

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2016.02.007

基于三种方法的螺旋桨敞水性能数值预报*

吴建威, 尹崇宏, 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: wujianwei@sjtu.edu.cn)

摘要: 该文基于三种不同的 CFD 方法: 多重坐标参考系法 (MRF)、任意网格界面元法 (AMI) 和重叠网格方法 (Overset) 对某一四叶螺旋桨的敞水性能进行数值模拟和预报, 并对螺旋桨周围的流场进行了分析。其中, 对于任意网格界面元法 (AMI) 与多重坐标参考系法 (MRF), 分别采用开源 CFD 计算软件 OpenFOAM 所提供的求解器 pimpleDyMFoam 与 MRFSimpleFoam 进行计算; 对于重叠网格方法 (Overset), 采用基于 OpenFOAM 平台开发的具有重叠网格模块的船舶与海洋工程水动力求解器—naoe-FOAM-SJTU 进行求解。通过与试验结果的对比以及方法间的比较, 验证了三种方法在螺旋桨敞水性能预报中的可靠性和有效性, 并总结了各方法的特征与优劣。同时也对螺旋桨附近的流场特征进行了讨论与分析。

关键词: MRF 方法; AMI 方法; Overset grid 方法; OpenFOAM; naoe-FOAM-SJTU 求解器

中图分类号: O357

文献标识码: A

Numerical prediction of the propeller open-water performance based on three numerical methods

WU Jian-wei, YIN Chong-hong, 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: In this paper, three kinds of methods, which are MRF, AMI and Overset grid method, are applied to predict the open-water performance of a four-blades propeller. The computations using AMI method and MRF method are performed by the

* **收稿日期:** 2015-06-25(2016-02-28 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 11432009, 51411130131)、国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2013CB036103)、长江学者奖励计划(T2014099)、上海高校特聘教授岗位跟踪计划(2013022)和海洋工程国家重点实验室课题(GKZD010065)

作者简介: 吴建威(1991 -), 男, 山东吕梁山, 硕士研究生。

通信作者: 万德成, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

Received: June 25, 2015 (**Revised** February 28, 2016)

Project supported by foundations: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51379125, 51490675, 11432009, 51411130131), the Major State Basic Research Development Plan of China (973 Program, 2013CB036103), the Chang Jiang Scholars Program (T2014099), the Program for Professor of Special Appointment (Eastern Scholar) at Shanghai Institutions of Higher Learning (2013022) and the Foundation of State Key Laboratory of Ocean Engineering (GKZD010065)

Biography: WU Jian-wei (1991-), Male, Master Candidate.

Corresponding author: WAN De-cheng, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

solvers pimpleDyMFoam and MRFSimpleFoam in OpenFOAM. The computation using overset grid method is carried out by the in-house CFD solver named naoe-FOAM-SJTU which is developed for solutions of viscous flows in ship and ocean engineering based on the platform of OpenFOAM. Through comparing the predictions of the three methods and experimental measurements, the reliability and validity of the three methods in prediction of propeller open-water performance are verified and the characteristics of the each method are summarized. This paper also presents a detailed discussion on the properties of flow around the propeller according to the computations.

Key words: MRF method; AMI method; overset grid method; OpenFOAM; naoe-FOAM-SJTU solver

引言

螺旋桨推进是船舶的主要推进方式之一。如何精确地预报螺旋桨的敞水性能对螺旋桨性能的评估、优化,以及船舶的设计都具有重要意义。预报螺旋桨水动力学性能主要分为试验方法与数值计算方法。随着计算机技术和数值方法的飞速发展,计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法越来越多地被应用于螺旋桨的水动力性能的预报。由于该方法本身计及了流体黏性的影响,因而可以求解得到精细的流场信息:如,桨叶表面的压力分布、梢涡与桨毂涡的形成与演化等。此外,与传统的物理敞水试验相比,基于 CFD 的预报效率更高,经济投入更小,能积极有效地效应设计者的需求,显著地缩短了螺旋桨的设计周期。

在螺旋桨性能预报的历程中,曾经历过升力线理论、升力面理论以及面元法。由于升力线理论难以满足物面条件,因此在解决三维问题时,多依赖于后两种方法^[1]。Ginzel^[2]于 1944 年提出了适用于宽叶螺旋桨的升力面理论。其中的升力面即是连续分布在螺旋桨叶片拱弧面上的附着涡,以此来代替叶片的作用^[3]。升力面理论是一种比较成熟的理论,对螺旋桨敞水性能具有较为理想的预报精度,曾被广泛应用于这方面的研究。王国强等^[4]利用 Kerwin 尾流模型,对 AU 型、DTNSRDC 桨进行升力面数值求解,并与相应的试验结果和其他方法的计算结果进行比较,验证了升力面方法的可行性。然而,它对桨叶导边附近的压力分布、螺旋桨的空泡性能的预报还存有缺陷,误差较大。面元法本质上是一种边界元的方法。1964 年 Hess 与 Smith^[5]提出了速度面元法,1974 年 Morino^[6]又提出了速度势面元法。基于面元法的预报取得了令人满意的结果。日本的 Hoshino^[7]利用定常螺旋桨的面元法对 DTRC 桨和 SRI 桨的水动力性能进行了分析计算,并将计算结果与基于升力面法的计算结果以及试验值进行对比,发现面元法不仅可以精确得到桨叶以及桨毂上的压力分布,而且可以有效预报桨的敞水特性。在国内,基于不同的网格划分、数值处理等,诸多学者也实现了应用面元法预报螺旋桨性能。如,冯锦章^[8]等将面元法成功应用在了导管螺旋桨

的性能预报上。

无论是升力面法还是面元法,都是一种忽略黏性效应的势流方法。它们不仅计算量相对较小,并能有效预报敞水性能。然而,基于势流理论的方法无法提供更多真实流动的特性,如桨后的尾流场、涡的形成与演化等。随着 CFD 方法的快速发展,利用 CFD 研究螺旋桨特性成为一个热点。Funeno^[9]基于 RANS 方程对大侧斜螺旋桨附近的流场进行了数值模拟,其结果与试验数据吻合得很好。在国内,唐登海等^[11]采用 CFD 方法数值求解 DTRC4119 桨周围的黏流场,也得到了理想的结果,表明了该方法能定量预报螺旋桨黏流场,且能捕捉桨周围黏性流动的一些重要特征。蔡荣泉等^[10]介绍了利用 Fluent 软件计算螺旋桨敞水性能的计算流程,并以一种侧斜反弯扭桨作为研究对象,给出了敞水性征曲线的计算结果及与试验值的对比。另外,文章还通过分析正弯扭螺旋桨和反弯扭螺旋桨的桨叶表面压力分布数值计算结果,考察了该桨的减振降噪机理。

本文的计算均基于 CFD 方法,分别采用多重坐标参考系法(MRF)、任意网格界面元法(AMI)和重叠网格方法(Overset)来对某一四叶螺旋桨的敞水性能进行了数值预报。其中,对多重坐标参考系法(MRF)与任意网格界面元法(AMI),分别采用了开源的 CFD 计算软件 OpenFOAM 所提供的求解器 MRFSimpleFoam 与 pimpleDyMFoam 进行计算。而对于重叠网格方法(Overset),应用了基于 OpenFOAM 平台自主开发的具有重叠网格模块的船舶与海洋工程水动力求解器 naoe-FOAM-SJTU^[12,22-29]进行求解。三种方法的计算均是基于雷诺时均纳维斯托克斯(Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS)控制方程,并采用 SST $k-\omega$ 作为湍流模型。该模型以湍流各向同性为基础,模型简单,易于收敛^[13]。

本文中选取某一四叶螺旋桨为研究对象,利用三种方法分别对其在进速系数 $J=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ 和 0.7 八个工况下的流场进行了数值模拟,并依据在各进速系数下得到的推力系数及扭矩系数绘制了该螺旋桨的敞水性征曲线。同时也对螺旋桨周围的流场特征进行了考察。经过与试验的结果对比以及不同方法间的比较,发现基于三种方

法均可以有效预报螺旋桨的敞水性能。本文验证了三种方法的可靠性与有效性, 同时总结了各方法的特征与优劣。

1 基本方法

1.1 多重参考系法

多重参考系法 (multi reference framework, MRF) 是一种在旋转坐标系下的定常计算模型^[14]。它将计算域划分为不同的子区域, 并在每一个子区域内建立不同的参考系与控制方程。针对螺旋桨的敞水性能预报问题, 在计算域中划分出一个圆柱形的子区域, 使之能将螺旋桨的桨叶与桨毂部分完全包络, 并在这一区域内建立与螺旋桨的转速、转向完全一致的旋转坐标系, 由于螺旋桨与旋转坐标系间没有相对运动, 因此在这一区域内, 螺旋桨的动态旋转可转化为静态计算。

由于引入了旋转坐标系, 惯性坐标系下的 Navier-Stoke 方程便无法在旋转坐标系中直接使用。因此务必建立两种坐标系间的转换关系。如图 1 所示, i 表示位置矢量, u 表示速度矢量, Ω 表示旋转参考系相对惯性参考系的角速度, r 表示旋转坐标系的位置矢量。旋转坐标系下 N-S 方程与惯性坐标系下的 N-S 方程相比, 多出了 $\rho[2\Omega \times u + \Omega \times \Omega \times r]$ 两项。最终 N-S 方程变为:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 u - \rho[2\Omega \times u + \Omega \times \Omega \times r] \quad (2)$$

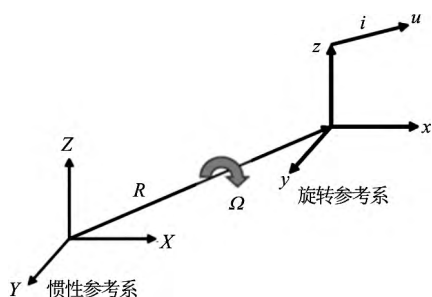


图 1 多重参考系的坐标示意图
Fig.1 Coordinate relations of multiple reference frames

在每个子域内分别对控制方程进行求解, 再在不同子域的交界面上将相对速度换算成绝对速度, 并进行流场信息交换。最终求解得到全计算域的流场。基于 MRF 方法得到的是旋转坐标系下的定常结果, 因此计算量较小, 却无法获得叶片在旋转过程中流场的变化情况, 如: 力和力矩的变化, 涡量的生成与演化等。

在本文中, 利用 OpenFOAM 开源平台所提供的求解器 MRFSimpleFoam 进行基于 MRF 方法的计算研究。

1.2 任意网格界面元法

任意网格界面元法 (arbitrary mesh interface, AMI) 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^[15-18]。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。旋转域内的网格随螺旋桨一起转动, 而旋转域外的网格始终保持静止。滑移面两侧的网格节点不一定完全重合, 但需要保证在每一个时间步内, 滑移面两侧的通量相等, 以此实现动静区域的耦合求解。

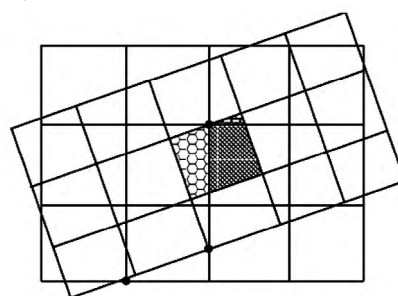


图 2 主面和从面的重叠区域
Fig.2 Overlapping area in master and slave

为了实现动静区域间合理的通量传递与流场信息交互, AMI 方法在交界面处采用了带权重的插值方式。如图 2, 权重是通过动面和静止面的重叠区域所占的比重来确定。主面到从面的权重为式 (3), 从面到主面的权重为式 (4):

$$W_{M_j \text{ to } S} = \frac{|S_{M_j \text{ to } S}|}{|S_{M_j}|}, \text{ 其中 } W_{M_j \text{ to } S} \in [0, 1] \quad (3)$$

$$W_{S_i \text{ to } M} = \frac{|S_{M_i \text{ to } M}|}{|S_{S_i}|}, \text{ 其中 } W_{S_i \text{ to } M} \in [0, 1] \quad (4)$$

式中: i 为某一主面的第 i 个相邻从面; j 为某一从面的第 j 个相邻主面; $|S_{M_j \text{ to } S}|$ 、 $|S_{M_i \text{ to } M}|$ 分别为第 j 个主面和从面重叠区域面积大小, 第 i 个从面和主面重叠区域面积大小; $|S_{M_j}|$ 和 $|S_{S_i}|$ 为某一从面第 j 个主面的面积和某一主面第 i 个从面的面积。

在本文中, 利用 OpenFOAM 开源平台所提供的求解器 pimpleDyMFoam 进行基于 AMI 方法的计算研究。

1.3 重叠网格技术

重叠网格方法 (overset grid) 是将物体的每个

部件单独划分网格，然后再嵌入到另一套网格当中。不同网格间会有重叠的部分，在经过挖洞等预处理后被排除在计算之外。剩余的网格重叠区域通过建立插值关系使流场信息可以进行交换，以达到整体求解的效果。重叠网格技术可以允许多个相互独立的网格之间产生无约束的相对位移，因此它对动态问题具有极强的处理能力。

重叠网格间插值关系的建立是通过由 Suggar^[19] 程序计算而得的 DCI 数据来实现的。求解 DCI 的过程分为四步。第一步是洞单元的搜寻，或称为挖洞过程 (Hole cutting)。SUGGAR 程序基于八叉树 (Octree) 结构的挖洞算法，将计算域之外的网格标记为洞单元，排除在计算之外。第二步是在另一套网格中，给某一套网格中的插值边界单元搜索足够数量的贡献单元，为插值边界单元提供插值信息。在完成贡献单元的搜索之后，第三步则是求解每一组插值边界单元和贡献单元的插值系数 (权重系数)。通过对所有贡献单元的物理值和对应插值系数进行加权求和，最终完成插值。

$$\phi_i = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \phi_i \quad (5)$$

式中： 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_i 是插值边界单元的对应值。此外所有插值系数均需无因次化，并满足条件

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (6)$$

最后一步是对重叠区域进行优化，寻找到匹配最佳的贡献单元与插值边界单元组合，以提高插值精度。

在本文中，利用基于 OpenFOAM 平台所开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 进行基于重叠网格技术的计算研究。

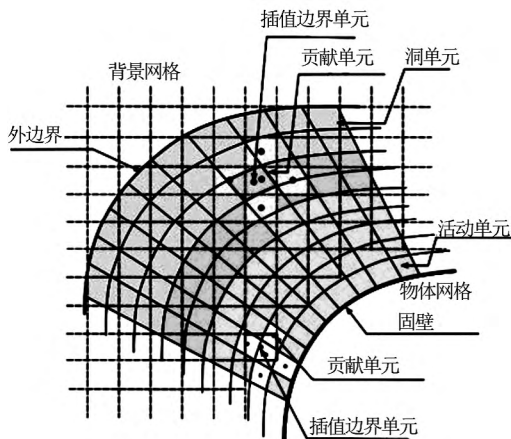


图 3 重叠网格示意图
Fig.3 Diagram of overset grid

2 数值方法

2.1 控制方程

本文所采用的三种方法均是基于求解雷诺平均的 N-S 不可压黏性方程。在惯性坐标系下，N-S 方程表达为：

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + (\mu + \mu_t) \nabla^2 \mathbf{u} \quad (8)$$

式中： ρ 为密度， \mathbf{u} 为脉动平均速度， p 为压力， μ 为动力黏性系数， μ_t 为湍流黏性系数。然而对于 MRF 方法，在旋转坐标系下方程 (8) 需改为方程 (2) 的形式。

2.2 速度压力解耦算法

对 MRF 方法，控制方程中采用 Patankar 和 Spalding 在 1972 年提出的 SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equation) 算法处理速度与压力间的耦合。对 Overset 方法，则是通过由 Issa 于 1986 年提出的 PISO (pressure implicit with splitting of operator) 算法来求解。对 AMI 方法，求解器采用的是一种 PISO 与 SIMPLE 的耦合算法—PIMPLE 算法来进行解耦。

2.3 湍流模型

本文的计算均是基于 Menter 提出的 SST (shear stress transport) $k-\omega$ 模型^[20]，SST $k-\omega$ 模型通过剪应力输运 (shear stress transport, SST) 公式结合了 $k-\omega$ 模型以及标准 $k-\varepsilon$ 模型的优点，即：在近壁面处采用 $k-\omega$ 模型，在远场的自由流动中采用 $k-\varepsilon$ 模型。最终表达式如式 (9) 所示。

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}k) &= \mathcal{G}_k - \beta^* k \omega + \nabla \cdot [(v + \alpha_k \nu_t) \nabla k], \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\omega) &= \gamma S^2 - \beta \omega^2 + \nabla \cdot [(v + \alpha_\omega \nu_t) \nabla \omega] + \\ & (1 - F_1) CD_{k\omega} \end{aligned} \quad (9)$$

式中： k 为湍动能； ω 为特定湍流耗散率。 F_1 是将 $k-\varepsilon$ 模型和 $k-\omega$ 模型结合的混合函数。关于 SST $k-\omega$ 模型的更多细节见参考文献[20]。

3 计算模型

3.1 模型及工况

本文的计算模型是某一四叶螺旋桨, 实尺度螺旋桨直径为 10 m, 模型尺度直径为 0.25 m, 缩尺比为 1:40, 螺旋桨转速为 20 rad/s。本文的计算都是基于螺旋桨模型尺度。我们利用三种方法分别对其在若干进速系数下的流场进行了数值模拟, 依据各进速系数下得到的推力系数及扭矩系数绘制了该螺旋桨的敞水性征曲线, 并对螺旋桨周围的流场特征进行了考察。螺旋桨模型如图 4 所示。计算工况如表 1 所示。

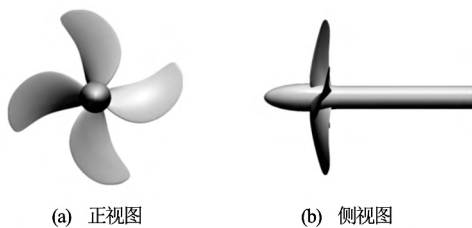


图 4 螺旋桨几何模型
Fig.4 Geometry model of propeller

表 1 螺旋桨计算工况

Table 1. Computational conditions for propeller

进速系数 J	螺旋桨转速 $n / \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	进速 $V_A / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
0	20	0
0.1	20	0.5
0.2	20	1
0.3	20	1.5
0.4	20	2
0.5	20	2.5
0.6	20	3
0.7	20	3.5

3.2 计算网格

网格的生成分为两步。首先采用 ANSYS ICEM-CFD 软件生成计算域内的背景网格。再用 OpenFOAM 提供的 snappyHexMesh 工具生成螺旋桨周围的多面体网格。

三种方法的计算域均为圆柱形: 圆柱底面圆心落在 x 轴上, 底面半径为 0.38; 圆柱高为 1 ($-0.35 \leq x \leq 0.65$)。对 MRF 方法, 旋转坐标系作用的区域也为圆柱形, 半径为 0.25, 高为 0.3 ($-0.1 \leq x \leq 0.2$), 并完全包络桨叶与桨毂。在 AMI 方法中, 旋转子域的大小及位置与 MRF 中旋转坐标系的作用域完

全一致。对 Overset 方法, 背景网格与计算域尺寸一致, 螺旋桨网格为一小长方体 ($-0.1 \leq x \leq 0.65$, $-0.16 \leq y \leq 0.16$, $-0.16 \leq z \leq 0.16$), 两套网格合并后再经 SUGGAR 程序挖去洞点单元, 剩余的网格参与计算。

MRF 方法, AMI 方法, Overset 方法相对应的网格量分别为 1647195、1646897 和 1646937。且在螺旋桨模型周围的网格数量及疏密程度类似。计算网格如图 5 所示。

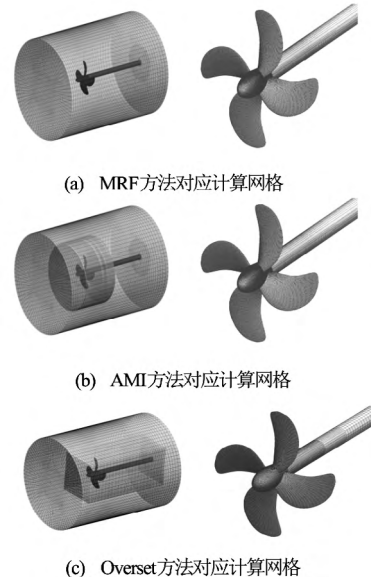


图 5 螺旋桨整体和局部网格
Fig.5 Global and local meshes of propeller

3.3 边界条件

与 MRF 方法、AMI 方法和 Overset 方法相对应的边界条件设置如图 6 所示。

值得说明的是: 在图 6 (a) 和图 6 (b) 中, inletOutlet 是 OpenFOAM 中提供的一种衍生边界条件。它根据速度的方向, 将速度和压力在 outlet 面上的边界条件在 fixedValue 与 zeroGradient 之间进行切换。在图 6 (c) 中, movingWallVelocity 也是由 OpenFOAM 提供的一种边界条件, 它可以通过改变界面的法向速度值使得通过 propeller 边界的通量为 0。

4 计算结果与分析

4.1 计算结果

本次计算以大地为基准参考系, 固定螺旋桨转速为 20 rad/s。对 MRF 方法和 AMI 方法, 螺旋桨在 x 方向的位置固定不变, 水流从入口面开始, 以匀速流向桨。对 Overset 方法, 则是模仿真实物理

敞水试验的情形，即周围的流体最初处于静止状态，螺旋桨迎着水流匀速前进。

式中： 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。

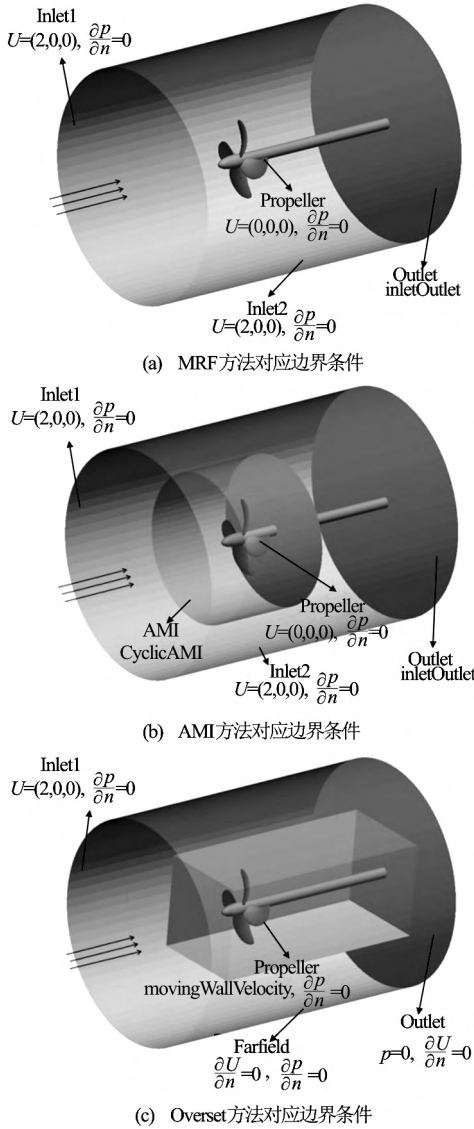


图 6 边界条件
Fig.6 Boundary conditions

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 。这些系数的定义分别为：

$$J = \frac{V_A}{nD} \tag{10}$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \tag{11}$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \tag{12}$$

$$\eta_0 = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \tag{13}$$

表 2 螺旋桨敞水性能试验结果
Table 2. Experimental measurements of open-water performance of propeller

进速系数 J	进速 $V_A / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	K_T	$10K_Q$	效率 η_0
0	0	0.3145	0.3210	0
0.1	0.5	0.284	0.2947	0.153
0.2	1	0.2483	0.2657	0.298
0.3	1.5	0.2096	0.2327	0.430
0.4	2	0.1692	0.1967	0.548
0.5	2.5	0.1277	0.1589	0.640
0.6	3	0.0845	0.1193	0.676
0.7	3.5	0.0375	0.0747	0.559

表 3 基于 MRF 方法的预报结果
Table 3. Predictions of propeller's open-water performance based on MRF method

进速系数 J	进速 $V_A / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	K_T	$10K_Q$	效率 η_0
0	0	0.3311	0.3410	0.000
0.1	0.5	0.2999	0.3129	0.153
0.2	1	0.2618	0.2804	0.297
0.3	1.5	0.2184	0.2434	0.428
0.4	2	0.1722	0.2031	0.540
0.5	2.5	0.1242	0.1598	0.618
0.6	3	0.0738	0.1128	0.625
0.7	3.5	0.0221	0.0624	0.395

表 4 基于 AMI 方法的预报结果
Table 4. Predictions of propeller's open-water performance based on AMI method

进速系数 J	进速 $V_A / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	K_T	$10K_Q$	效率 η_0
0	0	0.3085	0.3201	0.000
0.1	0.5	0.2868	0.2989	0.153
0.2	1	0.2533	0.2705	0.298
0.3	1.5	0.2130	0.2346	0.433
0.4	2	0.1694	0.1974	0.546
0.5	2.5	0.1246	0.1581	0.627
0.6	3	0.0772	0.1140	0.646
0.7	3.5	0.0260	0.0643	0.451

表 5 基于 Overset 方法的预报结果

Table 5. Predictions of propeller's open-water performance based on Overset method

进速系数 J	进速 $V_A / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	K_T	$10K_Q$	效率 η_0
0	0	0.3129	0.3368	0.000
0.1	0.5	0.2928	0.3157	0.148
0.2	1	0.2587	0.2805	0.294
0.3	1.5	0.2185	0.2407	0.433
0.4	2	0.1722	0.1997	0.549
0.5	2.5	0.1248	0.1568	0.633
0.6	3	0.0759	0.1115	0.650
0.7	3.5	0.0236	0.0617	0.426

分别采用 AMI、MRF 和 Overset 三种方法对 $J=0-0.7$ 下的 8 个工况进行了数值模拟计算, 试验结果如表 2, 计算结果如表 3、表 4 和表 5。图 7 所示为螺旋桨敞水性征曲线预报结果。

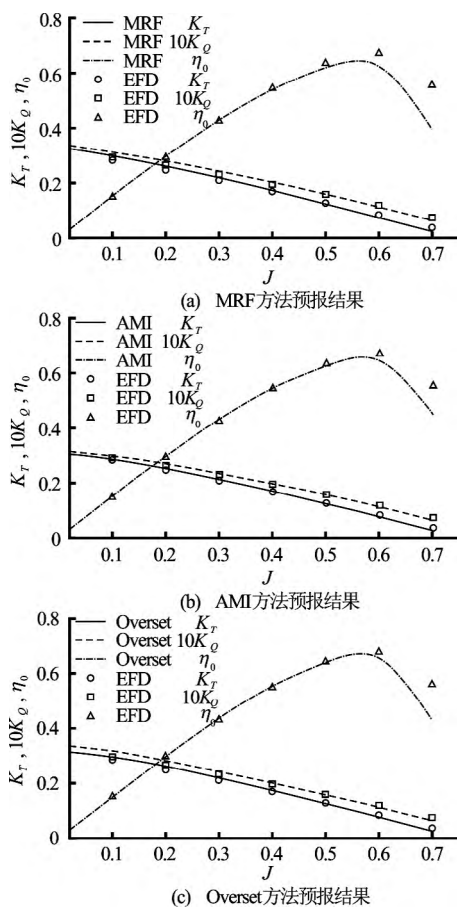


图 7 螺旋桨敞水性征曲线

Fig.7 Open water characteristics curves of propeller

4.2 结果分析

将三种方法的计算结果与敞水试验的结果进

行对比, 如表 6、表 7 和表 8。

表 6 试验值与 MRF 方法计算结果的对比

Table 6. Comparisons of experimental measurements and results based on MRF method

J	K_T 的 误差/%	$10K_Q$ 的 误差/%	效率 η_0 的 误差/%
0	5.29	6.24	0.00
0.1	5.60	6.16	□0.29
0.2	1.35	5.53	□0.27
0.3	4.19	4.58	□0.35
0.4	1.75	3.23	□1.50
0.5	□2.77	0.58	□3.40
0.6	□12.65	□5.43	□7.58
0.7	□41.05	□16.52	□29.36

表 7 试验值与 AMI 方法计算结果的对比

Table 7. Comparisons of experimental measurements and results based on AMI method

J	K_T 的 误差/%	$10K_Q$ 的 误差/%	效率 η_0 的 误差/%
0	□1.92	□0.30	0.00
0.1	0.98	1.41	□0.17
0.2	0.50	1.80	0.04
0.3	1.60	0.82	0.80
0.4	0.09	0.34	□0.32
0.5	□2.41	□0.53	□1.96
0.6	□8.69	□4.45	□4.39
0.7	□30.54	□13.88	□19.30

表 8 试验值与 Overset 方法计算结果的对比

Table 8. Comparisons of experimental measurements and results based on Overset method

J	K_T 的 误差/%	$10K_Q$ 的 误差/%	效率 η_0 的 误差/%
0	□0.50	4.92	0.00
0.1	3.11	7.13	□3.51
0.2	1.04	5.58	□1.49
0.3	4.23	3.46	0.76
0.4	1.80	1.50	0.22
0.5	□2.28	□1.31	□1.06
0.6	□10.17	□6.57	□3.80
0.7	□36.96	□17.34	□23.70

通过对比可知，利用三种方法对螺旋桨敞水性能的预报结果是基本可靠的，除 $J=0.7$ 的计算工况之外，绝大多数的误差都在 7% 以内，并基本呈现出低进速系数、高进速系数下误差较大，中等进速系数下误差较小的特点。该螺旋桨是应用于 VLCC 船上的推进装置，母船的设计航速所对应的进速系数约为 0.26，在这一进速系数附近的预报精度都在 5% 以内。

对比三种方法的预报精度可知：MRF 方法的求解精度与 AMI 方法和 Overset 方法相比较差，而 Overset 方法的精度稍逊于 AMI 方法。这是由于 MRF 方法是一种在旋转坐标系下的定常方法，而 AMI 方法以及 Overset 方法都是非定常的方法，它们在模拟旋转螺旋桨周围的流场时更具优势。

同时也注意到，在 $J=0.7$ 的工况下三种方法的预报误差都非常大。首先，这是由于计算采用的湍流模型 SST $k-\omega$ 不能模拟出高进速下桨叶前后的细小涡结构，因此会造成预报的偏差。如能选用更加完备的湍流模型，则会提高此工况下的预报精度，但同时也要因此消耗更多的计算资源，其次，该进速下的 K_T 与 K_Q 在数值上本身较小（ 10^{-2} 量级），在计算误差时易出现较大的结果。

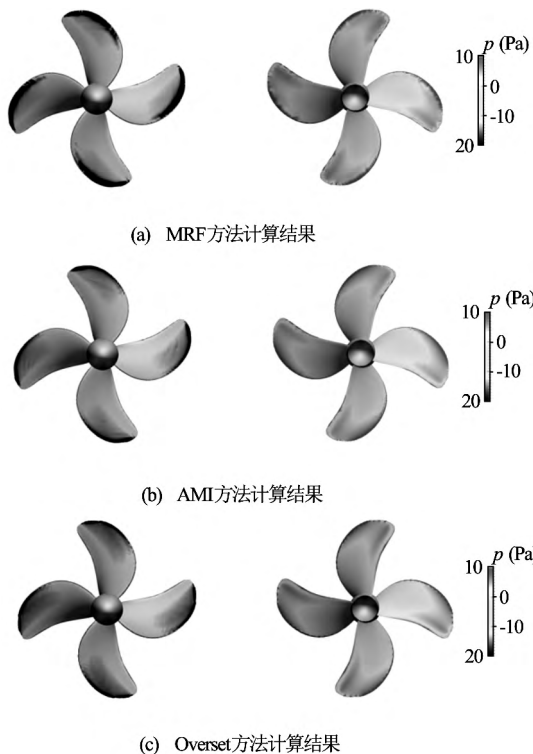


图 8 桨叶压力分布
Fig.8 Distribution of pressure on blades

4.3 流场结构

CFD 方法基于 N-S 方程，计及流体黏性，因此可以给出精细的流场信息，这是 CFD 方法的重要

优势之一。选取 $J=0.4$ 时的典型工况，通过后处理得到了螺旋桨桨叶上的压力分布，桨附近的速度场，以及桨后的涡结构，如图 8—图 10 所示。这些可视化的结果一方面可以更直观地了解和把握桨附近的流场特征，为进一步的设计和 optimization 提供参考；另一方面则可以从侧面验证三种预报方法的可靠性与可行性。

图 8 展示的是螺旋桨桨叶上的压力分布云图，每张图中左侧为吸力面，右侧为压力面，依次为基于 MRF 方法，AMI 方法，Overset 方法的计算结果。

由图 8 可知，三种方法的预报结果类似：吸力面上以负压为主，最大负压出现在叶片导边靠近叶梢的部分；压力面以正压为主，最大正压出现在叶片导边和随边靠近叶梢的部分。螺旋桨正是借助两面的正负压差来提供推力。

图 9 依次展示的是基于 MRF 方法、AMI 方法，Overset 方法得到的螺旋桨桨后速度场。可以清晰地看到由于螺旋桨的高速旋转而对桨后流场的加速作用，三种方法的结果十分类似。与 MRF 定常求解的结果不同的是，基于 AMI 和 Overset 两种方法求解的是非定常的结果，因此可以看到由于叶片旋转而产生的非均匀加速，在图中体现为规律的羽状区域。

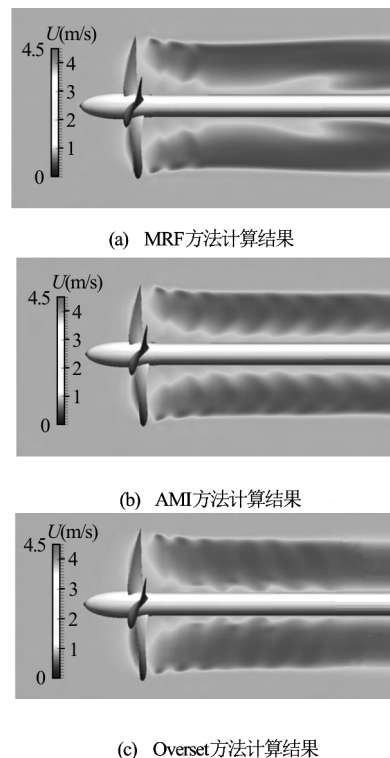


图 9 桨后速度场
Fig.9 Velocity fields behind the propeller

图 10 依次展示的是基于 MRF 方法、AMI 方法和 Overset 方法得到的螺旋桨桨后涡量场。这里用 $Q=300$ 的等值面表示从螺旋桨产生的涡结构，并

以 x 方向的速度作染色。螺旋桨叶梢处产生的梢涡和桨毂处产生的桨毂涡都可以从图中观察到。由于 MRF 是一种在旋转坐标系下的定常求解方法, 因此只能得到少量的定常涡结构。又由于所选用的湍流模式 SST $k-\omega$ 的局限性, 更加细节的涡, 如梢涡配对涡^[21]没能捕捉到, 但这对螺旋桨的敞水性能预报影响甚微。

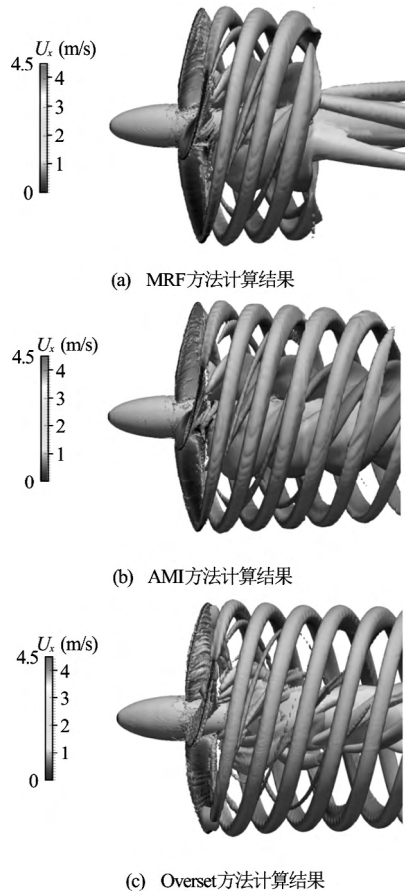


图 10 $Q = 300$ 的等值面

Fig.10 Iso-surfaces of $Q = 300$

4.4 计算时间

设置每一步的计算时间步长 Δt 为 0.00025 s , 也即螺旋桨旋转周期的 $1/200$; 以力的时历曲线稳定震荡, 且振幅小于收敛值的 5% 为收敛标志; 选取 $J = 0.4$ 时的典型工况为研究对象, 对比三种方法的计算时间。

MRF 方法、AMI 方法和 Overset 方法的收敛时间分别为 0.05 s (1 个螺旋桨旋转周期), 0.25 s (5 个螺旋桨旋转周期), 0.25 s (5 个螺旋桨旋转周期)。剔除网格量与并行计算的差异后, 基于 AMI 方法和 Overset 方法的单步计算时间分别是基于 MRF 方法计算时间的 3.4 倍和 4.8 倍。

综上所述, 基于 MRF 方法的收敛最快, 计算量最小; AMI 方法的计算量次之; Overset 方法的

计算量最大, 耗时最长。

5 结论

本文选取多重参考系法 (MRF)、任意网格界面元法 (AMI) 和重叠网格方法 (Overset) 三种 CFD 方法, 分别应用由 OpenFOAM 平台提供的求解器 MRFSimpleFoam、pimpleDyMFoam, 以及基于 OpenFOAM 自主开发的船舶与海洋工程水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 对某一四叶螺旋桨周围的流场进行了数值模拟, 并对其敞水性能进行了计算预报。通过与试验结果以及三种方法结果之间的对比分析, 并得出以下主要结论:

(1) 利用 MRF、AMI 和 Overset 三种方法均可以对螺旋桨的敞水性能进行可靠且有效的预报, 并能提供丰富的流场信息, 这是 CFD 方法与模型试验及势流理论相比所具备的突出优势。

(2) 多重参考系法 (MRF) 是一种在旋转坐标系下的定常方法。在计算过程中, 计算域内的网格保持不变, 仅在指定区域内采用了随桨转动的坐标系, 因此流动状态由非定常转化为了定常。因此, 与其他两种方法相比, MRF 方法的计算量小, 易于收敛, 在同等条件下耗时最短。但同时其预报精度有限, 不及非定常的预报方法。此外, MRF 只能得到定常的流场结果, 不能从中观察到流场随桨转动而产生的变化。

(3) 任意网格界面元法 (AMI) 和重叠网格方法 (Overset) 都是非定常的求解方法, 在计算过程中螺旋桨周围的网格会随之转动, 并通过旋转区域和固定区域的交界面来插值流场信息, 达到整体直接求解的目的。因此, 这两种方法的预报精度要优于 MRF 方法, 并能展示出梢涡与毂涡的生成演化过程, 可为研究螺旋桨的空泡、振动和噪声等性能提供参考。但这两种方法计算量大, 收敛较慢, 对生成网格的质量要求颇高。

(a) 一般而言, 螺旋桨敞水试验并不是孤立存在的。基于 Overset 技术的求解器 naoe-FOAM-SJTU 可以实现多级物体间的相对运动, 为船桨自航试验的数值模拟奠定了基础, 而采用 Overset 方法的螺旋桨敞水性能预报也将为随后的自航计算提供必要的验证与参考。这是其他两种方法所不具备的。

(b) 如果仅需考虑对螺旋桨敞水性能的预报, 则 AMI 方法较之其他方法更加简单有效: 由表 6、表 7 和表 8 对比可知, 基于 AMI 方法的预报精度最高, 尤其在本船设计航速 ($Fr = 0.26$) 附近, 其对螺旋桨敞水性能的计算误差小于 2% 。相比于 Overset 技术, 该方法对应的网格生成的要求较低, 在应用中可以减少若干算例配置上的步骤。

(4) 本文的计算都是基于 SST $k-\omega$ 湍流模型, 如采用更加精细的湍流模型如 DES 等, 则可以捕捉到高进速、小攻角下桨叶前后的细致涡结构。这将有效改善在高进速系数下的预报精度。

综上所述, 本文的计算结果充分验证了三种方法再螺旋桨敞水性能预报中的可靠性与可行性, 并分析了各方法的优劣特征。在实际应用中, 应依据不同的实际需求, 对三种方法做出合理的选择。

致谢

本文工作还得到了工信部高技术船舶科研项目以及上海交通大学高性能计算中心的资助, 在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献:

- [1] 王言英. 船用螺旋桨理论及其应用研究进展[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(2): 306-312.
WANG Yan-ying. Technological advances in propeller propulsion of ships[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(2): 306-312.
- [2] GINZEL G L. On the theory of broad blade propeller[M]. ARC, 1955.
- [3] 苏玉民, 黄胜. 船舶螺旋桨理论[M]. 哈尔滨, 中国: 哈尔滨工程大学出版社, 2003.
SU Yu-min, HUANG Sheng. Theory of ship propeller[M]. Harbin, China: Harbin Engineering University Press, 2003.
- [4] 王国强, 胡寿根, 杨晨俊. 螺旋桨性能计算及设计的升力面方法[J]. 上海交通大学学报, 上海, 中国, 1988, 22(2): 61-74.
WANG Guo-qiang. HU Shou-gen, YANG Chen-jun. Propeller analysis and design methods by numerical lifting-surface theory[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, 1988, 22(2): 61-74.
- [5] HESS J T, SMITH A M. Calculation of nonlifting potential flow about arbitrary three dimensional bodies[J]. Journal of Ship Research, 1964, 8(2): 22-44.
- [6] MORINO L, KUO C C. Subsonic potential aerodynamic for complex configuration: A general theory[J]. AIAA Journal, 1974, 12(2): 191-197.
- [7] HOSHINO T. Hydrodynamic analysis of propellers in unsteady flow using a surface panel method[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1993, 165: 71-87.
- [8] FENG J Z, DONG S T. A panel method for the prediction of unsteady hydrodynamic performance of the ducted propeller with a finite number of blades[C]. Proceedings of the International Symposium on Propeller and Cavitation, Wuxi, China, 1986.
- [9] FUNENO I. Analysis of steady viscous flow around a highly skewed propeller[J]. Journal Kansai Society of Naval Architect, 1999, 231: 1-6.
- [10] 蔡荣泉, 陈凤明, 冯学梅. 使用 Fluent 软件的螺旋桨敞水性能计算分析[J]. 船舶力学, 2006, 10(5): 41-48.
CAI Rong-quan. CHEN Feng-ming, FENG Xue-mei. Calculation and analysis of the open water performance of propeller by CFD software fluent[J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(5): 41-48.
- [11] 唐登海, 董世汤. 船舶螺旋桨周围黏流场数值预报与流场分析[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 1997, 12(4): 426-436.
TANG Deng-hai. DONG Shi-tang. Numerical prediction and physical analysis of the viscous flow around a marine propeller[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. A, 1997, 12(4): 426-436.
- [12] SHEN Z R, WAN D C, CARRICA P M. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering[J]. Ocean Engineering, 2015, 108: 287-306.
- [13] 高富东, 潘存云, 蔡汶珊, 等. 基于 CFD 的螺旋桨敞水性能数值分析与验证[J]. 机械工程学报, 2010, 46(8): 133-139.
GAO Fu-dong. PAN Cun-yun, CAI Wen-shan, et al. Numerical analysis and validation of propeller open-water performance based on CFD[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(8): 133-139.
- [14] ZHAO W C, WAN D C. Numerical simulation of hydrodynamic performance of propeller by MRFSimpleFoam solver[C]. The Proceedings of the Eleventh (2014) Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium (PACOMS-2014), Shanghai, China, 2014.
- [15] 张凌新, 胡龙兵, 邵雪明. 滑移网格下泵内流场的非定常流计算[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2013, 28(1): 10-16.
ZHANG Ling-xin, HU Long-bing, SHAO Xue-ming. Computation of unsteady flow fields in a pump using sliding mesh method[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(1): 10-16.
- [16] 周胡, 万德成. 不同叶片数的风力机绕流场的非定常流数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2014, 29(4): 444-453.
ZHOU Hu, WAN De-cheng. Numerical simulation of the unsteady flow around wind turbines with different

- blades numbers[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(4): 444-453.
- [17] BEAUDOIN M, JASAK H. Development of a generalized grid interface for turbomachinery simulations with OpenFOAM[C]. Open Source CFD International Conference, Germany, 2008.
- [18] 赵文超, 万德成. 海上浮式风力机叶片气动性能的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2014, 29(6): 663-669.
ZHAO Wen-chao, WAN De-cheng. Numerical simulation of aerodynamic characteristics of floating offshore wind turbine blades[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(6): 663-669.
- [19] NOACK R W. A general capability for moving body overset grid assembly[C]. In the Proceedings of the 17th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Canada, 2005.
- [20] MENTER F R, KUNTZ M, LANGTRY R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model[J]. Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2003, 4: 625-632.
- [21] CARRICA P M, CASTRO A M, STERN F. Self-propulsion computations using a speed controller and a discretized propeller with dynamic overset grids[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2010, 15(4): 316-330.
- [22] 曹洪建, 万德成, 杨驰. 三维溃坝波绕方柱剧烈流动的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2013, 28(4): 414-422.
CAO Hong-jian, WAN De-cheng, YANG Chi. Numerical simulation of violent flow of 3-D dam-breaking wave around square cylinder[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(4): 414-422.
- [23] 王建华, 万德成. 南海浮式码头与系泊系统动力耦合分析[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2015, 30(2): 180-186.
WANG Jian-hua, WAN De-cheng. Dynamic coupling analysis of the mooring system and floating pier in the South China Sea[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2015, 30(2): 180-186.
- [24] ZHAO W C, WAN D C. Numerical study of interactions between phase II of OC4 wind turbine and its Semi-Submersible floating support system[J]. Journal of Ocean and Wind Energy, 2015, 2(1): 45-53.
- [25] CAO H J, WAN D C. Development of multidirectional nonlinear numerical wave tank by naoe-FOAM-SJTU solver[J]. International Journal of Ocean System Engineering, 2014, 4(1): 52-59.
- [26] MENG Q J, WAN D C. Numerical simulations of viscous flows around a ship while entering a lock with overset grid technique[C]. Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference, Kona, Big Island, Hawaii, USA, 2015.
- [27] WANG J H, LIU X J, WAN D C. Numerical simulation of an oblique towed ship by naoe-FOAM-SJTU solver[C]. Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference, Kona, Big Island, Hawaii, USA, 2015.
- [28] CAO H J, WAN D C. RANS-VOF solver for solitary wave run-up on a circular cylinder[J]. China Ocean Engineering, 2015, 29(2): 183-196.
- [29] SHEN Z R, WAN D C. RANS computations of added resistance and motions of ship in head waves[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2013, 23(4): 263-271.