

上海交通大学硕士学位论文

聚焦波下半潜式平台波浪爬升和气隙的数值
模拟研究

硕 士 研 究 生：杨晓彤

学 号：118010910241

导 师：刘成副教授

副 导 师：

申 请 学 位：工学硕士

学 科：船舶与海洋工程

所 在 单 位：船舶海洋与建筑工程学院

答 辩 日 期：2021 年 1 月

授予学位单位：上海交通大学

Dissertation Submitted to Shanghai Jiao Tong University
for the Degree of Master

**NUMERICAL SIMULATION ON WAVE
RUN-UP AND AIR-GAP OF
SEMI-SUBMERSIBLE UNDER FOCUSED
WAVE**

Candidate:	Xiaotong Yang
Student ID:	118010910241
Supervisor:	A/Prof. Cheng Liu
Assistant Supervisor:	
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Ship Building and Ocean Engineering
Affiliation:	School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering
Date of Defence:	Jan, 2021
Degree-Confering-Institution:	Shanghai Jiao Tong University

上海交通大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

上海交通大学

学位论文使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。

本学位论文属于 ☐ 公开论文

☐ 内部论文，☐1 年/☐2 年/☐3 年 解密后适用本授权书。

☐ 秘密论文，____ 年（不超过 10 年）解密后适用本授权书。

☐ 机密论文，____ 年（不超过 20 年）解密后适用本授权书。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

指导教师签名：

日期： 年 月 日

聚焦波下半潜式平台波浪爬升和气隙的数值模拟研究

摘 要

随着海洋开发由浅海向深海领域发展, 半潜式平台在海洋工程中的应用日益广泛, 不仅应用在钻井、铺管、生产、起重等场景, 也将更多地应用于海上风电站、海上工厂等。当其在工作海域作业时, 会受到波浪的冲击, 由于半潜式平台立柱群和下浮体的干扰, 波浪会沿着平台的立柱向上爬升, 产生强烈的非线性特性, 在极限海况下会出现波浪砰击平台下甲板的现象, 即出现平台气隙为零的现象, 会对平台结构造成严重的破坏, 需要对平台各处上浪危险点进行局部加强, 因此研究半潜式平台的波浪爬升问题, 以及准确对平台的气隙进行预报, 对平台设计工作有着十分重要的意义。

本文应用课题组基于开源平台 OpenFOAM 平台开发的内部求解器 naoe-FOAM-SJTU, 对半潜式平台在聚焦波下的波浪爬升和平台气隙问题进行了模拟研究。文章首先进行了聚焦波的造波, 并将波高时历曲线与物理试验进行对比, 验证了求解器进行聚焦波造波的可行性和准确性。接着文章进行了直立圆柱在聚焦波下波浪爬升的数值模拟, 通过将计算域不同位置的波高时历曲线、运动圆柱周围的波高时历曲线以及圆柱表面的压力时历曲线与物理模型试验进行对比, 验证了求解器求解聚焦波沿直立圆柱波浪爬升问题的可行性, 分析了误差来源, 探究了圆柱运动速度对波浪爬升的影响, 结果发现圆柱的运动速度对圆柱近壁面的流场和较远的流场有不同的影响, 运动速度较大时圆柱近壁面的波浪爬升更高, 但是较远流场的波面升高情况相比运动速度较小时要低。

接着本文进行了半潜式平台在大波陡规则波下波浪爬升的研究, 将数值模拟结果与物理模型试验结果进行对比, 验证了求解器求解平

台波浪爬升问题的可行性和准确性。讨论了半潜式平台立柱间距以及波浪浪向对波浪爬升现象的影响，结果发现迎浪方向下半潜式平台波浪爬升的高度要高于横浪方向下半潜式平台前后立柱的波浪爬升高度；且立柱间距越小，半潜式平台前后立柱的波浪爬升高度越大。

最后本文进行了聚焦波下半潜式平台波浪爬升和平台气隙的研究，讨论了聚焦波波陡和聚焦位置对半潜式平台前后立柱波浪爬升和平台气隙的影响。结果发现随着聚焦波波陡的增加，聚焦波最大波的波幅也增加，进而导致半潜式前后立柱的波浪爬升幅度增加；聚焦位置在平台前立柱前方相比于聚焦位置在平台中央时，前立柱的波浪爬升高度更大；聚焦位置在平台中央相比于在前立柱前方，后立柱的波浪爬升高度更大；当平台出现零气隙现象时，甲板下方前后立柱附近的角隅位置是受到波浪砰击的危险点，在平台设计阶段要对该位置进行结构的加固。

关键词：聚焦波，半潜式平台，波浪爬升，平台气隙，naoe-FOAM-SJTU

NUMERICAL SIMULATION ON WAVE RUN-UP AND AIR-GAP OF SEMI-SUBMERSIBLE UNDER FOCUSED WAVE

ABSTRACT

With the development of marine development from shallow seas to deep seas, semi-submersible platforms are increasingly used in marine engineering, not only in drilling, pipe laying, production, lifting, etc., but also in offshore wind power plants and offshore Factories etc. When it operates in the working sea area, it will be impacted by waves. Due to the interference of the semi-submersible platform column group and the lower floating body, the wave will climb up along the platform column, which will have strong nonlinear characteristics. The phenomenon of waves attacking the lower deck of the platform, that is, the phenomenon that the air gap of the platform is zero, will cause serious damage to the platform structure. It is necessary to locally strengthen the dangerous points of the waves on the platform. Therefore, the wave climb of the semi-submersible platform is studied. The problem and the accurate prediction of the air gap of the platform are of great significance to the design of the platform.

In this paper, the self-developed internal solver naoe-FOAM-SJTU developed by the research group on the CFD-based OpenFOAM platform is used to simulate the wave climbing and platform air gap problems of a semi-submersible platform under focused waves. The article firstly carried out the wave making of the focused wave, and compared the wave height time history curve with the physical experiment, and verified the feasibility and accuracy of the solver in the wave making of the focused wave. Then the article carried out the numerical simulation of the wave climbing of the

vertical cylinder under the focused wave, by comparing the wave height time history curve at different positions in the calculation domain, the wave height time history curve around the moving cylinder, and the pressure time history curve on the cylindrical surface with physical model tests. , Verified the feasibility of the solver to solve the problem of wave climbing along a vertical cylinder with focused waves, analyzed the source of error, and explored the influence of the cylinder movement speed on the wave climb. It was found that the movement speed of the cylinder has different flow fields near and around the cylinder.

Then this paper carried out the research on the wave climbing of the semi-submersible platform under large and steep regular waves. The numerical simulation results were compared with the physical model test results to verify the feasibility and accuracy of the solver for the platform wave climbing problem. The influence of the column spacing of the semi-submersible platform and the wave direction on the wave climbing phenomenon was discussed, and it was found that the wave climb height of the semi-submersible platform in the heading direction is higher than that of the front and rear columns of the semi-submersible platform in the cross-wave direction. ; And the smaller the column spacing, the greater the wave climbing height of the front and rear columns of the semi-submersible platform.

Finally, this paper conducts the research on the wave climb and platform air gap of the semi-submersible platform under the focused wave, and discusses the influence of the wave steepness and focus position on the wave climb of the front and rear columns of the semi-submersible platform and the platform air gap. It is found that as the steepness of the focused wave increases, the maximum wave amplitude of the focused wave also increases, which in turn leads to an increase in the wave climbing amplitude of the semi-submersible front and rear columns; the focal position is in front of the platform's front column compared to when the focal position is in the center of the platform. The wave climb height of the front pillar is greater; the

focus position is at the center of the platform than in front of the front pillar, and the wave climb height of the rear pillar is greater; when the platform has zero air gap, the corner position near the front and rear pillars under the deck is At the dangerous point of wave slamming, the structure should be reinforced at the stage of platform design.

KEY WORDS: focused wave, semi-submersible, wave run-up, air-gap, naoe-FOAM-SJTU

目 录

聚焦波下半潜式平台波浪爬升和气隙的数值模拟研究	I
摘 要	I
ABSTRACT	III
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 聚焦波的研究现状	2
1.2.2 直立圆柱在聚焦波下的波浪爬升问题研究现状	6
1.2.3 半潜式平台波浪爬升和平台气隙的研究现状	8
1.3 主要内容与章节安排	12
第二章 数值方法	14
2.1 naoe-FOAM-SJTU 求解器简介	14
2.1.1 控制方程	15
2.1.2 自由面捕捉	15
2.1.3 离散方法和速度压力解耦方法	15
2.1.4 湍流模型	16
2.2 数值造波与消波区消波	17
2.2.1 Stokes 一阶波	18
2.2.2 聚焦波	18
2.2.3 消波方法	19
2.3 重叠网格方法	20
2.4 本章小结	21
第三章 运动圆柱与聚焦波相互作用的数值模拟	23
3.1 模型与试验	23
3.1.1 模型和数值水池的构建	23
3.1.2 网格划分	26
3.1.3 聚焦波的生成和收敛性验证	27
3.2 运动圆柱与聚焦波相互作用的数值模拟分析	28

3.2.1 聚焦波沿圆柱的波浪爬升分析	28
3.2.2 圆柱表面压力的分析	33
3.2.3 自由面的波面升高和涡脱落	35
3.3 本章小结	38
第四章 半潜式平台在规则波下的波浪爬升数值模拟	40
4.1 模型与试验	40
4.1.1 模型与数值水池的构建	40
4.1.2 网格划分	42
4.1.3 波浪的生成和收敛性验证	42
4.2 波浪爬升和流场分析	44
4.2.1 立柱周围的波浪爬升分析	44
4.2.2 立柱周围的流场细节分析	47
4.3 本章小结	49
第五章 半潜式平台在聚焦波下的波浪爬升数值模拟	51
5.1 数值模拟模型构建	51
5.2 聚焦波下半潜式平台的平台气隙和砰击现象	52
5.2.1 聚焦波参数对立柱周围的波浪爬升的影响	52
5.2.2 聚焦波沿前后立柱的波浪爬升现象	54
5.2.3 聚焦波对半潜式平台的砰击	57
5.3 本章小结	59
第六章 总结与展望	61
6.1 全文结论	61
6.2 展望	62
参考文献	64
致谢	68
攻读硕士学位期间已发表或录用的论文	71

图 录

图 1-1 挪威北海的 Draupner 平台	3
图 1-2 “新年波”	3
图 1-3 1969 年-1996 年 22 起聚焦波引起的海难事故造成的人员伤亡	4
图 1-4 HOS 方法模拟得到的聚焦波	6
图 1-5 圆柱与聚焦波相互作用的实验设置	7
图 1-6 平台在波浪中运动时的气隙	9
图 1-7 半潜式平台 GVA4000 (a)实物 (b)模型	10
图 2-1 naoe-FOAM-SJTU 架构图	14
图 2-2 造波模块架构图	18
图 2-3 矩形消波区示意图	20
图 2-4 重叠网格节点类型示意图	21
图 3-1 数值水池示意图	24
图 3-2 压力传感器示意图	24
图 3-3 运动浪高仪布置图	26
图 3-4 计算网格	27
图 3-5 不同网格下的波高时历曲线对比图	28
图 3-6 固定浪高仪的波高时历曲线对比图 (a)0.25m/s (b)0.75m/s	30
图 3-7 运动浪高仪的波高时历曲线对比图 (a)0.25m/s (b)0.75m/s	31
图 3-8 圆柱近壁面处的波浪爬升情况	32
图 3-9 聚焦位置处两工况下的波高时历曲线对比图	33
图 3-10 圆柱表面的压力时历曲线	35
图 3-11 0.25m/s 速度运动的圆柱周围的波浪爬升和波速云图	35
图 3-12 0.75m/s 速度运动的圆柱周围的波浪爬升和波速云图	36
图 3-13 0.25m/s 速度运动的圆柱在 $z=-0.5\text{m}$ 处的涡脱落	37
图 3-14 0.75m/s 速度运动的圆柱在不同水深处的涡脱落	38
图 4-1 半潜式平台计算模型	41
图 4-2 浪高仪位置图	41
图 4-3 计算域网格划分	42
图 4-4 数值水池示意图	42

图 4- 5 波高时历曲线对比图 (a)不同时间离散格式 (b) 不同网格划分方式 (c)不同测点位置.....	43
图 4- 6 数值模拟结果与试验结果对比图	44
图 4- 7 浪高仪组 Row A 的波面升高时历曲线	45
图 4- 8 浪高仪组 Row I 的波浪爬升曲线	46
图 4- 9 前立柱周围测点的爬升特性	47
图 4- 10 后立柱周围测点的爬升特性.....	47
图 4- 11 前立柱之间的波浪叠加云图.....	48
图 4- 12 前立柱背面的波浪抬升.....	48
图 4- 13 后立柱前的波浪爬升.....	49
图 4- 14 波浪破碎	49
图 5- 1 网格划分	51
图 5- 2 浪高仪分布图	52
图 5- 3 (a)前立柱和(b)后立柱波浪爬升高度和平台气隙响应	53
图 5- 4 半潜式平台周围的波高时历曲线	54
图 5- 5 波浪爬升过程中前立柱周围的速度云图	55
图 5- 6 波浪爬升、砰击、破碎过程中后立柱周围的速度云图.....	57
图 5- 7 波浪爬升过程中前立柱周围的压力云图	58
图 5- 8 后立柱周围的波浪爬升、砰击和破碎现象及压力云图.....	58
图 5- 9 平台表面压力云图	58
图 5- 10 (a)x 方向和(b)y 方向前后立柱波浪力响应分析图	59

表 录

表 2-1 计算使用过的离散方法	16
表 2-2 湍流系数	17
表 2-3 聚焦波参数	19
表 3-1 圆柱表面压力传感器分布表	25
表 3-2 固定浪高仪分布表	25
表 3-3 运动浪高仪分布表	26
表 3-4 网格数量表	28
表 4-1 半潜式平台模型参数	40
表 4-2 计算算例	41
表 4-3 网格数量表	44
表 5-1 聚焦波参数	52
表 5-2 最大波浪爬升高度统计表	53

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景及意义

随着海洋开发由浅海拓展向深海领域,海洋工程中半潜式平台的应用越来越广泛,不仅应用在钻井、铺管、生产、起重等,也将更多地应用于海上风电站、海上工厂等。平台气隙作为平台设计的安全性指标之一,表示的是平台下甲板到波面的垂直距离。当半潜式平台在作业过程中,不可避免地会受到海洋环境的影响,如波浪的冲击等,由于半潜式平台立柱群和下浮体的干扰,波浪会沿着平台的立柱向上爬升,会有强烈的非线性特性,在极限海况下会出现波浪砰击平台下甲板的现象,即出现平台气隙为零的现象,会对平台结构造成严重的破坏,为了平台安全性的考虑,需要对平台可能会遭受波浪砰击造成剧烈局部载荷的危险位置进行结构加强,那么就需要对半潜式平台的波浪爬升问题进行研究,以及对平台的气隙进行准确预报,这对平台设计工作有着十分重要的意义。

聚焦波作为一种特殊的不规则波,它的最大波峰远高于海洋环境的有义波高,具有强烈的非线性特征,波浪能量非常集中,作用在海上平台时,对平台破坏性巨大,会对平台造成剧烈的砰击,带来极大的安全隐患。近年来,由于聚焦波造成的船海工程事故有很多,仅 1969 年-1996 年聚焦波就在太平洋和大西洋造成的 22 起大型船舶事故,这些事故共造成了 525 人员伤亡。

大量的工程事故警示着我们,如果想要在海上开展作业,必须要充分认识海洋环境,尤其是可能会发生的灾害性的情况,只有充分认识到海洋环境可能会出现的恶劣情况,并且提前根据这些恶劣情况做好防备,才能避免灾害的发生。通过对聚焦波下半潜式平台的波浪爬升和平台气隙问题进行数值模拟的研究分析可以提前预测半潜式平台波浪爬升的高度,以及出现零气隙或负气隙问题时平台可能会遭受砰击的危险位置,可以根据这些结果针对性地对平台进行设计,保证平台作业时的安全性,这对工程安全问题的避免有着重要的意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 聚焦波的研究现状

聚焦波是指在实验室的条件下,通过组成波浪聚焦的方式形成的一个有明显高于其他波峰的陡且尖的波峰的波浪,具有强非线性特性,具有瞬时性,也常被成为畸形波(freak wave)、怪波(rogue wave)、极值波(extreme wave)等。聚焦波作为一个波峰巨大的巨浪,往往会对船舶、海洋结构物以及沿岸设施造成很大的损害进而给我们的财产和生命安全带来巨大的损失:1968年在南非沿岸 World Glory 游船遭遇巨浪断为两截后沉入海底;2006年5月21日号称“海上巨无霸”的法国豪华邮轮“彭特·艾温号”行驶在比斯开湾时,突遇15米高巨浪袭击,船舱玻璃被击碎,船舱大量进水;2018年7月在泰国普吉岛5米的巨浪掀翻了游船,16名中国游客遇难。

最著名的畸形波是挪威北海的 Draupner 平台(如图 1-1 所示)1995年1月1日记录下来的“新年波”^[1],如图 1-2 所示,最大波高将近 26m,北海海域的百年一遇波高预估为 27m,相比于其百年一遇的海况,这种波的极端模式在于波峰到静水面的高度高达 18m,该海域万年一遇的波峰高度为 19.5m,虽然波峰并没有超出设计参数,但是当时的海面的有义波高仅为 12m,是典型工程模型下无法预测的极端波浪事件,对探究这种强非线性的聚焦波形成的物理机制以及预测聚焦波形成的时间提出了挑战。

Lawton^[2]统计了 1969 年-1996 年聚焦波在太平洋和大西洋造成的 22 起大型船舶事故,这些事故共造成了 525 人员伤亡,图 1-3 展示了事故发生地及损伤情况。Mori^[3]展示了聚焦波分析测量的统计方法,这些聚焦波的数据是日本船舶科学研究院统计的 1986-1990 年发生在日本海 Yura 港口海域的聚焦波,对 4 年间该海域纪录的波高超有义波高 2 倍并且大于 10m 的极端波浪进行了统计,该海域的平均水深为 43 米。Nikolkina^[4]基于大众媒体资源收集了 2006 年-2010 年五年世界各地发生的 78 件聚焦波造成损害的情况。



图 1- 1 挪威北海的 Draupner 平台

Fig.1- 1 The Draupner S and Draupner E platforms in the North Sea

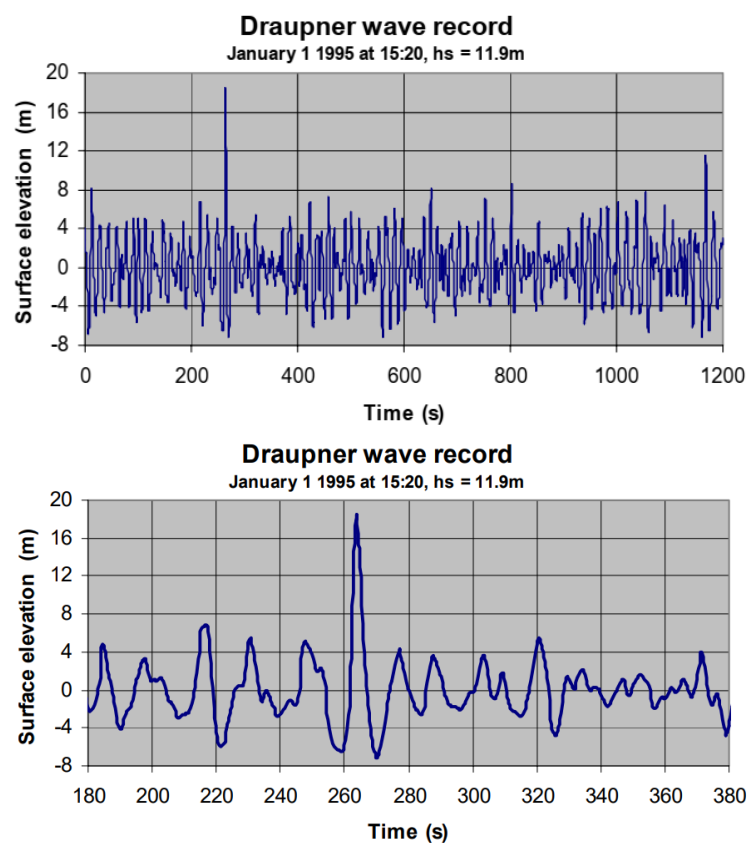


图 1- 2 “新年波”

Fig.1- 2 The New Year wave

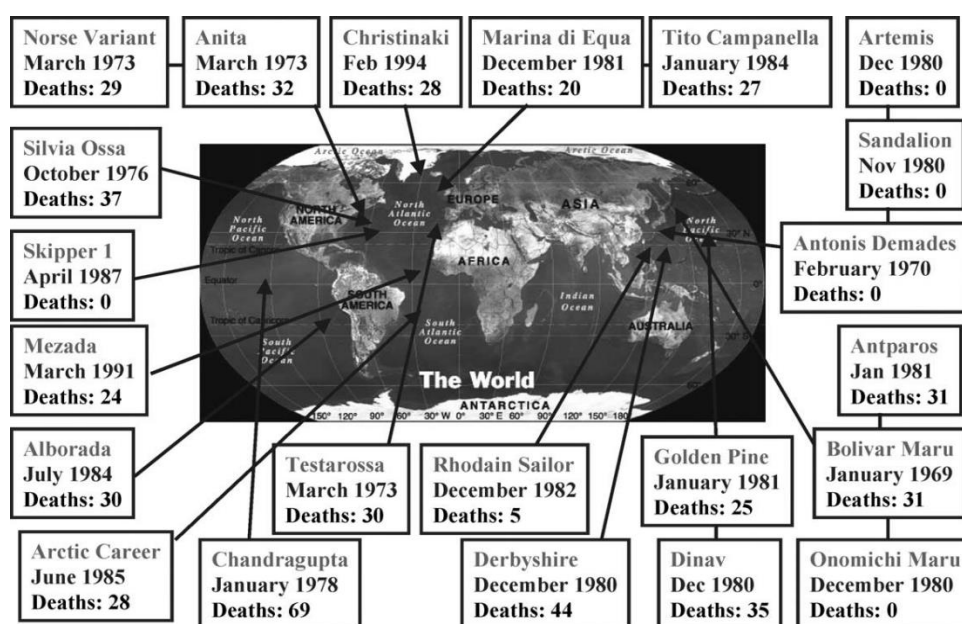


图 1-3 1969 年-1996 年 22 起聚焦波引起的海难事故造成的人员伤亡
Fig.1- 3 Statistics on casualties caused by focused waves from 1969 to 1996

Kharif^[5]分析了聚焦波的形成物理机制，从线性机制和非线性机制两方面进行了阐述，认为聚焦波的生成考虑到了以下机制：由于地形或者空间变化引起的空间聚焦；由于色散关系引起的时空聚焦；波流相互作用；大气作用，大气压的波动以及剪切风不稳定的波动；非线性调制的不稳定性（Benjamin-Feir instability）引起的非线性聚焦等。并提出在满足高斯假定的条件下，对聚焦波的判定标准是 $H_{\max} > 2H_s$ 。本文也采用上述标准来判定聚焦波。

聚焦波的研究方法主要分为以下三种：海洋实测、物理模型试验和数值模拟方法。海洋实测需要花费大量的人力物力，不适用于普遍的研究，最常用的方法就是进行物理水槽试验和在数值水池中进行聚焦波的模拟。

在物理模型试验中，波浪聚焦是产生聚焦波的重要方法之一，不同方向和频率的波在传播过程中相互调制，因此波能量可以集中并形成极大的波。这个过程称为波浪聚焦。聚焦波的产生主要分为相速度法，反向色散法和群速度法^[6]。基于线性理论，相速度法是一种通过将不同频率的波聚焦在指定位置和特定时间来模拟聚焦波的有效方法。Sriram^[7]应用这种方法在德国汉诺威的 Franzius-Institute 实验室进行了聚焦波的生成，考虑了两个不同的中心频率和三种不同的带宽比率，分析表明，对于宽带频谱，使用线性造波板桨距位移时差异更加明显，并且由于线性位移会导致波峰高度的增加，聚焦时间和位置也会发生改变。Ning^[8]在大连理工大学的波浪槽中进行了大量的聚焦波生成的试验研究。此外，波浪非线性调

制的不稳定性（Benjamin-Feir instability）也是生成聚焦波的方法，Stuart^[9]、Crawford^[10]、Zakharov^[11]等研究了此方法对聚焦波生成造成的影响。因为实际海洋情况下波浪的运动具有很强的随机性，所以通过在开阔海域中应用随机波组生成聚焦波更具有实际意义，但是物理模型试验很难满足这些条件，通常是用数值模拟方法实现。

数值模拟方法被广泛地应用到聚焦波的生成中。根据是否考虑自由面的粘性阻力，又可分为势流方法和粘流方法，两种方法各有优劣，分别有很多学者应用这两种方法进行了聚焦波生成和演化的研究。

势流方法不考虑自由面的粘性，将流体理想化处理，使得问题简化。Ning^[8]基于非线性的高阶边界元方法（BEM 方法）求解边界积分方程实现了聚焦波的生成和演化，模拟得到的聚焦波波形与物理试验得到的聚焦波波形吻合良好，对比线性、二阶理论得到的聚焦波，发现聚焦波在很大程度上依赖于非线性波之间至少三阶相互作用的强度，尽管三次谐波的谐波很小，但是三次共振分量却极大地改变了聚焦过程的动力学特性，从而导致聚焦位置和时间发生偏移，并在明显的线性范围内改变了主要波谱成分。赵西增^[12]应用可以快速、高效生成波浪场的高阶谱数值方法（HOS 方法）利用改进的 Longuet-Higgins 模型通过组合聚焦模型和相位角调制聚焦模型两种海浪模型进行聚焦波的生成。宋家琦^[13]基于 HOS 方法应用 LHEEA 实验室开发的开源程序 HOS-ocean^[14]进行了开阔海域下多向聚焦波的模拟，如图 1-4 所示。

在考虑自由面粘性的粘流方法中，根据自由面捕捉的方法可以分为以下几种：流体体积法^[15]（VOF 方法），水平集法^[16, 17]（Level set 方法）以及相场法^[18]（Phase field 方法）。VOF 方法（Volume of Fluid）带有人工压缩技术，可以控制数值耗散并拥有较高的自由液面捕捉精度，目前更多是使用 VOF 方法进行聚焦波生成过程中自由面的捕捉。Zhao^[19]进行了二维聚焦波的生成，并使用 VOF 方法进行自由面的捕捉。Cao^[20]同样采用 VOF 方法捕捉自由面，应用 naoe-FOAM-SJTU 求解器的数值水池进行了聚焦波等多种波浪的生成和演化，为后续进行波浪与海洋结构物相互作用的相关工作奠定了基础。

此外，也有基于粘势流耦合方法进行聚焦波生成的研究，宋家琦^[13]基于 HOS 方法以及粘势流耦合方法进行了多向聚焦波的数值模拟。

本文中，为了后续进行聚焦波与海洋结构物的相互作用，考虑到流场的强非线性以及对流场细节捕捉的需求，将采用基于 VOF 方法进行自由面捕捉的粘流方法通过相位角调制方法进行聚焦波的生成。

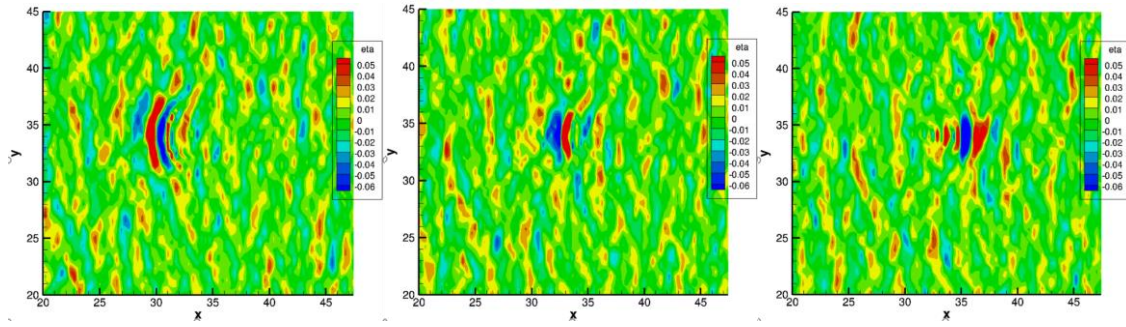


图 1- 4 HOS 方法模拟得到的聚焦波

Fig.1- 4 Focused wave simulated by HOS method

1.2.2 直立圆柱在聚焦波下的波浪爬升问题研究现状

为了开发和利用海洋资源，应运而生了越来越多的海洋结构物，例如离岸风力涡轮机，离岸平台。圆柱结构是海洋和海洋工程中常用的结构。为了评估这些海上结构的可靠性和生存能力，很多学者对直立圆柱体与聚焦波之间的相互作用进行了研究，研究包括物理实验和数值模拟。在这个方向的研究上，考虑到聚焦波与运动圆柱相互作用的非线性特性，数值模拟一般使用完全非线性势流理论（FNPT）和计算流体动力学（CFD）方法。

在物理模型试验方法中，Li^[21]进行了多方向聚焦波与直立圆柱相互作用的物理实验研究，并分析了聚焦波的波陡、频率带宽和方向对圆柱周围波浪爬升情况的影响，结果表明单向聚焦波导致的圆柱表面的波浪爬升要高于多向聚焦波；谱峰频率和频率带宽越高，波浪爬升越高；波浪方向性对圆柱前面波浪爬升的影响要高于圆柱背面。Ma^[22]进行了一系列物理模型试验，并考虑了由于波浪集中在直立圆柱体上而引起的更高谐波力。Hildebrand^[23]针对聚焦波对圆柱的作用进行了一系列的物理实验，实验设置如图 1-5 所示，测量了圆柱周围的波面升高值以及圆柱表面的压力值。



图 1-5 圆柱与聚焦波相互作用的实验设置

Fig.1- 5 Experiment set-up of interaction between the vertical cylinder and focused wave

在数值模拟方法中，Yan^[24]使用了基于完全非线性势流理论的 QALE-FEM（Quasi Arbitrary Lagrangian Eulerian Finite Element Method）和基于 CFD 方法的 OpenFOAM 平台进行了固定直立圆柱以及运动圆柱体与聚焦波相互作用的研究，通过与物理试验结果的波面升高值和压力值的对比分析发现，QALE-FEM 方法在圆柱运动速度较小的情况下与物理实验对比良好，但是当圆柱运动速度较大时，由于势流方法无法模拟圆柱运动产生的涡的脱落，所以与实验值的波面升高和压力值有明显的差异。这说明忽略了自由面粘性的势流理论在求解这种非线性特性较强的问题上会产生明显的误差，所以有人希望通过将势流理论和粘性理论耦合的方法来解决这个问题。Hildebrand^[25]应用 FNPT（Fully Nonlinear Potential Flow）模型和 N-S（Navier-Stokes）模型弱耦合的数值模型进行了聚焦波与圆柱体相互作用的数值模拟，圆柱周围的波面升高和圆柱表面的压力值与物理实验值良好符合，最后分析了圆柱周围的压力特性和涡旋脱落。

在 CFD 方法中，Bihs^[26]使用开源 CFD 代码 REEF3D 数值模拟了聚焦波与直立圆柱体的相互作用和使用 Level Set 方法以捕捉自由面，研究了非破碎性聚焦波与圆柱体相互作用期间以及在聚焦波的破碎过程中的自由表面流动特征，研究了相关的运动学特性，并记录了波面升高随时间的变化。吕合媛^[27]使用 STARCCM+ 软件对方形立柱在聚焦波下的动力学响应进行了分析讨论，研究发现逆相位分解法可分解波浪力的高阶成分，并且发现立柱在不同运动状态下所受波浪力不同。Hirt^[15]基于 Open FOAM 平台生成了不同的规则波和聚焦波，实现了波浪的生成和演化，并模拟了波浪在传播过程中与直立圆柱的相互作用，使用 VOF 方法进行自由面的捕捉。Chen^[28]基于 OpenFOAM 平台开发了新的模块来提高数值水池造波和消波的能力，实现了规则波和聚焦波的生成和演化，模拟了波浪在传播过程中

与圆柱相互作用导致的自由面的变化,数值模拟结果的波面升高值与物理试验吻合良好,结果表明 OpenFOAM 有能力模拟海上结构物与非线性波的相互作用,并可以正确捕获四阶谐波。Hu^[29]在基于 OpenFOAM 开发的 waves2oam^[30]求解器上加入了基于新波理论的新波边界条件,进行了聚焦波的生成,并与固定圆柱和浮动圆柱进行了相互作用,与物理实验对比了波面升高值、圆柱的垂荡运动和圆柱表面的压力值。Lin^[31]使用大涡模拟 (LES) 模型模拟了与垂直方圆柱体的波流相互作用,并建立了涡旋脱落与自由表面高度,平均流应变率和涡流粘度密切相关。Liu^[32]使用 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 数值模拟了聚焦波与系泊圆柱的相互作用,将数值模拟结果的波面升高值、圆柱的垂荡运动幅值、纵荡运动幅值以及纵摇运动值以及系泊载荷值与物理模型试验得到的结果进行对比,结果符合良好,验证了求解器在求解该问题的可靠性,并讨论了波陡对系泊圆柱运动响应的影响,且对流场细节进行了描述分析。

在本文第三章中,使用基于开源的 CFD 软件 OpenFOAM 的课题组内部求解器 naoe-FOAM-SJTU 模拟了聚焦波与运动圆柱体之间的相互作用。使用直接在入口边界输入聚焦波参数和松弛区技术来造波和消波,使用相速度法和恒定波陡度谱以实现波聚焦,使用重叠网格技术实现圆柱体的大规模移动,数值模拟试验遵循实验的设置。考虑了圆柱体的两种不同速度,以找出聚焦波如何与运动的圆柱体相互作用以及速度和距离对结果的影响。将计算域相应位置的波面升高值和圆柱表面的压力值与试验结果进行对比,验证求解器的可靠性。本文还讨论了涡旋脱落与自由表面之间的关系。

1.2.3 半潜式平台波浪爬升和平台气隙的研究现状

当半潜式平台在海洋上进行工程作业时,会出现波浪沿着平台立柱向上爬升的现象,由于平台立柱群和下浮体的干扰,这种现象会出现强烈的非线性特性,如果遭遇极限海况,甚至会出现波浪砰击平台下甲板的现象,即出现平台气隙为零的现象,会对平台结构造成严重的破坏,需要对平台各处上浪危险点进行局部加强,所以需要对半潜式平台的波浪爬升以及平台气隙问题进行研究。目前关于半潜式平台波浪爬升和气隙预报方法主要有物理试验方法和数值方法,大多是规则波和不规则波,关于聚焦波下半潜式平台波浪爬升的研究相对较少。

平台初始气隙是指平台下部甲板到静水面的垂向间距,是平台概念和基本设计中一个重要的参数;平台动态气隙是指平台在波浪运动状态下平台下部甲板到波面的垂向间距,如图1-6所示,它反映了平台气隙响应的瞬时变化情况,对平台

作业的安全性具有指标性意义。当出现零气隙或者负气隙,即气隙为0或者负值时,则会产生波浪撞击下甲板的情况,可能会破坏甲板上设备,甚至会引起平台甲板结构破坏和平台整体的倾覆。因此平台初始气隙的设计对平台设计有着重要意义,由于海洋环境恶劣,平台设计标准也在逐渐提高,平台在实际作业过程中很难避免零气隙甚至负气隙的现象,而且一味地增加平台的初始气隙高度也会导致平台浮体部分变大,可变载荷变小,不利于平台的稳定性。所以我们可以采用物理试验方法、理论分析方法或者数值模拟方法来进行平台波浪爬升和气隙的研究,找出平台最有可能出现零气隙造成对平台砰击的危险位置,进而对半潜式平台结构进行局部加固,避免由于零气隙导致的波浪砰击造成的平台结构损害,进而提高平台的安全性。

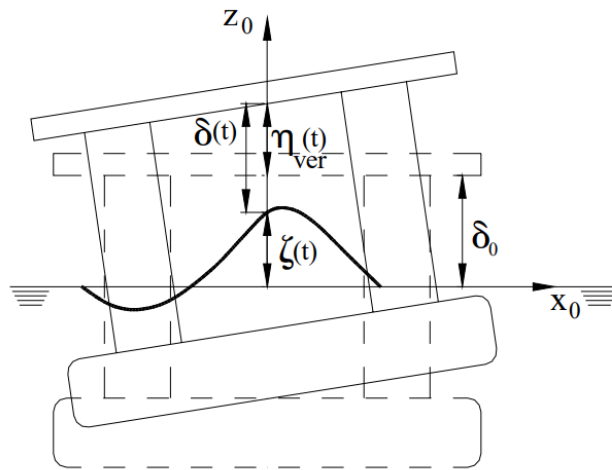


图 1-6 平台在波浪中运动时的气隙
Fig.1- 6 Page setting graph of pape

物理试验方法中, Simos^[33]在Brazil's Campos Basin对半潜式平台模型在约束和系泊状态下均进行了规则波试验,在三种不同的海况下评估了船体不同位置的气隙响应,并将结果与文献中提出的一些半分析模型进行了初步气隙估计,基于实验结果,还讨论了张紧腿系泊系统提供的动力耦合对气隙结果的作用。

Chatjigeorgiou^[34]试验研究了TLP平台与规则波的相互作用,针对平台的固定状态和系泊状态,讨论了入射波波频对波浪爬升的影响,结果发现系泊状态下的平台波浪爬升要低于平台固定状态,但是在平台垂荡方向的固有频率附近,平台大的垂荡运动造成的辐射波对水面有严重扰动。Kazemi^[35]在纽卡斯尔大学的波浪水池进行了关于里海最大的半潜式平台GVA4000系列“IRAN-ALBORZ”1: 100

模型试验，如图1-7所示，试验测量结果显示，在平台后立柱的背面的波浪爬升相比于入射波高放大了3倍，平台其他位置最大放大了2倍，且波浪冲击力的垂向分量在平台下甲板的中间位置处最大。

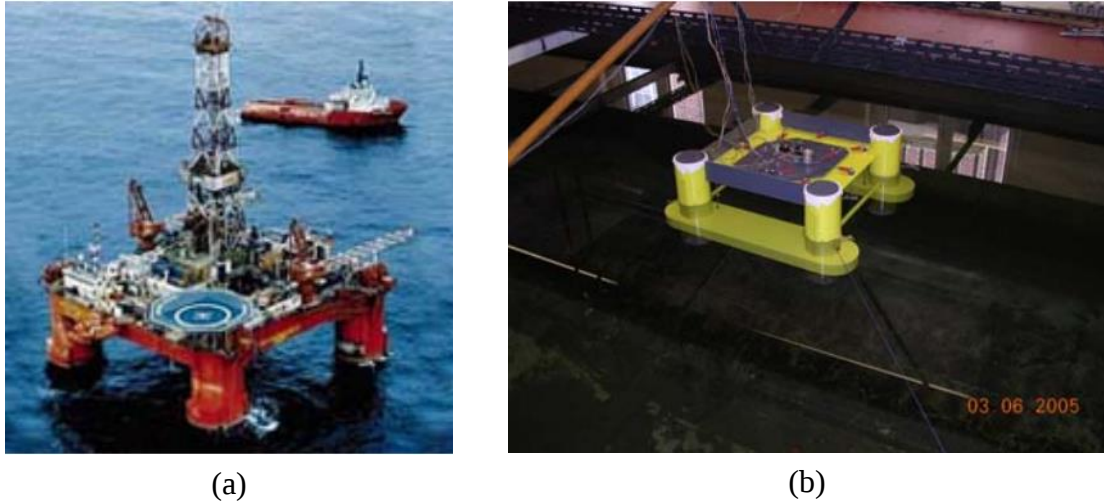


图 1-7 半潜式平台 GVA4000 (a)实物 (b)模型
Fig.1- 7 GVA4000 Class (a) GVA4000 Class (b)model

Naess^[36]对半潜式平台“Kristin”模型进行了气隙试验，要准确获得极限海况下的平台气隙值，可进行多次重复试验，因为单次随机波下模型试验获得的平台气隙具有一定的随机性，但是这种方法会耗费大量的人力物力，一般不采用这种方法；或者修正单次模型试验的数据以获取准确的平台气隙统计值。为了修正单次试验的数据，Naess使用了两种修正方法：一种基于韦伯分布进行修正，这种方法在处理过程中有较多的影响因子且影响因子间存在复杂的关系，增加了修正的难度；一种基于Gumbel分布进行修正，均取得了较好的结果。

沈鹏飞^[37]在哈尔滨工程大学多功能深水池实验室进行了半潜式平台气隙的系列研究，给出了平台各测点的危险程度，其结果发现，平台气隙不仅与入射波的波陡相关还与平台的高阶运动响应相关。

单铁兵^[38]在上海交通大学的海洋深水池中进行了规则波的生成和演化，并在这种环境下对半潜式平台的气隙问题进行了系统的研究，进行了不同波浪参数的影响的讨论。

势流方法中，Kazemi^[39]应用边界元法对IRAN ALBORZ半潜式平台做了气隙响应预报，该边界元方法考虑了两种类型：完全线性一阶理论、二阶混合理论，

因为没有考虑辐射和散射的二阶效应，导致平台立柱附近区域的波面升高值和基于Wagner理论方法波浪冲击力预测不准确。

Sweetman^[40]等人对Veslefrikk半潜式平台周围的最小气隙分布应用基于线性散射理论进行了研究，采用了两种非线性极限统计模型，其入射波具有二阶效应。因为引入了入射波的二阶效应，预报精度比线性模型有所提高，但因为二阶散射效应被忽略，还是会低估结果的峰值和偏角等统计值，导致势流模拟结果比物理模型试验结果偏低。Walker^[41]等利用NewWave方法进行了聚焦波的生成，并基于线性和二阶势流理论进行了聚焦波下四立柱平台的动力学分析。Rajendran^[42]基于条带理论的非线性时域方法进行了聚焦波下集装箱船垂荡运动响应的数值模拟分析，并与模型试验结果进行对比。

Simos^[33]使用势流软件WAMIT进行平台气隙响应分析，得到了初步的气隙估计，并与试验值进行对比。在规则波下的测试结果显示，对于超过4%的波陡度下会发生明显的非线性影响，尤其是在靠近立柱的区域由于波浪爬升现象造成的波面升高。Stansberg等人同样利用WAMIT 对该问题进行了数值模拟，采用线性理论和二阶非线性方法计算了平台气隙，得到了与Simos一致的研究结果，即发现二阶非线性方法基本能较好的预报平台不同位置的波面升高，但对于波陡较大的情况，势流方法会低估立柱附近区域的波浪爬升。

Clauss^[43]对FPSO和半潜式平台在“新年波”的海况下进行了平台运动学和结构力的数值模拟，同时给出了频域和时域的结果，其认为当按照确定的聚焦波波序列分析波浪与结构物的相互作用时，可以通过数值仿真评估最关键的位置，并揭示平台非线性运动响应的原因。

姜胜超^[44]使用边界元方法对四立柱在规则波下的近场干涉问题进行了研究。讨论了入射波频率对圆柱波浪爬升和圆柱所受的二阶漂移力造成的影响。曾志^[45]对半潜式平台进行了在规则波以及风和流的影响下5种海况的数值模拟，与模型试验的对比发现，势流方法可以较好地预测危险点的位置，但是一阶数值结果和二阶修正结果均会低估平台周围的波浪爬升的极值，且波陡越大，低估越严重。陶晶晶^[46]模拟了北海实际海况，利用边界元法对Veslefrikk平台的波浪爬升进行了模拟，利用了三种不同理论方法对相对波面升高进行了计算和分析，基于比较结果发现窄带模型理论较为合理。

丘文桢^[47]采用时域分析方法计算了极限海况下不同浪向平台锚泊耦合系统下的运动响应特性和气隙，并与频域结果进行比较；比较得出了两种方法对于气隙预报的差异，分析影响气隙预报结果的因素。肖鑫等^[48]应用New Wave方法实现了

聚焦波的生成,在时域内通过平台运动方程进行了聚焦波作用下TLP平台的瞬时响应分析。常爽^[49]对TLP平台在聚焦波下的运动相应进行了分析,研究了二阶差频、和频波浪力对平台不同自由度运动响应的影响,并讨论了聚焦位置对平台动力响应的影响。

采用CFD方法,Iwanowski^[50]等人应用基于粘性流理论的ComFLOW 软件对该问题进行了理论研究,该方法可以较好地模拟固定平台立柱周围的波浪爬升和平台气隙现象,但平台运动状态下情形不能真实反映,因为没考虑波浪和平台之间的非线性耦合。

单铁兵^[51]使用FLUENT软件对刚性固定的半潜式平台在规则波中的波浪非线性爬升问题进行了研究,讨论了波陡对波浪爬升的影响,着重研究了较大波陡的规则波对平台造成的强非线性现象,文章采用的粘性流方法捕捉到了水体分离、波浪破碎等强非线性现象。Liang^[52]同样采用FLUENT对半潜式平台在极端海况下的波浪爬升现象进行了模拟分析,结果同样发现在平台后立柱附近会产生波浪放大的最大值。

悦战刚^[53]使用Flow-3D软件进行了波浪爬升的数值分析,讨论了规则波不同波浪散射参数和波陡对半潜式平台波浪爬升特性的影响,并分析了平台固定和系泊状态下的波面情况,讨论了水下浮箱对结果的影响,结果发现,浮箱会增加平台前后立柱的波浪爬升高度,并对后立柱影响更大。Zhuang^[54]通过基于OpenFOAM的内部求解器naoe-FOAM-SJTU模拟了作用在固定FPSO形物体上的聚焦波。验证了数值方法解决波浪与结构相互作用问题的能力,并讨论了入射波角度和波陡度的影响。

1.3 主要内容与章节安排

本文的主要内容是讨论波浪和结构物的非线性作用,重点放在聚焦波以及波陡较大的规则波这种非线性很强的波浪对海洋平台等海洋结构物的作用,包括直立运动圆柱以及半潜式平台。国内外对聚焦波与海洋结构物在聚焦波下的波浪爬升问题研究的较少,针对半潜式平台的研究工作更少。本文对此工作应用 CFD 方法进行数值模拟,研究聚焦波参数,波陡和聚焦位置等对半潜式平台波浪爬升和平台气隙的影响,并给出波浪爬升、波浪破碎、波浪砰击平台下甲板等流场细节分析图,讨论了平台更容易受到波浪剧烈砰击的危险位置,验证应用 CFD 方法求解的可行性,展示 CFD 方法模拟该问题的优势,并在本文研究工作的基础上提出了未来值得深入研究的问题与思路。

本文主要分为六个章节，首先第一章进行了文章研究背景和研究意义的说明，总结了本文相关研究领域的国内外研究现状，包括聚焦波的研究、圆柱在聚焦波下的波浪爬升问题、半潜式平台波浪爬升和平台气隙问题的相关研究；

第二章主要介绍文章使用的数值方法，首先对本文使用的求解器 naoe-FOAM-SJTU 进行了简单的介绍，然后介绍本文使用的造波和消波方法，本文通过直接在造波边界设置入射波参数进行波浪的生成和演化，聚焦波的生成则是通过相速度法实现聚焦，通过恒定波陡谱来确定波幅，通过在计算域的出口设置松弛区来进行消波，以避免由于在数值水池出口的波浪反射对计算结果造成影响。最后对使用到的重叠网格方法进行介绍；

第三章中模拟聚焦波与运动圆柱体之间的相互作用，使用重叠网格技术用于实现圆柱体的大规模移动，数值模拟试验遵循实验的设置。考虑圆柱体的两种不同速度，以找出聚焦波如何与移动的圆柱体相互作用以及速度和距离对结果的影响。将波面升高值和圆柱表面的压力值与实验数据进行比较，以验证数值水池的可靠性和准确性，还讨论了涡旋脱落与自由表面之间的关系；

第四章研究半潜式平台在波陡较大的规则波下的波浪爬升问题，讨论规则波波陡和波浪浪向对平台前后立柱波浪爬升问题的影响，将前后立柱周围的波面升高时历值与物理试验结果进行对比，验证求解器在求解波浪爬升问题的可靠性和准确性；

第五章研究半潜式平台在聚焦波下的波浪爬升和平台气隙问题，讨论聚焦波参数对半潜式平台前后立柱波浪爬升的影响，分析零气隙情况下半潜式平台受到严重砰击载荷的危险位置；

第六章对全文完成的工作进行总结，并提出未来可以继续研究的思路 and 方向。

第二章 数值方法

2.1 naoe-FOAM-SJTU 求解器简介

本文的计算使用的是基于开源平台 OpenFOAM 自主开发的船海工程水动力软件 naoe-FOAM-SJTU 求解器，求解器的架构图如图 2-1 所示，该求解器包括六自由度运动、数值波浪水池以及系泊系统、重叠网格等模块，能解决船舶、海洋平台等海洋结构物在海洋环境中的大幅度运动、船桨舵耦合等复杂运动^[55]以及剧烈的液舱晃荡、极限海况波浪载荷、涡激振动^[56]、波浪爬升等强非线性现象模拟的问题。本文应用到的求解器的模块主要有重叠网格和数值水池。

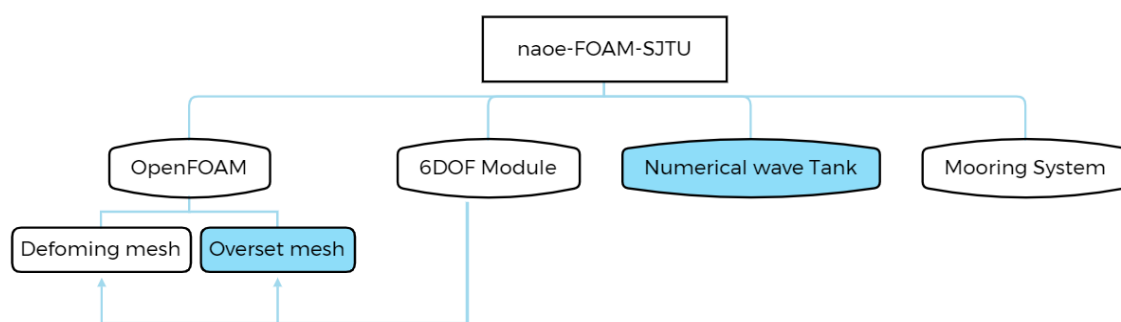


图 2-1 naoe-FOAM-SJTU 架构图
Fig.2- 1 Framework of naoe-FOAM-SJTU

通过以往大量的数值模拟研究，求解器在解决船海工程问题的可靠性和准确性得到了验证。比如，应用重叠网格技术解决船桨舵多级物体在波浪下的自推进和转弯回旋问题，各类型波浪的生成和验证，波浪条件下船舶运动与液化天然气储罐舱晃荡运动耦合问题，系泊系统数值分析等^[57-63]，均与物理试验等进行了对比分析，得到了不错的结果，验证了求解器的可行性和准确新，并为本文的研究内容的开展奠定了良好的基础。

该求解器采用了有限体积法离散控制方程，以 RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes) 方程为控制方程，VOF (Volume of Fluid) 方法来进行自由面的捕捉，下面将对其基本数值方法进行简单的介绍。

2.1.1 控制方程

对于气液两相不可压缩粘性流体使用 RANS 方程作为控制方程：

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho (\mathbf{U} - \mathbf{U}_g) \mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U}) + (\nabla \mathbf{U}) \cdot \nabla \mu + f_\sigma + f_s \quad (2-2)$$

其中， $\mathbf{U}$ 为流体速度； $\mathbf{U}_g$ 为网格节点的速度； ρ 为气液混合流的密度； $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ 为流体动压力， p 为总压； $\mathbf{g}$ 为重力加速度； $\mu = \rho(\nu + \nu_t)$ 为动力学粘性系数， ν 为运动粘性系数， ν_t 为由湍流模型求得的湍流涡粘度； f_σ 为两相流模型中的自由面的表面张力项； f_s 为消波区域所施加的源项，将在 2.2.3 节中进行描述。

2.1.2 自由面捕捉

在本文中，自由面的捕捉使用的是结合了界面压缩技术的 VOF 方法^[15]，其输运方程为：

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g) \alpha] + \nabla \cdot [\mathbf{U}_r (1 - \alpha) \alpha] = 0 \quad (2-3)$$

其中，体积分数 α 代表每一个网格中液体所占的体积百分比：

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{空气} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{自由面} \\ \alpha = 1 & \text{水} \end{cases} \quad (2-4)$$

对于混合流体中的 ρ 和 μ ，在 VOF 方法中可表示为

$$\begin{cases} \rho = \alpha \rho_w + \rho_a (1 - \alpha) \\ \mu = \alpha \mu_w + \mu_a (1 - \alpha) \end{cases} \quad (2-5)$$

其中，下标 w 和 a 分别代表水和空气。

2.1.3 离散方法和速度压力解耦方法

本文使用有限体积法 (FVM) 进行控制方程的离散，控制方程中各项使用的离散格式如下表 2-1 所示。在时间项的离散上，本文选用了两种不同的离散方法，隐式欧拉格式是一阶方法，相比于二阶方法的 CN 格式稳定性要好，但是数值耗散较严重，本文第四章在进行较大波陡规则波的数值模拟过程中，使用隐式欧拉格式出现了较大的数值耗散，所以后续选用了 CN 格式，具体算例验证参考本文

4.1.3。

表 2-1 计算使用过的离散方法
Table 2-1 Discrete method used in calculation

离散项	离散方法
时间项	隐式欧拉格式 (The implicit Euler scheme) / CN 格式 (Crank Nicolson)
对流项	二阶 TVD 格式 (The second-order TVD limited linear scheme)
扩散项	二阶中心差分格式 (The second-order central difference scheme)

控制方程中的速度压力的耦合是通过 Issa^[64]提出的 PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator) 算法来求解。在 OpenFOAM 中, PISO 算法通常是通过 PIMPLE 算法实现, PIMPLE 算法是 PISO 算法和 SIMPLE 算法的结合, 本质上是在 PISO 算法的基础上增加了若干非线性迭代, 以确保在非定常问题中每个时间步内的流场均能得到充分的迭代并收敛。

2.1.4 湍流模型

OpenFOAM 中湍流模型有多种选择, 目前本文采用的湍流模型是 Menter 提出的 $k-\omega$ SST 模型^[65], 该模型是通过 SST(Shear Stress Transport)公式将 $k-\omega$ 模型和 $k-\varepsilon$ 模型结合起来的湍流模型, 结合了两种模型的优点, 并避免了二者的缺点, 可以良好的处理近壁面的边界层流动和远场的自由流动。表达式如下所示:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}k) &= \tilde{G} - \beta^* k \omega + \nabla \cdot [(\nu + \alpha_k \nu_t) \nabla k] \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\omega) &= \gamma S^2 - \beta \omega^2 + \nabla \cdot [(\nu + \alpha_\omega \nu_t) \nabla \omega] + (1 - F_1) CD_{k\omega} \end{aligned} \quad (2-6)$$

其中, k 为湍动能, ω 为特定湍流耗散率。 F_1 是结合 $k-\omega$ 模型和 $k-\varepsilon$ 模型的混合函数。在混合函数的作用下, 在近壁处 $k-\omega$ 模型生效, 在远场处 $k-\varepsilon$ 模型生效。公式 (2-6) 中各参数的定义如下:

$$\begin{aligned}
F_1 &= \tanh \left\{ \left[\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\alpha_{\omega 2} k}{CD_{k\omega}^* y^2} \right] \right]^4 \right\}, \\
CD_{k\omega}^* &= \max(CD_{k\omega}, 10^{-10}), \\
CD_{k\omega} &= 2\sigma_{\omega 2} \nabla k \cdot \frac{\nabla \omega}{\omega}, \\
\tilde{G} &= \min\{G, c_1 \beta^* k \omega\}, \\
G &= \nu_t S^2
\end{aligned} \tag{2-7}$$

其中， G 为产生项， S 为应变率的不变量。

随着方程（2-6）求解完成后，湍动粘度 ν_t 可以通过下式求得：

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \tag{2-8}$$

其中， F_2 为第二个混合函数，定义如下：

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \tag{2-9}$$

此外，方程(2-6)中的各类系数，都是通过混合函数 F_1 得到：

$$\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1) \tag{2-10}$$

其中， ϕ 代表方程中各项混合后的系数； ϕ_1 和 ϕ_2 分别代表 $k-\omega$ 方程和 $k-\varepsilon$ 方程中的系数。所有系数见表 2-2。

表 2-2 湍流系数
Table 2-2 Coefficients for turbulence model

α_{k1}	α_{k2}	$\alpha_{\omega 1}$	$\alpha_{\omega 2}$	β_1	β_2	γ_1	γ_2	β^*	a_1	c_1
0.85034	1.0	0.5	0.85616	0.075	0.0828	0.5532	0.4403	0.09	0.31	10.0

2.2 数值造波与消波区消波

对海工平台进行波浪爬升的研究，首先要确保计算域内生成的波浪准确有效，本文采用 naoe-FOAM-SJTU 的造波模块进行造波，造波模块的架构图如图 2-2 所示。本文均采用通过在计算域入口边界直接输入入射波参数进行造波。下面将对文中使用到的波浪类型和理论，以及消波方法进行简单的介绍。

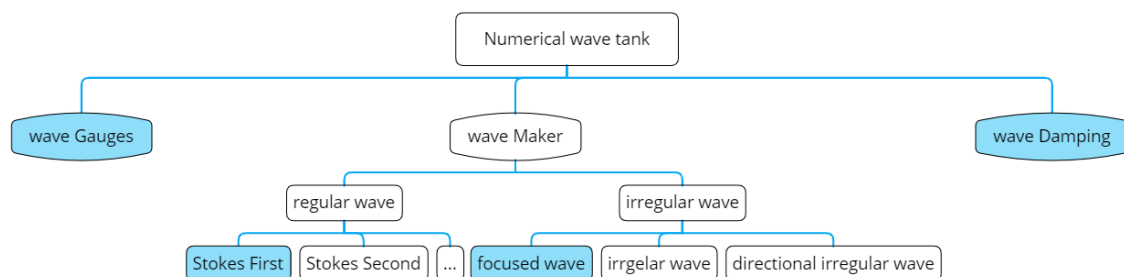


图 2-2 造波模块架构图

Fig.2- 2 Framework of numerical wave tank

2.2.1 Stokes 一阶波

$$\begin{aligned}\eta &= a \cos(kx - \omega t + \delta) \\ u &= a\omega \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \cos(kx - \omega t + \delta) \\ w &= a\omega \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \cos(kx - \omega t + \delta)\end{aligned}\quad (2-11)$$

其中： η 为波面函数； u 和 w 分别为流体质点的水平速度和垂向速度； a 表示波幅； h 为水深； ω 是波浪频率； k 表示波数； δ 表示相位。波浪的色散关系可以表示为：

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (2-12)$$

2.2.2 聚焦波

有四个不同的过程，可能会产生聚焦波：波与流相互作用，波与水底相互作用，波与波的相互作用以及风与浪相互作用^[66]。本文中聚焦波的生成基于波与波的相互作用，即不同成分波的线性叠加或非线性叠加以及定相过程。这种波浪聚焦的实现有三种方法，分别是群速度法，反向色散法和相速度法^[6]，本文使用的是相速度法，基于离散频率上多个正弦分量的总和推导出波浪桨板位移，其相位相应设置为聚焦在水池中的特定点上。

不规则波的波面可以表示成：

$$\eta = \sum_{j=1}^N a_j \cos(k_j x - \omega_j t + \varphi_j) \quad (2-13)$$

在聚焦波中，为了使所有组成波的波峰在特定时间汇聚在特定的一点， φ_j 需满足

$$\cos(k_j(x-x_f)-\omega_j(t-t_f)+\varphi_j)=1 \quad (2-14)$$

φ_j 可以计算得到为:

$$\varphi_j = -(k_j(x-x_f)-\omega_j(t-t_f))+2n\pi, \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2-15)$$

取 $n=0$, 则在特定时间 t_f 和特定位置 x_f 聚焦的聚焦波的波面方程为:

$$\eta(x,t) = \sum_{j=1}^N a_j \cos(k_j(x-x_f)-\omega_j(t-t_f)) \quad (2-16)$$

其中, N 为组成波的数量, a_j 是第 j 个组成波的波幅, φ_j 第 j 个组成波的相位, $\omega_j = 2\pi f_j$ 为第 j 个组成波的波浪角频率, k_j 为第 j 个组成波的波数, x_f 为聚焦位置, t_f 为聚焦时间。

表 2-3 聚焦波参数

Table 2-3 The input parameters of the focused wave

振幅增长参数	组成波频率范围	组成波数量	聚焦位置	聚焦时间
250	$f_{\min} < f_j < f_{\max}$	N	x_f	t_f

在数值模拟过程中, 输入了聚焦波各个组成波的频率范围, $f_{\min} < f_j < f_{\max}$, a_j 可以根据特定的谱函数计算得出, 常用的谱函数有 CWA, CWS 以及 JONSWAP, 本文中使用的 CWS (constant wave steepness), 表现形式为:

$$S = \sum_{j=1}^N a_j k_j \quad (2-17)$$

其中, $S = \pi G_a$ 为恒定波陡, G_a 是波幅增长参数。

2.2.3 消波方法

为了避免波浪在出口边界反射, 从而引起在计算域内部的反射而造成对计算结果的干扰或者造成解的发散, 在计算域的出口处设置松弛区进行消波。实现方法是将源项 $f_s(x)$ 添加到动量方程中, 其表达式为:

$$f_s(x) = \begin{cases} -\rho\alpha_s \left(\frac{x-x_s}{L_s} \right)^2 (\mathbf{U} - \mathbf{U}_{\text{ref}}) & x > x_s \\ 0 & x \leq x_s \end{cases} \quad (2-18)$$

其中, x_s 为松弛区的起始位置; L_s 为松弛区的长度; α_s 为人工粘性系数, 用于控制消波强度; 相对速度 $\mathbf{U}_{\text{ref}}$ 可以保证整个计算域的质量守恒。方程中 x 及 x 对应的项均可替换成 y 及 y 方向对应的项以实现 y 方向的消波。

本文中使用的为矩形的消波区, 如图 2-3 所示。

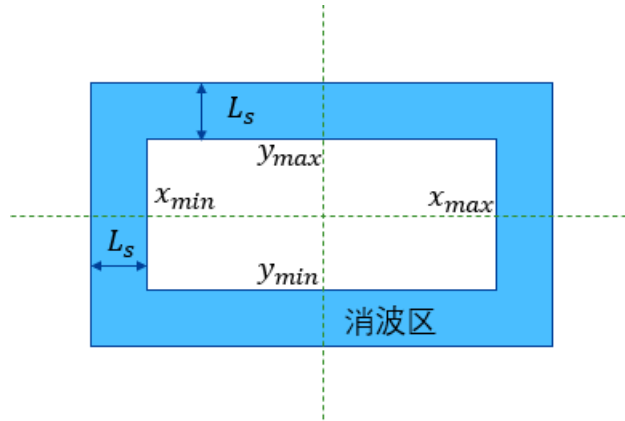


图 2-3 矩形消波区示意图

Fig.2- 3 Schematic diagram of rectangular sponge layer

2.3 重叠网格方法

在本文第三章的工作中，圆柱会进行大幅度的运动，如果使用动网格方法，圆柱的大规模运动会引起网格的过度变形，进而造成计算不收敛的情况，所以在本文中选择了重叠网格。重叠网格方法就是将研究对象的各个组件划分成单独的几套网格，然后再分别插到另一套背景网格中，将网格之间的重叠部分通过插值方法进行流场的信息交换，从而实现全流场计算的目的。在本文的第三章工作中将圆柱单独划分了一套网格，将这套网格嵌入到背景网格中，这两套独立网格之间可以实现无约束的相对运动，从而实现了圆柱的大幅度运动。

本文使用的 naoe-FOAM-SJTU 求解器在加入了重叠网格模块之后形成了求解器 naoeFoam-os-SJTU。计算 DCI (Domain Connectivity Information) 实现了多套重叠网格之间的插值关系。本文中使用的 DCI 数据是通过 Suggar ++^[67] (Structured, Unstructured, and Generalized overset Grid AssembleR++) 程序计算和生成的。DCI 主要由网格信息和插值系数组成。网格单元信息包含五种类型的网格：分别是参与正常计算的活动单元网格(Active cells)，直接反应真实流场的情况；位于计算域之外或者物体内部的不参与计算的洞网格(Hole)；位于重叠区域，通过插值方式从其它网格接收流场信息的插值单元(Fringe cells)；给插值单元提供流场信息的贡献单元(Donor cells)，所有贡献单元的流场值和相应插值系数的加权求和完成插值；没有找到贡献单元的插值单元则标记为孤点(Orphan)。

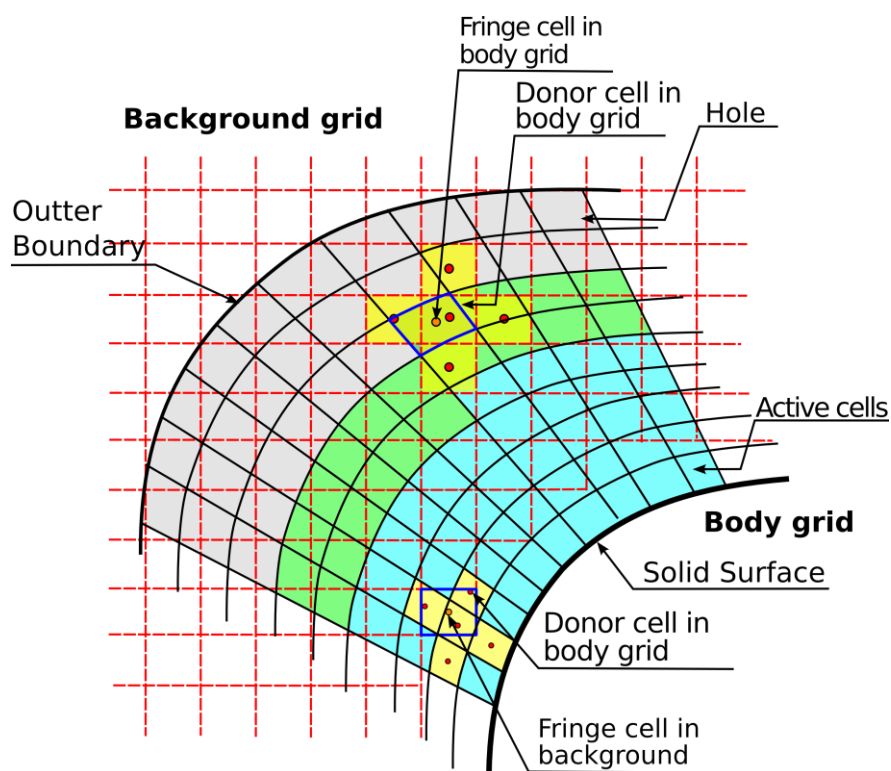


图 2-4 重叠网格节点类型示意图

Fig.2- 4 Schematic diagram of overset grids types

通过加权求和的方法完成插值单元和贡献单元之间的插值：

$$\phi_I = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \phi_i \quad (2-19)$$

其中， ϕ 表示速度、压力等流场信息； ω_i 是第 i 个贡献节点的插值系数； ϕ_I 为插值节点的值； ϕ_i 是第 i 个贡献节点的流场信息。此外插值系数 ω_i 需要无因次化，并满足以下条件：

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (2-20)$$

关于重叠网格的具体理论方法详见文献^[63]。

2.4 本章小结

本章主要介绍了文中使用到的数值计算方法，首先对本文使用船海工程水动力软件 naoe-FOAM-SJTU 求解器进行了简单介绍，包括对求解器模块的简介以及以往基于该求解器的研究工作，并对基本数值方法进行了介绍，包括控制方程

RANS 方程、自由面捕捉方法 VOF 方法的输运方程，将计算域的物理量进行离散之后，使用 PISO 方法进行速度压力解耦，实现数值求解。此外对本文使用的数值水池进行了介绍，主要介绍了本文使用的两种类型的波浪：规则波和聚焦波，并介绍了防止计算域出口边界造成反射的消波方法。最后对本文中使用的重叠网格方法进行了简要的介绍。综上，本章内容为后续数值模拟工作奠定了理论基础。

第三章 运动圆柱与聚焦波相互作用的数值模拟

在进行波浪与海洋平台相互作用的数值模拟之前，本文首先进行了运动圆柱与聚焦波的相互作用的数值模拟，圆柱在聚焦波的环境下进行纵向的匀速直线运动，圆柱的运动方向与聚焦波的传播方向相反，进行了两种圆柱运动速度的数值模拟，考察了不同圆柱运动速度下圆柱运动对聚焦波波场波高的影响以及沿圆柱的波浪爬升现象和圆柱表面的压力分布特性，由单圆柱与聚焦波的相互作用可以清晰地看到聚焦波对圆柱的作用，以及由于圆柱运动对波浪爬升、涡的脱落等造成的影响。

3.1 模型与试验

3.1.1 模型和数值水池的构建

本章进行数值模拟的设置参照了在德国汉诺威 Franzius-Institute 实验室^[23]进行的物理模型试验。物理模型试验是在高为 2m，水深为 0.7m，长为 110m，宽为 2.2m 的水池中进行的，在水池的造波边界的一端装有计算机控制的液压驱动活塞式造波器。在物理试验中，圆柱在水池开始造波之前先运动了一段距离使圆柱的运动稳定下来，然后圆柱分别以 0.25m/s 和 0.75m/s 两种速度在纵向 x 方向进行匀速直线运动，外部波浪环境为聚焦波。

在数值模拟过程中，不需要圆柱先运动一段距离以获得稳定速度，所以为了降低计算成本和过长的计算域引起网格耗散问题，对物理试验的进行了合理简化，构建了数值水池，在圆柱运动速度为 0.25m/s 时，数值水池参数为：高为 2m，水深为 0.7m，长为 40m，宽为 2.2m。在数值水池的左端入口处为造波边界，通过输入目标波的波形参数形成聚焦波，右端出口处设置了消波区，长为 5m，用来进行聚焦波的消波，防止波浪反射对计算结果造成影响。模型圆柱半径为 0.22m，高为 1.055m。数值水池示意图如图 3-1 所示，圆柱以 0.25m/s 速度进行运动时，设置了 0.5s 的加速时间，考虑到要使圆柱在聚焦波的聚焦时间到达聚焦位置，所以圆柱的初始位置与造波边界的距离为 32.4375m，同样的方法用于配置以 0.75m/s 速度运动的圆柱与聚焦波相互作用的数值水池。由图中可以看出，在水池的不同位置设置了七个浪高仪用于监测数值水池不同位置的波面升高情况，浪高仪的设置同物理模型试验设置一致。

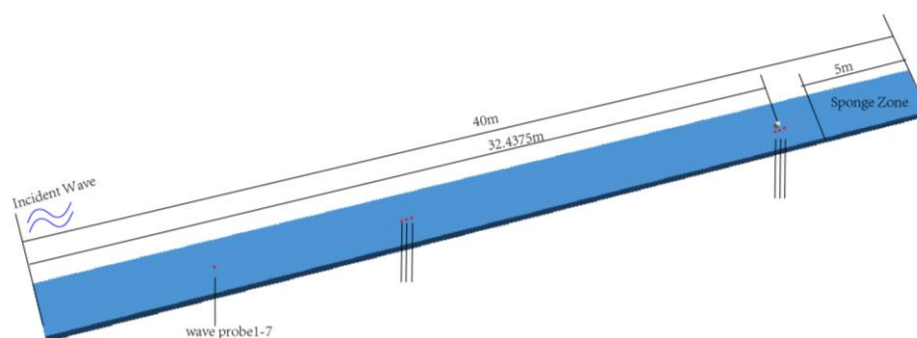


图 3- 1 数值水池示意图

Fig.3- 1 Schematic for numerical wave tank

在圆柱表面布置了 8 个压力传感器用来监测圆柱表面不同高度和迎浪角的压力值，压力传感器的布置如图 3-2 所示，位置的具体信息如表 3-1 所示。PP5 在自由面以上 0.115m，用来监测波浪爬升会对圆柱造成的冲击力，PP4 在自由表面附近，PP1、PP2、PP3 分别在水下的 0.285m、0.185m 和 0.085m，均设置在圆柱的正前方，迎浪方向；PP6、PP7 和 PP8 与 PP3 在同一垂向位置，同在水下 0.085m，分别位于与迎浪方向有 20° 夹角的位置、圆柱的侧面（与迎浪方向有 90° 夹角位置）以及圆柱的背面（与迎浪方向有 180° 夹角位置），用来监测圆柱表面不同位置处由于聚焦波作用和圆柱运动作用导致的圆柱表面压力的区别。

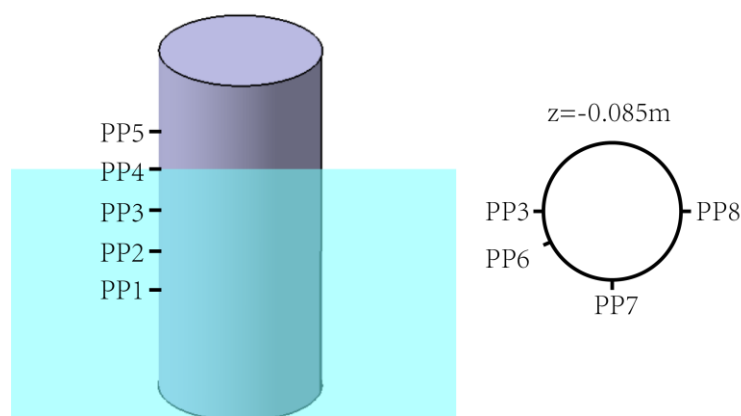


图 3- 2 压力传感器示意图

Fig.3- 2 Schematic for position of pressure probes

表 3-1 圆柱表面压力传感器分布表

Table 3-1 Position of pressure probes on the cylinder

压力传感器	垂向距离 z (m) (水平面 $z=0\text{m}$)	角度 α ($^\circ$) (迎浪方向 $\alpha=0^\circ$)
PP1	-0.285	0
PP2	-0.185	0
PP3	-0.085	0
PP4	0.015	0
PP5	0.115	0
PP6	-0.085	20
PP7	-0.085	90
PP8	-0.085	180

在数值水池布置了四个固定浪高仪来监测四个位置点的波面升高情况，浪高仪均位于数值水池的中心线上，在距离造波边界的不同位置处，用来监测数值水池的波面变化，如表 3-2 所示。在圆柱周围布置了十个跟随圆柱一起运动的浪高仪来监测圆柱周围的波面升高情况以及沿圆柱表面的波浪爬升情况，如表 3-3 所示，其中 WP5、WP6、WP7 与物理试验设置一致，距离圆柱中心有 0.26m 的横向距离，并且分别位于圆柱的前中后方向，WP5 与圆柱的中心在同一条轴线上，WP6 位于圆柱前方 0.57m，WP7 位于圆柱后方 0.705m；WPA-WPG 是本文为了研究由于聚焦波沿圆柱波浪爬升导致的距离圆柱前后不同距离的波面升高情况，布置如图 3-3 所示，负值代表在圆柱的前方，圆柱正前方为来浪方向，如浪高仪 WPA 位于圆柱前 0.1101m 处，处于圆柱中心轴线上。

表 3-2 固定浪高仪分布表

Table 3-2 Position of fixed wave probes

浪高仪	与造波板的纵向距离 x (m)	与圆柱中心的横向距离 y (m)
WP1	4.975	0
WP2	13.928	0
WP3	14.178	0
WP4	14.428	0

表 3-3 运动浪高仪分布表
Table 3-3 Position of moving wave probes

浪高仪	与圆柱中心的纵向距离 x (m)	与圆柱中心的横向距离 y (m)
WP5	0	0.26
WP6	-0.57	0.26
WP7	0.705	0.26
WP A	-0.1101	0
WP B	-0.132	0
WP C	-0.143	0
WP D	-0.176	0
WP E	-0.22	0
WP F	0.1101	0
WP G	-0.1101	0.26

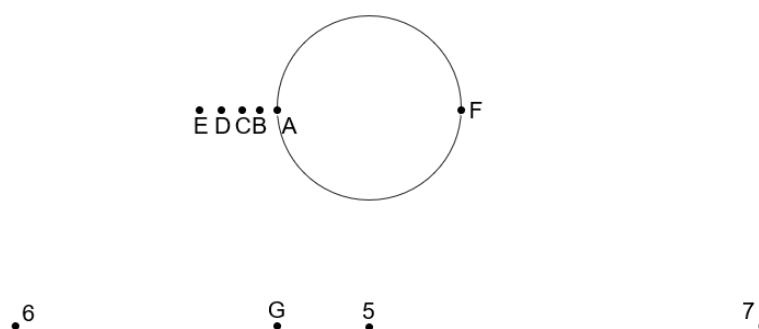


图 3-3 运动浪高仪布置图
Fig.3- 3 Distribution of moving wave probes

3.1.2 网格划分

本章工况的特点是数值水池纵横比大, 在 20 倍左右, 圆柱纵向运动范围较大, 将近数值水池纵向距离的 1/4, 如果采用动网格实现圆柱的运动, 因为圆柱大幅度运动会造成网格的大幅度的拉扯变形, 导致计算结果发散。为了保证数值计算的稳定性, 选用了重叠网格, 分别采用了一套运动圆柱的网格和一套背景网格, 相比于动网格, 两套独立网格之间的无限制相对运动不会造成网格的过度变形进而引起的数值计算发散的问题。

本章背景网格的划分是通过 OpenFOAM 自带的 blockMesh 生成的, 为了保证

聚焦波的生成和自由面的捕捉，需要对自由面附近进行网格的加密，自由面附近的网格大小为 $0.035\text{m} \times 0.037\text{m} \times 0.005\text{m}$ 。运动圆柱的网格则通过 OpenFOAM 自带的 blockMesh 和 snappyHexMesh 来生成，blockMesh 形成了基础网格，圆柱模型特征边的提取和边界层的加密通过 snappyHexMesh 实现。为了保障两套网格可以进行良好的数据传递，对应位置的两套网格大小比例应在 1 左右，整套网格数量为 638 万，计算网格如图 3-4 所示。

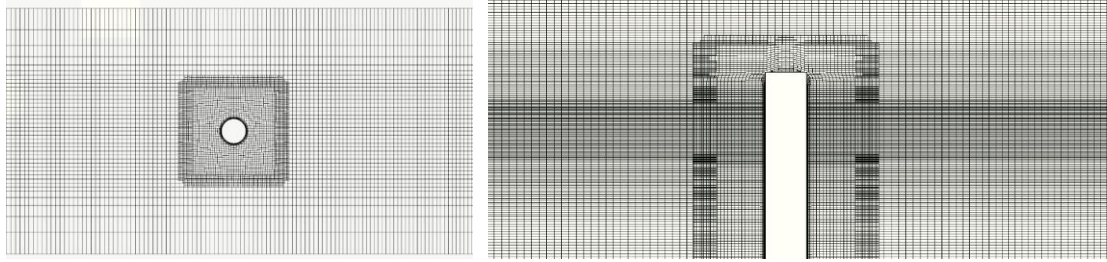


图 3-4 计算网格
Fig.3- 4 Mesh

3.1.3 聚焦波的生成和收敛性验证

本章数值水池的波浪环境为单向聚焦波，该聚焦波由 32 个成分波组成，组成波的频率最小值 $f_1 = 0.34\text{Hz}$ ，最大值为 $f_{\max} = 1.02\text{Hz}$ ，振幅增长参数 $G_a = 0.002$ 。聚焦波的聚焦时间为 38s，聚焦位置为 23m。使用相速度法实现聚焦波的聚焦，波谱函数采用 CWS 谱，聚焦波的生成方法详见 2.2.2 节。

为了保证数值模拟的准确性，对目标聚焦波进行了网格收敛验证，划分了三种不同类型的网格，分别是在一个聚焦波高范围内有 10 个网格的粗糙网格，在一个聚焦波高范围内有 20 个网格的中等网格，和在一个聚焦波高范围内有 40 个网格的精细网格，网格数量由表 3-4 所示，在计算过程中，时间步长选取为 0.002s。在物理模型试验中，由于 WP1 的位置远离运动圆柱，因此可以认为 WP1 基本上不受圆柱运动的影响，故将空场造波的数值模拟结果与物理模型试验的 WP1 的数据进行了对比。

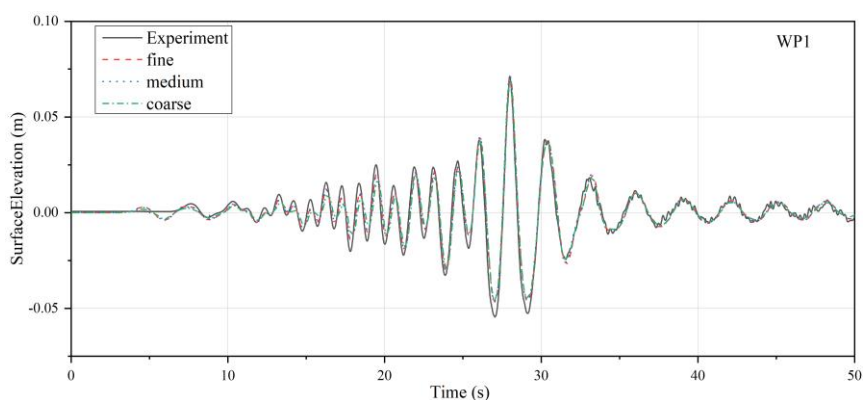
这三种网格下的波面升高随时间的变化曲线和物理试验结果对比如图 3-5 所示。从图 3-5 中可以看出，在聚焦位置之后，通过数值方法模拟的聚焦波的波形和通过物理试验生成的聚焦波的波形相差不大，与物理模型试验结果吻合良好。在聚焦位置之前，使用数值方法生成和演化的聚焦波的波峰值略小于实验值，尤其是在粗网格中，中细网格的结果差别不大，此误差可能是由于物理模型试验造

波方法与数值模拟造波方法不同而引起的。

表 3-4 网格数量表

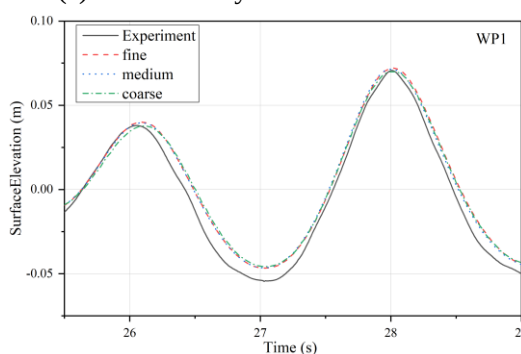
Table 3-4 Table of grids numbers

	粗糙	中等	精细
网格数量	37350	149400	597600



(a) 波高时历曲线对比图

(a) Time history of surface elevation



(b) 局部放大的波高时历曲线对比图

(b) Partial enlarged view of time history of surface elevation

图 3-5 不同网格下的波高时历曲线对比图

Fig.3- 5 Time history of surface elevation using different meshes

3.2 运动圆柱与聚焦波相互作用的数值模拟分析

3.2.1 聚焦波沿圆柱的波浪爬升分析

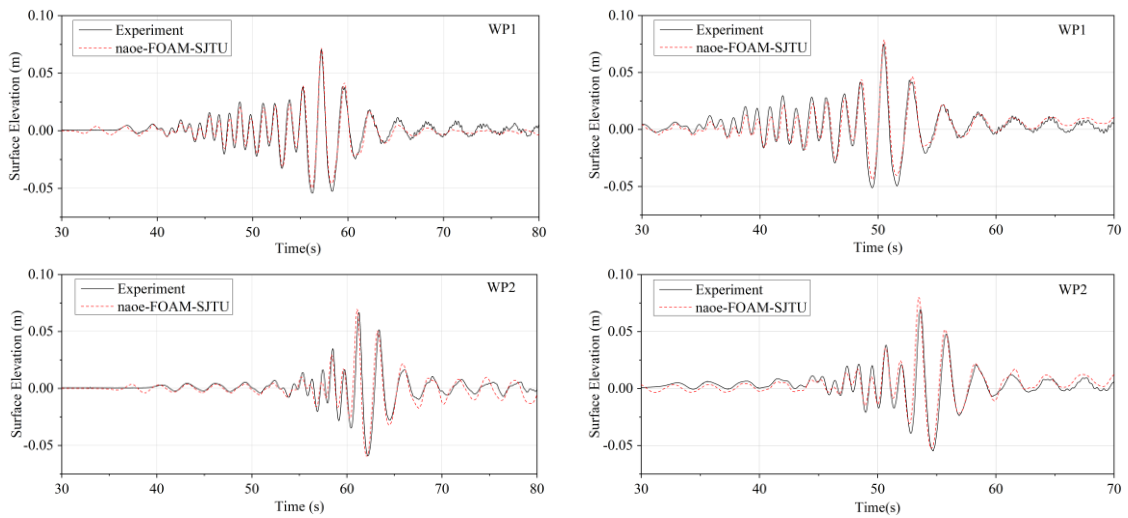
这部分对圆柱附近波面情况以及聚焦波沿圆柱的波浪爬升情况进行了分析讨论，并将圆柱附近的波面升高情况与物理试验进行了对比，验证了实验室内求解器的可行性与准确性。本章节进行了圆柱运动速度分别为 0.25m/s 和 0.75m/s 两

种运动速度下与聚焦波相互作用的数值模拟。

从图 3-6(a)-(b)固定浪高仪的波面升高值随时间变化的对比图可以看出，通过数值方法模拟得到的计算域不同位置的波面升高值结果与物理实验结果吻合良好。相比于聚焦时间之前的波形，聚焦时间之后的波形结果与物理试验结果更一致，这可能是由于聚焦波的产生方式不同所致。

从图 3-6 中我们可以看出，固定浪高仪的波高时历曲线中，除了最明显的聚焦波的最大波峰之外，最大波峰的右侧波的波峰也随着聚焦波的演化逐渐变大，从 WP1-WP3，右侧波峰是逐渐变大的，而左侧波峰是逐渐变小的，这是由于聚焦波是由不同频率的组成波的非线性扰动通过相位叠加法生成的，在聚焦波不断演化成型的过程中，成分波中的长波不断在追赶短波，随着聚焦波的传播，长波逐渐追赶上短波，相互叠加，所以聚焦波的最大波峰逐渐变大，右侧波峰也因为叠加作用而不断变大。

而到了 WP4 时，右侧波峰的波高反而下降了，且 0.75m/s 速度运动圆柱相比 0.25m/s 速度运动的圆柱下降的更多，这是因为聚焦波受到了因为圆柱运动而导致的辐射波的作用，相反方向的辐射波与聚焦波叠加，降低了右侧波的波峰值，因为圆柱运动速度更大，所以产生的辐射波也更强，叠加效应也更强，所以右侧波的波峰值下降的也相对更大。



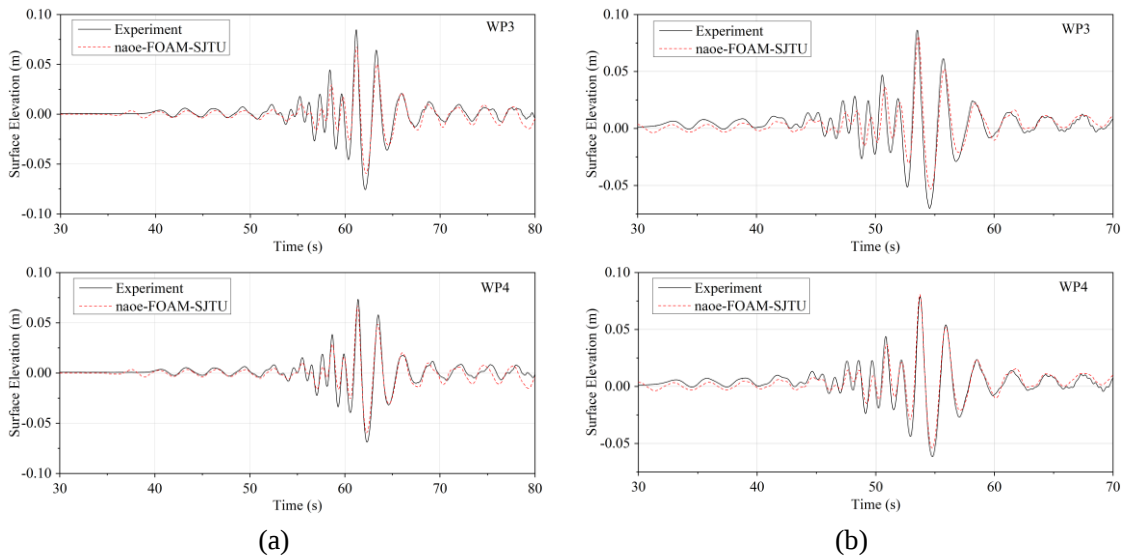


图 3-6 固定浪高仪的波高时历曲线对比图 (a)0.25m/s (b)0.75m/s
Fig.3- 6 Time history of surface elevation of fixed wave probes (a) 0.25m/s (b) 0.75m/s

与图 3-6 所展示的固定位置的浪高仪不同，图 3-7(a)-(b)展示了圆柱两种运动速度下运动浪高仪的波高时历曲线，由图 3-7 可以看出，naoe-FOAM-SJTU 求解器得出的圆柱附近流场的波面升高值与物理试验值有一些误差，符合的并不如固定的浪高仪符合的那么好，这些误差产生的原因首先可能是因为采用了重叠网格的方法，WP5-7 位于网格的重叠区域中，可能会因为重叠网格的插值造成一些数值误差，并且重叠网格的插值会对流场产生影响；其次因为浪高仪是跟着圆柱一起运动的，而数值模拟设置的圆柱运动是通过直接给定了圆柱的运动速度，这个设置相比于输入物理试验中圆柱的运动时历会带来与物理试验中圆柱运动速度的差别，进而也会导致浪高仪运动速度的差别，进而可能会导致因为浪高仪测波点的偏差而引起的误差。

可以从 3-7 (a)(b)两组图的对比看出，(a)组图的最大波峰要明显高于(b)组图的最大波峰，这就是因为圆柱反向的运动速度不同带来的差别，(b)组图中圆柱的运动速度要高于(a)组图，由于圆柱运动产生的反方向的辐射波也更强，与原聚焦波叠加之后对聚焦波的削弱也更强，同样的削弱作用也反映在了聚焦波最大波右侧波的波峰上，这种削弱作用对左侧波峰的作用较小。对比三个浪高仪的波高时历曲线，可以发现，与圆柱中心处于同一轴线的浪高仪 WP5 的最大波峰的波高值是最大的，处于圆柱前方的浪高仪 WP6 和处于圆柱后方的浪高仪 WP7 处最大波峰的波高值都要略小于 WP5，是因为聚焦波的聚焦位置在聚焦时间时正好位于圆柱中心的轴线上。

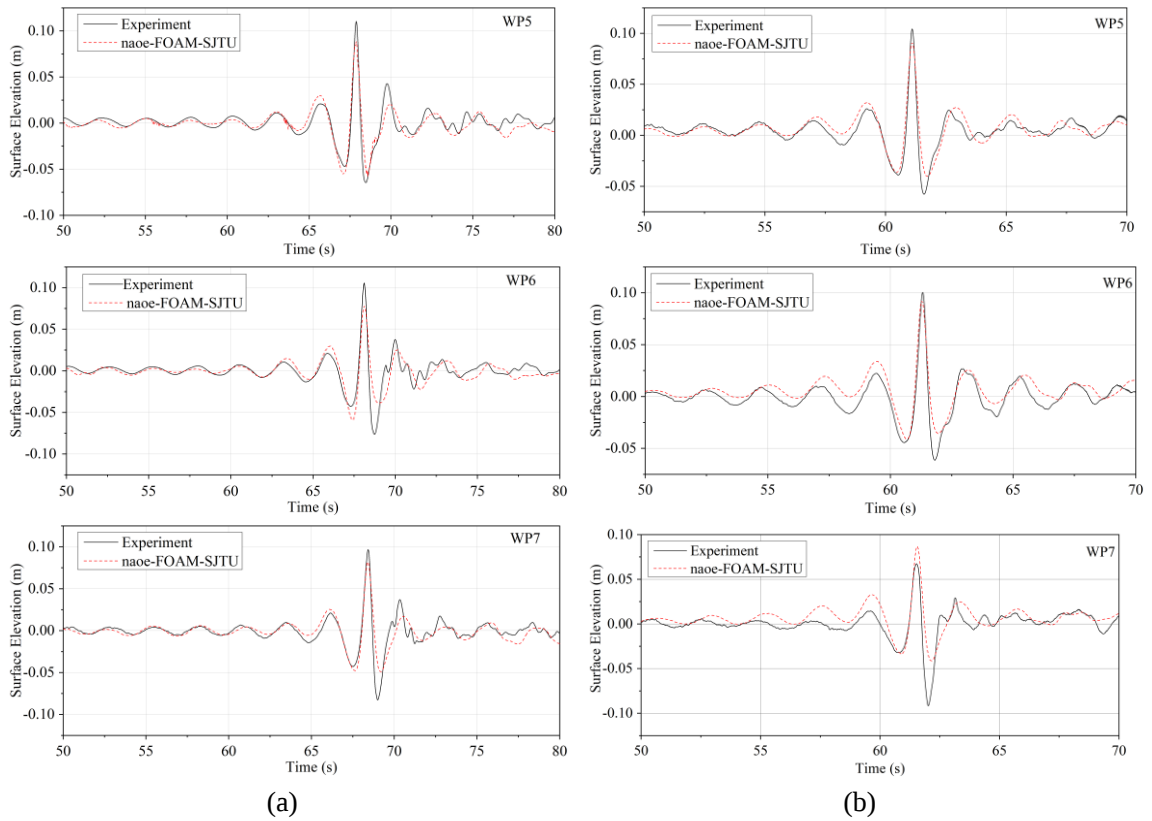


图 3-7 运动浪高仪的波高时历曲线对比图 (a)0.25m/s (b)0.75m/s
Fig.3-7 Time history of surface elevation of moving wave probes (a)0.25m/s (b)0.75m/s

为了探究圆柱近壁面的波浪爬升情况，在距离圆柱近壁面的前侧的 0.0001 、 $0.2R$ 、 $0.4R$ 、 $0.6R$ 、 $0.8R$ 及 R 分别设置了跟随圆柱一同运动的浪高仪 WPA-WPE，在圆柱的侧面 0.0001 处设置了跟随圆柱一同运动的浪高仪 WPG，在圆柱的背面 0.0001 处设置了跟随圆柱一同运动的浪高仪 WPF，圆柱近壁面的波浪爬升情况如图 3-8(a)-(f)所示。如图(a)、(b)所示，距离圆柱壁面越近，波浪爬升越高，随着浪高仪与圆柱壁面距离的增加，波面高度也随之下落，图(b)相比于图(a)显示出了更多的扰动，因为(b)组图的圆柱运动速度要大于(a)组图，圆柱周围的非线性扰动更强，使得圆柱近壁面的波面扰动更明显。

如图(c)-(f)所示，圆柱侧面和背面的波面是要显著低于圆柱迎浪面的波面高度，圆柱迎浪面的波浪爬升强度最大，波面提升最大。从图(b)(d)(e)可以看出， 0.75m/s 速度运动的圆柱在圆柱迎浪面的近壁面 WPA 处有一个明显的整体波面抬升的现象。且有一个很有意思的现象是， 0.75m/s 速度运动圆柱的波面爬升高度是要普遍高于 0.25m/s 速度运动圆柱的波面爬升高度，这与图 3-7 中的现象刚好相反，说明圆柱较大的运动速度的情况下与聚焦波正面作用，激起了波浪更大的爬升，

而图 3-7 是展示的距离圆柱有一段距离的流场的现象，这段流场更多的是圆柱运动产生的辐射波的影响。这也说明，海洋结构物更大的运动幅度会导致更高的波浪爬升，结构物的危险性更大。

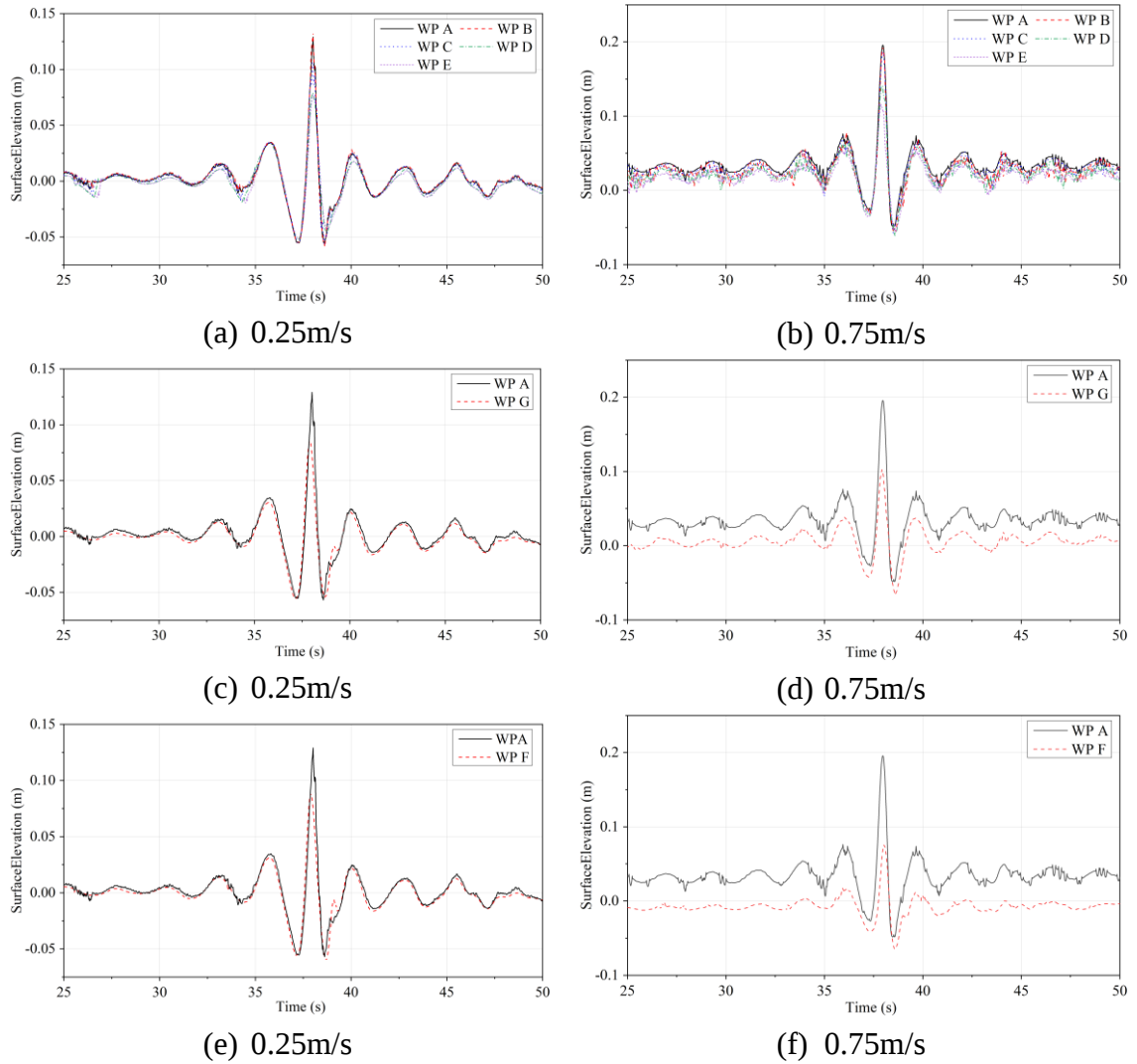


图 3-8 圆柱近壁面处的波浪爬升情况
Fig.3- 8 Wave climb near the cylinder wall

图 3-9 展示了在聚焦位置处圆柱两种运动速度下波高时历曲线对比图，由图中可以直观的看出，圆柱在 0.75m/s 的运动速度下的波面升高情况高于圆柱在 0.25m/s 运动速度下的波面升高情况，尤其在聚焦时间后，0.75m/s 的情况要明显高于 0.25m/s 的情况，圆柱运动速度更高的情况下聚焦波与圆柱的作用更为激烈。

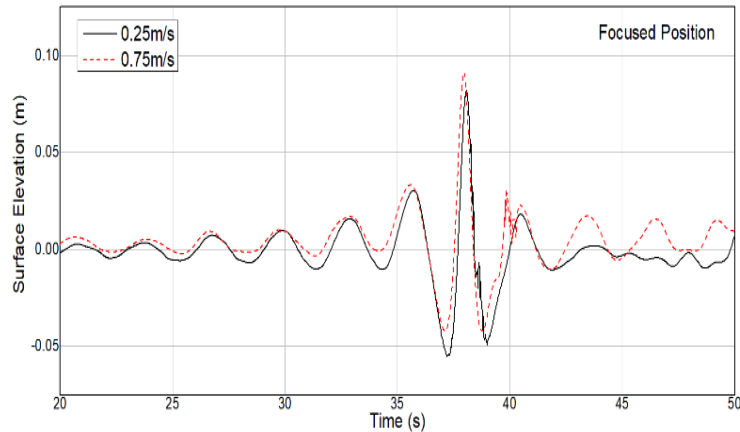
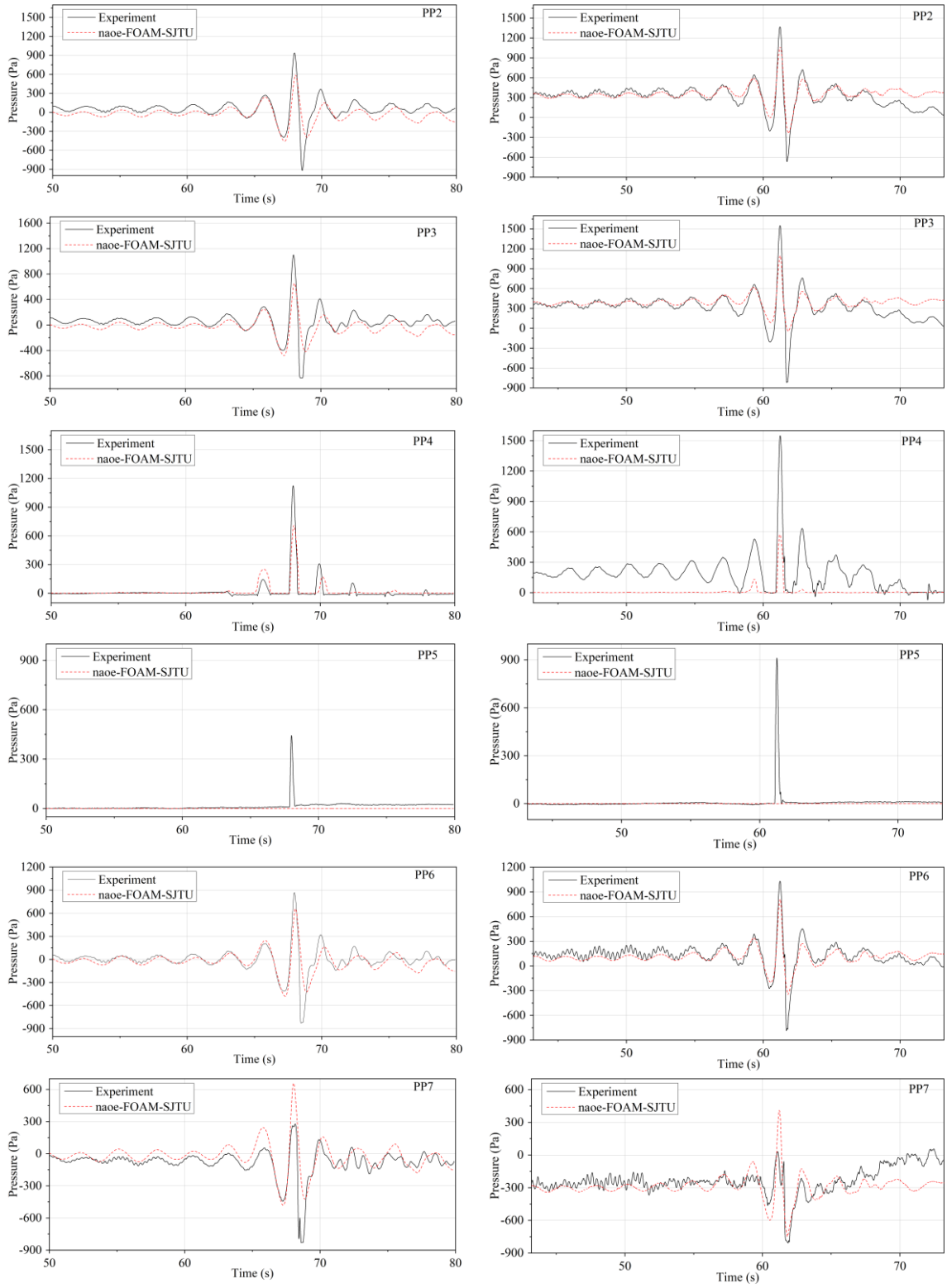


图 3-9 聚焦位置处两工况下的波高时历曲线对比图

Fig.3- 9 Comparison of time history of surface elevation of two case at the focused position

3.2.2 圆柱表面压力的分析

这部分对圆柱表面不同高度和斜度的压力进行了对比分析，从图 3-10(a)-(b) 可以看出，通过 naoe-FOAM-SJTU 求解出来的圆柱表面的压力时历曲线的趋势与实验一致，但数值模拟结果的峰值一般小于实验值。特别是在 PP5 的曲线中，在聚焦波与圆柱的相互作用过程中，在数值模拟的结果中，聚焦波沿圆柱表面的波浪爬升没有达到物理实验中波浪爬升的高度，所以导致 PP5 处测压点在数值模拟中没有测到压力突变。这一部分的误差来源，首先是因为聚焦波的演化没有达到物理试验的高度所以会导致数值模拟结果的压力值要小于物理试验值，其次是因为重叠网格的插值会导致没有办法较好地捕捉到较小的压力波动，还有是因为圆柱运动速度与物理试验的误差会导致聚焦波与运动圆柱之间的压力冲击减小。图 (a)和图(b)两组图中压力传感器 PP7 不同于其他压力传感器，该位置的数值模拟结果要大于物理试验结果，这是因为压力传感器 PP7 位于圆柱侧面迎浪角为 90° 的地方，物理试验结果一直呈负压状态，尤其是圆柱运动速度为 0.75m/s 的情况下，这是由于物理试验过程中圆柱侧面产生了明显的凹陷，但是在数值模拟过程中，明显的凹陷位置出现在圆柱侧面偏后的位置，这部分误差可能是物理试验和数值模拟过程各种对聚焦波聚焦位置设置的误差导致的。根据图(a)和(b)两组图的对比发现，在圆柱迎浪面的位置，圆柱速度为 0.75m/s 的情况下聚焦波和运动圆柱相互作用产生的压力值更大，且因为涡的脱落导致在圆柱的侧面和背面出现了负压的情况。



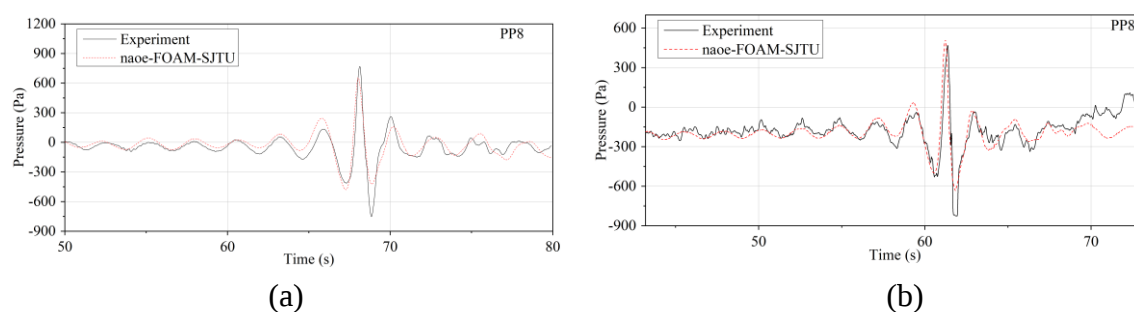


图 3- 10 圆柱表面的压力时历曲线

Fig.3- 10 Time history of pressure on the surface of the cylinder

3.2.3 自由面的波面升高和涡脱落

聚焦波在传播过程中不断演化成型，当它传播到聚焦位置时，最大波就与运动圆柱相碰发生波浪爬升的现象，图 3-11 和图 3-12 分别展示了聚焦波在聚焦时间和聚焦位置附近沿运动圆柱的波浪爬升现象以及波速云图。从图中我们可以看到聚焦波的速度是向右传播的（速度云图颜色为红色），圆柱周围的速度尤其时圆柱带来的尾流有一个向左的速度（速度云图颜色为深蓝色或蓝绿色），当聚焦波传播过程中遇到了圆柱的阻碍，就沿着圆柱表面进行波浪爬升运动。

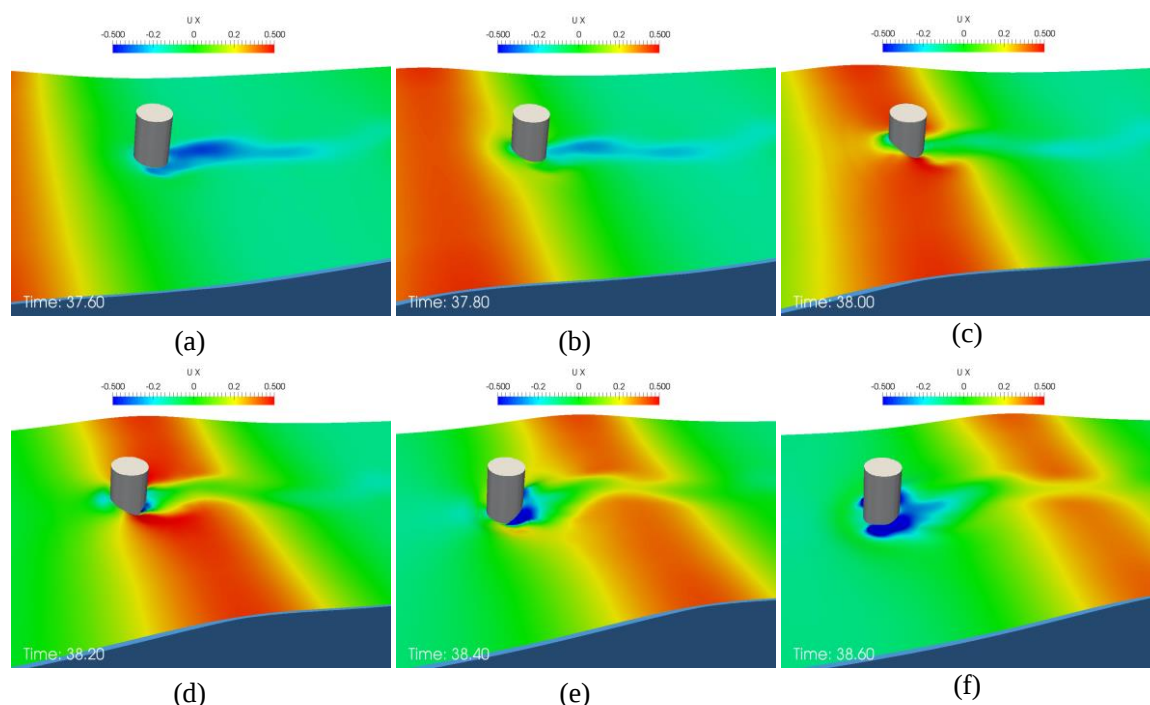


图 3- 11 0.25m/s 速度运动的圆柱周围的波浪爬升和波速云图

Fig.3- 11 Wave climb and wave velocity cloud diagram around a cylinder moving at 0.25m/s

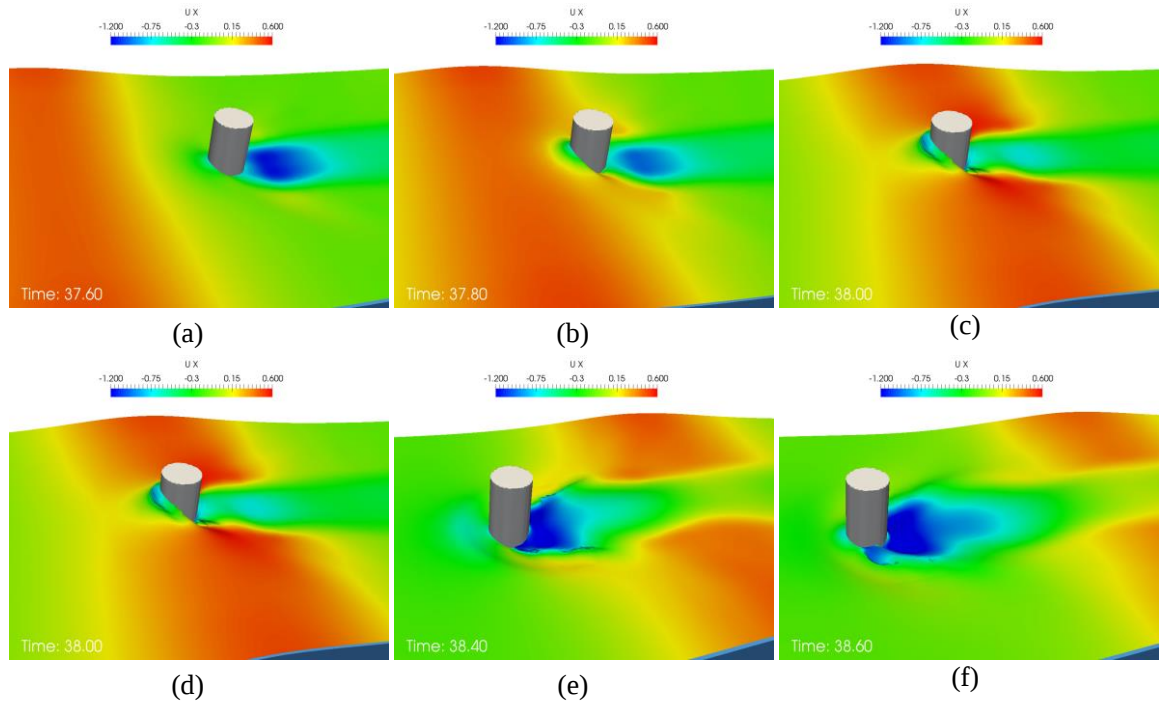


图 3- 12 0.75m/s 速度运动的圆柱周围的波浪爬升和波速云图

Fig.3- 12 Wave climb and wave velocity cloud diagram around a cylinder moving at 0.75m/s

从两组图的对比可以发现，由于 0.75m/s 速度运动的圆柱运动速度较大，对聚焦波的阻碍作用更大，其迎浪面有一个更高的波浪爬升，并且相比于 0.25m/s 速度运动的圆柱，其迎浪面形成了一个明显的环波围绕在圆柱的迎浪面，并可以观察到图 3-12(d)圆柱背面有一个明显的凹陷，是由于涡脱落导致的，相关涡面的云图如图 3-14 所示。

涡旋结构是流体运动的重要形式，涡量定义为流体速度矢量的旋度，沿 z 方向切面横截面的涡量的表达式为 $\omega_z = -\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$ 。在许多情况下，肉眼很难察觉到流动的涡流，但是通过 CFD 数值模拟的后处理，可以根据涡轮廓直观地表示流场涡结构。

如图 3-13 展示了 0.25m/s 速度运动的圆柱在水下 0.5m 处，圆柱周围涡脱落的过程，因为在水下 0.5m 处距离自由面较远，这部分的涡脱落基本上是由圆柱速度引起的流速导致的。图 3-14(a)-(e)展示了 0.75m/s 速度运动的圆柱在不同水深处的涡脱落图。对比图 3-13 和图 3-14(e)，图 3-14(e)因为圆柱运动速度更大，由圆柱运动引起的流速也更大，所以涡的强度也更大，涡旋更明显，并且涡脱落的速度也更快。

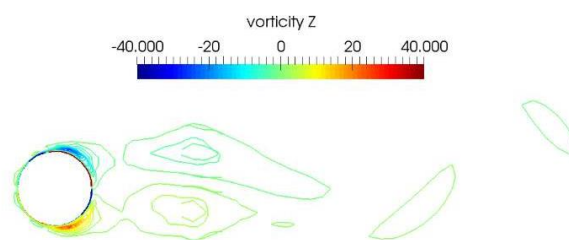
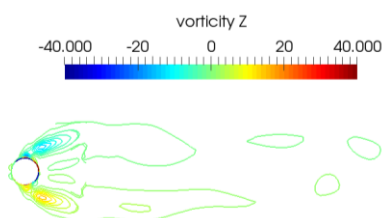
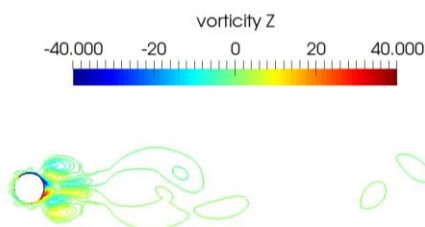


图 3- 13 0.25m/s 速度运动的圆柱在 $z=-0.5\text{m}$ 处的涡脱落
Fig.3- 13 Vortex shedding around a cylinder moving at 0.25m/s at $z=-0.5\text{m}$

图 3-14(a)-(e)展示了 0.75m/s 速度运动的圆柱在水下不同水深处周围涡脱落的现象。因为离自由表面的距离不同，自由面对涡脱落的影响不同，所以涡脱落的现象也不同。对比图 3-14(a)-(e)，图 3-14(a) 位于水下 0.085m 处的这部分的横截面靠近自由面，所以涡的脱落不仅受圆柱运动速度的影响，也受聚焦波以及聚焦波和圆柱相互作用导致的自由面的变化的影响；随着水深的增加，自由面的影响逐渐削弱，图 3-14(e)位于水下 0.5m 处，基本不会受到自由面的影响。结合图 3-12 圆柱周围的波浪爬升的展示图，可以发现自由表面附近的漩涡脱落与自由面的波面高度密切相关，且涡流脱落的位置通常发生在圆柱体背面的波面高度较低处，因为分离区中的压力相对较低。



(a) $z=-0.085\text{m}$



(b) $z=-0.2\text{m}$

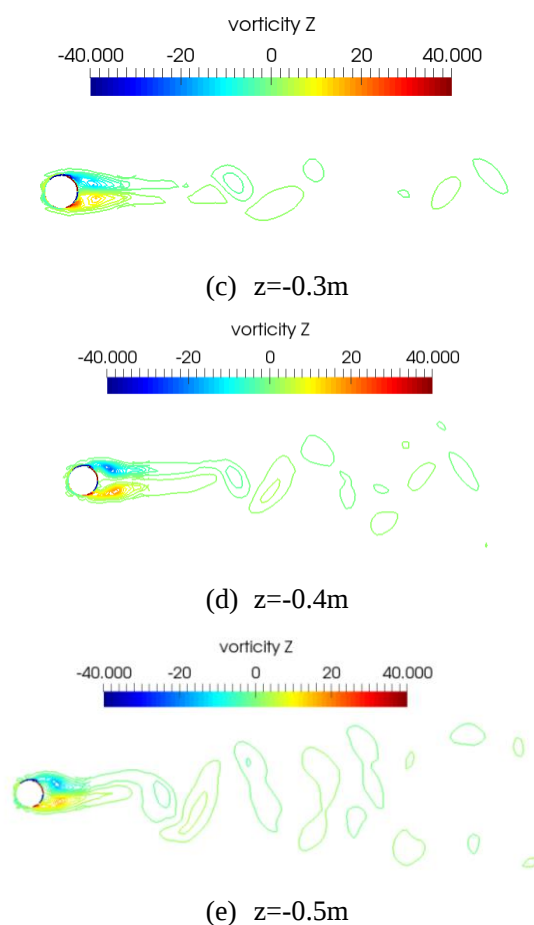


图 3- 14 0.75m/s 速度运动的圆柱在不同水深处的涡脱落

Fig.3- 14 Vortex shedding around a cylinder moving at 0.75m/s at different depth

3.3 本章小结

本文通过 naoe-FOAM-SJTU 求解器进行了聚焦波下的运动圆柱波浪爬升的数值模拟，并与物理模型试验结果进行了对比分析，结果发现计算域不同位置处浪高仪测得的波面升高值与物理模型试验值的结果吻合的较好，运动圆柱前中后的浪高仪测得的波面升高值比模型试验结果小，这是由于数值方法中采用了重叠网格额外引入了插值误差，并且因为数值模拟方法和物理实验中造波方法的不同以及运动圆柱运动速度设置可能会产生误差；数值模拟结果中圆柱表面的压力值要明显小于物理模型试验的结果，首先是因为采用数值模拟方法的结果中聚焦波在圆柱表面的波面爬升要比物理模型试验要小，这就导致了很大一部分的误差，另外还有重叠网格方法插值造成的误差，以及圆柱运动速度的误差引起的与聚焦波相互作用时表面压力的减小。

此外，本文分析了圆柱表面波浪爬升现象，发现圆柱运动速度较大的情况下在距离圆柱 0.26m 处的波面要比圆柱运动速度较小的要低，这是因为在这个范围内流场主要受因为圆柱运动引起的反向辐射波的作用，反向辐射波与正向传播的聚焦波叠加后，削弱了聚焦波的波峰；而圆柱运动速度较大的情况下在圆柱表面的波浪爬升要高于圆柱运动速度较小的情况，因为圆柱较大的运动速度会与聚焦波产生更大的砰击力，使得波浪爬升高度更高。最后分析了圆柱周围的细节流场，讨论了自由表面和涡脱落之间的联系，发现 0.75m/s 速度情况下圆柱迎浪面波浪爬升更强，圆柱背面的凹陷和涡的脱落更加明显。

第四章 半潜式平台在规则波下的波浪爬升数值模拟

在波浪与平台相互作用时，波浪会沿平台立柱爬升，甚至能爬升至平台下甲板的情况，严重影响平台安全。本文应用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对固定的半潜式平台在规则波下的波浪爬升现象进行了数值模拟，采用边界输入法进行造波，并且在数值水池末端设置松弛区进行消波。本文重点聚焦在由于入射波浪和平台相互作用导致的波浪爬升，以及入射波和反射波的叠加造成的波面非线性扰动特性，对固定平台的波浪爬升和气隙响应进行了数值模拟，与规则波下固定平台的波浪爬升和气隙响应的物理模型试验结果进行了对比分析，并考察了固定平台立柱间距以及波浪浪向对波浪爬升的影响。

4.1 模型与试验

4.1.1 模型与数值水池的构建

本文进行了深水半潜式平台在规则波下的波浪爬升数值模拟，选取的模型参考了文献^[38, 53]中的半潜式平台，平台主要有甲板，四根立柱，两个浮筒组成，平台沿中纵剖面以及中横剖面对称。平台立柱长宽高为 21cm*21cm*32.7cm，横截面带有 6cm 的导角。半潜式平台模型参数如下表 4-1 所示。水池设置 z 方向范围为 -3m 至 1m，水深为 3m，x 方向范围为 -6m 至 6m，y 方向范围为 -2m 至 2m。

表 4-1 半潜式平台模型参数
Table 4-1 Main parameters of semi-submersible platform model

参数	尺寸(m)
总长	1.54
总宽	1.33
立柱长*宽*高	0.21*0.21*0.327
浮筒长*宽*高	1.36*0.24*0.13
初始吃水	0.26
初始气隙	0.197

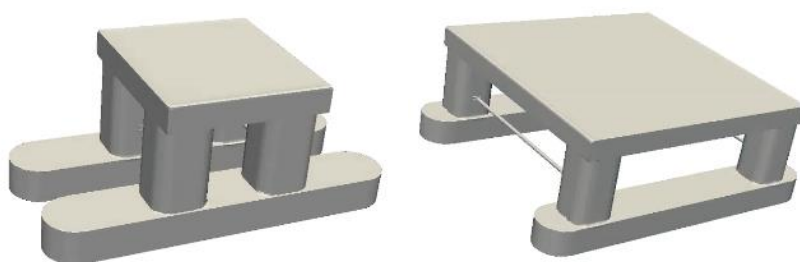


图 4-1 半潜式平台计算模型

Fig.4- 1 Computational models of semi-submersible platform

表 4-2 计算算例

Table 4- 2 Cases of numerical simulation

Case	立柱间距	浪向
Case 1	0.45m	0°
Case 2	1.1m	0°
Case 3	1.1m	90°

为了监测平台立柱附近的波浪爬升状况，在立柱周围设置了浪高仪，在迎着波浪来流方向的前立柱的前方设置了 gauge_A1, gauge_A2, gauge_A3, gauge_A4 四个浪高仪，距离立柱分别为 $0.00625R$, $0.2R$, $0.6R$, $1.0R$ ，其中 R 为立柱的等效半径。在后立柱的前方同样设置了四个浪高仪 gauge_I1, gauge_I2, gauge_I3, gauge_I4，与立柱间的距离同前立柱设置。另外设有多根浪高仪分别位于平台的中心 gauge_1，下浮体的中心 gauge_2，前立柱的侧面 gauge_B1、gauge_D1、gauge_C1、gauge_G1，后立柱的侧面 gauge_F1、gauge_H1，前立柱的背面 gauge_E1 等用来测量相应的气隙分布，浪高仪设置如下图 4-2 所示。

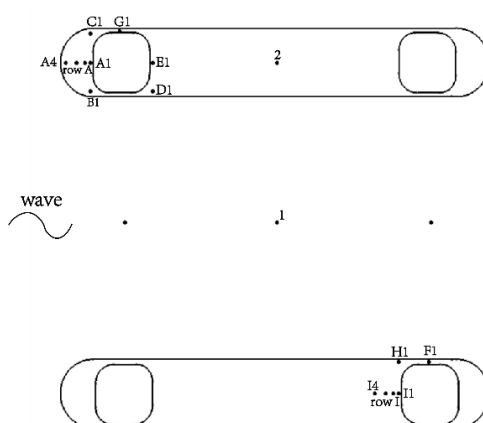


图 4-2 浪高仪位置图

Fig.4- 2 Distributions of wave gauges

4.1.2 网格划分

计算域网格划分如下图 4-3 所示。网格划分方式选取上文网格收敛性验证中的中等网格，自由面处的网格大小约为 $0.015\text{m} \times 0.015\text{m} \times 0.005\text{m}$ ，总网格量为 682 万。

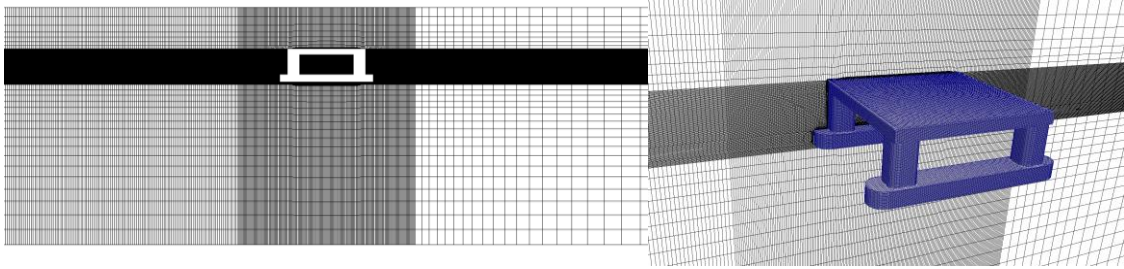


图 4-3 计算域网格划分
Fig.4- 3 Computational domain meshing

4.1.3 波浪的生成和收敛性验证

水池设置 x 方向为 -6m 至 6m ， y 方向为 -2m 至 2m ， z 方向 -3m 至 1m ，水深为 3m ，示意图如图 4-4 所示。为后续保证计算的数值收敛，需对空场造波进行数值收敛性验证。本文平台作用的规则波参数为：波高 $H = 0.104\text{m}$ ，周期 $T = 1\text{s}$ ，波陡参数 $KA = 0.21$ ，波浪散射参数 $KR = 0.42$ ，其中， $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数， A 为入射波幅， λ 为入射波长， R 为立柱的等效半径。

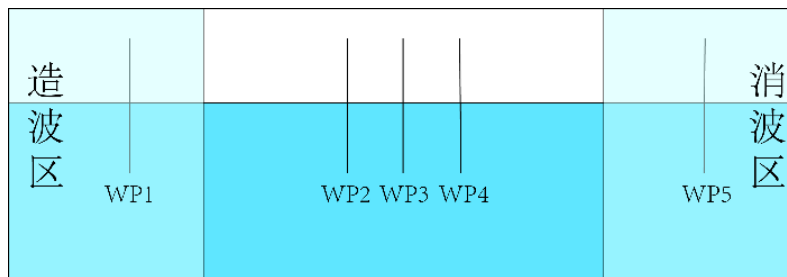


图 4-4 数值水池示意图
Fig.4- 4 Schematic for numerical wave tank

首先选取了两种不同的时间离散格式，Euler 和 CrankNicholson 0.95。网格划分同为一个波高范围内 20 个网格，一个波长范围内 50 个网格，时间步选择为 0.0025。两种不同的时间离散格式得到的规则波波高时历曲线如图 4-5(a)所示。

由图 4-5(a)可以看出，更高精度的 Crank Nicholson0.95 格式相较于 Euler 格式得到的波高更贴合设置所需的波高，衰减明显减小。随后在 Crank Nicholson0.95 的时间离散格式下进行了网格收敛验证，选取了不同的网格划分方式，下表 4-3

中给出了不同网格划分方式下自由面附近的网格尺寸，粗糙和中等网格选取的时间步为 0.0025，精细网格下为保证库朗数 $Courant = \frac{u\Delta t}{\Delta x} < 1$ 始终成立，保证计算的稳定性，选取的时间步为 0.001。

三种不同的网格得到的规则波波高时历曲线与理论波形的对比如图 4-6(b)所示。由图中可以看出，计算得到的规则波波峰相比理论波形要略尖瘦，波谷相比理论波形平坦。粗糙网格中的规则波波高是 0.0938m，衰减约为 9.9%，中等网格演化的规则波波高是 0.101m，衰减为 3.4%，精细网格演化的规则波波高是 0.1028，衰减为 1.14%。结合图 4 和数据可以看出，中等网格和精细网格演化的规则波较为接近，粗糙网格演化的规则波衰减较多。在保证计算精度的情况下为节省计算资源，后续将选用中等网格来进行平台波浪爬升的数值模拟。

图 4-5(c)展示了计算域不同位置测点的波高时历曲线，其中 WP1 位于造波区，WP5 位于消波区，WP3 位于整个计算域的正中央位置，WP4 处于整个计算域靠后位置，如图 4-4 所示。由图可以看出，计算域消波区消波显著，避免了波浪反射。

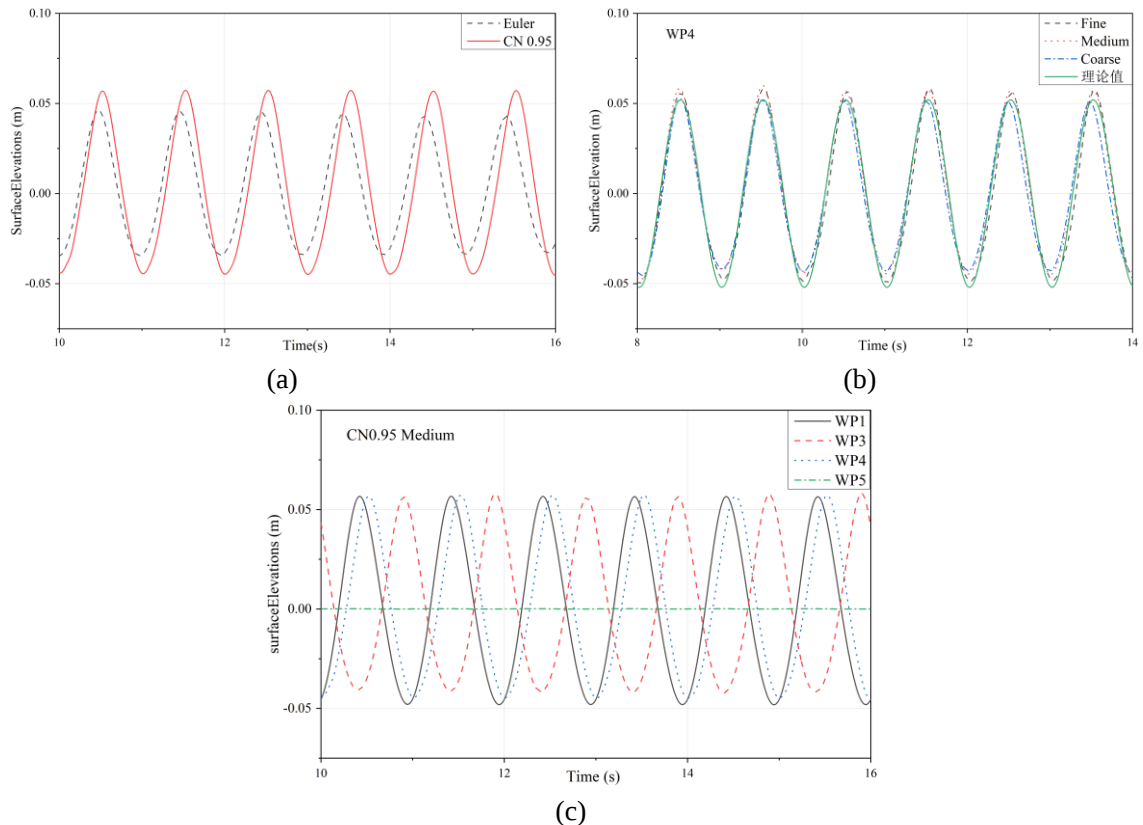


图 4-5 波高时历曲线对比图 (a)不同时间离散格式 (b) 不同网格划分方式 (c)不同测点位置
Fig.4- 5 Time history of surface elevation
(a) different time discrete formats (b) three meshing methods and theoretical wave profile (c)
different wave probes

表 4-3 网格数量表

Table 4-3 Table of grids numbers

网格划分方式	粗糙	中等	精细
网格数量	10/H, 50/ λ	20/H, 100/ λ	40/H, 200/ λ

4.2 波浪爬升和流场分析

4.2.1 立柱周围的波浪爬升分析

当波浪与半潜式平台相遇后，将沿着平台立柱爬升，并在立柱间出现波浪反射和波浪叠加等非线性现象，并且不同的立柱间距以及不同的浪向会有不同的结果，本文将通过数值模拟结果展示该现象。浪高仪采集的波面升高值均进行了无因次化处理，无因次化的波面升高值可以表示为 $\xi/(H/2)$ ，无因次化的波浪爬升程度可以表示为 $A_r/(H/2)$ ，其中， ξ 是浪高仪实测的波面高度， H 是入射波波高， A_r 是波浪爬升的最高点到静水面之间的垂向距离。

图 4-6 展示了数值模拟 case 1 与试验的对比，图中展示了前立柱迎浪向的 A4 至 A1 点波浪爬升程度，可以看出，该结果与试验算例中结果的变化趋势一致，测波点距离立柱越近，波浪爬升数值越高。但是数值模拟结果还是要略小于试验结果，这是由于选取的波浪波陡较大，并且数值模拟精度不够造成的，数值模拟与模型试验设置的测波点位置等数值误差也会导致结果的差异。

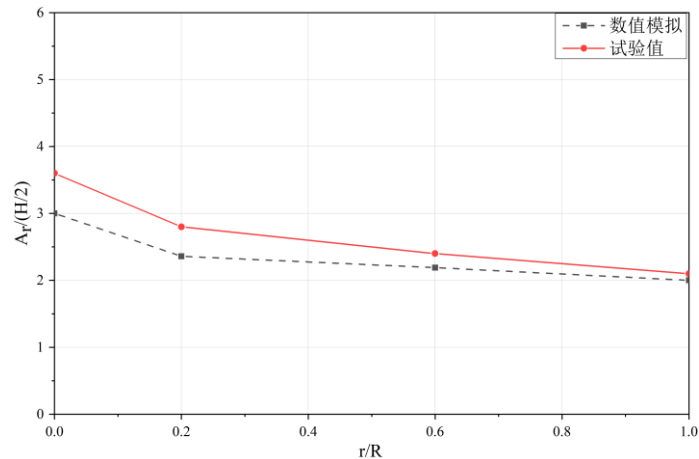


图 4-6 数值模拟结果与试验结果对比图

Fig.4-6 Comparison of numerical simulation and experiment

图 4-7(a)展示了数值模拟三种工况下前立柱迎浪向的 A4 至 A1 点波浪爬升程度的计算结果，由图可以看出，随着立柱间距的增大，波浪爬高明显下降，这是因为立柱间的波浪反射叠加的作用被削弱，而在波浪浪向为 90° 时，由于半潜

式平台的浮筒迎着来浪方向，损耗了一部分的波浪能量，使得波浪爬升比浪向为 0° 时较弱。图 4-7(b)展示了立柱间距较大的半潜式平台在迎浪条件下前立柱测波点 A4 到 A1 的无因次化后的波高时历曲线，展示了波浪爬升随时间的周期性变化，并且波峰呈现逐渐减小的趋势。当波浪靠近前立柱，波面沿着立柱表面迅速爬升；测点与立柱间距越小，波浪爬升越高，波形越来越细长，非线性特征越发显著。

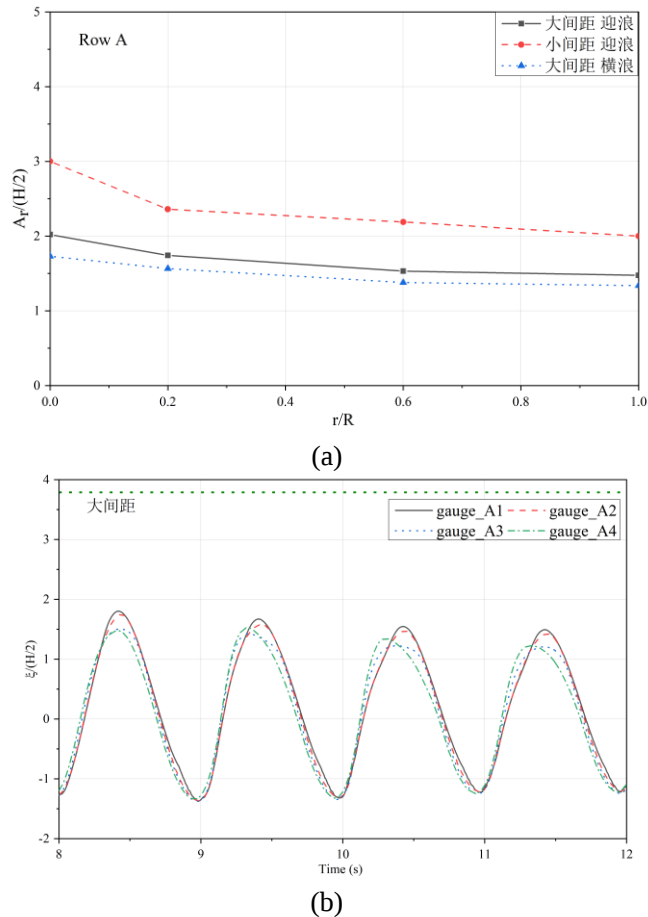


图 4-7 浪高仪组 Row A 的波面升高时历曲线

Fig.4-7 Time history curves of wave elevation around row A

图 4-8(a)展示了三种工况下后立柱附近的 I4 点至 I1 点波浪爬升峰值的变化曲线，图 4-8(b)展示了立柱间距较大的半潜式平台在迎浪条件下后立柱测波点 I4 到 I1 的无因次化后的波高时历曲线。同前立柱趋势基本一致，当波浪传播至后立柱时，波浪沿着立柱表面迅速爬升，尤其是在平台立柱间距较小的情况下，波浪爬升更为明显，波浪的非线性特征较为强烈。而在波浪浪向为 90° 时，其波浪爬升情况比浪向为 0° 时较弱。对比前、后立柱的波浪爬升特性可知，后立柱附近

的波浪爬升较为剧烈，波浪非线性特征更为显著。这是因为后立柱处于前立柱的流场影响范围内，会受到前立柱流场的干扰。

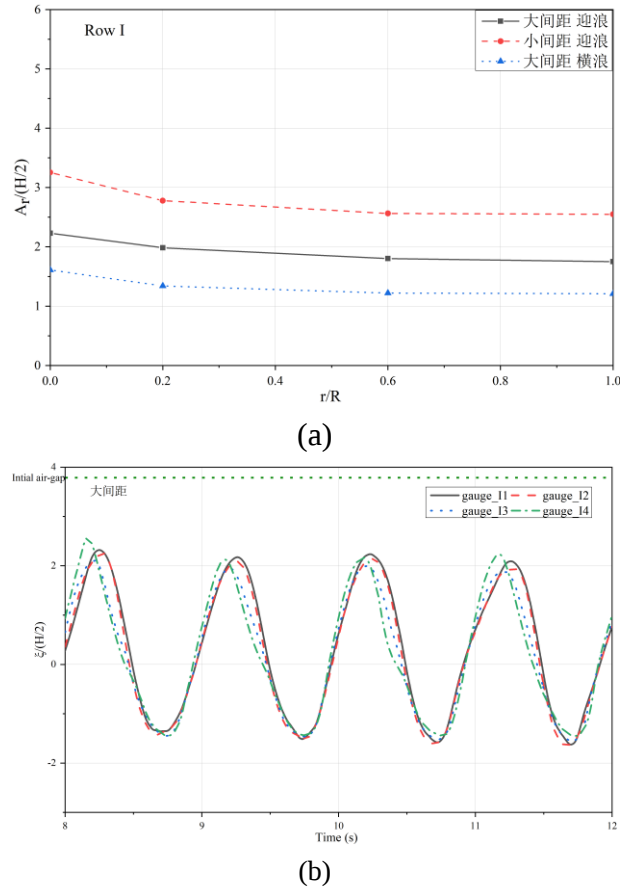


图 4-8 浪高仪组 Row I 的波浪爬升曲线
Fig.4- 8 The normalised wave elevation around row I

图 4-9(a)展现了立柱间距较大的情况下，前立柱迎浪点 gauge_A1，以及立柱内前侧点 gauge_B1、立柱内后侧点 gauge_D1 的波浪爬升时历曲线，由图可以看出，迎浪点 gauge_A1 的波浪爬升最高，前侧点 gauge_B1 处由于在导角附近，波浪爬升比中心位置稍低，后侧点 gauge_D1 处由于立柱与波浪的相互作用，出现了二次波峰，非线性性较强。图 4-9 (b)展现了立柱间距较小的情况下，前立柱迎浪方向 gauge_A1，以及立柱前外侧 gauge_C1、立柱中外侧 gauge_G1 的波面升高时历曲线，由图可以看出，迎浪方向 gauge_A1 的波浪爬升最高，相比于间距较大的情况，出现了二次波幅的情况，说明立柱间距较小的情况下，非线性特征越显著。前侧点 gauge_C1 处在导角附近，也出现了二次波幅的情形，后侧点 gauge_G1 处位于立柱的中间侧点，出现了边波回荡的情形。图 4-10 展示了平台后立柱外侧的波浪爬升分布时历曲线，由于平台侧面会出现边波回荡，故 gauge_F1 测点处出现

多个小波峰的情况，迎浪点以及前侧点 gauge_H1 位置处也出现了二次波峰的情况，后立柱的流场相比于前立柱的流场非线性更强。

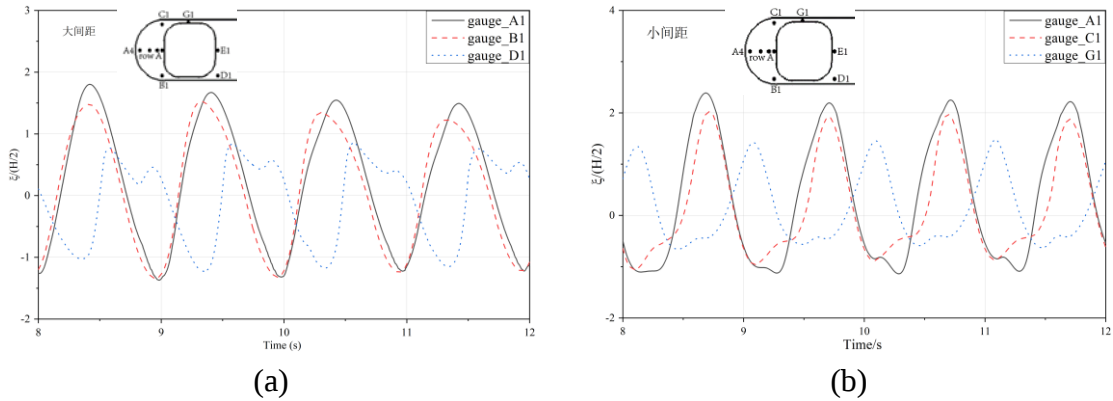


图 4-9 前立柱周围测点的爬升特性

Fig.4- 9 The normalised wave elevation around front column

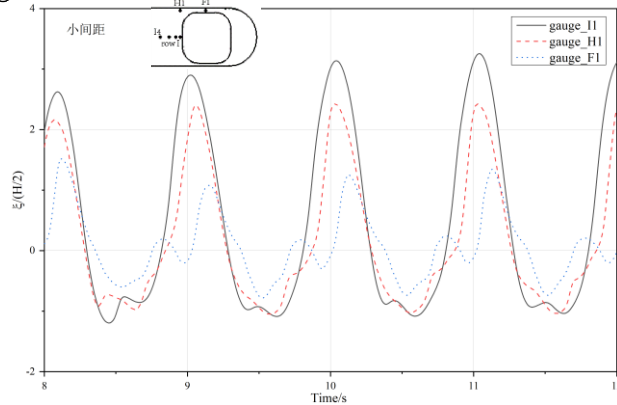


图 4-10 后立柱周围测点的爬升特性

Fig.4- 10 The normalised wave elevation around back column

4.2.2 立柱周围的流场细节分析

规则波在数值水池中传播，当遇到半潜式平台时，波浪首先沿着两个前立柱向上爬升，随后波浪继续向前传播，并沿着立柱向两侧扩散回荡，向内扩散的波浪会在两个立柱中间叠加并形成新的波峰，如图 4-11(a)所示，当立柱间距较小时，由于立柱间距较小，叠加兴起的波峰明显高于大间距的情况。

波浪继续向后传播，在前立柱周围回荡的边波向后传播，以及从两立柱中间向后传播的波浪，在立柱的背部攀升汇聚成脊状，如图 4-12 所示。如图 4-12(b)所示，在前立柱背部形成的脊状波浪继续向后传播，传播过程中与两侧的水波汇聚又形成了小波峰。如图 4-12(a)所示，由于立柱间距远小于波长，在前立柱背部形成的脊状波浪向后传播，直接沿着后立柱向上爬升，并可以看出由于立柱间距

较小，在四立柱的中央位置汇聚成了一个明显的波峰。可以看出小间距平台之间的波浪场比大间距的非线性要更显著。

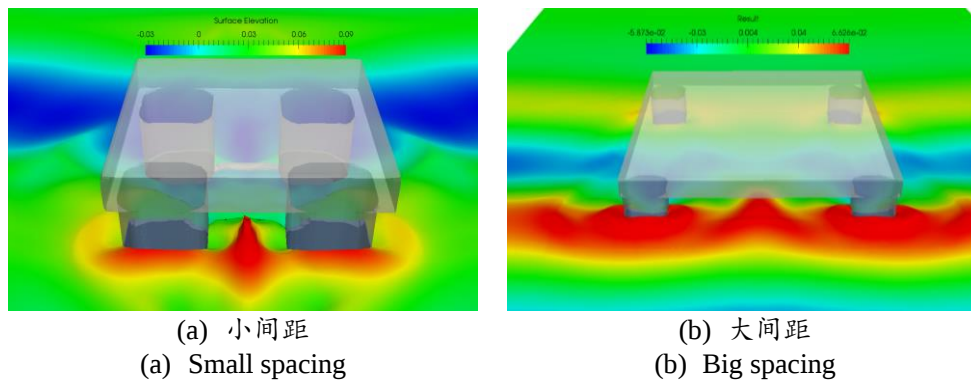


图 4-11 前立柱之间的波浪叠加云图

Fig.4-11 Wave superposition of front columns

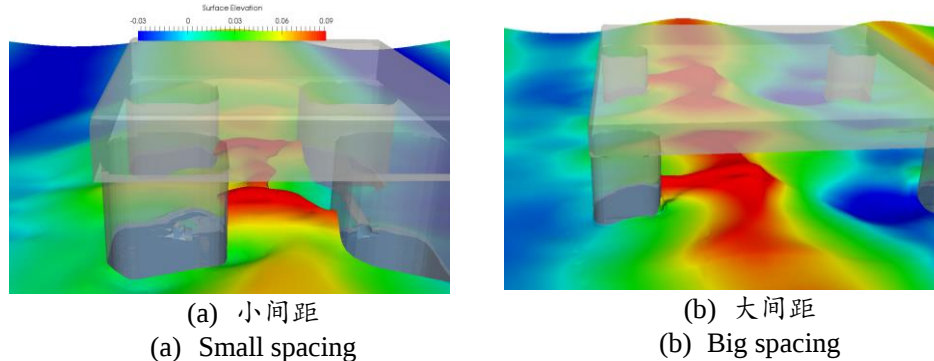


图 4-12 前立柱背面的波浪抬升

Fig.4-12 Uplift of waves on the back of the front column

规则波流经前立柱之后，前立柱尾部爬升的波浪，以及前立柱周围回荡的边波，穿越立柱中间的波浪汇集在一起继续向后传播，沿着后立柱向上爬升，与前立柱情形相似，如图 4-13 所示。

但是由于后立柱位于前立柱的流场影响范围内，波浪爬升更高。小间距平台后立柱的波浪爬升和后立柱中央形成的小波峰波高均高于大间距。由图 4-14 所示，在波浪经过平台横撑时，会产生波浪破碎的强非线性现象。

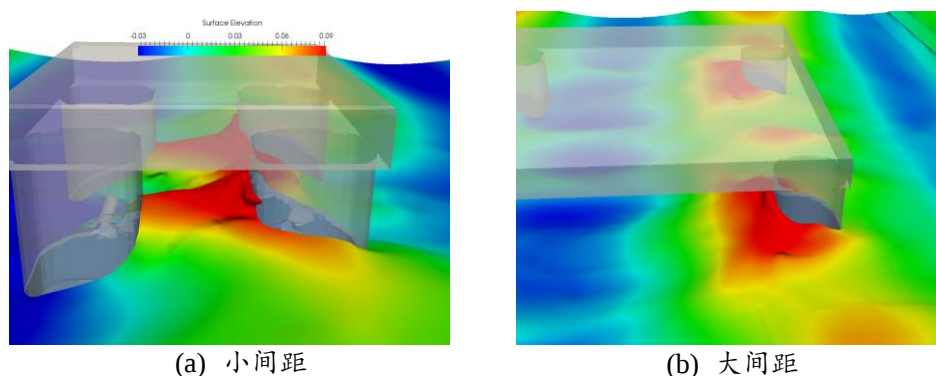


图 4-13 后立柱前的波浪爬升

Fig.4-13 Wave run-up in the front of the back column

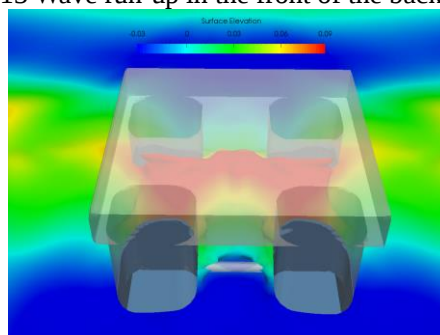


图 4-14 波浪破碎

Fig.4-14 Wave breaking

4.3 本章小结

本章基于 CFD 开源平台 OpenFOAM 中实验室内求解器 naoe-FOAM-SJTU，数值模拟了规则波与固定式半潜式平台间复杂的相互作用，揭示了波浪爬升的机理，分析了立柱间间距以及规则波浪向等因素对波浪爬升造成的影响。得出的结论如下：

- (1) 立柱周围的波高数值与变化趋势，计算与测试基本一致；
- (2) 在波浪靠近立柱向上爬升过程中，迎浪位置的测波点距离立柱越近，波浪非线性越明显；在立柱侧面的测波点可以看出由于边波回荡所产生的二次波峰的现象；
- (3) 后立柱位于前立柱的尾流流场影响区域内，现象比前立柱周围更为复杂，波浪爬升更为剧烈；
- (4) 迎浪情况下，立柱间距较小的情况下，波浪爬升现象更为显著；横浪条件下，由于浮筒的阻碍作用，波浪爬升减弱。

本文进行了半潜式平台在规则波下的波浪爬升的数值模拟研究，后期将继续

开展聚焦波下半潜式平台的波浪爬升和平台气隙问题的研究，深入探讨聚焦波参数，如聚焦波聚焦位置、波陡等对波浪爬升和平台气隙的影响。

第五章 半潜式平台在聚焦波下的波浪爬升数值模拟

聚焦波作为一种特殊的不规则波，有一个明显高于其他波峰的最大波峰，具有强烈的非线性特征，波浪能量非常集中，作用在半潜式平台时，会对平台造成很大的局部载荷，对平台造成剧烈的砰击，破坏性巨大，带来极大的安全隐患。本章将进行聚焦波下半潜式平台的波浪爬升和平台气隙的研究，进行了不同波陡和不同聚焦位置的聚焦波情况的模拟，发现了波浪爬升过程中的翻卷和破碎，讨论了聚焦波对平台下甲板的砰击和平台气隙的问题。

5.1 数值模拟模型构建

本章节采用的半潜式平台模型同第四章，针对半潜式平台的尺寸和聚焦波的波幅进行了网格优化，整体网格背景是通过 OpenFOAM 自带的 blockMesh 进行划分，在自由面附近应用等分的网格，根据前面网格收敛性验证工作，在一个波高范围内划分了 20 个网格，网格细长比约为 5:1，半潜式平台特征边的拾取和“挖洞”以及对自由面和结构物附近的加密、边界层的加密是通过 snappyHexMesh 实现的，整体网格数量为 445 万。计算域和半潜式平台附近的网格划分如图 5-1 所示。

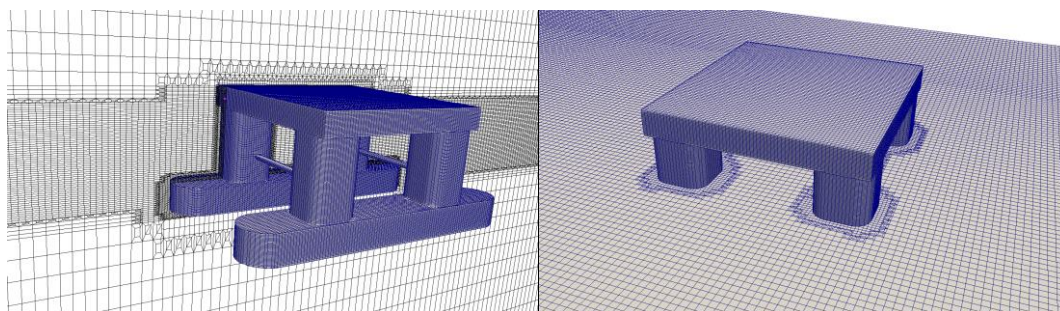


图 5-1 网格划分

Fig.5- 1 Grids

为了记录半潜式平台周围的波浪爬升现象，同样设置了浪高仪，本章节浪高仪设置与第四章稍有不同。为了看出距离圆柱不同位置处波面升高的情况，分别在距离前后立柱为 $0.00625R$, $0.2R$, $0.6R$, $1.0R$ 的位置处设立了浪高仪，此外还在圆柱四周，以及半潜式平台的中央位置，浮体的中心位置，前后立柱的中心位置分别设置了浪高仪，浪高仪的布置图如图 5-2 所示。

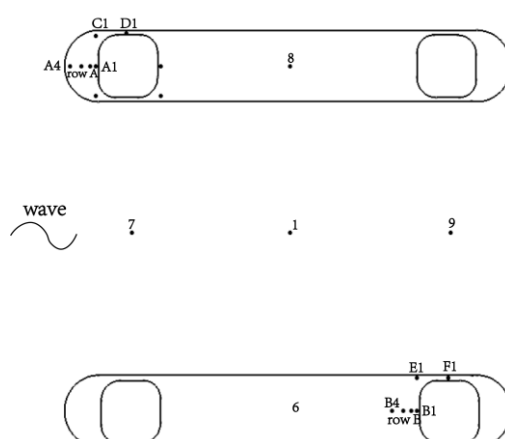


图 5-2 浪高仪分布图
Fig.5- 2 Distribution of wave probes

为了探究聚焦波波陡和聚焦位置对半潜式平台气隙和沿平台立柱周围的波浪爬升现象的影响，进行了四组不同聚焦波下的数值模拟，聚焦波参数如表 5-1 所示。因为在计算域的设置中，将半潜式平台的中央位置设置为原点，所以，聚焦位置为 0 表示聚焦波在半潜式平台中央位置聚焦，聚焦位置为-0.415 意味着，聚焦波将在半潜式平台前立柱的前方聚焦。

表 5-1 聚焦波参数

Table 5- 1 The input parameters of the focused wave

聚焦波	最大波峰	组成波频率范围	组成波数量	聚焦位置	聚焦时间
c1m	0.055	$0.34 < f_j < 1.02$	32	0	15
c2m	0.1101	$0.34 < f_j < 1.02$	32	0	15
f2m	0.1101	$0.34 < f_j < 1.02$	32	-0.415	15
c3m	0.166	$0.34 < f_j < 1.02$	32	0	15

5.2 聚焦波下半潜式平台的平台气隙和砰击现象

5.2.1 聚焦波参数对立柱周围的波浪爬升的影响

聚焦波有一个明显高于其他波峰的最大波峰，其特殊的波形使得它具有强烈的非线性特征，波浪能量非常集中。当聚焦波的最大波峰作用在半潜式平台时，可能会出现零气隙的现象，对平台造成剧烈的砰击，造成很大的局部载荷，会对平台下甲板以及甲板上的结构造成破坏，带来极大的安全隐患。

针对本章节设置的不同的聚焦波，统计了在不同海况下半潜式平台前后立柱的波浪爬升情况，如表 5-2 所示。

表 5-2 最大波浪爬升高度统计表
Table 5- 2 Statistics table maximum wave climb height

聚焦波	前立柱	后立柱
c1m	0.0654	0.072
c2m	0.149	0.16
f2m	0.1503	0.155
c3m	0.2568	0.196

由表 5-2 和图 5-3(a)-(b)可以看出，聚焦波最大波峰的高度越大，沿立柱的爬升高度越高。这个结果表明，当外界输入波浪越高的情况下，波浪沿立柱爬升的高度也会更高。半潜式平台后立柱的波浪爬升均高于前立柱的波浪爬升，这是因为，当聚焦波不断向前传播，经过前立柱受到阻碍时，一部分波浪沿着前立柱向上爬升，在这个向上爬升的过程中，聚集波和它后面的小波浪进行了叠加，放大了波浪，与前立柱相互作用完成的一部分波浪，与绕过前立柱的波浪汇合形成新的更大的波浪，继续向前传播，遇到后立柱的阻碍时，更大的波浪沿着后立柱向上爬升，所以后立柱的波浪爬升要高于前立柱的波浪爬升。

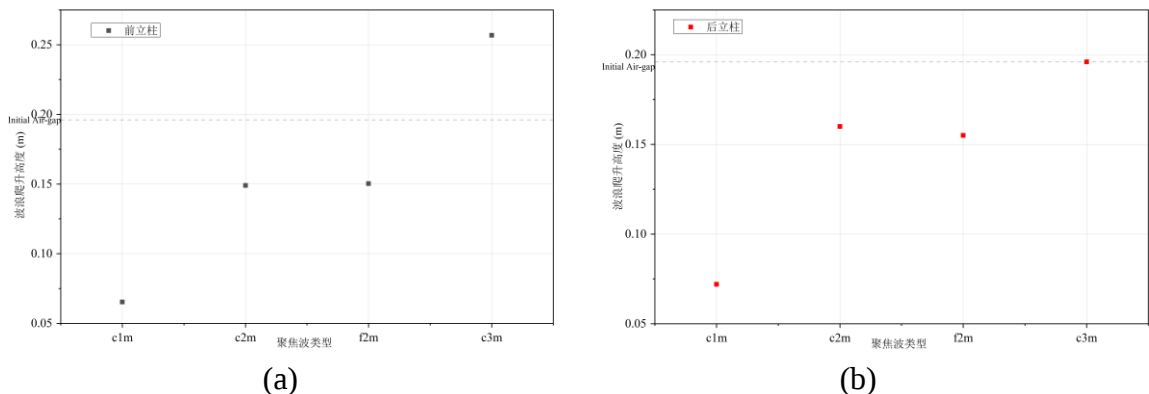


图 5-3 (a)前立柱和(b)后立柱波浪爬升高度和平台气隙响应
Fig.5- 3 The air-gap of semi-submersible and surface elevation around the columns
(a) the front column (b) the back Column

聚焦波在半潜式平台前立柱前方聚焦时，前立柱的波浪爬升高度要比聚焦波在半潜式平台的中心位置聚焦时的高度要高，后立柱的波浪爬升高度要低一些。这是因为，聚焦波在聚焦位置处的波峰达到最高，当它在前立柱前聚焦时，它的最大波峰就出现在前立柱前方，波浪在进行爬升之前，f2m 的波峰就要高于 c2m，所以前立柱的波浪爬升高度更高。但是因为与前立柱作用的波浪要更高，所以能量损耗也更大，所以相比聚焦波在中央位置聚焦时，在前立柱前方聚焦的聚焦波

沿后立柱的波浪爬升要低一些。

聚焦波在与半潜式平台相互作用的过程中，平台不同位置的波面情况是不一样的，如图 5-4(a)-(d)所示，图上展示的是 c3m 聚焦波沿半潜式平台的波浪爬升和平台气隙响应。如图(a)-(b)所示，距离立柱越近，波面升高越高，随着远离立柱，波浪爬升的效应越弱。因为 c3m 聚焦波本身最大波峰就很大，所以在沿着前立柱爬升的过程中，已经超过了立柱高度，出现了负气隙的现象，而随着波浪继续前进演化，在后立柱附近，由于有下甲板的阻碍，无法继续爬升的波浪持续砰击下甲板，所以波高时历曲线出现了一段持平，并且聚焦波峰右侧的波浪又对下甲板再次砰击，这个持续砰击的现象可能会造成半潜式平台下甲板或者甲板上设备的损害，所以应该加强半潜式平台后立柱下甲板附近角隅位置的结构强度，来提高平台的安全性。

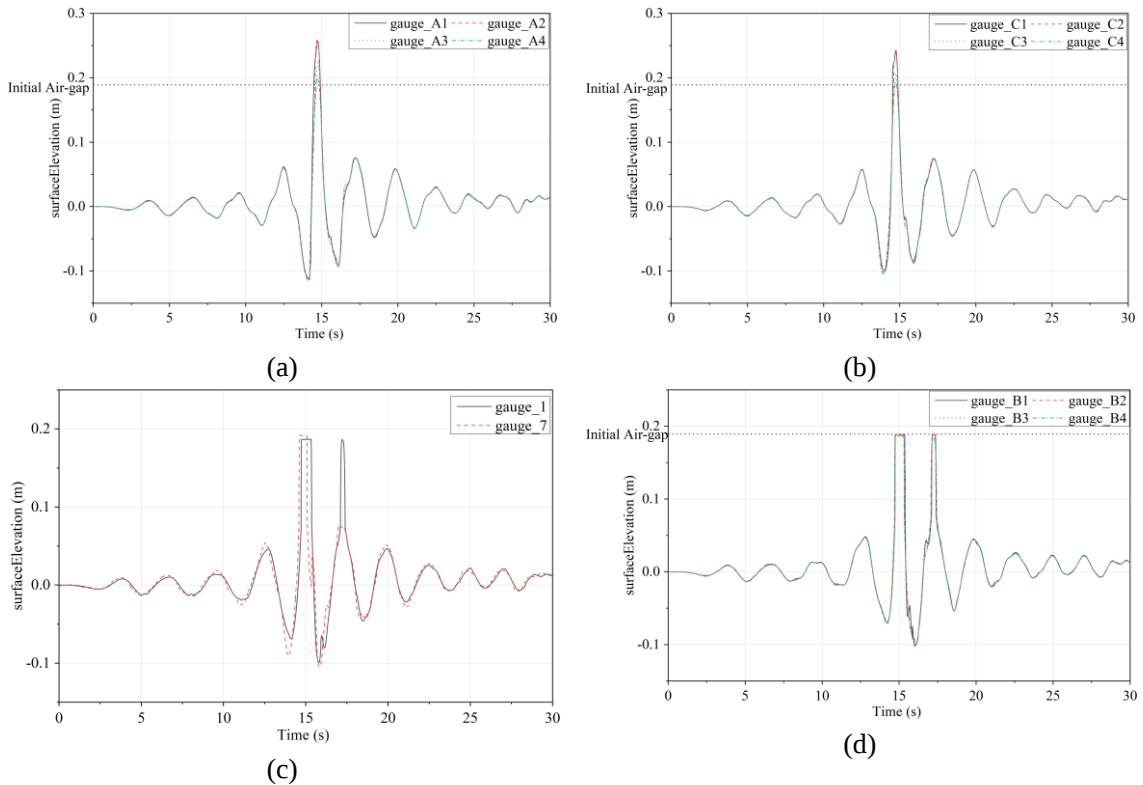


图 5-4 半潜式平台周围的波高时历曲线

Fig.5- 4 Time history of surface elevation around the semi-submersible

5.2.2 聚焦波沿前后立柱的波浪爬升现象

聚焦波 c3m 因为最大峰值较大，所以在与半潜式平台相互作用的过程中，出

现了零气隙的现象，下面将对 c3m 聚焦波与半潜式平台相互作用工程中的波浪爬升和平台气隙进行详细介绍。由图 5-5(a)-(i)波浪爬升过程中前立柱周围的速度云图可以看出，当聚焦波逐渐成型、不断向前传播时，波速越来越大，当遇到半潜式平台的阻碍时，一部分波浪沿着前立柱向上爬升，一部分波浪绕过了半潜式平台继续向前传播，还有一部分波浪从两立柱中央向前传播。

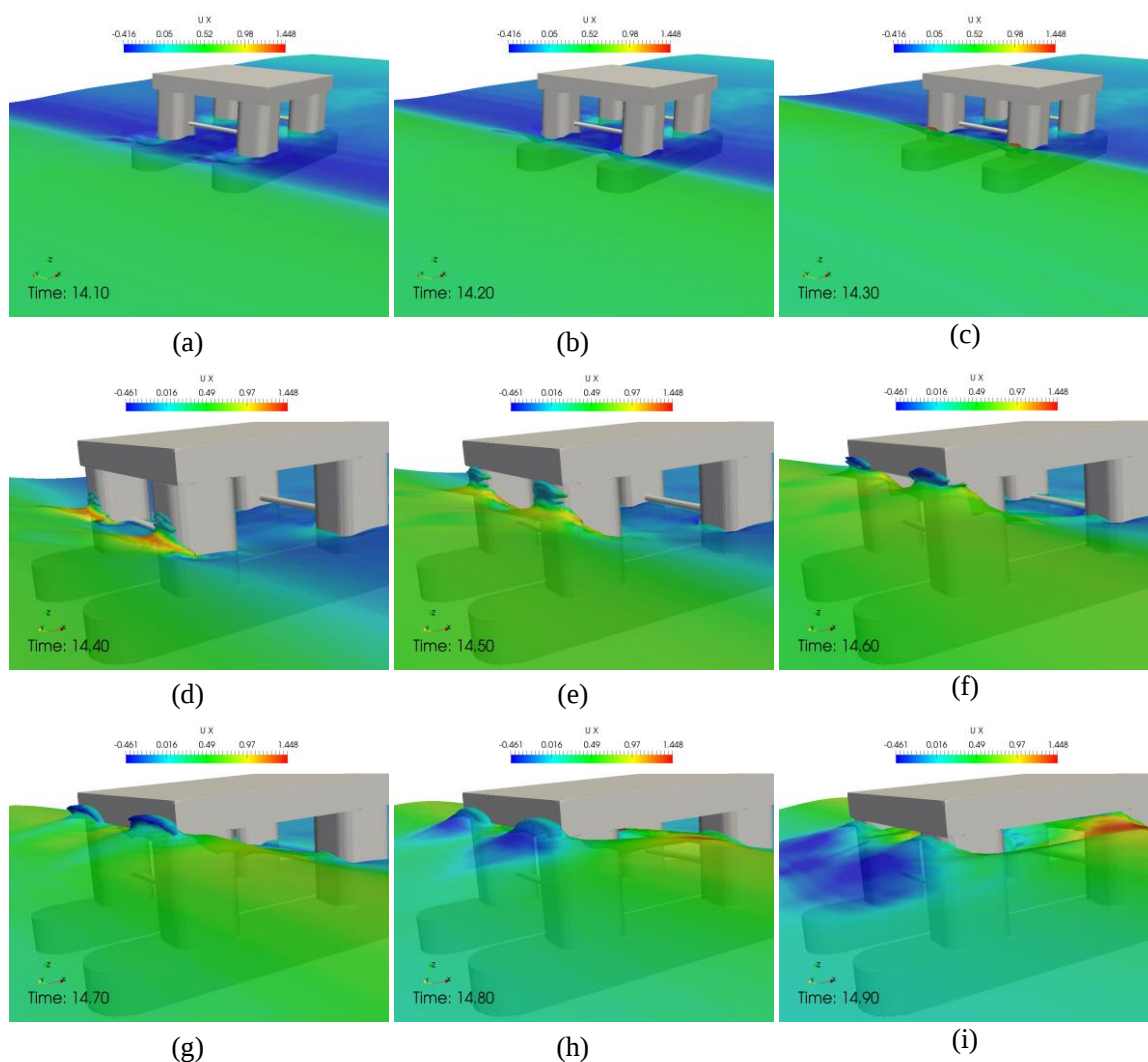


图 5-5 波浪爬升过程中前立柱周围的速度云图

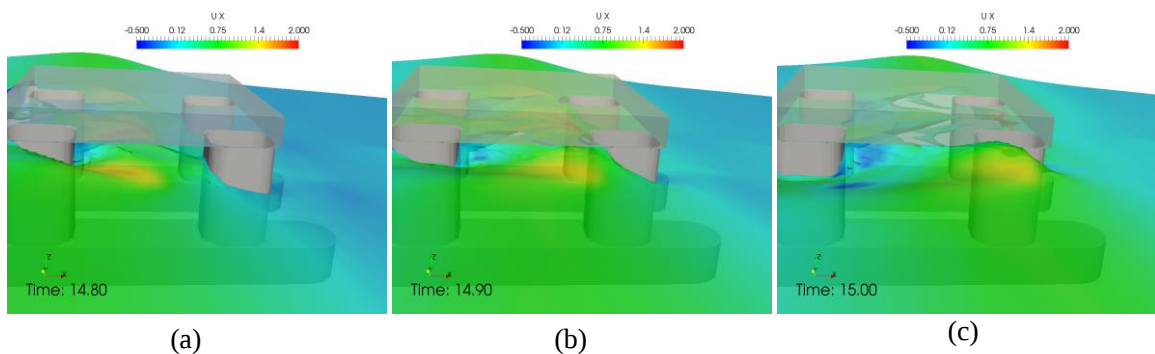
Fig.5- 5 Wave climbing around the front column and schematic diagram of wave speed

沿着前立柱向上爬升的那一部分波浪，在爬升过程中，波浪能量不断耗散，波峰上端的波速逐渐下降并慢慢变成负值，有向反方向传播的趋势，而波峰下面的流体则托着上端的流体爬升，当能量耗散越来越大时，动能逐渐转化成势能，波速逐渐下降，下面的流体的能量不足以给上面的流体提供动能时，由于重力作

用，在最上面的流体向下的速度越来越大，波浪就开始回落，由于有反方向的速度，出现了波浪翻卷的现象，回落的波浪，一部分由于反方向的速度向反方向回落，还有一部分继续向前传播。

前立柱的后方的自由面有明显的凹陷。继续向前传播的聚焦波由于聚焦波的波陡很大，并且因为前立柱的阻碍作用，聚焦波向上爬升，聚焦波在爬升过程中，后面的波浪也在向前传播，与前面的波浪叠加，波浪幅度得到放大，所以在向前继续传播的过程中高度超过了平台的初始气隙，砰击到了下甲板的底部，造成了零气隙的现象。向上传播的波浪因为受到了下甲板的阻碍和挤压，一部分波浪向外扩散，如图 5-5(h)-(i)所示。

经过前面的过程，传向后立柱的波浪由三部分波浪汇聚而成，一部分是绕过前立柱向前传播的波浪，一部分是从两个前立柱中央传播的波浪，一部分是与前立柱相互作用完的波浪，这三部分波浪汇聚在一起，继续向前传播，如图 5-6(a)-(f)所示，且因为设定的聚焦波的聚焦位置为半潜式平台的中央位置，所以聚焦波又进一步进行了演化成型，在半潜式平台的中央位置就砰击到了下甲板的底部，造成了一部分的波浪破碎和能量耗散。继续向前传播，在四立柱中央传播的前端的波浪波速很大，绕过了后立柱，从两个后立柱的中央向前涌进，还有一部分波浪受到了后立柱的阻碍，因为下甲板的阻挡无法继续向上爬升，所以继续砰击下甲板，对下甲板造成了强烈的局部载荷，在这个过程中可以观察到明显的波浪破碎现象，随着动能转化成势能，由于重力作用，波浪回落，这部分波浪也逐渐绕过后立柱继续向前传播。在四立柱中央传播的波浪，由于有绕过后立柱的一部分波浪的叠加，且因为两立柱之间的干涉作用，高度要明显高于周围的波浪，且后立柱的后方出现了明显的凹陷。



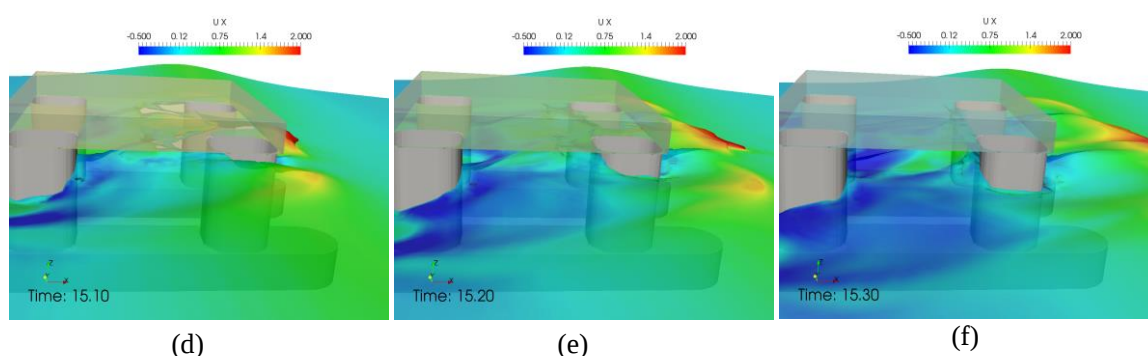
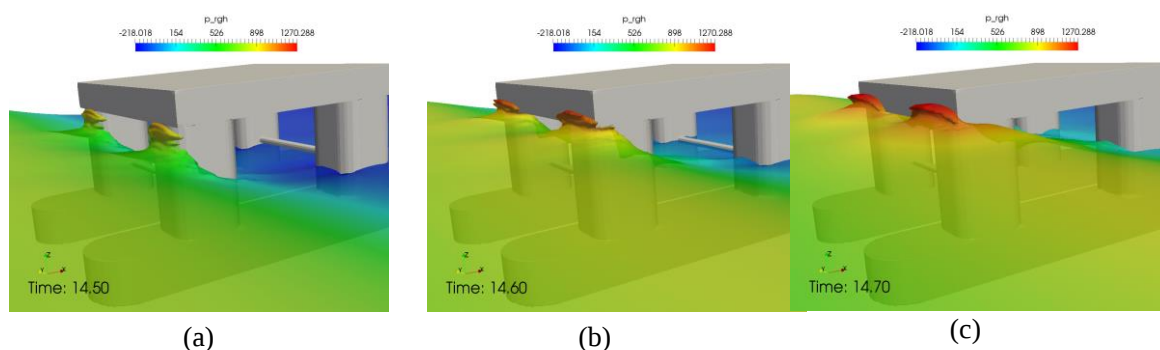


图 5-6 波浪爬升、砰击、破碎过程中后立柱周围的速度云图

Fig.5- 6 Waves climbing, slamming and breaking around the back column and schematic diagram of wave speed

5.2.3 聚焦波对半潜式平台的砰击

经过前面的分析发现，c3m 聚焦波在不断前进演化成型的过程中，与半潜式平台的前后立柱互相作用，沿着立柱向上爬升，并出现了零气隙，波浪砰击平台下甲板的现象，并可以观察到波浪破碎、波浪翻卷等强非线性现象。在这个过程中，平台下甲板的不同位置出现了不同程度的砰击现象，为了平台的安全性考虑，在平台设计阶段，应重点关注平台出现强烈砰击的危险位置。图 5-7(a)-(f)展示了聚焦波在沿前立柱不断爬升过程中半潜式平台的压力云图，从云图可以看出，在波浪不断爬升过程中，波峰位置的动压最大，随着后面波浪回落，压力也逐渐下降，所以在聚焦波不断向上爬升的这个过程中会对半潜式平台的前立柱上方带来较大的砰击，所以为了半潜式平台的安全性考虑，应该对平台甲板下方前立柱附近尤其是角隅位置进行加固，防止波浪的不断砰击造成结构损害，如果聚焦波更陡峭，甚至可能会出现甲板上浪的情况，将会对甲板上的设备结构带来损害。



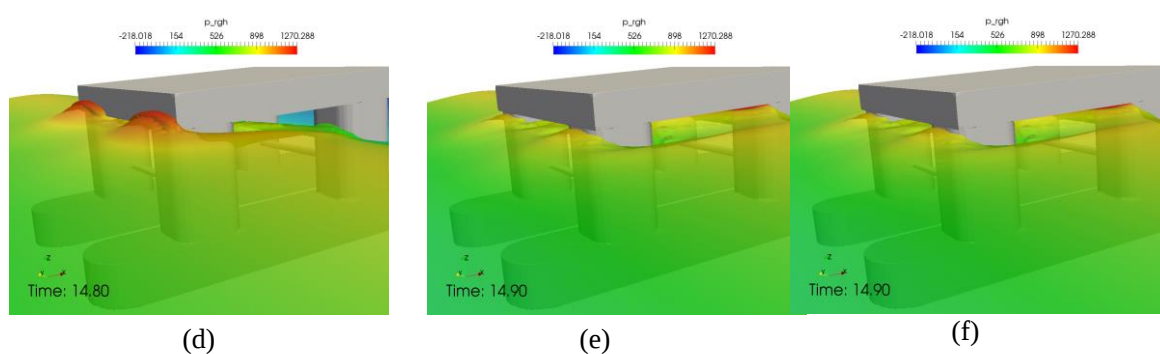


图 5-7 波浪爬升过程中前立柱周围的压力云图

Fig.5-7 Wave climbing around the front column and schematic diagram of dynamic pressure

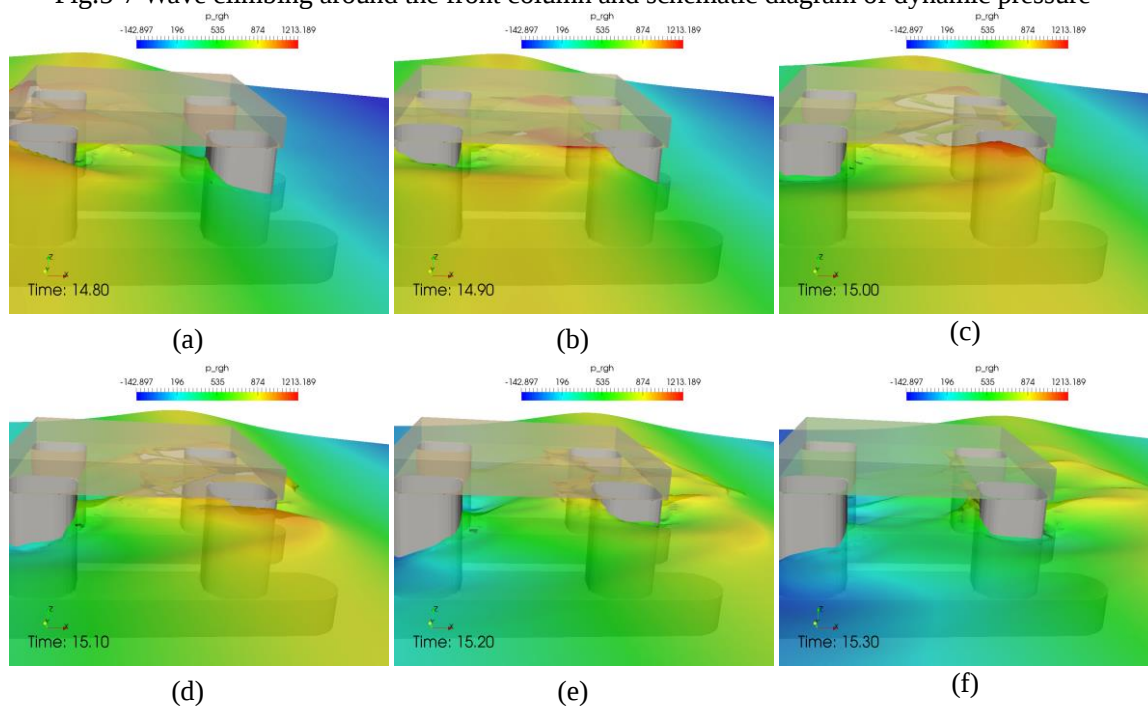


图 5-8 后立柱周围的波浪爬升、砰击和破碎现象及压力云图

Fig.5- 8 Waves climbing, slamming and breaking around the back column and schematic diagram of dynamic pressure

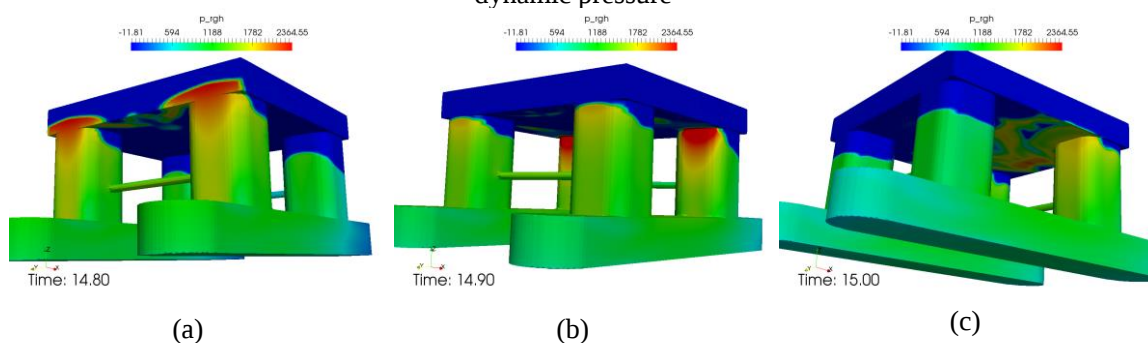


图 5-9 平台表面压力云图

Fig.5- 9 Schematic diagram of dynamic pressure

图 5-8(a)-(f)展示了 c3m 聚焦波在沿后立柱爬升过程中半潜式平台的压力云图，我们可以看到在波浪继续向后传播的过程中，出现了由于砰击下甲板产生的波浪破碎的现象，而这时在下甲板靠近后立柱的部分，下甲板受到了强烈的局部载荷。图 5-9(a)-(c)展示了聚焦波在聚焦时间附近，对平台下甲板造成砰击的过程中平台表面的压力云图，可以看出，平台下甲板前立柱周围角隅、后立柱周围角隅以及两个后立柱中央位置是受到波浪砰击力较大的位置，需要对这些位置进行结构加固。由图 5-10(a)-(b)前后立柱受到的波浪载荷的 x 方向和 z 方向的冲击力可以看出，在聚焦时间前后，后立柱 x 方向受到的波浪力要比前立柱受到的波浪力要大得多，所以在平台设计阶段，一定要注意甲板下方后立柱周围的结构强度的加强，尤其是在角隅附近，无论是前后立柱，甲板下方的角隅处都是受到砰击最严重的地方，后立柱附近由于聚焦波的放大作用，受到砰击的范围更大，受到了砰击力也更大，尤其需要注意加固。

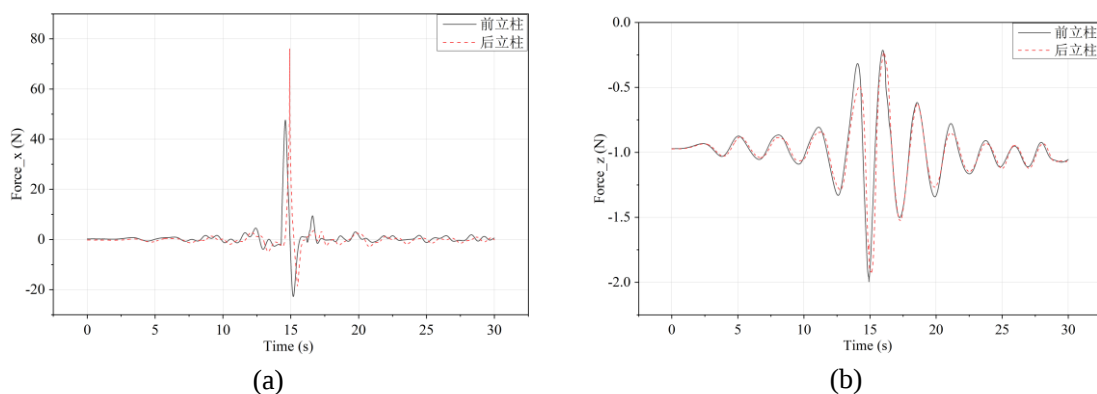


图 5-10 (a)x 方向和(b)y 方向前后立柱波浪力响应分析图
Fig.5- 10 Analysis of wave force response of front and rear columns
in the (a) x direction and (b) y direction

5.3 本章小结

本章使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器进行了聚焦波下半潜式平台波浪爬升和平台气隙的研究，讨论了聚焦波参数对前后立柱波浪爬升以及平台气隙造成的影响，结果发现，随着聚焦波波陡的增加，聚焦波最大波峰值变大，相应下半潜式平台前后立柱的波浪爬升情况都会变大；聚焦波在前立柱附近聚焦时沿前立柱的波浪爬升更高，因为此时沿前立柱爬升的波浪波峰更高，而聚焦波在半潜式平台中央位置聚焦时沿后立柱的波浪爬升相比聚焦波在前立柱附近聚焦时的波浪爬升要高，这是因为后者在沿前立柱波浪爬升时的能量损耗更大，传向后立柱的波高没

有前者的大。

对出现零气隙情况的海况进行了细节流场的分析，结果发现，在出现零气隙的情况下，下甲板前后立柱的角隅附近都受到了波浪的砰击，且后立柱受到了波浪力更大，所以处于对平台安全性的考虑，需要对平台下甲板前后立柱周围的角隅进行结构加强，以防止因为波浪的砰击造成的甲板及甲板上设备受到损害。由于后立柱受到了更大的波浪力的冲击，需要额外关注后立柱的结构强度。此外，可以观察到聚焦波在沿平台前立柱波浪爬升过程中出现了波浪翻卷的现象，在沿后立柱爬升砰击下甲板的过程中出现了波浪破碎现象，并且在前后立柱的后侧都观察到了波面的凹陷现象，以及在前立柱两个立柱中间、后立柱两个立柱之间由于波浪的叠加作用出现了比两侧波浪凸起的现象。

第六章 总结与展望

6.1 全文结论

本文主要是对聚焦波下半潜式平台的波浪爬升和平台气隙响应使用 CFD 方法进行了研究和分析。应用课题组内部开发的求解器 naoe-FOAM-SJTU 实现了聚焦波的生成和演化,实现了直立圆柱的大幅度运动,以及聚焦波下海洋结构物的波浪爬升的数值模拟求解。通过与物理模型试验结果进行对比分析,验证了求解器求解该问题的可行性和准确性。

在聚焦波下的运动圆柱波浪爬升的数值模拟中,根据与物理试验的对比分析,讨论了圆柱运动速度对波面高度以及圆柱表面波浪爬升的影响,并分析了圆柱表面不同位置的压力,讨论了圆柱周围自由表面和涡脱落之间的关系,对流场细节进行了分析,得到了以下结论:

1) 因为在这个范围内流场主要受由圆柱运动引起的反向辐射波的作用,反向辐射波与正向传播的聚焦波叠加后,削弱了聚焦波的波峰,所以圆柱运动速度较大的情况下在距离圆柱 0.26m 处的波面要比圆柱运动速度较小的要低;

2) 因为圆柱较大的运动速度会与聚焦波产生更大的砰击力,使得波浪爬升高度更高,所以圆柱运动速度较大的情况下在圆柱表面的波浪爬升要高于圆柱运动速度较小的情况;

3) 圆柱周围的波面升高和涡脱落的现象是相辅相成的,分析圆柱周围的流场细节发现 0.75m/s 速度情况下圆柱迎浪面波浪爬升更强,圆柱背面的凹陷和涡的脱落更加明显。

在大波陡规则波下固定式半潜式平台间复杂相互作用的数值模拟中,分析了时间离散格式对大波陡规则波生成的影响,生成波浪场后进行了半潜式平台波浪爬升的模拟,揭示了波浪爬升的机理,分析了立柱间间距以及规则波浪向等因素对波浪爬升造成的影响。得出的结论如下:

1) 半潜式平台前后立柱周围的波浪爬升最大值,以及距离前后立柱不同位置测波点所得数据的变化趋势,与物理模型试验符合的较好,验证了求解器求解该问题的可行性和准确性;

2) 在波浪靠近立柱向上爬升过程中,迎浪位置的测波点距离立柱越近,波浪非线性越明显;在立柱侧面的测波点可以看出由于边波回荡所产生的二次波峰的

现象;

3) 后立柱周围的波浪爬升现象比前立柱周围更为复杂, 波浪爬升更为剧烈; 迎浪情况下, 立柱间距较小的情况下, 波浪爬升现象更为显著; 横浪条件下, 由于浮筒的阻碍作用, 波浪爬升减弱。

在聚焦波下半潜式平台波浪爬升和平台气隙的研究, 讨论了聚焦波参数对前后立柱波浪爬升以及平台气隙造成的影响, 得到以下结论:

1) 随着聚焦波波陡的增加, 聚焦波最大波峰值变大, 半潜式平台前、后立柱的波浪爬升高度都会变大;

2) 聚焦波在前立柱附近聚焦时, 因为聚焦波浪波峰更高, 所以沿前立柱的波浪爬升更高;

3) 聚焦波在半潜式平台中央位置聚焦时, 因为沿前立柱爬升时的能量损耗较小, 传向后立柱的波峰更高, 所以沿后立柱的波浪爬升相比聚焦波在前立柱附近聚焦时的波浪爬升要高;

4) 在出现零气隙的情况下, 下甲板前后立柱的角隅附近都受到了波浪的砰击, 且后立柱受到了波浪力更大, 所以处于对平台安全性的考虑, 需要对平台下甲板前后立柱周围的角隅, 尤其时后立柱周围的角隅进行结构加强;

5) 在聚焦波沿平台前后立柱波浪爬升数值模拟的过程中, 观察到了波浪翻卷、波浪破碎、波面凹陷、波浪凸起等现象。

6.2 展望

平台气隙作为平台设计过程中重要的安全性设计参数, 始终是平台设计过程中绕不过去的环节, 随着数值方法的不断发展, 有越来越多的方法可以较好地模拟出来聚焦波这样的恶劣海况, 对于波浪爬升和平台气隙研究有重要意义, 本文在这方面做了一些相关的研究并得出了一些结论, 但是仍有很多可以继续深入研究的部分:

1) 粘势流耦合方法可行性的研究。本文使用的是全粘性流的 CFD 数值模拟, 这种方法由于考虑到了自由表面粘性项的影响所以可以较好地处理这种强非线性问题, 并且可以捕捉到流场的细节, 进行物理现象机理性的研究, 但是相比于势流方法, 粘性流方法会耗费大量的时间, 计算成本较高, 为了优化这个问题, 目前很多学者进行了粘势流耦合方法的研究, 如 Zhuang^[68]和宋家琦^[13]进行了 HOS-CFD 耦合的研究。可以尝试用粘势流耦合的方法进行聚焦波下半潜式平台波

浪爬升和气隙响应的研究，在较大的势流计算域进行聚焦波的演化和生成，在较小的粘性流计算域进行半潜式平台的波浪爬升和气隙响应的分析，这样就可以快速地生成大尺度的聚焦波，并进行半潜式平台周围强非线性现象的细节流场分析。

2) 半潜式平台系泊状态下的波浪爬升和气隙研究。本文主要对半潜式平台固定状态下的波浪爬升和气隙进行了研究，而半潜式平台在作业过程中是系泊状态的，它会有不可避免的六自由度运动，平台的六自由度运动也会对平台立柱的波浪爬升和平台气隙响应产生影响，这种影响可能会削弱平台立柱的爬升高度，但是会使整个现象的非线性更强，可以继续研究半潜式平台系泊状态的相关的运动响应和动力学分析。

3) 风浪流耦合作用的研究。本文主要是研究了只有聚焦波的海洋情况，实际的海况一般是风浪流的耦合作用，后期可以在数值水池中开发风场和海流的生成模块，探究风和流对半潜式平台波浪爬升和气隙响应的影响。

4) 甲板上浪等负气隙现象的研究。本文主要是研究讨论了聚焦波砰击下甲板，造成的零气隙的现象，没有考虑甲板上浪这种负气隙现象，这种现象对平台的危害性更大，后期可以对甲板上浪继续进行研究，并可以尝试研究通过增加一些漏水孔、防浪板等结构对削弱甲板上浪现象的作用。

参 考 文 献

- [1] Haver S. A possible freak wave event measured at the Draupner Jacket January 1 1995[J]. *Rogue Waves*. 2004, 2004: 1-8.
- [2] Lawton, Graham. MONSTERS OF THE DEEP [J]. *New Scientist*, 2001,
- [3] Mori N, Liu P C, Yasuda T. Analysis of freak wave measurements in the Sea of Japan [J]. *Ocean Engineering*, 2002, 29(11): 1399-414.
- [4] Nikolkina I, Didenkulova I. Rogue waves in 2006–2010 [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, 11(11): 2913-24.
- [5] Kharif C, Pelinovsky E. Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon [J]. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 2003, 22(6): 603-34.
- [6] Chaplin J R. On frequency-focusing unidirectional waves [J]. *International Journal of Offshore & Polar Engineering*, 1996, 6(2): 131-7.
- [7] Sriram V, Schlurmann T, Schimmels S. Focused wave evolution using linear and second order wavemaker theory [J]. *Applied Ocean Research*, 2015, 53(279-96).
- [8] Ning D Z, Zang J, Liu S X, et al. Free-surface evolution and wave kinematics for nonlinear uni-directional focused wave groups [J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(15-16): 1226-43.
- [9] Stuart, J., T., et al. The Eckhaus and Benjamin-Feir Resonance Mechanisms [J]. *Proceedings of the Royal Society A Mathematical*, 1978,
- [10] Crawford D R, Lake B M, Saffman P G, et al. Stability of weakly nonlinear deep-water waves in two and three dimensions [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 105(-1): 177-91.
- [11] Zakharov V E, Ostrovsky L A. Modulation instability: The beginning [J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2009, 238(5): 540-8.
- [12] 赵西增, 孙昭晨, 梁书秀. 模拟畸形波的聚焦波浪模型 [J]. *力学学报*, 2008, 40(004): 447-54.
- [13] 宋家琦, 万德成. 基于高阶谱方法与 CFD 计算的耦合模型在不规则波模拟中的应用 [J]. *水动力学研究与进展(A 辑)*, 2019, 34(01): 5-16.
- [14] Ducroz G, Bonnefoy F, Touzé D L, et al. HOS-ocean: Open-source solver for nonlinear waves in open ocean based on High-Order Spectral method [J]. *Computer Physics Communications*, 2016, 203(245-54).
- [15] 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): 201-25.

- [16] Osher S, Sethian J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations [J]. 1988, 79(1): 12-49.
- [17] Sussman M, Fatemi E, Osher S, et al. A Level Set Approach For Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow [J]. Journal of Computational Physics, 1995, 114(1): 4-8.
- [18] Jamtveit B, Meakin P. Growth, Dissolution and Pattern Formation in Geosystems [M]. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [19] Zhao X-z, Hu C-h, Sun Z-c. Numerical Simulation of Extreme Wave Generation Using VOF Method [J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(4): 466-77.
- [20] Cao H-J, Wan D-C. Development of Multidirectional Nonlinear Numerical Wave Tank by Naoe-FOAM-SJTU Solver [J]. Journal of Advanced Research in Ocean Engineering, 2015, 1(1): 14-24.
- [21] Li J, Wang Z, Liu S. Experimental study of interactions between multi-directional focused wave and vertical circular cylinder, Part I: Wave run-up [J]. Coastal Engineering, 2012, 64(151-60).
- [22] Ma Y, Dong G, Perlin M, et al. Higher-harmonic focused-wave forces on a vertical cylinder [J]. Ocean Engineering, 2009, 36(8): 595-604.
- [23] Hildebrandt A, Sriram V. Pressure Distribution and Vortex Shedding Around a Cylinder due to a Steep Wave at the Onset of Breaking from Physical and Numerical Modeling; proceedings of the International ocean and polar engineering conference, F].
- [24] Yan, S, et al. (2015). "Numerical and Experimental Studies of Moving Cylinder in Uni-directional Focusing Waves," Proc 25th Int Ocean Polar Eng Conf, Kona, HI, USA, ISOPE, 3, 711-718.
- [25] Hildebrandt A, Sriram V, Schlurmann T. Simulation of focusing waves and local line forces due to wave impacts on a tripod structure; proceedings of the Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, F, 2013 [C].
- [26] Bihs H, Chella M A, Kamath A, et al. Numerical Investigation of Focused Waves and Their Interaction With a Vertical Cylinder Using REEF3D [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2017, 139(4):
- [27] 吕合媛, 卢文月, 李欣. 聚焦波作用下立柱高阶波浪力特性研究 [J]. 海洋工程, 2020, 38(05): 12-23.
- [28] Chen L F, Zang J, Hillis A J, et al. Numerical investigation of wave-structure interaction using OpenFOAM [J]. Ocean Engineering, 2014, 88(91-109).
- [29] Hu Z Z, Greaves D, Raby A. Numerical wave tank study of extreme waves and wave-structure interaction using OpenFoam® [J]. Ocean Engineering, 2016, 126(329-42).

- [30] Jacobsen N G, Fuhrman D R, Fredsøe J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam® [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2012, 70(9): 1073-88.
- [31] Lin P, Li C W. Wave-current interaction with a vertical square cylinder [J]. Ocean Engineering, 2003, 30(7): 855-76.
- [32] Liu Z, Zhuang Y, Wan D. Numerical Study of Focused Wave Interactions with a Single-Point Moored Hemispherical-Bottomed Buoy [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2020, 30(1): 53-61.
- [33] Simos A N, Fajarra A L C, Sparano J V, et al. Experimental Evaluation of the Dynamic Air Gap of a Large-Volume Semi-Submersible Platform; proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics & Arctic Engineering, F, 2006 [C].
- [34] Chatjigeorgiou I K, Mavrakos S A, Grigoropoulos G, et al. Scale experiments for the measurement of motions and wave run-up on a TLP model, subjected to monochromatic waves; proceedings of the Proc International Conference on Offshore & Polar Engineering, F, 2004 [C].
- [35] Kazemi S, Incecik A. Experimental Study of Air Gap Response and Wave Impact Forces of a Semi-Submersible Drilling Unit[C]. International Conference on Offshore Mechanics & Arctic Engineering. 2006.
- [36] Naess A, Stansberg C T, Gaidai O, et al. Statistics of Extreme Events in Airgap Measurements - OMAE2008-57754 [J]. Journal of Offshore Mechanics & Arctic Engineering, 2014, 131(4): 733-42.
- [37] 沈鹏飞. 半潜式平台气隙响应的数值与实验研究 [D].
- [38] 单铁兵. 波浪爬升的机理性探索和半潜式平台气隙响应的关键特性研究 [D]; 上海交通大学, 2013.
- [39] Kazemi S, Incecik A. Theoretical and Experimental Analysis of Air Gap Response and Wave-on-Deck Impact of Floating Offshore Structures; proceedings of the Asme International Conference on Offshore Mechanics & Arctic Engineering, F, 2007 [C].
- [40] Sweetman B, Winterstein S R, Cornell C A. Airgap analysis of floating structures: first- and second-order transfer functions from system identification [J]. Applied Ocean Research, 2002, 24(2): 107-18.
- [41] Walker D A G, Eatock Taylor R, Taylor P H, et al. Wave diffraction and near-trapping by a multi-column gravity-based structure [J]. Ocean Engineering, 2008, 35(2): 201-29.
- [42] Rajendran S, Fonseca N, Soares C G, et al. Time Domain Comparison With Experiments for Ship Motions and Structural Loads on a Container Ship in Abnormal Waves; proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean,

- Offshore and Arctic Engineering, F, 2011 [C].
- [43]Clauss G, Stutz K, Schmittner C. Rogue wave impact on offshore structures [J]. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, 2004, 1(
- [44]姜胜超, 吕林, 滕斌, et al. 四柱结构在波浪作用下的近场干涉 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 05): 546-54.
- [45]曾志. 半潜式平台气隙响应的预报 [D]; 上海交通大学, 2009.
- [46]陶晶晶. 半潜式平台气隙响应的计算研究 [D]; 大连理工大学, 2008.
- [47]丘文桢, 冒羽, 宋兴宇, et al. 基于全耦合时域计算的半潜平台气隙预报 [J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2019, 2):
- [48]肖鑫, 滕斌, 勾莹, et al. 畸形波作用下张力腿平台的瞬时响应 [J]. 水运工程, 2009, 05): 9-14.
- [49]常爽, 黄维平, 魏东泽, et al. 二阶波浪力和聚焦位置对畸形波作用下张力腿平台动力响应的影响研究 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(17): 254-60.
- [50]Iwanowski B, Lefranc M, Wemmenhove R. CFD Simulation of Wave Run-Up on a Semi-Submersible and Comparison With Experiment [M]. Volume 1: Offshore Technology. 2009: 19-29.
- [51]单铁兵, 杨建民, 李欣,等. 一种适用于陡波条件下研究半潜平台周围波浪非线性爬升效应的计算方法[J]. 船舶力学, 2013, 000(004):346-359.
- [52]Liang X , Yang J , Xiao L , et al. Numerical Study of Air Gap Response and Wave Impact Load on a Moored Semi-Submersible Platform in Predetermined Irregular Wave Train[C]// Asme International Conference on Ocean. 2010.
- [53]悦战刚. 半潜平台波浪爬升数值研究 [D]; 中国海洋大学, 2014.
- [54]Zhuang Y, Wan D. Numerical Study of Focused Waves Acting on a Fixed FPSO-Shaped Body [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2019, 29(2): 128-40.
- [55]孙晨光, 王建华, 万德成. 基于重叠网格的船模停船操纵 CFD 数值模拟 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(02): 11-7.
- [56]王秋雯, 赵伟文, 万德成. 不同质量比多柱式平台涡激运动特性数值研究 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2018, 33(06): 22-31.
- [57]曹洪建, 万德成. 基于 naoe-FOAM-SJTU 求解器构建三维数值波浪水池, F, 2012 [C].
- [58]查晶晶, 万德成. 用 OpenFOAM 实现数值水池造波和消波 [J]. 海洋工程, 2011, 29(3): 1-12.
- [59]刘鑫旺, 万德成. 高速四体船片体间兴波干扰数值分析 [J]. 中国造船, 2017,

a01): 140-51.

[60]Wang J, Wan D. CFD Investigations of Ship Maneuvering in Waves Using naoe-FOAM-SJTU Solver [J]. Journal of Marine Science and Application, 2018, 17(3): 443-58.

[61]Wang J, Zhao W, Wan D. Simulations of Self-Propelled Fully Appended Ship Model at Different Speeds [J]. International Journal of Computational Methods, 2018, 16(5)

[62]Wang J, Zhao W, Wan D C. Free Maneuvering Simulation of ONR Tumblehome Using Overset Grid Method in naoe-FOAM-SJTU Solver; proceedings of the 31st Symposium on Naval Hydrodynamics, F, 2016 [C].

[63]Shen Z, Wan D, Carrica P M. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering [J]. Ocean Engineering, 2015, 108(287-306).

[64]Issa R I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting [M]. Academic Press Professional, Inc., 1986.

[65]Menter F R, Kuntz M, Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model [J]. Heat and Mass Transfer, 2003, 4

[66]Kharif C, Giovanangeli J P, Touboul J, et al. Influence of wind on extreme wave events: Experimental and numerical approaches [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 594(209-47).

[67]Noack R W, Boger D A, Kunz R F, et al. Suggar++: An Improved General Overset Grid Assembly Capability; proceedings of the 19th AIAA Computational Fluid Dynamics, F, 2009 [C].

[68]Yuan Zhuang D W. Review: Recent Development of High-Order-Spectral Method Combined with Computational Fluid Dynamics Method for Wave-Structure Interactions [J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2020, 27(3): 170-88.

致 谢

首先要感谢我的导师万德成教授、刘成副教授，印象最深的是第一次见万老师的时候，他就借发邮件这件事教导我们做事情要有头有尾，做人要有礼貌懂感恩，当时我就感觉到万老师不仅能在学业上给我指导，也能教我成为一个更好的人。后面与万老师的接触更加验证了这一点，万老师很注重对我们全方面的培养，科研上给我们提供方向给我们提出意见建议，并鼓励我们在公共场合表达自己，给我们参加国内外会议展示自己工作内容的机会；生活上万老师给我们提供了多彩的课余活动的机会，拉近了组内同学的关系，形成了和谐良好的课题组氛围，关心我们的身心健康，鼓励我们健身锻炼，鼓励我们培养自己的兴趣爱好，培养我们健全的人格，让我们无论从科研学习上还是生活上都能充实自己。感谢刘老师每一次在组会上给我提出的意见和建议，刘老师学术水平很高，并且做事非常认真有规划，大到选题方向小到文章内容表述，刘老师都可以给出宝贵的意见，他求真务实的态度给我留下了深刻的印象。老师们对工作科研认真负责、充满热情的态度给我树立了极好的榜样。

感谢赵伟文老师对我提供的指导和帮助，在我对科研题目没有头绪的时候给我提供思路、帮我解疑答惑，在我科研进展过程中遇到问题的时候，给我提供帮助，帮我查找问题，并提供技术上的支持。感谢王建华老师每一次在组会上提出的意见和建议，在我科研遇到问题的时候给予我帮助。

感谢父母杨庆伟先生和张景霞女士，感谢我的弟弟杨秉一同学。随着年纪增长，我才慢慢意识到父母在养育我的过程中付出了多少心血，他们从各种细节上呵护着我又不惊扰到我，让我在这二十几年都在正确的方向上前进。感谢他们在我心情最低落的时候一直陪伴着我，给我鼓励，让我感受到了家的温暖和家人的爱。

尤其感谢庄园师姐，她在我的科研工作上提供了很大的帮助，从最开始的HOS-CFD耦合到后面的平台气隙研究，庄园师姐都给我提供了研究思路，并帮我解决了很多问题。我也要感谢刘正浩师兄和刘聪师兄，在我使用求解器出现问题时，师兄帮我一起找问题、并帮我解决问题、提供其他的解决思路。

感谢师兄师姐，张晓嵩师兄、李政师兄、赵旻晟师兄、郭浩师姐、安筱婷师姐在研一期间带我入门Ubuntu系统、OpenFOAM以及各种后处理软件，帮我解决各种问题；感谢刘鑫旺师兄带我一起参加数学建模比赛，虽然出了点小问题我

他们没有拿奖，但是比赛的过程让我收获了很多也学到了很多，这对我之后工作的数据后处理奠定了基础。

感谢同级的实验室同门，在学业和科研上帮了我很多的项目扛把子谢路毅、一起做过比赛的满绩大佬尚哥梁尚、乐于助人帮我养花的老胡胡一丁、漂亮可爱的敏敏李敏、有故事的开哥詹开宇、活络会玩的鲁逸豪，隐藏大佬张钰琪、敢说的腿哥谢丰泽、读博之后黑眼圈越发严重的魏德志、认真的勃哥韩勃、入学时给了我很大鼓励的卉姐马春卉等，有你们的陪伴，研究生期间工作的开展和进行都不孤单；感谢办公室的师弟师妹们于连杰、郭涵慧、袁常乐、杨晓彬、杨玉肖等，感谢你们给办公室带来了欢乐，感谢你们给我提供的帮助和善意，办公室的环境真的是像家一样，大家一起努力奋斗，也互相照顾、互相帮助，良好的办公室氛围让我的研究生生活过得很棒！感谢我的室友可靠的杨红莹和可爱的谢惠媚，她们陪我经历了很多喜怒哀乐，分享了我研究生生活的点点滴滴，创造了很多酸甜苦辣的回忆，陪我一起度过了我心情最低落、情绪最糟糕的日子；还要感谢我在交大认识的好朋友们，陪我一起并肩完成毕业论文的战友乔倩，在我很没有自信的时候帮我看小论文、给我提出建议、给了我很大信心的康康徐德康，他和帅气温柔的李超凡还带我吃了很多交大周边的美食，因为有他们的陪伴，我在最阴郁的日子里都胃口大开，让我的研究生生活过得丰富多彩。感谢已经毕业的沈志荣师兄、曹洪建师兄、查晶晶师姐等，他们以往的工作的是我开展的工作的基石。

感谢我生命中出现过的每一个人，感谢你们陪我走过了人生中的一段段旅程。

攻读硕士学位期间已发表或录用的论文

- [1] Xiaotong Yang, Decheng Wan, Zhonghua Li, Numerical Simulations of Interaction between Focused Waves and Moving Cylinder, Proceeding the Thirtieth (2020) International Ocean and Polar Engineering Conference Shanghai, China, October 11-16, 2020, PP.2299-2306
- [2] 杨晓彤, 赵伟文, 万德成. 规则波下半潜式平台波浪爬升数值模拟[J]. 水动力学研究与进展 A 辑.
- [3] 杨晓彤, 万德成, 规则波下海洋平台气隙响应数值分析, 第三十一届全国水动力学研讨会暨第十六届全国水动力学学术会议文集, 2020 年 10 月 30 日-11 月 1 日, 福建厦门, pp.1818-1824.
- [4] 杨晓彤, 庄园, 万德成, 基于高阶谱方法的不规则波数值模拟的参数研究, 第三十届全国水动力学研讨会暨第十五届全国水动力学学术会议文集, 2019 年 8 月 16-19 日, 安徽合肥, pp.656-663