

上海交通大学硕士学位论文

用重叠网格技术数值模拟船模停船操纵

硕士研究生：孙晨光

学 号：116010910207

导 师：万德成

申 请 学 位：工学硕士

学 科：船舶与海洋工程

所 在 单 位：船舶海洋与建筑工程学院

答 辩 日 期：2019年1月

授予学位单位：上海交通大学



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

**SIMULATIONS OF SHIP STOPPING MANEUVER  
USING OVERSET GRID TECHNOLOGY**

<b>Candidate:</b>	Chenguang Sun
<b>Student ID:</b>	116010910207
<b>Supervisor:</b>	Decheng Wan
<b>Academic Degree Applied for:</b>	Master
<b>Speciality:</b>	Naval Architecture and Ocean Engineering
<b>Affiliation:</b>	School of Naval Architecture, Civil and Ocean Engineering
<b>Date of Defence:</b>	January, 2019
<b>Degree-Conferring-Institution:</b>	Shanghai Jiao Tong University



# 上海交通大学

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密，在\_\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日



# 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《用重叠网格技术数值模拟船模停船操纵》，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期：        年        月        日



# 用重叠网格技术数值模拟船模停船操纵

## 摘要

为了提升运输效率、节约运输成本,船舶在向大型化的方向发展,这使得港口与航道变得拥挤,同时大型船舶的操纵性能降低,容易发生撞击事故。为了确保船舶在航行中的安全,需要对船舶的停船性能进行更为深入的研究。

本文使用了基于开源计算流体力学软件 OpenFOAM 开发并结合了重叠网格技术的船舶与海洋工程水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU,对 KVLCC2 船模的数种停船操纵方式进行了数值模拟。

本文首先对不操舵紧急倒车操纵进行了数值模拟,得到了冲程、横距等停船参数,并与 NMRI 水池的数据进行对比,验证了本文中所采用数值方法的可靠性。通过对倒车停船过程中船周流场的分析,解释了倒车效应产生的原因:在倒转螺旋桨的作用下,排出流与船尾发生相互作用,其中右侧排出流受到船尾的阻挡,造成右侧船尾压力升高,从而推动船尾向左,导致船首右偏。另外本文还考虑了浅水效应对倒车停船操纵产生的影响,通过对停船参数和流场情况的对比得出,浅水中船体阻力增大,同时船尾流速增加,倒转螺旋桨进速增大,其排出流与船体的相互作用增强,使船舶受到的纵向力和转矩都增大,所以浅水中倒车停船的停船纵距以及停船时间减小,转艏角度增加。

随后本文对满舵紧急倒车操纵进行了数值模拟。发现左满舵紧急倒车会改变船的偏移方向,同时减少停船纵距和时间;而右满舵紧急倒车会增加停船距离与时间,同时使停船横距大幅减小。在对流场进行分析之后发现,桨后舵阻挡了流体向前流动,导致倒转螺旋桨的进速降低,在倒车操纵中减小倒车效应。同时倒转螺旋桨增加了舵周围的伴流速度,降低舵的进速,使舵效变差。

之后本文对停车转舵操纵进行了数值模拟。在对比了带桨与不带桨 KVLCC2 船模进行停车转舵操纵时的船尾压力分布与流场情况后,发现静止桨的影响可以忽略不计。于是本文对仅带有舵的 KVLCC2 船模进行了 3 个水深工况下的停车转舵操纵数值模拟,通过对停船参数、流场情况的对比,发现浅水中的船尾伴流速度增加,导致舵的进速降低,舵效变差,停车转舵操纵的效果不佳,所以在浅水中停车转舵会使停船距离变大、时间增加、转艏角度变小。

最后本文对深水与浅水中的回转规避操纵进行了数值模拟,在对停船参数和流场进行对比分析后发现,浅水中船后伴流速度增加,桨与舵的进速减小,效果变差,提供的推力和转艏力矩减小,所以船舶在浅水中转向能力变差,回转直径增大。在综合对比了本文中数值预报的各种停船方式参数之后得到结论,当需要

船舶完成停船操纵后停下时，左满舵倒车停船操纵具有最小的停船纵距与停船时间，右满舵倒车操纵具有最小的停船横距。回转规避操纵的规避纵距和时间最短，但在操纵完成后仍存在较大航速。本文的计算结果可以为停船方式的选择提供参考，而实际采用何种方式需要根据具体情况而定。

**关键词：**停船操纵；naoe-FOAM-SJTU 求解器；重叠网格技术；水动力学

# Numerical Simulations of Ship Stopping Maneuver Using Overset Grid Technology

## Abstract

Recently, ships are becoming larger in order to improve transport efficiency and save costs. The crowded waterways and worse maneuverability of large ships will cause more collision accidents. Therefore, it is necessary to study stopping maneuverability to ensure the safety of ships.

In this thesis, ship and offshore engineering hydrodynamic solver naoe-FOAM-SJTU based on open source computational fluid dynamics software OpenFOAM and overset grid technology is used to simulate several stopping maneuvers of KVLCC2 model.

Firstly, the maneuver of propeller reversing with no use of rudder is numerically simulated. The stopping parameters such as stroke and transverse distance are obtained and compared with the data of NMRI tank to verify the reliability of the numerical method adopted in this thesis. The thesis explains the cause of reversing effect through the analysis of the flow field. The right propelled flow is blocked by the stern, rising the pressure on the right aft of the ship, which pushes the stern to the left and turns the bow to the right. In addition, the influence of shallow water is considered in this thesis. By comparing the parameters and the flow field of stopping maneuver, it is found that the resistance of hull increases. Meanwhile, the wake velocity increases, making the reversing propeller more effective. So the longitudinal force and moment of Z direction acting on the ship is larger, leading to shorter stroke, less stopping time and larger turning angle of the ship in shallow water case.

Then the maneuvers of propeller reversing with rudder turning are numerically simulated. It is found that turning the rudder to left while reversing the propeller will change the moving direction and reduce the longitudinal distance and time of stopping maneuver. Turning the rudder to right will increase the longitudinal distance and stopping time, while significantly reduce the transverse distance. The analysis of flow field shows that the reversing effect is reduced because the rudder behind the propeller blocks the forward flow. At the same time, the reverse propeller increases the fluid velocity after the ship, worsening the efficiency of rudder.

After that, the maneuver of rudder turning with static propeller is numerically simulated. Through comparing the pressure distribution on the hull and the rudder, it is found that the existence of static propeller can be neglected. In this thesis, the KVLCC2 ship model with rudder is used and the simulation is carried on under three water depths. By comparing the stopping maneuver parameters and the flow field, it is found that the efficiency of rudder is worse in shallow water because the increasing wake velocity,

resulting in poor effect of stopping maneuvering. So stopping maneuver with turning rudder in shallow water has larger stopping distance, longer stopping time and smaller turning angle.

Finally, the maneuver of turning circle in deep and shallow water is numerically simulated. After analyzing and comparing the stopping parameters and flow field, it is found that the wake velocity in shallow water increases, worsening the effect of propeller and rudder. So the turning ability of the ship becomes worse in shallow water, which means larger diameter of turning circle. Then the parameters of various stopping maneuver predicted by the numerical method in this thesis is compared. If the ship needs to be completely stopped after stopping maneuver, the method of turning rudder to the left while reversing the propeller has minimum stopping distance and stopping time. While the method of turning rudder to the right has smallest transverse distance. The maneuver of turning circle can avoid crashing with minimum longitudinal distance and turning time. But there is still a large speed of ship when the maneuver is completed. The calculation results in this thesis can provide a reference for the selection of stopping maneuver, but the actual adopted method depends on the specific situation.

**Key words:** Stopping maneuver; naoe-FOAM-SJTU solver; Overset grid technology; Hydrodynamics

# 目录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 停船操纵研究进展.....	4
1.2.1 停船操纵的经验公式研究.....	4
1.2.2 停船操纵的约束模型试验研究.....	7
1.3 自航船舶操纵运动数值模拟研究进展.....	10
1.3.1 基于简化体积力方法的船舶操纵运动数值模拟研究.....	10
1.3.2 直接构建螺旋桨几何模型的船舶操纵运动数值模拟研究.....	12
1.4 本文主要工作.....	17
第二章 数值方法.....	18
2.1 求解器框架.....	18
2.2 基本数值方法.....	19
2.2.1 流体控制方程.....	19
2.2.2 湍流模型.....	19
2.2.3 VOF 自由面捕捉法.....	22
2.3 重叠网格技术.....	22
2.4 多级物体运动模块.....	24
2.5 本章小结.....	26
第三章 不操舵紧急倒车数值模拟分析.....	27
3.1 计算工况与网格.....	27
3.1.1 深水工况网格.....	28
3.1.2 浅水工况网格.....	29
3.2 不操舵紧急倒车操纵数值模拟结果与分析.....	30
3.2.1 深水工况不操舵紧急倒车操纵.....	30
3.2.2 水深影响.....	34
3.3 本章小结.....	43
第四章 满舵紧急倒车数值模拟分析.....	44
4.1 计算工况与网格.....	44
4.2 满舵紧急倒车操纵数值模拟结果与分析.....	45
4.2.1 左满舵紧急倒车操纵.....	46
4.2.2 右满舵紧急倒车操纵.....	49
4.2.3 操舵方式对紧急倒车操纵的影响.....	53
4.3 本章小结.....	54
第五章 停车转舵数值模拟分析.....	55
5.1 计算工况与网格.....	55
5.1.1 深水工况网格.....	55
5.1.2 浅水工况网格.....	57
5.2 停车转舵操纵数值模拟结果与分析.....	58

---

5.2.1 简化模型对模拟结果的影响.....	58
5.2.2 深水中停车转舵操纵数值模拟.....	59
5.2.3 水深对停车转舵操纵的影响.....	61
5.3 本章小结.....	66
第六章 回转规避数值模拟及不同停船操纵方式的对比.....	67
6.1 回转规避数值模拟计算工况与网格.....	67
6.1.1 深水工况网格.....	67
6.1.2 浅水工况网格.....	67
6.2 回转规避数值模拟结果与分析.....	68
6.3 不同停船操纵方式计算结果对比分析.....	72
6.4 本章小结.....	74
第七章 结论与展望.....	75
7.1 论文结论.....	75
7.2 研究展望.....	76
参考文献.....	77
攻读硕士学位期间已发表或录用的论文.....	83
致谢.....	85

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景及意义

在当今国际社会倡导节能减排，共建绿色地球的大背景下，为了提升运输效率，远洋运输类船舶正逐渐向大型化的方向发展，这使得港口与航道日益变得拥挤。又由于船舶的大型化使得船体本身的运动性能降低，其操纵性，如转向能力与速度调节能力等都有一定幅度的下降，另外浅水中船舶的操纵性能会进一步恶化。船舶对操纵的响应变得迟钝，无法对危机事件采取及时和有效的行动，导致大型船舶相撞事故频繁发生。为了确保船舶在航行中，特别是在港口、航道等限制水域航行时的安全，需要对船舶的停船性能进行更为深入的研究。

1993年，IMO通过了1992年发布的《船舶操纵性暂行标准》，对船舶的停船性能提出了明确的要求；2002年底，IMO正式颁布《船舶操纵性标准》<sup>[1]</sup>，对暂行标准进行了修改和补充工作，针对船舶的停船性能提出了量化的要求，即全速倒车停船试验测得的航迹行程不得超过15倍船长，对于大型船舶，当船舶排水量过大而导致船舶无法达到标准时，可以适当放宽该要求，但是停船距离仍然不得超过20倍船长<sup>[2]</sup>。

为了应对紧急情况，使船舶快速停下，有数种停船操纵方式可供选择。常见的停船操纵方式有倒车制动、停车制动、大舵角旋回、蛇航制动、拖锚制动和辅助装置制动等<sup>[3]</sup>。操作人员需要根据具体的船舶型号、船舶速度、船舶航行区域限制等，选择更为合适的停船方式，以达到最佳的停船效果。各种船舶制动方式及其适用范围如表1-1所示。

表 1-1 各种制动方式及适用范围

Table 1-1 Methods of ship stopping maneuver and their used conditions

船舶制动方式	制动类别	有效用的速度域	可使用的操船环境
停车制动	阻力消航型	全速域	港内水域大型船
倒车制动	提高拉力型	全速域	全水域
拖轮制动		低速域	全水域
旋回制动		高速域	较宽敞水域
拖锚制动	增加阻力型	低速域	港内操纵大型船
辅助装置制动		高速域	较宽水域紧急停船
蛇航制动	混合型	高速域	较宽水域大型船

对于在港内水域航行的大型船舶，通常可以采用停车制动的方式<sup>[4]</sup>。由于港内水域拥挤，船舶活动区域受限，船舶不允许有过多的横向位移。停车制动完全利用船体自身的阻力，使船慢慢停下。其优势在于不会改变船舶航向，停船轨迹通常为一条直线。而其劣势也很明显，即停船过程非常漫长。通常，该方式仅被使用于常规停船操作，如进港等情况，而当遭遇紧急情况时，停车制动不能作为有效的响应措施，以达到使船舶快速停下的目的。

当大型船舶遭遇紧急情况，需要快速停下时，倒车制动是较为普遍的停船操纵方式。倒车制动，即螺旋桨倒转，拨水向前，为船舶提供一个向后的作用力。该停船方式在利用了船体自身阻力的同时加上了螺旋桨通过轴系传递的向后作用力，可以使行驶中的船舶快速停下，从而起到“刹车”的效果。在螺旋桨倒转的过程中，由于流体、船尾和舵的相互作用，会在船尾产生侧向力，从而推动船尾向左或向右，造成船舶转向<sup>[5]</sup>，这就是“倒车效应”<sup>[6]</sup>。倒车制动的优势在于其降低船速的效果非常好，可以使行驶中的船舶快速停下，具有相对较小的停船纵距。同时倒车效应会导致船舶有一定的横向偏移，其幅度不大。倒车制动最大的难点在于对于主机和轴系的要求较高，主机需要从正车转换为倒车，在操作过程中对于主机和轴系的负载较大，同时反转的螺旋桨需要将来流转换方向排出，作用在叶片上的力以及作用在轴系的力矩都会大于正常运转时的螺旋桨。所以倒车制动虽然可以使船很快停下，却会对主机、螺旋桨和轴系造成较大负担。

在较为宽敞的水域，大型船舶还可以使用旋回规避的方式避让前方障碍。旋回规避，即对船舵进行操作，改变船舶航向，通过巨大的斜航阻力使船舶减速或停下<sup>[7]</sup>。旋回规避操纵可以分为停车与前进车两种，即螺旋桨不转或继续转动。停车旋回规避即利用船舶自身的阻力，加上转向时造成的速降，使船舶纵向速度快速降低；前进车旋回规避与船模试验中的回转试验相似，螺旋桨继续提供向前的推力，其排出流提高了舵的进速，从而提升舵效，让船能够更快转向从而达到快速避让前方障碍的目的。相比停车旋回规避，前进车旋回规避，即回转操纵拥有更小的避让纵距和转向时间，不同于传统的停船方式，回转操纵的船舶在达到最大纵距的时候总速度并不会减小为零，余速垂直于原航向，船舶会继续运动下去，该方法主要用于避让前方障碍。停车旋回规避是停车制动的改进，在宽阔水域中利用了船舶的斜航阻力；而前进车旋回规避则只是使船舶沿原方向的速度降为零，并不是真正的使船停下。

蛇航制动则是进一步利用了船舶的斜航阻力，类似于船舶试验中的 Z 型试验，通过不断转换舵角，改变船舶航向，同时对螺旋桨有着更加复杂的操作，从而达到使船舶快速停下的目的<sup>[8]</sup>。由于停船轨迹类似于蛇类向前爬行的痕迹，所以称为蛇航制动。该方法的停船纵距与横距都较为理想，但是停船路径附近的区域内不能存在障碍物，同时其操作非常复杂，对于船员的操作水平要求较高。当遭遇紧急情况时，完全按照蛇航制动的操作要求进行停船操纵难度较大。同时一旦遭遇浅水区域，舵效消失，蛇航制动将不能发挥其快速停船的功效<sup>[9]</sup>。

在条件允许的情况下，辅助装置制动也是非常不错的选择。辅助装置包括拖车、拖船、锚链、喷水推进<sup>[10]</sup>、变形船体（船尾）等等，即通过辅助装置，在外部添加作用力，或增加船体自身的额外阻力来使船体快速停下，类似于高速飞机着陆时后部展开的降落伞，或是客机降落减速时张开的机翼。但是辅助装置一般只会安装在经常具有停船操纵需求的船型上，集装箱船、油轮等大型船舶并不会装备这些装置，当遇到紧急状况时，还是需要采用上文所述的通过桨和舵配合完成的停船操纵方式。

上述停船操纵的过程中，由于船、桨、舵的综合作用，船舶或多或少会受到与原运动方向相垂直的横向力，这就使船舶在操纵过程中偏离原来的航线。船舶停船操纵的运动轨迹如图 1-1 所示。

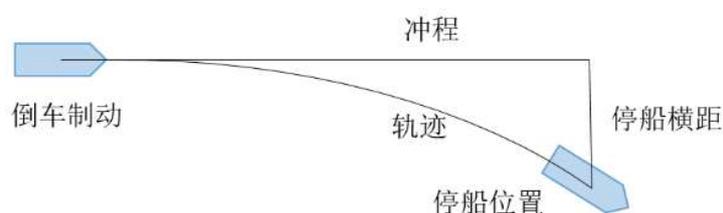


图 1-1 停船操纵轨迹

Fig. 1-1 Trajectory of stopping maneuver

为了达到避让前方障碍的目的，停船冲程的控制尤为重要，同时如果船舶所在区域有横向移动距离的限制，例如船舶在限制航道、狭窄海域等，那么停船的横距也是必须考虑的因素。具有良好停船性能的船舶，当采用某种停船操纵之后，应当能够快速停下，且纵向与横向移动的距离能够满足要求。

通常来说，大型船舶的设计不会专门为了停船性能的提升而改变船体总体结构，船能够快速停下，意味着阻力的增加，这与船舶减阻节能的设计理念是相违背的，所以对于停船性能的研究，更多的关注点会放在停船方式的选择上。根据船舶状况、航行区域情况选用最为合适的停船方式，是决策者需要做的。安全问题是优先需要考虑的因素，防止船舶碰撞造成巨大经济损失，是紧急停船操纵的首要目的。其次是停船之后的后续工作，船舶需要停在适当的位置以便采取后续操纵。同时，作用在船舶主机、螺旋桨和轴系的巨大载荷可能造成的设备损坏也是重要的考虑因素。

目前而言，应用最为广泛的船舶停船性能预报方法为经验公式估算法和缩尺船模试验法<sup>[11]</sup>。其中船模试验方法又可分为约束船模试验和自航船模试验。

经验公式估算法，即对于某一特定类型的船舶，基于大量实船停船操纵试验采集到的数据基础上，使用差值、回归等数学方法，归纳总结出一个通用型公式，对于同样类型的船舶，更改公式中相应的变量，并进行适当修正，可以得到其停船参数。这一方法可以非常便利且快速的得到某船舶的停船性能参数，但是说服力有限。当船舶型号产生较大差异时，经验公式的预报精度就会大打折扣。同时

船体上的零件和细节、螺旋桨的类型、桨舵的操作方式等都会对停船操纵的最终结果产生影响，降低经验公式预报的精度。

船模试验方法，即采用一定缩尺比的船体模型在水池中进行试验，将数据换算到实船，得到相应的参数。对于操纵性的研究，船模试验又分为约束模型试验和自航模型试验。约束模型试验使用特殊的船模约束装置，对船体模型进行大量的强迫运动，采集其运动过程中的各项数据，从而得到计算船体运动所需要的相应船模的水动力导数。将得到的特殊船型的水动力学导数代入到船体受力及运动方程中，最后得到停船操纵的轨迹、时间等参数。约束模型试验使用简化了的数学方程计算船体运动，与实际操作存在一定的区别，无法考虑到操作过程中的细节成分，需要试验操作人员对工况精确把控<sup>[12]</sup>。而自航模型试验实现的难度则更大，完全放开自由度的船模虽然最接近于真实情况，但是其操作难度非常高，对于船上设备如螺旋桨和舵的精确控制要求过高，目前而言基本无法实现对于停船操纵的全自航模型试验。模型试验的方法，无论是约束模型试验还是自航模型试验，都存在成本过高的问题，模型的制作、试验的进行，都需要大量的经济与时间成本，并且试验结果受到操作水平的影响。

上述的经验公式法和约束模型试验法虽然是研究船舶停船操纵性能的主流方法，却都存在着精度不高的问题，同时这些方法都无法对停船操纵过程中船舶周围流场的情况和船体表面的受力情况进行研究和分析，无法对停船操纵过程中产生的现象给出具体而可信的解释。

随着计算机技术的迅速发展，计算流体力学（CFD）在船舶与海洋工程领域逐渐被重视和认可，为船舶和海洋结构物的设计制造提供有价值的参考。目前对船舶的操纵性进行数值模拟的研究较多，但是基本是针对自航、回转、Z型操纵等基础的船模试验类型，目前国内外将 CFD 数值模拟方法应用于停船操纵的研究较少，鲜有相关资料。本文使用基于重叠网格技术的数值模拟方法，对船模的停船操纵过程进行数值模拟，得到各种停船方式的停船参数并进行比对分析，同时对停船操纵过程中船体压力和船周流场的分布规律进行分析。

## 1.2 停船操纵研究进展

### 1.2.1 停船操纵的经验公式研究

停船操纵虽然有着复杂的船、桨、舵配合运动，却有着相对简单的停船参数，即停船纵距、停船横距和停船时间。当某一类型的船舶拥有大量的停船操纵数据，就能够从中提取出某种通用型计算公式，当需要评估某艘新船停船性能的时候，采用经验公式的计算是最为快速便捷的。国内外很多学者，特别是日本关西造船协会的学者们<sup>[13-15]</sup>，针对船舶制动有着比较深入的研究。

经验公式法，即对于某种停船方式，在大量的统计数据基础上，总结出系列船型的停船轨迹计算公式，并设置数个参数对方程进行适应性的调整。常见的需

要调整的因素有：船型、船舶质量、主机类型、螺旋桨、浅水及堤岸、操舵方式等等。

以倒车制动纵向距离的经验预报为例<sup>[16]</sup>，将船舶沿原航向的运动简化为单自由度运动方程，即：

$$(m + m_x)\dot{V} = T(1 - t) - R \quad (1-1)$$

其中， $m$ 和 $m_x$ 为船舶的质量和纵向的附加质量， $\dot{V}$ 为加速度， $T$ 为螺旋桨提供的推力， $t$ 为推力减额系数， $R$ 为船体阻力。

假设船舶阻力与船速的平方成正比，并且采用有效推力系数 $K_{T(1-t)}$ 来表达螺旋桨推力，则可以将上式改写为：

$$(m + m_x)\dot{V} = \rho n^2 D^4 K_{T(1-t)}(J) - KV^2 \quad (1-2)$$

其中， $\rho$ 为水的密度， $n$ 为螺旋桨转速， $D$ 为螺旋桨直径， $J$ 为进速系数， $K$ 为船的总阻力系数。

对船舶制动性能存在影响的有诸多因素。首先是船型的影响，当船体偏向肥大时，就具有较大的附加质量。同样质量的船舶，若是肥大船，则其受到的阻力更大，船更容易停下，即停船距离更小。对于相同航速的船舶，质量大的船舶惯性更大，其停船距离也越长。另外，主机功率、主机类型、螺旋桨效率、螺旋桨进速系数等等船体设备参数都会影响船舶操纵性。浅水或限制航道中，船体受到的阻力更大，停船距离会有所减小。在基础倒车停船的基础上，进行左、右满舵的操作，同样会增加船体阻力，从而起到降低停船距离的作用。

古初藏<sup>[13]</sup>对大量船舶制动资料进行了研究和整理，认为船舶在制动的过程中，船速可以看作是线性递减的，可以近似表示为一条直线。将船舶制动数学模型近似表示为：

$$\alpha = aV^2 + bn^2 \quad (1-3)$$

其中， $\alpha$ 为加速度， $a$ 为船体阻力系数， $b$ 为螺旋桨推力系数。

因为上文提到的船速线性递减的假设， $\alpha$ 为一固定值。又由于在船舶停下的过程中船受到的阻力与螺旋桨推力都是变化的，而螺旋桨转速固定不变，故其运动数学模型可表示为：

$$\alpha = b'n^2 \quad (1-4)$$

其中 $b'$ 为满足该假定方程的常数，船舶在停下过程中的加速度与船速无关。

当船舶拥有任意初速度，同时以固定转速进行倒车制动时，船舶速度曲线的斜率总是一样的，如图 1-2 所示：

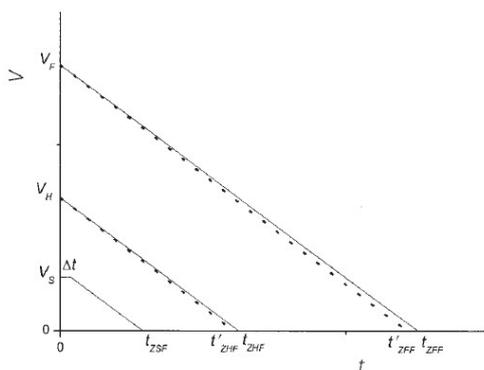


图 1-2 全功率倒车制动速度曲线<sup>[13]</sup>

Fig. 1-2 Velocity of ship with full-power reversing propeller

如果船在制动过程中有较大的转艏，则需要修正，修正后的停船时间为：

$$t'_{ZFF} = K_b \frac{2L}{V_F} \quad (1-5)$$

其中修正系数 $K_b$ 与偏转角度有关。 $L$ 为停船纵距。需要预报停船距离时，只需调整船舶初速度，对曲线进行平移操作，就能得到停船时间和停船距离。如果船舶初速度较低，则需进行停船时间修正，增加一个 $\Delta t$ ，用于表示主机滞留的时间。

当船舶拥有任意倒车功率，则需要对直线本身的斜率进行修正，修正后的停船时间为：

$$t_{ZHF} = \left(\frac{n_F}{n_H}\right)^2 t_{ZFF} \quad (1-6)$$

使用式(1-6)对前文中船舶任意初速全功率倒车停船公式进行修正，即可以得到任意初速、任意功率倒车停船操纵的数学预报模型。

对某大型集装箱船进行各种工况下倒车停船的数学模型预报，得到的预报结果与试验结果十分吻合，如图 1-3 所示。

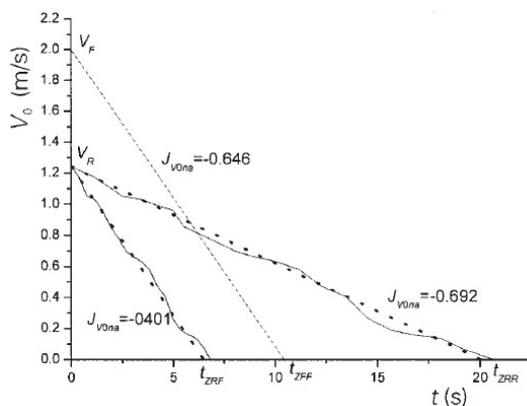


图 1-3 某大型集装箱船制动性能预报结果<sup>[13]</sup>

Fig. 1-3 Prediction results of astern stopping for a large container vessel

除了上述线性模型外，徐士友<sup>[17]</sup>对多功能水下作业支持船的回转操纵进行了研究，基于前人总结的经验公式，得到了回转半径等参数。黄超<sup>[18]</sup>对肥大船型的航行阻力给出了经验性的预报方法，能够快速预报肥大性船舶的阻力性能，从而计算得到船舶停车制动的相关参数。

### 1.2.2 停船操纵的约束模型试验研究

用于预报船舶水动力学操纵性的数学模型可以分为Abkowitz<sup>[19]</sup>提出的简化数学模型和由日本拖曳水池操纵性委员会提出的MMG模型<sup>[20]</sup>，前者将船、桨、舵视为一个整体，综合考虑其受力情况，而后者分别考虑船、桨、舵的受力情况与它们之间的相互作用，单独计算每个部分的受力与力矩。由于倒车停船操纵关系到桨与舵的具体操作形式，需要考虑到船、桨、舵的综合作用，故采用MMG模型作为水动力学计算的数学模型。

MMG模型，即分离型模型，后续由Ogawa<sup>[21][22]</sup>、Kasai、Mastsumoto<sup>[23]</sup>等人进行补充和完善，该模型假设船为刚体，船体受力为准静态，船舶的侧向速度相对整体速度可以忽略，同时忽略船舶所受的兴波阻力，不考虑船体横摇。只考虑船体三个自由度，即船在水平面上运动的数学模型如下式所示：

$$\begin{cases} X = (m - X_{\dot{u}})\dot{u} - (m - Y_{\dot{v}})vr - mX_G r^2 \\ Y = (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (m - X_{\dot{u}})ur + mX_G \dot{r} \\ N = (I_Z - N_{\dot{r}})\dot{r} + mX_G(ur + \dot{v}) \end{cases} \quad (1-7)$$

$$\begin{cases} X = X_H + X_P + X_R \\ Y = Y_H + Y_P + Y_R \\ N = N_H + N_P + N_R \end{cases} \quad (1-8)$$

其中， $X$ 、 $Y$ 、 $N$ 分别代表作用在船体上的纵向力、横向力和转矩。下标 $H$ 代表船体力， $P$ 代表螺旋桨产生的力， $R$ 代表舵产生的力。

上述公式中的水动力学系数需要通过系列约束模型试验来获取，系列试验首先需要完成自航试验、拖航试验和螺旋桨敞水试验等，接下来在不同螺旋桨转速条件下进行斜航试验、舵力试验、平面运动机构试验（PMM）、旋转试验（CMT）等等，得到船模的各项水动力学系数。从而对船体运动进行预报。

日本NMRI水池的Michio Ueno<sup>[24]</sup>基于船舶六自由度运动方程和船桨舵耦合受力方程，总结出的紧急倒车停船操纵数学模型如下式所示：

$$\begin{cases} X = -m_x \dot{u} - \frac{1}{2} \rho S_W C_T u^2 + X_{\beta\beta} \beta^2 + (X_{\beta r} - m_y V) \beta \gamma + X_{rr} r^2 + X_{\beta\beta\beta\beta} \beta^4 + X_P \\ Y = -m_y \dot{v} + Y_{\beta} \beta + (Y_r - m_x u) r + Y_{\beta\beta\beta} \beta^3 + Y_{\beta\beta r} \beta^2 r + Y_{rrr} r^3 + Y_P \\ N = -J_{zz} \dot{u} + N_{\beta} \beta + N_r r + N_{\beta\beta\beta} \beta^3 + N_{\beta\beta r} \beta^2 r + N_{\beta r r} \beta r^2 + N_{rrr} r^3 + N_P \end{cases} \quad (1-9)$$

其中， $m_x$ 、 $m_y$ 和 $J_{zz}$ 分别表示船体纵向、横向的附加质量和垂向附加惯性矩。 $\rho$ 表

示水的密度,  $C_T$ 表示总阻力系数,  $S_W$ 表示湿表面积。  $X_{\beta\beta}$ 、 $X_{\beta r}$ 、 $X_{rr}$ 、 $X_{\beta\beta\beta\beta}$ 、 $Y_\beta$ 、 $Y_r$ 、 $Y_{\beta\beta\beta}$ 、 $Y_{\beta\beta r}$ 、 $Y_{rrr}$ 、 $N_\beta$ 、 $N_r$ 、 $N_{\beta\beta\beta}$ 、 $N_{\beta\beta r}$ 、 $N_{\beta rr}$ 、 $N_{rrr}$ 表示作用在船体上的水动力分量,  $X_p$ 、 $Y_p$ 、 $N_p$ 表示由倒转螺旋桨产生的力与力矩。

由倒转螺旋桨产生的各力与力矩如下:

$$\begin{cases} X_p = \rho D^4 n^2 (1-t) K_T \\ Y_p = \rho D^4 n^2 K_Y \\ N_p = \rho D^4 L n^2 K_N \end{cases} \quad (1-10)$$

其中D为螺旋桨直径, t为推力减额分数,  $K_T$ 为推力系数, 同样的,  $K_Y$ 和 $K_N$ 为螺旋桨产生的横向力系数与垂向转矩系数。

通过上述数学模型, NMRI水池工作人员对KVLCC2、KCS等船模进行了倒车制动试验预报, 并在之后进行了数学模型的系数修正工作。其中对无舵KVLCC2船型进行的倒车制动试验预报结果就是本文第三章中试验数据的来源。

董国祥<sup>[25]</sup>在MMG模型和倒车停船操纵数学模型的基础上, 对于倒转螺旋桨力与力矩, 提出了混合型的估算公式如下:

$$\begin{cases} Y'_p = a_0 + a_0 J + a_2 J^2 + a_3 \beta \\ N'_p = b_0 + b_1 J + b_2 J^2 + b_3 \beta \end{cases} \quad (1-11)$$

其中 $a_0$ 、 $a_1$ 、 $\dots$ 和 $b_0$ 、 $b_1$ 、 $\dots$ 等为系数, 主要与船型参数 $C_b$ 、 $B/L$ 、 $d/B$ 等有关, 通过大量的实船数据统计得到。

通过上述对螺旋桨力与力矩的计算方式, 对数艘实船进行了仿真计算, 结果表明, 使用该混合型估值公式计算得到的螺旋桨力与力矩对倒车停船操纵进行数学预报, 结果与试验值吻合良好, 所得结果如图所示:

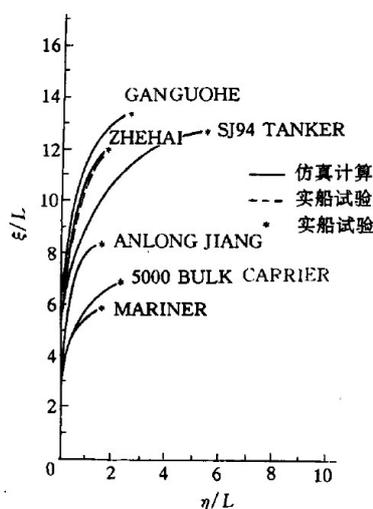


图 1-4 紧急停船操纵仿真计算与试验值比较<sup>[25]</sup>

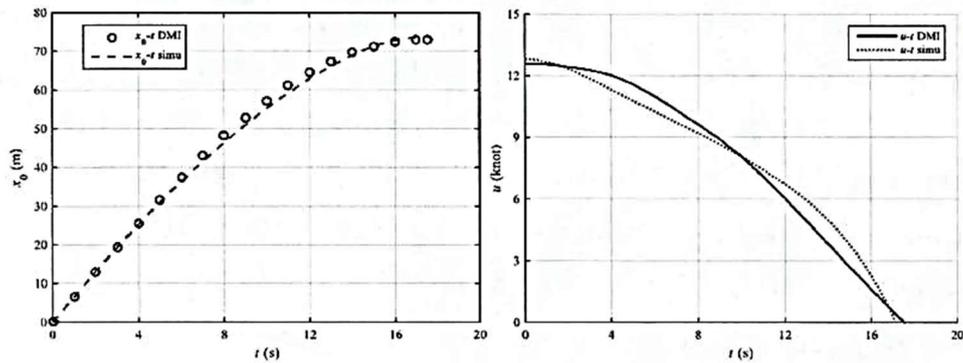
Fig. 1-4 Comparison of simulation result and experimental data of stopping maneuver

杨景<sup>[26]</sup>基于MMG建模思想，建立了ASD拖轮停船运动数学模型，文章从惯性力与粘性力两个方面来考虑，具体分析了船体水动力，而主动力则采用联合推进模型计算，模型如下：

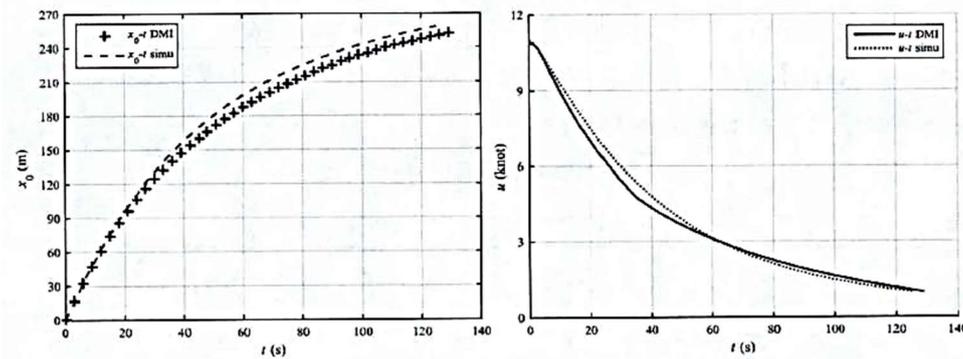
$$\begin{cases} X_P = T_{(P)} \cos(\delta_{(P)}) + T_{(S)} \cos(\delta_{(S)}) \\ Y_P = -T_{(P)} \sin(\delta_{(P)}) - T_{(S)} \sin(\delta_{(S)}) \\ N_P = (T_{(P)} \cos(\delta_{(P)}) - T_{(S)} \sin(\delta_{(S)})) \cdot \frac{L_{(pr)}}{2} - Y_P \cdot x_P \end{cases} \quad (1-12)$$

其中，(P)与(S)分别表示左右导管桨， $L_{(pr)}$ 为两桨之间的距离， $\delta$ 为导管桨偏转角，T为产生的推力， $x_p$ 为桨在船体坐标系中的纵向坐标值。

通过上述数学模型对Ducted FPP型ASD拖轮进行停船参数的计算，利用了搭建在Visual Studio上的仿真测试平台，使用了四阶Runge-Kutta进行求解，分别对倒车停船和停车停船试验进行了计算和分析，所得预报结果与丹麦海事机构(DMI)试验数据吻合良好，从而验证了数学模型的可靠性。倒车停船与停车停船的计算结果与试验值对比如图所示：



(a) 倒车停船计算结果对比



(b) 停车停船计算结果对比

图 1-5 停船操纵预报与试验值比较<sup>[26]</sup>

Fig. 1-5 Comparison of predicted result and experimental data of stopping maneuver

孙洪波<sup>[27]</sup>提出了一种螺旋桨在逆转工况下的力与力矩的经验预报公式。采用了螺旋桨推力与转矩的四象限表达方式，用MATLAB编写了计算程序，对船舶

倒车停船以及倒航运动进行了数值仿真，结果与前人研究成果基本吻合。文中提出的螺旋桨横向力计算的方法精确性有待进一步验证，同时文章并没有考虑到舵的影响。

对于停船操纵的约束模型试验主要是在MMG，即分离模型的基础上，对螺旋桨产生的力与力矩进行经验性的预报，将得到的螺旋桨产生的力与力矩代入数学模型，从而计算得到船体受力，最终得到停船轨迹、时间等参数。

### 1.3 自航船舶操纵运动数值模拟研究进展

目前，国内外对船舶自航行操纵的 CFD 数值模拟研究发展较快，从工具的使用上，可以分为自主开发 CFD 模拟程序、使用商业软件进行计算和在开源平台上进行编译和计算。对自航行船舶的数值模拟，是对船体运动和周围复杂流场的同时求解，从而可以直接得到船舶的操纵性能，并且对于操纵过程中产生的现象进行流体力学理论层面的解释。数值模拟船舶操纵过程的优势非常明显，同时其求解非常耗时，对模型精度和计算机性能的要求比较高。

从自航船舶操纵运动数值模拟处理螺旋桨的转动方式来看，现有的研究内容可以分为两种：将螺旋桨简化为体积力模型的方法和直接构建螺旋桨几何模型进行数值计算的方法。而直接构建螺旋桨几何模型的网格处理方法又可以大致分为滑移网格和重叠网格，本文中采用的就是直接构建螺旋桨几何模型的重叠网格法。

#### 1.3.1 基于简化体积力方法的船舶操纵运动数值模拟研究

通过在动量方程中添加源项，来替代螺旋桨的不断旋转对其周围流场产生的影响，就是传统来说的体积力方法。由于采用体积力源项来代替旋转螺旋桨的操作比较简单，并且可以降低数值计算量，因此被广泛应用在船舶自航、操纵计算中螺旋桨问题的处理上。体积力模型计算网格中的船桨舵区域划分如图 1-6 所示。

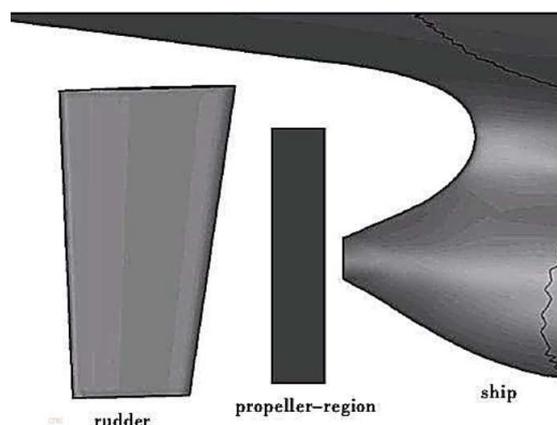


图1-6 基于体积力模型的船桨舵区域划分

Fig. 1-6 Region distribution of ship hull propeller and rudder through Actuator Disk method

使用体积力方法对带螺旋桨的模型进行数值可以较为精确的预报船体整体运动性能,但在螺旋桨附近流场的求解与真实情况存在一定的差异。使用体积力方法与真实螺旋桨模型进行数值模拟的桨周伴流分布情况对比<sup>[28]</sup>如图 1-7 所示。

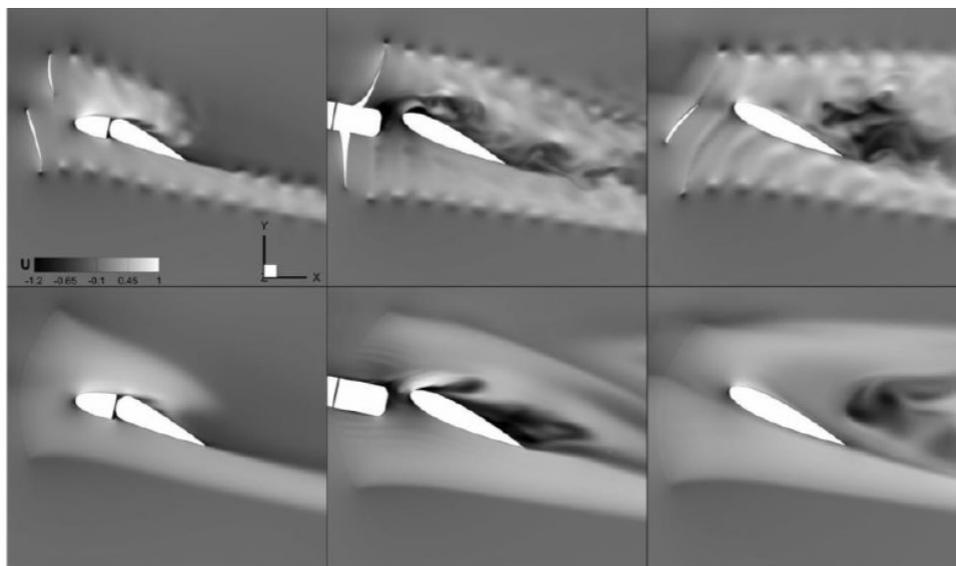


图1-7 体积力方法和真实螺旋桨模型周围伴流分布<sup>[28]</sup>

Fig. 1-7 Comparison of wave flow by body force and actual propeller

Simonsen 和 Stern<sup>[29]</sup>在处理船后螺旋桨的方式上采用了基于势流理论的体积力模型,通过迭代求解的方式对流场和螺旋桨体积力进行数值计算,对带附体的某型号油轮的操纵运动进行了数值模拟,之后通过压力与流场的展示分析了该游轮、桨、舵间的相互干扰。Stern 等<sup>[30]</sup>用轴对称控制体类比船舶尾部的螺旋桨转动和流场分布,在船舶的操纵性数值计算时采用了基于升力面模型的体积力方法,同时同样给出了细致的流场分析。同样的, Kawamura 等<sup>[31]</sup>使用类似的方式,在对船桨舵配合的船舶操纵过程数值模拟中采用了迭代的方法,得到了比较满意的结果。基于叶素动量理论,Phillips 等<sup>[32]</sup>把螺旋桨体积力模型同 RANS 方程进行了结合,对固定舵角的 KVLCC2 船桨模型进行了数值模拟,模拟结果与数学模型中的水动力系数符合较好。Phillips 等<sup>[33]</sup>采用等推力面模型、Hough 和 Ordway 三种螺旋桨体积力模型,对螺旋桨以及桨后舵进行了数值求解。文章指出,采用等推力面模型预报的桨后舵阻力精度较差,是因为忽略了桨的扭矩,这种模型不建议采用,而 Hough 和 Ordway 体积力模型计算结果与压力分布求解较为精确。但是后者一般适用于桨对舵的影响数值计算研究,而不能反过来探究舵对桨的影响,而前文提到的基于叶素动量理论的将体积力模型和 RANS 进行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配合下船舶自航与操纵的水动力性能研究。

还有很多学者使用体积力方法编写程序,开发了自己的船舶水动力学求解软件,或多既有 CFD 计算软件进行二次开发。Carrica 等<sup>[34]</sup>采用 Stern 等的体积力

模型, 在自主开发的水动力学数值计算软件 CFD Ship-Iowa V4 的基础上, 采用动态重叠网格技术处理大幅度运动的船体部件, 计算中采用了混合 k-Upsilon 和 k-Omega 模型的湍流模型, 采用 Level-set 方法对自由面进行捕捉, 模拟了不同航速下船舶的自由回转操纵 (35°舵角) 和 Z 形操纵 (20/20), 同时进行了波浪工况下的数值模拟, 文中数值预报结果的误差在 10% 以内, 作者指出, 由于简化模型忽略了真实螺旋桨转动时对船体产生的侧向力, 所以产生了一定的计算误差。Dubbioso 等<sup>[35]</sup>采用自主开发的 CFD 求解器, 对某双桨双舵船型的 Z 形操纵试验进行了数值模拟, 计算中的空间离散采用有限体积法, 通过数值求解非定常 RANS 方程进行整体流场的模拟, 计算中采用了 SA 模型表示的湍流模型和用体积力方法代替的螺旋桨模型, 数值模拟结果同试验值吻合良好, 但是第二超越角的预报结果偏大, 说明修正后的螺旋桨体积力模型还有需要改进的地方。Broglia 等<sup>[36]</sup>和 Dubbioso 等<sup>[37]</sup>采用上述改进后的螺旋桨体积力模型, 对单舵和双舵的某推进船舶回转试验进行数值模拟, 同样的, 舵和船体的运动采用动态重叠网格技术, 计算结果同试验误差在 10% 以内。Mofidi 等<sup>[38]</sup>将基于涡格法的升力面螺旋桨体积力求解模型同求解器 REX 相结合, 在每个时间步内都对周围流场数据与螺旋桨区域内数据进行信息的交互, 这样的方式可以考虑到船桨间的相互干扰和船尾伴流的变化, 文章应用该方法对 KCS 船模的 Z 形操纵进行了数值模拟, 预报结果与试验值吻合较好。Choi 等<sup>[39][40]</sup>将螺旋桨体积力模型应用到商业软件 FLUENT 中, 数值模拟了多种船型的带螺旋桨自航推进。

将螺旋桨进行简化的体积力方法不需要对高速转动的螺旋桨进行数值模拟, 因此不需要单独划分出螺旋桨网格, 可以显著的减少计算所需的网格量。同时由于不存在对时间步精度要求较高的高速运动模块, 整体网格计算的时间步长也可以适当放大, 能够缩短数值预报的时间。但是由于这种方法基于大量的假定, 在处理螺旋桨作用力时一般采用势流方法, 这样的方式无法顾及船尾伴流和螺旋桨之间的相互作用, 影响数值模拟结果的精确度。

在针对本文研究内容的数值方法选择问题上, 把螺旋桨简化处理为体积力模型无法顾及复杂的船桨舵流场相互作用, 不能准确预报出螺旋桨横向力的产生、浅水效应对船尾伴流、桨舵效率的影响等等, 所以本文采用的数值方法直接构建螺旋桨几何模型, 数值模拟真实转动的螺旋桨。

### 1.3.2 直接构建螺旋桨几何模型的船舶操纵运动数值模拟研究

上文所述简化的体积力方法无法顾及复杂流场中船桨舵的相互影响, 因此若想研究其中流场的细致作用机理, 同时提升数值模拟的精确度, 需要对螺旋桨直接构建几何模型进行数值模拟。直接构建螺旋桨几何模型进行数值模拟是将船体、螺旋桨和舵分别进行网格的划分, 再整体进行流场求解, 从而较为精准的预报船后复杂流场, 提升船体受力和运动的预报精度。目前, 构建螺旋桨几何模型进行求解的方法有滑移网格技术和重叠网格技术。

滑移网格 (Sliding Mesh) 技术被广泛应用于直接构建螺旋桨模型的运动求解中, 通常用于船舶自航的模拟。滑移网格技术的处理方法是在螺旋桨周围规定一个网格区域, 该区域一般为圆柱体, 其表面连接旋转的螺旋桨网格和螺旋桨外部的固定区域, 起到交换信息的作用, 通过圆柱体表面滑移边界进行螺旋桨网格和外部网格的流场信息传递。螺旋桨滑移网格技术中螺旋桨网格与船体固定网格的位置布置关系如图 1-8 所示。

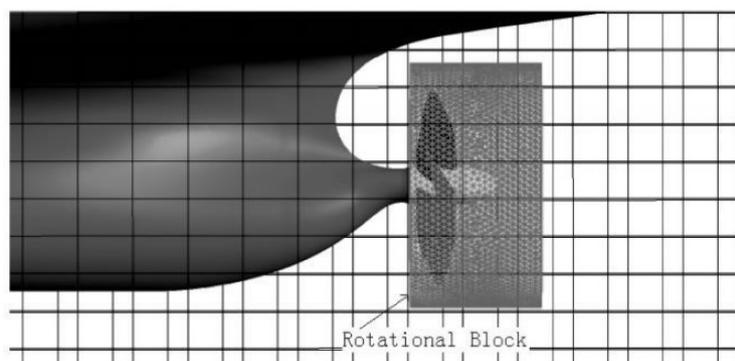


图1-8 螺旋桨滑移网格模型

Fig. 1-8 Sliding mesh interface of propeller

国外的学者使用滑移网格技术, 对船舶自航及操纵进行了很多数值模拟和机理研究。Bakker A<sup>[41]</sup>采用滑移网格技术, 对螺旋桨叶片后方产生的流动类型进行了分析。Moctar 等<sup>[42]</sup>采用滑移网格方法分别构建旋转螺旋桨和舵的计算网格, 直接数值模拟了某双桨双舵船模 Z 形操纵, 并将模拟结果与试验数值对比, 结果吻合良好。基于开源 CFD 平台 OpenFOAM, Badoe 等<sup>[43]</sup>使用滑移网格技术实现了桨的转动, 并对船桨舵配合下的船舶操纵运动进行了数值模拟研究。Queutey 等<sup>[44]</sup>采用自主开发的 CFD 求解器 ISIS-CFD, 将同位网格技术、有限体积法和滑移网格技术结合, 同时使用 VOF 法对自由面进行捕捉, 对 2010 年哥德堡船舶 CFD 研讨会上的 KCS 标准模型算例进行了数值模拟。Lübke<sup>[45]</sup>在商业流体力学计算软件 CFX 的基础上, 使用滑移网格技术对船体螺旋桨配合下的 KCS 自航推进算例进行数值模拟, 文章同时采用了自适应网格加密技术, 在保证精度的同时提升了计算效率。Seo 等<sup>[46]</sup>在通用商业流体力学计算软件 FLUENT 的基础上使用了滑移网格技术实现螺旋桨的转动, 同时采用了混合形式网格划分方法, 船首部和尾部以及螺旋桨周围采用非结构化的网格, 而计算网格的其它部分采用结构化网格, 提升计算效率的同时保证数值计算的精度, 对某船模自航推进进行了数值模拟, 预报的伴流分数同试验值吻合较好。Brewster<sup>[47]</sup>采用商业流体力学计算软件, 结合滑移网格技术, 对螺旋桨转动时对周围流场的扰动情况进行了分析研究。Kim 等<sup>[48]</sup>开发了三种适合大型集装箱船舶的扭曲舵, 并使用滑移网格处理旋转螺旋桨, 对这些扭曲舵的效果和流动机理进行了分析研究, 结果表明, 扭曲舵能够起到提升推进效率, 节约能源的效果。Dhinesh<sup>[49]</sup>等使用了自主开发的

RANSE 求解器，同时利用了滑移网格技术，对船舶自推进船体与螺旋桨的相互作用进行了研究。

我国在采用滑移网格方法进行船桨舵配合数值研究也有很多相关的工作。姚震球等<sup>[49]</sup>基于滑移网格技术，对带螺旋桨的艇体进行了数值模拟，并对其尾流场进行了详细分析。沈海龙等<sup>[51]</sup>基于分离涡模型，使用了滑移网格技术，对带桨的 KCS 船自航运动进行了数值模拟，对船体和螺旋桨之间的相互干扰进行了分析研究，结果表明，船桨之间的干扰对湍流边界层影响不大，但是会影响船体和桨叶片上的压力分布。杨春蕾等<sup>[52]</sup>采用了三种方式，对 KCS 船和 KVLCC2 船模进行了自航试验的参数预报，结果表明，三种方式均合理预报出船桨舵之间相互作用下船桨舵表面的压力分布和周围的流场分布情况，三种方式均可用于船体阻力、表面压力等、流动分布情况的计算分析。王骁等<sup>[53]</sup>采用滑移网格方法实现了双桨双舵船操纵运动模拟，并且对该船进行了回转操纵的计算，计算结果与试验数值吻合较好。张志荣<sup>[54]</sup>采用商业流体力学计算软件 FLUENT，对体积力模型和滑移网格法求解螺旋桨周围流场的结果进行了比对分析，验证了数值方法计算船舶操纵的可靠性。沈兴荣等<sup>[55]</sup>同样使用 FLUENT 进行了带螺旋桨带舵船舶的全粘性流场计算，其中应用到了软件中自带的滑移网格方法。使用 FLUENT，杜云龙等<sup>[56]</sup>数值模拟了不同型号带舵船模的自航行运动，研究了推进性能。王超等<sup>[57]</sup>运用滑移网格技术，对粘性流场中的桨舵相互干扰情况进行了研究，得到了随着进速系数变化，干扰性能的变化规律。黄鑫等<sup>[58]</sup>基于滑移网格技术，对某螺旋桨不同进速系数下的推力、转矩系数和敞水效率进行了计算，并与螺旋桨敞水试验结果对比。林育胜<sup>[59]</sup>将动网格技术与滑移网格技术结合，对带桨的水下潜器进行了阻力预报和流动特性分析。许璐荣等<sup>[60]</sup>使用了 naoe-FOAM-SJTU 水动力学求解器，运用滑移网格技术，对螺旋桨上毂帽鳍的节能机理进行了探究。

滑移网格被广泛应用于较为简单、固定航行路线的船舶自航运动数值模拟研究中，具有相对较高的预报精准性，并且可以较为精确的捕捉船、桨、舵之间流动的相互干扰，以便研究者对细致流场信息进行分析。然而现有基于滑移网格的研究大部分是通过使用商业软件进行计算，且可以模拟的船舶运动形式较为单一。滑移网格技术，并不能用于处理更大幅度的桨、舵运动，例如波浪中的船舶操纵问题等，对船舶操纵性的数值模拟依然具有一定的限制。

为了处理滑移网格技术所无法应对的物体间大幅度运动问题，突破传统动网格与滑移网格技术的瓶颈，给予船桨舵运动更大的自由度，从而实现对船舶操纵过程中的大幅度运动进行直接的数值模拟，重叠网格技术应运而生。重叠网格技术是在划分网格的时候将物体的每个部件独立建立一套网格，然后再通过某种插值方式，将小网格嵌入另一套大网格中，在经过挖洞处理后，将非计算域的网格排除在计算之外，通过建立插值关系来传递流场信息，这样的处理方式并不会增加网格数目，但是赋予了物体部件独立运动的能力。重叠网格技术允许多个相互独立的网格之间产生无拘束的相对运动，因此它可以很好地处理各组件间大尺度六自由度的相对运动问题。

重叠网格可以很好的处理船舶操纵模拟中桨、舵的大自由度运动问题,将船、桨、舵各自单独划分一套网格,再通过插值程序进行网格间的信息交换,从而达到求解整体流场的目的。船桨舵重叠网格分布如图 1-9 所示。

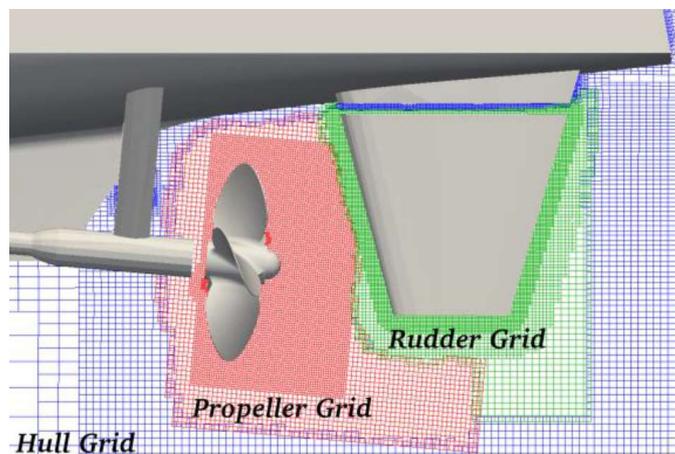


图1-9 船桨舵重叠网格分布

Fig. 1-9 Overset grid distribution of ship hull propeller and rudder

Carrica 和 Stern<sup>[61]</sup>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。Sakamoto 等<sup>[62]</sup>采用船舶水动力学软件 CFDSHIP-IWOA Ver. 4 对标准船模 DTMB5512 裸船体进行了 PMM 静态和动态试验的数值模拟,同时给出了相应的验证工作。Mofidi 等<sup>[63]</sup>采用对船桨舵全耦合条件下的船体 Z 型操纵试验进行了数值求解,其中关于船桨舵的耦合采用一套多级物体运动求解模块进行计算。Yoshimura 等<sup>[64]</sup>对浅水中的船舶操纵进行了数值建模和计算,结果与试验结果吻合较好。Broglia 等<sup>[65]</sup>和 Dubbioso 等<sup>[66]</sup>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,同时对比了单舵和双舵情况下的自由回转运动轨迹以及回转降速、漂角和横摇等历时曲线,分析了整个回转运动过程中的舵力和船体、附体侧向力变化,作者指出在双桨情况下,舵的存在会强烈干扰螺旋桨所受到的载荷。Muscarì 等<sup>[67]</sup>采用同样的处理方式,基于自主开发的 CFD 求解器,使用重叠网格方法处理船体和舵的运动,数值模拟了双桨双舵船舶的纯摇首运动和自由回转操纵运动。赵发明<sup>[68]</sup>等采用 RANS 方法,结合重叠网格技术,对带有自由液面的船舶扰流问题进行了数值模拟,计算中使用 Level Set 模拟自由液面,计算结果与试验结果较为吻合,表明重叠网格可以较好的模拟船舶在不同工况环境下的快速性、耐波性和操纵性。余泽爽<sup>[69]</sup>等使用重叠网格技术实现了对 M 型船在不同航行阶段中复杂的动态捕捉和对阻力的精确预报,并通过对流场的分析讨论了 M 型船的减阻原理。

上海交通大学万德成教授课题组的沈志荣等<sup>[70-74]</sup>在开源流体力学计算软件 OpenFOAM 中开发了 naoe-FOAM-SJTU 求解器，用于海洋工程水动力学问题的求解，并在此基础上引入了重叠网格模块，以处理复杂的船桨舵独立大自由度运动模拟问题。在求解过程中，流场求解进程和重叠网格插值信息进程并行，大大提升了计算效率。作者使用该求解器对 KCS 带桨自航和 Z 形操纵进行了数值模拟，模拟结果与实验值吻合较好，说明了该求解器的实用性，验证了该计算方法的准确性。王建华等<sup>[75]</sup>在此基础上，数值模拟了全附体双桨双舵 ONRT 船模的自航运动，并规定  $35^\circ$  舵角进行了回转试验的数值模拟，预报的自航点和计算得到的回转操纵性特征参数同试验结果吻合良好，进一步对 naoe-FOAM-SJTU 求解器对全附体船操纵问题的适用性进行了验证，操纵过程中的螺旋桨与舵附近涡结构如图 1-10 所示。王建华和万德成<sup>[76]</sup>采用 naoe-FOAM-SJTU 求解器，数值模拟了全附体 ONRT 船模在波浪中的 Z 形操纵，并将计算结果与静水中的自航船舶 Z 形操纵数值预报结果进行了对比。同样使用该求解器，吴建威等<sup>[77]</sup>成功预报了螺旋桨敞水性能，预报结果与螺旋桨敞水试验结果吻合较好。使用基于重叠网格的该求解器，尹崇宏等<sup>[78]</sup>数值模拟了 VLCC 船模的自航运动，航行阻力与实验结果吻合良好。罗天等<sup>[79]</sup>对 KCS 船型的横摇运动进行了数值计算求解，并对粘性效应进行了分析。孙晨光等<sup>[80]</sup>对大型船舶倒车停船操纵进行了数值模拟，将计算结果与实验值对比，并结合压力与流场分布分析了倒车效应产生的原因，进一步证明了 naoe-FOAM-SJTU 可以用于模拟各种船舶操纵方式。

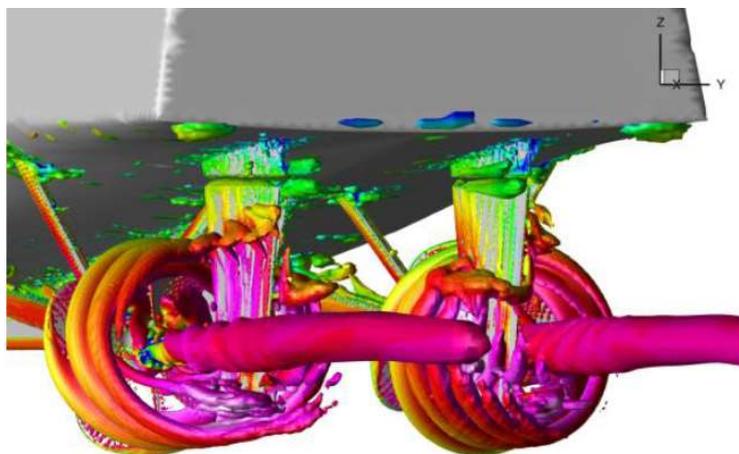


图1-10 重叠网格方法构建螺旋桨和舵模型的船舶操纵流场结果<sup>[75]</sup>

Fig. 1-10 Simulation results for ship maneuvering using discretized propeller and rudder model

上述基于重叠网格技术进行的船、桨、舵配合下的自航船模操纵数值模拟的研究成果，证明了重叠网格技术是数值模拟船舶操纵过程中适用广泛、准确性好、效率高的研究手段。能够为海洋工程水动力学科研工作提供有效的手段，在工程应用层面具有非常广阔的发展前景。

## 1.4 本文主要工作

本文使用了课题组基于开源计算流体力学软件 OpenFOAM 开发并结合了重叠网格技术的船舶与海洋工程水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU，对 KVLCC2 船模的数种停船操纵方式进行了数值模拟。给出了各停船方式的纵距、横距、时间等参数，并分析了停船过程中船体压力分布和船周流场信息，为船舶遭遇紧急状况时停船操纵方式的选择提供参考。

标准船模试验中停船性能的评价主要针对倒车停船操纵，为了为船舶的安全操纵提供参考，本文对于实际工程应用中的多种操船方式进行研究。文中研究的停船方式有如下几种：紧急倒车、停车转舵和回转规避，其中紧急倒车操纵又具体分为操舵与不操舵两种形式。

本文首先对不操舵紧急倒车操纵进行了研究。对不带舵的 KVLCC2 模型进行了倒车停船完整过程的数值模拟，得到了冲程、横距等停船参数，并与 NMRI 水池的数据进行对比，验证了本文采取的数值方法的可靠性。之后对倒车停船过程中流场压力与速度的分布进行了细致分析，解释了倒车效应产生的原因。另外本文还考虑了浅水效应对倒车停船操纵产生的影响，对停船参数和流场情况进行了对比分析。

接着，本文对满舵紧急倒车操纵进行了研究。即在不操舵紧急倒车停船算例的基础上，添加舵模型，在倒车停船操纵开始后，进行左满舵或右满舵（ $\pm 35^\circ$ ）的操作，对整个操作过程进行 CFD 数值求解。将得到的纵距、横距、速度变化等停船参数与不操舵的情况进行比对分析，并对不同工况下的压力分布、流动情况进行探究，找寻这些停船参数发生改变的原因。

然后，本文对停车转舵操纵进行了研究。在对比了带桨与不带桨 KVLCC2 船模进行停车转舵时的船尾压力分布与流场情况后，发现静止的桨基本可以忽略不计，故本文对仅带有舵的 KVLCC2 船模进行了 3 个水深工况下的停车转舵操纵数值模拟。给出了停船参数，通过对压力与流场的分析，解释了转舵过程中船向反方向运动的原因，并分析了水深对舵效的影响。

本文最后对回转规避进行了研究，采用带桨带舵的 KVLCC2 模型进行停船过程的数值模拟，主要研究了停船的轨迹、时间等参数，并将计算得到的相关参数与前文计算所得进行综合对比，分析并总结了各种停船方式的停船效果，可行性限制等。

相比传统的数学模型试验，本文采用 CFD 进行停船过程的数值模拟，在得到可靠停船参数结果的同时，更加直观的展示出停船的完整过程，并对操纵过程中的船、舵表面压力分布和船尾附近流场情况进行分析，使得出的结论更加丰满。

## 第二章 数值方法

### 2.1 求解器框架

本文采用课题组基于开源计算流体力学软件 OpenFOAM 自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器进行数值求解。该求解器以 OpenFOAM 软件中的两相流求解器 interFoam 为基础，在课题组的不断探索和研究下加入了动网格六自由度求解模块<sup>[81]</sup>、造波与消波模块、分离涡（DES）计算模块<sup>[82][83]</sup>、锚链模块<sup>[84][85]</sup>和重叠网格与多级物体运动模块等功能与技术，可以对船舶与海洋工程复杂水动力学问题进行数值模拟工作<sup>[86-93]</sup>，且取得了一定的成果。求解器的基本框架如图 2-1 所示。

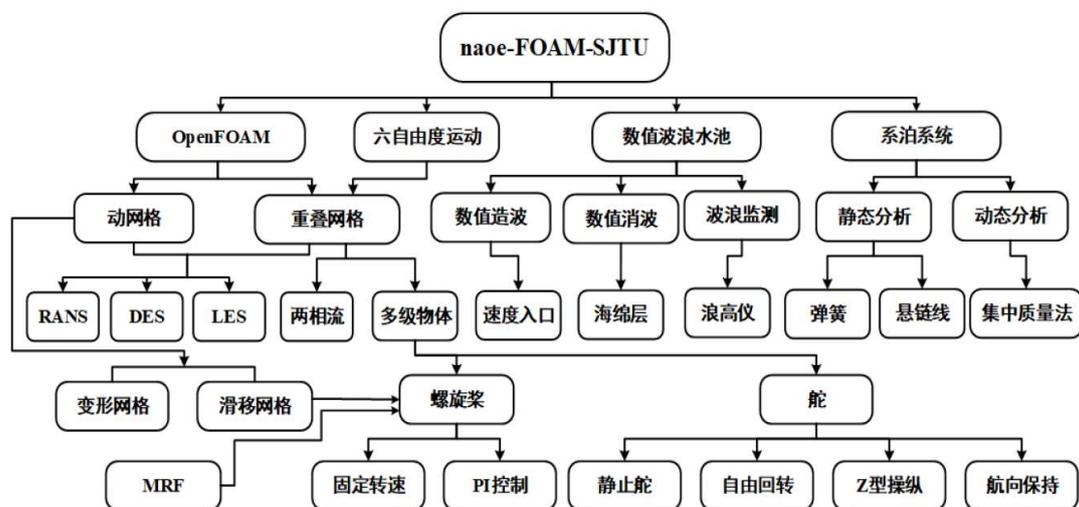


图2-1 naoe-FOAM-SJTU求解器基本框架

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

本文主要研究了静水中船舶停船操纵的问题，在图 2-1 框架中使用到的技术有：重叠网格多级物体运动模块、两相流技术、螺旋桨 PI 控制技术、静止舵、自由回转舵等。在求解船舶与海洋工程问题时，求解器一般采用 RANS 方程，使用有限体积法进行空间离散，采用非结构化的网格，同时使用 VOF 方法捕捉自由面，下面对这些基本的数值方法进行简单介绍。

## 2.2 基本数值方法

### 2.2.1 流体控制方程

本文中假定流体为不可压粘性流体,采用不可压雷诺平均 N-S 方程(RANS)进行求解,方程如下:

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

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

其中,  $\mathbf{U}$ 为速度场;  $\mathbf{U}_g$ 为网格的移动速度;  $p_d$ 为动压力,即总压力与静水压力值差;  $\rho$ 为流体密度;  $\mathbf{g}$ 为重力加速度向量;  $\mu_{eff}$ 为有效动力粘性系数;  $f_\sigma$ 为表面张力项;  $f_s$ 为消波源项。

### 2.2.2 湍流模型

目前计算流体力学中常用的湍流模型有三种:直接数值模拟 DNS(Direct Numerical Simulation)、大涡模拟 LES (Large Eddy Simulation) 和雷诺时均数值模拟 RANS (Reynold-Averaged Navier-Stokes)。三种湍流模型在求解涡的尺度上有所区别,如图 2-2 所示。

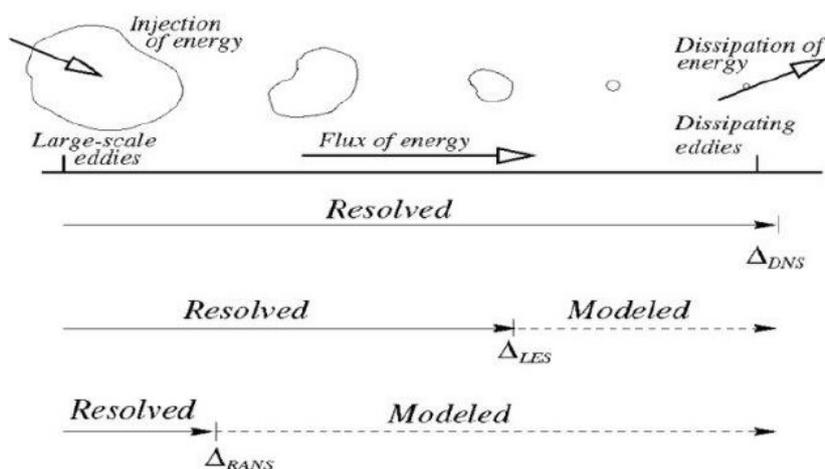


图2-2 不同湍流模型应对的涡尺度<sup>[81]</sup>

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

直接数值模拟 (DNS) 是通过直接求解流动控制方程进行模拟,不需要建立其他湍流模型,对尺度很小的涡也一并进行解析。DNS 方法可以得到比较准确

的结果，然而由于湍流信息量巨大，对空间和时间精度的要求非常高，所以计算成本很高，不能满足求解复杂湍流流动的需要，不适用于船舶操纵数值模拟。

大涡模拟（LES）根据涡的空间尺度进行过滤，对大尺度的涡进行直接流场计算解析，而对小尺度的涡采用适当的封闭模型。其精度要高于 RANS 方法，但是当雷诺数较大时，计算时间会成倍增加，同样不适用于船舶操纵的工程应用。

目前，对船舶与海洋结构物的工程问题仍以雷诺平均方法（RANS）为主，本文同样采用 RANS 方程进行数值计算。湍流模型方面使用 SST  $k - \omega$  湍流模型<sup>[94]</sup>，其中  $k$  为流体质点的湍动能， $\omega$  为特征耗散率。该模型综合了  $k - \omega$  湍流模型<sup>[95]</sup> 和  $k - \epsilon$  模型<sup>[96]</sup> 的优点，即具备优秀的边界层处理能力的同时具有良好的远场处理能力。OpenFOAM 中 SST  $k - \omega$  模型的表达式如下：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla(\mathbf{U}k) = \tilde{G} - \beta^*kw + \nabla \cdot [(v + \alpha_k v_t)\nabla k] \quad (2-3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla(\mathbf{U}w) = \gamma S^2 - \beta w^2 + \nabla \cdot [(v + \alpha_w v_t)\nabla w] + (1 - F_1)CD_{kw} \quad (2-4)$$

其中， $k$  为湍动能， $w$  为特定湍流耗散率。 $F_1$  为混合函数，其定义如下：

$$F_1 = \tanh\left\{ \min\left[ \max\left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^*ky}, \frac{500v}{y^2w} \right), \frac{4\alpha_w^2k}{CD_{kw}^*} \right] \right\} \quad (2-5)$$

其中， $CD_{kw}^*$  的定义为：

$$CD_{kw}^* = \max(CD_{kw}, 10^{-10}) \quad (2-6)$$

其中， $CD_{kw}$  的定义为：

$$CD_{kw} = 2\sigma_{w^2}\nabla k \frac{\nabla w}{w} \quad (2-7)$$

式(2-3)中  $\tilde{G}$  的定义如下：

$$\tilde{G} = \min\{G, c_1\beta^*kw\} \quad (2-8)$$

其中， $c_1 = 10$ ， $G$  为产生项，其定义为：

$$G = v_t S^2 \quad (2-9)$$

其中， $S$  为平均张力应变率系数，可表示为：

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ji}} \quad (2-10)$$

其中， $S_{ij}$  为应变张量率，其定义为：

$$S_{ij} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T) \quad (2-11)$$

在计算流体力学数值模拟过程中，需要有效的处理物体壁面附近的流动，这样才能得到较为精确的结果。边界层的流动可大致分为三层：粘性底层过渡层和对数率层<sup>[97]</sup>。假设壁湍流中壁面的切应力和壁面摩擦速度 $u_t$ 存在如下关系：

$$u_t = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (2-12)$$

其中， $\tau_0$ 为物面上的剪应力。

因为粘性底层与壁面非常靠近，所以速度也接近与壁面表面流体速度相同，物面雷诺应力也为零。所以在此区域内，分子的粘性应力控制流动，由平均运动方程可以推得：

$$\mu \frac{\partial U}{\partial y} = \tau_0 \quad (2-13)$$

将上式结合根据式(2-12)得到的 $\tau_0 = \rho u_t^2$ ，得到：

$$\frac{U}{u_t} = \frac{y u_t}{\nu} \quad (2-14)$$

将速度和液体到物面的距离无因次化，记 $u^+ = \frac{U}{u_t}$ ， $y^+ = \frac{y u_t}{\nu}$ ，则上式变为：

$$u^+ = y^+ \quad (2-15)$$

在对数率层中，有：

$$u^+ = \frac{\ln(E y^+)}{\kappa} \quad (2-16)$$

其中， $\kappa$ 为冯卡门常数。

若要对边界层内的流动进行求解，距离物面最近的第一层网格高度需要在粘性底层以内，这就要求无因次化的第一层网格到物面的距离 $y^+$ 小于等于1，因此计算网格的数量会增加，在实际计算求解中增加计算成本。所以一般会采用壁面函数进行处理，将物面的第一层网格放置于对数率层，从而达到降低网格数量，提升计算速度的目的。OpenFOAM 中提供了与此方法对应的湍粘度修正，因此根据式(2-15)与式(2-16)，在临界点上有：

$$y^+ = \frac{\ln(E y^+)}{\kappa} \quad (2-17)$$

其中， $E = 9.81$ ， $\kappa = 0.41$ 。计算可得临界值 $y^+ = 11.53$ ，然后就能求得物体表面处每个网格的临界值。

### 2.2.3 VOF 自由面捕捉法

本文中的船舶运动数值计算是船舶与海洋工程领域中典型的非定常两相流问题，求解器采用改进的带有人工压缩技术的流体体积法 (VOF) [98] 对自由面进行捕捉。VOF 法使用体积分数来表示单个网格内流体所占比重，拥有较高的计算精度，同时对于波浪等耗散问题具有很好的处理效果。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g)\alpha] + \nabla \cdot [\mathbf{U}_r(1 - \alpha)\alpha] = 0 \quad (2-18)$$

其中， $\mathbf{U}_r$  为用于压缩界面的速度场； $\alpha$  为两相流体积分数，其定义为：

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{空气} \\ \alpha = 1 & \text{水} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{自由面} \end{cases} \quad (2-19)$$

求解过程中，采用预估修正的半隐式方法。先将 VOF 方程进行离散，对离散好的方程进行预估求解，之后进行显式修正。这样处理可以使计算过程在较大 Courant 数的情况下，依旧保持稳定，在时间步长较大的时候依然能够计算收敛，从而提升计算效率，缩短数值模拟工作的时间。

### 2.3 重叠网格技术

重叠网格方法是将每个物体周围的区域单独划分网格，这样各网格间就存在重叠的部分。对于一套大的网格，在经过重叠区域的挖洞处理后，将挖去的非计算域的网格被排除在计算之外，两套网格之间通过建立插值关系来传递流场信息。重叠网格的布置示意如图 2-3 所示。

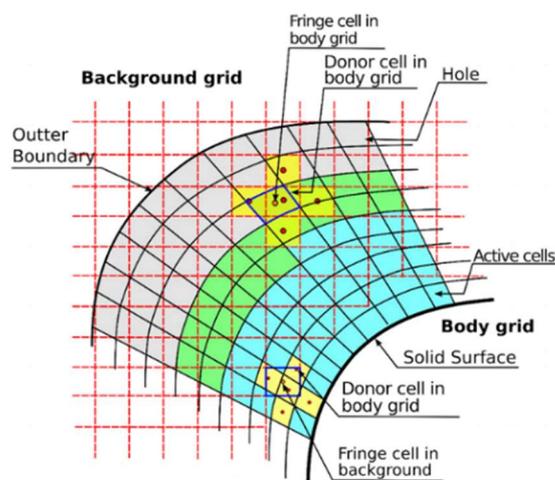


图2-3 重叠网格示意图

Fig. 2-3 Diagram of overset grids

计算过程中重叠网格间的联系信息 (Domain Connectivity Information, DCI) 中含有不同区域网格单元的类型信息、权重信息等。如图中所示, 各套网格中的活动单元 (Active cell) 参与独自的流场求解结算, 接近边界处的活动单元作为贡献单元 (Donor cell) 提供差值信息, 而交界处为边界单元 (Fringe cell), 负责进行不同网格之间流场信息的交换工作。一套大网格中被挖洞处理除去的网格, 叫做洞单元 (Hole cell), 它不参与数值模拟计算, 而当边界单元没有找到周围的贡献单元进行信息传递时, 其就成为孤点单元 (Orphan)。

本文中采用的 naoe-FOAM-SJTU 求解器使用 SUGGAR++ 程序<sup>[99]</sup>来进行 DCI 数据的计算, 从而进行网格间的信息传递。使用 SUGGAR++ 对 DCI 进行求解的过程分为四步。

第一步是进行挖洞处理。根据物体、网格间的位置关系, 进行重叠区域的识别, 找到洞单元, 并标记其周围的网格为边界单元。

第二步是找寻贡献单元, 从上一步标记好的边界单元周围, 从另一套网格中找到最佳位置能够传递信息的网格, 作为贡献单元。

第三步是对权重系数进行求解, 根据找寻到的边界单元和贡献单元的位置关系, 同时考虑到边界单元和贡献单元之间的距离远近和方向关系, 进行权重系数求解, 所有的权重系数满足:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (2-20)$$

第四步, 即最后一步是对重叠区域进行优化, 找寻最优的贡献单元和边界单元的组合, 去除多余的边界单元, 从而提高精度, 减少计算量。之后采用计算得到的差值系数, 对这些单元的物理值进行加权求和, 完成差值工作。

$$\phi_I = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \phi_i \quad (2-21)$$

其中,  $\phi$  是流场信息, 如压力、速度等;  $\omega_i$  是第  $i$  个贡献单元的插值系数;  $\phi_i$  是第  $i$  个贡献单元的流场信息物理值;  $\phi_I$  是最终得到的插值边界单元物理值。

本文中使用的 naoe-FOAM-SJTU, 把 DCI 计算和 CFD 流场计算结合, 从而实现重叠网格流场的计算, 计算的并行模式流程如图 2-4 所示。在计算过程中, 首先对 DCI 进行计算, 之后进行整体流场求解, 得到速度、压力等物理值, 从而预报物体的运动情况, 之后将运动值传递到 SUGGAR++ 进程中进行下一个时间步的 DCI 计算, 再重复上述步骤, 实现高效的并行求解。

求解器在并行化过程中, 重新分块和编号差值信息, 利用 MPI 将每块的插值信息传递给对应的进程。在对 DCI 进行分块的过程中, 根据网格区域分块的情况进行数据的分类和处理, 只将特定需求的信息传递给每个进程, 避免了多余信息的传递, 大大提升并行效率。将 OpenFOAM 与 SUGGAR++ 的运行分配到不同的进程中, 可以同时两者进行计算工作, 解决了动态重叠网格在计算过程中计算进程闲置, 计算资源浪费的问题, 提升了计算效率, 节约了计算时间。

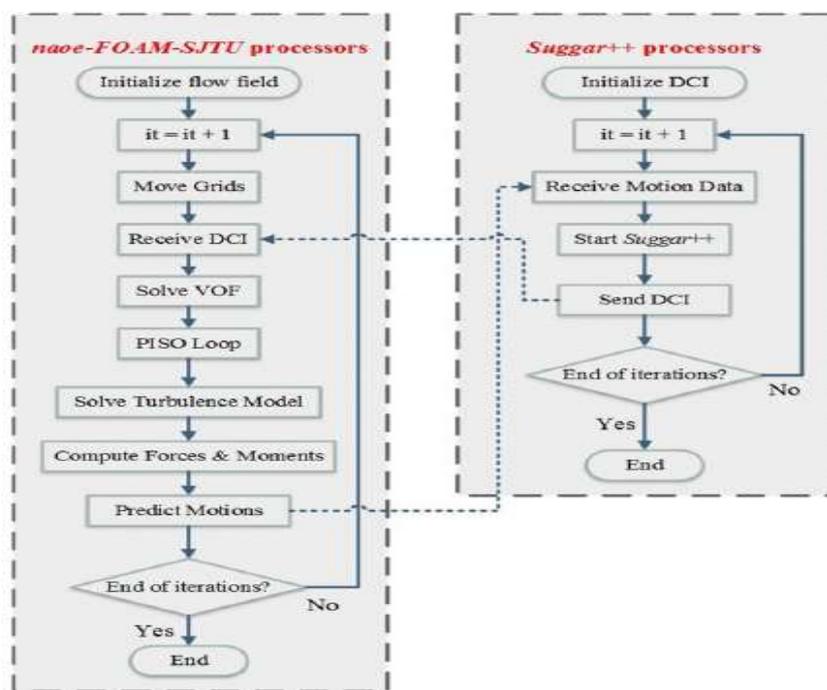


图2-4 naoe-FOAM-SJTU采用的并行模式

Fig. 2-4 Parallel mode adapted in naoe-FOAM-SJTU

## 2.4 多级物体运动模块

多级物体运动模块是实现本文中船、桨、舵独立运动，从而对停船操纵进行直接数值模拟的基础。在此模块中，会对重叠网格中的各套网格进行分级。最高级为背景网格，背景网格负责连接船体网格和远场，是整套计算网格的最外层；第二级网格是船体网格，相对于背景网格，可以进行独立的运动，即对应船舶的六自由度运动；第三级网格为桨、舵网格，可以相对船体网格进行独立运动，实现移动、旋转等操作。多级物体的运动示意如图 2-5 所示。

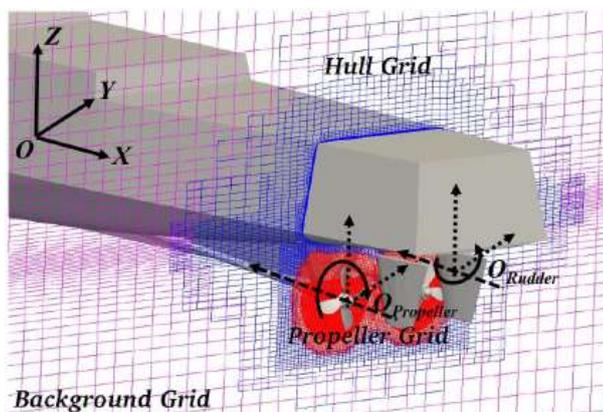


图2-5 多级物体运动示意图

Fig. 2-5 Diagram of motion between ship-propeller-rudder system

在计算过程中, 采用了两个坐标系, 即大地坐标系和船体坐标系。计算是从低级网格逐渐向高级网格进行递进计算。首先对于设定的桨、舵工况, 在船体坐标系下进行螺旋桨和舵的运动操控, 即第三级网格的移动。这一级网格的移动在某些自由度上是受到限制的, 例如螺旋桨只能在船体坐标系下绕船长方向的轴进行旋转, 舵只能围绕垂直水平面的轴进行旋转等, 这样可以使螺旋桨和舵的网格相对船体网格进行某种程度上的固定, 从而模拟真实情况。

然后是对船体网格进行移动, 将计算得到的大地坐标系下的船体上的力与力矩转换到船体坐标系下, 然后求解船舶六自由度运动方程, 得到船体的加速度情况, 六自由度加速度情况求解公式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{u} = \frac{X_s}{m} + vr - wq + x_g(q^2 + r^2) - y_g(pq - \dot{r}) - z_g(pr + \dot{q}) \\ \dot{v} = \frac{Y_s}{m} + wp - ur + y_g(r^2 + p^2) - z_g(qr - \dot{p}) - x_g(qp + \dot{r}) \\ \dot{w} = \frac{Z_s}{m} + uq - vp + z_g(p^2 + q^2) - x_g(rp - \dot{q}) - y_g(rp + \dot{p}) \\ \dot{p} = \frac{1}{I_x} \{K_S - (I_z - I_y)qr - m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)]\} \\ \dot{q} = \frac{1}{I_y} \{M_S - (I_x - I_z)rp - m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)]\} \\ \dot{r} = \frac{1}{I_z} \{N_S - (I_y - I_x)pq - m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{v} - vr + wq)]\} \end{array} \right. \quad (2-22)$$

在计算得到船体坐标系下的船体加速度情况后, 将加速度转换到大地坐标系下, 对时间进行积分得到船体位移、旋转角度等运动情况。之后将船体坐标系下的螺旋桨和舵按照该运动一并进行统一的平移和旋转。

最后是对背景网格进行移动。如果进行的船舶操纵模拟, 船体拥有较大的水平面上的位移, 则背景网格需要跟随船体一同运动, 以达到减小计算量的目的。背景网格只在水平面上具有 3 个自由度的运动, 这样保持背景网格处于水平, 有利于自由面求解的精度和效率。

在多级物体运动模块的支持下, 螺旋桨和舵可以实现各类操纵控制, 可操纵的类型如图 2-6 所示。

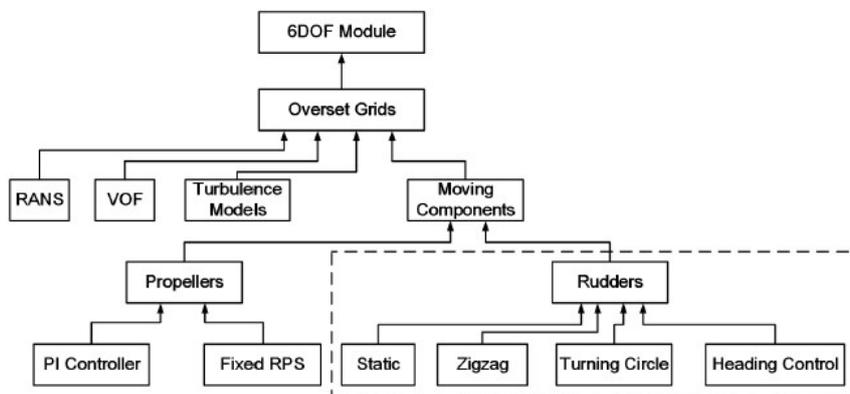


图2-6 多级物体运动模块功能

Fig. 2-6 Functions of ship-propeller-rudder system

本文中使用到的操纵功能为螺旋桨 PI 控制器、螺旋桨固定转速运动模式，静止舵、回转舵和 Z 型操纵舵。

## 2.5 本章小结

本章介绍了本文数值模拟工作所采用的 naoe-FOAM-SJTU 求解器，包括求解器的框架、基本数值方法、重叠网格技术和多级物体运动模块。

求解器框架部分主要介绍了求解器的基本结构，包含的模块和能够实现的功能等；基本数值方法部分主要介绍了计算中使用的流体控制方程、SST  $k - \omega$  湍流模型和 VOF 自由面捕捉法；重叠网格技术方面介绍了重叠网格的原理、计算过程和求解器中实现的方法；多级物体运动模块方面介绍了求解流程、船体运动计算方法等。

本章是对求解器中使用到的数值方法，以及其实现过程的简单介绍，为后文对于停船操纵的数值模拟工作奠定基础。

### 第三章 不操舵紧急倒车数值模拟分析

就一般大型船舶在通常情况下的紧急停船操纵动作而言,以倒车制动最为普遍。倒车制动通过使螺旋桨倒转,提供阻碍船舶向前的力,从而达到快速停船的操纵目的。同时,由于倒转螺旋桨存在“倒车效应”,在船尾产生横向力,导致船首向左或向右偏转,使船舶产生一定的横向偏移。

本章使用基于重叠网格技术的 naoe-FOAM-SJTU 求解器,针对 KVLCC2 船模在深水与浅水中,船桨配合下的不操舵紧急倒车操纵进行 CFD 数值模拟。预报停船过程中的纵距、横距等参数,与试验值进行对比,并对停船过程中的船体表面压力、流场分布情况进行展示和分析,探究倒车效应产生的原因,并研究浅水对倒车停船操纵的影响。

#### 3.1 计算工况与网格

为了方便计算和对各种停船方式参数进行对比,本文计算都采用缩尺比为 110 的 KVLCC2 船模,船模长度为 2.909 米。船体表面模型如图 3-1 所示。



图3-1 KVLCC2船体模型

Fig. 3-1 The KVLCC2 ship model

实船与模型的相关参数如表 3-1 所示。

表 3-1 KVLCC2 模型参数

Table 3-1 Parameters of KVLCC2 ship model

	实船	模型
缩尺比	1	1/110.0
船长 L (m)	320.00	2.909
船宽 B (m)	58.00	0.527
吃水 d (m)	20.80	0.189
螺旋桨直径 $D_p$ (m)	9.86	0.090
螺旋桨螺距比 P/D	0.721	0.721

由于在不操舵进行倒车停船的过程中，舵的存与否对于计算的结果影响几乎可以忽略不计<sup>[100]</sup>，故本章采用仅带有桨的 KVLCC2 模型进行倒车停船数值模拟。深水算例的计算工况取自日本 NMRI 水池的试验工况<sup>[101]</sup>：船模以 0.4905m/s 的速度（对应实船 10kn）向前航行，在达到稳定的自航状态之后，控制螺旋桨进行倒转，倒转速度为 10.36r/s，当船模的纵向速度降低为 0 时，停船操纵完成。本章的深水与浅水情况均采用此试验工况进行数值模拟。本文中实现船模初速度 0.4905m/s 的方法是采用 PI 控制器，控制螺旋桨转速以使船模达到预定航速。预报的该速度下的自航点为 10.52r/s，与 NMRI 试验池设定的倒转螺旋桨转速相近。

### 3.1.1 深水工况网格

在深水工况中，使用重叠网格方法构建船桨耦合计算模型，以船体纵剖面、水线面和船舳剖面的交点为原点划分计算域，其大小为  $-1.5L \leq x \leq 3L$ ， $-1.5L \leq y \leq 1.5L$  和  $-L \leq z \leq 0.5L$ ，其中  $L$  为船长，船首朝  $-x$  方向。将计算域划分为 3 个部分，分别为背景网格，船体网格和螺旋桨网格，所有的网格均由 OpenFOAM 自带的网格划分工具 snappyHexMesh 生成，由于停船操纵时间跨度较长，需要大量的计算资源，故网格数不宜过多，计算采用的背景网格数为 70 万，船体网格数为 293 万，螺旋桨网格数为 62 万，经过 Suggar++ 程序对几套网格进行插值得到的最终全流场计算网格总数为 425 万，计算域布置如图 3-2 所示，船体周围网格分布如图 3-3 所示：

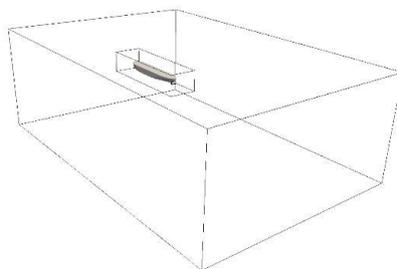


图3-2 深水工况计算域布置

Fig. 3-2 Arrangement of computational domain in deep water

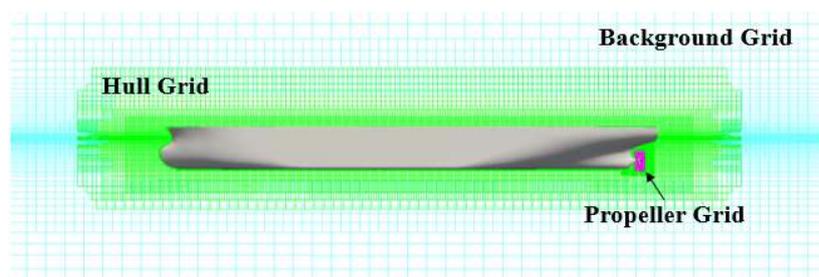


图3-3 深水工况船体周围网格分布

Fig. 3-3 Grid distribution around ship in deep water

为了验证本文中使用的数值方法的可靠性和所采用网格数目的合理性,需要对船模的自航问题进行数值模拟,并与试验数据进行对比。本文采用的naoe-FOAM-SJTU求解器,在计算过程中采用PI控制器来调整螺旋桨转速,从而使船模达到设定航速,得到其自航点。

根据NMRI试验水池的试验工况,选取船模的设计航速 $0.76\text{m/s}$ (对应实船 $15.5\text{kn}$ )进行数值模拟。模型在该工况下螺旋桨转速与船模航速的时历曲线如图3-4所示,其中点表示试验值,实线表示数值计算的结果。

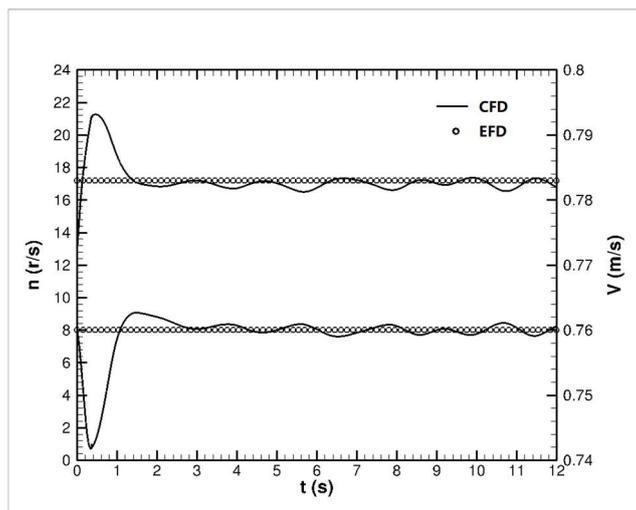


图3-4 船模航速与螺旋桨转速时历曲线

Fig. 3-4 Velocity and propeller rate of the ship model

从图3-4中可以看出,达到预定航速时,预报的螺旋桨转速为 $17.02\text{ r/s}$ ,与NMRI水池的试验值<sup>[102]</sup> $17.2\text{ r/s}$ 相比仅小了 $1.05\%$ 。采用本文中使用的数值计算方法对船模自航进行数值模拟,可以较为精确的预报出船模的自航点,所以考虑到算例计算的耗时,使用该套网格进行停船操纵的数值模拟是较为合适的。

### 3.1.2 浅水工况网格

在浅水工况中,以船体纵剖面、水线面和船舳剖面的交点为原点划分计算域,计算域的改动为 $Z$ 方向的尺度,本章中的浅水工况设置水深等于 $1.5$ 倍船体吃水。另外,计算域底面设置为壁面(wall),其表面流体速度为 $0$ 。在船底区域,为了增加算例的稳定性,同时精确计算流场的情况,对该区域进行进一步的加密,保证计算所需的网格层数。采用的计算域大小为 $-1.5L \leq x \leq 3L$ ,  $-1.5L \leq y \leq 1.5L$ 和 $1.5D \leq z \leq 0.5L$ ,其中 $D$ 为吃水。计算采用的背景网格数为 $68$ 万,船体网格数为 $285$ 万,螺旋桨网格数为 $62$ 万,最终全流场计算网格总数为 $415$ 万,计算网格如图3-5所示,船体周围网格分布如图3-6所示:

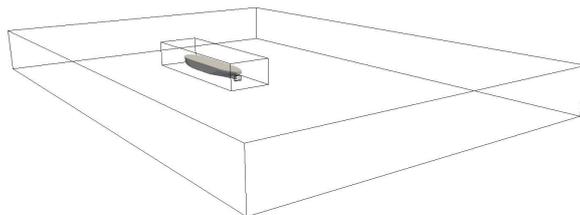


图3-5 浅水工况计算域布置

Fig. 3-5 Arrangement of computational domain in shallow water

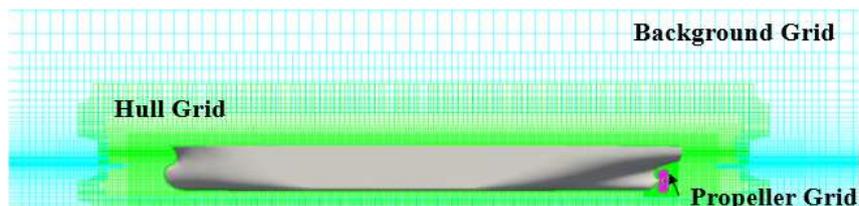


图3-6 浅水工况船体周围网格分布

Fig. 3-6 Grid distribution around ship in shallow water

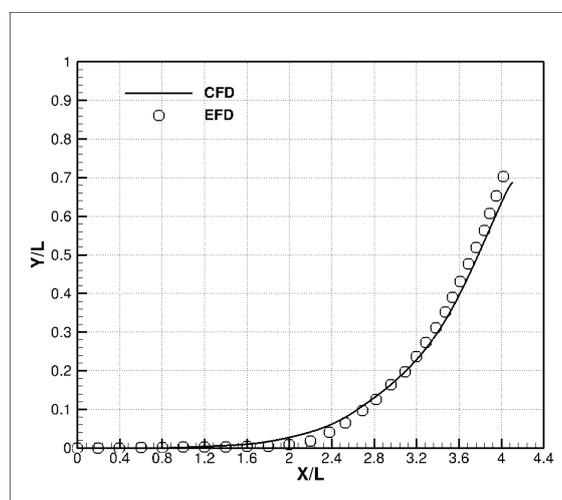
## 3.2 不操舵紧急倒车操纵数值模拟结果与分析

### 3.2.1 深水工况不操舵紧急倒车操纵

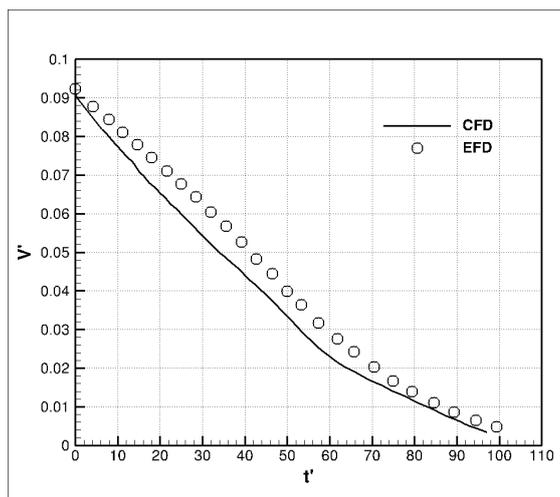
#### 3.2.1.1 停船参数计算

本章对不操舵紧急倒车的数值计算中时间步长取0.0005s，使用40核高性能计算集群进行数值模拟，计算持续到船模纵向速度降低为0，在倒车停船的情况下，该时刻船模的横向速度也为0。完成一个算例大约需要380小时的计算时间。

停船操纵过程中的船模运动轨迹以及速度随时间的变化曲线如图3-7所示，其中点表示试验值，实线表示数值计算结果。



(a) 船模停船轨迹



(b) 船模停船速度

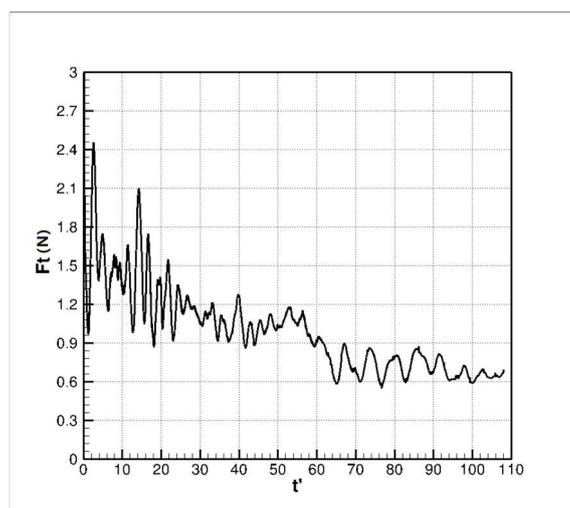
图 3-7 船模轨迹与速度图

Fig. 3-7 Trajectory and velocity of the ship model

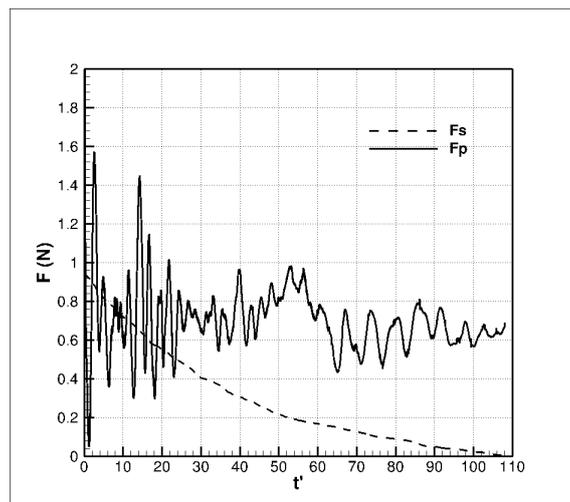
为了方便对比分析，这里的各停船参数都使用了无因次化参数，其中轨迹图中使用了无因次化长度，而速度变化图中使用了无因次化速度和时间，计算公式分别为： $t' = t / \sqrt{L/g}$ ， $V' = V / \sqrt{gL}$ 。其中L为船长，g为重力加速度。

从图3-7中可以看出，停船纵距、横距和停船轨迹与试验值吻合良好，其中停船纵距为4.07L，比试验值4.02L大了1.24%；停船横距为0.67L，比试验值0.70L小了4.29%；停船时间与试验值吻合较好，无因次停船时间为101.3，比试验值99.5大了1.81%，而倒车之后的速度变化情况与试验存在一定误差，在余速较高时，数值方法预报的速度降低较快。本文中采用的数值计算方法可以较为精确的预报船舶停船操纵的相关参数，为停船性能评估提供有力的手段。

为了研究倒车停船操纵中船舶停下的力学机理，对船体操纵过程中的受力情况进行分析，船体受到的总纵向力和该力的分解情况如图3-8所示：



(a) 船模总纵向受力



(b) 船模纵向受力分解

图 3-8 纵向船体受力

Fig. 3-8 Longitudinal force of the ship model

图3-8中，横轴依旧采用上文使用的无因次化时间。由于螺旋桨不停转动的工作状态，船体受到的总纵向力 $F_t$ 是波动的，随着船速的减小，该力有逐渐减小的趋势。将总纵向力分解为船体所受阻力 $F_s$ 和螺旋桨作用力 $F_p$ ，发现船体阻力曲线比较具有规律性，随着航行时间的增加，船体速度逐渐减小，船体所受阻力也逐渐减小，当航速降为零的时候，船体阻力也降低为零。而螺旋桨作用力并无明显规律性，在某一数值附近波动，为船模提供制动力。

### 3.2.1.2 流场分析

下面分析倒车停船操纵中船体水动力特征，船模倒车停船操纵进行10s后（对应实际船舶105s，无因次时间18.35）船艉部的压力分布如图3-9所示。

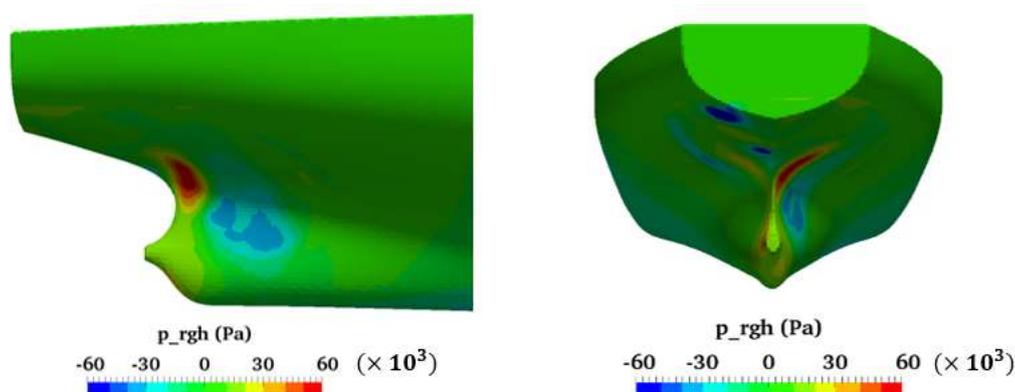


图 3-9 艉部动压分布图

Fig. 3-9 Pressure distribution on the aft of the ship

从图3-9中可以看出，倒车停船操纵过程中，船后方右侧形成高压区，而左侧因螺旋桨倒车而导致的压力变化情况较小，相较右侧可以忽略不计。船后方左右两侧的压力差形成了推动船尾向左的横向力，从而导致船首右偏，产生倒车效应。

为了研究船尾右侧高压区的产生原因，对该时刻船尾周围的流场情况进行研究，船尾高压区域附近的船周流体纵向速度和垂向速度的分布如图3-10、图3-11和所示，螺旋桨附近的流速如图3-12所示，其中左图为横剖面，右图为水平剖面，定义流体速度向船头和向上为正：

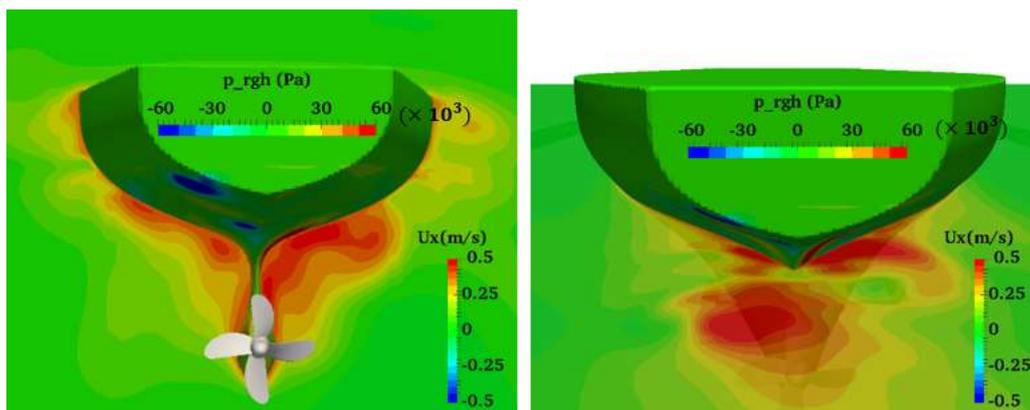


图 3-10 流体纵向速度分布图

Fig. 3-10 Speed distribution of X direction

从图3-10中可以看出，船尾两侧都存在一定大小的伴流，船尾右侧高压区附近流体纵向速度较左侧更大，这是因为在倒转螺旋桨的作用下，其左后方的流体被排向桨的右前方，排出流向前方运动的过程中受到船体的阻挡，冲击船体右后方产生压力。

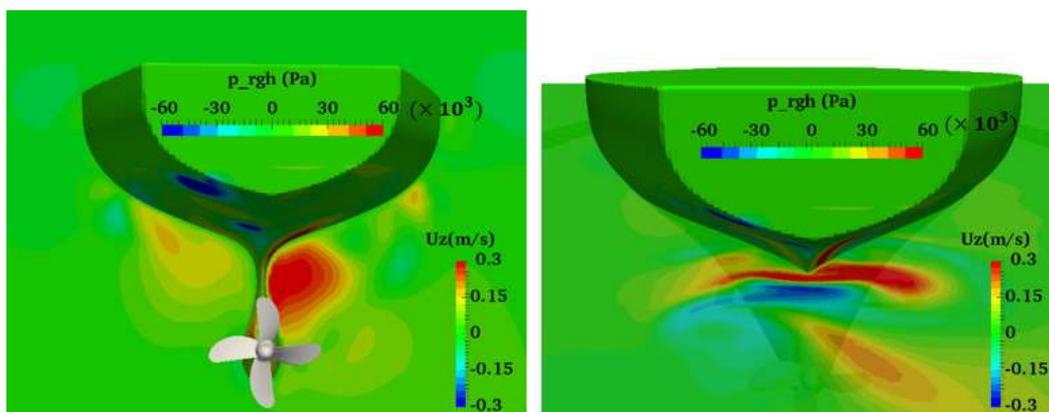


图 3-11 流体垂向速度分布图

Fig. 3-11 Speed distribution of Z direction

从图3-11中可以看出，在倒转螺旋桨的作用下，船尾右侧的流体被向上排出，

当其向上运动的过程中受到船体的阻挡，冲击船尾右下方，产生一定的压力。而左侧流体向下运动，流向更深的水域，不对船体表面压力分布产生明显影响。左右两侧的压力差形成了推动船尾向左的横向力。

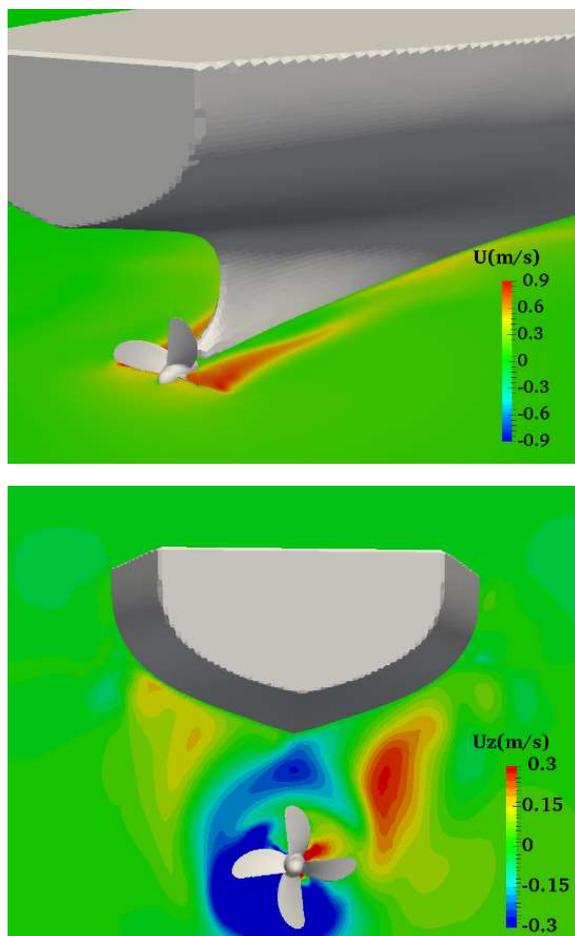


图 3-12 螺旋桨周围流体速度分布图

Fig. 3-12 Speed distribution near the propeller

图3-12中清晰的反映出倒车停船的作用机理，螺旋桨倒车，将流体向前方排出，流体的反作用力作用在螺旋桨上，通过桨轴为船舶提供刹车力。从船尾向船首看去，倒车螺旋桨逆时针旋转，改变了船尾附近的流体运动情况，右侧排出流向前方和上方运动，受到了船体的阻挡，与船体发生相互作用，在艉部船壳产生压力，推动船尾向左，从而造成船首右偏，产生倒车效应。

### 3.2.2 水深影响

#### 3.2.2.1 浅水对船模自航的影响

浅水工况下，由于浅水效应，船舶受到的阻力更大，如果需要与深水工况达到同样的船模航速，需要更大的螺旋桨推力，即更快的螺旋桨转速。同样通过使用PI控制器控制螺旋桨转速，以达到设定航速，以上一节验证的实船15.5kn航速

自航点为研究工况,对在浅水工况下以同样航速前进的船模进行自航点的计算预报,计算得到的航速与螺旋桨转速的时历曲线如图3-13所示。

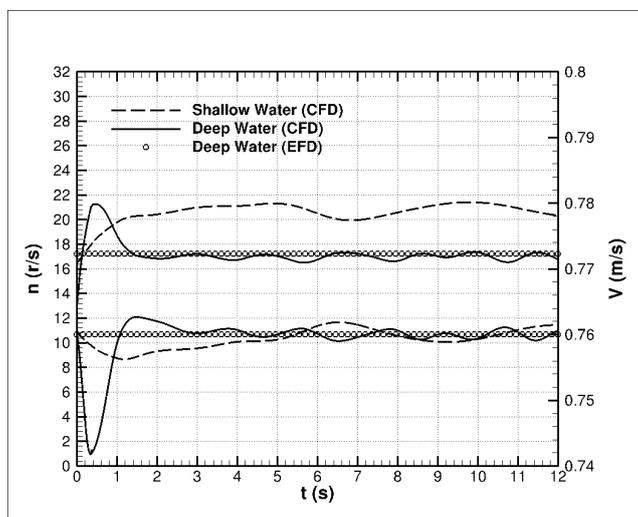


图3-13 不同水深中船模航速与螺旋桨转速时历曲线

Fig. 3-13 Velocity and propeller rate of the ship model in different water depth

浅水工况下,船模达到预定航速0.76m/s时,预报得到的螺旋桨转速平均值为20.84 r/s,与深水中转速相比增大了22.4%。这说明船舶在浅水中航行时,若需要达到与深水工况下相同的航速,则需要更大的螺旋桨转速。造成螺旋桨转速增大的原因是:浅水中船体所受阻力增大,需要更大的推力达到受力平衡,并且浅水中船体伴流较深水更大,降低了螺旋桨的进速,从而减小了推力。

为了探究浅水中螺旋桨推力降低的原因,对船周伴流情况进行分析。图3-14展示了此时船体下方流体沿船体中轴线的纵切面速度分布。

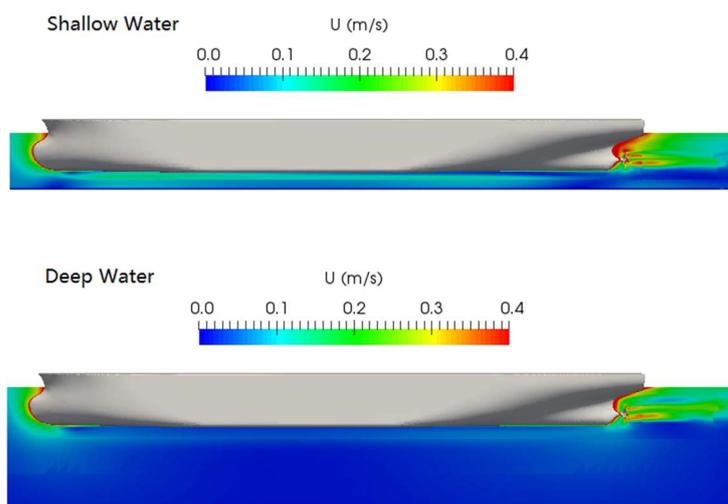


图3-14 不同水深中船尾流速分布

Fig. 3-14 Speed distribution after the ship in different water depth

对比浅水与深水工况下船周流速情况，发现浅水中船底流速增大，这也是造成摩擦阻力的增加和船底压力降低的原因。而从船尾附近流体速度分布可以看出，浅水中船后伴流速度明显增大，导致螺旋桨进速下降，推力降低。所以浅水中若想达到相同航速，需要更高的螺旋桨转速。

此时，船侧和船底的压力分布如图3-15所示：

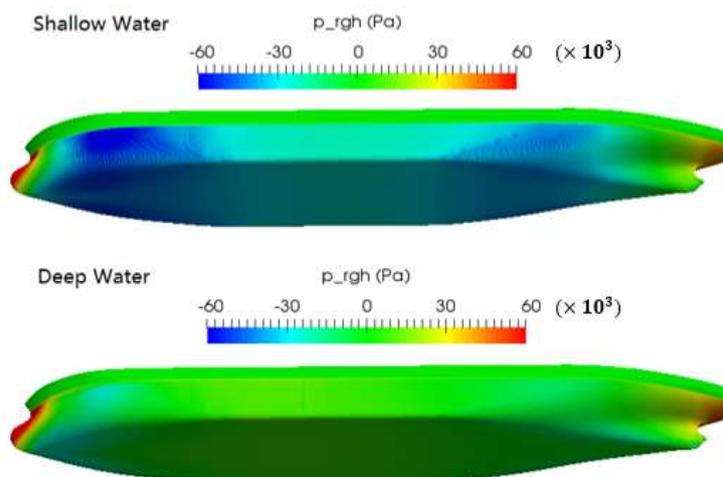


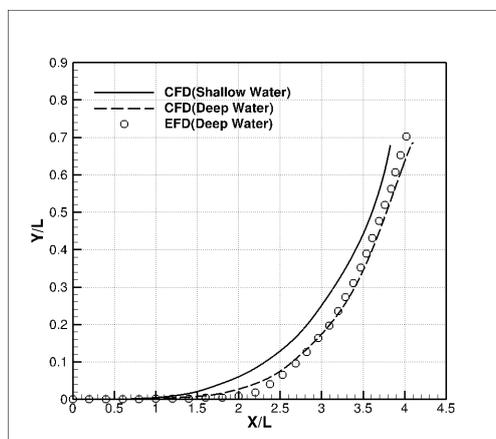
图3-15 不同水深中船壳上压力分布

Fig. 3-15 Pressure distribution on the hull of the ship in different water depth

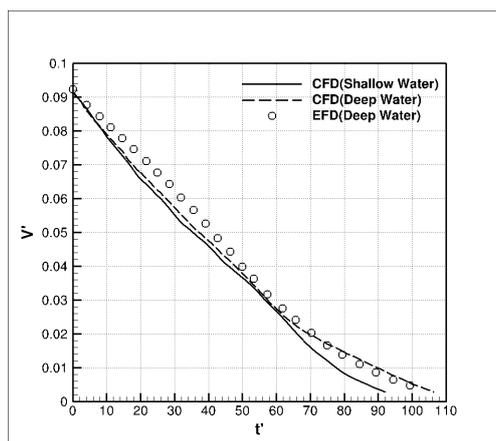
从图3-15中可以看出，浅水工况船侧及船底的压力明显降低，说明波高较小，同时流速更大，从而形成更大的摩擦阻力。压力降低还会造成船体下沉，吃水的增大导致船壳湿表面积增大，进一步增加摩擦阻力。由于本文中固定了船体的下沉自由度，故本文中的计算结果并没有发生进一步的浅水效应。

### 3.2.2.2 浅水对倒车停船参数的影响

数值模拟得到的不同水深工况下停船操纵的船模运动轨迹以及速度随时间的变化曲线如图3-16所示。



(a) 船模停船轨迹对比



(b) 船模停船速度对比

图 3-16 不同水深下船模轨迹与速度对比图

Fig. 3-16 Comparison of trajectory and velocity of the ship model in different water depth

相较深水工况，浅水中船模倒车停船操纵完成后，停船纵距更短，横距接近深水工况，停船时间也更短。前文中已阐述浅水中船模阻力更大，这可以使船舶更快停下，从而拥有更短的冲程和停船时间；而在相对更短的时间内浅水中船模停船纵距与深水工况中相近，说明在倒转螺旋桨作用下，船体受到了更大的转艏力矩。

为了进一步研究浅水对于船模停船纵距的影响原因，对船体纵向受力进行对比分析。不同水深工况下船体纵向受力时历曲线如图3-17所示。

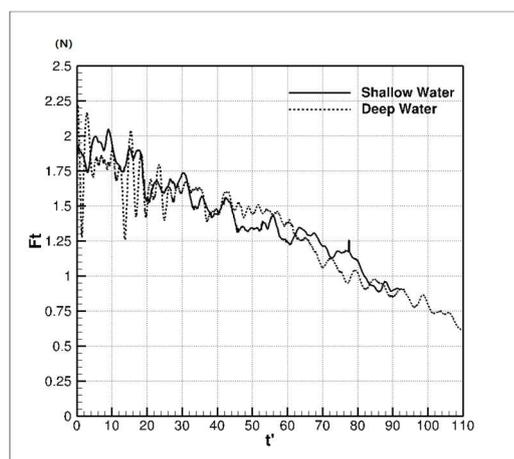


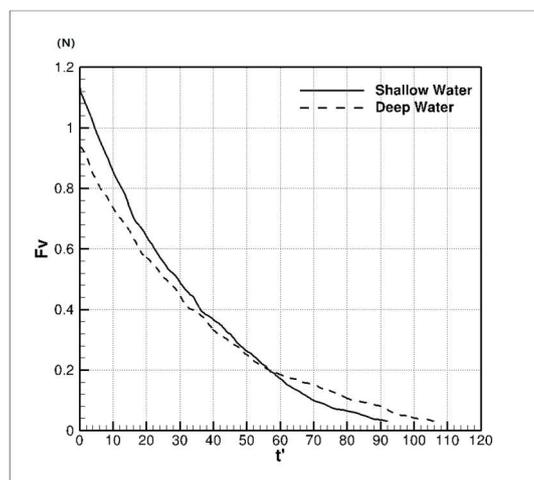
图 3-17 不同水深下船模受到的总纵向力

Fig. 3-17 Longitudinal force of the ship model in different water depth

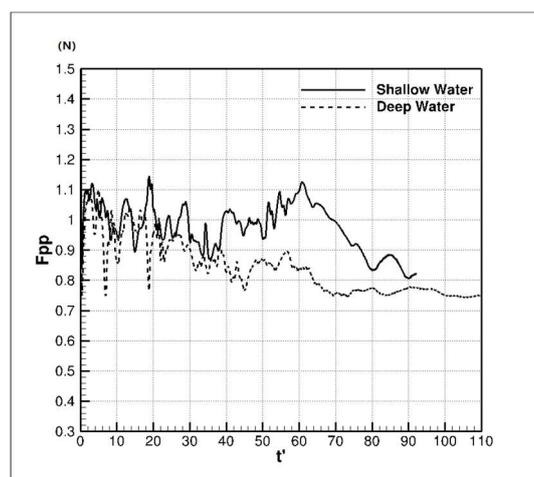
由于螺旋桨不断转动，提供的向后推力不是一个固定的数值，所以船体纵向受力曲线是波动的。从上图中可以看出，随着停船操纵的进行，船体所受总纵向力有逐渐减小的趋势，在停船操纵完成后，到达某一数值。这是因为船体所受阻力与航速相关，当航速逐渐降低时，阻力也逐渐减小，而螺旋桨倒转提供的向后

拉力由于螺旋桨转速固定，不会随航速的变化而发生明显变化趋势，在航速降为零，即停船操纵完成后，船体受力到达的某一数值，便是螺旋桨作用力。

为了进一步研究浅水对倒车停船操纵中船体受力的影响，将纵向力分解为船体所受阻力和螺旋桨的倒转反作用力，上述两种分力的时历曲线如图3-18所示。



(a) 船体阻力



(b) 螺旋桨作用力

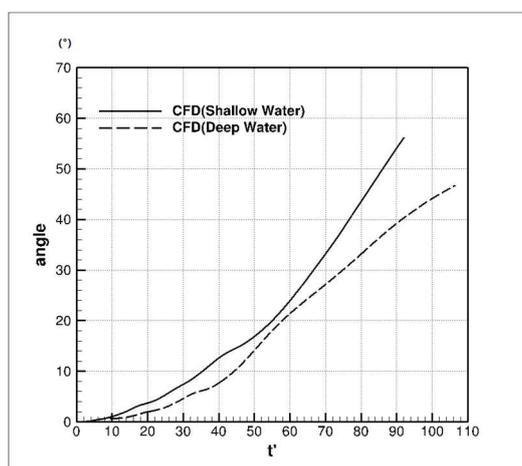
图 3-18 不同水深下船模纵向受力成分

Fig. 3-18 Components of longitudinal force in different water depth

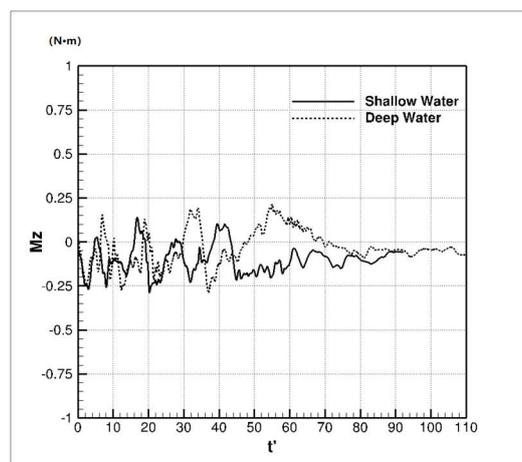
图中 $F_v$ 表示船体阻力， $F_{pp}$ 表示螺旋桨作用力。从船体阻力图中可以看出，船体阻力随航速的降低而减小，当航速降低为零时，船体阻力也降为零。当停船操纵开始时，浅水中船体所受阻力大于深水工况，原因前文已进行过分析。当两种水深下的船模初速度相同时，浅水中船模受到的摩擦阻力比深水中大约20%。随着航速的逐渐降低，两种工况下船体受到的阻力都开始减小，由于浅水中航速降低更快，故阻力降低也更快，在无因次时间达到60左右时，曲线发生交叉，此时两种工况船体阻力相同，之后浅水中船体阻力小于深水工况，直到船模停下。

从螺旋桨作用力图中可以看出,由于螺旋桨不断转动的动态工作状态,提供的作用力波动明显,就总体趋势而言,浅水中螺旋桨作用力大于深水工况。取停船操纵开始后的螺旋桨作用力平均值,得到浅水中作用力平均值为0.95 N,而深水中作用力平均值为0.88 N。在具有相同转速的情况下,浅水中螺旋桨提供的作用力略大。这也是造成浅水中停船纵距和时间小于深水工况的原因。浅水中螺旋桨作用力更大的原因与船尾伴流有关,通常,当螺旋桨正转时,由于船尾伴流更大,螺旋桨进速会变小,从而降低螺旋桨可以提供的推力;但是当螺旋桨反转时,这一情况就发生了改变,螺旋桨进速的方向改变,所以船尾伴流增大反而会增加倒转螺旋桨的进速,从而使螺旋桨能够提供更大的推力。这一解释的流场分析将在后文结合流体速度分布图给出。

为了进一步研究浅水对于船模停船操纵横距以及偏转角的影响,将深水与浅水工况下船模的转艏角度和转艏力矩进行对比,对比时历曲线如图3-19所示。实线为浅水中的计算结果,虚线为深水结果。



(a) 转艏角度



(b) 转艏力矩

图 3-19 不同水深下转艏角度与力矩对比图

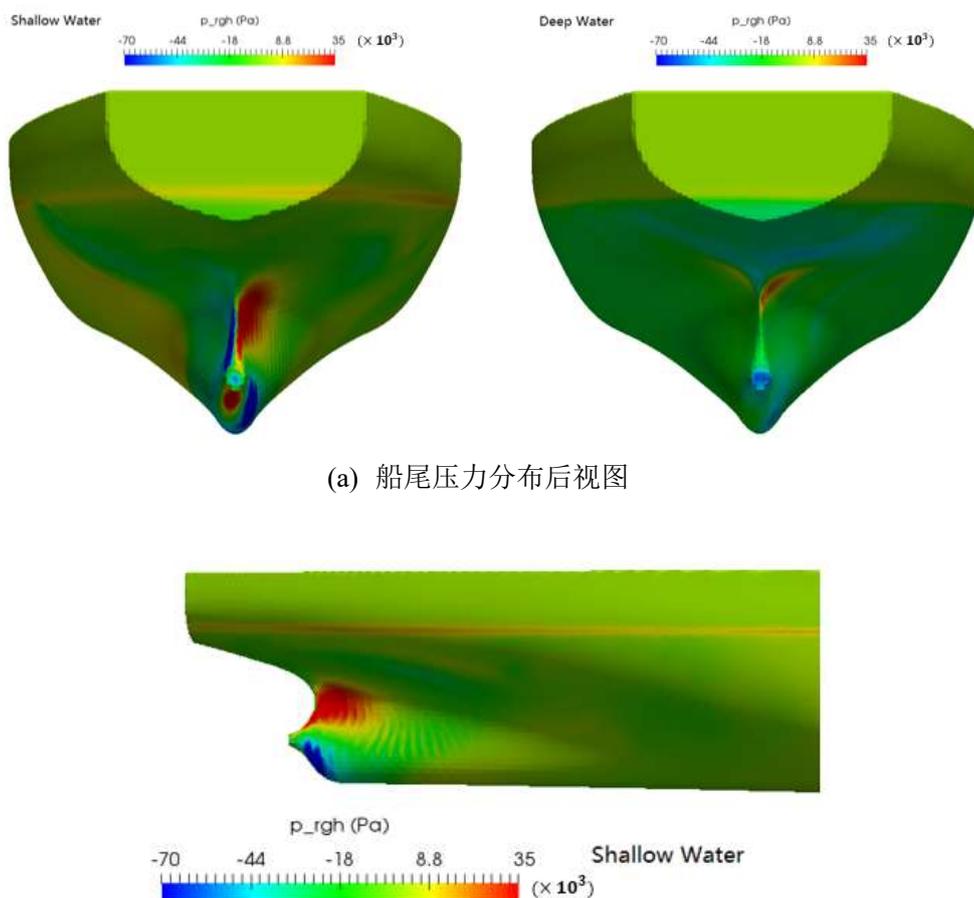
Fig. 3-20 Comparison of angle and moment of the ship model in different water depth

从船舶偏转角度时历曲线图中可以看出,从倒车停船操纵开始后,浅水中船体转艏角度更大,当船完全停下后,偏转角为 $56.2^\circ$ ;而深水中船体转艏较小,当船完全停下后,偏转角为 $46.3^\circ$ 。浅水工况中船模使用相对更少的时间到达了更大的偏转角。

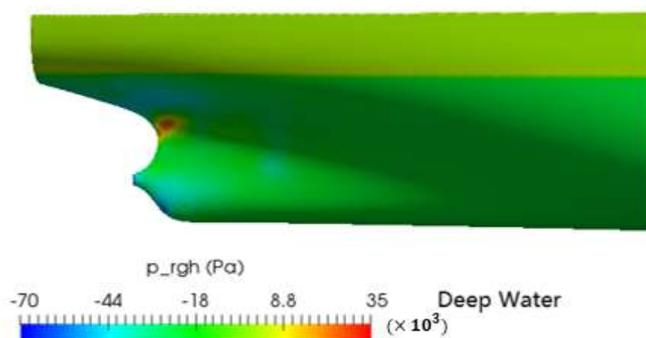
分析船体所受转艏力矩的时历曲线,发现由于螺旋桨的动态工作状态,力矩值有较大波动。导致船舶右转的转艏力矩为负,曲线中出现了正值,是因为船体受到向右舷方向转艏力矩的同时,船艏、船侧流体会同时提供向左舷方向的反作用转艏力矩,当螺旋桨提供的力矩因发生波动而降低时,流体提供的向左舷方向的转艏力矩更大,从而造成总转艏力矩为正值。取停船操纵开始后作用在船体上的总转艏力矩平均值,得到浅水中力矩平均值为 $0.121 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,而深水中力矩平均值为 $0.068 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。在具有相同转速的情况下,浅水中船体受到的转艏力矩略大。这也是造成浅水中停船偏转角大于深水工况的原因。

### 3.2.2.3 浅水对倒车停船流场的影响

为了探究浅水对倒车停船参数影响的原因,需要对停船操纵中船舶运动的流场情况进行对比分析。船模倒车停船操纵进行30s后(对应实际船舶315s)船尾部的压力分布如图3-21所示。



(a) 船尾压力分布后视图



(b) 船尾压力分布侧视图

图 3-21 不同水深下船尾压力分布对比

Fig. 3-21 Comparison of pressure distribution on the aft of the ship in different water depth

浅水中船后方右侧高压区域面积和压力值明显大于深水工况，这解释了前文中浅水工况船体所受螺旋桨作用力和转舵力矩大于深水的情况。此外，还可以看出浅水中船尾压力分布的复杂性大于深水工况，说明浅水工况下螺旋桨与船体之间的相互作用更大。为了研究船尾右侧高压区的产生原因，图3-22给出了该时刻船尾高压区周围流场横切面的纵向速度分布。

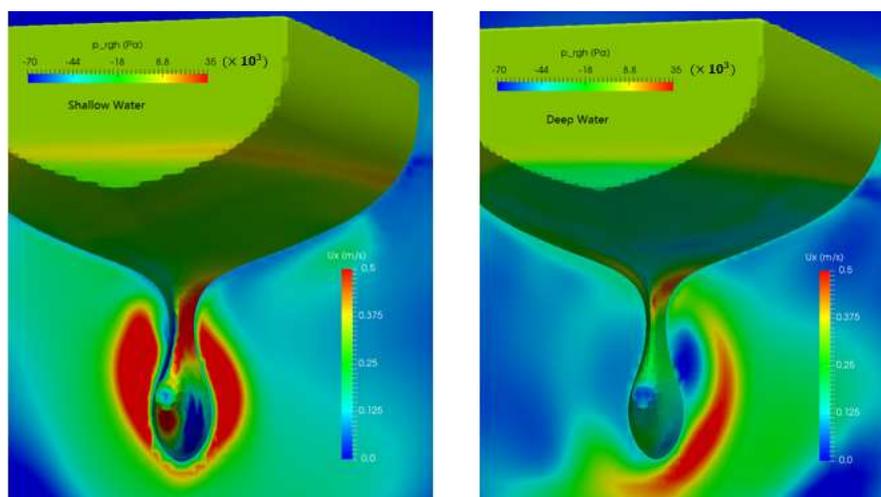


图 3-22 不同水深下纵向流速对比

Fig. 3-22 Comparison of fluid speed in X direction in different water depth

从图3-22中可以看出，浅水中船尾周围流速明显大于深水工况，这是因为其船体下方空间有限，流体需要加速通过，同时又有更多的流体从船两侧流过，造成整体流速增大。浅水工况中，虽然左侧排出流纵向速度分布在这个截面下具有更大的面积，但是距离船体有一定的距离，而右侧排出流非常贴近船体，与船体表面相互作用形成的压力更大，造成左右压力差；而深水工况中，左侧排出流纵向速度较小，右侧流体速度较高，冲击船体，形成相对较小的压力区。

该时刻船尾高压区周围流场横切面的垂向速度分布如图3-23所示。

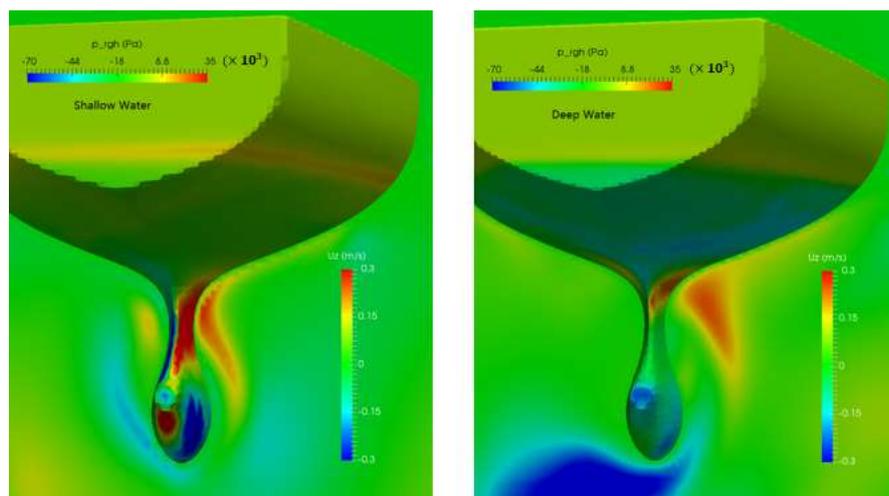


图 3-23 不同水深下垂向流速对比

Fig. 3-23 Comparison of fluid speed in Z direction in different water depth

从图3-23中可以看出，在倒转螺旋桨的作用下，船尾右侧的流体明显向上运动，冲击船尾右下方，而左侧流体向下运动，并没有受到船体的阻挡。浅水中高压区周围流体速度垂直分量数值更大，且分布更加贴近船身，所以相比深水工况，浅水中螺旋桨排出流与船体的相互作用更大。

该时刻船尾高压区周围流场垂向切面的速度分布如图3-24所示。

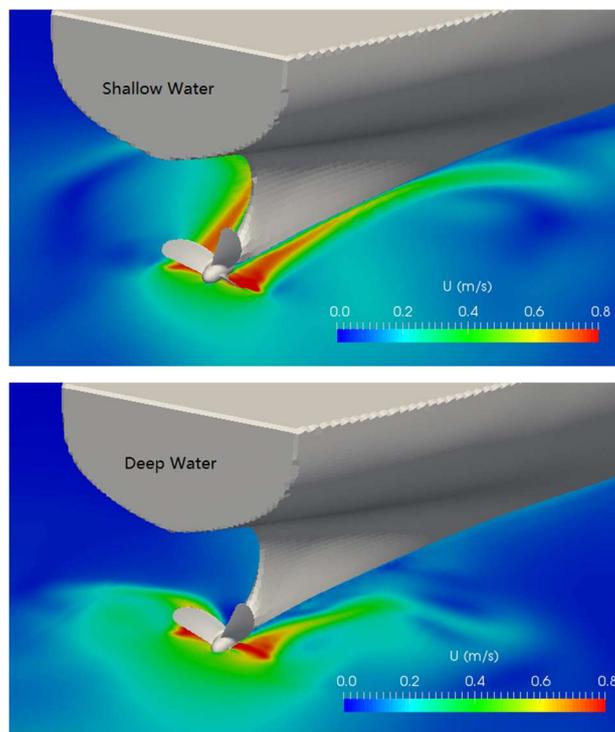


图 3-24 不同水深下螺旋桨周围流速对比

Fig. 3-24 Comparison of fluid speed around the propeller in different water depth

从图3-24中可以看出，在浅水中，由于船体整体伴流速度较大，船尾周围有大量的流体随船舶一同向前运动，故倒转螺旋桨的进速更大，产生更大的推力，同时其排出流速度也更大，作用在船体右下方形成更大的压力。所以在浅水工况下，船模具有更大的螺旋桨作用力和转艏力矩。

浅水中由于船体阻力增大、倒转螺旋桨进速增加等原因，停船距离和停船时间都会减小，同时船体受到的转矩更大，船首会更快发生偏转。

### 3.3 本章小结

本章使用基于重叠网格技术的 naoe-FOAM-SJTU 求解器，针对 KVLCC2 船模在深水与浅水中的不操舵倒车停船操纵进行了 CFD 数值模拟。

对于深水工况，数值预报得到的停船冲程、停船横距和停船时间与试验结果吻合良好，数值误差均在 5% 以内，验证了使用当前数值方法对停船操纵问题进行数值预报的可靠性。另外，对于船舶从自航到停止的过程，给出了详细的流场信息，如船体表面压力分布、螺旋桨周围流体速度变化等，发现在倒转螺旋桨的作用下，排出流的运动与船尾发生相互作用，右侧排出流受到船尾的阻挡，造成右侧船尾压力升高，从而推动船尾向左，导致船首右偏，产生“倒车效应”。

对于水深影响，对 1.5 倍吃水工况下的停船操纵进行了数值模拟，并与深水情况进行对比，分析了水深对倒车停船操纵的影响。对两种工况下的停船纵距、横距、停船时间、船体受力等计算结果进行对比，结果表明，相较深水工况，在浅水中倒车停船的停船纵距以及停船时间减小，停船横距相近，转艏角度增加。另外，给出了不同水深工况下船舶从自航到停船的过程中详细的流场信息，如船体表面压力分布、船周流体速度分布等，对比发现，浅水中船周伴流速度大，船体所受阻力增加，同时螺旋桨进速增大，其排出流与船体的相互作用增强，从而使浅水中进行倒车停船操纵的船舶纵向受力和转矩都增大。

本章验证了使用当前数值方法对倒车停船操纵进行数值模拟的可靠性，得到了两种水深工况下的停船参数，并分析了流场情况。下面将继续使用该方法对更多的停船方式进行数值模拟，并对停船参数进行对比分析。

## 第四章 满舵紧急倒车数值模拟分析

满舵紧急倒车是在紧急倒车停船的操纵的基础上,衍生出的一种停船操纵方式。紧急倒车停船是利用倒转螺旋桨产生的向前的推力,达到快速降低航速的目的,而在倒车的同时进行转舵的操纵,可以改变船舶的运动结果。在船舶向前航行时转舵,可以起到改变航向,同时增加阻力的效果,然而倒转螺旋桨的存在会导致舵的进速很低,从而降低舵效,而舵的存在同样会阻碍流体向前的运动,降低倒转螺旋桨的效果。所以在倒车的同时进行转舵操纵所产生的具体效果,需要进一步的计算和对比。

本章使用基于重叠网格技术的 naoe-FOAM-SJTU 求解器,针对 KVLCC2 船模船桨舵配合下的满舵紧急倒车操纵进行 CFD 数值模拟。预报停船过程中的纵距、横距等参数,与不操舵紧急倒车的停船方式对比,并对停船过程中的船体表面压力、流场分布情况进行展示和分析,探究转舵对紧急倒车操纵产生的影响。

### 4.1 计算工况与网格

由于 KVLCC2 船模的满舵紧急倒车操纵并没有相应的试验数据,为了方便同不操舵的情况进行对比,研究转舵的影响,本章满舵紧急倒车操纵数值模拟的计算工况与第三章基本相同。即首先使用求解器中自带的 PI 控制器,控制螺旋桨转速使船模以 0.4905m/s 的速度(对应实船 10kn)向前航行,在达到稳定的自航状态之后,控制螺旋桨进行倒转,倒转速度为 10.36r/s,同时控制舵在 1s 内达到 35° 左满舵或右满舵,之后对船体运动情况进行预报。

进行左、右满舵操纵后船体的几何模型如图 4-1 所示。

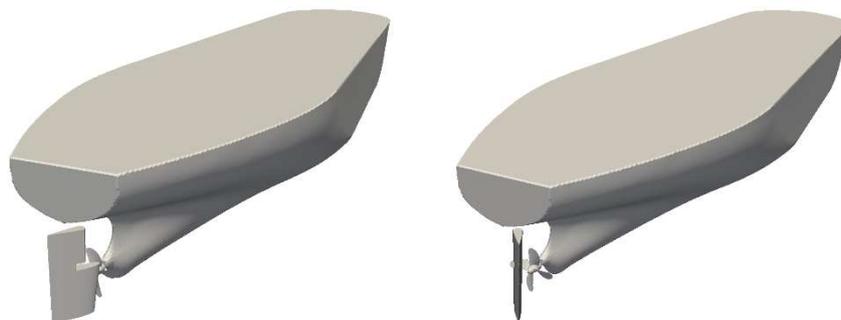


图4-1 满舵操纵示意图

Fig. 4-1 Diagram of rudder turning

本章中对满舵紧急倒车操纵进行数值模拟的左、右满舵工况，采用同一套网格即可，即对舵网格进行顺时针或逆时针旋转。为了方便对比，计算域设定为深水工况，使用重叠网格方法构建船桨耦合计算模型，计算域的小为 $-1.5L \leq x \leq 3L$ ， $-1.5L \leq y \leq 1.5L$  和  $-L \leq z \leq 0.5L$ ，其中  $L$  为船长，船首朝-x 方向。将计算域划分为 4 个部分，分别为背景网格，船体网格，桨网格和舵网格，所有的网格均由 OpenFOAM 自带的网格划分工具 snappyHexMesh 生成，由于停船操纵时间跨度较长，需要大量的计算资源，故网格数不宜过多，计算采用的背景网格数为 92 万，船体网格数为 276 万，桨网格数为 62 万，舵网格数为 52 万，全流场计算网格总数为 482 万，深水工况下的计算域布置如图 4-2 所示，船体和舵周围网格分布如图 4-3 所示：

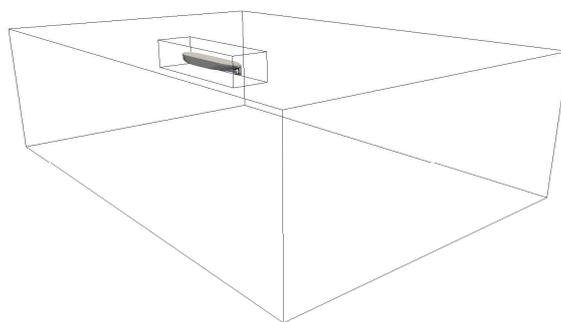


图4-2 计算域布置

Fig. 4-2 Arrangement of computational domain

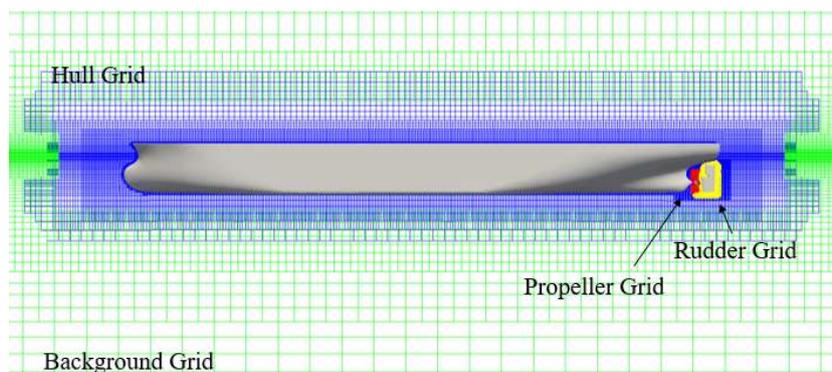


图4-3 深水工况船体周围网格分布

Fig. 4-3 Grid distribution around ship in deep water

## 4.2 满舵紧急倒车操纵数值模拟结果与分析

本章对满舵紧急倒车停船操纵的数值计算中时间步长取0.0005s，使用40核高性能计算集群进行数值模拟，计算持续到船模纵向速度降低为0，在满舵紧急倒车操纵的情况下，当船模纵向速度为0时，船模的横向速度也降低为0。完成一个算例大约需要400小时的计算时间。

## 4.2.1 左满舵紧急倒车操纵

### 4.2.1.1 停船参数对比分析

左满舵紧急倒车操纵过程中的船模运动轨迹以及速度随时间的变化与不操舵情况进行对比的曲线如图4-3所示，其中实线代表不操舵紧急倒车操纵的模拟结果，虚线表示左满舵的情况。

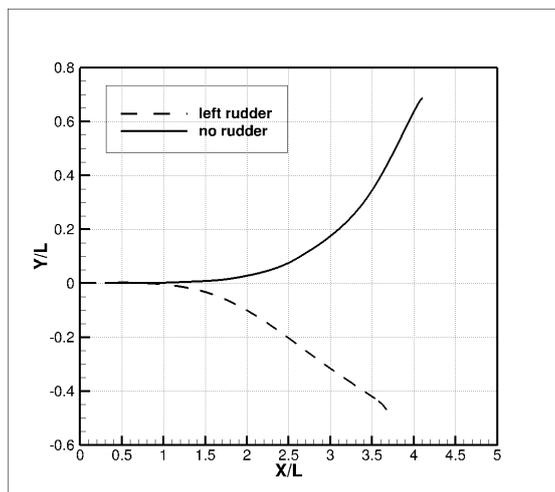


图4-3 船模运动轨迹对比

Fig. 4-3 Comparison of trajectory

从图 4-3 中发现，进行左满舵操纵之后，相较于不操舵的情况，船舶的横向偏移方向相反。在进行不操舵倒车停船操纵之后，由于倒车效应，船舶会向右发生偏航，而向左打舵，使船受到的总垂向力矩反向，从而使船向着完全相反的方向偏航。从停船参数来看，左满舵倒车停船操纵的停船纵距和横距都有所减小。

船模纵向速度时历曲线如图 4-4 所示。

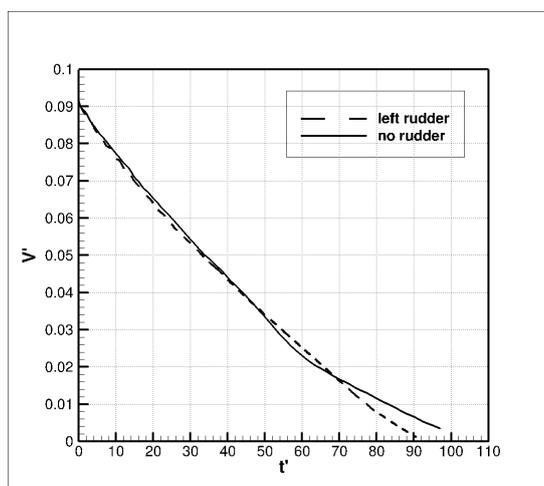


图4-4 船模纵向速度对比

Fig. 4-4 Comparison of longitudinal speed of the ship

从图 4-4 中可以看出, 在停船过程中的大部分时间, 左满舵与不操舵的情况下航速变化几乎没有差异, 在无因次时间到达 70, 船快要停下时, 左满舵操纵的船模速度降低更快。从最终的停船时间来看, 左满舵倒车停船操纵时间相较不操舵的情况缩短了 10%左右。

停船操纵过程中船舶受到的总纵向力时历曲线如图4-5所示。

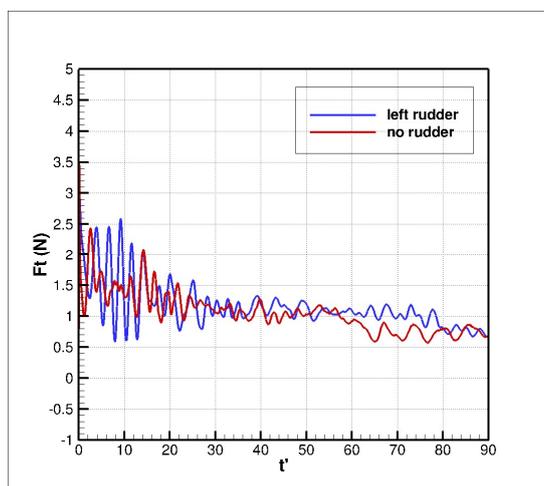


图4-5 船体纵向力

Fig. 4-5 Longitudinal force of the ship

从图 4-5 中可以看出, 在停船操纵开始后的很长一段时间内, 两种操纵方式的船模受到的船体阻力大小相近, 当无因次时间到达 60 之后, 由于舵本身的存在阻碍了水经过, 左满舵的船模受到的阻力更大。所以在速度曲线中相应的时间节点之后, 左满舵船舶速度降低更快。

#### 4.2.1.2 流场对比分析

为了研究左满舵对倒车效应产生的影响, 下面对停船操纵过程中船尾压力分布进行分析。两种操纵方式下的船尾动压分布如图4-6所示。

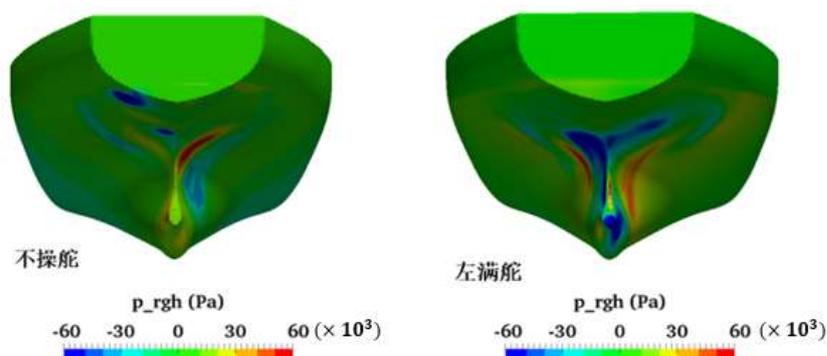


图4-6 船尾压力分布对比

Fig. 4-6 Comparison of pressure distribution on the ship tail

从图 4-6 中可以看出, 进行左满舵操纵之后, 倒车效应依旧存在。停船过程中的船尾右侧压力升高, 相比没有舵的情况, 正压的幅值有所下降。而左侧虽然压力分布也有一定的变化, 但是负压区域面积更大, 船尾受到的总压力方向向左, 依然会产生推动船尾向左, 造成船首右偏的转舵力矩。

倒车效应提供了使船模右转的力矩, 但是数值模拟的结果中船模仍向左转向, 说明舵提供了更大的使船向左转向的力矩。舵面的压力分布如图 5-15 所示, 其中左图为背流面, 右图为迎流面。

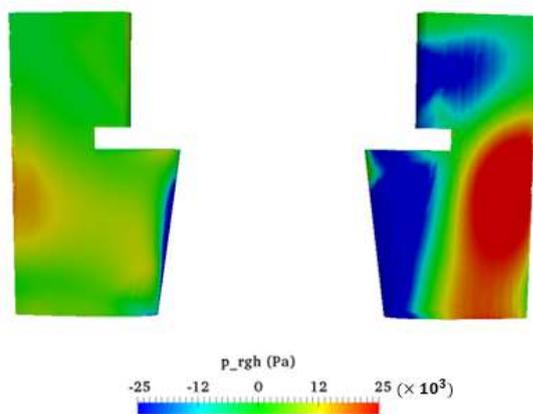
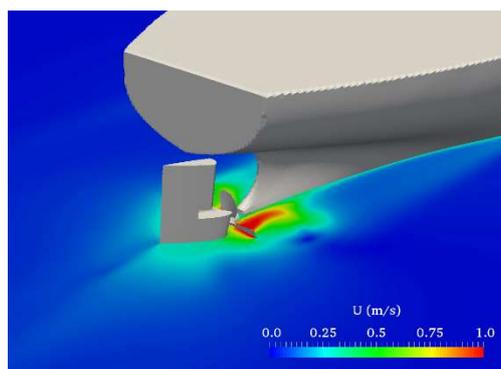


图 4-7 舵面压力分布

Fig. 4-7 Pressure distribution on rudder

从图 4-7 中可以看出, 转向舵的存在阻碍了流体的运动, 同时倒转螺旋桨对舵附近流速影响较大, 使舵面上的压力分布较为复杂。舵的迎流面后端压力升高, 这个压力分量通过船与舵之间的连接传递到船上, 形成使船舶左转的转舵力矩; 而其前端存在负压区域, 这是因为由于舵靠近倒转螺旋桨, 大量的流体被螺旋桨由后方排向前方, 所以该处流速较快, 造成压力降低, 然而此处的负压力作用在舵的前缘, 其分量对船整体的转舵力矩贡献较小。而舵的背流面受到的压力较小, 对舵的效果影响也比较小。所以综合上述对于压力分布的讨论, 舵给船舶提供了向左转向的转舵力矩, 且这个力矩大于倒车效应产生的力矩。

为了探究左满舵倒车操纵过程中船尾、舵面压力分布产生的原因, 下面给出了停船过程中桨、舵周围的流场情况, 如图 4-8 所示。



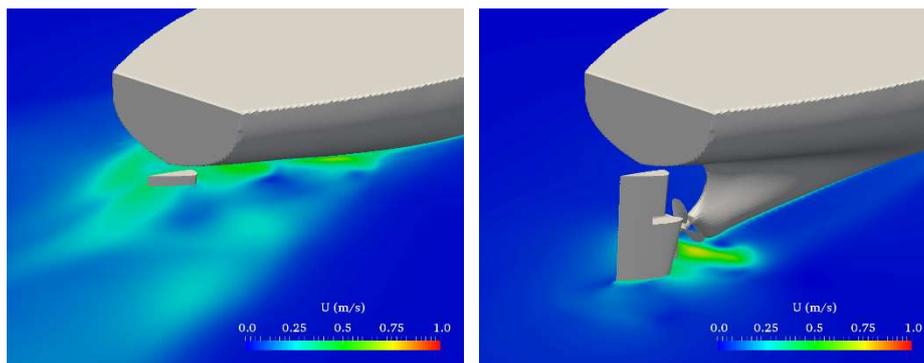


图4-8 舵周围流体速度分布

Fig. 4-8 Speed distribution around rudder

图 4-8 为流体速度分布的水平切面图，三幅图分别为经过舵中间、上方和下方的切面。相比不操舵的情况，由于舵的存在，右侧螺旋桨排出流的速度略有降低，造成船尾右侧受到的压力减小，而左侧螺旋桨后方流体受到舵的阻挡，流场更加复杂，这是船尾左侧压力分布复杂的原因。而从经过舵上下方的水平切面图中可以看出，在距离螺旋桨较远的地方，流场分布并没有过多受到倒转桨的影响，流体经过舵，产生压差，为船舶提供转舵力矩。由于左满舵的存在，倒车效应略有减小，同时舵本身与流体相互作用，二者的合力表现为使船模左转的转舵力矩。

## 4.2.2 右满舵紧急倒车操纵

### 4.2.2.1 停船参数对比分析

右满舵紧急倒车操纵过程中的船模运动轨迹以及速度随时间的变化与不操舵情况进行对比的曲线如图4-9所示，其中实线代表不操舵紧急倒车操纵的模拟结果，点划线表示右满舵的情况。

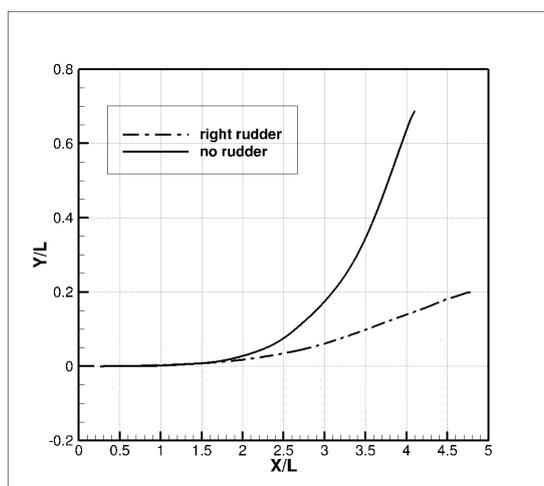


图4-9 船模运动轨迹对比

Fig. 4-9 Comparison of trajectory

从图 4-9 中发现, 进行右满舵操纵之后, 相较不操舵的情况, 船舶的停船纵距增加, 横向偏移反而大幅减小。右满舵反而导致了船模向右偏转的转舵力矩降低, 可能是倒转桨对舵效的干扰很大, 同时舵的存在使倒车效应也减小了。

船模纵向速度时历曲线如图 4-10 所示。

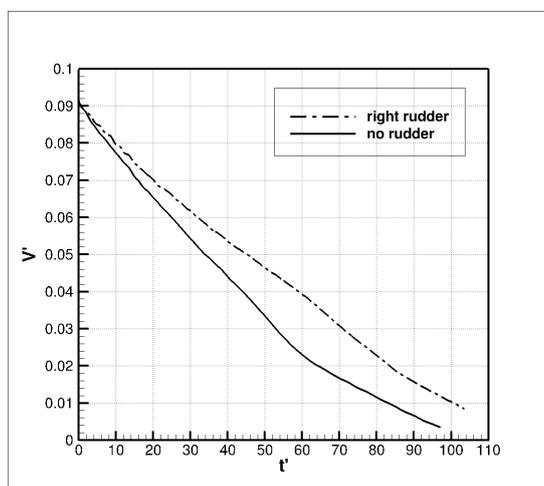


图4-10 船模纵向速度对比

Fig. 4-10 Comparison of longitudinal speed of the ship

这里使用了无因次速度与时间。从图 4-10 中可以看出, 右满舵倒车操纵的船模速度降低较慢, 停船时间增加。

停船操纵过程中船舶受到的纵向合力时历曲线如图4-11所示。

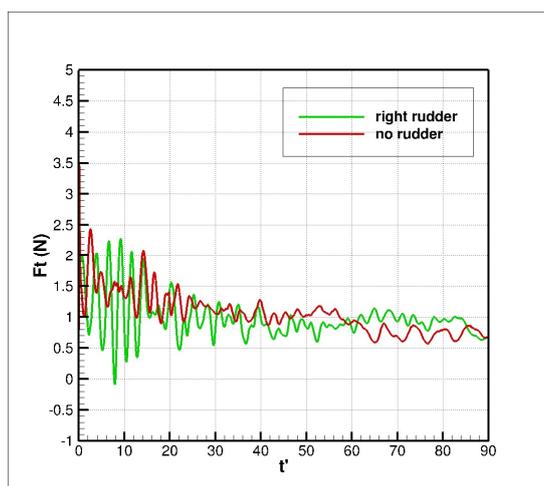


图4-11 船体纵向力

Fig. 4-11 Longitudinal force of the ship

从图 4-11 中可以看出, 在停船操纵开始后的很长时间内, 右满舵船模受到的纵向力较小, 当无因次时间到达 60 之后, 由于右满舵倒车操纵船模的航

速较高，其摩擦阻力更大，所以总纵向力开始大于不操舵的情况。

为了探究右满舵倒车停船操纵停船横距反而减小的原因，图 4-12 给出了停船过程中舵受到的横向力时历曲线。

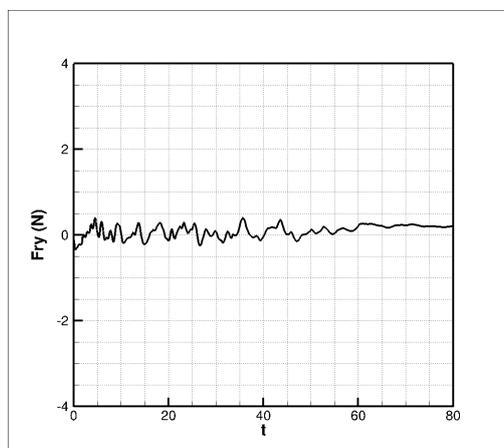


图4-12 舵横向力

Fig. 4-12 Transverse force of rudder

从图 4-12 中可以看出，舵受到的横向力在 0 附近波动，没有提供持续有效的舵力，无法为船提供有效的转舵力矩，这是船舶横向偏移较小的原因之一。

#### 4.2.2.2 流场对比分析

为了研究右满舵操纵对倒车效应产生的影响，下面对停船操纵过程中船尾压力分布进行分析。两种操纵方式下的船尾动压分布如图4-13所示。

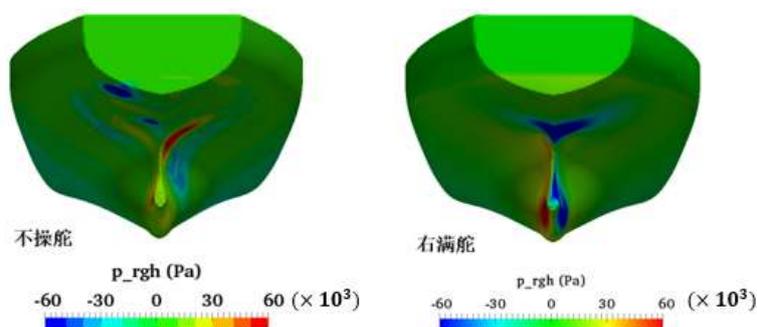


图4-13 船尾压力分布对比

Fig. 4-13 Comparison of pressure distribution

从图 4-13 中可以看出，进行右满舵操纵之后，倒车效应几乎不再存在。右满舵倒车操纵过程中，船尾右侧不再有压力升高的现象，船尾左侧的压力反而略有升高，船尾左右侧的压力差产生将船尾向右推的力，该力形成使船模向左转向的转舵力矩。在右满舵倒车操纵的情况下，螺旋桨排出流与船尾的相互作用产生的横向力与不操舵倒车停船的情况相反，阻碍着船首右转。

然而数值模拟的结果中船模仍向右转向，说明舵提供了更大的使船向右转向的力矩。舵面的压力分布如图4-14所示，其中左图为引流面，右图为背流面。

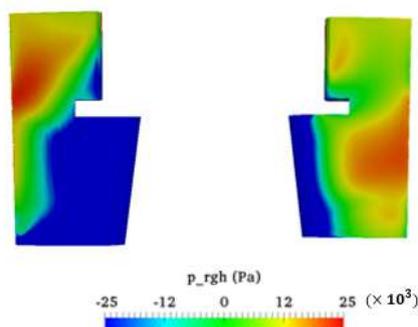


图 4-14 舵面压力分布

Fig. 4-14 Pressure distribution on rudder

从图 4-14 中可以看出，倒转螺旋桨对舵附近流速影响很大，使舵面上形成了较为复杂的压力分布。舵的迎流面后端压力升高，而前端有较大的负压区域。负压区域的产生主要是因为该处靠近倒转螺旋桨，大量的流体被螺旋桨由后方排向前方，所以该处流速较快，压力降低。而舵的背流面压力分布同样复杂，由于螺旋桨对周围流体的影响，舵面产生了正负压交替分布的情况。舵上复杂的压力分布使其效果降低，不能提供有效的转舵力矩。

为了探究右满舵倒车操纵过程中船尾、舵面复杂压力分布产生的原因，下面给出了停船过程中桨、舵周围的流场情况，如图4-15所示。

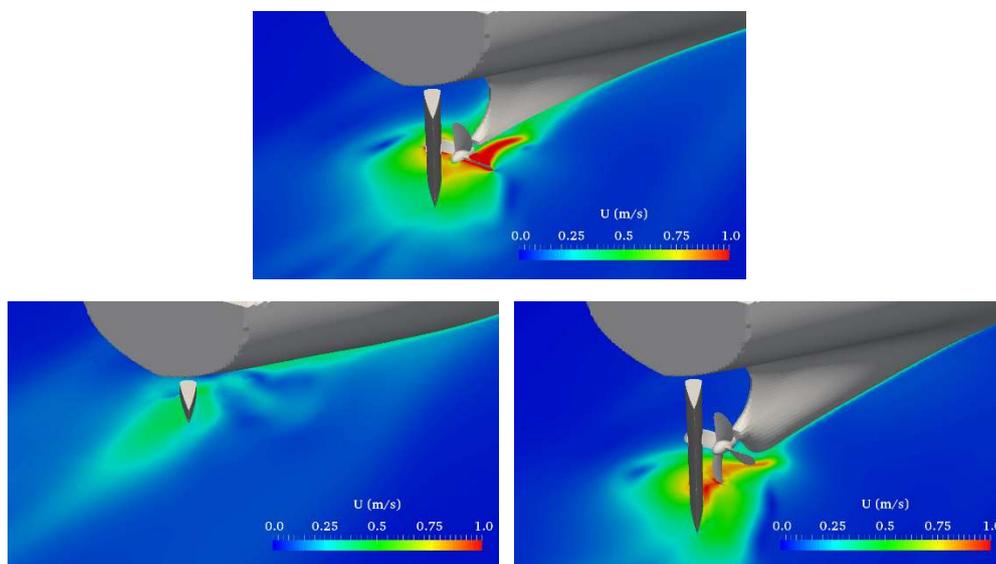


图4-15 舵周围流体速度分布

Fig. 4-15 Speed distribution around rudder

图 4-15 为流体速度分布的水平切面图，三幅图分别为经过舵中间和距舵上下缘 1/5 舵高的切面。相比不操舵的情况，由于右满舵的存在，右侧螺旋桨的进流受到阻碍，降低了右侧排出流的流速，改变了其流向，右侧排出流直接冲击船尾的成分减少，船尾右侧反而因为流速的增加而出现压力降低的情况。

从经过舵中部和下方的水平切面图中可以看出，舵处在螺旋桨后方流速较大

的区域中，舵前后的流体速度没有受到明显的影响，这意味着舵并没有发挥有效的作用。仅有舵上方的流体在经过舵时速度大小发生了小幅改变，在流体与舵的相互作用下，为船模提供右转的转舵力矩。

综合上述对压力和流场的分析，发现在倒车停船过程中采用右满舵操作，会大大削弱倒车效应，同时倒转桨改变了舵周围的流场分布情况，增加了船尾伴流速度，使舵效降低，相比不操舵的方式，右满舵倒车停船操纵中船模的转向幅度反而减小。所以右满舵会使停船纵距和时间增加，而停船横距大幅减小。

### 4.2.3 操舵方式对紧急倒车操纵的影响

下面将不同操舵方式的紧急倒车操纵进行对比，分析各停船参数的变化。船模的运动轨迹对比如图 4-16 所示，纵向速度变化如图 4-17 所示。

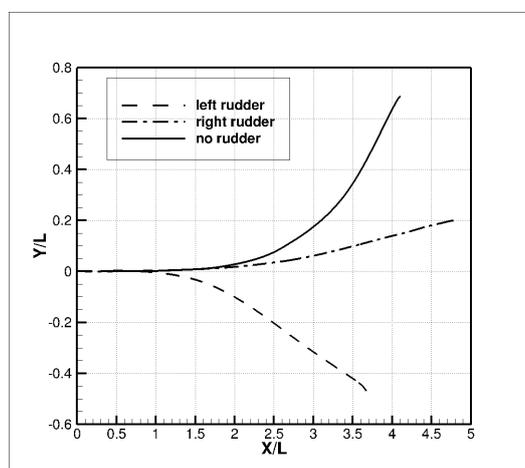


图4-16 船模运动轨迹对比

Fig. 4-16 Comparison of trajectory

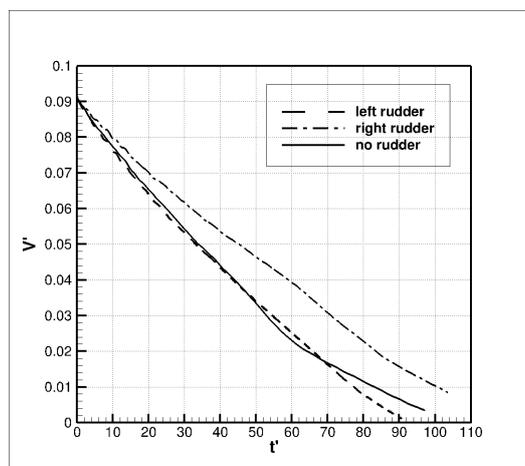


图4-17 船模纵向速度对比

Fig. 4-17 Comparison of longitudinal speed of the ship

从图 4-16 和图 4-17 中可以看出，左满舵倒车停船操纵的停船纵距和停船时间都是最少的；右满舵倒车停船操纵的横向偏移最小，但其停船时间最长。在航道和操纵条件都允许的情况下，左满舵倒车停船操纵拥有较为优秀的停船参数。而当航道的两侧有限制时，可以采用右满舵倒车停船的方式。

### 4.3 本章小结

本章使用基于重叠网格技术的 naoe-FOAM-SJTU 求解器，对 KVLCC2 船模的满舵紧急倒车操纵过程进行了 CFD 数值模拟。

对于左满舵紧急倒车操纵，给出了停船纵距、横距和停船时间与不操舵情况下的对比，结果表明，在紧急倒车操纵的同时向左打舵会改变船的偏移方向，同时减少停船纵距和停船时间。在对左满舵与不操舵情况下停船过程中的流场进行对比分析后发现，由于阻挡了流体向前的流动，左满舵减小了倒车效应，同时舵与流体相互作用，为船提供向左转向的转舵力矩。

对于右满舵紧急倒车操纵，同样对各停船参数进行了对比分析，结果表明，在紧急倒车操纵的同时向右打舵会增加停船距离与停船时间，同时使停船横距大幅减小。在对右满舵与不操舵情况下的停船过程中的流场情况进行对比分析后发现，由于阻挡了右侧流动，右满舵使倒车效应消失，同时由于倒转螺旋桨改变了舵周围的流速分布，增加了船尾伴流速度，导致舵效变差，船受到的转舵力矩反而减小。

对不操舵、左满舵和右满舵三种紧急倒车操纵方式的停船参数进行对比后发现，左满舵倒车操纵具有最小的停船纵距和停船时间，而右满舵倒车操纵的停船横距最小。

本章对左、右满舵紧急倒车的操纵方式进行了数值模拟，将停船参数与不操舵的工况进行了对比，并根据流场情况分析得出了参数变化的原因。下面将继续使用该方法对更多的停船方式进行数值模拟，并对计算得到的停船参数进行对比分析。

## 第五章 停车转舵数值模拟分析

在相对较为开阔的水域，当需要避让的目标距离较远时，或航行中的船舶主机状况与船员操作能力不足以满足复杂的船桨舵配合操纵要求时，通常可以采用停车转舵的方式完成避让任务。停车转舵操纵是在停车操纵的基础上，增加打舵的操作，通过左满舵或右满舵的方式，降低停船的冲程。前文已经介绍过停车操纵的劣势，即停船过程非常漫长，不能作为遇到紧急情况时有效的响应措施，而停车转舵操纵在此基础上增加了对舵的操作，利用一定角度的舵产生的巨大阻力，以及船体转向后产生的斜航阻力，使船尽快停下。在大型船舶的操纵中，这个方法操作简单，对主机和轴系较为温和，同时有着不错的避让效果。

本章使用基于重叠网格技术的 naoe-FOAM-SJTU 求解器，针对 KVLCC2 船模在 3 种水深工况中，船舵配合下的停车转舵操纵进行 CFD 数值模拟。预报停船过程中的纵距、横距等参数，并对停船过程中的船体表面压力、船周流场分布情况进行展示和分析，探究停船过程中产生的现象，并研究浅水对停车转舵操纵的影响。

### 5.1 计算工况与网格

由于 KVLCC2 船模的停车转舵操纵并没有相应的试验数据，为了方便同其他停船方式进行对比，研究停车转舵停船操纵的优劣，将本章停车转舵操纵数值模拟的船模初速度设定与第三章中倒车停船的船模初速度相同。即船模在  $0.4905\text{m/s}$ （对应实船  $10\text{kn}$ ）的初速度下进行停船操纵，当计算流场稳定之后，控制舵在  $1\text{s}$  内达到  $35^\circ$  舵角，之后对船体运动情况进行预报。

由于在停车转舵操纵过程中，静止的螺旋桨对舵效影响较小，并且处于不同位置的螺旋桨对舵的影响大小不同，不便于进行对比分析，所以本章中模拟的停车转舵操纵不考虑螺旋桨的存在，使用仅有船和舵的简化模型。本章中后续会对螺旋桨存在与否的舵周围流场进行对比，进一步说明简化模型的可取性。

#### 5.1.1 深水工况网格

在深水工况中，使用重叠网格方法构建船桨耦合计算模型，以船心为原点划分计算域，其大小为  $-1.5L \leq x \leq 3L$ ， $-1.5L \leq y \leq 1.5L$  和  $-L \leq z \leq 0.5L$ ，其中  $L$  为船长，船首朝  $-x$  方向。将计算域划分为 3 个部分，分别为背景网格，船体网格和舵网格，所有的网格均由 OpenFOAM 自带的网格划分工具 snappyHexMesh 生成，由于停

船操纵时间跨度较长,需要大量的计算资源,故网格数不宜过多,计算采用的背景网格数为82万,船体网格数为293万,舵网格数为52万,全流场计算网格总数为427万,深水工况下的计算域布置如图5-1所示,船体和舵周围网格分布如图5-2所示:

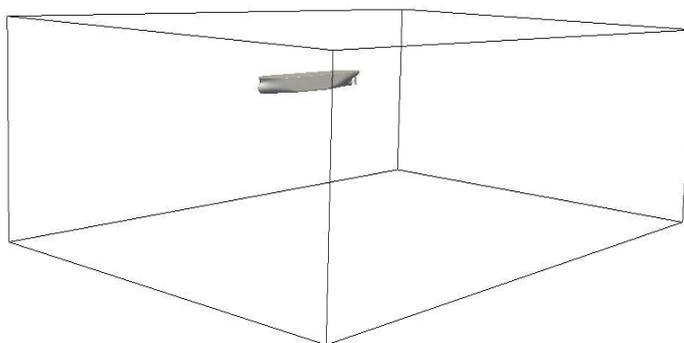


图5-1 深水工况计算域布置

Fig. 5-1 Arrangement of computational domain in deep water

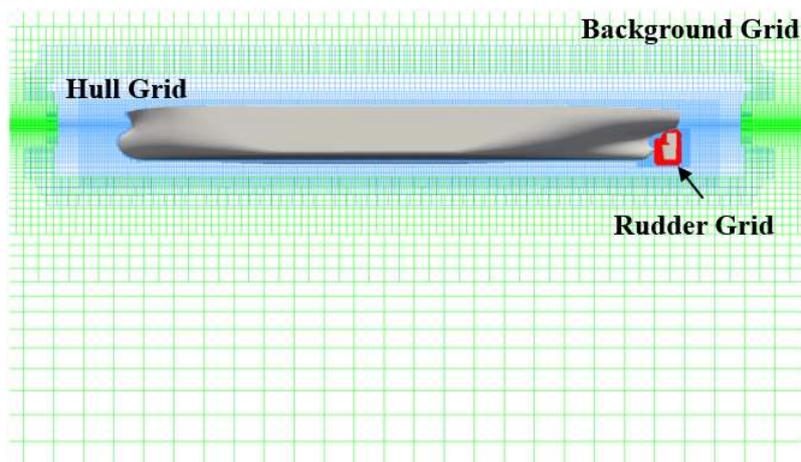


图5-2 深水工况船体周围网格分布

Fig. 5-2 Grid distribution around ship in deep water

为了验证本文中使用的数值方法的可靠性,需要对船模的航行阻力进行数值验证。本文采用naoe-FOAM-SJTU求解器,求解模型在一定航速下的稳定全流场信息,得到模型所受阻力值。

根据NMRI试验水池的试验数据,选取该船的设计航速0.76m/s(对应实船15.5kn)进行数值模拟。计算结果表明,达到预定航速时,数值预报得到的船体所受阻力为2.15N,与NMRI水池的试验值<sup>[100]</sup>2.06N相比仅大了4.37%,误差在5%以内,具有良好的预报精度。所以采用本文中使用的数值计算方法以及该套网格对船模的停车转舵操纵进行数值模拟,可以得到较为可靠的计算结果。

### 5.1.2 浅水工况网格

在浅水工况中，同样以船心为原点来划分计算域，计算域的改动为 Z 方向的尺度，本章中的浅水工况设置会水深等于 1.8 和 1.5 倍船体吃水。另外，计算域底面设置为壁面 (wall)，其表面流体速度为 0。在船底区域，为了增加算例的稳定性，同时精确计算流场的情况，需要对该区域进行进一步的加密，保证计算船与底面之间的流场所需的网格层数。水深 1.8 倍吃水工况中采用的计算域大小为  $-1.5L \leq x \leq 3L$ ， $-1.5L \leq y \leq 1.5L$  和  $-1.5D \leq z \leq 0.5L$ ，其中 D 为吃水。计算采用的背景网格数为 85 万，船体网格数为 285 万，舵网格数为 52 万，最终得到的全流场计算网格总数为 422 万；水深 1.5 倍吃水工况中所采用的计算域大小为  $-1.5L \leq x \leq 3L$ ， $-1.5L \leq y \leq 1.5L$  和  $-1.5D \leq z \leq 0.5L$ ，其中 D 为吃水。背景网格数为 82 万，船体网格数为 285 万，舵网格数为 52 万，最终全流场计算网格总数为 419 万，计算网格如图 5-3 所示，船体周围网格分布如图 5-4 所示：

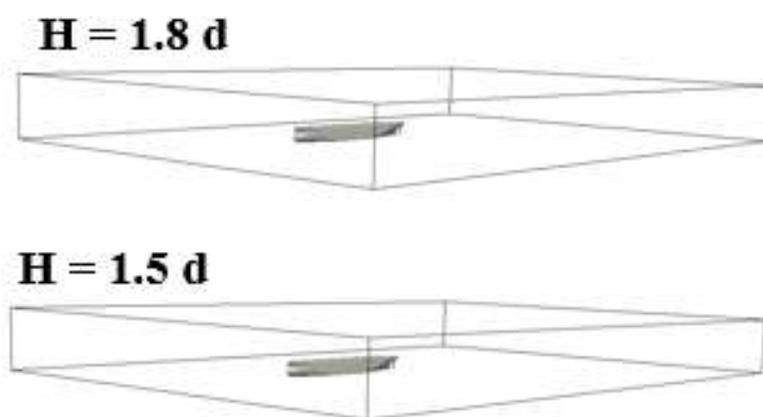


图5-3 浅水工况计算域布置

Fig. 5-3 Arrangement of computational domain in shallow water

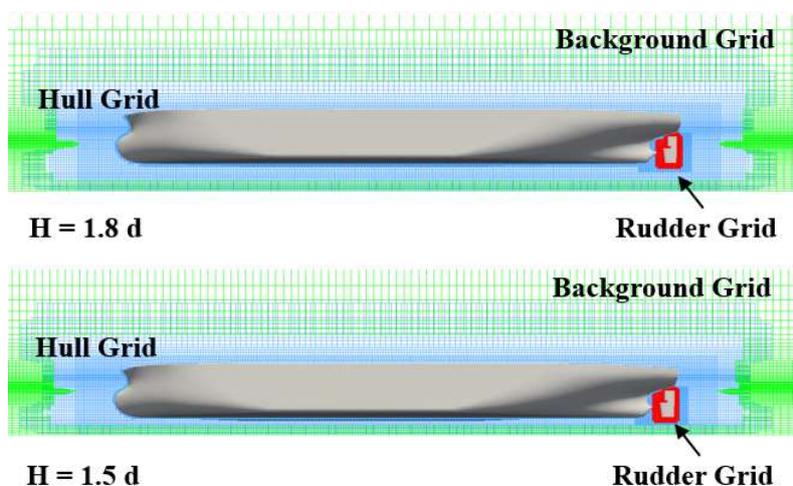


图5-4 浅水工况船体周围网格分布

Fig. 5-4 Grid distribution around ship in shallow water

## 5.2 停车转舵操纵数值模拟结果与分析

### 5.2.1 简化模型对模拟结果的影响

为了证明使用简化模型对船模停车转舵操纵进行数值模拟的可取性,分析带桨与不带静止桨模型在停车转舵操控开始 5 秒后的船尾压力分布、舵面压力分布与舵周围流场分布的对比情况,压力分布对比如图 5-5,图 5-6 所示,流场速度分布对比如图 5-7 所示。

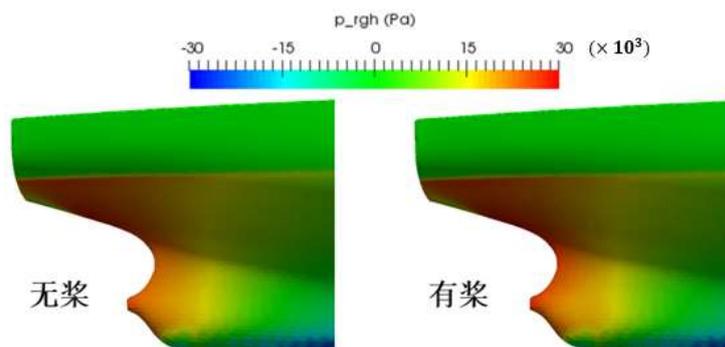


图5-5 船尾压力分布对比

Fig. 5-5 Comparison of pressure distribution on the aft of the ship

从图 5-5 中可以看出,是否使用带螺旋桨的几何模型,在停车转舵操纵中对船尾的压力分布的影响并不明显。

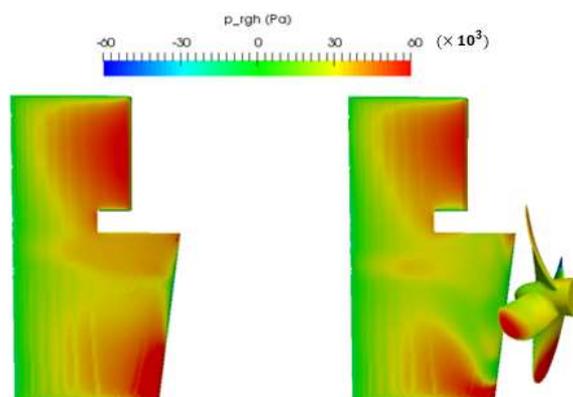


图5-6 舵面压力分布对比

Fig. 5-6 Comparison of pressure distribution on the rudder

此时计算得到的无桨情况下舵横向力大小为 0.632N,有桨情况下舵横向力大小为 0.603N,二者差距较小,为 4.6%。从图 5-6 中可以看出,舵面压力分布有所改变,在舵前方有螺旋桨的情况下,舵迎流面压力略有下降,这会导致舵效略有降低,但是对结果的影响不大。

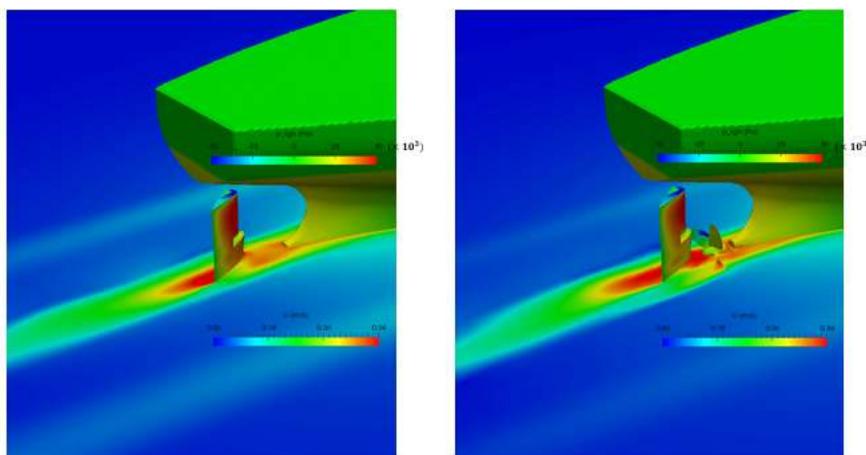


图5-7 舵周围流场速度分布对比

Fig. 5-7 Comparison of speed distribution around the rudder

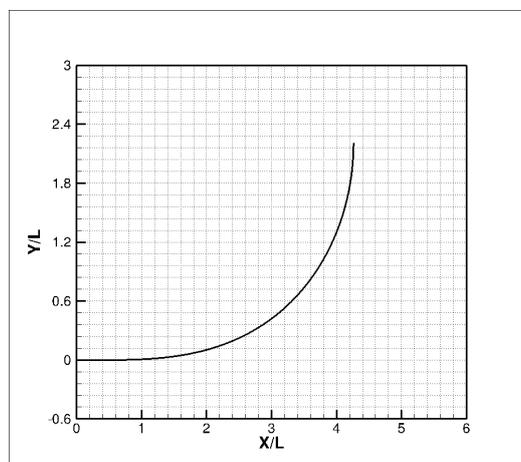
从图 5-7 中可以看出，舵前方存在螺旋桨时，在船尾后方、舵前方的伴流速度略有增加，导致舵的进速降低，这也是舵面压力略有降低的原因。

从上面的对比中，发现静止桨的存在对转舵后的船尾压力分布于流场速度分布影响十分有限，并不会对操纵的整体趋势产生明显的干扰，同时考虑到螺旋桨停止的位置不确定性，在本章中去除螺旋桨模型，对简化后的船舵模型进行数值计算是合理的。

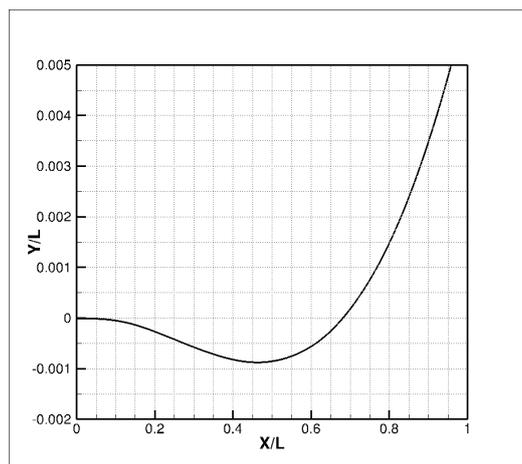
### 5.2.2 深水中停车转舵操纵数值模拟

本章对船模停车转舵操纵的数值计算中时间步长取 $0.0005\text{s}$ ，使用40核高性能计算集群进行数值模拟，计算持续到船模的纵向速度降低为0。完成一个算例大约需要340小时的计算时间。

对深水中船模停车转舵操纵进行 CFD 数值模拟。停船操纵过程中船模的运动轨迹如图 4-5 所示，a 图为深水中进行停车转舵操纵船模的停船轨迹，b 图为转舵操纵刚开始一段时间内局部放大后的船模运动轨迹。



(a) 完整运动轨迹



(b) 局部运动轨迹

图5-8 船模运动轨迹

Fig. 5-8 Trajectory of the ship

从图 5-8 的 b 图中可以看出，在转舵操纵开始后较短的时间内，船舶向转舵方向的反方向略有偏移。为了探究这一反方向偏移现象产生的原因，需要对船体受力进行分析，图 5-9 给出了再操纵开始后的一小段时间内，船舵系统整体受到的横向力的大小。

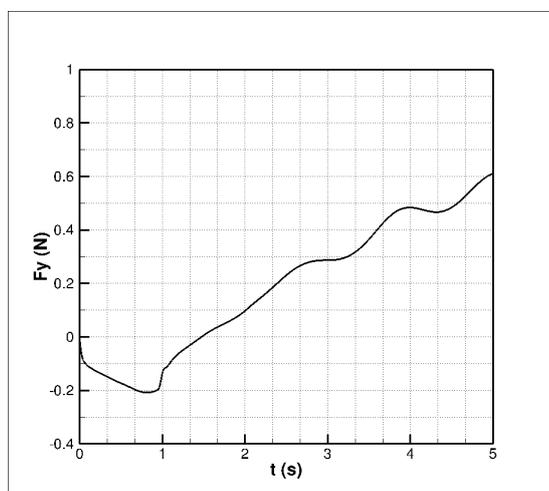


图5-9 船舵系统受到的横向力

Fig. 5-9 Lateral force of the ship-rudder system

从图 5-9 中可以看出，在停车转舵操控开始后的 1.5s 内，船体受到了与转舵方向相反的横向力，而之后船体受到的横向力与转舵方向相同。这是因为在转舵的过程中，运动的舵受到了周围水的反作用力。由于船舶惯矩较大，航向改变慢，该作用力作为外力，作用在船舵组成的系统整体上，使其向受力方向运动。在实际操船中，这一反向偏移的现象需要格外注意。

### 5.2.3 水深对停车转舵操纵的影响

#### 5.2.3.1 停船参数对比分析

本章对深水、 $H=1.8D$  和  $H=1.5D$  ( $H$  为水深,  $D$  为船舶吃水) 三种不同水深工况下的船模停车转舵操纵进行了 CFD 数值模拟。得到的停车转舵操纵船模停船轨迹对比如图 5-10 所示。

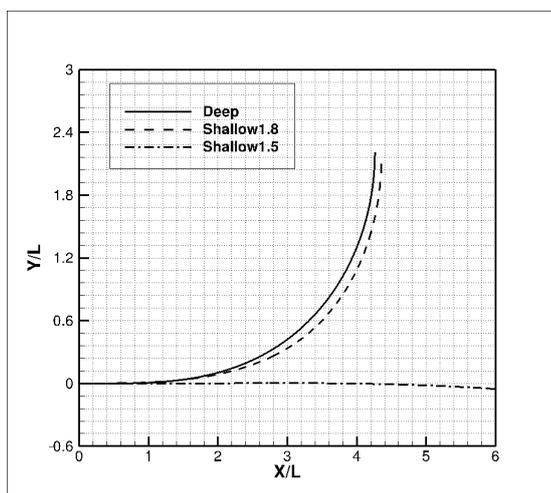


图5-10 不同水深下船模运动轨迹对比

Fig. 5-10 Comparison of trajectory in different water depth

从图 5-10 中发现, 深水工况中船舶具有最小的停船纵距, 当  $H=1.8D$  时, 停船纵距略有增加, 同时横向偏移距离略小。而在  $H=1.5D$  工况下, 转舵操纵没有改变船舶航向, 船模反而向转舵的相反方向略有偏移, 停船距离远大于其他两个工况, 在此工况下的转舵操纵无法达到紧急避让的目的。

船模纵向速度与转角时历曲线如图 5-11 和图 5-12 所示。

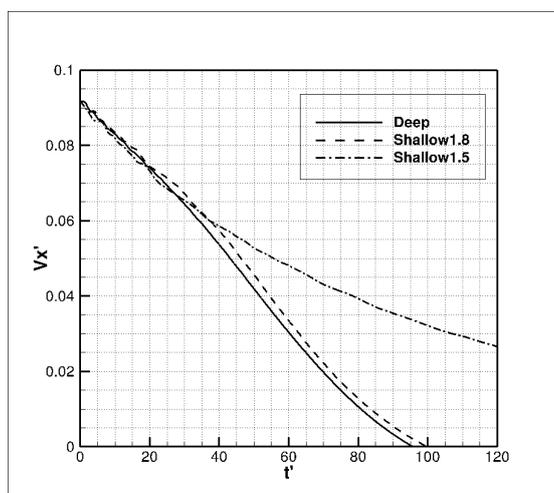


图5-11 船模纵向速度

Fig. 5-11 Longitudinal speed of the ship model

这里使用了前文中提到过的无因次参数。从图 5-11 中可以看出，深水工况下的船舶具有最短的停船时间，当  $H=1.8D$  时，停船时间略有增加，而  $H=1.5D$  工况中的船速降低很慢，从上文中得知该工况下转舵操纵没有按预期改变船舶航向，船舶仅靠自身阻力停下。

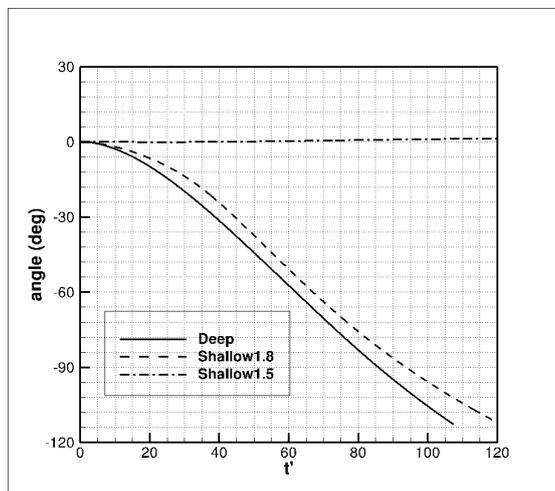


图5-12 船模转角

Fig. 5-12 Turning angle of the ship model

从图5-12中发现，深水工况中船舶转舵速度最快，当 $H=1.8D$ 时，转舵速度略有降低，而 $H=1.5D$ 工况中船舶没有向转舵方向偏转。

船舶受到的摩擦阻力和转舵力矩时历曲线如图5-13和图5-14所示。

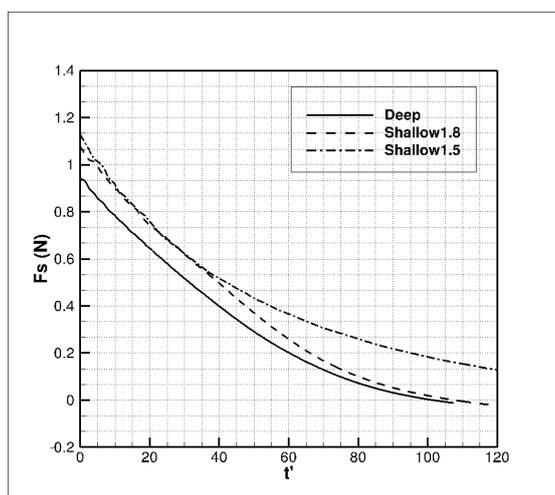


图5-13 船体阻力

Fig. 5-13 Resistance of the ship

从图 5-13 中可以看出，当停船操纵开始时（此时三种工况下航速相同）， $H=1.5D$  工况下船模受到的摩擦阻力最大，深水中船模的摩擦阻力最小。由于浅

水效应，随着水深的变浅，船模受到的摩擦阻力增大，这是因为浅水中水流动受限，会更快速的从船身周围经过，从而增大船体表面的摩擦阻力。

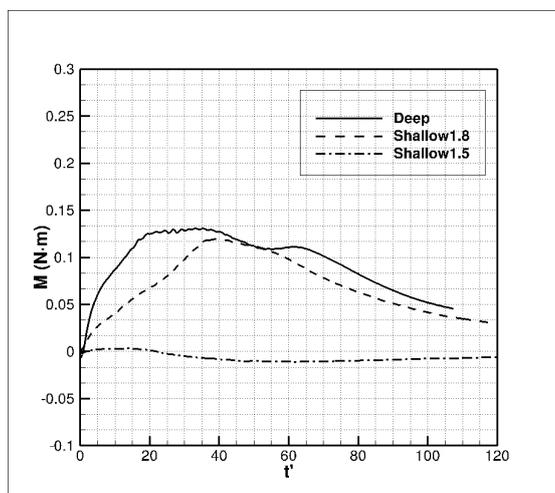


图5-14 船体转矩

Fig. 5-14 Moment of the ship

从图 5-14 中发现，深水中的船受到的转矩最大，而当  $H=1.5D$  时，船几乎不受到转舵力矩。浅水会导致舵效变差，当水深浅至一定程度时，舵效消失。

### 5.2.3.2 流场对比分析

为了分析停车转舵操纵中船舶运动的水动力特征，下面对停车操纵进行后 10s 的流场进行对比分析。不同水深工况下的船周自由液面情况如图 5-15 所示。

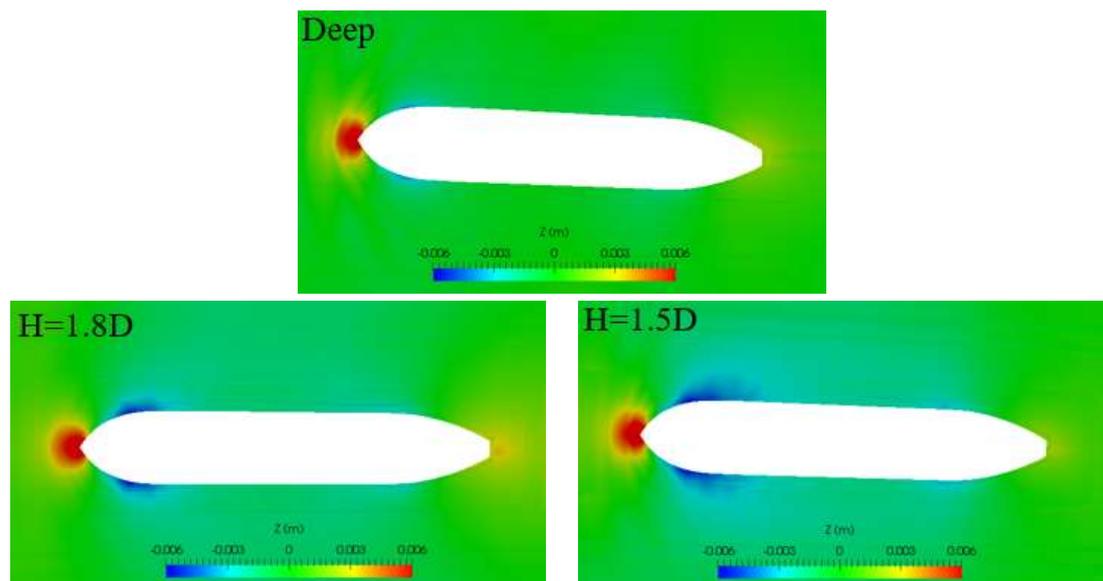


图5-15 自由液面对比

Fig. 5-15 Comparison of free surface

从图 5-15 中可以看出，浅水工况中船艏两侧自由面下降，水深越浅，自由面下降越明显。这是因为浅水工况下船底流动受阻，更多的流体从船两侧经过，流速加快，压力降低，导致自由面发生下降。此外，船侧及船底的压力降低会导致船体下沉，增大船体与水的接触面积，从而导致摩擦阻力的增加。同时船体下沉意味着水深变得更浅，进一步加剧浅水效应。

图 5-16 为转舵完成后船尾及舵面的压力分布。

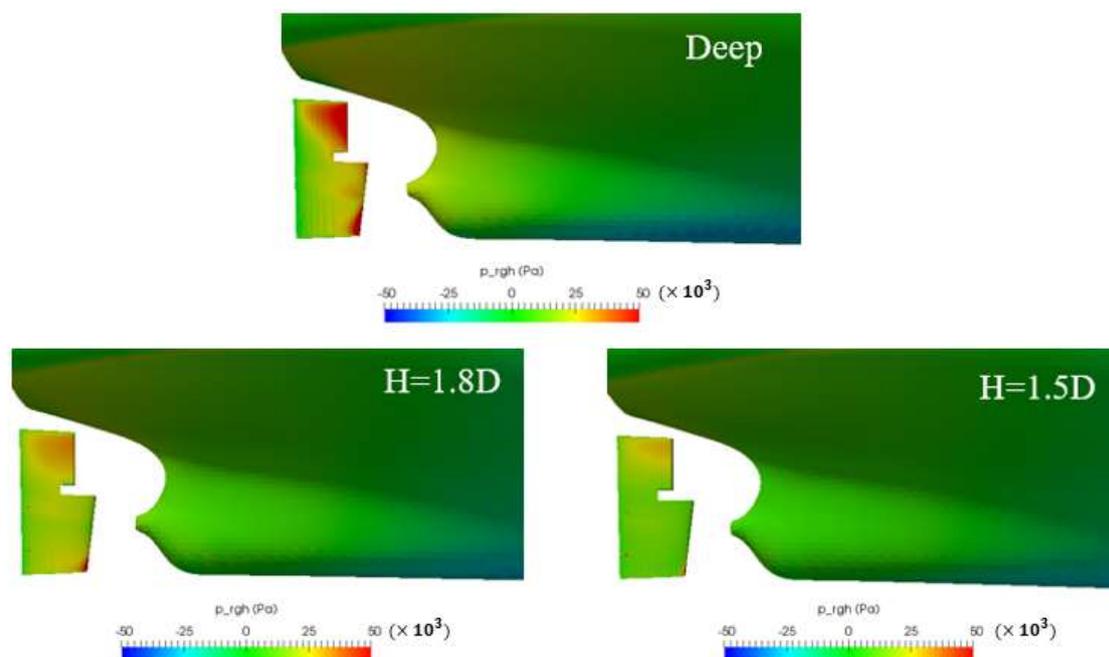
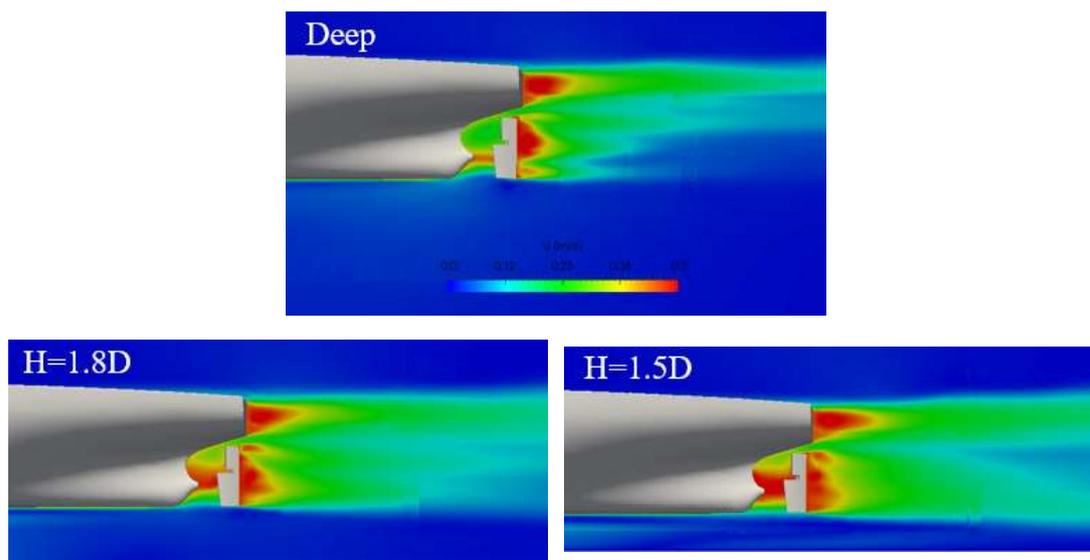


图5-16 船尾与舵面压力分布对比

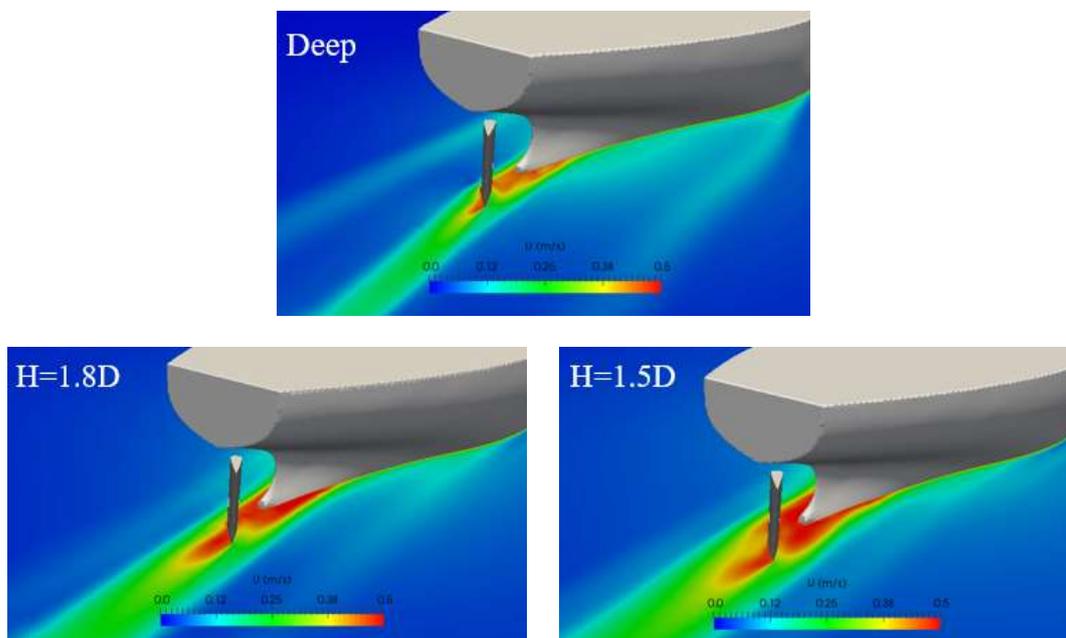
Fig. 5-16 Comparison of pressure distribution on ship tail and rudder

从图 5-16 中可以看出，水深对船壳尾部侧面的压力分布几乎没有影响，而对舵面压力分布影响较大。在深水工况下，一定舵角的舵阻碍流体按原方向的流动，在迎流面压力上升，而背面压力下降，形成压差，产生垂直于舵面的力。该力的分量通过舵与船的连接传递到船尾，推动船尾向某一侧运动，产生转舵力矩，从而起到帮助船舶转向的作用。随着水深的变浅，舵面压力降低，传递过去的船尾侧向力减小，导致转舵力矩减小，此时，转舵操纵的效果会大打折扣。而当水深浅至一定程度时，即本章中的  $H=1.5D$  工况下，舵两侧的压力差非常小，无法提供足够大的侧向力分量，导致舵效基本消失，此时转舵操纵无法改变船舶的航行方向。值得注意的是，正常带桨的船模在水深为 1.5 倍甚至 1.2 倍吃水的情况下，舵仍然能够起到转向的效果，这是因为舵前方的螺旋桨加速了流体，使舵的进速升高，产生压力。而本章中的停车转舵操纵没有桨对流体的加速，舵效在水深为 1.5 倍吃水的情况下就完全消失，说明停车转舵操纵对于水深要求更加严格，在浅水区域应当尤为注意。

为了研究浅水中舵面压力降低的原因，对舵舵周围流体速度分布情况进行研究。不同水深工况下船尾周围流体速度分布的对比如图 5-17 所示。



(a) 船尾流速分布纵剖面图



(b) 船尾流速分布水平剖面图

图5-17 流体速度分布对比

Fig. 5-17 Comparison of free surface

从图 5-17 中可以看出，随着水深的变浅，船尾伴流速度增大，伴流宽度增加，导致舵进速降低，舵面压力下降，舵效变差。在  $H=1.5D$  工况下，舵几乎整个处于船尾高速伴流区域，此时舵两侧的压力差不足以提供足够大的侧向力分量，舵效消失，转舵操纵无法改变船舶航向。

停车转舵操纵通过转舵改变船舶航向，产生较大的舵阻力与船体斜航阻力，从而达到停船的目的，而在浅水中航行的船舶，由于其船尾伴流速度增加，舵效变差，导致停车转舵操纵的效果不佳。

### 5.3 本章小结

本章使用基于重叠网格技术的 naoe-FOAM-SJTU 求解器，针对只带舵的 KVLCC2 船模在深水、 $H=1.8D$  和  $H=1.5D$  三种水深工况中的停车转舵操纵进行了 CFD 数值模拟。

对于深水工况，首先通过流场分析，对比了带桨与不带桨的船模进行停车转舵操纵时船尾、舵面的压力分布和船尾流速分布，说明了采用简化的船舵模型进行数值模拟的合理性。接着，通过对船体受力的分析，解释了转舵操纵之后一小段时间内船向反方向偏移的原因：在转舵的过程中，运动的舵受到周围水的反作用力，该作用力作用在船舵组成的系统整体上，使其向受力方向运动。

对于水深影响，对 1.8 倍和 1.5 倍吃水工况下的停车转舵操纵进行了数值模拟，并将计算结果进行对比，分析了水深对停车转舵操纵的影响。数值计算的结果表明，相较深水工况，在水深为 1.8 倍吃水的情况下，船舶的停船距离变大、时间增加、转舵角度变小；而水深为 1.5 倍吃水时，舵效消失，船模无法通过转舵操纵改变航向。通过对船周自由面、船尾及舵面压力和船尾流场情况的分析，发现在浅水中航行的船舶，由于其船尾伴流速度增加，舵的进速降低，舵效变差，会导致停车转舵操纵的效果不佳。

本章对停车转舵的操纵方式进行了数值模拟，得到了三种水深工况下的停船参数，并对比分析了流场情况。下面将继续使用该研究方法对船模回转规避操纵进行数值模拟，并对预报的运动参数进行对比分析。

## 第六章 回转规避数值模拟及不同停船操纵方式的对比

回转规避即船舶回转操纵的应用,在不改变螺旋桨转速的情况下,进行转舵操纵,通过使船舶转向的方法紧急避让前方障碍。该方法可以很快改变船舶航向,但是在完成避让动作之后仍存在较高的船速,所以需要较为宽阔的海域。

本章使用基于重叠网格技术的 naoe-FOAM-SJTU 求解器,针对 KVLCC2 船模在深水与浅水中的回转规避操纵进行 CFD 数值模拟。预报规避过程中的纵距、横距、避让时间等参数,并对不同水深工况下的船体表面压力、流场分布情况进行展示和分析,探究水深对回转规避操纵产生的影响。最后,将本文中研究的所有深水中的停船操纵方式进行对比,并简要分析优劣关系。

### 6.1 回转规避数值模拟计算工况与网格

为了对比不同停船方式的停船效果,本章回转规避数值模拟的深水工况与前面的章节基本相同。在第三章中,使用 PI 控制器预报的船模在 0.4905m/s 的速度下(对应实船 10kn)的自航点为 10.52r/s,与倒转桨 10.36r/s 的转速相近,本章采用固定转速螺旋桨进行回转规避的数值模拟。先使船模正常航行,固定螺旋桨转速为 10.52 r/s,在流场稳定之后,控制舵在 1s 内达到 35° 右满舵,之后对船体运动情况进行预报。而浅水工况中,为了研究浅水效应对船舶操纵产生的影响,将螺旋桨转速设定为与深水工况中相同,同样在流场稳定之后进行右满舵操作。

#### 6.1.1 深水工况网格

由于同样是对深水中的船桨舵模型进行操纵模拟,本章中深水工况部分与第四章中的工作采用同一套网格,这里不重复进行介绍。

#### 6.1.2 浅水工况网格

在浅水工况中,选用了水深等于 1.5 倍吃水的工况。使用重叠网格方法构建船桨耦合计算模型,以船心为原点划分计算域,其大小为  $-1.5L \leq x \leq 3L$ ,  $-1.5L \leq y \leq 1.5L$  和  $-0.5D \leq z \leq 0.5L$ ,其中 L 为船长, D 为吃水,船首朝-x 方向。计算采用的背景网格数为 86 万,船体网格数为 245 万,桨网格数为 62 万,舵网格数为 52 万,全流场计算网格总数为 445 万,浅水工况下的计算域布置如图 6-1 所示,船体和舵周围网格分布如图 6-2 所示:

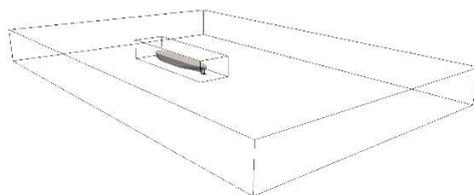


图6-1 计算域布置

Fig. 6-1 Arrangement of computational domain

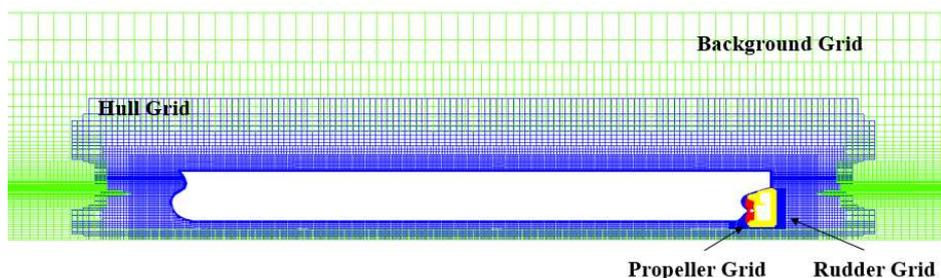


图6-2 浅水工况船体周围网格分布

Fig. 6-2 Grid distribution around ship in shallow water

## 6.2 回转规避数值模拟结果与分析

本章对船模回转规避操纵的数值计算中时间步长取0.0005s，使用40核高性能计算集群进行数值模拟，计算持续到船模的纵向速度降低为0，即船模完成四分之一圈的回转运动。完成一个算例大约需要220小时的计算时间。

### 6.2.1 停船参数对比分析

本章对深水和  $H=1.5D$ （ $H$  为水深， $D$  为船舶吃水）两种水深工况下的船模回转规避操纵进行了 CFD 数值模拟。得到的轨迹对比如图 6-3 所示。

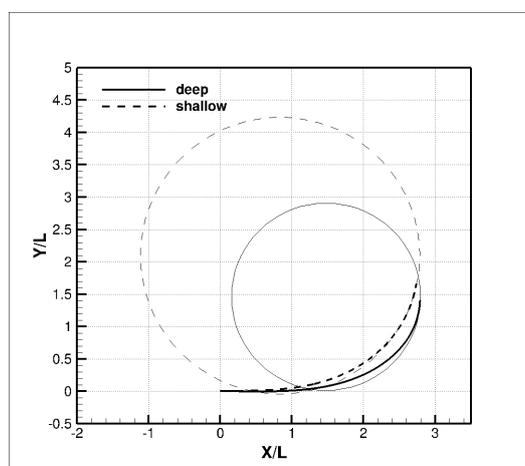


图6-3 不同水深下船模运动轨迹对比

Fig. 6-3 Comparison of trajectory in different water depth

为了方便对比回转半径,图中根据船模计算最后时刻的曲率进行了回转圈的补充。从图 6-3 中可以看出,当螺旋桨转速为 10.52r/s 时,船舶在深水中的回转直径约为 2.9 倍船长,而在浅水中的回转直径约为 4.25 倍船长,浅水中的回转圈直径明显大于深水工况,说明在浅水中船舶的转向性能变差。

不同水深下船模纵向速度的时历曲线如图 6-4 所示。

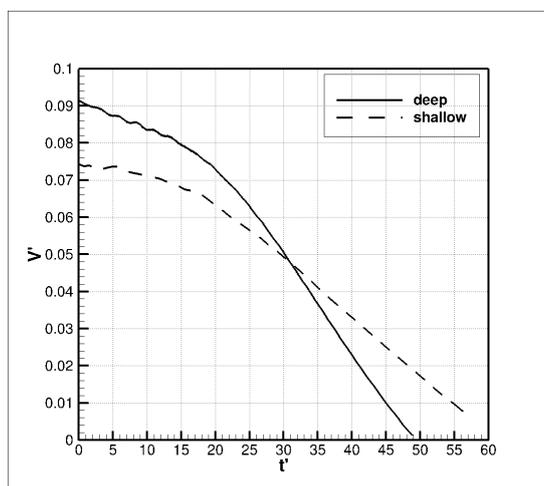


图6-4 船模纵向速度对比

Fig. 6-4 Comparison of longitudinal speed of the ship model

这里使用了前文中提到过的无因次参数。从图 6-4 中可以看出,同样螺旋桨转速的情况下,浅水中的船模航速较低,这是因为浅水效应导致螺旋桨进速降低,推力下降,同时浅水中船体所受阻力更大。在深水中进行回转操纵的船模纵向速度下降更快,说明其航向改变更快,桨、舵配合下的回转操纵效果更好。

回转规避操纵过程中船体受到的转艏力矩时历曲线如图6-5所示。

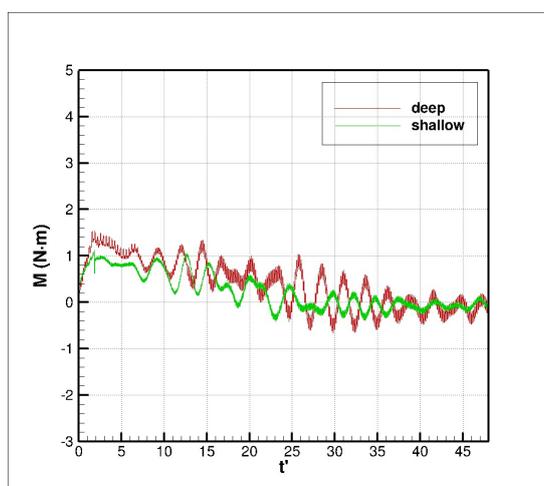


图6-5 船体转矩对比

Fig. 6-5 Comparison of moment of the ship

从图 6-5 中发现, 船模受到的转艏力矩波动较大, 随着时间的推移逐渐降低。这是因为船模在刚开始转向时航速较高, 随着回转操纵的进行, 船体因为受到斜航阻力等额外的阻力而开始减速, 此时螺旋桨与舵的操纵效果逐渐降低, 造成转艏力矩下降。而在浅水中, 由于浅水效应导致桨、舵操纵效果变差, 故船模受到的转艏力矩小于深水工况, 所以浅水中船模的回转直径更大。

为了研究转艏力矩产生差异的原因, 图 6-6 给出了舵受到的横向力对比。

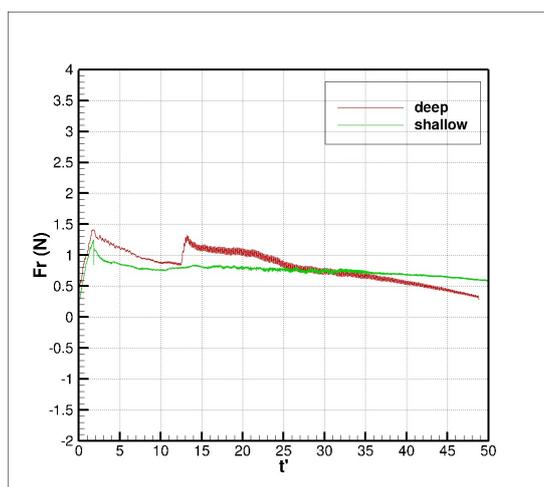


图6-6 舵力对比

Fig. 6-6 Comparison of rudder force

图中舵受到的横向力在大地坐标系下, 所以随着船舶的转向而逐渐减小。从图 6-6 中可以看出, 深水工况中舵效更好, 舵受到的横向力明显更大, 通过结构传递给船身的力矩更大, 所以船体受到的转艏力矩更大。

### 5.2.3.2 流场对比分析

为了分析回转规避操纵中的船体水动力特征, 下面对回转操纵过程中的流场进行对比分析。不同水深工况下的船周自由液面情况如图6-7所示。

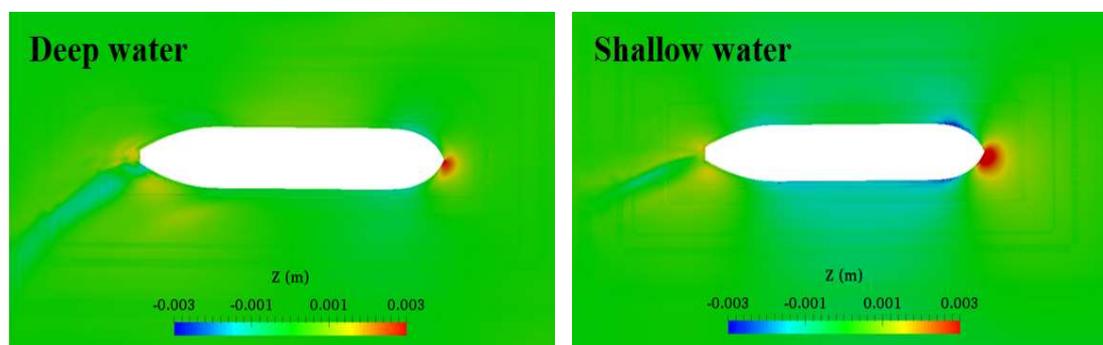
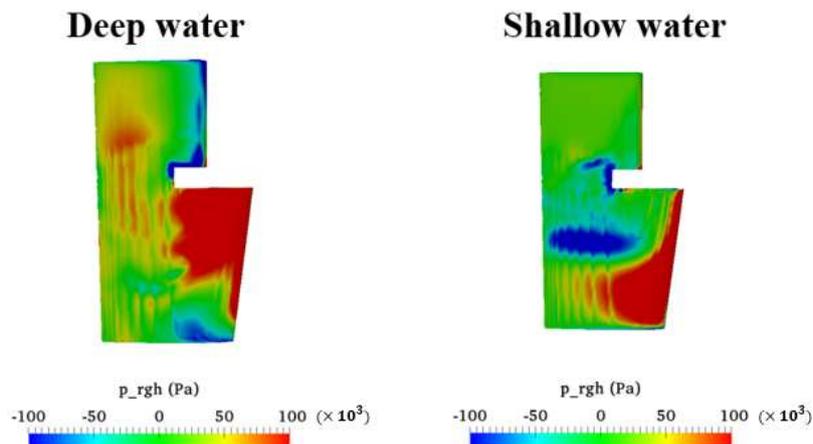


图6-7 自由液面对比

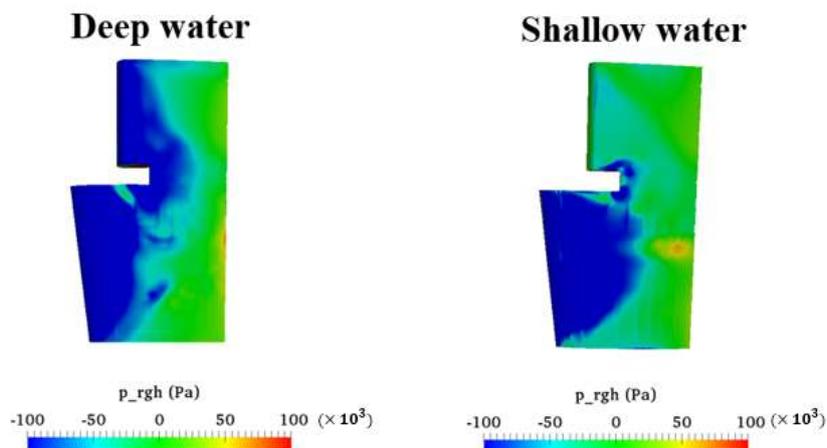
Fig. 6-7 Comparison of free surface

从图 6-7 中可以看出, 浅水工况中船首兴波更高, 这是因为前方的流体需要从各个方向流经船模, 而浅水工况中船底流动受阻, 更多的流体聚集在船首, 造成波高增大。同时浅水工况中船艏两侧自由面下降, 同样是因为浅水中船底流动受阻, 更多的流体从船两侧经过, 流速加快, 压力降低, 导致自由面发生下降。从船尾兴波能够看出因回转操纵而产生的液面波动, 两种工况的差别不明显。

图 6-8 为回转规避操纵过程中舵面的压力分布。



(a) 舵迎流面压力分布图



(b) 舵背流面压力分布图

图6-8 舵压力分布对比

Fig. 6-8 Comparison of pressure distribution on rudder

从图 6-8 中可以看出, 水深对舵面压力分布影响较大。桨后舵受到螺旋桨位置、船尾水流情况的综合影响, 其表面的压力分布具有较大的复杂性和不确定性。但是其整体压力分布还是有规可循的。深水中的舵在迎流面的高压区域面积更大, 在背流面的负压区域面积更大, 所以深水中的舵具有更大的压力差, 能够产生更大的舵力, 从而能够提供更大的转舵力矩。

图 6-9 为回转规避操纵过程中船尾流速在桨附近水平切面上的对比情况。

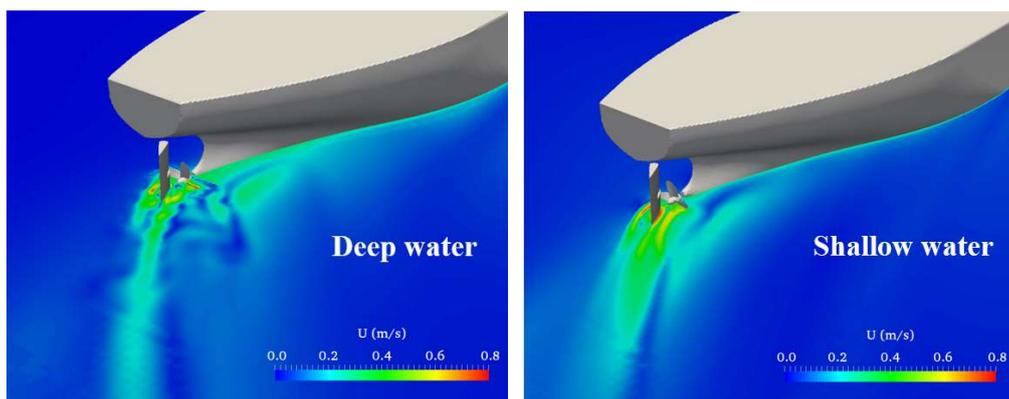


图6-9 船尾流速对比

Fig. 6-9 Comparison of flow velocity after the ship

从图 6-9 中可以看出，浅水中船尾伴流速度增大，伴流宽度增加，导致桨和舵的进速降低，螺旋桨排出流流速降低，造成舵进速减小，舵力也减小，船体受到的转舵力矩减小。所以船舶在浅水中的操纵性能下降，回转直径更大。

回转规避操纵通过快速改变船舶航向的方法，使船舶的纵向速度迅速降低，从而达到紧急避让前方障碍的目的。而在浅水中的船舶，由于其船尾伴流速度增加，桨与舵进速降低，舵效变差，导致回转直径增大，规避能力降低。

### 6.3 不同停船操纵方式计算结果对比分析

将本文中各种停船方式数值模拟的停船参数结果进行对比如下。图 6-10 为停船轨迹的对比，图 6-11 为停船操纵中纵向航速的时历曲线，图 6-12 为停船操纵过程中船模总航速的时历曲线。

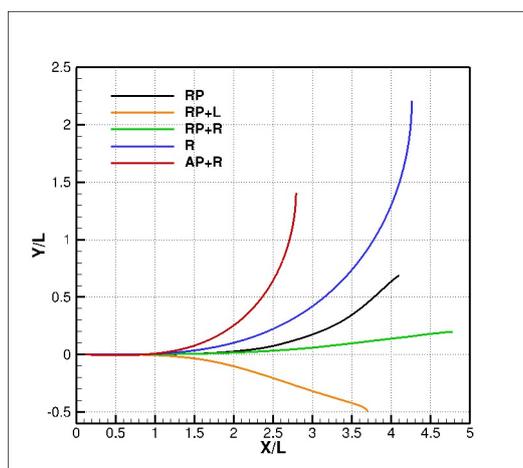


图6-10 停船轨迹对比

Fig. 6-10 Comparison of trajectory

图中使用简化的方式来表示停船方式。其中 RP 为倒车停船操纵 (Reversing Propeller), RP+L 为左满舵倒车停船操纵 (Reversing Propeller + Left Rudder), RP+R 为右满舵倒车停船操纵 (Reversing Propeller + Right Rudder), R 为停车转舵操纵 (Rudder), AP+R 为回转规避操纵 (Actual Propeller + Rudder)。

从图 6-10 中可以看出, 当需要船舶在完成操纵后停下时, 具有最小停船纵距的方式为左满舵倒车停船, 具有最小停船横距的方式为右满舵倒车停船; 若仅是为了对前方障碍进行避让, 不需要船舶停下时, 回转规避操纵的轨迹纵距最小。

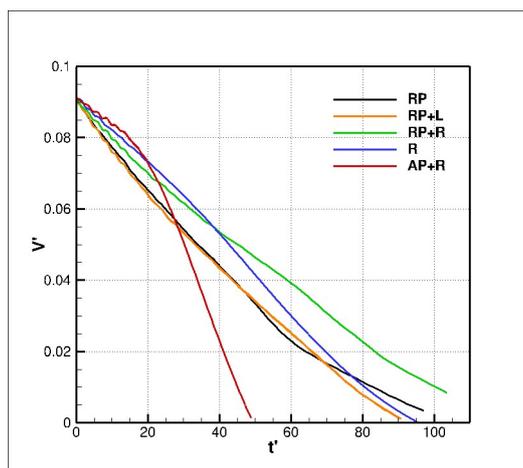


图6-11 纵向船速对比

Fig. 6-11 Comparison of longitudinal ship speed

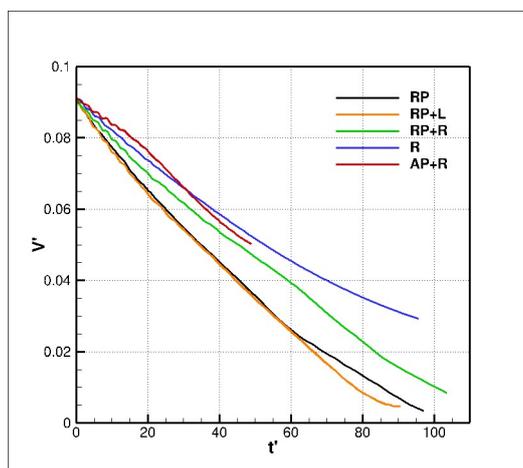


图6-12 总航速对比

Fig. 6-12 Comparison of total ship speed

从图 6-11 中可以看出, 回转规避操纵完成四分之一圈运动所需要的时间最短, 而其他停船方式的停船时间较为接近, 右满舵倒车停船的时间最长。从图 6-12 中可以看出, 当纵向速度降为零时, 回转规避与转舵操纵仍存在较大航速。

为了量化的展示各种停船方式的停船参数对比情况，将图 6-10，图 6-11 和图 6-12 中的参数进行统计，结果如表 6-1 所示。

表 6-1 各种停船方法对比

Table 6-1 Comparison of different stopping maneuver

	纵距/L	横距/L	时间/ $\sqrt{L/g}$	余速/ $V_0$
RP	4.13	0.68	105	0
RP+L	3.71	-0.5	93	0
RP+R	4.78	0.22	126	0
R	4.25	2.23	96	35%
AP+R	2.78	1.39	50	58%

回转规避可以最快的完成避让目标，且具有最小的避让纵距，但是其横距较大，在完成避让动作之后船舶仍具有较高航速，并不是真正意义上的“停船”。左满舵倒车停船操纵的停船参数较为优秀，但是倒转桨对主机的要求较高，对轴系会产生较大的载荷，操作也更加复杂。而操作最为简单、对主机性能要求较低的停车转舵操纵停船横距较大，需要比较宽阔的水域。

当船舶需要达到避让或停下的目的时，需要综合考虑紧急状况的类别、所在区域航道限制情况、船舶类型、桨舵的可操作性等因素，进行停船或避让方式的选择。安全因素是最优先需要考虑的，其次是停船或避让之后的后续处理工作，然后是操纵对设备的损伤程度等等。本文中对各种停船操纵方式进行的数值模拟预报结果，可以为大型船舶停船方式的选择提供有意义的参考。

## 6.4 本章小结

本章使用基于重叠网格技术的 naoe-FOAM-SJTU 求解器，对带有桨和舵的 KVLCC2 船模在深水与浅水工况中的回转规避操纵进行了 CFD 数值模拟，并对本文中数值计算的各种停船操纵方式的停船参数进行了整合对比分析。

在回转规避数值模拟工作中，计算得到了深水与浅水工况下船模的回转直径，并通过船体受到的力与力矩的对比、船尾流场情况的分析，对浅水中回转直径增大的原因给出了解释：由于浅水效应，桨与舵的进速减小，舵效变差，提供的转舵力矩减小，所以船舶在浅水中转向能力变差，回转直径增大。

在对各种停船操纵方式进行对比后得到：当需要船舶完成停船操纵后停下时，左满舵倒车停船具有最小的停船纵距与停船时间，右满舵停船操纵具有最小的停船横距；仅为了避让前方障碍时，不需要船舶完全停下时，回转规避操纵的规避纵距和规避时间最小。

本章对回转规避的操纵方式进行了数值模拟，得到了深水与浅水工况下的停船参数，对比分析了流场情况。并对本文中研究的停船方式进行了综合对比，为大型船舶停船方式的选择提供参考。

## 第七章 结论与展望

### 7.1 论文结论

近年来,为了提升运输效率,船舶正向大型化的方向发展,这使得港口与航道变得拥挤。同时船舶的大型化使得船体本身的可操纵性能降低,导致相撞事故频繁发生。为了确保船舶在航行中的安全,需要对船舶的停船性能进行更为深入的研究。相比传统的数学模型试验,本文采用 CFD 方法对停船过程进行直接数值模拟,在得到停船参数结果的同时,对操纵过程中的流场情况进行分析,为实际操船方式的选择提供参考。

本文使用了课题组基于开源计算流体力学软件 OpenFOAM 自主开发并结合了重叠网格技术的船舶与海洋工程水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU,对 KVLCC2 船模的数种停船操纵方式进行了数值模拟。给出了预报的停船纵距、横距、时间等参数,并分析了停船过程中船体压力分布和船周流场信息。

第三章不操舵紧急倒车操纵的数值模拟有如下结论:

(1)数值预报得到的深水工况下停船纵距为 4.07L,比试验值 4.02L 大了 1.24%;横距为 0.67L,比试验值 0.70L 小了 4.29%;无因次停船时间为 101.3,比试验值 99.5 大了 1.81%。数值预报结果为与试验值吻合良好,误差均在 5%以内,使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对倒车停船操纵问题进行数值预报具有一定的可靠性;

(2)在倒转螺旋桨的作用下,排出流的运动与船尾发生相互作用,右侧排出流受到船尾的阻挡,造成右侧船尾压力升高,从而推动船尾向左,导致船首右偏,产生“倒车效应”;

(3)浅水中倒车停船的停船纵距以及停船时间减小,转艏角度增加;

(4)浅水中船体阻力增大,同时船尾流速增加,倒转螺旋桨进速增大,其排出流与船体的相互作用增强,使船舶受到的纵向力和转矩都增大。

第四章满舵紧急倒车操纵的数值模拟有如下结论:

(1)左满舵紧急倒车会改变船的偏移方向,同时减少停船纵距和时间;

(2)右满舵紧急倒车会增加停船距离与时间,同时使停船横距大幅减小;

(3)桨后舵阻挡了向前的流动,导致倒转螺旋桨的进速降低,在倒车操纵中减小倒车效应;

(4)倒转螺旋桨增加了舵周围的流速,降低了舵的进速,使舵效变差。

第五章停车转舵操纵的数值模拟有如下结论:

(1)对于停车转舵操纵,桨的存在与否对于停船参数和流场的影响不大;

(2)转舵操纵刚开始的一小段时间内,转动的舵受到流体的反作用力,该作用力作用在船舵组成的系统整体上,使船向转舵方向的反方向偏移;

(3)浅水中停车转舵会使停船距离变大、时间增加、转舵角度变小;

(4)浅水中的船尾伴流速度增加,降低舵的进速,使舵效变差,导致停车转舵操纵的效果不佳。

第六章回转规避操纵的数值模拟和对各种停船方式的对比有如下结论:

(1)浅水中船后伴流速度增加,桨与舵的进速减小,舵效变差,提供的推力和转舵力矩减小,所以船舶在浅水中转向能力变差,回转直径增大;

(2)当需要船舶完成停船操纵后停下时,左满舵倒车停船具有最小的停船纵距与停船时间,右满舵停船操纵具有最小的停船横距;

(3)本文中采用的 KVLCC2 船模回转规避操纵的规避纵距和时间最短,但在操纵完成后仍存在较大航速。

## 7.2 研究展望

本文采用课题组开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器数值模拟了各种停船操纵方式,并对停船参数和流场进行了对比与分析。但由于硕士期间科研时间有限,且国内外对于停船操纵进行数值模拟的学者较少,本文的工作处于探索阶段,存在考虑不周、方式不精确等问题。在未来的研究中,可以对以下方面进行改进或继续进一步的研究:

(1)本文第三章中引用的 NMRI 水池的倒车停船操纵试验工况是放开了船舶平面上三个自由度,而其他方向的位移进行了强制固定,为了与试验值对比,本文中数值模拟的自由度也仅放开了平面上的横荡、纵荡和艏摇。而真实情况中,船舶在桨舵配合的操纵下会产生纵摇、横摇、垂荡等方向的运动,对停船的结果产生一定的影响,特别是在浅水工况下,船舶会发生“下蹲”,进一步增加浅水效应。所以接下来的工作可以尝试放开更多的船体自由度,计算船舶的横摇、纵摇等运动幅值,使停船过程更加贴近实际情况。

(2)本文中对于各种停船方式的对比基于船模相同的初始航速与操纵时的螺旋桨转速,螺旋桨转速相同的取法有待推敲。船舶操纵中需要考虑的重要因素之一为主机操作方式,所以采用主机的输出功率相同作为不同停船方式的相同操纵条件是更加合理的,之后的工作可以以主机输出功率相同作为计算工况,对各种停船操纵方式进行数值模拟。

(3)本文中针对大型邮轮 KVLCC2 进行了系列停船操纵的数值模拟,为了方便对比,整篇文章并没有使用其他船型。快艇、渔船等小型船舶发生相撞事故的频率非常高,而大型船舶与小型船舶在操纵性能方面差异很大,本文中得到的相关结论并不能为小型船舶的停船操纵提供建议。所以本文工作可以拓展到更多的船型,对于小型船舶进行系列停船操纵的数值模拟,为航行安全提供参考。

## 参考文献

- [1] 邹早建. IMO 船舶操纵性标准与操纵性预报研究[C]. 全国海事技术研讨会论文集. 2002:537-543.
- [2] International Maritime Organization. Standards for Ship Maneuverability[S], MSC. 137(76).
- [3] 古文贤. 船舶的停船性能[J]. 世界海运, 1995(3):42-44.
- [4] 刘勇, 黄向阳, 刘明俊. 船舶的制动和保向性研究[J]. 武汉船舶职业技术学院学报, 2009, 8(1):9-11.
- [5] 曾亚军. 倒车效应对船舶操纵的影响[J]. 中国水运, 2010(5):58-59.
- [6] 王应强. "倒车效应"对船舶操纵的影响"见或不见"[J]. 中国水运月刊, 2017, 17(6):40-41.
- [7] 陆吉庆. 港口水域航迹带宽度和操纵参数的回归分析[D]. 大连海事大学, 2010.
- [8] 胡云平. 船舶操纵中各种制动效果的比较[J]. 中国航海, 2007(3):13-16.
- [9] 沈定安, 刘洪梅. 大型船舶浅水操纵特性[J]. 船舶力学, 2009, 13(5):727-733.
- [10] 胡惠雅. 改善船舶操纵性能的辅助设备[J]. 机电设备, 1981(12):3-12.
- [11] 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.
- [12] ABS. American Bureau of Shipping: Guide for Vessel Maneuverability[R]. Houston, USA, 2006.
- [13] 谷初藏. 海上试运成绩利用レて任意の后进惰力な推定する方法[J]. 日本航海学会论文集, 1976(55): 25-33.
- [14] 山崎裕作. 船の停止性能に関する基础研究[J]. 关西造船协会志, 1978(168): 17-27.
- [15] 井上正佑, 贵岛胜郎, 田中丰彦. 制限水域における船の減速时运动のシミュレーション[J]. 西部造船协会志, 1980(60):33-45.
- [16] 沈定安, 刘洪梅. 大型船舶倒车制动性能实用预报方法[J]. 船舶力学, 2011, 15(10):1097-1101.
- [17] 徐士友. 多功能水下作业支持船操纵运动仿真[D]. 江苏科技大学, 2016.
- [18] 黄超. 肥大型船舶阻力快速预报方法研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2014.
- [19] 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.
- [20] 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.

- [21] 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.
- [22] Ogawa, A., Kasai, H. On the mathematical model of manoeuvring motion of ships[J]. International Shipbuilding Progress. 1978, 25(292).
- [23] Matsumoto, K., Suemitsu, K. The prediction of manoeuvring performances by captive model tests[J]. Journal of Kansai Society of Naval Architecture. 1980, 176: 11–22.
- [24] Ueno M., Suzuki R., Tsukada Y. Estimation of stopping ability of full-scale ship using free-running model[J]. Ocean Engineering, 2017, 130:260-273.
- [25] 董国祥, 陆惠生. 紧急停船运动数学模型及其仿真研究[J]. 上海交通大学学报, 1996(5):42-48.
- [26] 杨景. 全回转拖轮停船性能建模与仿真[D]. 大连海事大学, 2017.
- [27] 孙洪波. 螺旋桨逆转工况下船舶运动建模与仿真[D]. 大连海事大学, 2007.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Kawamura, T., Miyata, H., Mashimo, K. Numerical simulation of the flow about self-propelling tanker models[J]. Journal of Marine Science and Technology. 1997, 2(4): 245–256.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.

- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Bakker, A., Laroche R.D., Wang M. H, et al. Sliding Mesh Simulation of Laminar Flow in Stirred Reactors[J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 1997, 75(1):42–44.
- [42] Moctar, O., 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] Lübke, L.O. Numerical simulation of the flow around the propelled KCS[C]. In *Proceedings of CFD Workshop 2005*. Tokyo, Japan, 2005: 9–11.
- [46] 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.
- [47] Brewster, P.M., Modelling the wash from a ship's propeller[J]. *Queens University of Belfast*, 1997.
- [48] Kim, J.H., Choi, J.E., Choi, B.J., et al. Twisted rudder for reducing fuel-oil consumption[J]. *International Journal of Naval Architecture & Ocean Engineering*, 2014, 6(3):715-722.
- [49] Dhinesh, G., Murali, K., Ananthasubramanian, V., Estimation of hull-propeller interaction of a self-propelling model hull using a RANSE solver[J]. *Ships & Offshore Structures*, 2010, 5(2):125-139.
- [50] 姚震球, 高慧, 杨春蕾. 基于滑移网格的带螺旋桨艇体尾流场数值分析方法[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 22(2):15-20.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 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.

- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 王超, 黄胜, 常欣, 等. 基于滑移网格与 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型的桨舵干扰性能研究[J]. 船舶力学, 2011, 15(7):715-721.
- [58] 黄鑫, 朱汉华, 安邦. 基于滑移网格的螺旋桨性能分析[J]. 舰船科学技术, 2018(7): 6-10.
- [59] 林育胜. 运用动网格与滑移网格混合技术研究运动水下潜器系统的水动力性能[D]. 华南理工大学, 2016.
- [60] 许璐荣, 万德成. 基于 CFD 毂帽鳍节能机理研究[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. 2017, 长春: 1399-1406.
- [61] 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 Manoeuvring Simulation Methods. Lyngby, Denmark, 2008.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] Yoshimura Y., Mathematical Model for the Maneuvering Ship Motion in Shallow Water[J]. Journal of the Kansai Society of Naval Architects Japan, 1986:41-51.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 赵发明, 高成君, 程海刚. 基于重叠网格的船舶粘流数值模拟[C]. 北京造船工程学会年会. 北京, 2013: 289-302.
- [69] 余泽爽, 毛筱菲. 基于重叠网格 M 型船水气二相流数值模拟研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41(5):864-870.
- [70] 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.
- [71] Shen, Z., Ye, H., Wan, D. URANS simulations of ship motion responses in long-crest irregular waves[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B. 2014, 26(3): 436–446.
- [72] Shen, Z., Wan, D., 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.
- [73] 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.
- [74] Shen, Z., Wan, D. An irregular wave generating approach based on naoe-FOAM-SJTU solver[J]. China Ocean Engineering. 2016, 30: 177–192.
- [75] Wang, J., Zhao, W., Wan, D. 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.
- [76] Wang, J., Wan, D. 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.
- [77] 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, 2016, 31(2):177-187.
- [78] 尹崇宏, 吴建威, 万德成. 基于 IDDES 方法的模型尺度和实尺度 VLCC 阻力预报与流场分析[J]. 水动力学研究与进展, 2016, 31(3):259-268.
- [79] 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.
- [80] 孙晨光, 王建华, 万德成. 基于重叠网格的船模停船操纵 CFD 数值模拟[C]. 第二届“高新船舶与深海开发装备”创新论坛. 武汉, 2018: 258-266.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] 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.
- [84] 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.
- [85] 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.
- [86] 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.
- [87] 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.
- [88] 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.
- [89] Cao, H., Wan, D. 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.

- [90] Ye, H., Wan, D. 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.
- [91] 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.
- [92] Fu, B., Wan, D. 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.
- [93] Duanmu, Y., Zou, L., Wan, D. Numerical simulations of vortex-induced vibrations of a flexible riser with different aspect ratios in uniform and shear currents[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*. 2017, 29(6): 1010–1022.
- [94] Menter, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*. 1994, 32(8): 1598–1605.
- [95] Shih, T.-H., Liou, W.W., Shabbir, A., et al. A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. *Computers & Fluids*. 1995, 24(3): 227–238.
- [96] 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.
- [97] Wilcox, D.C., others. Turbulence modeling for CFD[M]. DCW industries La Canada, CA, 1998, 2.
- [98] Rusche, H. Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions[D]. Imperial College London (University of London), 2003.
- [99] Noack, R.W., Boger, D.A., Kunz, R.F., et al. Sugar++: An improved general overset grid assembly capability[C]. In *Proceedings of the 19th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*. San Antonio TX, 2009: 22–25.
- [100] Fujino, M., Kirita, A. On the maneuverability of ships while stopping by adverse rotation of propeller[J]. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1978, 169:57-70.
- [101] Ueno, M., Suzuki, R., Tsukada Y. Estimation of stopping ability of full-scale ship using free-running model[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 130:260-273.
- [102] Tsukada, Y., Ueno, M., Tanizawa, K. Development of an Auxiliary Thruster for Free-running Model Ship Tests[J]. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 2014, 20:59-67.

## 攻读硕士学位期间已发表或录用的论文

- [1] 孙晨光, 王建华, 万德成. 基于重叠网格的船模停船操纵 CFD 数值模拟[C]. 第二届高新船舶与深海开发装备创新论坛. 武汉, 2018: 258-266.(已发表)
- [2] Sun, C., Wang, J., Wan, D., Effects of Water Depth on Stopping Maneuver using CFD Numerical Simulation[C], The 13th OpenFOAM Workshop (OFW13), June 24-29, 2018, Shanghai, China, pp.336-339.(已发表)
- [3] Sun, C., Wang J., Wan D., Numerical Simulations of Ship Stopping Maneuver with Reversing Propeller[C], the Thirteenth (2018) Pacific-Asia Offshore Mechanics Symposium Jeju, Korea, October 14-17, 2018, pp.257-263.(已发表, EI 收录国际会议)
- [4] 孙晨光, 万德成. 基于重叠网格的船模停车转舵操纵 CFD 数值模拟[C]. 第九届船舶力学会议. 无锡, 2018: 258-266.(已发表)
- [5] 孙晨光, 王建华, 万德成. 基于重叠网格的船模停船操纵 CFD 数值模拟[J]. 中国舰船研究.(已录用, 中文核心期刊)



## 致谢

九百多天的硕士生涯，在落笔瞬间进入尾声。这段时光，说长也长，说短亦短。长在侧卧凝思，形形色色花花叶叶恍如初见，万千思绪涌上心头；短在拂袖而去，酸酸甜甜冷冷暖暖都成过往，他们共同的名字叫做昨天。这一路，需要感恩的太多，表达出来的却太少。

感谢万德成教授，成为我在求知路上的明灯。初入课题组，我就被万老师严谨的工作态度打动，虽然课题组的研究方向特别多，万老师还是认真对待每一位同学。在组会上，万老师会针对每一位同学的定期汇报进行指导，教导我们广泛阅读文献，凡事追求细节，组会经常开到很晚，万老师却一如既往的坚持。在万老师的指导下，我养成了对问题刨根问底，工作追求完美的习惯，不论是在学习阶段，还是今后的工作生活中，从万老师身上学到的这种品质都是难能可贵的。

感谢亲人，感恩父母。在我的高中阶段，对于自己的学习成绩容易满足，偶尔因为粗心而考试失误也不以为意，是我的父母严厉的教导，让我知道了人是为追求更高的目标而生。经过不懈的努力，我才能够进入交大，站在更高的起点上。后来我在交大继续硕士生涯，也是对个人层次的更高追求。站的高，眼界才会更宽，才能看到更加美丽而广阔的世界。

感谢师兄师姐，他们同样是我的“导师”。王建华师兄，现在已经是尊敬的王老师了，在我初入计算流体力学领域手足无措的时候，帮助我寻找研究的方向，我的毕业论文最基础的一篇文献，就是当时他提供给我的，在软件、后处理、分析工作遇到困难的时候，我总是会出现在他的面前，他也非常耐心给我解答，甚至直到我的毕业论文工作，也离不开他的指导。刘聪师兄，与我同一届进入课题组的博士，负责很多我们课题组与研究所合作的项目，由于在同一个研究方向下，我自然就成了他的“小弟”，共同参与到项目工作中。那一段时间，虽然非常辛苦，又是配算例又是写报告，但是也是我学到最多东西的时光，这些软件的使用方法，对问题的解决办法，对现象的分析方法，都是陪伴我度过整个研究生阶段，甚至延伸到将来工作的宝贵财富。还有缪爱琴师姐、夏可师兄、艾勇师兄，都在我向他们请教的时候毫无保留的耐心解答，使我逐渐能够独自的面对难题。

感谢师弟师妹，为我们实验室带来了新鲜的空气，在他们身上，总能看到曾经的自己。郭浩、张晓嵩、余安正，在我们项目节点紧张，工作内容繁重的时候来到了实验室，在教会了他们处理问题的方法之后，为我分担了非常多的项目工作，让我能有更多时间完成自己的科研任务。还有赵旻晟、安筱婷、李勇、李政，在 A402 的大家庭里，时不时为我们带来欢声笑语。

感谢一路同行的同学们，让我在前行的路上不孤单。学着最难的高数，打着最休闲的篮球，后来一起为成为硕士而努力，虽然有人中途离开，但是共同奋斗的身影不会消逝。进入课题组，认识了更多来自五湖四海的同学，大家互相学习，互帮互助，将这个大家庭变得很温馨。许璐荣、陈铠杰、王帝、段鑫泽、宋家琦、李思明、吴迪、漆小舟、陈泰文、谢康迪、田鑫、王哲、李奇、何佳伟、刘鑫旺、邓迪、黄杨、文潇，一起进来的兄弟们，大家商讨研究的方向，参加国际会议，硕士论文开题，承办学术活动，在大家的努力下，课题组变得更加壮大和优秀。还有一直相伴的优秀本科同学们，大家在研究生虽然跟随不同的导师，却依旧宛如一个团体，为母校代言。在即将毕业寻找工作的过程中，大家互相学习，共享经验，无所畏惧，一同为未来喝彩。

最后还需要感谢自己，感谢自己一直以来的努力。学习时的孜孜不倦，科研时的刨根究底，找工作时的不忘初心。自小我就梦想成为一名工程师，在大城市里，过上平凡且幸福的日子，现在看来，这个梦想已然握在手中。毕业之后，我会成为一名汽车工程师，在喜欢的岗位上实现自己的价值。

年年岁岁花相似，仰望艳阳天空，那一抹纯洁的碧蓝依旧如旧时般静好；远眺绿荫小道，两年中留下的点点足迹是否随风而散。有时会在朦胧中醒来，为了根本不存在的迟到而焦急；亦或在闲下来的时光，在回忆过往中怅然若失。可是明天总会到来，那个一腔热血的少年，未来终会变得成熟。回首初见时光，背起行囊，向着朝阳；感慨那时张扬，陷入迷茫，四处寻向；不曾放下梦想，踏着波浪，目视前方；信念无从阻挡，历经沧桑，创造辉煌！