

## 上海交通大学学位论文

# 基于 MPS-FEM 耦合方法的 甲板上浪数值研究

- **姓 名:** 吴萌萌
- 学号: 121010910096
- **导 师:**万德成
- **学 院:**船舶海洋与建筑工程学院
- 学科名称:船舶与海洋工程
- **学位类型:**学术型
- **申请学位层次:**硕士

2024年1月

#### A Dissertation Submitted to

Shanghai Jiao Tong University for Master Degree

# Numerical study of green water events using MPS-FEM coupled method

Author: Mengmeng Wu Supervisor: Decheng Wan

School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering

Shanghai Jiao Tong University

Shanghai, P.R.China

January, 2024

### 摘要

船舶等海洋结构物的船舷、船首或船尾处很容易受到来波的入侵。在恶劣海况下, 入射波很可能会超过干舷、登上甲板并在甲板上传播,这种现象被称为甲板上浪现象。 甲板上浪的发生往往伴随着波浪翻卷、破碎和飞溅等强非线性的流动现象,结构物也 会在波浪载荷的作用下剧烈运动,甚至可能产生结构变形和破坏,甲板上浪问题的模 拟对于现有的数值方法来说是巨大的挑战。移动粒子半隐式方法(Moving Particle Semi-implicit, MPS)在求解剧烈流动问题方面具有天然的优势,有限单元法(Finite Element Method, FEM)是较为成熟的结构动力学求解方法。因此本文使用 MPS-FEM 耦合方法,同时发挥 MPS 和 FEM 方法的求解优势来研究甲板上浪问题。

本文使用基于 MPS-FEM 耦合方法的流固耦合求解器 MPSFSI-SJTU 来进行甲板 上浪问题的数值研究。首先本文对甲板上浪的研究现状进行了归纳与总结,概括了研 究中面临的挑战。其次对 MPS-FEM 方法的理论进行了系统性的论述,并对 MPSFSI-SJTU 求解器的计算精度进行了验证。然后本文在二维框架下开展了甲板上浪问题的 数值研究,该部分的工作基于湿溃坝方法生成入射波,将结构物简化,以便进行多次 重复的数值模拟从而归纳总结规律。先探究了湿溃坝方法中闸门释放速度对甲板上浪 的波形以及刚性结构物所受载荷的影响,接着模拟分析了不同杨氏模量的弹性侧壁对 甲板上浪事件的影响,并与刚性结构物工况进行了对比。最后,本文在三维框架下对 孤立波与 S175 船舶的相互作用进行了数值研究,在两种不同的孤立波工况下深入探 究了刚性运动船体、刚性固定船体以及弹性固定船体的甲板上浪事件的差异,对甲板 上浪波形、船体受力和运动特性等方面进行了研究与分析。

综上所述,本文基于 MPS-FEM 耦合方法,在二维和三维框架下开展了刚性以及 弹性结构物甲板上浪问题的数值模拟分析,研究了弹性模量和结构物运动状态等参数 对甲板上浪波形以及结构物所受载荷的影响。本文的研究工作可为结构物的上浪特性 研究以及刚性与弹性结构物的上浪过程对比分析提供参考。

关键词: 甲板上浪, 移动粒子半隐式方法, 有限单元法, 弹性, 流固耦合

I

## ABSTRACT

In rough sea conditions, a large mass of water will exceed the freeboard and cause violent slamming on the deck, which is known as green water. The occurrence of green water is often accompanied by strong nonlinear flow phenomena such as wave roll, breaking and splashing. The structure will also move violently under wave loads, and may even produce structural deformation and damage. Thus, the simulation of the green water problem is a great challenge for the existing numerical methods. Moving Particle Semi-implicit (MPS) has a natural advantage in solving the violent flow problem. Finite Element Method (FEM) is a mature structural dynamics solution method. Therefore, in this paper, we use the coupled MPS-FEM method to study green water problem by utilizing the advantages of both MPS and FEM methods.

In this paper, MPSFSI-SJTU, a fluid-structure interaction solver based on the MPS-FEM coupling method, is used to carry out the numerical study of the green water problem. Firstly, this paper summarizes and concludes the current state of research on green water and outlines the challenges faced in the research. Secondly, the theory of the MPS-FEM method is systematically discussed and the computational accuracy of the MPSFSI-SJTU solver is verified. Then this paper carries out a numerical study of the green water problem in a twodimensional framework. This part of the work is based on the wet dam-break method to generate the incident waves and simplifies the structures in order to carry out numerical simulations with many repetitions so as to summarize the laws. The effect of gate release speed on the wave patterns of green water and the loads on rigid structures in the wet dambreak method is investigated. Also, the effect of elastic sidewalls with different Young's modulus on the green water events is analyzed. Finally, this paper numerically investigates the interaction between solitary waves and the S175 ship in a three-dimensional framework, and the differences in the green water events of rigid moving hulls, rigid fixed hulls, and elastic fixed hulls are deeply investigated under two different solitary wave conditions. The green wave patterns, hull forces, and kinematic characteristics of the ships are investigated and analyzed.

In conclusion, based on the MPS-FEM method, this paper carries out numerical simulation on the green water events of rigid and elastic structures in 2D and 3D frameworks, and investigates the effects of parameters such as Young's modulus and motion state of the structure on the wave patterns and loads on the structure. The research work in this paper can provide a reference for the study of green water events and the comparative analysis of the rigid and elastic structures.

**Key words**: green water, Moving particle semi-implicit method (MPS), Finite element method (FEM), elastic ships, fluid-structure interaction problems

| 기미                            | 要   | •••••••••••••••••••••••••••••••••••••••  | I  |
|-------------------------------|---|--|--|
|                               | TTT   |  | тт   |
| AB                            | 5 I R   | KAC I  | 111  |
| 第-                            | ·章  | 绪论   | 1  |
| 1.1                           | 引   | 言  | 1  |
| 1.2                           | 2 甲   | 板上浪问题国内外研究现状   | 3  |
|                               | 1.2.1   | 模型试验研究   | 4  |
|                               | 1.2.2   | 理论研究   | 6  |
|                               | 1.2.3   | 数值模拟   | 8  |
|                               | 1.2.4   | 研究中存在的挑战   | 18   |
| 1.3                           | 3本  | 文主要工作  | 19   |
| 第二                            | 章   | MPS 方法与 FEM 方法基本理论   | 21   |
|                               |   |  | 41   |
| 2.1                           | 引   | 言  | 21   |
| 2.1<br>2.2                    | 弓 <br>2 MP  | 言<br>PS 方法基本理论   | 21<br>21   |
| 2.1<br>2.2                    | 三弓 <br>2 MF<br>2.2.1  | 言<br>PS 方法基本理论<br>控制方程   | 21<br>21<br>21   |
| 2.1<br>2.2                    | 三号 <br>2 MF<br>2.2.1<br>2.2.2   | 言<br>PS 方法基本理论<br>控制方程<br>数值模型   | 21<br>21<br>22<br>22                                     |
| 2.1<br>2.2                    | 三<br>弓<br>2 MF<br>2.2.1<br>2.2.2<br>2.2.3   | 言PS 方法基本理论<br>控制方程<br>数值模型<br>压力泊松方程   | 21<br>21<br>21<br>22<br>22<br>25                         |
| 2.1<br>2.2                    | 三号<br>2 MP<br>2.2.1<br>2.2.2<br>2.2.3<br>2.2.4                                      | 言<br>PS 方法基本理论<br>控制方程   | 21<br>21<br>22<br>22<br>25<br>25                         |
| 2.1                           | 三<br>弓<br>(<br>2.2.1<br>2.2.2<br>2.2.3<br>2.2.3<br>2.2.4<br>2.2.5                   | 言<br>PS 方法基本理论<br>控制方程<br>数值模型<br>压力泊松方程<br>时间积分计算流程   | 21<br>21<br>21<br>22<br>22<br>25<br>25<br>26             |
| 2.1<br>2.2<br>2<br>2<br>2.3   | 日 弓<br>2 MF<br>2.2.1<br>2.2.2<br>2.2.3<br>2.2.4<br>2.2.5<br>3 FE                    | 言<br>PS 方法基本理论<br>控制方程   | 21<br>21<br>21<br>22<br>22<br>25<br>25<br>26<br>30       |
| 2.1<br>2.2<br>2<br>2.3<br>2.3 | 日   | <ul> <li>言</li> <li>PS 方法基本理论</li> <li>数值模型</li> <li>选力泊松方程</li> <li>时间积分计算流程</li> <li>边界条件</li> <li>M 方法基本理论</li> <li>结构动力学控制方程</li> </ul>                                  | 21<br>21<br>22<br>22<br>25<br>25<br>26<br>26<br>30<br>31 |
| 2.1<br>2.2<br>2.2<br>2.3      | 日 号 <br>2 MF<br>2.2.1<br>2.2.2<br>2.2.3<br>2.2.4<br>2.2.5<br>3 FE<br>2.3.1<br>2.3.2 | <ul> <li>言</li> <li>PS 方法基本理论</li> <li>控制方程</li> <li>数值模型</li> <li>压力泊松方程</li> <li>时间积分计算流程</li> <li>边界条件</li> <li>M 方法基本理论</li> <li>结构动力学控制方程</li> <li>控制方程的时间积分</li> </ul> | 21<br>21<br>22<br>22<br>25<br>26<br>26<br>30<br>31<br>33 |

| 2.4.1 MPS-FEM 的空间异构特征   |    |
|-------------------------|----|
| 2.4.2 MPS-FEM 的时间异构特征   |    |
| 2.4.3 MPS-FEM 界面插值技术    |    |
| 2.5 本章小结                |    |
| 第三章 MPSFSI-SJTU 求解器验证   |    |
| 3.1 引言                  |    |
| 3.2 泄洪流对三维弹性闸门的砰击问题模拟   |    |
| 3.2.1 算例设置              |    |
| 3.2.2 流场演化与闸门变形分析       |    |
| 3.2.3 闸门应力分析            | 42 |
| 3.3 本章小结                |    |
| 第四章 二维固定结构物上浪研究         |    |
| 4.1 引言                  | 45 |
| 4.2 数值验证                | 45 |
| 4.3 闸门释放速度对甲板上浪波形和载荷的影响 |    |
| 4.3.1 计算参数设置            | 49 |
| 4.3.2 甲板上浪波形            | 50 |
| 4.3.3 结构物所受载荷           | 57 |
| 4.4 弹性左侧壁的影响            | 60 |
| 4.4.1 甲板上浪波形            | 60 |
| 4.4.2 结构物所受载荷           | 62 |
| 4.5 弹性上壁的影响             | 63 |
| 4.5.1 甲板上浪波形            | 63 |
| 4.5.2 结构物所受载荷           | 65 |
| 4.6 本章小结                | 66 |
| 第五章 三维孤立波作用下的船舶上浪研究     |    |

| 5.1 引言                  |     |
|-------------------------|-----|
| 5.2 计算模型                |     |
| 5.2.1 船体粒子模型            | 70  |
| 5.2.2 船体单元模型            | 72  |
| 5.2.3 数值水池              | 73  |
| 5.3 波浪的生成               | 74  |
| 5.3.1 孤立波造波理论           | 75  |
| 5.3.2 孤立波造波验证           | 75  |
| 5.4 固定的刚性船体在孤立波作用下的上浪研究 |     |
| 5.4.1 流场演化              |     |
| 5.4.2 船体受力              |     |
| 5.5 运动的刚性船体在孤立波作用下的上浪研究 |     |
| 5.5.1 流场演化              |     |
| 5.5.2 船体受力              |     |
| 5.5.3 船舶的运动响应           |     |
| 5.6 弹性船体在孤立波作用下的上浪研究    |     |
| 5.6.1 流场演化              | 94  |
| 5.6.2 船体受力与变形           | 95  |
| 5.7 本章小结                |     |
| 第六章 全文总结                | 99  |
| 参考文献                    |     |
| 攻读学位期间学术论文和科研成果目录       |     |
| 致 谢                     | 111 |

| 图 | 1-1  | 甲板上浪现象1                                     |
|---|------|---|
| 图 | 1-2  | 自升式钻井平台失效 <sup>[10]</sup> 2                 |
| 图 | 1-3  | 五种甲板上浪类型(0、1和2代表时间顺序) <sup>[4]</sup>        |
| 图 | 1-4  | 典型的三维甲板上浪 <sup>[19]</sup>                   |
| 图 | 1-5  | 甲板上浪现象 <sup>[24]</sup>                      |
| 图 | 1-6  | 交叉波大振幅船舶运动观测 <sup>[55]</sup> 9              |
| 图 | 1-7  | 弹性船体上浪模拟 <sup>[58]</sup> 10                 |
| 图 | 1-8  | 孤立波冲击海堤断面 <sup>[59]</sup> 11                |
| 图 | 1-9  | Le Touz'e 等甲板上浪计算结果 <sup>[63]</sup> 12      |
| 图 | 1-10 | )渔船在波浪中的运动模拟与实验对比 <sup>[64]</sup> 12        |
| 图 | 1-11 | 畸形波冲击固定平台 <sup>[65]</sup> 13                |
| 图 | 1-12 | 2 采用湿溃坝方法模拟的甲板上浪现象[66]13                    |
| 图 | 1-13 | 规则波下渔船的响应 <sup>[67]</sup> 14                |
| 图 | 1-14 | 船首在孤立中上浪现象 <sup>[68]</sup> 14               |
| 图 | 1-15 | ,受迫运动船舶在规则波中上浪现象 <sup>[69]</sup> 15         |
| 图 | 1-16 | ,船舶在规则波中上浪现象 <sup>[70]</sup> 15             |
| 冬 | 1-17 | '三维 FPSO 在规则波作用下不同时刻的波面图 <sup>[72]</sup> 16 |
| 图 | 1-18 | 5 三维船舶在规则波作用下不同时刻的波面图[73]17                 |
| 冬 | 1-19 | 17 孤立波对三维平板结构的冲击模拟 <sup>[74]</sup> 17       |
| 冬 | 1-20 | ) 波浪与弹性体相互作用 <sup>[75]</sup> 18             |
| 冬 | 2-1  | 自由面粒子判定方式 <sup>[79]</sup>                   |
| 冬 | 2-2  | 固体壁面边界条件示意图[79]                             |
| 冬 | 2-3  | 整体坐标系和随体坐标系示意图[79]                          |
| 图 | 2-4  | 离散单元  |
| 图 | 2-5  | 梁单元流固界面耦合方式 <sup>[79]</sup>                 |
| 图 | 2-6  | 界面插值技术 <sup>[79]</sup>                      |
| 冬 | 3-1  | 数值模拟计算模型                                    |
| 图 | 3-2  | 泄洪流与弹性闸门的相互作用[91]40                         |

| 图 3-3  | 弹性闸门自由端中心处水平位移时历曲线40                                     |
|--------|--|
| 图 3-4  | 弹性闸门自由端中心处垂向位移时历曲线40                                     |
| 图 3-5  | 水柱中心处的液面高度时历曲线41   |
| 图 3-6  | 闸门附近的液面高度时历曲线41  |
| 图 3-7  | 闸门上各个测点的应力时历曲线42   |
| 图 3-8  | 典型时刻下的流场与弹性闸门的应力分布(左:流场压力图;右:应力分布图)                      |
| 图 4-1  | Areu-Rangel 等 <sup>[66]</sup> 研究的甲板上浪模型示意图(包含三个测波点以及两个测力 |
| 単元)    |  |
| 图 4-2  | MPS 模拟中使用的模型图46  |
| 图 4-3  | 三种不同粒子间距下数值模拟的粒子总数和模拟所用时间                                |
| 图 4-4  | 数值方法验证: 3 种不同粒子间距下 SPH 结果 <sup>[66]</sup> 与 MPS 结果的波高值对比 |
|        |  |
| 图 4-5  | 数值方法验证:三种不同粒子间距下 SPH 结果[66]和 MPS 结果的载荷对比图:               |
| (a) _  | 单元1的垂向载荷。(b)单元2的水平载荷。48                                  |
| 图 4-6  | 使用 SPH 方法 <sup>[66]</sup> 和 MPS 方法模拟过程中观察到的速度场图          |
| 图 4-7  | MPS 模拟中使用的模型图50  |
| 图 4-8  | 0.878 s 时刻实验 <sup>[24]</sup> 与数值模拟波形对比图51                |
| 图 4-9  | 0.970 s 时刻实验 <sup>[24]</sup> 与数值模拟波形对比图51                |
| 图 4-1  | 01.042 s 时刻实验 <sup>[24]</sup> 与数值模拟波形对比图52               |
| 图 4-1  | 11.086 s 时刻实验 <sup>[24]</sup> 与数值模拟波形对比图52               |
| 图 4-1  | 21.142 s 时刻实验 <sup>[24]</sup> 与数值模拟波形对比图53               |
| 图 4-1  | 3 1.226 s 时刻实验 <sup>[24]</sup> 与数值模拟波形对比53               |
| 图 4-1- | 4 闸门和水体停止接触时的流场54  |
| 图 4-1  | 5 不同闸门释放速度产生的不同入射波波形55                                   |
| 图 4-1  | 6 不同闸门释放速度产生的不同入射波波形55                                   |
| 图 4-1  | 7 不同闸门释放速度下测得的波高和实验 <sup>[24]</sup> 的波高对比图:(a)WP0 水位波高;  |
| (b) '  | WP1 水位波高; (c) WP2 水位波高 56                                |
| 图 4-1  | 8 不同闸门释放速度下测力单元的载荷和实验 <sup>[24]</sup> 的对比图:(a)单元1的垂向     |
| 载荷;    | (b) 单元 2 的水平载荷 57  |
| 图 4-1  | 9 不同闸门速度下 MPS 模拟在不同时刻得到的压力场59                            |

| 图 4-20 Hernández-Fontes 等人的实验 <sup>[24]</sup> 与不同杨氏模量的弹性侧壁的 MPS 模括 | 以对比<br>61 |
|--|-----------|
| 图 4-21 不同杨氏模量得左侧壁工况模拟测得波高与实验 <sup>[24]</sup> 测得波高对比图:              | (a)       |
| WP0 水位高程;(b) WP1 水位高程;(c) WP2 水位高程                                 | 62        |
| 图 4-22 实验 <sup>[24]</sup> 与不同杨氏模量的左侧壁工况模拟所得载荷时历曲线对比图:(             | a) 单      |
| 元1的竖向荷载;(b)单元2的水平荷载  | 62        |
| 图 4-23 Hernández-Fontes 等人的实验 <sup>[24]</sup> 与不同杨氏模量的弹性上壁的 MPS 模拟 | 以的流       |
| 场对比  | 64        |
| 图 4-24 不同杨氏模量的上壁面工况模拟的波高时历曲线图:(a)WP0 水位高程                          | ; (b)     |
| WP1 水位高程;(c) WP2 水位高程  | 65        |
| 图 4-25 实验 <sup>[24]</sup> 与不同杨氏模量的上壁面工况模拟所得载荷时历曲线对比图:(             | a) 单      |
| 元1的竖向荷载;(b)单元2的水平荷载  | 66        |
| 图 5-1 S175 船舶模型三视图   | 70        |
| 图 5-2 S175 船体粒子模型图   | 71        |
| 图 5-3 S175 船体截面特征参数沿船长的变化  | 71        |
| 图 5-4 船体梁模型与船体粒子的映射关系  | 72        |
| 图 5-5 数值水池模型   | 73        |
| 图 5-6 测波点位置  | 73        |
| 图 5-7 粒子模型   | 75        |
| 图 5-8 流场演化情况 (Wavel)   | 77        |
| 图 5-9 流场演化情况 (Wave2)   | 78        |
| 图 5-10 测波点波高曲线 (Wave1)   | 78        |
| 图 5-11 测波点波高曲线 (Wave2)   | 79        |
| 图 5-12 小波高孤立波工况下流场演化情况 (固定的刚性船舶)                                   | 80        |
| 图 5-13 大波高孤立波工况下流场演化情况 (固定的刚性船舶)                                   | 82        |
| 图 5-14 测波点液面高度时历曲线   | 83        |
| 图 5-15 船体所受 y 向砰击载荷  | 83        |
| 图 5-16 小波高孤立波作用下固定刚性船体表面压力分布                                       | 84        |
| 图 5-17 大波高孤立波作用下固定刚性船体表面压力分布                                       | 85        |
| 图 5-18 小波高孤立波工况下流场演化情况 (运动的刚性船舶)                                   | 86        |
| 图 5-19 大波高孤立波工况下流场演化情况 (运动的刚性船舶)                                   | 88        |
| 图 5-20 测波点液面高度时历曲线   | 89        |

| 图 5-21 | 船舶受力曲线                    | 90 |
|--------|---------------------------|----|
| 图 5-22 | 小波高孤立波作用下运动刚性船体表面压力分布     | 91 |
| 图 5-23 | 大波高孤立波作用下运动刚性船体表面压力分布     | 92 |
| 图 5-24 | 船舶运动响应                    | 93 |
| 图 5-25 | 大波高孤立波工况下流场演化情况 (固定的弹性船舶) | 95 |
| 图 5-26 | 船体所受 y 向砰击载荷              | 95 |
| 图 5-27 | 船体变形                      | 96 |

## 表 录

| 表 2-1 | 各微分算子模型的粒子作用半径 | . 23 |
|-------|----------------|------|
| 表 5-1 | 船体粒子模型特征参数     | . 69 |
| 表 5-2 | 计算参数设置         | . 74 |
| 表 5-3 | 孤立波工况参数表       | . 76 |
| 表 5-4 | 弹性船体参数表        | . 93 |

## 第一章 绪论

### 1.1 引言

船舶等海洋结构物在接近船舷、船首或船尾处,很容易受到来波的入侵。在恶劣海况下,这些来波很可能会超过干舷并登上甲板在甲板上传播,这种现象在海洋工程和近海工程中被称为甲板上浪<sup>[1]</sup>(Green water、Water shipping、Deck wetness 等),如图 1-1 所示。



图1-1 甲板上浪现象 Fig.1-1 Green water

在甲板上浪时,来波对结构物有一个垂向冲击载荷,在甲板淹没阶段有一个准静态垂直载荷<sup>[2]</sup>。然而,上层建筑往往放置在靠近甲板边缘的地方<sup>[3]</sup>。在这种情况下,甲板上浪也可能对海洋结构物产生显著的水平载荷。如果结构是固定的,垂直和水平上浪荷载可能会引起结构问题<sup>[4]</sup>,如果结构是浮动结构,则会引起稳定性问题<sup>[5]</sup>。

针对船舶而言,当面临恶劣海况时,甲板上浪可能导致诸多问题,例如:上层建 筑和船体结构的损伤,船体的超载,人员的伤亡,船舶失去控制或者需要调整航线, 船舶大幅的运动姿势变化,驾驶者的视野受到阻碍,甚至是危险及有害产品的溢出<sup>[6]</sup>。 因此,无论是在商用船只或是军事舰艇中,甲板上浪问题一直都是船舶设计过程中的 关键考虑点<sup>[7]</sup>。

不仅在船舶的设计阶段需关注甲板上浪,其他的海洋结构物(如浮式生产储油轮, Floating Production Storage and Offloading, FPSO)也必须考虑到这一影响。因为 FPSO 一般使用船头旋转平台来定点锚泊,因此经常面临着最为恶劣的风浪环境,从而造成 船头的部分常常是甲板上浪出现频率最高的地区。FPSO 的干舷设计受重量和稳定性的约束不能设计的过高。一般情况下,位于 FPSO 船头部分的甲板会安置有用于锚泊的旋转平台和管道等相关装置,但甲板上浪事件可能会影响其正常运作并造成破坏<sup>[8]</sup>。 Leonhardsen 等<sup>[9]</sup>的研究表明,北海地区的 FPSO 曾因为受到甲板上浪的影响,使得其首部遭受严重的损害,他们指出,FPSO 面临甲板上浪的风险相当高,因此必须采取相应的措施来防止这种情况的发生。除此之外,自升式钻井平台(Jack-up Rig)由于干舷高度相对于波浪高度很小,在从作业地点到港口的航行中,经常经历砰击、上浪等事件而造成平台失效<sup>[10]</sup>,如图 1-2 所示。



图1-2 自升式钻井平台失效<sup>[10]</sup> Fig.1-2 Jackup Rig Failure<sup>[10]</sup>

从上述概括中可以看出,对于船舶、FPSO等结构物而言,研究甲板上浪的机理 以及对海洋结构物所受的载荷、上浪的波高等因素进行预报对船舶和海洋结构物的安 全和性能的研究具有极其重要的实际价值。

2007年, Greco<sup>[4]</sup>提出了简化的不同类型的上浪的分类: 溃坝(Dam-Break)、卷 波溃坝(Plunging-Dam-Break),卷波(Plunging wave),锤击(Hammer-Fist)以及翻转(Flip-through)五种类型。这些事件主要由甲板上浪开始时流动形成的特征所区分,五种上浪事件的分类如图 1-3 所示。研究中最常见的现象是 Dam-Break, Plunging-Dam-Break 以及 Hammer-Fist 型。



(e) 翻转 (Flip-ulrough) 图1-3 五种甲板上浪类型 (0、1和2代表时间顺序)<sup>[4]</sup> Fig.1-3 Five Types of Green Water<sup>[4]</sup>

### 1.2 甲板上浪问题国内外研究现状

在 19 世纪末,学者们逐渐开始关注甲板上浪现象。1959 年,Newton<sup>[11]</sup>首次对甲板上浪进行了系统的分析。他对一艘驱逐舰在规则波和迎浪条件下开展了模型试验研究,分析了不同的船首形状下的甲板上浪现象。早期的试验大多基于肉眼观测。

Tasaki<sup>[12]</sup>通过规则波的试验测量了甲板上的上浪水量,并强调静态/动态船首波面升高是影响甲板上浪的关键因素。

Ochi<sup>[13]</sup>对 13 英尺长的船模开展了试验研究,记录了甲板上浪和船体受砰击情况, 分析了海况和装载等对甲板上浪的影响。他提出了基于数学模型的统计方法预测甲板 上浪和砰击的频率及载荷。

随后,越来越多的学者开始深入探讨甲板上浪现象。甲板上浪是一个复杂的强非 线性问题,与海洋结构物遇到的非线性波浪和因此导致的大幅运动密切相关。在恶劣 的海况下,流体常出现翻卷、破碎、飞溅以及气泡卷入等强烈的非线性特征。

现实中上浪是一个十分复杂的事件,为了研究上浪事件的特征和荷载,许多学者 使用简化的模型比如溃坝模型<sup>[14]</sup>,洪水模型<sup>[15]</sup>,湿溃坝模型<sup>[16]</sup>等方法生成入射波来 研究甲板上浪现象。

目前,甲板上浪的研究主要分为模型试验、理论分析以及数值研究(通常与实验 相结合)三大类。在甲板上浪的影响因素分析、上浪预测方法、对船体运动的影响, 以及载荷分析等多个方面,学者们已经取得了显著成果。

#### 1.2.1 模型试验研究

在早期阶段,由于对甲板上浪过程的认识相对有限,因此众多研究主要依赖于模型试验。这些试验不仅为建立各种简化的理论模型提供了基础,还为参数选择提供了依据,并为评估理论和数值结果的准确性提供了重要的数据支持。至今,模型试验仍然是甲板上浪研究的一个核心组成部分。

Buchner 等人<sup>[17]</sup>在 MARIN 水池对 FPSO 模型进行了试验。Buchner 等将甲板上 浪过程划分为四个阶段:(1)水面高度超过干舷。(2)水体越过甲板发生上浪。(3) 水体在甲板上传播,传播过程类似于浅水波。(4)水体撞击上层建筑的侧壁。Buchner 提出,水体登上甲板的这一环节与溃坝模型极为相似,而随后水体在甲板上的传播类 似于浅水波。通过这次试验,Buchner 强调了波浪参数对甲板上浪过程及其所产生的 冲击载荷的重大影响。

在 2000 年的一次 MARIN 水池模型试验中,研究人员对 FPSO 进行了进一步的 观察<sup>[18]</sup>。试验结果确认,甲板上浪的开始阶段大都类似于溃坝,这类上浪事件被称作 "溃坝型"上浪。该试验还意外发现,在特定波浪条件下,波浪可能会在船首发生破碎的现象,然后以水舌状水体冲击上层建筑,这种情况下船体所受的冲击载荷远超溃 坝型所受的冲击载荷,该种上浪方式被定义为"卷波形"甲板上浪。上浪的定义与先前提到的定义<sup>[4]</sup>保持一致。

Barcellona 等人<sup>[19]</sup>在 2003 年对三种不同船首形状进行了三维模型试验。在这些试验中,模型被完全固定,没有航行速度,且使用聚焦波作为入射波。试验详细记录

了甲板上水流的三维流动特点。船首的正前方和两侧的上浪水流发生相互作用,在船中处形成了类似二维上浪的水流动态。如图 1-4 所示,两股水流相遇时,在近似船中线方向形成了一个新的波峰(箭头指示的位置)。



图1-4 典型的三维甲板上浪<sup>[19]</sup> Fig.1-4 Typical three-dimensional green water events<sup>[19]</sup>

在 Colagross<sup>[20]</sup>的二维上浪数值研究中,他发现由于空气的可压缩性,气穴现象 能够增加其周围水体的压力,从而导致甲板上局部压力的升高。

Fonseca 等人<sup>[21]</sup>在 2005 年研究了 S175 型集装箱船在迎浪条件下的规则波和不规则波下,研究了船首的形状对甲板上浪事件的影响。研究表明,船体的纵摇受波浪非 线性的影响明显。甲板上浪的过程与船体和波浪的相对运动紧密相关,因此,依赖于 线性耐波性公式的船体运动预测方法可能不适合用于甲板上浪的预测和分析。

李俊等<sup>[22]</sup>在 2007 年对 FPSO 模型在规则波和不规则波下的甲板上浪开展了三维 模型试验。FPSO 能够产生垂荡和纵摇运动。此次试验记录了试验全过程,并测量了 压力峰值、甲板上的水体高度等数据。

唐浩云等人<sup>[23]</sup>通过一系列三体船模型的自航试验,分析和比较了三体船在不规则迎浪下的运动和载荷。通过比较特征值,对不同波浪尺度和航速下的三体船纵摇、 垂荡、船体加速度等运动进行统计分析。分析了不规则波下船体所受载荷的纵向分布 情况以及波浪参数和船舶航速的变化对所受载荷的影响。试验的数据为三体船的参数 设计以及结构强度评估等方面提供了依据。

Hernandez-Fontes 等人<sup>[24]</sup>使用湿溃坝法(Wet dam-break)产生入射波研究了一系列二维甲板上浪现象,进行了系统的实验来分析在一个矩形固定结构的甲板上浪事件和其导致的垂直载荷,如图 1-5 所示。实验研究了不同湿坝溃高度比产生的涌浪对矩形结构物甲板上浪现象的影响以及结构所受竖向荷载的变化趋势。



图1-5 甲板上浪现象<sup>[24]</sup> Fig.1-5 Green water events<sup>[24]</sup>

Deng 等人<sup>[25]</sup>于 2021 年在波浪水槽内对简化的浮式生产储油船艏部模型进行了 实验。实验中,模型保持固定,并采用了不同波陡的第五斯托克斯波和聚焦波群作为 试验波条件。实验结果揭示了典型的波浪砰击型上浪过程,包括波浪变形、爬升、破 碎和砰击等阶段,波浪对甲板和垂直壁面造成了巨大的冲击载荷。甲板上的冲击载荷 峰值主要出现于船首附近和上层建筑底部,上层建筑上的冲击载荷峰值则在船中出现。 甲板上的流动现象显示出显著的三维效应。

Niu 等人<sup>[26]</sup>在 2022 年研究了孤立波对悬板周围二维运动场的演化。实验中,板型结构保持刚性,并悬挂在平均水位之上,孤立波由造波机生成,模拟近岸孤立波现象。水流演变被分为三个阶段:卷波产生、上浪淹没和分离。在不同工况下,流动演变总体上展现出明显的相似性,但细节上有所差异。研究中还考察了 Ritter 关于溃坝水流的解析解,并与实验数据进行了比较,为后续研究提供了丰富的实验数据。

#### 1.2.2 理论研究

在上个世纪 70 年代到 90 年代,受限于计算机的性能和存储能力,这时理论研究 成为除模型试验外的关键手段。理论方法对试验结果进行分析,对物理实际问题进行 简化,获取经验公式来模拟或预测物理量,例如上浪后甲板上水体的传播速度、水体 对上层建筑的水平冲击力、上浪发生的频率等。这些公式较为简单以致于理论方法通 常非常快速,有些甚至能实现实时预测。

船体与波浪的相对运动对甲板上浪事件的发生影响较大,很多研究者专注于船体与波浪的相对运动。Hong 等<sup>[27]</sup>和 Hoffman 等<sup>[28]</sup>基于线性切片理论计算相对运动,并 根据模型试验的结果获取船首波面升高修正因子,进一步修正船舶运动的幅频响应算 子(Response Amplitude Operator, RAO)。

Tasai<sup>[29]</sup>首先提出了动态船首波面升高的概念,后由 Blok<sup>[30]</sup>进行了深入的阐述。 当考虑船首动态波面升高时,船首水面升高的程度会明显高于远场波浪条件。基于此,

Blok 及其团队进行了大量模型试验,测量了模型在静水中的升沉和首(尾)倾,并在模型固定和强迫振荡状态下测试了船体的绕射和辐射系数。试验结果归纳出了船首波面升高修正因子(swell-up coefficient, SUC)。利用这一修正因子来调整基于线性切片理论的船体-波浪相对运动计算,可显著提升甲板上浪预测的准确性。

基于 SUC 概念, Bales<sup>[31]</sup>和 Takaki<sup>[32]</sup>等学者对船舶的最小干舷提出了建议。特别 是 Takaki,他采用切片理论和 SUC 修正对 67 艘船只在规则波中的艏部运动进行了分 析,从而推导出用于计算最小干舷的经验公式。国内学者如贺五洲<sup>[33]</sup>和王仁康<sup>[34]</sup>,从 船舶与波面的垂直相对运动预测的角度,进行了甲板上浪的定量分析,如上浪概率、 每小时上浪次数和上浪水量等,预测了敞口集装箱船的进水量。

早期研究通常基于二维线性或非线性切片理论来研究瘦长型船体在波浪中的运动。然而,对于更大型的结构如 FPSO,船体与波浪相对运动主要依赖于三维线性绕射理论<sup>[35]</sup>计算。这种方法虽然计算速度快,适用于平稳海况中的船体运动预测,但忽略了甲板上浪对船体运动的影响,限制了其在预测恶劣海况下甲板上浪问题的精度。 Greco<sup>[36][37]</sup>引入了初始 Kutta 条件和连续 Kutta 条件来分别模拟普通溃坝型以及破波形的船首甲板上浪。该方法的准确性很大程度依赖于船体运动的幅值等因素的准确性,且无法预测射流撞击甲板上的垂向建筑后产生的非线性流动等情况。

甲板上浪导致的冲击载荷对甲板的安全造成威胁。Kawakami<sup>[38]</sup>提出了一种分析 甲板上浪冲击载荷的方法,假设水体超过干舷后直接撞击甲板,该方法计算的冲击压 力高于甲板上的静水头。Takezawa<sup>[39]</sup>的研究与之结论相似,他认为甲板上浪开始阶段 是水体越过干舷,随后以破波形式涌上甲板。Fukud等<sup>[40]</sup>提出了一种长期预测甲板上 浪载荷的方法,将甲板上浪载荷简化为静水压力。Kawakami<sup>[41]</sup>建立了关于甲板冲击 压力的公式,考虑了吃水、船体-波浪相对运动幅值及由波浪引起的干舷高度变化。该 方法基于势流理论,且忽略了流体重力。Zhang等人<sup>[42]</sup>使用相似解方法研究了楔形水 体撞击平板,估算了冲击阶段最大压力载荷。此方法在冲击初期压力模拟较好,但由 于忽略重力,随时间推移得到的压力偏大。

这些理论研究方法大多采用势流理论。然而,当船舶在极端破浪条件运动,发生 破浪翻卷和破碎等现象时,势流方法的模拟效果通常有限。此外,大多数模型专注于 甲板上浪过程的特定阶段。这种局部的关注通常忽略了内外流场的相互作用,这些处 理会严重影响理论计算精度。

#### 1.2.3 数值模拟

现阶段,计算机性能以及储存能力有了大幅度进步,计算流体力学(Computational Dynamic Fluid, CFD)在上浪问题的研究中使用的更加广泛。目前已经发展了欧拉网格类方法,拉格朗日粒子类方法等多种方法。

(1) 欧拉网格类方法的研究:

研究甲板上浪时面临的一个挑战是处理自由面的剧烈变形、水体的翻卷和飞溅等 复杂流动现象。在网格法中,一些能够处理自由面不连续和大变形的技术已被应用于 甲板上浪过程的模拟,例如 MAC<sup>[43]</sup>, Level-set<sup>[44]</sup>, VOF<sup>[45]</sup>方法。

在 MAC 方法中,为了标记自由液面的初始状态,采用了质量不计的粒子,追踪 粒子的运动从而捕捉自由面。当这些粒子分布得足够密集时,MAC 能够捕捉比网格 尺寸小的液面变形<sup>[46]</sup>。然而,它在计算时需同时追踪自由面粒子的运动,在三维模拟 中,这就导致了对计算时间和资源的大量消耗。

Level-set 方法引入 level-set 函数φ表征网格的节点与自由液面之间的距离。φ的 大小表示该点是否位于自由液面。Level-set 方法的一个问题为质量守恒难以保证。这 可以通过重初始化的方法得到缓解<sup>[47]</sup>,但计算量巨大。

在船海领域,VOF (Volume of Fluid)方法的应用最为广泛。该方法用体积分数 α来代表网格单元被流体占据的百分比,由 Hirt 等<sup>[45]</sup>提出。

Yu<sup>[48]</sup>采用了 Level-set 方法结合雷诺平均纳维尔-斯托克斯方程(Reynoldsaveraged Navier-stokes, RANS)的解法,对LNG 液舱的晃荡和上浪进行了数值模拟。 这项研究一定程度验证了 Level-set 方法在处理复杂流动现象方面的有效性。Chen 等 <sup>[49]</sup>结合了大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)与 Level-set 方法模拟了船体在剧 烈运动过程中出现的上浪现象。然而,该研究并没有详细阐述甲板上浪整个过程的物 理细节。接着, Chen 等人<sup>[50]</sup>采用了 Level-set 方法数值模拟了一艘不规则波下航行的 集装箱船,关注了纵摇和升沉下船艏和船尾的砰击现象。

Kleefsman<sup>[51]</sup>对固定的 FPSO 模型船首甲板上浪过程进行了三维模拟,重点模拟 了水体冲上甲板后的流动,将甲板上浪初始阶段简化为溃坝模型。

Nielsena 等<sup>[52]</sup>基于 VOF 方法分析了二维和三维 FPSO 甲板上浪情况。研究了固定和垂向运动下上浪水体的高度以及上层建筑受到的水平压力。由于船体在模拟中保持静止,其与波浪的相互作用未被充分研究。

Pham 等<sup>[53]</sup>使用 Fluent 软件对集装箱船和 FPSO 的甲板上浪行了模拟,采用 RANS 方程对流场进行模拟,并使用溃坝模型模拟甲板上浪初始阶段。

张显涛等<sup>[54]</sup>采用具有张角的二维固定矩形框来表示带有张角 FPSO。入射波是聚 焦波群,观测到了各种上浪情况,包括锤击(HF)、卷波加溃坝(PDB)和溃坝(DB) 甲板上浪事件。数值模拟使用 OpenFOAM 以及 wave2Foam。通过分析不同艏部外张 角下上浪量和甲板水流水平动量的变化,量化了艏部外张角的影响。结果表明,对于 船只固定的特殊情况,艏张角可以显著减少这些量。采用修正溃坝模型可以较好地解 释上浪水体漫顶体积和动量通量的变化趋势。

Huang 等<sup>[55]</sup>采用 RANS 方法分析了 S175 集装箱船船体在交叉波中的运动响应。 采用 VOF 方法以及重叠网格模拟船舶在波浪中的运动,模拟结果如图 1-6 所示。研 究发现,交叉波引起的船舶垂向运动响应很大,会发生明显的横摇和纵摇耦合运动。 此外模拟中观察到严重的船艏砰击和横浪状态下的甲板上浪。在对称交叉波中,基线 上的砰击压力相当大。船舶在非对称横浪场中航行时,会发生非对称砰击。



图1-6 交叉波大振幅船舶运动观测<sup>[55]</sup> Fig.1-6 Cross-wave large amplitude ship motion observation<sup>[55]</sup>

此外,值得一提的是,上述模拟都将结构简化为刚性模型,在近期的甲板上浪相 关数值模拟中,也有学者对弹性结构物进行了数值模拟:

Qin 等<sup>[56]</sup>研究畸形波引起的甲板上浪现象和甲板的结构响应,在水槽中设置水平 弹性裸甲板,甲板中间部位有弹性支撑。模拟结果包括用快速傅里叶变换和小波变换 方法分析的整个上浪过程、甲板上流体的压力和弹性甲板的位移。Qin 等对刚性甲板、 弹性裸甲板和中间弹性支承的弹性甲板结果进行了比较,发现,虽然甲板弹性对流体 运动的整体演化几乎没有影响,但对局部流体压力的影响很大。加筋肋(中间弹性支 撑)会明显影响结构响应频率和变形。

Yu 等<sup>[57]</sup>发展了一种完全耦合的非线性三维水弹性方法,用于研究大型船舶的振动响应。该数值模型由三维边界元法、一维 Euler-Bernoulli 梁模型和二维广义 Wagner 模型组成。实验研究部分中考虑了甲板上浪负荷,在大振幅规则波中对船模进行了试验,测量了冲击压力和非线性垂向弯矩,发现数值模拟提出的非线性模型产生了与试验模型相似的结果。此外,还分析了弹性模态和非线性对数值结果的影响。

Jiao 等<sup>[58]</sup>实现了 CFD 和有限单元分析(Finite Element Analysis, FEA)求解器的 双向耦合,其中 CFD 模拟输出的外部流体压力用于在 FEA 求解器中导出结构响应, 并将结构变形反馈到 CFD 求解器以使网格变形。CFD 求解器中的 RANS 和 VOF 技 术捕捉到了甲板上砰击和上浪等剧烈的自由表面流动。图 1-7 展示了模拟结果,船体 的动态 3D FEA 结构求解器可以准确地模拟非线性甩击和弹跳响应。采用标准 S175 集装箱船进行仿真,验证了所开发的全耦合方法能够模拟船舶耐波性和水弹性范围内 大部分的物理特性,包括大幅运动、加速度、波浪载荷、砰击载荷、上浪载荷以及船 体在波浪中的甩击和弹跳响应。



Fig.1-7 Simulation of green water on an elastic hull<sup>[58]</sup>

(2) 拉格朗日粒子类方法的研究:

拉格朗日粒子类方法已被用于解决重要的海洋工程问题。与基于网格的方法相比, 基于粒子的方法在模拟流固耦合、复杂几何、自由面大变形、流体破碎和合并等现象 方面具有优势。这是因为相较于网格类方法,粒子法具有以下独特优点:

①粒子基于拉格朗日描述法自由移动,根据粒子分布可直接得到自由面形状,不 需要额外的界面捕捉或重构算法,因此减少了计算误差;

②粒子之间没有固定的拓扑关系,可以追踪任意大变形的自由面,而不存在网格 类方法中常见的网格畸变问题;

③物体边界同样用粒子表达,有效避免了网格类方法处理动边界问题时需不断重 新生成网格的复杂过程;

④控制方程采用基于拉格朗日描述法的 N-S 方程,消除了对流项引起的数值耗散。

在粒子方法中,有几种方法被用于模拟上浪问题,如一致粒子方法(Consistent Particle Method, CPM)、光滑粒子法(Smoothed Particle Hydrodynamics method, SPH) 和移动粒子半隐式方法(Moving Particle Semi-implicit method, MPS)等。

罗敏等人<sup>[59]</sup>基于一致粒子法(CPM)对孤立波的冲击和上浪进行了数值研究。对海堤断面几何形状对上浪特性的影响进行了参数化研究。模拟结果如图 1-8 所示,研究发现,较高的水位会导致较大的上浪量和流体动能,这意味着随着海平面上升,沿海地区的遭遇波浪破坏风险更高。



图1-8 孤立波冲击海堤断面<sup>[59]</sup> Fig.1-8 Solitary wave impacting seawall sections<sup>[59]</sup>

SPH 方法最早应用于上浪问题的 SPH 模拟是 Dalrymple<sup>[60]</sup>等人。他们分析了一 个规则波越过平台固定甲板的演变过程,并将其结果与 Cox 等<sup>[61]</sup>的波浪水槽实验获 得的实验数据进行了比较。之后,G'Omez-Gesteira<sup>[62]</sup>等人使用 SPH 利用规则波对固 定水平甲板上的上浪高程、速度和压力进行了评估。Le Touz'e<sup>[63]</sup>等人用 SPH 方法来 分析了在甲板上传播的波浪,甲板上的垂直结构限制了波的传播,甲板上上层建筑的 垂直墙会影响上浪荷载(从甲板上浪开始到垂直墙出现最大波浪爬升阶段)和回流荷 载(从垂直墙的爬升波浪下降到波浪返回大海的阶段)。模拟结果如图 1-9 所示,其 得到的上浪波高时历曲线在趋势与实验相符,但幅值上误差较大。



图1-9 Le Touz'e 等甲板上浪计算结果<sup>[63]</sup> Fig.1-9 Calculation results of green water<sup>[63]</sup>

Kawamura 等人<sup>[64]</sup>对渔船在陡规则波中的 6 自由度运动进行了模拟,并与实测结 果进行了比较。图 1-10 为数值模拟与实验的对比图,通过与实船试验和自由运动试 验的比较,发现六自由度运动情况吻合较好,表明 SPH 方法有望实现渔船在恶劣水 上航行条件下的定量安全评估。



```
图1-10 渔船在波浪中的运动模拟与实验对比<sup>[64]</sup>
Fig.1-10 Comparison between simulated and experimental motion of a fishing vessel in waves<sup>[64]</sup>
```

孙鹏楠等<sup>[65]</sup>采用 SPH 方法, 更准确地说是δ+SPH 模型, 对固定平台上的畸形波 砰击进行了模拟, 如图 1-11 所示。在 SPH 模拟中, 负压的吸力效应会导致拉伸失稳, 因此在模拟中采用一种拉伸失稳控制的数值技术。在模拟中发现考虑空气相的两相模 拟对于 SPH 模型准确预测砰击初始阶段的冲击压力至关重要。此外,还讨论了波浪 与结构相互作用过程中波浪运动学/动力学特性和波浪冲击特性,分析了以负压为特 征的吸力效应的机理。



图1-11 畸形波冲击固定平台<sup>[65]</sup> Fig.1-11 Freak wave impact fixation platform<sup>[65]</sup>

Areu-Rangel 等<sup>[66]</sup>采用湿溃坝方法生成波浪并与和二维结构相互作用,研究了上 浪造成的垂直和水平载荷,如图 1-12 所示。分析了三种不同的甲板边缘保护板在减 小和延迟上浪载荷方面的能力。在该模拟中,波形与实验结果吻合较好,而载荷相对 实验稍有提前和放大。



图1-12 采用湿溃坝方法模拟的甲板上浪现象<sup>[66]</sup> Fig.1-12 Simulated green water phenomenon<sup>[66]</sup>

Mintu 等<sup>[67]</sup>建立了波浪喷溅的多相计算模型。对一艘实尺度中型渔船以不同的前 进速度在迎浪条件下遭遇规则波的工况进行了数值模拟,模拟结果如图 1-13 所示。 渔船可以在波浪中前进,具有三个自由度。研究中发现船舶前进的能量能够促使周围 液体喷溅。在二维模拟中还对波浪和风进行了模拟,演示了风促进船周围液体的喷溅 的过程。



图1-13 规则波下渔船的响应<sup>[67]</sup> Fig.1-13 Response of a fishing vessel under regular waves<sup>[67]</sup>

研究 MPS 方法的相关学者也对甲板上浪现象进行了模拟。

Shibata 和 Koshizuka 等人<sup>[68]</sup>模拟了孤立波作用下三维固定船首甲板上浪现象, 如图 1-14 所示, 并使用粒子方法预测甲板上的冲击压力。将实验与计算的流体运动、 表面高程和甲板上的冲击压力进行了对比, 得到了较好的一致性。



图1-14 船首在孤立中上浪现象<sup>[68]</sup> Fig.1-14 Green water phenomenon on a bow<sup>[68]</sup>

在后续的研究中, Shibata 和 Koshizuka 等人<sup>[69]</sup>模拟了规则波下超大型原油运输 船的甲板上浪现象,进行了三种典型规则波波长的数值模拟,模拟结果如图 1-15 所 示。船舶进行强迫运动来模拟测量的船舶振荡,并计算甲板上的冲击压力与实验结果 进行了比较。计算压力仍然存在振荡,且峰值高于实验值。



图1-15 受迫运动船舶在规则波中上浪现象[69]

然后,Shibata 等人<sup>[70]</sup>将船体假定为刚体,在弱耦合的基础上模拟了刚体与大幅 规则波的相互作用,模拟结果如图 1-16 所示。计算域入口根据势流理论给定波面, 出口使用透射条件。利用所建立的船舶运动模型和数值波浪水池,对五种典型波浪条 件下的拖曳试验进行了数值模拟。将船舶升沉,纵摇以及波高的计算结果与试验结果 进行了比较。结果表明,MPS 方法成功地模拟了甲板淹湿的非线性效应,但计算结果 与实验结果仍存在一定差异,有待完善。



图1-16 船舶在规则波中上浪现象<sup>[70]</sup> Fig.1-16 Green water phenomenon in regular waves<sup>[70]</sup>

Sueyoshi 等<sup>[71]</sup>对一个二维浮箱式浮体结构的甲板上浪进行了数值模拟,并与试验 结果进行了对比。

Bellezi 等人<sup>[72]</sup>在数值水池中模拟了三种不同 FPSO 模型在九种不同规则波波浪 条件下的上浪,模拟结果如图 1-17 所示。将计算结果与实验结果进行了比较,并对

Fig.1-15 The phenomenon of green water in regular waves on ships subjected to forced motion<sup>[69]</sup>

船载水量进行了估算。模拟得到的上浪行为与实验结果吻合较好。尽管计算得到的压力振荡,但与实验数据有相似的趋势行为。波浪振幅与甲板上浪进水量的关系与实验结果基本一致。粒子模拟的快照显示了甲板上浸水现象的动态,展示了上浪涌入和排出的阶段,如下图所示。



Fig.1-17 Wave patterns of 3D FPSOs at different moments under regular wave action<sup>[72]</sup>

张雨新<sup>[73]</sup>等人基于所在课题组开发的 MPS 并行求解器 MLParticle-SJTU, 对固定 船在无航速迎浪条件下的二维和三维上浪进行了数值研究,模拟结果如图1-18 所示。 考虑了两种情况:首先,分析了二维 FPSO 在规则波作用下的上浪情况。计算了甲板 上层建筑的上浪和冲击压力,并与 Greco<sup>[18]</sup>的试验结果和 Nielsen<sup>[52]</sup>的数值结果进行 了比较。然后在孤立波作用下进行了三维上浪模拟,分析了甲板上波浪的演化。观察 到严重的甲板淹湿现象,甲板上的结构受到较大的冲击压力。这个模拟表明 MLParticle-SJTU 求解器能够较好的模拟这样的三维上浪事件。



图1-18 三维船舶在规则波作用下不同时刻的波面图<sup>[73]</sup> Fig.1-18 Wave patterns under the action of a regular wave<sup>[73]</sup>

张友林等人<sup>[74]</sup>基于 MLParticle-SJTU 数值模拟了孤立波对刚性平板的冲击,分析 了刚性平板所受载荷的趋势。如图 1-19 所示,模拟中观察到了严重的上浪现象。



图1-19 孤立波对三维平板结构的冲击模拟[74]

Fig.1-19 Simulation of the impact of solitary waves on three-dimensional flat plate structures<sup>[74]</sup>

张冠宇等<sup>[75]</sup>提出了 MPS 和有限元法耦合,用于规则波与水平悬吊结构相互作用的数值研究。将 MPS 法计算的流体域离散为流体颗粒,将有限元法求解的结构域离散为梁单元,模拟结果如图 1-20 所示。对规则波与刚性结构的相互作用进行了初步分析,并通过与实验的对比验证了规则波与刚性结构的相互作用。在此基础上,考虑结构的弹性,研究了结构在波浪冲击作用下的弹性动力响应,包括自由面的演化、波

浪冲击压力的变化、速度分布以及结构的变形响应。通过与刚性情况的比较,可得到 结构柔度对波浪-弹性结构相互作用的影响。



图1-20 波浪与弹性体相互作用<sup>[75]</sup> Fig.1-20 Interaction of waves with elastic plate<sup>[75]</sup>

#### 1.2.4 研究中存在的挑战

甲板上浪的实验研究能提供真实的物理现象观测,确保了结果的可靠性。实验结果直观,易于理解和观察复杂现象。但实验往往需要昂贵的设备和大量资源。受实验条件和环境限制,难以完全模拟所有实际海洋环境。且实验中无法测得所有关心的参数<sup>[76][77]</sup>。

甲板上浪的理论研究方法大多采用势流理论,通常计算快速,适用于快速评估和 预测甲板上浪,也便于深入理解上浪的物理过程和现象。但理论方法简化过多,过度 简化复杂现象忽略了重要的物理细节,导致结果准确性的降低。且理论方法通常只适 用于特定条件下,对非线性和复杂现象的处理能力有限<sup>[76][77]</sup>。

数值模拟方法能够模拟各种复杂条件和场景。可以详细展现复杂现象,如自由面的大变形、翻卷等。而基于网格法的数值模拟在处理强非线性现象时,可能出现精度和稳定性问题。与基于网格的方法相比,基于粒子的方法在模拟流固耦合、复杂几何、自由面大变形、流体破碎和合并等现象方面具有优势。关于粒子法的研究工作表明粒子法在处理甲板上浪等自由面大变形问题具有很大的潜力,特别是对于模拟船体在大幅波浪中运动的情况。但对于甲板上浪的研究还处于起步阶段,仍存在很多问题需要研究。

船舶在甲板上浪数值模拟中大多被简化为刚体,很少考虑结构的弹性变形以及在 弹性变形下船体的运动响应,没有展示过弹性和刚性船体的明显区别。弹性变形不仅 对船舶的结构完整性构成挑战,也对船舶的操作和航行安全带来潜在影响。准确地预 测和量化这些弯曲变形对于理解船舶的结构响应以及评估船舶在极端海况下的性能 至关重要。

而基于 MPS-FEM<sup>[78][79]</sup>耦合方法进行研究可以对结构的弹性变形进行模拟,可以 模拟由于载荷在结构物上的不均匀分布,结构物产生的扭曲、弯曲、振动等变形。对 于进一步提高甲板上浪数值模拟的可靠性有重要意义。

#### 1.3 本文主要工作

本课题将在课题组研究工作的基础上,使用基于 MPS-FEM 耦合方法的 MPSFSI-SJTU 求解器<sup>[78][79]</sup>对甲板上浪问题进行数值分析。模拟包含了结构物和波浪的相互作 用、上浪砰击、波浪翻卷破碎等物理过程。模拟工作将基于刚性体以及弹性体的甲板 上浪问题开展,并对弹性体和刚性体上浪的差异进行对比与分析。

首先本文对使用的MPS-FEM耦合方法进行了介绍,包括MPS方法的基本理论、使用的梁单元模型基本理论、流固界面插值方法等。

接着本文先对二维框架下的甲板上浪问题进行了研究。使用湿溃坝模型模拟入射 波,采用方形结构物来简化船舶。先探究了湿溃坝模型中闸门的释放速度对产生的波 形和刚性结构物所受载荷的影响,为接下来的数值模拟选择合适的闸门释放速度,以 便后续进行数值模拟与实验的对比。然后分别将刚性结构物的左侧壁和上侧壁更改为 弹性体,改变侧壁的杨氏模量,对比分析了带刚性和弹性侧壁的结构物上浪的不同以 及更改结构物侧壁的杨氏模量对甲板上浪波形和载荷的影响。

最后本文进行了三维框架下的船舶上浪研究。入射波采用波浪非线性较强的孤立 波,以 S175 集装箱船为研究对象,建立了数值波浪水池。先对生成的船体粒子模型 的准确性以及数值水池的造波精度进行了验证。继而基于建立的数值模型探究了在不 同的船舶运动状态下(固定的刚性船舶和运动的刚性船舶),孤立波的波高对甲板上 浪的波形、结构物的运动响应以及结构物所受载荷等的影响。然后对大波高工况下固 定弹性船体的上浪事件进行了数值模拟,并将结果与固定刚性船舶上浪现象进行了对 比。
本文的创新点在于针对结构物的甲板上浪问题,在二维和三维框架下开展了刚性 结构物以及弹性结构物甲板上浪问题的数值模拟分析,研究了波浪与结构物相互作用 过程中的流场波形以及结构物所受的载荷,并将刚性结构物与弹性结构物的上浪过程 进行了对比分析。本文的研究工作可为结构物的上浪特性研究以及刚性与弹性结构物 的上浪过程对比分析提供借鉴和参考。

# 第二章 MPS 方法与 FEM 方法基本理论

# 2.1 引言

本文使用课题组自主开发的基于 MPS-FEM 耦合方法<sup>[78][79]</sup>的求解器 MPSFSI-SJTU 来对甲板上浪问题进行研究。针对流体场的求解, MPSFSI-SJTU 流固耦合求解 器采用无网格 MPS 方法, MPS 方法基于 Lagrangian 格式描述流场, 对于处理复杂自 由表面流动和多相流等现象具有天然的优势;针对结构场的求解, MPSFSI-SJTU 流 固耦合求解器采用 FEM 方法中的梁模型<sup>[80][81]</sup>,该方法已广泛应用于结构分析等领域, 可用来模拟和分析结构在静态和动态载荷下的行为。

MPSFSI-SJTU求解器集成了课题组前期开发的基于 MPS 方法的流场分析求解器 MLParticle-SJTU、采用 C++语言开发的基于 FEM 理论的结构场动力响应分析模块和 流固异构界面之间的数据传递模块,已经实现了基于 MPS 方法的流场分析与基于 FEM 方法的结构场分析功能的协同。

首先,本章对本文数值模拟涉及的 MPS 方法和 FEM 方法的基本理论进行介绍。 然后,本章从边界条件、MPS 和 FEM 耦合方法的界面信息插值技术等方面对 MPS-FEM 耦合方法进行介绍。

## 2.2 MPS 方法基本理论

MPS 方法是一种不可压缩无网格粒子类方法,最早由日本学者 Koshizuka 和 Oka 在 1996 年提出<sup>[82]</sup>。该方法将计算域离散成被赋予质量、速度、加速度等物理特性的 粒子,这些离散粒子点的运动就表示流体的流动或结构的运动。粒子通过核函数相互 驱动,粒子之间的距离越小,粒子间的相互作用越大。

在本课题的前期研究工作中<sup>[78][79][83]</sup>,已经对原始的 MPS 方法中的核函数、压力 梯度模型、压力泊松方程源项以及自由液面判断方法等部分进行了改进,改善了原始 MPS 法中较为严重的压力震荡现象,并取得了较好的成果。本节对本文数值模拟中 使用的改进的 MPS 方法进行简要介绍,主要包括控制方程、数值模型、压力泊松方 程、时间积分流程、边界条件等部分的理论。

21

#### 2.2.1 控制方程

MPS 方法的流体控制方程中包括了连续方程以及 N-S 方程。由于 MPS 方法的基于 Lagrangian 描述法的特性, N-S 方程的左侧不包含对流项。MPS 方法的流体域控制方程如下:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{V} = \boldsymbol{0} \tag{2-1}$$

$$\frac{D\boldsymbol{V}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2 \boldsymbol{V} + \boldsymbol{g}$$
(2-2)

式中: $\rho$ 表示流体密度,P表示压力,V是速度矢量,g为重力加速度矢量,v为运动 学粘性系数。

### 2.2.2 数值模型

在 MPS 方法中, 流体的流动基于流体中粒子点的运动。这些粒子通过彼此之间 的相互作用力来实现运动, 从而模拟出整体流体的动态行为。因此, 要准确模拟流动 现象, 必须对粒子间的互相作用力进行精确的求解。一个粒子的运动和力学属性是通 过对其周围邻近粒子的相应信息进行加权平均计算得到的, 该加权函数即为核函数。 从数学角度来说, 流体粒子运动的控制方程 (2-1) 和 (2-2) 涉及一阶和二阶微分项, 而 MPS 方法使用压力梯度模型、散度模型以及拉普拉斯模型对这些微分项进行离散 化处理, 这些模型借助核函数来实现。

(1) 核函数模型

由前述可知,在 MPS 方法中,流体粒子携带的物理量都是通过对邻居粒子的物理量基于核函数加权平均得到。由于压力梯度模型、散度模型以及拉普拉斯模型中都要用到核函数,因此核函数的选取对数值结果的精度影响重大。本求解器采用课题组张雨新<sup>[83]</sup>提出的无奇点的核函数,如下所示:

$$W(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{0.85r + 0.15r_e} - 1 & 0 \le r < r_e \\ 0 & r_e \le r \end{cases}$$
(2-3)

式中:W(r)代表各个物理量的权重值,r为任一流体粒子与目标流体粒子之间的距离, re代表流体粒子的影响半径。

该核函数具有与原始 MPS 方法的核函数相似的形式,形式简单但能避免原始 MPS 方法的核函数在粒子间距较小时导致的排斥力过大的现象。

在 MPS 方法的应用中,针对均匀分布粒子构成的流场空间离散化问题,不同的 微分模型在控制方程中采用差异化的粒子有效影响半径。Koshizuka 与 Oka<sup>[82]</sup>通过一

系列精密的数值实验,对各个微分模型中粒子影响半径的设定进行了深入研究,发现 在对 Laplacian 微分算子执行离散化处理时,为确保计算结果的稳定性与准确性,需 设定一个相对较大的粒子影响半径。对于其他微分算子模型(如梯度算子和散度算子), 粒子影响半径的一般设置为邻近粒子间距的 2.1 倍。下表详细列出了各模型中粒子影 响半径的推荐值,其中 dp 代表初始状态下相邻粒子间的间距。

表2-1 各微分算子模型的粒子作用半径

| Tab.2-1 Particle Interaction Radius of Various Differential Operator 1 | Model |
|--|-------|
|--|-------|

| 粒子作用模型                           | 粒子有效影响半径                 |
|----------------------------------|--------------------------|
| 压力梯度模型 <b>⟨∇P⟩</b> i             | $r_{e\_gra} = 2.1 * dp$  |
| 散度模型 <b>⟨∇・Φ⟩</b> <sub>i</sub>   | $r_{e\_div} = 2.1 * dp$  |
| 拉普拉斯模型 <b>⟨∇²φ⟩</b> <sub>i</sub> | $r_{e\_lap} = 4.01 * dp$ |

(2) 粒子数密度模型

粒子数密度是流体的密度在 MPS 方法中的衍生概念,它表示着流体粒子在流场中的分布情况。粒子数密度(*n<sup>k</sup>*)<sub>i</sub>是 *i* 粒子在第 *k* 个时间步时核函数控制域内所有邻居 粒子 *j* 的核函数的加和,即

$$\langle n^k \rangle_i = \sum_{j \neq i} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)$$
 (2-4)

式中,**r**<sub>i</sub>为粒子 i 的位移矢量,**r**<sub>j</sub>为邻居粒子 j 的位移矢量。粒子的数密度不变即为流体的密度不变,保证流体的不可压缩性即为保持粒子数密度为常数。

(3) 压力梯度模型

在 MPS 方法的计算框架内,压力梯度的离散化处理是基于梯度模型实现的。在 最初的 MPS 方法中,压力梯度模型按照公式(2-5)进行定义。然而,该模型存在一 个显著的限制:粒子间的作用力不全是排斥性质,导致整个粒子系统的动量守恒无法 得到保证,从而使计算过程易于发散。为了提高计算过程的稳定性,Koshizuka 等人 于 1998 年<sup>[84]</sup>提出了一种改进方案,即在公式(2-5)中将第*i*个粒子的压力替换为其 作用域内所有粒子的最小压力值,形成了改进后的公式(2-6)。这一改动确保了粒子 间作用力始终为排斥力。基于此,Khayyer 等人于 2008 年<sup>[85]</sup>进一步发展了这一模型, 在相邻粒子间构造一个虚构点,以此来推导出完全反对称(方向相反,大小相同)的

23

梯度模型,如式(2-7)。这一模型不仅能在粒子间距过小时增加粒子间的排斥力,而 且能够维持系统动量的守恒。Tanaka 和 Masunaga 在 2010 年<sup>[86]</sup>提出了一个类似的压 力梯度模型,并取得了较好的应用效果,如式(2-8)所示。流固耦合求解器 MPSFSI-SJTU 采用了该模型。

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{D}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{P_j - P_i}{\left| \boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i \right|^2} (\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i) \cdot W(\left| \boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i \right|)$$
(2-5)

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{D}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{P_j - P_{i\min}}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)$$
(2-6)

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{D}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{(P_j + P_i) - (P_{i\min} + P_{j\min})}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)$$
(2-7)

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{D}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{P_j + P_i}{\left| \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i \right|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot W(\left| \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i \right|)$$
(2-8)

式中: D 代表空间维度, n<sup>0</sup>为初始时刻粒子数密度。

(4) 散度模型

在不可压缩流体的连续性方程中,方程左侧是速度散度项,在 MPS 方法中借助 核函数对该项进行离散。速度散度项由下式的散度模型进行离散:

$$\langle \nabla \cdot \boldsymbol{\Phi} \rangle_{i} = \frac{D}{n^{0}} \sum_{j \neq i} \frac{\left(\boldsymbol{\Phi}_{j} - \boldsymbol{\Phi}_{i}\right) \cdot \left(\boldsymbol{r}_{j} - \boldsymbol{r}_{i}\right)}{\left|\boldsymbol{r}_{j} - \boldsymbol{r}_{i}\right|^{2}} W(\left|\boldsymbol{r}_{j} - \boldsymbol{r}_{i}\right|)$$
(2-9)

式中: • 代表任意矢量。

(5) 拉普拉斯模型

在 MPS 方法中流体域压力场是通过求解泊松方程来确定的,因此压力泊松方程 的求解方法直接影响到压力场的计算精度。迄今为止,学术界已经从泊松方程的拉普 拉斯算子(方程的左端)和源项(方程的右端)两个方面提出了多种不同的方程求解 形式。在本文中采取如下的拉普拉斯算子形式:

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2D}{n^0 \lambda} \sum_{j \neq i} (\phi_j - \phi_i) \cdot W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)$$
(2-10)

式中, λ 是一个修正参数, 用来补偿采用有限定义域范围的核函数来近似代替无限定 义域范围的高斯函数所带来误差, λ 可由下式计算得到,

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2}{\sum_{j \neq i} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)}$$
(2-11)

### 2.2.3 压力泊松方程

压力泊松方程源项的形式对计算流场压力的精度影响极大。传统 MPS 方法中, 源项完全由粒子数密度决定,利用粒子数密度的不变性来表示流体的不可压缩性。

为了融合粒子数密度恒定条件所提供的体积守恒特性和速度场无散度条件在产 生平滑压力场方面的优势, Tanaka 和 Masunaga<sup>[86]</sup>提出了一种混合源项方法, 如式(2-12)。此后, Lee 等<sup>[87]</sup>通过数值模拟确定了式(2-13)的形式更为合理。在本文使用的 流固耦合求解器的压力场计算中, 采用了式(2-13)这种源项表达形式。

$$\langle \nabla^2 p^{k+1} \rangle_i = \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot V_i^* + \gamma \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{n^0 - n^k}{n^0}$$
(2-12)

$$\langle \nabla^2 p^{k+1} \rangle_i = (1-\gamma) \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot V_i^* - \gamma \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{\langle n^k \rangle_i - n^0}{n^0}$$
(2-13)

式中, $\Delta t$ 表示流体模拟使用的时间步长, $V_i^*$ 是 MPS 方法在预估计算时计算得到的临时粒子速度(即中间速度),上标 k、k+1 和\*分别代表第 k 个时间步、第 k+1 个时间步和中间的预估计算步。y表示在压力泊松方程源项中粒子数密度项所占的比重。由 Lee 等人<sup>[87]</sup>的计算可知,通常情况下,当y在[0.01,0.05]的范围内时,计算得到的压力场相对平滑。在本文的数值模拟中,y的取值均设置为 0.01。

### 2.2.4 时间积分计算流程

MPS 方法为投影类方法的一种。该方法在每个流场计算步中,采用两阶段流程 来实现对 N-S 方程中速度场和压力场的解耦,即预估和修正两个步骤。此数学处理基 于物质导数项(N-S 方程左端项)可被分解为速度的临时分量和修正分量之和的原理。 此外,基于拉格朗日框架下的 N-S 方程中,右端的压力梯度项可以与粘性力项及质量 力项分别处理。由此推导出的临时速度如下:

$$\boldsymbol{V}_{i}^{*} = \boldsymbol{V}_{i}^{k} + \Delta t (\nu \nabla^{2} \boldsymbol{V}_{i}^{k} + \boldsymbol{g})$$
(2-14)

接下来要对求解出的临时速度进行修正。该步称为修正步。

$$\boldsymbol{V}_{i}^{k+1} = \boldsymbol{V}_{i}^{*} - \frac{\Delta t}{\rho} \nabla P^{k+1}$$
(2-15)

$$\boldsymbol{r}_{i}^{k+1} = \boldsymbol{V}_{i}^{k+1} \Delta t + \boldsymbol{r}_{i}^{k} \tag{2-16}$$

由于式(2-14)中的变量  $V_i^k$  是在先前步骤中计算得到的,因此可以显式地求解 出临时速度  $V_i^*$ 。为了确定式(2-16)中速度  $V_i^{k+1}$ ,需要求解压力  $P^{k+1}$ , $P^{k+1}$ 则可以通 过压力泊松方程来求解。

相对于原始的 MPS 方法,本文所采用的 MPS 方法在计算流程上也有一定的差异 <sup>[78]</sup>。原始 MPS 方法在基于式(2-14)计算得到临时速度之后,对流体粒子的位置也 进行了更新,流体粒子将移动到临时位置。而当粒子的位置变化后,粒子的邻居粒子 也会发生改变,因此需要在计算过程中再次对流场中的粒子进行搜寻,来更新该中间 时刻邻居粒子的配对情况。而在本文使用的 MPS 方法的计算流程中,粒子的临时位 置不再更新。从式(2-14)可知粒子的临时位置是根据粘性项和重力项计算得到的, 基于这两项计算得到的粒子位置变化量通常较小,因此本文直接采用前一时刻的粒子 位置来计算邻居粒子间核函数的数值。在 MPS 方法中,邻居粒子搜寻的过程在总计 算时间中所占的比重仅次于压力泊松方程求解的比重。使用此方法可以使计算步骤更 加简洁,降低了由粒子临时位置的更新所带来的自由面判断和粒子数密度计算的误差, 提高了计算效率。

### 2.2.5 边界条件

流场边界条件主要包括自由表面边界条件以及壁面边界条件。

(1) 自由表面边界条件

在 MPS 方法中,自由表面粒子所携带的压力被设置为零,此边界条件用来求解 压力泊松方程。能否准确判断粒子是否为自由表面粒子对流场计算的精确度具有至关 重要的影响。传统的 MPS 方法中,自由表面粒子判断常基于粒子数密度进行。

在本文所采用的流固耦合求解器 MPSFSI-SJTU 中,为了提升自由面粒子判断的 精确度,采用了 Zhang 和 Wan<sup>[88]</sup>提出的自由表面粒子判断方法。该方法基于粒子分 布的不对称性对粒子的属性进行判断。如图 2-1 所示,在本文所使用的单相流求解器 中,流场内部的流体粒子被其邻居粒子包围,其邻居粒子的分布具有较好的对称性; 而位于自由表面附近区域的流体粒子,其影响域被截断,粒子的邻居粒子全部分布于 靠向流体的一侧。基于此特点,可将不对称性较高的粒子判断为自由表面粒子。为了 量化粒子分布不对称性的特点,基于邻居粒子的分布定义了不对称性矢量 **F**:

$$\langle \boldsymbol{F} \rangle_{i} = \frac{D}{n^{0}} \sum_{j \neq i} \frac{(\boldsymbol{r}_{j} - \boldsymbol{r}_{i})}{|\boldsymbol{r}_{j} - \boldsymbol{r}_{i}|} W(|\boldsymbol{r}_{j} - \boldsymbol{r}_{i}|)$$
(2-17)

当流体粒子位于液面附近区域时,其邻居粒子的不对称性较大,矢量 *F* 的值也 较大。当粒子处于流体内部时,其邻居粒子的不对称性较小,矢量 *F* 的值较小。

综合传统的基于粒子数密度的自由表面粒子判断方法,本文采用如下的自由表面 粒子判定方法:当粒子的数密度(*n*)<sub>*i*</sub> < 0.8*n*<sup>0</sup>时,判定该粒子位于自由表面;当粒子的 数密度(*n*)<sub>*i*</sub> > 0.97*n*<sup>0</sup>,判定该粒子位于流体内部;而当粒子数密度0.8*n*<sup>0</sup> < (*n*)<sub>*i*</sub> < 0.97*n*<sup>0</sup>时,采用基于邻居粒子不对称性矢量的判断方法,若粒子不对称性矢量的值 |(*F*)<sub>*i*</sub>| > 0.9|*F*|<sup>0</sup>,则粒子位于自由表面,反之,则粒子位于流体内部。|*F*|<sup>0</sup>为初始时刻 的粒子不对称性矢量的值。



Fig.2-1 The judgment method of free surface particles<sup>[79]</sup>

(2) 壁面边界条件

在 MPS 方法中,一般来说对物体壁面的处理需要为壁面边界设置一层一类以及 两层二类边界粒子,如图 2-2 所示。一类边界粒子求解压力的方式与流体粒子相同, 即使用压力泊松方程来求解;第二类边界粒子的压力则通过壁面附近的流体粒子和一 类边界粒子所携带压力值的插值计算获得。





当结构物的壁面静止时,一类和二类边界粒子的速度都将被设置为零,当壁面边 界运动时,边界粒子的速度物理量则根据物体的运动特征求解。



图2-3 整体坐标系和随体坐标系示意图<sup>[79]</sup> Fig.2-3 Sketch for the Earth-fixed system and body-attached reference system<sup>[79]</sup>

在考虑自由表面流动与弹性结构体耦合的数值模拟过程中,结构体的运动响应受 到刚体六自由度运动方程和结构动力学方程的共同控制。在波浪载荷的作用下,结构 体的运动轨迹和变形响应实时更新,且结构体的运动和变形同时也对流体的流动产生 影响。如图 2-3 所示,在解决这个耦合运动的问题时,大地坐标系和与运动物体固连 的随体坐标系(Body-fixed coordinate system)这两种坐标系被共同使用。随体坐标系 是一种相对于运动物体自身的坐标系,随着物体的运动而移动和旋转。这种坐标系通 常用于描述物体内部或相对于物体的特定位置的运动和变形。随体坐标系的坐标原点 'O 位于物体质心处。结构体上某点的位置由下式表示:

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{x}_c + \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} \tag{2-18}$$

式中: *xc* 为大地坐标系下结构物的质心位置,该量与结构物的平动有关; *x* 表示随体 坐标系下结构物上任一点的位置, A 为从随体坐标系到整体坐标系的旋转矩阵, 与结 构物的转动有关。

本章中物体的平动和转动在大地坐标系中计算,在这一过程中物体被离散为边界 粒子和虚粒子,通过读取边界粒子所携带的压力,可以通过积分得到物体所受的载荷 与力矩,

本文所涉及的物体平动和转动的计算基于大地坐标系。在计算过程中,物体被离 散为多层边界粒子的形式。监测边界粒子携带的压力信息,便可以通过积分方法获取 物体所受的载荷和力矩。

$$\boldsymbol{F}_e = \int \boldsymbol{p} \mathrm{dS} \tag{2-19}$$

$$\boldsymbol{M}_{e} = \int \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{p} \mathrm{dS} \tag{2-20}$$

式中: *p* 为物面上的压力, *r* 为物体任一点相对结构物重心的位置向量, *d*S 表示物体 表面微元和内法线方向的向量的乘积。下标 *e* 表示在整体坐标系下计算。在本文中, 假设物体仅做平面运动,例如,在三维情况下,物体在水动压力的作用下沿着 *x* 和 *y* 轴方向平动和绕着过质心沿 *z* 轴方向的转动,其控制方程可简化表示如下:

$$\begin{cases} m \frac{d\boldsymbol{u}_{c}}{dt} = m\boldsymbol{g} + \boldsymbol{F}_{e} \\ I_{z} \frac{d\omega_{c}}{dt} = \boldsymbol{M}_{e} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{d\boldsymbol{x}_{c}}{dt} = \boldsymbol{u}_{c} \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega_{c} \end{cases}$$
(2-21) (2-22)

式中:  $m 和 I_z$ 分别表示结构物的质量和转动惯量,  $u_c$ 表示结构物在大地坐标系下的平动速度,  $\omega_c$ 表示结构物绕重心的转动角速度,  $\theta$ 为结构物绕过重心的 z 轴的旋转角度。从而,旋转矩阵 A 可以写成,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0\\ \sin\theta & \cos\theta & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2-23)

在 MPS-FEM 耦合方法中,物体的平动和转动采用 MPS 法计算,时间步与流体 计算时间步保持一致,物体的变形则根据 FEM 理论在随体坐标系中计算,物体被离 散为结构单元,根据 FEM 理论来计算得到相应的结构变形,这一步骤可以表示为,

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{N}\boldsymbol{u} \tag{2-24}$$

式中: v 表示在随体坐标系中物体的弹性变形, u 为节点位移, N 为有限元法中的形状函数。为了和物体的六自由度运动保持一致,结构变形的时间步也设置与流体时间步一致。因此,物体上任一点在随体坐标系中的位置 x 可表示为

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{r}_0 + \boldsymbol{v} \tag{2-25}$$

式中:**r**<sub>0</sub>表示在初始时刻结构物上任一点相对于质心的位置。基于这种方法,结构物的刚体运动响应和弹性变形得以同时计算。

## 2.3 FEM 方法基本理论

在流固耦合求解器 MPSFSI-SJTU 中,针对结构动力响应的求解采用了有限单元法。目前使用有限单元法已经可以获得较为准确的结构动力学计算结果。本节将从结构动力响应的控制方程、矩阵组装、时间积分等多个方面详细介绍 FEM 求解模块。

流固耦合求解器 MPSFSI-SJTU 具备用于进行二维和三维流固耦合分析的能力, 可以满足不同流固耦合问题中结构动力学响应分析所需的不同单元类型,包括二维和 三维梁单元、平面单元、壳单元、实体单元等单元,如图 2-4 所示。在本文对流固耦 合结构场的分析中,均选择梁单元对结构物进行离散。因此本节的介绍将围绕梁单元 来进行,不再对其他的单元类型过多叙述。





Fig.2-4 Discrete element

## 2.3.1 结构动力学控制方程

弹性连续体的控制方程可以基于最小势能原理建立。物体总势能 Π 可以定义为 应变能 U 和势能 V 的差, 即,

$$\Pi = U - V \tag{2-26}$$

$$U = \int \boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{T}} d\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \iiint \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{D} \boldsymbol{\varepsilon} \, dx \, dy \, dz \tag{2-27}$$

$$\mathbf{V} = \iiint \mathbf{u}^{\mathrm{T}} \mathbf{f} dx dy dz + \int_{s} \mathbf{u}^{\mathrm{T}} \overline{\mathbf{f}} ds \qquad (2-28)$$

式中:  $\sigma \pi \epsilon$ 是结构体被空间离散后的各个单元所受的应力和产生的应变,两者满足  $\sigma = D\epsilon$ ,矩阵 D 是弹性矩阵。 $f \pi \bar{f}$ 是各单元的体积力和表面力,u表示离散单元上 任一点的位移,可表示为,

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{N}\boldsymbol{\delta} \tag{2-29}$$

式中: **δ**为单元节点位移, **N**表示形函数。

在已知离散单元上某节点的位移的情况下,可求得单元上任一点应变,

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}\boldsymbol{\delta} \tag{2-30}$$

式中: B表示应变矩阵。将式(2-27)至式(2-30)带入到式(2-26),则总势能可以使用下式表达,

$$\Pi = \frac{1}{2} \iiint \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{T}} \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} \, dx \, dy \, dz - \iiint \boldsymbol{u}^{\mathrm{T}} \, \boldsymbol{f} \, dx \, dy \, dz - \int_{s} \boldsymbol{u}^{\mathrm{T}} \, \boldsymbol{\bar{f}} \, ds = \frac{1}{2} \boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}} \mathbf{K} \boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{R} \qquad (2-31)$$

$$\mathbf{K} = \iiint \mathbf{B}^{\mathrm{T}} \mathbf{D} \mathbf{B} \boldsymbol{\delta} \, dx dy dz \tag{2-32}$$

$$\boldsymbol{R} = \iiint \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{f} dx dy dz + \int_{s} \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\bar{f}} ds \qquad (2-33)$$

式中: K 表示单元的刚度矩阵, R 表示载荷矩阵。基于下式的最小势能原理,

$$\delta \Pi = \delta U - \delta V \tag{2-34}$$

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{R} \tag{2-35}$$

在进行结构的动力学分析的情况下,结构所受的载荷不仅仅包括外力载荷,还包 括结构运动所引起的惯性力和阻尼力。故载荷矩阵写为,

$$\boldsymbol{f} = \boldsymbol{f}^{\text{ext}} - \rho \frac{\partial^2 \boldsymbol{u}}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t}$$
(2-36)

式中:  $f^{\text{ext}}$ 表示外力载荷,  $-\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ 表示惯性力,  $-\mu \frac{\partial u}{\partial t}$ 表示阻尼力,  $\rho$ 表示结构的密度,  $\mu$ 表示阻尼系数。载荷矩阵可以写作,

$$\boldsymbol{f} = \boldsymbol{f}^{\text{ext}} - \rho \boldsymbol{N} \frac{\partial^2 \boldsymbol{\delta}}{\partial t^2} - \mu \boldsymbol{N} \frac{\partial \boldsymbol{\delta}}{\partial t}$$
(2-37)

将载荷矩阵带入式(2-33)得,

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{F}^{\text{ext}} - \mathbf{M} \frac{\partial^2 \boldsymbol{\delta}}{\partial t^2} - \mathbf{C} \frac{\partial \boldsymbol{\delta}}{\partial t}$$
(2-38)

$$\mathbf{M} = \iiint \mathbf{N}^{\mathrm{T}} \rho \mathbf{N} \, dx dy dz \tag{2-39}$$

$$\mathbf{C} = \iiint \mathbf{N}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\mu} \mathbf{N} dx dy dz \qquad (2-40)$$

式中: **F**<sup>ext</sup> 、**M**、**C** 分别表示单元上受到外界的体积力和表面力所构造的等效节点荷载、质量矩阵和阻尼矩阵。至此可以得到结构的动力学控制方程

$$\mathbf{M}\frac{d\boldsymbol{\delta}^2}{dt^2} + \mathbf{C}\frac{d\boldsymbol{\delta}}{dt} + \mathbf{K}\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{F}^{\text{ext}}$$
(2-41)

处于便于计算的考虑,将阻尼矩阵 C 构造为刚度矩阵 K 和质量矩阵 M 的线性组合,即所谓的 Rayleigh 阻尼矩阵,表达式如下,

$$\mathbf{C} = \beta_1 \mathbf{M} + \beta_2 \mathbf{K} \tag{2-42}$$

式中: $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 为与结构的自然频率和阻尼比有关的系数。

## 2.3.2 控制方程的时间积分

求解结构的动力响应需要对结构的动力学方程式(2-41)进行求解,式(2-41) 为二阶常系数微分方程组,在本文使用的求解器中使用 Newmark-β 方法进行求解<sup>[89]</sup>。 求解二阶常系数微分方程组前,需要设置附加的边界条件,本文的求解采用设零法, 即将网格中的某些节点的矩阵系数设置为 0,省去求解与这些节点相关联的方程的步 骤。求解结构动力响应时,在较大的单元数目以及节点数目的情况下,在求解中有效 刚度矩阵**K**的行列数较多,为了便于求解将有效刚度矩阵**K**看作是大型稀疏矩阵,采 用压缩稀疏行(Compressed Sparse Row, CSR)的格式来储存大型矩阵,同时采用 BiCGSTAB(Biconjugate gradient stabilized)算法来求解线性代数方程组<sup>[90]</sup>。

# 2.4.MPS-FEM 方法耦合策略

MPS-FEM 耦合方法的关键在于两种方法之间的耦合策略,本节将对此进行论述。

### 2.4.1 MPS-FEM 的空间异构特征

在应用 MPS-FEM 耦合方法处理流固耦合的问题时,核心任务包括精准识别流体与固体的交界面,并在两者的边界上建立映射。流体和结构的求解方法在空间离散上存在差异,导致流固交界面在离散形式和离散尺度上的不一致,即产生"空间异构"的界面。在本文使用的 MPS-FEM 方法中,流体区域采用粒子形式离散化,而结构域则根采用梁单元类型进行划分。所采用的流体域和结构域的边界耦合方法如图 2-5 所示。



Fig.2-5 The diagram of coupling fluid-structure interface<sup>[79]</sup>

在流固耦合分析中,流体与固体在其界面上进行数据交换。需要满足的条件为:

$$\boldsymbol{u}^F = \boldsymbol{u}^S \tag{2-43}$$

$$p^F \boldsymbol{n}^F = -p^S \boldsymbol{n}^S \tag{2-44}$$

式中: *n<sup>S</sup>*和 *n<sup>F</sup>*代表结构单元和流体粒子边界的法向量。上标 *F*和 *S*指代流体和结构 场。该公式阐释了在流固交界面上必须同时满足位移协调边界条件和载荷平衡边界条件,并保证这些参数数值的连续性和方向的一致性。流体边界粒子的法向量 *n<sup>F</sup>*通过 影响域内的邻居粒子来计算,结构单元边界的法向量 *n<sup>S</sup>*则根据结构的坐标来确定。

### 2.4.2 MPS-FEM 的时间异构特征

MPS-FEM 耦合方法在时间上的耦合同样不容忽视。

MPS 方法的时间步长  $\Delta t_f$  需要满足库朗(Courant-Friedrichs-Lewy, CFL)条件, 即,

$$\Delta t_f \le \frac{C * dp}{u_{max}} \tag{2-45}$$

式中: C 为介于 0 和 1 之间的常数, umax 表示粒子的最大速度的值。

在 FEM 方法中,时间步长  $\Delta t_s$  由中心差分法的参数确定,即,

$$\Delta t_s \le \frac{L_{\min}}{C_s} \tag{2-46}$$

式中: Lmin 为结构域网格最小尺寸的数值, Cs表示结构域的材料声速的数值, 表示为,

$$C_s = \sqrt{\frac{E_s(1-\mu_s)}{\rho_s(1+\mu_s)(1-2\mu_s)}}$$
(2-47)

式中:  $\rho_s$ 、 $E_s$ 以及 $\mu_s$ 分别代表结构域的密度、杨氏模量以及泊松比。

为了保证数值稳定性,流固耦合求解器 MPSFSI-SJTU 计算中使用的时间步  $\Delta t$  需要满足,

$$\Delta t \le \min\left\{\Delta t_f, \Delta t_s\right\} \tag{2-48}$$

总体而言,对流体和结构计算时间步长的适当配置,在保证计算过程稳定性和提高计算效率方面起着关键作用。

### 2.4.3 MPS-FEM 界面插值技术

MPS-FEM 耦合方法中的界面插值技术包括载荷信息的插值以及位移信息的插值。 粒子模型-梁单元的流固界面采用基于分组信息交换技术的界面插值方法<sup>[79]</sup>,如图 26 所示,以三维流固耦合问题为例,位于结构同一截面处的流体边界粒子被划分为同 组粒子,每组流体边界粒子等效为一个梁单元的节点。

流固界面的载荷传递采用如下的方法:将同一组一类边界粒子上的压力进行积分, 等效于每一个梁单元节点所受到的外载荷,结构求解模块根据结构动力学方程得到节 点的速度与角速度。

流固界面的位移传递采用如下的方法:每一组流体边界粒子根据节点的线速度和 角速度分别产生平移运动和绕节点的转动,流体边界粒子的速度以及位置据此更新。



(b) 位移信息传递
 图2-6 界面插值技术<sup>[79]</sup>

# Fig.2-6 Interpolation method in fluid-structure interface<sup>[79]</sup>

## 2.5 本章小结

本章主要对本文使用的 MPS-FEM 耦合方法进行了介绍,结构域采用梁单元进行 离散。首先阐述了流体动力学分析中使用的 MPS 方法的基本原理,包括了流场的控 制方程、核函数、粒子间的相互作用模型、流场的自由面和壁面边界条件等。然后,简要介绍了结构动力学响应计算中使用的 FEM 方法,包括结构控制方程、单元类型和时间积分方程等。最后,论述了 MPS 和 FEM 之间耦合的方法。

# 第三章 MPSFSI-SJTU 求解器验证

# 3.1 引言

在将流固耦合求解器 MPSFSI-SJTU 应用于甲板上浪的问题研究之前,首先将基 于求解器的求解精度开展验证工作。

本文的研究聚焦于分析表面波对于海洋结构物的上浪以及砰击响应。在船舶与海 洋工程领域,众多结构物如船舶和海洋平台常处于海面上的浮动状态。这些结构物的 动态响应与波浪载荷之间存在着复杂的相互作用机制。一方面,波浪载荷能够诱发并 加剧结构物的运动响应;另一方面,结构物的运动也会对周围流体的运动产生影响。 在这种情况下,结构物的大幅度运动可能会加剧水体对其的冲击力,增加结构物失稳 或遭受局部损伤的风险。近些年来,随着船舶以及海洋平台等海洋结构物尺寸的增大, 结构物更容易发生变形,结构物的变形响应同样会显著影响流场和流体载荷。对于船 体和海洋平台来说,其运动和变形响应是六自由度运动与结构弹性变形之间的耦合。 精准预测结构物在浮动状态下的运动和弹性变形对于结构物的整体性能分析是有重 要意义的。

流固耦合求解器 MPSFSI-SJTU 的运动求解计算模块已得到了较多的验证,本章 将主要关注流场求解以及结构的弹性变形等方面并开展验证工作。本章通过泄洪流与 弹性闸门的相互作用对本文使用的 MPS-FEM 耦合模型进行验证,与文献中提供的结 果进行对比,从而验证 MPSFSI-SJTU 求解器的总体性能以及该求解器在大规模并行 计算方面的适用性。

## 3.2 泄洪流对三维弹性闸门的砰击问题模拟

本节采用一个经典的流固耦合问题测试算例,等宽泄洪流与弹性闸门之间的相互 作用,对流固耦合求解器 MPSFSI-SJTU 进行整体验证。本节主要关注弹性结构物在 流体压力下产生的动力响应,从而验证求解器的动力响应求解模块以及流固界面插值 模块。在课题组之前的研究中,张冠宇<sup>[79]</sup>基于 MPSFSI-SJTU 求解器中的 Solid 模型 对该算例进行了验证,本文采用梁模型,比实体(Solid)单元模型具有更快的计算效 率。

37

### 3.2.1 算例设置

本节所用的计算模型如图 3-1 所示,水柱沿 x 方向长度为 0.1 m,沿 z 方向宽度 为 0.1 m,沿 y 方向高度为 0.14 m,左侧水柱在模拟开始时处于静平衡状态,右侧的 可变形固定闸门控制模拟的开始。流体密度设置为ρ<sub>f</sub> = 1000 kg/m<sup>3</sup>,重力加速度设置 为 g = 9.81 m/s<sup>2</sup>,运动粘度设置为γ = 1×10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s。闸门的上侧为不可变形固定闸门,下侧有可变形的弹性闸门部分,弹性闸门的上端与固定闸门相连也被固定,闸门整体 与水体同宽。闸门的厚度为 0.005 m,宽度为 0.1 m,底端弹性闸门部分高度为 0.079 m,密度、杨氏模量以及泊松比分别设置为ρ<sub>s</sub> = 1100 kg/m<sup>3</sup>、*E*<sub>s</sub> = 12 MPa 以及 *v*=0.3。 在模拟开始时刻,整个闸门闭合,水体全部位于闸门的左侧,随后左侧水柱在重力作 用下从静止开始向右侧流动,闸门下端的弹性部分在水柱的压力作用下变形。

在数值模拟中,粒子的初始间距为 dp = 0.001 m,生成的流体和固体粒子总数约为 120 万。弹性闸门部分采用 79 个梁单元离散,流体和结构求解的时间步长均设置为  $\Delta t = 0.0002$  s,插值半径设置为  $r_{e_i}/dp = 2$ ,总模拟时间为 0.36 s。数值模拟共采用了 10 核 CPU 并行计算,数值模拟计算时间约为 6 个小时。而采用实体单元模型计算时间约为 10 个小时<sup>[79]</sup>。



Fig.3-1 The model used in simulation

### 3.2.2 流场演化与闸门变形分析

图 3-2 为不同时刻流体的压力以及弹性闸门变形情况的模拟结果与实验结果<sup>[91]</sup> 的对比。实验开始时刻,水柱被释放,在水柱压力的作用下闸门自由端发生变形,闸 门末端出现较为明显的水平位移。随着时间的推移,左侧水柱高度降低,向右侧流动。 如图 3-2 所示,使用 MPS-FEM 耦合方法得到的结果和实验测得的结果高度相似, MPS-FEM 耦合方法成功地应用于流动流体与固定的可变形结构物之间相互作用的数 值模拟。

在闸门自由端中心处测得的水平位移和垂直位移时历曲线结果如图 3-3 和图 3-4 所示,图片中同时展示了其与实验以及其他数值方法模拟得到的结果<sup>[91]</sup>的对比。可以 看出,闸门自由端的水平以及垂向位移都呈现先增大再减小的趋势,这表明闸门在初 始较大的压力下快速发生变形,后随着受力的减小变形也渐渐减小。通过比较其他数 值方法与试验的闸门自由端的位移曲线可以发现,本文所采用的数值模拟计算所得的 结果与试验的结果相似度较高。此外,图片还提供了与张冠宇<sup>[79]</sup>基于 MPSFSI-SJTU 求解器的 Solid 模型求解的结果的对比,可以观察到两种模型具有相似的计算结果, 但是本文的梁模型具有更高的求解效率。综上,本文所使用的 MPSFSI-SJTU 求解器 的梁模型在求解流固耦合问题时具有较好的精度和效率。





(a) 实验结果
 (b) MPS-FEM 耦合方法数值结果
 图 3-2 泄洪流与弹性闸门的相互作用<sup>[91]</sup>
 Fig.3-2 The dam-break flow interacting with a deformable gate<sup>[91]</sup>









图 3-5 和图 3-6 为在泄洪流与弹性闸门发生相互作用的过程中,初始时刻水柱中 心位置(x=0.05 m, z=0.05 m)和靠近闸门水柱侧位置(x=0.1 m, z=0.05 m)处 的液面高度变化与实验结果<sup>[91]</sup>的对比图。无论是本文的数值模拟还是实验,两个位置 处的液面高度基本处于下降状态。此外,可以看出本文的数值模拟方法测得的液面高 度下降速度比实验液面的下降高度要快,该现象与图 3-3 和图 3-4 计算所得的闸门自 由端位移量比实验要更快到达峰值的现象相呼应,图 3-3 和图 3-4 中前 0.12 s 内采用 本文的数值模拟方法计算得到的自由端的横向和垂向移动幅度较实验更大,导致了数 值模拟中左侧水位下降的比实验更快的现象发生。总的来说,本文数值模拟方法测得 的液面高度与实验结果具有较好的相似度。







Fig.3-6 The liquid level height near the gate

41

### 3.2.3 闸门应力分析

在闸门变形部分的中心位置上沿 y 方向向等距离布置了 4 个测点,如图 3-1 所示,分别为 A、B、C 和 D,以观察闸门在变形过程中的应力分布情况,4 个测点的 位置如图 3-1 所示。4 个测点应力变化时历曲线如图 3-7 所示。可以看出,A 和 B 两 个测点的应力变化趋势较为相似,呈现先迅速增大再缓慢减小的趋势;C 和 D 两个 测点的应力值相对来说较小,尤其是 D 测点的应力接近于 0,C 测点处的应力呈现缓 慢增加再缓慢减小的趋势。从图 3-7 中能够看出,弹性闸门上距离固定端越近的测点 应力峰值越大,越靠近自由端的测点应力越小,自由端处的应力近似于零。该趋势与 理论吻合良好,一定程度上证明了 MPSFSI-SJTU 求解器求解的精度。



Fig.3-7 The stress time histories of measuring points on the gate

图 3-8 为一些典型时刻下的流场以及弹性闸门表面应力分布图。结构的应力变化 和结构的变形具有较好的一致性。此外可以观察到,流场的压力分布以及结构场的应 力分布都较为光滑。



(a) t = 0.05 s

2809-5 Litter- 6 1409-5

100-0



(b) 
$$t = 0.10 \text{ s}$$





(c) t = 0.15 s





(d) t = 0.20 s









(f) t = 0.30 s

图3-8 典型时刻下的流场与弹性闸门的应力分布(左: 流场压力图; 右: 应力分布图) Fig.3-8 The flow field and stress distribution of the elastic gate (Left: Flow pressure field; Right: Stress distribution)

## 3.3 本章小结

本章节着重研究了结构的弹性变形和流体流动部分的验证工作。本章采用了三维 泄洪流与弹性闸门的相互作用作为研究对象,对所使用的 MPS-FEM 耦合方法进行了 验证。通过将本文所使用的 MPS-FEM 耦合模型的计算结果与现有文献中的结果进行 比较,本章验证了 MPSFSI-SJTU 求解器在处理剧烈表面流动与结构弹性变形耦合问 题方面的突出的整体求解性能。

本章对三维泄洪流与弹性闸门的相互作用进行了数值模拟,细致地分析了弹性闸 门在受到水流冲击时的动态响应以及流场演化情况,对结构的应力分布、变形情况以 及流场的水位高度和压力分布等进行了详细的研究。与文献中实验的结果进行了对比 分析,数值模拟的结果与实验的结果具有较好的一致性。此外还与使用 MPSFSI-SJTU 求解器中 solid 模型进行的数值模拟进行了对比,验证了本文使用的梁模型在具有较 好的求解精度的同时还保证了较高的求解效率。本章的研究验证了本文所使用的数值 方法能够为非线性流固耦合问题提供稳定、合理且精确的数值结果。此外, MPSFSI-SJTU 求解器的梁模型在并行计算方面的表现也较为良好,为处理更大规模、更复杂 的海洋和水利工程问题提供了强大的计算分析工具,可以进行后续的数值研究工作。

# 第四章 二维固定结构物上浪研究

## 4.1 引言

甲板上浪是快速且复杂的现象,为了研究单个甲板上浪事件的机理和造成的砰击载荷,系统性的替代研究方法已经在最近被使用。简化的方法主要集中在波浪生成以及结构物的简化两方面。如,Hernández-Fontes等(2020)<sup>[24]</sup>的实验研究了用湿溃坝方法形成的甲板上浪,并研究了固定结构上的垂向载荷。Areu-Rangel等(2021)<sup>[66]</sup>基于该模型使用 SPH 方法进行了数值模拟,进一步研究了水平载荷。在这些研究中,甲板上浪事件都是通过湿溃坝方法产生的。湿溃坝方法对于实验和数值模拟分析不同的甲板上浪事件都非常友好,因为它容易实现,且可以产生系统的、可重复的和短持续时间的甲板上浪事件。本章将基于湿溃坝方法进行二维甲板上浪的相关研究。

首先,本章进行了数值验证,基于上述的模型使用 MPS 方法进行了数值模拟, 并与 Areu-Rangel 等基于 DualSPHysic 软件的数值模拟结果进行了对比,验证了 MPSFSI-SJTU 求解器模拟的准确性。其次,数值模拟并分析了闸门移动的速度对湿 溃坝法产生的二维甲板上浪事件的影响,主要关注对波浪的形成、结构物的载荷等方 面产生的影响。最后,分别模拟分析了带有不同杨氏模量的左侧壁以及上侧壁的甲板 上浪事件,并对流场以及结构物载荷进行了深入分析。

### 4.2 数值验证

Areu-Rangel 等人的 SPH 模拟采用湿溃坝法生成入射波,湿溃坝方法可以看作是 在溃坝的下游增加一定高度的水体。Areu-Rangel 等采用的数值仿真模型如图 4-1 所 示,水池左侧是两种高度的水体,水池右侧放置固定的矩形结构,可以看作是简化的 船首或其他结构。水池右侧壁可看作是船首上层建筑的侧壁。模型中布置了 3 个测波 点 WP0、WP1 和 WP2。在右侧的固定结构顶部放置一个长 0.18 m 的测力单元,在结 构物左侧壁放置一个高 0.15 m 的测力单元。这些设置是为了测量入射波高(WP0 和 WP1,图 4-1)、干舷超越(WP2,图 4-1)、结构物上甲板所受垂向载荷(Element1, 图 4-1)和结构物左侧壁所受水平的水平载荷(Element2,图 4-1)。其余尺寸如图 4-1 所示。

45



(Dimensions in mm)

图4-1 Areu-Rangel 等<sup>[66]</sup>研究的甲板上浪模型示意图(包含三个测波点以及两个测力单元) Fig.4-1 The sketch of the water shipping model studied by Areu-Rangel <sup>[66]</sup>, indicating the positions of the three wave probes and two structural elements for the investigation of the hydrodynamic loads

为了减少粒子总数以及节省计算资源,本节在 MPS 模拟中使用了图 4-2 所示的 简化模型,可以达到与 SPH 模拟相同的模拟目标。与 Areu-Rangel 等人的模拟一致, MPS 模拟中水体运动的开始时间也设置为 0.5 s。在 Areu-Rangel 等人的模拟中,模拟时间间隔设置为 0.0002 s,时间步长算法为 Verlet 算法,初始粒子间距为 0.0005 m。物理模拟时间为 1.5 s。



图4-2 MPS 模拟中使用的模型图

Fig.4-2 The sketch of the model used in validation of MPS simulation

本节还进行了粒子间距收敛性研究。3 种粒子间距(*dp*)分别设置为 0.0008 m、 0.001 和 0.0012 m。图 4-3 展示了在三种粒子间距下数值模拟的不同粒子总数和模拟 时间。图 4-4 和图 4-5 给出了在三种粒子间距下数值模拟中测得的三个测点的波高和 两个单元的载荷。可以看出,随着粒子间距的减小,数值结果逐渐收敛。粒子初始间

距 dp = 0.0008 m 和 dp = 0.001 m 的结果非常相似。从节约计算资源和节省时间的角度考虑,在后续研究中将采用 0.001 m 的粒子间距。





Fig.4-3 The information about particle spacing sensitivity analysis: total particles, total runtime.



图4-4 数值方法验证: 3 种不同粒子间距下 SPH 结果<sup>[66]</sup>与 MPS 结果的波高值对比 Fig.4-4 Validation of the numerical approach: comparison of the wave elevations between the SPH results <sup>[66]</sup> and MPS results with three different particle spacings



图4-5 数值方法验证:三种不同粒子间距下 SPH 结果<sup>[66]</sup>和 MPS 结果的载荷对比图:(a)单元1 的垂向载荷。(b)单元2的水平载荷

Fig.4-5 Validation of the numerical approach: comparison of the loads of elements between the SPH results <sup>[66]</sup> and MPS results with three different particle spacings

图 4-4 和图 4-5 还给出了 SPH 模拟与 MPS 模拟的对比。图 4-4 中 Elevation 纵坐标指的是该点处的水体最高位置距离固壁边界的高度,对于 WP0 和 WP1 指的是水体最高位置距离水池底部的高度,对于 WP2 指的是距离结构物上壁面的高度。图 4-5 中 Load 纵坐标指的是单元测得的水体载荷。从图 4-4 中 WP0、WP1 和 WP2 处测得的波高可以看出,粒子间距为 0.001 m 时 SPH 和 MPS 模拟的水位波高大致相同,这证明 MPS 模拟和 SPH 模拟在水槽左侧的波浪形态有很大的相似性。图 4-5 展示了 Element1 和 Element2 上测得的载荷,这表明 SPH 和 MPS 的结果在结构物所受载荷的趋势和峰值方面高度一致。

图 4-6 展示了 SPH 模拟的速度场和 MPS 模拟的速度场对比图。可以看出,这两种模拟的波形和速度场是相当相似的。入射波到达结构左侧边缘后发生破碎,随后入射波撞击结构上层甲板,并向左右两个方向穿过甲板。部分入射波还击中了上层建筑与甲板的交界处。随着甲板上的水越来越多,水开始沿着上层建筑侧壁向上爬升,回落并从甲板上流下。在波浪撞击甲板并在甲板上传播直至回落水池中的阶段,甲板左侧边缘附近出现了空腔。

综上所述,本文所采用的 MPS 方法的数值模拟结果与 Areu-Rangel 等人<sup>[66]</sup>SPH 模拟的结果具有较高的相似性,验证了本文所采用的数值模拟方法的准确性。本节使用的仿真模型可用于下一步的数值模拟。



图4-6 使用 SPH 方法<sup>[66]</sup>和 MPS 方法模拟过程中观察到的速度场图 Fig.4-6 Snapshots of the velocity fields of some relevant stages observed during the simulations using the SPH method by Areu-Rangel et al.<sup>[66]</sup> and the MPS method

## 4.3 闸门释放速度对甲板上浪波形和载荷的影响

在实验中为了实现湿溃坝法的条件,实验的开始阶段使用闸门控制水体的流动。 Hernández-Fontes 等进行的有闸门的实验和 Areu-Rangel 等进行的无闸门数值模拟产 生了不同的入射波形态。这可能说明闸门对波浪的形成和甲板上浪事件的产生有一定 的影响。本节将基于上述数值模拟模型,分析由不同闸门释放速度引起的甲板上浪现 象差异,可以为湿溃坝方法数值模拟与实验的对比验证提供参考。

### 4.3.1 计算参数设置

为了研究闸门释放速度的影响,本节采用了4种不同的闸门匀速释放速度来产生入射波,闸门释放速度分别为1m/s、1.6m/s、2m/s、5m/s。仅在闸门释放速度为1m/s时不能保证闸门开启时间  $t < (2h/g)^{0.5}$ ,其中g为重力加速度,h为闸门上游初始

水位。闸门厚度为 0.01 m,与 Hernández-Fontes 等的实验中的闸门厚度相同。在 Hern ández-Fontes 的实验中,门由向下坠落的重物驱动,实验中涉及的仪器的细节可以在 Hernández-Fontes 等<sup>[16]</sup>的论文中找到。



(b) 数值模拟示意图图4-7 MPS 模拟中使用的模型图Fig.4-7 The sketch of the model used in MPS simulation

本节所使用的数值模拟模型和设置如图 4-7 所示,与上一节使用的模型相比,仅 增加了一个宽度为 0.01 m 的闸门。3 个测波点和 2 个测力单元的设置与图 4-1 相同。 初始粒子间距设置为 0.001 m。本节所使用的模型与 Hernández-Fontes 等人实验的模 型相同,但实验没有提供闸门释放速度相关的信息。

### 4.3.2 甲板上浪波形

图 4-8 至图 4-13 为 Hernández-Fontes 等的实验和本节不同闸门释放速度下的 MPS 数值模拟在一些时刻的流场图,可以看出当闸门释放速度为 1.6 m/s 时,数值模拟的 波形与实验几乎一致。当闸门速度小于 2 m/s 时,0.97 s 时刻的甲板上浪入射波较为

完整,在速度更高的情况下,可以观察到破碎的入射波。在闸门速度为5m/s的情况下,可以观察到由多股射流组成的甲板上浪入射波。总的来说,当闸门速度越大,波 形更接近无闸门的情况。闸门速度在 1.6 m/s 时,模拟得到的波形与实验最为接近。







Fig.4-8 Snapshots found in the experiment of Hernández-Fontes et al. [24] and MPS simulations with





图4-90.970s时刻实验[24]与数值模拟波形对比图

Fig.4-9 Snapshots found in the experiment of Hernández-Fontes et al. <sup>[24]</sup> and MPS simulations with different gate speed at 0.970s



(b) MPS simulation

图4-10 1.042 s 时刻实验<sup>[24]</sup>与数值模拟波形对比图

Fig.4-10 Snapshots found in the experiment of Hernández-Fontes et al. <sup>[24]</sup> and MPS simulations with different gate speed at 1.042s



# (a) Experiment





图4-11 1.086 s 时刻实验[24]与数值模拟波形对比图

Fig.4-11 Snapshots found in the experiment of Hernández-Fontes et al. <sup>[24]</sup> and MPS simulations with different gate speed at 1.086s



(b) MPS simulation

图4-12 1.142 s 时刻实验<sup>[24]</sup>与数值模拟波形对比图

Fig.4-12 Snapshots found in the experiment of Hernández-Fontes et al. <sup>[24]</sup> and MPS simulations with different gate speed at 1.142s





Fig.4-13 Snapshots found in the experiment of Hernández-Fontes et al. <sup>[24]</sup> and MPS simulations with different gate speed at 1.226s

图 4-14 至图 4-16 表明,不同的闸门释放速度产生了不同的甲板上浪入射波。将 初始时刻闸门左侧的水体简称为 W1,初始时刻闸门右侧的水体简称为 W2。在闸门 速度较小(1m/s)的情况下,如图 4-14 所示,W1 从闸门下的缝隙流入 W2 的下部。 随后 W2 被 W1 顶起, W1 继续向右传播, 如图 4-15 所示。随后, 向右传播的 W1 到 达结构左侧附近,挤压结构附近的 W2。由于 W1 和 W2 的相互作用,部分 W2 的水 体沿结构左墙向上爬升,W1向右上方移动并将W2向上抬升,形成甲板上浪事件的 入射波,如图 4-16 所示。在闸门开启速度较高的情况下,闸门与水的相互作用时间 较短,当闸门离开 W1 的最上部时,W1 水体变形不大,如图 4-14 所示。闸门离开 W1 后,两个不同高度的水体相互挤压,在中间交汇处形成波浪。这个波浪向右传播。 当它到达结构物时,遇到结构物左侧被挤压涌上来的水体,如图 4-16 和图 4-8 至图 4-9 所示,导致甲板上浪的入射波破碎。闸门速度为 5 m/s 时的流场与无闸门的理想 湿溃坝法产生的流场接近。此外,在闸门移动速度较低的情况下,水面以下的水体速 度较大,在闸门运动速度较高的情况下,自由表面附近的水体速度较大。综上所述, 不同闸门释放速度下,甲板上浪的入射波产生方式不同。中等闸门速度(1.6 m/s 和 2 m/s)的入射波产生方式可以看作是低速运动闸门(1 m/s)和高速运动闸门(5 m/s) 的组合。此外,在图 4-15 中可以看到较为明显的水体的飞溅,实际在数值模拟没有 如此明显的飞溅,在作图时为了更好的显示效果,水体粒子被放大。





54



图4-15 不同闸门释放速度产生的不同入射波波形

Fig.4-15 Snapshots of the different wave patterns generated by different gate speeds



图4-16 不同闸门释放速度产生的不同入射波波形

从 WP0 的波高曲线(图 4-17)可以看出,闸门速度越慢,左侧水体下降越慢。 这是由于闸门对左侧水体的阻碍作用造成的。从 WP1 的波高曲线(图 4-17)可以看 出,随着闸门速度的增大,WP1 的波高峰值增大,且波高到达峰值的时间越早。闸门 释放速度不同,甲板上浪的入射波产生的方式不同,波的传播速度也不同,形成的甲 板上浪入射波也不同。闸门释放速度越大,W1 和 W2 水体中间交界处的相互挤压作 用越大,自由表面上形成的波高也越大。与 WP0 和 WP1 测波点类似,闸门速度越 高,WP2 测波点波高峰值出现的时间越早。然而,闸门速度为 1.6 m/s 时 WP2 测波 点的峰值最大。当闸门速度很低时,甲板上的入射波基本由 W1 抬升 W2 产生。从图 4-8 至图 4-11 可以看出,闸门释放速度为 1.6 m/s 产生的入射波与闸门速度为 1 m/s 的

Fig.4-16 Snapshots of the different incident waves of green water events generated by different gate speeds
入射波相比项部多了一个尖峰,这个波峰导致闸门速度为1m/s的波高峰值比闸门速度为1.6 m/s的波高峰值小。这个波峰是由自由表面上向右运动的波形成的。在闸门释放速度最大的情况下,甲板上浪事件的入射波由自由表面上向右运动的波和结构左侧爬升的水体共同形成,在闸门释放速度较小的情况下 W1的抬升作用较小,导致峰值减小。





Fig.4-17 Wave elevations at different gate release speeds and wave elevations of experiment (Hernández-Fontes et al., <sup>[24]</sup>). (a) Water elevations at WP0. (b) Water elevations at WP1. (c) Water elevations at WP2

56

#### 4.3.3 结构物所受载荷

图 4-17 将 Hernández-Fontes 等的实验结果与 MPS 数值模拟结果进行对比,可以 看出闸门释放速度为 1.6 m/s 时的测波点波高时历曲线与实验很相似。图中的曲线在 一定程度上验证了数值模拟中波形发展的准确性。



图4-18 不同闸门释放速度下测力单元的载荷和实验<sup>[24]</sup>的对比图:(a)单元1的垂向载荷;(b) 单元2的水平载荷

Fig.4-18 Loads of elements at different gate release speeds and loads of elements of experiment (Hernández-Fontes et al., <sup>[24]</sup>). (a) Vertical loads of Element1. (b) Horizontal loads of Element2

从 Element1 的垂向载荷时历曲线(图 4-18)可以看出,闸门释放速度越大,载 荷达到峰值的时间越早,这与 WP2 的波高时历曲线变化趋势相似。最大垂向载荷发 生在入射波大面积冲击结构物的甲板时。Element1 在闸门速度为 1.6 m/s 工况下的垂 向载荷峰值最大。较低的闸门速度使得入射波更平缓地撞击到甲板上,从而导致峰值 载荷值的降低。若闸门速度过高,波浪会在结构物左侧壁面附近碰撞破碎,部分水流 受阻回流至水池,降低了甲板上浪事件上浪的水体量和载荷峰值。闸门释放速度对 Element2 上水平载荷峰值的影响也与对 WP2 处波高峰值的影响类似,随着闸门释放 速度的增大,Element2 上水平载荷峰值先增大再减小。除静水压力外,结构左侧附近 水体的动能也会对 Element2 的水平载荷产生影响。因此,闸门释放速度对 Element2 的载荷峰值与对 WP2 测点处波高的影响略有不同。

此外,当闸门速度为1.6 m/s 时,Hernández-Fontes 实验中结构所受的载荷远低于 MPS 模拟中的载荷,这可能是由于结构物甲板左侧边缘产生了空腔。本节的数值模

57

拟没有考虑空气相,会对模拟结果产生一定的影响。此外,数值模拟是二维的,而实验是三维的,这也可能对实验结果产生影响。尽管如此,实验载荷的变化趋势与闸门速度为 1.6 m/s 的数值模拟结果非常相似,这表明本节的分析仍然有效。

图 4-19 展示了不同闸门释放速度下载荷达到峰值时刻的一些压力场图。可以看 出上层建筑与甲板的连接处产生了较大的压力,对此处的结构强度不利。







Fig.4-19 Snapshots of pressure fields found in MPS simulations with different gate speed at different

time

本节模拟分析了不同闸门释放速度对湿溃坝法产生的入射波波形以及对甲板上 浪事件中固定结构所受载荷的影响。通过对结果的分析,可以得出几点结论。首先, 不同闸门释放速度产生入射波的方式不同,波形也不同。闸门释放速度越大,入射波 到达甲板时越容易破碎。其次,闸门释放速度越大,结构所受波浪载荷越早到达峰值。 最后,在一定的闸门释放速度下,波浪载荷的峰值达到最大。闸门的速度低于此或者 高于此,波浪载荷的峰值都会有所减小。

# 4.4 弹性左侧壁的影响

在本节中,考虑了结构物弹性的影响。基于图 4-7 中的模型,本节中设置结构的 左侧壁为弹性侧壁进行模拟,即 Element2 作为弹性侧壁。弹性侧壁的密度为 7600 kg/m<sup>3</sup>,厚度为 8 mm,杨氏模量分别设置为 35、55、75 MPa。采用的单元类型为梁 单元(beam),插值的有效半径设置为 0.003 m。Element2 被分为 150 个梁单元。结 构和流体的时间步长均设置为 0.0002 秒。为了与 Hernández-Fontes 等人刚性结构的 实验结果进行比较,在本节中的数值模拟中以 1.6 m/s 的速度匀速打开闸门。

#### 4.4.1 甲板上浪波形

图 4-20 展示了不同杨氏模量下 MPS 数值模拟的流场速度图以及实验对应时刻的 流场图,可以看出杨氏模量越大,左侧壁的变形越小。在 Element2 为弹性的情况下, 甲板上浪事件的入射波的边缘开始变得不规则, 波浪的速度场也逐渐变得不平滑。

从图 4-21 中的波高时历曲线可以看出,在刚性侧壁条件下的模拟结果与 Hernández-Fontes 等人的实验结果吻合较好。弹性左侧壁对结构物左侧流场的波形没 有明显影响。对于有或无弹性左侧壁的结构物,结构物左侧流场中测得的波高与实验 测得的波高相近。





图4-20 Hernández-Fontes 等人的实验<sup>[24]</sup>与不同杨氏模量的弹性侧壁的 MPS 模拟对比 Fig.4-20 Snapshots found in the experiment of Hernández-Fontes et al.<sup>[24]</sup> and MPS simulations with different Young's modulus





图4-21 不同杨氏模量得左侧壁工况模拟测得波高与实验<sup>[24]</sup>测得波高对比图:(a) WP0 水位高程;(b) WP1 水位高程;(c) WP2 水位高程

Fig.4-21 Comparison of the wave elevations in the case of different elastic left walls. (a) Water elevations at WP0. (b) Water elevations at WP1. (c) Water elevations at WP2

#### 4.4.2 结构物所受载荷

弹性左侧壁一直与水体接触,弹性左侧壁对结构物所受载荷的影响不同于弹性上 侧壁。





(b) Element2



Fig.4-22 Comparison of the loads of elements between the experimental results of Hernández-Fontes et al. <sup>[24]</sup> and MPS results with elastic left side wall. (a) Vertical loads of Element1. (b) Horizontal loads of Element2

从图 4-22 中的载荷时历曲线可以看出,采用 MPSFSI-SJTU 求解器测得的结构物的载荷大于实验测得的载荷,但载荷的变化趋势非常相似。当杨氏模量为 75Mpa 时, Element2 上的水平载荷峰值最大,其余情况都小于杨氏模量为 75Mpa 时的载荷峰值。 Element1 上的载荷峰值随着左侧壁杨氏模量的减小而减小,峰值到达的时间也随之 推迟。当杨氏模量较小时,左侧壁的变形推迟了 Element2 上垂向载荷达到峰值的时间。

# 4.5 弹性上壁的影响

在本节中,考虑了结构物上侧壁(甲板)弹性的影响。基于图 4-7 中的模型,本 节中设置结构的上侧壁为弹性侧壁进行模拟,即 Element1 作为弹性侧壁。弹性侧壁 的密度为 7600 kg/m<sup>3</sup>,厚度为 8 mm,杨氏模量分别设置为 35、55、75 MPa。采用的 单元类型为梁单元(beam),插值的有效半径设置为 0.003 m。Element1 被分为 185 个 梁单元。结构和流体的时间步长均设置为 0.0002 s。为了与 Hernández-Fontes 等人刚 性结构的实验结果进行比较,在本节中的数值模拟中以 1.6 m/s 的速度匀速打开闸门。 这些设置除了梁单元个数外,其他均与弹性左侧壁的计算设置相同。

#### 4.5.1 甲板上浪波形

图 4-23 展示了不同杨氏模量的模拟与实验的流场的对比图,可以看出杨氏模量 越高, Element1 的变形越小。





图4-23 Hernández-Fontes 等人的实验<sup>[24]</sup>与不同杨氏模量的弹性上壁的 MPS 模拟的流场对比 Fig.4-23 Snapshots found in the experiment of Hernández-Fontes et al.<sup>[24]</sup> and MPS simulations with different Young's modulus

从图 4-24 中的波高时历曲线可以看出,在波浪传播至甲板之前,弹性上壁对结构物左侧流场的波形没有影响。当波浪传播至结构物后,对于有或无弹性上侧壁的结构物,结构物左侧流场中测得的波高与实验测得的波高相近。





图4-24 不同杨氏模量的上壁面工况模拟的波高时历曲线图:(a) WP0 水位高程;(b) WP1 水位高程;(c) WP2 水位高程

Fig.4-24 Comparison of the wave elevations in the case of different elastic right walls. (a) Water elevations at WP0. (b) Water elevations at WP1. (c) Water elevations at WP2

#### 4.5.2 结构物所受载荷

从图 4-25 中的载荷时历曲线可以看出,在上侧壁杨氏模量不同的工况下, Element2 所受的水平载荷峰值并没有差别,因为 Element2 的载荷峰值是在波浪未到 达 Element1 时达到的,因此载荷峰值与 Element1 的杨氏模量无关。随着 Element1 杨 氏模量的减小,作用在 Element1 上的垂向载荷峰值越小,达到峰值载荷的时间越滞 后。可以说,结构物上甲板的弹性延缓了甲板载荷峰值的到达以及减小了甲板载荷峰 值。



图4-25 实验<sup>[24]</sup>与不同杨氏模量的上壁面工况模拟所得载荷时历曲线对比图:(a)单元1的竖向荷载;(b)单元2的水平荷载

Fig.4-25 Comparison of the loads of elements between the experimental results<sup>[24]</sup> and MPS results with elastic upper side wall. (a) Vertical loads of Element1. (b) Horizontal loads of Element2

# 4.6本章小结

本章使用 MPSFSI-SJTU 求解器对具有弹性侧壁和刚性侧壁的二维固定结构的甲 板上浪事件进行了数值模拟,模拟中的入射波全部由湿溃坝法生成。模拟结果与已发 表的实验以及 SPH 模拟的结果吻合较好。

首先,本章研究了湿溃坝方法中闸门的速度对入射波以及波浪载荷的影响。得到 如下几个结论:

(1) 闸门速度越大,入射波到达甲板时越容易发生破碎的现象。

(2) 闸门速度越大,结构所受到的垂向和水平载荷越早到达峰值。

(3) 在一定的闸门释放速度下,波浪载荷的峰值达到最大,闸门的速度过高或 过低,波浪载荷的峰值都会有所减小。

然后,本章分别研究了结构物的弹性左侧壁和弹性上壁面对甲板上浪波形以及结构物所受载荷等的影响。得到如下几个结论:

(1) 弹性侧壁对结构物左侧的流场影响较小。

(2) 弹性左侧壁的杨氏模量越小,结构上浪的波形越不规则。

(3) 弹性侧壁的杨氏模量越高, 弹性侧壁的变形越小。

(4)不同的杨氏模量的左和上侧壁对 Element1 上的峰值载荷具有相似的影响。随着杨氏模量的减小, Element1 上的峰值载荷减小, 峰值的到来也随之推迟。

(5)不同的杨氏模量的左和上侧壁对 Element2 上载荷峰值的影响不同。不同杨 氏模量的弹性上侧壁对 Element2 的峰值荷载无影响,但不同杨氏模量的左侧壁对 Element2 有显著影响。

总的来说,本章研究了二维甲板上浪现象,对湿溃坝模型中闸门释放速度对模型 的影响进行了研究,并对带有弹性侧壁的结构物的甲板上浪现象进行了研究,研究取 得了较好的结果。为后续三维船舶与波浪的相互作用模拟奠定了基础。

# 第五章 三维孤立波作用下的船舶上浪研究

# 5.1 引言

在船舶与海洋平台等海洋结构物的甲板上浪问题的研究与分析中,波面升高的计 算、上浪机理的研究以及砰击力的计算是分析上浪问题的重要内容,本章将采用三维 模型来对这些内容进行计算与分析。

本章采用 MPS-FEM 耦合方法, 对波浪与船体的相互作用进行了深入的数值分析。 选取了具有典型特性的集装箱船 S175 作为研究对象,入射波为孤立波。在流场分析 中,本章采用了三维粒子模型,以精确捕捉流体与船体的相互作用:而在结构响应分 析中,将船体等效为非均匀梁单元,以简化计算过程并保持分析的准确性。

首先,本章把 S175 船舶离散成粒子模型,并验证了粒子模型生成的准确性。接 着,本章对 MPSFSI-SJTU 流固耦合求解器中的造波模块进行了验证,重点考察了该 模块的造波精度。这一验证过程为后续的运动响应分析提供了坚实的基础。然后,本 章将 MPSFSI-SJTU 求解器分别应用于两个不用波高的孤立波工况与船体的相互作用 研究中,研究分析了在两个孤立波工况下,运动的刚性船舶、固定的刚性船舶与孤立 波发生相互作用的差别。在进一步研究中,船舶还被视为一个弹性体,在波浪载荷的 作用下,船舶除了会产生刚体运动,还会发生弯曲变形。此外,本章将弹性船体工况 下的上浪特性与刚性船体工况进行了对比。

## 5.2 计算模型

本章基于 MPS-FEM 耦合方法来数值分析船体与孤立波的相互作用。采用集装箱 船 S175 作为研究对象。本章中采用的缩尺比为 1:50, S175 船舶的船型主尺度<sup>[58]</sup>以 及数值模型的相关参数见表 5-1。图 5-1 为 S175 集装箱船的模型示意图。

| Tab.5-1 Ship model characteristics |        |      |  |
|------------------------------------|--------|------|--|
| 特征参数                               | 全尺度    | 模型尺度 |  |
| 船长 (L <sub>pp</sub> /m)            | 175.00 | 3.50 |  |

主(1 机休料子描册特征余料

| 船宽 (B/m)                    | 25.40    | 0.51 |
|-----------------------------|----------|------|
| 重心距离基线距离 (KG/m)             | 9.50     | 0.19 |
| 吃水 (d/m)                    | 9.50     | 0.19 |
| 排水体积 (∇/m³)                 | 24140.00 | 0.19 |
| 纵摇惯性半径 (K <sub>yy</sub> /m) | 42.10    | 0.84 |
| 缩尺比                         | 1:1      | 1:50 |



图5-1 S175 船舶模型三视图 Fig.5-1 The three-view drawing of the ship model

## 5.2.1 船体粒子模型

粒子法的计算首先需要将计算域离散为粒子,但目前没有较为全面的粒子建模软件。在本文前几章的算例中,采用的计算模型较为简单,可以用简单的函数编程生成对应的粒子模型,如第三和第四章用到的方形体。然而,S175 船型较为复杂,无法通过简单的编程建模。为解决 S175 船型的建模问题,本章将基于开源软件DualSPHysics<sup>[93]</sup>来实现计算模型的前处理,从而生成在 SPH 方法中可以进行计算的前处理模型。在此基础上,本章使用课题组开发的计算模型前处理程序将生成的前处理模型转化为 MPSFSI-SJTU 可以进行计算的粒子模型。

本小节将首先生成船体粒子模型,并对该模型进行验证以保证船体粒子满足后续的计算精度要求。生成的船体粒子模型图如图 5-2 所示,船体粒子的粒子间距 *dp* = 0.025 m,船体粒子模型由一层一类边界粒子以及两层二类边界粒子组成,生成的船体粒子总数约为 2.5 万个。



由于目前计算程序的限制,无法设置可变的船体密度,因此根据上述的船体模型 相关特征参数,设置船体的密度为 $\rho_s = 331 \text{ kg/m}^3$ 。船体的横截面积沿着船体长度方向 发生变化。在本章的数值模拟中,S175 集装箱船舶的模型由初始粒子间距 dp = 0.025m的两类船体边界粒子构成,本小节将根据船体边界粒子的分布来计算粒子模型的截 面面积,由下式计算而得,

$$A_n = \sum_{i=1}^{n} A_i \tag{5-1}$$

$$M_n = \rho_S A_n, \qquad M_s = \rho_S \int A_n \, \mathrm{d}l \tag{5-2}$$

式中: *M*和*A*分别代表船体的横截面质量以及横截面积。下标*i、n*和*S*则分别表示 生成的船体边界粒子、截面编号以及船体。图 5-3 为计算得到的船体梁的横截面积以 及截面质量沿船长方向的分布。将截面质量进行积分可以统计出船体粒子模型总质量 约为 190 kg,与表 5-1 数据一致。证明了该粒子生成方法的有效性。

## 5.2.2 船体单元模型

为计算船舶的弹性变形,有多种处理方式:将船体的结构离散成全船有限元模型, 或将船体离散为非均匀梁模型。而使用全船有限元模型需要进行大量的建模工作和耗 费大量的计算资源,采用简化的变截面梁模型的计算效率大大提高。因此,在本章的 船体弹性变形计算分析中,船体被视为非均匀梁模型,并离散为 147 个变截面梁单 元,在每个单元内梁的横截面积不变。流固交界面选取粒子模型-梁单元模型,如图 5-4,位于同一横截面上的边界粒子被分为一组,等效为一个梁节点,船舶边界粒子与 梁单元上的节点会形成映射关系。船体边界粒子根据梁的变形和运动而移动,梁单元 上的节点载荷则根据船体边界粒子的所受的载荷更新。





### 5.2.3 数值水池

本章所用的数值水池计算模型如图 5-5 所示,流体域长 13.5 m,宽 1.6 m,水深 0.6 m。计算域的粒子初始间距设置为 *dp* = 0.025 m,生成的粒子总数约为 120 万个。数值水池的相关参数如表 5-2 所示。船舶被放置在距离造波板 6.34 m 的位置,船首 距离造波板约为 4.45 m,即为图 5-6 中的 A0 测波点位置。图 5-6 还展示了另外两个 测波点 A1 和 A2 的位置。在测量液面高度时,为了减轻数值震荡的现象,测波点测量的是以测波点坐标为中心、以 0.04 m(1.6 倍的初始粒子间距)为边长的正方形范 围内的液体粒子的最大 y 值坐标。



(b) 粒子模型图图5-5 数值水池模型

Fig.5-5 The sketch of the model used in MPS simulation



图 5-6 测波点位置 Fig.5-6 Position of wave measuring points

在 MPSFSI-SJTU 求解器中,造波方式采用的是推板造波。在数值模拟中由于数 值水池的长度有限,波浪传播到数值水池的末端就会产生反射的波浪,反射波会和入 射波叠加,从而影响造波精度,继而影响结构物的运动响应计算精度。在数值模拟中 往往需要对反射波进行抑制。由于孤立波是单向传播且只有一个波峰的波浪形为,因 此本章没有采用数值消波模型,而是将计算域的右侧设置为可以流出的边界,当孤立 波传播到数值水池的末端时,孤立波与结构物已经完成相互作用,此时波浪直接流出 边界即可。

| Tab.5-2 Computational parameters |                       |  |
|----------------------------------|-----------------------|--|
| 流体参数                             | 值                     |  |
| 流体密度(kg/m <sup>3</sup> )         | 1000                  |  |
| 运动粘度(m <sup>2</sup> /s)          | 1.01×10 <sup>-6</sup> |  |
| 重力加速度(m/s <sup>2</sup> )         | 9.81                  |  |
| 流体粒子数                            | 90万                   |  |
| 总粒子数                             | 120万                  |  |
| 时间步长(s)                          | 0.00025               |  |
| 模拟时间(s)                          | 6                     |  |
| <b>CPU</b> 核数                    | 10                    |  |
| 计算时间 (天数)                        | 6                     |  |

表5-2 计算参数设置

# 5.3 波浪的生成

在本章节的数值模拟中,我们研究船舶与孤立波的相互作用。孤立波作为一种理想化的非线性波形,常用于研究波浪对船舶结构的影响。对于研究甲板上浪现象而言,孤立波是快速的、非线性高且容易重复实施的波浪,有利于研究与分析上浪现象。因此本章选取孤立波作为研究对象。此外,由于计算效率等的限制,无法使用规则波进 行长时间的甲板上浪数值模拟工作,在未来的研究中将考虑使用规则波进行甲板上浪数值模拟。

#### 5.3.1 孤立波造波理论

在实际生活中,例如水库溃坝形成的波浪在河道中传播,或者是地震引起的海啸 波朝海岸线传播等等,都与孤立波具有非常近似的特性。因此,孤立波的模型通常被 用来模拟船舶以及海洋结构物与极端波浪的相互作用问题。孤立波的波面方程为,

$$\eta = H \operatorname{sech}^2(k(x - ct)) \tag{5-3}$$

$$k = \sqrt{3H/4d^3} \tag{5-4}$$

$$c = \sqrt{g(H+d)} \tag{5-5}$$

式中:H表示波高,d表示数值水池水深,x表示x方向坐标,k表示波数,c表示波速,t表示当前时刻。Goring<sup>[94]</sup>总结了推板生成孤立波的方法,造波板的速度为,

$$U(t) = \frac{dX(t)}{dt} = \frac{c\eta}{d+\eta} = \frac{cH\operatorname{sech}^2(k(X-ct))}{d+H\operatorname{sech}^2(k(X-ct))}$$
(5-6)

造波板的位置 X(t)表示如下,

$$X(t) = \frac{H}{kd} \tanh(k(ct - X))$$
(5-7)

造波板的冲程 S 可表示为,

$$S = \sqrt{16Hd/3} \tag{5-8}$$

#### 5.3.2 孤立波造波验证

本小节采用与上述图 5-5 相同的数值水池计算模型,对数值水池孤立波造波精度进行了验证。数值水池的粒子模型如图 5-7。本章的研究对象为两种孤立波工况,如表 5-3 所示。两种工况的孤立波水深相同,波高不同,从而导致波浪的传播速度也不同。其中,Wave1 为小波高工况,Wave2 为大波高工况。



图5-7 粒子模型 Fig.5-7 The sketch of the model used in MPS simulation.

| 流体参数                  | Wave1 | Wave2 |
|-----------------------|-------|-------|
| 波高 (m)                | 0.30  | 0.34  |
| 水深(m)                 | 0.60  | 0.60  |
| 波速(m/s)               | 2.97  | 3.04  |
| 波数 (m <sup>-1</sup> ) | 1.02  | 1.09  |

表5-3 孤立波工况参数表 Tab 5 2 Commutational momentation

图 5-8 为 Wave1 工况的孤立波造波情况,可以观察到流场的压力场较为光滑,波 浪形状完好,孤立波在传播过程中没有明显的衰减出现。当波浪完全通过图 5-5 中的 船尾位置(约 *x* = 8.1 m)处时,波浪尚未传播至水池右侧壁面。





图 5-8 流场演化情况 (Wave1) Fig.5-8 Evolution of flow field with wave height of 0.3 m

图 5-9 为 Wave2 工况的孤立波造波情况,同样可以看到压力场光滑,波浪形状完好,没有观察到明显的衰减。当波浪完全通过船尾的位置处时,波浪也尚未传播至水池右侧壁面。





Fig.5-9 Evolution of flow field with wave height of 0.34 m

图 5-10 和图 5-11 为两种工况下,船首位置处 A0 测波点(约 *x* = 4.45 m)的波高时历曲线与理论值的比较。通过与解析值对比可以发现,数值计算得到的波高幅值与解析值吻合较好。同时,在孤立波完全流过该点以及经过了长时间的模拟后,该点处的水位将恢复至与初始液面高度相同,说明本章采用水体自由流出来取代消波区的数值水池建模效果较好。该结果表明数值水池的计算精度良好,可以进行后续的数值模拟工作。



图5-10 测波点波高曲线 (Wave1) Fig.5-10 Wave elevations of wave measuring points with wave height of 0.3 m



图5-11 测波点波高曲线 (Wave2) Fig.5-11 Wave elevations of wave measuring points with wave height of 0.34 m

# 5.4 固定的刚性船体在孤立波作用下的上浪研究

本章中入射波采用孤立波来模拟船体在恶劣海况的上浪现象。本节考虑孤立波的两个工况与固定的刚性船舶的相互作用,船体航速设置为0。其中,Wave1为小波高工况,Wave2为大波高工况。

# 5.4.1 流场演化

图 5-12 为小波高工况下,刚性船舶在固定状态下与孤立波发生作用的流场图,可以看出此时船舶发生了上浪现象。在孤立波到达船首后,船首前方和两侧的波浪涌上船舶,此时船首上的水体呈现 V 字型。随着孤立波向前传播,船舶两侧的水体上涌形成甲板上浪,水体仍然呈现 V 字型。最后孤立波经过了整个船体,甲板上的水体由于惯性依然向前传播,但传播速度慢于孤立波,水体向前传播直至回落水池,甲板上仍有一部分水体保留。



79



图5-12 小波高孤立波工况下流场演化情况 (固定的刚性船舶) Fig.5-12 Fluid pressure field under the action of the fixed rigid ship and Wave1

图 5-13 为大波高孤立波工况下,刚性船舶在固定状态下与孤立波发生作用的流场图,可以看出此时船舶发生了较为明显的上浪现象。在孤立波到达船首后,船首前方以及两侧的波浪涌上船舶,此时船首上的水体呈现 V 字型。随着孤立波向前传播,

甲板上的水体逐渐呈现一字型,甲板上上浪的水体开始向水池回落。最后孤立波经过 了整个船体,甲板上还留下少量的水体。从流场压力图可以看出流体的压力较为光滑, 压力震荡现象不明显。





图5-13 大波高孤立波工况下流场演化情况 (固定的刚性船舶) Fig.5-13 Fluid pressure field under the action of the fixed rigid ship and Wave2

图 5-14 为两种工况下 A1 和 A2 测波点的波面高度时历曲线,可以看到无论船舶 与哪种波高的孤立波发生相互作用,A1 和 A2 测波点测得的液面高度都高于空场造 波时的波高。两个波高下每个测点测得的液面高度时历曲线的趋势都较为相似。这四 条曲线的液面高度在孤立波传播过来时都有一个突变,这是由孤立波在甲板前缘发生 上浪现象所导致的,孤立波传播到测点位置时,两个测点测得的液面高度从船底附近 的水面高度变成了甲板上水体的高度。随着孤立波的向前传播以及甲板上水体回落水 池,测波点测得的液位高度先上升再渐渐下降,最后测得的是甲板上留下的水体的高 度。而整体来说,同一个测点处大波高孤立波工况下测波点测得的波高最大值均大于 小波高孤立波工况下测波点测得的波高最大值,且由于孤立波的传播速度不同,同一 个测点处大波高孤立波工况下波高峰值比小波高孤立波工况下的波高峰值早到达。同 一个孤立波工况下 A1 测波点测得的液位高度略大于 A2 测波点测得的液位高度。





(b) 测波点 A2图5-14 测波点液面高度时历曲线Fig.5-14 Wave elevations of wave measuring points

#### 5.4.2 船体受力

图 5-15 为船体在与孤立波相互作用下所受的 y 向砰击载荷时历曲线。图 5-16 和 图 5-17 展示了船舶表面所受的压力分布图。从图中可以观察到,在孤立波砰击船体 之前,船体所受的静水压力与船体的自身重力相平衡。在这一阶段,船首、船中以及 船尾的压力较为稳定,两种工况下船舶的压力场相同。当孤立波快要传播到船首时, 船体的湿表面积增大,导致船体所受的垂向波浪载荷增大。在孤立波波峰从船首传播 到船尾时,船体所受垂向力呈现先增大再减小的趋势。在船体与孤立波结束接触后, 船体所受的水压力与船体的自身重力逐渐平衡。



图5-15 船体所受 y 向砰击载荷 Fig.5-15 The time histories of wave load on the ship in y direction

图 5-16 给出了固定刚性船舶在小波高孤立波作用下的船体表面压力场。可以看 出,在固定刚性船体的工况下,当波浪到达船体中间位置附近时,船体的湿表面积最 大,受到波浪力作用的位置更多,船体所受的波浪力达到最大。而甲板上的水体对船 体的垂向压力小于船体两侧受到的垂向波浪力。在 3.5 s 附近,船舶所受的垂向力最 大,该时刻在孤立波传播到船中之前。



图5-16 小波高孤立波作用下固定刚性船体表面压力分布 Fig.5-16 Pressure field of fixed rigid ship under the action of Wavel

图 5-17 给出了固定刚性船舶在大波高孤立波作用下的船体表面压力场。从图中可以观察到,与图 5-16 的小波高孤立波工况相比,大波高工况船体两侧受到的波浪力更剧烈,湿表面积更大,上浪现象也更明显。随着孤立波向前传播,船体的湿表面积先增大再减小,与受力趋势相对应。船体所受的垂向力在 3.3 s 附近时达到最大值,该时刻在孤立波传播到船中之前。

84



图5-17 大波高孤立波作用下固定刚性船体表面压力分布 Fig.5-17 Pressure field of fixed rigid ship under the action of Wave2

# 5.5 运动的刚性船体在孤立波作用下的上浪研究

本节考虑两个孤立波工况与运动的刚性船舶的相互作用,船体航速为0。刚性船 舶在波浪的作用下产生刚体运动,不考虑船体纵荡运动,船体仅具有垂荡和纵摇两个 自由度。其中,Wavel为小波高工况,Wave2为大波高工况。

# 5.5.1 流场演化

图 5-18 和图 5-19 分别为小波高和大波高孤立波的工况下,刚性船舶在运动状态 下与孤立波发生相互作用的流场图。



图5-18 小波高孤立波工况下流场演化情况 (运动的刚性船舶) Fig.5-18 Fluid pressure field under the action of the moving rigid ship and Wave1 从图 5-18 中可以观察到出此种工况下未发生明显的甲板上浪现象,船舶依然产 生了较为明显的运动响应。在船舶尾倾的过程中,船首下部将一些液体带离自由液面, 液面附近出现了一些飞溅的液滴。

图 5-19 为刚性船舶在运动状态下与大波高孤立波发生相互作用的流场图,与图 5-13 相比,可以看出船舶的运动很好的减轻了上浪现象的发生。在孤立波到达船首附 近前,船体已经出现了较为明显的尾倾。在孤立波的波峰到达船首时,船首前部有少 量的水体涌上船舶的甲板,甲板上的水体随着船体的运动而运动。随着孤立波向前传 播,船舶继续纵摇至船首全部离开水面。随后船舶从尾倾状态向首倾状态过渡,船首 逐渐回落并砰击水面,船舶上的水体也逐渐流回水池。最后孤立波经过了整个船体, 船舶逐渐回复到初始的平衡状态,甲板上还保留少量的水体。





图5-19 大波高孤立波工况下流场演化情况 (运动的刚性船舶) Fig.5-19 Fluid pressure field under the action of the moving rigid ship and Wave2

图 5-20 为两种孤立波工况下 A1 和 A2 测波点的波面高度时历曲线,可以看到无论是哪种孤立波与船体发生相互作用,A1 测波点测得的液面高度都高于空场造波时的波高。

在小波高孤立波的工况下,测波点测得的液面高度先是缓慢增加,这是由于船舶 的运动导致的船底位置测得的液面高度不断增加。随后 A1 测波点附近的水体被船首 带离水面,该部分飞溅的水体的高度甚至高于孤立波的波峰高度。这导致了即使没有 甲板上浪事件的发生,A1 测波点测得的液面高度仍然高于孤立波的波峰的值。随着 飞溅的水体的下落,A1 点测得的波高也随之减小。飞溅的水体落入水池之后,A1 测 波点测得的波高则是船底下面的液面高度值。A2 点测得的波高一直是船底下的液面 高度值,与船体的运动相对应。

在大波高孤立波的工况下,A1 测波点测得的高度起初缓慢增加,这是由于船舶 的尾倾导致船底位置测得的液面高度不断增加。随后由于上浪的水体在甲板上传播, 导致该位置在甲板上方也出现了少量的水体,因此在3s附近液位高度时历曲线有一 个突变,随后上浪的水体随着船舶运动而运动。在测波点A2位置处,3s左右测得的 波面高度不稳定,这是由于上浪的水体在甲板上的传播以及上浪的水体太少导致的。 3.5s左右测得的波高仍出现突变,这可能是由于船体上浪的水体较少,该时刻测得的 是船底下的液面高度。总的来说,在运动的刚性船舶状态下,两个测点的波面高度时 历曲线是衰减的波浪曲线。

88



图5-20 测波点液面高度时历曲线 Fig.5-20 Wave elevations of wave measuring points

# 5.5.2 船体受力

图 5-21 为两种孤立波工况下船体所受的垂向力曲线图,可以看到船体受力曲线 与固定刚性船舶状态下图 5-15 所示的受力趋势不同。固定刚性船舶状态下,小波高 工况下船体受力的最大值要小于大波高工况,而运动刚性船舶的状态下,小波高孤立 波工况下船体受力的最小值要大于大波高工况下船体受力的最大值。此外,由于小波 高的孤立波传播速度慢于大波高孤立波,船体所受垂向载荷最小值的出现时间也不同, 大波高工况下更早出现载荷最小值。



图 5-22 为小波高工况下运动刚性船舶的船体表面压力场图,可以明确的观察到 未发生上浪现象。同样,在孤立波通过船中前,船首抬升,船体的湿表面积减小,导 致船体所受y方向的合力减小,甚至小于重力。在 3.8 s 左右,船体出现载荷最小值, 此时波浪已经穿过船中。



90



图5-22 小波高孤立波作用下运动刚性船体表面压力分布 Fig.5-22 Pressure field of moving rigid ship under the action of Wave1

从图 5-23 可以看出,在大波高孤立波与运动刚性船体相互作用的工况下,在 3.6 s 左右,船体出现载荷最小值,此时波浪在船中附近。当波浪到达船体中间位置附近时,船体升沉最明显,船体湿表面积最小,船体所受的波浪力达到最小。




Fig.5-23 Pressure field of moving rigid ship under the action of Wave2

结合图 5-22 和图 5-23 可以看出,在孤立波与运动的刚性船舶相互作用的工况下, 当孤立波靠近船首时,船体重心位置上移,船首露出水面后,船体的湿表面积减小, 导致船体受到的砰击载荷减小。当波浪传播到船体中后方位置附近处,船舶的升沉最 为明显,湿表面积也较小,从而导致船体表面受到的垂向力较小,甚至小于船体自身 的重力。随着孤立波继续传播,船舶首倾明显,船首开始砰击自由表面,船体湿表面 积增大,船体所受的垂向力增大。

#### 5.5.3 船舶的运动响应

图 5-24 为两种波高的孤立波作用下,运动的刚性船体的运动响应。在船舶刚性 运动的状态下,小波高工况的垂荡和纵摇的峰值都小于大波高工况,但从趋势来说, 两者十分相似。

从图中可以观察到,在两种孤立波工况下,在波浪未传播到船舶附近时,船体基本处于初始平衡状态,一定程度验证了求解的准确性。随着孤立波的传播,船体在孤立波的作用下向上升起。随着波浪通过船中,船舶开始下降。升沉曲线的形状与孤立波的形状类似,大波高工况下升沉最大值达到了0.22m,小波高工况下升沉最大值达到了0.19m。

从纵摇曲线可以看出,波浪接近船舶时,船舶先是呈现尾倾的状态,在孤立波快 要到达船中时,船舶开始向正向旋转,船体逐渐向平衡位置回复,直至船体呈现首倾 的状态。在孤立波完全离开船舶之后,船舶的纵摇运动响应在平衡位置两侧逐渐衰减, 直至船舶回复平衡状态。两种孤立波工况下,纵摇响应的最大值出现在孤立波的波峰 传播至船尾附近,为首倾状态。



(b) 纵摇图5-24 船舶运动响应Fig.5-24 Movements of \$175

## 5.6 弹性船体在孤立波作用下的上浪研究

本节考虑大波高孤立波工况与固定的弹性船舶的相互作用,船体航速为0。在考虑船体的弹性变形时,船体重心被约束,船舶在波浪载荷作用下会产生弯曲变形。弹性船体的相关参数如表 5-4 所示。

| 衣5-4 升住加仲今奴衣                     |     |
|----------------------------------|-----|
| Tab.5-4 Computational parameters |     |
| 结构参数                             | 值   |
| 结构密度(kg/m <sup>3</sup> )         | 331 |
| 弹性模量(MPa)                        | 5   |

表5-4 弹性船体参数表

| 泊松比     | 0.3         |
|---------|-------------|
| 单元类型    | 梁单元         |
| 单元数目    | 147         |
| 节点数目    | 148         |
| 阻尼系数    | 0.012/0.001 |
| 时间步长(s) | 0.00025     |
| 插值半径(m) | 0.05        |

### 5.6.1 流场演化

图 5-25 为弹性船舶在固定状态下与孤立波发生作用的流场图,可以看出此时船 舶也发生了较为明显的上浪现象。但与图 5-13 相比,固定刚性船舶状态下的上浪比 弹性状态下的上浪现象更严重。在弹性状态下上浪的水体比刚性状态下要少。船舶的 弹性变形一定程度上阻碍了上浪事件的发生。





图5-25 大波高孤立波工况下流场演化情况 (固定的弹性船舶) Fig.5-25 Fluid pressure field under the action of the elastic ship and Wave2

### 5.6.2 船体受力与变形

图 5-26 为三种运动状态的船体在与大波高孤立波相互作用下所受的 y 向砰击载 荷时历曲线。从图中可以观察到, 在三种运动状态下, 孤立波砰击船体之前, 船体所 受的静水压力与船体的自身重力相平衡。在船体与孤立波结束接触后, 船体所受的水 压力与船体的自身重力逐渐平衡, 一定程度验证了求解的准确性。弹性船体受力与固 定刚性船体的受力趋势类似, 总体上呈现先增大再减小的趋势。与固定的刚性船体相 比, 弹性船体工况下波浪载荷的峰值被推迟。



图5-26 船体所受 y 向砰击载荷 Fig.5-26 The time histories of wave load on the ship in y direction

图 5-27 为弹性船体的变形图,波浪传递到船中附近时,船体在孤立波的作用下 呈现中拱的状态。



#### 图 5-27 船体变形 Fig.5-27 Deformation of S175

### 5.7 本章小结

本章通过数值模拟,使用 MPS-FEM 耦合方法研究了不同波高的孤立波与船体的 相互作用,并探究了不同运动状态的船体对孤立波与船体相互作用的影响。数值模拟 较好的捕捉了流体的飞溅等非线性的流动现象。

首先,本章建立了数值模拟的粒子模型,并对生成的船体粒子的横截面积以及质量进行了验证,证明了离散的船体粒子模型的准确性。其次,本章进行了孤立波的造波验证,对两种工况的孤立波进行了空场造波,验证了 MPSFSI-SJTU 流固耦合求解器的造波精度。然后,在 Wave1 工况下,探究了固定刚性船舶、运动刚性船舶以及固定的弹性船体这三种状态对孤立波与船体相互作用的影响。可以发现在 Wave1 工况下,三种运动状态的船体都发生了上浪现象,固定的弹性船体与刚性船体工况上浪最为严重。最后,在 Wave2 工况下,探究了固定刚性船舶、运动刚性船舶这两种状态对孤立波与船体相互作用的影响。固定船体状态下发生了上浪现象,而运动船体状态没有发生上浪。

通过本章的数值模拟,可以归纳以下结论:

上浪严重程度:固定刚性状态下的上浪现象比运动刚性状态和固定弹性状态下的 上浪更严重,船体的运动和弹性变形抑制了一部分水体的上浪。运动刚性状态下的船 体上浪程度最轻。在三种船体状态下,波高越高,上浪程度越严重。

上浪形式:孤立波的波高不同,导致固定的刚性船舶状态下的上浪形式不同。在 Wave2的大波高的工况下,甲板上的水体先呈现V字型向前传播,后又呈现一字型。 而Wave1的小波高的工况下,甲板上的水体一直呈现V字型。船舶的运动状态不同, 导致上浪的形式也不同。在大波高工况下,运动刚性船舶只有船首有轻微的上浪水体, 而其他两种船体状态下,波浪在甲板上传播,甚至淹没了大部分甲板。

船体所受波浪力:在固定弹性和固定刚性船舶状态下,船体所受的波浪力最大值 要大于重力,总体来说,船体受到的波浪力呈现先增大再减小的趋势,这两种运动状 态下船体受力最大值出现在波浪传播到船中附近,而弹性变形推迟了垂向波峰载荷出 现的时间。而运动的刚性船舶状态下,船体受力总体上先小幅增大再大幅减小至低于 重力,继而增大逐渐回复到与重力平衡。当波浪传递至船体中后侧时,船体受力最小, 甚至小于重力。

# 第六章 全文总结

本文基于 MPSFSI-SJTU 流固耦合求解器数值研究了甲板上浪现象。首先阐述了 甲板上浪问题的研究现状。系统的归纳了甲板上浪问题的实验研究、理论研究以及数 值研究的研究现状,发现了甲板上浪问题的研究中存在的诸多难点与挑战。本文旨在 基于 MPS-FEM 耦合方法研究刚性体和弹性体的上浪问题,因此对该方法进行了系统 的介绍与验证工作,使用 MPS-FEM 耦合方法既能较好的捕捉流体的剧烈流动现象, 又能对结构的动态响应进行准确的预报。本文先对二维状态下的甲板上浪问题进行了 研究,使用湿溃坝方法模拟入射波,采用简化的方形结构代替船舶,探究了湿溃坝方 法中闸门释放速度对产生的波形和刚性结构物所受载荷的影响,接着分别将结构物的 左侧壁和上侧壁改为弹性体,模拟分析了带弹性侧壁和完全为刚性侧壁的结构物上浪 情况的不同,以及不同弹性模量的单个弹性侧壁对甲板上浪波形和载荷的影响。本文 进而进行了三维情况下的船舶上浪研究,入射波采用波浪非线性较强的孤立波,以 S175 集装箱船为研究对象,建立了数值波浪水池,首先对数值水池的造波精度进行 了验证,继而基于建立的数值模型探究了不同的船舶状态(固定的刚性船舶,固定的 弹性船舶与运动的刚性船舶)以及不同的孤立波的波高对船舶上浪事件的影响。

在甲板上浪的二维数值模拟中,本文得出的主要结论如下:

(1)在二维模拟中,首先研究了湿溃坝方法中闸门的速度对入射波以及固定刚 性结构物所受载荷的影响。可以发现:闸门速度越大,入射波到达甲板时越容易破碎, 结构物所受到的垂向和水平载荷越早到达峰值;闸门速度越大越接近数值模拟中常采 用的无闸门的湿溃坝模拟的情况。

(2)接着分别研究了不同杨氏模量的弹性左壁和弹性上壁对甲板上浪的波形以 及结构物所受的载荷等方面的影响,刚性结构物可以近似看作是弹性模量非常大的弹 性结构物。可以观察到:结构物弹性侧壁的杨氏模量对结构物左侧(迎浪侧)的流场 影响较小,而弹性左侧壁的杨氏模量越小,导致结构物上浪的波形边缘越不规则;弹 性侧壁的杨氏模量越大,弹性侧壁的变形越小;在结构物左侧壁为弹性的工况下,左 侧壁的杨氏模量越小,上侧壁所受的垂向载荷的峰值越小,峰值的到达也随之推迟; 在结构物上侧壁为弹性的工况下,改变上侧壁杨氏模量的大小对左侧壁的峰值荷载无 影响,但上侧壁杨氏模量越小,上侧壁所受的垂向载荷的峰值越小,载荷峰值的到达 也被延迟。

在甲板上浪的三维数值模拟中,本文得出的主要结论如下:

(1)固定刚性状态下船舶的上浪现象比固定弹性状态下的上浪更严重,弹性变 形抑制了一部分水体的上浪。固定刚性状态下船舶的上浪现象比运动刚性状态下的上 浪现象更严重。船舶的运动很大程度改善了上浪现象的发生。

(2)孤立波的波高不同,导致固定刚性船舶状态下的上浪形式不同。在大波高的工况下,甲板上的水体先呈现 V 字型向前传播,后又呈现一字型继续传播。而在小波高的工况下,甲板上的水体一直呈现 V 字型向前传播。

(3)在固定状态下,弹性和刚性船体所受的波浪力最大值要大于重力,且最大 值出现在波浪传播到船中附近时,总体来说,固定船体受到的波浪力呈现先增大再减 小的趋势。弹性船体一定程度上延缓了载荷峰值的到达。而在运动的刚性船舶状态下, 船体受力相较来说较小。当波浪传递至船体中后侧时,船体受力最小,甚至小于重力。

尽管本文已对二维和三维甲板上浪问题进行了一定的模拟和分析,较好的捕捉了 流动中的波浪破碎以及飞溅等非线性流动现象,但仍存在以下不足与可以进一步改进 的地方:

(1)受所采用的计算方法的限制,没有考虑气相对甲板上浪产生的载荷和波形 等方面的影响。在未来的研究中可以考虑引入气相以提高计算精度;由于三维粒子法 的流入流出边界条件尚未成熟,本文中的模拟都使用船舶无航速的工况。

(2)受计算资源以及完成论文的时间等的客观限制,在 Wavel 中未考虑可运动的弹性船模工况,在计算中未监测船舶上的点所受的砰击力,未能完成船舶在规则波中的上浪过程模拟。在未来的研究中可以归纳总结上浪与孤立波各种参数之间的关系以及继续完成规则波中的结构物上浪模拟。

(3)在第五章船体梁单元的建立中,由于无法获得较为精确的船体质量分布,因此采用均匀的船体密度进行计算。在未来的研究中,考虑采用变船体密度来模拟。

参考文献

- Greco M, Landrini M, Faltinsen O M. Impact flows and loads on ship-deck structures[J]. Journal of Fluids and Structures, 2004, 19(3): 251-275.
- [2] Hernández-Fontes J V, Vitola M A, Paulo de Tarso T E, et al. Assessing shipping water vertical loads on a fixed structure by convolution model and wet dam-break tests[J]. Applied Ocean Research, 2019, 82: 63-73.
- [3] Barcellona M, Simos M, Greco M, et al. An experimental investigation on bow water shipping[J]. Journal of ship research, 2003, 47(04): 327-346.
- [4] Greco M, Colicchio G, Faltinsen O M. Shipping of water on a two-dimensional structure. Part 2[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 581: 371-399.
- [5] Pham X P, Varyani K S. Evaluation of green water loads on high-speed containership using CFD[J]. Ocean engineering, 2005, 32(5-6): 571-585.
- [6] González-Olvera M A, Torres L, Fontes J V H, et al. Characterizing water-on-deck propagation with a nonlinear advection-diffusion equation[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2022, 44(9): 417.
- [7] Kim S P. CFD as a seakeeping tool for ship design[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2011, 3(1): 65-71.
- [8] 肖龙飞,杨建民. FPSO水动力研究与进展[J]. 海洋工程, 2006(04):116-123+128.
- [9] Leonhardsen R L, Ersdal G, Kvitrud A. Experience and risk assessment of FPSOs in use on the Norwegian Continental Shelfi descriptions of events[C]. ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. ISOPE, 2001: ISOPE-I-01-048.
- [10] Ha Y S, Park J S, Koo J B, et al. Engineering establishment of living quarters for Jackup rig structures[C]. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2016, 49941: V003T02A079.
- [11] Newton R N. Wetness related to freeboard and flare[J]. Transaction RINA, 1960, 102.
- [12] Tasaki R. On the shippping water in head waves[J]. Journal of Zosen Kiokai, 1960, 1960(107): 47-54.
- [13] Ochi M K. Extreme behaviour of a ship in rough seas-Slamming and shipping of green water[C]. David Taylor Model Basin, Naval Ship Research and Development Center,

Washington DC, USA, Paper 2 of the Annual Meeting of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, SNAME Transactions 1964. 1964.

- [14] Goda K, Miyamoto T. A study of shipping water pressure on deck by two-dimensional ship model tests[J]. Journal of The Society of Naval Architects of Japan, 1976, 1976(140): 16-22.
- [15] Ogawa Y, Taguchi H, Ishida S. Study on prediction method for shipping water load and volume due to green sea[J]. Journal of The Society of Naval Architects of Japan, 1999, 1999(185): 61-73.
- [16] Hernández-Fontes J V, Vitola M A, Silva M C, et al. On the generation of isolated green water events using wet dam-break[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2018, 140(5): 051101.
- [17] Buchner B. The impact of green water on FPSO design[C]. Offshore technology conference. OTC, 1995: OTC-7698-MS.
- [18] Greco M. A two-dimensional study of green-water loading[M]. Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, 2001.
- [19] Barcellona M, Simos M, Greco M, et al. An experimental investigation on bow water shipping[J]. Journal of ship research, 2003, 47(04): 327-346.
- [20] Colagrossi A, Landrini M. Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics[J]. Journal of computational physics, 2003, 191(2): 448-475.
- [21] Fonseca N, Guedes Soares C. Experimental Investigation of the Shipping of Water on the Bow of a Containership[J]. 2005.
- [22] 李俊,杨建民,梁修峰等. FPSO 甲板上浪试验研究[J]. 中国海洋平台, 2007(05):10-13.
- [23] TANG H Y, REN H L, LI H. Experimental study on the motion and load of a trimaran in irregular head waves[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(18): 140-147.
- [24] Hernández-Fontes J V, Vitola M A, Esperança P T T, et al. Patterns and vertical loads in water shipping in systematic wet dam-break experiments[J]. Ocean Engineering, 2020, 197: 106891.
- [25] 邓建伟, 郭孝先, 杨建民等. 大波陡条件下 FPSO 上浪及其载荷特征的试验[J]. 船舶工程, 2021, 43(06):128-134.
- [26] Niu X, Ma Y, Dong G. Laboratory study on flow characteristics during solitary waves interacting with a suspended horizontal plate[J]. Water, 2022, 14(15): 2386.

- [27] Sa-Young H, Do-Sig G. Experimental Study on the Deck Wetting of a Container Ship in Irregular Head Waves[J]. Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea, 1990, 27(2): 31-39.
- [28] Hoffman D, Maclean W M. Ship model study of incidence of shipping water forward[J]. Marine Technology and SNAME News, 1970, 7(02): 149-158.
- [29] Tasai F. Wave height at the side of two-dimensional body oscillating on the surface of a fluid[J]. Reports of Research Institute for Applied Mechanics (Japan), 1961, 9(35).
- [30] Blok J J, Huisman J. Relative motions and swell-up for a frigate bow[J]. Royal Institution of Naval Architects Transactions, 1984, 126.
- [31] Bales N K. Minimum freeboard requirements for dry foredecks: a design procedure[J]. 1979.
- [32] Takaki M, Takaishi Y. Development of expression for estimating bow freeboard and assessment of the 1966 Load Line Convention[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1993, 1993(174): 171-179.
- [33] 贺五洲, 戴遗山, 谢楠, 等. 船舶上浪预报中甲板上浪的统计分析[J]. 中国造船, 1996 (3): 1-12.
- [34] 王仁康, 吴静萍. 淹湿性曲线和甲板上浪统计特性计算[J]. 武汉交通科技大学学报, 1998, 22(1): 8-12.
- [35] Van Oortmerssen G. The motions of a moored ship in waves[R]. H. Veenman en Zonen nv, 1976.
- [36] Greco M, Bouscasse B, Lugni C. 3-D seakeeping analysis with water on deck and slamming. Part 2: Experiments and physical investigation[J]. Journal of fluids and structures, 2012, 33: 148-179.
- [37] Greco M, Lugni C. 3-D seakeeping analysis with water on deck and slamming. Part 1: numerical solver[J]. Journal of Fluids and Structures, 2012, 33: 127-147.
- [38] Kawakami M. On the Impact Strength of Ships due to Shipping Green Seas Towing Experiments of a Ship Model in Regular Waves[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1969, 1969(125): 99-106.
- [39] Takezawa S, Kobayashi K, Hagino K, et al. On the deck wetness and the impulsive water pressures acting on the deck in head seas[J]. Journal of The Society of Naval Architects of Japan, 1977, 1977(141): 86-96.

- [40] Fukuda J, Ikegami K, Mori T. Predicting the long term trends of loads on deck due to shipping water[J]. J. West Japan Soc. Nav. Archit., 1973, 45.
- [41] Kawakami M, Tanaya K. Stochastic prediction of impact pressure due to shipping green sea on fore deck of ship[J]. 1977.
- [42] Zhang S, Yue D K P, Tanizawa K. Simulation of plunging wave impact on a vertical wall[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1996, 327: 221-254.
- [43] Welch J E, Harlow F H, Shannon J P, et al. The MAC method-a computing technique for solving viscous, incompressible, transient fluid-flow problems involving free surfaces[R]. Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), 1965.
- [44] Osher S, Sethian J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations[J]. Journal of computational physics, 1988, 79(1): 12-49.
- [45] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of computational physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [46] Armenio V. An improved MAC method (SIMAC) for unsteady high Reynolds free surface flows[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1997, 24(2): 185-214.
- [47] Zhang H, Zheng L L, Prasad V, et al. A curvilinear level set formulation for highly deformable free surface problems with application to solidification[J]. Numerical Heat Transfer, Part B, 1998, 34(1): 1-30.
- [48] Yu K, Chen H C, Kim J W, et al. Numerical simulation of two-phase sloshing flow in LNG tank using finite-analytic level-set method[C]. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2007, 42703: 851-860.
- [49] Chen H C, Yu K. CFD simulations of wave–current-body interactions including greenwater and wet deck slamming[J]. Computers & fluids, 2009, 38(5): 970-980.
- [50] Chen C R, Chen H C. CFD simulation of bow and stern slamming on a container ship in random waves[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2015, 25(03): 185-193.
- [51] Kleefsman K M T, Fekken G, Veldman A E P, et al. Prediction of green water and wave loading using a Navier-Stokes based simulation tool[C]. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2002, 36118: 745-752.

- [52] Nielsen K B, Mayer S. Numerical prediction of green water incidents[J]. Ocean Engineering, 2004, 31(3-4): 363-399.
- [53] Pham X P, Varyani K S. Evaluation of green water loads on high-speed containership using CFD[J]. Ocean engineering, 2005, 32(5-6): 571-585.
- [54] Zhang X, Draper S, Wolgamot H, et al. Numerical investigation of effects of bow flare angle on greenwater overtopping a fixed offshore vessel[C]. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2018, 51203: V001T01A002.
- [55] Huang S, Jiao J, Chen C. Numerical prediction of ship motion and slamming load characteristics in cross wave[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2022: 1-21.
- [56] Qin H, Tang W, Hu Z, et al. Structural response of deck structures on the green water event caused by freak waves[J]. Journal of Fluids and Structures, 2017, 68: 322-338.
- [57] Yu H, Ren H, Xu Y, et al. On the nonlinear vibrational responses of a large vessel with a broad bow flare under wave excitation: theory and experiment[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018: 1-17.
- [58] Jiao J, Huang S, Wang S, et al. A CFD–FEA two-way coupling method for predicting ship wave loads and hydroelastic responses[J]. Applied Ocean Research, 2021, 117: 102919.
- [59] Luo M, Reeve D E, Shao S, et al. Consistent Particle Method simulation of solitary wave impinging on and overtopping a seawall[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2019, 103: 160-171.
- [60] Dalrymple R A, Knio O, Cox D T, et al. Using a Lagrangian particle method for deck overtopping[M]. Ocean Wave Measurement and Analysis (2001). 2002: 1082-1091.
- [61] Cox D T, Ortega J A. Laboratory observations of green water overtopping a fixed deck[J]. Ocean Engineering, 2002, 29(14): 1827-1840.
- [62] Gómez-Gesteira M, Cerqueiro D, Crespo C, et al. Green water overtopping analyzed with a SPH model[J]. Ocean Engineering, 2005, 32(2): 223-238.
- [63] Le Touzé D, Marsh A, Oger G, et al. SPH simulation of green water and ship flooding scenarios[J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(1): 231-236.
- [64] Kawamura K, Hashimoto H, Matsuda A, et al. SPH simulation of ship behaviour in severe water-shipping situations[J]. Ocean Engineering, 2016, 120: 220-229.

- [65] Sun P N, Luo M, Le Touzé D, et al. The suction effect during freak wave slamming on a fixed platform deck: Smoothed particle hydrodynamics simulation and experimental study[J]. Physics of Fluids, 2019, 31(11).
- [66] Areu-Rangel O S, Hernández-Fontes J V, Silva R, et al. Green water loads using the wet dam-break method and SPH[J]. Ocean Engineering, 2021, 219: 108392.
- [67] Mintu S, Molyneux D, Colbourne B. Full-scale SPH simulations of ship-wave impact generated sea spray[J]. Ocean Engineering, 2021, 241: 110077.
- [68] Shibata K, Koshizuka S. Numerical analysis of shipping water impact on a deck using a particle method[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(3-4): 585-593.
- [69] Shibata K, Koshizuka S, Tanizawa K. Three-dimensional numerical analysis of shipping water onto a moving ship using a particle method[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2009, 14: 214-227.
- [70] Shibata K, Koshizuka S, Sakai M, et al. Lagrangian simulations of ship-wave interactions in rough seas[J]. Ocean Engineering, 2012, 42: 13-25.
- [71] Sueyoshi M, Kihara H, Kashiwagi M. Numerical simulation of deck wetness for a 2D pontoon-type floating structure[C]. OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean. IEEE, 2008: 1-7.
- [72] Bellezi C A, Cheng L Y, Nishimoto K. Particle based numerical analysis of green water on FPSO deck[C]. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2013, 55416: V007T08A079.
- [73] Zhang Y, Wang X, Tang Z, et al. Numerical simulation of green water incidents based on parallel MPS method[C]. ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. ISOPE, 2013: ISOPE-I-13-323.
- [74] 张友林, 唐振远, 万德成. 用 MPS 方法数值分析孤立波与平板相互作用问题[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2016, 31(04):395-401.
- [75] Zhang G, Chen X, Wan D. MPS-FEM coupled method for study of wave-structure interaction[J]. Journal of Marine Science and Application, 2019, 18: 387-399.
- [76] 朱仁传, 林兆伟, 缪国平. 甲板上浪问题的研究进展[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2007(03):387-395.
- [77] 叶海轩. 船首甲板上浪问题的数值模拟[D].上海交通大学,2016.
- [78] 张友林. MPS-FEM 方法在流固耦合问题中的应用[D]. 上海交通大学, 2020.

- [79] 张冠宇. 三维 MPS/FEM 耦合方法在波浪与弹性体相互作用中的研究与应用[D]. 上海交通大学, 2022.
- [80] 饶成平. 基于 MPS-FEM 耦合方法研究孤立波对弹性结构物的砰击[D]. 上海交通 大学, 2020.
- [81] 黄聪祎, 赵伟文, 万德成. MPS-FEM 方法模拟弹性船体在规则波中的运动[J]. 力 学学报, 2022, 54(12):3319-3332.
- [82] Koshizuka S, Oka Y. Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid[J]. Nuclear science and engineering, 1996, 123(3): 421-434.
- [83] 张雨新. 改进的 MPS 方法及其三维并行计算研究[D]. 上海交通大学, 2016.
- [84] Koshizuka S, Nobe A, Oka Y. Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi - implicit method[J]. International journal for numerical methods in fluids, 1998, 26(7): 751-769.
- [85] Khayyer A, Gotoh H. Development of CMPS method for accurate water-surface tracking in breaking waves[J]. Coastal Engineering Journal, 2008, 50(2): 179-207.
- [86] Tanaka M, Masunaga T. Stabilization and smoothing of pressure in MPS method by quasi-compressibility[J]. Journal of Computational Physics, 2010, 229(11): 4279-4290.
- [87] Lee B H, Park J C, Kim M H, et al. Step-by-step improvement of MPS method in simulating violent free-surface motions and impact-loads[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2011, 200(9-12): 1113-1125.
- [88] Zhang Y X, Wan D C. Numerical simulation of liquid sloshing in low-filling tank by MPS[J]. Chinese journal of hydrodynamics, 2012, 27(1): 100-107.
- [89] Newmark N M. A method of computation for structural dynamics[J]. Journal of the engineering mechanics division, 1959, 85(3): 67-94.
- [90] 陈翔. 复杂界面流动无网格 GPU 算法程序开发及应用[D]. 上海交通大学, 2020.
- [91] Antoci, C., Gallati, M, Sibilla, S. Numerical Simulation of Fluid–structure Interaction by SPH [J]. Computers and Structures, 2007, 85(11): 879-890.
- [92] Sun, Y.J., Xi, G., Sun, Z.G. A fully Lagrangian method for fluid–structure interaction problems with deformable floating structure [J]. Journal of Fluids and Structures. 2019, 90: 379-395.
- [93] Crespo A J C, Domínguez J M, Rogers B D, et al. DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)[J]. Computer Physics Communications, 2015, 187: 204-216.

[94] Goring D G. Tsunamis--the propagation of long waves onto a shelf[J]. 1978.

# 攻读学位期间学术论文和科研成果目录

- [1] Wu M, Zhao W, Wan D, et al. Numerical Study of Green Water Loads on a Fixed Structure with Various Gate Release Velocities by the MPS Method[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2023, 33(04): 399-408. (SCI, 已发表, 一作)
- [2] Wu M, Yang G, Zhao W. Numerical study of green water loads on a fixed structure with elastic sidewalls by MPS-FEM coupled method[C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2023, 1288(1): 012016. (国际会议,已发表,一作)
- [3] Wu M, Wang J, Zhao W, et al. Numerical Study of Green Water Loads on a Fixed Structure by MPS Method[C]. ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. ISOPE, 2023: ISOPE-I-23-363. (EI 会议,已发表,一作)
- [4] 吴萌萌, 王尼娜, 万德成. 基于 MPS 方法的固定半潜式平台波浪爬升数值模拟 [J/OL]. 海洋工程:1-15. (中文核心,已发表,一作)

## 致 谢

在我硕士学习生涯的每一个步伐中,我都深深感受到了来自导师、老师、同门师 兄师姐以及同学们的无私帮助和悉心指导。在此,我衷心地表达我的感激之情。

首先,我要特别感谢我的导师万德成教授,您不仅以深厚的学术造诣引领我步入 知识的海洋,更以其严谨的治学态度激励着我。在研究过程中,您为我的工作指引着 方向,对我的工作提出了宝贵的建议,带领我们参加国内外的学术会议,带着我们参 与科研项目提高能力,您的指导和关怀让我受益匪浅。对我而言,在 CMHL 大家庭 的学习与生活是一段难忘且珍贵的经历。

我也要感谢赵伟文、王建华、曹留帅和庄园老师。在我硕士生涯探索的道路上, 您们的专业知识和热心指导是我前进的灯塔。您们在数值模拟、数据分析和论文撰写 上的帮助,使我能够更好地理解和掌握研究的意义。同时感谢朱政老师辛苦保障课题 组的日常工作运转。

我还要感谢我的师兄师姐和同门同学室友们,感谢你们在这段学习旅程中给予我的帮助和支持。在日复一日的实验和研究中,是你们的陪伴和帮助让我克服了重重困难。我们共同度过的每一次讨论和交流,都是我宝贵的记忆,也是我读研究生的生活中不可或缺的一部分。

最后,我要感谢所有关心和支持我的家人。是你们的理解和鼓励,使我能够坚持 到最后,完成这篇硕士论文。

再次感谢所有给予我帮助和支持的人。