

叶环电驱桨导管形状对水动力性能的影响研究

赵鑫, 周军伟*, 余平

(哈尔滨工业大学(威海)船舶与海洋工程学院, 威海, 264209, Email: 18712727590@163.com)

摘要: 叶环电驱桨是永磁无刷直流电机与导管螺旋桨相结合的新型集成电机推进器, 由于电机定子和叶环转子需安装在导管中, 使导管径向尺寸变大, 为了保证叶环电驱桨的整体性能, 本文将对不同导管形状进行研究。该叶环电驱桨使用 Ka4-50 螺旋桨, 对 4 种不同导管情况下进行水动力数值模拟。使用软件 ANSYS-CFX 进行螺旋桨周围黏性流场的定常计算。计算得出了不同导管形状下电驱桨性能曲线。结果表明, 19A 导管下的叶环电驱桨敞水效率最高; case1 型导管下的叶环电驱桨推力特性最好。对性能分组对比发现, 导管前缘形状对桨叶推力特性影响较大, 尾缘形状对导管推力特性影响较大。导管尾缘形状是叶环电驱桨水动力性能的主要影响因素, 尾缘上部曲线下垂线型能提升叶环电驱桨水动力性能。

关键词: 叶环电驱桨; 导管形状; 水动力性能

1 引言

叶环电驱桨是一种将电机定子线圈集成在导管内的导管螺旋桨^[1], 其永磁体辐射状安装在桨叶叶环上, 构成电动转子。

美国通用动力电船公司早在 20 世纪 90 年代开发了一系列电驱桨, 试验结果表明其敞水效率比同功率的吊舱推进器高 5%~10%^[2]。HsiehMF 等^[3]为 ROV 设计了一种小型的无轮轴叶环电驱桨。汪勇等^[4]设计用于潜艇应急推进的叶环电驱桨, 通过敞水实验和模拟仿真验证了设计的可行性。Ø. Krøvel 等^[5]研制了功率为 100kW 的叶环电驱桨, 通过实船实验表明, 该桨较导管桨有更好的水动力性能。

在电驱桨水动力性能方面, 也有许多研究。宋保维^[6]采用 CFD 方法对叶环电驱桨有无轮轴进行性能研究。DubasAJ^[7]开发了一种 CFD 方案研究叶片的螺距角对电驱桨的性能影响。曹庆明^[8]利用 RANS 求解器分析电驱桨间隙流动的影响因素。本课题组对导管桨的水动力性能进行了大量的研究^[9-11], 这些工作对探讨电驱桨的水动力性能起到了促进作用。

作者简介: 赵鑫 (1995—), 男, 硕士研究生。研究方向: 船舶推进
通讯作者: 周军伟 (1981—), 男, 副教授。研究方向: 船舶推进

考虑到叶环电驱桨的电机定子和叶环转子需安装在导管中，使导管径向尺寸变大，进而影响其水动力性能，本研究将探讨导管形状对电驱桨水动力性能的影响。

2 电驱桨模型

2.1 叶环电驱桨参数

本研究中计算模型根据一种针对小型水下航程器设计制造的实桨模型进行建模，螺旋桨采用荷兰 MARINE 实验室的 Ka4-50 螺旋桨，该桨设计参数见表 1 所示。

表 1 螺旋桨参数

叶数	直径/m	螺距比	盘面比	毂径比	转速/rpm
4	0.18	1	0.5	0.167	500

2.2 导管形状

选取 4 种不同导管形状来探讨导管对叶环电驱桨的水动力性能的影响，其剖面如图 1 所示，内凹部分为定子和叶环安装区域。其中，图 1(a)采用 19A 导管外形；图 1(b)是前后两侧对称的 sym 型；图 1(c)和图 1(d)分别为 sym 型的改型，其外壁面做了不同程度的倾斜和过渡，分别命名为 case1 型和 case2 型。限于篇幅，不详细介绍四个导管的线型数据。四种导管内凹区尺寸大小、位置均保持一致。



图 1 不同类型导管剖面

3 数值模拟方法

在来流均匀的情况下，叶环电驱桨的工作接近定常状态，因而采用定常模拟方法。

3.1 计算域及网格的划分

图 2 为计算域示意图，划分为旋转域 I 和静止域 II 两部分。保证计算精度的前提下，为节省计算成本和时间，计算域采用周向 1/4 流场。静止域 II 中螺旋桨前方、后方、径向长度分别为 10 倍、30 倍、10 倍桨叶直径，以保证边界处流场均匀。叶环附近转静交界面的选取如图 3 所示。

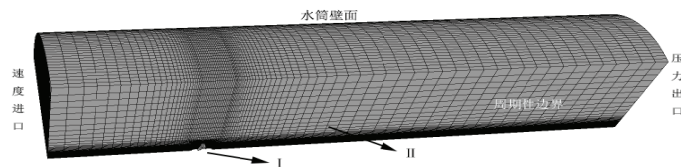


图 2 1/4 计算域流场网格

图 4 为旋转域网格，采用全结构化网格划分。为保证计算到黏性底层对网格进行加密处理，对靠近导管及桨毂处的网格部分进行适当的加密处理。本研究所有黏性壁面保证 y^+ 值在 1.0 附近。

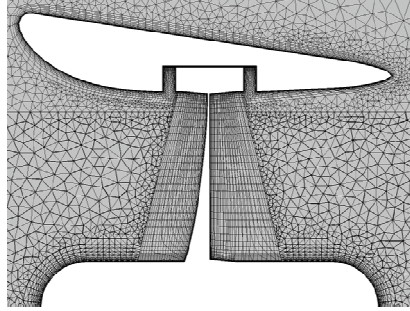


图 3 转静界面

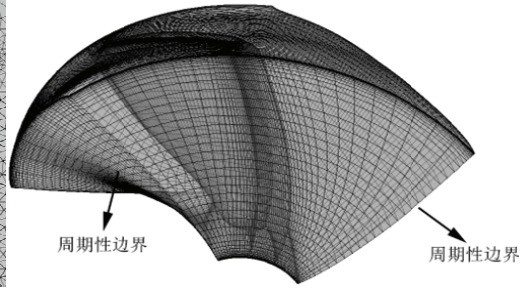


图 4 旋转域网格

3.2 边界条件

进口边界给定轴向速度，出口边界给定平均压强。水管壁面对流动影响较小，采用滑移壁面。导管、桨叶、桨毂物面都设定为无滑移固壁条件。在 $1/4$ 周期性交界面上采用周期性边界条件。

4 计算结果与分析

4.1 计算参数

采用黏流方法模拟了叶环电驱桨的定常流动，使用商用软件 Ansys-CFX 作为求解器求解不可压 RANS 方程。

电驱桨的进速系数 J ，总推力系数 K_T ，扭矩系数 K_Q 和敞水效率 η 分别按下式计算：

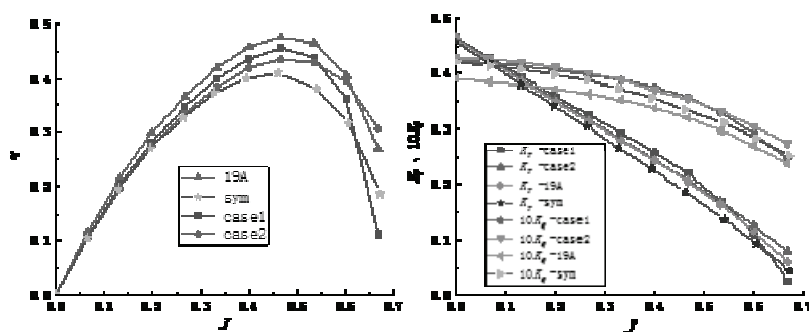
$$J = \frac{V_A}{nD} \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad \eta = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{J}{2\pi}$$

式中， V_A 为进口速度， T_R 为叶环推力， T_P 为桨叶推力， T_N 导管推力， Q 为电驱桨扭矩， n 为螺旋桨转速， D 为螺旋桨直径， ρ 为水的密度。

4.2 整体敞水性能对比

图 5(a) 为不同导管下电驱桨的敞水效率，可以看出 19A 导管下电驱桨敞水效率最高，sym 型导管相对于其他型导管的电驱桨敞水效率最小。

图 5 (b) 是加装不同导管时叶环电驱桨的总推力、扭矩系数计算结果；可以看出 case1 型导管下电驱桨的推力系数最大，sym 型导管下推力系数最小，其他两型导管下电驱桨的推力系数较为接近，19A 导管下电驱桨的扭矩系数最小；但 case1 型导管下电驱桨推力系数在 $J=0.5$ 后下降较快，解释了图 5 (a) 中该型电驱桨的敞水效率的较大幅度减小。

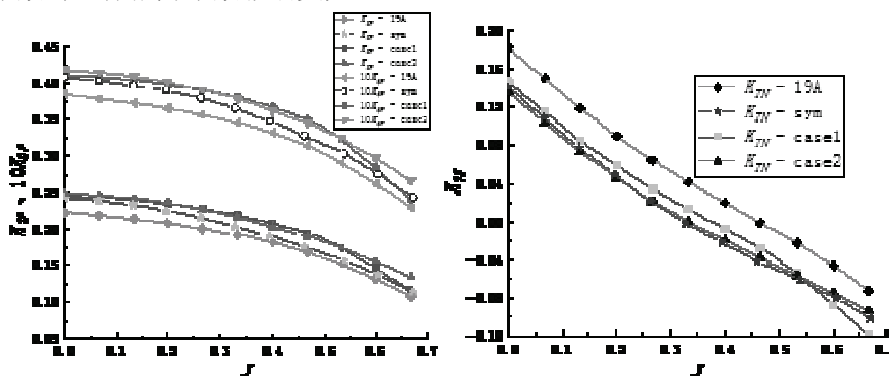


(a)叶环电驱浆敞水效率 (b) 叶环电驱浆总推力系数和扭矩系数

图5 叶环电驱浆水动力性能曲线

4.3 导管性能与桨叶性能分析

图6为桨叶和导管的水动力性能曲线，从图6(a)中可以发现，case1、case2型导管下的桨叶的推力、扭矩系数均是最大，19A导管下的桨叶的推力系数最小；从图6(b)中可看出19A导管的推力系数最大；图6(a)和图6(b)对比发现，与桨叶的推力系数相比，导管的推力系数对整体推力系数影响更大。



(a) 桨叶的推力系数和扭矩系数 (b) 导管的推力系数

图6 桨叶和导管的水动力性能曲线

4.4 流场分析

4.4.1 前缘形状对比

图7为最高效率工况不同导管下的导管周围的流线和压力云图，除了19A导管，其他三型前缘形状相同的导管在靠近导管前缘内壁处均出现了压力最低点，与桨叶叶背压力低处一同提升了桨叶的推力，与上文19A导管下桨叶推力系数最小相吻合。

4.4.2 尾缘形状对比

图7可以看出流线基本上与导管边线平行，除了19A导管外，在尾缘均出现了如图7(b)所示的脱落涡，脱落涡的产生主要由后缘形状决定，会降低导管推力，与上文19A导管下的导管自身推力系数最大相吻合；尾缘上部曲线下垂线型的导管19A、case1、case2型产生较大的导管推力，其中从前缘就开始下垂线型设计的19A、case1型导管产生推力更大。

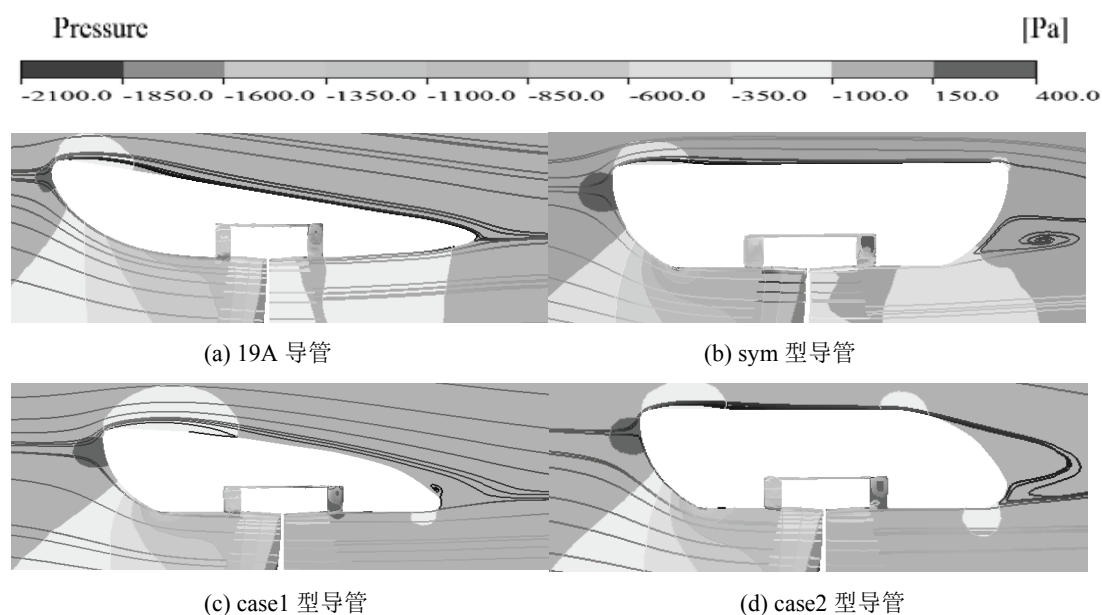


图7 最高效率工况下不同导管周围流场及压力分布

5 结论

(1)在4种导管形状中, case1型导管下的叶环电驱桨推力特性最好, 19A导管下叶环电驱桨敞水效率最高。

(2)对比桨叶和导管的推力系数发现, 导管的推力系数决定了电驱桨的推力系数。对比流场和压力云图发现, 导管前缘形状对桨叶推力特性影响较大, 尾缘形状对导管推力特性影响较大。导管尾缘上部曲线下垂形式, 如19A和case1型导管能提升叶环电驱桨性能。

本研究针对导管形状对叶环电驱桨的影响进行了相应研究, 但是由于叶环大小、位置以及叶环间隙的不同会影响电驱桨的性能, 而对该问题没有进行相应的研究, 因此论只针对相同叶环下不同导管形状对叶环电驱桨性能的影响。

参 考 文 献

- 1 Yan X, Liang X, Ouyang W, et al. A review of progress and applications of ship shaft-less rim-driven thrusters[J]. Ocean Engineering, 2017, 144:142-156.3
- 2 Van Dine P. Manufacture of a Prototype Advanced Permanent Magnet Motor Pod[J]. Journal of Ship Production, 2003, 19(2):91-97.
- 3 Hsieh M F, Chen J H, Yeh Y H, et al. Integrated Design and Realization of a Hubless Rim-driven Thruster[J]. 2007:3033-3038.
- 4 汪勇, 李庆. 新型集成电机推进器设计研究[J]. 中国舰船研究, 2011, 06(1):82-85.

- 5 Krøvel Ø, Nilssen R, Skaar S E, et al. Design of an integrated 100 kW permanentmagnet synchronous machine in a prototype thruster for ship propulsion[R].Proceedings of ICEM. Cracow, Poland, 2004:117-118.
- 6 Song B, Wang Y, Tian W. Open water performance comparison between hub-type and hubless rim driven thrusters based on CFD method[J]. OceanEngineering, 2015, 103: 55-63.
- 7 Dubas A J, Bressloff N W, Sharkh S M. Numerical modelling of rotor–stator interaction in rim driven thrusters[J]. Ocean Engineering, 2014, 106:281-288.
- 8 曹庆明, 韦喜忠, 唐登海, 等. 有/无压差的间隙流动对轮缘推进器水动力的影响研究[J]. 水动力学研究与进展, 2015, 30(5):485-494.
- 9 周军伟, 王大政. 导管螺旋桨不同桨叶的叶梢泄露涡分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2014,46(7):14-19.
- 10周军伟, 倪豪良. 导管螺旋桨叶梢泄漏涡机理研究及一种推迟梢涡空化的方法(英文)[J]. 船舶力学,2015,19(12):1445-1462.
- 11 周军伟, 李福正, 梅蕾. 无空化导管桨的极限效率分析[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(04):149-155.

Influence of the ducted shape of the Rim-Electric Driven Propeller on the hydrodynamic performance

ZHAO Xin, ZHOU Jun-wei, YU Ping

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology in Weihai, Weihai 264209, China, Email: 18712727590@163.com)

Abstract: The Rim-Electric Driven Propeller is a new integrated motor propeller that combines a permanent magnet brushless DC motor with a duct propeller. Since the motor stator and the leaf ring rotor need to be installed in the duct, the radial dimension of the duct becomes larger, in order to ensure the overall performance of the propeller, the different ducted shapes will be studied in this paper. The Rim-Electric Driven Propeller was hydrodynamically simulated using Ka4-50 propeller for four different ducts. The software ANSYS-CFX was used to perform a constant calculation of the viscous flow field around the propeller. The performance curve of the electric drive propeller under different duct shapes is calculated. The results show that the open loop water efficiency of the Rim-Electric Driven Propeller under the 19A duct is the highest; the propeller with the case1 type duct has the best thrust characteristics. Comparing the performance groups, it is found that the shape of the leading edge of the duct has a great influence on the thrust characteristics of the blade, and the shape of the trailing edge has a great influence on the thrust characteristics of the duct. The shape of the trailing edge of the duct is the main influencing factor of the hydrodynamic performance of the propeller. The vertical curve of the trailing edge upper curve can improve the hydrodynamic performance of the Rim-Electric Driven Propeller.

Key words: The Rim-Electric Driven Propeller; Ducted shape; Hydrodynamic performance.