

文章编号:1000-4653(2025)03-0010-09

船舶尾气排放“陆海空”立体监测与精准管控 技术及系统研发与应用

肖令¹, 齐兆宇¹, 谢昕², 彭士涛¹, 于迅¹, 邓孟涛¹

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456;

2. 中华人民共和国浦东海事局, 上海 200120)

摘要:为响应IMO MARPOL公约全球限硫令和我国船舶排放控制区管理要求,提升海事船舶排放监测的高效性与精准管控能力。本研究提出了船舶尾气排放“陆海空”立体监测技术,通过岸、桥、艇、机平台融合组网,满足通航水域环境复杂多样的现实监测需求;同时,研发了嗅探信号波峰自动识别与溯源算法,实现了船舶尾气排放智能遥测、精准溯源;最后,构建了智能遥测、精准溯源与执法查证的智能精准管控系统,打通海事监管多个环节间的信息化通道。

关键词:船舶尾气排放;立体监测;智能遥测;精准溯源;智能精准管控系统

中图分类号:U698.7

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.03.002

Research and application of "Terrestrial, Maritime, and Aerial" stereo monitoring and precise control technology and system for ship exhaust emissions

XIAO Ling¹, QI Zhaoyu¹, XIE Xin², PENG Shitao¹, YU Xun¹, DENG Mengtao¹

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M. O. T, Tianjin 300456, China;

2. Pudong Maritime Safety Administration of the People's Republic of China, Shanghai 200120, China)

Abstract: In response to the global sulfur cap regulations established by the IMO MARPOL Convention and the management requirements of China's ship emission control areas, it is imperative to improve the efficiency and accuracy of maritime ship emission monitoring. This study proposes a three-dimensional "Terrestrial-Maritime-Aerial" monitoring technology for ship exhaust emissions, which integrates shore stations, bridges, ships, and mobile platforms into a unified network to address the practical monitoring demands of diverse and complex navigation environments. Additionally, an automatic peak signal recognition algorithm has been developed to enable intelligent remote monitoring of ship exhaust emissions and facilitate precise source tracing. Finally, an integrated intelligent control system was constructed, incorporating intelligent remote monitoring, precise source tracing, and enforcement verification, thereby promoting seamless information flow across multiple aspects of maritime supervision.

Key words: ship exhaust emissions; three-dimensional monitoring; intelligent remote sensing; precise traceability; intelligent and precise control system

IMO MARPOL 公约的全球限硫令要求,自2020年1月1日起,全球范围内船舶使用的燃油硫含量

收稿日期:2024-10-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3707300)

作者简介:肖令(1994—),女,硕士,助理工程师,研究方向为船舶尾气污染。E-mail: 1348211120@qq.com

通信作者:齐兆宇(1992—),男,博士,副研究员,研究方向为交通环保、绿色低碳。E-mail: qizhy@tiwte.ac.cn

引用格式:肖令,齐兆宇,谢昕,等.船舶尾气排放“陆海空”立体监测与精准管控技术及系统研发与应用[J].中国航海,2025,48(3):10-18.

XIAO L, QI Z Y, XIE X, et al. Research and application of "Terrestrial, Maritime, and Aerial" stereo monitoring and precise control technology and system for ship exhaust emissions[J]. Navigation of China, 2025, 48(3): 10-18. (in Chinese)

不得超过 0.5%,而在排放控制区内,硫含量限制更为严格,不得超过 0.1%^[1-2]。这一规定对船舶尾气排放监测提出了更高的要求,需要实现对船舶尾气中硫含量的实时、准确监测,以确保船舶遵守排放标准^[3]。

2009 年 9 月,欧盟联合研究中心(Joint Research Centre, JRC)在鹿特丹启动了 SIRENAS-R 项目,比较了多种船用油硫分含量的遥测方法,该项目结论认为,嗅探法效果最好、精度最高^[4]。2010 年 10 月,欧盟联合研究中心 JRC 启动了 SIRENAS-R 项目的姊妹项目——SIRENAS-G 项目,利用无人机搭载小型 CO₂ 和 SO₂ 监测仪器设备在热那亚湾开展试验,结果表明,无人机嗅探法方案因为近距离接触尾气,结果更好^[5]。2014 ~ 2016 年间,欧盟 Compliance Monitoring for Marpol Annex VI (CompMon) 联盟^[6-7],在排放控制区船舶密集的区域共建立了 11 个固定监测点位,与 3 架监测飞机,监测到约 13% 的船舶在离开排放控制区的时候过早切换使用高硫油。

MARPOL 公约附则 VI 确定了在全球范围内船舶使用燃料油硫含量的标准,并于 2010 年在波罗的海、北海、北美地区和加勒比海范围内设立硫排放控制区(Sulfur Emission Control Area, SECA)^[8]。

我国的船舶尾气遥测监管技术研究和应用实践都比较晚,始于 2015 年 12 月份《珠三角、长三角、环渤海(京津冀)水域船舶排放控制区》出台之际,大多采用嗅探法原理。燃油中的 C 元素和 S 元素经过燃烧氧化后生成了尾气中的 CO₂ 和 SO₂,由于燃油中的 C 含量稳定在 87% 左右,可以通过尾气中 SO₂ 和 CO₂ 的组成比例反推燃油中的硫含量。这种方法被简称为嗅探法,是目前欧美 ECA 内在用的主流遥测方法^[9]。根据仪器精度以及平台的不同,主要有两种类型,分别为船舶尾气遥测无人机和船舶尾气遥测站^[10]。单一平台很难满足通航水域环境复杂多样的现实情况监测,因此需要融合组网^[11],实现因地制宜与高投产比的技术选型与应用。同时,船舶尾气排放遥测、溯源与执法脱节导致的高硫油船舶监管全过程效率低下。考虑到数据的所有权和时效性问题,开发一套适用于我国的船舶尾气智能精准管控系统成为迫切需求。

本研究围绕船舶尾气排放监管难题,形成三大创新技术体系:一是突破性构建了“桥—岸—艇—机”立体监测网络,创新研发移动式嗅探遥测装置与智能算法,攻克了传统固定式监测易受干扰的技术瓶颈,首次实现船舶尾气排放的移动追踪与动态

溯源监测。二是首创基于智能组网的分布式遥测站点群架构,相比传统监测网络建设成本降低,覆盖效率大幅提升。三是构建了“监测—溯源—执法”全链条智能监管系统,实现从疑似船舶智能筛查到执法证据链自动生成的全流程闭环管理。案件处理周期由 7 d 缩短至 24 h,填补了我国船舶大气污染智慧监管的技术空白,为航运污染治理提供了创新范式。该项目历经 10 年,研究成果形成 15 项国家专利、20 篇高水平论文、一篇著作与 1 项行业标准,成果应用于上海海事局、天津海事局等 14 家单位,支撑我国船舶大气污染防治从传统人工监管向智能精准监管的转型升级。

1 船舶尾气排放“陆海空”立体监测技术

1.1 免疫机动车尾气干扰的桥上遥测场景的管路铺设要求与选址方法

决定岸基遥测场景有效性的关键的因素是有效遥测距离与高度。本研究通利用高斯模型模拟了理论上的有效遥测距离与高度范围,得出适宜选址要求是,桥基遥测系统在桥梁高度最高可达 60 m,即江上的大桥基本都能用于监管万吨级以上船舶的尾气排放,并通过实际现场监测验证了桥基适用条件。

合理的桥面定位可以提高静风天气的检测率。本研究挑选具有统计意义数量的大型船舶(船长大于 120 m),提取其航行轨迹与桥梁正上方交点的经纬度(见图 1),将所有船的数据进行平均作为船舶过桥的中心位置,选取该中心位置作为桥基遥测选址。



图 1 通过船舶 AIS 数据确定经过苏通大桥位置
Fig. 1 Determine the location of ships passing through the Sutong Bridge using AIS data

为了确保设备能够采集船舶尾气,同时避免桥上机动车尾气的干扰,本研究单独设计设备的进气管路,使其沿着桥侧向下延伸一定距离(见图 2)。不宜过长,以满足桥梁净空高度的要求;不宜过短,以避免沿着桥面向两侧扩散的机动车尾气进入管路。为了避免桥梁结构和机动车行驶对风速风向的干扰,设计将风速风向传感器置于桥梁外侧,固定在

最外侧的栏杆上。

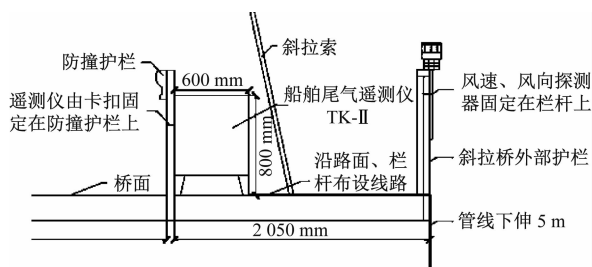


图2 进气管路和风速风向传感器位置示意

Fig.2 Schematic diagram of intake air duct and wind speed and direction sensor placement

1.2 免疫内河船舶尾气干扰的岸上遥测场景的适用距离上限和高度范围模拟

决定岸基遥测场景有效性的关键的因素是有效遥测距离与高度,因为船舶尾气会随距离与高度的增加而稀释。

岸基平台容易受近处内河船尾气的干扰,为免疫内河船尾气的干扰,通过集成高精度的 SO_2 和 CO_2 分析仪实现了超远距离的监测,利用高斯模型模拟了理论上的有效免疫内河船尾气干扰的遥测距离与高度,并通过实际现场监测验证了远距离情况下船舶尾气的可测性。

根据的船舶尾气扩散高斯模拟和现场实测经验,岸基遥测系统建设在距离 3 000 t 海船船舶 500 m 左右。内河船的有效监测距离范围为 300 m 左右,岸基遥测站点建设在距离江中心 500 m 处时能一定程度的免疫内河船尾气的干扰。内河船的岸基遥测高度范围在 0 ~ 20 m 之间。岸基平台船舶尾气遥测站点的建设高度是距离水面 30 m 左右,在建设条件不可控的情况下可选择在 20 ~ 40 m 之间。

1.3 免疫自身尾气干扰的艇上遥测场景的管路铺设要求与高效追踪方法

船载平台的遥测距离与岸基平台一致,区别仅在于平台可移动。海巡艇具有能够主动在风向合适的位置测得船舶尾气的优势,但是有自身尾气的干扰。为了避免干扰,设计了适用于艇载嗅探仪的管路铺设方案,一需确保进气口远离海巡艇的排气口,二需采气口高(见图3)。

为满足采气口要尽可能的高的需求,一般将采气口设置在桅杆的顶部(见图3)。一旦监测到船舶尾气信号(即 SO_2 和 CO_2 浓度先升后降的波峰),首先利用阈值分析算法判别是否是自身尾气,判别依据是超高浓度的 CO_2 增长量。

本研究发现,艇载船舶尾气遥测作业时,距离目标船舶至少 200 m,尾气信号较弱(CO_2 浓度增长量



图3 避免海巡艇自身尾气干扰的进气口安装要求

在 20×10^{-6} 以下);而测得自身尾气信号时,距离排气口不超过 20 m,尾气信号较强(CO_2 浓度增长量在 50×10^{-6} 以上)。

1.4 续航与避碰要求的无人机载遥测场景的高效飞行和安全追踪方法

使用无人机测船舶尾气,优势是距离近可以检测出高浓度尾气,但是容易出现碰撞安全事故。无人机避碰依赖人工识别传输画面,由人主观判断,易有纰漏。因此,本研究研发自动测算基于图像相对高差、水平间距的方法去解决避碰问题。

如图4所示,首先,操控无人机飞行至位于船舶航线正前方位置。无人机在该处悬停时,船舶行驶时从无人机正下方经过。其次,利用图像边缘处理算法,计算无人机与船舶间高差。再次,利用计算出的高差特定的摄像头具有特定的参数,计算无人机与船舶间的高差与水平间距。最后,基于上述图像的船机之间相对高差、水平间距实时测量方法,无人机沿垂直于船舶航向的面按矩形路线循环飞行自动设定无人机沿垂直于船舶航向的面按矩形路线循环飞行的参数(见图5),以确保无人机在任意方向能

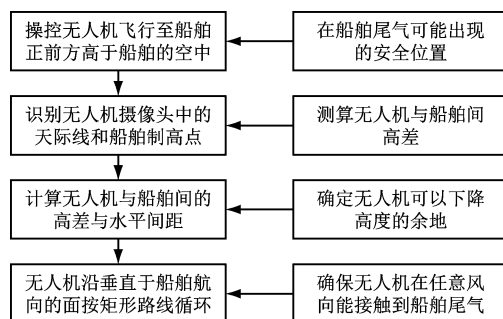


图4 无人机主动追踪尾气方法流程图

Fig.4 Flowchart for an active tracking method of exhaust gases

接触到船舶尾气,执行监测任务。

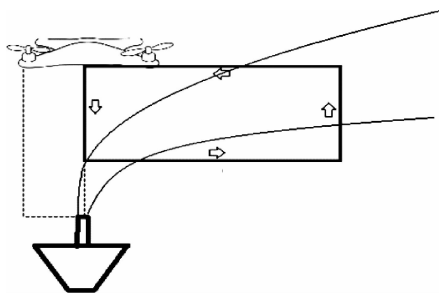


图5 无人机循环飞行路线示意

Fig. 5 Schematic diagram of the drone's circular flight route

本研究可以自动控制无人机搭载嗅探测硫传感器快速飞入船舶尾气烟羽中,大大提高了基于无人机的船舶尾气监测作业效率。

2 船舶尾气排放遥测站点群融合组网技术

2.1 岸、桥、船、机四大平台优劣势分析及融合组网的必要性

针对影响嗅探法的风和距离两个因素,目前应用桥、岸、艇、机4种嗅探法应用平台(见图6)去被动适应或主动克服。岸基和桥基是固定平台,是被动监测,适合狭长航道(距离限制),没有平台本身的额外成本投入,劣势是受制于场地要求(接电、桥梁),受制于风速风向;船载和机载是移动平台,是主动监测,开阔水域同样适用,船和无人机平台本身要比固定式监测平台的成本更高,无人机劣势是无法坚持全天候24 h连续监测,并存在一定的飞行安全隐患(落水损失)。



图6 嗅探法应用的2种固定平台(岸、桥)和2种移动平台(船、机)

Fig. 6 Two fixed platforms (shore, bridge) and two mobile platforms (ship, aircraft) for the application of sniffing methods

以上各平台各具优劣势,单一平台很难满足通

航水域环境复杂多样的现实情况监测,因此需要融合组网,实现因地制宜与高投产比的技术选型与应用,有力支撑全覆盖、高效力的船舶尾气排放遥测站点群布局规划。

2.2 适用沿海人工航道的岸基与无人机平台融合组网

吹填造陆建成的人工港口,其狭长的人工航道适宜岸基船舶尾气遥测仪的布设与无人机尾气遥测仪的起降。岸基可以在较大的风速中监测,而无人机需要在较小的风速下操作运行。岸基与无人机融合组网,无论在风大还是风小条件下均可监测,能发挥沿海人工航道船舶尾气监测的最优功效。岸基固定式船舶尾气遥测站,实现24 h监测时间及进出主要港区航道在航船舶监测全覆盖,结合开展无人机船舶尾气遥测技术服务,实现不同风向风速下的补充监测,配合实现监测全覆盖。

2.3 适用繁忙内河航道的桥基与无人机平台融合组网

针对繁忙内河航道,河道狭长,桥基船舶尾气遥测更具有优势。然而,桥基为被动监测,受选址,风向的影响较为突出,同时桥面方案只能够监测大船的尾气,无法监测小船的尾气。桥基固定遥测站只能监测到靠近航道中心线行驶的船舶,而对偏离中心线较远的船舶无能为力。无人机主动、灵活度高,适宜大多数气象条件,可以追溯小船的尾气,同时可以监测偏离中心线较远的两岸船舶,可以有效弥补桥基遥测的不足。桥基监测预警,无人机追溯融合组网可以形成良好的互补,实现繁忙内河航道的船舶全覆盖。

2.4 适用沿海与河口开阔水域的艇载与无人机载平台融合组网

在沿海与河口开阔水域,由于水域宽广,岸基与桥基的遥测站点布设容易超出监测范围。艇载船舶尾气遥测仪的优势是主动、灵活度高,适宜各种气象条件,适用于开阔水域。无人机载遥测仪的优势是主动、灵活度高,适宜大多数气象条件,在船上起降,更适用于开阔水域。在开阔水域有大风时,无人机不适合遥测,海巡艇是很好的补充。通过艇载与无人机的融合组网,实现沿海与河口开阔地带的船舶尾气遥测全天时全覆盖。

多平台组网的建设与运维与传统执法模式相比,具有显著的成本优势与长期效益。多平台组网通过技术集成与资源共享,可大幅降低硬件重复投入。例如,组网技术可减少设备需求,节约30%~50%的基础设施购置成本;支持7×24 h实时监控,

避免传统人工巡检的高昂时间成本。

从效益角度看,多平台组网的数据互通能力可提升执法响应效率60%以上,通过智能算法实现风险预警与精准处置,减少因执法滞后产生的二次治理成本。综合测算,多平台组网的全生命周期成本比传统模式低约22%,且随着技术迭代与规模应用,成本效益比将持续优化。

3 船舶尾气排放智能精准管控系统

3.1 船舶尾气自动识别与溯源方法

基于前文的船舶尾气嗅探遥测方法,采集船舶尾气嗅探遥测数据信号。人工识别数据工作量巨大,需要耗费大量人力和时间成本。且当船舶尾气嗅探遥测数据信号受背景波动影响时,还会存在主观判别标准不统一带来的识别误差。

为解决人为识别嫌疑波峰工作量大,识别结果不精准且无量化依据的问题,研究了针对基于在航船舶尾气嗅探遥测数据信号识别嫌疑波峰的自动识别方法,具体算法与数据介绍详见论文与专利^[12-13]。

判定波峰后,算法需确定波峰起止时刻,然后对波峰进行精确丈量,得到波峰的形状和范围参数,最后根据嗅探法计算公式,确定燃油硫含量^[11-12]。算法给出燃油硫含量估计的概率分布和置信区间,有助于判别超标船舶的把握,更好地协助海事执法。以苏通大桥站点2019年8月7日00:00~23:59船舶尾气遥测仪采集的船舶尾气中的燃油硫含量时程进行识别(见图7)。波峰中的CO₂、SO₂浓度的时间序列并非具有强相关性,通过以往文献中的识别方法无法进行判别。通过算法计算,该波峰具有较

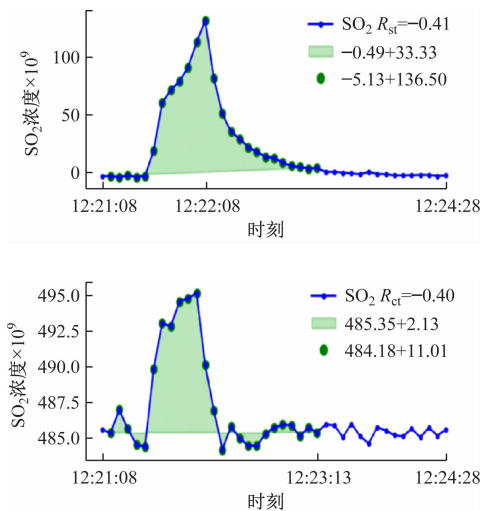


图7 波峰硫含量计算结果

Fig. 7 Wave peak sulfur content calculation result

强的燃油硫含量,达3.6%,远超过限值0.5%。根据图7可知,识别出最强的波峰为12:22的波峰,对其进行燃油硫含量的判别。以该批数据进行人工与算法对比统计分析,人工计算结果与算法计算的硫含量结果对比如图8所示,人工计算结果与算法计算结果相关性达0.954,且硫含量识别结果越大吻合越好。进一步对计算误差进行统计分析,如图9所示,90%以上的硫含量误差绝对值在1.5‰以内,95%以上的误差绝对值在3.0‰以内。

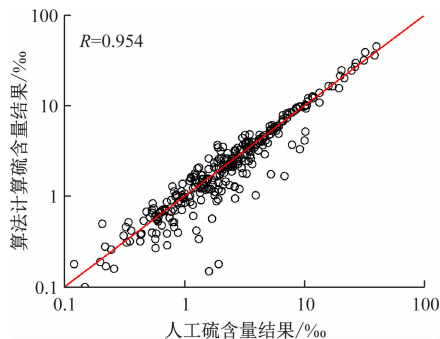
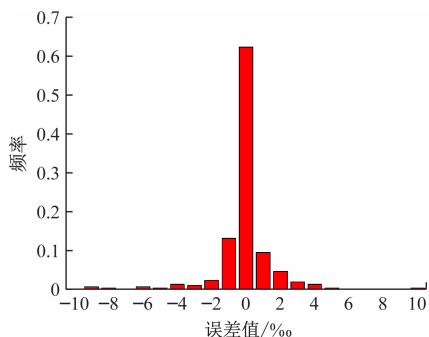
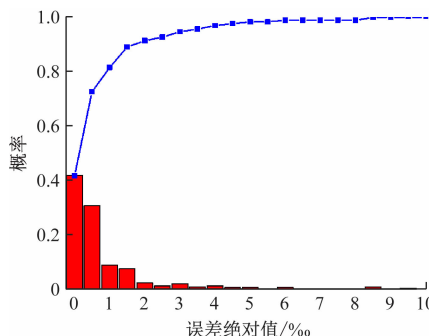


图8 硫含量计算结果的对比

Fig. 8 Comparison of the Calculation Results of Sulfur Content



(a) 误差值



(b) 误差绝对值

图9 硫含量计算误差统计图

Fig. 9 Statistical Chart of the Calculation Errors of Sulfur Content

针对识别到的波峰数据,尤其是超标船舶,需要实现对尾气的源头即超标船舶进行溯源锁定。研发基于路径积分的超标嫌疑船舶溯源锁定算法,结合AIS数据和风速风向数据对烟羽的路径轨迹进行积

分,通过烟羽轨迹与遥测站点间的距离反推定位到超标嫌疑船舶。以2019年7月至9月苏通大桥测试点的数据进行统计分析可得,92.8%的定位误差在150 m范围内,99%以上的定位误差在300 m范围内,定位误差在百米数量级内,说明该方法能够适应船舶尾气溯源工程应用的要求。

3.2 智能遥测、精准溯源与执法查证系统

为了充分发挥已建船舶尾气遥测站与融合组网功效,需要信息化大脑处理分析。本研究进一步开发船舶尾气遥测分析子系统、执法检查任务分派接收与执行子系统,以建立无人值守监测、任务分派、追踪监测、登船检查、结果反馈、执法等多个环节间的信息化通道,助力形成海陆空“三位一体”遥测立体监管新模式。

系统嵌入了研发的船舶尾气自动识别与溯源算法,如图10所示,系统主屏幕显示嗅探仪监测站点,点击站点可放大显示过往船只与该站点实时风速风向图,屏幕右侧会根据算法显示出溯源尾气所属船只的结果列表。左侧功能框显示各站点实时SO₂监测浓度。



图10 遥测与溯源模块

Fig. 10 Telemetry and traceability module

查证系统涵盖执法检查任务分派系统,用于分派针对嫌疑船的执法检查任务。主要功能包括:1) 移动船舶尾气遥测站工作状态和位置监测,以及就近执法检查任务分派算法;2) 无检查力量情况下的目的地港协查申请;3) 响应现场执法人员的反馈和协查的反馈。如图11所示,船舶信息与溯源模块流转衔接,支持对该船一键任务派发和新增待办事项。

执法检查任务接收与执行系统,用于接收控制中心分派的检查任务并反馈跟踪监测结果。主要功能包括:1) 接收检查任务通知以及附带的嫌疑船信息和遥测站估算的燃油硫含量值;2) 根据风速风向和嫌疑船航向,自动规划就近适宜位置的海事执法力量;3) 比对固定和移动船舶尾气遥测站结果,再次确认对方违规事实;4) 向控制中心反馈登船检查请求或放弃。



图11 任务派发模块

Fig. 11 Task dispatch module

最终根据遥测结果和实测结果,开发汇总系统建立船舶尾气监测监管平台,统计船舶尾气遥测和燃油检测工作量和效果(见图12)。

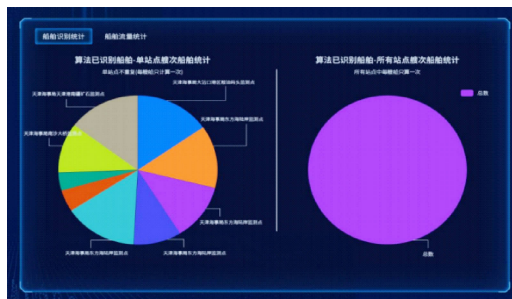


图12 船舶统计界面

Fig. 12 Ship Statistics Interface

智能遥测、精准溯源与执法查证系统,其整合多系统后运维成本下降28%,执法成本(人力成本、交通成本、化验成本等)95%,证明技术集约化带来的边际成本递减效应。

4 应用案例

4.1 适用沿海人工航道的岸基与无人机平台融合组网——天津港案例

天津海域具备使用高硫油条件的大吨位海船主要集中在分布于天津港北疆港区和南疆港区,分散分布于其他港区和锚地及开阔水域。

根据港口环境的复杂性、船舶类型的多样性等特点,综合上述已有的船舶尾气排放监测技术的功能特点,形成以下布点方案(见图13)。

1) 该地区共布设8台岸基固定式船舶尾气遥测仪,实现主航道、大沽沙航道、高沙岭航道(西北风天气)、大港航道(西北风天气)及东疆港区、北疆港区、南疆港区、大沽口港区、高沙岭港区、大港港区共6个港区的在航船舶尾气遥测监管覆盖。

2) 无人机载船舶尾气遥测技术与岸基配合使用可实现区域全覆盖,响应速度快,不受风向风速因素限制,作为补充监测使用。



图13 天津港融合组网布点方案

Fig. 13 Tianjin Port integration network deployment plan

无人机的选址侧重于航道口门(岸边起降),分别覆盖四大航道,无人机试点遥测范围为港口附近码头东北侧狭长领域,区域开阔,且此处距离上行航道约为0.5 km,能够覆盖到该位置的所有船舶。

在试运行4个月时间内,船舶尾气排放遥测站点共监测到5680艘次在航船舶的尾气。如图14所示案例,2022年8月10日凌晨1点,某轮到达天津港南港锚地,并于上午8点开始进港,由岸基遥测仪测得硫含量波峰。天津海事局南港分局与项目承担单位人员迅速携带船舶尾气嗅探监测无人机奔赴现场,并在该船靠泊前对该船的尾气进行监测。 SO_2 和 CO_2 波动曲线明显呈现“高硫低碳”的特点,

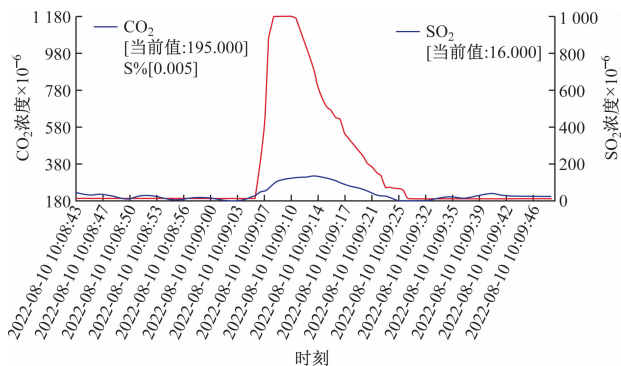


图14 船舶尾气遥测无人机协助查获超标案例数据

Fig. 14 Ship's exhaust gas remote sensing drones assist in identifying and collecting data on over-standard cases

经测算燃油硫含量接近2%,并在船舶尾气监测监管系统中进行录入登记。执法人员在船靠泊后,迅速登轮取样,送检结果显示燃油硫含量为1.84%,最终查明了该船违规使用高硫燃油的事实。

该案例验证了通过天津海域船舶尾气排放遥测站点和尾气监测监管系统两期建设,有效扩大了船舶尾气监测覆盖率,显著增加了执法效率,降低了执法成本。

4.2 适用繁忙内河航道的桥基与无人机平台融合组网——粤港澳大湾区案例

粤港澳大湾区主要分为两个水域,一个是西江水域,另一个是珠江水域。西江分两个口门,分别坐落在崖门大桥和珠海大桥,适合桥基遥测选址。珠江在内里口门处坐落着南沙大桥,出口处的水域开阔没有桥,但是岛屿众多,适合在岛上起降无人机。

根据珠江口电子海图、东莞市地图以及当地气象条件,选取三个固定位置(南沙大桥航道正上方和西江两口门—崖门大桥和珠海大桥)^[13],三座大桥分别位于粤港澳大湾区的口门处,可全面覆盖往来船舶(见图15)。



图15 粤港澳大湾区总体融合组网布点方案

Fig. 15 Overall integration and network deployment plan for the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

在珠三角点位对船舶尾气遥测仪进行安装,截至2022年12月,桥基监测站点共计遥测船舶数量6685艘次。期间共识别到燃油硫含量在0.5%以上的超标船舶95艘次,查实违规船舶33艘次。

无人机在南沙大桥附近进行补充监测,船舶尾气遥测无人机监测时间为2021年~2022年,约计遥测天数为32d,遥测总体共监测船舶445艘次,涉嫌超标船舶25艘次,海事执法人员登船抽样检测9艘,执法查实6艘次,其中未查实船舶的原因是防疫管控要求或已出辖区。

4.3 适用沿海与河口开阔水域的艇载与无人机载平台融合组网——上海海事局辖区海域案例

上海海事局辖区分为三个部分,分别为长江口,黄浦江和杭州湾。其中长江口的五好沟附近码头、圆圆沙锚地、邮轮母港码头、横沙趸船,黄浦江的殷行趸船、龙华趸船、鳗鲡咀趸船适合放飞无人机;杭州湾水域开阔,岛屿众多,其中洋山港航道与金山航道交汇处警戒区水域常年大风,且离岸边遥远,不适合无人机遥测,而适合艇载船舶尾气遥测仪追测。

根据船舶尾气监测无人机和艇载船舶尾气遥测仪的使用要求和各分支局辖区的航道与气象特点,设置以下八处船舶尾气监测位置,因地制宜开展常态化的船舶尾气监测工作。总体融合组网布点方案如图 16。



图 16 上海海事局辖区海域总体融合组网布点方案

Fig. 16 Overall integration and networking deployment plan for the marine areas under the Jurisdiction of Shanghai Maritime Administration

2022 年,船舶尾气遥测无人机监测时间为 2022 年 9 月~11 月,共计遥测天数为 38 d,遥测地点选在吴淞局圆圆沙锚地海巡艇。本研究承担单位在长江口上海水域测得船舶 942 艘次,其中 13 艘次涉嫌超标,违规率约为 1.4%。

5 结束语

本研究提出了船舶尾气排放“陆海空”立体监测与精准管控技术及系统研发与应用技术,能有效实现船舶尾气科学监管、船舶尾气排放系统管控。提出的船舶尾气排放“陆海空”立体监测与融合组网技术、船舶尾气排放智能精准管控系统等研究成果在上海海事局、天津海事局、东莞海事局等单位得以应用。

通过多平台融合组网技术的应用,船舶尾气监测与执法效率显著提升。在天津港案例中,岸基固定遥测站与无人机协同组网,监测船舶尾气的分辨率提升 40% 以上,违规船舶识别准确率达 92%,可有效解决执法成本(人力成本、交通成本、化验成本等)95% 以上。智能任务分派系统通过实

时定位与路径规划,将执法响应时间缩短至 30 分钟内,较传统人工执法调度效率提高 60%。此外,数据溯源算法与多平台交叉验证使违规证据链完整度提升 75%。总体来讲,本项目技术的应用,达到了降本、增效的作用。

在船舶尾气精准管控的同时,随着航运业减污降碳进程的不断推进,除了燃油硫含量管控之外,燃油船的 NO_x 排放、LNG 船的甲烷逃逸、甲醇船的 CH₄ 排放、氨动力船的氨逃逸、船上 CO₂ 捕集等管控需求日渐逼近,集合多参数的在线监测技术应用势在必行。建议前瞻性地开展低成本、长寿命、易维护的船舶尾气在线监测技术及装备研发,为制订相关行业标准与推广应用奠定基础。

参 考 文 献

- [1] 范金宇,黄加亮. MARPOL73/78 附则 VI 和船舶柴油机排放污染控制[J]. 天津航海,2000(4):13-18.
FAN J Y, HUANG J L. Annex VI MARPOL 73/78 and marine diesel engine discharge pollution control [J]. Tianjin Hanghai, 2000(4):13-18. (in Chinese)
- [2] 李敏,陈轩. MARPOL73/78 附则的进展研究[J]. 中国水运,2008(7):18-19.
LI M, CHEN X. Research on the progress MARPOL73/78 Annex VI [J]. China Water Transport, 2008(7):18-19. (in Chinese)
- [3] JOHNSTONE N, IVAN H, MARGARITA K. Environmental policy design characteristics and technological innovation: evidence from patent data [J]. OECD Environment Working Papers, 2010, 16: 1.
- [4] ALFOLDY B, BALZANI J, LAGLER F, et al. Final report on: remote sensing of ships' emissions of sulphur dioxide [DB/OL]. (2022-3-15) [2022-3-15]. https://environment.ec.europa.eu/topics/air_en.
- [5] BALZANILJM, ALFOLDY B, BEECKEN J. et al. Field test of available methods to measure remotely SO_x and NO_x from emissions ships [J]. Atmospheric Measurement Techniques Discussions, 2013, 6(6): 9735-9782.
- [6] Europa. eu. Compliance monitoring pilot for Marpol Annex VI | TRIMIS projects__SEPARATOR [EB/OL]. (2022-4-26) [2022-4-26]. <https://trimis.ec.europa.eu/project/compliance-monitoring-pilot-marpol-annex-vi>.
- [7] 杨甜甜,文元桥,黄亮,等. 船舶大气污染物岸基嗅探式自动监测系统设计与验证[J]. 中国航海,2020,43(1):106-110.
YANG T T, WEN Y Q, HUANG L, et al. Land-based sniffing automatic monitoring system for ship air pollutants [J]. Navigation of China, 2020, 43(1): 106-110. (in Chinese)

- [8] 胡健波,朱建华,彭士涛,等.嗅探法:通过监测尾气估算船用燃油硫含量的技术[J].水道港口,2018,39(5):619-625.
HU J B, ZHU J H, PENG S T, et al. Sniffing method a technique to estimate sulfur content in marine fuel through in situ measurements of ship emissions [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39 (5) : 619-625. (in Chinese)
- [9] 胡健波,张铁军,彭士涛.船舶大气污染物排放控制区遥测监管技术[J].中国海事,2020(1):24-26.
HU J B, ZHANG T J, PENG S T. Remote monitoring and regulation technology for ship air pollutant emission control areas [J]. China Maritime Safety, 2020 (1) : 24-26. (in Chinese)
- [10] 李亚军.无人机搭载嗅探设备监测船舶尾气研究[J].中国海事,2022(4):29-32.
LI Y J. Research on monitoring ship exhaust emissions using drone-mounted sniffer devices [J]. China Maritime Safety, 2022 (4) : 29-32. (in Chinese)
- [11] 交通运输部天津水运工程科学研究所.一种燃油硫含量的自动识别算法:CN202010041516.6[P].2021-02-02.
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering. M. O. T. An automatic recognition algorithm for fuel sulfur content; CN202010041516.6 [P]. 2021-02-02. (in Chinese)
- [12] QI Z Y, PENG S T, HU J B, et al. Surveillance practice and automatic data algorithm of sniffing telemetry for SO₂ emissions from ship exhaust in Tianjin Port[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 409:10.
- [13] 邓孟涛,向元京,胡豪杰,等.船舶尾气监测无人机系统设计与应用[J].中国航海,2024,47(1):139-144.
DENG M T, XIANG Y J, HU H J, et al. Design and application of UAV system for ship exhaust monitoring [J]. Navigation of China, 2024, 47(1) : 139-144. (in Chinese)
- [14] 引航调派中的应用研究[J].天津航海,2025(1):9-12.
YAN B, SUN S C, LI Z Q. Research on the application of automatic identification system (AIS) for ships in pilotage and dispatch [J]. Tianjin Navigation, 2025 (1) : 9-12. (in Chinese)
- [15] WANG S, LU J, JIANG L. Time reliability of the maritime transportation network for China's crude oil imports[J]. Sustainability, 2019, 12(1) : 198.
- [16] SU W, ZHANG L, LU J, et al. Crude oil maritime transportation network resilience assessment based on optimal strategies[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2025, 142: 104659.
- [17] KALOGIANNIDIS S, CHATZITHEODORIDIS F, KALFAS D, et al. The economic impact of Russia's Ukraine conflict on the EU fuel markets [J]. International Journal of Energy Economics and Policy, 2022, 12(6) : 37-49.
- [18] MICHAEL N A, MELAS K D. Geopolitical risk and the LNG-LPG trade[J]. Peace Economics, Peace Science and Public Policy, 2022, 28(3) : 243-265.
- [19] 禹佳宁,方志祥,胡筱渊,等.红海袭击事件波及的全球战略物资海运网络变化分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(9):1610-1620.
YU J N, FANG Z X, HU X Y, et al. Analysis of changes in maritime transport networks for strategic materials affected by attacks in the Red Sea [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(9) : 1610-1620. (in Chinese)
- [20] ZHU J, LU J, SU W. Empirical analysis of global crude oil transportation network amid the Russia-Ukraine conflict [J]. Journal of Transport Geography, 2025, 127: 104305.
- (上接第9页)
- [21] 李东阳. AIS 数据驱动下海底管道面临的船舶交通风险检测模型[D].上海:上海海事大学,2021.
LI D Y. Ship traffic risk detection model for submarine pipelines driven by AIS data [D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2021. (in Chinese)
- [22] 江龙晖,刘通,王旭升,等. AIS 数据中船舶避碰行为提取方法[J].舰船科学技术,2025,47(3):141-147.
JIANG L H, LIU T, WANG X S, et al. Method for extracting ship collision avoidance behavior in AIS data [J]. Ship Science and Technology, 2025, 47(3) : 141-147. (in Chinese)
- [23] 潘荣友,韦扬,李超,等.基于 AIS 大数据的内河船舶航线推荐方法[J].西部交通科技,2024(4):210-212.
PAN R Y, WEI Y, LI C, et al. Inland waterway vessel route recommendation method based on AIS big data [J]. Western China Communication Science & Technology, 2024(4) : 210-212. (in Chinese)
- [24] 陈宁.基于 AIS 数据的港口服务作业效率评价研究[D].大连:大连海事大学,2023.
CHEN N. Research on efficiency evaluation of port service operation based on AIS data [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023. (in Chinese)
- [25] 白响恩,李博翰,徐笑锋,等.基于 AIS 数据的航运物流港口调度优化研究[J].包装工程,2023,44(5):211-221.
BAI X E, LI B H, XU X F, et al. Scheduling optimization of shipping logistics port based on AIS data [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(5) : 211-221. (in Chinese)
- [26] 闫博,孙世成,李祖权.船舶自动识别系统(AIS)在