

冰水混合环境下冰区船冰水动力特性研究

赵桥生, 国威, 王习建, 韩阳

(中国船舶科学研究中心, 无锡, 214082, Email: zhaocssrc@163.com)

摘要: 冰区船舶在冰水混合环境中航行与操纵时, 作用在船体的外力被称为冰水动力, 包括水动力以及船-冰作用力等。冰区航行与操纵状态下船舶的外界作用力受冰的作用力影响较大, 相互作用过程复杂。本研究基于计算流体力学(CFD)和离散元(DEM)相结合的数值模拟方法, 对冰区船的斜航运动冰水动力开展了数值计算, 获取了典型工况的冰水动力, 冰水动力特性呈现非线性非定常的特征。

关键词: 冰区船舶; 船冰作用力; 数值计算

1 引言

随着北极海冰的加速融化, 北极地区的潜在价值越发受到关注。北方航道分为东北、西北两条航线。如若北方航道全面贯通, 亚洲与欧洲间的航程将缩短 3000km 余。

随着极地航道的开通以及油气资源的开采, 极地冰区船舶的需求也日益强烈, 全球各主要国家也都在加紧对冰区船舶的研制和开发。对我国而言, 北极海上通道和传统的航线相比, 最多能减少 50%的航程^[1]。自 2013 年“永盛”轮首次完成北极东北航道航行以来, 从 2013—2017 年间, 共派出 10 艘船舶, 累计完成 14 个北极东北航道航行, 运输货物 46.5 万计费吨, 缩短航行里程 67396n mile。

船舶在冰区航行是很危险的, 若是有可能应尽量绕过冰区, 避免冰区航行^[2]。船舶在北冰洋上航行遭遇的最大困难是冰区航行, 处理不当可能会造成船毁人亡的海难事故^[3]。船舶在冰区航行时, 由于海冰的普遍存在, 船冰作用力成为主要的环境载荷, 船舶的综合航行性能也发生了改变。王超等^[4]对破冰船在平整冰中的操纵性能进行初步简化预报, 其中船冰作用力主要基于经验估算的方法进行了冰阻力估算。冰区航行船舶的冰阻力估算方法很多^[5-14], 目前常用的有 Lindqvist 公式^[10]、Keinonen 公式^[11]和 Riska 公式^[12]。大部分的冰阻力估算公式的最大不足之处在于不能考虑具体的船体形状对冰阻力的影响。在冰区航行船舶船冰相互作用力研究方面, 也逐渐出现了离散元(DEM)和 FEM、SPH 等耦合方法^[6, 14-16]。季顺迎、李紫麟等^[17-18]针对海冰与船体相互作用时的动力特性, 建立海冰的离散单元模型, 采用三角形单元构造船体结构, 采用离散单元模型确定不同参数条件下的船冰作用力。

*基金项目: 高技术船舶科研项目(2017[614])

2 冰水动力数值计算方法

本研究采用计算流体力学 (CFD) 和离散元 (DEM) 方法相结合的数值方法模拟船舶在碎冰区中的操纵运动, CFD 方法中针对不可压缩流体, 湍流模型采用 $k-\varepsilon$ 模型。离散元方法是 Cundall 于 1971 年提出, 一种研究非连续介质问题的数值模型方法^[6]。离散元方法中采用线性弹簧接触模型来模拟粒子间的接触, 具体如下:

2.1 流体力学方法的基本理论

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i \quad (2)$$

$k-\varepsilon$ 湍流模型:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} C_{\varepsilon 1} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

式中, ρ 为流体密度, u_i 为流体速度, p 表示微元体上的压力, S_i 是广义源项, k 为湍动能, ε 为湍流动能耗散率, μ_t 为湍动黏度, G_k 是由速度梯度引起的湍动能产生项, G_b 是由于浮力引起的湍动能产生项, Y_M 是可压缩湍流的脉动扩张项, σ_k 和 σ_ε 是湍动能和耗散率的普朗特数。

2.2 离散元方法

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \vec{F}_d + \vec{F}_p + \vec{F}_g + \vec{F}_c \quad (4)$$

式中, m_p 为粒子质量, \vec{v}_p 为粒子速度, \vec{F}_d 为粒子拖曳力, \vec{F}_p 为压力梯度力, \vec{F}_g 为重力, \vec{F}_c 为粒子接触力。

拖曳力:

$$\vec{F}_d = \frac{1}{2} C_d \rho A_p |\vec{v}_s| \vec{v}_s \quad (5)$$

压力梯度力:

$$\vec{F}_p = -V_p \nabla p_{\text{static}} \quad (6)$$

式中, V_p 为粒子体积, ∇p_{static} 为连续流体静压梯度。

接触力:

$$\vec{F}_c = \sum_{\text{neighbor particles}} \vec{F}_{\text{contact}} + \sum_{\text{neighbor boundaries}} \vec{F}_{\text{contact}} \quad (7)$$

粒子间接触力:

$$\vec{F}_{\text{contact}} = \vec{F}_n + \vec{F}_t \quad (8)$$

式中, \vec{F}_n 为接触力法向分量, \vec{F}_t 为接触力切向分量。

$$\vec{F}_n = -K_n \vec{d}_n - N_n \vec{v}_n \quad (9)$$

$$\vec{F}_t = -K_t \vec{d}_t - N_t \vec{v}_t \quad (|K_t \vec{d}_t| < |K_n \vec{d}_n| C_{fs}) \quad (10)$$

$$\vec{F}_t = \frac{|K_n \vec{d}_n| C_{fs} \vec{d}_t}{|d_t|} \quad (|K_t \vec{d}_t| \geq |K_n \vec{d}_n| C_{fs})$$

式中, K_n 为法向弹簧系数, K_t 为切向弹簧系数, C_{fs} 为摩擦系数。

$$N_n = 2N_{n \text{ damp}} \sqrt{K_n M_{eq}} \quad (11)$$

$$N_t = 2N_{t \text{ damp}} \sqrt{K_t M_{eq}}$$

式中, $N_{n \text{ damp}}$ 为法向阻尼系数, $N_{t \text{ damp}}$ 为切向阻尼系数。

3 冰水动力特性计算与分析研究

选取一条破冰科考船为计算对象, 采用上述数值方法, 进行了开敞水域的水动力和碎冰区中航行的冰水动力数值计算。计算对象的船模主尺度参数如表 1 所示。

表 1 计算对象的船模主要参数

参数	符号	单位	船模
船长	L	m	4.175
型宽	B	m	0.565
设计吃水	T	m	0.200
排水体积	V	m ³	0.276

由于本研究模拟的是船在碎冰航道的斜航运动, 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。船模的冰水动力数值计算时, 海冰的弹性模量取 5.0E+07, 泊松比取 0.3。

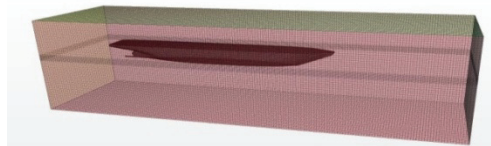


图 1 计算域及边界条件

船舶在碎冰区航行与操纵运动数值计算时，碎冰厚度取 0.02m，航道内碎冰分布密集度为 75%，船模的初始速度为 0.4m/s，斜航运动工况取船的漂角为 3° 。作用在船体上的水动力和总的冰水动力的时历曲线如图 2~图 4 所示。从图 2 至图 4 可以看出，与常见的水动力性能相比，作用在船模上的总的冰水动力呈现明显的非线性非定常的特征。

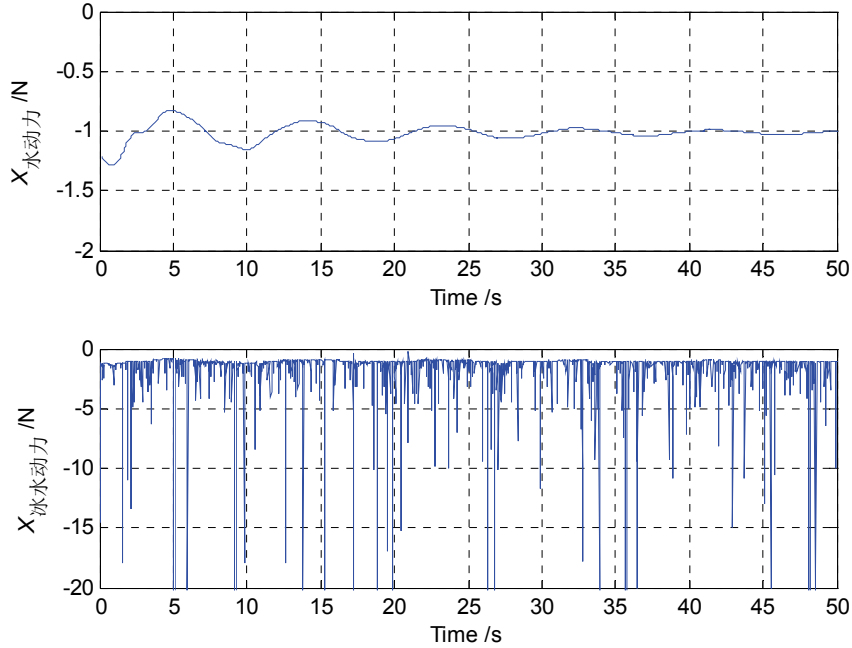


图2 船体纵向水动力和总的冰水动力（漂角 3° ）

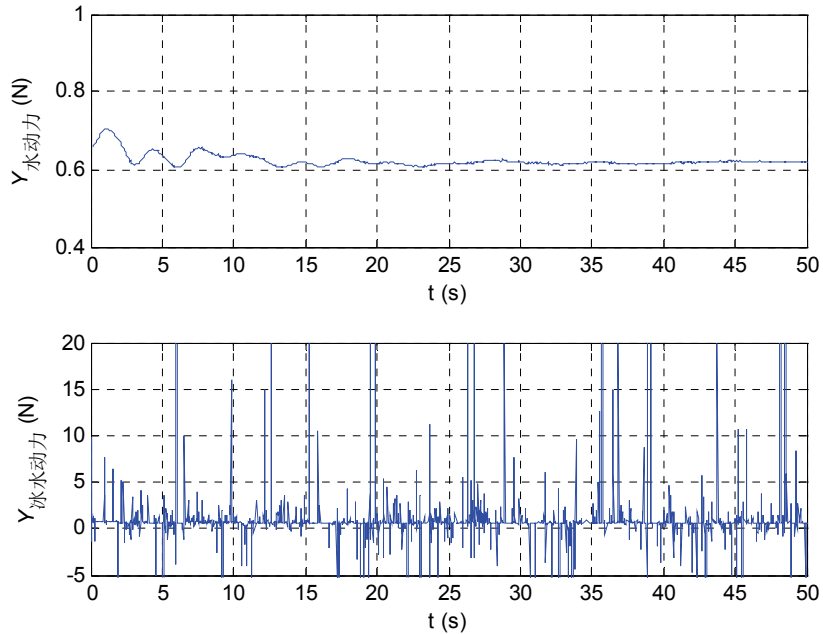


图3 船体侧向冰水动力和船冰作用力（漂角 3° ）

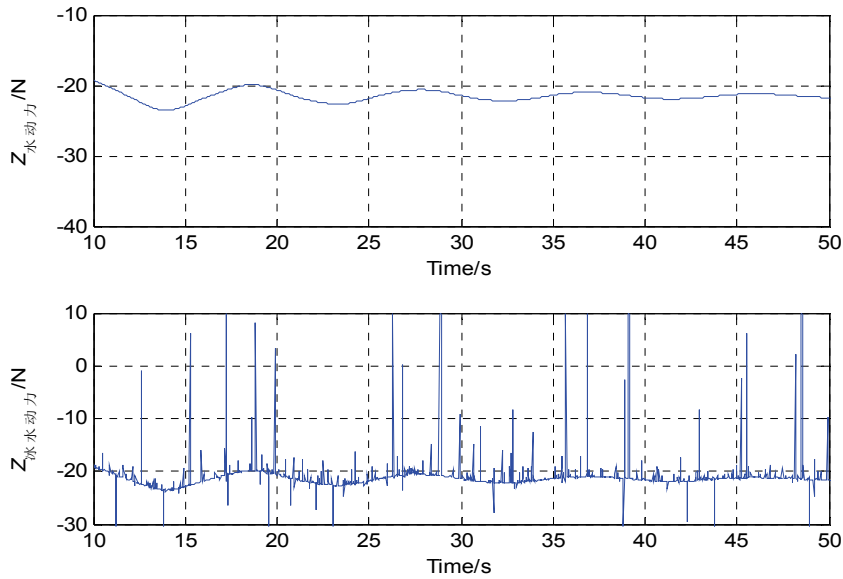


图4 船体垂向冰水动力和船冰作用力（漂角 3° ）

图5给出了作用在船体上的冰力，图6给出了冰区船在碎冰区直航运动状态下的冰水混合场，图7给出了冰区船在碎冰区直航和斜航操纵运动状态下的冰水混合场。从图6和图7中可以明显地看出，冰区船在碎冰区运动时，具有碎冰在船首翻转，碎冰沿船体滑动等现象。

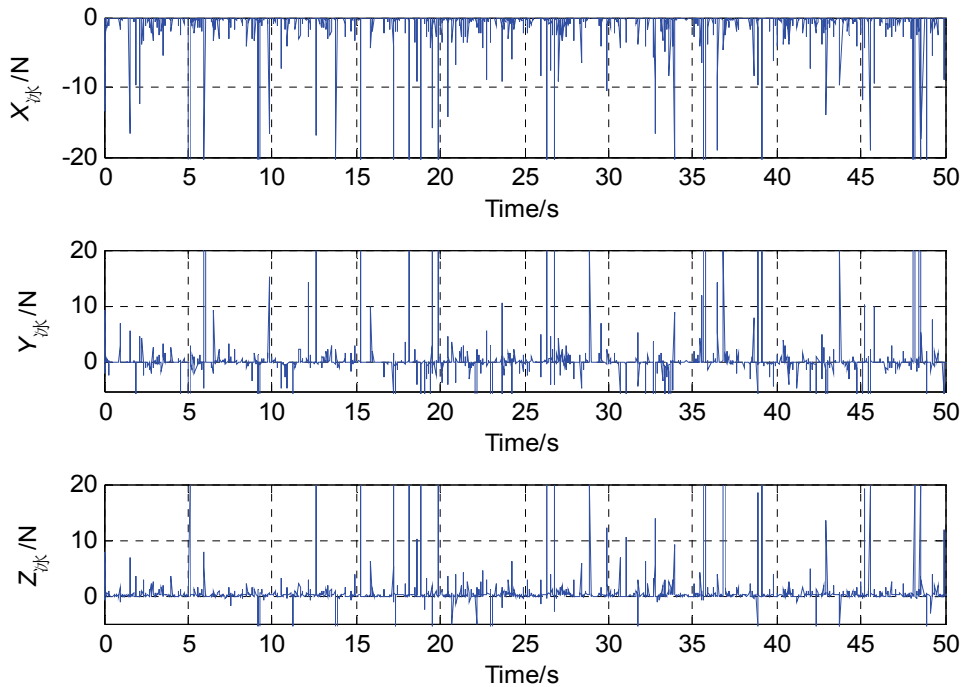


图5 船体冰阻力、侧向冰力和垂向冰力

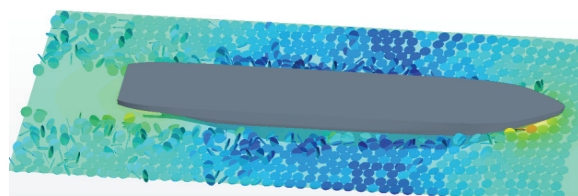


图6 碎冰区船舶直航运动数值模拟

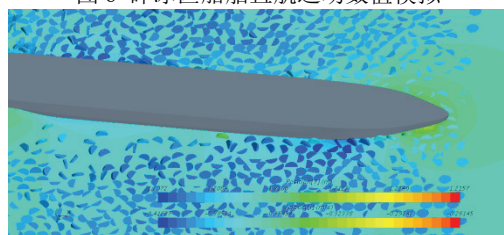


图7 冰区船碎冰区斜航运动数值模拟

4 结论

冰区船的冰水动力学是船舶在冰区航行与操纵的基础问题之一。针对冰区船舶在碎冰区航行与操纵时的船冰作用力问题，本研究基于计算流体动力学和离散元相结合的冰水动力数值模拟方法，获取了船舶在碎冰区航行的冰水动力，并能分离出水动力和船冰作用力成分。该数值计算方法可以有效地模拟出碎冰在船首翻转，碎冰沿船体滑动等现象。本研究获得的斜航运动冰水动力结果，为该船在冰区的航行与操纵运动预报提供了基础。

对于冰区船的船冰作用力问题，后续将进行冰的物理参数及力学特性等参数的影响研究。本工作只是一个开端，冰区船的冰水动力相关数值方法还处于发展之中，相关方法有待于进一步的试验验证。

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. 中国舰船研究[J]. 2015(10): 37-44.
- 2 孙凤羽. 冰区船舶操纵[J]. 中国航海. 1995(36): 89-93.
- 3 顾维国, 张秋荣, 胡志武. 北冰洋冰区航行的船舶操纵[J]. 航海技术. 2011(1).
- 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.
- 5 于晨芳, 吕烈彪, 柳卫东. 破冰船冰阻力估算方法研究[J]. 造船技术研究. 2018.4:73-81.
- 6 季顺迎. 计算颗粒力学及工程应用[M]. 科学出版社.2018.6.
- 7 Lewis J W, Edwards Jr R Y. Methods for predicting icebreaking and ice resistance characteristics of icebreakers. 1970.
- 8 ENKVIST E, VARSTA P, RISKA K. The ship-ice interaction[C]// Proceedings of the Fifth International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Trondheim, Norway, 1979:977-1002.
- 9 Lewis J W, DE Bord F W, Bulat V A. Resistance and propulsion of ice-worthy ships. Transactions-Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1982(90): 249-276.
- 10 Edwards, R.Y.J. et al., Influence of major characteristics of icebreaker hulls on their powering requirements and maneuverability in ice. Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), 1976(84):364-407.
- 11 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.
- 12 KEINONEN A J, BROWNE R, REVILL C, REYNOLDS A. Icebreaker characteristics synthesis[R]. Ontario, Canada, 1996.
 - 13 RISKI K, WILHELMSON M, ENGLUND K, LEIVISKA T. Performance of merchant vessels in the Baltic[R]. Winter Navigation Research Board. Helsinki, Finland, 1997.
 - 14 SPENCER D, JONES S J. Model-scale/full-scale correlation in open water and ice for Canadian Coast Guard "R-Class" icebreakers [J]. Journal of Ship Research, 2001, 45(4):249-261
 - 15 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.
 - 16 Xue Yanzhuo, Lu Xikui, Wang Qing. Simulation of three-point bending test of ice based on peridynamic[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(4): 607-613.
 - 17 Ji Shunying, Li Chunhua, Liu Yu. A review of advances in sea-ice discrete element models[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2012, 24(4): 315-330.
 - 18 Ji Shunying, Li Zilin, Li Chunhua, et al. The study of ice induced vibration on marine platforms by dynamic model test[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013(4): 520-526.

Study on interaction forces of ships-ice-water

ZHAO Qiao-sheng, GUO Wei, WANG Xi-jian, HAN Yang

(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China, Email: zhaocssrc@163.com)

Abstract: When a ship is navigating and maneuvering in the ice-water mixed environment, the external force acting on the hull is complicated, including hydrodynamics and ship-ice forces. The ship's external force is greatly affected by the ice when the ship is in the state of navigation and maneuvering, and the interaction process is complicated. Based on the numerical simulation method of computational fluid dynamics (CFD) and discrete element method (DEM), the oblique motion of ship in ice is carried out. The forces acting on the ship model is obtained, and the characteristics of nonlinear and unsteady are obvious. It can offer the reference to the researchers of ship maneuvering in ice.

Key words: Ship in ice; ice load; numerical simulation.