

# 船舶尾气成像遥感监测系统

何微微<sup>1</sup>, 张会亮<sup>1</sup>, 张一康<sup>1</sup>, 袁浩宸<sup>1</sup>, 周维<sup>1</sup>, 张子豪<sup>1</sup>, 郭建军<sup>1</sup>, 武魁军<sup>1\*</sup>

(1.烟台大学物理与电子信息学院, 山东烟台 264005)

**摘要:** 近年来, 交通运输部、国务院等部门相继发布多个指定区域内船舶尾气污染物控制相关的通告与方案, 旨在设置排放控制区, 减少船舶排放对空气和水质的负面影响。发展高可靠的海洋环境监测技术是保障相关政策顺利实施的关键, 为此提供一种船舶尾气成像遥感监测系统, 实现船舶尾气污染物的实时可视化监测。系统采用三通道光路设计, 通过记录分析过往船舶排放烟羽在紫外波段的吸收光谱, 结合自定标技术、引入人工智能技术, 反演 SO<sub>2</sub> 浓度以及排放速率。结果表明, 系统可以实现大规模、高可靠的船舶尾气污染物实时可视化监测, 促进船舶污染气体减排, 助力打赢蓝天保卫战。

**关键词:** SO<sub>2</sub> 遥感监测; 紫外光谱; 自定标技术; 排放速率; 光稀释效应

中图分类号 O433

文献标志码 A

## Ship Exhaust Imaging Remote Sensing Monitoring System

He Weiwei<sup>1</sup>, Zhang Huiliang<sup>1</sup>, Zhang Yikang<sup>1</sup>, Yuan Haochen<sup>1</sup>, Zhou Wei<sup>1</sup>,

Zhang Zihao<sup>1</sup>, Guo Jianjun<sup>1</sup>, Wu Kuijun<sup>1\*</sup>

(1. School of Physics and Electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, Shandong, China;)

**Abstract:** In recent years, the Ministry of Transport and other government departments, including the State Council, have successively issued multiple notices and plans related to the control of exhaust pollutants from ships within designated areas. The aim is to establish emission control areas to reduce the negative impact of ship emissions on air and water quality. The development of reliable marine environmental monitoring technology is a key factor in ensuring the smooth implementation of these policies. In this regard, a ship exhaust imaging remote sensing monitoring system is provided to achieve real-time visualization monitoring of ship exhaust pollutants. The system employs a three-channel optical path design, retrieves SO<sub>2</sub> concentration and emission rate by recording and analyzing the absorption spectra of the emission plume from passing ships in the ultraviolet band, combining with self-calibration technology and introducing artificial intelligence technology. The results indicate that the system can realize large-scale, high-reliability real-time

visualization monitoring of ship exhaust pollutants, thereby promoting the reduction of ship pollution emissions and contributing to the success of the fight for blue skies protection.

Keywords: Remote sensing of SO<sub>2</sub>; Ultraviolet spectroscopy; Self-calibration technique; Emission rate; Light dilution effect

## 1 设计背景和应用价值

### 1.1 设计背景

船舶尾气排放包括二氧化硫 (SO<sub>2</sub>) 和氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 在内的大量有害物质<sup>[1]</sup>, 会对空气和水质造成污染, 对沿海和港口城市的环境质量产生负面影响, 导致大气污染和酸雨等问题<sup>[2]</sup>。鉴于此, 中国以及国际社会对船舶排放的监管日益趋严格, 相继颁布多个船舶排放控制区政策<sup>[3-4]</sup>, 要求船舶在特定区域内限制排放。然而, 目前仍缺乏高效可靠的监测设备, 难以保证政策的顺利实施, 因此发展新型海洋环境监测技术显得尤为迫切。

国内外诸多科研机构相继提出了多种监测和量化船舶尾气中污染气体含量的方法, 包括嗅探法<sup>[5-6]</sup>、人工取样法<sup>[5]</sup>以及光学遥感法<sup>[5, 7-8]</sup>等。其中嗅探法可分为定点嗅探监测<sup>[9]</sup>和移动嗅探监测<sup>[10]</sup>, 该方法通常监测精度高、能够提供即时排放数据, 同时传感器性能稳定, 不易受环境干扰影响, 但受制于传感器的位置和数量, 通常该方法只能实现点式监测追踪, 且需要定期维护和校准传感器。人工取样法是一种采样式监测方法<sup>[11]</sup>, 通过人工登船抽取油样或通过出烟口安装采样装置收集样本, 而后通过后续样本在实验室中分析以确定污染物浓度, 该方法可同时提供多组分的高精度分析结果, 但采样和实验室分析首先需要耗费大量时间, 难以保证监测的时效性, 同时采样过程和实验室分析过程均需要复杂的仪器设备以及高额的人力成本。光学遥感法中的一个代表为激光雷达监测法, 通过使用固定波长的激光束照射船舶尾气, 通过测量分析激光的散射或吸收来获取污染物浓度, 该方法适用于多种污染物的监测, 同时可远程实现即时的数据分析结果。但通常激光雷达设备成本较高, 且需要专业人员进行操作维护, 同时恶劣天气条件均会影响监测精度, 此外激光束有一定的监测范围, 不适用于大范围监测<sup>[12]</sup>。综上所述, 发展兼具大规模、高稳定、高性能、高可靠的船舶尾气污染实时监测设备意义重大。

### 1.2 应用价值

船舶尾气排放的污染物会对环境和社会造成广泛而严重的危害, 这些污染物包括二氧化硫 (SO<sub>2</sub>)、氮氧化物 (NO<sub>x</sub>)、颗粒物等, 将会对大气、水体和生态系统带来不利影响<sup>[13]</sup>。

船舶尾气成像遥感监测系统通过监测和控制船舶排放物的浓度和速率,降低大气和水体中的污染水平,改善空气和水质,保护生态系统和野生动植物。其次,通过利用该监测系统实施监察,减少尾气排放中的有害物质含量,有助于改善城市和港口地区的空气质量,减少呼吸道疾病和其他健康问题的发生,提高公众的生活质量。此外,本技术还助力可持续发展目标的实现,通过降低排放、减少资源浪费,以及更好地保护环境,推动船舶行业向更加可持续的方向迈进,实现可持续发展目标,减少对地球资源的不可持续利用。最后,监测系统所收集的数据可用于研究船舶排放的影响、趋势和模式,有助于制定更有效的政策、法规和环境管理措施,同时促进相关领域的学术研究。

## 2 创新点与优势

1) 目前市面上缺乏能够对船舶尾气实现大规模二维成像的光学监测设备。本系统通过结合高分辨率光谱仪和紫外相机,实时记录船舶尾气污染物排放的空间分布,实现对船舶尾气排放的全面监测。

2) 针对船舶作为移动污染源移动快导致天空背景变化快的问题,创造性提出浓度本底实时自校准技术,实现实时重构当前帧图像的天空背景。

3) 针对船舶尾气排放速度快、变化无影形以及光谱仪视场与相机视场匹配困难的问题,创造性提出自定标技术,实现实时计算当前时刻定标参数<sup>[13]</sup>。

4) 针对随着监测距离增加,采集图像质量严重下降的问题,提出光稀释效应校正技术,提高监测系统的有效监测距离<sup>[13]</sup>。

5) 通过引入机器视觉,结合人工智能,将反演浓度信息实时转化为气体排放速率,以更有效地监管船舶尾气排放,强化监管的可行性。

## 3 实现方案简介

### 3.1 设计原理

船舶尾气成像遥感监测系统的探测原理基于 Beer-Lambert 定律。当太阳光穿过大气中的目标区域时,其中的 SO<sub>2</sub> 分子会吸收特定波长的紫外光,通常在 280 至 320 nm 之间,吸收过程是基于 SO<sub>2</sub> 分子的分子结构和电子能级,只在特定波长下发生。此时,监测系统感光面每一像素点测量光强  $I_{\text{mea}}$  受到波长  $\lambda$  的影响而变化:

$$I_{\text{mea}}(\lambda) = I_s(\lambda) \cdot T_0(\lambda) \cdot Q(\lambda) \cdot \exp[-\sigma(\lambda) \cdot S(\lambda)] \quad (1.1)$$

其中,  $Q$  为紫外相机的量子效率,  $T_0$  为滤光片的透射系数,  $I_s$  为大气背景辐射强度。  $\sigma$  为

SO<sub>2</sub> 的吸收截面， $S$  为 SO<sub>2</sub> 的柱密度。

光学厚度是用来描述大气中某种物质浓度的一种参数，根据目标区域中光线传播过程中的光强度变化来计算。在目标区域，未经大气中任何成分影响的初始光强度可用  $I_0$  表示，经过尾气中某些气体组分吸收后的光强可表示为  $I_{mea}$ 。因此，在监测波段  $\lambda$  若只存在一种物质（SO<sub>2</sub>）对太阳辐射有吸收，则 SO<sub>2</sub> 光学厚度可表示为：

$$\tau = -\ln \left[ \frac{I_{mea}(\lambda)}{I_0(\lambda)} \right] = \sigma(\lambda) \cdot S(\lambda) \quad (1.2)$$

事实上如图 1 所示，由于 O<sub>3</sub> 的吸收，到达地表的太阳辐射高于 300 nm，而在 SO<sub>2</sub> 吸收最明显的 310 nm 波段附近，同样存在气溶胶颗粒物对太阳辐射的吸收。幸运的是，气溶胶颗粒物的吸收受波长影响变化小，因此船舶尾气成像遥感监测系统采用三通道设计，其中 A 通道选择测量 310 nm 波段的辐射强度，从而量化气溶胶颗粒物和 SO<sub>2</sub> 气体的总吸收量；B 通道选择测量 330 nm 波段的辐射强度，该波段仅受到气溶胶颗粒物的吸收影响；同时增加光谱仪测量通道，用以确定定标曲线系数。分别依据公式 1.2 计算 A、B 两通道各光学厚度  $\tau_A$ 、 $\tau_B$  后进行差值计算，便可求取 SO<sub>2</sub> 气体的光学厚度  $\tau_{SO_2}$ 。

$$\begin{aligned} \tau_{SO_2} &= \tau_A - \tau_B \\ &= -\ln \left[ \frac{I_{mea,A}(\lambda)}{I_{0,A}(\lambda)} \right] - \left\{ -\ln \left[ \frac{I_{mea,B}(\lambda)}{I_{0,B}(\lambda)} \right] \right\} \end{aligned} \quad (1.3)$$

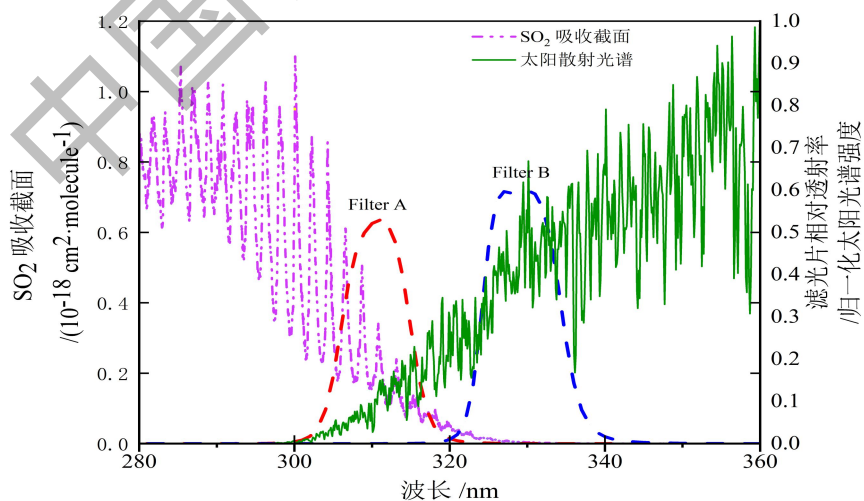


图 1 280 - 360 nm 波段内的 SO<sub>2</sub> 吸收截面（点划线）和相对太阳散射光谱（实线），同时标注了滤光片 A、B 的相对透射率曲线

## 3.2 设计方法

该设计利用太阳散射光作为光源,通过两台紫外相机与两个滤光片分别构成目标光路和背景光路,同时在目标光路和背景光路中间增加一条光谱仪光路,为定标过程提供数据支持的同时还克服视场不匹配问题。

监测仪器下方配置云台稳定系统,保证监测过程的平稳同时还方便视场调节。

## 3.3 实验验证过程

### 3.3.1 实验数据采集

于 2023年3月31日 10:00 开始在烟台某客运港口安置监测系统,对两艘客滚船进行实时监测。当日天气晴朗,气温 16 °C,能见度为 16 km,监测距离变化范围为 0.45 – 3 km。

首先根据当日现场环境情况,调整曝光时间以及监测频率等必要参数,随后调整监测视场,使被监测船舶烟羽充满视场中央,最后,随船舶运动情况实时监测船舶排放情况。现场监测情况如图 2 所示



图 2 现场实验监测情况及目标烟羽源

### 3.3.2 实验仪器参数

仪器参数如下表 1 所示:

表 1 船舶尾气成像遥感检测系统参数

性能参数	参数值
相机分辨率	2048 × 2048
像素大小	6.5 μm × 6.5 μm
帧频	5 fps@16-bit
感光元件尺寸	18 mm
视场角	9.8°
焦距	105 mm

### 3.3.3 实验结果与讨论

实验结果表明，该监测系统能够准确测量船舶尾气排放中的污染物排放情况。其中，监测系统利用 A 通道、B 通道拍摄目标烟羽图像如图 3 (a)、(b) 所示。

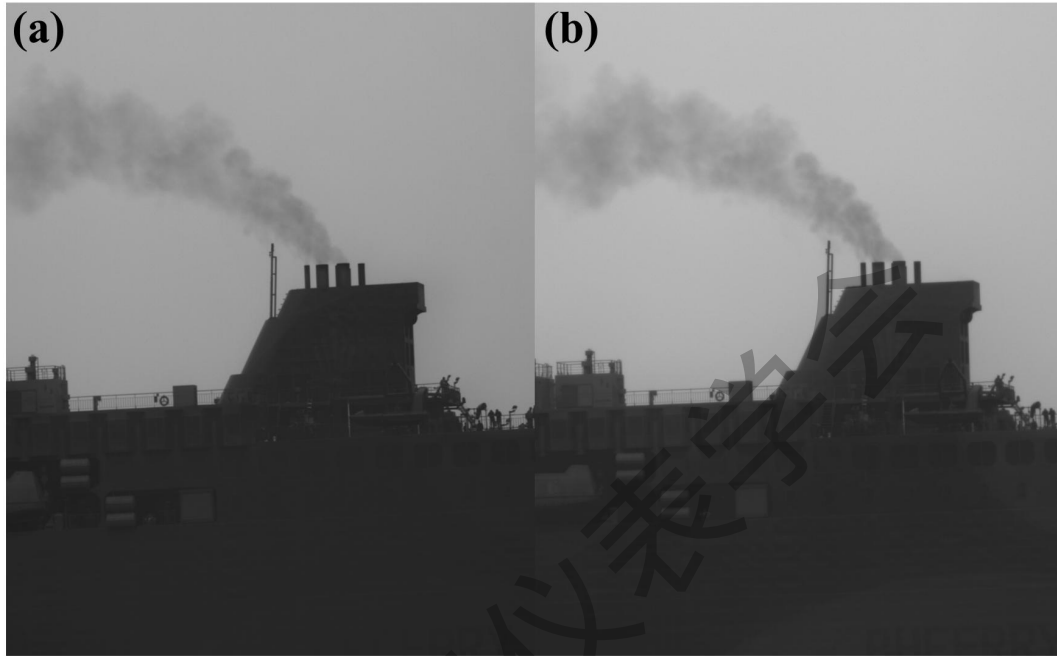


图 3 现场实验结果。(a) 310 通道采集数据结果 (b) 330 通道采集数据结果

结合天空背景信息便可求得两通道光学厚度值，利用定标曲线反演最终  $\text{SO}_2$  浓度分布如图 4 所示。

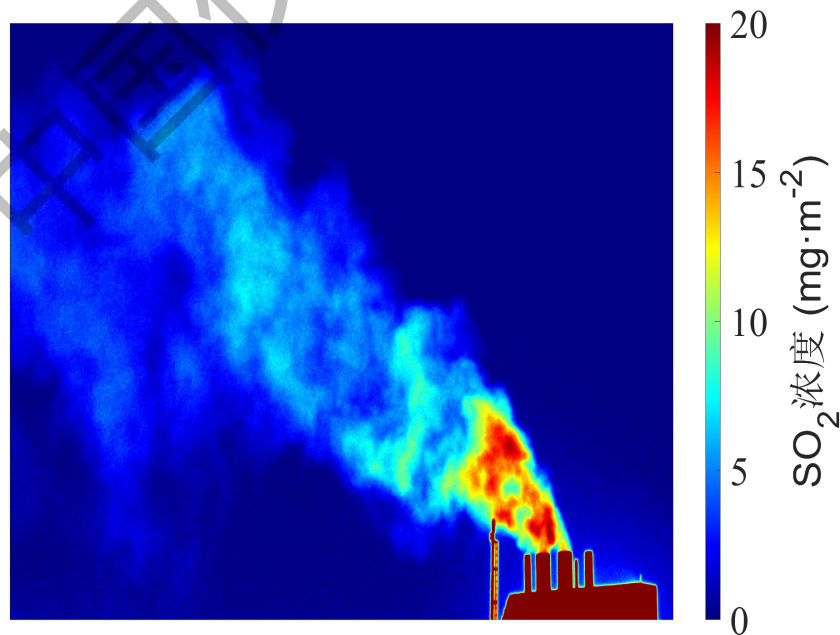


图 4 船舶尾气成像遥感监测系统监测效果

## 参考文献:

- [1] 翟绍兵, 郑美扬. 杭州港船舶尾气污染排放现状及措施建议[J]. 水上安全, 2023, 02: 80-81.
- [2] 刘晨, 陈荣昌. 粤港澳大湾区船舶污染风险分析及防治对策研究[J]. 交通节能与环保, 2022, 18(01): 32-35.
- [3] 凌贵阳, 李思颖. 锚定“双碳”目标 发展绿色航运[N]. 中国交通报, 2023-04-04.
- [4] 徐军华. 内河船舶尾气排放实施末端防治的对策[J]. 中国水运, 2022, 11: 72-74.
- [5] 王宏杰, 崔志旺, 杨晓东, 等. 船舶尾气在线监测系统[J]. 港口科技, 2022, 10: 18-24.
- [6] Beecken J, Mellqvist J, Salo K, et al. Airborne emission measurements of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and particles from individual ships using a sniffer technique[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 7: 1957-1968.
- [7] 郑文博. 船舶尾气 SO<sub>2</sub> 排放紫外成像遥感监测技术研究 [D]; 大连海事大学, 2022.
- [8] Čelić J, Cuculić A, Valčić M. Remote sensing for ship emissions monitoring in Adriatic ports: An approach [J]. Proceedings *ELMAR-2012*, 2012, 12: 263-266.
- [9] Qi Z, Peng S, Hu J, et al. Surveillance practice and automatic data algorithm of sniffing telemetry for SO<sub>2</sub> emissions from ship exhaust in Tianjin Port [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 409: 137225
- [10] Deng M, Peng S, Xie X, et al. A Diffused Mini-Sniffing Sensor for Monitoring SO<sub>2</sub> Emissions Compliance of Navigating Ships [J]. Sensors, 2022, 22: 5198.
- [11] 黄俊荣, 向元京. 桥基船舶尾气遥测系统在河口水域海船燃油监管的应用[J], 广州航海学院学报, 2021, 29(04): 26-30.
- [12] Volten H, Brinksma E J, Berkhout A J C, et al. NO<sub>2</sub> lidar profile measurements for satellite interpretation and validation [J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114: D24.
- [13] Granieri D, Vita F, Inguaggiato S J E P. Volcanogenic SO<sub>2</sub>, a natural pollutant: Measurements, modeling and hazard assessment at Vulcano Island Aeolian Archipelago, Italy [J]. Environmental pollution, 2017, 231: 219-228.
- [14] 张会亮, 李发泉, 李娟, 等. SO<sub>2</sub> 紫外相机标准泡定标法的误差校正[J]. 光学学报, 2024, 44(06): 07.