

引用格式: 杨霄楠, 施海天, 柴威, 等. 基于离散元法的极地船舶斜航冰载荷特性分析 [J]. 中国舰船研究, 2026, 21(2): 349–357.  
YANG X N, SHI H T, CHAI W, et al. Study on ice load characteristics of polar ships during oblique sailing based on discrete element method [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2026, 21(2): 349–357 (in Chinese).

# 基于离散元法的极地船舶斜航冰载荷特性分析



扫码阅读全文

杨霄楠<sup>1</sup>, 施海天<sup>2</sup>, 柴威<sup>\*1</sup>, 吕成<sup>2</sup>, 封培元<sup>2</sup>, 吴达<sup>3,4</sup>

1 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063

2 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011

3 武汉理工大学 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063

4 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063

**摘要:** [目的] 旨在开展斜航作业下船舶冰载荷的准确预报和冰载荷特性研究。[方法] 以某极地船型为研究对象, 应用离散元法对碎冰区船舶斜航状态下的冰载荷进行预报。首先, 针对目标船型建立数值模型, 通过对比试验数据验证其准确性; 其次, 设定不同的斜航角度、航速及冰厚, 计算斜航过程中船舶受到的冰载荷; 最后, 分析不同漂角和冰厚条件下船舶冰载荷的分布特性及变化趋势。[结果] 研究显示, 随着漂角的增大, 船舶所受碎冰阻力及碎冰侧向力呈非线性增长; 船模在航速 0.6 m/s、海冰密集度 70%、冰厚 0.014 97 m 条件下, 在斜航工况 15°漂角下, 相比直航工况, 碎冰阻力与碎冰侧向力增幅分别达 4.25 倍和 6.04 倍; 船舶在大于 10°漂角工况斜航作业下, 提高航速或进入冰厚较大区域需注意碎冰阻力及迎冰侧碎冰侧向力突变可能造成的不利影响。[结论] 所做研究可为船舶在极地碎冰区斜航工况下的安全性评估提供数据支持, 为斜航工况下极地船舶冰载荷预报与研究提供参考。

**关键词:** 极地船舶; 破冰船; 离散元法; 斜航; 冰载荷; 碎冰; 有限差分法

**中图分类号:** U674.81

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.04269

## 0 引言

随着全球气候变暖, 海冰加速融化, 北极地区船舶航行数量与航行窗口期呈现增长趋势<sup>[1]</sup>。对于极地航行船舶, 由不同大小和形状的破碎冰块组成的浮碎冰区域是其遭遇的典型作业场景之一<sup>[2-5]</sup>。对浮碎冰区域船舶冰载荷特性进行研究, 有助于提升船舶在极地复杂海洋环境下的航行安全, 可为极地航行路线规划提供参考。

目前, 关于碎冰区极地船舶冰载荷预报的研究主要集中于船舶直航工况, 其研究方法主要有经验公式、冰水池试验和数值模拟方法 3 种。在经验公式方面, Sazonov 等<sup>[6]</sup>提出了一种估算碎冰阻力的公式, 该公式是基于早期碎冰航道中预报冰阻力的半经验方法, 其参考了 5 种不同的船舶模型试验数据, 并对船体参数影响进行了考虑。但该公式更多地关注狭窄航道中碎冰对船舶阻力的

影响, 在更广泛的碎冰区域中的应用还有待考证。

冰水池试验是目前最认可的一种方法。Jeong 等<sup>[6]</sup>在冰池中开展了 IA 冰级和 IB 冰级船舶在碎冰区的阻力试验, 在与芬兰-瑞典冰级规则 (Finnish-Swedish ice class rules, FSICR) 公式进行对比验证其准确性后, 开展了不同航道宽度、冰密集度和冰厚对碎冰区阻力影响的试验研究<sup>[7]</sup>。若没有冰水池试验设施, 在常规水池中加入非冻结模型冰进行试验也是一种替代选择。Xue 等<sup>[8]</sup>使用非制冷聚丙烯模型冰, 开展了船体与碎冰之间的局部冰载荷以及船舶总阻力预报研究。但水池试验存在成本较高以及在冰面上试验次数受限的缺点。

数值模拟方法是目前研究领域中最常用的方法之一, 主要包括有限元法和离散元法等。Yang 等<sup>[9]</sup>基于有限元软件 LS-DYNA 开展了碎冰阻力预报, 并与 DuBrovin<sup>[10]</sup>的经验公式进行了对比。

收稿日期: 2024-11-13 修回日期: 2025-03-04 网络首发时间: 2025-03-10 09:38

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52201379); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (3120624109); 上海市船舶工程重点实验室开放基金资助项目 (SE202305)

作者简介: 杨霄楠, 男, 2000 年生, 硕士生。研究方向: 极地船舶。E-mail: xnyang20@163.com

柴威, 男, 1988 年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 极地船舶。Email: chawei@whut.edu.cn

\*通信作者: 柴威

然而,有限元法无法模拟船舶的水阻力,采用该方法开展碎冰区域的船舶冰载荷研究计算精度较低。采用离散元法可以很好地解决碎冰非连续性问题,在碎冰模拟方面具有明显的优势。徐雪松等<sup>[11]</sup>研究平板结构在碎冰与水耦合作用下的运动机理,提出碎冰的4种运动模式(堆积、滑移、翻转和跟随),并探讨了碎冰密集度和平板倾角对平板受碎冰阻力及其运动模式的影响。季顺迎等<sup>[12]</sup>采用离散元法构建三维圆盘状碎冰模型,开发用于模拟海冰与船体结构相互作用的黏弹性接触模型,并对船舶与碎冰之间的相互作用机制进行了系统研究。黄家煜等<sup>[13]</sup>采用离散元法对碎冰进行建模,分析了不同航速和碎冰环境对船体区域冰压力的影响。Zhong等<sup>[14]</sup>通过离散元法建立船舶碎冰航行数值模型,研究不同航速和冰密集度下船体冰压力的分布及其概率特性,并与试验进行了对比验证。王世超等<sup>[15]</sup>基于离散元法,提出采用HMIGA算法构建碎冰场,并对KCS标准模型进行船型优化,有效降低了碎冰阻力。

综上所述,国内外学者针对极地船舶碎冰区直航工况冰载荷特性做了大量研究,但斜航作为典型的工况,目前针对该工况下冰载荷特性的研究较少。结合以上现状,本文拟采用离散元法对碎冰区中某极地船在不同漂角下的斜航运动进行数值模拟,系统地开展冰载荷特性预报研究,统计船舶在斜航过程中所受碎冰阻力与侧向力的平均值和标准差,量化分析船舶碎冰区斜航过程中冰载荷的特性规律,为斜航工况下极地船舶冰载荷预报与研究提供参考。

## 1 理论基础

本文中的数值模拟研究遵循连续性方程和动量守恒方程的要求,使用标准 $k-\varepsilon$ 模型求解湍流问题。利用STAR-CCM+软件离散元法模块的单向耦合和双向耦合模式,可以实现冰与水之间的动量和能量交换。以0.7 m/s航速、0.014 97 m冰厚(实尺度下为0.9 m)、15°漂角工况为例,经验证,双向耦合碎冰阻力平均值为6.80 N,单向耦合碎冰阻力平均值为7.45 N,误差为9.55%,该工况下碎冰的不确定度为9.16%。在相同计算条件下,双向耦合下的计算时间为单向耦合下的2~3倍,因此,为了节省计算效率,采用单向耦合进行计算。

### 1.1 碎冰运动方程

在船-冰-水耦合作用过程中,模拟碎冰采用

基于拉格朗日框架的离散元法,碎冰的运动通常包含平动和旋转2种形式,其运动控制方程基于牛顿第二定律<sup>[16]</sup>。

动量守恒方程:

$$m \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_c \quad (1)$$

角动量守恒方程:

$$I \frac{d\boldsymbol{\omega}_p}{dt} = \mathbf{M}_f + \mathbf{M}_c \quad (2)$$

式中: $m$ 为碎冰颗粒的质量; $\mathbf{v}_p$ 为碎冰颗粒的速度; $\mathbf{F}_g$ 为碎冰颗粒的重力; $\mathbf{F}_f$ 为碎冰颗粒所受的流体力; $\mathbf{F}_c$ 为来自其他颗粒或船体的接触力; $I$ 为碎冰颗粒的惯性矩; $\boldsymbol{\omega}_p$ 为碎冰颗粒的角速度; $\mathbf{M}_f$ 为碎冰颗粒所受的扭矩; $\mathbf{M}_c$ 为来自其他颗粒或船体的扭矩。

### 1.2 接触力模型

使用线性弹簧模型计算冰-冰或船-冰相互作用的接触力 $\mathbf{F}_c$ ,线性弹簧模型广泛用于碎冰颗粒模型中,以求解接触力<sup>[16-18]</sup>。在线性弹簧接触模型时,弹簧提供弹性力,阻尼器提供黏性阻尼。结果,接触力 $\mathbf{F}_c$ 可以被分成沿着2个球体接触表面的法向和切向的2个分量,其中法向为沿着2个颗粒中心的连线,切向与之垂直,如图1所示。

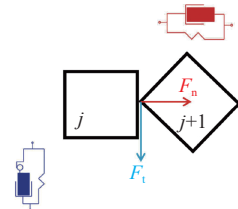


图1 弹簧-阻尼器接触模型

Fig. 1 Spring-damper contact model

法向分量和切向分量可以表示如下:

$$\mathbf{F}_c = F_n \mathbf{n} + F_t \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

式中: $F_n$ 为法向作用力; $F_t$ 为切向作用力; $\mathbf{n}$ ,  $\boldsymbol{\tau}$ 分别为法向方向和切向方向的单位向量。

当计算船-冰接触力时,可以将船舶颗粒视为具有无限直径的颗粒。此时,法向和切向分别垂直和切向于船体表面。

## 2 计算模型及方法验证

### 2.1 计算模型

本文计算模型选取为某极地船舶,其主要参数如表1所示。围绕船体建立数值水池,将流体

域设置为长  $7.84L$ 、宽  $2.40L$ 、高  $1.00L$ 。如图 2 所示, 在计算区域的高度方向, 水区域和空气区域的高度分别为  $0.543L$  和  $0.457L$ 。

表 1 船舶模型主要参数

Table 1 Principal dimensions of the scale ship model

参数	数值
缩尺比	60
总长 $L/m$	2.04
型宽 $B/m$	0.37
设计吃水 $D/m$	0.13

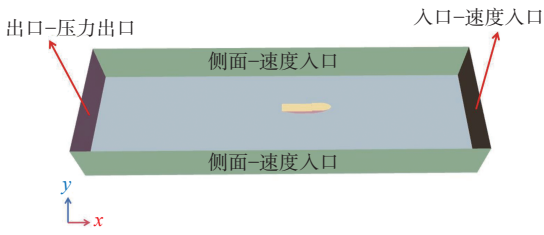


图 2 计算域划分图

Fig. 2 Division of the computational domain

划分网格时, 各漂角的网格尺寸保持不变。通过布尔减运算更新计算域网格。网格划分采用切割体网格。划分完成后, 总体网格单元数 209 万。为确保船体周围流场平滑过渡, 设置了 6 层棱柱层, 棱柱层的延伸率为 1.2。计算域及船体网格的划分如图 3 所示。

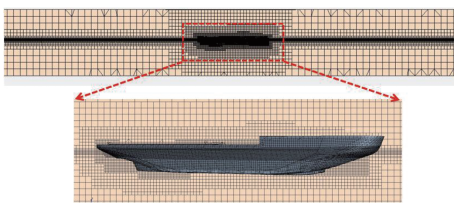


图 3 计算域及船体网格划分

Fig. 3 Computational domain and hull mesh generation

基于冰块不会发生破碎的假设不涉及海冰模型的弯曲失效, 为了节省计算资源, 每个冰单元的大小和形状一致, 每个碎冰只包含 1 个正方体单元, 碎冰主要参数如表 2 所示。模拟采用部件喷射器来产生碎冰, 喷射方向角度随机的碎冰颗粒。部件喷射器代表从各部件几何形状中提取的一系列喷射点, 这些点可以在部件上所定义点的一个子集, 碎冰颗粒从这些点中进行喷射, 从而实现造冰过程。

## 2.2 计算方法验证

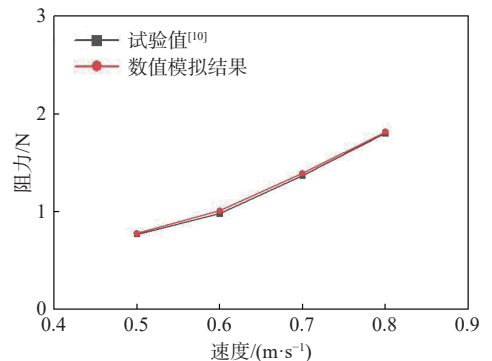
选取文献 [9] 中的直航工况模型试验结果对本文数值计算模型进行验证。本次验证的碎冰尺寸与试验中的非冻结冰尺寸一致, 碎冰边长为

表 2 碎冰颗粒主要参数

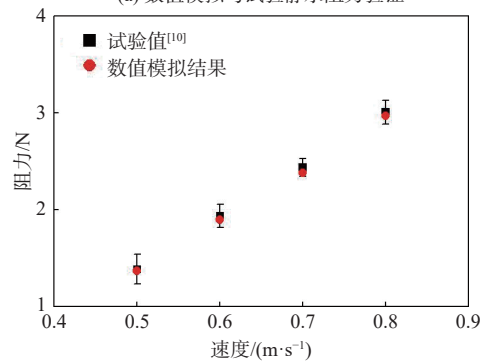
Table 2 Main parameters of the brash ice particle

参数	数值
缩尺比	60
密度 $(kg \cdot m^{-3})$	917.0
泊松比	0.3
杨氏模量 $/Pa$	$1.67 \times 10^7$
船-冰摩擦系数	0.138
冰-冰摩擦系数	0.29

$0.067 \text{ m}$  (实尺度下为  $4.0 \text{ m}$ ), 高度为  $0.01497 \text{ m}$  (实尺度下为  $0.9 \text{ m}$ )。验证选取 70% 的碎冰密集度, 在模型尺度下, 分别选取  $0.5, 0.6, 0.7$  和  $0.8 \text{ m/s}$  这 4 个航速进行敞水阻力与碎冰阻力验证。图 4 所示为静水及碎冰阻力数值模拟结果与试验数据的对比。由图可知, 静水阻力误差小于 5%, 碎冰阻力误差不超过碎冰的不确定度, 二者均具有较高的精度, 可以较好地模拟船舶在碎冰区航行时相关的冰载荷特性。



(a) 数值模拟与试验静水阻力验证



(b) 数值模拟与试验碎冰阻力验证

图 4 静水及碎冰阻力试验值与数值模拟结果对比

Fig. 4 Comparison between test values and numerical simulation results of hydrostatic and icebreaking resistance

本文将针对斜航状态下的冰载荷特性进行仿真。为了确保计算域和网格划分的准确性, 在保证计算精度和计算效率的情况下, 后续的计算均在模型尺度下进行。同时, 采用傅汝德及柯西相似定律保证碎冰模型与实际尺度在力学上的相似性<sup>[9]</sup>。

### 3 计算结果及分析

如图5所示, 漂角 $\alpha$ 为船首与 $x$ 轴的夹角。以航速0.6 m/s、冰厚0.014 97 m工况为例, 对船舶在斜航过程中的碎冰整体及局部分布情况进行说明, 如图6所示。

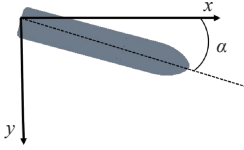


图5 漂角示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the drift angle

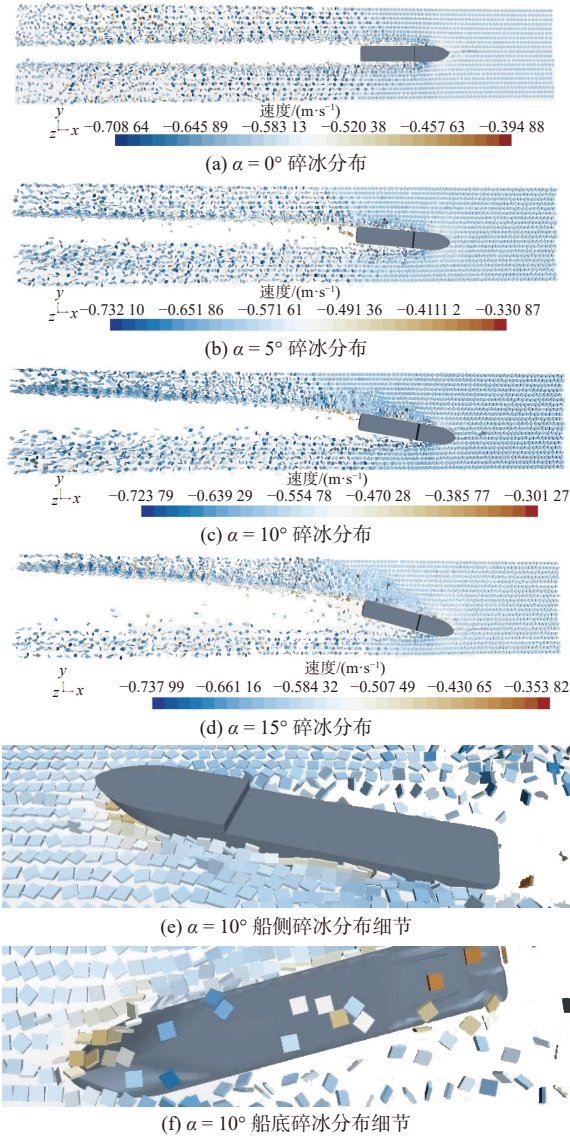


图6 斜航状态下的碎冰分布图

Fig. 6 Distributions of brash ice under oblique navigation conditions

如图6所示, 随着漂角的增大, 船舶迎冰侧碎冰堆积增加, 船-冰接触更加频繁, 部分碎冰滑移至船底与船体持续发生相互作用。对比图6(a)和图6(d)可知, 随着漂角的增大, 船舶尾迹无冰航道的宽度明显增加。

### 3.1 航速对斜航冰载荷的影响

#### 3.1.1 航速对船舶碎冰阻力的影响

船舶在0.6, 0.7 m/s速度下以不同漂角在碎冰区航行时所受的碎冰阻力时历曲线如图7所示。

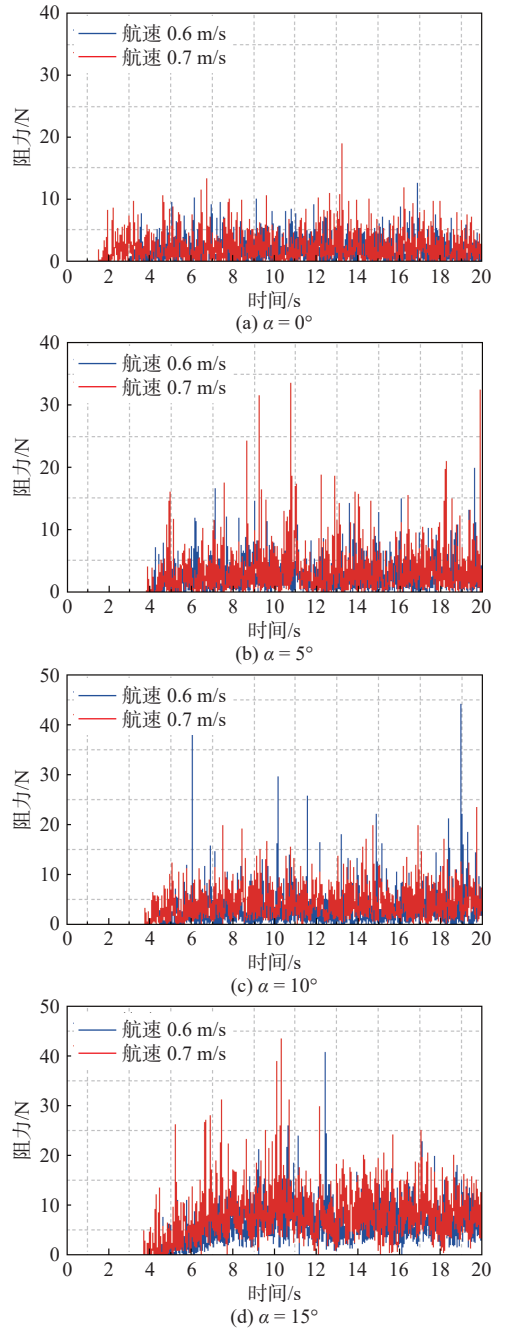


图7 不同速度和漂角下船舶所受碎冰阻力时历曲线

Fig. 7 Time history curves of icebreaking resistance for the ship at various speeds and drift angles

由图7可知, 碎冰开始与船体发生接触后, 由于船-冰碰撞和摩擦的随机性, 船舶所受碎冰阻力也呈现出波动性。随着漂角的增大, 冰块除了与船体发生摩擦作用外, 冰块的翻转、堆积等运动对船体造成的挤压载荷也会持续增大, 导致碎冰阻力峰值增加。不同速度下船舶的碎冰阻力平均值及标准差随漂角变化的曲线如图8所示, 图

中误差棒表示各工况下的阻力均值加上或是减去阻力的标准差。

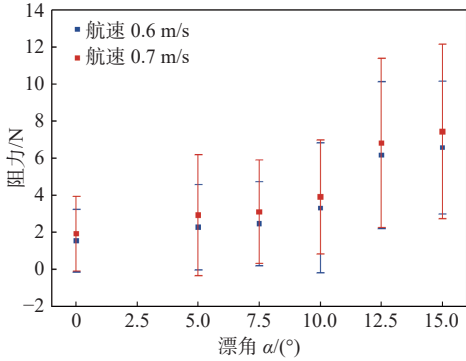


图 8 不同漂角下碎冰阻力平均值及标准差的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of the average values and standard deviations of icebreaking resistance at different drift angles

如图 8 所示, 船舶在 0.6, 0.7 m/s 速度下的碎冰阻力平均值随着漂角的增大, 整体变化趋势一致, 均呈非线性增长。当漂角  $\alpha$  在  $0^\circ \sim 10^\circ$  范围内时, 碎冰阻力增长缓慢, 接近于线性; 当漂角  $\alpha$  增至  $10^\circ \sim 12.5^\circ$  时, 碎冰阻力显著跃升。在小漂角下, 碎冰阻力增幅较大, 在  $\alpha = 5^\circ$  时增幅达 28.5%, 而在大漂角下其增幅相对较小。在 2 种航速下, 碎冰阻力标准差随着漂角的增大, 整体呈增大趋势。在 0.6 m/s 航速下, 当  $\alpha$  由  $7.5^\circ$  增大至  $10^\circ$  时, 碎冰不确定度增加, 导致标准差迅速增大; 在 0.7 m/s 航速下, 当  $\alpha$  由  $10^\circ$  增加至  $12.5^\circ$  时, 船-冰接触更加频繁、剧烈, 表现为标准差显著增大, 船舶碎冰阻力在此突增。当  $\alpha = 15^\circ$  时, 航速为 0.6, 0.7 m/s 时的碎冰阻力分别为直航工况的 4.25 倍和 3.86 倍。因此, 斜航状态下船舶所受的碎冰阻力问题值得关注。

### 3.1.2 航速对船舶所受碎冰侧向力的影响

船舶在 0.6, 0.7 m/s 速度下以不同漂角在碎冰区航行时所受的碎冰侧向力时历曲线如图 9 所示。由图可见, 在各漂角下, 船舶所受碎冰侧向力均呈现上、下波动的特性, 这是因为冰块在与船发生碰撞作用时冰块的运动姿态会发生变化, 部分冰块会产生翻转并沿船体表面滑行、通过, 还会有部分冰块被波浪排开, 导致冰块与船体不断发生加载-卸载, 致使碎冰侧向力呈现随机波动的特点。不同漂角下船舶碎冰侧向力平均值的变化曲线如图 10 所示。

由图 10 可知, 随着漂角的增大, 船舶所受碎冰侧向力呈非线性增长趋势。结合图 6 可知, 由于船舶迎冰侧碎冰堆积较多, 碎冰-船体接触力更强, 因此在相同航速下, 迎冰侧的侧向力整体大于非迎冰侧。相较于船舶是否迎冰, 航速对船舶所受碎冰侧向力的影响更显著, 在 0.7 m/s 航速

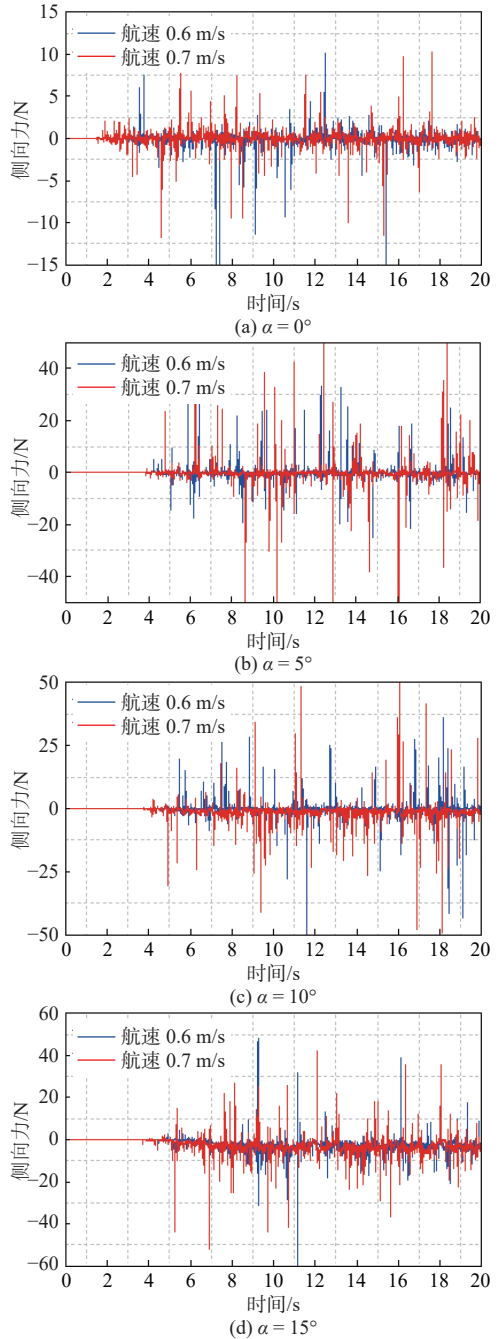


图 9 不同速度和漂角下船舶所受碎冰侧向力时历曲线

Fig. 9 Time history curves of icebreaking lateral force for the ship at various speeds and drift angles

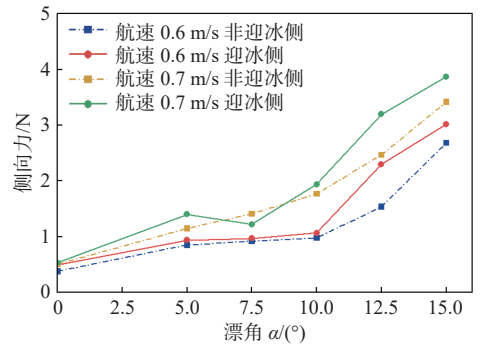


图 10 船舶碎冰侧向力平均值变化曲线

Fig. 10 Variation curves of the average values of icebreaking lateral force on ship

下非迎冰侧的侧向力大于0.6 m/s航速下迎冰侧的侧向力。

在0.6 m/s速度下,  $\alpha > 10^\circ$ 时侧向力显著增大;而在0.7 m/s速度下,  $\alpha$ 从 $5^\circ$ 增至 $7.5^\circ$ 时侧向力略微下降,但在 $\alpha = 7.5^\circ$ 后又快速上升。不同速度下漂角对侧向力的影响差异明显:当 $\alpha = 0^\circ$ 时,速度对侧向力的影响较小;当 $\alpha = 10^\circ$ 时增幅显著,达81.3%。因此,当船舶在 $\alpha = 10^\circ$ 及以上工况下增加速度时,需关注侧向力突增可能带来的航行风险。

## 3.2 冰厚对斜航冰载荷的影响

### 3.2.1 冰厚对船舶所受碎冰阻力的影响

船舶在冰厚为0.011 67和0.014 97 m时以不同的漂角在碎冰区航行时所受碎冰阻力时历曲线如图11所示。在不同冰厚下,船舶碎冰阻力平均值随漂角的变化如图12所示。

由图11和图12可知,随着漂角的增大,船舶碎冰阻力平均值呈非线性增长;碎冰阻力标准差随着漂角的增大,总体呈增大趋势。当冰厚为0.014 97 m时,  $\alpha > 10^\circ$ 时碎冰阻力显著增加;在较小的冰厚下,小块的碎冰更加不稳定,碎冰阻力标准差更大。当冰厚为0.011 67 m时,  $\alpha < 7.5^\circ$ 时阻力增长较缓,而在 $\alpha > 7.5^\circ$ 时近似呈线性增长。在相同漂角下,不同冰厚对碎冰阻力的影响差异明显:漂角 $\alpha$ 超过 $10^\circ$ 后,伴随着冰厚的增加,碎冰阻力显著跃升,最高增幅可达42.9%。因此,需要关注较大漂角以及更厚碎冰区对船舶航行的影响。在不同冰厚条件下,当 $\alpha = 7.5^\circ$ 时2种冰厚标准差均出现了下降情况。

### 3.2.2 冰厚对船舶所受碎冰侧向力的影响

船舶在冰厚为0.011 67, 0.014 97 m时以不同的漂角在碎冰区航行时所受碎冰侧向力时历曲线如图13所示。在不同冰厚下,船舶碎冰侧向力平均值随漂角的变化如图14所示。

由图13和图14可知,随着漂角的增大,船舶两侧的碎冰侧向力峰值随机波动并增加;船舶迎冰侧的侧向力整体大于非迎冰侧。当 $\alpha < 10^\circ$ 时,在2种冰厚条件下碎冰迎冰侧的侧向力随漂角变化的趋势相似,均在 $\alpha = 7.5^\circ$ 时出现下降;当 $\alpha > 10^\circ$ 时,0.014 97 m冰厚下船舶所受碎冰侧向力的增幅更大。随着冰厚的增加,  $\alpha = 15^\circ$ 时碎冰侧向力的增幅最大,达24.4%。因此,在大漂角工况下且冰厚增大时,需要关注迎冰侧碎冰侧向力突然增加时对航行的影响。

## 4 结论

本文采用离散元法建立了极地船舶碎冰区斜

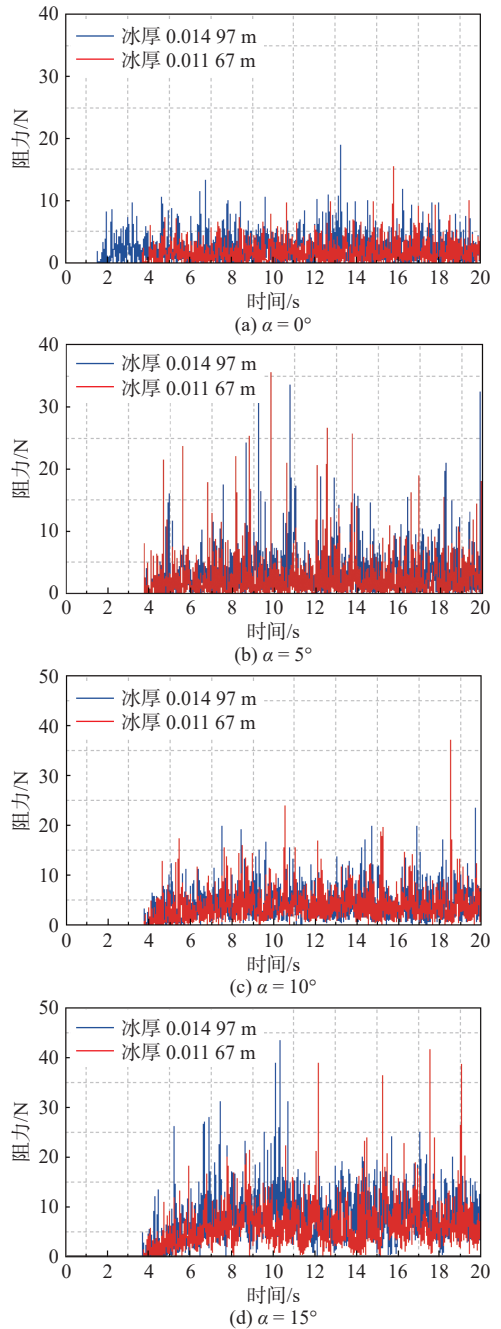


图11 不同冰厚和漂角下船舶所受碎冰阻力时历曲线

Fig. 11 Time history curves of icebreaking resistance for the ship at various ice thicknesses and drift angles

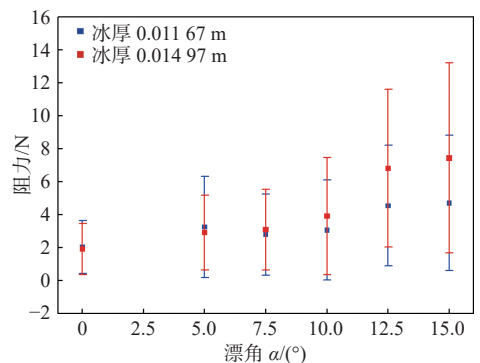


图12 不同漂角下碎冰阻力平均值及标准差变化曲线

Fig. 12 Variation curves of the average values and standard deviations of icebreaking resistance at different drift angles

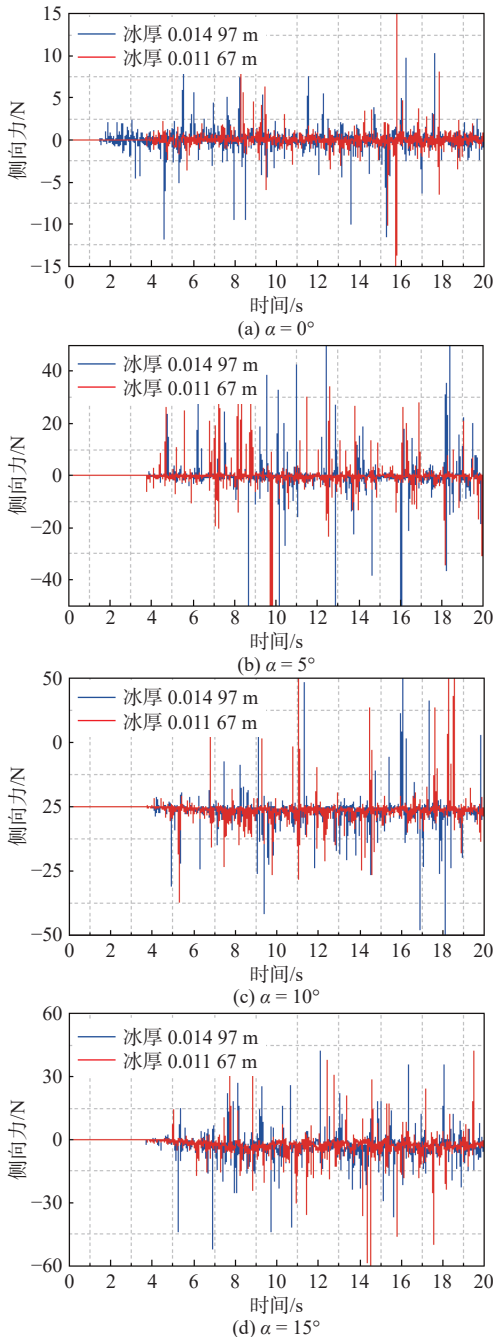


图 13 不同冰厚和漂角下船舶所受碎冰侧向力时历曲线

Fig. 13 Time history curves of icebreaking lateral force for the ship at various ice thicknesses and drift angles

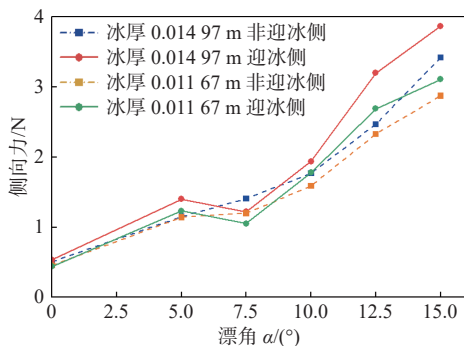


图 14 船舶碎冰侧向力平均值变化曲线

Fig. 14 Variation curves of the average values of icebreaking lateral force on ship

航数值模型,研究了斜航工况下船舶在碎冰区的冰载荷特性,主要得到如下结论:

1) 对比直航工况,当漂角  $\alpha$  增大时,船舶尾迹无冰航道宽度增加,迎冰侧碎冰堆积增多,与船体的接触作用增强,船舶所受碎冰阻力及碎冰侧向力均显著增加。在航速 0.6 m/s、海冰密集度 70%、冰厚 0.014 97 m 条件下,当  $\alpha = 15^\circ$  时,船舶碎冰阻力及碎冰侧向力分别为直航工况的 4.25 倍和 6.04 倍。

2) 在大漂角工况下,航速的增加使船舶受到的碎冰阻力和碎冰侧向力显著提高,当  $\alpha = 5^\circ$  时,碎冰阻力的增幅为 28.5%,当  $\alpha = 10^\circ$  时,碎冰侧向力的增幅达 81.3%。因此,当船舶在碎冰区以较高航速航行时,在部分漂角条件下需谨慎操作,以防止突发碎冰阻力或碎冰侧向力增加带来的潜在风险。

3) 在大漂角工况下,冰厚的增加显著影响船舶所受碎冰阻力及碎冰侧向力,当  $\alpha = 12.5^\circ$  时,碎冰阻力的增幅为 42.9%;当  $\alpha = 15^\circ$  时,碎冰侧向力的增幅为 24.4%。因此,在大漂角和厚冰环境下,应关注碎冰阻力和碎冰侧向力的变化,以确保航行的平稳与安全。

#### 参考文献:

- [1] NG A K Y, ANDREWS J, BABB D, et al. Implications of climate change for shipping: opening the Arctic seas[J]. WIREs Climate Change, 2018, 9(2): e507.
- [2] CHAI W, LEIRA B J, HØYLAND K V, et al. Statistics of thickness and strength of first-year ice along the Northern Sea Route[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2021, 26(2): 331–343.
- [3] LUO W Z, JIANG D P, WU T C, et al. Numerical simulation of an ice-strengthened bulk carrier in brash ice channel[J]. Ocean Engineering, 2020, 196: 106830.
- [4] 何林, 柴威, 余象鹏, 等. 极地船舶冰载荷随机特性研究综述[J]. 船舶力学, 2023, 27(7): 1109–1117.  
HE L, CHAI W, YU X P, et al. Review on random nature of ice loads for Arctic ships[J]. Journal of Ship Mechanics, 2023, 27(7): 1109–1117 (in Chinese).
- [5] SAZONOV K, DOBRODEEV A. Ice resistance assessment for a large size vessel running in a narrow ice channel behind an icebreaker[J]. Journal of Marine Science and Application, 2021, 20(3): 446–455.
- [6] JEONG S Y, JANG J, KANG K J, et al. Implementation of ship performance test in brash ice channel[J]. Ocean Engineering, 2017, 140: 57–65.
- [7] JEONG S Y, KIM H S. Study of ship resistance characteristics in pack ice fields[C]//25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Con-

- ditions. Delft, Netherlands: POAC, 2019: 9-13.
- [8] XUE Y Z, ZHONG K, NI B Y, et al. A combined experimental and numerical approach to predict ship resistance and power demand in broken ice[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 292: 116476.
- [9] YANG B Y, ZHANG G Y, HUANG Z G, et al. Numerical simulation of the ice resistance in pack ice conditions[J]. *International Journal of Computational Methods*, 2020, 17(1): 1844005.
- [10] DUBROVIN O V, ALEKSANDROV M, MOOR R. Calculation of brash ice resistance based on model testing [M]. Translation Department of Naval Architecture and Marine Engineering, University of Michigan, 1970.
- [11] 徐雪松, 李鸿远, 吴嘉蒙, 等. 平板-碎冰-水耦合作用下的碎冰运动机理研究 [J]. *中国造船*, 2023, 64(2): 95-103.
- XU X S, LI H Y, WU J M, et al. Research on movement mechanism of crushed ice coupled with plate and water[J]. *Shipbuilding of China*, 2023, 64(2): 95-103 (in Chinese).
- [12] 季顺迎, 李紫麟, 李春花, 等. 碎冰区海冰与船舶结构相互作用的离散元分析 [J]. *应用力学学报*, 2013, 30(4): 520-526.
- JI S Y, LI Z L, LI C H, et al. Analysis of interaction between ice floe and ship hull with discrete element method in broken-ice field[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2013, 30(4): 520-526 (in Chinese).
- [13] 黄家煜, 周利, 刘仁伟, 等. 航道碎冰条件下极地船舶冰压力分布特性 [J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(2): 53-61.
- HUANG J Y, ZHOU L, LIU R W, et al. Distribution characteristics of polar ship ice pressure in pack ice channel[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(2): 53-61 (in Chinese).
- [14] ZHONG K, NI B Y, LI Z Y, et al. Direct measurements and CFD simulations on ice-induced hull pressure of a ship in floe ice fields[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 272: 113523.
- [15] 王世超, 刘刚. 考虑碎冰阻力和静水阻力的高效船型多目标优化方法 [J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(6): 97-107.
- WANG S C, LIU G. Efficient ship hull multi-objective optimization method considering ice resistance and calm water resistance[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(6): 97-107 (in Chinese).
- [16] Siemens PLM Software. Simcenter STAR-CCM+® Documentation[M]. Plano: Siemens Digital Industries Software, 2020.
- [17] JOHNSON K L. Contact mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [18] DI RENZO A, DI MAIO F P. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes[J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, 59(3): 525-541.

## Study on ice load characteristics of polar ships during oblique sailing based on discrete element method

YANG Xiaonan<sup>1</sup>, SHI Haitian<sup>2</sup>, CHAI Wei<sup>1</sup>, LÜ Cheng<sup>2</sup>, FENG Peiyuan<sup>2</sup>, WU Da<sup>3,4</sup>

1 School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

2 Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China

3 National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

4 Intelligent Transport System Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

**Abstract:** [ **Objective** ] As global warming accelerates the melting of sea ice, the Arctic region witnesses an increase in ship navigation. The brash ice area, composed of brash ice of various sizes and shapes, is a common operational scenario for polar ships. Understanding the ice load characteristics of polar ships during oblique navigation in brash ice regions is crucial. This can enhance ship navigation safety in the complex polar marine environment, provide a reference for polar navigation route planning, and fill the gap in the current research that mainly focuses on straight-sailing conditions. [ **Method** ] This study selects a specific type of polar ship as the research object and utilizes the discrete element method (DEM) to predict the ice loads on the ship during oblique navigation through brash ice regions. First, a numerical model of the target ship is established. The model parameters include a ship model with a scale ratio of 60, a total length of 2.04 m, a beam of 0.37 m, and a design draft of 0.13 m. The ice particles have a density of 917.0 kg/m<sup>3</sup>, a Poisson's ratio of 0.3, and other specific properties. The accuracy of the model is verified by comparing it with the experimental results from the literature under the straight-sailing condition. Then, different oblique-sailing angles (0°–15°), speeds (0.6, 0.7 m/s), and ice thicknesses (0.011 67, 0.014 97 m) are set. The ice-load calculation is carried out

based on the momentum conservation equation, angular momentum conservation equation, and the linear spring contact force model in the DEM. [ **Results** ] The results show that as the drift angle increases, the ice-breaking resistance and lateral force on the ship increase non-linearly. For example, at a speed of 0.6 m/s, an ice concentration of 70%, and an ice thickness of 0.014 97 m, when the drift angle is 15°, the ice-breaking resistance and lateral force increase by 4.25 times and 6.04 times respectively, compared to the straight-sailing condition. In terms of speed, when the drift angle is between 0° and 10°, the ice-breaking resistance increases slowly, but when it exceeds 10°, it increases significantly. The lateral force also increases non-linearly, and the influence of speed on the lateral force is more significant than whether the ship is on the ice-facing side. Regarding the influence of ice thickness, when the drift angle is greater than 10°, the ice-breaking resistance and lateral force increase significantly as the ice thickness increases. [ **Conclusion** ] In conclusion, this research provides reliable data support for the safety assessment of ships during oblique navigation in polar brash ice regions. It offers a valuable reference for predicting and studying ice loads on polar ships under such conditions. Ship operators should be cautious when increasing speed or entering thicker ice areas, especially when the drift angle is greater than 10°. This is to avoid potential risks caused by sudden changes in ice-breaking resistance and lateral force, ensuring the safe and stable navigation of polar ships in complex ice-covered waters.

**Key words:** polar ship; icebreakers; discrete element method; oblique sailing; ice load; brash ice; finite difference method

## 相关论文

- [1] 赵瑾, 王燕舞, 李哲, 等. 船首结构冰致动力响应的准静态等效研究 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(6): 158–166. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03074>
- [2] 宗智, 陈昭场. 碎冰阻力的替代试验及其变化规律研究 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 196–203. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02847>
- [3] 余朝歌, 田于逵, 王纬波. 平整冰层中海工结构冰载荷研究方法综述 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(5): 39–53. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02084>
- [4] 何帅康, 陈晓东, 孔帅, 等. 基于动力效应的船体远场冰载荷测量与识别 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(5): 54–63. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02065>
- [5] 孔帅, 季顺迎, 季少鹏, 等. 基于高性能离散元方法的极区浮式平台冰载荷数值分析 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(5): 64–70. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02192>
- [6] 杨薛航, 王燕舞, 李鹏飞, 等. 冰载荷作用下舷侧骨架典型节点有限元分析 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(5): 71–77. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02196>
- [7] 王超, 封振, 李兴, 等. 航行于碎冰区船舶冰阻力与冰响应探析 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(1): 73–78. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.3969/j.issn.1673-3185.2018.01.011>
- [8] 龚榆峰, 张正艺, 刘敬喜, 等. 基于 ABAQUS 的海冰单元开发及冰载荷直接计算法 [J]. 中国舰船研究, 2017, 12(3): 75–85. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.3969/j.issn.1673-3185.2017.03.011>