

上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

学士学位论文

THESIS OF BACHELOR



论文题目：南海浮式码头在波浪中运动响应
与锚链力的计算

学生姓名：彭耀

学生学号：5100109102

专 业：船舶与海洋工程

指导教师：邹早建、万德成

学院(系)：船舶与海洋工程

南海浮式码头在波浪中运动响应与锚链力的计算

摘要

南海三沙一些岛屿由于受到海底地形的影响,水深在靠近岛屿时骤降,使得船舶无法靠近岛屿停泊。为了应对这个问题,南海三沙岛礁半潜式浮式码头应运而生。有别于传统的固定式码头,浮式码头一般由趸船和引桥组成,通过合适的锚泊系统定位可以在指定海域较好的完成工作,保证船舶的顺利靠泊。本文通过数值方法计算了一座南海三沙浮式码头,并对其在不同周期入射波浪和不同浪向作用下的六自由度运动响应和锚链受力的变化进行了分析。

本文的数值计算方法采用上海交通大学万德成教授小组开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器。该求解器基于开源代码平台 OpenFOAM 的基本工具库和数据结构,以两相流不可压缩 RANS 方程为控制方程,采用可以处理任意多面体结构网格的有限体积法(FVM)对方程离散求解。采用 PISO 算法求解速度和压力的耦合,使用 VOF 法捕捉自由液面。用动网格变形技术对运动进行模拟,可以求解码头的六自由度运动。naoe-FOAM-SJTU 求解器对锚泊系统的处理是基于求解器中的 naoe-FOAM-ms 模块,本文的计算采用模块中的分段外推法(PEM),锚泊系统作用力可以通过分段外推法理论得到,并作为码头所受到的外力添加到其运动方程。

本文分析了南海三沙浮式码头在迎浪工况下六自由度自由运动和锚链力的变化情况,给出了锚链张力的时历曲线,以及码头六自由度运动和受力的时历曲线。同时,本文分析了南海三沙浮式码头在 45 度入射波浪作用下六自由度运动和锚链张力的变化情况,并给出了相应数据。除此之外,文中还就迎浪情况对不同来浪周期和不同系泊材料锚链作用下浮式码头的运动响应作了分析和对比。

本文所得结果可以为南海三沙浮式码头进行性能预报,也可以为三沙码头的布置和改进提供参考。同时也验证 naoe-FOAM-SJTU 求解器可以较好的计算分析浮式码头等常见锚泊系统结构物的六自由度运动和锚链受力问题。

关键词: 浮式码头、OpenFOAM、naoe-FOAM-SJTU、六自由度运动、系泊系统

ANALYZE OF THE DYNAMIC PERFORMANCE IN WAVE FOR A FLOATING TYPE WHARF IN SANSHA, SOUTH CHINA SEA

ABSTRACT

Due to the effect of seabed topography in Sansha South China Sea, water depth dips when it closes to islands. In this situation, some ships can not be berthed near the islands, especially for those ships which have large draft. In order to deal with this problem, a typical type of floating type wharf is applied to the area.

By means of the CFD solver called naoe-FOAM-SJTU, which is designed for naval architecture and ocean engineering by our team, we can analyze the dynamic characteristics of the floating type wharf and its mooring system with CFD method. This paper analyze and compare the motion response of the floating type wharf in six degree of freedom and the variation of tension for the mooring lines in different types of incident waves. In addition, we will discuss the influence of different types of materials which the mooring lines adopt.

In this paper, two values of the period for incident waves are discussed, and two types of mooring-line materials are compared through control variate method, and also the influence of wave direction is analyzed in detail. The work of my research can be separated into three steps. The first step is to establish the model of the Sansha floating type wharf through Pro/Engineer wildfire 5.0, and divide gridding for future calculation through Pointwise software. The second step is to numerical simulate the model in corresponding working conditions and record the data. The last step is to analyze the data we get in step two and make a general conclusion. As is discussed above, the key point of establishing the model of the floating type wharf is to make an appropriate assumption for physical parameters of the Sansha floating type wharf. Because the physical parameters are not given completely, I have to set the density for the model according to some relevant references, and the other parameters can be calculated out by Pro/Engineer.

The results of this paper give a prediction of the dynamic performance for the Sansha floating type wharf. And because satisfactory results are obtained, we consider naoe-FOAM-SJTU is capable to handle motion response problem and mooring-line tension problem of floating structure in waves.

Key words: floating type wharf, Open-FOAM, naoe-FOAM-SJTU, 6 Degree of Freedom, mooring system

目录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 浮式码头及系泊系统简介.....	1
1.3 浮式码头的研究现状.....	2
1.4 研究方法.....	3
1.5 本文主要工作.....	3
第二章 理论介绍.....	5
2.1 粘性流体流动数学模型.....	5
2.1.1 控制方程.....	5
2.1.2 自由面处理.....	5
2.1.3 离散方法.....	5
2.1.4 PISO 算法求解速度压力方程.....	6
2.2 数值水池造波理论.....	6
2.3 数值水池消波理论.....	6
2.4 浮体六自由度运动计算理论.....	7
2.5 浮式结构物系泊系统计算理论.....	8
2.6 计算总流程.....	10
第三章 南海三沙某浮式码头及其模型介绍.....	11
3.1 南海三沙某浮式码头简介.....	11
3.2 模型介绍.....	12
3.3 系泊系统介绍.....	13
3.4 背景网格建立.....	13
3.5 波浪模拟.....	14
3.6 消波区设置.....	15
3.7 本章小结.....	16
第四章 码头迎浪工况时不同周期入射波浪下响应的数值模拟与分析比较.....	17
4.1 入射波浪周期为 6s 时码头数值模拟结果.....	17
4.1.1 入射波浪周期为 6s 时码头运动响应结果.....	17
4.1.2 入射波浪周期为 6s 时锚链张力的变化情况.....	19
4.2 入射波浪周期为 5s 时码头数值模拟结果.....	20
4.2.1 入射波浪周期为 5s 时码头运动响应结果.....	20
4.2.2 入射波浪周期为 5s 时锚链张力的变化情况.....	21
4.3 对比与小结.....	22
4.3.1 两种入射波浪周期下数值模拟结果的对比.....	22
4.3.2 本章小结.....	24
第五章 码头迎浪工况时不同系泊锚链材料下响应的数值模拟与分析比较.....	25
5.1 用 R4S 材料的锚链系泊时码头的响应计算结果.....	25
5.1.1 用 R4S 材料的锚链系泊时码头的运动响应结果.....	25
5.1.2 用 R4S 材料的锚链系泊时锚链张力变化情况.....	27

5.2 用材料 1 与 R4S 材料系泊时码头响应及锚链张力的比较	28
5.2.1 入射波浪周期 5s 情况下两种材料响应及锚链张力比较	28
5.2.2 入射波浪周期 6s 情况下两种材料响应及锚链张力比较	32
5.3 本章小结	34
第六章 码头斜浪工况时的数值模拟	35
6.1 码头斜浪工况的模型处理	35
6.2 数值模拟结果及其分析	36
6.2.1 浮式码头 45°斜浪作用下运动响应结果及其分析	36
6.2.2 浮式码头 45°斜浪作用下锚链张力变化结果及其分析	39
6.3 本章小结	40
第七章 全文总结	41
参考文献	42
谢辞	43

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

海洋占有地球表面积的 70%，海洋运输行业从根本上支撑着国际贸易。我国是一个海洋大国，拥有大陆海岸线长达 18000 多公里^[1]，300 多万平方公里的海洋领土，海洋运输产业是我国交通运输的中流砥柱。自步入二十一世纪以来，我国高度重视海洋经济特别是海洋运输业的发展。2003 年，《全国海洋经济发展规划纲要》^[2]提出“逐步把我国建设成为海洋强国”的发展目标，为了实现这一目标，发展我国海洋运输能力、港口吞吐能力势在必行。该纲要还指出，我国要根据船舶大型化发展的要求，实施深水航道为重点的改造工程，改善进出港航道的通航条件。然而从我国国情来看，我国海岸自然条件较为不利，大部分海岸水下地形非常平缓而水深较小，难以满足船舶靠泊的吃水要求，对于大型船舶的靠泊大多依赖深水港，以及海底挖掘等工程。而浮式码头的兴起则能一定程度上改善船舶的靠泊情况，使一部分吃水量大的船能够进行靠泊装卸，降低吃水限制，提高海运效率，因此浮式码头在我国拥有很好的发展运用前景。

南海三沙市位于中国最南端，是中国总面积最大的地级市，管辖西沙群岛、中沙群岛及南沙群岛。三沙市海洋资源丰富，拥有大量的渔业及石油天然气资源，又因其地理环境特殊，无论是对基础工农业产品的进口还是渔业及石油天然气产品的出口而言，海运业都显得尤为重要。

然而在南海三沙，部分海域由于海底地形的影响，水深在靠近岸边时下降很快，船舶无法正常进行靠泊，水深不足的瓶颈，限制了一些港口的装卸能力和进一步发展，为了克服这种水深的限制，往往有填海造陆修建固定码头、挖掘海底地形和建立浮式码头三种应对方法，这些方法都能够比较有效的解决问题。而只要通过合理的设计与制造，建造浮式码头相对其它两种方法而言有其独特的优势。填海造陆和挖掘海底地形两种方法工程量巨大，人为地改变了地貌地势，影响水文环境，施工成本和维护成本都很高。而浮式码头通过合理设计，可以较好的完成工作，通过改良制造工艺还可以达到规模形成量产化，降低制造成本。另外，浮式码头往往能够多次重复利用，也不会破坏当地地势地貌，影响自然环境。

本文通过研究南海三沙某浮式码头，计算它在不同系泊材料锚链系泊时和不同入射波浪作用下的六自由度的运动响应以及锚链的受力变化，对码头的性能进行预报，并选择合适的系泊材料。从更广泛的意义上来看，本文的研究内容也能够为今后浮式码头的设计和布置提供一些参考，同时也可以表明 naoe-FOAM-SJTU 求解器可以较好的处理浮式码头等常见锚泊系统结构物的六自由度运动和锚链受力问题。

1.2 浮式码头及系泊系统简介

浮式码头是一种可随着水位升降而升降的码头，有别于传统的固定式码头，浮式码头一般由趸船和浮桥组成，如图 1 所示，通过锚泊定位或者动力定位。浮式码头内部有货物堆积场和起重设备，较大型的码头内部往往还有生活区，供给码头上的工作人员生活和居住。船舶通过靠泊在浮式码头装卸货物，并通过浮桥完成码头上货物与外界的流程。通过设计浮式码头及其浮桥的长度，可以使浮式码头工作在离岸较远水深较大的海域，方便大吃水船舶的靠泊，降低港口对水深的限制。

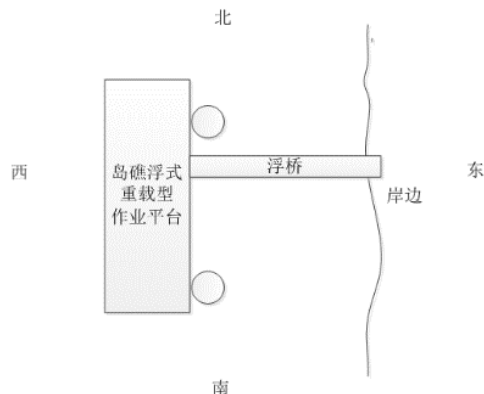
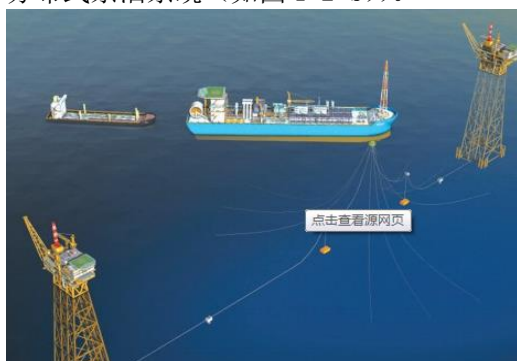


图 1-1 浮式码头示意图

浮式码头并不能靠自己独立运作，它必须依靠与自身配套的定位系统，而浮式码头在海域工作时，不可避免地又要受到风、浪、流等载荷的作用，这些外界干扰力与系泊系统提供的回复力共同构成浮式码头的受力体系，使它产生六自由度的运动响应。

对浮式码头的定位依靠系泊系统。系泊系统按照系泊力的提供方式分为三类：被动式系泊系统、动力定位系统和推进器辅助系泊系统。

被动式系泊系统：即最常见的传统的由锚链或纤维缆索与锚链配合提供系泊力的系泊系统。它根据系泊链索的系泊点位置的分布可以分为两类：单点系泊系统（如图 1-2 a））和分布式系泊系统（如图 1-2 b））。



a) 单点系泊系统



b) 分布式系泊系统

图 1-2 系泊系统示意图

动力定位系统：一般先用声呐测定船舶位置，将位置信息反馈到船上的自动控制系统，控制系统通过处理这些信息发出指令，控制安装在平台或者船舶上的侧向推进器产生对应的推进力来平衡其位置。

推进器辅助系泊系统：这类系统往往是在普通被动式定位系统的基础上增加了侧向推进系统来辅助定位。

本文要研究的浮式码头依靠锚链系泊定位，锚链对系泊系统产生回复力的同时，锚链自身也会受到变化的张力作用。因此文中也把锚链的受力情况作为一个研究对象。本文研究的该三沙平台的系泊方式属于被动式定位系统中的分布式系泊系统。

1.3 浮式码头的研究现状

对浮式码头的研究如同对一般船舶海洋工程其它结构物一样，有理论计算、实验研究和计算机数值模拟三种方法。理论计算主要通过三维势流理论、悬链线理论和时域频域分析等基本理论对码头和锚链进行分析和计算；试验研究主要通过建立仿真模型、模拟工作条件进行试验探究，或者直接使用真实的浮式码头进行试验，这种方法得到的结果往往更加形象化；数值模拟主要通过各种船舶与海洋工程方面相关软件，对浮式码头及其系泊系统进行建模仿真，通过调整各参数模拟码头的工作条件，对码头的运动和受力进行数值计算，并给出

计算结果。本文的研究方式属于数值模拟。

浮式码头与一般系泊式海洋平台以及类似的结构物并没有太大不同,目前阶段对这种类型结构物的研究也是比较深入。颜锦对浮式栈桥码头的总体规划进行了研究,对浮式码头系统所受环境载荷如风、浪和流等静态作用力进行了经验公式计算^[3]。王翔研究了船舶与浮式码头碰撞过程,并对其进行了仿真^[4]。史琪琪以三维势流理论为基础对“石油 981”台各海况进行频域计算,然后对半潜式钻井平台及其系泊系统在作业海况下水动力性能进行时域耦合分析,并且在文中将计算结果与“海洋石油 981”平台的试验模拟结果进行了对比^[5]。陈矗立以三维势流理论为基础,采用理论分析、数值计算与模型试验相结合的方式,研究了几种不同类型的深海系泊浮式结构物在波浪上的运动及其载荷^[6]。Per. I. Johansson 在其博士论文中建立了有限元模型对锚链的动力响应进行了非线性分析,他考虑了与阻尼有关的速度,偏离平衡位置的位移以及锚链力张力的突变等^[7]。

1.4 研究方法

本论文采用计算流体力学(CFD)的方法来研究三沙平台在波浪上的运动响应和它锚链张力的变化。基本研究思路是利用 pro/E 三维建模软件,建立三沙平台的模型并导出 ASCII 格式的 STL(STereo Lithography)文件,在 Pointwise 软件中绘制背景网格,然后在 OpenFOAM 中利用 snappyHexMesh 软件将模型嵌入背景网格并进行网格加密,根据不同海况和系泊情况设置好对应参数后,利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器中的造波模块、6DoF 运动求解模块和系泊系统计算模块进行数值模拟计算。然后对得到的数据进行处理分析。最后绘制图像整理结果,如下图 1-3。

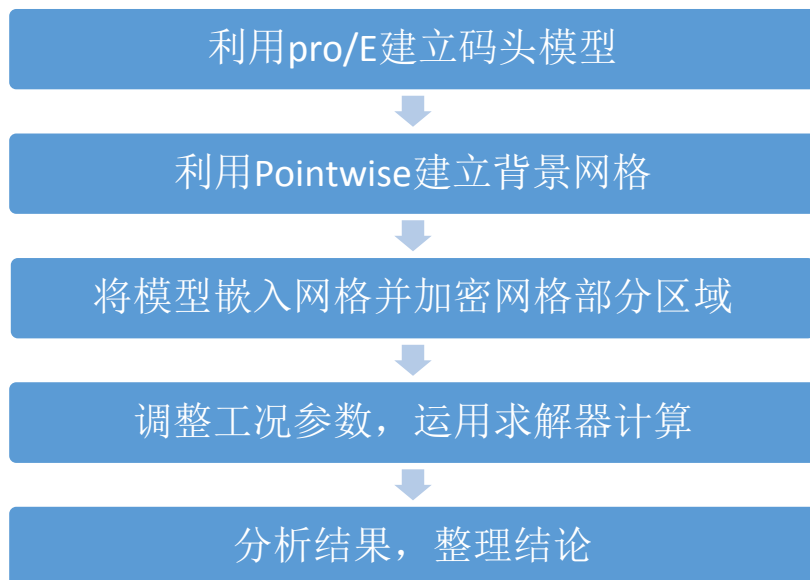


图 1-3 研究方法流程图

1.5 本文主要工作

本文以开源工具箱 OpenFOAM 为平台,利用上海交大万德成教授小组开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU。对南海三沙某浮式码头在迎浪和 45 度斜浪作用下的六自由度响应以及锚链力的变化进行计算模拟,同时还探讨了不同入射波浪周期以及不同系泊材料对浮式码头动力特性的影响。

第一章介绍了课题的背景,阐述了论文研究的目的与意义。简要的介绍了浮式码头的基

本概念和几种常见的系泊系统。明确的论文研究的方向和方法。并对关于式码头目前的一些研究进展作了介绍。

第二章系统地介绍了本次数值计算软件中用到的相关理论，并简要地阐述了naoe-FOAM-SJTU 求解器对这些理论的实现原理，讲解了浮式结构物六自由度运动和系泊锚链张力计算的流程。这些理论是数值软件的计算基础，也是深入理解软件工作原理所必须掌握的。

第三章介绍了南海三沙某浮式码头及其工作环境，并对其模型的建立和网格的划分作了简要说明。另外，在这一章中，还对波浪的模拟、消波区的设置和不同系泊锚链的参数作了阐述。

第四章通过控制变量法，对比了在其它因素相同的情况下，不同周期入射波浪作用下浮式码头的六自由度响应和系泊锚链张力的变化情况，并对结果进行了分析。

第五章通过控制变量法，对比了在其它因素相同的情况下，系泊锚链材料不同时浮式码头的六自由度响应和系泊锚链张力的变化情况。并对结果进行了分析。

第六章通过改变入射波浪方向，分析了浮式码头在斜浪作用下六自由度的响应情况及系泊锚链张力的变化。

第七章总结了全文的工作，并对文中得到的结论进行了梳理，也对以后的研究方向做了展望。

第二章 理论介绍

2.1 粘性流体流动数学模型

2.1.1 控制方程^[8]

对于非定常、不可压、粘性流体，流动的控制方程为 NS 方程：

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

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

其中： $\mathbf{U}$ 为流场速度， $\mathbf{U}_g$ 为网格节点速度， $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ 为流场动压力， $\mathbf{g}$ 为重力加速度， ρ 为流体的密度， μ 为动力粘性系数； $\mathbf{f}_\sigma$ 为表面张力，只在自由面处有影响，在其余位置为零。

2.1.2 自由面处理

本论文使用的 naoe-FOAM-SJTU 采用流体体积法 VOF 来捕捉自由液面。这种方法能有效的控制数值扩散并提高自由面的捕捉精度。

有限体积法对每一个网格定义了体积分数 α ，表示该网格单元内流体所占有的体积比，对于任意一个网格而言， $0 \leq \alpha \leq 1$ ， α 值的意义由下式给定：

$$\begin{cases} \alpha = 0, & \text{空气} \\ \alpha = 1, & \text{水} \\ 0 < \alpha < 1, & \text{自由面附近} \end{cases} \quad (2-3)$$

有限体积法的输运方程定义为：

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g)\alpha] + \nabla \cdot [\mathbf{U}_r(1 - \alpha)\alpha] = 0 \quad (2-4)$$

其中， $\mathbf{U}_g$ 是网格节点速度， $\mathbf{U}_r$ 是相对速度场， $\nabla \cdot [\mathbf{U}_r(1 - \alpha)\alpha]$ 是人工压缩项。在捕捉自由液面时，通过求解式(2-4) 可以得到各网格单元的体积分数，由此判断自由面位置。

根据引入的体积分数 α ，式 (2-2) 中密度 ρ 和动力粘性系数 μ 也可以由 α 来表征：

$$\begin{cases} \rho = \alpha \rho_l + (1 - \alpha) \rho_g \\ \mu = \alpha \mu_l + (1 - \alpha) \mu_g \end{cases} \quad (2-5)$$

其中，下标 l 和 g 分别表示液体和气体。

而式(2-2)中自由面处的表面张力 $\mathbf{f}_\sigma$ ，则由下式给出：

$$\mathbf{f}_\sigma = \sigma \kappa \nabla \alpha \quad (2-6)$$

其中， σ 为表面应力张力系数，当前研究中取 $\sigma = 0.07 \text{ kg/s}^2$ ； κ 为自由截面的曲率，由下式给出：

$$\kappa = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \right) \quad (2-7)$$

2.1.3 离散方法

运用有限体积法可以对 N.S.控制方程式(2-2)和 VOF 输运方程式(2-4)进行离散。在 naoe-FOAM-SJTU 中，计算域离散成一系列小单元，计算流场信息储存在网格单元中心，再根据单元中心的值进行插值便能得到单元面的值。该求解器对不同的项采用不同的插值方法，方程(2-2)中对流项采用二阶 TVD 有限线性法，扩散项采用二阶中心差分法，VOF 方程采用

Van Leer 离散方法，时间项采用二阶向后插值法离散。

2.1.4 PISO 算法求解速度压力方程

在求解流场时，我们发现速度和压力之间存在耦合。naoe-FOAM-SJTU 中利用分离算法中的 PISO 方法进行速度和压力的解耦。PISO 算法的思想是利用上一时刻的压力值作为估计值求解出速度值，经修正得到修正后的压力和速度值，并以此作为目前时刻的值带入下一时刻进行递推计算。

2.2 数值水池造波理论

本文对南海三沙平台的研究采用的波浪为 Stokes 一阶深水波。Stokes 一阶波是线性小振幅波，当 Stokes 一阶波在水深很大的情况下以至可以不考虑水深影响时，就是我们需求的 Stokes 一阶深水波，一般情况下，深水波对水深的要求是 $h/\lambda \geq 1/2$ 。

在 naoe-FOAM-SJTU 求解器中，Stokes 一阶波被标记为 stokesFirst。在迎浪情况下，线性 Stokes 波的波面方程为：

$$\eta = a \cos(kx - \omega t + \delta) \quad (2-8)$$

水质点的水平速度和垂直速度分别为：

$$\begin{cases} \mu = \frac{\pi H \cosh k(z+h)}{T \sinh kh} \cos(kx - \omega t + \delta) \\ w = \frac{\pi H \cosh k(z+h)}{T \sinh kh} \sin(kx - \omega t + \delta) \end{cases} \quad (2-9)$$

波浪中流体的压强为：

$$p = -\rho g z + \rho g \frac{H \cosh k(z+h)}{2 \cosh kh} \cos(kx - \omega t) \quad (2-10)$$

其中，H 为波高，T 为周期，h 为水深， ω 为波浪圆频率，k 为波数， δ 为相位。

当水深满足深水波的要求时，即本文要研究的情况，有：

$$e^{-kh} \rightarrow e^{-\infty} \rightarrow 0 \quad (2-11)$$

根据式(2-9)和(2-11)，我们得到：

$$\mu = a\omega e^{kz} \cos(kx - \omega t + \delta) \quad (2-12)$$

$$w = a\omega e^{kz} \sin \beta \sin(kx - \omega t + \delta) \quad (2-13)$$

在 naoe-FOAM-SJTU 中，通过配置 waveDict 中文件的参数，即可得到 Stokes 一阶深水波。需要配置的参数如下表 2-1 所示。

表 2-1 stokesFirstDeepWater 的输入参数

参数	数学符号	意义
height	H	波高
waveLength	λ	波长
phi	δ	相位角
waveDirection	β	波浪方向

2.3 数值水池消波理论

在使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器计算时，波浪在计算域的出口边界处会产生反射现象。反射波与入口处制造的入射波浪叠加，影响了波浪的形态，对数值计算结果产生干扰。为了应对这一问题，求解器中设置了专门的消波模块，又称作海绵层。在该求解器中，消波区的作用是通过在方程中增加一个源项 f_s 来实现的，该项仅作用在消波区内，如下式所示：

$$f_s(x) = \begin{cases} -\rho\alpha_s \left(\frac{x-x_s}{L_s}\right)^2 (U - U_{ref}) \\ 0 \end{cases} \quad (2-14)$$

其中， x_s 是消波区的起始位置， L_s 是消波区长度， α_s 是一个无因次化的人工粘性系数，用于控制消波强度。 U_{ref} 是一个参考速度，将此参考速度设定为入口平均速度可以保证整个计算域内水的质量守恒。

在 naoe-FOAM-SJTU 中，通过配置 `SpongeType` 中文件的参数，可以到的合适的消波区。本论文使用的消波区为矩形消波区，在求解器中对应的消波类型为 `rectangleShape`。所需配置参数如下表 2-2 所示。

表 2-2 消波区需要设置的参数

参数	意义
spongeLength	消波区长度
xMax	x 方向数值水池右端消波区起始位置
xMin	x 方向数值水池左端消波区起始位置
yMax	y 方向数值水池上端消波区起始位置
yMin	y 方向数值水池下端消波区起始位置

2.4 浮体六自由度运动计算理论

浮式码头在海域工作时，不可避免地会受到风、浪、流以及锚链系泊力的作用，产生空间六个自由度上的运动响应，即纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇、和艏摇。这些运动幅度的大小与浮式结构物的响应性能息息相关。

在研究船舶六自由度运动时，常常采用两个坐标系，即大地坐标系和随浮体运动坐标系。浮体在大地坐标系中的线位移和角位移可以表示为：

$$\vec{\eta} = (\vec{\eta}_1, \vec{\eta}_2) = (x_1, x_2, x_3, \varphi, \theta, \psi) \quad (2-15)$$

其中， $(x_1, x_2, x_3, \varphi, \theta, \psi)$ 分别表示纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇和艏摇。

浮体在随浮体运动坐标系中的线速度和角速度可以用下式表示：

$$\vec{v} = (\vec{v}_1, \vec{v}_2) = (u, v, w, p, q, r) \quad (2-16)$$

通过引入矩阵 J_1 和 J_2 ，经过一系列推导（这里省略推导步骤），可以得到如下速度在两种坐标系下的转换公式：

$$\vec{\eta}_1 = J_1 \cdot \vec{v}_1 \quad (2-17a)$$

$$\vec{\eta}_2 = J_2 \cdot \vec{v}_2 \quad (2-17b)$$

其中， J_1 和 J_2 分别表示为：

$$J_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \theta \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \theta \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \theta \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \theta \cos \psi \\ 0 & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \frac{\sin \phi}{\cos \theta} & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{bmatrix}$$

在运动坐标系下建立浮体六自由度运动方程如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{u} = \frac{X}{m} + vr - wq + x_g(q^2 + r^2) - y_g(pq - \dot{r}) - z_g(pr + \dot{q}) \\ \dot{v} = \frac{Y}{m} + wp - ur + y_g(r^2 + p^2) - z_g(qr - \dot{p}) - x_g(qp + \dot{r}) \\ \dot{w} = \frac{Z}{m} + uq - vp + z_g(p^2 + q^2) - x_g(rp - \dot{q}) - y_g(rp + \dot{p}) \\ \dot{p} = \frac{1}{I_x} \{K - (I_z - I_y)qr - m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)]\} \\ \dot{q} = \frac{1}{I_y} \{M - (I_x - I_z)rp - m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)]\} \\ \dot{r} = \frac{1}{I_z} \{N - (I_y - I_x)pq - m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)]\} \end{array} \right. \quad (2-18)$$

其中, x_g 、 y_g 、 z_g 分别是物体重心在运动坐标系中的坐标值; X 、 Y 、 Z 、 K 、 M 、 N 分别表示物体在运动坐标系中受到的力和力矩, 它们可以从软件数值计算中得到, 并进一步从固定坐标系中转换过来; I_x 、 I_y 、 I_z 分别是浮体在随浮体运动坐标系中关于坐标轴的转动惯量, 他们可以通过式(2-19)求得:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_x = I_{xcg} + m(y_g^2 + z_g^2) \\ I_y = I_{ycg} + m(x_g^2 + z_g^2) \\ I_z = I_{zcg} + m(x_g^2 + y_g^2) \end{array} \right. \quad (2-19)$$

其中 I_{xcg} 、 I_{ycg} 和 I_{zcg} 是绕重心的主转动惯量分量, 这些值在利用 pro/E 建模时可以得到。

在 naoe-FOAM-SJTU 中, 可以通过计算本时刻的速度值, 利用(2-18)式求得本时刻的加速度值, 进而求得下一时刻的速度值, 以此类推。而初始时刻的速度值和边界值由初始条件和边界条件给出。因此在 naoe-FOAM-SJTU 中, 只要知道初始条件和每个时刻的受力情况, 即可得到浮式结构物的六自由度运动结果, 而浮式结构物的受力中未知项主要是系泊系统的作用力, 其作用力可以通过 2.5 节求得。

2.5 浮式结构物系泊系统计算理论

本论文对南海浮式码头的计算基于分段外推法理论 (Piecewise Extrapolating Method, 简称 PEM 理论)。分段外推法基于递推思想, 该理论考虑锁链的拉伸以及流场力的作用, 并通过数值方法求解锁链元的平衡方程。分段外推法首先对链索进行分段, 通过对其中一段求解该段端点位置和张力的表达式, 再将结果应用到下一段的求解当中, 直到得到链索端点的位置与张力的表达式, 通过一定的初始条件便能解出这些表达式^[9]。

分段外推法在全局固定坐标系以外建立锚链所在平面的局部坐标系, 并保证 z 轴方向一致。在计算过程中, 分段外推法利用微分思想将链索分为多段单元, 不妨计为 n , 并将它们依次编号为 1、2、3…… i 、 $i+1$ 、……、 n , 我们选取其中一段来讨论, 如图 2-1 所示。

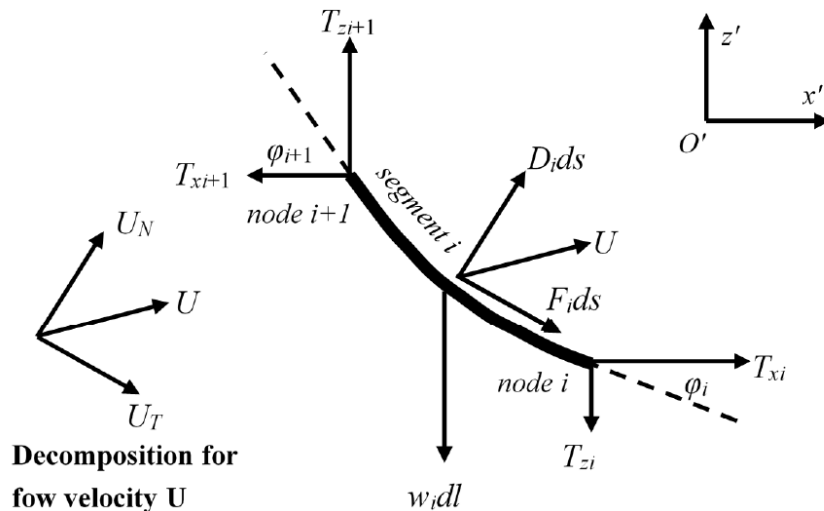


图 2-1 分段外推法系泊链索单元受力分析示意图

其中， T_x 、 T_y 和 φ 分别表示各节点处张力的水平分量、垂直分量和与水平分量的夹角； dl 和 ds 分表示链索单元拉伸前后的长度， w 为链索在水中的单位长度重量， D 和 F 分别为链索单元受流场作用力的法向和切向分量， U 为链索单元附近的速度流场矢量， U_N 和 U_T 分别是流场速度矢量在法向和切向的分量。 D_i 和 F_i 分别为链索单元所受锚链力的法向和切向分量。根据上图建立链索单元在水平与竖直方向的静力平衡方程式如下：

$$\begin{cases} T_{xi+1} = T_{xi} + F_i ds \cos \varphi_{i+1} + D_i ds \sin \varphi_{i+1} \\ T_{zi+1} + D_i ds \cos \varphi_{i+1} = T_{zi} + F_i ds \sin \varphi_{i+1} + w_i dl \end{cases} \quad (2-20)$$

其中， D_i 和 F_i 可以由莫里森(Morison)公式计算得到：

$$\begin{cases} D_i = \frac{1}{2} \rho C_{DN} D |U_N| U_N \\ F_i = \frac{1}{2} \rho C_{DT} (\pi D) |U_T| U_T \end{cases} \quad (2-21)$$

其中， C_{DN} 和 C_{DT} 分别是链索的法向和切向阻力系数， D 为锁链直径，在软件计算时这些参数可以从 3.3 节得到。 U_N 和 U_T 可以从本时刻软件中模拟得到的流场信息中获得。

通过分析图中几何关系，结合式(2-20)，可以得到：

$$\begin{cases} T_{xi} = T_{xi+1} - F_i \Delta x' - D_i \Delta z' \\ T_{zi} = T_{zi+1} - F_i \Delta z' + D_i \Delta x' - w_i dl \end{cases} \quad (2-22)$$

另外，式(2-19)中的 ds 可以从链索张力和拉伸变形之间的关系得到：

$$ds = dl \left(1 + \frac{T_{i+1}}{EA} \right) \quad (2-23)$$

通过联解(2-20)到(2-23)各式，并结合边界条件和初始条件，就能够求得系泊链索任意时刻的形状和张力。

在 naoe-FOAM-SJTU 中，有专门的系泊系统的求解模块 naoe-FOAM-ms，本次论文用到的相关参数如表 2-3 所示。

表 2-3 系泊模块需要设置的参数

参数	意义
lineArrangement	系泊链索布置角度，逆时针方向为正
rhoM	水中重量密度
depth	水深

续表 2-3

参数	意义
sections	限定词，表示包含链索所有的部分
diameter	该部分链索截面直径
YoungsModulus	该部分链索杨氏模量
CDT	链索切向阻力系数
CDN	链索法向阻力系数
bgMeshDict	限定词，用于定义背景网格

2.6 计算总流程

naoe-FOAM-SJTU 求解器通过初始边界条件和作用力，可以如 2.5 节所述用分段外推法用数值方法求得本时刻的系泊系统作用力和锚链形态（位置和形状），进而可以求得本时刻浮式结构物的受力情况，再根据本时刻浮式结构物的受力情况和周围的流场运动情况（可以由初始条件递推而来），如 2.4 节所述求得本时刻平台的运动速度和加速度，进而求得平台下一时刻的位置和锚链边界调节，然后又重复 2.5 节的过程，依次类推，便可以通过初始条件和边界条件求得每一时刻平台的运动响应和锚链的受力情况，如图 2-2 所示。

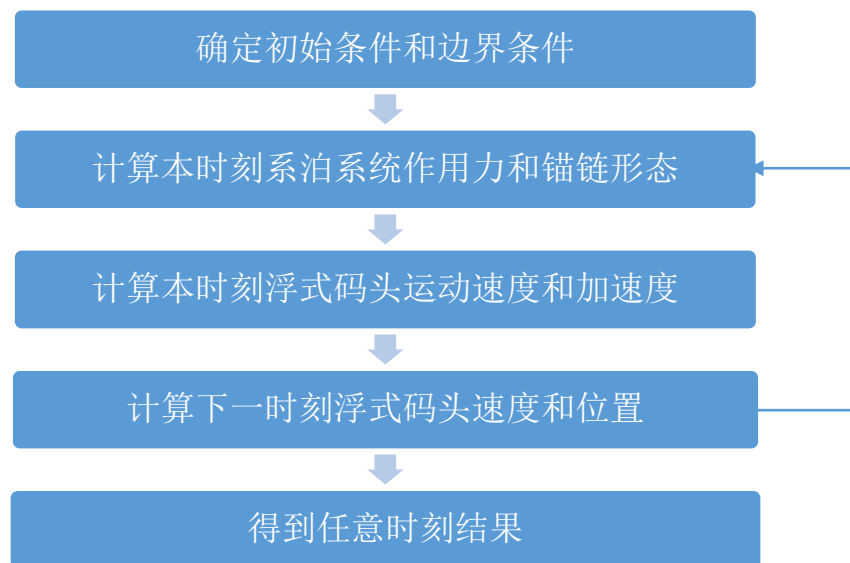


图 2-2 计算流程图

第三章 南海三沙某浮式码头及其模型介绍

3.1 南海三沙某浮式码头简介

本论文所研究的南海三沙某浮式码头的码头参数如下表 3-1 至表 3-3 所示，其中平台长度方向为南北，横向为东西。工作时所面对的工况有拖行工况、作业工况和自存工况三种，具体工况参数如下表 3-4 所示。我在计算时，选取较危险的台风（自存）工况作为研究工况。

表 3-1 码头总体尺度表

码头总体尺度	参数
总长	50 米
总宽	20 米
高度（基线至箱型甲板底）	9 米
高度（基线至箱型甲板顶）	12 米

表 3-2 下浮体尺度表

下浮体尺度	参数
长度	20 米
宽度	10 米
高度	3.5 米
浮体中心横向间距	20 米

表 3-3 立柱尺度表

立柱尺度	参数
水平截面	4.5×10 米
立柱中心纵向间距	9.5 米
立柱中心横向间距	20 米

表 3-4 工作工况表

吃水	参数
拖行吃水	3.2 米
作业吃水	5.0 米
自存吃水	5.0 米

该浮式码头甲板上布置有生活区和四个货物堆场，生活区用于平台上工作人员的起居生活，而货物堆场用于临时储存货物。

在箱型甲板内部布置有才有柴油舱、发电机舱、配电盘室、变压器室、雨水收集室、造水机室、污油水舱、冷库、污水处理间和中控室。

在各立柱内主要布置螺旋梯和空舱。

在下浮体中，布置有压载舱、淡水舱、泵舱和燃油舱。

3.2 模型介绍

本论文对浮式码头的建模采用 pro/E 三维建模软件，建立的模型与浮式码头尺寸比例为 1:1。建模坐标中心取在浮式码头在自由水面的几何中心，并取迎浪情况下的来浪方向为 x 轴正方向，垂直水面向上为 z 轴正方，并由右手坐标系定则取得 y 轴正方向，如图 3-1 所示。平台的三维建模结果如图 3-2 所示。模型的物理参数如下表 3-5 所示。

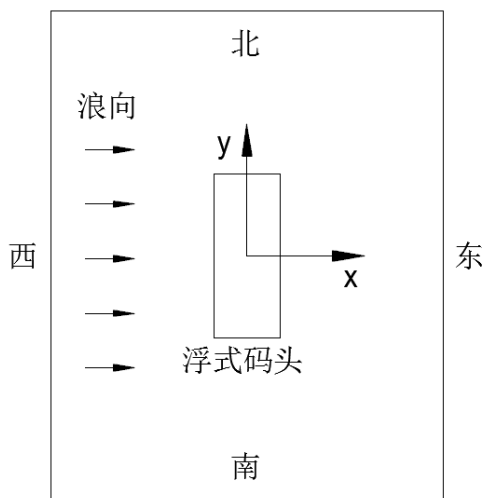


图 3-1 坐标方向及浪向示意图

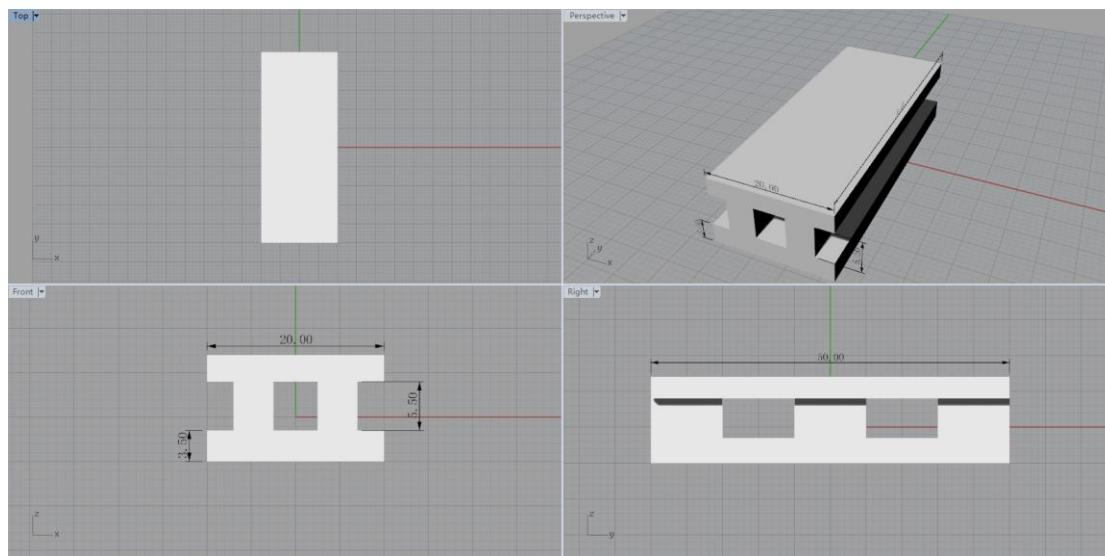


图 3-2 码头三维建模结果

表 3-5 浮式码头模型物理参数表

主要参数	单位	数值
质量	kg	2.2586E+06
中心位于水面以上高度	m	1.7511
横摇转动惯量	kg·m ²	5.9485E+09
纵摇转动惯量	kg·m ²	1.1298E+09
艏摇转动惯量	kg·m ²	6.2319E+09

3.3 系泊系统介绍

根据资料我们设定码头的系泊情况如下图 3-3。图中，锚链按逆时针顺序被依次编号#1、#2、#3、#4、#5、#6、#7、#8，锚链的角度和方向依图中所示。

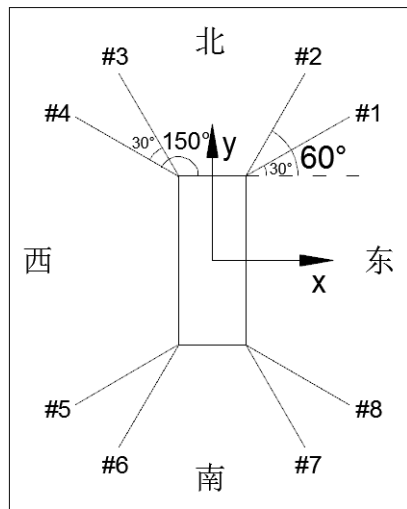


图 3-3 系泊锚链方向示意图

在系泊材料方面，本文会研究到两种不同材料系泊下浮式码头的响应，锚链材料的选取是依据前人一些研究论文中选择的。我将从 *Comparative study on mooring line dynamic loading*^[10]中选出的链索材料命名为“材料 1”，在本文后面的部分，我将多次用到这个称呼，并将材料 1 作为本文研究的主要材料。另外，从上海交大史琪琪的论文《深水锚泊半潜式钻井平台运动及动力特性研究》^[5]中，我选取了其中的 R4S 材料参数锚链材料对比研究中的对比材料。两种材料的参数如下表 3-6 所示。由于在本文中我们将对多种工况进行对比，我控制变量按码头本身重量的一定比例选定锚链初始垂向预张力，根据经验，取为 317.6KN。

表 3-6 锚链材料参数表

锚链材料	材料 1	R4S
长度	300m	300m
直径	0.14m	0.084m
杨氏模量	1.10E+11	4.48E+11
水中重量密度	326.4kg/m	133.86kg/m
CDT	0.6	0.05
CDN	3.2	1.2

3.4 背景网格建立

本论文对模型背景网格的建立采用 Pointwise 软件，结果如图 3-4 所示，其中每个边界的均赋予了定义。在建立网格时，我对模型所处的位置和水面进行了网格的初步加密，网格的进一步加密将通过 OpenFOAM 软件中的 snappyHexMesh 工具进行。。

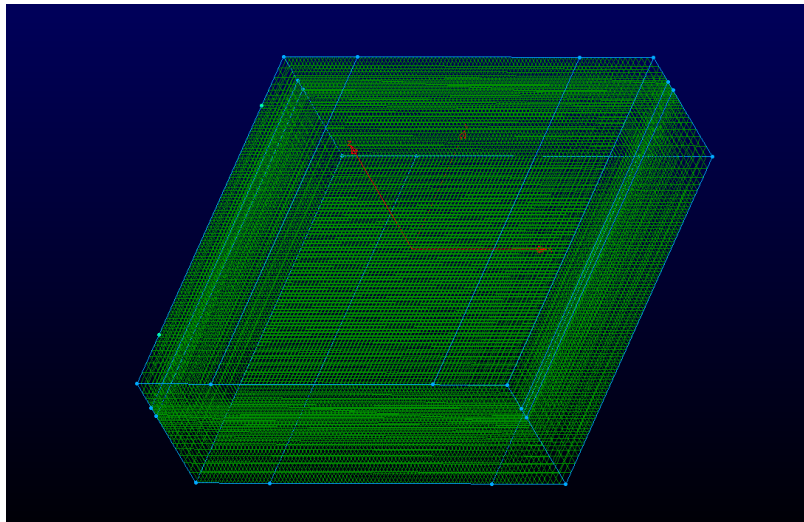


图 3-4 背景网格

将模型镶嵌入背景网格后,我们即可得到完成前处理工作的待计算的模型如下图 3-5 所示,图中蓝色部分为水面,黑色线条为锚链,计算域视图被隐藏。

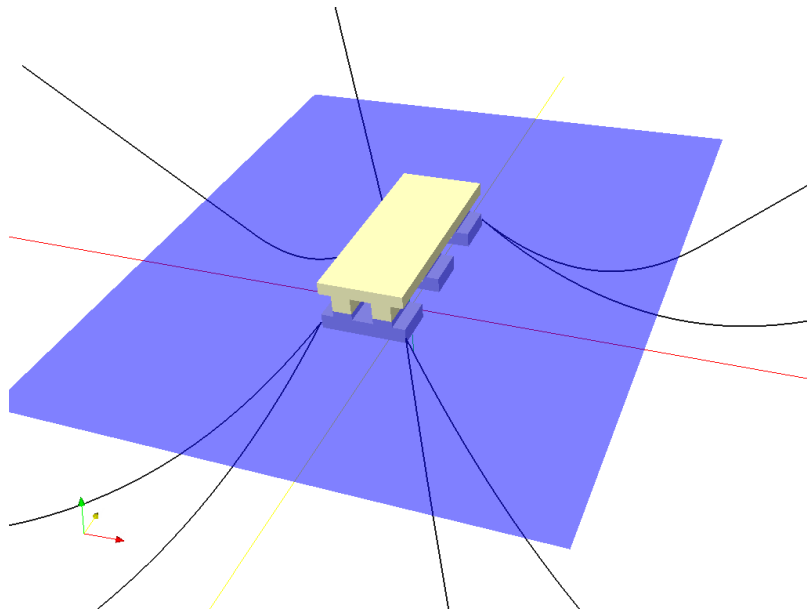


图 3-5 计算模型

3.5 波浪模拟

本论文研究的南海三沙码头所在海域的浪高条件已经由官方资料给出,为 3m/s ,但资料中并没有给出波浪的周期数据,根据中国南海台风网及相关资料得知南海台风普遍集中在 8、9 月份(即夏季),再根据《中国近海及临近海域海浪的季节特征及其时间变化》^[11],指出南海夏季谱峰周期为 6s 左右。本文中我们取波浪周期为 5s 和 6s 的情况作分析研究,研究结果将在第四章中得以展示。

如第二章中 2.2 节所述,我们在数值水池中所造的波浪依据是建立在微幅波理论基础上的,它可以被认为是线性波。在一定的水深下,前进的波浪将因为不同波长(频率)的水波以不同的速度传播,从而导致波浪分散的现象,这在波浪理论中称为色散关系或频散关系,表示为:

$$\omega^2 = kg \tanh(kh) = \frac{2\pi g}{\lambda} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (3-1)$$

或用波长表示为:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh) \quad (3-2)$$

其中: $\tanh(kh)$ 是浅水修正项。

在无限水深下, 即 $h \rightarrow \infty$ 时, 有 $\tanh(kh) \rightarrow 1$, 浅水修正项不用考虑。对应的圆频率公式由下式给出:

$$\omega^2 = kg = \frac{2\pi g}{\lambda} \quad (3-3)$$

波长公式由下式给出:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (3-4)$$

事实上, 在实际应用中, 若水深与波长之比 $h/\lambda \geq 1/2$ 时就认为符合深水波特征, 而本文研究的 $T=5s$ 和 $T=6s$ 的波浪经估算符合深水波特征。故由式(3-4)给出对应的波浪参数如下表 3-7 所示。

表 3-7 入射波浪参数表

入射波周期	波长	波速
5s	39.0327m	7.8065m/s
6s	56.2056m	9.3677m/s

3.6 消波区设置

正如第二章 2.3 节所述, 在使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器计算时, 波浪在计算域的出口边界处会产生反射现象。反射回来的波浪会干扰正常造波形成的波浪, 从而使数值模拟的结果不精确。在处理浮式码头迎浪问题时, 我在波浪出口段设置了一个长为 30m, 宽为 150m 的消波区, 如下图 3-6 所示。在第六章计算斜浪问题时, 消波区的处理会有所改变, 见 6.1 节。

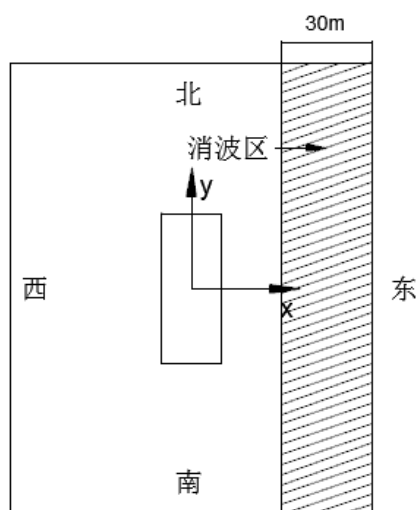


图 3-6 消波区设置示意图

3.7 本章小结

本章介绍了南海三沙某浮式码头的基本情况,并将模型建立和网格划分较为详细地进行了阐述。其中 3.5 节对波浪模拟的信息将运用到第四章中作不同入射波浪周期对码头响应及锚链力影响的研究;3.3 节对系泊材料的信息将运用到第五章中作不同系泊锚链材料对码头响应及锚链力影响的研究。在第六章讨论 45 度斜浪作用下平台的响应及锚链张力变化时,将会对 3.4 节的网格划分和 3.6 节的消波区设置有所改变。

第四章 码头迎浪工况时不同周期入射波浪下响应的数值模拟与分析比较

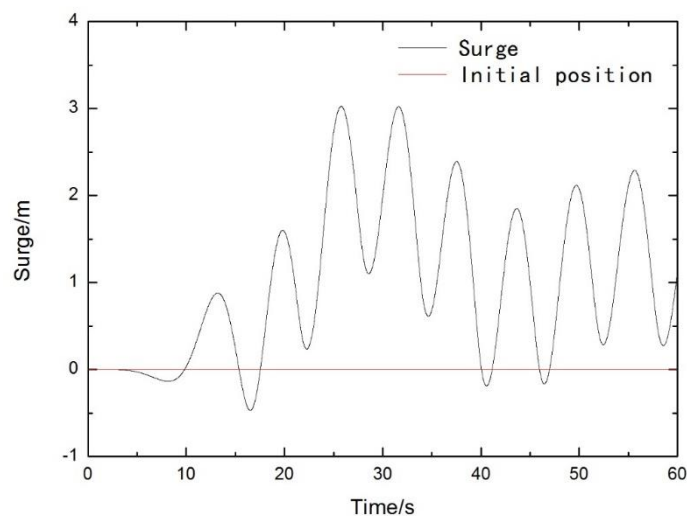
码头在迎浪工况时，由于受到外界干扰力的作用，码头将产生相应的运动响应，与此同时，浮式码头系泊锚链中的系泊张力也会产生变化。由于系泊系统本身和环境工况的对称性，码头在横荡、横摇和艏摇三个维度上运动幅度很小，主要在纵荡、纵摇和垂荡三个维度上产生运动，因此我在计算迎浪工况时将横荡、横摇和艏摇三个维度固定起来，主要考虑码头的纵荡、纵摇和垂荡响应。

平台迎浪情况下模型的处理见第三章。本章前两节分别对入射波浪周期为 5s 和 6s 时码头的数值计算结果进行了整理和分析，在第三节中将会对它们作较为详细的比较。

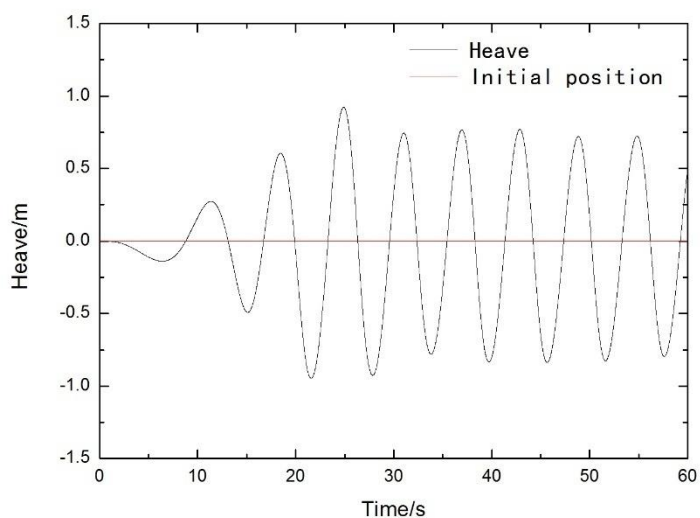
4.1 入射波浪周期为 6s 时码头数值模拟结果

4.1.1 入射波浪周期为 6s 时码头运动响应结果

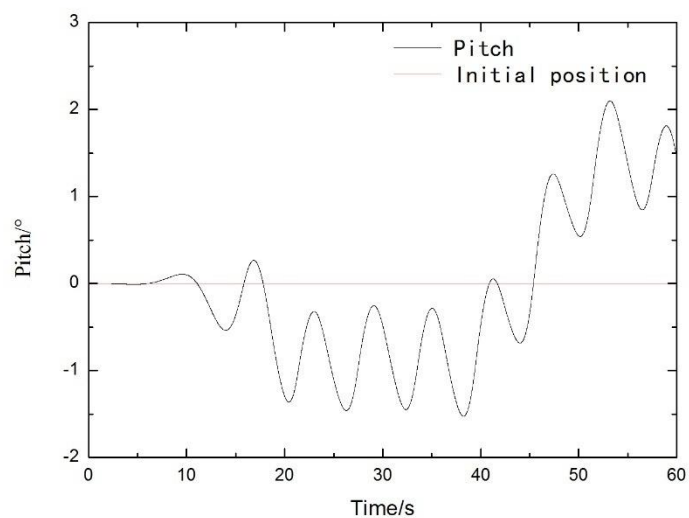
图 4-1 所示是系泊系统在入射波浪周期为 6s，系泊材料为材料 1 时，码头在波浪上的运动响应情况，其中图 a) 是纵荡运动、图 b) 是垂荡运动、图 c) 是纵摇运动。



a) 纵荡运动曲线



b) 垂荡运动曲线



c) 纵摇运动曲线

图 4-1 入射波浪周期 6s 时码头运动响应图

从图 4-1 中可以看出，码头在三个主要自由度上的响应不尽相同，具体分析如下：

- (1) 所有维度上的响应在刚开始都比较弱小，这是由于软件在 inlet 面模拟制造波浪，而波浪要经过一小段时间才能传递到码头上。在波浪刚好传递到码头时，码头受到波浪干扰力和锚链系泊力的作用，开始在各个自由度上产生运动。
- (2) 对于纵荡运动而言，码头在这个方向的运动基本保持在 0m 到 2m 之间，随波浪的周期震荡变化，码头整体运动中心随波浪运动方向有较大飘移。
- (3) 对于垂荡运动而言，码头在这个方向的运动基本保持在 -0.8m 到 0.8m 之间，随波浪的周期震荡变化，变化趋势较纵荡稳定。码头的运动中心基本保持在初始的垂向位置上。
- (4) 对于纵摇运动而言，码头在这个方向的运动变化幅度比较大，随波浪周期震荡变化。其纵摇的幅度基本上保持在 -2°到 2°之内。

4.1.2 入射波浪周期为 6s 时锚链张力的变化情况

图 4-2 所示是码头在入射波浪周期为 6s，系泊材料为材料 1 时，系泊系统锚链张力的变化情况。由于对称性，图中只列举了 1、2、3 和 4 号锚链的张力变化情况，其它 4 根锚链的情况可以通过它们得到反映。锚链的编号顺序见图 3-3 所示。在动态模拟中，我还观察到了波浪对码头下甲板的抨击现象，如图 4-3 所示。整个过程中，并没有出现甲板上浪现象。

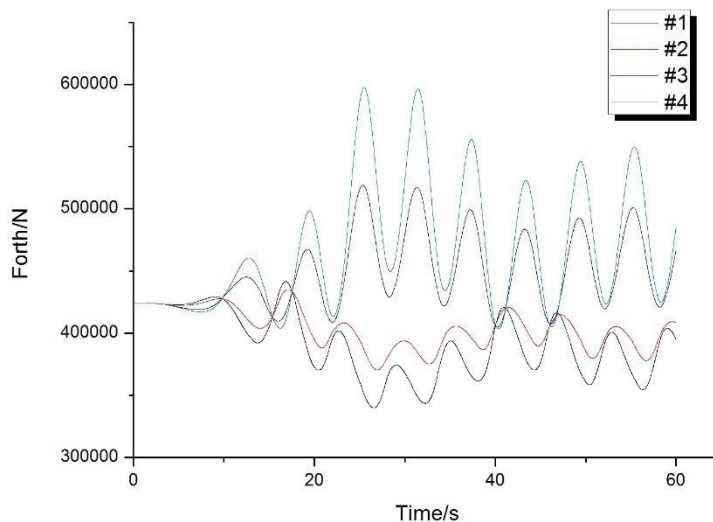


图 4-2 入射波浪周期 6s 时锚链#1、#2、#3、#4 受力图

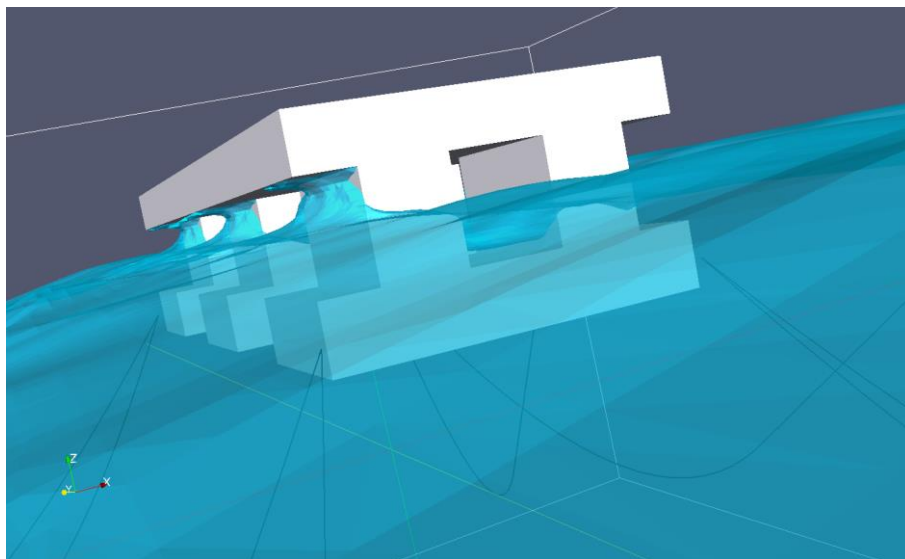


图 4-3 下甲板抨击示意图

从图 4-2 中我们可以看出，锚链的初始预张力在 420KN 附近，四根锚链的受力随波浪周期作震荡变化，且变化幅度较大。#3、#4 锚链受力基本大于初始预张力，而#1、#2 锚链受力基本小于预张力。#4 锚链受到的张力最大，最大可以达到 600KN。

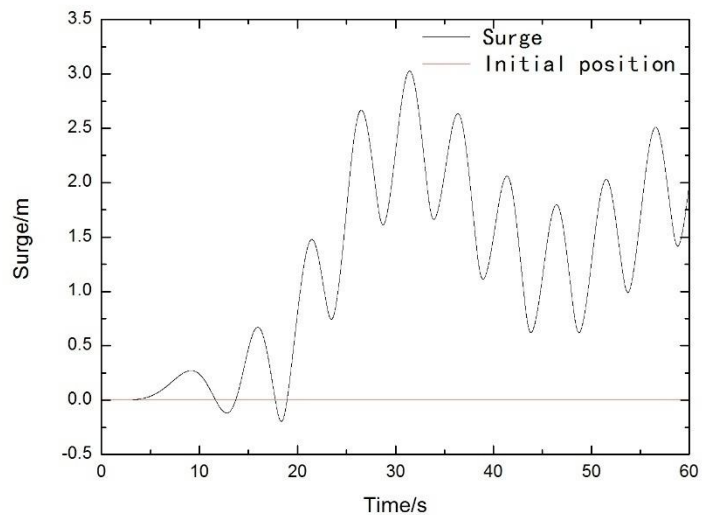
产生上述结果的原因主要可以结合码头的运动给予解释。我们通过比较图 4-1 (a)和图 4-2 可以发现，锚链的受力情况与码头的纵荡运动息息相关，码头整体在纵荡方向随着波浪方向有所飘移，使得#3 和#4 相对于初始状态拉伸效果更加明显，受力增加；而使得#1、#2 锚链相对于初始状态张力有所缓和，受力也相对减小。再结合图 3-3 可以看出，#1 和#4 锚链在 x 方向的分量更大，纵荡对他们的影响也更加明显，因此上述张力的增益和减少效果也

更加明显。

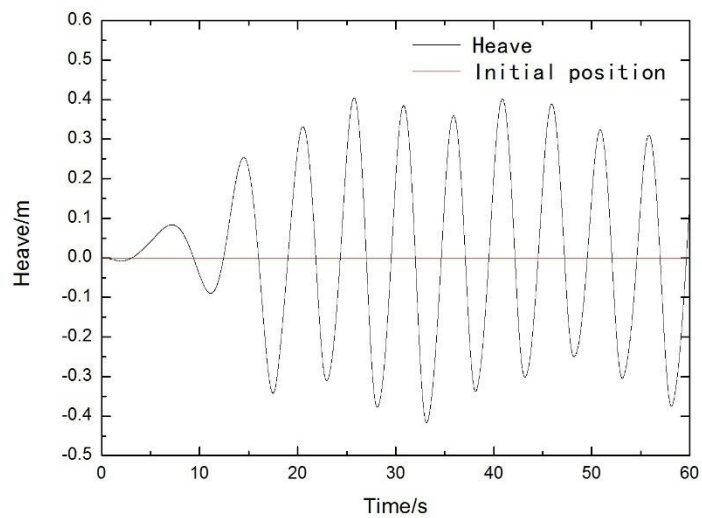
4.2 入射波浪周期为 5s 时码头数值模拟结果。

4.2.1 入射波浪周期为 5s 时码头运动响应结果

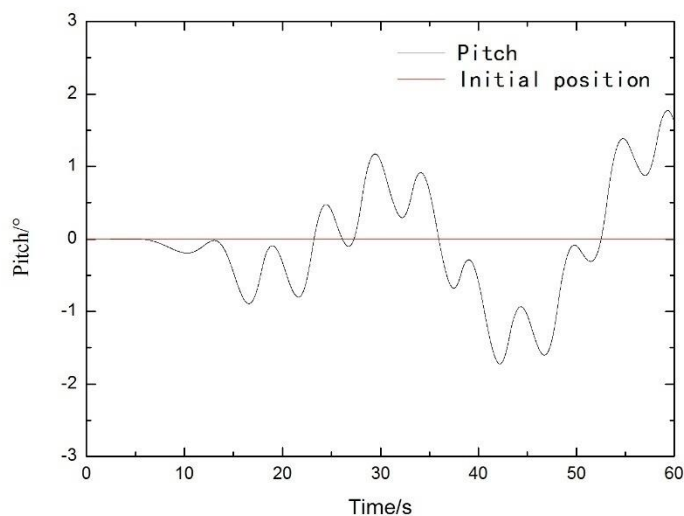
图 4-4 所示是系泊系统在入射波浪周期为 5s，系泊材料为材料 1 时，码头在波浪上的运动响应情况，其中图 a) 是纵荡运动、图 b) 是垂荡运动、图 c) 是纵摇运动。



a) 纵荡运动曲线



b) 垂荡运动曲线



c) 纵摇运动曲线

图 4-4 入射波浪周期 5s 时码头运动响应图

从图 4-4 中可以得到以下信息：

- (1) 刚开始码头运动响应并不明显，随着波浪将作用力传递到码头，使它从静止开始运动，码头开始产生明显的响应。
- (2) 各个自由度上的响应均随着入射波浪的周期作震荡变化。在纵荡维度上，码头整体随波浪方向有所飘移，在+x 方向 1m 到 2.5m 范围内运动。在垂荡维度上，码头基本保持在初始垂向位置附近运动，运动范围在-0.5m 到 0.5m 之间。在纵摇维度上，码头的纵摇角度基本保持在-2°到 2° 之间。

4.2.2 入射波浪周期为 5s 时锚链张力的变化情况

图 4-5 所示是码头在入射波浪周期为 5s，系泊材料为材料 1 时，系泊系统锚链张力的变化情况。同样由于对称性，图中只列举了 1、2、3 和 4 号锚链的张力变化情况，锚链的编号顺序见图 3-3 所示。在动态模拟中，我仍然观察到了波浪对码头下甲板的抨击现象。整个过程中，并没有出现甲板上浪现象。

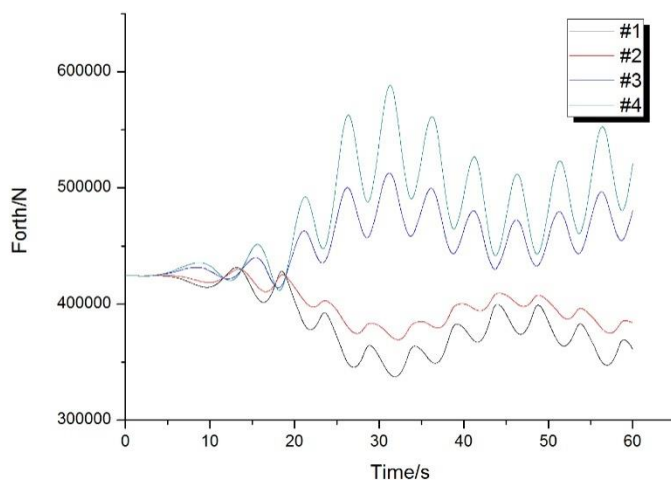


图 4-5 入射波浪周期 5s 时锚链#1、#2、#3、#4 受力图

从图 4-5 中我们可以看出，四根锚链的初始预张力在 420KN 附近，受力仍然随着波浪周期作震荡变化，且变化幅度较大。与入射波浪周期为 6s 时情况相似，#3、#4 锚链受力基本大于初始预张力，而#1、#2 锚链受力基本小于预张力。#4 锚链受到的力最大，最大可以接近 600KN。

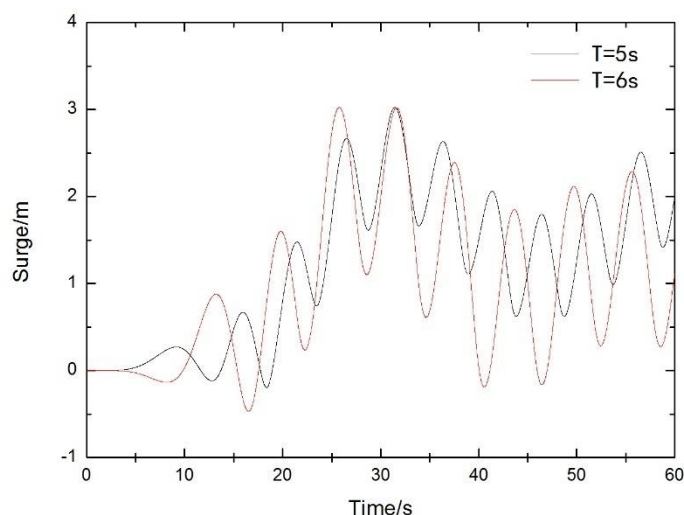
与上一节中的情况类似，产生上述结果的原因主要是受码头纵荡运动的影响。码头在纵荡方向随着波浪方向有所飘移，使得#3 和#4 相对于初始状态拉伸效果更加明显，而使得#1、#2 锚链相对于初始状态张力有所缓和。再结合图 3-3 可以看出，#1 和#4 锚链在 x 方向的分量更大，因此纵荡对他们的影响也更加明显。

在这两节中，我分别对入射波浪周期为 6s 和 5s 情况时码头的数值计算结果进行了分析，在下一节中，我会将它们作更加深入的比较。

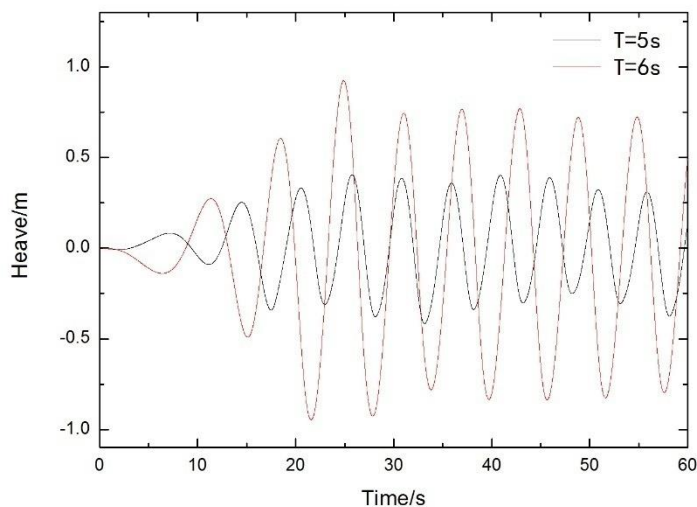
4.3 对比与小结

4.3.1 两种入射波浪周期下数值模拟结果的对比

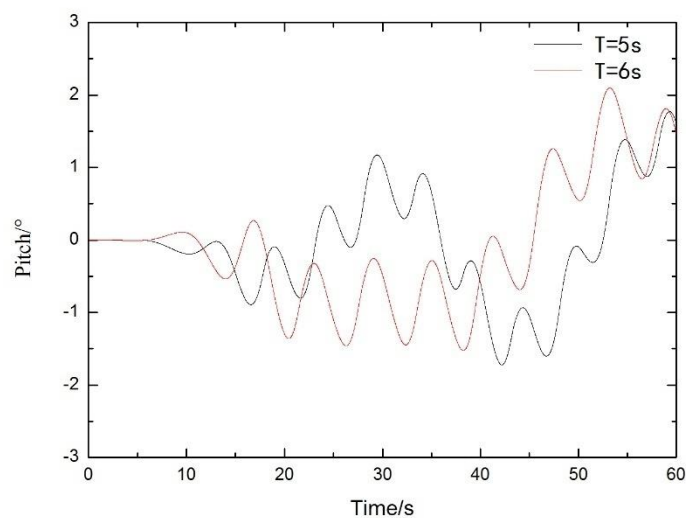
图 4-6 所示是浮式码头在迎浪工况下，系泊材料为材料 1，入射波浪周期分别为 5s 和 6s 时三个主要运动维度上运动响应的对比图。其中黑色线条代表入射波浪周期为 5s 时平台在该维度上的运动情况，红色线条表示入射波浪周期为 6s 时平台在该维度上的运动情况。



a) 纵荡比较图



b) 垂荡比较图



c) 纵摇比较图

图 4-6 不同周期入射波浪作用下码头运动响应比较图

根据图 4-6 中所示，结合图 4-2 和图 4-5，我们可以得到以下信息：

- (1) 在纵荡维度上，码头在两种工况下的运动特性相似，都整体顺着波浪方向有所漂移，并按照各自来浪周期做震荡运动。入射波浪周期为 6s 时平台纵荡的幅度大于入射波浪为 5s 时的响应幅度。
- (2) 在垂荡维度上，码头在两种工况下的运动特性仍然相似，都在初始垂向位置附近按照各自的来浪周期作震荡运动。入射波浪周期为 6s 时平台垂荡的幅度大于入射波浪周期为 5s 时的响应幅度。
- (3) 在纵摇维度上，码头在两种工况下的运动特性差异比较明显，但整体的趋势仍然是按照各自的来浪周期围绕一个震荡中心作震荡运动，而震荡中心在初始平衡位置附近波动。纵摇角度基本都在 -2° 到 2° 之间。
- (4) 在锚链受力上，锚链受力变化幅度和趋势相似，最大张力也相似。

从上面的信息我们可以看出，入射波浪周期的改变不会引起平台运动的本质变化，但在较大程度上引起纵荡和垂荡幅度的变化。我们可以从能量的角度来分析这种影响。

正如第二章中所叙述，我们制造的波浪属于深水微幅波，这种波满足波浪理论中的色散关系。我们根据深水情况下的色散关系公式：

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (4-1)$$

从上式可以看出，波长与周期的平方成正比。

再根据波浪能量理论，单位宽度一个波长内的波动总能量为：

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \lambda \quad (4-2)$$

从上式可以看出，单位宽度一个波长内的波动总能量与波高的平方成正比，与波长成正比。由于我们在计算中设定波长为 3m 不高，因此一个波长内波动总能量仅与波长成正比，即与周期的平方成正比。由于平台的纵荡和垂荡运动均按照来浪的周期作震荡运动，在每一单独的周期内，波浪波长越长，所具有的能量越多，传递给码头的能量也越多，码头在这个周期内的运动幅度也相对较大，这就解释了入射波浪周期为 6s 时码头纵荡和垂荡较入射波浪周期为 5s 时大的现象。

4.3.2 本章小结

本章分析比较了迎浪情况下，不同来浪周期相同来浪波高时，浮式码头响应的变化情况。根据分析可以看出，不同的来浪周期对码头响应的影响主要体现在对纵荡和垂荡幅度的影响上，且来浪周期越大，码头纵荡和垂荡的幅度越大。

从实用角度上来讲，该南海三沙浮式码头在台风工况下，受到不同周期来浪的激励会产生不同的响应。在它的工作海域中，此浮式码头以及其上面的设备和器材必须能够克服来浪周期为 6s 时的危险工况。浮式码头的响应时历图和锚链受力时历图已在本章给出，可以为码头的布置和改进提高参考。

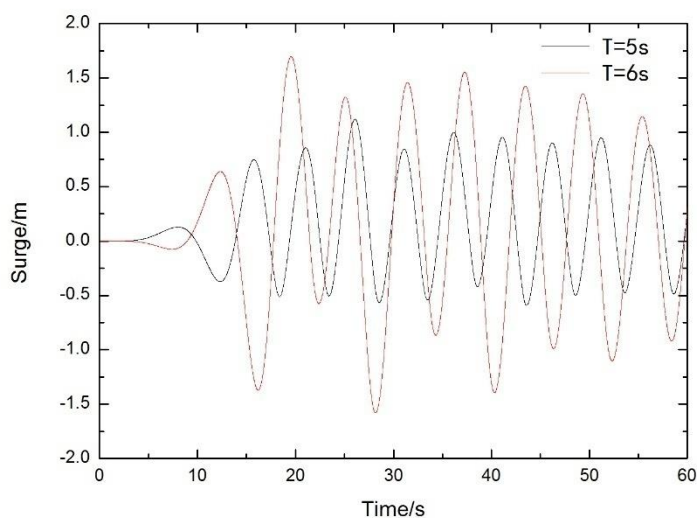
第五章 码头迎浪工况时不同系泊锚链材料下响应的数值模拟与分析比较

平台迎浪情况下模型的处理见第三章。同上一章中一样，在本章处理迎浪工况下的码头运动响应时，将横荡、横摇和艏摇三个微幅运动的自由度固定，主要讨论码头的纵荡、纵摇和垂荡响应。在之前的内容中，我们已经探讨了对于波高为 3m 的入射波浪，保持其波高不变而改变入射波浪周期对系泊系统的影响，本章主要探讨入射波浪波高和周期条件固定时，改变系泊系统的材料对码头运动响应的影响。另外，本章还简要的探讨了在另一种材料 R4S 材料下，波浪周期不同对码头的影响，为第四章的结论作一个例证。R4S 材料的参数见第三章表 3-6 所示。

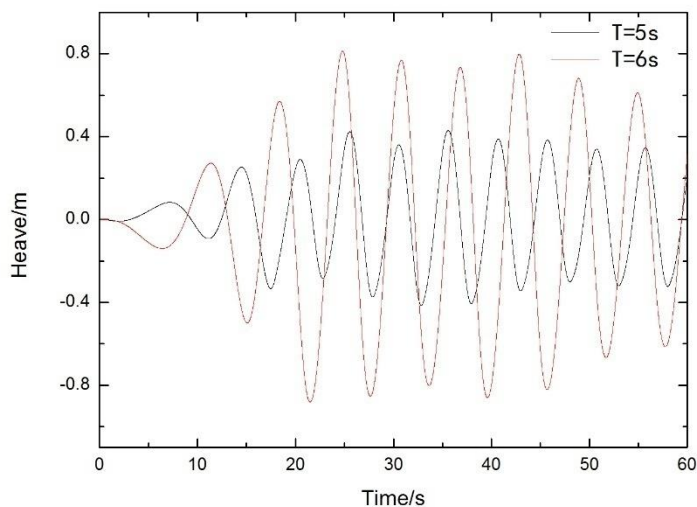
5.1 用 R4S 材料的锚链系泊时码头的响应计算结果

5.1.1 用 R4S 材料的锚链系泊时码头的运动响应结果

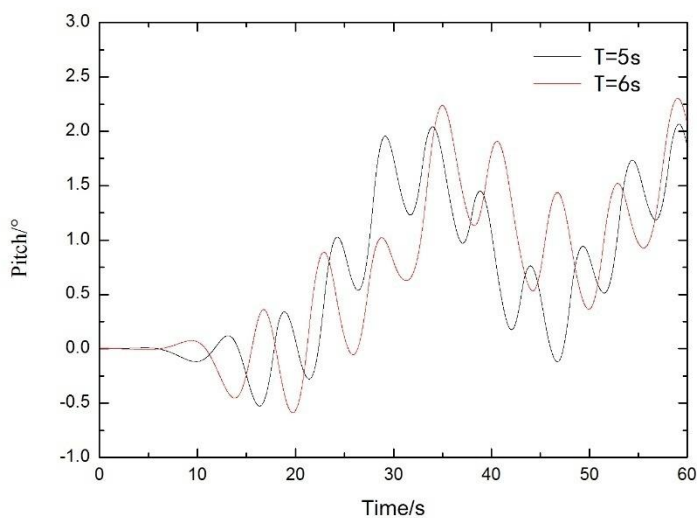
图 5-1 所示是系泊系统系泊材料为 R4S 材料，在入射波浪周期为 5s 和 6s 时，码头在波浪上的响应，其中图 a) 是纵荡运动、图 b) 是垂荡运动、图 c) 是纵摇运动。



a) 纵荡运动曲线



b) 垂荡运动曲线



c) 纵摇运动曲线

图 5-1 用 R4S 材料锚链系泊时码头的运动响应结果

从图 5-1 中我们可以得到以下几点信息：

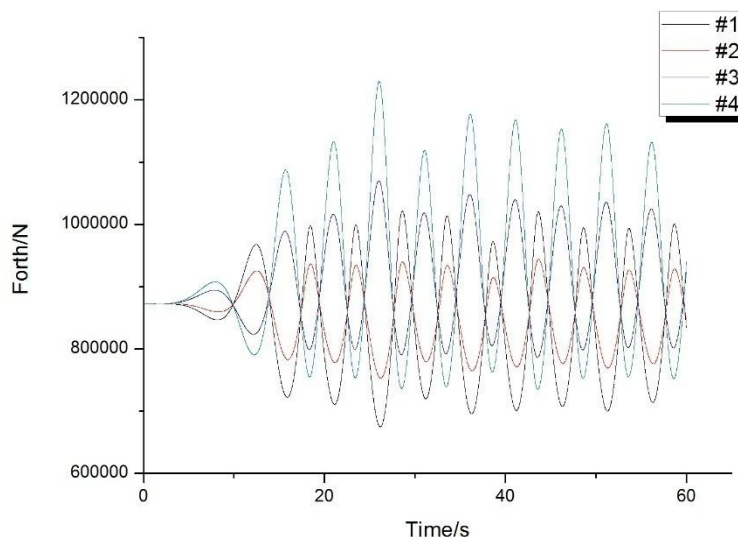
- (1) 对入射波浪周期为 5s 波浪而言。在纵荡运动维度上，码头的运动整体顺着波浪运动的方向有一定漂移，但幅度很小，它的纵荡幅度基本保持在-0.5m 到 1m 之间，按照入射波浪的频率围绕震荡中心作震荡运动，震荡中心在 0.25m 左右。在垂荡维度上，码头基本保持在垂向初始位置附近震荡运动，垂荡幅度在-0.5m 到 0.5m 之间。在纵摇维度上，码头基本保持在偏向顺时针的角度纵摇，纵摇幅度在-0.5° 到 2.5° 附近。
- (2) 对入射波浪周期为 6s 波浪而言。在纵荡运动维度上，与 1 中相似地，码头的运动整体顺着波浪运动的方向有一定漂移，它的纵荡幅度在-1m 到 1.5m 之间，按照入射波浪的频率作震荡运动。在垂荡维度上，码头仍基本保持在垂向初始位置附近震荡运动，垂荡幅度在-0.7m 到 0.7m 之间。在纵摇维度上，码头基本保持在偏向顺时

针的角度纵摇，纵摇幅度也在 -0.5° 到 2.5° 附近。

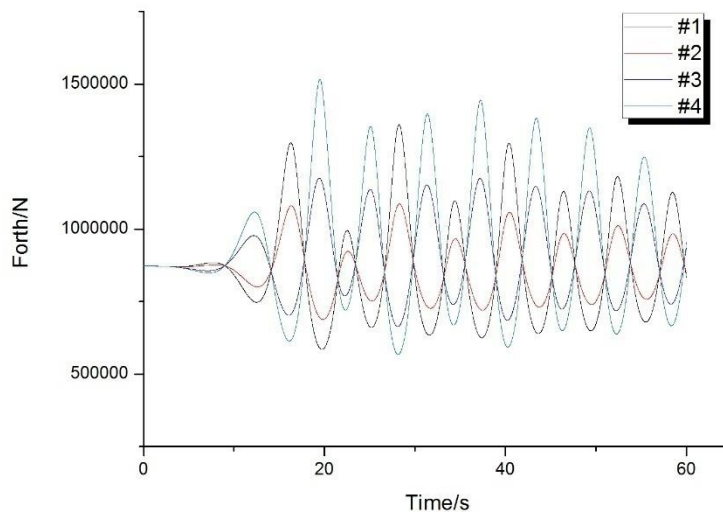
- (3) 第三章中得到的结论在这些图中同样得以体现。即在 R4S 系泊锚链下，入射波浪周期的改变并没有对码头的运动响应产生本质影响，主要是在一定程度上改变了纵荡和垂荡的幅度。这些信息对第三章得到的结论给予了一定的印证。

5.1.2 用 R4S 材料的锚链系泊时锚链张力变化情况

图 5-2 所示是系泊系统系泊材料为 R4S 材料，在入射波浪周期为 5s 和 6s 时，锚链张力的变化情况，其中图 a) 是入射波浪周期为 5s 的情况，图 b) 是入射波浪周期为 6s 的情况。



a) 入射波浪周期 5s 时锚链作用力



b) 入射波浪周期 6s 时锚链作用力

图 5-2 用 R4S 材料锚链系泊时锚链作用力变化图

从图 5-2 中，我们可以得到以下信息：

- (1) 对入射波浪周期为 5s 工况而言。码头锚链的初始预张力在 800kN 附近，#4 锚链所受的张力最大且可以达到 1100kN。码头锚链张力按 5s 周期做震荡变化，在运动过程中，每一根锚链的受力均有可能大于和小于初始预张力。

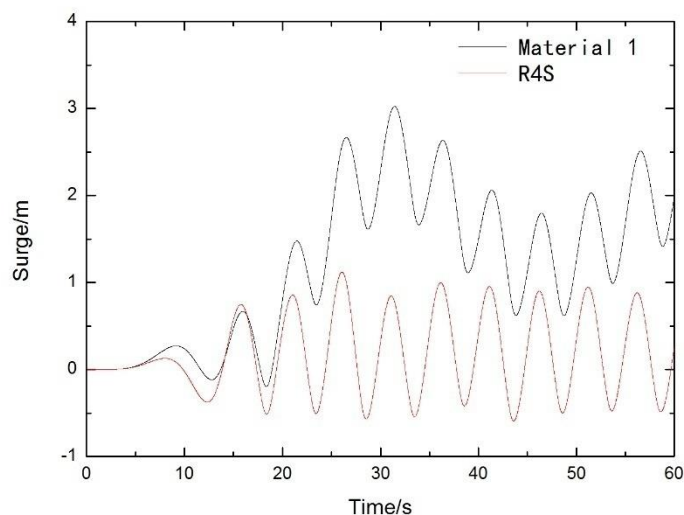
- (2) 对入射波浪周期为 6s 工况而言。码头锚链的初始预张力在 800KN 附近，#4 锚链所受的张力最大且可以达到 1250KN。码头锚链张力按 6s 周期做震荡变化，在运动过程中，每一根锚链的受力均有可能大于和小于初始预张力。

比较上面信息，我们可以发现，不同波浪周期对锚链受力的影响仍然体现在锚链受力幅度的改变上，且波浪周期越大锚链张力越大，这与第四章的结论相同。同第四章中 4.1 节，我们发现锚链的受力情况仍然可以从纵荡的角度来考虑，从图 5-2 中我们看出，四根锚链在纵荡幅度上相对初始长度有着拉伸和缩短，对应地，四根锚链的受力相对初始预张力有增加和减少。由于#1 和#4 锚链在 x 方向分量最大，因此它们所受影响也越大，变化幅度更大。

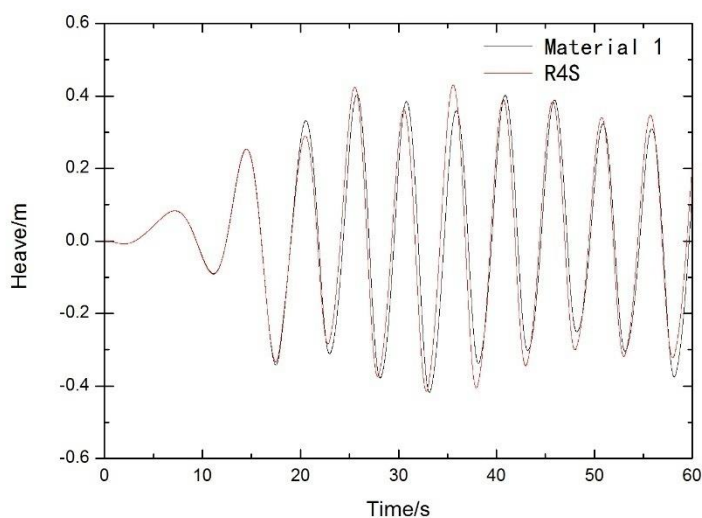
5.2 用材料 1 与 R4S 材料系泊时码头响应及锚链张力的比较

5.2.1 入射波浪周期 5s 情况下两种材料响应及锚链张力比较

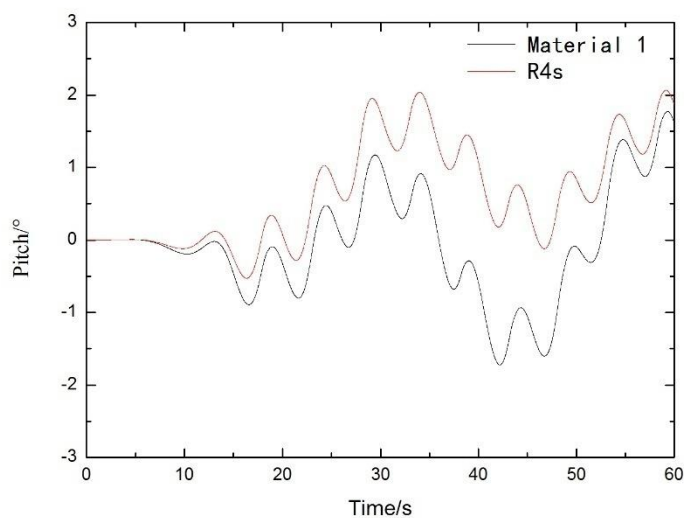
从运动响应的角度上看，图 5-3 所示是系泊系统系泊材料分别为材料 1 和 R4S 材料，在入射波浪周期为 5s 时，码头在波浪上的运动响应对比，其中图 a) 是纵荡运动、图 b) 是垂荡运动、图 c) 是纵摇运动。



a) 纵荡运动曲线



b) 垂荡运动曲线



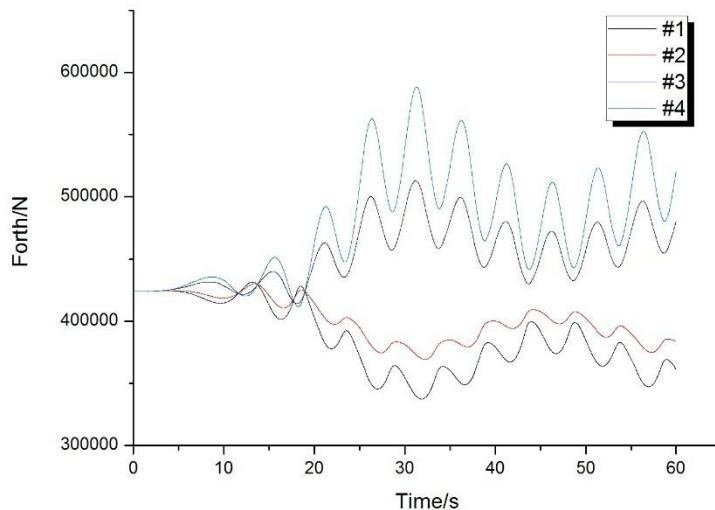
c) 纵摇运动曲线

图 5-3 入射波浪周期 5s 时不同材料锚链作用下运动响应对比图

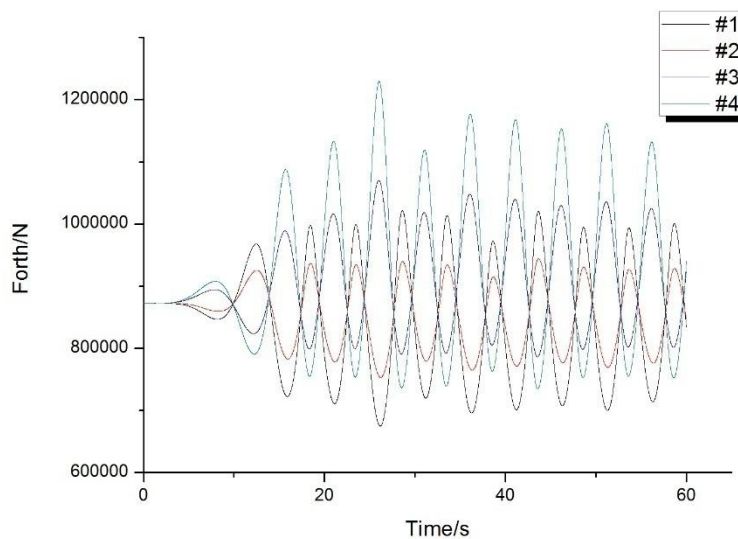
从图 5-3 中我们可以看出：

- (1) 在纵荡运动方面，材料 1 锚链系泊时码头运动中心较 R4S 锚链系泊时有明显的随浪方向的漂移，即材料 1 锚链系泊时码头基本上在 x 轴正值的位置运动，而 R4S 锚链系泊时码头在初始位置附近运动。从纵荡幅度上而言，材料 1 锚链系泊时码头在 x 方向的运动在 0.5m 到 2.5m 之间，而用 R4S 材料系泊时码头的运动在 -1m 到 1m 之间，两者的运动幅度相近。
- (2) 在垂荡运动方面，用两种材料分别系泊码头时码头的垂荡运动差异并不明显，都保持在 -0.5m 到 0.5m 的范围内运动，系泊材料的不同对码头的垂荡运动几乎没有影响。
- (3) 在纵摇运动方面，材料 1 锚链系泊时码头会在顺时针和逆时针倾斜方向发生纵摇运动。而用 R4S 锚链系泊时码头基本只会在顺时针倾斜方向作纵摇运动，且运动幅度略大于用材料 1 锚链系泊时的情况。

从锚链张力变化的角度来看,图 5-4 所示是系泊系统系泊材料分别为材料 1 和 R4S 材料,在入射波浪周期为 5s 时,锚链张力变化的对比,其中图 a) 是材料 1 锚链作用下四根锚链的张力曲线、图 b) 是 R4S 材料锚链作用下四根锚链的张力曲线。



a) 材料 1 锚链张力曲线



b) R4S 材料锚链张力曲线

图 5-4 入射波浪周期 5s 时不同材料锚链作用下张力曲线对比图

从图 5-4 中我们可以看出:

- (1) 相同点: 所有锚链受力均按入射波浪周期 5s 作震荡变化。锚链#4 受力最大, 且锚链#4 和锚链#1 受力变化最大。这些变化特性在第 4.1 节中已经从纵荡分析的角度予以解释。
- (2) 不同点: 用材料 1 锚链系泊时锚链的初始预张力为 400KN 左右, 远远小于用 R4S 材料锚链系泊时的 820KN。材料 1 锚链系泊时#3、#4 锚链受力基本大于初始预张力且#1、#2 锚链受力基本小于初始预张力, 而用 R4S 材料系泊时 4 根锚链的受力均较初始预张力有交替的增加或减少。最后一个比较重要的不同点就是用 R4S 材料锚链

系泊时所有锚链的张力均远大于用材料 1 锚链系泊时的锚链张力。

综合分析上面的信息，我们发现，两种材料下动力特性的不同点都可以从下面这一个观点来解释。事实上，从 3.3 节的表 3-6 中我们可以看出，材料 1 锚链水中重量密度 326.4kg/m 明显大于 R4S 的水中重量密度 133.86kg/m 。这导致分别用 2 材料系泊时锚链在水下的形态有所不同，如图 5-5 所示。其中左图是材料 1 系泊时的系泊形态，右图是 R4S 材料系泊时的系泊形态。

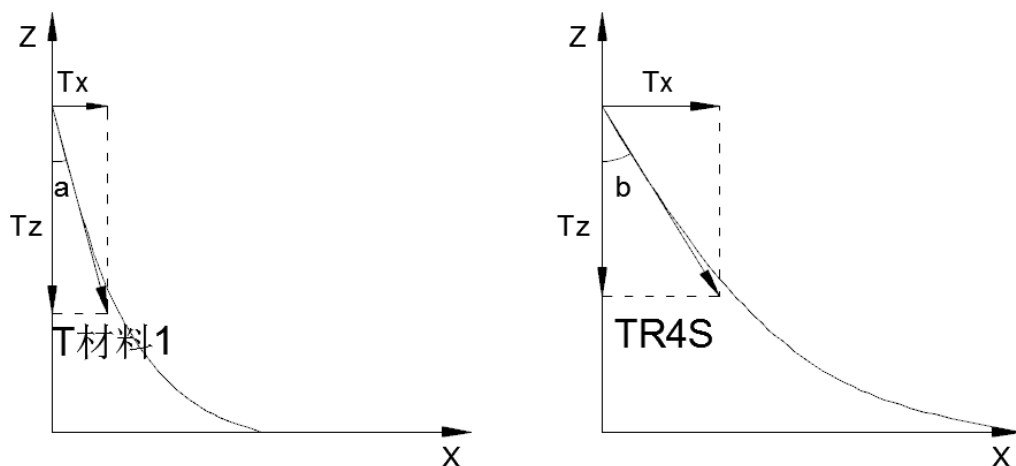


图 5-5 不同材料系泊时锚链的形态图

从图中可以看出，由于材料 1 的重量密度较大，使得其在码头上的系泊段与码头的垂向夹角 a 明显小于用 R4S 材料系泊时的角 b 。而在 3.3 节中我们指出，系泊时要保持初始垂向预张力相同：

$$T_{z \text{ 材料 } 1} = T_{zR4S} \quad (5-1)$$

亦即：

$$T_{\text{材料 } 1} \cdot \cos a = T_{R4S} \cdot \cos b \quad (5-2)$$

从图 5-5 中容易看出角度 $a < b < \frac{\pi}{2}$ ，也就是 $\cos a > \cos b$ ，从而有：

$$T_{\text{材料 } 1} < T_{R4S} \quad (5-3)$$

以及：

$$T_{x \text{ 材料 } 1} = T_{\text{材料 } 1} \cdot \sin a < T_{R4S} \cdot \sin a < T_{R4S} \cdot \sin b = T_{xR4S} \quad (5-4)$$

式(5-4)意味着用 R4S 材料系泊时水平方向的张力分力远大于用材料 1 系泊时的张力分力，同时 R4S 锚链的总预张力也明显大于材料 1 锚链的总预张力。这条推论从软件分析结果中锚链张力的初始数据中也可以看出来，如表 5-1 和 5-2 所示。其中表 5-1 是材料 1 系泊时初始时刻#1 锚链的张力情况，表 5-2 是 R4S 材料锚链系泊时初始时刻#1 锚链的张力情况，负号代表方向相反，Ftotal 代表初始总预张力。

表 5-1 材料 1 锚链#1 初始时刻张力

Time	Fx/N	Fy/N	Fz/N	Ftotal/N
0.000	243871	140799	-317600	424461

表 5-2 R4S 锚链#1 初始时刻张力

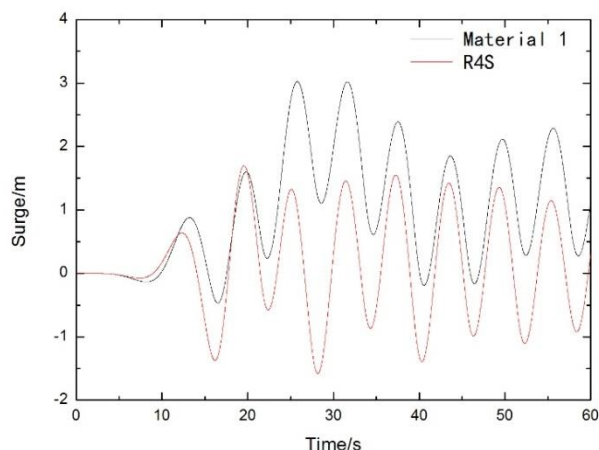
Time	Fx/N	Fy/N	Fz/N	Ftotal/N
0.000	703981	406444	-317600	872729

上面的推论指出, R4S 材料系泊时码头的初始水平预张力是远大于材料 1 的情况, 这意味着用 R4S 材料系泊时码头保持初始纵向位置的能力更大, 因此在受到相同外界干扰力的时候, 用 R4S 材料系泊时码头的随波浪流向漂移较材料 1 系泊时明显要小。以上这些分析便定性地解释了不同锚链系泊时动力特性不同点的原因。

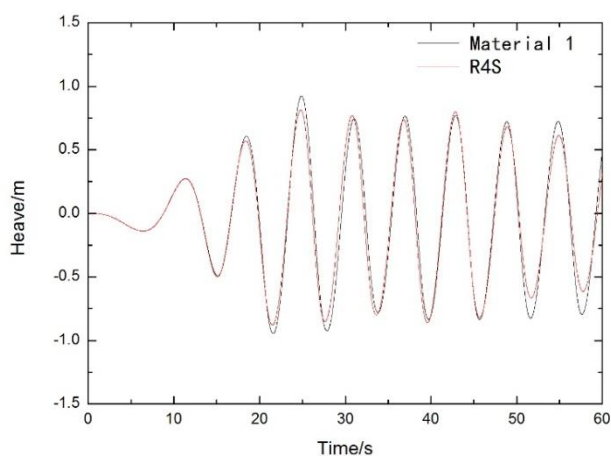
从本节分析中我们可以认识到, 对我们分析的这个浮式码头而言, 在保证相同的垂向预张力的条件下, R4S 材料锚链需要巨大的水平预张力, 因而使材料初始预张力很大, 对材料不利, 而从运动幅度上来看, 两种材料约束效果并没有明显差异。据此我认为材料 1 锚链在这种工况下性能好于 R4S 材料。在以后的章节探讨其它情况时, 也以材料 1 作为锚链材料。

5.2.2 入射波浪周期 6s 情况下两种材料响应及锚链张力比较

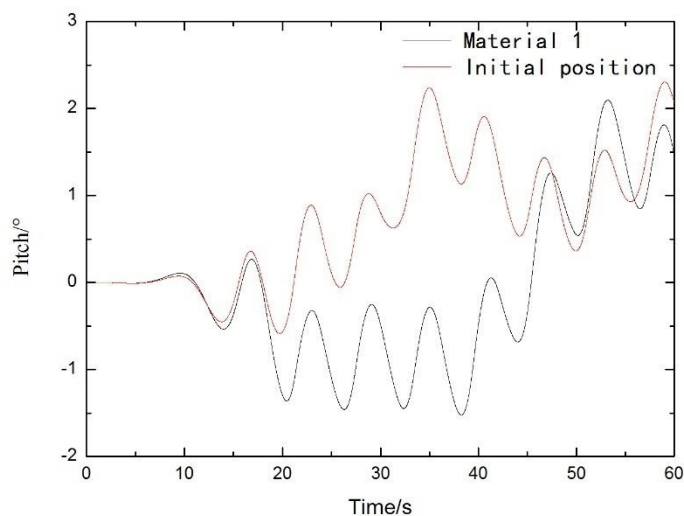
从运动响应的角度上看, 图 5-6 所示是系泊系统系泊材料分别为材料 1 和 R4S 材料, 在入射波浪周期为 6s 时, 码头在波浪上的运动响应对比, 其中图 a) 是纵荡运动、图 b) 是垂荡运动、图 c) 是纵摇运动。



a) 纵荡运动对比曲线



b) 垂荡运动对比曲线

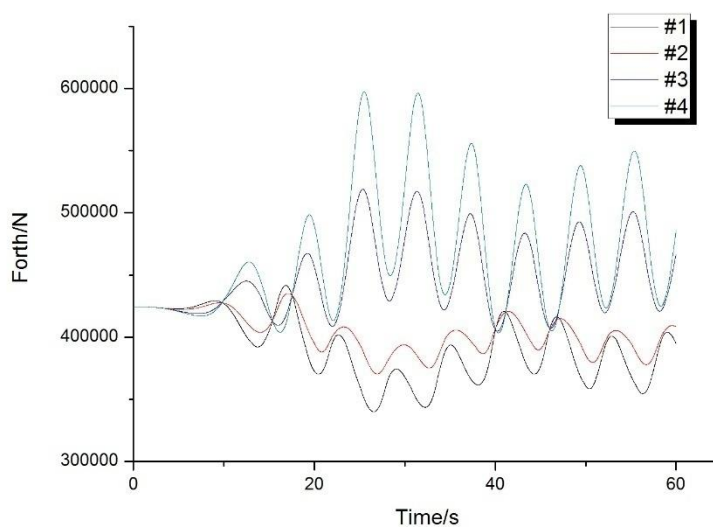


c) 纵摇运动对比曲线

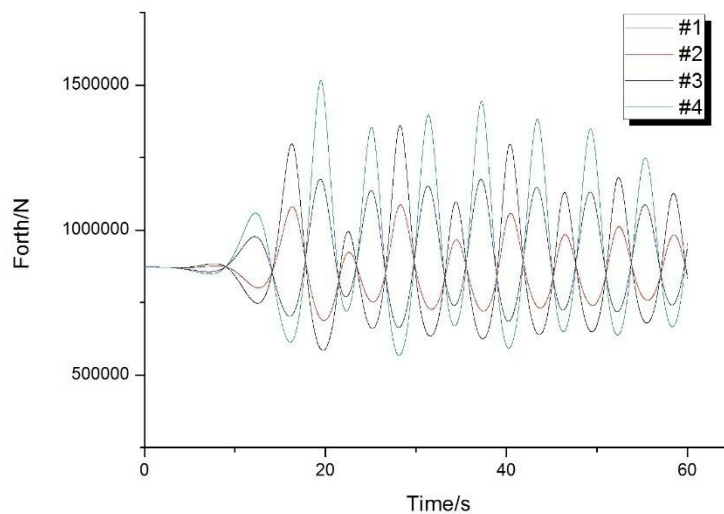
图 5-6 入射波浪周期 6s 时不同材料锚链作用下运动响应对比图

从上图中我们不难发现。它们的不同材料锚链作用下运动响应的相同点体现在：所有锚链受力均按入射波浪周期 6s 作震荡变化。锚链#4 受力最大，且锚链#4 和锚链#1 受力变化最大。不同点体现在：用材料 1 锚链系泊时锚链的初始预张力仍然远远小于用 R4S 材料锚链系泊时的初始预张力，以及材料 1 锚链系泊时#3、#4 锚链受力基本大于初始预张力且#1、#2 锚链受力基本小于初始预张力，而用 R4S 材料系泊时 4 根锚链的受力均可能大于和小于初始预张力。与 5.2.1 节现象类似地，用 R4S 材料锚链系泊时所有锚链的张力均远大于用材料 1 锚链系泊时的锚链张力。

从锚链张力变化的角度来看，图 5-7 所示是系泊系统系泊材料分别为材料 1 和 R4S 材料，在入射波浪周期为 6s 时，锚链张力变化的对比，其中图 a) 是材料 1 锚链作用下四根锚链的张力曲线、图 b) 是 R4S 材料锚链作用下四根锚链的张力曲线。



a) 材料 1 锚链张力曲线



b) R4S 材料锚链张力曲线

图 5-7 入射波浪周期 6s 时不同材料锚链作用下张力曲线对比图

从上图中我们发现,不同锚链材料对锚链张力的影响仍然呈现在初始预张力与各锚链张力变化范围上,这与 5.2.1 节中的现象和结论相似。

5.3 本章小结

通过 5.2.1 节与 5.2.2 节中的信息和分析,我们认识到在不同入射波浪周期下不同锚链对码头运动及锚链张力的影响是类似地。这种影响可以通过 5.2.1 节中的分析进行解释。

简而言之,为了保证锚链系统对码头提供一个确定的初始垂向预张力,不同材料锚链所需提供的初始总预张力不同,进而导致不同材料锚链提供的水平方向预张力不同,这会进一步影响到码头在水平方向的漂移以及纵荡运动的范围。而纵荡运动与锚链张力的变化息息相关,纵荡运动的不同会导致锚链张力变化的不同。这种影响效果在不同入射波浪周期的情况下是相似的。

具体到我们研究的浮式码头而言,从本章的资料和分析中,我们认为,不论入射波浪周期是多少,在保证相同的垂向预张力条件下,R4S 材料锚链相对于材料 1 锚链需要提供大得多的水平预张力,因而使得该材料初始预张力很大,对材料不利。而从约束效果而言,两种材料锚链在纵荡和垂荡幅度上约束效果相当,而在纵摇维度上,R4S 材料锚链约束下码头纵摇偏向于一侧倾斜,且倾斜幅度较材料 1 略大。从上面两点来看,我认为材料 1 在这种工况下性能好于 R4S 材料。在下一章分析浮式码头在 45 度斜浪入射下的动力特性时,我选择材料 1 作为系泊锚链材料。

第六章 码头斜浪工况时的数值模拟

在论文的前面几章中,我们已经就浮式码头入射波浪为迎浪条件下的动力特性做了分析。本章试图通过改变入射波浪浪向,观察浮式码头的响应变化并对斜浪作用下浮式码头的动力特性进行分析。在入射波浪为 45 度斜浪的情况下,浮式码头的运动和受力已经不具有对称性,因此本章的运动响应研究维度已经不局限于纵荡、垂荡、纵摇以及#1、#2、#3、#4 锚链张力,而是完整的分析浮式码头 6 个自由度的运动以及所有 8 个系泊锚链张力的变化。

6.1 码头斜浪工况的模型处理

码头斜浪工况下模型的处理是基于第三章中迎浪工况下模型的处理方法的。在 OpenFOAM 平台下,要研究 45 度斜浪工况,只需要改变以下几点:

第一,修改 Pointwise 导出的网格边界面特性,将网格 y 方向两个边界面由原来的 `symmetryPlane` 改成 `patch`,在命名时可以将它们分别由 `sidewall` 改成 `inlet` 和 `outlet`。这样,更改后的网格边界条件特性变成两个 `inlet` 面和两个 `outlet` 面。入射波浪可以从两个 `inlet` 面流计算域,并从两个 `outlet` 面消波。

第二,修改可用于 naoeFoam-SJTU 求解器识别的 `waveDict` 文件,将其中关联波浪入射方向的 β 值由 0 改为 45。更改过后的入射波浪方向如下图 6-1。

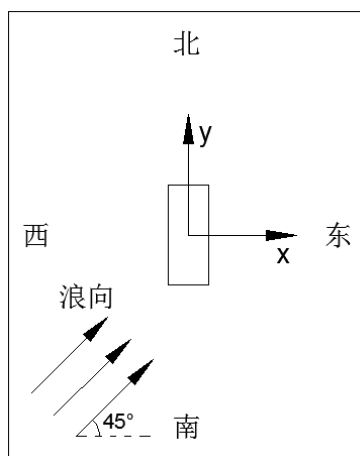


图 6-1 入射波浪方向示意图

第三,改变消波区处理。为了避免波浪从 `outlet` 界面反射回计算域,干扰计算结果,我们必须设置合理的消波区,同时为了满足消波区的设置不至于影响到码头周围的波浪情况,必须适当增大计算域,修改后的消波区示意图如下图 6-2。

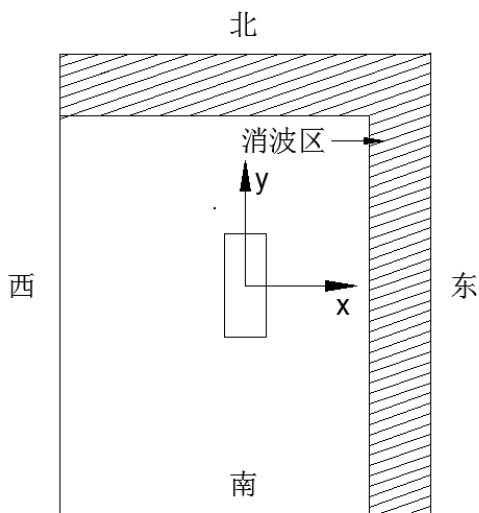


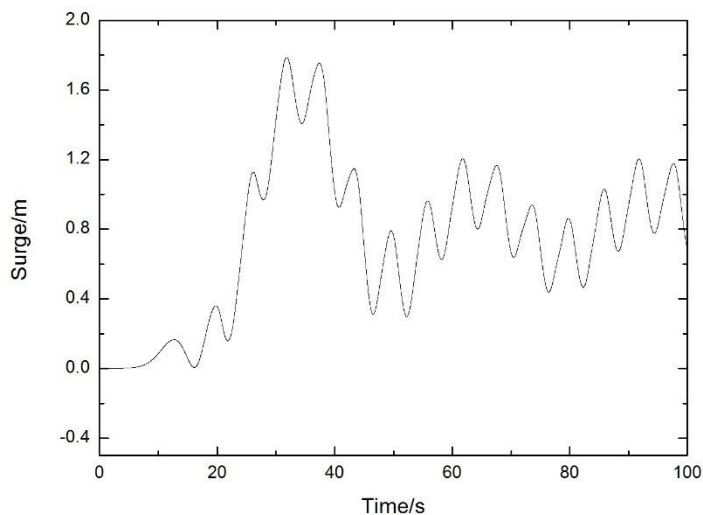
图 6-2 消波区示意图

在其它参数方面。我选择入射波浪周期为 6s，码头系泊锚链材料为材料 1，锚链布置形式保持不变。在计算时长上面，考虑到斜浪作用下码头运动的复杂性，我把计算时长调整为 0 到 100s，时间步长为 0.005s。

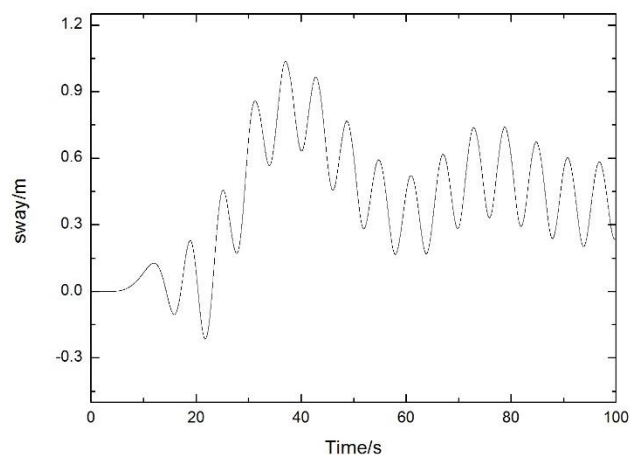
6.2 数值模拟结果及其分析

6.2.1 浮式码头 45° 斜浪作用下运动响应结果及其分析

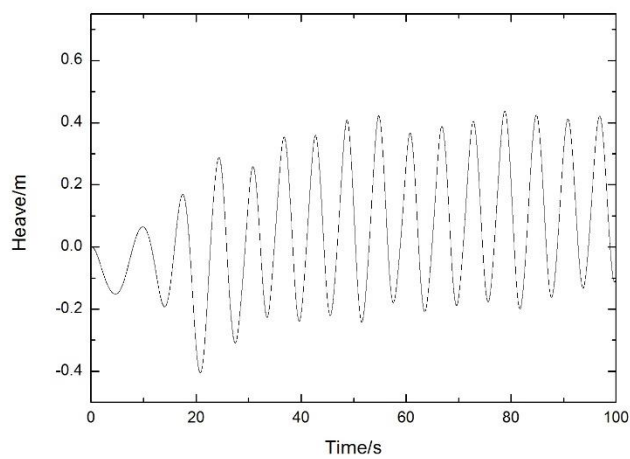
图 6-3 所示是系泊系统在入射波浪周期为 6s，系泊材料为材料 1 时，码头在波浪上的响应情况，其中图 a) 是纵荡运动、图 b) 是横荡运动、图 c) 是垂荡运动、图 d) 是横摇运动、图 e) 是纵摇运动、图 f) 是艏摇运动。



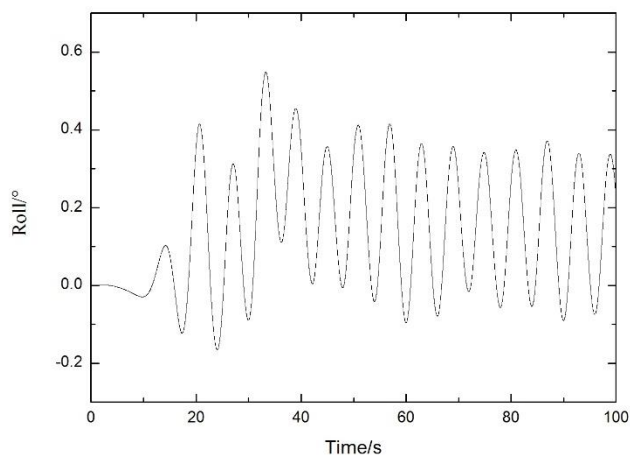
a) 纵荡运动曲线图



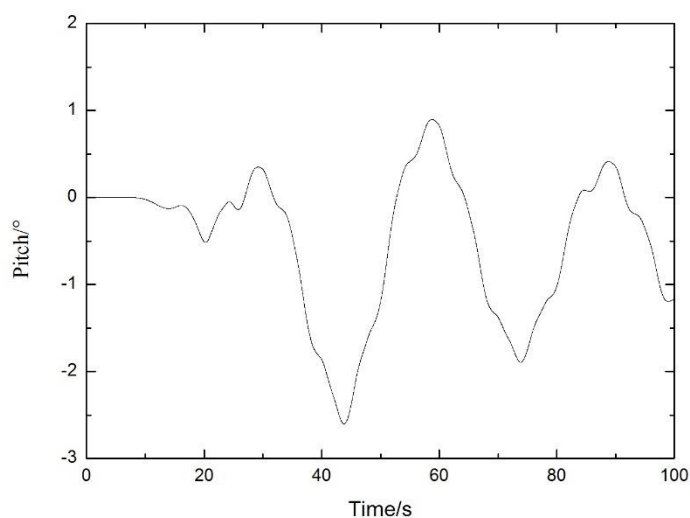
b) 横荡运动曲线图



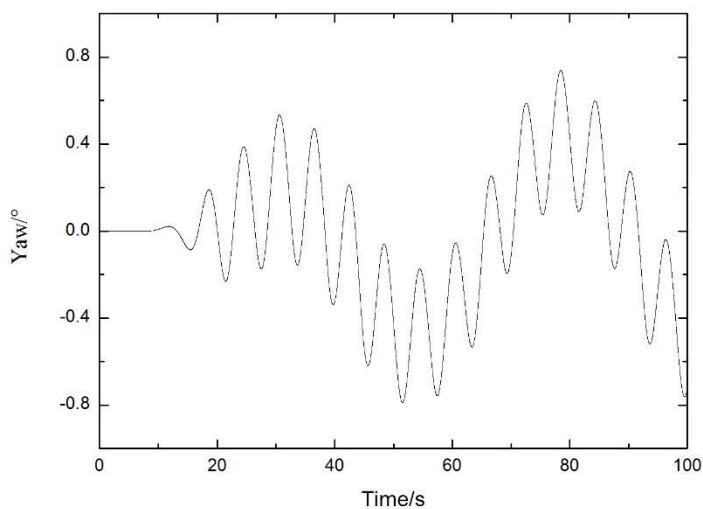
c) 垂荡运动曲线图



d) 横摇运动曲线图



e) 纵摇运动曲线图



f) 艏摇运动曲线图

图 6-3 斜浪作用下码头六自由度运动响应曲线

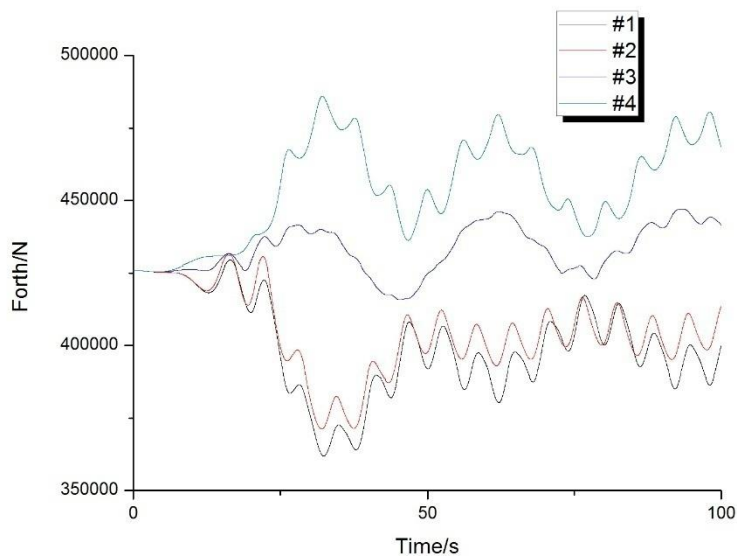
从图 6-3 中我们可以得到以下几点信息：

- (1) 在纵荡和横荡运动维度上，浮式码头顺着入射波浪方向有一定的漂移，在这两个维度上码头按照入射波浪的周期作震荡运动。纵荡运动基本保持在 0.5m 到 1.5m 之间，较迎浪作用下要下。横荡运动基本保持在 0.2m 到 0.8m 之间，运动幅度比纵荡运动小。
- (2) 在纵荡和横荡运动维度上，浮式码头顺着入射波浪方向有一定的漂移，在这两个维度上码头按照入射波浪的周期作震荡运动。纵荡运动基本保持在 0.5m 到 1.5m 之间，较迎浪作用下要下。横荡运动基本保持在 0.2m 到 0.8m 之间，运动幅度比纵荡运动小。
- (3) 在垂荡运动维度上，浮式码头基本围绕初始垂向位置作震荡运动，运动幅度在 -0.4m 到 0.4m 之间，运动幅度较迎浪情况下要小。

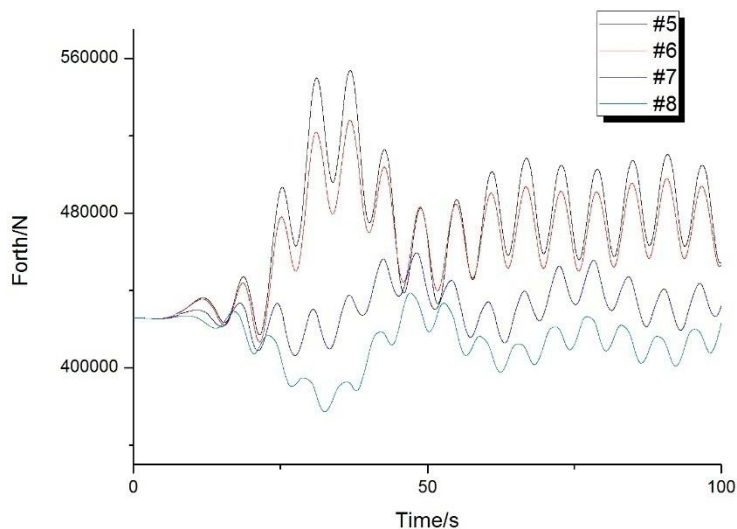
- (4) 在纵摇运动维度上，浮式码头绕 y 轴交替作顺时针方向和逆时针方向的震荡转动，运动趋势与迎浪情况下的运动趋势相近。最大纵摇角度在 2° 左右。
- (5) 在横摇运动维度上，浮式码头的横摇幅度较小，基本保持在 -0.1° 到 0.5° 之间，这与码头横向尺寸相对较大有密切关系。
- (6) 在艏摇运动维度上，浮式码头整体在顺时针和逆时针方向交替运动。

6.2.2 浮式码头 45° 斜浪作用下锚链张力变化结果及其分析

图 6-4 所示是本章所述斜浪工况下码头系泊锚链张力变化的时历曲线。其中图 a) 是 #1、#2、#3、#4 号锚链的张力图，图 b) 是 #5、#6、#7、#8 号锚链的张力图。



a) #1、#2、#3、#4 锚链张力图



b) #5、#6、#7、#8 锚链张力图

图 6-4 斜浪作用下锚链张力变化曲线

从图 6-4 中我们可以得到以下几点信息：

- (1) 结合图 6-1 我们可以看出，系泊锚链与入射波浪方向的关系从很大程度上决定了锚链受力的大小，由 6.1.1 节我们知道，浮式码头在 x 轴和 y 轴方向沿入射波浪流

向有一个整体的漂移,使得#1、#2 锚链张紧程度缓解,而使得#5、#6 锚链张紧程度有所增加,这在图中也明显地体现出来,即图 a)中#1、#2 锚链张力始终小于初始预张力,而图 b)中#5、#6 锚链张力始终大于初始预张力。

- (2) 各锚链受力均按入射波浪周期作震荡变化,而变化幅度不一。从图中可以看出,在码头运动幅度比较明显方向上的#1、#2、#5、#6 锚链受力变化相对而言较大。
- (3) 在本章 45 度斜浪工况下锚链的最大张力保持在 550KN 以下,较迎浪作用下锚链的最大张力要小,对锚链的抗拉性能要求也较低。

6.3 本章小结

本章通过改变入射波浪方向研究了浮式码头在 45 度斜浪作用下的运动响应和锚链张力的变化。在斜浪工况下,码头的整体运动趋势与浪向也相对吻合,因而#1、#2、#5、#6 号锚链的张力变化也相对明显。从总体上看,斜浪工况下码头的运动幅度和锚链的张力变化幅度较迎浪情况都要小,而运动情况也较为复杂。事实上,从码头各维度上的尺度来看,码头在 y 方向的尺度较大,在相同外界干扰情况小,产生响应的幅度也较小。

从本章的分析中我们认识到,要保证浮式码头安全而正常的工作,码头在斜浪作用下运动的幅度不必过分注意,而其运动的形式应该在码头空间设计和设备布置的时候予以重视。

第七章 全文总结

本文主要目的是通过开源求解器 naoe-FOAM-SJTU 探讨南海三沙某浮式码头在不同工况下的运动响应情况和锚链张力变化情况。本文对锚泊系统的数值计算基于分段外推法理论,入射波浪设定为 Stokes 一阶深水波。在计算迎浪作用下各工况时,由于横荡、横摇和艏摇三个自由度上运动幅度很小,我将它们三个自由度固定起来,主要探讨纵荡、垂荡和纵摇工况,较合理地简化了计算;而在计算 45 度斜浪作用工况时,由于情况的复杂化,我完整地探讨了六个自由度的响应。

在本文的第一章中,我阐述了本次课题研究的意义,表明浮式码头对南海三沙市的重要性,对浮式码头动力特性的研究有助于浮式码头的设计和改良。在第二章中,我简要的介绍了本次数值计算软件中所用到的理论基础,并将它们在软件中的实现进行了说明。在第三章中,我介绍了本次计算的南海三沙某浮式码头的具体参数,并对模型的建立、网格的划分和波浪的模拟进行了较详细的说明。在第四章中,我用控制变量法对比了迎浪作用下不同入射波浪周期对浮式码头动力特性的影响。在第五章中,我用控制变量法对比了迎浪作用下不同系泊锚链材料对浮式码头动力特性的影响。在第六章中,通过改变入射波浪方向,我研究了再 45 度斜浪作用下浮式码头的动力响应特性。

经过本次毕业设计研究,我接触并学习了 pro/E、Pointwise 和 OpenFOAM 等多个软件,逐步熟悉了以 Linux 为内核的 Ubuntu 操作系统,加深了对波浪理论、离散理论和粘性流体流动数学模型的认识。

在以后的研究中,我还会去探讨多段锚链、复合材料锚链以及复杂波浪等对浮式码头动力特性的影响,研究的对象也会从浮式码头推广到其它锚泊系统结构物。

经过全文的分析和研究,本文得到如下结论:

- (1) 对于本文研究的南海三沙某浮式码头而言,在其它条件相同的情况下,改变入射波浪周期对码头动力特性的影响主要体现在纵荡、垂荡幅度和锚链力幅度的改变上。且入射波浪周期增加会导致码头纵荡、垂荡幅度的增加,也使锚链张力变化幅度增加。
- (2) 对于本文研究的南海三沙某浮式码头而言,在其它条件相同的情况下,改变系泊锚链材料会对大幅影响码头的动力特性。这些影响主要体现在码头纵荡运动以及水平方向约束上。材料 1 和 R4S 两种材料锚链系泊下,浮式码头在水平方向的约束力差异很大,而这些差异对码头的使用性能影响不大,一般来说,用水中重量密度较小的锚链可以有效的减小锚链内部张力,锚链本身较为有利。就本文情况来讲,材料 1 比 R4S 材料更适合该浮式码头。
- (3) 相对于在迎浪作用下,浮式码头在斜浪作用下的动力特性变得更加复杂但幅度较小。在斜浪作用下,浮式码头在六个自由度上都有较为明显的运动,
- (4) 通过全文的研究,我认为 OpenFOAM 开源软件和 naoe-FOAM-SJTU 求解器能够较好地计算分析浮式码头等常见锚泊系统结构物的六自由度运动和锚链受力问题。

参考文献

- [1] 李欠标. 发展海洋经济和海洋运输的思考[J]. 综合运输,2011,11:66-70
- [2] 全国海洋经济发展规划纲要.2003.5
- [3] 颜锦. 浮式栈桥码头总体研究[D].天津大学,2004.
- [4] 王翔,黄太刚,宁小倩. 船舶与浮式码头碰撞过程仿真[J]. 船舶,2009,03:55-60
- [5] 史琪琪. 深水锚泊半潜式钻井平台运动及动力特性研究[D].上海交通大学,2011
- [6] 陈矗立. 深海浮式结构物及其锚泊系统的动力特性研究[D].上海交通大学,2007
- [7] Per.I.Johansson..A Finite Element Model for Dynamic Analysis of Mooring Cables.Doctor Thesis of MIT,1976
- [8] 沈志荣,曹洪建,叶海轩,万德成.CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 使用手册.2012,9.
- [9] 刘远传,万德成.系泊系统计算模块 naoeFOAM-ms 使用手册.2013.10
- [10] D.T Brown,S.Mavrakos.Comparative study on mooring line dynamic loading.Marine Structures,1999,12:131-151
- [11] 陈红霞,华锋,袁业立. 中国近海及临近海域海浪的季节特征及其时间变化[J]. 海洋科学进展,2006,04:407-415.
- [12] 郑艳娜. 波浪与浮式结构物相互作用的研究[D].大连理工大学,2006.
- [13] 吴小鹏. 深海半潜式钻井平台码头系泊数值计算与模型试验研究[D].上海交通大学,2010
- [14] 王艳妮. 海洋工程锚泊系统的分析研究[D].哈尔滨工程大学,2006.
- [15] 唐友刚,张素侠,张若瑜,刘海笑. 深海系泊系统动力特性研究进展[J]. 海洋工程,2008,01:120-126.
- [16] 朱意秋,陈倩倩. 海洋运输强国与航运自由化[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版),2010,03:36-39.

谢辞

本次毕业设计的顺利完成得益于万德成教授的耐心指导和帮助,特别是在明确选题和毕业设计思路的时候,万老师的建议给我指明了方向。也要感谢王建华和各位学长的悉心指教,为我解答疑问,让我学到了许多新的知识。

在这里,我还要感谢大学四年期间教导我的各位船舶与海洋学院的老师,你们孜孜不倦的教诲和勤奋踏实的精神一直感染着我们,使我们这些学生能够专注学术、专研上进。

在本次毕业设计过程中,我学习了 Pointwise、Pro/E、Rhino 和 OpenFOAM 等多个软件,也熟悉了以 Linux 为核心的 Ubuntu 操作系统和 OpenFOAM、naoeFOAM-SJTU 中的大部分理论知识,算是收益颇丰。这次毕业设计经历对我今后在科研上道路上的探索一定会有很大的影响,这段时间的历练也将使我受益终身。

最后,感谢上海交大这个让人引以为豪的学校,感谢学校老师和管理者们对学生的良苦用心,作为一个交大人,我会牢记自己的身份,做一个有责任感的交大人。

ANALYZE OF THE DYNAMIC PERFORMANCE IN WAVE FOR A FLOATING TYPE WHARF IN SANSHA, SOUTH CHINA SEA

Due to the effect of seabed topography in Sansha, South China Sea, water depth dips when it closes to islands. In this situation, some ships can not be berthed near the islands, especially for those ships which have large draft. In order to deal with this problem, a typical type of floating type wharf is applied to this area. Compared with traditional methods for solving the berthing problem of large-draft ships, such as sea reclamation or excavation of seabed, setting floating type wharf has its unique advantages. Firstly, setting floating type wharf doesn't have to change the form of seabed in this area, thus protecting the marine environment, and this is especially important for an area which depends on tourism industry like Sansha. Secondly, floating type wharf costs relatively less if well-designed and mass-produced. Thirdly, most floating type wharfs can be recycled thus saving resources and energy. And because we can benefit a lot from floating type wharfs, it is significant for us to study the dynamic performance of floating type wharfs in wave to help design it.

A floating type wharf is combined with a trestle and a floating body. By appropriate designing, the floating type wharf can be applied to deep water area which make the berthing available for large-draft ships. By means of the CFD (Computational Fluid Dynamics) solver called naoe-FOAM-SJTU, which is designed for naval architecture and ocean engineering by our team, we can analyze the dynamic characteristics of the floating type wharf and its mooring system with CFD method. Compared with methods based on potential theories, CFD method takes flow viscosity into consideration while the methods of potential theories don't. The solver naoe-FOAM-SJTU developed on the foundation of open source CFD toolkit OpenFOAM. Through elaborate development, the naoe-FOAM-SJTU now has many capabilities, such as the wave generating module, 6DoF module and naoeFOAM-ms module. The wave generating module can generate different types of waves. The 6DoF (6 degree of freedom) module enables naoe-FOAM-SJTU solver to handle large-motion problem of ships and floating structures. And the naoeFOAM-ms module enables naoe-FAOM-SJTU solver to deal with mooring systems. The three modules which are described above are the main tools I used to deal with the floating type wharf problem.

In this paper, two values of the period for incident waves are discussed, and two types of mooring-line materials are compared through control variate method, and also the influence of wave direction is analyzed in detail. The work of my research can be separated into three steps. The first step is to establish the model of the Sansha floating type wharf through Pro/Engineer wildfire 5.0, and divide gridding for future calculation through Pointwise software. The second step is to numerical simulate the model in corresponding working conditions and record the data. The last step is to analyze the data we get in step two and make a general conclusion. As is

discussed above, the key point of establishing the model of the floating type wharf is to make an appropriate assumption for physical parameters of the Sansha floating type wharf. Because the physical parameters are not given completely, I have to set the density for the model according to some relevant references, and the other parameters can be calculated out by Pro/Engineer.

This paper consists of seven chapters and the brief introduction of each chapter is as follows:

In chapter one, the background information of my subject is introduced, and also the purpose and significance of this research is discussed. Moreover, a brief introduction to the concepts of floating type wharfs and several types of common mooring systems is given. In addition, this chapter points out my research methods and working direction.

In chapter two, the theories those related to the software I used in this research are systematically introduced. And the way the naoe-FOAM-SJTU realize these theories is also discussed simply. From my perspective, the two main theories of this research are the so-called 6DoF motion theory and mooring-line force theory. To be more specific, the 6DoF theory bases on three-dimension kinematics and can solve motion response problem in 6 Degree of Motion if initial conditions, boundary conditions and acting force are given. The mooring-line theory based on differential method and can calculate out the tension of mooring lines. However, the progress of the calculation is simplified and some data is approximated, and the result of the mooring-line force can be regarded as part of acting force which is applied to the floating type wharf.

In chapter three, the model of Sansha floating type wharf and its working condition is introduced. And the progress of how the model established and how the gridding divided is briefly illustrated. Additionally, this chapter gives detailed parameters about the sponge area, the simulation of incident waves and the materials which the mooring lines adopt. This chapter is the foundation of my numerical calculation.

In chapter four, the influence of the period of incident wave on motion response of the wharf and tension variation of the mooring lines is discussed in detail through control variate method. According to some information about the Sansha sea conditions, 5s and 6s are chosen for the period of the incident wave as my object of study. Through carefully comparing and analyzing, I find that the main effect of incident-wave period on wharf is the range of motion response and the magnitude of mooring-line force. To be more specific, the bigger the value of incident-wave period is, the larger the motion range and force magnitude is, and this can simply be explained as the difference of wave energy that is delivered to the wharf. No matter the period of incident wave is 5s or 6s, the wharf has a tiny excursion in the surge dimension along the wave direction. And just as expected, the floating type wharf moves periodically according to the period of incident wave. As for the mooring-line force, the tension of mooring line #1, #4, #5 and #8 change more evidently because their tension has more component force along the wave direction.

In chapter five, the influence of materials which the mooring lines adopt are discussed in detail through control variate method. The result of my calculation indicates that the performance of the so-called material one is better than material R4S for the mooring lines of this floating type wharf. On account of different geometrical form of the mooring lines, larger initial tension should be given for mooring lines of R4S material than that of material one to provide equal initial vertical tension. In this situation, the R4S mooring lines provide larger initial horizontal tension than mooring lines of material one, thus making the magnitude of the excursion for the moving center of wharf less. However, the difference of initial horizontal tension doesn't, at least not distinctly, affect the amplitude of motion response in six degree of freedom. Moreover, just like

the phenomenon in chapter four, the floating type wharf moves periodically according to the period of incident wave as well.

In chapter six, the 6DoF motion response of the floating type wharf in oblique incident wave which is 45-degree angle to x-axis is discussed in detail, and the variation of tension is also analyzed. The result shows that the range of motion for the wharf is relatively smaller compared with that in head wave, and this phenomenon can be simply explained that the size of this wharf in y-axis direction is larger than that in x-axis direction. And of course, the motion response of the floating type wharf is more complicated in oblique incident wave situation. In the condition when the floating type wharf is in head wave, because of geometrical and mechanical symmetry in y-axis direction, the magnitude of motion response in yaw, roll and sway dimension is so tiny that can be ignored. While in the condition when the floating type wharf is in oblique incident wave, on the contrary, there is no more symmetry and the motion response in surge, sway, heave, pitch, roll and yaw is all significant. And as for the mooring-line force, the tension of mooring line #1, #2, #5 and #6 change more evidently because their tension has more component force along the incident wave direction.

Chapter seven summarizes the whole work of this paper and gives an organized conclusion of my research. Additionally, the prospect of my future research work is also given in this chapter. From my perspective, the dynamic performance of multi-material mooring lines is worthy of being further studied. And the detailed influence of incident wave direction is worth more attention and consideration. And in order to improve and develop the capability of naoe-FOAM-SJTU solver, I will concentrate more on theory study and computer programming.

The results of this paper give a prediction of the dynamic performance for the Sansha floating type wharf. And these results can also be referred to when similar type of floating type wharf is designed or manufactured. And because satisfactory results are obtained, we consider naoe-FOAM-SJTU is capable to handle motion response problem and mooring-line tension problem of floating structures in waves.