

基于 CFD 毂帽鳍节能机理研究

许璐荣, 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)

*通信作者: dcwan@sjtu.edu.cn

摘要: 毂帽鳍能够打散螺旋桨的毂涡, 消除螺旋桨毂帽后端的低压区, 是一种通过回收螺旋桨叶根部旋转尾流的能量从而达到节能的目的节能装置。传统上, 主要所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。

本研究使用 CFD 开源软件 OpenFOAM 对毂帽鳍的水动力性能进行了的计算。计算中采用滑移网格技术进行流场的计算。通对比有无毂帽鳍的两种情形下螺旋桨敞水特性, 发现毂帽鳍能够有效的改善螺旋桨后尾流场, 起到明显的节能作用。

关键词: 毂帽鳍; CFD; 滑移网格; 节能效果

1 引言

长久以来, 船舶航运业一直是高能耗的重要行业, 随着近年来能源紧缺、环境污染、温室效应等问题的加剧, “绿色船舶”设计成为一股新风逐渐引起行业内相关人员的重视。毂帽鳍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, 自被日本三井船舶株式会社的学者人内一之等人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^[1-2]。

传统上, 针对毂帽鳍的研究主要是通过船模试验或者理论研究来开展的。近年来, 计算流体力学 (CFD) 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。相对于理论方法来说, CFD 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¹: 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。

许多学者和研究机构使用 CFD 方法对毂帽鳍的节能机理以及节能效果进行了研究。Kurt Mizzi 等⁴使用 CFD 商业软件 Star-CCM+对毂帽鳍进行了设计和优化, 得到结论毂帽鳍可以带来 1.3%的节能效果。施小勇等⁵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 计算中主要考察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⁶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。通过数值模拟计算螺旋桨安装毂帽鳍前后各部件水动力数值, 评估了螺旋桨带毂帽鳍后的节能效果。郭灯等⁷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。Berger 等⁸用 CFD 的方法研究了毂帽鳍的优化设计流程。Takafumi Kawamura 等⁹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。

本研究使用 CFD 开源软件 OpenFOAM, 在敞水情况下, 对毂帽鳍的进行了数值模拟计算, 通过对比安装毂帽鳍前后螺旋桨流场的变化, 对其节能机理以及节能效果进行了分析。

2 数值方法与计算模型

2.1 控制方程

数值模拟的控制方程采用不可压缩流体连续方程和 RANS 方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \overline{\rho u_i u_j} \right) \quad (2)$$

式中: u_i, u_j 是速度的 i 分量和 j 分量, p 是静水压力, μ 是流体动力黏性系数, $-\overline{\rho u_i u_j}$ 是雷诺应力项。雷诺应力项通过湍流模型来保证 RANS 方程的封闭。

湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型, SST $k-\omega$ 湍流模型是 $k-\omega$ 模型和 $k-\epsilon$ 模型的结合, 在近壁面区域使用 $k-\omega$ 模型, 而在自由流区域使用 $k-\epsilon$ 模型。速度压力的解耦采用 PIMPLE 算法, 它综合了 PISO 算法与 SIMPLE 算法的优点, 即时间步内采用 SIMPLE 算法, 时间步的步进采用 PISO 算法, 这样可以在保证稳定性的前提下适当地加大时间步长。

2.2 计算模型与计算网格

本研究计算所用的螺旋桨是 MP687 型桨，毂帽鳍为简易板型，其形状为缩小版的 MP687 桨模型。螺旋桨与毂帽鳍的具体参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 MP687 螺旋桨参数

项目	MP687	
直径/m	D	0.203
毂径比	r_h/R	0.180
螺距比	$P_{0.7}/D$	0.750
盘面比	A_e/A_o	0.500
纵倾角/(°)	θ	5
叶数	Z	5

表 2 毂帽鳍参数

	PBCF	
直径/m	D_{PBCF}	0.04
安装角/(°)	α	40
毂帽鳍与螺旋桨直径比值	D_{PBCF}/D	0.197
叶数	Z	5

使用商业软件 catia 根据螺旋桨以及毂帽鳍的空间坐标建立几何模型(图 1)。



图 1 螺旋桨毂帽鳍模型

2.3 网格划分

计算采用任意网格界面元法 (Arbitrary Mesh Interface, AMI)，其本质上是一种滑移网格方法，可用于求解非定常流场的问题。它将计算域划分为两个子区域，桨叶与桨毂部分被完全包络在圆柱形的旋转子区域内。

因为螺旋桨桨叶以及毂帽鳍的几何形状比较复杂，具有不规则的表面，因此计算时采

用非结构化网格，其网格划分情况如图 2 和图 3 所示，网格总量为 399.1 万。

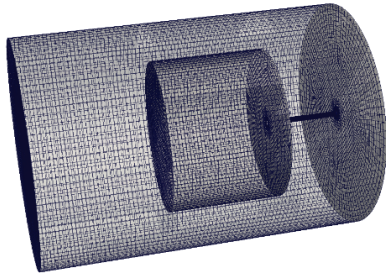


图 2 计算域网格

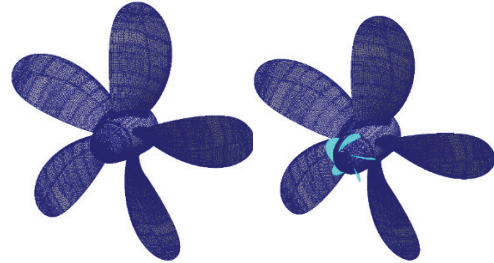


图 3 螺旋桨与毂帽鳍计算网格

2.4 分析方法

螺旋桨以及毂帽鳍水动力性能的评估可以从推力系数、扭矩系数以及推进效率来考量。设螺旋桨的进速系数为 J ，推力系数为 K_T ，扭矩系数为 K_Q ，系统推进效率为 η_0 ，则有

$$K_T = \frac{T_p}{\rho n^2 D^4} \quad (3)$$

$$K_Q = \frac{Q_p}{\rho n^2 D^5} \quad (4)$$

$$\eta_0 = \frac{K_T J}{K_Q 2\pi} \quad (5)$$

其中： ρ 为密度， n 为螺旋桨转速， D 为螺旋桨的直径。

整个计算过程中，密度取 998.2kg/m^3 ，水的运动黏性系数取为 $\nu=1.106\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 。

3 螺旋桨敞水特性计算分析

为了验证 AMI 方法在处理旋转网格时的精度，首先对螺旋桨敞水性能进行了计算模拟，并将结果与 NMRI 提供的实验数据进行比较。敞水螺旋桨 MP687 的计算由 OpenFOAM 自带求解器 `pimpleDyMFoam` 执行。计算过程中螺旋桨转速固定保持 $RPS=20$ 。

从图 4 可以看出，用 AMI 方法计算获得的螺旋桨敞水特性与试验结果对比的误差均在较小的范围内，其中推力系数 K_T 的误差均在 3% 以下，扭矩系数 K_Q 的误差均在 1% 以下，推进效率 η_0 的误差均在 3% 以下，这说明了 AMI 方法在旋转网格计算中的精度与可靠性。

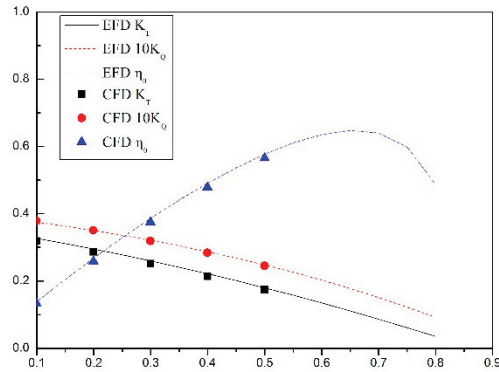


图4 螺旋桨敞水性征计算曲线

4 毂帽鳍节能特性评估与分析

4.1 CFD 数值模拟结果

分别选取进速系数 J 分别为 0.2、0.4、0.5 进行计算，螺旋桨的转速保持 20r/s 不变，通过改变水流速度来对进速系数进行调整。表 3 对比了在 $J=0.2$ 情况下螺旋桨带毂帽鳍与不带毂帽鳍的水动力性能。在 $J=0.2$ 情况下，毂帽鳍鳍片本身会产生阻力以及负的扭矩；螺旋桨本身的推力显著增加，扭矩显著下降，整个系统的推进效率有明显的提高。

针对螺旋桨的推进效率的变化来评估毂帽鳍的节能效果，三种进速系数下系统推进效率的提升见表 4。可以看出，三种进速系数下，毂帽鳍均可以获得 1% 以上的节能效果，且在螺旋桨重载时 ($J=0.2$)，推进效率的提升最为显著。

表 3 $J=0.2$ 时螺旋桨带毂帽鳍与不带毂帽鳍水动力特性对比

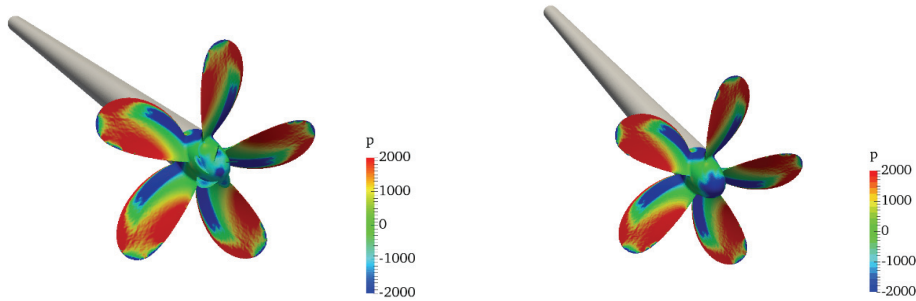
进速系数 J	螺旋桨推力 $T_p(N)$	螺旋桨扭矩 $Q_p(N*m)$	毂帽鳍推力 $T_{PBCF}(N)$	毂帽鳍扭矩 $Q_{PBCF}(N*m)$	总推力 (N)	总扭矩 $(N*m)$	K_T	$10K_Q$	效率 η_0
Without PBCF	0.2 195.400	4.853	\	\	195.400	4.853	0.2882	0.3526	0.2602
With PBCF	0.2 197.690	4.839	-0.776	-0.023	196.914	4.805	0.2904	0.3491	0.2648

表 4 不同进速系数下毂帽鳍节能效果数值模拟结果

进速系数 J	$\eta_{\text{with PBCF}}/\eta_{\text{without PBCF}}$
0.2	1.0177
0.4	1.0116
0.5	1.0115

4.2 毂帽鳍受力分析

图 5 给出了有无毂帽鳍情况下螺旋桨表面压力的分布。对比没有安装毂帽鳍的情况，装有毂帽鳍的桨毂其后端面的压力显著提高，螺旋桨毂帽后端的低压区被消除，恢复了桨毂和毂帽的压力，从而减小了桨毂的阻力，提高了整体的推进效率。



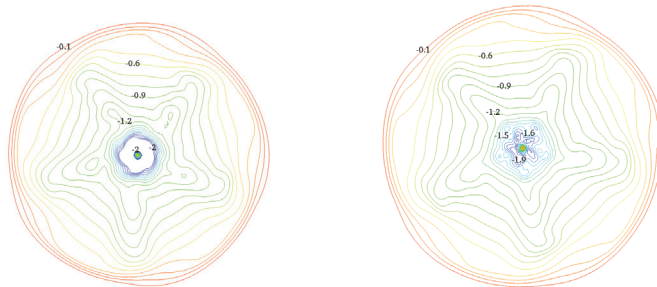
(a) 有毂帽鳍螺旋桨表面压力

(b) 无毂帽鳍螺旋桨表面压力

图 5 螺旋桨有无毂帽鳍表面压力对比

4.3 尾流场分析

为了研究毂帽鳍对螺旋桨尾流场的影响，图 6 给出了有无毂帽鳍情况下桨毂后距螺旋桨中心 0.21D 处截面的周向速度等值线图的对比。对比两种情况可以发现，安装毂帽鳍对桨毂后截面周向诱导速度产生很大影响。在没有安装毂帽鳍的情况下，螺旋桨桨毂后在桨毂中心诱导速度很大，即毂涡较大；而在安装了毂帽鳍后，螺旋桨桨毂后桨毂中心的诱导速度得到了明显的减小，因此减少了毂涡阻力，提高了螺旋桨的推进效率。



(a) 无毂帽鳍

(b) 有毂帽鳍

图 6 有无毂帽鳍螺旋桨周向速度等值线

5 结论

(1) 基于 RANS 方程、SST $k-\omega$ 湍流模型以及 AMI 方法的 CFD 方法具有良好的计算精度, 可以满足实际应用的要求。

(2) 毂帽鳍对螺旋桨推进效率的提高主要基于两个方面: 一方面毂帽鳍可以使桨毂后端面的压力显著提高, 消除毂帽后端的低压区, 恢复桨毂和毂帽的压力, 使桨毂后周向诱导速度显著减小, 减弱毂涡, 从而减小了桨毂的阻力, 提高了整体的推进效率; 另一方面毂帽鳍能够显著的降低系统的扭矩值, 从而提升螺旋桨的推进效率。

总而言之, CFD 方法可以很好地评估毂帽鳍的节能效果, 在后续的工作中, 可以进一步研究毂帽鳍的半径、安装角等细节因素对节能效果的影响, 从而能够获得更好的毂帽鳍设计。

致谢

本工作得到国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099), 上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022), 上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300), 上海市船舶工程重点实验室基金项目(K2015-11), 以及工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09) 的资助。在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- 1 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.
- 2 TAKEO N, NORIO I, HISASHI K. Energy saving technology of pbcf(propeller boss cap fins) and its evolution[C]. Okayama, Japan, 2010.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 S Berger, M Druckenbrod, M Pergande. Testing a semi-automated tool for the optimisation of full-scale

marine propellers working behind a ship. 2013.

- 9 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.

Study on the energy-saving mechanism of propeller boss cap fins based on CFD

XU Lu-rong, WAN De-cheng *

(Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

*Corresponding author: dcwan@sjtu.edu.cn

Abstract: Propeller Boss Cap Fins (PBCF) could break the hub vortex of the propeller and eliminate the low pressure area. It could save energy by recycling the rotating energy of blade root of the propeller. Traditionally, the study of PBCF was conducted using model test model which had the disadvantage of high cost and long study period. Along with the development of the computer technology, computational fluid dynamics was applied more and more to the study of the energy-saving devices.

This paper used the open software OpenFOAM to do the hydrodynamic calculation on the PBCF. The sliding mesh was used in the calculation. Comparing the open water characteristics of the propeller with and without PBCF, it found that PBCF could effectively improve the wake field of the propeller and obtained good energy-saving effect.

Key words: PBCF; CFD; sliding mesh; energy-saving effect