

上海交通大学硕士学位论文

两种典型船舶节能装置的节能参数研究

硕士研究生：孙涛

学 号：1140109200

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:	Sun Tao
Student ID:	1140109200
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-Confering-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《两种典型船舶节能装置的节能参数研究》，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

上海交通大学 学位论文版权使用授权书

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

保密，在___年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

两种典型节能装置的节能参数研究

摘要

自从我国实行改革开放的政策开始，国民经济进入了发展的快车道，各个领域的成就在全球逐渐占据重要地位。在此期间，我国在发展的同时也消耗了大量的能源和资源，“先发展后治理”的粗放型经济导致对能源资源的利用效率较低，而大量排放的温室气体的排放总量世界第一。在我国能源资源消耗和温室气体排放的领域中，船舶海洋领域的比重相当大，需要更多的关注。随着全球能源资源节约和环境保护意识的增强，人们开始意识到“绿色造船”的重要性。为此，国际海事组织顺应时代的需求设立了“船舶能效设计指数(EEDI)”来衡量船舶的节能环保性能^[1]。为了兼顾船舶运营效益与环境成本，船舶设计技术的改革创新与节能技术的应用就应时而生。主要包括：优化船型，降低船体阻力；开发新型高效的推进装置，发展诸如风能和太阳能等新的助推方式；优化动力装置及其配套设备；开发水动力节能装置^[2]。

相对于其它的船舶节能技术，节能装置具有成本低、节能效果好以及安装方便等优点，也越来越多的受到船东的青睐，常见的节能装置包括伴流补偿导管和前置预旋导管等。船舶节能装置的节能效果会受到其尺寸参数的影响，而通过模型试验来研究尺寸参数对节能装置节能效果的影响成本较高。随着计算机技术的发展以及数值方法的进步，通过 CFD 数值计算研究节能装置参数变化对其节能效果的影响可以有效降低成本，并且可以提供精确的压力和尾流场信息，有效的对节能装置的节能效果进行评估。

本文的数值研究工作基于上海交通大学万德成教授课题组自主开发的水动力学 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU，该求解器包含了重叠网

格模块和多级物体运动模块等，可以准确的模拟船舶运动过程中和螺旋桨的相对运动，满足本文研究节能装置对船尾螺旋桨的节能效果的目的。对于两种前置节能导管的相关参数变化对节能效果的影响进行了数值计算与分析。本文根据 2015 东京 CFD 研讨会标准算例进行数值计算，以标准船型 JBC(Japan Bulk Carrier)为载体，对伴流补偿导管的长度、进出口直径以及与螺旋桨的间距等参数进行数值计算与研究，对前置预旋导管的长度和定子个数等参数进行了数值计算与分析。并通过计算推进效率和螺旋桨功率两种方式评价伴流补偿导管和前置预旋导管的节能效果。

关键词：伴流补偿导管、前置预旋导管、节能参数、重叠网格、naoe-FOAM-SJTU

THE STUDY FOR PARAMETERS OF TWO COMMON ENERGY SAVING DEVICES

ABSTRACT

Since the reform and opening up, China has been experiencing rapid economic and social development. However, during the period, a huge energy consumption and low efficiency result in a large number of greenhouse gases, of which the shipping industry accounts for a large proportion. With the awareness of energy conservation and environmental protection enhanced, the concept of “green shipbuilding” has been widely recognized and respected. The development and implementation of the EEDI standard is an important measure of CO₂ energy efficiency by representing the environmental costs of the social benefits created by per unit of vessel transport volume. In order to balance the operating efficiency and environmental costs of ships, the innovation of ship design technology and application of energy saving technology come into being. Mainly including: optimizing the ship and reducing hull resistance; the development of efficient propulsion and new boost mode; optimizing the power plant and its supporting equipment; developing hydrodynamic energy saving device.

Compared to other energy saving technologies for ships, energy saving devices have the advantages of low cost, significant energy saving effect and easy installation, more and more favored by the ship owner. There are some common energy saving devices including wake equalizing duct and pre-swirl duct. The effect of energy saving device for ships will be affected by its size parameter, but it costs too much to study the size parameters of energy saving device by using model test method. With the development of computer technology and the progress of numerical methods, the size parameters can be studied at low cost and high efficiency and the accurate pressure and wake field information can be presented.

The work of the paper is based on the CFD solver naoe-FOAM-SJTU developed by Professor Wan's team for solving hydrodynamic problem of ship and ocean engineering, in which the overset grids technology is used to calculate the total viscous flow field. In the paper, numerical calculations are carried out according to the 2015 Tokyo CFD Symposium and JBC (Japan Bulk Carrier) is used as the carrier to study the length, diameter of the inlet and outlet, and the pitch from the propeller of wake equalizing duct, as well as the length and numbers of stator of pre-swirl duct. The energy saving effect is evaluated by propulsion efficiency and output power of propeller.

KEY WORDS: energy saving device, wake equalizing duct, pre-swirl duct, overset grid, naoe-FOAM-SJTU.

目 录

摘 要	-----	-----	IV
ABSTRACT	-----	-----	VI
第一章 绪论	-----	-----	1
1.1 引言	-----	-----	1
1.2 船舶节能装置种类及节能原理	-----	-----	3
1.3 船舶节能装置研究现状	-----	-----	8
1.3.1 伴流补偿导管研究概况	-----	-----	8
1.3.2 前置预旋导管研究概况	-----	-----	9
1.3.3 船舶节能装置研究方法	-----	-----	9
1.4 本文主要工作	-----	-----	10
第二章 数值计算方法与模块	-----	-----	11
2.1 引言	-----	-----	11
2.2 控制方程	-----	-----	11
2.3 自由面捕捉	-----	-----	12
2.4 六自由度运动模块	-----	-----	13
2.5 重叠网格模块和多级物体运动模块	-----	-----	16
第三章 伴流补偿导管节能参数分析	-----	-----	17
3.1 引言	-----	-----	17
3.2 螺旋桨敞水特性计算	-----	-----	18
3.3 JBC 无桨拖航数值计算	-----	-----	21
3.3.1 伴流补偿导管出口直径的影响	-----	-----	21
3.3.2 伴流补偿导管进出口直径的影响	-----	-----	25
3.3.3 伴流补偿导管长度的影响	-----	-----	27
3.3.4 伴流补偿导管与螺旋桨间距的影响	-----	-----	30
3.4 JBC 自航数值计算	-----	-----	32
3.4.1 伴流补偿导管出口直径的影响	-----	-----	32
3.4.2 伴流补偿导管进出口直径的影响	-----	-----	40
3.4.3 伴流补偿导管长度的影响	-----	-----	47
3.4.4 伴流补偿导管与螺旋桨间距的影响	-----	-----	54
3.5 本章小结	-----	-----	62
第四章 前置预旋导管节能参数分析	-----	-----	63

4.1 引言	63
4.2 JBC 无桨拖航数值计算	64
4.2.1 前置预旋导管长度的影响	64
4.2.2 前置预旋导管定子数量的影响	66
4.3 JBC 自航数值计算	69
4.3.1 前置预旋导管长度的影响	69
4.3.2 前置预旋导管定子数量的影响	76
4.4 本章小结	84
第五章 总结与展望	85
5.1 全文总结	85
5.2 研究展望	86
参考文献	87
致谢	91
攻读硕士期间已发表或已录用的论文	92

第一章 绪论

1.1 引言

自从我国实行改革开放的政策开始，国民经济实现了快速稳定的发展，各个领域的成就在全球逐渐占据重要地位。在此期间，我国在发展的同时也消耗了大量的能源和资源，“先发展后治理”的粗放型经济导致对能源资源的利用效率较低，而大量排放的温室气体的排放总量世界第一。在我国能源资源消耗和温室气体排放的领域中，船舶海洋领域的比重相当大，需要更多的关注。

船舶海洋领域节能减排的重要性和紧迫性最早由 INTERTANKO 提出，其向国际海事组织(IMO)提交的文件中指出了船舶海洋对资源和环境的巨大负担，全球航运业的 CO₂ 排放量达到 16 亿吨以上^[3]。近年来，随着能源资源节约以及环境保护意识的不断增强，绿色船舶的概念在国内以及国际受到广泛认可与推崇。2010 年和 2011 年，IMO 提出并通过了针对所有营运船舶的管理计划，并与 2013 年 1 月 1 日起强制执行。这无疑对目前高能耗、高污染的船舶海洋领域造成了巨大的冲击，船舶行业必须从设计和建造，甚至配套设备方面进行升级改造，一场船舶行业的绿色变革来临了^[4,5]。

而如今，绿色造船俨然已经成为船舶海洋领域的趋势，也促使着越来越多的组织与机构加入其中。在这场浪潮的席卷下，为了不落后于潮流，全球的造船相关企业开始将关注点和着力点更多的放在了节能技术和节能产品的开发上，并尝试将这一全新的造船理念融入到船舶设计、建造、运营等各个阶段，以迎接新的造船时代的到来。在国内，中国船级社不遗余力的促进 EEDI 标准在国内的推广，堪称国内绿色造船的第一人。实际上对于我国而言，虽然 EEDI 标准提高了国家船舶的准入门槛，在某种程度上而言是一种限制。但同时也是机遇，我们可以借此机会，努力的探索船舶提高资源利用效率和减少污染物排放的新技术和新思路，提高船舶企业的管理水准和业务能力，再加上我们国家良好的政策指引与支持，相信在不久的将来就可以丢掉我国过去船舶生产链中低端制造的帽子，占据生产链的主动地位。

船舶设计与建造技术的革新升级有多种方式，根据船舶的运动与能耗方式，我们可以有的放矢。船舶在水中前行时，克服阻力作用的能量只占了其中一部分，还有一部分的能量以不同的形式损失掉了。损失掉的能量可以归因于三个方面：首先是船舶运动时产生的波浪能量和由于水流的粘性造成的能量耗散；其次是船舶的推进过程中，推进系统在能量传递过程中的损失；螺旋桨旋转时的尾涡会造

成大量的能量损失。而节能减排技术则可以从减少克服阻力作用的能量和回收损失掉的能量两个方面去考量。基于此，船舶节能主要有以下的研究方向：

(1) 理想的船体型线，船舶和推进系统的良好配合。

在船舶设计阶段对船舶型线进行优化是节能的关键所在。到目前为止，经过船舶从业人员的不懈努力，许多新的船型陆续发展起来并投入使用，包括新 Y 型纵流槽船型等。虽然船型优化可以有效的降低船体阻力，但是其成本较高。并且该方法只能应用到新建造的船舶上面。

(2) 适用高效的推进装置

开发新型的高效率推进装置具有效率高、能耗小的特点，相比于常规推荐装置而言可以明显的提高船舶的推进效率。其中最具代表性的是新型的螺旋桨。这些新型的螺旋桨推进效率高，在保证同样的推进能力时，可以明显节约主机的能源消耗量。不仅如此，它们还可以降低激振力，无形中延长了船体结构和设备的使用期限，也提高了人员工作和生活的舒适程度。

(3) 发展新的助推方式

风能量是一种在地球上取之不竭的可再生绿色能源，使用风能量不会产生任何的污染物。自古以来，人类就对以风能为代表的绿色能源开始使用，并且一直延续至今。船舶借助风帆，可以方便顺利的利用风能航行。尤其是我国的沿海地区，风能更加充足。船舶海洋领域发展风力的助推方式具有积极的前景和光明的未来。除了风能之外，波浪能和太阳能也是具有潜力的助推方式，相关的研究工作也在开展当中。

(4) 优化动力装置及其配套设备

动力装置是船舶的核心，对动力装置进行优化升级具有关键性意义。科研工作者应该积极开发满足油耗低、热效率高甚至对燃油的品质要求不高的船舶动力装置及其配套设置。主要有以下方式：开发斯特林发动机、利用主机废气节能技术等。

(5) 开发水动力节能装置

在船舶航行的过程中，船舶推进器通过向后排水来产生船舶前进的推力，但是水流与推力方向相反的诱导速度造成了推进总能量的大量损失。将这部分水流的能量进行回收可以相当程度上提升螺旋桨的效率，降低船舶的能耗。科研工作者也越来越认识到回收尾流能量的重要性，各国学者开始对船舶附体进行研究，希望这些装置可以减少尾流能量的耗散^[6]。主要节能原理包括：降低螺旋桨桨盘面进流的紊乱状态，将其变得均匀；节能装置安装适当可在船尾形成高压区，增加

附近的推力；部分节能装置可以使螺旋桨浆盘面的进流与螺旋桨转动方向相反，从而可以减少尾流中的旋转能量损失；减少船体尾部的水流分离现象。开发水动力节能装置具有成本低、效果好、结构简单、安装方便的优点，因此受到船舶领域组织和机构的积极采用。

1.2 船舶节能装置种类及节能原理

由于船舶节能装置具有结构简单、可以方便的安装到船尾、生产和使用所耗费的成本低廉，但是节能效果让人满意的优点，其应用也越来越广泛。其中韩国的一些规模较大的船厂已经积极研发和生产新型的船舶节能装置，日本为数众多的船厂也在其建造的散货船和油船上安装不同类型的船舶节能装置。船舶节能装置的设计和应用已经成为国内外船舶企业顺应绿色造船大潮的有力武器，目前已经有许多不同的船舶节能装置被开发出来并得到了广泛的应用。从工作原理方面可以将这些不同程度提高船舶节能减排效果的节能装置分为三个大类：

第一类船舶节能装置位于螺旋桨之前，他们的作用对螺旋桨浆盘面的进流进行诸如加速和均匀化的改进。

(1)伴流补偿导管：伴流补偿导管^[7,8]诞生于上世纪八十年代初期，由来自德国的流体力学领域的专家内洛克斯(Schneekluth)针对方形系数较大的船舶在船尾产生的流动分离问题而设计制造。伴流补偿导管是一个由一对半圆形环构成的导管，半圆形环的直径大约是螺旋桨直径的二分之一。在安装补偿导管时，要注意将导管放置在螺旋桨的桨轴上面。伴流补偿导管结构简单、可以方便的安装在船尾，更重要的是，其节能效果很理想，但是补偿导管主要适用于航速低、船型肥大的船舶。伴流补偿导管首先可以起到整流的效果，使螺旋桨浆盘面的进流变得均匀，提高进流能量的利用率；其次可以降低肥大船型船尾部的流动分离程度；如果把补偿导管安装在船尾适当的位置，船尾还会因此产生高压区，为船舶航行创造部分的额外推力^[9]。

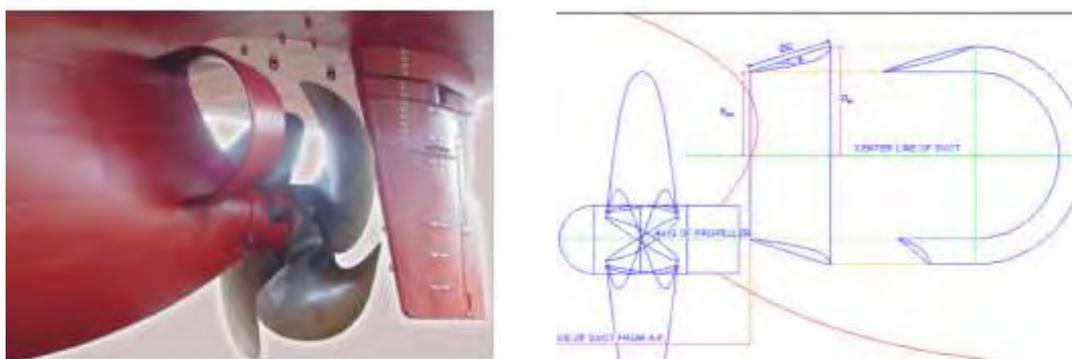


图 1-1 伴流补偿导管

Fig. 1-1 Wake equalizing duct

(2)前置预旋导管：前置预旋导管^[10]是一种将伴流补偿导管和导叶组合在一起而开发的新型节能装置。该节能装置能够预旋进流，使其与螺旋桨给尾流的诱导速度相抵消，减少了能量损失。同时前置预旋导管也具备伴流补偿导管加速进流、使桨盘面进流变得均匀、为船尾创造高压区等优点。前置预旋导管主要适用于低速肥大船型，具有巨大的市场应用潜力^[11]。



图 1-2 前置预旋导管

Fig. 1-2 Pre-swirl duct

(3)前置预旋定子：前置预旋定子^[12]的结构相比于伴流补偿导管和前置预旋导管更为简单，其由安装在螺旋桨前方的几个沿周向布置的叶片组成。这些桨前叶片可以通过预旋进流抵消来自螺旋桨的周向诱导速度，减少能量流失。国外在多个大型水池针对前置预旋定子的节能效果做了很多模型试验，结果表明前置预旋定子的节能效率可达 6%。

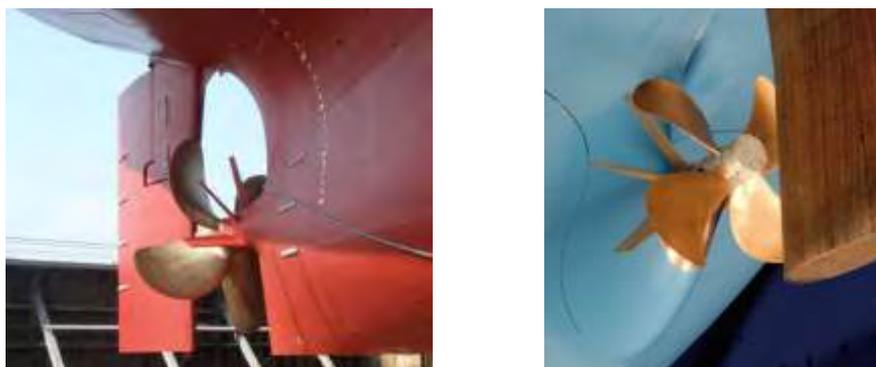


图 1-3 前置预旋定子

Fig. 1-3 Pre-swirl stator

(4) 桨前整流鳍：桨前整流鳍^[13,14]是类似与鱼鳍的一组固定引流片，被安装在船尾部的螺旋桨前面。这些鳍片可以通过适当的安装角度来改善螺旋桨桨盘面进流，为进流提供一个初始的旋转速度来提高推进效率，同时鳍片还可以在船后尾流的作用下为船舶航行提供一定的正推力。德国、日本等对桨前整流鳍做的一系列试验表明整流鳍的节能效率可达 5% 左右^[15]。国内对桨前整流鳍的研究同样取得了积极进展，708 研究所开了一种新型的桨前扇形整流鳍，该整流鳍由 2~3 片鳍翼组成，这些鳍翼安装于螺旋桨之前，并呈扇形分布。

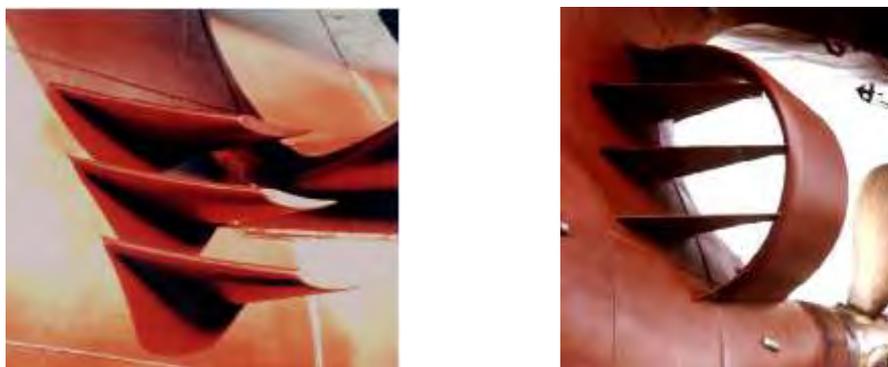


图 1-4 桨前整流鳍

Fig. 1-4 Rectifying fin before propeller

第二类船舶节能装置以梢涡助推器子母桨等为代表，其主要作用为消减尾流中的各种漩涡，减少漩涡阻力。

(1) 桨毂帽鳍：

螺旋桨转动为船舶航行提供了前进的动力，但是由于螺旋桨的转动也在桨毂处产生了难以忽视的桨毂涡，螺旋桨受桨毂涡影响，推进性能受到减弱。桨毂帽

鳍是安装在螺旋桨桨毂上^[16]。当螺旋桨后面形成桨毂涡时，毂帽鳍可以有效的打散和削弱桨毂涡，使其危害降到最低。因为毂帽鳍的直径只有螺旋桨的大约四分之一，因此在某种意义上，桨毂帽鳍可以称为“小螺旋桨”^[17,18]。桨毂帽鳍与伴流补偿导管等节能装置不同，其适用性十分广泛，不受船型的限制，尤其适用于集装箱船等高速航行的船舶。



图 1-5 桨毂帽鳍

Fig. 1-5 Propeller cap fin

(2)舵球：舵球是一种类似于球形的流线型回转体，它被安装在船尾的反应舵上面。因为在船体尾部的螺旋桨桨毂附近存在低压区域，尾流因为压力差的存在受到挤压，产生了较强的桨毂涡。由川崎重工开发出的舵球可以有效的解决桨毂附近存在低压区的问题^[19,20]。该节能装置可以有效的干扰船尾桨毂后的低压区形成，螺旋桨前后的压力差得到明显减小，桨毂涡强的问题得到了很大改善。



图 1-6 舵球

Fig. 1-6 Rudder ball

第三类船舶节能装置安装在螺旋桨后主要作用是在船尾螺旋桨后对原来白白损失掉的尾流周向能量进行回收利用。

(1) 桨后自由旋转助推叶轮：该节能附体别称涡轮桨^[21,22]，是一种涡轮机形状的叶片，叶片直径大于螺旋桨直径。其主要作用在于可以利用大于螺旋桨直径的叶片部分将螺旋桨尾流的旋转能量加以利用。自由旋转助推叶轮节能效果明显。自由旋转助推叶轮安装方便，新船、旧船均可安装。



图 1-7 桨后自由旋转助推叶轮
Fig. 1-7 Free rotation impeller after propeller

(2) 舵附推力鳍：顾名思义，该节能附体是安装于舵两侧的反应舵节能附体，具体形式是具有一定攻角的固定鳍^[23]。日本播磨重工于上世纪末研制开发的一种新型的船舶节能装置。该节能装置主要作用是将原本白白浪费掉的螺旋桨尾流中的旋转能量在此回收利用，同时在水流的作用下产生的升力也可以部分转化为推力。舵附推力鳍能够很方便的安装在新船以及经过适当改造的旧船上。



图 1-8 舵附推力鳍
Fig. 1-8 Rudder with thrust fins

其他组合节能装置：各种各样的节能装置的节能原理虽有不同，但是两种甚至两种以上节能装置之间相互配合得当的情况下，将会提高单一船舶节能装置可

能具有的节能效率^[24]。但是在进行节能装置组合的过程中，不能将两种或两种以上的节能装置随意的组合在一起，这样有可能不仅没有节能效果，甚至对于船舶来说有可能增加能源消耗的负担。

已经研制开发并投入使用的有国内研究院研制的舵球前置导管组合节能装置^[25]。该种节能装置将舵球和前置导管的节能优点结合在一起，使这两种节能装置相互配合，提高了节能效率。国外的川崎重工开发出带导流鳍的舵球系统，该组合体既可以改善螺旋桨后的尾流场，有效的削弱和打散桨毂涡，减少桨毂涡的产生。

1.3 船舶节能装置研究现状

目前，在船舶节能装置为数众多的种类中，伴流补偿导管和前置预旋导管等是最典型和广泛应用的节能装置。本文主要对伴流补偿导管和前置预旋导管进行研究分析，因此仅给出伴流补偿导管和前置预旋导管的研究现状。

1.3.1 伴流补偿导管研究概况

伴流补偿导管(Wake-equalizing duct)由来自德国的流体专家内洛克斯(Schneekluth)开发研制的安装在船尾螺旋桨前方的半圆形导管，因此该导管又被称为 Schneekluth's 导管。该种节能导管设计初衷之一是提高桨盘面进流的流速，因此需要其进流端的直径要比出流端的直径要大。20 世纪八十年代处，伴流补偿导管得到了在实船上使用的机会，它被安装在一艘 7 万吨的散货船船尾^[26]。

经过科研工作者的努力，种类众多的补偿导管被开发出来。这些节能导管的作用可以归为两种，一种是缓解船尾部水流紊乱的现象；另一种是创造理想的螺旋桨旋转推进的流场环境。张大有^[27]对影响补偿导管的两个主要参数进行了系统的试验研究分析。钱文豪^[28]针对该导管在船舶运动过程中受到推力的准确测量方法进行了探究。Korkut^[29]以不同形式的船型为载体，研究了相同导管的节能效果，分析了船型对补偿导管节能效果的影响。Friesch 和 Johannsen^[30]分别以实船和船模为载体，研究了补偿导管在船体尺度变化时的节能效果。除此之外，Fahri Celik^[31]研究了伴流补偿导管对化学品游轮的的节能效果。周熊就补偿导管的节能原理及其应用进行了介绍，提出了在我国海船和内河船上使用补偿导管的观点。黄少锋等^[32]通过研究，计算得到船身效率增加的数额减去船体阻力增加的数额得到的结果，该结果可以用来有效评价伴流补偿导管的节能效果。李洁雅等^[33]对伴流补偿导管的减振效果进行了研究，并介绍了船用伴流补偿导管的减振效果和实际应用

的实例。左成魁等^[34]以一艘 5 万吨的散货船为载体，分析了组合节能装置的节能效果。

1.3.2 前置预旋导管研究概况

前置预旋导管是一种由导管和导叶组合而成的新型前置式节能装置，内部设有产生预旋流动的 4~5 片导叶，主要适用于低速肥大船。Friedrich Mewis^[35]提出了一种新型的船舶节能装置——前置预旋导管，该节能装置具有高达 8% 的节能效果以及减小螺旋桨空泡影响，增加船体稳定性的良好效果。Guiard T^[36]等强调了前置预旋导管研究在尺度效应以及对高速船舶适用性方面遇到的问题。黄国富、黄振宇等人^[37]把某艘万吨散货船作为载体，用 CFD 方法设计了组合节能装置方案。张海华等采用 CFD 方法对前置预旋导管的结构强度进行计算分析，并将其强化后安装到实船上应用。罗飞虎^[38]利用 CFD 和有限元的商业软件，针对前置预旋导管的强度和振动性能进行了研究分析，他们发现中部的支撑构件可以有效的提高前置预旋导管强度，减少振动。薛庆雨等^[39]针对前置导管对螺旋桨空泡性能的影响进行研究，研究发现，螺旋桨空泡越严重，该导管的作用越明显。苗飞等^[40]针对前置预旋导管内的预旋定子布置进行了 CFD 研究。

1.3.3 船舶节能装置研究方法

随着船舶节能装置的应用越来越广泛，其在船舶节能领域的重要性也越来越明显，科研工作者也对节能装置的研究开展了更多的工作。对节能装置的研究主要分为模型试验和 CFD 数值模拟两种方法。一般认为模型试验方法更贴近真实的海洋环境，得到的研究结果也更加准确。但是模型试验方法的研究成本较高，所需时间也比较长，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。

随着计算机技术和数值方法的发展，CFD 方法的准确性和效率得到了长足的提升，相比于模型试验方法而言，CFD 方法可以大量减少研究成本和研究时间，缩短了研究工作的周期。就试验精度而言，CFD 方法虽然比模型试验方法略有欠缺，总体结果能够让人满意。更重要的是，CFD 方法可以提供一些模型试验无法提供的细节信息。因此，本文采用 CFD 方法对伴流补偿导管和前置预旋导管进行数值计算和研究。

在本文数值计算的过程中，CFD 方法不仅可以以较小的时间和成本代价来较为精确的模拟出伴流补偿导管和前置预旋导管的节能效果，还可以给出伴流场和压力场的细节信息，方便对节能装置的节能机理进行深入细致的分析研究。

1.4 本文主要工作

本论文基于前人对伴流补偿导管和前置预旋导管两种节能装置研究工作，通过学习节能装置的研究方法与评估方法，以 2015 东京 CFD 研讨会标准船型 JBC 船为载体，研究伴流补偿导管和前置预旋导管相关参数变化时，对这两种典型节能装置节能效果的影响。而这些参数对节能装置节能效果的影响将成为节能装置优化的重要参考。参考 2015 年东京 CFD 研讨会标准算例进行数值计算算例配置，研究过程采用上海交通大学万德成教授课题组自主开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 分别对安装伴流补偿导管和前置预旋导管的 JBC 船进行数值计算。

概括本文的具体工作如下：

第一章为绪论，介绍了全文工作的背景与意义，主要从“绿色船舶”概念的发展历程以及船舶节能减排的重要性和紧迫性进行阐述；接下来介绍了各种船舶节能方式的基本原理和节能效果，其中重点介绍了以伴流补偿导管和前置预旋导管为代表的船舶节能装置的节能效果以及节能原理。最后对伴流补偿导管和前置预旋导管的国内外研究概况进行了介绍。

第二章为数值方法与模块介绍，由于本文的数值计算基于万德成教授课题组自主开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU，因此，本章对 naoe-FOAM-SJTU 的基本结构框架和数值模块进行了介绍。主要包括其中的六自由度模块，重叠网格模块，多级物体运动模块和求解器计算所需要的控制方程，自由面捕捉方法以及湍流模型等。

第三章基于 naoe-FOAM-SJTU 求解器对伴流补偿导管的节能效果进行数值计算与研究。计算当伴流补偿导管的长度，进出口直径以及安装位置等参数变化时，对伴流补偿导管节能效果的影响，其中节能效果通过螺旋桨的推进效率以及螺旋桨功率两种方法进行评价，同时对船尾的细节流场和船艏、船尾压力场进行了研究分析。第一步要对螺旋桨的敞水性能进行预报，得到螺旋桨的敞水性能曲线；第二步对 JBC 无桨拖航进行数值计算，得到 JBC 裸船体阻力以及阻力系数，同时收敛后的流场可以作为 JBC 自航数值计算的初始流场；最后一步是对 JBC 进行自航数值计算，自航点等计算参数设置参考 2015 东京 CFD 研讨会标准算例。

第四章对前置预旋导管的长度以及预旋定子个数的变化对前置预旋导管节能效果的影响进行数值计算与研究。其中计算流程与对节能效果评价方法与第三章相同，最后对压力场和尾流场的变化进行了分析和研究。

第五章对全文进行了总结，并且对未来进一步的开展相关研究工作进行展望。

第二章 数值计算方法与模块

2.1 引言

naoe-FOAM-SJTU求解器的开发和应用对象是船舶海洋工程领域，它可以调用开源程序OpenFOAM的数据结构和程序库，包括FVM，RANS，VOF和PISO等算法。求解器naoe-FOAM-SJTU的控制方程是RANS方程^[41]，该方程适用于两相流不可压缩情况。求解器离散控制方程的方法是有限体积法(FVM)，该方法适用于任意的多面结构网格的处理。在捕捉自由面时，求解器采用了与界面压缩技术相结合的VOF法；求解器在封闭湍流方程时，调用诸如k- ω 、k- ω SST、k- ϵ 等湍流模型^[42,43]。在计算求解的过程当中，为了满足压力、速度的耦合问题求解需要，PISO算法得到采用。求解器由功能强大的计算模块组成，具体包括六自由度运动模块、重叠网格模块、造波与消波模块、锚链系泊模块等，其中重叠网格模块、六自由度运动模块以及多级物体运动模块相结合，可以解决以前科研工作者望而却步的船、桨、舵的相对运动和相互作用问题，对CFD数值研究的发展做出了巨大贡献。

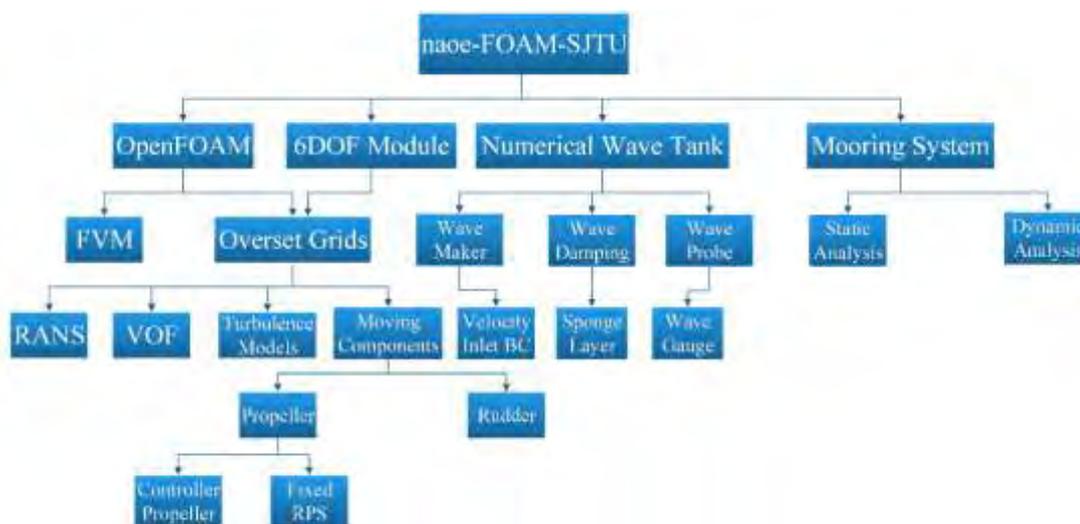


图 2-1 naoe-FOAM-SJTU基本框架图

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

2.2 控制方程

求解器 naoe-FOAM-SJTU 的控制方程是 RANS 方程，该方程适用于两相流不可压缩情况，具体包括连续性方程和动量方程^[44]：

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

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

其中： \mathbf{U} 代表的是速度场； \mathbf{U}_g 代表的是网格节点速度； p_d 代表的是动压力，该结果是总压力和静水压力的差值； ρ 代表的是水和空气的两相混合密度； \mathbf{g} 代表的是重力加速度； μ_{eff} 代表的是有效动力粘性系数； f_σ 代表的是水和空气两项模型中的表面张力项； f_s 代表的是添加在消波区域的源项。在求解方程时，方程的闭合还需要利用到湍流模型，这次采用 $k-\omega$ SST 湍流模型。

RANS 控制方程涉及到压力和速度的耦合求解，为了准确求解这一耦合问题，求解器采用了 PISO 算法，全称为 Pressure Implicit with Splitting of Operator。而在 OpenFOAM 中，PISO 算法的实现需要通过 PIMPLE 算法。PIMPLE 算法相对于 PISO 算法而言，利用非线性迭代的方式，在非定常工况下保证流场在每一个时间步内的计算达到收敛状态。

2.3 自由面捕捉

求解器在确定自由面的变化状态与位置时，采用的是 VOF 方法^[45]。VOF 方法定义了一个新的指标函数 α ， α 的取值范围 $0 \ll \alpha \ll 1$ ，用 α 值的变化表示水和空气两相流体的变化。其中水和空气的交界面，也就是自由面附近是水和空气的混合相，成为过渡层。具体定义如下：

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \text{网格内是液体} \\ 0, & \text{网格内是气体} \\ \in (0,1), & \text{过渡层} \end{cases} \quad (3)$$

因为 α 是与水和空气两相流体相关联，因此同样满足下面的连续性方程：

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (4)$$

求解式(4)，通过 α 的定义就能够确定自由面的位置。除此之外，还可以确定任一网格内的另外两个物理量，即流体密度 ρ 和动力粘度 μ 。计算公式如下（其中的下标 1 代表的是水，下标 0 代表的是空气）：

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_0 \quad (5)$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_0 \quad (6)$$

下式为修正后 VOF 方法的控制方程：

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(\bar{\mathbf{u}} - \bar{\mathbf{u}}_g) \alpha] + \nabla \cdot [\bar{\mathbf{u}}_g (1 - \alpha) \alpha] = 0 \quad (7)$$

在上式中，等号左边前两项代表的是传统 VOF 的输运项，第三项代表的是附加的人工压缩项。其中，压缩项含有 $\alpha(1-\alpha)$ ，该项对气液两相没有影响，只对两者的过渡区域，即自由面附近区域有影响。 U_r 用于表示气液两相界面的速度场，求解器在已知界面区域的最大速度值情况下，方可计算单元表面的速度场：

$$U_{rf} = n_f \min\left\{C_\alpha \frac{|f|}{|S_f|}, \max\left(\frac{|f|}{|S_f|}\right)\right\} \quad (8)$$

上式中，下标 f 代表物理量储存在网格单元面上， ϕ 是单元表面的速度通量，在本文的计算中引入了动网格技术，因此网格运动的通量 ϕ_g 也包含在 ϕ 中。 ϕ 值是通过 PISO 算法中的网格速度流量计算得到。 S_f 代表的是网格单元表面的方向向量，所以 S_f 的模与对应单元面的表面积相等。 C_α 代表压缩系数，它的物理意义代表的是可压缩性，当 $C_\alpha=0$ 时，自由面几乎不会受到影响；当 $C_\alpha=1$ 时，自由面会受到守恒压缩。 n_f 代表水和空气两相流上的单位矢量，它的具体数学形式为：

$$\mathbf{n}_f = \frac{(\nabla\alpha)_f}{|(\nabla\alpha)_f + \delta|} \quad (9)$$

上式中 δ 代表的是稳定因子：

$$\delta = \frac{1 \times 10^{-8}}{(\sum_{i=1}^N V_i / N)^{1/3}} \quad (10)$$

上式中 N 代表的是所有网格的数量。

控制方程中的表面张力项的具体数学形式如下：

$$f_\sigma = \sigma \kappa \nabla \alpha \quad (11)$$

σ 在上式中表示的是表面张力， $\sigma = 0.07 \text{ kg/m}^2$ ； κ 代表的是自由液面的曲率，具体数学形式如下：

$$\kappa = -\nabla \cdot \mathbf{n} = -\frac{\sum_f S_f}{V_i} \quad (12)$$

上式中， V_i 代表任一需要计算的单元体积； $\sum_f S_f$ 代表的是任一需要计算的单元所有面的面积之和。

2.4 六自由度运动模块

本文应用的六自由度运动求解模块基于 Carrica 等^[46]所提出的六自由度运动模型，该模型以 Euler 角为表述方法。此模型共采用了不同的两种坐标系，即船体坐标系和地球坐标系。船体坐标系与船体同步运动，坐标原点保持在船体中心或者旋心上，地球坐标系则始终保持不变。即船体坐标系相对于地球坐标系做六自由度运动，在地球坐标系下，其运动的位置为 $\eta = (\eta_1, \eta_2) = (x_1, x_2, x_3, \Phi, \theta, \psi)$ ，表示

的是六个自由度的运动，主要分为平移运动和旋转运动。其中平移运动分别包括纵荡、横荡以及垂荡运动，旋转运动分别包括横摇、纵摇以及首摇运动， x_1, x_2, x_3 三个物理量分别表示三个坐标轴方向的位移， Φ, θ, ψ 三个物理量分别表示三个旋转运动的 Euler 角。 η_1, η_2 的定义为：

$$\mathbf{v}_1 = \mathbf{J}_1^{-1} \cdot \dot{\eta}_1 \quad \mathbf{v}_2 = \mathbf{J}_2^{-1} \cdot \dot{\eta}_2 \quad (13)$$

$$\dot{\eta}_1 = \mathbf{J}_1 \cdot \mathbf{v}_1 \quad \dot{\eta}_2 = \mathbf{J}_2 \cdot \mathbf{v}_2 \quad (14)$$

\mathbf{J}_1 和它的逆矩阵， \mathbf{J}_2 和它的逆矩阵的表达式的具体形式为^[47]：

$$\mathbf{J}_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \sin\varphi\sin\theta\cos\psi - \cos\theta\sin\psi & \cos\varphi\sin\theta\cos\psi + \sin\varphi\sin\psi \\ \cos\theta\sin\psi & \sin\varphi\sin\theta\sin\psi + \cos\varphi\cos\psi & \cos\varphi\sin\theta\sin\psi - \sin\varphi\cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\varphi\cos\theta & \cos\varphi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{J}_2 = \begin{bmatrix} 1 & \sin\varphi\tan\theta & \cos\varphi\tan\theta \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi/\cos\theta & \cos\varphi/\cos\theta \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{J}_1^{-1} = \mathbf{J}_1^T \quad (17)$$

$$\mathbf{J}_2^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi\cos\theta \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (18)$$

由于计算六自由度运动信息的条件是船舶运动过程中所受到的力和力矩，所以在求解运动之前要得到力和力矩的值。力和力矩在求解过程中，与流场求解类似，都要基于地球坐标系，式(24)中下标 e 表示地球坐标系。将船体划分为若干单元面，那么作用在每个单元面上水动力为：

$$d\mathbf{F}_e = \boldsymbol{\tau} \cdot d|\mathbf{S}_f| + p d\mathbf{S}_f \quad (19)$$

其中， \mathbf{S}_f 是任一单元面的法相向量，它的模量与其单元面的表面积一致； $\boldsymbol{\tau}$ 表示剪应力， p 表示总压力，计算 $\boldsymbol{\tau}$ 和 p 的公式的具体形式为：

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau} = -\rho v_{\text{eff}}(\nabla\mathbf{U} + \nabla\mathbf{U}^T) \\ p = p_d + \rho\mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \end{cases} \quad (20)$$

由于船体表面划分为众多的单元面，将所有的单元面的力与力矩进行叠加，就可以通过积分的方式得到得到船体表面所受到的总的力与力矩。

$$\begin{cases} \mathbf{F}_e = m\mathbf{g} + \int d\mathbf{F}_e \\ \mathbf{M}_e = \mathbf{r}_{cg} \times m\mathbf{g} + \int \mathbf{r} \times d\mathbf{F}_e \end{cases} \quad (21)$$

其中， m 代表的是船体总质量； g 代表的是重力加速度，并且是一个矢量； r_{cg} 代表的是起点是旋转中心，终点是船体重心的矢量：

$$r_{cg} = (x_g, y_g, z_g) = (x_{cog}, y_{cog}, z_{cog}) - (x_{cot}, y_{cot}, z_{cot}) \quad (22)$$

由于船体总的力和力矩是在地球坐标系下求得的，而船体六自由度运动需要在船体坐标系下计算，因此船体的力和力矩必须转化到船体坐标系下，这样才可以得到船体的六自由度运动信息：

$$\begin{cases} \mathbf{F}_s = (X_s, Y_s, Z_s) = \mathbf{J}_1^{-1} \cdot \mathbf{F}_e \\ \mathbf{M}_s = (K_s, M_s, N_s) = \mathbf{J}_1^{-1} \cdot \mathbf{M}_e \end{cases} \quad (23)$$

其中，下标 e 的力与力矩是在地球坐标系下的计算结果，下标 s 的力和力矩则代表船体坐标系下的计算结果。在计算船舶运动的加速度时，求解器调用了结构力学的刚体运动方程。具体如下：

$$\begin{cases} \dot{u} = \frac{x_s}{m} + vr - wq + x_g(q^2 + r^2) - y_g(pq - \dot{r}) - z_g(pr + \dot{q}) \\ \dot{v} = \frac{y_s}{m} + wp - ur + y_g(p^2 + r^2) - z_g(qr - \dot{p}) - x_g(qp + \dot{r}) \\ \dot{w} = \frac{z_s}{m} + uq - vp + z_g(q^2 + p^2) - x_g(rp - \dot{q}) - y_g(rp + \dot{p}) \\ \dot{p} = \frac{1}{I_x} \{K_s - (I_z - I_y)qr - m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)]\} \\ \dot{q} = \frac{1}{I_y} \{M_s - (I_x - I_z)rp - m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)]\} \\ \dot{r} = \frac{1}{I_z} \{N_s - (I_y - I_x)pq - m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)]\} \end{cases} \quad (24)$$

其中， (x_g, y_g, z_g) 代表起点为船模重心，终点为船体旋转中心的向量， (I_x, I_y, I_z) 为船体绕旋转中心点运动时的主转动惯量。

$$\begin{cases} I_x = I_{xcg} + m(y_g^2 + z_g^2) \\ I_y = I_{ycg} + m(x_g^2 + z_g^2) \\ I_z = I_{zcg} + m(x_g^2 + y_g^2) \end{cases} \quad (25)$$

式中， $(I_{xcg}, I_{ycg}, I_{zcg})$ 为船体绕船体重心点运动时的主转动惯量。

求解器计算得出船体坐标系下六个自由度的加速度之后，再利用积分对其进行处理，得到六个自由度的速度 $v=(u, v, w, p, q, r)$ ，再将其转化成地球坐标系下的速度， $\eta = (\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$ 。再对地球坐标系下的速度进行积分，就可以进一步的得到地球坐标系下的位移 $\eta = (x_1, x_2, x_3, \Phi, \theta, \Psi)$ 。

2.5 重叠网格模块和多级物体运动模块

求解器求解船体在水中前行过程中与螺旋桨相对运动和相互作用的问题时，既要分别计算船体和螺旋桨的运动，又要将两者运动耦合在一起。在此过程中，需要用到多级物体运动模块和重叠网格模块^[47]。

重叠网格模块可以使多套网格之间实现相互自由运动，由于不同网格之间有重叠区域，此重叠区域可以作为网格之间交互、共享信息的枢纽，保证多套网格之间的耦合计算。在此基础上，多级物体运动模块就更加有了用武之地。在求解器的船舶数值计算过程中，可以将网格划分为背景网格、船体网格和运动附体网格（螺旋桨、舵等）三个部分，其中，背景网格为第一级，船体网格和运动附体网格分别为第二级和第三级。船体网格在背景网格中做六自由度运动，而背景网格跟随船体网格做水平面内的运动。运动附体网格在船体网格中做相对运动。在进行数值计算时，首先从最低级的运动附体网格开始计算，这里以螺旋桨为例。那么螺旋桨网格的旋转运动如(31)所示。

$$\mathbf{x}_{prop}^n = \begin{bmatrix} c + n_1^2(1-c) & n_1n_2(1-c) - n_3s & n_1n_3(1-c) + n_2s \\ n_1n_2(1-c) + n_3s & c + n_2^2(1-c) & n_2n_3(1-c) - n_1s \\ n_1n_3(1-c) - n_2s & n_2n_3(1-c) + n_1s & c + n_3^2(1-c) \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$* (\mathbf{x}_{prop}^0 - \mathbf{p}_a) + \mathbf{p}_a$$

其中， $c = \cos\alpha$ ， $s = \sin\alpha$ ； $\vec{n} = (n_1, n_2, n_3)$ 是与螺旋桨桨轴同向单位模量的矢量； \mathbf{p}_a 代表螺旋桨桨轴上的任意一点； \mathbf{X}_{prop}^0 代表螺旋桨网格在数值计算开始之前的位置， \mathbf{X}_{prop}^n 是运动开始之后螺旋桨网格的所处的位置。

螺旋桨网格结果计算完毕后，下一步对船体网格进行计算求解，利用六自由度模块计算出下一时间步船体运动之后，对船体和螺旋桨进行耦合计算，过程如下：

$$\mathbf{x}_{ship}^n = \mathbf{J}_1 \cdot (\mathbf{x}_{ship}^0 - \mathbf{x}_{rot}) + \mathbf{x}_{rot} + \boldsymbol{\eta}_1 \quad (27)$$

其中， \mathbf{x}_{ship}^0 代表船体网格在数值计算开始之前的位置； \mathbf{x}_{ship}^n 代表运动开始之后船体网格所处的位置； \mathbf{J}_1 代表旋转运动的矩阵， $\boldsymbol{\eta}_1$ 代表船体在 x, y, z 三个方向位移； \mathbf{x}_{rot} 代表船体运动过程中的旋心。

最后背景网格的计算求解最为简单，因为背景网格跟随船体网格在水平面内运动，只需使用船体网格的运动结果，不需要另外计算。

第三章 伴流补偿导管节能参数分析

3.1 引言

伴流补偿导管(Wake-equalizing duct)由来自德国的流体专家内洛克斯(Schneekluth)开发研制的安装在船尾螺旋桨前方的半圆形导管,因此该导管又被称为 Schneekluth's 导管。该种节能导管设计初衷之一是提高桨盘面进流的流速,因此需要其进流端的直径要比出流端的直径要大,如图(a)所示。本章进行数值计算和研究的补偿导管是由 NMRI 开发的新型补偿导管,这种导管进流端较大,出流端较小,安装在螺旋桨前方,如图(b)所示,适用于方形系数大并且船尾肥大的船型。JBC 船型作为一种典型的低速肥大船型,能够比较明显的体现伴流补偿导管的节能效果。



(a)经典补偿导管



(b)NMRI 新型补偿导管

图 3-1 伴流补偿导管模型

Fig. 3-1 Wake equalizing duct model

伴流补偿导管具有明显的节能效果,它可以起到使流向螺旋桨的进流速度增大,并使其以更加均匀的状态流向螺旋桨;可以明显减弱船体尾部的水流分离的程度;伴流补偿导管还可以在船尾形成高压区域,提供一项附加的推力。

影响补偿导管节能效果的参数包括补偿导管进出口的直径、补偿导管长度、补偿导管与螺旋桨之间的间距等。本章针对补偿导管的进出口直径、补偿导管长度以及补偿导管与螺旋桨之间的间距等参数对补偿导管节能效果的影响进行数值计算与分析。

伴流补偿导管的节能效果可以根据船体对螺旋桨功率的利用效率来评价,可以有两种方法。一种是评估螺旋桨推进效率,即船的有效功率和螺旋桨收到功率之比值,需要求解四个参数,即推力减额 t 和伴流分数 ω ,以及螺旋桨敞水效率 η_0 和螺旋桨相对旋转效率 η_R ,得到 $\eta_D = \frac{1-t}{1-\omega} \eta_0 \eta_R$,推进效率越高,节能效果越佳。

另一种评价伴流补偿导管节能效果的方式是螺旋桨功率，即船体在固定航速下航行时所需的螺旋桨功率， $P_D = 2\pi nQ$ ，螺旋桨功率越小，节能效果越佳。

在计算推进效率时，首先是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，后续利用等推力法求得伴流分数。还可以验证重叠网格在计算螺旋桨推力和扭矩时的可靠性，以及确定适当的螺旋桨网格布置方式；其次是进行 JBC 无桨拖航计算，得到裸船体的阻力，从而计算推力减额。计算收敛后的流场可以作为 JBC 自航数值计算的初始流场。最后是进行 JBC 在给定自航点下的自航数值计算，JBC 船模以一定的速度向前运动且仅有 x 方向运动的自由度，船尾的螺旋桨在随船模运动的过程中，也以一定的转速转动。

3.2 螺旋桨敞水特性计算

本节对螺旋桨敞水试验进行数值计算，算例配置依据 2015 CFD WorkShop 标准算例进行配置^[48]，在进行螺旋桨敞水的网格配置时，有背景网格和螺旋桨网格两套网格，其中固定轴的网格包含在背景网格中，螺旋桨网格绕固定轴进行转动。

首先进行螺旋桨敞水特性的计算的作用在于不仅可以得到敞水特性曲线，为后续推进效率计算提供数据。还可以通过数值计算的可靠精度，确定后续计算时螺旋桨网络的适当配置，使得对节能装置的节能效果评价尽量准确。螺旋桨模型如图 3-2 所示。

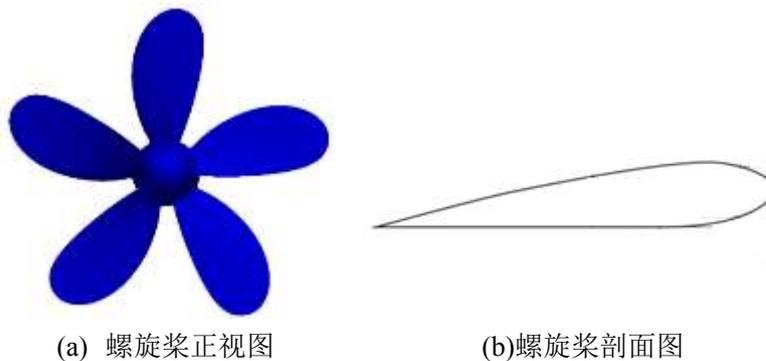


图 3-2 螺旋桨模型

Fig.3-2 Propeller model

螺旋桨模型参数如表 3-1 所示。

表 3-1 螺旋桨参数

Table 3-1. Parameters of propeller

螺旋桨型号	MP687	螺旋桨直径	203mm
毂径比	0.18	螺距（常量）	152.25
螺距比	0.75	盘面比	0.5
最大叶宽比	0.2262	叶厚比	0.05
倾斜角	5°	叶片数	5
叶切面	AU	旋转方向	顺时针

在本算例的计算中，螺旋桨以大地坐标系为参考，在转速保持不变的基础上，以不断增大的速度向前运动。在此过程中，螺旋桨的进速系数不断增大。得到如下结果：

$$J = \frac{V_A}{nD} \quad (28)$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (29)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (30)$$

$$\eta_0 = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \quad (31)$$

上式中，D 代表的是螺旋桨桨盘面的直径； V_A 代表的是螺旋桨相对伴流的前进速度；n 代表的是螺旋桨的转速；T 和 Q 分别代表的是螺旋桨受到的推力和扭矩。根据 2015 年东京 CFD 研讨会的敞水试验数据设置，这里将螺旋桨的转速设为 20rad/s。

计算域的范围为上游 4 个直径，下游 8 个直径，左右各 3 个直径。螺旋桨网格和背景网格分别用于计算近处流场和远处流场。螺旋桨计算域及其边界条件如图 3-3 所示，螺旋桨网格如图 3-4 所示。其中，背景网格 102 万，模型网格 249 万。

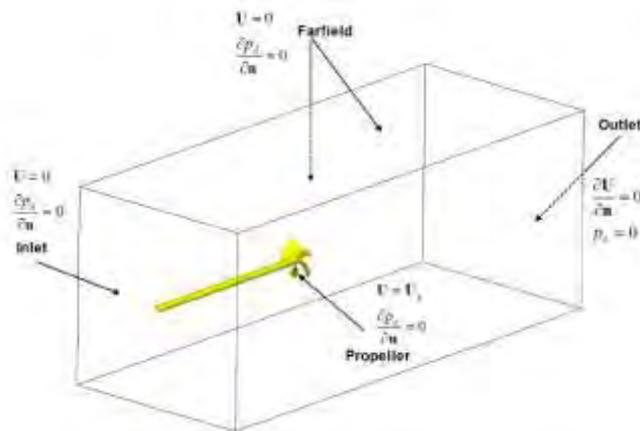


图 3-3 计算域及其边界条件

Fig. 3-3 Computation domain and boundary condition

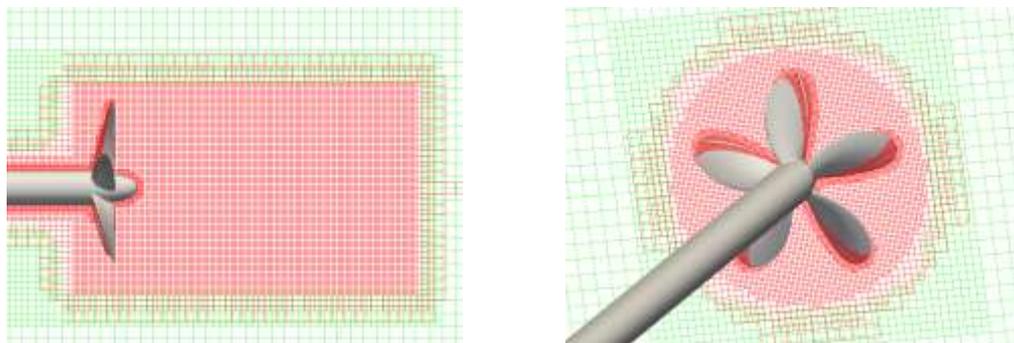


图 3-4 螺旋桨网格剖面图

Fig. 3-4 Slice of grids for propeller

计算过程参考 Xing 等^[49]针对螺旋桨敞水计算而提出的单次计算方法(Single-Run)。这种方法的中心思想是当螺旋桨沿固定方向前行时，保持其转速不变，而使螺旋桨的前进速度不断增大，由此造成进速系数的由小到大变化，从而可以在一次的数值计算中遍历所需计算的工况，大量的节省了计算时间和成本。在计算得到的敞水性能曲线以及其与试验数据的比较如图所示。对于单次计算方法，螺旋桨的进速系数由 $J=0.1$ 逐渐增加到 0.8 ，加速时间为 $5s$ ，螺旋桨转速为 $20rad/s$ ，计算采用的湍流模型是 $k-\omega$ SST 模型。图中，除 $J=0.7$ 附近试验值和数值计算结果偏差较大外，其它进速系数下试验值与数值计算结果基本吻合，表明螺旋桨数值计算结果较为精确，网格配置合理，为后续推进效率的计算打下良好的基础。

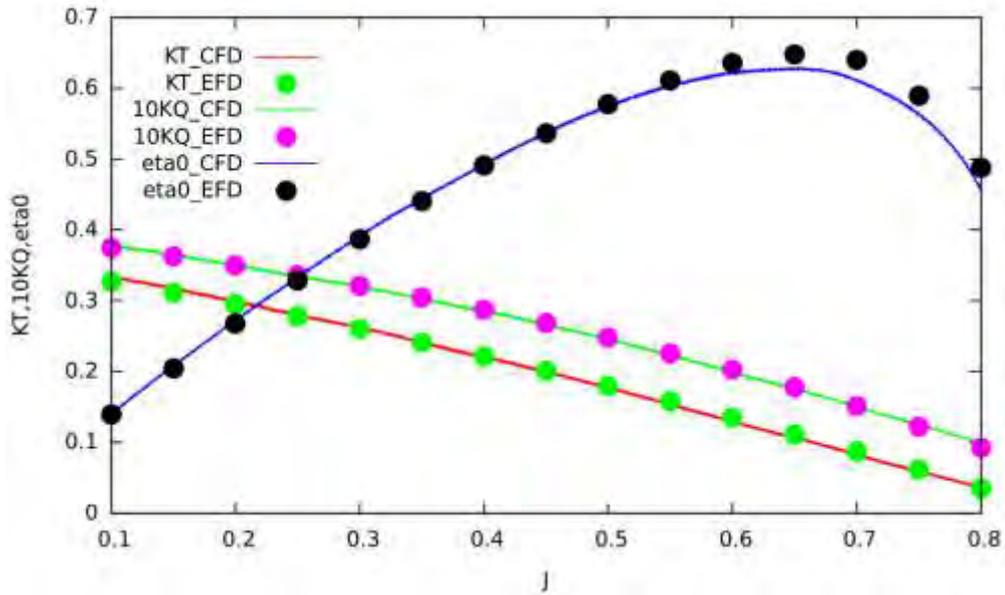


图 3-5 螺旋桨敞水特征计算曲线

Fig. 3-5 Propeller open-water curve

3.3 JBC 无桨拖航数值计算

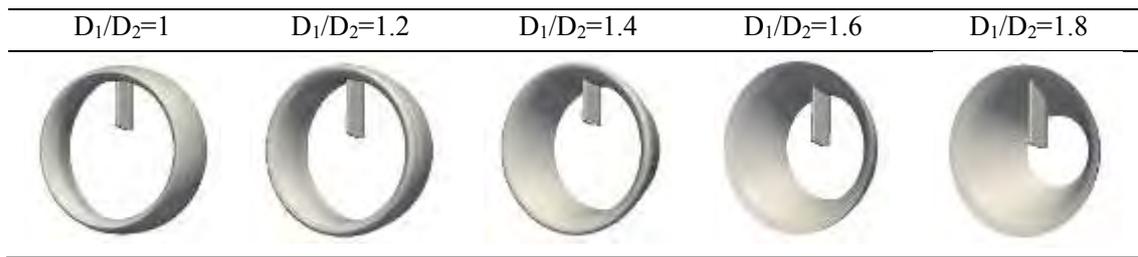
在计算得到螺旋桨敞水曲线后，接下来需要对无桨 JBC 进行拖航数值计算。计算无桨拖航情况下的船体阻力可以用于螺旋桨推进效率的计算^[50]，无桨拖航收敛后流场可以作为自航数值计算的初始流场。不带桨 JBC 拖航计算的工况为：航速 $V=1.179\text{m/s}$ ， $Fr=0.142$ 以及 $Re=7.46\times 10^6$ ，计算所采用的湍流模型为 $k-\omega$ SST 模型。当伴流补偿导管的进出口直径、长度以及与螺旋桨之间的间距等参数变化时，对安装参数不同伴流补偿导管的 JBC 船进行无桨拖航计算，得到 JBC 裸船体的阻力情况。

3.3.1 伴流补偿导管出口直径的影响

由于伴流补偿导管具有使进入桨盘面的来流速度增大，使进流更加均匀的作用。因而出口直径一般应当小于进口直径，进流口直径用 D_1 表示，出流口直径用 D_2 表示，进流口直径 D_1 保持不变，改变出流口直径 D_2 。随着出流口直径 D_2 的变化，伴流补偿导管的进出口直径之比 D_1/D_2 也随之发生变化，介于 1~1.8 之间，如下表所示。

表 3-2 伴流补偿导管模型

Table 3-2. Wake equalizing duct model



当伴流补偿导管的进流口直径不变，出流口直径 D_2 发生变化时，安装不同 D_1/D_2 伴流补偿导管的无桨拖航 JBC 模型如下图所示。

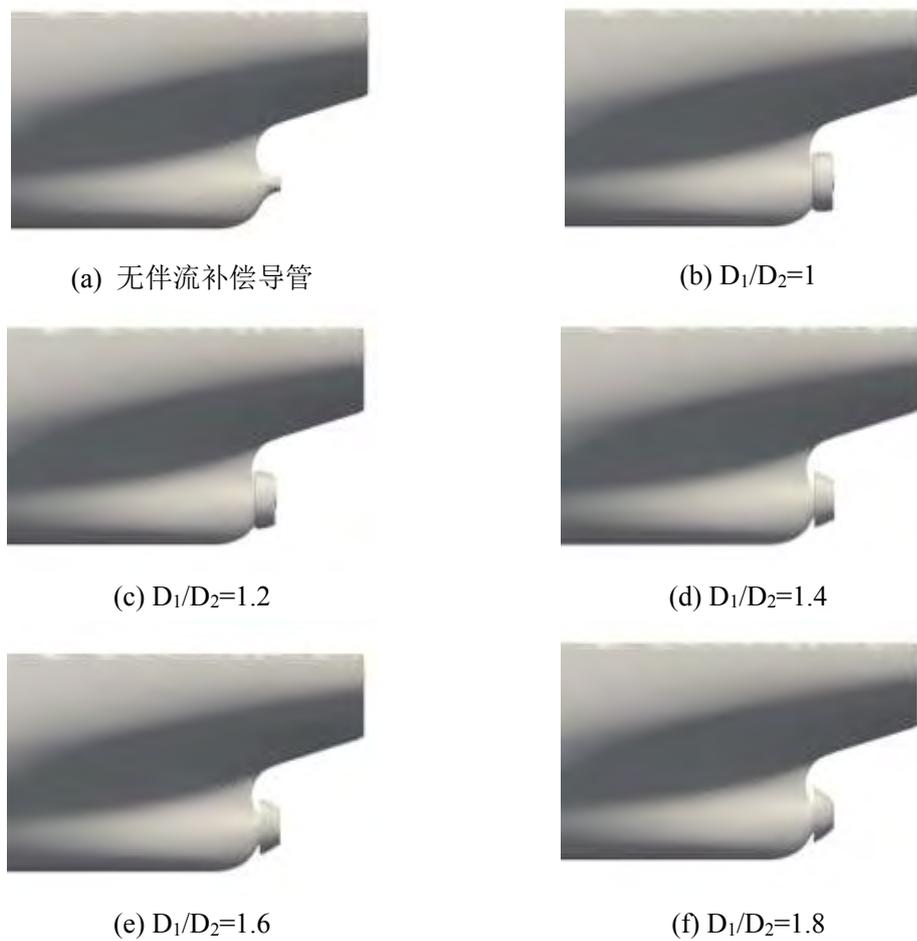


图 3-6 船体模型图
Fig. 3-6 Ship model

JBC 无桨拖航的计算域包括两套网格，包括用于求解近处流场的船体网格以及用于求解远处流场的背景网格。在进行网格的划分时，采用 OpenFOAM 自带的

网格生成工具 *SnappyMeshHex*。计算域的三个方向的坐标范围分别是 $-1.0L_{pp} < x < 4.0L_{pp}$, $-1.5L_{pp} < y < 1.5L_{pp}$, $-1.0L_{pp} < z < 1.0L_{pp}$ 。 L_{pp} 为 JBC 的垂线间长。计算域布置如下图所示。

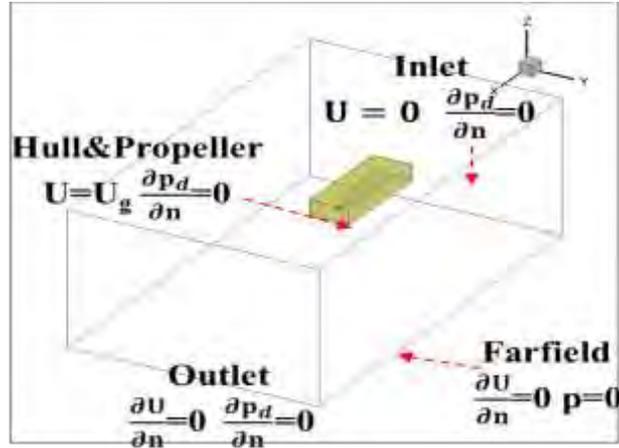


图 3-7 计算域布局图

Fig. 3-7 Computation domain

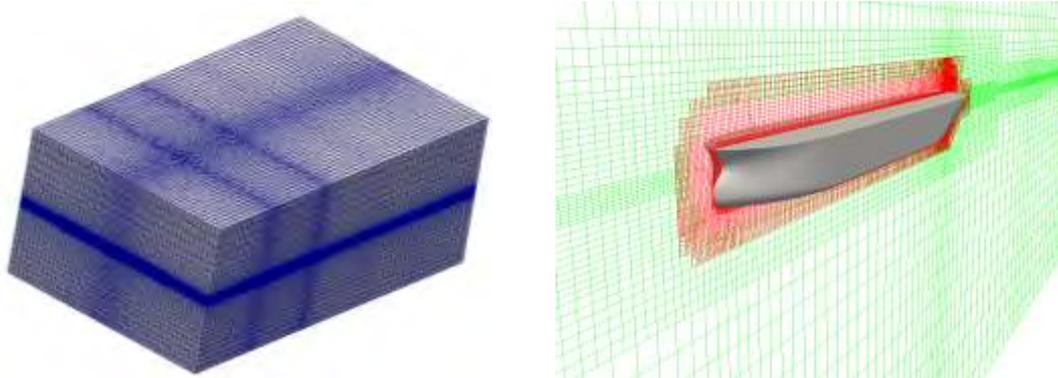
当伴流补偿导管的出流口直径 D_2 发生变化时，对于计算域的网格划分而言影响很小，因此仅列出安装 $D_1/D_2=1.4$ 伴流补偿导管的 JBC 网格图以及网格量。JBC 安装与不安装伴流补偿导管的网格量如表 3-3 所示。全局网格和局部网格图如下图 3-8 所示。

表 3-3 船体网格数量

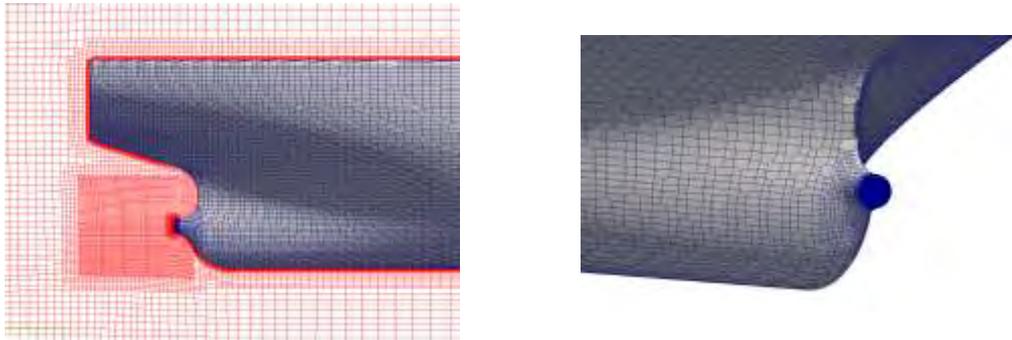
Table. 3-3 Number of grids for JBC

	船体网格	背景网格	总数量
无补偿导管	1.40×10^6	1.33×10^6	2.73×10^6
$D_1/D_2=1.4$	1.61×10^6	1.33×10^6	2.94×10^6

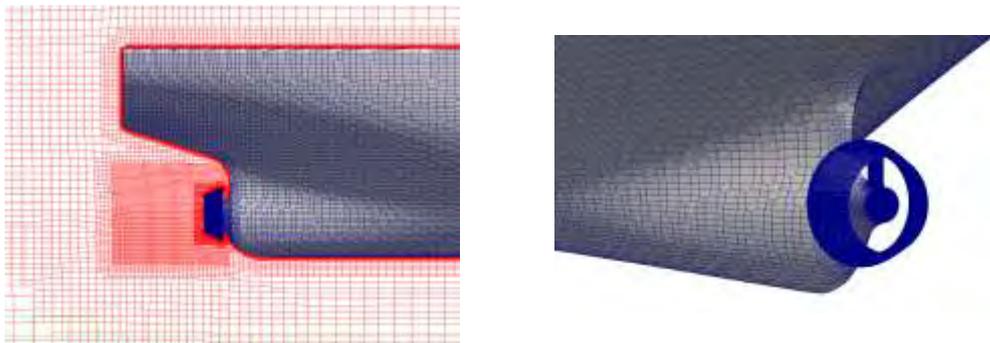
在背景网格和船体网格进行嵌套时，两者的水平面处都需要进行再一次的加密，可以保证提高重叠网格在自由面处的插值精度和精确的捕捉到自由面位置。提高计算精度^[51]。



(a) 整体网格



(b) 无补偿导管 JBC 网格



(c) 带补偿导管 JBC 网格

图 3-8 无桨拖航 JBC 网格

Fig.3-8 Grids for JBC model

计算得到的 JBC 船体阻力系数如表 3-4 所示。由表中可以看出，当 $D_1/D_2=1\sim 1.4$ 时，裸船体阻力系数较小，当 $D_1/D_2>1.4$ 时，裸船体阻力系数增大，表明当 D_1/D_2 过大时，船体阻力将会明显增大，节能导管的节能效果降低。得到 JBC 裸船体的阻力系数以后，需要对带桨的 JBC 进行数值计算，从而计算得到螺旋桨的推进效率。

表 3-4 JBC 船体阻力系数

Table 3-4. Resistance Coefficients of JBC

	$C_t \times 10^3$	$C_p \times 10^3$	$C_f \times 10^3$
无补偿导管	4.141	1.427	2.714
$D_1/D_2=1$	4.114	1.408	2.707
$D_1/D_2=1.2$	4.110	1.406	2.704
$D_1/D_2=1.4$	4.106	1.405	2.701
$D_1/D_2=1.6$	4.121	1.411	2.710
$D_1/D_2=1.8$	4.137	1.416	2.722

3.3.2 伴流补偿导管进出口直径的影响

由于补偿导管具有使进入桨盘面的来流速度增大，使进流更加均匀的作用，因而出口直径一般应当小于进口直径，本节的进出口直径同时变化，比值 D_1/D_2 保持为 1.4 不变，本节采用平均直径 D 表示补偿导管尺寸变化，如下表所示。

表 3-5 伴流补偿导管模型

Table 3-5. Wake equalizing duct model

$D=0.14\text{m}$	$D=0.125\text{m}$	$D=0.11\text{m}$	$D=0.095\text{m}$	$D=0.08\text{m}$
				

当伴流补偿导管的平均直径 D 发生变化时，安装不同 D 伴流补偿导管的无桨拖航 JBC 模型如下图所示。



(a) 无伴流补偿导管

(b) $D=0.14\text{m}$

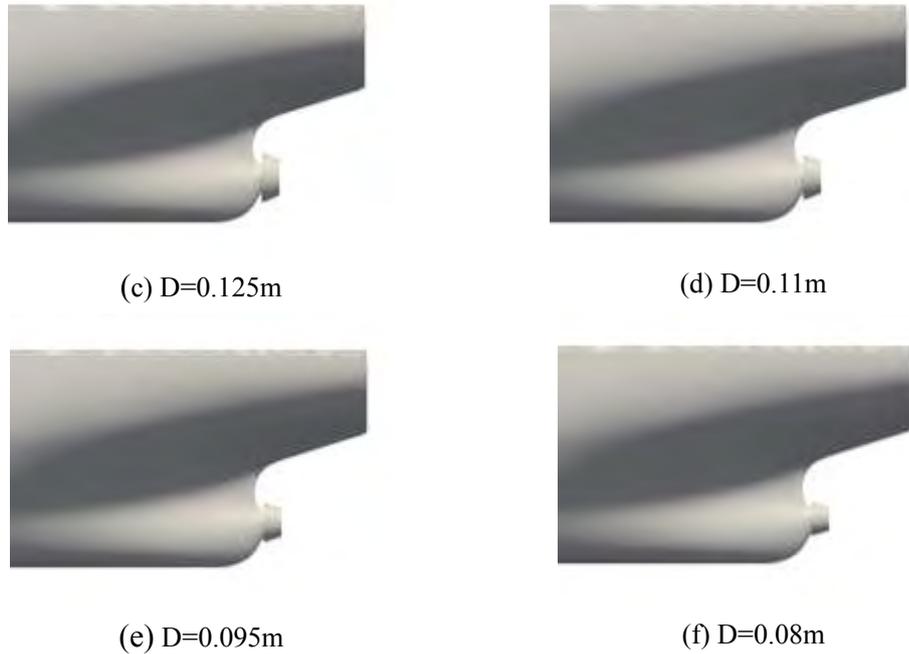


图 3-9 船体模型图

Fig. 3-9 Ship model

其中计算域布置以及计算域整体网格划分与 3.3.1 一致，这里不做重复介绍。仅给出安装不同平均直径 D 伴流补偿导管 JBC 的局部网格。由于伴流补偿导管平均直径 D 变化时，船体网格的变化很微小，因此仅给出 $D=0.14\text{m}$ 时的 JBC 无桨拖航局部网格图及网格量情况^[52]。

表 3-6 船体网格数量

Table. 3-6 Number of grids for JBC

	船体网格	背景网格	总数量
无补偿导管	1.40×10^6	1.33×10^6	2.73×10^6
$D=0.14\text{m}$	1.61×10^6	1.33×10^6	2.94×10^6

在画网格时，需要对伴流补偿导管进行局部的加密，从而精确的捕捉伴流补偿导管模型及其附近的流场变化。同时，因为船尾部分的伴流场对评估伴流补偿导管的节能效果很重要，需要对船尾区域进行适当的加密，从而精确的捕捉船尾流场，准确的评估伴流补偿导管的节能效果。

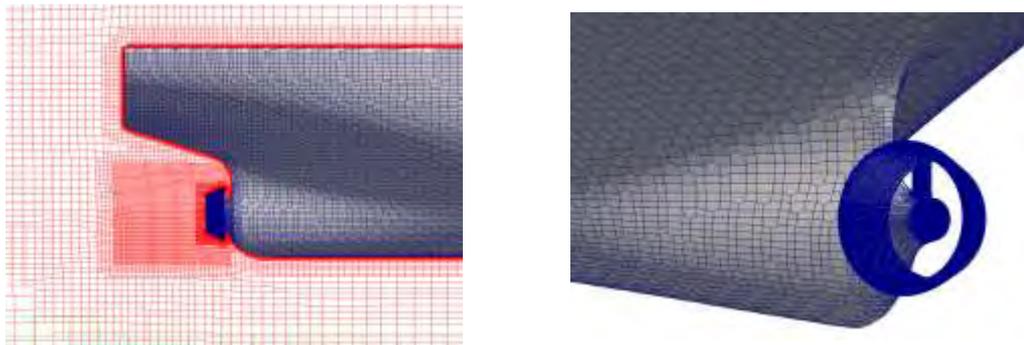


图 3-10 JBC 局部网格图

Fig. 3-10 Local Grid of JBC

计算得到的 JBC 船体阻力系数如表 3-6 所示。由表中可以看出，当 $D=0.14\text{m}\sim 0.08\text{m}$ 时，船体阻力系数比无补偿导管的船体阻力系数小，而随着伴流补偿导管平均直径 D 的减小，船体阻力系数增大，伴流补偿导管的节能效果降低。得到 JBC 裸船体的阻力系数以后，需要对带桨的 JBC 进行数值计算，从而计算得到螺旋桨的推进效率。

表 3-7 JBC 船体阻力系数

Table 3-7. Resistance Coefficients of JBC

	$C_T \times 10^3$	$C_P \times 10^3$	$C_T \times 10^3$
无补偿导管	4.141	1.427	2.714
$D=0.14\text{m}$	4.106	1.405	2.701
$D=0.125\text{m}$	4.109	1.406	2.703
$D=0.11\text{m}$	4.111	1.406	2.705
$D=0.095\text{m}$	4.115	1.408	2.707
$D=0.08\text{m}$	4.121	1.410	2.711

3.3.3 伴流补偿导管长度的影响

补偿导管的长度是影响补偿导管节能效果的重要参数，在船尾的有限空间内，改变补偿导管的长度，使补偿导管长度 L 介于 $0.06\text{m}\sim 0.04\text{m}$ 之间，保持其它参数不变。

表 3-8 伴流补偿导管模型

Table 3-8. Wake equalizing duct model

$L=0.06\text{m}$	$L=0.055\text{m}$	$L=0.05\text{m}$	$L=0.045\text{m}$	$L=0.04\text{m}$
------------------	-------------------	------------------	-------------------	------------------



当伴流补偿导管的长度 L 发生变化时，安装不同长度 L 伴流补偿导管的 JBC 模型如下图所示。

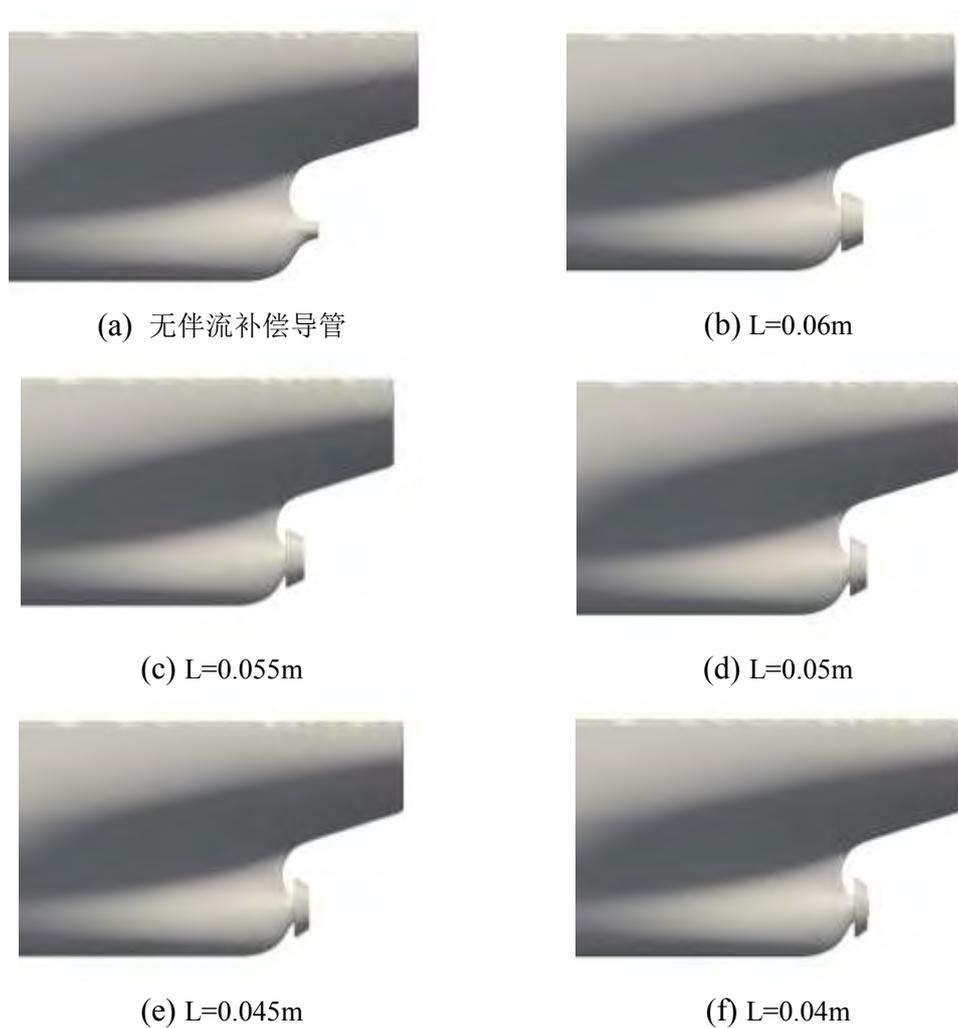


图 3-11 JBC 船体模型

Fig. 3-11 Ship model

其中计算域布置以及计算域整体网格划分与 3.3.1 一致，这里不做重复介绍。仅给出安装不同长度 L 伴流补偿导管 JBC 的局部网格。由于伴流补偿导管长度 L

变化时，船体网格的变化很微小，因此仅给出 $L=0.06\text{m}$ 时的 JBC 无桨拖航网格量及局部网格图。

表 3-9 船体网格数量

Table. 3-9 Number of grids for JBC

	船体网格	背景网格	总数量
无补偿导管	1.40×10^6	1.33×10^6	2.73×10^6
$L=0.06\text{m}$	1.61×10^6	1.33×10^6	2.94×10^6

在画网格时，需要对伴流补偿导管进行局部的加密，从而精确的捕捉伴流补偿导管模型及其附近的流场变化。同时，因为船尾部分的伴流场对评估伴流补偿导管的节能效果很重要，需要对船尾区域进行适当的加密，从而精确的捕捉船尾流场，准确的评估伴流补偿导管的节能效果。

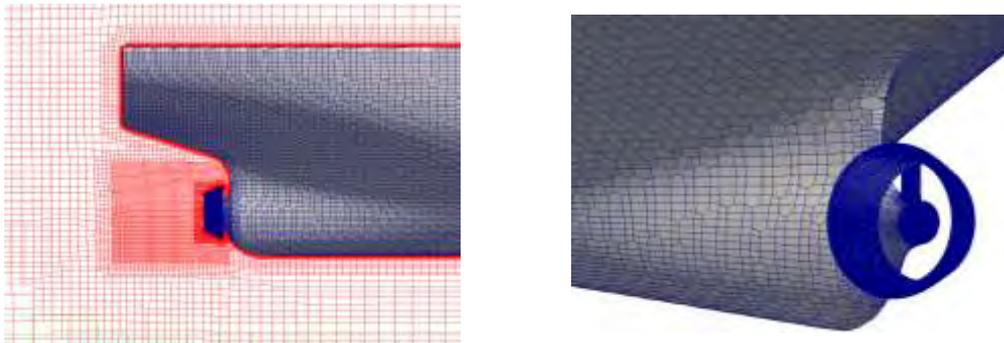


图 3-12 JBC 局部网格图

Fig. 3-12 Local grid of JBC

计算得到的 JBC 船体阻力系数如下表所示。由表中可以看出，当 $L=0.06\text{m} \sim 0.055\text{m}$ 时，船体阻力系数降低，表明伴流补偿导管的节能效果增强。当 $L < 0.055\text{m}$ 时，随着伴流补偿导管长度 L 的减小，船体阻力系数增大，伴流补偿导管的节能效果有所降低。得到 JBC 裸船体的阻力系数以后，需要对带桨的 JBC 进行数值计算，从而计算得到螺旋桨的推进效率。

表 3-10 JBC 船体阻力系数

Table 3-10. Resistance Coefficients of JBC

	$C_t \times 10^3$	$C_p \times 10^3$	$C_r \times 10^3$
无补偿导管	4.141	1.427	2.714
$L=0.060\text{m}$	4.107	1.404	2.703
$L=0.055\text{m}$	4.089	1.403	2.679

L=0.050m	4.098	1.411	2.687
L=0.045m	4.102	1.411	2.691
L=0.040m	4.110	1.413	2.697

3.3.4 伴流补偿导管与螺旋桨间距的影响

伴流补偿导管与桨间隙 Δ 是影响补偿导管节能效果的重要参数，在船尾的有限空间内，改变伴流补偿导管与螺旋桨之间的间隙，使间隙 Δ 介于 0.003m~0.019m 之间。

表 3-11 伴流补偿导管模型

Table 3-11. Wake equalizing duct model

$\Delta=0.003\text{m}$	$\Delta=0.007\text{m}$	$\Delta=0.011\text{m}$	$\Delta=0.015\text{m}$	$\Delta=0.019\text{m}$
				

当伴流补偿导管的与螺旋桨间距 Δ 发生变化时，对应的 JBC 船体模型如下图所示。



(a) 无伴流补偿导管



(b) $\Delta=0.003\text{m}$



(c) $\Delta=0.007\text{m}$



(d) $\Delta=0.011\text{m}$



图 3-13 JBC 船体模型图

Fig. 3-13 Ship model

其中计算域布置以及计算域整体网格划分与 3.3.1 一致，这里不做重复介绍。仅给出安装不同长度 L 伴流补偿导管 JBC 的局部网格。由于伴流补偿导管长度 L 变化时，船体网格的变化很微小，因此仅给出 $L=0.06\text{m}$ 时的 JBC 无桨拖航网格量及局部网格图。

表 3-12 船体网格数量

Table. 3-12 Number of grids for JBC

	船体网格	背景网格	总数量
无补偿导管	1.40×10^6	1.33×10^6	2.73×10^6
$L=0.06\text{m}$	1.61×10^6	1.33×10^6	2.94×10^6

在画网格时，需要对伴流补偿导管进行局部的加密，从而精确的捕捉伴流补偿导管模型及其附近的流场变化。同时，因为船尾部分的伴流场对评估伴流补偿导管的节能效果很重要，需要对船尾区域进行适当的加密，从而精确的捕捉船尾流场，准确的评估伴流补偿导管的节能效果。

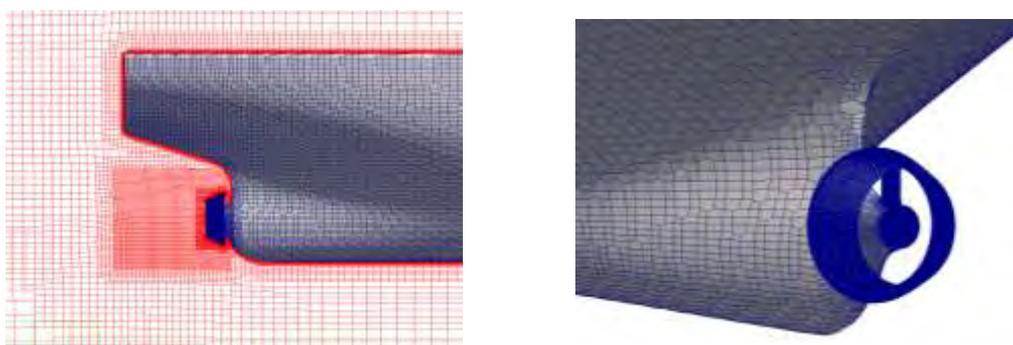


图 3-14 JBC 局部网格图

Fig. 3-14 Local grid of JBC

计算得到的 JBC 船体阻力系数如下表所示。由表中可以看出，由表中可以看出，当 $\Delta=0.003\sim 0.019\text{m}$ 时，船体阻力系数呈现增大的趋势，表明伴流补偿导管的节能效果降低。得到 JBC 裸船体的阻力系数以后，需要对带桨的 JBC 进行数值计算，从而计算得到螺旋桨的推进效率。

表 3-13 JBC 船体阻力系数
Table 3-13. Resistance Coefficients of JBC

	$C_t \times 10^3$	$C_p \times 10^3$	$C_r \times 10^3$
无补偿导管	4.141	1.427	2.714
$\Delta=0.003\text{m}$	4.107	1.404	2.703
$\Delta=0.007\text{m}$	4.093	1.400	2.692
$\Delta=0.011\text{m}$	4.108	1.406	2.702
$\Delta=0.015\text{m}$	4.112	1.407	2.705
$\Delta=0.019\text{m}$	4.115	1.408	2.707

3.4 JBC 自航数值计算

本节对安装伴流补偿导管的 JBC 进行自航数值计算。JBC 自航数值计算按照 2015 东京 CFD 研讨会进行算例配置，自航点为标准算例给定自航点。其中，计算的工况为：航速 $V=1.179\text{m/s}$ ， $Fr=0.142$ 以及 $Re=7.46 \times 10^6$ ，计算所采用的湍流模型为 $k-\omega$ SST 模型。带补偿导管的 JBC 螺旋桨转速为 7.5r/s ，不带补偿导管的 JBC 螺旋桨转速为 7.8r/s 。无桨拖航计算收敛后的流场作为研究伴流补偿导管节能效果的近似初始流场，可以节省大量的数值计算时间^[53]。

当伴流补偿导管的进出口直径、长度以及与螺旋桨之间的间距等参数变化时，对安装参数不同的安装伴流补偿导管的 JBC 船进行自航数值计算，利用螺旋桨推进效率和螺旋桨功率两种方式评价伴流补偿导管节能效果。

3.4.1 伴流补偿导管出口直径的影响

当伴流补偿导管的进流口直径 D_1 保持不变，而出口直径 D_2 变化时，相应的模型如 3.3.1 所示，这里不做赘述。仅列出安装不同出口直径 D_2 伴流补偿导管的 JBC 带桨数值计算模型，如下图所示。

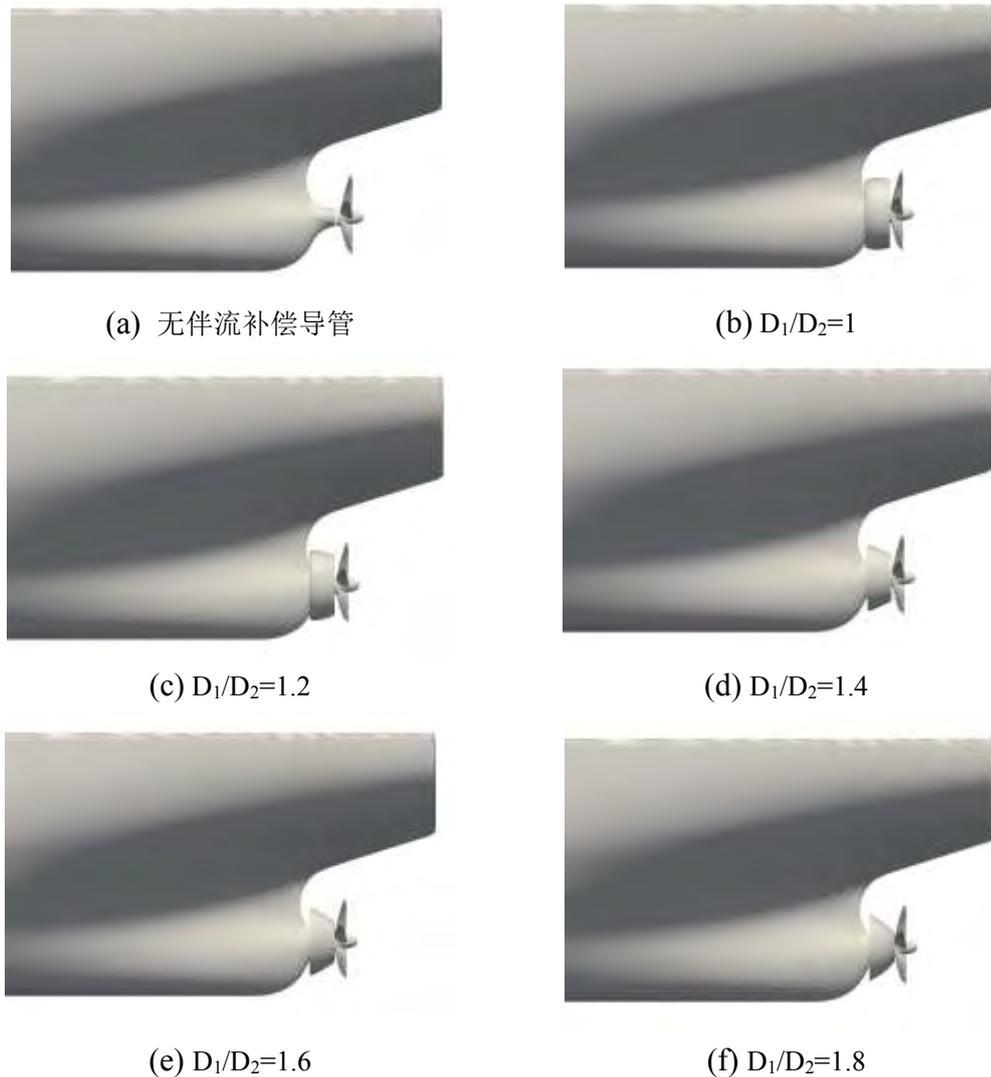


图 3-15 带桨船体模型图

Fig. 3-15 Ship model of JBC with propeller

本算例网格比 JBC 无桨拖航网格多了一套螺旋桨网格。其中，船体网格与背景网格和无桨拖航作用基本相同，螺旋桨网格可以捕捉螺旋桨尾流场以及保证螺旋桨扭矩的计算结果可靠性。计算域的坐标范围包括 $-1.0L_{pp} < x < 4.0L_{pp}$ ， $-1.5L_{pp} < y < 1.5L_{pp}$ ， $-1.0L_{pp} < z < 1.0L_{pp}$ 。 L_{pp} 为 JBC 的垂线间长。当伴流补偿导管的进流口直径 D_1 保持不变，而出流口直径 D_2 变化时，由于伴流补偿导管尺寸有限，所以其变化对网格量的变化影响较小，因此，仅列出 $D_1/D_2=1.4$ 时的网格量。带桨 JBC 的网格量情况如下表所示。

表 3-14 JBC 网格量

Table 3-14. Number of grids for JBC

	船体网格量	背景网格量	螺旋桨网格量	网格总量
无伴流补偿导管	1.45×10^6	1.93×10^6	1.44×10^6	4.82×10^6
补偿导管 $D_1/D_2=1.4$	1.64×10^6	1.93×10^6	1.44×10^6	5.01×10^6

当伴流补偿导管 D_1/D_2 介于 1~1.8 之间时,带桨 JBC 的网格划分如下图所示。

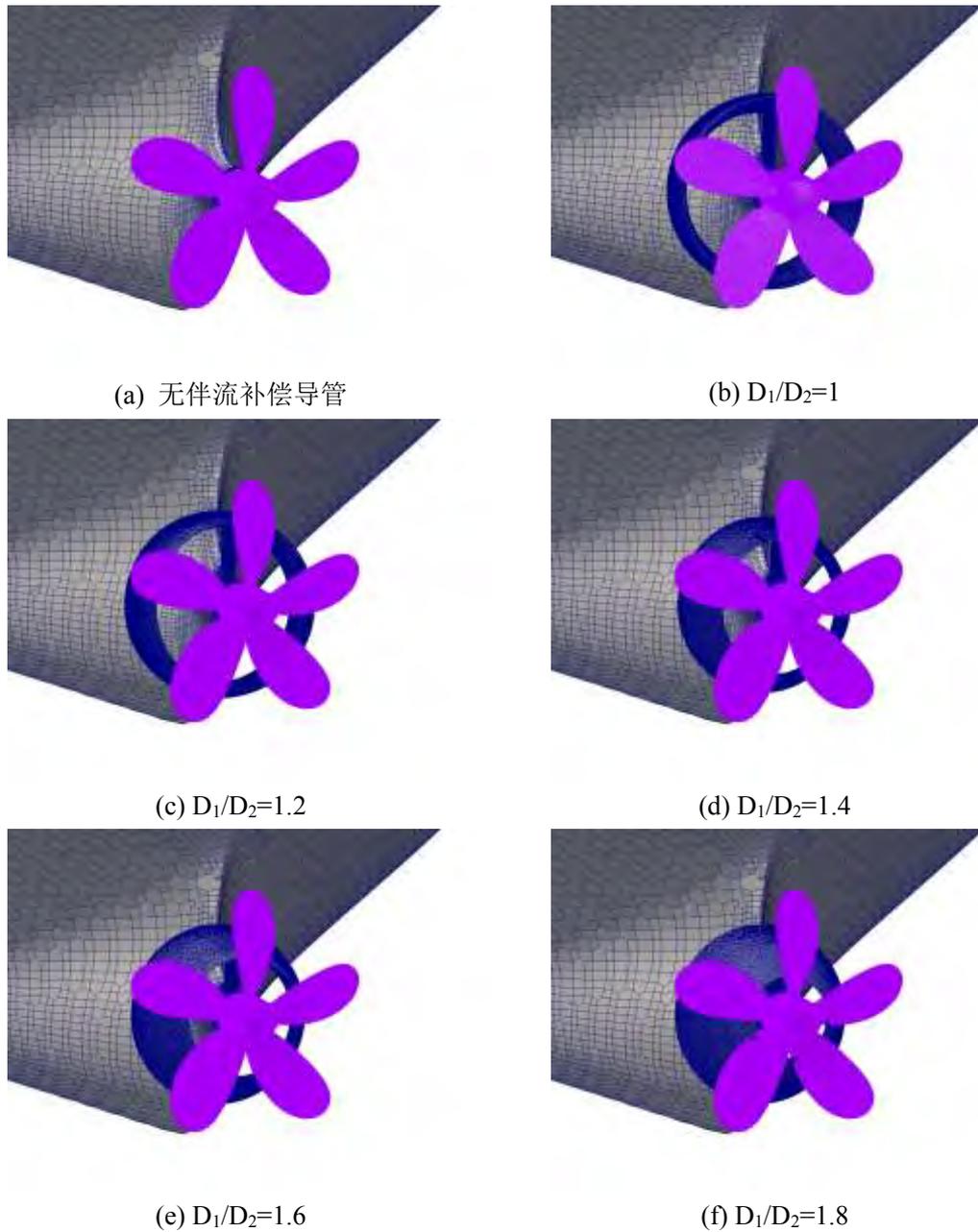


图 3-16 船体网格图

Fig. 3-16 Grids for JBC

伴流补偿导管的节能效果可以根据船体对螺旋桨功率的利用率来评价，可以有两种方法。一种是推进效率评价， $\eta_D = \frac{1-t}{1-\omega} \eta_0 \eta_R$ 。具体结果如下表所示，其中，ESD(energy saving device)表示船舶节能装置。

表 3-15 伴流补偿导管节能效果评估

Table 3-15. Evaluation of energy saving effect of Wake Equalizing Duct

	W/O ESD	D ₁ /D ₂ =1	D ₁ /D ₂ =1.2	D ₁ /D ₂ =1.4	D ₁ /D ₂ =1.6	D ₁ /D ₂ =1.8
$C_t (\times 10^{-3})$	4.405	4.391	4.386	4.382	4.397	4.408
K_T	0.201	0.216	0.216	0.218	0.217	0.215
$10K_Q$	0.232	0.244	0.242	0.240	0.249	0.252
$l-t$	0.918	0.916	0.916	0.922	0.917	0.915
$l-w$	0.519	0.445	0.447	0.448	0.444	0.440
η_0	0.488	0.440	0.445	0.449	0.439	0.428
η_R	1.004	0.993	0.994	0.996	0.993	0.997
n	7.8	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
η_D	0.866	0.899	0.907	0.919	0.902	0.887

另一种评价伴流补偿导管节能效果的方式是螺旋桨功率，即 $P_D = 2\pi nQ$ ，比较安装节能装置以及节能装置参数变化时螺旋桨功率的变化。具体计算结果如下表所示。

表 3-16 伴流补偿导管节能效果评估

Table 3-16. Evaluation of energy saving effect of Wake Equalizing Duct

伴流补偿导管布置	Q(N·m)	P(W)	ΔE
无伴流补偿导管	0.486	23.808	/
D ₁ /D ₂ =1	0.481	22.666	4.80%
D ₁ /D ₂ =1.2	0.477	22.477	5.59%
D ₁ /D ₂ =1.4	0.469	22.101	7.17%
D ₁ /D ₂ =1.6	0.479	22.572	5.19%
D ₁ /D ₂ =1.8	0.487	22.949	3.37%

从表 3-15 和表 3-16 可以看出，D₁/D₂=1~1.8 时，伴流补偿导管均有节能效果，但是当 D₁/D₂=1~1.4 时，伴流补偿导管的节能效果呈现增大的趋势，而当 D₁/D₂=1.4~1.8 时，伴流补偿导管的节能效果呈现减弱的趋势。说明当 D₁/D₂=1.4 时伴流补偿导管节能效果最优。因为随着 D₁/D₂ 值的增大，伴流补偿导管对进流的加速效果增强，但是实际的桨盘面进流面积却不断缩小，两者对于伴流补偿导管

节能效果的影响是相反的，当 $D_1/D_2=1.4$ 时，此时的进流加速效果和进流桨盘面积的配合达到最佳状态，伴流补偿导管的节能效果最优。

如图 3-16 所示，对于不同情形的 JBC 船体而言，船艏压力分布基本相同，未发生明显变化，说明补偿导管出口直径的变化对船艏压力分布不产生影响。

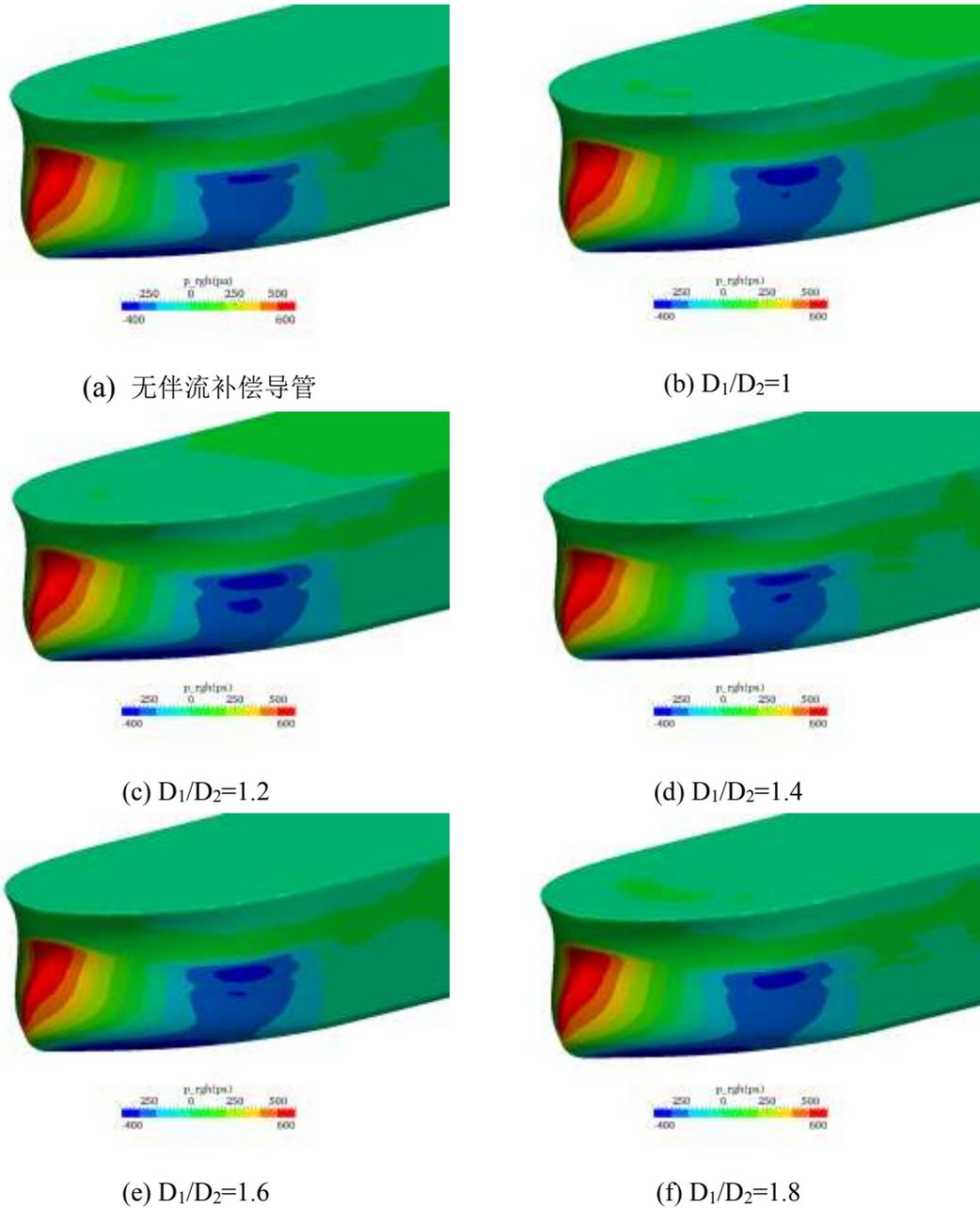


图 3-17 船艏压力图

Fig. 3-17 Pressure distribution at bow

由图 3-17 可以看出, $D_1/D_2=1\sim 1.4$ 时, 船尾螺旋桨表面压力小于无伴流补偿导管的船尾螺旋桨表面压力, 表明 D_1/D_2 在此范围内, 伴流补偿导管具有明显的节能效果。 $D_1/D_2>1.4$ 时, 船尾螺旋桨表面压力增大, 并且伴流补偿导管表面形成低压区, 船体阻力增大, 螺旋桨功率增大, 表明伴流补偿导管的节能效果减弱。

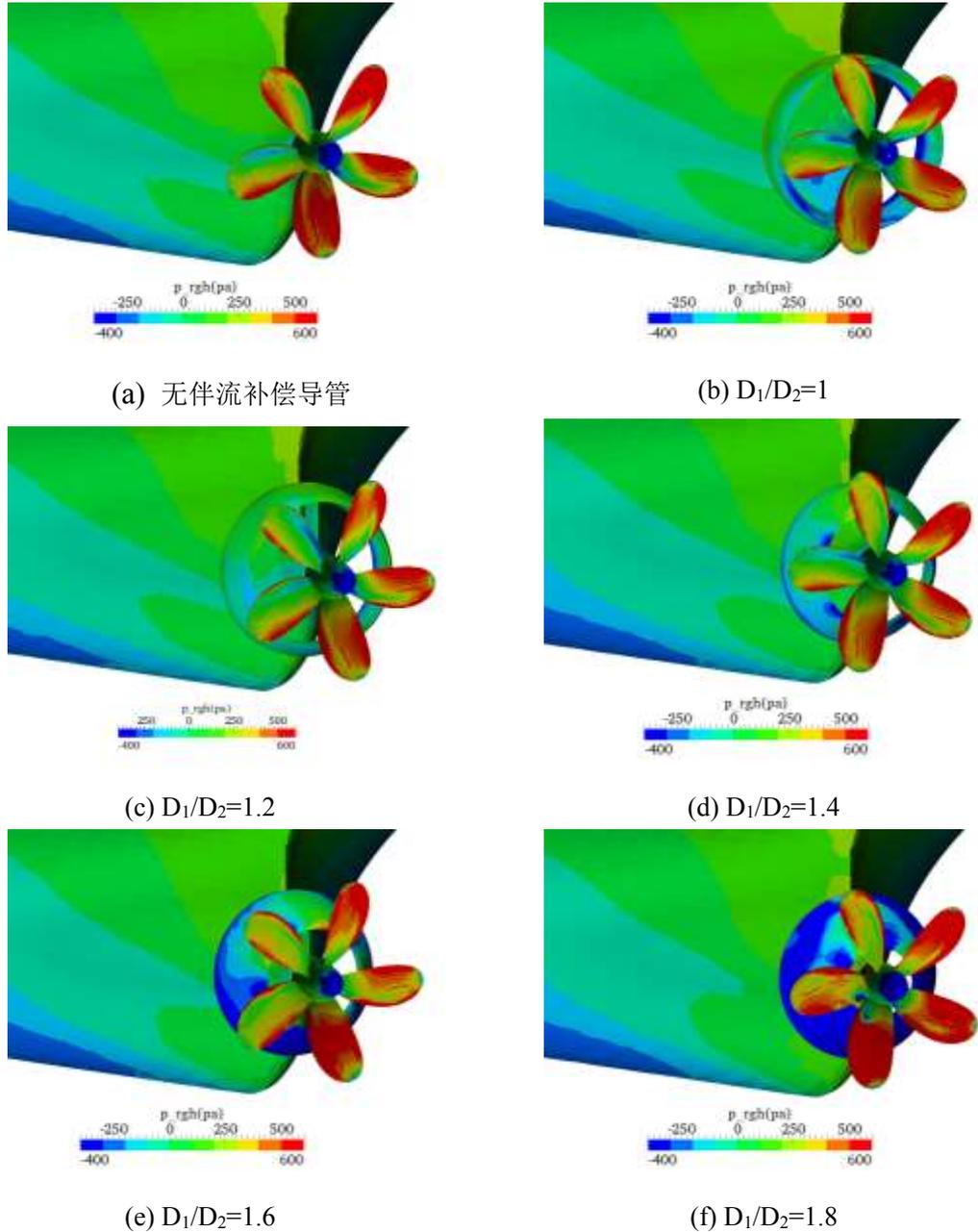


图 3-18 船艉压力图

Fig. 3-18 Pressure distribution at stern

由图 3-19 可以看出，补偿导管出口直径的相对变化，极大的影响了螺旋桨的桨盘面进流情况，在 $D_1/D_2=1\sim 1.4$ 时，螺旋桨桨盘面进流流速较大，流速较为均匀，相对于无补偿导管时的螺旋桨桨盘面进流，桨盘面进流流速明显增大。当 $D_1/D_2>1.6$ 时，螺旋桨桨盘面进流流速迅速减小，流速分布极不均匀。

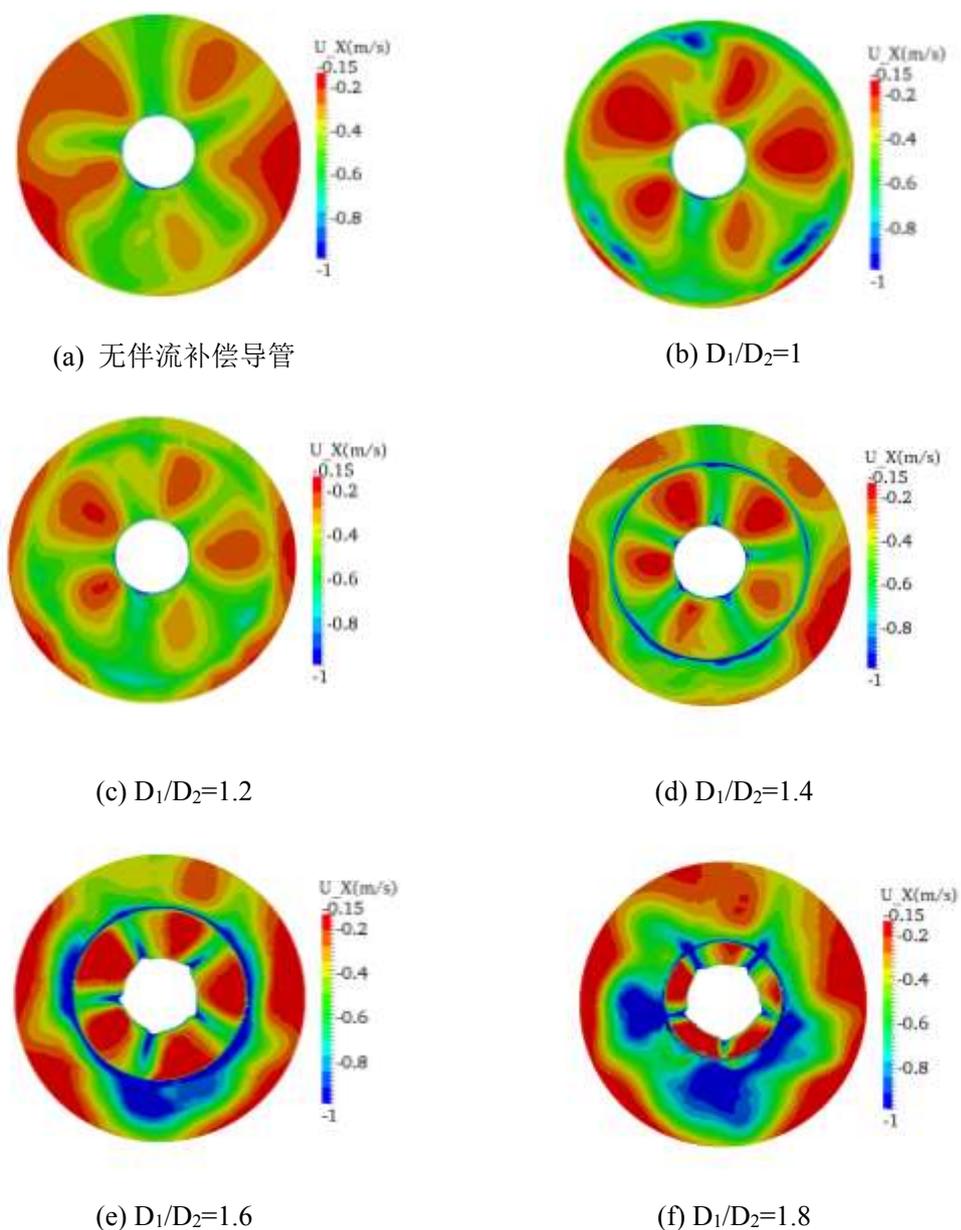
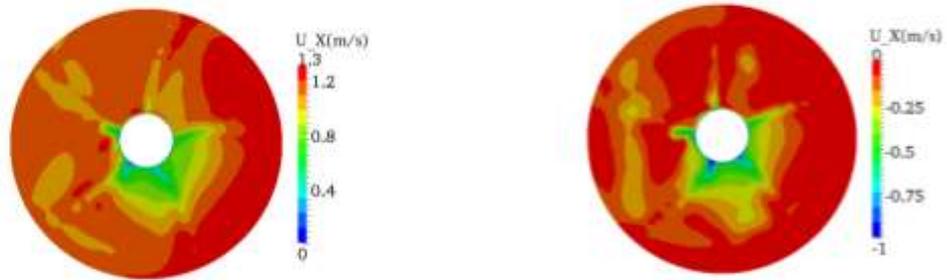


图 3-19 桨前伴流图

Fig. 3-19 Wake field before propeller

由图 3-20 可以看出，补偿导管出口直径的相对变化，相当程度影响了螺旋桨后的尾流情况，在 $D_1/D_2=1\sim 1.4$ 时，螺旋桨后尾流流速较小，相对于无伴流补偿导管的螺旋桨后尾流的能量损失而言，流速得到一定程度的减小，损失的尾流能量得到降低。当 $D_1/D_2>1.4$ 时，螺旋桨后尾流流速较大，损失的尾流能量也明显增大。



(a) 无伴流补偿导管

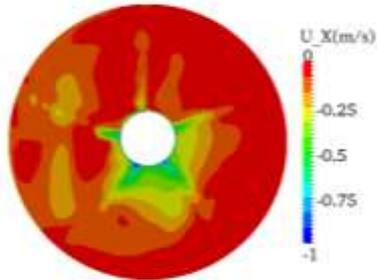
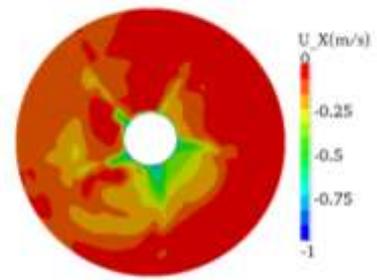
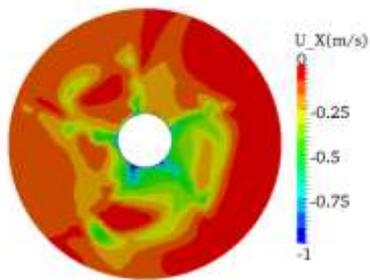
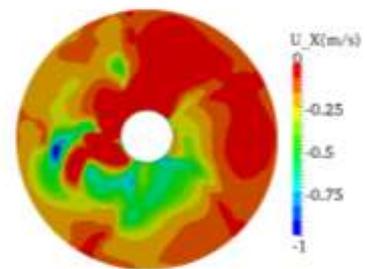
(b) $D_1/D_2=1$ (c) $D_1/D_2=1.2$ (d) $D_1/D_2=1.4$ (e) $D_1/D_2=1.6$ (f) $D_1/D_2=1.8$

图 3-20 桨后伴流图

Fig. 3-20 Wake field after propeller

3.4.2 伴流补偿导管进出口直径的影响

当伴流补偿导管的进流口直径 D_1 和出流口直径 D_2 以同等比例变化，其比值不变，而进出口直径 D_1 和 D_2 同时变化时，模型变化以平均直径 D 表示，相应的模型如 3.3.2 所示，这里不做赘述。仅列出安装不同平均直径 D 伴流补偿导管的 JBC 带桨数值计算模型，如下图所示。

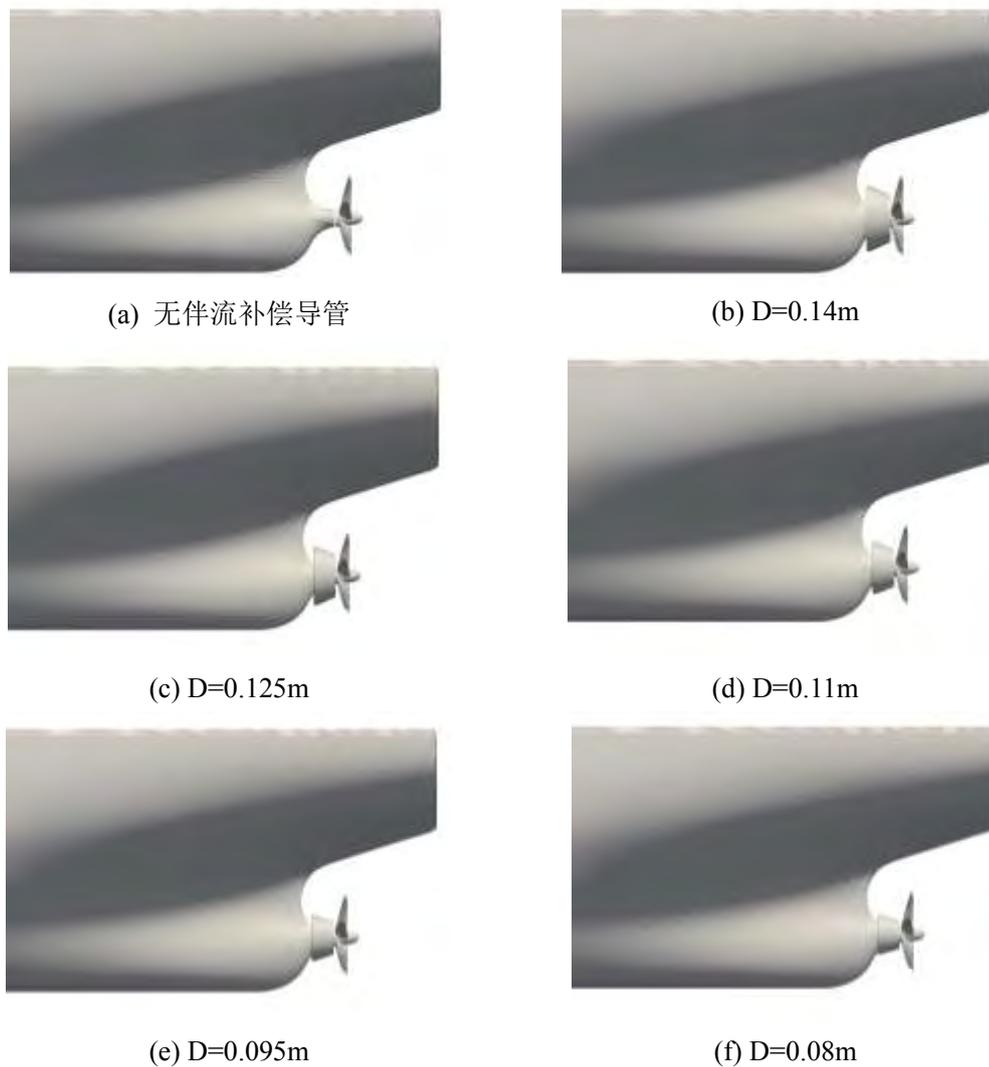


图 3-21 带桨船体模型图

Fig. 3-21 Ship model of JBC with propeller

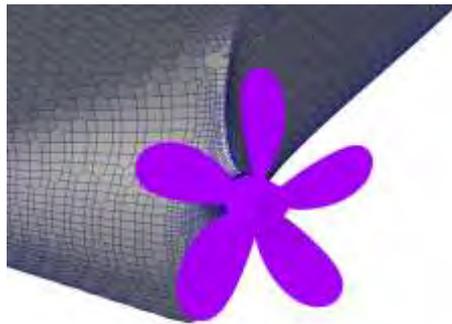
本算例网格比 JBC 无桨拖航网格多了一套螺旋桨网格。其中，船体网格与背景网格和无桨拖航作用基本相同，螺旋桨网格可以捕捉螺旋桨尾流场以及保证螺旋桨扭矩的计算结果可靠性。计算域的坐标范围包括 $-1.0L_{pp} < x < 4.0L_{pp}$ ， $-1.5L_{pp} < y < 1.5L_{pp}$ ， $-1.0L_{pp} < z < 1.0L_{pp}$ 。L_{pp} 为 JBC 的垂线间长。当伴流补偿导管的平均直径 D 变化时，由于伴流补偿导管尺寸有限，所以其变化对网格量的变化影响较小，因此，仅列出 D=0.14 时的网格量。带桨 JBC 的网格量情况如下表所示。

表 3-17 JBC 网格量

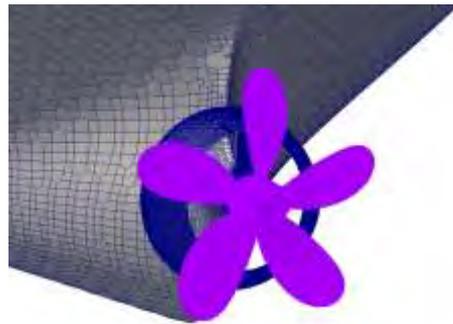
Table 3-17. Number of grids for JBC

	船体网格量	背景网格量	螺旋桨网格量	网格总量
无伴流补偿导管	1.45×10^6	1.93×10^6	1.44×10^6	4.82×10^6
补偿导管 D=0.14m	1.64×10^6	1.93×10^6	1.44×10^6	5.01×10^6

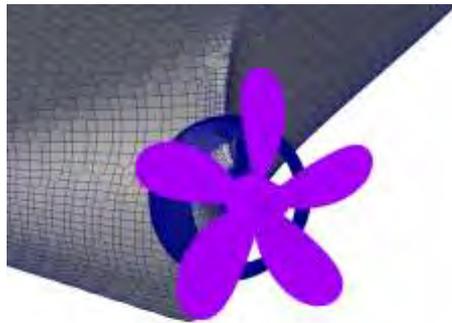
当伴流补偿导管的平均直径 D 介于 0.08m;~0.14m 之间时，船尾部分网格图如下图所示。



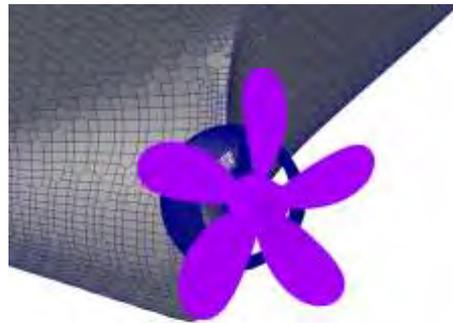
(a) 无伴流补偿导管



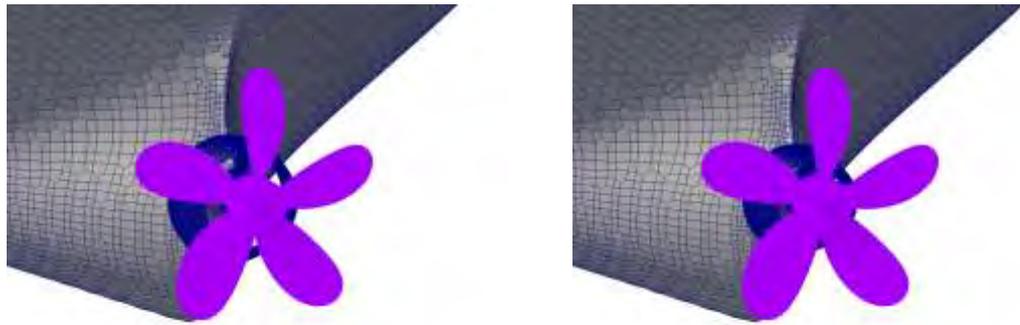
(b) D=0.14m



(c) D=0.125m



(d) D=0.11m



(e) D=0.095m

(f) D=0.08m

图 3-22 船体网格图

Fig. 3-22 Grids for JBC

伴流补偿导管的节能效果可以根据船体对螺旋桨功率的利用率来评价，可以有两种方法。一种是推进效率评价，即 $\eta_D = \frac{1-t}{1-\omega} \eta_0 \eta_R$ 。具体结果如下表所示。

表 3-18 伴流补偿导管节能效果评估

Table 3-18. Evaluation of energy saving effect of Wake Equalizing Duct

	W/O ESD	D=0.14m	D=0.125m	D=0.11m	D=0.095m	D=0.08m
$C_t (\times 10^{-3})$	4.405	4.382	4.385	4.387	4.391	4.398
K_T	0.201	0.217	0.216	0.216	0.216	0.215
$10K_Q$	0.232	0.240	0.244	0.245	0.246	0.249
$1-t$	0.918	0.922	0.918	0.918	0.918	0.917
$1-w$	0.519	0.448	0.447	0.447	0.445	0.443
η_0	0.488	0.449	0.447	0.445	0.443	0.435
η_R	1.004	0.996	0.995	0.994	0.993	0.997
n	7.8	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
η_D	0.866	0.919	0.912	0.910	0.906	0.897

另一种评价伴流补偿导管节能效果的方式是螺旋桨功率，即 $P_D = 2\pi nQ$ ，比较安装节能装置以及节能装置参数变化时螺旋桨功率的变化。具体计算结果如下表所示。

表 3-19 伴流补偿导管节能效果评估

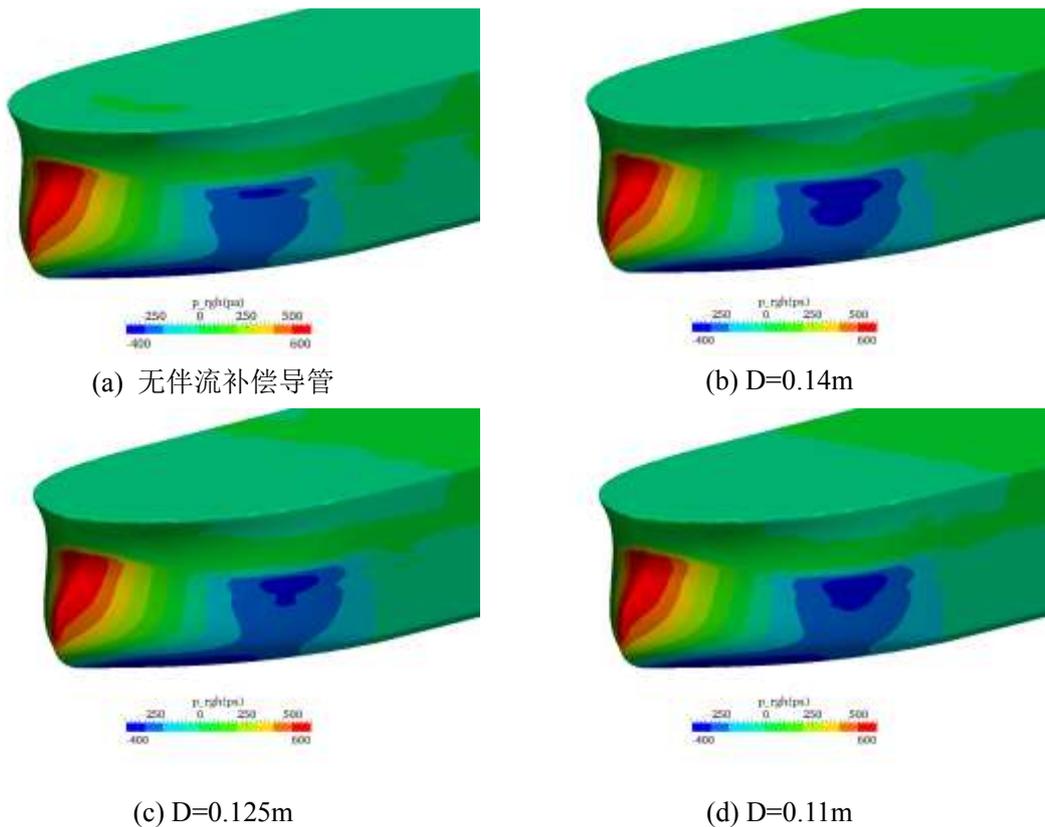
Table 3-19. Evaluation of energy saving effect of Wake Equalizing Duct

伴流补偿导管布置	Q(N·m)	P(W)	ΔE
无伴流补偿导管	0.486	23.808	/

D=0.140m	0.469	22.101	7.17%
D=0.125m	0.473	22.289	6.38%
D=0.110m	0.475	22.383	5.98%
D=0.095m	0.476	22.430	5.79%
D=0.080m	0.482	22.713	4.61%

当伴流补偿导管的平均直径 D 在 $0.08\text{m}\sim 0.14\text{m}$ 之间变化时，由表 3-18 和表 3-19 可以看出，螺旋桨的功率上升，推进效率下降。因为伴流补偿导管的进出口直径比 D_1/D_2 不变，补偿导管对来流的加速效果基本不变，但是由于平均直径的减小，导致接受加速来流的桨盘面面积减小，伴流补偿导管的节能效果受到削弱。因此，在伴流补偿导管的平均直径接近于桨盘面直径时，其平均直径越小，节能效果会变得越弱。

如图 3-23 所示，对于不同情形的 JBC 船体而言，船艏压力分布基本相同，未发生明显变化，说明补偿导管进出口直径的变化对船艏压力分布不产生影响。



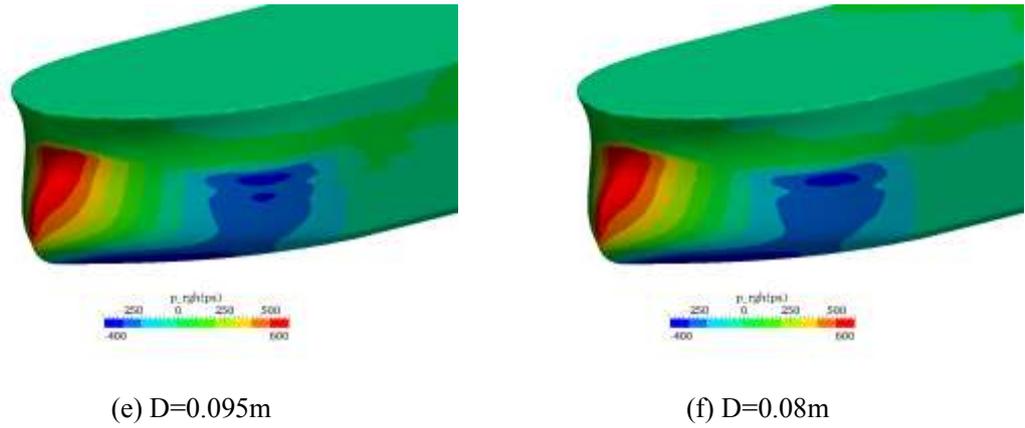
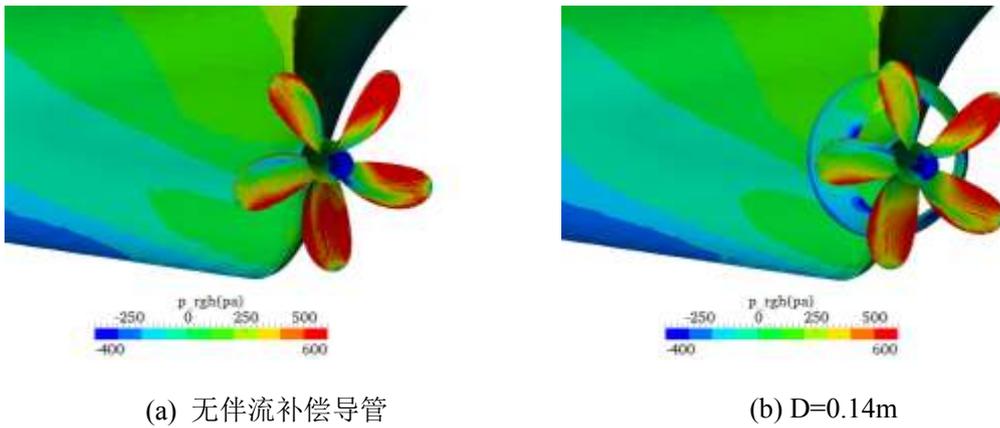


图 3-23 船舶压力图

Fig. 3-23 Pressure distribution at bow

由图 3-24 可以看出，补偿导管的进出口直径在 $D=0.14\text{m}\sim 0.08\text{m}$ 之间发生变化时，虽然船尾压力和螺旋桨桨盘面压力发生变化，但补偿导管始终具有节能效果，桨盘面压力明显小于无补偿导管的螺旋桨桨盘面压力。补偿导管平均直径 $D=0.14\text{m}\sim 0.11\text{m}$ 时，螺旋桨桨盘面压力有所减小，补偿导管节能效果有所增强，船尾压力有一定程度的波动，当补偿导管平均直径 $D=0.125\text{m}$ 和 $D=0.11\text{m}$ 时，船尾产生了一定的额外推力。当补偿导管平均直径 $D=0.095\text{m}$ 和 $D=0.08\text{m}$ 时，螺旋桨桨盘面压力增大，船尾压力明显降低，螺旋桨要求的有效功率增大，补偿导管节能效果有所降低。



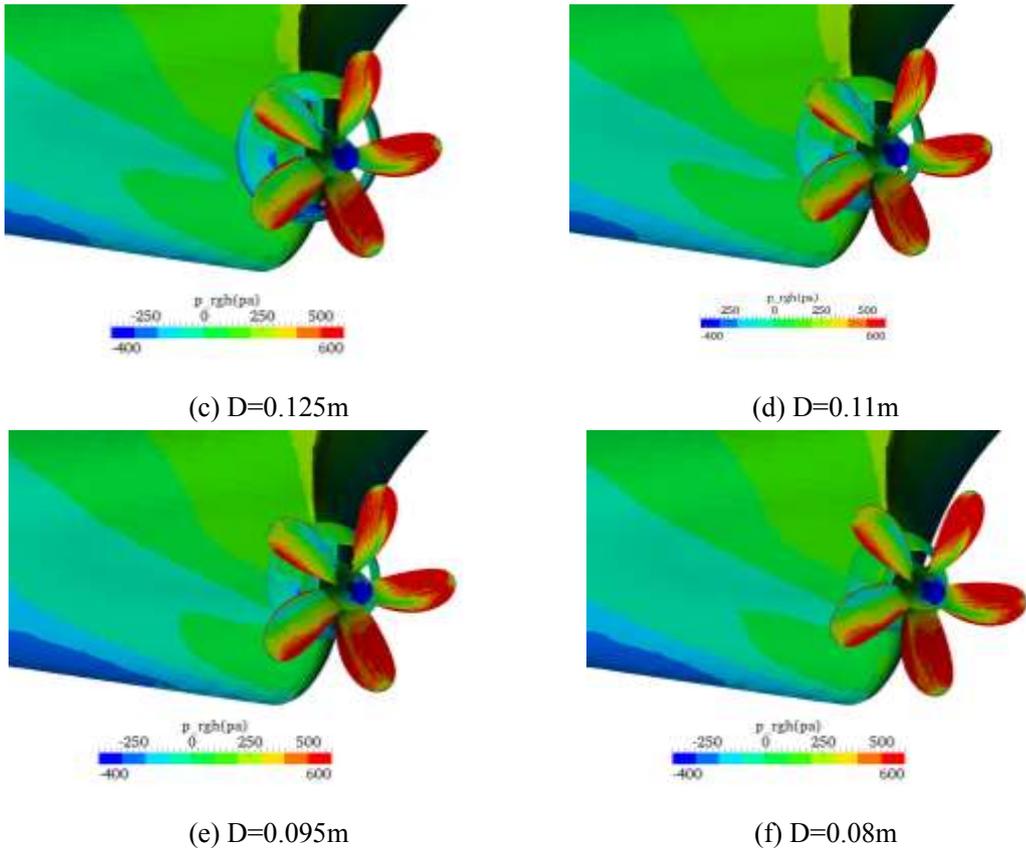
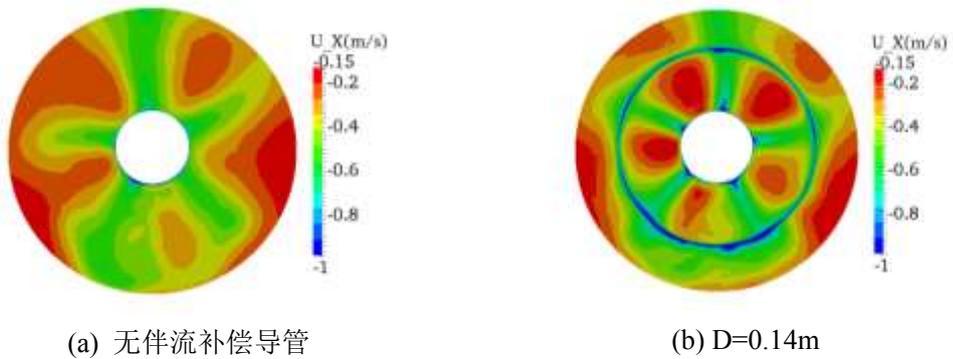


图 3-24 船艉压力图

Fig. 3-24 Pressure distribution at stern

由图 3-25 可以看出，加装补偿导管后，桨盘面进流更加均匀，流速有所增加，随着补偿导管进出口直径的减小，螺旋桨桨盘面进流的加速区域缩小。当平均直径 $D < 0.11\text{m}$ 时，桨盘面进流与无补偿导管的螺旋桨桨盘面进流相似，补偿导管的加速进流以及使桨盘面进流更加均匀的作用变得不明显。



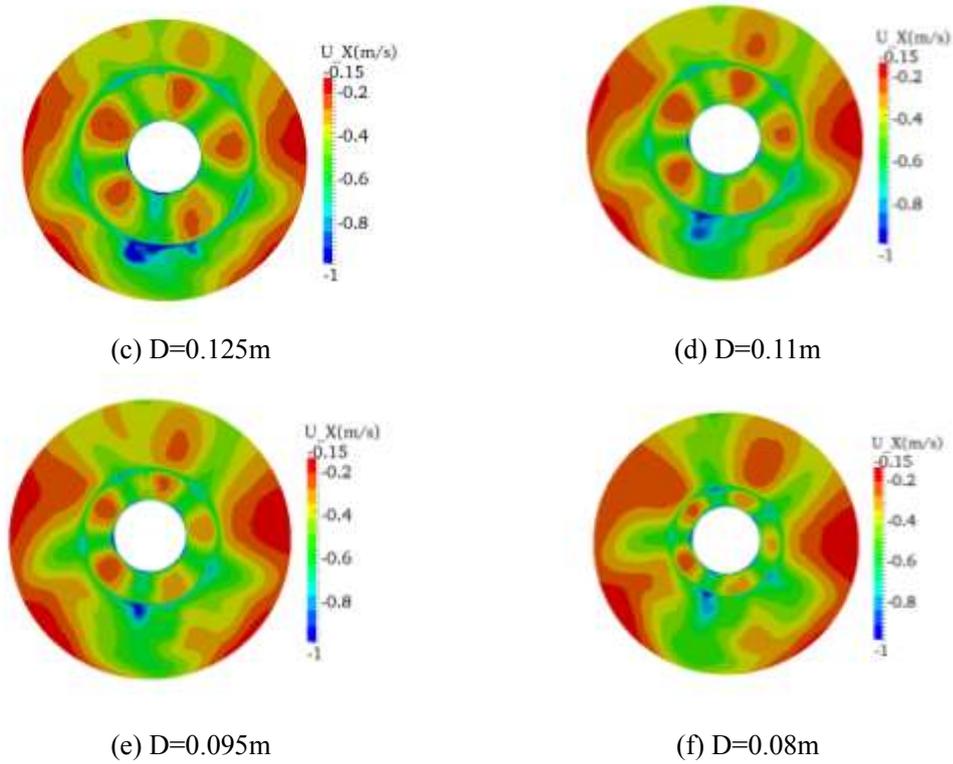
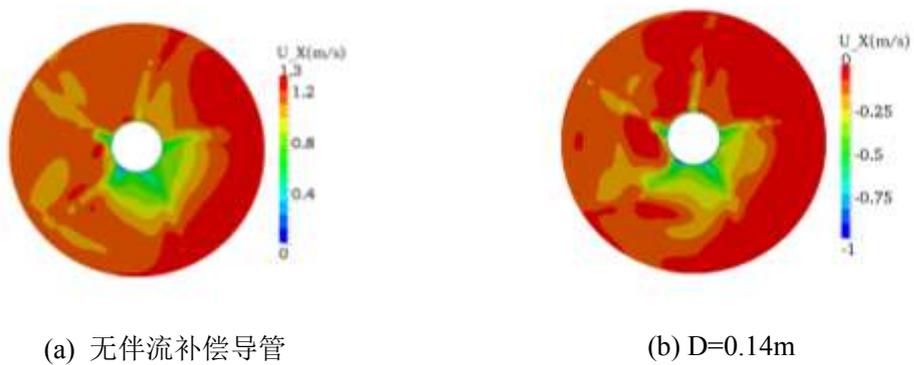


图 3-25 桨前伴流图

Fig. 3-25 Wake field before propeller

由图 3-26 可以看出，不同平均直径 D 的补偿导管后的螺旋桨尾流，其速度小于无补偿导管的螺旋桨尾流，说明螺旋桨后的尾流能量减少，补偿导管有明显的节能效果。随着补偿导管平均直径的减小，螺旋桨尾流的速度有一定程度的增大，表明尾流的能量损失增大，补偿导管的节能效果有一定的减小。



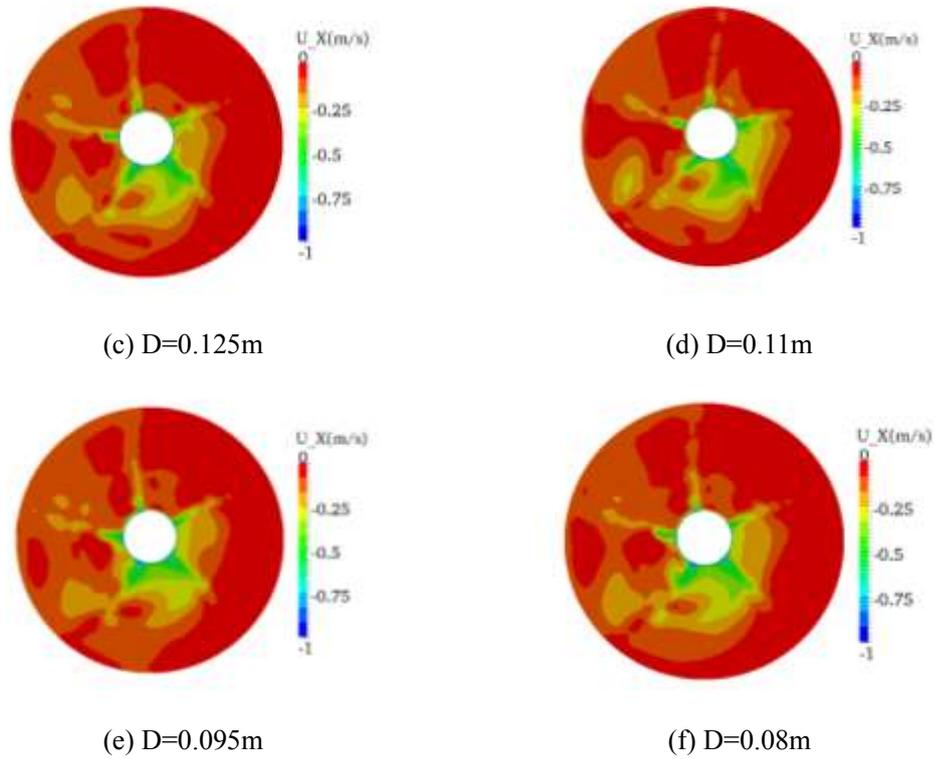
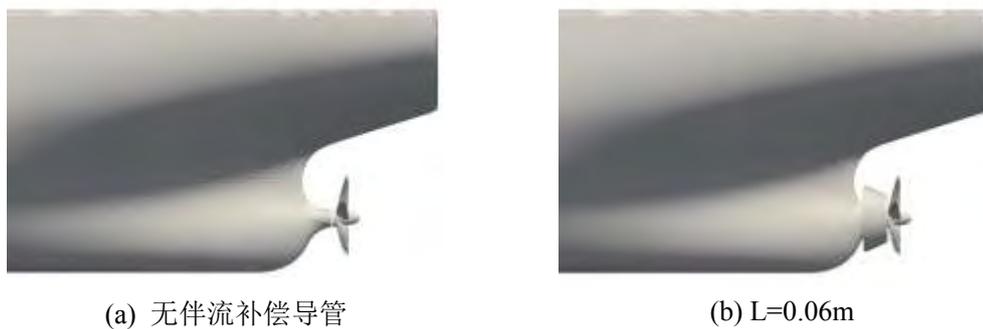


图 3-26 桨后伴流图

Fig. 3-26 Wake field after propeller

3.4.3 伴流补偿导管长度的影响

当伴流补偿导管的长度 L 变化时, 相应的模型如上一章所示, 这里不做赘述。仅列出安装不同长度 L 伴流补偿导管的 JBC 带桨数值计算模型, 如下图所示。



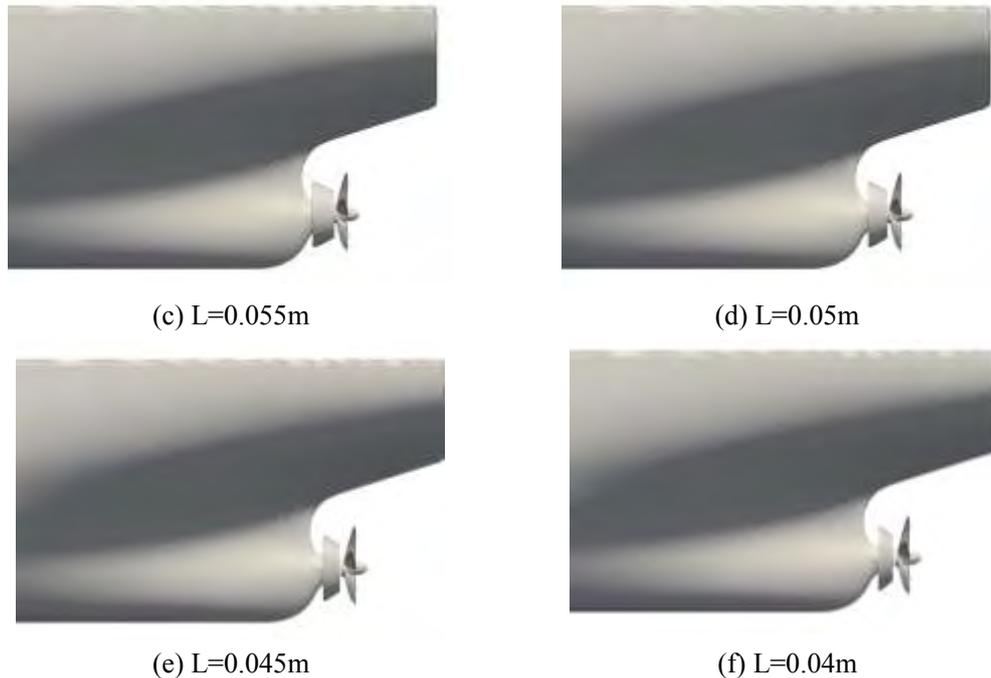


图 3-27 带桨船体模型图

Fig. 3-27 Model of JBC with propeller

本算例网格比 JBC 无桨拖航网格多了一套螺旋桨网格。其中，船体网格与背景网格和无桨拖航作用基本相同，螺旋桨网格可以捕捉螺旋桨尾流场以及保证螺旋桨扭矩的计算结果可靠性。计算域的坐标范围包括 $-1.0L_{pp} < x < 4.0L_{pp}$ ， $-1.5L_{pp} < y < 1.5L_{pp}$ ， $-1.0L_{pp} < z < 1.0L_{pp}$ 。 L_{pp} 为 JBC 的垂线间长。当伴流补偿导管的长度 L 变化时，由于伴流补偿导管尺寸有限，所以其变化对网格量的变化影响较小，因此，仅列出 $L=0.06m$ 时的网格量。带桨 JBC 的网格量情况如下表所示。

表 3-20 JBC 网格量

Table 3-20. Number of grids for JBC

	船体网格量	背景网格量	螺旋桨网格量	网格总量
无伴流补偿导管	1.45×10^6	1.93×10^6	1.44×10^6	4.82×10^6
补偿导管 $L=0.06m$	1.64×10^6	1.93×10^6	1.44×10^6	5.01×10^6

当伴流补偿导管的长度 D 介于 $0.04m \sim 0.06m$ 之间时，船尾部分网格图如下图所示。

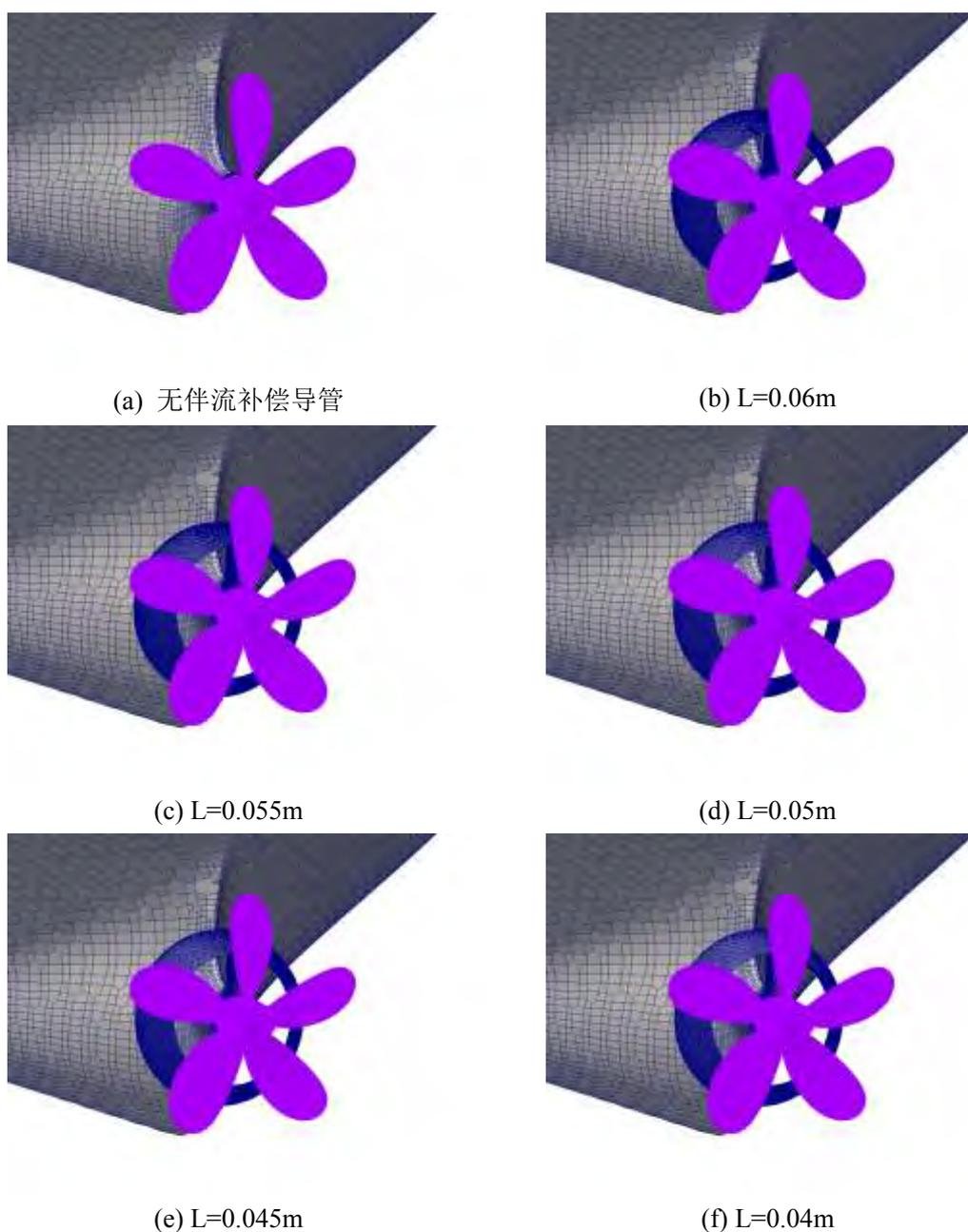


图 3-28 JBC 船体网格图

Fig. 3-28 Grids for JBC

伴流补偿导管的节能效果可以根据船体对螺旋桨功率的利用率来评价，可以有两种方法。一种是推进效率评价，即 $\eta_D = \frac{1-t}{1-\omega} \eta_0 \eta_R$ 。

表 3-21 伴流补偿导管节能效果评估

Table 3-21. Evaluation of energy saving effect of Wake Equalizing Duct

	W/O ESD	L=0.06m	L=0.055m	L=0.05m	L=0.045m	L=0.04m
$C_t (\times 10^{-3})$	4.405	4.382	4.379	4.385	4.389	4.391
K_T	0.201	0.217	0.215	0.216	0.216	0.217
$10K_Q$	0.232	0.240	0.239	0.244	0.248	0.252
$l-t$	0.918	0.922	0.919	0.918	0.918	0.917
$l-w$	0.519	0.448	0.450	0.446	0.446	0.443
η_0	0.488	0.449	0.452	0.446	0.441	0.433
η_R	1.004	0.996	0.994	0.995	0.992	0.994
N	7.8	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
η_D	0.866	0.919	0.923	0.913	0.902	0.887

另一种评价伴流补偿导管节能效果的方式是螺旋桨功率，即 $P_D = 2\pi nQ$ ，比较安装节能装置以及节能装置参数变化时螺旋桨收到功率的变化。

表 3-22 伴流补偿导管节能效果评估

Table 3-22. Evaluation of energy saving effect of Wake Equalizing Duct

伴流补偿导管布置	Q(N·m)	P(W)	ΔE
无伴流补偿导管	0.486	23.808	/
L=0.060m	0.469	22.100	7.17%
L=0.055m	0.464	21.865	8.16%
L=0.050m	0.471	22.195	6.78%
L=0.045m	0.476	22.430	5.79%
L=0.040m	0.491	23.137	2.82%

当伴流补偿导管的长度 L 减小时，伴流补偿导管的尺寸减小，导管进流在伴流补偿导管中的运动过程变得剧烈，会导致伴流补偿导管的整流及节能效果减弱。但是当伴流补偿导管的长度增大时，导管进流在伴流导管中的运动趋于缓和，而导管的阻力却会增大。因此，伴流补偿导管应该选择合适的长度 L ，使节能效果与阻力达到最佳匹配。导管过长或过短都会降低伴流补偿导管的节能效果。

由图 3-28 可以看出，补偿导管长度 L 介于 0.06m~0.04m 之间变化时，船艏的压力分布仅有微小的变化，基本保持不变。说明，补偿导管长度 L 在 0.06m~0.04m 之间变化时，对船艏压力分布几乎没有影响。

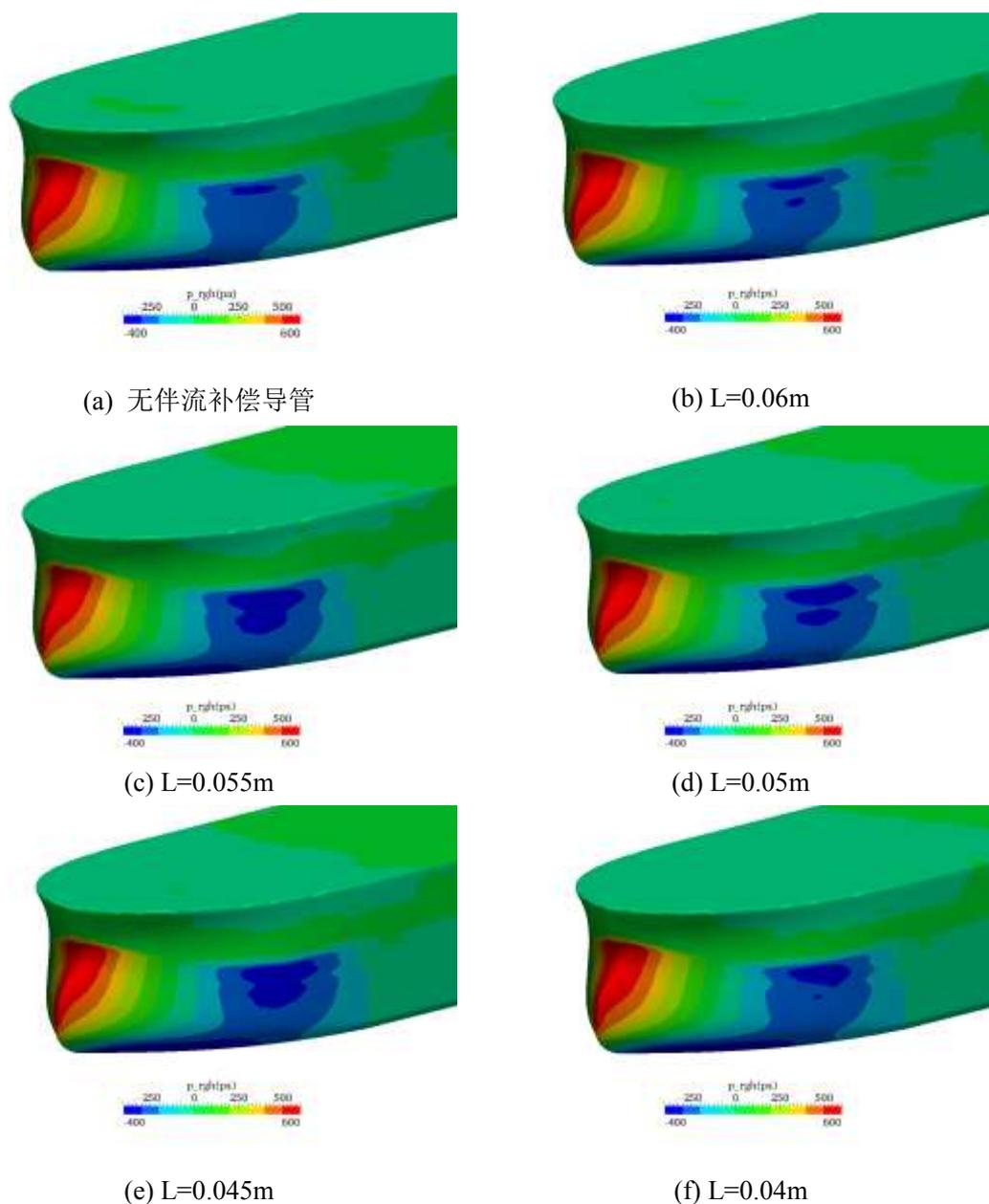


图 3-29 船艏压力图

Fig. 3-29 Pressure distribution at bow

由图 3-30 可以看出，补偿导管的长度变化对船尾压力和螺旋桨盘面压力分布有较为显著的影响。补偿导管长度 $L=0.06\text{m}\sim 0.055\text{m}$ 时，螺旋桨盘面压力明显小于无补偿导管螺旋桨盘面压力，当 $L=0.055\text{m}$ 时，船尾压力明显增大，产生了一定的附加推力。当 $L=0.05\text{m}\sim 0.04\text{m}$ 时，螺旋桨盘面压力增大，与无补偿导管

的螺旋桨桨盘面压力相比无明显减小，表明，此时螺旋桨要求的有效功率增大，补偿导管的节能效果减弱。

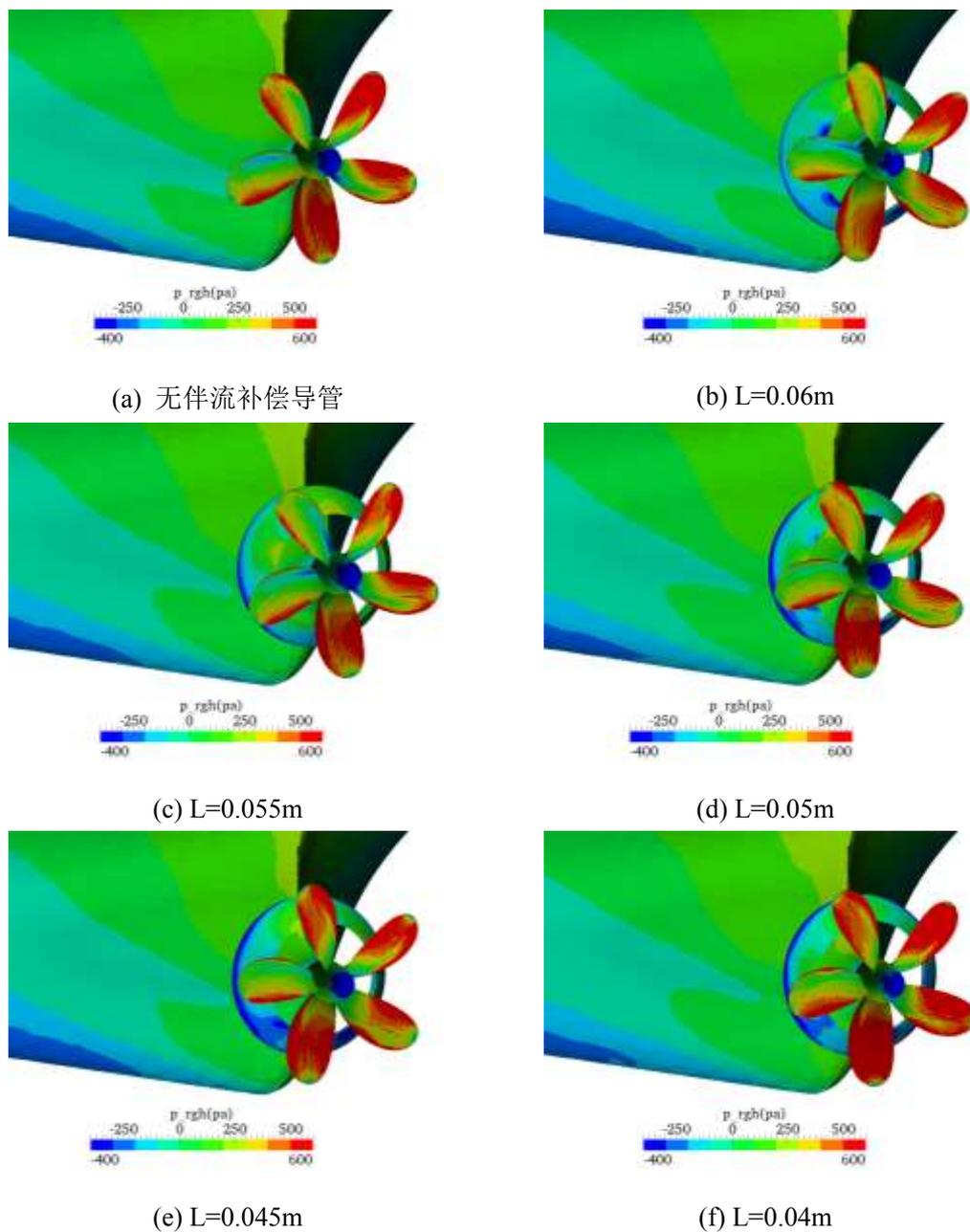


图 3-30 船艉压力图

Fig.3-30 Pressure distribution at stern

如图 3-31 所示，补偿导管长度介于 $0.06\text{m}\sim 0.04\text{m}$ 之间时，随着补偿导管长度的减小，螺旋桨桨盘面进流的速度也逐渐降低，说明随着补偿导管长度的减小，

补偿导管对螺旋桨盘面进流的加速作用也有所减弱，进流能量降低，补偿导管节能效果减弱。

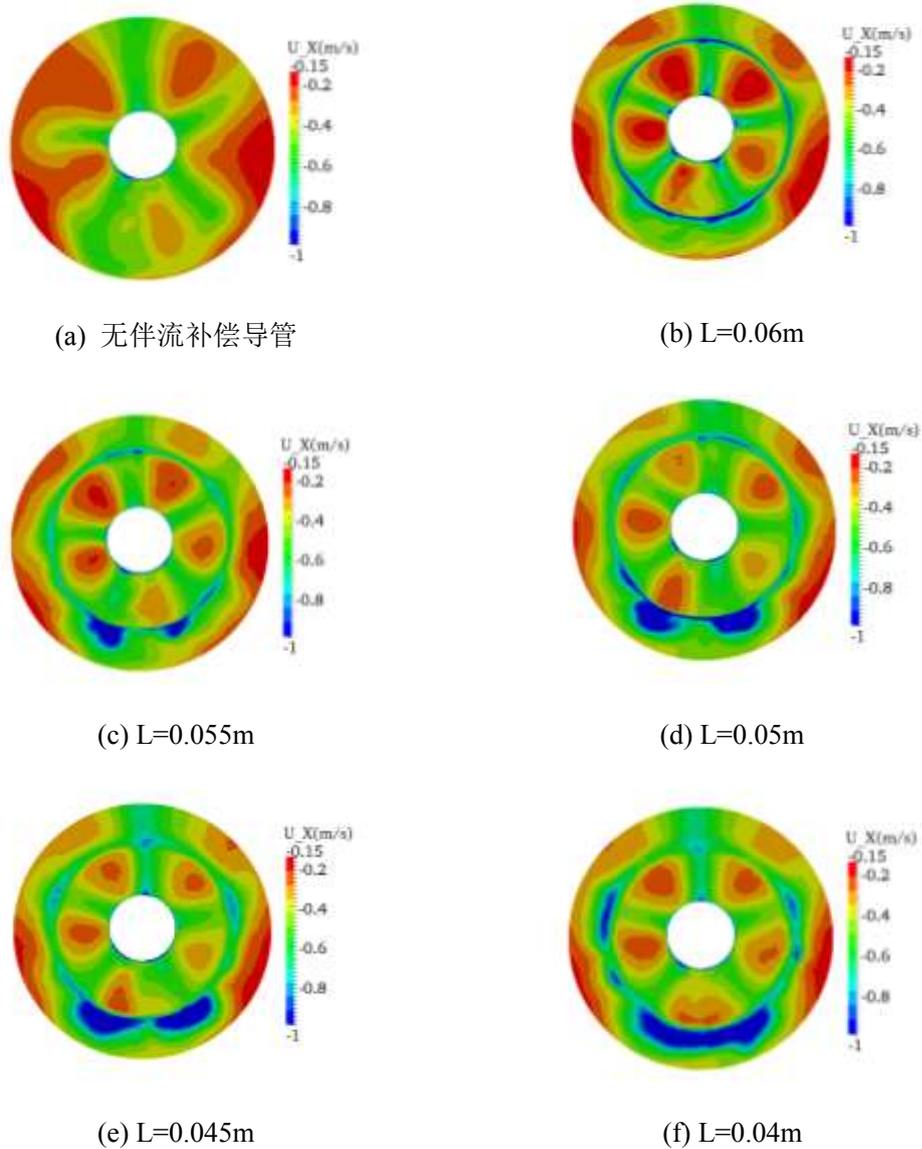


图 3-31 桨前伴流图

Fig.3-31 Wake field before propeller

如图 3-32 所示，补偿导管长度介于 $0.06\text{m}\sim 0.055\text{m}$ 之间时，螺旋桨盘面后的尾流速度比不装补偿导管的螺旋桨尾流速度明显减小，当补偿导管长度介于 $0.05\text{m}\sim 0.04\text{m}$ 时，螺旋桨后尾流的速度有所增大，与无补偿导管的螺旋桨后尾流相比无明显减小，说明此时螺旋桨后尾流能量损失较大，补偿导管节能效果欠佳。

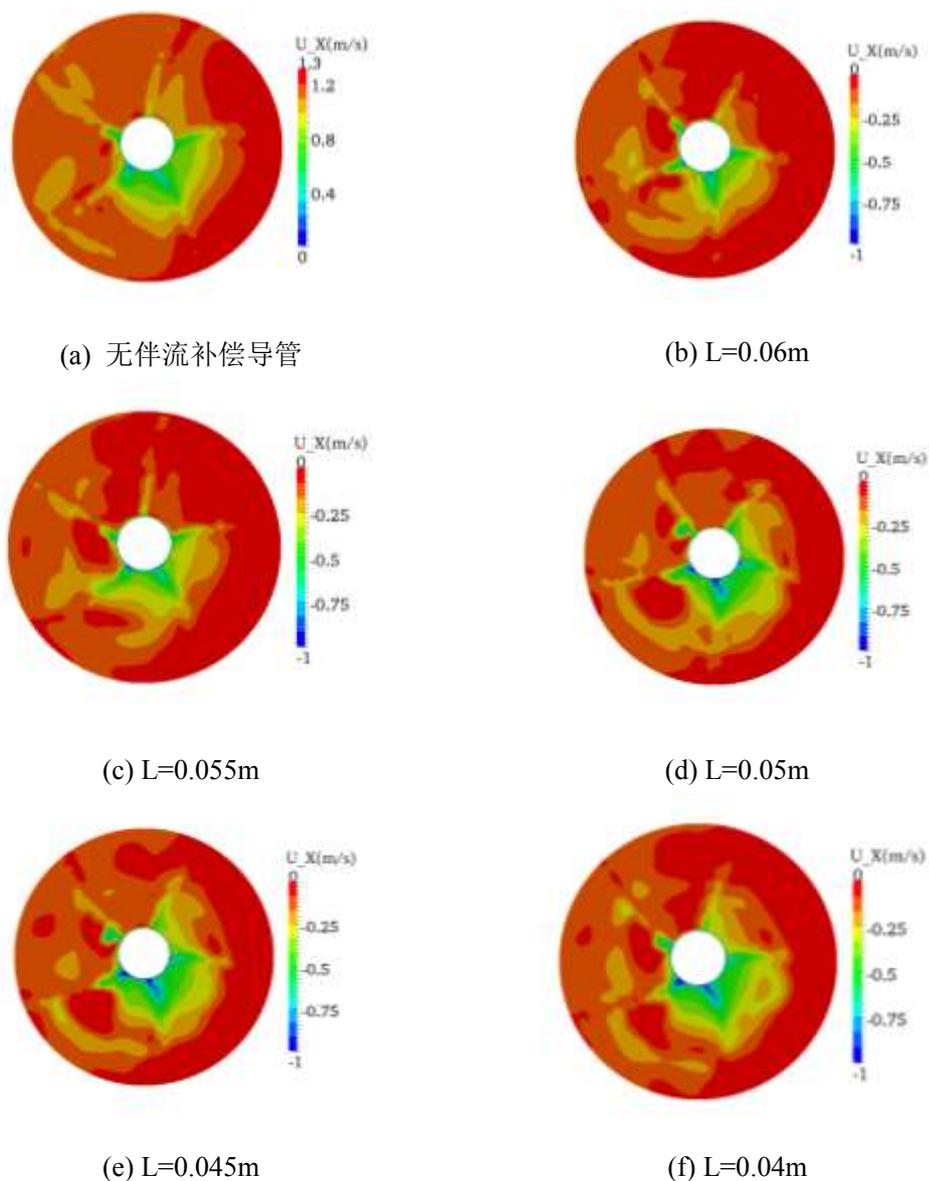


图 3-32 桨后伴流图

Fig. 3-32 Wake field after propeller

3.4.4 伴流补偿导管与螺旋桨间距的影响

当伴流补偿导管与螺旋桨之间的间距 Δ 变化时，相应的模型如 3.3.4 所示，这里不做赘述。仅列出安装与螺旋桨间距 Δ 不同伴流补偿导管的 JBC 带桨数值计算模型，如下图所示。

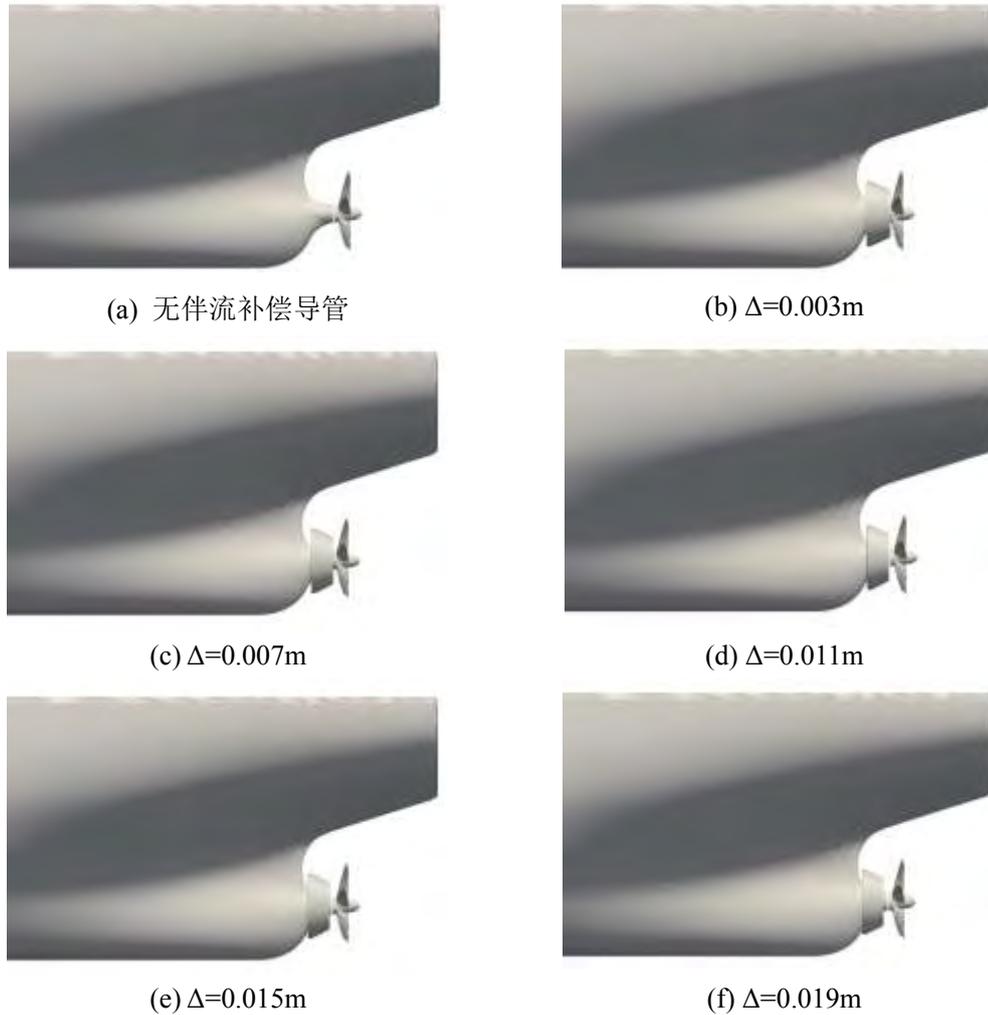


图 3-33 带桨船体模型图

Fig. 3-33 Model of JBC with propeller

本算例网格比 JBC 无桨拖航网格多了一套螺旋桨网格。其中，船体网格与背景网格和无桨拖航作用基本相同，螺旋桨网格可以捕捉螺旋桨尾流场以及保证螺旋桨扭矩的计算结果可靠性。计算域的坐标范围包括 $-1.0L_{pp} < x < 4.0L_{pp}$, $-1.5L_{pp} < y < 1.5L_{pp}$, $-1.0L_{pp} < z < 1.0L_{pp}$ 。 L_{pp} 为 JBC 的垂线间长。当伴流补偿导管与螺旋桨的间距 Δ 变化时，由于伴流补偿导管与螺旋桨的间距有限，所以其变化对网格量的变化影响较小，因此，仅列出 $\Delta=0.003\text{m}$ 时的网格量。带桨 JBC 的网格量情况如下表所示。

表 3-23 JBC 网格量

Table 3-23. Number of grids for JBC

	船体网格量	背景网格量	螺旋桨网格量	网格总量
无伴流补偿导管	1.45×10^6	1.93×10^6	1.44×10^6	4.82×10^6
补偿导管 $L=0.06\text{m}$	1.64×10^6	1.93×10^6	1.44×10^6	5.01×10^6

当伴流补偿导管与螺旋桨之间的间距 Δ 介于 $0.003\text{m} \sim 0.019\text{m}$ 之间时，船尾部分网格图如下图所示。

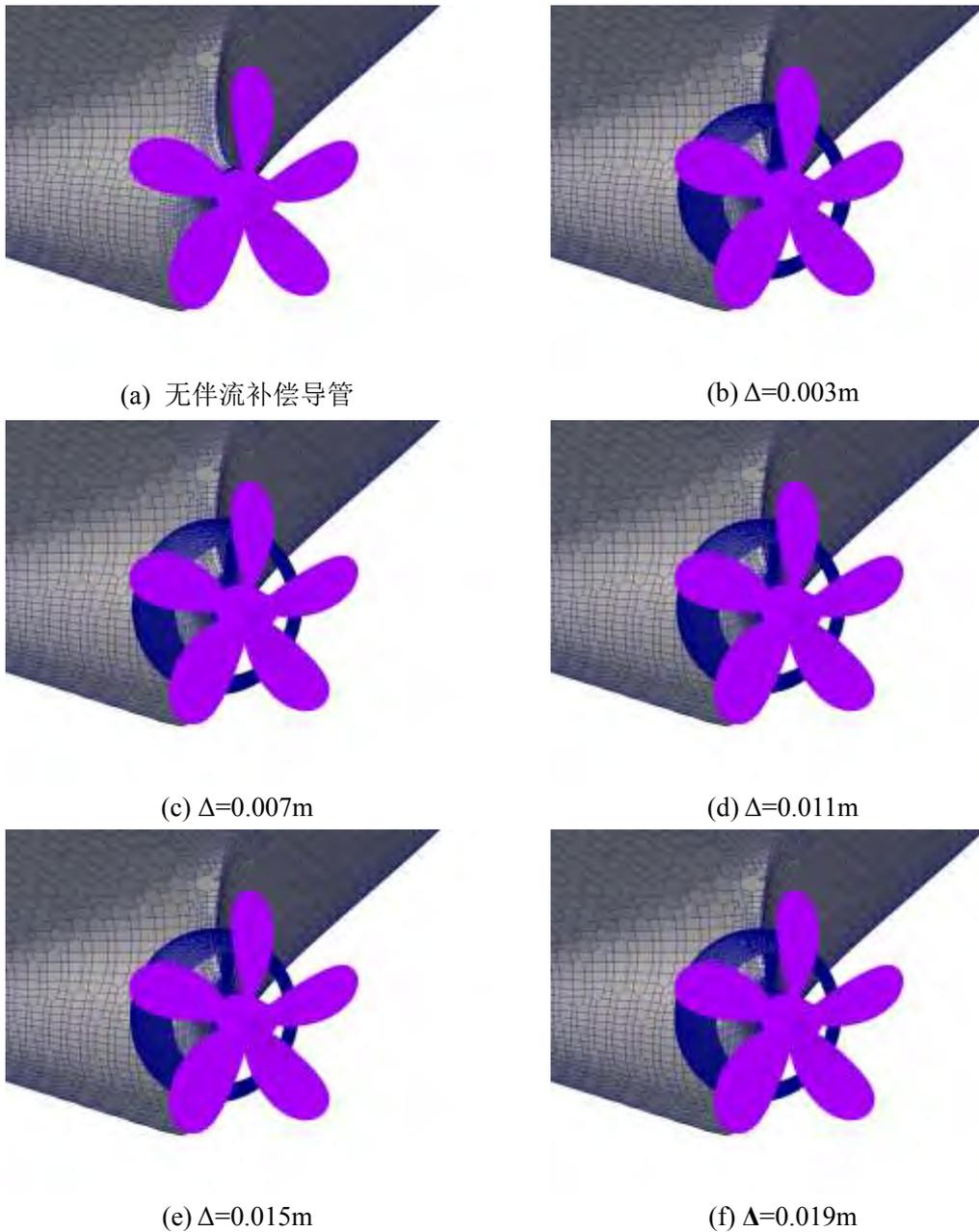


图 3-34 JBC 船体网格图

Fig. 3-34 Grids for JBC

伴流补偿导管的节能效果可以根据船体对螺旋桨功率的利用率来评价，可以有两种方法。一种是推进效率评价，即 $\eta_D = \frac{1-t}{1-\omega} \eta_0 \eta_R$ 。

表 3-24 伴流补偿导管节能效果评估

Table 3-24. Evaluation of energy saving effect of Wake Equalizing Duct

	W/O ESD	$\Delta=0.003\text{m}$	$\Delta=0.007\text{m}$	$\Delta=0.011\text{m}$	$\Delta=0.015\text{m}$	$\Delta=0.019\text{m}$
$C_t (\times 10^{-3})$	4.405	4.382	4.386	4.391	4.393	4.388
K_T	0.201	0.215	0.215	0.216	0.216	0.216
$10K_Q$	0.232	0.240	0.243	0.246	0.248	0.251
$l-t$	0.918	0.922	0.918	0.918	0.917	0.916
$l-w$	0.519	0.448	0.448	0.447	0.445	0.444
η_0	0.488	0.449	0.448	0.443	0.440	0.435
η_R	1.004	0.996	0.993	0.994	0.993	0.997
N	7.8	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
η_D	0.866	0.919	0.912	0.904	0.900	0.894

另一种评价伴流补偿导管节能效果的方式是螺旋桨功率，即 $P_D = 2\pi nQ$ ，比较安装节能装置以及节能装置参数变化时螺旋桨收到功率的变化。

表 3-25 伴流补偿导管节能效果评估

Table 3-25. Evaluation of energy saving effect of Wake Equalizing Duct

伴流补偿导管布置	Q(N·m)	P(W)	ΔE
无伴流补偿导管	0.486	23.808	/
$\Delta=0.003\text{m}$	0.469	22.100	7.19%
$\Delta=0.007\text{m}$	0.471	22.195	6.80%
$\Delta=0.011\text{m}$	0.477	22.477	5.61%
$\Delta=0.015\text{m}$	0.479	22.572	5.19%
$\Delta=0.019\text{m}$	0.486	22.902	3.80%

由表 3-24 与 3-25 可以看出，当伴流补偿导管与螺旋桨之间的间距 Δ 增大时，补偿导管整流后的水流在接触到桨盘面之前，有可能再次变得紊乱，减弱了伴流补偿导管的整流和加速效果，降低了伴流补偿导管的节能效果。

由图 3-35 可以看出，补偿导管与螺旋桨间隙 Δ 介于 0.003m~0.019m 之间变化时，船艏的压力分布仅有微小的变化，基本保持不变。说明补偿导管与螺旋桨之间间距 Δ 在 0.003m~0.019m 之间变化时，对船艏压力分布几乎没有影响

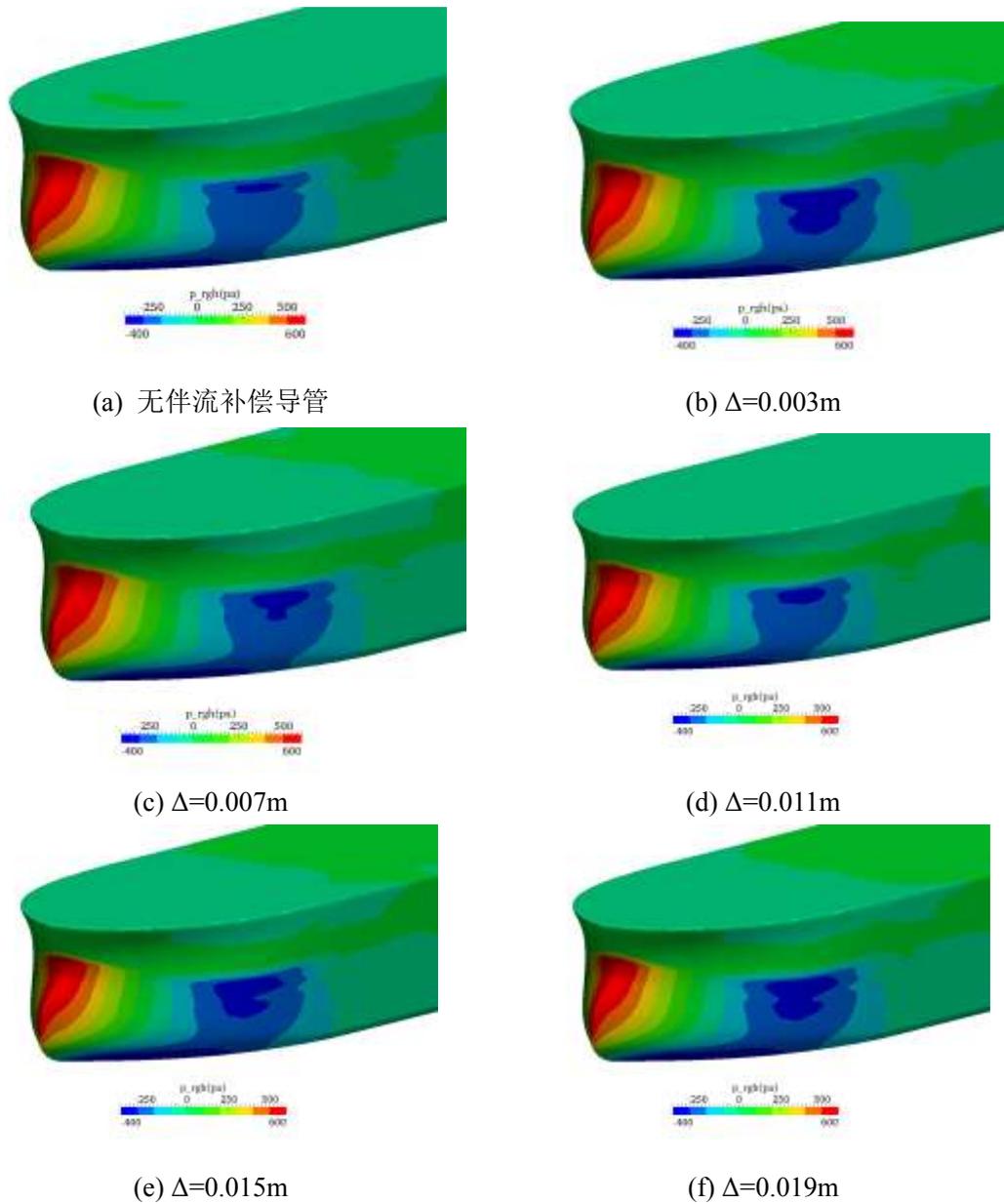


图 3-35 船艏压力图

Fig. 3-35 Pressure distribution at bow

如图 3-36 所示，补偿导管与桨间距 Δ 介于 0.003m~0.019m 之间变化时，螺旋桨表面载荷要小于无伴流补偿导管螺旋桨表面载荷，并且船尾压力有所增大，产生附加推力。表明补偿导管在此参数范围内具有节能效果。当导管与桨间距 Δ 介于 0.003m~0.007m 之间时，螺旋桨表面压力与无补偿导管的螺旋桨表面压力相比有明显减小。而导管与桨间距 Δ 介于 0.007m~0.019m 时，螺旋桨表面压力明显增

大，表明补偿导管与桨间距 Δ 介于 0.007m~0.019m 时，螺旋桨要求的有效功率增大，补偿导管节能效果降低。

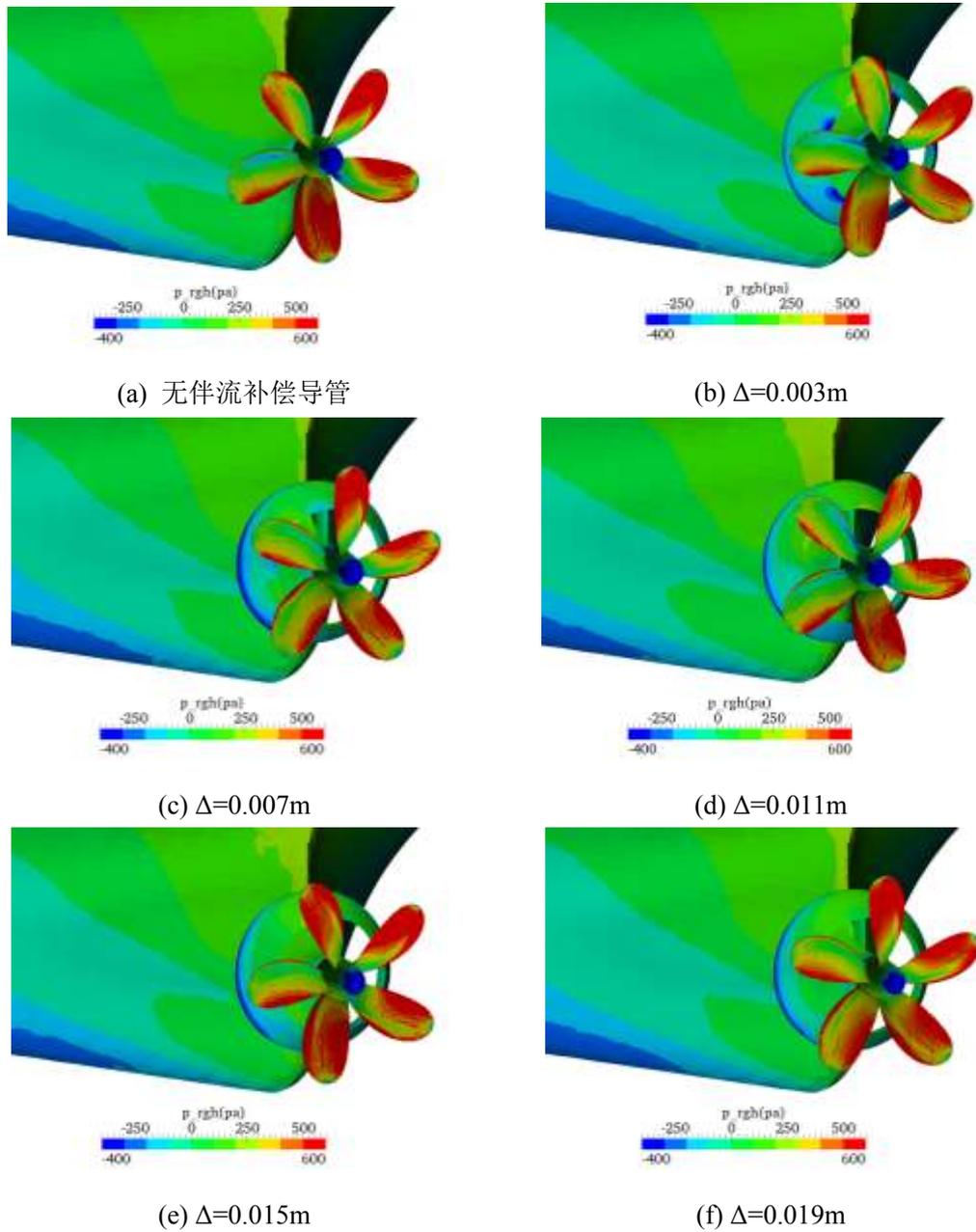


图 3-36 船尾压力图

Fig. 3-36 Pressure distribution at stern

如图 3-37 所示，随着补偿导管与桨间距 Δ 的增大，螺旋桨桨盘面进流速度减小，补偿导管对来流的加速效果降低。因为随着补偿导管与桨间距的增大，经补偿导管加速与整流的来流在补偿导管与桨的间隙处受到干扰，并产生能量的耗散，导致螺旋桨的实际进流速度降低。

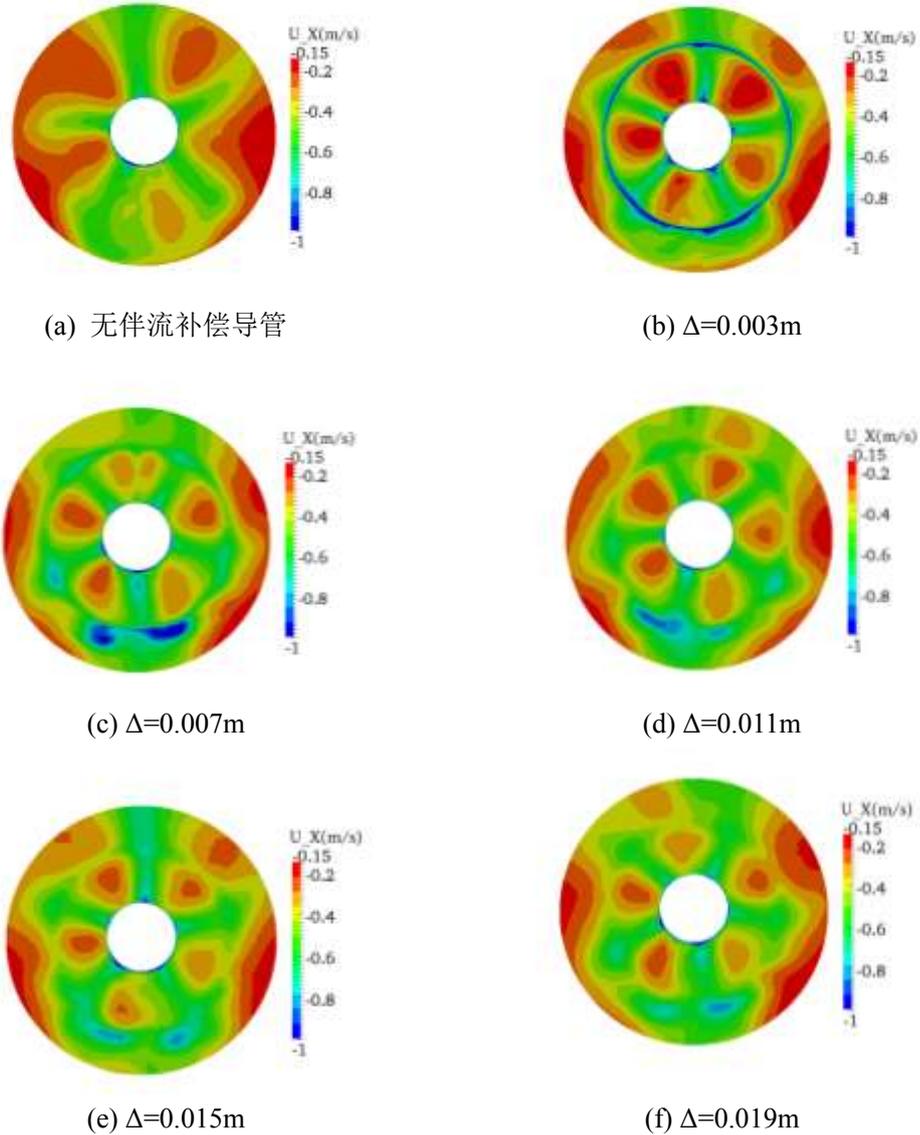


图 3-37 桨前伴流图

Fig. 3-37 Wake field before propeller

如图 3-38 所示，当补偿导管与螺旋桨间距 Δ 介于 $0.003\text{m}\sim 0.019\text{m}$ 之间时，螺旋桨桨后尾流的速度明显小于无补偿导管螺旋桨后的尾流速度，表明螺旋桨后尾

流能量损失减少，补偿导管的节能效果较为明显。当补偿导管与螺旋桨间距 Δ 介于 $0.011\text{m}\sim 0.019\text{m}$ 之间时，螺旋桨浆后尾流速度明显增大，与无补偿导管的螺旋桨浆后尾流相比，速度无明显降低，表明此时螺旋桨浆后尾流能量损失较大，补偿导管节能效果欠佳。

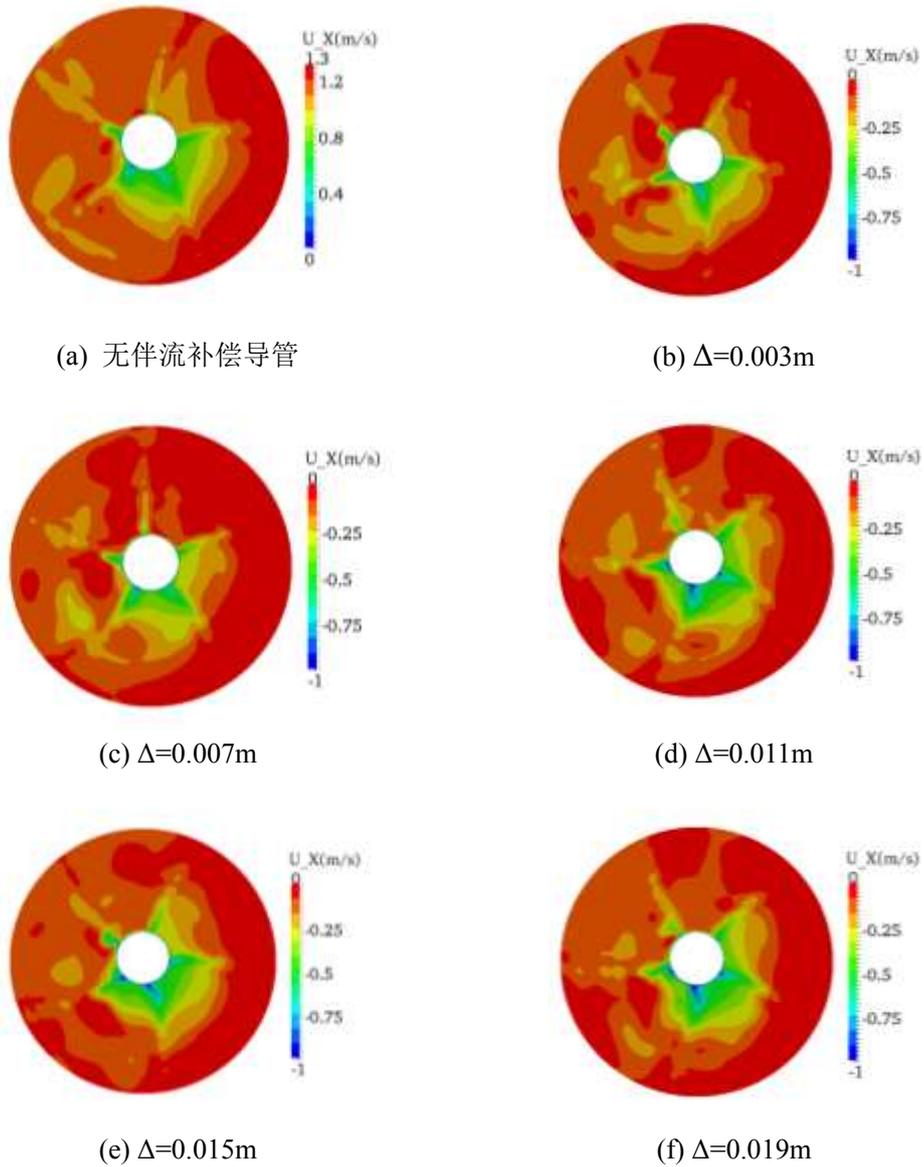


图 3-38 桨后伴流图

Fig. 3-38 Wake field after propeller

3.5 本章小结

本章通过万德成教授课题组自主开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 对伴流补偿导管的长度、进出口直径以及导管与螺旋桨之间的间距等参数对伴流补偿导管的节能效果的影响进行数值计算与研究。在计算中，通过评估螺旋桨推进效率和螺旋桨功率两种方法对伴流补偿导管的节能效果进行研究与分析，计算过程分为三个步骤，首先是进行螺旋桨敞水特性数值计算；第二步是进行 JBC 无桨拖航数值计算；第三步是进行 JBC 自航数值计算，得到伴流补偿导管不同参数条件下螺旋桨推进效率与螺旋桨功率^[55]。

经过数值计算与分析研究，得到以下结论：

- 1、伴流补偿导管的进流口直径不变，要使伴流补偿导管具有整流以及加速进流的效果，出流口直径要小于进流口直径，当出流口直径过小时，伴流补偿导管的节能效果会受到极大减弱，甚至没有节能效果。因为随着 D_1/D_2 值的增大，伴流补偿导管对进流的加速效果增强，但是实际的桨盘面进流面积却不断缩小，伴流增大，反过来又削弱了补偿导管的节能效果，当 $D_1/D_2=1.4$ 时，此时的进流加速效果和进流桨盘面积达到最佳状态，伴流补偿导管的节能效果最优。
- 2、伴流补偿导管的进出口直径同比例变化时，随着前后径的缩小，伴流补偿导管的节能效果减弱。因为伴流补偿导管的进出口直径比 D_1/D_2 不变，补偿导管对来流的加速效果基本不变，但是由于平均直径的减小，导致接受加速来流的桨盘面面积减小，伴流补偿导管的节能效果受到削弱。
- 3、伴流补偿导管的长度发生变化时， $L=0.055\text{m}$ 时节能效果最佳，长度过大与过小都会减弱伴流补偿导管的节能效果。当伴流补偿导管的长度 L 减小时，导管进流在伴流补偿导管中的加速过程变得剧烈，会导致伴流补偿导管的整流效果减弱；而过长的导管长度又会增大阻力。
- 4、伴流补偿导管与螺旋桨之间的间距发生变化时，随着间距的增大，伴流补偿导管的节能效果减弱。伴流补偿导管与螺旋桨之间的间距 Δ 增大时，补偿导管整流后的水流在接触到桨盘面之前，有可能再次变得紊乱，减弱了伴流补偿导管的整流和加速效果，降低了伴流补偿导管的节能效果。

第四章 前置预旋导管节能参数分析

4.1 引言

前置预旋导管安装在船尾螺旋桨前部，包括预旋定子和导管，其中预旋定子沿着导管的周向安装。它的主要作用是给来流一个和螺旋桨诱导速度相反的速度，削弱和打散船尾原来白白浪费掉的旋转能量。而且可以提高尾流的轴向速度，提高船尾的高压力区域^[56]。与伴流补偿导管类似，前置预旋导管也适用于方形系数大并且船尾肥大的船型。JBC 船作为一种典型的低速肥大船型，可以比较明显的体现前置预旋导管的节能效果。



图 4-1 前置预旋导管模型

Fig. 4-1 Model of pre-swirl duct

影响前置预旋导管的参数主要有前置预旋导管的长度以及定子的个数。本章针对前置预旋导管的长度以及定子个数对前置预旋导管节能效果的影响进行数值研究与分析。

与伴流补偿导管节能效果的评估方式类似，前置预旋导管的节能效果也可以通过推进效率和螺旋桨功率来评估，比较安装前置预旋导管以及前置预旋导管参数变化时螺旋桨推进效率和功率的变化。

前置预旋导管的算例参陪伴流补偿导管的算例进行配置，前置预旋导管的节能效果通过螺旋桨推进效率以及螺旋桨功率进行评价，计算推进效率时需要进行螺旋桨敞水数值计算，得到螺旋桨敞水特性曲线，其次需要对无桨 JBC 进行拖航数值计算，得到裸船体阻力及阻力系数。最后 JBC 进行自航数值计算，JBC 自航点等计算参数设置参考 2015 东京 CFD 研讨会标准算例，并根据数值结果计算得到 JBC 船身效率和螺旋桨输出功率，评价前置预旋导管的节能效果。螺旋桨敞水特性曲线已由上一章计算得到，在此不做重复介绍。

4.2 JBC 无桨拖航数值计算

计算不带桨拖航情况下的船体阻力不仅为后续推进效率的计算提供数据。而且不带桨拖航计算稳定收敛后的自由面流场可以作为为 JBC 自航数值计算初始化使用。JBC 无桨拖航计算的工况为：航速 $V=1.179\text{m/s}$ ， $Fr=0.142$ 以及 $Re=7.46\times 10^6$ ，计算所采用的湍流模型为 $k-\omega$ SST 模型。当前置预旋导管长度以及预旋定子个数等参数变化时，对安装参数不同的安装伴流补偿导管的 JBC 船进行无桨拖航计算，得到 JBC 裸船体的阻力情况。

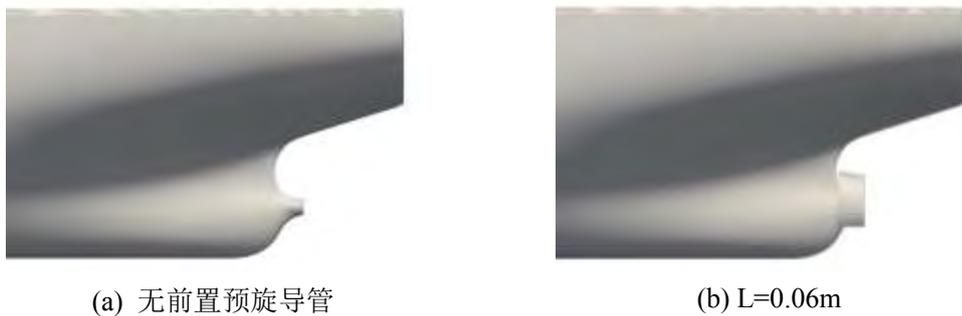
4.2.1 前置预旋导管长度的影响

前置预旋导管的长度是影响前置预旋导管节能效果的重要参数，在船尾的有限空间内，改变前置预旋导管的长度，使补偿导管长度 L 介于 $0.06\text{m}\sim 0.04\text{m}$ 之间，保持其它参数不变。前置预旋导管模型如下表所示。

表 4-1 前置预旋导管模型
Table 4-1. Model of pre-swirl duct

$L=0.06\text{m}$	$L=0.055\text{m}$	$L=0.05\text{m}$	$L=0.045\text{m}$	$L=0.04\text{m}$
				

当前置预旋导管的长度 L 发生变化时，安装不同长度 L 前置预旋导管的 JBC 模型如下图所示。



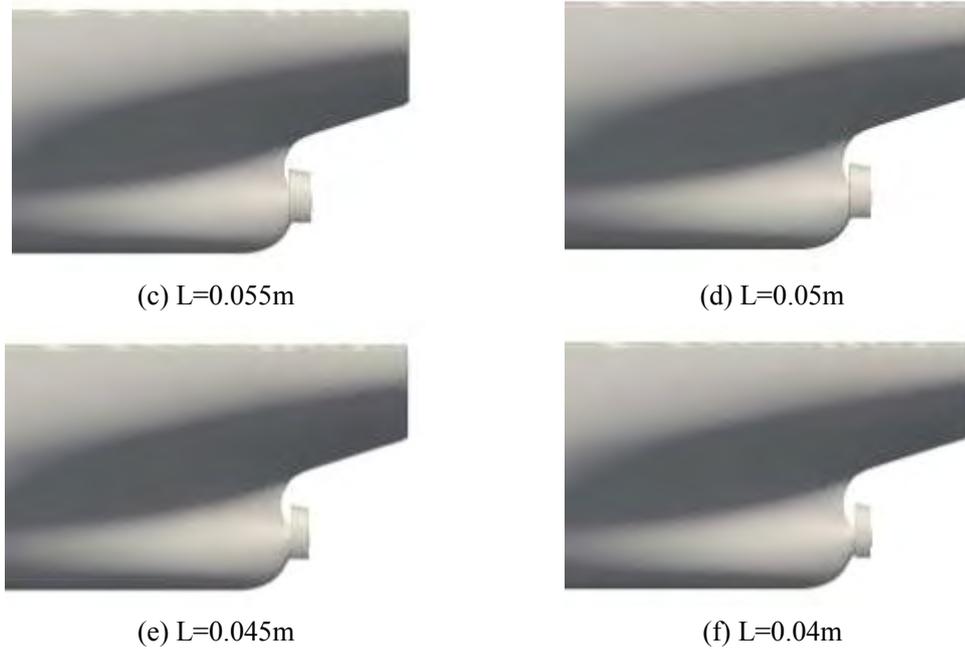


图 4-2 船体模型图

Fig. 4-2 Model of JBC

其中计算域布置以及计算域整体网格划分与上一章一致，这里不做重复介绍。仅给出安装不同长度 L 前置预旋导管 JBC 的局部网格。由于前置预旋导管长度 L 变化时，船体网格的变化很微小，因此仅给出 $L=0.06\text{m}$ 时的 JBC 无桨拖航网格量与局部网格图。

表 4-2 船体网格数量

Table. 4-2 Number of grids for JBC

	船体网格	背景网格	总数量
无前置预旋导管	1.40×10^6	1.33×10^6	2.73×10^6
$L=0.06\text{m}$	1.62×10^6	1.33×10^6	2.95×10^6

在画网格时，需要对前置预旋导管进行局部的加密，从而精确的捕捉前置预旋导管模型及其附近的流场变化。同时，因为船尾部分的伴流场对评估前置预旋导管的节能效果很重要，需要对船尾区域进行适当的加密，从而精确的捕捉船尾流场，准确的评估前置预旋导管的节能效果。

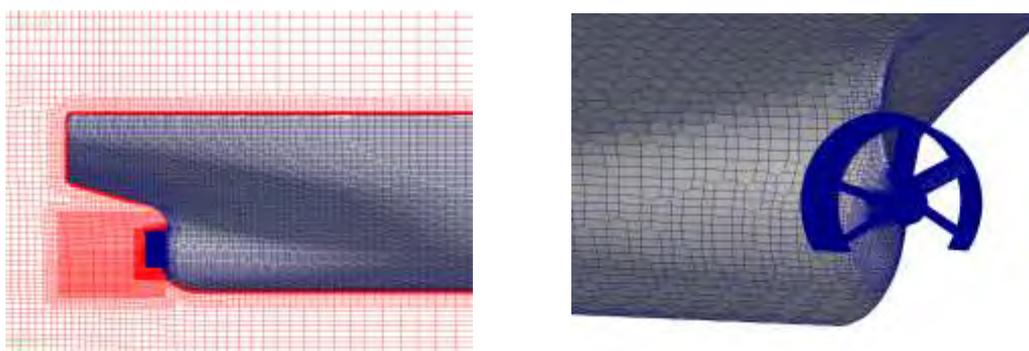


图 4-3 JBC 局部网格图

Fig. 4-3 Local grids for JBC

计算得到的 JBC 船体阻力系数如下表所示。由表中可以看出，当 $L=0.06\sim 0.055\text{m}$ 时，船体阻力系数降低，表明伴流补偿导管的节能效果增强。当 $L<0.055\text{m}$ 时，随着伴流补偿导管长度 L 的减小，船体阻力系数增大，伴流补偿导管的节能效果有所降低。得到 JBC 裸船体的阻力系数以后，需要对带桨的 JBC 进行数值计算，从而计算得到螺旋桨的推进效率。

表 4-3 JBC 船体阻力系数

Table 4-3. Resistance Coefficients of JBC

	$C_t \times 10^3$	$C_p \times 10^3$	$C_f \times 10^3$
无补偿导管	4.141	1.427	2.714
$L=0.060\text{m}$	4.103	1.404	2.699
$L=0.055\text{m}$	4.099	1.403	2.697
$L=0.050\text{m}$	4.098	1.402	2.696
$L=0.045\text{m}$	4.102	1.404	2.699
$L=0.040\text{m}$	4.109	1.406	2.703

4.2.2 前置预旋导管定子数量的影响

前置预旋导管的定子个数是影响前置预旋导管节能效果的重要参数，在前置预旋导管其它参数不变的情况下，改变前置预旋导管的预旋定子个数，预旋导管的定子个数介于 1~5 之间。前置预旋导管模型如下表所示。

表 4-4 前置预旋导管模型

Table 4-4. Model of pre-swirl duct

N=5	N=4	N=3	N=2	N=1
-----	-----	-----	-----	-----



当前置预旋导管的定子数量发生变化时，安装不同定子数量前置预旋导管的 JBC 模型如下图所示。

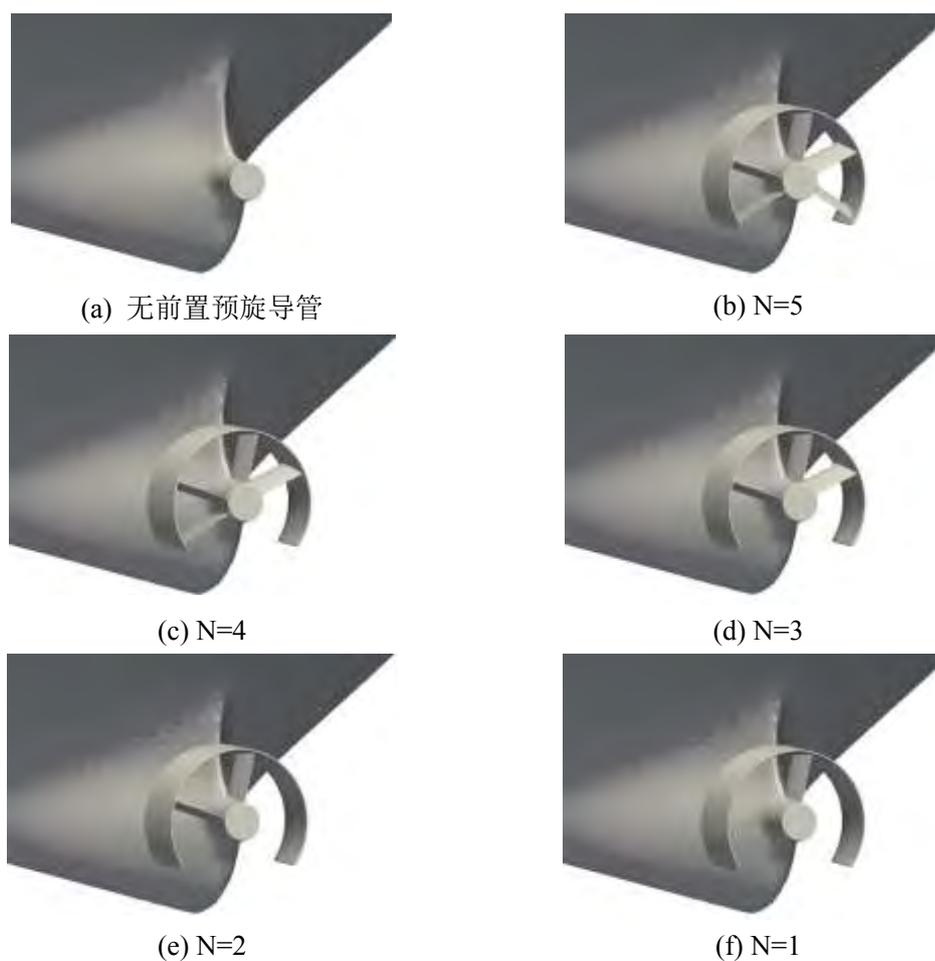


图 4-4 船体模型图

Fig. 4-4 Model of JBC

其中计算域布置以及计算域整体网格划分与上一章一致，这里不做重复介绍。仅给出安装不同预旋定子数量前置预旋导管 JBC 的局部网格。由于前置预旋导管定子个数变化时，船体网格的变化不明显，因此仅给出 $N=5$ 时的 JBC 无桨拖航网格量与局部网格图。

表 4-5 船体网格数量

Table 4-5 Number of grids for JBC

	船体网格	背景网格	总数量
无前置预旋导管	1.40×10^6	1.33×10^6	2.73×10^6
定子个数 N=5	1.61×10^6	1.33×10^6	2.94×10^6

在画网格时，需要对前置预旋导管进行局部的加密，从而精确的捕捉前置预旋导管模型及其附近的流场变化。同时，因为船尾部分的伴流场对评估前置预旋导管的节能效果很重要，需要对船尾区域进行适当的加密，从而精确的捕捉船尾流场，准确的评估前置预旋导管的节能效果^[58]。

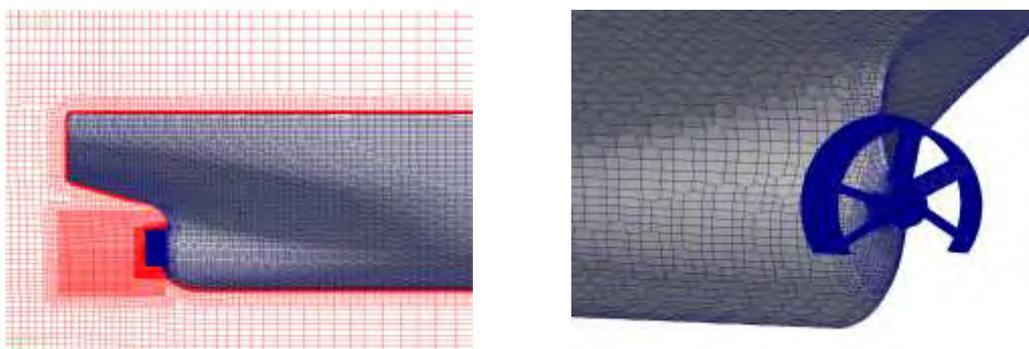


图 4-5 JBC 局部网格图

Fig. 4-5 Local grids for JBC

计算得到的 JBC 船体阻力系数如下表所示。由表中可以看出，当前置预旋导管的定子个数减少时，JBC 的船体阻力系数增大，表明随着前置预旋导管的减少，前置预旋导管的节能效果降低。得到 JBC 裸船体的阻力系数以后，需要对带桨的 JBC 进行数值计算，从而计算得到螺旋桨的推进效率。

表 4-6 JBC 船体阻力系数

Table 4-6. Resistance Coefficients of JBC

	$C_t \times 10^3$	$C_p \times 10^3$	$C_r \times 10^3$
无前置预旋导管	4.141	1.427	2.714
N=5	4.103	1.404	2.699
N=4	4.108	1.406	2.702
N=3	4.111	1.406	2.704
N=2	4.116	1.408	2.708

N=1	4.120	1.410	2.710
-----	-------	-------	-------

4.3 JBC 自航数值计算

本节对安装前置预旋导管的 JBC 进行自航数值计算。JBC 自航数值计算按照 2015 东京 CFD 研讨会标准算例进行配置，自航点为给定值。其中，计算的工况为：航速 $V=1.179\text{m/s}$ ， $Fr=0.142$ 以及 $Re=7.46\times 10^6$ ，计算所采用的湍流模型为 $k-\omega$ SST 模型。带前置预旋导管的 JBC 螺旋桨转速为 7.5r/s ，不带前置预旋导管的 JBC 螺旋桨转速为 7.8r/s 。无桨拖航计算收敛后的流场作为研究前置预旋导管节能效果的近似初始流场，可以节省大量的数值计算时间^[59]。

当前置预旋导管的长度以及与预旋定子个数等参数变化时，对安装参数不同的前置预旋导管的 JBC 船进行带桨数值计算，利用螺旋桨推进效率和螺旋桨功率两种方式评价伴流补偿导管节能效果。

4.3.1 前置预旋导管长度的影响

当前置预旋导管的长度 L 变化时，相应的模型如上一节所示，这里不做赘述。仅列出安装不同长度 L 前置预旋导管的 JBC 带桨数值计算模型，如下图所示。



(a) 无前置预旋导管



(b) $L=0.06\text{m}$



(c) $L=0.055\text{m}$



(d) $L=0.05\text{m}$



图 4-6 带桨船体模型图

Fig. 4-6 Model of JBC with propeller

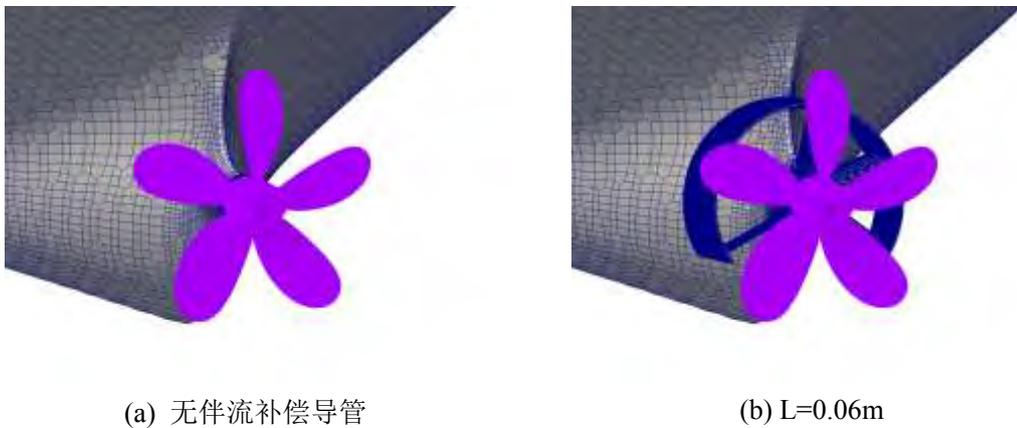
本算例网格比 JBC 无桨拖航网格多了一套螺旋桨网格。其中，船体网格与背景网格和无桨拖航作用基本相同，螺旋桨网格可以捕捉螺旋桨尾流场以及保证螺旋桨扭矩的计算结果可靠性。计算域的坐标范围包括 $-1.0L_{pp} < x < 4.0L_{pp}$ ， $-1.5L_{pp} < y < 1.5L_{pp}$ ， $-1.0L_{pp} < z < 1.0L_{pp}$ 。 L_{pp} 为 JBC 的垂线间长。当前置预旋导管的长度 L 变化时，由于前置预旋导管尺寸有限，所以其变化对网格量的变化影响较小，因此，仅列出 $L=0.06m$ 时的网格量。带桨 JBC 的网格量情况如下表所示。

表 4-7 JBC 网格量

Table 4-7. Number of grids for JBC

	船体网格量	背景网格量	螺旋桨网格量	网格总量
无前置预旋导管	1.45×10^6	1.93×10^6	1.44×10^6	4.82×10^6
$L=0.06m$	1.64×10^6	1.93×10^6	1.44×10^6	5.01×10^6

当前置预旋导管的长度 L 介于 $0.04m \sim 0.06m$ 之间时，船尾部分网格图如下图所示。



(a) 无伴流补偿导管

(b) $L=0.06m$

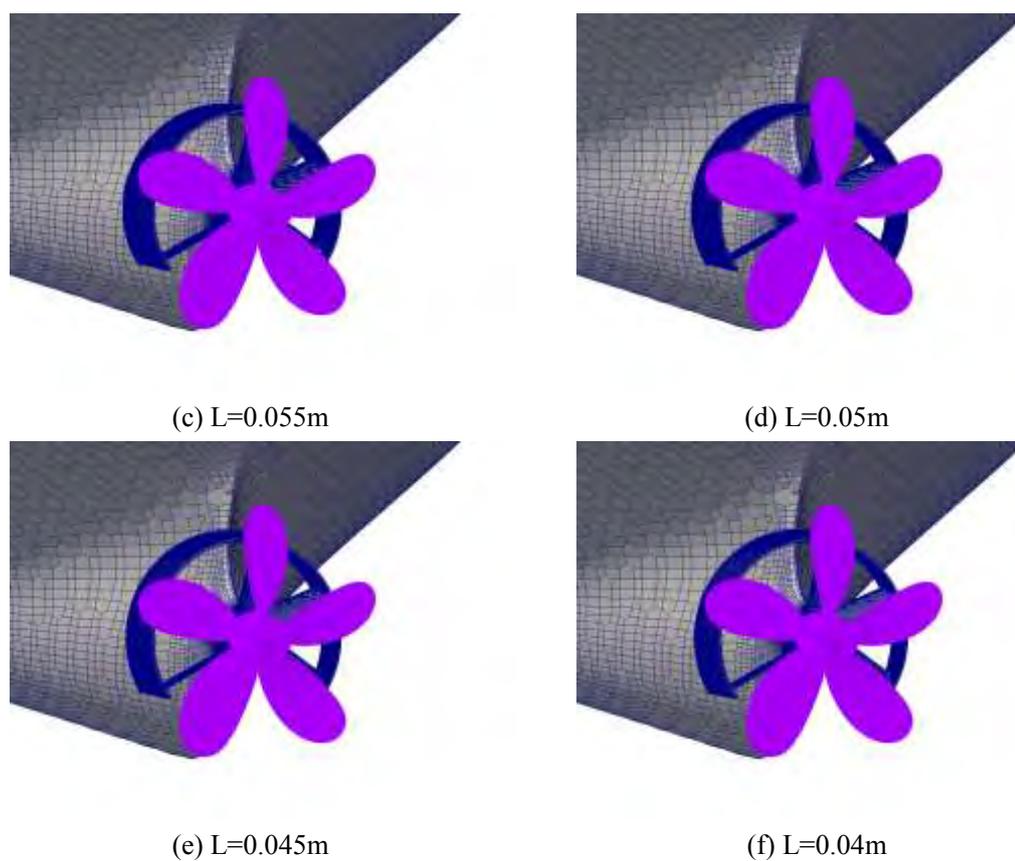


图 4-7 JBC 船体网格图

Fig. 4-7 Grids for JBC

伴流补偿导管的节能效果可以根据船体对螺旋桨功率的利用率来评价，可以有两种方法。一种是推进效率评价，即 $\eta_D = \frac{1-t}{1-\omega} \eta_0 \eta_R$ 。

表 4-9 前置预旋导管节能效果评估

Table 4-9. Evaluation of energy saving effect of pre-swirl duct

	W/O ESD	L=0.06m	L=0.055m	L=0.05m	L=0.045m	L=0.04m
$C_t (\times 10^{-3})$	4.405	4.379	4.375	4.373	4.378	4.385
K_T	0.201	0.217	0.216	0.216	0.215	0.218
$10K_Q$	0.232	0.243	0.242	0.241	0.244	0.249
$1-t$	0.918	0.922	0.920	0.920	0.919	0.918
$1-w$	0.519	0.448	0.449	0.445	0.445	0.442
η_0	0.488	0.448	0.451	0.450	0.446	0.439
η_R	1.004	0.998	0.997	0.998	0.996	0.995
n	7.8	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
η_D	0.866	0.920	0.922	0.929	0.916	0.906

另一种评价前置预旋导管节能效果的方式是螺旋桨功率，即 $P_D = 2\pi nQ$ ，比较安装前置预旋导管以及前置预旋导管参数变化时螺旋桨收到功率的变化。

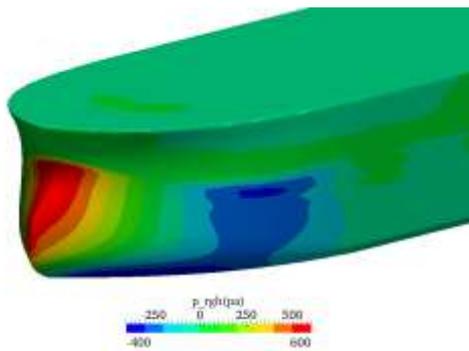
表 4-10 前置预旋导管节能效果评估

Table 4-10. Evaluation of energy saving effect of pre-swirl duct

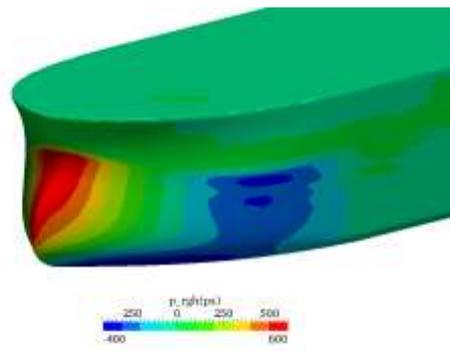
前置预旋导管布置	Q(N·m)	P(W)	ΔE
无前置预旋导管	0.486	23.808	/
L=0.060m	0.471	22.195	6.78%
L=0.055m	0.468	22.053	7.37%
L=0.050m	0.466	21.959	7.77%
L=0.045m	0.473	22.289	6.38%
L=0.040m	0.482	22.713	4.60%

当前置预旋导管的长度 L 减小时，预旋导管的阻力会减小，但是预旋导管长度的减小，又会导致预旋导管均匀伴流场和产生预旋流消除尾涡的作用减弱。当前置预旋导管长度 L 增大到一定值时，预旋导管均匀伴流场和产生预旋流消除尾涡的作用区域不变，而随着前置预旋导管长度的增大，其阻力则会不断增大。由表 4-9 与 4-10 可以看出，当 $L=0.05\text{m}$ 时，前置预旋导管的节能效果最好，即此时前置预旋导管均匀伴流场和产生预旋流消除尾涡的作用最强。

由下图可以看出，前置预旋导管长度 L 介于 $0.06\text{m}\sim 0.04\text{m}$ 之间变化时，船艏的压力分布仅有微小的变化，基本保持不变。说明，前置预旋导管长度 L 在 $0.06\text{m}\sim 0.04\text{m}$ 之间变化时，对船艏压力分布几乎没有影响。



(a) 无前置预旋导管

(b) 预旋导管长度 $L=0.06\text{m}$

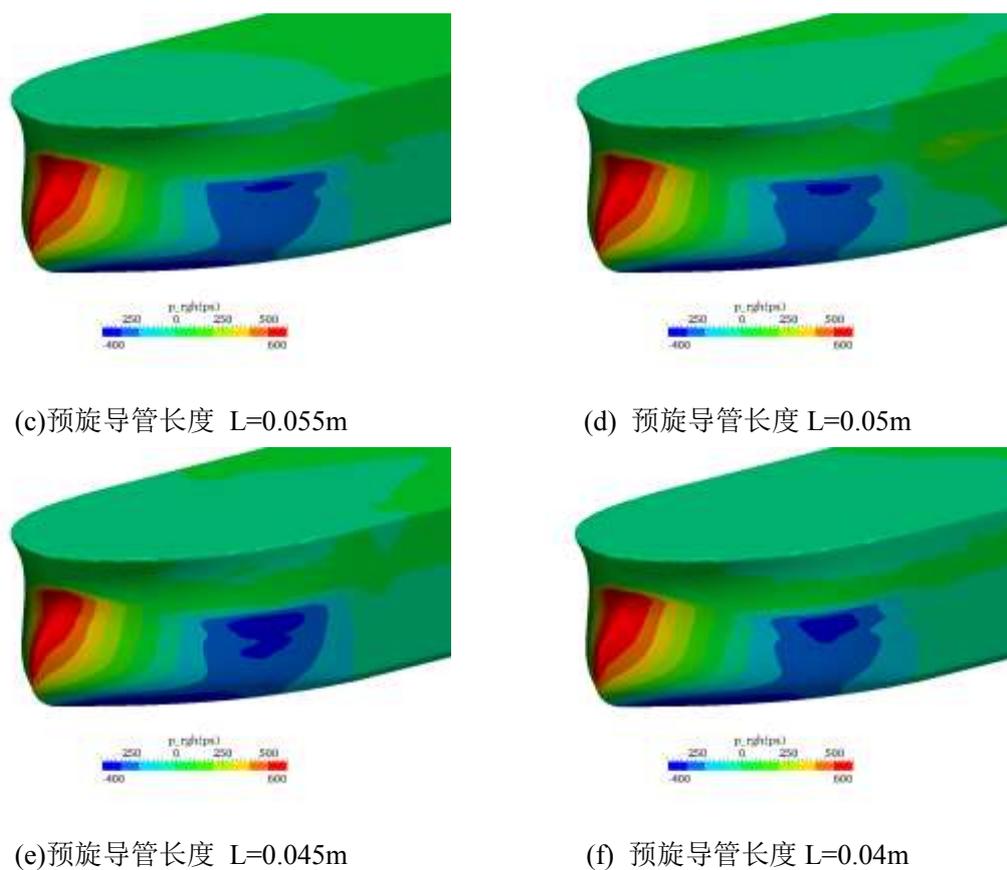


图 4-8 船艏压力分布图

Fig. 4-8 Pressure Distribution at bow

由下图可以看出，前置预旋导管的长度变化对船尾压力和螺旋桨桨盘面压力分布有较为显著的影响。补偿导管长度 $L=0.06\text{m}\sim 0.04\text{m}$ 时，螺旋桨桨盘面压力小于无补偿导管螺旋桨桨盘面压力。当 $L=0.06\text{m}\sim 0.05\text{m}$ 时，桨盘面压力逐渐减小，当 $L>0.05\text{m}$ 时，桨盘面的压力开始增大。即 $L=0.05\text{m}$ 时桨盘面压力最小，螺旋桨所荷载荷最小，所需功率最小。

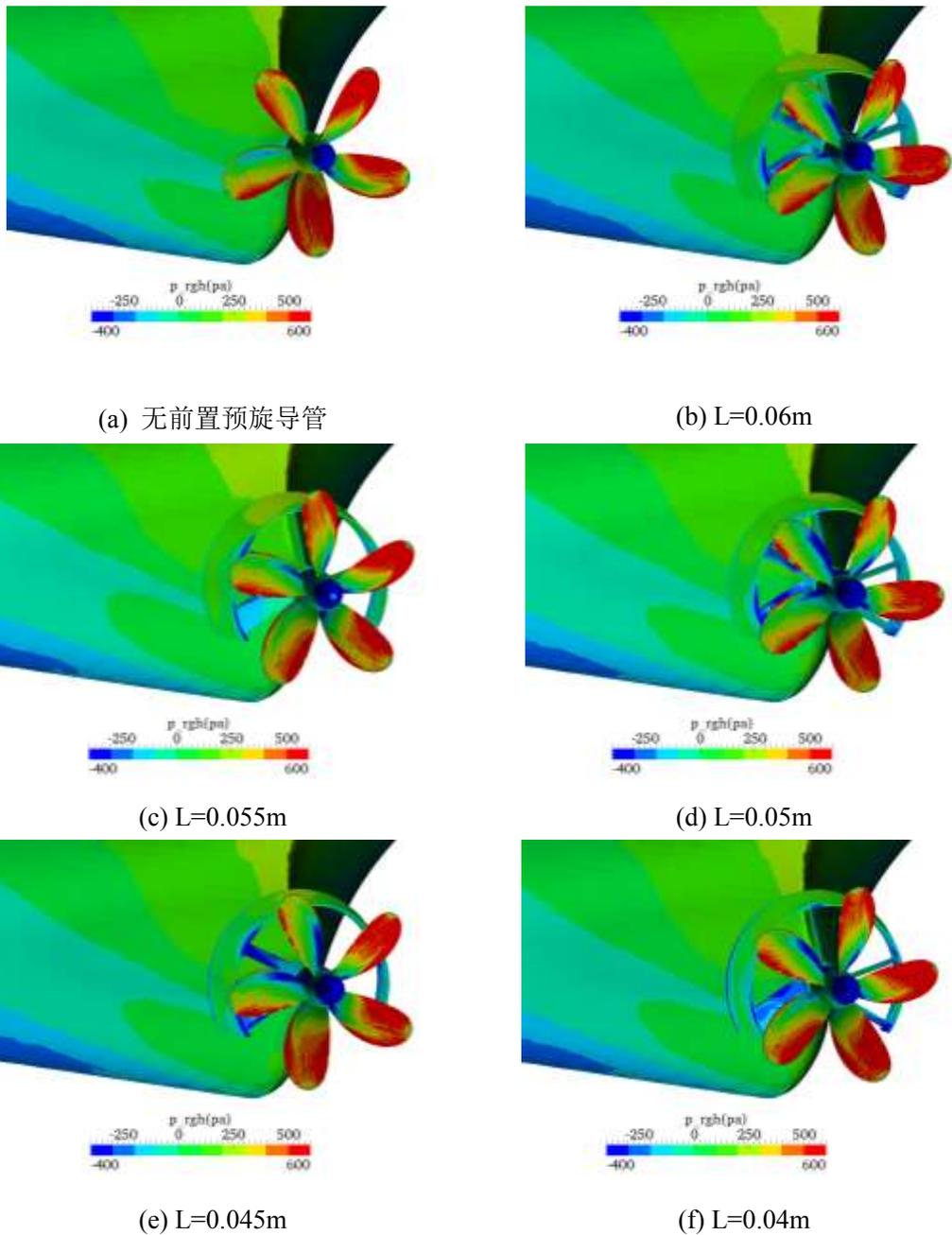


图 4-9 船尾压力分布图

Fig. 4-9 Pressure Distribution at stern

如下图所示，补偿导管长度介于 0.06~0.05m 之间时，随着补偿导管长度的减小，螺旋桨桨盘面进流的速度分布基本保持不变，表明 $L>0.05\text{m}$ 时，前置预旋导管均匀进流的作用趋于不变。而当 $L<0.05\text{m}$ 时，桨盘面进流开始变得散乱，进流速度有所降低，表明节能效果减弱。

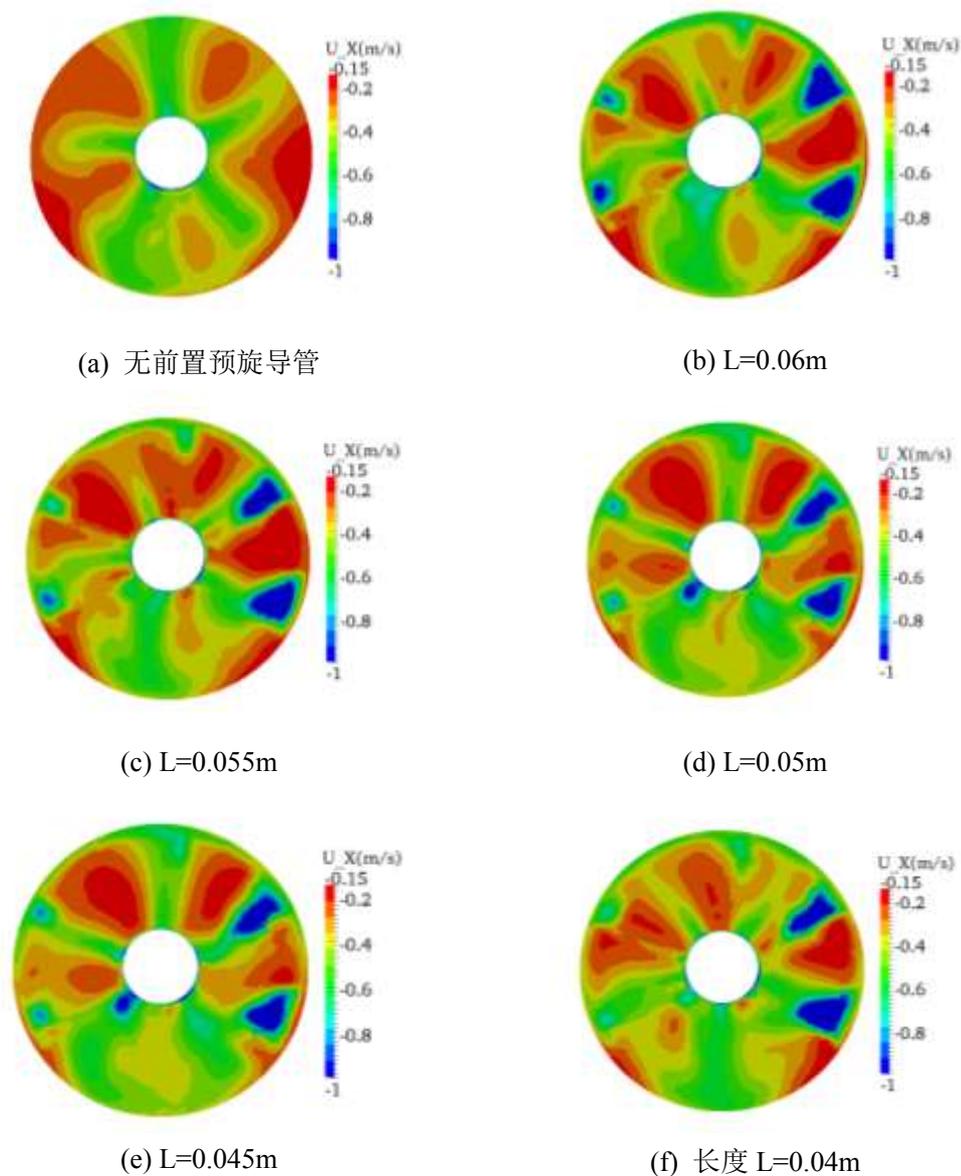


图 4-10 桨前尾流图

Fig. 4-10 Wake field before propeller

如下图所示，补偿导管长度介于 $0.06\text{m}\sim 0.05\text{m}$ 之间时，随着补偿导管长度的减小，螺旋桨桨盘面尾流的速度分布基本保持不变，表明 $L>0.05\text{m}$ 时，前置预旋导管预旋进流消除尾涡的作用趋于不变。而当 $L<0.05\text{m}$ 时，桨盘面尾流的速度开始变大，表明前置预旋导管预旋进流消除尾涡的作用减弱。

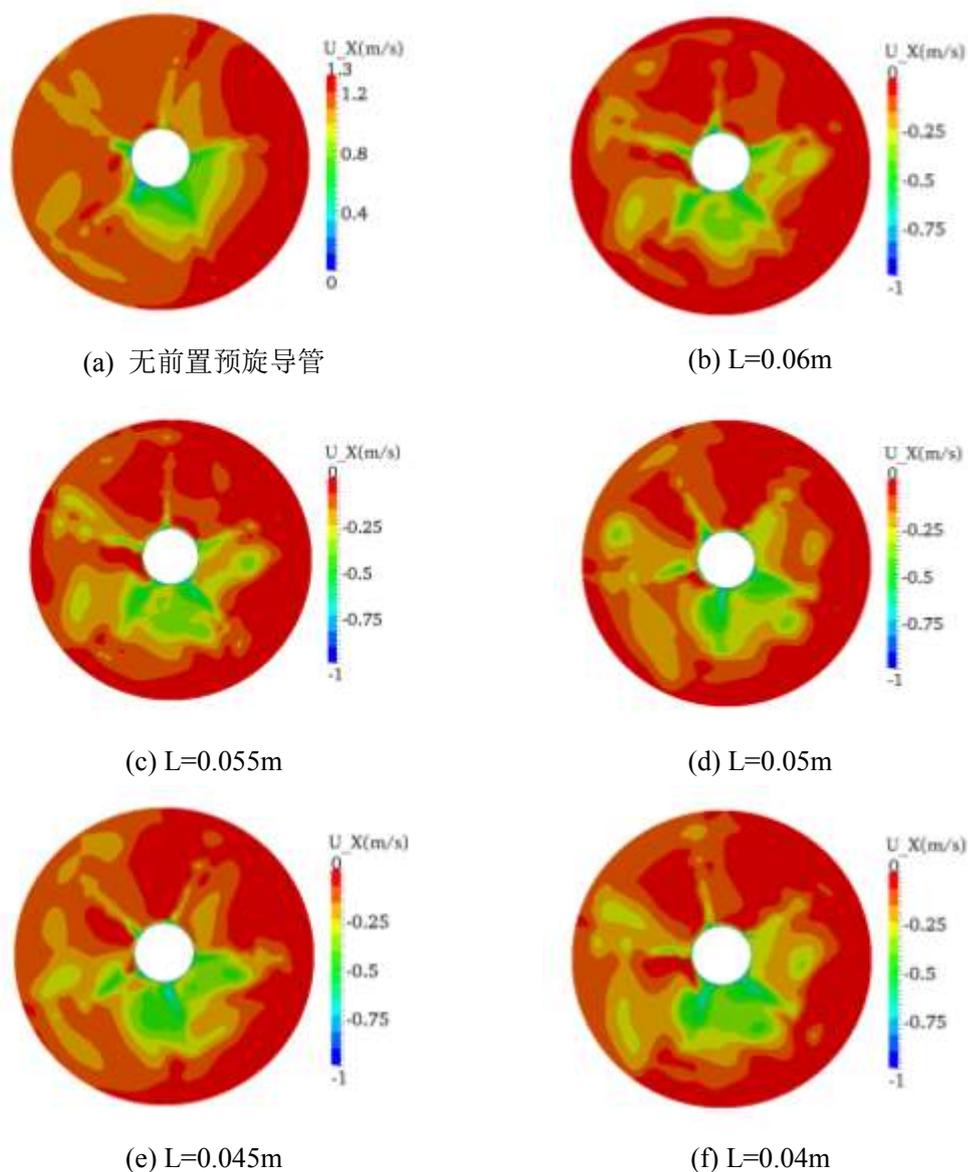


图 4-11 桨后尾流图

Fig. 4-11 Wake field after propeller

4.3.2 前置预旋导管定子数量的影响

当前置预旋导管的定子个数 N 发生变化时，相应的模型如上一节所示，这里不做赘述。仅列出安装不同定子个数 N 前置预旋导管的 JBC 带桨数值计算模型，如下图所示。

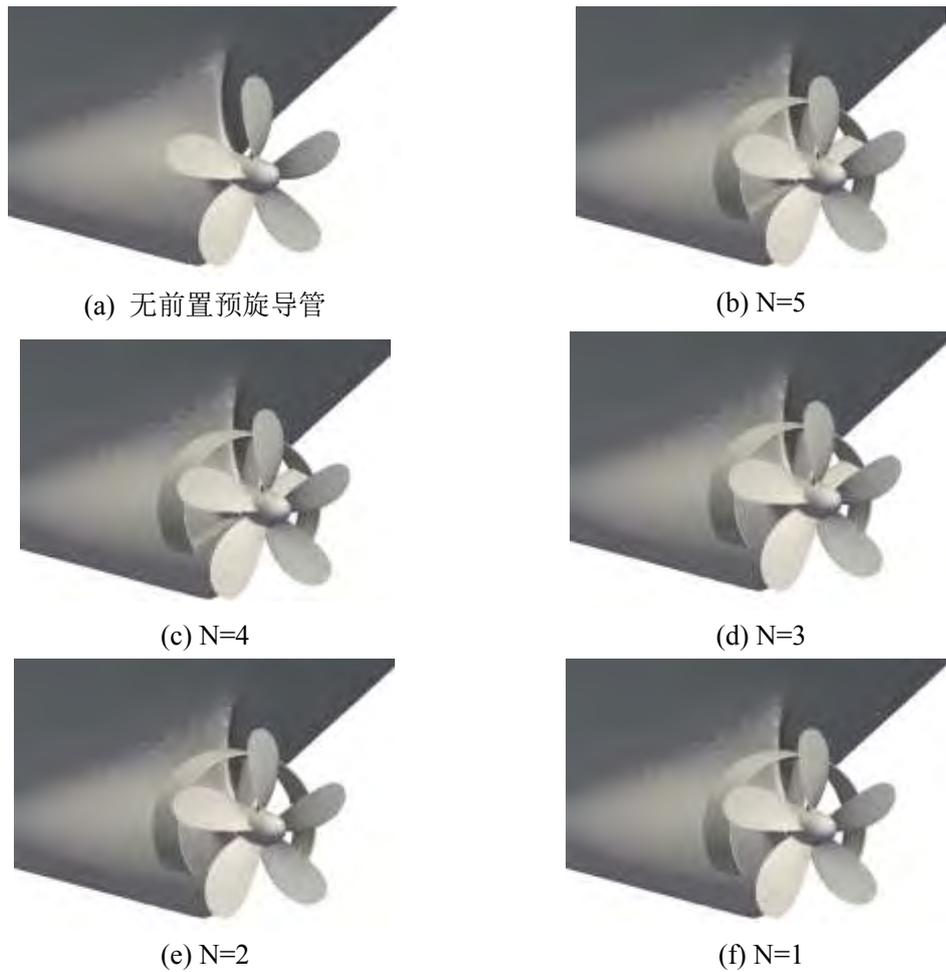


图 4-12 带桨船体模型图

Fig. 4-12 Model of JBC with propeller

本算例网格比 JBC 无桨拖航网格多了一套螺旋桨网格。其中，船体网格与背景网格和无桨拖航作用基本相同，螺旋桨网格可以捕捉螺旋桨尾流场以及保证螺旋桨扭矩的计算结果可靠性。计算域的坐标范围包括 $-1.0L_{pp} < x < 4.0L_{pp}$ ， $-1.5L_{pp} < y < 1.5L_{pp}$ ， $-1.0L_{pp} < z < 1.0L_{pp}$ 。 L_{pp} 为 JBC 的垂线间长。当前置预旋导管的定子个数 N 变化时，由于前置预旋导管尺寸有限，所以其变化对网格量的变化影响较小，因此，仅列出 $N=5$ 时的网格量。带桨 JBC 的网格量情况如下表所示。

表 4-11 JBC 网格量

Table 4-11. Number of grids for JBC

	船体网格量	背景网格量	螺旋桨网格量	网格总量
无前置预旋导管	1.45×10^6	1.93×10^6	1.44×10^6	4.82×10^6

定子个数 N=5	1.64×10^6	1.93×10^6	1.44×10^6	5.01×10^6
----------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------

当前置预旋导管的定子个数 N 介于 1~5 之间时, 船尾部分网格图如下图所示。

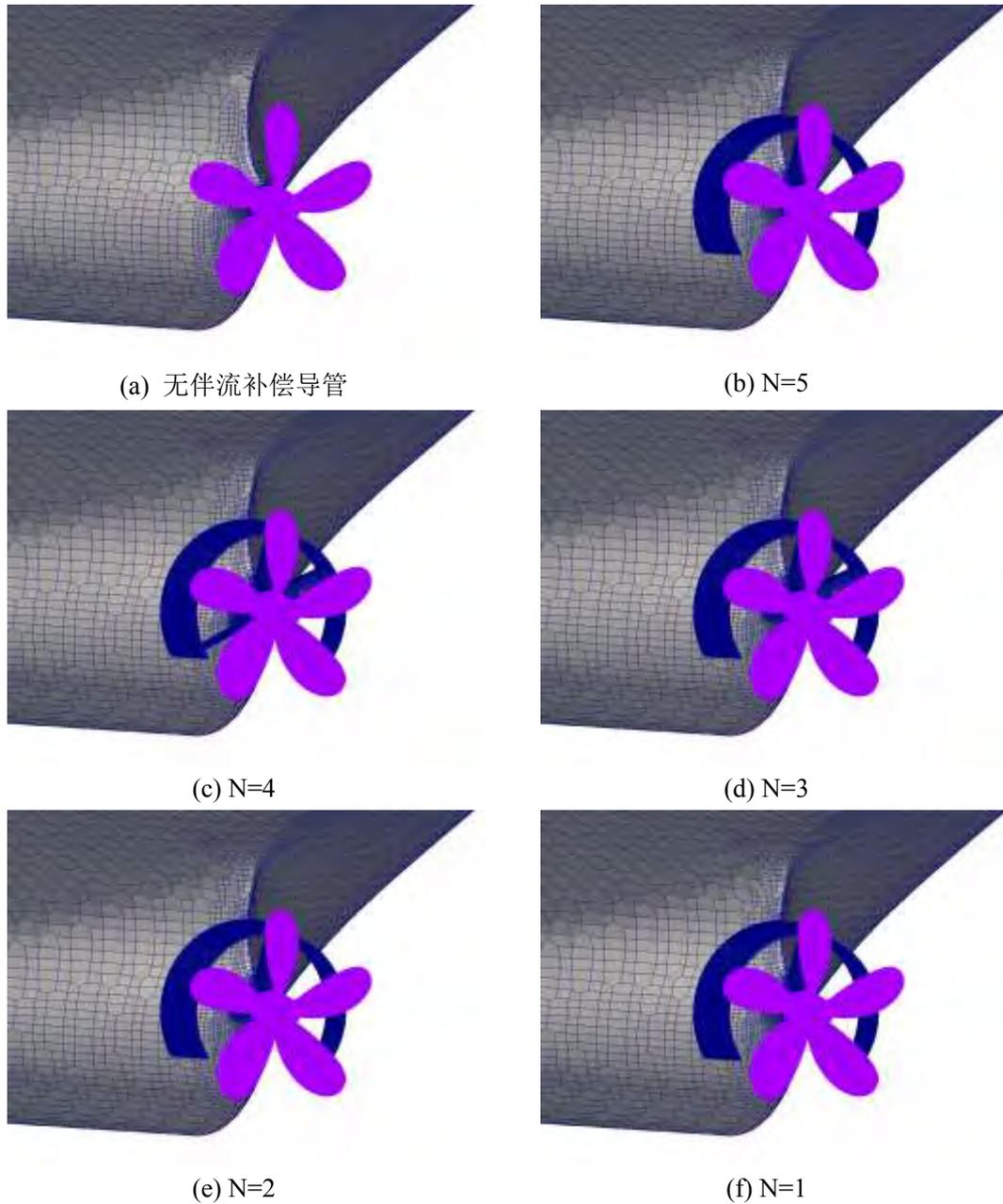


图 4-14 JBC 船体网格图

Fig. 4-14 Grids for JBC

伴流补偿导管的节能效果可以根据船体对螺旋桨功率的利用率来评价, 可以

有两种方法。一种是推进效率评价，即 $\eta_D = \frac{1-t}{1-\omega} \eta_0 \eta_R$ 。

表 4-12 伴流补偿导管节能效果评估

Table 4-12. Evaluation of energy saving effect of Wake Equalizing Duct

	W/O ESD	N=5	N=4	N=3	N=2	N=1
$C_t (\times 10^{-3})$	4.405	4.379	4.384	4.387	4.393	4.397
K_T	0.201	0.215	0.216	0.216	0.216	0.217
$10K_Q$	0.232	0.243	0.244	0.247	0.250	0.252
$l-t$	0.918	0.922	0.918	0.918	0.918	0.917
$l-w$	0.519	0.448	0.447	0.446	0.444	0.443
η_0	0.488	0.448	0.446	0.441	0.435	0.431
η_R	1.004	0.998	0.994	0.995	0.992	0.994
n	7.8	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
η_D	0.866	0.920	0.910	0.903	0.891	0.887

另一种评价前置预旋导管节能效果的方式是螺旋桨功率，即 $P_D = 2\pi nQ$ ，比较安装节能装置以及节能装置参数变化时螺旋桨功率的变化。具体计算结果如下表所示。

表 4-13 伴流补偿导管节能效果评估

Table 4-13. Evaluation of energy saving effect of Wake Equalizing Duct

前置预旋导管布置	Q(N·m)	P(W)	ΔE
无前置预旋导管	0.486	23.808	/
N=5	0.471	22.195	6.78%
N=4	0.473	22.289	6.38%
N=3	0.478	22.525	5.39%
N=2	0.484	22.807	4.20%
N=1	0.488	22.996	3.41%

由表 4-12 和表 4-13 的结果可以看出，当前置预旋导管的预旋定子个数减少时，由于前置预旋导管的预旋进流减少尾涡的作用减弱，前置预旋导管的节能效果减弱，螺旋桨推进效率降低，功率增大。

当前置预旋导管的定子个数 N=1~5 时，JBC 船艏的压力分布基本保持不变，表明船尾安装的前置预旋导管的定子个数变化对船艏压力分布几乎没有影响。

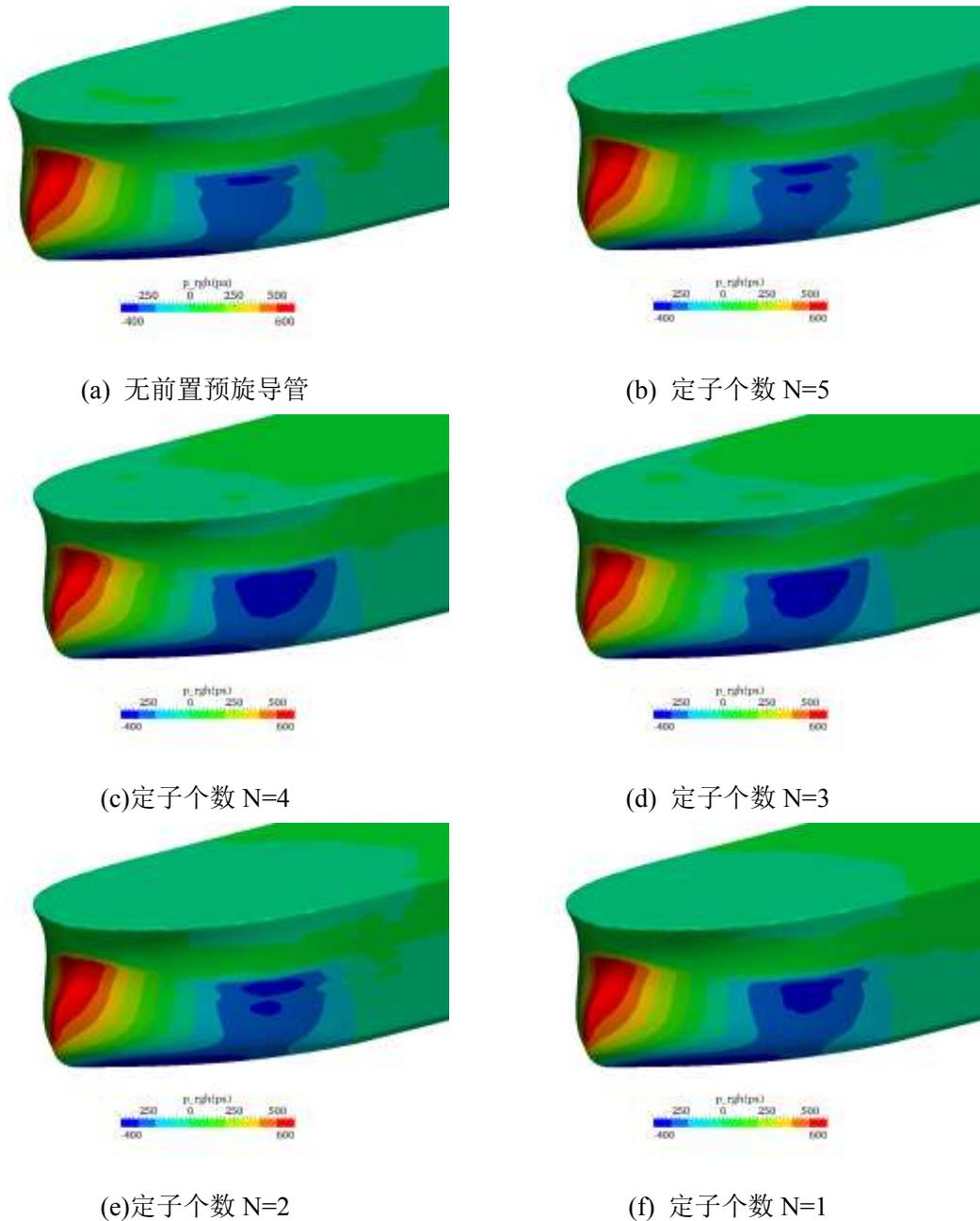


图 4-15 船舶压力图

Fig. 4-15 Pressure distribution at bow

前置预旋导管的预旋定子个数 N 介于 1~5 之间时，由于前置预旋导管具有均匀进流以及预旋进流消除尾涡的作用，安装前置预旋导管的 JBC 船尾桨的表面压力小于无前置预旋导管 JBC 船尾桨的压力分布。但是随着前置预旋导管中预旋定

子的减少，船尾螺旋桨的表面压力不断增大，表明螺旋桨所受载荷增大，功率也相应的增大。前置预旋导管的节能效果随着预旋定子的减少而减弱。

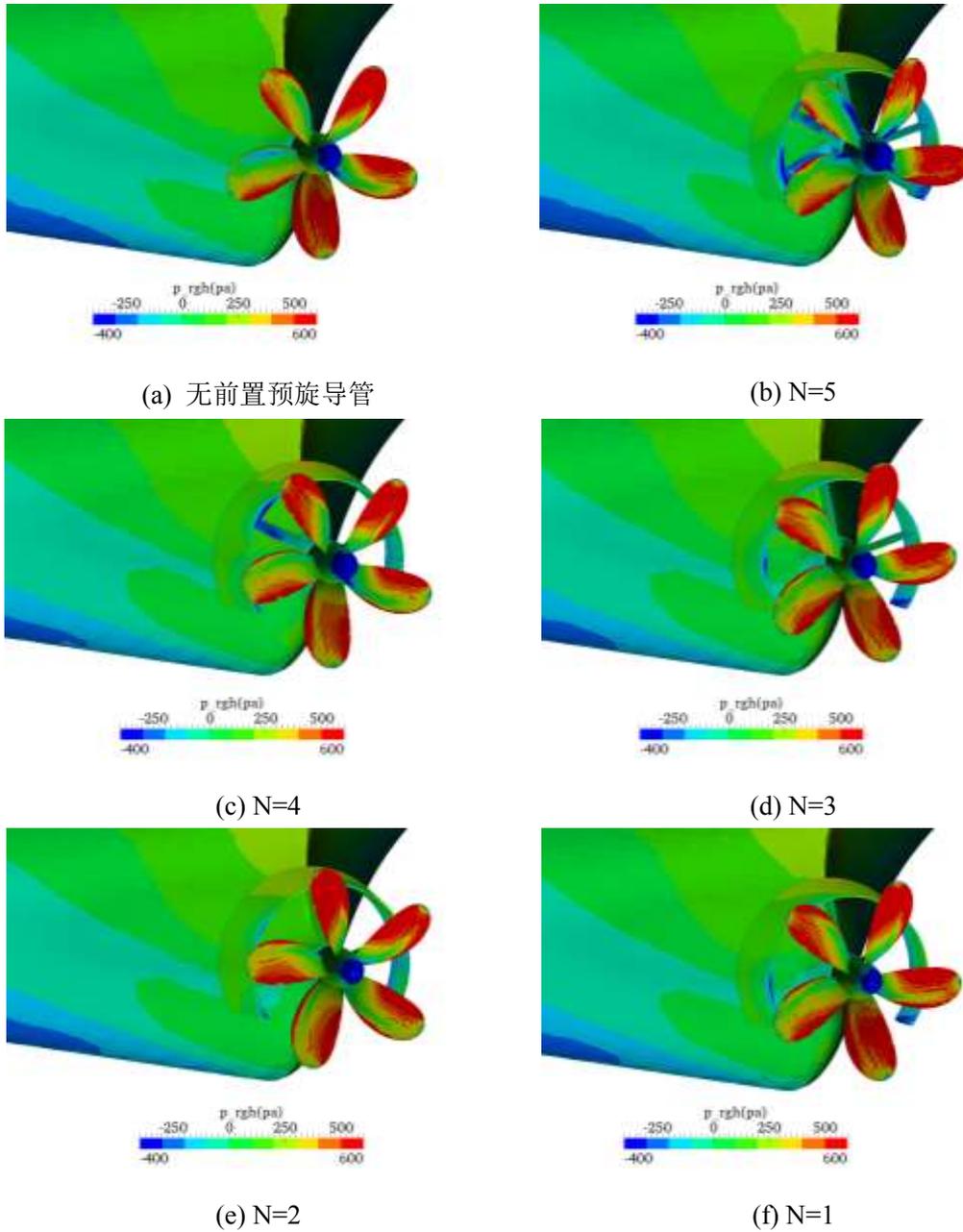


图 4-16 船艉压力图

Fig. 4-16 Pressure distribution at stern

当前置预旋导管的定子个数 $N=1\sim 5$ 时，随着定子个数的减少，桨前进流的速度降低，前置预旋导管的加速进流效果和均匀进流效果减弱，前置预旋导管节能效果减弱。

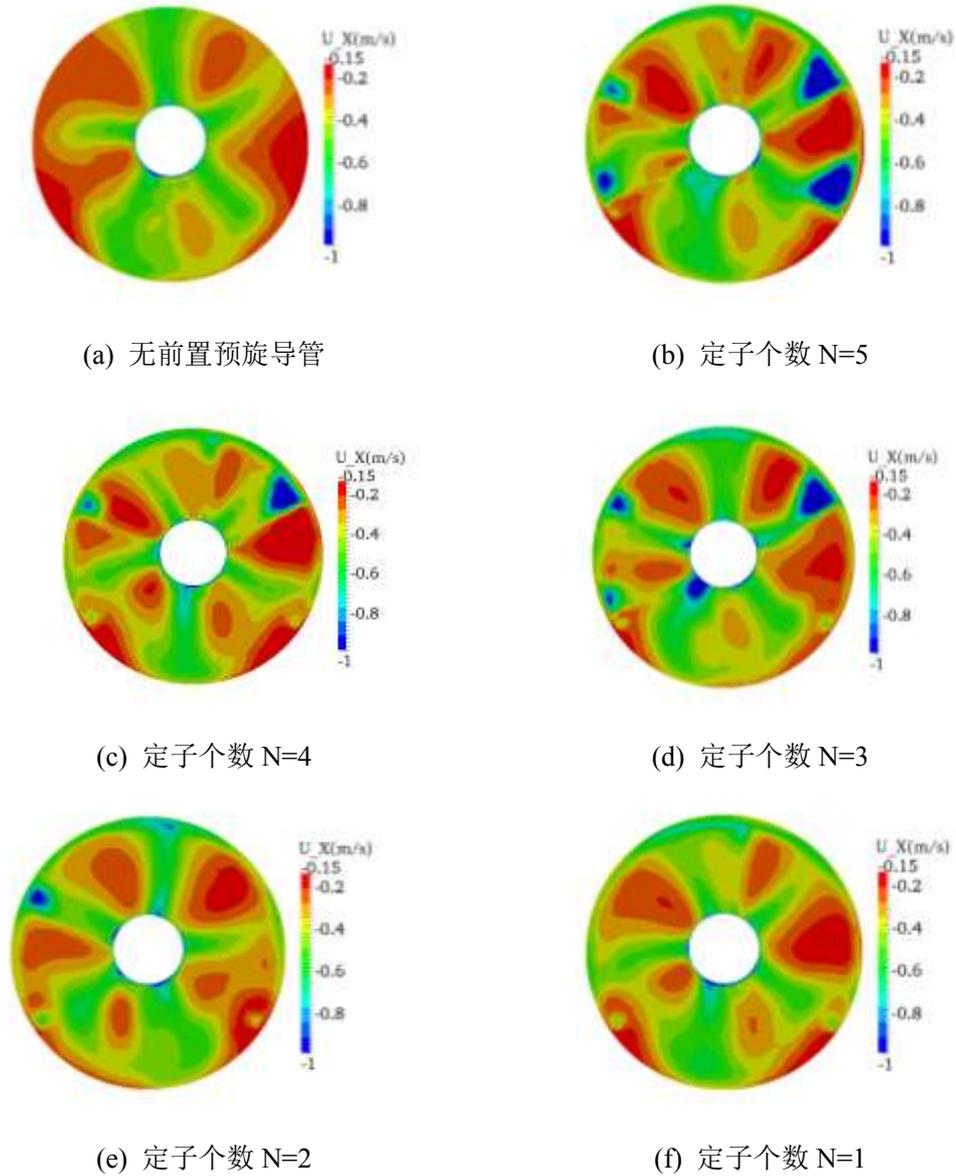


图 4-17 桨前伴流图

Fig. 4-17 Wake field before propeller

当前置预旋导管的定子个数 $N=1\sim 5$ 时, 随着定子 N 个数的减少, 前置预旋导管预旋进流消除尾涡的效果降低, 螺旋桨后尾流的速度增大, 尾流能量损失增大, 表明前置预旋导管的节能作用减弱。

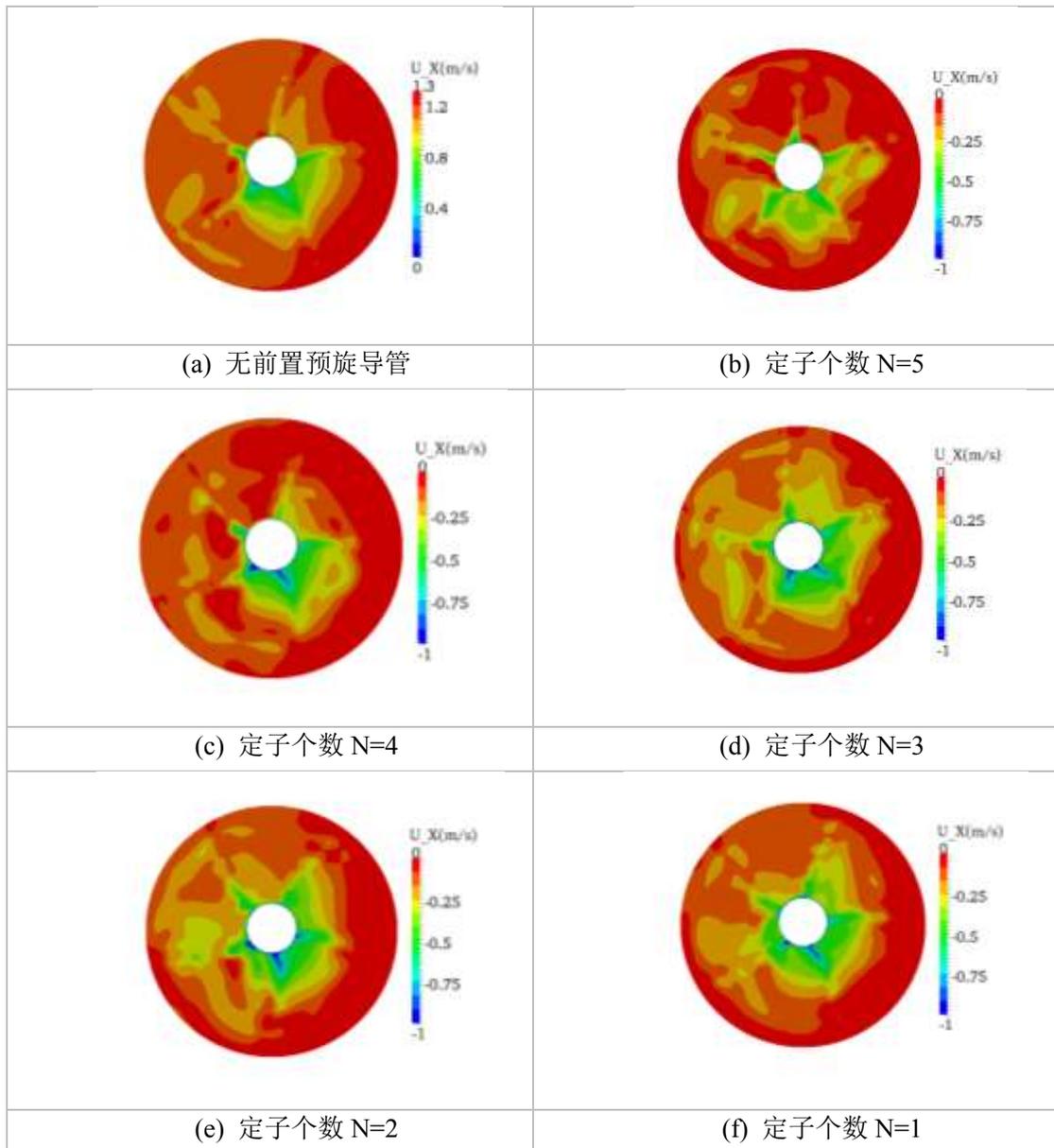


图 4-18 桨后伴流图

Fig. 4-18 Wake field after propeller

4.4 本章小结

本节对前置预旋导管长度和预旋定子个数对前置预旋导管节能效果的影响进行了数值计算与研究，计算步骤与节能评估方式与伴流补偿导管的数值计算过程一致。通过对螺旋桨推进效率和螺旋桨功率的比较分析，以及对压力场和伴流场的研究分析，得到以下结论：

1、当前置预旋导管的长度 L 减小时，预旋导管的阻力会减小，但是预旋导管长度的减小，又会导致预旋导管均匀伴流场和产生预旋流消除尾涡的作用减弱。当前置预旋导管长度 L 增大，其阻力则会不断增大。当 $L=0.05\text{m}$ 时，前置预旋导管的节能效果最好，即此时前置预旋导管均匀伴流场和产生预旋流消除尾涡的作用最强。

2、当前置预旋导管的预旋定子 N 个数减少时，由于前置预旋导管的预旋进流减少尾涡的作用减弱，前置预旋导管的节能效果减弱，螺旋桨推进效率降低，功率增大。

第五章 总结与展望

5.1 全文总结

中国经济的快速发展带来了能源资源消耗量大、利用率低的问题，并产生了大量的温室气体，引发严重的环境问题，其中，船舶行业占到很大的比重。为了顺应 EEDI 标准对节能减排的要求，船舶行业采用了优化船型降低形状阻力，发展新的助推方式，开发新的推进器以及开发水动力节能装置等方法。其中，船舶节能装置具有成本低，结构简单，安装方便和节能效果较好的优点，对于船舶节能减排具有十分重大的意义。最为典型的节能装置类型包括伴流补偿导管和前置预旋导管。

本文基于万德成教授课题组自主开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU^[60]，采用重叠网格技术对伴流补偿导管和前置预旋导管进行数值研究。对伴流补偿导管和前置预旋导管的相关参数变化对其节能效果的影响进行了数值计算，利用螺旋桨推进效率和螺旋桨功率两种方法对节能效果进行评估，并对压力场和船尾伴流场进行了分析。最终得到如下结论：

1、伴流补偿导管的进流口直径不变，要使伴流补偿导管具有整流以及加速进流的效果，出流口直径 D_2 要小于进流口直径 D_1 ，当出流口直径 D_2 过小时，伴流补偿导管的节能效果会受到极大减弱，甚至没有节能效果。因为随着 D_1/D_2 值的增大，伴流补偿导管对进流的加速效果增强，但是实际的桨盘面进流面积却不断缩小，两者对于伴流补偿导管节能效果的影响是相反的，当 $D_1/D_2=1.4$ 时，此时的进流加速效果和进流桨盘面积达到最佳状态，伴流补偿导管的节能效果最优。

2、伴流补偿导管的进出口直径同比例变化时，随着前后径的缩小，伴流补偿导管的节能效果减弱。因为伴流补偿导管的进出口直径比 D_1/D_2 不变，补偿导管对来流的加速效果基本不变，但是由于平均直径的减小，导致接受加速来流的桨盘面面积减小，伴流补偿导管的节能效果受到削弱。

3、伴流补偿导管的长度发生变化时， $L=0.055m$ 时节能效果最佳，长度过大与过小都会减弱伴流补偿导管的节能效果。当伴流补偿导管的长度 L 减小时，伴流补偿导管的尺寸减小，会导致伴流补偿导管的加速进流和均匀进流的作用减弱。但是当伴流补偿导管的长度增大时，加速进流和均匀进流的作用趋于稳定，而导管的阻力却会增大。

4、伴流补偿导管与螺旋桨之间的间距发生变化时，随着间距的增大，伴流补偿导管的节能效果减弱。伴流补偿导管与螺旋桨之间的间距 Δ 增大时，补偿导管

整流后的水流在接触到桨盘面之前，会再次变得紊乱，减弱了伴流补偿导管的整流和加速效果，降低了伴流补偿导管的节能效果。

5、当前置预旋导管的长度 L 减小时，预旋导管的阻力会减小，但是预旋导管长度的减小，又会导致预旋导管均匀伴流场和产生预旋流消除尾涡的作用减弱。当前置预旋导管长度 L 增大到一定值时，其阻力则会不断增大。当 $L=0.05\text{m}$ 时，前置预旋导管的节能效果最好，即此时前置预旋导管均匀伴流场和产生预旋流消除尾涡的作用最强。

6、当前置预旋导管的预旋定子个数减少时，由于前置预旋导管的预旋进流减少尾涡的作用减弱，前置预旋导管的节能效果减弱，螺旋桨推进效率降低，功率增大。

本文针对伴流补偿导管和前置预旋导管所得到的结论仅适用于低速肥大船型，因为前置预旋导管和伴流补偿导管仅对低速肥大船型具有节能效果，对集装箱船等高速船无节能效果。

5.2 研究展望

本文基于万德成教授课题组自主开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 对伴流补偿导管和前置预旋导管的相关参数变化对其节能效果的影响。采用螺旋桨推进效率和螺旋桨功率两种方法对两种节能导管的节能效果进行了评估，对伴流场和压力场进行了分析。针对相关参数变化对两种节能导管节能效果的影响得到了相关结论。下面可以对以下几个方面做更加深入和细致的工作：

1、本文是在静水中对节能装置进行数值研究，并没有考虑波浪对节能装置的节能效果影响，可以通过增加规则波和不规则波的方式深入研究波浪对节能装置的节能效果的影响。

2、本文所做的工作均是数值计算工作，可以用船模试验的方式对节能装置做进一步的研究，更加深入准确的研究节能装置节能效果。

3、本文没有考虑节能装置的特征参数变化对 JBC 自航点的影响，而参考标准算例给定自航点，为了更准确的研究节能装置的参数变化对节能效果的影响，应当得到节能参数变化时的自航点变化情况，并在此基础上研究节能参数变化对节能效果的影响。

4、在对螺旋桨伴流的分析过程中，本文仅考虑了轴向伴流，在以后的工作中，要将周向伴流的因素也考虑在内，全面评价螺旋桨伴流的情况。

参考文献

- [1] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理上册[M]. 上海交通大学出版社, 2003.
- [2] Ship Energy Efficiency Measures: Status and Guidance[R]. ABS, 2013.
- [3] 徐华. 绿色船舶扬帆中国[J]. 中国船检, 2008, 2: 0-25.
- [4] 王美飞, 浅析船舶能效设计指数[J]. 造船技术, 2014(4): 50-51.
- [5] 张丽璞, 船舶能效设计指数及其未来对航运业的影响[J]. 中国水运, 2011(1): 1-3.
- [6] 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.
- [7] 曹关桐. 船舶简单实用的节能附体[J]. 天津航海, 1994(4): 15-19.
- [8] 陈学宁. 补偿导管技术的应用[J]. 中国水运, 2005(7): 50.
- [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] 张海华等. 5万吨级前置预旋导轮结构设计及强度直接计算方法研究[J]. 中国造船, 2013, 54(4): 120-121.
- [11] 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.
- [12] 黄树权等. 前置预旋定子设计参数对其水动力性能的影响研究[C]. 中国造船工程学会 2013 年船舶水动力学学术会议. 无锡, 2013.
- [13] 钱文豪, 赵汉魂, 蔡跃进. 一种新型的船舶节能装置—桨前扇形整流鳍[J]. 船舶. 1995(4): 27-31.
- [14] 沈海龙, 蔡昊鹏, 苏玉民. 桨前节能装置节能效果的理论预报方法[J]. 上海交通大学学报. 2010, 44(10): 1418-1422.
- [15] 林安平, 余培文. 几种船舶节能技术性能分析[J]. 武汉船舶职业技术学院学报. 2008(5):15-17.
- [16] 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.
- [17] 郑建成. 螺旋桨毂帽鳍节能降噪研究[M]. 哈尔滨工程大学. 2009: 64-65.
- [18] 张越峰. 船用水动力节能装置分析[J]. 上海造船. 2010(2): 7-9.
- [19] 裴为民, 杨怀蜀. 舵球对螺旋桨敞水效率的影响[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 1994, 17(1), 6-14.

- [20] 马聘, 钱正方, 张旭, 杜度. 螺旋桨-舵-舵球推进组合体水动力性能的计算与方针研究[J]. 船舶力学. 2005, 9(5): 38-43.
- [21] 黄胜. 船舶推进节能技术与特种推进器[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007: 41-42.
- [22] 曹关桐. 近几年船舶节能技术的开发与应用[J]. 交通部上海船舶运输科学研究所学报. 2003, 26(2): 108-110.
- [23] 郭春雨. 螺旋桨与舵附推力鳍相互干扰水动力性能数值计算[D]. 哈尔滨工程大学. 2006: 85-108.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 钱文豪, 莫诚, 卫燕青, 赵汉魂, 蔡跃进, 范余明. 补偿导管推力的实验研究[J]. 船舶, 1997(2):7-11.
- [29] KORKUT E. 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(2):205-218.
- [30] FRIESCH J, JONANNSEN C. Propulsion optimization tests at high Reynolds number[J]. SNAME Transactions, 1994(102):1-21.
- [31] Fahri Celik. A numerical study for effectiveness of a wake equalizing duct[J]. Ocean Engineering. 2007,34:2138-2145.
- [32] 黄少锋等. 补偿导管节能增效 CFD 评估方法研究[J]. 中国造船, 2012(53): 7-8.
- [33] 李洁雅, 李干洛, 余灵. 船体补偿导管的减振作用[J]. 造船技术, 1997(8):14-15.
- [34] 左成魁, 孙权, 黄国富等. 伴流补偿导管和消涡鳍组合节能装置实船节能效果验证[J]. 中国造船, 2015,56(3):89-91.
- [35] Friedrich Mewis. A novel power-saving device for full-form vessels[C]. First International Symposium on Marine Propulsors SMP's 09, Trondheim, Norway, June 2009.
- [36] Thomas Guiard, Steven Leonard, Friedrich Mewis. The Becker Mewis Duct-

- Challenges in Full-Scale Design and new Developments for Fast Ships[C]. Third International Symposium on Marine Propulsors SMP'13, Launceston, Tasmania, Australia, May 2013.
- [37] 黄国富, 黄振宇等. 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暨第十二届全国水动力学学术会议, 浙江舟山, 2013 年 9 月.
- [38] 罗飞虎. 前置预旋导轮综合性能分析技术研究[M]. 大连理工大学. 2016:1-5.
- [39] 薛庆雨, 陆芳, 黄红波. 前置节能导管对螺旋桨空泡性能影响的比较分析[C]. 船舶水动力学学术会议, 无锡, 2015.
- [40] 苗飞, 黄国富. 前置预旋导管内定子周向布置形式的数值研究[J]. 船海工程, 2013, 42(5). pp.16-18.
- [41] Zhang, Z. Verification and validation for RANS simulation of KCS container ship without/with propeller[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B. 2010, 22(5, Supplement 1): 932–939.
- [42] Wilcox, D.C. Turbulence modeling for CFD[M]. 3rd Edition. La Canada, CA, DCW industries, 2006.
- [43] Menter, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal. 1994, 32(8), pp.1598-1605.
- [44] Jin, W., Gao, Q., Vassalos, D. The prediction of KCS resistance and self-propulsion by RANSE[C]. In the Proceedings of the Gothenburg 2010 Workshop. Gothenburg, Sweden, 2010: 615–620.
- [45] Jasak H., Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows[D]. Ph.D. thesis, Imperial College 1996.
- [46] Carrica, P.M., Wilson, R.V., Noack, R.W., et al. Ship motions using single-phase level set with dynamic overset grids[J]. Computer & Fluids. 2007, 36(9), pp.1415-1433.
- [47] 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.
- [48] 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, 2015 年船舶水动力学学术会议, 2015 年 7 月 23-25 日, 哈尔滨, pp.290-296.
- [49] 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(10):101-102.

- [50] Jianhua Wang, Xiaojian Liu and Decheng Wan, Numerical Simulation of an Oblique Towed Ship by naoe-FOAM-SJTU Solver, Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE), Kona, Big Island, Hawaii, USA, June 21-26, 2015, pp.432-438.
- [51] Ruosi Zha, Haixuan Ye, Zhirong Shen and Decheng Wan, Numerical computations of resistance of high speed catamaran in calm water, Journal of Hydrodynamics, Vol. 26, No. 6, 2014, pp. 930-938
- [52] Zhirong Shen and Decheng Wan, Computation of Steady Viscous Flows around Ship with Free Surface by Overset Grids Techniques in OpenFOAM, Proceedings of the Twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference, Busan, Korea, June 15-20, 2014, pp. 832-838
- [53] 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, 水动力学研究与进展, 2016年9月, 31(5):567-574.
- [54] 孙涛, 万德成, 前置导管节能效果数值计算与分析, 水动力学研究与进展, 2016年9月, 31(6):651-658.
- [55] Jianhua Wang, Xiaojian Liu, Decheng Wan, Gang Chen, Numerical Prediction of KCS Self-Propulsion in Shallow Water, Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference Rhodes, Greece, June 26-July 1, 2016, pp. 757-763
- [56] Chonghong Yin, Jianwei Wu, Tao Sun, Decheng Wan, A NUMERICAL STUDY FOR SELF-PROPELLED JBC WITH AND WITHOUT ENERGY SAVING DEVICE, Proceedings of Tokyo 2015 Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics, Vol. III, Dec. 2-4, 2015, NMRI, Tokyo, Japan, pp. 395-400
- [57] Xiaoyi Liu, Weiwen Zhao and Decheng Wan, Verification and Validation for CFD Simulation of KRISO Container Ship, Proceedings of Tokyo 2015 Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics, Vol. III, Dec. 2-4, 2015, NMRI, Tokyo, Japan, pp. 317-376
- [58] Ruosi Zha, Decheng Wan, Numerical Computations of Added Resistance of Delft Catamaran Advancing in Regular Waves, The Proceedings of the 20th International Conference on High Performance Marine Vessels, April 10, 2015, Shanghai, pp. E11-1-E11-11
- [59] 何德明, 李远林. 船舶前置导管流态的数值计算与分析[J]. 船舶工程, 2004, 26(4).
- [60] Shen ZR, Cao HJ, Wan DC. Manual of CFD solver naoe-FOAM-SJTU[R]. Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, 2012.

致谢

转眼间，研究生的学习生活已经悄然接近了尾声。在这忙碌而充实的两年半时间里，我收获了很多珍贵美好的东西，而这些收获也将成为我未来人生中永不褪色的靓丽色彩。对那些指导我、帮助我、鼓励我的人，我心中充满了感激。

首先要感谢我的导师万德成教授，在我整个研究生生涯中，万老师为我倾注了大量的心血，我深深受益于万老师的关心、爱护和谆谆教导。万老师生活中平易近人，学术上严谨求实，为人正直无私，师从万老师，我感到何其荣幸，在此谨向万老师表示我最诚挚的敬意和感谢！

真诚感谢我的师兄师姐师弟师妹以及同届同学给予我的关心与帮助，他们不仅在学术上给予我指引，在生活上也给予我帮助。当我遇到难以解决的科研问题时，赵伟文博士和王建华博士经常给予我宝贵的建议。师弟师妹们朝气蓬勃的乐观与活泼精神也不断感染我，为我的生活增添了一抹靓丽的色彩。尹崇宏、吴建威、刘晓义、吴惠宇、罗天、彭耀等同届同学认真严谨的科研态度也不断激励我努力提升自己的科研水平。在此向诸位献上我诚挚的谢意！

最后要感谢我的家人，他们是我求学路上的坚强后盾，在我面临人生的迷惘之际，他们给予我鼓励和支持，为我排忧解难，他们无私而深厚的爱是我不断前进的动力。

值此即将告别母校之际，我也要向上海交通大学致以最崇高的谢意！从大一入学开始，“选择交大就是选择了责任”这句话就印在了我的心中，在交大的学习生活拓宽了我的知识面、提升了我的个人修养和专业技能、培养了我“苟利国家生死以”的家国情怀，是交大教育了我，成就了我！我将终生铭记“饮水思源、爱国荣校”的校训，做一个合格的交大人！

攻读硕士期间已发表或已录用的论文

- [1] 孙涛, 彭耀, 万德成. SDPSO 深水平台储卸油过程数值模拟, 第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会会议论文集, 2015年11月13-16日, 广西, 南宁, pp.136-141.
- [2] **Tao Sun**, Decheng Wan. Numerical prediction of JBC Resistance in Calm Water, proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 26-July 1, 2016, pp. 575-579.
- [3] 孙涛, 万德成. 基于重叠网格技术的伴流补偿导管单参数研究, 2016年船舶力学学术会议论文集, 2016年7月21-22日, 武汉.
- [4] **Tao Sun**, Decheng Wan. “Numerical Investigation of Wake Equalizing Duct by using Double-model Theory”, proceedings of the 2nd Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics, Nove 11-14, 2016, Wuxi, China, pp. 442-447.
- [5] 孙涛, 万德成. 前置导管节能效果数值计算与分析, 水动力学研究与进展专辑, 2016年9月, 第31卷, 第6期, pp. 651-658.