上海交通大學

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

学士学位论文

BACHELOR’S THESIS

论文题目：船舶节能装置水动力性能数值计算与分析

学生姓名: 许璐荣

学生学号: 5120109015

专　　业: 船舶与海洋工程

指导教师: 万德成

学院(系): 船舶海洋与建筑工程学院

船舶节能装置水动力性能数值计算与分析

摘要

在当今的航运市场，船舶节能已经成为一个重要的课题。安装船舶水动力附加节能装置作为一种有效的节能措施之一，具有成本较低、节能效果好、在旧船上改造方便的特点。目前对于节能装置节能效果的评估除了进行实船或船模试验外，还可以采用 CFD 的方法。

首先，本文对目前比较常见的水动力附加节能装置进行了细致的阐述。水动力附加节能装置主要包括三类：基于桨前进流优化技术的水动力附加节能装置、基于桨后能量回收技术的水动力附加节能装置、基于衰减以及分隔船舶引起的漩涡的船舶水动力附加节能装置。论文分析了它们的节能原理、适用性、节能效果以及各自的特点，对于这些装置的设计参数做了讨论。

其次，对于目前使用比较多的组合水动力节能装置，本文做了简要的介绍。组合节能装置主要有两类：一类是基于导管类的附加水动力节能装置，另一类是基于导流鳍的附加水动力组合节能装置。本文对这些组合节能装置的特点以及它们的节能原理以及节能效果进行了总结。

最后，为了评估节能装置对船舶的影响，本文使用 OpenFOAM 对装有前置预旋导轮的 VLCC 船进行了数值模拟计算，发现水动力附加节能装置能够起到良好的节能效果。

关键词：水动力附加节能装置，节能效果，数值模拟，OpenFOAM

NUMERICAL CALCULATION AND ANALYSIS OF HYDRODYNAMIC PERFORMANCE OF SHIP ENERGY-SAVING DEVICE

Abstract

In today's shipping market, energy-saving has become an important issue. As one of the effective measures, the installation of additional energy-saving device of ship water power has the characteristics of low cost, good energy-saving effect and convenient transformation on the old ship. At the present, besides the actual ship or ship model test, use the CFD method is also a good way to evaluate the effect of energy-saving devices.

First of all, this paper makes a detailed description of the current additional energy saving devices. Hydrodynamic additional energy-saving device mainly includes three categories: energy-saving devices for ship based on inflow optimization technology of propeller, energy-saving devices for ship based on energy recovery technology of propeller,and energy-saving devices for ship based on the reduction or separation of the vortex induced by the ship.The energy saving principle, applicability, energy saving effect and their characteristics are analyzed in this paper, and the design parameters of these devices are discussed as well.

Secondly, this paper made a brief introduction for some combined energy-saving devices which are used wide.There are two main types: one is based on ducts and the other is based on fair water fin. In this paper, the characteristics of these combined energy-saving devices and their principle as well as the energy-saving effect are summarized.

Finally, to assess the impact of energy-saving device on ship,this paper uses the OpenFOAM to do a numerical simulation of VLCC ship equipped with pre-swirl duct and find that the hydrodynamic additional energy-saving device can bring a good energy-saving effect.

Key words: hydrodynamic additional energy-saving device, effect of energy-saving, numerical simulation, OpenFOAM

目录

第一章 绪论.....1
1.1 研究背景和意义.....1
1.2 研究现状.....1
1.3 研究方法.....3
1.3.1 基于试验的节能装置设计评估.....3
1.3.2 基于 CFD 技术的节能装置设计评估.....3
1.4 论文研究方向.....3
第二章 基于桨前进流优化技术的水动力附加节能装置.....5
2.2 前置导管.....5
2.2.1 前置导管的发展.....5
2.2.2 前置导管的节能原理.....5
2.2.3 前置导管的适用对象.....6
2.2.4 前置导管的特点.....6
2.2.5 前置导管的设计参数.....7
2.2.6 前置导管基于 CFD 技术的研究.....7
2.3 节能轴支架.....7
2.3.1 节能轴支架的发展.....8
2.3.2 节能轴支架的节能原理.....8
2.3.3 节能轴支架的特点.....9
2.3.4 节能轴支架的设计参数.....9
2.3.5 节能轴支架的经济效益.....9
2.4 本章小结.....9
第三章 基于桨后能量回收技术的水动力附加节能装置.....10
3.1 引言.....10
3.2 舵球.....10
3.2.2 舵球的发展.....10
3.2.3 舵球的节能原理.....10
3.2.4 舵球的设计参数.....11
3.2.5 舵球基于 CFD 技术的研究.....11
3.3 自由旋转助推叶轮.....11
3.3.1 自由旋转助推叶轮的发展.....12
3.3.2 自由助推叶轮的节能原理.....12
3.3.3 自由旋转助推叶轮的特点.....12
3.3.4 自由旋转助推叶轮的适用对象.....13
3.4 舵附推力鳍.....13
3.4.1 舵附推力鳍的发展.....13
3.4.2 舵附推力鳍节能原理.....13
3.4.3 舵附推力鳍的设计参数.....13
3.5 本章小结.....14

第四章 基于衰减以及分隔船舶引起的漩涡的水动力附加节能装置.....15
4.1 引言.....15
4.2 桨毂整流鳍.....15
4.2.1 桨毂整流鳍的发展.....15
4.2.2 桨毂整流鳍的节能原理.....16
4.2.3 桨毂整流鳍基于 CFD 技术的研究.....16
4.3 螺旋桨端板.....16
4.3.1 螺旋桨端板的发展.....16
4.3.2 螺旋桨端板的节能原理.....17
4.3.3 螺旋桨端板的特点.....17
4.3.4 几种不同的螺旋桨端板.....17
4.4 本章小结.....18
第五章 组合动力节能装置.....19
5.1 引言.....19
5.2 基于导管类的水动力附加节能装置.....19
5.2.1 前置半导管－导流鳍.....19
5.2.2 导管－导流鳍.....20
5.2.3 补偿导管－螺旋桨毂帽鳍.....20
5.2.4 补偿导管－自由旋转助推叶轮.....21
5.2.5 超级导流管－舵球－舵附推力鳍.....22
5.3 基于导流鳍的附加水动力组合节能装置.....23
5.3.1 导流鳍－自由旋转助推叶轮.....23
5.3.2 名村整流鳍－舵附推力鳍组.....24
5.4 本章小结.....24
第六章 伴流补偿导管计算分析.....26
6.1 引言.....26
6.2 软件介绍.....26
6.3 前置预旋导轮基于 CFD 技术的研究方法.....27
6.4 对 VLCC 前置预旋导轮节能效果的研究.....27
6.4.1 计算模型.....27
6.4.2 计算网格与边界条件.....28
6.4.3 计算结果与分析.....28
6.5 本章小结.....30
第七章 研究与展望.....31
7.1 全文总结.....31
7.2 研究展望.....32
参考文献.....33
谢辞.....37

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

受到 2008 年世界经济危机的影响，世界船舶运输业从 2009 年一直处于低谷状态。供过于求的行情长时间延续，业内的竞争由于运力过剩变得愈发的残酷。很多船公司为了获得维持自身生存的订单，而不得不进行残酷的价格战。有鉴于这种情形，降低船舶航行成本的重要性就越来越凸显出来。在各项成本中，燃料的成本占据了最大的比例。

船舶燃油成本过高的情况由来已久，但是 2008 年之前，这个问题被繁荣的船舶市场所掩盖但随着经济的衰退，这个问题凸显出来。在其逐渐成为多数船舶盈利的障碍后，如何能够减少船舶航运过程中的燃油成本成为一个颇受关注的焦点。为了减少燃料成本，同时为企业树立节能减排、保护环境的企业形象，船舶的节能特性逐渐变成许多船东选择船舶时的重要指标。有鉴于此，节能装置成为一个重要的研究方向。

相比于 MEPC 提供的 EEDI 指数的 Baseline，我国的船舶 EEDI 指数始终居高不下：中国 63%的散货船 EEDI 大于 Baseline；56%的集装箱船的 EEDI 大于 Baseline；74%的共同规范散货船超标[1]。《MARPOL73/83》于 2011 年在 MEPC 第 62 次会议上通过，确定了 RRDI 以及 SEEMP 两项船舶能效准则，并且于 2015 年强制执行。EEDI 指数不达标的船舶将无法进入国际航运市场。这对我国的船舶工业带来了巨大的挑战。在这种情况下，我国应当采取积极的措施来应对这场由技术指标进步带来的市场的变革，投入更多的力量于节能装置技术的研究，并且将这些技术早日的转入实际生产中。图 1-1 是船舶节能装置示意图。

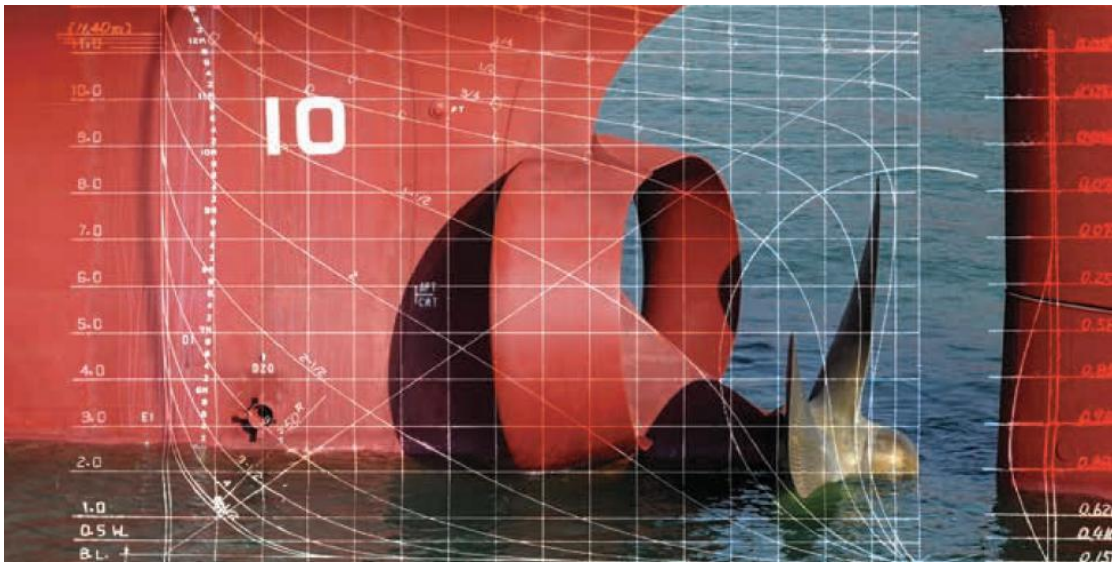


图 1-1 船舶节能装置示意图[2]

1.2 研究现状

为了减少船舶的能耗，各国都付出了巨大的努力，目前有多种方式可以实现船舶能耗的减少。如优化船体线型，使用能耗较少的新型船型；使用效率高、能耗小的发动机，提高燃料的燃烧效率；使用风能、太阳能、核能等新型能源；采用新型的钢材料，降低船体整体

的重量等方式。但是这些方法要么花费昂贵、节能效果不明显，要么许多技术面临许多的技术难题，而且这些方式基本都只能运用于新船设计，而不能用于对不符合 EEDI 标准的旧船的改造。相比而言，水动力附加节能装置经过数十年的研究，相关的技术很多已经相当成熟，并且有许多在旧船上改造成功的案例。

运动于水中的船舶，其消耗的能量真正用于克服前进阻力做功的只有一部分，其它的能量都以各种形式损失掉了。造成船舶能量损失的原因有三个：一是水具有粘性，船舶在水中前进时，会受到受到粘性阻力的作用从而造成能量的损失；二是船舶推进过程中轴承机器间的摩擦热量损失；三是由于螺旋桨推进时的涡流能量损失以及桨后的尾流能量损失。如何降低主船体、主机和螺旋桨这三者的能量损失是节能的关键 。在船舶方面，目前使用最广泛的是水动力方面的节能方法，这种方法的有效性体现在对船体尾部的伴流场的改善作用。螺旋桨节能装置比较显著的作用就是有效优化了船舶尾部的伴流场。

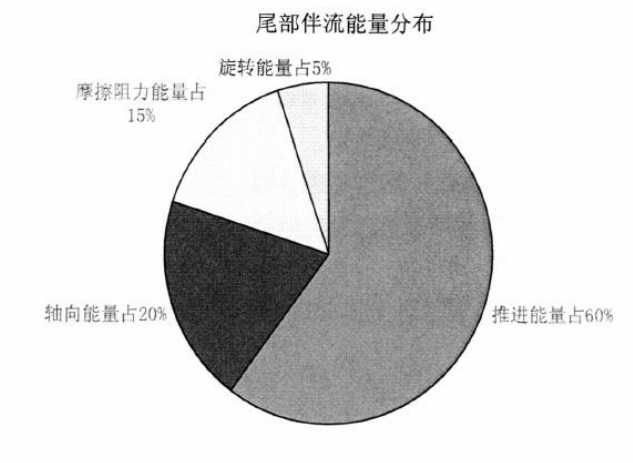


图 1-2 船舶尾流伴流能量分布示意图

因此，对船舶节能装置的研究可以从以下几个方面入手：

(1) 改善船舶尾部表面压力的分布；
(2) 使螺旋桨进流预旋，降低尾流的能量损耗；
(3) 优化船舶尾部的伴流场，提高螺旋桨推进效率；
(4) 优化流场，降低螺旋桨的激振力，降低船体尾部的振动；
(5) 产生附加推力

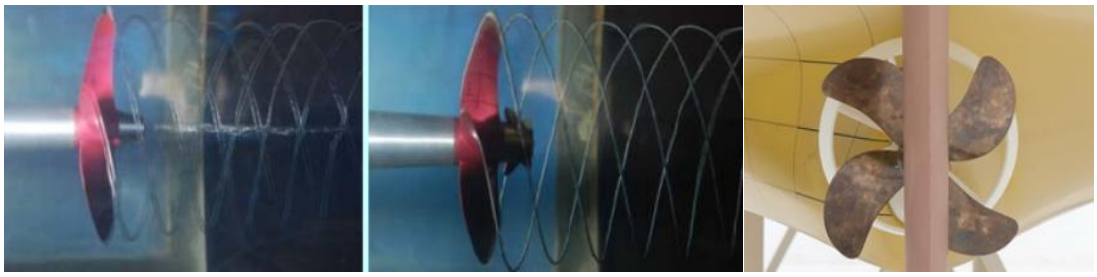


图 1-3 节能原理示意图[3]

相比其它的一些节能方式，水动力附加节能装置具有技术成熟、安装方便、易于改造旧船、成本较低、节能效果较好等优点。并且不同的水动力附加节能装置都有其独自的特点，在实际应用中还可以将它们搭配使用，从而获得更好的节能效果。

根据工作原理的不同，船舶水动力附加节能装置大致能够分为三类：第一类是基于桨前进流优化技术的水动力附加节能装置，此类装置能够改善桨盘进流，并且使船尾部产生均匀伴流或预旋流。典型的包括前置导管、桨前扇形整流鳍、节能轴支架。第二类是基于桨后

能量回收技术的水动力附加节能装置，调此类装置能够优化船体尾部的压力场，回收尾流能量。典型的包括自由旋转助推叶轮、推力鳍、舵球。第三类基于衰减以及分隔船舶引起的漩涡水动力附加节能装置，此类装置能够减少或消除漩涡阻力。这类装置包括毂帽鳍、预旋圆柱、螺旋桨端板、梢涡助推器。

1.3 研究方法

对于水动力附加节能装置，欧洲和日本相对而言处于一定的领先地位。而我们国家的水池建设起步比较晚，但是发展的速度比较快，目前有不少企业机构在进行相关方面的研究。同时，国内外在节能装置方面也有比较多的交流，因此能够取长补短，加快节能装置的发展速率。

1.3.1 基于试验的节能装置设计评估

节能装置的设计需要对船尾细节流场进行预报，这一点势流方法是无能为力的。传统的对节能装置设计和评估的方法主要基于模型试验和实船海试展开。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无桨拖航试验，主要考察安装前置导管等节能装置后对船尾伴流场以及船体阻力的影响，为节能装置设计的修改提供信息；之后研究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，并对节能效果进行预报。

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的参数优化以及深入研究。

伴随着计算机性能以及数值方法的迅速进步，运用计算流体力学技术（CFD）来解决船舶与海洋工程水动力学问题越来越受到广泛的重视。 CFD 方法可以轻易的实现模型试验中难以构造的物理条件，如自航试验中的恒定强制力。与传统的势流理论相比，CFD 方法能够模拟复杂的船舶与海洋工程水动力问题，同时充分考虑流体的粘性作用，还可以将流体的非线性因素计算在内，得到详细的流场信息，为船舶的精细化设计提供参考，展现出巨大的优势。图 1-5 是 CFD 对节能装置效果评估流程示意图。

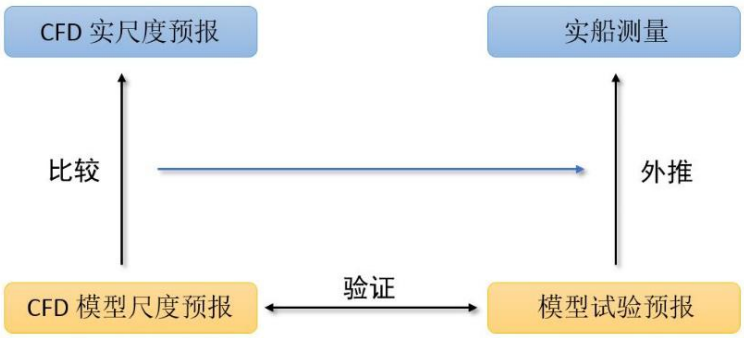


图 1-4 CFD 对节能装置效果评估流程示意图

1.4 论文研究方向

本文在前人工作的基础上，总结不同的水动力节能装置的研究进展及适用船型，重点分析了这些装置的水动力性能，为下一步用 CFD 的方法对这些节能装置进行理论计算打下坚实基础，并且在本文的第六章进行了计算的尝试，第六章使用了重叠网格 RANS 求解器 naoe-FOAM-SJTU，对前置预旋导轮的节能装置的 VLCC 进行纯粹自航的数值研究。论文的重点在于结合已有的研究结果对水动力节能装置进行分析，同时学习使用软件 naoe-FOAM-SJTU，用 CFD 的方法进行计算的尝试，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。

（1）对船舶水动力研究的背景以及当前的研究现状做了一定的归纳，并且从船舶尾部伴流的能量分布入手，总结了节能装置的研究方向；

（2）基于桨前进流优化技术的水动力附加节能装置，包括前置导管、桨前扇形整流鳍、节能轴支架、尾框鳍等。主要考察了这些附体装置的节能原理、节能效果以及适用范围等；

（3）基于桨后能量回收技术的水动力附加节能装置，包括自由旋转助推叶轮、推力鳍、舵球。主要考察了这些附体装置的节能原理、节能效果以及适用范围等；

（4）基于衰减以及分隔船舶引起的漩涡的水动力附加节能装置，包括毂帽鳍、螺旋桨端板等。主要考察了这些附体装置的节能原理、节能效果以及适用范围等；

（5）组合节能装置，包括基于导管类的水动力附加节能装置以及基于导流鳍的水动力附加组合节能装置。研究了这两类组合装置的工作原理以及节能效果等；

（6）首先结合前人的工作总结了前置预旋导轮的节能机理，考察了前置预旋导轮理论的节能效率。之后本文尝试使用 CFD 的方法对安装前置预旋导轮的 VLCC 船进行了纯粹自航的设置研究；

（7）对本文工作进行了总结。

第二章 基于桨前进流优化技术的水动力附加节能装置

2.1 引言

基于桨前进流优化技术的水动力附加节能装置主要包括前置导管以及节能轴支架。这类节能装置主要通过优化螺旋桨的进流以及减少船体尾部的流动分离达到提高螺旋桨推进效率、节能的目的。

2.2 前置导管

前置导管是安置于船体尾部的环状导流装置，其剖面为机翼型，一般布置在螺旋桨的前方，靠近桨的中纵剖面的两侧或者单侧。图 2-1 是前置导管的示意图。

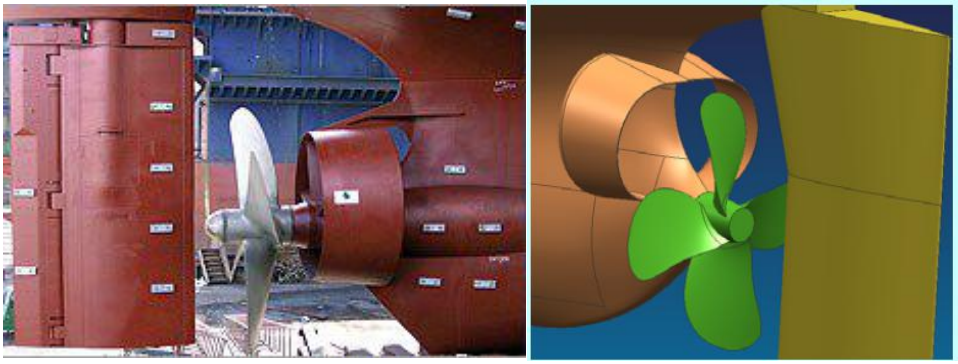


图 2-1 前置导管示意图

2.2.1 前置导管的发展

最早于 1984 年，德国教授克罗斯（Schneekluth）[4]首次在散货船上使用了前置导管节能装置。日本三井造船公司[5]把原来安装在螺旋桨外围导管移至前方，称之为“前置导管”。Korkutlo[6]比较了同一伴流前置导管在不同船型上的节能效果。Frieschlvl[7]考察了尺度效应对前置导管的影响。Fahri[8]用 CFD 方法模拟计算出前置导管最大节能效果约为 10%。蒋永旭[9]考察了前置导管对船体失速以及汹涛阻力增值的影响，获得结论前置导管能够减少船舶在波浪中的船体摇动情况，有效的降低船舶在波浪中行驶时的阻力的增加值，并且减少船体失速现象的发生。张大有[10]研究了与前置导管节能效果密切相关的两个主要参数：导管与螺旋桨的距离以及导管长度与螺旋桨直径的长径比。胡志安[11]从理论上研究了前置导管距螺旋桨前缘的距离等参数对导管节能表现的影响。钱文豪[12]进行了实船试验，结合试验结果研究了前置导管对船舶操纵性影响的大小，获得结论：导管不会影响大舵角的回转性，但是能够有效提高小舵角的操纵性。

2.2.2 前置导管的节能原理

前置导管产生节能效果主要基于以下两个方面：一方面优化船体尾部的伴流场；另一方面，减少船舶尾部的水流的流动分离，降低尾流旋转能量损失，图 2-2 所示。

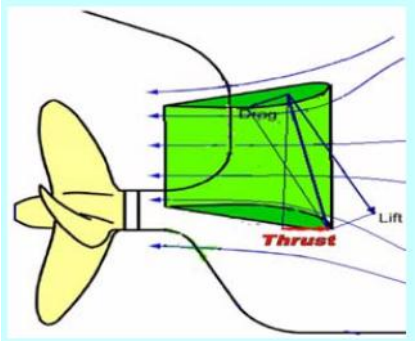


图 2-2 前置导管节能原理示意图

具体体现在：

（1）提高螺旋桨上部水流进速，使进入桨盘面的进流变得更加的均匀；

（2）减少船体尾部水流分离状况，降低船体尾部的形状阻力；

（3）前置导管左右半环以不对称的形式布置，这种布置能够对进入螺旋桨盘面的水流的预旋程度进行调节，降低船体尾流旋转能量的损耗；

（4）合理的调整前置导管在船体上的安装角能够获得附加推力。

2.2.3 前置导管的适用对象

前置导管一般适合应用于方形系数不小于 0.65 而且傅汝德数 Fr<0.3 的单桨运输船，也适合部分的双螺旋桨船。通常船型比较丰满的船舶在使用前置导管可以获得更好的节能效果[16]。

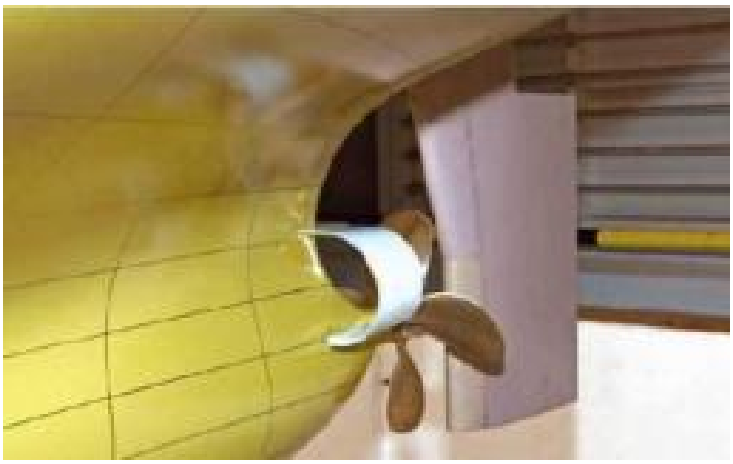


图 2-3 3032 万吨 VLCC 桨前节能导管

2.2.4 前置导管的特点

在前置导管中，存在着对称以及不对称外形两种设计。对称型前置导管在船舶压载的情况下起不到节能效果，而不对称型前置导管在船舶压载以及满载条件下均可以节省功率和油耗。因此，实际应用上都将前置导管设计成不对称外形。

前置导管主要有以下 3 个节能特点：

（1）使水流均匀化。前置导管的外形为上部弦长较长、向下逐渐减小，上下不对称。导管内上部水流经过一段较长的导管加速，在流到螺旋桨盘面以前，下部水流加速较慢，之后进入盘面处的水流就变得均匀了。

（2）使水流稳定化。前置导管可以提高船体尾部水流的进速，起到导流作用，同时减少水流边界层的分离情况。

（3）减少导管及螺旋桨的空泡剥蚀现象。前置导管能够起到均匀水流的作用，使导管推力的推力获得增加，减轻螺旋桨承受的工作负荷，有效改善了桨的空泡性能，减少了导管

的空泡剥蚀现象的发生。

一般来说，对前置导管而言，当船舶处于压载状态下时，对称型的形状无法起到节能的作用，而不对称型在各种情形下都能够有良好的节能效果。因此，在实用上一般采用的都是不对称型前置导管。

2.2.5 前置导管的设计参数

要确定一种前置导管，需要考虑以下几种主参数：纵倾角、后倾角、导管长度、导管直径。

其中，主要有两个参数对前置导管的系统性能影响较大[17]：导管与螺旋桨前缘间隙△和长径比 L / D 有关。

对于长径比 L / D 对前置导管的影响，一般认为 L / D 的值应选在 0. 2-1.0 的范围内，L / D 过大或过小，都会使剩余阻力增加。另外从 NSMB 对 5 种不同长径比(L /D 从 0.3 至 0.83）的导管的研究可知，在较轻负荷时，短导管在的节能效果更好，随着负荷的加重，长导管的优越性逐渐显现出来。

对于导管与螺旋桨前缘距离对前置导管的影响，一般认为不同间隙△的导管推力系数曲线能够分为推力段以及阻力段。在推力段内，如果保持进速系数不变，推力系数的大小与管桨间隙成反比；而在阻力段内，如果保持进速系数不变，阻力的大小也与管桨间隙成反比。因此导管对螺旋桨的影响要看是推力还是阻力占据主导地位。

2.2.6 前置导管基于 CFD 技术的研究

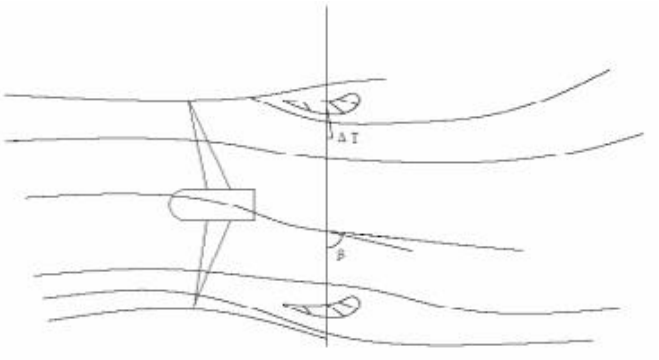
Fahri Celik[12]使用商业软件 Fluent 对运输船上的前置导管进行了数值模拟计算，采用 RANS 模型，获得了运输船详细的尾流场；在计算时，考虑到计算效率，数值模拟只对半船体进行了计算。研究重点分析了在 10kn~16kn 航速下船舶的伴流分数以及螺旋桨推进性能，得到结论对于大方形系数的船型，前置导管能够很好的提高螺旋桨的推进效率、降低船体受到的粘性阻力。并且计算考察了导管的安装角度以及纵向安装位置对导管工作效率的影响，发现导管安装角度对节能效果影响明显，纵向安装位置对节能效果相对影响较小。

Heinke[13]等使用商业软件 CFX 对典型集装箱船上的前置导管进行了尺度效应的研究。通过数值模拟计算获得了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，考察了尺度效应对节能装置的影响。

Martinas[14]等研究了某船型前置导管的参数优化，采用 CFD 方法进行了大量的计算，研究了导管的安装角度、导管长度、出入口半径、距螺旋桨距离的最佳匹配。

2.3 节能轴支架

节能轴支架是将两个支架臂看作桨前的两叶定叶轮，位于螺旋桨上游的一组固定水流进入螺旋桨桨盘面前方产生与螺旋桨旋转方向相反的环量，从而使桨后尾流中的周向诱导速度抵消，提高了螺旋桨的推进效率。图 2-1 是节能轴支架的示意图和实物图。



(a) 节能轴支架示意图

(b) 节能轴支架实物图

图 2-4 节能轴支架示意图与实物图

2.3.1 节能轴支架的发展

周昭明、赵汉魂以桨前二叶预旋定叶轮的设计方法来设计轴支架，在多桨船上取得了一定的节能效果。毕毅[18]重点研究了轴支架的设计参数对船舶操纵性的影响，发现合理的大小以及安装位置的安排能够有效的提高船舶的操纵性。华汉金[19]发现高升阻比翼型的叶剖面可以有效的减缓空泡的产生。王展智[20]对带附体的船舶的三维粘性流场进行了数值模拟计算，使用 RANS 方法着重研究了支架角度的大小以及支架剖面形状的不同对船体受到的粘性阻力的大小以及伴流场均匀度的影响。

2.3.2 节能轴支架的节能原理

（1）在船舶行进时，节能轴支架类似一个螺旋桨前的固定叶轮，能够使水流预旋，在进入螺旋桨桨盘面之前形成与桨的旋转方向相反的旋转。在水流与螺旋桨不同旋向的影响下，消除了螺旋桨后尾流中的周向诱导速度，只留下平向的流动，降低了能量损耗，因此改善了螺旋桨的推进效率。

（2） 如果支架的两个支臂的剖面能够形成恰当的攻角，支架能够与螺旋桨尾流共同作用来形成一定的附加推力。

节能轴支架具有较好的节能效果[21]。用于双桨船的节能效果在 5%~8%之间；如果采用高升阻比的机翼型剖面，节能效果能够达到 5%~11%；针对同一条船，其节能效果与航速的高低以及螺旋桨负载的大小成正比。

2.3.3 节能轴支架的特点

节能轴支架具有装置相对简单，结构可靠的优点，较多的在双桨或者多桨船上获得应用。就新建船舶来说，节能轴支架的安装施工方便简单，复杂程度与常规支架相当；而在旧船舶上进行改造安装时，只需要在已有的支架的支臂上加一层外壳，就可以构成节能轴支架。

节能轴支架不仅可以通过优化螺旋桨来流来提升推进效率，还能够减少船体航行时遇到阻力。

一般来说，拥有较高的航速的船舶能够产生更强的预旋流，因此也能获得更好的节能效果，但是船舶航行速度过高时，将导致螺旋桨空化方面的不良影响。

2.3.4 节能轴支架的设计参数

（1）轴支架支臂的位置角，使两支臂处于相对有利的伴流位置上；

（2）轴支架支臂的前倾角，适当增大桨盘面和轴支架后缘的距离；

（3）安装角，经过计算和试验确定支臂的安装角；

（4）剖面，采用不对称机翼形剖面。

图 2-5 是轴支架的安装位置示意图。

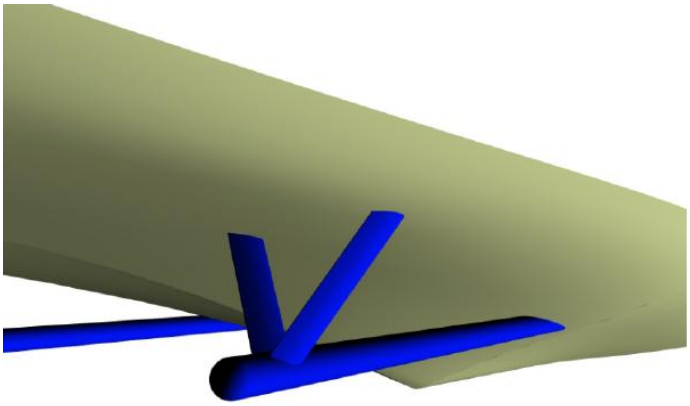


图 2-5 轴支架的安装位置示意图

2.3.5 节能轴支架的经济效益

节能轴支架具有明显的经济效益，目前尚没有比较全面的统计资料，因此各种船型采用节能轴支架后全部经济效益尚无法统计，总的来说有一下两种[22]：

（1）节能轴支架的初投资费用比较小。对于新建船舶上安装节能轴支架，一般只需追加很少的投资费用；而对于在旧船舶上进行改装，安装节能轴支架实际只要增加一个包壳，因此需要投入的投资费用较小，通常情况下，3～6 个月就能够收回成本。甚至如果同型船数量多，投资回收周期会更短。

（2）提高了客船到港的准点率。

2.4 本章小结

在本章中，对前置导管、节能轴支架以及桨毂整流鳍进行了介绍。对前置导管主要研究了其发展过程、节能原理、适用对象、装置的优点以及影响装置节能效果的参数；对节能轴支架的研究除了考察了与前置导管类似的内容外，还研究了节能轴支架的经济效益；对桨毂整流鳍主要考察了它的研究发展、节能原理以及适用对象。

第三章 基于桨后能量回收技术的水动力附加节能装置

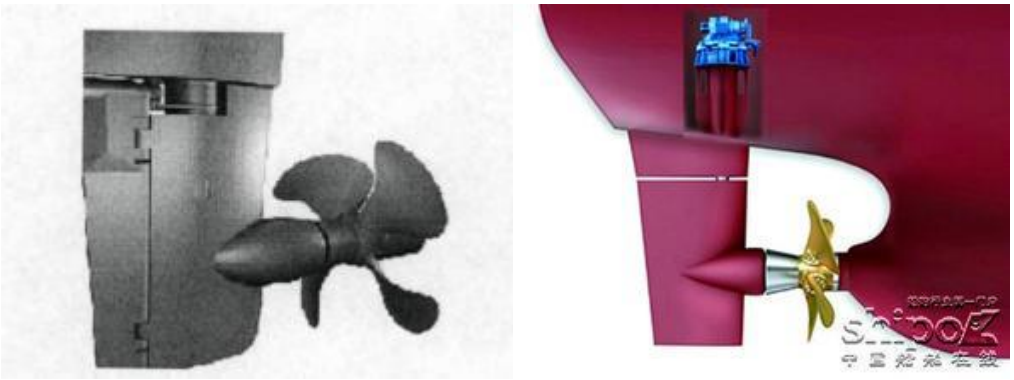
3.1 引言

基于桨后进流优化技术的水动力附加节能装置主要包括舵球、自由旋转助推叶轮以及舵附推力鳍。这类节能装置主要是通过调整船体尾部的压力分布场，并且回收尾流能量，从而达到提高螺旋桨的推进效率、节能的目的。

3.2 舵球

日本川崎重工的科研人员在进行船模试验时，在螺旋桨后的中心区域发现一个明显的低压区，这个低压区紊乱的水流以及与之伴随的漩涡造成了能量的损失。因此研究人员在螺旋桨的桨帽处安装了舵球，从而减少这部分能量损失。加装的舵球可以有效的优化螺旋桨后的尾流分布，从而降低桨后的能量损耗。

一般来说，常见的舵球有两种形状，一种舵球的头部为球面，一种舵球的头部是平面，这两种舵球的示意图见图 2-5。



(a)头部为平头舵球　　(b)头部为球形舵球

图 3-1 两种舵球示意图

3.2.2 舵球的发展

十九世纪八十年代初，日本川崎重工首先将舵球应用于一艘十三万吨级的散货船“瑞川丸”上。CHRISTENSEN DONALD J，HANLON，CASEY 对舵球的性能进行了数值模拟试验。上海船舶研究所研究了一系列几何相似的舵球和桨的组合，重点研究了不同的舵球和螺旋桨的组合、不同的舵球间距以及不同的舵球尺度对螺旋桨敞水效率的影响 。张大有[20]考察了舵球直径和桨舵之间的距离对舵球工作效能的影响。马骋[21]通过建立螺旋桨一舵—舵球水动力性能的计算机仿真模型，对螺旋桨一舵一舵球水动力性能的计算方法进行了研究。李鑫[22]从理论上讨论了对桨—舵—舵球组合体的水动力性能，运用基于速度势的面元法研究了舵球尺寸的不同对其工作效能的影响。

3.2.3 舵球的节能原理

船体后部的紊流会形成涡流，舵球可以很好的整流螺旋桨后的水流，能够降低由涡流引起的能量损耗；舵球具有的前伸的特殊回转体的形状能够有效的使螺旋桨桨盘面伴流场变得

更加均匀，所以对螺旋桨激振以及空泡等性能产生有利的影响；舵球由内半径向外将尾流压出，从而能够减少尾降低缩现象的出现可能，提高螺旋桨的推进效率。

总结起来说：

（1）舵球能够很好的填充螺旋桨毂帽后低压区，有效降低了涡流导致的能量损耗，同时能够很好的整流螺旋桨后的水流。

（2）选择经试验后进行了几何参数优化的舵球，优化后的舵球可以部分回收螺旋桨后尾流的能量，将这些能量转化成推动船舶前进的动力。

（3）舵球有效优化了螺旋桨后的流场分布，舵以及尾部船体受到的尾流激振力因此而减少了。

裴为民试验显示，如果螺旋桨的设计得当，舵球对螺旋桨效率的提高能够达 3%~5%。

3.2.4 舵球的设计参数

舵球在船舶上的表现主要跟舵球额直径以及舵球的长度两个因素有关[26]。

（1）舵球的直径

在船舶上安装舵球可以有效的消除毂涡以及提高螺旋桨桨盘面处伴流的均匀性，所以对于不同大小的毂涡区，对应着最合适的舵球直径，而且在特定的范围内，螺旋桨盘面处的整流效果与舵球的直径的大小成正比。

舵球选择上存在着最佳直径[27]。如果舵球的直径过小，那么可能会导致节能效果为负，即安装舵球后反而起不到节能的效果，所以在进行舵球的安装之前应当进行充分的计算，考虑到各种要素。

对于最佳的舵球直径的取值，有关学者做了不少的研究。周占群[28]通过研究发现舵球与螺旋桨两者直径的比值在 0.18~0.3 之间比较好；朱光远的研究显示这个比例值在 0.2~0.216 之间比较好。

螺旋桨尾流场与舵、舵球的匹配特性会因为桨本身的差异而不同，以上所说的最佳直径的取值仅仅是一个参考值，实际应用中，一般可以通过理论计算或者实船、船模试验来确定能够与螺旋桨形成最佳匹配的舵球。

所以鉴于舵球与螺旋桨之间存在匹配的问题，不同的螺旋桨在舵球直径选择方面存在着较大的差异，要获得与螺旋桨匹配最佳的舵球，应当进行足够计算或试验。

（2）舵球的长度

舵球长度指的是螺旋桨桨毂后端与舵叶导边之间的距离。一般来说，相对较长的舵球，长度越小的舵球，能够使螺旋桨获得更高推进效率，这是因为舵球能够回收部分螺旋桨尾流中的能量。长度过大的舵球无法充分的回收利用螺旋桨尾流中的能量；但是同时，如果舵球过小，会给安装上带来一定的困难。因此在进行舵球选择时，要将长度的因素纳入考虑的范畴内，不仅要顾及到安装的方便性，同时也要顾及到舵球安装后的带来的节能效果的高低。

此外，舵球的有一个长度的临界值。在临界值之上时，舵球长度的减小对节能效果的影响相对有限；而在这个值之下时，舵球长度的减小会带来节能效果显著的提高。

（3）舵球与螺旋桨的距离

舵球距离螺旋桨越近，螺旋桨的效率越高。

3.2.5 舵球基于 CFD 技术的研究

李学军等[28] 使用了商业软件*FLUENT*对*AU*5－593桨进行了数值模拟计算，考察了桨－舵－舵球系统的水动力性能，研究了浆后舵对螺旋桨性能的影响及舵球的节能效果，通过改变舵球直径与螺旋桨直径的比值，考察了舵球尺寸的变化对螺旋桨效率的影响。

3.3 自由旋转助推叶轮

自由叶轮使用滚柱轴承支撑安装在螺旋桨轴的末端，可以自由转动，它的外形与螺旋桨相似，其直径大约是螺旋桨直径的 1.2 倍 ，见图 2-6。

图 3-2 自由旋转助推叶轮

3.3.1 自由旋转助推叶轮的发展

O.Grim[29]首次提出了自由旋转助推叶轮的理论模型、作用方式以及计算方法，并且之后介绍了其水池试验的结果。谭延寿[30]基于升力线理论，成功的估计了助推叶轮的水动力特性。张大有[31]研究了特定的双尾型内河船的导轮最佳环量的设计方法，并且考察了自由旋转助推叶轮的一些设计参数对导轮系统水动力特性的影响。

3.3.2 自由助推叶轮的节能原理

叶轮位于螺旋桨尾流中的内半径部分起到类似于水轮机的作用，它能够将螺旋桨的尾流能量转换为推动导轮旋转的机械能，以此提供回转力矩；同时自由叶轮位于螺旋桨尾流之外的部分则起到常规螺旋桨的作用，这部分将自由叶轮水轮机部分获得的机械能转化为推力功率，形成推力。

3.3.3 自由旋转助推叶轮的特点

自由旋转助推叶轮能够较好的提高螺旋桨的推进效率，其具有以下特点:

（1）节能效果显著

实验结果显示，自由助推叶轮的通常有 5%～10%的节能效果，在比较理想的情况下，最高节能效果可达 11%~13%。这种节能的效果要效果明显的优于其他水动力附加节能装置(反作用鳍、尾波补偿导管、固定叶轮、毂 冒鳍等的节能效果大多在 4%～8%之间)[32]。

（2）安装方便

除了能够在新建造的船舶上比较容易的加装助推叶轮外，在航船舶也能够通过合适的改装来安装助推叶轮。加装助推叶轮通常只花费两个小时左右的时间，加上船舶进出船坞的时间最多只要一天的时间。

（3）结构可靠

在保修方面，可以用锂皂脂润滑填充轴承盖。这种方式能够在海水中同样获得比较好的润滑防腐作用，两年内轴承结构不需要进行检修而能够保证安全运行。

（4）有利于减少振动

叶轮安装位置的船体表面压力不会由于自由旋转助推叶轮的安装而提高；相反，位于螺旋桨之前的船体表面的压力下降了大概 40%～50%，这种压力的减小十分有助于船体螺旋桨振动的降低。

（5）成本低廉

第一艘加装助推叶轮的船是“Gauos”号，在加装该节能装置后取得了 9%的节能效果，如果假设该船一年航行 150 天，那么每年的航行能够节省油耗约 668000 马克，在八个半月之内就能够收回安装成本[33]。

（6）不会对船舶操纵性能、主机功率以及螺旋桨转速带来不利的影响。

有实验证明，在某些情况下，船舶加装自由旋转助推叶轮后甚至会带来操纵性能的提升。

3.3.4 自由旋转助推叶轮的适用对象

（1）自由助推叶轮主要应用对象是负载比较大的单桨型船[34]，如散货船或油船等。而双桨型船由于负荷相对较小，所以加装助推叶轮后的效果不是很显著。将助推叶轮与导管相比较，当螺旋桨的推力负荷系数处于 2.5~3.0 之间时，助推叶轮能够收到更好的节能效果；但是伴随着螺旋桨负荷系数的提高，导管表现出更好的效果。鉴于现在大部分运输船的推力负荷系数处于 2.5～3.0 之间，所以助推叶轮的有更加广阔的应用空间。

（2）对在航船舶进行自由旋转助推叶轮的加装改造一般要达到必要的要求，比如船、桨、舵之间要保留适当的间距；此外螺旋桨桨轴要有足够的强度来承受加装叶轮后带来的负载增值，相对于通常的单桨船，加装自由助推叶轮要多承受一倍载荷。对于一般的船舶来说，均可满足上面的条件。

3.4 舵附推力鳍

舵附推力鳍是沿水平方向安置在舵的左右两侧的翼型鳍。

图 3-3 舵附推力鳍示意图

3.4.1 舵附推力鳍的发展

日本的森正彦、山崎祯昭等[32]最早对舵附推力鳍的节能特性进行了考察。张云彩等[33]进行了推力翼方面的相关试验。王德询[34]运用数值计算方法，对推力鳍进行了理 论计算。王国强[35]研究了非线性涡格法在讨论舵附推力鳍节能特性方面的应用。郭春雨[36]采用面元法研究了舵附推力鳍节能特性，重点考察了螺旋桨尾涡模型的不同对推力鳍造成的影响。

3.4.2 舵附推力鳍节能原理

推力鳍的两侧机翼分别有一定大小的攻角，攻角的值有正有负。推力鳍可以改变流经的水流的方向，此时流场的方向被两侧机翼改变，如果攻角合适，就会产生附加推力，从而起到回收螺旋桨周向流 旋转 能量的作用。

理想的情况下，舵附推力鳍在可以节省 3%左右的螺旋桨功率[38]。

3.4.3 舵附推力鳍的设计参数

舵附推力鳍的节能效果主要受到下面几个参数的影响[39]：

（1）推力鳍安装角β

推力鳍的阻力一般由两部分组成：受有限翼展导致的诱导阻力以及由于水的粘性作用导致的摩擦阻力。考虑到这两种阻力都对分别应着一个使自身阻力最小的攻角，所以推力鳍的安装角存在着一个最佳角度，大概为 5°[40]。一般情况下，较大得安装角会对应着较大的有效攻角，在攻角不是很大的情况下，升力和阻力会同时随着有效攻角的变大而变大，但是两者合力沿轴向并非一直变大，而是在某一安装角存在着最佳值。

（2）推力鳍展弦比 S/R

当 S /R =0. 9 左 右 时，推力鳍有最高的助推效率（其中 R 是螺旋桨的半径)[41]。通常来讲，如果保持其它参数不变，随着展长 S 的增大，展弦比 S/R 随之增大，则升力和摩擦阻力随之增大。结合船体后部的尾涡因素，S/R 在工程应用中可以取 0.95 左右。

（3）推力鳍垂向位置

一般来说，当垂向位置最靠近距螺旋桨桨轴线时，推力鳍有最好的节能效果[42]。

（4）推力鳍的轴向位置

这里所说的轴向位置指的是舵柱距离桨盘面中心的距离。螺旋桨的尾涡区域可以分为过渡区以及稳定区，相比于稳定区，推力鳍处于过渡区可以收到更好的节能效果。同时，处于螺旋桨尾流场中的舵也能够回收一定比例的周向旋转能量，所以推力鳍通常安装于靠近舵的前缘处[43]。

（5）推力鳍叶数

日本石田峻一考察了有不同叶片数的推力鳍（每边 1~6 片)的节能效率。结论显示，拥有更多叶片数的推力鳍同时有着更好的助推效果。但是因此会带来结构复杂，根部应力大的不利情况[44]，对结构的叶片强度安全带来了一定的挑战。

（6）推力鳍的剖面型式

推力鳍一般使用 NACA 系列翼型[45]，例如 NACA0017、NACA64A-010、NACA0010、NACA0018 等。剖面的选取应当注意要尽可能的降低推力鳍的阻升比，小的阻升比可以让阻力在进流攻角变化较大时保持比较平缓的改变。现在一般使用 NACA64A-010 对称翼型，这种型式的剖面厚度较薄，可以很好的适应正负偏角两个方向的进流，而且具有比较的阻力性能。

（7）舵厚

一般舵厚越小，推力鳍的节能效果越好[46]。在不影响舵的性能的情况下，一般将推力鳍安装于有较小厚度的舵上，从而能够获得较大节能效率。

（8）进速系数 J

小的进速系数 J 一般对应着更好的助推效果；当 J 增大时，效率减小；J 存在着一个临界值，当 J 增大至这个值附近时，推力鳍对能量的回收利用率以及节能效率将逐渐降低至零。但是同时进速系数也不易过小，当进速系数 J<0.8 时一般不适合使用推力鳍，

图 3-4 舵附推力鳍安装位置示意图

3.5 本章小结

在本章中，对舵球、自由旋转助推叶轮以及舵附推力鳍进行了介绍。对舵球主要研究了其发展过程、节能原理、影响节能效果的设计参数以及装置的节能效率；对自由旋转助推叶轮的研究主要考察研究的进展、节能原理、装置的特点以及适用对象；舵附推力鳍的研究主要的是关注了其设计参数对节能效果的影响，同时考察了装置的研究发展以及节能原理。

第四章 基于衰减以及分隔船舶引起的漩涡的水动力附加节能装置

4.1 引言

基于衰减以及分隔船舶引起的漩涡的水动力附加节能装置主要是通过衰减或分割各类漩涡，以减少漩涡阻力来达到节能减阻、提高螺旋桨效率的目的。这类装置主要包括桨毂整流鳍和螺旋桨端板。

4.2 桨毂整流鳍

整流鳍是安装在桨毂帽处的一种附体装置。

图 4-1 桨毂整流鳍示意图

4.2.1 桨毂整流鳍的发展

大内之一[47]通过实验证实了整流鳍具有良好的节能效率。丁举、蔡荣泉等[48]利用数值模拟的方法考察了鳍的攻角、鳍的弦长以及鳍的垂向安装位置等参数对船尾尾流流动的影响。王超[49]运用 CFD 软件计算了桨毂整流鳍的水动力特性，通过对模拟数据结果处理分析，获得了在不同进速系数下对应的桨毂整流鳍的敞水特性曲线。何伟佳[51]研究了在船体减振方面整流鳍片的作用，获得了整流鳍片能够很有效的消除船体振动、降低船体阻力、增加螺

旋桨推进效率的结论。刘启民[50]研究了螺旋桨激振力的产生原理，得到了整流鳍的减振以及减阻机理。

4.2.2 桨毂整流鳍的节能原理

螺旋桨毂帽附近的区域在船舶航行时会生成漩涡，漩涡会造成能量的消耗。为了减少毂涡引起的能量损耗，可以在螺旋桨毂帽附近安装整流鳍片，鳍片与螺旋桨的旋转保持同步，扩散毂涡，降低能耗，提高推进效率。

4.2.3 桨毂整流鳍基于 CFD 技术的研究

王超等[48]使用 CFD 的方法对桨毂整流鳍的水动力性能进行了数值分析。模拟了某型整流鳍在不同进速系数下的推力系数、转矩系数、螺旋桨桨叶表面压力分布。研究将计算结果与过母型桨的计算结果进行对比，发现在低进速系数情况下，安装整流鳍后会使推力系数上升、转矩系数下降，从而提高其效率有。使用 CFD 考察了船体的细节流场，发现安装整流鳍后桨毂处水流流速的分布被改变，原来围绕桨毂随螺旋桨方向旋转的水流变得沿着鳍向桨后运动，从而水流不再在桨毂处汇集，减弱了桨毂涡流。

杨帆等[49]采用 FLUENT 软件对均匀流场中螺旋桨、桨一毂帽鳍、桨一毂帽鳍一舵的推进性能分别进行了计算，获得了相应的流场信息及各进速系数下螺旋桨的推力、扭矩值，并与实验结果进行了比较。分析了有舵和无舵情况下有无毂帽鳍时螺旋桨流场特点，并从能量的角度出发，考察了桨后尾流能量组成，分析了毂帽鳍、舵的整流作用。分析得出毂帽鳍和舵均能改善桨后流场、具有减小尾流动能的作用，但毂帽鳍在有舵情况下的节能效果要低于无舵情况时的节能效果。

张志强等[50]分析研究整流鳍节能性能，应用*CFD*技术数值预报整流鳍节能效率，数值研究整体船－桨－舵相互干扰的水动力性能模型，其数值计算结果与试验结果吻合较好，具有较高的数值计算精度。进而采用上述方法预报船－桨－舵－整流鳍相互干扰的水动力性能，通过比较有整流鳍和无整流鳍两种情况下螺旋桨吸收单位转矩所发出的推力，分析了整流鳍的节能效果，得到了节能效果较优的整流鳍，其综合节能效果可达3.41%，表明整流鳍具有良好的节能效用，此方法研究船舶节能装置的节能效用具有可行性。

4.3 螺旋桨端板

螺旋桨端板是安装于螺旋桨桨叶顶端沿梢圆的切向方向的端板。端板的存在能够使依附于叶梢处的涡维持一定的强度，而无梢涡则会被随尾流流走。同时，因为端板的存在，桨叶叶面和叶背会存在着压力差而产生更大的升力。叶梢带端板的螺旋桨又根据结构形式、安装装位置、尺寸大小的不同分为整式端板螺旋桨、交替小叶型螺旋桨、交替端板型螺旋桨、CLT 螺旋桨。

图 4-2 带端板的螺旋桨

4.3.1 螺旋桨端板的发展

西班牙的 Gomez 首先研究了叶梢带端板的螺旋桨的特性[52]。丹麦的 Kappel 和德国的 Sehwaneeke 开发了 Kappel 螺旋桨。施能继对修改了 B4-55 桨模的外形，对装有不同形式端板的螺旋桨进行了敞水试验以及理论计算。日本的伊藤和荷兰的 dejong 等对叶梢带小翼的螺旋桨进行了研究。崔承根[53]研究了如何计算诱导速度以及水动力螺距角，使用推广的勒布斯升力线理论以及修正过的动量定理来对叶梢带端板的螺旋桨进行设计。胡志安[54]对端板的形状进行了分析，从涡流理论出发，研究了端板的选取在实际应用中的重要作用。

4.3.2 螺旋桨端板的节能原理

螺旋桨端板能够优化螺旋桨叶梢处的涡流分布情况，使其一直处于良好状态，减少甚至消除梢涡，并且在叶梢处形成一定大小的载荷，减少径向诱导损失，从而提高了螺旋桨的效率。

4.3.3 螺旋桨端板的特点

合理的安装端板能够有效的提高螺旋桨的性能，具体总结为：

（1）端板的安装能够比较多的提高螺旋桨的敞水效率，主起到显著的主机节能效果，实船数据显示，安装端板后可节油 10 %左右[55]；如果进一步与前置导管联合使用，节油效果可达 15%左右；

（2）在推力和水流进速一定时，加装端板的螺旋桨所需的最佳直径较小，有利于吃水受限制的船舶采用；

（3）降低发生空泡现象的可能[56]；

（4）有效的降低船体得振动以及噪声[57]；

（5）改善船舶机动性[58]。

4.3.4 几种不同的螺旋桨端板

（1）整式端板

这种型式的叶梢端板是一个整块，在整个叶背两侧呈对称分布。安装了这种端板的螺旋桨的叶梢处有一定长度的弦长，弦长的存在方便能连接端板。由船舶的敞水模型实验结果显示，安装整式端板后的螺旋桨相对于常规桨能够获得 2.5%左右的节能效果[59]。

（2）交替小叶

这种端板的设计思路来自于在飞机上安装的小翼。考虑飞机上装小翼的原理，将其拓展到船舶上，就可以获得能够安装在螺旋桨上类似的小翼，这种螺旋桨称为交替小叶型螺旋桨。小翼安装的位置在于叶背和叶面，这两处交替安装，并且需要考虑反角、后掠角、安装角等设计参数。

（3）交替端板

这种端板的主要特点有：

（a）相比于整式端板桨，这种形式的端板减小了端板的弦长，这样有助于降低端板在受到水流的粘性作用而产生的能量损失；但是同时端板弦长不宜太小，因为过小的弦长会导致空泡的产生。所以，在考虑弦长大小时应当根据优化的方法以及空泡极限判据来进行设计，使得端板能够有最小的粘性能量消耗，并且拥有最好的环量分布。

（b）交替型端板叶根处的弦长有重叠部分，能够防止梢涡分裂现象的发生，降低了动能损失以及诱导阻力。同时，两个端板叶根部重叠的部分还有利于改善桨叶的要分布

（c）临近梢部导边安装的端板偏向叶背方向，临近梢部随边安装的端板偏向叶面方向，这与上述交替小叶型端板的布置恰好相反，这样做能够降低桨叶的应力，不仅保证了强度，而且提高了流体的动力性能。

（d） 端板设置叶梢的两个侧面而非单面设置，从空泡的角度来看，两面交替设置端板，不仅能够减少螺旋桨在不发生空泡时设置端板所需的表面积，而且能够降低端板所受水的粘性作用而产生的能量消耗。

（4）CLT

CLT 型端板最早由西班牙 Gom 等人进行研究。CLT 型端板与前面所说的交替小叶相类似，两者的不同之处在于 C L T 桨仅在螺旋桨叶片的压力面一侧安装端板，并且 CLT 端板在螺旋桨上是向后收缩的，这种设计是为了方便流体通过桨盘时的收缩。C L T 端板螺旋桨的这种设计，能够有效的降低端板的粘性阻力，同时可以避免桨后压力的减额，从而使得螺旋桨的推进效率获得进一步提升。

4.4 本章小结

在本章中，对前置导管、节能轴支架以及桨毂整流鳍进行了介绍。对舵球主要研究了其发展过程、节能原理、影响节能效果的设计参数以及装置的节能效率；对自由助推叶轮的研究主要考察研究的进展、节能原理、装置的特点以及适用对象；舵球的研究主要的是关注了其设计参数对节能效果的影响，同时考察了装置的研究发展以及节能原理。

第五章 组合动力节能装置

5.1 引言

在实际应用中，常常将两种或两种以上的附体节能装置进行合理的搭配使用，结合其不同的优点，从而获得更优异的节能效果。以下是几种比较常见的组合节能装置。

5.2 基于导管类的水动力附加节能装置

通过对导管类节能装置进行改进或与其他附加水动力节能装置组合可形成多种新型节能装置。

5.2.1 前置半导管－导流鳍

前置半导管－导流鳍组合节能装置(SDS－F)是由日本川崎船舶工业集团公司开发的一种新型组合节能装置[60]。SDS－F 由安装在船体上的逆向导流鳍以及安置于螺旋桨前方的半导管构成，示意图见图 4-1。

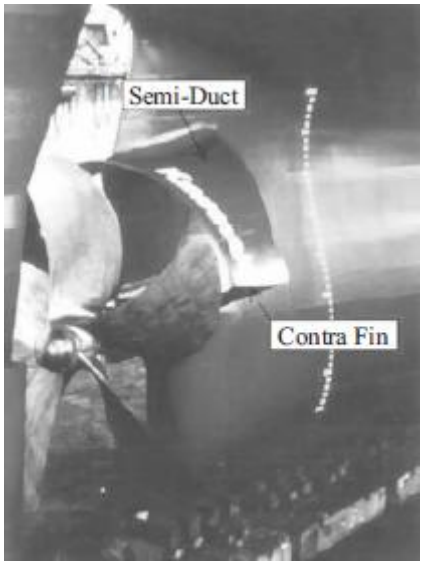


图 5-1 川崎船舶工业公司的 SDS － F 节能装置

该节能装置的节能原理如下：

（1）船体表面并不是简单规则的形状，其本身是个复杂多样的曲面，粘性表面层以及表面兴波的存在使船舶的尾部形成对推进不利的伴流。前置半导管能够起到整流作用，提高了螺旋桨的推进效率。

（2）前置半导管可以提高螺旋桨尾流的流速，有降低了边界层的分离状况发生的可能性，提高尾流分布的均匀度和稳定性，有效的缓解船体在航行过程中的振动，从而降低了船舶所受到的阻力。

（3）逆向导流鳍能够使进流进行预旋运动，方向与螺旋桨的旋转方向相反，此时螺旋桨在运转过程中生成的与桨的旋向相同的水流被抵消，因此降低了尾流的能量损耗，提高了螺旋桨的工作效率。

SDS－F 装置经实船试验能够达到 3%～7%的节能效果，如果与舵球－推力鳍联合使用，能够获得更好的结果。

5.2.2 导管－导流鳍

导管－导流鳍是由德国汉堡的贝克尔船舶系统公司研发出的新型组合节能装置[61][62]，又被称为 Mewis 导管(Mewis Duct)。该装置包括一个安装在螺旋桨前方的补偿导管以及一组预旋导流鳍片，见图 5-2。

图 5-2 Mewis Duct

与一般的独立节能装置相比较，Mewis 导管能够有效的减少两种相互独立的能量损耗：一是导管可以减少螺旋桨尾流的能量损耗；二是导流鳍片能减少船舶尾部旋流的滑移损失。Mewis 导管的水动力性能特点如下：

（1）一般方形系数比较大的船舶通常有相对不佳的尾部伴流场，这就导致螺旋桨无法获得充足的进流，而因此对其推进效率的造成了不利的影响。这种新型节能装置的作用就体现于此，安装在船体尾部、螺旋桨前方的 Mewis 导管调节乐螺旋桨进流，使螺旋桨的桨叶始终处于进流的作用下。

（2）导管能够使导流鳍的鳍片更加稳定并且生成一部分的推力。

（3）Mewis 导管中的导流鳍能够在螺旋桨前方形成预漩涡，预旋涡具有与螺旋桨旋向相异的旋向，增加了桨的负载从而提高了螺旋桨的推力。同时，导管与螺旋桨处于不同的轴线上，螺旋桨的直径大于导管的直径，而且导流鳍具有非对称的剖面以及位置，所以能够得到较好的螺旋桨来流场。

（4）整流鳍与导管的组合系统降低了船舶尾流旋转动能损失，可以降低在螺旋桨内径重载情况下螺旋桨桨毂处的毂涡损失，改善螺旋桨叶梢处空化现象。

魏琳等[63]使用商业软件 Fluent 对带附体的80000吨油船进行了数值模拟，采用叠模以及计及自由面影响的 VOF 两种方法，将模拟计算获得的船尾伴流场与模型试验的结果进行了比较。结果发现，在无桨时，Mewis 导管会在导管内部产生漩涡，这对船体节能是不利的；但是 Mewis 能够产生的与螺旋桨旋向的预旋涡，可以提高螺旋桨负荷，从而提高推力。

5.2.3 补偿导管－螺旋桨毂帽鳍

补偿导管－螺旋桨毂帽鳍组合节能装置是一种由桨前补偿导管节能装置与桨后螺旋桨毂帽鳍节能装置联合使用的水动力节能装置[63]，见图 5-3。

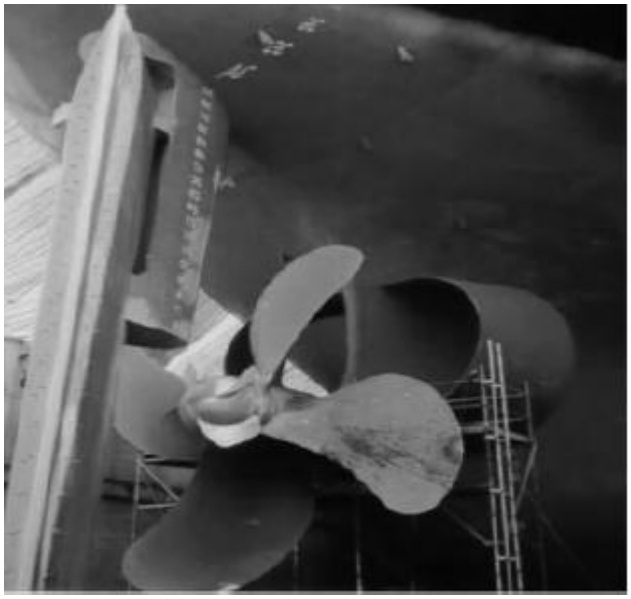


图 5-3 补偿导管－螺旋桨毂帽鳍

一般来说，船舶在行进时螺旋桨桨盘面的伴流处于不均匀状态，这种情况对于方形系数比较大的船舶尤为明显，严重时，这种不均匀的程度在螺旋桨盘面上处与下处能够达到 50%以上。这种情况不但会比较大对螺旋桨的推进效率造成影响，而且会导致螺旋桨由于桨盘面伴流的上下不均匀生成振动。而置于船体尾部左右侧的半圆型导管通过将水流压缩使其流向船体，从而减少船尾的水流分离的现象发生，增加进流，使螺旋桨获得更高的工作效率。

螺旋桨毂帽鳍是一种安装在螺旋桨之后附体装置，能够对桨毂附近的流体起到整流作用从而较少或消除毂涡；毂帽鳍的鳍叶与来自于桨毂处的水流构成合适攻角，形成升力以及阻力，升力降低了螺旋桨回转方向的力矩；同时螺旋桨桨鳍具有干扰作用，有助于降低包括鳍、桨等在内的整个推进系统的转矩。

三井商船株式会社进行了非常多的实船航行试验，获得结论：在安装 PBCF 后螺旋桨的推进效率得到了显著的提升，能够提升 3%～5% （一般螺旋桨的螺距比越高越显著）。

这种新型的附体装置已经运用于许多新建船舶上并且取得很好的节能收益。主要适于方形系数大于 0.65 并且傅汝德数小于 0.3 的单螺旋桨运输船上，同时也能够应用在一些双桨船上。我国首先在“湘航 803”号浅水客轮上实现这种装置的应用，获得大约 8%[64]的收益。

5.2.4 补偿导管－自由旋转助推叶轮

补偿导管－自由旋转助推叶轮组合节能装置[65]是由安装在螺旋桨前、船体尾部的补偿导管以及桨后自由旋转助推叶轮组成的一种水动力节能装置，见图 5-4。

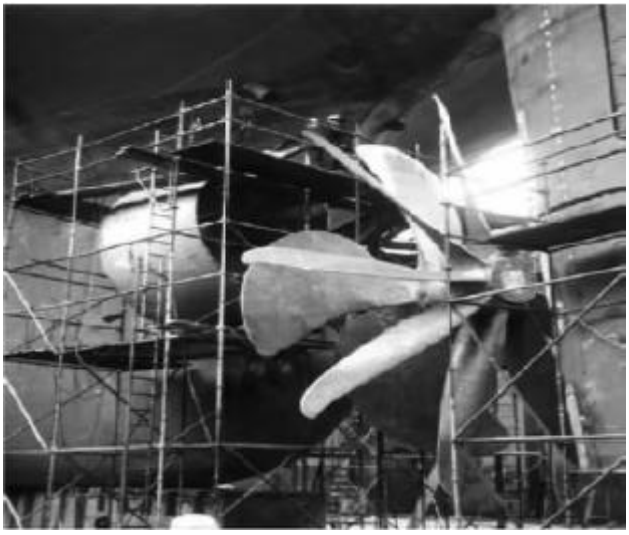


图 5-4 补偿导管－自由旋转助推叶轮

这种组合节能装置的目的：提高桨的进流速度并且回收螺旋桨尾流中的能量。其节能原理如下：

（1）补偿导管能够挤压尾流，改变其方向并使其流向船体，降低边界层发生水流分离状况的可能性，使螺旋桨在工作时有更多的水流以匀速流向螺旋桨，从而使螺旋桨获得更多的进流，平均桨盘位于上下两个地方的负载，达到提升螺旋桨推进效率以及降低螺旋桨激振力的目的。

（2）补偿导管能够借助环流生成附加推力，同时位于桨后的自由旋转助推叶轮可以吸收螺旋桨后的尾流能量，同样生成部分的附加推力。

（3）位于桨后的叶轮还能够减小螺旋桨之前的船舶表面的脉动压力，从而降低了由螺旋桨引起的船体振动。

对于这种组合的节能装置，良好的工作表现首先源于它们各自独立工作时均能起到很好的节能效果。伴流补偿导管由于其本身结构简单以及安装方便特点，因此在当下新建的商船上获得了广泛的应用，而且它不但能够安装于新建船舶上，同时也能够用于在航船舶的改造安装。综合各种实船试航后的统计结果，考虑到负载、船速以及海况等条件，装置的理想节能效果能够达到 5%及以上。O.Grim 首次在一艘 HDW-1 型摩托艇上安装自由旋转助推叶轮获得成功，从而证明了其能够将螺旋桨的推力增加 10%～13%[66][67]。

补偿导管－自由旋转助推叶轮组合节能装置通过桨前补偿导管与桨后自由旋转叶轮相互配合使用，不仅能够发挥独立装置所能达到节能效果，同时装置之间还能产生部分的促进作用，因此这种组合装置有很好的应用潜能。

5.2.5 超级导流管－舵球－舵附推力鳍

超级导流管－舵球－舵附推力鳍组合节能装置是由安装在螺旋桨之前船体上的超级导流管以及桨后舵球－舵附推力鳍系统组合而成的一种水动力节能装置[68]，见图 4-5。

图 5-5 超级导流管－舵球－舵附推力鳍

该组合节能装置节能原理如下：

（1）导管的存在大幅降低了位于船体尾部的涡流出现分离的可能性，因此拥有很好的稳流作用。此外，超级导流管的伴流分数会受到其本身诱导速度的作用而变大。

（2）桨的诱导作用使导管生成额外的推力，降低了推力减额因子。

（3）受到伴流变化以及“稳流效应”的影响，螺旋桨桨盘处的流场变得更加的均匀，受此影响，螺旋所桨承受的不均匀力矩获得减小，进一步使船体振动得到降低，推进效率获得提升。

（4）舵球－舵附推力鳍系统能够很好的填充螺旋桨毂帽后低压区，有效降低了涡流导致的能量损耗，同时能够很好的整流螺旋桨后的水流。

瑞典水池(SSPA)经过试验得到结论：超级导流管的节能效果最高为2%，推理鳍的节能效果最高为 3%，舵球的节能效果为0%～2%。

德国汉堡水池(HSVA) 经过试验得出结论：超级导流管的节能效果最高为4%，推理鳍的节能效果最高为 5%，舵球的节能效果为0%～2%。

综合来看，由于舵球、舵附推力鳍、螺旋桨以及船型的差异，因此综合起来，这种组合装置的节能效果为 5%～7%。

5.3 基于导流鳍的附加水动力组合节能装置

5.3.1 导流鳍－自由旋转助推叶轮

导流鳍－自由旋转助推叶轮组合节能装置由安装在螺旋桨前方、船体尾部的导流鳍以及安装在桨后自由旋转助推叶轮组成的一种附体节能装置，见图 4-6。

图 5-6 导流鳍－自由旋转助推叶轮

这种装置的设计思想是：对桨的进流起到引流作用、对船舶的伴流起到优化作用并且吸收位于螺旋桨尾流中的能量，其节能原理如下：

（1）桨前导流鳍能够在吸收船体涡流能量的同时降低由于舭涡以及斜流引起的螺旋桨力矩以及推力的脉动，通过使水流的流向发生变化优化船舶的伴流或者在螺旋桨的前方生成预旋流，预旋流与螺旋桨的旋向相异，从而提高了螺旋桨的效率。

（2）桨后自由旋转助推叶轮能够通过充分的回收螺旋桨的尾流旋转动能产生部分的附加推力。

（3）桨后自由旋转助推叶轮能够使螺旋桨前方的船体表面压力幅值降低大40%～50%，而脉动压力的减小进而导致船体振动的降低。

导流鳍－自由旋转助推叶轮装置综合了两种装置各自的流体动力特性以及优点，在使用时能够起到互相促进的作用。

5.3.2 名村整流鳍－舵附推力鳍组

名村整流鳍－舵附推力鳍组合节能装置[69]是由日本名村造船厂研制的名村整流鳍和舵附推力鳍水动力合理组合的一种附体节能装置，见图 4-7。

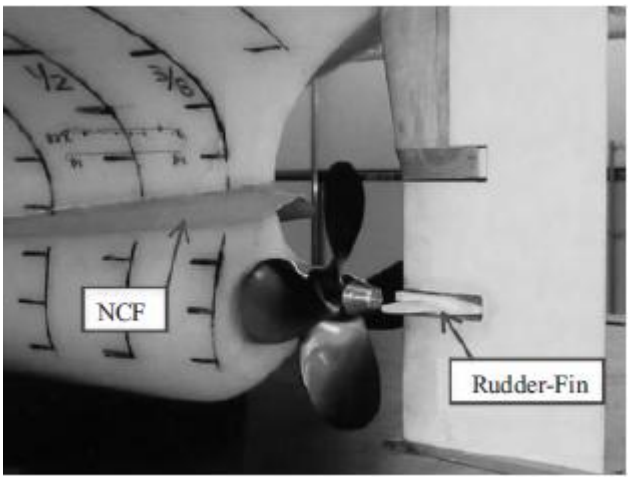


图 5-7 名村整流鳍－舵附推力鳍

名村整流鳍－舵附推力鳍的设计思想是优化螺旋桨的进流并且提高对螺旋桨产生的尾流动能的使用效率。其特点如下：

（1） NCF 的整流鳍片能够调整船体尾部的涡流以及紊流，从而使船体受到的阻力减小、桨的进流变得更加的均匀。优化后的桨的进流能够减小桨的激振力，同时减轻船体的振动。

（2）舵附推力鳍有合适的攻角，能够回收螺旋桨后的尾流能量，从而生成推动船舶的附加推力。瑞典水池(*SSPA*)与德国汉堡水池(*HSVA*)分别通过试验给出其节能效果为0%～3%以及 0%～5%，在不同船舶上的应用结果视船型、螺旋桨型号以及推力鳍攻角的差异而不同。

名村造船厂对四种类型的船舶进行了实船航行试验。在满载航行的情况下，如果只安装名村整流鳍(NCF) ，能够达到约 2%～3%的节能效果 ；而使用了组合装置后，可以节省约7%～9%的主机功率。这是因为导流鳍能够在优化桨的的进流并且推力鳍能够生成附加推力。

5.4 本章小结

本章主要探讨了两种类型的组合节能装置。一类是基于导管类的附加水动力组合节能装置，主要包括前置半导管－导流鳍节能装置、导管－导流鳍节能装置、补偿导管－螺旋桨毂

帽鳍、补偿导管－桨后自由旋转助推叶轮组合节能装置以及超级导流管－舵球－舵附推力器节能装置；另一类是基于导流鳍的附加水动力组合节能装置，主要包括桨前导流鳍－桨后自由旋转助推叶轮以及名村整流鳍－舵附推力鳍组合节能装置。本章主要是对这些组合节能装置的特点以及它们的节能原理进行叙述，在每一种节能装置的最后叙述其节能效果。

第六章 伴流补偿导管计算分析

6.1 引言

前置预旋导轮一般由一个导管加若干定子构成，导管能够改善螺旋桨的进流场的均匀性以提高螺旋桨效率，定子叶片能生成预旋进流以减少螺旋桨尾流能量的损耗。这种节能装置适用于低俗肥大型船，具有良好的节能效果。

在本章中，将对超大型油轮在静水情况下，有无伴前置预旋导轮的流场情况进行比较。

6.2 软件介绍

OpenFOAM 是一款开源软件，其本质上就是一个 C++类库，用于创建可执行文件，比如应用程序。应用程序分成两类：求解器与工具。其中求解器是为了解决特定的连续介质力学问题而设计的；工具则是为了执行包括数据操作等任务而设计的。OpenFOAM 包括了大量的求解器和工具，牵涉的问题也比较广泛。OpenFOAM 的一个特点是用户可以通过必要的一些知识（包括数学，物理和编程技术等）创建新的求解器和工具。图 6-1 是 OpenFOAM 的总体结构示意图。

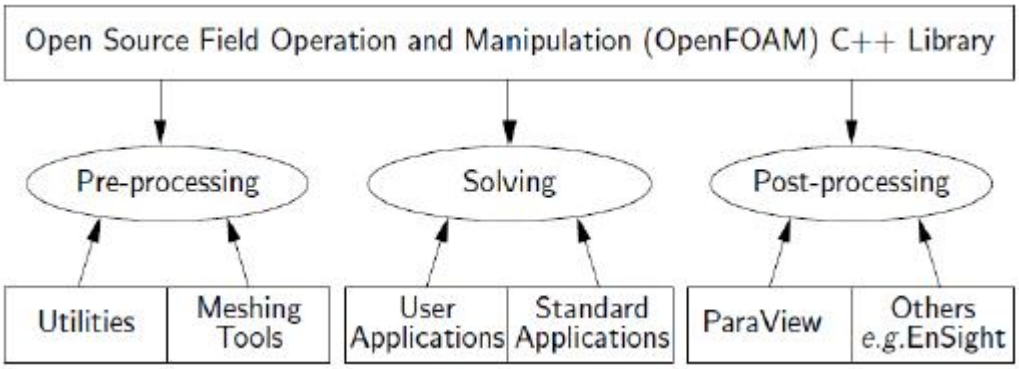


图 6-1 OpenFOAM 总体结构图

naoe-FOAM-SJTU 是一款基于 OpenFOAM 的数值求解器，由上海交通大学万德成教授课题组开发。这款求解器面向船舶与海洋工程水动力学，有六自由度运动模型、数值波浪水池造波与消波模块、系泊锚链模块、重叠网格模块，其基本框架图见图 6-2。

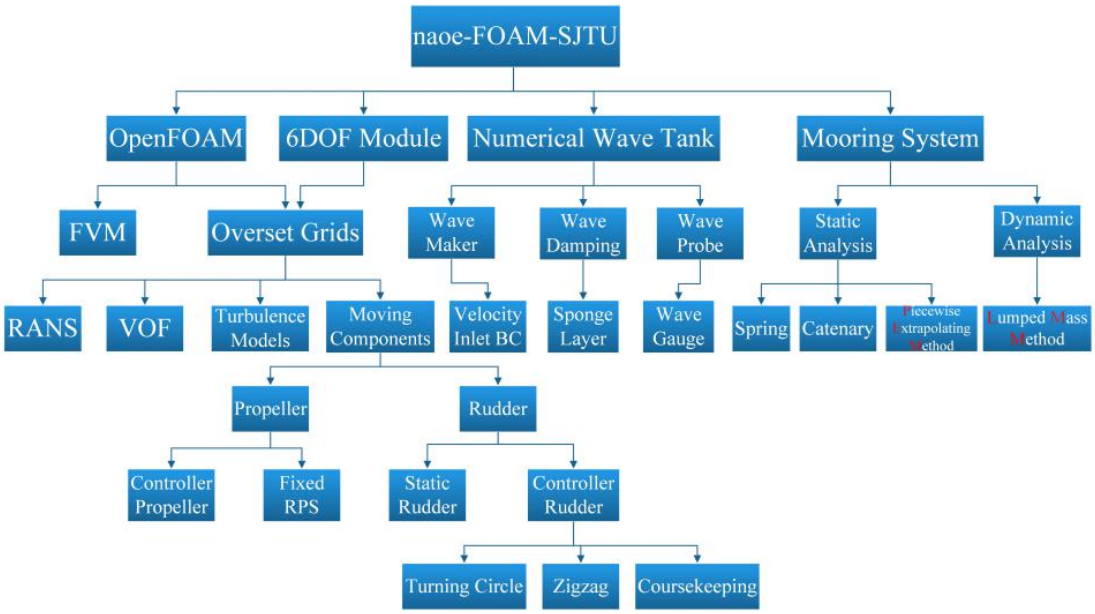


图 6-2 naoe-FOAM-SJTU 求解器框架图

6.3 前置预旋导轮基于 CFD 技术的研究方法

由于 CFD 在节能装置的计算方面还处于发展之中，前置预旋导轮的 CFD 研究成果不是很多，下面以 Shin 等[70]的研究为例，考察基于 CFD 技术对前置预旋导轮的研究。

Shin 的研究对象安装前置预旋导轮的 VLCC 船，研究采用了德国汉堡水池（HSVA）开发的 CFD 代码 FreSCo+，首先对 VLCC 船进行了数值模拟，而之后则进行了模型试验验证。数值模拟计算采用的是 RANS 控制方程，离散采用的是有限体积法，计算网格为四面体非结构化网格。Shin 等的计算获得了船尾详细的伴流场和压力场，通过对伴流场以及压力场的分析发现，在预旋导轮的导管内壁中部存在着一个明显的低压区；研究同时考察了导管不同安装角度队导管节能效果的影响，结果发现，相对不安装节能装置的情况，安装在在+5°~-5°（“-”表示导管向螺旋桨倾斜，“+”表示导管向远离螺旋桨方向倾斜）范围内的前置预旋导轮均有节能效果，-5°时节能效果最为明显。

6.4 对 VLCC 前置预旋导轮节能效果的研究

为了对 VLCC 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。利用重叠网格方法来对螺旋桨进行网格划分，进行 VLCC 有无节能装置的自航计算。

6.4.1 计算模型

本次计算的船型为某型号 32 万吨 VLCC，其垂线间长 Lpp 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 6-1 所示，计算船型如下图 6-3 所示。

前置预旋导轮节能设计理想节能效果在 3%~8%左右。

表 6-1 VLCC 船主尺度

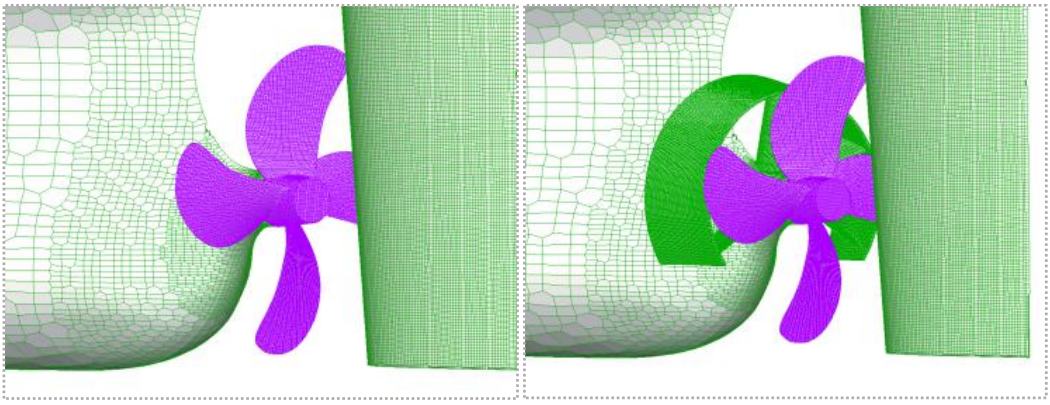
主尺度		实尺度	模型尺度
垂线间长	L_{PP} (m)	320.000	8.000
水线长	L_{WL} (m)	325.992	8.150
吃水	T (m)	20.500	0.513
湿表面积	S (m^2)	28640.000	17.900
LCG	LCG (m)	148.880	3.722
纵向惯性矩	I_{yy} ($kg\cdot m^2$)	2.053×10^{12}	20046.280
螺旋桨 x 方向位置	x/L_{PP}	0.9864	0.9864
螺旋桨 z 方向位置	$-z/L_{PP}$	-0.0411	-0.0411

6.4.2 计算网格与边界条件

地球坐标系下 VLCC 有无节能装置自航计算网格计算域为：$1.0L_{pp}<x<4.0L_{pp}$，$-1.5L_{pp}<y<1.5L_{pp}$，$-1.0L_{pp}<z<1.0L_{pp}$。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 Suggar++挖洞插值。有无节能装置自航计算的网格量分布如表 6-2 所示。所采用的重叠网格布局以及边界条件如图 6-4 所示，全局网格以及船尾局部网格如图 6-5 所示。

表 6-2 VLCC 计算网格配置

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



(a)无节能装置　　(b)有节能装置

图 6-3 计算网格

6.4.3 计算结果与分析

计算模型对应的傅汝德数为 Fr=0.147，对应的实际航速约为 16kn。有无节能装置情况下的 VLCC 摩擦阻力修正值均为 25.74N。计算航速为 1.303m/s（，计算中放开垂荡、纵摇自由度；其中以尾倾为正，首倾为负；船体上升为正，船体下沉为负。

经过计算，可以得到 VLCC 船模在 Fr=0.147 航速下有无节能装置的自航推进因子，结果如下表 6-3 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。

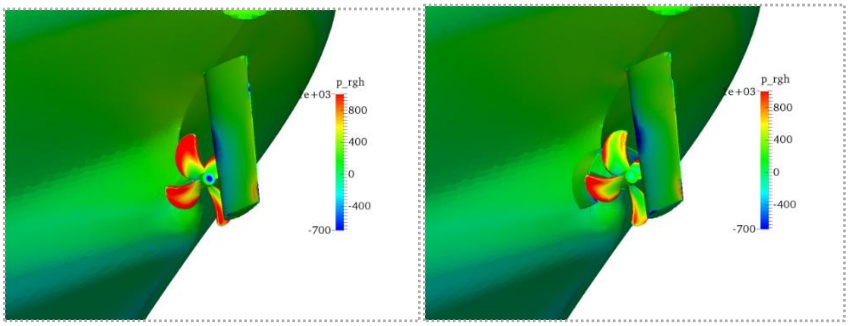
分析计算结果可以发现，有无节能装置对 VLCC 船的自航推进性能的影响非常明显。加装节能装置后可以有效改善船后伴流，降低推力减额。船体在自航点下的总阻力，螺旋桨的转速、推力、扭矩均比无节能装置时更小，以螺旋桨的功率为标准，安装节能装置后可以节能 5.7%。

表 6-3 有无节能装置 VLCC 自航阻力系数及推进因子计算结果

计算模型		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
螺旋桨效率	η_0	0.5302	0.5335
扭矩系数	K_{Q0}	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

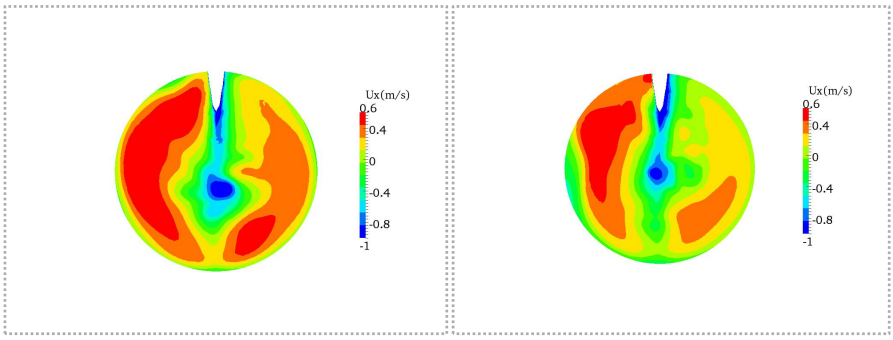
船体压力分布图如图 6-7 所示，可以看到安装节能装置后对船身整体压力分布基本不产生影响，但对船尾局部的压力分布产生了明显的影响。安装节能装置后，螺旋桨桨毂处的低压区有明显的减小，这对于回收桨毂涡能量有帮助。同时可以看到螺旋桨推力面压力降低，这说明螺旋桨功率有明显减小。

船尾伴流图如图 6-8 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，这对增加螺旋桨推进效率，减小螺旋桨振动起到很大的帮助。



（a）不带节能装置船尾压力图　　（b）带节能装置船尾压力图

图 6-4 压力分布图



(a)不带节能装置（桨后，x/L_{pp}=0.990）　(b)带节能装置（桨后，x/L_{pp}=0.990）

图 6-5 桨面伴流图

6.5 本章小结

本章运用 CFD 数值模拟与分析的方法探讨了 VLCC 在安装前置预旋导轮前后尾流场的情况。数值模拟，得到了初步的计算结果，说明了使用 CFD 进行节能装置效果评估的有效性。结果显示，VLCC 在安装前置预旋导轮后，螺旋桨的效率有了明显的提升，这表明水动力附加节能装置对于船舶的节能的方面有着重要的作用。

但是，我们同时要考虑到，由于该 CFD 数值模拟的对象是船模，因此相对于实船来讲，难免会存在着尺度效应，导致实际安装于实船的节能装置的效果往往与模型尺度预报的结果有一定的出入。所以为了更好的评估节能装置的效果，在今后可以进一步的展开对实尺度安装节能装置的船舶进行 CFD 数值模拟与分析。

第七章 研究与展望

7.1 全文总结

随着“绿色船舶”理念的不断发展，伴随着能源紧缺、石油价格上涨、温室效应等问题的加剧，节能的设计理念越来越成为船舶设计过程中占据关键地位的一环。相比于其它节能措施，水动力附加节能装置由于其本身具有的造价较低、安装方便等优点逐渐获得船舶设计者的青睐。而现在的水动力附加节能装置种类较多，在选择节能装置时，给人一种措手不及的感觉。鉴于这一点，本文总结了几种比较常见水动力节能装置，并且建立了船舶的模型对前置伴流补偿导管工作表现进行了性能模拟计算。具体的工作如下：

（1）基于桨前进流优化技术的船舶水动力附加节能装置。这类节能装置主要包括前置导管、节能轴支架等。对于这些节能装置，具体的分析了它们的节能原理、节能效果以及装置的使用范围等。获得如下结论：(a)前置导管主要适合于方形系数大于 0.65，傅汝德数 Fr 小于 0.3 的单桨运输船，船型越丰满其节能效果越明显。装置主要通过改善船舶尾部伴流场以及降低尾流旋转能量损失来达到节能的目的，其节能效果为 4%~6%。(b)节能轴支架适用于双桨或多桨船，主要通过使螺旋桨进流预旋来达到节能的目的，轴支架具有比较高的经济效益，节能效果为 5%~11%之间。

（2）基于桨后能量回收技术的船舶水动力附加节能装置。这类节能装置主要包括自由旋转助推叶轮、舵附推力鳍以及舵球。主要的结论有：(a)自由旋转助推叶轮主要适用于高负载的单螺旋桨船，装置主要是通过吸收螺旋桨的尾流能量并将其转换为推动导轮旋转的机械能，形成推力，从而达到节能的目的，其节能效果通常为 5%~11%，最高可达到 11% ~13%。(b)舵附推力鳍具有比较广的适用性，可以在一般的船舶上安装，装置主要是通过改变水流的流场方向获得附加推力从而起到节能的效果，其节能效果为 3%左右。(c)舵球属于通用性的节能装置，可以用于一般的船舶上，装置主要通过减少螺旋桨桨毂帽后的粘性损失来达到节能的目的，其节能效果在 2%~4%之间。

（3）基于衰减以及分隔船舶引起的漩涡的船舶水动力附加节能装置。这类节能装置主要包括螺旋桨端板和桨毂整流鳍。主要结论有：(a)螺旋桨端板适用于一般的船舶，装置主要通过优化螺旋桨叶梢的涡流分布，使其一直处于最佳状态，减少或者消除梢涡，并且在叶梢处形成部分载荷，降低径向诱导速度的损失，从而提高了螺旋桨的推进效率。安装端板后，可以节油 10%左右。(b)桨毂整流鳍适用于一般船舶，装置主要通过扩散毂帽后的毂涡来达到节能的目的，其节能效果在 4%左右。

（4）组合节能装置由两种及以上的装置组合而成。本文主要研究了两类组合节能装置：一类是基于导管类的附加水动力节能装置，主要包括前置半导管－导流鳍节能装置、导管－导流鳍节能装置、补偿导管－螺旋桨毂帽鳍、补偿导管－桨后自由旋转助推叶轮组合节能装置以及超级导流管－舵球－舵附推力器节能装置；另一类是基于导流鳍的附加水动力组合节能装置，主要包括桨前导流鳍－桨后自由旋转助推叶轮以及名村整流鳍－舵附推力鳍组合节能装置。对这些组合节能装置的特点以及它们的节能原理进行叙述，在每一种节能装置的最后叙述其节能效果。

（5）CFD 是研究流场问题的有效的方法。本文使用基于开源软件 OpenFOAM 开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器对超大型油轮在静水情况下，有无伴前置预旋导轮的流场情况进行

了比较。在安装节能装置后，螺旋桨的效率有了明显的提升，这表明水动力附加节能装置对于船舶的节能的方面有着重要的作用。

7.2 研究展望

本文总结了目前比较常见的几种水动力附加节能装置的特性，并且对一些节能装置组合使用后的情况进行了分析，同时用重叠网格的方法具体计算了一种水动力附加节能装置在某种工况下的工作特性。但是，考虑到水动力附加节能装置种类的多样性以及它们工作水域的复杂性，未来还有很多的工作可以深入开展。

（1）本文仅仅介绍了七种独立的水动力附加节能装置，并对它们的特性进行了一个概括性的总结。实际上目前运用在船舶上的水动力附加节能装置有很多，而每种节能装置在不同的船型上安装或者工作在不同的工况水域下，它们的结构参数都会发生一些变化，这些变化会很大程度上影响它们的特性，并且对最后的节能效果带来或深或浅的影响。未来可以进一步深入的考察这些节能装置，更加具体的研究装置的每一参数的变化会带来的影响。

（2）对于组合节能装置，本文仅仅是对一些常见的组合装置进行了简要的说明，并未具体的研究这些装置设计参数等方面的特性。然而节能装置的组合应用一个目前比较热门的点，未来可以对任意节能装置的组合使用进行一个系统的研究，总结出比较好的组合方式。

（3）运用 CFD 的方法可以进一步计算水动力节能装置在不同的设计参数下，工作在不同的工况下的节能功效，从而获得在特定环境下某个节能装置的理想工作状态。但是由于尺度效应的影响，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。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。

参考文献

[1] Wri Jin-fang,CHEN Jing-pu,ZHOU Wei-xin. Study on the calculation method of coefficient fw for the decrease of ship speed in EEDI[J].Shipbuilding of China,2010,51(3):77-82.
[2] Ship Energy Efficiency Measures: Status and Guidance[R]. ABS, 2013.
[3] 船舶节能装置[R]. 中国船舶科学研究中心.
[4] Schneekluth H. Wake equalizing duct. The Naval Architect 1986(103):147-150.
[5] 邱天霞,高清廉. 前置导管对螺旋桨性能改善的研究[J]. 齐鲁渔业,1997,06:36-39.
[6] KORKUTE.A case study for the effect of a flow improvement device (a Partial wake equalizing duet)on ship Powering characteristics[J].Ocean Engineering ,2006,33(2):205-218.
[7] FRIESCH J,JONANNSENC. Propulsion optimization tests at high Reynolds numbers[J]. SNAME Transactions,1994(102).
[8] Fahri. A numerical study for effectiveness of a wake equalizingduct[J].Ocean Engineering,2007(34) :2138–2145.
[9] 蒋永旭. 节能前置导管对波浪增阻和失速的影响[J].上海船舶运输科学研究所学报,2013.
[10] 张大有. 关于前置导管两个主要参数的研究[J].武汉水运工程学院学报,1989(8).
[11] 胡志安,吴闻江. 螺旋桨前置导管的理论研究[J].华南理工大学学报,1989.
[12] Fahri Celik., A numerical study for effectiveness of a wake equalizing duct[J]. Ocean Engineering, 2007, 34: 2138-2145.
[13] 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.
[14] 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).
[15] 钱文豪. 船舶螺旋桨进流补偿导管[J].船舶工程,1989.
[16] 钱文豪. 船尾节能型线和水动力附加节能装置[J].船舶,1993,03:1-19.
[17] 船舶推进装置. (日) 特许公报,昭 56 -33279,1981.
[18] 毕毅. 双尾鳍和轴支架对 800t 级排水船操纵性影响的模型对比试验研究.海军工程大学学报,2008,4.
[19] 华汉金,周昭明. 高升阻比翼型优化及其节能轴支架设计.船舶工程,2003,25（2）:8-14.
[20] 王展智. 双臂轴支架的剖面形状和安装角度对船舶伴流场的影响.中国舰船研究,2012.
[21] 郭春雨,赵庆新,等. 船舶附加水动力组合节能技术研究进展[J].舰船科学技术,2014,04:1-10.
[22] 周昭明,赵汉魂. 节能轴支架研究[J].民船船型开发通讯,1993,03:29-43.
[23] 张大有. 襟翼舵舵球技术研究.武汉交通科技大学学报,1997,6:595-599.
[24] 马骋,钱正芳,等. 螺旋桨一舵一舵球推进组合体水动力性能的计算与仿真,研究[J].船舶力学,2005,9（5）:35-45.

[25] 李鑫. 舵球节能装置理论计算[C].2008 年船舶水动力学学术会议暨中国船舶学术界进入 ITTC30 周年纪念会论文集哈尔滨工程大学:131-136.
[26] 裴为民,杨怀蜀. 舵球对螺旋桨敞水效率的影响[J]. 交通部上海船舶运输科学研究所学报,1994,01:6-14.
[27] Hassan Ghassemi,Parviz Ghadimi. Computational Hydrodynamic Analysis of the Propeller-rudder and the AZIPOD Systems[J].Ocean Engineering,2008,35:123-125.
[28] 李学军,苗飞,沈海龙. 基于 CFD 技术的节能舵球节能效果数值预报[J]. 船舶标准化工程师,2014,03:18-20+23.
[29] 关于我们 CNKI 荣誉 版权公告 客服中心 在线咨询 用户建议
[30] 周占群. 船舶尾部节能装置研究[C].92 船舶阻力与性能学术讨论会,1992:355-360.
[31] SU Y. A Study on Design of Marine Propellers by Lifting Body Theory[D].Yokohama National University,1999.
[32] 谭延寿. 螺旋桨和自由叶轮的性能预估[J].武汉交通科技大学学报,1995,3:23-29.
[33] 张大有,萧衍芬,等. 附体节能技术研究[J].武汉交通科技大学学报,1996,20（5）:538-543.
[34] 黄胜. 船舶推进节能技术与特种推进器[Ml.哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1998.
[35] 黄胜,郭春雨. 船舶推进节能技术研究与进展[J].舰船科学技术,2007,29(l):27-32.
[36] 张建华. 关于一种节能装置一固定叶轮的研究[J],中国造船.1988(4):33-38.
[37] 森正彦等. IHIA.T.Fin 一第一报原理打,止梦开发刃要点一.石川岛播磨技报第 23 卷第 3 号,昭和 58 年 5 月.
[38] 张云彩,陈晓. 推力翼的试验研究,船舶工程.1984,4.
[39] 陈东,王德询. 助推鳍理论计算.武汉水运工程学院学报,1991,12（4）.
[40] G.Q.Wang. Design of additional Thrusting Fin with Nonlinear Vortex Lattice Method,1987.
[41] 郭春雨,黄胜. 面元法计算桨后舵附推力鳍水动力性能[J].哈尔滨工程大学学报,2006（4）:501-504.
[42] 胡文婷. 带有舵球式推力鳍的船用舵水动力性能研究[D].哈尔滨工程大学,2011.
[43] 赵大刚. 船—桨—舵—舵球式推力鳍系统水动力性能数值计算[D].哈尔滨工程大学,2012.
[44] 陈雷强. 舵附推力鳍参数化设计及试验分析[D].武汉理工大学,2012.
[45] 张海泉,杨鹄. 舵附推力鳍在导管桨推轮上的应用[J]. 武汉船舶职业技术学院学报,2006,01:11-13.
[46] 郭春雨,黄胜. 非线性涡格法预报桨后舵附推力鳍水动力性能[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2006,06:87-89.
[47] 郭春雨,黄胜,常欣. 非定常流中桨后舵附推力鳍的数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报,2007,03:259-262.
[48] 张旭婷,苏玉民,等. 基于面元法的桨后舵附推力鳍尾流场的研究[A]. 《水动力学研究与进展》编委会、中国力学学会、中国造船工程学会、浙江海洋学院.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文集（下册）[C].《水动力学研究与进展》编委会、中国力学学会、中国造船工程学会、浙江海洋学院:,2013:6.
[49] 杨帆,陈昌运,陈霞萍. 基于 CFD 的桨-毂帽鳍-舵性能研究[A]. 《水动力学研究与进展》编委会、中国力学学会、中国造船工程学会、浙江海洋学院.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文集（上册）[C].《水动力学研究与进展》编委会、中国力学学会、中国造船工程学会、浙江海洋学院:,2013:9.
[50] 张志强,凌乃俊,胡俊明,沈海龙. 基于 CFD 技术的整流鳍节能效果数值预报[J]. 船舶工程,2015,S1:102-105.

[51] 大内一之. 新型节能装置一螺旋桨桨毅帽整流鳍的开发[J].船舶,1992,3:12-19.
[52] 王超. 螺旋桨毅帽鳍水动力性能数值分析[J].船海工程,2009,12,20-24.
[53] 丁举. 船尾整流鳍绕流的数值计算[J].船舶力学,1999,8:25-33.
[54] 刘启民,朱兰,等. 船尾桨前垂向整流鳍的减振机理研究及其应用[J].船舶工程,2007,06:50-53.
[55] 何伟佳. 1600m~3 冷藏运输船异常振动原因及整流鳍片应用[J].广东造船,2000,03:14-17.
[56] Gomez G P. Linares F G.Briones I B.Some Improvements of Traditional Lifting Line Theory for Ship propellers,ISP,1980(4):154-175.
[57] 崔成根. 叶梢带端板螺旋桨的性能研究.华中理工大学学报,1991.
[58] 胡志安. 关于端板螺旋桨形状的若干分析.广东造船,1994.
[59] Fornells R G,Gomez G P. Full-scale results of the first TVF propeller.The Naval Architect, 1983(11):291.
[60] Andersen P,Schwanecke H. Design and model test of tip fin propellers.Transactions of the royal Institution of Naval Architects,1992(134):315.
[61] Hai-jun XU,Cun-yun PAN,Xiao-jun XU,Han ZHOU. Modeling and Hydrodynamic Characteristics of Bionic Undulate Fin Propeller Driven by Hydraulic[J].Advances in Natural Science,2010,32.
[62] Sheng Huang,Xiang-yuan Zhu,Chun-yu Guo,Xin Chang. CFD simulation of propeller and rudder performance when using additional thrust fins[J].Journal of Marine Science and Application,2007,64.
[63] Ying Xiong,Zhanzhi Wang,Wanjiang Qi. Numerical study on the influence of boss cap fins on efficiency of controllable-pitch propeller[J].Journal of Marine Science and Application, 2013,121.
[64] Kawasaki Shipbuilding Corporation[EB/OL].http: / /www.kawasakizosen.com.
[65] JOHAN H,JONG D. A Framework for energy saving device(ESD) decision making[C].Ship Efficiency 2011 3rd International Conference,Hamburg,Germany,2011: 26-27.
[66] SVARDAL J,MEWIS F. Three years of experience with the mewis duct-a contribution to ship efficiency[C].Ship Efficiency 2011 3rd International Conference,Hamburg,Germany, 2011:26-27.
[67] 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.
[68] HUANG Sheng. The technology of ship propulsion and marine energy saving and special propulsion[M. Harbin:Harbin Engineering University Press,1998.
[69] MA Qian-chu,TANG Zhong-gu,ZHANG Shao-qing. The situation and prospects of marine compounded energy-saving[J].Shipbuilding of Wuhan,1992(5):36-40.
[70] IR. Frans Quadvlieg. Marine propulsion and fuel economy[C].Maritime Research Institute Netherlands,October 13th,2009.
[71] ZHOU Xiong. The energy-saving principle and application of Wake-equalising duct[J]. Marine Fire,1993(4) .
[72] QIAN Wen-hao,MO Cheng,WEI Yan-qing,et al. Testingand study of the thrust of compensation duct[J]. Ship,1997(2):7-11.
[73] Universal Shipbuilding. The development of marine energy-saving technology[N].Japan Maritime News,2010:16-23.
[74] Co. Ltd. Namura Technical Review[Z]. No.12,Namura Shipbuilding,2009.

[75] 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.

谢辞

时光荏苒，转眼间四年的本科学习生活就要过去了。回首过去的大学四年，我成长的中的一点一滴都离不开老师的指引，离不开父母的支持和同学的帮助。

首先，我衷心的感谢我的导师万德成教授。从论文的选题阶段到论文框架的建立，再到论文的完成，万老师都给了我莫大的帮助。在研究的过程中，老师总能够在百忙之中抽出时间，细致的解答我的疑问。同时万老师严谨的科研精神给我留下了深刻的印象，这将一直指引我未来的学习与生活。

其次我要感谢赵伟文师兄、尹崇宏师兄以及何东亚师兄，师兄们在我进行毕业设计的过程中给予了我极大的帮助，从软件的安装到算例的计算都离不开师兄的帮助。在论文的写作过程中，师兄提供了很多宝贵的意见，这对我论文的完成起到了重要的作用。同时我要感谢整个 CFD 小组，组内良好的学习氛围、师兄师姐的帮助都对我顺利的完成毕业设计起到了重要作用。

另外，我要感谢好友程铖、陈靖、高路等同学，通过和这些同学的交流与相处，让我始终以积极乐观的心态去面对生活与学业。

最后我要感谢一直以来鼓励、支持我的父母。在我沮丧的时候，父母的鼓励给了我巨大的战胜苦难的勇气与动力。而在我取得了一些进步的时候，父母的提醒又让我继续脚踏实地地去迎接未来更大的挑战。

尽管本科生活就此结束，但是我希望自己能够在未来继续深造的过程中更加努力，不辜负老师、同学和父母的殷切期望，成为一个对社会有贡献的人。

NUMERICAL CALCULATION AND ANALYSIS OF HYDRODYNAMIC PERFORMANCE OF SHIP ENERGY-SAVING DEVICE

Affected by the economic crisis in 2008, the shipping industry has been in the doldrums since 2009. Oversupply of the market has continued for a long time.And the excess capacity has led to fierce competition in the ship industry.Many shipping companies have to carry out a brutal price war in order to get an order for their own survival. In this case, the importance of reducing the cost of ship performance is becoming more and more prominent. In the cost of shipping,fuel costs account for the largest proportion.

However, the situation of high cost of fuel has last for a long time.Before 2008, the problem was masked by the boom of the ship market.But with the economic downturn, the problem came out. How to reduce the cost of fuel in the shipping process has become a focus of concern after the it became the major obstacle to the profitability of the of ships. In order to reduce fuel costs, to reflect the concept of the green of ships,to establish a positive image of the shipping companies,to protect the environment, more and more shipowners have put energy efficiency on an important position.In this case,the research of hydrodynamic additional energy-saving device becomes an important research direction.

This paper includes an overall of seven chapters.The structure and the corresponding conclusions of the paper are summarized as follows.

Chapter One summarized the background of the research of energy-saving device.The research achievements among these decades are described.The research methods are also summarized.

Chapter Two to Five introduced three kinds of energy-saving device and some energy-saving assembly devices.

Chapter Two described energy-saving devices for ship based on inflow optimization technology of propeller.This kind of energy-saving device mainly includes Wake-equalizing duct, energy-saving shaft strut and so on. For these energy-saving devices,the specific analysis of their energy-saving principles, energy efficiency and the use of the scope of the device has been described. The results obtained are as the followings: (1)the Wake-equalizing duct is mainly applied to a single paddle transport ship with a block coefficient of more than 0.65 and the Froude number Fr<0.3.Generally speaking,the more full a ship is, the more obvious the energy-saving effect is. This device attach the aim of energy-saving mainly through the improvement of the ship's flow field in the stern and the reduction of the rotational energy loss.The energy-saving effect of this device is about 4%~6%.(2)energy-saving shaft strut was used in ships with two or more paddles.This device achieve the purpose of energy-saving mainly through making the inflow of propeller pre-whirl.Energy-saving shaft strut has relatively high economic benefits with energy-saving effect between 5%~11%.

Chapter Three described energy-saving devices for ship based on energy recovery technology of propeller.This kind of energy-saving device mainly comprises grim vane wheel, rudder fin and rudder ball. The main conclusions are as the followings (1)grim vane wheel is mainly used in heavy load of single screw ship.The device can absorb the energy of the flow in the stern and convert it to mechanical energy which can push the guide roller rotate.As a result,the ship can save much energy.Generally,the energy-saving effect of this device is usually 5%~11% and maximum of effect can reach to 11% ~13%.(2) rudder fin has wide applicability and can be installed on the usual ships.The device can save energy by changing the flow direction to obtain additional thrust. Its energy-saving effect is about 3%. (c) rudder ball belongs to the general energy-saving device and can be used for usual ship. The device can reduce viscous losses after the hub of propeller to achieve energy-saving purpose.Its energy-saving effect is between 2% and 4%.

Chapter Four described energy-saving devices for ship based on the reduction or separation of the vortex induced by the ship.This kind of energy-saving device mainly comprises Tip Vortex Free Propeller and propeller boss cap fins. The main conclusions are: (1) Tip Vortex Free Propeller is applied to the usual ships.The device can optimize the distribution of the vortex in the propeller blade tip and make it keep in the best condition.At the same time,the device can reduce the lose of radial induced velocity.As a result, efficiency of the propeller is improved and the energy is saved. After the installation of the Tip Vortex Free Propeller,10% of energy can be saved.(2) propeller boss cap fins are applicable to usual ship.This device is can save energy mainly by spread the boss vortex after the hub of the propeller.The energy-saving effect is around 4%.

In Chapter Five,some energy-saving assembly devices which is composed of two or more devices are introduced.There are two kinds assembly devices.The first one is the device based on duct parts.This kind of device include SDS-F,Mewis Duct,Compensating duct-PBCF energy-saving device,Wake equalizing duct-Grimm's wheel energy-saving devices,Super stream duct-surf-bulb energy-saving devices.The second one is the device based on fair water fin.This kind of device include Combination of vane wheel and hydrodynamic fin energy-saving devices and NCF Rudder-Fin energy-saving devices.The characters of these assembly devices are introduced with their energy-saving principles are described.

Chapter Six used the method of CFD numerical simulation and analysis to compare the situations of the flow field in the stern of VLCC when it is installed or not installed with pre-swirl duct.The software named OpenFOAM is used.OpenFOAM is an open source software who is a C++ class library in essence.It can create executable files such as applications.Applications are divided into two classes:solvers and tools.The solvers are designed to solve the specific problem of continuous media mechanics.The tools are designed to perform the task of data manipulation.OpenFOAM includes a large number of solvers and tools and the problems can be solved are also extensive.One of features of OpenFOAM is that users can create new solvers and tools with some necessary knowledge including mathematics, physics,and programming techniques.Naoe-FOAM-SJTU is a numerical solver based on OpenFOAM which is developed by research group of Professor Wan Decheng of Shanghai Jiao Tong University.This solver is meant for Marine Hydrodynamics.It has several modules and they are the motion model of six-degree of freedom, module of numerical wave-make and wave-dissipation, mooring chain module, overlapping grid module.

It can be seen that the pressure distribution on the hull changed little after the installation of energy-saving device.However,the distribution of pressure on the stern has a significant difference.

After the installation of energy-saving device, the low pressure area of the propeller hub were reduced obviously, which was helpful for the recovery of vortex energy in the hub . At the same time, the pressure in the propeller thrust surface is reduced as well.This means that the propeller power is significantly reduced.Also,the wake in upper half of the propeller disk has a significant improvement and velocity of the flow increased greatly.This is to good to improve the efficiency of propeller propulsion as well as the reduction of the vibration.By the numerical simulation,the preliminary calculation results are obtained.And the result show the effectiveness of using CFD to evaluate the energy-saving device.The results showed that the propeller efficiency have significantly improvement after installation of pre-swirl duct and this make sense that hydrodynamic additional power energy-saving device plays an important role in the energy-saving of ships.

Finally,Chapter Seven drew the conclusion and future work for the whole paper.Concerning the conclusion part,the summary of character of hydrodynamic energy-saving devices can provide guidance for choosing which hydrodynamic energy-saving device is suitable when design a ship.The part of calculation show the superiority of CFD in analysing the hydrodynamic energy-saving devices.

However, there is still much work to do on the basis of this paper. First of all,considering the diversity of the hydrodynamic additional energy-saving device types as well as the complexity working waters they work in,more devices and more working situations should be taken into account.Each kind of hydrodynamic energy-saving device has different structure parameters which will deeply affect their characters when they are installed in different types of ship or work in the different conditions of water.These parameters will affect the their energy-saving effect differently.So the study of these energy-saving devices should be further conducted as well as more specific study of the impact which brought about by the changes of the parameters of these devices. Secondly,there remains much to do with the hydrodynamic energy-saving assembly devices.In the future,the systematic study about the combined use of the hydrodynamic additional energy-saving device ought to be carried out in order to summarize a good conclusion that what the best compound mode is.Besides,the method of CFD can be further used in the analysis of hydrodynamic additional energy-saving devices.What the CFD can do is that they can provide a theoretical result of the devices working in the water without carrying out full scale ship test.And in the most situation,the results are believable.