

# 船舶水动力节能装置 CFD 研究现状及分析

许璐荣, 何东亚, 万德成\*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240, Email: [dcwan@sjtu.edu.cn](mailto:dcwan@sjtu.edu.cn))

**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。传统上, 对节能装置主要采用的模型试验的方法进行研究, 但有着成本高、周期长等不足。随着计算机技术的发展, 计算流体力学 (CFD) 越来越多的应用在了节能装置的研究上。

本文总结了近年来用 CFD 方法对水动力节能装置的研究现状。对不同类型的节能装置, 根据其节能原理的不同主要分成了四类: 基于桨前进流优化技术的节能装置、基于桨后能量回收技术的节能装置、基于漩涡衰减降阻技术的节能装置以及新型推进器。对于每种节能装置, 首先对其进行了简要的介绍, 分析了其节能原理, 之后总结了基于 CFD 方法对其研究的成果。文章的最后, 对于节能装置的 CFD 研究进行了展望。

**关键词:** 船舶节能装置; CFD; 数值模拟; 研究现状

## 引言

随着近年来能源紧缺、环境污染、温室效应等问题, 绿色船舶设计作为一股新风逐渐引起行业内相关人员的重视。长久以来, 船舶航运业一直是消耗能源的重要行业, 同时也导致了温室效应等一系列环境问题。早在 2011 年, MEPC 第 62 次会议上, 正式通过了《MARPOL 73/78 公约》附则 VI 修正案, 确定了 EEDI 和 SEEMP 两项船舶能效准则。这两项准则应经于 2013 年 1 月 1 日生效, 并且在 2015 年强制执行<sup>[1]</sup>。EEDI 指数超标的新设计船将不能通过船级社或 IMO 的审核, EEDI 指数超标的运营船舶可能被强制报废或者无法进入国际航运市场。因此船舶的节能减排成为一个需要十分重视的问题。船舶水动力节能装置效果显著, 在船舶的节能技术研究中具有重要的影响。

根据不同的工作原理, 对水动力节能装置大概可以分为四类: 第一类安装于螺旋桨的前部, 改善螺旋桨浆盘面的进流, 优化船舶尾部的伴流、产生预旋流。这类节能装置主要包括伴流补偿导管、前置预旋定子以及节能轴支架等。第二类安装于螺旋桨的尾部, 回收螺旋桨尾流的周向旋转能量。这类节能装置主要包括对转桨、舵球、舵附推力鳍、自由旋转叶轮以及反应舵。第三类通过削弱各种漩涡, 从而降低漩涡阻力<sup>[2]</sup>。代表性的装置主要是毂帽鳍。第四类是新型推进器, 这类装置主要有混合吊舱式 CRPs (Contra-Rotating Propellers) 推进系统, 尖鳍推进器以及仿生推进器。

传统上, 对于节能装置的研究主要是通过船模试验或者理论研究来开展的, 而近些年来, 计算流体力学逐渐兴起。作为流体力学的新手段, CFD 是一种用计算机手段模拟流体流动的方法, 它能够极大的减少设计时间, 降低设计费用。它相对于理论方法来说, 具有假设限制少、应用范围广的特点, 其方法也容易应用。相对于模型试验来说, 计算流体力学很少有马赫数和物体尺寸的限制。数值仿真优于模型试验的地方还在于<sup>[4]</sup>: 计算机仿真的诊断“探测”并不干扰流动且不使所研究的现象变得不可捉摸。在节能装置的 CFD 研究方面, 国内许多的大学、研究机构进行了不懈的探索, 例如上海交通大学万德成教授 CMHL 小组 (以下简称“CMHL 小组”) 基于开源软件 OpenFOAM 自主开发的船舶与海洋工程水动力学 CFD 求解器

naoe-FOAM-SJTU, 由于采用重叠网格方法, 该求解器可以较好地处理船、桨、舵多级物体多自由度的复杂运动问题, 可用于船舶阻力性能, 操纵性能的研究<sup>[3]</sup>。并已用于节能装置对船舶推进效率的影响的研究工作中。哈尔滨工程大学、708 研究所、702 研究所使用 CFD 商业软件 fluent、STAR CCM+等均对节能装置做出了重要的研究。

## 1. 基于桨前进流优化技术的节能装置

### 1.1 伴流补偿导管

伴流补偿导管是在 20 世纪 80 年代初, 最早由德国流体力学教授罗斯开发并运用于散货船上。<sup>[5]</sup>该装置安装于船尾螺旋桨前的桨轴上方, 由 2 个半环组成, 我国称之为“前置导管”或“补偿导管”。这种装置的作用是:

- (1) 提高螺旋桨上部进流的速度, 均匀桨盘面的进流, 提高推进效率;
- (2) 减少船体尾部的水流分离, 降低船体航行时受到的阻力;
- (3) 安装于合适的位置和角度, 可以使船舶产生附加推力。

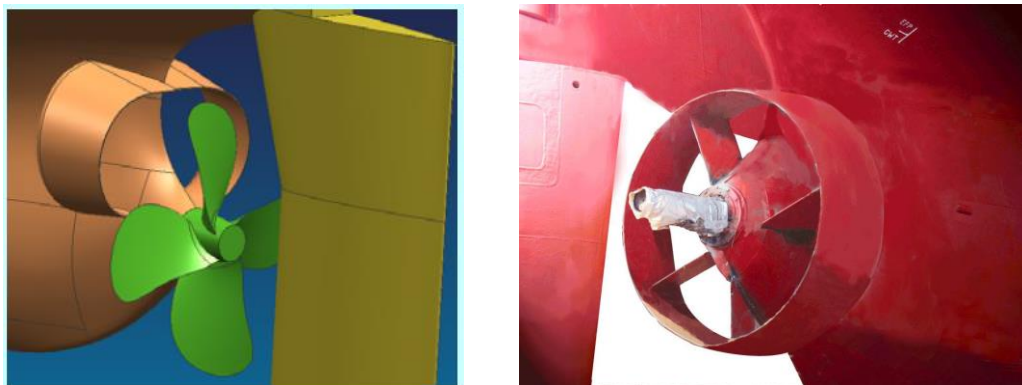


图 1 伴流补偿导管

Fahri Celik<sup>[6]</sup>采用商业软件 FLUENT 对运输船舶配备的导管进行了数值模拟。文章着重分析了运输船在 10~16 节的速度下的尾流以及螺旋桨推进性能。计算结果显示, 补偿导管可以显著地提高具有较大方形系数的船舶的螺旋桨的推进效率, 并降低粘性阻力。试验表明, 导管的安装角度对节能效果有明显影响, 而纵向位置则影响较弱。Heinke<sup>[7]</sup>使用商业软件 CFX 研究了安装于典型集装箱船的伴流补偿导管的尺度效应。计算使用了四面体和六面体网格, 对比了实船以及船模在安装或没有安装节能装置的情况下的船体阻力、推进性能和流场, 分析了导管的尺度效应。CMHL 小组的尹崇宏<sup>[8]</sup>采用了具有重叠网格模块的 naoe-FOAM-SJTU 求解器对 JBC 船安装伴流补偿导管的节能效果进行了研究。该求解器可以通过 Single-Run 方法(单次法)一次性地计算得到螺旋桨各进速下的推力值和扭矩值。结果显示, 伴流补偿导管可以显著提高 JBC 船的推进特性, 以推进功率为指标评估的节能效果为 6.7%, 图 3 是 JBC 船自航的尾涡图。

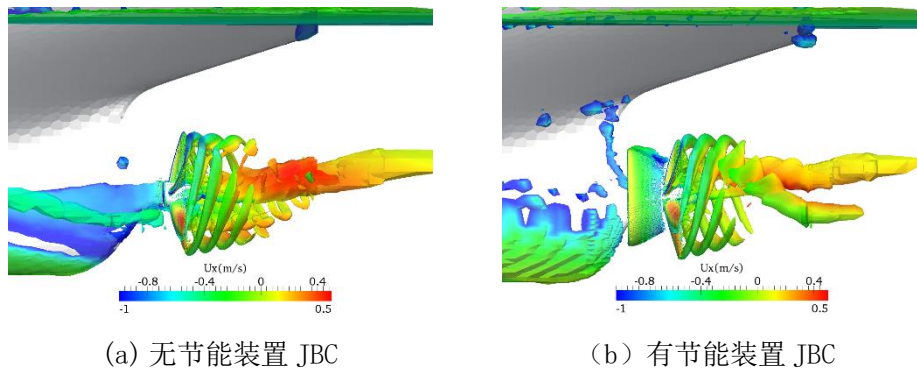


图 2 自航 JBC 船尾涡图<sup>[8]</sup>

Martinas<sup>[9]</sup>对装有伴流补偿导管的特定船舶进行了参数优化研究。采用 CFD 方法考察了导管的安装角度、长度、进出口的半径以及导管与螺旋桨之间的长度对节能效果的影响。由于计算资源的限制，他只考虑模型的尾部影响，不考虑自由表面的影响。通过大量的数值计算，得到了可选的设计方案。黄少峰<sup>[10]</sup>对安装在散货船上的导管的尺度效应以及节能原理进行了数值研究。采用叠模法，忽略自由表面的影响的方法。最后，得出两个结论：伴流补偿导管可以减少尾部旋转能量的损失并且产生附加的推力；随着雷诺数的增加，由伴流补偿导管提供的推力变大、能量损失降低。因此，在实船上，伴流补偿导管可以获得更好的节能效果。CMHL 小组的孙涛<sup>[11]</sup>使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器研究了导管的进出口直径以及长度对伴流补偿导管节能效果的影响。计算采用  $k-\omega$ SST 模型，并且运用重叠网格的网格划分技术，对比 JBC 船舶在有/无节能装置下自航的阻力，结果显示：要使伴流补偿导管具有整流以及加速进流的效果，出口直径要小于进口直径，当出口直径过小时，伴流补偿导管的节能效果会受到极大减弱；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。沈海龙<sup>[12]</sup>提出了一种预测桨前伴流补偿导管节能效果的方法。这种方法基于面元法以及 RANS 方程。文章预测了一个完整的形式船在 15 节的速度下，配备了伴流补偿导管的尾流场。计算结果表明，这种方法可以较好的运用于伴流补偿导管以及其它节能装置工作性能的预测。

## 1.2 前置预旋定子

前置预旋定子是一种安装于船尾、螺旋桨前方的节能装置，其主要是由若干个导叶所组成，并可使螺旋桨进流产生一定的预旋，从而提高螺旋桨推进效率，并回收螺旋桨旋向能量损失，从而达到降低能耗的目的。

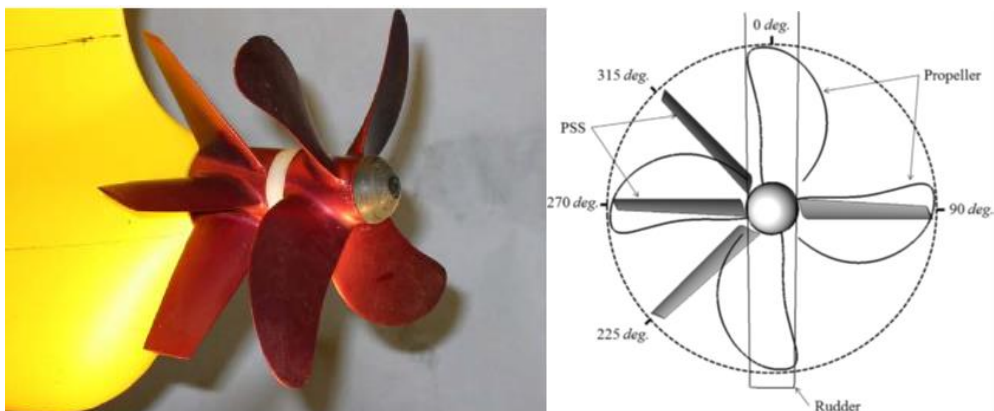


图 3 前置预旋定子

Sunho Park<sup>[13]</sup>用商业 CFD 软件 STAR-CCM+研究了预旋定子 (PSS) 装备在 KVLCC2 后的节能效果。在文章的计算中,忽略了自由表面的影响。作者提出一种从船模中获得可靠推进性能预测的新方法。具体来说,作者用由 RANS 方程计算获得的尾流摩擦减去从欧拉方程计算得到的尾流摩擦。相减的结果被看作是粘性尾流摩擦,并可以把这个结果扩展到实尺度。对比扩展结果和全尺寸直接计算结果,验证了该方法能将节能装置在船模上获得节能效果扩展到实船上。凌乃俊<sup>[14]</sup>等用 CFD 方法分析了安装在一艘 7 吨散货船上的预旋定子的设计环量对节能效果的影响。计算运用升力线理论引入环量权重因子。CFD 方法的计算结果与水槽试验结果进行了对比,得出了预旋定子大约节能 4.54%的结论。Dang<sup>[15]</sup>运用了一段名叫 ReFRESCO 程序分析了装备有前置预旋定子的推进系统的细节流场。文章使用了 PIV 和 CFD 两种方法考察了流动细节。得出的结论是:CFD 方法具有足够的捕捉流场的细节以及可能发生的流动分离。从 CFD 计算得到的结果与用 PIV 测量获得流动现象一致。说明了 CFD 方法的可靠性。Keunjae Kim<sup>[16]</sup>使用商业软件 SHIPFLOW 研究了在早期的设计阶段为安装在阿芙拉型油轮的前置预旋定子的设计优化。Yong-Jin Shin<sup>[17]</sup>用使用商业软件 STAR CCM+分析上 3600 TEU 集装箱船上不对称前置预旋定子的阻力性能。在数值分析中,文章采用了不可压缩的 RANS 方程和  $k-\epsilon$  湍流模型。计算结果表明,在设计航速时 (24 节),装有预旋定子的船舶的推进效率要比裸船体高 6.65%。对比 CFD 结果以及实验结果,两种方法仅仅有一个非常小的差异,由此说明了 CFD 方法的可靠性。Yan Xing Kaeding<sup>[18]</sup>采用使用了基于 RANS 方程的程序 FreSCo+以及基于计算螺旋桨的程序 QCM 观察了船体-节能装置-螺旋桨的复杂的相互作用。获得的结论是:由 CFD 计算获得的前置预旋定子的节能效果大约为 5.3%,而在海上试验中测量获得的结果为 6.8%左右。

### 1.3 节能轴支架

节能轴支架将两个支架臂视作桨前两叶定叶轮,置于螺旋桨上游的一组固定叶片使水流进入桨盘面前产生与螺旋桨旋向相反的环量,从而桨后尾流中的周向诱导速度抵消,提高推进效率。

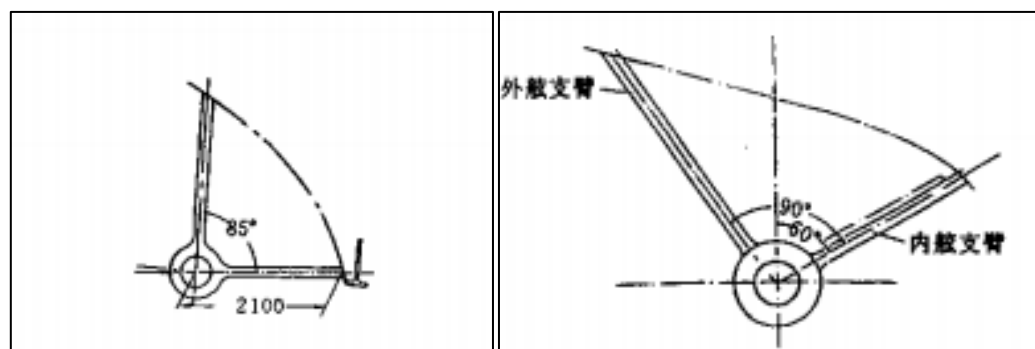


图 4 节能轴支架

王展智<sup>[19]</sup>采用 RANS 方法对船体带附体的三维粘性流场进行数值模拟,重点分析双臂轴支架的剖面形状和安装角度的变化对船舶粘性阻力和标称伴流场的影响,发现用轴支架前方流场速度矢量的方向来确定双臂轴支架的安装角度是工程上比较实用的做法。Keqiang Chen 基于势流理论,使用 CFD 方法针对一艘双螺旋桨船进行了轴支架的设计,并且考察了其所能达到的节能效果。

## 2. 基于桨后能量回收技术的节能装置

### 2.1 舵球

舵球是安装在舵叶上桨轴中心线位置的节能装置，其节能原理为：

- (1) 舵球削减螺旋桨后方轴线处的低压区；
- (2) 加强舵的整流作用，减小螺旋桨周向诱导速度；
- (3) 提高桨盘面处伴流场均匀度，对螺旋桨空泡、激振等性能的影响有利。

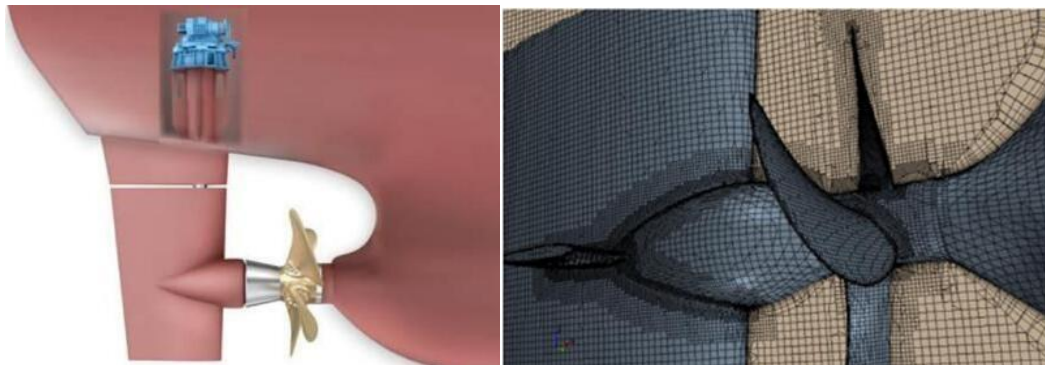


图 5 舵球及其网格划分

严周广等<sup>[20]</sup>利用 CFD 商用软件分析了敞水情况下舵球和减摇鳍的效率。研究的船型是带有舵球或鳍稳定器的集装箱船。计算结果显示舵球和减摇鳍同时使用可以获得更好的节能效果。但是减摇鳍具有明显的尺度效应，而舵球具有尺度效应很弱。沈海龙等<sup>[21]</sup>研究了一种新型的舵球，这种舵球的直径增加为螺旋桨直径的 0.3 倍。舵球被安装在螺旋桨的轴线位置可以获得最好的工作特性。文章进行了大量的模型数值分析，结果显示舵球的节能效果在 2.03% 左右。王贵彪等<sup>[22]</sup>设计了一种节能舵球，使用 CFD 商业软件 Fluent 提供的 MRF 法和 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型分析了安装舵球后桨-舵-舵球系统的水动力性能，研究的目标船型是一艘装有导管桨的 42m 的拖网渔船。获得的结论是，由于导管的存在，随着进速系数的增大，舵球的节能效果先增大后减小，接着再增大再减小，节能效果曲线形成两个波峰和一个波谷。李学军等<sup>[23]</sup>使用 CFD 商业软件 FLUENT，选用大涡模拟，通过求解三维粘性不可压缩雷诺平均纳维-斯托克斯方程（RANS），对 AU5-593 桨进行数值模拟，研究了桨舵干扰，考察了舵球尺寸的变化对螺旋桨效率的影响。获得的结论是，舵球和螺旋桨直径存在一个最佳的比值，在这个比值附近时，舵球可以发挥出最好的节能效果。陈雷强等<sup>[24]</sup>以某油船为对象，使用 CFD 商业软件 FLUENT 对比了船模在加装舵球和不加装舵球时船后螺旋桨实际收到的功率，从而评估舵球的节能效果。得到的结论是，舵球直径与螺旋桨直径存在一个最佳匹配区间，在此区间内节能效果较好；在桨舵间距一定时，舵球长度越长，舵球越接近毂帽，产生推力越大，节能效果也越好。

### 2.2 舵附推力鳍

日本石川岛播重工（IHI）开发出一种新型的船舶推进节能装置——附加推力鳍，它悬挂于船舵的两侧，且与来流的方向存在相应的安装角度，能够将螺旋桨后水流的旋转能转化为船舶的推力。其工作原理是：当螺旋桨旋转时，舵两侧的推力鳍沿上下方向发生偏移，鳍叶片与螺旋桨尾流相互作用产生升力，升力在船前进方向的分力就是附加推力。以下是决定舵附加推力鳍节能效益的 2 个因素<sup>[25]</sup>：



图 6 舵附推力鳍

(1) 推力鳍安装角度。根据不同的船型，推力鳍存在着一个最佳的安装角。总体来说， $5^{\circ}$  左右的安装角节能效益最好。

(2) 推力鳍的长度。推力鳍的展长处于尾流场之内时，水流与鳍片相互作用产生推力，助推效率显著提高；推力鳍展长超出尾流场之外时，产生的附加推力亦随之减小，助推效率降低。

王文全等<sup>[26]</sup>针对 75 000 t 船模型开展带有纵摇和横摇运动的自航 CFD 模拟研究。运用商业软件 STAR CCM+对比了船舶在安装舵附推力鳍以及没有安装舵附推力鳍情况下的船-桨-舵系统水动力数值计算结果。获得的结论是，静水状态与运动状态下舵附推力鳍有助于提高螺旋桨效率。胡海洲等<sup>[27]</sup>针对某散货船运用 CFD 方法计算了在船体影响下舵附推力鳍带来的节能效果。计算中采用 VOF 模型来模拟气液两相流，湍流模型选择  $k-\varepsilon$  湍流模型，螺旋桨旋转通过 MRF 模型实现。得到的结论是，舵附推力鳍能够吸收螺旋桨尾流能量，增加螺旋桨推力，改善伴流，减小船身阻力，带来 2.3%左右的节能效果。胡文婷<sup>[28]</sup>使用 CFD 商业软件 FLUENT 对加装了舵球和推力鳍的某螺旋桨进行了水动力性能预报，选择了 RNG  $k-\varepsilon$  双方程湍流模型模拟真实流场。沈海龙等<sup>[29]</sup>使用 CFD 商业软件 STAR CCM+考察了舵附推力鳍安装在 35000 吨散货船上的节能效果。计算中使用 RANS 法，采用 VOF 模型来模拟气液两相流，湍流模型选择  $k-\varepsilon$  湍流模型。文章研究了尺度效应对舵附推力鳍节能效果的影响。Lee 等<sup>[30]</sup>运用 CFD 的方法研究了装有舵附推力鳍的集装箱船在船首尾受到抨击载荷时的性能。

### 2.3 自由旋转叶轮

桨后自由旋转助推叶轮的作用是将螺旋桨后转动的水流能转变为有利于船舶行驶的助推力，它的最初设计起源于 20 世纪 60 年代。自由旋转助推叶轮可以在新船建造过程中安装，同时也适用于对旧船进行加装助推叶轮的改造，安装简便<sup>[31]</sup>。

其节能原理为：

(1) 螺旋桨后旋转的尾流带动涡轮机形状叶片的旋转，机翼叶片将尾流区的旋转能转换为附加推力。

(2) 自由叶轮的安装使得船体表面脉动压力值降低 40%~50%，脉动压力的降低减少了船体的振动。



图 7 自由旋转助推叶轮

侯立勋等<sup>[32]</sup>采用螺旋桨的旋涡理论对桨后自由叶轮进行设计，通过面元法对前桨尾流场进行分析来求其收缩率，从而确定自由叶轮涡轮段直径，并用面元法分别对前桨和自由叶轮进行水动力性能预报。获得结论是进速系数越大，盘面比越小，叶轮的节能效果越好。

### 3. 基于漩涡衰减降阻技术的节能装置

#### 3.1 毂帽鳍

毂帽鳍（Propeller Boss Cap Fins, 简称 PBCF）是一种安装在螺旋桨后方、跟随螺旋桨旋转的水动力节能装置。毂帽鳍自被发明以来，因具有良好的节能收益、结构简单、成本低、施工方便、新旧船舶均可装用、对船舶操纵性能和倒车性能无明显影响以及可降低螺旋桨激振力和噪声等优点而受到了广泛的应用<sup>[33]-[36]</sup>。

毂帽鳍能够回收螺旋桨叶根部旋转尾流的能量，其节能机理可概括为：

- （1）毂帽鳍叶片具有整流作用，能够打散螺旋桨的毂涡，消除螺旋桨毂帽后端的低压区，恢复桨毂和毂帽的压力，从而增加带螺旋桨的整体推力；
- （2）毂帽鳍叶片产生与螺旋桨扭矩方向相反的反扭矩，从而减小带螺旋桨的整体扭矩。



图 8 毂帽鳍

Kurt Mizzi 等<sup>[37]</sup>使用 CFD 商业软件 Star-CCM+对毂帽鳍进行了设计和优化。文章考察了一些设计参数对毂帽鳍节能效果的影响，总结一系列的设计和优化毂帽鳍的步骤。通过计算，得到结论毂帽鳍带来 1.3%的节能效果，提高了能量的使用率。施小勇等<sup>[38]</sup>使用商业软件 FLUENT 对安装在 82000DWT 的散货船船模上的节能装置——毂帽鳍进行了节能特性的研究。CFD 计算中主要计算了毂帽鳍的安装角的不同对其节能效果的影响。计算结果显示，

毂帽鳍存在一个合适的安装角,在这个角度范围内,毂帽鳍可以获得 1.75%左右的节能效果。马艳等<sup>[39]</sup>使用商用 CFD 软件 FLUENT 的 RANS 求解器对一艘 57000DWT 散货船毂帽鳍方案进行了能效评估。CFD 的计算中,湍流模型使用 SST  $k-\omega$  模型,整体求解过程基于 SIMPLE 算法。离散方程通过 Gauss-Seidel 方法迭代求解,用代数多重网格技术来加速解的收敛。通过数值模拟只有螺旋桨和螺旋桨后置毂帽鳍这两种状态,计算各部件水动力,评估螺旋桨带毂帽鳍后的节能效果。郭灯等<sup>[40]</sup>使用 CFD 商业软件 FLUENT 考察了毂帽鳍安装角、直径大小以及轴向位置变化对毂帽鳍节能效果的影响。同时对比了使用不同湍流模型所得计算结果,结论是,采用不同的湍流模型会带来较为显著的影响。齐慧博等<sup>[41]</sup>用 CFD 对普通螺旋桨在加装和没有加装毂帽鳍情况下的水动力性能进行了计算。文章计算中的采用 Fortran 语言根据螺旋桨及毂帽鳍型值编程建立几何模型,与 Gambit 相结合建立螺旋桨及以及桨+毂帽鳍计算模型。CFD 的计算中应用了 RNG 湍流模型以及动参考系计算模型 (MRF)。获得结论是,毂帽鳍的节能机理主要是毂帽鳍减弱了毂涡的强度,提高了桨的推力。Berger 等<sup>[42]</sup>用 CFD 的方法研究了毂帽鳍的优化设计流程。Takafumi Kawamura 等<sup>[43]</sup>用 CFD 研究了在船模以及实尺度船舶上毂帽鳍节能效果的差异。

#### 4. 基于螺旋桨自身优化的装置

##### 4.1 对转螺旋桨

对转桨是两个常规螺旋桨分别装于同心的两轴上,以相反方向旋转的一种推进装置,因此也称为双反转螺旋桨。与普通单桨相比,对转桨有很多优点,最典型的优点是,位于后方的桨可以吸收前桨尾流中的旋转能量,从而提高了推进的效率,在前后桨最佳匹配的情况下,桨后的尾流中可以几乎没有周向诱导速度,因此可以大大提高推进效率。

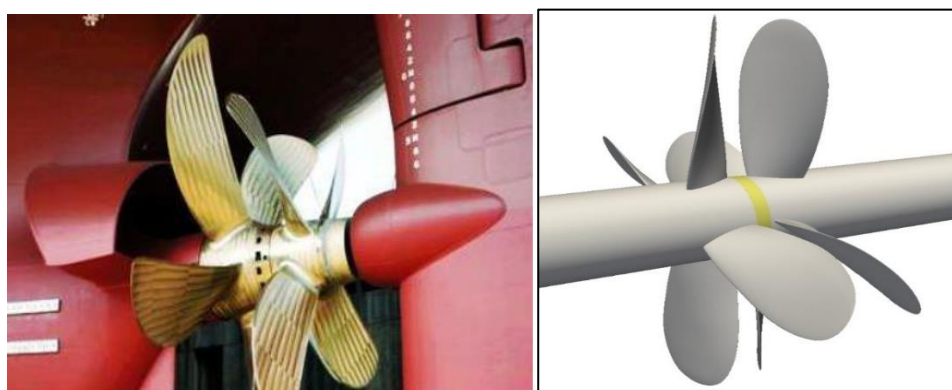


图 9 对转螺旋桨

张涛等<sup>[44]</sup>使用 CFD 商业软件 FLUENT,基于滑移网格模型研究了对转桨前后桨的非定常性对船舶水动力的影响。CFD 计算中,湍流模型使用 RNG  $k-\omega$  模型,整体求解过程基于 SIMPLE 算法。通过对比非定常滑移面模型与定常多参考系模型(准定常模型)的 CFD 计算结果,得到的结论是,由于对转桨中前桨产生的尾涡对后桨的桨叶有撞击作用,因此非定常模型能够更加准确的预报推力及扭矩的时间平均值及脉动量幅值。S. Béchet 等<sup>[45]</sup>使用多种 CFD 工具进行了对转桨桨叶的设计。文章确立一系列桨叶设计的流程,通过 CFD 的数值模拟计算在这一过程中不断的优化桨叶的设计参数,最终形成一整套桨叶设计的方法。李允<sup>[46]</sup>使用 CFD 商业软件 Star-CCM+研究了不同工况下对转桨的性能以及非同步对转桨的性能。在 CFD 计算中,采用了滑移网格,在处理自由液面影响时,采用了 VOF 方法。车霖源等<sup>[47]</sup>使用开源软件 OpenFOAM 以及商业软件 Star-CCM+对单独前桨、单独吊舱推进器以及混合



对转桨吊舱推进系统在均匀来流中的水动力性能进行了非定常数值模拟。在 CFD 计算中，采用了滑移网格的方法。将数值模拟的结果与在敞水试验中获得的结果进行了对比，验证了 CFD 方法对 CRP 系统水动力性能预报的可靠性。侯知音等<sup>[48]</sup>使用 CFD 商业软件 FLUENT 对某特定的对转桨进行了无空泡噪声特性的预报。常煜等<sup>[49]</sup>用 CFD 数值模拟计算了对转桨的水动力性能。在 CFD 计算中，采用了比较混合面以及滑移网格两种处理相对旋转部件的数值方法。通过对比，得到的结论是，在对转桨的水动力性能的数值模拟中，非定常效应必须考虑在内。CMHL 小组的何东亚使用 CFD 开源软件 OpenFOAM 对对转桨的敞水性能进行了数值模拟。文章采用了滑移网格的方法来处理对转桨的相对旋转运动。获得的结论是，对转桨比单桨的推进效率要高大约 2.2%，因为位于后方的桨能够吸收前桨尾流中的旋转能量，从而提高了推进效率。影响对转桨推进效率的因素有前后桨转速比、叶数比、前后桨间距等。要大幅度提高推进效率仍需对这些参数进行系统地研究，图 10 对转桨与单桨的涡结构对比，图 11 是对转桨与单桨的周向速度对比图。

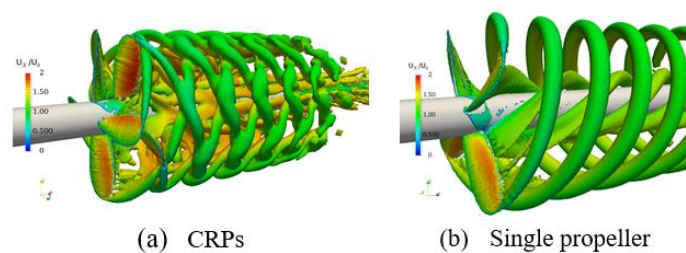


图 10 对转桨及单桨涡结构对比图

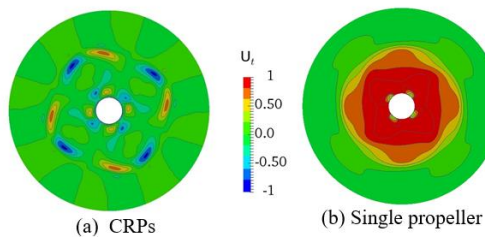


图 11 对转桨与对转桨周向速度对比图

## 4.2 仿生推进器

传统的水下航行器主要采用螺旋桨进行推进，但这种推进方式的推进效率相对较低的缺陷。而仿生推进器是一类模仿自然界水生生物设计的推进器，具有较高的推进效率。

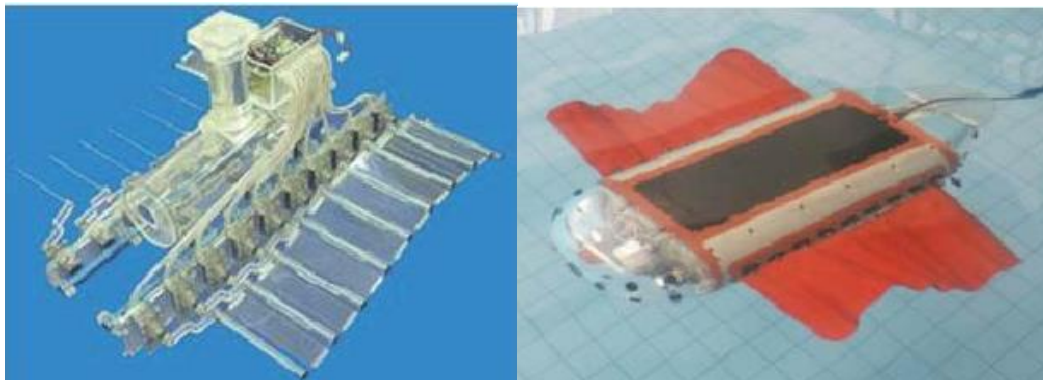


图 12 仿生波动鳍推进器

M. Bozkurttas 等<sup>[50]</sup>设计了一种模仿鱼鳍的推进器,并用 CFD 数值模拟计算了这种推进器的水动力特性。Galdo 等<sup>[51]</sup>用 CFD 优化设计了一种仿生波动鳍推进器,并且对推进器的外形利用 CFD 的计算的设计优化。何建慧等<sup>[52]</sup>对鲹鱼的胸鳍进行形态和结构上的仿生设计,使用 CFD 技术分析了不同运动学参数下仿生鳍无量纲阻力系数随时间的变化规律。周晗<sup>[53]</sup>采用 CFD 动网格计算方法,分析了仿生波动鳍的水动力特性,与既有试验进行了对比,验证了 CFD 方法的可行性。李健<sup>[54]</sup>以乌贼为主要研究对象,设计了一种仿生乌贼推进器,并使用 CFD 方法对其流体动力进行了分析。

## 5. 总结与展望

本文对一些主要的水动力节能装置的 CFD 研究进行了一个总结,基于目前的研究现状,未来对节能装置的 CFD 研究将会更多的集中在以下几个方面:

- (1) 使用 CFD 方法对船舶型线和水动力节能装置进行综合优化;
- (2) 使用 CFD 方法对组合节能装置进行研究,从而获得更好的节能装置的设计;
- (3) 对节能装置的尺度效应进行研究;
- (4) 仿生推进技术的研究。

限于篇幅原因,本文仅对几种比较有代表性的节能装置的 CFD 研究进行了介绍。而随着 CFD 理论以及计算机技术的发展,CFD 对于节能装置的研究必将跨上新的台阶。

## 参考文献

- [1] Resolution MEPC. 203 ( 62 ), Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto [S], 2011.
- [2] 黄璐, 陈立, 邱辽原, 等. 舰船水动力附加节能装置现状及分析[J]. 中国水运月刊, 2013(11):160-162.
- [3] 王建华, 万德成. 基于重叠网格技术数值模拟船舶纯摇首运动[J]. 水动力学研究与进展, 2016(5):567-574.
- [4] 余金伟, 冯晓锋. 计算流体力学发展综述[J]. 现代制造技术与装备, 2013(6):25-26.
- [5] Schneekluth, H., 1986. Wake equalizing duct. The Naval Architect 103: 147-150.
- [6] Fahri Celik., A numerical study for effectiveness of a wake equalizing duct[J]. Ocean Engineering, 2007, 34: 2138-2145.
- [7] 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.
- [8] Chonghong Yin, Jianwei Wu, Decheng Wan, "A Numerical Study for Self-propelled JBC with and without Energy Saving Device", Proc. of Tokyo 2015 CFD Workshop, 2015.
- [9] Martinas G, Cupsa O. Numeric Wake Equalizing Duct Geometry Optimization for a Given Ship[J]. 2015, 9(2):243-248.
- [10] 黄少锋, 赵峰. 伴流补偿导管的尺度效应研究及节能机理探讨[J]. 水动力学研究与进展, 2016(2):171-176.
- [11] 孙涛, 万德成. 前置导管节能效果数值计算与分析[J]. 水动力学研究与进展, 2016(6):651-658.
- [12] 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.
- [13] S Park, OH Gwangho, SH Rhee. NUMERICAL ANALYSIS OF TURBULENT FLOW

AROUND ENERGY SAVING PRE-SWIRL STATOR FOR FULL AND MODEL SCALE SHIPS.

- [14] 凌乃俊, 苗飞, 黄国富. 前置预旋定子的最佳设计环量研究[J]. 中国造船, 2014(4):74-81.
- [15] Dang J, Dong G, Chen H. An Exploratory Study on the Working Principles of Energy Saving Devices (ESDs): PIV, CFD Investigations and ESD Design Guidelines[C]. ASME 2012, International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2012.
- [16] Kim K, Leer-Andersen M, Werner S, et al. Hydrodynamic optimization of pre-swirl stator by CFD and model testing[J]. International Shipbuilding Progress, 2013, 60(1):233-276.
- [17] Yong-Jin Shin<sup>1</sup>, Moon-Chan Kim, Won-Joon Lee<sup>1</sup>. Numerical and Experimental Investigation of Performance of the Asymmetric Pre-Swirl Stator for Container Ship.
- [18] Yan Xing-Kaeding, Scott Gatchell and Heinrich Streckwall. Towards Practical Design Optimization of Pre-Swirl Device and its Life Cycle Assessment.
- [19] 王展智, 熊鹰, 刘志华,等. 双臂轴支架的剖面形状和安装角度对船舶伴流场的影响[J]. 中国舰船研究, 2012, 07(4):23-29.
- [20] 严周广, 陈雷强, 黄树权,等. 敞水下消涡鳍和舵球节能效果评估与分析[C]// 全国水动力学研讨会. 2014.
- [21] Shen H L, Obwogi E O, Su Y M. Scale effects for rudder bulb and rudder thrust fin on propulsive efficiency based on computational fluid dynamics[J]. Ocean Engineering, 2016, 117:199-209.
- [22] 王贵彪, 谢永和. 导管桨加装节能舵球的水动力性能计算分析[J]. 船海工程, 2013, 42(3):48-50.
- [23] 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, 47(3):18-20.
- [24] 陈雷强, 黄树权. 自航模拟下的舵球变参数节能效果分析[C]// 全国水动力学研讨会. 2015.
- [25] 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(英文版), 2006, 27(4):501-504.
- [26] 王文全, 王诗洋, 张天添. 船舶运动状态下舵附推力鳍水动力性能分析[J]. 船舶, 2016, 27(6):19-27.
- [27] 胡海洲, 苏玉民, 沈海龙,等. 船体影响下舵附推力鳍的节能效果研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(3):67-72.
- [28] 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.
- [29] Shen H L, Obwogi E O, Su Y M. Scale effects for rudder bulb and rudder thrust fin on propulsive efficiency based on computational fluid dynamics[J]. Ocean Engineering, 2016, 117:199-209.
- [30] Lee S K, Yu K, Tseng K C. CFD simulation of slamming loads on a containership fitted with energy-saving rudder fins[J]. 2012.
- [31] 郭春雨, 赵庆新, 吴铁成,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, 36(4):1-10.
- [32] 侯立勋, 胡安康, 汪春辉,等. 桨后自由叶轮理论设计方法研究[J]. 船舶力学, 2015(8):905-911.
- [33] OUCHI K, OGURA M, KONO Y, et al. A research and development of PBCF(propeller boss cap fins)-improvement of flow from propeller boss[J]. Journal of Society of Naval Architects of Japan. 1988, 163: 66-78.

- [34] OUCHI K, TAMASHIMA M, KAWASAKI T, et al. A research and development of pbcf(propeller boss cap fins)-2<sup>nd</sup> report: study on propeller slipstream and actual ship performance[J]. Journal of Society of Naval Architects of Japan. 1989,165: 43-53.
- [35] TAKEO N, NORIO I, HISASHI K. Energy saving technology of pbcf(propeller boss cap fins) and its evolution[C]//IPS'10. Okayama, Japan, 2010.
- [36] 马艳, 辛公正, 施小勇, 黄国富. 螺旋桨毂帽鳍节能装置的数值评估与试验研究[J]. 中国造船, 2011, 52(7): 7-18.
- [37] Mizzi K, Demirel Y K, Banks C, et al. Design optimisation of Propeller Boss Cap Fins for enhanced propeller performance[J]. Applied Ocean Research, 2017, 62:210-222.
- [38] 施小勇, 马艳. 82000DWT 散货船螺旋桨毂帽鳍节能技术研究[C]// 全国水动力学学术会议. 2011.
- [39] 马艳, 辛公正, 施小勇,等. 螺旋桨毂帽鳍节能装置的数值评估与试验研究[J]. 中国造船, 2011, 52(S1):7-18.
- [40] 郭灯, 李铁骊, 胡俊明. 螺旋桨毂帽鳍节能性能的数值模拟[J]. 中国舰船研究, 2014, 9(1):59-65.
- [41] 齐慧博, 刘业宝, 张克正,等. 毂帽鳍的节能机理分析[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(13):138-142.
- [42] S Berger, M Druckenbrod, M Pergande. Testing a semi-automated tool for the optimisation of full-scale marine propellers working behind a ship. 2013.
- [43] Kawamura T, Ouchi K, Nojiri T. Model and full scale CFD analysis of propeller boss cap fins (PBCF)[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2012, 17(4):469-480.
- [44] 张涛, 杨晨俊, 宋保维,等. 对转桨非定常性能的 CFD 模拟[J]. 船舶力学, 2011, 15(6):605-615.
- [45] Bechet S, Negulescu C, Chapin V, et al. Integration of CFD tools in aerodynamic design of contra-rotating propellers blades[J]. 2011.
- [46] 李允. 不同工况下的对转桨性能预报及非同步对转桨性能研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2015.
- [47] 车霖源, 杜云龙, 陈伟民. 混合对转桨吊舱推进器水动力性能研究[C]. 船舶水动力学学术会议. 2015.
- [48] 侯知音, 王超, 白雪夫. 基于 CFD 的对转桨无空泡噪声的仿真预报[J]. 船海工程, 2015(4):37-40.
- [49] 常煜, 洪方文, 张志荣,等. 对转桨水动力性能的数值分析[C]// 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. 2008.
- [50] Bozkurttas M, Dong H, Mittal R, et al. CFD-Based Analysis and Design of Biomimetic Flexible Propulsor for Autonomous Underwater Vehicles[J]. Aiaa Journal, 2013.
- [51] Galdo M I L, Vidal C G R, García J D R. Optimization of the efficiency of a biomimetic marine propulsor using CFD[J]. Ingeniería E Investigación, 2014, 34(1):17-21.
- [52] 何建慧, 章永华. 仿生波动鳍推进器设计及运动学仿真分析[J]. 系统仿真技术, 2016, 12(3):173-178.
- [53] 周晗. 仿生波动推进水下机器人水动力计算与实验研究[D]. 国防科学技术大学, 2009.
- [54] 李健. 仿生乌贼推进器及其流体动力仿真和实验研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2011.