

# 弹性冰群与波浪相互作用的数值模拟<sup>1</sup>

张崇伟<sup>2,\*</sup>, 庄乾泽<sup>2</sup>, HUANG Luofeng<sup>3</sup>, 宁德志<sup>2</sup>

(<sup>2</sup>大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024;

<sup>3</sup>Dept. of Mechanical Engineering, University College London, London WC1E 7JE;

\*通讯作者 Email: chongweizhang@dlut.edu.cn)

**摘要:** 本文围绕弹性冰群与波浪相互作用问题, 建立了基于 OpenFOAM 开源软件的数值计算模型, 实现了流体与弹性浮冰耦合运动的双向迭代求解, 并以规则波与两片弹性浮冰的相互作用为例, 分析了浮冰间距和浮冰刚度等参数对二维波浪传播特性的影响。研究发现, 在所考虑的参数范围内, 刚度越大、间距越小的两块浮冰, 对应的波浪反射系数越小、透射系数越大, 并且波浪反射系数的减小幅度大于透射系数的增加幅度。

**关键词:** OpenFOAM; 流固耦合; 浮冰; 波物作用; 水弹性

## 1 引言

随着全球气候变暖, 夏季北极边缘冰区 (Marginal ice zone, MIZ) 范围逐渐扩大<sup>[1]</sup>, 边缘冰区内船舶通航正日渐成为现实。与传统开敞水域环境相比, 边缘冰区中浮冰密布, 浮冰的存在会对波浪环境产生复杂影响, 给船体运动安全预报带来极大的不确定性。因此, 波浪与浮冰如何发生相互作用, 已成为当前北极航道议题中至关重要的基础科学问题。

围绕浮冰与波浪的相互作用问题, 许多学者采用理论解析方法开展了广泛研究。例如, Kohout 与 Meylan<sup>[2]</sup>采用特征函数匹配法研究了波浪在边缘冰区的传播, 得到了波浪能量的衰减规律; Bennetts 等<sup>[3]</sup>在此基础上建立了三维模型, 并与实验数据进行了对比分析。部分学者也开展物理模型实验工作。例如, Meylan 等<sup>[4]</sup>采用两种不同材料属性的正方形薄板来近似波浪场中弹性漂浮冰板, 并与理论解进行对比; Sree 等<sup>[5]</sup>采用分段浮动粘弹性覆盖层来近似冰层, 模拟其对波浪传播的影响, 结果显示粘弹性对波浪衰减具有重要作用。此外, Squire 等<sup>[6]</sup>则在白令海边缘冰区开展实地测量, 发现大量浮冰可导致波浪传播发生指数型能量衰减的特性。

<sup>1</sup> 国家自然科学基金 (51709038 和 51739010)、中国博士后科学基金(2018M630289 和 2019T120209)、中央高校基本科研业务费专项资金 (DUT19RC(4)027) 资助项目。

理论解析方法常常引入线性势流理论假设, 难以处理越浪等强非线性波浪现象。近年来, 随着计算流体力学技术的快速发展, 已有学者开始采用数值模拟方法, 研究强非线性波浪与浮冰的相互作用问题。例如, Huang 等<sup>[7]</sup>使用 OpenFOAM 开源软件模拟了规则波与单片弹性浮冰的相互作用问题; 倪宝玉等<sup>[8]</sup>应用 Fluent 软件研究了在规则波作用下多块刚性浮冰的运动响应。在实际边缘冰区环境中, 浮冰大多群状分布且浮冰弹性不能忽略。本文围绕弹性冰群与波浪耦合作用问题, 建立基于 OpenFOAM 开源软件的数值计算模型, 实现双向流固耦合的隐式迭代求解, 并以规则波与两片弹性浮冰的相互作用为例, 模拟和分析浮冰间距和浮冰刚度等参数对二维波浪传播特性的影响。

## 2 数学模型

本文所建数值模型将计算域划分为流体域和固体域两部分。流体域满足 Navier-Stokes 方程组

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

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{v}$  是流体质点速度,  $P$  是流体压力,  $\rho$  是流体密度,  $\mu$  是流体动力粘性系数。采用了 VOF 方法追踪流体自由表面, 在整个计算域内定义标量场  $\alpha$ , 标识各网格内液相所占的体积分数。其中,  $0 \leq \alpha \leq 1$ ,  $\alpha = 0$  表示该网格完全处于气相,  $\alpha = 1$  表示该网格完全处于液相。在固体域, 采用线性动量守恒定律描述固体变形, 并采用拉格朗日表达式

$$\rho_0 \int_{V_0} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right) dV - \oint_{S_0} \mathbf{n} \cdot (2\mu + \lambda) \nabla \mathbf{u} dS = \oint_{S_0} \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} dS + \rho_0 \int_{V_0} \mathbf{g} dV \quad (3)$$

其中, 下标 0 表示初始物理量,  $\mathbf{u}$  是位移矢量,  $\mu$  和  $\lambda$  是拉梅常数<sup>[9]</sup>。

结合开源工具箱 waves2Foam, 实现数值波浪水池的造波和消波功能。造波功能通过定义数值波浪水池速度入口方法实现, 消波功能则通过在数值波浪水槽前后两端分别设置松弛区来实现。松弛区内引入一个空间加权因子  $\omega_R$ , 用以表征了目标值和计算值之间的权重。

对流体域和固体域同时采用有限体积法分别进行离散求解, 并根据位移连续的原则, 在流固相交界面利用 waveFsiFoam 求解器进行双向耦合。在每一个时间步均进行充分的双向耦合迭代求解, 直至满足精度要求; 然后步进至下一时间步, 开启新一轮迭代计算。该双向耦合计算流程如图 1 所示。

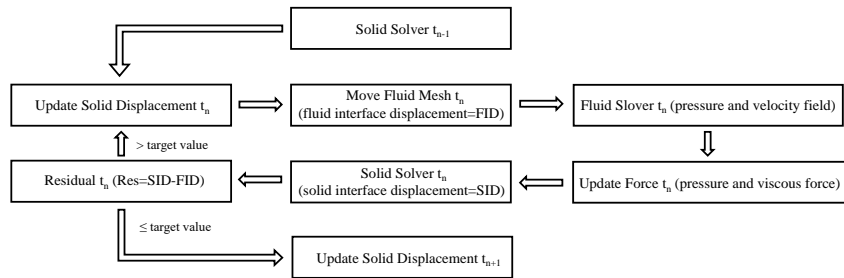


图 1 双向流固耦合的迭代求解流程

### 3 数值模型与结果分析

如图 2 所示，建立二维数值波浪水槽。水槽长 12m，高 0.6m，水深  $h=0.45\text{m}$ ，造波区长  $Z_i=3\text{m}$ ，消波区长  $Z_r=3\text{m}$ 。 $d$  为浮冰长度， $m$  为浮冰厚度， $L$  为浮冰间距，并采用下标  $l$  和  $r$  分别标记迎浪侧和背浪侧两块浮冰。水槽左侧边界为速度入口，顶部为总压为 0 的大气边界，底部为海底固壁边界。为防止浮冰发生水平漂移运动，将每块浮冰背浪面设置为固壁边界，而其他三个面均为自由边界。建立直角坐标系  $Oxy$ ， $O$  位于水槽左侧底角， $x$  轴水平向右， $y$  轴垂直向上。

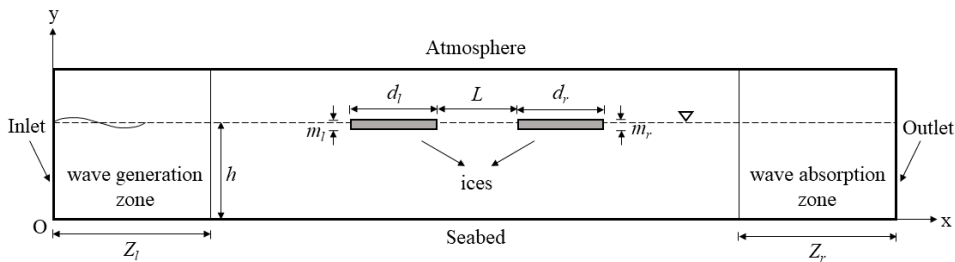


图 2 计算域示意图

网格划分情况如图 3 所示。计算域内网格沿水平方向均匀分布，各网格长 0.01m；在垂直方向上，流体域网格在自由面附近高度最小(设为 0.002m)，固体网格高度设为 0.008m。网格收敛性验证具体参见 Huang 等<sup>[7]</sup>。

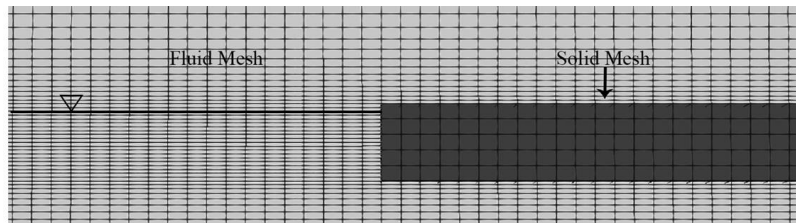


图 3 网格布置示意图

围绕浮冰刚度和间距对波浪传播特性的影响, 本文设置六组工况。如表 1 所示,  $T$  为入射波周期,  $H$  为入射波高,  $E$  为浮冰的杨氏模量,  $\mu$  为浮冰的泊松比。对于  $L=1\text{m}$  的工况, 两块浮冰关于水槽中垂线左右对称分布; 对于  $L=0.8\text{m}$  或  $1.2\text{m}$  的工况, 通过移动右侧浮冰位置来达到改变间距的目的。浮冰刚度数据参考相关实验论文得到, 并将其中第 4 组工况中的浮冰设置为刚体。

表 1 浮冰与波浪相互作用工况参数表

Case	$T(\text{s})$	$H(\text{m})$	$m_l(\text{m})$	$m_r(\text{m})$	$E(\text{MPa})$	$d_l(\text{m})$	$d_r(\text{m})$	$L(\text{m})$	$\mu$
1	1	0.03	0.04	0.04	860	1	1	1	0.4
2	1	0.03	0.04	0.04	1600	1	1	1	0.4
3	1	0.03	0.04	0.04	4000	1	1	1	0.4
4	1	0.03	0.04	0.04	$\infty$	1	1	1	0.4
5	1	0.03	0.04	0.04	1600	1	1	1.2	0.4
6	1	0.03	0.04	0.04	1600	1	1	0.8	0.4

表 2 给出了各个工况下, 两块浮冰对波浪的反射系数  $C_R$  和透射系数  $C_T$ 。对比工况 1~4 可以发现, 在所考虑的参数范围内, 浮冰刚度越大对应的波浪反射系数越小、透射系数越大, 并且波浪反射系数的减小幅度往往大于透射系数的增加幅度。图 4 展示了当浮冰刚度逐渐增大时, 右侧浮冰上表面发生越浪的典型时刻。对于工况 1, 右侧浮冰上表面几乎未出现越浪现象; 而工况 2 和 3 条件下, 右侧浮冰上表面的越浪量逐渐增加; 当工况 4 设置为刚性浮冰时, 越浪现象最为明显。这可能是因为弹性浮冰产生了更强的波浪反射, 导致浮冰间水体振荡幅值减小, 进而减小了波浪在右侧浮冰上表面越浪的可能性。

表 2 规则波中双块弹性浮冰的反/透射系数

Case	1	2	3	4	5	6
$C_R$	0.800	0.750	0.722	0.721	0.783	0.657
$C_T$	0.107	0.122	0.139	0.156	0.084	0.210

对比工况 2、5 和 6 则可以发现, 随着浮冰间距减小, 波浪反射率减小, 透射率增加。图 5 展示了工况 6 中当两块浮冰间距  $0.8\text{m}$  时, 浮冰之间液面在同一周期内的连续波动瞬间。图中可见, 波浪在冰间水域形成了类似驻波的现象, 波浪反复碰撞左右两侧浮冰, 在两侧浮冰上表面均发生了复杂的越浪现象, 越浪现象会加大波浪的能量耗散。

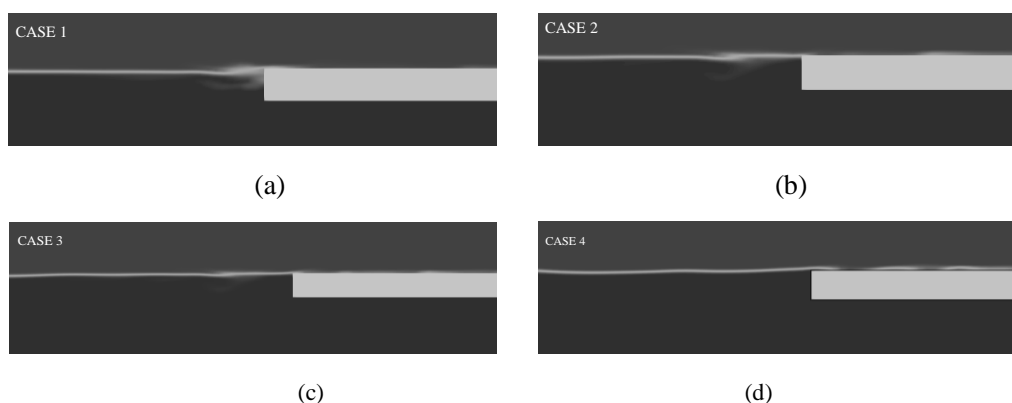


图4 不同刚度条件下右侧浮冰上表面的越浪现象

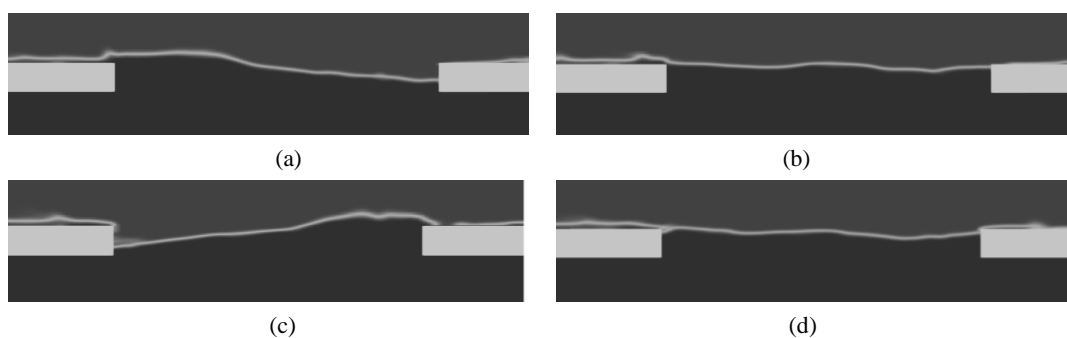


图5 浮冰之间波面在同一周期内的变化

## 4 结论

本文基于 OpenFOAM 开源软件建立了数值波浪水池,模拟了规则波与两片弹性浮冰的相互作用问题。计算模型结合开源工具箱 waves2Foam 实现造波和消波功能,并在流固相交界面利用 waveFsiFoam 求解器实现了流体与弹性浮冰结构运动的双向耦合求解。设置了六组计算工况,模拟和分析了浮冰刚度和间距等参数对二维波浪传播特性的影响。研究发现,在所考虑的参数范围内,刚度越大、间距越小的两块浮冰,对应的波浪反射系数越小、透射系数越大,并且波浪反射系数的减小幅度大于透射系数的增加幅度。

## 参考文献

- 1 Strong C, Rigor I G. Arctic marginal ice zone trending wider in summer and narrower in winter[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(18): 4864–4868.

- 2 Kohout A L, Meylan M H. An elastic plate model for wave attenuation and ice floe breaking in the marginal ice zone[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C9): C09016.
- 3 Bennetts L G, Peter M A, Squire V A, et al. A three-dimensional model of wave attenuation in the marginal ice zone[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C12): C12043.
- 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 Sree D K K, Law A W-K, Shen H H. An experimental study of gravity waves through segmented floating viscoelastic covers[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 101: 102233.
- 6 Squire V A, Moore S C. Direct measurement of the attenuation of ocean waves by pack ice[J]. *Nature*, 1980, 283(5745):365-368.
- 7 Huang L, Ren K, Li M, et al. Fluid-structure interaction of a large ice sheet in waves[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 182: 102–111.
- 8 倪宝玉, 刘晨辉, 胡文进, 等. 二维 Stokes 波与多块浮冰相互作用数值模拟[J]. *水动力学研究与进展 (A 辑)*, 2019, 34(02): 141–148.
- 9 Tuković Ž, Karač A, Cardiff P, et al. OpenFOAM Finite Volume Solver for Fluid-Solid Interaction[J]. *Transactions of FAMENA*, 2018, 42(3): 1–31.

## NUMERICAL SIMULATION OF WATER WAVES INTERACTING WITH ELASTIC ICE FLOES

ZHANG Chongwei <sup>2,\*</sup>, ZHUANG Qianze <sup>2</sup>, HUANG Luofeng <sup>3</sup>, NING Dezhi <sup>2</sup>

<sup>(2)</sup> State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

<sup>(3)</sup> Dept. of Mechanical Engineering, University College London, London WC1E 7JE;

\* Email: chongweizhang@dlut.edu.cn)

**Abstract:** A numerical model based on the open-source software OpenFOAM is established to consider the interaction between elastic ice floes and water waves. The two-way iterative solution of the coupled motion of fluid and elastic ice floes is achieved. Cases of twin elastic ice floes in regular waves are taken for investigation. Effects of parameters including the spacing and stiffness of the ice floes on 2D wave propagation are analyzed. The results show that, within the considered range of parameters, a greater stiffness and smaller distance between two ice floes can lead to a smaller wave reflection coefficient but larger transmission coefficient. Meanwhile, the decrease in the wave reflection coefficient is greater than the increase in the transmission coefficient.

**Key words:** OpenFOAM; FSI; ice floes; wave-structure interaction; hydroelasticity