

基于重叠网格技术的单次法螺旋桨 敞水性能预报

尹崇宏, 吴建威, 赵伟文, 万德成

(上海交通大学 海洋工程国家重点实验室 船舶海洋与建筑工程学院
高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘要

螺旋桨敞水性能预报是船舶设计中的一个重要课题。本文的工作是利用基于开源平台 OpenFOAM 开发的具有重叠网格模块的船舶与海洋工程水动力 CFD 求解器——naoe-FOAM-os-SJTU, 对应用于 VLCC 上的四叶螺旋桨敞水性能进行数值预报。我们采用基于重叠网格技术的单次法 (Single-Run), 能够一次性完成不同航速下的性能计算。为了验证单次法的有效性, 本文也同时对三个工况下进行了额外的单点 (Single-Point) 计算。我们将 CFD 计算结果与模型实验结果进行比较分析。计算分析的结果验证了重叠网格技术在螺旋桨敞水性能预报中的可靠性和有效性, 同时本文也对该螺旋桨的敞水性能、桨后涡结构进行了分析讨论。

关键词: 重叠网格; 螺旋桨; 敞水性征; Single-Run, naoe-FOAM-os-SJTU

1 引言

准确预报螺旋桨的敞水性能对于船舶设计具有重要的意义。传统的势流预报采用基于无黏性假设的升力线理论、升力面理论和面元法等。随着计算流体力学技术 (CFD) 的发展, 人们开始利用滑移网格方法 (Sliding Mesh) 和多重参考系法 (MRF) 进行螺旋桨敞水性能预报。近年来, 基于 CFD 的重叠网格技术的出现, 在 CFD 技术的范畴内为我们解决这类问题提供了另一种途径。

近年来, 国内外都对螺旋桨敞水性能预报作了相关的研究。刘志华, 熊鹰^[1]等采用商业软件 Fluent, 选取单选转系模型、RANS 控制方程对不同叶数、不同侧斜度的螺旋桨模型进行了敞水性能预报。杨仁友^[2]等基于 ITTC 推荐的 CFD 不确定度分析规程对螺旋桨敞水性能计算结果进行了不确定度分析, 采用 MRF 方法尝试分析了 SST $k-\omega$ 和 RNG $k-\epsilon$ 两种不同湍流模型对 CFD 不确定度的影响。Alejandro M. Castro 等^[3]采用其开发的基于 RANS/DES 控制方程的重叠网格求解器 CFDShip-Iowa v4.5 对实尺度 KCS 的 KP 505 螺旋桨进行了数值模拟, 计算结果与试验值吻合良好。Carrica, P.M^[4]等利用 DES 方法成功捕捉到了螺线形的梢涡, 从桨毂处产生的桨毂涡, 以及梢涡配对涡 (Vortex pairing)。

本文采用的是 Tao Xing^[5]等提出单次计算方法 (Single-Run)。在该方法当中, 计算对象以很小的加速度向前移动, 直至达到最大速度。在整个加速的过程中, 就能一次性完成不同进速系数下的性能计算。本文采用的求解器 naoe-FOAM-os-SJTU^[6]是基于开源平台 OpenFOAM 自主开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器。该求解器包含重叠网格模块、造波与消波模块、六自由度运动模块和锚泊系统模块。本文应用该求解器对应用于 32 万吨 VLCC 上的某型螺旋桨进行了数值模拟。文中给出了推力和扭矩的时历曲线, 同时绘制了螺旋桨敞水性征曲线和螺旋桨后涡结构分布图等, 并对结果进行

了分析。

2 数学模型

2.1 控制方程

对于不可压、粘性流体，本文采用的控制方程为 RANS 方程：

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

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho (\mathbf{U} - \mathbf{U}_g) \mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu \mathbf{N} \mathbf{U}) \quad (2)$$

式中， \mathbf{U} 和 \mathbf{U}_g 分别表示流场速度和网格节点速度； $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ 为流场动压力，等于总压力减去静水压力； \mathbf{g} 、 ρ 和 μ 分别为重力加速度、流体的密度和动力粘性系数。

计算中，采用有限体积法 (FVM) 对控制方程进行离散；应用 PISO 算法处理速度、压力耦合；为模拟螺旋桨的转动，求解器采用了重叠网格技术。

2.2 重叠网格实现

重叠网格之间插值关系的建立是通过 DCI 数据的计算来实现的。本文方法所使用的 DCI 数据是由 SUGGAR^[7] 程序来计算生成的。SUGGAR 不仅支持结构化网格，还能处理非结构网格。SUGGAR 同时能支持以单元顶点 (Node-centered) 和单元中心 (Cell-centered) 为存储位置的两种流场信息存储方式。因此，它不仅能适用于传统的有限差分法求解器，还能处理现在主流的有限体积法求解器。

求解 DCI 的过程通常需要四个步骤。第一步是洞单元的搜寻，或称为挖洞。这一步是定位网格与物面、计算域等相对位置关系，并将处于物体内部或者计算域之外的网格单元标记为洞单元，排除在计算之外。与洞单元相邻的单元会被标记为插值边界单元。第二步是给插值边界单元从另外一套网格中寻找足够数量的贡献单元，为插值边界单元提供插值信息。第三步是根据插值边界单元和贡献单元的相互位置关系求得插值系数。最后一步是重叠区域的优化过程。

在计算开始之前，首先调用 SUGGAR 计算重叠网格之间插值所需的 DCI。在求得所有重叠网格信息 (DCI) 以后，通过对所有贡献单元的流场值和对应插值系数 (或称为权重系数) 进行加权求和，最终完成插值：

$$\phi = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \phi_i \quad (3)$$

其中， ϕ 是任意流场信息，如速度、压力等； ω_i 是第 i 个贡献单元的插值系数 (权重系数)； ϕ_i 是第 i 个贡献单元的流场信息值； ϕ_j 是插值边界单元的值。此外所有的插值系数均需要无因次化，并满足以下条件：

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (4)$$

3 计算模型

3.1 模型及工况

本文计算的螺旋桨模型是应用于 VLCC 的四叶螺旋桨，螺旋桨实尺度直径为 10m，模型尺度直径为 0.25m，缩尺比为 1:40。本文的计算都是基于螺旋桨的模型尺度。计算螺旋桨模型如图 1 所示。

在本文的计算中，螺旋桨转速保持 20 转/s 不变，前进速度从静止匀加速至 4m/s，整个过程历时 4s。在单点计算中，我们选取了进速系数 $J=0.2, 0.4, 0.6$ （分别对应前进速度 1m/s, 2m/s, 3m/s）三个工况进行了计算，目的是为了验证单次法的可靠性。

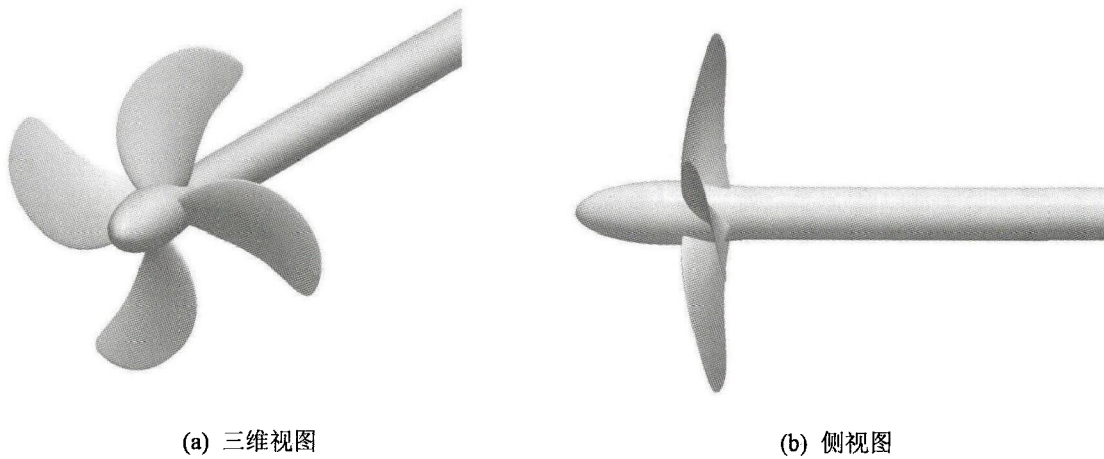


图 1 螺旋桨模型示意图

3.2 计算网格

计算用的背景网格由 OpenFOAM 自带的网格生成工具 blockMesh 生成，螺旋桨网格由其自带工具 snappyHexMesh 生成。在生成背景网格与螺旋桨网格之后，将两套网格合并为一体，再经过 SUGGAR++ 程序挖去洞点单元，剩余的网格参与计算。螺旋桨网格用于求解近流场，网格较密。背景网格相对较粗，用于求解远流场。螺旋桨网格相对于背景网格以恒定的速度进行旋转。两套网格均以恒定的加速度向前移动。为了避免远场边界条件的影响，计算域被设置得尽可能大。该算例网格总量为 244 万，计算的时间步长设置为 0.00025s，即螺旋桨旋转周期的 1/200。

螺旋桨计算网格如图 2 所示，计算域及边界条件如图 3 所示。

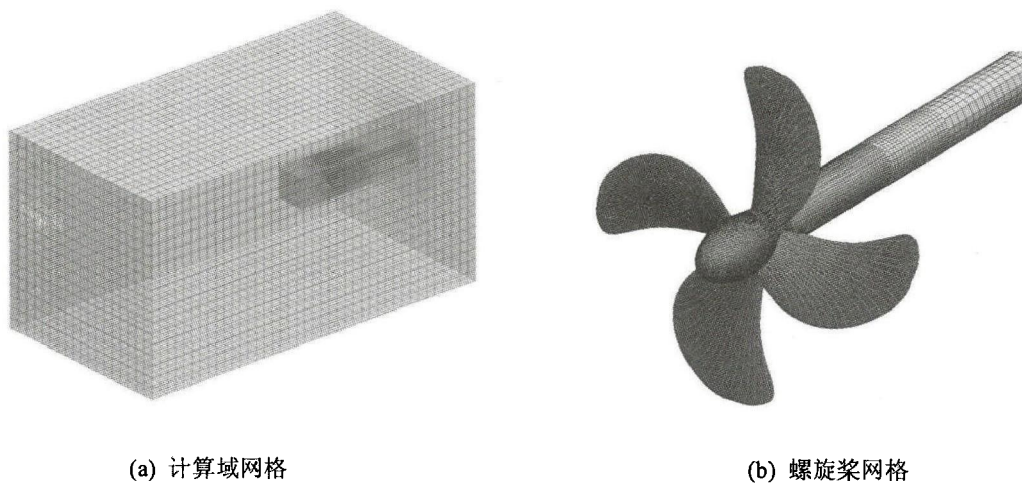


图 2 计算网格

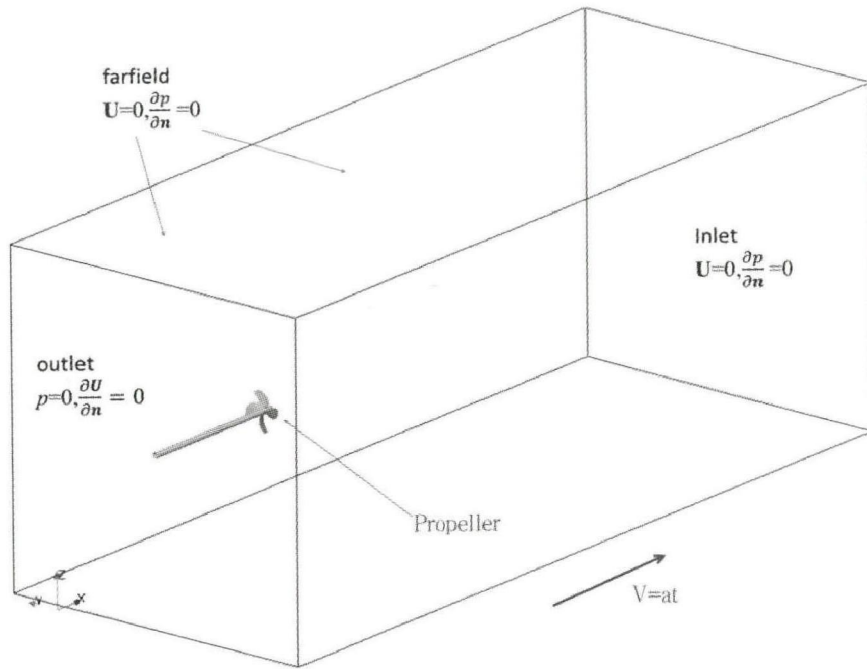


图3 计算域及边界条件

4 计算结果

4.1 单次法计算结果

单次法的计算中，采用以大地为基准的参考系，螺旋桨的转速 RPS 固定，包括螺旋桨在内的整个计算网格以匀加速向前前进，模仿在拖曳水池中进行敞水试验的做法。在整个加速的过程中，就能一次性完成不同航速下的性能计算。这种方法可以将多次多工况的计算节化为单次的计算，大幅度减少计算时间。计算所采用的湍流模型为 $k-\omega$ SST 模型。

计算结果当中包含不同进速系数(J)下的推力系数(K_T)、扭矩系数(K_Q)以及敞水效率 η_0 。这些系数的定义为：

$$J = \frac{V_A}{nD} \quad (5)$$

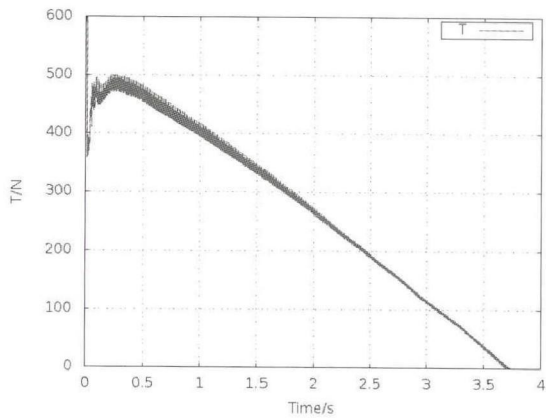
$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^5} \quad (6)$$

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

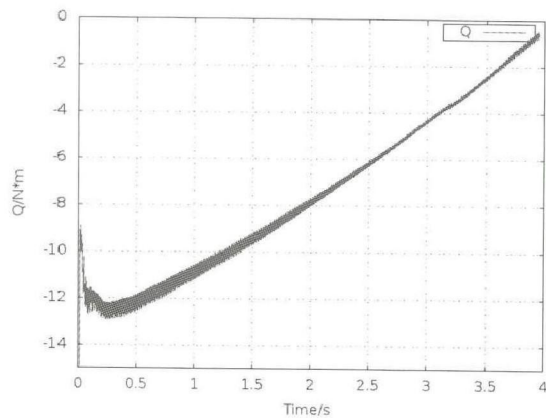
$$\eta_0 = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \quad (8)$$

其中， T 和 Q 是螺旋桨的推力和扭矩； D 是螺旋桨的直径； n 是螺旋桨的转速； V_A 是螺旋桨的前进速度。

单次法计算的螺旋桨推力 T 和扭矩 Q 的时历曲线如下图 4 所示。



(a) 螺旋桨推力时历曲线



(b) 螺旋桨扭矩时历曲线

图4 螺旋桨推力、扭矩时历曲线

4.2 单次法计算与单点计算比较

为了以验证单次法的有效性，在进速系数 $J=0.4$ 、 0.5 以及 0.6 三个工况下我们进行了额外的单点 (Single-Point) 计算。单点计算的网格及边界条件设置与单次法完全一致，只是在每次计算中整个网格均以恒定速度前进。

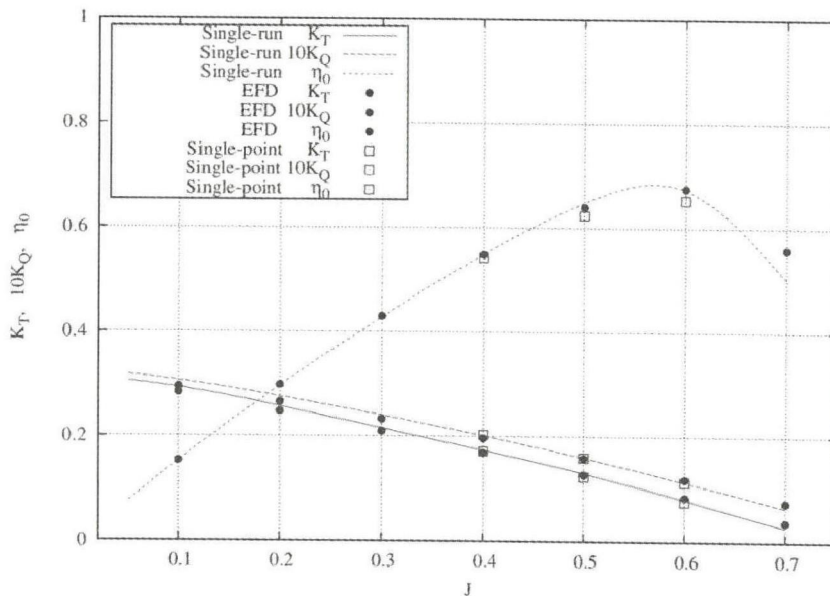


图5 敞水曲线结果比较

两种数值计算的结果与模型试验数据的比较如图5所示。对于单次计算方法，螺旋桨的进速系数由 $J=0.05$ 逐渐加速至 0.7 。加速时间为 $4s$ 。在与实验数据的比较中，除了当 $J > 0.6$ 时，推进效率与试验值相比偏大，其余计算得到的敞水性能结果均与试验值吻合较好。此外，图中也显示了单点 ($J=0.4, 0.5$ 和 0.6) 的计算结果。单点的计算结果与单次法及试验数据相比除 0.6 进速系数稍有误差，其余均落在单次法曲线上，基本验证了单次计算方法的有效性，说明其计算精度可以达到甚至超过单点计算的效果。从计算结果比较中可以得出，采用重叠网格方法，使用两种不同的计算敞水曲线

的方法，均与试验结果吻合较好，验证了重叠网格方法在计算螺旋桨敞水试性能计算中的准确性以及单次法的精度。

4.3 桨后涡结构

图 6 是 $J=0.4$ 计算工况下螺旋桨的桨后涡结构图。计算结果由单点计算得到。从图 6 我们可以看到，在该进速系数下，螺旋线形的螺旋桨梢涡能够被清晰地捕捉到。从桨毂处产生的桨毂涡也可以清晰地观察到，并且具有比梢涡更高的强度。但是，没有捕捉到 Carrica, P.M.^[4]等提到的梢涡配对涡。这可能由于是本算例是采用 RANS 控制方程而在文献[4]中采用了 DES 方法。相比 DES 方法，RANS 方法在涡流场的诸多细节的捕捉上都稍有欠缺。尽管如此，本文通过 RANS 方法计算得到的积分量如 K_T 、 K_Q 以及 η_0 都与试验结果吻合较好，表明了计算结果的准确性以及重叠网格方法的有效性。

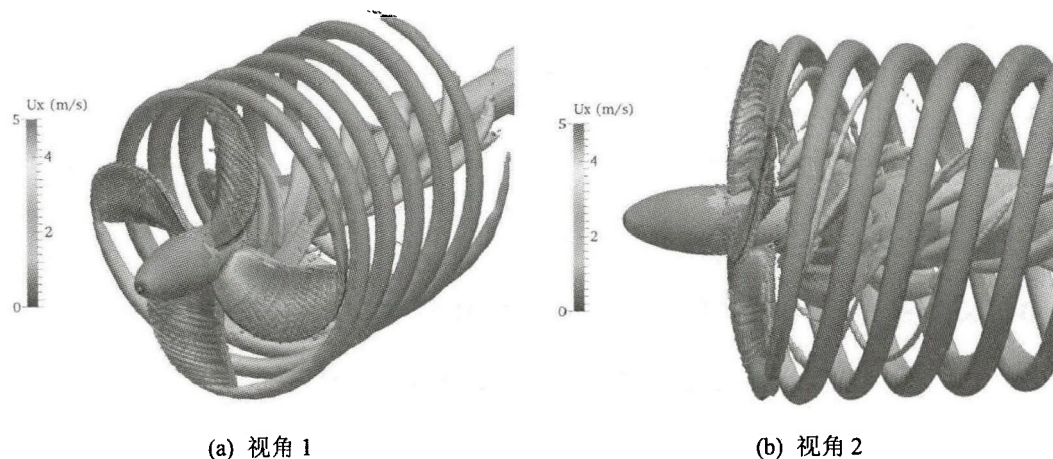


图 5 桨后涡结构

5 结论

本文应用基于开源平台 OpenFOAM 开发的具有重叠网格模块的船舶与海洋工程 CFD 求解器——naoe-FOAM-os-SJTU，采用单次法数值模拟了螺旋桨敞水试验，通过一次计算得到了螺旋桨敞水性能曲线。为了验证单次法的计算，我们也进行了三个工况的单点计算，并将两种不同方法的计算结果与模型试验数据进行比较，结果吻合良好。文中给出了单次法计算螺旋桨推力、扭矩的时历曲线，敞水性能曲线以及螺旋桨涡结构，并进行了分析。所得结果展示了具有重叠网格模块的 naoe-FOAM-os-SJTU 求解器的在螺旋桨敞水性能预报中的有效性和可靠性。同时本文的计算结果也验证了单次法的高效性与精确性，为接下来在船舶自航、操纵性等数值计算中通过一次计算迅速获得螺旋桨敞水性能提供了便利。目前该求解器已应用于船-桨-舵相互作用的船舶自航数值模拟中。

致 谢

本文工作得到国家自然科学基金项目 (Grant Nos 51379125, 51490675, 11432009, 51411130131)，长江学者奖励计划(Grant No. 2014099)，上海高校特聘教授 (东方学者) 岗位跟踪计划(Grant No. 2013022)，国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (Grant No. 2013CB036103)，工信部高技术船舶科研项目的资助。在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

[1] 刘志华, 熊鹰, 叶金铭, 谭廷寿. 基于多块混合网格的 RANS 方法预报螺旋桨敞水性能的研究, 水动力学研究与

进展,2007,(04):450-456

- [2] 杨仁友, 沈泓萃, 姚惠之. 螺旋桨敞水性能 CFD 不确定度分析, 船舶力学,2010,(05):472-480
- [3] Alejandro M. Castro, Pablo M. Carrica, et al. Full scale self-propulsion computations using discretized propeller for the KRISO container ship KCS, Computers & Fluids, 51 (2011) 35–47
- [4] Carrica, P.M., Castro, A.M., Stern, F. Self-propulsion computations using a speed controller and a discretized propeller with dynamic overset grids, Journal of Marine Science and Technology, 2010, 15(4): 316–330
- [5] Tao Xing, Pablo Carrica, Frederick Stern. Computational Towing Tank Procedures for Single Run Curves of Resistance and Propulsion, Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(10): 101102
- [6] Shen Z, Zhao W, Wang J. Manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-os-SJTU. Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [7] Noack, R.W. SUGGAR: a general capability for moving body overset grid assembly, In the Proceedings of the 17th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference. Toronto, Ontario, Canada, AIAA 2005-5117, 2005.
- [8] Shen Z, Wan D. RANS Computations of Added Resistance and Motions of Ship in Head Waves. Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), 2012, 1096-1103.

Propeller open water curve computations based on overset grid and Single-Run method

YIN Chong-hong, WU Jian-wei, ZHAO Wei-wen, WAN De-cheng

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

Abstract

Prediction of propeller open water curve is an important subject in ship design. The work of this paper is based on the ship and ocean engineering hydrodynamic CFD solver naoe-Foam-os-SJTU, which is developed from the open source platform OpenFOAM and added with overlapping grid module. The computation model is the propeller equipped on the VLCC. We adopt the Single-Run method based on the overlapping grid, which can calculate conditions under different speeds in one-time. In order to verify the effectiveness of Single-Run method, also three conditions are calculated by the additional Single-Point calculation. CFD results are compared with model experiment. Calculation and analysis results show reliability and validity of CFD method. Open water performance of the propeller, blade surface pressure distribution and vortex structure are also analyzed at the same time.

Key words: Overset grid; Propellers; Open water curve; Single-Run; naoe-FOAM-os-SJTU