

Fluid Simulation Analysis of Shaftless Submersible Propeller

Xing Li^{1,2} Fuyang Huang^{1,2} Zongfei Yu^{1,2}

1. Hefei Hengda Jianghai Pump Industry Co., Ltd., Hefei, Anhui, 231131, China

2. Anhui Provincial Key Laboratory of Large Submersible Electric Pump and Equipment, Hefei, Anhui, 231131, China

Abstract

The shaftless submersible thruster integrates the driving motor directly into the pump spray pipe or hub, and uses the motor to drive the blades to rotate directly. Due to its unique structure, this study analyzes the thrust and power performance of a shaftless submersible thruster under static water conditions at three different rotational speeds. Additionally, it investigates the impact of different inlet velocities on the thruster's thrust and efficiency performance under three operating conditions: 0°, 10°, and 20° angles between the water flow direction and the thruster axis. The study of performance under various operating conditions can provide guidance for the design and testing of shaftless submersible thrusters.

Keywords

shaftless; thruster; thrust; efficiency

无轴潜水推进器流体仿真分析

李星^{1,2} 黄福洋^{1,2} 郁宗飞^{1,2}

1. 合肥恒大海泵业股份有限公司, 中国·安徽 合肥 231131

2. 安徽省大型潜水电泵及装备重点实验室, 中国·安徽 合肥 231131

摘要

无轴潜水推进器是直接驱动电机集成到泵喷导管或者轮毂内, 直接利用电动机驱动桨叶旋转。由于结构上的特别, 分析静水条件下无轴潜水推进器的三个不同转速推力和功率性能, 以及在水流方向与推进器轴线夹角为 0°、10°、20° 三种工况下, 研究不同进水速度对推进器的推力和效率性能影响。对各种工况性能的研究, 可以为无轴潜水推进器的设计和试验提供指导。

关键词

无轴; 推进器; 推力; 效率

1 引言

在船舶和潜艇应用意义重大, 必将拥有更广阔的前景^[1-3]。一是提高空间利用率, 传统船舶的传动轴系长度往往要占据船舶全长的 15%~20%, 据测算, 采用无轴推进系统可以减小动力系统占用空间的 60%~70%, 提高整体空间利用率的 15%~25%^[4,5]。二是提高舰船隐蔽性, 在船舶运行过程中, 由于传统轴系、齿轮箱等传动机构运动所产生振动占其总量的 60%~70%, 这对军用舰船, 尤其是潜艇等水下航行器的隐蔽性和生存能力造成严重影响^[6,7]。为了满足新一代舰船的战略需求, 世界先进工业国家逐渐将目光转向先进的无轴推进系统。

2 数值计算方法

2.1 计算假设和物理模型

连续性方程:

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

动量方程:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(\mathbf{u}\mathbf{u}) = \mu \nabla^2 \mathbf{u} - \nabla p \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(\mathbf{v}\mathbf{v}) = \mu \nabla^2 \mathbf{v} - \nabla p \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(\mathbf{w}\mathbf{w}) = \mu \nabla^2 \mathbf{w} - \nabla p \quad (4)$$

湍流模型: 论文采用的湍流模型为 k—① SST 模型及 Realizable K-Epsilon 模型。在对包含旋转域流场的数值求解采用多参考坐标系方法, 多参考坐标系 (Multiple Reference Frame, MRF) 模型的思想是将推进器内流场分为叶轮附近旋转区域和静止区域, 在旋转叶片附近区域建立一个与叶片

【作者简介】李星 (1991—), 男, 中国安徽肥西人, 硕士, 高级工程师, 从事机械工程研究。

旋转角速度相同的旋转坐标系，该区域内的流体用相对于旋转坐标系的相对速度描述，而外部静止区域仍采用静止的参考坐标系，并通过非一致网格间的通量插值使不同参考界面间的通量保持一致。

2.2 计算域模型

外部流场计算域为长方体（图 1），推进器尾流区域适当延长，来流方向为 X 轴向方向，尺寸为：

x: [-6.0000e+00, 7.0000e+00]m

y: [-4.0000e+00, 4.0000e+00]m

z: [-4.0000e+00, 4.0000e+00]m

速度入口按 XYZ 三个方向的速度分量进行设置，其中：

①静水条件下速度入口设置为 (0, 0, 0) m/s。

②无斜流条件下速度入口设置为 (u, 0, 0) m/s, u 为航速。

③斜流(或侧滑角为零)条件下速度入口设置为 (cos(θ)u, sin(θ)u, 0) m/s, 其中 θ 为来流夹角(侧滑角), u 为航速。压力出口设置压力值为 0Pa。

划分网格时采用切体网格方法，推进器附近区域网格进行加密处理，并对壁面进行了边界层划分。推进器面网格尺寸为 0.005m（图 1）。

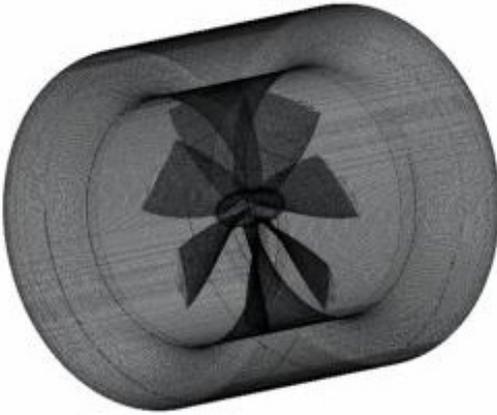


图 1 推进器面网格

3 计算结果

3.1 静水推力计算

静水状态下设置速度入口速度为 0，主要计算不同转速下推进器输出的推力，静水推力计算时结合推进器电机特性采用三个转速，分别是 590RPM、730RPM 及 980RPM，性能结果如图 2 所示。

由图 2 可以看到，推进器转速低于约 650RPM 时，功率及推力上升较为平缓，而转速大于 650RPM 时，推力及功率上升迅速。为此，在电机功率及效率许可条件下，推力输出在转速大于 650RPM 时较为理想，而推进器转速低于约 650RPM 时功率及推力上升较为平缓的特性有助于推进器低负载快速启动。

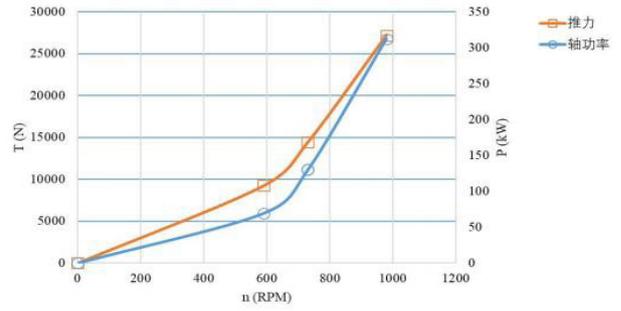


图 2 静水条件下不同转速推力及功率曲线

3.2 不同进速推进性能曲线

主要参数计算公式：

$$J = u/nD \quad (5)$$

其中，J 为进速系数；n 为推进器转速 (rad/s)；D 为推进器直径（本报告因导管较厚，取桨叶直径 604mm）。

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (6)$$

其中，KT 为推力系数；T 为推力 (N)。

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (7)$$

其中，KQ 为扭矩系数；Q 为扭矩 (N·m)。

不同转速下的推进器性能曲线如图 3~ 图 5 所示。

3.3 不同滑角不同转速条件下推进器效能分析

为更直观为推进器应用提供参考，进一步分析无侧滑角不同转速条件下推进器效能。在不考虑推进电机效率情况下，转速 730RPM、980RPM 的高效区较宽，因推进器功率限制未分析 980RPM 超过 5m/s 航速的性能。在不同转速不同航速条件下，推进器使用在 4m/s 航速、730RPM 条件下较优，此时推力在 5911N，轴功率为 109.69kW。结合上述分析，730RPM 转速下推进器性能较优，为此以该转速分析不同来流夹角下推进器性能曲线如图 6 和图 7 所示，可以看到推进器性能受来流影响较小，能够在此条件下正常输出推力。

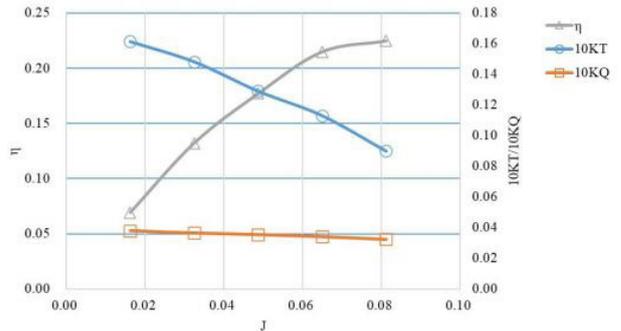


图 3 n=980RPM 时推进器性能曲线

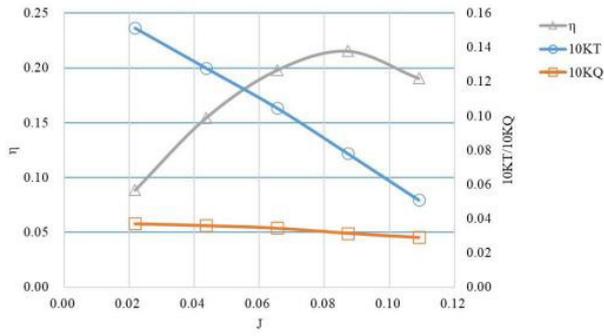


图 4 n=730RPM 时推进器性能曲线

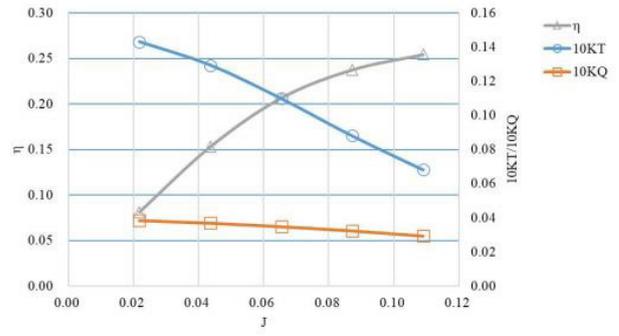


图 7 n=730RPM 及来流夹角 20° 时推进器性能曲线

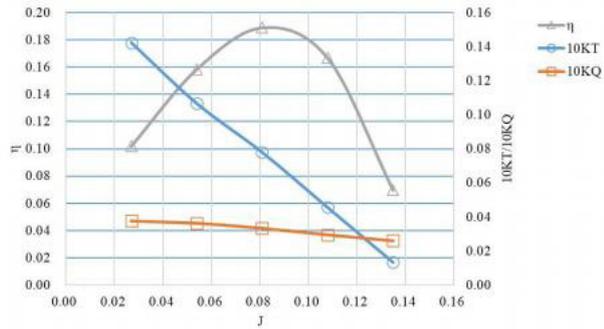


图 5 n=590RPM 时推进器性能曲线

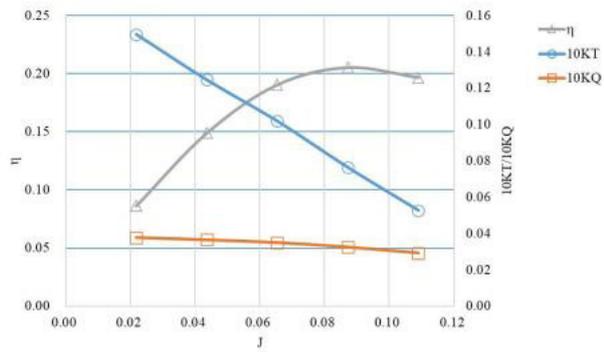


图 6 n=730RPM 及来流夹角 10° 时推进器性能曲线

4 结论

基于 730RPM 转速较优，在此转速下，推进器在侧滑角 10° 工况性能略差于无侧滑角及 20° 侧滑角工况。同时，比较不同航速条件下推力曲线及功率，可以看到高航速时侧滑角 20° 推进器推力输出优于其他侧滑角条件，推进器轴功率在有侧滑角条件下略微提高。结合以上特性分析后续有必要对该推进器设计导流叶片可进一步提高推进效率。

参考文献

- [1] 谈微中,严新平,刘正林,等.无轴轮缘推进系统的研究现状与展望[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2015,39(3):601-605.
- [2] 郑珂.集成电机推进器构型及特点分析[J].舰船科学技术,2011,33(6):96-98.
- [3] 陈虹,冷文军.美、俄核潜艇技术发展述评[J].船科学技术,2008(2):38-44.
- [4] 钱东,崔立,薛蒙.美国新一代电力轻型鱼雷研发策略分析[J].水下无人系统学报,2007,15(6):1-4.
- [5] 汪勇,李庆.新型集成电机推进器设计研究[J].中国舰船研究,2011,6(1):82-85.
- [6] 严新平,欧阳武,刘正林,等.对转无轴轮缘驱动推进器 CN105109650 A[P].2015.
- [7] 倪豪良.导管对转桨的水动力优化设计及噪声性能分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.