

营运船舶温室气体排放计量方法：燃料舱测量法计量技术规范

测量不确定度评定报告

1 测量方法

本规范基于燃料舱测量法进行营运船舶温室气体排放总量的计量，核算边界为营运船舶所有类型船用燃料燃烧排放量之和。计量规范中（1）-（10）式规定了碳排放量的计算方法。在实际应用中，活动数据、排放因子的采集有一定的误差存在，因此有必要对碳排放量数据进行不确定度分析。

2 企业温室气体排放量偏差不确定度评定示例

在起草本规范的过程中，对某国际航行船舶年度碳排放量进行了核算。该营运船舶使用极低硫燃料油（VLSFO）、低硫船用轻柴油（LSMGO）作为燃料，其中极低硫燃料油主要供主机、副机使用，储存于左、右重油舱（均为加油舱）、重油沉淀柜及重油日用柜中；低硫船用轻柴油同样主要供主机、副机使用，储存于左、右轻油舱（均为加油舱）以及轻油日用柜中。极低硫燃料油年消耗量为 462t，低硫船用轻柴油年消耗量为 139t，产生的温室气体排放量为 1901.396 吨。两类燃料消耗量均使用安装于燃料舱中的燃料测量系统进行测量。两类燃料消耗量均使用安装于燃料舱中的燃料测量系统进行测量，参数测量最大允许误差/不确定度见表 1。

表 1 燃料测量系统性能参数

最大允许误差/不确定度	参数值
液位计最大允许误差（mm）	±4
温度计最大允许误差（℃）	±0.5
倾角仪纵倾测量最大允许误差（°）	±0.1

倾角仪横倾测量最大允许误差 (°)	±0.1
燃料计量舱相对扩展不确定度	0.4%
密度测量最大允许误差 (kg/m³)	±0.5

2.1 测量模型

基于燃料舱测量法的营运船舶温室气体排放总量按式（1）计算：

$$E = \sum_i (E_i) \quad (1)$$

式中：

E ——营运船舶温室气体排放总量， tCO₂；

E_i ——第 i 种船用燃料燃烧温室气体排放量， tCO₂。

2.2 不确定度计算公式

营运船舶温室气体排放量不确定度按式（2）计算：

$$u(E) = \sqrt{\sum_i u^2(E_i)} \quad (2)$$

式中：

$u(E)$ ——营运船舶温室气体排放总量标准不确定度；

$u(E_i)$ ——第 i 种船用燃料燃烧温室气体排放量标准不确定度。

其中，第 i 种燃料燃烧产生的温室气体排放量 E_i 相对标准不确定度按式（3）计算：

$$\frac{u(E_i)}{E_i} = \sqrt{\left(\frac{u(FC_i)}{FC_i}\right)^2 + \left(\frac{u(CF_i)}{CF_i}\right)^2} \quad (3)$$

式中：

FC_i ——第 i 种船用燃料的活动数据， t；

CF_i ——第 i 种船用燃料的二氧化碳排放因子，活动数据， $tCO_2 / tfuel$ 。

$u(FC_i)$ ——第 i 种燃料燃烧活动数据的标准不确定度， t ；

$u(CF_i)$ ——第 i 种燃料排放因子的标准不确定度， $tCO_2 / tfuel$ 。

2.2.1 活动数据不确定度

第 i 种燃料燃烧活动数据按式（4）计算：

$$FC_i = \sum_{k=1}^n Q_{i,k} \quad (4)$$

式中：

$Q_{i,k}$ ——报告期内第 i 种燃料第 k 次测量获取的燃油消耗量， t 。

每次燃料消耗量的获取，是通过燃料消耗前、后两次测量液位等参数得到。考虑加油、驳油导致的燃料消耗前的测量液位变化，并为方便开展不确定度计分析，可将式（4）变换成式（5）：

$$FC_i = Q_{i,s} + \sum_{k=1}^n (Q_{i,k,2} - Q_{i,k,1}) - Q_{i,e} \quad (5)$$

式中：

$Q_{i,s}$ ——计量开始时燃料舱内第 i 种船用燃料量， t ；

$Q_{i,e}$ ——计量结束时燃料舱内第 i 种船用燃料量， t ；

$Q_{i,k,1}$ ——第 i 种燃料第 k 次加注/驳出前舱内船用燃料量 t ；

$Q_{i,k,2}$ ——第 i 种燃料第 k 次加注/驳出后舱内船用燃料量 t 。

对于同一条船舶，整船使用相同的计量设备、舱容表，每次测量值之间认为强相关，燃料活动数据标准不确定度按式（5）计算：

$$u(FC_i) = u(Q_{i,s}) + \sum_{k=1}^n (u(Q_{i,k,2}) + u(Q_{i,k,1})) + u(Q_{i,e}) \quad (5)$$

式中：

$u(Q_{i,s})$ ——计量开始时燃料舱内第 i 种船用燃料的燃料量测量的标准不确定度；

$u(Q_{i,k,1})$ ——第 k 次第 i 种燃料加注/驳出前船用燃料量测量标准不确定度；

$u(Q_{i,k,2})$ ——第 k 次第 i 种燃料加注/驳出后船用燃料量测量标准不确定度；

$u(Q_{i,e})$ ——计量结束时燃料舱内第 i 种船用燃料的燃料量测量标准不确定度。

按公式（6）计算燃料舱内燃料质量：

$$Q = \rho_{air} V_b \quad (6)$$

式中：

Q ——舱内燃料质量，t；

V_b ——舱内燃料标准体积， m^3 ；

ρ_{air} ——燃料空气中标准密度， t/m^3 。

燃料舱内燃料质量测量标准不确定度按式（7）计算：

$$u(Q) = \sqrt{\rho_{air}^2 u^2(V_b) + V_b^2 u^2(\rho_{air})} \quad (7)$$

2.2.2 排放因子测量不确定度

排放因子燃烧过程第 i 种燃料排放因子的标准不确定度按式（8）计算：

$$\frac{u(CF_i)}{CF_i} = \frac{44}{12} \sqrt{\left(\frac{u(C_{ar,i})}{C_{ar,i}}\right)^2 + \left(\frac{u(OF_i)}{OF_i}\right)^2} \quad (8)$$

式中：

$u(C_{ar,i})$ ——第 i 种燃料元素含碳量测量不确定度；

$u(OF_i)$ ——第 i 种燃料燃烧氧化率测量不确定度。

2.3 不确定度评估

由式（5）可知，将计量开始和计量结束测量视作加油前后的特殊场景，

则船舶燃料消耗测量不确定度等于每次加油量测量引入的不确定度总和。由于每次加油前后测量液位、倾角、温度参数有差异，测量不确定度在一定范围内波动。为评估燃油消耗量的不确定度，选取本船舶典型加油工况进行不确定度计算，以相对不确定度形式表示。典型工况选取见表 2。

表 2 典型工况

典型工况					
状态	液面高度 (m)	纵倾角(°)	横倾角(°)	舱温 (°C)	平均密度 (kg/m ³) 20℃
加油前（低位）	20%舱高	0	0	VLSFO : 45 LSMGO: 20	VLSFO: 929 LSMGO: 855
加油后（高位）	80%舱高	0	0	VLSFO : 45 LSMGO: 20	VLSFO: 929 LSMGO: 855

2.3.1 舱内体积测量不确定度

舱内燃料标准体积按式（9）计算：

$$V_b = (V_{\text{底量}} + (z + \Delta z_T + \Delta z_L) \times \overline{S_z}) \times (1 + 3\alpha(T - T_0)) \times VCF_{20} \quad (9)$$

式中：

V_b ——舱内燃料温度为 20℃时，舱内燃料体积，m³；

z ——舱内测量液面高度，m；

Δz_{Trim} ——纵倾修正值，m；

Δz_{List} ——横倾修正值，m；

$\overline{S_z}$ ——液面高度 z 以下舱容表厘米容量平均值（平均面积），m²；

T ——舱内燃料温度，℃；

T_0 ——舱容表给定的标准温度，℃；

α ——舱壁材料的线膨胀系数， $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，取 $0.000012^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

VCF_{20} ——石油及液体石油产品体积修正系数。

2.3.1.1 舱容表引入的标准不确定度

舱容表相对扩展不确定度通过查找检定/校准证书可得到，舱容表查表引入的体积标准不确定度按式（10）计算：

$$u(V_{d_{table}}) = V_b \times \frac{U_{rel,table}}{2} \quad (10)$$

式中：

$U_{rel,table}$ ——舱容表相对扩展不确定度。

2.3.1.2 液位测量引入的标准不确定度

液位计最大允许误差为 d_{ATG} ，其概率分布可以被视为矩形分布，液位测量误差引入的液位高度标准不确定度按式（11）计算：

$$u(z) = \frac{d_{ATG}}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

引入的体积标准不确定度按式（12）计算：

$$u(V_{d_{ATG}}) = \frac{d_{ATG}}{\sqrt{3}} \times \bar{S}_z \times (1 + 3\alpha(t - t_0)) \times VCF_{20} \quad (12)$$

2.3.1.3 纵倾测量引入的标准不确定度

纵倾角度测量最大允许误差为 d_{α} ，其概率分布可以被视为矩形分布。结合纵倾修正表，可得到计量液面下纵倾修正值最大允许误差，由纵倾角度测量误差引入的体积标准不确定度按式（13）计算：

$$u(V_{d_{Trim,\alpha}}) = \bar{S}_z \times (1 + 3\alpha(t - t_0)) \times VCF_{20} * k_1 \times d_{\alpha} / \sqrt{3} \quad (13)$$

式中：

k_1 ——计量高度处，纵倾修正值误差与角度误差的转换系数， $\text{m}/^{\circ}$ 。

2.3.1.4 横倾角测量误差引入标准不确定度

横倾角度测量最大允许误差为 d_β ，其概率分布可以被视为矩形分布。结合横倾修正表，可得到计量液面下横倾修正值最大允许误差，由横倾角度测量误差引入的体积标准不确定度按式（14）计算：

$$u(V_{d_{trim,\alpha}}) = \overline{S_z} \times (1 + 3\alpha(t - t_0)) \times VCF_{20} * k_2 * d_\beta / \sqrt{3} \quad (14)$$

式中：

k_2 ——计量高度处，横倾修正值误差与角度误差的转换系数， $m/^\circ$ 。

2.3.1.5 由温度测量引入的舱体体积修正不确定度

温度计最大允许误差为 d_T ，其概率分布可以被视为矩形分布。由温度测量误差导致舱体膨胀/收缩修正误差而引入的体积标准不确定度，按式（15）计算：

$$u(V_{d_T}) = 3\alpha \frac{d_T}{\sqrt{3}} (z + \Delta z_T + \Delta z_L) \times \overline{S_z} \times VCF_{20} \quad (15)$$

2.3.1.6 由温度测量引入的舱内油品体积修正不确定度

VCF_{20} 通过查石油计量表得到，结合石油计量表，由温度测量误差导致 VCF_{20} 误差而引入的体积标准不确定度，按式（16）计算：

$$u(V_{VCF_{20}}) = (V_{底量} + (z + \Delta z_T + \Delta z_L) \times \overline{S_z}) \times (1 + 3\alpha(t - t_0)) \times f \times \frac{d_T}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

式中：

f ——标密为 ρ ，燃油温度为 T 时， VCF_{20} 误差与温度误差的转换系数， $/^\circ\text{C}$ 。

2.3.2 密度测量引入的标准不确定度

实验室/船端测量最大允许误差为 d_ρ ，其概率分布可以被视为矩形分布。由密度测量误差引入的舱内油品体积修正不确定度按式（17）计算：

$$u(\rho) = \frac{d_\rho}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

2.3.3 极低硫燃料油消耗量不确定度

a) 加油前测量不确定度

根据 2.3.1、2.3.2 节给出的各分量不确定度计算公式及参数值，计算得到重油舱（左）加油前各分量标准不确定度，见表 3。

表 3 标准不确定度汇总表

标准不确定度分量	标准不确定度分量来源	标准不确定度分量值
$u(V_{d_{table}})$	舱容表不确定度	0.01895 m ³
$u(V_{d_{ATG}})$	液位计测量误差	0.01728m ³
$u(V_{d_{trim,\alpha}})$	纵倾测量误差	0 m ³
$u(V_{d_{list,\beta}})$	横倾测量误差	0.00073 m ³
$u(V_{d_T})$	温度测量误差	0.00098 m ³
$u(V_{VCF_{20}})$	温度测量误差	0.00223 m ³
$u(\rho)$	密度测量误差	0.28868kg/ m ³

则重油舱（左）加油前燃油量体积测量标准不确定度为：

$$\begin{aligned}
 u(V_b) &= \sqrt{u^2(V_{d_{table}}) + u^2(V_{d_{ATG}}) + u^2(V_{d_{trim,\alpha}}) + u^2(V_{d_{list,\beta}}) + u^2(V_{d_T}) + u^2(V_{VCF_{20}})} \\
 &= 0.026\text{m}^3
 \end{aligned}$$

由式（7）可得，重油舱（左）加油前测量标准不确定度为 24.082kg。

采用和以上相同计算方法，得到重油舱（右）加油前测量标准不确定度为 34.384kg，则加油前重油测量标准不确定度为：

$$\sqrt{24.082^2 + 34.384^2} = 41.979\text{kg}$$

b) 加油后测量不确定度

相同的，重油舱（左）加油后不确定度为 107.657kg，重油舱（右）加油后不确定度为 124.004kg，加油后重油测量不确定度为 164.217kg。

c) 每次加油测量不确定度

每次加油不确定度为 206.196kg。

d) 加油量计算

结合舱容表，基于石油和液体石油产品质量计算公式，计算重油舱（左）加油前燃料量为 8801.479kg，加油后燃料量为 51462.791kg；重油舱（右）加油前油量为 10286.981kg，加油后油量为 57344.659kg，则总加油量为 89718.989kg。

e) 每次加油测量相对不确定度

$$\frac{206.196}{89718.989} \times 100\% = 0.23\%$$

2.3.4 低硫船用轻柴油消耗量不确定度计算

按照 2.3.3 计算方法，计算低硫船用轻柴油加油相对不确定度，为 0.37%。

2.3.5 碳排放因子不确定度

该船舶采用国际海事组织 IMO 推荐使用的默认碳排放因子，其中极低硫燃料油（VLSFO）排放因子为 3.151 g CO₂/g fuel，低硫船用轻柴油（LSMGO）碳排放因子为 3.206 g CO₂/g fuel。因采用推荐排放因子，排放因子的不确定度不计。

2.3.6 合成不确定度

a) 极低硫燃料油燃烧排放量及引入的不确定分量

$$E_1 = 462 \times 3.151 = 1455.762 \text{ tCO}_2$$

$$u(E_1) = 1455.762 \times 0.23\% = 3.35 \text{ tCO}_2$$

b) 低硫船用轻柴油燃烧排放量及引入的不确定分量

$$E_2 = 139 \times 3.206 = 445.634 \text{tCO}_2$$

$$u(E_2) = 445.634 \times 0.37\% = 1.65 \text{tCO}_2$$

c) 总排放量及标准合成不确定度:

$$E = E_1 + E_2 = 1901.396 \text{tCO}_2$$

$$u(E) = \sqrt{u^2(E_1) + u^2(E_2)} = 3.73 \text{tCO}_2$$

相对标准合成不确定度:

$$\frac{u(E)}{E} = \frac{3.73}{1901.396} \times 100\% = 0.2\%$$

综合以上分析, 该船舶总碳排放量标准不确定度 3.73 tCO₂, 相对不确定度为 0.2%, 扩展相对不确定度为 0.4% (k=2)。