

DOI:10.11918/202005145

船舶碎冰区斜航运动的水动力导数预报

王超¹, 刘正¹, 傅江妍², 汪春辉¹, 郭春雨¹

(1. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 中国舰船研究设计中心, 上海 201108)

摘要: 目前敞水水动力导数的研究较为成熟, 冰水耦合后的船舶水动力导数研究尚处于起步阶段。为求解碎冰工况下冰水耦合后船舶斜航运动水动力导数, 使用 CFD 软件 STAR-CCM + 中 DEM 颗粒模拟碎冰粒子, 开启 DEM 模块下双向耦合模式, 通过动量、能量交换达到冰块与水耦合作用, 并选用小漂角工况分别为 0°、2°、4°、6°、8° 进行了斜航运动数值模拟。忽略自由液面的影响。分别计算敞水工况以及碎冰工况下船舶所受的侧向力以及转艏力矩, 通过对各漂角下无因次后的力以及力矩拟合从而求解出各个水动力导数。考虑冰块的干扰具有随机性所以采用干扰后的力以及力矩最大值以及最小值分别求解对应的水动力导数, 形成一个水动力波动区间, 更为真实地预报冰水耦合下的船舶水动力导数。通过计算结果表明, 敞水工况下船舶各部分水动力导数值与模型统计公式计算值相差不大, 冰水耦合后部分水动力导数波动区间端点值出现正负, 冰水耦合后水动力导数随机性较大。

关键词: 斜航运动; 碎冰区; 冰水耦合; DEM; 冰水耦合水动力导数

中图分类号: U661.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)12-0144-09

Prediction for hydrodynamic derivatives of ships in oblique motion under brash ice conditions

WANG Chao¹, LIU Zheng¹, FU Jiangyan², WANG Chunhui¹, GUO Chunyu¹

(1. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
2. China Ship Development and Design Center, Shanghai 201108, China)

Abstract: The current research on the hydrodynamic derivatives in open water is relatively mature, but the research on the hydrodynamic derivatives under ice-water coupling is still in infancy. In order to solve the hydrodynamic derivatives of a ship in oblique motion after ice-water coupling under brash ice conditions, the DEM particle of the CFD software STAR-CCM + was used to simulate brash ice particles. The momentum and energy exchange was performed to achieve the coupling effect between ice and water by turning on the two-way coupling mode under the DEM module. The small drift angles of 0°, 2°, 4°, 6°, and 8° were selected for the numerical simulation of oblique motion. The effect of the free surface was ignored. The lateral force and turning moment of the ship under open water conditions and brash ice conditions were calculated respectively. The hydrodynamic derivatives were obtained by fitting the dimensionless force and moment at each drift angle. Considering the randomness of the brash ice interference, the maximum and minimum values of the force and moment after the interference were used to solve the corresponding hydrodynamic derivatives, so as to form a hydrodynamic fluctuation interval, which can more accurately predict the hydrodynamic derivatives of the ship under ice-water coupling. Calculation results show that the hydrodynamic derivatives of the ship at each part under open water conditions were not significantly different from those calculated by the statistical model. The end values of the fluctuation interval of some hydrodynamic derivatives after ice-water coupling were positive and negative. Hydrodynamic derivatives were more random under brash ice-water coupling.

Keywords: oblique motion; brash ice region; ice-water coupling; DEM; hydrodynamic derivatives under ice-water coupling

破冰船在冰区航行时, 船体周围流场受到冰面

的干扰, 其流场特性必然发生变化, 故在求解船舶所受水动力时需额外考虑冰面干扰。水动力导数求解相对于船舶其他方面的研究较少, 主要存在经验公式法、约束船模实验法、数值模拟方法等, 其中约束船模试验是目前公认的求解水动力导数较为准确的方法。针对敞水水动力导数研究主要有: 吴兴亚等^[1]基于民用打捞型船采用 CFD 软件 STAR-CCM 数值模拟敞水中船舶斜航运动, 验证了 CFD 方法求

收稿日期: 2020-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(51679052, 51809055, 51909043, 51639004); 国防基础科研计划(JCKY2016604B001); 中国博士后科学基金(2019M651266); 国家重点实验室基金(6142223180210); 装备预研领域基金(JZX7Y20190247022501)

作者简介: 王超(1981—), 男, 副教授, 博士生导师;
郭春雨(1981—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 汪春辉, chunhui_wang@hrbeu.edu.cn

解水动力导数的可行性。Ohmori 等^[2]等采用有限体积法分别对 Esso Osake 船模作斜航运动的黏性流场和水动力进行了计算。Alessandrini 等^[3]对系列 60 船模作定常斜航以及回转运动时的黏性流场和所受侧向力和纵向分布进行了计算。Carrica 等^[4]采用 RANS 方程数值模拟船舶较快速度下周围流场分布并计算了部分水动力,后期又针对回转以及 Z 型操纵运动进行了相关的数值模拟。Miller^[5]使用了 CFDSHIP-IOWA 程序对斜航、横荡、艏摇等 RANS 方程进行了求解从而进行了相关数值模拟。Ismail 等^[6]对裸船体模型在 0° 以及 12° 漂角进行了斜航数值模拟,得到了船舶水动力导数的预报采用 2 阶 TVD 格式更精结论。Cura-Hochbaum^[7]对 KVLCC1 的邮轮进行了 PMM 运动数值模拟,预报相应的水动力导数,并将其代入操纵模型中与自航试验对比,验证了 RANS 方法的可靠性。Simonsen 等^[8]对 KCS 船舶做艏摇运动进行了数值模拟,对所受的力以及力矩的不确定进行了分析。Simonsen 等^[9]基于求解器 CFDSHIP-IOWA,数值模拟 PMM 运动试验,求解部分水动力导数值,数值模拟了 KCS 船舶的 Z 型操纵运动以及全回转运动。

Kim 等^[10]应用有限元软件 LS-DYNA 模拟了碎冰航道阻力,并与冰水池实验结果进行了对比,验证了方法的准确性。Vroegrijk^[11]利用 STAR-CCM + 软件数值模拟了船舶在碎冰航道中的航行时相关性能。Lau 等^[12]使用离散元手段针对海冰与船舶作用下破碎模型以及船舶阻力进行了研究。刘晨飞等^[13]运用 CFD 以及重叠网格技术模拟了斜航、纯横荡运动分别计算了月池封闭以及打开时船舶水动力导数,得到了水动力导数会因为月池存在有所增加。孟庆杰^[14]采用湍流模型中两方程 K-W SST 模型模拟了浅水工况下船体的吸底效应,不同漂角下水动力性能以及船体周围流场的变化。王建华^[15]采用自主开发求解器 naoe-FoAM-SJTU 数值模拟了船舶斜航运动,得到了不同漂角下的转艏力矩以及侧向以及相应的水动力导数。针对冰区相关的研究主要有:郭春雨等^[16]使用 LS-DYNA 软件模拟了船舶碎冰阻力以及船-冰作用过程,得出数值模拟结果在较低速度条件下在定性上与试验结果比较符合。任奕舟等^[17]采用有限元方法建模对冰区船舶阻力进行了数值模拟,得到的冰阻力较为准确,适用于预报破冰船冰阻力。齐江辉等^[18]使用 STAR-CCM + 软件数值模拟了碎冰区的航行过程,分析了航速对航行阻力的影响以及碎冰在船体周围的运动状态,得出船舶航行阻力随着航速的增加有所提高,碎冰阻力由于存在波浪排开作用随着航速待提高缓

慢增加的结论。涂勋程^[19]使用软件 LS-Dyna 在碎冰环境和平整环境下物探船的冰阻力预报及相关参数敏感性开展了数值模拟研究并与经验公式对比误差较小,验证了耦合方法的准确性。王超等^[20]运用离散元模型结合欧拉多相流,对船体与碎冰之间的相互作用关系进行探索,计算不同航速、不同碎冰密集度下船体的受力情况,从直观上解释碎冰阻力的变化原因。

碎冰区冰水耦合下船舶水动力导数预报的研究缺失,可查到的文献考虑冰水耦合也仅仅用于碎冰阻力方面未考虑耦合后对流体阻力本身的影响,大部分只针对船舶直航时碎冰阻力以及水阻力独立研究。本文拟采用 STAR-CCM + 软件中 DEM 模块下双向耦合模式对碎冰区中某型船舶进行不同漂角下的斜航运动模拟,求取船舶所受的侧向力以及转艏力矩,进而求解出冰水耦合下的部分水动力导数,为今后考虑耦合下流体增阻后的水动力导数以及操纵性能预报方法研究提供理论基础和技术支撑。

1 基础理论和计算模型

本文主要采用 CFD 软件 STAR-CCM + 手段获得,需要满足连续性方程以及动量守恒方程。选用目前广泛使用的标准的 $k-\varepsilon$ 模型处理标准的两方程中湍流问题。依靠 STAR-CCM + 中 DEM 模块下的双向耦合模式,进行冰块与水的动量、能量交换达到耦合作用,监测耦合后的船舶所受的水动力。由于双向耦合基础理论内容较多请详见 STAR-CCM + 软件帮助文档,此处不进行详述。

1.1 DEM 基础理论

碎冰工况航行时存在船-冰-水耦合作用的过程,本文采用 CFD 软件 STAR-CCM + 中 DEM 模块模拟碎冰粒子,碎冰粒子由若干 DEM 基本颗粒组成。拉格朗日构架下,通过显式计算进行计算域中所有粒子的轨迹跟踪。CFD-DEM 耦合计算包括冰粒子之间的相互作用以及离散相冰与流体相水之间的相互作用的计算,离散相 DEM 冰粒子的运动通常包括平行运动和转动运动两种方式,需满足平动动量守恒以及旋转角动量守恒方程具体形式为:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j F_{ij} + F_g + F_{fluid} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} I_i \omega_i = \sum_j T_{ij} \quad (2)$$

式中: m_i 、 v_i 和 w_i 分别为离散冰项粒子编号 i 的质量、速度和角速度; I_i 为编号 i 的粒子的转动惯量; R_i 为粒子 i 的半径; $F_g = m_i g$ 为粒子 i 的重力; F_{fluid} 为流体对粒子 i 的作用力; F_{ij} 为粒子 i 与粒子 j 或壁面之间的碰撞力以及其他作用在粒子上的非接触

力; T_{ij} 为接触力矩, 表示除粒子重力以外的接触力在粒子上产生的扭矩, $T_{ij} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}_{ij} - \mu_r |F_{ij}| \omega_i / |\omega_i|$, 其中 \mathbf{r} 为粒子重心到粒子接触点的矢量。

1.2 数学模型的建立

单一来说冰粒子主要属于固体力学研究范畴, 流体力部分属于流体力学研究范畴, 软件 STAR-CCM+ 中双向耦合模块可实现二者耦合。DEM 参数的设置具有开放性, 可进行变参数研究。围绕船体建立数值水池, 为模拟无限水域, 速度入口距离船首部 3.0 L, 压力出口距离船尾部 3.5 L。水池左右两侧距离船中 3.3 L, 水池顶部以及底部分别距离船舶 2.0、3.5 L, 如图 1 所示。

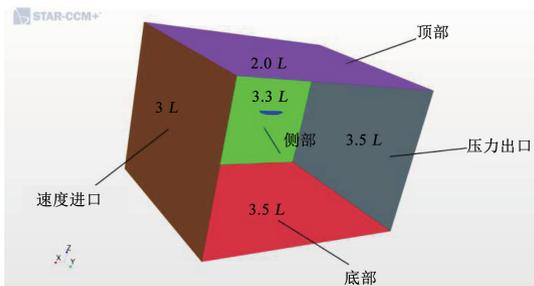


图 1 计算域划分图

Fig. 1 Computational domain division diagram

1.3 几何模型建立

碎冰区冰块厚度范围在 0.3 ~ 3.0 m^[19], 小型碎冰跨度在 2.0 m 左右, 大型碎冰尺寸跨度为 0.5 ~ 10.0 m^[19]。考虑模拟采用的碎冰粒子是用 DEM 复合颗粒填充形成的碎冰粒子, 尺寸过大喷射碎冰粒子耗时多, 综合考虑本次碎冰模型采用小型碎冰,

长度、宽度、厚度分别为 3.0、3.0、1.5 m, 按缩尺比 40 进行建模, 碎冰如图 2 所示。碎冰的 DEM 粒子填充数为 120。采用 STAR-CCM+ 软件中探针进行喷射碎冰, 其中探针的长度为 6.0 m, 分辨率为 38, 如图 3 所示, 喷射时颗粒流率为每秒喷射 9 个。某型冰区船模主尺度以及碎冰物理性质见表 1, 其中表 1 中碎冰的物理参数指的是依据实尺度冰属性与缩尺的关系换算得到的模型冰参数。船模几何图形如图 4 所示。



图 2 碎冰粒子图

Fig. 2 Brash ice particle diagram

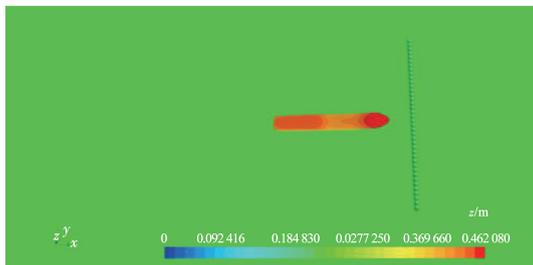


图 3 探针布置图

Fig. 3 Probe layout diagram

表 1 某冰区船型参数

Tab. 1 Parameters of an ice-going ship

船型参数	缩尺比	总长/m	垂线间长/m	型深/m	型宽/m	设计吃水/m	结构吃水/m	设计航速/(m · s ⁻¹)
船模	40	4.175	3.731 5	0.337 5	0.565	0.2	0.225	1.39
碎冰物理参数	缩尺比	弹性模量/MPa	冰-船摩擦系数	泊松比	密度/(kg · m ⁻³)	长度/m	宽度/m	厚度/m
模型冰	40	135	0.15	0.3	917	0.075 0	0.075 0	0.037 5



图 4 船体模型几何图

Fig. 4 Hull geometric model diagram

1.4 网格划分

斜航工况漂角选择 0°, 2°, 4°, 6°, 8° 网格划分方法为各工况网格尺度不变, 需要将船体分别旋转 2°, 4°, 6°, 8° 将船体与计算域进行布尔减运算, 然后

划分网格。模型网格划分选用切割体网格、棱柱层网格以及表面重构相结合的方式。总体网格基础尺寸为 2.3% L, 船体表面网格大小选取为基础尺寸的 12.5%, 船舶尾部进行网格加密, 尺寸为基础尺寸的 6.25%, 为使船体周围的流场过渡缓和, 设置棱柱层数 6 层, 棱柱层延伸率 1.2。船体网格图如图 5(a) 所示, 尾部加密图如图 5(b) 所示。使用 DEM 模拟冰粒子时粒子求解是否收敛很大程度上取决于水线面处网格密度, 考虑防止自由液面发散, 分别对自由面进行 x-y-z 向加密, z 向采用两层加密, 网格尺度分别为基础尺寸的 25.0%、12.5%。x-y 方向网格尺度均为基础尺寸的 80%。以斜航 0° 为例。计算域整体网格图如图 5(c) 所示, z 向加密图如图 5(d) 所示。

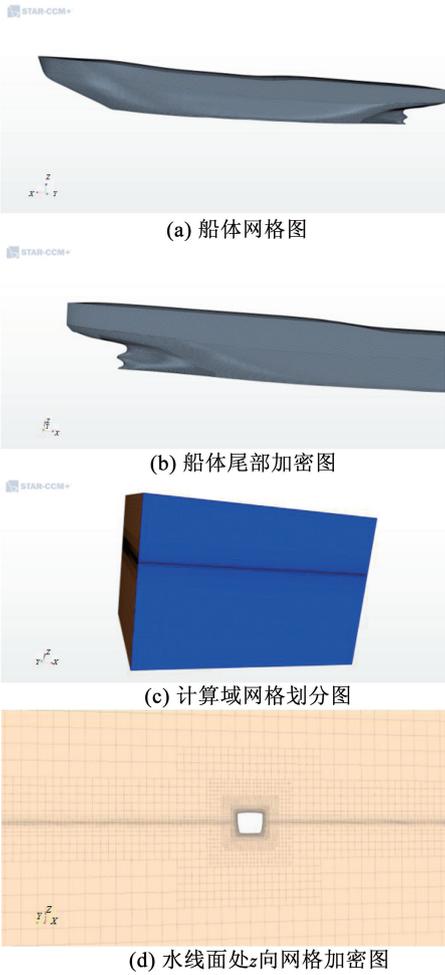
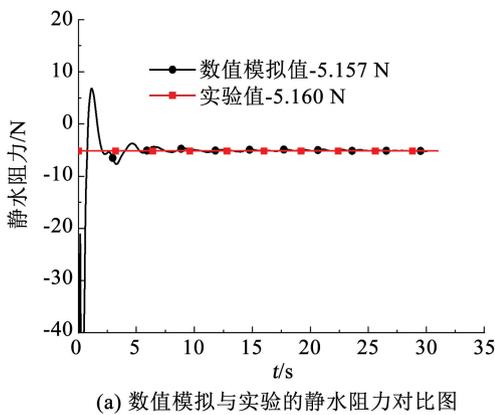
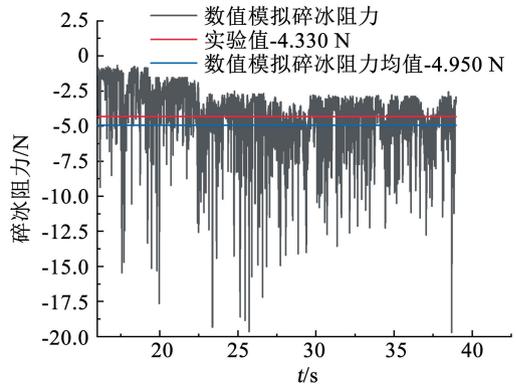


图 5 网格划分图

Fig. 5 Mesh division diagram



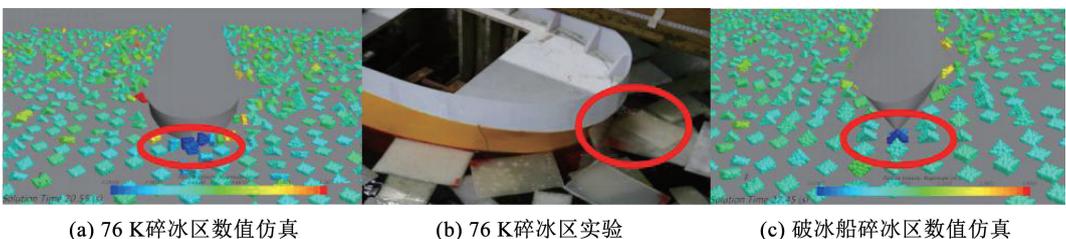
(a) 数值模拟与实验的静水阻力对比图



(b) 数值模拟与实验的碎冰阻力对比图

图 6 76 K 冰区加强散货船碎冰区阻力图

Fig. 6 Resistance of 76 K strengthened bulk carrier in brash ice region



(a) 76 K 碎冰区数值仿真

(b) 76 K 碎冰区实验

(c) 破冰船碎冰区数值仿真

图 7 船舶碎冰运动姿态图

Fig. 7 Motion posture of ship bow in brash ice region

2 计算方法的验证

本次数值计算方法的验证依托哈尔滨工程大学船模拖曳水池中进行的 76K 冰区加强散货船^[21]的碎冰实验。76 K 船模网格设置以及 DEM 相关设置与本文某型破冰船数值模拟设置一致,通过验证 76 K 数值模拟的网格以及 DEM 设置的合理性从而验证本次数值模拟方法的准确性。本次验证选择一种碎冰密集度 40%、一个航速点 0.613 m/s,进行敞水船模阻力、碎冰阻力以及碎冰姿态验证。进而说明本次计算网格设置的合理性。阻力图如图 6 所示,图 7 为冰块与船艏相互作用的数值模拟与实验测量的对比图。图 8 为船体航行后尾部区域碎冰分布图。静水阻力取图 6(a)后 5 s 均值为 -5.157 N,静水阻力实验值为 -5.160 N,可看出数值模拟结果与试验吻合度非常高。碎冰阻力值取图 6(b)25 s 后稳定段均值为 -4.950 N,实验值为 -4.330 N,误差控制在 15% 以内,满足目前行业内冰阻力预报误差不超 20% 的要求。图 7 中可看出 76 K 冰区加强散货船以及某型破冰船的数值仿真结果与 76 K 试验结果在船舶首部均出现了碎冰堆积现象。图 8 中可以看出 76 K 冰区加强散货船以及某型破冰船的数值仿真结果与 76 K 试验结果在船舶尾部均出现了碎冰向船两侧移动形成的尾迹图。综上所述本次数值模拟具有一定的准确性,可以较为真实地模拟船舶在碎冰区航行时相关的阻力性能以及冰块运动姿态。



图 8 尾部区域碎冰分布图

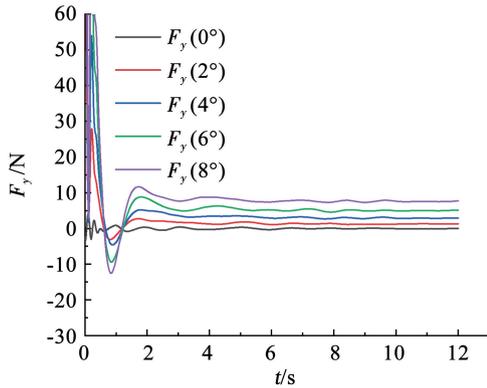
Fig. 8 Brush ice distribution at stern area

3 计算结果及分析

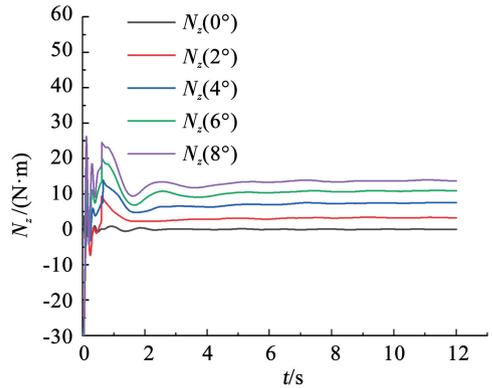
3.1 敞水工况水动力导数数值计算结果

斜航运动选择漂角为 $0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$, 数值模拟采用相对运动模拟船舶斜航, 计算来流速度为

0.8 m/s , 分别计算船舶的侧向力以及转艏力矩如图 9 所示, 其中船舶的侧向力是指沿着船宽方向的力。用最小二乘法分别拟合无因次后的侧向力 F_y 、转艏力矩 N_z , 所得曲线在原点处斜率即为水动力导数。侧向力 F_y 、转艏力矩 N_z 的计算结果见表 2。



(a) 不同漂角下船舶所受侧向力图



(b) 不同漂角下船舶所受转艏力矩

图 9 船舶所受侧向力及转艏力矩图

Fig. 9 Lateral force and turning moment on ship

表 2 不同漂角下船舶所受侧向力及转艏力矩

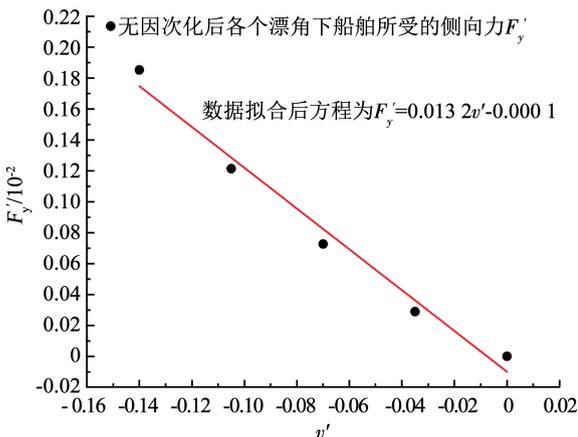
Tab. 2 Lateral force and turning moment on ship at different drift angles

漂角/ $(^\circ)$	侧向力/N	转艏力矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)
0	0	0
2	1.32	3.45
4	3.30	7.60
6	5.38	11.10
8	8.46	14.50

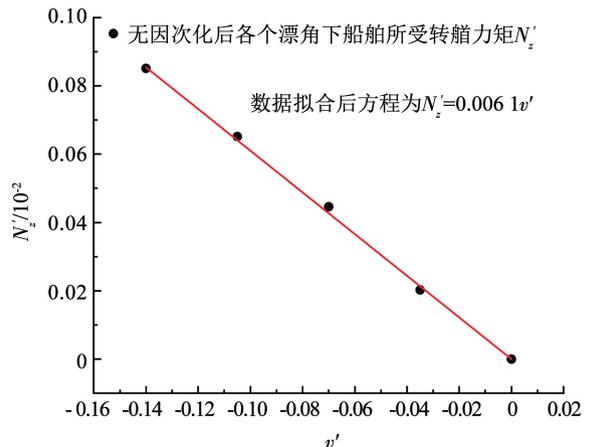
依据式(3)进行无因次化后拟合得到的曲线如图 10 所示。

$$\begin{cases} N'_z = \frac{N_z}{0.5\rho V^2 L^3} \\ F'_y = \frac{F_y}{0.5\rho V^2 L^2} \\ v' = \frac{v}{V} = -\sin\beta \end{cases} \quad (3)$$

将船舶在不同漂角所受的侧向力以及转艏力矩



(a) 敞水侧向力拟合图



(b) 敞水转艏力矩拟合图

图 10 敞水侧向力及转艏力矩拟合图

Fig. 10 Fitting diagram of lateral force and turning moment in open water

斜航敞水工况水动力导数计算结果以及统计公式计算结果(采用井上模型)见表 3,可以看出 Y'_v 、 N'_v 相对偏差为 20%、5.2%, Y'_v 误差偏大的原因是由于处于斜航运动模式时变化漂角时船舶力矩的变化较侧向力更为敏感求解结果更为准确,并且统计公式采用的是井上模型,井上模型是根据 10 艘各种类型的船模(油轮 3 艘,货船 3 艘,集装箱船、液化天然气船、滚装船、汽车轮渡各 1 艘)进行相关试验整理出的水动力导数计算公式,本次计算模型采用的是冰区某型破冰船其型线以及舱室布置、尾部形状都进行了改进与传统船型存在一定的差别,综上考虑文章数值计算方法具有一定的有效性。

表 3 斜航敞水工况水动力导数计算结果

Tab. 3 Results of hydrodynamic derivatives of oblique navigation in open water

水动力导数	数值计算结果	统计公式
Y'_v	-0.013 2	-0.016 5
N'_v	-0.006 1	-0.005 8

3.2 碎冰工况冰水耦合后水动力导数数值计算结果

碎冰工况的斜航运动参数设置与敞水工况一致,漂角为 $0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$ 。船体表面设置为壁面,物理模型中选择拉格朗日混合模型中多相耦合模块达到水与冰块流固耦合作用。多相相互作用设置冰-冰接触、冰-船接触、冰-水接触、冰-空气接触和

水-空气接触。通过冰-船耦合作用改变冰块运动姿态进而冰块对船体周围流场产生干扰从而达到船冰水相互耦合。阻力模型选用 Hertz Mindlin,阻力系数模型使用 Schiller-Naumann 模型,考虑计算耗时问题,本次模拟为碎冰低密集度 40% 下水动力相关模拟,经调研某型破冰船在浮冰工况下(浮冰尺寸大于 50 ~ 60 cm),连续破冰航速是:连续自破冰下,航速不超过 18.52 km/h,0.2 ~ 0.3 m 的浮冰基本不受影响,考虑本次模拟情况为低密集度小型碎冰并且不存在破冰船引航,选取船舶速度为 18.149 6 km/h,依据弗汝德数相似换算得来流速为 0.8 m/s。分别计算冰水耦合后船舶的侧向力以及转艏力矩,如图 11 ~ 13 所示。

3.2.1 冰水耦合下斜航侧向力

从图 11 中可以看出在每一个漂角工况下,船舶的侧向力都呈现了上、下波动的情况,这是由于冰块与船发生碰撞作用时冰块的运动姿态发生变化,部分会翻转以及沿着船表面滑行还有一部分会被波浪排开,这些都对流场造成一定规律性扰动。本次数据处理考虑冰块的干扰具有随机性所以采用干扰的最大值以及最小值分别求解对应的水动力导数,从而形成一个水动力波动区间,更为真实地预报冰水耦合下的船舶水动力导数。其中最大以及最小值求取方法采用将 15 ~ 33 s 时间分为 12 个时间段,第 i

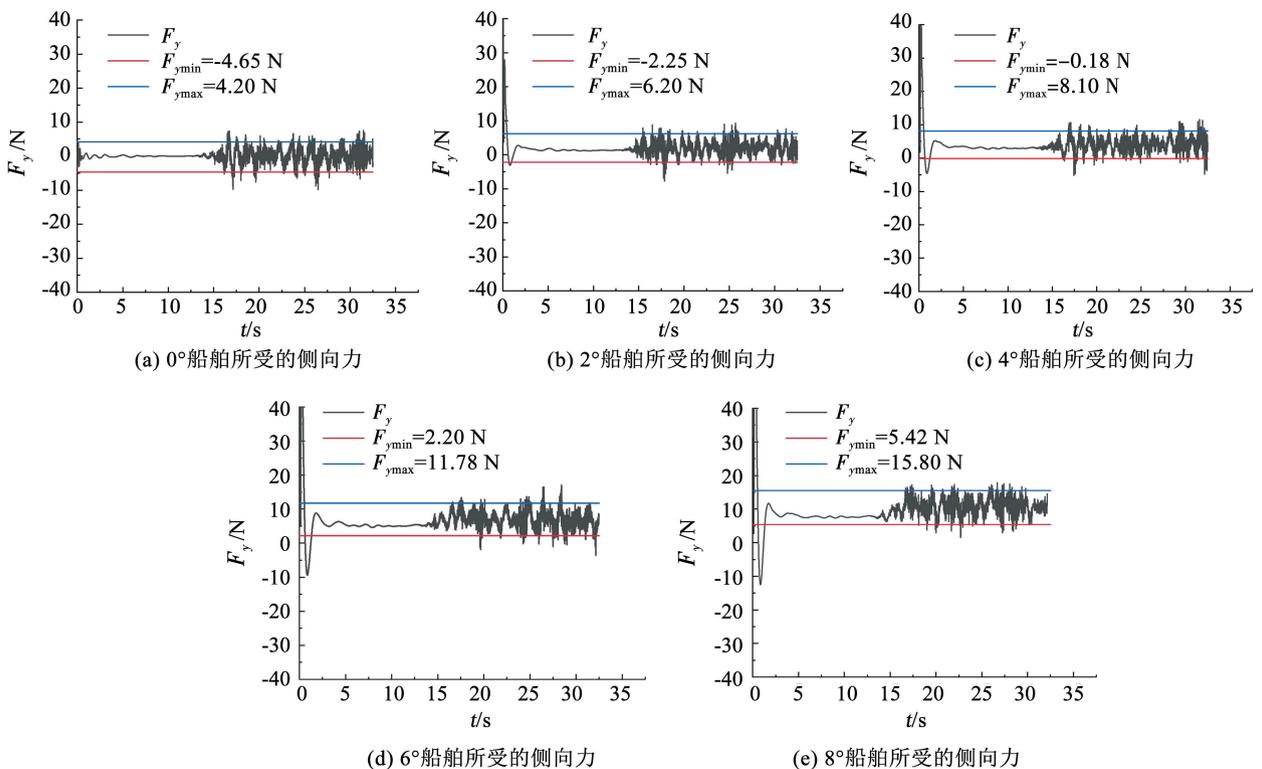


图 11 碎冰工况斜航 $0^\circ \sim 8^\circ$ 船舶所受的侧向力

Fig. 11 Lateral force on ship at oblique angles of $0^\circ - 8^\circ$ in brash ice region

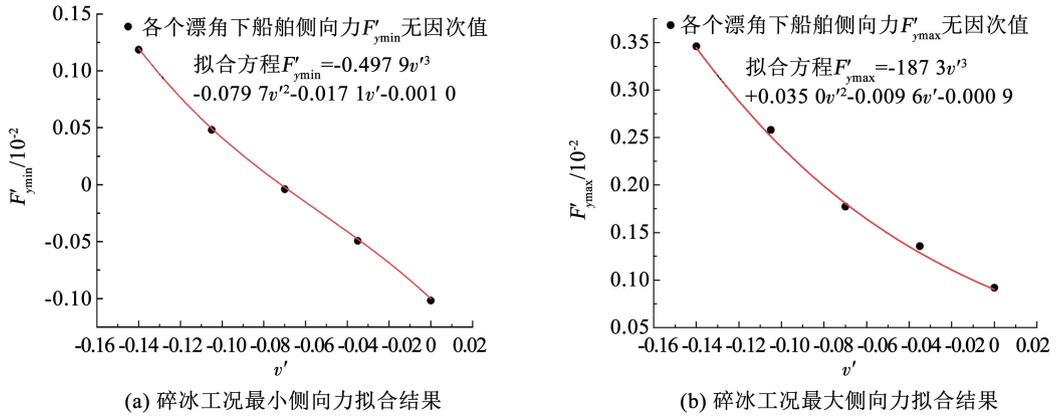


图 12 碎冰工况最小侧向力及最大侧向力拟合图

Fig. 12 Fitting diagram of minimum lateral force and maximum lateral force in brash ice region

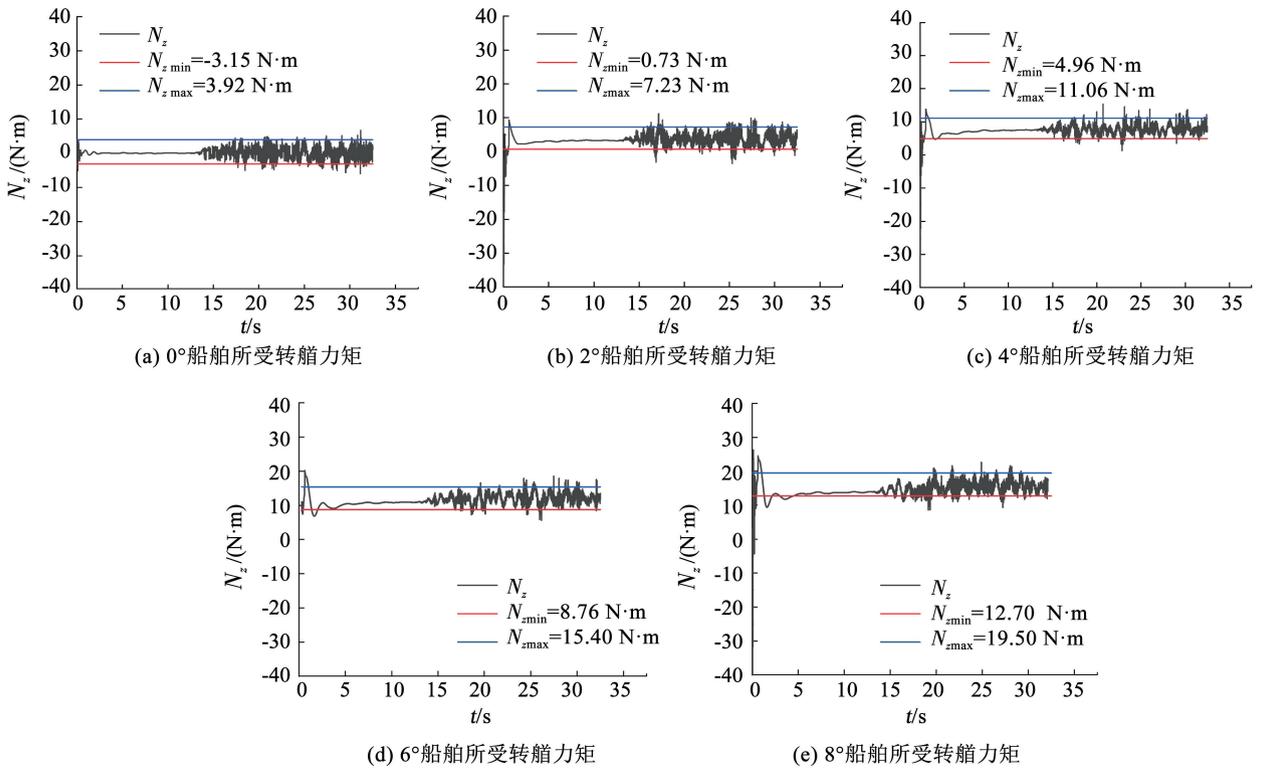


图 13 碎冰工况斜航 0° - 8° 船舶所受的转舵力矩

Fig. 13 Turning moment on ship at oblique angle of 0° - 8° in brash ice region

个时间段水动力波动的峰值为 A_i 、 B_i ，则整个时间段水动力波动峰值为 $A = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} A_i$ 、 $B = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} B_i$ ，侧向力具体值见表 4。不同漂角所受的侧向力进行无因次化拟合后得到的曲线如图 12 所示。碎冰工况冰水耦合水动力导数计算结果见表 5。

表 4 碎冰工况下不同漂角时船舶所受侧向力

Tab. 4 Lateral force on ship at different drift angles in brash ice region

漂角/(°)	最小侧向力/N	最大侧向力/N
0	-4.65	4.20
2	-2.25	6.20
4	-0.18	8.10
6	2.20	11.78
8	5.42	15.80

表 5 碎冰工况下斜航水动力导数计算结果

Tab. 5 Results of hydrodynamic derivatives of oblique navigation in brash ice region

水动力导数	最大侧向力 F'_{ymax}	最小侧向力 F'_{ymin}
Y'_v	-0.009 6	-0.017 1
Y'_{vv}	0.035 0	-0.079 7

3.2.2 冰水耦合下斜航转舵力矩

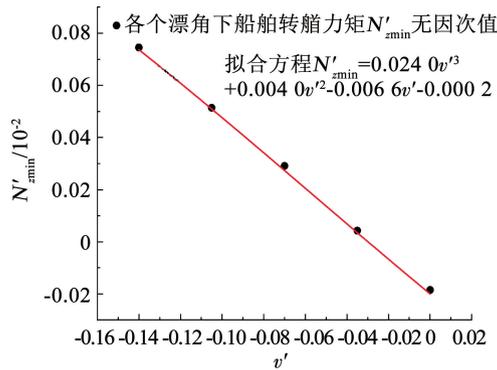
从图 13 中可以看出在每个漂角工况下，船舶转舵力矩同样会由于冰块的运动姿态发生改变(主要包括部分会翻转、沿着船表面滑行以及一部分会被波浪排开)对船体周围流场造成干扰从而导致力矩值上下波动的情况。力矩数据处理方法与侧向力方法一致。转舵力矩具体值见表 6。将浮冰工况下船

船在不同漂角所受的转艏力矩进行无因次化后拟合得到的曲线如图 14 所示。

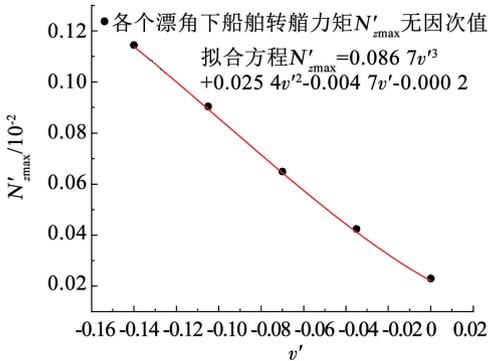
表 6 碎冰工况下不同漂角时船舶所受转艏力矩

Tab. 6 Turning moment on ship at different drift angles in brash ice region

漂角/(°)	最小转艏力矩/(N·m)	最大转艏力矩/(N·m)
0	-3.15	3.92
2	0.73	7.23
4	4.96	11.06
6	8.76	15.40
8	12.70	19.50



(a) 碎冰工况最小转艏力矩拟合结果



(b) 碎冰工况最大转艏力矩拟合结果

图 14 碎冰工况最小转艏力矩以及最大转艏力矩拟合图

Fig. 14 Fitting diagram of minimum turning moment and maximum turning moment in brash ice region

由表 3、表 5 和表 7 中水动力导数计算结果可以看出碎冰工况冰水耦合下最大侧向力得到的线性水动力导数值 $F'_{y\max}$ 小于敞水计算结果, 最小侧向力得到的线性水动力导数值 $F'_{y\min}$ 大于敞水计算结果。最大转艏力矩得到的线性水动力导数值 $N'_{z\max}$ 小于敞水计算结果, 最小转艏力矩得到的线性水动力导数值 $N'_{z\min}$ 略大于敞水计算结果, 线性水动力导数区间端点的绝对值存在一端数值大于敞水计算结果一端数值小于敞水计算结果的现象, 并且非线性水动力导数计算结果呈现正负值。这是由于船舶在碎冰中航行时冰块与船体作用使得冰块运动姿态发生变

化, 冰块会在船体周围翻转、在船艏的堆积以及由于压力差紧贴船体表面的滑行, 使得冰面对船体周围的流场造成了随机性的干扰, 非线性水动力导数计算结果呈现正负值可看出对流场的干扰更具有随机性, 并且非线性水动力导数值在冰水耦合下不容易捕捉求解, 波动灵敏性太大。

表 7 碎冰工况下斜航水动力导数计算结果

Tab. 7 Results of hydrodynamic derivatives of oblique navigation in brash ice region

水动力导数	最大转艏力矩 $N'_{z\max}$	最小转艏力矩 $N'_{z\min}$
N'_v	-0.004 7	-0.006 6
N'_{vv}	0.025 4	0.004 0

4 结 论

1) 本文通过与本次数值模拟具有相同网格以及 DEM 相关参数设置的 76 K 冰区散货船碎冰区的数值模拟, 从静水阻力、碎冰阻力以及碎冰与船舶船尾运动姿态与实验进行了对比验证, 并将敞水下船舶进行斜航模拟得到的水动力导数值与井上模型统计公式数值对比, 数值较为接近, 进一步说明了数值方法的可靠性。

2) 船舶的侧向力以及转艏力矩在冰水耦合的情况下都呈现了上、下波动的情况, 这是由于冰块与船发生碰撞作用时冰块的运动姿态发生变化, 部分会翻转以及沿着船表面滑行还有一部分会被波浪排开, 这些都对流场造成一定规律性扰动。

3) 水动力导数计算结果可以看出最大侧向力以及最大转艏力矩得到的线性水动力导数值 $F'_{y\max}$ 、 $N'_{z\max}$ 小于敞水计算结果, 最小侧向力以及最小转艏力矩得到的线性水动力导数值 $F'_{y\min}$ 、 $N'_{z\min}$ 大于敞水计算结果, 这是由于船舶在碎冰中航行时冰块与船体作用使得冰块运动姿态发生变化, 冰面对船体周围的流场造成了随机性的干扰。随机性取其区间值能体现冰块对流场干扰的随机性。

4) 本文使用 CFD-DEM 方法虽然一定程度上解决了冰水耦合的问题, 但还有许多设置需要改进, 同时受到时间和计算能力等的限制, 本文只计算了一种密集度下冰水耦合的情况, 后期将针对于不同密集度以及碎冰的不同尺寸部分进行研究。

参考文献

[1] 吴兴亚, 高霄鹏. 基于操纵运动方程的水动力导数计算方法的研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 36(1): 26
WU Xingya, GAO Xiaopeng. Research on calculation method of hydrodynamic derivatives based on manipulation equation[J]. Ship Science and Technology, 2017, 36(1): 26. DOI:10.3404/j.issn.1672-7619.2017.01.006

- [2] OHMORI T, FUJINO M, MIYATA H. A study on flow field around full ship forms in maneuvering motion[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 1998, 3(1): 22. DOI:10.1007/BF01239803
- [3] ALESSANDRINI B, DELHOMMEAU G. Viscous free surface flow past a ship in drift and in rotating motion[C]//Proceeding of 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics. Washington DC: [s. n.], 1998
- [4] CARRICA P M, WILSON R V, STERN F. Unsteady RANS simulation of the ship forward speed diffraction problem [J]. *Computers & Fluids*, 2006, 35(6): 545. DOI: 10.1016/j.compfluid.2005.08.001
- [5] MILLER R W. PMM calculations for the bare and appended DTMB 5415 using the RANS solver CFD-Ship-IOWA[C]//Proceedings of Workshop on Verification and Validation of Ship Maneuvering Simulation Methods (SIMMAN2008). Copenhagen, Denmark: [s. n.], 2008
- [6] ISMAIL F, CARRICA P M, XING Tao, et al. Evaluation of linear and nonlinear convection schemes on multidimensional non-orthogonal grids with applications to KVLCC2 tanker[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2010, 64(8): 850. DOI:10.1002/flid.2174
- [7] CURA-HOCHBAUM A. On the numerical prediction of the ship's manoeuvring behaviour [J]. *Ship Science & Technology*, 2011, 5(9): 27. DOI:10.25043/19098642.49
- [8] SIMONSEN C D, STERN F. RANS simulation of the flow around the KCS container ship in pure yaw [C]//Proceedings of SIMMAN 2008 Workshop on Verification and Validation of Ship Maneuvering Simulation Methods. Lyngby: [s. n.], 2008
- [9] SIMONSEN C D, OTZEN J F, KLIMT C, et al. Maneuvering predictions in the early design phase using CFD generated PMM data [C]//Proceedings of the 29th Symposium on Naval Hydrodynamics. Gothenburg: [s. n.], 2012: 26
- [10] KIM M C, LEE S K, LEE W J, et al. Numerical and experimental investigation of the resistance performance of an icebreaking cargo vessel in pack ice conditions [J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2013, 5(1): 116. DOI:10.2478/ijnaoe-2013-0121
- [11] VROEGRIJK E. Validation of CFD-DEM against measured data [C]//Proceedings of the 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Newfoundland: [s. n.], 2015: V008T07A021. DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.10.004
- [12] 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. DOI:10.1080/17445302.2010.544086
- [13] 刘晨飞, 刘亚东, 孟毅. 月池对船舶水动力导数影响研究[J]. *舰船科学技术*, 2019, 41(3): 42
LIU Chenfei, LIU Yadong, MENG Yi. Influence of moonpool on hydrodynamic derivatives of ship [J]. *Ship Science and Technology*, 2019, 41(3): 42. DOI:10.3404/j.issn.1672-7649.2019.03.008
- [14] 孟庆杰. 限制水域运动船舶复杂粘性流场的数值模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016
MENG Qingjie. Numerical simulation of viscous flow around the ship maneuvering in restricted waters [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2016. DOI: 10.27307/d.cnki.gsjtj.2016.000144
- [15] 王建华. 基于重叠网格技术的船舶操纵运动直接数值模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2018
WANG Jianhua. Direct simulations of ship maneuver using overset grid technique [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018. DOI:10.27307/d.cnki.gsjtj.2018.000660
- [16] 郭春雨, 李夏炎, 王帅, 等. 冰区航行船舶破冰阻力预报数值模拟方法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2016, 37(2): 145
GUO Chunyu, LI Xiayan, WANG Shuai, et al. A numerical simulation method for resistance prediction of ship in pack ice[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(2): 145. DOI:10.11990/jheu.201507064
- [17] 任奕舟, 邹早建. 破冰船在冰层中连续破冰时的冰阻力预报[J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(8): 1152
REN Yizhou, ZOU Zaojian. Ice resistance prediction of an icebreaker during continuous icebreaking in level ice[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2016, 50(8): 1152. DOI:10.16183/j.cnki.jsjtj.2016.08.003
- [18] 齐江辉, 郭翔, 陈强, 等. 碎冰区航行船舶阻力预报数值模拟研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2019, 40(11): 207
QI Jianghui, GUO Xiang, CHEN Qiang. A numerical simulation research for resistance prediction of ship in crushed ice area[J]. *Journal of Ordnance Engineering*, 2019, 40(11): 207. DOI:10.11809/bqzbgcxb2019.11.041
- [19] 涂勋程. 极地物探船冰阻力预报及参数敏感性研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019
TU Xuncheng. Ice resistance prediction and parameters sensitivity study for polar geophysical prospecting vessel [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2019
- [20] 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
WANG Chao, FENG Zhen, LI Xing, et al. Analysis of ice resistance and ice response of ships sailing in brash ice[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, 13(1): 73. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2018.01.011
- [21] 骆婉珍. 碎冰区船-冰-水耦合力学特性及流场特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019
LUO Wanzen. Study on the resistance and wake field characteristics of ship-ice-water coupling in ice floe areas [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. DOI: 10.27060/d.cnki.ghbcu.2019.000003

(编辑 张红)