

文章编号: 1000-4653(2025)03-0114-07

# 船用柴油机氮氧化物实船排放测试简化方法研究

马忠民, 孙培廷, 段树林, 王凯, 曲宏飞

(大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 根据国际海事组织(IMO)发布的《国际防止船舶造成污染公约》(MARPOL 公约)附则VI“防止船舶造成空气污染规则”的第13条氮氧化物( $\text{NO}_x$ )排放技术要求,提出了一种船用柴油机氮氧化物排放实船测试简化方案,基于碳平衡法计算排气流量,仅需测量部分工况点柴油机排气中的 $\text{NO}_x$ 和 $\text{CO}_2$ 浓度,同时采用IMO指南给出的燃油元素含量默认值。试验结果表明,采用简化方案与标准方案相比, $\text{NO}_x$ 加权平均值相差2%左右,简化了排放测试设备,缩短了测试过程。该研究成果可为实船 $\text{NO}_x$ 排放测试方案的简化提供理论依据。

**关键词:** 氮氧化物; 实船测试; 废气排放; 船用柴油机; 碳平衡

中图分类号: U664.121

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.03.014

## Study on on-board test simplified method for $\text{NO}_x$ emission from marine diesel engine

MA Zhongmin, SUN Peiting, DUAN Shulin, WANG Kai, QU Hongfei

(Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** In accordance with the MARPOL Annex VI Nitrogen Oxide ( $\text{NO}_x$ ) Technical Code issued by the International Maritime Organization (IMO), this paper proposes a simplified on-board test scheme for measuring  $\text{NO}_x$  emissions from marine diesel engines. The scheme employs the carbon balance method to calculate exhaust flow, requiring only the measurement of  $\text{NO}_x$  and  $\text{CO}_2$  concentrations in diesel exhaust at selected load points, and adopts the default fuel element content values provided in the IMO Technical Code. The results show that the weighted average  $\text{NO}_x$  deviation of the simplified method is approximately 2% compared with the standard cycle, while also reducing the complexity of emission testing equipment and shortening the testing process. The findings provide a theoretical basis for streamlining  $\text{NO}_x$  emission on-board tests.

**Key words:** nitrogen oxides; on-board test; exhaust emission; marine diesel engine; carbon balance

航运业作为国家经济发展的重要组成部分,承担了全球贸易的80%以上,因此航运在为国家带来巨大经济效益的同时,也导致了严重的环境污染<sup>[1-3]</sup>。相关研究表明,全球约70%的船舶排放距海岸400 km以内,导致沿海地区和港口城市的空气质量持续恶化<sup>[4-6]</sup>。为控制船舶发动机 $\text{NO}_x$ 的排放,国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)发布了MARPOL公约附则VI“防止船舶

造成空气污染规则”,根据该规则的第13条要求制定了船舶 $\text{NO}_x$ 排放测试指南<sup>[7-8]</sup>,以限制输出功率超过130 kW柴油机的 $\text{NO}_x$ 排放。近年来,随着MARPOL公约附则VI的实施,船舶柴油机 $\text{NO}_x$ 实船排放测试也持续落实和推进。目前,已有部分学者进行了实船排放测试的相关研究,尹自斌等<sup>[9]</sup>对船舶主机 $\text{NO}_x$ 排放实船测试方案进行了探讨,提出在船舶试航时进行 $\text{NO}_x$ 排放测试并以试航工况曲线

收稿日期:2024-04-24

基金项目:国家自然科学基金项目(52271305)

作者简介:马忠民(1987—),男,实验师,研究方向为船舶节能减排及排放控制。E-mail:mazhongmin1090@163.com

通信作者:孙培廷(1959—),男,教授,研究方向为船舶节能减排及排放控制。E-mail:sunptg@dlmu.edu.cn

引用格式:马忠民,孙培廷,段树林,等.船用柴油机氮氧化物实船排放测试简化方法研究[J].中国航海,2025,48(3):114-120.

MA Z M, SUN P T, DUAN S L, et al. Study on on-board test simplified method for  $\text{NO}_x$  emission from marine diesel engine [J]. Navigation of China, 2025, 48(3): 114-120. (in Chinese)

为基础建立相应的试验循环工况标准。王征等<sup>[10]</sup>从理论推导与实测验证相结合的角度,建立了船舶 $\text{NO}_x$ 排放强度的推算方法,旨在通过开展废气监测来辅助海事监测监管。MIHANOVIĆ等<sup>[11]</sup>对某船典型航次的四冲程主机排放情况进行了实船测试,给出相关排放污染物的排放情况,并着重强调了开展实船排放测试的必要性。BOGDANOWICZ等<sup>[12]</sup>提出船舶柴油机动态排放测量的方法,使用废气分析仪并记录负载指示、发动机转速、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)等数据,利用神经网络算法计算出测试船舶航线上的排放量。向蜀霞等<sup>[13]</sup>研究了液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)船舶大气污染物实船瞬时排放特征,实时在线监测气态污染物( $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、总挥发性有机化合物(Total Volatile Organic Compounds, TVOC))和颗粒物(PM),获得了LNG动力船舶尾气污染物排放因数,并探索了以LNG为动力的单船尾气排放规律。FU等<sup>[14]</sup>测量了7艘内河船舶发动机 $\text{CO}$ 、 $\text{HC}$ 、 $\text{NO}_x$ 和PM的排放情况,并根据巡航和操纵模式得出了基于距离和基于燃料的排放因子。此外,SHU等<sup>[15-17]</sup>建立船舶运行期间实时排放强度评估及排放估算模型,研究成果可以对船舶污染物减排运营管理策略的制定提供指导。

综上所述可以发现,对柴油机安装到实船的 $\text{NO}_x$ 排放测试方案或者简化测试方法的研究内容较少。目前,中国船级社(CCS)发布的《船用柴油机氮氧化物排放试验及检验指南2020》给出了三种验证实船符合 $\text{NO}_x$ 排放标准的方法,分别是参数检查法、简化测量法、直接测量和监测法。参数检查法通常适用于通过台架排放测试并获得前期证书(国际防止发动机大气污染(Engine International Air Pollution Prevention, EIAPP))的柴油机,或者对指定结构部件进行改装的柴油机,该方法是在静态下核查柴油机技术参数进而判断柴油机排放性能的简易方法,也是目前使用较多的检验方法。简化测量法仅适用于船上的确认试验、换证检验、年度检验和中间检验,为了使检验结果有意义,可以根据柴油机用途不同而仅对 $\text{NO}_x$ 和 $\text{CO}_2$ 的排放浓度进行测量,由于扭矩和油耗量测试仪器的允许误差也有所增加,因此简化测试的结果可以接受有适用排放限值10%的容许偏差。直接测量和监测方法是指抽取柴油机最近30天内常规运行状态下所记录的相关监测数据,进而计算柴油机排放结果的方法,该方法需要船上安装有排放测试设备才能实现。柴油机安装到实船以后,采用实验室台架排放测试设备进行测量,设

备不仅结构复杂而且体积庞大,需要较大的机舱空间安放,并且在实船测试中柴油机负荷很难稳定控制,存在诸多困难。为了更可靠地测量船舶的燃料消耗和排放,目前已经提出了几种不同的估计方法,但关于测量船舶排放的最佳方法仍在验证中<sup>[18]</sup>。

本文认为船舶柴油机在获得前期证书并安装到实船以后,应在遵循IMO指南要求的基础上寻求简易测量方法,尽量采用相对简单的测试设备,采用推荐的经验数据,简化测试循环,缩短测试时间,减少排放测试工作量。因此,本文提出了一种船用柴油机 $\text{NO}_x$ 排放实船测试简化方案,可采用相对简单的排放测试设备,只需测量部分负荷点下柴油机排气中的 $\text{NO}_x$ 和 $\text{CO}_2$ 浓度,并采用IMO指南给出的燃油元素含量默认值。文章分析了碳平衡法计算中忽略 $\text{HC}$ 、 $\text{CO}$ 以及采用燃油元素含量默认值对 $\text{NO}_x$ 加权比排放计算结果的影响,对比了简化方案与标准循环下 $\text{NO}_x$ 比排放结果的差异。研究表明,采用简化方案与标准方案相比, $\text{NO}_x$ 加权平均值相差2%左右,对推广实船 $\text{NO}_x$ 测试具有重要意义。

## 1 计算方法

### 1.1 排气流量确定方法

IMO船机排放指南中给出了船用柴油机台架排放试验的排放测试程序和计算方法,通常,柴油机排气流量的确定方法有三种:直接测量法、空气和燃料流量测量法和碳平衡方法<sup>[8,19-20]</sup>。直接测量法是采用流量嘴或等效的测量系统直接测量排气流量,并应符合公认的标准,该方法对流量计的安装及测量条件要求十分严格,应尽可能避免大量测量,实施困难且过程复杂,一般不推荐使用。空气和燃料流量测量法指的是测量空气进气流量及燃料消耗量,根据质量守恒定律,即可求出排气流量,该方法需要高精度的空气流量计和燃料流量计,因此对于中大型柴油机来说并不适用。碳平衡方法是根据质量守恒定律,化学反应前后碳元素质量保持不变,进而求出废气流量。碳平衡方法在实施过程中,需要准确测量燃油消耗量、燃油元素含量以及废气中的 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{HC}$ 浓度。通过分析上述排气流量方法的适用条件可以发现,在实船排放测试过程中,碳平衡方法要求最低,实现最为容易。因此,本文确定以碳平衡方法进行研究,计算过程参考《船用柴油机氮氧化物排放试验及检验指南2020》给出的相关公式,具体计算过程如下。

$$q_{\text{mew}} = q_{\text{mf}} \times \left[ \frac{2w_{\text{BET}} \times 1.4}{\left( \frac{w_{\text{BET}} \times 1.4}{f_c} + w_{\text{ALF}} \times 0.089\ 36 - 1 \right) \times \frac{1}{1.293} + f_{\text{fd}}} + w_{\text{ALF}} \times 0.089\ 36 - 1 \right] \times \left( 1 + \frac{H_a}{1\ 000} \right) + 1 \quad (1)$$

$$f_c = (c_{\text{CO}_2\text{d}} - c_{\text{CO}_2\text{ad}}) \times 0.544\ 1 + \frac{c_{\text{COd}}/18\ 522 + c_{\text{HCw}}/17\ 355}{\quad} \quad (2)$$

$$f_{\text{fd}} = -0.055\ 593 \times w_{\text{ALF}} + 0.008\ 200\ 2 \times w_{\text{DEL}} + 0.007\ 004\ 6 \times w_{\text{EPS}} \quad (3)$$

$$H_a = 6.22 \times p_a \times R_a / (p_b - 0.01 \times p_a \times R_a) \quad (4)$$

式中,  $q_{\text{mew}}$  为湿基废气质量流量, kg/h;  $q_{\text{mf}}$  为燃料质量流量, kg/h;  $f_c$  为碳系数, 无量纲;  $f_{\text{fd}}$  为干基废气燃料特定系数, 无量纲;  $H_a$  为吸入空气的绝对湿度, g/kg;  $w_{\text{BET}}$  为燃料碳含量, % m/m;  $w_{\text{ALF}}$  为燃料氢含量, % m/m;  $w_{\text{DEL}}$  为燃料氮含量, % m/m;  $w_{\text{EPS}}$  为燃料氧含量, % m/m;  $c_{\text{CO}_2\text{d}}$  为排气中干基  $\text{CO}_2$  浓度, %;  $c_{\text{CO}_2\text{ad}}$  为环境中干基  $\text{CO}_2$  浓度, 通常为 0.03%;  $c_{\text{COd}}$  为排气中干基 CO 浓度;  $c_{\text{HCw}}$  为排气中湿基 HC 浓度;  $p_a$  为吸入空气饱和蒸汽压力, kPa;  $R_a$  为吸入空气相对湿度, %;  $p_b$  为总大气压力, kPa。

## 1.2 排气干/湿修正系数

排气干/湿修正系数是用来将测量的干基浓度转化为湿基参考状态, 是湿基与干基废气体积流量的比值。柴油机的排气中含有水分, 因此以湿基排放标准计算各类有害排放物质。IMO 指南中根据排气流量计算方法不同, 给出了柴油机完全燃烧和不完全燃烧的干/湿修正系数计算过程, 具体算法稍微有所差异。不完全燃烧是指计算柴油机排气流量时, 柴油机存在一个或者更多工况点的 CO 或 HC 浓度超过  $100 \times 10^{-6} \text{C}$  的情况。本文研究采用碳平衡计算方法, 排气干/湿修正系数计算方法如下:

$$k_{\text{w}_2} = 1 / [1 + \alpha \times 0.005 \times (c_{\text{CO}_2\text{d}} + c_{\text{COd}}) - 0.01 \times c_{\text{H}_2\text{d}} + k_{\text{w}_2} - p_i/p_b] \quad (5)$$

$$\alpha = 11.916\ 4 \times w_{\text{ALF}}/w_{\text{BET}} \quad (6)$$

$$c_{\text{H}_2\text{d}} = 0.5 \times \alpha \times c_{\text{COd}} \times (c_{\text{CO}_2\text{d}} + c_{\text{COd}}) / (3c_{\text{CO}_2\text{d}} + c_{\text{COd}}) \quad (7)$$

$$k_{\text{w}_2} = 1.608 \times H_a / (1\ 000 + 1.608 \times H_a) \quad (8)$$

式中,  $k_{\text{w}_2}$  为排气干/湿修正系数, 无量纲;  $\alpha$  为 H/C 摩尔比率, 无量纲;  $c_{\text{H}_2\text{d}}$  和  $k_{\text{w}_2}$  为中间变量。

## 1.3 $\text{NO}_x$ 温湿度修正系数

如果测试环境大气条件(主要是温度和湿度)是非标准条件, 那么测量得到的干基  $\text{NO}_x$  浓度应该乘以一个修正系数  $k_{\text{hd}}$  进行修正, 如果测量得到的是湿基  $\text{NO}_x$  浓度, 则无需修正。标准条件是指大气压

101.32 kPa、温度 25 °C、绝对湿度 10.71 g/kg 的环境状态。

IMO 指南中给出了一般柴油机和带增压空冷器柴油机的  $\text{NO}_x$  温湿度修正系数计算方法。目前多数船舶普遍采用增压柴油机, 在台架排放试验过程中,  $\text{NO}_x$  温湿度修正系数计算方法如下:

$$k_{\text{hd}} = 1 / [1 - 0.012 \times (H_a - 10.71) - 0.002\ 75 \times (T_a - 298) + 0.002\ 85 \times (T_{\text{SC}} - T_{\text{SCRef}})] \quad (9)$$

$$H_{\text{SC}} = 6.22 \times P_{\text{SC}} \times 100 / (P_c - P_{\text{SC}}) \quad (10)$$

式中,  $T_a$  为进气温度, K;  $T_{\text{SC}}$  为增压空气温度, K;  $T_{\text{SCRef}}$  为增压空气参考温度, K, 一般由厂家提供;  $H_{\text{SC}}$  为增压空气湿度, g/kg;  $P_{\text{SC}}$  为增压空气的饱和蒸汽压力, kPa;  $P_c$  为增压空气压力, kPa。如果  $H_a \geq H_{\text{sc}}$ , 在式(9)中需要用  $H_{\text{sc}}$  代替  $H_a$ 。

## 1.4 $\text{NO}_x$ 比排量计算方法

船舶发动机以比排放量衡量其排放水平, 在 IMO 指南中给出了  $\text{NO}_x$  比排量计算方法, 其计算过程如下:

$$q_{\text{mgas}} = \mu_{\text{gas}} \times c_{\text{gas}} \times q_{\text{mew}} \times k_{\text{hd}} \quad (11)$$

$$E_{\text{NO}_x} = \sum_{i=1}^n q_{\text{mgas},i} \times W_{\text{F},i} / \left( \sum_{i=1}^n P_i \times W_{\text{F},i} \right) \quad (12)$$

式中,  $q_{\text{mgas}}$  为  $\text{NO}_x$  气体排放质量流量, g/h;  $\mu_{\text{gas}}$  为  $\text{NO}_x$  烟密度与排气密度比值,  $\times 10^3$ , 查表获取;  $c_{\text{gas}}$  为  $\text{NO}_x$  湿基排气浓度,  $\times 10^{-6}$ ;  $q_{\text{mew}}$  为排气质量流量, kg/h;  $k_{\text{hd}}$  为  $\text{NO}_x$  温湿度修正系数, 无量纲;  $E_{\text{NO}_x}$  为  $\text{NO}_x$  加权比排放量, g/kW · h;  $W_{\text{F},i}$  为加权系数, 查表获取;  $P_i$  为试验中相应负荷下的功率, kW。

## 2 排放测试

### 2.1 试验要求和试验台架

选择一台船用柴油机, 按照 IMO 指南要求进行台架排放试验并整理相关试验数据, 在试验过程中测量燃油消耗量和废气中的  $\text{CO}_2$ 、CO、HC 体积浓度, 并分析燃油中的元素含量。为保证测试数据的准确性, 本次试验利用相关测试仪器进行校准, 校准过程和仪器精度满足 IMO 测试指南技术要求。在台架排放试验前对排放分析仪进行充分预热, 完成零点、量程、漏泄等检查, 台架排放试验如图 1 所示。

### 2.2 试验柴油机和测试设备

试验使用的柴油机为直列增压中冷型柴油机,

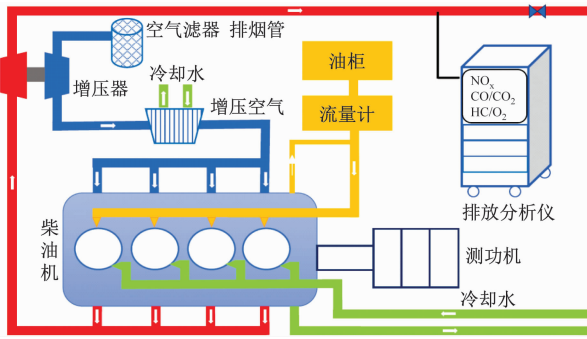


图1 台架排放试验

Fig.1 Bench emission test

额定功率 780 kW, 额定转速 900 r/min, 排放分析仪采用 Horiba MEXA-1600DSEGR, 测试原理满足 IMO 指南要求, 排放分析仪技术参数, 如表 1 所示。

### 2.3 试验循环和权重系数

试验柴油机分别按照推进特性(E3 循环)和负荷特性(D2 循环)运行, 测试方案和加权系数如表 2 所示; 其中, 标准方案表示柴油机在台架上的测试方法, 简化方案 A ~ G 是 IMO 测试指南给出的实船测试参考方案。

表1 排放分析仪技术参数

Tab.1 Technical parameters of emission analyzer

测量成分	测试原理	设备精度	量程范围
CO	不分光红外线法(Non-Dispersive Infrared Analyser, NDIR)	0.3% FS	0 ~ 500/3 000 × 10 <sup>-6</sup>
CO <sub>2</sub>	不分光红外线法(Non-Dispersive Infrared Analyser, NDIR)	0.3% FS	0 ~ 10%
NO <sub>x</sub>	化学发光法(Chemiluminescent Detector, CLD)	0.3% FS	0 ~ 500/1 000/2 000/5 000 × 10 <sup>-6</sup>
O <sub>2</sub>	顺磁法(Paramagnetic Detector, PMD)	0.3% FS	0 ~ 25%
THC	加热型氢火焰离子法(Heated Flame Ionization Detector, HFID)	0.3% FS	0 ~ 500/1 000/2 000/5 000 × 10 <sup>-6</sup>

表2 测试方案和加权系数

Tab.2 Test scheme and weighting coefficient

试验循环	方案	功率百分比/%				
		100	75	50	25	10
E3	标准方案	0.2	0.5	0.15	0.15	—
	简化方案 A	0.29	0.71	—	—	—
	简化方案 B	—	0.77	0.23	—	—
	简化方案 C	0.24	0.59	—	0.18	—
D2	标准方案	0.05	0.25	0.3	0.3	0.1
	简化方案 D	—	—	0.5	0.5	—
	简化方案 E	—	0.45	—	0.55	—
	简化方案 F	—	0.38	0.46	—	0.15
	简化方案 G	0.06	0.28	0.33	0.33	—

### 2.4 燃油信息

在柴油机台架排放试验前, 对本次试验使用的燃油进行化验分析, 结果表明, 试验燃油的碳元素含量为 85.22%, 氢元素含量 14.12%, 氧元素含量 0.02%, 氮元素含量 0.43%。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 试验数据

试验柴油机各试验负荷点的具体排放试验测量数据, 如表 3 所示。

### 3.2 排放计算结果对比分析

柴油机排气组分中各类污染物的排放浓度和排放率不仅与柴油机运行工况密切相关, 还会受到燃料成分的影响<sup>[21]</sup>。因此, 本节将研究柴油机废气成分和燃油元素含量对 NO<sub>x</sub> 比排放的影响。

按照 IMO 指南给出的计算过程, 根据式(1) ~ (4)使用碳平衡计算方法得到排气质量流量, 根据式(5) ~ (8)计算排气干湿修正系数, 根据式(9)和(10)计算 NO<sub>x</sub> 温湿度修正系数, 根据式(11)和(12)计算船舶柴油机 NO<sub>x</sub> 加权排放量。根据上述公式计算柴油机在各情景和各负荷下 NO<sub>x</sub> 的比排放量和加权比排放量, 计算结果如表 4 所示。其中, 情景一表示只忽略排气中 CO 情景; 情景二表示只忽略排气中 HC 情景; 情景三表示同时忽略排气中 CO 和 HC 情景; 情景四表示只采用默认元素含量情景, 即碳含量为 86.2%, 氢元素含量为 13.6%, 其他元素含量为 0; 情景五表示同时忽略排气中 CO 和 HC 成分, 并采用默认元素含量情景。

由表 4 可知, 对于 E3 循环, 如果忽略排气中 CO 成分, NO<sub>x</sub> 的加权计算结果比实际值高出 0.6%; 如果忽略排气中 HC 成分, NO<sub>x</sub> 的加权计算结果比实际值高出 0.24%; 如果同时忽略排气中 CO 和 HC 成分, NO<sub>x</sub> 的加权计算结果比实际值高出 0.84%; 如果采用 IMO 指南中燃油元素含量的默认值, NO<sub>x</sub> 的加权计算结果比实际值高出 1.31%; 如果同时忽

表3 排放试验测量数据  
Tab.3 Emission test measurement data

试验循环	E3				D2				
	100	75	50	25	100	75	50	25	10
负荷百分比/%	100	75	50	25	100	75	50	25	10
柴油机功率/kW	780	587	392	196	780	588	390	197	78
转速/(r/min)	900	819	724	567	900	902	900	901	900
油耗量/kg/h	161.8	124.1	86.1	45.8	161.8	125	87.7	52.7	29.9
大气压力/kPa	100	100	100	100	100	100	100	100	100
环境温度/°C	32.5	33.1	33.5	33.1	32.5	32.7	32.9	33.3	33.1
相对湿度/%	44.2	42.4	40.8	40.1	44.2	44.8	45.2	45.4	45.1
CO <sub>2</sub> 干基浓度/%	6.84	6.74	6.65	6.12	6.84	6.59	6.28	6.65	4.64
NO <sub>x</sub> 干基浓度 × 10 <sup>-6</sup>	769	775	850	899	769	722	662	552	441
CO 干基浓度 × 10 <sup>-6</sup>	394	412	382	218	394	284	243	270	277
HC 湿基浓度 × 10 <sup>-6</sup>	152	180	203	182	152	200	223	199	156

表4 废气组分和燃油元素对 NO<sub>x</sub> 比排放量的影响  
Tab.4 Effects of exhaust gas components and fuel elements on specific NO<sub>x</sub> emissions

试验循环	负荷/%	标准情景/(g/kW·h)	情景一		情景二		情景三		情景四		情景五	
			排放量/(g/kW·h)	偏差/%	排放量/(g/kW·h)	偏差/%	排放量/(g/kW·h)	偏差/%	排放量/(g/kW·h)	偏差/%	排放量/(g/kW·h)	偏差/%
E3	100	7.77	7.82	0.64	7.79	0.26	7.83	0.77	7.87	1.29	7.93	2.06
	75	8.17	8.22	0.61	8.19	0.24	8.24	0.86	8.28	1.35	8.35	2.20
	50	9.42	9.48	0.64	9.45	0.32	9.50	0.85	9.54	1.27	9.63	2.23
	25	11.43	11.47	0.35	11.46	0.26	11.50	0.61	11.58	1.31	11.65	1.92
	加权值	8.37	8.42	0.60	8.39	0.24	8.44	0.84	8.48	1.31	8.55	2.15
D2	100	7.77	7.82	0.64	7.79	0.26	7.83	0.77	7.87	1.29	7.93	2.06
	75	7.88	7.91	0.38	7.90	0.25	7.93	0.63	7.98	1.27	8.03	1.90
	50	8.05	8.08	0.37	8.08	0.37	8.11	0.75	8.15	1.24	8.21	1.99
	25	7.56	7.60	0.53	7.59	0.40	7.62	0.79	7.66	1.32	7.71	1.98
	10	12.29	12.36	0.57	12.32	0.24	12.40	0.90	12.44	1.22	12.56	2.20
加权值	7.96	8.00	0.50	7.99	0.38	8.02	0.75	8.07	1.38	8.13	2.14	

略排气中 CO 和 HC 成分,并采用 IMO 指南中给出的燃油元素含量默认值,NO<sub>x</sub> 的加权计算结果比实际值高出 2.15%。对于 D2 循环,如果忽略排气中 CO 成分,NO<sub>x</sub> 的加权计算结果比实际值高出 0.5%;如果忽略排气中 HC 成分,NO<sub>x</sub> 的加权计算结果比实际值高出 0.38%;如果同时忽略排气中 CO 和 HC 成分,NO<sub>x</sub> 的加权计算结果比实际值高出 0.75%;如果采用 IMO 指南中给出的燃油元素含量默认值,NO<sub>x</sub> 的加权计算结果比实际值高出 1.38%;如果同时忽略排气中 CO 和 HC 成分,并采用 IMO 指南中给出的燃油元素含量默认值,NO<sub>x</sub> 的

加权计算结果比实际值高出 2.14%。

总体而言,采用碳平衡法计算柴油机 NO<sub>x</sub> 比排放量时,CO 和 HC 两组分浓度对计算结果影响较小,偏差在 1% 以内。因此,在实船测试中,基于现场测试条件和操作难度的双重考虑,可以忽略 CO 和 HC 两组分的测量,这与蔡尚峰<sup>[22]</sup>的研究结果一致。邢辉等和 MZ 等<sup>[23-25]</sup>统计了柴油机台架试验时燃油的碳元素含量情况,根据统计结果,台架试验使用的燃油碳元素含量在 85.15% ~ 86.99%,IMO 给出的默认碳元素含量为 86.2%,最大差值 1.2%。因此,如果采用 IMO 指南给出的默认燃油元素含

量,NO<sub>x</sub> 加权比排放量与实际值相差在 2% 以内,在满足规范要求测试精度要求的情况下可以采用 IMO 指南给出的燃油元素含量默认值。

### 3.3 加权系数对计算结果的影响

IMO 指南中指出,柴油机进行实船 NO<sub>x</sub> 排放测试时如果不能按照指南规定的试验循环进行,要求试验程序应该尽可能接近台架排放测试程序。为了深入研究柴油机在不同加权系数下 NO<sub>x</sub> 比排放量的差异性,本文按照表 2 给出的简化方案和对应的加权系数进行计算,NO<sub>x</sub> 比排放计算结果如图 2 所示。其中,标准方案表示在实验室台架测试时的计算结果。

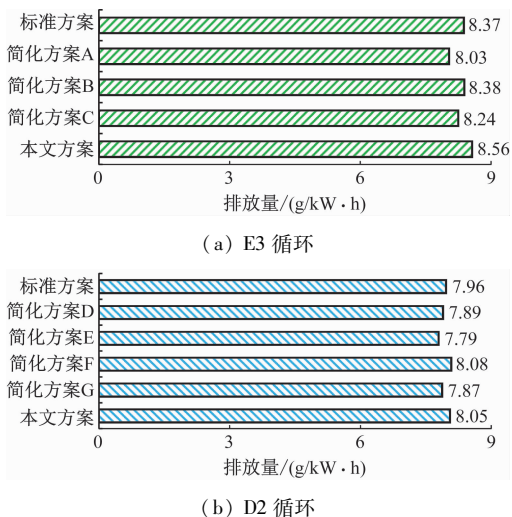


图2 不同加权系数下的 NO<sub>x</sub> 加权值

Fig. 2 Weighted value of NO<sub>x</sub> under different weighting coefficients

从图 2 中可以看出,对于 E3 循环,采用简化方案 A 时,NO<sub>x</sub> 加权计算结果比标准方案低 4.1%;采用简化方案 B 时,NO<sub>x</sub> 加权计算结果比标准方案高 0.1%,计算结果比较接近;采用简化方案 C 时,NO<sub>x</sub> 加权计算结果比标准方案低 1.6%,因此简化方案 B 的计算结果与标准值最为接近。对于 D2 循环,采用简化方案 D 时,NO<sub>x</sub> 加权计算结果比标准方案低 0.9%;采用简化方案 E 时,NO<sub>x</sub> 加权计算结果比标准方案低 2.1%;采用简化方案 F 时,NO<sub>x</sub> 加权计算结果比标准方案高 1.5%;采用简化方案 G 时,NO<sub>x</sub> 加权计算结果比标准方案低 1.1%,因此简化方案 D 的计算结果与标准方案最为接近。

## 4 简化测试方案及可行性分析

### 4.1 实船简化测试方案

受制于测试设备体积、船舶机舱空间和海况风浪工况等诸多因素的影响,本文提出了船舶柴油机

NO<sub>x</sub> 实船测试简化方案。简化方案的具体实施过程如下,在实船测试时仅对 CO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 进行测量,测试仪器建议选用符合台架测试精度要求的相关仪器;CO 和 HC 成分对最终 NO<sub>x</sub> 的加权计算结果影响较小,同时参考《船用柴油机氮氧化物排放试验及检验指南 2020》给出的实船简化测量方法,本文提出在实船测试时忽略 CO 和 HC 成分的测量,燃油元素使用 IMO 指南中给出的默认值。对于测试负荷点的选择,本文认为对于按照推进特性运行的主机选取 75% 和 50% 两个负荷点进行测试,对于恒速运行的发电机选取 50% 和 25% 两个负荷点进行测试,该方案能够简化测试内容和工作强度。

### 4.2 可行性分析

本文提出的简化测试方案计算结果与台架标准试验循环的计算结果对比情况,如图 2 所示。图 2 数据表明,对于 E3 循环,本文提出的简化情景,其 NO<sub>x</sub> 加权计算结果为 8.56 g/kW·h,比实验室中台架试验的标准情景高 2.27%;对于 D2 循环,简化情景 NO<sub>x</sub> 的加权计算结果为 8.05 g/kW·h,比标准情景高 1.13%。IMO 指南中提出船舶柴油机在实船测试时如果采用简化法,可接受适用极限值 10% 的容许偏差,因此本文提出的简化实船 NO<sub>x</sub> 测试内容具有可行性,该方案的加权计算结果与标准值接近,偏差在 2% 左右,满足实船测试精度要求,同时还可以减少测试工作量和成本。此外,由于实船运行的柴油机很难达到额定负载,本文提出的简化方案,能够在保证测试仪器精度的情况下减小测试仪器的体积,方便测试仪器的携带和在机舱内的现场布置安装,还可以避开船舶柴油机在满负荷下运行,确保船舶安全通航。

本文提出的实船简化测试方案是基于实验室台架测试结果经过理论分析和计算而提出,需要在后续的研究中通过实船测试进行对比,检验本文简化方法的实际误差。此外,《船用柴油机氮氧化物排放试验及检验指南 2020》指出实船测量 NO<sub>x</sub> 排放的关键是获得柴油机功率,蔡尚峰的研究结果也表明柴油机功率测量误差对比排放量有着较大的影响。因此,在实船测试中柴油机的有效功率应当准确测量,以保证测试结果的误差符合要求,并使测量结果具有实际意义。

## 5 结束语

本文采用实验法对比研究了废气成分和燃油元素含量对船舶柴油机 NO<sub>x</sub> 加权比排放的影响。结果表明,CO 和 HC 对 NO<sub>x</sub> 加权计算结果影响较小,

在满足 IMO 测试指南要求的情况下,实船测试时可以忽略 CO 和 HC 两组分的测量,并直接采用燃油元素的默认值。

加权系数对船舶柴油机 NO<sub>x</sub> 加权比排放的影响表明,对于 E3 循环,如果进行实船 NO<sub>x</sub> 排放测试推荐选取 75% 和 50% 两个负荷点进行测试;对于 D2 循环,推荐选取 50% 和 25% 两个负荷点进行测试,计算结果的准确性较高、偏差较小。

本文给出的船舶柴油机 NO<sub>x</sub> 实船测试简化方案是基于实验室台架测试数据经过理论分析和计算而提出,建议在实船测试中可以忽略 CO 和 HC 成分的测量,并采用燃油元素默认值,计算结果与台架测试结果偏差在 2% 左右,该方法可以为简化实船 NO<sub>x</sub> 排放测试提供理论依据。

### 参 考 文 献

[1] 余红楚,方庆龙,方志祥,等. 船舶动态驱动的碳排放时空分布规律挖掘[J]. 中国环境科学,2024,44(3): 1769-1776.  
YU H C, FANG Q L, FANG Z X, et al. Exploring the spatiotemporal distribution patterns of carbon emissions driven by massive ship trajectory data [J]. China Environmental Science, 2024, 44(3): 1769-1776. (in Chinese).

[2] UNCTAD. Review of Maritime Transport 2019 [R]. New York: United Nations Publications, 2019.

[3] PENG W H, YANG J C, 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(3): 115404.

[4] SORTE S, RODRIGUES V, BORREGO C, et al. Impact of harbour activities on local air quality: a review [J]. Environmental Pollution, 2020, 257: 113542.

[5] MONTEIRO A, RUSSO M, GAMA C, et al. How important are maritime emissions for the air quality: at European and national scale [J]. Environmental Pollution, 2018, 242: 565-575.

[6] RAMACHER M O P, KARL M, BIESER J, et al. Urban population exposure to NO<sub>x</sub> emissions from local shipping in three Baltic Sea harbour cities-a generic approach [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(14): 9153-9179.

[7] IMO. Amendments to the technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engines (NO<sub>x</sub> Technical Code 2008): MEPC. 177(58) [S]. London: IMO, 2008.

[8] 中国船级社. 船用柴油机氮氧化物排放试验及检验

指南[S]. 北京:中国船级社,2020.

China Classification Society. Technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engines [S]. Beijing: China Classification Society, 2020. (in Chinese).

- [9] 尹自斌,陈景锋,廖海峰. 船舶主柴油机 NO<sub>x</sub> 排放实船测试方案探讨[J]. 船海工程, 2010, 39(1): 88-90.  
YIN Z B, CHEN J F, LIAO H F. Discussion about on-board test plan of NO<sub>x</sub>-emission from marine main diesel engine[J]. Ship & Ocean Engineering, 2010, 39(1): 88-90. (in Chinese).
- [10] 王征,彭传圣,陈俊峰,等. 船舶氮氧化物排放和燃油合规性监测监管研究[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 800-806.  
WANG Z, PENG C S, CHEN J F, et al. Study on monitoring and supervision of ship nitrogen oxide emission and fuel compliance [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(S2): 800-806. (in Chinese).
- [11] MIHANOVIĆ L, JELIĆ M, RADICA G, et al. Experimental investigation of marine engine exhaust emissions [J]. Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects, 2021: 1-14.
- [12] BOGDANOWICZ A, KNIAZIEWICZ T. Marine diesel engine exhaust emissions measured in ship's dynamic operating conditions[J]. Sensors, 2020, 22: 6589.
- [13] 向蜀霞,姚婷婷,彭勇平,等. LNG 动力船舶大气污染物排放特征实船测试[J]. 中国航海, 2020, 43(3): 101-104.  
XIANG S X, YAO T T, PENG Y P, et al. On board tests of emission characteristics of LNG powered vessel at sea[J], Navigation of China, 2020, 43(3): 101-104. (in Chinese).
- [14] FU M L, DING Y, GE Y S, et al. Real-world emissions of inland ships on the Grand Canal, China [J]. Atmospheric Environment, 2013,81: 222-229.
- [15] SHU Y Q, HU A Y, ZHENG Y Z, et al. Evaluation of ship emission intensity and the inaccuracy of exhaust emission estimation model [J]. Ocean Engineering, 2023, 287: 115723.
- [16] ZHOU F, LIU J, ZHU H, et al. A real-time measurement-modeling system for ship air pollution emission factors [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022,10(6): 760.
- [17] WANG K, HUA Y, HUANG L Z, et al. A novel GA-LSTM-based prediction method of ship energy usage based on the characteristics analysis of operational data [J]. Energy,2023, 282: 128910.

- scheduling & refueling strategy in container liner shipping with perishable assets[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2021, 41(11):2963-2974. (in Chinese)
- [8] 李德昌, 杨华龙, 段静茹. 基于合作协议的集装箱班轮运输船期设计和加油策略联合优化[J]. *上海交通大学学报*, 2022, 56(7):953-964.  
LI D C, YANG H L, DUAN J R. A joint optimization of vessel scheduling and refueling strategy for container liner shipping with cooperative agreements[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2022, 56(7):953-964. (in Chinese)
- [9] DE A, WANG J W, TIWARI M K, et al. Hybridizing basic variable neighborhood search with particle swarm optimization for solving sustainable ship routing and bunker management problem[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(3):986-997.
- [10] DAS J N, MANDAL J, DATE H, et al. Joint optimization of bunker fuel and vessel speed considering delay and carbon emission[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2022, 55(10):31-36.
- [11] OMHOLT-JENSEN S, FAGERHOLT K, MEISEL F. Tramp ship routing with bunker optimization and flexible cargo quantities: case from dry bulk shipping[C]. *Computational Logistics: 14th International Conference, ICCL 2023*. Berlin, Germany: Springer, 2023, 185-201.
- [12] 赵帅奇, 杨华龙, 张井波, 等. 基于合作协议的集装箱班轮运输绿色船期设计[J]. *中国航海*, 2021, 44(4):86-93.  
ZHAO S Q, YANG H L, ZHANG J B, et al. Green voyage scheduling of container liner based on cooperation agreement[J]. *Navigation of China*, 2021, 44(4):86-93. (in Chinese)
- [13] NORSTAD I, FAGERHOLT K, LAPORTE G. Tramp ship routing and scheduling with speed optimization[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2011, 19(5):853-865.
- (上接第120页)
- [18] MORENO GUTIÉRREZ J, PÁJARO-VELÁZQUEZ E, AMADO-SÁNCHEZ Y, et al. Comparative analysis between different methods for calculating on-board ship's emissions and energy consumption based on operational data[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 834:575-584.
- [19] 许建华, 王忠俊. 船用柴油机排放计算方法对比[J]. *船海工程*, 2009, 38(6):73-75.  
XU J H, WANG Z J. Contrastive analysis of calculation methods of exhaust emission from marine diesel engine[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2009, 38(6):73-75. (in Chinese).
- [20] 贾建雄, 张世恒, 王忠俊. 船舶发动机排气污染物满足不同标准的差异分析[J]. *船海工程*, 2020, 49(5):23-27.  
JIA J X, ZHANG S H, WANG Z J. Difference analysis of requirements of different standards for marine engine exhaust pollutant[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2020, 49(5):23-27. (in Chinese).
- [21] 邢辉. 船舶废气排放量化问题研究[D]. 大连:大连海事大学, 2017.  
XING H. Study on quantification of exhaust emissions from ships[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017. (in Chinese).
- [22] 蔡尚峰. 双燃料发动机的排放算法与误差因素研究[D]. 大连:大连海事大学, 2015.  
CAI S F. Calculation of dual-fuel engine exhaust emissions and the analysis of error factors[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015. (in Chinese).
- [23] 邢辉, 段树林, 黄连忠, 等. 基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子[J]. *环境科学*, 2016, 37(10):3750-3757.  
XING H, DUAN S L, HUANG L Z, et al. Testbed-based exhaust emission factors for marine diesel engines in China[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(10):3750-3757. (in Chinese).
- [24] MA Z M, DU T L, DUAN S L, et al. Analysis of exhaust pollutants from four-stroke marine diesel engines based on bench tests[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(2):413.
- [25] MA Z M, YANG Y Y, SUN P T, et al. Analysis of marine diesel engine emission characteristics of different power ranges in China[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(9):1108.