

块状冰对螺旋桨水动力性能的影响

杨建, 董小倩, 杨晨俊

(上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海, 200240, Email: cjyang@sjtu.edu.cn)

摘要: 以 DTMB-4381 桨为对象, 利用重叠网格方法, 对块状冰的大小、位置及运动对螺旋桨水动力性能的影响进行了非定常 RANS 数值模拟。采用切割体网格和棱柱层网格, 分别生成整个计算域的背景网格以及螺旋桨计算域和块状冰计算域的重叠网格, 在计算过程中, 背景网格区域与重叠网格区域通过两者的边界面进行数据交换。首先利用控制变量法, 研究固定冰块参数对螺旋桨水动力性能的影响, 数值模拟结果表明, 在固定冰块的影响下, 螺旋桨推力和扭矩以叶频周期性变化, 其时间平均值主要与冰块在桨盘面内的投影面积、冰桨轴向距离及冰块水平位置有关; 然后研究运动冰块对螺旋桨水动力性能的影响, 数值模拟结果表明, 在冰块沿轴向接近螺旋桨的过程中, 推力和扭矩呈振荡式上升, 且振荡频率和叶频相同。分析认为, 这一现象是由冰桨轴向距离的逐渐减小以及冰块与桨叶周向相对位置的周期性变化两者共同作用造成的。

关键词: 螺旋桨; 冰; 水动力性能; 重叠网格; RANS

1 引言

当船舶在冰区航行时, 一些冰块在船体艏部下沉并沿着船体向后移动, 临近螺旋桨甚至与螺旋桨发生碰撞和切削, 这将会对船舶推进系统带来一些不利的影响。当冰块临近螺旋桨时, 由于冰块的存在导致尾流场发生变化, 螺旋桨的进流发生改变, 对螺旋桨的水动力性能影响较大, 除此之外, 冰区船舶螺旋桨大多在重载工况下工作, 极易产生空泡, 空泡不仅使得螺旋桨水动力性能恶化, 还会引起振动、噪声及桨叶剥蚀等问题。因此研究冰对螺旋桨水动力性能的影响, 对于破冰船和冰区航行船舶推进系统的设计有着极其重要的作用。

20 世纪 90 年代之后, 国内外学者在冰桨相互作用方面取得了一系列研究成果。在冰桨未接触工况下研究方法主要有试验方法和数值计算方法。在试验研究方面, 1991 年, Browne^[1]在冰水池中对导管桨和普通螺旋桨与冰的相互作用载荷进行了试验研究, 试验得到了螺旋桨水动力载荷变化的经验公式, 并且证明了冰桨相互作用过程中螺旋桨水动力载

荷的变化具有重要影响；2004—2006 年，Wang^[2-3]等在冰水池中对吊舱推进器进行了一系列试验，研究了不同工况下吊舱推进器在预先锯开的块状冰的水池中工作时推力和扭矩的变化；王超等^[4]利用循环水槽对非接触工况下的冰桨轴向间距对螺旋桨的水动力干扰进行了试验研究；郭春雨等^[5]在拖曳水池中对模型冰位置对螺旋桨水动力性能的影响进行了试验研究；同年，武琨等^[6]在空泡水槽中对冰阻塞参数对螺旋桨水动力性能的影响进行了试验研究。在数值计算方法方面，一些学者提出了二维边界元方法、三维边界元方法、面元法等计算冰桨相互作用的势流方法，除此之外，一些学者采用黏流方法对该问题进行了一系列研究，常欣等^[7]运用重叠网格技术对桨前冰块位置对螺旋桨的水动力性能的影响进行了研究；王超等^[8]利用重叠网格方法对非接触工况下切削型冰对螺旋桨水动力性能的影响进行了数值模拟；武琨等^[9]采用滑移网格方法对冰阻塞环境下螺旋桨水动力性能和空泡形态进行了数值模拟。

迄今为止，对于未接触工况下冰桨相互作用的研究主要集中在冰块尺寸、位置对螺旋桨推力和扭矩大小的影响，但是对于冰块尺寸、位置对螺旋桨水动力性能影响规律的分析与总结较少；关于运动冰块的影响，对螺旋桨水动力性能随冰块运动速度的变化规律和速度变化对螺旋桨水动力性能的影响基本没有研究，所以针对以上两点，以 DTMB-4381 桨为对象，利用重叠网格方法，对块状冰的大小、位置及运动对螺旋桨水动力性能的影响进行了非定常 RANS 数值模拟。

2 数值模拟方法

根据相应的程序生成直径 D 为 0.25m 的 DTMB-4381 桨的模型几何，块状冰均为长方体。采用上述几何，利用重叠网格方法对不同工况下块状冰对螺旋桨的水动力性能的影响进行非定常 RANS 数值模拟。计算区域的划分和边界条件的设置如图 1 所示，整个计算区域为底面直径 $10D$ 、长 $15D$ 的圆柱体，包含螺旋桨的计算子区域为底面直径 $1.3D$ 、长 $2D$ 的圆柱体，包含块状冰的计算子区域为长方体，其尺寸随冰块尺寸变化；静止区域左端平面和四周圆柱面均设置为速度进口、右端平面设置为压力出口。

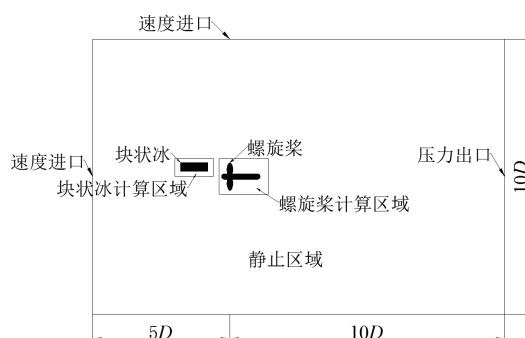


图 1 计算区域划分及边界条件设置

采用切割体网格和棱柱层网格分别生成整个计算域的背景网格以及螺旋桨计算域和块状冰计算域的重叠网格，网格总数为 849 万。分别为两个重叠网格计算区域给定不同的运动，计算过程中，每一个时间步内，背景网格中与螺旋桨计算域和块状冰计算域重叠部分的网格被挖掉，重叠网格与背景网格在两者边缘形成重叠网格交界面进行数据传递。不同计算区域的重叠网格之间的交互方式与背景网格和重叠网格之间相同。

在网格划分过程中，在桨叶及其附近进行加密，桨叶和冰块表面均设置 15 层边界层，调整第一层网格高度以确保桨叶表面 y^+ 值均小于 1，除此之外，对于重叠网格要保证不同区域重叠网格和背景网格两两之间在交界面的网格尺寸尽量一致，对于运动冰块，在其运动的路径上也要对背景网格进行加密，以保证重叠网格和背景网格之间数据的正确传递。本文计算采用 Two-layer Realizable $k \sim \varepsilon$ 湍流模型，时间离散格式为一阶，时间步长为 1/1800s。

3 数值模拟结果

3.1 参数定义

冰块长 L 、宽 W 、高 H 和冰桨轴向距离 X 、水平距离 Y 、径向距离 Z 的参数定义如图 2 所示。

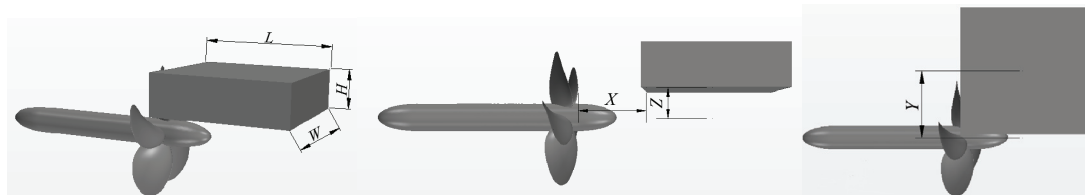


图 2 冰块尺寸及冰桨位置参数定义

3.2 DTMB-4381 桨敞水计算结果

利用重叠网格方法对 DTMB-4381 桨进行敞水数值计算的结果如图 3 所示。利用重叠网格方法得到的敞水性能计算结果与试验结果相比较，误差均小于 5%，表明本文的重叠网格模型具有合理的水动力计算精度。

3.3 固定冰块参数对螺旋桨水动力性能的影响

在研究冰块尺寸对螺旋桨水动力性能的影响的过程中，保证冰桨相对位置不变，利用控制变量法对冰块长、宽和高分别进行一系列的改变。具体计算工况如表 1 所示，冰块长、宽和高的变化对螺旋桨水动力性能的影响分别如图 4 至图 6 所示。

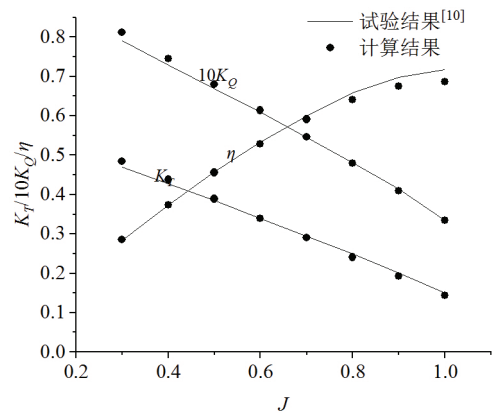


图3 DTMB-4381 桨敞水数值模拟结果

表1 固定冰块尺寸变化对螺旋桨水动力性能的影响的计算工况

项目	J	X/D	Y/D	Z/D	L/D	W/D	H/D
长度变化	0.3	0.05	0	0.2	0.25~3.0	1.0	0.3
宽度变化	0.3	0.05	0	0.2	1.0	0.25~3.0	0.3
高度变化	0.3	0.05	0	0.2	1.0	1.0	0.1~0.7

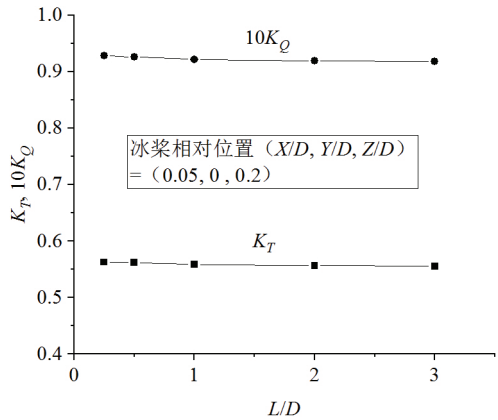


图4 冰块长度对螺旋桨水动力性能的影响

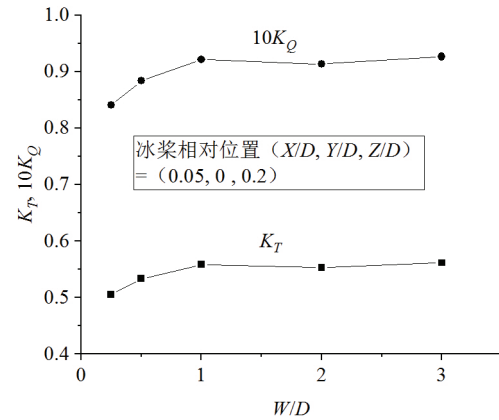


图5 冰块宽度对螺旋桨水动力性能的影响

同理，保证冰块尺寸不变，分别改变冰桨轴向距离、水平距离和径向距离来研究固定冰块的位置对螺旋桨水动力性能的影响。具体计算工况如表 2 所示，冰桨轴向距离、水平距离和径向距离对螺旋桨水动力性能的影响分别如图 7 至图 9 所示。

从图 4 至图 9 可以看出，螺旋桨推力系数和扭矩系数与冰块长度关系不大，随着冰块宽度

和高度的增加，推力系数和扭矩系数先增加之后基本不再变化；推力系数和扭矩系数均随着冰桨轴向距离和径向距离的减小而增大，当冰块位置在水平方向变化时，推力系数和扭矩系数先增大后减小但是并不对称，这和螺旋桨的旋转有关。当冰桨轴向距离和水平距离不变时，冰块尺寸的变化以及径向位置的变化本质上是冰块在螺旋桨盘面内投影面积的变化，因此将图 4~图 6 及图 9 的所有计算结果随冰块在螺旋桨盘面内投影面积的关系绘制成曲线，如图 10 所示，图中 S 表示冰块在螺旋桨盘面内投影面积与螺旋桨盘面面积的比值。

表 2 固定冰块的位置变化对螺旋桨水动力性能的影响的计算工况

项目	J	X/D	Y/D	Z/D	L/D	W/D	H/D
轴向距离变化	0.3	0.01-1.00	0	0.2	1.0	1.0	0.3
水平距离变化	0.3	0.05	-1~1	0.2	1.0	1.0	0.3
径向距离变化	0.3	0.05	0	0.2~0.6	1.0	1.0	0.3

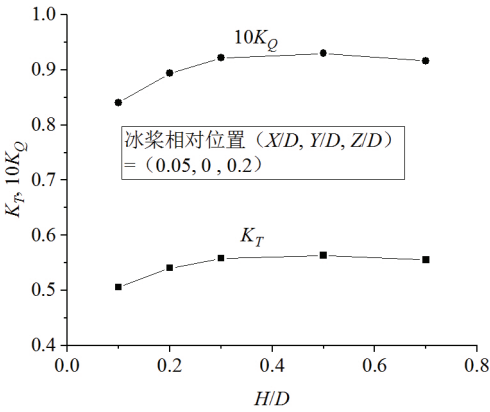


图 6 冰块高度对螺旋桨水动力性能的影响

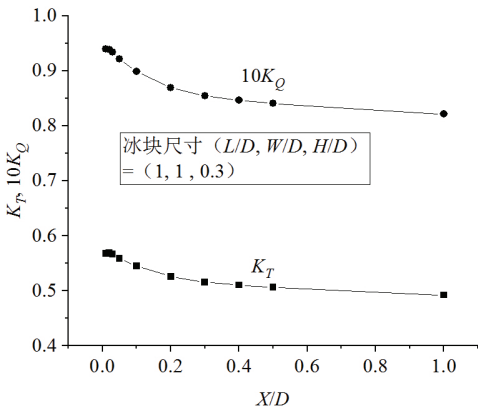


图 7 冰桨轴向距离对螺旋桨水动力性能的影响

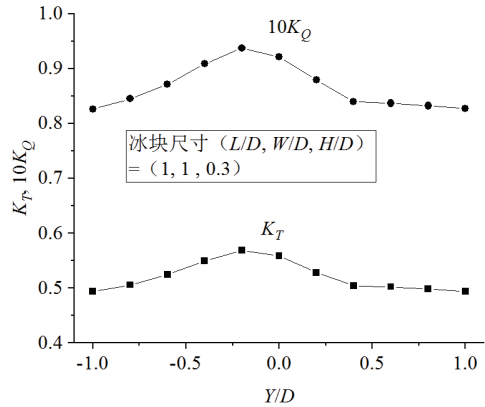


图 8 冰桨水平距离对螺旋桨水动力性能的影响

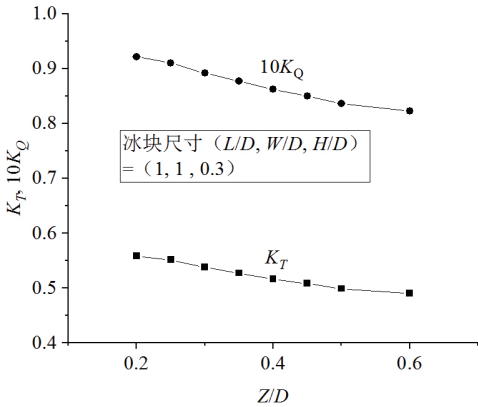


图 9 冰桨径向距离对螺旋桨水动力性能的影响

从图 10 可以看出,当冰块轴向位置和水平位置不变时,螺旋桨推力系数和扭矩系数与冰块在螺旋桨盘面内投影面积正相关。图 11 为螺旋桨在冰阻塞工况下旋转一周的过程中水动力性能随旋转角度 θ 的变化图, $\theta=0$ 时,一片桨叶位于冰块的正后方,结果显示,在螺旋桨旋转一周的过程中,推力系数和扭矩系数形成 5 个周期,其频率与叶频相同。

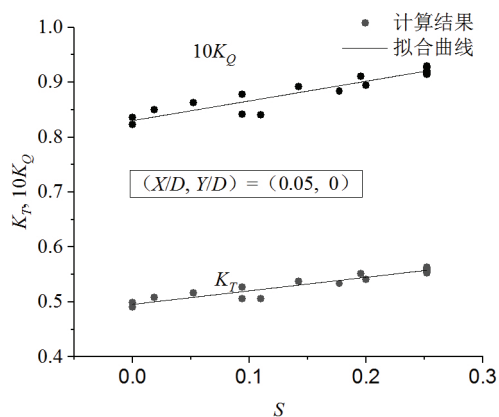


图 10 投影面积对水动力性能的影响

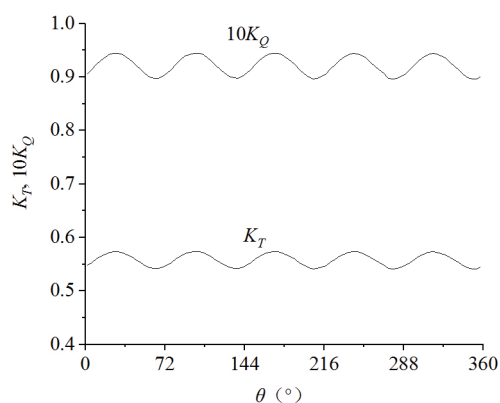


图 11 螺旋桨水动力性能随旋转角度的变化

3.4 运动冰块对螺旋桨水动力性能的影响

给定冰块尺寸、水平和径向位置,研究冰块以不同的轴向速度匀速靠近螺旋桨时对螺旋桨水动力性能的影响。在计算中,进速系数取 0.3,螺旋桨转速取 20r/s,块状冰尺寸为 $L=D$ 、 $W=D$ 、 $H=0.3D$,冰块初始位置为 $X=D$ 、 $Y=0$ 、 $Z=0.2D$,冰块分别以 V_A (进速)、 $0.75V_A$ 、 $0.5V_A$ 、 $0.25V_A$ 的速度沿轴向匀速靠近螺旋桨直至 $X=0.05D$ 。图 12 至图 15 为不同轴向速度下螺旋桨推力系数随冰桨轴向距离的动态变化。扭矩系数和推力系数表现出同样的规律,这里不再赘述。

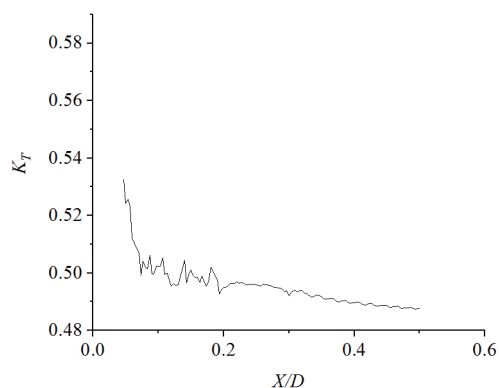


图 12 推力系数随轴向距离的动态变化 (V_A)

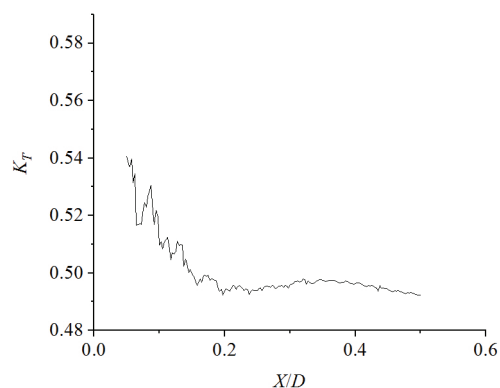


图 13 推力系数随轴向距离的动态变化 ($0.75V_A$)

从图 12 至图 15 可以看出,在冰块沿轴向接近螺旋桨的过程中,推力和扭矩并非单调递增,而是呈振荡式上升,随着冰块运动速度的减小,振荡规律逐渐明显,且振荡频率和

叶频相同。结合图 7 和图 11 分析认为,这一现象是由冰桨轴向距离的逐渐减小以及冰块与桨叶相对位置的周期性变化两者共同作用造成的。

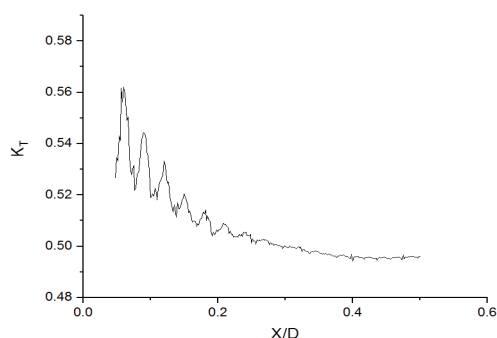


图 14 推力系数随轴向距离的动态变化 ($0.5V_A$)

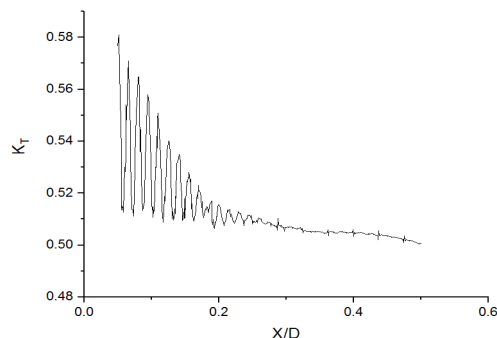


图 15 推力系数随轴向距离的动态变化 ($0.25V_A$)

4 结论

本文以 DTMB-4381 桨为对象,利用重叠网格方法,对块状冰的大小、位置及运动对螺旋桨水动力性能的影响进行了非定常 RANS 数值模拟。数值模拟结果表明,在固定冰块的影响下,螺旋桨推力和扭矩以叶频周期性变化,其时间平均值主要与冰块在桨盘面内的投影面积、冰桨轴向距离及冰块水平位置有关;在冰块沿轴向接近螺旋桨的过程中,推力和扭矩并非单调递增,而是呈振荡式上升,随着冰块运动速度的减小,振荡规律逐渐明显,且振荡频率和叶频相同,这一现象是由冰桨轴向距离的持续减小以及冰块与桨叶相对位置的周期性变化两者共同作用造成的。

参 考 文 献

- 1 Robin P. Browne, Arno Keinonen, Pierre Semery. Ice loading on open and ducted propellers[C]//Proceedings of the first(1991) International Offshore and Polar Engineering Conference. Edinburgh, 1991: 562-570.
- 2 J. Wang, A. Akinturk, W. Foster, et al. An experimental model for ice performance of podded propellers[C]//27th American Towing Tank Conference. Newfoundland and Labrador, 2004.
- 3 J. Wang, A. Akinturk, S J. Jones, et al. Ice loads acting on a model podded propeller blade [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2007, 129(3): 236-244.
- 4 王超, 叶礼裕, 常欣, 等. 非接触工况下冰桨干扰水动力载荷试验[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(08): 1190-1196.
- 5 郭春雨, 徐佩, 张海鹏. 冰对螺旋桨水动力性能影响的试验研究[J]. 船舶力学, 2018, 22(07): 797-806.
- 6 武琨, 曾志波, 张国平. 冰阻塞参数对螺旋桨水动力性能影响试验研究[J]. 船舶力学, 2018, 22(02): 156-164.

- 7 常欣, 封振, 王超, 等. 冰临近过程中螺旋桨的水动力性能计算分析[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(9): 43-50.
- 8 Chao W, Sheng-xia S, Xin C, et al. Numerical simulation of hydrodynamic performance of ice class propeller in blocked flow—using overlapping grids method[J]. Ocean Engineering, 2017, 141: 418-426.
- 9 武琨, 刘亚非, 曾志波, 等. 空泡效应对冰阻塞环境下的螺旋桨性能影响研究[J]. 中国造船, 2018, 59(01): 110-121.
- 10 Justin E. Kerwin, Chang-Sup Lee. Prediction of steady and unsteady marine propeller performance by numerical lifting-surface theory[J]. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1978, 86: 218-253.

Effects of block ice on hydrodynamic performance of propeller

YANG Jian, DONG Xiao-qian, YANG Chen-jun

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240.

Email: cjyang@sjtu.edu.cn)

Abstract: Taking the DTMB-4381 propeller as the object, the unsteady RANS numerical simulation of effects of the size, position and motion of block ice on propeller hydrodynamic performance was carried out by using the overset meshes method. The trimmed mesher and prism layer mesher are used to generate background mesh of entire calculation domain and overset meshes of propeller calculation domain and block ice calculation domain. During the calculation process, the background mesh region and the overset mesh region exchange data through their overset mesh interface. Firstly, the influence of parameters of fixed block ice on propeller hydrodynamic performance is studied by using the control variable method. Numerical simulation results show that under the influence of fixed block ice, propeller thrust and torque change periodically with blade frequency, and their time average value is mainly related to the projected area of block ice in propeller plane, the axial and horizontal distance between block ice and propeller. Then the influence of moving block ice on propeller hydrodynamic performance is studied. The numerical simulation results show that the thrust and torque increase in an oscillating manner when the block ice approaches propeller along the axial direction, and the oscillation frequency is the same as the blade frequency. The analysis shows that this phenomenon is caused by the continuous decrease of the axial distance between block ice and propeller and the periodic change of the relative position of block ice and propeller blades.

Key words: Propeller; Ice; Hydrodynamic performance; Overset mesh; RANS.