

ICS 27.020

CCS J 92

团 体 标 准

T/CSICE 056-2025

船舶氨发动机非常规排气污染物测量方法

Measurement method for unconventional exhaust pollutants of
marine ammonia-fueled engines

2025-12-26 发布

2025-12-26 实施

中国内燃机学会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 试验环境条件	2
5 测量仪器与设备	2
5.1 测量系统组成	2
5.2 氨气、氧化亚氮分析仪	3
5.3 排气质量流量测量系统	4
5.4 试验台测量仪器	5
6 测量项目	5
7 测量原理	5
8 测量程序	5
8.1 测量前准备	5
8.2 测量步骤	6
9 测量数据处理	6
9.1 气态污染物的计算	6
9.2 比排放计算	7
10 测量报告	7
附录 A（资料性） 船舶氨发动机排气污染物测量数据记录表	8
参考文献	9

船舶氨发动机非常规排气污染物测量方法

警告：本标准的应用可能涉及到某些有危险性的材料、操作和设备，但未对与此有关的所有安全问题都提出建议。因此，用户在使用本标准之前有责任制定相应的安全和防护措施，并确定相关规章限制的适用性。

1 范围

本文件规定了船舶氨发动机非常规排气污染物排放量测量的试验环境条件、测量仪器与设备、测量项目、测量原理、测量程序、测量数据处理及测量报告。

本文件适用于船舶氨发动机排气中非常规污染物的比排放测量，包括氨(NH₃)和氧化亚氮(N₂O)。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2624.3 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量

GB/T 8570.2 液体无水氨的测定方法 第2部分：氨含量

GB/T 17805 柴油机进、排气流量的测量

GB 15097-2016 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）

ISO 8190.1 Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement -Part 1: Test-bed measurement systems of gaseous and particulate emissions

ISO 8190.4 Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement -Part 4: Steady-state and transient test cycles for different engine applications

JJG 1132 热式气体质量流量计检定规程

MEPC.177(58) Amendments to the technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engines

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

氨燃料发动机 ammonia-fueled engines

可使用氨燃料的发动机，包括氨单一燃料发动机和氨-柴双燃料发动机。

3.2

标准气 standard gas

用于气体分析仪满量程和零点检查及标定的气体。

3.3

比排放 specific emissions

单位时间单位功率所排放的污染物质量。

4 试验环境条件

船舶氨发动机排气污染物测量的实验室大气因子 f_a 应满足 $0.93 \leq f_a \leq 1.07$ 。

对于自然吸气和机械增压式氨燃料发动机, f_a 应按式(1)计算:

$$f_a = \left(\frac{99}{p_s}\right) \cdot \left(\frac{T_a}{298}\right)^{0.7} \dots\dots\dots (1)$$

对于带或不带进气冷却的涡轮增压式氨燃料发动机, f_a 应按式(2)计算:

$$f_a = \left(\frac{99}{p_s}\right)^{0.7} \cdot \left(\frac{T_a}{298}\right)^{1.5} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

T_a ——进气绝对温度, 单位为开尔文(K);

p_s ——干大气压力, 单位为千帕(kPa), 应按式(3)计算:

$$p_s = p_b - 0.01 \cdot p_a \cdot R_a \dots\dots\dots (3)$$

式中:

p_b ——大气压力, 单位为千帕(kPa);

p_a ——吸入空气的饱和蒸汽压力, 单位为千帕(kPa), 应按式(4)计算。

$$p_a = (4.856884 + 0.2660089 \cdot t_a + 0.01688979 \cdot t_a^2 - 7.477123 \cdot 10^{-5} \cdot t_a^3 + 8.10525 \cdot 10^{-6} \cdot t_a^4 - 3.115221 \cdot 10^{-8} \cdot t_a^5) \cdot (101.32/760) \dots\dots\dots (4)$$

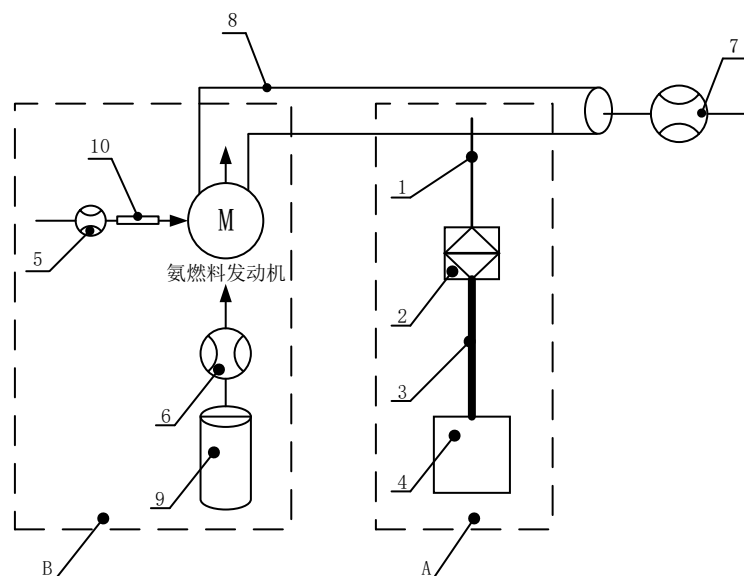
t_a ——进气温度, 单位为摄氏度(°C);

R_a ——吸入空气的相对湿度, 单位为百分比(%)。

5 测量仪器与设备

5.1 测量系统组成

5.1.1 用于检测船舶氨发动机非常规排气污染物的测量系统应由氨气、氧化亚氮分析仪、排气质量流量测量系统组成, 详细构成如图1所示。其中氨气、氧化亚氮分析仪包括取样探头、加热过滤器、加热取样管、气体分析单元, 用于氨气、氧化亚氮体积浓度的测量; 排气流量测量系统包括燃料流量表、进气流量计或排气流量计(可选), 用于发动机排气流量的测量。



标引号说明:

- A——氨气、氧化亚氮分析仪;
- B——排气质量流量测量系统;
- 1——取样探头;
- 2——加热过滤器;
- 3——加热取样管;
- 4——气体分析单元;
- 5——燃料流量表;
- 6——进气流量计;
- 7——排气流量计 (可选);
- 8——排气管;
- 9——进气管;
- 10——燃料传输管。

图 1 船舶氨发动机非常排气污染物测量系统组成图

5.2 氨气、氧化亚氮分析仪

5.2.1 氨气、氧化亚氮分析仪宜使用傅里叶红外光谱 (FTIR)、激光红外原理。分析仪应足下列技术要求:

- a) 分析仪样品通路应由不锈钢或聚四氟乙烯 (PTFE) 材料制造, 并应具备保温功能。
- b) 当测量量程大于 50ppm 时, 分析仪的测量误差不应超过名义标定点读数的 $\pm 2\%$ 或 $\pm 1\%FS$, 取其中较大值; 当测量量程小于等于 50 ppm 时, 分析仪的测量误差不应超过 ± 1 ppm。
- c) 傅里叶红外光谱仪应具备消除环境或仪器干扰的背景光谱自动扣除的功能。

5.2.2 氨气、氧化亚氮分析仪的标定应满足 GB 15097-2016 附录 B 中附件 BB 的要求。

5.2.3 取样探头应为不锈钢材料制成的直管段, 且一端封闭, 在探头的轴向上至少等间距取 3 个不同径向平面, 每个径向平面的管壁上有 3 个孔, 呈 120° 角分布, 取样探头长度应满足至少伸入排气管 80% 直径处。

5.2.4 取样管内的采样导管应使用聚四氟乙烯管或不锈钢管，取样管温度应保持在 (190 ± 10) ℃，取样管长度不宜超过10m。

5.2.5 滤器应为加热式微粒过滤器，加热温度应保持在 (190 ± 10) ℃。

5.2.6 氨气、氧化亚氮分析仪所用标准气应满足下述要求：

- a) 氧化亚氮分析仪的零气宜采用高纯氮气（纯度 $\geq 99.999\%$ ），量距气宜使用氧化亚氮和纯氮气混合，混合后的实际浓度应在标称值的 $\pm 2\%$ 以内，量距气的标称值为测量范围满量程的80%以上；
- b) 氨分析仪的零气宜采用高纯氮气（纯度 $\geq 99.999\%$ ），量距气宜使用氨和纯氮气混合，混合后的实际浓度应在标称值的 $\pm 2\%$ 以内，量距气的标称值为测量范围满量程的80%以上；
- c) 标准气的有效期应满足标准气生产厂家的要求。

5.3 排气质量流量测量系统

5.3.1 排气质量流量的测量可以使用直接测量法、进气空气和燃料测量法、元素平衡法。其中直接测量法是通过流量喷嘴或其他等效的流量计系统直接测量排气质量流量，而进气空气和燃料测量法是通过用空气流量计和燃料流量表分别测量进气质量流量及燃料质量流量，其流量和即排气质量流量。元素平衡法是通过测得的燃料消耗量、燃料成分和排气浓度，并利用空气、燃料和发动机输出的碳/氢/氧摩尔量平衡来计算。针对船用氨燃料发动机排气流量的测量，应优先选用进气空气和燃料测量法，对于大型低速机，亦可选用元素平衡法。

5.3.2 针对燃料质量流量的测量，要求流量计测量精度应满足读数的 $\pm 2\%$ 或发动机最大值的 $\pm 1.5\%$ ，取大值。

5.3.3 针对进气空气质量流量的测量，所用仪器应满足下列技术要求：

- a) 进气空气流量测量仪器应由流量计、稳压装置、二次仪表（压力、差压、温度测量仪表，数据采集和处理的流量计算机）组成。
- b) 进气管径不超过630mm的发动机，进气空气流量测量推荐采用喷嘴流量计；进气管径超过630mm的发动机，进气空气流量测量推荐使用恒温差法插入式热式质量流量计。
- c) 喷嘴流量计应为光滑收缩喷嘴，喷嘴流量计推荐依据GB/T 2624.3设计；喷嘴形式应符合GB/T 17805的要求，包含包括从大气注入容器的喷嘴、从大气流入管子的喷嘴以及管内喷嘴三种形式，喷嘴流量计的流体流速必须在低于音速的紊流区域内；喷嘴的安装位置、二次仪表的安装位置及精度要求应满足GB/T 17805法规的要求。
- d) 恒温差法插入式热式气体质量流量计对于测量介质温度、压力影响、湿度的影响要求、流量计的安装位置、安装要求、重复性误差应满足GB/T 17805法规的要求。

5.3.4 进气空气流量计测量精度应满足读数的 $\pm 2.5\%$ 或发动机最大值的 $\pm 1.5\%$ ，取大值。

5.3.5 喷嘴式流量计以及恒温差法插入式热式气体质量流量计的进气质量流量计算方法可参考GB/T 17805或者厂家提供的计算公式进行计算。

5.3.6 针对进气空气流量测量仪表的校准，应满足下列要求：

- a) 针对流量喷嘴的校准，可参考GB/T 17805法规，对于大气注入容器的喷嘴、从大气流入管子的喷嘴，应连同容器或者管子一起校准。详细校准规程应满足JJG 640法规要求。当相邻管子部分发生变化，或者在喷嘴的收缩段或喉部出现磨损或污垢，建议对系统进行重新校正和检查泄漏。只要注意使用和保持清洁，喷嘴流量计本体无需定期重新校正，但喷嘴流量计配套的压力、差压、温度测量仪表应每年重新进行校验。
- b) 恒温差法插入式热式质量流量计的校准应满足JJG 1132法规要求，检定周期不应超过2年。

5.3.7 针对进气空气质量流量的测量，需在流量计和发动机进气管之间使用稳压箱，相关要求应满足GB/T 17805 法规。

5.4 试验台测量仪器

试验台所有相关测量仪器的校准应该可溯源到国家基准，其精度应符合表 1 要求。

表 1 测试仪器精度要求

序号	测量仪器	精度
1	发动机转速转换器	读数的±2%或发动机最大值的±0.5%，取大值
2	发动机扭矩转换器	读数的±2%或发动机最大值的±1%，取大值
3	电功（有功功率表）	读数的±2%或发动机最大值的±0.5%，取大值
4	通用大气压力表	±250Pa
5	通用大气湿度表	±3%绝对值
6	通用压力转化器（非其他仪器的一部分）	读数的±2%或发动机最大值的±1%，取大值
7	通用温度传感器（温度 K）	读数的±0.4%或最大值的±0.2%，取大值

6 测量项目

测量项目应包括排气中氧化亚氮（ N_2O ）和氨（ NH_3 ）的比排放测量。

7 测量原理

船舶氨发动机非常规排气污染物比排放测量的测量原理如图 2 所示，通过直接测量法、进气空气和燃料测量法或者元素平衡法获得排气质量流量数据，通过氨气、氧化亚氮分析仪对排气测量获得非常规污染物体积浓度，计算得到各污染物质量流量，除以测得的发动机功率，可求出不同排气污染物的比排放。

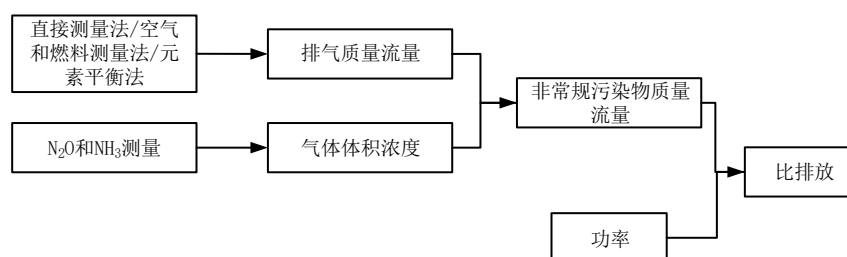


图 2 试验原理图

8 测量程序

8.1 测量前准备

测量前准备主要包括下列内容：

- a) 完成取样点探头安装，取样点位置的选取应满足GB 15097-2016 附录B中附件BA的要求；

- b) 分析仪应安放在适当的位置，有足够空间且无明显温度波动、无振动；
- c) 完成试验台各设备和测试仪表的安装联接，按照仪器制造商的建议进行系统预热；
- d) 按照GB 15097-2016 附录B中附件BB要求完成氨气、氧化亚氮分析仪泄漏试验、零点检查和量距点检查；
- e) 按照GB/T 17805要求完成空气流量测量系统泄漏检查；
- f) 按照氧化亚氮、氨分析仪仪器要求，执行设备检查，若分析仪采用傅里叶红外原理，需执行背景光谱扣除操作，消除环境或仪器干扰；
- g) 应对试验用的燃料进行燃料特性的分析确定，燃料特性至少包含密度、低热值和元素成分，氨燃料还应进行纯度检测，检测方法应符合GB/T 8570.2要求。

8.2 测量步骤

测量步骤应按照以下流程实施：

- a) 起动发动机进行暖机运转，使水温、油温、油压等运转参数达到制造厂规定的范围；
- b) 依据发动机类型，按照GB8190.4规定的船用发动机试验循环开展试验；
- c) 测量应在发动机每一工况稳定后进行，每一测量工况的转速偏差应不大于额定转速的±1%或±3r/min（取大者）（低怠速除外，低怠速应在制造厂声明的偏差之内），负荷偏差（测量过程平均扭矩与该工况规定扭矩的偏差）应不大于额定转速下额定扭矩的±2%；
- d) 每个测量点至少稳定运转5min后，从排气中连续取样测量，氨气、氧化亚氮分析系统的记录时间应不少于10min，数据记录每分钟不少于3次；
- e) 在测量的同时，应记录氨燃料发动机的其他基本参数（转速、功率、扭矩、温度、压力、湿度、燃料消耗量、进气流量等），具体记录表格式可参考附录A；
- f) 完成最后一个测量点后，重新进行泄漏试验、零点检查和量距点检查等氨气、氧化亚氮气体分析仪的检查。

9 测量数据处理

9.1 气态污染物的计算

每工况非常规污染物各组分的质量流量应按公式（5）计算：

$$G_{mass} = u \cdot conc \cdot G_{EXHW} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

- G_{mass} ——排气中非常规污染物各组分的排放质量流量，单位为克每小时（g/h）；
- u ——排气各组分密度与排气密度的比率系数，其系数见表2；
- $conc$ ——排气非常规污染物各组分的体积浓度，单位为百万分比（ppm）；
- G_{EXHW} ——排气质量流量，单位为千克每小时（kg/h）。

表2 排气各组分密度与排气密度的比率系数

气体		N ₂ O	NH ₃
$\rho_{gas}/(kg/m^3)$		1.964	0.760
	$\rho_e^a/(kg/m^3)$	系数 u^b	
柴油	1.2943	0.001517	0.000587
氨	1.1902	0.001650	0.000638
^a ρ_e 为排气的名义密度; ^b 在 $\lambda=2$, 湿空气, 273K, 101.3kPa。			

9.2 比排放计算

非常规污染物各组分的比排放量应按公式(6)计算:

$$G_x = \frac{\sum_{i=1}^n (G_{mass,i} \times WF_i)}{\sum_{i=1}^n (P_{(n)i} \times WF_i)} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

- G_x ——非常规污染物各气体组分的比排放量, 单位为克每千瓦时 (g/(kW·h));
- $G_{mass,i}$ ——不同工况下各气体组分的湿基质量流量, 单位为千克每小时 (kg/h);
- WF_i ——各工况加权系数, 具体系数要求可参见 ISO 8178.4 法规;
- $P_{(n)i}$ ——各工况功率, 单位为千瓦 (kW)。

10 测量报告

测量报告中应当包括以下内容。

- a) 发动机信息, 包括制造厂、型式和名称、产品编号、额定功率、额定转速。
- b) 进气系统及排气系统型号、参数及安装位置(若有)。
- c) 发动机运行的环境状况, 包括温度、压力、湿度。
- d) 发动机测量工况点的功率、转速等信息。
- e) 燃料的消耗量如燃油的消耗及氨的消耗量、燃料类型等信息。
- f) 测点布置图、取样管开孔图等信息。
- g) 测试设备的名称型号、规格、序列号、制造厂等信息。
- h) 非常规污染物(N₂O和NH₃)实时工况测得的体积浓度以及计算求得的比排放结果。
- i) 其他诸如测量地点、测量人员、日期等信息。

附录 A
(资料性)
船舶氨发动机排气污染物测量数据记录表

表 A.1 船舶氨发动机排气污染物排放测量数据

测量工况点	1	2	3	4	5	6	7	8
负荷/%								
开始时间								
测量的环境参数								
大气压力/kPa								
进气温度/℃								
进气湿度/%RH								
测量的发动机数据								
转速/(r/min)								
附加功率/kW								
设定功率/kW								
实测功率/kW								
平均有效压力/MPa								
燃油齿条								
燃油质量流量/(kg/h)								
氨气质量流量/(kg/h)								
空气质量流量/(kg/h)								
排气质量流量/(kg/h)								
排气温度/℃								
排气背压/kPa								
滑油温度/℃								
滑油压力/kPa								
增压空气温度/℃								
增压空气压力/kPa								
燃料温度/℃								
进气压力降/kPa								
测量排气数据								
N ₂ O (湿) /ppm								
NH ₃ (湿) /ppm								

参 考 文 献

- [1] GB/T 6040 红外光谱分析方法通则
 - [2] GB/T 20727 封闭管道中流体流量的测量 热式质量流量计
 - [3] GB/T 21186 傅里叶变换红外光谱仪
 - [4] GB/T 21188 用临界流文丘里喷嘴测量气体流量
 - [5] GB/T 34166 用标准喷嘴流量计测量天然气流量
 - [6] HJ 1011 环境空气和废气 挥发性有机物组分便携式傅里叶红外监测仪技术要求及检测方法
 - [7] HJ 1240 固定污染源废气 气态污染物（SO₂、NO、NO₂、CO、CO₂）的测定 便携式傅立叶变换红外光谱法
 - [8] JJG 640 差压式流量计检定规程
 - [9] SAE J2992 FTIR Gas Analyzer Performance Evaluation/ Qualification for Automotive Testing
-

