

团 体 标 准

T/CSNAME 210—2026

极地船舶冰区阻力与推进功率快速预报 方法

Rapid prediction method for ice resistance and propulsion power of polar vessels in
ice conditions

2026 - 02 - 12 发布

2026 - 05 - 11 实施

中国造船工程学会 发 布

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国造船工程学会船舶标准化专业委员会提出。

本文件由中国造船工程学会归口。

本文件起草单位：上海交通大学、中国船级社上海规范研究所、中国船舶集团有限公司第七〇八研究所。

本文件主要起草人：周利、丁仕风、张钰菲、王峥嵘、李放、崔濛、吴刚、曹晶。



极地船舶冰区阻力与推进功率快速预报方法

1 范围

本文件规定了极地船舶冰区阻力与推进功率快速预报方法（以下简称预报方法）的计算输入、计算流程和分析计算。

本文件适用于极地船舶的冰阻力与推进功率的直接预报。

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。

中国船级社，钢质海船入级规范，2025

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

冰阻力 ice resistance

船舶在冰区航行遭受的阻力，其值为冰载荷的时历平均，取平均的时长至少为航行1倍船长所需时长。冰阻力包括破冰阻力与清冰阻力两部分。

3.2

推进功率 propulsive power

为使船舶保持稳定航速，推进装置所输出的有效机械功率。

4 符号与缩略语

4.1 符号

表1中的符号适用于本文件。

表1 极地船舶冰区阻力与推进功率快速预报计算符号

符号	说明	符号	说明
α	残差，无物理意义	λ_t	两物体多点碰撞切向冲量
α_i	节点 <i>i</i> 处的入水角	L	接触长度
A_c	接触面积	L_{cr}	临界接触长度
A_i	碎冰第 <i>i</i> 个三角网格的面积	L_d	接触深度
β	残差，无物理意义	m	经验系数，取-0.16
B	船舶型宽	m_A	物体A的质量
B_{ice}	碎冰浮心坐标	m_B	物体B的质量
c_i	常数，用于计算临界接触长度	M	物体质量矩阵
C_i	碎冰水下网格 <i>i</i> 顶点坐标	μ	船舶摩擦系数

表1 极地船舶冰区阻力与推进功率快速预报计算符号（续）

符号	说明	符号	说明
C_f	经验系数，用于计算冰层承载能力	n	经验系数，当冰厚小于1米时， $n = -0.50 + h/5$ ，当冰厚大于1米时， $n = -0.30$
C_l	经验系数，用于计算环向裂纹半径	\vec{n}	竖直向上的单位向量
C_R	海冰的强度系数	\vec{n}_i	碎冰第 <i>i</i> 个三角网格的法向单位向量
C_p	经验系数，用于计算环向裂纹半径	ν	海冰泊松比
Δ	船舶排水量	O	坐标原点
Δu	两物体多点碰撞物体速度变化	ϕ	外倾角
E	海冰弹性模量	ϕ_i	节点 <i>i</i> 处的外倾角
f_1	桨推进方式参数	ϕ_m	极限外倾角
f_2	桨数参数	p_G	脆性局部挤压力
f_3	主尺度参数	P	推进功率
f_4	船艏型线参数	$[P]$	用户设置推进功率
f_5	航行参数	P_0	设计水线节点 <i>i</i>
f_{AR}	经验附加项，用于计算脆性局部挤压力	P_1	设计水线节点 <i>i</i> - 1
f_H	船舶作用水平面内摩擦力	P_2	辅助水线节点 <i>i</i> - 1
f_V	船舶作用垂直面内摩擦力	P_f	冰层承载能力
\vec{F}_b	碎冰浮力	\vec{r}_b	由碎冰重心指向浮心的向量
F_{cr}	局部挤压冰力	\vec{r}_i	从碎冰质心指向第 <i>i</i> 个三角网格的中心的向量
F_H	局部挤压冰力 F_{cr} 与摩擦力 f_V 的合力的水平面分力	R	环向裂纹半径
\vec{F}_i	碎冰第 <i>i</i> 个三角网格所受流体拖曳力	R_t	船舶总阻力
\vec{F}_f	碎冰所受流体拖曳力	ρ_w	海水密度
F_h	冰厚傅汝德数	σ_f	海冰弯曲强度
F_V	局部挤压冰力 F_{cr} 与摩擦力 f_V 的合力的垂直面分力	θ	冰楔开角
g	重力加速度	\vec{T}_b	碎冰浮力矩
γ_n	与接触点物体相对速度与冲量相关	$\vec{U}_{i,rel}$	碎冰第 <i>i</i> 个三角网格与流体的相对速度
γ_t	与接触点物体相对速度与冲量相关	\vec{v}_{rel}	物体A、B碰撞前相对速度
h	海冰厚度	v_n^{rel}	船冰相对法向速度
h_1	参考冰厚	$v_{n,1}^{rel}$	碰撞点处船冰法向相对速度在垂直面内平行于结构物表面的速度分量
I_n	两物体单点碰撞法向冲量	v_t^{rel}	碰撞点处船冰切向相对速度
I_t	两物体单点碰撞切向冲量	V	碎冰排水体积
J_n	法向接触限制矩阵	V_{ship}	航速
J_t	切向接触限制矩阵	x_i	设计水线第 <i>i</i> 个节点的坐标
J_A	物体A转动惯量矩阵	y_i	设计水线第 <i>i</i> 个节点的坐标
J_B	物体B转动惯量矩阵	\vec{z}_0	Z轴单位方向向量
l_c	海冰特征长度	Δu	两物体多点碰撞物体速度变化
λ_n	两物体多点碰撞法向冲量		

4.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AABB：轴对齐包围盒算法（Axis-Aligned Bounding Box）；

CFD-DEM：计算流体动力学—离散单元法（Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Method）

EPA：扩展多面体算法（Expanding Polytope Algorithm）；

GJK：吉伯特·D·W·詹森·S·S·科西算法（Gilbert-Johnson-Keerthi）。

5 冰阻力预报与推进功率计算流程

极地船舶冰阻力与推进功率方法的计算流程如图1所示。

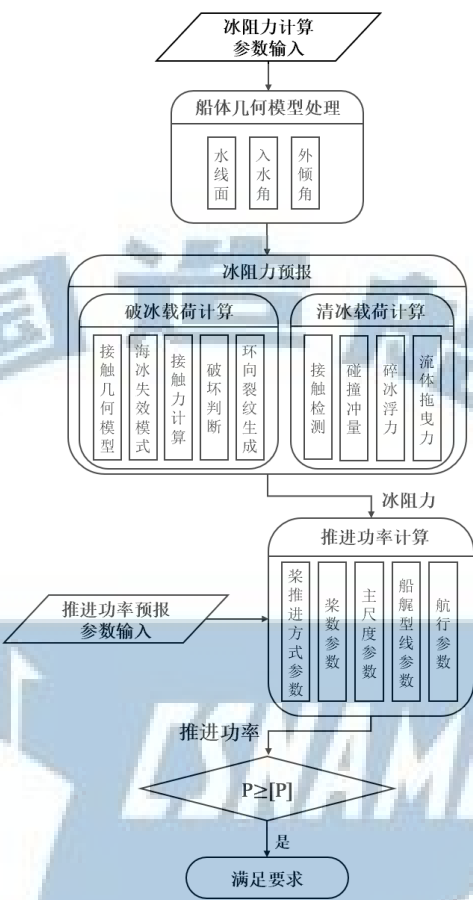


图1 冰阻力预报与推进功率计算流程图

- 具体流程如下：
- a) 输入参数：输入用于冰阻力预报的海冰参数、船舶参数及其他相关参数（具体参数内容见 6.1）；同时输入用于推进功率预报的螺旋桨配置参数、船舶参数及航行参数。
 - b) 船体几何模型预处理：对船体几何模型进行预处理，提取水线及辅助水线的坐标信息，通过计算得到水线处各节点的入水角与外倾角。
 - c) 冰载荷计算（按时间步）：针对每个时间步，分别计算破冰载荷与清冰载荷。提取该时刻的水线坐标点和冰场坐标点，获取冰场轮廓信息；利用水线坐标与冰场轮廓信息，判断船体与平整冰的碰撞情况，对每个接触处计算接触面积，并借助节点外倾角信息判断冰体破坏模式，进而计算接触力大小，得到破冰载荷（具体破坏准则与载荷计算方法见 6.3.1）。依据破坏准则判断冰场是否发生破坏，若发生破坏，计算环向裂纹半径并更新冰场信息；同时检测船体与碎冰的碰撞情况，对每个碰撞处计算碰撞冲量，得到清冰载荷，计算碎冰所受浮力与拖曳力，并更新碎冰位姿。
 - d) 冰阻力计算：对仿真得到的冰载荷时历曲线进行时间平均计算，得到冰阻力。
 - e) 推进功率计算：将计算得到的冰阻力代入推进功率计算公式，求解得到船舶推进功率。
 - f) 结果验证与优化：若计算得到的推进功率不小于用户设置的推进功率阈值，则满足设计要求；若不满足设计要求，可通过优化船体破冰线型以降低冰阻力，或增加船舶推进动力，重新进行上述计算流程，直至满足要求。

6 冰区阻力预报方法

6.1 参数确定

6.1.1 海冰参数

海冰参数主要包括海冰的几何参数、物理参数与力学参数，具体详见表2。

表2 海冰参数

分类	参数
几何参数	厚度
物理参数	密度
力学参数	弯曲强度、挤压强度、弹性模量、泊松比、船-冰摩擦系数
注：表中所列参数为海冰阻力与推进功率预报计算所需核心参数，具体取值需符合相关规范要求	

6.1.2 船舶参数

船舶参数主要包括船舶主尺度、操纵性参数和船体模型，其中船体模型需为fbx或stl格式，具体参数如表3。

表3 船舶参数

分类	参数
主尺度	水线长、船宽、吃水、排水体积、艏柱倾角、1/4半宽水线角、湿表面积
操纵性参数	航速

6.1.3 其他参数

其他参数具体如下：

- a) 海水密度；
- b) 重力加速度。

6.2 船体几何模型

6.2.1 水线面

提取半船设计水线 and 设计水线上方一定距离（例如0.5米）处的辅助水线坐标位置，根据逆时针顺序进行排列。

6.2.2 入水角

水线面节点*i*处的入水角 α_i 计算公式见式（1）：

$$\alpha_i = \arctan \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right) \dots\dots\dots (1)$$

6.2.3 外倾角

水线面节点*i*处的外倾角 φ_i 计算公式见式（2）和式（3）：

$$\varphi_i = \arctan \left(\frac{|\vec{n}_0 \times \vec{z}_0|}{|\vec{n}_0 \cdot \vec{z}_0|} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\vec{n}_0 = \frac{\vec{P_0P_1} \times \vec{P_0P_2}}{|\vec{P_0P_1} \times \vec{P_0P_2}|} \dots\dots\dots (3)$$

6.3 冰区阻力预报

6.3.1 破冰载荷计算

6.3.1.1 接触几何模型

冰阻力根据物理机理的不同分为破冰阻力与清冰阻力，其中破冰阻力为破冰载荷的时历平均，清冰阻力为清冰载荷的时历平均。破冰载荷依据环向裂纹法计算，环向裂纹法是一种基于断裂力学原理，通过环向裂纹来模拟海冰在荷载作用下发生断裂的数值模拟方法。

船冰相互作用主要发生在水线面处，因此在数值模拟的过程中，利用提前提取的船体水线轮廓和平整冰场边缘，进行平整冰的破冰计算，示意图如图2所示。

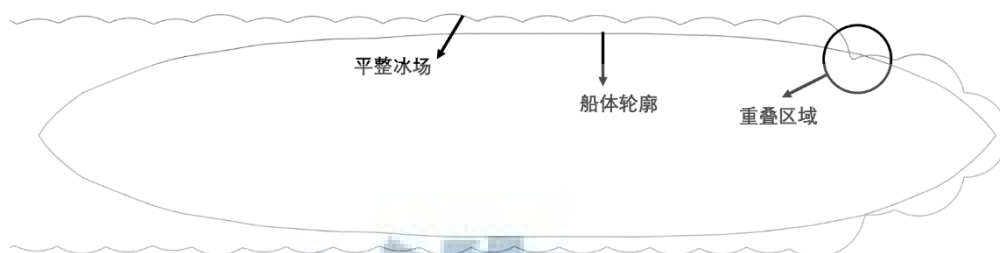


图2 船冰接触示意图

为简化接触面积计算方法，假设船冰接触面为平面，考虑下述两种情况：

船冰接触面未达平整冰底部，即 $L_d \cdot \tan(\varphi) < h$ ，此时接触面形状为三角形，详见图3，接触面积由式（4）计算得到。

$$A_c = \frac{1}{2} L \frac{L_d}{\cos(\varphi)} \quad (4)$$

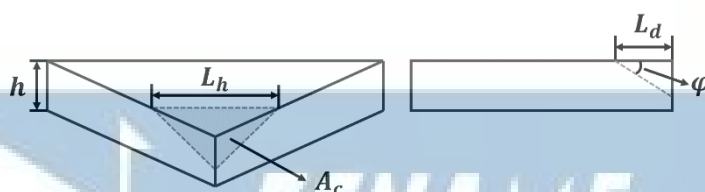


图3 接触面未达平整冰底部示意图

船冰接触面达到平整冰底部，即 $L_d \cdot \tan(\varphi) \geq h$ ，此时接触面形状为梯形，详见图4，接触面积由式（5）计算得到。

$$A_c = \frac{1}{2} \left(L_h + \frac{L_d - h \tan(\varphi)}{L_d} L \right) \frac{h}{\sin(\varphi)} \quad (5)$$

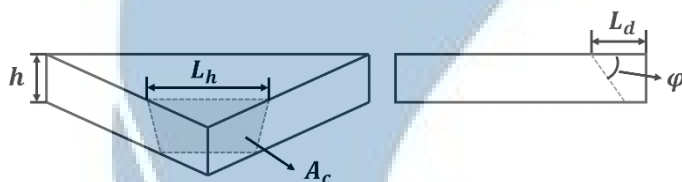


图4 接触面达到平整冰底部示意图

6.3.1.2 接触力计算

冰的失效模式对冰与结构物作用力的大小有显著影响。结构物倾角增大时，冰层发生挤压破坏的可能性也增大；反之，发生弯曲破坏的可能性更大。设置极限外倾角 φ_m ，当接触处船体外倾角 φ 小于极限外倾角 φ_m ，海冰可能发生弯曲破坏。在弯曲破坏前，船冰接触表面上产生的局部挤压冰力 F_{cr} 垂直于该表面，可由式（6）计算得到：

$$F_{cr} = \sigma_f \cdot A_c \quad (6)$$

当接触处船体外倾角 φ 大于极限外倾角 φ_m ，海冰可能发生挤压破坏，在不考虑其他限制情况下，海冰连续作用在船体上局部挤压冰力 F_{cr} 可由式（7）计算得到：

$$F_{cr} = p_G \cdot A_c \quad (7)$$

脆性局部挤压力通常受海冰温度、接触面积、接触区域形状、船冰相对速度等因素影响。通过海冰全尺度测量数据的分析可确定当年冰或多年冰与结构发生挤压时的冰压力上限，脆性局部挤压力 p_G 可由式（8）计算得到：

$$p_G = C_R \left[\left(\frac{h}{h_1} \right)^n \left(\frac{L}{h} \right)^m + f_{AR} \right] \quad (8)$$

为得到船冰接触处层冰所受垂向作用力从而判断层冰是否发生破坏，对船冰接触处层冰受力进行分解，结果如图5所示。

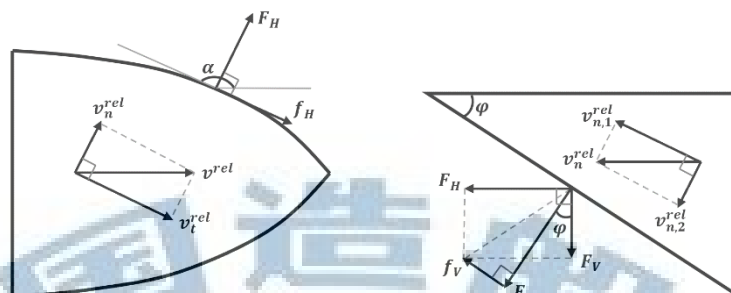


图5 船冰接触处受力分析

水平面内摩擦力计算见式 (9)：

$$f_H = \frac{\mu F_{cr} v_t^{rel}}{\sqrt{(v_t^{rel})^2 + (v_{n,1}^{rel})^2}} \quad (9)$$

垂直面内摩擦力计算见式 (10)：

$$f_V = \frac{\mu F_{cr} v_{n,1}^{rel}}{\sqrt{(v_t^{rel})^2 + (v_{n,1}^{rel})^2}} \quad (10)$$

局部挤压冰力 F_{cr} 与摩擦力 f_V 的合力可分解为水平面内的 F_H 和垂直面内竖直向下的 F_V ，具体见式 (11) 和式 (12)：

$$F_H = F_{cr} \sin(\varphi) + f_V \cos(\varphi) \quad (11)$$

$$F_V = F_{cr} \cos(\varphi) - f_V \sin(\varphi) \quad (12)$$

6.3.1.3 破坏判断

层冰在船体作用下若发生弯曲失效，则会产生一个开角为 θ ，半径为 R 的冰楔。冰楔顶端受到垂直作用力随着接触面积的增大而增大，当载荷达到其承载极限时，冰层发生断裂。冰层承载能力 P_f 可通过式 (13) 计算得到，当垂向力 $F_V \geq P_f$ 时，发生弯曲破坏；当 $F_V < P_f$ 时，不发生弯曲破坏。

$$P_f = C_f \sigma_f h^2 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2 \quad (13)$$

船冰接触长度 L 随着破冰过程的进行而增加，当 L 达到预设的临界接触长度 L_{cr} 时，冰层发生挤压失效。根据模型试验，临界接触长度 L_{cr} 可通过式 (14) 计算得到，当船冰接触长度 $L \geq L_{cr}$ 时，发生挤压破坏；当 $L < L_{cr}$ 时，不发生挤压破坏。

$$L_{cr} = c_i h \quad (14)$$

式中：

c_i ——常数，可根据模型试验结果进行取值。

6.3.1.4 环向裂纹生成

当船冰接触时，层冰会承受径向的拉压作用和平行于接触面方向的拉伸作用。在这两种应力的作用下，层冰会产生平行于接触面方向的环向裂纹或者垂直于接触面方向的径向裂纹，且两种裂纹存在竞争机制。基于环向裂纹物理现象模拟层冰破碎效果，层冰破碎后产生的浮冰的几何形状可假设为扇形，环向裂纹半径根据式 (15) 计算：

$$R = C_l l_c (1.0 + C_v v_n^{rel}) \quad (15)$$

式中：

C_l ——经验参数，可根据模型试验结果进行取值；

海冰特征长度如式 (16) 计算：

$$l_c = \left[\frac{E h^3}{12(1-\nu^2)\rho_w g} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (16)$$

6.3.2 清冰载荷计算

6.3.2.1 接触检测

清冰载荷依据非光滑离散元方法计算。非光滑离散元方法是一种结合了非光滑力学与离散元思想的数值方法，它通过允许接触体间存在速度跳跃并基于互补条件求解接触力，从而高效模拟多体接触、碰撞与摩擦等非连续动力学过程。

接触检测分为粗检测阶段和细检测阶段。粗检测阶段利用轴对齐包围盒AABB算法，初步筛选可能碰撞的物体对。细检测阶段利用GJK算法判断碰撞，利用EPA算法求解接触点与接触深度等接触信息。根据接触信息，可计算碰撞冲量。

6.3.2.2 碰撞冲量

基于冲量方法计算船舶与浮冰之间的相互作用力，对于两个物体A,B单点碰撞，法向冲量 I_n 和切向冲量 I_t 可由式(17)和式(18)计算得到。

$$I_n = \frac{-(1+e)\vec{v}_{rel} \cdot \vec{n}}{(\vec{m}_A^{-1} + \vec{m}_B^{-1}) + [(\vec{J}_B^{-1} \vec{r}_B \times \vec{n}) \times \vec{r}_B + (\vec{J}_A^{-1} \vec{r}_A \times \vec{n}) \times \vec{r}_A] \cdot \vec{n}} \quad (17)$$

$$I_t = \mu I_n \quad (18)$$

船体与浮冰为复杂三维几何体，两者之间的碰撞在很多情况下为多点碰撞。对于两个物体的多点碰撞，法向冲量与切向冲量可通过求解式(19)混合线性互补问题得到。

$$\begin{bmatrix} M & -J_n & J_t \\ J_n^T & 0 & 0 \\ J_t^T & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \lambda_n \\ \lambda_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \gamma_n \\ \gamma_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (19)$$

6.3.2.3 碎冰浮力

碎冰浮力方向竖直向上，如图6所示。

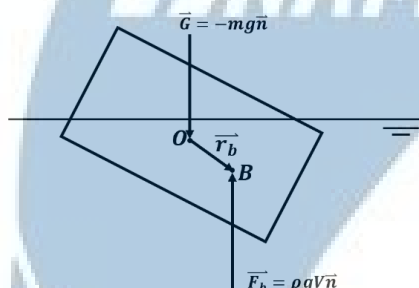


图6 碎冰浮力示意图

浮力基于阿基米德原理进行计算，如式(20)所示：

$$\vec{F}_b = \rho_w V g \vec{n} \quad (20)$$

浮力矩可由式(21)计算：

$$\vec{T}_b = \vec{r}_b \times \vec{F}_b \quad (21)$$

当实时碎冰浮心位置与排水体积确定，碎冰所受浮力与浮力矩也可确定。在计算程序中，碎冰由三角网格表示，其排水体积与浮心可利用四面体的有符号体积方法求解，具体方法为每个三角网格与原点构成一个四面体，计算其有向体积，求和得到总体积，与四面体形心加权平均得到浮心位置。

排水体积计算式具体如式(22)。

$$V = \sum_i^{n-2} \frac{1}{6} (\vec{OC}_i \times \vec{OC}_{i+1}) \cdot \vec{OC}_{i+2} \quad (22)$$

浮心计算式具体如式(23)。

$$B_{ice} = \frac{\sum_i^{n-2} (\vec{OC}_i \times \vec{OC}_{i+1}) \cdot \vec{OC}_{i+2} \cdot (O + C_i + C_{i+1} + C_{i+2})}{24V} \quad (23)$$

6.3.2.4 流体拖曳力

碎冰由三角网格表示，分别计算施加在每一个三角形面片上的流体动力，再对计算结果进行求和，得到作用在碎冰上的拖曳力和拖曳力矩。

拖曳力的具体计算公式如式(24)：

$$\vec{F}_f = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \rho_w A_i |\vec{U}_{i,rel}| (\vec{U}_{i,rel} \cdot \vec{n}_i) \cdot \vec{n}_i \dots\dots\dots (24)$$

拖曳力矩表达式如式(25)：

$$\vec{T}_f = \sum_{i=1}^n \vec{T}_i = \sum_{i=1}^n \vec{r}_i \times \left(\frac{1}{2} \rho_w A_i |\vec{U}_{i,rel}| (\vec{U}_{i,rel} \cdot \vec{n}_i) \cdot \vec{n}_i \right) \dots\dots\dots (25)$$

6.3.3 冰载荷时历曲线

将6.3.1与6.3.2中每一时刻计算得到的水线各处受到的载荷相加,得到该时刻的破冰载荷与清冰载荷,两者相加得到该时刻的总冰载荷。以时间为横坐标,载荷取值为纵坐标绘图即可得到冰载荷时历曲线。计算平稳段载荷平均值,即可得到该工况下的冰阻力 R_t 。

7 推进功率预报方法

7.1 参数确定

推进功率预报参数包括桨配置参数、船参数和航行参数,具体如下:

- 桨配置参数:桨推进方式(定距桨/可调桨)、桨数量(单桨/双桨/三桨);
- 船参数:船艏型线(U型/V型/球型)、主尺度(型宽、排水量);
- 航行参数:航速、冰厚。

7.2 推进功率估算方法

推进功率计算可分为阻力部分与推进性能部分。阻力部分由船舶所受总阻力与航速确定,推进性能部分通过一系列与桨、船和航行相关的参数表征,具体公式如式(26)计算所示:

$$P = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot R_t \cdot V_{ship} \dots\dots\dots (26)$$

7.2.1 桨推进方式参数

桨推进方式参数取值参考《钢质海船入级规范》,与桨类型相关,定距桨取1,可调距、电推桨取0.9。

7.2.2 桨数参数

桨之间存在扰流效应,形成低速区域,降低螺旋桨性能,同时增加了阻力,因此桨数参数与桨的数量和布置位置有关。参数取值可由基于CFD-DEM耦合方法的冰区极地船舶自航数值模拟确定,碎冰通过船底线喷射器向极地船航行方向喷出,速度大小与流速相同。边界条件为:入口边界、侧面边界、上部边界和底部边界为速度入口,出口边界设置为压力出口。仿真结果表明:单桨可取0.90,双桨取0.99,当三桨布置为同一纵向位置时,取1.13,三桨品字型布置时,取1.06。

7.2.3 主尺度参数

主尺度参数与型宽和排水量有关,取值按照《钢质海船入级规范》,其值不小于1,具体计算公式如式(27):

$$f_3 = 1.2B/\sqrt[3]{\Delta} \dots\dots\dots (27)$$

7.2.4 船艏型线参数

船艏型线参数取值同样可由基于CFD-DEM耦合方法的冰区极地船舶自航数值模拟确定,不同船型的仿真结果表明,当船艏为U型船艏时,船艏型线参数取1,V型船艏取0.95,球型取0.9。

7.2.4 航行参数

基于重型破冰船试验结果,拟合航行参数与冰厚傅汝德数之间的函数关系,得到航行参数的计算式具体如式(28)所示。

$$f_5 = 300e^{-32F_h} + 11e^{-1.7F_h} + 0.4 \dots\dots\dots (28)$$

冰厚傅汝德数计算式具体如式(29):

$$F_h = \frac{V_{ship}}{\sqrt{gh}} \dots\dots\dots (29)$$

8 预报结果的评定与验证

预报方法计算出的推进功率为 P ，预报误差为10%以内。用户方提供的要求的推进功率为 $[P]$ 。当 $P \geq [P]$ 时，推进功率满足要求。



参 考 文 献

- [1] 中国船级社, 重型破冰船规范, 2024
- [2] ISO 19906:2019 石油和天然气工业 北极近海结构 (Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures)

