

上海交通大学硕士学位论文

海上固定式风机基础波流力载荷数值模拟与
分析

硕士研究生：彭耀

学 号：1140109195

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：2017年1月

授予学位单位：上海交通大学

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

**NUMERICAL STUDY OF WAVE-CURRENT
LOADS ACTING ON FOUNDATION OF
FIXED OFFSHORE WIND TURBINE**

Candidate:	Peng, Yao
Student ID:	1140109195
Supervisor:	Prof. Wan Decheng
Academic Degree Applied for:	Master
Speciality:	Naval Architecture and Ocean Engineering
Affiliation:	School of Naval Architecture, Civil and Ocean Engineering
Date of Defence:	Jan, 2017
Degree-Conferring-Institution:	Shanghai Jiao Tong University

上海交通大学

学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

上海交通大学

学位论文版权使用授权书

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，在__年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

海上固定式风机基础波流力载荷数值模拟与分析

摘要

新世纪以来，陆上风电场发电技术趋于成熟，而国家和社会对于风电的需求也有所增加，市场需求和技术支持也进一步带动了近海风电场^[4]的发展，有序、合理地开发利用海上风能对改善我国的能源现状和环境现状都有很好的促进作用。同时，风能是一种清洁的可再生能源，开发和利用风能对改善国家能源消耗结构和保护生态环境具有深远的意义。目前阶段，我国对海上风能的利用主要集中在近海，工作主要载体是海上固定式风机。海上固定式风机为了保持正常的工作性能，需要有不同类型的支承基础使得风机拥有保持工作位置的能力。本文主要研究四种典型的固定式支承基础，其中，单桩基础是目前运用最为广泛的固定式基础，高桩承台基础对水深有更宽广的适应性，同时导管架基础也得到越来越频繁的应用。这些支承基础在工作时由于处于不同水深、受到不同的波流载荷以及不同波高的波浪作用，展现出不同的受力特性。研究这些支承基础的载荷特性以及波浪爬高情况，对支承基础本身的设计研究以及风机设备的安装与运维都有重大的意义。

传统的固定式风机基础研究方法是理论上的数学模型计算，难以考虑粘性影响和波浪砰击等现象。随着计算机科学技术的飞速进步和硬件的性能提升，计算流体力学方法扮演着越来越重要的角色。本文在参考大量国内外研究资料和计算规范的基础上，以计算流体力学方法为主要手段，以实验室物模试验和工程规范计算为辅助手段，综合分析四种典型海上固定式风机基础的水动力性能。分析了波流夹角、入射波高、水深和形状等因素对固定式风机基础载荷特性和波浪爬高

情况的影响。最后还比较和验证了 CFD 方法与模型试验及规范计算方法的结果，主要研究内容如下：

首先，本文介绍了海上固定式风机基础波流载荷课题的研究背景与研究意义，归纳和总结了国内外相关课题研究进展，提出了以 CFD 方法为主，配合使用模型试验方法和规范计算方法较系统性地研究固定式风机基础波流载荷特性和波浪爬高特性的研究目标，并给出了三种方法相关的理论基础和研究条件。

在此基础上，本文对四种固定式风机基础按缩尺比 1 比 30 进行数值建模和模型试验建模，给出数值模型相应的计算域、计算网格和规格参数，以及不同计算工况的对应参数。利用建好的各组模型，数值模拟它们在不同波流夹角载荷作用下波浪爬高情况、水平方向总载荷以及基础表面特征点压力变化情况，同时探讨了水深以及入射波高对这些基础载荷性能的影响。进一步地，本文还深入研究了高桩承台的甲板砰击现象和各个桩腿独自受到的外载荷情况。本文对数值模拟不同工况下的结果进行了对比验证和统计分析，挖掘出相关规律。

最后，将由 naoe-FOAM-SJTU 求解器计算出来的数值结果与相应的实验室物模试验结果和国家规范计算结果进行了对比和验证，从而保证 naoe-FOAM-SJTU 求解器得到的数值模拟结果的可靠性。同时也能总结出数值模拟方法的优缺点和其它特点，积累固定式风机基础领域的数值模拟经验，对风机基础提供相应的性能预报和工程设计建议。

本文采用的计算模型来源于工程实际，对模型的部分细小附件进行了简化。本文所用的求解器为上海交大万德成课题组基于开源平台 OpenFOAM 自主开发而来的 naoe-FOAM-SJTU 求解器。该求解器基于有限体积法 (FVM)，针对三维非定常不可压两相流 RANS 方程进行离散求解，可以处理任意形状多面体网格；采用流体体积函数捕捉自由液面；使用 PISO 算法求解压力-速度耦合项。本文所涉及的试验在

上海交通大学徐汇校区国家重点实验室完成，本文所涉及的理论计算参照国家交通部制定的相应规范完成。

关键词：固定式风机基础、波流联合作用、波流夹角、波浪爬高、naoe-FOAM-SJTU

NUMERICAL STUDY OF WAVE-CURRENT LOADS ACTING ON FOUNDATION OF FIXED OFFSHORE WIND TURBINE

ABSTRACT

Wind energy is one of the most promising renewable clean energy, and it plays a more and more important role in the field of new energy. The use of offshore wind turbine is one of the efficient way to exploit wind energy. And to make the wind turbine work properly, it is necessary to set up a corresponding foundation for the offshore wind turbine which can keep the wind turbine at its position. With the development of computational fluid dynamics (CFD) and numerical method, CFD is playing an increasingly important role in prediction of dynamic performance of fixed offshore wind-turbine foundation. Due to viscosity effects have been taken into consideration, CFD method can provide more detailed and accurate prediction about the pressure and forth for the foundation.

The foundation of offshore wind turbine has varies kinds of types. The monopile foundation is the most widely used form of fixed foundation. The elevated pile foundation can work in deeper water than the monopile foundation, and the jacket foundation becomes more and more popular. This research is to understand more about the influence of the water depth, wave height and wave direction on the environmental loads of different foundations.

In this paper, a series of numerical simulation is conducted by the help of a viscous flow solver named naoe-FOAM-SJTU, which is based on the open source toolbox OpenFOAM, for the foundation of a 3MW wind turbine. The combined wave-current loads on varies types of foundations in time domain is calculated. The different dynamic characteristics of those 4

foundations are discussed, and the influence of different flow direction, water depth and wave height on the loads foundation is studied. More over, the wave elevation for each foundation in different working condition is calculated. And the result in this research is chosen to be compared with the relative experimental result which is conducted in the State key laboratory of Shanghai Jiaotong University in order to validate the simulation. The result calculated by design specifications is also discussed. Conclusions from this research may provide practical information for the designers of fixed wind-turbine foundations.

KEY WORDS: Fixed offshore wind turbine; monopole foundation; the elevated pile foundation; jacket foundation; wave-current loads; naoe-FOAM-SJTU solver..

目 录

摘 要	-----	-----	· I
ABSTRACT	-----	-----	IV
目 录	-----	-----	VI
第一章 绪论	-----	-----	1
1.1 研究背景与意义	-----	-----	1
1.2 海上风机基础结构介绍	-----	-----	· 3
1.2.1 海上风机的构成	-----	-----	3
1.2.2 海上风机基础的分类	-----	-----	3
1.3 海上固定式风机载荷国内外研究发展现状	-----	-----	7
1.3.1 理论计算方法相关研究	-----	-----	7
1.3.2 数值计算方法相关研究	-----	-----	8
1.3.3 其它相关研究	-----	-----	8
1.4 本文主要工作	-----	-----	9
第二章 基本方法及理论基础	-----	-----	· 11
2.1 引言	-----	-----	11
2.2 数值求解基本方法及理论基础^{[54]-[59]}	-----	-----	11
2.2.1 控制方程	-----	-----	11
2.2.2 自由面捕捉方法	-----	-----	11
2.2.3 湍流模型	-----	-----	12
2.2.4 速度压力耦合方程的求解	-----	-----	12
2.2.5 离散方法	-----	-----	12
2.3 规范计算基本方法及理论基础	-----	-----	12
2.3.1 直立桩腿计算理论	-----	-----	· 12
2.3.2 倾斜桩腿计算理论	-----	-----	· 15
2.4 模型试验基本方法	-----	-----	18
2.5 本章小结	-----	-----	19
第三章 典型单桩基础波浪载荷特性数值计算与对比分析	-----	-----	20
3.1 引言	-----	-----	20
3.2 计算模型与工况	-----	-----	20
3.2.1 计算模型	-----	-----	20

3.2.2 计算工况	-----	-----	21
3.2.3 计算网格	-----	-----	23
3.2.4 边界条件	-----	-----	24
3.3 数值计算结果分析	-----	---	24
3.3.1 波流夹角对单桩基础水动力特性的影响	-----	---	24
3.3.2 入射波高对单桩基础水动力特性的影响	-----	---	28
3.3.3 水深对单桩基础水动力特性的影响	-----	-----	30
3.3.4 单桩基础受力特性综合分析	-----	-----	32
3.4 计算结果对比验证与分析	-----	-----	34
3.4.1 典型工况下数值计算结果与试验结果对比验证	-----	-----	34
3.4.2 数值计算结果与试验结果和规范计算结果总体趋势对比分析	-----	-----	36
3.5 本章小结	-----	-----	37
第四章 长桩脚高桩承台型波流载荷特性计算与对比分析			38
4.1 引言	-----	-----	38
4.2 计算模型与工况	-----	-----	38
4.2.1 计算模型	-----	-----	38
4.2.2 计算工况	-----	-----	39
4.2.3 计算网格	-----	-----	41
4.2.4 边界条件	-----	-----	42
4.3 数值计算结果分析	-----	---	42
4.3.1 波流夹角对长桩腿高桩承台水动力特性的影响	-----	-----	42
4.3.2 入射波高对长桩腿高桩承台基础水动力特性的影响	-----	-----	45
4.3.3 水深对高桩承台基础水动力特性的影响	-----	---	46
4.3.4 长桩腿高桩承台基础受力特性综合分析	-----	---	48
4.3.5 桩腿受力特性分析	-----	-----	49
4.4 计算结果对比验证与分析	-----	-----	50
4.4.1 典型工况下数值计算结果与试验结果对比验证	-----	-----	50
4.4.2 数值计算结果与试验结果和规范计算结果总体趋势对比分析	-----	-----	52
4.5 本章小结	-----	-----	54
第五章 短桩脚高桩承台波流载荷特性数值计算与对比分析			55
5.1 引言	-----	-----	55
5.2 计算模型与工况	-----	-----	55

5.2.1 计算模型	55
5.2.2 计算工况	56
5.2.3 计算网格	58
5.2.4 边界条件	59
5.3 数值计算结果分析	59
5.3.1 波流夹角对短桩腿高桩承台水动力特性的影响	59
5.3.2 入射波高对短桩腿高桩承台水动力特性的影响	62
5.3.3 水深对短桩腿高桩承台水动力特性的影响	63
5.3.4 短桩腿高桩承台基础受力特性综合分析	65
5.3.5 桩腿受力特性综合分析	67
5.4 计算结果对比验证与分析	68
5.4.1 典型工况下数值计算结果与试验结果对比验证	68
5.4.2 数值计算结果与试验结果和规范计算结果总体趋势对比分析	70
5.5 本章小结	73
第六章 导管架平台波流载荷特性数值计算与对比分析	74
6.1 引言	74
6.2 计算模型与工况	74
6.2.1 计算模型	74
6.2.2 计算工况	75
6.2.3 计算网格	77
6.2.4 边界条件	78
6.3 数值计算结果分析	78
6.3.1 波流夹角对导管架基础水动力特性的影响	78
6.3.2 入射波高对导管架基础水动力特性的影响	82
6.3.3 水深对导管架基础水动力特性的影响	84
6.3.4 导管架基础受力特性综合分析	86
6.4 计算结果对比验证与分析	86
6.4.1 典型工况下数值计算结果与试验结果对比验证	86
6.4.2 数值计算结果与试验结果和规范计算结果总体趋势对比分析	89
6.5 本章小结	89
第七章 总结与展望	91
7.1 全文总结	91

7.2 研究展望	93
参 考 文 献	94
致 谢	98
攻读硕士学位期间已发表或录用的论文	99

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

人类对风能的利用有着十分悠久的历史,据考证从 3000 年前人类就已经开始使用风车^[1]。对海上风能的系统利用,可以认为从上世纪 90 年代初人们在丹麦建立起世界上第一个海上风电场开始^[2]。而在 1990 年以后,由于环境污染问题日益突出,人们开始意识到能源本身对环境的影响,包括风能在内的一些清洁能源开始受到人类的重视^[3],而风力发电则是人们对风能的主要利用形式。新世纪以来,陆上风电场发电技术趋于成熟,而国家和社会对于风电的需求也有所增加,市场需求和技术支持也进一步带动了近海风电场^[4]的发展,有序、合理地开发利用海上风能对改善我国的能源现状和环境现状都有很好的促进作用。风能是一种清洁的新能源,经济、合理和有效地开发海上风能不仅进一步缓解新世纪能源紧张的问题,还能促进我国建立环境友好型能源网络。图 1-1 就展现出我国近海地区丰富的风能开发潜力。在 2006 年,出于对较高油价以及能源安全性的考虑,对风力发电技术的研究有着突飞猛进的进展,国际上一些国家政府出台了鼓励利用风能的政策。2012 年中国政府宣布新的能源政策,到 2030 年可再生能源提供的电力要占能源消耗的 20%。清洁能源的发展即是大势所趋,也是国家支持的能源结构调整方向,借着这股发展热潮,国内一些国企和私企在风力发电方面都有一定的进展。诸如远景能源这样的“换联网+”新能源公司甚至着手将日本丰田汽车公司的精益生产理念引入到风机的制造中去。

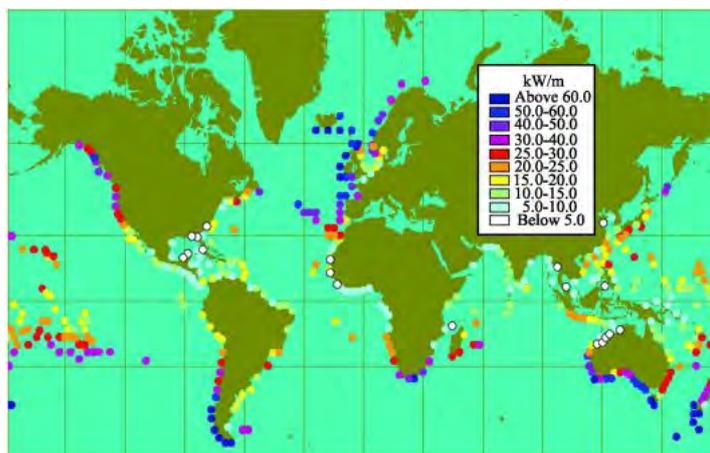


图 1-1 中国周边潜在风能分布图^[5]

Fig.1-1 Potential offshore wind energy in China

海上风机为了保持正常的工作性能，需要有不同类型的支撑基础使得风机拥有保持工作位置的能力。这些支撑结构以支撑基础本身是否能运动分为浮式支撑结构和固定式支撑结构。目前阶段，我国对海上风能的利用主要集中在近海，工作主要载体是海上固定式风机。相对于浮式风机，在近海海域固定式风机制造安装成本和运维成本较低，而从技术角度考虑也相对易于实现。从世界范围上来讲，目前阶段海洋风电场的分布大多处于 40 米水深以内的浅海区域，以单桩式固定支撑结构为主要风机支承形式^[6]，同时还有多桩支撑结构和导管架支撑基础等。总体而言以固定式基础为主^[7]，因此本文的研究对象也是不同类型的海上固定式风机支撑基础。图 1-2 是海上风电场示意图。



图 1-2 海上风电场示意图

Fig.1-2 Offshore wind plant

海上固定式风机基础在实际海洋环境中受到非常复杂的海洋环境载荷作用，环境载荷的主要形式为风力、波浪力和流力，因此海上风机基础比陆上的支撑结构受到更多的考验，从实际经验来说，这些外力载荷对风机基础的主要威胁在于水平推力合力以及基础关键部位压力。同时，由于波浪砰击的作用，海水在风机基础表面上会有爬高，极端海况下有上浪的风险，对风机上层建筑和设备零件造成威胁，而一旦产生破坏，海上风机相比陆上风机维护难度较大^[8]且维护成本也较高。因此，对海上固定式风机基础受到的复杂的波流联合载荷和波浪爬高进行预报具有深远的意义，它是风机基础设计的重要依据也是海上风机能够正常长久运行的可靠保障。

正是由于海上固定式风机基础载荷特性和波高爬高特性对风机发电设备的正常运行有着重要的影响，本文从实际的工程需求出发，探索如何准确而有效地对

固定式风机基础进行性能预报。而本文所主要采用的数值计算工具 naoeFOAM-SJTU 经详细研究和验证对固定式风机基础的性能预报有强大而较为准确的预报能力，对于固定式风机基础载荷特性的深入研究有着十分重要的意义。

本文所主要采用的数值方法，相对于规范计算和模型试验有一定的优势：相对于相对于规范计算，数值手段能考虑到砰击现象、上浪情况，也能考虑附体等复杂结构的影响，而规范只能计算主要构件，且大多数参数来自于经验插值；相对于试验模拟，数值手段能够考虑更广泛的工况，实验室设备限制了物模试验的模拟参数，而数值手段则没有这一限制。同时，试验中可能出现零飘、测量误差和难以完全模仿均匀流的情况，这些在数值手段中可以较好解决。

1.2 海上风机基础结构介绍

1.2.1 海上风机的构成

海上风机按功能结构可以分为发电部分和支撑部分^{[9]-[11]}。其中发电部分是将风能转换为电能的部分，一般包括塔架、机舱和叶片等部分；而支撑部分是保持整个系统处在可正常工作位置以及抵抗外载荷作用部分。一般而言，支撑部分向下可以延伸到海底，而向上可以伸出水面。它通常还连接着楼梯、防撞结构、电缆结构、桁架结构、圈梁结构和主基础等构件。

1.2.2 海上风机基础的分类

海上风机基础是海上石油平台应对海上风机需求而发展产生的衍生物，形式和种类较多，主要形式如图 1-3 所示。根据其是否运动分为固定式风机基础和浮式风机基础两大类。固定式风机基础主要包括单桩基础、重力式基础、高桩承台基础以及导管架基础^{[12]-[16]}等：

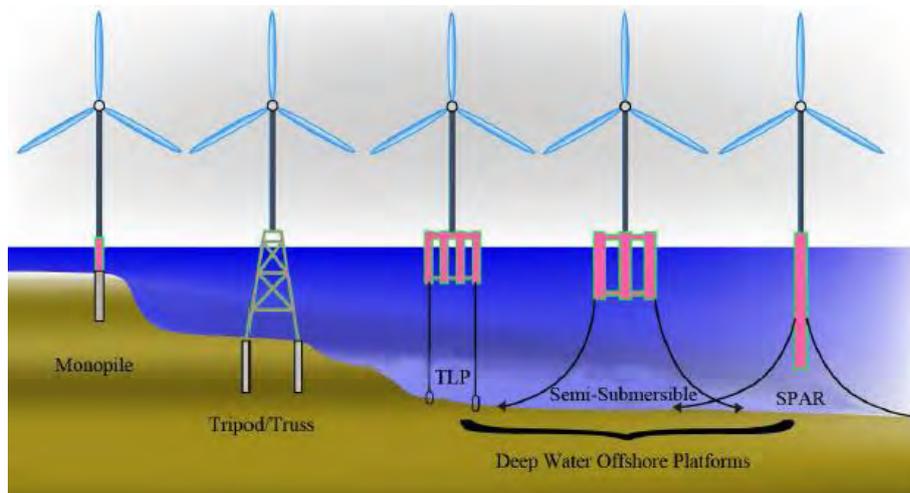


图 1-3 海上风机结构基础形式^[17]

Fig.1-3 Foundation types of offshore wind turbine structure

单桩基础通常由一根直径在 3-6m 之间的钢管桩构成,在钢管桩上可以布置各种加强圈梁、立柱以及导缆设备。单桩基础适用于水深在 25m 以内的浅水区域。单桩基础在世界范围内使用最广,是浅水区域固定式风机的主要基础形式。



图 1-4 海上风机单桩基础示意图

Fig.1-4 Monopile foundation

重力式基础主要依靠自重使得风机直立在工作区域,它是世界上早期海上风机主要采取的基础形式。重力式基础适合坚硬的黏土及岩石地基^[18],要求地基拥有足够的承载支撑基础自身重量、风浪流载荷以及在寒冷地区还要考虑冰载荷。重力式基础又因其强大的自重可以使风机保持垂直,结构简单,造价较低,但是承载能力较低。



图 1-5 海上风机重力式基础示意图

Fig.1-5 Gravity foundation

多桩基础通常也可称之为高桩承台基础,主要包含基桩和上部承台结构,适用于相对较深的海域,该种类型的基础桩腿往往呈倾斜状态布置,多绕主轴承圆形

分布，这些桩腿可以有效的抵制塔架变形。多桩基础的结构比单桩复杂，而应用也日渐广泛。

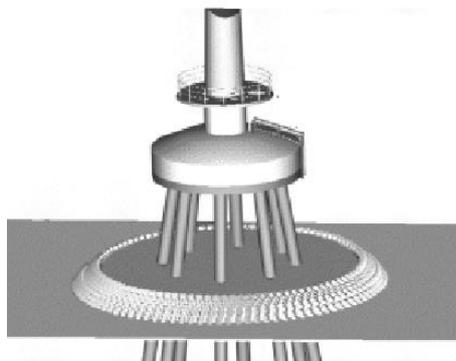


图 1-6 海上风机高桩承台基础示意图
Fig.1-6 The elevated-pile foundation

导管架基础是多桩基础的一种改造，它拥有更多的连杆结构，结构形式也更加复杂，针对复杂的地形和大型的风机，导管架基础相对单桩基础能够提供更强的约束力，保证风机发电部分的平稳运行。



图 1-7 海上风机导管架基础示意图
Fig.1-7 The jacket foundation

浮式风机基础主要包括半潜式基础、Spar 式基础、TLP 式基础和混合式基础^{[19]-[22]}等，它们由各种形式的海上浮式平台衍生而来。

半潜式风机平台将大部分结构置于水面以下，从而较大大幅减小了浮体所受到的载荷^[23]，由于水线面面积比较小，浮体受到波浪载荷而产生的运动响应较小，但其对于大型风机而言性价比较低。



图 1-8 海上风机半潜式基础示意图

Fig.1-8 Semi-submerged platform of the offshore wind turbine

Spar 式风机基础由于重心远低于浮心^[24]，且吃水比较深，拥有很强的回复力矩以及保持位置的能力。这种风机一般适用于较深的海域，利用运输装置水平运送至指定位置安装。

TLP 式风机基础即张力腿基础，它通过将锚链固定到海床，使得风机基础拥有较好的保持直立状态的能力，但是这种风机基础安装成本和制造成本都较高。

混合式浮式风机基础一般是将不同风机基础类型进行组合，有些地方甚至出现了以动力定位辅助的浮式风机基础。



图 1-9 Sway 公司 Spar/TLP 混合结构式风机基础^[25]

Fig.1-9 Spar/TLP floating wind turbine concept Sway (Sway)

本文的研究对象都属于固定式风机基础。

1.3 海上固定式风机载荷国内外研究发展现状

海上固定式风机基础实际上是海上固定式平台的衍生，近年来，国内外对这些风机基础的研究主要采用数值模拟方法和理论模型计算方法，同时也对风机基础的设计和优化等进行了相关研究。

1.3.1 理论计算方法相关研究

由于海上固定式风机基础实际上衍生于海上固定式平台，相关的研究还算比较成熟，早期人们对这种风机基础的载荷和波浪爬高等研究主要采取理论研究和数学计算的形式，近年来，在固定式风机基础相关理论计算方法研究上，国内外取得了一定的进展。

王海龙^[26]等人利用非线性波浪时域耦合数值模型计算了圆柱物体上的非线性波浪压力和波浪爬高情况，并进行了圆柱波浪压力的物理模型试验以及验证了计算结果。

王国粹等人基础长期海上风电场设计时间和经验归纳的基础，建立了可以考虑长期循环荷载影响的单桩基础荷载模型。

根据工程实践需求，横向载荷已经成为了固定式风机基础主要考虑的外载荷。我国相关规范^[27]一般采用 m 法分析水平受荷桩，美国石油规范协会则根据地形的不同，对黏性土一般采用 Matlock 提出的 p-y 曲线^[28]进行计算，而对砾土则采用 Murchison and O'Neill 提出的 p-y 曲线^[31]进行分析。

我国有不少研究人员对 p-y 曲线进行了研究和改进^[29]。章连洋^[30]等以镇江大港桩柱波流载荷作用的数据为研究基础，分析了实测结果与规范计算结果的差异，发油 Matlock 的 p-y 曲线对长江中下游地区的软黏土不适用。朱斌等^[32]利用高桩基础开展了现场试验，利用测量数据导出了 p-y 曲线，发现规范中数据比实测结果偏小。

规范计算在求解圆柱体上横向力时基本采用 Morison 公式。孟珣^[33]利用简化的 Morison 方程计算了细长柱体的横向力。Merz^[34]等人在前人研究的基础上重点分析了不同 Morison 方程在计算研究海上固定式风机基础的浪流载荷时的精度。

周龙^[35]等人针对大直径钢管桩载荷瞬时性的特点，提出了一种利用动力计算方法处理桩上受到的波浪力还海流力的动力模拟方法。他们的研究显示，传统的 API 规范所考虑的大多是荷载长期作用的效果，与钢管桩瞬态载荷特性不符合，动力法分析结果比规范结果偏大。

周正全^[36]研究了波流联合作用下三维物体的绕射课题，并建立了求解波浪绕射力的时域理论模型。他研究得到的一个主要成果是证明了在他给定的简化数学模型中波浪绕射力公式不包含水线积分项。

齐鹏^[37]等建立了适用于求解非线性波浪对海上建筑物载荷的数学模型，该模型在外域上使用差分方法求解 Boussinesq 方程，而在内域上使用差分方法求解 Navier-Stokes 方程。

Sarpkaya^[38]-^[39]等人研究了在波流共同作用下圆柱体主力系数在波流场中的变化特性。给出了实际计算波流载荷时计算参数的选取建议。

1.3.2 数值计算方法相关研究

随着计算机科学技术的发展和硬件基础的进一步提升，计算流体力学方法在固定式风机基础载荷特性研究的手段中占有越来越重要的地位。国内外有不少研究学者用自己编写的软件或者商业软件对固定式风机基础进行了研究。

祁德庆^[40]等人对不规则波作用下风机高桩承台基础机构响应进行了数值模拟，他们运用商业软件 MATLAB 和 ANSYS，对高桩承台基础在不规则波浪载荷作用下的响应进行了分析，他们将所得到的结果与航道水文规范中的相应计算结果进行对比，捕捉到考虑了动力载荷后的载荷放大作用。

刘贝贝^[41]利用有限元软件 ANSYS 建立了一套带地基高桩承台基础模型，重点分析了高桩承台基础在水平载荷特别是地震载荷作用下的动力响应。郭健^[42]等人利用 ANSYS 软件对海上高桩承台的振动载荷特性进行了研究，归纳出高桩承台基础的振动特性。

Mirza 等^[43]利用 SEADYN 程序数值模拟和研究了导管架基础，对桩土相互作用采用 API 规范中的几类曲线，发现基桩顶部载荷存在差别。

吴梓鑫^[44]基于商用软件 FLUENT14.5 针对波流联合作用下海洋立管的载荷特性进行了相关研究。数值模拟了长径比为 103 的柔性立管在数值水池中的运动响应和变形，对不同波流夹角下的响应进行了对比和总结。

1.3.3 其它相关研究

杨锋^[45]等人对近海风机基础的结构型式进行了研究，他们认为除了单桩式基础外，三桩柱式和四桩柱式基础比较适合我国设备的施工能力及东部近海的地质情况。

相对结构复杂的基础形式，研究人员对结构简单的单桩基础往往采用半经验分析的方法。莫继华^[46]等从工程实践角度出发，利用工程规范中单位长度结构物受到的浪流载荷公式计算分析了固定式风机单桩基础的波流联合响应。

马良^[47]等基于大量的试验结果和项目经验，对某种字-母管在波流联合作用下的载荷特性进行了相关研究。对比了规范计算的结果，给出了适用于工程实践的建议。

朱海飞^[48]等参考国内外海洋工程结构物设计的流程和方法，研究了部分海上风电机组固定式支承基础结构的设计和优化方法。他们的研究主要考虑风机受到的风浪流载荷、海床的地质结构、风机工作离岸距离和海冰影响等要素。

1.4 本文主要工作

本论文将在前述研究现状的基础上，根据海上固定式风机基础所面临的的主要挑战——水深问题、波流联合载荷问题、波浪砰击和爬高问题，有针对性的主要利用数值模拟手段（naoeFOAM-SJTU^{[49]-[50]}），同时配合模型试验手段和规范计算手段，较为深入和全面地从水深、波流夹角和入射波浪波高等因素入手，分析四种典型海上固定式风机基础结构的载荷特性。同时对比三种计算手段的异同，分析产生差异的原因和结果的可靠性，总结三种方法各自的优势和缺点，验证数值模拟求解器 naoeFOAM-SJTU 的关于固定式风机基础载荷特性计算的可靠性。

具体来讲，本论文首先分析了所涉及课题的研究背景与现实意义，介绍了海上固定式风机基础的常见类型和特点，对国内外先关研究进展也进行了介绍。进一步地，本文主要通过计算流体力学手段，利用 naoeFOAM-SJTU 求解器，同时配合在上海交通大学徐汇校区国家重点实验室进行的物理模型试验和国家相关规范^{[51]-[52]}计算的方法，对目前世界上应用最广泛的单桩基础和使用日渐频繁的多桩基础以及导管架基础进行计算研究和对比分析，重点考察不同类型固定式风机基础在不同波流夹角(波流同向、波流夹角 22.5 度、波流夹角 45 度和波流夹角 90 度)、不同波高^[53]（计算中对每个基础都采用了一大一小两组波高）以及不同水深情况下的横向载荷以及波浪爬高情况下不同的载荷特性，总结各种风机基础的载荷特点，对工程设计和理论研究提供相应的参考。最后，本文还通过对比数值模拟、模型试验和规范计算的结果，证明 naoeFOAM-SJTU 求解器在固定式风机基础计算上的应用的可靠性，通过对比研究三种方法结果各自的特点，总结各个方法（特别是 CFD 方法）的优势，同时提出对课题未来进一步研究的展望。

文章内容可以分为以下几个部分：

第一章重点指出了本文的选题背景与研究意义，重点介绍了海上风机基础结构的定义与种类，对海上固定式风机基础载荷特性研究的国内外研究现状进行了介绍，最后提出本文以数值模拟手段（naoeFOAM-SJTU 求解器）为主要手段，辅以模型试验方法和规范计算方法来研究不同类型固定式风机基础的研究目标。

第二章介绍了本文所采用的数值模拟求解器 naoeFOAM-SJTU 的基本理论和框架。同时介绍了本文所采用的规范及其理论依据。在本章最后还介绍了本文所进行的试验条件和方法。

第三章介绍了本文所研究的典型单桩基础的计算模型、计算工况、计算网格和边界条件。从数值模拟角度分析单桩基础在不同波流联合载荷作用下的载荷特性，同时考察水深对单桩基础推力载荷及压力载荷的影响，预报单桩基础的波浪爬高情况，并给出数值模拟结果与模型试验结果和规范计算结果的对比和分析，给出相关的结论。

第四章介绍了本文所研究的长桩腿高桩承台的计算模型、计算工况、计算网格和边界条件。从数值模拟角度分析高桩承台基础在不同波流联合载荷作用下的载荷特性，同时考察水深对高桩承台基础推力载荷及压力载荷的影响，预报高桩承台的波浪爬高情况，分析各个桩腿单独受到的载荷，并给出数值模拟结果与模型试验结果和规范计算结果的对比和分析。

第五章介绍了短桩腿高桩承台的计算模型、计算工况、计算网格和边界条件。从数值模拟角度分析高桩承台基础在不同波流联合载荷作用下的载荷特性，同时考察水深对高桩承台基础推力载荷及压力载荷的影响，重点分析了波浪抨击现象，预报短桩脚高桩承台的波浪爬高情况，分析各个桩腿单独受到的载荷，并给出数值模拟结果与模型试验结果和规范计算结果的对比和分析，同时给出相关结论。

第六章为介绍了本文所研究的导管架基础的计算模型、计算工况、计算网格和边界条件。从数值模拟角度分析导管架基础在不同波流联合载荷作用下的载荷特性，同时考察水深对导管架基础推力载荷及压力载荷的影响，预报导管架的波浪爬高情况，并给出数值模拟结果与模型试验结果和规范计算结果的对比和分析，同时给出相关结论。

第七章为全文的总结和展望。这一章针对全文的研究内容和研究成果进行归纳总结，并对未来的工作做了研究展望。

第二章 基本方法及理论基础

2.1 引言

本文采用数值模拟、模型试验和规范计算三种手段对不同类型的风机基础进行了分析和探究，这些研究手段都依赖各自的基本方法和理论基础，本章将对这三种方法进行简要的介绍。

2.2 数值求解基本方法及理论基础^{[54]-[59]}

2.2.1 控制方程

对于对于不可压、黏性流体，naoe-FOAM-SJTU 求解器的控制方程为不可压 RANS 方程：

和动量方程如下式：

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

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U}) + \mathbf{f}_\sigma + \mathbf{f}_s \quad (2)$$

式中： t 为时间， \mathbf{U} 为流场速度， p 为压力， p_d 为压力修正项，即动压力（总压力减去静水压力）。采用压力修正项代替原方程中压力项的目的有两个，其一为简化压力边界条件，其二是通过压力梯度的求解来有效地处理自由面处的密度突变。 $\nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U})$ 为应力张量； \mathbf{g} 、 ρ 和 μ 分别为重力加速度、流体的密度和动力粘性系数， μ_{eff} 为有效动力粘度，等于 $\rho(\nu + \nu_t)$ ，其中 ν 为运动粘性系数， ν_t 为湍流涡粘度； \mathbf{f}_σ 为表面张力项，作用于两相流模型中的自由面处， \mathbf{f}_s 为消波源项。

2.2.2 自由面捕捉方法

求解器对自由面的捕捉采用边界可压缩的 VOF 方法。这种方法能够有效的控制数值扩散，以较高的精度捕捉自由面。

VOF 输运方程定义为：

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

其中， α 是体积分数，是网格单元中流体所占网格总体积的体积比，当网格中几乎没有流体时，其值为 0；相反，当网格中充满流体时，其值为 1：

$$\begin{cases} \alpha = 0, & \text{air} \\ \alpha = 1, & \text{water} \\ 0 < \alpha < 1, & \text{free surface} \end{cases} \quad (4)$$

同时，密度 ρ 和动力粘性系数 μ 也可以由 α 来表征：

$$\begin{cases} \rho = \alpha\rho_l + (1-\alpha)\rho_g \\ \mu = \alpha\mu_l + (1-\alpha)\mu_g \end{cases} \quad (5)$$

下标 l、g 分别表示流体和气体。

2.2.3 湍流模型

本文中采用的是标准 $k-\omega$ 湍流模型，它是基于 Wilcox $k-\omega$ 模型修改而来，可以考虑低雷诺数和压缩性等。

2.2.4 速度压力耦合方程的求解

本文通过 PISO (pressure-implicit-split-operator) 算法来求解 N-S 方程和连续性方程。PISO 意为压力的隐式算子分割法，它的每个迭代过程由三个主要步骤构成，即预测、修正和进一步修正，拥有较快的收敛速度。

2.2.5 离散方法

本次计算中，RANS 方程和 VOF 输运方程都采用有限体积法离散，计算中流场信息保存在网格单元的中心，单元面元上的值可以通过插值求得。同时根据高斯理论，把面元上的值求和积分可以得到单元体的值。

2.3 规范计算基本方法及理论基础

本模型计算直立桩腿采用的方法选自《港口与航道水文规范 JTS145-2015》10.3 和《港口工程荷载规范 JTS144-1-2010》的 13.0。本模型计算倾斜桩腿的方法，选自《港口与航道水文规范 JTS145-2015》的 10.4。

2.3.1 直立桩腿计算理论

试将波浪和水流对小尺度桩（柱）（ D/L 或 $b/L \leq 0.2$ 时）的作用分开考。

第一种情况：在 $H/d \leq 0.2$ 且 $d/L \geq 0.2$ 或 $H/d > 0.2$ 且 $d/L \geq 0.35$ 时，根据规范要求，如图 2-1 所示对于指定高度 z 上的水平正向力分力和惯性分力，由下面诸式能够得到：

$$p_D = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} C_D D u |u| \quad (6)$$

$$p_I = \frac{\gamma}{g} C_M A \frac{\partial u}{\partial t} \quad (7)$$

$$u = \frac{\pi H c h \frac{2\pi z}{L}}{T s h \frac{2\pi d}{L}} \cos \omega t \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{2\pi^2 H c h \frac{2\pi z}{L}}{T^2 s h \frac{2\pi d}{L}} \sin \omega t \quad (9)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (10)$$

式中：

D ——直径 (m)；

L ——波长 (m)；

a 、 b ——平行和垂直于波向的宽度 (m)；

H ——建筑物所在处进行波波高 (m)；

d ——建筑物前水深 (m)；

z 、 z_1 、 z_2 ——计算点在水底面以上的高度 (m)；

p_D ——波浪力的速度分力 (KN/m)，其最大值 $p_{D\max}$ 出现在 $\omega t = 0^\circ$ 的相位上；

γ ——水的重度 (KN/m³)；

g ——重力加速度 (m/s²)；

C_D ——速度力系数；

u ——水质点轨道运动的水平速度 (m/s)；

p_I ——波浪力的惯性分力 (KN/m)；

C_M ——惯性力系数；

A ——柱体的断面积 (m²)；

$\frac{\partial u}{\partial t}$ ——水平加速度 (m/s²)；

T ——波浪周期 (s)；

ω ——波浪运动的圆频率 (s⁻¹)；

t ——时间 (s)。

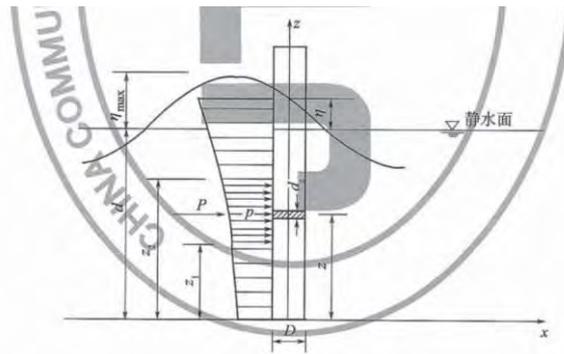


图 2-1 桩上压力分布图^[51]

Fig.2-1 Pressure distribution on the pile

第二种情况：在 $H/d \leq 0.2$ 且 $d/L < 0.2$ 或 $H/d > 0.2$ 且 $d/L < 0.35$ 时，可按（6）到（10）式计算作用于整个柱体上的正向波浪力，并应对 P_D 乘以系数 α ；对 P_I 乘以系数 β 。 α 和 β 可按图 2-2 和图 2-3 确定。

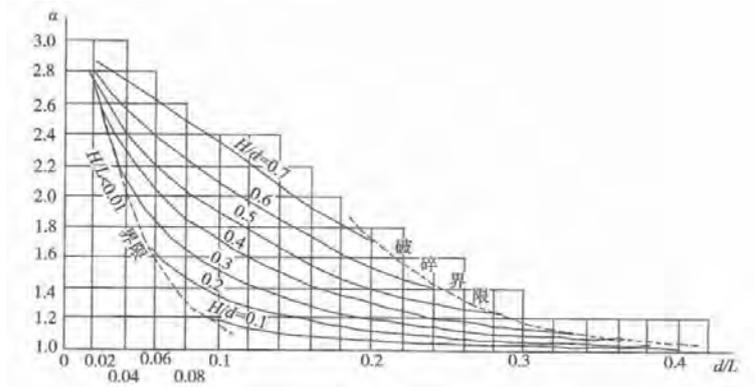


图 2-2 系数 α ^[51]

Fig.2-2 Coefficient α

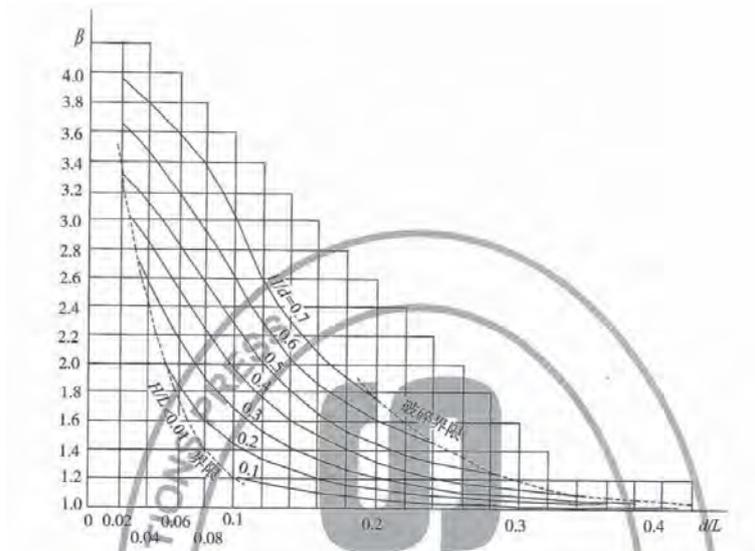


图 2-3 系数 β ^[51]
Fig.2-3 Coefficient β

另外，结构上的水流力可以按下式计算：

$$F_w = C_w \frac{\rho}{2} V^2 A \quad (11)$$

单独波浪和单独水流对构件的作用力计算完成后，把二者相加，即可得到波浪总的的作用力 F_x (F_x 是沿波浪传递方向的载荷力)、 F_y 和 M_y 。

2.3.2 倾斜桩腿计算理论

计算倾斜桩腿的方法，选自《港口与航道水文规范 JTS145-2015》的 10.4。桩（柱）直径 D 与波长 L 之比 $D/L \leq 0.2$ 时，作用在 $\theta < 75^\circ$ 斜桩上的作用力或波流力（图 2-4）可按下列规定确定：

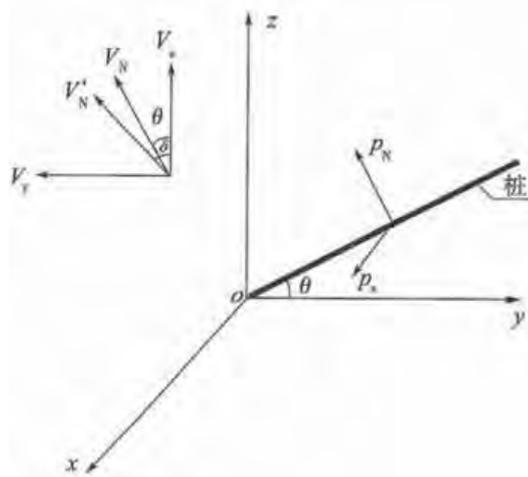


图 2-4 作用在斜桩上的波流力示意图^[51]
Fig.2-4 Wave-current force act on the inclined pile

作用在单位长度斜桩上垂直于 yoz 平面的力 p_x 按下列公式计算：

$$p_x(z, x, t) = K_D V_x |V| + K_M \dot{V}_x \quad (12)$$

$$K_D = \frac{1}{2} C'_D \frac{\gamma}{g} D \quad (13)$$

$$K_M = \frac{1}{4} C'_M \frac{\gamma}{g} \pi D^2 \quad (14)$$

作用在单位长度斜桩上 yoz 平面内垂直于桩（柱）的力 $p_N(z, y, t)$ 分解为 $p_y(z, y, t)$ 和 $p_z(z, y, t)$ ，按下列公式计算：

$$p_y(z, y, t) = K_D V_y |V| + K_M \dot{V}_y \quad (15)$$

$$p_z(z, y, t) = K_D V_z |V| + K_M \dot{V}_z \quad (16)$$

沿各轴方向的波流速度按下列公式计算：

$$V_x = u_c \sin \beta + u_{wz} \sin(\alpha + \beta) \quad (17)$$

$$V_y = u_c \cos \beta + u_{wz} \cos(\alpha + \beta) \quad (18)$$

$$V_z = u_{wz} \quad (19)$$

总流速可按下列公式计算：

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (20)$$

沿各轴方向的加速度可按下列公式计算：

$$\dot{V}_x = \dot{u}_{wz} \sin(\alpha + \beta) \quad (21)$$

$$\dot{V}_y = \dot{u}_{wz} \cos(\alpha + \beta) \quad (22)$$

$$\dot{V}_z = \dot{u}_{wz} \quad (23)$$

波浪水质点速度和流速的关系见图 2-5，沿波浪传播方向的质点水平运动速度 u_{wz} 和加速度 \dot{u}_{wz} 及其垂直运动速度 u_{wz} 和加速度 \dot{u}_{wz} 按下列公式计算：

$$u_{wz}(z, \lambda, t) = \frac{\omega_r H}{2} \frac{ch kz}{sh kd} \cos(k\lambda - \omega_a t) \quad (24)$$

$$\dot{u}_{wz}(z, \lambda, t) = \frac{\omega_r^2 H}{2} \frac{ch kz}{sh kd} \sin(k\lambda - \omega_a t) \quad (25)$$

$$u_{wz}(z, \lambda, t) = \frac{\omega_r H}{2} \frac{sh kz}{sh kd} \sin(k\lambda - \omega_a t) \quad (26)$$

$$\dot{u}_{wz}(z, \lambda, t) = -\frac{\omega_r^2 H}{2} \frac{sh kz}{sh kd} \cos(k\lambda - \omega_a t) \quad (27)$$

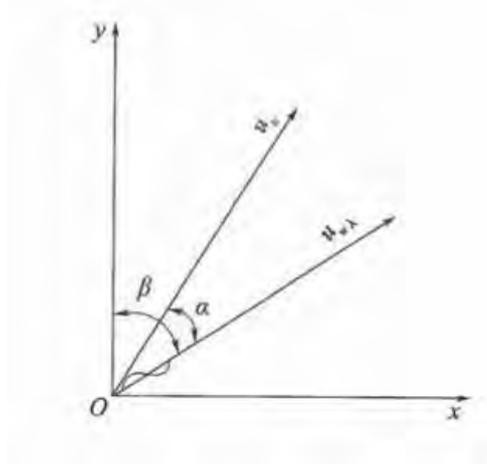


图 2-5 水质点速度和流速关系^[41]

Fig.2-5 The relationship of water particle speed and current speed.

波浪圆频率 ω_r 和 ω_a 可按下列公式计算:

$$\omega_r = \omega_a - ku_c \cos \alpha \quad (28)$$

$$\omega_a^2 = kgthkd \quad (29)$$

斜桩的速度力系数 C'_D 和惯性力系数 C'_M 按下列公式计算:

$$C'_D = \frac{C_D}{1 - \cos^3 \mu} \quad (30)$$

$$C'_M = \frac{C_M}{\sin \mu} \quad (31)$$

$$\tan \mu = \frac{\tan \theta}{\cos(\alpha + \beta)} \quad (32)$$

将 p_x 和 p_z 从 $z=0$ 到波面处进行积分, 即可得到波流对整个倾斜柱体的作用力。

上面所有式子中:

p_x ——作用在单位长度斜桩上垂直于 yoz 平面内的力 (KN);

p_N ——作用在单位长度斜桩上, 在 yoz 平面内垂直于桩的力 (KN);

V_x ——波流速度沿 x 轴的分速度 (m/s);

V ——波流总的速度 (m/s);

C'_D ——斜桩的速度力系数;

γ ——水的重度 (KN/m³);

g ——重力加速度 (m/s²);

D ——桩的直径 (m);

V_y ——波流速度沿 y 轴的分速度 (m/s);

p_y —— p_N 沿 y 轴的分力 (KN);

p_z —— p_N 沿 z 轴的分力 (KN);

V_z ——波流速度沿 z 轴的分速度 (m/s);

u_c ——水流速度 (m/s);

β ——水流与 y 轴的夹角 (°);

$u_{w\lambda}$ ——沿波浪传播方向的水质点水平运动速度 (m/s);

α ——水流与波向的夹角 (°);

u_{wz} ——波浪水质点运动的垂直分速 (m/s);

K_D 、 K_M ——系数;

- θ ——斜桩与 xoy 平面的夹角 ($^{\circ}$)
 ω_r ——波浪相对于水流的圆频率 (s^{-1})
 H ——波高 (m);
 k ——波数 (m^{-1});
 λ ——沿波浪传播方向的距离 (m);
 ω_a ——波浪的绝对圆频率 (s^{-1});
 t ——时间 (s);
 d ——水深 (m);
 z ——计算点距水底的高度 (m);
 C'_D ——斜桩的速度力系数;
 C'_M ——斜桩的惯性力系数;
 μ ——夹角 ($^{\circ}$),

2.4 模型试验基本方法

模型试验^{[60]-[61]}在上海交通大学海洋工程水池开展,如图 2-6 所示。上海交通大学海洋工程水池是我国第一座海洋工程水池,位于上海交通大学徐家汇校区内。该水池可以模拟不同类型的环境载荷,进行丰富的模型试验。水池可以在一定范围内调节水深,以精确模拟潮汐变化的作用。海洋工程水池可以在 0~4 米范围内模拟水深,本次数值模拟选取的 1:30 的缩尺比研究中所涉及的波浪变化情况可以完全在水池试验中实现。

海洋工程水池拥有先进的造波系统,同时也可以造各个方向的局部均匀流,本次试验所需求的波流联合海况可以被完全实现。通过调整局部流的方向,可以得到不同波流夹角的波流组合。

海洋工程水池同时也拥有完备的模型试验装置和测量系统,如六自由度运动测量系统,力传感器、加速度仪,浪高仪等。可以通过这些工具测量模型的波浪爬高,各个自由度上的波流载荷情况等。模型试验严格按照模型尺度实验方法进行。



图 2-6 上海交通大学海洋工程水池
Fig.2-6 State Key Laboratory of Ocean Engineering

2.5 本章小结

本章介绍了数值模拟求解器 naoeFOAM-SJTU 的理论基础和计算依据，同时给出国家规范中关于直立桩腿和倾斜桩腿荷载的计算方法，最后给出模型试验的技术简介。本章所介绍的内容是后续计算的基本前提。

第三章 典型单桩基础波流载荷特性数值计算与对比分析

3.1 引言

单桩基础是运用最为广泛的固定式风机基础。本章主要分析单桩基础在不同波流联合载荷作用下的载荷特性，同时考察水深对单桩基础推力载荷及压力载荷的影响，预报单桩基础的波浪爬高情况，并给出数值模拟结果与模型试验结果和规范计算结果的对比和分析。

3.2 计算模型与工况

本节给出单桩基础 24 种不同波流载荷和波高组合工况的详细参数，介绍单桩基础数值模拟的网格和模型信息。

3.2.1 计算模型

本节所选取的计算模型是由某 3 兆瓦海上固定式风机的单桩基础按缩尺比 1:30 转化而来。该单桩基础主要由主柱体及附体构成，主柱体上面部分呈圆柱体形态，直径为 4.3 米，换算成模型尺度后为 0.143 米，主柱体下面部分呈圆台形态。附体主要包括支撑桁架、圈梁、电缆管和防撞挡板等。本文的所有计算都是基于单桩基础的模型尺度，并将对应的海况作了相应的缩尺处理。相应的物理参数可以由工况表中模型尺度参数得知。单桩基础的模型如图 3-1 所示。由于要对单桩基础表面压力进行分析，本文在单桩基础表面布置了 15 个测压点，它们的分布如图 3-2 所示。

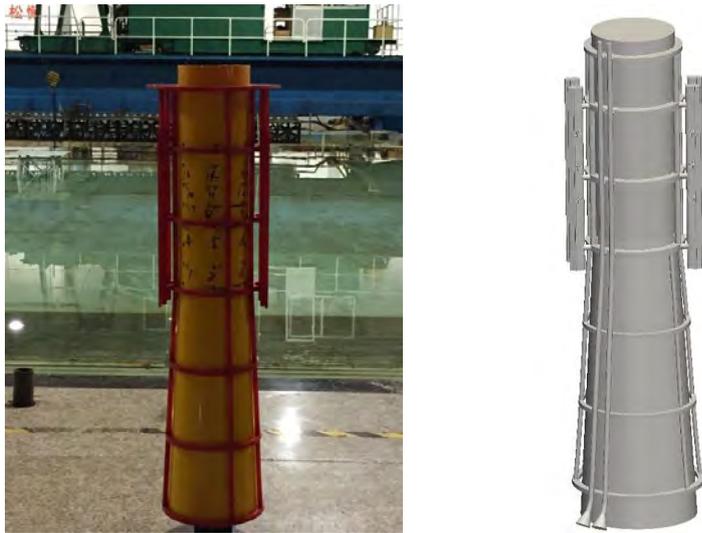


图 3-1 试验模型（左）与数值模型（右）
Fig.3-1 Experimental model (left) and Numerical model (right)

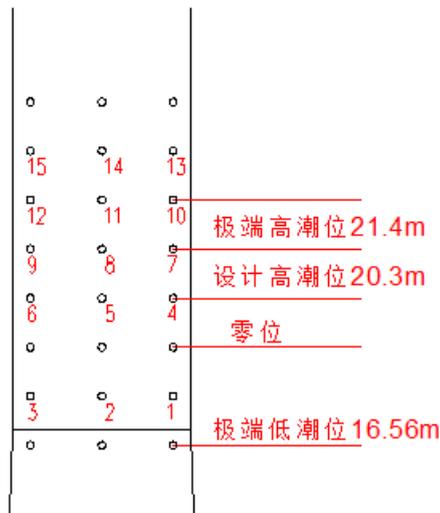


图 3-2 测压点示意图
Fig. 3-2 Illustration of the pressure taps

3.2.2 计算工况

本文的计算工况，均采用设计平台工作时具体的海况简化而来，拥有较强的工程应用性能，对于单桩基础，考虑三种水深条件，分别定义为：

- 1) 极端高潮位，实际水深 21.4 米，模型水深 0.713 米；
- 2) 设计高潮位，实际水深 20.3 米，模型水深 0.677 米；
- 3) 低端低潮位，实际水深 16.56 米，模型水深 0.552 米。

同时，在数值模拟中，模拟规则波海况。一共包含四个波流夹角，分别为：

波流同向，波流夹角为 0 度；
 波流垂向，波流夹角为 90 度；
 波流斜向一，波流夹角为 22.5 度；
 波流斜向二，波流夹角为 45 度。
 具体方向如下图 3-3 所示。

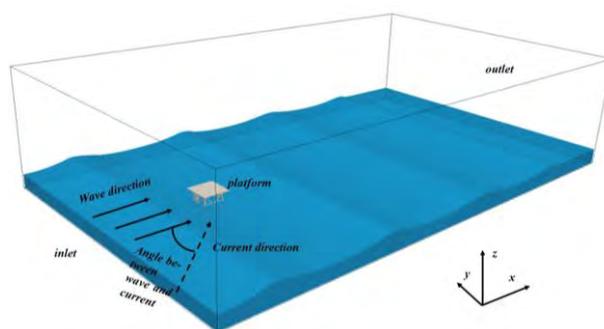


图 3-3 波流夹角示意图

Fig. 3-3 Illustration of the wave and flow direction

波浪参数如下表 3-1 和表 3-2 所示

表 3-1 单桩基础实尺度波浪参数表

Table 3-1 Wave parameters of full-scale foundation

海况编号	波高(m)	周期(s)	海流流速 (m/s)
规则波 1	7.78	10.95	1.73
规则波 2	5.52	9.5	1.73

表 3-2 单桩基础模型尺度波浪参数表

Table 3-2 Wave parameters of model-scale foundation

海况编号	波高(m)	周期(s)	海流流速 (m/s)
规则波 1	0.259	2.000	0.316
规则波 2	0.184	1.734	0.316

工况编号如下表 3-3 所示

表 3-3 单桩基础各工况介绍

Table 3-3 List of each working condition

工况号	海况编号	波流夹角	水深编号
A 1	1		

A 2	2	波流同向	
A 3	1	波流垂直	
A 4	2		
A 5	1	波流斜向一	极端高潮位
A 6	2		
A 7	1	波流斜向二	
A 8	2		
A 9	1	波流同向	
A 10	2		
A 11	1	波流垂直	
A 12	2		设计高潮位
A 13	1	波流斜向一	
A 14	2		
A 15	1	波流斜向二	
A 16	2		
A 17	1	波流同向	
A 18	2		
A 19	1	波流垂直	
A 20	2		极端低潮位
A 21	1	波流斜向一	
A 22	2		
A 23	1	波流斜向二	
A 24	2		

3.2.3 计算网格

网格的生成分为两步。首先采用 POINTWISE 软件生成计算域内的背景网格。再利用 OpenFOAM 提供的 snappyHexMesh 工具生成高桩承台基础周围的多面体网格并完成自由液面附近和高桩承台基础附近的网格加密。

在每一个计算工况下，空间坐标轴 x 轴都落在初始自由水面上，坐标原点为高桩承台水线面的型心。整个计算域为一个长方体 ($-5 \leq x \leq 20$, $-7.5 \leq y \leq 7.5$, $-h \leq z \leq 20$ ，其中 h 为对应工况的水深)。计算网格量在 180 万左右（根据水深不同网格数量会有细微变化）。模型表面 $y+$ 控制在 50 左右。一个波高内模型网格 z 方向个数大于 20 个。附体包括支撑桁架、圈梁、电缆管和防撞挡板等。具体的网格示意图如图 3-4 所示。

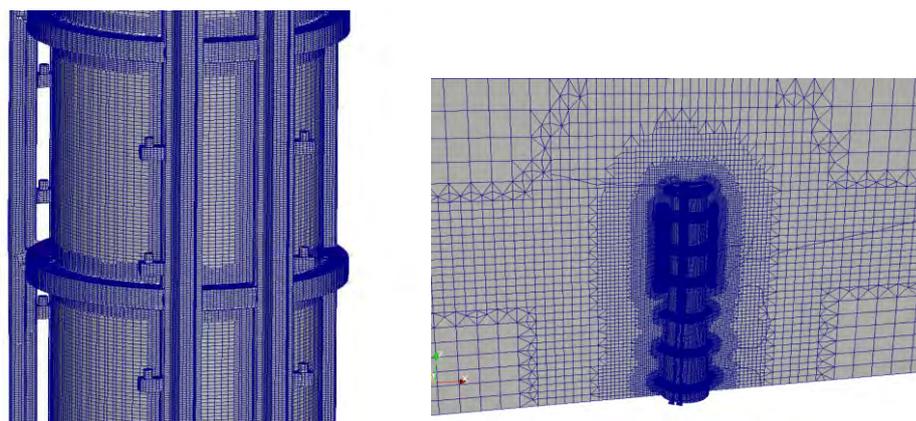


图 3-4 局部网格（左）与全局网格（右）
Fig. 3-4 Illustration of the numerical grids

3.2.4 边界条件

在速度边界条件方面，波浪和来流入口面选择 `wavevelocity`；水底和基础结构表面选择壁面条件：`fixedValue`，速度为 0；波浪和来流出口面选择 `zeroGradient`，0 梯度条件；计算域上表面（空气中远场处）选择 `pressureInletOutletVelocity` 条件。

在压力边界条件方面，波浪和来流入口面、水底和基础结构表面都选择通量为 0 条件，`fixedFluxPressure` 条件；计算域上表面（空气中远场处）选择 `totalPressure` 条件，总压力为 0；出口处选择 0 梯度条件，`zeroGradient`。

3.3 数值计算结果分析

本节主要用计算流体力学的手段研究波流夹角、入射波浪高度和水深对单桩平台载荷特性的影响，并在第四节给出单桩平台的整体受力特性。

3.3.1 波流夹角对单桩基础水动力特性的影响

本节探讨不同波流夹角对单桩基础受力、力矩以及砰击压力的影响，我们选定入射波为规则波 1、流速 1.73m/s、水深 21.4 米（极端高潮位）下入射波流夹角分别为 0 度、22.5 度、45 度和 90 度作为研究对象，对应工况分别为 A1, A5, A7, A3。测压点请参考图 3-2。下面图 3-5、3-6 和 3-7 分别给出沿波浪方向推力、水平方向总推力以及各个测压点处压力的时间历程曲线。

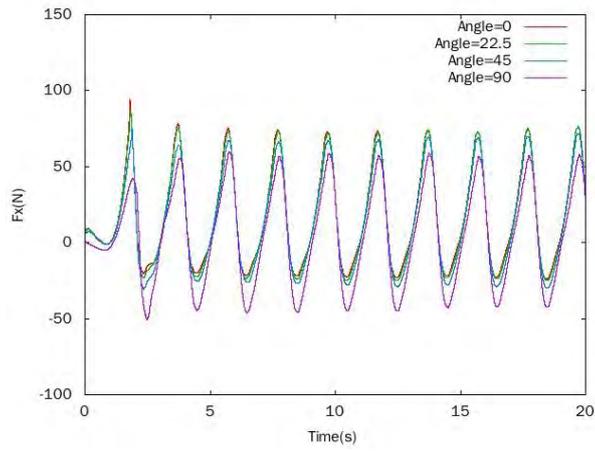


图 3-5 不同波流夹角水平推力 F_x 示意图
Fig. 3-5 Comparison of F_x in different flow direction

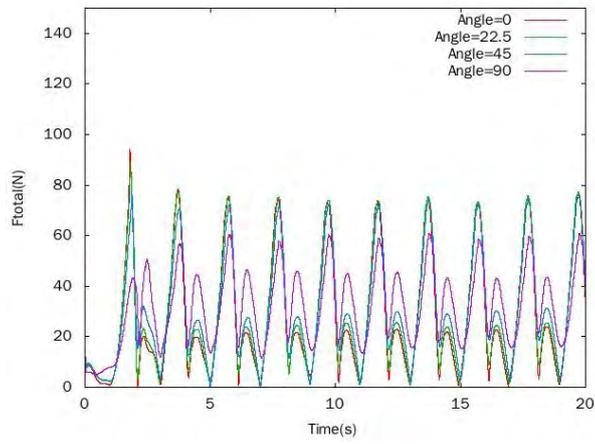
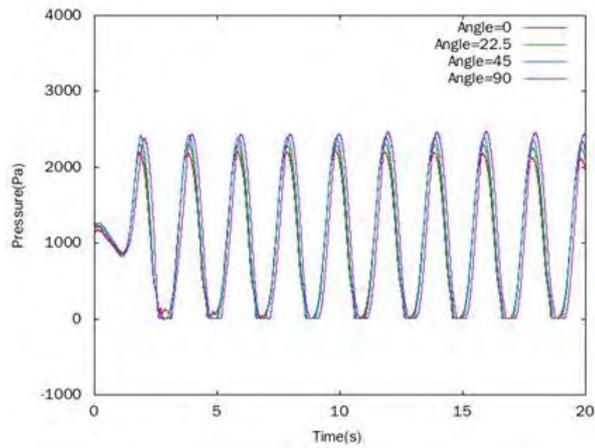
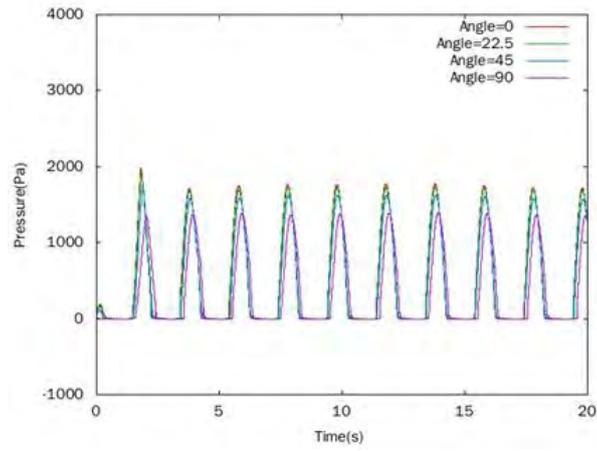


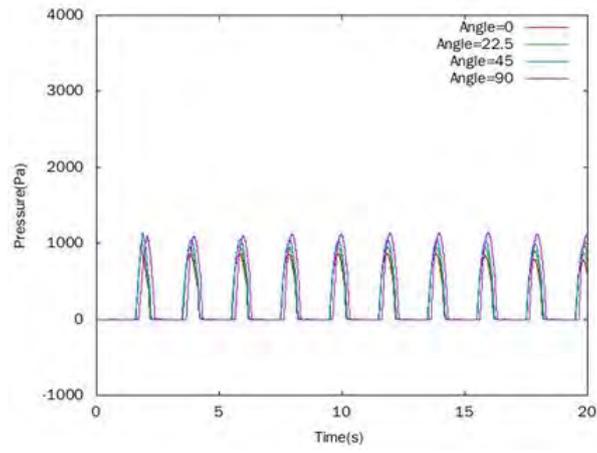
图 3-6 不同波流夹角水平总推力 F_{ht} 示意图
Fig. 3-6 Comparison of F_{ht} in different flow direction



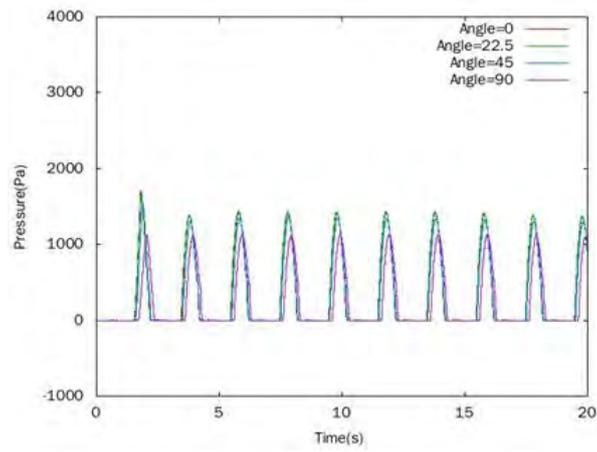
(a) P1



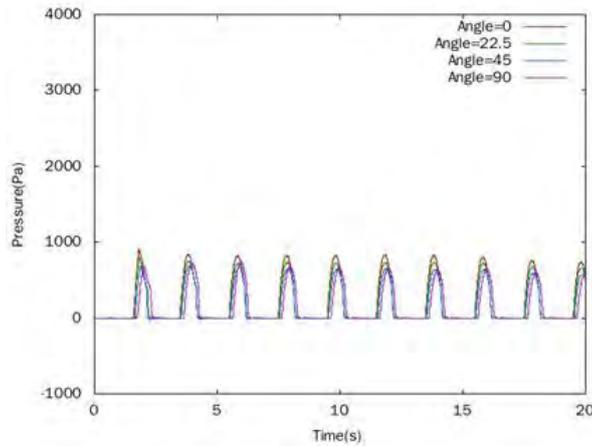
(b) P8



(c) P10



(d) P11



(e) P12

图 3-7 不同波流夹角测压点压力对比

Fig. 3-7 Comparison of pressure in different flow direction

从图中可以看出，对于单桩平台的这个水深而言，波流夹角的改变对平台的水平方向总推力 F_{ht} 有一定的影响。可以看到，随着波流夹角的增大，平台受到的水平方向总推力 F_{ht} 逐渐减小。我们可以定性地从理论角度来分析这个问题，如果单纯地将波和流的作用线性叠加来看，可以认为流对单桩基础的作用是一个恒定的力，方向随着流的方向改变而变化，而波浪对于单桩基础的作用力可以看做一个周期性变化的类似简谐力，当它的最大值出现时，与流作用的力矢量叠加，这个情况下，波流夹角越大则合力越小，能充分的解释上述现象。当然，波流合力实际上也不是简单的线性叠加，另外由于附体的作用在数值模拟过程中测力的时候我们发现单桩平台的最大受力常常出现在波流夹角为 22.5 度的情况下（实际上由于附体的作用，这个波流夹角下流对单桩基础的有效作用面积最大）。在整个数值模拟的所有工况中，上述规律是比较明显地。

观察测压点处压力值的变化，我们可以发现，当波流的相对作用方向由波流同向转为波流有一定的夹角后，靠近斜来流来向的测压点 10 压力幅值和最大压力值有所增加，而背向斜流来向的和面向波浪来向的其它测压点压力幅值有微弱的减小，这与我们的认知符合的较好。另外，从整体的趋势上而言，测压点的位置越靠近下方，则测压点的压力值越大；若测压点之间高度相同，则面向来浪或者来流方向的测压点压力相对较大。我们还可以看到，有些测压点（如测压点 1）始终处于液面以下，因此压力值始终随时间变化并且变化幅度较大；有些测压点（如测压点 8 和 10）有时处于液面以下，有时处于液面以上，因此在每个波浪周期内，这些测压点或长或短有一段时间暴露在空气中，不受到水压作用。

3.3.2 入射波高对单桩基础水动力特性的影响

本节探讨不同入射波高对单桩基础受力、力矩以及砰击压力的影响，我们选定波流同向、水深 21.4 米（设计高潮位）下入射波浪高度分别为 7.78 米（规则波 1）和 5.52 米（规则波 2）作为研究对象，对应工况分别为 A1，A2。下面图 3-8、3-9 和 3-10 分别给出水平方向总推力以及各个测压点处压力的时间历程曲线。

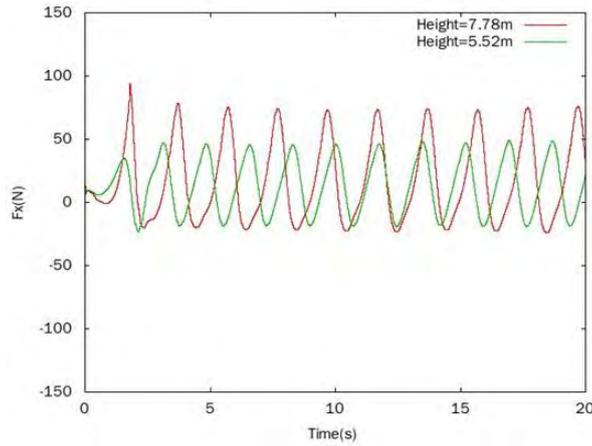


图 3-8 不同入射波高下水平推力 F_x 示意图

Fig. 3-8 Comparison of F_x in wave of different wave heights

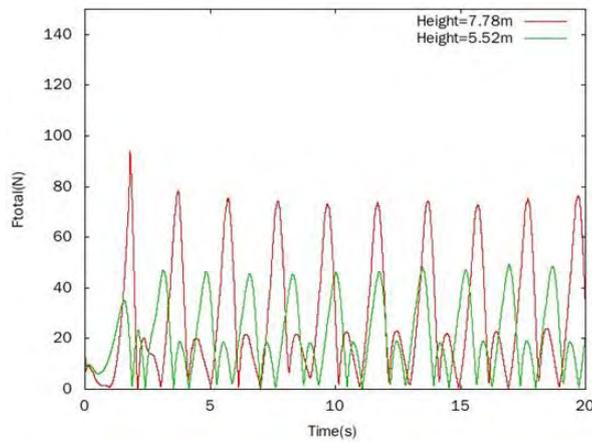
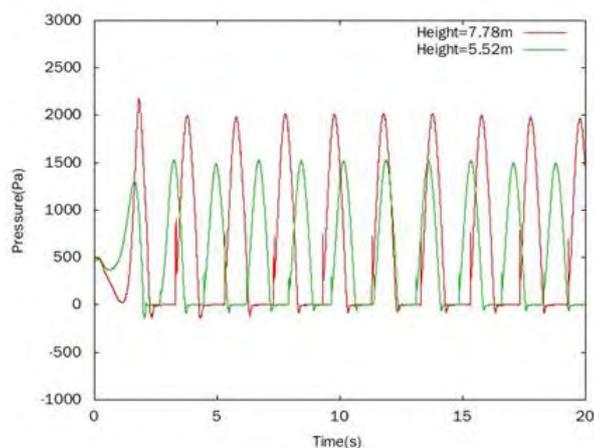
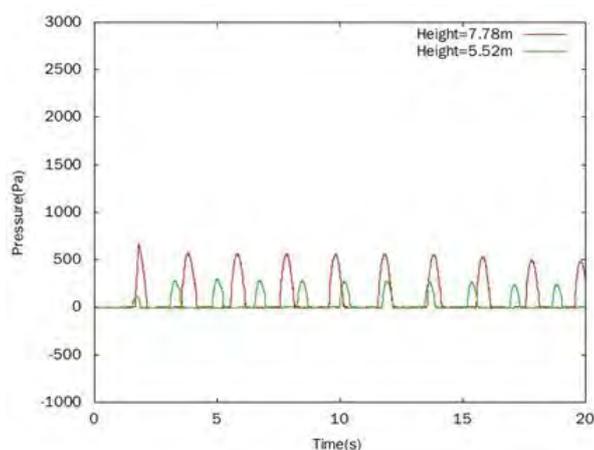


图 3-9 不同入射波高下水平总推力 F_{ht} 示意图

Fig. 3-9 Comparison of F_{ht} in wave of different wave heights



(a) P10



(b) P15

图 3-10 测压点 10 和 15 处压力变化曲线
Fig. 3-10 Comparison of pressure in different wave height

从图中可以看出，对于单桩基础的这个水深而言，波高的改变对对平台的水平方向总推力 F_{ht} 及各个测压点处的压力值都有比较明显的影响。总体而言，由于波高的改变致使波浪周期不同，进一步导致两种波浪作用在单桩基础上的 F_{ht} 和 F_x 以及压力变化的周期也不相同。波高较高的波浪对单桩基础产生更大的载荷，同时波浪砰击的高度也越大。整个数值模拟过程中，这些规律是比较明显的。

观察测压点处压力值的变化，我们可以发现，当入射波浪由小波高变为大波高后，所有测压点处的压力变化幅值及压力最大值都增大了。对于像压力点 15 这样的点，小波高波浪很少能砰击到它，而在大波高波浪作用下压力也有了明显的变化。另外，从整体的趋势上而言，测压点的位置越靠近下方，则测压点的压力值越大；若测压点之间高度相同，则面向来浪或者来流方向的测压点压力相对较大。

3.3.3 水深对单桩基础水动力特性的影响

本节探讨不同吃水深度对单桩基础受力、力矩以及砰击压力的影响，我们选定波流同向、规则波 1，水深分别是 16.56 米、20.3 米和 21.4 米，对应工况分别为 A17，A9，A1。

下图 3-11 是波流同向、规则波 1，水深分别是 16.56 米、20.3 米和 21.4 米时单桩基础受到的总推力 F_x 对比。

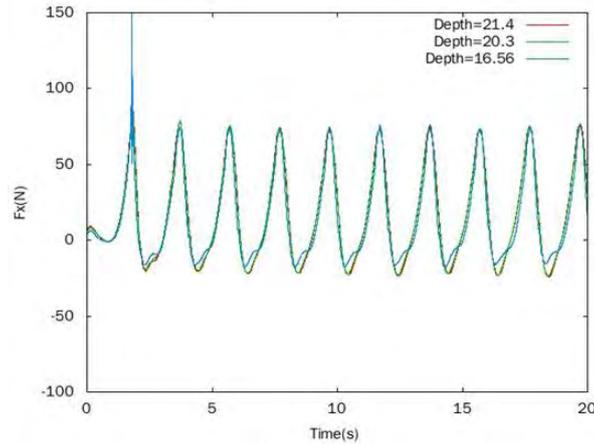


图 3-11 相同波流夹角、规则波 1，不同水深波浪方向推力 F_x 对比

Fig. 3-11 Comparison of F_x in different water depth

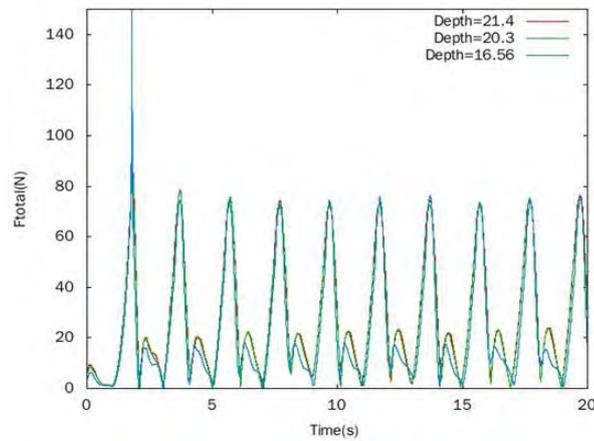
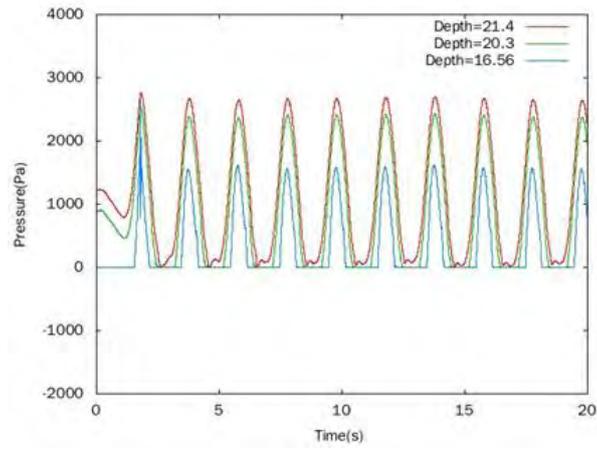
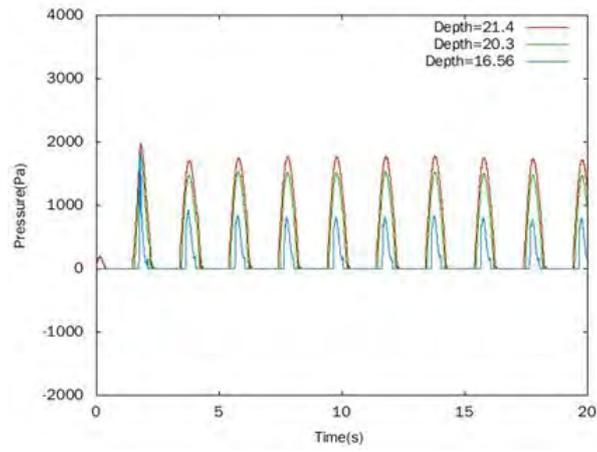


图 3-12 相同波流夹角、规则波 1，不同水深波浪方向推力 F_{ht} 对比

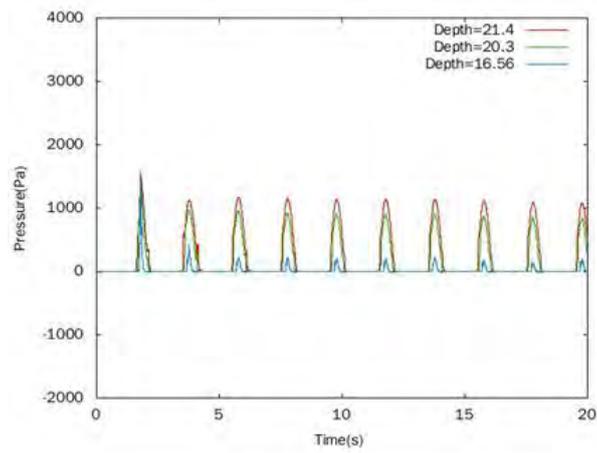
Fig. 3-12 The time history curve of P_{10}



(a) P2



(b) P8



(c) P14

图 3-13 相同波流夹角、规则波 1，不同水深测压点压力对比
Fig. 3-13 Comparison of pressure in different water depth

从图中可以看出，对于单桩基础的这个波浪工况而言，水深的改变对单桩基础的总推力 F_{ht} 影响不大，而对各个测压点处的压力值则有明显地影响。我们可以从两方面来考虑水深对 F_{ht} 的影响：首先，水深的增加导致单桩基础的受力面积增加，单桩基础的受力有增大的趋势；同时，就本例而言，随着水深的增加单桩基础的水线面面积较小，波浪对单桩基础的作用减小，单桩基础的受力有减小趋势。综合上述两种趋势，本例的结果是单桩基础在不同水深下受力变化不大。从推广规律的角度来看，波流对单桩基础的作用与单桩基础的吃水深度及单桩基础（包含附件）在水线面附近的几何形状都有一定关系，所以要综合地考虑。

观察测压点处压力值的变化，我们可以发现，随着水深的增加，水面能砰击的高度也明显增加，各测压点的压力数据也相应增大。观察测压点 2，我们发现在极端高潮位和设计高潮位下，它始终在水面以下，而在极端低潮位下时，它在每个周期内的一段时间会露出水面，导致在这段时间内它们并不受到水的压力。。

3.3.4 单桩基础受力特性综合分析

本节对单桩平台受力特性进行综合分析，我们选取了所有工况下单桩基础受到的水平方向总推力进行比较和研究，从总体上判断单桩基础的受力特性和趋势。。

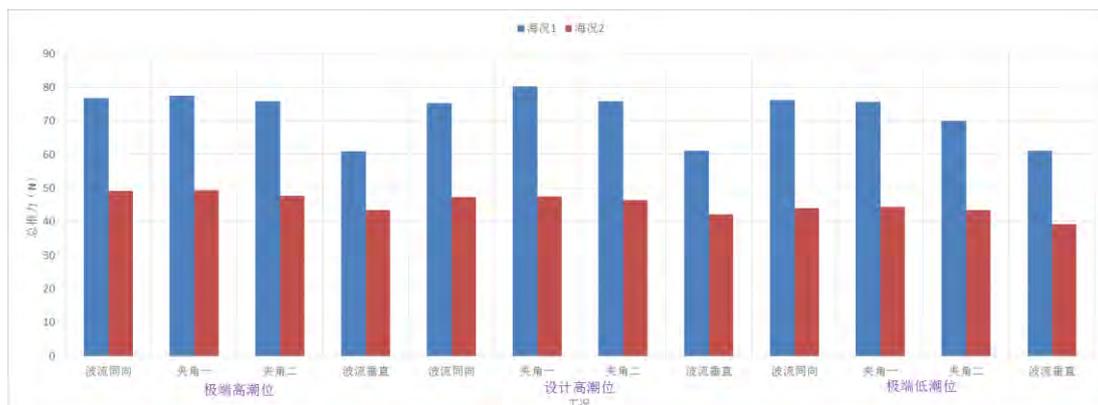


图 3-14 单桩基础水平方向总推力趋势图

Fig. 3-14 Comparison of F_{ht} in different wave condition

从图 3-14 中可以看出，波高这一要素对单桩基础的总体载荷有十分明显的影响，波高增加，单桩基础的整体受力明显增加；波流夹角对单桩基础的总体载荷影响比较复杂，不过在数值模拟中体现出了较强的规律性，在波流夹角 22.5 度时单桩基础在相同水深和波浪工况下的载荷都是最大的，随着波流夹角的进一步增加受到的载荷呈衰减趋势，但总体而言变化幅度不大；水深对单桩基础总体载荷的影响要考虑两个因素，一个是由于水深变化而导致的单桩基础总体受力面积的

变化，另一个是由于水深的变化而导致的单桩基础水线面附近空间几何形状的变化，就本次数值模拟的结果而言，水深对单桩基础的总体受力影响很小。

同时，由于 naoe-FOAM-SJTU 计算时保存全流场信息，以工况 A9 为例可以获得任意时刻的自由面流场图（如图 3-15 所示）以及物体表面的动压力图（如图 3-16 所示）。

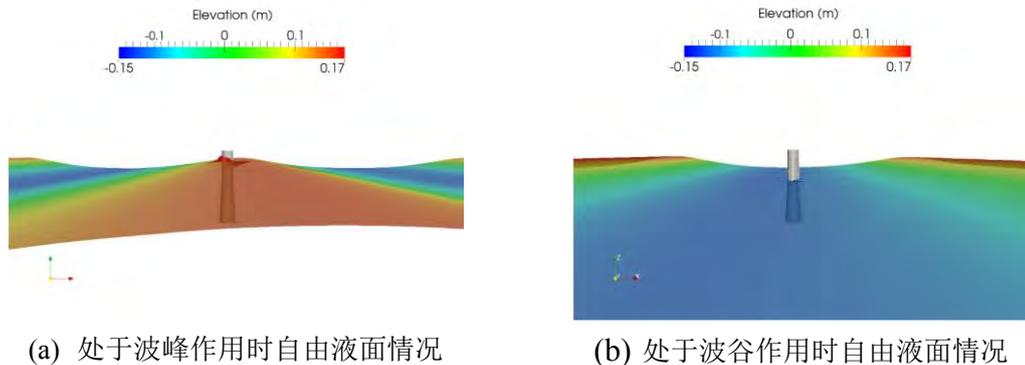


图 3-15 自由液面情况
Fig. 3-15 Illustration of free surface

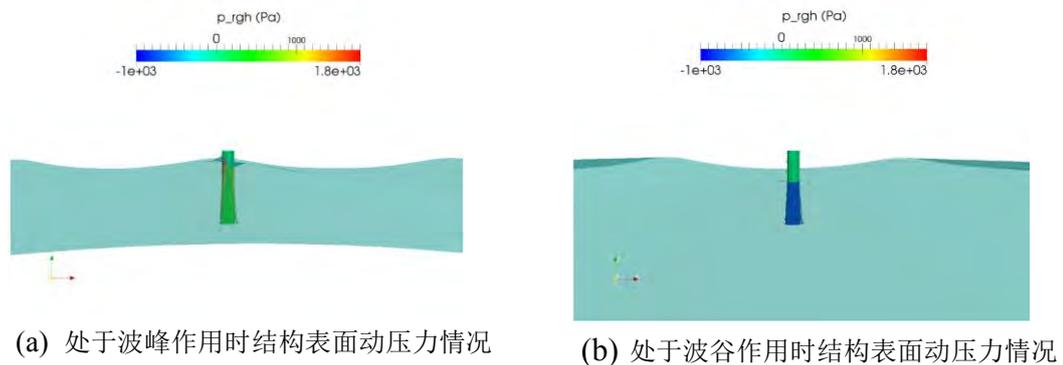


图 3-16 基础表面动压力情况
Fig. 3-16 Illustration of the pressure on surface

由图 3-15 和图 3-16 可知，在 A9 工况下，波浪爬升的最高高度达到单桩基础的最高圈梁出处，并且发生在波峰传递到的时候。与此同时，单桩基础表面的动压力达到最大值，动压力尤其集中在挡板附近以及面向来浪方向的位置。在波谷传来时，物面动压力下降比较明显，出现负压表示这些位置在波谷传来时表面的动压力小于初始静水面时受到的压力。

3.4 计算结果对比验证与分析

3.4.1 典型工况下数值计算结果与试验结果对比验证

将单桩基础的实验和数值模拟的结果进行比对和验证。碍于篇幅，下文以 A2、A10 和 A18 的比较为例，选取模型值进行比较。以 A2（极端高潮位、波流同向、规则波 2）作为考察对象，对单桩基础受到的推力 F_x 及各个测压点的砰击力进行对比分析。

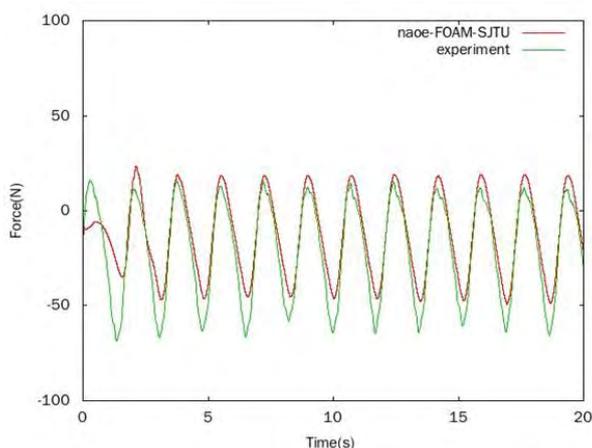
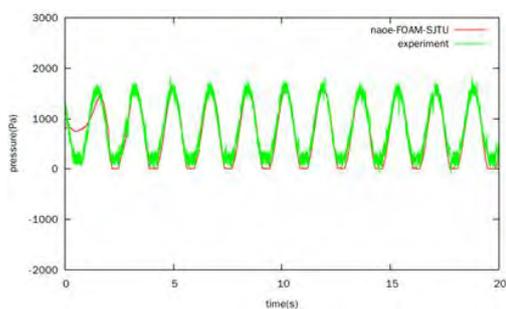
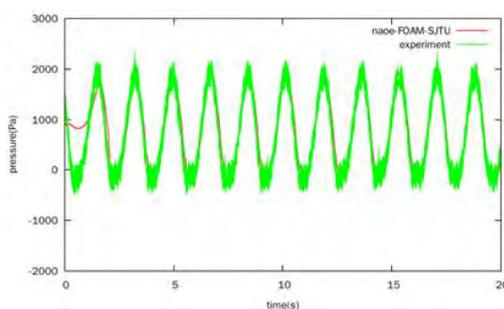


图 3-17 水平推力 F_x 对比
Fig. 3-17 Comparison of F_x

上图 3-17 为单桩基础推力 F_x 对比图。从图中可以看出，数值模拟结果与试验结果在总推力和单桩基础底部力矩方面幅度和频率吻合的都比较好，单桩基础在沿波流传播的方向受到平均漂移力的作用，单桩基础受到的最大推力在 60N 左右，受到的最大力矩在 $27\text{N} \cdot \text{m}$ 左右。



(a) P1



(b) P2

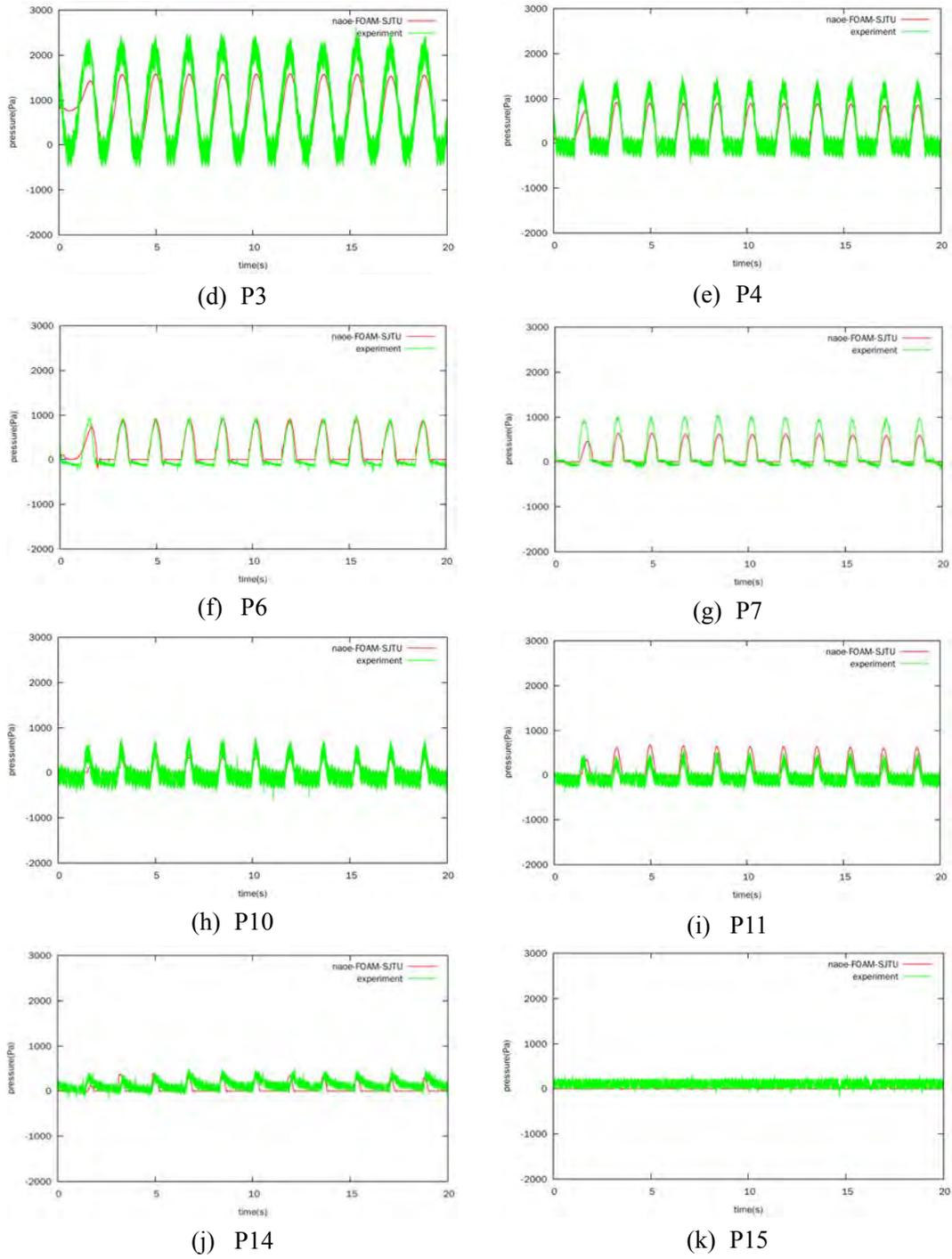


图 3-18 测压点压力对比
Fig. 3-18 Comparison of the pressure

从测压点的砰击力对比图 3-18 中可以看出，在物体表面的不同位置，有明显不同的压力分布，压力由下而上整体呈现下降趋势，在压力点 14 和 15 处，波浪已经难以或者很少波及到，单桩基础受到的最大砰击压力在压力点 2 附近，其值约为 2200Pa。本次单桩基础的数值模拟结果与模型试验结果吻合地较好。

3.4.2 数值计算结果与试验结果和规范计算结果总体趋势对比分析

下图 3-19 是单桩基础数值模拟结果、规范计算结果和物模试验结果的对比，由于物模试验结果只能算出实尺度值，故本文将数值模拟结果和物模结果都转化为实尺度进行比较（其中规范值指规范计算结果；模型值指物模试验结果换算成实尺度的值；数值模型转换值指数值模拟结果转换成实尺度的值）。从图中我们可以看出，三种途径得到的结果符合程度较好。值得指出的是，本规范在 $H/d \leq 0.2$ 且 $d/L < 0.2$ 或 $H/d > 0.2$ 且 $d/L < 0.35$ 时，对 P_D 乘以系数 α 。 α 为 1.5-2 之间的一个值，相当于已经考虑了砰击力的影响因素。但是其仍然没有考虑二阶慢漂力的影响，导致波浪力为一个正负值近似相等，均值接近 0 的值，此时会导致波浪最大受力/力矩偏小。物模试验结果、数值结果和规范计算结果在整体趋势上吻合一致，在极端高潮为和设计高潮位下三者相对误差不超过 10%，不过在极端低潮位下物模试验结果较规范偏小而数模试验结果偏大。究其原因，从整体趋势上看，水深对规范值和数模值影响不大，而这个水深下物模结果相对减小，可以认为这个结果是由诸多可能引起误差的因素造成的，如实验室造波误差、测量误差等。

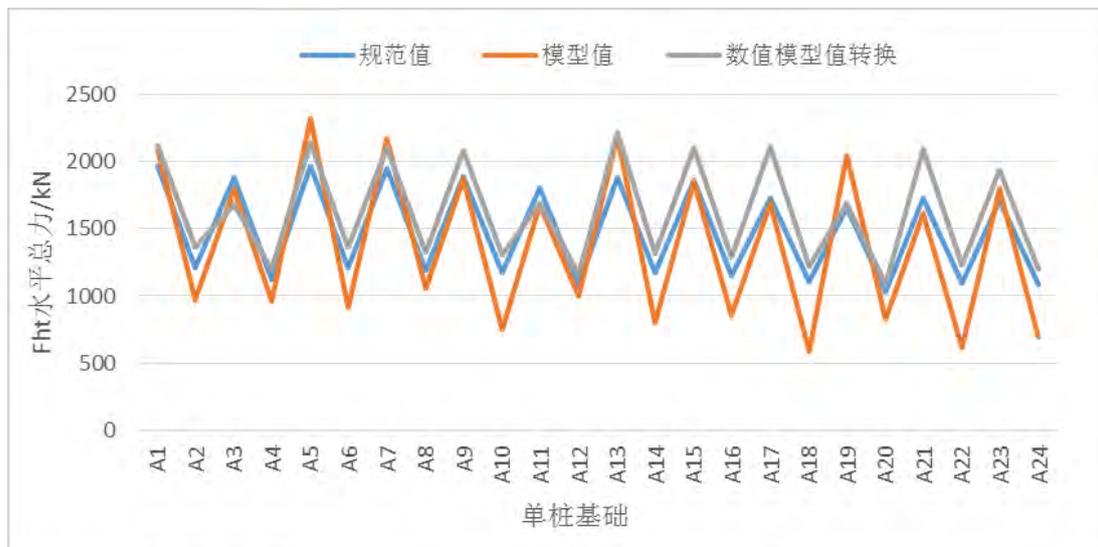


图 3-19 单桩基础水平总推力对比图

Fig. 3-19 Comparison of Fht by numerical simulation, model experiment and designing specifications

3.5 本章小结

单桩基础在所给定的所有工况下不会出现甲板上浪情况。波高对单桩基础的总体载荷有十分明显的影响，波高增加，单桩基础的整体受力明显增加；在波流夹角 22.5 度时单桩基础在相同水深和波浪工况下的载荷都是最大的，随着波流夹角的进一步增加受到的载荷呈衰减趋势，但总体而言变化幅度不大；水深对单桩基础的总体受力影响不大。整体而言，数值结果、规范结果和物模结果的趋势吻合的较好。数值结果与物模试验结果的平均相对误差绝对值为 9.8%。

第四章 长桩脚高桩承台型波流载荷特性计算与对比分析

4.1 引言

高桩承台是适用范围较广的固定式风机基础。本章主要分析高桩承台基础在不同波流联合载荷作用下的载荷特性，同时考察水深对高桩承台基础推力载荷及压力载荷的影响，预报高桩承台的波浪爬高情况，并给出数值模拟结果与模型试验结果和规范计算结果的对比和分析。

4.2 计算模型与工况

本节给出高桩承台 24 种不同波流载荷和波高组合工况的详细参数，介绍高桩承台基础数值模拟网格和模型信息。

4.2.1 计算模型

本节选取的计算模型是由某 3 兆瓦海上固定式风机长桩脚高桩承台按缩尺比 1:30 转化而来。该高桩承台基础主要由上层柱体、防撞挡板、主甲板和 8 根桩腿组成，上层柱体承圆柱体形态，直径为 4.3 米，换算成模型尺度为 0.143 米；主甲板厚 4 米，直径为 14.9 米，换算成模型尺度后为 0.500 米，主甲板由 8 根倾斜桩腿所支承，迎浪方向的桩腿上还装有防撞装置。本文的所有计算都是基于高桩承台基础的模型尺度，并将对应的海况作了相应的缩尺处理。相应的物理参数可以由工况表中模型尺度参数得知。高桩承台基础的模型如图 4-1 所示。由于要对高桩承台基础表面压力进行分析，本文在高桩承台基础表面布置了 15 个测压点，它们的分布如图 4-2 所示。



图 4-1 试验模型（左）与数值模型（右）
Fig.4-1 Experimental model (left) and Numerical model (right)

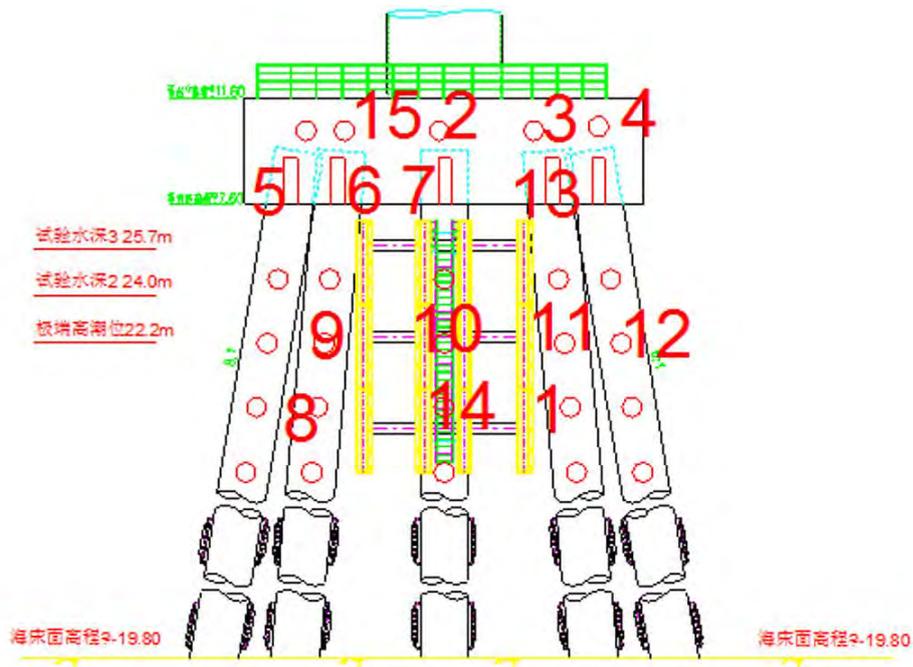


图 4-2 测压点示意图
Fig. 4-2 Illustration of the pressure taps

4.2.2 计算工况

本文对于长桩脚高桩承台基础，考虑三种水深条件，分别定义为：

- 1) 试验水深 3，实际水深 25.7 米，模型水深 0.857 米；
- 2) 试验水深 2，实际水深 24.0 米，模型水深 0.800 米；
- 3) 极端高潮位，实际水深 22.2 米，模型水深 0.740 米。

同时，在数值模拟中，模拟规则波海况。一共包含四个波流夹角，分别为：

波流同向，波流夹角为 0 度；

波流垂向，波流夹角为 90 度；

波流斜向一，波流夹角为 22.5 度；

波流斜向二，波流夹角为 45 度。

具体方向如下图 4-3 所示。

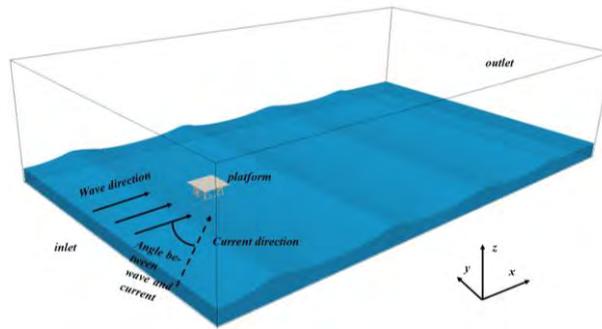


图 4-3 波流夹角示意图

Fig. 4-3 Illustration of the wave and flow direction

波浪参数如下表 4-1 和表 4-2 所示

表 4-1 长桩脚高桩承台实尺度波浪参数表
Table 4-1 Wave parameters of full-scale foundation

海况编号	波高(m)	周期(s)	海流流速 (m/s)
规则波 1	7.78	10.95	1.73
规则波 2	5.52	9.5	1.73

表 4-2 长桩脚高桩承台模型尺度波浪参数表
Table 4-2 Wave parameters of model-scale foundation

海况编号	波高(m)	周期(s)	海流流速 (m/s)
规则波 1	0.259	2.000	0.316
规则波 2	0.184	1.734	0.316

工况编号如下表 4-3 所示

表 4-3 长桩脚高桩承台各工况介绍
Table 4-3 List of each working condition

工况号	海况编号	波流夹角	水深编号
B 1	1	波流同向	试验水深 3
B 2	2		
B 3	1	波流垂直	
B 4	2		
B 5	1	波流斜向一	
B 6	2		
B 7	1	波流斜向二	
B 8	2		
B 9	1	波流同向	试验水深 2
B 10	2		
B 11	1	波流垂直	
B 12	2		
B 13	1	波流斜向一	
B 14	2		
B 15	1	波流斜向二	
B 16	2		
B 17	1	波流同向	极端高潮位
B 18	2		
B 19	1	波流垂直	
B 20	2		
B 21	1	波流斜向一	
B 22	2		
B 23	1	波流斜向二	
B 24	2		

4.2.3 计算网格

网格的生成分为两步。首先采用 POINTWISE 软件生成计算域内的背景网格。再利用 OpenFOAM 提供的 snappyHexMesh 工具生成高桩承台基础周围的多面体网格并完成自由液面附近和高桩承台基础附近的网格加密。

在每一个计算工况下，空间坐标轴 x 轴都落在初始自由水面上，坐标原点为高桩承台水线面的型心。整个计算域为一个长方体 ($-5 \leq x \leq 20, -7.5 \leq y \leq 7.5, -h \leq z \leq 20$ ，其中 h 为对应工况的水深)。计算网格量在 200 万左右（根据水深不同网格数量会有细微变化）。模型表面 $y+$ 控制在 50 左右。一个波高内模型网格 z 方向

个数大于 20 个。附体包括防撞挡板也在建模和网格中充分体现。具体的网格示意图如图 4-4 所示。

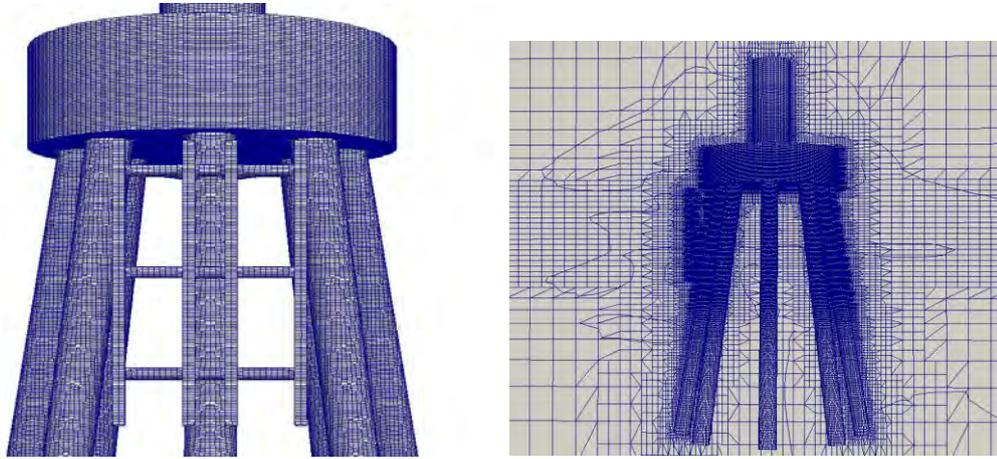


图 4-4 局部网格（左）与全局网格（右）
Fig. 4-4 Illustration of the numerical grids

4.2.4 边界条件

速度边界条件方面，波浪和来流入口面选择 `wavevelocity`；水底和基础结构表面选择壁面条件：`fixedValue`，速度为 0；波浪和来流出口面选择 `zeroGradient`，0 梯度条件；计算域上表面（空气中远场处）选择 `pressureInletOutletVelocity` 条件。

在压力边界条件方面，波浪和来流入口面、水底和基础结构表面都选择通量为 0 条件，`fixedFluxPressure` 条件；计算域上表面（空气中远场处）选择 `totalPressure` 条件，总压力为 0；出口处选择 0 梯度条件，`zeroGradient`。

4.3 数值计算结果分析

本节主要用计算流体力学的手段研究波流夹角、入射波浪高度和水深对长桩脚高桩承台基础载荷特性的影响，并在第四节给出该高桩承台基础的整体受力特性。

4.3.1 波流夹角对长桩腿高桩承台水动力特性的影响

本节探讨不同波流夹角对高桩承台基础受力 F_x 和砰击压力的影响，以入射波为规则波 1、流速 1.73m/s、水深 22.2 米（极端高潮位）下入射波流夹角分别为 0 度、22.5 度、45 度和 90 度作为研究对象。下面图 4-5、4-6 和 4-7 分别给出水平方向总推力以及典型测压点处压力的时间历程曲线。

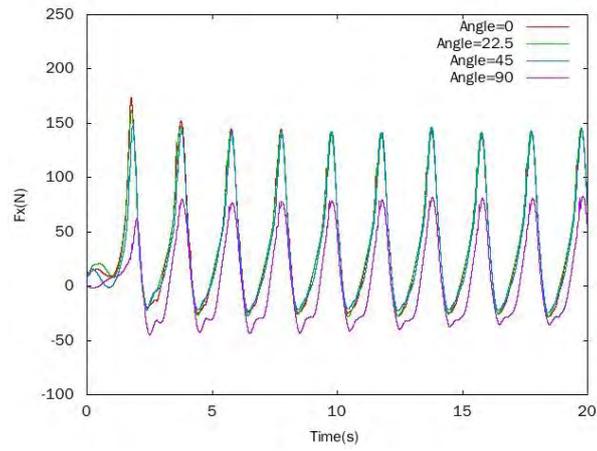


图 4-5 不同波流夹角水平推力 F_x 示意图
Fig. 4-5 Comparison of F_x in different flow direction

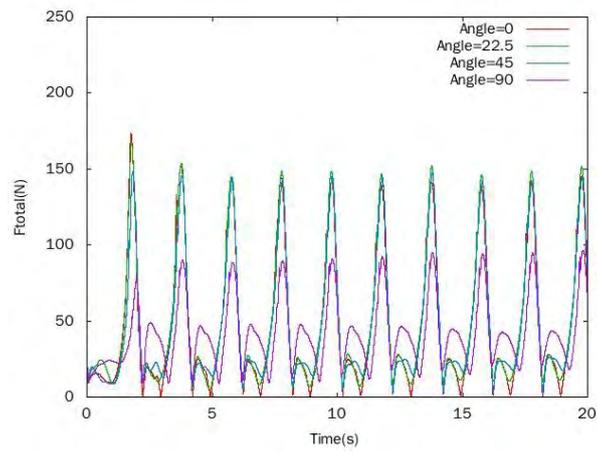
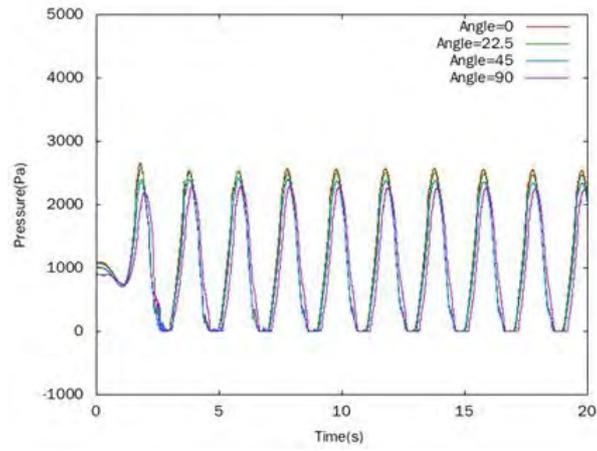
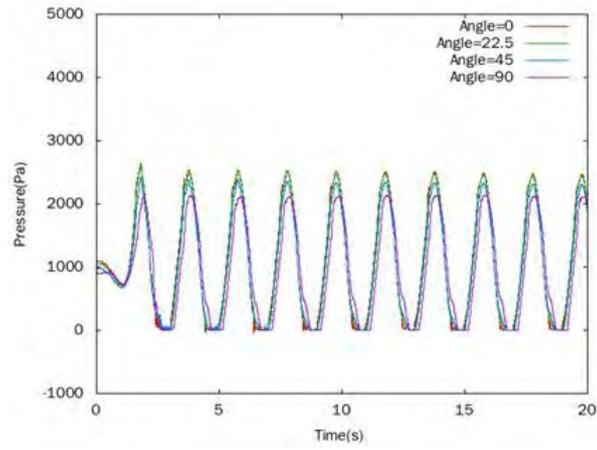


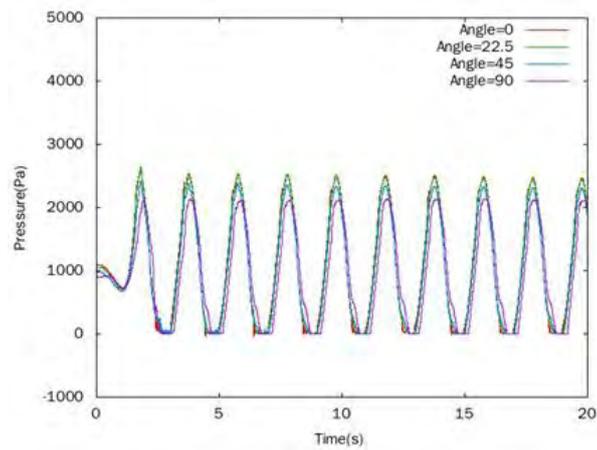
图 4-6 不同波流夹角水平总推力 F_{ht} 示意图
Fig. 4-6 Comparison of F_{ht} in different flow direction



(a) P9



(b) P10



(c) P12

图 4-7 不同波流夹角测压点压力对比
Fig. 4-7 Comparison of pressure in different flow direction

由图可知，对于高桩承台的这个水深而言，波流夹角的改变对平台的水平方向总推力 F_{ht} 有一定的影响。可以看到，随着波流夹角的增大，平台受到的水平方向总推力 F_{ht} 逐渐减小。在本次数值模拟结果中，我们看到载荷最大点出现在波流夹角为 22.5° 时，而随着波流夹角的继续增加，载荷逐渐减小。

观察测压点处压力值的变化，我们可以发现，当工况由波流同向转为波流有一定的夹角后，靠近斜流来向的测压点 12 压力幅值有所增加，而背离斜流来向的和面向波浪来向的 9 和 10 号测压点压力有所减小，这与认知符合得较好。

4.3.2 入射波高对长桩腿高桩承台基础水动力特性的影响

本节探讨不同入射波高对高桩承台受力 F_x 、 F_{ht} 和砰击压力的影响，我们选定波流同向、水深 22.2 米（极端高潮位）下入射波浪高度分别为 7.78 米（规则波 1）和 5.52 米（规则波 2）作为研究对象。下面图 4-8、4-9 和 4-10 分别给出水平方向总推力以及各个测压点处压力的时间历程曲线。

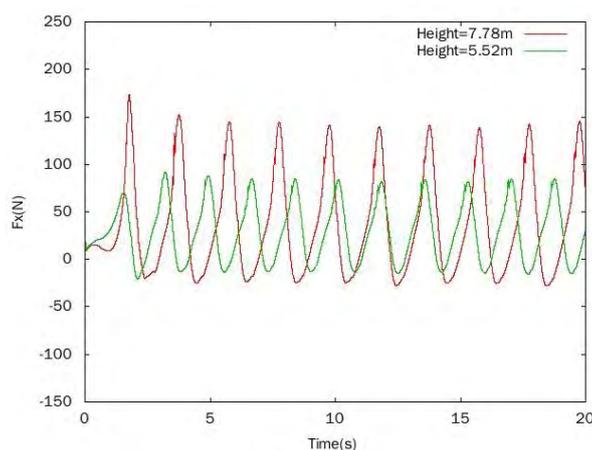


图 4-8 不同入射波高下水平推力 F_x 示意图
Fig. 4-8 Comparison of F_x in wave of different wave heights

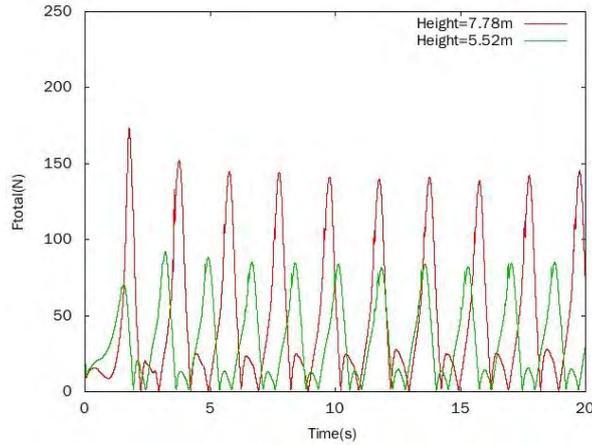


图 4-9 不同入射波高下水平总推力 F_{ht} 示意图
Fig. 4-9 Comparison of F_{ht} in wave of different wave heights

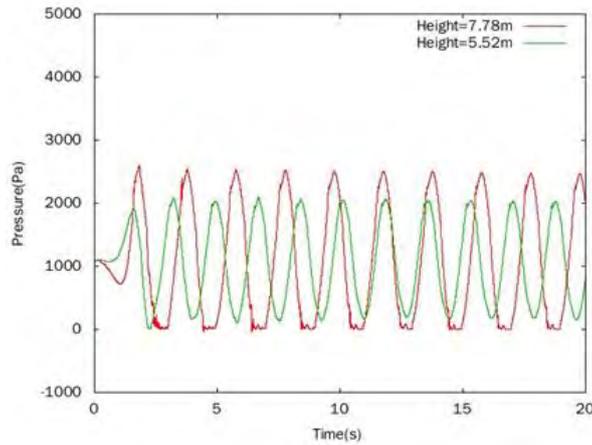


图 4-10 测压点 10 处压力变化曲线 P10
Fig. 4-10 Comparison of pressure in different wave height

由图可知，对于高桩承台的这个水深而言，波高的改变对平台的水平方向总推力 F_{ht} 及各个测压点处的压力值都有比较明显的影响。总体而言，由于波高的改变致使波浪周期不同，进一步导致两种波浪作用在高桩承台基础上的 F_{ht} 压力变化的周期也不相同；波高较高的波浪对高桩承台产生更大的载荷（压力的也更大），同时波浪砰击的高度也越大。

4.3.3 水深对高桩承台基础水动力特性的影响

本节探讨不同吃水深度对高桩承台受力 F_x 、 F_{ht} 和砰击压力的影响，我们选定波流同向、规则波 1，水深分别是 25.7 m、24.0 m 和 22.2 m。图 4-11、4-12 和图 4-13 分别是高桩承台受到的水平 x 方向推力 F_x 以及总推力 F_{ht} 对比。

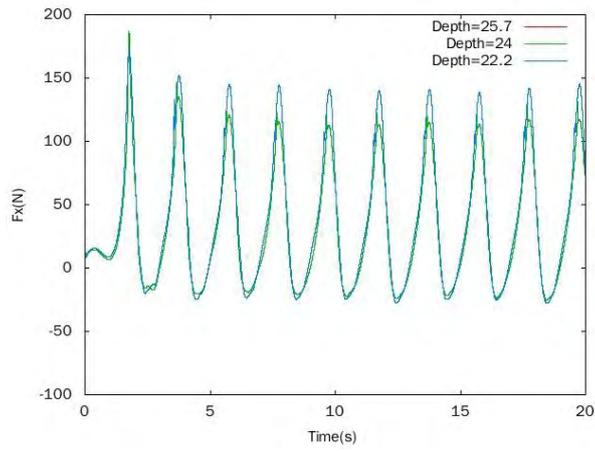


图 4-11 相同波流夹角、规则波 1，不同水深波浪方向推力 F_x 对比
Fig. 4-11 Comparison of F_x in different water depth

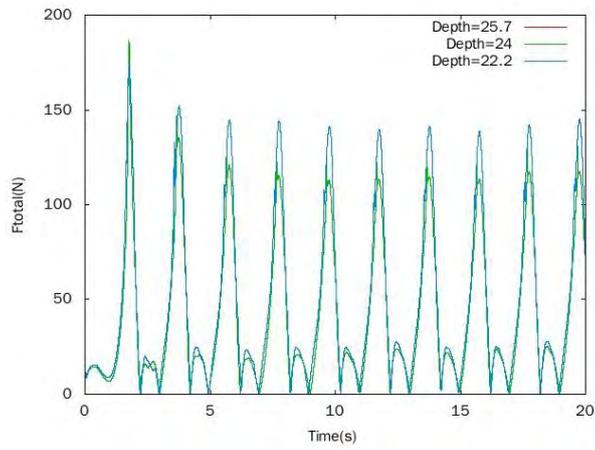
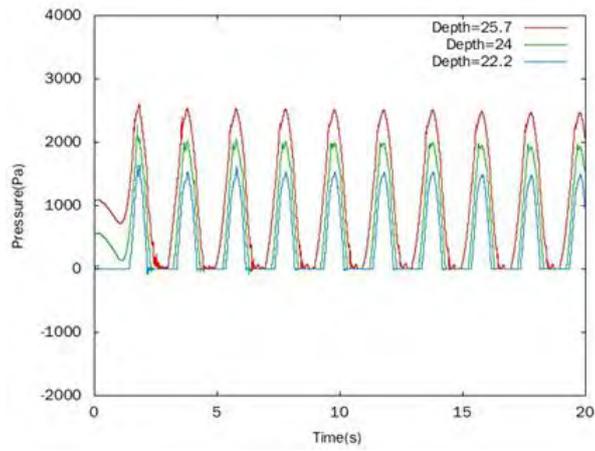
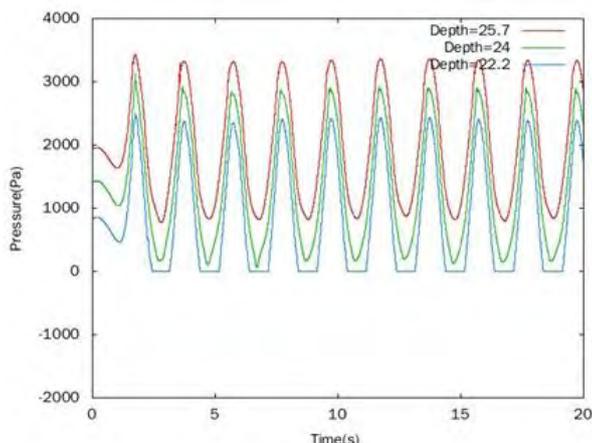


图 4-12 相同波流夹角、规则波 1，不同水深波浪方向推力 F_{ht} 对比
Fig. 4-12 The time history curve of P_{10}



(a) P_{10}



(b) P14

图 4-13 相同波流夹角、规则波 1，不同水深测压点压力对比

Fig. 4-13 Comparison of pressure in different water depth

由图可知，对于高桩承台的这个波浪工况而言，水深的改变对高桩承台的总推力影响不大，而对各个测压点处的压力值则有明显的影响，水深越深，波浪能抨击到的相对高度越高，同一个测压点处的压力值也越大。

4.3.4 长桩腿高桩承台基础受力特性综合分析

本节对高桩承台综合受力特性进行分析，我们选取了所有工况下计算出的水平方向总推力进行比较和研究，从总体上判断高桩承台基础的受力特性和趋势。

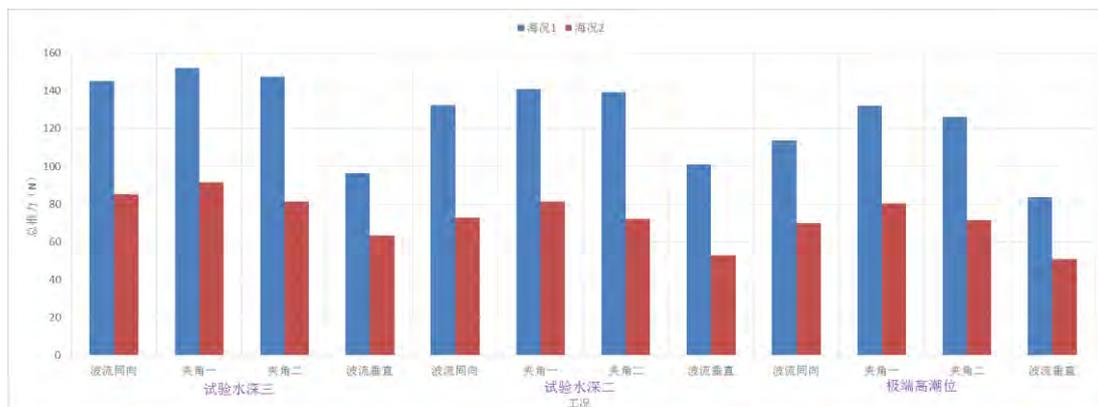


图 4-14 长桩脚高桩承台水平方向总推力趋势图

Fig. 4-14 Comparison of Fht in different wave condition

由图 4-14 可知，波高这一要素对高桩承台的总体载荷有十分明显的影响，波高增加，高桩承台的整体受力明显增加；波流夹角对高桩承台的总体载荷影响比较复杂，在数值模拟过程中我们发现波流夹角为 22.5 时高桩承台受到的载荷最大，

但总体而言变化幅度不大；水深对高桩承台总体载荷的影响要考虑两个因素，一个是由于水深变化而导致的高桩承台总体受力面积的变化，另一个是由于水深的变化而导致的高桩承台水线面附近空间几何形状的变化，就本次试验结果而言，水深对高桩承台的总体受力影响不大。

4.3.5 桩腿受力特性分析

本节分析着眼于数模试验桩腿力自身的规律。对于长桩腿高桩承台，选取极端低潮位、海况 2 和不同波流夹角方向作为研究对象，得到每个桩腿在一个周期内 x 方向平均受力模型值，如图 4-15 所示。

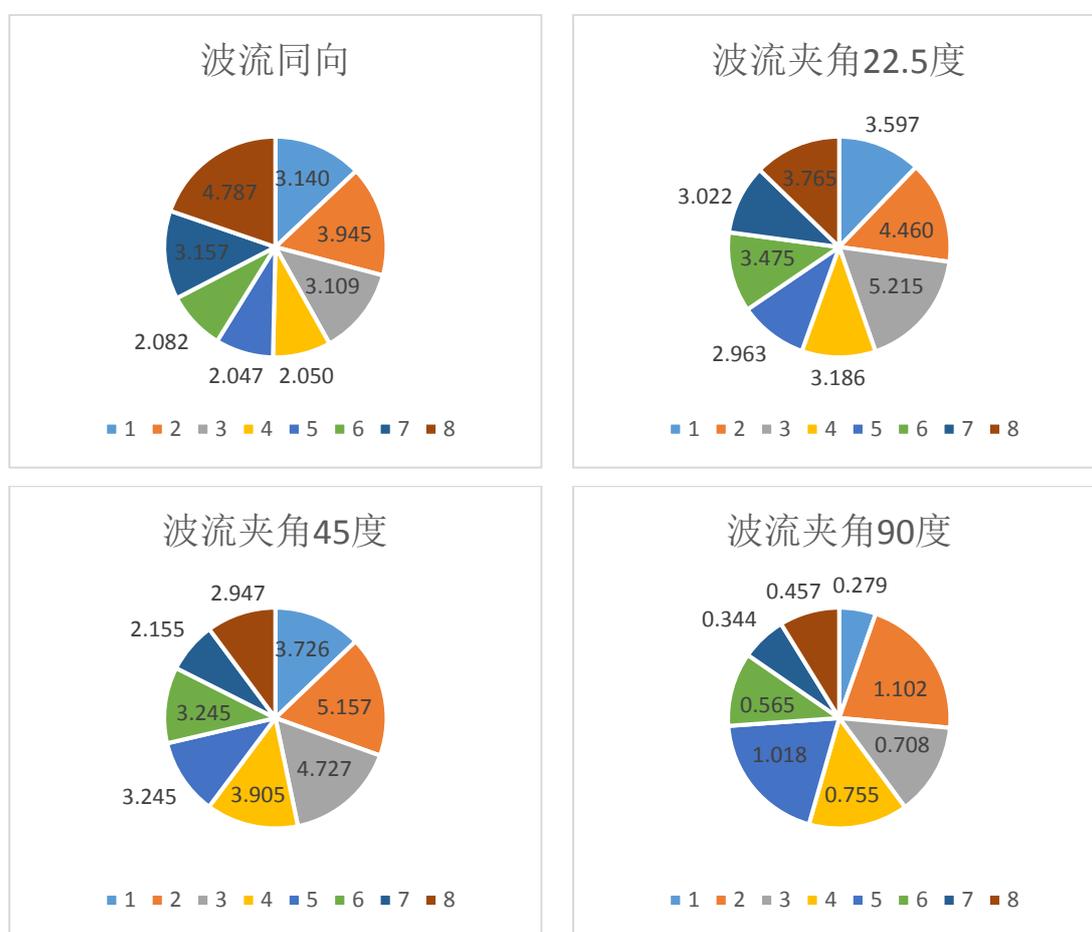


图 4-15 各桩腿受力示意图

Fig. 4-15 Illustration of the F_x on each leg

可以发现，对长桩腿高桩承台而言，各桩腿收到的力所占比例与波流夹角有明显的规律性，随着入射流的方向改变，靠近来流方向的桩腿受力增加，而远离来流方向的桩腿受力有所减小，这一点符合我们的认知规律。

4.4 计算结果对比验证与分析

4.4.1 典型工况下数值计算结果与试验结果对比验证

本节以最常用的试验水深 2、波流同向、海况 1 工况作为考察对象。对高桩承台基础受到的水平方向总推力 F_{ht} （及水平方向 x 和 y 向的总合力的大小）以及各个测压点的砰击力进行详细地对比分析。水平方向推力对比图如图 4-16 所示，抨击压力图如图 4-17 所示，测压点的布置请参照图 4-2，限于篇幅在本节后面几节中，文章都选取富有代表性的几个压力点进行分析。

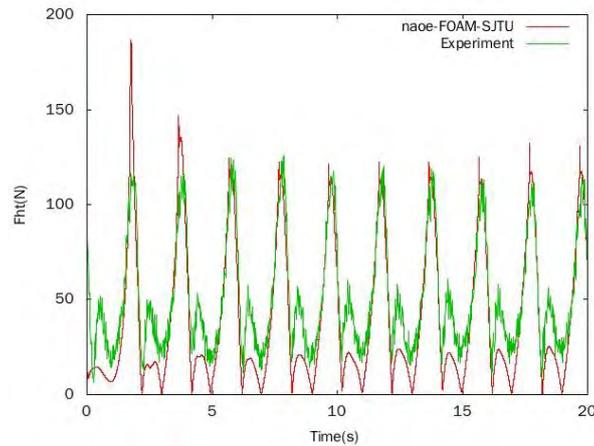
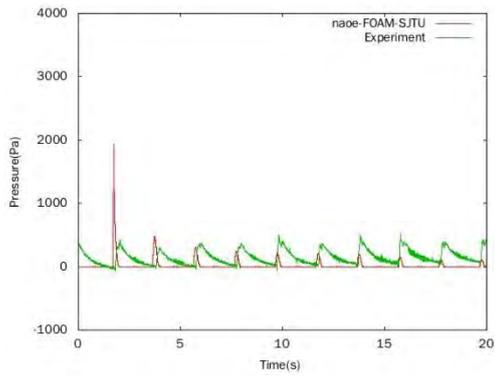


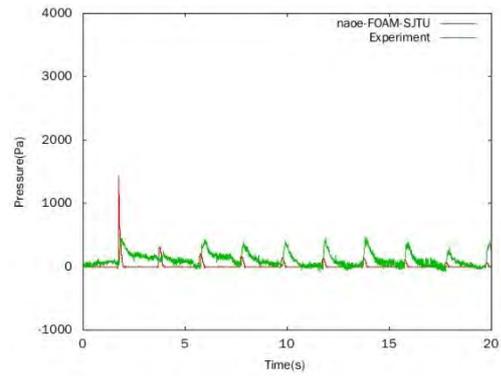
图 4-16 水平总推力对比

Fig. 4-16 Comparison of the horizontal force

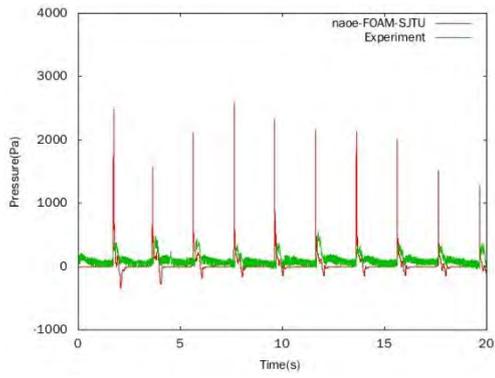
由图 xxxxx 可知，数值模拟结果与物模试验结果在水平方向总推力的对比上吻合的比较好，最大推力在 120N 左右，同时对于数值模拟的结果，由于采样频率很高(2000Hz)，能够捕捉到一定的瞬时砰击压力，这是物模试验(采样频率 75Hz)并没有捕捉到的。事实上，在数据分析过程中，本文尝试将数值结果的采样频率降低至于试验差不多的水平，瞬时砰击压力现象消失，这意味着在物模试验模拟时，适当地提升设备的高频采样能力有助于我们捕捉更多的物理现象。



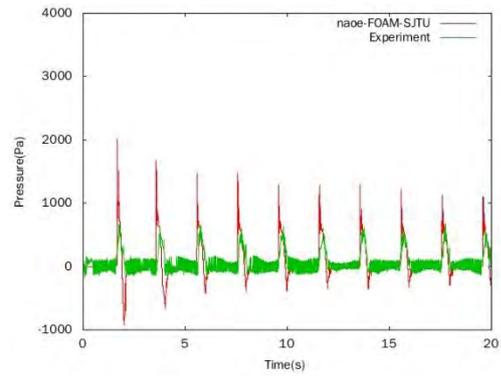
(c) P2



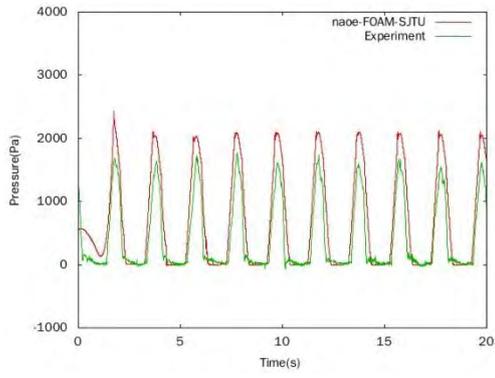
(d) P3



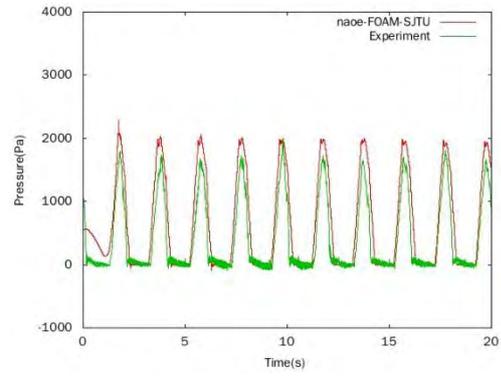
(l) P5



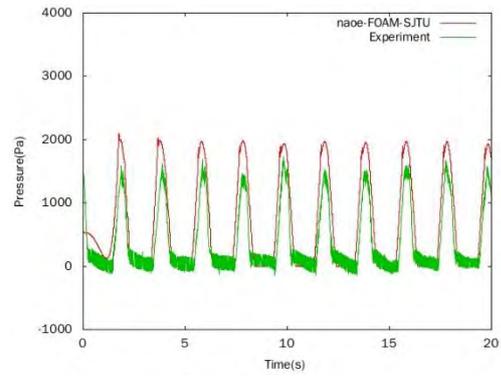
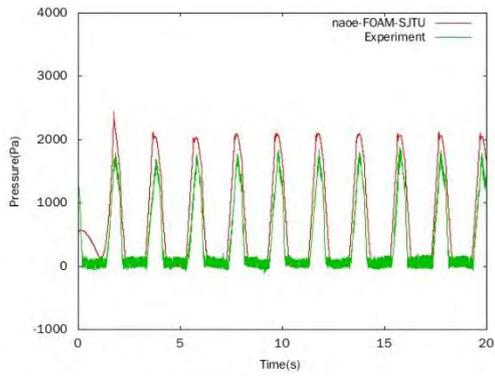
(m) P6



(n) P9



(o) P10



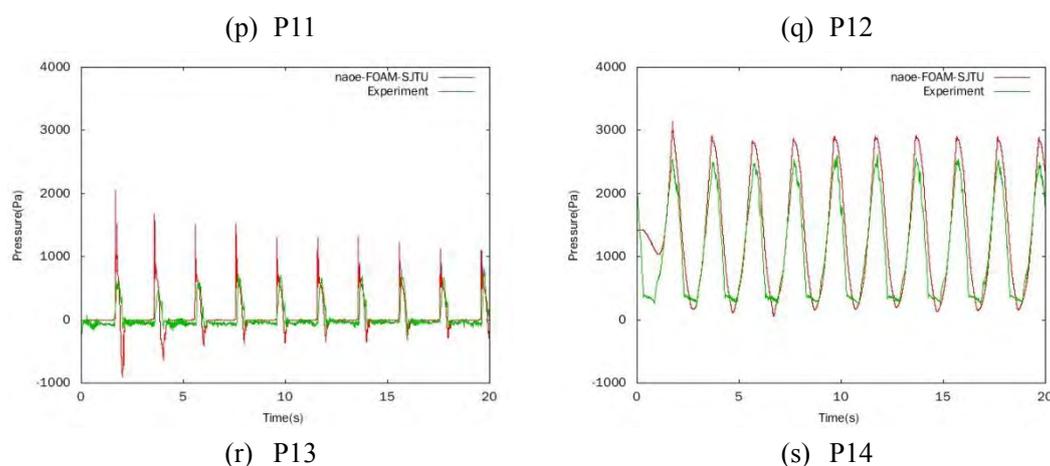


图 4-17 测压点压力对比
Fig. 4-17 Comparison of the pressure

由图 6 可知，数模试验结果与物模试验结果在大多数测压点吻合地都比较好。对于处在承台主体上的测压点 2、3 而言，它们处在高桩承台的最高处，波浪在每个周期内都只有很少一段时间能够砸击到这些点，它们所在位置基本是工况下波浪的极限爬高位置；对于处在承台甲板下方的 5、6 和 13 号测压点，它们在每个波浪周期内会有一段时间暴露在空气中，也会在一段时间内受到波浪砸击的强烈作用，它们的瞬时砸击压力很高，波浪砸击现象最为明显；对于分布在桩腿上的测压点 9、10、11 和 12 而言，它们在每个周期的一小段时间仍然会露出水面；对于最下方的 14 号测压点而言，它则长期处于自由液面以下，不会露出水面。同样值得指出的是，对于测压点 5、6 和 13，数值模拟（采样频率 2000Hz）能够捕捉到比较明显的砸击压力，除开这些瞬时砸击压力作用的时刻后，测压点 5、6 和 13 对应的数值结果和物模试验结果仍然是很好的。

4.4.2 数值计算结果与试验结果和规范计算结果总体趋势对比分析

图 4-18 是高桩承台数值模拟结果、规范计算结果和物模试验结果的对比，由于物模试验结果只能算出实尺度值，故本文将数值模拟结果和物模结果都转化为实尺度进行比较（其中规范值指规范计算结果；模型值指物模试验结果换算成实尺度的值；数值模型转换值指数值模拟结果转换成实尺度的值）。可以看出，从整体趋势而言，数值结果、规范结果和物模结果的趋势吻合的较好。大多数工况下，数值结果与物模试验结果的误差都在 5% 以内，在个别工况如 B11 有 25% 左右的误差，但考虑到整体的规律性以及规范的结果，本文认为数值结果在这些工况仍然比较可靠，误差可能由于试验偶然误差引起。

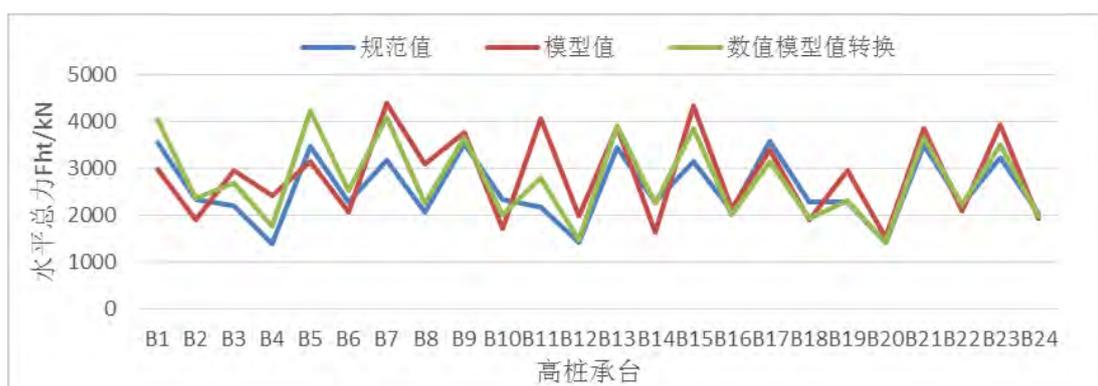


图 4-18 长桩脚高桩承台水平总推力对比图

Fig. 4-18 Comparison of Fht by numerical simulation, model experiment and designing specifications

我们选取高桩承台一在设计水位 3 的情况（本水位下水平载荷最大，威胁最强）来详细分析波流夹角对总推力的影响，在原有的 0 度、22.5 度和 45 度基础上，补充计算了如下几个角度：

表 4-4 长桩腿高桩承台波流夹角及速度分量情况
Table 4-4 List of wave-flow angle and velocity

波流夹角 (度)	流速 x 方 向分量 (m/s)	流速 y 方 向分量 (m/s)
5	0.3147	0.0275
10	0.3111	0.0549
15	0.3051	0.0818
20	0.2968	0.1080
25	0.2863	0.1335
30	0.2736	0.1579
35	0.2588	0.1812
40	0.2420	0.2031

下图是波流总推力与波流夹角的关系，我们看到，波流载荷在 25 度左右受力最大，最大载荷为 152.4413N，相对于波流同向时的 145.2550N，其波流夹角影响因子 p 可以定义如下：

$$p = \frac{152.4413}{145.2550} = 1.0495$$

可以认为，对本高桩承台一而言，根据本次数值模拟的结果，水平总推力并非在波流同向时最大，而是在有一定的波流夹角（本工况下为 25 度）时最大，此时受力是波流同向时的 1.0495 倍。

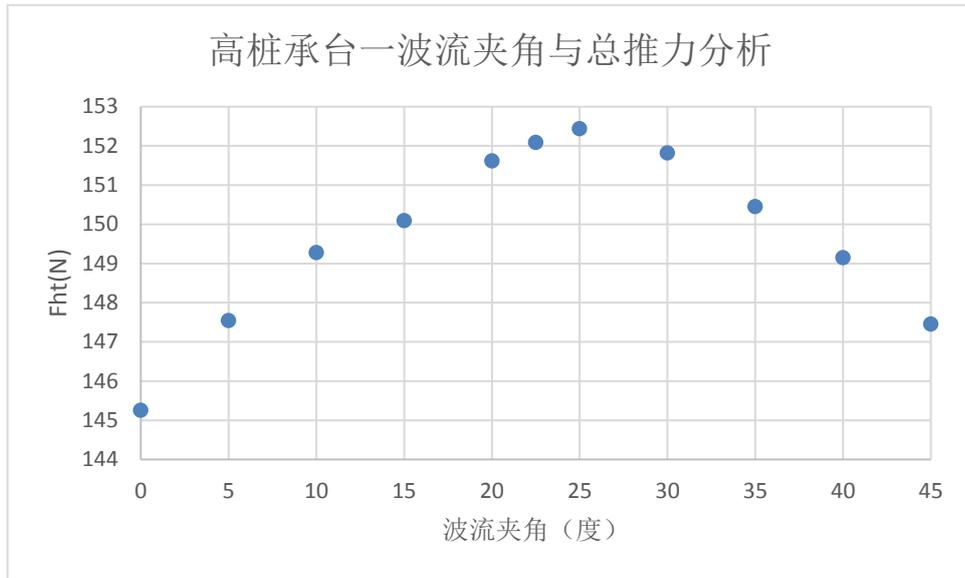


图 4-19 长桩腿高桩承台波流夹角与最大水平推力关系
Fig. 4-19 The relationship of wave-flow angle and Fht

4.5 本章小结

长桩脚高桩承台甲板基本不会上浪，有一定的波浪砰击现象，主要出现在甲板下表面。波高这一要素对高桩承台一的总体载荷有十分明显的影响，波高增加，高桩承台一的整体受力明显增加；波流夹角对高桩承台一的总体载荷影响比较复杂，在数值模拟中我们发现波流夹角为 22.5 时高桩承台一受到的载荷最大，但总体而言变化幅度不大；水深对高桩承台一的总体受力影响不大，主要影响波浪爬高和测压点的压力。整体而言，数值结果、规范结果和物模结果的趋势吻合的较好。在个别工况如 B11 工况，试验结果、物模结果和规范结果差不较大，可能是由试验中的偶然误差引起。数值结果与物模试验结果的平均相对误差绝对值为 8.1%。

第五章 短桩脚高桩承台波流载荷特性数值计算与对比分析

5.1 引言

高桩承台基础是适用范围较广的风机基础。本章所研究的高桩承台基础与上一章类似，模型的主要区别在于桩腿长度不同，工况的主要区别在于波浪条件不同，本章主要研究高桩承台基础在多种波流联合载荷作用下的载荷和特点，同时考察水深对短桩腿高桩承台基础推力载荷及压力载荷的影响，预报高桩承台基础的波浪爬高情况，并给出数值模拟结果与模型试验结果和规范计算结果的对比和分析。

5.2 计算模型与工况

本节给出短桩腿高桩承台基础 24 种不同波流载荷和波高组合工况的详细参数，介绍高桩承台基础数值模拟网格和模型信息。

5.2.1 计算模型

本节选取的计算模型是由某 3 兆瓦海上固定式风机短桩腿高桩承台按缩尺比 1:30 转化而来。该短桩腿高桩承台主要由上层柱体、主甲板、防撞挡板和桩腿构成，上层柱体直径为 6 米，换算成模型尺度后为 0.2 米，防撞挡板直接连接在甲板上。本文的所有计算都是基于短桩腿高桩承台的模型尺度，并将对应的海况作了相应的缩尺处理。相应的物理参数可以油工况表中模型尺度参数得知。短桩腿高桩承台的模型如图 5-1 所示。由于要对短桩腿高桩承台表面压力进行分析，本文在短桩腿高桩承台表面布置了 15 个测压点，它们的分布如图 5-2 所示。



图 5-1 试验模型（左）与数值模型（右）
Fig.5-1 Experimental model (left) and Numerical model (right)

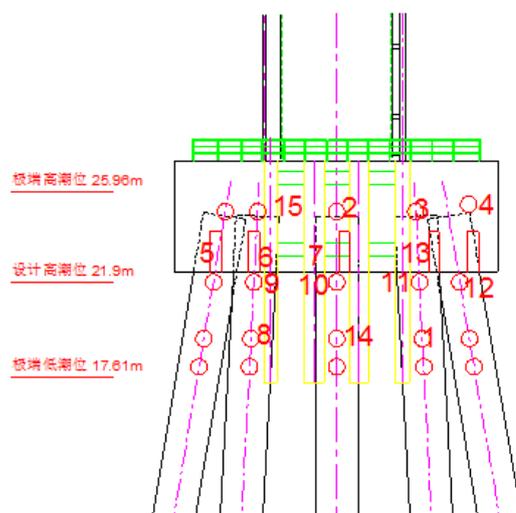


图 5-2 测压点示意图
Fig. 5-2 Illustration of the pressure taps

5.2.2 计算工况

本文对于高桩承台基础，考虑三种水深条件，分别定义为：

- 1) 极端高潮位，实际水深 25.96 米，模型水深 0.865 米；
- 2) 设计高潮位，实际水深 21.9 米，模型水深 0.730 米；
- 3) 低端低潮位，实际水深 17.61 米。模型水深 0.587 米。

同时，在数值模拟中，模拟规则波海况。一共包含四个波流夹角，分别为：

波流同向，波流夹角为 0 度；
 波流垂向，波流夹角为 90 度；
 波流斜向一，波流夹角为 22.5 度；
 波流斜向二，波流夹角为 45 度。
 具体方向如下图 5-3 所示。

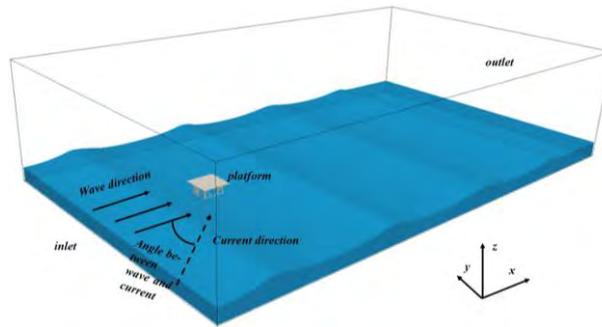


图 5-3 波流夹角示意图

Fig. 5-3 Illustration of the wave and flow direction

波浪参数如下表 5-1 和表 5-2 所示

表 5-1 短桩脚高桩承台实尺度波浪参数表
 Table 5-1 Wave parameters of full-scale foundation

海况编号	波高(m)	周期(s)	海流流速 (m/s)
规则波 5	8.70	11.50	0.89
规则波 6	6.37	10.20	0.89

表 5-2 短桩脚高桩承台尺度波浪参数表
 Table 5-2 Wave parameters of model-scale foundation

海况编号	波高(m)	周期(s)	海流流速 (m/s)
规则波 5	0.290	2.100	0.162
规则波 6	0.212	1.862	0.162

工况编号如下表 5-3 所示

表 5-3 短桩脚高桩承台各工况介绍
 Table 5-3 List of each working condition

工况号	海况编号	波流夹角	水深编号
C 1	5		

C 2	6	波流同向	
C 3	5	波流垂直	
C 4	6	波流垂直	
C 5	5	波流斜向一	极端高潮位
C 6	6	波流斜向一	
C 7	5	波流斜向二	
C 8	6	波流斜向二	
C 9	5	波流同向	
C 10	6	波流同向	
C 11	5	波流垂直	
C 12	6	波流垂直	设计高潮位
C 13	5	波流斜向一	
C 14	6	波流斜向一	
C 15	5	波流斜向二	
C 16	6	波流斜向二	
C 17	5	波流同向	
C 18	6	波流同向	
C 19	5	波流垂直	
C 20	6	波流垂直	极端低潮位
C 21	5	波流斜向一	
C 22	6	波流斜向一	
C 23	5	波流斜向二	
C 24	6	波流斜向二	

5.2.3 计算网格

网格的生成分为两步。首先采用 POINTWISE 软件生成计算域内的背景网格。再利用 OpenFOAM 提供的 snappyHexMesh 工具生成高桩承台基础周围的多面体网格并完成自由液面附近和高桩承台基础附近的网格加密。

在每一个计算工况下，空间坐标轴 x 轴都落在初始自由水面上，坐标原点为高桩承台水线面的型心。整个计算域为一个长方体 ($-5 \leq x \leq 20$, $-7.5 \leq y \leq 7.5$, $-h \leq z \leq 20$ ，其中 h 为对应工况的水深)。计算网格量在 200 万左右（根据水深不同网格数量会有细微变化）。模型表面 y 控制在 50 左右。一个波高内模型网格 z 方向个数大于 20 个。如图 5-4 所示。

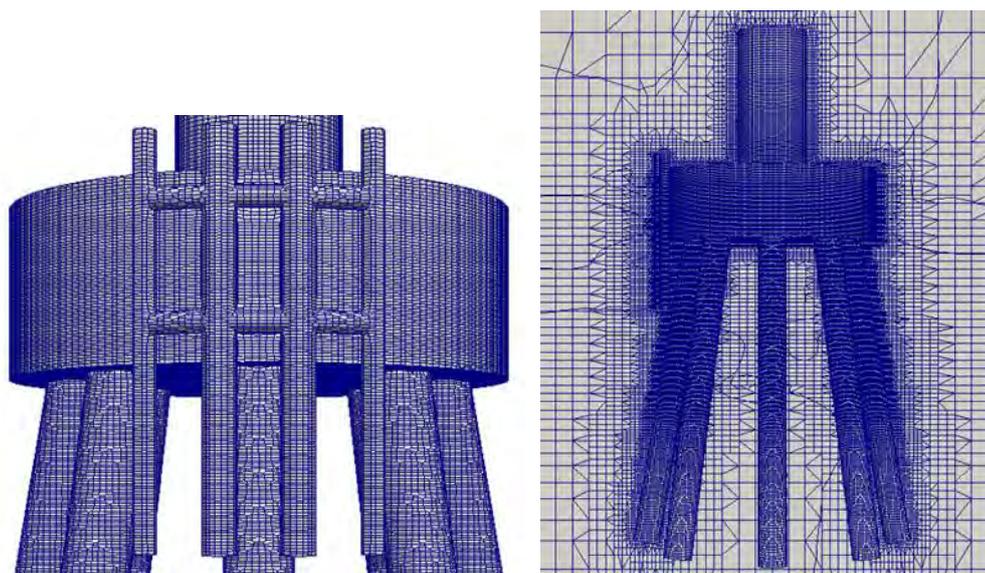


图 5-4 局部网格（左）与全局网格（右）
Fig. 5-4 Illustration of the numerical grids

5.2.4 边界条件

速度边界条件方面，波浪和来流入口面选择 `wavevelocity`；水底和基础结构表面选择壁面条件：`fixedValue`，速度为 0；波浪和来流出口面选择 `zeroGradient`，0 梯度条件；计算域上表面（空气中远场处）选择 `pressureInletOutletVelocity` 条件。

在压力边界条件方面，波浪和来流入口面、水底和基础结构表面都选择通量为 0 条件，`fixedFluxPressure` 条件；计算域上表面（空气中远场处）选择 `totalPressure` 条件，总压力为 0；出口处选择 0 梯度条件，`zeroGradient`。

5.3 数值计算结果分析

本节主要用计算流体力学的手段研究波流夹角、入射波浪高度和水深对短桩脚高桩承台基础载荷特性的影响，并在第四节给出该高桩承台基础的整体受力特性。

5.3.1 波流夹角对短桩腿高桩承台水动力特性的影响

本节探讨不同波流夹角对高桩承台二基础受力 F_x 和砰击压力的影响，以入射波为规则波 4、流速 0.89m/s、水深 25.96 米（极端高潮位）下入射波流夹角分别为 0 度、22.5 度、45 度和 90 度作为研究对象，对应工况分别为 C1, C5, C7, C3。下面图 5-5、5-6 和图 5-7 分别给出水平方向总推力以及各个测压点处压力的时间历程曲线。

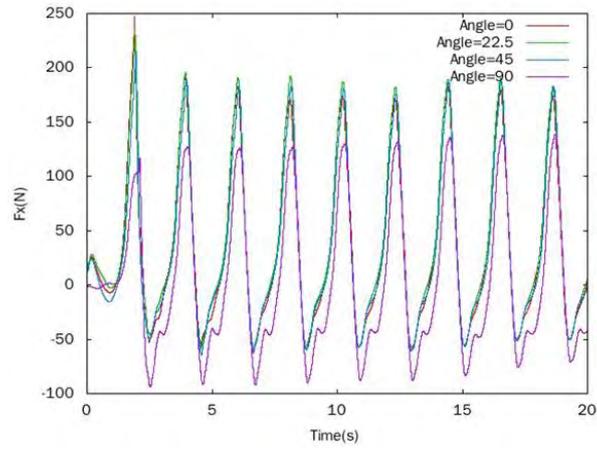


图 5-5 不同波流夹角水平推力 F_x 示意图
Fig. 5-5 Comparison of F_x in different flow direction

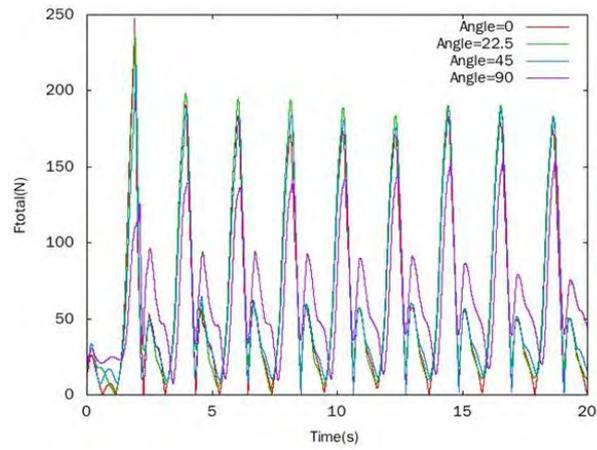
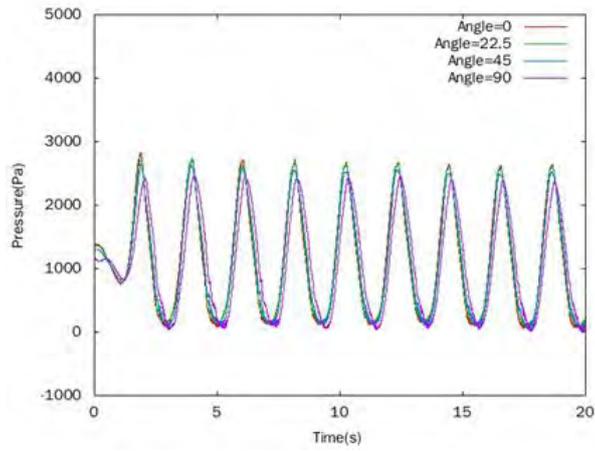
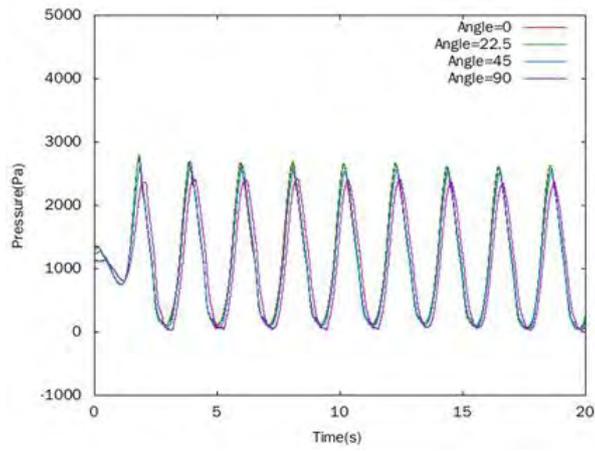


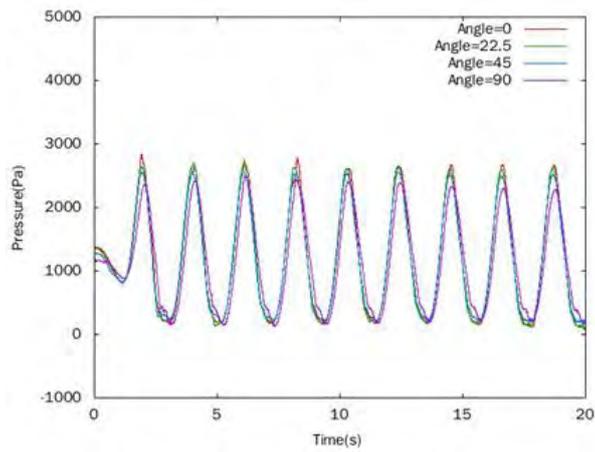
图 5-6 不同波流夹角水平总推力 F_{ht} 示意图
Fig. 5-6 Comparison of F_{ht} in different flow direction



(a) P9



(b) P10



(c) P12

图 5-7 不同波流夹角测压点压力对比
Fig. 5-7 Comparison of pressure in different flow direction

由图可知，对于高桩承台的这个水深而言，波流夹角的改变对平台的水平方向总推力 F_{ht} 有一定的影响。可以看到，随着波流夹角的增大，平台受到的水平方向总推力 F_{ht} 逐渐减小。在本次数值模拟结果中，我们看到载荷最大点出现在波流夹角为 22.5° 时，而随着波流夹角的继续增加，载荷逐渐减小。

观察测压点处压力值的变化，我们可以发现，当工况由波流同向转为波流有一定的夹角后，靠近斜流来向的测压点 12 压力幅值有所增加，而背离斜流来向的和面向波浪来向的 9 和 10 号测压点压力有所减小，这与认知符合得较好。

5.3.2 入射波高对短桩腿高桩承台水动力特性的影响

本节探讨不同入射波高对高桩承台二受力 F_x 和砰击压力的影响，我们选定波流同向、水深 25.96 米（极端高潮位）下入射波浪高度分别为 8.70 米（规则波 4）和 6.37 米（规则波 5）作为研究对象，对于工况分别为 C1, C2。下面图 5-8、5-9 和图 5-10 分别给出水平方向总推力以及各个测压点处压力的时间历程曲线。

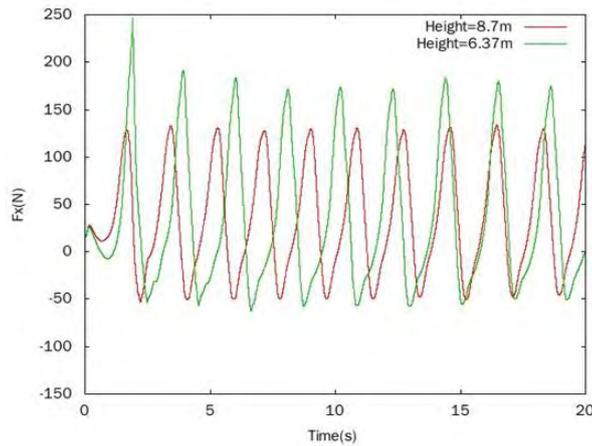


图 5-8 不同入射波高下水平推力 F_x 示意图
Fig. 5-8 Comparison of F_x in wave of different wave heights

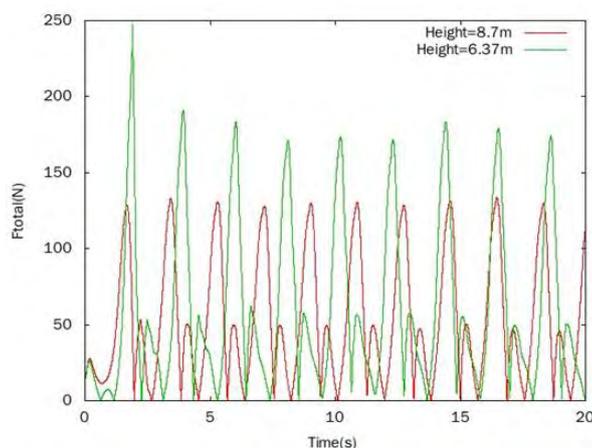


图 5-9 不同入射波高下水平总推力 Fht 示意图
Fig. 5-9 Comparison of Fht in wave of different wave heights

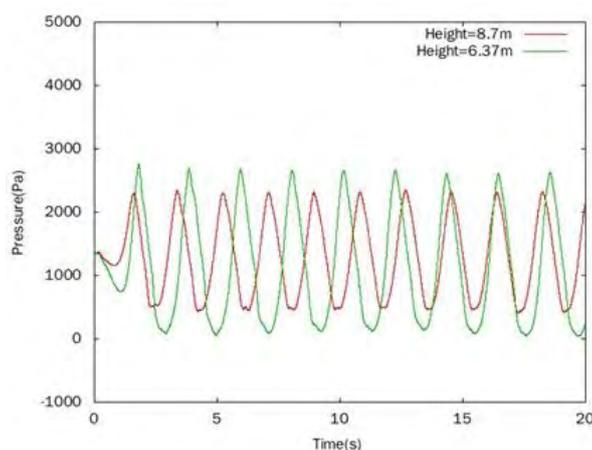


图 5-10 测压点 10 处压力变化曲线 P10
Fig. 5-10 Comparison of pressure in different wave height

由图可知，对于高桩承台的这个水深而言，波高的改变对平台的水平方向总推力 F_{ht} 及各个测压点处的压力值都有比较明显的影响。总体而言，由于波高的改变致使波浪周期不同，进一步导致两种波浪作用在短桩腿高桩承台上的 F_{ht} 压力变化的周期也不相同；波高较高的波浪对高桩承台产生更大的载荷（压力的也更大），同时波浪砰击的高度也越大。

5.3.3 水深对短桩腿高桩承台水动力特性的影响

本节探讨不同吃水深度对高桩承台二受力 F_x 和砰击压力的影响，我们选定波流同向、规则波 1，水深分别是 25.96 米、21.9 米和 17.61 米，对应工况分别为 C1，C9，C17。图 5-11 是高桩承台二受到的推力 F_x 对比，而图 5-12 给出水平方向总推力 F_{ht} 的对比。

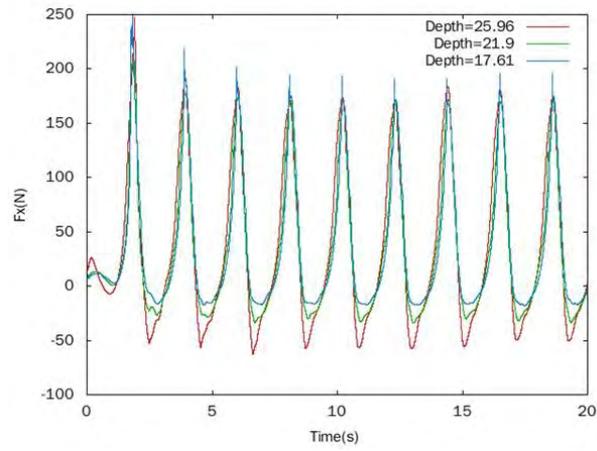


图 5-11 相同波流夹角、规则波 1，不同水深波浪方向推力 F_x 对比
Fig. 5-11 Comparison of F_x in different water depth

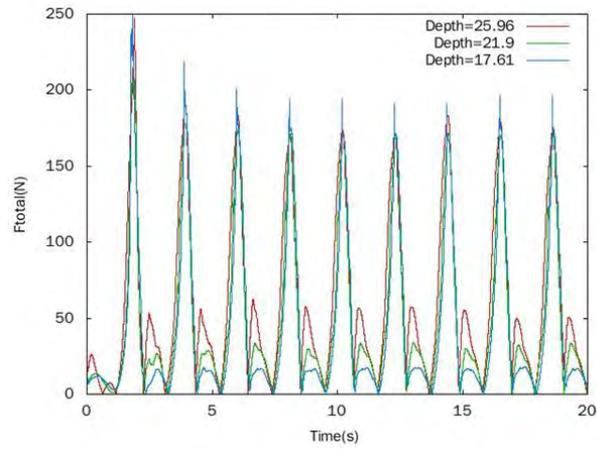
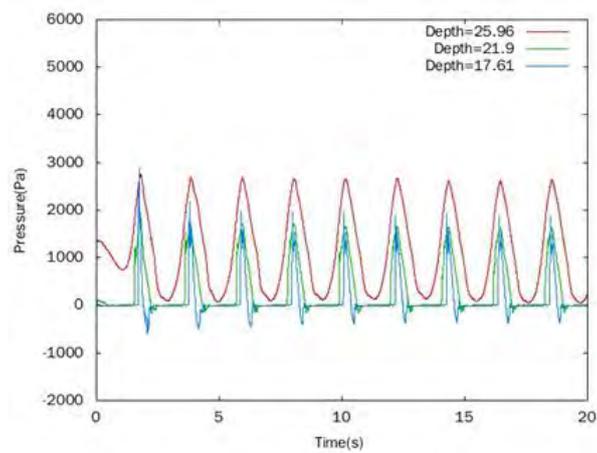
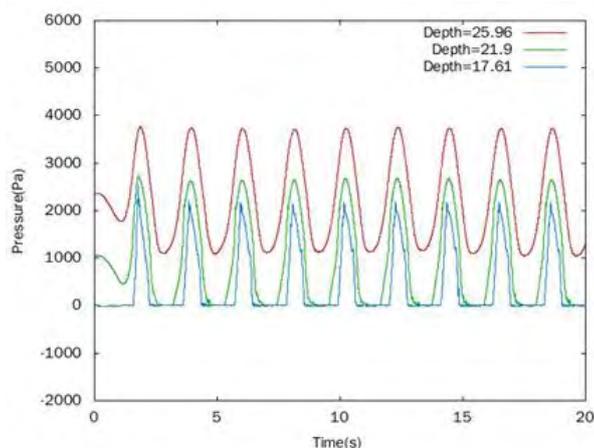


图 5-12 相同波流夹角、规则波 1，不同水深波浪方向推力 F_{ht} 对比
Fig. 5-12 The time history curve of P10



(a) P10



(b) P14

图 5-13 相同波流夹角、规则波 1，不同水深测压点压力对比
Fig. 5-13 Comparison of pressure in different water depth

从图中可以看出，对于短桩腿高桩承台的这个波浪工况而言，水深的改变对高桩承台的总推力最大值有一定的影响，同时对各个测压点处的压力值也有明显地影响。就本例而言，在极端低潮位下，甲板下沿正好收到猛烈的波浪抨击作用，平台收到比较明显的砰击力作用并有高频的数值模拟采样结果捕捉到，具体的分析可以参考 5.4 章。水深越深，波浪能抨击到的相对高度越高，同一个测压点处的压力值也越大。

5.3.4 短桩腿高桩承台基础受力特性综合分析

本节对短桩腿高桩承台综合受力特性进行分析，我们选取了所有工况下计算出的水平方向总推力进行比较和研究，从总体上判断短桩腿高桩承台的受力特性和趋势。

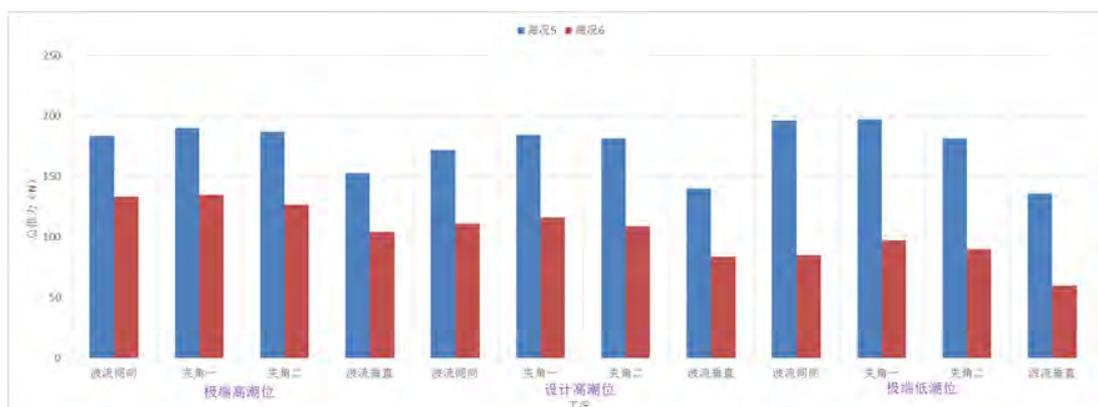


图 5-14 短桩腿高桩承台水平方向总推力趋势图

Fig. 5-14 Comparison of Fht in different wave condition

从图 5-14 中可以看出，波高这一要素对短桩腿高桩承台的总体载荷有十分明显的影响，波高增加，高桩承台一的整体受力明显增加；波流夹角对高桩承台的总体载荷影响比较复杂，在试验中我们发现波流夹角为 22.5 度（在试验时为 22.5 度或 45 度）时高桩承台受到的载荷最大，但总体而言变化幅度不大；水深对高桩承台总体载荷的影响要考虑三个因素，一个是由于水深变化而导致的高桩承台总体受力面积的变化，另一个是由于水深的变化而导致的高桩承台水线面附近空间几何形状的变化，还有一个因素是波浪对甲板的砰击作用。就本次数值模拟的结果而言，在海况 5 条件下高桩承台受到的砰击作用比较明显，而在海况 6 条件由于波浪较小，影响不大。

同时，由于 naoe-FOAM-SJTU 计算时保存全流场信息，以工况 C1 为例可以获得任意时刻的自由面流场图（如图 5-15 所示）以及物体表面的动压力图（如图 5-16 所示）。

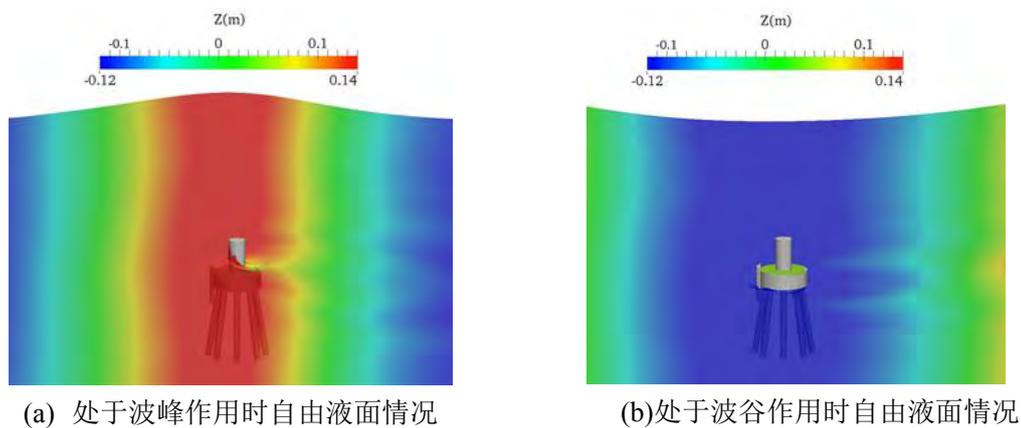
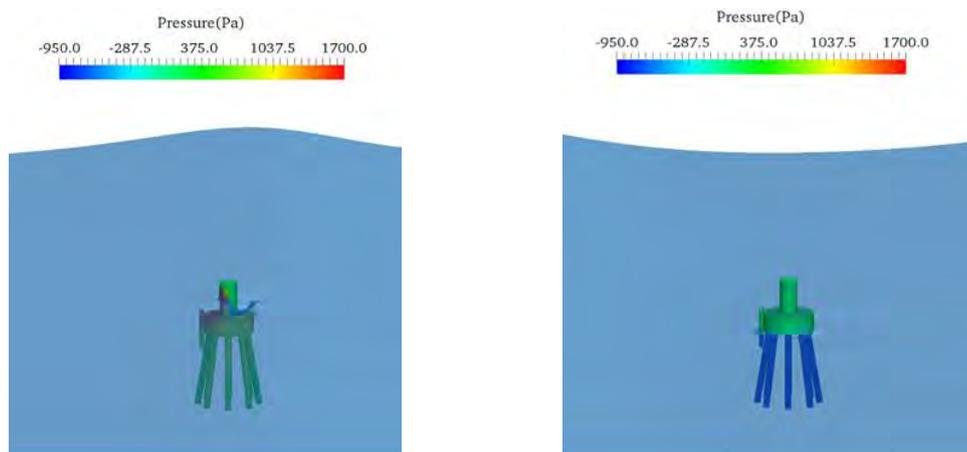


图 5-15 自由液面情况

Fig. 5-15 Illustration of free surface



(a) 处于波峰作用时结构表面动压力情况 (b) 处于波谷作用时结构表面动压力情况

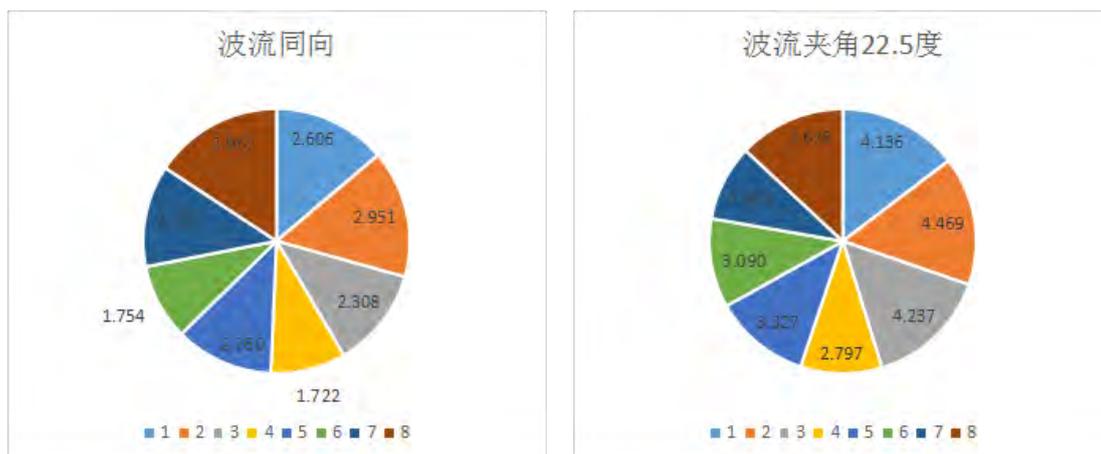
图 5-16 基础表面动压力情况

Fig. 5-16 Illustration of the pressure on surface

由图 5-15 图 5-16 可知，在设计高潮位、波流同向、波高 7.78 米情况下，波浪爬升的最高高度达到甲板上层立柱的三分之二处，并且发生在波峰传递到的时候。与此同时，短桩腿高桩承台基础表面的动压力达到最大值，动压力尤其集中在挡板附近以及面向来浪方向的位置，模型尺度下最大压力超过 1700Pa。在波谷传来时，整个甲板基本浮出水面，物面动压力下降比较明显，出现负压表示这些位置在波谷传来时表面的动压力小于初始静水面时受到的压力。

5.3.5 桩腿受力特性综合分析

本节分析着眼于数模试验桩腿力自身的规律。对于短桩腿高桩承台，选取极端低潮位、海况 6 和不同波流夹角方向作为研究对象，得到每个桩腿在一个周期内 x 方向平均受力模型值，如图 5-17 所示。



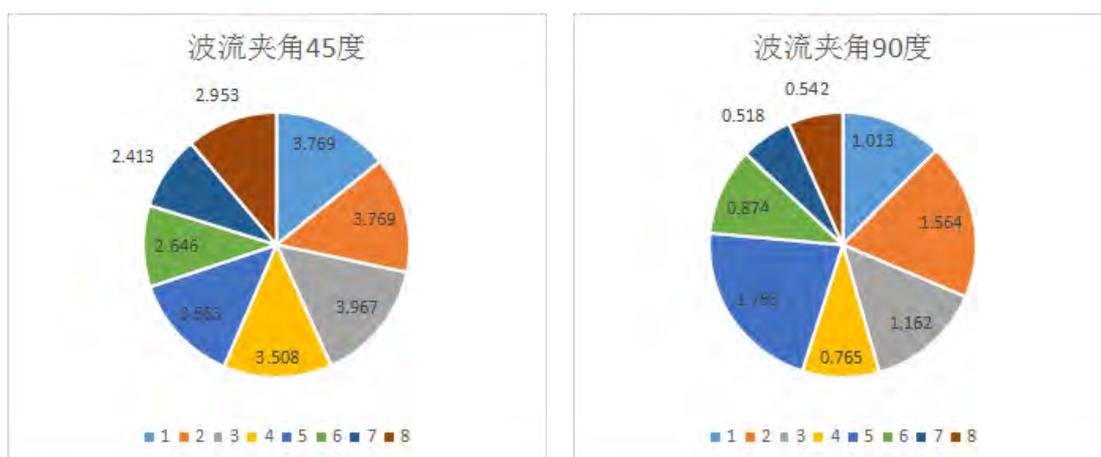


图 5-17 各桩腿受力示意图

Fig. 5-17 Illustration of the Fx on each leg

可以发现，对短桩腿高桩承台而言，各桩腿收到的力所占比例与波流夹角有明显的规律性，随着入射流的方向改变，靠近来流方向的桩腿受力增加，而远离来流方向的桩腿受力有所减小，这一点符合我们的认知规律。

5.4 计算结果对比验证与分析

5.4.1 典型工况下数值计算结果与试验结果对比验证

我们考察典型工况 C9（设计高潮位、波流同向、规则波 5）。线面给出数值方法与试验方法的水平总推力对比图 5-18。

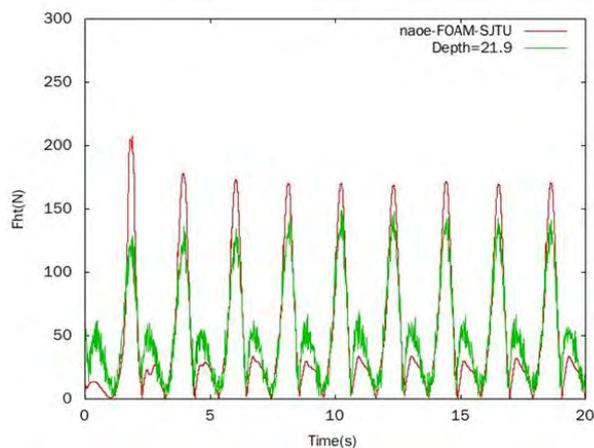
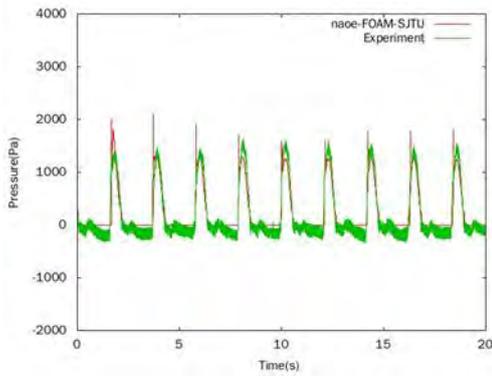


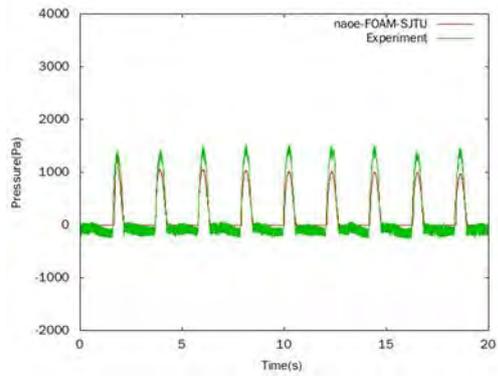
图 5-18 水平总推力对比

Fig. 5-18 Comparison of the horizontal force

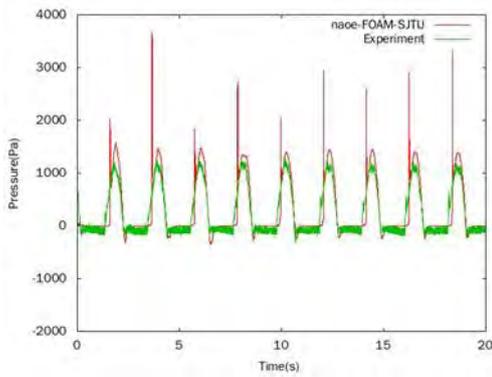
从图中可以看出,在工况 C9 下水平方向总推力 F_{ht} 的数值模拟结果与物模试验结果符合得比较好。不过数值模拟的最大总推力(约 160N)略大于物模试验(约 140N)。在变化的趋势和频率上是一致的。



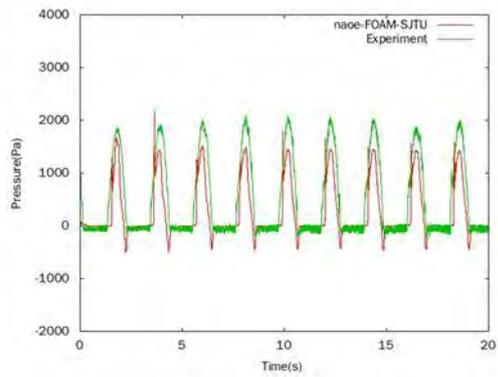
(a) P2



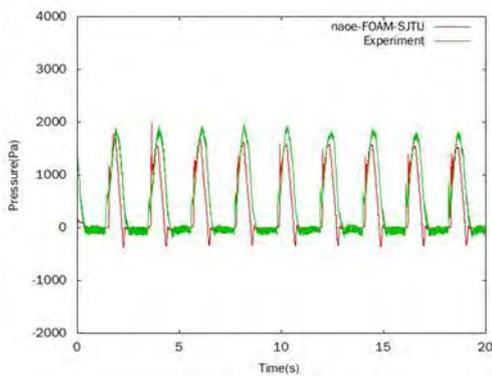
(b) P3



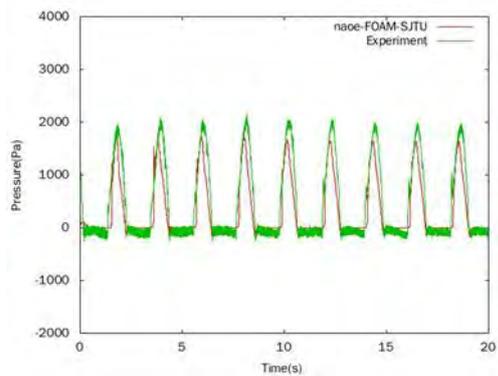
(c) P5



(d) P6



(e) P9



(f) P10

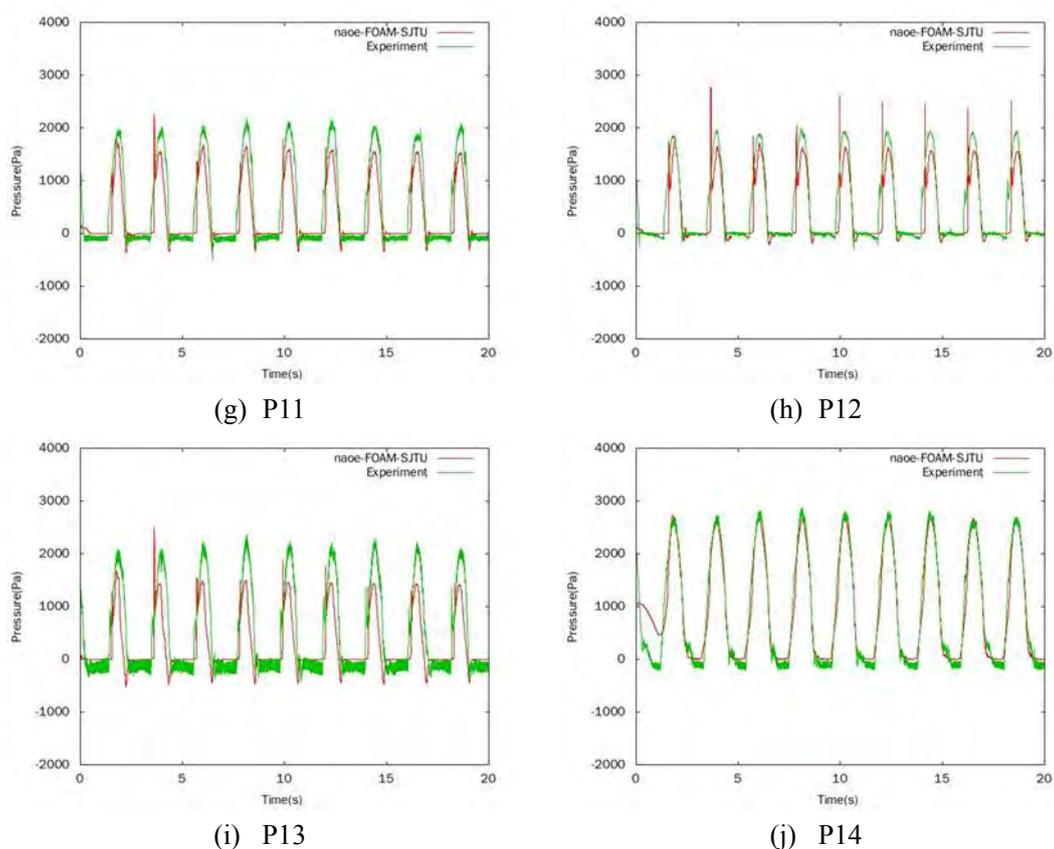


图 5-19 测压点压力对比
Fig. 5-19 Comparison of the pressure

从图 5-19 中可以看出，数模试验结果与物模试验结果在大多数测压点吻合得都很好。对于测压点 14 而言它几乎始终在自由液面以下，压力变化的幅度也是所有测压点中最大的。对于其它测压点，它们在每个波浪周期内会有一段时间暴露在空气中，也会在一段时间内受到波浪砰击的强烈作用。数模和物模测出的压力点的值差距不大并且周期和趋势一致。大多数测压点的值对应的物模试验结果略大于数值模拟结果，应该是初始液面高度有微小误差所致。从上面力和压力的对比分析可以认为数值模拟结果与试验结果吻合得比较好。

5.4.2 数值计算结果与试验结果和规范计算结果总体趋势对比分析

短桩腿高桩承台包括八根桩腿和上面两个半径不同的圆柱。圆柱受力的计算利用直立桩腿波流耦合计算来进行，八根桩腿受力的计算采用倾斜桩腿的计算理论，该规范也采用了波流力耦合计算。将每个桩腿得到的受力经过处理，得到整个平台的合力。规范得到的结果与试验结果和数模结果进行比较，得到图 5-20。

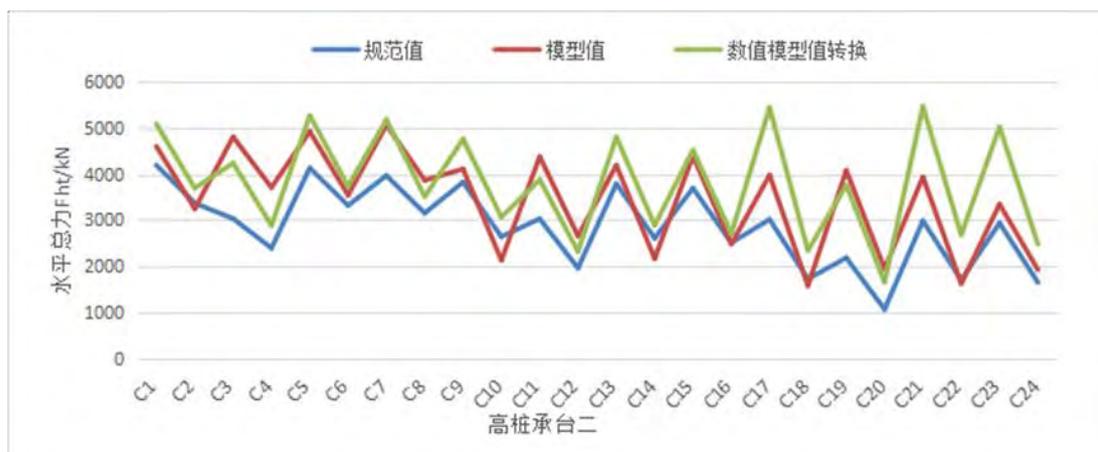


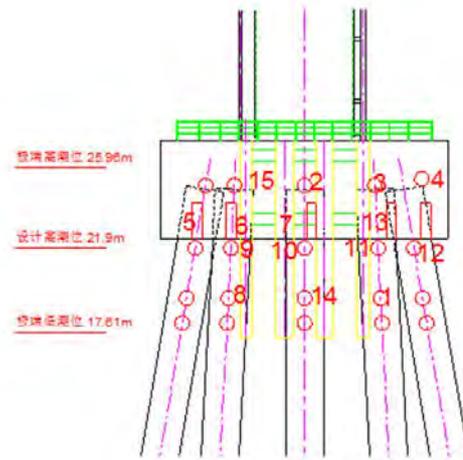
图 5-20 短桩腿高桩承台水平总推力对比图

Fig. 5-20 Comparison of Fht by numerical simulation, model experiment and designing specifications

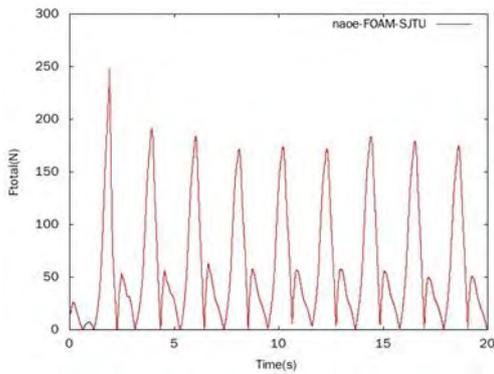
从上图可以看出，对工况 C1 到 C16 而言，数值结果、规范结果和物模结果的趋势吻合的较好。从具体的值上来看实验结果和数值结果往往较规范结果偏大一些。我们同样可以从以下角度来考虑这个问题：由于规范计算实质本身级基于 Morison 方程的半经验公式，并且认为入射波浪是规则的一阶线性波，忽略了粘性影响、短桩腿高桩承台的附体影响和高阶波的影响，因此规范计算出的结果偏小是有依据的。我们需要特别指出几个工况，如工况 C17、C18、C19、C20、C21、C22、C23 和 C24，可以发现，在这几个工况下数模结果比物模和规范都大一些，可以从以下角度来理解：

如下图 5-21 所示，高桩承台二在 C17~C24 工况都属于极端低潮位工况，而在这些工况下波浪都会砰击到高桩承台平台下表面，砰击力现象明显，以 C1（无明显砰击现象）和 C17 为例（有明显砰击现象），比较结果如图 5-21 所示，我们看到在工况 C1 的受力峰值出很平滑，而在 C17 的受力峰值处出现了瞬间较高的砰击力现象，我们数值模拟 2000HZ 的采样频率捕捉到了这个现象而试验 75HZ 的采样频率并不能捕捉到这个现象，规范也考虑不了这个因素，因此数值模拟的值比它们都大，这是合理的现象。我们可以从波浪抨击理论对此作如下分析：根据波浪参数表，我们知道这些工况都属于极端低潮位工况，而在这些工况下波浪都会砰击到高桩承台平台下表面，对比 C1 和 C17 的受力情况，可以看到 C17 砰击效应明显，C17 工况实际上发生了非常典型的砰击。一般而言，对于一次典型的波浪砰击，首先水质点运动到物面（即高桩承台表面），水质点运动受到阻碍，带动周围流场中水质点运动速度下降，水质点动能大幅减小，在短时间内给平台造

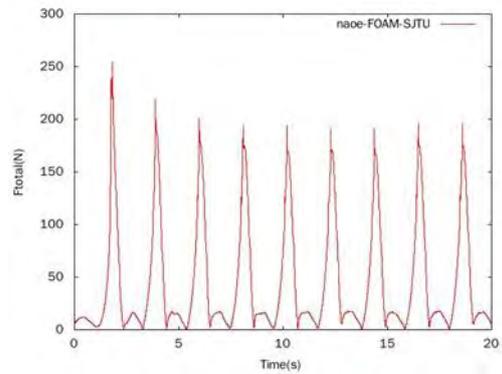
成较大冲击力，且这种冲击力具有周期性和随机性；其次由于惯性的作用，后续水质点持续给予桩基础表面一定的正压，但此压力持续减小；最后水质点脱离基础表面，由于粘性的作用，脱离时水质点对基础表面有短暂的拉力作用，产生短时间的负压。这些现象，在数值模拟中有效地捕捉到了，提醒设计者注意相应位置的保护。



(a) P10



(b) 工况C1, F_{total} 峰值无冲击力现象



(c) 工况C17, F_{total} 峰值有冲击力现象

图 5-21 短桩腿高桩承台 C1 及 C17Fht 对比示意图

Fig. 5-21 Comparison of C1 and C17 in terms of Fht

5.5 本章小结

短桩腿高桩承台在所给定的大多数海况下均出现甲板上浪情况，值得设计者和设备维护人员的注意。波高这一要素同样对高桩承台二的总体载荷有十分明显的影响，波高增加，高桩承台一的整体受力明显增加；波流夹角对高桩承台二的总体载荷影响比较复杂，在试验中我们发现波流夹角为 22.5 或 45 度（有时甚至在 90 度）时高桩承台二受到的载荷最大，但总体而言变化幅度不大；就本次数值模拟的结果而言，在海况 5 条件下高桩承台二的受力对水深并不敏感，而在海况 6 条件下高桩承台二随吃水增加受到的载荷也增加。对工况 C1 到 C16 而言，数值结果、规范结果和物模结果的趋势吻合的较好，数值结果与物模试验结果的平均相对误差绝对值为 10.1%。而在工况 C17 到 C24 时，数值结果比物模试验结果和规范结果偏大一定的值，同时数值结果与物模试验结果的平均相对误差绝对值达到 20%，这是由于高频（2000HZ）采样的数值模拟结果捕捉到的极端低潮位下波浪对承台下表面（及桩腿链接处）的砰击现象所引起的砰击力而引起的。

第六章 导管架平台波流载荷特性数值计算与对比分析

6.1 引言

导管架平台的运用日渐频繁。本章主要分析导管架基础在不同波流联合载荷作用下的载荷特性，同时考察水深对导管架基础推力载荷及压力载荷的影响，预报导管架基础的波浪爬高情况，并给出数值模拟结果与模型试验结果和规范计算结果的对比和分析。

6.2 计算模型与工况

本节给出导管架基础 24 种不同波流载荷和波高组合工况的详细参数，介绍导管架基础数值模拟网格和模型信息。

6.2.1 计算模型

本节选取的计算模型是由某 3 兆瓦海上固定式风机导管架基础按缩尺比 1:30 转化而来。该导管架基础主要由甲板和导管架构成，导管架主要由四根主支承腿和众多横梁和斜梁构成，并且还连接着两套防撞的装置。本文的所有计算都是基于导管架基础的模型尺度，并将对应的海况作了相应的缩尺处理。相应的物理参数可以油工况表中模型尺度参数得知。导管架基础的模型如图 6-1 所示。由于要对导管架基础表面压力进行分析，本文在导管架基础表面布置了 15 个测压点，它们的分布如图 6-2 所示。



图 6-1 数值模型
Fig.6-1 Numerical model

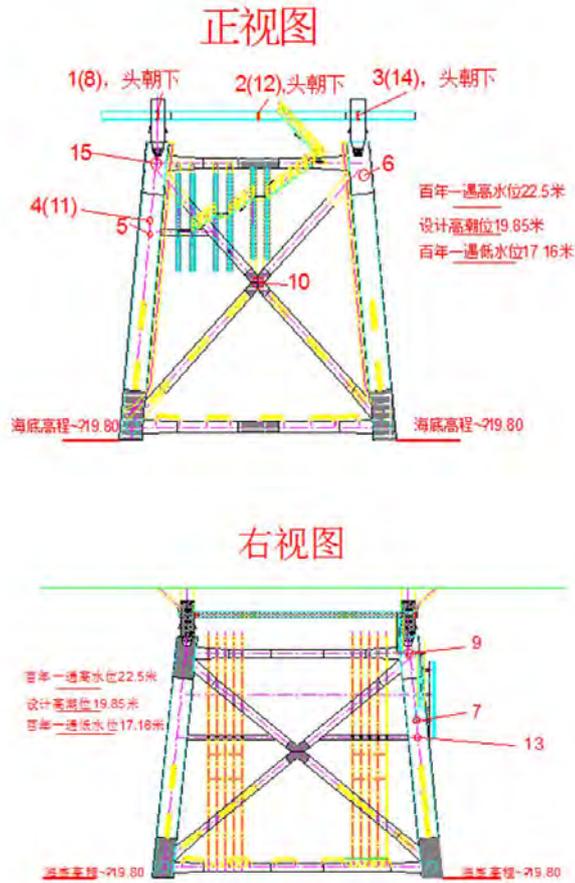


图 6-2 测压点示意图

Fig. 6-2 Illustration of the pressure taps

6.2.2 计算工况

是本文对于高桩承台基础，考虑三种水深条件，分别定义为：

- 1) 极端高潮位，实际水深 22.5 米，模型水深 0.750 米；
- 2) 设计高潮位，实际水深 19.85 米，模型水深 0.662 米；
- 3) 低端低潮位，实际水深 17.16 米，模型水深 0.572 米。

同时，在数值模拟中，模拟规则波海况。一共包含四个波流夹角，分别为：

- 波流同向，波流夹角为 0 度；
- 波流垂向，波流夹角为 90 度；
- 波流斜向一，波流夹角为 22.5 度；
- 波流斜向二，波流夹角为 45 度。

具体方向如下图 6-3 所示。

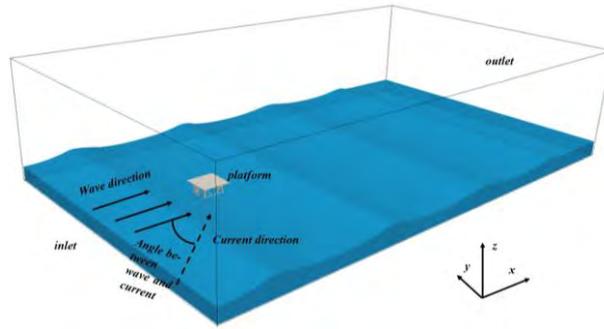


图 6-3 波流夹角示意图

Fig. 6-3 Illustration of the wave and flow direction

波浪参数如下表 6-1 和表 6-2 所示

表 6-1 导管架基础实尺度波浪参数表

Table 6-1 Wave parameters of full-scale foundation

海况编号	波高(m)	周期(s)	海流流速 (m/s)
规则波 3	5.63	9.80	1.73
规则波 4	8.70	11.50	1.73

表 6-2 导管架基础模型尺度波浪参数表

Table 6-2 Wave parameters of model-scale foundation

海况编号	波高(m)	周期(s)	海流流速 (m/s)
规则波 3	0.188	1.789	0.316
规则波 4	0.290	2.100	0.316

工况编号如下表 6-3 所示.

表 6-3 导管架基础基础各工况介绍

Table 6-3 List of each working condition

工况号	海况编号	波流夹角	水深编号
D 1		波流同向	
D 2		波流垂直	极端高潮位
D 3		波流斜向一	
D 4	3	波流斜向二	
D 5		波流同向	
D 6		波流垂直	设计高潮位
D 7		波流斜向一	

D 8		波流斜向二	
D 9		波流同向	
D 10		波流垂直	极端低潮位
D 11		波流斜向一	
D 12		波流斜向二	
D 1		波流同向	
D 2		波流垂直	极端高潮位
D 3		波流斜向一	
D 4		波流斜向二	
D 5		波流同向	
D 6	4	波流垂直	设计高潮位
D 7		波流斜向一	
D 8		波流斜向二	
D 9		波流同向	
D 10		波流垂直	极端低潮位
D 11		波流斜向一	
D 12		波流斜向二	

6.2.3 计算网格

网格的生成分为两步。首先采用 POINTWISE 软件生成计算域内的背景网格。再利用 OpenFOAM 提供的 snappyHexMesh 工具生成高桩承台基础周围的多面体网格并完成自由液面附近和高桩承台基础附近的网格加密。

在每一个计算工况下，空间坐标轴 x 轴都落在初始自由水面上，坐标原点为高桩承台水线面的型心。整个计算域为一个长方体 ($-5 \leq x \leq 20, -7.5 \leq y \leq 7.5, -h \leq z \leq 20$ ，其中 h 为对应工况的水深)。计算网格量在 350 万左右（根据水深不同网格数量会有细微变化）。模型表面 $y+$ 控制在 50 左右。一个波高内模型网格 z 方向个数大于 20 个。附体包括包括连杆、桁架、防撞挡板等。具体的网格示意图如图 6-4 所示。

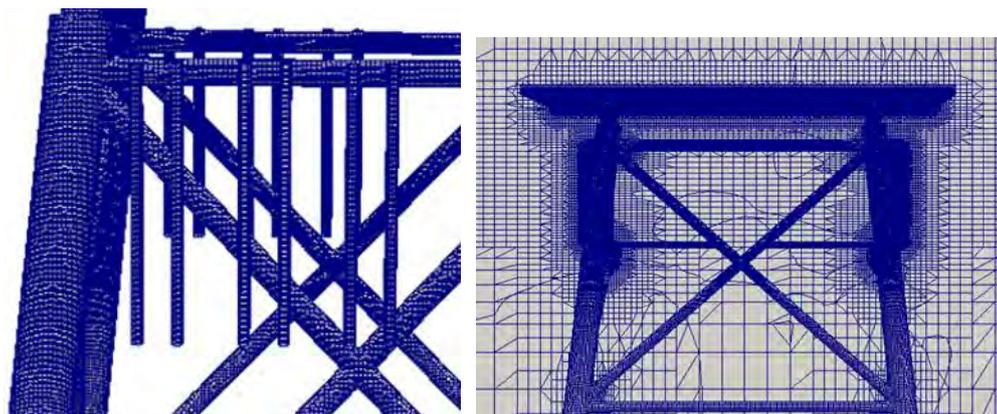


图 6-4 局部网格（左）与全局网格（右）
Fig. 6-4 Illustration of the numerical grids

6.2.4 边界条件

速度边界条件方面，波浪和来流入口面选择 `wavevelocity`；水底和基础结构表面选择壁面条件：`fixedValue`，速度为 0；波浪和来流出口面选择 `zeroGradient`，0 梯度条件；计算域上表面（空气中远场处）选择 `pressureInletOutletVelocity` 条件。

在压力边界条件方面，波浪和来流入口面、水底和基础结构表面都选择通量为 0 条件，`fixedFluxPressure` 条件；计算域上表面（空气中远场处）选择 `totalPressure` 条件，总压力为 0；出口处选择 0 梯度条件，`zeroGradient`。

6.3 数值计算结果分析

本节主要用计算流体力学的手段研究波流夹角、入射波浪高度和水深对导管架基础载荷特性的影响，并在第四节给出该导管架基础的整体受力特性。

6.3.1 波流夹角对导管架基础水动力特性的影响

本节探讨不同波流夹角对导管架基础受力 F_x 和砰击压力的影响，以入射波为规则波 3、流速 1.73m/s、水深 22.5 米（极端高潮位）下入射波流夹角分别为 0 度、22.5 度、45 度和 90 度作为研究对象，对应工况分别为 D1，D3，D4，D2。下面分别给出水平方向总推力以及各个测压点处压力的时间历程曲线。

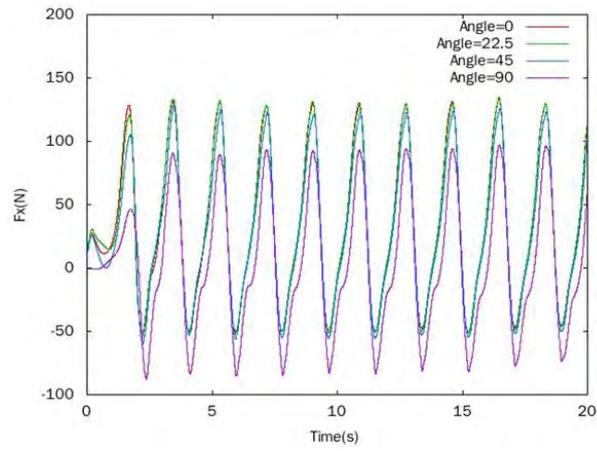


图 6-5 不同波流夹角水平推力 F_x 示意图
Fig. 6-5 Comparison of F_x in different flow direction

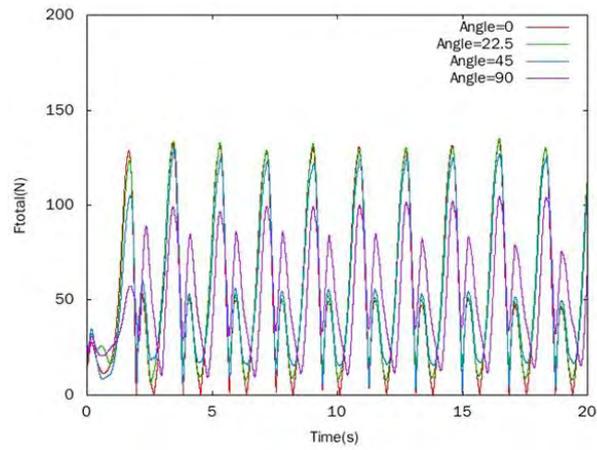
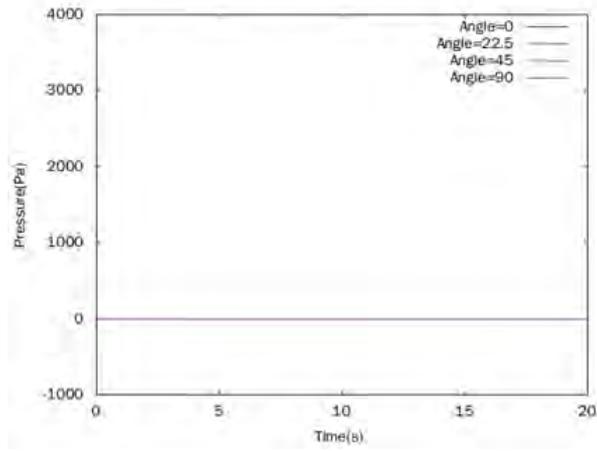
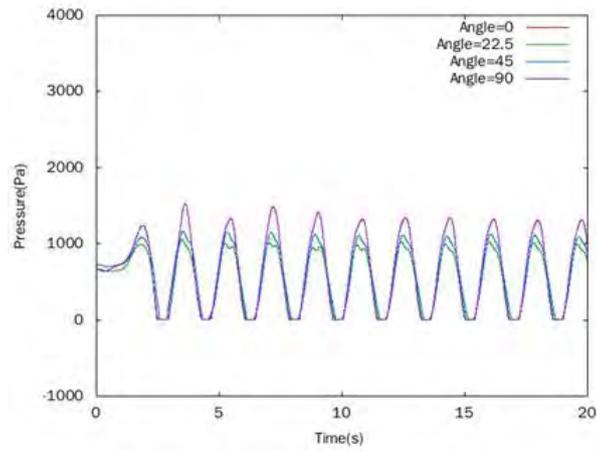


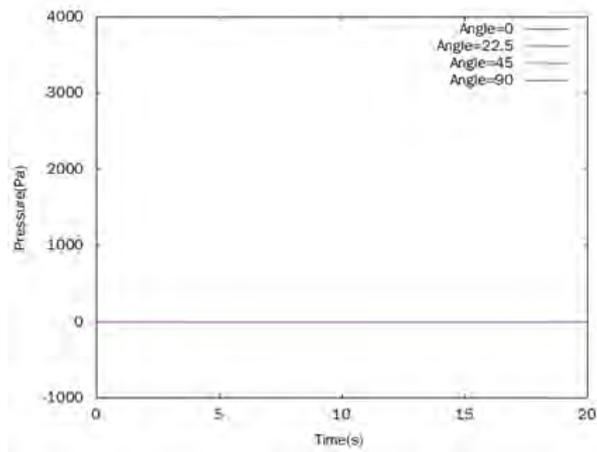
图 6-6 不同波流夹角水平总推力 F_{ht} 示意图
Fig. 6-6 Comparison of F_{ht} in different flow direction



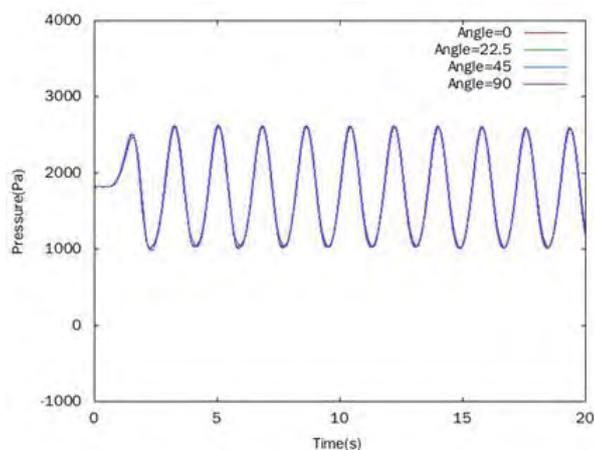
(a) P1



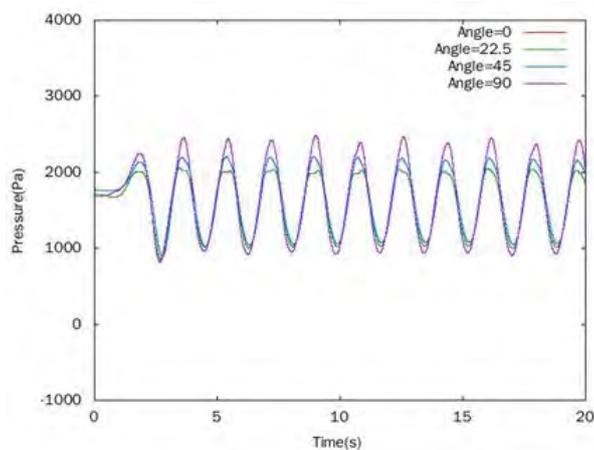
(b) P7



(c) P8



(d) P10



(e) P13

图 6-7 不同波流夹角测压点压力对比

Fig. 6-7 Comparison of pressure in different flow direction

从图中可以看出，对于导管架基础的这个水深而言，波流夹角的改变对平台的水平方向总推力 F_{ht} 有一定的影响。可以看到，随着波流夹角的增大，平台受到的水平方向总推力 F_{ht} 逐渐减小。我们可以定性地从理论角度来分析这个问题，如果单纯地将波和流的作用线性叠加来看，可以认为流对单桩基础的作用是一个恒定的力，方向随着流的方向改变而变化，而波浪对于单桩基础的作用力可以看做一个周期性变化的类似简谐力，当它的最大值出现时，与流作用的力矢量叠加，这个情况下，波流夹角越大则合力越小。当然，波流合力实际上也不是简单的线性叠加，另外由于附体的作用在实际测力的时候我们发现导管架基础的最大受力常常出现在波流夹角为 22.5 度的情况下。在本次数值模拟过程中，在不同工况下测得的最大载荷点大多发生在 22.5 度附近。

观察测压点处压力值的变化，我们可以发现，当波流的相对作用方向由波流同向转为波流有一定的夹角后，靠近斜来流来向的测压点 7、10 和 13 压力幅值和最大压力值有所增加，而背向斜来流来向的和面向波浪来向的其它测压点压力幅值有微弱的减小，这与我们的认知符合的较好。另外，从整体的趋势上而言，测压点的位置越靠近下方，则测压点的压力值越大；若测压点之间高度相同，则面向来浪或者来流方向的测压点压力相对较大。我们还可以发现，从测压点 1 和 8 的数据来看，波浪爬高并没有到达这个位置，也就是说这个工况下海水不能砸击到平台甲板底部。从压力的变化情况来看，随着流方向的变化，迎流方向的测压点压力相应有所增加。

6.3.2 入射波高对导管架基础水动力特性的影响

本节探讨不同入射波高对导管架受力 F_x 和砰击压力的影响，我们选定波流同向、水深 22.5 米（极端高潮位）下入射波浪高度分别为 5.63 米（规则波 3）和 8.7 米（规则波 4）作为研究对象，对应工况分别为 D1，D13。下面分别给出水平方向总推力以及各个测压点处压力的时间历程曲线。

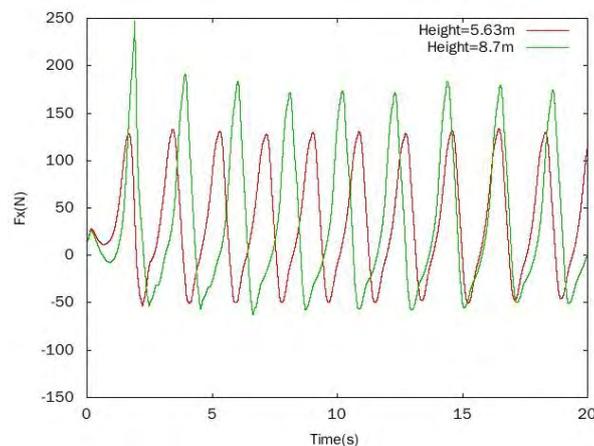


图 6-8 不同入射波高下水平推力 F_x 示意图
Fig. 6-8 Comparison of F_x in wave of different wave heights

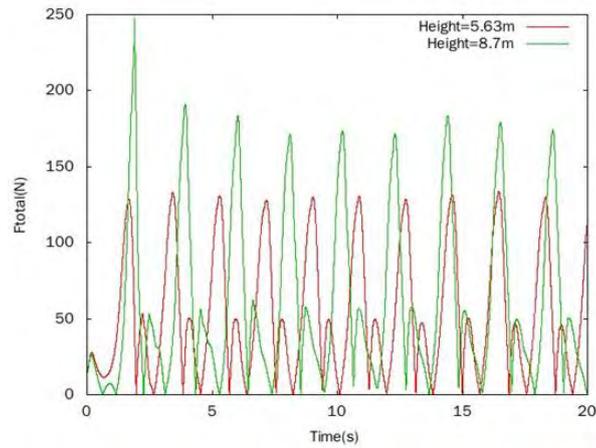
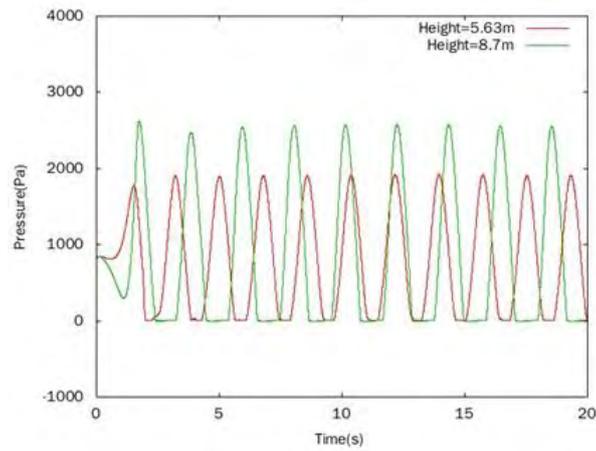
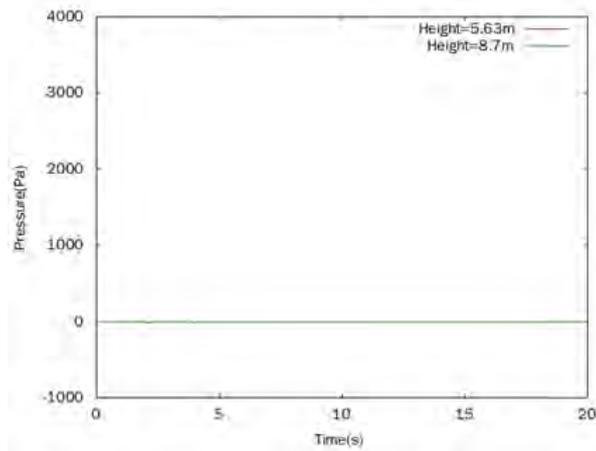


图 6-9 不同入射波高下水平总推力 Fht 示意图
Fig. 6-9 Comparison of Fht in wave of different wave heights



(a) P5



(b) P12

图 6-10 不同入射波高测压点压力对比
Fig. 6-10 Comparison of pressure in different wave height

从图中可以看出，对于导管架基础的这个水深而言，波高的改变对平台的水平方向总推力 F_{ht} 及各个测压点处的压力值都有比较明显的影响。总体而言，由于波高的改变致使波浪周期不同，进一步导致两种波浪作用在导管架基础上的 F_{ht} 以及压力变化的周期也不相同。波高较高的波浪对单桩基础产生更大的载荷，同时波浪砰击的高度也越大。观察测压点处压力值的变化，我们可以发现，当入射波浪由小波高变为大波高后，所有测压点处的压力变化幅值及压力最大值都增大了。从测压点 12 的数据来看，即使波浪的高度由 5.63 米增加到 8.7 米，也很难砰击到甲板底部。

6.3.3 水深对导管架基础水动力特性的影响

本节探讨不同吃水深度对导管架受力 F_x 和砰击压力的影响，我们选定波流同向、规则波 3，水深分别是 22.5 米、19.85 米和 17.16 米，对应工况分别为 D1，D5，D9。图 6-11、6-12 和图 6-13 分别是高桩承台受到的水平 x 方向推力 F_x 以及总推力 F_{ht} 对比。

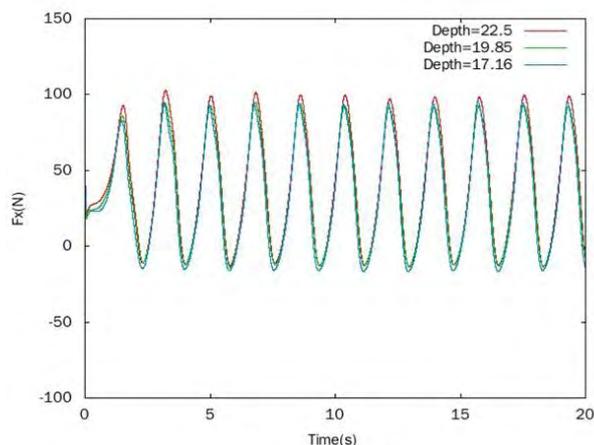


图 6-11 相同波流夹角、规则波 1，不同水深波浪方向推力 F_x 对比

Fig. 6-11 Comparison of F_x in different water depth

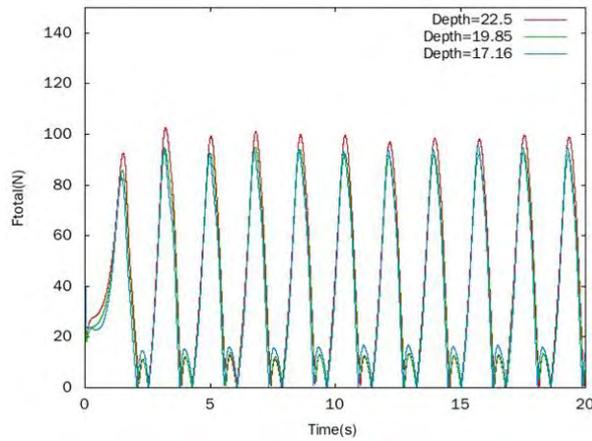
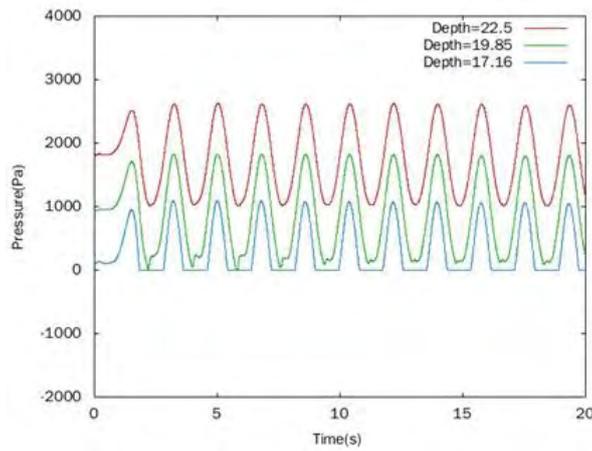
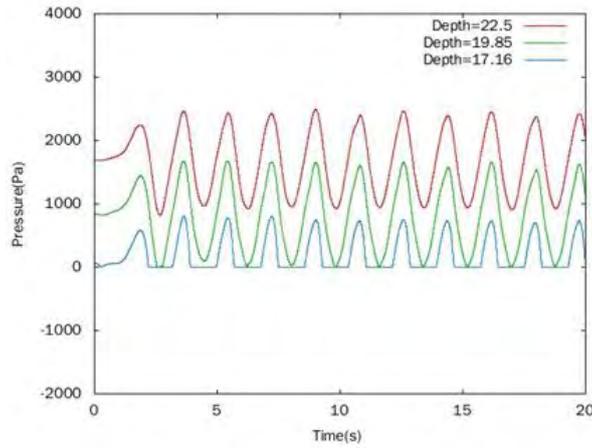


图 6-12 相同波流夹角、规则波 1，不同水深波浪方向推力 Fht 对比
Fig. 6-12 The time history curve of P10



(a) P10



(b) P13

图 6-13 相同波流夹角、规则波 1，不同水深测压点压力对比
Fig. 6-13 Comparison of pressure in different water depth

由图可知，对于导管架基础的这个波浪工况而言，水深的改变对导管架基础的总推力影响不大，而对各个测压点处的压力值则有明显的影响，水深越深，波浪能抨击到的相对高度越高，同一个测压点处的压力值也越大。

6.3.4 导管架基础受力特性综合分析

本节对导管架基础综合受力特性进行分析，我们选取了所有工况下计算出的水平方向总推力进行比较和研究，从总体上判断单桩基础的受力特性和趋势。



图 6-14 导管架基础水平方向总推力趋势图

Fig. 6-14 Comparison of Fht in different wave condition

从图 6-14 中可以看出，波高这一要素对导管架基础的总体载荷有十分明显的影响，波高增加，导管架基础的受到的整体载荷明显增加；波流夹角对导管架基础的总体载荷影响比较复杂，在数值模拟中我们发现波流夹角为 22.5 度时导管架基础受到的载荷最大，并且载荷随着波流夹角继续增大而减小，但总体而言变化幅度不大；水深对导管架基础总体载荷的影响要考虑两个因素，一个是由于水深变化而导致的导管架基础总体受力面积的变化，另一个是由于水深的变化而导致的导管架基础水线面附近空间几何形状的变化。就本次数值模拟结果而言，水深对导管架基础受到的总体载荷影响不大。

6.4 计算结果对比验证与分析

6.4.1 典型工况下数值计算结果与试验结果对比验证

本节我们考察典型工况 D1（极端高潮位、波流同向、海况 4）。水平方向推力对比图如图 6-15 所示，抨击压力图如图 6-16 所示。

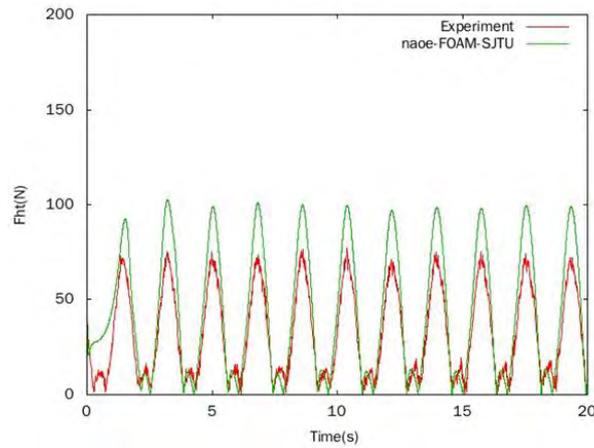
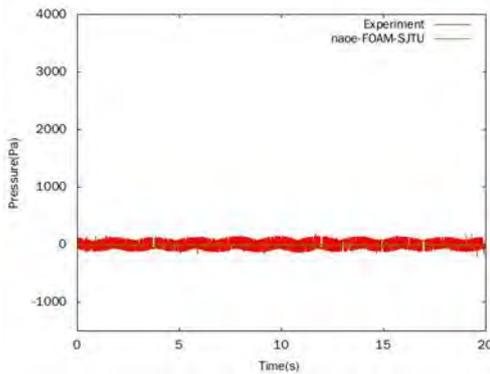
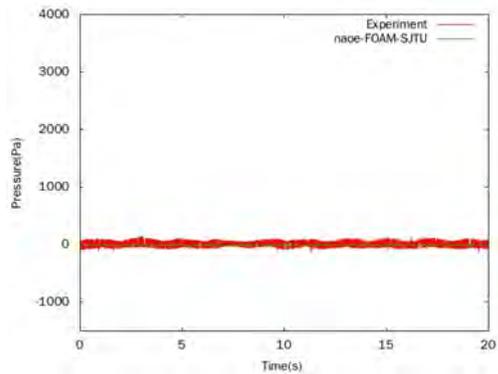


图 6-15 水平总推力对比
Fig. 6-15 Comparison of the horizontal force

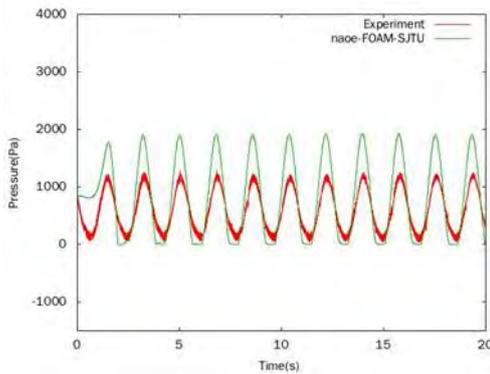
从图中可以看出，数值模拟结果与物模试验水平方向总推力结果频率和趋势一致。数值模拟结果略大于实验结果，数值模拟结果与物模试验结果总体变化趋势是吻合的比较好，平均最大水平推力误差为 21%，在工程时间中可以被接受。



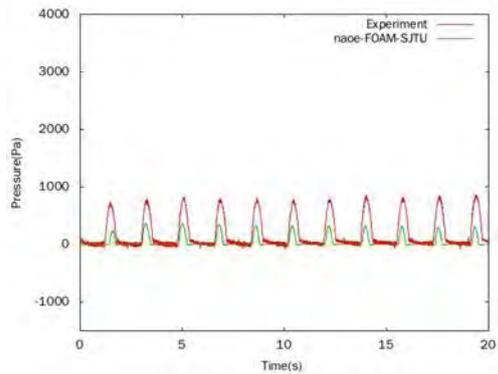
(a) P2



(b) P3



(c) P5



(d) P6

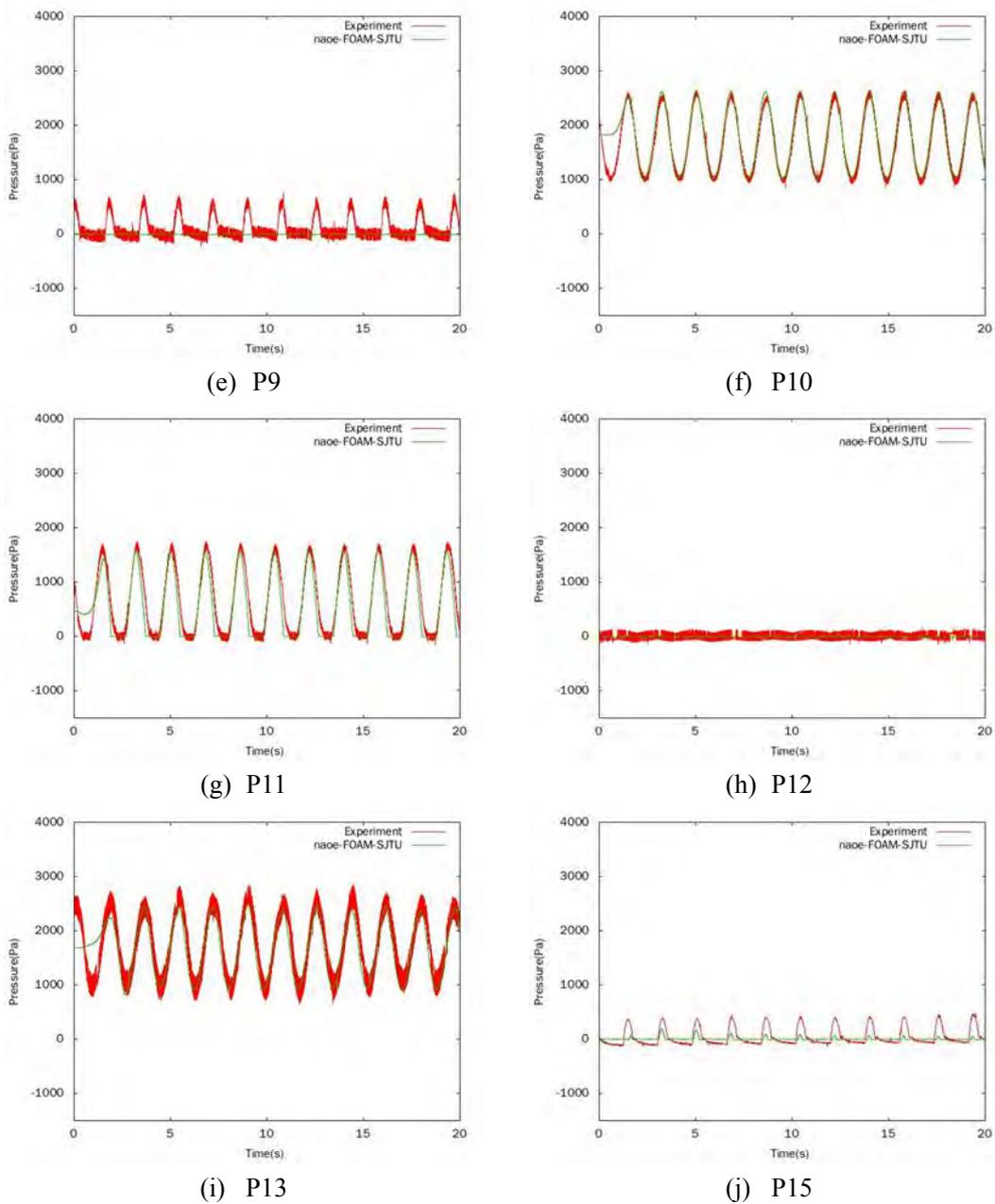


图 6-16 测压点压力对比
Fig. 6-16 Comparison of the pressure

从图中可以看出，数模试验结果与物模试验结果在大多数测压点吻合的都比较好，对于测压点 2、3 和 12 等而言，整个物理过程波浪几乎不能达到这些点，他们始终暴露在空气中。对于测压点 6、9 和 15 而言，它们在每个波浪周期内会有一段时间暴露在空气中，也会在一段时间内受到波浪砰击的强烈作用。对于测

压点 5、10、11 和 13 而言，它们始终淹没在水面以下，压力持续地发生变化。数模和物模测出的压力点的值差距不大并且周期和趋势一致。

6.4.2 数值计算结果与试验结果和规范计算结果总体趋势对比分析

导管架基础包括四根桩腿，其每个桩腿的规范计算采用倾斜桩腿的计算理论，该规范采用了波流力耦合计算。将每个桩腿得到的受力经过处理，得到整个平台的合力。规范得到的结果与试验结果和数值结果进行比较，得到图 6-17。



图 6-17 导管架基础水平总推力对比图

Fig. 6-17 Comparison of Fht by numerical simulation, model experiment and designing specifications

从上图可以看出，从整体趋势而言，数值结果、规范结果和物模结果的趋势吻合的较好。实际上上述结果已经对导管架的规范计算结果进行了处理：处理的方式是将其值乘以一个附件系数 $K_a=1.5$ ，这是因为在计算时候只计算了 4 根桩腿的受力，并没有计算其他一些附件的受力/力矩，而导管架的附体较多，会较大地影响受力/力矩，而 1.5 这个值，是海洋工程实验室项目成员根据经验获取的（主要考虑与波浪传递方向垂直的投影面积），事实上可能更大。如果单独观察数值结果与试验结果，可以发现他们吻合的较好，不过这在所有波流垂向的工况下，数模体现出了与规范结果一致的规律——波流垂向时导管架基础受到的载荷较其它方向有一个比较明显的减小，而物模试验结果却有时体现出这个规律，有时并没有呈现这个规律，这一点值得思考。我认为原因与造均匀流的器件有关，局部均匀流的角度可能有些许误差。

6.5 本章小结

导管架基础在所给工况下均不会出现甲板上浪情况。波高增加，导管架基础的受到的整体载荷明显增加；在数值模拟中我们发现波流夹角为 22.5 度时导管架

基础受到的载荷最大，并且载荷随着波流夹角继续增大而减小；水深对导管架基础受到的总体载荷影响不大，主要影响测压点压力。数值结果与物模试验结果吻合较好。规范计算难以直接考虑导管架基础的斜梁等众多附件，考虑引入附体系数 $K_a=1.5$ ，或者根据理论或经验选取更为合理的附体系数值，才能使规范计算预报的结果更加准确可靠。数值结果与物模试验结果的平均相对误差绝对值为 13.4%。

第七章 总结与展望

7.1 全文总结

海上固定式风机的设计和制造已经进入较为成熟的时期，设计的重点也应当从“能不能用”转移到“好不好用”，随着计算船舶流体力学方法的发展设计者可以进一步研究各种风机基础的载荷性能和波浪爬高特性，从而设计出低维护成本、高稳定性和高可靠性的海上固定式风机系统，对海上风能发电的发展有深远的意义。

本文以计算流体力学方法为主要研究手段，配合模型试验技术和规范计算，得到模型尺度的数值模拟结果和模型试验结果，同时得到规范公式对所研究目标进行几何简化后的计算结果，将三种手段得到的结果进行了详细的对比和分析，得出以下结论：

(1) 对于单桩基础，在所给定的所有工况下不会出现甲板上浪情况；波高对单桩基础的总体载荷有十分明显的影响，波高增加，单桩基础的整体受力明显增加；在波流夹角 22.5 度时单桩基础在相同水深和波浪工况下的载荷都是最大的，随着波流夹角的进一步增加受到的载荷呈衰减趋势，但总体而言变化幅度不大；水深对单桩基础的总体受力影响不大。整体而言，数值结果、规范结果和物模结果的趋势吻合的较好。数值结果与物模试验结果的平均相对误差绝对值为 9.8%。

(2) 对于长桩腿高桩承台，甲板基本不会上浪，有一定的波浪砰击现象，主要出现在甲板下表面；波高这一要素对高桩承台一的总体载荷有十分明显的影响，波高增加，高桩承台一的整体受力明显增加；波流夹角对高桩承台一的总体载荷影响比较复杂，在数值模拟中我们发现波流夹角为 22.5 时高桩承台一受到的载荷最大，但总体而言变化幅度不大；水深对高桩承台一的总体受力影响不大，主要影响波浪爬高和测压点的压力。整体而言，数值结果、规范结果和物模结果的趋势吻合的较好。在个别工况如 B11 工况，试验结果、物模结果和规范结果差不较大，可能是由试验中的偶然误差引起。数值结果与物模试验结果的平均相对误差绝对值为 8.1%。

(3) 对于短桩腿高桩承台，在所给定的大多数海况下均出现甲板上浪情况，值得设计者和设备维护人员的注意；波高这一要素同样对高桩承台二的总体载荷

有十分明显的影响，波高增加，高桩承台一的整体受力明显增加；波流夹角对高桩承台二的总体载荷影响比较复杂，在试验中我们发现波流夹角为 22.5 或 45 度（有时甚至在 90 度）时高桩承台二受到的载荷最大，但总体而言变化幅度不大；就本次数值模拟的结果而言，在海况 5 条件下高桩承台二的受力对水深并不敏感，而在海况 6 条件下高桩承台二随吃水增加受到的载荷也增加。对工况 C1 到 C16 而言，数值结果、规范结果和物模结果的趋势吻合的较好，数值结果与物模试验结果的平均相对误差绝对值为 10.1%。而在工况 C17 到 C24 时，数值结果比物模试验结果和规范结果偏大一定的值，同时数值结果与物模试验结果的平均相对误差绝对值达到 20%，这是由于高频（2000HZ）采样的数值模拟结果捕捉到的极端低潮位下波浪对承台下表面（及桩腿链接处）的砰击现象所引起的砰击力而引起的。

（4）对于导管架基础，在所给工况下均不会出现甲板上浪情况；波高增加，导管架基础的受到的整体载荷明显增加；在数值模拟中我们发现波流夹角为 22.5 度时导管架基础受到的载荷最大，并且载荷随着波流夹角继续增大而减小；水深对导管架基础受到的总体载荷影响不大，主要影响测压点压力。数值结果与物模试验结果吻合较好。规范计算难以直接考虑导管架基础的斜梁等众多附件，考虑引入附体系数 $K_a=1.5$ ，或者根据理论或经验选取更为合理的附体系数值，才能使规范计算预报的结果更加准确可靠。数值结果与物模试验结果的平均相对误差绝对值为 13.4%。

（5）对高桩承台一和二而言，各桩腿受到的力所占比例与波流夹角有明显的规律性，随着入射流的方向改变，靠近来流方向的桩腿受力增加，而远离来流方向的桩腿受力有所减小。

一般而言，规范是根据工程实际经验与要求结合理论所形成的比较完善的工程解决方案，随着工程经验的积累，包括物模试验和数值模拟经验的积累，所形成的规范可以参考相应的结果进行调整和改善，以求更加准确和满足工程的需求。数值模拟、物模试验和工程规范各有所长，可以协调在一起为完成指定项目提供高效、便捷可靠的工具，熟悉这三种方式的规则和原理，是解决工程实际问题的有效途径。在本文的研究结论中，可以发现各个风机基础在波流小角度夹角的情况下往往会出现最大水平载荷，值得工程师们的注意。

7.2 研究展望

本文以计算流体力学手段为主，辅以国家相应规范的计算和国家重点实验室模型试验的结果对 4 种典型固定式风机基础载荷特性完成了较为系统的研究，但是仍有一些做得不够好的地方和值得更加深入探讨的地方，可以在今后进一步开展以下研究：

- (1) 可以采用本文所利用的计算工具 naoeFOAM-SJTU 对风机基础在更加极端海况下的载荷反应和上浪情况进行研究。
- (2) 今后可以进一步探讨分级基础附件对波流载荷和上浪情况的影响，也可以研究响应附件对基础周围涡流场的影响，从而更加恰当地布置附件。
- (3) 利用 naoeFOAM-SJTU 求解器也可以进一步系统和全面地研究更加复杂的浮式风机。
- (4) 考虑尺度效应，本文所研究的风机基础与模型试验尺度保持一致，与实尺度相比有一个 30 的缩尺比，在今后的计算研究中，可以考虑直接计算实尺度模型。
- (5) 进一步考虑桩柱的柔性影响，计算流固耦合问题，考虑地质条件等。

本文的所采用的数值模拟方法通过了模型试验的验证，同时也体现出相对于经验规范的优势。在工程实践中设计与本文所涉及的几种典型风机基础相似的目标时，可以参考本文所给的数据和结论。

参 考 文 献

- [1] Burton T, Sharpe D, Jenkins N, et al. Wind Energy Handbook[M], Second Edition, John Wiley & Sons. 2001:15-18.
- [2] 王国粹, 王伟, 杨敏. 3.6MW 海上风机单桩基础设计与分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 95-100
- [3] 李鹏飞. 海上浮式风机尾流场模拟及耦合动力分析[D]. 上海交通大学, 2012.
- [4] 张秀芝, 徐经纬. 中国近海的风能资源[J]. 风能产业, 2013.07: 16-21.
- [5] 辛华龙. 中国海上风能开发研究展望[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(6):147-152.
- [6] Macaskill A., Mitchell P. Offshore wind-an overview [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 2013,2(4): 374-383
- [7] 毛宏宇, 何炎平, 赵永生. 固定式基础海上风机的工业应用[J]. 中国海洋平台, 2015,30(2):96-100.
- [8] Van B. G., Zaaier M. Reliability, availability and maintenance aspects of large-scale offshore wind farms: a concepts study[C]//. In Marine Renewable Energies Conference. Newcastle, United Kingdom. 2001, 113(1): 119-26.
- [9] 郇彩云. 海上桩式风机基础结构设计与研究[D]. 大连理工大学, 2009.
- [10] 宋础, 刘汉中. 海上风力发电场开发现状及发展趋势[J]. 太阳能学报,2006,2.
- [11] 胡可颖, 张慧. 欧洲的海上风力发电[J]. 太阳能学报, 2005,5.
- [12] Arshad M., O'Kelly B. C. Offshore wind-turbine structures: A review. In Proceedings of Institution of Civil Engineers: Energy. London, United Kingdom. 2013, 166(4):139-152.
- [13] Malhotra S. Design and construction considerations for offshore wind turbine foundations in north America. In GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling and Design – Proceedings of the GeoFlorida 2010 Conference. West Palm Beach, United States. 2010,(199):1533-1542.
- [14] 郑师亮. 海上风力发电机组基础形式研究[J]. 城市建筑, 2013, 10(14): 289-290.
- [15] 刘俊. 3MW 海上风力发电机组的基础设计[J]. 南昌工程学院学报, 2013, 31(6): 25-29.
- [16] 王建峰, 蔡安民, 刘晶. 我国海上风机基础形式分析[C]. 经济发展方式转变与自主创新, 第十二届中国科学技术协会年会, 2010.
- [17] 张亮, 白勇. 海上风力发电[M].北京: 海洋出版社, 2012: 168-176.

- [18] 李玉刚。桩式海上风机基础可靠度分析及优化方法研究 [D]. 大连理工大学, 2009.
- [19] 毛莹。海上浮式风机半潜式基础水动力特性研究[D]. 上海交通大学, 2015.
- [20] 李梦阳。海上浮式风机平台锚泊系统设计与研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2013.
- [21] 阮胜福。海上风电浮式基础动力响应研究[D]. 天津大学, 2010。
- [22] 童波。半潜式平台系泊系统型式及其动力特性研究[D]. 上海交通大学, 2009.
- [23] Fulton G, Malcolm D, Moroz E. Design of a semi-submersible platform for a 5 MW wind turbine [C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting 2006. Reno, NV: [s.n.], 2006, 16:11943-11963.
- [24] 陈法波。海上风机结构动力反应分析[D]. 大连理工大学, 2010.
- [25] SWAY website.<http://www.sway.no/?page=166>
- [26] 王海龙, 邹志利, 周亚龙, 等. 波浪对圆柱作用的三维耦合计算模型[J]. 中国海洋平台, 2010, 25(5): 38-48.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部。建筑桩基技术规范(s). JGJ94-2008,2008.
- [28] Matlock H M, Reese L C. Generalized solutions for laterally loaded piles[J]. J Soil Mech and Found Div, ASCE, 1960, 86(5):122-133.
- [29] Murchison J M, O'Neill M W. Evaluation of p-y relationships in cohesionless soils[C]// Proc of the Conference on Analysis and Design of Pile Foundations, San Francisco, California, 1984:174-213.
- [30] 李涛。近海风机导管架基础水平受荷特性研究[D]. 浙江大学, 2015.
- [31] 章连洋, 陈竹昌。计算黏性土 p-y 曲线的方法[J]. 海洋工程, 1992,10(4):50-58.
- [32] 朱斌, 杨永垚, 余振刚等。海洋高桩基础水平单调及循环加载现场试验[J]. 岩土工程学报, 2012,34(6):1028-1037.
- [33] 孟珣。基于动力特性的海上风力发电支撑结构优化技术研究[D]. 中国海洋大学, 2010.
- [34] Merz K.O., Moe G., Gudmestad O.T. A review of hydrodynamic effects on bottom-fixed offshore wind turbine. In Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Honolulu, United states. 2009, 927-941.
- [35] 周龙, 刘润, 张金凤, 郭绍曾。考虑波流联合作用的大直径钢管桩自由站立稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2015,37(11):1992-1999.
- [36] 周正全, 张亮, 戴遗山。波流联合作用下的物体上的波浪绕射力[J].水动力学研究与进展, 1992,7(4): 476-483.

- [37] 齐鹏, 王永学. 非线性波浪时域计算的三维耦合模型[J]. 海洋学报, 2000, 22(6):102-109.
- [38] Sarpkaya T, Bakmis C. Hydrodynamic forces from combined wave and current Flow on smooth and rough circular cylinders at high Reynolds number[C]. Proceeding of 16th OTC, Houston,1984.
- [39] Sarpkaya T. In-line force on a cylinder translating in oscillatory flow[J].Applied Ocean Research, 1985,7(4):188-196.
- [40] 祁德庆, 崩兴峰. 不规则波作用下风机单桩基础结构响应分析 [J]. 力学季刊, 2012.33(4): 657-664.
- [41] 刘贝贝. 水平荷载作用下高承台桩基础的动力响应分析[D]. 燕山大学, 2011.
- [42] 郭建, 杨敏, 王伟. 海上风机高桩承台基础模态建模分析研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 1172-1174.
- [43] Mirza U. A., Maclaren D. J. Jacket performance due to foundation-degraded response[C]. Offshore technology conference, Houston, 1992:311-322.
- [44] 吴梓鑫. 波流联合作用下海洋立管载荷与响应分析[D]. 江苏科技大学, 2015.
- [45] 杨锋, 邢占清, 符平, 等. 近海风机基础结构型式研究 [J]. 水利水电技术, 2009.40(9): 35-38.
- [46] 莫继华, 何炎平, 李勇刚, 张二虎. 近海风电机组单桩式支撑结构疲劳分析[J]. 上海交通大学学报, 2011,45(4):565-569.
- [47] 马良, 王金英, 孙绍述, 邢至庄. 海底(子-母)管道在波流作用下水动力载荷的实验研究[J]. 大连大学学报, 1993, 3(4):54-63.
- [48] 朱海飞, 孟庆顺, 李荣富, 李利飞等. 海上风电机组固定式基础结构与优化方法研究[C]. 风能产业, 2015,7.
- [49] 上海交通大学. 船舶与海洋工程水动力学求解器软件 naoe-FOAM-SJTU [CP]. 著作权登记号:2012SR118110.
- [50] Shen Z, Wan D. Manual of CFD solver naoe- FOAM-SJTU[R]. Technical Report No. 2012SR118110. Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [51] 交通部. 港口与航道水文规范(s). JTS145-2015. 2016.
- [52] 交通部. 港口工程荷载规范(s). JTS144-1-2010. 2010.
- [53] 查晶晶, 万德成. 用 OpenFOAM 实现数值水池造波和消波 [J]. 海洋工程, 2011.29(3): 1-12.
- [54] CAN Hong-jian, WAN De-cheng. RANS-VOF Solver for Solitary Wave Run-up on a Circular Cylinder. [J] China Ocean Engineering. 2015, 29(2):183-196.

- [55] CAO Hong-jian., WANG Xu-yang., LIU Yuan-chuan, et al. Numerical Prediction of Wave Loading on a Floating Platform Coupled with a Mooring System. [C] In The Twenty-third International Offshore and Polar Engineering Conference. Anchorage, Alaska, USA. 2013: 582-589.
- [56] CAO Hong-jian, WAN De-cheng. Development of Multi- directional Nonlinear Numerical Wave Tank by naoe-FOAM-SJTU Solver [J]. International Journal of Ocean System Engineering. 2014, 4(1): 52-59.
- [57] CAO Hong-jian, LIU Yuan-chuan, WAN De-cheng. Numerical simulation of solitary wave impact on fixed offshore platform. [C] The 7th International Workshop on Ship Hydrodynamics, 2011. 138-143.
- [58] SHEN Zhi-rong, WAN De-cheng. An Irregular Wave Generating Approach Based on naoe-FOAM- SJTU Solver [J]. China Ocean Engineering. 2016, 30(2): 177-192
- [59] LIU Yuan-chuan, XIAO Qing, Incecik Atilla, et al. Investigation of the Effects of Platform Motion on the Aerodynamics of a Floating Offshore Wind Turbine[J]. Journal of Hydrodynamics, 2016, 28(1): 95-101.
- [60] 杨建民, 肖龙飞, 盛振邦。海洋工程水动力学试验研究[M]. 上海交通大学出版社, 2008.
- [61] 曾一非。海洋工程环境[M]. 上海交通大学出版社, 2007.

致 谢

转眼间，青葱的六年岁月已经过去，回想从初入交大校门到如今，成长了许多也学到了许多。在交大认识的大多数人都十分优秀，他们身上或多或少绽放着迷人的光彩，照耀着我前进。如今来到了毕业季，完成了这篇毕业论文，也算是对这几年在交大学习和科研经历的总结。借此机会，我要向很多支持过我、帮助过我和与我共同成长的人表达最诚挚的谢意。

首先要感谢我的父母，对我给予思想上的引导同时又给我自由，对我包容而又开明，这些情感伴随着我成长至今同时也会伴随我的终身岁月。希望你们平平安安、健健康康，未来倘有坎坷，由我来为你们担当。

十分感谢我的导师万德成教授，万老师是我接触到的最有进取精神和工作热情的人，您那认真的态度和勤勉的灵魂无不感染着课题组内的每一个人。您关心每一个同学的学习和生活，更是从忙碌的工作中每周抽出时间开展组会，进行深入交流而不走过场和形式。希望万老师在今后继续保持健康和活力，影响更多的学生。

感谢一同进入课题组的吴建威、罗天、尹崇宏、吴惠宇、孙涛和刘晓义，记得我们曾经的侧夜长谈，记得我们对未来的相互鼓励，记得在生活中互相协助的点点滴滴，为来还望各自在工作和求学的旅途中勇往直前，不失本心。

感谢赵伟文和王建华师兄，你们对我的工作好学习提供了大量的帮助，让我受益匪浅。感谢沈志荣、刘远传、李鹏飞、张晨亮、叶海轩和何佳益师兄以及端木玉师姐，你们认真的科研精神和求学态度感染着每一个学弟。感谢课题组的曹洪建、张雨新、朱怡、周胡、孟庆杰、查若思、唐振远、刘小健、程萍、张友林、杨亚强、李海洲，你们是过去小组蒸蒸日上的中坚力量。感谢夏可、缪爱琴、庄园、刘正浩、陈翔、付博文、饶成平、艾勇等同学，你们充满活力、积极向上。

感谢王巍、陈哲凌、许洋洋（寝室）、周建文（寝室）的老朋友和现在认识的8班的新朋友，你们给我的生活带来了无限乐趣。感谢我的室友许皓然、陈成、高懿臣，未来虽是各奔东西，但友情却是美好记忆。

感谢交大，让我认识了这么多优秀的人，也让我有机会把自己变成优秀的人。

攻读硕士学位期间已发表或录用的论文

- [1] 彭耀, 张笑通, 万德成, 郇彩云. 海上固定式风机基础的波流载荷数值计算分析[J]. 水动力学研究与进展。(已录用)
- [2] **Yao Peng**, Decheng Wan, Gang Chen, Wenhua Huang. Numerical study of a moving object in calm water using overset and non-overset grids [C]. Proceedings of the Twenty-sixth International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece. 2016:152-158.
- [3] 彭耀, 万德成. 波流联合作用下风机单桩基础复杂流场的数值模拟[C]. 2016年船舶力学学术会议文集, 武汉, 2016.
- [4] **Yao Peng**, Decheng Wan. Numerical Study of Two Different Types of Semi-Submersible Platforms with Mooring Systems in the Sea [C]//The 12th International Conference on Hydrodynamics, Egmond aan Zee, The Netherlands, Sep. 2016.
- [5] 刘正浩, 彭耀, 万德成, 波流作用下海上风机基础水动力性能计算分析[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.
- [6] 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, 第四届全国船舶与海洋工程 CFD 专题研讨会论文集, 镇江, 2016.