

上海交通大学硕士学位论文

带节能装置-桨-舵的船舶自航数值模拟与分析

硕士研究生：尹崇宏

学 号：1140109212

导 师：万德成 教授

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：2017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

Candidate:	Yin, Chonghong
Student ID:	1140109212
Supervisor:	Prof. Wan Decheng
Academic Degree Applied for:	Master
Speciality:	Naval Architecture and Ocean Engineering
Affiliation:	School of Naval Architecture, Civil and Ocean Engineering
Date of Defence:	Jan, 2017
Degree-Conferring-Institution:	Shanghai Jiao Tong University

上海交通大学 学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

上海交通大学 学位论文版权使用授权书

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

保密，在___年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

带节能装置-桨-舵的船舶自航数值模拟与分析

摘要

随着近年来能源紧缺、石油价格上涨以及温室效应等问题，绿色船舶设计作为一股新风逐渐引起行业内相关人员的重视。长久以来，船舶航运业一直是消耗能源的重要行业，同时也导致了温室效应等一系列环境问题。因此，通过相关技术革新，绿色船舶节能设计成为世界各国造船界和航运界研究的重要课题。国际海事组织（IMO）近年来尤其重视对船舶节能减排以及对船舶“绿色化”建造的引导，并推出了强制性的船舶能效设计指数（EEDI, Energy Efficiency Design Index）。EEDI 的设立为造船界设定了以二氧化碳排放为指标的船舶能耗标准，将从设计建造阶段对船舶能耗提出新的更高的要求。

降低船舶能耗的一个重要手段是对船舶安装船舶节能装置，因为相对船型优化、主机传动优化等其他手段，安装船舶节能装置工艺简单、风险低、效果明显，同时适用范围广。近年来，船舶节能装置的设计和应用越来越受到有关设计人员和船舶海运市场的重视。

目前，相关研究人员对于船舶节能装置的设计研究主要基于模型试验方法展开。模型试验方法在船舶节能装置的设计中存在先天的劣势，因为船舶节能装置的设计需要通过对船尾复杂细节流场进行精确评估，通过不断优化节能装置的各项设计参数和安装位置来达到最优效果，这导致完全采用模型试验来进行船舶节能装置设计成本高昂。同时，传统的势流方法也无法对细节流场进行提取，因此采用计算流体力学方法进行 CFD 数值模拟在船舶节能装置设计中逐渐成为一种重要的手段。

本文的工作基于课题组自主研发的船舶与海洋工程水动力学 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU，采用重叠网格技术进行全粘性流场计算。为了验证求解器以及重叠网格技术的可靠性，本文首先采用 2015 年东

京 CFD 研讨会标准船型 JBC 船进行船-桨配合的自航计算，通过与模型试验的对比分析来确保数值计算的精度。为了进一步对安装有节能装置的 VLCC 和 JBC 两型船进行自航性能和节能装置效果的有效评估，本文对两型船分别进行带/不带节能装置静水阻力计算分析、螺旋桨敞水性能计算分析以及带桨强制/纯粹自航计算分析，通过全面系统的计算完成带节能装置、船-桨配合的船舶自航性能预报以及节能装置效果分析评估。

关键词：船舶节能装置、船舶自航、粘流、重叠网格、naoe-FOAM-SJTU

ABSTRACT

With the energy shortage, rising oil prices, greenhouse effects and other issues in the last decades, energy-saving emission reduction increasingly aroused the concern of the community. Shipping industry consumes a lot of energy and emissions and of large amounts of greenhouse gases, so the ship energy saving has become an important research topic in the world's shipbuilding industry and shipping sector. In recent years, the International Maritime Organization (IMO) has accelerated the implementation of green shipbuilding, limit the pace of new shipbuilding greenhouse gas emissions, and promote the development and implementation of ship energy efficiency design index (EEDI) standards. The EEDI was established to build a minimum energy efficiency standard for the ship and stimulate all innovations and technological developments that affect the energy efficiency of the ship from the design stage. At the same time, the continuing downturn in the shipping industry has sparked a strong demand from shipowners for reducing ship energy consumption.

By virtue of its simple process, low risk, the obvious effect and a wide range of applications, ship energy-saving devices has become more and more popular in shipping market. At present, the study of ship energy-saving devices is mainly based on the method of model test. However, the design of ship energy-saving devices requires accurate assessment of the flow field, so a lot of detail design and modification is needed, which led to the full use of model tests for ship energy-saving device design costly. With the development of numerical techniques and the progress of computer hardware, computational fluid dynamics (CFD) is playing an increasingly important role in many disciplines, including ship design and ocean engineering. By using the CFD technique to calculate the total viscous flow field, we can accurately capture the information of the

stern detail flow field and evaluate the effect of the energy saving device effectively.

The work of this paper is based on the solver naoe-FOAM-SJTU, a hydrodynamic CFD solver developed by the research group, which uses the overlapped grid technology to calculate the total viscous flow field. In order to evaluate the self-propelled feature of VLCC and JBC fitted with energy-saving devices, the calculation of standard ship JBC from Tokyo CFD Seminar in 2015 is carried out firstly, the reliability of the solver and the overlapping grid technique is verified by comparative analysis of the experiments. Self-propulsion simulations in this work consider the effect of free surface and directly discretized propeller. Self-propulsion points are obtained in a single computation by using a controller to modify the propeller RPS until the target speed is reached. Finally, self-propulsion factors for self-propelled JBC and VLCC with and without ESD (Energy Saving Device) are analyzed and compared with experimental data.

KEY WORDS: Ship energy saving device, self-propulsion, viscous flow, overset grid, naoe-FOAM-SJTU.

目 录

摘 要	IV
ABSTRACT	VI
第一章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 船舶节能装置的分类和作用原理	4
1.2.1 提高螺旋桨推进效率的节能装置	4
1.2.2 减小船体摩擦阻力的节能装置	9
1.2.3 利用可再生能源的节能装置	9
1.3 船舶节能装置研究现状	11
1.3.1 基于试验的节能装置设计评估	11
1.3.2 基于 CFD 技术的节能装置设计评估	13
1.3.3 基于 CFD 技术的船-桨配合计算研究	17
1.4 本文主要工作	18
第二章 数值求解器基本框架及理论基础	20
2.1 引言	20
2.1.1 控制方程与湍流模型	20
2.1.2 自由面处理	21
2.1.3 重叠网格技术	21
2.1.4 多级物体运动模块	23
2.1.5 方程离散	24
2.1.6 naoe-FOAM-SJTU 求解器结构框图	26
2.2 JBC 标准船型自航算例验证	26
2.2.1 自航数值计算模型	27
2.2.2 计算网格与边界条件	28
2.2.3 计算结果分析比较	30
2.3 本章小结	32
第三章 JBC 伴流补偿导管节能效果数值计算与分析	33
3.1 引言	33
3.2 计算模型与网格	33

3.2.1 几何模型	33
3.2.2 计算域与计算网格	35
3.3 计算结果分析	38
3.3.1 JBC 静水阻力计算结果分析	38
3.3.2 MP687 螺旋桨敞水性征计算分析	40
3.3.3 JBC 自航计算结果分析	43
3.4 本章小结	47
第四章 VLCC 前置预旋导轮节能效果数值计算与分析	48
4.1 引言	48
4.2 计算模型与网格	48
4.2.1 几何模型	48
4.2.2 计算域与计算网格	50
4.3 计算结果分析	52
4.3.1 VLCC 静水阻力计算结果分析	52
4.3.2 螺旋桨敞水性征计算分析	55
4.3.3 VLCC 自航计算结果分析	58
4.4 本章小结	63
第五章 总结与展望	64
5.1 全文总结	64
5.2 研究展望	66
参 考 文 献	67
致 谢	71
攻读硕士学位期间已发表或录用的论文	73

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

近年来，IMO 推动了船舶能效设计指数（EEDI）标准的制定和实施，绿色造船、限制新建船舶温室气体排放的措施逐渐引起工业界和科研界的重视。降低船舶能耗的一个重要手段是对船舶安装船舶节能装置，因为相对船型优化、主机传动优化等其他手段，安装船舶节能装置工艺简单、风险低、效果明显，同时适用范围广，因此，船舶节能装置的设计和应用越来越受到有关设计人员和船舶海运市场的重视。

EEDI 的设立是为船舶建立一个最低能源效率的标准，其初衷是从设计阶段刺激所有影响船舶能效要素的革新和技术发展，并通过对现有船舶的统计分析设立排放基线，在基线的基础上对新船能效水平进行控制。随着 IMO 强制执行 EEDI，目前的船舶设计、建造及配套单位就必须对不满足要求的船型进行改进，方能进入国际市场。据相关机构估算，按照 IMO 制定的 EEDI 指数基准，现有半数以上的船舶都不能达到新公式的要求。EEDI 标准的制定过程中主要反映了发达国家的意志，其中包括各种手段来限制发展中国家船舶工业的发展。这将对我国船舶工业的发展带来严峻的挑战：一方面，由于我国设计建造的船舶能效水平超标，将导致产量下降、订单外流、工人失业等问题；另一方面，高额的碳排放量将给我国政府和航运企业带来巨大的压力，对我国航运业的可持续发展带来不利影响。

对于船舶节能减排的研究，欧美国家和日本的起步较早，在模型试验和实际应用领域都较为成熟。相对国际先进水平，我国在该方面的模型试验和理论研究都较为欠缺，在实际应用领域也缺乏实用化的设计。相关研究的缺失导致了我国相关部门在参与 IMO 谈判时因缺乏研究基础而丧失话语权，难以为本国的造船企业和航运企业在竞争中争取自身利益。在船舶航运业本身萧条的大环境下，难以参与国际标准制定的我国船舶制造企业将雪上加霜。在这样的背景下，针对船舶能源效益和节能减排的研究工作显得刻不容缓。

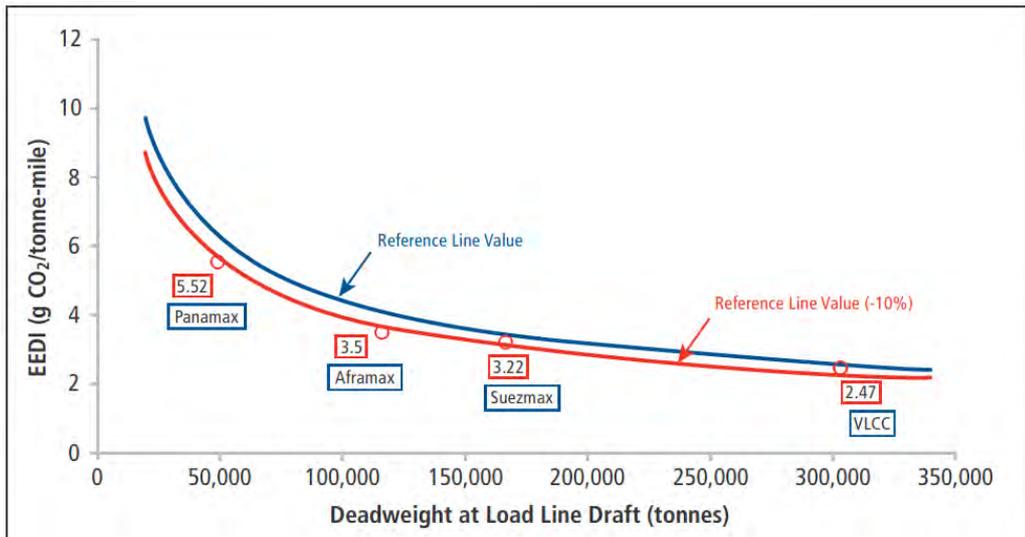


图 1 - 1 EEDI 对标准油船的评估 [1]

Fig. 1-1 EEDI Assessment for Standard Tankers

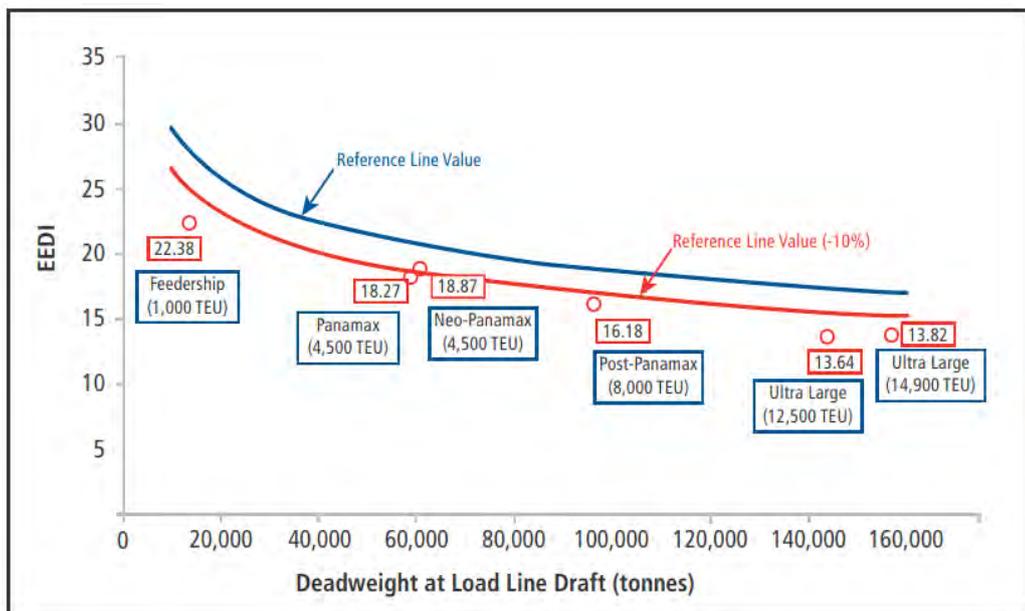


图 1 - 2 EEDI 对典型集装箱船的评估 [1]

Fig. 1-2 EEDI Assessment for Typical Containerships

现阶段，在船舶设计和建造过程中通过相关手段降低船舶能耗水平，使其适应于 IMO 推行的 EEDI 标准以及船东对经济性的普遍需求，主要存在的技术思路有以下几种：

- 1、船体型线优化；

- 2、船体结构优化；
- 3、主机传动优化；
- 4、安装船舶节能装置。

船型优化技术以及船体结构优化技术需要在设计阶段即对船舶进行相应的改动，其特点是效果明显，但工作量较大。船型优化需要从船舶设计的总体布局角度出发，涉及面非常广泛，已经超出了一般的船舶水动力学问题的范畴；另一方面，船型优化技术难以对已经下水的船舶进行二次修改，这意味着对于大量已经投入运营的船舶船型优化技术是无能为力的。通过优化主机传动来提高能源利用率则需要一定的技术积累，涉及到轮机、传动、材料、结构等各项船舶装备，其过程相对复杂。相对于前三者，给船舶安装节能装置成本较小、风险较低，而且不需要对现有船体结构进行改动，能够对已经参与航运的船舶进行二次修改，降低其能耗以适应 EEDI 标准。同时，安装船舶节能效果明显，根据不同情况安装各类船舶节能装置可以实现 1%~7%左右的船舶节能，多项组合型的船舶节能装置更是能达到 8%甚至 10%左右的节能。正是因为船舶节能装置在降低船舶能耗的措施中优势明显，因此渐渐受到船东和设计人员的重视，成为目前行业内研究的一个重点课题和船舶节能突破点。

相对于西方发达国家和日韩等造船强国，我国在绿色船舶设计和船舶节能装置设计研发中处于相对落后的位置。国内船厂及船舶设计单位普遍对于船舶节能装置重视程度不够，应用的船舶节能装置也以引进国外的相关设备为主。

从实际船舶设计出发，正是因为安装船舶节能装置对于提高船舶能效有着重要的影响，针对船舶节能装置的研究也就具有重大的意义。对于设计的船舶节能装置，如何有效准确的评估其节能效果以及对船舶推进性能和尾流场的影响，成为本文研究的主要目的。

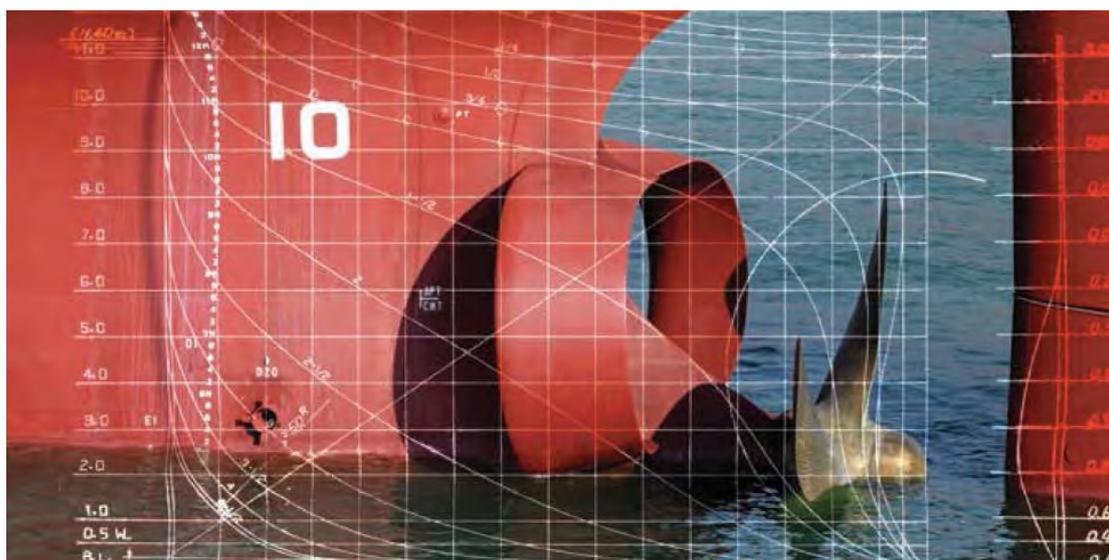
图 1-3 船舶节能装置示意^[1]

Fig. 1-3 Ship energy saving device

1.2 船舶节能装置的分类和作用原理

根据船舶节能装置的分类，目前关于船舶节能装置的研究主要集中在以下三个方面：

- 1、用于提高螺旋桨推进效率的节能装置 (Propulsion Improving Devices, PIDs)；
- 2、用于减小船体摩擦阻力的节能装置 (Skin Friction Reduction)；
- 3、利用可再生能源（如太阳能和风能）的节能装置 (Renewable Energy)。

接下来本部分就分三方面介绍各种节能装置的原理与节能效果。

1.2.1 提高螺旋桨推进效率的节能装置

根据节能原理以及安装位置的不同，可将该部分节能装置归结为以下 4 类：

- 1) 伴流补偿和减轻流动分离的装置。

伴流补偿类节能装置主要应用于中低速肥大型船。伴流补偿导管 (Wake Equalizing Duct, WED) 是这类装置中的典型代表。伴流补偿导管是一种常见的水动力节能装置，最早由日本企业研发完成并投入实用。伴流补偿导管安装于船尾部、螺旋桨前方，根据实际船尾伴流场有若干种改形，其典型设计如下图 1-4 所示。伴流补偿导管开口方向通常对准螺旋桨上半盘面，用来改善肥大型船上半桨盘面的入流均匀性，同时通过机翼形的剖面对船舶产生附加推力。据已经安装海试的船舶统计，伴流补偿导管通常可获得 2%~6% 的节能效果，是一种高效的船舶节能装置。

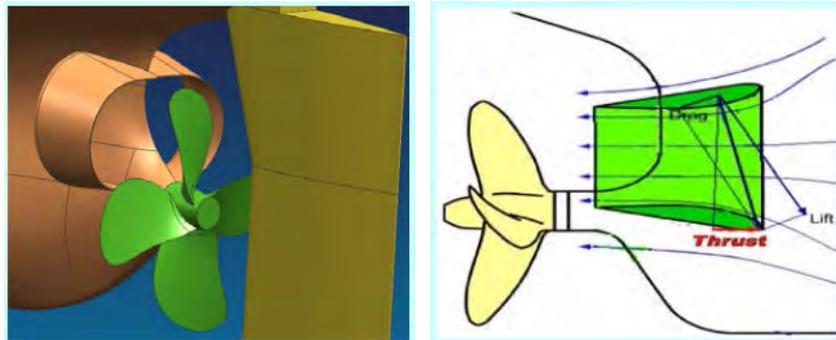


图 1-4 伴流补偿导管及其节能原理示意 [2]

Fig. 1-4 Wake equalizing duct work principle

2) 前置预旋装置。

前置预旋装置主要分为前置预旋定子 (Pre-swirl Stator) 和前置预旋导轮 (pre-swirl duct)。前者主要应用于伴流不严重中高航速的集装箱船；后者相当于前置预旋定子和伴流补偿导管的“结合体”，主要应用于低速肥大船。

前置预旋导轮是船舶节能装置中前置预旋装置的典型代表。前置预旋导轮是一种前置式水动力节能装置，相当于 1) 中伴流补偿导管与前置预旋定子的“结合体”。前置预旋导轮常安装在船尾与螺旋桨之间，内部的非对称定子起对来流“预旋”的作用，导管则类似伴流补偿导管的作用，可以在“汇流”的同时改善船尾压力分布，减少流动分离。中船重工节能公司设计的前置预旋导轮曾成功应用于南京远洋“海澜”系列船型，反馈节能效果达到 3%~7%。本文第四章基于 CFD 技术研究的船舶节能装置即为安装于 32 万吨超大油轮的前置预旋导轮。

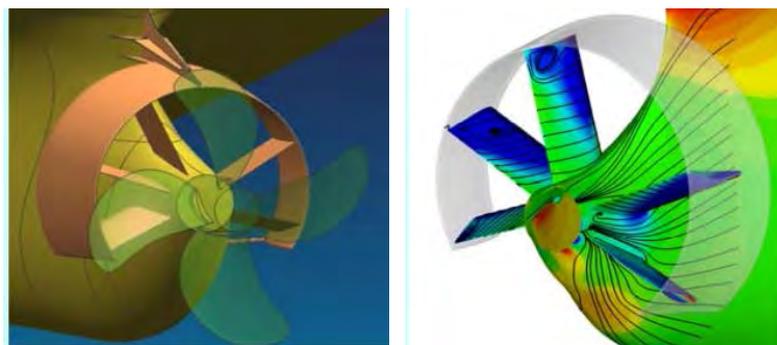


图 1-5 前置预旋导管及其节能原理示意 [2]

Fig. 1-5 Pre-swirl duct work principle

3) 后置旋转装置。

后置旋转装置主要包括消涡鳍 (Hub Vortex Absorbed Fins), 舵球 (Rudder Bulb), 扭曲舵等。

消涡鳍是一种典型的后置旋转船舶节能装置, 其设计结构相对简单。消涡鳍的主要做法是在螺旋桨将军帽上增设与螺旋桨叶树相同的小叶片, 其节能的主要思想是通过打散螺旋桨桨毂涡以恢复桨毂或舵叶压力、利用尾流轴向加速水流做功产生额外推力、以及回收螺旋桨尾流能量来减少螺旋桨尾流能量损失。消涡鳍具有结构简单、重量轻、安装方便、实用安全、造价较低等优点, 无论在新船上还是在旧船上安装, 都可以起到 2%~5% 的节能效果。

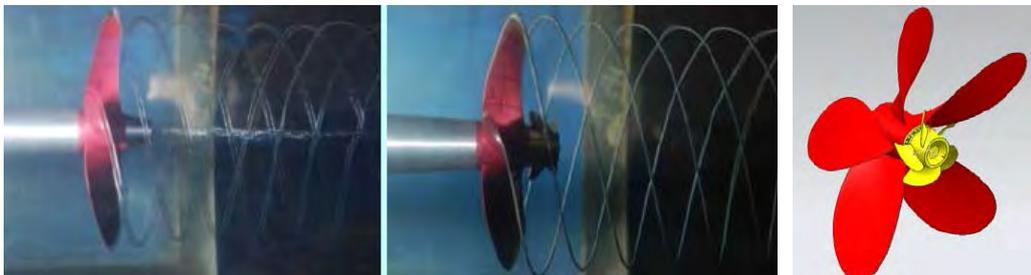


图 1-6 消涡鳍示意^[2]

Fig. 1-6 Hub Vortex Absorbed Fins (HVAF)

舵球是一种与船尾舵相结合的简易船舶节能装置, 其做法是在常规舵上设计一个与桨毂形状结合良好的球状体, 通过改善桨毂涡的分离状况来回收螺旋桨桨毂涡能量损失; 舵球结构简单、安装方便, 通过较小的改动即可获得 0.5%~2.5% 的节能效果, 在中速集装箱船上应用比较广泛。

高性能舵也是一种常见的船舶节能装置, 如下图 1-7 所示, 其基本原理与舵球类似, 通过对桨后方舵结构的整体设计来改善桨毂后流场, 能够充分回收桨后能量, 经统计可以回收 1%~3.5% 左右的能量损失。



图 1-7 高性能舵示意^[1]

Fig. 1-7 High efficiency rudder

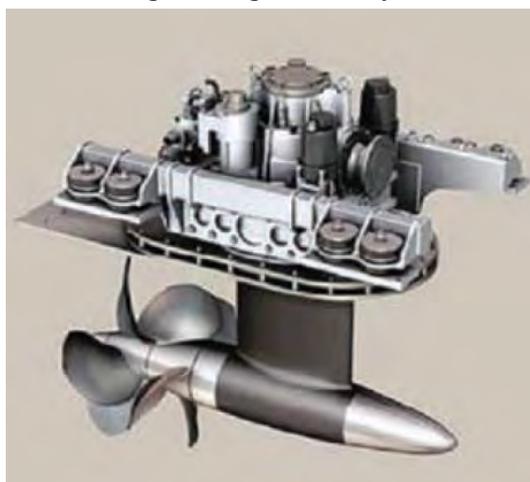


图 1-8 对转式螺旋桨^[1]

Fig. 1-8. Contra-rotating Propellers

4) 高性能推进螺旋桨。

高性能螺旋桨是非典型的船舶节能装置，根据实际需要有多种不同形式。新型高效螺旋桨主要有适伴流调距桨、导管螺旋桨、无梢涡螺旋桨以及部分浸水螺旋桨、振动推进器、竖轴直翼推进器、全方位推进器等。

高性能螺旋桨的设计思路主要是通过对螺旋桨以及螺旋桨周围流场的设计来提高其推进效率、减小船体振动、降低噪声，同时对于特种船舶也可以改善其船舶操纵性。高性能螺旋桨中以导管螺旋桨应用最为广泛，螺旋桨载荷越重、尾流能量损失越大，越宜采用。



图 1-9 导管螺旋桨

Fig. 1-9. Catheter Propellers

表 1 - 1 几种类型节能装置的节能原理及效果评估

Table 1-1 Principles and effectiveness evaluation of several energy-saving devices

	节能原理	节能效果	设计参数	适用性
伴流补偿装置	1) 优化船尾伴流场; 2) 通过机翼形剖面产生附加推力; 3) 对螺旋桨进流进行加速、提高其推进效率; 4) 通过改善船尾压力分布减小船尾流动分离。	2%~8%	进/出口直径; 长度; 剖面翼型; 外轮廓; 与桨盘面距离; 水平、垂向偏距及安装角。	肥大船型
前置预旋装置	1) 优化船尾伴流场; 2) 通过机翼形剖面产生附加推力; 3) 对螺旋桨进流进行加速、汇流、提高其推进效率; 4) 通过改善船尾压力分布减小船尾流动分离; 5) 通过预旋定子对螺旋桨进流产生预旋。	3%~8%	叶片数; 叶片展长; 叶片弦长; 叶剖面; 安装角度和位置。	通用

后置旋转装置	1) 打散桨毂涡, 回收能量; 2) 恢复舵球及舵表明压力; 3) 减小尾流旋转能量损失。	1%~5%	直径; 长度; 厚度; 外形; 与螺旋桨间距。	通用
高性能螺旋桨	1) 提高螺旋桨效率; 2) 改善操纵性。	3%~10%	螺旋桨设计	通用

1.2.2 减小船体摩擦阻力的节能装置

减小船体摩擦阻力的节能装置主要分为空气润滑装置和船体表面纹理装置两部分。在船舶阻力成分中, 船体的粘性阻力在中、低航速船舶的总阻力是主要成分, 粘性阻力最大的来源就是船体表面的摩擦力。摩擦力的大小主要取决于船体湿表面积、船体在水中的运动方式以及实时海况。减小摩擦阻力主要有三个手段: 减小湿表面积 (线性减小), 降低航速 (二次减小), 改善船体湿表面与水的作用方式。对于最后一种手段, 改变船体表面纹理是常见的有效方式。其典型的做法是对船体表面纹理进行处理, 如下图 1-10 所示, 在船侧添加进气口等。



图 1-10 船侧进气口^[4]

Fig. 1-10. Air induction pipe over the hull side

1.2.3 利用可再生能源的节能装置

随着对太阳能、风能利用效率的提高, 在航行的船舶上添加利用可再生能源的船舶节能装置也成为一种新的思路和方法。根据利用可再生能源得不同, 该部分节能装置主要分为利用风能的节能装置和利用太阳能的节能装置。

利用风能的常见方式是拖放风筝和安装风帆。全球海洋风能资源要远远大于陆地，从古代开始，利用风帆进行船舶驱动就是一个典型的方式。19 世纪以来随着工业革命的推进，蒸汽轮机和船舶柴油机逐渐称为船舶的主要动力来源，风帆逐渐被弃用。近年来，随着绿色船舶概念的提出和船舶能耗问题的突出，在风力较大的航线上应用风帆作为辅助动力从而节省船舶能耗成为研究热点，由于拖放风筝需要较高的航速，因此在远洋集装箱船上使用较为普遍。风帆系统主要包括：拖放风筝、控制系统、控制盒、缆绳、绞车、收放系统等。

利用太阳能的主要手段则是在船甲板上安装太阳能电池板。目前世界上最大的太阳能船——Tûranor PlanetSolar 号曾单纯凭借太阳能在 2010 年完成环球之旅，其重达 89 吨、拥有 512 平方米太阳能电池板。虽然这艘船在能效、速度等各方面可能尚未尽如人意，但是却是未来的可再生动力船的一个很好的示范。

尽管在风能和太阳能利用领域有着诸多的尝试，但由于拖放风筝系统及回收系统较为复杂，同时太阳能电池板的效率和成本问题，这两种方法在目前主流的船舶节能措施中使用并不广泛。风能利用和太阳能利用的典型示意图如下图 1-11 所示。



(a) 风能利用



(b) 太阳能利用

图 1 - 11 可再生能源利用(拖放风筝和太阳能电池板)

Fig. 1-10. Renewable energy (Towing Kite and planet solar)

1.3 船舶节能装置研究现状

1.3.1 基于试验的节能装置设计评估

船舶节能装置的设计需要对船尾细节流场进行预报分析，用来评估节能装置的作用。传统的势流方法在处理该类细节流场问题时较为困难，因此目前对船舶节能装置的设计和评估主要基于模型试验和实船海试展开。实船海试对于设计人员来说是非常规手段，同时成本过高。模型试验主要基于两方面展开研究：首先是安装节能装置后的静水阻力试验，主要考察安装的节能装置对船尾伴流场以及船体阻力的影响，通过 PIV 技术等精确的船尾流场提取为船尾型线设计和节能装置的设计修改提供伴流场信息；下一步是进行安装节能装置后的带桨自航试验，主要考察螺旋桨与节能装置的匹配问题，对节能装置的安装位置、角度等进行评估选择，并对节能效果进行预报。

应用模型试验方法研究船舶节能装置是目前较为普遍的做法，国内外学者都进行过大量的工作。荷兰 Maritime 水池的 Jie Dang 等^[3]对常见的螺旋桨前置类节能装置进行了研究，模型试验过程中采用 PIV 测量等技术得到船尾精细流场，为节能装置的设计提供参考。经过大量的试验数据分析，其在文章中提出了一种在安装节能装置情况下由船模阻力外推实船阻力的方法，对 1957 ITTC 换算公式^[33]进行了拓展。

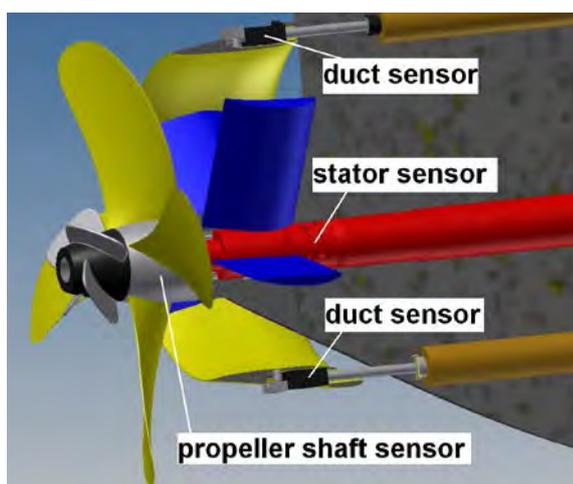
图 1 - 12 模型试验测量装置^[3]

Fig. 1-12. The sensors used to measure forces and moments

Emin Korkut^[4]等对一种圆形的伴流补偿导管分别展开静水阻力试验研究和带桨自航试验研究，采用了丰富的流场可视化技术捕捉流场细节信息。模型试验中在节能装置前方的船体左右舷侧设置了漩涡发生器用来控制边界层的分离。模型试验的结果采用 ITTC 1978 公式换算到实船，并对模型尺度结果和实船结果进行了比较分析。

Hansen^[5]等对安装于阿芙拉油船（Aframax Tanker）的螺旋桨毂帽鳍进行了研究，模型尺度的研究通过拖曳水池中的带桨拖航试验完成，实尺度的测试则进行了实船海试。在对节能效果的评估中，采用了功率指标。模型试验分别对 8kn，14kn，16kn 航速下满载、压载工况的螺旋桨轴功率进行分析，安装毂帽鳍后轴功率均有 3%~4% 的降低，在满载工况下节能效果相对更明显。实船海试在 14.4kn~15.6kn 航速范围内进行，结果显示安装毂帽鳍后螺旋桨轴功率有 3.89%~3.41% 的降低，航速越低，节能效果越明显。

Holtrop^[6]等对带节能附体的模型试验结果外推法进行了研究，提出了一种考虑节能装置对螺旋桨推进性能影响的阻力外推法，与 Emin Korkut^[4]等的做法类似，也对安装船舶节能装置下的 1978 ITTC 公式进行了拓展和补充。



图 1 - 13 安装于实船的毂帽鳍^[5]

Fig. 1-13. Propeller boss cap fins on Aframax Tanker

从上世纪八十年代开始，国内的学者也开展了一系列的模型试验工作来研究船舶节能装置的效果。胡敬等^[7]对 64000t 散货船半前置整流导管振动特性进行了分析，这是国内较早的研究前置导管的文献。钱文豪等^[8]对内河船上的水动力附加节能装置进行了研究。李洁雅等^[9]对安装于 16000 吨“红旗 125”货舱的进流补偿导管进行了试验研究和实船测试；评估的效果显示，只要位置安装合理，安

装进流补偿导管之后船体阻力与未安装时相差很小，在某些航速下甚至会减小阻力；与未安装相比，安装进流补偿导管节能装置之后，通过对螺旋桨收到功率分析比较发现节省能源 4.24%~6.63%。中船重工 702 研究所在船舶节能装置的研发中一直处在国内前列，黄国富等^[10]研究了 5.7 万吨散货船上的组合式水动力节能装置，首先经过 CFD 性能预报优选设计前置预旋导轮和消涡鳍的组合节能方案，之后进行了模型试验的验证，采用螺旋桨轴功率指标，发现在不同工况下组合节能装置可以取得 4%~7% 的节能效果，并得到了实船试航结果的验证。黄少锋等^[11]对应用于 82000 吨散货船上的伴流补偿导管和前置定子进行了不同方案的研究；伴流补偿导管设计了 5 个不同的安装角度，前置定子设计了 3 中不同的定子配置方案，最终经过大量模型试验确定了伴流补偿导管+舵球的组合方式进行节能，节能效果能够达到 7% 左右。

1.3.2 基于 CFD 技术的节能装置设计评估

模型试验虽然可以较准确的具体评估某一节能装置的节能效果，但是由于无法得到精细的船尾流场信息，给节能装置设计提供的信息有限。同时，由于成本过高等问题，难以在大量不同的节能装置设计方案中进行优选，也限制了对节能装置参数优化以及深入研究。

近年来，随着 CFD 技术的成熟与规范，采用计算流体力学技术对船舶节能装置进行设计分析逐渐称为主流的方法，并且得到工程界越来越多的重视。因此，国内外的学者也开始利用 CFD 技术对各种不同形式的船舶节能装置展开了深入的研究。节能装置效果评估中 CFD 与试验的关系如下图 1-14 所示，CFD 技术不仅能对模型尺度下的船舶节能装置进行评估分析，也可以直接对实船尺度下的船舶节能装置效果进行评估，并直接与实船海试测量的结果进行比较，相对模型试验和传统的势流方法展示出巨大的优势。

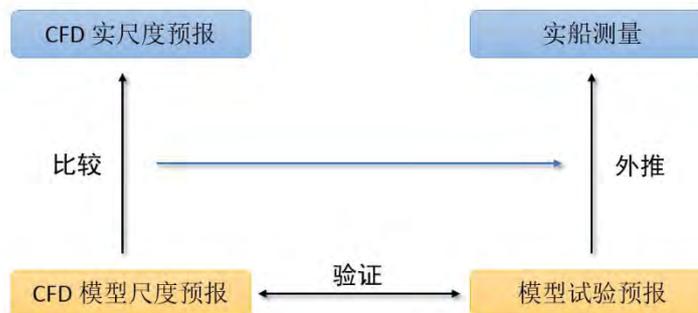


图 1-14 节能装置效果评估中 CFD 与试验
Fig. 1-14. CFD and experimental test in ESD design

Fahri Celik^[12]利用商业软件 Fluent、采用 RANS 模型对安装于化学品运输船的伴流补偿导管进行了数值模型研究，得到了详细的尾流场和船尾伴流场；为了提高计算效率，仅对后半船体进行数值计算。研究通过分析 10kn~16kn 航速下伴流分数和螺旋桨推进性能，发现对于大方形系数的船型，伴流补偿导管可以有效提高螺旋桨推进效率、减小螺旋桨激振力、降低船体粘性阻力。同时，文中也对伴流补偿导管的安装位置进行了分析比较。

Shin 等^[13]采用汉堡水池 (HSVA) 开发的 CFD 代码 FreSCo+对安装前置预旋导轮的 VLCC 进行了数值模拟，并做了模型试验验证。计算采用 RANS 控制方程，离散采用有限体积法，计算网格为四面体非结构化网格，网格量 292 万，无因次化的第一层网格厚度 y^+ 控制在 50 左右。计算得到了船尾详细的伴流场和压力场，结果显示在导管内壁中部有一个明显的低压区；对导管不同安装倾斜角度的研究发现，相对不安装节能装置的情况，安装在在 $+5^\circ\sim-5^\circ$ 范围内的前置预旋导轮均有节能效果， -5° （“-”表示导管向螺旋桨倾斜）时节能效果最为明显。

Sunho Park 等^[14]采用商业 CFD 软件 STAR-CCM+对安装于 KVLCC2 上的前置预旋定子进行了研究，计算中没有计及自由面的影响，采用了叠模的方法，进行了网格收敛性验证。作者提出了一种新的安装节能装置情况下的外推方法，模型尺度计算结果该方法外推得到了实尺度下的伴流分数；具体来讲是用 RANS 方程计算得到的伴流分数减去 Euler 方程计算得到的伴流分数，认为想减的结果是粘性伴流分数，并以此进行实尺度外推。模型尺度外推实船的结果与直接实尺度计算的结果进行了比较，显示较 ITTC 1978 和 ITTC 1999 公式的外推结果相比，作者提出的新的外推方法更加接近直接实尺度计算的结果。

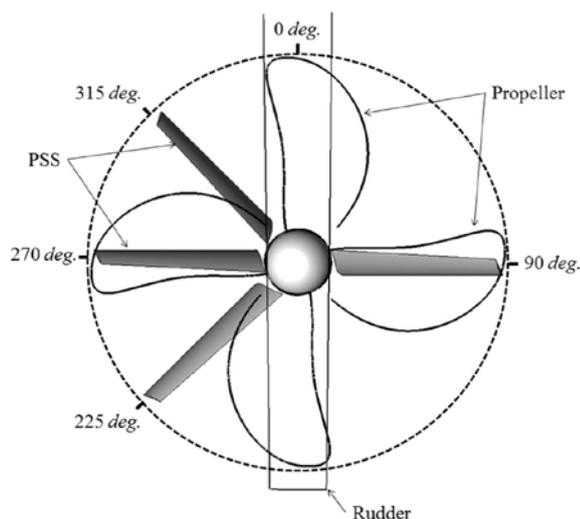


图 1-15 前置预旋定子示意 [14]

Fig. 1-15. Pre-swirl stator, propeller and rudder

Heinke^[15]等同样利用商业软件 CFX 对安装于典型集装箱船的节能装置——伴流补偿导管进行了尺度效应的研究。CFD 计算中采用了四面体、六面体混合网格,通过数值模拟有无节能装置情况下模型尺度和实尺度的船体阻力、推进性能、伴流场等,对节能装置的尺度效应进行分析评估。

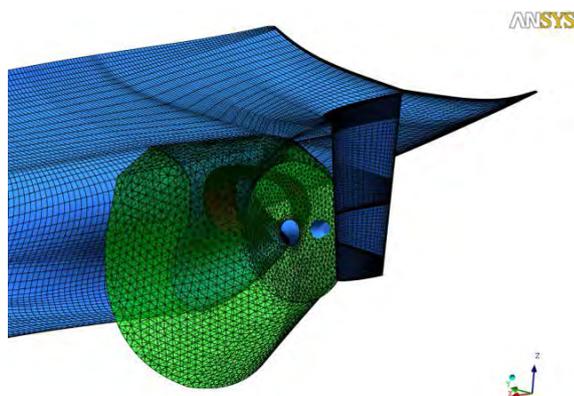


图 1-16 带节能装置船体计算网格 [15]

Fig. 1-16. Numerical grid for the ship with WED

Martinas 等^[16]针对某船型的伴流补偿导管进行了详细的参数化优化研究,采用 CFD 方法对导管的安装角度、导管长度、出入口半径、距螺旋桨距离等参数进行了研究,通过大量的数值计算得出最优设计方案。考虑到计算量等因素,计算模型仅取了船尾一段,同时没有考虑自由面的影响。

王超等^[17]等对螺旋桨毂帽鳍水动力性能进行了数值分析, 通过将数值模拟结果与母型桨计算结果的对比, 发现在低进速系数情况下, 螺旋桨毂帽鳍的安装能够明显提高螺旋桨效率; 通过 CFD 对细节流场的展示, 发现由于鳍的存在, 对桨毂处流场速度分布产生了影响, 导致水流沿鳍向桨后运动, 不再在桨毂处汇集, 从而减弱了桨毂涡流。

魏琳等^[18]对带附体的 80000 吨油船用商业软件 Fluent、 $k-\omega$ SST 湍流模型进行了数值模拟, 同时采用了叠模和计及自由面影响的 VOF 两种方法, 将计算得到的船尾伴流场与模型试验进行了比较。计算发现研究的节能装置——Mewis 导管在无桨时会在导管内部产生漩涡, 这对船体节能是不利的; 但由于 Mewis 产生的是与螺旋桨相反方向的预旋涡, 反而使得螺旋桨负荷提高, 从而提高推力。

程宣恺^[19]对带节能装置的船模纯粹自航试验进行了数值模拟, 基于 SHIPFLOW 软件模拟船后不同布局的预旋三角导管对阻力、自航因子和各效率的影响, 优选出性能较好的布局。最后将 CFD 计算结果与模型试验进行了对比分析验证, 为预旋三角导管的设计和下一步的应用提供参考。

另外丁文祥等^[20-23]相关学者对各类节能装置的参数化设计进行了研究分析。

简单总结一下, 由于能够在保证一定精度的前提下提供丰富的细节流场信息, CFD 技术在船舶节能装置的设计优选和效果评估中得到越来越广泛的应用。节能装置设计的路线图如下图 1-17 所示。第一步进行船型信息的分析, 根据实际情况选择合适的船舶节能装置; 第二步对无桨的船舶模型进行 CFD 计算, 提取精细的船尾伴流场, 为船舶节能装置的设计提供丰富的信息; 第三步对船舶节能装置进行初步的设计; 第四步采用 CFD 技术对安装螺旋桨之后的船模进行全粘性流场自航计算分析, 评估实际节能效果并进行设计参数、安装位置等优化; 第五步对定型的船舶节能装置进行模型试验验证; 最后一步完成实船海试分析。

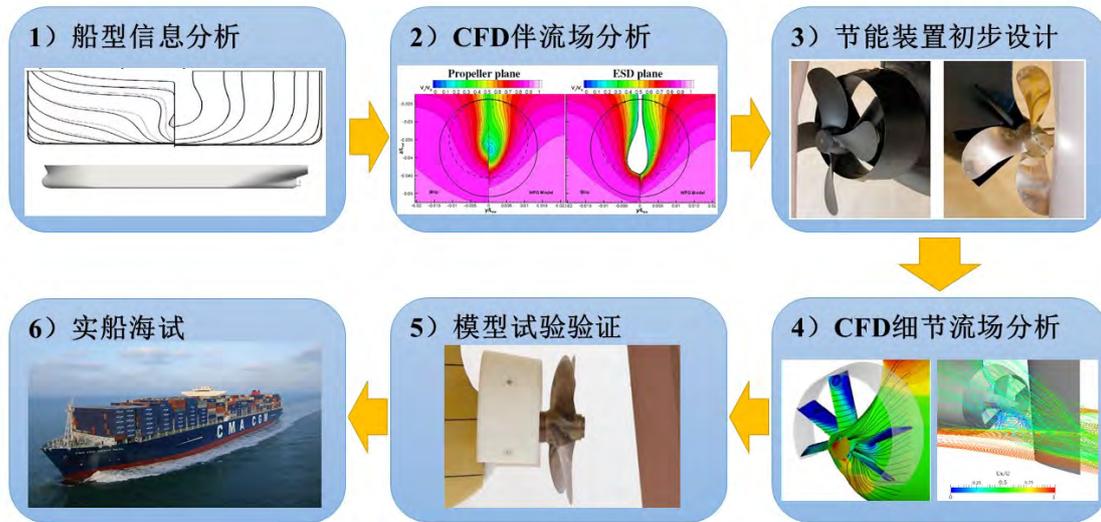


图 1 - 17. 节能装置设计路线图

Fig. 1-17. Routine of ESD design

1.3.3 基于 CFD 技术的船-桨配合计算研究

在应用 CFD 数值技术进行船舶节能装置的研究中，由于节能装置与螺旋桨的相互作用是考察研究的重点，因此需要进行船-桨-舵配合的数值计算。目前基于 CFD 技术的船舶节能装置数值研究主要基于忽略自由面影响的叠模方法，或者只对后半段船体做叠模的数值计算。这样做的主要目的是为了节省计算资源，同时也是因为传统的船-桨配合计算的局限。

对于船-桨-舵配合的数值计算研究一直以来都是船舶 CFD 领域的一个难题，多年来学者们提出了很多方法来解决这一难题。最早出现的是体积力方法，其基本思想是在 N-S 方程的动量方程中添加一个源项，用来表示螺旋桨对流场的影响。该方法可以以较高效率求解船-桨配合计算问题，能对螺旋桨推力、扭矩进行较为精确的求解，但本文的计算中考察船舶节能装置效果需要得到船尾的精细流场，分析节能装置与桨的相互作用情况，这一点采用体积力方法是无法实现的^[24]。

滑移网格方法也是目前常见的用来处理船-桨-舵配合计算的 CFD 常用技术，相对体积力方法，滑移网格方法对螺旋桨进行完全的网格划分，可以对船尾流场进行精确的模拟。但由于船尾结构复杂，特别是安装船舶节能装置之后，给滑移网格在网格划分上带来巨大的难度，其滑移面难以设置，网格布局难以实现；同时，滑移网格在处理螺旋桨旋转的同时难以同时实现船体的大幅度六自由度运动，在船舶节能装置的 CFD 设计评估中难以广泛使用。

随着重叠网格技术的出现，船-桨-舵的完全 CFD 模拟不再是难题。重叠网格破除了各部分网格之间的关系，能够在实现船体六自由度大幅度运动的同时实现螺旋桨的转动，同时可以随意添加网格模块从而轻松实现船舶节能装置的网格生成和计算分析。为使用 CFD 技术进行船舶节能装置的设计研究提供了有效手段。

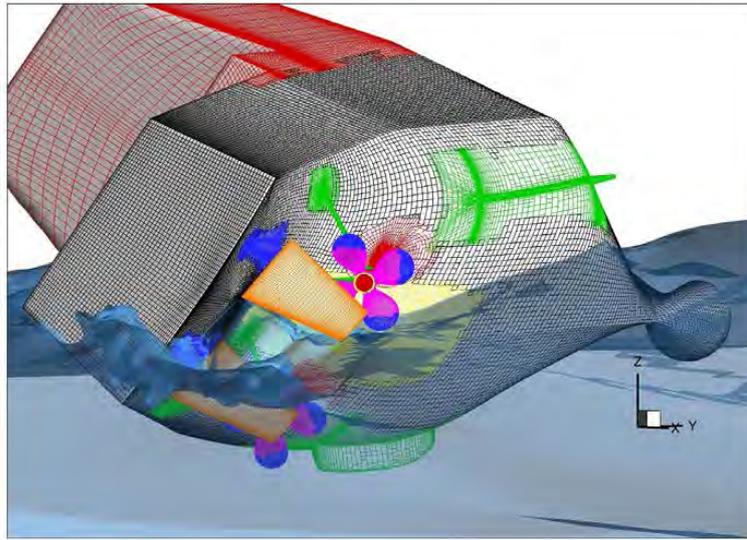


图 1-18 利用重叠网格进行船-桨-舵配合计算^[32]

Fig. 1-18. Overset grids for CFD calculation

具体到安装节能装置的船舶自航计算，采用滑移网格的船-桨配合通常只能实现固定船体和螺旋桨转速的强制自航试验的模拟，对于实现纯粹自航试验的模拟有一定技术层面的难度。强制自航试验在预报螺旋桨自航推进性能时需要进行若干不同转速的计算，最终需要对多个桨转速下的结果进行插值才能得到自航点的螺旋桨推进性能，这样一来计算量便会大大增加，限制了该方法在船舶节能装置设计评估中的应用。因此，采用重叠网格技术进行船舶纯粹自航的数值模拟对于节能装置的研究就显得十分必要。

1.4 本文主要工作

本论文将在前人工作的基础上，通过学习并研究不同船舶节能装置的节能原理以及适用船型，采用 CFD 技术，使用重叠网格 RANS 求解器 naoe-FOAM-SJTU^[36-43]，对安装伴流补偿导管和前置预旋导轮这两种典型的节能装置的 JBC 船和 VLCC 进行纯粹/强制自航的数值研究，探索并检验 CFD 方法在节能装置设计与性能预报中的具体可行性方法。相对于势流方法，RANS 模型可

以考虑水的粘性效应，更好的捕捉精细流场，满足节能装置设计中细节流场提取的要求；同时，RANS 模型相对 LES、DES 等模型在保证精度的基础上具有更高的效率，更适用于工程实际。

概括本文的具体工作如下：

第一章为绪论，首先介绍了全文的研究背景与意义，重点从 EEDI 标准的设立与能源耗费角度强调了船舶节能的重要性；接下来介绍了各类船舶节能装置的基本原理以及节能效果；最后介绍了对于船舶节能装置国内外研究现状，从模型试验技术、CFD 技术两个方面进行了介绍，对于 CFD 技术又重点介绍了船-桨配合计算过程中的各项技术。

第二章重点介绍了本文 CFD 计算过程中采用的控制方程与数值格式等，介绍了 naoe-FOAM-SJTU 求解器的基本结构框架。其中重点介绍了求解器的重叠网格模块、多级物体运动模块，包括重叠网格的挖洞、插值等过程，船-桨多级物体运动等，同时也介绍了计算迭代循环的流程与步骤。最后，采用标准船型 JBC 船采用重叠网格求解器对其进行船-桨配合的自航计算，来检验 CFD 求解过程的可行性与精度。

第三章对 JBC 船安装的伴流补偿导管的节能效果进行分析。通过对安装节能装置前后 JBC 船的静水阻力和带桨纯粹自航计算，得到船尾的精细流场信息、各项阻力系数以及自航推进因子，从而全面考察伴流补偿导管的节能效果。第一步本文进行 MP687 螺旋桨敞水性能的预报，检验重叠网格在计算螺旋桨推力、扭矩过程中的可靠性。第二步计算 JBC 静水阻力的工况，同时用作自航计算的初始流场。最后一步进行带桨纯粹自航数值计算。

第四章对 VLCC 船安装的前置预旋导轮的节能效果进行分析。基本思路与第三章中对 JBC 船的评估计算过程相同，通过对船尾压力场、伴流场、涡结构的定性分析以及对各项自航因子、螺旋桨收到功率等指标的定量分析，全面考察前置预旋导轮的节能效果。

第五章对全文的工作进行了总结，并对下一步工作做了研究展望。

第二章 数值求解器基本框架及理论基础

2.1 引言

船舶节能装置的研究需要对船尾细节流场进行提取分析，同时需要考虑到螺旋桨旋转对船尾流场带来的影响。本文采用计算流体动力学方法，通过求解两相流 RANS 方程来得到切合实际真实流场的数值结果。通过 CFD 技术求解全粘性流场能够在兼顾成本效率的同时得到精细准确的流场结果，在评估节能装置对细节流场的影响中相对模型试验和传统势流方法具有明显的优势。

2.1.1 控制方程与湍流模型

本文采用 naoe-FOAM-SJTU 求解器进行全粘性流场计算^[45]，采用 RANS 方程作为流体控制方程，其连续性方程和动量方程如下式：

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

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

其中 \mathbf{U} 表示流场速度， p 、 p_d 分别表示压力和压力修正项， ρ 、 \mathbf{g} 分别表示密度和重力加速度， μ 、 μ_{eff} 分别表示动力粘度和有效动力粘度， \mathbf{f}_σ 为两相流表面处张力项， \mathbf{f}_s 为消波区源项。

RANS 方程的基本思想是对 N-S 方程进行时间平均化处理，采用时均化方法描述瞬态脉动，这样对 N-S 方程进行了简化的同时减小了数值计算量，但带来的问题是产生了方程右端的雷诺应力项。OpenFOAM 中提供了多种用来闭合 RANS 方程的湍流模型，本文下面的数值计算均采用 SST $k-w$ 湍流模型，该模型是一种适用范围广泛，精度较为可靠的方法，因此，

本文采用经验公式方法，估算得到 SST $k-w$ 湍流模型的入口 k 和 w 初值。在确定了湍流强度 $I = u'/U$ 、涡粘比率 μ_t/μ 后， k 和 w 我们通过下两式得到：

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2 \quad (3)$$

$$w = \frac{\rho k}{\mu} \left(\frac{\mu_t}{\mu} \right)^{-1} \quad (4)$$

其中 u' 、 U 分别为速度脉动量和时均量， μ 、 μ_t 分别为动力粘性系数和湍动粘度；参考文献[45]中的经验设置，(3) 式中的湍流强度 I 设为 1%，(4) 式中的涡粘比率 μ_t/μ 设为 1。

2.1.2 自由面处理

区别于一般叠模计算方法，本文带节能装置、船-桨配合的自航计算考虑了自由面的影响，同时放开了船体垂荡、纵摇两向运动，因此需要解决数值计算中的自由面处理问题。本文采用 VOF 方法求解两相流，该方法在具备较高的精度的同时能够处理好数值扩散，是一种广泛被应用的方法。

VOF 方法的基本思想是采用一个体积分数变量 α 作为标记函数来标记气、液两相流体， $0 \leq \alpha \leq 1$ ，其定义为：

$$\begin{cases} \alpha = 0, & \text{空气} \\ \alpha = 1, & \text{水} \\ 0 < \alpha < 1, & \text{自由面附近} \end{cases} \quad (5)$$

因此，带人工压缩项的 VOF 输运方程为下式：

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g)\alpha] + \nabla \cdot [\mathbf{U}_r(1 - \alpha)\alpha] = 0 \quad (6)$$

上式中的 \mathbf{U}_g 、 \mathbf{U}_r 分别表示网格节点速度和相对速度。

密度 ρ 和动力粘性系数 μ 由下式计算得到：

$$\begin{cases} \rho = \alpha\rho_l + (1 - \alpha)\rho_g \\ \mu = \alpha\mu_l + (1 - \alpha)\mu_g \end{cases} \quad (7)$$

(2)式中的表面张力项 \mathbf{f}_σ 如下式得到：

$$\mathbf{f}_\sigma = \sigma\kappa\nabla\alpha \quad (8)$$

其中 σ 为表面应力张力系数，取 $\sigma = 0.07\text{kg} / \text{s}^2$ ， κ 为自由界面曲率：

$$\kappa = -\nabla \cdot \mathbf{n} = -\frac{\sum_f S_f \cdot \mathbf{n}_f}{V_i} \quad (9)$$

\mathbf{n} 是单位法向矢量， V_i 为网格单元体积。

2.1.3 重叠网格技术

近年来，计算流体力学技术（CFD）在船舶海洋、化学化工、医学、航空航天、生物流体等各个领域内的应用越来越广泛。具体到船舶水动力学领域的应用，因为在对实际船舶海洋工程问题的数值模拟计算中，需要考虑到船-桨-舵的配合计算问题。特别是在带船舶节能装置的船舶自航数值模拟中，一般的动网格技术与滑移网格技术在处理这类耦合运动时便显得乏力。

重叠网格的诞生一举解决了该类问题，重叠网格可以破除物体与网格之间的约束关系，通过挖洞插值以及多级物体运动处理，可以使数值计算中船体在大幅度六自由度运动的同时，各类附体仍能够相对于船体自由转动；经过多年的努力，沈志荣^[44]将重叠网格技术成功植入了——naoe-FOAM-SJTU 求解器，从而有效地解决了船-桨相互配合等复杂问题的 CFD 计算求解，为本文带节能装置-桨-舵的船舶自航数值模拟计算提供了有效工具。

重叠网格技术最初是在航空航天领域 CFD 计算中用来处理多套结构化网格整合匹配问题的，每套网格之间通过插值进行数据交换，从而计算得到整个流场域的信息。相对与一般动网格技术与滑移网格技术，重叠网格能够实现带节能装置的船-桨-舵配合的船舶自航和操纵性计算等问题，为使用 CFD 技术进行船舶节能装置的设计评估提供了有力的工具。

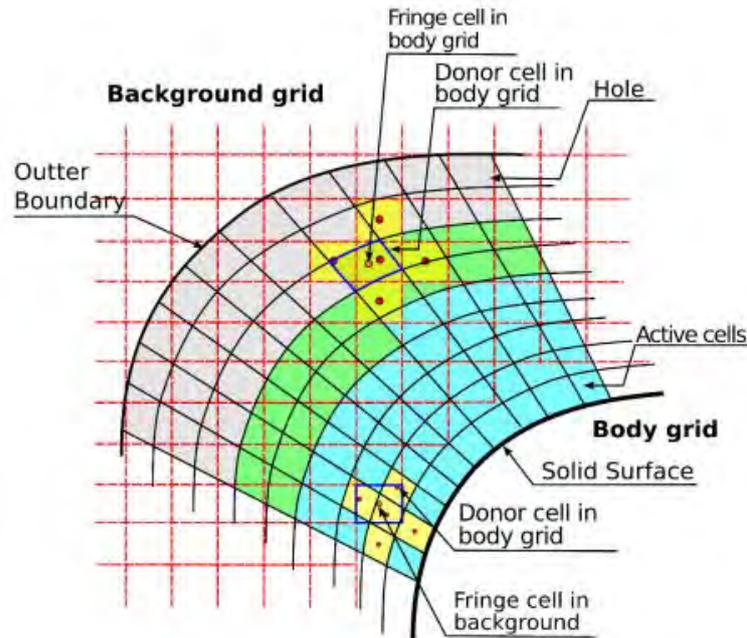


图 2-1 重叠网格示意图

Fig.2-1. Overset grid

本文计算使用的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 中重叠网格之间插值关系的建立通过 SUGGAR++^[38]程序计算域连接信息 (Domain connectivity information, DCI) 的来实现的。

2.1.4 多级物体运动模块

本文研究的带节能装置船舶的自航计算问题需要考虑到船-桨的配合，naoe-FOAM-SJTU 求解器的重叠网格模块在处理多级物体运动问题时，会对各部分网格进行层级确定：背景网格为最高层级，带节能装置的船体网格为第二层级，螺旋桨网格为第三层级；具体如图 2-1 所示。船舶节能装置网格作为附体与船体网格结合，其运动状态也与船体网格完全一致。

具体计算过程如下：螺旋桨旋转通过下式 (10) 计算得到：

$$\mathbf{x}_{prop}^n = \begin{bmatrix} c + n_1^2(1-c) & n_1n_2(1-c) - n_3s & n_1n_3(1-c) + n_2s \\ n_1n_2(1-c) + n_3s & c + n_2^2(1-c) & n_2n_3(1-c) - n_1s \\ n_1n_3(1-c) - n_2s & n_2n_3(1-c) + n_1s & c + n_3^2(1-c) \end{bmatrix} * (\mathbf{x}_{prop}^0 - \mathbf{p}_a) + \mathbf{p}_a \quad (10)$$

上式中 α 为下一个时刻螺旋桨旋转角度， $\bar{\mathbf{n}}$ 为螺旋桨桨轴矢量， $c = \cos\alpha$ ， $s = \sin\alpha$ ； $\bar{\mathbf{n}} = (n_1, n_2, n_3)$ 为单位矢量， $\sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2} = 1$ ； \mathbf{x}_{prop}^0 为初始时刻螺旋桨位置， \mathbf{x}_{prop}^n 为旋转后螺旋桨位置。

在处理完最低一级的螺旋桨转动后，对安装节能装置的船体网格进行计算处理，具体如下式：

$$\mathbf{x}_{ship}^n = \mathbf{J}_1 \cdot (\mathbf{x}_{ship}^0 - \mathbf{x}_{rot}) + \mathbf{x}_{rot} + \boldsymbol{\eta}_1 \quad (11)$$

需要注意的是 (11) 式反应的是在大地坐标系下的计算情况。 \mathbf{x}_{ship}^0 表示船体初始位置， \mathbf{x}_{ship}^n 表示六自由度计算后的船体位置； $\boldsymbol{\eta}_1$ 是船体平移位移， \mathbf{x}_{rot} 是船体旋转中心， \mathbf{J}_1 是旋转矩阵。

最后对背景网格进行处理，平移和旋转背景网格至船体位置。

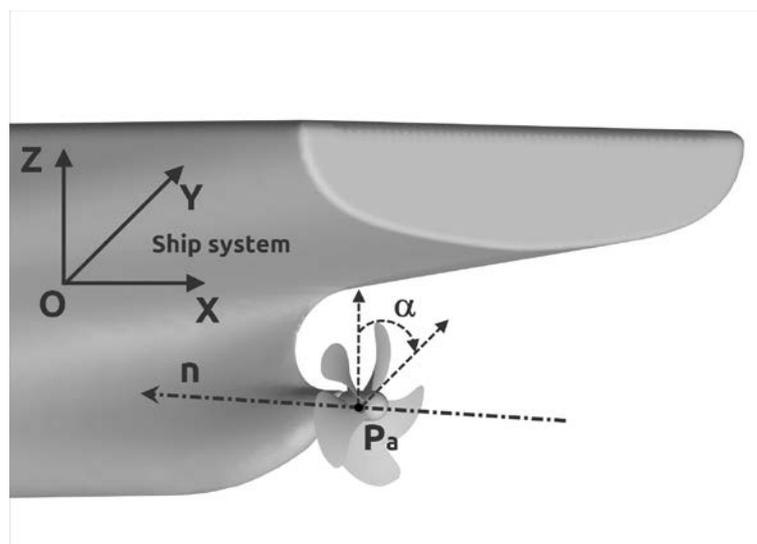


图 2-2 多级物体运动模块布局

Fig.2-2. Propeller rotating in ship system

2.1.5 方程离散

naoe-FOAM-SJTU 求解器利用 OpenFOAM 中自带的有限体积法 FVM (Finite Volume Method) 对动量方程和 VOF 方程进行离散处理, 采用 OpenFOAM 中自带的 PISO 算法来处理 RANS 控制方程和 VOF 输运方程离散之后的速度和压力耦合问题^[46], PISO 算法推进的具体流程如图 2-3 所示。

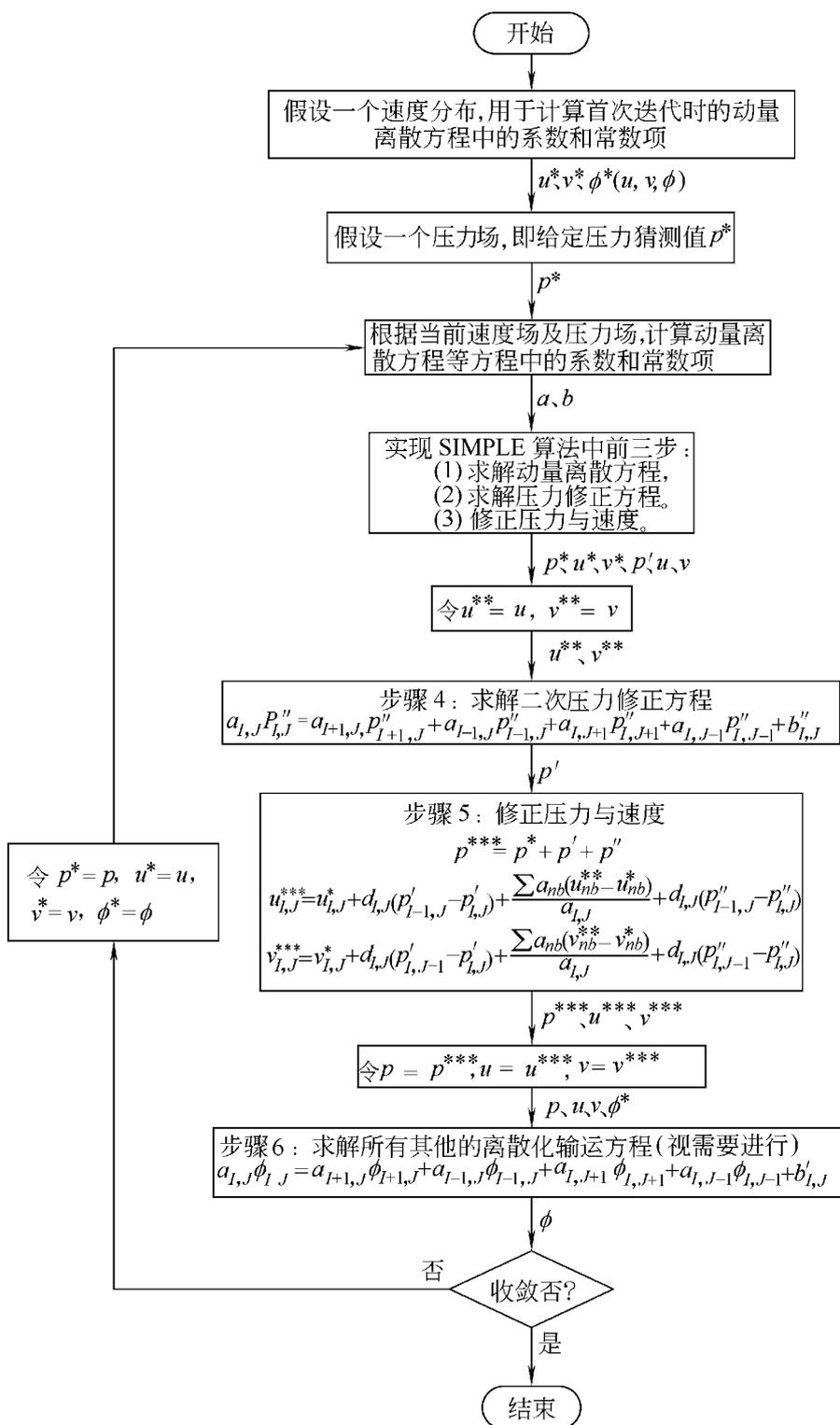


图 2 - 3 PISO 算法求解流程

Fig. 2 - 3 Process of a PISO loop

2.1.6 naoe-FOAM-SJTU 求解器结构框图

本文采用的CFD全粘性流场数值求解器naoe-FOAM-SJTU求解器结构框图如下图所示。主要包括以下几个模块：

- 1)、OpenFOAM 自带部分，主要为采用有限体积法离散的 RANS 控制方程，湍流模型，VOF 方程等；
- 2)、六自由度模块，用来完成船体六自由度运动的计算；
- 3)、重叠网格模块，用来完成船-桨-舵配合的多级物体运动计算；
- 4)、数值造波模块，用来完成各类规则波、不规则波的生成，以及消波等；
- 5)、锚链系统模块，用来完成海洋平台系泊计算。

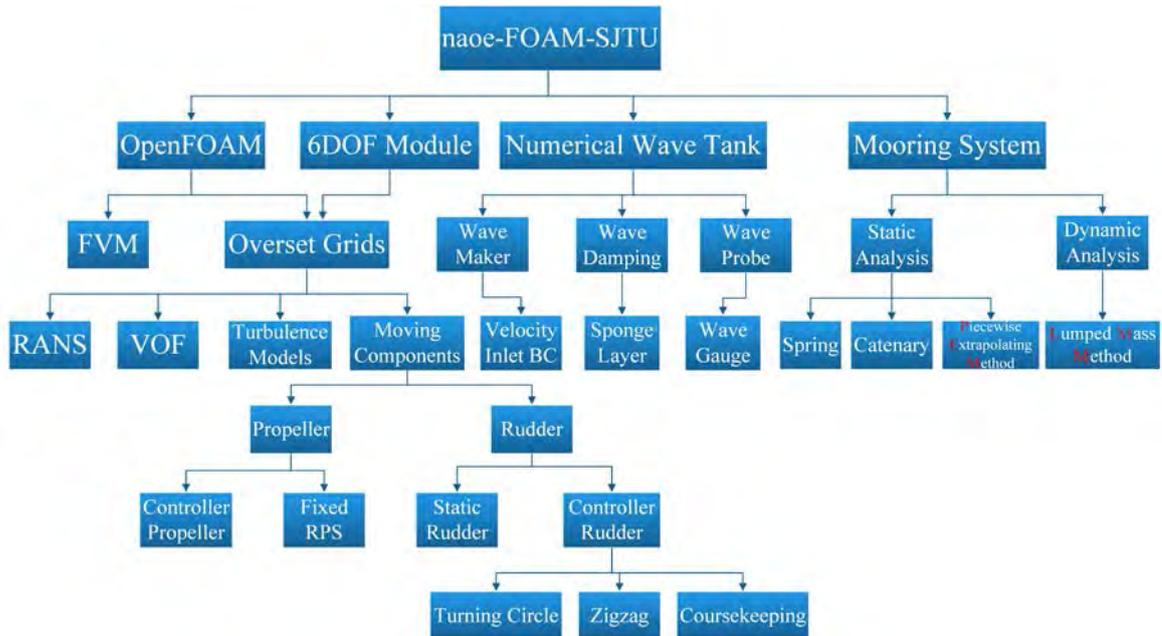


图 2 - 4 naoe-FOAM-SJTU 求解器框架图

Fig. 2 - 4 The framework of naoe-FOAM-SJTU

2.2 JBC 标准船型自航算例验证

为了验证 naoe-FOAM-SJTU 求解器及其重叠网格技术的准确性和可靠性，本小节对 2015 年东京 CFD 研讨会标准船型 JBC(Japan Bulk Carrier)散货船带桨静水纯粹自航性能进行数值计算，并将 CFD 计算结果与日本海上技术研究所(NMRI)提供的模型试验数据进行了比较 [26]。

2.2.1 自航数值计算模型

本次计算的 JBC 船型主尺度及缩尺比如下表 2-1 所示，船体模型如下图 2-5 所示。

表 2-1 JBC 船主尺度
Table 2-1. Principle Dimensions of JBC

参数	单位	模型尺度	实尺度
缩尺比	—	40	—
垂线间长	L_{PP} (m)	7	280
设计水线长	L_{wl} (m)	7.125	285
吃水	T (m)	0.4125	16.5
排水体积	∇ (m ³)	2.7870	178369.9
湿表面积	S (m ²)	12.2226	19556.1
方形系数	C_B	0.858	0.858
LCB, fwd+	(% L_{PP})	2.5475	2.5475
螺旋桨位置	x/L_{PP}	0.9857	0.9857
	$-z/L_{PP}$	-0.04042	-0.04042



(a)整体视图



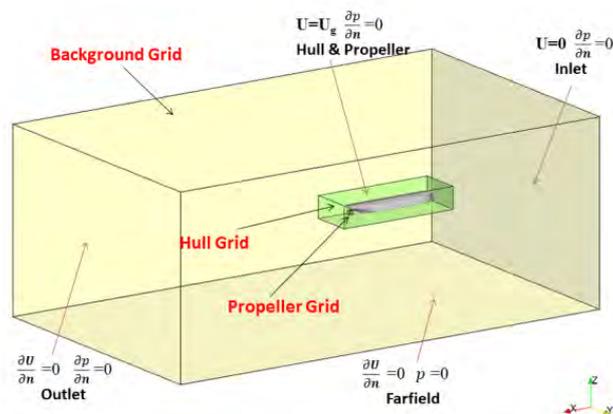
(b)船艏局部视图

图 2-5 计算船型

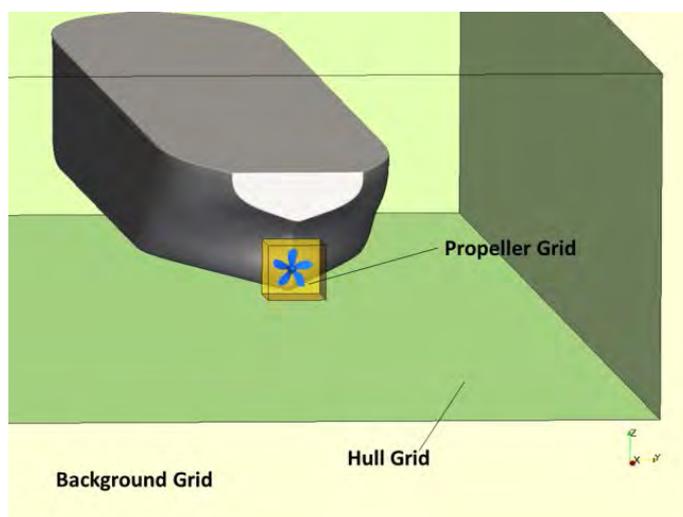
Fig.2-5. Computation model

2.2.2 计算网格与边界条件

自航计算网格、计算域以及所采用的重叠网格布局以及边界条件由下图 2-6(a)所示。图 2-6(b)显示的是网格的局部示意图。自航计算网格总量 556 万，其中背景网格占网格量 141 万，螺旋桨占网格量 163 万，JBC 船体占网格量 252 万。计算网格如图 2-7 所示。



(a)全局视图



(b)局部视图

图 2-6 重叠网格布局

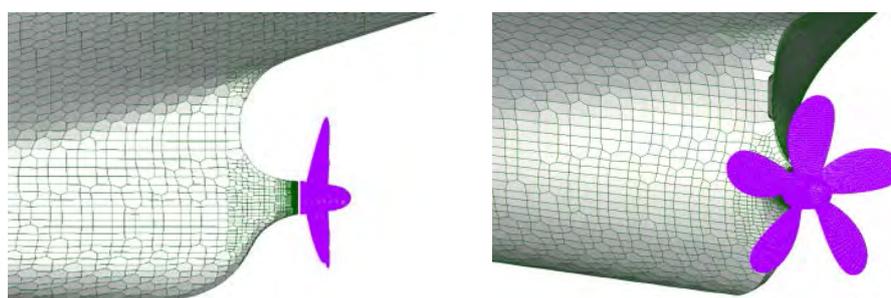
Fig.2-6. Layout of overset grid system

对于本次计算的边界条件，在远场设置零速度和零压力梯度条件。计算用的网格均由 *SnappyHexMesh* 生成，这是 *OpenFOAM* 自带的多面体网格生成工具。相对一般四面体网格，多面体网格可以用较小的网格量完成船-桨-舵模型的网格生成，同时 *SnappyHexMesh* 生成的网格格式也可以由重叠网格 DCI 生成工具 *SUGGAR++* 进行处理。

数值计算中为了更精细的捕捉 JBC 船尾的涡结构，本文在网格布局中在船尾下游增加了加密等级；考虑到低航速下兴波阻力较小，需要用较密的自由面网格

进行捕捉，本文也对自由面进行了相对背景网格的二级加密；船体周围相对背景网格进行了二级加密。在背景网格是设计中，船首部和船尾部也进行了加密处理。

为了让 SUGGAR++程序在挖洞插值的过程中正常运行，同时避免 orphan 单元（孤点单元）的产生，在船尾网格布局设计中，本文在船体、螺旋桨之间留有一个很小的间隙，这样做的目的是使 SUGGAR++程序挖洞时顺利将螺旋桨网格和船体网格分开。由于间隙很小，为了留有充分的插值单元，间隙内的网格必须要足够加密才能保证挖洞过程和插值精度。



(a)船艉网格视角 1

(b)船艉网格视角 2

(c)计算域整体网格

图 2-7 全局网格和局部网格

Fig.2-7. Global and local hull mesh

2.2.3 计算结果分析比较

我们对设计航速，傅汝德数 $Fr=0.142$ 下的船模在加摩擦阻力修正的情况下进行了放开船体垂荡、纵摇自由度的自航计算。为了进行自航模计算，我们先进行

了静水阻力的计算，这样做的目的是得到发展完全的船体边界层，以及得到初始的自由面兴波场，然后通过流场映射工具 *mapFields* 对自航模算例进行流场初始化。考虑到时间步长以及网格量等因素，静水阻力计算的速度远远大于带桨自航的计算，这样采用流场映射的方法便节省了带桨自航计算的时间，提高了 CFD 计算的效率。

在自航试验的数值模拟中，本文采用 PI 控制器控制螺旋桨转速，从而控制其推力。初始时刻，JBC 船以 1.179 m/s 航速前进，螺旋桨保持不动。由于螺旋桨计算对于时间步长要求更小，本文在自航试验中控制时间步长为 $\Delta t = 2.5 \times 10^{-4} \text{s}$ ，这个时间步长与螺旋桨敞水计算的时间步长保持一致，是通过敞水计算中步长收敛性验证得到的结果。

经过 15s 左右计算得到了 JBC 船该航速下的自航推进各项性能，下表 2-2 列出 CFD 计算结果与模型试验数据的比较分析，同时列出了相关误差分析。自航推进因子的求解方法采用的是 ITTC 推荐使用的等推力法^[40]。在所有 CFD 计算得到的系数与试验测量的比较当中，最大误差为船身效率 η_H ，比试验值大 5.85%。其它计算结果也和试验值吻合较好，除推力减额分数较实验值大 4.42% 外，误差均在 4.0% 以内。该计算结果验证了 naoe-FOAM-SJTU 求解器以及重叠网格方法在自航推进计算中的有效性和结果的准确性。

表 2-2 数值结果与模型试验比较
Table 2-2. Comparison of CFD results with EFD

	EFD	CFD (误差)
$C_t (\times 10^{-3})$	4.811	4.607 (-4.24%)
$C_p (\times 10^{-3})$	—	1.788
$C_f (\times 10^{-3})$	—	2.819
K_T	0.217	0.2225 (2.55%)
$10K_Q$	0.279	0.2867 (2.76%)
$l-t$	0.8915	0.9309 (4.42%)
$l-w$	0.5483	0.5268 (-3.92%)
η_o	0.4981	0.4895 (-1.72%)
η_R	1.0158	1.0066 (-0.91%)
J	0.4083	0.3983 (-2.45%)
n	7.8	7.682 (-1.51%)
η_H	0.8227	0.8708 (5.85%)

- a. t 为推力减额分数
- b. w 为伴流分数
- c. η_o 为螺旋桨敞水效率

- d. η_R 为相对旋转效率
- e. η_H 为船身效率, 定义为 $\eta_H = (1-t)/(1-w)$

2.3 本章小结

本章主要介绍了重叠网格求解器 naoe-FOAM-SJTU 在船-桨配合的船舶自航计算中所使用到的控制方程和数值方法, 包括 $k-\omega$ SST 湍流模型、VOF 自由面捕捉方法、重叠网格 DCI 生成以及多级物体运动模型的基本原理等, 总结了应用该求解器以及重叠网格技术在船舶自航计算中一个时间步内的整个迭代循环求解流程。

同时, 为了验证求解器的精度与可靠性, 本章也对 2015 东京 CFD 研讨会标准船型 JBC 船进行了带桨自航算例计算验证, 通过对总阻力系数、各项自航因子进行与模型试验数据的比较, 验证了 CFD 求解器的可靠性, 为下一步研究带节能装置 JBC 船自航数值计算打下基础。

第三章 JBC 伴流补偿导管节能效果数值计算与分析

3.1 引言

为了对 JBC 船的节能装置效果进行研究, 需要进行一系列的数值模拟。首先我们进行带/不带节能装置 JBC 船静水阻力计算, 得到裸船阻力以及自航计算的初始流场。第二步进行螺旋桨敞水性能的预报, 从而得到螺旋桨敞水性能曲线, 同时检验重叠网格在计算螺旋桨推力、扭矩过程中的可靠性。本文通过 Single-Run 方法 (单次法) 通过一次计算得到螺旋桨敞水性征曲线。最后一步进行 JBC 有无节能装置的自航计算, 包括强制自航计算和采用 PI 控制器控制螺旋桨转速的纯粹自航计算。计算过程中 JBC 船模放开垂荡、纵摇两自由度。同时由于船体沿 x 方向向前运动, 因此背景网格也将跟随船模一起向前运动。具体运动方式见 2.1.4 小节多级物体运动模块的介绍。

3.2 计算模型与网格

3.2.1 几何模型

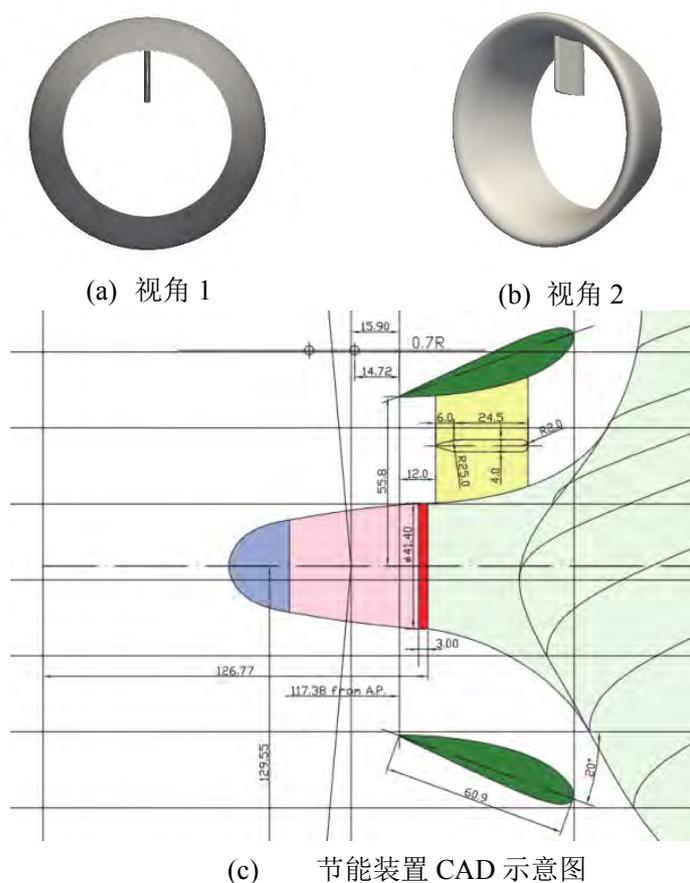
本次评估的节能装置为 JBC 船伴流补偿导管。伴流补偿导管节能的基本原理是改善螺旋桨上半平面入流的均匀性、改善船尾流动分离并产生附加推力, 设计理想可获得 3%~7% 的节能效果。相对传统的伴流补偿导管, 本次计算的导管开口正对螺旋桨桨盘面而非上半桨盘面, 同时其机翼攻角更大, 对船尾压力分布的影响也更大。

JBC 船是一型尚未完成实船建造的散货船, 其垂线间长 L_{pp} 为 280m, 设计吃水 16.5m, 模型尺度的缩尺比为 40, 安装的节能装置为伴流补偿导管。具体船型参数如下表 3-1 所示, 节能装置模型如下图 3-1 所示, 静水及自航 JBC 计算模型如图 3-2 所示。船型及实验数据由日本海上技术安全研究所(NMRI)提供。

表 3-1 JBC 船主尺度
Table 3-1. Principle Dimensions of JBC



	主尺度	实尺度	模型尺度
垂线间长	L_{PP} (m)	280	7
水线长	L_{WL} (m)	285	7.125
水线型宽	B_{WL} (m)	45	1.125
型深	D (m)	25	0.625
吃水	T (m)	16.5	0.4125
排水量	∇ (m ³)	178369.9	2.7870
湿表面积 (无节能装置)	$S_{0_w/oESD}$ (m ²)	19556.1	12.2226
湿表面积 (带节能装置)	S_{0_wESD} (m ²)	19633.9	12.2706
方形系数	C_B	0.858	0.858
棱形系数	C_M	0.9981	0.9981
LCB (% L_{PP}), fwd+	LCB	2.5475	2.5475
螺旋桨 x 方向位置	x/L_{PP}	0.985714	0.985714
螺旋桨 z 方向位置	$-z/L_{PP}$	-0.040421	-0.040421
螺旋桨转向 (船尾视角)	—	clockwise	clockwise



(c) 节能装置 CAD 示意图

图 3-1 节能装置模型

Fig.3-1 Model of wake equalizing duct

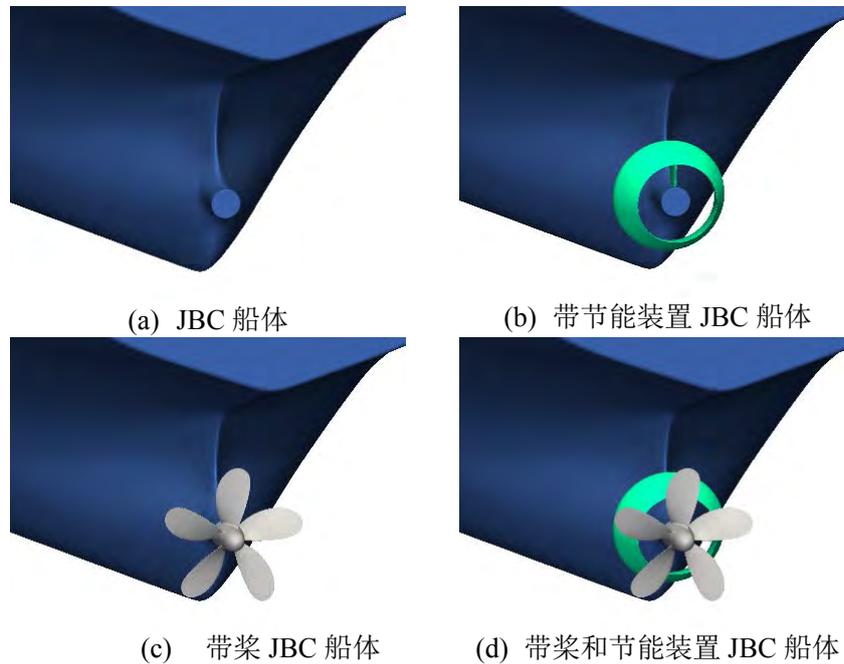


图 3-2 静水及自航 JBC 计算模型

Fig.3-2 Computational models of JBC for resistance (a, b) and self-propulsion (c, d)

3.2.2 计算域与计算网格

地球坐标系下 JBC 有无节能装置静水及之后的自航计算网格计算域均为： $1.0L_{pp} < x < 4.0L_{pp}$ ， $-1.5L_{pp} < y < 1.5L_{pp}$ ， $-1.0L_{pp} < z < 1.0L_{pp}$ 。所采用的重叠网格布局以及边界条件由图 3-3(a)所示，图 3-3(b)显示的是船尾网格布局示意图。相对静水阻力的计算，自航计算网格中添加了一块重叠网格来布置螺旋桨。有无节能装置自航计算的网格量分布如表 3-2 所示。全局网格以及船艏局部网格如图 3-4 所示。

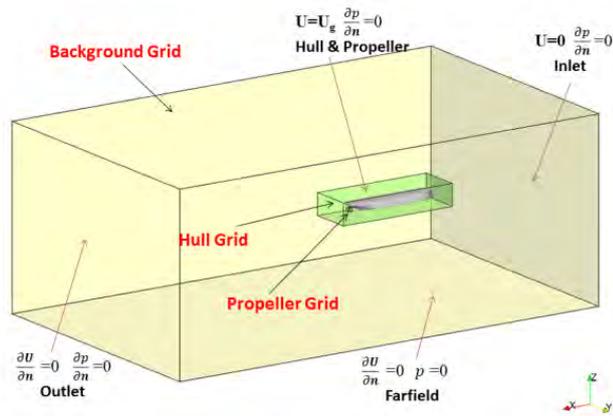
对于边界条件而言，在远场设置零速度和零压力梯度条件。为了让 SUGGAR++ 程序在挖洞插值的过程中正常运行，同时避免 orphan 单元(孤点单元)的产生，在船尾网格布局设计中本文在船体、螺旋桨留有一个很小的间隙，这样做的目的是使 SUGGAR++ 程序挖洞时顺利将螺旋桨网格和船体网格分开。由于间隙很小，为了留有充分的插值单元，间隙内的网格必须要足够加密才能保证挖洞过程和插值精度。

在自航试验的数值模拟中，本文采用 PI 控制器控制螺旋桨转速，从而控制其推力。由于螺旋桨计算对于时间步长要求更小，本文在自航计算中控制时间步长

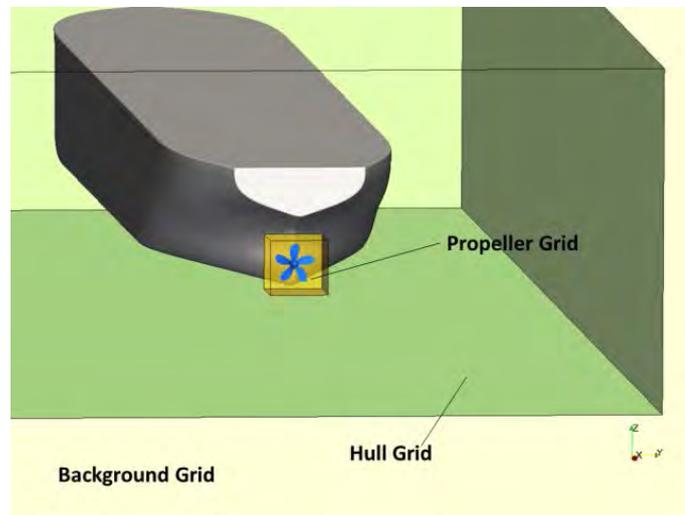
为 $\Delta t=2.5\times 10^{-4}s$ ，与螺旋桨敞水计算的时间步长保持一致。

表 3 - 2 网格量分布
Table 3-2. Grid distribution

	船体	螺旋桨	背景网格	网格总量
JBC W/O	1.42×10^6	1.90×10^6	1.41×10^6	4.73×10^6
JBC W	1.60×10^6	1.90×10^6	1.41×10^6	4.91×10^6



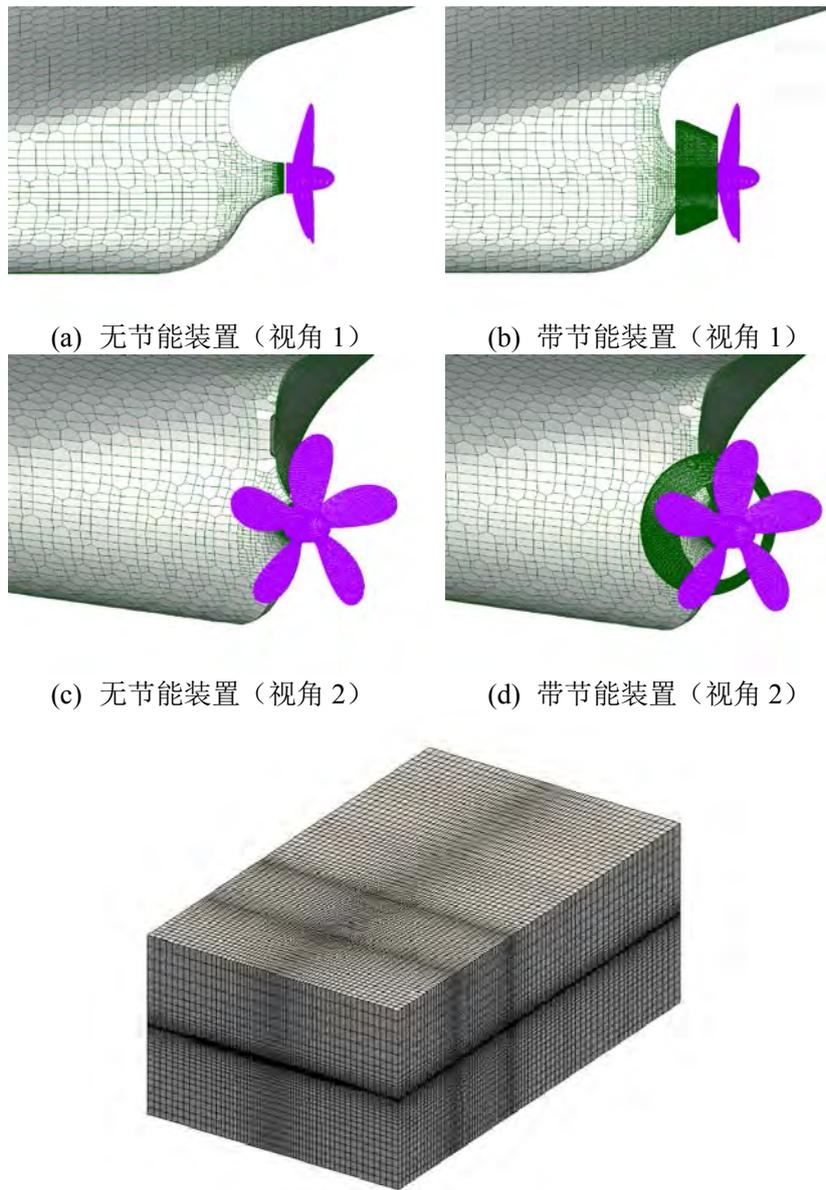
(a) 全局视图



(b) 局部视图

图 3-3 重叠网格布局

Fig.3-3. Layout of overset grid system



(e) 全局网格

图 3-4 计算网格

Fig.3-4 Mesh generation

3.3 计算结果分析

3.3.1 JBC 静水阻力计算结果分析

为了对节能装置效果进行评估,本部分首先进行的是带/不带节能装置 JBC 船的静水阻力计算。计算中拖航速度为 $U_0=1.179\text{m/s}$, 对应傅汝德数 Fr 为 0.142。拖航计算的目的是有两个, 第一是检验程序在该船阻力计算中的精确度, 确保误差控制在有效范围内方可进行下一步带桨自航计算; 第二个目的是通过拖航计算为自航计算得到一个充分发展的船体边界层和初始自由面兴波的初始场, 具体操作是通过流场映射工具 *mapFields* 对自航模算例进行流场初始化。考虑到时间步长以及网格量等因素, 静水阻力计算的速度远远大于带桨自航的计算, 这样采用流场映射的方法便节省了带桨自航计算的时间, 提高了 CFD 计算的效率。计算时间步长为 0.001s, 计算中采用壁面函数, 控制 y^+ 在 30 左右。

经过 CFD 计算得到的 JBC 船阻力系数以及船体姿态列于表 3-3 中, 数值计算结果与 NMRI 模型实验数据进行了比较, 结果显示良好的一致性。带与不带节能装置的 JBC 在该 Fr 下的静水总阻力系数分别比实验值低 2.62% 和 2.52%, 垂荡、纵摇结果与实验值相比也在 5% 误差以内。准确的静水阻力计算结果保证了计算网格、时间步长的可靠性, 可以为下一步的自航计算提供良好的基础。此外, 从带/不带节能装置的 JBC 船总阻力系数可以看出, 船的总阻力受到伴流补偿导管的轻微影响, 安装导管的 JBC 船总阻力系数较小, 这是由于导管机翼状翼型产生额外推力造成的。

表 3 - 3 JBC 船静水拖航计算结果

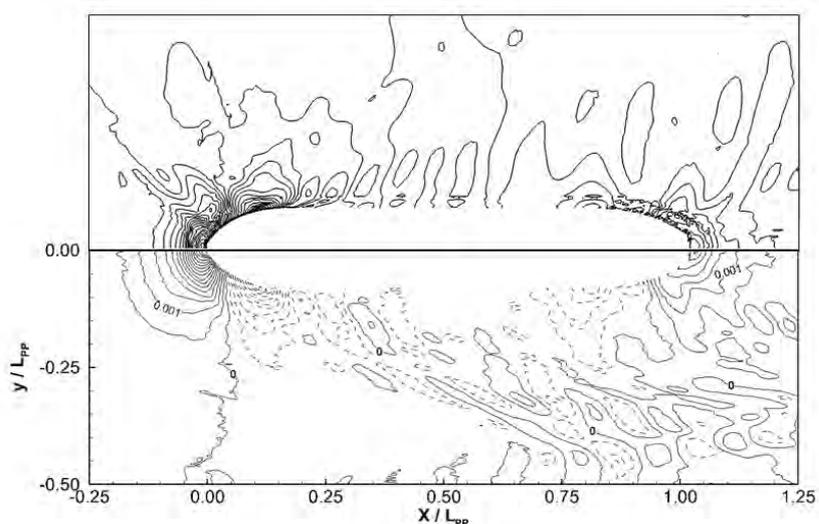
Table 3-3. Resistance coefficients for towed JBC

		$C_T(\times 10^{-3})$	垂荡(% L_{pp})	纵摇(% L_{pp})
JBC W/O ESD	EFD	4.289	-0.0860	-0.180
	CFD	4.176 (-2.62%)	-0.0842 (2.08%)	-0.171 (4.93%)
JBC W ESD	EFD	4.263	-0.0850	-0.182
	CFD	4.156 (-2.52%)	-0.0842 (0.93%)	-0.174 (4.44%)

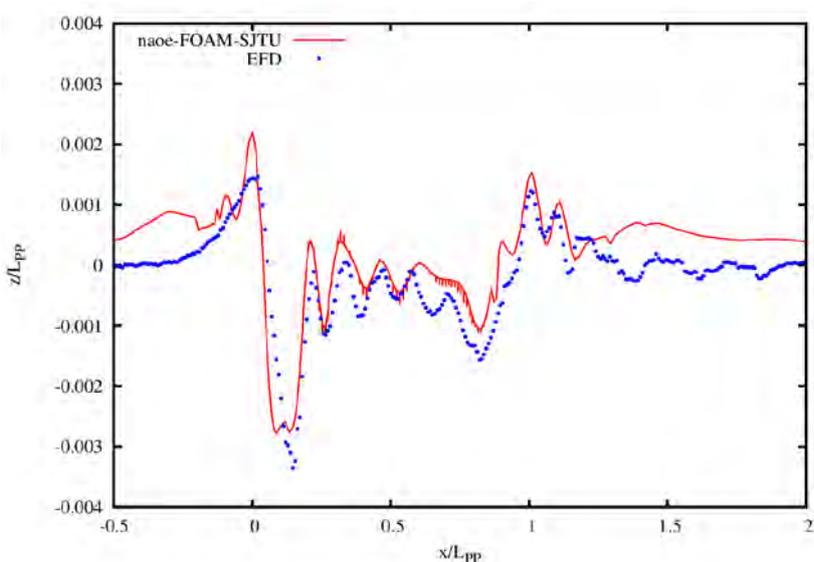
下图 3-5 展示的是 CFD 计算得到的自由面等值线结果、沿船长兴波高度与模型试验结果的比较, 由于安装的伴流补偿导管布置在自由面下方一定深度处, 因此其对自由面兴波的影响可以忽略, 所以本文只选取了未安装伴流补偿导管的 JBC 船的计算结果进行比较。通过自由面等值线图的比较结果显示, 通过 CFD 计

算结果计算得到的自由面兴波与模型试验结果较为接近，船首和船尾较大的兴波均捕捉清晰，相对试验测量结果略微偏大；船中部分由于兴波相对较小，CFD 计算结果与试验测量结果有一定的偏差。

图 3-6 展示了是否安装伴流补偿导管对船体各位置截面、特别是船尾伴流场的影响。通过 CFD 技术得到的精细流场结果显示，安装伴流补偿导管后，船尾桨盘面处流场等值线加密，显示出明显的“汇流”效果。这说明安装伴流补偿导管之后螺旋桨进流有明显的改善。



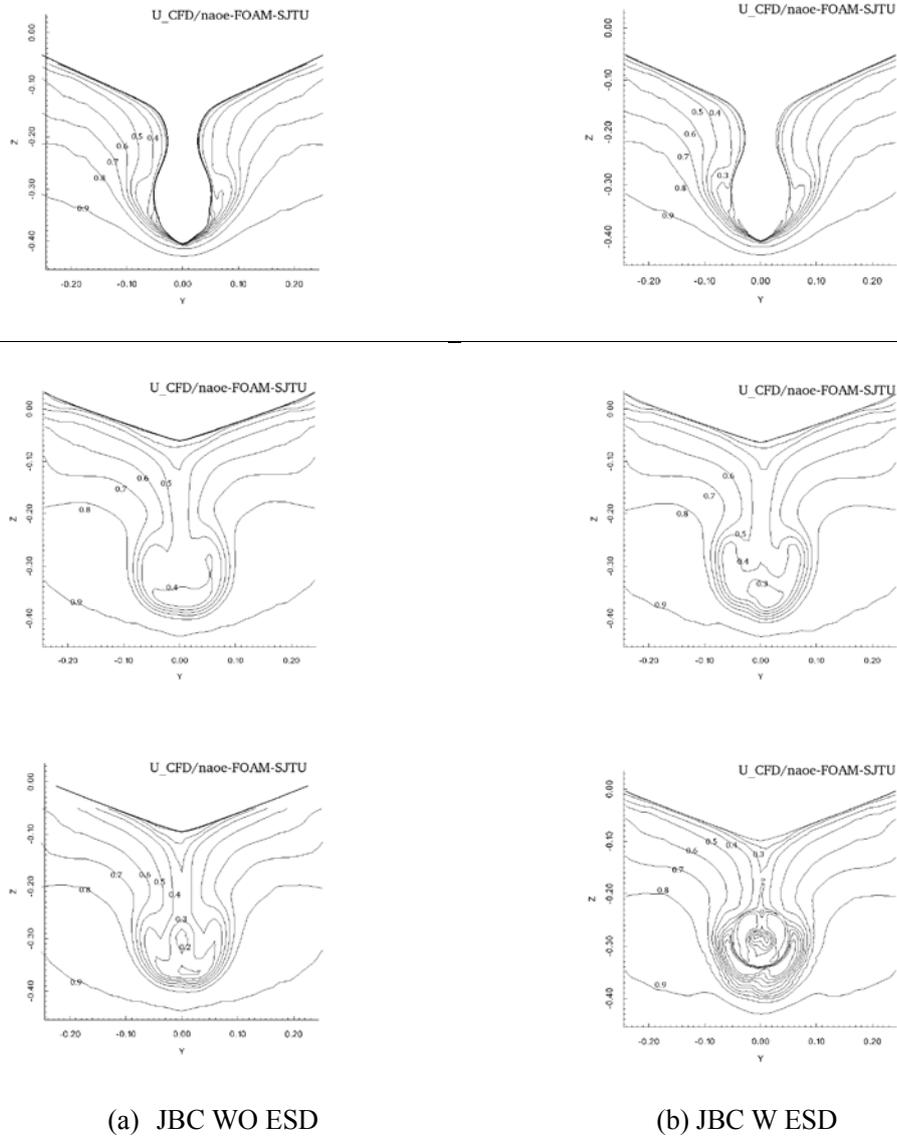
(a) 自由面等值线比较（上半部分为 CFD 结果，下半部分为 EFD 结果）



(b) 沿船长方向兴波高度比较

图 3-5 自由面兴波比较

Fig.3-5 Free-surface wave comparison



(a) JBC WO ESD

(b) JBC W ESD

图 3-6 三个截面处轴向速度 U 的比较

Fig.3-6 Comparison of Axial Velocity at Different Sections

3.3.2 MP687 螺旋桨敞水性征计算分析

为了测试重叠网格求解器在处理旋转网格时的精度以及得到螺旋桨敞水性征曲线，第二步进行了螺旋桨敞水性能的计算模拟，并将结果与 NMRI 提供的实验数据进行比较。敞水螺旋桨 MP687 的计算也由求解器 naoe-FOAM-SJTU 执行，数

值计算采用 $k-\omega$ SST 两方程 RANS 湍流模型。计算采用了 Xing 等^[27]提出的 Single-Run 方法, 即单次法进行。区别于以往的“单点法”, 该方法给予物体一个很小的加速度, 在较长的时间跨度内, 通过一次计算得到不同进速系数下螺旋桨的推力和扭矩。计算过程中螺旋桨转速固定保持 RPS=20, 采用大地坐标系作固定参考系。单次法计算的螺旋桨模型以及计算域、边界条件如下图 3-7 所示。

进速系数 J , 推力系数 K_T , 扭矩系数 K_Q 和敞水效率 η_0 的定义如下:

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (12)$$

$$K_Q = \frac{T}{\rho n^2 D^5} \quad (13)$$

$$\eta_0 = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \quad (14)$$

$$J = \frac{V_A}{nD} \quad (15)$$

图 3-8 展示的是采用 CFD 单次法计算得到的螺旋桨敞水性征曲线与模型试验数据的对比, 模型试验数据由 2015 东京 CFD 研讨会主办方 NMRI 提供。CFD 单次法计算过程中, 在 0~5s 的时间内, 螺旋桨转速保持 20RPS 不变, 进速缓慢增加, 进速系数从 $J=0$ 提高到 0.8。整个计算过程中采用 $\Delta t = 0.00025$ 时间步来进行, 近似认为每个进速系数下都是准稳态计算。通过与试验数据的对比可以看到, CFD 计算得到的螺旋桨推力系数、扭矩系数以及敞水效率与模型试验吻合良好, 特别是在中等进速系数 $J=0.3\sim 0.6$ 范围内, 二者误差保持在 3% 以内。螺旋桨敞水计算验证了 naoe-FOAM-SJTU 求解器的重叠网格模块处理该类问题的可靠性, 为船-桨配合计算提供精度保证。

图 3-9 展示了单次计算中四个不同的进速系数 $J=0.16, 0.32, 0.48$ 和 0.64 四个不同进速系数下的 $Q=400$ 涡量等值面, 并采用压力染色。从图中可以看到, 在高负载 $J=0.16$ 时, 叶片高压侧上的压力非常大, 随着负载的减小而该压力也逐渐减小。螺旋桨梢涡之间的间距随着进速系数的增加而增大, 同时可以注意到, 梢涡的强度随着负载的减小而减小。另外, 由于单次运行模拟中的桨前进时具有一个小的加速度, 因此螺旋桨梢涡的直径在桨后呈现逐渐减小的趋势。

通过本部分的计算, 我们得到了准确的螺旋桨敞水性征曲线, 同时验证了重叠网格求解器在旋转网格计算中的精度与可靠性。

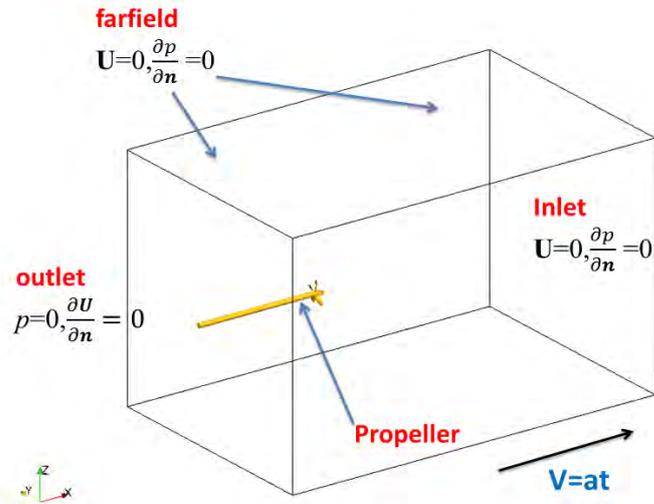


图 3-7 单次法计算域与边界条件

Fig.3-7 Domain and boundary conditions for single-run case

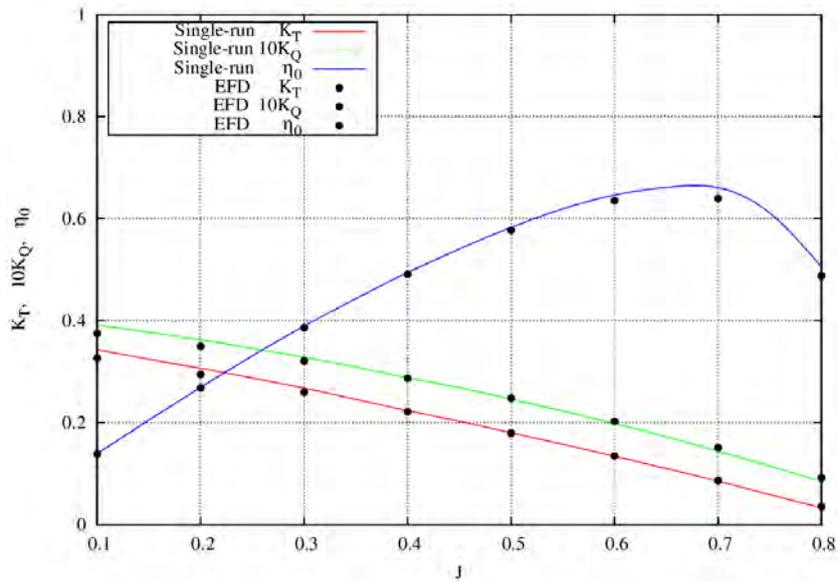


图 3-8 螺旋桨敞水性征计算曲线

Fig.3-8 Propeller open-water curve, experimental (points) and computed with a single-run (lines)

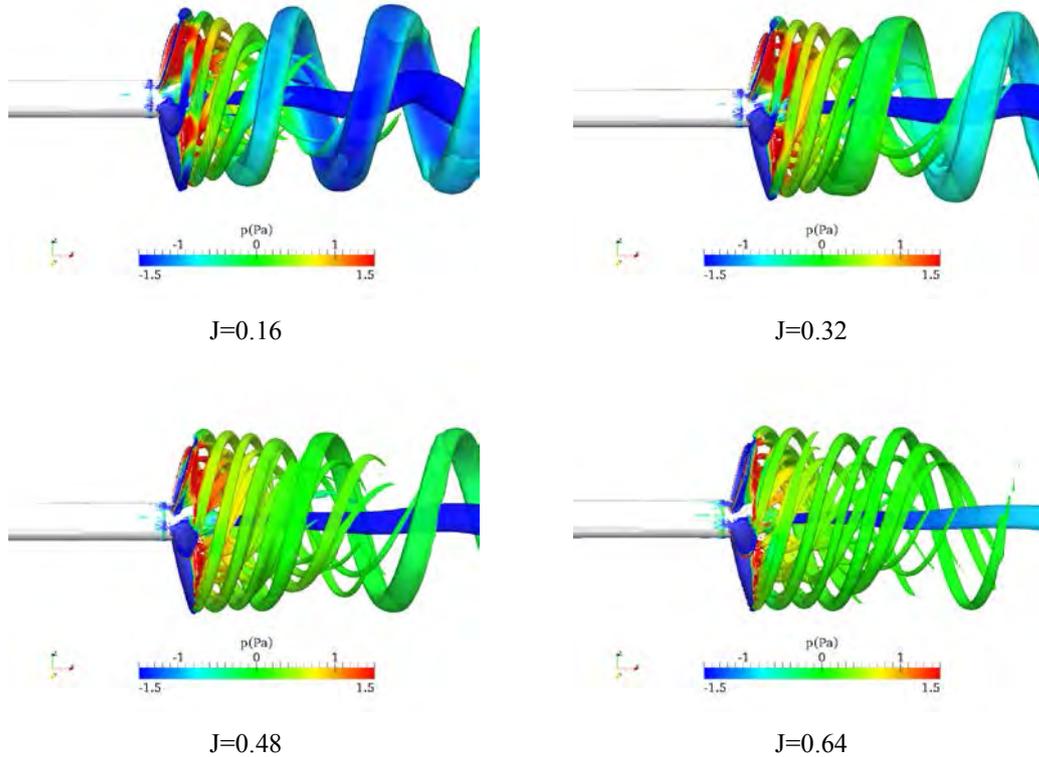


图 3-9 不同进速系数下涡量场等值面

Fig. 3-9 Isosurfaces of $Q=400$ for four different loading conditions during transient acceleration

3.3.3 JBC 自航计算结果分析

经过3.3.1部分静水阻力计算和3.3.2部分螺旋桨敞水计算，本部分将直接对有/无节能装置的JBC船纯粹自航计算进行计算，并对节能装置效果进行分析评估。

对节能装置效果的评估需要在实船自航点下进行，因此我们采用添加强制力的方式进行纯粹自航计算。强制力的作用是用来修正尺度效应引起的摩擦力误差。

强制力的定义为：

$$\text{SFC} = \left\{ (1+k)(C_{F0M} - C_{F0S}) - \Delta C_F \right\} \times \frac{1}{2} \rho U_0^2 S_w \quad (16)$$

其中， C_{F0M} 以及 C_{F0S} 分别为船模和实船尺度下的摩擦阻力系数，可以根据ITTC 1957摩擦阻力公式计算得到的； ΔC_F 为摩擦阻力补偿； k 为形状因子； $U_0=1.179\text{m/s}$ 是计算航速； S_w 是在静水中参考湿表面积。最后计算得到的有无节能装置的摩擦阻力修正SFC分别为18.2N和18.1N。

经过以上3个小节分别对无桨JBC拖航计算、螺旋桨的敞水试验和带节能装置-螺旋桨的纯粹自航试验的计算,本文得到了有/无节能装置JBC自航阻力系数及推进因子的计算结果,如下表4-2所示。

计算结果与试验数据进行了比较,用来验证CFD方法在预报评估船舶节能装置效果过程中的有效性。从表中可以看到,安装伴流补偿导管之后,JBC船的总阻力系数明显减小,螺旋桨推力系数和扭矩系数均有所增加,船身效率也有明显的改善。同时也可以看到,除船身效率和伴流分数两项结果以外,CFD计算的各项结果与模型试验数据的误差均保持在5%以内,表明了CFD计算结果的可靠性。

表 3 - 4 有无节能装置 JBC 纯粹自航计算结果
Table 3-4. Self-propulsion results for JBC W/WO ESD

	EFD-W/O ESD	CFD-W/O ESD	EFD-W ESD	CFD-W ESD
$C_t (\times 10^{-3})$	4.811	4.607 (-4.24%)	4.762	4.551 (-4.43%)
K_T	0.217	0.2225 (2.55%)	0.233	0.2402 (3.07%)
$10K_Q$	0.279	0.2867 (2.76%)	0.295	0.3047 (3.30%)
$1-t$	0.8915	0.9309 (4.42%)	0.8952	0.9367 (4.63%)
$1-w$	0.5483	0.5268 (-3.92%)	0.4742	0.4480 (-5.52%)
η_0	0.4981	0.4895 (-1.72%)	0.4572	0.4446 (-2.74%)
η_R	1.0158	1.0066 (-0.91%)	1.0107	0.9929 (-1.76%)
J	0.4083	0.3983 (-2.45%)	0.3672	0.3538 (-3.64%)
n	7.8	7.682 (-1.51%)	7.5	7.354 (-1.95%)
η_H	0.8227	0.8708 (5.85%)	0.8724	0.9231 (5.81%)

- a. t 为推力减额系数
- b. w 为伴流分数
- c. η_0 为螺旋桨敞水效率
- d. η_R 为相对旋转效率
- e. η_H 为船身效率, 定义为: $\eta_H = (1-t)/(1-w)$

本文采用螺旋桨功率这一指标来评估节能装置的效果,收到功率的定义为: $P=2\pi n \times Q$,其中 Q 为螺旋桨输出扭矩, n 为螺旋桨转速。计算公式如下式(17),节能效果的评估以及与模型试验的比较如下表4-3所示。CFD计算得到的螺旋桨功率与模型试验结果误差均在3%以内,节能指标 ΔE 相对试验数据偏高11.67%。通过将CFD计算得到的受到功率与模型试验结果进行比较,验证了本文方法在评估船舶节能装置效果过程中的可靠性。

$$\Delta E(\%) = (P_{W-ESD} - P_{WO-ESD}) / P_{WO-ESD} \times 100 \quad (17)$$

表 3 - 5 JBC 节能装置效果分析
Table 3-5. Energy saving for JBC with ESD

		P(W)	ΔE
JBC W/O	EFD	28.621	—
	CFD	28.096	—
JBC W ESD	EFD	26.903	6.0%
	CFD	26.200	6.7%

船体压力分布图如图3-10所示，可以看到安装节能装置伴流补偿导管之后对船首的压力基本不产生影响，但对船尾的压力分布产生了明显的影响。在安装节能装置后，船尾的低压区有明显的减小，螺旋桨前方的一个低压带消失，这对减小船舶压阻力有明显的帮助，反应了伴流补偿导管对船尾流场产生的正面影响。同时可以看到节能装置前方形成了一个明显的低压区，这将使节能装置本身也对船身产生一个正推力，起到节省能耗的作用。

船尾涡结构的展示如下图3-11所示。本文选取了两个典型的视角，从两个视角都可以明显的看到，安装节能装置之后，桨毂涡和梢涡的强度较原先均有明显的减弱；特别对于桨毂涡，由安装前一个强度很大的涡分解成两个小涡。这说明节能装置的安装对于改善船尾伴流、提高螺旋桨推进效率、回收能量起到一定的帮助。

船尾伴流场的比较如图3-12所示。这里截取了 $x / L_{pp} = 0.986$ 和 $x / L_{pp} = 0.991$ 两个截面，分别位于螺旋桨桨盘前方和后方，截面用轴向速度 U_x 染色。如预期的相同，在安装伴流补偿导管之后，桨盘面前方的轴向速度要高于未安装导管的情况。船尾伴流场显示，伴流补偿导管对于桨盘面来流汇聚起到了重要的作用，增加桨盘面进流量，特别是对于上半桨盘面的汇流。

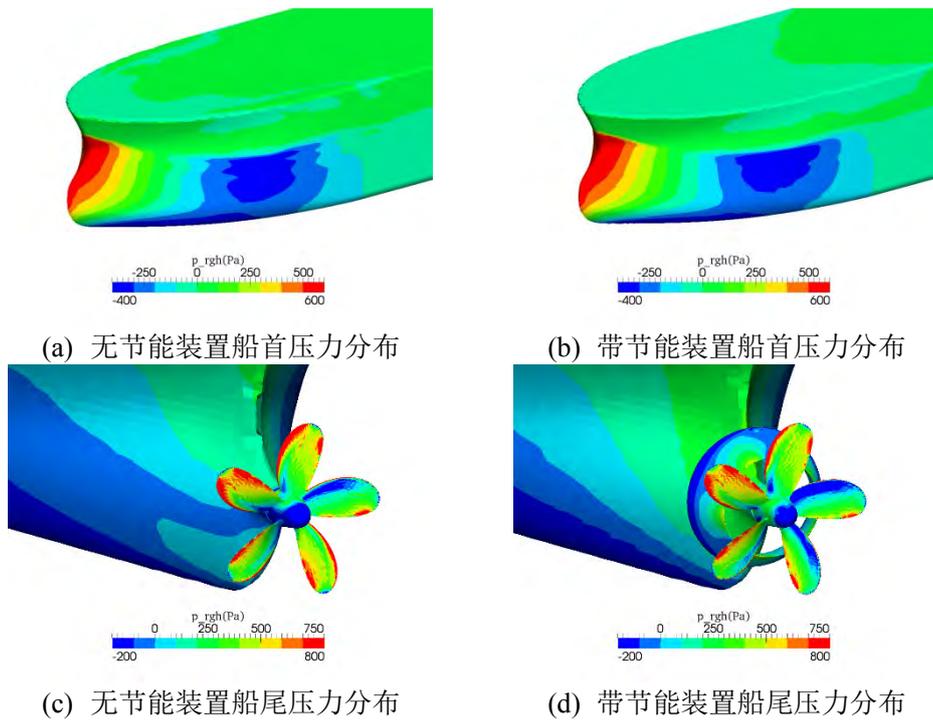


图 3-10 压力分布

Fig.3-10 Pressure distribution

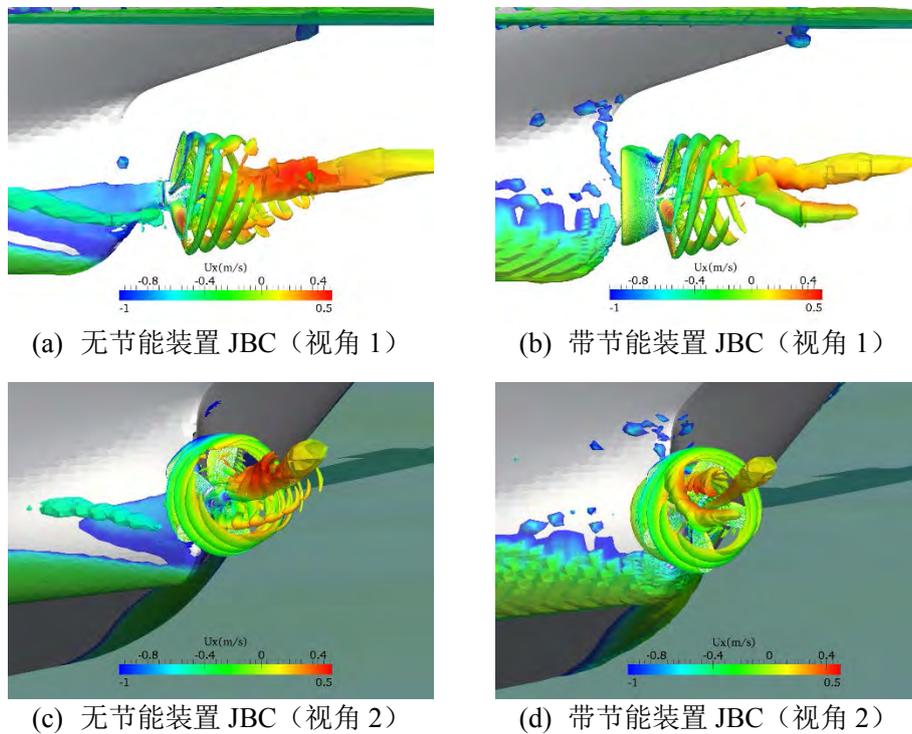


图 3-11 自航 JBC 船轴向速度染色的 $Q=100$ 等值面

Fig.3-11 Isosurfaces of $Q=100$ colored according to U_x under self-propulsion

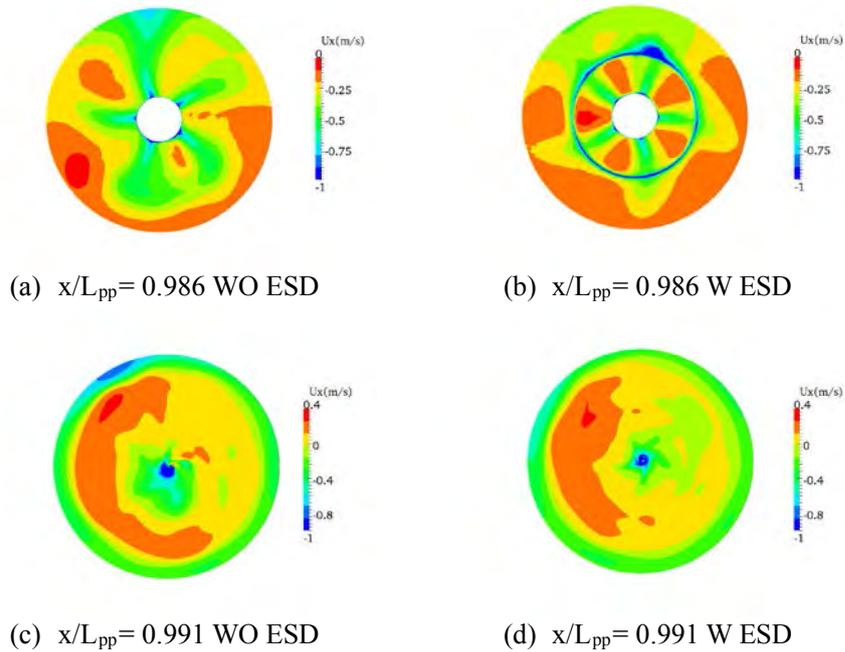


图 3 - 12 船尾伴流场比较

Fig.3-12 Wake field comparison

3.4 本章小结

本章采用 CFD 方法对带/不带伴流补偿导管的 JBC 船进行了自航的数值计算，得到了各项自航性能，分析了船体压力分布、船尾伴流场、船尾涡量场等细节流场信息，并对节能装置效果进行了分析评估。CFD 计算采用了具有重叠网格模块的 naoe-FOAM-SJTU 求解器，基于 RANS 方程，考虑了流体的粘性以及自由表面的影响，并对螺旋桨进行直接离散处理。

数值计算结果以及细节流场显示，伴流补偿导管可以显著提高 JBC 船的推进特性。通过 CFD 计算，以推进功率为指标评估的节能效果为 6.7%，根据实验数据该值为 6.0%。

通过计算分析可以将 JBC 伴流补偿导管的作用原理归纳如下：首先，它可以在桨盘面前起到“汇流”作用，增加桨盘面进流量，改善伴流场；其次，导管可以对船尾压力分布进行调节，通过改善船尾的压力分布来减小流动分离，从而减小船舶航行中的压阻力；最后，伴流补偿导管的机翼形横截面可以产生附加推力。

第四章 VLCC 前置预旋导轮节能效果数值计算与分析

4.1 引言

本部分计算的船型为某型号 32 万吨超大油轮 (VLCC)，对 VLCC 节能装置研究的基本思路与 JBC 船一致。首先进行静水阻力的计算，第二步进行螺旋桨敞水性能预报，最后进行 VLCC 有无节能装置的自航数值模拟。与第三章不同的是本章第三部分同时采用了强制自航和纯粹自航两种方法来获得实船自航点，同时评估了节能装置效果。

4.2 计算模型与网格

4.2.1 几何模型

本部分计算的船型为某型号 32 万吨 VLCC，其垂线间长 L_{pp} 为 320m，设计吃水 20.5m，模型尺度的缩尺比为 40，安装的节能装置为前置预旋导轮。具体船型参数如下表 4-1 所示，节能装置模型如图 4-1 所示，计算船型如下图 4-2 所示。

前置预旋导轮是一种前置式水动力节能装置，相当于伴流补偿导管与前置预旋定子的“结合体”。前置预旋导轮常安装在螺旋桨近前方，外部为导管，内部设有产生预旋流动的 4~5 叶导叶，具有改善螺旋桨入流的均匀性、减小螺旋桨尾流旋转能量损失、提高螺旋桨船身效率等作用，可获得 3%~8% 的节能效果。

表 4-1 VLCC 船主尺度

Table 4-1. Principle Dimensions of VLCC

	主尺度	实尺度	模型尺度
垂线间长	L_{pp} (m)	320.000	8.000
水线长	L_{wl} (m)	325.992	8.150
吃水	T (m)	20.500	0.513
排水量	Δ (kg)	3.207×10^8	5011.57
湿表面积	S (m^2)	28640.000	17.900
LCG	LCG (m)	148.880	3.722
纵向惯性矩	I_{yy} ($kg \cdot m^2$)	2.053×10^{12}	20046.280
螺旋桨 x 方向位置	x/L_{pp}	0.9864	0.9864
螺旋桨 z 方向位置	$-z/L_{pp}$	-0.0411	-0.0411
螺旋桨转向 (船尾视角)	—	clockwise	clockwise

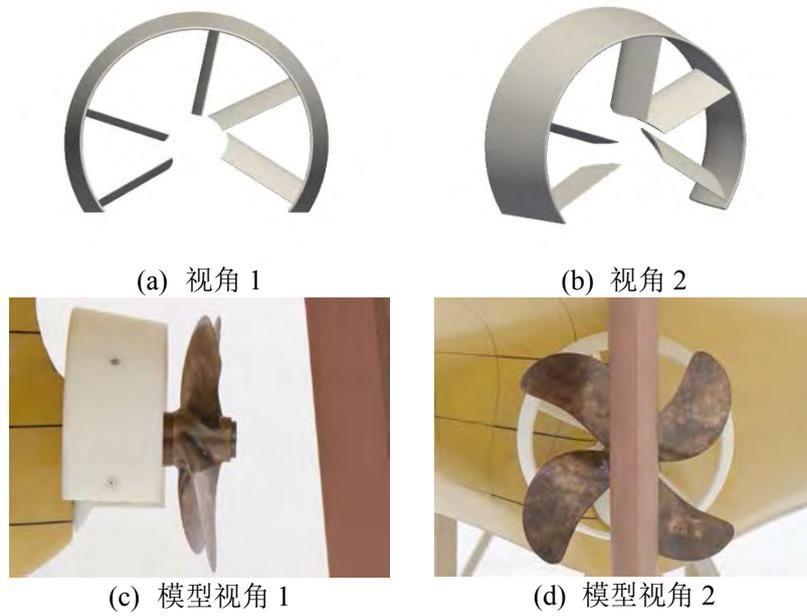


图 4-1 节能装置模型

Fig.4-1 Model of pre-swirl duct

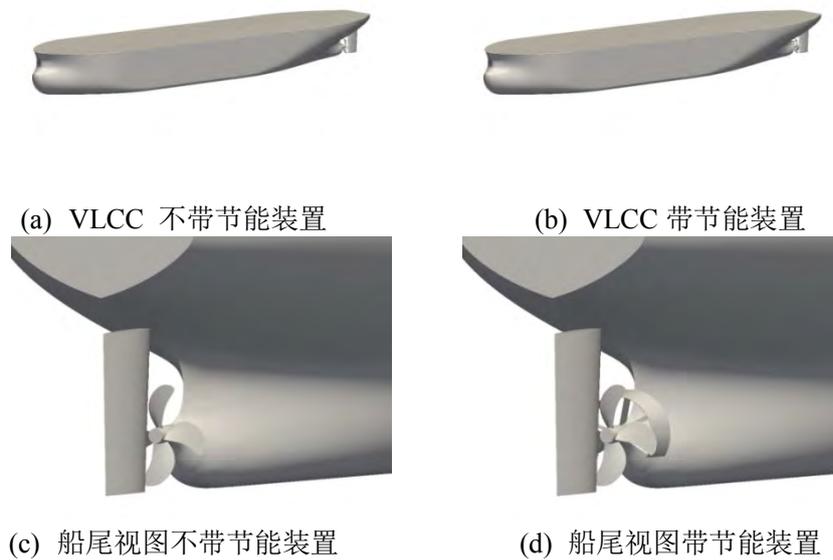


图 4-2 静水及自航 JBC 计算模型

Fig.4-2 Computational models of VLCC for resistance (a, b) and self-propulsion (c, d)

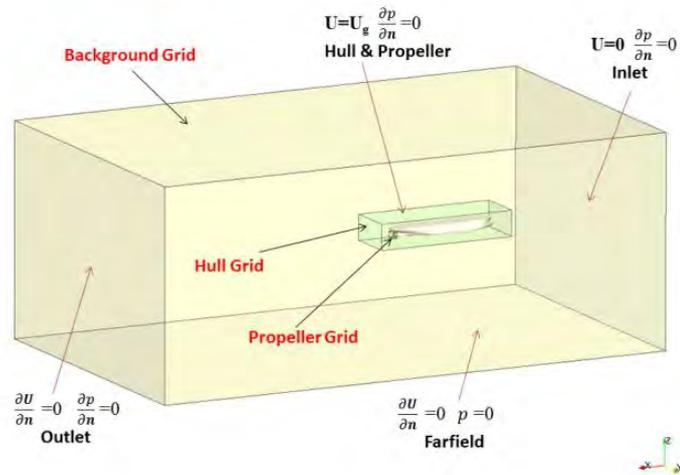
4.2.2 计算域与计算网格

VLCC 的计算域布置以及边界条件设置均与 JBC 船相同。地球坐标系下计算域为： $1.0L_{pp} < x < 4.0L_{pp}$ ， $-1.5L_{pp} < y < 1.5L_{pp}$ ， $-1.0L_{pp} < z < 1.0L_{pp}$ 。

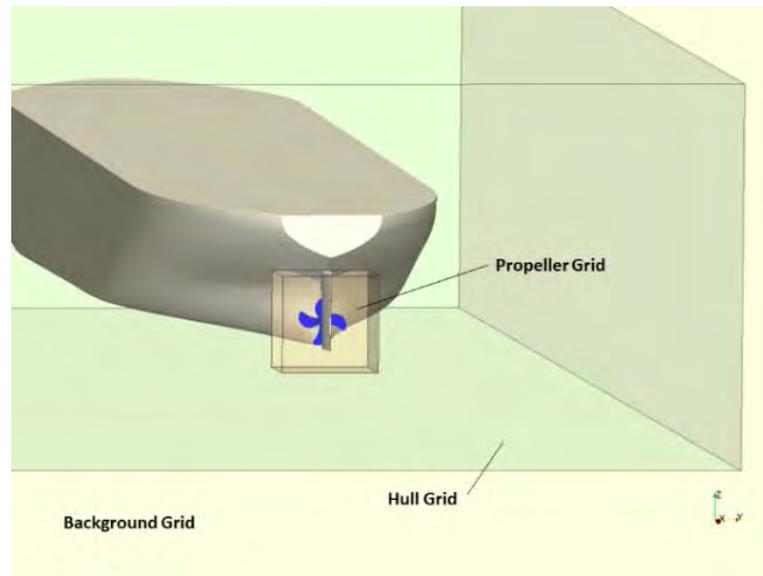
计算的重叠网格仍然由 OpenFOAM 自带的网格生成工具 *SnappyHexMesh* 生成。在螺旋桨的下游以及自由面和船体周围进行了局部加密，在螺旋桨和船体之间保留有一个很小的间隙供重叠网格程序 *Sugar++* 挖洞插值。有无节能装置自航计算的网格量分布如表 4-2 所示。所采用的重叠网格布局以及边界条件如图 4-3 所示，全局网格以及船尾局部网格如图 4-4 所示。

表 4 - 2 VLCC 船计算网格量分布
Table 4-2. Grid distribution for VLCC calculation

网格量	船体	螺旋桨	背景网格	网格总量
VLCC/WO	2.48×10^6	1.63×10^6	1.41×10^6	5.52×10^6
VLCC/W	3.24×10^6	1.63×10^6	1.41×10^6	6.28×10^6



(a)全局视图



(b)局部视图

图 4-3 重叠网格布局

Fig.4-3. Layout of overset grid

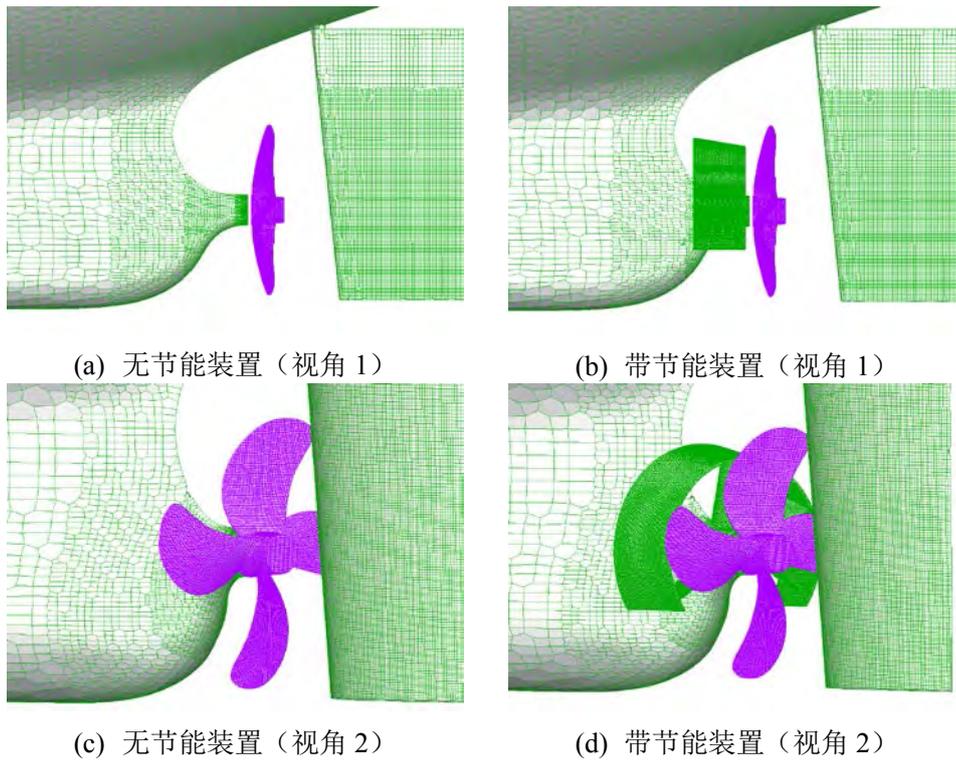


图 4-4 计算网格

Fig.4-4 Mesh generation

4.3 计算结果分析

4.3.1 VLCC 静水阻力计算结果分析

对于不带节能装置和带节能装置两种工况，我们均采用全模计算，前者网格量为 237 万，后者网格量为 338 万，计算时间步长为 0.001s，计算中采用壁面函数，控制 y^+ 在 30 左右。本部分分别对固定船体和放开垂荡、纵摇两自由度的工况进行了计算，计算来流速度为 1.303m/s（傅汝德数 $Fr=0.147$ ，对应实际航速约为 16kn），模型尺度计算结果如下表 4-3 所示。

表 4-3 VLCC 船静水拖航计算结果
Table 4-3. Resistance coefficients for towed JBC

计算模型	船模阻力				船模姿态	
	$C_p (\times 10^{-3})$	$C_f (\times 10^{-3})$	$C_t (\times 10^{-3})$	$R_t (N)$	纵倾(deg)	升沉(m)
不带节 固定船体	1.239	2.936	4.175	63.375	—	—
能装置 放开自由度	1.294	2.956	4.250	64.511	-0.144	-0.00613
带节能 固定船体	1.232	2.950	4.182	63.485	—	—
装置 放开自由度	1.308	2.958	4.266	64.749	-0.144	-0.00676

进一步我们对不带节能装置的 VLCC 在船模尺度下 14kn-18kn (对应实船速度) 的静水阻力进行了计算。计算结果及与试验值的对比如表 4-4 所示。通过与试验数据对比可以看到，CFD 计算得到的总阻力系数在趋势上和绝对值上与试验均吻合良好，验证了计算采用的网格和时间步长的合理性，并为下一步带节能装置、螺旋桨的强制/纯粹自航计算提供精度保证。

表 4-4 VLCC 船静水不同航速计算结果
Table 4-4. Resistance coefficients for towed JBC at different speed

总阻力系数对比	14kn	15kn	16kn	17kn	18kn
CFD	0.00411	0.00409	0.00410	0.00407	0.00410
拖航试验	0.00398	0.00394	0.00395	0.00393	0.00396
误差	3.16%	3.67%	3.66%	3.44%	3.41%

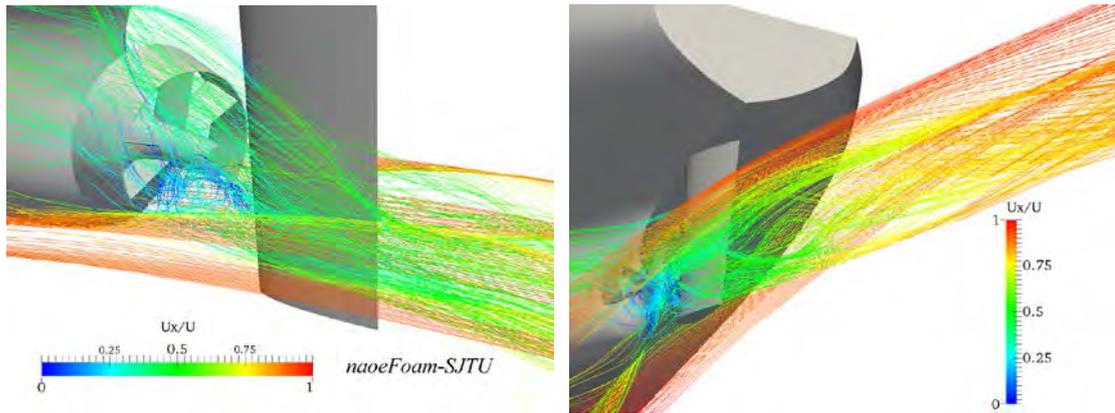
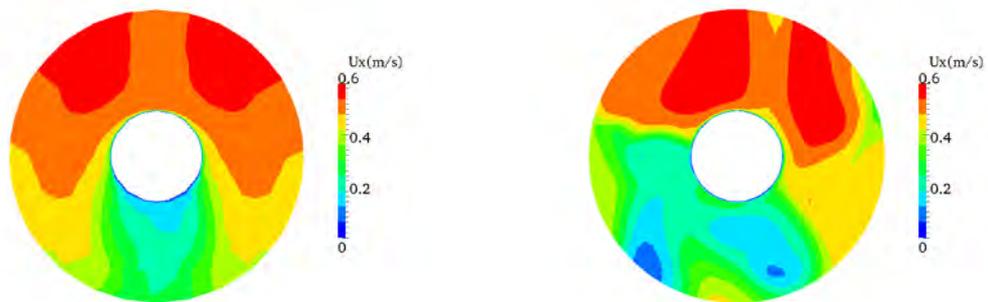


图 4-5 船尾流线图

Fig.4-5 Stream lines at stern

16kn 航速下船尾局部流线图如图 4-5 所示，通过流线图可以看到节能装置对来流的汇聚作用，同时在桨盘面处产生了一定的预旋，这是上部分伴流补偿导管计算中所没有的现象。同时，在本部分中，本文分别对模型尺度下未装节能装置和加装节能装置两种情况下的尾部伴流进行了提取分析。所有数据均来自于裸船模（不带螺旋桨）在静水中以设计航速匀速前进时的尾部流场。以螺旋桨盘面位置为监测位置，重点分析轴向速度和切向速度的区别，以 0.5 倍桨半径、0.7 倍桨半径、0.9 倍桨半径、1.1 倍桨半径所围成的面积为监测区域，采集该区域内所有点的位置与速度信息。又以沿船长方向的速度分量 U_x 和 U_y 染色，做桨盘面处速度云图如下图所示：

 $r=0.5R$, WO ESD $r=0.5R$, W ESD

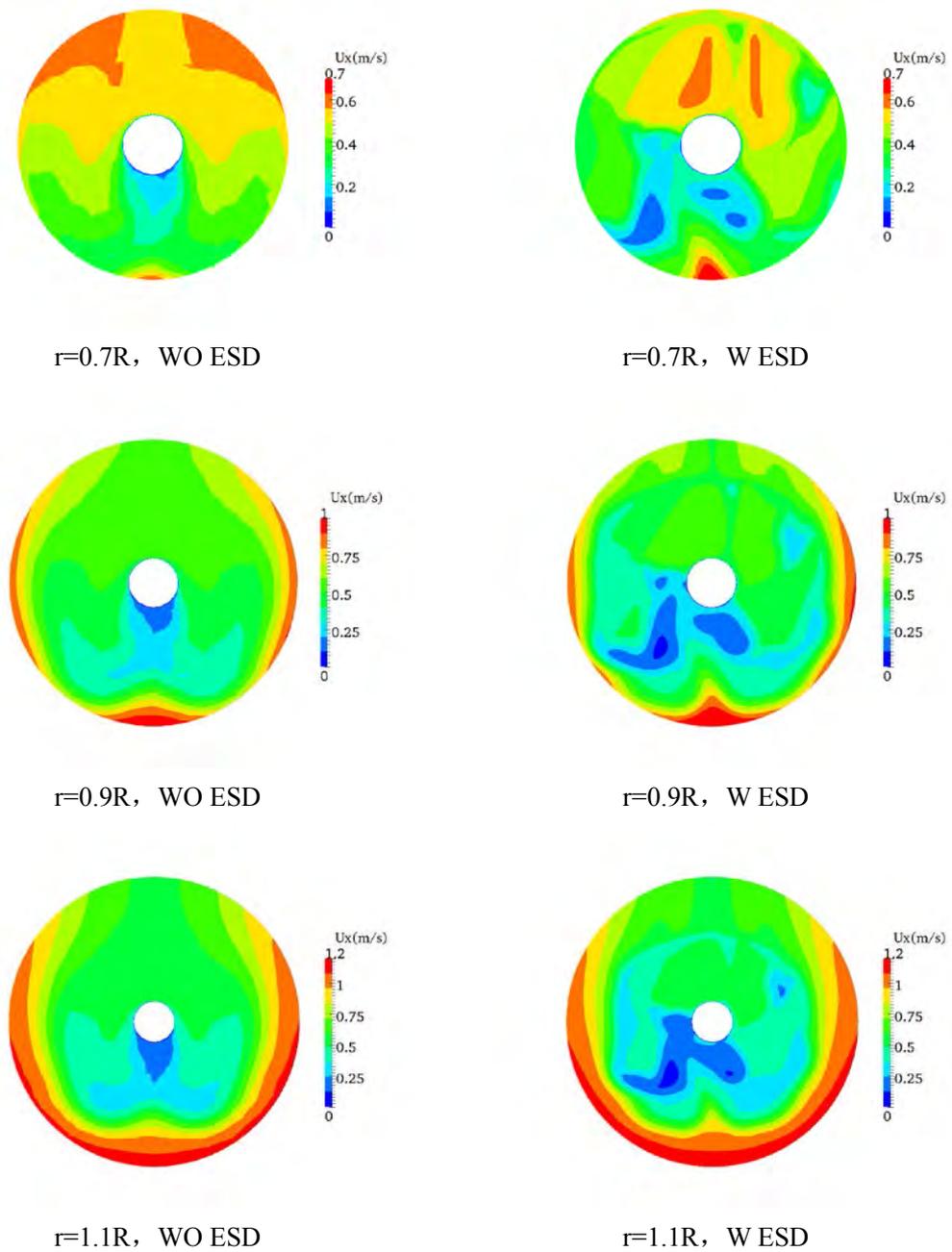


图 4 - 6 船尾伴流场比较
Fig.4-6 Wake field comparison

取桨盘面上所有点的 U_x ，求和做平均，以平均速度作为进速，又可换算得到船尾标称伴流值，如下表 4-5。通过对比可知，加装节能装置后可以有效改善船尾

伴流。一方面，桨盘面处的平均速度增加，标称伴流分数降低；另一方面，预旋作用对螺旋桨运行亦有正面影响。

表 4-5 桨盘面处平均速度与标称伴流
Fig 4-5 Average U_x at propeller disk and wake comparison

	平均速度	标称伴流
无节能装置	0.532548	0.591291
有节能装置	0.565808	0.565765

4.3.2 螺旋桨敞水性征计算分析

本部分计算的螺旋桨模型是安装于 VLCC 的四叶螺旋桨，螺旋桨实尺度直径为 10m，模型尺度直径为 0.25m，缩尺比为 1:40。本文的计算都是基于螺旋桨的模型尺度。计算螺旋桨模型如下图 4-7 所示。在本文的单次法计算中，螺旋桨转速保持 20 转/s 不变，前进速度从静止匀加速至 4m/s，整个过程历时 4s。在单点法计算中，我们选取了进速系数 $J=0.2, 0.4, 0.6$ （分别对应前进速度 1m/s, 2m/s, 3m/s）三个工况进行了计算，目的是为了验证单次法的可靠性。

计算网格如图 4-8 所示，网格是用 OpenFOAM 自带的网格生成工具 *SnappyHexMesh* 生成的，为了更好的捕捉螺旋桨的尾流场，我们对螺旋桨前后的区域进行了适当加密。计算域与边界条件如图 4-9 所示。

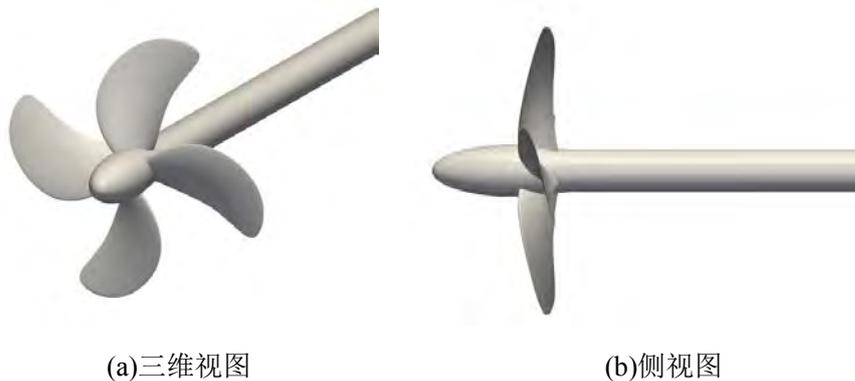


图 4-7 螺旋桨模型示意图

Fig. 4-7 Propeller model

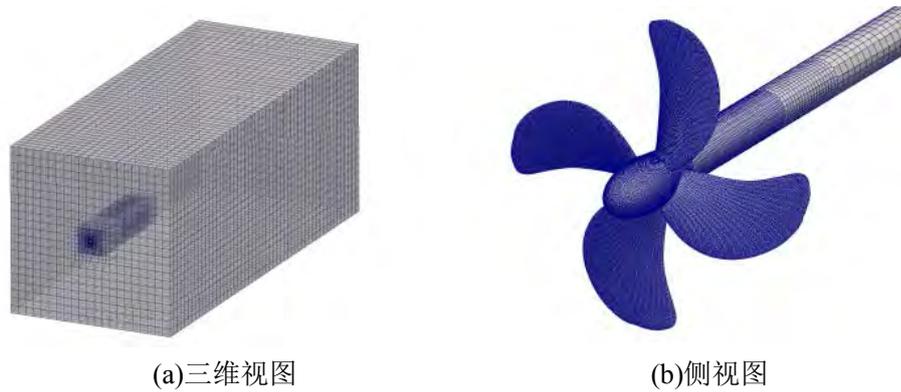


图 4-8 螺旋桨计算网格
Fig. 4-8 Propeller mesh

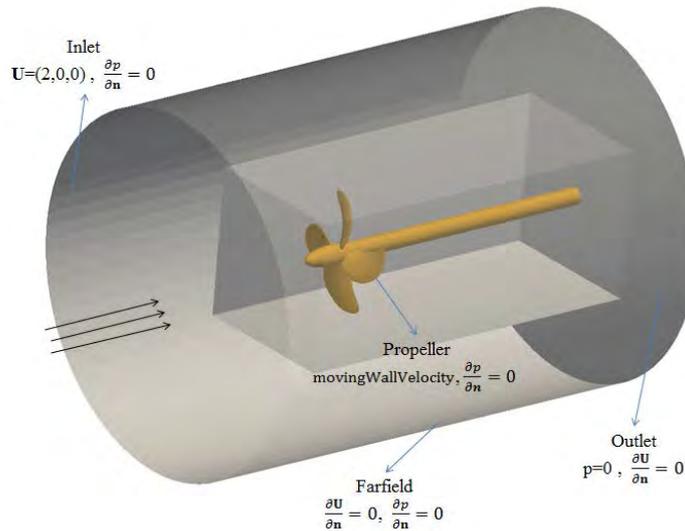


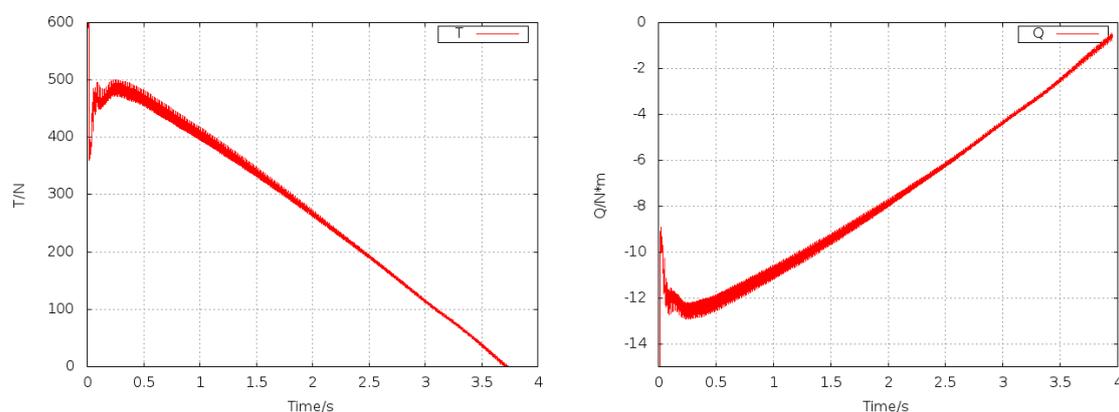
图 4-9 计算域与边界条件
Fig. 4-9 Boundary conditions

单次法的计算中，采用以大地为基准的参考系，螺旋桨的转速 RPS 固定，包括螺旋桨在内的整个计算网格以匀加速推进。计算得到的螺旋桨推力、扭矩时历曲线如下图所示，随着进速的增加，推力逐渐减小、扭矩逐渐增大，其收敛曲线呈现一条斜线。为了验证单次法的有效性，我们在 $J=0.4$ 、 0.5 、 0.6 三个工况进行了计算验证。验证采用传统的固定螺旋桨转速和来流速度的单点法进行。两种方法计算的网格及边界条件设置完全一致，只是单点法每次计算中整个网格均以恒定速度前进。

两种数值计算的结果与模型试验数据的比较如图 4-11 所示。对于单次计算方法，螺旋桨的进速系数由 $J=0.05$ 逐渐加速至 0.7 。加速时间为 $4s$ 。在与实验数据

的比较中可以发现，当高进速系数下，CFD 计算偏差较大。当 $J=0.7$ 时与试验数据误差在 8% 以上。在中低进速系数下 CFD 计算得到的推力系数、扭矩系数和敞水效率均与模型试验结果吻合较好。另外，3 个单点计算的结果准确的落在单次法计算得到的敞水曲线上，这也验证了本文计算所采用的单次计算方法的有效性。

图 4-12 是 $J=0.4$ 计算工况下螺旋桨的桨后涡结构图。计算结果由单点计算得到。从图中我们可以看到，采用重叠网格技术计算得到了清晰的螺旋桨桨毂涡和螺旋桨梢涡，相对梢涡，桨毂涡由于强度较大，可以延伸的更长。



(a) 推力时历曲线

(b) 扭矩时历曲线

图 4-10 螺旋桨推力、扭矩时历曲线

Fig 4-10 Curve of T and Q for single-run propeller

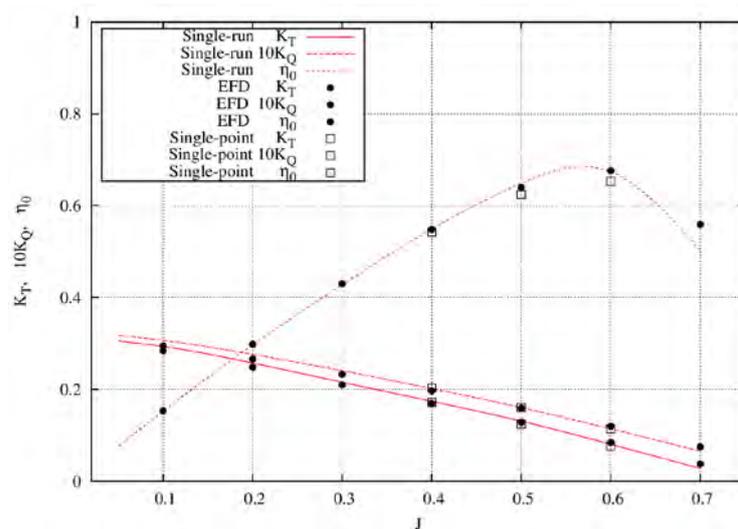


图 4-11 敞水曲线结果比较

Fig 4-11 Propeller open-water curve

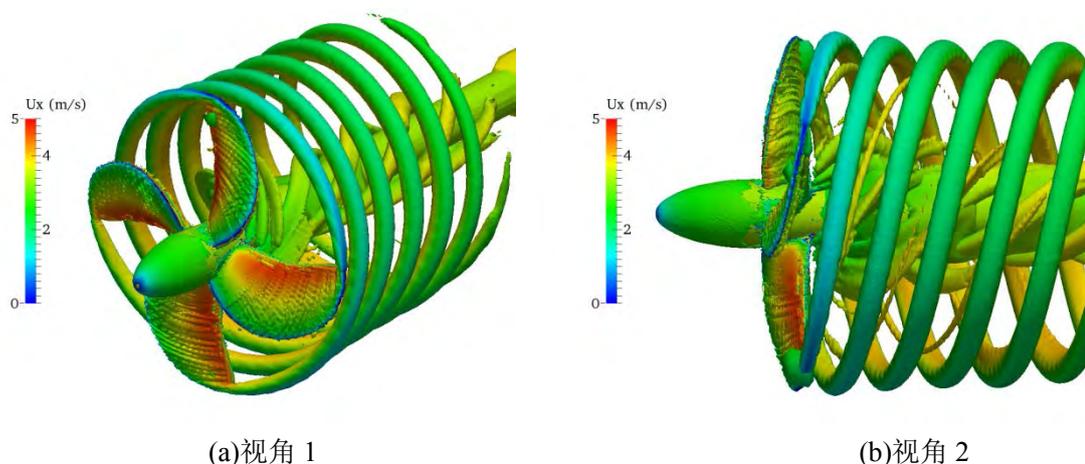


图 4-12 桨后涡结构（基于 Q 的等值面）

Fig 4-12 Isosurfaces of $Q=100$ colored according to U_x

4.3.3 VLCC 自航计算结果分析

本部分主要介绍有无节能装置的 VLCC 船自航计算结果，并对节能装置效果进行分析评估。对有无节能装置的 VLCC 摩擦阻力修正 SFC 均为 25.74N。计算航速为 1.303m/s（傅汝德数 $Fr=0.147$ ，对应实际航速约为 16kn），计算中放开垂荡、纵摇自由度，背景网格随船体一起向前运动；计算中以尾倾为正，首倾为负；船体上升为正，船体下沉为负。

本部分同时采用强制自航法和纯粹自航法进行计算。首先介绍强制自航计算，强制自航的计算航速为 1.303m/s，对于不带节能装置 VLCC 螺旋桨计算四个转速分别为：4.913、6.866、8.211、8.741RPS，带节能装置 VLCC 螺旋桨计算四个转速分别为：4.339、6.443、7.828、8.348RPS。

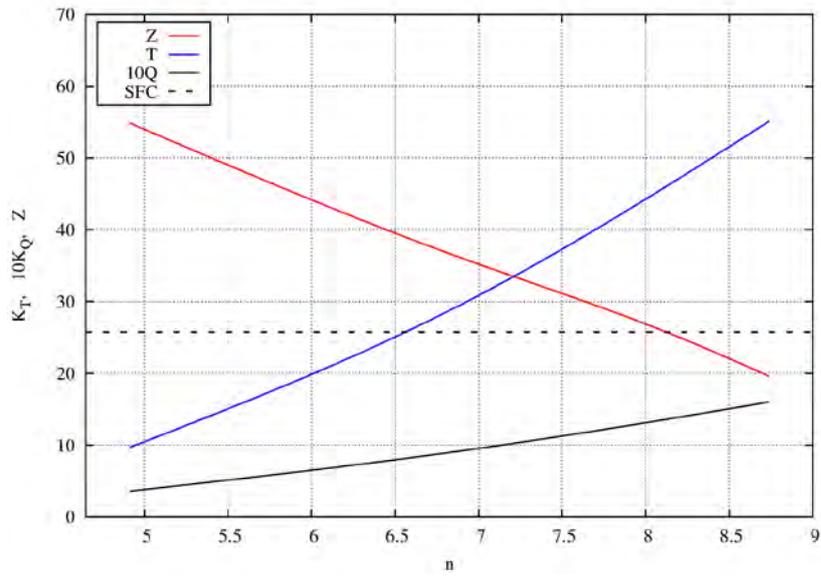
强制自航计算结果如下表 4-6 所示，将表 4-6 中的计算结果整理成船模自航试验曲线图，如图 4-13。又以摩擦阻力修正值 SFC 插值图 4-13 中的拖车强制力变化曲线，最终得到实船自航点，不带节能装置 VLCC 实船自航点螺旋桨转速为 8.016RPS，带节能装置 VLCC 实船自航点螺旋桨转速 7.893RPS。

表 4-6 强制自航试验船模阻力、姿态计算结果

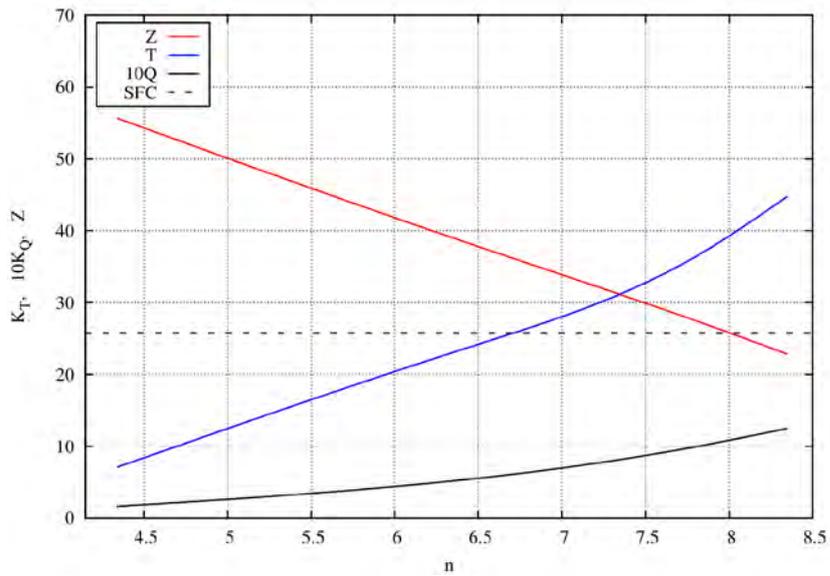
Fig 4-6 Model ship results for compulsory self-propulsion computation

模型	转速 n	强制力 /N	推力 T/N	扭矩 Q /N*m	K_T	$10K_Q$	总阻力 /N	垂荡(m)	纵倾 (deg)
不带节	4.913	52.768	9.471	0.322	0.1006	0.1369	62.239	-0.00889	-0.1473
	6.866	35.340	28.336	0.819	0.1542	0.1783	63.676	-0.00904	-0.1571

能装置	8.211	23.086	42.628	1.254	0.1622	0.1908	65.714	-0.00915	-0.1422
	8.741	18.280	50.687	1.441	0.1702	0.1935	68.967	-0.00914	-0.1409
	4.339	53.178	9.075	0.164	0.1236	0.0894	62.253	-0.00986	-0.1303
带节能装置	6.443	36.851	26.769	0.641	0.1654	0.1584	63.620	-0.00947	-0.1352
	7.828	25.246	39.775	1.106	0.1665	0.1852	65.021	-0.00991	-0.1343
	8.348	20.832	46.780	1.348	0.1722	0.1984	67.612	-0.01003	-0.1230



(a) 不带节能装置



(b) 带节能装置

图 4-13 船模自航试验曲线

Fig 4-13 Self-test curve for model ship

下面介绍纯粹自航法计算。VLCC 的纯粹自航计算设置与第三章中 JBC 船相同，采用加强制力通过 PI 控制器调节螺旋桨转速收敛到自航点的方法。纯粹自航计算得到的 VLCC 船模在 $Fr=0.147$ 航速下配合其四叶螺旋桨的自航推进因子结果如下表 4-7 所示。其中有效伴流分数由等推力法得到，推力减额的计算则参考了试验艏船体阻力值。表中对有/无节能装置的计算结果进行了比较，用来分析前置预旋导论对船舶自航性能的影响。

分析计算结果可以发现，有无节能装置对 VLCC 船的自航推进性能的影响非常明显。加装节能装置后可以有效改善船后伴流，降低推力减额。船体在自航点下的总阻力，螺旋桨的转速、推力、扭矩均比无节能装置时更小，以螺旋桨的功率为标准，安装节能装置后可以节能 5.7%。

表 4-7 有无节能装置 VLCC 自航推进因子
Table 4-7. Self-propulsion factors for VLCC W/WO ESD

VLCC		无节能装置	有节能装置
总阻力系数	C_t	0.004418	0.004325
推力系数	K_T	0.1752	0.1744
扭矩系数	K_Q	0.1946	0.1920
推力减额	$1-t$	0.8809	0.8998
有效伴流分数	$1-w$	0.5715	0.5689
敞水效率	η_o	0.5302	0.5335
敞水扭矩系数	K_{Qo}	0.2031	0.2014
相对旋转效率	η_R	1.0434	1.0487
进速系数	J	0.3833	0.3874
螺旋桨转速	n	7.7720	7.6550
船身效率	η_H	0.8526	0.8848

船体压力分布图如图 4-14 所示，可以看到安装节能装置后对船身整体压力分布基本不产生影响，但对船尾局部的压力分布产生了明显的影响。安装节能装置后，螺旋桨桨毂处的低压区有明显的减小，这对于回收桨毂涡能量有帮助。同时可以看到螺旋桨推力面压力降低，这说明螺旋桨功率有明显减小。

船尾伴流图如图 4-15 所示，可以看到安装节能装置之后，上半桨盘面伴流有明显的改善，来流速度大幅度提高，这对提高螺旋桨推进效率，减小螺旋桨振动

起到很大的帮助。

船尾涡结构的展示如下图 4-16 所示。从图中两个视角都可以明显的看到，安装节能装置之后，桨毂涡的强度较原先均有明显的减弱，同时桨后的水流速度明显降低，说明节能装置的安装对于改善船尾伴流、提高螺旋桨推进效率起到一定的帮助。

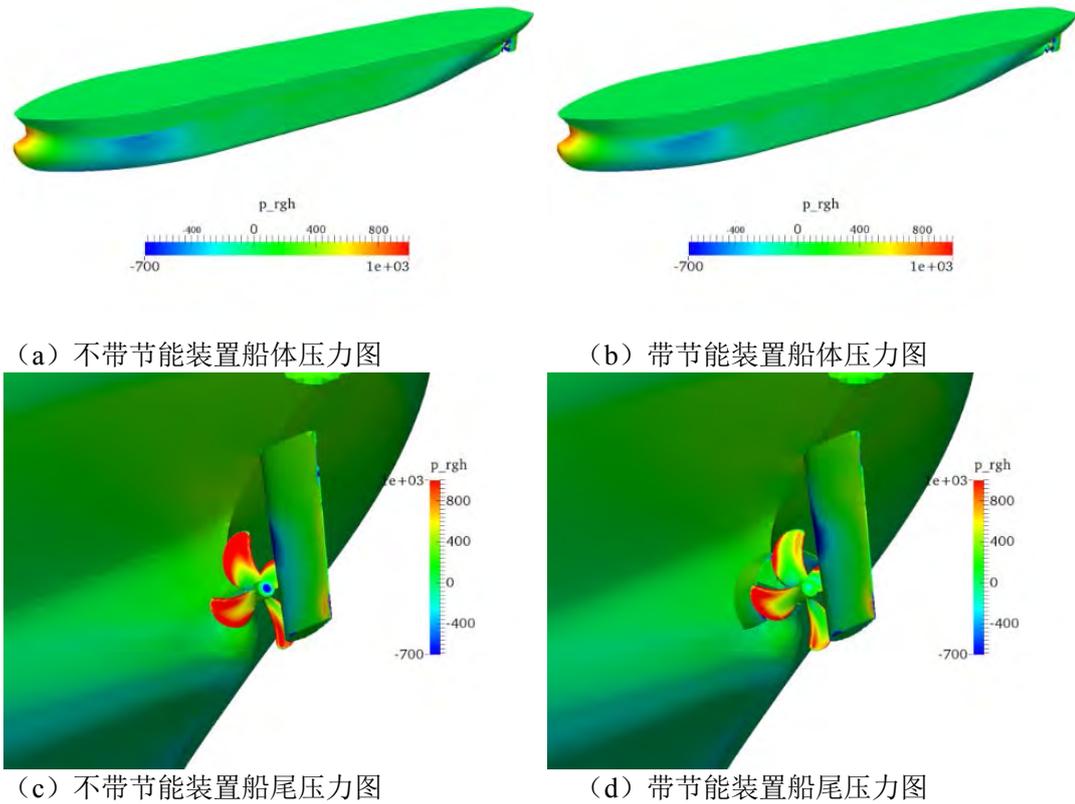


图 4-14 压力分布

Fig.4-14 Pressure distribution

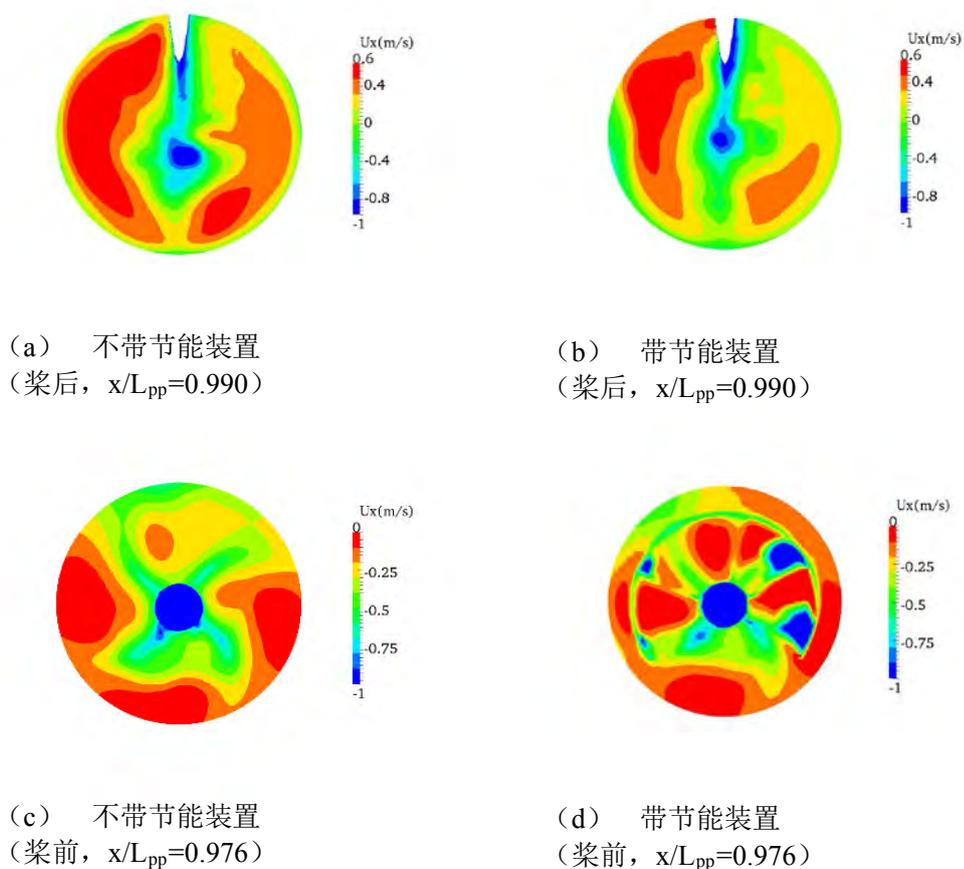
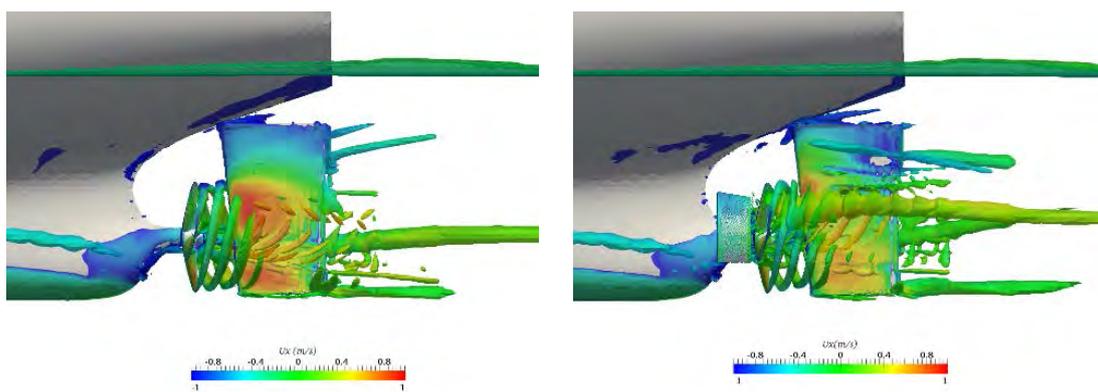


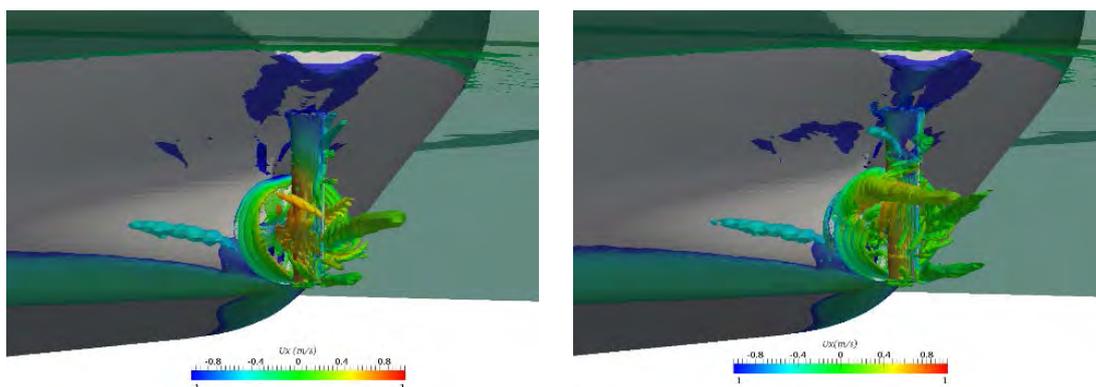
图 4 - 15 伴流场比较

Fig.4-15 Wake field comparison



(a) 无节能装置 视角 1

(b) 带节能装置 视角 1



(c) 无节能装置 视角 2

(d) 带节能装置 视角 2

图 4 - 16 自航 VLCC 船轴向速度染色的 $Q=100$ 等值面Fig.4-16 Isosurfaces of $Q=100$ colored according to U_x under self-propulsion

4.4 本章小结

本章采用自主开发的多功能求解器 naoe-FOAM-SJTU 对 VLCC 在船模尺度下的强制自航试验与纯粹自航试验进行数值模拟计算分析。在计算中：船体以恒定速度向前运动，船后螺旋桨以一定转速做旋转运动，计算域网格随船整体向前移动。为了加快收敛，我们首先对裸船体（不带任何附体，且船体固定）向前匀速运动时的情况进行了计算，并将其稳定收敛时的流场映射为带桨自航算例的初始流场。最后给出了强制自航与纯粹自航的自航点计算结果、以及基于纯粹自航计算进一步换算得到推进因子。

通过对比分析计算结果，可以发现得到以下结论：

- 1、强制自航的计算与纯粹自航的自航点预报结果非常接近。这一方面验证了两种自航试验方法的可行性，另一方面也验证了本次计算的可靠性。
- 2、有无节能装置对船的影响非常明显。加装节能装置后可以有效改善船后伴流，降低推力减额。船体在自航点下的总阻力，螺旋桨的转速、推力、扭矩均比无节能装置时更小，以螺旋桨的功率为标准，发现加装节能装置可以达到节能 5.7% 的效果。

总结 VLCC 前置预旋导管的作用原理：首先，加装前置预旋导轮后可以有效改善船后伴流，降低推力减额；其次，导轮可以对螺旋桨进流进行加速、汇流、提高其推进效率；同时导轮通过机翼形剖面产生附加推力，并通过改善船尾压力分布减小船尾流动分离；最后，相对伴流补偿导管，前置预旋导轮可以通过预旋定子对螺旋桨进流产生预旋。

第五章 总结与展望

5.1 全文总结

为了提高船舶能效水平,使其满足 EEDI 标准以及船东对降低船舶能耗的普遍需求,给船舶安装节能装置成本较小、风险较低,不需要对现有船体结构进行改动,同时节能效果明显,因此渐渐受到船东和设计人员的重视。从实际船舶设计出发,正是因为船舶节能装置对于提高船舶能效有着重要的影响,针对船舶节能装置的研究也就具有重大的意义。对于设计的船舶节能装置,如何有效准确的评估其节能效果以及对船舶推进性能和尾流场的影响,成为本文研究的主要工作。

本文的工作基于课题组自主研发的船舶与海洋工程水动力学 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU,采用重叠网格技术进行带节能装置-桨-舵的船舶自航全粘性流场计算,得出了下述几个方面的结论:

(1) 为了对安装有节能装置的 VLCC 和 JBC 两型船进行自航性能和节能装置效果的有效评估,首先本文采用 2015 年东京 CFD 研讨会标准船型 JBC 进行船-桨配合的自航计算。通过与 NMRI 提供的模型试验进行对比分析,数值计算得到的总阻力系数与试验值误差在 3%以内,垂荡、纵摇运动与模型试验结果误差在 5%以内。CFD 计算结果与试验数据吻合良好,验证了 naoe-FOAM-SJTU 求解器以及重叠网格技术的可靠性,为下一步带节能装置-桨-舵的船舶自航数值模拟提供了必要条件。

(2) 本文对带/不带伴流补偿导管的 JBC 船进行了纯粹自航数值模拟,通过对数值计算结果进行分析以及细节流场显示,发现伴流补偿导管可以显著提高 JBC 船的推进特性。通过 CFD 计算,以推进功率为指标评估的节能效果为 6.7%,与实验数据的评估值 6.0%接近。

通过计算分析可以将伴流补偿导管的作用原理归纳如下:首先,它可以在桨盘面前起到“汇流”作用,增加桨盘面进流量;其次,导管可以对船尾压力分布进行调节,减小流动分离,从而减小压阻力;最后,伴流补偿导管的机翼形横截面可以产生附加推力。

(3) 本文对带/不带前置预旋导轮的 VLCC 进行了船模尺度下的强制自航与纯粹自航数值模拟计算分析。强制自航通过四个螺旋桨转速点拟合插值得到自航点及各推进因子,纯粹自航通过 PI 控制器调节螺旋桨转速收敛到自航点,二者得

到的自航点接近，凸显了采用重叠网格技术通过 PI 控制器直接得到自航点的高效性。

通过对比分析计算结果可以发现，是否安装前置预旋导论对 VLCC 的推进性能影响非常明显。VLCC 在自航点下的总阻力，螺旋桨的转速、推力、扭矩均比无节能装置时更小，以螺旋桨的功率为标准，发现加装节能装置可以达到节能 5.7% 的效果。可以将前置预旋导管的作用原理归纳如下：首先，加装前置预旋导轮后可以有效改善船后伴流，降低推力减额；其次，导轮可以对螺旋桨进流进行加速、汇流、提高其推进效率；同时导轮通过机翼形剖面产生附加推力，并通过改善船尾压力分布减小船尾流动分离；最后，相对伴流补偿导管，前置预旋导轮可以通过预旋定子对螺旋桨进流产生预旋。

5.2 研究展望

本文采用课题组基于 OpenFOAM 自主开发的船舶水动力学 CFD 求解器对带节能装置-桨-舵的船舶自航进行了数值模拟，具体分析了 JBC 和 VLCC 两种安装不同节能装置的船型，得到了初步的计算结果，说明了利用 CFD 进行节能装置效果评估的有效性。

但由于时间有限，本文工作仍然属于初步阶段，下一步可以从以下几个方面做更加深入的研究：

- 1、考虑尺度效应的影响。实际安装于实船的节能装置的节能效果往往与模型试验以及模型尺度 CFD 预报的结果有一定的出入。船舶节能装置的设计作为实际问题必须从实际出发，为了更好的评估节能装置的效果，探讨实尺度下节能装置对尾流场的影响，有必要直接对实尺度安装节能装置的船舶自航进行 CFD 数值模拟与分析。

- 2、采用 DES 模型进行数值计算。船舶节能装置的设计研究需要对船尾细节流场进行精细化的模拟，从而得到准确的流场结构，从而为设计提供参考。目前采用的 RANS 方法在计算精度以及对细节流场的捕捉上存在诸多的欠缺，而 LES 方法由于船舶水动力学问题的高雷诺数暂时难以投入实际应用，因此采用混合二者的 DES 模型进行计算在未来将是兼顾效率与精度的选择。

- 3、船舶节能装置的优化设计。本文的工作主要集中在对已有船舶节能装置的性能评估，验证了 CFD 技术在船舶节能装置设计中的优势和可靠性。下一步可以采用 CFD 技术对新型节能装置进行设计和优化。

参 考 文 献

- [1] Ship Energy Efficiency Measures: Status and Guidance[R]. ABS, 2013.
- [2] 船舶节能装置[R]. 中国船舶科学研究中心.
- [3] Jie Dang, Hao Chen, Guoxiang Dong. An Exploratory Study on the working Principles of Energy Saving Devices (ESDa) [A]. Symposium on Green Ship Technology [C]. Wuxi, China, 2011.
- [4] Emin Korkut. A case study for the effect of a flow improvement device (a partial wake equalizing duct) on ship powering characteristics[J]. Ocean Engineering, 2006, 33: 205–218.
- [5] Hansen H. R., Dinham-Peren T., Nojiri T. Model and Full Scale Evaluation of a Propeller Boss Cap Fins Device Fitted to an Aframax Tanker[C]. Proceedings of 2nd International Symposium on Marine Propulsors, Hamburg, Germany, 2011.
- [6] Holtrop J. Extrapolation of Propulsion Tests for Ships with Appendages and Complex Propulsors[J], Marine Technology, Vol 38, No 3, 2001.
- [7] 胡敬. 64000t 散货船半前置整流导管振动特性分析[C]. 上海地区船舶引进技术交流会, 1988.
- [8] 钱文豪, 范余明. 水动力附加节能装置在内河船上的应用[C]. 全国内河船学术研讨会论文集, 1995.
- [9] 李洁雅, 余灵, 羊少刚, 李干洛, 廖涛. 货舱进流补偿导管试验研究[J]. 船舶工程, 1996.
- [10] 黄国富, 黄振宇, 马艳, 张海华, 杨奕. 组合式水动力节能装置在 5.7 万吨散货船上的设计与应用[C]. 第二十五届全国水动力学研讨会, 舟山, 2013.
- [11] 黄少锋, 杨奕, 黄国富, 曾志波, 黄树权. 某 82000 吨散货船节能装置研究[C]. 第二十三届全国水动力学研讨会, 西安, 2011.
- [12] Fahri Celik., A numerical study for effectiveness of a wake equalizing duct[J]. Ocean Engineering, 2007, 34: 2138-2145.
- [13] Shin H. J., Lee J. S., Numerical and experimental investigation of conventional and un-conventional preswirl duct for VLCC [J], International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2013, 5: 414–430.
- [14] Sunho Park., GWANGHO O., SHIN H. R. et al. Full scale wake prediction of an energy saving device by using computational fluid dynamics[J], Ocean Engineering, 2015,101: 254–263.

- [15] Heinke H. J., Hellwig-Rieck K.. Investigation of Scale Effects on Ships with a Wake Equalizing Duct or with Vortex Generator Fins[C], Proceedings of 2nd International Symposium on Marine Propulsors, Hamburg, Germany, 2011.
- [16] G. Martinas, O.S. Cupsa. Numeric Wake Equalizing Duct Geometry Optimization for a Given Ship[J]. The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2015, 9(2).
- [17] 王超, 黄胜, 常欣, 郑建成. 螺旋桨毂帽鳍水动力性能数值分析[J]. 船海工程, 2009, 6(38).
- [18] 魏琳, 董国祥, 金允龙. 船与附体阻力计算与流场分析[C]. 第二十四届全国水动力学研讨会, 无锡, 2012.
- [19] 程宣恺. 带节能装置的船模自航试验数值模拟[J]. 船舶与海洋工程, 2015, 31(1).
- [20] 丁文祥. 肥大型船加装水动力节能装置之 EEDI 计算方法探讨[J]. 中国造船, 2013(3)
- [21] 何苗等. 舵球几何参数对螺旋桨水动力性能的影响[J]. 交通科学与工程. 2011, 33(7):68-70.
- [22] 周熊. 补偿导管的节能原理及其应用[J]. 航海科技动态, 1993(4): 10-11.
- [23] 张大有. 关于前置导管两个重要参数的研究[J]. 武汉水运工程学院学报, 1989(13): 100-101.
- [24] John D Anderson. Computational Fluid Dynamics The Basics with Applications [M]. 北京:清华大学出版社, 2010.12.
- [25] Carrica, P.M., Sadat-Hosseini, H., Stern, F. CFD analysis of broaching for a model surface combatant with explicit simulation of moving rudders and rotating propellers[J]. Computers & Fluids. 2012, 53: 117-132.
- [26] Tokyo 2015 CFD Workshop organizers. Tokyo 2015 CFD Workshop website. <http://www.t2015.nmri.go.jp/>, 2015.
- [27] Xing T., Carrica P. M., Stern F. Computational towing tank procedures for single run curves of resistance and propulsion[J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(101102):1-14.
- [28] ITTC. Testing and Extrapolation Methods Propulsion, Performance Propulsion Test (Recommended Procedures and Guidelines) [R]. 7.5-02-03-01.1, 2002.
- [29] Jasak H., Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows[D]. Ph.D. thesis, Imperial College 1996.

- [30] Shen Z. R., Wan D. C., Carric P. M.. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 108: 287-306.
- [31] Noack, R.W. SUGGAR: a general capability for moving body overset grid assembly[C], In the Proceedings of the 17th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference. Toronto, Canada, 2005.
- [32] ITTC. Testing and Extrapolation Methods Propulsion, Performance Propulsion Test (Recommended Procedures and Guidelines)[R]. 7.5-02-03-01.1, 2002.
- [33] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理上册[M]. 上海交通大学出版社, 2003.
- [34] 刘应中, 缪国平. 船舶在波浪上的运动理论[M]. 上海交通大学出版社, 1987.
- [35] Ye H., Shen Z., Wan D. Numerical prediction of added resistance and vertical ship motions in regular head waves[J]. *Journal of Marine Science and Application*. 2012, 11(4): 410-416.
- [36] Zha, Ruosi, et al. RANS Computations of Added Resistance of Advancing Modified Wigley Ships in Head Waves[C]. The Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2014:102-113.
- [37] Cao, Hong-Jian, and De-Cheng Wan. Development of Multidirectional Nonlinear Numerical Wave Tank by naoe-FOAM-SJTU Solver[J]. *International Journal of Ocean System Engineering* 4.1 (2014): 52-59.
- [38] 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, 27(6): 621-633.
- [39] 查晶晶, 万德成. 用 OpenFOAM 实现数值水池造波和消波[J]. *海洋工程*, 2011, 29(3): 1-12.
- [40] Cao H., Zha J., Wan D. Numerical simulation of wave run-up around a vertical cylinder[C]. In Proceedings of the 21st International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Hawaii, USA, 2011.
- [41] Cao H., Wan D. Numerical investigation of extreme wave effects on cylindrical offshore structures[C]. In Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, 2012.
- [42] Cao, Hongjian, and Decheng Wan. Numerical Study of Motion Response of Floating Body in Extreme Wave[C]. The Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2014:401-410.

- [43] 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专辑 A, 2016, 31(3).
- [44] 沈志荣. 船桨舵相互作用的重叠网格技术数值方法研究[D]. 上海:上海交通大学, 2014.
- [45] 查若思. 单体船和双体船波浪增阻的数值计算分析[D]. 上海:上海交通大学, 2014.
- [46] 曹洪建,万德成. 基于 naoe-FOAM-SJTU 求解器构建三维数值波浪水池[J]. 复旦大学学报, 2013, 10.
- [47] 尹崇宏,吴建威,赵伟文,万德成. 基于重叠网格技术的单次法螺旋桨敞水性能预报[C],中国造船工程学会船舶力学会议, 哈尔滨, 2015.
- [48] 尹崇宏,吴建威,万德成. 基于 DES 方法的 VLCC 实船阻力预报与流场分析[C], 第二十七届全国水动力学研讨会, 南京, 2015.
- [49] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004:54-57.
- [50] “Openfoam website.” <http://www.openfoam.com/>

致 谢

在即将踏上工作岗位之际，才越发感受到学校时光的美好和宝贵。从 2010 年 9 月到现在，我把青春最美好的几年留在了交大。从大一新生到硕士即将毕业，六年半的时光里，太多人给予了我帮助、陪伴和支持，饮水思源，下面就向你们表达最真挚的谢意。

首先需要感谢我的父母，养育我二十四载有余，“丝丝白发儿女债，历历深纹岁月痕”，辛苦你们了！

其次要感谢我的导师万德成教授。“山积而高，泽积而长”，万老师渊博的学识，严谨的治学态度，扎实的理论功底，对学术前瞻性的思考，无一不让我受教匪浅。万老师在百忙之中仍然每周主持组会讨论，常常进行到深夜，给困惑中的我们拨云见日。万老师多次资助我参加国内外的学术会议，不仅开拓眼界，也了解最新的学术动向。同时，万老师为我们配备了一流的工作电脑，一流的超算、计算集群设备，给科研工作提供了强有力的硬件保障。谢谢万老师这些年的培养与照顾！

感谢我这些年来的室友，张任其、陈礼康、吴惠宇、刘晓义、孔小兵、朱一鸣，谢谢你们的陪伴；感谢陪我从高中一起来到交大的同学王腾飞、季晨、张俊赫、杨洁、毕博、赵扬、李亚男，在上海这座城市，我们彼此之间就像亲人一样。感谢在交大认识的好友王力、管恩玺、方达、杜明树，与你们之间的友谊将是我宝贵的财富。感谢这些年来从未断过联系的好友吕福煜、王仁华、封硕、刘群、徐煜、于法军、杨一帆、杨建、周子杰、徐墨林、李笑磊等，纵然我们生活在不同的城市，却是天涯若比邻。

感谢同届入组的吴建威、刘晓义、吴惠宇、孙涛、彭耀、罗天，我们一起从科研的菜鸟一步步成长，一起完成一个个项目的攻关。特别是吴建威，与你的合作时间最长，深深佩服你出众的才华和打硬仗的能力。

感谢带我走上科研道路的沈志荣、叶海轩、查若思等三位师兄。沈师兄的 CFD 造诣入神坐照，叶师兄无论在科研上还是生活中都是潇洒飘逸，查师兄为人做事脚踏实地；三位师兄虽然风格各异，但都深深影响了我。师兄们不仅教会我知识，也培养了我严谨求实的科研态度。感谢给予我大量指导的曹洪建师兄、端木玉师姐。尤记大四刚刚进入 A704 办公室，对科研一窍不通的我反复求教端木师姐，师姐不厌其烦的给我讲解；尤记惜时如金的曹师兄在预答辩前仍然抽出不少时间细心解答我的困惑。感谢同门的刘远传、张晨亮、何佳益师兄，从接过刘远传师

兄电脑的那一刻起，翻看着师兄留下的算例和资料，敬佩之情油然而生；我也暗暗下定决心要像师兄一样，绝不辜负这几年的好时光。

感谢赵伟文、王建华两位师兄。赵博作为“天才少年”和“技术小能手”帮助大家解决一个又一个疑难困惑；王博踏实勤恳，周末、节假日总能在实验室看到你的身影，无形中给师弟师妹们作出了表率。感谢庄园小师妹，你的到来给组里带来了许多欢乐，与你的合作中也对你身上严谨求实、一丝不苟的精神感到钦佩。感谢同门的张雨新、周胡、孟庆杰、唐振远、赵文超、刘小健、覃鑫生、程萍、杨亚强、李鹏飞、李海洲、马超、张友林、夏可、付博文、刘聪、饶成平、何东亚、缪爱琴、陈翔等，也感谢 A708 实验室的崔继峰、李晓晨、李晓明、李娇娇、俞强等，感谢你们在学习和生活上对我的关心和帮助，是你们让我几年实验室的生活更加丰富多彩。

“或许明日太阳西下倦鸟已归时，你将已经踏上旧时的归途”。在即将告别上海、告别交大之际，我会收拾好这些年的成长与回忆，背负行囊继续前行。最后，感谢在交大遇到的每一个人，感谢你们的相伴，祝大家都前程似锦！

攻读硕士学位期间已发表或录用的论文

- [1] **Chonghong Yin**, Jianwei Wu, Decheng Wan, “Numerical Study on Liquid Sloshing in Three-dimensional Rectangular Tanks with Different Filling Rates and Fixed Baffle”, *The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference*, International Society of Offshore and Polar Engineers, 2015. (EI, 收录号: 20154301439651)
- [2] 尹崇宏等, “基于重叠网格技术的单次法螺旋桨敞水性能预报”, 中国造船工程学会船舶力学会议, 哈尔滨, 2015.
- [3] 尹崇宏等, “基于 DES 方法的 VLCC 实船阻力预报与流场分析”, 第二十七届全国水动力学研讨会, 南京, 2015.
- [4] **Chonghong Yin**, Jianwei Wu, Decheng Wan, “A Numerical Study for Self-propelled JBC with and without Energy Saving Device”, *Proc. of Tokyo 2015 CFD Workshop*, 2015.
- [5] **Chonghong Yin**, Yuan Zhuang, Decheng Wan, “Numerical Study on Liquid Sloshing in LNG Tanks Coupled with Ship Motion in Waves”, *Proc. of 3rd International Conference on Violent Flows*, Osaka, Japan, 2016.
- [6] **Chonghong Yin**, Jianwei Wu, Decheng Wan, “Model- and Full-scale VLCC resistance prediction and flow field analysis based on IDDES method”, *The Twenty-sixth International Ocean and Polar Engineering Conference*, International Society of Offshore and Polar Engineers, 2016. (EI, 收录号: 20163802824980)
- [7] 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”, 水动力学研究与进展专辑 A, 2016, 31(3).
- [8] 尹崇宏, 庄园, 万德成, “基于重叠网格技术的 LNG 波浪下内外流场耦合计算分析”, 中国造船工程学会船舶力学会议, 武汉, 2016.