文章编号：1007−7294(2026)08−1234−11

碎冰中船舶斜航运动船体冰水动力数值计算研究

赵桥生[1,2]，国　威[2]，任梦晨[2]，修苑人[2]
（1. 天津大学，天津 300072；2. 中国船舶科学研究中心，江苏 无锡 214082）

摘要：本文基于 CFD–DEM 方法对碎冰域中船舶斜航时的冰水动力进行了数值预报。计算结果表明，与定常、稳定的水动力部分相比，时域冰力呈现非定常、随机脉冲群的特征。文中对这一特征形成的机理进行了阐述，并根据船舶巨大惯性的特点，提出了以该船操舵频率为界，将冰力分成用于运动预报的低频量，以及用于振动及结构损伤评估的高频量。鉴于滤波后的低频冰力依然是随机量，本文除了继续采用传统的“时间平均法”提取冰水动力的解析表达式外，还提出了一种“随机取数法”，用于提取时域曲线中不同漂角或角速度对应的冰力。因此，船舶的操纵运动预报将不再是一条确定的迹线，而是一个带区。文中创新性地开展了冰力机理分析、滤波频率选取原则以及冰力随机取数法等方面的研究，可供碎冰域中船舶操纵性预报参考。

关键词：船舶；碎冰；冰力；数值计算
中图分类号：U661.31　　**文献标识码：**A　　**doi:** 10.3969/j.issn.1007−7294.2026.08.002

Numerical calculation of ice force on ship’s oblique motion in brash ice

ZHAO Qiao−sheng[1,2], *GUO Wei*[2], *REN Meng−chen*[2], *XIU Yuan−ren*[2]
(1. Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: Using the CFD-DEM numerical simulation method, this paper predicts the hydrodynamic forces and ice forces on a ship sailing obliquely in brash ice region. The results show that, compared with the steady and stable hydrodynamic component, the ice force in the time domain exhibits characteristics of unsteady and random pulse groups. The mechanism of this feature was explained in the paper. Considering the large inertia of the ship, this paper proposed to divide the ice force into low-frequency components for motion prediction and high-frequency components for vibration and structural damage assessment based on the ship's steering frequency. Since the filtered low-frequency ice force remains random, a "random sampling method" was proposed alongside the conventional 'time averaging method', This new method extracts the ice force corresponding to different drift angles or angular velocities from the time-domain curve for analytical representation. Therefore, predicting the ship's maneuvering motion yields not a unique trajectory but a probability band instead. The paper investigates the mechanism of ice force, filtering frequency selection criteria, and a random sampling method of ice force. The findings can serve as a reference for maneuverability prediction in brash ice.

Key words: ship; broken ice; ice force; numerical simulation

收稿日期：2025−12−10
基金项目：重点研发计划项目(2021YFC2803401)
作者简介：赵桥生(1981–)，男，研究员；
国　威(1988–)，男，博士，高级工程师，通讯作者，E-mail: 291836470@qq.com。

0 引　言

自货船“永盛”轮在东北航道首航以来，我国商船已多次航行于东北航道。东北航道航行的一个典型特征是船舶需穿越海冰区。船舶在冰区航行风险较高，冰情严重时易出现冰困事故。船舶在冰区航行时，海冰广泛存在，使得船–冰作用力成为主要的环境载荷，船舶的航行性能也因此发生变化。船舶在冰区航行时，需由推进器或者舵提供足够的操纵力，以克服作用于船体的冰水作用力，从而保持或改变航向。因此，准确预报作用于船体的冰水载荷，是研究人员关注的重点，也是影响船舶冰区操纵性能的关键。

目前，国际上对于船舶在冰区航行的操纵性研究方法主要包括理论方法、数值计算、模型试验以及实船试验。在冰区航行船舶的设计初期，就需要对其在冰区中的操纵性能进行评估，而船–冰作用力是进行此项评估的基础。胡晓芳等[1] 分析了北极航道航行船舶对操纵性设计的特定需求，并开展了初步研究。Lau 等[2] 对破冰船在平整冰中的操纵性能进行了研究，该研究主要基于冰水池船模试验来测量冰力，进而确定船–冰作用力。基于冰水池模型试验的方法比较可靠但耗时较长，而且这种方法常因研究机构缺乏相关设施而难以开展。狄少丞等[3] 基于离散元方法对船舶在平整冰中的破冰阻力及回转特性进行了数值模拟。王超等[4] 对破冰船在平整冰中的操纵性进行了预报，其研究中冰力通过经验公式估算获得。冰区航行船舶的船体冰力估算方法很多，目前常用的有 Lindqvist 公式 [5]（1989）、Keinonen 公式[6]（1996）和 Riska 公式[7]（1997）。这些公式大多用于估算冰阻力，计算快捷；但其不足之处在于难以考虑船体线型对冰力的影响，也未能计入船舶操纵运动状态参数对冰力的影响。在船–冰相互作用力研究方面，也逐渐出现了离散元（DEM）[8]、DEM–FEM[9] 和 SPH–DEM 耦合数值方法[10]。Liu 等 [11] 采用离散元方法研究了船舶在层冰中航行的冰阻力，该方法使用扩展多面体的 DEM 模拟船–冰相互作用，其接触力和粘结破坏准则考虑了海冰的碰撞和破裂。上述研究大多针对层冰冰况，重点考虑了冰阻力以及冰载荷预报问题，所采用的方法以经验公式以及 DEM 模型为主。而对于碎冰工况，目前的研究都集中于冰阻力，针对操纵工况下的冰水耦合作用力的研究尚显不足。

碎冰中船舶操纵性预报需要考虑船–冰–水耦合作用，并计算碎冰作用下的船–冰相互作用力。本文将计算流体力学（CFD）方法和离散元（DEM）方法相结合，采用 CFD–DEM 耦合数值方法，对碎冰区中处于操纵状态下的船舶进行船体冰力和水动力的时域求解，并分析不同漂角下船体冰力时历特性，以期为船舶在碎冰区的操纵运动研究与分析提供基础。

1 数值方法验证及计算参数

1.1 数值方法与验证

离散元方法是一种用于研究非连续介质问题的数值模型方法，也被用于船舶冰区航行时的冰载荷计算，并在层冰破冰载荷计算方面取得了进展。该方法的一个关键是建立了离散单元间相互作用的力模型，该模型能较好地模拟冰块与船体之间的碰撞、摩擦等动力作用过程。

为了计算分析碎冰中作用在船舶上的船–冰作用力，本文采用 CFD–DEM 耦合数值方法模拟船舶在碎冰环境中的斜航运动受力。其中，通过 CFD 方法计算不可压缩流体作用于船舶的流体动力。船舶在碎冰环境下航行时，除受常规水动力外，还会受到由海冰作用产生的船–冰作用力。本文利用 DEM 方法计算船–冰作用力，模拟船舶与海冰之间的碰撞、摩擦等现象。

利用 CFD–DEM 数值模拟方法，可模拟船舶与碎冰接触时冰块的翻转、堆叠、滑动等现象。将小碎冰简化为具有一定直径和厚度的圆形，未考虑其二次破碎。采用线性弹簧接触模型来模拟单元间的接触，单元形状为圆盘，每个单元代表一块冰，碎冰线位移与角位移的运动遵循牛顿第二定律，基本方程简约表达式为

$$m_{\mathrm{p}}\frac{\mathrm{d}\vec{v}_{\mathrm{s}}}{d\mathrm{t}}=\vec{F}_{\mathrm{d}}+\vec{F}_{\mathrm{p}}+\vec{F}_{\mathrm{g}}+\vec{F}_{\mathrm{c}} \tag{1}$$

式中: m_{p}为冰粒子的质量, V_{s}为冰的速度, F_{d}为碎冰拖曳力, F_{p}为压力梯度力, F_{g}为重力, F_{c}为碎冰接触力。以上运动参数和力参数均是广义的矢量参数。F_{d}、F_{p}、F_{g}以及F_{c}的具体计算方法见文献[12]。其中, 单元接触力采用线性弹簧接触模型计算获取。

CFD–DEM 法的模型试验验证在之前的研究工作中已开展, 具体参见文献[12]。如图 1 所示, 船模在碎冰中直航时, 总阻力数值计算结果与模型试验值之间的偏差在 20% 以内。随着航速的增加, 水阻力和总阻力均增大, 且总阻力的增长速率明显高于水阻力。

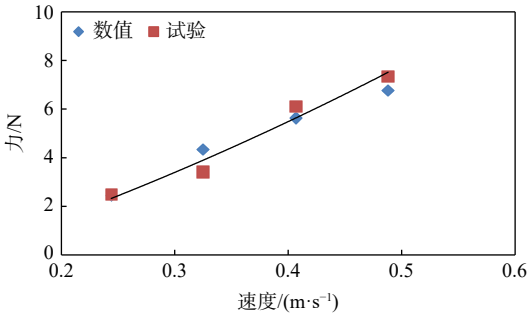


图 1 文献[12] 数值计算结果与模型试验结果的比较

Fig.1 Comparison between numerical calculation results and those of model test

1.2 计算对象与计算参数

本文以一条冰区航行船舶的缩比模型为计算对象, 采用上述数值计算理论, 进行开敞水域的水动力和碎冰中航行的冰水动力数值计算。船模的主尺度参数如表 1 所示。

表 1 模型参数

Tab.1 Parameters of the ship model

参数	数值
船长L/m	4.175
型宽B/m	0.565
设计吃水T/m	0.200
排水体积∇/m^3	0.276

数值模拟中采用速度入口和压力出口模拟流体从计算域的流入和流出, 以生成恒速流动的水流。在船体前方布置碎冰喷射器, 所生成的碎冰速度与水流速度相同。船体保持静止, 实现船–冰–水的相对运动。水流和碎冰均无法通过计算域的不可穿透壁面。计算参数为: 碎冰直径取 0.10 m, 厚度为 0.02 m, 碎冰密集度为 75%, 水速为 0.4 m/s, 计算时漂角分别取为 0°、3°、6°、9°。数值模拟边界条件的设置如图 2 所示, 具体的数值计算对象及船首局部网格划分如图 3 所示。

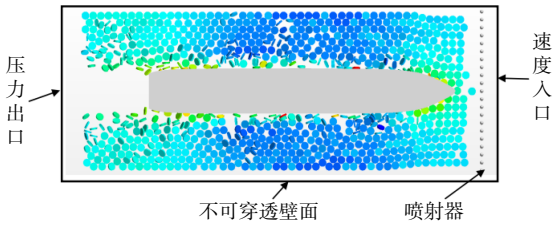
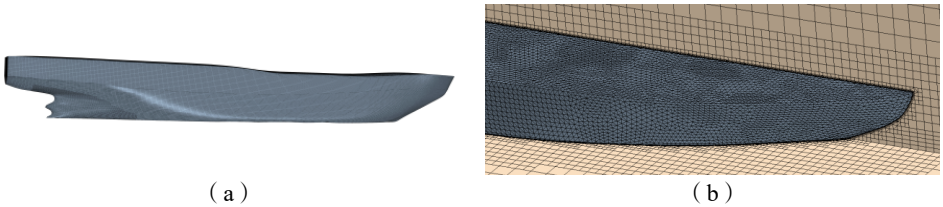


图 2 数值模拟边界条件示意图

Fig.2 Setting of boundary conditions of CFD

由于模拟的是碎冰环境中的船舶斜航运动, 船体表面与冰接触的区域需要较细的网格, 对于远离船体的区域, 则可适当增大网格尺度。在进行冰区斜航运动冰–水动力数值计算时, 海冰的密度设为 900 kg/m^3, 泊松比为 0.3, 弹性模量为 50 MPa。



(a) (b)

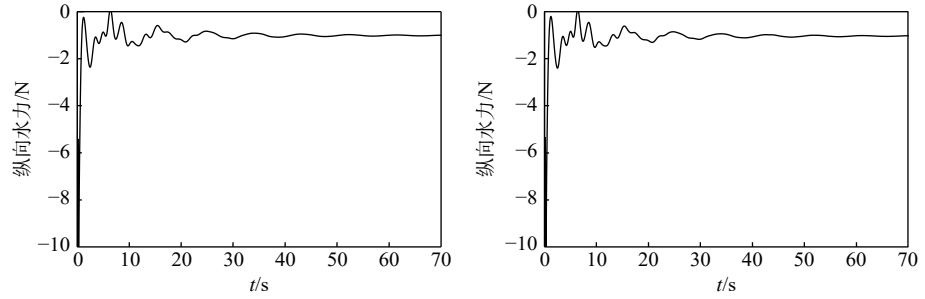
图 3 计算对象及船首局部网格划分

Fig.3 Mesh of the calculation object and the local area of bow

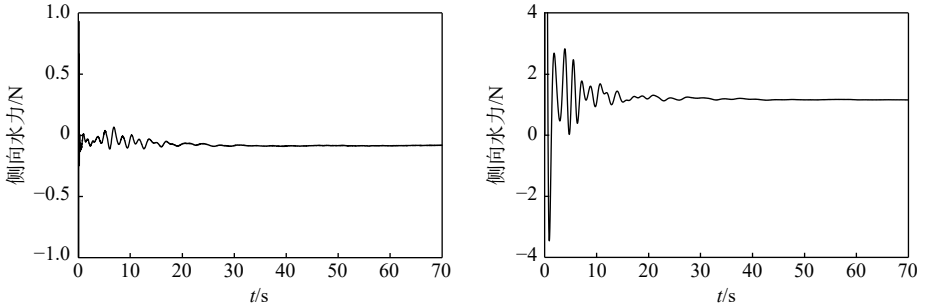
2 冰水动力特性计算结果时域与频域分析

2.1 斜航冰水动力数值计算结果

为了分析水动力、冰力以及冰水动力的时域曲线特征，在图 4~5 中给出了漂角 0°和 6°时，作用在船体上的水动力和冰力时历曲线的计算结果，按纵向力和侧向力分别给出，图 6 则给出两者的叠加结果。



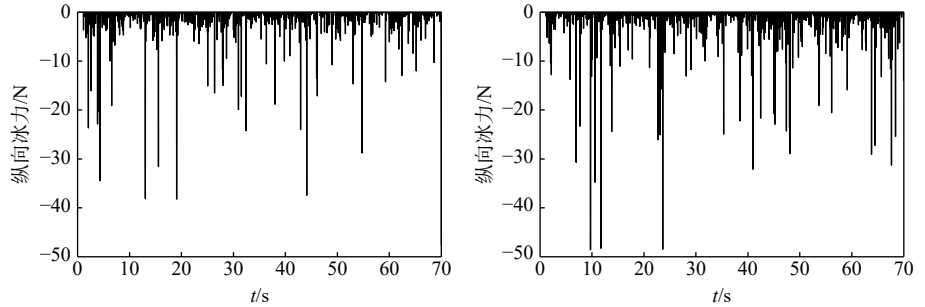
（a）纵向水动力（左图漂角 0°，右图漂角 6°）



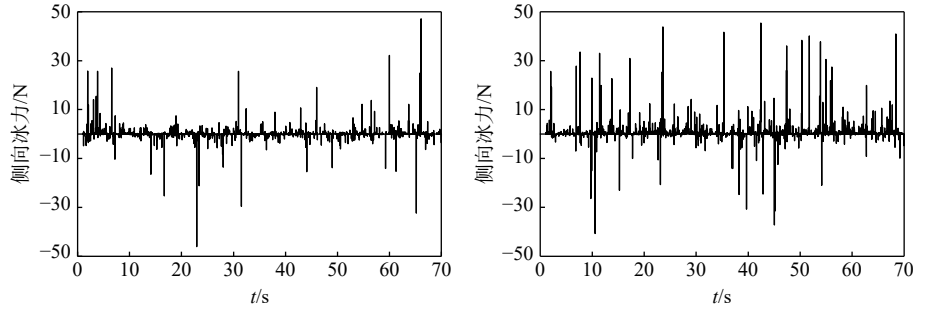
（b）侧向水动力（左图漂角 0°，右图漂角 6°）

图 4 船体纵向水动力和侧向水动力（漂角 0°和 6°）

Fig.4 Longitudinal and lateral hydrodynamic forces on the ship model (Drife angles: 0° and 6°)



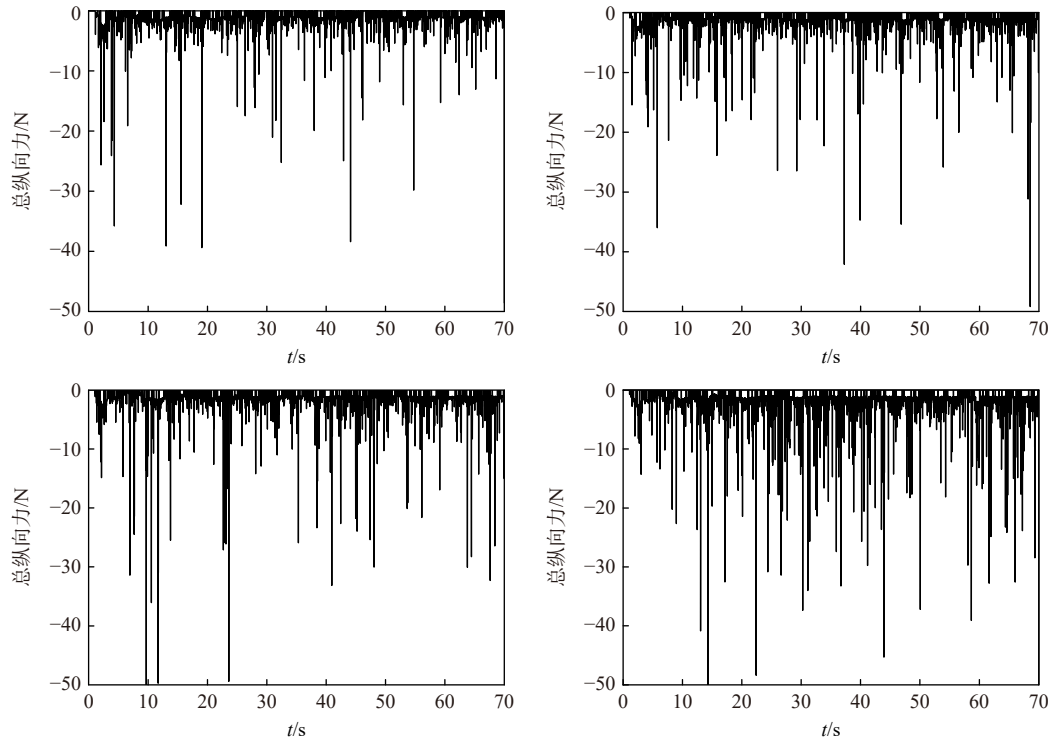
（a）纵向冰力（左图漂角 0°，右图漂角 6°）



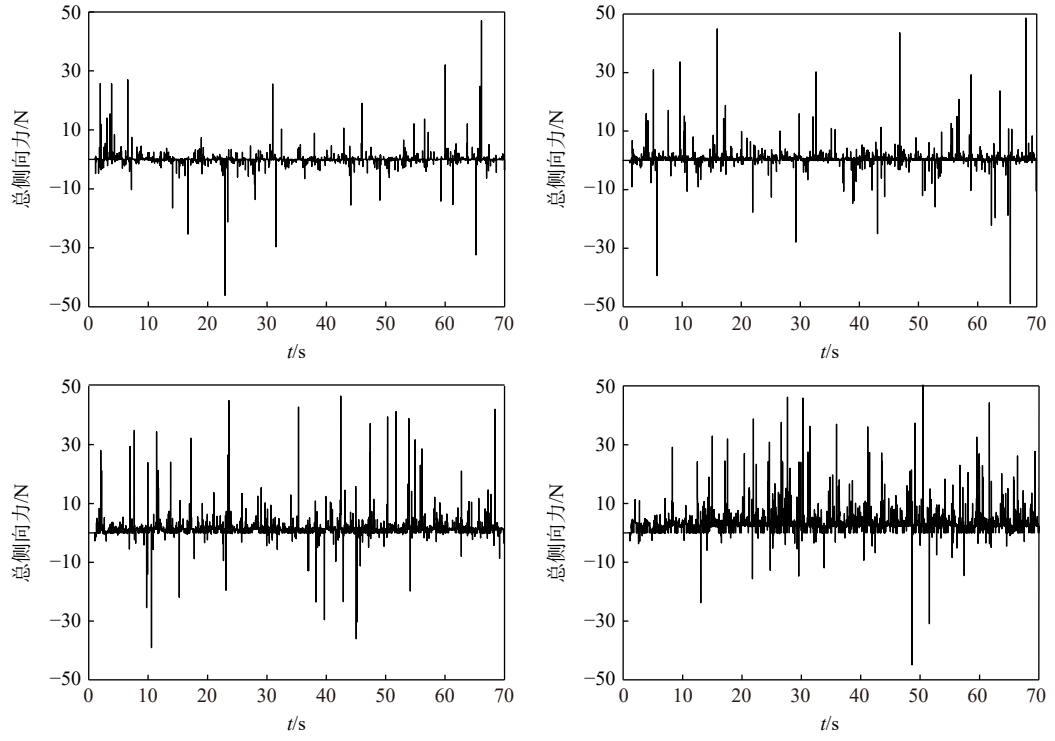
（b）侧向冰力（左图漂角 0°，右图漂角 6°）

图 5 船体纵向冰力和侧向冰力（漂角 0°和 6°）

Fig.5 Longitudinal and lateral ice force of the ship model (Drife angles: 0° and 6°)



（a）总纵向力（漂角 0°、3°、6° 和 9°）



（b）总侧向力（漂角 0°、3°、6° 和 9°）

图 6 船体总纵向力和总侧向力

Fig.6 Total longitudinal forces and total lateral forces of the ship model

(1)水动力计算结果

图 4 给出了漂角为 0°和 6°时作用在船体上的纵向和侧向水动力计算结果。表 2 为不同漂角下的船体纵向力和侧向力的计算结果。

表 2 不同漂角下的船体纵向力和侧向力计算结果

Tab.2 Longitudinal and lateral forces on the ship model at different drift angles

漂角/°	水动力计算结果	
	纵向力/N	侧向力/N
0	−1.014	0.000
3	−1.014	0.617
6	−1.038	1.167
9	−1.054	2.296

显然, 在图 4 的时历曲线中, 当时间 t 小于 20 s, 曲线波动为 CFD 计算尚未进入收敛稳定所致, 应予以忽略。t=20 s 后对应的稳定值即是定常水动力, 列于表 2。

(2)冰力计算结果

基于表 1 中船模尺度数据, 本文开展了船舶在碎冰中运动的冰水动力数值计算。图 5 展示了作用在船体上的纵向冰力和侧向冰力数值计算结果。

显然, 与图 4 相比图 5 的时历曲线存在显著差异。水动力曲线除了在时间 t 小于 20 s 内, 因 CFD 求解尚未收敛产生的时域振荡外, 均呈现定常、稳定特点, 而所有时段的冰力均表现出非定常、随机特性, 整个时历曲线由密集脉冲力组成, 脉冲宽度和高度变化显著。纵向冰力由单向脉冲群组成, 侧向冰力呈现双向脉冲群, 且随着漂角增加呈现不对称性, 表现为脉冲宽度和高度及密集度均向正侧向力方向偏移。

在碎冰区航行的船体, 持续遭受碎冰与船壳的碰撞。每一块碎冰与船壳碰撞就会产生脉高为 h_i, 脉宽为 τ_i 单脉冲。在船舶保持斜航时, 此类碰撞沿水线位置持续随机发生。斜航时某一时刻的冰力即为该时刻所有碎冰作用力沿水线的矢量积分。作用力同相或反相叠加会导致冰力脉冲宽度增加或减少, 而错相叠加除了会引起脉高变化, 还会使合成的脉冲变宽。这正是斜航碎冰力时域曲线呈现出脉冲高度参差不齐、频率较为丰富、随机的非定常脉冲群特征的机理。其频率覆盖范围约为 0~$f_{\max}$ Hz, 其中 $f_{\max}$ 可视为单元碎冰与船体碰撞力的特征频率。与图 4 水动力仅与船舶外形、船速、水密度有关不同, 图 5 的冰力还取决于碎冰几何尺度、冰力学特性和碎冰密集度。

(3)冰水动力计算结果

基于 CFD–DEM 方法, 图 6 给出了船模在 0°、3°、6°和 9°漂角下斜航运动时冰水动力(纵向力和侧向力)计算结果。显然, 船舶在碎冰域斜航时所受的总纵向力和侧向力为相应漂角下冰力与水动力两者的瞬时矢量叠加。

为分析船舶斜航运动条件下的冰水动力特性, 以 6°漂角为例进行说明, 可以看出船体总受力和水动力之间存在显著差异与变化。从图 6 可以看出, 作用在船模上的总冰水动力呈现明显的非定常特性, 船体纵向力以及侧向力都具有脉冲特征。该特性与较为稳定的水动力特性相比差异显著, 主要原因是船舶在碎冰中斜航运动时, 船体与海冰不断碰撞产生了船–冰作用力。此外, 船体与海冰碰撞接触产生的冰力表现出一定的脉冲特性。

2.2 斜航冰水动力数据处理方法 1–传统时间平均法

(1)水动力数据处理

对于定常水动力, 依然采用常规表达方法, 将船体纵向力 X 和侧向力 Y 的计算结果按式(2)进行无因次化数据处理, 可得

$$X' = X/\left(\frac{1}{2}\rho L^2 V^2\right) \qquad Y' = Y/\left(\frac{1}{2}\rho L^2 V^2\right) \tag{2}$$

式中: L 为船长, V 为船模的航速。

根据船舶操纵性理论, 斜航运动受力无因次化后用式(3)表示为

$$X' = X'_0 + X'_{vv}v'^2$$
$$Y' = Y'_v v' + Y'_{vvv}v'^3 \quad (3)$$

式中：v'为船体的无因次横向速度，$v' = -\sin\beta$，β为船舶运动时的漂角。

根据表 2 中的船体水动力数据，采用式(3)分别对船体纵向力和侧向力进行拟合，得到无冰水域中的的船体斜航水动力导数如表 3 所示。

表 3 斜航运动水动力导数（$\times 10^{-3}$）

Tab.3 Hydrodynamic derivatives of the ship model in oblique motion

结果	X'_0	X'_{vv}	Y'_v	Y'_{vvv}
无冰水域	−0.73	−1.23	−6.89	−145.49

(2)冰水动力数据处理

为处理斜航时的纵、侧向冰水动力，参考一般的冰阻力数据处理方法，即选取船−冰接触的计算时间段，计算船体冰力的平均值，并以该平均值表征该工况下船体在碎冰中所受的力。

表 4 为不同漂角下的船体纵向力计算结果，表 5 为不同漂角下的船体侧向力计算结果。从表 4 和表 5 可以看出，随着船舶斜航运动的漂角增大，船体纵向力和侧向力均呈增大趋势，且侧向力的增长速率明显高于纵向力，这是由于斜航运动时漂角的增大会使船体的迎流面积增大，也会增加船体与冰的接触面积，这与船舶直航状态存在较大差别。

表 4 不同漂角下的船体纵向力计算结果

Tab.4 Longitudinal forces on the ship model at different drift angles

漂角/°	纵向力/N			
	水动力	冰力	总力（冰水动力）	占比（水动力/总力）
0	−1.014	−0.776	−1.790	56.6%
3	−1.014	−1.036	−2.050	49.5%
6	−1.038	−1.008	−2.046	50.7%
9	−1.054	−1.507	−2.561	41.2%

表 5 不同漂角下的船体侧向力计算结果

Tab.5 Lateral forces on the ship model at different drift angles

漂角/°	侧向力/N			
	水动力	冰力	总力（冰水动力）	占比（水动力/总力）
0	0.000	0.700	0.700	0%
3	0.617	1.050	1.667	37.0%
6	1.167	1.157	2.324	50.2%
9	2.296	1.885	4.181	54.9%

对于碎冰区的冰水动力，参考水动力的常规数据处理方法，将船体冰水动力的计算结果按式(2)进行无因次化处理，斜航运动受力无因次化后用式(3)表示。

根据表 4 和表 5 中的船体受力，采用式(3)分别对船体水动力和碎冰环境中的冰水动力进行拟合，得到碎冰环境下的船体斜航水动力导数如表 6 所示。

表 6 斜航运动水动力导数（$\times 10^{-3}$）

Tab.6 Hydrodynamic derivatives of the ship model in oblique motion

结果	X'_0	X'_{vv}	Y'_v	Y'_{vvv}
无冰水域	−0.73	−1.23	−6.89	−145.49
碎冰环境	−1.32	−20.01	−17.44	−55.94

从表 4~6 可以看出：

(1) 水动力、冰力以及水动力导数、冰水动力导数，它们对应的符号均相同，说明对于碎冰而言，它对船舶受力所起作用可以看作是一种“广义流体”所为。

(2) 从占比分析，水动力与碎冰力占比较为接近，两者几乎不相上下，均是操纵性受力中不可忽略的重要因素。

(3) 纵向力方面，对比二者X'_0，可知在直航情况下，冰力可以显著增加船体总阻力；对比导数X'_{vv}，可以看出随着漂角增大，冰力的增加速率高于水动力增加速率。

(4) 侧向力方面，对比二者Y'_v，可知随漂角增加，冰力对侧向力的贡献远大于水动力，超过了两倍。虽然这种趋势在Y'_{vvv}上出现了反转，但后者毕竟是更高阶小量项，对总体侧向力的影响相对较小。

2.3 碎冰中斜航运动冰力数据处理方法 2−随机取数法

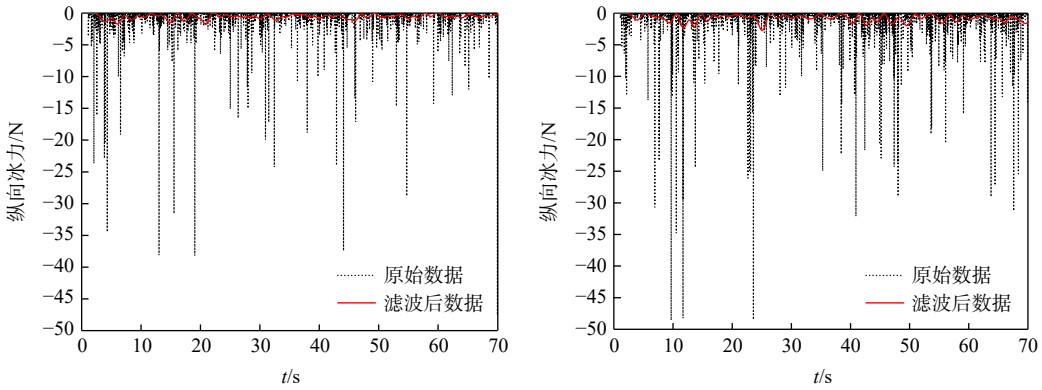
(1)滤波必要性及滤波频率选取原则

当研究者从船舶操纵性的角度来研究冰力时，其目的是预报船舶在碎冰中的运动。斜航中船舶所

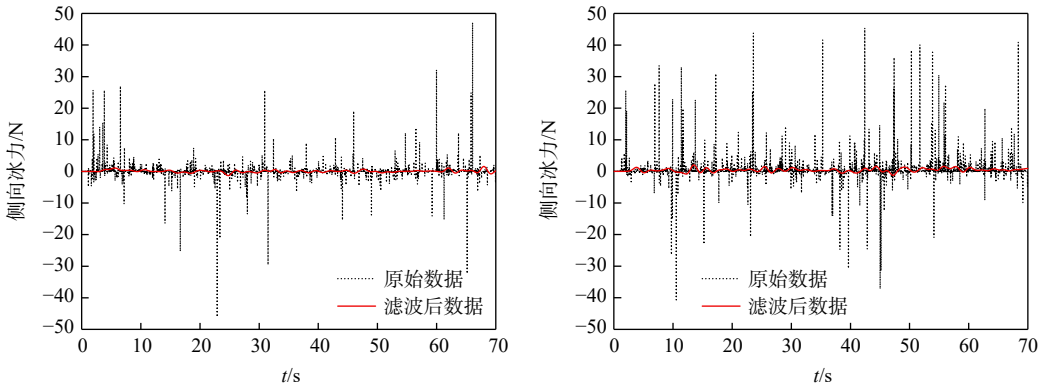
受的冰力在时域曲线上呈现随机、频率较为丰富的脉冲群特性，而由于船舶拥有巨大的质量，其操纵运动呈现出慢变的特点。显然，那些较高频率的冰力基本不影响船舶的操纵运动，我们以实尺度研究对象的实际操舵频率 f_d（约为 0.08 Hz）为界，将冰力的时历曲线分为两部分，以 f_d 为滤波频率，将频率小于 f_d 的冰力用于船舶的操纵运动预报，而将频率大于 f_d 的冰力用于船舶壳体结构损伤及振动研究。对于本文数值模拟对应的船模，有 f_{dm} = 0.5 Hz。

（2）滤波前后冰力时域曲线

碎冰中船体与碎冰发生碰撞，船体冰水动力非定常特性显著。对 2.1 节中的船体冰水动力结果进行了频域处理。图 7 给出了采用低通滤波处理后漂角为 0°和 6°时的船体冰力数据，可以看出在过滤掉高频部分的力后，冰力的幅值明显减小。



（a）纵向冰力（左图漂角 0°，右图漂角 6°）



（b）侧向冰力（左图漂角 0°，右图漂角 6°）

图 7　滤波后的船体纵向冰力和侧向冰力（漂角 0°和 6°）

Fig.7　Longitudinal and lateral ice force after filtering（Drift angles: 0°and 6°）

（3）冰力高低频分量的能量谱

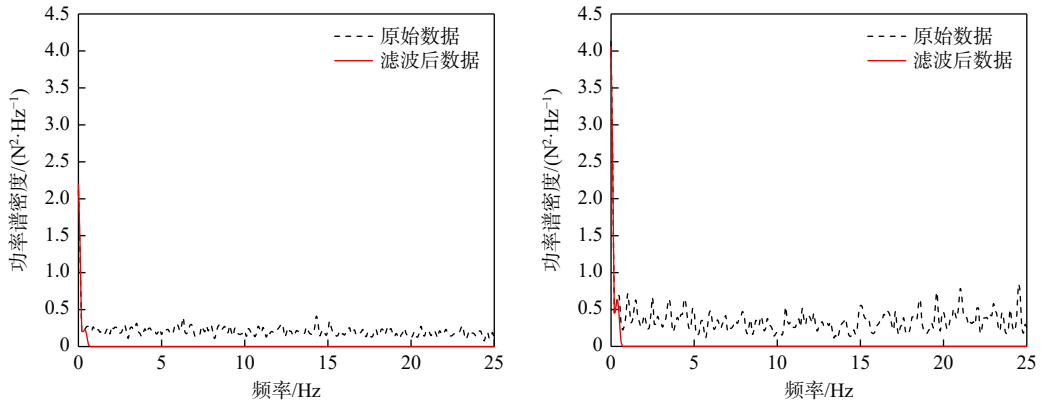
船舶在碎冰区运动时，无数持续不断的冰单元碰撞脉冲力随机组合，形成了频率低于 f_{max} 的各种脉冲。从统计学的角度看，任何频率的脉冲都不比其他频率脉冲更具出现优势，可视为等概率事件，这与图 8 所示的近似均匀的功率谱密度相符。

利用傅里叶变换将冰力信号从时域转换到频域，图 8 给出了进行频域处理后船体纵向冰力和侧向冰力的功率谱密度，结果表明漂角的增大会使 0 Hz 附近的冰力成分增大。

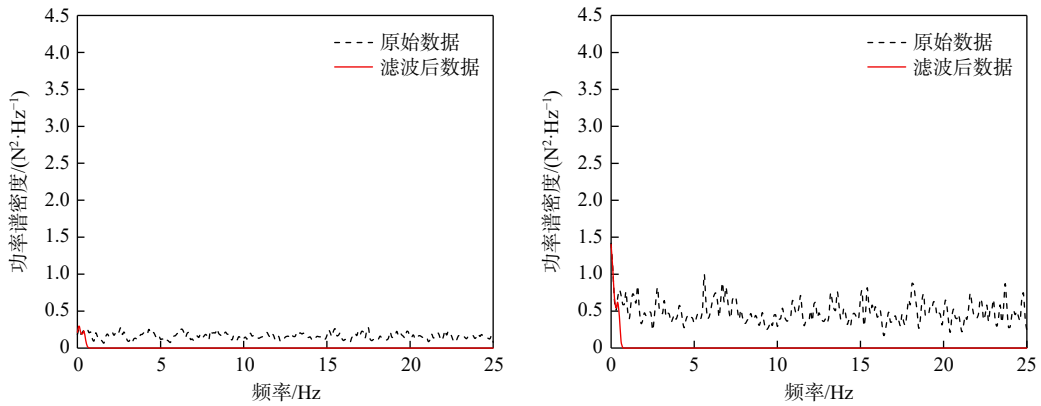
（4）冰力低频分量统计特性

以 f_{dm} 为截止频率，对图 5 中不同漂角 β（0°, 3°, 6°, 9°）的冰力时域曲线数据进行滤波，分别得到纵向和横向冰力的低频（$<f_{dm}$）和高频（$>f_{dm}$）部分时历曲线。高频部分如前文所述，本文不再继续研究。而对于操纵运动起作用的低频部分数据，本文进行了统计分析，得到了不同漂角 β 时的每条时域曲线的

平均值、四一值和四三值,列于表 7 中。表中还给出了滤波后冰力数据的方差统计特征,其中方差表示数据在平均值附近的波动程度。



(a) 纵向冰力(左图漂角 0°,右图漂角 6°)



(b) 侧向冰力(左图漂角 0°,右图漂角 6°)

图 8 船体纵向冰力和侧向冰力的功率谱密度

Fig.8 Power spectral density of longitudinal and lateral ice forces

表 7 滤波后冰力数据统计特征

Tab.7 Statistical characteristics of filtered ice force data

	漂角/°	平均值/N	四三值/N	四一值/N	方差
纵向冰力	0	−0.532	−0.320	−0.684	0.119
	3	−0.568	−0.295	−0.793	0.143
	6	−0.744	−0.348	−1.025	0.297
	9	−1.210	−0.653	−1.683	0.530
侧向冰力	0	0.044	0.243	−0.166	0.147
	3	0.084	0.332	−0.190	0.204
	6	0.413	0.742	0.070	0.284
	9	1.147	1.616	0.354	1.439

从表 7 可以看出,随着漂角增加,方差在增加;其次,[四三值+四一值]/2≠平均值,说明随机量相对期望值为不对称分布。

取冰力平均值为基准点,分别用冰力数据的四三值(统计数据中小于该值的力占全部数据的四分之三)和四一值表征持续作用于船体的冰力上限和下限,据此绘制船体纵向和侧向冰力随漂角的变化曲线,如图 9 所示。

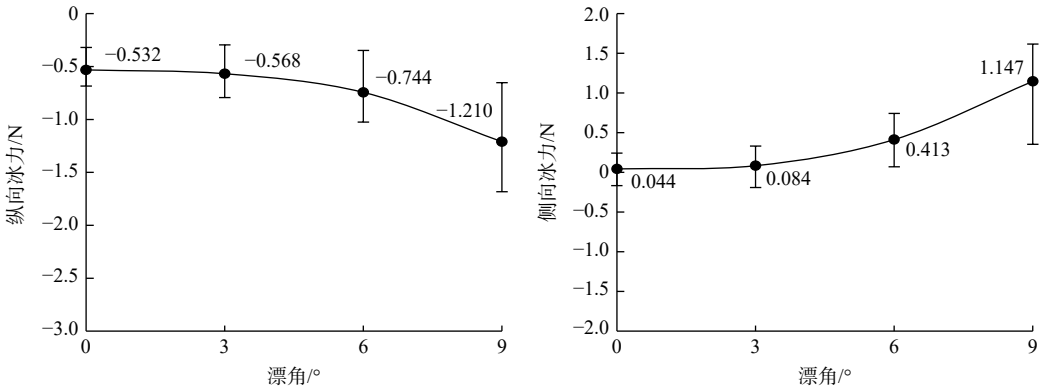


图 9　纵向冰力和侧向冰力随漂角的变化关系

Fig.9　Relationship of longitudinal ice force and lateral ice force with drift angle

(5)随机取数法

将冰力时域曲线视为 N 个离散数据组成的数据集 $x(\beta_i, n_j)$(通过数值预报或模型试验得到),其中整数序号 n_j=[0, 1, ⋯, N−1]。通过计算机程序生成等概率的随机数 $\varepsilon_j \epsilon$[0,1]。令 $N\varepsilon_j$取整,[$N\varepsilon_j$]=n_j,即可对应选取离散数据集中的冰力数据点 $x(\beta_i, n_j)$。当进行碎冰区域船舶操纵性预报时,每个操纵预报时刻采用随机选数法选取并更新冰力数据,区别于开敞水域船舶操纵预报结果的一条迹线,在碎冰区船舶操纵运动预报的结果将是由多次预报生成的船舶航行迹线构成的航行带,由此实现碎冰区船舶操纵性运动的“带区”预报。

至于如何将对操纵运动真正有意义的低频冰力运用到运动的数值预报中,本文认为有两种方法可选择。第一种方法,即传统水动力方法,先将图 6 中每一条时域曲线进行时间平均,得到定常数据,然后类似于水动力数据的表 2、表 4 和表 5,也可以得到对应的冰水动力及冰水动力导数,并且把结果列于表 3 和表 6。但作者并不看好这样的处理方法,因为水动力数值预报结果的微小起伏是因为收敛稳定性所致,水动力模型试验值的起伏波动是一次、二次仪表正负偏差造成的,平均值有效地消除了它们,而冰力曲线的起伏从机理上可知,是一种客观存在的物理现象。低频冰力起伏是真实作用在船舶上决定运动的力,不宜平均,但它的出现又是随机的。第二种方法,随机选数法,见上描述。

目前,基于船舶操纵性应用出发,作者对该方面的船体冰力数据处理方法进行了探讨,该方法能一定程度地反映碎冰中船−冰碰撞冰力的随机特性,但有待于后续试验验证。

3 结　论

针对船舶在碎冰区斜航条件下的船−冰作用力问题,本文将碎冰形状简化为一定直径和厚度的圆盘形,利用 CFD+DEM 数值方法对斜航下船体水动力及冰力进行了数值模拟,获取了船舶在碎冰中的冰水动力,得到了漂角对船体冰水动力的影响规律。得出的主要结论如下:

(1)在本文建立的船−冰相互作用理论模型下,船舶所受冰力呈现非定常随机脉冲群的时域特性,与稳态的水动力时域曲线存在显著差异。

(2)从机理上讲,构成冰力的基础是单块碎冰与船壳碰撞产生的单个脉冲力,在时域中,无数单脉冲的同相、反相和错相的叠加覆盖,最终形成了数值模拟的频率比较丰富、呈现非定常脉冲群特性的冰力时域曲线;

(3)本文提出以所预报船模实际操舵频率 f_d 为界,对时域曲线进行滤波,频率小于 f_d 的冰力数据为影响船舶操纵运动的低频冰力,频率大于 f_d 的数据为影响船壳结构的高频冰力。

(4)本文提出了一种随机选数法,来提取已滤波低频冰力时域曲线中漂角 β_i 所对应的冰力,以用于

操纵运动预报。此方法同样适用于提取 DEM 方法计算的关于角速度所对应的冰力。这样，由随机选数法提供冰力的船舶操纵运动预报，将不再是一条确定的航迹线，而是航迹“带区”。

（5）碎冰力显然与碎冰尺度、密集度、碎冰物理特性以及船型、船速、航行姿态密切相关。后续研究需在理论以及试验验证方面不断完善 DEM 数值模型，以实现碎冰区操纵性运动的“带区”预报。

参 考 文 献：

[1] 胡晓芳, 蔡敬标. 北极航道航行船舶操纵性设计需求分析[J]. 中国舰船研究, 2015(10): 37−44.
Hu X F, Cai J B. Analysis of maneuver design requirements for ships in the arctic waterway[J]. Chinese Ship Research, 2015(10): 37−44. (in Chinese)

[2] Lau M, Lawrence K P, Rothenburg L. Discrete element analysis of ice loads on ships and structures[J]. Ships and Offshore Structures, 2011, 6(3): 211–221.

[3] 狄少丞, 王　庆, 薛彦卓, 等. 破冰船冰区操纵性能离散元分析[J]. 工程力学, 2018, 35(11): 255–262.
Di S C, Wang Q, Xue Y Z, et al. Maneuverability analysis of an icebreaker based on discrete element method[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(11): 255–262. (in Chinese)

[4] 王　超, 康　瑞, 孙文林, 王国亮. 平整冰中破冰船操纵性能初步预报方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(6): 747–753.
Wang C, Kang R, Sun W L, Wang G L. Preliminary prediction method of icebreaker maneuverability in level ice[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(6): 747–753. (in Chinese)

[5] Lindqvist G. A straightforward method for calculation of ice resistance of ships[C]//Proceedings of the Tenth International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Lulea, Sweden, 1989: 722−735.

[6] Keinonen A J, Browne R, Revill C, et al. Icebreaker characteristics synthesis[R]. Ontario, Canada, 1996.

[7] Riska K, Wilhelmson M, Englund K, et al. Performance of merchant vessels in the Baltic[R]. Helsinki: Winter Navigation Research Board, 1997.

[8] 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. Study on the dynamic responses of blasting vibration on undercrossing railway tunnel with small distance[J]. Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(4): 520–526. (in Chinese)

[9] 杨冬宝, 高俊松, 刘建平, 等. 基于 DEM-FEM 耦合方法的海上风机结构冰激振动分析[J]. 力学学报, 2021, 53(3): 682–692.
Yang D B, Gao J S, Liu J P, et al. Analysis of ice-induced vibration of offshore fan structure based on DEM and FEM coupling method[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(3): 682–692. (in Chinese)

[10] Robb D M, Gaskin S J, Marongiu J C. SPH-DEM model for free-surface flows containing solids applied to river ice jams[J]. Journal of Hydraulic Research, 2016, 54(1): 27–40.

[11] Liu L, Ji S Y. Dilated-polyhedron-based DEM analysis of the ice resistance on ship hulls in escort operations in level ice[J]. Marine Structures, 2021, 80: 103092.

[12] Guo W, Zhao Q S, Tian Y K, et al. The research on floe ice force acting on the XueLong icebreaker based on synthetic ice test and virtual mass numerical method[J]. Journal of Hydrodynamics, 2021, 33(2): 271–281.