I_{\text{B sky}}$ 分别为 A、B 通道天空背景的光强; d 为被测量点与相机间的距离。

1.4 排放速率反演原理

紫外相机反演得到的 SO₂ 二维浓度图像虽然能够直观地呈现气体污染物的空间分布情况,但难以直接量化气体污染物的排放量。与浓度信息相比,排放速率更加能够直观反映污染物的具体排放情况。在工程应用中,为精准反映污染源实际排放情况,一般可以借助互相关法^[18]或光流法^[23-24]从浓度图像中提取速度流场信息并进一步转化为排放速率。

排放速率是指单位时间内从污染源释放到大气中的污染物的量,这个量可通过气体污染物浓度信息与其运动速度矢量信息计算得出。沿浓度图像中合适的烟羽横截面 l 对 SO₂ 气体柱浓度 C_{SO_2} 和有效速度 $v_{\text{eff}}(m)$ 进行离散积分计算得到每一帧的排放速率信息:

$$\Phi(l)=f^{-1}\sum_{m=1}^MC_{SO_2}(m)\cdot v_{eff}(m)\cdot d_{pl}(m)\cdot \Delta s(m)$$

(6)

式中: m 表示沿羽流横截面 l 的 M 个样本之一,表示为内插图像坐标 (i,j) ; f 是相机焦距; d_{pl} 是相机和羽流之间的距离; Δs 是积分步长; $v_{eff}(m)$ 表示烟羽的有效速度。

$$v_{eff}(m)=\langle \bar{v}(m)\cdot \hat{n}(m)\rangle$$

(7)

式中: $\bar{v}(m)$ 表示相应的速度矢量,包含在观察方向平均的投影羽流速度; $\hat{n}(m)$ 表示为 l 的法线^[25-26]。

本文中,船舶烟羽的速度流场信息是利用机器视觉算法通过比较相邻帧中对应像素点的亮度变化,再结合灰度不变性原理及空间梯度信息,然后求解每个像素点的速度矢量 \bar{v} 得到。再结合每一帧图像中像素的 SO_2 二维浓度信息即可得到排放速率反演结果。

2 仪器设计与构成

本文设计的船舶尾气遥感监测系统在 SO_2 辐射传输特性和紫外相机原理的基础上研制而成,由如下核心组件构建:1)紫外光学镜头,用于接收太阳散射信号并在紫外焦平面成像;2)紫外相机,用于将光信号强度转为数字信号强度,获取烟羽的图像信息;3)带通滤光片,用于滤除干扰信号,并提取船舶尾气烟羽中的 SO_2 气体及碳黑颗粒物的光谱信息;4)紫外光谱仪,采集天空背景光谱及烟羽信号光谱,用于校正辅助及对比验证。鉴于船舶尾气监测的实际应用场景,系统设计需综合考量硬件性能与操作环境,在保障系统功能性和稳定性的前提下,提升仪器的集成度和便携性,以灵活应对现场监测的多样化要求。

2.1 系统设计

鉴于 SO_2 气体的紫外吸收光谱特征及其对高精度、高灵敏度的监测要求,选用 Dhyana 400BSI V3 型背照式紫外相机作为图像采集元件。该相机的响应波段覆盖 200~1 000 nm,涵盖 SO_2 气体在 240~320 nm 的紫外吸收特征谱区域,在该特征区域,相机的量子效率高达 50% (图 2 中实线),满足 SO_2 气体监测的光谱需求。

该相机出色地兼顾了高空间采样率与高灵敏度,探测器像元数量高达 1 024 (H) × 1 024 (V),满阱容量 45 ke⁻,读出噪声为 1.2 e⁻。此外,该相机采用风冷控温技术,冷却温度可低于环境温度 45 ℃,符合外场监测使用要求。该紫外相机采用轻量化、低功耗的机身设计(功率 45 W,重量仅 995 g),利于仪器系统整合与快速部署。

紫外相机系统中,紫外光学镜头接收和聚焦紫外光,并传递至相机的感光元件上,二者共同构成了紫外成像系统的核心。为实现紫外光至相机感光元件的高效传

递,镜头参数需与相机严格匹配。为此,选用 10540 UVC 型号紫外光学镜头,该镜头表面特制紫外材料涂层,光谱响应覆盖 200~1 000 nm 的紫外波段。其透过率如图 2 所示(虚线),在 310 nm 波长处镜头的透过率高达 85%,与紫外相机的参数相契合。

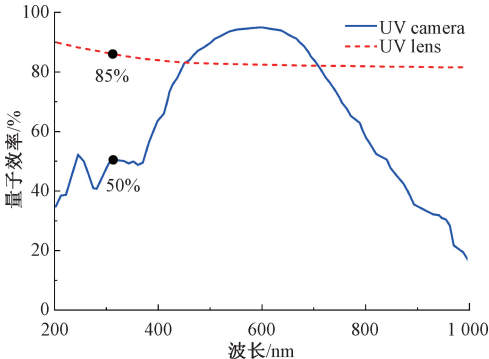


图 2 紫外相机机芯和紫外镜头的量子效率
Fig. 2 The quantum efficiency of the UV camera sensor and UV lens

鉴于 SO_2 吸收光谱特性以及碳黑颗粒物的光谱干扰,本系统采用信号通道和参考通道的双通道设计。其中,信号通道的中心波长为 310 nm,用于获取 SO_2 吸收光谱;参考通道中心波长为 330 nm 波段,用于消除碳黑颗粒物的影响。为实现精确的紫外波段筛选,本文系统使用 XHQA310 型(310 nm)与 XHQA330 型(330 nm)窄带滤光片,二者带宽均为 10 nm,直径 25 mm,厚度 5.5 mm。其透过率曲线如图 3 所示,实线代表 310 nm 滤光片,虚线代表 330 nm 滤光片,在中心波段两款滤光片的透过率均超过 60%,满足 SO_2 精确监测的技术要求。

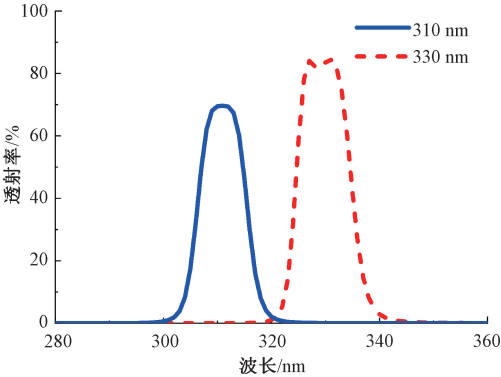


图 3 滤光片透过率曲线
Fig. 3 Transmission curve of the optical filter

此外,由于进入镜头的散射光线并非全部垂直照射滤光片表面的,这导致其中心波长和透射率发生偏移,引入误差。滤光片前置时,有效中心波长偏向短波,透射率随入射角增大而下降。相反,后置滤光片设计能缓解相

机系统边缘对监测灵敏度的削弱,优化 SO₂ 浓度反演的准确性^[27]。鉴于此,本系统采用滤光片后置方案,以最小化入射角度误差。

为扩展紫外系统监测功能以及验证 SO₂ 监测结果的准确性,在双通道设计的框架上增设了由紫外光谱仪组成的光谱通道。鉴于 SO₂ 紫外光谱特性,紫外光谱仪选用 BIM-6704 面阵高灵敏光谱仪,探测范围覆盖 200 ~ 1 100 nm 的紫外波段,尤其在 200 ~ 500 nm 波段处的灵敏度更为出众。该光谱仪配备 S10420-01 系列面阵背照式 CCD 探测器,A/D 分辨率为 16 bit,确保了数据的精确捕捉。此款光谱仪功耗仅为 2.5 W,符合外场监测的低能耗需求。

2.2 系统集成

在充分考量污染物光谱特性与仪器配置的基础上,结合机械设计与光学设计,设计了信号通道、参考通道和光谱通道的三通道 SO₂ 紫外相机系统如图 4 所示,旨在实现 SO₂ 污染排放的高效监测。其中,信号通道由中心波长为 310 nm 的滤光片、紫外镜头、紫外相机组成,用于获取 SO₂ 的光谱信息;参考通道由中心波长为 330 nm 的滤光片、紫外镜头、紫外相机所组成,用于采集碳黑颗粒物的光谱信息,以剔除其对 SO₂ 测量的潜在干扰;光谱通道,由光学镜头和紫外光谱仪组成,用于 SO₂ 污染物 DOAS 定标,并验证 SO₂ 浓度反演的准确性。

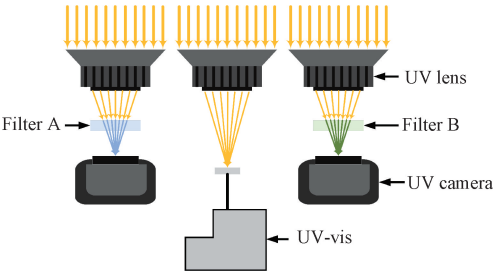


图 4 SO₂ 紫外相机系统通道设计光路

Fig. 4 Optical path diagram of the channel design for the SO₂ UV camera system

依据图 4 的光路设计,将主要器件(表 1)组装成 SO₂ 船舶尾气紫外成像监测系统样机。首先,依次链接紫外镜头 A、滤光片 A(310 nm)和紫外相机 A,构建紫外相机信号通道。同理,将紫外镜头 B、滤光片 B(330 nm)和紫外相机 B 顺次链接,组成紫外相机参考通道。最后,通过光纤将紫外镜头 C 与紫外光谱仪链接,构成紫外相机光谱仪通道。完成上述步骤后,按照信号通道、光谱仪通道、参考通道的顺序固定这 3 个通道,从而完成 SO₂ 紫外相机系统样机的组装。图 5(a)所示为组装完成的 SO₂ 船舶尾气紫外成像监测设备原型机实物,图 5(b)所示为设备俯视图。

表 1 船舶尾气紫外成像监测系统主要器件参数以及数量
Table 1 Key parameters and quantities of the components in the ship exhaust UV imaging monitoring system

| 仪器名 | 关键参数 | 参数信息 | 数量 |
|--------|--------------|---------------|----|
| 紫外光学镜头 | 视场角 | 9.8° | 3 |
| | 光圈范围 | F/4.0-F/22 | |
| | 焦距 | 105 mm | |
| 紫外相机 | 曝光时长 | 6.6 μs ~ 10 s | 2 |
| | 最高帧率 | 100 fps | |
| | 310 nm 处量子效率 | 50% | |
| 带通滤光片 | 中心波长 | 310、330 nm | 2 |
| | 带宽 | 10 nm | |
| 紫外光谱仪 | 光谱范围 | 200~1 100 nm | 1 |
| | 光谱分辨率 | 0.35 nm | |

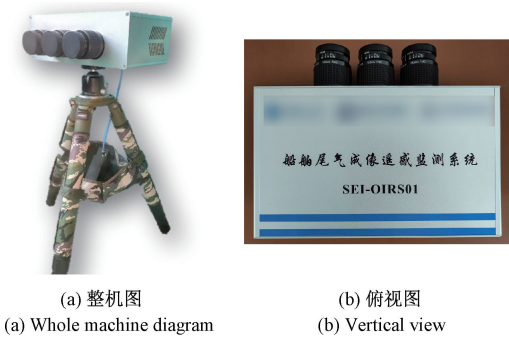


图 5 紫外相机系统样机

Fig. 5 Prototype of the UV camera system

图 6 所示为 SO₂ 紫外遥感成像系统的实际应用场景。在实际监测过程中,首先拍摄暗噪声图像,以备图像数据降噪使用。然后,移除镜头盖并调整相机云台,使监测系统正对烟羽羽流。此时,太阳散射光穿过污染物羽流后,经过紫外镜头进入 3 个监测通道。进入信号通道和参考通道的散射光分别通过 310 和 330 nm 滤光片,滤除杂散光后,被相机的测量模块接收。这些信号在计算模块中进一步处理,最终分别生成 SO₂ 信号图像与碳黑颗粒物信号图像。观察光子数即可判断是否满足该条件。在正式开展污染物监测前,须检查紫外相机和紫外光谱仪的参数设置以及初始时间是否对齐,以保障二者运行正常且保持同步,以减少误差并提高测量精度。最后,烟羽数据将传输至计算模块,通过反演算法精确获取 SO₂ 的二维浓度图像,从而实现船舶尾气中 SO₂ 的可视化实时在线监测。计算模块所呈图像,调整相机曝光时间及各镜头光圈的大小,直至图像清晰且相机采光电子数接近满阱电子数的 80%。由于像元收集的电荷量与光子数在理想状态下呈线性关系,在实际操作中,通过像素获取观测数据后的处理流程如图 7 所示。首先读取两通道的图像数据,运用阈值分割算法,去除图像中烟羽、船身等干扰部分,得到较为纯净的天空背景图像。接着,采

用背景重构法,基于已获取的天空背景图像,构建人工重建的天空背景图像,并利用这一新背景对原图像进行校正,从而获得准确的光学厚度图像。随后,运用自定标法,将已得的光学厚度图像转换为浓度图像。最后,将浓度图像序列作为输入,借助机器视觉算法提取浓度图像序列的速度矢量信息,将速度矢量信息与浓度图像相结合,反演得到污染物的排放速率曲线。

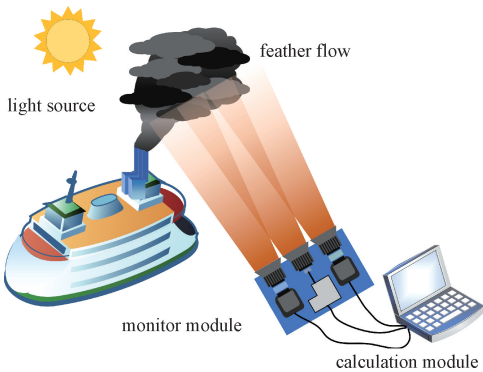


图 6 SO₂ 紫外相机实验原理

Fig. 6 Schematic diagram of the experimental setup for the SO₂ UV camera

3 实验与结果

为评估紫外相机系统在低 SO₂ 排放量及目标源快速移动场景下的性能,利用自主研制的船舶尾气遥感监测系统 in 烟台港进行船舶 SO₂ 排放遥感监测实验。实验地理信息如图 8 所示,其中黄色标记标明了紫外相机的布设位置;深红色点代表监测目标源的起始位置,红色点代表遥感监测结束时目标源所在位置。实验完整记录了船舶从启动到离港的全过程 of SO₂ 排放数据。为有效保障数据的精确性,选用 200 ms 曝光时间,旨在契合满阱电子数 80% 的既定标准。同时,为确保数据的动态连贯性与实时性,并以 5 fps 的帧率进行记录,为后续基于光学遥感和机器视觉的分析处理提供了坚实可靠的数据基础。

3.1 浓度反演

利用监测系统测得的船舶尾气污染排放图像,结合 SO₂ 紫外相机的信号通道和参考通道不同的光谱吸收特性,获取双通道光学厚度图像如图 9 所示,其中图 9(a)

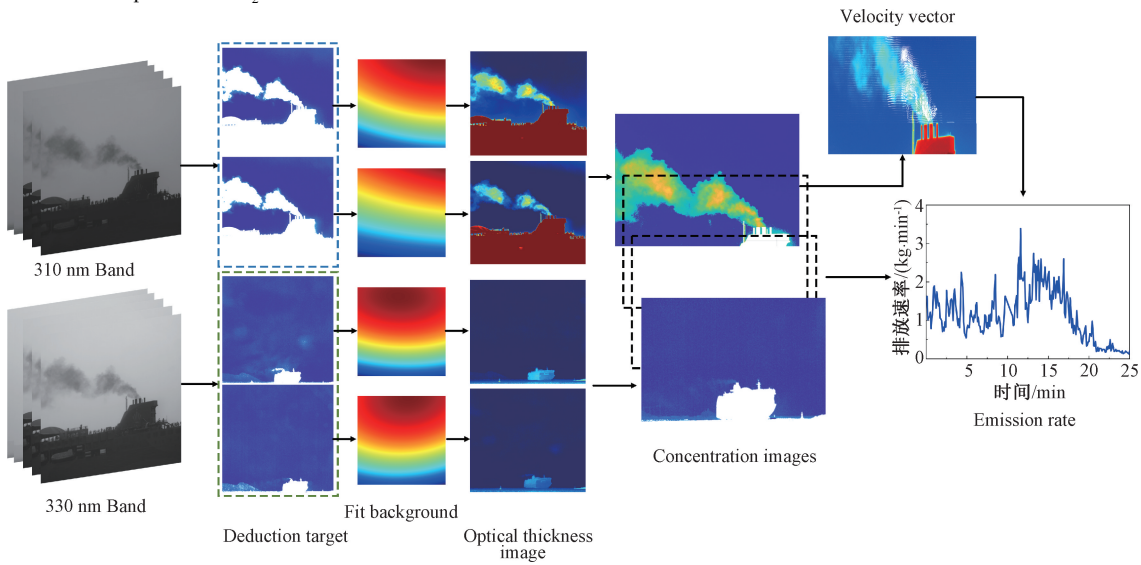


图 7 紫外相机系统数据处理流程

Fig. 7 Data processing flowchart of UV camera system

是 310 nm 波段的光学厚度图像,图 9(b)是 330 nm 波段的光学厚度图像。两相机同步状态良好,烟羽结构完整且清晰,为 SO₂ 浓度的精确反演提供了坚实的基础。

对两通道的光学厚度图像采用差值处理,可以有效剔除碳黑颗粒物的干扰,精确提取 SO₂ 光学厚度。然而,在紫外相机捕获的光学厚度图像中,由于船舶实时移动,其烟羽后方天空背景的光学厚度无法直接测量,极易导致 SO₂ 浓度反演结果偏离实际值。为此,创新性地应用

2-IM 方法重构背景图像^[16],首先精确识别并剔除图像中的烟羽区域,再对剔除区域做插值处理,人工重建的天空背景如图 10 所示,图 10(a)、(b)分别为信号通道人工拟合天空背景和参考通道人工拟合天空背景。利用新构建的人工天空背景对原图像进行校正,最终得到准确的光学厚度图像,如图 11 所示,图 11(a)、(b)分别为信号通道光学厚度图像和参考通道光学厚度图像。

在精确重构天空背景并准确获取 SO₂ 光学厚度图像

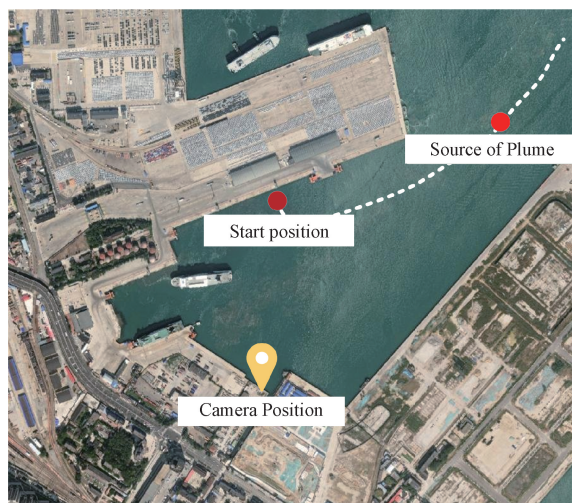


图8 实验地理信息

Fig. 8 Geographic information map of the experiment

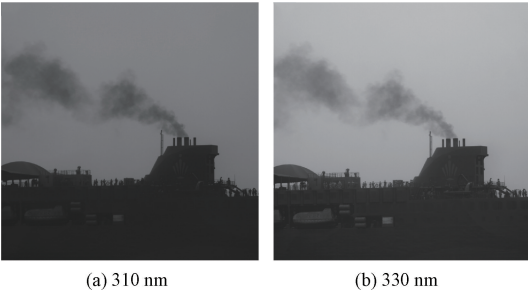


图9 船舶烟羽羽流紫外光学厚度图像

Fig. 9 UV optical thickness image of ship plume emissions

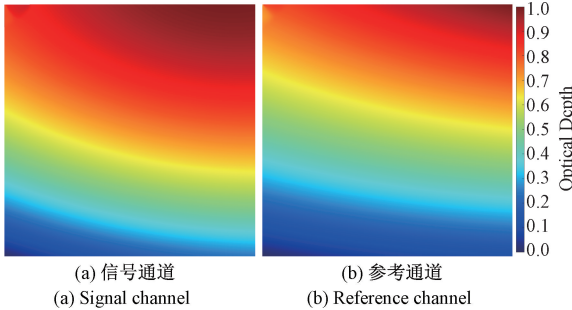


图10 2-IM 法得到的天空背景

Fig. 10 Sky background image obtained using the 2-IM method

的基础上,还需进一步利用定标曲线将 SO₂ 光学厚度信息转换为 SO₂ 浓度信息。这一过程主要依据光学厚度与浓度间的数值关系拟合得到的定标曲线完成。标准泡定标法(calibration cell)^[28]、DOAS 定标法^[29]和光谱定标法(spectral calibration)^[30]是获得定标曲线的3种常用方法,定标结果如图12所示。此外,利用信号通道和背景通道的比值求解定标系数的自定标法(self-calibration)^[31]更加适用于移动污染源。对比结果表明,自定标曲线与 DOAS 法曲线差异微小,仅为 1.25%;相较

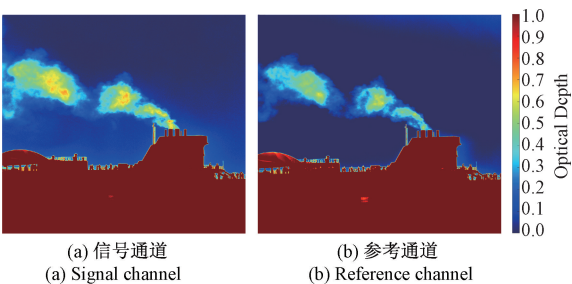


图11 信号通道和参考通道光学厚度图像

Fig. 11 Optical thickness images of signal channel and reference channel

于标准泡法和光谱定标法,差异分别为 2.35% 和 5.93%。数据表明,自定标法所得定标曲线与广泛应用的 DOAS 法结果高度一致,验证了自定标法的准确性和可行性。

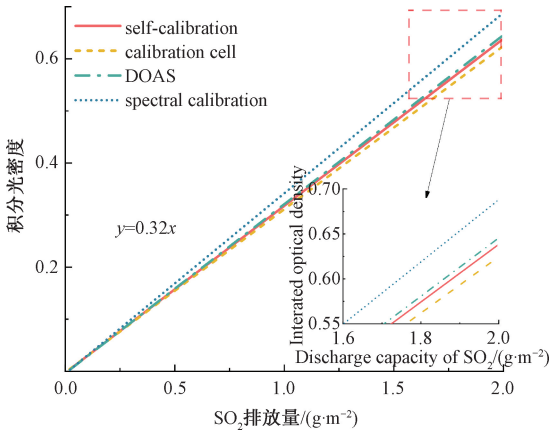


图12 不同定标方法的定标曲线

Fig. 12 Calibration curves of different calibration methods

利用得到的自定标曲线将 SO₂ 的光学厚度信息转换为 SO₂ 浓度信息,得到 SO₂ 浓度图像如图13所示。图13中,烟羽结构完整且边界分明,精确揭示了烟羽的浓度空间分布及其梯度变化,有力证明了自定标技术及 SO₂ 浓度反演算法的准确性,同时也彰显了 SO₂ 紫外相机的卓越性能。

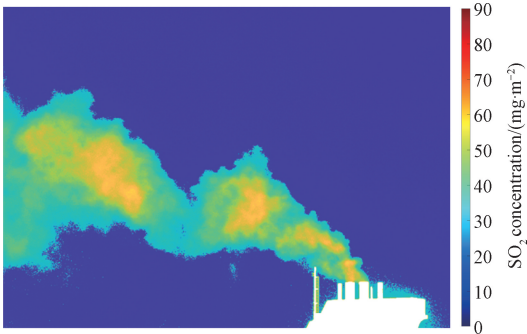


图13 SO₂ 浓度反演图像

Fig. 13 Inverted image of SO₂ concentration

3.2 光稀释效应校正

随着船舶驶离港口,相机监测距离逐渐增加,大气的“光稀释效应”的影响愈发显著,导致反演得到的 SO_2 浓度结果被严重低估。为探究不同监测距离下光稀释效应对测量结果的影响,选取了两处代表性监测点的测量结果对光稀释效应的影响以及校正效果做科学评估,两监测点距离监测系统的实际距离分别为 623 m 和 1 932 m (图 14(a) 和 (d))。在 1 932 m 处,光稀释效应尤为显著,导致图中烟羽结构模糊,与天空背景的界限难以辨识。光稀释效应校正前的光学厚度图像如图 14(b) 和 (e) 所示,结果表明,监测距离的增加直接导致光学厚度图像的精度下降,最终影响远距离 SO_2 监测的有效性。

为了提升紫外相机的监测精度与监测距离,引入消光系数 ε 量化和校正光学厚度图像中的光稀释效应。根据计算,623 m 处紫外相机的消光系数为 $\varepsilon_A = 0.1963$, 1 932 m 处紫外相机的消光系数 $\varepsilon_B = 0.2554$ 。利用计算得到的消光系数对光学厚度图像进行校正,校正结果如图 14(c) 和 (f) 所示。其中,图 14(f) 的校正结果更为显著,与未经校正的图 14(e) 相比,校正后的烟羽结构变得更清晰,与天空背景的界限也更为分明。

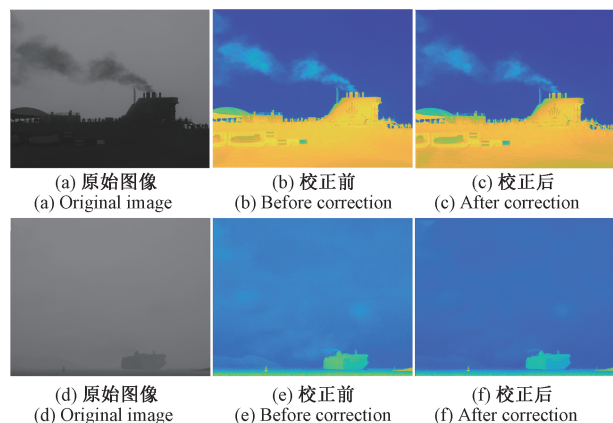


图 14 不同距离下光稀释效应校正前后对比图像

Fig. 14 Comparison images before and after optical dilution effect correction at different distances

3.3 探测极限

船舶尾气作为移动污染源,在远距离监测时,烟羽中 SO_2 浓度信息极易淹没在了背景噪声中,此时相机系统达到探测极限,难以有效区分 SO_2 信号与背景噪声。探测极限作为衡量系统监测性能的关键指标,直接体现了设备的灵敏度和精度。

影响 SO_2 紫外相机探测极限的因素有很多,除了前文提到的“光稀释效应”外,还包括天气状况、监测距离以及监测目标特性等外部因素,以及量子效率、暗电流与暗噪声等内部因素。为了保障 SO_2 浓度反演结果的准确

性,并提升 SO_2 紫外相机系统的精度与可操作性,探究该系统的探测极限显得尤为重要。

为了计算 SO_2 紫外相机在不同距离下的探测极限,选取不同监测距离拍摄的光学厚度图像中包含烟羽的一行,曲线如图 15 所示。其中,图 15(a) 为 623 m 处 SO_2 光学厚度图像第 460 行的光学厚度值,图 15(b) 为 1 932 m 处 SO_2 光学厚度图像的 760 行的光学厚度值。当图中 SO_2 信号略低于背景中的噪声时,表明 SO_2 光学厚度信号已被背景噪声掩盖,此时即视为达到了探测极限。实验数据表明,近距离监测(623 m 处)时,相机的探测极限为 3.84×10^{-6} m;而随着监测距离的增加(1 932 m 处),相机探测极限恶化至 6.24×10^{-6} m。

当系统探测极限不佳时,烟羽中低浓度的 SO_2 区域信号将难以被有效监测,导致较大的测量误差。为确保 SO_2 监测的清晰度和准确性,在使用 SO_2 紫外相机时应尽可能提升其探测极限。鉴于 SO_2 紫外相机的硬件性能是固定的,提升探测极限的关键在于优化外部条件。例如,晴朗的天气下,强烈的太阳辐射能为紫外相机提供了充足的光源,从而有效提高探测极限。

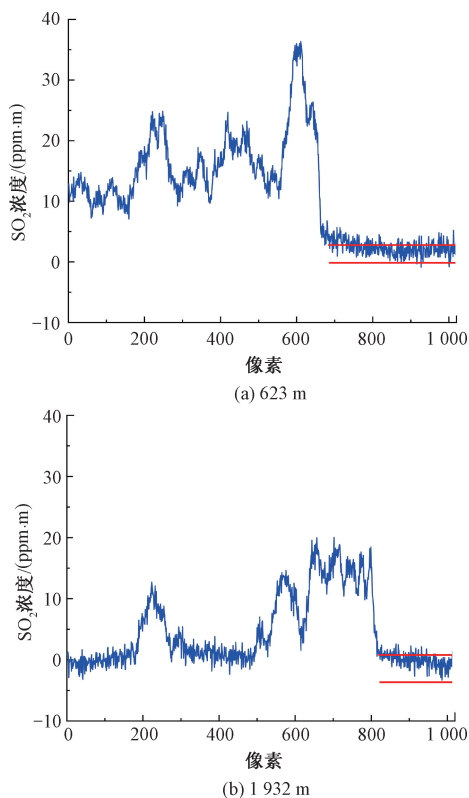


图 15 不同距离下相机的探测极限

Fig. 15 Detection limits of the camera at different distances

3.4 排放速率反演结果

反演得到的 SO_2 浓度图像虽然能够直观的展现 SO_2 的空间分布情况,却不能直接作为 SO_2 排放是否超标的

判断标准。在实际工程中,常采用机器视觉算法,将 SO_2 二维浓度数据转换为更具有实用价值的排放速率信息。该方法首先以反演得到的船舶尾气二维浓度图像为输入,使用 Farneback 等光流算法^[32],依据相邻图像间烟羽的亮度值的变化,计算得到烟羽速度矢量信息如图 16(a)所示。其中,白色箭头表示改像素点的运动估计矢量,箭头的方向代表像素移动的方向,箭头的长度代表速度的大小。随后,选取适合的羽流横截面,结合该羽流横截面上的 SO_2 二维浓度信息与速度矢量信息,依据式(6)即可得到每一帧的 SO_2 排放速率。

由图 16(a)可见,多数烟羽速度矢量指向左上方,符合实际烟羽运动的自然特征。值得注意的是,烟囱附近的烟羽因高速与湍流影响,出现速度矢量紊乱的现象。为确保排放速率反演结果的准确性,选择羽流横截面时应避免此区域。

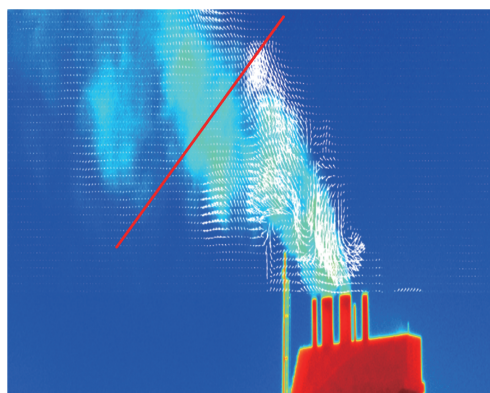
选取图 16(a)中红线的羽流横截面,计算得到的 SO_2 排放速率曲线如图 16(b)所示,其中 SO_2 排放速率的数值呈现先增后减的趋势。一方面随着船舶加速离港期间,燃油消耗增加带动了 SO_2 排放量的增加,进而使 SO_2 排放速率上升。另一方面,随着观测距离的增加,光稀释效应等因素的影响愈发明显,导致 SO_2 浓度值被低估,从而使得排放速率反演值逐渐下降,直至超出监测范围。这一变化趋势与 SO_2 排放速率的预期走势相吻合,证实了反演方法的有效性与准确性。

4 结 论

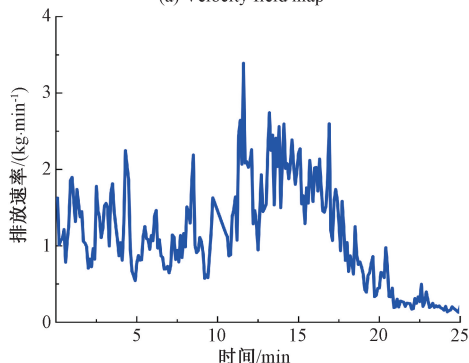
本文聚焦于船舶尾气这一典型的移动污染源,研制了一套船舶尾气 SO_2 紫外遥感成像监测设备,并利用该设备进行了现场测试和数据分析。对仪器的监测原理、硬件系统及反演方法进行了详细的介绍,并通过外场实验验证了该仪器的可操作性与准确性。

本文系统采用三通道设计,包括中心波段为 310 nm 的信号通道、中心波段为 330 nm 的参考通道,以及紫外光谱仪构建的光谱通道。信号通道被用于获取烟羽羽流中 SO_2 光谱信号,参考通道则用于消除碳黑颗粒物干扰,从而精确绘制 SO_2 光学厚度图像;而紫外光谱仪构建的光谱通道则用于测量结果的对比验证,以确保系统的精度及可靠性。

为破解移动污染源在远距离低浓度监测中的难题,创新性提出了 2-IM 天空背景重构法、自定标法、光稀释效应校正以及排放速率反演算法。首先,利用 2-IM 法实时重构人工天空背景,以克服天空背景随机变化的干扰,从而获取高精度 SO_2 光学厚度图像。然后,采用自定标技术实时拟合 SO_2 光学厚度和 SO_2 浓度的数值关系,以满足移动污染源对定标方法的特殊要求,结果表明自定



(a) 速度场图
(a) Velocity field map



(b) 排放速率反演结果
(b) Results of emission rate inversion

图 16 流场图和排放速率反演结果

Fig. 16 Flow field map and results of emission rate inversion

标技术与传统定标方法相比不仅工程实现难度极大降低,而且精度也显著提高,自定标技术的误差低至 2.35%,可以满足 SO_2 实时监测的要求。其次,为增强设备远距离条件下 SO_2 监测能力,引入光稀释校正技术,有效补偿了因光稀释效应引起的光强变化,实验结果显示在 623 和 1 932 m 处相机探测极限分别可达 3.84 和 6.24 ppm·m,设备监测性能获得了显著提升。最后,通过排放速率反演算法,将 SO_2 二维浓度数据转化为直观的排放速率信息,进一步增强了监测数据的实用性和可解释性。

基于紫外多光谱成像机理的船舶尾气 SO_2 遥感监测设备,具有远距离监测、快速响应、可视化监测以及实时反馈等显著优势,能够实现对移动污染源的高精度实时监测。该设备不仅为海洋大气环境保护提供了有力的技术支撑,而且有助于深入了解船舶排放特性及气体污染物扩散机制,其数据支持为制定更加科学、合理的排放控制政策和技术手段奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] CHENG B, REN B, LU S. Smartphone-assisted electrochemical sensors for environmental monitoring:

- Smartphone-assisted sensors[J]. Instrumentation, 2024, 11(3):1-12.
- [2] ZHANG Z, ZHENG W, CAO K, et al. An improved method for optimizing detection bands of marine exhaust SO₂ concentration in ultraviolet dual-band measurements based on signal-to-noise ratio[J]. Atmospheric Pollution Research, 2022, 13(7):101479.
- [3] BAI C, LI Y, LIU B, et al. Gaseous emissions from a seagoing ship under different operating conditions in the coastal region of China[J]. Atmosphere, 2020, 11(3):305.
- [4] ANAND A, WEI P, GALI N K, et al. Protocol development for real-time ship fuel sulfur content determination using drone based plume sniffing microsensor system [J]. The Science of The Total Environment, 2020, 744:140885.
- [5] ZHOU F, GU J, CHEN W, et al. Measurement of SO₂ and NO₂ in ship plumes using rotary unmanned aerial system[J]. Atmosphere, 2019, DOI:10.3390/atmos10110657.
- [6] BEECKEN J, MELLQVIST J, SALO K, et al. Airborne emission measurements of SO₂, NO_x and particles from individual ships using a sniffer technique [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, 7(7):1957-1968.
- [7] 范云生, 张凯, 牛龙辉, 等. 海上无人机对运动船舶的长期检测跟踪算法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(3):326-335.
- FAN Y SH, ZHANG K, NIU L H, et al. Long term detection and tracking algorithm for moving ships using unmanned aerial vehicles at sea[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(3):326-335.
- [8] WANG Y, LIN C, LIU G H. Trajectory-based vehicle emission evaluation for signalized intersection using roadside LiDAR data[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 440:140971.
- [9] 刘永超, 刘秀文, 谢兴涛, 等. 基于激光雷达的港口环境海面目标检测[J]. 电子测量技术, 2023, 46(6):153-158.
- LIU Y CH, LIU X W, XIE X T, et al. Port environment sea surface target detection based on LiDAR [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(6):153-158.
- [10] ZHANG K, ZHU W, ZHAO J, et al. Study of vehicle exhaust detection based on TDLAS [J]. Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications VI, 2019, 11189:286-294.
- [11] HAN X, LIU Y, GUO J. Motor exhaust telemetry device based on differential optical absorption spectroscopy[C]. 17th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN2018), 2019, 11048:707-711.
- [12] GIECHASKIEL B, CLAIROTTE M. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy for measurements of vehicle exhaust emissions: A review [J]. Applied Sciences, 2021, 11(16):7416.
- [13] SMIT R, KINGSTON P, NEALE D W, et al. Monitoring on-road air quality and measuring vehicle emissions with remote sensing in an urban area [J]. Atmospheric Environment, 2019, 218:116978.
- [14] DONNE D, AIUPPA A, BITETTO M, et al. Changes in SO₂ flux regime at Mt. Etna captured by automatically processed ultraviolet camera data[J]. Remote Sensing, 2019, 11(10):1201.
- [15] CAO K, ZHANG Z, LI Y, et al. Ship fuel sulfur content prediction based on convolutional network and ultraviolet camera images [J]. Environmental Pollution, 2021, 273:116501.
- [16] 何微微, 袁浩宸, 郭建军, 等. 基于背景图像重构的船舶尾气遥感监测方法[J]. 光学学报, 2024, 44(12):384-393.
- HE W W, YUAN H CH, GUO J J, et al. Remote sensing monitoring method for ship exhaust based on background image reconstruction [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(12):384-393.
- [17] WU K, XIONG Y, FENG Y, et al. Development of a self-calibration method for real-time monitoring of SO₂ ship emissions with UV cameras [J]. Optics Express, 2021, 29(2):1813-1823.
- [18] VARNAM M, BURTON M, ESSE B, et al. Two independent light dilution corrections for the SO₂ camera retrieve comparable emission rates at masaya volcano[J]. Nicaragua, 2021, 13(5):935.
- [19] WU K, FENG Y, XIONG Y, et al. Real-time continuous calibration method for an ultraviolet camera [J]. Optics Letters, 2020, 45(24):6851-6854.
- [20] OSHINA I, SPIGULIS J. Beer-Lambert law for optical tissue diagnostics: Current state of the art and the main limitations [J]. Journal of Biomedical Optics, 2021, 26(10):100901.
- [21] GORDON I E, ROTHMAN L S, HARGREAVES R, et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2021, 277(11):107949.
- [22] BAIS A F, BERNHARD G, MCKENZIE R L, et al. Ozone-climate interactions and effects on solar ultraviolet radiation[J]. Photochemical & Photobiological Sciences, 2019, 18(1):602-640.

- [23] PRATA F, CORRADINI S, BIONDI R, et al. Applications of ground-based infrared cameras for remote sensing of volcanic plumes [J]. *Geosciences*, 2024, 14(3):82.
- [24] 李泉成, 曹江涛, 姬晓飞. 光流增强的红外成像气体泄漏检测方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(3):50-56.
LI Q CH, CAO J T, JI X F. Infrared imaging gas leak detection method enhanced by optical flow[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(3):50-56.
- [25] GLIB J, STEBEL K, KYLLING A, et al. Pyplis-A python software toolbox for the analysis of SO₂ camera images for emission rate retrievals from point sources[J]. *Geosciences*, 2017, 7(4):134.
- [26] GLIB J, STEBEL K, KYLLING A, et al. Improved optical flow velocity analysis in SO₂ camera images of volcanic plumes - implications for emission-rate retrievals investigated at Mt Etna, Italy and Guallatiri, Chile[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(2):781-801.
- [27] 熊远辉, 罗中杰, 陈振威, 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.
XIONG Y H, LUO ZH J, CHEN ZH W, et al. Ultraviolet imaging remote sensing monitoring of SO₂ gas emissions[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(4):1289-1296.
- [28] 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.
- [29] 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*, 2017, 9(6):517.
- [30] WU K J, GUO J J, ZHANG Z H, et al. Spectral calibration for SO₂ cameras with light dilution effect correction[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(14):3652.
- [31] 张子豪, 郭建军, 张会亮, 等. SO₂ 紫外相机的实时自定标方法研究[J]. *光学学报*, 2023, 43(12):255-263.
ZHANG Z H, GUO J J, ZHANG H L, et al. Research on real time self calibration method of SO₂ ultraviolet camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(12):255-263.
- [32] 卢嫚, 朱世博. 基于 OpenCV 和 YOLOv5 的车道线检测与识别[J]. *国外电子测量技术*, 2024, 43(6):134-142.
LU M, ZHU SH B. Lane line detection and recognition based on OpenCV and YOLOv5 [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2024, 43(6):134-142.

作者简介



张一康, 2022 年于山东理工大学获得学士学位, 现为烟台大学硕士研究生, 主要研究方向为电子仪器设计。

E-mail: yikangzhang@s.ytu.edu.cn

Zhang Yikang received his B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at Yantai University. His main research interest includes electronic instrument design.



何微微(通信作者), 2010 年于鲁东大学获得学士学位, 2015 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为烟台大学副教授, 主要研究方向为光学遥感。

E-mail: heweiwei@ytu.edu.cn

He Weiwei (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Ludong University in 2010, Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2015. Now she is an associate professor at Yantai University. Her main research interest includes optical remote sensing.