

上海交通大学硕士学位论文

单点系泊 FLNG
液舱晃荡耦合运动数值模拟

硕 士 研 究 生：李奇

学 号：116010910189

导 师：曾一非 教授

申 请 学 位：工程硕士

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：2019 年 1 月

授予学位单位：上海交通大学

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

NUMERICAL SIMULATION OF LIQUID TANK SLOSHING COUPLED MOTION OF SINGLE-POINT MOORING FLNG

Candidate:	QI, LI
Student ID:	116010910189
Supervisor:	Prof. Yifei Zeng
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Naval Architecture and Ocean Engineering
Affiliation:	School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering
Date of Defence:	Jan, 2019
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《单点系泊 FLNG 液舱晃荡耦合运动数值研究》，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

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

单点系泊 FLNG 液舱晃荡耦合运动数值模拟

摘 要

随着我国对南海新能源开发力度的加大, 开采作业范围已从浅水逐渐转向深水环境, 以往管线输运方法已经不再适用。对此, 国际上提出了具有独特优势的大型液化天然气生产储存平台 FLNG。而 FLNG 内部舱室的液舱晃荡现象以及单点系泊方式使得船体运动响应十分复杂, 因此相关研究具有重要的工程设计参考价值。

本文在 OpenFOAM 开源平台的基础上, 利用组内自主开发的船舶与海洋水动力学 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 对单点系泊充液的 FLNG 在波浪中的液舱晃荡耦合运动进行了模拟探究。文中首先进行数值造波模拟, 验证了求解器数值造波的准确性。随后实现了对波浪中双液舱充液 FLNG 液舱模型的耦合运动问题的全流场 CFD 同时模拟求解。通过将运动幅值 RAO 模拟结果与实验进行对比, 验证了求解器的准确性和可靠性。为了探究液舱晃荡耦合运动的规律, 系统地研究了波浪频率、液舱充液率以及波浪高度对充液 FLNG 液舱的横摇耦合运动的影响, 通过对比运动时历, 以及提取的液舱内外壁上的作用力矩, 发现晃荡现象对液舱耦合运动幅值的加剧或者抑制, 主要取决于液舱内外壁所受力矩的相位差, 加剧或抑制的幅值取决于力矩的幅值。

接着本文参照物理试验构建多液舱 FLNG 船模型, 并对模型进行了自由衰减运动模拟。通过对比 FLNG 模型自由衰减周期的数值模拟结果与物理试验结果, 验证了模型结构与参数配置的准确性。再由网格收敛性验证给出了适合本文模拟的网格生成方法与网格量。参照物理水池试验结果, 验证了横浪与迎浪两种工况多种入射波浪频率作用时, FLNG 液舱晃荡耦合运动响应的幅值 RAO 结果, 证明求解器可以

准确模拟该问题。在此基础上，对比空舱压载情况，探究了液舱充液率、波浪频率和浪向因素对于充液 FLNG 运动响应的影响，发现横浪工况下 FLNG 的横摇运动对液舱晃荡的耦合作用最为敏感。同时，文中展示了 FLNG 液舱内外流场信息，阐述了波浪场与舱内流场与船体之间的相互作用情况。

最后，本文实现了对单点系泊状态下充液 FLNG 在波浪中六自由度运动的数值模拟。分析了系泊系统，波浪环境以及液舱晃荡多种因素对于船体整体运动的耦合影响。通过对比单点系泊前后以及液舱充液前后 FLNG 的运动时历、舱内外流场情况和锚链力等结果，发现在横浪工况中，受波浪载荷激励，FLNG 会绕系泊点产生旋转。在此过程中船体横摇角幅值会逐渐增大，从而对 FLNG 的安全性产生威胁。同时由于 FLNG 采用多液舱设计，舱内的流体晃荡现象会大幅度减弱，从而提高了船舶的稳定性。本文相关结果可以为工程实践提供参考。

关键词：液舱晃荡，单点系泊，FLNG，naoe-FOAM-SJTU

NUMERICAL SIMULATION OF LIQUID TANK SLOSHING COUPLED MOTION OF SINGLE-POINT MOORING FLNG

ABSTRACT

With the increase of China's new energy development in the South China Sea, the scope of exploitation has gradually shifted from shallow water to deep water. Pipeline transportation methods are no longer applicable. In this regard, FLNG, a large-scale LNG production and storage platform with unique advantages, has been proposed internationally. The tank sloshing phenomenon in the FLNG internal tank and the single-point mooring system make the hull motion response very complicated, so the related research has important engineering design reference value.

Based on the open source platform OpenFOAM, this paper simulates and explores the tank sloshing coupled motion of a single-point moored liquid-filled FLNG in waves using the in-house developed ship and ocean hydrodynamic CFD solver naoe-FOAM-SJTU. Firstly, the accuracy of numerical wave generation of this solver is verified by making waves in an empty numerical wave tank. Then, by simulating the coupled motion problem of the simplified FLNG tank model with double liquid tanks in waves, the full flow field is solved using CFD method simultaneously. The accuracy and reliability of the solver are verified by comparing motion amplitude RAO results with experimental results. In order to investigate the sloshing coupled motion of the tank, research about the effects of wave frequency, tank filling ratio and wave height on the coupled roll motion of the liquid-filled FLNG have been done systematically. By comparing the motion response time series and the extracted moments inside and outside the liquid tank wall. It is found that whether the sloshing phenomenon

intensifies the amplitude of the coupled motion of the tank, is mainly determined by the phase difference of the moment on the inner and outer wall of the liquid tank. And the amplitude increase or decrease is mainly depend on the amplitude of the moments.

After that, this paper constructs a multi-tank FLNG ship model with the reference of physical experiments. And the free decay motion of the model is simulated. By comparing the numerical simulation results and physical test results of the free decay period of the FLNG model, the accuracy of the model structure and parameter configuration is verified. Then, the mesh generation method and the suitable mesh quantity for the simulation are given by the work of grid convergence verification. Referring to the results of the experiment, the amplitudes RAO of the sloshing coupled motion response of the FLNG tank under various incident wave frequencies are compared in beam and head waves. And the accuracy and reliability of the solver are verified. On this basis, by comparing the results of the empty tank cases, the effects of tank filling ratio, wave frequency and wave direction on the motion response of liquid-filled FLNG are investigated. The roll motion of FLNG in beam waves is the most sensitive to the sloshing influence. At the same time, the paper shows the flow field information inside and outside the FLNG tank, and explains the interaction between the wave and the hull.

Finally, this paper implements a numerical simulation of the six degree-of-freedom motion of liquid-filled FLNG under single-point mooring. The coupled effects of mooring system, wave environment and tank sloshing on the overall motion of the hull are analyzed. By comparing the FLNG motion time series, the flow field inside and outside the tank and the mooring force before and after single-point mooring and liquid tank filling, it is found that in beam wave condition, FLNG will rotate around the mooring point under the wave load excitation. During this process, the amplitude of roll motion angle will gradually increase, which will threaten the safety of FLNG. At the same time, due to the multi-tank design of FLNG, the fluid sloshing

phenomenon in tanks will be obviously reduced, thus improving the stability of the ship. The relevant results of this paper can provide reference for engineering practice.

KEY WORDS: Liquid tank sloshing, single-point mooring, FLNG, naoe-FOAM-SJTU

目 录

单点系泊 FLNG 液舱晃荡耦合运动数值模拟	I
摘 要	I
ABSTRACT	III
第一章 绪论	1
1.1 研究背景目的简述	1
1.1.1 FLNG 简介与技术难点	1
1.1.2 液舱晃荡问题难点	2
1.1.3 FLNG 系泊系统设计问题	3
1.1.4 CFD 全流场数值模拟的优势	5
1.2 国内外研究现状	5
1.2.1 液舱晃荡与船体运动耦合问题	5
1.2.2 单点系泊情况下的船体水动力问题	12
1.2.3 单点系泊充液 FLNG 船液舱晃荡耦合运动问题	14
1.3 本文内容布置与重点特色工作	14
第二章 数值计算方法	16
2.1 naoe-FOAM-SJTU 求解器介绍	16
2.2 全流场计算域初始化实现方法	18
2.3 液舱内外壁力矩输出方法	19
2.4 数值造波与消波方法	19
2.5 系泊系统模块介绍与应用	21
2.6 本章小结	23
第三章 FLNG 液舱在波浪中液舱晃荡耦合运动数值模拟	24
3.1 数值模型构建与求解器验证	24
3.1.1 FLNG 液舱模型的构建	24
3.1.2 数值模拟计算域的构建	25
3.1.3 数值计算网格的生成	26
3.1.4 求解器可靠性验证	27
3.2 充液 FLNG 液舱晃荡耦合运动影响因素分析	27

3.2.1 波浪频率对液舱晃荡的影响	27
3.2.2 液舱充液率对液舱晃荡的影响	30
3.2.3 入射波的波陡因素对液舱晃荡的影响	34
3.3 本章小结	36
第四章 FLNG 液舱晃荡耦合运动数值模拟	38
4.1 数值模型构建与验证	38
4.1.1 FLNG 船体模型的构建	38
4.1.2 数值模拟计算域的构建与网格生成	39
4.1.3 FLNG 数值模型自由衰减验证	40
4.2 FLNG 液舱晃荡/船体耦合运动数值模拟	42
4.2.1 求解器可靠性验证	42
4.2.2 数值模拟网格收敛性验证	45
4.2.3 波浪中 FLNG 液舱晃荡耦合运动影响因素分析	46
4.3 本章小结	52
第五章 单点系泊 FLNG 液舱晃荡耦合运动数值模拟	53
5.1 单点系泊系统配置	53
5.1.1 作业环境与系泊系统布置	53
5.1.2 锚链水平刚度验证	54
5.2 充液 FLNG 单点系泊/船体耦合水动力运动响应数值模拟	55
5.2.1 海洋环境模拟工况描述	55
5.2.2 单点系泊对波浪中 FLNG 运动响应的影响	56
5.2.3 液舱晃荡对单点系泊 FLNG 运动响应的影响	59
5.2.4 液舱晃荡对单点系泊 FLNG 锚链受力的影响	61
5.3 数值模拟流场展示与分析	63
5.3.1 单点系泊 FLNG 外部波浪流场分析	63
5.3.2 单点系泊 FLNG 液舱内部流场分析	65
5.4 本章小结	66
第六章 结论与展望	68
6.1 全文结论	68
6.2 未来展望	71
参考文献	72
致谢	79

攻读硕士学位期间已发表或录用的论文	81
-------------------------	----

第一章 绪论

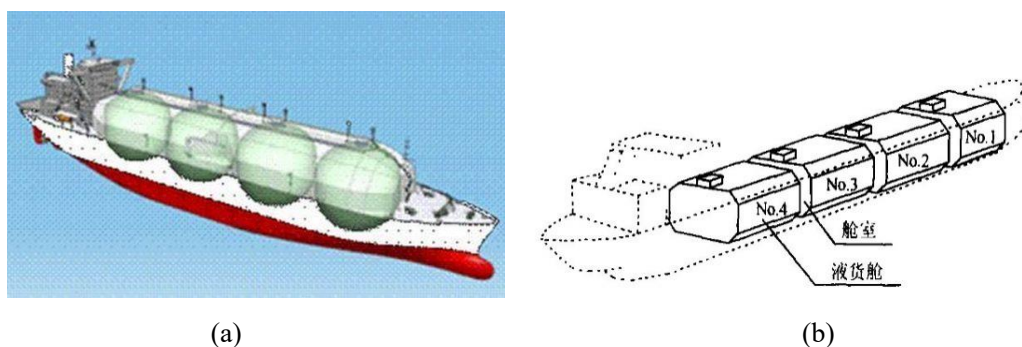
1.1 研究背景目的简述

1.1.1 FLNG 简介与技术难点

自人类进入 21 世纪以来,资源紧缺问题逐步显露出来,开发海洋能源已经成为未来的发展趋势。我国海洋能源储量丰富,而对资源的勘探开发仍然处于早中期的阶段,在我国的海洋资源中,石油和天然气的储备量分别占全国总储量的 23% 和 30%,可见海洋能源的未来发展空间巨大^[1]。同时,中国一直致力于环境保护,推广适用新型清洁能源,因此天然气能源的开发与运输逐渐成为热点研究课题。

随着人类对海洋能源的开发技术的不断进步,海洋天然气资源的开采范围也从近海逐渐走向了深海,在对深海范围天然气的开采运输过程中,以往的近海管线运输能源的方式已经不再普遍适用。原因主要有两点,一是对于远海的深海资源区来讲,开采位置距离海岸线较远,管线的建设成本巨大,维护要求更高。二是天然气在常温下是气体资源,管线运输效率低。为此,针对深海油气的开采,人们设计出了一种大型浮式液化天然气设施 FLNG(Floating Liquefied Natural Gas),整套作业系统包括 FLNG 主体、油气采集输送装置以及穿梭油船 LNG 船等。作为主体的油气处理平台 FLNG 船,具有对油气进行初加工、储存与外输的能力^[2]。整套系统具有经济、可靠、可适应大部分海域的特点,相当于一座大型的海上油气工厂,具有很高的商业价值与战略意义。目前,FLNG 的概念已经被众多世界能源公司所接受,并开始投入工程化建设。截止 2017 年,全球已有一艘 FLNG 船投入商用,并陆续有 FLNG 投入生产。

液化天然气船的液舱形状主要分为球形舱和薄膜式舱两种^[3],见图 1-1。形状的选择主要考虑的是建造难易度和储存容量问题。随着薄膜式舱壁中,拥有抗低温能力的材料殷瓦钢的投入使用,使薄膜式液舱具有重量轻,空间利用率大的优点,并在如今的 LNG 船上应用越来越广泛。本文研究的船舱形状即为薄膜式。



(a) (b)

图 1-1 球形舱(a)与薄膜式舱(b)LNG 船示意图

Fig.1-1 The graph of spherical tank (a) and prismatic tank (b) of LNG ships

FLNG 承载了大量的液化天然气资源，而这种资源严苛的储存条件以及流动特性使工程中 FLNG 船的建造更加困难。未来对于 FLNG 仍有很多复杂的技术需要探索，例如液舱晃荡问题，系泊问题，LNG-FLNG 之间输油时的旁靠、串列问题等等。每一个领域的深入研究都会在工程上发挥十分重要的指导作用，因此对于 FLNG 系统的研究已逐渐成为海洋工程领域的热点研究课题。

1.1.2 液舱晃荡问题难点

在 FLNG 船的内部带有液化天然气的储存液舱。舱内运载的液化天然气具有密度小，流动性强的特点。随着船体在波浪中的摇晃，内部液舱中的流体会出现流体晃荡的现象。反过来，在液舱内部剧烈晃荡的液体也会对液舱壁施加砰击压力，从而影响船体运动。因此 FLNG 船除了类似其他船型的水动力运动特性之外，还具有与之不同的复杂液舱晃荡耦合运动的现象。而当前人们对于液舱晃荡的机理，影响因素规律还有待深入研究。

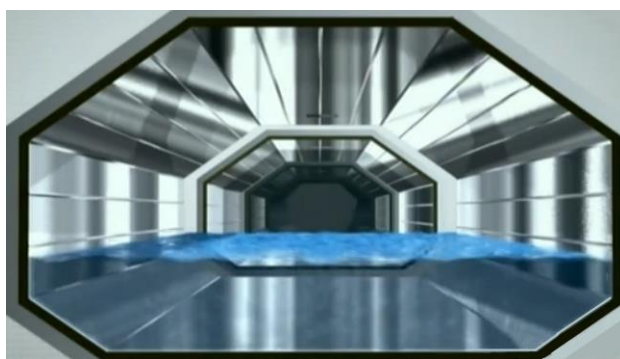


图 1-2 部分充液情况液舱截面透视图

Fig.1-2 Section view of liquid tank under partial filling condition

剧烈的液舱晃荡现象对船体的危害不容忽视，比如，当外界波浪频率临近液

舱内部流体晃荡的固有频率时，会引发剧烈的晃荡现象，由此可能加剧船体的运动幅值，造成船体的倾覆。同时，剧烈的晃荡也会对液舱的舱壁产生较大的撞击压力，致使船舱破损。再考虑到液化天然气所需要的低温高压的储存要求，在 FLNG 整个作业与航行的过程中，液舱晃荡所带来的安全问题都不能轻视。该现象轻则导致天然气泄露，重则导致 FLNG 起火爆炸等重大事故，严重威胁人们的生命财产安全。因此对于液舱晃荡与船体运动之间的耦合机理研究，在如今 FLNG 工程领域中具有重要意义。也是在未来 FLNG 大量投入商用前，亟待解决的关键技术问题之一。目前，国内外专家学者也在液舱减晃荡装置上做了大量工作，取得了不小成果。鉴于目前工程上 LNG 船液舱多以球型和薄膜型为主要液舱形式，舱内无减晃荡装置，因此本文暂不考虑减晃荡装置对液舱晃荡的影响。

1.1.3 FLNG 系泊系统设计问题

开采作业中的 FLNG 船舶通过锚泊系统与海底相连，以此进行船舶定位，并且往往要长期固定于某一个特定作业地点。由于深海海浪环境十分复杂，作业船舶很可能遭遇十分恶劣的极端海况，再考虑到作业船舶上工作设备以及工作人员需要在较为稳定的环境下工作。作业中船舶的稳定性和船体定位能力就显得尤为重要。设计的 FLNG 在作业中主要依靠锚泊系统来进行定位，在系泊状态下，锚泊系统对船体施加锚链力即回复力，使船舶回归初始位置。系泊系统与船体运动之间的耦合运动，会影响 FLNG 在水平面上的稳定性，从而影响到船上作业的安全性。观察目前工程上设计的 FLNG 锚泊系统，常用单点系泊形式，该主要分为外转塔与内转塔两种单点系泊方式^[2]。见图 1-3 所示。

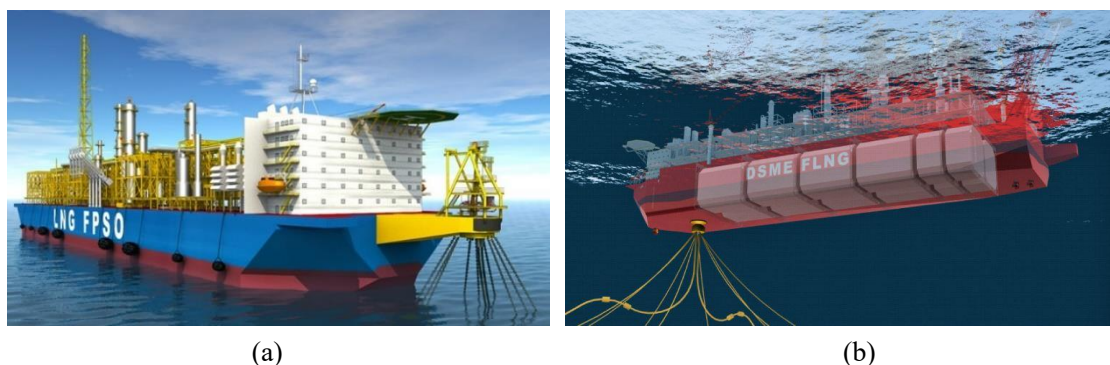


图 1-3 FLNG 外转塔 (a) 与内转塔 (b) 单点系泊系统示意图

Fig.1-3 The sketch of external (a) and internal (b) single point mooring torrent of FLNG

内转塔系泊类型是通过在船首附近、船舶内部建造内转塔对 FLNG 进行单点系泊。外转塔系泊类型是在船首前设立船体外部的转塔，与船体连接进行固定。

因为单点系泊情况下的 FLNG 船可以绕着系泊点进行 360° 旋转运动，同时，具有大长宽比的 FLNG 船受波浪力的影响十分敏感。所以单点系泊的优势之一是 FLNG 会受波浪作用力的推动进行转动，使船首始终会转到迎着来浪来流的方向，从而减小船体运动幅值以及所受载荷大小，降低风、流、浪对 FLNG 船体的不良影响。该现象类似风向标的原理，因此被称为“风标效应”。对比外转塔与内转塔两种系泊方式的优缺点，外转塔系泊的优点是减少对于甲板的利用面积，提供更大的生产平台，并且相对于内转塔，对船舶建造技术要求较低。类似于外转塔系泊，软钢臂系泊方式允许船舶与系泊系统相分离，该应用适合于二手油船改装 FLNG^[4]。见图 1-4(b)。在遭遇风暴时，船舶脱离系泊转塔，被驳船拖至安全区域，待风暴过后返回作业区域重新系泊，具有安全与经济的特点。单点系泊的优势是可以减少立管与系泊锚链的作用力，提高系泊与作业的安全性。由于系泊点距离船中位置越远，系泊点位置的运动幅值越大，但系泊点距离船中越近，“风标效应”越弱，有时需要采取助推系统进行动力定位来进行辅助，受海洋作业环境影响较大。因此在系泊形式设计中要综合考虑立管与锚链的承受能力以及作业区域的海洋环境等重要因素。除了单点系泊以外，还有多点式系泊方式。软钢臂系泊方式以及多点系泊方式见图 1-4 所示。

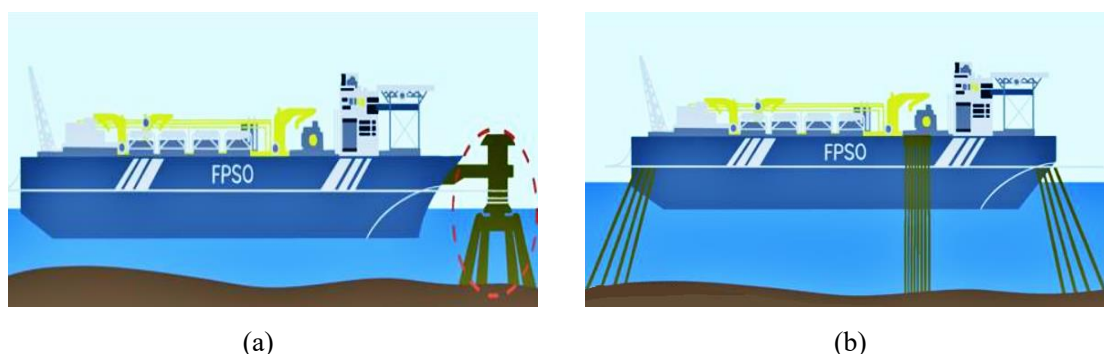


图 1-4 FPSO 软钢臂单点系泊(a)与多点系泊(b)系统示意图

Fig.1-4 The soft yoke single point mooring (a) and spread mooring (b) system of FPSO

在工程中，除单点系泊以外，还有多点式系泊方式。多点式系泊同样具有优缺点。由于单点系泊转塔需要复杂的机械与设备，成本和维修费用高。所以多点系泊的设备简单，可以实现国产化，就成为该方式的一大优势。因此在作业环境相对良好的环境中，可以采用多点系泊的方式来固定浮式结构。但对于长宽比大的浮式结构物，由于对于载荷作用力方向更加敏感，多点式系泊的固定方式可能会导致锚链断裂。所以目前多点式系泊方式主要应用于长宽比较接近的浮体，如海洋平台，以及一部分 FPSO 船型^[5]。在本文中，主要对单点系泊大长宽比的

FLNG 液舱晃荡耦合运动进行数值模拟分析，根据参考文献中的物理试验模型进行数值模型的构建，系泊系统属于外转塔式单点系泊。

1.1.4 CFD 全流场数值模拟的优势

随着计算机性能的提升，计算流体力学 CFD 方法已经成为目前船舶与海洋工程中热点的研究方法。作为数值模拟方法，相较于物理水池试验成本更低，实验周期更短，且通过精细化流场，能观察到物理实验观察不到的流体运动机理。相对于以往势流方法，CFD 方法考虑流体粘性，计算结果更加接近真实物理情况。且对于复杂形状的液舱（如菱形球形等）来说，高充水率时自由液面处于坡度较陡处时，线性势流理论无法计算，而 CFD 方法可以很好的模拟这种形状的液舱。同时 CFD 方法还具有对各时刻流场可视化的优势，并且可以处理自由面复杂变化、结构物大幅度运动等问题。本文应用 CFD 方法，对 FLNG 船液舱内流场以及外部波浪场同时进行数值模拟。考虑全流场中流体的粘性影响，使得计算结果更加接近真实情况，并且可以通过对全流场的观察，多角度分析液舱晃荡耦合运动机理。在对锚泊系统的模拟上，CFD 方法可以实现全水深锚链模拟，考虑了拖底段所受阻力以及锚链质量对于锚泊系统的影响，从而使模拟结果更接近真实情况。综上，针对本文的研究问题，CFD 方法具有特殊优势。

1.2 国内外研究现状

本文研究的波浪中单点系泊 FLNG 液舱晃荡耦合运动响应问题较为复杂，其中涵盖了多个研究课题方向，包括强迫运动液舱的晃荡问题、液舱晃荡与船体运动耦合问题以及单点系泊时船体在波浪中水动力响应问题等。目前国内外对于各个方向已有大量的研究。主流的研究方法有物理模型试验方法、势流方法以及势流与 CFD 相结合求解的方法。国内外专家学者已经对上述方法进行了验证，并在此基础上取得了不小研究成果。本节将针对不同问题，对国际上的研究现状加以梳理。

1.2.1 液舱晃荡与船体运动耦合问题

国内外针对液舱晃荡问题的研究已有较长时间的积累，国际上已经有一批学者应用多种方法对液舱中强迫晃荡现象进行了大量研究。并在此基础上，对波浪环境中的带液舱浮箱、带液舱 LNG 船的液舱晃荡耦合运动问题进行了研究，并取得了一定成果。在研究方法方面，当前主要包括物理试验研究与数值模拟研究两

大方面，两种方法相互之间可以进行验证和补充。在数值模拟研究方法中，主要有势流方法和计算流体力学 CFD 方法。两种数值模拟方法各有利弊，目前的大多数研究中，专家学者主要采用势流方法和 CFD 方法相结合的方式，在保证计算效率的基础上，提高计算的准确性。下文主要对国内外应用不同方法进行研究的现状和所取得的成就进行梳理。

1) 物理试验方法

在对液舱晃荡现象的研究中，各国学者对液舱晃荡现象进行了多种情况下的物理模型试验，如图 1-5 所示，并进行了对应的数值模拟计算，通过对比两种方法的计算结果，验证并发现了液舱晃荡的一般规律。其中较为经典的试验有以下几个。Faltinsen 和 Rognebakke^[6]在水槽中对带双液舱的矩形浮箱进行了液舱晃荡物理试验。二人在水槽中造波，激励浮箱进行限制自由度的横荡运动。并采用线性势流与非线性两种方法进行了模拟，验证发现模拟结果与试验较为符合。试验发现，在某些情况下，液体晃荡现象对浮箱壁产生的作用力会与波浪产生的部分激励力进行抵消，减小横荡运动的幅值。当波浪频率与液体晃荡固有频率相接近时，很小的横荡运动就会诱导出剧烈的晃荡现象。Akyildiz 等^[7]对长方体液舱中晃荡对舱壁的压力分布进行了物理模拟试验，并观察晃荡的三维效应。试验同样也观察了隔板减晃装置对晃荡的影响。Molin 等^[8]在试验中研究了平顶浮箱顶盖和斜面倒角浮箱顶盖形式对液舱晃荡的影响，对液舱耦合运动的响应进行了监测。通过应用线性势流理论方法进行对比验证，发现不同舱顶形状虽会造成的不同程度的内部能量耗散，但是体现在运动响应上的影响很小。不过，在高充液率的情况下，改变舱顶形式会改变自由液面的面积，从而致使晃荡共振频率偏移，在某些频率情况中，表现出液舱运动响应幅值减小。Nam 等^[9]在波浪水池中对带有两个液舱，部分充液的 LNG-FPSO 船模进行了物理试验和对应的数值模拟。在数值模拟中，应用势流与 FEM 方法相结合的方式，分别对波浪流场与液舱内部流场进行数值模拟，加快了计算效率，也保留了液舱内部流场的模拟准确性。模拟结果与试验结果吻合良好，并发现船体运动和液舱晃荡有明显的耦合现象。在波浪流场激励情况下的耦合运动中，液舱内部压力明显不同于强迫晃荡时液舱中的压力结果，说明在实际工程中，波浪中的液舱晃荡耦合运动需要更加深入的研究。Nsasr 等^[10]在波浪物理水池中，对带有双液舱浮箱式驳船进行了液舱晃荡耦合运动试验。针对浮箱的升沉、横摇以及横荡自由度上的耦合运动情况进行了分析，并与液舱的空舱情况作对比。给出了充液晃荡情况，波浪频率因素对于耦合运动的一般影响规律。Battaglia 等^[11]对三维流体强迫晃荡问题进行了物理试验与数值研究，在

模拟中考虑了充液深度和流体粘性的影响。并通过模拟，分析了二维和三维对晃荡的影响。

国内对于液舱晃荡问题的试验研究，尤其是在物理波浪水池环境中带液舱浮箱、LNG 船等的液舱晃荡耦合运动的试验研究起步较晚。但近年来已经开展了大量工作并取得了不错成果。张新放等^[12]梳理了 FLNG 相关研究问题以及国内外研究成果。祁恩荣等^[13]基于某大型 LNG 船的液舱制作了精细的液舱模型，通过对不同载液水平液舱在不同激励形式下的物理试验，探究了晃荡冲击压力特征。陈强等^[14]对强迫横摇运动中带液舱浮箱的液舱晃荡现象做了系统化的研究。在波浪水槽中，对带液舱的长方体型浮箱所做的液舱晃荡-横摇耦合运动响应进行了试验，并进行了对应的数值模拟来验证与补充。通过研究，给出了波浪频率，充液率等因素对充液浮箱的液舱晃荡现象的影响规律。徐潜岳^[15]对液舱晃荡中模型的比尺效应以及晃荡对液舱的冲击载荷进行了研究。薛米安等^[16]对宽频带 Bretschneider 海浪谱与窄频带 JONSWAP 海浪谱激励情况下的矩形液舱晃荡现象进行物理试验研究，详细探讨了两种海浪谱对液舱晃荡的不同影响。Zhao 等^[17]对带有不同充液情况的二维浮箱在波浪中的晃荡-运动耦合问题进行了物理模型试验和数值研究。发现在一阶运动模态中，晃荡对于整体运动的影响显著，而在高阶模态下的影响则并不明显。

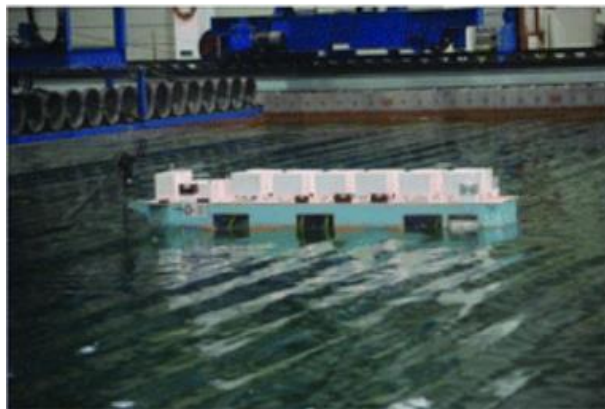


图 1-5 多液舱 FLNG 船在波浪水池中的液舱晃荡实验
Fig.1-5 Liquid tank sloshing experiment of multi-tank FLNG in wave tank

赵文华等^[18,19]后续针对液舱晃荡与整船运动间的耦合影响进行了物理水池中的模型试验，采用并制作了多液舱 FLNG 船模型，在物理波浪水池中进行了不同波浪环境作用下的物理试验，见图 1-5 所示。为了分析充液液舱晃荡对 FLNG 整船的影响，对照组实验将原液舱内的液体换成等质量的固体压载，并在同工况下进行实验，对比结果展示出液体晃荡在部分频率下会对整船运动中的横摇，纵摇

运动产生较为明显的影响。同时在实验中还观察到了具有重要意义的液舱内多模态晃荡现象。苏仰旋等^[20]基于世界上第一艘 FLNG 制作比例尺 1/300 的物理模型, 在物理波浪水池中进行了带液舱充液 FLNG 拖拽试验, 研究了载液率对液舱晃荡的影响, 以及晃荡对于拖曳阻力的影响。张东伟等^[21]在深水池对多液舱载液 FLNG 模型进行了物理试验, 通过观察液舱内液面高度, 提出了平液面假设, 并以此探究了舱壁晃荡压力的影响因素。王舒雅等^[22,23]在物理水池中对 FLNG 模型进行了液舱晃荡耦合运动试验。其中白噪声试验, 探究了频域内液舱晃荡对 FLNG 运动响应的影响。并在风浪流联合作用试验环境中, 对比充液与固定压载情况下 FLNG 的运动响应情况。通过统计分析, 对耦合运动特性进行了研究。文中研究方法思路有很好的参考价值。

2) 势流理论方法

势流方法假设船体进行小幅度运动, 不考虑流体粘性, 对复杂问题进行简化。专家学者最早运用线性势流公式对液舱内外流场进行计算, 得到液舱晃荡耦合响应。对于势流方法中的线性与非线性理论, Ibrahim^[24]在其书中做出了综合性的全面总结。包括线性晃动动力学、非线性晃动动力学, 以及晃荡与结构物相互作用耦合问题和旋转液体和低重力晃动问题, 对晃荡问题的理解值得参考。Abramson^[25]在 1966 年就将自己的研究结果与相关研究文献进行了整理与总结, 早期的方法主要对规则舱如圆柱舱和球形舱进行了多自由度方向上的晃荡实验与计算推导。虽然计算方法简便, 能快速得到压力计算结果, 以及液舱力矩和晃荡频率等数据。但在进一步研究中, 发现该方法仍存在很多不足, 首先势流模型不能准确表达真实流体, 其次计算的模型必须做小幅度运动, 这就限制了该方法的有效性。再者, 对于复杂舱型的计算坐标系选取上存在困难。不过在后来的研究中, 采用边界元离散方法可以解决这个问题。随着计算能力快速发展, 人们提出了非线性理论, 并与原线性势流理论进行综合。对于船体在波浪中的运动采用标准线性切片理论配合脉冲响应函数方法来进行求解, 对于液舱内部晃荡问题则采用非线性方法来进行描述。Newman^[26]以及 Kim^[27]等人应用线性频域法, 对液舱晃荡与船体运动耦合影响进行了分析, 计算发现在横浪条件下, 晃荡现象对升沉和纵摇两自由度运动上耦合影响很小, 主要体现在对横荡与横摇运动影响上。Faltinsen 与 Timokha^[28]提出了一种自适应的多模型的非线性方法, 应用该方法对液舱晃荡耦合运动进行计算。该方法仍假定流体无粘无旋, 除此之外假设舱盖无穷高, 且波浪不出现翻卷现象。二人运用该方法对长方体型液舱的晃荡现象进行了计算。计算结果与模型试验进行了对比, 验证了该方法的有效性。当液舱内晃荡流体不与舱

顶产生剧烈冲击,且充液的深度大于液舱宽度 0.24 倍时,计算结果与模型试验吻合良好。在之前的研究中,Faltinsen^[29]给出了有限水深方法,但该方法不适用于液体深度小于 0.24 倍液舱宽时的浅水情况。在随后的研究中发现,浅水时液体晃荡的每个模态可能会有多个主谐波,在接下来的研究中提出新的非线性浅水理论对原理论进行补充。新理论解决了有限水深方法对于液体深度为 0.173 倍液舱宽情况时的不适用情况,计算结果与模型试验结果吻合良好,验证了有效性。由此其理论更加完善。

Zhao 等^[30]基于势流理论,编写了矩形 LNG 液舱在强迫激励下非线性晃荡的数值计算程序。求解了压力计算中的加速度势并引入人工阻尼计算晃荡中的能量耗散。通过将数值模拟结果与物理试验结果进行对比,修正壁面边界条件的人工阻尼模型适用于不同液体填充率情况。大连理工大学勾莹等^[31]利用线性势流方法对 FLNG 液舱内外流场进行模拟计算,并考虑了晃荡与整船运动的耦合影响。计算中应用格林公式和基于频域以及时域的 Rankine 平板法对晃荡耦合运动进行处理。计算得到了部分充液情况下,带有双液舱的 FLNG 的耦合运动响应结果。通过与模型试验相对比,验证了方法的合理性,认为该方法可以作为分析液舱晃荡与船体运动耦合的初步的计算工具。上海交通大学赵文华等^[32]应用边界元法,对波浪中箱型浮体,即 FLNG 液舱的简化模型,受液舱晃荡影响的运动响应情况进行了计算与准确性验证。从液舱内外壁受到的诱导力的相位差角度,提出了晃荡对整体运动减摇作用的可能原因。同时,赵文华等^[33]采用势流方法,应用 WADAM 程序,对设定波浪频域内的液舱内外流场情况进行了数值模拟。模拟考虑了迎浪和横浪两种浪向情况,对带液舱以及不带液舱的 FLNG 船分别进行了计算和对比。发现相对于其他自由度,浪向因素与波浪频率因素对船体的垂荡运动影响很小。在特定充液率下,不同的浪向会对 FLNG 船体整体运动的规律产生明显不同的影响。除此之外,发现液舱晃荡现象可能加剧或减弱船体整体运动响应幅值。且由于液舱晃荡现象的存在,船体运动的共振频率会发生偏移。赵文华^[34]在其博士学位论文中,对 FLNG 问题进行了系统的研究与分析,展示对 FLNG 船在海洋环境中的水动力预报方法,开发了求解在液舱内外流场作用下运动耦合的非线性势流方法程序,并对物理试验方法进行了改进。文中采用的非线性势流求解方法,可以有效提高模拟的计算精度。最后结合南海海洋环境,展示了该方法在工程上的应用,并对 FLNG 船工程设计中的前期设计工作提供了参考依据。

以上势流方法在频域内均可以较为准确地展示液舱晃荡对于船舶运动的耦合影响,并容易发现晃荡共振产生的频率。但研究中也发现,该方法仍存在不足,

比如由于考虑液体无粘无旋，物体小位移运动以及计算方法中的线性假设，在特殊频率位置，势流方法计算结果会出现偏离物理试验的真实流场结果的现象。由于液舱晃荡现象属于强非线性问题，因此为了引入流体粘性，物体大幅度运动，进一步提高计算准确度，势流方法仍需要新的研究方法理论与理论进行完善与补充。

3) CFD 数值模拟方法

高性能计算机 HPC 的不断技术升级，使计算机的数据处理能力大幅度提升，以往计算流体力学 CFD 方法消耗大量计算资源的劣势逐渐减弱。目前国内外专家学者应用计算流体力学方法处理水动力问题逐渐变成了未来的发展应用趋势。CFD 方法具有考虑流体的粘性，并且允许结构物在一定幅值范围内运动的特点。因此，在研究具有强非线性的液舱晃荡问题上，CFD 方法就逐渐展示出了巨大的优势。

Kim 等^[35,36]应用非线性时域方法，基于有限差分法，对棱柱形液舱强迫晃荡问题进行了研究。在通过二维模型验证后，对三维液舱受内部流体晃荡产生的砰击压力进行了预报，并研究了舱内增加隔板对晃荡现象的抑制效果。Lee 等^[37]模拟了波浪中带有多个液舱的 FPSO 的液舱晃荡耦合运动问题，用三维绕射/辐射理论的势流方法对船体所受的波浪力和水动力系数进行计算，对液舱内晃荡的流体液面采用有限差分法进行模拟，但模拟不计及液体翻卷与飞溅等强非线性现象。不过相较于在频域范围内应用纯势流方法，该方法虽然具有一定简化，但计算结果更加合理。Ryu 等^[38]应用 CFD 方法，采用 FLUENT 软件对并排两列液舱布置情况下晃荡流体对舱壁的压力情况进行了模拟与分析，发现并排液舱布置情况下压力有所减小。同时也进行了物理模型试验对比验证。陈翔等^[39]介绍了移动粒子半隐式 MPS(moving particle semi-implicit)方法的应用现状，以及 MPS 方法处理自由液面强非线性大变形的优势。可以展示液舱晃荡问题中的液面破碎、翻卷以及液体飞溅等现象，并与物理试验现象吻合良好。对于液舱晃荡问题祁江涛等^[40]，应用流体体积 VOF(volume of fluid)方法来模拟液舱内的流体自由面，模拟中给定液舱横荡与横摇运动，观察晃荡现象。对二维液舱的压力计算结果与光滑粒子流体动力学 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)方法计算结果相近。在对三维液舱模拟中，VOF 方法可以展示自由面形状，包括波浪的翻卷破碎现象。

目前，对于液舱在波浪中的内部液体晃荡与整体运动的耦合响应问题的研究，大多应用势流与 CFD 相结合的方法，即利用势流方法计算液舱外部非线性较弱的波浪场对液舱的作用力和水动力系数，利用 CFD 方法来模拟液舱内部的强非线性流体晃荡情况，计算内部晃荡流体对液舱内壁的作用力，再综合液舱内外壁的作用

用力对液舱的运动进行求解，体现出耦合的特征。这种方法的好处是可以在拥有较高计算效率的同时保证一定的计算精度。示意图如图 1-5 所示，其中 IRF (impulse response function) 方法为势流理论中的脉冲响应函数法。

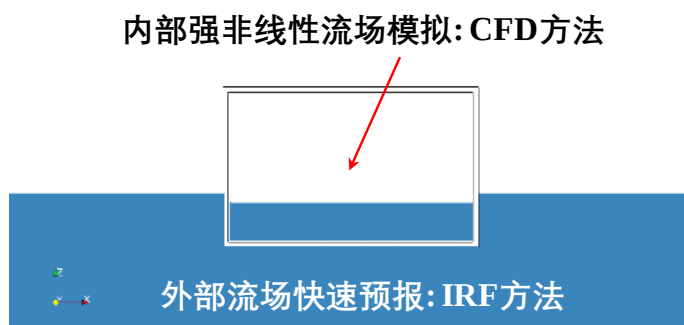


图 1-5 势流-CFD 相结合方法示意图

Fig.1-5 The sketch of a method combined potential flow method with CFD method

Kim 等^[41]较早地应用势流和 CFD 相结合的方法进行研究，即用两种方法分别对液舱内外流场进行计算，考虑舱内流体晃荡具有较强的非线性特征，粘性因素不可忽略，Kim 采用有限差分法对其进行处理。对于舱外部的波浪场，则采用 IRF 方法进行计算。比较之前的纯势流方法，此方法得到的船体运动与液舱晃荡耦合现象计算结果，与模型试验结果吻合更好。李裕龙等^[42]也应用脉冲响应函数 IRF 方法与有限差分法对波浪环境下船体运动与液舱晃荡耦合问题进行研究，文中讲述了内外流场两种计算方法的耦合公式，展示了计算实现的步骤流程图，对耦合运动的计算方法以及内外流场信息传递的表述比较清晰。Wang 等^[43]同样应用势流方法模拟外流场，但使用三维有限差分法来模拟液舱内部流场，对晃荡与船体运动耦合现象进行时域分析。文中考虑了不同浪向，不同波浪频率的影响因素，并展示了模拟出的液舱内自由液面的强非线性情况。Kim^[44]基于势流方法的边界元法对液舱的运动进行模拟，应用改进的 MPS 移动粒子法对舱内流体进行模拟。两种计算方法的结果在每一计算时间步中进行交互，从而实现耦合。洪亮等^[45]在时域内应用时延函数，采用切片法和脉冲响应函数法来计算波浪中的船体水动力系数。应用时域边界元法来计算液舱内的非线性晃荡。在晃荡的流体不发生波面翻卷破碎的情况下，模拟结果较为准确，且计算效率较高。邓琪等^[46]应用 OpenFOAM 开源代码包对强迫振动的单液舱浮箱进行了 CFD 数值模拟，通过输入超谐激励，使液舱内部液体产生倍于晃荡固有模态的超谐振动，此时可以明显地观察到液舱内部液体产生了剧烈的破碎翻卷等强非线性现象。赵文华^[34]在其博士毕业论文中，对 FLNG 系统、系泊系统、旁靠问题和液舱晃荡耦合问题进行了

详细系统的分析，部分试验结果可以用作数值模拟验证的参考。在数值计算方法上，文中对于液舱内外流场的计算主要采用频域势流方法^[47]。Jiang 等^[48]将势流脉冲响应函数 IRF 方法与 OpenFOAM 开源代码包 CFD 方法相结合，利用自主开发的程序实现了内部 CFD 结果与外部势流结果的信息交互，并在其博士毕业论文^[49]中，对液舱晃荡与整体运动耦合现象做了系统化的工作，并与物理试验对照验证良好。其中通过改变波浪频率、液舱充液率和波浪波高的方法来观察晃荡现象对液舱耦合运动带来的影响。并通过分析液舱内外壁所受的力矩大小和相位差与运动响应之间的关系，进行了液舱晃荡机理性的分析。其中部分试验结果为本文第三章数值模拟结果的验证提供了参考。

由于计算资源限制，在国内外对波浪环境中液舱晃荡耦合运动的研究中，采用 CFD 数值模拟方法对液舱内外全部流场同时进行计算的研究较少。此种方法的计算效率虽然相对上文方法低，但由于考虑了波浪场和液舱内流场的粘性和非线性因素，对流场的求解结果更加接近真实物理情况，同时 CFD 方法可以模拟出上文方法不能展示的全流场变化情况，因此相较于物理试验以及势流方法都更有优势和研究空间。基于此方法上海交通大学尹崇宏等^[50]应用组内自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器，对带有前后双液舱的 LNG 船在波浪中的液舱晃荡耦合运动进行了模拟，结果给出了船体运动时历，并展示出了液舱内外的流场可视化信息。Zhuang 等^[51]应用 CFD 方法同时求解液舱内外流场，并引入了 overset 重叠网格技术解决船体大位移求解问题，针对带有双液舱的 LNG 船的液舱晃荡进行数值模拟。Zhuang^[52,53]又结合了波浪浪向、波浪高度，液舱充液率等因素考察对耦合运动的影响。可以监测到液舱内壁受到的砰击压力，观察到在极端海况下 LNG 船内外流场产生的翻卷破碎等剧烈非线性现象在对晃荡机理的探究中，Zhuang 等^[54]对弹簧锚链系泊的浮箱在规则波中的晃荡耦合横荡运动进行了研究，研究中引入了弹簧锚链力对运动的耦合影响。

1.2.2 单点系泊情况下的船体水动力问题

针对锚链系统设计中的单点系泊问题，船舶领域以往普遍采用的方法是用势流软件计算求解 FPSO 的运动响应，并与对应的物理模型试验结果进行比对。大量的研究都取得了不错的成果^[55]。Kim 等^[56]模拟了在 6000 英尺水深，百年一遇海况，非定常风条件下，内转塔系泊 FPSO 船体、锚链与立管之间的耦合作用，该模拟结果与 OTRC 水池物理试验结果对比很好。随后 Kim 等^[57]又针对 OTRC 实验结果，将单点系泊锚泊系统的四组锚链简化成每组一根。利用 Winpost FPSO 软

件,对 FPSO 进行建模,利用 FPSO 自由衰减试验对数值方法与数值模型进行了验证,随后模拟了波、浪、流环境下, FPSO 的运动响应情况,得到了各锚链的锚链力情况,其结果与试验结果对比良好,其研究思路为本文研究提供了很好参考。Soares 等^[58]考虑了一系列迎浪规则波以及不规则波情况,针对转塔式单点系泊的 FPSO 进行了试验并通过势流 WAMIT 软件模拟验证,结果吻合良好。Masuda 等^[59]根据船舶操纵性的数学模型,针对单点系泊 FPSO 在水平面运动的水动力系数提出了预估方法。文中应用细长体理论作为基础,对来流作用在船体上的水动力问题进行了计算并验证。结果表明该方法可以预估当 FPSO 做缓慢变化的振荡时作用在船体上的水流作用力。不过作者也表示细长体理论只能应用在物体漂移角较小的情况,当漂移角增大就要改用交叉流模型或者 CFD 方法进行有效计算。

国内袁洪涛等^[60]应用 AQWA 和 OCRAFLEX 软件,对深水单点系泊 FPSO 在风浪流环境中的运动响应,以及系泊力进行了时域与频域分析,并研究了压载与满载两种情况对 FPSO 运动幅值以及锚链力的影响。发现满载情况 FPSO 运动响应相对较小,但是对应锚链力更大。风与流对锚链力影响也十分明显,当风浪流存在夹角时系泊链锁受力最大。刘元丹等^[61]利用 AQWA-DRIFT 软件,分析波、浪、流联合作用的环境,对带立管、锚链系统的 FPSO 的运动响应的影响。给出了单点系泊 FPSO 的六自由度时域运动响应计算结果,并对锚链力计算结果也进行了分析。文中结论对工程中的系泊系统初始设计具有一定参考价值。Liu 等^[62]应用系泊系统模块,对波浪中半潜浮式平台在动态分析和静态分析两种系泊方法中的锚链力以及平台运动情况进行计算对比,还做了不同锚链材料布置情况下的计算结果的对比工作。王建华等^[63]采用动态分析方法求解系泊系统,对南海浮式码头分布式系泊方式进行数值模拟,通过与静态分析方法结果之间进行对比,阐述了两种方法的优缺点。谢志添等^[64]对单点系泊 FLNG 在风波流联合作用下的运动进行了频域与时域的势流方法计算,并通过模型自由衰减实验与系泊系统水平刚度实验,验证了计算模型的准确性。文中模拟了充液 FLNG 在不同海况下的液舱晃动对六自由度运动的耦合影响,以及波浪流传播方向对 FLNG 运动响应和锚链力的影响,文章整体研究思路与实验结果具有较强的参考性。除此之外 Xie 等^[65]还分析了单点系泊系统中转塔纵向位置对于船舶运动响应的影响。赵文华等^[66]指出应用单点系泊系统的 FLNG 船体将在波浪中出现“风标效应”,在船首方向与来浪来流方向呈夹角时,船舶会在浪与流的作用下,逐渐使船首迎向来浪来流方向,稳定在海洋环境对 FLNG 船横向运动响应影响较小的位置。同时文献还指出了内转塔与外转塔单点系泊方法各自的优缺点。表示系泊系统与船体运动之间的耦合

问题值得更加深入地研究。

1.2.3 单点系泊充液 FLNG 船液舱晃荡耦合运动问题

在实际工程中,当 FLNG 船进行装载或者卸载作业时,船舶中的液舱充液率在不断发生变化,导致液舱内部流体晃荡的固有频率也在不断变化。很可能受外界激励力的影响产生共振,出现液舱晃荡现象,从而加剧船体运动或者使舱内壁受到的砰击压力迅速增加,导致危险的发生。当 FLNG 停留在特定海域作业时,需要通过系泊使其固定在某一范围。目前最常见的是单点系泊形式,此种系泊方式允许船舶在水平面内绕系泊点进行旋转,整个系统依靠锚链力对船舶的运动进行约束。因此,多种因素耦合影响下的船舶运动响应问题就变得更为复杂,需要进行深入探索。

目前,国内外专家学者对系泊、液舱晃荡与船体运动三种因素同时研究的工作仍比较少。许鑫等^[67]利用商业软件 Ariane 和 Orcaflex 研究了波流联合作用对于单点系泊 FLNG 的影响,发现由于波流耦合作用的存在,会大大增加系泊力以及最大水平位移。Hu 等^[68]对 FLNG 船的液舱晃荡耦合运动进行了物理试验,并参考试验,利用 SEASAM 势流软件,对 FLNG 船在多种工况下的运动耦合情况进行模拟,并对频域上的计算结果进行对比与验证。计算中的 FLNG 船放开了六个运动自由度,考虑了不同浪向与充液率因素,结论中给出的规律与以往浮箱模型试验得到的液舱晃荡耦合运动规律类似。Zhao 等^[69]进行了一系列单点系泊 FLNG 液舱晃荡耦合运动的试验,系统化地对系泊系统、液舱充液率、波浪参数以及波浪形式进行了研究。试验结果发现,在整个系统中,FLNG 的运动响应对遭遇波浪频率十分敏感,其中横摇运动所受影响最为明显。对比充液前后的船体运动,可以发现晃荡会改变运动响应的频率。随后赵文华等通过势流方法对相关试验工况进行了模拟并进行对比验证,得到的计算结果吻合良好,验证了试验与数值模拟的可靠性。有关试验的文献提供了大量完整的参考数据,本文对单点系泊 FLNG 的液舱晃荡耦合问题模拟参照该试验的基础上展开。采用 CFD 全流场模拟的方法模拟并探讨液舱晃荡、系泊系统与 FLNG 运动响应之间的耦合作用。

1.3 本文内容布置与重点特色工作

本文主要划分为五个章节,第一章主要介绍了本文研究背景和国内外研究现状。内容包括 FLNG 简介,液舱晃荡问题的产生与目前研究方法。单点系泊锚泊系统的优缺点与应用等。详细介绍了当前国内外对上述问题的研究现状与研究方

法。第二章主要介绍了本文数值模拟中所涉及知识,包括流体力学基本方程,数值模拟计算求解方法,锚泊系统求解原理等。论文第三章针对双液舱 FLNG 液舱在波浪中的液舱晃荡横摇耦合运动进行了数值模拟研究,探究了液舱充液率,波浪频率,波浪高度等因素对液舱晃荡耦合运动的影响。并参考物理试验结果进行了对比验证。第四章主要是参照物理试验模型对 FLNG 船进行数值模型构建,并进行了 FLNG 在波浪中的液舱晃荡耦合运动数值模拟。通过与空舱情况进行对比,分析了液舱晃荡对于运动响应的耦合影响。并考虑了充液率,波浪频率对于船舶在波浪中液舱晃荡耦合运动的影响。第五章在上文的基础上,引入了单点系泊系统的影响。对波浪中单点系泊状态下,充液 FLNG 的耦合运动响应进行了数值模拟。通过对比空舱 FLNG 的运动响应情况,以及无单点系泊的运动响应情况,分析液舱晃荡、单点系泊系统和船体整体运动之间的耦合作用关系。

本文重点特色部分在于,对于液舱晃荡问题,应用 CFD 方法,对液舱内部流场以及外部波浪场同时进行全耦合数值模拟,展示任意时刻,全流场的可视化信息,当前国内外应用此种研究方法的专家学者很少。通过与文献中势流方法计算结果进行对比,发现当使用 CFD 方法对全流场进行模拟时,在某些模拟工况中,一定波浪频率范围内的 CFD 模拟结果更加接近文献中的物理实验结果,体现了考虑流体粘性的 CFD 方法具有计算结果更加精确的优势。在对双液舱 FLNG 液舱在波浪中的液舱晃荡耦合运动响应的模拟中,在前人对液舱晃荡耦合运动时历研究的基础上,系统地研究了不同波浪频率,不同液舱充液率以及不同波陡三方面因素对液舱晃荡耦合运动的影响规律。同时,通过提取数值模拟得到的液舱内壁与船体外壁所受流场作用力矩信息,分析了不同情况下液舱内外部力矩大小以及相位差对于耦合运动的影响。在对波浪中单点系泊充液 FLNG 液舱晃荡耦合运动的模拟中,参照文献,准确还原了 FLNG 的物理试验模型与试验工况。利用 CFD 方法对全流场进行数值模拟,捕捉到了物理试验与势流方法中难以得到的瞬时全流场信息,展示了内外流场波面高度信息、截面速度信息与船体附近涡脱落的现象。实现了液舱晃荡、锚泊系统与船体六自由度运动三种因素之间的耦合影响,该模拟更加贴近实际工程设计的需要。本文在前人研究的基础上,对单点系泊 FLNG 液舱晃荡耦合运动问题进行了探究性的工作,验证了对全流场同时应用 CFD 方法求解的可行性,展示了 CFD 方法模拟该问题的优势,并在此基础上提出了未来值得深入研究的问题与思路。

第二章 数值计算方法

2.1 naoe-FOAM-SJTU 求解器介绍

本文应用课题组基于 OpenFOAM 开源平台，在平台自带求解器 interDyFoam 的基础上自主开发的船舶与海洋工程水动力 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU^[70]，对波浪中单点系泊载液 FLNG 液舱晃荡耦合运动问题进行数值模拟。

相对于以往研究中采用的势流方法，naoe-FOAM-SJTU 求解器应用 CFD 方法，引入了重叠网格技术，可以有效解决对结构物大幅度运动问题的模拟^[71]。该求解器也可以模拟强非线性现象如剧烈液舱晃荡^[72]、极限海况载荷模拟、波浪爬高^[73,74]、甲板上浪以及平台涡激振动^[75]等势流方法难以解决的问题。相较于物理模型试验方法，CFD 方法也具有成本相对较低，周期较短，能捕捉某一时刻全流场信息等优点。naoe-FOAM-SJTU 求解器各模块组成见图 2-1。

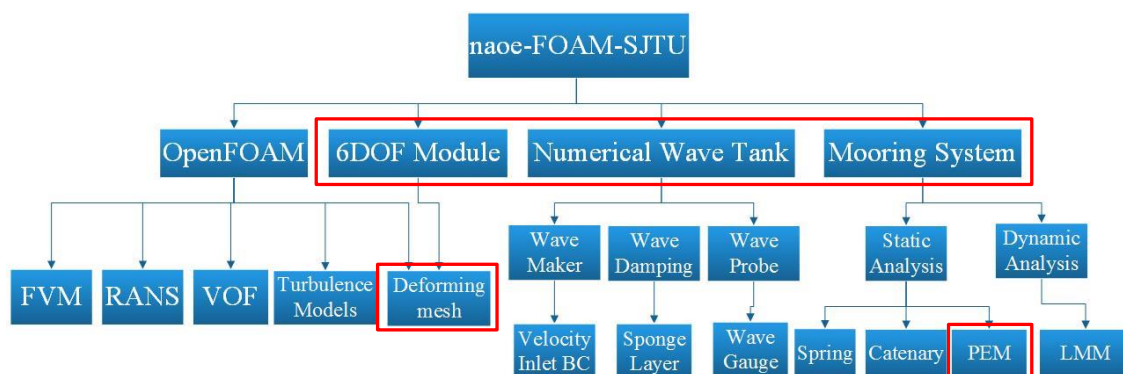


图 2-1 naoe-FOAM-SJTU 求解器的模块框架

Fig.2-1 The module framework of naoe-FOAM-SJTU solver

课题组基于该求解器做过大量研究工作，验证了求解器各个模块的可靠性与准确性。如对两相流，多种波浪条件的生成与模拟验证^[76,77,78]，船舶运动与阻力预报^[79,80]，应用重叠网格技术对船体大幅度运动船、桨、舵相互配合操纵性问题的模拟验证^[81]，系泊系统静力与动力分析方法模拟^[82]等，均取得了一定成果。以往的工作为本文问题的模拟提供了参考思路，并奠定了良好基础。

本文应用求解器中的船舶六自由度（6DOF）运动模块、数值波浪水池模块以及系泊系统模块，选用动网格技术，入口边界速度输入式造波方法，以及系泊系统静力学的分段外推法。在模拟中实现各模块之间的数据传递，对波浪中的液舱晃荡、船体运动与系泊系统的耦合作用进行模拟与分析。

在模拟中,求解器主要是对 $N-S$ 方程在时间、空间上进行离散,以此求解不可压缩粘性两相流体的非定常流动问题。控制方程如 (2-1) 和 (2-2):

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

$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial t} + \nabla(\rho(\vec{U} - \vec{U}_g)\vec{U}) = -\nabla P_d - \vec{g} \cdot \vec{x} \nabla \rho + \nabla(\mu \nabla \vec{U}) \quad (2-2)$$

公式中 U 是流体速度, U_g 是网格节点运动速度; 流场动压力 $P_d = P - \rho \vec{g} \cdot \vec{x}$ 即总压减去静水压; 水的密度 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 代表重力加速度, 水的动力粘度记为 μ ; 通过选取 $SST k-\omega$ 湍流模型, 对 $N-S$ 方程组进行封闭, 在结构物近壁面区域采用 $k-\omega$ 模型, 对远场采用 $k-\varepsilon$ 模型, 可以经济地满足合理计算精度。

对于两相流问题,就涉及到了自由液面捕捉技术。由于考虑到流体体积 (VOF) 方法具有守恒性良好,效率高于易于实现等优点^[83], 本文即采用 VOF 方法计算并追踪水相、气相的交界面, 作为一种十分常用的方法, 在此就不再赘述, 具体实现方法可以参考 Hirt 等人的工作^[84]。通过在网格中定义体积分数 α , VOF 方法可以对每个网格中的液体和气体的比例进行判断并进行计算, 当 $\alpha = 1$ 时, 该网格为液体, 当 $\alpha = 0$ 时, 该网格为气体。在对计算结果进行可视化后处理工作时, 一般选取 $\alpha = 0.5$ 的等值面作为流场内的自由液面。

在有了控制方程以及 VOF 方法体积分数的输运方程后, 还需要用到离散方法对方程进行离散求解。首先将流场的计算域划分成许多小单元网格, 将物理量信息储存在各单元的中心处, 通过插值, 可以求得单元面的信息。本文采用的离散方法如下。离散后, 再应用 PISO 算法对压力与速度进行解耦并迭代求解。综上所述可以得到随计算物理时间推移带来的流场变化情况, 并得到最终的模拟结果。

表 2-1 计算中采用的离散方法
Table 2-1 Discrete method used in calculation

离散项	离散方法
空间	有限体积法 (FVM)
时间	隐式欧拉格式 (The implicit Euler scheme)
对流项	二阶 TVD 格式 (The second-order TVD limited linear scheme)
扩散项	二阶中心差分格式 (The second-order central difference scheme)

由于在本文模拟中结构物存在运动位移, 需要计算网格不断地变化来适应结构物运动对流场所带来的影响。由于在本文液舱晃荡耦合运动问题的研究过程中,

暂时不需要考虑船体的大幅值运动，因此相较于重叠网格，选用较为高效、易实现的动网格技术来提升计算效率。当结构物产生位移时，在采用动网格技术的计算域中，网格节点以及拓扑结构均不发生变化，变化的是网格自身的形状。通过对网格进行扭曲，拉伸，平移以及旋转等操作使网格适应结构物的运动，从而可以维持计算可以持续并保证一定的计算准确性^[85]。

2.2 全流场计算域初始化实现方法

在模拟波浪环境中的液舱晃荡现象时，流场液面会受液舱壁分隔成为两个区域，即液舱内部产生晃荡的流场和液舱外部的波浪流场。本文应用 CFD 方法，在对计算域进行初始化的过程中，实现了对两部分流场同时进行流场初始化设置，达到了同步计算求解的目的。具体方法是在制作液舱数值模型时，在液舱舱顶处留一个贯穿液舱的开口。随后应用 OpenFOAM 中的 snappyHexMesh 方法对计算域网格进行捕捉划分。模型的开口可以使液舱内外的空间被判定为一个连通的空间，网格会围绕液舱的舱壁进行捕捉，从而使液舱内外区域划分在一套网格中。但需要注意的是，模型上的开口的大小应至少大于此处最小网格边长的 2 倍，否则如果开口过小，在划分网格时对开口的捕捉会被忽略，液舱顶部被判定为封闭平面，从而导致液舱内部无法生成网格。该处理方式可以监测到液舱顶部受到的晃荡砰击压力。与 CFD 和势流相结合方法的最大不同点是可以对液舱内外流场同时进行初始化并同步求解，从而达到内外流场全耦合的目的。通过对液舱开口连通内外流场的方法示意图如图 2-2 所示。

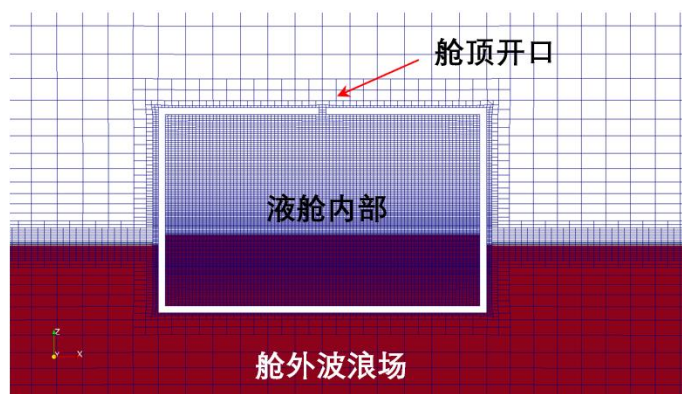


图 2-2 液舱模型开口连通内外计算域方法示意图

Fig.2-2 The sketch of whole calculation domain connection through tank hatch

在网格划分好之后，使用 OpenFOAM 自带的 setFields 流场初始化方法，对液舱内外区域的水相气相信息分别进行设置。该方法允许液舱内外流场存在液面高

度差，从而实现对液舱不同充液高度工况的配置。

2.3 液舱内外壁力矩输出方法

液舱在流场中受波浪激励产生运动，同时液舱内部的流场受运动激励也会产生晃荡现象。因此在液舱晃荡耦合运动中，对液舱模型的激励力由波浪对液舱外壁的激励力，以及液舱内流体晃荡对液舱内壁产生的激励力两部分组成。

由于只研究液舱壁上某一点所受的砰击压力，不能反映出全部流场对液舱的作用力情况，因此本文对液舱内外壁所受作用力沿舱壁绕运动轴向进行积分，转化为作用在液舱壁上的力矩，通过对力矩时历曲线与液舱运动时历曲线结果，可以更加清晰地研究液舱内外所受力矩大小和力矩差对液舱运动的影响情况，从激励的角度，分析耦合运动的机理与规律。

为了分别输出液舱内外壁所受到的作用力矩信息，本文在数值模型制作时，将液舱分为内部（inner patch）和外部（outer patch）两部分进行构建，两部分的相对位置不变。在计算时，将两部分受到的作用力相加，再进行六自由度运动的计算，流程如图 2-3。由于内部结构只受晃荡流场的作用，外部结构只受波浪流场作用，内外部分计算输出的力矩即分别为晃荡诱导力矩以及波浪诱导力矩。具体算例参见 3.1 节。



图 2-3 液舱内外壁力矩输出流程图

Fig.2-3 The process of output moments of internal and external liquid tank

2.4 数值造波与消波方法

在研究 FLNG 在波浪中的水动力运动响应问题时，最重要的是要保证模拟出的波浪环境是准确、有效的。文中采用 VOF 方法对波浪流场自由液面进行捕捉。在计算模型的选取上，由于纯波浪问题的雷诺数较低，湍流的影响较小，可以选择层流模型提高计算效率，并且由验证可知层流模型满足波浪造波问题要求。在造波方法的选取上，使用开源工具箱 waves2Foam^[86]对波浪进行模拟。根据后文模

拟中的波浪参数要求，结合波浪理论，通过对水深与波高进行计算，选取斯托克斯二阶波作为模拟中的波浪形式。在计算域的入口端与出口端设置松弛区，在松弛区内选取松弛因子，通过控制方程，使波浪参数平稳地在理论值与数值解之间转化，实现数值造波与消波。最终在松弛区之间，得到符合实验要求的稳定传播的、衰减小的波浪模拟结果。松弛区分布以及松弛因子变化示意图如图 2-4，控制方程如 (2-3) (2-4) 所示。

$$\alpha_R(x_R) = 1 - \frac{\exp(x_R^{3.5}) - 1}{\exp(1) - 1}, \text{ 其中 } x_R \in [0, 1] \quad (2-3)$$

$$\phi = \alpha_R \phi_{computed} + (1 - \alpha_R) \phi_{target} \quad (2-4)$$

其中，松弛因子即为 α_R ，其值大小随当前位置与入口边界的距离 x_R 变化而变化，如图 2-4。在公式 (2-4) 中，物理量 ϕ 可以代表自由液面的速度 U 以及相位 γ ，其值受 α_R 的控制，入口处的目标理论值 ϕ_{target} 逐渐转化为计算数值 $\phi_{computed}$ 。从而在数值上生成符合要求的波浪，并且波浪在松弛区之间传播稳定。

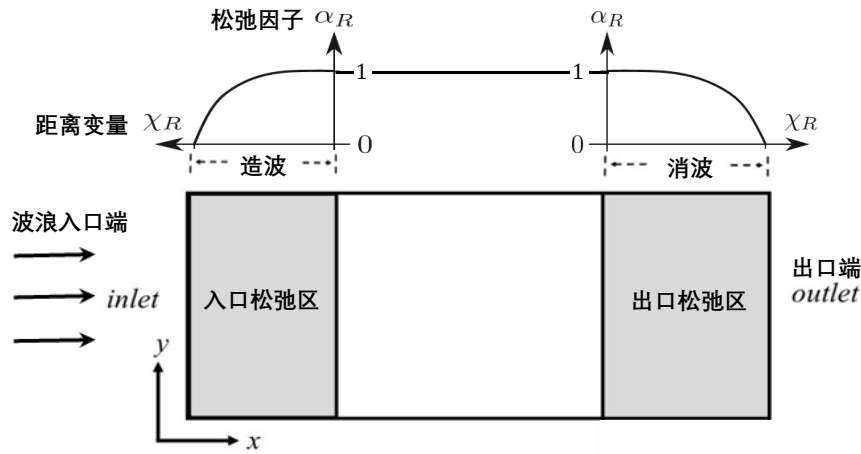


图 2-4 松弛区以及松弛因子分布图

Fig.2-4 The distribution of relaxation zone and relaxation factor

为了保证划分的网格能够满足波浪的稳定传播，首先进行数值造波模拟，验证波浪数值模拟是否可以满足要求。选取第三章参考文献中的波浪参数，模拟斯托克斯二阶规则波，波频 6.7rad/s，波高 0.03m。计算域与波高仪布置如图 2-5，将造波入口位置计算所得的波高时历与传播一个波长后的波高时历曲线进行对比，如图 2-6 所示，验证了该造波方法可以较好地制造模拟所要求的稳定传播，衰减

小的波浪，从而为后续模拟提供良好的波浪环境基础。

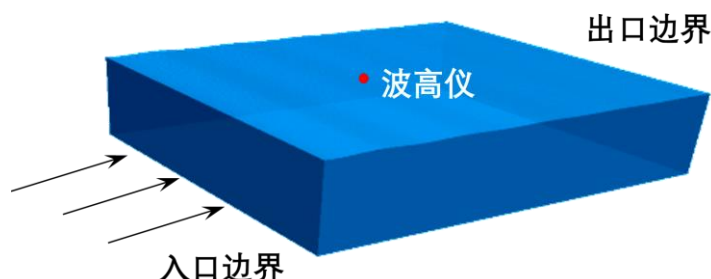


图 2-5 数值造波模拟与波高仪布置

Fig.2-5 Simulation of numerical wave tank and the layout of wave gauge

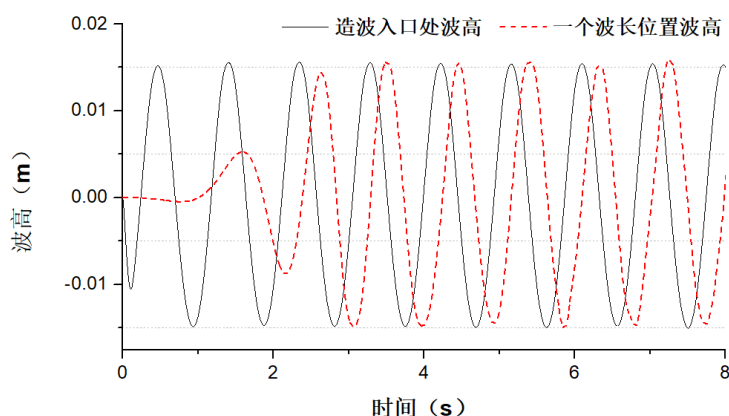


图 2-6 两波高仪位置处监测到的波高时历

Fig.2-6 Time series of wave heights measured by two wave gauges

2.5 系泊系统模块介绍与应用

对锚链系统模拟方法的选取在本文的研究中至关重要，naoe-FOAM-SJTU 求解器开发了系泊系统模块对锚链与船体运动之间的耦合问题进行模拟。本文模拟采用了静力学方法的分段外推法对系泊系统进行求解，该方法考虑了系泊链锁的重力和拉伸变形的影响，计及作用在锚链上的流体拖曳力，还可以对海床上的锚链躺底段进行处理，适合对悬链线式系泊系统进行求解。同时，该方法还易于实现对不同材料配置的锚链进行模拟与计算。由于在船舶的高频运动中，如升沉、纵摇和横摇，系泊系统中的静力学与动力学方法的求解结果区别不大，只是对于低频运动，如大周期的纵荡运动会有一定影响^[62,63]。因本文主要研究系泊中的液舱晃荡运动，而晃荡现象对于船体的低频纵荡运动的影响较小，所以静力学方法

处理系泊问题满足本文需要，易于实现，并可以提高计算效率。

分段外推法求解的思路是首先对系泊链锁进行分段，将上一段求解输出的计算结果作为下一段计算的输入，以此外推传递进行计算，直至得到最终所有结果。被分割后的锚链上，每小段受力情况如图 2-7 所示，分段所受作用力的平衡方程见公式 2-5。

$$\begin{cases} T_{xi+1} = T_{xi} + F_{Ti}dl' \cos \varphi_{i+1} + F_{Ni}dl' \sin \varphi_{i+1} \\ T_{zi+1} + F_{Ni}dl' \cos \varphi_{i+1} = T_{zi} + F_{Ti}dl' \sin \varphi_{i+1} + w_i dl \end{cases} \quad (2-5)$$

上式中 x 和 z 分别代表水平与竖直方向， T_x 与 T_z 为每个分段上的拉力在水平和竖直方向上的分量。 φ 是拉力方向与水平方向的夹角。 dl 是分段原始长度， dl' 是分段拉伸后的长度。 w 为净水下重量，即每单位长度上的锚链重力减去所受浮力。 F_{Ni} 与 F_{Ti} 分别为在锚链分段上流体拖曳力的法向与切向分量，可由 Morison 公式求得。

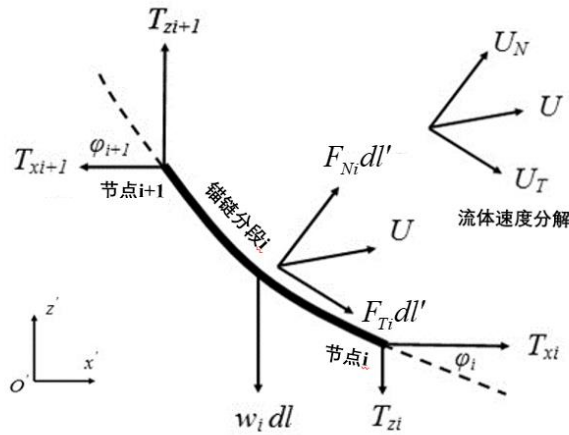


图 2-7 分段外推法（PEM）节点受力示意图

Fig.2-7 The sketch of forces on one segment of piecewise extrapolation method

系泊系统模块与船体六自由度运动模块属于相互独立的求解模块，在两模块之间存在着数据的交换。图 2-8 为对系泊船舶的船体运动与锚链情况求解的流程示意图。在模拟中，随着时间步的推进，依照此流程不断地进行计算求解与数据更新。

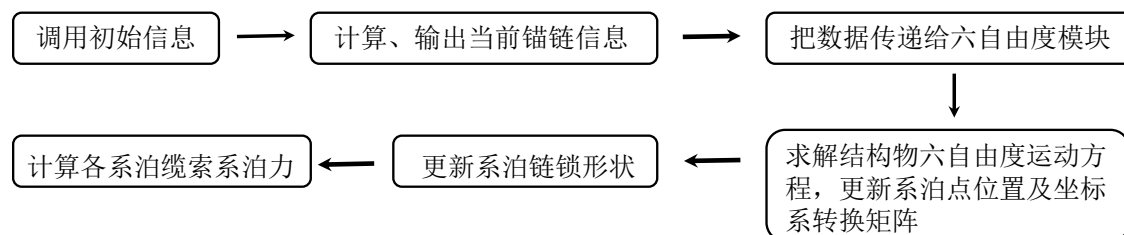


图 2-8 系泊系统计算模块计算流程简图
Fig.2-8 The calculation process of mooring system model

2.6 本章小结

本章主要介绍了文中涉及到的计算模拟方法。首先，对 naoe-FOAM-SJTU 求解器进行了介绍，包括对各模块的功能介绍以及前人对求解器所做的验证性工作介绍，随后阐述了本文应用到的求解模块，求解方法以及动网格技术。在求解方法上，通过列举流体力学 $N-S$ 方程，结合 VOF 方法的流体体积分数与输运方程，给出了模拟求解中的基本控制方程。将流场中的物理量通过一系列计算方法进行离散，再结合 PISO 方法在每一个时间步中，对控制方程中的流体体积分数，流场速度与压力进行迭代，从而实现对本文问题的数值模拟。其次本文提出了对全流场计算域进行初始化的方法，实现了液舱内外流场的同步 CFD 数值模拟。提出了对液舱内外壁所受力矩分别输出的方法，实现了对晃荡诱导力矩和波浪诱导力矩的分别监测与分析。除此之外，在数值造波与消波方法上，应用 waves2Foam 开源工具箱，建造了符合模拟要求的波浪环境，验证了求解器造波模块的准确性和可靠性。最后讲述了文中应用的系泊系统模块的计算方法与在模拟中的求解流程。综上，本章内容为后续数值模拟工作的开展提供了良好的基础。

第三章 FLNG 液舱在波浪中液舱晃荡耦合运动数值模拟

在模拟 FLNG 液舱晃荡耦合运动问题之前，先对一个带有双液舱的 FLNG 液舱模型进行数值模拟。通过问题的简化，可以更加清晰地探究波浪作用下液舱晃荡耦合运动的机理和基本规律。参考前人文献，对于六自由度运动，液舱晃荡现象对横摇运动的影响最为明显^[87]，因此本章暂且只针对在波浪环境下，做横摇运动的 FLNG 液舱进行数值模拟与分析。

3.1 数值模型构建与求解器验证

3.1.1 FLNG 液舱模型的构建

本章数值模拟对照的物理模型试验为大连理工大学主持的在物理波浪水池中的 FLNG 液舱横摇试验^[49]。通过对照试验参数，设置数值模拟工况。液舱的主尺度以及固定位置见下图 3-1，其中液舱被一水平钢制轴固定，只能绕轴旋转。液舱物理模型的其他主要参数见表 3-1。

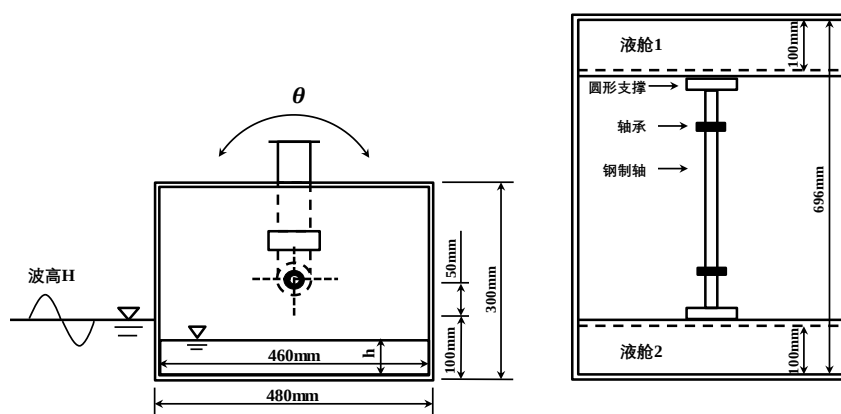


图 3-1 FLNG 船体液舱主尺度示意图

Fig.3-1 The sketch of the main dimension of a FLNG tank

表 3-1 FLNG 液舱模型主要参数

Table 3-1 The main parameters of FLNG tank

主要参数	数值
液舱质量 M	16.6 kg
惯性矩 I_{xx}	$0.419 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
惯性矩 I_{zz}	$0.162 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
空舱液舱自振频率	5.536 rad/s

液舱内部的液体会随液舱的运动而产生晃荡现象，当液舱内流体受外部激励

的频率达到其固有振动频率时，晃荡现象就会十分剧烈，这种情况会对液舱的运动产生明显影响。其中液舱内部的固有振动频率可以由公式 3-1 计算得到。其中 h_s 为液舱内充液液面高度， l 为在晃荡方向上液舱的宽度， n 为内部晃荡的阶数。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n\pi g}{l} \tanh\left(\frac{n\pi h_s}{l}\right)}, \quad n = 1, 2, 3... \quad (3-1)$$

为了对液舱内外壁的力矩分别进行监测和预报，研究力矩相位差对液舱晃荡耦合运动的影响，构建的液舱数值模型分为内外两部分。如图 3-2，其中 (a) 为液舱外部结构，(b) 为液舱内部液舱结构。需要说明的是，内部结构的顶部开有小口，以连通液舱内外计算域，对该方法的介绍详见 2.3 节。

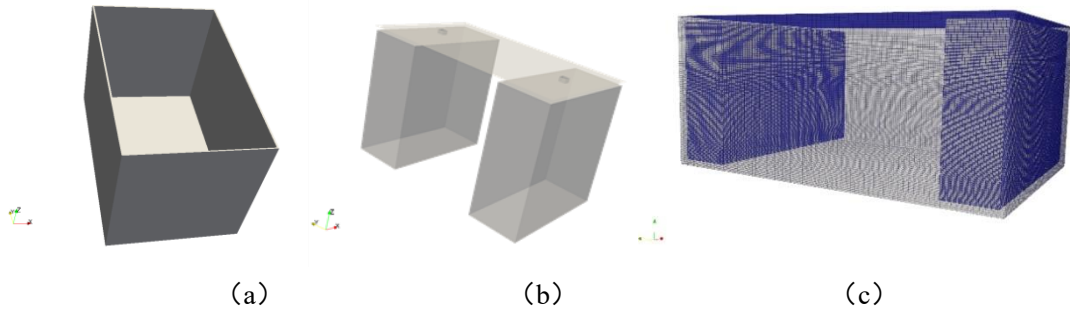


图 3-2 模型及网格示意图 (a) 外部结构 (b) 内部液舱 (c) 表面网格

Fig.3-2 The sketch of the FLNG tank: (a) external structure (b) internal tank (c) surface mesh

3.1.2 数值模拟计算域的构建

在计算域的布置上，与波浪入口和出口两端分别设置松弛区，松弛区的长度应大于一个波长，来保证波浪的准确生成与完全消波。松弛区中间的波浪传播区域设置有三个波长长度，宽度设置为液舱长边长度的三倍，以保证被边界反射回的波浪不会对液舱运动造成影响。如图 3-3 (a) 所示。其中液舱短边的法线方向与入射波浪方向呈 90° 角。FLNG 液舱只放开横摇自由度，受波浪作用将只做横摇运动。

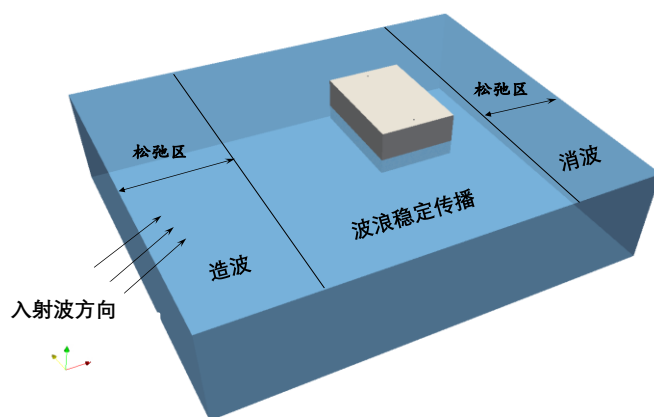


图 3-3 模型计算域布置示意图

Fig.3-3 The sketch of the layout of simulation domain

3.1.3 数值计算网格的生成

为了保证模拟可以生成准确的波浪并稳定传播、对 FLNG 液舱附近以及液舱内部复杂流场进行准确模拟，需要对结构物表面进行捕捉，并对部分区域网格进行加密。本文对模型的捕捉以及区域加密均是应用 OpenFOAM 中自带的 snappyHexMesh 方法实现的，首先提取液舱模型结构的特征边，并对模型的表面网格进行三级加密以便精细地捕捉模型结构。对自由液面以及液舱附近的网格进行二级加密，自由面加密区域高度应大于波高。在竖直方向，一个波高内至少划分 12 个网格，在水平方向，一个波长内最好分布在 60 个网格左右。由于液舱内部存在复杂的流体晃动现象，需要对内部网格进行三级加密，加密区域的高度应能涵盖流体在晃动过程中能达到的最大高度。经验证，总体网格数为 240 万可以满足计算要求。生成网格的可视化图像如图 3-4 所示。

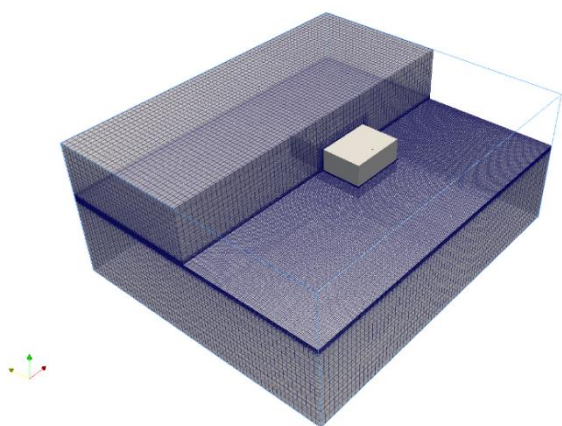


图 3-4 模型计算域网格剖面示意图

Fig.3-4 The sketch of the layout of mesh configuration

3.1.4 求解器可靠性验证

为了验证波浪流场的生成情况以及求解器的准确性与可靠性。首先将空舱 FLNG 液舱在不同频率波浪中的横摇运动响应数值模拟结果与物理水池试验结果进行对比。需要提到的是，由于不同波浪频率对应的波浪波长不同，要求的网格量也不同。根据上节网格划分的经验，结合对应的波浪参数，为不同工况的算例划分适合的网格再进行模拟。模拟与试验结果的对比情况如图 3-5 所示。

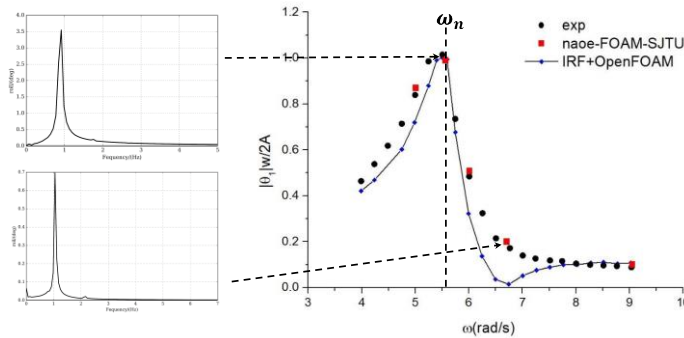


图 3-5 不同波浪频率下，空舱 FLNG 液舱横摇幅值及其对应 FFT 变换结果

Fig.3-5 Roll motion amplitude of empty tank FLNG tank under several wave frequencies and their corresponding FFT transformation results

由上图对比可见，在空箱共振频率 5.536rad/s 处最大运动响应幅值的对比情况良好。并且观察到在 6.7rad/s 时，本文全流场 CFD 模拟的方法相较于势流 IRF 与 CFD 相结合的方法更加接近物理试验 (exp) 结果。原因是线性势流 IRF 方法在模拟液舱外部波浪场时，忽略了流场的非线性以及粘性影响，在输入规则波频率为 6.7rad/s 时，计算出现奇异，得到的波浪诱导力矩趋向于 0，致使 FLNG 液舱运动也趋近于 0，偏离了真实值。本部分计算结果说明 naoe-FOAM-SJTU 求解器在处理该问题时具有有效性，验证了模型参数设置和求解的准确性。相对于势流结合 CFD 方法来说，对内外全流场同时进行 CFD 模拟的方法的优势在于考虑了液舱外部波浪场的粘性影响，使结果更接近真实物理情况。

3.2 充液 FLNG 液舱晃荡耦合运动影响因素分析

3.2.1 波浪频率对液舱晃荡的影响

为了探究在不同波浪频率下，FLNG 液舱晃荡对液舱耦合运动的影响。本文模拟了六种波浪频率工况下，充液 FLNG 液舱的横摇运动情况。此处提出了充液

率来表示液舱内的载液程度，即液舱内的载液液面高度与液舱高度的比值。本部分参考文献，选取单侧液舱充液率 24.3% 的情况，根据运动幅值的频率分布，模拟了具有特点的波浪频率工况，分别为 5.56 rad/s、6.2 rad/s、6.3 rad/s、6.4 rad/s、6.7 rad/s 以及 9.0 rad/s。此处给出充液率 24.3%，波浪频率为 6.7 rad/s 时，FLNG 液舱在波浪中的液舱晃荡耦合运动全流场波浪高度示意图，如图 3-6。

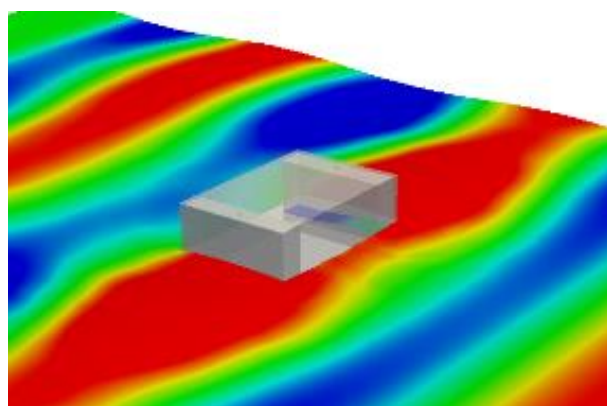


图 3-6 FLNG 液舱在入射波浪场中的晃荡耦合横摇运动全流场模拟图

Fig.3-6 The whole flow field of liquid tank sloshing coupled roll motion of FLNG tank in incident wave environment

此模拟的整体网格数量约为 300 万，为了使波浪能稳定传播，并保证计算收敛，将时间步设置为 0.001 秒。可以看到 FLNG 液舱结构对规则波的波形产生了影响，也可以看到在计算域的出口端，波浪被很好地吸收，消除了反射回波的影响。同时，也可以观察到液舱内部的流场已经出现了一定程度的晃荡现象。为了验证求解的准确性，对比了数值实验结果、物理实验结果和势流-CFD 方法结果，如图 3-7 所示。

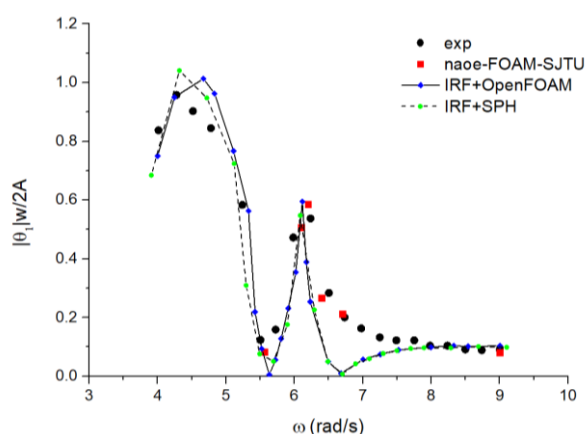


图 3-7 单侧充液率 24.3%，FLNG 液舱晃荡耦合运动幅值频域结果与对比

Fig.3-7 Single tank with 24.3% filling ratio, the verification of sloshing coupled motion of FLNG tank in frequency domain

由验证结果可知，模拟结果与试验结果吻合良好。对比空舱情况，充液后的液舱运动幅值出现了很大变化，空舱时最大横摇运动幅值出现在 5.55 rad/s 附近，而在充液率 24.3% 时，运动出现了两个峰值，反而在 5.55 rad/s 附近的运动幅值很小。原因是 FLNG 液舱的运动是由波浪对液舱外壁的力矩和液舱内部流体晃荡对内壁的力矩两者共同耦合作用决定的。由公式 3-1 可知，充液率 24.3% 时的液舱内部液体的固有晃荡频率和 5.55 rad/s 的激励频率相近，此时液舱内部会产生较剧烈的晃荡，从而会对液舱的整体运动产生较大的影响。此时，可以将液舱内外的力矩变化进行监测提取并分析。图 3-8 给出了当波频为 5.55 rad/s 时，液舱内外流体诱导力矩的时历对比情况。可以看到，同一时刻液舱内外所受的力矩相位差接近 180° ，考虑内外力矩参考系相同，说明两者作用力矩方向相反。由于液舱的运动主要是受内外力矩的合力矩激励，因此液舱会表现为液舱的运动幅值大幅度减小。

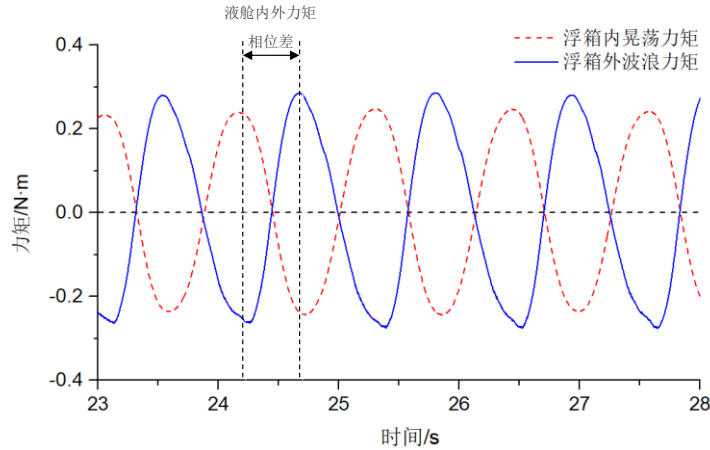


图 3-8 波浪频率 5.55 rad/s 时，FLNG 液舱内外壁所受力矩时历

Fig.3-8 Time series of the moment on internal and external liquid tank of FLNG tank at 5.55 rad/s wave frequency

在 6.4 rad/s - 8.0 rad/s 的波浪频率区间内，由于本文的全流场 CFD 模拟的方法考虑了波浪流场的粘性，因此比势流-CFD 相结合的方法得到的结果更加贴近物理试验结果。通过对模拟得到的液舱内外壁所受力矩情况进行对比，如图 3-9，可以发现，对于液舱内部晃荡诱导力矩的计算结果十分接近，主要是因为本部分计算方法与参考文献中对于液舱内部的计算方法相近。而在对浮箱外部的波浪力矩进行计算上，计算结果与参考文献上结果出现差别。在入射波浪频率在 6.2 、 6.5 及 6.8 rad/s 工况下，本部分方法计算考虑了流体粘性影响，得到浮箱外壁所受的波浪诱导力矩大于参考文献中的方法，从而使浮箱的运动更为接近物理实验结果。

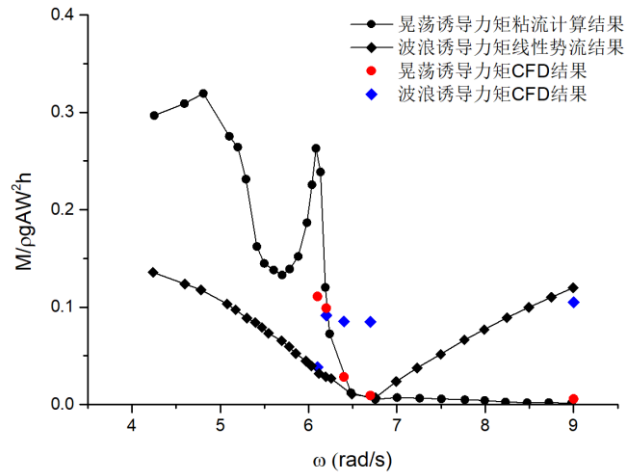


图 3-9 单侧充液率 24.3%，FLNG 液舱内外壁所受力矩模拟结果对比

Fig.3-9 Single tank with 24.3% filling ratio, the moment results comparison of internal and external tank of FLNG tank

3.2.2 液舱充液率对液舱晃荡的影响

上文介绍了液舱内部晃荡固有频率主要受舱内流体高度与舱体形状影响，因此对于同一液舱，不同充液情况就具有不同的晃荡固有频率，当外部激励频率接近该固有频率时内部液体就会产生剧烈晃荡的现象。为了观察不同充液率情况对液舱晃荡耦合运动的影响，探究内部晃荡固有频率与外部激励频率的关系，本节设置了几种充液情况，分别进行了模拟。

在对不同充液情况的模拟中，保持外界的波浪激励频率不变，均选取参考文献中，势流方法模拟偏差较大的 6.7rad/s 波浪频率，可以发挥 CFD 方法模拟的优势。在对充液率的选取上，为了方便与物理试验结果进行对比，参考文献中配置情况，并与空舱情况进行对比。由于模型具有两个液舱，因此可以对两个液舱分别配置。四种充液情况分别为 24.3%-0%、38.3%-0%、61.3%-0%以及 61.3%-61.3%。充液情况示意图如图 3-10 所示，每种液舱充液情况内部的晃荡固有频率可以通过公式 3-1 计算得到，结果如表 3-2 所示，其中双液舱同充液率时，固有频率与单液舱相同。通过模拟，可以得到不同充液率情况下液舱的横摇运动幅值，并得到液舱内外壁所受的力矩时历情况。通过统计整理，并与物理试验结果进行对比，整理结果见表 3-3。

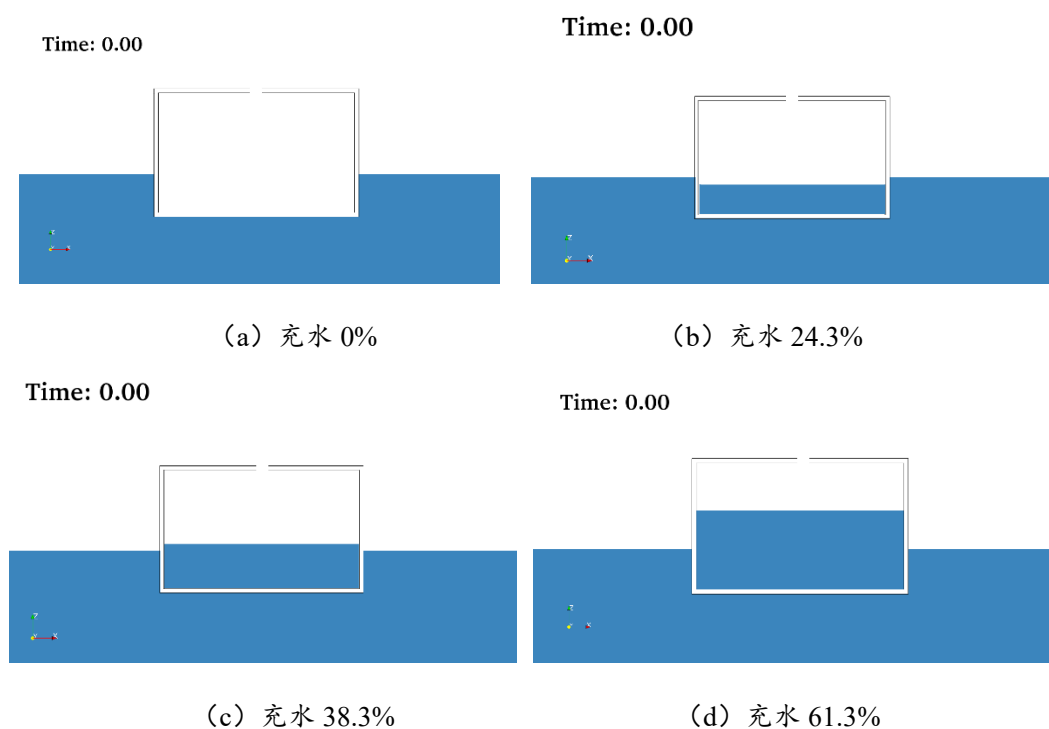


图 3-10 不同充液率的液舱充液情况示意图

Fig.3-10 The sketch of liquid tanks with different filling ratios

表 3-2 不同充液工况充液率及晃荡固有频率

Table 3-2 Filling ratio configuration and resonance frequency

充液率		流体晃荡固有频率 (rad/s)
液舱 1	液舱 2	
0%	0%	5.536
24.30%	0%	5.556
38.30%	0%	6.627
61.30%	0%	7.546
61.30%	61.30%	7.546

表 3-3 不同液舱充液率工况中横摇幅值角对比

Table 3-3 The roll motion amplitude comparison of liquid tanks with different filling ratios

波高 m	波频 rad/s	方法	稳定时横摇幅值角无因次结果				
			充液率				
			0%	24.30%	38.30%	61.3% (单舱)	61.3% (双舱)
0.03	6.7	CFD	0.1955	0.2094	0.2527	0.1232	0.0916
		EXP	0.1860	0.2004	0.2392	0.1253	0.0935
		误差	4.85%	4.32%	5.65%	-1.74%	-2.07%

得到的横摇幅值角对比图以及不同充液情况下运动时历见图 3-11。

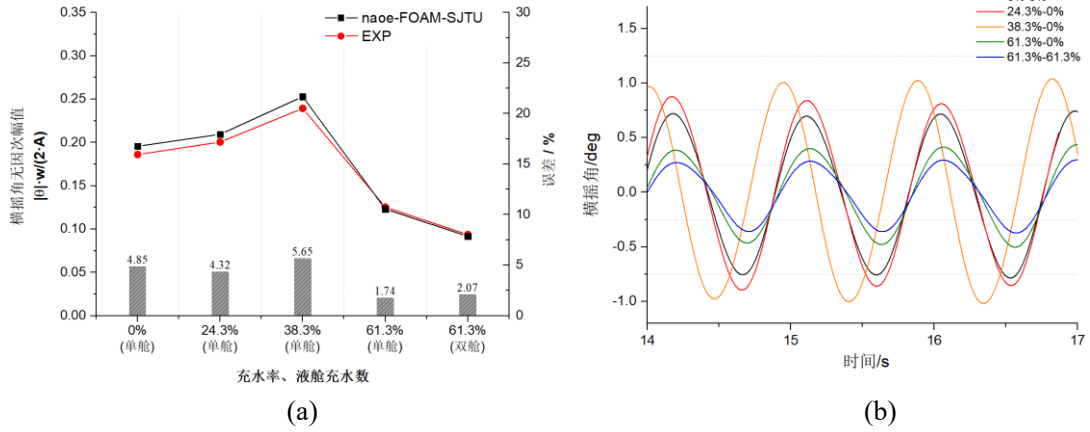


图 3-11 不同充液情况横摇幅值角对比(a)与运动时历图(b)

Fig.3-11 The comparison of roll motion amplitude(a) and motion time series(b) of liquid tanks with different filling ratios

由结果可知,对比物理试验结果,CFD 模拟结果的误差在 6%以内,说明 naoe-FOAM-SJTU 求解器可以很好地对该问题进行求解。对比空舱情况,在充液率为 24.3%和 38.3%时,液舱的横摇运动幅值有所增加。而在 61.3%单舱以及 61.3%双舱充液的两种情况中,FLNG 液舱的运动幅值有所减小。在充液率为 38.3%时,内部液体的固有晃动频率为 6.627rad/s ,与此时外部波浪频率 6.7rad/s 十分接近。舱内产生了较其他充液率更加剧烈的强非线性晃动现象。分析运动时历曲线 3-11,发现在充液率为 38.3%时,横摇运动的相位与其他工况出现了较大差异,为了研究其相位变化原因,对液舱的内外壁所受力矩进行提取,如图 3-12。

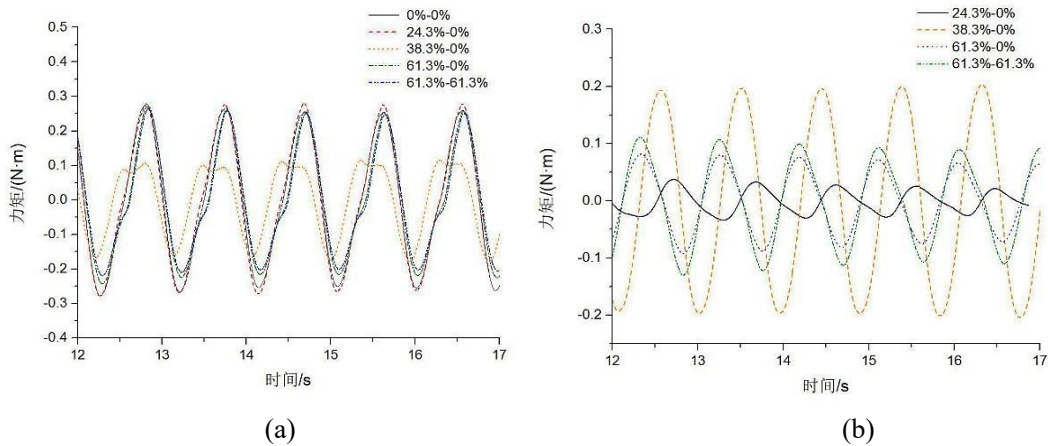


图 3-12 不同充液情况下 FLNG 液舱外壁(a)内壁(b)所受力矩时历

Fig.3-12 Time series of moments on external hull (a) and internal hull (b) of the tank under different filling ratios

从图 3-12 中可以明显发现,除了单舱充液率 38.3%情况,不同充液率下波浪激励力矩相位均与空舱情况下的十分接近,只有幅值出现略微差别,原因可能是不同充液情况的液舱的运动幅值不同,对波浪诱导力矩程度影响不同。虽然本文采用的 VOF 方法结合层流模型,不易模拟微小的波面破碎和漩涡能量损失,导致误差略大,但仍在可以接受的范围内,不会对结果产生明显影响。

在充液率 38.3%时波浪诱导力矩出现了相位的偏移,并且幅值大幅减小,原因可能是此时入射波浪频率十分接近液舱内部晃荡固有频率,导致液舱内的晃荡诱导力矩显著增大,加大了运动幅值,并对外界波浪场造成了一定影响,使波浪诱导力矩受到的力矩产生了较大差别。

在充液率为 61.3%时,单双液舱充液两种情况之间也存在这略微差别。可以发现,双舱充液时得到的晃荡诱导力矩略小于单液舱情况的两倍,可能原因是双液舱充液情况时,内部流体由于考虑粘性作用,会产生更大的能量损失。除此之外,可以发现单、双液舱在同充液率的情况下,内部晃荡力矩时历的相位与液舱整体运动时历的相位几乎没有变化,说明影响相位的可能原因主要与液舱内部液体的固有频率有关。

液舱晃荡现象会对液舱的运动产生影响,可能表现为增加或减小液舱运动幅值。通过观察,发现增加或者减小可能主要是受液舱内外力矩的相位差决定。表 3-4 给出了不同充液情况下的内外力矩相位差情况。

表 3-4 FLNG 液舱内外液舱壁所受力矩相位差

Table 3-4 Phase difference of moments between internal and external tank hull of FLNG tank

波高 m	波频 rad/s	充液率			
		24.30%	38.30%	61.3% (单舱)	61.3% (双舱)
0.03	6.7	27.59°	14.72°	-168.42°	-172.10°

从结果中可以发现,24.3%与 38.3%两种充液情况的力矩相位差较小,其中 38.3%充液时的相位差最小。由于液舱内外力矩参考系相同,相位差小的内外力矩成分作用方向相同,大小可以相加,使液舱运动增大。而在充液率为 61.3%时,内外力矩相位差接近 180 度,说明此时内外力矩作用方向相反,两者成分相互抵消,从而减小液舱运动。所以,可知上文结果中液舱内外力矩的大小和相位与对应的运动响应之间的规律。比如双舱充液率 61.3%时,因其内部晃荡诱导力矩更大,但相位与波浪诱导力矩反向,导致双液舱情况较单液舱充液情况的运动幅值有所减小。

3.2.3 入射波的波陡因素对液舱晃荡的影响

在前人应用势流方法对波浪环境进行模拟时，由于不考虑流体粘性影响，在增加波浪高度后，波浪对液舱外壁的诱导力矩会成比例增加，但实际情况中由于非线性影响，波形会出现变化，从而对波浪诱导力矩也会产生影响。

本节即对波浪高度，即波陡因素进行探究。保持波浪频率为 6.7rad/s 不变，将上文模拟中的波高增加一倍，即对波浪高度为 0.06m 的波浪与液舱之间的相互作用进行数值模拟。模拟中的五种充液率情况仍同上节一致，将模拟结果与之前的结果进行对比，如图 3-13 所示。其中横摇角 θ 进行无因次变换中， w 代表液舱的宽， A 为波浪的波幅。

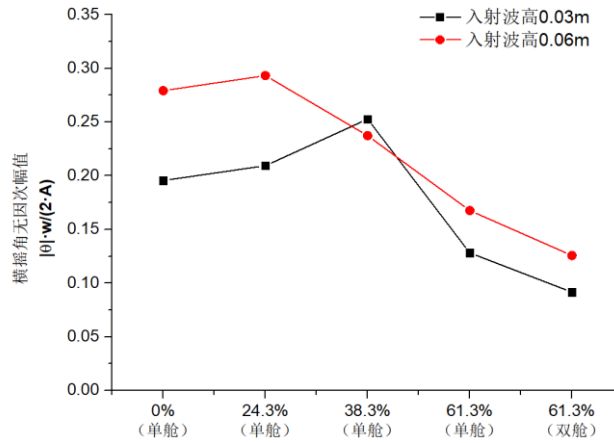


图 3-13 FLNG 液舱横摇运动响应无因次幅值

Fig.3-13 The no dimension value of roll motion amplitude of FLNG tank

对比图 3-13 中的两条曲线可以发现，运动幅值会随着波高的增大而呈现非线性的增长，除 38.3% 充液率情况外，其他情况的液舱运动幅值的增加均大于波高增长的倍数。但需要说明的是，在本文应用 VOF 方法和层流模型模拟液舱晃荡时，模拟存在一定误差，其中自由面破碎以及流体内部的湍流对液舱运动的影响会弱于真实情况，因此模拟中的能量损失较小，这也是使得运动幅值增大的一小部分原因。但尽管存在使运动幅值增大的误差，在 38.3% 充液率时，运动幅值却随着波高的增大而减小。可以通过观察模拟计算结果对此现象进行分析，见图 3-14。

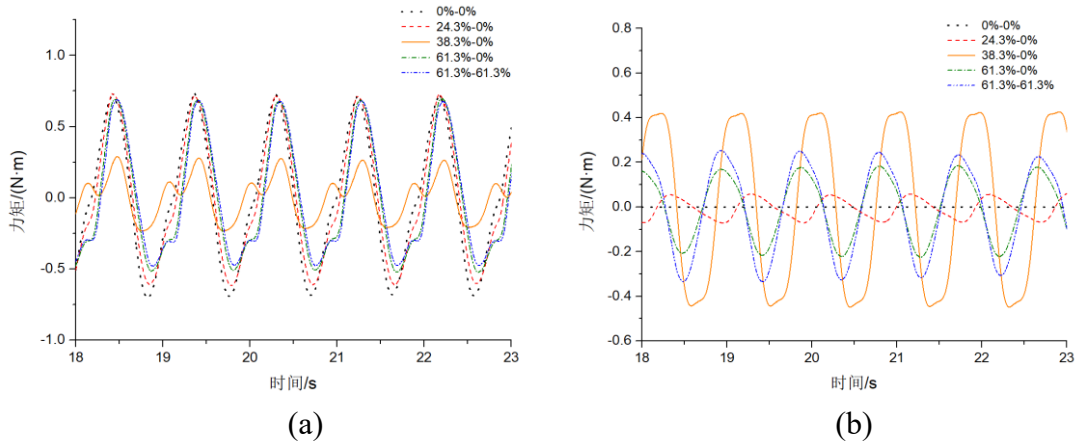


图 3-14 波高 0.06m 不同充液情况下波浪诱导力矩(a)晃荡诱导力矩(b)时历图
Fig.3-14 Time series of wave induced moments (a) and sloshing induced moments (b) with different filling ratios under 0.06m wave height

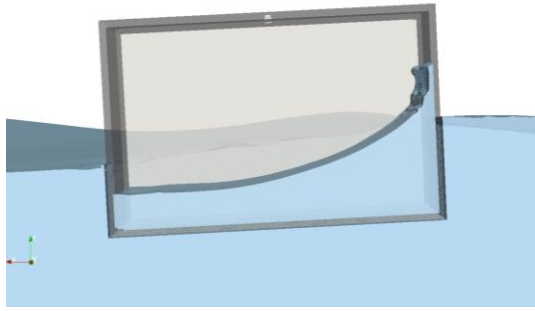


图 3-15 横摇运动 FLNG 液舱内部晃荡流场展示
Fig.3-15 The display of internal sloshing flow during the roll motion of FLNG tank

可以看到的是,相比波高 0.03m 的情况,在波高增加到 0.06m 时,除了 38.3% 充液率情况,其他充液率工况波浪诱导力矩曲线十分相似。在充液率为 38.3% 时,液舱内部晃荡现象更加明显,如图 3-15,晃荡诱导力矩的峰值由尖锐变得平缓,说明此时液舱内部晃荡流体出现了翻卷破碎,此现象使得晃荡耦合运动更加复杂。受晃荡耦合影响,舱外的波浪场对 FLNG 的作用也发生了变化,波浪诱导力矩出现强非线性非简谐形式,致使耦合运动响应的幅值发生变化。说明当波浪激励频率接近晃荡固有频率时,液舱内部剧烈晃荡产生的能量耗散以及耦合效应会明显影响液舱的运动响应幅值,这种影响也会随着波陡的增加而更加明显。

在增大波高进行模拟后,发现 FLNG 液舱对波浪的影响更加明显,见图 3-16。由于液舱结构的迎浪面较大,存在对波浪的反射效应,该反射波会对入射波浪的波形造成影响。受液舱阻挡,波浪会在液舱模型迎浪面处出现爬升的现象,并绕着液舱在其两边通过,因此液舱两侧也会出现波面升高的现象。该现象也会导致

波浪诱导力矩出现非简谐现象。需要注意的是，在模拟的配置阶段，波面高度的爬升对结构物附近的网格提出了更高的要求，需要扩大网格加密区域以保证对自由面的准确捕捉。

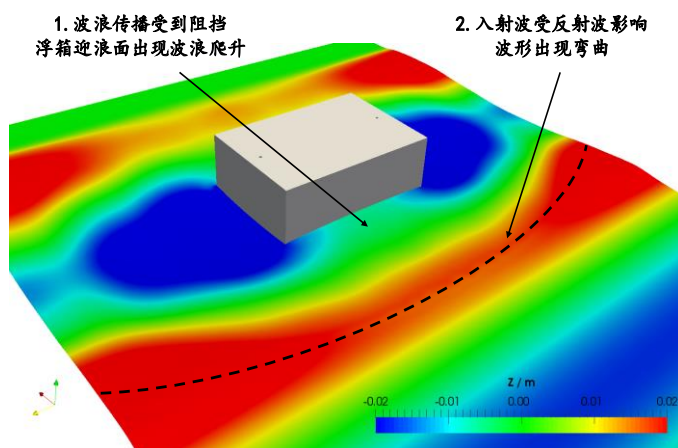


图 3-16 FLNG 液舱迎浪面对入射波波形的影响
Fig.3-16 The effect of FLNG tank surface on incident waveform

3.3 本章小结

本章对带有两个液舱的简化 FLNG 液舱模型受不同波浪频率，不同液舱充液率以及不同波浪波陡三种因素影响下的液舱晃荡耦合运动进行了模拟分析，讨论了不同因素对于液舱晃荡效应的影响以及一般规律。首先对数值模型以及参考文献中的试验配置进行了介绍，并对求解器进行了准确性和可靠性验证。在此基础上，分别对不同波浪频率，不同液舱充液率，以及不同波陡因素下的 FLNG 液舱耦合运动进行了数值模拟，结果与试验结果吻合较好。观察发现，CFD 方法同时对全流场进行模拟，考虑流体粘性影响，可以避免势流方法对于某些波浪频率计算出现奇异的情况，使计算结果更加贴近真实物理情况。在对不同波浪频率和充液率工况的模拟中，通过观察模拟结果，发现了相位差对于耦合运动的影响。在增大波浪波陡后，发现在固有晃荡频率激励下的液舱晃荡现象会随波陡的增大而变得更加剧烈，内部液体的翻卷破碎也会使得舱内晃荡诱导力矩幅值有所减小。同时，由于 FLNG 液舱结构迎浪面较大，会对波浪产生阻挡与反射，从而导致波浪诱导力矩出现非线性现象。

本章的内容表明，应用 CFD 方法对波浪场中的 FLNG 液舱横摇晃荡耦合运动的全流场数值模拟可以在部分波浪频率范围工况中得到更加准确的计算结果。同时，对液舱内外壁所受的力矩进行提取的方法可以更加深入地分析内外流场对运

动的贡献与耦合效应。除此之外，对 FLNG 液舱的液舱晃荡耦合运动规律还有待进行深入研究，如多自由度运动，相位差变化规律，以及双液舱不同充液率的影响等等，都十分具有研究价值。本章的模拟为后文的模拟研究积累了丰富的经验，并为更为复杂的 FLNG 船液舱晃荡耦合运动模拟打下了良好的基础。

第四章 FLNG 液舱晃荡耦合运动数值模拟

第三章对带有液舱的 FLNG 液舱简化模型受多种因素影响下的液舱晃荡耦合运动进行了数值模拟，探究了一般规律，实现了对液舱晃荡的全流场 CFD 数值模拟，并验证了求解器的准确性与处理该问题时的可靠性。为了探究更加复杂的液舱晃荡现象，并结合工程实际，本章在之前研究的基础上，参照赵文华^[34]在上海交通大学海洋工程深水池开展的船型 FLNG 在波浪中的液舱晃荡耦合运动物理模型试验，配置 FLNG 数值模型以及相关模拟参数。从 CFD 方法的角度，探究船体运动和非线性液舱晃荡之间的耦合问题机理。

4.1 数值模型构建与验证

4.1.1 FLNG 船体模型的构建

根据文献中的描述，试验中制作的模型是参照了由中海油研究总院和中船工业第 708 研究所联合设计，针对我国南海荔枝气田作业环境的 FLNG 概念方案。FLNG 系统中的主体为船型 FLNG，船首部分设有外转塔系泊设备来对 FLNG 进行锚泊定位，该设备与 3 组 $\times$ 4 根锚链的单点系泊系统进行连接，具体介绍见第五章。FLNG 内部的 LNG 储存舱采用薄膜型 GTT 型结构，在 FLNG 中并列两排分布，每排液舱的数量为 5 个。物理试验模型按照 1:81 的缩尺比进行制作，模型的照片以及在本文中对应的模型尺度数值模型如图 4-1 所示。模型的主尺度以及主要参数如表 4-1 所示。

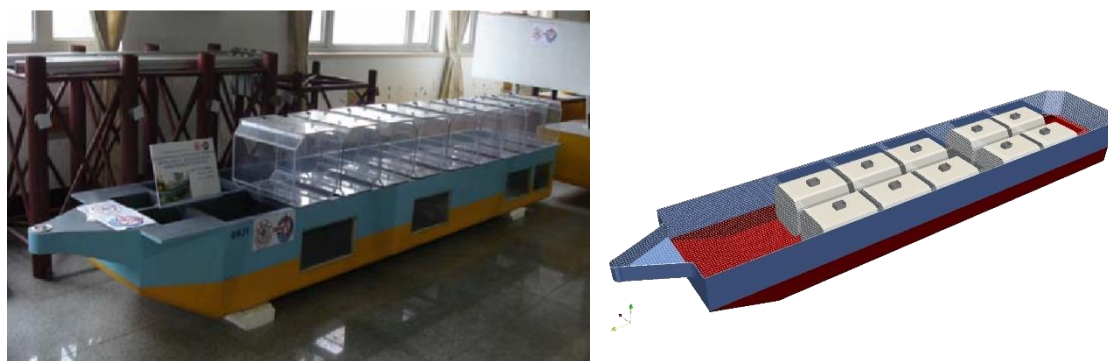


图 4-1 FLNG 船物理模型 (a) 及数值模型 (b)

Fig.4-1 Physical model (a) and numerical model (b) of FLNG

船型 FLNG 内部的液舱模型为 GTT 薄膜型液舱，液舱的主尺度参数与横剖面示意图如图 4-2，每个液舱的实尺度长度为 35.76m，模型尺度长度为 0.479m。

表 4-1 船型 FLNG 的主尺度参数
Table 4-1 Principal dimension parameters of ship-shaped FLNG hull

主要参数	60%充液率		40%充液率		20%充液率	
	实尺度	模型尺度	实尺度	模型尺度	实尺度	模型尺度
总长度(m)	392.00	4.84	392.00	4.84	392.00	4.84
垂线间长(m)	356.00	4.40	356.00	4.40	356.00	4.40
船宽(m)	69.00	0.85	69.00	0.85	69.00	0.85
型深(m)	35.70	0.44	35.70	0.44	35.70	0.44
吃水(m)	13.85	0.17	13.20	0.16	13.20	0.16
排水量(ton)	320,804	0.59	307,642	0.57	308,866	0.57
液化天然气容积(m ³)	290,000	0.55	290,000	0.55	290,000	0.55
重心距基线的高度(m)	20.55	0.25	20.31	0.25	21.16	0.26
重心与尾垂线间距(m)	171.02	2.11	169.21	2.09	170.09	2.10
横摇惯性半径(m)	25.30	0.31	27.30	0.34	28.90	0.36
纵摇惯性半径(m)	91.60	1.13	96.50	1.19	99.80	1.23
首摇惯性半径(m)	93.70	1.16	98.60	1.22	102.00	1.26

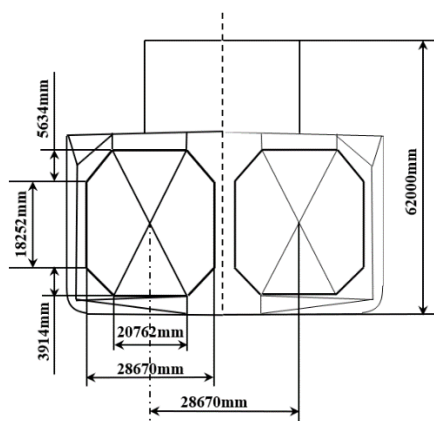


图 4-2 FLNG 内部液舱横剖面示意图
Fig.4-2 The sketch of the transverse section of liquid tanks inside FLNG

4.1.2 数值模拟计算域的构建与网格生成

在建立数值模型后,开始划分计算域,并生成模拟计算网格。在本章模拟中,为了研究不同来流方向对 FLNG 船体的液舱晃荡耦合运动的影响,设置了 FLNG 迎浪与横浪两种情况,不同的布置方式所对应的计算域以及网格也有所不同。图 4-3 给出了两种布置形式下计算域的划分情况。在迎浪情况下,由于船体较长,在计算域的 x 方向上,船首前方设置一个松弛区以及波浪传播段,以保证良好的波浪生成与传播。在船后设置尾部波浪传播区域以捕捉船后尾流场,在计算域出口端设置足够长度的松弛区以充分消波,防止出口边界对波浪产生反射。在横浪情

况中，由于船体对波浪的存在阻挡，波浪会绕过船体，在船体首尾两侧通过，因此在 y 方向需设置三个船长的长度，以留出足够的距离防止侧面边界反射回的波浪对船体运动产生影响。

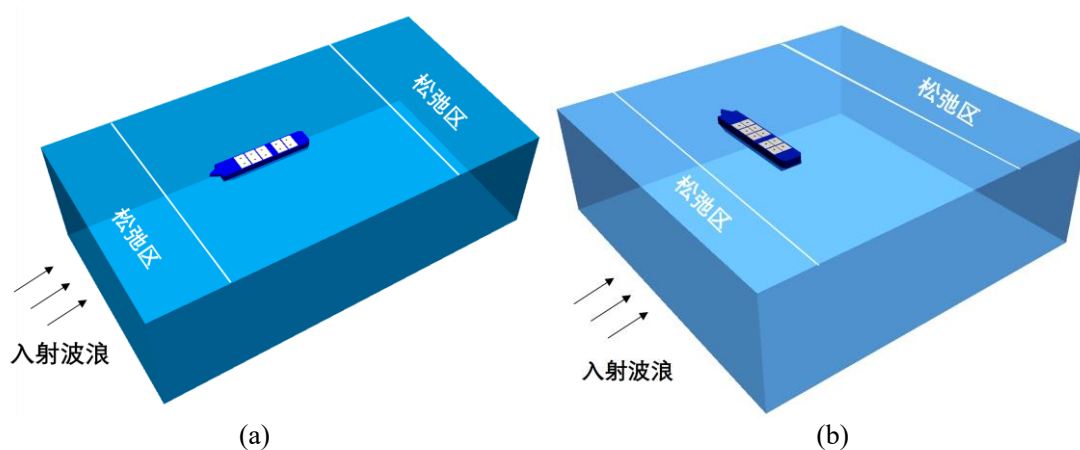


图 4-3 模拟计算域划分 (a)迎浪情况 (b)横浪情况

Fig.4-3 Configuration of simulation domain (a)case in head waves (b)case in beam waves

根据上一章的网格配置方法，在自由表面附近、FLNG 船体周围以及液舱内部分别进行网格的加密，以捕捉船体附近复杂流场信息以及液舱内部的晃荡现象。生成的网格情况可见图 4-4。图 4-4(a)中展示了自由面网格加密以及船体表面网格的捕捉与生成情况，图 4-4(b)展示了船体内部液舱的网格生成情况，可以发现的是，在船体外壳与液舱之间的区域被判定为封闭区域，不生成网格。

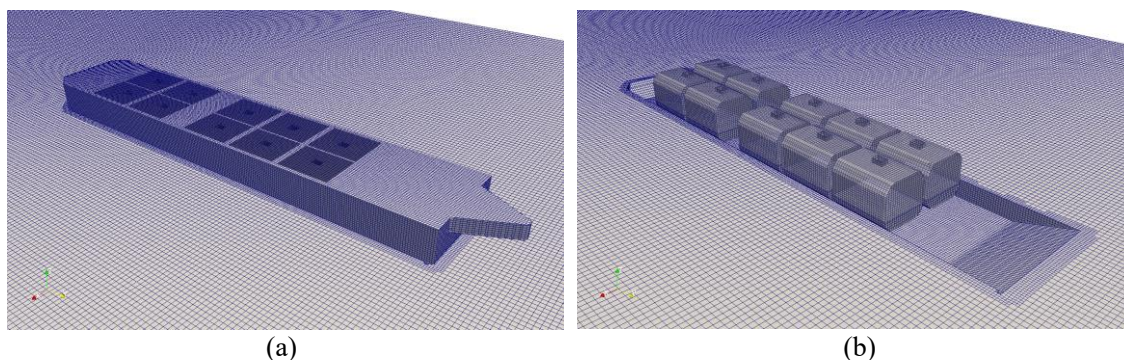


图 4-4 网格划分图 (a)船体表面以及附近 (b)液舱内部网格

Fig.4-4 Mesh configuration (a)on the surface and around the hull (b)inside the liquid tank

4.1.3 FLNG 数值模型自由衰减验证

在建立好数值计算模型后，需要进行模型的自由衰减模拟，以验证模型参数设置的准确性以及求解器的可靠性。利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器模拟的自由衰减试验，是将 FLNG 放置在静水面上，分别在升沉、横摇与纵摇三个自由度上，

对 FLNG 施加一个强迫运动的初始速度，在接下来的模拟过程中，船体运动不再受外界能量激励，只受流场粘性的阻力作用，使船体运动逐渐趋向于平衡状态，通过观察往复运动周期观察船体特性。除此之外，考虑到 FLNG 液舱在载液前后运动属性也会发生变化，为了研究液舱晃荡现象带来的影响，并验证求解器对液舱晃荡与船体之间耦合运动模拟的可靠性，需要对 FLNG 固体压载情况和载液情况分别进行自由衰减模拟，并将模拟结果与试验结果相对比。图 4-5 是在升沉、横摇和纵摇自由度上，带有 20%充液率的 FLNG 船体与同重量固体压载 FLNG 两种情况下自由衰减运动时历的对比曲线。将自由衰减运动周期的数值模拟结果，对应物理试验结果对比，以及误差统计表格如 4-2 所示。

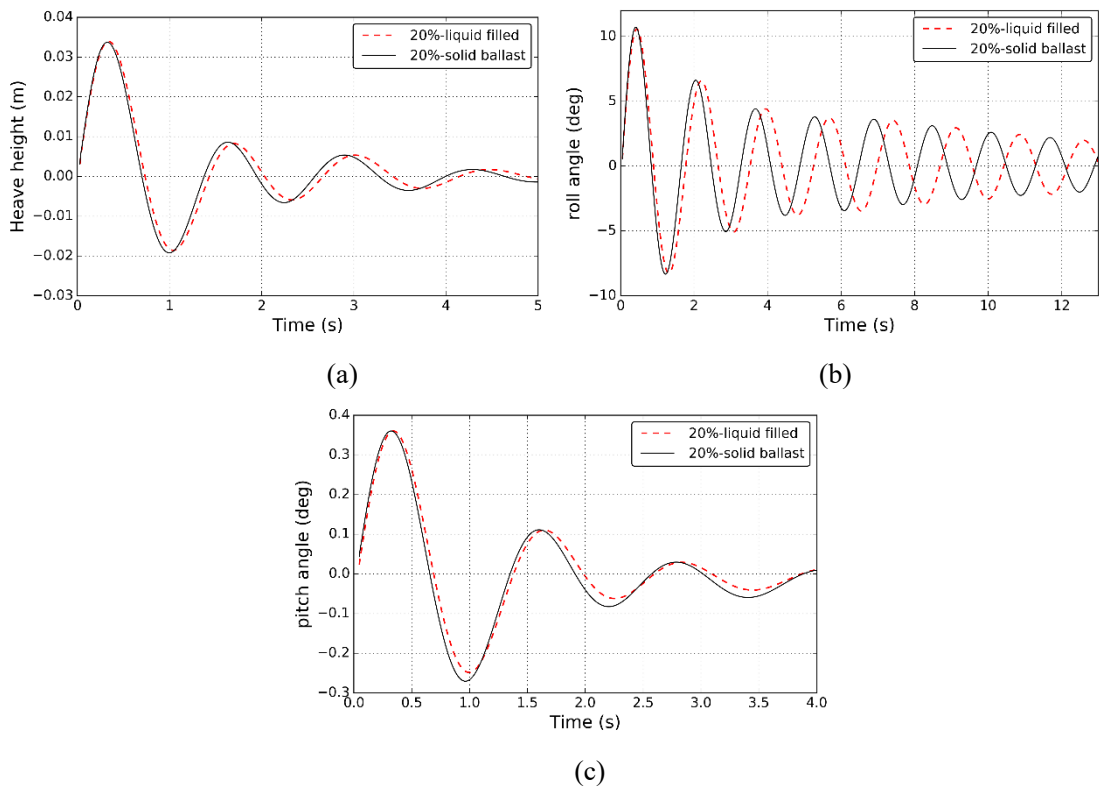


图 4-5 FLNG 自由衰减验证: (a) 升沉 (b) 横摇 (c) 纵摇
Fig.4-5 Free decay test of FLNG (a) heave (b) roll (c) pitch

对比自由衰减运动周期，可以发现，充液后的 FLNG 自由衰减运动周期会发生变化。说明充液后 FLNG 内部的液舱晃荡会使运动的相位发生变化。观察三个自由度上的运动周期变化，可以发现充液后的 FLNG 在升沉运动和纵摇运动上的自由衰减运动周期都有略微增大，但是不明显。横摇运动的周期增加比较明显，考虑原因是结合船舶稳定性原理，在升沉和纵摇自由度上，船体自身受流场的回复力较大，液舱晃荡对回复力产生的影响较小，而在横摇运动自由度上，液舱晃

荡的回复占比就更大，因此影响更加明显。

表 4-2 FLNG 自由衰减数值模拟结果与物理试验结果对比
Table 4-2 The comparison of numerical results and experimental results of FLNG free decay test

装填状态	自由度	FLNG 自由衰减运动周期		error
		EXP	naoe-FOAM-SJTU	
20%固体压载	升沉	1.326	1.312	-1.06%
	横摇	1.637	1.598	-2.38%
	纵摇	1.363	1.342	-1.54%
20%液舱充液	升沉	1.386	1.358	-2.02%
	横摇	1.796	1.728	-3.79%
	纵摇	1.351	1.318	-2.44%

将数值模拟结果与物理试验结果进行统计对比，发现两者结果较为接近，可以验证模型参数配置准确，表面本文 CFD 求解器可以对载液多液舱 FLNG 船的液舱晃荡问题进行可靠模拟。

4.2 FLNG 液舱晃荡/船体耦合运动数值模拟

在对数值模型验证的基础上，下文主要考虑不同波浪频率，不同液舱充液率以及不同浪向等因素影响下，FLNG 液舱晃荡与船体耦合的运动响应情况，从而研究液舱晃荡现象对船型 FLNG 的作用规律，以及在实际工程中的影响。

4.2.1 求解器可靠性验证

模拟多液舱 FLNG 与波浪之间的相互作用，再结合液舱晃荡现象以及多自由度运动，会使得问题变得更加复杂。所以在进行系统工况模拟之前，需要对求解器和模拟参数设置的准确性，以及网格的可靠性进行验证。考虑到迎浪与横浪环境两种情况下模拟网格划分有较大区别，因此对两种情况分别进行了验证。

参照文献中提到的物理水池模型试验，对横浪和迎浪两种波浪环境中的多液舱载液 FLNG 进行液舱晃荡耦合运动数值模拟。需要提到的是，在物理模型试验中，为了保证 FLNG 不受波浪慢漂力远离初始位置，用两根软弹簧沿着船体中轴线，系泊在船体首尾两端以保证船体在限制区域运动。在模型尺度试验中，锚链系统的总刚度为 48cm/kg。在数值模拟，参照物理试验也设置了两根弹簧锚链对 FLNG 的运动范围进行限制，如图 4-6 所示。

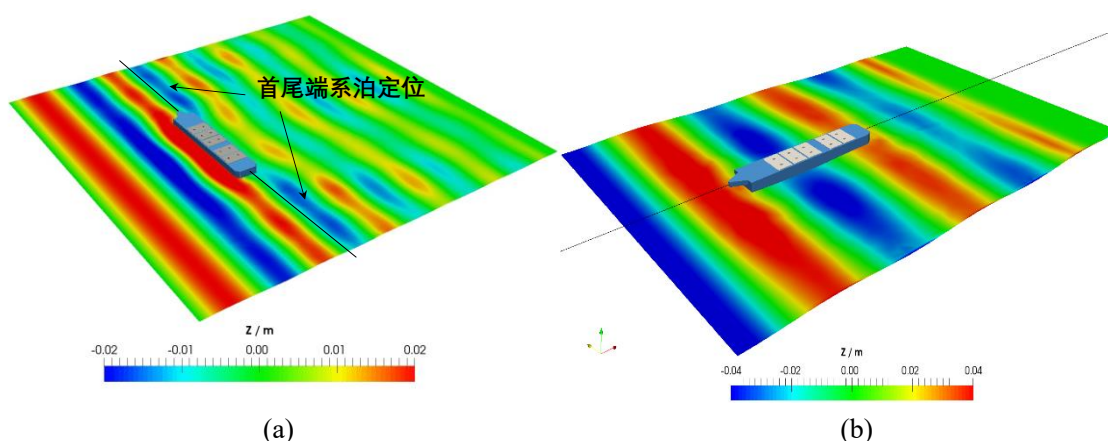


图 4-6 规则波中弹簧系泊 FLNG 示意图 (a)横浪 (b)迎浪

Fig.4-6 The sketch of spring mooring FLNG in regular waves (a)beam waves (b)head waves

由于 FLNG 在充液前后，船体质量会发生变化，因此需要进行质量修正。文献中提到在物理试验时，采用增加压载的形式，来调节充液前后的水线高度。在本文的数值模拟中，使用 OpenFOAM 中 constant 文件夹下的 shipDict 来对船体结构参数进行配置。需要提到的是字典中的质量参数为船体结构的质量，当船体充液后，船体质量加上液舱内部流体的质量会使船体的吃水增加，因此，充液后的船体质量需要改为原船体质量减去舱内加入的流体总质量，以此对 FLNG 的质量进行修正。

在完成质量修正与参数设置后，选取迎浪与横浪两种工况中的模拟结果中的运动响应幅值，通过与参考文献中对应的物理试验^[69]测量结果进行对比，来验证求解器的准确性。

选取的计算工况参数见表 4-3 所示，对于横浪与迎浪算例，均选取 20%充液的情况，以此验证求解器对于液舱晃荡耦合运动问题模拟的准确性。

在迎浪算例中，根据文献中频域内纵摇运动响应幅值，选取运动幅值差异较大的两个频率，进行 CFD 模拟求解器的验证。在横浪算例中，由于横摇运动幅值受频率影响较为明显，在运动响应峰值附近，选取三个频率进行 CFD 数值模拟验证。以上工况的数值模拟运动时历曲线结果以及对应物理试验在频域上的运动响应幅值测量结果见图 4-7 与图 4-8。

由于文献中结果换算成了实尺度，因此在计算运动响应 RAO，即单位波高激励下的运动幅值时，需要将数值模拟结果中的物理量换算成实尺度进行计算与对比。

表 4-3 求解器验证工况参数设置

Table 4-3 Parameters configuration of solver verification cases

浪向	波高 (m)	周期 (s)	波频 (rad/s)	液舱充液率	模拟自由度
横浪	0.04	2.156	2.91	20%	横摇
		1.761	3.57		
		1.257	5.00		
迎浪	0.08	1.761	3.57	20%	纵摇
		1.257	5.00		

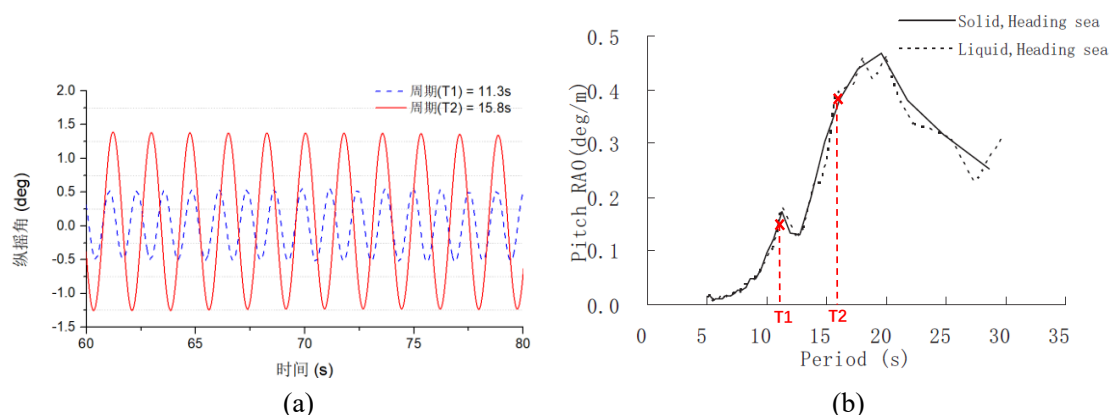


图 4-7 迎浪工况 20%充液 FLNG 纵摇运动 (a)运动时历曲线 (b)频域运动幅值 RAO^[69]
Fig.4-7 Pitch motion of FLNG with 20% filling ratio under head waves (a)motion time series curve (b)RAO of motion amplitude in frequency domain

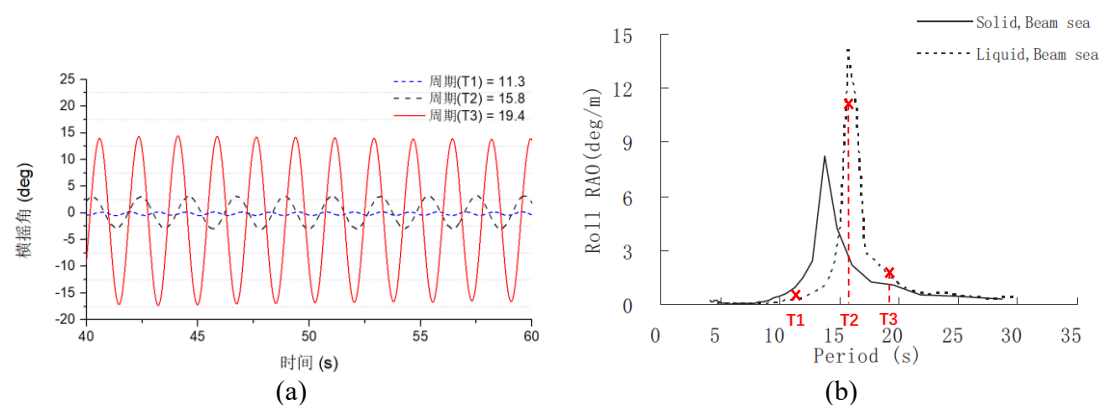


图 4-8 横浪工况 20%充液 FLNG 横摇运动 (a)运动时历曲线 (b)频域运动幅值 RAO^[69]
Fig.4-8 Roll motion of FLNG with 20% filling ratio under beam waves (a)motion time series curve (b)RAO of motion amplitude in frequency domain

由上图可知, CFD 数值模拟结果与物理试验结果吻合良好, 证明 naoe-FOAM-SJTU 求解器在模拟载液 FLNG 在波浪中的液舱晃荡问题具有准确性和频域内的可靠性。同时, 证明了数值模型参数设置的准确性以及质量修正方法的可行性。由图可以看到液舱晃荡耦合运动与波浪频率之间的规律, 将在下文进行具体分析。

4.2.2 数值模拟网格收敛性验证

在模拟中保证计算的准确性是十分重要的。根据一般经验，虽然提高网格数量可以在一定程度上提高求解的准确性，但过大的网格量需要更多的计算资源和时间，因此为了平衡计算的准确性与经济性，还需要进行网格收敛性验证，以便于系统模拟工作的开展。在收敛性验证模拟试验中，通过改变背景网格边长方法，对模拟网格的数量进行控制，针对横浪与迎浪环境下的两种工况，每种工况均生成三套网格量由疏到密的网格，计算工况参数如下表 4-4 所示。

表 4-4 网格收敛性验证模拟工况
Table 4-4 Simulation cases of mesh convergence verification

浪向	网格量 (万)	时间步 (s)	液舱 充液率	波长 (m)	波高 (m)	波浪类型	放开自由度
横浪	140	0.002	20%	2.465	0.04	Stokes 一阶深水规则波	横摇、横荡 升沉、纵摇
	232						
	433						
迎浪	148	0.002	40%	4.840	0.08	Stokes 一阶深水规则波	纵摇、纵荡 升沉、横摇
	242						
	499						

对于验证工况的选取，主要考虑的因素是该工况的模拟难易程度和在研究中的重要性。对于横浪工况，波浪对船体横摇运动的影响最为显著，同时，液舱晃荡现象也对船体横摇耦合运动影响最大，在模拟中对准确性要求更高。在迎浪工况中，主要考虑升沉运动与纵摇运动。由于在横浪和迎浪两种工况中，液舱晃荡对船体的升沉耦合运动影响均不明显。除此之外，横浪工况中的纵摇运动幅值很小。因此在迎浪工况中，选取纵摇运动结果进行收敛性验证。两种工况的运动时历曲线如图 4-9 所示。

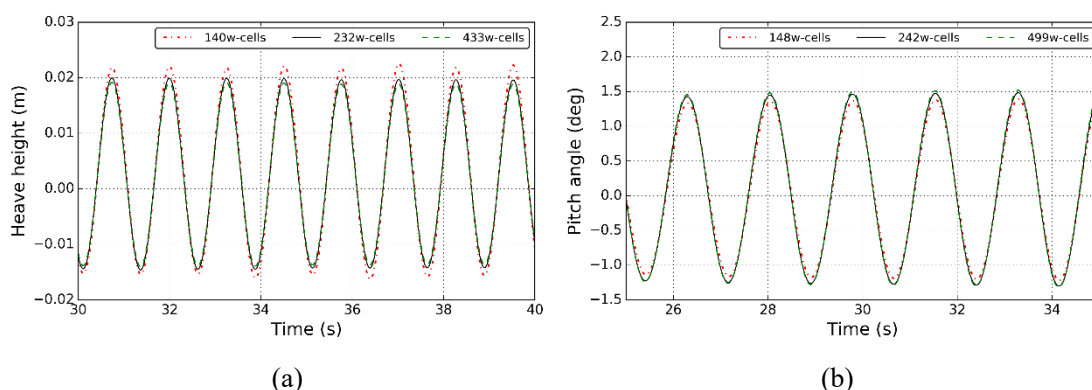


图 4-9 运动时历曲线网格收敛性验证(a)横浪-横摇 (b)迎浪-纵摇

Fig.4-9 Mesh convergence verification of motion time series curve (a)roll in beam waves (b)pitch in head waves

从图中可以看出, 两种工况中, 网格数最少的算例结果与其他两套网格计算结果相差较大。中等与最多网格数的算例计算结果较为接近, 并且通过计算运动响应 RAO 结果, 发现与参考文献中对应工况的物理试验结果吻合良好。由于大量网格约为中量网格数量的二倍, 模拟所需的计算资源会大幅度增加, 同时也会增加模拟时间。因此考虑经济性, 并保证计算求解一定的准确性, 选取中等网格数的网格划分方式作为本文模拟的网格划分方法。在网格的基础上, 选取三种时间步 0.001s、0.002s、0.004s 进行网格收敛性验证, 发现在时间步定在 0.002s 时更加适合。以上网格收敛性结果即采用该时间步的求解结果。

4.2.3 波浪中 FLNG 液舱晃荡耦合运动影响因素分析

以上验证工作确保了求解的准确性与模拟的高效性, 在此基础上, 对释放多自由度的多液舱 FLNG 在波浪中的液舱晃荡耦合运动时历进行分析, 对比固体压载情况, 探究工程中常遇的液舱充液率、波浪频率、波浪高度三种因素在液舱晃荡耦合运动中的影响规律。

首先, FLNG 会受液舱充液率影响。在工程中, FLNG 船会向 LNG 运输进行输液作业, 将内部的液体转运到 LNG 船上。在这个过程中, FLNG 液舱内的液面高度就会发生变化。第三章提到, 不同的充液高度会使液舱内部流体的固有晃荡频率发生变化, 若频率接近作业区域内的波浪激励频率, 就很可能在液舱内产生剧烈的流体晃荡现象, 增加船体运动响应幅值, 以及液舱内壁所受的砰击压力。因此对于某一频率下的不同充液高度对液舱晃荡耦合运动的问题影响就具有重要意义。在充液率的研究中同样考虑横浪和迎浪两种工况。工况参数见表 4-5。在对六自由度运动响应的研究中, 对于迎浪工况, 由于横荡和首摇运动幅值很小, 为了提高计算效率, 释放船体的纵荡、纵摇、横摇与升沉四个自由度, 在横浪工况中, 纵荡和首摇自由度运动幅值很小, 因此释放船体的横荡、横摇、纵摇、升沉四个自由度。

表 4-5 不同充液率下 FLNG 运动响应模拟工况

Table 4-5 The simulation cases of motion response of FLNG with different filling ratios

浪向	液舱 充液率	波长 (m)	波频 (rad/s)	波高 (m)	波浪类型	释放 自由度
横浪	0%、20%、60%	2.465	5	0.04	Stokes 一阶深水规则波	横荡、升沉、 横摇、纵摇
迎浪	0%、20%、40%、 60%	4.840	3.57	0.08		纵荡、升沉、 纵摇、横摇

将同波浪频率环境下，不同充液率的 FLNG 的运动响应情况进行对比，以分析充液率的影响，如图 4-10 所示。经验证，数值模拟的运动幅值 RAO 求解结果与文献中的物理试验结果吻合良好。

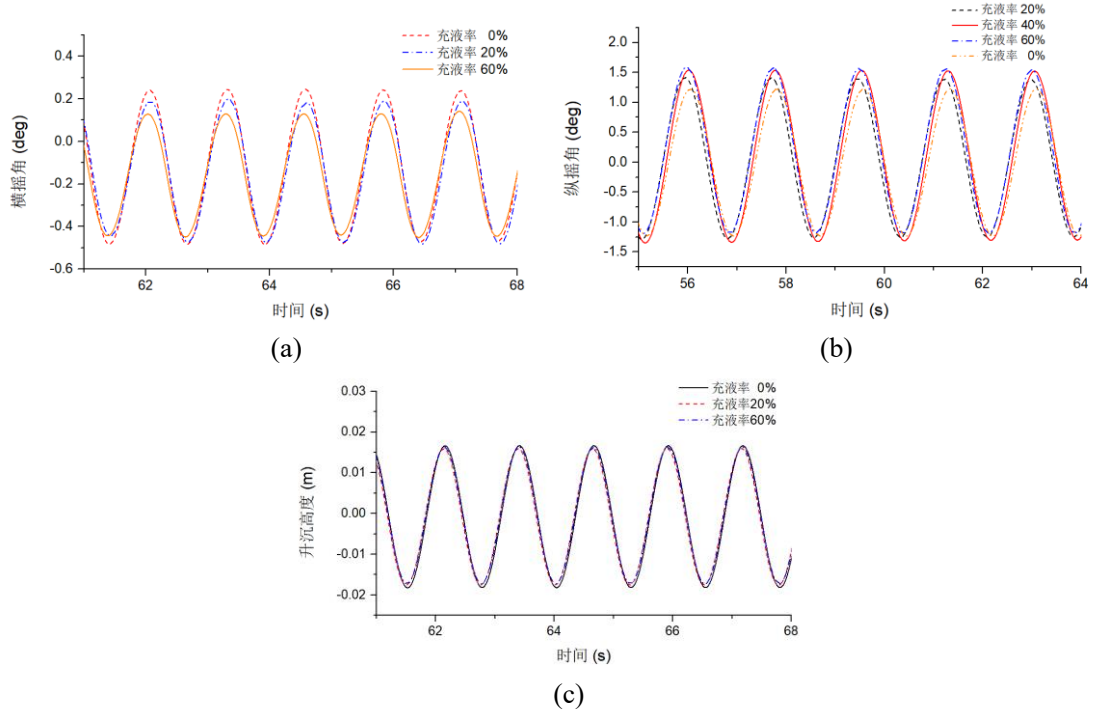


图 4-10 不同充液情况 FLNG 运动响应时历曲线 (a)横浪-横摇 (b)迎浪-纵摇 (c)横浪-升沉
Fig.4-10 Time series curve of FLNG motion response with different filling ratios (a)roll motion in beam waves (b)pitch motion in head waves (c)heave motion in beam waves

在横浪浪向环境的模拟中，波浪的波长约为船长一半，从计算结果中可以看出，在此频率的波浪力激励下不同充液率对于船体横摇运动和升沉耦合运动的相位影响很小。对升沉运动幅值影响不明显，由于在船体的垂向运动中，舱内流体会随船一起运动，升沉运动主要受波浪频率和波浪高度影响，不同充液情况的液舱晃荡作用区别不大。而在横摇运动幅值上不同充液率的影响区别明显，这是由于横摇自由度上的惯性矩相对较小，对液舱晃荡诱导力矩更加敏感。图 4-11 截取了不同充液率情况的 FLNG 船在横摇角幅值最大时刻的流场波浪高度标量图以及横截面流速合速度标量图。波浪从图左舷到右舷方向传播，可以看出在此波浪频率激励中的 20%充液率与 60%充液率情况下，FLNG 液舱内流体整体随着船体的运动而运动，仅观察到舱内流体表面有较高的流速，产生晃荡现象均不明显。可能的原因是由于液舱分舱，使舱内自由面较小，波浪激励频率远离液舱内部的晃荡共振频率。

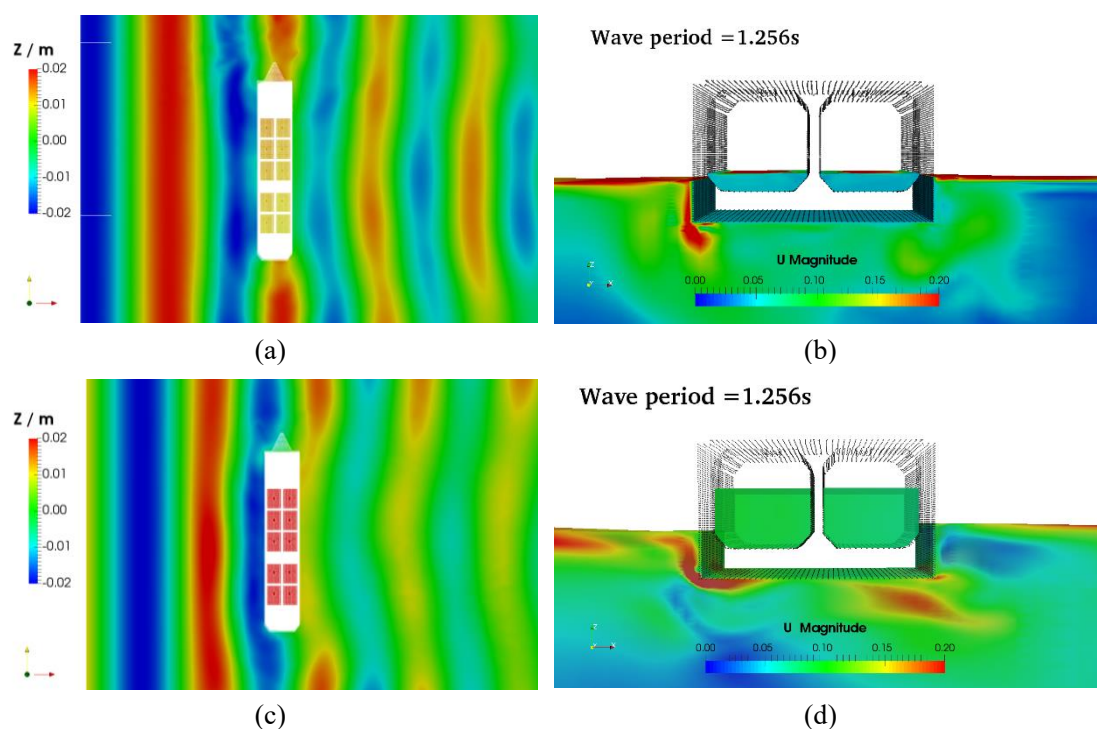
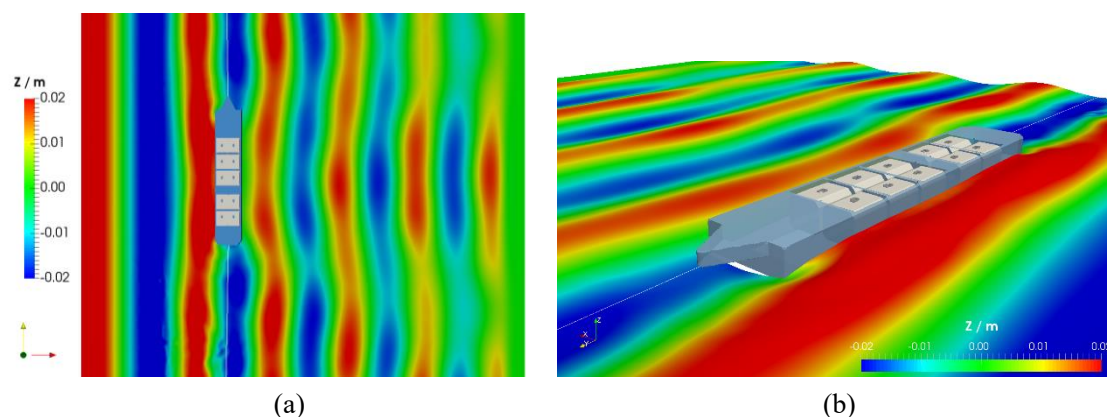


图 4-11 横浪工况下波高与 FLNG 横截面流场速度标量图 (a)(b)20%充液率 (c)(d)60%充液率
Fig.4-11 The graph of wave elevation and velocity scalar of FLNG hull section under beam waves
(a)(b)20% filling ratio (c)(d)60% filling ratio

观察船体外部波浪场，如图 4-11 左图与图 4-12 所示。可以看到，波浪受到船体的阻挡，会绕船体首尾两端通过，船左舷迎浪面会出现波浪的爬升，船右舷的流场波面高度明显降低。船左舷侧的流速增加，受到阻挡的流体从船体底侧通过，在船体结构转角处流速达到最大，由于流体具有粘性，此处有流体旋涡产生。流场速度与压力的不对称也使船体受到波浪施加的波浪力。在能量角度，波浪能转化为船体运动动能以及船体附近流体旋涡的能量损失。



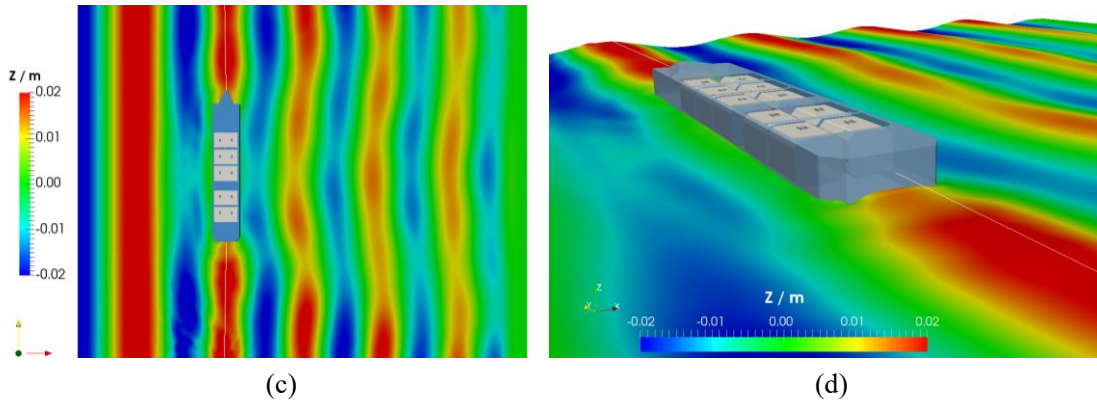
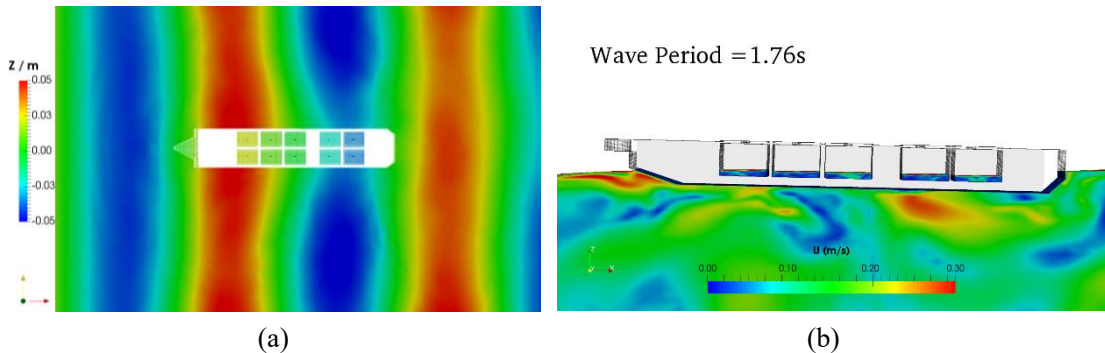


图 4-12 横浪工况下船体附近波面流场图 (a)(b)船体位于波谷 (c)(d)船体位于波峰
Fig.4-12 The wave field near FLNG hull under beam waves (a) at wave trough (b) at wave peak

在迎浪环境中，波浪的波长等于船长，根据经验，在此波浪频率作用下的船体运动幅值会明显增大，相对应的液舱内部晃荡现象应最为明显。但从运动响应时历结果中，看到不同充液率对纵摇运动的相位与运动响应幅值影响很小，相较于空舱情况，运动幅值只有微小增加。流场图 4-13 展示了在船体纵摇角运动幅值最大时刻，流场波面高度以及纵截面流速合速度标量图。可以发现，船体内部流体受重力作用，在船体运动过程中出现倾斜，20%充液率液舱内部流体流速相较于 40%充液率液舱内流体流速更大，且均为流体波面附近流速最大。但两种充液情况的波面晃荡变形仍不明显。考虑原因为，本文研究的 FLNG 模型，采用多液舱，小自由液面设计，避免液舱内部流体晃荡固有频率接近一般海况中的波浪频率。除此之外，相对于船体纵摇惯性矩，液舱晃荡对船体纵摇自由度作用的力矩影响很小，因此对于船体纵摇耦合运动的影响不明显。模拟情况也说明了 FLNG 液舱结构设计具有合理性。

观察船体外部流场波面高度，两种情况中波长等于船长，波峰均处于船中前部，波谷均处于船中后部，两部分位置的流场合速度最大。在船首部迎浪面，可以观察到船体对于流场速度的阻挡，流体从船体底部通过。体现了船体与波浪流场之间的耦合作用。



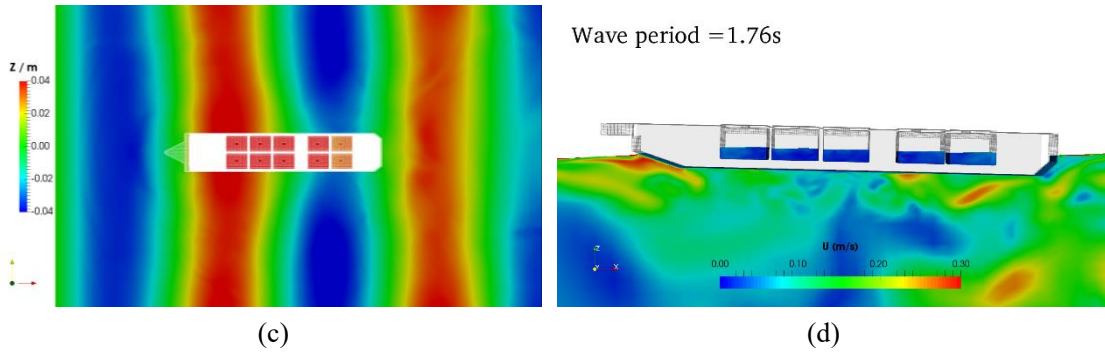


图 4-13 迎浪工况下波高与 FLNG 纵截面流场速度标量图 (a)(b)20%充液率 (c)(d)40%充液率
Fig.4-13 The graph of wave elevation and velocity scalar of FLNG hull section under head waves
(a)20% filling ratio (b)40% filling ratio

由上文所述，液舱内部的晃荡现象剧烈程度受外界激励频率影响。在本文问题中，对于在横浪工况中运动的 FLNG，由于横摇惯性矩相较于其他自由度惯性矩小，所以在横摇自由度是受液舱晃荡耦合作用的影响更加明显。当船体外部波浪频率激励接近液舱内部流体的固有晃荡频率时，晃荡现象会对船体运动产生明显的耦合影响。在 4.2.1 中，表 4-3 给出了横浪工况同波浪高度，不同频率的波浪环境以及充液率等参数。其中 FLNG 横摇运动时历曲线对比情况如上文图 4-8。

通过观察模拟结果可以发现，在波浪频率等于 0.5 倍、1 倍以及 1.5 倍船长时，充液率均为 20% 的 FLNG 出现了明显不同的横摇运动响应结果，图 4-14 给出了不同波浪频率下的流场波面高度图，可以发现，在周期为 1.257s 时，波形受船体影响产生弯曲，并且船体右舷侧流场波面高度明显降低。在周期为 1.761s 时，船体对波面形状影响降低，对船右舷侧流场波面高度有一定抑制现象；对于周期为 2.156s 时，船体对波形以及波面高度的影响均不明显。以上现象表明，随着波浪周期的增加，使得船体对波浪的影响越来越小，可能的原因是激励频率逐渐远离船体共振频率所致，使得船体与波浪之间的耦合作用逐渐减弱。

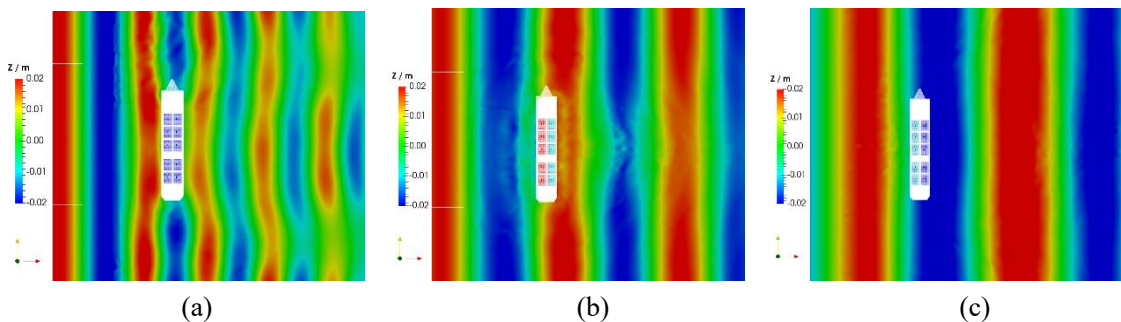


图 4-14 横浪工况不同频率波浪流场波面高度标量图 (a) $T=1.257$ (b) $T=1.761$ (c) $T=2.156$
Fig.4-14 The graph of wave elevation scalar under beam waves with the wave frequency of
(a) $T=1.257$ (b) $T=1.761$ (c) $T=2.156$

图 4-15 给出了在波浪周期为 1.761s 时，一个波浪周期内 FLNG 附近波浪流场以及液舱内流场的波面高度标量图。由于液舱内充液率较低，内部流场自由液面高度整体低于外部流场自由液面高度，因此分开采用两个颜色条标识。

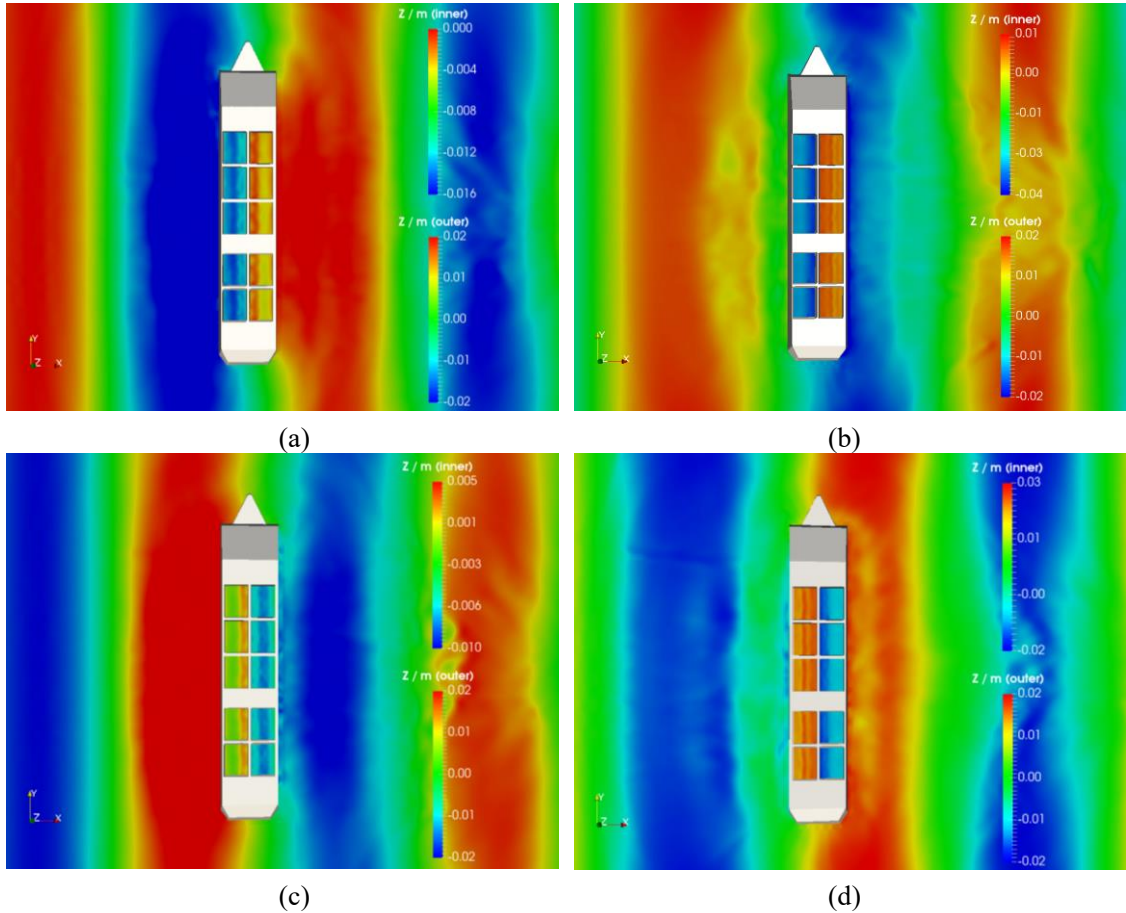


图 4-15 周期内 FLNG 船体附近及液舱内流场液面高度标量图 (a)T/4 (b)T/2 (c)3T/4 (d)T
Fig.4-15 Wave elevation scalar of flow field near and inside FLNG hull during one wave period
(a) T/4 (b) T/2 (c) 3T/4 (d) T

图中充液率 20% 的 FLNG 在横浪工况的波浪中做多自由度运动。可以观察到，液舱内的流场呈三维流动，受船体运动的激励，舱内流场也形成了波峰与波谷，并与外部波浪传播方向一致。当舱内波浪碰触到一侧液舱内壁后会发生反射，因此会在舱内壁之间往复传播。由于液舱是并排两列的分舱结构，沿横截面方向的流场被分成两段自由液面，每段自由液面都会随着船体横摇整体的上升或者下降，并且晃荡传播空间小，因此相比与横向单舱的形式，这种布置方式会减小舱内流体的流动，从而削弱晃荡现象。

以上算例中，可以发现观察到的液舱内流体的晃荡均无剧烈的翻卷破碎现象，在部分工况中，液面呈近似水平的状态，这一现象与张东伟等人^[21]在研究中提出

的平液面假设较为符合。与大液舱 LNG 船的剧烈液舱晃荡现象不同，更大型的 FLNG 船内部的液舱是采用并排、多液舱的分舱形式布置的。这种分舱形式可以有效减小自由液面面积，大幅度削弱液舱内流体的晃荡现象。这样做的好处是降低晃荡流体对液舱结构的冲击力，使 FLNG 具有更好的稳定性与安全性，以满足工程的设计需要。

4.3 本章小结

本章主要对多液舱充液 FLNG 在波浪中的液舱晃荡耦合运动规律以及影响因素进行了模拟与探究。首先参照工程设计模型，对多液舱 FLNG 进行数值建模，并通过自由衰减试验对模型的几何特征以及配置参数进行验证。随后通过对横浪和迎浪两种浪向工况下充液 FLNG 运动响应幅值进行求解，并与文献中模型试验结果进行对比，验证了求解器对于不同频率波浪工况以及液舱晃荡耦合运动求解的准确性进和可靠性。随后，为了平衡求解准确性与计算效率，进行了网格的收敛性验证，保证了后续大量系统工作的高效开展。以上工作为后续的模拟与分析打下了良好基础。

本章模拟主要得到以下结论。对于模拟中的 FLNG 多自由度运动，由于两根软弹簧锚链限制，大周期的横荡、纵荡与首摇运动在研究中可以忽略。而固有频率与波浪频率相近的升沉、纵摇、横摇三个自由度运动较为明显。在本章模拟的工况中，不同充液率情况对横浪和迎浪工况下的船体液舱晃荡耦合运动的影响不同。由于船体纵摇惯性矩远大于横摇惯性矩，液舱晃荡现象对横摇运动的影响大于纵摇自由度。因此在探究不同波浪频率对液舱晃荡耦合运动的影响时，选取横浪工况中的横摇自由度进行模拟分析。可以发现不同波浪频率下横摇运动的相位和幅值均出现了明显变化。在波浪周期为 1.76s 时，横摇运动幅值显著增加，最大横摇角超过 17° ，这将对 FLNG 结构安全性构成威胁。在实际工程中需避开此种波浪环境。同时由于液舱布置采用分舱设计，舱内流体晃荡现象没有产生翻卷破碎的剧烈晃荡现象，模拟结果符合物理试验现象规律。

模拟给出了充液 FLNG 在波浪环境中的瞬时流场图，利用波面高度标量，流场合速度标量展示了全流场信息。有利于分析在液舱晃荡与波浪场全耦合过程中液舱内外流场的变化情况，为工程中船体结构设计提供参考，体现了 CFD 全流场数值模拟的优势。

第五章 单点系泊 FLNG 液舱晃荡耦合运动数值模拟

上文主要介绍了 FLNG 在波浪中的液舱晃荡耦合运动模拟情况与结果。给出了横浪情况下，FLNG 的大幅值横摇会对船体结构带来很大影响，需要采用单点系泊的方式避免横浪情况的产生。因此本章在上文研究的基础上，引入单点系泊系统，研究系泊系统、船体运动与液舱晃荡三者之间的耦合作用机理。

5.1 单点系泊系统配置

本文第 2.5 节已经对 naoe-FOAM-SJTU 求解器中的系泊系统模块进行了详细的介绍，并分析了静力学与动力学各方法的优点。本文选用静力学系泊系统分析方法中的分段外推法来对单点系泊系统进行数值模拟，主要考虑的因素是，首先静力学方法对于船体高频运动如升沉、纵摇、横摇运动，与动力学方法差别不大，只是对与低频大周期运动如纵荡、横荡运动有一定劣势。而对于单点系泊 FLNG 在波浪中的液舱晃荡耦合运动问题，液舱晃荡现象在船体横荡与纵荡自由度运动上影响很小，只在纵摇与横摇自由度上影响明显^[18]。本文暂不深入研究系泊系统和液舱晃荡现象在大周期纵荡横荡运动中的影响，因此静力学分段外推方法可以满足本文需求。其次，分段外推法将锚泊链锁分解成一段段小单元，通过在每段上进行受力分析，列平衡方程的方式进行求解，因此每小段单元之间的计算是相对独立的，使得此方法易于对多材质组成的锚链进行求解，适合本文研究的问题。

5.1.1 作业环境与系泊系统布置

在本文的研究问题中，FLNG 船在南海的作业位置水深为 1500 米，属于深水环境。系泊系统采用外转塔单点系泊形式，FLNG 可以绕船首部的系泊点进行旋转。系泊锚链由长度不同的铁链与聚酯纤维两种材质构成，从系泊点到锚泊点的锚链分布以及对应的材质特性参数如表 5-1 所示。

表 5-1 锚链配置与参数
Table 5-1 The configuration and parameters of mooring lines

锚链材质	长度 (m)	直径 (m)	在空气中的质量 (kg/m)	在水中的质量 (kg/m)	轴向刚度 EA (kN)
铁链	100	0.127	322.93	280.95	1214733
聚酯纤维	4000	0.233	33.8	7.9	479000
铁链	2000	0.127	322.93	280.95	1214733

系泊系统由三组锚链组成，每组锚链为四根。每根锚链之间的夹角为 5° ，每

组锚链中心线之间的夹角为 120° ，如图 5-1(a)所示。锚链水平跨度为 5850 米，每根锚链长度为 6100 米，在海底存在躺底段，如图 5-1(b)所示。

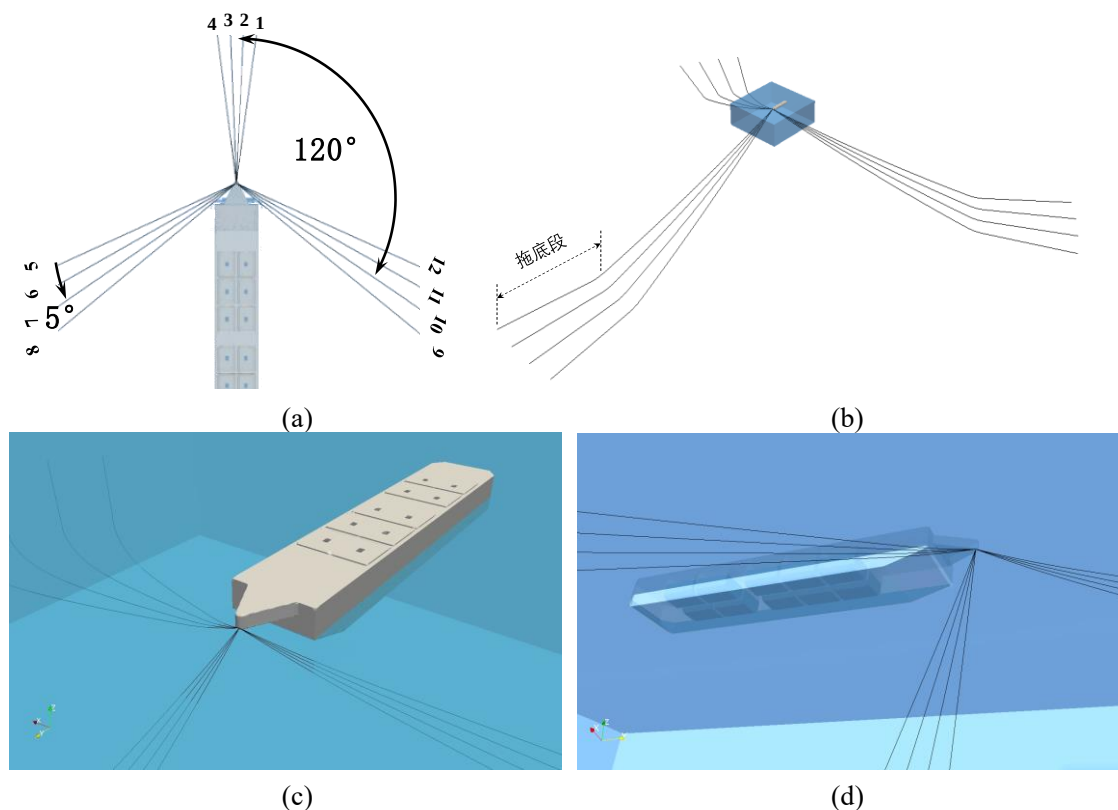


图 5-1 系泊系统布置示意图 (a)俯视图 (b-d)侧视图

Fig.5-1 The sketch of mooring system configuration (a)Top view (b-d)Side views

5.1.2 锚链水平刚度验证

由于场地的限制，在物理试验中，波浪水池的深度无法达到对全水深进行试验，因此在系泊系统中，往往采用截断锚链的等效方法进行处理。但本文应用 CFD 方法，可以实现对全水深环境与完整锚链的模拟。

为了验证模拟中系泊系统的准确性，需要在静水中进行水平刚度试验。通过在水平方向给船体施加强迫运动，来求解随着系泊点位移的增加，系泊系统对于船体的水平回复力。模拟结果与文献中方法结果对比图，如图 5-2 所示。可见本文求解器中的系泊系统模块求解结果与文献中的方法结果十分吻合。在水平方向位移 70 米内，相较于势流截断锚链的方法，本文方法计算结果更加贴近物理试验结果。同时考虑到南海海况，70 米的水平位移范围能够满足工程需要。需要提到的是，图中水平拉力发生波动是因为船舶运动会打破静水面的稳定，产生的波浪

向远处扩散，遇到计算域边界产生反射，反射的回波与船体附近新产生的波浪相互作用，造成了计算结果的波动。

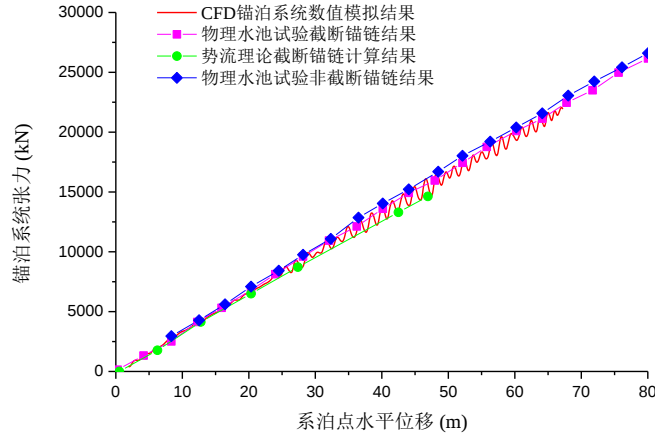


图 5-2 锚泊系统水平刚度曲线验证

Fig.5-2 Verification of horizontal stiffness of mooring system

5.2 充液 FLNG 单点系泊/船体耦合水动力运动响应数值模拟

本章内容模拟工况与第四章相同，但是为了更接近工程实际，数值模型从对模型尺度改为对实尺度进行模拟。其中物理量需要用到相似理论进行换算。在本章中，实尺度模型的参数在上章中已经提到，见表 4-1。为了方便对单点系泊前后 FLNG 船体的运动响应变化进行分析，统一将各物理量换算成实尺度再进行对比。在尺度的缩放中，长度量缩尺比 $\lambda = 81$ ，时间量缩尺比为 $\sqrt{\lambda} = 9$ ，对于角度无尺度效应，因此缩尺比为 1。

5.2.1 海洋环境模拟工况描述

为了探究引入单点系泊系统后，波浪中运动的充液 FLNG 受到的影响。与第四章相同，模拟中考虑横浪与迎浪两种波浪情况，工况的具体参数见表 5-2。本章的主要内容主要是探究单点系泊、液舱晃荡与船体运动三者之间的耦合作用。通过对比引入单点系泊系统前后 FLNG 的运动响应与液舱晃荡现象的变化，探究系泊系统对船体液舱晃荡耦合运动之间的作用。再通过对比充液与空舱情况下单点系泊 FLNG 的运动响应与锚链力情况，分析液舱晃荡效应对于系泊系统的影响。横浪与迎浪工况下，FLNG 在波浪中运动的流场图如图 5-3 所示。

表 5-2 波浪中单点系泊 FLNG 模拟工况设置

Table 5-2 The configuration of numerical simulation cases of single-point mooring FLNG in waves

浪向	液舱 充液率	波长 (m)	波频 (rad/s)	波高 (m)	水深 (m)	波浪类型	释放 自由度
横浪	0%、20%	196	0.5608	3.92	392	Stokes	六自由度
迎浪	0%、20%	392	0.3965	7.84	392	一阶深水规则波	六自由度

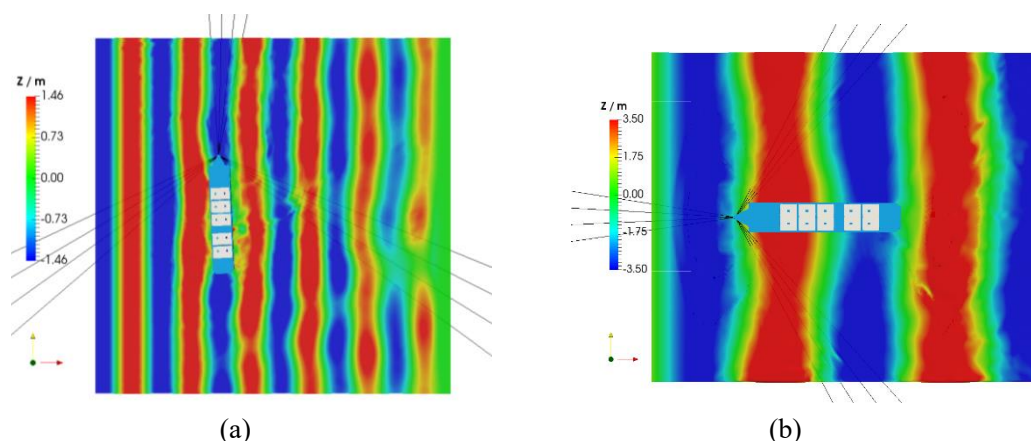


图 5-3 横浪(a)与迎浪(b)工况下单点系泊 FLNG 在计算域中的流场图

Fig.5-3 The graph of flow fields of single-point mooring FLNG in (a)beam waves (b)head waves

从流场中可以看出，由单点系泊系统定位的 FLNG 船在波浪的作用下产生了运动。在横向波浪的作用下，FLNG 船体绕单点系泊位置出现了水平面上的旋转，体现出了单点系泊系统中的“风标效应”特性^[66]。即船体会受波浪作用在水平面上旋转，最终船首稳定在朝向波浪的位置，稳定后船体受到的波浪力会大幅度减小，从而使船体运动幅值减小，提高作业的安全性。在迎浪情况中，船体会出现大位移大周期的纵荡运动，但在此过程中，由于波浪与船体的对称性，使得船体在横向上受到的力相互抵消，从而在横摇、横荡与首摇自由度上运动响应的幅值很小可以忽略。

5.2.2 单点系泊对波浪中 FLNG 运动响应的影响

在引入单点系泊后，FLNG 的运动响应除了受波浪力与舱内晃荡流体作用力的作用以外，还会受首部的锚链力作用。通过对比系泊前后运动响应时历曲线的变化情况，可以对单点系泊系统对液舱晃荡/船体耦合运动响应的影响进行分析。对于横浪工况，此时 FLNG 迎浪面较大，波浪会对船体在横荡、横摇自由度上产生明显影响，从而对实际作业中船体的安全性造成威胁。图 5-4 对比了空舱压载 FLNG 在横浪工况下升沉自由度和横摇自由度的运动响应时历情况。

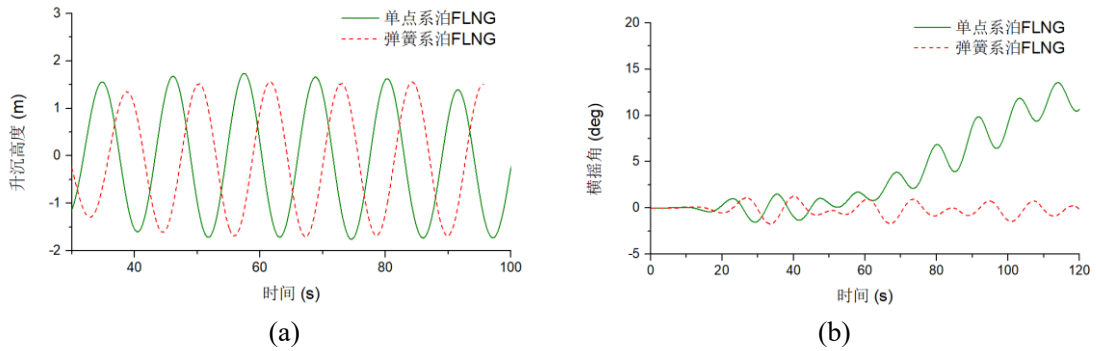


图 5-4 横浪中空舱 FLNG 在有单点系泊时的运动响应时历对比 (a)升沉 (b)横摇
Fig.5-4 Time series of motion response of empty tank FLNG with/without single-point mooring in beam waves (a)heave (b)roll

由图可以观察到不同系泊系统下船体从初始静止到运动状态的变化情况。从对比图 5-4(a)中可以发现,在横浪工况下,升沉运动的相位发生明显变化,但是运动幅值变化幅度较小。相位的变化可以理解为单点系泊相较于首尾两端弹簧系泊,在船体横荡自由度上的约束力较小,随着波浪作用产生的横荡位移更大,船体位置的改变也体现在升沉运动相位的改变上。对比图 5-4(b)可以发现,在单点系泊情况下,船体的横摇角随波浪作用周期的增加大幅度增加,并且船体在 50s 后,横摇角始终为正值,说明船体一直向一侧倾斜。此现象说明,在横浪工况下,单点系泊的 FLNG 船体易受波浪作用产生大幅度倾斜,会对作业安全构成严重的威胁。在实际工程中,可以采用助推系统来避免此种情况的发生。

由于在迎浪工况时船体的迎浪面小,并且由于船体对称性,横向受力相互之间会进行抵消,所以在初始一段时间内,FLNG 的横荡、横摇与首摇三个自由度的运动幅值很小,而由于三维流场以及液舱内部的液体的扰动,会打破受力平衡。因此相对于横浪工况,FLNG 在迎浪环境下的运动响应主要为低频大周期的纵荡运动,高频小周期的升沉与纵摇运动。为了分析不同单点系泊对船体运动的影响,对迎浪工况下的 FLNG 运动响应进行快速傅里叶变化,对比结果如图 5-5 所示。

从图中可以看出,对迎浪中 FLNG 采用单点系泊方式进行定位后,升沉运动与纵摇运动响应的主频率没有改变,并且注意到,该频率十分接近波浪频率 0.063HZ,由此可知升沉和纵摇运动是由波浪激励主导的。对比单点系泊前后的运动响应 FFT 结果,可以发现,单点系泊系统会使升沉和纵摇的运动幅值有所降低。可能的原因是,单点系泊在垂向上对船体施加的回复力以及在绕船体重心方向上施加的回复力矩会对船体在升沉和纵摇运动产生约束作用,减小运动幅值,此现象对实际工程中船体的稳定性有所帮助。

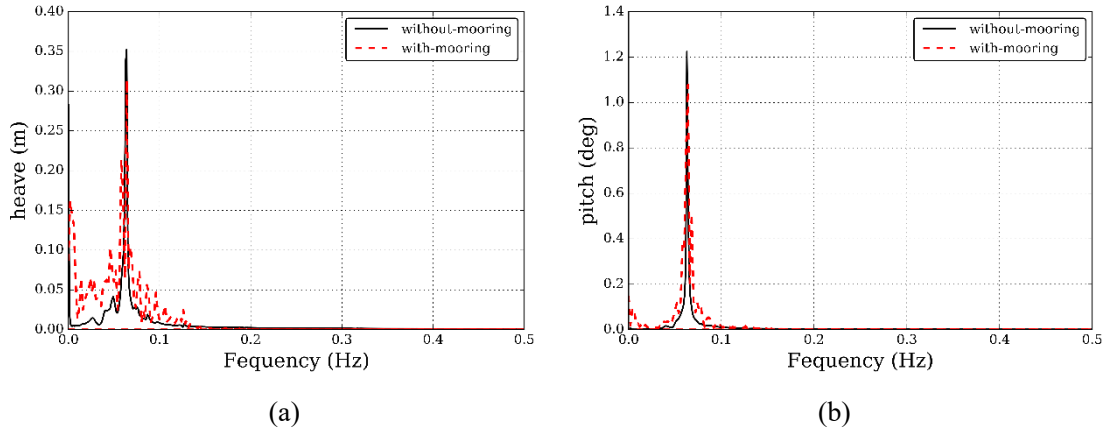


图 5-5 迎浪中空舱 FLNG 有无单点系泊时运动响应 FFT 变换结果对比 (a)升沉 (b)纵摇
Fig.5-5 Fast Fourier transform results of motion response of empty tank FLNG with/without single-point mooring in head waves (a)heave (b)pitch

在观察中还可以发现，单点系泊的 FLNG 除了在波浪频率存在峰值外，在低频区域也存在幅值。说明单点系泊系统会对船体产生低频影响，并且对于 FLNG 的升沉运动影响更加明显。这部分的原因可能是受波浪慢漂力的作用，FLNG 产生了大周期和大幅值的纵荡运动，此运动会不断改变船体位置，改变了高频升沉与纵摇运动的相位，从而体现出了低频影响。

同样，通过观察 20%充液率 FLNG 在采用单点系泊系统定位后运动的变化情况，如图 5-6 与图 5-7，也可以发现与空舱情况类似的规律。

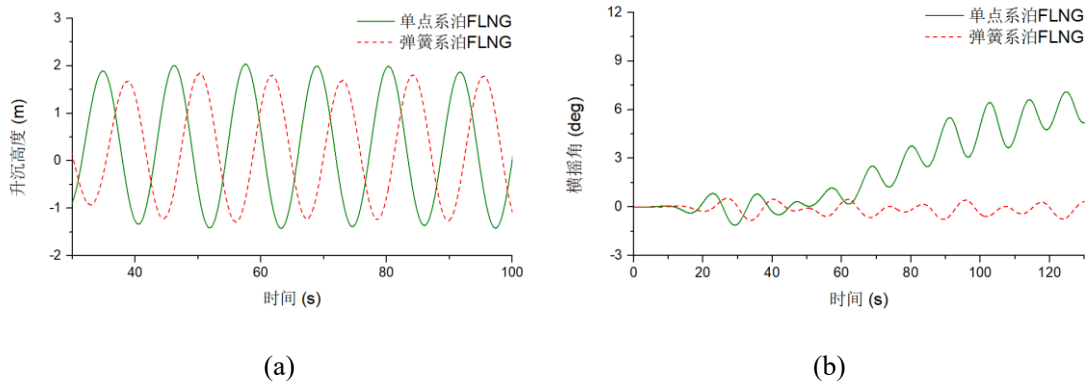


图 5-6 横浪中 20%充液率 FLNG 在有无单点系泊时的运动响应时历对比 (a)升沉 (b)横摇
Fig.5-6 Time series of motion response of 20% filling ratio FLNG with/without single-point mooring in beam waves (a)heave (b)roll

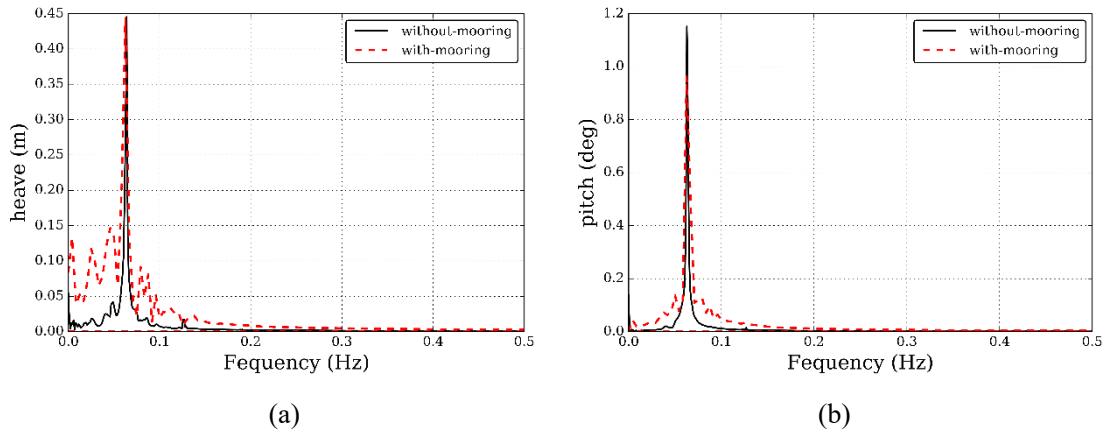
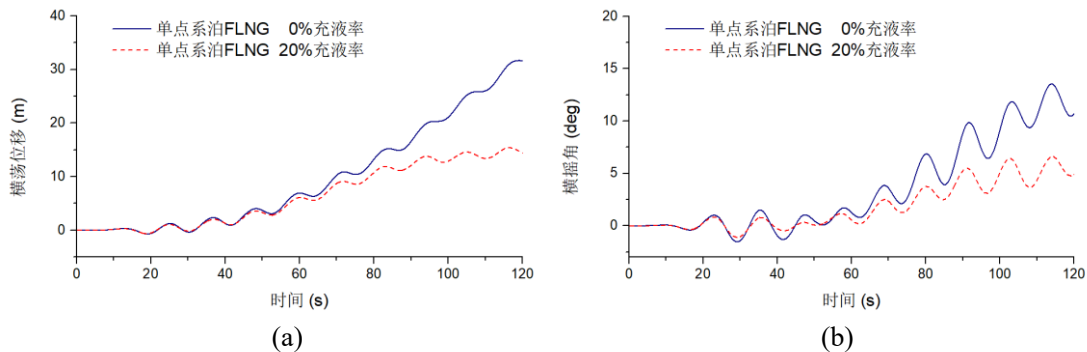


图 5-7 迎浪中 20%充液率 FLNG 有无单点系泊运动响应 FFT 变换结果对比 (a)升沉 (b)纵摇
Fig.5-7 Fast Fourier transform results of motion response of 20% filling ratio FLNG with/without single-point mooring in head waves (a)heave (b)pitch

5.2.3 液舱晃荡对单点系泊 FLNG 运动响应的影响

在波浪的作用下,释放了六自由度的单点系泊 FLNG 会产生复杂的运动响应。受单点系泊的约束下,FLNG 会由波浪力作用绕外转塔系泊点进行水平旋转,做大周期的首摇、横荡与纵荡运动。在此过程中,液舱内部的流体受船体运动的激励会出现复杂的晃荡现象。反过来,晃荡现象诱导的力矩会作用在液舱内壁上,对船体运动产生耦合。为了探究晃荡对于单点系泊 FLNG 运动响应的影响,下文对同工况下的空舱与 20%充液率情况下的 FLNG 运动响应结果进行对比。

由第四章内容可知,液舱晃荡现象主要会对横浪工况下的 FLNG 横摇以及迎浪工况下的 FLNG 纵摇运动产生影响。同时也已知单点系泊 FLNG 在波浪中会产生大周期横荡与纵荡运动。所以,主要对以上两个工况中的四个自由度进行对比分析。图 5-8 给出了空舱与 20%充液率情况下,单点系泊 FLNG 在横浪工况中运动的横荡与横摇时历曲线对比,以及迎浪工况中,FLNG 的纵荡与纵摇运动 FFT 计算结果对比。



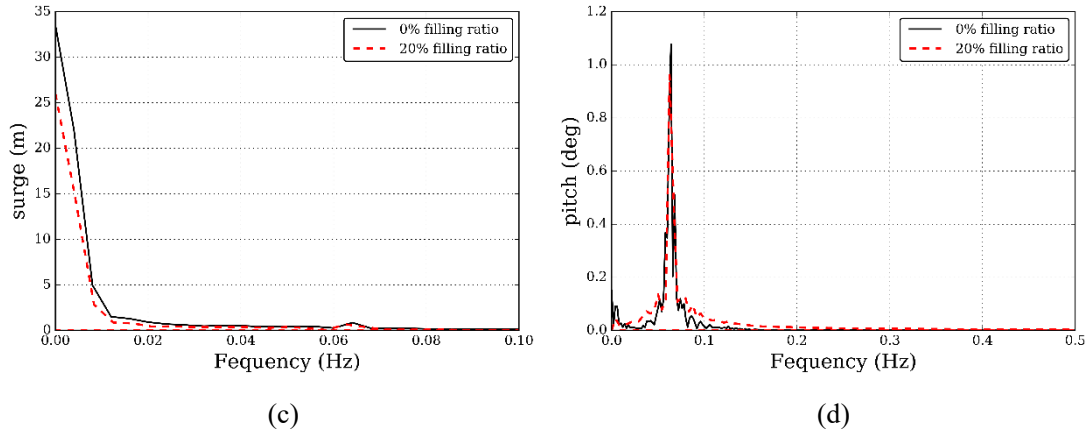


图 5-8 单点系泊空舱与 20%充液率 FLNG 在波浪中运动时历对比 (a)横浪-横荡 (b)横浪-横摇 (c)迎浪-纵荡 (d)迎浪-纵摇

Fig.5-8 The time series of motion response of single-point mooring FLNG with 0% and 20% filling ratios in waves (a)sway - beam (b)roll - beam (c)surge - head (d)pitch - head

由图可见，相较于空舱 FLNG 情况，在液舱充液率为 20%时，在横浪与迎浪两种浪向工况中，均可以看到运动响应幅值的减小，而对于运动相位的影响不十分明显。在横浪工况中，参考“风标效应”原理，FLNG 会受波浪作用产生偏移，绕系泊点产生旋转，最终稳定在迎浪方向。在 FLNG 静止到运动的过程中，在横荡自由度上产生的位移可以被监测并记录，由图 5-8(a)所示。可以发现，液舱充液率为 20%时的 FLNG 横荡运动幅值增加的速度小于空舱情况，说明液舱内流体的晃荡耦合作用对 FLNG 在波浪中的漂移速度起到了减缓的作用。观察 FLNG 充液前后的横摇角运动时历变化，可以发现充液 20%后 FLNG 的横摇角明显减小，说明在此充液情况和波浪频率激励下，液舱晃荡现象降低了船体在偏转时的最大横摇角，增加了 FLNG 的稳定性和安全性。

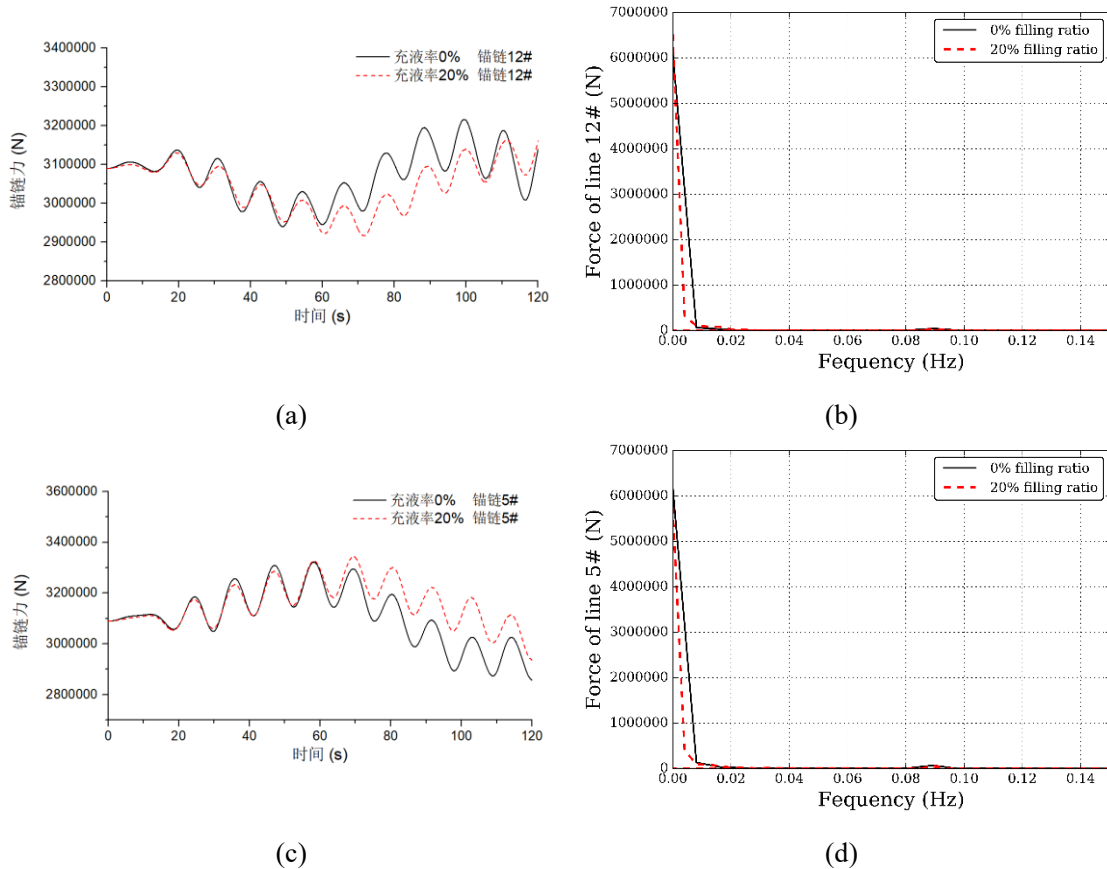
观察图 5-8(c)，可以发现 FLNG 受波浪的作用，会产生大位移的低频纵荡运动。同时通过 FFT 变换，也捕捉到了纵荡运动中的高频分量，这部分分量的频率接近波浪频率 0.063HZ，所以纵荡运动包括高频与低频两部分运动分量组成。液舱晃荡现象也减小了船体的纵荡位移,可能的原因是液舱晃荡使 FLNG 的整体运动存在能量耗散。观察图 5-8(d)，可以发现，液舱晃荡对于迎浪工况中的纵摇运动频率影响不明显，对纵摇运动响应的幅值有一定减小。考虑原因主要是在 FLNG 内部液舱在船纵向上设计为 5 排，使单个液舱的自由面面积大幅度减小，从而大大抑制了液舱晃荡现象，削弱其对于船体的耦合影响。需要说明的是，虽然在上文工况中，液舱晃荡现象对船体的稳定性有利，但并非所有液舱晃荡现象都会减少船体的运动幅值。加剧或抑制船体耦合运动，取决于船体内部的充液率和波浪激

励频率等因素对液舱内外壁作用力矩的相位差与幅值。

5.2.4 液舱晃荡对单点系泊 FLNG 锚链受力的影响

在单点系泊中，由于每根锚链的位置不同，因此受力也不同，存在某工况下最大受力锚链以及最小受力锚链。为方便描述与分析，将锚链进行编号，如图 5-1(a)所示。上文结果说明充液前后，FLNG 的运动响应会产生变化，为观察运动变化对锚泊系统的影响，将监测到的锚链力情况整理，同时为了观察锚链力的变化情况，从初始时刻开始监测并记录锚链力时历结果。在三组锚链中，每组锚链中的四根锚链受到的锚链力相近，因此只选取具有最大与最小锚链力的一根锚链进行对比。

在横浪工况中，选取三组锚链中具有最大锚链力的三根锚链 12、5 和 2 号，为了观察锚链力在频域上能量的分布，对锚链力时历结果进行快速傅里叶变化。每根锚链在 FLNG 充液前后的锚链力时历以及对应的 FFT 结果如图 5-9 所示。



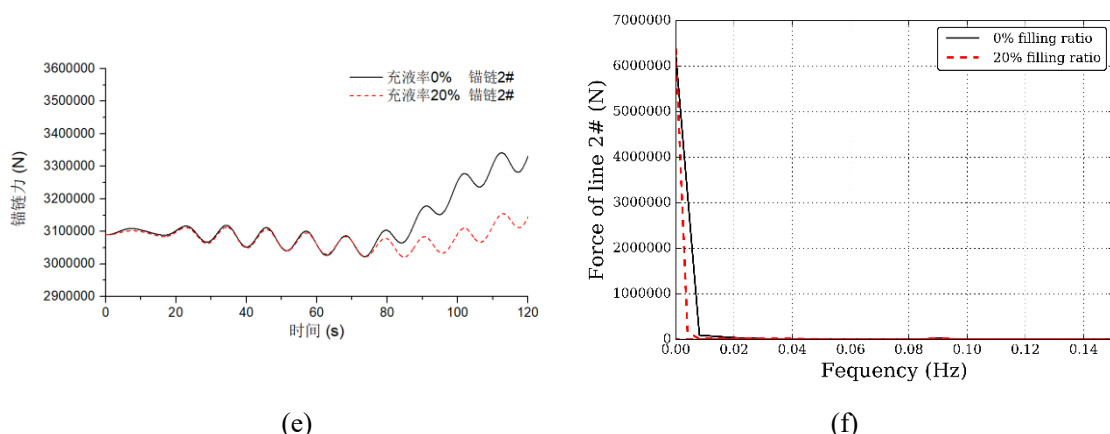


图 5-9 横浪中空舱与 20%充液单点系泊 FLNG 运动所受锚链力与对应 FFT 变换结果对比，
锚链号：(a-b)12# (c-d)5# (e-f)2#

Fig.5-9 The mooring force and corresponding FFT results of single-point mooring FLNG with 0% and 20% filling ratios in beam waves, mooring line No. (a-b) 12# (c-d)5# (e-f)2#

由图可以看出，横浪工况中的三组锚链的锚链力变化范围均比较接近，通过频域 FFT 变换结果可以看到锚链力均为大周期大幅值的变化，也可以捕捉到接近波浪激励频率的高频分量。对比液舱充液前后，锚链力幅值出现明显变化，主要原因是由于船体在充液前后运动响应情况不同，由于 FLNG 在同时刻的位置不同使得对应锚链顶端张力出现区别。观察 FFT 结果，发现液舱晃荡现象对锚链力低频分量的相位影响较小，可能原因是液舱晃荡主要影响 FLNG 接近波浪频率的高频运动，在锚链的大周期低频分量上影响较小。

同上方法，在迎浪工况中，由于尾部两组锚链对称分布，在初始一段时间内，锚链顶端张力接近。因此只需选取三组锚链中具有最大锚链力的 2 号与 8 号两根锚链。模拟计算结果如图 5-10 所示。

为了探究锚链力与 FLNG 纵荡运动的关系，在图中增加了空舱时 FLNG 纵荡位移时历进行对比参照。可以明显发现，锚链力与纵荡位移曲线有很好的对应关系。FLNG 的位移会使锚链拉紧或松弛，首部 2#锚链的顶端拉力随着纵荡沿 x 轴正向位移的增加而增加，沿 x 轴负向位移的增加而减小，尾部 8#则与之相反。从结果的 FFT 结果中可以明显的看到锚链力存在两个峰值，分别为大幅值的低频分量，以及小幅值的与波浪频率相近的高频分量。同样说明锚链力的主要成为在低频区域。对比充液前后的锚链力变化可以发现，充液后的锚链力幅值减小，主要原因是纵荡位移幅值的减小。充液前后，锚链力相位的变化很小，仍存在低频与高频两个分量。也证明了液舱晃荡主要影响船体的高频运动，而锚链力主要分布于低频区域，因此两者之间的耦合影响较小。

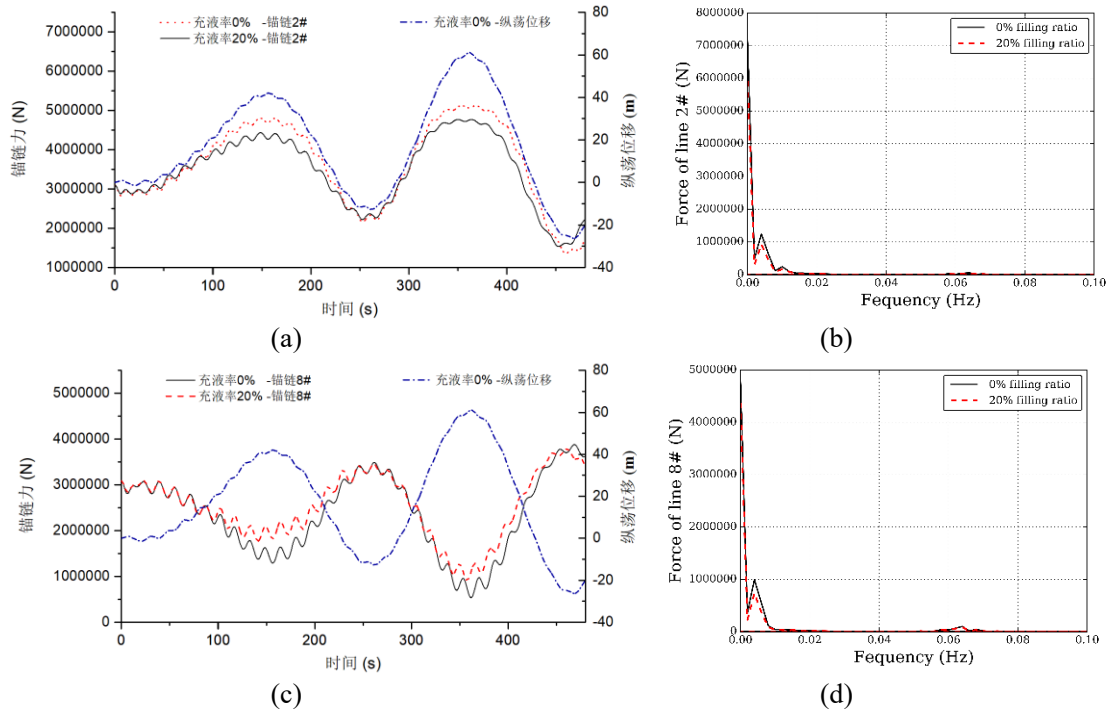


图 5-10 迎浪中空舱与 20%充液单点系泊 FLNG 运动所受锚链力与对应 FFT 变换结果对比，
锚链号：(a-b)2# (c-d)8#

Fig.5-10 The mooring force and corresponding FFT results of single-point mooring FLNG with 0% and 20% filling ratios in head waves, mooring line No. (a-b)2# (c-d)8#

5.3 数值模拟流场展示与分析

本文应用 CFD 数值模拟方法，考虑流体粘性影响，同时全耦合模拟液舱内外流场，能够处理 FLNG 大幅度运动问题，并展示流场细节。而势流方法通过添加人工粘性，在对船体湿表面积积分过程中，无法准确计算粘性影响，同时势流方法假设结构物小幅度运动，与物理试验存在一定偏差。因此在模拟波浪中单点系泊 FLNG 液舱晃荡问题时，CFD 方法更具有优势。下文通过对流场的捕捉，分析横浪与迎浪两种工况中的单点系泊 FLNG 运动问题。

5.3.1 单点系泊 FLNG 外部波浪流场分析

由于在横浪与迎浪两种工况下，FLNG 的迎浪面与受力情况不同，使得流场变化有所不同。图 5-11 展示了横浪工况中 FLNG 迎浪面和尾流场的变化情况。

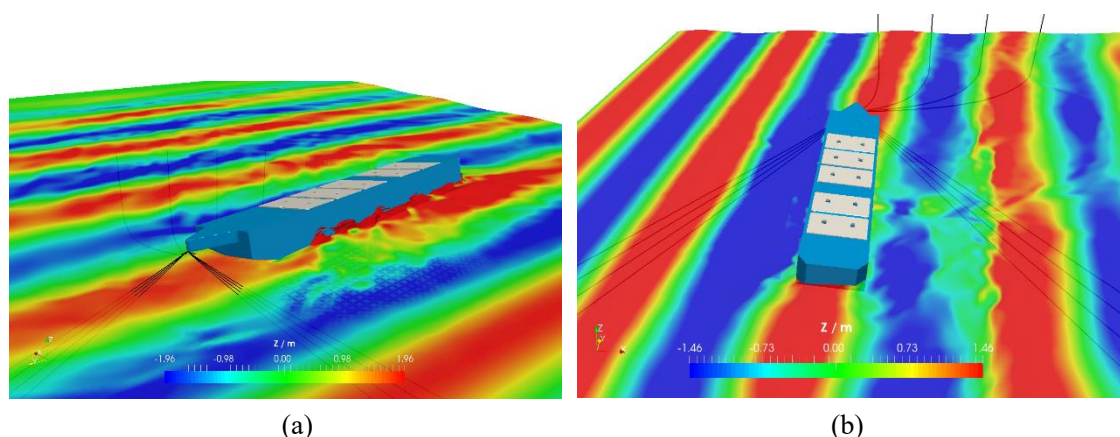


图 5-11 横浪中的迎浪面波浪爬升现象(a)和尾流场波面变化(b)

Fig.5-11 FLNG wave climbing phenomenon(a) and wave surface change of wake flow field(b) in beam wave

可以看到，当波浪的波峰冲击到 FLNG 迎浪面上时，波浪沿船侧表面存在明显的波浪爬升现象，高度远超波峰幅值，呈现剧烈的非线性特征。在波浪的作用下，船体绕单点系泊点在水平面产生旋转，同时船体向右舷侧出现倾斜。观察尾流场可见波浪受到 FLNG 船体阻挡，波峰从船首尾以及船底通过，波浪在通过船体后可以重新形成波峰，但尾流场的波面出现不规则的三维特征以及破碎等非线性现象，可能是由于船体表面涡脱落对波浪形状产生了影响，如图 5-13。图 5-12 展示了 FLNG 在迎浪工况中的船首尾部的流场变化情况，观察可发现与横浪明显不同的现象。

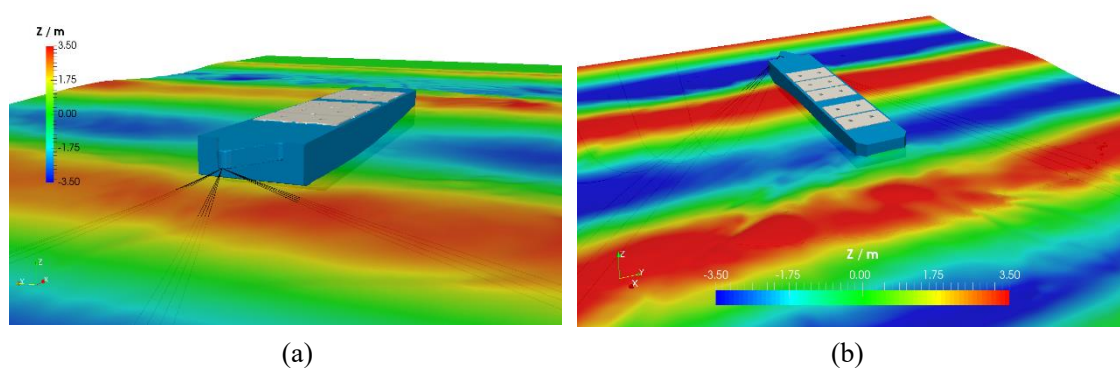


图 5-12 迎浪中的迎浪面波浪爬升现象(a)和尾流场波面变化(b)

Fig.5-12 FLNG wave climbing phenomenon(a) and wave surface change of wake flow field(b) in head wave

相对于横浪工况，迎浪工况中 FLNG 迎浪面较小，波浪与船体之间的相互作用较弱，波浪爬升现象不明显。观察船体尾流场可以看到规则波的波面出现变化，由于 FLNG 处在无流速的纯波浪环境中，兴波现象也比较微弱。从整体流场可以

看到, 在迎浪环境中, 波浪对船体的影响小, 可以提高船体作业的安全性, 因此在工程中最好通过辅助定位系统, 将船体随时调整到迎浪情况。

由于 FLNG 船体结构存在角度近 90° 的直角边, 根据第四章流场速度分布可知, 此时在船体表面附近的流场会形成漩涡脱落现象, 从而造成能量损失, 并对船体运动与振动产生影响。同时船体表面的压力也会随之发生变化, 是结构设计中需要考虑的重要问题。CFD 模拟可以捕捉瞬时流场信息, 由流场速度信息可以计算得到流场的涡量信息。图 5-13 展示了横浪工况下, 船体表面的涡脱落现象。

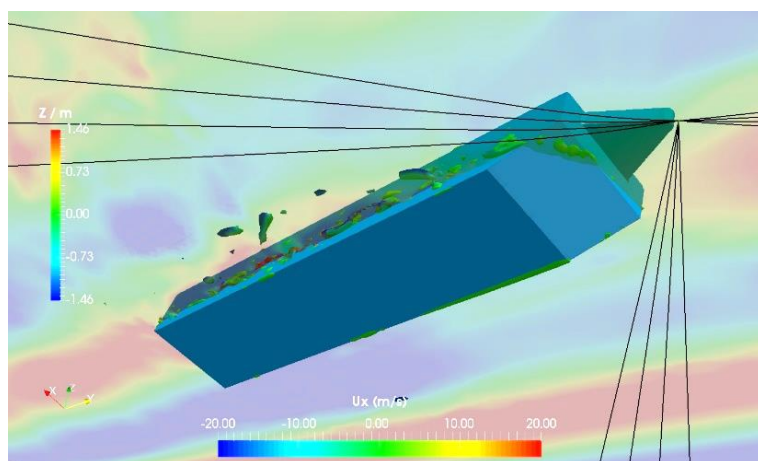


图 5-13 横浪工况中的 FLNG 船体附近涡脱落现象

Fig.5-13 The vortex shedding phenomenon near FLNG hull in beam waves

由图可以看见, 在船体左舷迎浪面与船底面的交线边处, 以及船体右舷近水面附近, 出现了明显的涡脱落现象, 证明此处流体的速度较大形成漩涡。因此可知在船底边缘, 以及船体水线面附近区域, 所受压力情况更加复杂, 对结构强度的要求较高。

5.3.2 单点系泊 FLNG 液舱内部流场分析

当 FLNG 的液舱内充液时, 船体的运动会对液舱内部的流体运动与液面形状产生影响。在船体放开六自由度之后, 多自由度运动相互叠加, 使得船体运动与液舱内部的流场更加复杂。考虑到横浪中 FLNG 的运动情况更加复杂, 属于危险工况, 对此时的 FLNG 内部液舱分别进行切面观察。图 5-14 给出了横浪工况中, FLNG 内部各位置液舱的内外瞬时流场示意图。

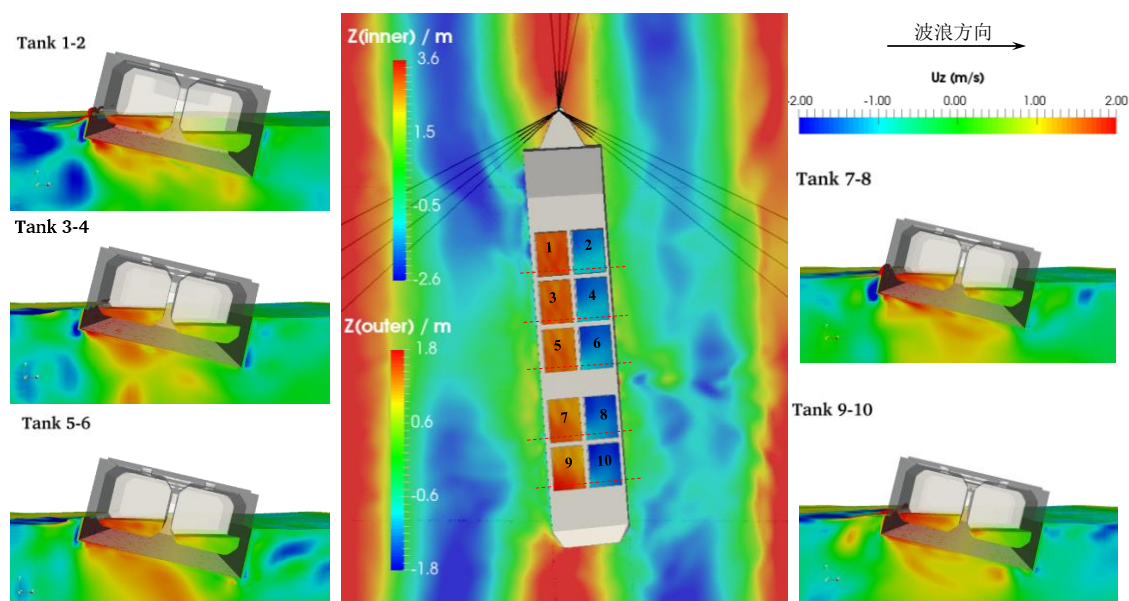


图 5-14 横浪工况中的 FLNG 各液舱截面瞬时流场图

Fig.5-14 The transient flow field of cross sections of FLNG liquid tanks in beam waves

图中液舱截面的选取位置在图中已经表明，可以看出，船体向右舷侧倾斜，各个截面均在明显的横摇现象。观察液舱截面内液面的垂向流速分布，可以发现左侧液舱的垂向速度明显大于右侧液舱速度，说明单点系泊后，船体横摇旋转中心偏向右侧。纵向观察各个液舱内的速度分布，可以发现，越接近船尾，液舱内部的速度越大，可以理解为单点系泊时，船体绕系泊点在水平面旋转，由于船体为刚体，各部分角速度相同，因此越接近船尾的速度越大，使得船尾处垂向速度也随之提高。观察液舱外流场，可以发现，波浪在船体左舷侧出现爬升现象，在左舷与船底交界线处流速较大，也说明此处有旋涡产生。再观察液舱内部液面高度，可以发现，每个液舱在接近船尾侧的侧壁处液面高度更高。原因是船体绕系泊点旋转，由于系泊限制，FLNG 出现了类似横向漂移的甩尾现象，船体越近船尾处速度越大。也可看到尾部液舱 9-10 的液面变形会较船首部液舱 1-2 明显。以上现象会导致此时船尾处的液舱壁所受的晃荡诱导压力增加，因此在工程设计中，需要注意尾部舱室结构的强度是否满足强度要求。

5.4 本章小结

本章内容主要对单点系泊充液 FLNG 在波浪中的系泊系统、液舱晃荡与船体运动三者之间的耦合关系进行探究。首先通过对比引入单点系泊系统前后 FLNG 船体的运动响应，分析单点系泊的影响。模拟结果发现在引入单点系泊后，船体

在升沉、纵摇和横摇高频运动分量的基础上，出现了大幅值的纵荡、横荡与首摇低频分量。横浪工况中，在升沉运动上，单点系泊改变了运动相位，但对运动响应幅值的影响较小。在横荡和横摇运动上，均出现了响应幅值向一侧增加的现象，主要由于船体受系泊点限制，在水平面上出现旋转，即“风标效应”的现象，结果表明，此时的船体横倾角近 15° ，将对船体作业造成不良影响，并威胁到 FLNG 船的稳定性 and 安全性。在迎浪工况中，FLNG 受波浪慢漂力影响，产生大周期大幅值的纵荡运动，受锚链力作用，升沉运动与纵摇运动幅值减小。观察 FFT 结果，升沉运动出现了低频分量，纵摇运动相位的变化较小。

接着通过观察单点系泊状态下，空舱与充液两种状态的 FLNG 中，液舱晃荡对船体运动响应以及系泊锚链力的影响，探究各因素之间的耦合作用。结果发现，在本文波浪频率以及 20% 充液率情况下，液舱晃荡减小了横浪与迎浪中各运动响应的幅值，对船体的安全性有利。但并非只要充液就会减弱船体的运动响应，FLNG 的液舱晃荡耦合运动是收到抑制或者增强，主要与波浪频率和充液率、液舱内外壁所受诱导力矩的幅值与相位差决定。同时还发现，液舱晃荡主要影响船体的高频运动响应，而锚链力主要影响船体的低频运动响应，因此液舱晃荡与锚链力之间的耦合效应不会十分显著。

最后，文中解释了 CFD 方法对本文问题的处理优势。并给出了横浪与迎浪两种浪向工况中 FLNG 瞬时全流场情况。通过分析外部波浪场，发现由于迎浪面积不同，相较于迎浪工况，横浪工况中船体对流场的影响更加大。并且捕捉到船体迎浪面强非线性的波浪爬升现象，尾流场波浪扰动，以及船体附近的涡脱落现象。展示了 CFD 对于流场丰富的监测与分析处理能力。随后为了从流场角度探究复杂横浪工况中的液舱晃荡现象，沿船体中纵轴线方向截取不同液舱位置处的横截面流场情况，发现受系泊限制，FLNG 将在水平面绕系泊点旋转，出现类似“漂移甩尾”的现象。使得近船尾部的液舱内流体速度明显增加，对应内部的液面高度更高，对液舱壁的作用压力也越大。因此在工程结构设计中，需要注意并保证尾部液舱的结构强度满足要求。

第六章 结论与展望

6.1 全文结论

当前我国对南海新能源的开发仍处于起步阶段，能源的开采环境也逐渐从近海走向深海。由于以往的海底输油管线的方式已经不再适用于深海环境，全球范围内提出了一种大型浮式生产及储卸油装置 FLNG 来对天然气进行采集与储存。在南海的波浪环境作用下，FLNG 会产生复杂水动力响应，内部舱室储存的液化天然气会受船体运动产生晃荡现象，反过来晃荡现象也会改变船体的运动，因此液舱晃荡/船体耦合运动是当前 FLNG 设计阶段需要考虑的一项重要课题。除此之外，由于 FLNG 需在固定作业区域作业，需采用系泊系统进行定位。本文考虑到单点系泊系统的优势，对单点系泊 FLNG 船的系泊系统、液舱晃荡与船体运动之间的耦合效应进行了探究，从而为工程设计提供参考。

本文的主要内容是对波浪中单点系泊 FLNG 船的液舱晃荡耦合运动问题进行 CFD 全流场数值模拟。结合课题组内部自主研发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器中各模块，实现了 FLNG 液舱内外全流场同步初始化、液舱内外壁力矩分别输出、数值波浪的准确造波消波以及对单点系泊系统的配置与求解。通过与物理试验结果模拟进行对比，验证了求解器和数值模拟设置的准确性与可靠性。全文采用由简到繁的研究思路，将复杂问题进行拆解，以求逐步深入。第一二章主要在数值模拟的实现上提供基础与理论支撑，第三章针对 FLNG 液舱简化模型，实现全流场数值模拟，并探究波浪激励下液舱晃荡耦合运动的机理。第四章结合文献中物理试验，构建并验证 FLNG 数值模型，研究波浪激励下 FLNG 整船的液舱晃荡耦合运动。在以上研究的基础上，在第五章引入单点系泊系统，探究在波浪激励下，系泊系统、液舱晃荡与船体运动三者之间的复杂耦合效应。

第三章主要对液舱晃荡与液舱运动之间的耦合规律进行探究，针对充液 FLNG 液舱简化模型进行 CFD 数值模拟。实现了对全流场的同时数值模拟，并验证了求解器和计算配置的精确性。分析波浪频率、充液率与波浪高度三种因素对液舱晃荡与横摇耦合运动影响的规律与机理。主要得到以下结论：

- 1) 当外部波浪的频率接近液舱内部液体的晃荡固有频率时，会激发舱内流体产生剧烈的晃荡现象，液舱内部的固有频率主要取决于舱室形状与充液高度。受不同频率的波浪激励，晃荡流体对液舱内壁作用力矩的相位与幅值都会产生较大变化。

2) 充液后的液舱受内部晃荡诱导力矩和外部波浪诱导力矩的共同作用进行耦合运动, 相较于空舱情况, 充入的液体可能会增大或减小液舱的运动幅值。对运动的加剧或者抑制主要取决于晃荡诱导力矩与波浪诱导力矩的相位差, 当相位同相时, 两者作用力矩的幅值叠加, 增大液舱的运动幅值, 而相位接近反相时, 作用力矩相互抵消, 从而体现在耦合运动幅值的减小。

3) 在波高增加后, 液舱所受波浪诱导力矩和晃荡诱导力矩都会增大, 此时液舱晃荡现象也会更加剧烈, 可能会出现翻卷破碎的现象, 造成能量损失, 从而减小液舱的运动幅值。

4) 相较于势流-CFD 相结合的方法, 全流场 CFD 方法也考虑到了波浪场中的粘性影响, 以及内外部流场的全耦合影响, 使得模拟结果更加接近物理试验结果。

第四章对 FLNG 模型进行了数值建模, 考虑横浪以及迎浪工况, 对充液 FLNG 在波浪中的液舱晃荡耦合运动进行模拟。模拟同文献中的物理试验, 在船体首尾两端利用弹簧锚链进行约束。对比空舱情况, 探究液舱充液率以及波浪频率两种因素对 FLNG 升沉、纵摇与横摇三个自由度上的液舱晃荡耦合运动影响情况。为第五章单点系泊充液 FLNG 船的模拟打下基础。本章的主要结论有:

1) 为了验证 FLNG 数值模型结构形式和参数配置的准确性, 进行了空舱压载与 20%充液两种情况的自由衰减运动模拟, 在升沉、横摇与纵摇三个自由度上, 分别与物理水池试验结果进行对比, 最大误差在 4%以内, 验证了求解器与模型构建的准确性, 同时证明了全流场数值模拟和网格划分的可靠性。

2) 针对 FLNG 在横浪工况中的横摇运动以及迎浪工况中的纵摇运动进行网格收敛性验证, 表明横浪时 232 万网格, 迎浪时 242 万网格可以保证计算的准确性, 同时还可以具有较高的计算效率。

3) 液舱晃荡对横浪工况中的横摇运动影响更加明显, 对升沉运动以及迎浪中的升沉和纵摇运动影响较小, 主要原因一是采用多液舱设计的 FLNG, 单个液舱自由液面积很小, 极大地削弱了液舱晃荡给 FLNG 运动带来的影响。二是与纵摇自由度的大转动惯量相比, 液舱晃荡对船体的晃荡诱导力矩不能激励出明显运动响应, 而由于横摇转动惯量比纵摇的自由度少约一个数量级, 因此液舱晃荡在横摇自由度上的影响更加突出。

4) 通过观察 FLNG 在 20%、40%与 60%充液率下的液舱晃荡耦合作用, 可以发现, 充液率虽然可以改变晃荡固有频率, 但由于固有频率均与波浪激励频率相差较远, FLNG 运动响应没有明显变化, 说明此种舱室设计可以减小充液率对液舱晃荡耦合运动的影响。

5) 观察流场可以发现,液舱内液面接近水平状态,从流场速度上来看,液舱内部流体整体随着船体一起运动,晃荡现象十分微弱。原因是相比于 LNG 船的大型液舱设计,FLNG 船的液舱采用多个小液舱设计,单个舱室的自由液面面积大大减小,有效抑制了液舱晃荡的现象。该现象与张东伟^[21]在文献中提到的“平液面假设”理论接近。此种结构设计的好处是可以有效降低液舱晃荡对于船体结构安全性的威胁。

第五章在上文的基础上,引入了单点系泊系统,放开船体六自由度,对横浪与迎浪两种波浪工况下 FLNG 的液舱晃荡耦合运动响应进行模拟。波浪环境与第四章相同,通过对比,探究引入单点系泊对整个系统的影响。得到的主要结论如下:

1) CFD 方法可以对全水深锚链进行模拟,通过系泊系统水平刚度模拟实验,验证了 naoe-FOAM-SJTU 求解器中系泊系统的准确性。

2) 在引入单点系泊后,横浪工况的 FLNG 受波浪力作用,绕系泊点在水平面上发生旋转。升沉运动的相位发生明显变化,横摇运动向一侧发生倾斜,最大横摇角约 15° 。说明横浪工况将会对 FLNG 的安全性构成严重威胁,建议采用助推系统避免遭遇此种工况。观察迎浪工况 FLNG 运动响应的 FFT 结果,发现引入单点系泊后,升沉和纵摇运动幅值有所减小,升沉和纵摇运动出现低频分量,但主峰值的频率不变,仍接近波浪频率。说明单点系泊主要对运动产生低频影响。

3) 对比空舱压载与 20%充液情况下单点系泊 FLNG 的运动响应情况,可以发现,液舱晃荡耦合作用减缓了横浪工况中 FLNG 横荡与横摇运动幅值的增加,降低了迎浪工况中 FLNG 的纵荡与纵摇幅值。结果发现,液舱晃荡对近波浪频率的运动影响更加明显。

4) 对比液舱充液前后,横浪与迎浪工况下的锚链力情况,通过对比时历与 FFT 结果,发现锚链顶端张力主要与船体的横荡、纵荡大周期运动的位移有关。同时在锚链力中也提取出了近波浪频率的高频分量,但此分量幅值远小于低频分量幅值。说明锚链力主要分布于低频范围。

5) 横浪与迎浪两种工况下 FLNG 的外部流场受船体结构影响,会出现绕射与反射现象。在复杂横浪工况中流场变化更加剧烈,在引入单点系泊后,船体迎浪面出现更加明显的波浪爬升现象。在船体迎浪面与船底交线位置,以及船体背浪面水线附近,捕捉到了涡脱落的现象,该现象会增加船体压力,并产生振动。同时,FLNG 会绕系泊点旋转,出现甩尾现象,靠近船尾的液舱壁所受压力增加。以上现象可以在 FLNG 的结构设计中予以参考。

6.2 未来展望

本文工作对单点系泊下带有液舱晃荡现象的 FLNG 进行了摸索与基础性工作,验证了数值模拟的准确性与可靠性,取得了一定成果。由于此问题国内外的研究学者较少,并且硕士科研时间有限。在研究过程中,对更多有意义,并值得深入研究的课题暂未开展相关研究。在此对未来可以做进一步研究的方向进行梳理与展望。

1) 减晃装置在液舱晃荡问题中的应用。目前国内外对于液舱内的减晃荡装置开展了大量研究,已取得了不错成果。如 Kolaei^[88]对圆柱形油罐内加装纵向挡板后的减晃效果进行了数值模拟分析。宁德志等^[89]基于边界元方法,模拟探究了三维液舱中的浮子式减晃荡结构对减晃效果的影响。杨亚强等^[90]应用无网格粒子 MPS 方法探究水平隔板减晃装置的布置方式对于二维液舱减晃效果的影响。未来可以将减晃荡装置应用在船体内部液舱中,模拟并分析工程中减晃荡装置的作用。

2) 探究不同液舱结构形式在液舱晃荡问题中的影响。唐亮等^[91]应用 VOF 方法,对薄膜型、球型以及 SPB 型三种液舱进行了数值模拟。刘戈等^[92]对 LNG 独立 C 型液舱的液舱晃荡问题进行了物理模型试验和数值模拟。卫志军^[93]对大尺度储舱的流体晃荡砰击问题进行了系统试验。以上文章均提供了很好的研究思路。

3) 应用重叠网格技术模拟单点系泊 FLNG 船风标效应。单点系泊情况下的 FLNG 船在风浪流联合作用下,如船首方向与作用载荷方向存在夹角,则会绕系泊点进行旋转。最终船首方向会迎向作用载荷方向。在整个过程中,船体会产生大幅度位移,采用重叠网格技术可以有效解决该类问题,便于系统化研究的开展。

4) 浪流夹角环境中单点系泊 FLNG 船的摆尾效应。当浪流存在夹角时,单点系泊 FLNG 会受到周期变化的波浪力和固定流速产生的恒定作用力,两种作用力的方向不同,因此船体的合力方向也将呈周期性变化,此时表现为 FLNG 绕系泊点做摆尾运动。对此现象与液舱晃荡现象之间的相互影响进行研究也具有一定工程参考价值。

参 考 文 献

- [1] 史丹, 刘佳骏. 我国海洋能源开发现状与政策建议[J]. 中国能源, 2013, 35(09): 6-11.
- [2] 吴家鸣. FPSO 的特点与现状[J]. 船舶工程, 2012, 34(S2): 1-4+102.
- [3] 刘晓健. FPSO 单点系泊系统运动响应分析[D]. 江苏科技大学, 2013.
- [4] 杨贵强. FPSO 系泊系统设计相关因素分析[J]. 船海工程, 2018, 47(02):123-126.
- [5] 杜敏. 浅水多点系泊 FPSO 水动力性能分析[D]. 中国石油大学(华东), 2016.
- [6] Rognabakke O F, Faltinsen O M. Coupling of Sloshing and Ship Motions[J]. Journal of Ship Research, 2003, 47(14):208-221.
- [7] Akyildiz H, Ünal E. Experimental investigation of pressure distribution on a rectangular tank due to the liquid sloshing[J]. Ocean Engineering, 2005, 32(11):1503-1516.
- [8] Molin B, Remy F, Ledoux A, et al. Effect of Roof Impacts on Coupling Between Wave Response and Sloshing in Tanks of LNG-Carriers[C]. ASME 2008, International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2008: 15-24.
- [9] Nam B W, Kim Y, Kim D W, et al. Experimental and numerical studies on ship motion responses coupled with sloshing in waves[J]. Journal of Ship Research, 2009, 53(2): 68-82.
- [10] Nasar T, Sannasiraj S A, Sundar V. Motion responses of barge carrying liquid tank[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(10):935-946.
- [11] Battaglia L, Cruchaga M, Storti M, et al. Numerical modelling of 3D sloshing experiments in rectangular tanks[J], Applied Mathematical Modelling, 2018, 59:357-378.
- [12] 张新放, 关克平. FLNG 水动力性能研究进展[J]. 油气储运, 2017, 36(08): 883-888.
- [13] 祁恩荣, 庞建华, 徐春, 王德禹, 蔡忠华, 陈小平. 薄膜型 LNG 液舱晃荡压力与结构响应试验[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(04):17-24.
- [14] 陈强. 波浪联合液舱晃荡作用下的二维浮箱运动响应[D]. 大连理工大学, 2013.
- [15] 徐潜岳. 基于实验的 LNG 液舱晃荡冲击荷载特征分析研究[D]. 大连理工大学, 2016.
- [16] 薛米安, 陈奕超, 苑晓丽, 邢建建. 不同海浪谱激励下矩形液舱内液体晃荡试

- 验研究[J]. 大连理工大学学报, 2018, 58(03):261-268.
- [17] Zhao W, Yang J, Hu Z, et al. Hydrodynamics of a 2D vessel including internal sloshing flows[J]. Ocean Engineering, 2014, 84(4):45-53.
- [18] Zhao W, Yang J, Hu Z, et al. Numerical and Experimental Investigation on Hydrodynamic Characteristics of FLNG With an Account of the Inner-Tank Sloshing[C]. ASME 2011, International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2011: 243-251.
- [19] Zhao W, Yang J, Hu Z. Effects of sloshing on the global motion responses of FLNG[J]. Ships & Offshore Structures, 2013, 8(2): 111-122.
- [20] 苏仰旋, 郑苗子, 赵天奉, 余阳, 段梦兰, 时文斌. FLNG 拖曳晃荡试验研究[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(09):25-29.
- [21] 张东伟, 胡志强, 陈刚, 赵晶瑞. FLNG 液舱晃荡压力影响因素及安全性评估研究[J]. 海洋工程, 2015, 33(06):26-34.
- [22] 王舒雅, 胡志强, 陈刚. FLNG 系统液舱晃荡特性及其对横摇运动的影响[J]. 中国海洋平台, 2015, 30(05):84-92.
- [23] 王舒雅, 胡志强, 陈刚. 液舱晃荡对 FLNG 运动耦合影响的水动力模型试验和数值分析研究[C]. 第十七届中国海洋（岸）工程学术讨论会, 2015.
- [24] Ibrahim R A. Liquid Sloshing Dynamics[M]. Cambridge University Press, 2005.
- [25] Abramson H N. The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers, With Applications to Space Vehicle Technology[J]. Applied Mechanics Reviews, 1966, 16(7).
- [26] Newman J N. Wave effects on vessels with internal tanks[C]. Proceedings of the 20th Interactional Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Spitsbergen, Norway, 2005.
- [27] KIM B, SHIN Y. Coupled seakeeping with liquid sloshing in ship tanks[C]. Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, Portugal, 2008: 247-257.
- [28] Faltinsen O M, Timokha A N. An adaptive multimodal approach to nonlinear sloshing in a rectangular tank[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 432(432): 167-200.
- [29] Faltinsen O M, Rognabakke O F, Lukovsky I A, Timokha A N. 2000 Multidimensional modal analysis of nonlinear sloshing in a rectangular tank with finite water depth [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 407:201-234
- [30] Zhao D, Hu Z, Chen G, et al. Nonlinear sloshing in rectangular tanks under forced excitation[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering,

2017:S2092678217302340.

- [31] Gou Y, Kim Y, Kim T Y. A numerical study on coupling between ship motions and sloshing in frequency and time domain[C]. Proceedings of the 21th International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Hawaii, USA, June 19-24, 2011:158-164.
- [32] Zhao W, Yang J, Hu Z, et al. Coupled analysis of nonlinear sloshing and ship motions[J]. Applied Ocean Research, 2014, 47(47):85-97.
- [33] Zhao W, Hu Z, Yang J, Wei Y. Investigation on Sloshing Effects of Tank Liquid on the FLNG Vessel Responses in Frequency Domain[J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(03):227-237.
- [34] 赵文华. 浮式液化天然气装备(FLNG)水动力性能的数值分析及实验研究[D]. 上海交通大学, 2014.
- [35] Kim Y, Shin Y S, Lin W M, et al. Study on sloshing problem coupled with ship motion in waves[C]. The 8th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics. Busan, Korea, 2003.
- [36] Kim Y, Shin Y S, Lee K H. Numerical study on slosh-induced impact pressures on three-dimensional prismatic tanks[J]. Applied Ocean Research, 2004, 26(5):213-226.
- [37] Lee S J, Kim M H, Lee D H, et al. The Effects of Tank Sloshing on LNG Vessel Responses[C]. ASME 2007, International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2007: 789-795.
- [38] Ryu M C, Hwang Y S, Jung J H, Jeon S S, Kim Y S. Sloshing Load Assessment for LNG Offshore Units with a Two-Row Tank Arrangement[C]. Proceedings of the 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, Beijing, China, ISOPE, 2009, 3:284-294
- [39] 陈翔, 张友林, 万德成. MPS 方法研究进展及其在船舶水动力学问题中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(06):955-972.
- [40] 祁江涛, 顾民, 吴乘胜. 液舱晃荡的数值模拟[J]. 船舶力学, 2008, (04):574-581.
- [41] Kim Y, Nam B W, Kim D W, et al. Study on coupling effects of ship motion and sloshing[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(16):2176-2187.
- [42] 李裕龙, 朱仁传, 缪国平, 范菊, 陆志妹. 基于 OpenFOAM 的船舶与液舱流体晃荡在波浪中时域耦合运动的数值模拟[J]. 船舶力学, 2012, 16(07):750-758.
- [43] Wang X, Arai M. A Study on Coupling Effect Between Seakeeping and Sloshing for Membrane-Type LNG Carrier[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2010, 21(4):256-263.
- [44] Kim K S, Kim M H. Sloshing effects on multi-vessel motions by using moving

- particle simulation[C]. Proceedings of the 21th Interactional Offshore and Polar Engineering Conference, Hawaii, USA, 2011: 39-45.
- [45]洪亮, 朱仁传, 缪国平, 范菊, 李裕龙. 波浪中船体与液舱晃荡耦合运动的时域数值计算[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(05):635-641+647.
- [46]邓棋, 尤云祥, 张新曙. 超谐共振横摇下液舱晃荡特性数值研究[J]. 水动力学研究与进展, 2016, 31(5):525-534.
- [47]Zhao W, Yang J, Hu Z, et al. Numerical and Experimental Investigation on Hydrodynamic Characteristics of FLNG With an Account of the Inner-Tank Sloshing[C]. Asme International Conference on Ocean, 19-24, June, 2011, Rotterdam, The Netherlands.
- [48]Jiang S C, Teng B, Bai W, et al. Numerical simulation of coupling effect between ship motion and liquid sloshing under wave action[J]. Ocean Engineering, 2015, 108:140-154.
- [49]姜胜超. 波浪作用下船舶运动与液舱内流体晃荡的耦合数值分析[D]. 大连理工大学, 2013.
- [50]Yin C, Zhuang Y, Wan D. Numerical Study on Liquid Sloshing in LNG Tanks Coupled with Ship Motion in Waves[C]. Proceedings of 3rd International Conference on Violent Flows (VF-2016), 9-11, March, 2016, Osaka, Japan.
- [51]Zhuang Y, Yin C, Wan D. Numerical Study on Ship Motion Coupled with LNG tank Sloshing Using Dynamic Overset Grid Approach[C]. Proceedings of the 7th International Conference on Computational Methods (ICCM2016), Berkeley, USA, 2016:1503-5525-1-PB.
- [52]Zhuang Y, Wan D. Numerical study on coupling effects of FPSO ship motion and LNG tank sloshing in low-filling condition, Applied Mathematics and Mechanics, 2016, 37(12): 1378-1393
- [53]Zhuang Y, Wan D. The fully coupled effects of FPSO with different filling ratio tanks in CFD method. Proceedings of the 8th International Conference on Computational Methods (ICCM2017), Guilin, Guangxi, China, 2017:1055-1065.
- [54]Zhuang Y, Wan D. Fully coupled effects on waves and barge with single sloshing tank by CFD methods[C]. International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics, Keelung, Taiwan, China, 5-8, November, 2017.
- [55]李奇, 万德成. 单点系泊 FPSO 在波浪中水动力性能 CFD 数值分析[C]. 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集, 浙江舟山, 2017:585-591.
- [56]Kim Y B, Kim M H. Hull/mooring/riser coupled dynamic analysis of a tanker-based turret-moored FPSO in deep water[C]. The Twelfth International Offshore and Polar

- Engineering Conference, Kitakyushu, Japan, 26-31, May, 2002.
- [57] Kim M H, Koo B J, Mercier R M, et al. Vessel/mooring/riser coupled dynamic analysis of a turret-moored FPSO compared with OTRC experiment[J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32(14):1780-1802.
- [58] Soares C G, Fonseca N, Pascoal R. Experimental and Numerical Study of the Motions of a turret Moored FPSO in Waves[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2005, 127(3):197.
- [59] Masuda K, Asanuma T, Maeda H, et al. A Prediction Method for Horizontal Plane Behavior of FPSO Under the Single Point Mooring[C]. *The 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Oslo, Norway, June 23–28, 2002, 1:163-168.
- [60] 袁洪涛, 曾骥, 莫建等. 极端海况下深水单点系泊系统 FPSO 运动响应分析[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2015(2): 108-113.
- [61] 刘元丹, 刘敬喜, 谭安全. 单点系泊 FPSO 风浪流载荷下运动及其系泊力研究[J]. *船海工程*, 2011, 40(06): 146-149.
- [62] Liu Y, Peng Y, Wan D. Numerical Investigation on Interaction Between a Semi-Submersible Platform and its Mooring System, *Proceedings of the 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, May 31-June 5, 2015, St. John's, Newfoundland, Canada, Paper No. OMAE2015-41294.
- [63] 王建华, 万德成, 南海浮式码头与系泊系统动力耦合分析, *水动力学研究与进展 A 辑*, 2015 年 3 月, 30(2):180-186
- [64] 谢志添. 浮式液化天然气生产装备 (FLNG) 单点系泊系统水动力特性研究[D]. 上海交通大学, 2015.
- [65] Xie Z, Yang J, Hu Z, et al. The horizontal stability of an FLNG with different turret locations[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2015, 7(2):244-258.
- [66] 赵文华, 杨建民, 胡志强, 谢彬, 喻西崇. 大型浮式液化天然气开发系统关键技术现状及发展趋势[J]. *中国海上油气*, 2013, 25(01):82-86+90.
- [67] 许鑫, 申辉, 杨凯东, 钟华, 孙延国. 波流耦合作用对单点系泊系统的影响[C]. *深海能源大会会议论文集*, 2015: 32-41.
- [68] Hu Z, Wang S, Chen G, et al. The effects of LNG-tank sloshing on the global motions of FLNG system[J]. *International Journal of Naval Architecture & Ocean Engineering*, 2016, 9(1).
- [69] Zhao W, Yang J, Hu Z. Effects of sloshing on the global motion responses of FLNG[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2013, 8(2):111-122.

- [70] Shen Z, Wan D, Wang J, Zhao W. Manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU[R]. Technol Rep Solver Man, 2014, Shanghai Jiao Tong University.
- [71] Shen Z, Carrica P M, Wan D. Ship Motions of KCS in Head Waves with Rotating Propeller Using Overset Grid Method[C], Proceedings of the 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE-2014, July 8-13, 2014, San Francisco, California, USA, Paper No.: OMAE2014-23657
- [72] Shen Z, Wan D. Numerical Simulations of Large-Amplitude Motions of KVLCC2 with Tank Liquid Sloshing in Waves[C]. In 2nd International Conference on Violent Flows. Nantes, France. 2012: 149-156.
- [73] Cao H, Zha J, Wan D. Numerical simulation of wave run-up around a vertical cylinder[C]. In Proceedings of the Twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference. Maui, Hawaii, USA. 2011: 726-733.
- [74] Cao H, Wan D. Application of OpenFOAM to simulate 3-D flow past single and two tandem circular cylinder[C]. In the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference. Beijing, China. 2010: 702-709.
- [75] Zhao W, Zou L, Wan D, Hu Z. Numerical Investigation of Vortex-Induced Motions of a Paired-Column Semisubmersible in Currents[J], Ocean Engineering, 2018, 164: 272–283
- [76] 曹洪建. 海洋工程粘性数值波浪水池开发及应用[D]. 上海交通大学, 2014.
- [77] 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.
- [78] Cao H, Liu Y, Wan D, Yang C. Numerical simulation of solitary wave impact on fixed offshore platform[C]. In The 7th International Workshop on Ship Hydrodynamics. Shanghai, China, 2011:138-143.
- [79] Ye H, Shen Z, Wan D. Numerical prediction of added resistance and vertical ship motions in regular head waves[J]. Journal of Marine Science and Application. 2012, 11(4): 410-416.
- [80] Shen Z, Wan D. RANS Computations of Added Resistance and Motions of Ship in Head Waves[C]. In Proceedings of the 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE). Rhodes, Greece. 2012:1096-1103.
- [81] Wang J, Wan D. CFD Investigations of Ship Maneuvering in Waves Using naoe-FOAM-SJTU Solver[J]. Journal of Marine Science and Application, 2018, 1-16
- [82] 刘远传. 浮式结构物系泊系统数值分析模块 naoeFOAM-ms 开发[D]. 上海交通大学, 2014.
- [83] Cao H, Wan D. RANS-VOF solver for solitary wave run-up on a circular cylinder[J].

- China Ocean Engineering, 2015, 29(2):183–196.
- [84]Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1):201-225.
- [85]Jasak H, Tukovic Z. Automatic mesh motion for the unstructured finite volume method[J]. Transactions of FAMENA. 2006, 30(2): 1-20.
- [86]Jacobsen N G, Fuhrman D R, Fredsoe J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam(R)[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2012, 70(9):1073–1088.
- [87]韩旭亮, 谢彬, 朱小松, 赵晶瑞. 载液 FLNG 船体运动性能的数值模拟及模型试验[J]. 中国造船, 2016, 57(04):87-97.
- [88]Kolaei A, Rakheja S, Richard M J. Coupled multimodal fluid-vehicle model for analysis of anti-slosh effectiveness of longitudinal baffles in a partially-filled tank vehicle[J]. Journal of Fluids and Structures, 2017, 70:519-536.
- [89]宁德志, 苏朋, 张崇伟, 李翔. 三维液舱内浮子式减晃荡结构的水动力特性[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019(01):1-8
- [90]杨亚强, 唐振远, 万德成. 基于 MPS 方法模拟带水平隔板的液舱晃荡[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2015, 30(02):146-153.
- [91]唐亮, 李玉星, 臧垒垒, 王武昌, 朱建鲁. 不同 LNG 液舱对晃荡敏感性的数值模拟[J]. 油气储运, 2017, 36(07):849-854+860.
- [92]刘戈, 林焰, 管官, 李冰. LNG 独立 C 型液舱晃荡特性试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2017, 57(05):467-475.
- [93]卫志军. FLNG 系统储舱设计中的晃荡与砰击荷载研究[D]. 大连理工大学, 2015.

致 谢

时光飞逝，转眼间两年半的研究生时光也要结束了。人生就像一场旅行，回想过去十余年来走过的求学之路，经历了种种风景，结识了朋友知己。这段时间承载了我思绪的变迁，也见证了我的成长。

洋洋洒洒五万余字，这篇毕业论文昭示着我已经临近毕业。要感谢的人有很多，百感交集中，首先要感谢的是我的研究生导师万德成教授。万老师虽然身兼数任，工作繁忙，但是一向以严谨认真的态度来指导我们的学习与科研。印象最深的是万老师在忙完一天工作之后，在近午夜的时候还认真阅读和回复我们的邮件，这点让我十分地钦佩。万老师以身作则，让我们懂得了成功的道路是不容易的，不能浮躁急功近利，要时刻保持充沛的精力，勤奋努力，向着目标勇敢前进。在学术上，万老师根据我们的意向指引我们研究方向，并在每一次组会汇报中耐心指导。老师鼓励我们研究生也积极投稿会议文章，并大力支持我们外出参会、汇报成果，锻炼中英文汇报能力，提高自身视野与自信心。在生活上，万老师还时刻关注我们的健康，鼓励我们锻炼健身，规律作息并倡导我们进行课余团建活动，拉进组内同学之间的关系。说句题外话，当初我选择万老师作为研究生导师时，有一点是觉得万老师的笑容极具亲和力，我十分满意当时所做的选择。未来我也会以万老师为榜样，去努力奋斗，追求卓越，在社会大舞台尽情绽放自我。

我很感谢我的父母，20多年来，我深知没有父母的培养与支持，就没有现在的我。从小父母对我一直都是赏识教育，表扬与鼓励远远多于批评，加之父母对我充分的信任与无微不至的照顾，我始终都在被爱的环境下无忧无虑地成长，这也塑造了我现在自信阳光的性格。我知道不管遇到多大的困难，父母都是我最坚实的后盾。看着父母的白头发不断增多，我最想做的事情就是好好努力，早日成为全家的依靠，与爸妈多多团聚，一起去旅行，去品位生活。

感谢女朋友给我带来的成长与改变。我一直都生活在自己的舒适圈里，总觉得缺乏动力，是你的出现让我觉得所有努力都有了意义。在感情中，我并不是一个很成熟的人，偶尔我们的感情也会有磕磕绊绊。是你让我逐渐地学会了换位思考问题，学会如何去经营一段感情。虽然我们从在一起到现在，由两校异地到如今的两地异国，十分得不容易，但这段时光也让我懂得了什么是信任，是包容，

是牵挂，是坚持。我相信苦尽甘来，等你回来我们便永不分离。

感谢和我一同进入研究生生活的亲人们，感谢你们给我的帮助与陪伴。在科研中你们是我的强大战友，在生活中你们也是我最亲切的小伙伴。沉稳靠谱、无所不知的哲哥，风趣幽默、特别合得来的思明，体育全能、老实呆萌的小谢，聪明又猜不透的家琦，勤奋好男人鑫泽，帅气有型的泰文，大智若愚的小舟，有点宅宅的吴迪，亲切有趣的邓迪，老实努力的黄扬，效率超高的晨光，程序大佬璐荣和凯杰，友善靠谱的佳伟，天才学霸刘鑫旺，成熟的鑫哥以及上知天文下知地理的王帝。我们相互扶持，从 Linux 小白到 OpenFOAM 熟练工，一起从入学时的迷茫走向清晰。未来我们就要各奔东西，跟大家道一声保重，期待我们下一次相聚。

感谢课题组中陪伴我一路走来的兄弟姐妹。要单独感谢夏可师兄和庄园师姐。怀念帅可师兄带我快速上手科研，还能一起飙歌的时光。十分感激师兄指引我进了交大联合利华俱乐部，在那里我收获了更多真挚的友谊，改变了我研究生的生活轨迹。感谢庄园师姐在我科研上的指导和帮助，我们相互扶持，克服了一道又一道难关，未来希望师姐顺顺利利，早日博士毕业。感谢缪爱琴喵师姐和萌萌的浩哥刘正浩在我学习和生活上的关照，祝你们早日学业有成。在此，还要一并感谢实验室的安筱婷，张晓嵩，王秋雯，武磊，余安正，赵伟文，王建华，程萍，吴慧宇，陈翔，刘聪，文潇，任振，赵旻晟，张冠宇，李政，梁尚，马春卉，韩勃，郭浩，周彬，许彦章等在我硕士期间给予我的帮助与陪伴。

还要感谢与我一路同行，并肩作战的人。感谢从我本科到现在一起走过六年半的好室友、好哥们张若初和王鑫，我们的革命友谊我将终生难忘。感谢交大联合利华俱乐部优秀的大佬们：郁环宇，许显杨，陈明毅，邱琛，何思宇，葛依颖，李雅，缪斯（排名不分先后）。团结在一起的我们疯狂输出，披荆斩棘，打造交大最强最和谐的求职俱乐部。未来我们约定好，江湖再聚！

最后也感谢一下自己，感谢一直以来自己的坚持与努力，感谢为了不留遗憾早出晚归拼命的自己，我会更加珍惜现在来之不易的幸福生活。很快我将在上海这座城市开启我的职业生涯，在今后的生活中，我将不忘初心，不断进取，努力充实自己，秉承“饮水思源，爱国荣校”的交大校训，担负起一切我应该担负起的责任。一切都只是开始，奋斗吧少年，我们有诗、有酒，有远方！

攻读硕士学位期间已发表或录用的论文

- [1] **李奇**, 庄园, 万德成, 基于 CFD 方法对波浪中 FLNG 分段液舱晃荡耦合运动的研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2018. (第一作者, 中文核心, 已录用)
- [2] **Qi Li**, Yuan Zhuang, Decheng Wan, Gang Chen. Numerical Analysis of the Interaction Between a Fixed FPSO Benchmark Model and Focused Waves[C], the Twenty-eighth (2018) International Ocean and Polar Engineering Conference Sapporo, Japan, June 10-15, 2018:1420-1427. (第一作者, EI 会议, 已发表)
- [3] **Qi Li**, Yuan Zhuang, Decheng Wan, Numerical Simulation of Sloshing Flows of Liquid Tanks in Waves[C], The 13th World Congress on Computational Mechanics(WCCM-2018), New York City, 2018. (第一作者, 国际会议, 已发表)
- [4] **Qi Li**, Yuan Zhuang, Decheng Wan, Study on Sloshing Coupled Motion of a FLNG Setion in Waves using Whole Flow Field CFD Method[C], The 13th OpenFOAM Workshop (OFW13), Shanghai, China, 2018:328-331. (第一作者, 国际会议, 已发表)
- [5] **李奇**, 万德成. 单点系泊 FPSO 在波浪中水动力性能 CFD 数值分析[C]. 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集, 浙江舟山, 2017, 585-591. (第一作者, 国内会议, 已发表)
- [6] Yuan Zhuang, **Qi Li**, Decheng Wan, Numerical Study of a Fixed FPSO-Shaped Body under Focused Waves with Different Headings[C], the Twenty-eighth (2018) International Ocean and Polar Engineering Conference Sapporo, Japan, June 10-15, 2018:1257-1263. (第二作者, EI 会议, 已发表)
- [7] 安筱婷, **李奇**, 万德成, STLP 平台水动力与运动性能 CFD 分析[C], 第二十九届全国水动力学研讨会论文集, 江苏镇江, 2018:573-585. (第二作者, 国内会议, 已发表)