

# 上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

## 学士学位论文

BACHELOR'S THESIS



论文题目：规则波中船舶波浪增阻  
数值计算分析

学生姓名：                    缪宇琦                    

学生学号：                    5130109127                    

专    业：                    船舶与海洋工程                    

指导教师：                    万德成                    

学院(系)：                    船舶海洋与建筑工程学院

## 规则波中船舶波浪增阻数值计算分析

### 摘要

在节能减排的背景下,国际海事组织提出了新的 EEDI 要求,船舶能效的研究引起了关注。波浪增阻的存在会造成额外的燃料消耗以及失速现象,对船舶的耐波性与快速性造成不良影响,提高了经济成本,不利于环境友好。因此想要提高船舶能效,波浪增阻的预报与分析有很重要的实际意义。本文使用基于 OpenFOAM 工具箱的 naoe-FOAM-SJTU 求解器,以 DTC 船模型为研究对象,研究规则波中波浪增阻随波长、航速、自由度的变化规律,并且对波浪增阻的成分进行分析。计算结果表明,DTC 船模型在放开自由度情况下,波浪增阻系数随波长增大,在共振点达到阻力峰值,然后随波长增大数值发生减小;在固定波长,放开自由度情况下,DTC 船模型的波浪增阻整体随航速增大而增大,中长波增加幅度比较大;固定自由度时,波浪增阻变化不明显;在短波时,绕射增阻占据大部分波浪增阻,中长波时,辐射增阻占据主导地位,长波情况下,绕射增阻占比较大。

**关键词:** 波浪增阻, DTC 船, CFD, naoe-FOAM-SJTU

# NUMERICAL SIMULATION AND ANALYSIS OF SHIP ADDED RESISTANCE IN REGULAR WAVES

## ABSTRACT

Under the background of energy saving and emission reduction, International Maritime Organization put forward new requirements of Energy Efficiency Design Index, which made people raise concern about the study on energy efficiency and emission reduction. The added resistance can lead to extra fuel consumption and sometimes speed loss in seaway. It also has negative effects on ship resistance and performance, which may be not environmentally friendly and increase economic costs. As a result, to reach the purpose of improving energy efficient, the prediction and analysis of the added resistance can play an important role. In the paper, by the CFD solver naoe-FOAM-SJTU, the added resistance of DTC is computed and analyzed under different conditions. The results show that with the wave length going up, the added resistance increases until the peak is reached, and then it goes down. When the wave length remains unchanged, the added resistance reflects an upward trend, with ship speed increasing. Moreover, the added resistance varies greatly in longer wave conditions. When the motion of DTC is fixed, the added resistance remains basically unchanged. After analyzing the added resistance, we can also figure out the composition of the added resistance. In short waves, the diffraction component is dominated, while the radiation component plays the most important part in longer wave conditions.

**Key words:** added resistance, DTC, CFD, naoe-FOAM-SJTU

## 目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 波浪增阻定义	1
1.3 波浪增阻研究现状	3
1.3.1 船模试验法	3
1.3.2 理论算法	3
1.3.3 CFD 数值模拟	4
1.4 本文主要工作	5
1.5 本章小结	6
第二章 数值方法与数学模型	7
2.1 控制方程	7
2.1.1 基本控制方程	7
2.1.2 RANS 控制方程	9
2.2 湍流模型	9
2.2.1 湍流模拟方法	9
2.2.2 SST $k-\omega$ 模型	10
2.2.3 近壁面处理	12
2.3 自由面处理	12
2.4 造波与消波	13
2.5 方程离散	13
2.5.1 空间离散	14
2.5.2 时间离散	15
2.5.3 耦合方程求解	16
2.6 求解流程	16
2.7 本章小结	16
第三章 船型参数与计算模型	17
3.1 实船介绍	17
3.2 计算模型	19
3.3 本章小结	19
第四章 DTC 静水算例验证	20
4.1 试验数据	20
4.2 网格划分	21
4.3 数值计算	22
4.4 本章小结	23
第五章 DTC 船波浪增阻数值计算与分析	24
5.1 DTC 船静水与波浪工况对比	24
5.2 波浪增阻与波长的关系	26
5.3 波浪增阻与航速的关系	28
5.4 波浪增阻与自由度的关系	29



---

5.5 波浪增阻成分分析	30
5.6 本章小结	31
第六章 总结与展望	32
6.1 全文总结	32
6.2 研究展望	33
6.3 本章小结	33
参考文献	34
谢辞	36

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景与意义

近年来,随着温室效应的不断加剧,全球气温呈加速趋势不断上升,且增长幅度也逐渐加大<sup>[1]</sup>。为了遏制这一趋势,保护人们赖以生存的环境,节约能源与减少排放已经成为各国关注的重点。中国作为全球排名第二的能源消耗大国,每年耗费大量能源用以支持经济社会的发展,对环境产生了巨大的压力,节能减排措施的施行刻不容缓。各行各业,如汽车、建筑等都在为减少二氧化碳等温室气体的排放而提高技术水平,作为三大运输方式之一的海运业也亟待燃料消耗率的提高<sup>[2]</sup>。在这一背景下,船舶在实际航行中的航海性能引起了关注。如何提高船舶能效,减少船舶在实际海况中的排放成为船舶行业的研究重点。

2011年,国际海事组织环境保护委员会第62次会议,确定了新的EEDI(Energy Efficiency Design Index)<sup>[1]</sup>。EEDI新船设计能效指数,是衡量船舶性能高低的标准,具体可由船舶所消耗能量与船舶实际有效能量在换算为二氧化碳排放量之后的比值表示。新的EEDI的提出为未来船舶能效设立了更高的标准,并且随着时间推移,EEDI数值将继续下降,即二氧化碳的排放会更加严格。为了满足EEDI的高标准,船型设计、新能源技术等领域都需要达到更高的标准。与日本等造船技术发达的国家相比,我国对EEDI的研究尚处于落后的位置<sup>[3]</sup>,只有从满足EEDI的角度出发,加大对船舶能效的研究力度,顺应节能减排的趋势,才能提高我国船舶的业内竞争水平,为未来中国在船舶市场占领一席之地。

为了更好地满足EEDI的要求,只优化船舶在静水状态下的阻力是不能达到大幅提高船舶能效的目的。由于波浪的存在,与在静水中相比,船舶在实际航行中会受到额外的阻力,这部分增加的阻力可能高达静水阻力的30%,并且会造成多余的燃料消耗以及失速现象<sup>[4]</sup>,不容忽视。对船体本身而言,增加的阻力影响船舶耐波性与快速性,严重时对船舶安全性产生消极影响;对海洋环境而言,额外的燃料消耗排放给海洋带来了不必要的污染,碳排放的增加会加剧温室效应,加速全球变暖,与绿色船舶的发展理念相违背;对生产作业而言,民用船舶方面,阻力的增加导致成本的增加,损伤经济效益,军用船舶方面,阻力增加导致的失速现象对其作战性能的发挥产生不良影响,对战役结果产生直接影响。因此,无论是对船舶本身还是对与之相关的经济社会活动而言,波浪增阻的研究都有十分重要的意义。

通过分析波浪增阻的影响要素,我们可以针对各要素对船舶设计进行优化调整,并依据不同的航行状况进行合适的航海要素选择,达到提高船舶能效的目的。总之,波浪增阻的研究可以推进我国在EEDI方面的研究,让船舶能效提升,更好达到国际海事组织提出的要求;同时,减小波浪增阻意味着燃料消耗的减少,有利于环境保护,更加契合绿色船舶与可持续发展的理念;最后,从整体着眼,波浪增阻的研究可以提高我国在船舶市场的竞争力,在节能减排的环境下能更好地在国际市场占领有利位置,获取更大的经济效益。

## 1.2 波浪增阻定义

船舶在有浪的海况中航行时,会发生横摇、纵摇、升沉等现象,并且运动比在静水中频率更高,幅度也更大,同时船体与波浪之间也存在相互作用,因此船体受到的阻力与在静水中相比数值更大,这份增加的阻力就是波浪增阻,或者被称为汹涛阻力,记为 $R_{AW}$ <sup>[5]</sup>。

作为一个物理现象,波浪增阻表现为二阶力,与波幅等要素相关,在船舶在以一定的速

度在海上航行时产生，并且在纵向上与船舶前进方向相反<sup>[6]</sup>。当船舶的前行速度为零时，波浪增阻被看作是纵向漂移力<sup>[7]</sup>。如图 1-1 所示，波浪增阻的数值可以由船舶在有浪的工况下航行时受到的阻力时均值减去其在静水中受到的阻力求得，并且在规则波的情况下，波浪增阻的数值不随时间发生变化，其瞬时值与平均值之差 $\Delta R_{AW}$ 随时间有规律变化。

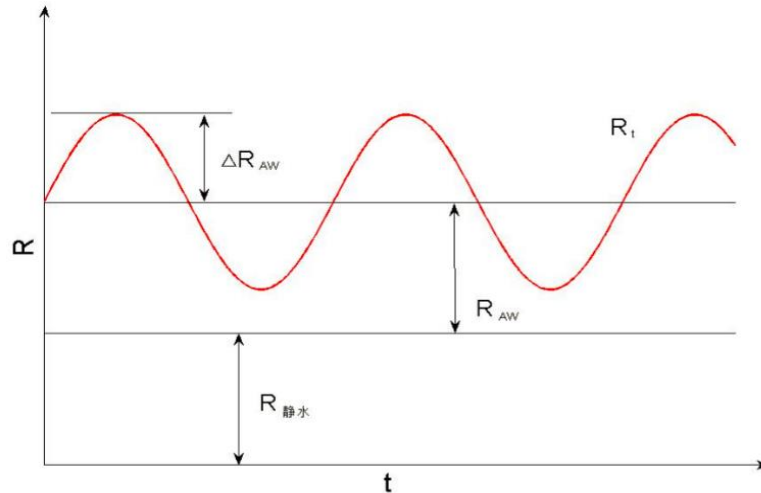


图 1-1 波浪工况下船舶阻力图

一般情况下，波浪增阻可以根据生成方式的不同分为两部分<sup>[8]</sup>。第一部分增阻为由船体的运动引起的波浪辐射增阻，船体在波浪中进行六自由度运动时，会造成辐射波，这部分波所消耗能量使得船体受到的阻力变大；第二部分增阻为船体对波浪的绕射作用引起的波浪绕射增阻，当波浪接触船体时，被船身绕射，于是引起反射水波，这部分水波具有的能量导致了阻力的加大。除此之外，各种波之间的相互干扰也会对船身受到的压力产生作用。因此，波浪增阻大部分由绕射增阻与辐射增阻组成，也存在很小一部分由其他部分构成。为了更加精确得到波浪增阻的数值，我们不将波浪增阻按成分计算，而是一般取船体在波浪中受到的总阻力的时间均值与在静水中阻力的差值进行计算。

由于环境的复杂性，波浪增阻的影响要素非常多，由现有研究来看，影响要素基本上可以分为两大类，即船型要素与波浪要素。

船型要素包括主尺度、方形系数、排水体积，剖面形状，艏部形状、瘦削程度等，由于船型的不同，波浪增阻往往存在很大的差异。就外部结构而言，船艏形状、舵龙骨以及附体的设置，直接影响了波浪与船体接触时造成的压力，船体与波浪之间的相互作用，从而对绕射增阻的数值产生影响，比如与 U 型剖面相比，船艏为 V 型剖面的船舶受到的波浪增阻更小；而船体的船型参数，如剖面形状、浮心重心位置等，影响了船体六自由度下的运动响应，运动幅度的大小直接影响了波浪辐射增阻，比如满载的船舶比压载船舶受到的波浪增阻更小。因此，船型要素的选择对波浪增阻数值的作用十分显著。

波浪要素包括波速、波高、波长以及频率等，由已有船模与实船试验可以得到波浪要素与波浪增阻的相关结论。比如，当波高增加时，船体所受到的波浪增阻也随之增加，具体表现为波浪增阻与波高的平方成正比。特别地，如图 1-2 所示，当波浪周期与船舶纵摇周期接近时，船舶发生纵摇谐振，受到的阻力将达到一个峰值。在不同波长情况下，如短波与中长波，波浪增阻的表现差异也非常大。



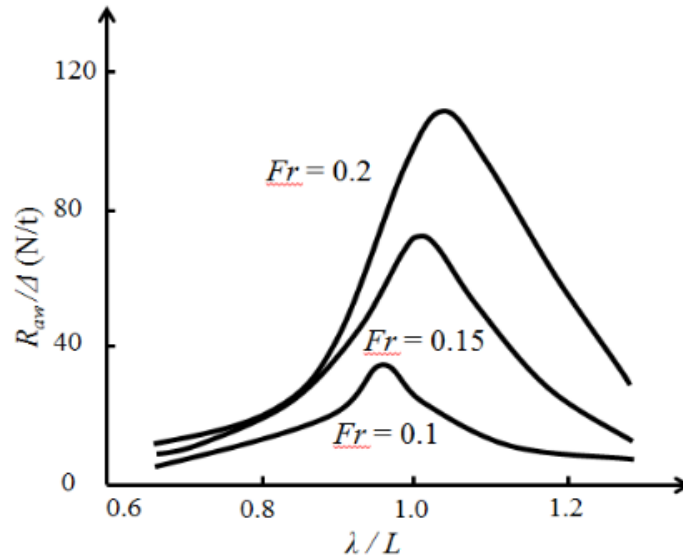


图 1-2 规则波工况下的船舶波浪增阻

### 1.3 波浪增阻研究现状

波浪增阻作为船舶阻力的关键组成，一直是学者研究的重点。国内外已有多种研究波浪增阻的方法，主要有三种，分别为船模试验法，理论计算法与 CFD（Computational Fluid Dynamics）方法数值模拟。

#### 1.3.1 船模试验法

船模试验法是一种研究船舶受力与运动的基本手段。在波浪增阻研究中，船模试验法表现出了很高的精确性以及可靠性，能够得到与实际情况下较一致的结果。但是，如果仅仅使用船模试验法作为波浪增阻的研究手段，将会耗费过多的时间成本与经济成本，不利于多次试验得出规律性的总结。一般情况下，可以将船模试验法得到的试验数据与理论计算数值相结合，从而验证数值方法的可靠性。如冯学知<sup>[9]</sup>等采用船舶波频运动计算程序 SVMP-R，基于 Gerritsma-Beukelman<sup>[10]</sup>方法和 Joosen<sup>[11]</sup>方法，对四种航速下的集装箱船进行了波浪增阻的理论预报，并与船模试验数据对比验证，发现预报结果与模型试验在整个波频范围内吻合良好，验证了 SVMP-R 程序预报功能的实用性，推动了波浪增阻分析预报的研究进展。

#### 1.3.2 理论计算法

理论计算方面进行研究的学者很多，方法也各不相同，其中比较具有代表性的是传统理论计算方法以及由于计算机发展而得到广泛应用的面元法。

传统理论方法主要分为两种，分别是近场法与远场法。远场法基于能量守恒定律进行计算，但是近场法从伯努利方程出发对压力进行积分，从而分析船舶受力情况。远场法与近场法在形式有所差异，但是它们的结果往往一致，能够进行转化。上世纪 40 年代，Havelock<sup>[12]</sup>最早开始着手思考波浪增阻问题。他的研究以近场法为理论方法，计算了船体所受的压力，以及其在规则波中增加的阻力的平均值。他运用了 Froude-Krylov 假设，即流场不因物体扰动发生改变，对自由面积分得到压力值。这部分压力值没有考虑到船体的运动，并不能完整计算出波浪增阻的数值，因此按照他的方法计算得到的波浪增阻数值误差较大。远场法中，1974 年，Maruo<sup>[13]</sup>根据线性势流理论，将速度势分为三部分进行独立研究，分别为入射势、辐射势和绕射势，并且将波浪增阻分为辐射增阻与绕射增阻，推导出了丸尾孟公式<sup>[14]</sup>来计算波浪增阻。Salvesen<sup>[15]</sup>在计算增加阻力的均值时，计入了扰动力，并且保留了力矩的二阶项，这种考虑波浪扰动二阶项的方法提高了船舶运动响应以及阻力估算的精确度，但是未考



虑其它自由度的运动,也没有计算波浪绕射增阻部分,因此对长波情况下的波浪增阻计算适用性较好,但对于短波情况则计算误差较大。短波情况下的波浪增阻研究一直是个难题,因为此时的船体的运动幅度不大,但是波浪的波陡较大,能量的耗散十分严重。此时,波浪绕射增阻在波浪增阻中占据主导地位,不能不计入计算,需要修正处理。1980年, Faltinsen 等<sup>[16]</sup>提出短波渐近理论,研究了波浪对船体以及反射作用于船体的力。2009年国际海事组织环境保护委员会第59次会议上,来自日本的学者提出了计算失速系数的方法。该方法计入了短波的影响,共分为两步,首先使用 Maruo 理论计算得到由船舶运动造成的辐射增阻,再计算短波下船舶绕射增阻修正,相加得到船舶总的波浪增阻数值结果<sup>[17]</sup>。

计算机技术水平的发展使得三维数值计算得到了快速发展。用时域法对波浪增阻进行三维数值模拟的计算方法得到了非常普遍的使用。洪亮<sup>[18]</sup>等人在势流理论下,使用三维移动脉动源格林函数对辐射与绕射作用进行求解,从而得到波浪增阻的数值;杨春蕾<sup>[19]</sup>使用有航速的三维频域方法先对船舶的耐波性进行求解,继而通过三维船体辐射能量法对船舶辐射增阻的数值进行计算。三维数值计算方法中,最具有代表性的是一种以 Rankine 源为基础的面元法。这种算法分析船体在某瞬时的受力情况,将其波浪压力按照湿表面进行积分运算,得到的纵向的分量即为所求的波浪阻力。三维数值模拟计算能够很好计入船型要素对波浪增阻的影响,使计算结果更加合理。1977年, Dawson<sup>[20]</sup>提出了一种线性的兴波数值方法。这种方法基于 Rankine 源,在船体表面与自由面上设置 Rankine 源,从而满足所要求的线性自由面条件与物面条件。朱德祥和陈京普<sup>[21]</sup>将速度势分为已知速度与未知扰动速度这两部分进行分别研究,用面元法研究了船体的运动响应和波浪阻力预测,结果与试验值对比符合较好。

除了传统理论方法与三维数值计算之外,也有部分学者以切片理论为基础,进行波浪增阻研究工作的展开。比如,李建鹏<sup>[22]</sup>等人从 Frank 二维切片理论出发,增加了能量辐射法,对不同航速下的波浪增阻进行了分析,并与试验结果相对比,验证了理论的可行性。

### 1.3.3 CFD 数值模拟

CFD 的具体求解流程可以分为以下几步:首先,建立控制方程,确定计算的初始参数以及边界条件;其次,根据要求划分好计算网格,并且生成计算节点;接着,建立离散方程,对初始条件与边界条件进行离散处理并且求解;然后判断结果是否收敛,收敛则结束计算输出结果,否则继续建立离散方程进行计算,直到收敛。

CFD 的发展以及现如今在各领域的广泛应用离不开计算机的快速发展。船舶 CFD 的应用不但能够节约经济成本和时间成本,更能得到精确的计算结果,为船舶设计质量的提高起了非常重要的作用。

1962年, Hess 与 Smith<sup>[23]</sup>使用叠模绕流的方法,对任意三维无升力物体的势流进行求解。在这之后,计算粘性流体的边界层的方法得到了研究人员的重视,并且接连发展了二维的边界层方法以及三位的薄边界层理论。1980年, ITTC(International Towing Tank Conference)举办了第一次船舶粘性流动数值预报国际研讨会,总结了计算粘性流动的最新方法,方法可以满足船体部分区域要求的工程精度,但是无法满足船体尾部的边界层。经过数十年的发展, CFD 技术发展了到了一定的水平,研究的船型也更加复杂。除了船体本身, CFD 还可以进行同时具有附体。螺旋桨、船舵等情况下的数值计算。2000年,第四次船舶流体力学数值计算国际研讨会举办,采用现代船型作为新的研究模型,推动了 CFD 在实用方向上的进步。如今,计算机技术飞速发展, CFD 方法现在已经成为了研究水动力问题的关键手段。与传统理论计算方法相比, CFD 不需要依赖引进新的数学模型对耦合方程组进行求解,它可以同时考虑船舵桨三者互相影响的情况,并且给出运动与受力情况,从而更加准确分析船体所受到的阻力。同时,与其他方法相比, CFD 方法数值模拟不仅可以充分考虑流体的粘性作用,还可以处理强非线性船舶运动和力的响应预报。

随着 CFD 学科的发展, CFD 软件也逐渐出现, 并且已经在船舶水动力领域得到了广泛应用, 例如 Fluent、star-CCM+, OpenFOAM 等。Simonsen 等<sup>[24]</sup>对 KCS 集装箱船的波浪增阻进行了试验与 CFD 计算, 发现船体运动共振最大时, 波浪增阻达到最大值, 运动响应的 CFD 计算结果与试验结果较符合, 但波浪增阻的预报与试验值误差比较大; 沈志荣和万德成等<sup>[25]</sup>运用基于 OpenFOAM 开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器计算分析了多种船型在迎浪情况下的运动响应, 包括三个航速和不同波长下 WigleyIII 型船模的运动响应与波浪增阻<sup>[26]</sup>, 计算结果和试验结果及势流理论计算结果吻合度较高; 倪阳<sup>[27]</sup>等人采用数值波浪水池技术, 以油船的船模为研究对象, 改变波长获取波浪增阻, 为快速性研究提供了参考; 谢云平<sup>[28]</sup>等人用 CFD 技术对高速船的波浪增阻进行了计算, 使用了动网格技术, 并将数值结果与试验值进行对比, 推动了排水型高速船的波浪增阻研究。

CFD 方法在理论方面的研究已经取得了非常大的进展, 在实用性方面, CFD 也在不断取得进步。C. Yang<sup>[29]</sup>使用 CFD 方法设计消波多体船优化了船舶设计; Tahara<sup>[30]</sup>为了船舶附近的涡的尽可能小, 采用了 CFD 方法对水面的舰球船艏进行设计; Hino<sup>[31]</sup>在优化船型的过程中, 通过 CFD 对控制方程求解, 取得最优设计。虽然 CFD 已经逐步迈向实用化, 但是目前为止, CFD 主要还是用于流场分析以及船舶运动的计算与预报, 在工程中的参与度还不够。由发展趋势来看, 未来 CFD 技术应该会更多融入船舶设计的过程中, 与最优化技术相配合, 为船型的优化计算实现可能。

由上文介绍可看出, CFD 作为水动力研究的常用手段具有很大的优势。与模型试验法相比, CFD 方法省时省力; 与传统理论方法相比, CFD 的计算环境更加贴合真实环境, 能取得更精确的数值解。由现有研究来看, CFD 方法在计算波浪增阻方面也能取得很好的结果。除此之外, CFD 方法无论是可靠性还是精确度都非常高。基于以上优点, 本文也将运用 CFD 方法对波浪增阻进行分析研究。

## 1.4 本文主要工作

本文运用 OpenFOAM 开源工具箱以及 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 以 DTC 船型作为研究对象, 分别改变航速、波长, 以及船体自由度, 计算 DTC 船在不同工况下波浪增阻的数值变化以及运动响应, 分析不同工况下 DTC 船波浪增阻的成分变化以及阻力分布, 并且对结果进行对比分析。

本文的主要工作有以下几个方面:

(1) 阅读参考文献与相关资料, 说明研究课题的背景与意义, 学习掌握波浪增阻的概念, 阐述目前国内外对于波浪增阻的研究现状;

(2) 学习 OpenFOAM 工具箱以及 naoe-FOAM-SJTU 求解器, 叙述求解器的理论基础, 以及模拟求解过程中各种模型的选择;

(3) 介绍本文研究模型 DTC 船型的参数, 并且以 DTC 船为主体进行计算算例, 与试验结果相对比验证求解器的精确性;

(4) 放开自由度, 固定波高, 分别在短波、中等波、长波 3 种情况下, 选取 3 组航速, 研究 DTC 船的波浪增阻与航速的变化关系, 同时对比不同波长情况下的阻力与航速的变化差异;

(5) 放开自由度, 固定波高与航速, 选取 5 组波长, 研究 DTC 船的波浪增阻与波长的变化关系;

(6) 固定自由度, 固定波高与航速, 选取 5 组波长, 研究 DTC 船的波浪增阻与波长的变化关系, 并且与放开自由度的数据进行对比, 研究两种情况下 DTC 船波浪增阻成分变化。

## 1.5 本章小结

本章阐述了选取波浪增阻作为课题的意义与研究背景,并且详细介绍了波浪增阻的概念与产生机理,由此分析了波浪增阻的影响要素。同时,本章回顾了波浪增阻的三大类研究方法,及它们各自的发展历程与研究现状。其中,着重介绍了 CFD 数值计算方法,阐述了选择 CFD 数值方法作为本文研究方法的理由。

## 第二章 数值方法与数学模型

近年来,信息技术的高速发展以及硬件水平的大幅提升,使得计算机成为了备受研究人员青睐的研究工具。随着研究工作中计算机的大规模使用,CFD 方法越来越受到人们的重视,现已成为流体力学领域必不可少的研究手段,在航空、建筑、造船等涉及流体的研究的多种行业中都发挥着非常重要的作用。与其它研究方法相比,CFD 方法能够更真实细致地模拟流场环境,即使是在处理非线性问题时也能得到较为精确的结果。除此之外,CFD 方法能够综合考虑船型要素、流体的粘性作用等因素对结果的影响,就算是很细微的参数改变也能在计算结果中有所体现,有很高的精确度。与传统试验方法相比,CFD 方法利用数值方法,借助于计算机对控制方程进行求解,模拟出的数值结果更加准确,对参数的改变也十分迅速,能够在短时间内进行大量模拟,省时省力,已经在水动力学领域有了广泛应用。

本文采用 CFD 方法进行船舶波浪增阻的数值计算,使用基于开源 CDF 工具箱 OpenFOAM 开发的求解器 naoe-FOAM-SJTU。如图为 naoe-FOAM-SJTU 的框架,由图可知求解器包含多种数学模型与数学方法,其中与计算求解波浪增阻相关的有控制方程,湍流模型、自由面处理、造波与船体六自由度运动求解等,将在下文进行原理的叙述。目前,naoe-FOAM-SJTU 求解器已经用于处理多种问题,包括船舶运动响应计算、波浪增阻等,并且在解决问题的过程中不断优化升级,取得了较多研究成果。例如,沈志荣<sup>[32]</sup>等人,利用 naoe-FOAM-SJTU 研究了一种生成峰不规则波的新方法,并且验证了这种方法的精确度;王建华<sup>[33]</sup>等人基于 naoe-FOAM-SJTU 模拟了标准船模 DTMB5512 的纯摇首运动,验证了数值方法的可靠性;王建华和万德成<sup>[34]</sup>使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器模拟了浮式码头的运动响应,并将受力曲线与静力分析对比,对动力分析方法可靠性进行了验证。

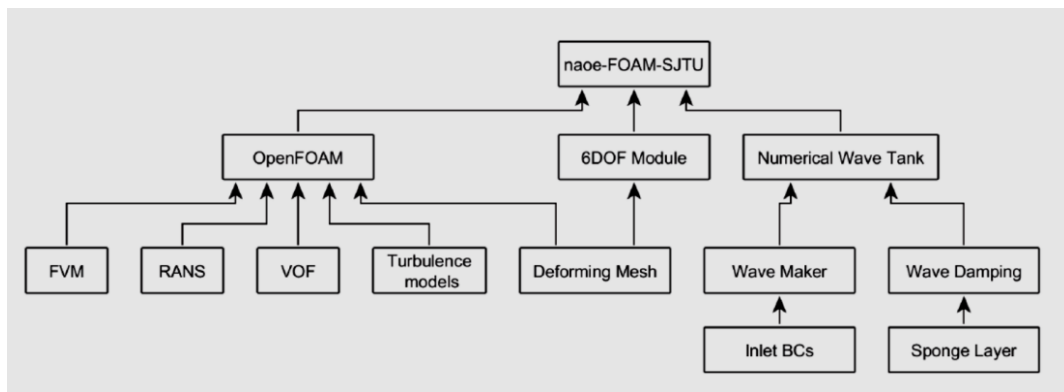


图 2-1 naoe-FOAM-SJTU 结构图

### 2.1 控制方程

#### 2.1.1 基本控制方程

CFD 方法利用了基本控制方程作为基础,再进行模拟计算。基本控制方程包括三种:连续方程、动量方程与能量方程。这三个控制方程都是微分形式,研究对象是无穷小的微团。微团的“微”体现在它能表示出最微小的变化,然而它又包含非常多的流体分子,足够使它本身依然以连续介质的形态存在。由于控制方程研究的对象是每个微团个体,而不是整片区域,因此这些方程并不能反映整个流场的情况。基本方程分为两种形式,分别为守恒形式与

非守恒形式，其中守恒形式方程是对位置固定的微团得到的偏微分方程组，而非守恒形式方程则是对处于运动状态的流体微团偏微分得到的，下面就详细介绍一下三种基本方程的守恒形式与非守恒形式。

(1) 连续方程也叫质量守恒方程，对应的物理原理为质量守恒定律，连续方程的非守恒形式可以表示为：

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2-1)$$

连续方程的守恒形式表示为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2-2)$$

式中， $\rho$ 代表的是流体密度， $\vec{V}$ 代表的是流体速度。

(2) 动量方程又叫动量守恒方程，对应的物理原理为牛顿第二运动定律。动量方程可以分解为三个方向的分量，它的非守恒形式表示为：

x 方向的表达式：

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2-3)$$

y 方向的表达式：

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (2-4)$$

z 方向的表达式：

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (2-5)$$

动量方程的守恒形式表示为：

x 方向的表达式：

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2-6)$$

y 方向的表达式：

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (2-7)$$

z 方向的表达式：

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (2-8)$$

式中， $\rho$ 表示流体密度， $\vec{V}$ 表示流体速度， $u$ ， $v$ ， $w$ 和 $f_x$ ， $f_y$ ， $f_z$ 分别表示流体速度 $\vec{V}$ 和体积力在  $x$ ， $y$ ， $z$  三个方向上的分量， $\tau_{ii}$ 表示  $i$  方向上的正应力， $\tau_{ij}$ 表示切应力， $i$  代表切应力所在平面的法向量， $j$  代表切应力所指方向。

(3) 能量方程又叫能量守恒方程，对应的物理原理为能量守恒定律。

能量方程的非守恒形式表示为：

$$\begin{aligned} \rho \frac{D}{Dt} \left( e + \frac{V^2}{2} \right) &= \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &\quad - \frac{\partial(\rho u p)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v p)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho w p)}{\partial z} \\ &\quad + \frac{\partial u \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial u \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial u \tau_{zx}}{\partial z} \end{aligned} \quad (2-9)$$



$$\begin{aligned}
 & + \frac{\partial v\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial v\tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial v\tau_{zy}}{\partial z} \\
 & + \frac{\partial w\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial w\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial w\tau_{zz}}{\partial z} \\
 & + \rho \vec{f} \cdot \vec{V}
 \end{aligned}$$

能量方程的守恒形式表示为:

$$\begin{aligned}
 & \rho \frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[ \rho \left( e + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \right] \\
 & = \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\
 & - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} - \frac{\partial (wp)}{\partial z} \\
 & + \frac{\partial u\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial u\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial u\tau_{zx}}{\partial z} \\
 & + \frac{\partial v\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial v\tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial v\tau_{zy}}{\partial z} \\
 & + \frac{\partial w\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial w\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial w\tau_{zz}}{\partial z} \\
 & + \rho \vec{f} \cdot \vec{V}
 \end{aligned} \tag{2-10}$$

式中,  $\rho$ 表示流体密度,  $\vec{V}$ 表示流体速度,  $u, v, w$ 和 $f_x, f_y, f_z$ 分别表示流体速度 $\vec{V}$ 和体积力 $\vec{f}$ 在  $x, y, z$  三个方向上的分量,  $\tau_{ii}$ 表示  $i$  方向上的正应力,  $\tau_{ij}$ 表示切应力,  $i$  代表切应力所在平面的法向量,  $j$  代表切应力所指方向,  $\dot{q}$ 是单位质量的体积加热率;  $T$ 代表流体温度;  $e$ 代表流体的微团内能。

### 2.1.2 RANS 控制方程

在进行数值模拟计算时,流体的粘性一般会纳入考虑。这种情况下,流体就被认为是非定常、不可压的。本文采用的流动控制方程为 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 方程,具体表达式如下:

连续方程表示为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2-11}$$

动量方程表示为:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu s_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) \tag{2-12}$$

式中,  $x_i, u_i$ 分别表示位置分量和速度分量;  $\rho$ 表示密度,  $t, p$ 分别代表时间与压力;  $\mu$ 为流体的动力粘性系数;  $s_{ij}$ 为应变率张量,计算公式为:

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{2-13}$$

RANS 方程用时均量来表示瞬态变化的脉冲量,使得方程另一端产生新的雷诺应力项,从而方程组不封闭无法求解。要求解方程,则需要添加新的湍流模型。

## 2.2 湍流模型

### 2.2.1 湍流模拟方法

湍流是空间与时间上无规则的一种非线性流体运动,流动状态非常复杂难以分析,是流

体力学中研究的难点,主要表现在湍流的随机性、有旋性以及统计性。湍流的描述基础是 NS (Navier-Stokes) 方程,根据 NS 方程对湍流处理的尺度的不同,可以划分出四种方法,分别为直接数值模拟 (Direct Numerical Simulation, DNS)、雷诺时均数值模拟 (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS),大涡模拟 (Large Eddy Simulation, LES) 与离散涡模拟 (Discrete Vortex Simulation, DVS)。其中雷诺时均数值模拟又包含 k-ε 模型、RSM (Reynolds Stress Model) 模型、SST (Shear-Stress-Transport) 模型等。

直接数值模拟不使用湍流模型,可以由瞬时流场获取湍流瞬时运动量在三维流场中的时间演变,通过求解 NS (Navier-Stokes) 方程能够得到数值结果。然而大雷诺数湍流运动不是非常稳定,并且信息量过大。对技术的要求也很高,这些因素使得直接数值模拟方法并不适用于需要求解复杂流动的实际工程。

大涡模拟将小尺度的涡与大尺度涡分开处理。主要处理方法为对大涡导出近似的方程,以及建立模型对小涡模拟。这种方法直接模拟湍流脉动部分,平均 NS 方程,对高阶项的反映并不精确,并且需要较高水平的计算机水平。虽然大涡模拟已经成为研究湍流的重要方法,但还是存在缺点。

现阶段,研究工程问题时,主要运用的方法是雷诺时均数值模拟。其中湍流模型可分为两类,分别为雷诺应力模型与涡粘性模型。这两种模型在求解时都会引入新的未知量,因此需要增加方程数量使得方程封闭,得以求解。雷诺应力模型用方程表征应力,再与 RANS 方程联立求值;涡粘性模型首先假设湍流脉动的附加值,再与其它方程联立求解。本文采用的是涡粘性模型,根据 Boussinesq 的理论<sup>[35]</sup>,用基础平均量与涡团粘度表示雷诺应力,通过求解基础平均量与涡团粘度即可得到雷诺应力的各部分数值。由涡团粘度需要的方程数量的不同,可将涡团粘度划分出四种不同模式:零方程模式、半方程模式、一方程模式与两方程模式。工程上经常采用一种两方程模式湍流模型,叫做 SST k-ω 模型。这种模型对湍流参数变化敏感,能较好求解远场处自由流动问题,并且较好处理逆压力梯度和流动分离。本文波浪增阻数值模拟过程中选用的就是这种 SST k-ω 模型。

### 2.2.2 SST k-ω 模型

SST k-ω 模型中, k 表示湍流动能, ω 表示流体比耗散率,即湍流动耗散率 ε 与湍流动能 k 的比率。

SST k-ω 模型是基于 Wilcox k-ω 模型的改进模型,很好结合了 k-ω 与 k-ε 模型这两种模型的优点。SST k-ω 模型根据边界的不同改变了计算方法,如靠壁面处使用了 Wilcox k-ω 模式,边界层处使用了 k-ε 模型,中间部分则用混合函数以起到过渡作用。

SST k-ω 输运方程表示为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \overline{G_k} - Y_k \quad (2-14)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \overline{G_\omega} - Y_\omega + D_\omega \quad (2-15)$$

其中,  $\Gamma_k$  为 k 的有效扩散率,  $\Gamma_\omega$  为 ω 的有效扩散率,计算式如下:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k}, \quad \Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\omega} \quad (2-16)$$

式中,  $\sigma_k$  代表 k 的湍动普朗特数,  $\sigma_\omega$  代表 ω 的湍动普朗特数,表达式为:

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1/\sigma_{k,1} + (1-F_2)/\sigma_{k,2}} \quad (2-17)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1/\sigma_{\omega,1} + (1-F_2)/\sigma_{\omega,2}} \quad (2-18)$$

湍动粘度  $\mu_i$  可由下式计算得到:



$$\mu_i = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max[1/\alpha^*, SF_2/\alpha_1 \omega]} \quad (2-19)$$

式中， $S$ 表示为平均张力应变率系数，可由下式表达：

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ji}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2-20)$$

系数表达式如所示：

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left( \frac{\alpha_\infty^* + Re_i/R_k}{1 + Re_i/R_k} \right) \quad (2-21)$$

其中， $Re_i = \frac{\rho k}{\mu \omega}$ ， $R_k = 6$ ， $\alpha_\infty^* = \frac{\beta_i}{3}$ ， $\beta_i = 0.072$ 。

混合函数  $F_1$  表示为：

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (2-22)$$

混合函数  $F_2$  表示为：

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (2-23)$$

混合函数中

$$\Phi_1 = \min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2}\right] \quad (2-24)$$

$$D_\omega^+ = \max\left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i}, 10^{-10}\right) \quad (2-25)$$

$$\Phi_1 = \max\left(2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right) \quad (2-26)$$

其中， $\overline{G_k}$ 是湍动能的产生项，表达式为：

$$\overline{G_k} = \min(G_k, 10\rho\beta^*k\omega) \quad (2-27)$$

$$G_k = \mu_i S^2 \quad (2-28)$$

$G_\omega$ 表示耗散率的产生项，计算公式如下：

$$G_\omega = \frac{\alpha}{v_i} G_k \quad (2-29)$$

其中， $\alpha$ 可由下式计算得到：

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left( \frac{\alpha_0 + Re_i/R_\omega}{1 + Re_i/R_\omega} \right) \quad (2-30)$$

式中， $R_\omega = 2.95$ ， $\alpha_\infty$ 的表达式为：

$$\alpha_\infty = F_1 \alpha_{\infty,1} + (1 - F_1) \alpha_{\infty,2} \quad (2-31)$$

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{i,1} \sqrt{\beta_\infty^*}}, \quad \alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{i,2} \sqrt{\beta_\infty^*}} \quad (2-32)$$

$Y_k$ 代表湍动能  $k$  的耗散项， $Y_\omega$ 代表 $\omega$ 产生的耗散项，表达式为：

$$Y_k = \rho\beta^*k\omega \quad (2-33)$$

$$Y_\omega = \rho\beta\omega^2 \quad (2-34)$$

其中， $\beta = \beta_i [1 - \frac{\beta_i^*}{\beta_i} \zeta^* F(M_i)]$ ， $\beta_i = F_1 \beta_{i,1} + (1 - F_1) \beta_{i,2}$ 。

$F(M_i)$ 的计算公式为：

$$F(M_i) \begin{cases} 0 & M_i^2 < M_{i0}^2 \\ M_i^2 - M_{i0}^2 & M_i^2 \geq M_{i0}^2 \end{cases} \quad (2-35)$$

式中， $M_i^2 = \frac{2k}{a^2}$ ， $M_{i0} = 0.25$ ， $a = \sqrt{\gamma RT}$ ，在高雷诺数模型中， $\beta_i^* = \beta_\infty^*$ ，可

压缩形式中,  $\beta^* = \beta_i^*$ 。

参数取值如下:

$$\alpha_i^* = 1, \alpha_\infty = 0.52, \alpha_0 = 1/9, \beta_\infty^* = 0.09, R_k = 6, \zeta^* = 1.5, \sigma_{k,1} = 1.176, \\ \alpha_{\infty,1} = 2.0, \alpha_{k,2} = 1.0, \sigma_{\omega,2} = 1.168, a_1 = 0.31, \beta_{i,1} = 0.075, \beta_{i,2} = 0.0828, \kappa=0.41。$$

### 2.2.3 近壁面处理

在处理湍流问题时,壁面的处理至关重要。壁面不但要满足无滑移的条件,还能对湍流特性产生影响。比如,在近壁面区域,流体的粘性切向脉动将变小,同时,流体之间动能的交流也会使得垂直方向上的脉动减少。近壁面区域的流动变量梯度较大,参数变化很快,因此近壁面的处理对流动数值模拟的精确度起着关键作用。

壁面摩擦速度 $u_t$ ,本质上是壁面的切应力,表达式如下:

$$u_t = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (2-36)$$

式中,  $\tau_0$ 表示壁面切应力。

在靠近壁面的区域中,雷诺应力的值趋近于零,分子的粘性应力控制流动,因此平均运动方程可以得到简化,表达式如下:

$$\mu \frac{\partial U}{\partial y} = \tau_0 \quad (2-37)$$

由 $\tau_0 = \rho u_t^2$ ,近壁面粘性层中的平均速度分布表达式如下:

$$\frac{U}{u_t} = \frac{y u_t}{\nu} \quad (2-38)$$

除此之外,SSTk- $\omega$ 湍流模型对网格的要求也非常高,不但靠近壁面的网格要设置在粘性底层内,壁面附近的网格密度也要很高。

## 2.3 自由面处理

船舶在波浪中运动时,自由面的处理是个重要问题。如何准确追踪捕捉自由面是研究阻力问题的难点。本文选择OpenFOAM具有的流体体积法(Volume Of Fluid, VOF),对空气与水的两相流自由面进行追踪与捕捉。VOF具有精度高,很好处理网格耗散等优点,是一种被普遍使用的自由面处理方法。

VOF方法并不明确规定两相边界,而是定义一个过渡层,过渡层内的成分看作是两相流体的混合。定义体积分数 $\alpha$ 表示网格单元内某一流体所占比例,表达式为:

$$\begin{cases} \alpha = 0, \\ \alpha = 1, \\ 0 < \alpha < 1, \end{cases} \quad (2-39)$$

在本文中,体积分数为0对应的情况为空气,体积分数为1对应的情况为水,介于0到1之间对应于自由面附近。

具备人工压缩项的体积分数输运方程表达式如下:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(U - U_g)\alpha] + \nabla \cdot [U_r(1 - \alpha)\alpha] = 0 \quad (2-40)$$

式中, $U_r$ 表示的是相对速度场, $U_g$ 代表网格节点处具有的速度。由体积分数输运方程可以求出网格单元的体积分数,从而准确追踪到交界面位置。

空气与水的密度 $\rho_g$ 与 $\rho_l$ ,以及动力粘性系数 $\mu_g$ 和 $\mu_l$ 可由体积分数 $\alpha$ 表示为:

$$\begin{cases} \rho = \alpha \rho_l + (1 - \alpha) \rho_g \\ \mu = \alpha \mu_l + (1 - \alpha) \mu_g \end{cases} \quad (2-41)$$

表面张力项 $f_\sigma$ 可表达为如下方程:

$$f_\sigma = \sigma K \nabla \alpha \quad (2-42)$$

式中,  $\sigma$ 代表的是表面应力张力系数,  $K$ 表示自由面曲率, 计算公式为:

$$K = -\nabla \cdot \mathbf{n} = -\frac{\sum_f S_f \cdot \mathbf{n}_f}{V_i} \quad (2-43)$$

其中,  $\mathbf{n}$ 表示网格某个面上的单位法向量,  $V_i$ 表示网格体积。

## 2.4 造波与消波

本文使用的 naoe-FOAM-SJTU 求解器中, waveMaker 类模块决定所造波浪的类型, 并且提交参数给边界条件。常用的波浪类型有规则波与不规则波, 其中规则波有 Stokes 深水波与浅水波, 不规则波有长峰不规则波与短峰不规则波。本文研究的是船舶在规则波中的波浪增阻, 因此采用的是 Stokes 一阶深水波, 波面方程为:

$$\zeta(x, t) = A \cos(kx - \omega_e t) \quad (2-44)$$

水质点速度表达式为:

$$\begin{cases} u(x, y, z, t) = U_o + A\omega e^{kz} \cos(kx - \omega_e t + \phi) \\ \omega(x, y, z, t) = A\omega e^{kz} \sin(kx - \omega_e t + \phi) \end{cases} \quad (2-45)$$

式中,  $U_o$ 代表的是船体速度,  $A$ 代表波浪幅值,  $\omega$ 代表波浪的自然频率, 计算公式为:

$$\omega = \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}} \quad (2-46)$$

$k$ 表示波数,  $\omega_e$ 代表的是波浪遭遇频率, 可由下列公式计算得到:

$$\omega_e = \omega + kU_o \quad (2-47)$$

波浪色散关系表达式为:

$$\omega^2 = gk \quad (2-48)$$

由于波浪到计算域边界时, 会发生反射现象, 与生成的波浪叠加互相干扰, 使得波形发生变化, 影响计算精度, 因此, 求解器采用添加人工阻尼的方法来实现消波, 即海绵消波层, 如图 2-2 所示, 提高了计算精度。

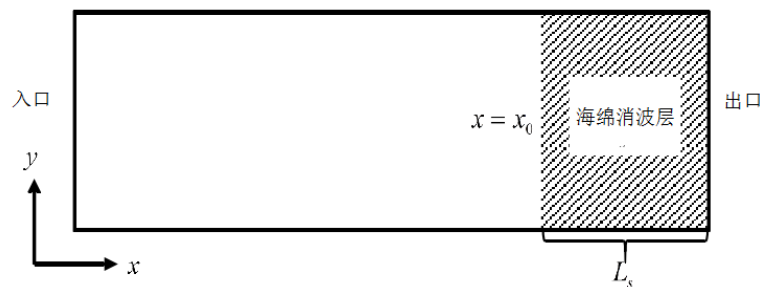


图 2-2 海绵消波层

## 2.5 方程离散

CFD 方法的控制方程组中包含的方程都是偏微分形式, 对于大多数情况来说, 直接求解微分方程组是非常困难的, 一般对微分方程组进行离散转化为线性方程组之后再行求解。本文运用的方法是由 McDonald<sup>[36]</sup>提出的有限体积法, 又叫作控制体积法。这种方法将要进行计算的区域分割为若干个三维网格, 然后将微分方程按照三维网格进行积分, 可以生成一组离散后的方程组。数学上提取网格中每一点的信息并且存储在三维网格中心, 再通过插值的方法计算出网格面的速度场与压力场。

在使用有限体积法时，要注意守恒，不仅仅是三维网格内的守恒，还包括整个计算区域的守恒。除此之外，有限体积法的特点也使它能够得到广泛运用：首先，有限体积法运用的控制方程形式为积分形式，这一点与有限差分法存在差异，表现出了特征变量在控制体积内守恒，与有限元法相比具有一定的优势；其次，有限体积法运用的积分形式方程中的每一项都具有非常明确的物理含义，在进行离散处理之后，它们的物理含义依然明确，能够得到很好的解释，这一特点使它优于其它数值计算方法；最后，有限体积法中的区域离散的节点网格和进行积分的控制体积是相互独立的，能够用控制体积中的特征变量守恒来达到保证求解欲内场变量守恒的目的。这些优点的存在使得有限体积法在现阶段的工程问题中得到广泛运用。

有限体积法输运方程表示为：

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \oint_S (\vec{U} - \vec{U}_S) \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (2-49)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho u_i dV + \oint_S (\vec{U} - \vec{U}_S) \cdot \vec{n} dS = \oint_S (\tau_{ij} \vec{l}_j - \tau p_{eff} \vec{l}_i) \cdot \vec{n} dS \quad (2-50)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \oint_S (\vec{U} - \vec{U}_S) \cdot \vec{n} dS = \oint_S \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot \vec{n} dS + \int_V q_{\phi V} dV \quad (2-51)$$

以上三个输运方程分别对应于质量、动量和标量， $V$  代表封闭边界内的控制体体积， $\vec{n}$  为控制体指向外部的表面单位法向量， $\vec{U}$  为流体速度， $\vec{U}_S$  表示控制体积表面速度， $\Gamma_\phi$  代表标量  $\phi$  的扩散系数， $q_{\phi V}$  代表的是标量  $\phi$  的源强。

### 2.5.1 空间离散

在有限体积法中，一阶离散格式有中心差分格式、上风差分格式、混合差分格式等。

中心差分形式是一种显示积分法，它用位移有限差分来代替位移导数，即加速度与速度。中心差分形式将微分方程组转化为代数方程组再进行求解，在时间区间内求得每个细小的时间区间之间的递推公式，从而求得整个过程的结果。

上风差分格式在计算控制体积上的参数时，规定取上游的节点处数值，而中心差分格式则取上下节点处数值的算数平均值。与中心差分格式相比，上风差分格式改变了流项的差分格式，从而使其具有输运特性，扩散项依旧采用中心差分格式。上风差分格式特点明显：控制体积公共界面的输运变量相等，保证了离散方程的守恒；系数都为正值，具有有界性，避免了计算结果的不收敛情况；考虑流动的方向性，保证了微分方程的输运特性；计算精度为一阶，扩散输运总是存在，有可能出现假扩散现象。

上风差分格式中存在的误差是可以降低的，只需在 Taylor 截断中将高阶导数得到的高阶离散格式留下，常用的方法有二阶迎风格式和对流运动的二次迎风格式（Quadratic Upwind Interpolation of Convective Kinematics, QUICK）。一般情况下，扩散项使用中心差分格式，离散格式最对流项起作用，并不影响瞬态项。

空间项离散涉及高斯定理，表达式如下：

$$\int_V \nabla \cdot \vec{a} dV = \oint_{\partial V} d\vec{S} \cdot \vec{a} \quad (2-52)$$

$$\int_V \nabla \phi dV = \oint_{\partial V} d\vec{S} \phi \quad (2-53)$$

$$\int_V \nabla \vec{a} dV = \oint_{\partial V} d\vec{S} \vec{a} \quad (2-54)$$

式中， $\partial V$  为控制体的封闭表面， $d\vec{S}$  为非常微小的表面单元，其法向量指向外侧。

假设任意张量都满足在时空为线性关系，即如下表达式：

$$\phi(x) = \phi_P + (x - x_P) \cdot (\nabla \phi)_P \quad (2-55)$$

那么， $\phi$ 在控制体的积分可转化为如下：

$$\begin{aligned} \int_{V_P} \phi(x) dV &= \int_{V_P} [\phi_P + (x - x_P) \cdot (\nabla\phi)_P] dV \\ &= \phi_P \int_{V_P} dV + \int_{V_P} (x - x_P) dV \cdot (\nabla\phi)_P \\ &= \phi_P V_P \end{aligned} \quad (2-56)$$

式中， $V_P$ 代表的是单元体的体积。

类似的，由：

$$\int d\vec{S} \cdot \vec{a} = \vec{S} \cdot \vec{a}_f \quad (2-57)$$

可以将 $\nabla \cdot \vec{a}$ 在控制体的积分转化为：

$$\begin{aligned} \int_V \nabla \cdot \vec{a} dV &= \oint_{\partial V} d\vec{S} \cdot \vec{a} \\ &= \sum_f (\int d\vec{S} \cdot \vec{a}) \\ &= \sum_f \vec{S} \cdot \vec{a}_f \end{aligned} \quad (2-58)$$

二阶精度的高斯离散公式如下：

$$(\nabla \cdot \vec{a}) V_P = \sum_f \vec{S} \cdot \vec{a}_f \quad (2-59)$$

对流项的离散表达式如下：

$$\begin{aligned} \int_{V_P} \nabla(\rho \vec{U} \phi) dV &= \int_{V_P} \vec{S} \cdot (\rho \vec{U} \phi)_f \\ &= \sum_f \vec{S} \cdot (\rho \vec{U})_f \phi_f \\ &= \sum_f F \phi_f \end{aligned} \quad (2-60)$$

式中， $F$ 为通过面 $f$ 的质量通量，表达式如下：

$$F = \vec{S} \cdot (\rho \vec{U})_f \quad (2-61)$$

耗散项的离散表达式为：

$$\begin{aligned} \int_{V_P} \nabla(\rho \Gamma_\phi \nabla \phi) dV &= \sum_f \vec{S} \cdot (\rho \Gamma_\phi \nabla \phi)_f \\ &= \sum_f \vec{S} \cdot (\rho \Gamma_\phi)_f \vec{S} \cdot (\nabla \phi)_f \end{aligned} \quad (2-62)$$

将源项线性化，得到：

$$S_\phi(\phi) = Su + Sp\phi \quad (2-63)$$

其中 $Su$ 和 $Sp$ 由 $\phi$ 的数值决定，因此源项的体积积分可以进一步化为：

$$\int_{V_P} S_\phi(\phi) dV = Su V_P + Sp V_P \phi_P \quad (2-64)$$

### 2.5.2 时间离散

由于流体的性质是由时间发生变化的，因此在计算非定常流体时对时间也要进行离散处理，转变为瞬态问题之后再进行处理。由时间上设定物理量分布的不同，对时间积分的方案分为很多种，其中最简单的是显式方案，实用性最强的是全隐式方案。本文采取的方案是隐式方案。

变量 $\phi$ 的广义表达式如下：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F(\phi) \quad (2-65)$$

式中 $F(\phi)$ 一般采用二阶精度时间离散格式，表达式如下：

$$F(\phi) = \frac{3\phi^{(n+1)} - 4\phi^{(n)} + \phi^{(n-1)}}{2\Delta t} \quad (2-66)$$

式中， $n$  对应于当前时间层  $t$ ， $n-1$  和  $n+1$  分别对应于时间层  $t - \Delta t$  与  $t + \Delta t$ ，用时间向后差分的隐式积分法来估算下一时间层的  $F(\phi^{(n+1)})$  的，计算公式为：

$$\phi^{(n+1)} = \phi^{(n)} + \Delta t F(\phi^{(n+1)}) \quad (2-67)$$

上述方程中存在的未知量需要耦合联立方程求解，有无条件稳定性。

### 2.5.3 耦合方程求解

将控制方程与输运方程离散之后，就需要对方程组进行求解。由于非线性量的存在以及方程存在的强耦合现象，方程组的直接求解存在困难，因此需要使用新的算法。常用的求解不可压流体控制方程的方法有耦合式解法记忆分离式解法。耦合式算法是求解动量方程以及连续性方程，从而解得速度场与压力场，这种方法对计算机内存消耗很大，效率还很低，不推荐使用。分离式算法使用迭代思想，根据给定的初始值，多次迭代求解动量方程与连续性方程，使得求出的数值通过迭代逼近真实情况下的速度场与压力场，这种算法求得的数值更加精确，本文运用的就是分离式解法，具体使用的是 OpenFOAM 中的 PISO (Pressure Implicit Splitting of Operators, PISO) 与 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) 算法，具体算法步骤如下：

- (1) 对速度分布进行假设，计算首次迭代的方程中的常数项与系数；
- (2) 假设压力场及相关参数；
- (3) 由给出的速度场与要离场参数，计算方程中的常数项与系数；
- (4) 进行 SIMPLE 算法：求解动量离散方程，求解压力修正方程，修正压力和速度；
- (5) 求解二次压力修正方程；
- (6) 修正压力与速度；
- (7) 验证是否收敛，否则继续迭代。

## 2.6 求解流程

由上文所述，求解船舶在波浪中的受力情况与运动响应过程如下：

- (1) 给定初始条件，确定速度场、压力场和体积分数的参数；
- (2) 对网格运动方程与移动通量进行求解；
- (3) 求解流体体积法输运方程；
- (4) 求解动量预估方程；
- (5) 依据 PISO 算法循环，求解速度场与压力场；
- (6) 求解湍流模型；
- (7) 积分船体表面压力，求得力与力矩；
- (8) 转换坐标系，求得力与力矩在船体坐标系的数值；
- (9) 求解运动方程，计算船体在船舶坐标系中的加速度；
- (10) 积分加速度得到速度并且转化坐标系，求得大地坐标系下的船体速度；
- (11) 跳转至步骤 (2)，计算下一时间步的数值。

## 2.7 本章小结

本章分析了 CFD 工具箱 OpenFOAM 以及 naoe-FOAM-SJTU 的数学模型与数值计算方法，详细介绍了 RANS 控制方程，湍流模型的选取，自由面处理方法，造波过程、方程离散流程等方面，为下文计算分析提供理论基础。



## 第三章 船型参数与计算模型

EEDI 新标准的提出,对所有类型的船舶而言,都是极大的挑战。为了降低能耗,达到 EEDI 的新标准,首先想到的方法就是降低发动机功率。这种措施虽然能有效地提高船舶能效,但是会带来更严重的安全隐患问题。在发动机功率降低的情况下,船舶在遇然不利情况时,它的推进装置与转向装置无法保证船舶本身的机动性,也因此无法为船上相关作业人员的提供安全保障。因此,简单地通过降低发动机功率来达到提高能效的目的是行不通的。为了在船舶能效方面有先进深入的研究,从而能够找到合适的提升船舶能效的方法,一个欧洲研究组织 SHOPERA (Energy Efficient Safe Ship Operation) 成立。该组织旨在为船舶行业的未来发展研究先进的理论方法,并且开发有效实用的工具。SHOPERA 除了研究多种复杂的数值方法,比如势流理论,粘性方法等之外,还会挑选船型进行试验,并且留下了大量的试验数据,为验证数值方法的可靠性与精确度提供了让人信服的事实依据。本文的研究船型也是 SHOPERA 的试验对象之一。

### 3.1 实船介绍

本文的研究船型 DTC (Duisburg Test Case) 船是一种超巴拿马型 14000 标准箱集装箱型船,由杜伊斯堡艾森大学的船舶科技海洋工程与交通系统机构研究开发。DTC 船主要被用于验证数值方法,同时也是其它类型船的比较基准。DTC 船设计装载情况下的主要参数如表 3-1 所示,其中湿表面积  $S$  并不包括附体部分的湿表面积。

表3-1 DTC船主尺度

项目	单位	参数值
垂线间长 $L_{pp}$	M	355
水线宽 $B_{WL}$	m	51.0
设计吃水 T	m	14.5
设计排水体积 V	m <sup>3</sup>	173467
湿表面积 S	m <sup>2</sup>	22032
方形系数 $C_B$	-	0.661

在用 DTC 船进行试验时,选取的坐标系为右手坐标系,船艏方向指向 x 轴正方向, z 轴正方向指向下方(如图 3-1)。DTC 船体示意图如图 3-2 所示。图 3-3 为 DTC 船的设计舵,它围绕着中间轴扭转了 5.0°,具有前缘整流体,高度为 12.9 米,舵叶面积为 255.0 平方米,轴直径为 1.0 米,其运动部分的投影面积为 95.1 平方米。图 3-4 示意的是 DTC 船的定螺距五叶螺旋桨,它的直径为 8.911 米,螺距比为 0.959,从 x 正方向看,螺旋桨旋转方向为右旋方向。



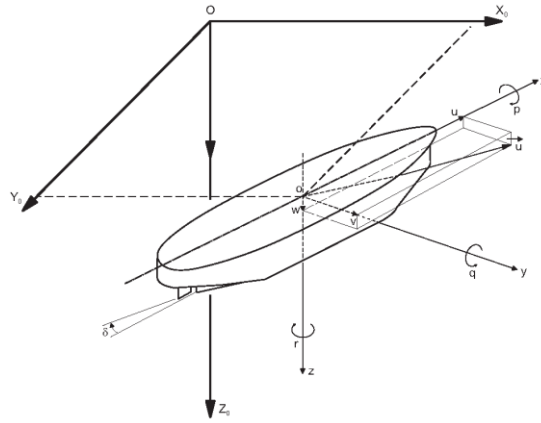


图 3-1 坐标系示意图



图 3-2 DTC 船体示意图



图 3-3 DTC 船舵



图 3-4 DTC 螺旋桨

除了舵和螺旋桨，DTC 船体的两边还设置了舦龙骨。舦龙骨一共被分为了 5 段，每段长度为 14.85 米，高度为 0.4 米，彼此之前间隔 3 米，被对称设置在船舳部分，按照在船体设计吃水下的流线形态排成一线。

### 3.2 计算模型

由于本文研究物理量为波浪增阻，不涉及推进等特性的研究，因此对计算模型进行简化，只保留 DTC 的裸船部分，忽略舵和桨。

本文数值计算使用的 DTC 模型数据与 SHOPERA 试验中使用的模型数据一致。实船与模型的尺度比为 63.65，由此可以得出表 3-2 中 DTC 计算模型的相关参数。

表3-2 DTC船模型主尺度

项目	单位	参数值
垂线间长 $L_{pp}$	m	5.577
船宽 $B_{WL}$	m	0.801
设计吃水 T	m	0.228
设计排水体积 V	m <sup>3</sup>	0.673
湿表面积 S	m <sup>2</sup>	5.438
方形系数 $C_B$	-	0.661

根据 DTC 船模型的参数，可以用 CFD 工具箱 OpenFOAM 建立 DTC 的三维模型，如图 3-5 所示。



图 3-5 DTC 船三维模型

### 3.3 本章小结

本章介绍了 DTC 船的基本情况，详细说明了 DTC 船的主尺度，以及计算模型的参数与模型的建立。

## 第四章 DTC 静水算例验证

在进行波浪增阻研究的同时，船舶的静水阻力研究也一直是船型优化的研究重点，必不可少。由船舶增阻的定义中可以看出，波浪增阻的数值需要由总阻力减去静水阻力来求得，因此，静水阻力的研究也非常有必要，是进行波浪增阻数值计算的必要步骤。

SHOPERA 在针对 DTC 船的相关试验中，也曾探讨过 DTC 船的航速与静水阻力的关系，并且有详细的试验数据。本文研究波浪增阻的过程中，对静水阻力的计算过程也是必不可少的。因此，为了验证 naoe-FOAM-SJTU 求解器的精确性，判断该求解器是否适用于 DTC 模型，DTC 模型的建立以及网格的划分是否能够较好进行水动力的计算，本文选取试验数据中航速为 15 节的数据点作为测试点，用求解器 naoe-FOAM-SJTU 计算 DTC 模型在某一航速下受到的静水阻力，并与试验数据相对比，进行算例验证。

### 4.1 试验数据

由 SHOPERA 发布的试验数据，如表 4-1 与图 4-1，我们可以知道 DTC 船在静水中的阻力情况，静水阻力与航速近似为线性关系，并且随着船舶航速的增长，其受到的静水阻力有非常明显的对应变化，其中红色标注对应于航速为 15 节的试验数据，为选取的测试点。

表 4-1 DTC 模型静水阻力表

Vs (knots)	RT <sub>M</sub> (N)	Vs (knots)	RT <sub>M</sub> (N)	Vs (knots)	RT <sub>M</sub> (N)
5	1.334	12	6.645	19	15.06
5.5	1.585	12.5	7.146	19.5	15.737
6	1.854	13	7.657	20	16.428
6.5	2.14	13.5	8.189	20.5	17.155
7	2.466	14	8.753	21	17.951
7.5	2.773	14.5	9.359	21.5	18.794
8	3.116	15	9.979	22	19.68
8.5	3.47	15.5	10.563	22.5	20.619
9	3.851	16	11.152	23	21.572
9.5	4.268	16.5	11.8	23.5	22.457
10	4.71	17	12.467	24	23.321
10.5	5.174	17.5	13.108	24.5	24.257
11	5.654	18	13.745	25	25.251
11.5	6.146	18.5	14.395		

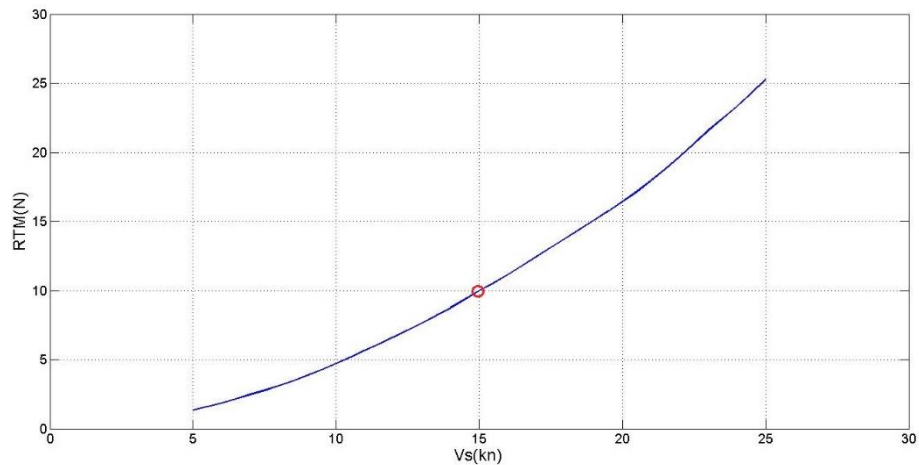


图 4-1 DTC 试验静水阻力图

## 4.2 网格划分

用 OpenFOAM 自带的工具对 DTC 模型进行计算网格划分，设置网格参数。由于船体是对称的，生成网格计算时只针对半船模型即可，可以提高计算速度。总共对模型进行 5 层网格加密（如图 4-2），其中，由于船艏与艉部的流场与受力情况较为复杂，为了获取更多的细节信息，我们对船艏与艉部的网格进行了加密处理（如图 4-3 与 4-4），网格总计 141 万，能较好反映 DTC 模型受力情况。

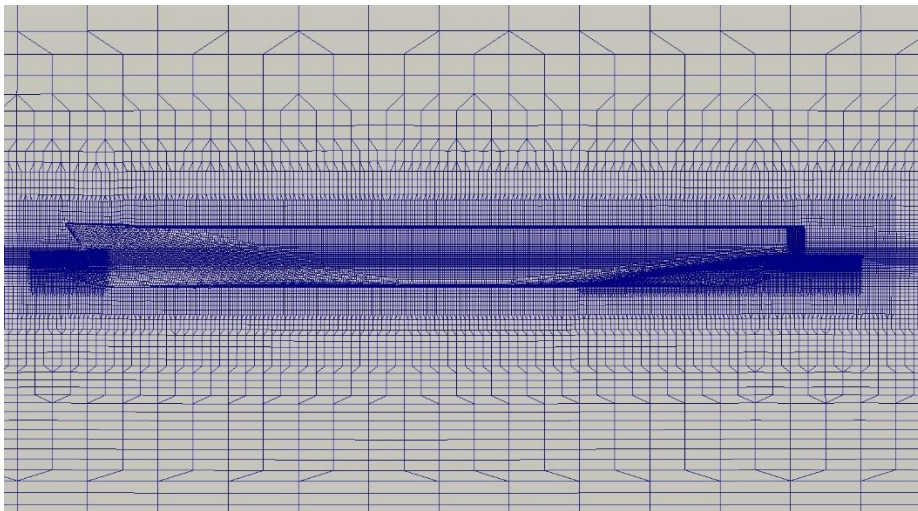


图 4-2 DTC 模型网格



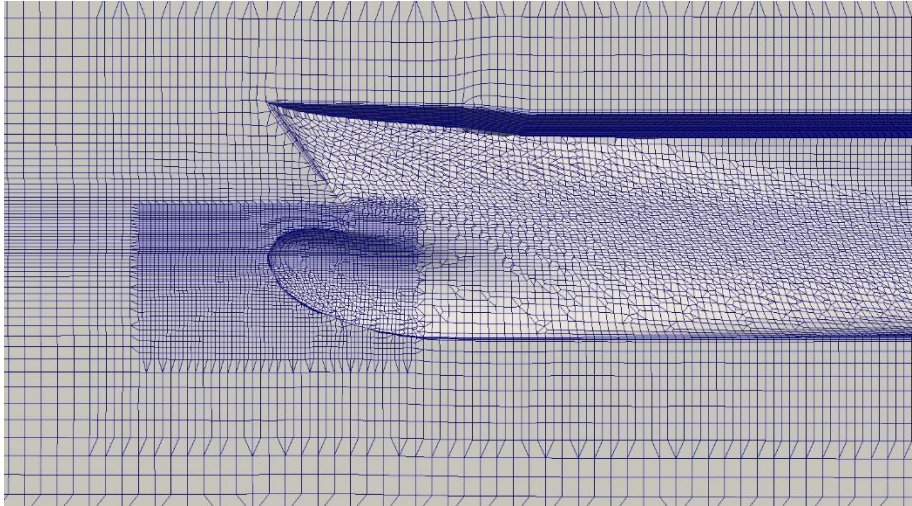


图 4-3 船艏加密网格

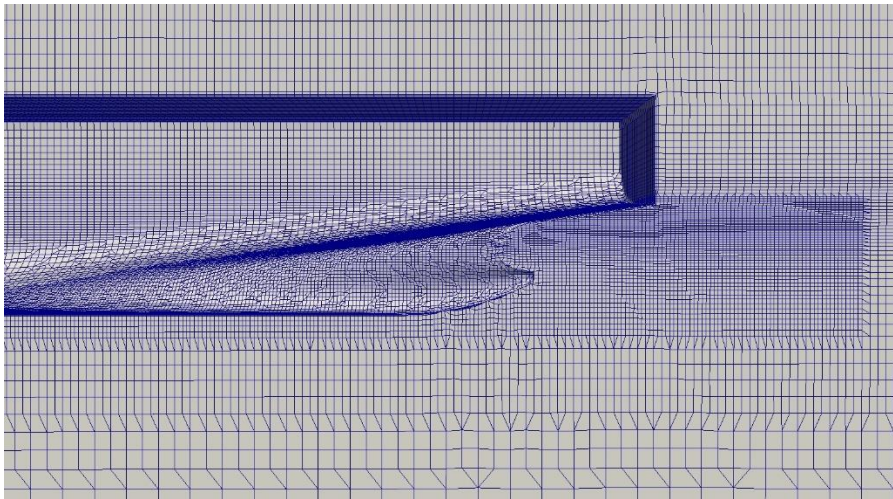


图 4-4 船艉加密网格

### 4.3 数值计算

在划分好网格之后,我们要进行初始参数的设定。依据试验中的数据,修改 naoe-FOAM-SJTU 中关于航速的参数,进行数值计算。数值模拟计算过程约为 50 秒,实际求解器运行时间为 3 天,由计算得到的结果,可以得到图 4-5。

由图可知,当 DTC 在静水中航行时, $t=0$  时刻,船体刚刚与水接触,遭到了较大的阻力,发生了阻力数值的突变,随后波动逐渐减小,在阻力值为 10N 附近近似振荡;在  $t=25s$  之后,船体所受的阻力越来越平稳,围绕着一个数值做微小的变化,说明船体受力是收敛的,说明了网格的收敛性。在时长足够的情况下,可以认为这个数值就是船体所受到的静水阻力。将计算所得的静水阻力与试验数据相对比,可以发现二者之间的相对误差很小,仅仅为 1.804% (见表 4-2)。

由静水阻力图我们可以发现,计算所得的静水阻力波动趋势基本上是与实际情况相符合的,较为合理。由此,我们可以得出结论,naoe-FOAM-SJTU 求解器的精确度与可靠性很高,同时 DTC 三维模型与网格的划分也很合适,可以较好反映船体的受力情况,可以继续用来进行接下来的研究。

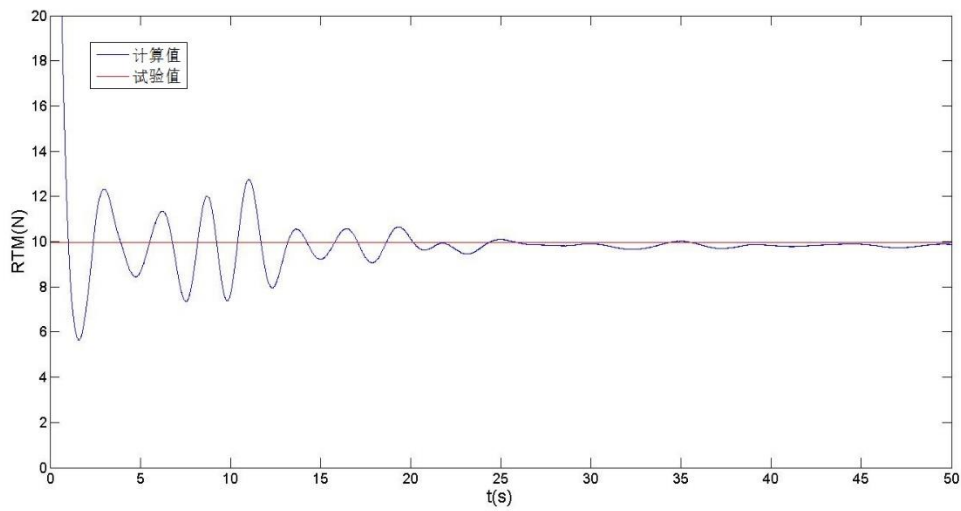


图 4-5 DTC 计算静水阻力图 ( $V_s=15$  knots)

表 4-2 试验与计算静水阻力数值对比

项目	试验结果	naoe-FOAM-SJTU 结果	相对误差
静水阻力 $R_{TM}$ (N)	9.979	9.799	1.804%

### 3.4 本章小结

本章为了验证 DTC 三维模型的正确性以及 naoe-FOAM-SJTU 求解器的精确度与可靠性,进行了算例验证,与试验数据相对比,发现计算的静水阻力数值与试验数据吻合较好,说明了求解器在解决水动力问题上的优点,可靠性很高。

## 第五章 DTC 船波浪增阻数值计算与分析

### 5.1 DTC 船静水与波浪工况对比

与在静水中相比，船舶在波浪工况下会遭受更大的阻力。为了研究波浪增阻对船体受力以及周围波浪是否存在较大影响，从而说明是否存在研究波浪增阻以及其影响要素的必要性，本文选取波幅  $A$  为 0.03 米，Froude 数为 0.4， $\lambda/L$  为 0.4，并且放开船体运动自由度的计算工况，根据所选取的波高，对 DTC 船进行网格划分，与静水工况下 DTC 船的表现进行对比。

如图 5-1 与 5-2，分别表示了 DTC 船在静水中航行时侧面与底部的受力图。由图可知，DTC 船在静水中航行时，船体中间部分受力比较平均，船艏与船艉受力较大，尤其是船艏部分。图 5-3 与 5-4 分别表示了 DTC 船在波浪中航行时侧面与底部的受力图，可以发现它们与 DTC 在静水中的受力图有很大不同。在波浪中时，DTC 船底部受力较在静水中增大，船艏位置附近区域的受力数值极高，与船艏部分一起承担了大部分压力。虽然在波浪中，船艉受力略大于静水中的受力，但是由于船艏部分受力远远大于其在静水中的受力，因此对 DTC 船而言，船艏与船艉的压力差依然是大大增加的，因此 DTC 船在波浪中航行时受到的阻力数值也会增加。

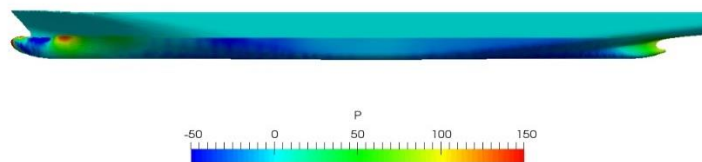


图 5-1 DTC 船在静水中侧面受力图



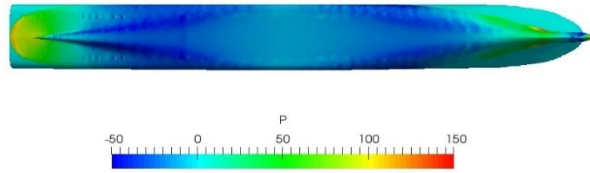


图 5-2 DTC 船在静水中底部受力图

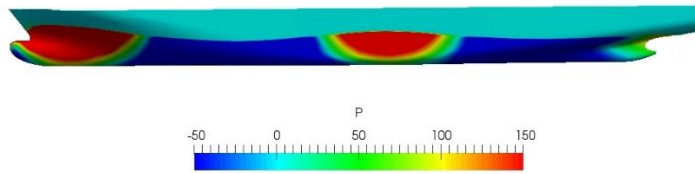


图 5-3 DTC 船在波浪中的侧面受力图

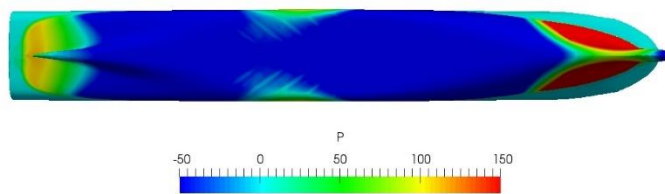


图 5-4 DTC 船在波浪中的底部受力图

为了更好地比较 DTC 船在静水中与在波浪中航行的差异, 本文通过流场自由面兴波等值线来观察 DTC 在不同工况下的航行状态。如图 5-5 所示, DTC 船在静水中航行时, 仅在船艏附近与船艉部分存在较大的波峰, 船行波并不明显。图 5-6 反映了 DTC 船在波浪中航行的自由面情况, 由图可知, 船艏部分形成了较大的波峰, 并且由船体兴波产生的新波形与波浪工况下原有的规则波发生了叠加。叠加之后, 波峰的高度增大, 波谷的高度减小, 并且在船体两侧出现了较为明显的船形波, 波形沿着船体两侧成一定角度朝外扩散。

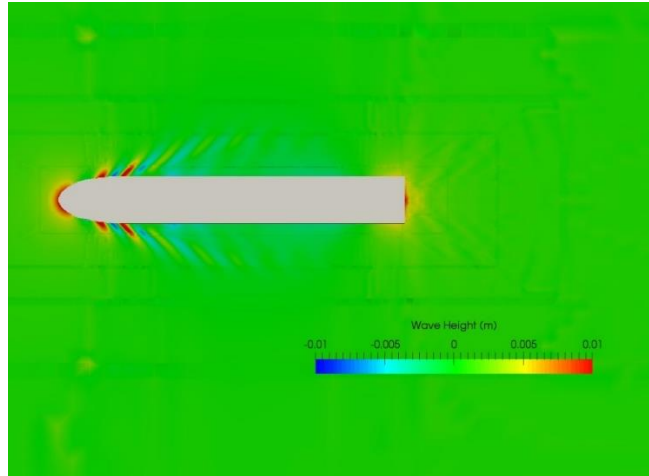


图 5-5 DTC 船在静水中的自由面

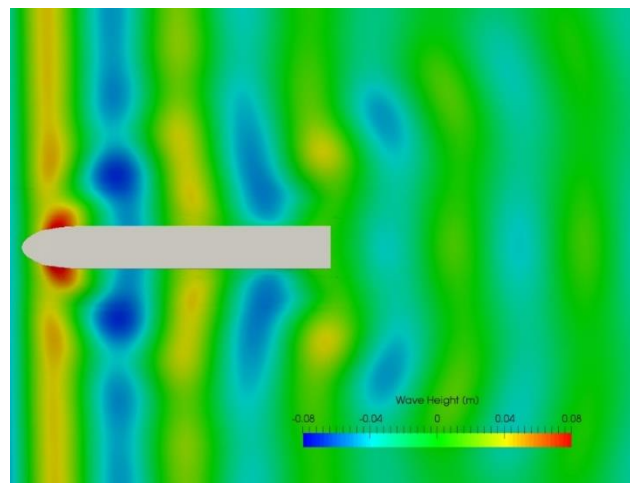


图 5-6 DTC 船在波浪中的自由面

由此看来, 由于波浪环境的不同, DTC 船的受力情况, 包括受力大小与受力分布, 以及与周围波浪的作用都发生了很大的变化。因此, 研究 DTC 船波浪情况下的阻力是十分有必要的。接下来, 本文就将 DTC 船在波浪中航行时受到的波浪增阻与影响因素之间的关系进行详细研究。

## 5.2 波浪增阻与波长的关系

船舶在波浪工况下航行时, 波长对船舶阻力的影响十分显著。为了研究波浪增阻数值与波长的变化关系, 本文选择波幅  $A$  为 0.03 米, Froude 数为 0.2, 放开船体自由度的计算工况来进行数值计算。

为了更好反映波长与波浪增阻的关系，本文将波浪增阻的数值进行无因次化处理，即定义波浪增阻系数  $C$ ，其表达式为：

$$C = \frac{R_{AW}}{\rho g A^2 (B^2/L)} \quad (5-1)$$

式中， $R_{AW}$ 代表船舶波浪增阻， $A$ 代表波浪波幅， $B$ 代表船宽， $L$ 代表船长。

由基于 OpenFOAM 的求解器 naoe-FOAM-SJTU 可以得出计算结果，整理数据，得到表格 5-1，并作出图 5-7。

表 5-1 DTC 波浪增阻随波长变化的计算结果（放开自由度）

$\lambda/L$	波浪增阻 $R_{AW}(N)$	波浪增阻系数 $C$
0.4	2.303	2.214
0.7	3.996	3.842
1.1	10.578	10.171
1.3	7.793	7.493
1.6	1.895	1.822

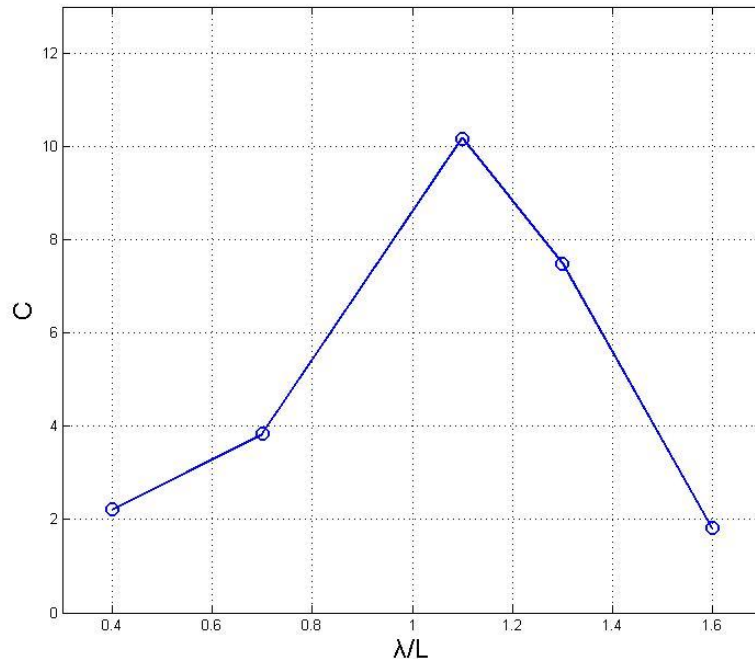


图 5-7 DTC 波浪增阻系数与波长变化图（放开自由度）

由图 5-7 可以得出，在波长较短的情况下，波浪增阻的系数数值较小，随着波长的增加而变大，但是幅度并不大；在波长中等的情况下，波浪增阻系数随着波长的变大，数值发生了较明显的变化，在  $\lambda/L=1.1$  达到了计算值的最大值，随后波浪增阻系数逐渐变小；在波长较长的情况下，波浪增阻系数随着波长的变大而减小，逐渐减小到数值与短波情况下相近。

图中值得关注的是峰值点，即  $\lambda/L=1.1$  时，由于波浪的遭遇频率数值与船体固有频率相近，船体发生了共振，从而运动剧烈，振荡幅度大大增加，也大大增加了波浪增阻，使得波浪增阻系数达到了最大值。

DTC 波浪增阻的总体变化规律为：随着波长的增加，波浪增阻数值在波长较短时缓慢增长，在波长中等时增长速度加快，直到船体发生共振，波浪增阻达到最大值，随后波浪增

阻数值开始减小，在波长较长时波浪增阻数值减小到与短波时相当。总体变化趋势与图 1-2 所示的波浪增阻随波长变化图像相符合。

### 5.3 波浪增阻与航速的关系

为了研究航速与波浪增阻的关系，本文选择波幅 A 为 0.03 米，短波、中长波、长波三种典型波长的计算工况，放开船体自由度，改变航速来观察波浪增阻数值相应的变化规律。

短波情况下，取  $\lambda/L=0.4$ ，使用基于 OpenFOAM 的求解器 naoe-FOAM-SJTU 进行计算，整理数据可以得到表 5-2 与图 5-8。

表 5-2 DTC 波浪增阻随航速变化的计算结果 ( $\lambda/L=0.4$ )

Vs(m/s)	Fr	波浪增阻 $R_{AW}(N)$	波浪增阻系数 C
0.739	0.10	1.219	1.172
1.109	0.15	1.897	1.824
1.479	0.20	2.303	2.214

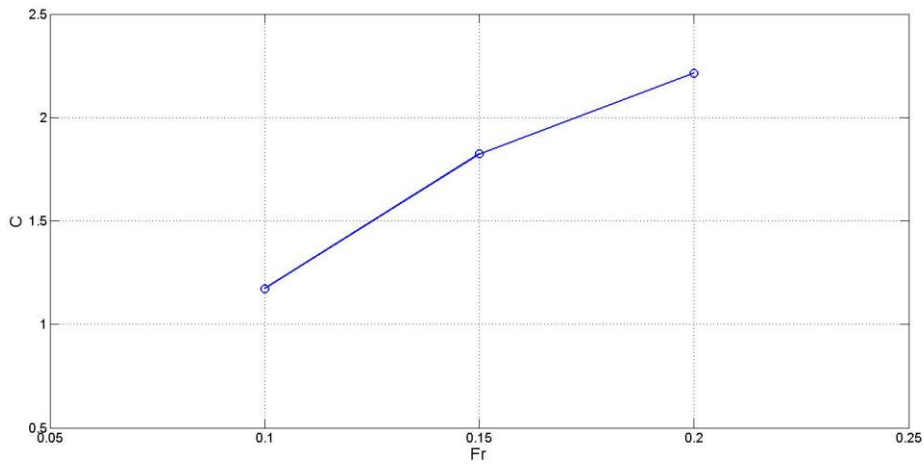


图 5-8 DTC 波浪增阻与航速变化图 ( $\lambda/L=0.4$ )

由图 5-8 可知，在短波  $\lambda/L=0.4$  的情况下，随着航速的增加，波浪增阻数值也对应增大。同理，对中长波  $\lambda/L=1.1$ ，长波  $\lambda/L=1.6$  可以进行同样的计算，整理数据之后进行处理，可以得到表 5-3 与表 5-4，将短波、中长波、长波情况下的波浪增阻数值随航速变化进行对比，可以得到图 5-9。

表 5-3 DTC 波浪增阻随航速变化的计算结果 ( $\lambda/L=1.1$ )

Vs(m/s)	Fr	波浪增阻 $R_{AW}(N)$	波浪增阻系数 C
0.739	0.10	2.535	2.437
1.109	0.15	6.149	5.912
1.479	0.20	10.578	10.171

表 5-4 DTC 波浪增阻随航速变化的计算结果 ( $\lambda/L=1.6$ )

Vs(m/s)	Fr	波浪增阻 $R_{AW}(N)$	波浪增阻系数 C
0.739	0.10	1.229	1.182
1.109	0.15	1.448	1.392
1.479	0.20	1.895	1.822

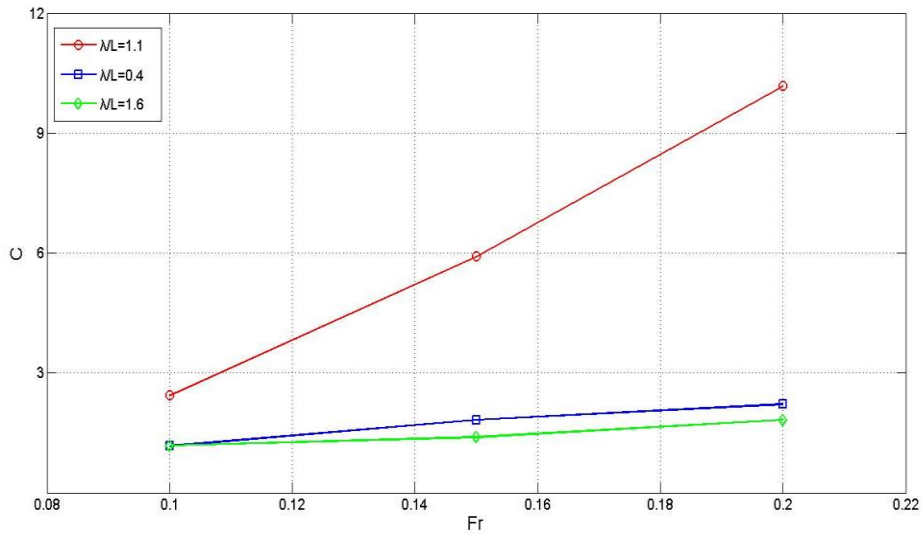


图 5-9 三种典型波长下波浪增阻与航速变化图

由图 5-9 可以发现，中长波情况下，尤其是  $\lambda/L=1.1$ ，船体发生共振现象的波长范围，波浪增阻系数远远大于短波与长波情况下船舶的波浪增阻系数。总体看来，随着航速的增加，波浪增阻数值也会增大，这一现象在中长波情况下尤其明显，在短波与长波情况下。波浪增阻呈上升趋势，但是数值并没有中长波时变化显著，且长短波时的波浪增阻系数非常接近。

#### 5.4 波浪增阻与自由度的关系

为了研究船体自由度与波浪增阻的关系，本文选择波幅  $A$  为 0.03 米，Froude 数为 0.2 的计算工况，分别计算放开与固定自由度情况下波长与波浪增阻的关系。处理计算所得的数据可以得到表 5-5，与前文计算放开自由度的数据相结合可作出图 5-10。

表 5-5 DTC 波浪增阻随波长变化的计算结果（固定自由度）

$\lambda/L$	波浪增阻 $R_{AW}(N)$	波浪增阻系数
0.4	1.968	1.892
0.7	2.078	1.998
1.1	1.937	1.862
1.3	1.825	1.755
1.6	1.767	1.699

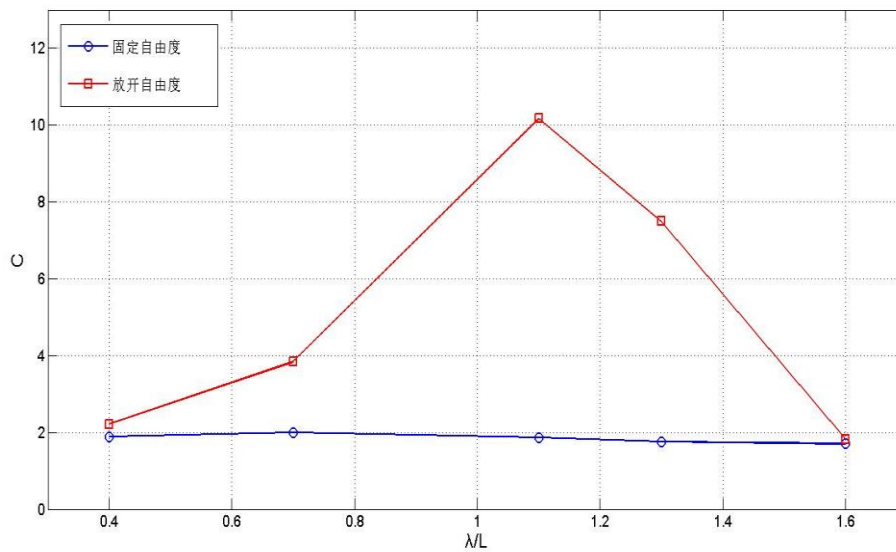


图 5-10 不同自由度下 DTC 波浪增阻系数与波长变化图

由图 5-10 可以得到，不同自由度下，DTC 波浪增阻的变化趋势差异很大。放开自由度下，波浪增阻随波长变化显著，先变大后减小；固定自由度情况下，波浪增阻随波长变化非常微小，几乎没有发生变化，说明自由度对波浪增阻的产生有非常重要的影响。

### 5.5 波浪增阻成分分析

由 5.4 关于自由度的分析，我们发现自由度的放开与否使得波浪增阻数值发生了巨大的变化，这与波浪增阻的成分构成有非常大的关系。

一般情况下，我们认为波浪增阻主要是由辐射增阻与绕射增阻这两部分组成的。辐射增阻由船体运动产生，当船体运动时，会产生辐射波，这部分波所耗散的能量就是辐射增阻。绕射增阻与船体的绕射作用相关，波浪遇到船体时由于绕射作用会产生反射水波，这部分水波所耗散的能量就是绕射增阻。

当船体自由度被固定时，船体的运动受到限制，我们可以基本认为此时的波浪增阻主要是由绕射增阻引起的；当船体自由度放开时，船体运动不受限制，自身运动的同时也与波浪相作用，我们认为此时的波浪增阻包括绕射增阻与辐射增阻两部分。

由放开与固定自由度两种情况下波浪增阻的表现，我们可以大概复估算波浪增阻各成分所占比率  $n$ ，得到表 5-6 和图 5-11。

表 5-6 不同波长下波浪增阻成分表

	$\lambda/L$				
	0.4	0.7	1.1	1.3	1.6
绕射增阻(N)	1.968	2.078	1.937	1.825	1.767
绕射占比	85.45%	52.00%	18.31%	23.42%	93.25%
辐射增阻(N)	0.335	1.918	8.641	5.968	0.128
辐射占比	14.55%	48.00%	81.69%	76.58%	6.75%



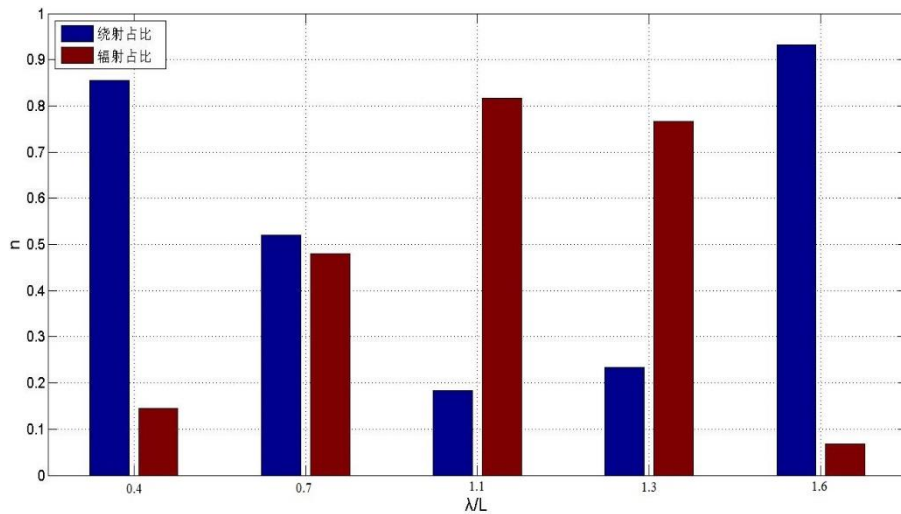


图 5-11 不同波长下波浪增阻成分占比图

由图 5-11 所示，在短波情况下，绕射增阻起主导作用，辐射增阻起的作用非常小，此时船体的运动对波浪增阻的影响不大；随着波长变大，在中长波部分，船体的运动越来越剧烈，直到产生共振，此时其决定性作用的是辐射增阻，绕射增阻占比很少；随着波长增加，在长波情况下，船体与波浪运动，这时的辐射作用较之前减缓，波浪增阻数值变小，绕射增阻占比增加。

因此，在短波与长波情况下，船体运动对波浪增阻的影响很小，要减少波浪增阻应该主要减少船体与波浪的绕射作用；在中长波的情况下，辐射增阻对波浪增阻的影响占主导地位，此时应该通过减少船体运动的运动幅值从而达到减少波浪增阻的目的。

## 5.6 本章小结

本章主要对比了静水与波浪工况下，DTC 船受力与兴波的差异，从而说明波浪增阻的研究必要性。接着根据波浪增阻的影响因素，选取了不同的计算工况，进行了相关的数值计算。随着波长增加，波浪增阻先增加后减小，在共振频率附近取得波浪增阻的峰值；随着航速的增加，波浪增阻呈增加趋势，这一点在中等波长情况下非常明显，在短波与长波情况下并不明显；固定自由度的情况下，波浪增阻基本不变，由此与放开自由度情况下的波浪增阻表现相对比，对波浪增阻的成分进行分析，发现在短波时绕射增阻占据主导地位，随着波长增加，船体运动变得剧烈，从而辐射增阻的作用增强，等到波长足够长时，船体与波浪一起运动，此时绕射增阻再次占据主要部分。由不同波长下波浪增阻的主导成分不同，应该采取不同的对应措施来减少波浪增阻。



## 第六章 总结与展望

### 6.1 全文总结

为了顺应节能减排的趋势，共同承担起保护环境的责任，世界范围内各行各业都在致力于碳排放的减少。国际海事组织环境保护委员会也制定了新的船舶能效系数 EEDI，对船舶的能效提出了新的更高的要求。船舶的能效一直是船舶行业研究者的关注重点，在新的 EEDI 标准提出之后，船舶能效的研究更是成为了重中之重。为了提高船舶能效，减少燃料消耗率，船舶阻力的减少是非常关键的一步。想要有效减少船舶阻力，仅仅研究静水中的船舶阻力是不够的，船舶在波浪中增加的阻力可能高达静水阻力的百分之五十，波浪增阻的减少能够有效改善船舶总阻力。

本文利用基于 OpenFOAM 工具箱的求解器 naoe-FOAM-SJTU 进行数值计算。该求解器选用的控制方程为 RANS 方程，以及 SST  $k-\omega$  湍流模型，波浪选择 stokes 一阶深水波来进行数值模拟。通过改变波浪的波长、DTC 航速、船体自由度，计算各种工况下的波浪增阻，得出了以下结论，具体为：

(1) 根据 SHOPERA 发布的 DTC 静水阻力试验数据，本文选择了航速为 15 节的数据点，使用求解器 naoe-FOAM-SJTU 进行数值模拟计算，计算结果与试验数值误差为 1.804%，说明求解器 naoe-FOAM-SJTU 具有非常高的准确度与可靠性，另外证明了 DTC 的 CFD 模型与划分的网格能够较好模拟 DTC 的运动与受力情况，可以用来进行下面的数值研究。

(2) 通过固定波高与航速，本文研究了放开自由度情况下，DTC 的波浪增阻与波长的关系，得出结论：随着波长的增加，在短波情况下，波浪增阻缓慢增加；在中长波情况下，波浪增阻变化显著，在达到共振之前波浪增阻显著增加，在共振时到达波浪增阻的峰值点，共振之后波浪增阻显著下降；在长波情况下，波浪增阻缓慢减少，数值与短波时相近。

(3) 通过固定波高，放开自由度，选取三种典型波长，研究航速与波浪增阻的关系，得出结论：在短波与长波情况下，波浪增阻随航速显缓慢增长；在中长波情况下，波浪增阻随航速增加变化明显，呈现快速增长。总体上，波浪增阻随着航速的增加呈现出数值增加的趋势。

(4) 通过比较放开自由度与固定自由度这两种情况下的波浪增阻表现，我们发现自由度对船舶增阻的影响十分明显。在放开自由度情况下，船舶增阻随波长先增加，达到峰值后减小；在固定自由度情况下，船舶增阻基本维持不变。

(5) 通过波浪增阻的成分研究，我们发现在固定自由度时，与船体运动有关的辐射增阻被移除，此时的波浪增阻主要是绕射增阻。由此我们发现，在短波与长波时，绕射增阻占主要部分，此时船体运动对于波浪增阻影响并不大，这与 (3) 中在短波与长波情况下航速增加对波浪增阻影响不大的结论相一致；在中长波时，辐射增阻占据主导地位，此时船体运动对波浪增阻影响较大，对应于 (3) 中中长波时航速增加，波浪增阻急剧变化。

(6) 由以上得出的结论，在研究 DTC 实际航行工况时，我们应该根据不同的航行环境采取相对应的措施减少波浪增阻。短波与长波时，船体运动与波浪增阻关系不大，此时应该着力于减少绕射作用；在中长波时，船体运动主要相关，应该减少船体运动的幅值与剧烈程度，达到减少波浪增阻的目的，尤其要注意峰值点，即共振的发生。

## 6.2 研究展望

本文通过计算不同工况下 DTC 的波浪增阻，得出了一些结论，但还是处于初步研究的阶段，希望研究工作能继续开展下去，主要涉及以下几个方面：

(1) 本文选取的波浪为规则波，造波类型为 stokes 一阶波，然而实际海况中主要是不规则波，并且还有风浪等更多的影响因素，类似这种考虑更多影响要素的研究才更有实际意义，希望未来能有更加切合实际海况的研究。

(2) 短波情况下的波浪阻力问题一直是一个研究难点，本文对这方面的研究力度还不够，希望未来可以以短波情况下的波浪增阻为重点研究内容。

(3) 在进行 DTC 的波浪增阻数值计算时，求解器 naoe-FOAM-SJTU 的稳定性并不能得到保证，希望提高 CFD 方法的稳定性，更好地进行数值计算。

(4) 本文使用 CFD 方法对波浪增阻进行研究，是基于粘性理论对波浪增阻进行了探讨，希望能与势流理论基础上的方法进行比较，探究更适合研究波浪增阻的理论方法。

(5) 本文主要得出的结论都是理论方面的，比如波浪增阻的成分分析，及不同波长下波浪增阻的决定要素等，这些结论的实用性没有得到体现，现有的研究进展以及本人自身的知识水平使得无法将这些结论应用到实际的船舶设计中，让船舶设计得到优化，提高船舶能效，这一点非常遗憾，希望未来的研究能够对船舶设计提出切实的建议。

## 5.3 本章小结

本章主要就本文的重点内容与结论进行了总结，并且对未来的研究进行了展望，希望未来研究可以取得本文没能得到理论结果，并且在实际建议方面有更多的进展。

## 参考文献

- [1] 戴君虎, 晏磊. 温室效应及全球变暖研究简介[J]. 世界环境, 2001(4):18-21.
- [2] 雷栋, 马跃. 新船能效设计指数介绍及应对[J]. 机电设备, 2012(s1):89-91.
- [3] 王分良. EEDI 时代的船舶减排[J]. 中国船检, 2009, (08):62-65.
- [4] 查若思. 单体船和双体船波浪增阻的数值计算分析[D]. 上海交通大学, 2015.
- [5] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理[M]. 上海交通大学出版社, 2004.
- [6] Liu S, Apostolos P, George Z. Prediction of added resistance of ships in waves[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(4):641-650.
- [7] Apostolos P, George Z. On an improved method for the evaluation of second-order motions and loads on 3D floating bodies in waves[J]. Journal Schiffstechnik—Ship Technology Research, 1987, 34.
- [8] 张文旭. 基于 EEDI 的集装箱船波浪中船型多学科优化[D]. 武汉理工大学, 2012.
- [9] 冯学知, 李俊兴. 船舶在规则波中阻力增加的理论预报与验证[J]. 船舶力学, 1998(6):24-29.
- [10] Gerritsma J, Beukelman W. Analysis of the resistance increase in waves of a fast cargo ship[J]. International shipbuilding progress, 1972, 19(217).
- [11] Joosen W P A. Added Resistance of Ship Waves[M]. Netherlands Ship Model Basin, 1966.
- [12] Havelock T H. XLVII. The drifting force on a ship among waves[J]. Philosophical Magazine, 1976, 33(221):467-475.
- [13] Maruo H, Sasaki N. On the Wave Pressure Acting on the Surface of an Elongated Body Fixed in Head Seas[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1974, 1974(136):107-114.
- [14] Maruo H, Iwase K. Calculation of Added Resistance in Oblique Waves[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1980, 1980(147):79-84.
- [15] Salvesen N, Tuck E O, Faltinsen O W. Ship Motions and Sea Loads[J]. Transactions - Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1971, 78.
- [16] Faltinsen K., Minsaaa N., Svein O. Skjoldal: Prediction of resistance and propulsion of a ship in a seaway[C]// In Proceedings of 13th Symposium on Naval Hydrodynamics, 1980.
- [17] Tsujimoto M, Kuroda M, Shibata K, et al. 10 On a Calculation of Decrease of Ship Speed in Actual Seas[C]// The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 2009:79-85.
- [18] 洪亮, 朱仁传, 缪国平等. 船舶在波浪中阻力增加的成分分析与比较[C]// 船舶水动力学学术会议. 2015.
- [19] 杨春蕾, 朱仁传, 莫中华, 等. 大型瘦削型船舶波浪增阻数值计算研究[C]// 中国科协年会. 2015.
- [20] Dawson C. A Practical Computer Method for Solving Ship-Wave Problems[C]// II Int. Conf. Num. Ship Hydrodynamics. 1977:30-38.
- [21] 朱德祥, 陈京普. 基于 Rankine 源的面元法及其船型优化中的应用[C]// 全国水动力学研讨会. 2009.
- [22] 李建鹏, 董国祥, 蒋永旭, 等. 船舶在波浪中的增阻及艏部改型初步研究[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2012, 35(2):34-38.
- [23] Hess J L, Smith A M. Calculation of non-lifting potential flow about arbitrary three-

- dimensional bodies[R]. DOUGLAS AIRCRAFT CO LONG BEACH CA, 1962.
- [24] Simonsen C, Stern F. CFD simulation of KCS sailing in regular head waves[C]//Proceedings from Gothenburg 2010—A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics. 2010, 2.
- [25] Shen Z, Jiang L, Miao S, et al. RANS Simulations of Benchmark Ships Based on Open Source Code[C]// the 7th international workshop on ship hydrodynamics. 2011.
- [26] 沈志荣, 叶海轩, 万德成. 船舶在迎浪中运动响应和波浪增阻的 RANS 数值模拟[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2012, 6: 002.
- [27] 闫岱峻, 邱耿耀, 倪阳. 大型船舶在短波中的增阻及伴流场数值计算研究[C]//第十三届全国水动力学学术会议暨第二十六届全国水动力学研讨会论文集——F 船舶与海洋工程流体力学. 2014.
- [28] 谢云平, 姚伟, 糜成杰, 等. 数值波浪水池与排水型高速船波浪增阻计算方法研究[J]. 船舶工程, 2013 (2): 6-8.
- [29] Yang C, Noblesse F, Lohner R, et al. Practical CFD applications to design of a wave cancellation multihull ship[C]//23rd Symposium on Naval Hydrodynamics. Val de Reuil, 2000: 17-22.
- [30] Tahara Y, Paterson E G, Stern F, et al. Flow-and wave-field optimization of surface combatants using CFD-based optimization methods[C]//Twenty-Third Symposium on Naval Hydrodynamics. 2001.
- [31] Hino T. Shape optimization of practical ship hull forms using Navier-Stokes analysis[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics. 1999: 1-15.
- [32] Shen Z R, Wan D C. An irregular wave generating approach based on naoe-FOAM-SJTU solver[J]. China Ocean Engineering, 2016, 30(2):177-192.
- [33] 王建华, 万德成. 基于重叠网格技术数值模拟船舶纯摇首运动[J]. 水动力学研究与进展, 2016(5):567-574.
- [34] 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, 2015, 30(2):180-186.
- [35] Boussinesq J. Essai sur la théorie des eaux courantes[M]. Imprimerie nationale, 1877.
- [36] Mcdonald P W. The Computation of Transonic Flow Through Two-Dimensional Gas Turbine Cascades[C]// ASME 1971 International Gas Turbine Conference and Products Show. American Society of Mechanical Engineers, 1971.

## 谢辞

时间过得飞快，转眼间，我的大学生活已经接近了尾声。四年愉快的大学生活之后，我迎来了对我四年学业水平的检测——毕业设计。毕业设计是对自己大学四年的一个总结，也是对自己的一个挑战。在完成毕业设计的期间，我遇到了困难也曾经放弃，但是最后都还是选择坚持了下来，为自己交上一份满意的答卷。

首先，我要感谢我的母校，上海交通大学。能够在上海交通大学学习，度过我的大学生活，真的是我这辈子最幸运的事情。我现在还记得自己拿到录取通知书，踏入校门那一刻的激动与欣喜，就好像多年的努力终于有了回报，那么充实与喜悦。感谢上海交通大学四年里教会我的知识，以及为我学习提供的良好环境，我将带着这份关怀，永远铭记这段时光。

接下来，我要感谢我的导师，万德成教授。早在跟着万老师做毕业设计之前，我就从别人口中无数次听说您的学术造诣，以及对待学生的和蔼可亲。初次见您，我的内心是非常忐忑与紧张的，担心自己不能很好完成毕设。尽管您很忙，课题组工作量那么大，您还是很关心我们毕业设计的同学，听取我们的报告，给出您的指导建议。虽然未来可能没有在您手下学习的机会了，但是我非常感谢有这段经历，让我感受在课题组中学习研究的氛围，得到您的指导。

然后，我要感谢在我毕业设计中一直帮助我的王建华学长、刘聪学长和孙晨光学长。王建华学长在我没有研究方向，不知对课题如何下手的时候帮助我理清了思路；刘聪学长为我提供了各种资料，让我更好地理解课题；孙晨光学长教我使用软件、画网格、进行数据的后期处理，一遍又一遍，非常耐心。如果没有这些学长的帮助，我觉得我的毕业设计将困难重重。

最后，我要感谢和我一起走过四年的大学同学，是你们和我一起互相鼓励，熬夜写论文，我非常珍惜这份友谊，也希望这份友谊不会随着我们毕业的天各一方而消散。

新的征程已经开始，我会带着满满的感恩继续前进，祝我大学四年里认识的善良的人们，还有我自己，都能实现自己的理想，拥有美好的未来！

# NUMERICAL SIMULATION AND ANALYSIS OF SHIP ADDED RESISTANCE IN REGULAR WAVES

In recent years, with the green house influence sharply increasing, the global temperature shows a trend of acceleration. In order to curb the trend and protect our environment, more and more people have paid much attention to the study of energy saving and emission reduction. As the second largest energy consumer in the world, China consumes a lot of energy to support economic and social development every year, which puts much pressure on the environment. The measures of energy saving and emission reduction are of no delay time. As one of the most important modes of transportation, the shipping industry is required to increase the rate of fuel consumption as well. Under this background, the improvement of the navigation performance of ships in the actual working process is valuable and necessary.

To improve the performance of ships, International Maritime Organization put forward new requirements of Energy Efficiency Design Index, which means a challenge for all the shipbuilding countries. To reach the purpose of energy saving and emission reduction, one of the methods is to decrease the ship resistance. Up to now, much relevant research has been done about ship resistance in calm water conditions. However, when a ship sails in wave conditions, it will always be affected by the extra resistance, which is namely added resistance. According to the relevant study, the added resistance can reach up to 30% of resistance in calm water, which is worth attention in the study of resistance reduction. The added resistance can lead to extra fuel consumption and speed loss in seaway, which have negative effects on seakeeping performance. As a result, it is of great value to analyze the added resistance and find ways to reduce it in wave conditions.

In this paper, we employ the CFD solver naoe-FOAM-SJTU, which is a software based on the open source toolbox OpenFOAM, to compute the added resistance of a ship in regular wave conditions. The solver naoe-FOAM-SJTU is developed for naval architecture and ocean engineering and has been proved to have a high degree of accuracy. We study several factors which may have influence on added influence and some results have been obtained. We also try to figure out the composition of added resistance, which may help optimize ship design.

In the first chapter, we study the significance, the definition and the factors that may have influence on added resistance. Firstly, the research on added resistance is of great importance, since it can help improve the performance of ships in wave conditions, and make new ships better meet the requirements of EEDI. It is of great importance to modify the resistance of ships, which can reduce economic costs and enhance competitive ability of our shipbuilding enterprise in ship manufacture industry. Afterwards, we introduce the definition of the added resistance, which can be calculated by the average resistance and calm water resistance. It is also stated that ship particulars and wave elements can have great influence on added resistance. Finally, three methods that widely used to study added resistance and relevant research are introduced, including ship model tests, theoretical methods and computational fluid dynamics. Among three methods, we introduce CFD in detail, especially the advantages of employing it, which make us choose it to calculate added



resistance in this paper.

In the second chapter, mathematical models and numerical models which are mentioned in the CFD solver naoe-FOAM-SJTU are introduced in detail. First, three fundamental governing equations are given, and then the RANS equation is reviewed and discussed, which is the governing equation in the solver. After that, we introduce some typical simulation methods, including Direct Numerical Simulation, Reynolds-Averaged Navier-Stocks, Large Eddy Simulation and Discrete Vortex Simulation. Then, several turbulent models are displayed and SST  $k-\omega$  turbulent model is introduced in detail, which is employed in this paper. Volume of Fluid is displayed in the following, which is used to manage the free surface. We also introduce the waveMaker class in the solver naoe-FOAM-SJTU, through which we can make regular waves. Afterwards, a brief explanation about how to solve discrete equations is given. Finally, we give the structure of the process of CFD calculation. These theories play fundamental roles in the CFD works, through which we can better comprehend our study.

In the third chapter, an introduction of DTC is given, which is the object in this paper. DTC is a ship developed by an organization called SHOPERA. The organization aims at developing the technology of ship design and improve numerical methods and tools to better advance the development of ship industry. SHOPERA has done a lot of model tests. According to the parameters of the real ship, the model that used in added resistance computation can be designed. Based on the open source toolbox OpenFOAM, the three-dimension model can be established.

In the fourth chapter, a benchmark ship case of DTC model sailing in still water is simulated in order to validate the correction and reliability of the CFD solver naoe-FOAM-SJTU. According to the benchmark case, we can also figure that whether the three-dimension model can make correct response. First, according to the test data released by SHOPERA, we select the speed of the benchmark case, which is fifteen knots per second. After that, we mesh the model and solve the resistance in calm water conditions at a speed of fifteen knots per second. The results show that the resistance computed by the solver naoe-FOAM-SJTU only has an inaccuracy of 1.8% compared with the test data, which indicates a high degree of accuracy and reliability of the solver naoe-FOAM-SJTU..

In the fifth chapter, the added resistance of DTC is computed and analyzed under different conditions, and the relations between added resistance and speed, wave length and degree of freedom are studied. First, we set no limit to the degree of freedom of DTC, and keep the speed unchanged, to study the relations between added resistance and wave length. According to the calculation results, we find that in short waves, the added resistance increases slowly with the wave length going up and the value of added resistance is very small. While in medium waves, added resistance changes obviously with wave length increasing. It goes up sharply until reaching the peak, after which added resistance decreases with wave length going up. Opposite to short waves, added resistance goes down when wave length increases in long waves. We can find that the values of added resistance are both small and change slowly. Afterwards, we calculate added resistance in short waves, medium waves and long waves respectively, changing the speed. The results help obtain the following conclusions. In three different wave conditions, added resistance increases with speed going up. However, the speed of rise in short and long waves is far less than that in medium waves, which indicates that added resistance may not be sensitive to the change of speed in short and long waves. Finally, we try to find the relations between added resistance and the degree of freedom. The added resistance is computed in the condition that the motion of ship is fixed, and we

find that the value of added resistance keeps basically unchanged with wave length going up, which is obviously different from the performance in the previous conditions. To figure out the reason, we study the composition of added resistance, and find that added resistance is made up of two parts, namely the diffraction component and radiation component. The diffraction component results from wave reflection diffraction, while radiation component is generated from ship motion. When the ship is fixed, the radiation component is removed from total added resistance, and the diffraction does not change obviously with wave length changing. It can be inferred that the added resistance contains diffraction component and radiation component when the ship is free, while the radiation component is removed after the ship is fixed. As a result, we can approximately estimate the proportion of the components of added resistance by comparing results under different degree of freedom. The results show that in short and long waves, the diffraction component is dominated, while in medium waves, the radiation component plays the most important role.

In the last chapter, a summary of current work is given and some suggestions to the future work are stated as well. In this paper, added resistance is calculated in regular waves. However, in the actual sailing, the waves are usually irregular and always accompany with winds. I think more factors should be taken into consideration when studying added resistance, which may more accord with the fact. Second, it is always a thorny point to study added resistance in short waves, and in this paper, little attention is put on the short wave condition. It is necessary to do some future work about ship performance in short waves. Third, since the solver naoe-FOAM-SJTU can be efficient when computing added resistance, there are still some disadvantages. Sometimes, the solver may crash during the computation, and I hope the solver can be optimized and be more stable. Fourth, the conclusions obtained from this paper are mainly about theoretical side, which have difficulty in practical application. I hope thorough research can be done in future, and make contributions to ship optimization design.