上海交通大学硕士学位论文

基于 CFD 方法的浅水近岛礁环境下浮式平 台水动力性能分析及波浪演化特性研究

硕	+	研	究	生:	夏可
~~~		1.4.1	~ 0		

- 学 号: 115010910120
- 导 师: 万德成 教授

### 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: 2018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

## Hydrodynamic Study of Wave Evolution Characteristics around Floating Platform in Shallow Water with Submerged Terrain near Island by CFD Method

Candidate:	Ke Xia		
Student ID:	115010910120		
Supervisor:	Prof. Decheng Wan		
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering		
Speciality:	Naval Architecture and Ocean Engineering		
Affiliation:	School of Naval architecture, Ocean&Civil Engineering		
Date of Defence:	Jan, 2018		
Degree-Conferring-Institution:	Shanghai Jiao Tong University		

## 基于 CFD 方法的浅水近岛礁环境下浮式平台水动力性能分析 及波浪演化特性研究

#### 摘要

随着国家南海资源的开发,岛礁的战略地位日益凸显。为了保障 岛礁建设,在远离大陆的南海岛礁附近布置一浮式保障平台就成为了 一个绝佳的选择。研究近岛礁波浪环境及浮式结构物的水动力性能可 以为浅水浮式平台的设计和研究奠定基础,具有重要意义。

本文应用基于开源平台 OpenFOAM 开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU,对近岛礁环境下规则波演化特性以及一座 带系泊系统的浮式平台在相应波浪作用下的水动力性能进行了数值模 拟。本文首先对于浮式平台自由衰减运动的计算准确性以及求解器造 波模块的计算准确性进行验证。在平台自由衰减运动的计算方面,网 格收敛性验证工作给出本文所研究问题的合理网格量,平台自由衰减 固有周期的计算结果与实验结果的对比工作验证了本文所使用的求解 器的准确性;在造波模块的验证方面,分别将各工况下波浪的时历与 理论波浪时历进行对比,验证了求解器造波模块的准确性。

随后本文针对近岛礁浮式平台在规则波中水动力特性以及斜底地 形下规则波演化特性进行了研究。在平台水动力研究部分,首先对于 平台在不同频率规则波中的响应特性进行研究,将计算的 RAO (Response Amplitude Operator)结果与实验结果进行对比,进一步验 证了本文的求解器及计算结果的准确性,最后通过对 RAO 结果的分

析,得到平台对中高频波浪响应性能较优的结论;在斜底地形下波浪 演化特性分析部分,首先对于不同工况的规则波在近岛礁地形下的演 化特性进行分析,随后针对演化过程中波高和波浪频率成分变化两个 方面展开研究。研究发现,随着波浪周期的增大,波浪演化过程中, 波高会明显增大,波浪的高阶成分会越发明显。

此外,本文还针对不同地形对波浪演化的影响展开了讨论,探究 平底地形以及斜底地形下波浪的演化差异。从结果分析中可以发现在 平底地形的波浪演化中,波浪的波高呈稳定衰减趋势,并未出现明显 的波高增大及非线性增强等演化特性,由此验证了在前文平台水动力 及斜底波浪演化的研究中得到的一系列强非线性现象和规律确是地形 原因导致。

最后,本文针对波浪翻卷的机理性问题展开更进一步探究。本文 建立了二维波浪水池,对于波浪在斜坡地形上的翻卷问题展开具体讨 论。研究发现随着波陡增大,波浪临界状态下的水深指数、波高指数 以及垂向不对称性参数均明显减小,而波浪的前缘不对称性、后缘不 对称性以及横向不对称性参数对于波陡均不敏感。

关键词:海底地形,浮式平台,波浪演化,naoe-FOAM-SJTU

## HYDRODYNAMIC STUDY OF WAVE EVOLUTION CHARACTERISTICS AROUND SEMI-SUBMERSIBLE PLATFORM IN SHALLOW WATER WITH SUBMERGED TERRAIN NEAR ISLAND BY CFD METHOD

#### ABSTRACT

With the development of the resources of South China Sea, the strategic position of the island and reefs become increasingly prominent. It is an excellent choice to build a floating platform near the island to guarantee the construction of the islands. So that it is significant to investigate the wave condition and the hydrodynamic characteristics of the floating platform near the island and reefs.

In this paper, a 3D viscous flow solver (naoe-FOAM-SJTU) is employed to simulate the wave evolution characteristics and hydrodynamic properties of semi-submersible platform in the corresponding wave environment in shallow water with submerged terrain near island.

Firstly, a validation work was done. The comparison work was carried out between the natural period the free-decay motion of the computational results and experimental results which verifies the accuracy of the solver employed in this paper. In the validation work of the wave generation module, the waveform of this work was compared with the theoretical waveform which verifies the accuracy of the wave making module.

Subsequently, the investigation about the hydrodynamic characteristics of the platform and the wave evolution phenomenon with the oblique bottom terrain were carried out. The response characteristic of the floating platform was firstly studied and the RAO (Response Amplitude Operator) results were compared with the experimental data to conduct a further verification of the solver and the calculation results. Meanwhile, a conclusion can be drawn that the response characteristic of the platform is better in high frequency waves. In the part of analysis about the wave evolution characteristics with oblique bottom terrain, the evolution characteristics of the regular waves with different wave condition were firstly analyzed, and then the research about the variation of the wave height and wave frequency components were mainly investigated. It is found that with the increase of the wave period, the wave height will increase obviously during the wave evolution process, and the high-order components of the wave will be more pronounced.

In addition, the influence of different seabed terrain upon the wave evolution characteristics was studied, and the difference of the wave evolution characteristics between the flat bottom condition and slope bottom condition was explored. It can be found that the wave height decays steadily in the flat bottom condition and no obvious evolution characteristics such as the enlargement of wave height and non-linear component enhancement can be observed in this process. Thus it is verified that a series of strong nonlinear phenomenon that captured in the previous research are caused by the oblique bottom terrain exactly.

Finally, the mechanism of wave overturning phenomenon was investigated deeply. In this paper, a two-dimensional wave pool was established in which the wave overturning problem was carried out. It is shown that with the increase of the wave steepness, the wave depth index, wave height index and the wave vertical asymmetry index reduced significantly, while the wave front asymmetry index, wave rear asymmetry index and the horizontal asymmetry index are not very sensitive to the wave steepness.

# **KEY WORDS:** Submerged terrain, floating platform, wave evolution, naoe-FOAM-SJTU

## 目 录

基于 CFD 方法的浅水近岛礁环境下浮式平台水动力性能分析及波浪演化特性研
究I
摘 要 ······I
ABSTRACT ······III
第一章 绪论
1.1 研究背景与意义
1.2 浅水浮式结构物水动力学问题研究现状
1.2.1 浅水波浪问题概述
<b>1.2.2</b> 浅水波浪问题的研究历程9
1.2.3 浮式结构物研究方法
<b>1.2.4</b> 浅水浮式结构物水动力性能
1.3 本文主要工作
第二章 浅水浮式结构物研究数值方法
2.1 粘性流体流动数学模型
2.1.1 粘性流体控制方程
2.1.2 自由面处理方法
2.2 数值水池波浪模拟
2.3 浅水波浪理论
2.4 浮式结构物六自由度运动计算
2.5 系泊系统求解方法
第三章 平台自由衰减运动及造波的计算验证
3.1 引言
3.2 计算模型设置
3.3 平台自由衰减运动模拟和验证
3.4 给定工况的波浪仿真及验证41
3.5 本章小结
第四章 近岛礁地形下平台响应和规则波演化特性47
4.1 引言
4.2 斜底地形下平台运动及波浪演化特性分析47

上海交通大学硕士学位论文

4.2.1 平台对规则波的频率响应特性分析47
<b>4.2.2</b> 波陡对于斜坡波浪演化的影响
4.3 地形对波浪演化特性影响
4.4 本章小结
第五章 波浪斜坡地形翻卷机理探究
5.1 引言
5.2 波浪斜坡地形翻卷的算例设置
5.3 波浪翻卷参数的敏感性分析
5.4 本章小结
第六章 总结与展望
6.1 全文总结
6.2 研究展望
参考文献
致 谢
攻读硕士学位期间已发表或录用的论文

### 第一章 绪论

#### 1.1 研究背景与意义

南海是我国最大的外海,调查表明,南海海域有 200 多个油气构造,其中的 将近 90%有希望开发并利用。该区域石油天然气总储量约占全球储量的 12%,因 此被国内外学者誉为"第二个波斯湾"。南海还有丰富的金属矿产等资源,潮汐能、 波浪能、温差能、压差能等可再生能源。此外,南海航线是我国运输战略资源、 维持对外贸易的咽喉,也是一带一路中"海上丝绸之路"的必经之路,因此南海 的战略价值日益彰显。

南海属于热带海洋,其水温以及气候十分适于珊瑚的繁殖,因此会在海底的 地形变化处形成珊瑚礁或珊瑚岛屿,如图 1-1(a)所示,也正因为这个原因,南 海上的东沙、西沙及南沙群岛中的多数海岛均为珊瑚岛屿。而在对南海的开发中, 岛礁的存在势必起着极为重要的战略作用。岛礁可以为各种资源的开发提供依托 和保障,为我国"海上丝绸之路"航线的通畅保驾护航,保障国家的战略物资需 求。同时南海岛礁也是中国领土主权中不可分割的一部分,是中国领土的最前沿, 是中国的南大门,可以为国家的战略部署提供前沿的基地。因此,南海岛礁的战 略地位日益凸显,围绕岛礁的争夺和建设也愈演愈烈。



图 1-1 南海岛礁(a)及近岛礁结构物(b)示意图 Fig.1-1 Diagram of island and reefs and structures near the island.

散布在浩瀚南海上星罗棋布的珊瑚岛面积较小,数量繁多,海洋岛礁周围往 往环绕着数百米至数千米的珊瑚礁盘。如图 1-2 所示,这些礁盘一般在岛礁周围 水深较浅位置分布,而在离开岛礁数百米左右后,水深会骤然增大到数十米甚至 上百米,从而接近深海水深^[1]。岛上缺乏淡水等生活必需物资,缺乏停泊的码头, 礁盘的存在也使得近岛礁附近海况复杂激烈,岛礁周围较大的浅水范围也使得大规模的岛礁补给更为困难^[2]。为了更好地保障资源开发及岛礁建设,如图 1-1 (b) 所示。在岛礁附近建立一个平台作为综合保障基地就是一个极佳的选择。



Fig.1-2 Section of seabed near island and reefs

一般情况下,平台按照适应水深的不同,会有不同的平台形式。平台按照基础形式不同,可分为固定式平台以及移动式平台。固定式平台可分为重力式平台、导管架平台等;移动式平台可以分为底撑式平台以及浮动式平台,底撑式平台可分为自升式平台以及坐底式平台,浮动式平台可分为半潜式平台、TLP平台、Spar平台等形式。如图 1-3,根据水深的变化,在浅水区域,一般采用固定式平台或底撑式平台;随着水深变深,平台形式逐渐向浮式转变。在超深水区域,由于海况相对恶劣,顺应式浮式平台开始展现出其良好的抗风浪能力,TLP平台、Spar平台以及半潜式平台开始随着人们对于海洋的探索而不断向深海领域挺进。



图 1-3 海洋平台形式随水深变化趋势 Fig.1-3 Variation trend of offshore platform form with water depth

然而针对南海岛礁附近的复杂海洋地理环境,若采用传统的固定式平台作为 近岛礁保障平台,会遇到一系列问题:

 1)远离大陆带来的建设、补给问题。南海地处外海远离大陆,若建设固定式 平台则需要大量的土方机械以及后勤保障,如此远距离的机械设备、后勤保障的 运输都会导致巨大的成本增量^[3];2)较大范围的礁坪浅水环境使得施工困难。如 前文所述,岛礁附近的礁坪上水深较浅,多为10m以内,礁坪上的较大范围的浅 水环境也使得施工困难,大型工程船舶难以进入,且浅水复杂海况下的飞沫、破 碎等现象会给施工带来一定的困难和安全隐患;3)固定式平台对地形要求高。大 部分固定式平台对底部地形有一定要求,如重力式平台、自升式平台以及导管架 平台,或要求底部地形平整或要求地形适合打桩,而岛礁周围地形较为复杂,因 此对于固定式平台的选址较为困难;4)固定式平台的建设对环境有一定的影响和 破坏。岛礁的生态环境较为脆弱,由于岛礁面积较小,因此生态圈很小,自身的 生态恢复能力较弱,如遭破坏则多年难以恢复。固定式平台的建设势必会对岛礁 的生态环境造成一定程度的破坏;5)固定式平台难以实现大型化发展。固定式平 台建设的成本较高,且由于地处外海远离大陆,其建设规模不可能非常大,也就 限制了岛礁资源的开发及主权的进一步维护;6)固定式平台的固定性限制了岛礁 夏设的进程。固定式平台难以根据岛礁的建设工程的推进进行迁移,每发展一处 岛礁均需要建设一个新的平台,极大的增高了岛礁开发工程的成本,限制了南海 岛礁的进一步开发。

而若运用浮式平台,则有以下优势:

1)现场施工周期短,可实现快速布放,不需要长距离的建设和补给,成本低。 浮式平台可以在大陆进行建设,无需在项目所在地进行现场建设,建设完成后可 由拖船拖到现场,现场所需工作仅为抛锚定锚工作,建设成本低;2)基本不受地 形影响,选址容易。由于浮式平台利用系泊系统定位,仅锚泊点与海底有接触, 因此对于底部地形要求不大,大部分地形均可抛锚,从而使得保障平台的选址较 为容易:3)对生态环境、礁盘和海岛陆地形态几乎没有影响。由于在项目所在地 不需要进行现场建设,因此对于地形、生态影响较小:4)可实现模块化组装,从 而实现超大型浮体的布置和使用。如图 1-4 所示,是美国的海上浮式机场的概念 图,是由几个浮式平台舱段在海上对接而成。我国目前也在建设该方面的项目, 据有关专家透露,目前我国桁架式超大型海上平台技术已经取得重大突破,项目 计划建设 90 米×300 米、120 米×600 米以及 120 米×900 米三种规格的模块化平 台,可以根据要求拼接组装无限放大,相当于多个平台船体并联形成的浮岛式平 台^[4]。此外通过建设超大型浮式结构物可以为未来的海上浮式城市设计做探索和 研究。5)可以根据需要随时移动位置。若在岛礁建设的过程中,需要移动补给平 台位置,则可以根据需要,相应的将锚泊系统收回,并由拖船将其拖至工作海域 即可; 6) 更适合南海的极端恶劣海况。因为平台要常年驻扎在南海岛礁附近, 而 南海的海况相对恶劣,经常会有台风等极端恶劣天气,而浮式平台比固定式平台

- 3 -

更能够经受住极端恶劣海况的考验,其顺应式定位系统有助于吸收部分外载荷;7) 依托我国造船大国的优势,浮式平台的设计、建造和运营难点较少。



图 1-4 大型模块化浮式平台(可移动陆地) 概念图 Fig.1-4 Conceptual figure of modularized platform in South Sea

因此,在建设岛礁、开发岛礁的过程中,在近岛礁位置设立一个浮式保障平 台就成了一个极佳的选择。然而对于岛礁附近的浮式平台,其所处的波浪环境与 深水的线形波浪环境有较大区别。一方面岛礁附近海底复杂的地形条件会导致波 浪在此处发生反射、绕射以及折射等一系列变化^[5],使得波浪环境较为复杂;另 一方面波浪在从深水向浅水传播的过程中,水质点的轨圆运动受到底部边界条件 的阻塞作用从而使波浪产生变形,波浪波峰偏向前缘,波陡增大并产生翻卷和破 碎,因此会带来更多的强非线性波浪问题,强非线性波浪会对平台造成非线性较 强的抨击、爬高等载荷作用。因此在近岛礁浮式平台的设计建造与安全性评估中, 对岛礁波浪环境及浮式结构物水动力特性的研究显得尤为重要。

精确模拟海浪在浅水礁坪上的一系列变化以及分析近岛礁波浪对浮式结构物 的水动力载荷是相当困难的。目前国际上的专家学者在波浪数值模拟领域的研究 和应用方面已经取得了相当多的成果,目前通过建立波浪的数值模型,可以模拟 出波浪在海洋环境下的传播、反射、折射、绕射等情形^[6],但针对波浪在浅水地 形上的演化、翻卷、破碎以及对结构物抨击等现象的研究还未深入,国际上诸多 学者目前都在聚焦这一波浪力学的前沿领域。此外,在浮体水动力性能的研究方 面,目前对于深海浮式结构物的动响应问题研究较为透彻,许多学者已进行了多 年的研究;但对于浅水浮式结构物的水动力学特性研究方面,由于浅水使用浮式 平台的工程案例较少,因此这方面的研究成果较少,本课题亦属于前沿课题。鉴 于南海独特的地理环境以及国家的战略规划,本文将对近岛礁浅水浮式平台的水 动力特性进行深入研究,同时对波浪在近岛礁地形的爬坡过程中出现的一系列演化现象进行精确模拟和探究。

#### 1.2 浅水浮式结构物水动力学问题研究现状

#### 1.2.1 浅水波浪问题概述

相比于深海波浪环境,浅水波浪环境更为复杂。浅水波浪在传播过程中会受 到海底地形的显著影响,使得以往的线性波浪理论不再适用。浅水波浪在传播过 程中会因为地形的影响而出现一系列的演化现象,如绕射、反射、折射等,同时 也会出现波浪翻卷和破碎等强非线性现象。因此,对于浅水波浪演化特性的研究 是研究浅水浮式结构物水动力特性的关键。

1) 波浪在浅水的演化

当波浪从深水接近海岸时,水深(d)与波长(L)之比减小。水深大于波长的一半时,波浪为深水波,此时波浪运动基本不受海床的影响,其速度由波长决定。当水深小于波长的1/20时,波浪运动受海床干扰,波浪为浅水波,其速度主要由水深决定。然而,在中等水深(1/20<d/L<1/2)的波浪的情况下,波浪运动部分地受到海床的影响,其速度部分取决于波长,部分取决于水深^[7],海底与波浪的相互作用愈加明显,使波浪进入浅滩水域时减速。此时,波峰处的波高和质点速度偏大,波浪的波长和波速减小,从而波浪上缘的波峰比靠近下缘的波谷传播得快得多,波峰变得更加陡峭,波峰偏向波浪前缘。当波陡(H/L)随波高和波长的变化不断增大最终超过极限,波浪破碎现象就发生了。关于浅水波浪演化问题,国内外学者做了诸多研究,包括波浪在深水和浅水演化过程中相应的破碎物理特征^[8-13]。

2) 浅水波浪的破碎准则

在深水中,判断波浪是否破碎主要取决于一列波中最高波浪的物理参数。而 在浅水区,波浪传播到水深减小时会发生变形,因此在确定破碎准则时,会考虑 海底和浅滩的影响。波浪破碎的运动学准则由 Rankine^[14](1864)定义,指的是波峰 处的水平质点速度超过相速度,这个准则既适用于深水波,也适用于浅水波。 Miche^[14](1994)有限水深周期波破碎准则是 Stokes 理论的推广,当波陡度达到 *H/L*=0.142tanhkd (*H*, *L*, *k* 和 *d* 分别为局部波高、波长、波数和水深)时,波浪发 生破碎,此时波浪能保持的极限波峰角为 120°。浅水波破碎的另一个几何学准 则是波面斜率趋于无穷大,也就是前表面波面垂直于水平面。该准则的动力学判 据是水粒子垂直向下加速度超过重力加速度的一半。波浪破碎也与平均动量和能 量密度局部的相对增长率有关^[15]。Peregrine 等人^[16](1980)研究了波浪接近破碎时 波峰的流体特性。作者发现此时水质点在波峰区域运动速度高,在波的前表面加 速度高,在波的后表面加速度低。

3) 浅水波浪破碎机理和破碎类型

在波浪破碎过程中涉及许多空气和水之间质量、动量和能量交换的物理过程。 从破碎开始到波浪完全破碎的过程中,有两种完全不同的物理机制在起作用:一 种机制控制破碎现象开始出现直至破碎点之间波浪的波高和波能的演化;另一种 机制控制破碎点后波高衰减和能量耗散。波浪在破碎过程中波高会损失一半以上, 在卷波破碎中,能量会迅速耗散,而在崩波破碎中,耗散较为缓慢^[17]。



图 1-5 波浪破碎区的分布 Fig.1-5 Distribution of wave breaking zones

根据 Svendsen 等人^[18](1978)的研究,破碎区可细分为三个区域:外部区域、内部区域和上爬区域,如图 1-5 所示。当波浪接近海岸时,波浪的前端逐渐变得陡峭,直到波浪前端与平坦的波谷垂直,并且波浪前端翻转,最终波浪破碎,在这个过程中波浪特性发生了显著的变化。波浪在外部区域由有组织的无旋流动过渡到有旋运动,此外,翻转的波峰向前跌落到波谷中,并沿波前表面向前的运动。结果如图 1-6 所示,翻卷产生带有气穴的旋转涡流,并且在自由面产生表面水滚,水滚以波速传播。Peregrine^[11] (1983)和 Basco^[9](1985)指出,湍流是由翻卷涡流向 深海传播以及表面水滚向岸上传播的共同作用形成的。Peregrine 和

上海交通大学硕士学位论文



Svendsen^[19](1978)指出,湍流产生于表面水滚的趾部,并沿着自由表面向下扩展。

图 1-6 波浪破碎时翻卷涡和表面涡的形成

Fig.1-6 A schematic sketch of plunger vortex and surface vortex during breaking (Basco, 1985)

波浪的破碎类型描述了波浪在破碎时的剖面形状,在平面斜坡上,破碎类型 主要海底坡度和波浪参数的控制^[20-22]。根据 Battjes ^[20] (1974)提出的 SURF 相似参 数  $\xi = \frac{m}{\sqrt{H_0/L_0}}$ ,可以将波浪分为三种破碎类型:崩波( $\xi < 0.5$ ),卷波( $0.5 < \xi < 3.3$ ), 激散波( $\xi > 3.3$ )。



图 1-7 波浪破碎类型示意图 Fig.1-7 Schematic sketch of type of breaker

虽然卷波和崩波大部分的发展特征和涡流形成过程相似,但其涡流的大小和 强度是显著不同的^{[9][17]}。通常,波峰在自由表面卷曲并产生漩涡,破碎引起的能 量耗散率取决于旋涡的大小和强度^[17]。卷波破碎产生的旋涡更大,水流会以更大 的速度射到底部,而崩波破碎旋涡比较小,并且主要停留在自由面附近,速率也 相对较慢^{[17][23]}。因此,由于崩波破碎中湍流引起的能量传递的速率更小,所以崩 波的长度和速度量级也一般更小。这就解释了为什么在破碎区,卷波的波高衰减 是迅速的,而崩波的衰减相对缓慢。在卷波破碎中的湍流是由表面水滚和翻卷涡量共同作用产生的^[9]。如图 1-6 所示。而对于崩波破碎,湍流主要来自表面水滚的贡献。

4) 波浪破碎特性

波浪在浅水传播过程中,随着水深变浅,局部波陡不断增大,直至破碎点。 在波浪开始破碎时刻,波浪波高达到最大值。



Fig.1-8 Schematic sketch of the wave profile at breaking

具体而言,破碎高度(*H_b*)和水深(*d_b*)是用于评估破碎波的水动力载荷的重要设 计参数。前人研究了入射波特性与破波特性之间在破碎指数方面的关系^[24-27]。破 碎水深指数和破碎波高指数是水深、波浪周期和海底坡度的函数。其中破碎深度 指数 γ_b是破碎高度(*H_b*)与深度(*d_b*)之比:

$$\gamma_b = \frac{H_b}{d_b} \tag{1-1}$$

这个式子描述了破碎时的无量纲波高,该值对于较浅的水深处的破碎波更大。 破碎高度指数Ω_b是破碎高度 H_b与海上波高 H₀的比值:

$$\Omega_b = \frac{H_b}{H_0} \tag{1-2}$$

5) 浅水波浪的几何特性

波浪在均匀的海底斜坡传播时,会与海底相互作用从而变得波峰陡峭而波谷 平坦,当波浪达到破碎点时,其剖面并不是几何对称的。由于整体波陡度(*H/L*)不 足以描述非对称剖面,因此在破碎时局部波剖面的几何描述需要更详细的参数。 很多研究者对波浪在深水和浅水的几何特性都进行过实验研究^[28-32]。Kjeldsen 和 Myhaug^[29](1978)首次研究了不对称参数与波浪翻卷类型之间的关系,他们引入陡 度和不对称参数来定义波形的不对称性,其中有波峰前缘不对称性参数(ε)、后缘 不对称性参数(δ)、垂直不对称性参数(λ)和水平不对称性参数(μ)。作者根据陡度和 不对称因素对破碎类型进行了分类。此外,其几何特性还与深水中浮式结构所受 的波浪破碎力有关。他们还确定了深水中卷波的陡度和不对称参数的上限值和下 限值。

Ippen 和 Kulin^[33](1954)首次系统地研究了浅水破碎波的几何特性。Miller 和 Zeigler^[34](1964)根据破碎时波形的不对称性将波浪破碎分为对称型、不对称型和中 间型。Adeyemo^[31](1968)深入研究了这一点,他的研究还包括海滩坡度对几何特性 的影响,作者将破碎时的波几何特征描述为:波的垂直不对称性、波的斜率不对 称性和波的水平不对称性。Iwagaki 和 Sakai^[25](1972)研究了海滩坡度对波浪转换 的影响以及波浪接近破碎的几何特性。Hwang^[32](1984)利用 Kjeldsen 和 Myhaug^[29](1978)提出的深水陡度和不对称特性研究了缓坡上波浪的不对称特性。

#### 1.2.2 浅水波浪问题的研究历程

1) 理论研究

浅水中破碎周期波的理论知识最初基于 Russell^[35](1834)提出的孤立波理论。 随后,Airy 在假定任意点的压力等于静水压头的前提下,忽略了水粒子加速度, 提出了一种在缓坡上有限振幅波的非色散浅水方程,作者还指出,波浪在浅水中 的演化使波前表面变陡并使最大粒子速度的出现在波峰处^[11]。此时波浪的上部速 度大于下部速度,其值等于波峰处水质点速度的水平分量和长波的波速之和,如 下所示:

$$u_{crest} = \sqrt{g(d+\eta)} + u \tag{1-3}$$

其中*g*是重力加速度,*u*是水粒子速度的水平分量,*d*是水深,*η*为波幅。结果,波的前表面变得更加陡峭,这影响波峰下的压力分布。Boussinesq(1871)和Rayleigh(1876)^[35]指出了这一点。孤立波传播的Boussinesq 方程包括一个附加色散项,以平衡由于波陡变化引起的垂直加速度的变化。Stokes(1880)最先根据波高(*H*)和波长(*L*)确定破碎临界点波陡为 *H* / *L* =0.141,波峰角 120 度。Korteweg 和 Devries(1895)在Boussinesq 方程的基础上发展了浅水理论来描述周期性色散长波。Benjamin(1972)证明了孤立波 KdV 方程的稳定性。Sverdrup 和 Munk(1944)提出了一种基于稳定孤立波的波浪破碎理论,随后 Munk(1949)将该方法推广到破碎区的 波浪研究^[36]。Stoker^[37](1949)基于空气动力学理论通过处理可压缩的气流发展了一种不同的理论方法来处理浅水中的周期性波浪破碎问题。

如前文所述,自由表面水滚的形成和传播是波浪在破碎带的重要特征。 Svendsen^[38](1984)发展了一个二维理论模型,通过利用表面水滚概念预测波浪高度 在破碎区的变化。Svendsen 和 Madsen^[39](1984)发展了一种理论方法来描述与破碎 区湍流潮涌相关的速度分布、能量耗散和流动特征,他们将非线性有限振幅浅水 方程推广到 k-ε 模型中,并考虑了水流中湍流的影响。Yamazaki(2008)^[40]等人在研 究中试图通过描述具有非静水压项的弱色散波,使用非线性浅水方程来模拟孤立 波的破碎和爬升。此外,该模型能够在没有任何波浪破碎经验参数或耗散系数的 情况下预测破碎的出现时点。然而,该数值模型不能用于模拟波浪在破碎区的湍 流特性和自由表面变形。

波浪理论适用于描述微幅波在均匀海底上的演化现象,该理论忽略了物理量 在垂向的变化。由于基于近似理论,如无旋、二维运动、水平海底和静水压假设, 它们无法描述完整的波浪破碎过程^[40]。尽管浅水理论在对浅水长波的演化预报中 表现得很好,但当波面变得非常陡峭甚至垂直时,该理论则无法适用。大多数理 论模型没有考虑破碎过程中的回流效应,这将影响临近破碎时波浪自由表面的演 化。

#### 2) 基于 Boussinesq 方程

Boussinesq 方程可以很好地预测波浪的非线性波变换,包括浅水波、折射波、 绕射波和反射波,特别是均匀水深中的孤立波。随后,Peregrine^[42](1967)改进了基 于深度平均的方程,以考虑水深变化。Madsen 等人^[43](1991)进一步发展了方程的 色散特性,对于较深水域和不规则波,Madsen 还提出了一种基于时间中心隐式有 限差分格式求解该方程的数值方法。Nwogu^[44](1993)扩展了 Boussinesq 方程,Wei 等人^[46](1995)提出了完全非线性 Boussinesq 方程来模拟浅水中接近破碎极限的波 浪。然而,这些模型没有考虑海底摩擦和波浪破碎的影响。Wei 和 Kirby^[46](1996) 通过在扩展 Boussinesq 方程中增加能量耗散项来改进模型。一些研究使用经典 Boussinesq 方程和表面水滚概念来模拟规则和不规则的波浪破碎,例如 Hemming 等人^[47](1993)和 Madsen 等人^[48](1997)。还有研究者将人工粘性项添加到水深积分 动量守恒方程以对破碎建模^[49-51]。这些方法假定能量耗散取决于各水深平均速度 中的水平梯度。因此,该模型既不能预测破碎开始节点,也不能模拟破碎过程。

除了这些方法之外, Svendsen 等人^[52](1996)提出了一种基于 Boussinesq 方程 和 Reynolds 输运方程的二维理论方法来模拟破碎过程。Veeramony 和 Svendsen(2000)利用他们的研究成果^[53],对破碎区波浪的水动力特性进行了研究。 通过考虑流体的旋转运动,利用涡结构的发展描述了破碎过程。计算结果与实验 数据吻合较好。但是,该模型低估了接近破碎点的波浪高度,并且由于假设在水 深上存在均匀的涡流粘性,因此对湍流特性的描述相当有限。Briganti等人^[54](2004) 进一步发展了这种方法。他们通过定义涡流粘性随水深变化的紊流应力来详细研究破碎波下的紊流。

接近破碎的强非线性浅水波的演变可用 Boussinesq 波模型来表示,它基于具 有色散项的深度平均方程,并且对于描述浅水中的波浪演化可能更精确^[55]。此外, 通过增加破碎波能量耗散的人工耗散项,可以将模型推广到破碎区和冲泻区。然 而,这种模型的应用仅限于破碎前的区域,并且由于模型涉及了很多近似,该模 型不用于揭示破碎过程的直接的基础物理规律。

3) 基于势流的模型

Longuet-Higgins 和 Cokelet ^[56](1976)首先采用基于势流理论的边界积分法和 Eulerian-Lagrangian 混合公式对破碎波进行了数值模拟。该方法使用适用于深水中 二维周期波的物理平面的保角映射。此外, Vinje 和 Brevig^[13](1981)使用了相同的 模型,并且将模型扩展从而研究有限水深的波浪。New 等人^[57](1985)将 Longuet-Higgins 和 Cokelet 模型推广到有限水深的破碎波研究,包括水平底的影响。基于 Cauchy 积分定理,Dold 和 Peregrine^[58](1986)提出了一种边界积分法,用 于计算波浪破碎过程中自由面的非定常运动。Dommermuth 等人^[59](1988)用数值方 法对模型进行了改进,计算结果与深水破浪器实测数据吻合较好。

Grili 等人^[60](1989)通过实施改进的波生成、时间步进和数值稳定性方法,建 立了具有高阶边界元法的二维全非线性波模型。该模型成功地用于模拟淹没破碎 水中的孤立波破碎。Xue 等^[61](2001)提出了一个基于混合拉格朗日方法的三维模 型,采用高阶边界元法,研究了深水中的卷波破碎现象。Guyenne 和 Grilli^[62](2006) 模拟了三维数值波浪水槽中斜坡上孤立波在浅滩上的演化和破碎。模拟中较好地 描述了初始破碎过程中波峰发展的运动学特征和流动特征的细节。文中还指出, 用该模型模拟的物理过程仅限于卷波射流初始阶段的演化,不能用该模型模拟射 流冲击波面后的流动情况。

另外 Lachume 等人^[63](2003)和 Grilli 等人^[64](2004)试图通过将完全非线性势流 方程与流体体积法(VOF)相结合来模拟孤立波的二维破碎和破碎后的演化过程。文 中认为,用边界元法对破碎点的预测与 VOF 模型对破波区和破波区后的计算相结 合,可以从三维上描述完整的破碎过程。结果表明,该模型即使在翻卷的波峰冲 击自由面后也能模拟水流特性。然而,该模型并未与模拟破碎区平均速度场和湍 流速度场的实验数据进行验证。总的来说,随着数值方法的发展,势流模型可以 用来模拟破碎开始时期波浪运动学和力学特点。但是,这些模型不能用于模拟翻 卷后自由面重新接触的现象和波浪达到临界破碎点后的相关自由表面变形情况。 4) 基于 Navier-Stokes 方程的模型

Harlow和Welch^[65](1965)首先提出了一种基于 Navier-Stokes 方程的求解粘性、 不可压缩流体自由表面运动问题的有效方法。该模型用有限差分近似求解 Navier-Stokes 方程,用标记法描述自由面。然而,这种方法应对包括较大自由表 面变形和两相的波浪破碎时变得麻烦和耗时。Lemos^[66](1992)首次利用 RANS 方程 对浅水中的破碎波进行了系统的数值模拟研究。该模型在各向同性涡流粘性假设 和 VOF 方法定义的自由面的情况下,采用 *k-ε* 封闭的 RANS 方程求解速度和压力。 作者研究基于单相流,而空气和水的相互作用不包括在研究中。作者认为,在破 碎过程中,靠近自由表面的内部物理过程比空气-水相互作用起着更重要的作用。 Lin 和 Liu^[67](1998)基于 Reynolds 方程建立了单相流数值模型,该模型消除了各向 同性涡流粘性假设,用于研究破碎区内波浪的流体特性。模型使用湍流模型为两 方程模型 *k-ε*,自由表面求解采用 VOF 方法。其数值计算结果与 Ting 和 Kirby 的 实验数据吻合较好,尽管它们的模型较好地描述了破碎区的平均流场和湍流流场, 但由于数值耗散过大,模型高估了湍流强度,低估了接近破碎点的波峰。此外, 在初始破碎过程中自由表面处的翻卷射流的演变而产生的小规模湍流在模拟中没 有很好地捕捉到^[68]。

Bradford^[68](2000)利用基于 RANS 方程和 VOF 方法的商业软件模拟斜坡上的 崩波和卷波破碎。研究还检验了 *k-ε* 模型、线性 *k-ε* 模型和重整 *k-ε* 模型在模拟波 浪破碎带湍流时的适用性。Mayer 和 Madsen^[69](2000)尝试用 VOF 方法和两方程 *k-ω* 模型对崩波破碎进行建模。作者注意到,计算中出现了较多不合理湍流,从 而很大程度上影响了湍流模型的稳定性,从而影响了波的传播特性。Christensen 和 Deigaard^[70](2001)和 Watanabe(2005)^[71]等人使用了大涡模拟方法,对不同类型 波浪破碎下的流动特性和湍流结构进行了广泛的研究。

Zhao 等人^[72](2004)利用具有多尺度湍流模型的空间滤波 Navier -Stokes 方程, 对斜坡上的卷波和崩波进行了二维模拟。该模型高估了两种破碎的破碎点附近和 破碎点之后的波峰高度。但该模型能准确地展示破碎区中的波浪特性。虽然计算 的底流剖面与实验数据吻合得很好,但湍流特性并没有直接与实验数据比较,并 且在破碎过程中自由表面的演化也没有很好地表现出来。一些研究者基于单相流 假设,即不考虑水气相互作用,建立了数值计算模型^[68,70-72],这些模型很好地预 测了波浪在破碎区的特性。但是由于气-水相互作用在描述波浪破碎过程中自由表 面的演变和小尺度湍流方面起着重要作用,所以这些模型不能描述波浪破碎时的 物理过程。 空气-水相互作用是描述整个物理过程如翻卷射流、气穴、飞溅和二次波形成 等现象的重要参数,因此,近年来,基于两相流假设的 CFD 模型受到了广泛关注 ^[73-80]。Hieu 等人^[75](2004)提出了基于 Navier -Stokes 方程和 VOF 方法的两相流数 值模型。采用亚格子湍流 Smagorinsky 模型描述破碎波下的湍流。计算的二维结 果与实验数据吻合得很好。Christensen^[76](2006)对破碎波进行了三维大涡模拟,并 与 Ting 和 Kirby 的实验数据进行了比较。该模型较好地反映了实验中破碎区内部 区域的演化和底流剖面的特性。然而,对于崩波破碎,波峰高度会被高估,而对 于卷波破碎,波峰高度被低估。因此,对于崩波破碎而言,波浪破碎发生得更早, 对于翻卷破碎而言,波浪破碎发生得更晚。该模型还高估了湍流强度,低估了底 流剖面的梯度。作者指出,破碎点附近数值预报中的不确定性与网格尺寸和空气 的影响有关。

Wang 等人^[81](2009)基于不可压缩 Navier -Stokes 方程和不含显式湍流模型的 level-set 方法,提出了一种二维数值方法来模拟波浪破碎。该方法对崩波破碎的数 值计算结果与实验结果吻合较好。虽然在破碎区的外部区域特别是靠近破碎点的 区域,波峰高度被低估,但破碎点捕获得相当好。Xie^[82](2012)利用 RANS 方程、 *k-ɛ* 湍流模型和 VOF 方法,提出了一个数值模型来模拟斜坡和暗礁上的破碎波, 该模型与试验数据在波面高程、底流剖面和湍流强度方面较为接近。该方法对破 碎点进行了精确预测,但对崩波破碎点附近的波高和卷波破碎点后的波高稍有低 估。作者以合理的精度捕获了两种破碎现象在破碎过程中的速度场和涡度场,然 而数值模拟并没有很好地反映波浪破碎过程中自由表面变形和流动特征。

目前已有大量的针对波浪演化水动力学问题模拟的研究,并取得了较好的结果,但对破碎过程中自由面形态的演变和突出的流动特性的研究却很少。从水动力载荷评估的角度来看,在破碎波浪对结构物的载荷作用研究中,自由表面剖面、波高的演化、波的运动学特性及破碎临界状态的几何特性是较为关键的参数。由于势流方法无法描述波浪破碎时的物理过程,对于翻卷后自由面重新接触的问题无法描述,因此随着 CFD 方法的兴起,这种对粘性以及漩涡描述较好的方法越来越受到学者的青睐。

#### 1.2.3 浮式结构物研究方法

对海上浮式结构物的理论研究和数值研究在了解结构物运动和载荷响应特 性,辅助海上浮式结构物工程设计等方面具有重要的意义。目前,对于深水浮式 平台水动力性能的研究和预报已经非常完善,其主要研究方法有理论和实验方法、 势流方法和 CFD 方法等。

1) 理论研究方法

Morison^[83](1950)提出了采用半经验公式计算海洋结构上的波浪力,将平台周围的波浪力分为惯性力和阻力两部分。该方程根据经验力系数以准静态惯性和阻力的形式描述力,如下所示:

$$F_{D} + F_{M} = \frac{1}{2} \int_{-d}^{\eta} \rho_{W} C_{D} Du \left| u \right| dz + \int_{-d}^{\eta} \rho_{W} C_{M} \frac{\pi D^{2}}{4} \frac{\partial u}{\partial t} dz \qquad (1-4)$$

其中,*F*_D为阻力,*F*_M为惯性力,*C*_D为阻力系数,*C*_M为惯性系数,D为结构 直径,u为质点速度的水平分量,D为水深,η为瞬时波面高程。通过 Morison 方 程可以确定尺寸小于波长 1/5 的小尺度结构物的波浪载荷。Morison 方程没有考虑 波浪频率对结构物受力的影响,但可以包含粘性的作用。

Hooff^[84](1971)将平台分为尺寸足够小的若干部分,各个部分所受的水动力载荷相互之间不影响,整个平台的水动力载荷值为各个部分水动力载荷相加,作者就平台运动响应与波浪方向,水深之间的关系,得到了平台附加质量和阻尼系数的解。

Faltinsen^[85](1993)采用 Morison 方程研究了半潜平台的受力特性,结果表明,与流体加速度同一方向的势流力是平台所受水动力的主要组成部分,波浪绕射力以及粘性的作用是次要的。

Maeda 等人^[86](1992)研究了半潜式平台在一定方向规则波中的运动响应,发现入射波在一定频率范围内粘性效应非常突出。其结果表明,只有充分考虑粘性效应,才能得到较好的结果。Kobayashi 等人^[87](1987)早些时候也提出了类似的意见。

一些研究人员已经研究了势流漂移力和弹性力对半潜式平台的运动响应和 TLP 的系绳张力的影响^[88-92]。然而,粘性力对运动响应的影响没有被详细研究。 Bums^[93](1983)提出了一种计算不规则波中 TLP 的粘性漂移力和浪涌响应的方法。 Ertekin 和 Chitrapu^[94](1988)和 Chitrapu 等人^[95](1993)计算了 TLP 在规则波和随机 波中六个自由度的粘性漂移力和由此产生的响应。Donley 和 Spanos^[96](1992)提出 了一种研究 TLP 响应的方法,包括势流和粘流漂移力的影响,该研究利用统计方 法计算了拖曳力的平均值。

恒定水动力系数法^[97]和记忆效应积分公式法^[98]是研究平台运动常见的理论 方法。在这些方法中,假定平台运动为小幅度运动,在某些情况下,拖曳力在平 台湿长度上被线性化计算。Paulling^[99](1977)提出了非线性平台运动的时域仿真模 型。Huang 等人^[100](1982)给出了具有大横摇角的半潜体在规则波中的力和运动的 实验结果。Takarada 等人^[101](1986)利用非线性时域仿真和实验研究了半潜体的大 振幅运动甚至包括倾覆。Soylemez 和 Incecik^[102](1989)提出了一种预测半潜式平台 大振幅运动的非线性时域仿真方法。研究结果表明,作用在平台构件整个浸入长 度上的力的积分可引起平台的额外倾斜,非线性模拟得到的稳态倾角与实验数据 吻合较好。

2) 基于势流理论的模拟计算方法

基于势流理论的三维计算方法被广泛应用于深水和浅水海洋结构的水动力响 应计算,很多研究者在这一特定领域做过非常深入的研究。根据边界积分公式采 用的格林函数,可将势流方法分为两类^[103]。

在第一类方法中,点源和点汇分布在湿表面上,格林函数满足自由表面条件 和辐射条件。这个方法可以有效解决零速问题,但在考虑前进速度效应的情况下, 这种方法有一定的局限性。主要原因是它不能考虑近场流动条件以及定常和非定 常流动之间的相互作用。

第二类称为 Rankine 面元法,它在边界积分公式中使用非常简单的格林函数。 与第一类的明显区别在于其奇点不仅分布在湿表面,而且分布在自由面和控制面 上。这种方法具有适用于任何几何形状的浮体的优点,也可以对任意的海床形状 进行建模。Rankine 面元法最早由 Hess 和 Smith^[104](1964)提出。Kring^[105](1994)将 Rankine 面元法的使用扩展到时域。这使得该方法可以在计算中直接涵盖任何种类 的外力和非线性波浪。

刘应中、缪国平等^[106](1997)提出了一种分析系泊系统对浮体作用的时域方法, 作者假设锚链响应对浮体作用不明显,因此在求解锚链系泊力时采用准静态方法。 在求解出浮体运动的时历曲线后,再根据三维集中质量法对锚链的运动情况进行 求解。

范菊和黄祥鹿^[107](1999)用频域分析方法研究平台慢漂运动中系泊系统施加的 阻尼力问题,他们利用摄动理论求解的二阶锚链线张力的响应函数与时域方法进 行比较。由于系泊系统与浮式结构物之间的相互作用问题很难处理,致使平台运 动的复杂性大大提高,也使数值模型的难度显著提升,应对这种问题的主要方法 是对结构物和锚链系统的影响进行一定的简化,降低计算和分析的难度。

Söylemez和Atlar^[106](2000)对通过实验方法对势流方法和Morison公式法进行 了比较,结果显示两种方法在主要频率范围内都与实验吻合的很好,但是在低频 范围两种方法表现差距很大。 黄祥鹿等^[106](2001)开发了一种通过频域分析对平台和系泊系统耦合求解的方法,作者假设浮体的运动响应是线性的,而波浪载荷和锚链力是非线性的。这种方法可以计算出平台在波浪力和锚泊系统共同作用下的波频运动和慢漂运动,对于时域中最大值等统计值,则通过概率分布给出。

为了检验时域和频域计算的有效性, Clauss 等人^[110](2003)使用数值模拟和实验方法相结合,对 GVA4000 半潜式平台的水动力性能进行了计算,结果显示时域和频域方法对线性波浪下结构物运动和载荷的计算都比较准确,但是对于非线性波浪,时域的计算结果明显更好。

Tahar 和 Kim^[111](2003)基于 FEM 方法建模开发了一个求解器,用于在波浪、风和水流中对基于油轮的转塔系泊 FPSO(浮式生产储油和卸载)进行船体/系泊/立管耦合动态分析。

肖越、王言英^[112](2005)提出了一种在时域内分析浮式结构物运动的方法。他 们通过使用频域求解结构物的运动响应,将计算结果由频域转换到时域,再结合 时域下的锚链力模型求解此时锚泊系统的运动响应和受力。

Lowa 和 Langleyb^[113](2006)提出通过时域和频域分析综合计算平台水动力性 能的方法,作者认为由于锚链,平台和立管等因素的综合作用,使得整体的运动 响应很复杂,所以应当使用时域分析进行求解,但是由于时域分析计算量很大, 所以采用频域分析方法辅助分析,并将立管作用和锚链力进行线性化。

3) 基于 Navier-Stokes 的数值模拟方法

近年来,随着计算机能力的不断提升,计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法在水动力学研究中迅速普及。CFD 基于对粘性流动的模拟方法,更适用于求解诸如甲板上浪,波浪破碎等强非线性问题。因此,CFD 方法成为越来越多研究者研究浮式平台问题的主要工具。

Wei 等^[114](2013)基于正交设计理论,对翼梁平台螺旋板的参数进行了优化。 通过求解 RANS 方程,研究了影响 Spar 平台横向力系数的几个参数。采用"极差 分析"和"方差分析"方法对计算结果进行处理,得到不同螺旋筋参数下的 VIM 抑 制效果,建立了翼梁平台螺旋板的优化选择方法。

Rudman M 和 Cleary P W^[115](2016)应用光滑粒子流体力学方法对半潜式平台 上的波浪冲击进行建模,重点研究了不同系泊系统对平台运动和系泊张力的影响。 研究表明,由张力腿平台和张紧式扩展系泊系统混合而成的系泊系统比非混合系 泊系统具有优势,同时,系泊缆材料在这评种估中起着重要作用,特别是使用聚 酯绳作为系泊缆材料会使平台响应更有优势。 Pan K 等人^[116](2016)研究了大型波浪与浮式海洋结构物的相互作用。研究采用弱可压缩光滑粒子 (SPH)方法研究流体-结构相互作用,同时为了保证该方法的适用性,通过计算结果与两组实验数据的对比验证了该方法对流体力和刚体运动模拟的准确性。结果表明,张力腿平台在极限波浪作用下不太可能发生倾覆的情况。

Oggiano L 等人^[117](2016)对 1:40 比例的海上浮式风机模型进行了包括自由和 给定自由度下的规则波和不规则波受力和运动的实验,并使用 CFD 求解器 star CCM+用于计算模拟。结果表明,数值模拟结果与实验结果吻合的很好。

Pakozdi C 等人^[118](2017)使用 CFD 建模对随机极限波浪破碎及其对结构的冲击载荷进行了研究。作者基于一个广泛的非规则海况下的模型试验方案,确定了三个极端波浪工况,并用 CFD 方法对其进行了模拟。结果显示,数值模拟很好地再现了极限波浪的波陡,而计算中波浪的高度略小于实验中的高度。波浪冲击力的时历曲线与实验结果基本一致,但峰值略小于实验结果。

Tran T T,和 Kim D^[119](2017)采用基于重叠网格技术的计算流体动力学方法, 进行了同时考虑气动耦合对 FOWT 动力运动影响的流体-结构相互作用仿真。作者 针对 OC4 半潜式平台的多相流、6 自由度运动问题,建立了基于耦合计算流体动 力学和动态结构分析的计算模型。

Li 等人^[120](2017)本文研究了半潜式超大型浮式结构的水动力系数。导出了移动式海上平台(MOB)单模块运动动力学方程中结构质量、附加质量和静弹性系数的简化公式。文章给出了附加质量和静态回弹系数的求解结果,其数值与其他文献的结论非常相似,从而验证了各水动力系数理论公式的正确性、可行性和合理性,为超大型浮体水动力响应的计算提供了简化方法。

#### 1.2.4 浅水浮式结构物水动力性能

相比于深水,浅水波浪的非线性更为明显,浅水平台会更多地受到非线性力 的作用,其中有来自浅水波浪破碎带来的破碎波浪力,也有因水流从平台两侧和 底部通过而带来的三维效应,还有由海底地形变化而引发的波浪衍射和散射的影 响等等。目前,对海上浮式结构物在浅水中的研究时间较短,其相关的文献比较 少,但学者在浅水平台在波浪中的运动和载荷响应方面也做出了一定的工作。

最先兴起的是传统的势流理论, Endo^[121](1987)研究了三维物体在浅水波中的自由运动。他使用面元法计算刚体的水动力和波浪载荷,其假设与线性波势流理论相同。Li^[122](2001)得出结论, Endo 方法在浅水中精确的预测了物体的耐波性。

尽管如此,他认为 Endo 的一些代码需要修改。林建国,陶尧森^[123](1997)提出了 一种新的基于 Boussinesq 方程的浮体浅水非线性波动问题的求解方法。他们通过 将浮体湿表面作为自由表面处理,使 Boussinesq 方程具备全域直接求解能力,并 计算了固定浮体在浅水孤立波下的反射与透射问题。Bingham^[124](2000)利用势流 理论,设计了一种预报浮式结构物在浅水波浪上运动响应的新方法,并改进 Boussinesq 理论来预测波浪从深水传播到停泊的港口或海湾时的变化。

但如前文所述,浅水波浪问题是一个较强的非线性问题,若使用传统的势流 方法,无法对其进行准确描述,且由于粘性以及漩涡在浅水波浪问题中占据着较 为重要的地位,因此随着高性能计算机的兴起,越来越多的学者趋向于利用 CFD 方法对于浅水浮式平台问题进行探究。Christensen 等人^[125](2005)使用 N-S 方程解 算器和 VOF 方法模拟由于浅水中的破碎波引起的总波浪力和波浪上升。Bredmose 和 Jacobsen ^[126](2010)在没有显式湍流模型的情况下,使用基于 Navier-Stokes 方程 的开源软件 OpenFoam 和自由表面 VOF 方法进行了模拟。他们基于流场横向对称 性的假设,对计算域的一侧进行了建模。在仿真中,采用聚焦波群法产生破碎波。 Bredmose 和 Jacobsen^[127](2011)也采用了类似的方法,利用 OpenFoam 研究了垂直 波浪对海上风机平台的影响。

Mo 等^[128](2013)模拟了孤立波破碎以及破碎波与细长圆柱体在斜坡上的相互 作用,采用 PIV(particle image velocimetry)技术对 25m 长玻璃水槽内不同位置的 自由液面高度和速度进行了实验室测量。在数值研究中,采用过滤后的 N-S 方程 对平均流场进行了数值模拟,并采用 RNG 亚网格模型对湍流进行了描述。模拟得 到的自由面高程、波浪剖面和速度与实测值吻合较好。研究基于波槽内流场对称 的假设,因此数值模拟计算范围为半域。此外,该文章还研究了圆柱上的波浪起 伏和破碎波浪力。

丁军等^[129](2014)以近岛礁半潜式平台为研究对象,使用 Morison 公式和有限 水深格林函数法对其运动响应和载荷响应特征进行了数值研究。他们通过计算不 同浪向和水深下平台的响应参数和二阶波浪力的传递函数,计算了中横剖面垂向 弯矩的变化趋势。

Xiao 和 Huang^[130](2014)使用 RANS 方程和 *k-ω* 湍流模型,研究了在倾斜海滩 上垂直圆柱受到的孤立波破碎力,作者使用 VOF 法捕获自由表面,用实验数据验 证了该数值模型的准确性。该项工作还研究了在破碎区倾斜海滩上不同水深处的 圆柱体上的总作用力。

Choi 等人^[131](2015)使用基于 Navier-Stokes 方程的 CFD 模型计算竖直圆柱和

倾斜圆柱体上的波浪爬升和波浪破碎力。该模型采用 VOF 法进行自由面计算, Smagorinsky SGS (亚格子)模型进行湍流计算。计算结果与过滤后的实验数据吻合 较好。

Xiong 等^[132](2015)采用数值模拟和试验研究相结合的方法,对某驳船在浅水中的水动力性能进行了研究。他们基于三维势流理论,在频域和时域进行了数值 模拟。研究了不同水深和不同海况下浮式结构的响应,阐明了浅水浮式装置的安 全条件,研究根据数值计算和实验结果,进一步明确了浅水效应的临界水深。

Tezdogan T^[133](2016)等使用定常雷诺平均 Navier-Stokes 方程解算器,对船舶 浅水运动进行了数值研究。他们通过一系列模拟研究了浅水波的特性,并以大型 油轮模型为例,对其在不同水深、零航速下的升沉和纵摇响应进行了预测。

Lee S 和 Hong C^[134](2017)为评价大型船舶在浅水中低速航行的安全性,分析 了船舶类型对船舶航向稳定性的影响,采用 CFD 方法分别对 KVLCC2 和 DTC 进 行了水深、漂移角和角速度的预测模拟。

Seemontini R^[135](2017)等采用 RANS 求解器 SHIPFLOW 对 KRISO 超大型原 油运输船 2 号(KVLC C2)油轮在浅水不同漂移角、偏航率、方向舵角及其组合下 的稳态船舶运动进行了数值仿真。

从目前的浅水浮式平台研究现状和方法看,由于浅水波浪环境的非线性较强, 局部的波浪抨击更为激烈,波浪的演化、翻卷、破碎现象较为明显,传统的理论 方法以及势流方法已经无法对于各种强非线性的物理现象进行描述,因此 CFD 已 经成为了描述该问题的最有力工具。

#### 1.3 本文主要工作

本文基于课题组开发的船舶与海洋工程水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 对于一近岛礁浮式平台的水动力性能及相应的波浪环境问题进行探究。全文主要用到了六自由度模块、造波模块、锚链模块、动网格模块等,全文的 CFD 仿真基于 *K-* ω SST 两方程湍流模型进行求解。

第一章首先介绍了课题的研究背景,阐述了在南海地区发展浮式平台保障平 台的重要性以及针对近岛礁浮式平台开展水动力学研究的意义。随后介绍了近岛 礁浅水浮式平台及浅水波浪问题的研究现状。文章首先对于浅水波浪问题进行了 一个详细的阐述,随后对于浅水波浪问题的研究现状进行总结,归纳现有各种方 法对于浅水波浪问题的处理优劣势,根据分析发现,CFD 方法作为最直接的方法, 可以准确捕捉波浪翻卷破碎全部的物理过程,CFD 方法正在成为浅水波浪问题的 主流数值研究方法。随后对于浮式平台的研究现状进行阐述,目前浮式平台的水动力研究方面,深水平台偏多,浅水平台非常少,从而也侧面印证了该课题的创新性。在浅水浮式平台的研究中,针对非线性较强的浅水波浪中浮式结构物水动力学问题,CFD方法也是目前的主流研究方法。因此本文将采用 CFD 方法对于近岛礁波浪环境演化以及平台水动力特性进行分析。

第二章主要介绍了本文用到的数值方法和理论。本章首先介绍了粘性流体的 数学控制方程,在其中分别介绍了 N-S 方程以及自由面处理的 VOF 方法。随后介 绍了数值水池的构建以及造波、消波模块,紧随其后的是对于浅水波浪理论的阐 述,该部分理论有助于后文对于浅水波浪演化的深入理解,最后则是本文做浮式 平台计算所需要使用的六自由度运动模块以及系泊系统模块的理论介绍。

第三章主要对于平台自由衰减运动及求解器造波模块进行验证。本章对于本 文求解的问题进行了介绍,对于各种数值模型的构建进行了阐述,对于网格划分 等问题进行了详细的描述,并给出了作者在波浪问题计算中的网格划分经验。在 验证工作中,首先对于垂向自由衰减运动进行网格收敛性验证,并求得最优网格 量;其后对于平台三个方向自由度的自由衰减运动进行求解,并将固有周期与实 验结果对比;最后对于造波模块进行验证,分别将各个工况的波浪时历与理论波 形进行对比,验证波浪高度以及波形的吻合度。

第四章是本文的核心章节,主要对近岛礁波浪环境下平台的运动性能以及相 应的波浪演化特性进行分析。在平台水动力分析中,首先对于各波浪工况下的平 台水动力性能进行计算,并分别分析各个工况下,平台运动、受力方面的特点, 随后对于不同波频下的 RAO 结果进行统计,并与实验结果及其他学者所做的计算 结果进行对比,其后,针对不同波陡对平台的影响进行阐述,主要围绕波浪的爬 高和抨击现象区别进行描述;在斜底地形的波浪演化方面,首先对于各个工况的 波浪时历进行分析,分析各工况各自的演化特性,其次对于波浪传播过程中各个 工况的波高的变化趋势进行分析,并总结波高变化与波浪参数(周期)间的关系, 最后对于波浪演化的频率特性进行阐述,分析在波浪传播过程中,波浪的高频成 分发展情况,并分析波浪参数对于波浪的频率成分的影响;在开展地形对波浪演 化的影响对比部分,首先针对平底、斜底两个地形开展波浪演化问题计算,随后 针对两者的波高变化趋势进行对比分析,总结两者的波高变化差异,最后针对两 种地形下波浪传播中的频率特性差异进行分析,从而可以验证本章所做的关于平 台水动力性能及波浪演化特性计算和研究中的一系列非线性现象及规律确是由近 岛礁地形导致。 第五章是对第四章问题的一个延伸和深入。由于作者对第四章的波浪演化问题较感兴趣,因此在第五章针对二维的波浪斜坡爬坡翻卷问题进行了深入研究。本章首先针对不同波浪工况开展波浪翻卷的计算,其次对于波浪临界状况下的水深指数和波高系数进行计算,并与实验结果进行对比验证,最后针对波浪临界状况下的不对称性参数进行分析,总结上述参数对于波陡的敏感性。

第六章总结全文工作,对于各个主要章节得到的结论进行整理阐述,随后对 未来工作进行展望,指出现有工作中的不足,并对后续感兴趣的方向或应该继续 开展研究的方向进行了展望。 上海交通大学硕士学位论文

### 第二章 浅水浮式结构物研究数值方法

#### 2.1 粘性流体流动数学模型

#### 2.1.1 粘性流体控制方程

本文中流体假设为不可压缩粘性流体,控制方程采用不可压缩雷诺平均 N-S 方程,方程如下所示:

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

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \left(U - U_g\right)\right) U = -\nabla p_d - g \cdot x \nabla \rho + \nabla \cdot \left(\mu_{eff} \nabla U\right) + (\nabla U) \cdot \nabla \mu_{eff} + f_\sigma + f_s$$
(2-2)

其中,U和 $U_g$ 表示流场和网格节点的速度; $p_d = p - \rho g \cdot x$ 为压力修正项,其 值等于总压力与静水压力的差;g为重力加速度、 $\rho$ 为流体密度; $\mu_{eff} = \rho(v + v_t)$ , 为有效动力粘度; $f_\sigma$ 为表面张力项,只作用在自由表面上; $f_s$ 消波源项。由于本 文主要计算浅水波浪问题,因此本文的湍流模型主要用到了 *K-*  $\omega$  SST 湍流模型。

#### 2.1.2 自由面处理方法

浮式平台的浅水问题是典型的两相流问题,因此解决自由面问题是数值模拟 中不可缺少的一环。本文采用的自由面处理方法为流体体积法(VOF)方法,该 方法相较于其他方法能保持较好的计算精度,同时对于数值耗散问题也可以很好 应对。

VOF 方法的基本思路是:使用体积分数  $\alpha$  表示单个网格内流体所占整个网格的比重,  $0 \le \alpha \le 1$ ,其中  $\alpha = 0$  表示空气,  $\alpha = 1$  表示流体,  $0 \le \alpha \le 1$ 表示空气和流体的交界面,即自由面。体积分数需要满足的输运方程如下式所示:

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

其中, $U_g$ 和 $U_r$ 分别表示网格节点的速度和压缩界面的速度。

方程(2-1)中的表面张力项 f。可以由下式得到:

$$f_{\sigma} = \sigma \kappa \nabla \alpha \tag{2-4}$$

其中, $\sigma$ 表示表面张力系数, $\sigma=0.07$ kg/s²; $\kappa$ 为自由面曲率。

#### 2.2 数值水池波浪模拟

数值造波是海洋浮式结构研究和波浪演化的重要组成部分。本文利用基于 CFD 开源工具箱 OpenFOAM 开发的数值造波求解器 Waves2foam 实现造波和消波 功能。Waves2foam 通过设定入口处速度边界条件产生波浪,并利用松弛因子调整 波浪参数。在本文中,根据计算工况和波浪条件,将应用 Stokes 二阶波理论产生 波浪。Stokes 二阶波方程如下所示:

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 \tag{2-5}$$

$$\eta_1 = \frac{H}{2} \cos \omega t \tag{2-6}$$

$$\eta_2 = \frac{\pi H^2}{8L} \frac{\cosh kd}{\sinh^3 kd} (2 + \cosh 2kd) \cos 2\omega t$$
(2-7)

其中, η为自由面的波面高度, H, k, d分别为波高, 波数和水深。

造波器模块在出口处设置了松弛区。松弛区可以吸收入射波,保持入射波浪的质量守恒,同时可以避免波浪在出口处发生反射,从而避免反射波对浮式结构 物和造波区产生干扰。反射波对浮式结构物的作用会影响数值模拟结果的准确性, 对造波区的干扰可能引起造波边界数值结果发散((Jacobsen, 2012)^[77]。松弛区的 松弛效应由松弛函数调节,如下式所示:

$$\alpha_{R}(\chi_{R}) = 1 - \frac{\exp(\chi_{R}^{3.5}) - 1}{\exp(1) - 1} \text{ for } \chi_{R} \in [0, 1]$$
(2-8)

松弛因子 $\alpha_{\rm R}$ 对波浪的作用如下式所示:

$$\phi = \alpha_R \phi_{\text{computed}} + (1 - \alpha_R) \phi_{\text{target}}$$
(2-9)

其中, φ为流体质点速度或者液相参数。χ_R保证松弛因子 α_R 在入口处和出口 处为 0,在松弛区和非松弛区的交界处为 1,如图 2-1 所示



图 2-1 X_P在造波区和消波区的分布

Fig.2-1 A sketch of the variation of  $\chi_{\rm R}$  for both inlet and outlet relaxation zones

#### 2.3 浅水波浪理论

当波浪从深海向浅海传播时,由于水深的减小,诸如波浪传播速度、水质点速度、波高、波长、波浪形状等波浪参数都会发生变化。随着深度减小至临界值, 波浪往往会出现各种形式的破碎现象,破碎后的波浪形成水流冲向海岸。这个过程被称为变浅效应(Shoaling)。如果不考虑波浪破碎的影响,浅水波波浪参数的变化可以使用能量近似法描述。能量近似法由瑞利提出,它的基本假定为:

1) 波浪在传播过程中深度变化可忽略。因此波浪的波面形状,水质点速度忽略深度变化的影响;

2) 波面守恒,通过某一断面的波浪个数是稳定的,不会随时间变化;

3) 通过断面的能量通量保持不变。

在基本假定下同时忽略波浪折射和反射的作用,同时也不考虑底面摩擦。 有限水深波浪的色散关系为:

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \tag{2-10}$$

结合波速的定义,可得波速随水深的变化关系为:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kd} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{\lambda}}$$
 (2-11)

其中, *k*, λ 和 ω 分别为波数, 波长和圆频率。假设式() 也适用于水底面倾 斜的情况。当波浪在深水区域时, 有:

$$c_0 = \sqrt{\frac{g\lambda_0}{2\pi}} \tag{2-12}$$

比较式(2-11)和式(2-12),根据周期不变的假定,可得:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{\lambda}{\lambda_0} = \tanh\left(2\pi \frac{d/\lambda_0}{\lambda/\lambda_0}\right)$$
(2-13)

同时,根据能量不发生变化的假定:

$$Enc = E_0 n_0 c_0 (2-14)$$

其中
$$n = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4\pi d/\lambda}{\sinh(4\pi d/\lambda)} \right]$$

可以推算出波高H的变化。其公式为:

$$\frac{H}{H_0} = \left[\frac{2\cosh^2(2\pi d/\lambda)}{4\pi d/\lambda + \sinh(4\pi d/\lambda)}\right]^{1/2}$$
(2-15)

根据式 (2-15),波高 H/H₀ 受到相对深度 d/λ₀ 的影响。在波浪从深水向浅水 的传播过程中,波高随着水深不断发生着变化。当由深水至 d/λ₀=0.5 左右,波高 几乎没有发生变化,从 d/λ₀=0.5 至 0.2 附近过程中,波高略有减小,当 d/λ₀=0.2 附 近,波高值达到最小,H/H₀约为 0.91。然后,波高随水深变迁而增大。当水深极 浅时,波高幅值只与水深的数值相关,其变化关系可近似为:

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-\frac{1}{4}}$$
(2-16)

由于此时水深很浅,  $tanh kd \approx kd$ , 使得波速仅为水深的函数:

$$c = \sqrt{gd} \tag{2-17}$$

同时波长可由下式计算:

$$\lambda = T \sqrt{gd} \tag{2-18}$$

从上面的公式中可知,当水深减小时,波浪的传播速度降低。当一组波浪从 深海向浅海传播,处于前方的波浪速度降低,同时处于后面的波浪仍然以比较快 的速度进行传播,使得波浪向前方堆积,从而波高增大。同时因为波长随水深的 减小而减小,所以波浪的波陡增大。当波陡增大到极限值后,就会出现波浪破碎 现象。

#### 2.4 浮式结构物六自由度运动计算

海上浮式结构物会在外载荷的作用下产生六个自由度运动,它们分别是横荡、 纵荡、垂荡三个平面运动和横摇、纵摇、首摇三个旋转运动。了解浮式结构物在 波浪中的运动响应,对于研究浮式结构物水动力学特性,辅助设计平台外观结构 是非常重要的。

(1) 全局坐标系和随体坐标系

在六自由度模型中有两套坐标系,如图 2-2 所示,它们分别是全局坐标系 OXYZ和随体坐标系O'X'Y'Z'。浮体的六自由度运动定义都是在全局坐标系下的, 且全局坐标系原点一般是人为设定的,随体坐标系则通常默认浮体重心位置为坐 标系原点。



图 2-2 naoe-FOAM-SJTU 中坐标系定义 Fig.2-2 Definition of coordinate systems

(2) 坐标系间转换关系

若浮体完全静止,那么两套坐标系是平行的,两套坐标系上的信息也具有一 致性。而一旦物体发生运动,那么两套坐标系下运动信息将不再一致,需要对两 套坐标系下的各个物理量进行转换^[136]。

如图 2-2 所示,在全局坐标系中浮体的运动可以用一列向量表示:

$$\vec{\eta} = (\vec{\eta}_1, \ \vec{\eta}_2) = (x, \ y, \ z, \ \phi, \ \theta, \ \psi)$$
 (2-19)

其中, *x*, *y*, *z* 分别表示在全局坐标系下三个坐标方向的线位移,也就是纵荡, 横荡和垂荡; φ,θ,ψ 分别表示绕三个坐标方向的角位移,也就是横摇,纵摇和艏摇。

同样,在随体坐标系中浮体的运动速度也可以表示为:

$$\vec{v} = (\vec{v}_1, \vec{v}_2) = (u, v, w, p, q, r)$$
 (2-20)

其中,*u*,*v*,*w*分别表示物体纵荡、横荡和垂荡的速度,*p*,*q*,*r*分别表示物体横摇、纵摇和艏摇的角速度。

其中,前三个分量表示浮式结构物纵荡、横荡与垂荡运动的速度,后三个分 量则表示其横摇、纵摇与艏摇运动的角速度。

全局坐标系中的运动速度可以由全局坐标系中运动位移对时间求一阶导数得到,用, 示, 表示。全局坐标系下的运动速度和随体坐标系下的运动速度之间的转化 公式为:

$$\dot{\vec{\eta}}_1 = J_1 v_1, \ v_1 = J_1^{-1} \dot{\vec{\eta}}_1$$
 (2-21)

其中, $J_1$ 和 $J_1^{-1}$ 表示各个线性物理量在两个坐标系之间进行转化的矩阵, $J_1$ 和 $J_1^{-1}$ 互为逆矩阵,且 $J_1^{-1} = J_1^T$ 。 $J_1$ 如下式所示:

上海交通大学硕士学位论文

其中J2为角速度等旋转物理量的转换矩阵,其表达式为:

$$J_{2} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix}$$
(2-24)

 $J_2^{-1}$ 为 $J_2$ 的逆矩阵,其表达式为:

$$J_{2}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \cos\theta\sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}$$
(2-25)

(3)运动受力方程

物体整体受力可以分为两个部分,分别是物体受到的流体作用力和其他外力。 其中流体作用力可以由对物面压力积分和流体剪切力积分得到。现介绍整个运动 方程建立过程。



图 2-3 平面单元受力示意图 Fig.2-3 Sketch of force for a plane element

如图 2-3 所示,我们把物体表面的面单元作为研究对象,并用*ō*_i表示这个单元,该向量模量为单元表面积,方向为外法向方向。首先,将物体受到的流体作用力在沿物体法向和切向两个方向分解为*F*_n和*F*_i。其中*F*_n来源于流体对物体的压力,*F*_i来源于粘性流体对物面的剪切力。

我们对各个单元受到的压力和剪切力在整个物体表面上进行积分,可以得到物体所受的合力:  $\vec{F}_n = \int_s \vec{F}_{ni} \vec{\sigma}_i \ \pi \vec{F}_i = \int_s \vec{F}_{ii} \vec{\sigma}_i$ 。
除了流体作用力以外,浮式结构物还要受到其他力的作用,其中有结构物自 身重力*F_g*,有系泊系统的应考虑系泊力*F_{mi}*。由牛顿第二定律,可以得到结构物 线性运动和受力关系的方程:

$$m\vec{a} = \vec{F}_n + \vec{F}_t + \vec{F}_g + \vec{F}_m + \vec{F}_w$$
 (2-26)

同样,对于结构物转动和受力关系为:

$$\mathbf{I}\vec{\alpha} = \int_{S}\vec{r}_{i} \times \left(\vec{F}_{ni} + \vec{F}_{ti}\right)\vec{\sigma}_{i} + \vec{r}_{mi} \times \vec{F}_{mi}$$
(2-27)

其中, **I** 为浮式结构物在的转动惯量; *a* 为角加速度; *r_i* 表示由结构物重心到 表面各个单元的矢径; *r_m* 为由结构物重心指向锚泊系统连接点的矢径。

结构物运动与受力关系的方程是基于随体坐标系建立的,但其受到的外载荷 是由全局坐标系给出的,因此需要利用转换矩阵将全局坐标系的数值转化为随体 坐标系的数值。

由式(2-26)与(2-27)给出的结构物的运动方程是在局部运动坐标系中的建 立的,而方程右端项的各项外力载荷的计算(包括流场力、重力、系泊力等)则 是在全局固定坐标系中完成的,因此需要利用式(2-21)和(2-23)给出的转化关 系将其转化到局部运动坐标系中。

(4) 动网格技术

使用 CFD 方法计算浮式平台水动力性能时,会由于平台的六自由度运动发生 网格的变形。本文使用了 naoeFOAM-SJTU 求解器的动网格技术,其主要思路是: 当结构物运动时,在保持各个网格节点与邻近单元的拓扑关系的同时,通过移动 节点使网格的形状发生改变。可以求解拉普拉斯方程来得到网格节点的位置

$$\nabla \cdot \left(\gamma \nabla X_{\sigma}\right) = 0 \tag{2-28}$$

其中, X_e为了节点位移值, γ为网格变形系数, 可以用下式取得:

$$\gamma = \frac{1}{r^2} \tag{2-29}$$

其中,r为网格中心到动边界之间距离。

## 2.5 系泊系统求解方法

在对带锚泊系统浮式平台的运动受力进行求解时,需要考虑锚链对平台的作用力。本文的系泊系使用的是 naoe-FOAM-SJTU 求解器下的系泊系统模块,该系 泊系统模块由课题组刘远传等人开发,并经过严格验证^[137]。本文系泊系统采用的 是分段外推法(Piecewise Extrapolating Method, PEM)对锚链作用力进行求解。 其基本思路为:先对锚链进行分段,求解某一段端点位置和所受张力,再以其为 已知量进行下一段求解,直至解得整段锚链的端点位置与张力。图 2-4 所示为分 段外推法对系泊链索坐标系的定义,



图 2-4 分段外推法系泊链索坐标系定义

Fig. 2-4 Definition of the mooring line coordinate system for PEM,(a)Side view, (b)Top view

如图 2-5 所示,选取第 *i* 个单元作为研究对象,近系泊点端点编号 *i*+1,近毛 波点端点编号 *i*。



Fig.2-5 Sketch of forces acting on one segment of a mooring line for PEM

图中, *T_x*和*T_z*分别表示节点处张力在锚泊系统坐标系中的水平分量和垂直分量, *φ*表示节点张力与水平张力的夹角。力的方向与坐标系的轴方向无关,均默认为拉力。*dl*和*ds*分别表示该锚链单元在拉伸前和拉伸后的长度, *w*为锚链单元的重量, *D*和*F*为锚链单元所受流场力的法向分量和切向分量, *U*为附近流场的速度, *U_N*和*U_T*分别为流场速度沿法向和切向的分量。

对锚链单元建立静力平衡方程:

$$\begin{cases} T_{xi+1} = T_{xi} + F_i ds \cos \varphi_{i+1} + D_i ds \sin \varphi_{i+1} \\ T_{zi+1} + D_i ds \cos \varphi_{i+1} = T_{zi} + F_i ds \sin \varphi_{i+1} + w_i dl \end{cases}$$
(2-30)

如果锚链单元足够多,那么每一个单元都可近似看做直线,所以在将流场力 分解时,选择*φ_{i+1}*为分解角度。

锚链单元所受流场作用力可以由 Morison 公式得到:

$$\begin{cases} D_{i} = \frac{1}{2} \rho C_{DN} D \left| U_{N} \right| U_{N} \\ F_{i} = \frac{1}{2} \rho C_{DT} \left( \pi D \right) \left| U_{T} \right| U_{T} \end{cases}$$

$$(2-31)$$

其中, ρ为流体密度, C_{DN}为法向阻力系数, C_{DT}为切向阻力系数, D 为单元 的直径。

根据几何关系,还可以得到节点坐标与拉伸长度的关系式:

$$\begin{cases} ds \cos \varphi_{i+1} = x'_i - x'_{i+1} = \Delta x' \\ ds \sin \varphi_{i+1} = z'_{i+1} - z'_i = \Delta z' \end{cases}$$
(2-32)

其中,为了使左边项大于0,调整了坐标做差的顺序。 将式(2-32)代入式(2-30)中,可以得到:

$$\begin{cases} T_{xi} = T_{xi+1} - F_i \Delta x' - D_i \Delta z' \\ T_{zi} = T_{zi+1} + F_i \Delta z' + D_i \Delta x' - w_i dI \end{cases}$$
(2-33)

结合单元张力与变形之间的关系:

$$ds = dI \left( 1 + \frac{T_{i+1}}{EA} \right)$$
(2-34)

利用式(2-31)至(2-34)四个方程,再结合边界条件,就可以求解锚链的形状和 张力大小。 上海交通大学硕士学位论文

# 第三章 平台自由衰减运动及造波的计算验证

## 3.1 引言

平台的固有周期是水动力研究的重要一部分,在开展平台水动力性能计算前, 本文首先对于近岛礁浮式平台的固有频率特性进行了研究,对于波浪问题中所关 注的平台纵荡、升沉以及纵摇三个自由度进行了自由衰减运动的计算,得出平台 的固有响应特性,并将计算的固有周期结果与实验结果进行对比验证,从而验证 求解器的准确性。

此外,由于后文将对于平台在规则波中的运动响应问题及规则波在近岛礁斜 坡地形上的演化现象进行仿真模拟,因此本章还将对于空场的规则波造波问题进 行仿真,确保波浪达到计算工况预定高度,并将波浪仿真结果与输入的理论波波 形进行对比,从而验证求解器以及造波结果的准确性,并总结部分的波浪波形演 化特性。

## 3.2 计算模型设置

本文工作之一主要是研究一近岛礁浮式平台在相应波浪工况中的水动力性 能,平台的计算模型主要参考田超^[5]等人在江苏科技大学所做的实验。平台的实 验模型以及计算模型如图 3-1 所示,平台的试验模型主要由六根立柱、三个底部 浮筒以及一个甲板组成,计算模型与试验模型参数严格一致。平台的系泊系统分 布如图 3-2 所示,平台系泊系统由 8 根锚链组成,锚链分为 4 组,组内两根锚链 夹角均为 7.5°,组间夹角依照平台的布置决定,具体数据见图中所示。此外为了 适应近岛礁斜底地形,锚链的布置呈现不对称性,水深一侧,锚链相应较长,水 浅一侧,锚链相应较短。平台的主要参数如表 3-1,系泊系统参数如表 3-2 所示。



图 3-1 平台实验模型(左)及平台数值模型(右) Fig.3-1 Overview of experimental (left) and numerical model (right)

上海交通大学硕士学位论文



图 3-2 系泊系统布置示意图 Fig.3-2 Configuration of the mooring system

表 3-1 浮式平台主要参数
Table 3-1 Gross parameters of semi-submersible platform

1	1	
主要参数	单位	数值
型长	m	50
型宽	m	25
型深	m	9.7
吃水	m	5
排水量	m ³	2970
重心相对于水线高度	m	1.01
横摇惯性矩	Kg·m ²	$7.67 \times 10^{8}$
纵摇惯性矩	Kg·m ²	2.29×10 ⁸
首摇惯性矩	$Kg \cdot m^2$	$8.73 \times 10^{8}$

表 3-2 系泊系统主要参数

Table 3-2 Gross parameters of mooring system
----------------------------------------------

主要参数	单位	数值		
锚链数量		8		
每组锚链间角度	0	150.1/14.9		
锚泊点位置水深	m	10		
系泊点位置水深	m	5		
等效质量	Kg/m	97.08		
锚链直径	m	0.095		
杨氏模量	$N/m^2$	$1.2 \times 10^{11}$		

本文的另外一大核心问题是研究近岛礁的地形环境对于波浪演化以及浮式结构物性能的影响,因此对于近岛礁地形的模拟就显得尤为重要。如图 3-3,本文选取了一块与实验地形类似的近岛礁不规则斜底地形,计算域与地形相对位置如图中所示,方盒子即为计算域的区域,白色为选取的近岛礁地形,其延伸到水下的部分在计算域中的地形坡度约为两度,可以保证平台所处位置处水深约为 10 米,从而保证了计算地形与试验模型的相似性。最后,将在计算域中的部分地形提取出来作为计算域的底部物面边界条件来模拟海底。计算域内部布置包括系泊系统、平台位置、消波区、波浪来向、坐标系定义等如图 3-4 所示。计算域长度约为 250m,入口边界距离平台中心约 100m,出口边界距离平台中心约 150m,计算域的横向宽度为 130m。计算域的大小保证了平台前后各有一个以上的波长,平台左右也预留出足够空间,防止左右边界条件对于波面的反射和干扰,满足波浪计算的条件。



图 3-3 计算域及地形相对位置示意图 Fig.3-3 Sketch of computational domain and submerged terrain



图 3-4 计算域布置示意图 Fig.3-4 Computational domain with all key factors.

本文的计算网格如图 3-5 所示,计算域网格如图 3-5 (a) 所示,为一斜底边 界条件下的计算域,从地形模型中提取出的斜底边界条件如图 3-5 (b) 所示,地 形的纵向形状以及斜底的角度变化可从计算域侧面图 3-5 (c) 观察,图 3-5 (d) 则给出了平台附近的网格布置情况。本文的网格基于 OpenFOAM 自带的 snappyHexMesh^[138]求解器生成,通过对背景网格加密,其后捕捉出计算所需的物 面边界条件并进行网格贴合,可以在较短时间内生成质量较高的网格。本文所用 计算网格总数约为 160 万,计算的时间步长为 0.005s。



图 3-5 计算网格, (a) 计算域网格, (b) 底部地形, (c) 计算域侧视图, (d) 平台局部网格 Fig.3-5 Computational mesh of the domain (upper left), extracted terrain (upper right), lateral view of the domain (lower left) and the local view of the mesh beside the platform.

对于船舶与海洋工程领域 CFD 计算问题尤其是涉及到波浪的计算问题,其网格划分经过作者大量的计算,总结了以下计算经验:

1)整体计算域网格在疏密上呈现出一个包装盒的形状,即在计算域表面,横向、竖向以及纵向三个方向的中部网格均较密集,而在计算域的 8 个角上,网格较为稀疏,这样的布置使得在结构物周围以及自由液面附近网格相对密集,确保计算的关键要素的准确性以及可捕捉性,而在计算中相对不是很关注的角点上,网格相对稀疏,这可以有效的减少网格量,提高计算效率。

2) 在划分波浪问题网格时,自由液面处的网格要求较高,要求一个波长内应 有 60-80 个网格,一个波高内应该有 12-20 个网格,如此可以确保波形被准确捕捉, 且不会造成过度加密的网格浪费现象。 3) 从入口处到结构物位置处网格从稀疏到密集,但网格在波浪传播方向应尽 量确保一定的长细比,因为这段属于波浪造波和传播的一个过程,如果网格长细 比过大,会影响波浪的传递精度,建议在入口处长细比不超过3:1到4:1;从结构 物到出口处的网格网格从密集到稀疏,在之后的一个波长内尽量确保一定的长细 比,建议与入口处相同的值,当波浪传播到消波区附近,网格长细比则不太重要, 可以非常稀疏,网格数量确保波浪在其中可以消掉即可。

4)横向的网格(y方向)在平台位置密集,在两侧稍粗,但在两侧也建议长 细比不超过上文提到的长细比。

5)垂向的网格(z方向)由于本文研究的是浅水问题,因此建议从底部边界 条件到水面长细比变化较小,而自由面以上部分的网格,在超出了结构物加密区 之后即可较为稀疏,从而可以节省部分网格。

6)物面附近的网格尽量确保长细比为 1:1,从而保证较好的网格质量,对于物面的捕捉较好,对于数值计算结果的传递也较为精确。此外物面附近建议多加一个 box 进行网格加密,对于结构物运动可能导致的流体运动较为激烈部分都囊括在内,从而可以确保计算的准确性。

7)对于模型尺寸的波浪计算,网格需要长细比尽量保证以上的要求,此外模型尺寸的时间步需要在可行范围内尽可能的小,否则波浪会衰减的非常快。实尺度计算则网格要求相应可略微降低。

数值计算的边界条件是数值计算过程中最重要的影响因素,直接影响计算结果的正确性和可靠性,本文数值模拟设置的边界条件如下:

1) 在入口边界处,因为涉及到造波,所以速度条件采用波浪入口的 waveVelocity边界条件,压力条件则采用则是 zeroGradient 边界条件,压力梯度为 零。

2)在出口边界处速度条件采用 zeroGradient,速度梯度为零,压力条件设定的第一类边界条件边界条件。

3)在计算域的上下边界处,上边界压力与速度条件采用的第三类 inletOutlet 混合边界条件边界条件,下边界采用的是固壁面边界条件,为了模拟海底地形对 波流场的干扰。

4) 计算域左右边界采用的是 symmetry 边界条件。

5) 模型物面处,采用的则是固壁面的边界条件。

## 3.3 平台自由衰减运动模拟和验证

浮式平台的固有周期是其水动力研究的重要组成部分,在后文规则波中平台 运动性能的分析中将会应用到固有周期结果。本文首先对于近岛礁浮式平台的固 有特性进行了研究,对于波浪问题中所关注的平台纵荡、垂荡以及纵摇三个自由 度自由衰减运动进行了计算。

为了验证网格的准确性,本文对于平台的自由衰减运动进行网格收敛性验证, 本文的网格收敛性验证选择的计算工况为平台垂荡运动的工况,垂荡运动初始位 移为0.18m,网格量分别为100万,160万以及200万,计算结果如图3-6所示, 从图中可以出,三种网格量对于计算周期的预测都较为一致,但是对于平台的垂 荡运动的幅值的预报有明显差距。其中100万网格量的计算结果,平台衰减最快, 与另外两个网格量的计算结果差距较大,160万网格量的计算结果与200万网格 量的计算结果较为一致,后者的计算衰减幅度略慢于前者的衰减幅度,但总体误 差较小。因此,鉴于160万网格量的计算相对准确性,同时为了提高计算效率, 本文的网格计算总数确定为160万网格。



图 3-6 平台垂荡运动网格收敛性验证 Fig.3-6 Verification of grid convergence of heave decay motion of the platform

在进行了自由衰减的网格收敛性验证后,本文对于平台三个自由度的自由衰 减运动分别进行了仿真计算,计算的时历结果如图 3-7 所示。随后本文对于垂荡 及纵摇的固有周期的仿真结果与田超^[5]等人给出的实验结果以及理论预报给出的 结果进行了对比,由于在田超等人的论文中未给出平台纵荡运动的固有周期实验




图 3-7 三个自由度平台自由衰减结果, (a) 纵荡运动, (b) 垂荡运动, (c) 纵摇运动 Fig.3-7 Free decay motion of platform, (a) surge motion, (b) heave motion, (c) pitch motion

	1		
		固有周期 <i>T</i> _{\$\$\$} (s)	
自由度	模型试验值 (田超, 2014)	理论预报值/相对误差 (田超,2014)	数值计算值/相对误差 (naoe-FOAM-SJTU)
纵荡	-	-	33/-
垂荡	16.1	16.5/2.48%	16/0.62%
纵摇	20.1	19.5/2.99%	20.8/3.48%

表 3-3 固有周期计算结果对比(相对误差为相对实验误差) Tab. 3-3 Comparison of natural period of computational results with experiment data

从对比中可以发现,本文的数值计算结果与实验结果吻合良好。为了更进一步分析计算误差,本文以实验结果为标准计算进行相对误差的计算,计算结果在 表格中的周期后标注。从结果分析中可以发现,naoe-FOAM-SJTU 的计算结果中 垂荡固有周期相对误差为 0.62%,而纵摇相对误差为 3.48%,计算结果与实验结果 相当吻合,垂荡结果相较于田超等人理论预报结果更接近真实值,从而验证了求 解器的准确性,并为后文分析奠定基础。通过分析,作者认为此处细小的计算误 差主要来自于三个方面:

 1) 计算模型相比于试验模型略去了小横撑等部分小型构件,这会对平台的阻 尼造成一定影响,从而影响平台固有周期;

2)试验中平台周围有一系列测量仪器,其所处的环境并非理论预报以及数值 计算的完全理想环境,线路等构件的存在会影响平台阻尼;

3)由于数值计算是运用网格向物面贴合,势必无法保证网格与原物面的完全

一致,因此造成一定排水量的变化,因此也会因此影响计算结果。

总的来看,由于垂荡与纵摇的固有周期的计算结果较为准确,因此可以推论 纵荡运动在无试验结果进行对比的情况下也具有相当的可信度,后文将运用到平 台的固有频率特性进行波浪中平台运动性能的对应分析。

## 3.4 给定工况的波浪仿真及验证

本文的主要问题之一是研究波浪在礁坪(斜坡)上的一系列演化特性,同时 本文的另一个重要问题是对于平台在波浪中的水动力性能进行分析,并相应的计 算无因次参数 RAO (Response Amplitude Operator),从而对平台对波浪的频率响 应特性进行分析。为了保证波浪演化计算结果的准确性同时方便后文对于波浪中 平台运动幅值的结果进行处理和对比,本文选定了田超^[5]等人试验中所设定的工 况,对应的波浪工况 Case1-7 如表 3-4 所示。所有的工况均从实验工况中进行选取, Case1-6 波浪工况具有同样的波高,波高均为 2m,波浪周期不同,Case1 的波浪 周期最小为 4.38s, Case6 的波浪周期最大为 14s,这 6 种波浪工况主要为了讨论 平台对于波浪的频率响应特性,求解出相应的 RAO 从而与实验进行对比,同时这 6 种不同周期的波浪与 Case7 也就组成了一组波陡不同的波浪组,相应可以分析 不同波陡的情况下波浪的演化特性和规律。此外,如图 3-8,为不同波浪的波浪理 论谱,根据计算工况的水深、波高、周期条件,本文所有的波浪工况属于 Stokes 二阶波的范畴,如图中红色阴影所示均,因此本文的造波理论均采用 Stokes 二阶 波理论。

Tab.3-4 Parameter of the wave condition calculated in this paper				
计算工况	波浪高度 (m)	波浪周期 (s)		
Case1	2	4.38		
Case2	2	5.66		
Case3	2	8		
Case4	2	10.526		
Case5	2	12		
Case6	2	14		
Case7	3.2	10.526		

表 3-4 计算波浪工况主要参数



Fig.3-8 Spectrum of wave theory and the relative distribution of calculated wave condition

为了保证所造波浪在预定位置达到预定高度以保证 RAO 的计算,同时为了验证求解器造波模块的准确性方便后文对于纯波浪的演化特性进行分析,本文需要对于造波工作进行验证。

造波的验证工作就需要在计算域中设置相应的测波点以测量波浪在不同位置处的波浪高度。测波点在计算域中布置如图 3-9 所示,本文在计算域中轴线位置 布置了 20 个测波点,测波点沿波浪传播方向从 1 到 20 进行编号,每个测波点之 间间隔为 10m,其中第十个测波点所在位置即为平台正中心处水面位置。在本节 的波浪验证中,需要对于平台中心处(gauge10)的波浪与 Stokes 二阶波的理论波 形进行对比,保证波浪在平台位置处的波高达到预定的波高,从而可以进行后续 的波浪工况的计算。工况 Case3-6 的计算结果与理论波形结果对比如图 3-10 所示。



图 3-9 测波点在计算域中布置示意图 Fig.3-9 Arrangement of the wave gauges in the computational domain



- 43 -





从波浪的时间历程验证结果可以看到:

计算波浪的波形与理论波浪吻合良好,计算波浪的波高与理论波浪的波高一致。在图中虚线为理论二阶波波形,而实线为传播到平台位置处的计算波浪波形,点画线为理论波形的波峰及波谷的高度,可以看到,波浪的数值仿真结果在经过一段时间的波动后,待达到稳定阶段,其波峰及波谷均与理论波浪的波峰波谷一致,从而满足给定工况的波浪波高的要求,可以进行后续的波浪工况计算。

2)随着周期的增大,数值波形的差异越发明显。从 Case3-Case6,随着波浪 周期的增大,仿真结果的非线性成分越来越明显。当波浪周期较小时,计算波形 与理论波形基本一致,当周期较大时,计算波形与理论波形出现了较为明显的差 异。

3)随着周期的增大,数值波形的不对称性越发明显。浅水波浪由于底部边界条件的影响,仿真波浪出现了明显的尖峰坦谷的坦谷波形态,且随着波浪周期的增大越发明显,此外,随着波浪周期的增大,波形的不对称性越发明显。波浪的波峰偏向波浪的前缘,波浪的横向不对称性以及垂向不对称性相对于理论波形都有明显的增大。

4)随着周期的增大,数值波浪体现出越来越明显的非线性。在周期较大的两个工况,波浪均出现了明显的高频成分,突出表现在波浪的波谷与波浪后缘连接处出现高频的震荡。

本节观察到的波浪结果随周期的变化主要是由于波浪在斜坡上演化所造成的,关于波浪演化在周期上的差异,在第四章针对不同波陡波浪演化特性的分析

中会有专门的探究。

## 3.5 本章小结

本章主要对于平台的自由衰减运动以及波浪的造波准确性进行了验证:

1)本章首先对平台的垂荡自由衰减运动进行了网格收敛性验证,计算结果表明,160万网格量既可以保证计算结果的准确性,又可以保证计算的效率相对较高。随后对于平台三个自由度的自由衰减运动进行仿真,并针对自由衰减的固有周期这一主要参数,将计算结果与实验结果及其他学者所做的理论预报结果进行对比,从对比中可以发现,计算结果与实验结果吻合良好,对于平台固有周期的预报较为准确,误差均在4%以内。

2)本章随后对于给定参数的规则波工况进行了造波的计算和验证。对于本文 给定的 Case1-7 的 7 种工况的波浪分别进行了测波计算,并给出 Case3-6 的结果进 行对比验证。通过与理论波形的验证发现,计算波浪波形与理论波形较为吻合, 波高达到了给定的波高,达到了平台规则波计算所需的波高要求。同时在计算中 也发现,随着波浪周期的增大,计算波形与理论波形的差异越发明显,具体体现 为:波浪不对称性增强,波浪的非线性愈加明显。该现象主要由于波浪并非理论 波浪,而是经过了在斜坡地形上一段时间的爬坡和演化之后形成的波浪。在第四 章,作者还将对于该现象进行深入的研究和分析。 上海交通大学硕士学位论文

# 第四章 近岛礁地形下平台响应和规则波演化特性

## 4.1 引言

在对于浮式平台在波浪中的运动响应评估中,RAO (Response Amplitude Operator)即幅值响应算子是一个至关重要的参数。RAO 是浮体运动幅值比上波 浪幅值的无因次参数,可以用来评估平台对于波浪响应的频率特性。如第一章所 述,由于浅水波浪具有强非线性的特点,浅水浮式平台水动力性能与深水浮式平 台会有较大的区别,因此本章首先对于给定的波浪工况 Case1-7 进行了数值计算, 求出对应的 RAO 结果,并与实验结果进行了对比,同时相应的对于一些平台计算 中出现的特征性问题以及现象进行深入的探究。随后,针对不同的波浪工况在斜 坡上的纯波浪的演化问题进行了探究,对于波浪在斜坡上演化过程中的形态变化、 波高变化以及非线性情况进行深入探究,并分析波陡对上述现象的影响,从而总 结出一般规律。最后,本文对于不同地形下的同一种波浪工况的演化情况进行分 析,从而分析地形(斜坡角度)对于波浪演化特性的影响。

## 4.2 斜底地形下平台运动及波浪演化特性分析

### 4.2.1 平台对规则波的频率响应特性分析

本文的第三章已经对求解器的造波模块进行了验证,本节将重点对于平台在 相应波浪工况下的水动力特性进行探究。本节首先将平台及系泊系统分别置于 Case1-7 的波浪工况中,进行规则波下平台系统水动力性能的计算,如图 4-1 所示, 为 Case2 工况下的一个周期内的平台-系泊系统的运动以及自由面的波浪传播结 果。根据 ITTC 规定^[139],对于浮式结构物进行规则波实验需要有十个以上的稳定 周期,因此,本文的计算时常均为 400-600s,确保了计算的后半段计算结果的相 对稳定。如图 4-2 左侧,为工况 Case2 的平台运动时历曲线,图 4-2 中,右侧为左 侧的运动时历曲线数据通过 FFT 变换得到的频谱分析结果。

从 Case2 的运动时历曲线及频谱分析结果中,可以看出一些在浅水情况下平 台运动的一些显著特点:1)总体平台运动呈现出明显的非线性特点,运动曲线都 呈现出一定的非线性成分;2)尽管已经进行了 600s 的数值计算,已经经过了一 百多个波浪周期,平台的运动处于一个相对稳定的状态,但其运动曲线还是会有 明显的非稳定波动,这主要与浅水波浪的强非线性以及平台自身对于浅水波浪环 上海交通大学硕士学位论文



Fig.4-1 Simulation results of the free surface of Case2

境影响较大有关。由于该工况中水深较浅,约为10米,而平台自身的吃水为5米,因此平台自身的存在会对该浅水流场产生较大的影响,平台自身的辐射波也会对整体的波浪场产生较为明显的影响,因此综合各种因素,波浪环境及载荷较为激烈且不稳定,相应的造成了平台运动的相对不稳定性;3)纵荡运动的非线性成分尤其明显,在波浪周期外捕捉到明显的第二主频,因此对于该纵荡运动进行 FFT 变换,通过频谱分析可以发现,在较低频位置确实存在二阶峰值,对该位置处的频率进行分析,可以发现,二阶峰值对应的频率为0.03HZ,与第三章计算的平台纵荡固有周期33s 对应,说明该二阶成分是由于平台自身纵荡的固有频率导致。



图 4-2 Case2 工况下平台三个自由度时历曲线(左)及频谱分析结果(右),(a)纵荡运动, (b)垂荡运动,(c)纵摇运动

Fig.4-2 Time-history line of the three DOFs of the platform in Case2 wave condition and the corresponding frequency analysis results

此外,通过观察 Case2 平台的运动时历曲线,可以发现,平台的三个自由度运动中心并不在零位置,均有所偏移。平台纵荡运动中心约在正向 0.6m 位置,纵摇运动中心约在正向 1.25 度的位置。这些现象说明了平台产生了慢漂运动,该运动主要受二阶波浪漂移力的影响,因此为了分析平台受力的成分,如图 4-3,本文将平台的三个方向受力给出,并对三个方向的平台受力进行 FFT 变换,分析受力的频率特性。



图 4-3 Case2 工况下平台三个自由度对应方向的受力时历曲线(左)及频谱分析结果(右), (a) X 方向力,(b) Z 方向力,(c) Y 轴力矩

Fig.4-3 Time-history line of the three directions of force of the platform in Case2 wave condition and the corresponding frequency analysis results

从受力上可以看出,三个方向受力均较为稳定,这也是 Case2 运动较为稳定

的原因。但从受力的频谱分析可以看到,平台的受力呈现出较明显的非线性成分,除了提到的二级波浪力外,平台三个方向受力均呈现较为明显的三阶、四阶的高阶特性,而这主要是由于波浪经过较长时间演化,从二阶波浪演化为高阶波浪所导致。关于该部分的原因,后文会予以详细分析。

在进行 7 个工况计算时,大多数工况的计算结果都与 Case2 表现类似,即平台的运动以及受力均呈现出与波浪频率倍数相关的高阶特性。除了 Case2 这种结果较为常规的工况,还有一种工况较为独特,如图 4-4,为 Case3 的运动时历。



图 4-4 Case3 工况下平台三个自由度时历曲线(左)及频谱分析结果(右),(a)纵荡运动, (b)垂荡运动,(c)纵摇运动

Fig.4-4 Time-history line of the three DOFs of the platform in Case3 wave condition and the corresponding frequency analysis results

Case3 的运动曲线体现出与 Case2 较为明显的区别,其运动趋势相对不稳定, 且如垂荡和纵摇除了波频运动,还会出现额外的周期性波动,该波动是以波浪周 期的两倍为周期,从而使两个方向的运动出现一大一小的交替态势。从频谱分析 上也可以看出,除了上述常规的以波浪频率为倍数出现的高频峰值外,频谱上出 现了额外的以波浪二分之一频率为倍数的频率峰值。为了进一步探究该现象的成 因,在本节对于该工况的平台受力进行了分析。如图 4-5 为 Case3 工况下平台三 个方向的受力以及相应的频谱分析。



图 4-5 Case3 工况下平台三个自由度对应方向的受力时历曲线(左)及频谱分析结果(右), (a) X 方向力,(b) Z 方向力,(c) Y 轴力矩

Fig.4-5 Time-history line of the three directions of force of the platform in Case3 wave condition and the corresponding frequency analysis results

平台的受力与 Case2 相比也呈现出了较大的区别,首先平台受力不再是规整的受力,受力的波形出现了较强的非线性特征。将三个方向受力进行 FFT 变换,可以发现,X 方向受力尚与 Case 的频率特性类似,但 Z 方向受力以及 Y 轴向力矩的频谱分析中,除了以波浪频率为倍数的高频分量外,还出现了以二分之一波浪频率为倍数的分量,尤以纵摇运动方向所受力矩最为显著。相应的反馈到平台运动上,也是平台的纵摇运动变化最为激烈。从受力的时间历程上看,每两个波浪周期,平台的受力呈现出一定的周期性规律,如 Z 方向受力,每两个周期,会出现一个波峰波动出现两个小波峰的情况,而对于 Y 轴力矩,这种现象更为明显,每两个波浪周期会出现一次力矩的较大值,相应的每两个周期也会出现一次 Y 周力矩在一个波峰上出现两次波动的强非线性情况。



图 4-6 Case3 工况下平台出现周期性的波浪抨击现象 Fig.4-6 Periodic wave slamming phenomenon action on the column of the platform in Case3

为了解释这一现象,本文对 Case3 的后处理结果进行了分析,通过分析发现, 在该工况下,由于平台固有周期、地形、波浪参数等的整体耦合影响,波浪每两 个周期会出现明显抨击、爬高和波浪破碎现象。如图 4-6 所示,每两个波浪周期, 波浪绕过第一列立柱并在其后方形成射流,并抨击到后排立柱上,从而形成了受 力上的波动,及波峰上两个小波峰中的第一个波峰;随后当波谷来到第一排立柱 时,流体由于平台的阻塞作用会在第一排立柱边缘再次产生爬高和破碎,并形成 了波峰上两个小波峰中的第二个小波峰。每两个周期重复出现一次从而导致了平 台在受力和运动上出现以二分之一波浪频率为倍数的非线性分量。

当时间历程的计算结果稳定后,取后半段稳定后的运动结果进行分析,对于 该部分时间历程进行运动幅值统计,并求出运动幅值的平均值,将其除以波幅, 从而得到对应工况的 RAO,计算结果如表 4-1 所示。本文将计算结果与田超^[5]等 人的实验结果以及其利用三维势流软件 AQWA 所做的计算结果进行了对比,对比 结果如图 4-7 所示。



图 4-7 平台 RAO 计算结果同实验及势流软件结果对比, (a) 垂荡运动, (b) 纵摇运动 Fig.4-7 Comparison of RAO results in heave and pitch motion between present work, experimental test and the AQWA results

表 4-1 主要波浪工况下平台 RAO 的计算结果 Tab.4-1 Results of the RAO of the platform in certain wave condition						
Wave Cases	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
Surge RAO	0.10	0.34	0.76	1.41	2.39	1.12
Heave RAO	0.19	0.33	0.67	0.53	0.59	0.52
Pitch RAO	1.07	1.88	1.01	0.80	0.35	1.00

上海交通大学硕士学位论文

从 RAO 对比结果可以发现,对于浅水近岛礁浮式平台的运动性能问题的探 究,CFD 的计算结果与实验结果吻合良好,特别在纵摇低频峰值波浪周期约为 5s 处及垂荡运动在波浪周期 15s 处的谷值处,CFD 的计算结果与实验结果吻合较好, 总体计算结果比 AQWA 的计算结果更为准确。上述的对比工作也验证了求解器的 准确性以及结果的可信度,同时也体现出了 CFD 方法研究浅水波浪及浮式结构物 众的优越性。CFD 方法在对于近岛礁波浪工况中浮式结构物的预报中相较于势流 软件计算结果更为准确,可能是由于 CFD 是一种较为直接的计算模型,它将粘性 以及漩涡等因素的影响都考虑在了模型中,势流相对是一种较为简化的模型,将 一系列的水动力因素用一些经验性或半经验性的系数来代替,这种平均化的概念 也就造成了势流方法对于粘性问题以及漩涡问题的计算存在较大误差,同时由于 其无法对于具体细节具体设定参数进行具体分析,从而其对于一些局部较为激烈 的强非线性问题也难以处理。而 CFD 方法则可以将粘性和漩涡等因素直接包含在 模型中进行计算,因此对于强非线性的波浪抨击、破碎、越浪以及爬高等现象模 拟较为真实可靠,因此本文的计算结果与实验更为接近。

此外,由 RAO 的计算结果可以分析该平台对于不同频率波浪的响应特性,换一种说法就是对于同波高,不同波陡波浪的响应特性:1)从平台的整体频域特性 看,平台对于高频波浪(周期较小)的响应小于对于低频波浪(周期较大)的响 应。因此,该平台对于高频波浪的响应特性较优。当波浪周期小于等于15s 时, 平台对于波浪的响应相应较小,担当波浪周期大于15s 时,平台对于波浪的响应 急剧增大,该平台更适应于在中高频波浪中工作。3)从设计角度来看,该平台的 设计较为成功。因为平台所处波浪环境为浅水波浪环境,浅水近岛礁地区的一般 工作海况波浪即属于中高频波浪,本文研究的波浪周期范围即为4-15s,该周期范 围即近岛礁工况下主要的波浪周期范围。由于平台对于高频波浪的响应特性较优, 响应幅度较小,因此满足了平台在近岛礁浅水波浪环境下的工作要求。

在分析了平台对同波高,不同周期的波浪的响应特性后,本文还对同周期, 不同波高的波浪对平台运动的影响进行了简要探究。如图 4-8 所示,为 Case7 与 Case4 的波面对比图,为了更为清晰地分析波面形态,此处,选择将平台隐去。 六幅图中,左侧为 Case7 的计算结果,右侧为 Case4 的计算结果,两个 Case 有同 样的波浪周期,均为 10.526s,但波浪的高度各不相同,Case7 的波浪高度为 3.2m, 而 Case4 的波浪高度为 2m。相应的上下三行图中,最上一行表示波浪的一个波峰 刚刚抵达第一排立柱,中间一行表示波浪刚传播到第二排立柱,而最下面一行则 表示波浪刚离开第二排立柱。



图 4-8 Case7 (左侧) 与 Case4 (右侧) 一个周期内同时刻波面形态 Fig.4-8 Comparison between elevation of free surface of Case 7 (left) and Case 4 (right) at different time steps that wave crest arrives the first row of columns (upper), wave crest arrives the second row of columns (middle) and wave crest leaves the second row of columns (lower)

从图中可以发现,当波浪到达第一排立柱时,Case7 中波浪由于立柱的阻塞 作用,在立柱前表面形成了较为明显的爬高,而 Case4 则未出现由于平台而导致 的较为明显的辐射以及绕射波;当波浪达到第二排立柱时候,Case7 中波面出现 了明显的抬升,波浪自第一排立柱左右两侧绕过,并在第一排立柱后方汇合,形 成一股射流,再由于第二排立柱的阻塞作用,在第二排立柱表面再次爬高,而波 浪在此时,由于平台的影响,已经出现了极为明显的变形,波浪的波峰基本偏移 到波浪的前缘,波峰前侧几乎呈垂直形态,波浪的横向不对称性极为明显,波浪

#### 上海交通大学硕士学位论文

由于平台的绕射、辐射波影响,已经提前到达了破碎临界点,此时波浪表面各种 局部的次生波非常明显,非线性极强。而反观 Case4,此时波浪在第二排立柱表 面仍然基本没有爬高,整体波面仍然较为平整,未出现较为明显的次生波;当波 浪离开第二排立柱后,Case7 的波浪由于平台的影响会,以及在平台浮筒上传播 时,有效水深较浅的影响,波浪出现明显的三维效应,波浪发生破碎,形成了几 股次生波,而 Case4 中,当波浪离开第二排立柱,波浪受立柱影响,在立柱后侧 发生了一定程度的抬高,但整体波面的形状所受影响较小。



图 4-9 Case7 (左侧) 与 Case4 (右侧) 波浪在两排立柱表面的爬高对比及动压力分布 Fig.4-9 Comparison between dynamic pressure of Case 7 (left) and Case 4 (right) at different time steps that wave crest arrives the first row of columns (upper), crest arrives the second row of columns (lower)

为了更清晰的观察两者的差异,如图 4-9,为两个不同工况下,波浪分别达到 第一排立柱以及第二排立柱时,波浪在立柱表面的爬高、动压力分布情况。Case7 工况下,波浪在两排立柱表面均出现了极为明显的爬高,同时波浪对于两排立柱 的抨击现象也较为明显,尤其是当波浪达到第二排立柱时,由于波浪绕过前排立 柱,在第二排立柱前方汇聚,形成一股射流,因此第二排立柱收到的抨击力更大, 相应的图中的立柱表面动压力增大非常明显。相比之下,Case4 立柱表面的动压 力增量则小很多。从而波高的大小会显著影响波浪的演化以及波浪形态,同时对 于波浪作用于结构物上的非线性砰击力有明显的影响。

### 4.2.2 波陡对于斜坡波浪演化的影响

本节主要对波浪在斜坡上的演化特性进行了深入研究,本部分计算波浪工况 仍为 Case1-7,与前文进行规则波中平台水动力性能计算不同的是,在本部分的研 究中,作者限定了波浪参数在造波区即达到给定的波浪参数,并非使波浪传播到 计算域中心位置处波浪达到给定的波浪高度。如此,同样波高不同波陡的波浪均 有同样的初始波高,有助于后文对于波陡对于波浪演化影响的集中对比和分析。



图 4-10 Case4 在不同测波点处的波形(左)以及自由面形态(右) Fig.4-10 Waveform (left) measured by different wave gauges (No. 10, No. 14, No. 17 and No 20) and feature of free surface (right) of Case 4



图 4-11 Case5 在不同测波点处的波形(左)以及自由面形态(右) Fig.4-11. Waveform (left) measured by different wave gauges (No. 10, No. 14, No. 17 and No 20) and feature of free surface (right) of Case 5



图 4-12 Case6 在不同测波点处的波形(左)以及自由面形态(右) Fig.4-12. Waveform (left) measured by different wave gauges (No. 10, No. 14, No. 17 and No 20) and feature of free surface (right) of Case 6



图 4-13 Case7 在不同测波点处的波形(左)以及自由面形态(右) Fig.4-13. Waveform (left) measured by different wave gauges (No. 10, No. 14, No. 17 and No 20) and feature of free surface (right) of Case 6

如图 4-10 至 4-13 所示,为 Case4-Case7 四个不同工况下不同测波点处测得的 波浪波形时历以及相应的自由面形状。从各个工况在不同测波点的波形波高的对 比有以下几点结论:

1)整体看,波浪都出现了不同程度的演化,随着波浪的传播,波浪的波形逐 渐发展为尖峰坦谷的坦谷波形态,且随着波浪周期及波高的增大,这种变化愈加 明显。

2)从波形上看,除了整体形状的变形外,波浪在沿着测波点排布传播的过程中,波形的非线性越发明显,一些高阶的频率成分出现,尤其在波峰和波谷处,局部会出现较小的破碎和高频波动。

3)波浪的横向不对称性及垂向不对称性随着波浪的传播越发明显。随着波浪 在斜底上的爬坡,波浪后缘速度大于前缘速度,波浪逐渐向前缘堆积,因此波浪 的横向不对称性和垂向不对称性逐渐明显,波形在横向上偏向波浪前缘,在垂向 上波浪波峰到水平面距离明显大于波谷到水平面距离,且这一现象随着波浪的周 期增大而越发明显。

4) Case7 的计算中,出现了明显的波浪破碎现象。当波浪经过一段时间演化 后,波高增大,波长变小,波浪不对称性极为明显,波陡到达临界波陡后,波浪 发生了破碎,破碎发生在测波点 15 和 20 之间,破碎后由于波浪翻卷等对能量的 急剧耗散,测波点 20 处的波高陡然减小。

此外,从 Case7 的波面中可以看到,在破碎波浪后侧还有一个较小的类似于 破碎带的扰动,这点与其他几个 Case 不大相同。为了分析出该波动的成因,本文 对于计算域的中轴面进行了提取并以速度染色,同时如图 4-14 给出速度矢量。

从图 4-14(c)可以看到,由于波浪的演化较为明显,波浪传播方向第二个波峰位置处水质点速度远远高于波浪的传播速度,呈现出较为明显的红色,因此波

#### 上海交通大学硕士学位论文

浪的波峰会向前翻卷、崩溃从而形成波浪破碎;而从 4-14 (b) 中可以看到,虽然 第一个波峰尚未发生明显的波浪破碎,但在其波峰下缘,波形已经难以维持,波 浪表面的速度一致向右,且速度较大。与此同时,第二个波峰过境后,其后缘的 水质点继续做轨圆运动,轨圆运动的方向一致向左,由于浅水的阻塞作用,第二 个波峰后侧形成了较为明显的波生流现象,从而形成了一股回流,回流与第一个 波峰表面的一致向右的水质点相遇,从而在此处形成了一股类似于小破碎带的扰 动。



图 4-14 计算域中纵剖面速度矢量图, (a) 全局, (b) 左侧 Fig.4-14. Velocity vector figure of longitudinal section of the computational domain

为了更进一步分析波浪演化中的波形,本文将其中四个波浪工况的波浪波面 在某时刻沿计算域中纵剖面进行提取形成了图 4-15,从而可以观察波浪具体沿传 播方向的空间形状。从图中可以明显看出,波浪在斜底地形存在的情况下,沿着 波浪的传播方向演化现象明显,波浪在传播过程中,由于水深不断变浅,波浪速 度不断减小,波浪前缘速度明显低于后缘,因此后侧波浪向前侧堆积,波浪出现 横向不对称性。同时由于随着水深的变浅,根据浅水的波浪色散关系,波长不断 变短,能量也逐渐向上堆积,波高也会逐渐增大,并体现出更强的垂向不对称性。 从图中可以看到,传播距离越远(图上越靠右),波浪演化越充分,波形的非线性 越明显,且随着演化过程中波陡的不断增大,波浪会出现破碎的现象。



图 4-15 计算域中纵剖面速度矢量图, (a) 全局, (b) 左侧 Fig.4-15. Whole sketch (upper) and explicit sketch (lower) of waveforms alone the x-axis of different wave cases at a fixed certain time

为了总结波浪波高的演化规律,本文将各工况波浪在不同测波点处测得的波 浪时间历程进行统计,从而得到各工况波浪演化的波高变化过程,结果如图 4-16 所示。从图中可以清晰的看到:

1) 波浪发生了明显的演化现象, 波浪的波高都有不同程度的变化。

2)波浪的周期越大,波浪的演化现象越显著,该规律与丁军等人在试验中观察到的结果一致。从论文的正文开始,这一结论就不断被提及。在同波高情况下,当波浪周期较小时,波浪的波高呈衰减的趋势,虽波形上有非线性的演化现象,但由于水质点轨圆运动幅度小,底部边界对于流体质点运动形象不显著,演化不明显,因此波浪处于衰减的过程;当波浪周期较大时,波浪波高出现明显变化,

这主要是由于周期大的波浪其波长较大,相应的水质点做轨圆运动的幅度较大,则受到底部边界条件的影响较为显著。从有限水深波浪的色散关系来看也可以明确得到上述结论,根据公式 2-13,当波浪周期一定时,波浪的波长及速度主要受到水深的影响,因此对于周期大的波浪,随着水深的不断减小,其波长的减小量更为显著,相应的波陡变化也较为显著,根据公式 2-15 的关系,波浪能量保持不变时,波高主要受相对水深 d / λ₀影响,波长减小,则波高必然会相应增大,从形态上来说,波浪的波长减小带来的是波浪的水质点向上方堆积,造成波高的增大。 Case5 波浪波高随着水深的变浅,传播到计算域尽头时已经产生了波高的增大,但由于计算域大小限制,还没有充分演化,Case6 的波浪则出现了明显的先增大后减小的趋势。

3)同周期波浪波高大则演化现象明显,这主要是由于波陡增大导致。同样的 波浪周期则在相同水深对应的波长一致,从色散关系看,水深主要对波浪的波长 有直接影响。因此对于同周期不同波高波浪来说,由于波浪周期相同,随着水深 的变化,波浪的波长变化是一致的,因此当波浪爬坡时,Case4 与 Case7 保持着同 样波长,则波高大的工况波陡更大,波浪的演化和破碎则更为明显。对比 Case4 和 Case7 两个波浪工况,其周期相同,而后者波高较大,因此后者出现了极为明 显的波高变化,波高先增大后减小,特别是在发生了波浪破碎后,波高大幅衰减。 如图 4-17 所示, Case7 的波浪因为在爬坡过程中演化剧烈而产生破碎。





图 4-17 Case7 波浪演化计算中波浪破碎现象 Fig.4-17. Wave breaking phenomenon captured in Case7

由于波浪的波高并不能完全体现出波浪的演化特性,在前文的结果中可以发现,虽然周期较小的波浪波高变化不明显,但其波浪形状已经发生了变化,在其波形上已经可以发现较为明显的非线性成分。因此本文对于同波高的 Casel-Case6 的波浪在不同测波点处的时间历程进行频谱分析,对各不同周期的波浪做 FFT 变换,对于波浪的非线性特性进行量化的分析。

如图 4-18 所示,图中给出了不同波浪周期的工况在测波点 gauge1、gauge10、gauge15 及 gauge20 处的波浪频谱分析结果。从结果中可以发现与前文结论及实验结论相同的规律,即随着波浪周期的增大,波浪的演化现象更为明显,且随着波浪传播距离的增大,波浪的演化越发充分。从图中可以看出:

1)当在测波点1位置处时,由于波浪刚进入计算域,波浪基本还未演化,波 浪波形还处在理论解给定的 Stokes 二阶波的范畴。因此在测波点1出可以看到, 各个周期的波浪均有两个很规整的峰值,说明此时波浪都还为二阶波。

2)随着波浪的传播,在测波点 10 位置处,周期为 14s(Case6)的波浪已经体现了极强的非线性特性,波浪已经出现了六个较为明显的峰值,说明此时波浪已经发生了明显的演化并呈现为六阶的状态,而周期为 12s(Case5)的波浪则也出现了三阶的峰值,说明此时该波浪也明显演化。

3) 当波浪传播到测波点 15 位置处, Case6 仍有六个较为明显的峰值, 而 Case5 出现了五个较为明显的峰值, 而周期较小的波浪也已体现出三阶的特性。

4) 在测波点 20 处, Case5 也演化为较为明显的 7 阶波浪, 而此时由于 Case6 的波高已经经历了演化由增大到了减小的过程, 此时该波浪由于能量的消耗各阶幅值明显降低, 而在前文的波高演化分析中, Case4 在接近计算域出口的位置出

现了较为明显的演化,在此处相应的,Case4 的波浪已出现了 5 个较为明显的峰 值,且此刻的 Case3 也体现出三阶的特性。

5) 与前文分析一致,周期较小的波浪演化现象并不明显,在波浪传播的过程 中,周期最小的 Casel 和 Case2 三阶频率成分均不明显,且各阶幅值持续衰减。

6) 综上, 波浪在传播的过程中, 随着传播距离的增大, 波浪的非线性成分越 发明显。随着波浪周期(波陡)的增大,波浪的非线性成分也越发明显。












Fig.4-18. Frequency analysis of different wave cases at gauge1, gaue10, gauge15 and gauge20

除上述波浪演化规律外,在本文的研究中,还发现了一个比较有趣的现象, 即波浪的折射现象。由于底部边界条件并非规则的斜坡,在地形上是从一个岛礁 模型上提取,因此地形存在一定的坡度和拱度,即在 y 方向上,该地形也并非等 高,因此波浪在该地形上的传播过程中,周期较大,演化较为明显的工况中,出 现了波浪折射的现象。

波浪折射主要与水深变化有关,在日常生活中,波浪从深水向浅水的传播过程中,由于水深的变浅,波长变短的同时,波浪速度也在不断变小,因此浅水地区域的波速慢,深水区域的波速快,因此在往岸边传播的过程中,波浪的波峰线总是可以与海岸线保持平行。如图 4-19 所示,在计算的过程中,针对 Case6 这个工况,波浪的波峰线出现了明显的弯曲,分析其可能的原因就是该地形的中纵剖面处的水深大于两侧水深,即该地形的等高线为如图所示的等高线,所以波浪在经过较为剧烈的演化后波峰线会出现弯曲现象。



图 4-19 Case6 (T=14s) 工况下波浪传播过程中出现了折射现象 Fig.4-19. Wave crest lines of the wave at certain time of Case 6 (T=14 s)

### 4.3 地形对波浪演化特性影响

为了更深一步对于本文的研究内容进行分析,探讨前文的一些现象的原因和 成因,验证前文的一系列结果和猜想,在本节还将针对不同的两种地形,即平底 地形以及前文所述的斜底地形的波浪演化特性区别进行分析和阐述,从而验证前 文的一系列现象的成因确实是斜底地形导致。



图 4-20 平底地形计算域(左)及侧面视图(右) Fig.4-20. Computational domain (left) and lateral view (right) of the flat bottom condition

如图 4-20 所示,为另外一种地形形式,即地形底部是完全平坦,没有任何坡

度,为一个平底地形。希望通过该地形下波浪的演化特性与斜底约为2度坡度的 地形下波浪的演化特性区别的对比,来验证前文的现象和结论,并可以进一步得 出地形对于波浪演化的影响。

平底计算域的网格约为 160 万,与前文的计算域网格数一致,仍采用 RANS 湍流模型,计算的时间步长仍保持为 0.005s,计算的工况选取的是 Case7,即波高为 3.2m,周期为 10.526s 这一工况。选择这一工况的最显著原因即为:在这个工况下,平底地形的波浪不会发生翻卷和破碎,而斜底地形下的波浪会发生翻卷和破碎。

对于平底地形的波浪演化计算结果如图 4-21,为一个周期内波浪的传播过程。 从图中可以看到,波浪在平底地形上的传播并未出现破碎,波面形状仍保持的较 为良好,波形整体较为规则。而斜底地形下 Case7 工况已经出现了明显的破碎, 从而平底地形下波浪的演化与斜底地形有较为明显的区别。



图 4-21 一个周期内平底地形下的波浪传播计算结果(Case7) Fig.4-21. Simulation results of the wave propagation process of flat bottom condition

为了更进进一步分析平底工况与斜底工况的区别,本文对两种地形工况下, 波浪波高的演化过程进行的分析。首先对于平底工况的波浪在各个测波点处的波 高进行统计,取出波形较为稳定的后半段波浪时间历程,对于每个波浪历程中的 波高求平均值,得到每个测波点处的波高,再按照测波点排布,以波高和测波点 序号为参数作图,结果如图 4-22 所示。

上海交通大学硕士学位论文



图 4-22 不同地形工况下波浪波高沿传播方向变化情况 Fig.4-22. Variation of wave height along the spread direction of different bottom condition



图 4-23 两种地形下 Case7 的波面对比, (a) 平底地形, (b) 斜底地形 Fig.4-23. Comparison of the free surface of Case7 between the two bottom condition

图 4-22 明确给出了两种地形下,波浪的波高演化过程,deg=0 代表了平底地形,而 deg=2 代表了坡度约为两度的前文计算的斜坡地形。对照图 4-23 的后处理结果可以发现,在平底工 况下,波浪未出现明显的演化现象,波浪的波高未出现增大现象,且波高持续衰减,约从 3.2m 下降到 2.5m;对于斜底工况,波浪在中间出现了明显的演化现象,波浪明显升高,最高点达 到约 3.8m 的位置,随后波浪破碎,波浪能量由于波浪翻卷破碎产生的涡流等而耗散,波高急 剧减小,最终波高约为 2.2m,小于平底地形下波高大小。从原理上来说,平底地形没有水深 的变化,色散关系保持不变,波浪的一系列参数维持原状,一般不会产生明显的演化现象, 而在本文的计算中,平底工况波浪波高的减小主要原因是底部边界条件对于波浪能量的摩擦 以及流体自身粘性导致的摩擦能量耗散,因此波浪的波高会明显减小。





除了对波浪演化进行波高上的变化分析,与 4.2 类似,本节还对波浪的非线性特性进行了详细描述。如图 4-24,为两种不同地形下,波浪在不同测波点处的频谱分析,图中的两条线,以地形角度为变量,地形角度为 0 度的是平底地形对应的曲线,即左下方的曲线,而地形角度为 2 度的为斜底地形对应的曲线,即右

上方的曲线。通过对比可以发现:1) 在测波点1 处时,两者均为理论的 Stokes 二阶波,波浪主要体现出二阶特性;2) 当波浪传播到测波点10 时,斜底地形下 的波浪已经体现出较为明显的高阶分量,可观察到的最高阶可达6 阶,而反观平 底地形,在地形上经过一段时间的演化后,体现出了略微的三阶特性,但三阶成 分占比非常小,波浪的频率成分基本没有产生变化;3) 当波浪传播到测波点15 时,斜底地形的非线性已经非常显著,高阶分量均在幅值上占据了较大比重,反 观平底地形,其波浪的频率成分基本与测波点10 处一致,无明显变化;4) 当波 浪传播到测波点20,斜底地形下的波浪,虽然高阶属性还是很清晰,但是幅值已 经显著减小,因为这个时候波浪已经发生了破碎,波浪能量急剧耗散,波高显著 减小,对应的各阶成分幅值也减小的较为明显。平底地形下的波浪在测波点20 处, 相比于此前的测波点处的波浪,波高、高频成分均无明显变化,与前文的结论一 致,平底地形下,波浪无显著的波浪演化现象出现,波浪的非线性成分不显著, 波浪的波高无剧烈变化,主要呈一个逐渐衰减的趋势。

由此也就验证了,地形对于波浪确实有显著的影响,通过两种地形下的波浪 对比,可以发现,在 4.2 中所述的波浪演化现象以及波浪平台计算中出现的一些 非线性现象主要原因就来自于地形带来的波浪演化。在无斜坡地形的情况下,波 浪基本保持原状,无显著变化。

#### 4.4 本章小结

本章内容主要分为两部分,第一部分是近岛礁斜底地形下,平台的水动力性 能以及波浪的演化特性。

在对于平台的水动力性能计算中,首先对平台在七个工况下的水动力性能进行计算,计算中发现,平台的运动主要受波浪的二阶属性影响而呈现出一些二阶的频率特性,其中在 Case2 这个工况,纵荡运动出现了较为明显的第二主频,对 其分析可以发现,该频率对应着平台纵荡运动固有频率。而 Case3 的结果相对较 为奇特,本文针对其中出现的以二分之一波频为倍数的频率成分进行了详细分析。 随后本章对于该浮式平台一系列同波高、不同周期的规则波中计算结果进行统计, 求出平台的 RAO,并与田超等人的实验结果以及计算结果进行对比,通过对比可 以发现,naoe-FOAM-SJTU 求解器对于该浅水浮式结构物问题求解结果较为精确, 与实验结果误差较小,优于田超等人基于势流软件 AQWA 所做的计算结果。最后 对于同周期不同波高的两种工况 Case4 和 Case7 进行对比,从而分析波高、波陡 对于平台水动力的影响。 在对于近岛礁波浪演化的计算中,首先对于七种不同的波浪工况各自的波浪 演化进行计算,通过计算发现,波浪在传播过程中发生了较为明显的演化,波浪 的波形以及横向、垂向不对称性均发生明显变化,且该演化现象随着周期的增大 而增大。对于波浪演化特性的分析主要分为两部分,一部分为是对于波浪的波高 变化现象进行统计分析,第二部分是对于波浪演化中的各工况波浪的频率成分进 行分析。在对于波高的分析中,可以发现,随着波浪周期的增大,波浪波高的增 大越发明显。当波浪周期较小时,波浪基本呈衰减趋势,波高趋于变小,当波浪 周期较大时,波高在传播的过程中逐渐增大,波高由于波浪演化中的波长变短、 波浪水质点向上堆积等作用,逐渐变大,特别是 Case7,当波浪波高大到一定程 度,达到临界波陡位置处时,波浪发生破碎,波高随后迅速减小。在对于波浪的 频率成分的分析中,可以总结以下规律:随着波浪周期的增大,以及波浪传播距 离的增大,波浪的高频成分越发明显,波浪呈现出较强的非线性特性。

本章的第二部分,主要是对于前文所做内容的一个对比验证,即针对平底地 形以及前文的斜底地形下波浪演化特性进行对比。在对比中发现,波浪在平底地 形上并未出现明显的波浪升高的演化现象,波浪主要呈现出稳步减小的衰减特性, 相应的波浪在斜底地形下,波高出现了非常明显的先变大后破碎减小的趋势。而 针对波浪的频率成分分析中,斜底地形下的波浪在传播了一段距离后,波形即发 生了明显的变化,波浪中高阶成分即非常显著;而反观平底地形,经过一段时间 的传播演化后,波浪未出现非常明显的高频成分,基本还是维持这二阶到三阶波 浪的形状,并在各阶幅值上呈现出逐渐衰减的趋势,这与前文捕捉到的现象和波 高统计结果完全吻合。

两部分的结果进行对比验证,也就可以得出结论,即在本章第一部分计算中 出现的平台强非线性问题以及波浪演化、波高变化、非线性增强等现象均是由斜 底地形导致的波浪演化现象引起,斜底地形确实会对波浪以及浮式结构物的水动 力特性产生影响。 上海交通大学硕士学位论文

### 第五章 波浪斜坡地形翻卷机理探究

#### 5.1 引言

在上文针对斜坡地形下波浪演化特性进行了计算分析后,作者对于斜坡下波 浪的演化特性产生了浓厚的兴趣,尤其是其中的波浪翻卷破碎这一现象。波浪翻 卷是一个气、流两相耦合的复杂运动。粘性以及漩涡在这其中起到了非常重要的 作用,因此在对于该问题的数值求解中,CFD方法是一个较为理想的手段。本文 为了探究波浪演化、翻卷、破碎过程中的波浪变形机理,利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器构建了一二维数值水池,对于一二维的波浪爬坡翻卷的问题进行了研究, 主要探究波浪翻卷过程中的一些机理以及在这过这种的一些波形参数的变化。

#### 5.2 波浪斜坡地形翻卷的算例设置

为了对波浪翻卷的机理进行深入研究,本文主要参考了 Blenkinsopp(2008)^[140] 所做的波浪翻卷实验,利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器,构建了一个二维的数值水 池,从而进行波浪翻卷问题的仿真。本文构建的数值水池保证了与实验的完全一 致,如图 5-1,为实验的主要设置和尺寸,造波区约长2米,在造波区的出口放置 第一个测波点,随后在水槽的中纵剖面位置布置了一系列的测波点,旨在捕捉不 同位置处波浪的时间历程和波高、波形。



图 5-1 计算域的示意图及尺寸(Blenkinsopp)^[140] Fig.5-1. Sketch of the computational domain (Blenkinsopp and Chaplin, 2008)^[140]

在水槽的布置中,其中用来模拟底部礁石的斜坡高度约 0.618 米,斜坡坡度为 1/10,角度约为 5.71°,斜坡的起始点距离造波机距离约为 3.8 米,水深 0.7 米,整个计算模型的设置与实验模型完全一致,除了计算模型为二维模型这一点外。

本文的计算工况如表 5-1 所示。波高统一为 0.2m,改变波浪周期满足该波陡。

表 5-1 主要计算工况类别 Tab 5 1 List of commutational access			
计算工况	 工况编号	波陡, Ho/Lo	水深, d (m)
基于波陡差异进行分 析(H ₀ /L ₀ )	1	0.02	0.7
	2	0.03	
	3	0.04	
	4	0.05	
	5	0.06	
	6	0.07	



图 5-2 计算域网格 (a) 及布置情况 (b) 示意图 Fig.5-2. Sketch of the mesh and arrangement of the computational domain

本文构建的二维数值水池如图 5.2 所示,在 y 方向,计算域仅布置了一层网格,从而构建起一个二维的数值水槽。该计算域的网格总量约在 82 万,底部边界条件到水面位置,网格尺寸保持一致,网格尺寸为 0.5 毫米,计算时间步为 0.0005s,如此网格及时间步精度很高,保证了对于强非线性的波浪破碎问题捕捉。

本章对于波浪翻卷研究及对波浪不对称性的评估主要是选取当波浪的前缘演 化至垂直位置时,即波浪的波峰点与波浪前缘与水平面的交点的连线垂直于水平 面时刻,如图 5-3 所示。该状态可称为翻卷临界状态,利用此时刻的水深(d_b)以 及波高(H_b),可以计算出两个在浅水波浪翻卷中较为重要的参数:波浪翻卷的水 深指数以及波高指数。翻卷的水深指数如公式 5-1 所示,是波浪临界位置处的波 高除以该位置处的水深,该参数主要考察在波浪翻卷临界状态下,水深和波高的 相对关系,因为波浪破碎主要受两个因素影响,最直观的因素是波陡,根本原因 是水深,波陡最后的体现往往都是波高,因此找到波高和水深两者之间的关系即 可确定波浪翻卷的临界点,这在浅水波浪理论以及波浪破碎理论中有着较为重要 的意义;而翻卷的波高指数如公式 5-2 所示,是波浪临界位置处的波高除以波浪 初始波高,即给定的波浪工况的波高,在造波区位置处的波高,该系数主要考察 在波浪的演化、翻卷直到破碎的过程中,波高的变化的幅度。

$$\gamma_b = \frac{H_b}{d_b} \tag{5-1}$$

$$\Omega_b = \frac{H_b}{H_0} \tag{5-2}$$



图 5-3 关于波浪不对称性的定义 Fig.5-3. Definition of local wave profile asymmetry (Kjeldsen and Myrhaug, 1978)^[29]

众所周知,波浪在传播演化的过程中,尤其是在斜坡上爬坡的过程中,其波 浪的不对称性会显著增强,而波浪的不对称性无法用波浪的波陡来描述,因此 Kjeldsen and Myrhaug (1978)^[29]等人引入了波浪不对称性参数的概念,如图 5-3 及 公式 5-3 所示,各项参数的具体概念在图 5-3 中有明确标注,而公式 5-3 给出了四 个波浪不对称性参数的定义,ε为波浪前缘不对称性参数,δ为波浪后缘不对称性 参数,λ为波浪的横向不对称性参数,μ为波浪的垂向不对称性参数。

$$\varepsilon = \frac{\eta'}{L'}, \delta = \frac{\eta'}{L''}, \lambda = \frac{L''}{L'}, \mu = \frac{\eta'}{H_b}$$
(5-3)

## 5.3 波浪翻卷参数的敏感性分析



图 5-4 Casel 工况下波浪在斜坡礁石上方的第一个翻卷结果(速度染色) Fig.5-4. Wave breaking phenomenon of Casel over the reef in half wave period colored by velocity

在建立了波浪的数值水池后,针对给定的6个同波高不同周期的工况,分别

#### 上海交通大学硕士学位论文

进行计算,如图 5-4,为 Casel 的计算结果,在其中可以看到第一个波浪在斜坡上 演化爬坡知道翻卷并冲击到右侧深水区的一整个过程。从图中可以看到,波浪在 演化的过程中,首先其波峰慢慢向右侧倾斜,波浪高度逐渐升高,流体质点逐渐 向上方堆积,随后,当达到波陡的临界值后,波浪开始发生翻卷,速度较大的流 体指点抛出波浪外,向前形成一股射流,在前缘形成水滚,翻卷的涡流形成较大 的漩涡,空腔下潜形成大量气泡。图 5-4 的结果使用速度染色,并在图中给出了 速度矢量的方向,该速度矢量大小并不代表速度大小,作者人为规定所有的速度 矢量大小长度一致,从而便于观察整体的流体运动方向。



(b)

图 5-5 Casel 工况下波浪在斜坡上第一个波浪和第二个波浪的位置、形态对比(a)第一个波浪,(b)第二个波浪

Fig.5-5. Comparison between the position and shape of the first and second wave of Case1

在计算过程中,还发现了一些较有趣的问题。如图 5-5,几乎所有的工况,第 一个波浪的位置与第二个波浪的位置都不太相同,此外第一个翻卷的高度与第二 个翻卷的高度也不尽相同。以 Casel 为例,第一个波浪传播到礁石顶点位置才发 生了翻卷,在这过程中,波浪前侧尚无任何扰动,波浪相当于传播到了一个静水 当中。而第二个波浪传到礁石位置处时,由于前一个波浪翻卷带来的影响,此处 的流体质点已经具有了一定的速度,特别是在第二个波浪前侧,由于此处水深非 常浅,前一个波浪传播过境后而带来的流体质点轨圆运动方向基本一致,均向左 侧,从而形成了一个明显的波生流现象,构成了浅水波浪翻卷中一个典型的回流 现象。该回流与第二个波浪的翻卷对流体的卷吸作用方向一致,从而使波浪翻卷 更为激烈,同时也使得第二个波浪的翻卷位置提前,高度相对较高。



图 5-6 波浪破碎的水深指数(a)和波高指数(b)与波浪初始波陡之间的关系 Fig.5-6. Breaker depth index (a) and breaker height index (b) as a function of offshore wave steepness (H₀/L₀)

随后,本文对计算的 6 个工况的波浪参数进行分析,首先对于波浪翻卷的水 深指数以及波高指数进行探究。通过对于六个工况下自由液面形状的提取,统计 和分析,得到如图 5-6 所示的结果。本文将计算结果与 Blenkinsopp^[140], Chella^[141], Smith^[142]等人的实验及计算结果进行对比,可以发现,naoe-FOAM-SJTU 求解器 的计算结果与实验结果吻合良好,对于该强非线性问题求解较为准确。此外,从 研究的结果中也可以总结出一些一般规律:1)波浪破碎的水深指数随着初始波陡 的增加而减小,这意味着,同样初始波高的波浪,随着初始波陡的增加,波浪翻 卷的临界点处的水深逐渐增加,即对于初始波陡较大,周期较小的波浪,会较早 发生波浪翻卷,相应的对于周期交大的波浪,翻卷处的水深较小,会较晚发生波 浪翻卷。2)波浪的波高指数随着初始波陡的增加也呈现减小的趋势,这意味着, 在初始波高相同的情况下,破碎处的波高越来越小。即初始波陡较大,周期较小 的波浪,破碎时的波高较小,初始波陡较小,周期较大的波浪,破碎时波高较大。

以上两点结论在第四章也有过一定的陈述,即同样波高的情况下,波浪的初 始波陡越大,周期即越大,相应的波浪演化现象越明显,底部边界条件对于波长 的影响量越显著,波长的减小量越显著,相应的在波高上的堆积也就越显著,导 致波浪的波高增大。



图 5-7 波浪破碎的水深指数(a)和波高指数(b)与波浪初始波陡之间的关系 Fig.5-7. Wave profile asymmetry parameters as functions of offshore wave steepness (H₀/L₀)

最后对于波浪的不对称性参数进行分析,如图 5-7 所示,为波浪不对称性参数关于波浪初始波陡的关系。从图中的结果可以发现,临界状态下的波浪的前缘 不对称性参数、后缘不对称性参数以及横向不对称性参数受初始波陡的影响均不 慎显著,但从细节的趋势上可以看出,该三项参数的值均随着初始波陡的增加而 略有增加。而波浪的垂向不对称性参数随着初始波陡的增大,呈下降趋势,这一 点也与前文的研究内容吻合。当初始初始波陡较小时,波浪周期较大,在波浪传 播的过程中,演化较为剧烈,因此波高升高较为明显,波浪向上方的积聚效应较 为明显,因此波浪的垂向对称性较大,相反的若初始波陡较大,波浪周期较小, 波高的演化并不充分,因此在垂向上的升高也相应较小,波浪的垂向不对称性参 数相对较小。

#### 5.4 本章小结

本章主要对一二维的波浪翻卷及演化问题进行了较为细节的分析。首先对于 六种不同的工况在斜坡礁石上的演化进行计算,计算中发现波浪均在斜坡顶端附 近发生翻卷,且受波浪自身的影响,前一个波浪与后一个波浪的破碎位置以及破 碎时的波高会有一定区别。

随后本章针对波陡对于波浪翻卷的参数敏感性进行了分析。1)首先对临界情况下的波浪的水深指数和波高指数进行了计算分析,并与实验结果预计其他学者的计算结果进行对比,多种结果吻合较好,从而验证了本文所使用的求解器 naoe-FOAM-SJTU 在求解该强非线性的波浪翻卷问题中的准确性。2)其次在对于参数敏感性的分析中,发现波浪的水深指数以及波高指数均随初始波陡的增大而减小,即波浪的周期越大,波浪发生翻卷位置处的水深越浅,相应翻卷的临界状态下,波高越高。3)最后对于波浪的不对称性参数的参数敏感性进行了分析,分析发现,波浪的前缘不对称性、后缘不对称性以及横向不对称性受初始波陡的影响较小,随着波陡的增大,各项参数略有增大,而波浪的垂向不对称性随着初始 波陡的增大而减小,即波浪的周期越大,相应的垂向不对称性越明显,波高抬升约剧烈。

### 第六章 总结与展望

#### 6.1 全文总结

随着国家对于南海资源的开发以及周边国家对于南海岛礁的争夺日益激烈, 岛礁的战略地位日益凸显。为了保障岛礁建设,在远离大陆的南海岛礁附近建设 一保障平台就成为了一个绝佳的选择,而浮式平台由于具有现场工程量少,可快 速布放,受地形影响小等优点,成为了南海海域岛礁保障平台的首选。由于近岛 礁地形较为复杂,波浪在传播的过程中会由于地形的原因产生一系列的绕射、折 射、翻卷等现象,波浪环境较为复杂。因此研究近岛礁的波浪环境对于该近岛礁 浮式结构物的水动力分析有着重要的意义,研究结果可以进一步阐释近岛礁波浪 环境特点及该环境下浮式平台的水动力特性,从而为工程实际提供建议。

本 文 主 要 基 于 课 题 组 开 发 的 船 舶 与 海 洋 工 程 水 动 力 学 求 解 器 naoe-FOAM-SJTU 对于一近岛礁浮式结构物的水动力性能及相应的波浪环境问题 进行探究。全文主要用到了六自由度模块、造波模块、锚链模块、动网格模块等, 全文基于 *K-* ω SST 两方程进行求解。

本文在第三章主要对平台的自由衰减运动计算及造波计算的准确性进行了验证,该章首先对本文的计算算例进行了介绍,突出强调了其中的近岛礁地形的形成和提取。随后针对平台的自由衰减运动进行了计算,主要得到以下结论:

1)针对平台垂荡运动进行的网格收敛性验证,表明了160万网格量既可以保证计算的精度,又可以保证相对较高的计算效率。

2)针对平台纵荡、垂荡及纵摇三个自由度的自由衰减运动的计算中,平台自由衰减运动的固有周期计算结果与实验结果吻合良好,误差均在4%以内,由此验证了本文所用求解器的准确性,同时验证了本文计算设定、网格划分等的准确性。

在随后对于造波的计算和验证中,对于给定的波浪工况进行了计算,将造波 结果与理论波形进行了对比,发现计算波浪波形与理论波形吻合良好,确保波浪 在平台中心位置处的波高达到工况要求波高。计算中还发现了造波波形与理论波 形的区别,波浪经过一段时间的传播后出现了较为明显的波形不对称以及非线性 现象。为了进一步分析平台的水动力特性,同时为了进一步分析波浪与理论波性 差异的成因,本文开展了第四章的工作。

第四章主要对平台在规则波中的水动力特性以及波浪在近岛礁地形下的演化

特性进行了分析,这一章也是全文最核心的一章。该章主要分为两部分,一部分 是对于近岛礁斜底地形下的平台水动力性能及波浪演化特性进行分析,第二部分 主要对斜底、平底两种地形下的波浪演化特性进行对比,分析地形对波浪影响。

第一部分的内容主要分为两块,第一块是斜底地形下规则波中平台水动力性 能的分析,主要得到了以下结论:

1) 平台的运动主要受 Stokes 二阶波的影响,整体呈现 2 阶的频率特性,其中 Case2 工况的纵荡运动,出现了较为明显的第二主频,该频率对应平台的纵荡固 有周期。Case3 的受力还受到以二分之一波频为倍数的高频波浪力影响,通过分 析发现,该频率成分主要源自于两个周期一次的波浪抨击现象。

2)将计算的平台的 RAO 结果与实验结果及其他学者开展的计算结果进行对 比,发现本文的计算结果与试验吻合良好,且明显优于另一种势流软件计算结果, 由此验证了求解器以及 CFD 方法的准确性。

3) 波高、波陡对平台的水动力特性影响较大。波浪波高相同周期不同时,平 台 RAO 有明显的区别;波浪周期相同波高不同时,波浪的爬高抨击有明显区别。

第二块是对于斜底地形下波浪演化特性进行了分析,主要得到以下结论:

1) 波浪在传播过程中波形发生了明显的变化。波形趋于尖峰坦谷的坦谷波波
形,波浪横向、垂向不对称性增大,波形出现局部破碎及波动。

2)波浪的波高升高幅度随波浪周期增大而增大。当波浪周期较小时,波浪的 波高逐渐衰减,为呈现出增大趋势,随着波浪周期的增大,波浪的波高也逐渐增 大,当波高增大使波陡达到临界状态,波浪发生破碎,随后波高迅速减小。

3)随着波浪周期的增大,以及波浪传播距离的增大,波浪的高频成分越发明显,波浪也呈现出更强的非线性特性。

第二部分对平台在平底、斜底两种地形下波浪演化特性进行对比,主要得到 以下结论:

 1)平底地形下,波高方面基本未出现演化增高现象,波浪呈现出逐渐衰减的 趋势;而在斜底地形下,波高迅速增大并破碎,波高先增大,后迅速减小。

2)频谱分析方面,平底地形下波浪经过一段时间传播,无明显的高阶频率成分,3阶成分幅值极小,各阶频率成分幅值略有减小;斜底地形下,波浪经过演化,高阶成分明显增大,波浪呈现出6阶特性,且随着传播距离增大而越发明显。

3) 验证了第一部分的分析中波浪的高阶的频率特性及平台计算中大量的强非 线性现象均是由于地形导致。

在第四章的研究中,作者对于其中的波浪演化现象产生了浓厚的兴趣,因此,

为了进一步探究波浪演化、翻卷及破碎的特性和机理,本文开展了第五章的研究。

第五章主要对二维波浪翻卷演化问题进行了较为细节的分析,该部分的研究 主要参考 Blenkinsopp^[140]等人所做的实验,并利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器将其 数值实现。该部分研究主要有以下结论:

1)对于临界情况下波浪的水深指数以及波高指数进行了计算分析,并与实验 结果及其他学者开展的计算结果进行对比,多种结果吻合良好,验证了求解器准 确性以及利用 CFD 方法求解该强非线性波浪翻卷问题的可行性。

2)波浪的水深指数及波高指数随初始波陡的增大而增大。即波浪周期越大, 相应波浪破碎时水深越浅,波浪翻卷临界状态下的波高越大。

3) 波浪的前缘不对称性、后缘不对称性、横向不对称性受波陡的影响不显著, 三者随着波陡的增大,趋势上略有增大。

(4) 波浪的垂向不对称性随着波陡的增大明显减小,同波高下,波浪的周期越大,波浪的垂向不对称性越大。

#### 6.2 研究展望

虽然本文结合了课题组开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器,对于近岛礁浮式平台的水动力性能以及波浪演化特性进行了较为系统的分析,但由于硕士阶段学习时间有限,且该项内容国内外研究学者较少,本文针对平台的水动力性能以及波浪演化现象的研究仍处于摸索阶段,还存在诸多不足,在日后的研究中,还可以从以下几个方面做更进一步的研究。

 1)对于浅水海况中规则波下平台的水动力性能研究还较浅,这个问题是一个 比较复杂的系统性工程问题,涉及到平台、波浪、锚链、地形的耦合作用,可以 研究的内容还有非常多。下一步的研究中,可以聚焦到其中的某一个点或者两个 点,例如非线性波浪、翻卷波浪对于固定式立柱或浮式立柱的冲击力方面。

2)平台实际的工作海况一般为不规则波海况,而本文的计算均为规则波计算, 在日后的研究中,可以进一步对平台在不规则波中的水动力性能进行分析。

3)本文为了探究波浪演化及翻卷的机理,专门开辟了第五章的内容,利用二 维的波浪翻卷,对波浪翻卷的规律、不对称性等问题进行了探究。但总体来看, 本文该部分的研究还较浅,待研究的内容还非常多,单独针对纯粹浅水波浪翻卷 的问题即可开展一系列的研究,下一步若在这方面开展研究,将主要聚焦两个方 面,第一个就是关于斜坡高度、斜坡顶点深度对于波浪翻卷特性的影响;第二个 则是关于更进一步波浪翻卷中的空腔、能量耗散等问题的探究。 上海交通大学硕士学位论文

## 参考文献

- [1] 丁军,田超,王志东,凌宏杰,李志伟. 近岛礁波浪传播变形模型试验研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑,2015,(02):194-200.
- [2] 刘远传. 锚泊浮式码头在波浪上的运动响应计算[C]. 第二十五届全国水动力 学研讨会暨第十二届全国水动力学学术会议文集(上册). 浙江海洋学院: 2013:7.
- [3] 丁军,程小明,田超,张凯,吴波.近岛礁浅水环境下浮式平台系泊系统设计研究[J]. 船舶力学,2015,19(07):782-790.

[4] 国际海事信息网,中国超级巨型海上平台项目曝光.(2015-11-23). http://www.simic.net.cn/news_show.php?lan=cn&id=173219&page=2.

[5] 田超,丁军,吴有生. 近岛礁浮式平台水动力模型试验研究.第十三届全国水动力 学学术会议暨第二十六届全国水动力学研讨会论文集——D 水动力学实验和测试 技术[C].中国石油大学(华东):2014:9.

[6] Philipp G M, Paul S K, Analytical modelling of wave refraction and convergence on coral reef platforms: Implications for island formation and stability[J]. Geomorphology, 2012:84–92.

- [7] Chakrabarti S K. Hydrodynamics of Offshore Structures[J]. Computational Mechanics Publications, 1986.
- [8] Banner M L, Peregrine D H. Wave Breaking in Deep Water[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1993, 25(25):373-397.
- [9] Basco D R. A Qualitative Description of Wave Breaking[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2014, 111(2):171-188.
- [10]Cokelet E D. Breaking waves [J]. Nature, 1977, 267(5614):769-774.
- [11]Peregrine D H. Breaking Waves on Beaches[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1983, 15(15):149-178.
- [12]Perlin M, Choi W, Tian Z. Breaking Waves in Deep and Intermediate Waters [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2013, 45(2):115-145.
- [13] Vinje T, Brevig P. Numerical simulation of breaking waves[J]. Advances in Water Resources, 1981, 4(2):77-82.
- [14]Battjes J A, Sakai T. Velocity field in a steady breaker[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 111(111):421-437.
- [15]Banner M L, Tian X. On the determination of the onset of breaking for modulating surface gravity water waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998,

367(367):107-137.

- [16]Peregrine D H, Cokelet E D, Mciver P. The Fluid Mechanics of Waves Approaching Breaking[C]. Coastal Engineering. ASCE, 1981:512-528.
- [17]Miller R L. Role of vortices in surf zone prediction: Sedimentation and wave forces[M]. Beach and Nearshore Sedimentation. 2013:92-114.
- [18]Svendsen I A, Madsen P Å, Hansen J B. Wave Characteristics in the Surf Zone[C]. International Conference on Coastal Engineering. 1978:520-539.
- [19]Peregrine D H, Svendsen I A. Spilling Breakers, Bores, and Hydraulic Jumps[C]. Coastal Engineering (1978). ASCE, 1978:540-550.
- [20]Battjes J A. Surf Similarity[C]. International Conference on Coastal Engineering. 1974:466-480.
- [21]Jr C J G. Breaker type classification on three laboratory beaches[J]. Journal of Geophysical Research, 1968, 73(12):3651–3659.
- [22] Iversen H W. Laboratory study of breakers [J]. Gravity Waves, 1952, 9-32.
- [23]Ting F C K, Kirby J T. Dynamics of surf-zone turbulence in a spilling breaker[J]. Coastal Engineering, 1996, 27(3):131-160.
- [24]Yoshima Goda. Reanalysis of regular and random breaking wave statistics[J]. Coastal Engineering Journal, 2010, 52(01):71-106.
- [25]Iwagaki Y, Sakai T, Iwagaki Y, et al. Shoaling of Finite Amplitude Long Waves on a Beach of Constant Slope[C]. Coastal Engineering. ASCE, 2013:347-364.
- [26]Tsai C P, Chen H B, Hwung H H, et al. Examination of empirical formulas for wave shoaling and breaking on steep slopes[J]. Ocean Engineering, 2005, 32(3):469-483.
- [27] Weggel J R. Maximum Breaker Height for Design[C]. Coastal Engineering (1972). ASCE, 1972:419-432.
- [28]Bonmarin P. Geometric properties of deep-water breaking waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1989, 209(209):405-433.
- [29]Kjeldsen S, Vinje T P, Myrhaug D P, et al. Kinematics Of Deep Water Breaking Waves[C]. 1980.
- [30]Lader P F. Geometry and Kinematics of Breaking Waves[J]. Fakultet for Ingeniørvitenskap Og Teknologi, 2002.
- [31]Adeyemo M D. Effect of Beach Slope and Shoaling on Wave Asymmetry[C]. Coastal Engineering (1968). ASCE, 2012:145-172.
- [32]Hwang P A. Profile Asymmetry of Shoaling Waves on a Mild Slope[C]. Coastal Engineering (1984). ASCE, 2012:1016-1027.
- [33] Arthur T. Ippen, Gershon Kulin. The Shoaling and breaking of the solitary wave[J].

Journal of Antimicrobial Chemotherapy, 1954, 66(3):527-530(4).

- [34]Miller R, Zeigler J. The internal velocity field in breaking waves[J]. American Society of Civil Engineers, 1964.
- [35]Miles J W. Solitary Waves[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1980, 12(12):11-43.
- [36]Munk W H. The Solitary Wave Theory And Its Application To Surf Problems[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 1949, 51(3):376–424.
- [37]Stoker J J. Water Waves. The Mathematical Theory with Applications[M]. [n.d.], 1992.
- [38]Svendsen I A. Wave heights and set-up in a surf zone[J]. Coastal Engineering, 1984, 8(4):303-329.
- [39]Svendsen I A, Madsen P A. A turbulent bore on a beach[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 148(148):73-96.
- [40]Yamazaki Y, Kowalik Z, Cheung K F. Depth-integrated, non-hydrostatic model for wave breaking and run-up[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2010, 61(5):473-497.
- [41]Babanin A. Breaking and Dissipation of Ocean Surface Waves[J]. Journal of Steroid Biochemistry & Molecular Biology, 2011, 44(4–6):671-673.
- [42]Peregrine D H, Long waves on a beach[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 27(4):815-827.
- [43]Madsen P A, Murray R, Sørensen O R. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics[J]. Coastal Engineering, 1991, 15(4):371-388.
- [44]Okey Nwogu. Alternative Form of Boussinesq Equations for Nearshore Wave Propagation[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1993, 119(6):618-638.
- [45]Wei g. A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1. Highly nonlinear unsteady waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 294(294):71-92.
- [46]Wei G, Kirby J T. A Coastal Processes Model Based on Time-Domain Boussinesq Equations[J]. A Coastal Processes Model Based on Time-Domain Boussinesq Equations. 1996.
- [47]Hemming A. Schäffer, Per A. Madsen, Rolf Deigaard. A Boussinesq model for waves breaking in shallow water[J]. Coastal Engineering, 1993, 20(3–4):185-202.
- [48]Madsen P A, Sørensen O R, Schäffer H A. Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part I. Model description and cross-shore motion of regular waves[J]. Coastal Engineering, 1997, 32(4):255–287.

- [49]Heitner K L, Housner G W. Numerical model for tsunami runup[J]. American Society of Civil Engineers, 1970:701-719
- [50]Kennedy B, Chen Q, Kirby J T, et al. Boussinesq Modeling Of Wave Transformation, Breaking, And Runup I: 1D[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2000, 126(1):39-47.
- [51]Zelt J A. The run-up of nonbreaking and breaking solitary waves[J]. Coastal Engineering, 1991, 15(3):205-246.
- [52]Svendsen I A, Yu K, Veeramony J. A Boussinesq breaking wave model with vorticity[C]. Coastal Engineering (1996). ASCE, 1996:1192-1204.
- [53] Veeramony J, Svendsen I A. The flow in surf-zone waves[J]. Coastal Engineering, 2000, 39(2–4):93-122.
- [54]Briganti R, Musumeci R E, Bellotti G, et al. Boussinesq modeling of breaking waves: Description of turbulence[M]. Coastal Engineering 2004:(In 4 Volumes). 2004:402-414.
- [55]Brocchini M. A reasoned overview on Boussinesq-type models: the interplay between physics, mathematics and numerics.[J]. Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2013, 469(2160):20130496.
- [56]Longuet-Higgins M S, Cokelet E D. The Deformation of Steep Surface Waves on Water. I. A Numerical Method of Computation[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1976, 350(1660):1-26.
- [57]New A L, McIver P, Peregrine D H. Computations of overturning waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1985, 150(150):233-251.
- [58]Dold J, Peregrine H. An Efficient Boundary Integral Method for Steep Unsteady Water Waves[M]. Numerical Methods for Fluid Dynamics II. 1986:671-679.
- [59]Dommermuth D G, Yue D K P, Lin W M, et al. Deep-water plunging breakers: a comparison between potential theory and experiments[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 189(189):423-442.
- [60]Grilli S T, Skourup J, Svendsen I A. An efficient boundary element method for nonlinear water waves[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 1989, 6(2):97-107.
- [61]Xue M, Xü H, Liu Y, et al. Computations of fully nonlinear three-dimensional wave–wave and wave–body interactions. Part 1. Dynamics of steep three-dimensional waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 438(438):11-39.
- [62]Guyenne P, Grilli S T. Numerical study of three-dimensional overturning waves in shallow water[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 547(547):361-388.
- [63] Lachaume C, Biausser B, Grilli S T, et al. Modeling of Breaking and Post-breaking

Waves on Slopes by Coupling of BEM and VOF Methods[J]. Proc Intl Offshore & Polar Engng Conf, 2003:353--359.

- [64]Grilli S, Gilbert R, Lubin P, et al. Numerical modeling and experiments for solitary wave shoaling and breaking over a sloping beach[C]. Int Offshore & Polar Engng Conf. 2004.
- [65]Harlow F H, Welch J E. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface[J]. Phys. Fluids, 1965, 8(12):2182–2189.
- [66]Lemos C M. A simple numerical technique for turbulent flows with free surfaces[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2010, 15(2):127-146.
- [67]Lin P, Liu, Philip L. A numerical study of breaking waves in the surf zone[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 359(359):239-264.
- [68]Bradford S F. Numerical Simulation of Surf Zone Dynamics[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2000, 126(1):1-13.
- [69]Mayer S, Madsen P A. Simulation of Breaking Waves in the Surf Zone using a Navier-Stokes Solver[C]. International Conference on Coastal Engineering. 2000:928-941.
- [70]Christensen E D, Deigaard R. Large eddy simulation of breaking waves[J]. Coastal Engineering, 2001, 42(1):53-86.
- [71] Watanabe Y, Saeki H, Hosking R J. Three-dimensional vortex structures under breaking waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 545(545):291-328.
- [72]Zhao Q, Armfield S, Tanimoto K. Numerical simulation of breaking waves by a multi-scale turbulence model[J]. Coastal Engineering, 2004, 51(1):53-80.
- [73]Chella M A, Bihs H, Myrhaug D. Characteristics and profile asymmetry properties of waves breaking over an impermeable submerged reef[J]. Coastal Engineering, 2015, 100:26-36.
- [74]Chen G, Kharif C, Zaleski S, et al. Two-dimensional Navier–Stokes simulation of breaking waves[J]. Physics of Fluids, 1999, 11(1):121-133.
- [75]Hieu P D, Katsutoshi T, Ca V T. Numerical simulation of breaking waves using a two-phase flow model[J]. Applied Mathematical Modelling, 2004, 28(11):983-1005.
- [76]Christensen E D. Large eddy simulation of spilling and plunging breakers[J]. Coastal Engineering, 2006, 53(5–6):463-485.
- [77]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):1073–1088.

- [78]Lubin P, Vincent S, Abadie S, et al. Three-dimensional Large Eddy Simulation of air entrainment under plunging breaking waves[J]. Coastal Engineering, 2006, 53(8):631-655.
- [79]Ma G, Shi F, Kirby J T. A polydisperse two fluid model for surf zone bubble simulation[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011, 116(C5):-.
- [80]Xie Z. Two-phase flow modelling of spilling and plunging breaking waves[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(6):3698-3713.
- [81]Wang Z, Yang J, Koo B, et al. A coupled level set and volume-of-fluid method for sharp interface simulation of plunging breaking waves[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2009, 35(3):227-246.
- [82]Xie Z. Numerical study of breaking waves by a two-phase flow model[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2011, 70(2):246-268.
- [83]Morison J R, O'Brien M P, Johnson J W, et al. The force exerted by surface waves on piles[J]. Journal of Petroleum Technology, 1950, 2(5):149-154.
- [84]Hooft J P. A mathematical method of determining hydrodynamically induced forces on a semisubmersible[J]. Hydrodynamic Pressure, 1971, 01(79):28-70
- [85]Faltinsen O M. Sea loads on ships and offshore structures[J]. New York, NY (United States); Cambridge University Press, 1993, 10(1).
- [86]Maeda H, Jo H J, Miyajima S. Effects of directional waves on the low-frequency motions of moored floating structures[J]. Motion, 1992, 3:489-495.
- [87]Kobayashi M, Shimada K, Fujihira T. Study on Dynamic Responses of a TLP in Waves[J]. Journal of Offshore Mechanics & Arctic Engineering, 1987, 109(1):61-66.
- [88]Pinkster J A. Mean and low frequency wave drifting forces on floating structures[J]. Ocean Engineering, 1979, 6(6):593-615.
- [89]Boom W C D, Pinkster J A, Tan S G. Motion and Tether Force Prediction for a Deepwater Tension Leg Platform[C]. 15th Offshore Tech. Houston, 1983:377-388.
- [90]Salvesen N, Meinhold M J, Yue D K P. Nonlinear motions and forces on tension leg platforms[M]. U.S. Coast Guard Ren, 1984.
- [91]Petrauskas C, Liu S V. Springing force response of a tension leg platform[C]. 19th Ann. Offshore Tech. Conf, Houston,1987: 333-341.
- [92]Kim M H, Yue D K P. Sum- and difference-frequency wave loads on a body in unidirectional Gaussian seas[J]. Journal of Ship Research, 1991, 35(2):127-140.
- [93]Bums G E. Calculating viscous drift of a tension leg platform[C].2nd Znt. Offshore Mech. and Arctic Engng, ASME, New York, 1983:22-30.
- [94]Ertekin R C, Chitrapu A S. Wave- and current-induced viscous drift forces on

floating platforms[J]. Offshore Engineering, 1988, 6:615-629.

- [95]Chitrapu A S, Ertekin R C, Paulling J R. Viscous drift forces in regular and irregular waves[J]. Ocean Engineering, 1993, 20(1):33-55.
- [96]Donley M G, Spanos P D. Stochastic response of a tension leg platform to viscous and potential drift forces[C].11th Int Offshore Mech and Arctic Engineering ASME, New York, 1992, 2:325-334.
- [97]Finnigan T D, Botelho D L R, Petrauskas C. Time-domain model for TLP surge response in extreme sea states[J]. Proc. Annu. Offshore Technol. Conf.; (United States), 1984, 1.
- [98]Chou F S F, Ghosh S, Huang E. 1983. Conceptual design process of a tension leg platform[J]. SNAME Trans., Jersey City, NJ,1983, 91:275-305.
- [99]Paulling J R. Time-domain simulation of semi-submersible platform motion with application to the tension leg platform[C].Second Ship Technology and Research (STAR) Symposium, SNAME, Jersey City, NJ, 1977: 303-314.
- [100] Huang X, Hoff J R, Naess A. Loads and motions measured on a semisubmersible having a large permanent list angle[J]. Nonvegicn Maritime Research, 1982, 10:24-33.
- [101] Takarada N, Nakajima T, Inoue R. A study on the capsizing mechanism of semi-submersible platforms[J]. Naval Architecture & Ocean Engineering, 1986, 24:115-132.
- [102] Soylemez M, Incecik A. Nonlinear Effects in Predicting the Motion Response of Intact and Damaged Mobile Platforms[C]. Offshore Technology Conference. 1989,65:54-67.
- [103] Yuan Z M, Incecik A, Jia L. A new radiation condition for ships travelling with very low forward speed[J]. Ocean Engineering, 2014, 88(5):298-309.
- [104] Hess J L, Smith A M O. Calculation of non-lifting potential flow about three-dimensional bodies[J]. Journal of Ship Research, 1964,8(2):22–44.
- [105] Kring D C. Time Domain Ship Motions by a Three-dimensional Rankine Panel Method[D]. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 1994.
- [106] 刘应中,缪国平,李谊乐,刘滋源,刘和东.系泊系统动力分析的时域方法[J]. 上海交通大学学报,1997, 31(11):7-12.
- [107] 范菊,黄祥鹿. 锚泊线的动力分析[J]. 中国造船,1999,(1)
- [108] Söylemez M, Atlar M. A Comparative Study of Two Practical Methods for Estimating the Hydrodynamic Loads and Motions of a Semi -Submersible[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2000, 122:57-65.
- [109] 黄祥鹿, 陈小红, 范菊.锚泊浮式结构波浪上运动的频域算法[J].上海交通

大学学报,2001,35(10):1471-1477.

- [110] Clauss G F, Schmittner C E, Stutz K. Freak Wave Impact on Semisubmersibles Time-domain Analysis of Motions and Forces[C].Proceedings of the Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference. 2003, JSC–371.
- [111] Tahar A, Kim M H. Hull/mooring/riser coupled dynamic analysis and sensitivity study of a tanker-based FPSO[J]. Applied Ocean Research, 2003, 25(6):367-382.
- [112] 肖越,王言英.三维锚泊系统时域计算分析[J].船舶力学.2005,9(5):8-16
- [113] Lowa Y M, Langleyb R S. Time and frequency domain coupled analysis o f deepwater floating production systems[J]. Applied Ocean Research 2006, 28:371 – 385.
- [114] Wei Z, Cheng-Sheng W U, Yang N I. Optimum hydrodynamic design of helical strake on Spar platforms based on orthogonal design and CFD method[J]. Journal of Ship Mechanics, 2013, 17(10):1133-1139.
- [115] Rudman M, Cleary P W. The influence of mooring system in rogue wave impact on an offshore platform[J]. Ocean Engineering, 2016, 115:168-181.
- [116] Pan K, Ijzermans R H A, Jones B D, et al. Application of the SPH method to solitary wave impact on an offshore platform[J]. Computational Particle Mechanics, 2016, 3(2):155-166.
- [117] Oggiano L, Pierella F, Nygaard T A, et al. Comparison of Experiments and CFD Simulations of a Braceless Concrete Semi-submersible Platform ☆[J]. Energy Procedia, 2016, 94:278-289.
- [118] Pakozdi C, Östman A, Abrahamsen B C, et al. New Combined CFD and Model Testing Technique for Identification of Wave Impact Loads on a Semisubmersible[C]. ASME 2017, International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2017:V001T01A089.
- [119] Tran T T, Kim D. A CFD study of coupled aerodynamic hydrodynamic loads on a semisubmersible floating offshore wind turbine[J]. Wind Energy, 2017(4).
- [120] Qingmei L I, Linjian W U, Wang Y, et al. Hydrodynamic coefficients of semi-submersible type very large floating structures[J]. Ocean Engineering, 2017.
- [121] Endo H. Shallow-water effect on the motions of three-dimensional bodies in waves[J]. Journal of Ship Research, 1987,31(1): 34–40.
- [122] Li L. Numerical seakeeping predictions of shallow water effect on two ship interactions in waves[J]. Journal of Professional Nursing Official Journal of the American Association of Colleges of Nursing, 2001, 9(3):129.
- [123] 林建国, 陶尧森. 浮体浅水非线性波动问题的 Boussinesq 方程求解方法[J].

上海交通大学学报, 1997(2):41-45.

- [124] Bingham H B. A hybrid Boussinesq-panel method for predicting the motion of a moored ship[J]. Coastal Engineering, 2000, 40(1):21-38.
- [125] Christensen E D, Bredmose H, Hansen E A. Extreme wave forces and wave run-up on offshore wind- turbine foundations[J]. Proceedings of Copenhagen Offshore Wind, 2005:1-10.
- [126] Bredmose H, Jacobsen N G. Breaking Wave Impacts on Offshore Wind Turbine Foundations: Focused Wave Groups and CFD[C]. ASME 2010, International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2010:397-404.
- [127] Bredmose H, Jacobsen N G. Vertical Wave Impacts on Offshore Wind Turbine Inspection Platforms[C]. ASME 2011, International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2011:645-654.
- [128] Mo W, Jensen A, Liu L F. Plunging solitary wave and its interaction with a slender cylinder on a sloping beach[J]. Ocean Engineering, 2013, 74(7):48-60.
- [129] 丁军,田超,张凯,等.近岛礁半潜式平台的运动及载荷响应研究[C].全国 水动力学研讨会. 2014.
- [130] Xiao H, Huang W. Three-Dimensional Numerical Modeling of Solitary Wave Breaking and Force on a Cylinder Pile in a Coastal Surf Zone[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2014, 141(8):A4014001.
- [131] Choi S J, Lee K H, Gudmestad O T. The effect of dynamic amplification due to a structure's vibration on breaking wave impact[J]. Ocean Engineering, 2015, 96:8-20.
- [132] Xiong L Z, Lu H N, Yang J M, et al. Motion responses of a moored barge in shallow water[J]. Ocean Engineering, 2015, 97:207-217.
- [133] Tezdogan T, Incecik A, Turan O. Full-scale unsteady RANS simulations of vertical ship motions in shallow water[J]. Ocean Engineering, 2016, 123:131-145.
- [134] Lee S, Hong C. Study on the course stability of very large vessels in shallow water using CFD[J]. Ocean Engineering, 2017, 145:395-405.
- [135] Seemontini R, Anil K D, Vishwanath N, et al. CFD simulations of steady drift and yaw motions in deep and shallow water[J]. Ocean Engineering, 2017, 142:161–184.
- [136] Shen Z, Zhao W, Wang J and Wan D. Manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU. Technol Rep Solver Man, Shanghai Jiao Tong University. 2014.
- [137] 刘远传. 锚泊浮式码头在波浪上的运动响应计算[C]. 第二十五届全国水

动力学研讨会暨第十二届全国水动力学学术会议文集(上册).浙江海洋学院:,2013:7.

- [138] OpenFOAM. Mesh generation with the snappyHexMesh utility, 2013. Available from: http://www.openfoam.org/docs/user/snappyHex Mesh.php#x26-1510005.4.
- [139] ITTC. ITTC Recommended Procedures Sea Keeping Experiments. 2002: 4.
- [140] Blenkinsopp C, Chaplin J. The effect of relative crest submergence on wave breaking over submerged slopes[J]. Coastal Engineering, 2008, 55, 967–974.
- [141] Chella M A, Bihs H, Myrhaug D. Characteristics and profile asymmetry properties of waves breaking over an impermeable submerged reef [J]. Coastal Engineering, 2015, 100 26–36.
- [142] Smith E R, Kraus N C. Laboratory study of wave breaking over bars and artificial reefs [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 1991, 117 (4), 307–325.

### 致 谢

言罢落笔,心潮澎湃。洋洋洒洒五万余字,昭示着我已经走到了研究生的尾 声,五万字说多不多,说少也不少,恰恰刚好承载我三年的思绪和变迁。

回首往昔,仿佛自己才刚踏入交大的校园,我们送走了研三的师兄,又送走 了一批研三的师兄,毕业对我们来说仿佛还很遥远,但恍然梦醒,我们已经成为 了那一批要被送走的研三。

毕业在即,百感交集之中,首先要感谢的是我的导师万德成教授。在交大求 学的两年半里,万老师严谨的治学态度、认真的工作态度、务实的做事态度深深 的影响着我,因此我这两年半中的一切也都以万老师为榜样,不管是工作、学习 还是科研,总是以最高的标准严格要求自己。此外,在万老师的身上,我学到了 什么叫勤奋。很难想象一个作为我们父辈的长江学者,每天睡得比我们晚,起的 比我们早,同时兼顾着科研和公务,需要保持着怎样的精力。师兄弟们有的时候 也会讨论,到底是什么给了万老师力量让我的导师可以保持着年轻人一般的精力, 永不懈怠。其实每每这个时候我心底里都是有一个自己的答案的:永远追求卓越, 永远渴望进步的上进心。这可以说是我从导师身上得到的会影响一生的点,我的 导师尚且如此努力,我们一个刚踏出校门的年轻人有什么理由不努力奋斗,有什 么理由不拼尽全力绽放自我。

在这里需要感谢我的父母,我苦读了 20 年,其实换个角度,我就是享受了 20 年。这 20 年里,我无忧无虑,每天只需要考虑学习和玩耍,从来不需要考虑 一点生活的压力,是他们给我创造了良好的学习氛围,给我树立了正确的人生观 价值观和奋斗观。特别是今年秋天,是他们在我身后毫无保留的支持,让我在秋 招中,可以更有底气的去追逐梦想。感谢父母在我背后的默默付出,在你们看来 我是你们的骄傲,而在我来看,你们又何尝不是我的骄傲!

感谢一起入学的亲人们,我们这一届入学一共九人,可能因为都是外校学生 的原因,来到之后,九人的关系就格外的亲切,互相之间的相处更像是亲人与亲 人之间的包容。获奖专业户&赚钱小能手艾勇,努力而又机智的博文,稳重而又 执着的东亚,最年轻最聪明最可爱踢球最猛的小平,蠢萌可爱的喵喵师姐,性格 超好的萌萌哒浩哥,一头扎进 GPU 的高富帅人赢翔哥,卖萌专业户&晋江人气写 手大团子,我们九个人互相搀扶,一路走过了硕士两年半的旅途,然后我们前面 五个到站了,默默回身,向仍在车上的亲人们道一声珍重。虽然毕业后我们可能 各奔东西,天南海北,但我们有约在先,我们相约下次再会,你们的博士毕业就 是我们九个人的下一个站点,希望逗勇,胖喵,浩哥你们抓紧结婚,修成正果。

谢谢实验室陪伴我走过两年半的兄弟姐妹,尤其感谢王帝和王哲两位小伙子, 王帝为我的毕业论文做了较多的协助工作,同时与王哲一起,在我秋招找工作的 过程中提供了太多的帮助,总是说请吃饭,但是你们帮忙做了那么多次笔试,感 觉一次吃饭也难以表达自己的感谢,大恩不言谢,希望师弟们日后珍重。还需要 单独感谢实验室的大博士赵伟文赵博士,他在我两年半的硕士学习中,提供了太 多的帮助,每次算例出问题,程序跑不下去,都是赵博士帮我解决,感觉赵博士 就像自己的兄长一样亲切,两个人的性格也十分合得来,希望赵博士以后的工作 中,能够大展宏图,展现出自己超人的能力。此外,还需要感谢实验室的李奇, 宋家琦,谢康迪,吴惠宇,漆小舟,陈泰文,许璐荣,王建华,刘聪,何佳伟, 程萍,张友林,孙晨光,段鑫泽,邓迪,黄扬,刘鑫旺在我硕士的学习生活中给 予我的帮助以及陪伴。

谢谢与我一路同行,与我一起奋斗过的人。感谢杨奇、许振华,暑假一起蜗 居的两个月是我这几年以来成长最快,最开心的两个月,感谢研会的小伙伴彭勇、 米阳、姜若云一路相伴的成长,感谢申万的培养,感谢财通给予的答辩机会,感 谢秋招以来认识的所有优秀的同学,你们的存在让我感觉到自己奋斗的意义,也 让感觉到自己前进的方向并没有走偏,让我更享受与优秀的人一起成长的过程。

最后,也感谢自己。从来没有想过,自己可以这么努力,这么执着。整个秋 招持续了数个月,我也就拼命了数个月,早起晚归,为了自己心中那点百折不挠, 屡挫不灭的梦想,一直在奋斗,感谢自己现在的坚持,希望自己现在做的是一个 让未来的自己感激的事情。

大论文完成,八篇小论文也都发了,硕士期间拿过茫茫多的荣誉,刚刚也获 得了上海市优秀毕业生的名额,GPA 成绩优异,做过研会副主席,拿过交大的十 佳歌手。其实当初在决定不读博的那一刻起,我就努力的让自己的研究生生活变 得充实,努力去尝试每一件之前一直想做而未能做,想实现却未实现的事情。归 根到底其实就是一点,只是希望自己的最后一段学生生活中不要再留遗憾,希望 自己最后的一段求学旅程可以完美落幕。

硕士的学习告一段落,马上就将踏上工作的旅程。这对我们来说不是结束, 相反,这才刚刚开始,我们即将迎来属于自己的事业和人生。我有三杯酒,一杯 敬理想,一杯敬自由,还有一杯敬走在追梦路上的我们!

### 攻读硕士学位期间已发表或录用的论文

[1] **夏可**,万德成.波流夹角对浅水导管架平台载荷影响的计算分析[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2017,31(05):597-604.(己发表,中文核心)

[2] **夏可**,万德成.岛礁附近浮式平台运动响应特性数值分析[J].海洋工程.(已录用, 中文核心)

[3] **Ke Xia**, Yong Ai, Decheng Wan,Hydrodynamic Study of Wave Evolution Characteristics around Semi-submersible Platform in Shallow Water with Submerged Terrain near Island[C], Proceedings of the Twenty-seven (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference San Francisco, California, USA, June 25-30, 2017, pp. 161-169. (己发表, EI 收录)

[4] 夏可,万德成,基于 CFD 方法近岛礁地形波浪演化及半潜式平台运动性能的数值分析[C],第十四届全国水动力学学术会议暨第二十八届全国水动力学研讨会 文集,2017 年 8 月 8-13 日,长春, PP.982-991.(已发表)

[5] **Ke Xia**, Decheng Wan, Effects of wave steepness on wave breaking properties over submerged reef[C], Proceedings of the 8th International Conference on Computational Methods (ICCM2017),25-29 July 2017, Guilin, Guangxi, China, PP.952-961 (已发表) [6] **Ke Xia**, Decheng Wan, Numerical Validation and Analysis of the Semi-submersible Platform of the DeepCwind Floating Wind Turbine based on CFD[C], Proceedings of the 7th International Conference on Computational Methods (ICCM2016), August 1-4, 2016, Berkeley, USA, paper No. ID 1502-5541-1-PB. (已发表)

[7] **夏可**,艾勇,万德成,近岛礁半潜式平台运动性能数值计算分析[C],2016年 船舶力学学术会议文集,2016年7月21-22日,武汉.(已发表)

[8] **夏可**,彭耀,万德成,波流联合作用下浅海导管架平台载荷计算[C],第四届 全国船舶与海洋工程CFD专题研讨会论文集,镇江,2016年10月28-30日, pp. 9-18. (已发表)

[9] 王帝, **夏可**, 万德成, 圆柱形振荡浮子式波浪能吸收装置水动力性能数值计算 与分析[C], 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集, 2017年9月 22-25 日,浙江舟山, PP.339-351.(已发表)

## 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《基于 CFD 方法的浅水近岛 礁环境下浮式平台水动力性能分析及波浪演化特性研究》, 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: 長 5

日期: 2018年2月25日

## 上海交通大学

# 学位论文版权使用授权书

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。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的 全部或部分内容编入有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或扫 描等复制手段保存和汇编本学位论文。

**保密**口,在____年解密后适用本授权书。 本学位论文属于

不保密口。

(请在以上方框内打"√")

学位论文作者签名: 2 5

日期: 2018年 2月 2月

指导教师签名: Ø

日期:2018年2月26日