

上浪冲洗对浮冰摇荡运动影响特性研究

张曦, 朱仁庆, 李志富*

(江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 镇江, 212003, Email: 2351230383@qq.com

Email: zhifu.li@hotmail.com)

摘要: 冰缘区是海冰与开阔水域交界的区域, 也是受波浪影响最直接的区域, 该区域处的海冰主要以碎冰状态存在。本研究基于计算流体力学技术, 采用速度入口造波方式建立三维数值波浪水池。在给定波高的情况下, 研究了浮冰在不同波长规则波中垂荡和纵摇运动响应。在数值水池中模拟了波浪冲洗冰体表面的现象, 并且研究了波浪冲洗冰体表面对浮冰运动的影响, 对比分析了浮冰在有/无波浪冲洗冰体表面工况下的运动响应。计算结果表明, 在小波长的情况下, 波浪冲洗冰体表面现象较明显, 它们对浮冰运动具有较强的抑制作用。

关键词: 浮冰; 冰缘区; 波浪冲洗; 运动响应

1 引言

北极拥有丰富的自然资源, 其资源的开发利用对世界经济的可持续发展具有重要的战略意义。随着全球变暖的加剧, 北极海冰覆盖面积的季节性减少使得北极资源大规模的开发成为可能。因此, 冰缘区成为人们研究的主要区域。波浪对海冰的影响主要发生在冰缘区, 是决定冰缘区形态结构的主要因素^[1]。

对于浮冰在波浪里的运动, 人们开展了大量的理论与试验研究。郭春雨^[2]在试验研究中关注到了冰体上浪现象, 并且考虑到该现象对浮冰运动造成的非线性影响。对于大波长工况下浮冰运动, Meylan^[3]提出了基于改进的莫里森方程建立的理论模型来预测浮冰的纵荡运动。同时, Meylan^[4]建立了海冰弯曲运动的理论模型, 与试验数据对比, 发现波浪冲洗现象对海冰弯曲运动没有影响。在小波长的条件下, Skene^[5]提出了利用非线性浅水方程模拟冲洗过程, 利用线性势流理论和线性薄板模型迫使产生冲洗现象, 并与试验进行对比。此外, 该文对冲洗造成的薄板上表面堆积的水的高度进行了研究。Yiew^[6]分别基于斜坡滑动理论和线性势流-薄板理论建立理论模型, 其中线性势流-薄板模型未考虑波浪冲洗浮体表面的现象, 使得其预测值与试验值存在误差。

随着计算流体力学的发展,越来越多学者利用数值模拟的方法。Huang^[7]特别关注了波浪冲洗冰体表面和波浪散射现象。Bai^[8]利用势流软件和黏流软件对浮冰在波浪中的运动响应进行数值模拟并与试验结果作对比,验证了黏流软件更适合于模拟浮冰运动。

因此,本研究采用考虑黏性数值模拟的方法模拟有/无护栏浮冰在波浪中的运动。考虑不同波长波浪冲洗冰体表面现象对浮冰垂荡、纵摇运动幅值的影响。

2 数值计算方法

在求解浮冰在波浪中的运动的问题时需要求解流动控制方程。同时考虑到实际工程问题中的湍流流动,需要将控制方程中的各项分解为时间平均值和相对于这些平均值的脉动值两部分,因此得到湍流时均量所满足的方程组,即雷诺时均方程组,其表达如下

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{v}} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{\mathbf{v}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{v}} \bar{\mathbf{v}}) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}} - \rho \overline{\mathbf{v}' \mathbf{v}'}) + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

式中, $\bar{\mathbf{v}}$ 为时均速度, \bar{p} 为压力, \mathbf{v}' 为时均速度的脉动值, $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ 为黏性应力, $\rho \overline{\mathbf{v}' \mathbf{v}'}$ 为雷诺应力,它是湍流涨落所引起的时均效应。在随浮体进行平移和旋转的运动坐标系中,浮体的运动方程为

$$m \left(\frac{d\mathbf{V}}{dt} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V} \right) = \mathbf{f} \quad (3)$$

$$\mathbf{I} \cdot \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} + \boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\Omega}) = \mathbf{m} \quad (4)$$

式中, m 为浮体质量, \mathbf{I} 为浮体转动惯量, \mathbf{f} 为流体施加于浮体的合外力, \mathbf{m} 为浮体受到的合外力矩。

3 算例设置

选用 RKE 2L 湍流模型^[9]来对控制方程进行封闭求解。离散方法选用有限体积法,采用 PIMPLE 算法将压力速度进行耦合。采用 VOF 法对自由液面进行捕捉。如图 1 所示,计算区域为 $4.5\text{m} \times 2\text{m} \times 0.8\text{m}$,其中水深为 0.5m 。水池左边界、上边界以及下边界设置为速度

入口条件；前后两侧边界设置为对称边界条件；右侧边界设置为压力出口条件。入口消波区和出口消波区长度分别取为一个波长长度。在水池中加入浮冰模型，如图 2 所示，浮冰模型采用了两种模型，一个为圆柱体，另一个为加护栏的圆柱体，放置于距离入口 1.5m 处。圆柱直径 0.5m，高度 0.05m，入水深度为 0.03m。其中为了防止流体冲洗冰体表面，在圆柱上表面增加了一圈薄护栏，护栏高度为 0.05m，厚度尺寸很小可忽略不计。

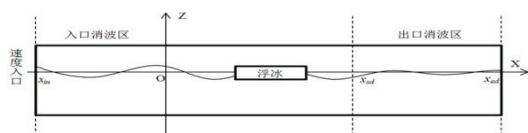


图 1 三维数值水池

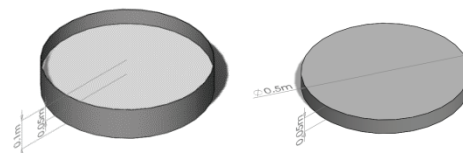


图 2 两种浮冰模型

本研究采用重叠网格技术来模拟浮冰运动，在背景网格中对自由液面区域进行加密，并且对浮体运动区域也进行了网格加密。网格纵剖图如图 3 所示。

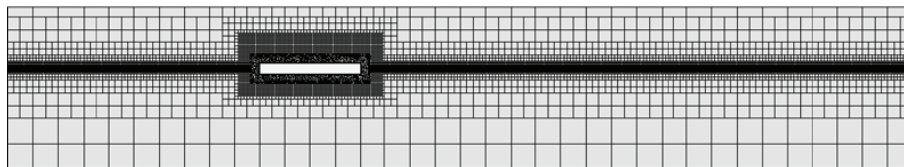


图 3 重叠网格纵剖图

4 计算结果及分析

为了探索浮冰与不同波长（0.6~1.0m）入射波相互作用，对浮冰垂荡、纵摇运动响应进行了频谱分析。

海冰受到波浪的作用会发生剧烈的运动，大量的水会涌上冰体表面。通过数值模拟发现，随着波长增加，波浪冲洗冰体现象逐渐变弱。

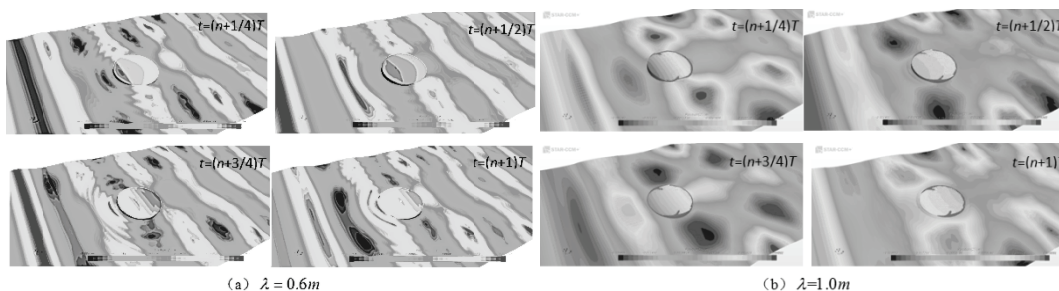


图 4 不同波长的波浪冲洗冰体表面过程

图 4 中描述了不同波长的波浪中无护栏海冰表面所受到的冲洗现象。图 4 (a) 对应波

长为 0.6m，浮冰上表面被水体完全覆盖，表现出较强的波浪冲洗现象；图 4 (b) 对应波长为 1.0m，浮冰上表面没有被水体完全覆盖，相较于前者，其所受的波浪冲洗现象较弱。

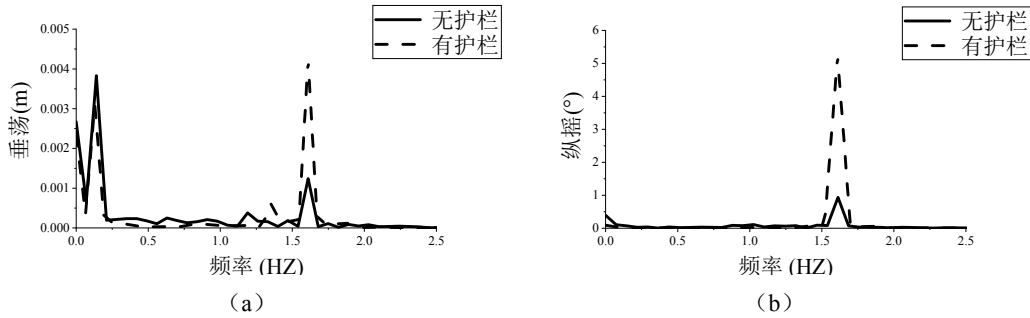


图 5 波长 $\lambda=0.6m$ 的浮冰运动响应谱分析

表 1 不同波长下浮冰垂荡运动响应谱分析

波长	响应频率阶数	响应频率 (无护栏)	幅值 (无护栏)	响应频率 (有护栏)	幅值 (有护栏)
$\lambda=0.6$	1	0.13995	0.00383	0.12875	0.00309
	2	1.6094	0.00124	1.60937	0.00422
$\lambda=0.7$	1	0.13548	0.00407	0.1354	0.00248
	2	1.49031	0.00227	1.4894	0.00767
$\lambda=0.8$	1	0.12723	0.00384	0.12664	0.00262
	2	1.39949	0.00275	1.39302	0.01055
$\lambda=0.9$	1	0.13148	0.00373	0.13212	0.00173
	2	1.31484	0.00261	1.3188	0.01202
$\lambda=1.0$	1	0.12974	0.00288	0.13061	0.00276
	2	1.23257	0.00416	1.24078	0.01469

表 2 不同波长下浮冰纵摇运动响应谱分析

波长	响应频率阶数	响应频率 (无护栏)	幅值 (无护栏)	响应频率 (有护栏)	幅值 (有护栏)
$\lambda=0.6$	1	1.61267	0.93522	1.60915	5.24093
$\lambda=0.7$	1	1.49031	1.19767	1.49048	7.05449
$\lambda=0.8$	1	1.39746	1.91958	1.3973	9.38222
$\lambda=0.9$	1	1.31827	2.63881	1.31779	8.62609
$\lambda=1.0$	1	1.24026	3.05963	1.24037	6.06502

图 5 中给出了 $\lambda=0.6$ 的浮冰垂荡、纵摇的频谱分析图。可以发现浮冰垂荡固有频率

处,冰体表面上浪对该处频率以及振动幅值大小没有影响,有护栏浮冰与无护栏浮冰的振动幅值差异不大。波浪激励频率下,无护栏浮冰的垂荡运动幅值一般小于有护栏浮冰垂荡运动幅值。在纵摇运动响应中,无护栏浮冰在波浪激励处的运动幅值也远远小于有护栏浮冰。表1和表2整理出了不同工况下浮冰垂荡、纵摇运动,与图5中给出的趋势相同,无护栏浮冰在波浪激励频率下的垂荡,纵摇运动幅值远远低于有护栏浮冰的幅值。造成幅值差异的原因主要是波浪冲洗冰体表面,堆积在冰体表面的水阻碍了浮冰的运动。

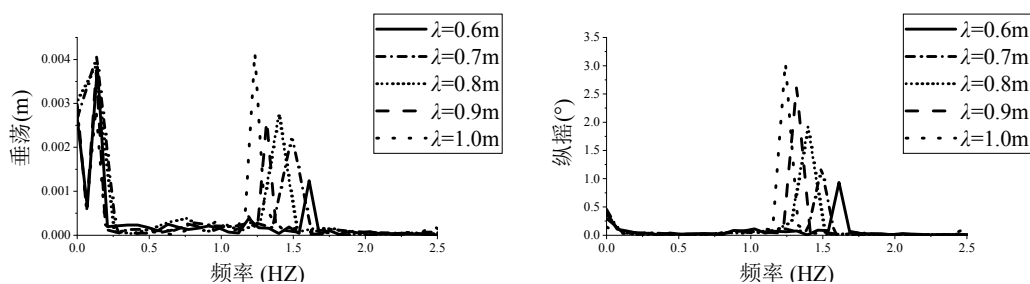


图6 不同波长对浮冰的运动响应影响

图6给出了不同波长下,即不同波浪激励频率下的波浪冲洗现象对浮冰运动的影响,随着波长减小,浮冰的垂荡运动幅值与纵摇运动幅值也减小。在短波长时,波陡较大,波浪与浮冰的相互作用较强。因此,导致波浪冲洗冰体表面现象较严重,堆积在冰体表面的水比较多,对浮冰运动产生比较大的抑制作用,从而导致了浮冰运动幅值的减小。在浮冰垂荡固有频率处,波长的增加或减少对浮冰运动幅值没有影响。

5 结论

本研究通过数值模拟两种浮冰模型(带护栏/无护栏)在波浪中的运动来分析有/无上浪现象对浮冰垂荡与纵摇运动的影响。研究发现:①波浪冲洗冰体表面现象对垂荡运动的固有频率以及该处振动幅值几乎没有影响;②在波浪激励频率处,短波长时,波浪冲洗冰体表面现象更严重;③波浪冲洗冰体表面现象对浮冰垂荡,纵摇运动幅值有明显的抑制作用;④随着冲洗现象变强,其对浮冰运动抑制作用越强。

参考文献

- 1 骆婉珍,郭春雨,苏玉民.冰缘区船舶与波浪及海冰耦合作用研究与进展[J].中国造船,2017(2).
- 2 郭春雨,宋妙妍,骆婉珍.海冰在波浪中纵向运动的试验研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2017(6).
- 3 Meylan M H , Yiew L J , Bennetts L G , et al. Surge motion of an ice floe in waves: comparison of a

- theoretical and an experimental model[J]. *Annals of Glaciology*, 2015, 56(69):46 - 52.
- 4 Meylan M H , Bennetts L G , Cavaliere C , et al. Experimental and theoretical models of wave-induced flexure of a sea ice floe[J]. *Physics of Fluids*, 2015, 27(4):041704.
- 5 Skene D M , Bennetts L G , Meylan M H , et al. Modelling water wave overwash of a thin floating plate[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015.
- 6 Yiew L J , Meylan M H, Bennetts L G , et al. Hydrodynamic responses of a thin floating disk to regular waves[J]. *Ocean Modelling* , 2016, 97:52-64.
- 7 Loufeng Huang , Giles Thomas. Simulation of wave interaction with a circular ice floe [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2019.
- 8 Bai W , Zhang T , MCGovern D J . Response of small sea ice floes in regular waves: A comparison of numerical and experimental results[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 129:495-506.
- 9 Rodi, W. Experience with Two-Layer Models Combining the k-e Model with a One-Equation Model Near the Wall[C]. 29th Aerospace Sciences Meeting, 1991.

The influence of overwash on the motion response of ice floe

ZHANG Xi, ZHU Ren-qing, LI Zhi-fu *

(Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, 212003, Email:2351230383@qq.com

Correspondence: Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, 212003,

Email:zhifu.li@hotmail.com)

Abstract: A transition between open sea and ice covered water is known as the marginal ice zone (MIZ). The sea ice in the MIZ mainly exists in form of comprised ice floes, which is more sensitive to waves. In this paper, a three-dimensional numerical wave tank (NWT) is established based on computational fluid dynamics (CFD) technology. The wave is generated by imposing a specified velocity condition on the inlet boundary. The heave and pitch motion responses of an ice floe in regular waves are studied, with several wavelengths and a fixed wave height. The overwash phenomenon, as well as its impact on the ice floe motion, are investigated. This is obtained through the comparison of motion response for ice floes with and without the barrier. The result shows that in the case of small wavelength, the effect of overwash phenomenon is more prominent, i.e. the ice motion will be suppressed significantly.

Key words: Ice floes; Marginal ice zone; Overwash; Motion response