申请上海交通大学博士学位论文

基于重叠网格技术的船舶操纵运动直接数值模拟

- **学 校:** 上海交通大学
- 院 系: 船舶海洋与建筑工程学院
- 班级: A1301092
- **学 号:** 0130109040
- 专 业: 船舶与海洋工程
- **博士生:** 王建华
- 导师: 万德成 教授

上海交通大学

船舶海洋与建筑工程学院

2018年3月

A Dissertation Submitted to Shanghai Jiao Tong University for the Degree of Philosophy Doctor

DIRECT SIMULATIONS OF SHIP MANEUVER USING OVERSET GRID TECHNIQUE

Author: Jianhua Wang Advisor: Prof. Decheng Wan Specialty: Naval Architecture and Ocean Engineering

School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering Shanghai Jiao Tong University Shanghai, P.R.China March, 2018

基于重叠网格技术的船舶操纵运动直接数值模拟

摘要

随着高性能计算机的飞速发展以及计算流体力学(CFD)方法的长足进步,采用 数值方法研究船舶与海洋工程问题越来越广泛。其中船舶操纵运动,尤其是带螺旋桨 带舵船舶的操纵运动数值研究尤为复杂。如果考虑到自航船舶在波浪上的操纵问题, 则涉及到了船舶阻力、耐波、推进、操纵等多个方面。该问题是目前国际上最为热点 也是最为复杂的船舶水动力学问题之一,同时也是最为接近实际航行船舶的物理问 题,因此对该问题的研究有着巨大的科研价值和工程应用前景。采用 CFD 方法研究 船舶操纵运动问题主要受限于几个难点,首先就是自航船舶中复杂的船桨舵耦合运 动实现;其次为船舶操纵中的大幅度操纵运动以及不同操纵运动的控制;此外,如果 考虑到波浪工况下的自航操纵问题,则需要具备同时进行波浪导致的高频运动和操 纵对应的低频运动的求解能力。

本博士论文的目的是基于开源代码 OpenFOAM,结合课题组开发的包含重叠网格技术的水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU,开发船舶自航操纵控制模块,实现船、桨、舵相互作用下的典型船舶操纵运动的数值模拟。同时,对求解器的造波方式进行改造,实现大幅度操纵运动计算中的波浪生成,为自航船舶在波浪工况下的操纵问题数值研究提供了一个有效可行的方案和工具,进而将自航船舶操纵运动的数值研究从静水工况扩展到波浪工况中。

操纵运动控制模块开发中,本文在求解器多级物体运动模块的基础上完成了不 同操纵试验中所需的舵角控制器设计工作。基于重叠网格技术的多级物体运动概念, 采用运动反馈机制,完成了船舶航向保持、Z形操纵和自由回转操纵试验的舵角控制 模块开发和完善,进而实现了自航船舶典型操纵运动的直接数值模拟。

针对波浪中船舶的操纵运动问题,文中通过将原有的水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 与开源造波工具包 waves2Foam 相结合,充分利用 waves2Foam 造波方 法中的基于松弛方法的区域造波形式,解决了计算域移动过程中所面临的数值造波 问题。扩充造波功能后的求解器能够进行在规则波浪工况下带螺旋桨带舵船舶操纵 运动的直接数值模拟。

为了验证基于重叠网格技术的求解器在处理船舶大幅度操纵运动,以及自主开 发的自航船舶操纵控制模块和造波模块处理带螺旋桨带舵船舶在静水和波浪中操纵 运动问题时的能力,本文进行了船舶平面运动机构试验数值模拟、静水中船舶典型操 纵运动和波浪工况下的自航操纵运动的直接数值模拟三部分的算例验证。第一部分 是针对标准船模 DTMB 5415 平面运动机构试验 (PMM) 的数值模拟研究。利用重叠 网格实现船舶的大幅度平面运动,计算获得 PMM 操纵运动过程中的船舶水动力系 数。通过与试验结果的对比,验证了当前的动态重叠网格技术在处理大幅度船舶运动 中的可靠性。第二部分为静水工况中带螺旋桨带舵船舶的自航操纵运动直接数值模 拟。数值验证算例包括全附体双桨双舵 ONRT 船模的标准 10/10、20/20 Z 形操纵试 验和 35° 舵角自由回转操纵试验的数值模拟。第三部分为波浪工况下的自航船舶操 纵运动直接数值模拟,验证算例包括 ONRT 船模在迎浪、首斜浪和横浪三种规则波 工况下的航向保持数值模拟;不同波长、波高工况下的标准 10/10 Z 形操纵运动数值 模拟;规则波下 35° 舵角自由回转操纵运动数值模拟。所有算例均采用重叠网格方 法进行船体、螺旋桨和舵的网格划分,并且通过运动反馈机制进行相应的操纵运动控 制。数值验证算例均有模型试验数据进行验证和对比分析,数值结果可以较为准确的 预报出船舶的操纵运动特性,充分验证了当前的基于重叠网格技术开发的操纵控制 模块在处理自航船舶操纵问题上的有效性和可靠性。同时,根据波浪工况下的船舶自 航操纵运动直接数值模拟可以看出,目前的方法可以为规则波环境下的船舶操纵性 研究提供一个有效的途径,大幅度地扩展了当前 CFD 方法在船舶水动力学方面的应 用范围。

关键词: 重叠网格,船桨舵相互作用,波浪中船舶操纵, OpenFOAM, naoe-FOAM-SJTU

DIRECT SIMULATIONS OF SHIP MANEUVER USING OVERSET GRID TECHNIQUE

ABSTRACT

With the boosting of high performance computing and developments of numerical methods, Computational Fluid Dynamics (CFD) has been widely used in the research field of naval architecture and ocean engineering. Among several concerned hydrodynamic problems, ship maneuveriability is one of the most complex problems in the research of ship hydrodynamics. When considering ship maneuver in waves, it becomes the one of the most challenging issues since it involves the performance of ship resistance, propulsion, seakeeping and maneuvering. In general, it is very close to the real world condition and making it with a great prospect for the applications in ship and ocean engineering. So far, the most challenging problems are as follows: first is the complex coupling motion with the ship hull-propeller-rudder system, another one is the maneuvering control and large amplitude motions, as for maneuvering in waves, the tool should have the ability to solve the low frequency maneuvering motion and high frequency wave induced motion simultaneously.

The objective of this dissertation is to develop the maneuvering control module based on the in-house code naoe-FOAM-SJTU, with the purpose of extending its ability in simulating various ship maneuvers. In addition, this paper has also modified the wave generation module, which makes it possible to numerically investigate the self-propelled ship maneuver in waves.

Within the implementation of maneuvering control module, the paper adopts a feedback control mechanism with respect to the ship motion. Based on the overset grid technology, heading control, zigzag and turning circle maneuver control module are developed to directly simulate the free running ship maneuver.

As for the wave generation module, the paper have combined the present naoe-FOAM-SJTU solver with the open source third-party wave generation tool waves2Foam, which can make full use of the relaxation zone and can generate desired waves with moving computational domain. So far, it has been proved to be reliable and robust in simulating ship maneuver in regular waves.

ABSTRACT

In order to validate the developed maneuvering control module and improved naoe-FOAM-SJTU solver, three categories of validation cases including planner motion mechanism (PMM) tests, free running ship maneuver in calm water and various waves are performed. The first validation case is the simulation of PMM tests, where the static drift, pure sway and pure yaw test are computed. Through the static and dyanmic test, the solver is proved to be reliable in simulating the large amplitude maneuvering motion. The second category is the self-propelled ship maneuvers with direct rotating propellers and moving rudders. The fully appened twin screw ONR Tumblehome ship model is used for the selfpropulsion calculation and the free running maneuver in calm water. In the free running maneuver in calm water case, standard 10/10, 20/20 zigzag maneuver and turning circle maneuver are performed. In the third category, the free running ship maneuver in regular waves are directly simulated. The validation cases include the course keeping simulations in head waves, bow quartering waves and beam waves, as well as the free running ship zigzag maneuver in various wave conditions, where different wave length and wave heights are calculated to investigate the wave effects on the free running ship maneuver. Turning circle maneuver in waves is also investigated. The rudders and propellers are fully discretized by overset grids in all the validation cases. These rotating propellers and moving rudders are able to move with respect to the ship motions and itself can move according to the specified maneuvering control. The numerical results of the maneuvering parameters are compared with the available experiment measurements and the comparisons show good agreements, which indicate that the present developed maneuvering control module and the wave module can be reliable and robust in handling with free running ship maneuver in both calm water and regular waves. The application areas in ship hydrodynamics have been greatly expanded using the present numerical approach.

Keywords: overset grid, ship hull-propeller-rudder interaction, ship maneuvering in waves, OpenFOAM, naoe-FOAM-SJTU

日	录	

摘 要	I
ABSTRACT	III
第一章 绪 论	
11 课题研究的背景和意义	
1.2 应用操纵性数学模型预报船舶操纵性能的研究进展	
 1.2.1 静态约束模试验数值模拟研究进展 	4
1.2.2 动态约束模试验数值模拟研究进展	
1.3 自航船舶操纵运动数值模拟研究进展	
1.3.1 基于螺旋桨简化体积力方法的船舶操纵运动研究进展	
1.3.2 基于滑移网格模拟螺旋桨的船舶操纵运动研究进展	
1.3.3 基于重叠网格方法的船舶操纵运动研究进展	
1.4 本文的主要工作	
1.5 本文的主要创新	
第二章 数值方法和求解器模块开发	
2.1 求解器基本框架	
2.2 基本数值方法	
2.2.1 流体控制方程	
2.2.2 自由面捕捉 VOF 方法	
2.2.3 速度压力解耦	
2.2.4 湍流模型	
2.3 边界造波和区域造波模块	
2.3.1 边界入口造波模块	
2.3.2 区域造波模块开发	
2.4 重叠网格方法和操纵控制模块	
2.4.1 重叠网格方法	
2.4.2 多级物体运动	
2.4.3 操纵控制模块开发	
2.5 本章小结	

第三章 船舶静水阳力计算验证和约束船模试验数值模拟	49
	40
3.1 加加靜水阻刀及肌切り昇湿证	
5.1.1 D1 MB 5415	
5.1.2 KCS	
 3.2 约禾加侯风湿奴徂侯10月 异侯至型土仍	
 3.5	כן
5.4 动态约米加俟风湿效值候纵	
5.4.2 211 11 11 12 12 12 12 12 12 12 12 12 1	
5.5 平早小行	
第四早 靜小工 沉下的目別和加傑然迄初致值候拟	
4.1 静水中 ONRT 船模自航推进数值模拟	
4.1.1 螺旋桨敞水性能计算	
4.1.2 无桨阻力试验数值模拟	
4.1.3 带桨带舵的船舶自航推进数值模拟	
4.2 静水中 Z 形操纵运动数值模拟	
4.2.1 20/20 Z 形操纵运动直接数值模拟	
4.2.2 10/10 Z 形操纵运动直接数值模拟	
4.3 静水中自由回转操纵运动直接数值模拟	
4.3.1 非定常阶段	
4.3.2 定常阶段	
4.4 本章小结	
第五章 波浪工况下自航船舶航向保持数值研究	
5.1 计算工况和数值造波	
5.1.1 计算工况	
5.1.2 数值造波	
5.2 全附体 ONRT 模型在波浪中的航向保持数值模拟	
5.2.1 迎浪工况	
5.2.2 首斜浪工况	
5.2.3 横浪工况	
5.3 本章小结	
第六章 波浪工况下自航船舶 Z 形操纵运动数值模拟	

6.1 计算网格和工况	
6.2 波浪上的 Z 形操纵运动计算结果和分析	
6.2.1 船舶运动响应	
6.2.2 船舶水动力载荷	
6.2.3 流场分析	
6.3 本章小结	
第七章 波浪中自由回转操纵运动数值模拟	
7.1 计算工况	
7.2 数值模拟结果和分析	
7.3 本章小结	
第八章 总结及展望	
8.1 论文总结	
8.2 研究展望	
参考文献	
攻读博士学位期间已发表或录用的论文	
攻读博士学位期间参与的科研项目	
致 谢	

第一章 绪 论

1.1 课题研究的背景和意义

船舶操纵性能跟船舶的实际营运密切相关,良好的操纵性能可以保证船舶在航行过程中的安全。国际上针对船舶操纵问题提出了很多的标准,负责海事安全的国际海事组织在1993年通过了"船舶操纵性暂行标准",并于2002年底正式通过了"船舶操纵性标准"决议^[1],对不同船型的操纵性指标做出了规定和安全性建议。2017年9月在中国无锡召开的第28届国际拖曳水池会议(International Towing Tank Conference, ITTC 2017)上,结合当前船舶操纵问题研究需求,专门成立了波浪中操纵问题研究的专业委员会^[2],为船舶操纵性的研究提出了新的指导方向,同时也表明船舶操纵问题,尤其是波浪中的操纵问题仍然是船舶与海洋工程领域内最为重要的研究方向之一。



图1-1 船舶操纵性预报方法

Fig.1-1 Prediction methods for ship maneuvering

目前船舶操纵问题的研究包括很多种手段,第 25 届国际拖曳水池会议^[3]上,船 舶操纵性委员会根据已有的研究汇总了主流的船舶操纵性预报方法,主要有直接预 报法、系统方式的研究方法和 CFD 数值模拟方法三种^[4],如图 1-1 所示。其中,直 接预报的方法包括:根据已有数据库进行插值估算、实船海试和自航模试验等。系统 方式的操纵性预报方法则是从操纵运动方程出发,利用预报的水动力系数/导数,仿 真获得船舶操纵性指数,该方法主要集中在水动力系数/导数的获取方式上。CFD 数 值模拟方法分为约束船模和自航船模的数值模拟。

具体来讲,目前应用最为广泛的船舶操纵性预报方法为经验估算方法、船模试验 方法和基于 CFD 的数值模拟方法。经验估算方法通过大量的模型和实船的数据对操 纵性参数进行插值预报。该方法可以快速地给出船舶的操纵性指标。但受限于已有母 型船的试验数据,当船型出现较大的差异时,其预报精度就会存在问题。并且,该方 法无法考虑船舶附体的细节以及不同配型的螺旋桨和舵对操纵性能的影响,因此存 在精度与可靠度不足的问题。因此这种根据已有数据的经验估算方法很难做出准确 预报。

船模试验方法包括约束船模试验和自由自航船模试验。约束船模试验方法,包括 静态的斜拖试验(Oblique Towing Test)、动态的平面运动机构试验(Planar Motion Mechanism Test)和旋转试验(Circular Motion Test)等。约束船模试验在装备了特定 船模控制设备的拖曳水池中完成,可以测量得出一系列的船舶操纵性数学模型中所 需的水动力导数值。但该方法需要对船体模型进行大量的强迫运动试验,最终通过操 纵性数学模型仿真得到船舶操作性能结果, 但是得到的操纵性结果精度与系列试验 工况数量及设计息息相关,存在费用与适用性的矛盾。另外,约束船模试验的完成需 要对试验方法、结果分析等具有丰富经验的人员才能保证其可信度。自由自航船模试 验方法是采用在一定缩尺比下船体、螺旋桨和舵的模型,螺旋桨旋转速度和舵角的变 化通过对应的标准操纵性试验进行控制,实现在物理操纵水池中进行标准操纵试验, 如典型 Z 形操纵试验、自由回转试验等,进而完成船舶操纵性能的预报。该方法是 目前最能真实反映船舶在实际工作环境中操纵性能的方法,因此具有很高的可信性, 而且可针对目标问题给出直接的结果。但该方法需要较大的试验水池,精确的螺旋桨 和舵的控制系统以及船体六自由度运动测量设备,此外,为真实还原船舶操纵运动中 的实际流场,需要与实际环境相似的试验水池,设备费用和试验成本高昂。到目前为 止,国际船模拖曳水池委员会 ITTC 针对船舶操纵试验制定了相应的规范要求^[5,6], 各船级社对操纵性试验也有相应的规范指南^[7]。并且伴随着 PIV^[8,9]等现代化的设备 出现,物理试验水池也可以捕捉操纵运动中的特定流场信息。当前国际上比较有名的

模型试验水池如荷兰的 MARIN 水池、德国的汉堡水池、意大利的 INSEAN、美国爱 荷华大学的 IIHR、日本的 NMRI 等等都进行过相关的船舶操纵性试验。总体而言, 试验方法在理论上具备一定的可靠性,解决了根据已有数据进行经验估算存在的精 度问题,但由于试验费用高、周期长而受到限制。而且,鉴于当前的流场测量设备(如 PIV 等)普及性及适用性有限,试验中尚且给不出操纵运动过程中船体、螺旋桨和舵 周围细致流场结构,无法详细分析操纵运动过程中船舶水动力性能变化。

通过数值计算方法预报船舶操纵性能由来已久,并且随着计算机技术的快速发展,计算流体力学(CFD)在船舶水动力学领域取得了突飞猛进的成果,为船桨舵相互作用下的船舶大幅度操纵运动数值计算提供了强有力的支持。下面将从基于数值手段进行船桨舵相互作用下的船舶操纵性研究的角度介绍其国内外的研究进展,包括应用操纵性数学模型预报和基于自航船舶的操纵运动数值模拟预报两种方法。前者将主要介绍约束船模操纵运动的数值模拟研究进展,将分别介绍静态约束船模试验和动态约束船模试验的 CFD 数值模拟研究;基于自航船舶的操纵运动直接数值模拟方法,将从对螺旋桨处理方式的不同,分别介绍基于简化体积力方法、滑移网格方法和重叠网格方法等三个方面国内外的研究进展。

1.2 应用操纵性数学模型预报船舶操纵性能的研究进展

操纵性数学模型是目前进行操纵性数值预报的的主要方式。船舶操纵性数学模型的研究可以追溯到上世纪 40 年代左右 Schoenherr 出版的第一版船舶原理 PNA (Principles of Naval Architecture)^[10],其中引入了船舶操纵运动理论,但是当时的理论偏向于单元化并且控制点在现在看来都不是很精确。到了上世纪 60 年代,随着第二版 PNA 的问世,有了专门的操纵章节 (Mandel)^[11]。而现在通常采用的操纵性数学模型是 Crane 等^[12,13]修订出版的第三版 PNA。

描述船舶操纵运动的数学模型总体上可以分为水动力数学模型和操纵响应模型。 水动力学操纵性数学模型主要分为两种:一种是整体型,Abkowitz^[14,15]提出的简化数 学模型,把船、桨、舵视为一个不可分割的整体,不考虑他们之间的流体动力干扰, 研究船、桨、舵的整体受力情况;另一种为分离型,由日本拖曳水池操纵性委员会提 出的 MMG (Mathematical Modeling Group)模型^[16],分别考虑船体、螺旋桨、舵的 单独受力情况及其之间的相互干扰,作用于裸船体的流体力和力矩按照产生的性质 分为惯性力和非惯性力,由于该方法中每一项都具有明确的物理意义,方便求解得到 数学模型中的各个系数。操纵响应模型,通常称为野本 (Nomoto)模型^[17],是一种 线性响应模型,该方法主要应用于船舶控制和自动舵的设计中。本节将主要介绍应用 水动力数学模型的船舶操纵性预报研究进展。

采用操纵性数学模型进行船舶操纵性能数值预报,需要进行系列的约束模试验 来获得上述各个水动力系数。一般情况下,首先需要完成拖航试验、自航试验以及螺 旋桨敞水试验等,然后进行不同螺旋桨转速下的舵力试验,斜拖试验(OTT)、平面 运动机构试验(PMM)、悬臂试验(RAT)和旋转试验(CMT)等。目前这种方法 被较广泛地采用。近些年来,随着计算流体力学(CFD)方法的日臻完善,国内外众 多研究学者对上述约束船模试验展开了广泛的CFD数值模拟研究,并应用操纵性数 学模型数值仿真出船舶特定的操纵运动。

目前,国内外采用 CFD 方法研究约束船模操纵试验的水动力特性,从模拟手段 上大致可以分为三种形式,分别为自主开发的 CFD 程序、通用商业软件以及开源软 件平台。本节将分别从约束船模静态斜拖试验和动态试验的数值模拟两个方面进行 分别介绍。

1.2.1 静态约束模试验数值模拟研究进展

Ohmori^[18]基于有限体积法自主开发了面向不可压两相流问题的 CFD 求解器 WISDAM-V,模拟了两个不同尾部线型的船型 SR221A 和 SR221B 的静态斜拖试验 (OTT),考虑了0°、3°、6°和9°四个漂角的工况,并且给出了船体侧向力和 转首力矩的数值和试验的对比结果,此外还进行了旋转试验(CMT)以及平面运动 机构试验(PMM)等典型的约束模操纵试验的数值模拟,所得数值结果同试验结果 趋势一致,初步验证了采用 CFD 方法数值研究操纵性的可行性,文中并没有给出根 据计算结果推导出的船舶操纵性水动力导数,但是为数值研究此类问题提供了示范。 Orihara 和 Miyata^[19]在该求解器的基础上进一步引入了重叠网格功能,形成了新的 CFD 求解器 WISDAM-X, 拓展了求解器在船舶水动力性能预报方面的功能, 并利用 该求解器对一种集装箱船型(SR-108)的运动响应进行求解。Tahara 等^[20]采用自主 开发的程序求解非定常 RANS 方程,湍流模型采用 Baldwin-Lomax 模型,对 S60 船 型在不同傅汝德数(Fr=0.16 和 Fr=0.36)、不同漂角(0°和 10°)工况下的斜拖试 验进行了数值模拟,并且同试验结果进行了对比,文中还通过 5 种不同密度的网格 进行了数值的不确定性分析。此外,作者给出了斜拖工况下的详细流场信息,如自由 面兴波、不同截面处的伴流场等,验证了数值手段可以再现斜拖试验过程中的流动现 象。Hyman 等^[21]开发了考虑气泡的两相流 RANS 求解器 CMFD,并且模拟了 Athena **R/V** 船型在给定定常回转半径下的数值模拟,并且对尾部的兴波模拟结果同实船观测数据进行了定量的对比,证明了数值方法模拟船舶定常回转试验的可行性。

美国爱荷华大学船舶水动力学研究团队基于有限差分法(FDM)自主开发了船 舶水动力学求解器 CFDShip-Iowa,并在船舶操纵性领域进行了广泛的应用, Simonsen 和 Stern^[22]采用非定常 RANS 方法数值模拟了带静态舵的斜拖试验,文中采用 $k-\omega$ SST 湍流模型对 Esso Osaka 的裸船体模型以及带附体的模型进行了数值求解,计算 中忽略自由面的影响。此外,文中对带舵的斜拖试验数值模拟进行了数值不确定性分 析(V&V),发现尽管斜拖试验的部分工况没有达到收敛性要求,但是当前数值方 法总体上可以很好地模拟出斜拖试验过程中的水动力变化。Simonsen 和 Stern^[23]采用 同样的求解器在相同工况下进一步研究了带附体船体的流场特性,通过对斜拖工况 下船体两侧涡量场的对比分析,可以看出明显的不对称特性,并且可以看出由舭龙骨 导致的涡结构。此外,通过不同漂角工况下的计算结果对比,可以看出漂角对摩擦力 的影响较小,而对船体表面的压力影响较大。Pinto-Heredero 等^[24]采用 CFDShip-Iwoa 求解器进行了 Wigley 船型在漂角 10°到 60°间的斜拖试验数值模拟,不同于前面 学者, 文中采用了两相流模型, 自由面采用 level-set 方法进行捕捉, 同时文中还分别 采用了 RANS 和 DES 两种方法进行了数值求解,但是限于当时的计算能力,网格量 最大仅为140万,因此文中只是进行了简单的定性上的分析。Ismail等^[25]在同样的数 值求解器基础上,分析了不同的对流项离散格式对斜拖试验计算结果的影响,文中试 验模型采用 KVLCC2 油轮, 计算中对流项的离散格式分别选用了线性和非线性的总 变差减小(TVD)格式,对裸船体模型在 0°和 12°漂角工况下的斜拖试验进行了 数值模拟,得出了对于船舶水动力预报中采用2阶 TVD 格式可以更精确得预报出船 体受力的结论。Xing 等^[26]同样采用 CFDShip-Iowa 求解器对大型油轮 KVLCC2 进行 了不同漂角(0°、12°、30°)的斜拖工况数值模拟,不同于前面的研究学者,文 中湍流解析采用分离涡模型(DES),为了能够更为精确地解析在大漂角斜拖工况下 的流动分离现象以及船体周围的精细涡结构,总计算网格量达到了1300万,计算中 仍然采用叠模形式,忽略自由面,同前面 Ismail 等在 160 万网格规模上的计算精度 对比可以看出显著的提升,证实了采用 DES 方法,更为精细的网格可以模拟出斜拖 工况下的精确伴流场信息。Stern 等^[27]在国际操纵性会议 SIMMAN2008 的基础上总 结了当前采用 CFD 方法数值模拟操纵性的方法,给出了采用 DES 方法以及更细网 格可以给出更为精确的数值求解结果的结论。

国内学者针对静态约束模试验也进行了广泛的研究,田喜民等^[28]采用商业软件 FLUENT 对大型油轮 KVLCC2 进行了斜拖试验的全粘性流场的数值预报,文中采用 了两种不同的湍流模型,通过与试验结果进行比较,得出了*k*-ω SST 模型求解精度 更高的结论。孟庆杰和万德成^[29]采用非定常 RANS 方法对大型油轮 KVLCC2M 船型 在不同漂角下的斜拖试验进行了数值模拟,计算中湍流模型采用两方程的*k*-ω SST 模型,并且分别进行了深水和浅水两种工况下的船体周围粘性流场数值求解,模拟出 了浅水工况下船体的吸底效应,并且给出了大量的船体周围流场信息,分析了不同漂 角,不同水深下的船体水动力变化。









Fig.1-2 Vortical structures around ship hull under different drift angles

王建华等^[30]采用上海交通大学计算水动力学研究中心(CMHL)基于开源 CFD 平台 OpenFOAM 自主开发的面向船舶与海洋工程的水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU,数值模拟了某船型在6个漂角工况(2°、4°、6°、8°、10°和12°)下的斜拖试验,计算中采用非定常 RANS 方法,湍流模型采用*k-ω* SST 模型,精确地预报了在斜拖工况下的船体侧向力、转首力矩等,并且预报的水动力导数值同试验结果吻合良好,验证了当前方法对静态约束模试验数值模拟的可靠性。冯松波等^[31]采用商业软件 FLUENT 对 KVLCC2 模型进行了 0°和 12°两种工况下的斜拖试验数值模拟,计算中压力速度耦合采用 SIMPLEC 算法,湍流模型采用 RNG*k-ε*模型,文中给出了三套不同网格密度的数值计算结果,并进行了网格收敛性分析,数值模拟中考虑了舵角为零时不同漂角下以及不同舵角、不同漂角下作用在船-舵系统上的横向力和转首力矩,并对计算结果进行了分析。

1.2.2 动态约束模试验数值模拟研究进展

动态约束模试验包括平面运动机构试验中的纯横荡试验(Pure Sway Test)、纯 摇首试验(Pure Yaw Test)等。动态试验更为复杂,要求精确地预报出整个动态操纵 运动过程中的船舶水动力变化,因此对数值计算要求更高。采用粘性 CFD 手段 (URANS/DES) 对动态约束模试验的研究可以考虑在复杂操纵运动过程中船体周围 的粘性效应,进而提升整体的水动力预报精度,因此粘性 CFD 数值预报可以作为一 种有效的研究手段补充或者替代初步设计阶段的模型试验。Broglia 等^[32]在 SIMMAN2008 国际船舶操纵性研讨会,对带舵的 KVLCC1 和 KVLCC2 两种船型的 动态纯横荡和纯摇首试验进行了数值预报,并且根据他们的计算结果,指出船体尾部 区域是产生侧向力的主要部位。Toxopeus 等^[33]针对全附体的 KVLCC2 船型, 求解非 定常 RANS 方程,采用动网格技术处理船体操纵运动,数值预报的船体侧向力和转 首力矩同 SIMMAN2008 会议给出的标准船模试验数据吻合良好。Cura-Hochbaum 等 ^[34]同样对 KVLCC1 的油轮进行了基于 RANS 方法的动态约束模试验数值模拟, 预报 了对应的水动力导数,并且通过水动力导数,基于操纵性模型模拟得出了自由回转和 Z 形操纵运动的轨迹,同自航模试验结果吻合较好,验证了采用 RANS 方法进行数 值预报操纵运动的可靠性。Simonsen 和 Stern^[35]对 KCS 在纯摇首运动下的动态操纵 试验进行了数值模拟,并且对计算得到的船体受力和力矩进行了数值不确定性分析。 Simonsen 等^[36]在已有工作的基础上,利用自主开发求解器 CFDShip-Iowa,数值模拟 了静态和动态平面运动机构试验,数值预报了水动力导数值,采用分离型操纵性数学 模型完成了标准船模 KCS 的 Z 形操纵运动和自由回转运动的数值模拟。



图1-3 纯摇首运动中局部流场数值模拟结果同试验值对比^[37]

Sadat-Hosseini 等^[38]对 ONRT 船模进行了水动系数的求解,根据操纵运动模型对 该船模在波浪上的复杂运动进行了数值模拟。Sakamoto 等^[37,39]以及 Yoon 等^[40,41]针 对国际操纵性研讨会提供的标准船模,水面舰艇 DTMB5415,采用自主开发程序 CFDShip-Iwoa 进行了静态和动态的 PMM 试验数值模拟,数值预报得到的操纵运动 相关的水动力导数,并且同试验结果进行对比分析,给出了数值结果的验证与确认 (V&V),通过系列的 PMM 试验数值仿真,表明大部分线性水动力导数数值预报精度

Fig.1-3 Local flow comparisons between CFD and experiments during pure yaw test^[37]

较高,同试验值的误差在 10%以内,且非线性水动力导数预报误差较大。同时,还对不同形式的操纵运动下的详细流场信息进行了细致分析(见图 1-3),包括自由面兴波、船体周围涡量场等,通过局部流场的变化解释了不同操纵运动过程中的水动力变化。Kim 等^[42]采用自主开发的基于 RANS 方法的求解器 SHIP_Motion 研究了 KCS 船模不同形式的平面运动机构试验,包括动态纯横荡试验和纯摇首试验,数值计算中湍流模型采用动态亚格子 DSGS 模型,计算网格为结构化网格,有限体积法进行空间离散。数值预报的静态试验和动态纯横荡试验的水动力导数值同试验结果吻合良好,但是纯摇首试验的预报结果有一定误差,总体来讲,验证了 CFD 方法可以作为替代物理试验的一种研究手段。

近些年来,国内也有很多研究学者进行动态约束模试验的数值研究。杨勇等[43] 通过求解非定常 RANS 方程,选取 SST $k - \omega$ 湍流模型,采用全六面体网格进行离散, 在忽略自由面兴波影响的情况下,对深水和浅水工况下的船体纯横荡操纵运动进行 了数值模拟,获得了纯横荡运动中的线性水动力导数。程捷等[44]通过商业软件 FLUENT 提供的动网格功能对 DTMB5415 模型的平面运动机构试验中的动态纯横荡 和纯摇首试验进行了数值模拟,忽略了自由面兴波,计算得到的侧向力及转首力矩的 变化与试验结果趋势一致,但是鉴于忽略自由面、固定船体纵倾和升沉等简化,预报 精度有待提高。刘小健等[45]对不同航速和水深工况下的船舶纯横荡试验进行了数值 模拟,数值计算采用基于 OpenFOAM 开发的水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU,求 解非定常 RANS 方程,湍流模型为 SST $k-\omega$ 模型,采用动态变形网格处理船体横 荡运动, 计算结果表明在浅水工况下船舶的侧向力和转首力矩会明显增大, 数值预报 水动力变化趋势同试验结果保持一致,但动态变形网格处理船舶的大幅操纵运动导 致预报结果同试验值有一定偏差。王建华和万德成[46]采用自主开发的结合重叠网格 技术的船舶水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU,模拟了标准船模 DTMB5415 的纯横 荡和纯摇首运动,其中采用重叠网格技术模拟船舶的大幅度操纵运动,数值模拟中放 开船体的纵倾和升沉运动,同试验保持一致,模拟了最大摇首角度为 10.2°工况下 的三种纯摇首操纵运动,其中通过调整横荡和首摇运动的相位达到纯摇首工况对应 的每个时刻船体坐标系下没有侧向速度的要求,数值预报的相关水动力导数通过最 小二乘法回归获得,线性导数的误差在 10%以内,非线性水动力导数的预报误差在 20%以内,达到了国际上的同等预报水平。刘晗等[47]基于计算流体力学技术对限宽水 域中的平面运动机构试验进行了数值模拟,在对有限水域宽度的 PMM 试验的动态 模拟上,开发了混合动网格技术,数值计算结果与循环水槽 PMM 试验结果对比证明 采用该方法有效,继而模拟不同宽度水域中的 PMM 试验,分析船舶水动力随运动速

度变化的关系,结果表明,限宽水域中水动力随运动速度变化的非线性特征更为显 著,船舶操纵加速度导数增大。该研究为限制水域的平面运动机构试验提供了参考。

除了上述的通过全数值数段模拟船舶操纵运动,预报船体水动力变化和水动力 导数,并结合船舶操纵性数学模型完整预报船舶操纵性能,很多研究学者通过操纵性 试验数据和数值预报相结合的方式进行船桨舵相互作用下的操纵性预报。Kang 等^[48] 和 Khanfir 等^[49]均采用这种方式进行了 Z 形操纵运动和自由回转试验的模拟,但是 预报的船舶操纵运动轨迹与试验测量值误差较大。

综上,应用约束船模操纵试验 CFD 数值模拟并结合操纵性数学模型开展船舶操 纵性数值预报仍是当今广为流行的研究手段,但是这种研究手段仍是对船舶操纵运 动问题进行简化处理,因此,数值预报的精度仍有待提升。通过数值构建船桨舵整体 耦合运动求解模型,进行自航船舶操纵运动的直接数值模拟,可以更为精确的描述船 舶操纵运动过程,不存在分离简化处理,因此自航船舶操纵的数值模拟是更为精确的 预报方法,也是目前国内外最为前沿的研究热点。下面将介绍自航船舶操纵运动数值 模拟方面的研究进展。

1.3 自航船舶操纵运动数值模拟研究进展

如 1.1 节中所述,自航船舶的不同操纵运动数值模拟可以预报出船舶的运动轨 迹、典型操纵参数,如超越角、纵距、横距等,直接反映船舶的操纵性能。因此自航 船舶的操纵运动数值预报是目前最热门也是最为复杂的问题。数值研究自航船舶操 纵问题最为复杂的技术难题是如何进行船桨舵系统复杂运动和流场的同时求解,而 船桨舵系统中船后尾流场中旋转螺旋桨的直接数值模拟则最为复杂和耗时。从现有 的研究来看,自航船舶操纵运动的研究从对螺旋桨模拟形式的不同,大致可以分为不 依赖螺旋桨几何模型的简化体积力法和直接构建螺旋桨几何模型进行模拟的两种方 法,而第二种方法中又可以根据不同的动网格处理方式分为滑移网格法和重叠网格 方法。下面将分别从这三种方法进行介绍船桨舵系统下自航船舶操纵运动的研究进 展。

1.3.1 基于螺旋桨简化体积力方法的船舶操纵运动研究进展

传统的螺旋桨体积力方法,一般是在动量方程中添加源项,替代螺旋桨旋转对周 围流场的影响。体积力的计算方法有叶素动量理论(Blade element momentum)、等 推力面模型(equivalent thrust disk)、升力面和升力线模型(lifting-surface/line)等等。 螺旋桨体积力模型简单易实施,并且计算量小,因此被广泛应用到船舶自航推进和操 纵运动的数值模拟。Stern等^[50]将船舶尾部流场和螺旋桨考虑为一个轴对称的控制体, 采用基于升力面模型的体积力方法进行了带螺旋桨船舶的数值计算。Kawamura等^[51] 采用类似的方式,通过迭代法实现了船和螺旋桨之间相互配合的数值模拟。Choi等 ^[52,53]采用商业软件 FLUENT 和开发的螺旋桨体积力模型,对多种船型进行了带螺旋 桨船舶的自航推进计算。Phillips等^[54]实现了基于叶素动量理论的螺旋桨体积力模型 同 RANS 方程的结合,并且进行了固定舵角下的 KVLCC2 船和桨的相互作用计算, 预报了船舶操纵性数学模型中的水动力系数值。Phillips等^[55]采用三种不同形式的螺 旋桨体积力模型,等推力面模型、Hough 和 Ordway 体积力模型和叶素动量理论体积 力模型,研究了螺旋桨和后面舵的水动力特性,采用等推力面模型,由于忽略了桨的 扭矩,因此预报的桨后舵的阻力精度很差,因此不推荐采用此种体积力模型,Hough 和 Ordway 体积力模型和叶素动量理论体积力模型均可以准确的预报出舵面上的压 力分布,但是前者只适用于桨对舵的影响研究,而不能计及舵对桨的影响,而叶素动 量理论和 RANS 方法的耦合方式可以考虑到桨舵间的相互影响,因此更适用于船桨 舵相互作用下的自航船舶水动力性能研究。



图1-4 结合体积力模型(Actuator Disk)的船桨舵网格划分(Broglia 等^[81]) Fig.1-4 Grid distribution around ship hull propeller and rudder through Actuator Disk method

Simonsen 和 Stern^[56]采用基于势流理论的体积力模型替代船后螺旋桨,采用迭代 方式实现 RANS 方法流场和螺旋桨体积力的耦合求解,并且将该方法应用到带附体 的油轮 Esso Osaka 的操纵运动数值求解,并且分析了船、桨、舵间的相互干扰情况, 为自航船舶操纵性的研究提供了可行性示范。Carrica 等^[57]同样采用 Stern 等^[50]的体 积力模型,数值计算采用 CFDShip-Iowa V4,湍流模型采用混合 $k-\omega$ 和 $k-\varepsilon$ 模型, 自由面采用 Level-set 方法进行捕捉,采用动态重叠网格技术处理大幅度的船舶操纵 运动,模拟了不同航速下 (Fr=0.25, Fr=0.41)的自由回转 (35° 舵角)和 Z 形操纵 (20/20),同时进行了波浪工况下的计算,文中数值预报的操纵性参数同试验值的 误差在 10%以内,并且作者指出预报误差的主要原因在于简化的螺旋桨体积力模型, 简化模型忽略了由于真实旋转桨导致的对船体运动的阻尼以及桨收到的侧向力影响 等。Dubbioso 等^[58]采用自主开发的 CFD 求解器 *znavis* 数值模拟了双桨双舵的船型 Z 形操纵运动,数值计算中采用有限体积法进行空间离散,数值求解非定常 RANS 方 程,湍流模型采用一方程的 SA 模型,螺旋桨采用改进的体积力模型,修正了由于舵 影响导致的桨水动力变化,数值模型了典型 20/20 Z 形操纵,对比了数值预报的超越 角同试验值的差别,第一超越角同试验值吻合良好,但是第二超越角预报结果偏大, 证实了修正形式的螺旋桨体积力模型还有待改进。Broglia 等^[59]和 Dubbioso 等^[60]采 用上述改进的螺旋桨体积力模型,分别进行了单独舵和双舵情况下的双桨推进船舶 的自由回转试验数值模拟,舵和船体的运动则采用动态重叠网格进行处理,数值模拟 得到的船体运动轨迹同试验进行了对比,误差在 10%以内。Mofidi 等^[61]实现了基于 涡格法的升力面螺旋桨体积力求解模型 PUF-14,同 CFD 求解器 REX 相结合,每个 时间步内进行 CFD 流场数据同螺旋桨区域的交互,可以考虑船尾伴流的变化以及船 桨间的干扰,并且应用该方法数值模拟了 KCS 船模 Z 形操纵运动。



图1-5 体积力方法和旋转螺旋桨周围伴流分布[61]

Fig.1-5 Comparison of wave flow by body force and actual rotating propeller[61]

简化的体积力方法由于不需要进行真实螺旋桨转动的数值模拟,因此该方法不 需要划分螺旋桨的网格,计算所需的网格量显著减小,时间步长也可以放大,有利于 对此类问题进行快速的数值预报。但是由于这种方法进行了大量的人为假定,并且一 般采用势流程序进行螺旋桨的体积力计算,无法精确计算船体尾部伴流和螺旋桨之间的强烈流场干扰,在整体数值计算精度上仍有待提升。

1.3.2 基于滑移网格模拟螺旋桨的船舶操纵运动研究进展

由于简化的螺旋桨体积力方法存在天然的缺陷,因此想要获得更为精确的船桨 舵相互作用下的数值预报,需要直接构建螺旋桨模型,进行旋转螺旋桨的模拟。通过 直接对船体、螺旋桨和舵进行网格的划分,进行船体运动和船后螺旋桨和舵等转动的 数值计算,从而精确预报船、桨、舵周围流场干扰和水动力变化。随着高性能计算设 备的飞速发展以及数值方法的日臻完善,对船桨舵系统的直接离散化求解已经成为 现实。

滑移网格(Sliding Mesh)方法是目前广泛采用的螺旋桨网格运动求解方法。该 方法对螺旋桨周围划定一个控制域,一般为圆柱体,圆柱体表面作为滑移边界连接内 部旋转域和外部的固定域,通过这个滑移边界实现旋转螺旋桨的网格同外部船体网 格的连接,并完成流场信息传递。除此之外,常用的螺旋桨计算方法中的多重参考系 (MRF)方法与滑移网格方法类似。该方法同样的是分区域进行计算,移动区域内设 置旋转坐标系,但在计算中该区域内网格没有发生旋转运动。多重参考系方法计算时 收敛速度快,但是由于计算的是稳态流动,无法对螺旋桨的非定常流动进行模拟,因 此计算精度要低于滑移网格方法。目前,应用较广的是采用滑移网格技术实现船后螺 旋桨转动的计算。



图1-6 船后螺旋桨滑移网格模型^[66] Fig.1-6 Sliding mesh interface after ship hull^[66]

第 13 页

Lübke^[63]使用滑移网格方法构建船体螺旋桨相互作用计算模型,采用商业软件 CFX 完成了不考虑自由面的工况下带螺旋桨的 KCS 自航推进计算。Queutey 等^[64]针 对 2010 年哥德堡船舶 CFD 研讨会上的标准算例,采用自主开发的 CFD 求解器 ISIS-CFD 求解流场,计算中采用同位网格技术,有限体积法离散求解 RANS 方法,结合 采用滑移网格方法模拟船后螺旋桨的转动,对固定姿态的 KCS 的自航模拟进行了研 究,与 Lübke 数值计算不同的是,这里考虑了自由面的影响,自由面通过 VOF 方法 进行捕捉,此外,作者采用了自适应网格加密技术,改进了计算的精度。Seo 等^[62]使 用通用商业软件 FLUENT,采用混合形式网格划分方法,即船首部和尾部以及螺旋 桨周围采用非结构网格,其它部分采用结构化网格,并且采用滑移网格方法实现船后 螺旋桨的转动,自由面求解采用 VOF 方法结合高精度离散算法,数值预报的伴流分 数和推进系数同试验值吻合较好。Badoe 等^[65]基于开源 CFD 平台 OpenFOAM 进行 了船桨舵相互作用下的操纵运动的数值仿真。el Moctar 等^[66]采用滑移网格方法 分别构建旋转螺旋桨和舵的计算网格(见图 1-6),实现了双桨双舵船模 Z 形操纵运 动的直接数值模拟。

我国在采用滑移网格方法进行船桨舵相互作用数值研究也有很多相关的工作。 张志荣^[67]分别使用体积力模型(Hough 和 Ordway 模型)和滑移网格法求解螺旋桨处 流场,数值计算采用商业软件 FLUENT,对 KCS 船型的船、桨相互作用进行数值计 算,并进行了详细的数值不确定性验证和确认分析(V&V),证实了 CFD 方法在数 值预报船桨相互作用问题上的可靠性。沈海龙和苏玉民^[68]基于分离涡 (DES) 模型和 滑移网格方法,对带桨的 KCS 船进行了数值模拟,得出了船体和螺旋桨的相互干扰, 对湍流边界层影响不大,但是对船体和桨叶上的表面压力分布影响较大的结论。沈兴 荣等^[69]应用 FLUENT 软件的滑移网格技术,进行了带螺旋桨带舵船舶的全粘性流场 计算。杜云龙等^[70]同样采用商业软件 FLUENT 数值计算了考虑带舵的不同船型的推 进性能。王骁等[71]采用滑移网格方法实现了双螺旋桨的旋转运动模拟,并且进行了 回转运动的数值计算。杨春蕾等^[72]应用计算流体力学(CFD)方法对带桨的 KCS 集装 箱船以及带桨和舵的 KVLCC2 油船进行了数值模拟,分别采用了三种不同的方式进 行船桨舵干扰的数值计算,研究表明不同模拟计算方法均能合理预报出船/桨/舵相互 干扰相互作用下速度场和压力场分布等详细流场信息,可用于计算船体阻力、表面压 力和桨盘面伴流等。通过这种详细的数值模拟研究,可以更好地理解复杂流动干扰现 象。

目前,滑移网格方法作为一种有效的研究手段,已经被广泛地应用于船、桨、舵 相互作用的数值计算中,具有较高的数值预报精度,并且可以精确地捕捉船、桨、舵 之间的粘性流场干扰,但是现有基于滑移网格的研究大部分仍然采用通用的商业软 件,并且大部分仍然只是针对船桨舵最为简化的固定航线的自航运动数值预报,针对 自由自航船舶操纵运动的应用还很少。更多的应用仍然是在较为简单的自航推进计 算中,并没有实现船、桨、舵相互作用下的复杂操纵运动数值计算。

1.3.3 基于重叠网格方法的船舶操纵运动研究进展

通过上面讲述的基于简化的体积力模型和滑移网格方法,都无法真实还原船舶 操纵运动。为了得到更精确的自航操纵计算结果以及更详细的流场信息,需要实现船 体、螺旋桨和舵的运动耦合求解,完成对这类非定常问题的直接数值模拟。根据已有 的研究,传统的动态变形网格技术和滑移网格技术在处理船桨舵耦合运动上都存在 瓶颈,而重叠网格方法可以实现在船、桨、舵三者复杂运动耦合的处理,并且计算过 程中不会发生网格变形,能够保证计算的精度。



图1-7 船桨舵周围重叠网格分布(左侧为结构化网格^[73],右侧为非结构化网格^[74]) Fig.1-7 Overset grid distribution for structured and unstructured mesh

Carrica 和 Stern^[75]结合重叠网格的水动力学求解器 CFDShip-Iwoa,实现了自航船舶操纵运动的数值模拟,直接构建基于几何体的船体、螺旋桨和舵离散模型,采用重叠网格方法处理自航操纵运动工况下的船桨舵耦合运动,进行了 KVLCC 船型的 Z 形操纵运动和自由回转运动的数值模拟。Mofidi 和 Carrica^[73]采用同样的求解器和数值方法进行了典型 10/10 Z 形操纵试验和修正型的 15/1 Z 形操纵试验的数值模拟,数值预报的船体运动及操纵性参数同试验结果吻合良好,并且对自航操纵运动过程中



图1-8 重叠网格方法构建螺旋桨和舵模型的船舶操纵流场结果[73]

Fig.1-8 Simulation results for ship maneuvering using discretized propeller and rudder model^[73]

前面的研究学者,不论是基于有限差分求解器,还是有限体积的求解器,都是采用基于结构化网格的重叠网格技术,部分学者在开源 CFD 平台 OpenFOAM 平台上引入了重叠网格模块^[77-80]适用于非结构化网格,但是到目前为止应用的问题较为简单且有限。沈志荣等^[74,81-84]在 OpenFOAM 中引入了适用于全非结构化网格的重叠网格模块,开发了船舶水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU,该求解器实现了流场求解进

程和重叠网格插值信息计算进程的并行化求解,并且应用到 KCS 带桨自航和 Z 形操 纵运动的数值模拟,验证了在相对较为粗糙的非结构网格情况下也可以得出较为精确的预报结果。王建华等^[85]在此基础上,进行了全附体双桨双舵 ONRT 船模的自由自航试验,并进行了 35° 舵角工况下的自由回转试验数值模拟,预报的自航点和回转操纵性特征参数同试验结果吻合良好,进一步验证了 naoe-FOAM-SJTU 求解器对 全附体船,尤其是双桨双舵船型自航操纵问题的适用性。Carrica 等^[86]采用重叠网格方法实现了对浅水工况下的大型集装箱船 KCS 船桨舵相互作用下的自航和修正型 20/5 Z 形操纵试验的直接数值模拟,并且文中首次完成了对基于重叠网格技术的船桨舵相互作用数值模拟的网格收敛性验证,使用的三套计算网格量分别为 870 万、2460 万和 7130 万,并行规模达到 500 核以上,网格收敛性研究表明对自航数值模拟 呈现一致收敛,但是针对 Z 形操纵工况,部分参数呈现出振荡收敛的情况,甚至部分参数没有达到收敛性要求,证实了进行基于重叠网格方法的自航船舶操纵性网格收敛性研究较为困难。



图1-9 采用简化制动盘模型的数值计算结果^[60] Fig.1-9 Numerical results using simplified actuator disk model^[60]

目前,部分学者将重叠网格方法应用到了波浪中的操纵性研究。Carrica 等^[57]实现了波浪工况下自航船舶的自由回转和 Z 形操纵运动的数值模拟,但是其中桨的模型仍是采用的制动盘(Actuator Disk)的体积力模型。王建华等^[87]采用自主开发的三维数值造波消波模块实现了船桨舵相互作用下在迎浪工况下的直接数值模拟,数值预报的船体运动响应,航速等参数同东京 2015 年 CFD 船舶水动力学研讨会上所提供的试验数据吻合良好,拓展了 naoe-FOAM-SJTU 求解器在波浪中自航的应用功能。 Shen 和 Korpus^[83]实现了自航船舶在迎浪和尾斜浪工况下的航向保持数值模拟,并且同东京 CFD 研讨会上的标准船舶试验数据进行了对比,验证了重叠网格处理大幅度船舶操纵运动的可靠性。王建华和万德成^[88]采用自主开发 naoe-FOAM-SJTU 求解器, 实现了全附体船舶 ONRT 在波浪工况下的 Z 形操纵运动的直接数值模拟,并且同静水工况下的自航船舶 Z 形操纵数值预报结果进行了对比,发现波浪对 Z 形操纵运动的影响主要是航速和完成一个 Z 形操纵运动的周期。

根据上述研究学者基于重叠网格技术进行的船、桨、舵耦合运动以及自航操纵运动数值模拟的研究成果,充分地证明了基于重叠网格技术的 CFD 数值模拟方法是目前为止研究自航船舶操纵性最为有效和精确的研究手段,也是目前最具发展潜力和工程应用前景的研究方法。

1.4 本文的主要工作

本文的主要工作是在课题组开发的基于重叠网格技术的船舶水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU基础上,根据多级物体运动概念和运动反馈机制,开发和完善自航 船舶操纵运动控制模块,实现船、桨、舵相互作用下的典型船舶自航操纵运动的直接 数值模拟。同时将第三方开源造波工具包waves2Foam^[89]同船舶水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU进行了有效结合,为带螺旋桨带舵船舶在规则波浪工况下的操纵运动数 值模拟提供了一个有效可行的方案和工具,从而将自航船舶的操纵运动数值研究从 静水扩展到波浪工况中。为了验证当前开发的操纵运动控制模块以及波浪中自航操 纵运动求解模块,进行了一系列相关问题的计算和验证。包括船舶的静水阻力计算、 静态和动态的平面运动机构试验数值计算、静水工况下的自航推进和操纵计算(包括 典型 Z 形试验,自由回转试验)、不同规则波工况下的航向保持、Z 形操纵运动和自 由回转操纵运动的直接数值模拟等。数值计算的算例囊括了约束船模大幅度的操纵 运动、小舵角对应的航向纠偏、中舵角对应的机动性和大舵角下的回转特性等各个范 围的船舶操纵运动,全面的进行了船舶操纵性能的数值预报。

1.5 本文的主要创新

本文的主要创新有:

1. 对船舶水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 进行了适用于船舶操纵运动直接数 值模拟功能上的大幅度扩展,包括:

 对造波方式的改进。将现有结合重叠网格技术的船舶水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 与开源造波工具包 waves2Foam 相结合,整合并开发出了适用 于求解波浪中自航操纵运动的有效工具。通过基于松弛算法的区域造波方法, 有效的解决了边界波浪反射以及由于运动辐射波浪对造波边界产生的数值 影响。同时,采用锁定于背景计算域(frozen type relaxation zone)的造波区 域,可以实现计算域在移动过程中的波浪生成,即能够有效处理在大幅运动 下船舶在波浪中操纵运动的数值模拟。从而在节省计算区域的情况下还能够 完成目标波浪工况的自航操纵数值计算。通过算例验证,表明目前的数值研 究手段可以有效的进行波浪中的船舶自航操纵运动的数值模拟。

- 2) 开发了自由航行船舶的航向保持控制模块。根据动态重叠网格技术和多级物体运动概念,实现了采用 PID 控制器对船舶航向保持数值模拟中舵角的实时控制,即通过航向角的变化作为控制参数,反馈对应的舵角变化,从而实现船舶在不同浪向工况下航行时,保持目标的航向角的目的。为波浪中船舶的航向保持问题研究提供了一个有效的数值研究工具。
- 3) 将水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 的开发平台从原来的 OpenFOAM-2.0.1 提升至目前的 OpenFOAM-3.0.1,提高了求解器的求解效率。新版本的 OpenFOAM 做了较多的数值方法上的完善,从而使得计算更加稳定和高效, 针对船舶与海洋工程特定的两相流方面做了较大的完善,即在求解 VOF 方 程中采用了隐式预估,然后显式修正的半隐式算法,放宽了求解时对最大库 朗数的约束,在保证有界性和稳定性的前提下大大提升了计算效率。通过这 种方法来实现自航船舶在波浪中的操纵运动数值计算,可以将以往的数月的 计算量压缩到现在的两周左右,使得波浪中的自航操纵计算可以更方便的为 工程应用服务。

2. 首次在 OpenFOAM 上实现带螺旋桨带舵船舶的各种操纵运动的直接数值模拟,数值预报的精度和效率与国际上行业内知名的美国爱荷华大学 Stern 教授研究团队和意大利 INSEAN 研究所的水平相当。

3. 实现了在波浪中的船舶操纵运动的直接数值模拟,进行了不同浪向下的航向保持数值预报,规则波浪工况下的船舶 Z 形操纵运动和自由回转操纵运动的直接数 值模拟,为研究波浪对船舶操纵运动的影响提供了可靠的分析工具。 第一章 绪 论

第二章 数值方法和求解器模块开发

本章主要介绍了基于重叠网格技术的船舶水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 的基本构成,数值计算所采用的基本数值方法,以及自主开发的针对自航船舶操纵运动的控制模块,针对波浪中操纵运动问题的造波方法改进,最后对当前求解器进行了基本的流场计算算例验证。

2.1 求解器基本框架



图2-1 naoe-FOAM-SJTU 求解器基本框架

Fig.2-1 Framework of naoe-FOAM-SJTU solver

本博士论文采用课题组基于开源 CFD 平台 OpenFOAM^[90,91]自主开发的 naoe-FOAM-SJTU^[92-94]作为基础求解器。该求解器最早在 OpenFOAM-2.0.1 版本上进行开发,以 OpenFOAM 发行版中的两相流求解器 interFoam 为基础,先后加入了基于动态变形网格^[95]的六自由度运动求解模块,三维数值造波和消波模块,分离涡(DES) 求解模块^[96,97],浮式结构物锚泊系统求解模块^[98-100],重叠网格模块和多级物体运动模块,从而形成了适用于大多数船舶与海洋工程水动力学问题研究的 CFD 数值求解器^[101-111]。

本章节在原来求解器 naoe-FOAM-SJTU 的基础上,开发自航船舶操纵运动控制 模块,实现了开源造波工具包 waves2Foam^[89]同基础求解器的结合,从而形成了适用 于求解典型船舶操纵运动,以及复杂波浪工况下的自航船舶操纵运动的求解器软件。 完整的求解器的框架见图 2-1。求解器主要面对船舶与海洋结构物水动力学问题,流 体控制方程为雷诺平均 RANS 方程,空间离散采用有限体积法,使用任意多面体形 式的非结构化网格,自由面捕捉采用带有人工压缩项的 VOF 方法,下面将详细介绍 计算中使用的数值求解方法。

2.2 基本数值方法

基本数值方法部分包括流体控制方程,自由面求解的流体体积 VOF 方法,湍流 和近壁面近似,速度压力求解以及离散格式等方面。

2.2.1 流体控制方程

数值计算中,流体控制方程为非定常两相不可压的雷诺平均 RANS 方程:

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

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

其中: U代表计算域中网格单元速度场, U_g 表示变形网格中的网格运动速度。 $p_d = p - \rho_g \cdot x$ 为动压力, ρ 为两相流体域中的液体或者气体密度(界面处为混合值, 详见下一节 VOF 方法介绍), g为重力加速度向量。 $\mu_{eff} = \rho(v + v_i)$ 表示有效动力粘 性, v表示运动粘度, v_i 表示涡粘度。 f_σ 为表面张力项, f_s 是用于消波的源项,详见 2.3 节。

2.2.2 自由面捕捉 VOF 方法

船舶与海洋工程领域中的一大特色便是非定常的两相流问题,同时也是水动力 学问题中较为复杂且难处理的问题。流体体积法(VOF)是目前基于有限体积法的 CFD 求解器或通的 CFD 软件中求解两相流问题应用最为广泛的方法之一。该方法首 先通过流体所占离散网格体积的比重α来统一衡量流体在计算域中的分布,其中α 取值范围在0到1之间,0代表为气体,1则代表为水,介于0到1之间则表征为自 由面位置。因此,通过体积分数α便可以将两相流规化为统一的流体域,其中的流体物理参数均可通过以体积分数来权衡,如计算域中的流体密度和粘度可以写作:

$$\begin{cases} \rho = \alpha \rho_l + (1 - \alpha) \rho_g \\ \mu = \alpha \mu_l + (1 - \alpha) \mu_g \end{cases}$$
(2-3)

其中, $\rho_l \pi \rho_g$ 分别表示水和空气的密度, $\mu_l \pi \mu_g$ 则为水和空气的粘度。

采用 VOF 方法捕捉自由面的数值模拟中遇到的最为关键的问题便是体积分数的 守恒性,如果针对流体密度差较大,如水和空气密度比约为 1000,这种情况下,一 个较小的体积分数数值误差就会导致很大的物理参数差别。同时体积分数同自由面 曲率求解和表面张力,自由面压力梯度都息息相关,一般情况下,两种流体介质间的 界面很厚(几层网格),并且计算结果对网格的分辨率很敏感。目前已有很多研究改 进 VOF 方法,改进求解精度,同时还能保证有界性和守恒性。



图2-2 计算域离散方式[112]

Fig.2-2 Discretization of the solution domain^[112]

本文采用 OpenFOAM 中改进的带有人工压缩技术的流体体积 VOF 法(Volume of Fluid)^[112]来捕捉自由面。该方法中引入了一个额外的对流项,从而可以提供较为精细(sharp)的界面。这种人工压缩技术方法首先分别单独求解空气和水的体积分数输运方程:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\mathbf{U}_{t} \alpha \right) = 0 \tag{2-4}$$

$$\frac{\partial(1-\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\mathbf{U}_{g} \left(1-\alpha \right) \right] = 0$$
(2-5)

其中1和g下标分别代表水和空气项。假定水和空气的速度对自由面的演化为与体积 分数呈等比例的贡献,那么整个流场中的有效速度场可以表征为:

$$\mathbf{U} = \alpha \mathbf{U}_l + (1 - \alpha) \mathbf{U}_g \tag{2-6}$$

那么公式(2-4)可以重新写作:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\mathbf{U} \alpha \right) + \nabla \cdot \left[\mathbf{U}_r \alpha (1 - \alpha) \right] = 0$$
(2-7)

其中 $\mathbf{U}_r = \mathbf{U}_l - \mathbf{U}_s$ 为相对速度,定义为"压缩速度"。公式中压缩项的数值离散通过自由界面处的速度通量来求解(见图 2-2):

$$\mathbf{U}_{r,f} = \mathbf{n}_{f} \min \left\{ C_{\alpha} \frac{|\phi|}{|\mathbf{S}_{f}|}, \max \left(\frac{|\phi|}{|\mathbf{S}_{f}|} \right) \right\}$$
(2-8)

其中,下标 f 表示面单元上的物理量; ϕ 是通量; \mathbf{S}_{f} 是网格面单元的法向向量, \mathbf{S}_{f} 的模等于网格面单元的面积; C_{α} 是压缩系数; \mathbf{n}_{f} 表征界面上的法向量,通过界面处的网格面上的体积分数梯度求解:

$$\mathbf{n}_{f} = \frac{\left(\nabla \alpha\right)_{f}}{\left|\left(\nabla \alpha\right)_{f} + \delta_{n}\right|} \cdot \mathbf{S}_{f}$$
(2-9)

公式中的 δ_n 是稳定系数,表征网格的不规则性,定义如下:

$$\delta_n = \frac{\varepsilon}{\left(\sum_{i=1}^N V_i / N\right)^{1/3}}$$
(2-10)

其中 N 为计算的总网格量, ε 为小参数,这里取1×10⁻⁸。这种离散求解方式即简单又 具有良好的可靠性和稳定性。

这样就将原始的 VOF 方法扩展为带有人工压缩项的 VOF 输运方程,同时,人 工压缩项仅在自由面范围内起作用,远离自由面的流体域则不受影响,这样的优点是 可以控制数值耗散并拥有较高的自由液面捕捉精度,从而不再需要为了提高精度去 采用高阶的对流项离散格式,如 FLUENT 中采用的 CICSAM 格式。该方法的具体原 理和详细求解过程可以参阅文献^[113]。目前 OpenFOAM 不同的发行版本以及其他人 员也进行了一系列的 VOF 方法的改进工作,详细改进模型可以参阅文献^[114-119]。

动量方程(公式(2-2))中的表面张力项 f_o是通过水气界面处产生的额外压力梯度导致的,其具体表达形式如下:

$$f_{\sigma} = \sigma \kappa \nabla \alpha \tag{2-11}$$

其中κ是自由面的平均曲率,由下面的表达式求得:

$$\kappa = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \right) \tag{2-12}$$

第 24 页

公式(2-11)中的表面张力求解方式只适用于表面张量为常量的问题,这里表面张力系数取为 $\sigma = 0.0734 kg / s^2$ 。

在 OpenFOAM 在早期的版本当中(1.4 到 2.3.0 版本之间),对 VOF 输运方程 采用显式的求解方法,对 CFL 条件有严格的要求,时间步长很小,因此这种显式求 解方式计算代价较大。而从 OpenFOAM-2.3.0 版本开始,引入了预估修正的半隐式方 法(Predictor-Corrector Semi-Implicit),即求解过程中,首先根据离散好的 VOF 方 程进行隐式的预估求解,然后进行一步显式 MULES 修正。这种方式能够在较大的库 朗数情况下,保证数值计算的稳定性和有界性,因此能够提高数值计算中的时间步 长,从而加速计算。本博士论文的一项主要工作也是将之前的基础求解器 naoe-FOAM-SJTU 升级到新版本的 OpenFOAM 平台(现已升级至 OpenFOAM-3.0.1)上 来,从而提升数值模拟的计算效率。

2.2.3 速度压力解耦

针对流体控制方程 RANS 方程(2-1)和(2-2),由于没有一个显式的压力方程,因此不能够直接求解,常用的求解方式是通过对动量方程取散度,然后跟连续性方程联立获得显式的压力方程。动量方程公式(2-2)可以写作一个半离散的格式:

$$a_p \mathbf{U}_p = H(\mathbf{U}) - \nabla p \Leftrightarrow \mathbf{U}_p = \frac{H(\mathbf{U})}{a_p} - \frac{\nabla p}{a_p}$$
 (2-13)

其中:

$$H(\mathbf{U}) = -\sum_{n} a_{n} \mathbf{U}_{n} + \frac{\mathbf{U}^{0}}{\Delta t}$$
(2-14)

H(**U**) 右端的第一项代表构造的系数矩阵中所有的相邻单元的系数同对应速度的乘积之和,第二项包含除去压力梯度项的其它所有源项以及非定常项。

连续性方程的离散形式可以写作:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = \sum_{f} \mathbf{SU}_{f} \tag{2-15}$$

其中,**S**是从单元中心指向外侧的面单元面积向量,**U**_f则为面单元上的速度矢量。 面上的速度通过半离散格式的动量方程(2-13)插值得到:

$$\mathbf{U}_{f} = \left(\frac{H(\mathbf{U})}{a_{p}}\right)_{f} - \frac{(\nabla p)_{f}}{(a_{p})_{f}}$$
(2-16)

将公式(2-16)代入离散的连续性方程我们得到压力方程:

第 25 页

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{a_p} \nabla p\right) = \nabla \cdot \left(\frac{H(\mathbf{U})}{a_p}\right) = \sum_f \mathbf{S} \left(\frac{H(\mathbf{U})}{a_p}\right)_f$$
(2-17)

OpenFOAM 中对上述方程的求解有三种方式,对稳态问题一般采用 SIMPLE 算法;对瞬态问题可以采用 PISO^[120]算法来求解,也可以采用两种的结合形式 PIMPLE 算法。



图2-3 SIMPLE 算法计算流程

Fig.2-3 Flow chart of the SIMPLE algorithm

针对稳态问题的 SIMPLE 算法可用于船舶与海洋工程中的静水阻力求解(固定船体),其主要求解流程见图 2-3。计算中采用一种迭代的方式进行,具体步骤如下:

- 1) 设置计算边界条件;
- 2) 通过离散的动量方程求解预估速度场;
- 3) 求解面单元的通量;
- 4) 求解压力方程(2-17)并根据需要施加松弛条件;
- 5) 修正面单元上的通量;
- 6) 根据新求解的压力场修正速度场;
- 7) 更新边界流场信息,求解湍流输运方程(见2.2.4节);
- 8) 重复上述步骤直至达到收敛。

需要指出的是,针对非正交网格,步骤 4 和 5 可以根据非正交修正需要重复指 定次数。



图2-4 PISO 算法计算流程 Fig.2-4 Flow chart of the PISO algorithm

目前 OpenFOAM 中的 PISO 算法利用的是同位网格方法^[121]。该方法对比传统的 交错网格,将所有数据信息存储于网格单元中心,易于编程实现,并且对三维问题效 率更高。OpenFOAM 中的 PISO 算法计算流程见图 2-4。

与 SIMPLE 算法主要的不同点是, PISO 算法不需要施加松弛系数, 动量修正不止一次。详细的求解步骤如下:

- 1) 设置边界条件;
- 2) 根据初始的流场参数求解离散的动量方程获得第一次预估的速度场;
- 3) 求解网格面单元的通量;
- 4) 求解压力方程(2-17);
- 5) 修正网格面单元上的通量值;
- 6) 根据新求解的压力场修正速度场;
- 7) 更新边界流场,求解湍流方程;
- 8) 从步骤3开始重复指定的次数;

第 27 页
9) 进入下一时间步,并从步骤1重新开始。



图2-5 PIMPLE 算法计算流程 Fig.2-5 Flow chart of the PIMPLE algorithm

在 OpenFOAM 中, 瞬态问题,尤其是强非线性的两相流问题中,通常是通过 PIMPLE 算法来进行速度压力的求解。该算法的计算流程见图 2-5。值得指出的是, PIMPLE 算法中的湍流流动方程可以在每个 PIMPLE 循环中都进行求解,也可以选 择只在最后一个循环中进行求解,针对船舶与海洋工程问题来讲,由于时间步长通常 较小,可以保证计算的较高精度,因此没有必要在每个 PIMPLE 循环中都进行湍流 的修正求解,这样也可以提高整个流场的计算效率。

2.2.4 湍流模型

目前计算流体力学常采用的数值模拟方法主要分为三种: DNS (Direct Numerical Simulation)、LES (Large Eddy Simulation)、RANS (Reynold-Averaged Navier-Stokes)。 三者的主要区分标准就是直接求解的涡的尺度,见图 2-6。目前版本的 OpenFOAM 提供了当前主流的大多数湍流模型,针对雷诺平均假设,闭合 RANS 方程的湍流模型包括单方程模型的 SpalartAllmaras (SA)模型^[122],两方程模型中的标准 $k-\varepsilon$ 模型^[123],以及在此基础上发展的 RNG $k-\varepsilon$ 模型^[124], Realizable $k-\varepsilon$ 模型^[125]等,另一个主流的两方程模型为标准 $k-\omega$ 模型^[126],以及在此基础上的 SST (Shear Stress Transport) $k-\omega$ 模型^[127]。其中目前工程应用最为广泛的是 SST $k-\omega$ 模型。

大涡模拟方法(LES),与 RANS 方法采用时间平均方式求解的本质区别是对涡的解析方式。LES 方法通过空间尺度(滤波函数)进行大小尺度涡的过滤,大尺度的涡可以直接通过流场计算解析,小尺度的涡则用适当的模型来封闭。采用 LES 方法进行数值计算时,雷诺数越高,为解析精细的流动所需的网格量越多,计算时间也会成倍地增加。



图2-6 不同方法解析湍流涡的尺度

Fig.2-6 Resolve scale of eddies by different methods

直接数值模拟方法(DNS)是对流动控制方程直接进行数值求解,不需要建立湍流模型,也就是需要解析很小尺度的涡,因此对空间和时间的分辨率要求很高,计算成本很高,目前该方法也仅仅适用于雷诺数较低的简单湍流流动。

根据船舶与海洋工程的流动特点,非定常、两相流、高雷诺数以及尺度大等特点, 目前 DNS 和 LES 方法还不适用于求解这类问题,本博士论文主要采用的流动控制方 程仍然为 RANS 方程,湍流模型采用主流的两方程模型,由 Menter 提出的 SST $k-\omega$ 模型^[128],该模型结合了标准 $k-\omega$ 和标准 $k-\varepsilon$ 模型的优点,是目前 CFD 数值计算中应用最为广泛的湍流模型。

SST $k - \omega$ 模型的实现是通过将标准的 $k - \omega$ 模型和标准 $k - \varepsilon$ 以所谓的混合函数 结合到一起。混合模型的两方程最终表达式如式(2-18)所示:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}k) = \tilde{G} - \beta^* k \omega + \nabla \cdot \left[(\nu + \alpha_k \nu_t) \nabla k \right]$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\omega) = \gamma S^2 - \beta \omega^2 + \nabla \cdot \left[(\nu + \alpha_\omega \nu_t) \nabla \omega \right] + (1 - F_1) CD_{k\omega}$$
(2-18)

其中,k和 ω 分别表征湍动能和耗散率。 F_1 为混合函数,通过该函数可以实现在近壁面处采用标准 $k-\omega$ 模型,而在远离物体区域采用 $k-\varepsilon$ 模型。

2.2.4.2 近壁面处理

数值模拟中,如何有效的处理物体壁面附近的流动是能否得到精确解的关键方面,一般情况下,边界层内的流动可以分为粘性底层、过渡层和对数率层^[126],如图 2-7 所示。在粘性底层流动中,经过无因次化后的速度*U*⁺和网格到物面距离 y⁺呈线 性关系:

$$U^+ = y^+$$
 (2-19)

在对数率层流动中, U^+ 与 y^+ 的自然对数呈线性关系:

$$U^{+} = \frac{\ln\left(Ey^{+}\right)}{\kappa} \tag{2-20}$$

其中, $U^+ = U/u_\tau$; $y^+ = yu_\tau/v$; $u_\tau = \sqrt{\tau_\omega/\rho}$ 为流动剪切速度; κ 是冯卡门常数; τ_ω 为物体表面上的剪切应力。

边界层内的流动解析需要满足物面最近的一层网格高度在粘性底层之内。由于 粘性底层很薄,这就要求无因次化的网格到物面的距离 y⁺ ≤1。由此就会产生大量的 计算网格。因此,这种超大网格量在工程应用当中非常不经济。而在工程应用中一般 会采用壁面函数,即将物面第一层网格置于对数率层,对应于 30 ≤ y⁺ ≤ 300,由此降 低计算网格。同时,更大的网格单元有利于提高数值计算的稳定性,也利于提升计算 的收敛速率^[129]。因此,壁面函数被广泛的应用当前的 CFD 数值计算中,也是本博士 论文中数值模拟所采用的方式。



图2-7 边界层内的速度示意图^[187]

Fig.2-7 Diagram of velocity distribution in boundary layer ^[187]

此外,通过图 2-7 可以发现有过渡层的存在,在过渡层内,不满足线性或者对数 关系,并且没有一个精确可靠的的模型来描述这一区域内的流动变化。因此,使用壁 面函数时只是针对粘性底层或者对数层,即图 2-7 中的两条蓝线去拟合真实的红线 分布。

采用壁面函数方法,一般将壁面的第一层的网格放入对数层。而近壁面的流动变 化最大,同时伴随较大的速度梯度变化。而将网格越过这一剧烈流动区域,会导致流 场求解出现较大的误差。因此,为保证计算精度,在 OpenFOAM 中,通过修正物面 第一层网格的湍动粘度v,来实现。修正的方法是在粘性底层和对数层中间设定一个 临界值,如图 2-7 所示。在粘性底层关系见公式(2-19),对数率层中的关系则为式(2-20) 所示。由此,在临界点上就有:

$$y^{+} = \frac{\ln\left(Ey^{+}\right)}{\kappa} \tag{2-21}$$

其中, *κ*=0.41, *E*=9.81。通过方程(2-21)可以求得临界值为 y⁺=11.53。然后就能够求 得物体表面上每个网格的 y⁺:

$$y^{+} = \beta^{*1/4} y \frac{\sqrt{k}}{\nu}$$
(2-22)

第 31 页

求解中以临界值区分层流流动区域和湍流流动区域,在层流区的湍动粘度为零。 而在湍流流动区域中湍动粘度v,通过下式求得:

$$v_t = v \left(\frac{y^+ k}{\ln\left(Ey^+\right)} - 1.0 \right) \tag{2-23}$$

2.3 边界造波和区域造波模块

本文采用的水动力学基础求解器 naoe-FOAM-SJTU 包括了自主开发的三维数值 波浪水池模块^[84,93,94]。但是需要指出的是求解器中已有的三维造波模块是基于速度入 口边界条件的方式进行造波。本节将首先简要介绍一下已具备的边界造波方法,然后 详细介绍了一下区域造波模块的开发,也是本博士论文的主要工作之一,即将开源的 造波工具 waves2Foam^[89]结合到 naoe-FOAM-SJTU 求解器中,从而能够实现自航船 舶在波浪中操纵运动的直接数值模拟。

2.3.1 边界入口造波模块

边界入口式造波方法,即通过入口处施加特定波浪场的速度和体积分数边界条件,即可实现典型波浪环境的生成。该方法的实现比较简单,无需通过额外增加的计 算域或者传统的推板或者摇板来实现造波,因此无论程序开发或者是计算量方面都 比较有优势。

2.3.1.1 边界造波基本结构

边界入口造波模块的主要代码结构如图 2-8 所示。waveMaker 类对象用于选择不 同波浪的类型,选定好对应的波浪,如规则波、不规则波,再根据相应的波浪理论值 为造波边界提供速度和体积分数值。waveMaker 类包含一个指向特定造波理论的指 针。而造波理论类型通过一个抽象基类 waveTheory 来管理,在它的基础上派生出相 关的子类对应于不同的造波理论,并且保留统一的对外接口。目前三维数值造波模块 可以实现的波浪类型包括一阶 Stokes 波(深水和浅水)、高阶波、聚焦波、孤立波、 多向不规则波等。在不规则波生成中提供了多种波谱函数,如白噪声、P-M 谱、ITTC 单/双参数谱和 JONSWAP 谱等。



图2-8 数值造波模块基本框架[62]

Fig.2-8 Framework of the wave generation module ^[62]

waveMaker 根据设定的造波类型,依据对应的造波理论,计算出造波边界上的速度 U(*u*,*v*,*w*,*t*) 和体积分数α值,并且将此作为第一类边界条件(Dirichlet)参与到整个 流场的计算中去。这里以一阶 Stokes 深水波为例,介绍一下具体的波浪入口条件的 形式。

一阶 Stokes 深水波的表达式如下:

$$\begin{cases} \eta = a\cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t + \delta) \\ u = a\omega e^{kz}\cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t + \delta) \\ v = a\omega e^{kz}\cos\chi\cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t + \delta) \\ w = a\omega e^{kz}\sin\chi\cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t + \delta) \end{cases}$$
(2-24)

其中, η 表征波高,u,v,w代表入口边界上面的速度场,k是入射波波数,并且包含入 射波的方向, δ 为相位,用来控制初始波形的参数,而 χ 则是入射波的方向,如 $\chi=0$ 代表迎浪, $\chi=90$ 为横浪工况。

相比于入口处的速度边界条件,体积分数 α 就更加复杂了。由于自由面的波高 η 与 α 没有直接联系,因此造波边界需要进行单独处理。如果面单元所有顶点都位于 η 之上,则 α =0;当所有面单元顶点都在 η 以下,则 α =1。其它情况下的体积分数 α 可以通过下式求得:

$$\alpha = \frac{S_w}{S_0} \tag{2-25}$$

其中, *S*₀为面单元的面积, *S*_w代表该面单元的湿表面积。通过这种简单的处理方式可以求得交界面处的体积分数值。

第 33 页

2.3.1.2 数值消波模块

船舶与海洋工程问题中,数值波浪水池中波浪传播到边界处一般会产生反射,从 而对计算域内的流动产生干扰,影响计算的精度,因此必然需要具备消波功能,从而 避免由于边界存在导致的波浪反射现象,课题组开发的三维数值波浪水池中采用设 置海绵层^[194]进行消波。主要是通过在动量方程(2-2)中添加一个消波的源项 f_s,该项 可以表达为:

$$f_{s}(x) = \begin{cases} -\rho \alpha_{s} \left(\frac{x - x_{s}}{L_{s}} \right)^{2} \left(\mathbf{U} - \mathbf{U}_{ref} \right) & \text{在消波区内} \\ 0 & \text{在消波区外} \end{cases}$$
(2-26)

其中,消波项从*x*_s处开始起作用;*L*_s表征消波持续的长度;*α*_s为消波粘性系数。公式(2-26)中的相对速度项U_{ref}用于保证进出口的速度相同,进而确保计算过程中的流体质量守恒。目前求解器中能够选择的消波区形状有矩形和圆柱形两种。图 2-9 给出了迎浪工况下的消波区设置,展示了消波区内不同位置的消波强度变化。







2.3.2 区域造波模块开发

区域造波方法同速度入口边界造波方法直接的区别就是前者不仅仅需要边界造 波,同时还需要在特定的区域范围内对流场进行改造。具体实现方式是通过采用松弛 区域,保证外部边界处没有波浪反射,同时还能够确保计算域内部的波浪反射不会对 造波边界产生干扰,这也是边界造波方法所不具备的特点。

开源造波工具包 waves2Foam^[89]采用的松弛技术是对 Mayer 等人^[130]工作的拓展, 采用一个松弛方程:

$$\alpha_{R}(\chi_{R}) = 1 - \frac{\exp(\chi_{R}^{3.5})}{\exp(1) - 1} \quad for \quad \chi_{R} \in [0; 1]$$

$$(2-27)$$

然后松弛区域中的流场信息可以由以下方式获得:

$$\phi = \alpha_R \phi_{computed} + (1 - \alpha_R) \phi_{target}$$
(2-28)

其中, ϕ 是流场物理量,可以是速度U或者体积分数。变量 χ_R 的定义是在松弛区域 同非松弛区域的交界处始终保持 $\alpha_R = 1.0$,具体变化形式可以参照图 2-10。松弛系数 α_R 必须满足 $\alpha_R(0) = 1$ 和 $\alpha_R^{(n)}(0) = 0$,在当前的程序实现中第二个条件满足到了三阶导 数为0,即 $\alpha_R^{(3)}(0) = 0$,并且验证了这种情况已经足够办证计算精度。通过公式(2-28) 以及图 2-10 可以看出,在造波边界处松弛系数为零,即严格按照波浪理论进行输入, 而在松弛区和非松弛区的交界处松弛系数为1,即此处的流场值完全等于计算值,从 而实现了松弛区流场信息和主流动区流场的完整过渡。消波区的流场形式类似域造 波区,在出口处能够实现最终想要的流速,从而完成消波的目的。



图2-10 造波区和消波区里面松弛系数 α_R 跟变量 χ_R 的关系^[89] Fig.2-10 A sketch of the variation of $\alpha_R(\chi_R)$ for both inlet and outlet relaxation zones

目前,该造波工具包可以实现主要两种形式的松弛区域,矩形区域或者环形区域,以及两种区域的任意叠加。不同的松弛区域内可以实现不同形式的波浪或消波形

式。此外,松弛区域可以选择锁定(frozen type)在计算域的某一区域,即松弛区域 跟该范围内的网格绑定,计算域移动,松弛区域也会相应的跟着移动,这种方式适用 于做大范围内的操纵运动船舶同时在波浪中运动的数值模拟,同时这也是本博士论 文在求解器中引入这种造波方式的原因。

本博士论文中采用 waves2Foam 这种区域造波方式进行波浪工况下的自航船舶 操纵运动数值模拟,首先需要进行该工具包同自主开发的船舶与海洋工程水动力学 求解器 naoe-FOAM-SJTU 的有效结合。同 2.3.1 节中介绍的自主开发的边界输入式造 波编程思路一致,waves2Foam 也是充分利用了面对对象编程的优势,封装成独立的 库 *libwaves2Foam.so*,包含各种造波理论以及相应的松弛算法和松弛区域等等。为了 同 naoe-FOAM-SJTU 求解器完成整合,需要在初始化场量文件 creatFields.H 中实例 化一个 relaxationZone 对象,类似于上一节中的 waveMaker 对象,可以实现指定波浪 类型的生成,然后在求解器的主程序的具体调用过程中,在完成 VOF 方程求解之后, 执行 PIMPLE 循环之前施加松弛区域造波对象的 correct()函数,从而完成波浪场的更 新。两者结合进行的主要工作见图 2-11。

完成上述 waves2Foam 同 naoe-FOAM-SJTU 求解器结合的有关步骤之后,在 OpenFOAM 平台进行改造完成的求解器的编译,从而生成最后进行波浪中自航船舶 操纵性数值模拟所需的求解器。





2.4 重叠网格方法和操纵控制模块

2.4.1 重叠网格方法

重叠网格方法是将每个运动物体周围进行单独的网格划分,计算网格可以是结构化网格或者非结构化网格,同时各嵌套网格之间存在网格重叠的部分。计算过程中首先需要计算重叠网格之间的联系信息(Domain Connectivity Information, DCI), DCI 信息中包含了不同区域网格单元的类型,以及边界网格插值所需的网格和对应的插值权重等信息。典型的船桨舵周围重叠网格分布见图 2-12,多套网格间通过边界单元(Fringe cell)进行流场信息交换,活动单元(Active cell)参与流场求解,靠近边界单元的活动单元可以作为贡献单元(Donor cell)为边界单元提供插值信息。



图2-12 重叠网格示意图 Fig.2-12 Diagram of overset grids

为介绍在重叠网格技术中如何区别单元的属性并且实现整体的计算,这里首先 介绍重叠网格中的主要单元类型,前面已经介绍了活动单元、边界单元和贡献单元, 重叠网格方法中还有两种单元类型:洞单元和孤点单元。洞单元(Hole cell)是不参 与计算的网格单元,处于计算区域之外或者在运动结构物内部,计算中首先根据位置 标记这些单元为洞单元,另外,没有参与计算的重叠区域内的网格单元也会被认为洞 单元;孤点单元(Orphan)是当边界单元没有找到贡献单元时,就会被标记为孤点单 元,因此,它也是一种特殊的边界单元。通常在两套网格之间没有足够多的重叠单元 时,就会出现孤点单元。 图 2-13 中列举了一个应用实例,共两套网格组成,分别为圆柱体周围网格 (Cylinder grid)和背景网格(Background grid)。圆柱体周围网格是辐射形式的结构 化网格,背景网格则采用的是规则的结构化网格。左侧图片显示的是圆柱体网格中的 网格类型分布,由于物体内部本来就没有网格单元,因此只存在活动单元和边界单元 两种,分别以红色和绿色表示;在右侧显示的背景网格中,共有三种单元类型,包括 了蓝色标识的洞单元,在背景网格中物体内部和无用的重叠区域;绿色表示的是边界 单元,介于洞单元和活动单元之间的两层网格,需要从圆柱体网格插值获取流场信 息;红色部分是正常参与计算的活动单元。



图2-13 重叠网格应用实例 Fig.2-13 Example of overset grid applications

不同套重叠网格之间的插值关系通过计算 DCI 数据实现,本博士论文中所采用 的 DCI 数据是由 SUGGAR++^[131]程序来计算完成。该程序是在 SUGGAR 版本基础上 开发的更为灵活的版本,目前也已经实现商业化。能够用于结构化网格和非结构化网 格的计算,同时支持以单元顶点(Node-centered)为存储位置和以单元中心(Cellcentered)为存储位置两种不同的流场信息存储方式,因此,可以满足基于 OpenFOAM 平台开发的以单元中心格式、非结构化网格以及有限体积方法离散的水动力学求解 器的要求。

SUGGAR++求解 DCI 的过程分为四个步骤:

 首先是执行挖洞步骤,即搜寻标记洞单元。根据上面介绍的识别方法寻找洞单元, 并且将相邻的单元标记为边界单元。

- 进行贡献单元的搜寻,根据上面标记的边界单元从另外一套网格中寻找最佳匹配 的的贡献单元。
- 求解权重系数,根据搜寻的边界和贡献单元的位置,依据下面的方式进行贡献单元的权重系数求解。

第i个贡献单元的无因次化权重系数写作 ω, 所有的权重系数 ω, 应满足:

$$\sum_{i=1}^{n} \omega_{i} = 1$$
 (2-29)

在权重系数*ω*,的求解上,有三种典型的做法:第一种方法是就近原则,只有一个 贡献单元其权重系数定为1,将最近单元的流场值赋给边界单元,因此只有零阶 精度,容易造成较大误差;另外一种方式是通过边界单元到贡献单元中心的距离 倒数来求得插值系数 (Inverse-Distance Weights)^[132],即贡献单元中心离插值边 界单元中心越近,权重系数越大,这种插值方法便于实施,但是该方法忽略两者 间的方向关系,因此精度仍有待提高;第三种方法是 Laplace 算子权重方法^[133], 相比于第二种方法, Laplace 权重方法可以考虑到了贡献单元和边界单元之前的 方向联系,具有更高的插值精度,本文中的数值计算均采用这种权重系数求解方 法。

 DCI 计算的最后一步是对重叠区域的优化。这一步会重新搜寻最优的匹配单元, 保证最佳的插值关系,去除额外的边界单元,进而减少计算量。

完成 DCI 数据的计算以后,接下来的工作便是如何实现 DCI 计算同 CFD 流场 计算联系起来,实现并行高效计算。这部分的工作在沈志荣的论文^[134]中进行了详细 的阐述,这里只是简要介绍一下其流程。OpenFOAM 流场计算和 SUGGAR++进行的 插值信息 DCI 计算并行模式见图 2-14。计算中,首先先进行 DCI 计算,然后在流场 计算时,需要接受 DCI 信息,然后进行统一的流场求解,即得到速度压力,预报物 体六自由度运动,这个步骤完成后,将运动信息再传递给 SUGGAR++进程,进行下 一时刻的 DCI 信息计算,如此重复便能够完成两者之间的有效并行计算。

采用重叠网格方法进行流场计算时,需要对离散好的矩阵进行修正,从而完成对整体流场的求解。这部分需要对 OpenFOAM 中的流动控制方程、自由面 VOF 方程、湍流方程等,进行适当的改造。主要修改包括计算中对离散矩阵进行重新组装,洞单元对应的矩阵中系数设置为零,然后边界单元对应系数和右端项均乘以一个极大值,此外还需要再求解线型方程组时,剔除洞单元导致的残差部分。其中详细的改造过程可以参考沈志荣的博士论文^[134]。





Fig.2-14 Parallel mode between OpenFOAM processor and DCI processor

2.4.2 多级物体运动

多级物体运动(Hierarchy of bodies)是实现船、桨、舵协同配合运动直接数值模 拟的必然要求,即螺旋桨和舵作为船体运动的子级物体,可以在船体进行六自由度运 动的基础上,完成自身需要的旋转运动。在多级物体运动系统当中,最高一级为计算 域中连接远场和船体网格的背景网格。第二级船体网格可以相对于背景网格进行六 个自由度的运动。第三级为螺旋桨和舵,是相对于船体运动的独立运动。此外,为了 实现船舶操纵等大幅度运动的数值模拟,程序设计中可以选择第一级的背景网格,能 够跟随第二级中的船体一起运动,但是不能够发生纵摇、横摇和垂荡运动,即只能跟 随船体做水平面内的运动,从而保证背景网格处于水平,这样利于自由面范围内网格 均匀,利于 VOF 方程求解的精度和收敛速率。

采用重叠网格方法处理船桨舵多级物体运动时,首先进行最低层级的网格移动, 而后逐步移动更高级的网格。这里以带螺旋桨带舵船体运动为例(见图 2-15),介绍 多级物体运动的实现过程。网格的移动首先从第三级的螺旋桨和舵部分开始。螺旋桨 和舵根据不同船体运动形式,可以按照指定的控制参数(如螺旋桨转速、最大转舵角 度等),绕着旋转轴进行自身的旋转运动,螺旋桨和舵的控制,即操纵运动控制详见 下一节的介绍。需要注意的是,上述螺旋桨和舵的旋转是在船体坐标系中进行的,而 不是在大地坐标系下。

接下来要移动的是船体网格。网格移动量依据基于 Euler 角表述的六自由度运动 模型求解得到的运动值。



图2-15 船桨舵多级物体运动示意图 Fig.2-15 Diagram of motion between ship-propeller-rudder system

计算中使用两个坐标系,即大地坐标系(或称惯性坐标系)和船体坐标系(也称 非惯性坐标系)。为了求解船舶的六自由度运动,首先需要进行流场的求解,积分求 得船舶受到的力和力矩,由于这部分的求解是在大地坐标系下,因此需要根据 Euler 角构造得转换矩阵将水动力和力矩转换到船体坐标系下,然后求解六自由度运动方 程,即根据船体受到得水动力以及螺旋桨和舵力联合作用下得船体运动,下面为船体 在受力情况下的六自由度加速度求解:

$$\begin{cases} \dot{u} = X_{s} / m + vr - wq + x_{g} (q^{2} + r^{2}) - y_{g} (pq - \dot{r}) - z_{g} (pr + \dot{q}) \\ \dot{v} = Y_{s} / m + wp - ur + y_{g} (r^{2} + p^{2}) - z_{g} (qr - \dot{p}) - x_{g} (qp + \dot{r}) \\ \dot{w} = Z_{s} / m + uq - vp + z_{g} (p^{2} + q^{2}) - x_{g} (rp - \dot{q}) - y_{g} (rp + \dot{p}) \\ \dot{p} = \frac{1}{I_{x}} \Big\{ K_{s} - (I_{z} - I_{y})qr - m[y_{g} (\dot{w} - uq + vp) - z_{g} (\dot{v} - wp + ur)] \Big\}$$

$$\dot{q} = \frac{1}{I_{y}} \Big\{ M_{s} - (I_{x} - I_{z})rp - m[z_{g} (\dot{u} - vr + wq) - x_{g} (\dot{w} - uq + vp)] \Big\}$$

$$\dot{r} = \frac{1}{I_{z}} \Big\{ N_{s} - (I_{y} - I_{x})pq - m[x_{g} (\dot{v} - wp + ur) - y_{g} (\dot{u} - vr + wq)] \Big\}$$
(2-30)

获得船体的加速度后,需要积分得到在船体坐标系下的六个自由度的速度。然后 转换到大地坐标系下,按时间积分得到下一个时间步的船体位移和姿态角度。然后, 将船体、螺旋桨和舵的网格根据求得的船体姿态同时进行平移和旋转。

最后进行背景网格的移动。根据实际问题的需要可以选择背景网格是否运动,像 大范围内的船舶推进或者操纵运动问题,则可以通过选择背景网格跟随船体平移,这 样会减少很大一部分的计算区域,从而减小计算量。但是需要注意的是,如果进行背 景网格的移动,只能限制其跟随船体进行平面范围内的移动。如果背景网格是固定 的,则不进行网格移动。

此外,当前的多级物体运动方法方法还可以应用至多个船体(或者浮式结构物) 相互作用问题,并且每艘船舶(结构物)可以带有自身的桨和舵等移动附体情况。因此,可以很大程度上扩展目前 CFD 方法求解船舶与海洋工程问题的范围。

2.4.3 操纵控制模块开发

依托于上面讲述的重叠网格方法以及多级物体运动模块,可以很方便地实现船 舶操纵控制模块。对于船舶操纵性能评估来说,通常采用的试验手段有典型的 Z 形 操纵运动、自由回转运动、航向保持等等。为了通过数值手段模拟这类操纵运动,预 报船舶的航向稳定性、机动性和回转特性等关心的操纵性能,则需要开发相应的船舶 操纵控制模块,即通过对舵角的控制,实现特定船舶操纵运动的数值模拟。

目前在 naoe-FOAM-SJTU 求解器的基础上,完成了不同形式操纵运动的舵角控制器设计,开发了航向保持控制器,同时拓展和优化了 Z 形操纵运动和自由回转运动控制器的功能。目前船舶操纵控制器的形式如图 2-16 中虚线框内所示,包括固定舵(用于船舶推进数值模拟)、Z 形操纵控制器、自由回转控制器以及航向保持控制器。下面将详细介绍本博士论文中主要开发完成的操纵控制模块。



图2-16 船舶操纵控制器模块开发

Fig.2-16 Development of maneuvering control module

2.4.3.1 航向保持控制器

一般情况下,船舶理想状态是能够直线航行,从而能够避免额外操作导致的能耗 以及风险。但是真实海况下的船舶受到周围复杂流动和波浪影响,会产生不可避免的 偏航和大幅度运动。因此,如果能够在设计阶段预报船舶在不同海况下的航向变化和 小舵角的船舶航向纠偏性能,可以为船舶设计和安全提供巨大帮助。这也是本博士论 文进行航向保持控制器开发以及相关数值模拟的研究动机。

类似于 2.3.1 节中介绍的造波模块,这里多级物体运动中,同样利用了 C++程序 语言中的面向对象编程思想,六自由度运动模块中移动附体作为基类派生出螺旋桨 和舵两个子类,而螺旋桨和舵又可以作为父类派生出不同运动形式的螺旋桨或者舵。 图 2-16 中虚线框起来的对应于目前开发完成的不同形式的操纵控制器。构造对象时, 根据不同的关键字,通过 OpenFOAM 中的运行时选择机制(Run Time Seletion, RTS) 构造不同运动形式的舵对象,从而完成对舵不同形式的运动更新。

目前,针对船舶航向保持的试验中,所采用的舵角控制器为一种以航向角作为指标的运动反馈机制,在东京 2015 年的船舶水动力学 CFD 研讨会上,提供了自航船舶在波浪中航向保持的试验,并且作为了标准算例,本博士论文中开发的航向保持控制器即是为了实现该类问题的直接数值模拟。

本文中, 航向保持的舵角控制是通过一个 PID 自动控制器来进行, 其中舵角的 控制形式如下:

$$\delta(t) = K_{P}e(t) + K_{I} \int_{0}^{t} e(t')dt' + K_{D} \frac{de(t)}{dt}$$
(2-31)

$$e(t) = \psi(t) - \psi_c \tag{2-32}$$

其中, $\delta(t)$ 为舵角, K_p 为比例系数, K_1 为积分系数, K_p 为微分系数,e(t)为瞬时的 航向角与目标航向角的偏差,为首摇角度 $\psi(t)$ 与目标航向角 ψ_c 的差值,根据试验 中对舵角的不同控制形式,选取不同的控制参数, K_p 为零时则变为 PI 控制器,若积 分和微分系数均为零则可变为 P 控制器。

在计算过程中,通过不断调整舵角的角度,来使船模在航行过程中一直保持目标 航向角。该控制器可以选择在某一时刻再激活,即可以使自航船舶流场稳定以后开始 进行航向控制,它在接下来的每个时间步内根据航向角的变化进行舵角的调整。目前 已经开发完成的航向控制器会在第五章中进行广泛的应用和验证。

2.4.3.2 典型操纵运动控制器

典型的船舶操纵运动,包括 Z 形操纵运动(10/10,20/20,或者修整型 15/1 等形式),自由回转操纵运动(初始左舷或右舷 35° 舵角)等。目前的求解器 naoe-FOAM-SJTU 已经完成了这两部分的控制器开发,也已经应用到相应的操纵运动数值模拟中去,典型的 10/10 Z 形操纵运动中舵角的控制见下式:

$$\delta(t) = \begin{cases} \min(kt, 10), & t_1 \le t \le t_2 \\ \max(-kt, -10), & t_2 \le t \le t_3 \\ \min(kt, 10), & t_3 \le t \le t_4 \end{cases}$$
(2-33)

其中, $\delta(t)$ 为实时的舵角,k 代表转舵速度,通常试验中选取为最大转舵速率, t_i 表示第i 次执行转舵。图 2-17 给出了典型 10/10 Z 形操纵运动的航向角和舵角的历时曲线。从图中也可以看出,当航向角达到 10°以后,执行转舵直至达到最小舵角-10°,然后船舶航向角会在反向舵力的作用继续扩大,达到第一次最大超越角(1st Overshoot Angle)后向反向运动,直至到达-10°后再执行第二次转舵,并接下来会达到第二次超越角(2nd Overshoot Angle),如此循环,船舶会在舵角的转换过程中以类似于 Z 形进行运动,从而测量船舶的机动性能。



图2-17 典型 10/10 Z 形操纵运动的主要特征参数^[7]



上面讲述的是典型的 10/10 Z 形运动,而 20/20 Z 形运动则是最大舵角为 20°, 转舵航向角为 20°,试验过程类似。



图2-18 自由回转特征参数[7]



自由回转运动的实现较为简单,即根据需要直接按照最大转舵速率转至 35° 舵 角,然后船舶回转对应的舵力作用先实现回转运动,当需要结束回转运动时,增加一 个控制参数(*t_p*),即何时回到初始零度舵角,如果回转一圈则该参数设为360°,相应的两圈为720°。35°满舵向右舷进行自由回转操纵运动的舵角控制如下所示:

$$\delta(t) = \begin{cases} \max(0, kt), \ \delta \le 35 \\ 35 \\ \max(35 - k(t - t_n), 0), \ t \ge t_n \end{cases}$$
(2-34)

图 2-18 给出了典型的自由回转运动中的主要操纵性参数,进行相应的数值模拟, 需要预报出回转圈的特征尺度,之前求解器中已经实现了这部分功能。但是当前的控 制器只是适用于静水工况的数值模拟,而本博士论文中的一大特色是将自航船舶的 操纵运动数值模拟从静水扩展到波浪工况,这其中就会遇到自航船舶操纵运动过程 中同遭遇波浪浪向的问题,如自航船舶在波浪中做自由回转运动,初始状态下是迎浪 工况,如果背景网格跟随船体做平面的运动,则船体跟背景网格之间就没有相对运 动,从而导致造波区域仍然跟随船旋转,在船艏转过 180°以后必然导致船体周围没 有波浪传播过来。因此,针对这种问题,对船体网格和背景网格的运动关系进行了优 化改造,即使得背景网格只是跟随船体进行横荡和纵荡的运动,关闭其与船体间的摇 动联系,从而可以使得船艏出现大幅度的偏转以后,造波区的波浪仍然可以正常传播

2.5 本章小结

本章节介绍了数值研究所采用的基本数值方法以及在课题组自主开发的船舶与 海洋工程水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 基础上,针对船舶操纵运动研究所开发 和完善的相关模块,包括重叠网格功能、数值造波方法、多级物体运动和船舶操纵运 动控制器等。

基本数值方法中详细介绍了流体控制方程、自由面捕捉 VOF 方法、速度压力解 耦算法和湍流模型。控制方程采用基于雷诺平均假设的 RANS 方程,数值求解中采 用有限体积法进行空间离散,自由面捕捉采用带有人工压缩项的 VOF 方法,速度压 力解耦算法介绍了针对稳态问题的 SIMPLE 算法,针对瞬态问题的 PISO 算法以及两 者混合的 PIMPLE 算法,湍流模型主要介绍了本文中主要使用的 SST *k* – *ω*模型,以 及数值计算中所采用的壁面函数。

在数值造波部分,首先介绍了课题组自主开发的基于边界入口式的造波模块以 及消波方法。并且对基于松弛方式的区域造波工具包 waves2Foam 以及其与自主开发 的船舶水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 结合方式进行了详细介绍,为船桨舵相互 作用下自航船舶在复杂波浪工况下的船舶操纵运动直接数值模拟的实现提供了研究手段。

在重叠网格和操纵控制模块部分,简要介绍了重叠网格方法以及基于重叠网格 方法的求解器模块,然后详细介绍了针对自航船舶操纵运动问题所开发和完善的航 向保持控制器、Z形操纵运动和自由回转运动控制模块。

本章介绍的数值方法以及自主开发的船桨舵操纵运动控制模块,为下一步进行 船舶操纵运动的数值模拟奠定了坚实的基础。

第三章 船舶静水阻力计算验证和约束船模试验数值模拟

采用升级改造后的 naoe-FOAM-SJTU 求解器,进行船舶操纵性数值计算之前, 需要先对最基本的问题进行考核验证,保证该求解器在求解船舶水动力学问题上的 可靠性和精度,进而再进行船舶操纵运动以及自航船舶在静水和波浪环境下的操纵 运动数值预报。当前验证计算采用国际上通用的标准船型的标准算例,通过与试验数 据的对比,验证求解器所采用的数值方法的可靠性。

3.1 船舶静水阻力及流场计算验证

当前选用的验证算例是标准船型水面舰船 DTMB 5415 和大型集装箱船 KCS, 均是在静水流场中的阻力计算和流场分析。

3.1.1 DTMB 5415 流场计算验证分析

早期美国海军设计的水面舰艇 DTMB 5415 是目前用作 CFD 数值计算的最为广 泛的标准船型之一。该船实尺度垂线间长为 142 米,用作静水阻力试验的船模长度 为 5.72 米。DTMB 5415 的三维几何模型见图 3-1,船体的主尺度参数在表 3-1 列出。

这里进行了三个航速(Fr=0.28、0.35 以及 0.41)下的船舶静水阻力计算,采用 设计航速 Fr=0.28 工况作为标准工况进行验证分析,并且进行网格的不确定性分析, 而高航速下 Fr=0.35 和 Fr=0.41 工况则用作精细流场的数值模拟,包括不同切面处的 伴流情况以及自由面兴波等流场分析。



图3-1 DTMB 5415 船模的几何模型 Fig.3-1 Geometry model of DTMB 5415

第 49 页

本章以及后续章节中所有数值计算均在上海交通大学船舶与海洋工程计算水动 力学研究中心(CMHL)的高性能并行计算集群完成,集群服务器型号为 IBM nx360M4,计算节点主要参数如下,单个计算节点包括两个 CPU,型号为 Intel 至强 E5-2680V2,单颗 CPU 核心数为 10 个,主频 2.8GHz,内存 64GB。

主尺度	符号和单位	实尺度	模型尺度
缩尺比	λ	1	24.8
垂线间长	$L_{pp}\left(\mathbf{m}\right)$	141	5.72
最大船宽	$B_{WL}(\mathbf{m})$	19.06	0.768
吃水	<i>T</i> (m)	6.15	0.248
排水量	Δ (m ³)	84244	0.551
湿表面积	$S_W(\mathrm{m}^2)$	2967	4.824
方形系数	C_B	0.507	0.507
纵向浮心位置(船中向前为正)	LCB (% L_{pp})	-16.94	-0.683
重心高度(从基线起)	KG (m)	7.54	0.304
惯性半径	K_{yy}/L_{pp}	0.25	0.25

表3-1 DTMB 5415 模型的几何主尺度 Table 3-1 Main particulars of DTMB 5415

3.1.1.2 Fr=0.28

设计工况为 *Fr*=0.28, 对应船模航速为 *U*=2.097m/s, 雷诺数为 Re=1.19×10⁷。数 值计算针对于裸船体,分为两套网格,一个是船体周围网格,另外一个则是背景网格。数 值 计 算 采 用 的 网 格 是 由 OpenFOAM 自 带 的 前 处 理 工 具 blockMesh 和 SnappyHexMesh 生成,前者用作背景网格生成,后者则进行船体周围网格贴合、局 部加密以及添加边界层等步骤。

计算域的示意图如图 3-2 所示,其中船体周围网格范围为-0.2Lpp < x < 1.2Lpp,-0.2Lpp < y < 0.2Lpp,-0.1Lpp < z < 0.1Lpp,网格量为 68 万,背景网格范围是-1.5Lpp < x < 5.0Lpp,-1.5Lpp < y < 1.5Lpp,-1.0Lpp < z < 0.5Lpp,网格量为 121 万。船体网格周围边界条件设置为 overlap,从而实现两套网格之间的插值计算。总的计算网格为 189 万。两套网格在船体周围的局部分布如所示。其中蓝色表示船体网格,红色为背景网格,中间重叠部分为插值区域。

第 50 页



图3-2 计算域布置

Fig.3-2 Arrangement of computational domain



图3-3 船体周围网格分布

Fig.3-3 Grid distribution around ship hull

进行设计航速 *Fr*=0.28 的计算时,首先进行了该航速的网格不确定性分析。这里 采用的数值不确定性分析依据 ITTC 推荐的方式^[135]进行,用于收敛性验证的三套网 格数量从 0.64×10^{6} 到 3.67×10^{6} ,网格尺度缩放比例为 $\sqrt{2}$ 。为达到这一缩放效果,网格生成过程中,将背景网格的尺度按照这个比例在 *x*,*y*,*z* 三个方向上进行放缩,然 后采用 snappyHexMesh 工具局部加密时采用相对尺寸,如此便能保证生成的网格绝 大多数保证这种比例关系,但是由于纯非结构化网格自动生成过程中涉及到拓展边 界层等复杂流程,细节部分不一定完全达到该比例要求,但不会影响整体的网格不确

定性分析。为减少不确定性因素,网格不确定性分析的计算当中固定船舶的运动姿态。根据模型试验的测量结果^[136],调整船舶的姿态如下,升沉值为向下移动1.83×10⁻³L_{pp},纵倾值旋转-0.108°。这里升沉的定义为向上为正,纵倾角的定义为尾倾为正。

网格不确定性分析的主要验证对象是无因次化的阻力系数,包括总阻力系数 C_r , 压阻力系数 C_p 和粘性阻力系数 C_v ,其定义如下:

$$\begin{bmatrix} C_T \\ C_V \\ C_P \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{R_T}{0.5\rho U_0^2 T L_{pp}} \\ \frac{R_V}{0.5\rho U_0^2 T L_{pp}} \\ \frac{R_P}{0.5\rho U_0^2 T L_{pp}^2} \end{vmatrix}$$
(3-1)

其中, R_{T} 为船模受到的总阻力, R_{p} 为船模受到的压阻力, 即受到的法向力的积分, R_{v} 为船模受到的粘性阻力, 也就是受到的切向力的积分; ρ 为水的密度; U_{0} 为船舶的航行速度; T为船模吃水, L_{m} 为船舶的垂线间长。

根据 ITTC 对 CFD 数值计算的验证和确认分析(V&V)指导意见,网格不确定 性分析中判别达到何种收敛形式是采用收敛参数 *R_g*,其值的大小由不同密度网格解 (一般至少包括三种密度的网格,粗网格、中等密度网格和密网格)*S_i*来确定,定义 如下:

$$R_G = \frac{S_2 - S_1}{S_3 - S_2} \tag{3-2}$$

其中,下标 S_i ,i=1,2,3代表密网格、中等密度网格和粗网格的结果。不同的 R_G 取值对应于不同的收敛形式:

(i)
$$0 < R_G < 1$$
 Monotonic convergence(ii) $R_G < 0$ Oscillatory convergence(3-3)(iii) $R_G > 1$ Divergence

对于第一种情况,为一致性收敛,一般采用 Richardson 外插法 (RE)^[137]来评估 网格不确定性 U_{g} ;对于第二种振荡收敛的形式,网格的不确定性是通过振荡的最大 值 S_{U} 和最小值之 S_{L} 差的平均值,即:

$$U_G = 1/2(S_U - S_L)$$
(3-4)

第 52 页

网格	符号	网格量	C_p	C_{v}	C_t	C_t 误差
试验值					1.706e-2	
细网格	S 1	3.67M	0.507e-2	1.171e-2	1.678e-2	-1.66%
中等密 度网格	S2	1.87M	0.499e-2	1.162e-2	1.661e-2	-2.64%
粗网格	S3	0.64M	0.473e-2	1.124e-2	1.597e-2	-6.39%
R_G			0.307	0.237	0.265	
Р			3.4088	4.1559	3.834	
GCI ₁₂			0.87%	0.31%	0.45%	
GCI ₂₃			2.88%	1.27%	1.74%	
收敛形 式			一致收敛	一致收敛	一致收敛	

表3-2 DTMB 5415 在设计航速下的的网格不确定性分析 Table 3-2 Uncertainty analysis for DTMB 5415 at *Fr*=0.28

而第三种情况下,证明没有达到收敛,因此也就无所谓网格不确定性了。不同网格的阻力参数见表 3-2。从表中可以看到,随着网格的加密,数值预报的结果同试验值呈现一致收敛的趋势,因此,这里需要用到 RE 方法进行评估网格的不确定性。离散的阶数 *P* 由下式定义:

$$P = \frac{\ln(1/R_G)}{\ln(r)} \tag{3-5}$$

并且网格收敛指数(Grid Convergence Index, GCI)可以通过下式得到:

$$GCI_{ij} = F_s \frac{\left|e_{ij}\right|}{r^p - 1} \tag{3-6}$$

其中, *F_s* 是一个安全参数,对于采用三套或者以上的网格时 *F_s* =1.25。*e_{ij}* 表示 *S_i* 和 *S_j*之间的差别,网格收敛指数可以表征不同网格对数值结果的影响,小的 GCI 值表 示数值结果对网格的敏感度低。从表 3-2 种可以看出,所有的阻力系数都呈现一致收敛,其中总阻力系数的 *GCI*₁₂ (细网格和中等密度网格间的差别)只有 0.45%,并且 *GCI*₂₃ 均大于前者,说明达到中等网格密度后,数值预报结果受网格的变化影响较小。

图 3-4 给出了 DTMB 5415 船模在航速为 Fr=0.28 工况下的自由面兴波波形以及 同试验测量的对比。试验中测量选取的范围较小,因此,可比较的兴波区域只有船侧 0.4 个船长以及船后约 0.75 个船长的范围内。不过在这有限的比较范围内,仍然可以

看到数值计算捕捉到的自由面兴波同试验值吻合良好。不论是船体兴波的波幅、散波的波形,还是横波的波长方面,数值预报结果和试验的结果相吻合。同时,从 CFD 的计算结果来看,数值计算得到的自由面存在数值耗散,但耗散较小,兴波波形可以 很清晰得捕捉到。随着船后距离和横向距离的增加,兴波波幅的同试验值相比出现小 幅度的衰减。



图3-4 DTMB 5415 在 Fr=0.28 航速下的自由面兴波对比

Fig.3-4 Comparison of wave pattern of DTMB 5415 at Fr=0.28



图 3-5 在 $x/L_{pp} = 0.935$ 剖面处伴流场的比较 Fig.3-5 Comparison of wake profile at $x/L_{pp} = 0.935$

除了自由面兴波波形分析,图 3-5 给出了在螺旋桨桨盘面处 x/L_{pp} = 0.935 的详细 伴流场信息,并且同试验值进行了对比。从图中可以看出,当前数值预报得到的船尾 伴流整体分布形式跟试验结果相似,但是数值结果得到的边界层厚度偏大。这种情况 与数值计算中采用的 SST $k - \omega$ 湍流模型有关,在近壁面处采用的是对逆压梯度和流动分离处理性能更好的 $k - \omega$ 模型,但是基于 RANS 方法构造的湍流模型,因其本身简化处理,导致不能够精确的捕捉详细的流场信息,数值预报的涡粘度偏大,从而导致数值预报得到的边界层较厚。不过整体上 RANS 方法结合 VOF 方程和 SST $k - \omega$ 湍流能够精确的预报处船体的阻力特性以及兴波分布,同时预报的尾部伴流趋势同试验一致。

为了更深入的研究 DTMB 5415 的粘性流场,这里对高航速下的船舶周围流场和 水动力性能进行分析,包括 Fr=0.35 和 Fr=0.41 两个工况。

3.1.1.3 Fr=0.35

本节和下一节将主要针对于高航速下的船舶兴波特性和伴流进行详细分析和预 报,目前国际上已经有一系列的高速流动下的兴波破碎研究理论^[138-144]。这里选取 DTMB 5415 船模作为对象,主要是由于该船模拥有丰富的试验数据^[145,146]。不仅包 含阻力信息,同时还有广泛的流场信息可以用于对比验证当前数值方法在进行船舶 水动力性能预报方面的精度和可靠性。



(a) 粗网格

(b) 细网格

图3-6 Fr=0.35 工况下两套计算网格首部加密情况

Fig.3-6 Different grid distribution around ship bow area for computations at Fr=0.35

为了能够精确的捕捉到高航速下的船舶周围流场以及兴波和波浪破碎等特性, 这里在上一节数值计算采用的网格基础上,进行细化,从而研究哪种网格可以给出更 为可靠的流场预报结果。本文中采用了两套网格,分别为 1200 万和 1870 万两套大 规模的网格进行数值计算。根据试验工况,船体模型是固定浮态,根据已有试验数据 进行船体浮态的调整,然后再进行直线拖航试验。因此,数值计算中根据对称特性采用半船计算域进行,所采用的两套网格首部的局部网格分布见图 3-6。

计算中,船模航速为2.621m/s,初始浮态为升沉量-0.0032Lpp,纵倾值为0.069°。 其中较粗的网格在船首兴波区域没有进行加密,而细网格则在该区域进行了多一级 的分裂。此外,根据已有的船舶兴波破碎问题研究,高航速船舶兴波破碎同自由面的 表面张力以及湍流参数有强烈的联系,因此本文将所取的相关物理参数以及同试验 值的对比列在表 3-3 中。

表3-3 试验和数值计具甲的物理参数取位	值
----------------------	---

参数	标识和单位	试验值	计算值	实尺度值
水密度	ρ (kg / m^3)	998.5 ^a	998.5	1030 ^a
运动粘度	$v(m^2/s)$	1.09×10^{-6}	1.09×10^{-6}	1.17×10^{-6}
表面张力	$\sigma(N/m)$	0.0734	0.0734	0.0734
重力加速度	$g(m/s^2)$	9.8033ª	9.81	9.806*

Table 3-3 Physical quantities in experiment and simulation

根据上述计算参数以及两套不同网格计算得到的船舶总阻力以及同试验值的对 比见表 3-4。从表中可以看出,两套网格计算得到的船体总阻力值基本一致,同时, 与试验值的误差也均在 3%左右。因此,可以说明在船体静水阻力预报中,超过一千 万网格以后基本上的预报精度就达到很高精度了,这同 2015 年东京船舶水动力学 CFD 国际会议上总结的国际范围内各家单位不同数值方法预报的船舶静水阻力总体 水平一致。

表3-4 Fr=0.35 工况下总阻力预报结果试验值的对比

	-		
算例类型	总网格量 (百万)	总阻力值 (N)	误差 (%)
细网格	18.7	78.33	-2.86
粗网格	12.4	78.15	-3.09
试验值[136]		80.64	

Table 3-4 Total resistance comparison at *Fr*=0.35

两套不同网格计算得到的自由面兴波,尤其是首部的兴波形态见图 3-7。从图中 可以看出,细网格计算得到的自由面首部波形同粗网格结果有明显差别,细网格中可 以捕捉到试验中观测到的由于首部波浪破碎导致的自由面变形(文献中称作 Scar)。 因此,可以看出,在同样的阻力预报精度下,更细的网格可以给出更为细致的流场变 化, 流场的模拟精度也更高。



图3-7 不同网格预报的船体首部兴波波形 Fig.3-7 Ship bow waves with different grids

图 3-8 给出了在细网格工况下计算的船首和船尾兴波,从图中可以清晰的看到 首部的波浪破碎现象,同时由于波浪破碎导致的 Scar 也可以捕捉到,而从尾部兴波 也可以看出明显的波浪破碎现象,为了验证这种现象的准确性,图 3-9 给出了试验观 测的图片以及计算得到的船首破波 Scar 现象。



(a) 首部兴波

(b) 尾部兴波

图3-8 Fr=0.35 工况下的船舶首尾兴波

Fig.3-8 Ship bow and stern waves at Fr=0.35

第 57 页





从图 3-9 中可以看出,首部破波产生的具体类型为卷波(Plunger type),其中红 色虚线为由于卷波产生的 Scar,即在卷波尖部由于重力原因向下同自由面接触导致 的变形。数值预报的这一现象同船模试验中观测到的现象保持一致,因此,后面对于 更高航速 Fr=0.41 工况同样采用这套网格。

此外,除了自由面,本文还对详细的船体伴流场进行了分析,如图 3-10 所示, 左侧一列为当前数值预报结果,右侧为对应的试验测量值。该处截面位于船首兴波区 域,从图中可以看出,首部出现的显著的波浪破碎现象(卷波形式)。试验测量时的 区域范围较小,如图中右侧所示,仅有一个小的范围,但是从可以对比的区域看出, 数值预报的三个方向的速度分量同试验测量结果吻合良好,由于试验测量的伴流场 中没有自由面信息,因此对比只能针对于速度分量。



图 3-10 截面 $x/L_{pp} = 0.15$ 处不同速度分量分布同试验测量对比(左侧数值结果,右侧试验值) Fig.3-10 Velocity components at $x/L_{pp} = 0.15$ (left: CFD results, right: experiment measurement^[145])

同时,本文还对船体肩部兴波区域的伴流场进行了详细地分析,如图 3-11 所示, 截面位于 x/L_{pp} = 0.40,从试验测量结果和数值计算结果都可以看出,在肩部兴波处, 呈现出跟首部完全不同形式的破波类型,这里波形为溢波(Spiller type)。船体在此 截面处的三个方向的速度分布跟己有的试验测量一致。以上的两个截面,首部和肩部 位置均给出了非常高精度的流场预报,这也证实了现在使用的数值方法能够较为真 实的还原船体周围流场,也为接下来数值模拟船舶操纵运动过程中的船舶水动力性 能奠定了很好的基础。



图3-11 截面 $x/L_{pp} = 0.40$ 处不同速度分量分布同试验测量对比(左侧为数值结果, 右侧为试验值) Fig.3-11 Velocity components at $x/L_{pp} = 0.40$ (left: CFD results, right: experiment measurement^[145])

3.1.1.4 Fr=0.41

同上节内容,这部分将对更高航速, Fr=0.41 工况下的船舶兴波问题进行数值研究,计算中采用上节中讨论的细网格,这里同样给出了数值预报的船体总阻力同试验 值的对比,见表 3-5。从表中可以看出,在当前的计算参数下,数值预报的船体总阻 力同试验值吻合较好,数值预报的误差在 1.59%。

Table 3-5 Comparison of total resistance at <i>Fr</i> =0.41				
工况	网格量 (百万)	总阻力 (N)	误差 (%)	
数值计算结果	18.7	155.02	1.59	
试验值[145]		152.59		

表3-5 Fr=0.41 工况下船体总阻力同试验结果对比

(a) 首部兴波

(b) 尾部兴波

图3-12 Fr=0.41 工况下的船舶首尾兴波

Fig.3-12 Ship bow and stern waves at Fr=0.41



图3-13 船舶首部波浪破碎和 Scar 现象

Fig.3-13 Ship bow wave breaking and induced scars





Fig.3-14 Axial vorticity at different cross sections

图 3-12 给出了数值计算得到的船首和船尾兴波,从图中可以清晰的看到首部的 波浪破碎现象,同时由于波浪破碎导致的 Scar 也可以捕捉到,而从尾部兴波同 *Fr*=0.35 工况时可以看出明显的不同,同时,高航速下的船体兴波波幅明显大于之前的低航速的工况。此外,本文同时还给出了首部兴波波浪破碎的不同截面处的形式,见图 3-13,跟上一节中 Fr=0.35 工况不同的是,在高航速下船体首部兴波出现了更为明显的卷波破碎现象,在前面几个切面以后,就出现了多个气穴,即出现多次的卷波同自由面的结合,将气体卷入其中,造成大范围的自由面变形(Scar)。



图3-15 首部和肩部兴波截面处三向速度分量分布(左侧: $x/L_{pp} = 0.15$, 右侧: $x/L_{pp} = 0.40$) Fig.3-15 Velocity components at cross sections of ship bow wave and shoulder wave (left: $x/L_{pp} = 0.15$ right: $x/L_{pp} = 0.40$)

由于自由面的变化跟粘性和表面张力存在 $\alpha = \frac{S_w}{S_0}$ 紧密的联系,这里给出了首部 兴波不同截面处的涡量场分布,见图 3-14,从而来解释自由面变形同涡量场的联系。
从图中可以看出,在截面 x/L_{pp} =0.1处,首部兴波发生了翻卷,并且当卷波的顶部在 重力作用下再次打到自由面处时,会在波浪包裹的气穴处产生一个很大的负向的轴 向的涡,并且在 x/L_{pp} =0.15 处会产生第二次的波浪翻卷,并且在两个气穴中间产生 一个较大的正向的涡,在更为远处的截面,如 x/L_{pp} =0.225 处,第三次的波浪翻卷出 现,同时也会伴随着产生对应较大的负向涡。因此,较大的涡的产生伴随着波浪的翻 卷,两者之间存在紧密的联系,同时也解释了自由面处的变形产生的原因。

除了自由面以及涡量场地分析,本文还给出了在船首兴波和肩部兴波截面处的 伴流场信息,见图 3-15。从图中可以明显地看出,在 *Fr*=0.41 工况下,船首的波浪翻 卷现象非常明显,同时表现出卷波的破波形式,会出现两个气穴,而对于肩部兴波截 面处的流场可以看出,*Fr*=0.41 工况时,肩部兴波第一个波峰距离船体较近,同时两 个波峰之间有较大的波谷范围,从两个波峰的形式也可以清楚的看出这种航速下船 舶的肩部兴波呈现一种溢波的形式。此外,与 Fr=0.35 工况相比,两个截面处的三个 方向的速度分布趋势基本一致,但是高航速下的伴流影响的范围更大。

3.1.2 KCS 流场计算验证分析

大型集装箱船 KCS(KRISO Container Ship)是由韩国 KRISO(Koera Research Institude of Ships and Ocean Engineering)公司设计。并且它跟 DTMB 5415 船型一样, 被广泛的用于 CFD 的数值计算, 该模型在 2000 年和 2010 年两届哥德堡船舶水动力 学 CFD 国际研讨会^[147,148]以及 2005 年^[149]和 2015 年的东京船舶水动力学 CFD 国际 研讨会上, 被用于 CFD 考核验证的标准船型。KCS 的三维几何模型见图 3-16, 船体 的主要参数列于表 3-6。跟上节中采用的 DTMB 5415 模型相比, KCS 船模首部和尾 部均有较大的线型变化。此外, 由于 KCS 属于肥大型的集装箱船型, 因此阻力成分 中粘性部分占主导, 同时, 在静水阻力试验中, 在模型尾部安装了舵, 因此在实际计 算用网格生成过程中, 也考虑了舵的存在。

本文中 KCS 静水阻力的计算参照东京 2015 年船舶水动力学 CFD 国际研讨会上的标准算例,计算工况列于表 3-7 当中。一共六个航速,对应傅汝德数从 0.108 到 0.282,计算过程当中考虑船舶的姿态变化(升沉和纵倾)。



图3-16 KCS 船模的三维几何形状

Fig.3-16 3D geometry of KCS ship model

表3-6 KCS 船模的主尺度参数

Table 3-6 Main particulars of KCS ship model

主尺度	符号和单位	实尺度	模型值
缩尺比	λ	1	31.6
垂线间长	$L_{pp}(\mathbf{m})$	230.0	7.2786
水线长	$L_{WL}(\mathbf{m})$	232.5	7.3577
最大船宽	$B_{WL}(\mathbf{m})$	32.2	1.0190
型深	<i>D</i> (m)	19.0	0.6013
吃水	<i>T</i> (m)	10.8	0.3418
排水量	Δ (m ³)	52030	1.6490
湿表面积	$S_w (m^2)$	9424	9.4379
方形系数	$C_{_B}$	0.6505	0.6505
中横剖面系数	C_{M}	0.9849	0.9849
纵向浮心位置(船中向前为正)	$LCB(\%L_{pp})$	-1.48	-1.48
惯性半径	$K_{_{yy}}$ / $L_{_{pp}}$	0.25	0.25

表3-7 KCS 模型的计算工况

Table 3-7	Case condit	ions for	model	KCS
		10110 101		

工况号	1	2	3	4	5	6
航速 (U, m/s)	0.915	1.281	1.647	1.922	2.195	2.379
傅氏数 (Fr)	0.108	0.152	0.195	0.227	0.260	0.282
雷诺数 (Re)	6.66×10 ⁶	9.32×10 ⁶	1.20×10^{7}	1.40×10^{7}	1.60×10 ⁷	1.73×10^{7}

用于 KCS 的计算域的分布如图 3-17 所示,计算中考虑到只有升沉和纵倾的自由度,因此采用半船计算域,船体离入口一个船长,距离侧面边界 1.5 个船长,距离出

口 3 个船长。计算网格同样采用 SnappyHexMesh 生成。这里根据网格不确定性分析 的方法(见3.1.1.2节),采用粗中细三套网格进行数值计算,见图3-18。





Fig.3-17 Arrangement of computational domain



(b) 中等密度网格

第三章 船舶静水阻力计算验证和约束船模试验数值模拟



图3-18 KCS 船模的用于网格不确定性分析的计算网格

Fig.3-18 Computational mesh of KCS model for grid uncertainty analysis

根据试验提供的数据,这里不仅进行了网格的不确定性分析,同时还进行了整体数值的验证和确认分析(Verification and Validation, V&V)^[135]。之前 DTMB 5415 静水阻力计算中进行了网格的不确定性分析,这里同时在最细的网格基础上求解了迭代不确定性U₁,从而可以获取数值的不确定性参数U_{sw},其定义如下:

$$U_{SN} = \sqrt{U_G^2 + U_I^2}$$
(3-7)

然后,整体的验证不确定性参数U_v可以表示为:

$$U_{SN} = \sqrt{U_{SN}^2 + U_D^2}$$
(3-8)

其中, U, 表示试验数据的不确定性, 由试验给出。

表 3-8 列出了不同阻力成分的验证和确认分析结果,同时表中给出了当前数值 结果同试验值的误差 *E*。并且不同航速下的总阻力不确定性分析结果见图 3-19,从 表和图中可以看出,在较低的航速时,数值预报的结果较差(最大误差在 8%),同 时总体的不确定性都维持在 3%到 4%。计算得到的 KCS 船模在不同航速下的升沉和 纵倾结果与测量值的比较见图 3-20。同时也给出了升沉值和纵倾值的验证和确认分 析,从图中可以看出,数值预报结果总体上和试验值相近。但是升沉值有相对较大的 误差,这是由于升沉量绝对值较小,并且在低航速下收敛较为困难。对于纵倾而言, 计算值结果同试验值更为吻合,并且在几个航速下,都在试验的误差范围之内。总体 来看,当前的数值手段可以较为精确的捕捉不同航速下的船舶水动力特性,包括阻力 和船舶运动。

表3-8 不同阻力成分的验证和确认分析

Table 3-8 Verification and Validation for co	omponents of resistance
--	-------------------------

Fr	阻力参数	<i>E%</i>	r _G	$\varepsilon_{21}\%S_1$	$U_I \% S_1$	$U_G\%S_1$	$U_{SN} \% S_1$	$U_D\%D$	$U_V\%$
	$C_T \times 10^3$	-8.456	1.4	0.097	0.078	4.032	4.033	1.0	4.155
0.108	$C_F \times 10^3$	/	1.4	0.117	0.080	3.080	3.081	/	/
	$C_{PV}\!\!\times\!\!10^3$	/	1.4	0.000	0.004	8.743	8.743	/	/
	$C_T \times 10^3$	-3.323	1.4	0.133	0.048	4.199	4.200	1.0	4.318
0.152	$C_F \times 10^3$	/	1.4	0.185	0.056	2.360	2.361	/	/
	$C_{PV}\!\!\times\!\!10^3$	/	1.4	0.192	0.005	15.643	15.643	/	/
	$C_T \times 10^3$	4.547	1.4	0.543	0.043	3.954	3.954	1.0	4.079
0.195	$C_F \times 10^3$	/	1.4	0.661	0.037	3.090	3.090	/	/
	$C_{PV}\!\!\times\!\!10^3$	/	1.4	0.258	0.002	9.817	9.817	/	/
	$C_T \times 10^3$	4.586	1.4	0.363	0.054	4.202	4.202	1.0	4.319
0.227	$C_{\rm F} \times 10^3$	/	1.4	0.365	0.022	4.311	4.311	/	/
	$C_{PV}\!\!\times\!\!10^3$	/	1.4	0.350	0.001	3.678	3.678	/	/
	$C_T \times 10^3$	-0.593	1.4	0.214	0.045	3.509	3.510	1.0	3.650
0.260	$C_{\rm F} \times 10^3$	/	1.4	0.220	0.035	3.101	3.101	/	/
	$C_{PV}\!\!\times\!\!10^3$	/	1.4	0.198	0.009	4.613	4.613	/	/
	$C_T \times 10^3$	1.199	1.4	0.112	0.069	2.991	2.992	1.0	3.154
0.282	$C_{\rm F} \times 10^3$	/	1.4	0.111	0.068	2.804	2.805	/	/
	$C_{PV}{\times}10^3$	/	1.4	0.115	0.025	3.282	3.282	/	/



图3-19 KCS 船模总阻力系数的验证和确认分析

Fig.3-19 Verification and validation of total resistance coefficient C_T



图3-20 KCS 船模的升沉和纵倾的验证和确认分析

Fig.3-20 Verification and validation of sinkage and trim of KCS ship

图 3-21 给出了 KCS 带舵模型在 Fr=0.26 航速下的自由面兴波波形同试验测量结 果的对比。从图中可以看出,当前所采用的 RANS 方法求解流场,以及带有人工压 缩项的 VOF 方法可以精确捕捉肥大船型的兴波特性。同时,远场的自由面兴波结果 也没有发生较为明显的兴波耗散现象,说明了当前计算方法在求解船舶水动力学问 题中的可靠性。



图 3-21 KCS 在 Fr=0.26 航速下的自由面兴波波形同试验对比 Fig.3-21 Comparison of wave pattern of KCS at Fr=0.26



图3-22 Fr=0.26 航速下的船体表面波高的比较 Fig.3-22 Comparison of wave profiles of KCS at Fr=0.26

图 3-22 给出了 Fr=0.26 航速下船体表面波高分布和试验值的对比。从图中可以 看出,数值计算结果可以精确的捕捉到船体周围兴波的变化趋势,同时对于船首的兴 波波峰可以高精度的捕捉到,船中的波谷等信息同样跟试验测量值吻合较好,但是尾 部的兴波波高数值预报结果大于试验测量值,这部分的区别同样可以从图 3-21 中看 出。

3.2 约束船模试验数值模拟计算模型和工况

从本章节开始,论文将着重对基于重叠网格技术的船舶操纵运动研究进行介绍 和分析,本章主要针对裸船体的约束船模试验进行数值模拟,该问题可以验证重叠网 格方法在数值模拟大幅度船体操纵运动工况下的可靠性和精度。同时,由于只是考虑 了裸船体模型,能够简化问题的复杂度,单纯的研究基于重叠网格技术进行船舶操纵 运动数值模拟的适用性,从而为后面的带螺旋桨带舵情况下自由自航船舶的操纵运 动数值研究奠定基础。

本节中所采用的计算模型为国际操纵性会议 SIMMAN 2014 上的标准船模 DTMB 5415,该会议上提供了此船型约束船模试验的大量数据,方便进行 CFD 数值 计算结果的验证工作。这里采用的模型为 DTMB 5415 更小的操纵性船模(IIHR 水 池模型试验),缩尺比为 46.588,主尺度见表 3-9。本文中对不同形式的约束船模试 验数值模拟采用的是同一种计算网格,即为 3.1.1 节中进行过网格收敛性分析的网格, 总网格量 189 万,重叠网格分布见图 3-23。



图3-23 约束船模试验数值模拟计算网格

Fig.3-23 Computational grid for simulations of captive model tests

计算中采用两套网格,蓝色部分表示船体周围网格,这部分网格跟随船体的不同 操纵运动而移动,同时嵌套在背景网格中去,从而实现船舶的大幅度约束船模试验的 数值模拟。

本章中所有数值计算均采用同一套网格,数值计算均在上海交通大学船舶与海 洋工程计算水动力学研究中心(CMHL)的高性能并行计算集群完成,单个算例分为 20个进程并行计算,计算时间步长选取为 0.001s,静态试验数值模拟的时间为 50s, 共花费 47个小时,共计 941个核机时;动态试验的数值模拟中时间步长为 0.0005s, 完成数值计算共花费 175个小时,共计 3504个核机时。

主尺度	符号和单位	实尺度	模型尺度
缩尺比	λ	1	46.588
垂线间长	$L_{pp}\left(\mathbf{m} ight)$	141	3.048
最大船宽	$B_{WL}(\mathbf{m})$	19.06	0.409
吃水	<i>T</i> (m)	6.15	0.132
排水量	Δ (m ³)	84244	0.0826
湿表面积	$S_W(\mathrm{m}^2)$	2967	TBD
方形系数	C_B	0.507	0.507
纵向浮心位置(船中向前为正)	LCB (% L_{pp})	-16.94	-0.0157
重心高度(从基线起)	KG (m)	7.54	0.120
惯性半径	K_{yy}/L_{pp}	0.25	0.255

表3-9 船体模型主尺度

Table 3-9 Main particulars for maneuvering ship model

本章针对该船型分别进行了静态和动态约束船模试验的数值模拟,为了分析约 束船模试验中的船舶操纵运动特性,将采用基于分离型的操纵性数学模型(MMG) 进行水动力导数的求解。

需要指出的是,本章中对水动力参数地分析,均采用的是无因次化的参数,利用船体的拖曳速度U,船模垂线间长 L_{pp} ,船体吃水T,水的密度 ρ ,重力加速度g, 以及动力粘度系数 μ 进行无因次化。表征得到的傅汝德数为 $Fr = U / \sqrt{gL_{pp}}$,雷诺数为 $Re = \rho U L_{pp} / \mu$,其它的无因次化参数定义为:

$$\begin{bmatrix} v'\\ \dot{v}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v}{U}\\ \frac{\dot{v}}{U} \end{bmatrix}$$
(3-9)

第 72 页

$$\begin{bmatrix} r'\\ \dot{r}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{rL_{pp}}{U}\\ r\left(\frac{L_{pp}}{U}\right)^2 \end{bmatrix}$$
(3-10)
$$\begin{bmatrix} X'\\ Y'\\ N' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X}{0.5\rho U^2 T L_{pp}}\\ \frac{Y}{0.5\rho U^2 T L_{pp}}\\ \frac{N}{0.5\rho U^2 T L_{pp}^2} \end{bmatrix}$$

采用的船舶操纵性数学模型形式如下:

$$\begin{bmatrix} X'\\Y'\\N' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_* + X_{vv}v'^2 + X_{rr}r'^2 + X_{vr}v'r'\\Y_{v}\dot{v}' + Y_{r}\dot{r}' + Y_{v}v' + Y_{v|v|}v'|v'| + Y_{r}r' + Y_{r|r|}r'|r'| + Y_{v|v|}v'|r' + Y_{v|r|}v'|r'|\\N_{v}\dot{v}' + N_{r}\dot{r}' + N_{v}v' + N_{v|v|}v'|v'| + N_{r}r' + N_{r|r|}r'|r'| + N_{|v|r}|v'|r' + N_{v|r|}v'|r'| \end{bmatrix}$$
(3-12)

3.3 静态斜拖试验数值模拟

静态斜拖试验(Oblique Towing Test, Static Drift Test)是约束船模试验中最为简 单的一种,试验过程中,船体模型以一定的漂角下,进行拖曳试验,试验过程中的升 沉和纵倾自由。斜拖试验可以测定出船体在不同漂角下的侧向力和转首力矩,从而根 据操纵性数学模型给出对应的水动力导数值。

根据静态斜拖试验的工况设定,船体没有转动角速度r,因此公式(3-12)中船体 受到的阻力,侧向力以及转首力矩系数可以简化为:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ N' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_* + X_{vv} v'^2 \\ Y_v v' + Y_{v|v|} v' |v'| \\ N_v v' + N_{v|v|} v' |v'| \end{bmatrix}$$
(3-13)

其中, X_{*}代表没有漂角工况下(即传统的直线拖航)的船体阻力。根据式(3-13)就可以推导出斜航工况下的水动力导数值 X_w, Y_v, Y_v, N_v, N_v, N_v, N_v, N

本节针对四种不同漂角工况,0°、6°、10°和 20°进行了数值模拟,具体计 算工况见表 3-10。图 3-24 给出了不同漂角时的无因次阻力、侧向力和转首力矩,以 及同试验值的对比。从图中可以看出,当前数值预报的船体水动力参数同试验值呈现 出了总体的一致性,并且吻合较好。随着漂角的增加,数值误差逐渐增大,其中,船 体阻力系数的误差范围在 1.28%到 4.35%之间,而侧向力系数的预报误差则从 5.66% 到 10.55%,转首力矩的误差较前两者更大,在 0°到 10°漂角时最大误差达到 11%, 在最大漂角时误差更大。根据式(3-13),并且采用最小二乘法对数据进行回归,得到 了不同的水动力导数值,见表 3-11。从表中可以看出,所有的数值求解得到的水动 力导数值均小于试验值。其中,线性水动力导数值预报误差较小,误差在 3%到 6%, 而非线性水动力导数的误差则更大,最大达到了 9.95%。不过整体的预报精度都维持 在 10%以内,证实了当前的数值手段可以较为精确的预报出船舶在静水斜拖工况下 的主要水动力特性。



图3-24 不同漂角下的阻力、侧向力和转首力矩系数同试验值对比 Fig.3-24 Forces and moment coefficients for static drift at different drift angles

表3-10 静态斜拖试验计算工况

Table 3-10 Conditions for static drift simulations

算例	航速(m/s)	漂角(度)
静态斜拖试验	1.531	0, 6, 10, 20

表3-11 静态斜拖试验中水动力导数值与试验值对比

Table 3-11 Comparison of hydrodynamic derivatives from static drift tests

水动力导数	当前数值结果	试验值*	误差
X '	0.157	0.162	3.09%
Y_{ν}'	0.187	0.197	5.08%
$Y_{\nu \nu }'$	0.896	0.949	5.58%
N_{v}^{\prime}	0.136	0.145	6.21%
$N_{_{arphi arphi }}'$	0.190	0.211	9.95%

CFD 方法相对于试验方法的主要优势表现在其不仅可以预报出船舶的水动力特性,而且可以给出不同工况下的船体周围详细的流场分布,可以进行船舶相关流动问题以及水动力载荷地分析研究。图 3-25 中给出了在不同漂角工况下的自由面兴波对比。自由面兴波波形可以从一定程度上说明船体静水阻力的特性,比如兴波波高和兴波波长等。从图 3-25 中可以看出,随着漂角的增加,兴波波形的不对称性越来越明显,此外,漂角越大,首部兴波波峰(右舷)范围扩大,且峰值变大,而左舷方向的绕射波峰值也明显增加,由此加剧了船体两侧的压力分布的差异,从而导致了船体侧向力和转首力矩的产生,以及随着漂角增加船体侧向力和转首力矩的增长。



第 75 页









图3-26 不同漂角下的尾部伴流分布



图 3-26 给出了不同漂角工况下的船体尾部伴流场分布,该处截面为螺旋桨桨盘 面处 x/L_{pp} = 0.935,尾部伴流场的详细分布可以反映出船体周围流动随漂角变化而产 生的流动差异,并且分析对周围流动产生影响的范围。从图中可以清晰地看出,在 0 漂角工况下,船体伴流场基本呈现对称分布,这也是直线拖航工况下船体侧向力和转 首力矩基本为零的原因。而随着漂角的增加,伴流的分布呈现出非常明显的不对称 性,在漂角为 6°的工况下仍然较为明显,这主要是由于在带漂角工况下,船体并非 呈现为流线型,船首对流动的阻碍使得流动在此处产生明显的扰动,同时伴随着强烈 的泻涡现象,从而影响了船体周围的伴流分布。当漂角增加时,这种分离和泻涡现象 更加明显,从而导致影响的伴流场范围增加。

同时,由于速度压力的对应关系,上述的流动分布反映出了船体周围的压力分 布,从另外一个侧面也能充分的说明漂角对船体周围压力分布的影响,从而解释了静 态斜拖试验中船体水动力特性。

3.4 动态约束船模试验数值模拟

所谓动态约束船模试验,是相对于静态斜拖试验来说,船体模型不再固定水平面的运动,而是给定不同自由度方向上的振荡运动,研究运动船体下的水动力特性。根据不同的运动形式,动态约束船模试验可以分为纯横荡试验、纯摇首试验等。本博士论文针对标准船型 DTMB 5415,进行了设计航速 Fr=0.28 工况下的纯横荡试验和纯摇首试验的数值模拟。

本文中的动态约束船模试验模拟工况参照国际船舶操纵性会议 SIMMAN 2014 中提供的标准算例设置进行。计算网格同静态斜拖试验工况,同样采用船体和背景两 套网格,船体周围网格跟随船体做特定的操纵运动,计算中除了船体的平面振荡运 动,为了跟试验中的设置一样,升沉和纵倾的自由度同样放开。

3.4.1 纯横荡试验数值模拟

纯横荡试验,顾名思义,就是船体在横荡方向上进行周期振荡。本文根据 SIMMAN 2014 会议的标准算例,对三种不同振幅的纯横荡运动进行数值模拟。具体 的数值模拟工况见表 3-12。从表中可以看出,最大的振荡幅度基本接近于最大的船 宽尺度,因此属于大幅度的船舶操纵运动,采用重叠网格方法处理运动问题可以避免 由于网格变形导致的数值误差,从而得到较为精确的数值结果。 而采用操纵性数学模型进行纯横荡试验的水动力导数求解可以遵循以下推导。 纯横荡试验中没有侧向速度v,因此公式(3-12)可以简化为:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ N' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_* + X_{vv}v'^2 \\ Y_v\dot{v}' + Y_vv' + Y_{v|v|}v'|v'| \\ N_v\dot{v}' + N_vv' + N_{v|v|}v'|v'| \end{bmatrix}$$
(3-14)

而纯横荡的运动形式为:

$$\begin{cases} Y = -a\sin\omega t \\ v = \dot{Y} = -a\omega\cos\omega t \\ \dot{v} = \ddot{Y} = a\omega^2\sin\omega t \end{cases}$$
(3-15)

将式(3-15)中_v和_v的无因次化参数代入式(3-14)中,并且采用积分的形式分离出 水动力导数值可以得到以下形式:

$$\begin{cases} Y_{in} = \frac{1}{4} \left(\int_{0}^{\pi} Y' dwt - \int_{\pi}^{2\pi} Y' dwt \right) = Y_{v} \dot{v}' \\ N_{in} = \frac{1}{4} \left(\int_{0}^{\pi} N' dwt - \int_{\pi}^{2\pi} N' dwt \right) = N_{v} \dot{v}' \\ Y_{out} = \frac{1}{4} \left(\int_{0}^{\pi/2} Y' dwt - \int_{\pi/2}^{3\pi/2} Y' dwt + \int_{3\pi/2}^{2\pi} Y' dwt \right) = -Y_{v} v' - Y_{v|v|} v'^{2} \frac{\pi}{4} \\ N_{out} = \frac{1}{4} \left(\int_{0}^{\pi/2} N' dwt - \int_{\pi/2}^{3\pi/2} N' dwt + \int_{3\pi/2}^{2\pi} N' dwt \right) = -N_{v} v' - N_{v|v|} v'^{2} \frac{\pi}{4} \end{cases}$$
(3-16)

从上式可以看出,加速度水动力导数 Y_v 和 N_v 可以通过积分量 Y_{in} 和 N_{in} 来求得,而 侧向速度线性和非线性水动力导数 Y_v , Y_{vh} , N_v , N_{vh} 则可以通过积分形式的 Y_{out} 和 N_{out} 进 行最小二乘回归得到。

表3-12 动态纯横荡试验计算工况

算例编号	航速(m/s)	频率(Hz)	振幅 (m)
1	1.531	0.134	0.064
2	1.531	0.134	0.127
3	1.531	0.134	0.317

Table 3-12 Conditions for dynamic pure sway simulations





图 3-27 纯横荡试验中船体阻力、侧向力和转首力矩系数历时曲线 Fig.3-27 Time variations of force coefficients during pure sway test

表3-13	纯横荡试验中水动力导数值与试验值对比
$\chi CJ^{-1}J$	

Table 3-13 Comparisons of hydrodynamic derivatives during pure sway test

水动力导数值	数值预报结果	试验值	误差
$Y'_{\dot{v}}$	3.39e-2	3.75e-2	-9.82%
$N_{\dot{v}}'$	4.11e-3	4.71e-3	-12.6%
Y_{ν}'	4.81e-2	5.85e-2	-17.8%
$Y_{\nu u }'$	0.271	0.304	-10.6%
N_{ν}'	5.07e-2	5.35e-2	-5.27%
$N_{_{ u u }}{}'$	2.16e-2	2.69e-2	-19.6%

图 3-27 给出了三种不同振幅工况下的船体阻力、侧向力和转首力矩随时间的变 化曲线。从图中可以看出,一个横荡运动周期内,侧向力和转首力矩均呈现周期性的 变化,而船体阻力则呈现出更为高频的变化,尤其试验中的阻力值振荡频率较高,但 是数值预报的阻力均值同试验值吻合较好。侧向力和转首力矩的变化在不同振幅下 均能较高精度的预报出来,这也能验证当前基于重叠网格方法进行大幅度的船舶操 纵运动数值预报的可靠性。





(f) 2T



Fig.3-28 Wave patterns in one period for pure sway test

从表 3-13 中可以看出,目前基于重叠网格技术数值模拟预报得出的船舶操纵性 水动力导数值精度都在 20%以内。同时非线性水动力导数值的误差较大,比如 N_w' 的误差就达到了 19.6%。同时,数值预报结果均小于试验值。

图 3-28 给出了在一个横荡运动周期内的自由面兴波变化,从图中可以看出,随着船体的横荡运动,自由面波形呈现出周期性的变化,当船体向左舷方向移动过程中,左侧的兴波波形被挤压,首部和尾部兴波波幅均增大,即对应于侧向力指向右舷, 而船体向右舷移动过程中,变化趋势则正好相反。由于上述变化导致了如图 3-27 所示的周期性的水动力变化。

3.4.2 纯摇首试验数值模拟

船舶纯摇首试验是船舶的横荡和首摇两个自由度运动的叠加,其中船舶的横荡运动方程见式(3-15),首摇的运动方程如下:

$$\phi = -\frac{a\omega}{u}\cos\omega t$$

$$r = \dot{\phi} = \frac{a\omega^2}{u}\sin\omega t$$

$$\dot{r} = \ddot{\phi} = \frac{a\omega^3}{u}\cos\omega t$$
(3-17)

船舶纯摇首运动的实现是通过控制同频率条件下的横荡幅值和摇首幅值和两个运动的相位来达到船体运动过程中,在船体坐标系下每一时刻均没有侧向速度。纯摇 首运动下船体的受力平衡方程为:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ N' \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} X_* + X_{rr} r'^2 \\ Y_r \dot{r}' + Y_r r' + Y_{r|r|} r' |r'| \\ N_r \dot{r}' + N_r r' + N_{r|r|} r' |r'| \end{vmatrix}$$
(3-18)

将公式(3-17)带入到操纵性数学模型(3-18)中,并且采用以下的积分方式可以得到分离的水动力导数,如公式(3-19)所示。通过中间值 Y_{in} 和 N_{in} 可以得出加速度水动力导数值,通过 Y_{out} 和 N_{out} 可以得出线性水动力导数和二阶水动力导数值。

$$\begin{cases} Y_{in} = \frac{1}{4} \left(\int_{0}^{\pi/2} Y' dwt - \int_{\pi/2}^{3\pi/2} Y' dwt + \int_{3\pi/2}^{2\pi} Y' dwt \right) = (Y_{i} - mx_{G}) \frac{\dot{r}'}{4} \\ Y_{out} = \frac{1}{4} \left(\int_{0}^{\pi} Y' dwt - \int_{\pi}^{2\pi} Y' dwt \right) = (Y_{r} - mu)r' - Y_{r|r|}r'^{2}\frac{\pi}{4} \\ N_{in} = \frac{1}{4} \left(\int_{0}^{\pi/2} N' dwt - \int_{\pi/2}^{3\pi/2} N' dwt + \int_{3\pi/2}^{2\pi} N' dwt \right) = (N_{i} - I_{z})\dot{r}' \\ N_{out} = \frac{1}{4} \left(\int_{0}^{\pi} N' dwt - \int_{\pi}^{2\pi} N' dwt \right) = (N_{r} - mx_{G}u)r' + N_{r|r|}r'^{2}\frac{\pi}{4} \end{cases}$$
(3-19)

本论文中计算的工况根据 SIMMAN 2014 会议提供的标准算例,采用同样振动 频率下的三组匹配好的振幅的横荡和首摇运动,具体的计算工况见表 3-14。

不同振幅下的纯摇首运动数值模拟得出的船体阻力、侧向力和转首力矩历时曲 线如图 3-29 所示。其中,实线为当前数值计算的结果,带点的虚线为 SIMMAN2014 会议提供的模型试验测量数据。从图中的对比结果可以看出,船舶的阻力预报结果同 试验值在时间历程上有较大差别,CFD 计算结果更为平滑,而试验值有更为高频的 波动,但两者均值保持一致。这部分主要原因可能为进行动态船模试验过程中船舶的 航速变化导致。



第 83 页



图3-29 不同振幅纯摇首运动下船体阻力、侧向力和转首力矩历时曲线 Fig.3-29 Time variations of force coefficients during pure yaw test

表3-14 不同振幅下的纯摇首计算工况

Table 3-14 Conditions	s for pure yaw test
-----------------------	---------------------

算例编号	频率(Hz)	横荡幅值(m)	摇首幅值(°)
1	0.134	0.055	1.7
2	0.134	0.164	5.1
3	0.134	0.327	10.2

通过图中的历时曲线对比可以看出,除了阻力结果表现的不一致以外,数值计算 所得的船体侧向力和转首力矩变化趋势同试验测量值在时间历程上保持一致,并且 预报结果精度较高。此外,从图中还可以看出,船舶在振荡运动幅值增大以后,船体 受到的水动力预报精度反而更高,其主要原因如下,在运动幅度较小时,船体受到的 侧向力和转首力矩幅值较小,采用数值计算得到的绝对误差量级较小,但是相对误差 较大,主要原因可归结为数值误差,而在船体大幅度运动的情况下,船体的侧向力和 转首力矩均比较大,同时,流场变化更为剧烈,在这种情况下数值预报精度反而比较 高,这从另一个方面也说明通过重叠网格可以有效的解决大幅度船舶操纵运动情况 下由于网格质量下降而导致的计算精度下降问题。这也证实了当前采用的基于重叠 网格方法的 CFD 粘性流场数值模拟船舶纯摇首运动是有必要并且可行的。

水动力导数	计算值	试验值	误差	
$Y_{\dot{r}}'$	2.21e-3	2.26e-2	-2.26%	
$N_{\dot{r}}'$	2.89e-3	2.63e-3	9.61%	
Y_r'	7.66e-3	6.96e-3	9.98%	
$Y_{r r }'$	9.06e-3	7.21e-3	20.4%	
N_{r}^{\prime}	1.29e-2	1.36e-2	-5.41%	
$N_{r r }'$	5.61e-3	6.94e-3	19.1%	

表3-15 纯摇首运动水动力导数同试验值对比

Table 3-15 Comparison of hydrodynamic derivatives for pure yaw test

根据公式(3-19)进行水动力导数的回归,得出的纯摇首运动工况下船体无因次化 的水动力导数值和同试验值的对比如表 3-15 所示。试验测量和数值计算的水动力导 数值均采用最小二乘法回归得出,通过表 3-15 可以看出,通过回归得到的线性水动 力导数值误差都维持在 10%以内,而非线性水动力导数值误差较大,达到了 20%左 右。误差主要来源于数值预报历时曲线上的差异,导致回归得到的水动力导数,尤其 是非线性水动力导数值出现较大差异。这种预报精度同目前国际上其它研究学者进 行的动态约束船模试验的数值预报精度在同样的水平,这说明采用当前方法计算可 以较高精度的预报出水动力导数值。









(c) T+2/5T





(e) T+4/5T

(f) 2T

图3-30 一个纯摇首运动周期内自由面兴波 Fig.3-30 Wave patterns for one period of pure yaw test

绪论中提到过,目前最为常用的船舶操纵性能预报方法仍然是水池试验,但采用 试验手段想捕捉到精确的流场信息,需要精度较高的 PIV 设备等(代价非常高)。 而 CFD 方法则可以给出船体周围详细流场信息,方便分析整个计算过程中的船舶水 动力特性。这里我们给出了在运动幅度最大的工况下一个纯摇首运动周期内船舶自 由面兴波变化。

通过图 3-30 可以看出,相较于 3.4.1 节中的纯横荡运动工况下,这里船体周围自 由面兴波变化更为剧烈,首部兴波和船体侧向波高周期性变化明显。同时,由于存在 大幅度的首摇运动,因此首部兴波波峰幅值较纯横荡运动中的波峰更大,并且两侧的 绕射波形差别更大。兴波周期性变化可以使得船体周围压力场发生相应的变化,从而 导致船体侧向力和转首力矩呈现周期性变化。通过采用 CFD 粘性流场计算,可以充 分地对船体纯摇首运动过程中的流场进行可视化分析,为水动力特性的分析提供强 有力的数据支撑。

3.5 本章小结

为了验证本文中所采用的数值方法求解船舶水动力学问题的精度和可靠性,本 章首先进行了两个标准船型的计算与验证。标准算例包括了 DTMB 5415 和 KCS 船 型在静水中的阻力计算。算例中同时对阻力特性和流场进行了详细地分析,并且针对 不同问题进行了网格的不确定性分析以及整体的验证和确认分析,验证了当前采用 的数值方法在求解船舶水动力学问题中的精度和可靠性。

本章接下来详细介绍了约束船模试验的数值模拟,包括采用的几何模型 DTMB 5415 及计算网格布置,并且介绍了进行操纵性水动力导数分析的分离型操纵性数学 模型。文中对静态斜拖试验以及动态约束船模试验,即纯横荡和纯摇首运动进行了数 值模拟分析。静态斜拖试验中针对 0°、6°、10°和 20°四种漂角工况进行了数值 计算,并且回归得到了对应的水动力导数值,并且同试验值进行了对比分析,预报误 差在 10%以内。同时对详细的流场,如自由面兴波波形以及尾部伴流场进行了分析, 解释了侧向力和转首力矩产生的原因和变化规律。动态约束船模试验数值模拟中,分 别对三种不同振动幅值工况下的纯横荡和纯摇首试验进行了数值模拟,根据振荡运 动方程和操纵性数学模型,采用分离型的积分形式回归得到了对应的水动力导数值, 数值预报误差在 20%以内,总体达到了国际上同等的预报精度。并且两种工况下分 别给出了一个振荡运动周期内的自由面兴波波形,分析了船体所受水动力变化的原 因。 通过约束船模试验的数值模拟,尤其是大幅度动态约束船模试验的数值模拟,验 证了我们当前所采用的基于重叠网格方法的 CFD 粘性数值流场计算在船舶操纵运动 数值预报方面的可靠性和精度。以此为基础,接下来会针对带螺旋桨带舵船舶的自航 操纵运动问题进行数值模拟研究。共分为四个部分:第一种是静水工况下的船舶操纵 运动问题,包括 Z 形操纵试验和自由回转试验的数值模拟,可以验证当前求解器可 以预报中舵角(Z 形操纵)下的船舶机动性以及大舵角(自由回转)下的回转性能; 第二种是在不同浪向下的自航船舶航向保持问题,可以验证当前开发的航向保持控 制器的可靠性,以及验证求解器在处理小舵角下的船舶航向纠偏的求解能力;第三种 是波浪工况下的典型 Z 形操纵和自由回转操纵问题,研究波浪对船舶 Z 形操纵运动 和自由回转操纵运动的影响。这三部分的数值计算将分别在下面的第四、第五、第六 和第七章中进行介绍。

第四章 静水工况下的自航船舶操纵运动数值模拟

本章将结合动态重叠网格技术和多级物体运动模块,首先完成船舶自航推进试验的数值计算和验证。接下来利用自主开发完善的自航操纵控制模块完成 ONRT 船模在静水中的典型操纵运动的直接数值模拟,包括典型的 Z 形操纵试验和 35° 舵角的自由回转试验。螺旋桨转速采用自航推进数值预报得到的船舶模型自航点,之后通过不同形式的舵角控制,完成上述的典型操纵运动的直接数值模拟和分析。数值预报的典型操纵性特征参数与已有的试验数据进行比较,以验证当前基于重叠网格技术的CFD 粘性流场计算方法对自航船舶操纵运动计算的准确性。

4.1 静水中 ONRT 船模自航推进数值模拟

本章节选择的船型是全附体的双桨双舵 ONRT (ONR Tumblehome)模型,也称为 DTMB 5613,整个船体模型包括舭龙骨、桨轴、支撑、呆木等,同时配备有一对 对转的螺旋桨和一对舵,其几何模型见图 4-1。ONRT 模型的航行速度为 1.11m/s, 对应 *Fr*=0.20 以及 *Re*=3.39×10⁶。这个计算工况是 2015 年东京 CFD 船舶水动力学研 讨会上提供的标准算例之一。



图4-1 ONRT 船体几何模型 Fig.4-1 Geometry model of ONRT

船体的主尺度见表 4-1,其中船体的水线长为 3.147m,配备的螺旋桨为四叶桨,螺旋桨的直径以及在船后的位置见表 4-1, 舵最大的转动速度为 35°/s。

表4-1	ONRT	船型	的几	何主	尺度

主要参数	符号	模型尺度	实尺度
水线长 (m)	$L_{\scriptscriptstyle WL}$	3.147	154.0
最大船宽(m)	$B_{\scriptscriptstyle WL}$	0.384	18.78
型深 (m)	D	0.266	14.5
吃水 (m)	Т	0.112	5.494
湿表面积(m ²)	S ₀	1.5	NA
方形系数(C _B)	$ abla / (L_{WL}B_{WL}T)$	0.535	0.535
排水量 (kg)	Δ	72.6	8.507e6
重心距基线高度(m)	KG	0.156	NA
浮心距船中距离(距离船首)	LCB aft FP	1.625	NA
杜动柙具	$K_{_{XX}}$ / $B_{_{WL}}$	0.444	0.444
我妈顶里	$K_{_{yy}}$ / $L_{_{WL}}$, $K_{_{ZZ}}$ / $L_{_{WL}}$	0.25	0.25
螺旋桨直径 (m)	D_P	0.1066	NA
螺旋桨中心纵向距离	x / L_{wL}	0.9267	NA
螺旋桨中心距离中轴线距离	$\pm y / L_{\scriptscriptstyle WL}$	0.02661	NA
螺旋桨中心距离水线距离	$-z / L_{WL}$	0.03565	NA
螺旋桨桨轴倾角(向下为正)	Е	5	NA
螺旋桨旋转方向(从船后看)		内旋	内旋
最大转舵速度(deg/s)		35.0	NA

Table 4-1 Main particulars of ONRT

为了进行带螺旋桨带舵船舶的自航推进数值模拟,本节进行了三种不同试验的 数值计算。首先进行了螺旋桨敞水试验的数值模拟,可以获取螺旋桨的敞水性能曲 线,并且研究何种网格尺度能够精确捕捉螺旋桨流动。其次为不带桨的船舶阻力试验 模拟,可以当作船桨舵自航计算的初始流场。最后是船舶自航推进试验的数值模拟, 数值预报船舶阻力、螺旋桨的推力和扭矩等水动力性能,并且求解得到船模的自航点 等推进参数。

4.1.1 螺旋桨敞水性能计算

螺旋桨敞水性能的计算主要是验证重叠网格技术进行旋转螺旋桨水动力计算的 可靠性,通过数值计算得到敞水性能曲线,同己有试验数据进行对比,此外,螺旋桨 敞水性能计算还将进行网格的收敛性分析,为后续的船桨舵相互作用下的自航船舶 计算提供网格设计参考。螺旋桨的模型参数见表 4-1,敞水试验是在美国爱荷华大学 水池 IIHR 进行的,并且有详细的敞水特性参数,供 CFD 验证使用。

螺旋桨敞水试验的数值模拟中,效仿拖曳水池中敞水试验的做法,螺旋桨相对于 大地坐标系以一定速度向前前进,螺旋桨的转速RPS固定。计算结果当中包含不同进 速系数 (J)下的推力系数 (K_T)、扭矩系数 (K_Q)以及敞水效率 (η_0)。无因次化 的推进系数的定义为:

$$J = \frac{V_A}{nD_P} \tag{4-1}$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D_P^4} \tag{4-2}$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D_P^5} \tag{4-3}$$

$$\eta_0 = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \tag{4-4}$$

其中, *T* 和 *Q* 是螺旋桨的推力和扭矩; *D_P* 和 *n* 分别为螺旋桨的直径和转速; *V_A* 是 前进速度。根据 ONRT 自航推进试验中螺旋桨转速的结果,这里将螺旋桨转速设定 为 *n*=8.97RPS。螺旋桨的敞水试验(IIHR)数据来自于 2015 年东京 CFD 研讨会。

螺旋桨敞水试验的数值计算采用的计算域布置如图 4-2 所示,共分为两套网格, 一块为螺旋桨网格,嵌套在另一块网格背景网格中。计算过程中,螺旋桨的网格可以 相对于背景网格进行旋转。背景网格可以跟随螺旋桨网格以一定的速度向前移动。同 时,增加了计算域边界与螺旋桨的距离,从而减小边界对流场计算的影响。

计算中采用的网格同样采用 SnappyHexMesh 生成。图 4-3 显示的是螺旋桨周围 的局部网格分部,图中蓝色网格代表螺旋桨网格,背景网格则用红色表示。螺旋桨敞 水性能计算中采用的是 Xing 等^[150]提出单次计算方法。该方法中螺旋桨以非常小的 加速度向前移动,逐渐加速至最大指定航速。由于整个加速的过程历程较久,因此可 以把某一时刻的进速当作定常值,如此便能一次性完成不同进速下的敞水性能计算。 采用这种方法可以将以多个进速下的计算汇总到单次的计算中,从而可以大幅减少

第 91 页

计算时间。计算中采用的湍流模型为 $k-\omega$ SST 模型,计算中的总网格量为 113 万,不同区域网格的大小见表 4-2。

数值计算中分为 20 个核进行并行计算,时间步长设置为Δt=0.0005s,对应一个时间步内螺旋桨转过1.5°,计算共花费了 55 个小时,共 1107 个核机时。





Fig.4-2 Computational domain arrangement for open water calculations





Fig.4-3 Local grid distribution for open water calculation

表4-2 敞水计算的网格分布

Table 4-2 Grid number in different part of overset grids

	总网格量	螺旋桨网格	背景网格
网格数量(百万)	1.13	0.51	0.62

采用上述计算参数得到的敞水性能曲线由图 4-4 所示。在单次计算中,螺旋桨的 进速系数由 J=0.0 逐渐加速至 1.8,整个加速时间为 10s。从数值计算结果和试验测 量的对比情况来看,除了进速系数较小(J<0.3)和较大(J>1.3)时,整个计算精度 较高,敞水性能结果均与试验值吻合较好。由此可以说明,采用当前的动态重叠网格 方法,可以较高精度的预报螺旋桨的敞水性能。为后续船桨舵相互作用计算奠定了很 好的基础。



图4-4 敞水曲线结果的比较

Fig.4-4 Comparisons of open water results

图 4-5 给出了三个不同进速系数 (J=0.8、1.0 和 1.2)下,螺旋桨产生的涡结构, 用 Q=200 等值线来表征,同时用轴向速度进行染色。在不同的进速系数下,都可以 明显地看出螺旋桨梢涡。并且在桨轴处伴随有螺旋状包裹的桨毂涡。进速系数 J 增 加以后会导致螺旋桨的来流攻角降低,进而使得梢涡的强度和螺旋桨上的载荷有所 降低,桨轴周围的泻涡强度逐渐减弱。此外,随着进速系数的增加,螺旋桨梢涡的螺 距也随之明显增加。



图4-5 不同进速系数下螺旋桨周围的涡量等值面 Fig.4-5 Vortical contours around propeller in different advance coefficients

除了上述的单次计算法进行的敞水性能数值预报之外,本文还针对该工况进行 了网格的收敛性分析,计算中采用三套不同尺度的网格进行在进速系数为 J=1.0 工况 下的推进性能计算,不同的网格参数见表 4-3,最细的网格量为 389 万,最粗的网格 为 58 万,中等密度网格即上面进行的单次计算法所采用的网格,为 113 万,网格按 照 $\sqrt{2}$ 的比例进行缩放。不同网格计算得到的螺旋桨的推进性能,如推力系数 K_r ,扭 矩系数 K_o 以及推进效率 η ,判断网格收敛类型的指标 R_G 分别为 0.789,0.7916 和 0.5915,都介于 0 到 1 之间,因此都表现为一致性收敛。同时细网格跟试验值的误差 最小,推力系数预报精度最高,而扭矩系数预报精度较差,如在粗网格工况下的扭矩 系数误差达到了 10%,但是从表中可以看出,中等密度网格和细网格间的差别较小, 因此可以说明当网格量达到中等密度网格以上,对数值计算的结果影响较小。基于总 的计算量和计算精度来说,我们接下来进行的船桨舵数值计算就采用中等密度的网 格进行。

表4-3 进速系数为 1.0 工况下的网格收敛性计算结果

网格类型	标识	网格量 (百万)	K _T	误差 (%)	K_Q	误差 (%)	$\eta_{_0}$	误差 (%)
试验值			0.2638		0.0734		0.5723	
细网格	S_1	3.892	0.2635	-0.113	0.0763	3.951	0.5496	-3.966
中密度网格	S_2	1.133	0.2632	-0.226	0.0782	6.539	0.5357	-6.395
粗网格	S_3	0.576	0.2594	1.668	0.0806	9.809	0.5122	-10.501
R_G			0.0789		0.7916		0.5915	
收敛类型			一致性		一致性		一致性	

Table 4-3 Grid convergence study at J=1.0

4.1.2 无桨阻力试验数值模拟

无桨的船舶阻力数值计算可以为船桨舵相互作用下的自航推进数值模拟提供初始流场,并且也可以通过该计算验证目前求解的精度。阻力数值计算参数设置以及网格类型同 3.1.1.2 节中描述的一致。计算工况为船体以额定航速(*U*=1.11*m/s*, *Fr*=0.20) 直线航行,固定其它五个自由度的运动。计算中采用两套重叠网格进行,分别为船体网格和背景网格,计算域的布置以及边界条件见图 4-6。



图4-6 计算域设置和边界条件

Fig.4-6 Computational domain and boundary conditions

表4-4	拖航计	算中	的	网	格分	布
10-1-1-1		711	~ ~	1 4	14 /	· I ·

Table 4-4 Grid number in different part of overset grids for towing condition

	总网格量	船体网格	背景网格
网格数量(百万)	1.87	0.82	1.05

计算所采用的总网格量为 187 万,其中不同部分的网格分布见表 4-4。计算求解 得到的船体阻力以及同试验值的对比见表 4-5,从表中可以看出,当前数值计算得到 的无桨工况下的静水阻力值同意大利的 INSEAN 水池的 ONRT 裸船体阻力试验结果 非常接近(误差为 0.7%),而同爱荷华大学的全附体阻力值相差 17.9%,这也说明 了附体对于整个船体阻力的贡献值较大,其它数值计算结果趋势也一致。

表4-5 拖航阻力计算结果对比

Table 4-5 Comparisons of resistance for towing condition

Fr	IIHR EFD	INSEAN EFD	IIHR CFD	naoe-FOAM-SJTU
	全附体	裸船体	裸船体	裸船体
0.20	4.54 N	-18.6%	-15.7%	-17.9%



图4-7 拖航工况下的自由面兴波

Fig.4-7 Wave pattern for towing condition at Fr=0.20

图 4-7 给出了裸船体在 Fr=0.20 工况下的静水拖航自由面兴波图形,图中可以明显地看出船体周围产生的对称的 Kelvin 波系,由于数值计算中采用的裸船体,并且

固定了其它的五个自由度运动,因此没有试验观测的自由面数据进行对比验证,但是从上述的静水阻力结果来看,目前的拖航计算较为可靠。

4.1.3 带桨带舵的船舶自航推进数值模拟

进行完上述的螺旋桨敞水性能计算以及静水拖航数值模拟以后,就可以进行最 后的自航推进数值预报。计算中,同时对船桨舵分别进行网格划分,整个计算域的划 分以及船桨舵的网格布置见图 4-8。







计算中采用六套网格来实现船桨舵所有部分的划分,从图 4-8 中可以看出,计算 域共分为两套螺旋桨网格、两套舵网格、一套船体网格和一套背景网格。不同网格的 布置如图中所示。所有网格的生成均采用 OpenFOAM 自带的 snappyHexMesh 工具完 成。用于计算的网格分布见图 4-9,分别显示了横截面和纵截面上的船桨舵周围的局 部网格分布。图中蓝色代表船体网格,紫色代表背景网格,红色代表螺旋桨网格,绿 色则代表舵周围网格,各网格间的重叠关系由图中所示。船体跟背景网格进行插值, 而螺旋桨和舵间有重叠关系,并且都同船体网格进行插值。同时需要注意的是,由于 目前采用的重叠网格方法,各网格区块间需要保证有一定量的网格用于插值计算,因 此,在螺旋桨和桨轴之间,以及舵和舵根之间采用人工的间隙来进行网格划分,从而 保证边界单元处有足够的贡献单元用于插值计算。目前所采用的总网格量为681万, 各部分网格的分布以及网格运动的层级见表 4-6。



图4-9 船桨舵周围局部网格分布

Fig.4-9 Overset grid distribution around ship hull propeller and rudder

表4-6 不同部位网格量的分布

位置	网格量 (百万)	左舷网格 (百万)	右舷网格 (百万)	层级
背景网格	1.34			最高级
船体网格	2.61			父级
螺旋桨网格	2.28	1.14	1.14	子级
舵网格	0.58	0.29	0.29	子级
总计	6.81			

Table 4-6 Grid distribution in each part

静水自航推进数值模拟的初始流场是从拖航工况数值计算的最终稳定流场映射 过来,从而能够给定一个较为接近的初始状态,包括发展较为完整的边界层流场,从 而加速自航推进的数值计算。根据试验设定,全附体的船模在静水中以模型自航点进 行推进,设定航速为 *Fr*=0.20。数值计算中采用 PI 控制器控制螺旋桨的转速以提供 足够的推力达到目标航速。考虑到大的 P 和 I 可以较快的达到目标转速值,因此计 算中比例系数 P 和积分系数 I 的值均取为 800。

自航数值计算中分为40个进程并行计算,其中39个为流场计算进程,1个进程 为插值计算进程。时间步长设置为Δt=0.0005s,对应一个时间步内螺旋桨转过1.5°, 计算共花费了125个小时,共5019个核机时,完成了24000个时间步的计算。

数值计算得到的螺旋桨转速和船舶航速的历时曲线见图 4-10。从图中可以看出, 螺旋桨转速和船舶航速在模型尺度下均在前几秒钟就达到了目标值。并且从船舶的 航速变化可以看到,刚开始时船舶航速先下降,这是由于初始状态的螺旋桨是从静止 开始加速的,因此起初的推力较小不足以支撑船舶的航行速度,而随着螺旋桨转速的 增加,其能提供的推力也相应增长,使得船舶航速逐渐达到了目标值。另外,图中还 对比了数值预报的结果同东京 2015 年 CFD 研讨会上的标准试验结果进行对比,可 以看出目前的数值手段可以较为精确的预报出船舶的自航推进特性^[151]。



图4-10 ONRT 自航计算中螺旋桨转速和船舶航速变化 Fig.4-10 Time variations of RPS and ship instantaneous speed

衣4-/ 致111则报的船舶推进参致回试验11的)	₹4-7	数值预报1	的船舶推进	井参数后]试验值	的对比
---------------------------	------	-------	-------	------	------	-----

Table 4-7 Comparisons of propulsion parameters between present CFD results and measurements

参数	数值结果	试验值	误差
<i>u</i> (m/s)	1.109	1.125	-1.4%
升沉 $\sigma \times 10^2$ (m)	2.41E-1	2.26E-1	6.5%
纵倾 <i>τ</i> (deg)	4.64E-2	3.86E-2	20.3%
$C_T \times 10^3$	5.291		
$C_F \times 10^3$	3.752		
$C_P \times 10^3$	1.539		
n(RPS)	8.819	8.97	-1.7%
K _T	0.242		
K_Q	0.616		
为了量化分析当前数值结果的精度,表 4-7 中列出了当前预报得到的船舶模型 自航点以及受力和运动参数同试验值的对比。从表中可以看出,当前数值预报的模型 自航点,即额定航速下的螺旋桨转速,同试验值的误差仅为 1.7%,充分说明了当前 基于重叠网格方法以及 CFD 粘性流场计算的可靠性和高精度。此外,数值求解得到 的自航工况下的船舶运动参数,如纵倾和升沉值均同试验值吻合较好,同时表中还给 出了该工况下船舶的阻力系数以及螺旋桨的推力及扭矩系数,鉴于没有相应的试验 值,目前没有进行这些量的对比验证。

当前的 ONRT 船模自航推进试验中,不仅放开了纵倾和升沉的自由度,其它几 个船体自由度均放开,也就是说当前的数值试验是针对 6 自由度的自由自航,除了 前进方向,其它 5 个自由度的运动历时曲线见图 4-11。从图中可以看出,虽然是在 静水的自航计算,仍然出现了小幅度的六自由度运动,图中左侧标尺为线运动的幅 度,而右标尺则代表的是 3 个角运动的值,小幅度的船体运动,如横摇和首摇运动主 要原因有以下几点:首先全非结构化网格生成过程中,针对全附体的船舶必然会存在 船体两侧网格的不对称性(自动网格生成中存在各种迭代算法),由此会产生相应的 流场不一致;其次则为全粘性流场的数值计算中,船体周围的泻涡等现象均表现出强 非线性,即问题本身就不应该流场对称;第三是由于初始流场是经过拖航计算结果映 射过来,会出现一定的映射误差,而计算中船舶为全自由度放开,所以一定的初始扰 动就会造成后续的流场变化,进而出现小幅度的船舶运动。



图4-11 静水自航中船舶运动历时曲线

Fig.4-11 Time histories of ship motions for self-propulsion in calm water

除了上述的推进性能以及船舶运动情况,接下来进行自航数值计算的详细流场 分析,图 4-12 给出了自航推进计算得到的自由面兴波波形,从图中可以看出整个船 舶兴波呈现的效果同拖航工况基本一致,并且可以在尾部兴波处看到由于螺旋桨存 在导致的干扰情况。



图4-12 静水自航计算得到的船舶自由面兴波 Fig.4-12 Wave pattern for self-propulsion in calm water



(a) 螺旋桨盘面处伴流场

(b) 舵切面处伴流场





图 4-13 给出了尾部螺旋桨盘面处以及舵切面处的伴流分布,伴流场用无因次化的轴向速度*Ux/U* 染色,从图中可以看出,螺旋桨和舵周围的流动分布,由于真实螺旋桨和舵的存在,导致对周围流动的强烈干扰,尤其是在舵周围可以看到舵根处和两

侧产生的漩涡,这一现象可以从桨舵周围的详细涡量场进行分析,见图 4-14。图中 采用 Q=200 的涡量等值面来表示,并且采用轴向速度进行染色,给出了侧视图和三 维视图两个视角,从中可以清晰地看出螺旋桨产生的梢涡以及桨毂涡,并且当梢涡传 到舵面处会产生强烈的干扰。此外,从三维视图中也可以看出这种干扰发生在舵的两 侧,这也解释了图 4-13 中舵周围伴流的复杂分布。桨毂涡的强度较大,并且由于舵 的轴线偏离前面螺旋桨,因此桨毂涡基本没有受到舵面的影响,而当进行操舵时,必 然会产生相应的干扰,这部分内容将会在下面的自航操纵部分进行阐述。





4.2 静水中 Z 形操纵运动数值模拟

本章从第二个部分开始进入带螺旋桨带舵船舶的操纵运动数值研究,本节将针 对典型的 Z 形操纵试验进行数值模拟和分析。Z 形操纵的形式在 2.4.3.2 节中已经进 行阐述,这里不进行详细说明。Z 形操纵试验,主要是为了评估船舶在进行中舵角操 舵时船舶的航向以及运动轨迹变化,以此来评估船舶的机动性。一般情况下根据执行 舵角和换舵首向角的值来命名 Z 形试验,如执行舵角为 10°,且换舵首向角也为 10°,则该试验为 10/10 Z 形操纵试验。本文将针对两种 Z 形操纵试验,10/10 和 20/20,分别进行数值模拟。

4.1.3 节中进行的自航推进数值模拟,预报出的模型自航点将应用于本章后续自 航操纵以及后面波浪中的操纵运动中,即采用固定的螺旋桨转速 8.819RPS 来进行自 航操纵的数值模拟,以此来减少 CFD 数值计算中的影响变量,这种设置也是 2015 年 东京船舶水动力学 CFD 国际研讨会上标准算例的要求。后续计算中,螺旋桨转速为固定值,然后通过不同的舵角控制,实现不同操纵运动的数值模拟。

这里 Z 形操纵运动的数值计算仍然在上海交通大学船舶与海洋工程计算水动力 学研究中心(CMHL)的高性能并行计算集群进行,Z 形操纵数值计算中共分为 40 个进程并行计算,其中 39 个为流场计算进程,1 个进程为插值计算进程。时间步长 设置为Δ*t* = 0.0005*s*,对应一个时间步内螺旋桨转过1.5°。完成 Z 形操纵试验的数值计 算共花费了 325 个小时,共12975 个核机时,完成了 39000 个时间步的计算。

4.2.1 20/20 Z 形操纵运动直接数值模拟

首先对 20/20 Z 形操纵运动进行直接数值模拟,图 4-15 给出了船舶的舵角变化 情况以及对应的首摇响应历时曲线,并且同己有试验结果^[152]进行了对比验证。数值 计算对时间轴进行了平移,从而保证与试验的第一次执行操舵时间一致,后面船舶的 其它运动历时曲线均进行了此调整,用来更好的跟试验结果进行对比。当前的数值预 报可以较为精确的模拟出船舶的操纵情况,以及对应的首摇运动响应。



图4-15 20/20 Z 形操纵中船舶首摇角和舵角的历时曲线

表 4-8 中给出了 20/20 Z 形操纵试验数值预报的特征操纵性参数同试验值的对比,其中执行舵角以及完成一个 Z 形操纵所需的周期都能够较高精度的预报出来,而第二超越角的预报结果相对误差较大,CFD 数值预报得到的超越角均小于试验中

Fig.4-15 Time histories of rudder angle and yaw motion for 20/20 zigzag maneuver

测量值。此外,数值模拟得到的 Z 形操纵运动过程中的船舶运动响应,包括转首速 率、横摇运动、船舶航速以及漂角的历时曲线同试验值的对比见图 4-16。从图中可 以看出,当前数值预报结果能够较好地给出船舶 Z 形操纵运动过程中的运动响应, 而 CFD 预报的转首速率峰值小于试验测量值,这也解释了数值计算的超越角小于试 验值。同时横摇运动以及漂角的数值预报结果峰值较试验值偏小。



图4-16 20/20 Z 形操纵试验横摇运动和首摇速率历时曲线 Fig.4-16 Time histories of roll and yaw rate during 20/20 zigzag maneuver

图 4-17 给出了在 20/20 Z 形操纵试验过程中数值预报的螺旋桨的推进性能变化, 包括推力和扭矩曲线。图中红色曲线表示左舷螺旋桨的推进性能,蓝色代表右舷螺旋 桨的推进性能变化。图中可以明显地看出由于操舵导致的低频振荡,同时还可以从曲 线的局部放大图中看出高频的曲线振荡,这主要是对应于螺旋桨四个叶片在旋转过 程中对流场的干扰。此外,在整个 Z 形操纵运动过程中,由于船舶左右的运动,导 致尾部伴流的大范围变化,这也引起了左右舷螺旋桨的水动力性能的巨大差别。

表4-8 20/20 Z 形操纵试验结果对比

Table 4-8 Comparisons of main parameters of 20/20 zigzag maneuver

操纵性参数	标识	EFD	CFD
第一超越角 (°)	1st OSA	5.92	5.02
第二超越角 (°)	2nd OSA	5.49	3.99
第三超越角 (°)	3rd OSA	5.50	5.01
周期(s)	Т	15.81s	15.68s
第一次操舵时间(s)	t1	2.41s	2.52s
第三次操舵时间(s)	t3	15.38s	15.74s



图4-17 20/20 Z 形操纵试验中推进性能变化 Fig.4-17 Propulsion performance for 20/20 zigzag maneuver



图4-18 20/20 Z 形操纵试验中舵水动力变化历时曲线 Fig.4-18 Time histories of rudder forces for 20/20 zigzag maneuver

从图 4-19 中可以明显的看到,在A和B时刻左舷舵周围的流场比右舷舵更为复杂,这也很好的解释了图 4-18 中从A到B时刻左舷舵的阻力和侧向力更大,而在时刻C和D,这种情况正好相反,右舷舵的阻力和侧向力更大。此外,从图 4-19 中还可以看出,在C时刻,螺旋桨的进流比A时刻更大,这也能很好的解释图 4-17 中的 推力和扭矩变化。

图 4-20 和图 4-21 给出了一个 Z 形操纵周期内的四个典型时刻的自由面波形和 船桨舵周围的涡结构分布。其中四个典型时刻分别对应于第一超越角、第二超越角以 及零首摇角。从自由面波形图可以看出,在经历第一和第二超越角时刻,船舶两侧的 绕射波形呈现明显的不对称性,当船舶达到右舷最大首摇角时,左舷侧的波形较右舷 侧的波形更加明显,但影响范围较小。当船舶经过零首摇角时,同静水直航工况的兴 波波形有较大差别,在 Z 形操纵运动过程中的自由波形能反映出船舶的运动趋势。 而从一个周期内的涡结构变化来看,桨舵处的涡量场出现明显的干扰情况,当船舶具 有 20° 舵角时,螺旋桨所产生的梢涡和桨毂涡会明显受到后面舵面的干扰,尤其是 在经历最大首摇角时,左舷处螺旋桨的桨毂涡被后面的舵干扰打碎,在经历最小首摇 角时,则表现为右舷处的桨毂涡干扰,进而影响船舶的推进性能和操纵性能。而当经 历零首摇角时,由于涡在向后传播的过程中,船舶经历很大幅度的操纵运动,因此从 桨毂涡的轨迹也能反映出船舶的运动情况。



图4-19 20/20Z 形操纵一个周期内螺旋桨和舵轴线横截面处的伴流场分布

Fig.4-19 Horizontal section of wake region around twin propellers and rudders during one zigzag period



第 107 页



图4-20 一个 Z 形操纵运动周期内的自由面变化 Fig.4-20 Wave patterns during one zigzag turn





Fig.4-21 Vortical structures during one zigzag turn

4.2.2 10/10 Z 形操纵运动直接数值模拟

此外,本章内容还针对较小的执行舵角和换舵首向角工况进行了数值模拟,即典型的 10/10 Z 形操纵试验。同样的,这里给出了数值模拟得到的船舶 10/10 Z 形操纵运动过程中的舵角和首摇角历时曲线,见图 4-22。图中实线代表当前数值预报结果,虚线则为试验测量值^[152]。从图中可以看出,数值结果同试验结果吻合较好,能预报出操纵运动过程中的整体执行舵角和首摇运动响应。同上节中的预报结果类似,数值预报的超越角小于试验值,而数值计算得到的周期则大于试验值。这部分的误差是由于数值计算和试验中采用的不同策略,即试验中的螺旋桨转速不是恒定值,从而会导致提供的推力不同,即影响到最后的操纵周期。同时,图中四个点,A,B,C,D分别对应于第一超越角、零首摇角、第二超越角和第二次零首摇角四个时刻,用于后面的流场分析。





Fig.4-22 Time histories of rudder and yaw angle of 10/10 zigzag maneuver

本文还给出了 10/10 Z 形操纵试验中的船舶运动响应同试验值的对比,见图 4-23。从中可以看出,试验跟数值模拟在初始状态存在着较大的不同,比如船舶的航速 以及横摇角度,这也导致数值预报结果存在一定误差。同时,试验中能够有多大的精 度去保证船舶达到名义上的航速也是不确定的。这里为了更好的比较,也是将 CFD 的数值结果在时间尺度上进行了平移,以达到同时进行第一次操舵。在船舶执行了相应的舵角之后,由于这时船舶的运动主要是由于转舵的水动力变化导致,初始状态不同导致的区别逐渐减小。同首摇速率曲线可以看出,在转角处的数值结果小于试验测量值,因此导致数值预报的超越角小于试验值。针对横摇运动以及漂角的历时曲线,数值预报的不同主要是相位上的差别,并且数值预报的横摇峰值小于试验值。由于目前无法获取试验的原始数据,这里的试验值是从已发表的文章^[152]中取出,因此也存在一定的人为误差。

虽然目前的数值预报结果同试验值存在一定程度的误差,但是总体来看,当前的 直接数值模拟手段可以较为理想的预报出船舶操纵运动特性,这也为后续的船舶在 波浪上的操纵试验数值模拟奠定了良好的基础。





图 4-24 给出了在 10/10 Z 形操纵试验过程中数值预报的螺旋桨的推进性能变化, 包括推力和扭矩曲线。图中红色曲线表示左舷螺旋桨的推进性能,蓝色代表右舷螺旋 桨的推进性能变化。图中可以明显地看出由于操舵导致的低频振荡,同时还可以从曲 线的局部放大图中看出高频的曲线振荡,这主要是对应于四叶螺旋桨旋转过程中对 流场的干扰。另外可以发现,在整个 Z 形操纵运动过程中,由于船舶左右的运动, 导致尾部伴流的大范围变化,这也引起了左右舷螺旋桨水动力性能的巨大差别。同上 一节中 20/20 Z 形操纵的推力和扭矩(图 4-17)对比可以发现,在更小的操舵角度工 况下,船舶的推力峰值会有明显的下降。





Fig.4-24 Propulsion performance for 10/10 zigzag maneuver

第 111 页



图4-25 10/10 Z 形操纵试验中舵水动力变化历时曲线 Fig.4-25 Time histories of rudder forces for 10/10 zigzag maneuver

图 4-25 给出了 10/10 Z 形操纵运动过程中两侧舵的水动力变化,红色表示左舷 舵受力变化,蓝色表示右舷舵力的变化。从图中可以看出由于操舵导致了舵力的突 变,尤其舵的侧向力的增加,这也是产生船舶转向的主要动力。并且 10/10 Z 形操纵 运动中舵的侧向力和转首力矩幅值明显的小于上一节中 20/20 Z 形操纵运动中的舵 力。为了更好的理解上述螺旋桨和舵的水动力性能变化,这里给出了螺旋桨和舵轴线 处的横截面的伴流场,见图 4-26,图中 A, B, C, D 分别对应于图 4-25 中的时刻。

从图 4-26 中可以明显的看到,在 A 和 B 时刻左舷舵周围的流场比右舷舵更为复 杂,这也很好的解释了图 4-25 中从 A 到 B 时刻左舷舵的阻力和侧向力更大,而在时 刻 C 和 D,这种情况正好相反,右舷舵的阻力和侧向力更大。此外,从图 4-26 中还 可以看出,在 C 时刻,螺旋桨的进流比 A 时刻更大,这也能很好的解释图 4-24 中的 推力和扭矩变化。由于转舵角度时上一节中的一半,因此,这里舵周围的流动变化不 如大舵角时的复杂(见图 4-19)。



图4-26 螺旋桨和舵轴线横截面处的伴流场分布

Fig.4-26 Horizontal section of wake region around twin propellers and rudders during one zigzag period

4.3 静水中自由回转操纵运动直接数值模拟

本章针对 35° 舵角的自由回转操纵运动进行了直接数值模拟,自由回转试验是 检测船舶机动性最常用的评估手段。该试验是在直线航行的船舶,将舵转至某一舵 角,一般都为最大舵角 35°,并保持此舵角,船舶此后将做回转运动。整个回转运 动通常分为三个阶段:首先是转舵阶段,是指从执行转舵命令开始到实现指定舵角位 置;第二阶段为过渡阶段,是指从转舵终止到船舶进入定常回转的中间阶段;最后一 个阶段为定常阶段,船舶的运动参数稳定,进入新的平衡的阶段。

自由回转操纵试验的数值模拟依然是针对全附体的 ONRT 船模,拥有双桨双舵 以及桨支撑、呆木、舭龙骨等附体,船型参数和主尺度分别见图 4-1 和表 4-1。数值

模拟中螺旋桨的转速为之前自航推进预报得到的模型自航点 8.819RPS,船舶航速为 *Fr*=0.20,数值模拟船模自由回转一圈的过程。

自由回转操纵试验的数值计算仍然采用上海交通大学船舶与海洋工程计算水动 力学研究中心(CMHL)的高性能并行计算集群进行(Intel 至强 E5-2680V2@2.8GHz), 自由回转操纵试验数值计算中共分为 40 个进程并行计算,其中 39 个为流场计算进 程,1个进程为插值计算进程。时间步长设置为Δt=0.0004s,对应一个时间步内螺旋 桨转过1.3°,模型尺度下共计算了 50s。完成自由回转操纵试验的数值计算共花费了 970 个小时,共38797 个核机时,完成了 125000 个时间步的计算。

计算得到的船舶在 35° 舵角工况下的回转运动轨迹以及同试验值的对比见图 4-27。



图4-27 35°舵角自由回转试验船舶运动轨迹 Fig.4-27 Trajectory of 35° turning circle simulation

从图中可以看出,当前数值预报的船舶自由回转运动轨迹同试验中测量的回转 圈基本一致,但是数值计算得到回转半径较试验值偏大,为了量化分析当前数值预报 的精度,表4-9给出了自由回转的特征参数以及同试验值的对比^[85]。

表4-9 自由回转特征参数对比

Table 4-9 Comparisons of main parameters of turning circle maneuver

特征参数		CFD	EFD	误差
纵距 (m)	A_D	7.2854	7.4806	-2.61%
正横距 (m)	T_R	4.3255	4.0539	6.69%
<i>T</i> ₉₀ (s)		15.9872	15.1400	5.59%
战术直径 (m)	T_A	10.4581	10.0068	4.51%
T_{180} (s)		27.5894	26.0700	5.83%
回转直径 (m)	T_D	10.5431	10.1481	3.89%





图4-28 自由回转试验中首摇速率、横摇运动和航速的历时曲线 Fig.4-28 Time histories of yaw rate, roll motion and speed during turning circle maneuver

从表 4-9 中可以看出,数值预报的回转圈特定参数同试验值吻合良好,回转圈直 径 *D* 的误差为 3.89%,而比较关心的纵距误差则仅为 2.61%。这充分说明了当前的数 值手段可以高精度的进行自由回转操纵运动的数值模拟。

图 4-28 给出了自由回转运动过程中首摇速率、横摇运动以及船舶航速的历时曲 线,并且同试验值^[152]进行了对比。从图中可以看出,初始时刻由于转舵阶段以及过 渡阶段的存在,导致曲线有较大的波动,数值预报的首摇速率峰值小于试验值,因此 说明数值模拟得到的船舶的回转性能低于试验,由此导致数值预报的回转圈的直径 偏大;而从横摇运动可以看出,数值预报得到的横摇运动整体上同试验的变化趋势一 致,但是存在着一定的波动,初始转舵时,船体有个最大幅值为 3.13°的横摇运动响 应,接下来转向另一侧,最大横摇幅度达到 5.42°,进入定常回转阶段以后,船体的 横摇运动维持在 2.08°左右;从船舶航速的历时曲线可以看出,在船舶进行大幅度 的舵角操作时,船舶会发生明显的降速,从当前数值预报结果和试验测量中都可以看 到在定常回转过程中的船舶降速达到 30%左右。三个曲线图都可以看到很长的一段 范围内的定常回转状态。CFD 数值模拟中只计算了一个回转周期的运动,即当首向 角达到 360°时,将舵转回初始状态。

接下来将从两个阶段进行自由回转运动地分析,分别为初始的非定常阶段,以及 之后的定常回转阶段。

4.3.1 非定常阶段

这个阶段包括前面介绍的初始转舵阶段和过渡阶段,为了能够更好的理解初期 非定常阶段的水动力性能,给出了转舵过程中桨舵周围的涡量场变化,见图 4-29。





图4-29 桨舵周围水平面内的涡量场分布

Fig.4-29 Vorticity field around twin propellers and rudders at horizontal sections

图中 6 张图片分别对应于船舶转舵的几个特定时刻,初始时刻两侧的涡量分布 基本保持对称,而当执行操舵过程时,周围的涡量场马上变得很复杂。当舵向右舷转 动时,右舷的螺旋桨的桨毂涡基本上没有受到后面舵的影响,而左舷螺旋桨的桨毂涡 随着转舵角度的增大,影响越来越大,当达到最大舵角 35°时,左舷螺旋桨的尾涡 被干扰的非常杂乱。同时,从图中可以看出,由于呆木产生的泻涡对左舷的螺旋桨流 场也会产生干扰。

上述强烈的流场变化,将会导致桨和舵的水动力受到明显的影响,尤其是对舵力 的影响。图 4-30 给出了两侧舵在转舵过程中所受到的侧向力的变化曲线。从图中可 以看出,在*t*=1*s*进行转舵以后,左舷舵的侧向力一直增加,而右舷舵则先减小再增 长到同样的侧向力。初始状态是,两个舵的侧向力和为零,即船体会保持直线航行, 而当执行完转舵操作后,两个舵的侧向力合力会急剧增加,从而产生整个船体自由回 转所需的动力。



图4-30 转舵过程中两侧舵受到的侧向力的历时曲线

Fig.4-30 Time histories of lateral forces of the leeward and windward rudder

4.3.2 定常阶段

在初期的非定常阶段以后,船舶在相应的舵力作用下进入定常回转阶段。图 4-31 给出了船体表面以及螺旋桨和舵上面的压力分布,分别为左侧以及右侧视图。从 图中可以看出, 右舷部分的船体表面的压力比左舷更大, 同时, 从首部的压力分布来 看, 左舷的压力值大于右舷压力值, 从而产生了向右舷方向的转动力矩。而从尾部的 压力分布来看, 同样是左舷压力值更大, 跟首部压力产生的效果一致, 都使得船体向 右舷方向转动。我们同样可以观测到船体表面以及桨舵面上一些压力的突变, 而产生 这些压力变化的原因可以从船桨舵周围的涡结构解释, 见图 4-32。图中的涡结构为 Q=200 的等值面, 用速度进行染色, 从中可以看出强烈的船桨舵以及附体间的干扰。 由于舭龙骨的存在而导致的泻涡会影响到尾部流场的左舷螺旋桨和呆木位置, 这也 是压力分布中产生突变的原因。同 Z 形操纵试验结果一样, 这里螺旋桨的桨载涡同 样可以观测处船体的运动趋势, 并且可以发现两侧舵在舵根和舵尖处产生的明显泻 涡。



图4-31 定常阶段船桨舵表面压力分布

Fig.4-31 Pressure distribution on the ship hull, propellers, and rudders during the steady phase



图4-32 定常回转阶段船桨舵周围涡结构分布

Fig.4-32 Vortical structure around fully appended ship hull, twin propellers and rudders



图4-33 定常回转阶段自由面兴波

Fig.4-33 Wave pattern in stabilized phase during turning circle simulation

图 4-33 给出了定常回转阶段船体周围的自由面兴波波形,跟拖航工况不同的是, 这里可以明显的观测到船体两侧自由面的差别,由于回转运动的存在,左舷处船首的 波高明显高于右舷,同时尾部兴波也存在较强的非对称性。

4.4 本章小结

本章采用基于重叠网格技术的 naoe-FOAM-SJTU 求解器以及开发完善的船舶操 纵控制模块完成了 ONRT 船模在静水工况下的自航推进、典型 Z 形操纵运动和自由 回转试验的直接数值模拟。

针对自航推进的数值计算,首先进行了螺旋桨的敞水性能计算,验证了重叠网格 方法进行敞水试验数值模拟的可靠性,并且分析了网格尺度对数值模拟结果的影响; 其次进行了无桨无舵的船模拖航计算,计算结果同己有试验值进行了对比验证,同 时,数值模拟得到的稳定流场可以作为后续带桨带舵自航计算的初始流场,从而加速 计算;最后进行了全附体船的自航推进数值模拟,并采用 PI 控制器来实时调整螺旋 桨的转速,从而预报模型自航点。数值预报的船舶推进自航点误差仅为 1.7%。验证 了当前数值计算方法对带螺旋桨带舵船舶计算的可靠性和高精度。

针对典型 Z 形操纵试验,进行了 10/10 和 20/20 两种工况的数值模拟,并且同试 验数据进行了对比验证,比较了 Z 形操纵的特征参数,如超越角、周期等,以及操 纵运动过程中船体的运动响应。同时还对一个周期内的船桨舵周围详细流场变化进 行了分析,给出了预报误差的原因。总体来看,当前数值预报可以较为精确地给出 Z 形操纵运动过程中的水动力特性。

针对自由回转试验的数值模拟,计算得到的回转轨迹以及特征参数同试验值吻 合良好,并且分别对初期的非定常阶段和后续的定常回转阶段进行了详细地分析,包 括操舵过程中的桨舵周围的涡量场变化,两侧舵的侧向力变化。同时给出了定常回转 阶段的船体表面压力分布、船桨舵周围涡结构和自由面兴波等流场细节。

本章中进行的静水工况下的自航推进,Z 形操纵运动和自由回转试验的数值模 拟,充分验证了当前基于重叠网格技术开发完善的操纵控制模块进行船舶自航操纵 运动直接数值模拟方面的可靠性,同时数值预报精度较高,为后续的船舶在波浪上的 自航操纵运动数值研究奠定了坚实的基础。

第五章 波浪工况下自航船舶航向保持数值研究

在完成静水工况中带螺旋桨带舵船舶的自航推进和操纵运动的数值模拟之后,本章将进行波浪工况下的自航船舶操纵运动的数值研究。采用三维数值造波模块和自主开发的航向保持控制模块(2.4.3.1节),对全附体 ONRT 船模在不同浪向工况下的航向保持进行 CFD 数值模拟,预报船舶在小舵角操纵下的航向纠偏能力。并与试验结果进行比较,以验证当前开发的航向保持模块的可靠性,以及求解器进行波浪中船舶操纵运动数值预报的能力。

5.1 计算工况和数值造波

5.1.1 计算工况



图5-1 船舶在波浪上的航向保持数值计算示意图

Fig.5-1 Diagram of free running ship in waves under course keeping control

本节采用的模型仍然是全附体双桨双舵的 ONRT 模型, 船体模型见图 4-1, 船体 主尺度见表 4-1。计算工况的设置完全参照 2015 年东京船舶水动力学 CFD 国际研讨 会上提供的标准算例进行。图 5-1 为航向保持数值计算的示意图, 船舶在不同的浪向 工况下需要完成以特定的航向角航行。其中 OXYZ 代表大地坐标系, oxyz 为船体坐标 系,也称非惯性坐标系,U为船舶航行速度, δ 为舵角, β 表示漂角, ψ 是首向角, χ 代表入射波浪的浪向角。

根据模型试验的设置,船舶是在模型自航点进行全自由度的航行,同时外部入射 波浪浪向角在变化,船舶航速为U=1.11m/s,对应于Fr=0.20。当前数值计算中,船 舶的螺旋桨转速根据上一章中的自航推进计算预报的结果给出,为 8.819RPS,入射 波浪的波长为 $\lambda/L_{wL}=1.0$,波高为 $H/\lambda=0.02$,详细的计算工况见表 5-1。

表5-1	自航船舶	在波浪中	的航向保	持计算工况
------	------	------	------	-------

一	船舶航速	浪向角	波高	波长
<i>仮很天空</i>	U_{0} (m/s)	χ (deg.)	<i>H</i> (m)	$\lambda(m)$
迎浪	1.11	0	0.06294	3.147
首斜浪	1.11	45	0.06294	3.147
横浪	1.11	90	0.06294	3.147

Table 5-1 Test conditions for course keeping simulations

5.1.2 数值造波



图5-2 数值造波和消波示意图

Fig.5-2 Schematic of the wave generation and absorption

本章节将进行自航船舶在波浪中的操纵性数值模拟,因此首先需要完成特定波 浪环境的生成。这里采用课题组自主开发的面向船舶与海洋工程的水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU中的数值造波模块,进行不同浪向工况的数值造波和消波,详细造 波形式见 2.3 节。这里只给出本章数值计算所采用部分的简要介绍。

图 5-2 给出了本章中进行的船舶在波浪上的航向保持数值模拟所采用的数值造 波和消波示意图。由于要进行斜浪工况的数值模拟,因此采用了两侧造波的形式,即 有两个造波入口,从而造出的波浪能够覆盖整个计算域。另外在出口一侧设置了消波 区,减小由于出口边界波浪反射的影响。同时,示意图下方给出了消波区的强度变化, 即消波系数在消波区开始部位为零,到出口处达到最强,具体的消波效果见公式 (2-26)。

5.2 全附体 ONRT 模型在波浪中的航向保持数值模拟

根据表 5-1 中给出的计算工况,本文将进行迎浪、首斜浪和横浪三种工况下的自 航船舶的航向保持数值计算^[153]。计算中船舶舵角根据首向角的变化进行实时反馈, 保证计算中船舶航向角始终保持为目标航向角。航向保持控制器的具体形式见公式 (2-31),根据试验要求,采用 P 控制器,且比例系数 *K_p*=1。数值计算采用的网格及 分布见上一章静水自航操纵计算中的图 4-8 和图 4-9,不同区块网格量的分布见表 4-6。但这里需要指出的是,跟静水工况中不同的是,这里波浪工况的计算网格在自由 面波高范围内进行了加密,波高范围内布置 16 个网格,因此较之前的网格量增加了 30 万,只是背景网格量增加,最终波浪工况中的自航操纵计算网格量为 713 万。

所有数值计算均在上海交通大学船舶与海洋工程计算水动力学研究中心 (CMHL)的高性能计算集群进行,服务器型号为 IBM nx360M4,每个计算节点包 含 2 块 Intel 至强 E5-2680V2 处理器,共 20 个计算核心,并且拥有 64GB 的内存。 当前数值模拟中共采用 40 个核心进行并行计算,其中,38 个核心为流场计算,2 个 核心分配给插值信息计算。时间步长设置为Δt = 0.0005s,对应于每个时间步内螺旋桨 转过 1.5°。完成一个算例的计算所需要的总计算时间约为 225 个小时,对应的 CPU 计算时间为 8979 核机时,完成了约 38000 个时间步的计算。

这里需要指出的是,由于重叠网格方法计算自航船舶的操纵性问题的复杂性,本 文中没有针对这部分进行网格的收敛性分析,并且,国际上当前其他的研究学者也基 本没有针对这种问题进行相关分析。唯一针对船桨舵相互作用下的自航船舶计算进 行网格收敛性分析是 Carrica^[86],根据他的研究表明,虽然数值模拟的船舶操纵特性 同试验值吻合良好,但是很多参数的网格不确定性很高,并且没有达到网格收敛性要求。鉴于重叠网格方法对网格的布置要求极高,不能进行大范围的网格尺度变化,因此不利于网格的收敛性分析,本文中也没有针对这部分的计算进行相关研究。但是, 文中所有的数值计算结果均同东京 2015CFD 研讨会上的标准试验结果进行了详细的 对比验证,而且前面章节中对当前求解器在简单的问题中,如静水拖航工况和螺旋桨 敞水性能计算中均进行过网格的收敛性分析,足以验证当前求解器的可靠性。

本章中进行船舶在波浪上操纵性能分析时,均采用无因次化的参数,针对六自由 度运动参数(X,Y,Z,ϕ,θ,ψ),平面上的两个线运动可以无量纲化为($X - X_0$)/ L_{wL} ,和 ($Y - Y_0$)/ L_{wL} ,同时,垂荡运动通过波高 ζ_a 来无量纲化,而三个角运动的无因次化形 式为:

$$\begin{cases} \phi / k\zeta_a, & 橫摇运动 \\ \theta / k\zeta_a, & 纵摇运动 \\ (\psi - \psi_c) / k\zeta_a, & 首摇运动 \end{cases}$$
(5-1)

其中, k为入射波浪的波数, 六个自由度运动的速度无因次化形式为:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \frac{1}{U_0} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix}$$
(5-2)

$$\begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} = \frac{1}{\omega_e k \zeta_a} \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix}$$
(5-3)

其中, ω_e 为波浪的遭遇频率,角速度 $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \psi$ 的单位为rad/s。舵角 δ 没有进行无因次化,单位是度,螺旋桨的推进系数分别为:

$$KT = \frac{T}{\rho n^2 D_p^4} \tag{5-4}$$

$$KQ = \frac{Q}{\rho n^2 D_p^5} \tag{5-5}$$

第 126 页

其中, *T* 和*Q*分别为螺旋桨的推力和扭矩; *n* 为螺旋桨的转速, 这里设置为 8.819RPS; *D_p*为螺旋桨的直径。这里先进行声明,本章中所有同试验值的对比图片中,实线代表当前数值计算结果,圆圈代表试验值。

此外,为了更好地分析波浪工况下的船体运动响应情况,文中采用傅里叶级数展 开的方法^[154,155]来量化分析波浪作用下的船体非定常历时曲线。随时间变化的量 *φ*(*t*), 可以是船舶运动、速度或者是受力等信息,它们可以通过船舶遭遇频率进行傅里叶级 数展开:

$$\varphi(t) = \frac{\varphi_0}{2} + \sum_{n=1}^{N} \varphi_n \cos(\omega_e nt + \gamma_n) \qquad n = 1, 2, 3...$$
(5-6)

其中, φ_n 为第 n 阶幅值, γ_n 为对应的相位值,其中第 n 阶的幅值和相位可以通过下 式得出:

$$\varphi_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \tag{5-7}$$

$$\gamma_n = \tan^{-1}(\frac{b_n}{a_n}) \tag{5-8}$$

其中,相应的第 n 阶系数可以通过下式求得:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T \varphi(t) \cos(\omega_e nt) dt$$
(5-9)

$$b_n = -\frac{2}{T} \int_0^T \varphi(t) \sin(\omega_e n t) dt$$
 (5-10)

进行傅里叶级数展开后的各阶级数中,零阶的幅值 φ_0 可以表示历时曲线 $\varphi(t)$ 的时间平均值。零阶和一阶响应幅值表征了对应函数的线性项。高阶幅值 $(\varphi_n, n \ge 2)$ 代表非线性项,在强非线性问题中,高阶幅值则必须考虑在内。

5.2.1 迎浪工况

跟上一章中静水中自航操纵的数值模拟一样,波浪中的自航操纵数值计算是从 静水自航推进数值模拟最终稳定的流场开始的,然后根据试验设置,当入射波浪波峰 到达船首位置处,放开船体运动。迎浪工况下的船舶运动响应历时曲线见图 5-3。

第 127 页







从图中可以看出,船舶的垂荡和纵摇运动响应较大,而横摇和首摇运动幅值很小。并且垂荡运动和纵摇运动的数值预报结果同试验测量的历时曲线吻合良好,并且 两者的一阶的傅里叶幅值同试验值的误差为3.7%和2.8%。试验和数值预报得到的横 摇和首摇运动基本上都没有波动。此外,图5-4给出了自航船舶在运动过程中的舵角 变化历时曲线,从图中可以看出,在迎浪工况下,基本上不需要进行舵角控制,船舶 可以保持直线航行。











(c) 纵摇速度

图5-5 迎浪工况下的船舶速度历时曲线

Fig.5-5 Time histories of ship velocities in head waves

图 5-5 给出了迎浪工况下自航船舶航向保持数值计算中的船舶速度变化历时曲线,包括船舶航速、垂荡速度以及纵摇运动的速度。针对船舶航速u,不论是试验值还是数值预报结果均表现出了明显的失速现象,这主要是由于在迎浪工况下的波浪增阻所致。取历时曲线无因次化时间尺度(t-t₀)*V_A/L_{wc}=2以后的速度值零阶傅里叶级数值,即时间平均值来计算船舶失速值,迎浪下的失速约为 17%。但是虽然历时曲线吻合较好,但是速度的波动幅值(一阶傅里叶级数幅值)跟试验值的误差达到了46%。这部分的原因主要是由于在数值计算中采用的是固定螺旋桨转速,不同的螺旋桨转速必然会一定程度的影响船舶航速变化,此外,同航速联系最为紧密的是船舶的受力情况,包括详细的船桨舵的受力情况,但是由于没有具体的试验数据进行对比,因此无法确定其影响多大。垂荡和纵摇运动的速度预报结果跟试验值趋势一致,由此也可以解释之前的垂荡和纵摇运动的高预报精度。

为了能够更深入地分析自航船舶在波浪工况下的推进性能,这里给出了计算中 螺旋桨的推力和扭矩系数变化曲线,见图 5-6。由于迎浪工况下船舶尾部流场基本处 于对称情况,因此这里只给出了一侧螺旋桨的推进系数。通过推力系数历时曲线变化 可以看出,推进性能的变化同图 5-3 中船舶运动呈现出紧密的联系。推力系数在船舶 首部上升时到达最大值,然后当船舶埋首时推力最小,扭矩的变化规律类似。此外, 推力的变化同船舶的航速变化同样紧密相关,例如,在时刻 B,实际的船舶航速较 大,因此导致尾部螺旋桨的进流更大,从而导致了推力的下降。这部分的现象可以通 过详细的尾部伴流场进行解释,这部分内容将在下面说明。从图中的曲线局部放大图 可以看到明显的高频振荡,这部分的振荡是由于真实螺旋桨叶片切割流场导致的。





Fig.5-6 Time histories of propulsion coefficients in head waves

下面将进行迎浪工况下自航船舶的航向保持数值计算的流场特性分析,其中,选取了一个波浪周期中的四个特征时刻进行对比,即A,B,C,D,对应于图5-3a中标注的四个时刻。图5-7给出了四个典型时刻下的船体周围自由面兴波变化,图中采用自由面波高进行染色。



图5-7 一个波浪周期内的自由面变化

Fig.5-7 Wave elevation colored with wave elevation in head waves

从图中可以看出,迎浪工况下自航船舶周围的兴波基本保持对称,并且在 D 时刻,可以发现在船首遭遇波峰时会在后面产生一个明显的二次波峰,进而会影响船体表面的压力分布,使得船体出现较为明显的非线性的运动响应。此外,为了分析迎浪工况下自由航行船舶的推进性能,这里给出了螺旋桨桨盘面处的伴流场分布,分别对应于上面的 B 和 D 时刻,如图 5-8 所示,图中等值线表征螺旋桨周围流场的轴向速度分布。



Ur: 0.4 0.6 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2

图5-8 B和D时刻螺旋桨桨盘面处的伴流场分布

Fig.5-8 Wake profiles in head waves at time instance B and D





Fig.5-9 Vortical strucutures around ship hull propeller and rudder in one wave period

等值线取为船体的相对速度 $U_r = U_0 - U_x$,这样能更清晰地看出周围伴流场的变化。在 B 时刻,相对速度明显的小于 D 时刻,即螺旋桨的实际进流在 B 时刻更大,因此导致在 B 时刻的推力和扭矩系数更小,详见图 5-6。

此外,本文还给出了在四个典型时刻的船桨舵周围的涡结构分布,见图 5-9。图 中采用 Q=200 等值面来展示涡结构的分布,并用轴向速度染色。从图中可以清晰地 看出,首部的球鼻艏产生的泻涡,以及螺旋桨和舵周围的涡的明显干扰。同时,较强 的螺旋桨桨毂涡的轨迹可以显示出船舶的上下运动情况,并且在 D 时刻,侧视图中 可以更为清晰的看到船首遭遇波峰时产生的二次波峰现象,这也显示出船舶在迎浪 工况下出现的很强的非线性现象。

5.2.2 首斜浪工况

首斜浪的工况跟迎浪工况入射波长和波高一致,仅仅是浪向上的差别。这里采用 航向保持控制器进行舵角的实时调整,确保自航船舶保持目标航向角。







图 5-10 给出了在首斜浪 45°工况下的船舶运动历时曲线以及同试验值的对比。 跟迎浪工况一致,自航船舶的垂荡和纵摇运动幅值依然很大,并且数值预报的运动趋 势跟试验值基本一致,但是首斜浪工况中的船舶出现了明显的横摇和首摇运动。无因 次化的横摇运动幅值最大 0.6,对应于 2.2°的横摇角。首摇运动的幅度更大,最大的 无因次化首摇角约为 0.89,对应于 3.2°的首摇角。这主要是由于在斜浪的工况下, 船舶在迎浪面和背浪面的波高分布不同,从而导致了产生横摇和首摇的力矩。当前的 数值预报结果可以很好的预报出在斜浪工况下的船舶运动响应,并且同试验的测量 值吻合较好。

图 5-11 给出了船舶在首斜浪工况下的船舶速度历时曲线,以及同试验的对比。 该工况下的船舶失速为 9%,小于迎浪工况下的 17%。这是由于斜浪在船体周围的分 布不同,会产生对应的侧向力,而沿航行方向的阻力减小。数值预报的航速波动要小 于试验值,其中数值预报的波动幅值误差在 58%,但是整体的趋势一致。其它的船 舶运动速度,均同试验测量值吻合良好,主要差别集中在初始的一段时间,这主要是 由于数值计算中是从稳定的自航状态开始,而试验中则是直接从静止状态开始的。速 度值的准确预报也解释了上图中船舶运动响应预报的准确性。


第 136 页



图5-11 首斜浪工况下自航船舶的船舶速度历时曲线 Fig.5-11 Comparison of ship velocities in bow quartering waves

在首斜浪工况下船舶航向控制器所进行的舵角的变化见图 5-12。从图中可以看出,为了保证首斜浪中的船舶航向,进行舵角变换是一个非常关键的步骤。最大的操 舵角为 3.2°,由于航向保持控制器中舵角跟首向角的变化直接相关,因此图中舵角 的变化曲线跟图 5-10d 中的首向角变化趋势保持一致。当前采用开发的航向控制器 预报的舵角变化同试验值基本保持一致,只是初始状态下不同。



图5-12 首斜浪工况下的船舶航向保持模拟中舵角的历时变化

Fig.5-12 Time histories of rudder deflection during course keeping simulation in quartering waves

图 5-13 给出了在首斜浪工况下的自航船舶的运动轨迹以及同试验值的对比。尽管首斜浪工况下的船舶运动响应非常复杂,还需要进行操舵保持船舶航向,但是当前数值预报得到的自航船舶的运动轨迹跟试验值吻合的非常好,这也充分说明了采用 当前的基于重叠网格方法以及所开发的船舶航向控制器的可靠性和高精度。



图 5-13 首斜浪工况下的自航船舶运动轨迹对比 Fig.5-13 Trajectory comparison in bow quartering waves

数值预报的自航船舶在首斜浪工况下的螺旋桨推进系数见图 5-14。从图中可以 看出, 左舷螺旋桨和右舷螺旋桨的推进性能有很大的差别, 其中, 红色代表左舷螺旋 桨推进系数, 而蓝色则代表右舷螺旋桨的推力和扭矩系数。



第 138 页



图5-14 首斜浪工况下的船舶推进性能变化

两者之间的区别主要是由于斜浪工况导致的船舶尾部流场的不对称性,在这种 干扰下,左舷螺旋桨的推力始终小于右舷螺旋桨。这部分的原因可以从后面的尾部伴 流场分布中得出。同时,这里的螺旋桨推进系数的波动变化同图 5-5a 中的船舶航速 变化直接相关,例如,在 B 时刻,真实的船舶航速更低,由此导致了螺旋桨的进流 减小,进而引起了螺旋桨的推力增加。同样的,从局部放大图中可以清晰地看到由于 真实螺旋桨叶片切割流场导致的高频振荡。需要指出的是,在扭矩系数的对比中,将 右舷螺旋桨的扭矩系数取了绝对值,方便更好的对比。



第 139 页

Fig.5-14 Time histories of propulsion coefficients in bow quartering waves



图5-15 首斜浪工况下的船舶两侧舵的水动力变化





图5-16 首斜浪工况下的四个典型时刻自由面变化 Fig.5-16 Wave elevation in one wave period for bow quartering waves

图 5-15 给出了在首斜浪工况下两侧舵的水动力变化,包括舵的阻力和侧向力历时曲线。从图中可以明显地看出,右舷舵所受到的阻力和侧向力波动幅度始终大于左舷舵,这个现象也能解释图 5-14 中的螺旋桨的推进系数变化。由于保持航向的需要进行的操舵会显著影响到舵前方的螺旋桨尾流,进而使得左舷螺旋桨的推进系数波动更大。为了更好地分析两侧螺旋桨和舵所受到的水动力的显著差异,这里采用一个波浪周期内的四个典型时刻的流场进行分析,四个时刻 A, B, C, D 分别对应于图 5-11a 中的四个时间点。



图5-17 首斜浪工况下螺旋桨和舵周围的水平截面伴流分布

图 5-16 给出了一个波浪周期内的四个典型时刻的自由面波形分布,图中等值线为自由面波高,从图中可以看出,船体两侧的波形的分布差异较大,由此也产生了船舶横摇及首摇运动的力矩。此外,在当前的航速下船舶的兴波特性较为明显,并且同

Fig.5-17 Wake regions around twin propellers and twin rudders in one wave period

入射波浪呈现出强烈的干扰作用。入射波的传播方向同迎浪面的绕射波方向相反,从 而导致迎浪面的波形被挤压,而在背浪面,两者的传播方向一致,因此绕射波的影响 范围较大。

图 5-17 给出了一个波浪周期内,螺旋桨轴线处的水平切面上的伴流分布变化。 从图中可以明显地看出,右舷螺旋桨和舵周围的伴流分布变化更为剧烈,这也导致了 两侧螺旋桨(见图 5-14)和舵(见图 5-15)的水动力差异。此外,通过水平面内的 伴流分布,还可以清晰地看出两侧螺旋桨的进流变化情况,从而也能够从另一个侧面 去解释首斜浪工况下的推进性能变化。



图5-18 首斜浪工况下一个波浪周期内的尾部涡量场变化

Fig.5-18 Vortical structures around twin propellers and rudders depicts as Q=200 colored by axial velocity in one wave period

图 5-18 给出了一个波浪周期内的四个典型时刻的螺旋桨和舵周围的涡量场变化, 图中的涡结构为 Q=200 的等值面,并且用轴向速度进行染色。螺旋桨周围的梢涡以 及桨毂涡可以清晰的观测到,并且螺旋桨产生的涡跟后面的舵间会产生强烈的干扰 情况,例如,在时刻 B 和时刻 C,左舷螺旋桨的桨毂涡被后面的舵干扰较为剧烈, 但是在 A 和 D 时刻,则是右舷的螺旋桨受到的舵干扰更为明显。此外,螺旋桨的桨 毂涡轨迹同样可以反映出船体的运动情况。舵根处的涡也是可以明显的观测到,这部 分的泻涡主要是由于人工间隙的存在,以及由于操舵产生的转角导致。

5.2.3 横浪工况

类似于前面的迎浪和首斜浪工况,这里给出了在横浪条件下的自航船舶航向保 持数值模拟得出的船舶运动历时曲线以及同试验值的对比,见图 5-19。横浪工况下 的垂荡运动依然很剧烈,数值预报的波动幅值与试验值的波动幅值误差为 8.9%。但 是纵摇运动是三种波浪工况中最小的,这种现象在试验和数值预报的结果中都可以 观测到。横摇运动是所有波浪工况中最为剧烈的,最大的无因次横摇幅值达到 1.9, 对应于横摇角为 6.8°,这主要是由于横浪工况下,迎浪面和背浪面的压力分布差异 最大,从而导致了较强的横摇运动。此外,初始状态的不同以及现在数值模拟中转动 中心的值跟试验中有可能也不一致,这些因素都会导致最后的横摇结果误差。





图5-19 横浪工况下自航船舶航向保持数值模拟中船舶运动历时曲线

Fig.5-19 Time histories of ship motions in beam waves

跟首斜浪工况中较大的首摇运动变化不同,在横浪工况下,首摇运动较小,如图 5-19d 所示,这里最大的无因次化首摇运动值为 0.19,较首斜浪工况中的 0.89 小很 多。这也说明在横浪工况下,很难影响到船舶的航向。

图 5-20 展示了在横浪工况下的船舶各个方向运动的速度变化历时曲线,跟前面 两种工况相比,这里的船舶失速只有 2%,这主要是由于横浪工况很难改变船舶的纵 向阻力大小。同时,船舶的垂荡速度、纵摇角速度和首摇角速度预报结果同试验测量 值吻合较好,横摇角速度的误差较大,主要的原因在上面对横摇运动地分析中已经说 明。



第 144 页



Fig.5-20 Time histories of ship velocities in beam waves

图 5-21 给出了在横浪工况下的航向保持所需的舵角变化历时曲线。从图中可以 观察到,为了保证船舶的航向,横浪工况下舵角的变化很小,舵角幅值在 1°以内。 尽管在历时曲线上的波动幅度存在差异,但是当前数值预报的操舵情况同试验值的 整体趋势一致。





Fig.5-21 Time histories of rudder deflection in beam waves



图5-22 横浪工况下的自航船舶航向保持数值模拟运动轨迹对比

Fig.5-22 Trajectory comparison in beam waves

图 5-22 给出了在横浪工况下的自航船舶航向保持数值模拟中预报的船体运动轨迹同试验值的对比。跟首斜浪工况类似,这里数值预报得到的船舶运动轨迹跟试验中

的测量结果吻合的非常好。试验中的船舶运动轨迹较当前的数值预报结果偏离初始 航线更多一点,这主要是由于在试验中的船体首摇运动一直处于负值,见图 5-19d 中 的首摇运动历时曲线,而数值预报的首摇运动则是在围绕零点上下震荡,因此才出现 了当前的数值结果偏离初始轨迹更少一些。



图5-23 横浪工况下的螺旋桨推进系数历时曲线

Fig.5-23 Time histories of propulsion coefficients in beam waves

数值预报的横浪工况下的螺旋桨推进系数历时曲线见图 5-23,图中的右舷螺旋 桨的扭矩系数取了绝对值,为了更好的对比两侧的区别。不同于首斜浪工况,两侧的 推力系数振荡幅度均较小,这里的推力系数范围在 0.2 到 0.25 之间,小于迎浪工况 中的 0.19 到 0.35,以及首斜浪工况中的 0.19 到 0.32。这可以通过船舶的实时航速 (见图 5-20a)来进行说明,在横浪工况下,船舶的失速仅为 2%,即此时螺旋桨的 进流更大,从而导致在同等螺旋桨转速下推力更小。另外,从图中可以看到左舷螺旋 桨的推力和扭矩振荡幅值较右舷稍大,这主要是由于左舷的螺旋桨位于迎浪面,从而 对应的螺旋桨周围流动更加复杂导致。这里也可以捕捉到由于真实螺旋桨桨叶切割 流场导致的高频振荡现象,见局部放大图。

图 5-24 给出了在横浪工况下的船体两侧舵的阻力和侧向力变化历时曲线,图中 舵的侧向力取的是绝对值,从而进行更好的对比说明。从图中可以看出,处于迎浪面 的左舷舵的阻力振荡幅度更为明显,侧向力幅值变化则差别较小。



图5-24 横浪工况下的两侧舵阻力和侧向力的历时变化 Fig.5-24 Comparison of port and starboard rudder forces in beam waves

为了更好地分析横浪工况下的自航船舶推进和操纵特性,这里给出了一个波浪 周期内的四个典型时刻的流场分布,四个时刻点见图 5-19a。图 5-25 给出了四个时刻 对应的横浪工况下的波形图,图中等值线为波高。从图中可以看出明显的区别,例如 在 B 和 D 时刻,自由面的波高高度明显大于 A 和 C 时刻,也就是说在船体经历波峰 和波谷时,对应的整个自由面的波高较大。这主要是由于在横浪工况下的船舶横摇运 动较大,这时船舶会产生相应的辐射波形,当辐射波和入射的横浪叠加时,会产生波峰值的叠加,而当两个波叠加时,方向相反则会减小峰值,因此会出现图中的现象。此外,从图中也可以看出入射波浪对迎浪面的绕射波的挤压情况,以及在背浪面的大范围影响。



图5-25 一个波浪周期内横浪工况下的自由面波形变化 Fig.5-25 Wave elevation in one wave period in beam waves

横浪工况下的螺旋桨和舵在桨轴线水平切面处的伴流场分布见图 5-26。从图中 可以明显地看出,两侧螺旋桨的进流基本一致,变化幅度较小,这也解释了图 5-23 中的螺旋桨推进系数的较小波动。此外,从图中还可以看出,迎浪面的螺旋桨和舵周 围的流场变化更为剧烈,同时左舷螺旋桨产生的桨毂涡会随着波浪的传播方向偏移。 同时,从图中也可以看出在不同时刻两侧舵周围的流场分布变化,从而可以解释图 5-24 中舵阻力和侧向力的差别。





Fig.5-26 Wake region around twin propellers and rudders in one wave period in beam waves

5.3 本章小结

本章节利用动态重叠网格技术和三维数值造波和消波模块,配合以自主开发的 航向保持控制器,完成了对全附体 ONRT 船型的在不同浪向工况下的自航船舶航向 保持数值模拟。计算中采用静水工况中 CFD 数值预报的船舶自航点设置螺旋桨转速, 舵是根据航向保持控制器进行调整,共进行了迎浪、首斜浪和横浪三种浪向工况下的 船舶航向保持数值模拟。所有算例均有试验结果进行比较和验证,包括自航船舶的运 动、船舶航速、各方向的运动速度、船舶运动轨迹以及舵角的变化等。同时给出了在 不同浪向计算中的船舶推进系数变化、舵阻力和侧向力的历时曲线、自由面兴波波 形、螺旋桨和舵周围的伴流场分布以及尾部的涡量场分布。 从本章的计算结果中可以得出,在首斜浪工况下船舶会产生最为明显的首摇运动,因此最需要进行舵角的操控来保证船舶的航向角;在迎浪工况下,船舶的失速现 象最为明显;在横浪工况下船舶的横摇运动最为显著,但是失速最小。通过与试验结 果的详细对比验证,证明了当前基于重叠网格方法进行复杂波浪工况下的船舶操纵 运动数值研究,尤其是船舶航向保持的数值模拟具有很高的可靠性和数值预报精度。 同时,也充分验证了本博士论文中自主开发的船舶航向保持控制器的适用性和可靠 性,对小舵角操作下的船舶航向纠偏性能给出了精确的数值预报。目前的工作为后续 开展更大幅度的波浪中操纵运动的直接数值模拟奠定了基础。

第六章 波浪工况下自航船舶 Z 形操纵运动数值模拟

本章将利用基于重叠网格技术的船舶 Z 形操纵控制模块和基于松弛算法的区域 造波方法完成对不同波浪工况下的典型 Z 形操纵运动的数值模拟研究。进而验证当 前开发的基于重叠网格技术的面向自航船舶波浪中操纵运动问题求解器的可靠性和 适用性。当前的数值模拟中不仅考虑到了船桨舵之间的相互干扰作用,同时船舶还在 进行大幅度的操纵运动,此外还要叠加外部波浪的影响。因此,是对自航船舶在波浪 下操纵运动的直接数值模拟。本章研究了不同波长和波高对 Z 形操纵运动的影响, 数值预报结果与已有试验值进行了对比分析,验证了当前开发的 CFD 求解器可以作 为一种可靠的分析工具进行该类复杂问题的研究。

6.1 计算网格和工况

本章所采用的计算船型与前两个章节中使用的船型一致,均为全附体的 ONRT 模型,其几何模型见图 4-1,模型的主尺度可以参见表 4-1。用于波浪工况计算的总 网格量为 713 万,这里给出计算网格的中纵剖面,见图 6-1。



图6-1 计算域中纵剖面的重叠网格分布

Fig.6-1 Profile view of overset grid distribution

本章节主要是针对不同波浪工况下的典型 Z 形操纵运动的数值计算分析,执行 舵角和换舵首向角均为 10°,即典型的 10/10 Z 形操纵运动的数值模拟。计算中的波 浪均为初始的迎浪状态,波长和波高不同,从而研究不同波长以及不同波高对自航船 舶 Z 形操纵运动的影响。详细的计算工况见表 6-1。数值模拟中船舶是在模型自航点 进行全自由度的航行,船舶航速为U=1.11m/s,对应于 Fr=0.20。

表6-1	自航船舶在波浪上的乙用	汐操纵计算工况
------	-------------	---------

计算工况	波长 λ(m)	λ / $L_{_{WL}}$	波高 <i>H</i> (m)	波陡 H / λ
静水工况				
	1 5735	0.5	0.03147	0.02
	1.5755	0.5	0.06294	0.04
波浪工况	3.147	1.0	0.06294	0.02
	3.7764	1.2	0.077528	0.02
		1.2	0.06294	0.0167

Table 6-1 Test conditions for zigzag maneuver simulations in waves





Fig.6-2 Schematic of the computational domain and wave generation zone

计算中采用第三方的基于松弛算法的区域造波工具 waves2Foam 进行波浪环境的生成,由于计算过程中计算域的背景网格会跟随船体做大幅度平面运动,因此,这 里采用了同计算域锁定的区域(Relaxation zone)进行造波。整个计算域和造波区域的设置见图 6-2。

6.2 波浪上的 Z 形操纵运动计算结果和分析

波浪上的自航船舶 Z 形操纵运动数值计算均在上海交通大学船舶与海洋工程计 算水动力学研究中心(CMHL)的高性能计算集群进行,计算机型号为 IBM nx360M4, 每个计算节点包含 2 块 Intel 至强 E5 2680V2 处理器,共 20 个计算核心,并且拥有 64GB 的内存。当前数值模拟中共采用 40 个进程(两个计算节点)进行并行计算, 其中,38 个进程进行流场计算,另外 2 个进程分配给插值信息计算。时间步长设置 为Δt = 0.0005s,对应于每个时间步内螺旋桨转过 1.5°。完成一个波浪中的 Z 形操纵 算例所需要的总计算时间约为 347 个小时,对应的 CPU 计算时间为 13880 核机时, 完成了约 39000 个时间步的计算。

本章中将主要从三个方面进行详细的波浪中 Z 形操纵的数值分析,首先是自航船舶在相同的波陡工况下,不同波长对 Z 形操纵运动的影响分析;其次为在相同的 波长条件下,不同的波高对自航船舶 Z 形操纵运动的影响^[156];最后是汇总的不同入 射波浪对船舶 Z 形操纵运动的影响。接下来的内容将以船舶运动响应、水动力载荷 以及流场分析三部分来说明波浪对 Z 形操纵的影响。数值预报的船舶运动和操纵特 征参数均同已有的试验数据^[152]进行了对比验证。

6.2.1 船舶运动响应

本节将主要研究不同波浪工况下的 Z 形操纵中船舶的运动响应^[88],首先是相同 波陡工况下,不同波长波浪条件下的船舶运动响应,接下来是不同波高条件下的运动 响应分析。分析的运动参数包括 Z 形操纵中的船舶首向角、舵角变化历程、船舶六 自由度运动响应、超越角、操纵周期、船舶航速、漂角、首摇角速率等等一系列的参数历时曲线,并且针对非定常的历时曲线采用傅里叶级数展开(Fourier Series, FS) 和快速傅里叶变换(Fast Fourier Transformation, FFT)进行分析。

图 6-3 到图 6-5 给出了在相同波陡(0.02),不同的波长条件下的船舶首向角及 舵角变化历时曲线。从图中可以看出,当期数值预报的换舵和首摇响应均同试验测量 结果吻合较好,但是跟静水中计算的工况类似,数值预报的操纵周期均稍大于试验中 的操纵周期。另外,从图中也可以看出,数值预报的第一超越角以及第二超越角均小于试验中的测量值。除此之外,数值预报的结果可以较好地给出整个波浪中 Z 形操 纵的首摇和舵角历时变化。



图 6-3 $\lambda / L_{wL} = 0.5$ 工况下首向角和舵角历时曲线

Fig.6-3 Rudder execution and yaw angle in waves of $\lambda / L_{wL} = 0.5$





Fig.6-4 Rudder execution and yaw angle in waves of $\lambda / L_{WL} = 1.0$



图6-5 λ/L_{WL} = 1.2 工况下首向角和舵角历时曲线

为了能够量化分析数值预报的波浪中 Z 形操纵的特征参数,这里给出了不同波 长工况下的船舶操纵性参数,如第一超越角、第二超越角以及对应时刻的首摇角、操 纵周期等的对比结果,见表 6-2。从中可以看出,第一和第二超越角同试验值相比均 偏小,并且从对应时刻的首摇角来看绝对偏差均在 0.3°以内。操纵周期的预报精度 也较高,误差都在 0.3s 以内。

λ / $L_{_{WL}}$		第一超越角	首向角	第二超越角	首向角	周期
		(°)	(1st OSA)	(°)	(2nd OSA)	(s)
0.5	CFD	1.9391	11.9391	1.8641	11.8641	15.7565
0.5	EFD	2.2005	12.2005	2.2136	12.2136	15.6685
1.0	CFD	1.8293	11.8293	2.1533	12.1533	20.0388
1.0	EFD	2.0810	12.0810	2.5454	12.5454	19.7724
1.2	CFD	1.8081	11.8081	1.8582	11.8582	19.4279
1.2	EFD	2.1256	12.1256	2.1382	12.1382	19.2901

Table 6-2 Comparison of 1st and 2nd overshoot angles and period in waves

表6-2 不同波长工况下的操纵参数对比

Fig.6-5 Rudder execution and yaw angle in waves of $\lambda / L_{WL} = 1.2$



图6-6 不同波长工况下的第一和第二超越角同试验值的对比

Fig.6-6 Comparisons of overshoot angles in different waves

为了更好的看出当前数值预报的波浪中 Z 形操纵超越角的情况,图 6-6 给出了 对应于不同波长工况下的第一和第二超越角的变化,并且同试验值^[152]进行了对比。 图中,圆圈代表第一超越角,三角代表第二超越角,实心图形表征试验测量值,空心 图形则代表数值预报结果。从图中可以清晰地看到,当前数值预报的不论是第一超越 角还是第二超越角,虽然在数值上同试验值有一定的误差,但是都可以较好地模拟出 随着波长变化而变化的趋势。

图 6-7 到图 6-9 给出了不同波长工况下的自航船舶 Z 形操纵运动过程中的横摇、 漂角、首摇速率以及船舶航速的变化历时曲线,以及同试验的对比。由于在短波工况 下的船舶垂荡和纵摇运动响应较小,试验值的测量值也较难获取,因此这里只是在图 6-8 和图 6-9 中给出了船舶对应的垂荡和纵摇运动历时曲线同试验的对比。从图中可 以看出,当前数值预报的不同波浪工况下的船舶运动响应可以较好的反映出真实 Z 形操纵试验中的运动情况,趋势吻合良好,但是在初始的一段时间内误差较大。分析 原因主要是由于数值模拟中采用固定的螺旋桨转速,而试验中则无法保证是固定的 转速,同时,数值模拟中的初始状态是从稳定的静水自航流场开始,而试验中则是直 接在波浪上的运动,因此导致了初始阶段的误差,但是随着时间的推移,这种由于初 始状态不同而导致的误差逐渐消失。后期的数值模拟结果同试验值吻合较好。



图 6-7 $\lambda/L_{WL} = 0.5$ 工况下的首摇速率、横摇、航速和漂角的对比 Fig.6-7 Comparison of yaw rate, roll, ship speed and drift angle in waves of $\lambda/L_{WL} = 0.5$

此外,从图中可以明显地看出由于波浪影响而导致的高频的振荡情况,同时,振荡的幅值在短波工况最小,而在 λ/L_{wL} =1.0和 λ/L_{wL} =1.2波浪条件下,振荡幅度很大,在漂角、首摇速率以及船舶航速的历时曲线中都可以看得出来。为了更好的量化分析由于波浪变化引起的运动响应影响,这里采用傅里叶级数展开的方法来分析波频振荡的幅值(1st FS)和船舶航速的失速效应(0th FS)。求得的运动参数见表 6-3。

从图 6-8 和图 6-9 中的垂荡和纵摇运动历时曲线可以看出,当波浪场在计算域中 全部生成以后,船舶很快就进入了周期性的波频振荡运动,并且为了更为清晰的看到 由于波浪导致的垂荡和纵摇运动的变化,图 6-10 给出了更小时间尺度上的不同波浪 工况下的垂荡和纵摇运动。从一阶傅里叶级数幅值可以看出,在相同的波陡条件下, 当波长增加时,波浪的运动响应也随之增加,并且当波长在一个船长尺度附近,波浪 导致的运动响应会明显放大。同时,试验测量的结果也是这一趋势。



图 6-8 λ/L_{WL} = 1.0 工况下的垂荡、纵摇、横摇、漂角、首摇速率以及航速的对比 Fig.6-8 Comparison of heave, pitch, roll, drift motions, yaw rate and instantaneous ship speed in waves of

 $\lambda / L_{WL} = 1.0$

针对Z形操纵运动过程中的横摇运动,数值预报的结果变化趋势同试验值一致, 但是横摇运动的峰值预报结果偏小。而操纵运动过程中的漂角,定义为船长方向跟运 动轨迹的切线间的夹角,可以用来衡量船舶的回转性能。从图中可以看出,试验中测 量的由于波浪导致的漂角振荡幅值明显大于数值预报的结果,这也证实了在实际的 船模试验中船舶的回转性能比数值中更好,也进一步解释了数值预报得到的船舶超 越角偏小。这也说明了想要完美地再现船模试验结果还是存在一定的难度。尽管有一 定的预报误差,但是当前整体预报的漂角变化规律跟试验值吻合良好,并且均值基本 一致。



图 6-9 $\lambda/L_{WL} = 1.2$ 工况下的垂荡、纵摇、横摇、漂角、首摇速率以及航速的对比 Fig.6-9 Comparison of heave, pitch, roll, drift motions, yaw rate and instantaneous ship speed in waves of $\lambda/L_{WL} = 1.2$

表6-3 不同波长工况下的船舶横摇、垂荡、纵摇和航速变化

λ / $L_{_{WL}}$	横摇 (°)		垂荡(×10 ⁻² m)	纵摇(°)	航速 (m/s)
	最小值	最大值	(1st FS)	(1st FS)	(0th FS)
0.5	-2.8491	2.9069	0.1799	0.1065	1.0350
1.0	-2.6257	2.8037	1.8234	2.2911	0.8675
1.2	-3.5198	2.7372	2.3883	2.8690	0.8919

Table 6-3 Roll, heave, pitch and ship speed in different wave lengths



图6-10 不同波长工况下的船舶运动响应对比

针对首摇速率,当前的数值预报结果较为理想,能够同时预报出由于操纵运动导 致的低频变化,以及由于波浪导致的高频振荡。船舶失速是在波浪中航行船舶的一大 特性,并且可以通过船舶实时航速变化求得。平均的船舶航速通过零阶的傅里叶级数 幅值来表示,不同波长下的平均航速见表 6-3。在短波工况下的船舶失速最小,为 6.76%,在波长等于船长时,失速最大,为21.85%,当波长等于1.2倍的船长时,失 速为19.65%。船舶在不同波长工况下的航速变化历时曲线对比见图 6-10。从中可以

Fig.6-10 Comparisons of ship motions under different wave lengths ($H / \lambda = 0.02$)

看出,尽管在波长等于船长时失速最大,但是 1.2 倍船长的波浪工况下,航速的变化 幅度最大。



图6-11 相同波长,不同波高情况下船舶运动响应对比 Fig.6-11 Comparisons of ship motions under different wave heights

第 163 页

由于船舶的航速同 Z 形操纵运动的周期有关,因此,我们从其它自由度的运动 历时曲线可以看出明显的相位差,也由此导致了不同波浪工况下的船舶 Z 形操纵周 期的不同,见表 6-2。在波长等于船长时,操纵周期最长,为 20.0388s。

除了上述的在相同波陡条件下的波长变化对 Z 形操纵的影响外,本文还进行了 同样波长工况下不同波高的数值模拟,图 6-11 给出了在 λ/L_{wL} = 0.5 和 λ/L_{wL} = 1.2 两 种不同波长工况下的不同波高对船舶运动的影响对比,包括垂荡运动、纵摇运动、横 摇运动和首摇运动四种的运动历时曲线对比。横摇运动峰值、第一和第二超越角、垂 荡和纵摇的一阶傅里叶幅值,以及航速的对比情况见表 6-4。从垂荡运动的振荡幅值 来看,随着波高的增加,振荡幅值基本成比例增加,例如,在短波工况下,波陡为 0.02 的垂荡幅值为 0.1799,而波陡为 0.04 工况时的垂荡幅值则为 0.3624。众所周知,波 浪的波高大小即能表示其所蕴含的能量大小,因此,当船舶遭遇更大波高的波浪时, 必然需要消耗更多的动力,正因为如此,船舶的航速随着波高的增加,呈现出明显的 下降趋势,例如,在 1.2 倍船长的波长工况下,0.02 波陡的船舶失速为 19.65%,而 0.0167 波陡下的船舶失速则为 16.19%。由于航速的变化,所以在波高更大的工况中, 船舶操纵的周期更长,从图 6-11 中的对比也可以看出,最为明显的差别就是在波高 更大时,运动历时曲线较为延后。

2/1	H / 2	横摇 (°)		超越角 (°)		垂荡	纵摇	航速
$\mathcal{N} / \mathcal{L}_{WL}$	11 / 70	最小值	最大值	1st	2nd	$\times 10^{-2} \mathrm{m}$	(°)	(m/s)
0.5	0.02	-2.8491	2.9069	1.9391	1.8641	0.1799	0.1065	1.0350
0.5	0.04	-2.9344	2.9226	1.8892	1.7905	0.3624	0.2006	0.9775
1.0	0.02	-2.6257	2.8037	1.8293	2.1533	1.8234	2.2911	0.8675
1.0	0.0167	-3.4675	3.1960	1.8281	1.8797	2.0075	2.4128	0.9303
1.2	0.02	-3.5198	2.7372	1.8081	1.8582	2.3883	2.8690	0.8919

表6-4 不同波浪工况下的船舶运动响应参数对比 Table 6-4 Comparisons of main parameters in different waves

6.2.2 船舶水动力载荷

本节将主要研究在不同入射波浪工况下,自航船舶所受到的水动力载荷变化。并且由于船舶的运动响应是水动力载荷的直接表现,因此,本节的载荷研究能够更好的

解释上一节中的船舶运动性能。这里将首先以波长等于船长的工况作为例子,来分析 自航船舶在波浪中进行 Z 形操纵运动过程中的水动力载荷。图 6-12 给出了船体阻力, 螺旋桨推力以及舵阻力随时间的变化曲线,其中螺旋桨和舵的力均采用左舷和右舷 两部分力的总和,即图中的曲线可以变现出船桨舵三部分力的分布情况。从图中可以 看出,船体的阻力占最为主要的力的成分,大范围的振荡同样导致了上节中阐述的船 体的大幅度的周期运动。



图6-12 A/Lwz = 1.0 波浪工况下船体、螺旋桨和舵纵向力历时曲线

Fig.6-12 Comparison of longitudinal forces on ship hull, propeller and rudder in waves of $\lambda / L_{wL} = 1.0$

为了更好地分析在波浪工况下的自航船舶 Z 形操纵运动的推进性能,图 6-13 给 出了整个数值模拟过程中的左舷和右舷螺旋桨的推力和扭矩变化历时曲线。从图中 可以清晰的看到由于操纵运动导致的低频振荡,以及由于波浪导致的高频振荡。不同 于静水工况,波浪导致的推进参数波动明显,并且推力和扭矩均值比静水工况中要显 著增加。同时,由于真实螺旋桨切割流场导致的更为高频的振荡同样可以从局部的放 大图中观测到。图中的推力和扭矩变化反映出了自航船舶在波浪中进行典型的 Z 形 操纵运动过程中的推进性能,大幅度的波动则是由转舵和船舶操纵运动引起的尾部 的流场变化导致。





Fig.6-13 Time histories of thrust (up) and torque (down) coefficients for zigzag maneuver in waves of

 $\lambda / L_{WL} = 1.0$

作用在左舷和右舷舵上面的阻力和侧向力的变化历时曲线见图 6-14。同静水工 况中的舵上所受到的水动力变化(图 4-25)不同的是,阻力和侧向力均呈现出明显 的波动,并且波动幅值较大,但是整体的水动力载荷变化趋势一致。从图中可以看出, 由于波浪导致的舵力变化基本上等同于由于转舵而导致的舵力变化,这也说明了波 浪对船舶操纵性能的影响非常可观。我们知道,目前所采用的基于重叠网格方法的 CFD 全粘性流场数值计算中,基本上考虑到了所有的因素,如粘性效应、真实的螺 旋桨转动以及转舵效应、波浪效应等等。因此,目前的数值模拟能够捕捉到非定常的 水动力变化,以及一些强非线性的现象。图 6-14 中的舵力变化反映了自航船舶在波 浪上进行 Z 形操纵运动过程中的舵效应。目前由于缺少试验中的螺旋桨和舵所受到 的水动力的变化数值,因此,现阶段还无法进行相关数据的对比和验证工作。但是当前的数值计算结果仍然可以作为研究船舶在波浪上的操纵运动性能的数据支撑。



图6-14 $\lambda/L_{WL} = 1.0$ 波浪工况下的两侧舵的阻力和侧向力变化历时曲线 Fig.6-14 Comparison of port and starboard rudder forces in waves of $\lambda/L_{WL} = 1.0$

除了上述的 λ/L_{wz} =1.0 的波浪工况,这里还分析了不同波长工况下的水动力载荷 性能。图 6-15 给出了在相同波陡 0.02,不同波长工况下的船体阻力变化历时曲线对 比。并且对曲线进行的快速傅里叶变换,从而分析非定常现象中的主导频率。从傅里 叶变换的结果可以看出,主导的频率均为入射波浪的遭遇频率,并且在波长最大的时 候,船体的阻力波动幅值最大。此外,在 λ/L_{wz} =1.0 和 λ/L_{wz} =1.2 两种工况下,出现 了一个二次的峰值,并且在 λ/L_{wz} =1.0 工况下这种现象最为明显,并且这种现象同样 可以从船体阻力的历时曲线中看出。通常来说,这种强非线性的现象主要是由于船舶 在波浪中的运动所引起的辐射问题导致,但是在当前的这个问题中,二次的频率跟船 舶的运动所对应的频率均不一致,也就是说明不是由于辐射问题所引起的。这部分的 原因可以从后续的流场分析中看出,即在船首遭遇波峰时,会产生一个二次的波峰现 象,这种非线性的流动现象进而导致了这一高频的波动载荷,该现象将在下一节的分 析中进行详细说明。





Fig.6-15 Comparison of ship hull resistance (up) and FFT (down) in different waves

表6-5 不同波长工况	下	5的不	同部	分水:	动力	载荷双	讨比
-------------	---	-----	----	-----	----	-----	----

Table	6-5	Compa	arisons	of hyc	lrodyna	imic l	loads	in (different	waves
		1			2					

2/1	н/2	船体阻力 (N)		总推力	舵阻力	
	11 / 70	0th FS	1st FS	0th FS	1st FS	0th FS (N)
0.5	0.02	4.225	1.577	-4.935	0.281	0.740
1.0	0.02	5.902	10.335	-6.346	0.763	0.545
1.2	0.02	5.924	18.657	-6.288	1.267	0.521

图 6-16 给出了在不同波长工况下的总螺旋桨推力以及总舵阻力的历时曲线对比 情况,其中,红色代表短波工况、黑色代表波长等于船长的波浪工况,而蓝色则代表 波长最大的工况。类似于前面的船体阻力变化规律,在波长更大的工况,由于波浪导 致的水动力波动幅值更大。从舵的阻力变化来看,当发生转舵操作时,舵的阻力会发 生较大的转变,这同静水中的操纵模拟结果一致。为了能够更量化地分析不同波浪对 水动力载荷的影响,傅里叶级数展开方法用来量化水动力波动的幅度和均值,见表 6-5。从表中可以看出,对于船体的阻力和螺旋桨总的推力来说,时间平均值在 λ/L_{wL}=1.0和λ/L_{wL}=1.2两种工况下基本相同,但是后者的一阶傅里叶振动幅值则较 前者分别增加了 80.5%和 66.1%。这也充分说明了在最长的波长工况下,船舶的水动 力波动幅度最大,从而导致了上节中介绍的在波长最长时船舶的运动响应波动幅度 最大。





Fig.6-16 Comparisons of total thrust (up) and rudder resistance (down) in different waves





Fig.6-17 Comparison of ship hull resistance (up) and FFT (down) in different wave heights with wave length of $\lambda / L_{WL} = 0.5$

除了上面介绍的同样波陡,不同波长波浪对自航船舶 Z 形操纵运动的影响,本 文中还对同样波长情况下,不同波高的波浪影响进行了分析。图 6-17 和图 6-18 分别 给出了在 $\lambda/L_{wL} = 0.5 \pi \lambda/L_{wL} = 1.2$ 两种不同波长条件下,不同的波高对自航船舶水动 力的影响,并且针对非定常的受力曲线进行了快速傅里叶变换。从图中可以明显地看 出,大的波高会使得船舶受力明显增加,例如,在 $\lambda/L_{wL} = 0.5$ 工况下,波陡为 0.04 的 波浪中船体阻力振荡幅值为 3N,而波陡为 0.02 工况下的船体阻力振荡幅值仅为 1.2N, 可以看出波高会明显增加船体的阻力振动幅度。同样的,更大的阻力波动会使得船体 的航速下降,这也解释了图 6-11 中更大波高工况下船舶的失速更大的现象。另外, 从 FFT 变换图中可以看出,在波高更大的工况下,主导的频率会有细微的减小。





Fig.6-18 Comparison of ship hull resistance (up) and FFT (down) in different wave heights with wave length of $\lambda / L_{wL} = 1.2$

6.2.3 **流场分析**

当前的数值预报手段,不仅能够提供详细的船舶运动及水动力载荷信息,同样可 以给出在自航船舶波浪工况下进行 Z 形操纵运动时的完整流场信息,从而方便分析 船舶的操纵性能原因以及波浪具体的影响。图 6-19 给出了在一个波浪周期内的船舶 自由面波形变化以及对应的尾部涡量场的变化。图中,自由面图中采用波高染色,涡 量场用 Q=200 的等值面,并且采用轴向速度染色。具体选用的时刻对应于数值模拟 中的 13.95s 到 14.67s,这主要是考虑到,在这个时间段内,舵角没有改变,因此没有 操舵而带来的流场干扰。
从流场图中可以清晰地反映出自航船舶在波浪下的运动响应情况。当波峰到达船体时,船首抬起,并且在船体从遭遇波峰到波谷的过程中会出现埋首现象。同时在 $t/T_e = 0.75$ 时刻,船舶在遭遇波峰之前,会在首部出现另一个波峰,这个强非线性的现象导致了在图 6-15 中给出的船舶阻力的高频振荡。此外,从涡量图中可以明显地看出螺旋桨梢涡、桨毂涡同后面舵的强烈干扰现象。其中,在 $t/T_e = 0.25 \, \pi t/T_e = 0.50$ 时刻的螺旋桨产生的涡量处的速度值小于时刻 $t/T_e = 0.0 \, \pi t/T_e = 0.75$ 。这是由于在前两个时刻,船舶尾部在经历波谷,这时波浪传播速度同船舶航行速度方向相反,造成了桨盘面处的绝对流速减小,这就使得螺旋桨处的载荷更高。类似的,在后面两个时刻 $t/T_e = 0.0 \, \pi t/T_e = 0.75$,波浪传播的速度和船舶航行速度同向,从而减小了螺旋桨的载荷。这里讨论的螺旋桨处的载荷变化可以很好的跟图 6-13 中的推进参数历时变化匹配。这里较为明显的桨毂涡的轨迹同样也能反映出船舶的运动变化。



第六章 波浪工况下自航船舶Z形操纵运动数值模拟





Fig.6-19 Snapshots of free surface (left column) colored by wave elevation and iso-surfaces of Q=100 (right column) colored by axial velocity in one wave period

自航船舶在 λ/L_{wL} =1.0波浪条件下,一个 Z 形操纵周期内四个典型时刻的自由 面波形图见图 6-20。图中采用波高来染色,A,B,C,D 四个时刻分别对应于第一 超越角、零首向角、第二超越角和从右舷转向左舷时的零首向角。时刻 C 的自由面 波形同图 6-19 中的 t/T_e =0.75 时刻反映的现象一致,均在遭遇波峰之前,船首处产生 一个额外的波峰。从图中还可以看出,在当前的航速下 (Fr=0.20),船舶的绕射波形 较为明显,同时,在船舶达到最大首向角时,两侧的波形呈现明显的非对称现象,由 此也导致了船舶运动,尤其是首摇速率变化曲线中的高频波动。





图 6-21 给出了一个更为近距离的螺旋桨和舵周围的伴流场分布,这里取的截面 位于螺旋桨轴线处,并且用速度场来表示。不同于之前的静水工况,当前的螺旋桨和 舵周围的伴流场明显更为复杂,这种流场的分布可以很好的解释图 6-14 中舵受到水 动力大幅波动。此外,从螺旋桨和舵周围的伴流场分布同样可以看出,在波浪工况下 螺旋桨的进流变化,例如,在时刻 A,螺旋桨的进流明显小于时刻 C,这样就导致了 C 时刻的进速更大,由此导致该时刻的螺旋桨推力较小。四个典型时刻的船体、螺旋 桨和舵周围的涡量分布见图 6-22,图中的涡量采用 Q=100 等值面,并且用轴向速度 进行涡结构的染色。在整个的数值模拟期间,螺旋桨产生的梢涡和桨毂涡一直很明 显,并且螺旋桨的涡结构强度较船舶附体,如舭龙骨处产生的涡结构要更强。从图中 还能明显的观察到舵根处和舵底部断面处产生的泻涡,这主要是由于为了获得更多 的贡献单元而设置的人工间隙,并且,当舵进行转动时,同样会产生部分泻涡。



图6-21 λ/L_{wi}=1.0 波浪工况下一个操纵周期内的螺旋桨和舵周围的伴流分布

Fig.6-21 Horizontal section of wake region around twin propellers and rudders during one zigzag period in

waves of $\lambda / L_{WL} = 1.0$

此外, 舵底部断面处产生的舵尖涡在 A 和 C 时刻非常的明显, 这个时候船舶正 好经历最大的首向角。并且舵尖涡在向后传播过程中会跟螺旋桨的桨毂涡汇合, 这主 要是由于船舶的运动, 尤其是纵摇运动所导致。泻涡的轨迹会跟随船舶的运动而运 动, 这样就导致之前传播出的泻涡同刚生成的涡的干扰。另外一个比较明显的特点是 螺旋桨涡同后面舵的强烈干扰, 当舵发生转动时或者船舶的航向轨迹改变时, 这种干 扰现象都会出现。这些复杂的船桨舵之间的干扰, 造成了自航船舶推进和操纵参数的 强非线性。



图 6-22 λ/L_{wL} = 1.0 波浪条件下的一个操纵周期内四个典型时刻的涡结构变化 Fig.6-22 Iso-surfaces of Q=100 colored with axial velocity for the zigzag maneuver in waves of λ/L_{wL} = 1.0

6.3 本章小结

本章主要验证了采用重叠网格技术和区域造波方法进行带螺旋桨带舵船舶在波 浪中典型 Z 形操纵运动直接数值模拟的适用性。本章分别进行了不同波长,不同波 高条件下船舶 Z 形操纵运动的直接数值模拟。计算所采用的船型依然是全附体的双 桨双舵 ONRT 船型。计算中,船舶在固定螺旋桨转速下进行全自由度的操纵运动, 船舶的执行舵角和换舵首向角均为 10°。

数值预报了自航船舶 10/10 Z 形操纵运动过程中的操纵参数,如第一/第二超越 角、操纵周期等,以及船舶运动参数,包括首向角、舵角、六自由度运动、航速、首 摇速率等参数。并且同试验值进行了对比验证,数值预报结果可以较好地模拟出实际 模型 Z 形操纵试验中的运动特性。此外,文中还给出了自航船舶在波浪中操纵运动 过程中的船体阻力、螺旋桨推进参数以及舵受到的水动力变化。最后还对详细的流场,包括自由面波形、船桨舵周围的涡量场变化等进行了分析。

本章总结了波浪对自航船舶操纵运动性能的影响,主要可以分为两点:首先,波 陡相同条件下,不同波长的影响主要表现在运动响应以及水动力载荷的变化上,波长 越长,船舶的运动响应越大,并且波浪导致的运动振荡幅值和水动力振荡幅值均更 大。这里发现在船长等于波长时,船舶的失速最为明显,但是波长最大时,船舶的振 荡运动幅度最大,包括航速的振荡幅值;其次,在相同的波长条件下,波高越高,船 舶的运动响应越大,在短波工况下,运动幅度基本同波高的变化呈等比例变化,但是 波高更大的船舶阻力幅度则显示出明显的非线性变化。此外,计算中发现了船体受到 的阻力存在一个高频的振荡成分,通过后续的流场特性分析,发现是由于船首在遭遇 波峰之前会产生一个额外波峰而导致。

本章对数值预报的船舶操纵参数和详细的船舶运动参数,与试验中的测量结果进行了对比,数值计算结果同试验值保持一致,进而说明了当前基于重叠网格技术和 区域造波方法开发的船舶水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 能够用于自航船舶波浪 中操纵运动的直接数值模拟。同时该求解器也为数值研究此类复杂问题,提供了一个 可靠有效的工具。

第169页

第七章 波浪中自由回转操纵运动数值模拟

本章将利用基于重叠网格技术的船舶自由回转操纵运动控制模块和基于松弛算法的区域造波方法完成对规则波浪工况下的自由回转操纵运动的数值模拟研究。进而验证当前开发的基于重叠网格技术的面向自航船舶波浪中操纵运动问题求解器的可靠性和适用性。当前的数值模拟中不仅考虑到了船桨舵之间的相互干扰作用,而且船舶还在进行 360°范围内的回转操纵,此外还要叠加外部入射波浪的影响。本章所得到的数值预报结果与已有试验值进行了对比分析,验证了当前开发的 CFD 求解器可以作为一种可靠的分析工具进行波浪中自由回转操纵运动的数值模拟研究。

7.1 计算工况

本章所采用的计算船型与前面章节中使用的船型一致,均为全附体的 ONRT 模型,其几何模型见图 4-1,模型的主尺度可以参见表 4-1。用于波浪工况中自由回转操纵运动数值模拟的计算域和环形造波区如图 3 所示,该造波区在计算中可以跟随计算域进行移动,因此可以保证波浪在船舶进行 360°回转运动过程中可以传播到整个计算域中。





Fig.7-1 Schematic of the computational domain and wave generation zone for turning circle maneuver in

waves

本章节进行了 35°舵角下的船舶在波浪中的自由回转操纵运动的直接数值模拟, 船舶初始航速为 1.11m/s,对应于 Fr=0.2,数值计算中螺旋桨的转速设置为对应于这 个航速下的模型自航点值,为 8.819RPS。入射波浪根据 IIHR 的试验进行设置,波长 λ 等于船长 L_{WL} ,波陡 H/λ 为 0.02。计算中,船舶在固定螺旋桨转速下进行全自由度 的回转操纵运动,船模的转舵速率为 35°/s。

波浪中的自由回转操纵运动数值模拟从最终稳定的自航数值计算开始,然后开始放开船舶的六自由度运动, 舵按照自由回转操纵运动进行控制。所有数值计算均在 上海交通大学船海计算水动力学研究中心高性能计算集群进行,采用 40 个进程并行 计算,计算时间步长为 Δ*t* =0.0005s, 对应于每个时间步螺旋桨转过 1.5°。完成波浪 中的自由回转操纵运动共花费 1206 小时,对应于 155000 个时间步。

7.2 数值模拟结果和分析

图 7-2 给出了数值预报的波浪中船舶自由回转得到的运动轨迹以及同试验值^[152] 的对比。



图7-2 波浪中回转运动轨迹对比[152]

Fig.7-2 Trajectory comparison for turning circle in waves^[152]

从图中可以看出,当前的数值预报结果同试验结果吻合较好,但是数值预报的回转圈会较试验结果更大,这主要是由于数值计算中为了保证重叠网格间足够的插值单元,而对舵的几何模型进行了修正,减小了有效的舵面积,因此使得舵效减小。此

第 180 页

外,从图中还可以看出在船舶航向角改变 90°和 270°时,回转曲线会产生明显的 波动现象,图 7-3 给出了对应的局部放大对比图,在对应的两个时间段,船舶的运动 轨迹会产生明显的波动,并且试验和 CFD 预报结果都显示有这一现象。数值计算得 到的波动幅值明显小于试验中的波动值,这也说明了 CFD 模拟中船舶的回转性较试 验更差,这也解释了图 7-2 中数值预报的船舶回转圈更大的原因。



图7-3 局部回转运动轨迹对比[152]

Fig.7-3 Local comparison of trajectory for turning circle maneuver in waves^[152]

数值预报的波浪中船舶回转圈特征参数及其同试验值[152]的对比见下表。

表7-1 回转圈特征参数对比

Table 7-1	Comparison	of main parame	eters of turning	circle tr	ajectory
-----------	------------	----------------	------------------	-----------	----------

主要参数	CFD 结果	试验结果[152]	误差
纵距 (m)	6.9171	6.9978	-1.15%
横距(m)	4.1063	3.8797	5.84%
90°转向时间(s)	12.2822	11.5700	6.15%
战术直径(m)	10.1838	9.6213	5.85%
180°转向时间(s)	24.5894	22.4100	9.72%
回转直径(m)	10.2807	9.6464	6.57%

为了保证对比的可靠性,将曲线的时间尺度进行了调整,满足 CFD 和试验在同一个时刻执行转舵操作从表中的对比结果可以看出,所有的特征参数同试验值的误差均在 10%以内,当前的数值计算可以较高精度的预报出波浪中自由回转船舶操纵运动特性。

图 7-4 给出了数值预报的船舶在波浪中自由回转过程中六自由度运动的历时曲 线。从图中可以看出,船舶的垂荡、纵摇和横摇运动会产生较为明显的波频振荡特性。 另外,由于回转运动过程中船舶的遭遇浪向角也在时刻变化,因此在高频的波频运动 下还存在由于回转操纵运动导致的低频波动。整个回转运动过程中,最大的纵摇幅值 可达 2.5°,横摇运动的幅度在-4.4°到 8°之间。此外,从横摇运动的历时曲线可以 看出,由于波浪导致的横摇运动幅值较由于初始操舵导致的横摇运动更大。而三个平 面的运动,纵荡、横荡和首摇运动则展现较小的波频运动特性。从首摇运动的曲线上 可以看出较小的波动,这也导致了图 7-3 中展现的平面运动轨迹中的局部波动。



图7-4 波浪中自由回转操纵中船舶六自由度运动历时曲线 Fig.7-4 Time histories of ship motions for turning circle maneuver in waves

为了更好的分析船舶在不同的遭遇浪向时的运动变化,这里给出了垂荡、纵摇和 横摇运动的极坐标下的变化,如图 7-5 所示。从图中可以看出,对于垂荡运动,在迎 浪范围内,船舶垂荡运动明显的大于处于随浪下的垂荡运动,并且当船舶遭遇横浪工 况时,会产生较大的垂荡运动。对于纵摇运动来说,横浪工况下的运动幅度最小,而 对于横摇运动来说,在船舶航向角为 120°时遭遇最大的横摇变化,幅值为 8°。以 上图片也展示了船舶在波浪中进行自由回转操纵运动时对应于不同遭遇浪向的运动 响应变化。



图7-5 极坐标下的垂荡、纵摇和横摇运动变化

Fig.7-5 Heave, pitch and roll motions in polar coordinate system during turning circle maneuver in waves

图 7-6 给出了船舶在波浪中自由回转运动过程中的船舶航速以及首摇速率的变化,从图中可以看出,波浪中的船舶在回转运动过程中会出现明显的回转降速现象,并且最大降速可达 40%。初始的航速降低是由于转舵导致的降速,进入回转运动以后会维持在平均 30%的降速范围内。而对于首摇速率来说,初始的明显的速率变化是由于受到的转舵影响,而后期的波动则是由于船舶遭遇的变化的浪向导致,最大的首摇速率可达 12.2°/s。



图7-6 波浪中自由回转操纵中船舶航速和首摇速率变化

Fig.7-6 Time histories of ship speed and yaw rate during turning circle maneuver in waves



图7-7 波浪中自由回转操纵中船舶推进性能变化



图 7-7 给出了船舶在波浪中进行自由回转操纵运动过程中的螺旋桨推力扭矩变 化,以及舵的阻力及侧向力变化,从图中可以看出,螺旋桨的推力和扭矩呈现明显的 波频振动特性,这主要是由于船舶运动过程中会导致螺旋桨的进流产生变化,进而使 得推进性能产生波动。从局部放大图中也可以更为高频的振荡现象,这是由于真实旋 转螺旋桨叶片切割流场导致。



图7-8 波浪中自由回转操纵中舵阻力和侧向力变化

Fig.7-8 Time histories of rudder resistance and lateral force during turning circle maneuver in waves

图 7-8 给出了波浪中自由回转操纵过程中舵受到的阻力和侧向力变化历时曲线。 从两侧的舵上的阻力和侧向力变化可以看出,其变化规律同推进性能变化趋势基本 一致,并且可以看出初始转舵导致的舵阻力和侧向力的明显增加,而侧向力的合力也 使得船舶产生回转运动。为了更好的展示由于转舵导致的水动力变化,这里给出了局 部的舵力变化曲线,如图 7-9 所示。



第 185 页



图7-9 转舵过程中舵受到的水动力变化

从图中可以看出,执行转舵操作之前,作用在两侧舵上的阻力基本一致,并且侧向力对称,而执行完操舵以后,舵阻力增加明显,而侧向力变成同向,产生较大的侧向合力,而侧向力的合力也使得船舶产生回转运动。



图7-10 转舵过程中桨舵周围的涡量场变化

Fig.7-10 Snapshots of vortical field around twin propellers and rudders during rudder execution

Fig.7-9 Time histories of rudder forces during rudder execution

图 7-10 给出了在转舵过程中的桨舵周围的涡量场变化。初始时刻, 舵角为 0 时, 桨舵周围的涡量分布基本为对称形式, 而随着舵角的增加, 舵对前面螺旋桨的泻涡会 产生明显的干扰现象, 由于舵向左舷转动, 因此左舷舵会对螺旋桨的桨毂涡产生干 扰, 而右舷舵则会影响到右舷桨的叶稍涡。这种现象的区别也解释了图 7-8 和图 7-9 中两侧螺旋桨和舵水动力的区别。而舵周围会发生明显的流动分离现象, 但是现在采 用的是 RANS 方法, 无法精确的捕捉这种情况下的周围流动, 因此会对舵力的计算 产生误差, 这也是导致目前计算中的回转圈变大的原因之一。



图7-11 波浪中自由回转过程中船舶周围自由面变化

Fig.7-11 Snapshots of wave elevation around ship hull for turning circle maneuver in waves (heading change A: 0° B: 120° C: 240° D: 360°)

图 7-11 给出了船舶在波浪中自由回转过程中,四个典型时刻的自由面波形变化, 分别对应于 0°、120°、240°和 360°航向角的时刻。从图中可以看出,在没有转向时, 船舶周围的波浪环境基本对称,但是在回转角度到达 360°时,船首和船尾处均能看 出由于转动导致的两侧波面的差别。而从 120°和 240°航向角时的自由面看出,两侧 波面明显的高度差别,这也导致了船体两侧的压力分布不均。从 D 时刻图片中同样可以看出船首会抬出水面,证明在该波浪情况下船舶会产生大幅度的六自由度运动。



图7-12 波浪中自由回转过程中船桨舵周围泻涡变化

Fig.7-12 Vortical structures around ship hull, propeller and rudder during turning circle maneuver in waves

船桨舵周围的三维涡结构变化见图 7-12,图中涡结构通过 Q=200 的等值面来表 征,四个时刻与图 7-11 中的各个时刻对应。在船舶没有转舵时,船舶两舷的泻涡基 本对称,但是当船舶在 35° 舵角作用下进入自由回转状态时,泻涡现象发生明显的 变化,尤其是从桨毂涡的轨迹可以看出船舶的转向趋势。另外,螺旋桨的泻涡会受到 后面舵的强烈干扰,并且由于大舵角的存在,舵会产生明显的泻涡现象。从 B 和 D 时刻可以看出,右舷螺旋桨的桨毂涡和舵泻涡强度较大,分别向后传播,而左舷部分, 由于舵正好转到桨毂涡的位置,两个部分的泻涡汇聚在一起,强度较右舷涡更大。这 种强烈的干扰形式也解释了图 7-7 和图 7-8 中左舷和右舷螺旋桨和舵上水动力载荷 的不同。以上桨舵间的干扰现象又可以揭示出自航船舶在波浪中进行自由回转操纵 运动过程中的水动力变化,为船桨舵系统设计提供参考依据。

7.3 本章小结

本章主要验证了采用重叠网格技术和区域造波方法进行带螺旋桨带舵船舶在波 浪中自由回转操纵运动直接数值模拟的适用性。本章介绍了规则波工况下船舶 35° 自由回转操纵运动的直接数值模拟。计算所采用的船型依然是全附体的双桨双舵 ONRT 船型。计算中,船舶在固定螺旋桨转速下进行全自由度的回转操纵运动,船模 的转舵速率为 35°/s。

数值预报了自航船舶 35° 右舷转向的自由回转操纵运动过程中的回转圈特征参数,如纵距、横距、战术直径、回转直径等,以及船舶六自由度运动、航速和首摇速率等参数。并且同试验测量的回转圈参数进行了对比验证,误差均在 10%以内,验证了当前求解器对船桨舵相互作用下的波浪中船舶自由回转操纵运动预报的适用性和可靠性。此外,根据计算结果显示,船舶的垂荡、纵摇和横摇运动展现出明显的波频运动响应,而纵荡、横荡和首摇三个平面运动的波频振动特征不明显。在波浪中船舶进行自由回转时的最大船舶失速可达 40%。同时,给出了整个操纵运动过程中的推进性能和舵力的变化。并且通过详细的流场信息,如不同时刻自由面变化,桨、舵周围伴流场、周围涡量场变化等等,分析了在回转操纵运动下水动力变化的原因。

第190页

第八章 总结及展望

8.1 论文总结

本博士论文基于课题组开发的面向船舶与海洋工程的水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU,基于重叠网格技术和多级物体运动模块,开发和完善了船舶操纵控制模块,包括自航船舶航向保持控制器、Z 形操纵和自由回转操纵控制模块,并且完成了基于松弛方法的区域造波开源工具包 waves2Foam 与 naoe-FOAM-SJTU 求解器的有效结合,形成了面向带螺旋桨带舵船舶在波浪中操纵运动直接数值模拟的求解器,并利用重叠网格技术和已开发的操纵控制模块及改进的造波方式,实现了裸船体约束船模试验以及静水和规则波工况中的自航船舶典型操纵运动的直接数值模拟。

文中针对船舶操纵运动的数值研究首先从较为简单的船舶约束船模试验的数值 模拟开始。该类问题没有螺旋桨和舵,但是具有大幅度的操纵运动,可以用来验证当 前的 CFD 求解器处理船舶大幅度操纵运动问题的可靠性和精度。文中主要对静态斜 拖试验和动态的纯横荡和纯摇首试验进行了数值计算,预报的船舶水动力变化以及 船舶操纵性水动力导数值均同试验值吻合良好。

接下来,对船舶操纵运动的数值研究从裸船体扩展到了带螺旋桨带舵船舶的操 纵运动。首先对静水工况下的自航船舶典型操纵运动进行了直接数值模拟,包括典型 Z形操纵运动(10/10和20/20Z形操纵)和35°自由回转操纵运动。对操纵性参数, 如第一/第二超越角、操纵周期、回转圈特征参数等同试验结果进行了对比验证。证 实了当前基于重叠网格技术开发的船舶操纵控制模块可以完成典型船舶操纵运动的 直接数值模拟,并且具有较高的精度和可靠性。

之后,将自航船舶的操纵运动数值模拟从静水工况扩展到波浪工况,利用开发的适用于波浪中操纵运动数值模拟的求解器,完成了不同浪向规则波下(迎浪、首斜浪和横浪)自航船舶的航向保持数值模拟,预报的船舶舵角变化以及船舶运动轨迹等均同试验结果吻合良好;进行了不同波长和不同波高规则波工况下的自航船舶的 Z 形操纵运动的直接数值模拟,数值预报了波浪对 Z 形操纵运动的参数,包括运动和水动力的影响;此外还进行了规则波工况下的 35° 舵角自由回转操纵运动的数值模拟,预报得到的回转圈参数同已有试验结果吻合良好。数值计算结果同试验测量值呈现

一致的趋势,验证了当前所开发的面向波浪中带螺旋桨带舵船舶操纵运动问题的数 值求解器的可靠性。

所有的上述数值模拟研究中,均提供了相应的详细流场分析,包括自由面兴波、 船体、螺旋桨舵附近的伴流场、涡量场、船体表面压力等,可以为船舶操纵运动性能 地分析提供丰富的流场数据。

通过操纵运动算例的计算和验证,充分证实了基于重叠网格技术开发的操纵运动控制模块以及造波模块在静水和波浪工况中船舶操纵运动直接数值模拟方面的适用性。当前的数值计算手段可以为船舶操纵问题研究,尤其是船舶水动力学中最为复杂的波浪中船舶操纵运动问题提供了强有力的研究工具,大幅度扩展了 CFD 在船舶水动力学领域的应用范围。

8.2 研究展望

本文基于船舶水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 开发了船舶自航操纵控制模块, 完成了波浪中操纵运动直接数值模拟的求解器功能扩展。并且进行了一系列的相关 问题验证,尽管在相应的算例中展现了良好的适用性和精度,但是仍有很多工作需要 进一步的改进和完善,主要可以分为以下几个方面:

1)本文数值计算中所采用的流体控制方程,均为基于雷诺平均假设条件下的 RANS模型,虽然在处理船舶静水阻力等问题中的计算精度较高,但是船桨舵相互作 用问题中会出现强烈的流动分离现象,RANS模型的求解精度较为有限,接下来,可 以针对这类问题开展分离涡模拟(DES)和大涡模拟(LES)方面的探索和研究,从 而进一步提升该类问题的求解精度。

2)当前在求解自航船舶操纵运动问题中,数值计算网格量较大,一般都需要近 千万的网格规模,而目前的求解策略仍然是流场计算和插值计算分离的形式,并且在 流场计算和插值计算进程之间采用延迟的模式实现并行计算。虽然可以一定程度上 提高并行计算效率,但是该类方法在进行多个插值进程计算时会存在较大的插值误 差,不利于更大规模网格量的数值计算。需要对插值进程的并行模式进行改进,最好 的办法是将插值计算同流场计算放在一起,即一个进程流场计算的网格中对应的插 值计算就在该进程完成,类似于现在 OpenFOAM 在 ESI 版本中实现的方式;另外一 种方法是针对当前的求解方法进行改造,即将插值计算进程同流场计算一样可以分 块并行计算,从而提升整体的计算效率。 3)当前在波浪工况中的操纵运动数值模拟均是针对规则波的工况进行,接下来 需要进一步对不规则波浪条件下的船舶操纵运动问题进行数值计算,来研究不规则 波浪对船舶的机动性和回转性的影响。

4)船桨舵问题中处于船体尾流中的旋转螺旋桨经常会伴随有空泡现象的出现, 目前的数值计算中没有考虑空泡问题,将来可以结合空泡模型研究此类问题,从而可 以更为准确的预报出螺旋桨处的脉动压力变化。

5)本文中对船舶操纵运动的数值模拟目前仍然是针对模型尺度,而计算流体力 学区别于试验手段的一大优势便是可以进行实尺度问题的直接模拟,接下来可以考 虑将现有的数值研究拓展到实尺度船舶操纵问题中去,从而更为真实准确的预报船 舶的操纵性能。

6)本文中实现了自航船舶操纵数值模拟从静水工况到波浪工况的拓展,但是目前数值模拟的工况还没有进行过尾随浪工况的自航船舶操纵数值模拟,由于尾随浪会造成尾部螺旋桨和舵周围更为复杂的流动现象,因此需要进行相关问题的求解和验证工作。

7)当前的操纵控制模块可以进一步的进行功能扩展和完善,目前开发的操纵控制模块还仅仅是针对目前遇到的典型操纵问题进行的,接下来根据 C++程序面向对象编程思想以及多态和继承等特点,可以很方便的扩展操纵控制模块。例如可以扩展到船舶航行轨迹控制中,即开发一个舵角变化的控制器,用于实现自航船舶在航行过程中保持运动轨迹不变。此外,也可以开发船舶横摇控制等特定问题的控制器,进一步拓展当前数值求解器的应用范围。

第194页

- [1] International Maritime Organization. Standards for Ship Maneuverability, MSC. 137(76)[S].
- [2] ITTC. Proposed Tasks and Structure of the 29th ITTC Technical Committees and Groups[C]. In Proceedings of 28th International Towing Tank Conference. Wuxi, China, 2017, I: 393–408.
- [3] International Towing Tank Conference Maneuvering Committee. Final report and recommendations to the 25th ITTC[C]. In Proceedings of 25th International Towing Tank Conference. Fukuoka, Japan, 2008.
- [4] 王化明. 限制水域操纵运动船舶粘性流场及水动力数值研究[D]. 上海交通大学, 2009.
- [5] Gindroz, B., Hoshino, T., Pylkkanen, J. The 22nd ITTC Propulsion Committee Propeller RANS[C]. In Proceedings of Panel Method Workshop. Grenoble, France, 1998.
- [6] Procedures, R. Testing and Extrapolation Methods Loads and Responses, Seakeeping Experiments[J]. International Towing Tank Conference (ITTC). 2005: 7.5-0207.
- [7] ABS. American Bureau of Shipping: Guide for Vessel Maneuverability[R]. Houston, USA, 2006.
- [8] Gui, L., Longo, J., Metcalf, B., et al. Forces, moment, and wave pattern for surface combatant in regular head waves Part I. Measurement systems and uncertainty assessment[J]. Experiments in fluids. 2001, **31**(6): 674–680.
- [9] Longo, J., Shao, J., Irvine, M., et al. Phase-Averaged PIV for the Nominal Wake of a Surface Ship in Regular Head Waves[J]. Journal of Fluids Engineering. 2006, 129(5): 524–540.
- [10] Schoenherr, K.E. Steering. In H. E. Rossel and L. B. Chapman (Eds.)[G]. In Principles of Naval Architecture, NY: SNAME, 1939, 2: 197–233.
- [11] Mandel, P. Ship Maneuvering and Control[G]. In Principles of Naval Architecture, New York, NJ: SNAME, 1965: 463–606.
- [12] Crane, C.L., Eda, H., Landsburg, A. Controllability[J]. Principles of naval architecture. 1989, 3: 191–365.
- [13] Lewis, E.V. Principles of naval architecture second revision[J]. Jersey: SNAME. 1988.
- [14] Abkowitz, M.A. Measurement of hydrodynamic characteristics from ship maneuvering trials by system identification[J]. Transactions - Society of Naval Architects and Marine Engineers. 1980, 88(1): 283–318.
- [15] Abkowitz, M.A., Liu, G. Measurement of ship resistance, powering and manoeuvring coefficients from simple trials during a regular voyage[J]. Transactions - Society of Naval Architects and Marine Engineers. 1988, 96: 97–128.
- [16] Ogawa, A., Koyama, T., Kijima, K. MMG report-I, on the mathematical model of ship manoeuvring[J]. Bull Society of Naval Architecture. 1977, **575**: 22–28.

参考文献

- [17] 野本謙作,田口賢士,本田啓之輔, et al. 船の操縦性に就いて (1)[J]. 造船協 會論文集. 1956(99): 75-82.
- [18] Ohmori, T. Finite-volume simulation of flows about a ship in maneuvering motion[J]. Journal of Marine Science and Technology. 1998, **3**(2): 82–93.
- [19] Orihara, H., Miyata, H. Evaluation of added resistance in regular incident waves by computational fluid dynamics motion simulation using an overlapping grid system[J]. Journal of Marine Science and Technology. 2003, 8(2): 47–60.
- [20] Tahara, Y., Longo, J., Stern, F. Comparison of CFD and EFD for the Series 60 C B= 0.6 in steady drift motion[J]. Journal of Marine Science and Technology. 2002, 7(1): 17–30.
- [21] Hyman, M., Moraga, F., Drew, D., et al. Computation of the Unsteady Two-Phase Flow Around a Maneuvering Surface Ship[C]. In 26th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics. Rome, Italy, 2006.
- [22] Simonsen, C.D., Stern, F. Verification and validation of RANS maneuvering simulation of Esso Osaka: effects of drift and rudder angle on forces and moments[J]. Computers & Fluids. 2003, 32(10): 1325–1356.
- [23] Simonsen, C.D., Stern, F. Flow pattern around an appended tanker hull form in simple maneuvering conditions[J]. Computers & Fluids. 2005, **34**(2): 169–198.
- [24] Pinto-Heredero, A., Xing, T., Stern, F. URANS and DES analysis for a Wigley hull at extreme drift angles[J]. Journal of Marine Science and Technology. 2010, 15(4): 295–315.
- [25] Ismail, F., Carrica, P.M., Xing, T., et al. Evaluation of linear and nonlinear convection schemes on multidimensional non-orthogonal grids with applications to KVLCC2 tanker[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids. 2010, 64(8): 850– 886.
- [26] Xing, T., Bhushan, S., Stern, F. Vortical and turbulent structures for KVLCC2 at drift angle 0, 12, and 30 degrees[J]. Ocean Engineering. 2012, **55**: 23–43.
- [27] Stern, F., Agdrup, K., Kim, S.Y., et al. Experience from SIMMAN 2008—The First Workshop on Verification and Validation of Ship Maneuvering Simulation Methods[J]. Journal of ship research. 2011, 55(2): 135–147.
- [28] 田喜民, 邹早建, 王化明. KVLCC2 船模斜航运动粘性流场及水动力数值计算 [J]. 船舶力学. 2010, 14(8): 834-840.
- [29] Meng, Q., Wan, D. C. Numerical simulations of viscous flow around the obliquely towed KVLCC2M model in deep and shallow water[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B. 2016, 28(3): 506–518.
- [30] Wang, J., Liu, X., Wan, D. C. Numerical Simulation of an Oblique Towed Ship by naoe-FOAM-SJTU Solver[C]. In Proceedings of 25th International Offshore and Polar Engineering Conference. Big Island, Hawaii, USA, 2015.
- [31] 冯松波, 邹早建, 邹璐. KVLCC2 船-舵系统斜航水动力数值计算[J]. 上海交通 大学学报. 2015, **49**(4): 470–474.
- [32] Broglia, R., Muscari, R., Di Mascio, A. Numerical simulations of the pure sway and pure yaw motion of the KVLCC-1 and 2 tanker[C]. In Proceedings of SIMMAN 2008 Workshop on Verification and Validation of Ship Maneuvering Simulation Methods. Denmark, 2008.

- [33] Toxopeus, S.L., Walree, F. van, Hallmann, R. Maneuvering and Seakeeping Tests for 5415M[C]. In Proceedings of AVT-189 Specialists' Meeting. Portsdown West, UK, 2011.
- [34] Cura-Hochbaum, A. On the numerical prediction of the ship's manoeuvring behaviour[J]. Ship Science & Technology. 2011, **5**(9): 27–39.
- [35] Simonsen, C.D., Stern, F. RANS simulation of the flow around the KCS container ship in pure yaw[C]. In Proceedings of SIMMAN 2008 workshop on verification and validation of ship maneuvering simulation methods. Lyngby, Denmark, 2008.
- [36] Simonsen, C.D., Otzen, J.F., Klimt, C., et al. Maneuvering predictions in the early design phase using CFD generated PMM data[C]. In Proceedings of the 29th Symposium on Naval Hydrodynamics. 2012: 26–31.
- [37] Sakamoto, N., Carrica, P.M., Stern, F. URANS simulations of static and dynamic maneuvering for surface combatant: part 1. Verification and validation for forces, moment, and hydrodynamic derivatives[J]. Journal of Marine Science and Technology. 2012, 17(4): 422–445.
- [38] Sadat-Hosseini, H., Carrica, P., Stern, F., et al. CFD, system-based and EFD study of ship dynamic instability events: Surf-riding, periodic motion, and broaching[J]. Ocean Engineering. 2011, 38(1): 88–110.
- [39] Sakamoto, N., Carrica, P.M., Stern, F. URANS simulations of static and dynamic maneuvering for surface combatant: part 2. Analysis and validation for local flow characteristics[J]. Journal of Marine Science and Technology. 2012, 17(4): 446–468.
- [40] Yoon, H., Simonsen, C.D., Benedetti, L., et al. Benchmark CFD validation data for surface combatant 5415 in PMM maneuvers – Part I: Force/moment/motion measurements[J]. Ocean Engineering. 2015, 109: 705–734.
- [41] Yoon, H., Longo, J., Toda, Y., et al. Benchmark CFD validation data for surface combatant 5415 in PMM maneuvers – Part II: Phase-averaged stereoscopic PIV flow field measurements[J]. Ocean Engineering. 2015, 109: 735–750.
- [42] Kim, H., Akimoto, H., Islam, H. Estimation of the hydrodynamic derivatives by RaNS simulation of planar motion mechanism test[J]. Ocean Engineering. 2015, 108: 129–139.
- [43] 杨勇, 邹早建, 张晨曦. 深浅水中 KVLCC 船体横荡运动水动力数值计算[J]. 水 动力学研究与进展 A 辑. 2011, 26(1): 85–93.
- [44] 程捷, 张志国, 蒋奉兼, 等. 平面运动机构试验的数值模拟[J]. 水动力学研究 与进展: A 辑. 2013, 28(4): 460-464.
- [45] Liu, X., Fan, S., Wang, J., et al. Hydrodynamic Simulation of Pure Sway Tests with Ship Speed and Water Depth Effects[C]. In Proceedings of the 25th International Offshore and Polar Engineering Conference. Big Island, Hawaii, USA, 2015.
- [46] 王建华, 万德成. 基于重叠网格技术数值模拟船舶纯摇首运动[J]. 水动力学研 究与进展(A 辑). 2016, **31**(05): 567–574.
- [47] 刘晗, 马宁, 邵闯, 等. 限宽水域中船舶平面运动机构试验及水动力导数数值 模拟[J]. 上海交通大学学报. 2016, **50**(1): 115–122.
- [48] Kang, D., Nagarajan, V., Hasegawa, K., et al. Mathematical model of single-propeller twin-rudder ship[J]. Journal of Marine Science and Technology. 2008, 13(3): 207– 222.

- [49] Khanfir, S., Hasegawa, K., Nagarajan, V., et al. Manoeuvring characteristics of twinrudder systems: rudder-hull interaction effect on the manoeuvrability of twin-rudder ships[J]. Journal of Marine Science and Technology. 2011, 16(4): 472–490.
- [50] Stern, F., Kim, H.T., Patel, V.C., et al. A viscous-flow approach to the computation of propeller-hull interaction[J]. Journal of ship research. 1988, **32**(4): 246–262.
- [51] Kawamura, T., Miyata, H., Mashimo, K. Numerical simulation of the flow about selfpropelling tanker models[J]. Journal of Marine Science and Technology. 1997, 2(4): 245–256.
- [52] Choi, J.-E., Kim, J.-H., Lee, H.-G., et al. Computational predictions of ship-speed performance[J]. Journal of Marine Science and Technology. 2009, **14**(3): 322–333.
- [53] Choi, J.E., Min, K.-S., Kim, J.H., et al. Resistance and propulsion characteristics of various commercial ships based on CFD results[J]. Ocean Engineering. 2010, 37(7): 549–566.
- [54] Phillips, A.B., Turnock, S.R., Furlong, M. Evaluation of manoeuvring coefficients of a self-propelled ship using a blade element momentum propeller model coupled to a Reynolds averaged Navier Stokes flow solver[J]. Ocean Engineering. 2009, 36(15– 16): 1217–1225.
- [55] Phillips, A.B., Turnock, S.R., Furlong, M. Accurate Capture of Propeller-Rudder Interaction using a Coupled Blade Element Momentum-RANS Approach[J]. Ship Technology Research. 2010, 57(2): 128–139.
- [56] Simonsen, C.D., Stern, F. RANS Maneuvering Simulation of Esso Osaka With Rudder and a Body-Force Propeller[J]. Journal of Ship Research. 2005, 49(2): 98– 120.
- [57] Carrica, P.M., Ismail, F., Hyman, M., et al. Turn and zigzag maneuvers of a surface combatant using a URANS approach with dynamic overset grids[J]. Journal of Marine Science and Technology. 2012, **18**(2): 166–181.
- [58] Dubbioso, G., Durante, D., Broglia, R. Zig-zag maneuver simulation by CFD for tanker like vessel[C]. In Proceedings of the 5th International Conference on Computational Methods in Marine Engineering. Hamburg, Germany, 2013: 29–31.
- [59] Broglia, R., Dubbioso, G., Durante, D., et al. Turning ability analysis of a fully appended twin screw vessel by CFD. Part I: Single rudder configuration[J]. Ocean Engineering. 2015, **105**: 275–286.
- [60] Dubbioso, G., Durante, D., Di Mascio, A., et al. Turning ability analysis of a fully appended twin screw vessel by CFD. Part II: Single vs. twin rudder configuration[J]. Ocean Engineering. 2016, 117: 259–271.
- [61] Mofidi, A., Martin, J.E., Carrica, P.M. Propeller/rudder interaction with direct and coupled CFD/potential flow propeller approaches, and application to a zigzag manoeuvre[J]. Ship Technology Research. 2018, **65**(1): 10–31.
- [62] Seo, J.H., Seol, D.M., Lee, J.H., et al. Flexible CFD meshing strategy for prediction of ship resistance and propulsion performance[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2010, 2(3): 139–145.
- [63] Lübke, L.O. Numerical simulation of the flow around the propelled KCS[C]. In Proceedings of CFD Workshop 2005. Tokyo, Japan, 2005: 9–11.

- [64] Queutey, P., Deng, G., Wackers, J., et al. Sliding Grids and Adaptive Grid Refinement for RANS Simulation of Ship-Propeller Interaction[J]. Ship Technology Research. 2012, **59**(2): 44–57.
- [65] Badoe, C.E., Phillips, A.B., Turnock, S.R. Influence of drift angle on the computation of hull–propeller–rudder interaction[J]. Ocean Engineering. 2015, **103**: 64–77.
- [66] Moctar, O. el, Lantermann, U., Mucha, P., et al. RANS-Based Simulated Ship Maneuvering Accounting for Hull-Propulsor-Engine Interaction[J]. Ship Technology Research. 2014, 61(3): 142–161.
- [67] 张志荣, 李百齐, 赵峰. 螺旋桨 / 船体粘性流场的整体数值求解[J]. 船舶力学. 2004, 8(5): 19-26.
- [68] 沈海龙, 苏玉民. 基于滑移网格技术的船桨相互干扰研究[J]. 哈尔滨工程大学 学报. 2010, **31**(1): 1–7.
- [69] 沈兴荣, 冯学梅, 蔡荣泉. 均流中大型集装箱船桨舵干扰粘性流场的数值计算 研究[J]. 船舶力学. 2009, 13(4): 540–550.
- [70] 杜云龙,陈霞萍,陈昌运,等. 某船及其改型船桨舵数值模拟与性能比较[J]. 水动力学研究与进展 A 辑. 2013, 28(5): 566-574.
- [71] 王骁, 蔡烽, 石爱国, 等. 双桨双舵舰船旋臂试验粘性流场数值模拟方法研究 [J]. 船舶力学. 2014, 18(7): 786–793.
- [72] 杨春蕾,朱仁传,缪国平,等. 基于 CFD 方法的船/桨/舵干扰数值模拟[J]. 水动 力学研究与进展: A 辑. 2011, 26(6): 667-673.
- [73] Mofidi, A., Carrica, P.M. Simulations of zigzag maneuvers for a container ship with direct moving rudder and propeller[J]. Computers & Fluids. 2014, **96**: 191–203.
- [74] Shen, Z., Wan, D., Carrica, P.M. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering[J]. Ocean Engineering. 2015, 108: 287–306.
- [75] Carrica, P.M., Stern, F. DES simulations of KVLCC1 in turn and zigzag maneuvers with moving propeller and rudder[C]. In Proceedings of SIMMAN 2008 Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvering Simulation Methods. Lyngby, Denmark, 2008.
- [76] Muscari, R., Dubbioso, G., Viviani, M., et al. Analysis of the asymmetric behavior of propeller-rudder system of twin screw ships by CFD[J]. Ocean Engineering. 2017, 143: 269–281.
- [77] Boger, D.A., Noack, R.W., Paterson, E.G. Dynamic Overset Grid Implementation in OpenFOAM[C]. In Proceedings of the 5th OpenFOAM Workshop. Gothenburg, Sweden, 2010.
- [78] Boger, D., Paterson, E., Noack, R.W. FoamedOver: A Dynamic Overset Grid Implementation in OpenFOAM[C]. In Proceedings of the 10th Symposium on Overset Composite Grids and Solution Technology. NASA, California, USA, 2010.
- [79] Chandar, D. Development of a Parallel Overset Grid Framework for Moving Body Simulations in OpenFOAM.[J]. Journal of Applied Computer Science & Mathematics. 2015, 9(20): 22–30.
- [80] Chandar, D., Nguyen, V.-T., Gopalan, H., et al. Flow past tandem circular cylinders at high Reynolds numbers using overset grids in openFOAM[C]. In Proceedings of

the 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting. Kissimmee, Florida, USA, 2015: 315–335.

- [81] Shen, Z., Ye, H., Wan, D. C. URANS simulations of ship motion responses in longcrest irregular waves[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B. 2014, **26**(3): 436–446.
- [82] Shen, Z., Wan, D. C., Carrica, P.M. RANS simulations of free maneuvers with moving rudders and propellers using overset grids in OpenFOAM[C]. In Proceedings of SIMMAN 2014 workshop on Verification and Validation of Ship Maneuvering Simulation Methods. Lyngby, Denmark, 2014.
- [83] Shen, Z., Korpus, R. Numerical Simulations of Ship Self-Propulsion and Maneuvering Using Dynamic Overset Grids in OpenFOAM[C]. In Proceedings of Tokyo 2015 CFD Workshop. Tokyo, Japan, 2015.
- [84] Shen, Z., Wan, D. C. An irregular wave generating approach based on naoe-FOAM-SJTU solver[J]. China Ocean Engineering. 2016, **30**: 177–192.
- [85] Wang, J., Zhao, W., Wan, D. C. Free Maneuvering Simulation of ONR Tumblehome Using Overset Grid Method in naoe-FOAM-SJTU Solver[C]. In Proceedings of 31th Symposium on Naval Hydrodynamics. Monterey, USA, 2016.
- [86] Carrica, P.M., Mofidi, A., Eloot, K., et al. Direct simulation and experimental study of zigzag maneuver of KCS in shallow water[J]. Ocean Engineering. 2016, 112: 117– 133.
- [87] 王建华, 万德成. 全附体 ONRT 船模在波浪中自航的数值模拟(英文)[J]. 应 用数学和力学. 2016(12): 1345–1358.
- [88] Wang, J., Wan, D. C., Yu, X. Standard zigzag maneuver simulations in calm water and waves with direct propeller and rudder[C]. In Proceedings of the 27th International Offshore and Polar Engineering Conference. San Francisco, USA, 2017, pp. 1042-1048.
- [89] Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R., Fredsøe, J. A wave generation toolbox for the opensource CFD library: OpenFoam®[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids. 2012, 70(9): 1073–1088.
- [90] Jasak, H., Jemcov, A., Tukovic, Z., et al. OpenFOAM: A C++ library for complex physics simulations[C]. In Proceedings of International workshop on coupled methods in numerical dynamics. IUC Dubrovnik, Croatia, 2007: 1–20.
- [91] Jasak, H. OpenFOAM: Open source CFD in research and industry[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2009, **1**(2): 89–94.
- [92] Shen, Z., Cao, H., Ye, H., et al. The manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU[R]. Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [93] Cao, H., Wan, D. C. Development of Multidirectional Nonlinear Numerical Wave Tank by naoe-FOAM-SJTU Solver[J]. International Journal of Ocean System Engineering. 2014, **4**(1): 52–59.
- [94] Cao, H., Wan, D. C. RANS-VOF solver for solitary wave run-up on a circular cylinder[J]. China Ocean Engineering. 2015, 29: 183–196.
- [95] Jasak, H. Dynamic mesh handling in OpenFOAM[C]. In Proceedings of the 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida, USA, 2009.
- [96] 赵伟文, 万德成. 用 SST-DES 和 SST-URANS 方法数值模拟亚临界雷诺数下三 维圆柱绕流问题[J]. 水动力学研究与进展 A 辑. 2016, **31**(1): 1–8.

- [97] 赵伟文, 万德成. 用 DES 分离涡方法数值模拟串列双圆柱绕流问题[J]. 应用数 学和力学. 2016, **37**(12): 1272–1281.
- [98] 王建华, 万德成. 南海浮式码头与系泊系统动力耦合分析[J]. 水动力学研究与进展 A 辑. 2015, 30(2): 180–186.
- [99] Liu, Y., Xiao, Q., Atilla, I., et al. Investigation of the effects of platform motion on the aerodynamics of a floating offshore wind turbine[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B. 2016, 28(1): 95–101.
- [100] Liu, Y., Wan, D. C. Numerical simulation of motion response of an offshore observation platform in waves[J]. Journal of Marine Science and Application. 2013, 12(1): 89–97.
- [101] 彭耀, 张笑通, 万德成, 等. 海上固定式风机基础的波流载荷数值计算分析[J]. 水动力学研究与进展: A 辑. 2017, **32**(1): 1–10.
- [102] 吴建威, 尹崇宏, 万德成. 基于三种方法的螺旋桨敞水性能数值预报[J]. 水动 力学研究与进展 A 辑. 2016, **31**(2): 177–187.
- [103] 程萍, 万德成. 基于重叠网格法数值分析塔架对风机气动性能的影响[J]. 水动 力学研究与进展: A 辑. 2017, **32**(1): 32–39.
- [104] 罗天, 万德成. 基于 CFD 的船舶横摇数值模拟与粘性效应分析[J]. 中国舰船研 究. 2017, 12(2): 1–11.
- [105] 孙涛, 万德成. 前置导管节能效果数值计算与分析[J]. 水动力学研究与进展: A 辑. 2016, **31**(6): 651–658.
- [106] Ye, H., Wan, D. C. Benchmark computations for flows around a stationary cylinder with high Reynolds numbers by RANS-overset grid approach[J]. Applied Ocean Research. 2017, 65: 315–326.
- [107] Cao, H., Wan, D. C. Benchmark computations of wave run-up on single cylinder and four cylinders by naoe-FOAM-SJTU solver[J]. Applied Ocean Research. 2017, 65: 327–337.
- [108] 庄园, 万德成. FPSO 船与低充水率下 LNG 液舱晃荡耦合运动的数值模拟[J]. 应用数学和力学. 2016, **37**(12): 1378–1393.
- [109] Ye, H., Shen, Z., Wan, D. C. 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.
- [110] Duanmu, Y., Zou, L., Wan, D. C. Numerical simulations of vortex-induced vibrations of a flexible riser with different aspect ratiosin uniform and shear currents[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B. 2017, 29(6): 1010–1022.
- [111] Fu, B., Wan, D. C. Numerical study of vibrations of a vertical tension riser excited at the top end[J]. Journal of Ocean Engineering and Science. 2017, **2**(4): 268–278.
- [112] Berberović, E., van Hinsberg, N., Jakirlić, S., et al. Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: Dynamics of the cavity evolution[J]. Physical Review E. 2009, 79(3): 36306.
- [113] Rusche, H. Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions[D]. Imperial College London (University of London), 2003.

- [114] Springer, J., Kissling, K., Jasak, H., et al. A coupled pressure based solution algorithm based on the Volume-of-Fluid approach for two or more immiscible fluids[C]. In Proceedings of the 5th OpenFOAM Workshop. Gothenburg, Sweden, 2010.
- [115] Weller, H., Weller, H.G. A high-order arbitrarily unstructured finite-volume model of the global atmosphere: Tests solving the shallow-water equations[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids. 2008, 56(8): 1589–1596.
- [116] Ubbink, O., Issa, R.I. A Method for Capturing Sharp Fluid Interfaces on Arbitrary Meshes[J]. Journal of Computational Physics. 1999, 153(1): 26–50.
- [117] Tuković, Ž., Jasak, H. A moving mesh finite volume interface tracking method for surface tension dominated interfacial fluid flow[J]. Computers & Fluids. 2012, 55: 70–84.
- [118] Albadawi, A., Donoghue, D.B., Robinson, A.J., et al. Influence of surface tension implementation in Volume of Fluid and coupled Volume of Fluid with Level Set methods for bubble growth and detachment[J]. International Journal of Multiphase Flow. 2013, 53: 11–28.
- [119] Roenby, J., Bredmose, H., Jasak, H. A computational method for sharp interface advection[J]. Royal Society Open Science. 2016, **3**(11): 160405.
- [120] Issa, R.I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting[J]. Journal of Computational Physics. 1986, **62**(1): 40–65.
- [121] Rhie, C.M., Chow, W.L. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation[J]. AIAA Journal. 1983, **21**(11): 1525–1532.
- [122] Deck, S., Duveau, P., d'Espiney, P., et al. Development and application of Spalart– Allmaras one equation turbulence model to three-dimensional supersonic complex configurations[J]. Aerospace Science and Technology. 2002, 6(3): 171–183.
- [123] Launder, B.E., Spalding, D.B. The numerical computation of turbulent flows[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering. 1974, **3**(2): 269–289.
- [124] Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., et al. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique[J]. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics. 1992, 4(7): 1510–1520.
- [125] Shih, T.-H., Liou, W.W., Shabbir, A., et al. A new k-ϵ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows[J]. Computers & Fluids. 1995, 24(3): 227–238.
- [126] Wilcox, D.C., others. Turbulence modeling for CFD[M]. DCW industries La Canada, CA, 1998, 2.
- [127] Menter, F.R., Kuntz, M., Langtry, R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model[J]. Turbulence, heat and mass transfer. 2003, 4(1): 625–632.
- [128] Menter, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal. 1994, 32(8): 1598–1605.
- [129] Bredberg, J. On the wall boundary condition for turbulence models[J]. Chalmers University of Technology, Department of Thermo and Fluid Dynamics. Internal Report 00/4. G oteborg. 2000.
- [130] Mayer, S., Garapon, A., Sørensen, L., et al. A fractional step method for unsteady free-surface flow with applications to non-linear wave dynamics[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids. 1998, 28(2): 293–315.

- [131] Noack, R.W., Boger, D.A., Kunz, R.F., et al. Suggar++: An improved general overset grid assembly capability[C]. In Proceedings of the 19th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference. San Antonio TX, 2009: 22–25.
- [132] Frink, N. Upwind scheme for solving the Euler equations on unstructured tetrahedral meshes[J]. AIAA journal. 1992, 30(1): 70–77.
- [133] Frink, N. Recent progress toward a three-dimensional unstructured Navier-Stokes flow solver[C]. In Proceedings of the 32nd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV, USA, 1994: 61.
- [134] 沈志荣. 船桨舵相互作用的重叠网格技术数值方法研究[D]. 上海交通大学博士论文, 2014.
- [135] Stern, F., Wilson, R., Shao, J. Quantitative V&V of CFD simulations and certification of CFD codes[J]. International journal for numerical methods in fluids. 2006, 50(11): 1335–1355.
- [136] Olivieri, A., Pistani, F., Avanzini, A., et al. Towing tank experiments of resistance, sinkage and trim, boundary layer, wake, and free surface flow around a naval combatant INSEAN 2340 model[R]. IIHR Report No. 421, DTIC Document, 2001.
- [137] Roache, P.J. Verification and validation in computational science and engineering[M]. Hermosa Albuquerque, NM, 1998.
- [138] Marrone, S., Colagrossi, A., Antuono, M., et al. A 2D+t SPH model to study the breaking wave pattern generated by fast ships[J]. Journal of Fluids and Structures. 2011, 27(8): 1199–1215.
- [139] Moraga, F.J., Carrica, P.M., Drew, D.A., et al. A sub-grid air entrainment model for breaking bow waves and naval surface ships[J]. Computers & Fluids. 2008, 37(3): 281–298.
- [140] Marrone, S., Bouscasse, B., Colagrossi, A., et al. Study of ship wave breaking patterns using 3D parallel SPH simulations[J]. Computers & Fluids. 2012, **69**: 54–66.
- [141] Wang, Z., Yang, J., Koo, B., et al. A coupled level set and volume-of-fluid method for sharp interface simulation of plunging breaking waves[J]. International Journal of Multiphase Flow. 2009, 35(3): 227–246.
- [142] Hieu, P.D., Katsutoshi, T., Ca, V.T. Numerical simulation of breaking waves using a two-phase flow model[J]. Applied Mathematical Modelling. 2004, 28(11): 983–1005.
- [143] Dong, R.R., Katz, J., Huang, T.T. On the structure of bow waves on a ship model[J]. Journal of Fluid Mechanics. 1997, 346: 77–115.
- [144] Landrini, M., Colagrossi, A., Greco, M., et al. The fluid mechanics of splashing bow waves on ships: A hybrid BEM–SPH analysis[J]. Ocean Engineering. 2012, 53: 111– 127.
- [145] Olivieri, A., Pistani, F., Wilson, R., et al. Scars and Vortices Induced by Ship Bow and Shoulder Wave Breaking[J]. Journal of Fluids Engineering. 2007, 129(11): 1445–1459.
- [146] Wilson, R.V., Carrica, P.M., Stern, F. URANS simulations for a high-speed transom stern ship with breaking waves[J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics. 2006, 20(2): 105–125.
- [147] Larsson, L., Stern, F., Bertram, V. Benchmarking of computational fluid dynamics for ship flows: the Gothenburg 2000 workshop[J]. Journal of Ship Research. 2003, 47(1): 63–81.

- [148] Larsson, L., Stern, F., Visonneau, M. Numerical ship hydrodynamics: an assessment of the Gothenburg 2010 workshop[M]. Springer, 2013.
- [149] Hino, T. The Proceedings of CFD Workshop, Tokyo, 2005[M]. National Maritime Research Institute, 2005.
- [150] Xing, T., Carrica, P., Stern, F. Computational towing tank procedures for single run curves of resistance and propulsion[J]. Journal of fluids engineering. 2008, 130(10): 101102.
- [151] Wang, J., Liu, X., Wan, D. C. Numerical prediction of free runing at model point for ONR Tumblehome using overset grid method[C]. In Proceedings of Tokyo 2015 CFD Workshop. Tokyo, Japan, 2015, 3: 383–388.
- [152] Elshiekh, H. Maneuvering characteristics in calm water and regular waves for ONR Tumblehome[D]. The University of IOWA, 2014.
- [153] Wang, J., Zou, L., Wan, D. C. CFD simulations of free running ship under course keeping control[J]. Ocean Engineering. 2017, **141**: 450–464.
- [154] Shen, Z., Wan, D. C. RANS computations of added resistance and motions of a ship in head waves[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering. 2013, 23(04): 264–271.
- [155] Tezdogan, T., Demirel, Y.K., Kellett, P., et al. Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour and performance in head seas due to slow steaming[J]. Ocean Engineering. 2015, 97: 186–206.
- [156] Wang, J., Wan, D. C. Wave Effects on Free Running Ship in Standard Zigzag Maneuver[C]. In Proceedings of the 32nd International Workshop on Water Waves and Floating Bodies. Dalian, China, 2017.

攻读博士学位期间已发表或录用的论文

(一)已发表期刊论文:

- [1] **Wang, J.H.**, Zou, L., Wan, D.C. CFD simulations of free running ship under course keeping control[J]. Ocean Engineering. 2017, **141**: 450–464
- [2] **Wang, J.H.**, Wan, D.C. Investigations of self-propulsion in waves of fully appended ONR Tumblehome model[J], Applied Mathematics and Mechanics, 2016, **37**(12): 1345-1358
- [3] **王建华**, 万德成. 基于重叠网格技术数值模拟船舶纯摇首运动[J]. 水动力学研究 与进展 A 辑. 2016, **31**(5): 567–574
- [4] **王建华**, 万德成. 南海浮式码头与系泊系统动力耦合分析[J]. 水动力学研究与进展 A 辑. 2015, **30**(2): 180–186

(二)已发表会议论文:

- [1] Wang, J.H., Zhao, W.W., Wan, D.C. Free maneuvering simulation of ONR Tumblehome using overset grid method in naoe-FOAM-SJTU[C], In the Proceedings of the 31st Symposium on Naval Hydrodynamics, Monterey, California, USA. 2016, Paper No. 16
- [2] **Wang, J.H.**, Wan, D.C. Wave effects on free running ship in standard zigzag maneuver[C], In the Proceedings of the 32nd International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Dalian, China, 2017, pp. 201-204
- [3] Wang, J.H., Liu, X.J., Wan, D.C. Numerical prediction of free running at model point for ONR Tumblehome using overset grid method[C], In the Proceedings of Tokyo 2015 Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics, Tokyo, Japan, 2015, 3: pp. 383-388
- [4] Wang, J.H., Wan, D.C., Yu, X.G. Standard zigzag maneuver simulations in Calm water and waves with direct propeller and rudder[C], In the Proceedings of the 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco, California, USA, 2017, pp.1042-1048
- [5] Wang, J.H., Wan, D.C., Chen, G., Huang, W.H. Comparative studies of 3-D LNG tank sloshing based on the VOF and IMPS methods[C], In the Proceedings of the 26th International Ocean and Polar Engineering Conference Rhodes, Greece: 2016, pp. 815-821
- [6] **Wang, J.H.**, Liu, X.J., Wan, D.C., Chen, G. Numerical prediction of KCS selfpropulsion in shallow water[C], In the Proceedings of the 26th International Ocean and Polar Engineering Conference Rhodes, Greece: 2016, pp. 757-763

- [7] **Wang, J.H.**, Wan, D.C. Direct simulation of zigzag maneuver for fully appended ship [C], In the Proceedings of the Second Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics, Wuxi, China, 2016, pp. 436-441
- [8] **Wang, J.H.**, Liu, X.J., Wan, D.C. Numerical simulation of an oblique towed ship by naoe-FOAM-SJTU Solver[C], In the Proceedings of the 25th International Ocean and Polar Engineering Conference, Kona, Big Island, Hawaii, USA, 2015, pp.432-438
- [9] Wang, J.H., Zhao, W.W., Wan, D.C. Self-propulsion simulation of ONR Tumblehome using dynamic overset grid method[C], In the Proceedings of the 7th International Conference on Computational Methods, Berkeley, USA, 2016, paper No. ID 1499-5539-1-PB
- [10] **Wang, J.H.**, Wan, D.C. Computations of self-Propulsion in waves of fully appended ONR Tumblehome model[C], In the Proceedings of the 11th Asian Computational Fluid Dynamics Conference, Dalian, China, 2016, pp. 244-249
- [11] **Wang, J.H.**, Wan, D.C. Breaking wave simulations of high-speed surface combatant using OpenFOAM[C], Proceedings of the 8th International Conference on Computational Methods, Guilin, Guangxi, China, 2017, pp.841-852
- [12] Wang, J.H., Wan, D.C. Overset grid in naoe-FOAM-SJTU solver with applications to naval hydrodynamics[C], In the Proceedings of the 12th OpenFOAM Workshop, Exeter, UK, 2017
- [13] **王建华**,万德成,船桨舵协同作用下船舶操纵性 CFD 模拟[C],首届"高新船舶 与深海开发装备"创新论坛论文集,上海,2017, pp. 66-78
- [14] **王建华**, 万德成, 船桨舵配合下自航船舶在首斜浪中航向保持的数值模拟研究[C], 第十四届全国水动力学学术会议暨第二十八届全国水动力学研讨会文集, 长春, 2017, pp.1484-1491
- [15] **王建华**,赵伟文,万德成,naoe-FOAM-SJTU 求解器在船舶水动力性能数值预报中的应用[C],《中国舰船研究》第三届编委会成立大会暨"面向 2030 舰船研发与创新"论坛论文集,武汉,2016, pp. 57-69
- [16]**王建华**,刘小健,万德成,用重叠网格技术数值模拟船舶纯摇首运动[C],第二十 七届全国水动力学研讨会暨第五届海峡两岸水动力学研讨会论文集,江苏,南京, 2015, pp. 984-990
- [17] **王建华,**刘小健,万德成,用 Overset 网格技术数值模拟不同振幅下船舶纯横荡 试验[C],全国船舶操纵与控制专题研讨会论文集,武汉,2015
- [18] Liu, C., Wang, J.H., Wan, D.C. Yu, X.G. Computation of wave drift forces and motions for DTC ship in oblique waves[C], In the Proceedings of the 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco, California, USA, 2017, pp. 144-152
- [19]Liu, C., Wang, J.H., Wan, D.C. The numerical investigation on hydrodynamic performance of twisted rudder during self-propulsion[C], In the Proceedings of the 8th

International Conference on Computational Methods, Guilin, Guangxi, China, 2017, pp.934-943

[20] Tang, Z.Y., **Wang, J.H.**, Zhang, Y.L., Wan, D.C. Numerical investigation of 3D water entry based on IMPS method and overset method[C], In the Proceedings of 3rd International Conference on Violent Flows, Osaka, Japan, 2016, Paper No. 29

(三)已投稿期刊论文:

- [1] **Wang, J.H.**, Wan, D.C. Numerical investigations of free running ship zigzag maneuver in waves using RANS-overset grid method. (审稿中, Ocean Engineering)
- [2] Wang, J.H., Wan, D.C. Direct computations of self-propelled fully appended ship model at different speeds. (审稿中, International Journal of Computational Methods)
- [3] Wang, J.H., Wan, D.C. Investigations of breaking ship waves for high-speed surface combatant using OpenFOAM. (审稿中, International Journal of Computational Methods)
- [4] Liu, C., Wang, J.H., Wan, D.C. CFD computation of wave forces and motions of DTC ship in oblique waves. (待发表, International Journal of Offshore and Polar Engineering)
攻读博士学位期间参与的科研项目

- 上海东方学者特聘教授跟踪计划项目:《海洋结构物非线性水动力学问题的数值 模拟研究》,批准号: 2013022, 2014年1月至2016年12月。
- 教育部长江学者特聘教授资助项目:《船舶与海洋工程数值水池数值方法研究与 软件开发》,批准号: T2014099, 2015年1月至2019年12月。
- 国家自然科学基金项目:《海洋结构物大幅度运动剧烈流场数值模拟方法研究》, 批准号: 51379125,2014年1月至2017年12月。
- 工信部数值水池创新专项项目:涡激振动/涡激运动子系统软件开发,批准号: 2016-23/09,2016年1月至2019年12月。
- 5. 国家自然科学基金项目:《立管涡激振动问题的多尺度分析方法研究》,批准号: 11072154,2011年1月至2013年12月。
- 6. 国家自然科学基金项目:海上浮式风机流固耦合标准问题建模研究,批准号: 51411130131,2014年1月至2016年12月。
- 国家自然科学基金重大项目:《大型深海结构水动力学理论与流固耦合分析方法 ——深海浮体/系缆/立管运动的耦合动力分析方法》,批准号:51490675,2015年 1月至 2019 年 12 月。

致 谢

落笔时感慨万千,回顾二十八年的人生和二十一年的学习生涯,一路来遇到了 很多帮助和激励我前行的人,正是他们的悉心教导和热情鼓励,才让我顺利的走到 今天,所以想在这里献给你们最真挚的谢意。

首先要感谢的是我的博士生导师万德成教授。本博士论文的完成离不开万老师的 悉心指导。从博士课题的选择、开展到最后的完成,万老师一直给予了最大的帮助, 期间遇到的各种问题,万老师总能提供细心的指导,并且提供解决问题的思路和方 法。同时,万老师为我们提供了优良的学习、研究以及工作环境,使自己能够全力的 投入到博士课题的研究中。万老师不仅在我的博士课题研究中起到关键作用,而且平 时一直激励着我要奋力进取,教会了我在为人处世、与人交往、思考问题等方面很多 的人生道理。万老师严谨的学术理念以及认真的工作态度时刻影响着我,同时也激励 着我能够砥砺前行!

其次,我要感谢的是从小学开始到现在的整个学生生涯指导和教育过我的老师 们。正是他们的无私奉献和悉心教导,才使得我能够一步步的走到今天,衷心感谢他 们的付出。

同时,我要感谢我的家人为我求学二十余年的付出,感谢母亲闫香彩女士,感谢 您多年的养育之恩和这么多年来负担整个家庭的辛勤劳动,感谢在天堂的父亲,您一 直是我的榜样,感谢姐姐王建莉女士对我从小到大的陪伴和亲切的关怀,感谢其他的 家庭成员,是你们的鼎力支持,我才能完成自己的学业,您们辛苦了。我也为生活在 这样的家庭了而感到温暖和感动!

我还要感谢在上海交通大学一起学习和生活过的朋友们。感谢课题组的赵伟文 博士和沈志荣博士在自己的博士课题开展过程中提供的无私帮助,感谢同届的张晨 亮、何佳益、李鹏飞、杨亚强和李海洲在前两年半的陪伴,感谢唐振远博士、孟庆杰 博士、端木玉博士、曹洪建博士、张雨新博士在学习上的指导和帮助,感谢朱怡、刘 远传、查若思、叶海轩、周胡、赵文超、孙涛、刘晓义、尹崇宏、吴建威、罗天、彭 耀、吴慧宇,同时还要感谢现在课题组的程萍、张友林、刘聪、任振、刘正浩、何佳 伟、缪爱琴、陈翔、庄园、何东亚、艾勇、付博文、夏可、饶成平、文潇、邓迪、黄 杨、孙晨光、许璐荣等。感谢大家在课题组各项事务中的配合和帮助,有了大家的合 作、互帮互助,才能取得学习和工作上的成功。同时感谢课题组的朱政老师在日常事

第 211 页

务中的热情帮助。希望目前已经毕业的师兄师姐们工作顺利,事业有成,家庭美满; 希望课题组内的师弟师妹们,能够科研顺利,多发论文,完成学业。

下面,我要感谢我的室友赵庆凯博士,感谢在四年半里的一起学习和生活。感谢 一起健身的小伙伴们,孙涛、李靖、李晓明、钟晓旭,有你们的激励和陪伴,健身的 时光里不寂寞。

本博士论文还受到了英国劳氏船级社基金(Lloyd's Register Foundation for Doctroal Student, LRF)的长期资助。对此我表示深深的感谢。

最后我要感谢上海交通大学为我提供和创造的一流的学习环境和教育资源,以 及生活上提供的资助。

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

不保密区。

(请在以上方框内打"√")

学位论文作者签名: 上建华 指导教师签名: 日期:2018年 6月16日 日期: 2918年 (1月16日

上海交通大学

学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名: 主連络

日期: >>18年 4月 16 日