

ICS 47.020.70

CCS U11

团 体 标 准

T/CSNAME 211—2026

极地船舶冰区回转性能快速评估方法

Rapid assessment method for ice navigation maneuvering performance of polar vessels

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。



极地船舶冰区回转性能快速评估方法

1 范围

本文件规定了极地船舶冰区回转性能的直接快速评估方法（以下简称评估方法）的评估流程、评估要求、评估结果的评定与验证。

本文件适用于极地船舶冰区回转性能评估。

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。

T/CSNAME 210—2026 极地船舶冰区阻力与推进功率快速预报方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

回转性能 turning ability
操满舵使船舶做回转运动的性能。

4 符号和缩略语

4.1 符号

表1所列符号适用于本文件。

表1 符号说明

符号	内容	符号	内容
α_H	操舵引起的对船体的水动力	t_p	螺旋桨推力减额系数
$a_i(i = 0,1,2)$	拟合系数，用于计算螺旋桨敞水推力系数	t_R	舵的推力减额系数
α_R	有效舵角	τ'	无量纲吃水差
A_d	舵面积	T	吃水
$A(k)$	吊舱桨推力系数回归公式系数	u	船舶 x 方向线速度
β	船舶坐标原点的漂角	u'	无量纲船舶 x 方向线速度
β_p	螺旋桨位置处的几何漂角	U_R	有效来流速度
β_R	舵处漂角	v	船舶 y 方向线速度
$\beta_{0.7}$	吊舱桨梢 0.7 半径处水动力螺距角	v'	无量纲船舶 y 方向线速度
B	船宽	v_A	吊舱桨的轴向进速
$B(k)$	吊舱桨推力系数回归公式系数	V	船舶速度
c_1	系数，操左右舵时分别为 1.065 以及 0.935，参考藤井公式	w_p	螺旋桨有效伴流分数
C_b	船舶的方形系数	w_{p_0}	直航状态下螺旋桨的有效伴流分数
C_p	系数，用于计算整流系数	w_R	舵的有效伴流分数
C_R	系数，用于计算整流系数	w_{R_0}	直航状态下舵的有效伴流分数
d_a	艏吃水	x_p	螺旋桨的纵向位置坐标
d_f	艉吃水	x_R	舵力作用中心至船舶重心的纵向距离

表1 符号说明（续）

符号	内容	符号	内容
δ	舵角	X_H	水动力在 OX 方向的分量
δ_0	零正压舵角	X_p	螺旋桨、吊舱推力在 OX 方向的分量
D_p	螺旋桨、吊舱桨直径	X_R	舵力在 OX 方向的分量
η	系数，用于计算有效来流速度	X_{ice}	冰力在 OX 方向的分量
F_N	舵的法向力	X'_{vv}	纵向非线性水动力导数
γ	整流系数	X'_{vr}	纵向非线性水动力导数
h_R	舵高	X'_{rr}	纵向非线性水动力导数
I_z	船舶质量绕轴的惯性矩	X'_{uu}	纵向非线性水动力导数
J	进速系数	Y'_v	横向线性水动力导数
J_{zz}	船体在水中运动时绕 z 轴的附加质量惯性矩	Y'_r	横向线性水动力导数
k_R	系数，用于计算有效来流速度	Y'_{vv}	横向非线性水动力导数
K_T	螺旋桨敞水推力系数	Y'_{vr}	横向非线性水动力导数
λ	舵的展弦比	Y'_{rr}	横向非线性水动力导数
l_v	系数，用于计算线性水动力导数	N'_v	转首力矩线性水动力导数
L	船长	N'_r	转首力矩线性水动力导数
m	船舶质量	N'_{vrr}	转首力矩非线性水动力导数
m_x	船舶 OX 方向的附加质量	N'_{vr}	转首力矩非线性水动力导数
m_y	船舶 OY 方向的附加质量	N'_{rr}	转首力矩非线性水动力导数
n	螺旋桨、吊舱桨转速	Y_H	水动力在 OY 方向的分量
p	螺旋桨螺距	Y_p	螺旋桨、吊舱推力在 OY 方向的分量
r	船舶转艏速度	Y_R	舵力在 OY 方向的分量
r'	无量纲船舶转艏速度	Y_{ice}	冰力在 OY 方向的分量
$[R_{allow}]$	用户提供回转半径	N_H	水动力绕 z 轴的外力矩
R_{cal}	计算得到回转半径	N_p	螺旋桨、吊舱推力绕 z 轴的外力矩
ρ	海水密度，范围为 $1.02 \times 10^3 - 1.07 \times 10^3$	N_R	舵力绕 z 轴的外力矩
s	滑脱比	N_{ice}	冰力绕 z 轴的外力矩

4.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

MMG：分离型船舶操纵性模型（Maneuvering Modeling Group）；

CFD-DEM：计算流体力学与离散元耦合方法（Computational Fluid Dynamics–Discrete Element Method）。

5 评估流程

极地船舶破冰能力与冰区回转性能快速评估计算流程如图1所示，计算说明如下：

- a) 输入海冰参数、船舶参数与其他参数。其中，海冰参数主要包括海冰的几何参数、物理参数与力学参数，船舶参数主要包括船舶主尺度、船体模型和操纵性参数，具体见6.1；
- b) 计算作用在船体上的外载荷，包括冰载荷、推力、舵力和浮力。其中冰载荷分为破冰载荷与清冰载荷，破冰载荷依据环向裂纹法计算，清冰载荷依据非光滑离散元方法计算，具体计算方法见T/CSNAME 210—2026；
- c) 基于MMG模型建立船舶操纵性方程，计算水动力导数得到作用在船体上水动力，借助经验公式就散附加质量与附加惯性矩，将计算得到的外载荷代入方程求解，更新船体位姿；
- d) 当船舶回转角度达到180° 时，结束数值模拟。根据船舶位姿时历曲线，确定战术直径；
- e) 若计算得到的战术直径不大于用户设置值，则满足要求；若不满足要求，则通过修改型线形状、优化附体设计和改善推进器配置以提升操纵性。

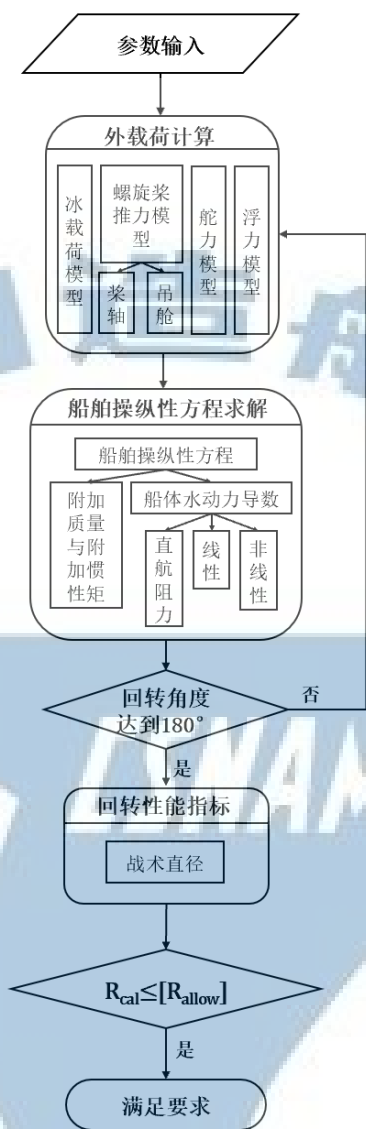


图1 极地船舶冰区回转性能快速评估流程图

6 评估要求

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，具体如下：

- a) 几何参数：厚度；
- b) 物理参数：密度；
- c) 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。

6.1.2 船舶参数

船舶参数主要包括船舶主尺度、船体模型和操纵性参数，具体如下：

- a) 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；
- b) 船体模型：船体三维模型文件；
- c) 操纵性参数：螺旋桨直径、敞水特性曲线、螺旋桨纵向位置、舵展弦比、舵面积、舵高。

6.1.3 其他参数

- 其他参数具体如下：
- a) 海水密度；
 - b) 运动粘性系数；
 - c) 重力加速度。

6.2 外载荷计算

6.2.1 螺旋桨推力模型

6.2.1.1 轴桨系统

螺旋桨除了纵向的力外，其他方向上所能提供的力和力矩足够小，可认为螺旋桨只提供纵向推力 X_p 。计算螺旋桨推力时，先基于螺旋桨敞水实验数据拟合出螺旋桨敞水推力系数与进速系数的关系，再根据推力系数计算纵向推力 X_p 。

螺旋桨推力 X_p 表达式如式（1）所示。

$$X_p = (1 - t_p)\rho n^2 D_p^2 K_T \dots\dots\dots (1)$$

进行螺旋桨模型的敞水试验能够得到敞水特性曲线，而推力系数是通过使用多项式拟合敞水特性曲线得到， K_T 的计算公式如式（2）。

$$K_T = a_0 + a_1 J + a_2 J^2 \dots\dots\dots (2)$$

进速系数可由式（3）计算得到。

$$J = u(1 - w_p)/(nD_p) \dots\dots\dots (3)$$

操纵运动中螺旋桨的有效伴流分数 w_p 伴流分数与直航运动中不同，采用式（4）进行估算。

$$w_p = w_{p_0} \exp(-4.0 \cdot \beta_p^2) \dots\dots\dots (4)$$

螺旋桨位置处的几何漂角由式（5）计算得到。

$$\beta_p = \beta - x_p r/V \dots\dots\dots (5)$$

船舶坐标原点的漂角由式（6）计算得到。

$$\beta = -\sin^{-1}\left(\frac{v}{V}\right) \dots\dots\dots (6)$$

6.2.1.2 吊舱系统

不考虑推力减额时，吊舱桨推力 X_p 可通过式（7）计算得到：

$$X_p = (\rho/2)[v_A^2 + (0.7\pi nD_p)^2](\pi/4)D_p^2 C_T^* \dots\dots\dots (7)$$

荷兰船模试验水池对120只B系列螺旋桨进行了敞水试验，给出部分螺旋桨的推力系数的回归公式及回归系数，后对其回归公式进行修正，修正后的 C_T^* 可由式（8）和（9）计算得到。式中 $A(k)$ 和 $B(k)$ 为回归系数，如表2所示。

$$C_T^* = \frac{1}{100} \sum_{k=0}^{30} [A(k)\cos k\beta_{0.7} + B(k)\sin k\beta_{0.7}] \dots\dots\dots (8)$$

$$\beta = \arctan(v_A/0.7\pi nD_p) \dots\dots\dots (9)$$

表2 推力系数回归公式系数

k	A(k)	B(k)	k	A(k)	B(k)
0	3.0339	0	16	-0.07194	0.031255
1	15.6775	-54.3095	17	0.582625	0.15376
2	0.38001	-0.69776	18	0.155389	-0.23252
3	1.52305	1.50585	19	-0.03562	-0.30734
4	0.00721	-0.75636	20	-0.0135	0.085544
5	-3.3702	6.61565	21	0.198565	-0.16483
6	-0.03973	0.457482	22	-0.0652	-0.15561
7	2.03111	0.501555	23	-0.10863	-0.12932
8	-0.38171	-0.07204	24	0.068835	0.038395
9	-0.141	0.701585	25	0.029506	-0.13507
10	0.240423	0.08845	26	-0.05743	-0.05404
11	0.83936	0.331666	27	-0.14069	-0.04525
12	-0.05659	0.04509	28	0.039131	0.003141

表2 推力系数回归公式系数（续）

k	A(k)	B(k)	k	A(k)	B(k)
13	0.335634	0.823795	29	-0.0462	-0.05416
14	0.164294	-0.02139	30	-0.04525	-0.02367
15	0.35565	-0.47647			

6.2.2 舵力模型

作为应用最为广泛的船舶操纵装置，舵的性能很大程度上决定了船舶操纵性的优劣。在计算舵力和舵力矩时，首先考虑舵的敞水特性，再分析船体、螺旋桨和舵之间的相互作用，得到的舵力及操纵引起的水动力导数如式（10）所示：

$$\begin{cases} X_R = -(1 - t_R)F_N \sin \delta \\ Y_R = -(1 + \alpha_H)F_N \cos \delta \\ N_R = -(1 + \alpha_H) \cdot x_R \cdot F_N \cos \delta \end{cases} \quad (10)$$

经理论与试验研究， α_H 与船舵间隔、船型、桨负荷变化等因素有关，只考虑船型影响时， α_H 可由式（11）计算得到。

$$\alpha_H = 0.6784 - 1.3374C_b + 1.8891C_b^2 \quad (11)$$

舵的推力减额系数 t_R 通常可取0.29，当考虑船型对 t_R 的影响时，可由式（12）计算得到。

$$t_R = 0.2618 + 0.0539C_b - 0.1755C_b^2 \quad (12)$$

当考虑螺旋桨和船体对舵的干涉作用时， F_N 计算公式如式（13）所示。

$$F_N = \frac{1}{2} \rho \frac{6.13\lambda}{\lambda + 2.25} A_d U_R^2 \cdot \sin \alpha_R \quad (13)$$

螺旋桨的轴向诱导速度使得舵处于桨尾流中舵效有所提高。计算桨轴向诱导速度一般有两种理论方法：动量理论方法和升力线理论方法。升力线理论方法极为复杂，在船舶操纵领域很少采用。一般利用动量理论配以模型试验修正的方法计算桨轴向诱导速度，进而求得桨尾流中舵的有效来流速度。有效来流速度 U_R 具体如式（14）和（15）计算得到。

$$U_R = V(1 - w_R) \sqrt{1 + c_1 g(s)} \quad (14)$$

$$g(s) = \frac{\eta k s [2 - (2 - k_R)s]}{(1 - s)^2} \quad (15)$$

滑脱比由式（16）计算得到。

$$s = 1 - \frac{(1 - w_p)u}{np} \quad (16)$$

η 为系数，由式（17）计算得到。

$$\eta = D_p / h_R \quad (17)$$

k_R 由式（18）计算得到。

$$k_R = \frac{0.6(1 - w_p)}{1 - w_R} \quad (18)$$

舵的有效伴流分数由式（19）计算得到。

$$w_R = w_{R0} \exp(-4.0 \cdot \beta_p^2) \quad (19)$$

有效舵角由式（20）计算得到。

$$\alpha_R = \delta + \delta_0 - \gamma \beta_R \quad (20)$$

零正压舵角由式（21）计算得到。

$$\delta_0 = -(2s + 0.6) \quad (21)$$

舵处漂角由式（22）计算得到。

$$\beta_R = \beta + Lr/V \quad (22)$$

整流系数由式（23）计算得到。

$$\gamma = C_p C_s \quad (23)$$

系数 C_p 可由式（24）计算得到。

$$C_p = \frac{1 - s}{\sqrt{1 + 0.6\eta(2 - 1.4s)s}} \quad (24)$$

系数 C_s 可由式（25）计算得到。

$$C_s = \begin{cases} 0.45\beta_R, \beta_R \leq \frac{10}{9} \\ 0.5, \beta_R \geq \frac{10}{9} \end{cases} \dots\dots\dots (25)$$

6.2.3 浮力模型

船体模型由三角网格表示,切割得到水下部分网格,利用四面体的有符号体积方法求解排水体积与浮心,即可得到作用于船体模型的浮力与浮力矩。四面体的有符号体积方法具体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,加权平均得到浮心位置。

6.3 船舶操纵性方程求解

6.3.1 MMG 模型

船舶操纵性方程采用MMG模型,即分离型船舶操纵性模型。MMG模型把作用在船-桨-舵系统上的水动力分为作用在船、桨、舵三者之上的三部分之和,并用水动力干扰系数表达它们之间的水动力相互作用。三自由度MMG方程表达式如式(26):

$$\begin{cases} (m+m_x)\ddot{u} - (m+m_y)vr = X_H + X_R + X_P + \sum X_{ice} \\ (m+m_y)\ddot{u} + (m+m_z)ur = Y_H + Y_R + Y_P + \sum Y_{ice} \\ (I_z + J_{zz})\dot{r} = N_H + N_R + N_P + \sum N_{ice} \end{cases} \dots\dots\dots (26)$$

6.3.2 附加质量与附加惯性矩

m_x, m_y, J_{zz} 可由由式(27)~式(29)所示回归公式计算得到。

$$m_x = \frac{m}{100} \left[0.398 + 11.97C_b \left(1 + 3.73 \frac{T}{B} \right) - 2.89C_b \frac{L}{B} \left(1 + 1.13 \frac{T}{B} \right) + 0.175C_b \left(\frac{L}{B} \right)^2 \left(1 + 0.541 \frac{T}{B} \right) - 1.107 \frac{L}{B} \cdot \frac{T}{B} \right] \dots\dots\dots (27)$$

$$m_y = m \left[0.882 - 0.54C_b \left(1 - 1.6 \frac{T}{B} \right) - 0.156 \frac{L}{B} \left(1 - 0.673C_b \right) + 0.826 \frac{L}{B} \cdot \frac{T}{B} \left(1 - 0.678 \frac{T}{B} \right) - 0.638C_b \frac{L}{B} \cdot \frac{T}{B} \left(1 - 0.669 \frac{T}{B} \right) \right] \dots\dots\dots (28)$$

$$J_{zz} = \frac{mL^2}{100^2} [33 - 76.85C_b(1 - 0.784C_b) + 3.43 \frac{L}{B} (1 - 0.63C_b)]^2 \dots\dots\dots (29)$$

6.3.3 船体水动力导数

6.3.3.1 流体动力模型

船体水动力 X_H, Y_H, N_H 计算主要考虑一般工况,即常速小漂角情况,流体动力模型采用井上模型,如式(30)所示。

$$\begin{cases} X_H = X'_{vv}v'^2 + X'_{vr}v'r' + X'_{rr}r'^2 + X'_{uu}u'^2 \\ Y_H = Y'_v v' + Y'_r r' + Y'_{vv}v|v'| + Y'_{vr}v'|r'| + Y'_{rr}r'|r'| \\ N_H = N'_v v' + N'_r r' + N'_{rr}r'^2 + N'_{vr}v'^2 r' + N'_{vrr}v'r'^2 \end{cases} \dots\dots\dots (30)$$

6.3.3.2 直航阻力

船舶直航阻力在船舶流体阻力中占有较大的比重,直航时船舶所受阻力求解准确性能够对船舶操纵性预报精确性起到直接影响。直航阻力系数 X'_{uu} 可由式(31)计算得到。

$$X'_{uu} = -\frac{S}{LT} C_t \dots\dots\dots (31)$$

船体湿表面积 S 一般采用经验公式估算船体湿表面积。常用的减量法经验计算公式为如式(32)所示:

$$S = LBT \left(\frac{1}{T} + \frac{2}{B} + \frac{2}{L} \right) - 4.4 \left(\frac{1}{C_b} - 1 \right)^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots (32)$$

船舶总阻力系数 C_t 可由式(33)计算得到。

$$C_t = C_f + C_r + \Delta C \dots\dots\dots (33)$$

船舶摩擦阻力系数 C_f 采用1957 ITTC公式计算。该公式为1957年国际船模实验池会议提出的实船-船模换算公式,如式(34)所示。

$$C_f = \frac{0.075}{(\lg Re - 2)^2} \dots\dots\dots (34)$$

粗糙度补贴系数 ΔC 可根据表3选取。

表3 粗糙度补贴系数

船长 m	$\Delta C \times 10^3$
50~150	0.35-0.4, 可取为 0.375
150~210	0.2
210~260	0.1
260~300	0
300~350	-0.1
350~450	-0.25

雷诺数 Re 由式（35）计算得到。

$$Re = \frac{VL}{\nu} \dots\dots\dots (35)$$

剩余阻力系数 C_r 主要由兴波阻力和涡流阻力构成，而这两部分阻力目前还无法精确计算，只能依据适合的船型选择相应的阻力图谱进行近似估算。常用图谱的有泰勒图谱、系列60图谱和兰波-奥芬凯勒图谱。

6.3.3.3 线性水动力导数

线性水动力导数可采用如式（36）所示的井上近似公式进行计算。

$$\begin{cases} Y'_v = -\left(\frac{\pi}{2}\lambda + 1.4C_b\frac{B}{L}\right)(1 + 0.67\tau') \\ Y'_r = \frac{\pi}{4}\lambda(1 + 0.80\tau') \\ N'_v = -\lambda(1 - 0.27\frac{\tau'}{l_v}) \\ N'_r = -(0.54\lambda - \lambda^2)(1 + 0.30\tau') \end{cases} \dots\dots\dots (36)$$

展弦比 λ 可由式（37）计算得到，与船长和船舶平均吃水相关。

$$\lambda = \frac{2T}{L} \dots\dots\dots (37)$$

平均吃水 T 可由式（38）计算。

$$T = \frac{d_a + d_f}{2} \dots\dots\dots (38)$$

无量纲吃水差可由式（39）计算得到。

$$\tau' = \frac{d_a - d_f}{T} \dots\dots\dots (39)$$

系数 l_v 可由式（40）计算得到。

$$l_v = \lambda / \left(\frac{\lambda\pi}{2} + \frac{1.4C_bB}{L} \right) \dots\dots\dots (40)$$

6.3.3.4 非线性水动力导数

船长方向的非线性水动力导数由式（41）计算得到：

$$\begin{cases} X'_{vv} = 0.4\frac{B}{L} - 0.006\frac{L}{T} \\ X'_{vr} = (1.11C_b - 1.07)m_y \\ X'_{rr} = 0.0003\frac{L}{T} \end{cases} \dots\dots\dots (41)$$

船宽方向的非线性水动力导数可由如式（42）所示的回归公式进行计算。

$$\begin{cases} X'_{vv} = 0.048265 - 6.293(1 - C_b)\frac{T}{B} \\ X'_{vr} = -0.3791 + 1.28(1 - C_b)\frac{T}{B} \\ X'_{rr} = 0.0045 - 0.445(1 - C_b)\frac{T}{B} \end{cases} \dots\dots\dots (42)$$

转首力矩非线性水动力导数同样可由回归公式计算，如式（43）所示。

$$\begin{cases} N'_{rr} = -0.0805 + 8.6092 \left(C_b \frac{B}{L} \right)^2 - 36.9816 \left(C_b \frac{B}{L} \right)^3 \\ N'_{vvr} = -6.0856 + 137.4735 \left(C_b \frac{B}{L} \right) - 1029.514 \left(C_b \frac{B}{L} \right)^2 + 2480.6082 \left(C_b \frac{B}{L} \right)^3 \dots\dots\dots (43) \\ N'_{vrr} = -0.0635 + 0.04414 \left(C_b \frac{T}{L} \right) \end{cases}$$

6.4 战术直径计算

提取仿真得到的船舶位姿时历数据，船舶在转向 180° 时，计算此时船体重心与初始航向之间的垂直距离，即为战术直径。

7 评估结果的评定与验证

评估方法计算出的战术直径记为 R_{cal} ，预报误差不超过10%。用户方提供的要求的战术直径为 $[R_{allow}]$ 。当 $R_{cal} \leq [R_{allow}]$ ，回转性能满足要求。



参 考 文 献

- [1] 中国船级社, 钢质海船入级规范, 2025
- [2] 中国船级社, 重型破冰船规范, 2024
- [3] 国际海事组织 (IMO), 船舶操纵性标准 (Standards for ship manoeuvrability)

