

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417443

船舶尾气检测方法研究现状与展望^{*}邓宇昂^{1,2} 张彦¹ 李秋娟³ 刁宇³ 朱敏杰²

(1. 武汉理工大学船海与能源动力工程学院 武汉 430070; 2. 机械工业仪器仪表综合技术经济研究所 北京 100055;
3. 国家石油天然气管网集团有限公司科学技术研究总院分公司 天津 654303)

摘要: 船舶尾气检测对于落实航运业环保法规,推动可持续发展具有重要意义。当前船舶航运业朝着绿色、无碳方向发展,清洁燃料在环保方面的独特优势,正逐步成为船舶燃料转型的主流,但是清洁燃料的使用引发了一些新的排放问题,尾气检测新需求不断涌现,进而影响现有检测方法和设备的适用性。本文通过分析传统化石燃料和五种新型清洁燃料的排放物情况,提出了排放检测清单,指出了法规外需要检测的组分;根据尾气检测原理介绍了烟气和烟羽的检测方法,指出了烟羽检测在非常规排放物上的不足;介绍了8种常用的气体分析仪,从装置规格、适用的检测方法、可检测组分种类、检测时长和精度五个维度对目前气体分析设备进行分析评估,最后对尾气检测方法和设备发展方向进行展望,指出多组分检测、小型化、智能化和低功耗将会是检测设备后续发展的重心。开展现有船舶尾气检测方法的综述研究有助于指导相关检测设备的研制与开发。

关键词: 船舶尾气;检测方法;仪器

中图分类号: TN98;TH83 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Research status and prospect of ship exhaust detection methods

Deng Yuang^{1,2} Zhang Yan¹ Li Qiujuan³ Diao Yu³ Zhu Minjie²

(1. College of Marine and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Mechanical Industry Instrumentation Comprehensive Technology and Economic Research Institute, Beijing 100055, China;

3. National Oil and Gas Pipeline Network Group Company Limited Science and Technology Research Institute Branch, Tianjin 654303, China)

Abstract: Ship exhaust gas testing is of great significance for the implementation of environmental protection regulations and the promotion of sustainable development. At present, the shipping industry is developing in a green and carbon-free direction, and the unique advantages of clean fuels in environmental protection are gradually becoming the mainstream of ship fuel transformation, but the use of clean fuels has caused some new emission problems, and new demand for exhaust gas detection is emerging, which in turn affects the applicability of existing testing methods and equipment. By analyzing the emissions of traditional fossil fuels and five new clean fuels, this paper proposes an emission detection list and points out the components that need to be tested outside the regulations. According to the location of exhaust gas detection, the detection methods of flue gas and plume were introduced, and the shortcomings of plume detection in unconventional emissions were pointed out. Eight commonly used gas analyzers were introduced, and the current gas analyzers were analyzed and evaluated from five dimensions: volume, applicable detection methods, types of components, detection time and accuracy, and finally the development direction of exhaust gas detection methods and equipment was prospected, and it was pointed out that miniaturization, intelligence and low power consumption will be the focus of the subsequent development of testing equipment. The review and research of existing ship exhaust gas detection methods will help guide the research and development of related testing equipment.

Keywords: ship exhaust; detection methods; instrument

0 引言

船舶航运业是国际贸易运输的支柱,据联合国贸易和

发展会议发布的《2023年海运述评》显示^[1],航运业占世界贸易量的80%以上,且在未来的五年之内海运贸易量还会继续稳定上升。与此同时,船舶排放也是全球空气污染的

收稿日期:2024-11-25

^{*} 基金项目:国家重点研发计划课题(2022YFB4300801)项目资助

主要来源之一^[2-3],而且大约 70% 的船舶排放发生在距离陆地 400 km 的范围内^[4],这严重地危害了沿江和沿海地区的大气环境。

为了保护大气环境,航运部门从立法、执法两个方面开展了相关工作,目前船舶使用的燃料包括化石燃料和可替代的清洁燃料。从立法和执法的角度,目前主要针对的是化石燃料,而对于清洁燃料的排放规定和检测方法的研究仍有较大空缺。

本文系统地梳理了不同类型燃料的船舶大气污染排放物清单;基于尾气检测位置介绍了目前已有船舶尾气检测方法;从气体分析原理出发,列举了目前主要的气体分析设备,并从气体排放清单和检测方法的需求去评估目前这些设备的研究现状,并对未来发展方向提出了建议和展望,以期对船舶尾气检测技术及设备研发提供建议。

1 船舶的排放检测清单

燃料本身的性质很大程度上决定了排放的船舶尾气特性。船用燃料按清洁度可分为传统燃料与清洁替代燃料。针对不同燃料类型存在不同法规约束的实际情况,建立排放清单是有效检测的前提。

1.1 传统化石燃料的排放

传统燃料又被称为燃油,是目前使用最广泛的船用燃料。燃油虽然具有成本低廉、储运便利的优势^[5],但是普遍存在较大的排放问题,尤其是 NO_x 和 SO₂ 等常规排放物。

燃料中的硫分(含硫量)是产生 SO₂ 和固体颗粒物(PM)主要的来源^[6],以往的燃油均为高硫燃油(HSFO,含硫量≤3.5%),自 2020 年“限硫令”(非排放控制区船用燃油含硫量≤0.5%,排放控制区含硫量≤0.1%)由 IMO 颁布之后,低硫燃油的生产与应用也愈发得到重视,低硫燃油包括低硫燃油(LSFO,含硫量≤1%)、超低硫燃油(VLSFO,含硫量≤0.5%)、极低硫燃油(ULSFO,含硫量≤0.1%)和馏分油^[7],其中馏分油属于轻油,黏度较低,包括船用重柴油(MDO)和船用轻柴油(MGO)等。针对传统燃料的排放,Bilgili^[8]从含硫量的角度出发,比较了 HFO、LSFO、VLSFO 和 ULSFO 四种燃料的排放特性,如表 1 所示。

表 1 传统燃料的排放数值

Table 1 Emission values of traditional fuels

污染物/燃料类型	(g/kwh)			
	HFO	LSFO	VLSFO	ULSFO
CO ₂	3.114	3.114	3.206	3.206
NO _x	0.090 3	0.090 3	0.096 1	0.096 1
SO ₂	0.053	0.020	0.010	0.002
PM	0.007 28	0.004 26	0.000 97	0.000 97
CO	0.002 77	0.002 77	0.002 77	0.002 77
CH ₄	0.000 06	0.000 06	0.000 06	0.000 06
N ₂ O	0.000 15	0.000 15	0.000 16	0.000 16
NM VOC	0.003 08	0.003 08	0.003 08	0.003 08

燃油产生的排放主要以 SO₂、NO_x、PM 和 CO₂ 这 4 类常规排放物为主,低硫燃油虽然可以减少 SO₂ 和 PM 的排放^[9-12],但是 NO_x 和 CO₂ 的排放超标依旧是一个难以突破的问题,来自芬兰气象研究所和美国罗切斯特理工学院的研究报告显示^[2]:低硫燃油的使用仍造成每年约 25 万人过早死亡,因此采用清洁燃料是大势所趋。

1.2 清洁燃料的排放

目前船用的清洁替代燃料主要包括 LNG、甲醇、液化石油气(LPG)、氨燃料和氢燃料五种,可以有效地解决 SO₂ 和 NO_x 的排放问题,然而除了氢燃料之外,其余 4 种燃料还存在其他的排放问题。

1) LNG 的排放

LNG 是一种无毒、无色、无味且无腐蚀性的燃料,由天然气在除烃、去水和脱硫处理后,于零下 163℃(天然气沸点)加压冷却形成,体积仅为气态的 1/600,其主要组成为甲烷(较高的碳氢比),具有高热值、清洁的自然属性。

LNG 是目前应用最成熟的船用清洁能源,具备较为完备的基础设施和法律法规^[13],早在 20 世纪 60 年代就应用在船舶上,技术已经较为成熟。在 2022 年已运行的使用清洁燃料的船舶中,使用 LNG 燃料占 68.4%,而在建的清洁燃料船舶中,约占 52.1%,这表明未来一段时间内 LNG 将作为船舶燃料中节能减排的主力军。

LNG 作为一种可代替的清洁能源,关于其排放的研究也有很多,其中大部分研究都表明使用 LNG 作为船用燃料可以降低 SO₂、NO_x、CO₂ 和 PM 的排放^[14-23],其 SO₂、NO_x 和 PM 的排放均能满足 MARPOL 公约提出的限制要求^[24];但是 LNG 仍存在其他大气污染物的排放问题,在温室气体的排放上,LNG 虽然能减少 20% 的 CO₂ 排放,但是其燃烧过程中存在甲烷滑脱的现象,据日本造船与海洋工程学院的 Ushakov 等^[25-26]通过实船检测的数据显示,使用 LNG 作为燃料的 LBSI(稀薄燃烧纯气体机)、LPDF(低压双燃料发动机)甲烷的排放因子分别为 4.42 g/kwh、5.26 g/kwh,均高于《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法(中国第一、二阶段)》中第二阶段规定的 CH₄ 排放限值,而逸出的甲烷在 100 年内对全球的温室效应影响相当于 CO₂ 的 29.8 倍,在 20 年内的影响相当于 84 倍,因此甲烷的排放与 2050 年气候变化密切相关^[25-27],需要充分得到重视。在 LNG 常规污染物排放研究中,瑞典查尔姆斯理工大学的 Anderson^[28]团队发现,相比于船用燃油,使用 LNG 燃料会产生更多的 CO 和碳氢化合物(HC)排放;此外,加州大学伯恩斯工程学院联合加拿大国家研究委员会的研究^[29]发现,使用 LNG 燃料代替船用燃油后,其甲醛(HCHO)的平均排放因子由原来的 0.034 g/kwh 变为 0.24 g/kwh,其排放增加了数十倍,HCHO 作为一种致癌物,其排放将会产生一定的安全隐患,其排放问题也因此得到重视。

2) 甲醇的排放

甲醇(CH₃OH)是一种无色有毒且具有挥发性的液体,

其沸点为 64.7℃,目前甲醇主要是由天然气重整和蒸馏得到的混合物制成^[30],此外 CH₃OH 同样可以从可再生资源中获得,从而在向非化石燃料过渡的过程中降低温室气体的排放^[31]。

根据联合国贸易和发展会议(UNCTAD)的数据显示,在 2022 年已运行的船舶中,CH₃OH 燃料船舶占清洁燃料船舶的 0.8%,而在建造的船舶中占 3.4%,由此可见,CH₃OH 燃料也愈发得到船舶航运业的重视。

在船用 CH₃OH 燃料的常规排放研究上,2020 年瑞典查尔姆斯理工大学的 Fridell 等^[31]发现使用甲醇燃料相比于船用轻质柴油(MGO),总烃化合物(THC)和非甲烷总烃(NMHC)的排放均有所增加。在 CO 的排放研究中,Zincir 等^[32]发现,CH₃OH 在低负荷时表现出较高的 CO 排放,相比于柴油,其 CO 排放量增加了 2 倍。在非常规排放物的研究中^[33],由于不完全燃烧,CH₃OH 会部分氧化,从而产生一定的醛类排放。

3)LPG 的排放

LPG 是由炼厂气或天然气加压降温液化得到的一种无色挥发性易燃液体,主要成分为丙烷(C₃H₈)、丙烯(C₃H₆)和丁烷(C₄H₁₀)。

2022 年,在已运行的船舶中,LPG 燃料占清洁燃料的 1.4%,在建造的船舶中,占比增加为 5.5%。

LPG 的排放特性与 LNG 相似,但 LPG 中碳氢比更低,

这就导致其减少 CO₂ 排放的能力不如 LNG^[34],同时 LPG 也会释放出未燃烧的燃料排放,包括 C₃H₈、C₄H₁₀(包括正丁烷和异丁烷),这 3 类气体都会产生一定的温室效应。

4)氨的排放

氨(NH₃)是一种无色、有刺激性气味和易挥发的有毒气体,可以在常温下加压液化。目前氨气的制备工艺包括灰氨、蓝氨和绿氨 3 种,其中灰氨和蓝氨采用天然气在内的化石燃料合成,而绿氨则是利用可再生能源获取。

考虑到目前使用 NH₃ 的船舶较少,《2023 海运评述》并没有提到氨燃料船舶的占比,引用挪威船级社 2021 年的资料^[35],2021 年 在建的船舶中氨燃料船舶的占比为 0.02%,由此可见 NH₃ 作为船用燃料还处于起步阶段。

NH₃ 是一种无碳无硫的清洁燃料,因此与氢燃料一起被誉为最有希望实现零碳排放的理想能源^[36]。然而,有部分研究表明氨燃料存在一定的排放问题,来自麻省理工学院和香港科技大学的 Wong 等^[37]发现,虽然使用氨燃料能有效地减少温室气体的排放,但是必须考虑到氨燃料产生的 NO_x、N₂O、NH₃ 等大气污染物排放,其中 N₂O 产生的温室效应相当于 CO₂ 的 300 倍,因此需要调整合理的燃烧策略来保证零温室气体排放^[38-39]。

1.3 排放监测清单的建立

综上所述,按照污染物类型,从燃料种类、法规要求和影响 3 个层面建立了排放清单,如表 2 所示。

表 2 船用燃料排放清单
Table 2 Marine fuel emission inventory

污染物	燃料种类						是否为法规要求	法规外的影响
	燃油	低硫油	LNG	LPG	甲醇	氨		
SO ₂	√	—	—	—	—	—	是	有毒
NO _x	√	√	—	—	—	√	是	有毒
HC/NMVOC	√	√	√	√	—	√	是	致癌
CO	√	√	√	√	√	—	是	有毒
CO ₂	√	√	√	√	√	—	否	温室气体
CH ₄	—	—	√	—	—	—	是	温室气体
醛类	—	—	√	—	√	—	否	致癌
NH ₃	—	—	—	—	—	√	否	有毒
N ₂ O	—	—	—	—	—	√	否	有毒

注:其中√代表需要检测,—代表无需检测

由此可见随着清洁燃料的使用,醛类、NH₃、N₂O 和多环芳烃等非常规排放物将成为未来检测的重点对象,但是缺乏相应的限制法规、排放指标和检测方法。

2 船舶尾气检测的方法分析

船舶尾气从位置上可以分为未排入大气环境的烟气和已排入大气的烟羽。

从物质形态上看,烟气属于高温高压的气态污染物;

而烟羽属于低温低压的气溶胶形态。

从检测难度来看,烟气处于船用发动机的排气尾管中,可以直接采样检测;而烟羽与大气环境中发生扩散、反射、光化学反应等现象,检测难度要更大。

2.1 船舶尾气的检测方法

1)烟气的检测方法

烟气的检测流程包括 3 部分:烟气采集/预处理、气体分析和数据处理^[40],如图 1 所示。

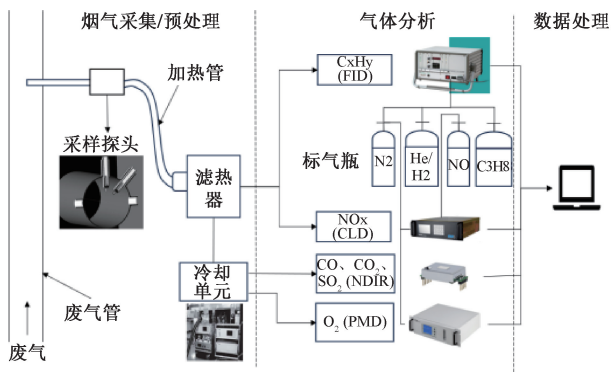


图 1 烟气分析基本流程

Fig.1 Basic flow of flue gas analysis

烟气采集装置一般包括采样探头、加热管、滤热片和冷却单元；气体分析部分包括各种气体传感器和标定气体；数据处理部则利用上位机软件对气体传感器进行校准和数据处理。在实际开展过程中，首先是采集和预处理过程，由于烟气中含有水蒸气，当采样管路温度较低时，会冷凝成液态水，干扰仪器的分析，再根据检测仪器的温度需求进行冷却处理；其次是分析过程，目前烟气分析采用的多仪器联用的组合方式；最后再行数据处理。

烟气的检测根据气体分析方式的不同可以分为：离线检测、在线固定式检测和便携式检测 3 种。离线检测在采样完成后，送入实验室的分析仪器中进行检测，精度极高但是时效性低；在线固定式检测则是将气体分析仪直接安装至船舶上，又称为在线可以实时读取发动机烟道内的组分及其浓度，但缺乏灵活性；便携式检测法通过人员携带便携式气体分析仪登船进行检测，相较于在线固定式检测法，其具备较高的灵活性，可以在多艘船舶上进行检测。

目前烟气的测量主要采用《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法（中国第一、二阶段）》的标准方法，对于处于航行状态的船舶，还需结合船舶自动识别系统提供位置、速度等信息，形成准确合理的排放清单^[41]。

2) 烟羽的检测

考虑到烟羽是尾气排入大气环境的部分，风速、光照和湿度等外界环境对检测的影响是不容忽视的，同时还需考虑现场采样的方法很难得到准确的结果，需要掌握烟羽的扩散规律即烟羽模型，推导出烟羽在大气中扩散的空间分布，然后再采用遥测的方式进行检测。

常见的烟羽模型为高斯烟羽模型，其模型方程为：

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

式中： C 表示污染物的浓度（单位为 kg/m^3 ）； Q 为污染源强度（单位为 kg/s ）； u 为泄漏高度的平均风速（单位为 m/s ）； σ_y 、 σ_z 分别为用浓度标准偏差表示的 y 轴和 z 轴上

的扩散系数； H 为泄漏有效高度（单位为 m ）。

针对船舶排放的烟羽模型目前也有不少研究：2018 年大连海事的李付宇等^[42]在考虑到航速对烟羽扩散的影响，采用船速、风速矢量合成的方式，得到的气体扩散浓度为：

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + P * \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (2)$$

其中， p 为像源权值，改进后风速方向误差和风速大小都更加准确。

2019 年杨硕等^[43]采用平板-高斯烟羽模型：在对风速和船速进行矢量合成的基础上，考虑重气湍流扩散的影响对高斯烟羽进行了改进，结果与实际测量值基本吻合。利用智能优化算法优化高斯烟羽模型的也有研究，2024 年 Wu 等^[44]通过粒子群优化高斯烟羽模型参数，准确率达到了 88.37%。

此外，从数值分析的角度进行烟羽建模也有研究：2020 年 Karl 团队^[45]采用多成分气溶胶模拟模型 (MAFOR) 计算烟羽中超细粒子的浓度；2021 年 Toscano 等^[46]通过计算流体力学研究了那不勒斯港停靠的邮轮排放的 SO_2 、 NO_x 、 PM 、 CO 和 VOCs ；2024 年德国的 Fink 团队^[47]考虑到烟羽的气溶胶性质，采用 MAFOR 来优化烟羽中 VOCs 的排放因子。

烟羽检测方法包括嗅探法和光学遥测两种。

(1) 嗅探法

嗅探技术是基于化学相互作用来检测特定气体的存在，通过获取每千克燃料排放产生的大气污染物浓度与 CO_2 的浓度之比^[48-49]，通常用于检测船舶烟羽中的 SO_2 和 NO_x 。

以 SO_2 为例，其检测指标为含硫量，其反演计算公式如下：

$$FSC(\%) = \frac{\text{SO}_2(\text{ppb})}{\text{CO}_2(\text{ppm})} \times 0.232\% \quad (3)$$

NO_x 则是采用排放因子的作为测量指标，其计算公式如下：

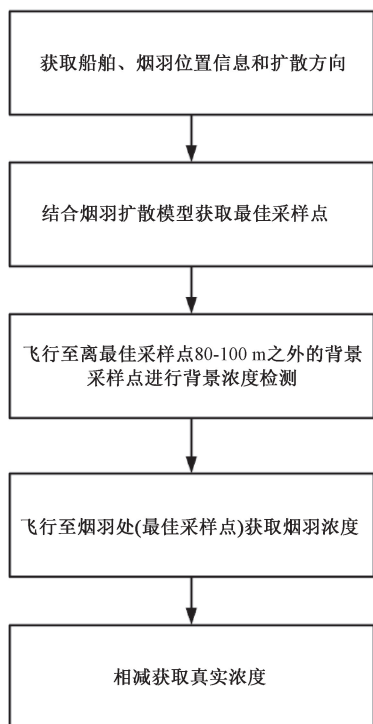
$$E_{\text{NO}_x} = 3.33 \cdot \frac{C(\text{NO}_x)(\text{ppb})}{C(\text{CO}_2)(\text{ppm})} (\text{g} \cdot \text{kWh}^{-1}) \quad (4)$$

根据上述公式可知，使用嗅探法检测烟羽的关键是获取烟羽中目标组分和 CO_2 的浓度。为了获取烟羽中组分的浓度，嗅探法采用气体传感器结合搭载平台的形式，通过靠近烟羽去“捕获”其组分及其浓度。目前使用固定式嗅探法和移动式嗅探法来监测烟羽^[50]。固定式嗅探法采用岸基、桥基等固定式平台，这是一种被动的测试方法，主要通过风将船舶尾气扩散到检测地点后进行气体分析检测，因此监测地点的选址尤为重要，通常位于上风向，受制于风速和风向的影响，固定式嗅探法只能适合于船舶必经的狭长航道附近的岸桥位置^[51]。移动式嗅探法

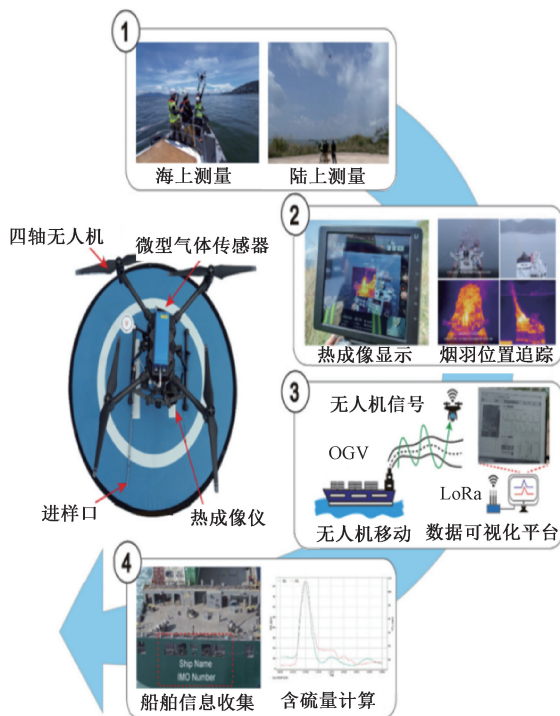
是一种主动的测试方法,可以通过控制移动平台去接近烟羽监测点进行检测,移动平台可以是船舶、直升机甚至是无人机^[52],固定平台虽然具有低成本并且具备全自动化的能力,但是船舶烟羽的采样与测量节点的航行状况相关(船速、风速等),这导致固定平台的测量结果不稳定,在移动平台中,但是在浅风条件下当烟羽扩散上升至50 m以上时很难进行检测;同时由于高昂运营成本,采用直升机并不适合海事部门的日常监测需求。无人机嗅探具备高度智能化、低成本的优势,国外如欧洲联合研究中心^[53]、瑞典查尔姆斯理工大学^[54-55]和荷兰应用科学研究

组织^[56],国内大连海事大学、上海海事局和中国交通运输部天津水运工程科学研究所^[57-60],都采用无人机嗅探法进行船舶烟羽检测。

无人机嗅探系统包括无人机、控制终端、气体分析模块和数据处理模块,气体分析模块除了气体传感器,还需具备风速方向检测仪、热成像和激光测距模块和采样模块,旨在提供烟羽位置信息、扩散方向等信息,控制终端需要结合这些信息并通过烟羽扩散模型确定最佳采样并对无人机的飞行路径进行优化从而提高检测效率和准确率,其检测流程(左)和检测系统(右)如图2所示。



(a) 流程图
(a) Flow chart



(b) 系统组成
(b) System components

图2 无人机嗅探法的流程及系统组成

Fig. 2 Process and system components of drone sniffing method

无人机嗅探法目前的一个研究热点为无人机航线规划和调度,这是为了提高无人机的检测效率和检测精度。

上海海事大学的刘天赐^[61]提出了一种无人机与船舶同步相遇模型,在通过船舶自动识别系统引入船速大小的基础上,对无人机航行方向和航行轨迹进行刻画,得到最优路径。大连海事大学的胡碟等^[62]建立了一种面向运动船舶以最小飞行距离为目标的无人机路径优化模型,实现多无人机协同检测,以满足检测的时效性。此外针对最小航线的规划,改进遗传算法^[63]、改进 PSO 算法^[64]和改进蜘蛛峰算法^[65]均有研究。

(2) 光学遥测

光学遥测技术是一种新型的无损检测方式,依据光波透过烟羽发生的吸收和散射等现象而产生的特征光谱,结

合船舶运行的情况进行浓度反演,从而获取烟羽中 SO_2 和 NO_x 的浓度。其根据光源类型可以分为主动遥测和被动遥测,主动遥测的光源来自于检测装置发出的激光;而被动遥测的光源则来自于太阳等外界光源的辐射,主动遥测法依托于激光雷达技术,激光器发出脉冲与烟羽相互接触后,其后向散射光被望远镜接收后可以通过算法反演得到待测气体的浓度,同时具有较高的时空分辨率;而被动遥测则是依托于太阳光,太阳光辐射通过大气层与待测烟羽接触,其散射光被光谱分析仪吸收后可以通过特征光谱吸收峰反演得到浓度,因为不自带光源,被动遥测法的设备目前通常为便携式设备。

光学遥测法的优势在于能够从较远距离直接观测烟羽的分布情况,但是其测量精度较低^[66]。

2.2 检测方法评估

烟气的检测相对成熟,在遵循法规的要求下,考虑船舶自身的航行情况将会使测量结果更加可靠。

烟羽的检测目前仍在进行,烟羽检测的不确定性因素较多,包括气象条件、航行状况、烟羽组分等,而且目前缺乏对非常规组分的烟羽模型,使用烟羽检测非常规的组分目前仍充满挑战。此外烟羽检测中的无人机嗅探法的路径规划目前只考虑了船舶的实时位置和速度等信息,并未考虑烟羽扩散位置和方向。

3 船舶尾气检测设备

对于上述的检测方法,气体分析都是必要且关键的一环,气体分析的核心在于气体分析仪,这关系到污染物的定性和定量分析,不同检测方法对气体分析的需求也有所不同。目前用于船舶尾气检测的气体检测设备有以下几类。

3.1 光谱仪

光谱仪检测气体的原理是利用气体对特殊波长或频率光线存在吸收(吸收光谱)、散射和发射现象(发射光谱),其中用于船舶尾气检测包括非色散红外吸收光谱仪(NDIR)、差分吸收光谱仪(DOAS)^[67-68]、傅里叶红外吸收光谱仪(FIR)和拉曼激光雷达(RL),这四种光谱仪在船舶尾气检测中具备广阔的应用前景。

NDIR、DOAS、FTIR 检测气体的原理都是基于比尔朗伯定律,该定律描述了光谱谱线参数、环境参数(温度、压力、组分浓度和测量光程等)及分子吸光率之间的对应关系^[69],不同种类的气体都能对特定波长的光进行吸收,从而形成特征吸收谱峰,且吸收的光强正比于气体的浓度,因此可以实现对混合气体的定性定量分析,原理如图 3 所示:NDIR 技术通过发射特定波长的红外光,测量气体对这些波长光的吸收程度来检测气体浓度,光源发出的红外光经过气体样本室后,部分光被气体吸收,剩余光强度由探测器测量,通过比较光强的变化,可以计算出气体的浓度;DOAS 主要包括紫外光谱、气体吸收室、光谱仪等组成,设备内部设有两个通道,即参比通道和样品通道,通过计算两者光强的差值即差分信号,不仅可以获取待测物的浓度,还可以消除光源波动、光路漂移等因素带来的误差从而提高测量的准确性。FTIR 主要由红外光源、气体吸收室、干涉仪和检测器组成,红外光源发出宽频谱的红外光通过干涉仪进入气体吸收室,形成不同颜色的干涉条纹,再经过傅里叶变化转换为频率信息,通过分析频谱信息达到检测的目的;RL 属于拉曼光谱,其原理基于拉曼散射效应,装备包括泵浦光源、望远镜、光学接收系统、光谱分析系统和数据处理系统,泵浦光源发射激光进入气室与样品气体相互作用发生散射现象,经过光学接收系统进入光谱分析系统,最后进行数据处理。

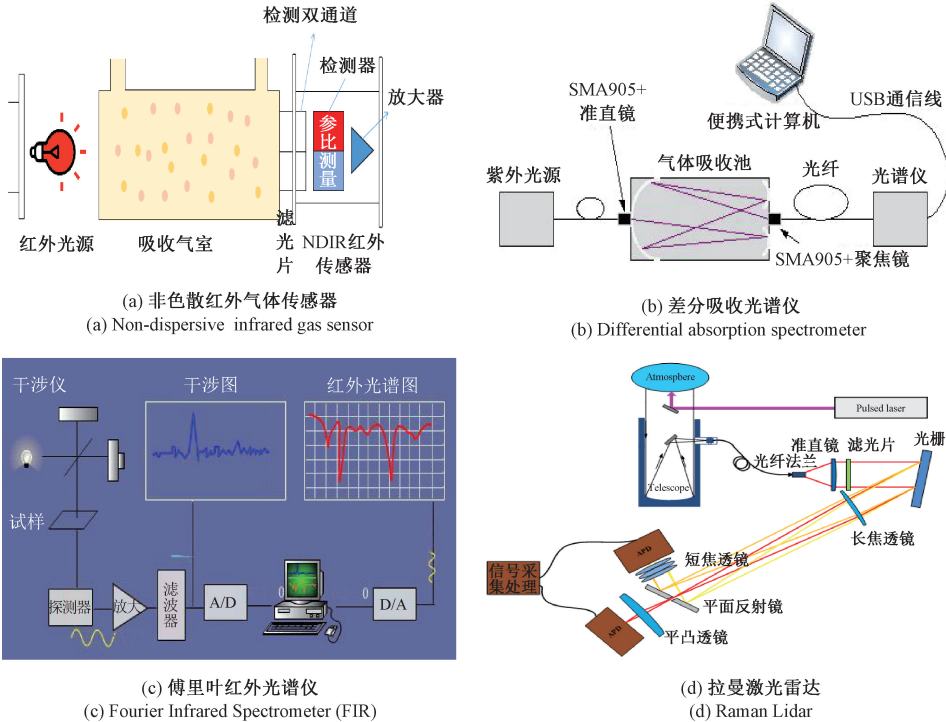


图 3 光谱仪的原理

Fig. 3 Principle of spectrometer

2016 年 Peng 等^[70]采用便携式 NDIR 分析仪测量船舶排放的 CO₂;2018 年 Hong 等^[71]采用船载 DOAS 实现了

对长江沿岸 SO₂、NO_x 和 HCHO 的测量;2020 年意大利环境分析方法研究所的 Boselli 等^[72]采用 RL 在那不勒斯

港口检测周边船舶排放的 PM、SO₂ 和 NO_x, 2021 年大连海事大学的 Zhang 等^[73]采用 DOAS 结合成像技术实时监测船舶排放的 SO₂; 同年 Gagnon^[74]采用 FTIR 测量 SO₂ 和 CO₂, 上述两种方法均为光学遥测法; 2024 年来自香港科技 Yang 团队^[75]采用无人机携带 NDIR 传感器测量了船舶含硫量。可以发现光谱仪在多组分检测 and 小型化方面均有研究, 适合烟气和烟羽两者的检测。

3.2 电化学气体分析仪

电化学气体分析仪 (electrochemical gas analyzer, EGA) 基于电化学的原理, 利用气体的氧化性或还原性在特定电化学反应装置内发生化学反应, 通过测量化学反应产生的电流或者电势变化来确定待测组分的浓度^[76], 然而单个的电化学传感器只能检测特定的组分, 对于船舶尾气这种复杂的混合气体, 需要采用由多个电化学传感器组成阵列来进行检测。

凭借微小的体积和较低的成本, 电化学气体传感器是目前最常见的烟气分析设备。

3.3 光声气体传感器

光声气体传感器 (photoacoustic gas sensor, PGS) 是一种基于吸收光谱和光声效应的气体检测器, 通常由激光发射器、光声单元、麦克风 and 测量电路组成, 其测量原理如下: 激光发射器发出激光进入光声单元, 待测气体通过吸收特定波长的光 (能量), 由基态跃迁到高能态, 通过麦克风对外界产生压力波 (声信号), 通过探测声波的强度可以间接获取气体的浓度等信息^[77]。

在目前的研究中, 光声气体传感器尺寸通常较小, 2018 年来自德国弗莱堡大学的 El-Safoury^[78]团队针对船舶尾气中 SO₂ 的检测开发了一种光声气体传感器 (如图 4 所示), 该传感器总长为 15 cm。

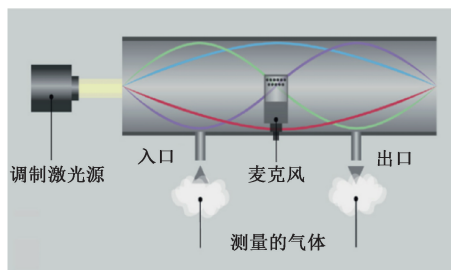


图 4 弗莱堡大学研制的光声气体传感器

Fig. 4 Photoacoustic gas sensors at the University of Freiburg

2024 年大连理工大学的 Qi 等^[79]研发了一种用于同时检测 NO₂ 和 SO₂ 的快速光声废气分析仪, 如图 5 所示, 该分析仪具备便携检测的能力。

同年山东大学的 Xu 等^[80]研发用于检测 CO₂ 的非谐振光声气体传感器, 其体积为 12 mm×12 mm×6 mm, 功耗仅为 44 mw, 结构如图 6 所示。

3.4 气相色谱-质谱联用仪

气相色谱-质谱联用仪 (gas chromatography and mass

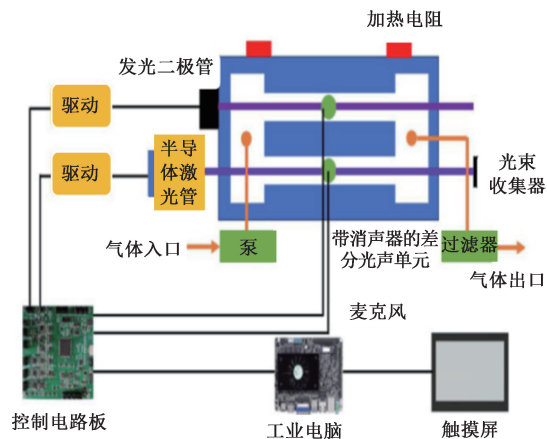


图 5 NO₂、SO₂ 快速光声废气分析仪

Fig. 5 NO₂ and SO₂ rapid photoacoustic exhaust gas analyzer

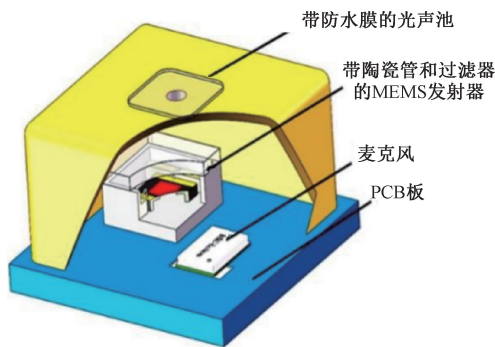


图 6 用于检测 CO₂ 非谐振光声气体传感器

Fig. 6 Non-resonant photoacoustic gas sensors for CO₂ detection

spectrometry, GC-MS) 是一种结合 GC 和 MS 技术的一种检测仪器, 其中 GC 起到分离混合物的作用, 而 MS 则负责高精度的定性和定量检测。

GC 是一种基于分离与检测的分析方法, 其结构由载气、气路组件 (进样装置、阀)、色谱柱、检测器组成, 复杂混合物通过进样装置进入定量环或者富集器中, 由载气推动进入色谱柱中进行分离, 最后再送入检测器中生成色谱图信号进行定性定量分析。MS 是一种通过电场和磁场将运动的离子 (带电荷的原子、分子或分子碎片) 按它们的质荷比 (m/z) 分离后进行检测的方法, 这种方法能够提供化合物的分子量、化学结构、裂解规律以及由单分子分解形成的某些离子间存在的相互关系等信息。质谱仪主要由样品导入系统、离子源、质量分析器、检测器、数据处理系统等部分组成, 其中离子源负责将样品分子转化为带电离子, 质量分析器则根据离子的质荷比进行分离, 检测器记录分离后的离子信号, 最终通过数据处理系统分析得到质谱图谱。

目前 GC-MS 主要用于检测船舶尾气中的复杂组分如 VOCs、芳香烃和苯系物^[81-82]。

3.5 化学发光检测器分析仪

化学发光检测器分析仪 (chemiluminescent detector

analyzer,CLDA)^[83-84] 虽然属于分子光谱的范畴,但是其对特定的气体分子中的官能团灵敏度非常高,因此主要用来检测船舶发动机尾气中的氮氧化物,1971 年由福特汽车有限公司的 Niki 等^[85] 提出用化学发光法检测 NO,其原理是将 NO 气体和臭氧(O₃)在检测器中混合,此时一部分 NO 会被氧化成处于激发状态的 NO₂,当激发态的 NO₂ 回到基态时,会以特定波长的电磁波形式释放激发能从而使检测器发光,且发光强度与 NO 的浓度成正比。通过检测光强就可以得到 NO 的浓度。而在 NO₂ 的检测上,由于 NO₂ 本身不具备发光特性,因此需要将 NO₂ 还原成 NO 再进行测量,目前通常采用钼转化炉进行转化,如图 7 所示。

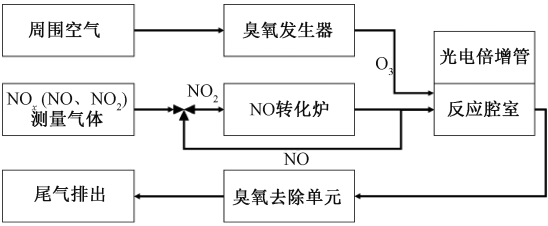


图 7 化学发光法检测氮氧化物的流程

Fig. 7 Procedure of chemiluminescence method for detecting nitrogen oxides

化学发光分析仪是符合目前柴油机排放试验规定的 NO_x 分析仪,此外同济大学的 Li 等^[86] 在船载嗅探法中使用化学发光法来检测 NO_x。

3.6 氢火焰离子检测器

氢火焰离子检测器(Flame Ionization Detector,FID)是一种具有破坏性的质量型气体检测器,通常与 GC 一起联用,用于检测各种复杂的有机化合物,是目前应用最广泛的 GC 检测器^[87],FID 的原理一般认为是基于有机化合物在氢火焰中发生的裂解,所产生的自由基碎片经过与氧气的进一步反应产生了离子,其反应式如下:



在电场作用下,离子定向移动,通过火焰上方的收集极就可以测得微电流,再由电子线路转换为电压信号输出从而得到待测物的浓度。

考虑到 FID 对有机化合物的响应特别敏感,其主要检测船舶烟气中的碳氢化合物(总烃和非甲烷总烃),目前有催化氧化法和气相色谱法两种^[88],催化氧化法的原理是将废气通过采样系统、定量环分别进入总烃检测单元和甲烷催化转换单元(将除 CH₄ 以外的其他有机化合物全部转化为 CO₂ 和水),经 FID 分别测得总烃和甲烷的浓度,两者之差为非甲烷总烃的浓度;气相色谱法的进样过程和催化氧化法一致,然后将样气送入总烃柱和甲烷柱上进行分离,再通过 FID 检测器测出总烃和甲烷的浓度,两者之差为非甲烷总烃的浓度^[89]。

目前采用便携式加热型的氢火焰离子检测器检测烟气中的 HC 是法规规定的方案。

3.7 光离子化检测器

光离子化检测器(photoionization detector,PID)主要用于检测气体中的 VOCs,其使用紫外光作为光源,当紫外光照射到气室中的待测气体时会将气体分子电离形成离子和电子,在电场的作用下产生电流且电流强度与气体浓度成正比,其中可电离的物质范围包括:烃类、醇类和醛类^[90]。

由于其微小的体积和较低的功耗,目前 PID 检测器不仅可以作为烟气分析使用,其同样适合搭载无人机进行嗅探法检测。

3.8 顺磁式氧分析仪

O₂ 虽然不是大气污染物,但是获取其含量既可以评估发动机燃烧室的燃烧状态,又能从整体上估计含氧化合物(SO₂ 和 NO_x)的排放水平。

顺磁式氧分析仪(paramagnetic oxygen analyzer,POA)主要用于检测船舶尾气中的氧气^[91-92],这是因为氧气的磁化率要远高于其他气体,通常情况下氧气和其他气体组成的混合物的磁化率是由氧气的浓度来决定的,因此只要测量混合气体的磁化率就可以得到氧气的浓度。

4 船舶尾气分析设备的对比分析

船舶尾气分析设备的选择与检测对象、检测环境和检测方法密切相关。表 3 为检测方法对分析设备的要求。

表 3 各种检测方法对仪器的需求
Table 3 Instrumentation requirements for various testing methods

检测对象	检测环境	检测方法	仪器要求
烟气(高温高压)	实验室(安全可靠)	离线检测法	高精度、复杂组分
	机舱(多振动噪声)	便携检测	便携化、多组分化
		在线检测	固定在线式(高续航)
烟羽(低温低压)	无人机等移动平台	嗅探法	微型化、低功耗、快速分析
	岸、桥(空间开阔)	光学遥测法	光学类、非接触式

针对上述的需求,从设备体积、适用的检测方法、可检测组分种类、检测时长、精度五个层面对现有的气体分析

仪进行对比。如表 4 所示。

表 4 船舶尾气分析设备对比

Table 4 Comparison of ship exhaust gas analysis equipment

分析仪器	体积	适用的检测方法	可检测组分(定量)	检测时长	精度
Spectrometer	便携、微型	(1)无人机嗅探	常规污染物	短	较高
		(2)光学遥测			
		(3)便携式烟气检测			
		(4)在线烟气检测			
		(5)离线检测			
EGA	微型	(1)无人机嗅探	常规污染物	短	较低
		(2)便携式烟气检测			
PGS	微型、便携	(3)在线烟气检测	CO ₂ 、CO、CH ₄ 、NH ₃ 、VOCs	短	较高
		(1)无人机嗅探			
GC-MS	便携、实验室	(2)便携式烟气检测	常规污染物+复杂混合物	较长	极高
		(1)便携式烟气检测			
CLD	便携、实验室	(2)离线检测	NO	较长	较高
		(1)便携式烟气检测			
PID	微型	(2)离线检测	VOCs	极短	极高
		(1)无人机嗅探			
PID	便携	(2)便携式烟气检测	HC	较短	极高
POA	便携	便携式烟气检测	单一(O ₂)	较长	较高

注:表 4 中常规污染物包括 CO、CO₂、SO₂、NO_x、HC 和 PM

5 结 论

检测清单:随着清洁能源的使用,虽然有效地缓解了 SO₂ 和 NO_x 的排放,但是出现了新的排放问题,CH₄、HC 和 CO 等排放物虽然已被纳入排放限值中,但 NH₃、N₂O、醛类以及多环芳烃等非常规排放物仍然没有相关的限制法规和检测指标。

检测方法:目前针对烟气和烟羽这两个检测对象共有 5 种检测方法,每种方法都有各自的适用场景,支撑着船舶尾气检测的多元化检测需求,对于非常规污染物,烟羽扩散模型的缺乏使得烟羽检测无法实施。

分析设备:从气体分析的角度,本文整理出目前最常用的 8 类气体分析仪,对于排放清单中新增的气体组分,以及检测位置的需求进行了评判。光谱仪和 EGA 是目前最常见的船舶尾气分析设备,但是缺乏对复杂组分的检测能力;PGS 和 PID 目前在小型化方面的研究较多,特别适合无人机嗅探法,但是都属于高选择性的气体分析设备,可检测的组分有限;GC-MS 作为目前船舶尾气检测中精度最高、可检测组分最多的仪器,存在体积大、功耗高和检测时间长的不足;CLD、FID 和 POA 是目前最常用的便携式烟气分析仪,但受制于体积和功耗,基本不用于烟羽的检测。

从法规上,建议增加非常规污染物的排放法规和检测指标,从检测方法层面,烟气检测应该严格遵循法规的检

测要求;烟羽检测中,应研究非常规组分的烟羽扩散模型,此外无人机嗅探法检测船舶烟羽非常有应用前景,研究所多无人机协同检测算法将会成为研究的热门;从气体分析仪器方面,面向不同的检测需求,小型化、多组分和快速分析是未来仪器的研究方向,特别是针对 CH₄、NH₃、N₂O 等新增气体组分的检测。

参考文献

[1] WANG Q W, ZHANG H, HU C H. China' s competition regulation in the maritime industry: Regulatory concerns, problems and potential implications [J]. Ocean & Coastal Management, 2024, 251: 107082.

[2] SOFIEV M, WINEBRAKE J J, JOHANSSON L, et al. Cleaner fuels for ships provide public health benefits with climate tradeoffs [J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 406.

[3] EKMEKÇIOĞLU A, KUZU S L, ÜNLÜGENÇOĞLU K, et al. Assessment of shipping emission factors through monitoring and modelling studies[J]. Science of the Total Environment, 2020, 743: 140742.

[4] CHEN C, SAIKAWA E, COMER B, et al. Ship emission impacts on air quality and human health in the Pearl River Delta (PRD) region, China, in 2015, with projections to 2030[J]. GeoHealth, 2019, 3(9):

- 284-306.
- [5] JAMEEL A G A, ALKHATEEB A, TELALOVIĆ S, et al. Environmental challenges and opportunities in marine engine heavy fuel oil combustion[C]. Fourth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2018) Volume 1. Springer Singapore, 2019: 1047-1055.
 - [6] ALFÖLDY B, LÖÖV J B, LAGLER F, et al. Measurements of air pollution emission factors for marine transportation in SECA [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6(7): 1777-1791.
 - [7] JIANG R, ZHAO L. Effects of IMO sulphur limits on the international shipping company's operations: From a game theory perspective[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 173: 108707.
 - [8] BILGILI L. Life cycle comparison of marine fuels for IMO 2020 Sulphur Cap [J]. Science of the Total Environment, 2021, 774: 145719.
 - [9] JAMEEL A G A, KHATEEB A, ELBAZ A M, et al. Characterization of deasphalted heavy fuel oil using APPI(+) FT-ICR mass spectrometry and NMR spectroscopy[J]. Fuel, 2019, 253: 950-963.
 - [10] FAN J Y, SAXENA S, XIAO C K, et al. Molecular characteristics of sulfur compounds in oxidative desulfurization for heavy fuel oil based on APPI FT-ICR MS analysis[J]. Catalysis Today, 2022, 404: 262-268.
 - [11] ELBAZ A M, GANI A, HOURANI N, et al. TG/DTG, FT-ICR mass spectrometry, and NMR spectroscopy study of heavy fuel oil[J]. Energy & Fuels, 2015, 29(12): 7825-7835.
 - [12] CORBIN J C, PIEBER S M, CZECH H, et al. Brown and black carbon emitted by a marine engine operated on heavy fuel oil and distillate fuels; Optical properties, size distributions, and emission factors [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(11): 6175-6195.
 - [13] 刘会纳, 刘巍. 船舶未来燃料的走向或是“组合替代”[J]. 中国远洋海运, 2022(6): 50-55.
 - LIU H N, LIU W. The future direction of ship fuel or "combination substitution" [J]. China Ocean Shipping, 2022(6): 50-55.
 - [14] BILGILI L. Comparative assessment of alternative marine fuels in life cycle perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 144: 110985.
 - [15] NERHEIM A R. Maritime LNG fuel systems for small vessels-a survey of patents[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023, 119: 103766.
 - [16] SARI D P, TUSWAN T, MUTTAQIE T, et al. Critical overview and challenge of representative LNG-fuelled ships on potential GHG emission reduction[J]. EVERGREEN, 2023, 10(3): 1792-1808.
 - [17] WANG Z, DONG B, LI M Y, et al. Configuration of Low-Carbon fuels green marine power systems in diverse ship types and Applications [J]. Energy Conversion and Management, 2024, 302: 118139.
 - [18] KUITTINEN N, HEIKKILÄ M, VESALA H, et al. Methane slip from LNG engines—review and on-board study[C]. Joint TAP and S&E Conference, 2023.
 - [19] JAFARZADEH S, PALTRINIERI N, UTNE I B, et al. LNG-fuelled fishing vessels: A systems engineering approach [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 50: 202-222.
 - [20] TAY Z Y, KONOVESSIS D. Sustainable energy propulsion system for sea transport to achieve United Nations sustainable development goals; A review[J]. Discover Sustainability, 2023, 4(1): 20.
 - [21] DENG J, WANG X, WEI Z, et al. A review of NO_x and SO_x emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels[J]. Science of the Total Environment, 2021, 766: 144319.
 - [22] JELIĆ M, MRZLJAK V, RADICA G, et al. An alternative and hybrid propulsion for merchant ships: current state and perspective [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2021: 1-33. DOI: 10.1080/15567036.2021.1963354.
 - [23] SOPTA D, BUKŠA T, BUKŠA J, et al. Alternative fuels and technologies for short sea shipping [J]. Pomorski zbornik, 2020, 59(1): 61-84.
 - [24] VAN VELDHUIZEN B, VAN BIERT L, ARAVIND P V, et al. Solid oxide fuel cells for marine applications[J]. International Journal of Energy Research, 2023, 2023(1): 5163448.
 - [25] FLATO G, MAROTZKE J, ABIODUN B, et al. Evaluation of climate models. In: Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [J]. Computational Geometry, 2013, 18(2): 95-123.
 - [26] USHAKOV S, STENERSEN D, EINANG P M. Methane slip from gas fuelled ships; A comprehensive summary based on measurement data[J]. Journal of

- Marine Science and Technology, 2019, 24(4): 1308-1325.
- [27] AREFIN M A, NABI M N, AKRAM M W, et al. A review on liquefied natural gas as fuels for dual fuel engines: Opportunities, challenges and responses[J]. Energies, 2020, 13(22): 6127.
- [28] ANDERSON M, SALO K, FRIDELL E. Particle-and gaseous emissions from an LNG powered ship[J]. Environmental science & technology, 2015, 49(20): 12568-12575.
- [29] PENG W H, YANG J CH, CORBIN J, et al. Comprehensive analysis of the air quality impacts of switching a marine vessel from diesel fuel to natural gas[J]. Environmental Pollution, 2020, 266: 115404.
- [30] RIAZ A, ZAHEDI G, KLEMEŠ J J. A review of cleaner production methods for the manufacture of methanol[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 57: 19-37.
- [31] FRIDELL E, SALBERG H, SALO K. Measurements of emissions to air from a marine engine fueled by methanol [J]. Journal of Marine Science and Application, 2021, 20: 138-143.
- [32] ZINCIR B, DENIZ C, TUNÉR M. Investigation of environmental, operational and economic performance of methanol partially premixed combustion at slow speed operation of a marine engine[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 235: 1006-1019.
- [33] RAMSAY W, FRIDELL E, MICHAN M. Maritime energy transition: future fuels and future emissions[J]. Journal of Marine Science and Application, 2023, 22(4): 681-692.
- [34] KIM J K, YEO S, CHOI J H, et al. LPG, gasoline, and diesel engines for small marine vessels: A comparative analysis of eco-friendliness and economic feasibility[J]. Energies, 2024, 17(2): 450.
- [35] SCHWARZKOPF D A, PETRIK R, HAHN J, et al. Future ship emission scenarios with a focus on ammonia fuel[J]. Atmosphere, 2023, 14(5): 879.
- [36] AYVALI T, EDMAN TSANG S C, VAN VRIJALDENHOVEN T. The position of ammonia in decarbonising maritime industry: An overview and perspectives: Part I: Technological advantages and the momentum towards ammonia-propelled shipping[J]. Johnson Matthey Technology Review, 2021, 65(2): 275-290.
- [37] WONG A Y H, SELIN N E, EASTHAM S D, et al. Climate and air quality impact of using ammonia as an alternative shipping fuel[J]. Environmental Research Letters, 2024, 19(8): 084002.
- [38] ZINCIR B. A short review of ammonia as an alternative marine fuel for decarbonised maritime transportation[C]. International Conference on Energy, Environment and Storage of Energy (ICEESEN2020), 2020.
- [39] XU L L, XU S J, BAI X S, et al. Performance and emission characteristics of an ammonia/diesel dual-fuel marine engine[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 185: 113631.
- [40] IOANNOU M, PAPALAMBROU G, KYRTATOS N P, et al. Evaluation of emission sensors for four-stroke marine diesel engines[J]. Journal of Marine Engineering & Technology, 2013, 12(3): 20-29.
- [41] 严实. 利用改进 BP 网络的船舶尾气检测精度提升方法[J]. 电子测量技术, 2017, 40(11): 221-225.
- YAN SH. An accuracy enhancement method for ship exhaust gas detection using improved BP network[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(11): 221-225.
- [42] 付金字, 李颖. 基于高斯烟羽模型的船舶尾气扩散研究[J]. 海洋通报, 2018, 37(2): 235-240.
- FU J Y, LI Y. Diffusion study of ship exhaust based on Gaussian plume model[J]. Marine Bulletin, 2018, 37(2): 235-240.
- [43] 杨硕, 李颖, 刘大刚, 等. 基于平板-高斯烟羽模型的海上重气泄漏事故研究[J]. 大连海事大学学报, 2019, 45(4): 153-160.
- YANG SH, LI Y, LIU D G, et al. Study of offshore heavy gas leakage accidents based on flat plate-Gaussian plume model[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2019, 45(4): 153-160.
- [44] WU H, LI X Y, WANG CH, et al. Inverse calculation of vessel emission source intensity based on optimized Gaussian puff model and particle swarm optimization algorithm[J]. Marine Pollution Bulletin, 2024, 209: 117117.
- [45] KARL M, PIRJOLA L, KARPPINEN A, et al. Modeling of the concentrations of ultrafine particles in the plumes of ships in the vicinity of major harbors[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(3): 777.
- [46] TOSCANO D, MARRO M, MELE B, et al. Assessment of the impact of gaseous ship emissions in ports using physical and numerical models: The case of Naples [J]. Building and Environment, 2021, 196: 107812.
- [47] FINK L, KARL M, MATTHIAS V, et al. Using the multicomponent aerosol formation model(MAFOR) to

- determine improved VOC emission factors in ship plumes[J]. *Toxics*, 2024, 12(6): 432.
- [48] BALZANI LÖÖV J M, ALFOLDY B, GAST L F L, et al. Field test of available methods to measure remotely SO_x and NO_x emissions from ships [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(8): 2597-2613.
- [49] BEECKEN J, MELLQVIST J, SALO K, et al. Airborne emission measurements of SO_2 , NO_x and particles from individual ships using a sniffer technique [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(7): 1957-1968.
- [50] VILLA T F, SALIMI F, MORTON K, et al. Development and validation of a UAV based system for air pollution measurements[J]. *Sensors*, 2016, 16(12): 2202.
- [51] 于晓洋, 车金涛, 鞠伟达. 无人机船舶尾气监测系统研究[J]. *动力系统与控制*, 2023, 12: 10.
YU X Y, CHE J T, JU W D. Research on UAV ship exhaust monitoring system [J]. *Dynamical Systems and Control*, 2023, 12: 10.
- [52] KATTNER L, MATHIEU-ÜFFING B, BURROWS J P, et al. Monitoring compliance with sulfur content regulations of shipping fuel by in situ measurements of ship emissions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(17): 10087-10092.
- [53] BURGUÉS J, ESCLAPEZ M D, DOÑATE S, et al. Aerial mapping of odorous gases in a wastewater treatment plant using a small drone [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(9): 1757.
- [54] BEECKEN J, WEIGELT A, GRIESEL S, et al. Performance assessment of state-of-the-art and novel methods for remote compliance monitoring of sulphur emissions from shipping[J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2023, 2023: 1-19.
- [55] BEECKEN J, WEIGELT A, GRIESEL S, et al. Performance assessment of state-of-the-art and novel methods for remote compliance monitoring of sulphur emissions from shipping [J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2023, 2023: 1-19.
- [56] VAN ROY W, VAN NIEUWENHOVE A, SCHELDENMAN K, et al. Measurement of sulfur-dioxide emissions from ocean-going vessels in Belgium using novel techniques [J]. *Atmosphere*, 2022, 13(11): 1756.
- [57] 石振男, 冯宝明, 董祥武, 等. 无人机搭载嗅探设备监测船舶尾气研究[J]. *中国海事*, 2024(6): 18-20.
SHI ZH N, FENG B M, DONG X W, et al. Study on monitoring of ship exhaust gases by UAV with sniffer equipment[J]. *China Maritime*, 2024(6): 18-20.
- [58] 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 SH T. Remote monitoring and supervision technology for ship air pollutant emission control area [J]. *China Maritime*, 2020(1): 24-26.
- [59] 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, 154.
DENG M T, XIANG Y J, HU H J, et al. Design and application of unmanned aircraft system for ship exhaust monitoring [J]. *China Navigation*, 2024, 47(1): 139-144, 154.
- [60] DENG M T, PENG SH T, XIE X, et al. A diffused mini-sniffing sensor for monitoring SO_2 emissions compliance of navigating ships [J]. *Sensors*, 2022, 22(14): 5198.
- [61] 刘天赐. 面向船舶尾气排放检测的无人机调度优化问题研究[D]. 上海: 上海海事大学, 2023.
LIU T C. Research on UAV scheduling optimisation problem for ship exhaust emission detection [D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2023.
- [62] 胡碟, 胡志华, 田曦丹. 考虑船舶实时位置的船舶尾气排放检测无人机路径优化[J]. *大连海事大学学报*, 2024, 50(1): 28-38.
HU D, HU ZH H, TIAN X D. Path optimisation of ship exhaust emission detection UAV considering real-time ship position [J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2024, 50(1): 28-38.
- [63] 吴振, 吴红兰. 基于改进遗传算法的无人机航路规划[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(24): 52-58.
WU ZH, WU H L. UAV route planning based on improved genetic algorithm [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(24): 52-58.
- [64] 许诺. 基于改进 PSO 算法的 UAV 三维路径规划研究[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(2): 78-83.
XU N. Research on three-dimensional path planning of UAV based on improved PSO algorithm [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(2): 78-83.
- [65] 张颖, 姜文刚, 陈一鸣, 等. 基于改进蜘蛛蜂算法的无人机三维路径规划[J]. *电子测量技术*, 2024, 47(11): 101-111.
ZHANG Y, JIANG W G, CHEN Y M, et al. Three-dimensional path planning for unmanned aerial vehicles based on improved spider bee algorithm [J]. *Electronic*

- Measurement Technology, 2024, 47(11): 101-111.
- [66] ZHOU F, FAN Y L, ZOU J, et al. Ship emission monitoring sensor web for research and application[J]. Ocean Engineering, 2022, 249: 110980.
- [67] 汤光华, 许传龙, 邵礼堂, 等. 差分吸收光谱法在线测量烟气浓度实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2008(2): 244-249.
- TANG G H, XU CH L, SHAO L T, et al. Experimental study on online measurement of flue gas concentration by differential absorption spectroscopy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008(2): 244-249.
- [68] 邵理堂, 王式民, 汤光华, 等. DOAS方法在线测量污染气体浓度的温度与非线性补偿[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(7): 1518-23.
- SHAO L T, WANG SH M, TANG G H, et al. Temperature and nonlinearity compensation of DOAS method for online measurement of pollutant gas concentration [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(7): 1518-1523.
- [69] 黄小东, 郝晓剑, 梁晓东, 等. 基于TDLAS的高温氧气标定方法研究[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(5): 43-46.
- HUANG X D, HAO X J, LIANG X D, et al. Research on high temperature oxygen calibration method based on TDLAS [J]. Sensors and Microsystems, 2024, 43(5): 43-46.
- [70] PENG Z H, GE Y SH, TAN J W, et al. Emissions from several in-use ships tested by portable emission measurement system[J]. Ocean Engineering, 2016, 116: 260-267.
- [71] HONG Q Q, LIU CH, CHAN K L, et al. Ship-based MAX-DOAS measurements of tropospheric NO₂, SO₂, and HCHO distribution along the Yangtze River [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(8): 5931-5951.
- [72] BOSELLI A, DE MARCO C, MOCERINO L, et al. Evaluating LIDAR sensors for the survey of emissions from ships at harbor[C]. Practical Design of Ships and Other Floating Structures, 2019.
- [73] ZHANG ZH D, ZHENG W B, LI Y, et al. Monitoring sulfur content in marine fuel oil using ultraviolet imaging technology [J]. Atmosphere, 2021, 12(9): 1182.
- [74] GAGNON J P, LARIVIÈRE-BASTIEN M, THIBODEAU J, et al. Remote estimation of sulfur content in fuel from SO₂ and CO₂ quantification of ship exhaust plumes [C]. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. IEEE, 2021: 7287-7290.
- [75] YANG SH Y, GHADIKOLAEI M A, GALI N K, et al. Evaluating methods for marine fuel sulfur content using microsensor sniffing systems on ocean-going vessels[J]. Science of The Total Environment, 2024, 942: 173765.
- [76] 周艺环, 叶日新, 董明, 等. 基于电化学传感器的SF₆分解气体检测技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 2133-2139.
- ZHOU Y H, YE R X, DONG M, et al. Research on SF₆ decomposition gas detection technology based on electrochemical sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9): 2133-2139.
- [77] 查申龙, 刘锟, 朱公栋, 等. 基于共振型高灵敏度光声光谱技术探测痕量乙炔气体浓度[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(9): 2673-2678.
- CHA SH L, LIU K, ZHU G D, et al. Detection of trace acetylene gas concentration based on resonance-based high-sensitivity photoacoustic spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(9): 2673-2678.
- [78] EL-SAFOURY M, WEBER C, SCHMITT K, et al. Photoacoustic gas detector for the monitoring of sulfur dioxide content in ship emissions[C]. Sensors and Measuring Systems; 19th ITG/GMA-Symposium. VDE, 2018: 1-3.
- [79] QI H CH, ZHAO X Y, XU Y F, et al. Rapid photoacoustic exhaust gas analyzer for simultaneous measurement of nitrogen dioxide and sulfur dioxide[J]. Analytical Chemistry, 2024, 96(13): 5258-5264.
- [80] XU M S, ZHENG K Y, TIAN X, et al. Development of a non-resonant photoacoustic gas sensor for CO₂ detection[J]. Infrared Physics & Technology, 2024, 137: 105177.
- [81] RÜGER C P, SCHWEMER T, SKLORZ M, et al. Comprehensive chemical comparison of fuel composition and aerosol particles emitted from a ship diesel engine by gas chromatography atmospheric pressure chemical ionisation ultra-high resolution mass spectrometry with improved data processing routines[J]. European Journal of Mass Spectrometry, 2017, 23(1): 28-39.
- [82] GRESCH J, FUHLÄNDER L, KOLB M, et al. Analysis of dimethylsiloxanes in hydrocarbon matrices like marine fuels applying a novel enrichment procedure and a two-column gas chromatography-mass spectrometry measurement [J]. Analytical Letters, 2025, 58(8): 1403-1421.

- [83] ZHANG Y H, ZHAO K Q, LOU D M, et al. Study on the real-world emission characteristics of gaseous and particulate pollutants from an inland ship using a portable emission measurement system[J]. Marine pollution bulletin, 2022, 184: 114205.
- [84] ALIABADI A A, STAEBLER R M, SHARMA S. Air quality monitoring in communities of the Canadian Arctic during the high shipping season with a focus on local and marine pollution[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(5): 2651-2673.
- [85] NIKI H, WARNICK A, LORD R R. An Ozone-NO chemiluminescence method for NO analysis in piston and turbine engines[J]. SAE Transactions, 1971, 80: 246-255.
- [86] LI X B, LI K, JI Q P, et al. Investigation of sniffer technique on remote measurement of ship emissions: A case study in Shanghai, China[J]. PloS One, 2022, 17(9): e0274236.
- [87] 刘虎威. 色谱技术丛书 气相色谱方法及应用 第 3 版[M]. 北京:化学工业出版社, 2023.
- LIU H W. Chromatographic techniques series gas chromatographic methods and applications 3rd edition[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2023.
- [88] 谢馨, 韩颖, 秦承华. 基于便携式氢火焰离子化检测器法测定固定污染源废气中非甲烷总烃的研究[J]. 中国环境监测, 2020, 36(1): 120-124.
- XIE X, HAN Y, QIN CH H. Determination of non-total methane hydrocarbons in exhaust gas from stationary sources based on a portable hydrogen flame ionization detector method[J]. China Environmental Monitoring, 2020, 36(1): 120-124.
- [89] 葛璇, 陈燕朋, 魏征, 等. 罐采样-加压进样-气相色谱法测定环境空气中非甲烷总烃研究[J]. 中国环境监测, 2023, 39(2): 177-186.
- GE X, CHEN Y P, WEI ZH, et al. Determination of non-total methane hydrocarbons in ambient air by gas chromatography with tank sampling and pressurized injection[J]. China Environmental Monitoring, 2023, 39(2): 177-186.
- [90] 郑培超, 许冠捷, 何雨桐, 等. 便携式光离子化 VOCs 气体检测器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2021(12): 45-50.
- ZHENG P CH, XU G J, HE Y T, et al. Design of portable photoionization VOCs gas detector [J]. Instrumentation Technology and Sensors, 2021(12): 45-50.
- [91] FLAGIELLO D, ESPOSITO M, DI NATALE F, et al. A novel approach to reduce the environmental footprint of maritime shipping[J]. Journal of Marine Science and Application, 2021, 20: 229-247.
- [92] WU G, MA Q L, WEI L J, et al. Characteristics of Particulate matter emissions for low-sulfur heavy oil used in low-speed two-stroke diesel engines of ocean-going ships[J]. Journal of Thermal Science, 2024, 33(2): 739-750.

作者简介

邓宇昂, 硕士研究生, 主要研究方向为船舶大气污染监测与诊断。

E-mail: 285751@whut.edu.cn

张彦, 博士, 高级实验师, 主要研究方向为船舶动力系统绿色技术。

E-mail: zhangyant1223@163.com

李秋娟, 高级工程师, 主要研究方向为油气管道智能化。

E-mail: Liqiujuan@pipechina.com.cn

刁宇, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为油气管道智能决策与 控制、功能安全。

E-mail: Diaoyu@pipechina.com.cn

朱敏杰(通信作者), 博士, 高级工程师, 特聘研究员, 主要研究方向为 MEMS、传感器、微型仪器、可靠性。

E-mail: zmj@tc124.com