

复合材料船用螺旋桨设计与 CFD/FEM 计算

洪毅, 赫晓东

(哈尔滨工业大学 复合材料结构研究所, 哈尔滨 150080, hongyi@hit.edu.cn)

摘要: 将基于 RANS 方程的计算流体力学方法与有限元方法相结合, 沿着螺旋桨水动力性能计算、复合材料螺旋桨建模及结构铺层设计、CFD/FEM 载荷传递、复合材料螺旋桨结构力学性能计算, 水动力性能收敛判定的设计分析流程, 完成了某种螺旋桨桨叶的初步的设计过程. 提出一种预变形策略以改进复合材料螺旋桨的综合性能. 计算结果表明, 该复合材料螺旋桨能够满足预定设计指标的要求, 在达到传统金属螺旋桨水动力性能要求的同时, 减重 30%, 运行效率增加. 研究结果充分说明了所采用设计方法的可行性.

关键词: 复合材料螺旋桨; CFD/FEM; 铺层设计; 预变形

中图分类号: U668.5

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)03-0404-05

Design of composite marine propeller and the calculation of CFD/FEM

HONG Yi, HE Xiao-dong

(Center for Composite Material and Structure, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China, hongyi@hit.edu.cn)

Abstract: In this paper, we combine the computational fluid dynamics method based on RANS equations and finite element method in the design of composite marine propeller. The primary design is completed through computing the hydrodynamic performance, conducting the finite element model, designing stacking sequence, transferring the load, calculating the mechanic performance of structure, and checking in the convergence in turn. A predeformation method is presented for improving the combination performance of composite propeller. The results show that the designed propeller can meet the hydrodynamic demand of the propeller made of metal, at the same time, reduce the weight by 30% and improve the efficiency.

Key words: composite propeller; CFD/FEM; design of stacking sequence; predeformation

我国过去的军用舰艇和水中兵器的推进系统中,螺旋桨大多由镍铝青铜(NAB)合金制成.这种材料具有硬度大,屈服强度高,弯曲变形小等优点,但同时也存在很多问题,由NAB制造的螺旋桨桨叶易出现诱发疲劳裂纹,空泡腐蚀现象严重,不易形成较为复杂的形状,且在船体触地或是碰撞的情况下易弯曲,另外重量大,降低了燃料的使用效率,更为重要的是该类金属螺旋桨的声阻尼性能较差,导致由振动引发的噪声问题突出.这诸多不利的性质都将直接影响舰艇的生存以及鱼雷的攻击能力,迫使设计者评价其它材料生产螺旋桨的可行性^[1].

近年来,树脂基复合材料的广泛使用给螺旋桨的设计者提供了全新的契机.树脂基复合材料具有轻质、比强度大、比刚度高的特点,并且有良好的可设计性和优异的阻尼性能,这些均为高效率、低激振、低噪音螺旋桨的设计提供了基础.近几十年来,已有很多国家都将目光投向了复合材料螺旋桨的设计与研究.

最初完成船用复合材料螺旋桨设计的是 Lin^[2-3].他使用基于无粘势流理论的 PSF-2 程序计算作用在桨叶上的流体压力和离心载荷,并利用一个三维实体单元构建螺旋桨桨叶的有限元模型,结合等效模量的方法,通过有限元软件 ABAQUS 就复合材料螺旋桨的应力与变形进行了分析,并与同样的金属螺旋桨进行了比较.

随后, Lin 等^[4-8]利用耦合的 FEM/VLM

收稿日期: 2009-04-01.

作者简介: 洪毅(1981—),女,博士研究生;

赫晓东(1961—),男,教授,博士生导师.

(PSF2)方法对复合材料螺旋桨进行了一系列的研究.分析了不同纤维铺层方式对桨叶水弹性行为的影响,并基于 Hashin 材料失效准则对复合材料螺旋桨进行了强度评价.

本文利用 FEM/CFD 初步设计了一个完全由纤维增强复合材料组成的螺旋桨桨叶.整个研究过程中包括水动载荷计算,复合材料结构的几何构型和铺层设计,分布式水动载荷传递,复合材料结构静力学计算分析等多方面内容.计算由通用的 ANAYS/ANSYS - CFX 软件完成.

1 理论基础

1.1 RANS 方程

在计算流体力学中,目前广泛使用的湍流数值模拟方法是 Reynolds 平均法(Reynolds Averaged Navier - Stokes Equation, 简记为 RANS 方程),其中基于 RANS 方程的 SST $k - \omega$ 两方程湍流模型能够很好的解释湍流剪应力的输送,并可对负压力梯度下的流体分离的开端和数量给出高度准确的预测,已成功在国内外螺旋桨的水动力性能的预报工作中加以使用^[9-11].

经过螺旋桨桨叶的三维、粘性湍流的连续方程和基于 RANS 的动量方程的形式如下:

连续方程

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

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'}) + S_i.$$

其中 u_i , u_j 为笛卡尔坐标系下的速度矢量, p 是静态压力, μ 是分子粘度, $-\rho \overline{u_i' u_j'}$ 是 Reynolds 应力. 根据 Boussinesq 提出的湍粘假定,建立的 Reynolds 应力相对于平均速度梯度的关系为

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij}.$$

这里 δ_{ij} 是“Kronecker delta”符号(当 $i = j$ 时, $\delta_{ij} = 1$; 当 $i \neq j$ 时, $\delta_{ij} = 0$), μ_t 为湍动粘度, k 为湍动能.

在 SST $k - \omega$ 模型中,假定湍动粘度与湍动能 k 和湍动频率 ω 之间有如下关系:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}.$$

并对其进行一定的限制,就可获得相应的两个输送方程, k 方程和 ω 方程分别表达为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta \rho k \omega,$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2.$$

湍粘公式的限制公式为

$$\nu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, S F_2)}.$$

其中: $\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho}$, F_2 为壁边界层的限制, S 是应变率的不变量.

根据以上的 Boussinesq 湍粘假定及相应的两方程输送方程, RANS 方程就可以完成封闭求解,从而获取螺旋桨的水动力性能参数.

1.2 复合材料螺旋桨的有限元分析

复合材料螺旋桨桨叶同时受到离心力和水动压力载荷的作用,产生弯扭耦合变形.考虑到桨叶对载荷的变形行为是一个几何非线性行为,故其有限元模型的平衡方程能够表示为

$$\{ [K_l] + [K_o] + [K_g] - [K_r] \} \{ u \} = \{ F_{ext} \} + \{ F_r \} + \{ F_h \}.$$

其中 $[K_l]$ 是线性刚度矩阵, $[K_o]$, $[K_g]$ 和 $[K_r]$ 分别是初始位移、几何以及旋转刚度矩阵. $\{ u \}$ 是局部坐标下的节点位移矢量, $\{ F_{ext} \}$ 是除了流体力 $\{ F_h \}$ 以外的外部载荷, $\{ F_r \}$ 是离心载荷.

2 算例分析

2.1 复合材料螺旋桨设计流程

1) 以一个四叶金属螺旋桨的型值参数为基础绘制复合材料螺旋桨的三维 CAD 模型.

2) 采用 CFD 软件计算螺旋桨在一定工况范围内的水动性能,获取设计点工况下的水动力载荷作为作用在螺旋桨桨叶上的水动压力.

3) 根据桨叶的结构形式及载荷传递路线,设计复合材料铺层方式及其它的结构参数.建立复合材料螺旋桨桨叶的有限元分析模型.

4) 根据设计工况下的水动载荷,计算螺旋桨桨叶的变形和应力分布,预测强度/刚度性能.

5) 计算变形后螺旋桨的水动力性能.校核是否螺旋桨满足水动力性能的收敛标准,即两次扭矩系数 K_Q 的差值小于 5% 的 K_Q 值.

重复以上步骤计算直至获得满足设计要求的复合材料螺旋桨桨叶的结构设计方案.

2.2 水动力性能计算

本文研究螺旋桨的水动力性能设计要求为如下:设计工况为进速比 $J = 0.6018$ ($J = V_a/nD$), 此时推力系数 $K_T = 0.2525$ ($K_T = T/\rho n^2 D^4$), 扭矩系数 $K_Q = 0.04245$ ($K_Q = Q/\rho n^2 D^5$), 其中 V_a 为入流速度, ρ 为流体密度, n 和 D 分别为螺旋桨

的转速和直径.

由于所计算的桨叶和流体域具有周期性,所以仅对 1/4 的求解域进行计算. 该 90° 的计算域包含一个桨叶、1/4 桨毂、入口、出口、柱形外边界以及两个周期性边界表面,其中入口、出口、柱形外边界分别放置在距离螺旋桨中心 6*D*, 9*D* 和 6*D* 的位置. 流体网格的产生是由流体计算的前处理器 GAMBIT 完成的,在桨叶表面及其周围区域以非结构网格方式进行划分,设置较小的网格尺度以保证准确模拟旋转过程中螺旋桨桨叶的流体域情况,与此同时,在距螺旋桨较远的区域则采用了结构网格,且网格尺度逐渐增大. 通过使用这种混合格网的方式不仅能够大大减少计算量,同时还确保了计算的准确性. 图 1 充分显示了求解域的网格划分以及边界条件情况. 在该流体域的划分的网格单元是 413 422.

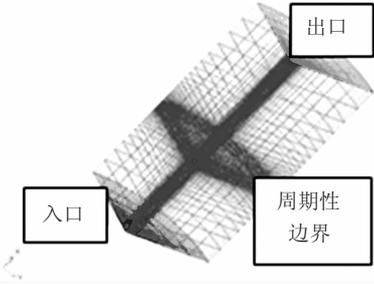


图 1 计算流体域的网格划分

将 GAMBIT 产生的流体计算网格导入流体计算软件 CFX 进行水动力计算. 设置螺旋桨转速为 1 200 r/min;在出口边界考虑非空穴的情况,将出口压力设置为零;而在外边界和周期性边界则分别确保它们没有滑移以及为旋转周期的情况. 在进速比为 0.4 ~ 0.9 范围内选取几个工况分别计算螺旋桨的水动力性能.

2.3 结构设计

本文研究的螺旋桨桨叶是由树脂基纤维层合复合材料构成的,故选取一个 8 节点的三维层合实体单元进行有限元建模,厚度方向上只有一个单元,图 2 显示了单元划分后的桨叶有限元模型,总共有 180 个单元.

其中,每个单元都能够被看作是一个由不同铺层角度单层组成的轴对称层合板,由于螺旋桨的厚度是位置坐标的函数,所以每个单元的层合数目也相应不同. 在本文中,分别考虑四种材料体系和三种铺层方式对复合材料螺旋桨进行优选设计分析(其中,方案 ba 代表选择的材料体系为 b,铺层方式为 a). 表 1 和表 2 分别显示了所选用的材料性能参数和材料体系的选取方案,表 3 显示

的是铺层方案.

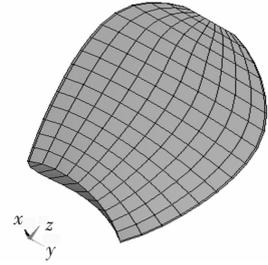


图 2 桨叶的有限元模型

表 1 纤维增强材料性能参数

| 材料 | E_1 / Pa | E_2 / Pa | G_{12} / Pa | ν_{12} | $\frac{\rho}{(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})}$ |
|----------------|-------------------|-------------------|----------------------|------------|--|
| C | 1.350e11 | 9.400e9 | 5.000e9 | 0.280 | 1 404 |
| C ₁ | 7.626e10 | 7.626e10 | 4.900e9 | 0.320 | 1 536 |
| G | 3.860e10 | 8.270e9 | 4.140e9 | 0.260 | 1 620 |
| G ₁ | 1.170e10 | 1.170e10 | 3.530e9 | 0.140 | 1 800 |
| 金属 | 1.270e11 | | | 0.420 | 7 500 |

表 2 五种材料方案

| 编号 | 材料方案 |
|----|----------------------------------|
| aa | C ₁ /C/C ₁ |
| ba | G ₁ /G/G ₁ |
| ca | G ₁ /C/G ₁ |
| da | C ₁ /G/C ₁ |
| m | 金属 |

表 3 三种轴对称铺层序列

| 编号 | 轴对称铺层方案 |
|----|---|
| ea | $[0^\circ_2/45^\circ_2/90^\circ_4/45^\circ_6/90^\circ_6/45^\circ_6/90^\circ_6]_s$ |
| eb | $[30^\circ_2/45^\circ_2/0^\circ_4/-45^\circ_6/0^\circ_6/-45^\circ_6/0^\circ_6]_s$ |
| ec | $[0^\circ_2/45^\circ_2/0^\circ_4/45^\circ_6/0^\circ_6/45^\circ_6/0^\circ_6]_s$ |

图 3 是第一种对称堆放序列的示意图,纤维依次按照下面的角度进行堆放 0°, 0°, 45°, 45°, 90°, 90°, 90°, …, 分别从桨叶的压力面和吸力面开始到中曲面,其中图示的 *x* 方向作为纤维铺层的参考方向.

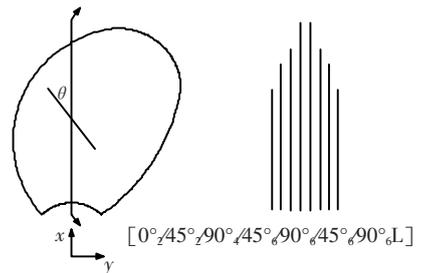


图 3 桨叶的轴对称铺层序列

在有限元建模及铺层完成以后,将螺旋桨叶片看作悬臂梁结构,设置相关的边界约束条件,然后利用 ANSYS 与 CFX 间的接口软件,可直接将计算出的桨叶上的水动力压力导入有限元分析软件

ANSYS,从而完成桨叶的几何非线性结构计算,确定桨叶在工况下的变形及应力分布情况.

2.4 收敛计算

建立变形后的复合材料螺旋桨桨叶的几何构型,再次产生流体网格,创建流体域并对其水动力性能进行计算,考察螺旋桨是否满足水动力性能的收敛标准,即两次扭矩系数 K_Q 的差值小于 5% 的 K_Q 值. 如果不满足,继续完成设计流程中的第 2 步至第 5 步,直至获取收敛解.

2.5 结果讨论

研究首先针对铺层方案 a 考虑材料因素对复合材料螺旋桨各种性能的影响,分别对碳纤维、玻璃纤维及两种混杂纤维材料体系进行分析. 图 4~6 对比了几种复合材料体系的螺旋桨与金属螺旋桨的推力系数、扭矩系数以及效率. 从图中可见,随着进速比减小,螺旋桨所受的推力和扭矩增加,对于复合材料螺旋桨和金属螺旋桨而言均有相同的趋势;而另一方面,由于复合材料弹性较

大,复合材料螺旋桨的推力、扭矩系数均低于金属螺旋桨,但效率较金属螺旋桨有所提高. 此外,由于桨叶几何尺寸较小,不同复合材料体系螺旋桨的推力,扭矩及效率差距很小,各复合材料螺旋桨的结果基本重合.

表 4 列举了几种复合材料螺旋桨桨叶的最大应力和变形. 结果显示复合材料螺旋桨桨叶能够满足相应材料的强度要求,但其变形略大于金属螺旋桨桨叶,其中碳纤维螺旋桨 aa 的变形最小,玻璃纤维螺旋桨 ba 的变形最大,两种混合纤维方案居中. 但综合考虑到玻璃纤维具有较良好的抗冲击性,且价格低廉,最后结合所选螺旋桨桨叶的具体结构形式,确定出一种更适合该螺旋桨的材料体系铺设方案 $C_1/G/C/G/C_1$, 并命名该材料体系为 e.

表 4 几种材料螺旋桨的最大应力和变形结果

| 编号 | 最大位移/ mm | 最大主应力 S_1 /MPa | 最大等效 应力/MPa | 最大剪应 力 S_{xz} /MPa |
|----|-------------|---------------------|----------------|-------------------------|
| aa | 0.027 534 | 10.150 726 | 11.385 165 | 0.397 018 |
| ba | 0.083 701 | 6.324 173 | 5.765 184 | 0.284 787 |
| ca | 0.059 907 | 13.428 813 | 12.796 149 | 0.307 555 |
| da | 0.037 473 | 11.462 966 | 12.910 440 | 0.440 091 |
| m | 0.012 892 | | 2.809 100 | |

利用复合材料优异的可设计性,又对复合材料螺旋桨桨叶的铺层方案进行了优化,设计基于所选的混合材料体系方案 e. 水动力计算的结果趋势与上述不同材料方案的比较结果相同.

表 5 列举了不同铺层方案下复合材料螺旋桨的最大应力和变形数值. 从结果可见,当铺层方式为 c 时,螺旋桨桨叶的最大变形和应力优于其他两种铺层方案,是适合桨叶结构形式的铺层方案.

表 5 三种铺层方式螺旋桨的最大应力和变形结果

| 编号 | 最大位移/ mm | 最大主应力 S_1 /MPa | 最大等效 应力/MPa | 最大剪应 力 S_{xz} /MPa |
|----|-------------|---------------------|----------------|-------------------------|
| ea | 0.036 277 | 8.920 913 | 8.071 695 | 0.261 876 |
| eb | 0.044 683 | 7.092 413 | 6.963 146 | 0.283 131 |
| ec | 0.025 689 | 6.157 773 | 6.039 798 | 0.240 563 |

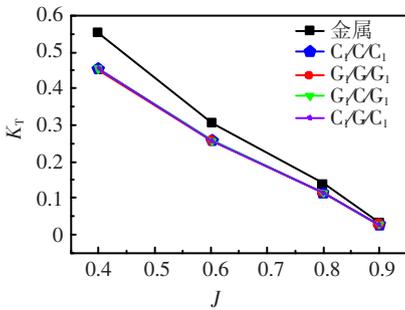


图 4 不同材料方案的推力系数比较

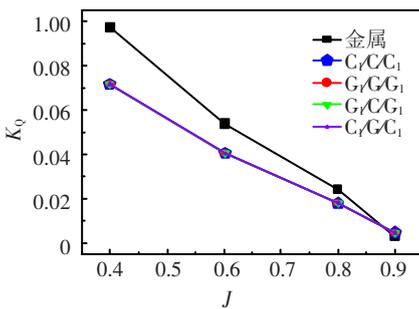


图 5 不同材料方案的扭矩系数比较

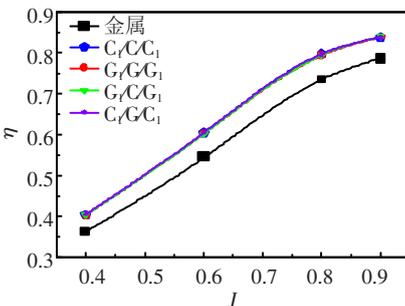


图 6 不同材料方案的效率对比

3 预变形

从以上的计算分析结果可知,通过改变材料方案和铺层方案,可有效地提高复合材料螺旋桨的结构性能,但不能满足完全螺旋桨的水动力性能设计要求. 因此在复合材料螺旋桨的设计过程中需要探索其他的有效方法.

在本研究中,根据复合材料螺旋桨桨叶在水动

力载荷作用下的变形值,在螺旋桨桨叶初始的几何构型的基础上进行预变形处理,从而获得新的复合材料螺旋桨桨叶的几何形式.计算该构型下复合材料螺旋桨的水动力性能,若满足要求,则完成预变形设计,否则,继续上述过程.选取材料体系 e,铺层方案 c,分别在初始螺旋桨及预变形螺旋桨的几何构型基础上进行水动力计算和结构计算,结果如图 7 和 8 所示.通过预变形,螺旋桨的水动力性能与金属螺旋桨的设计值基本一致,较初始复合材料螺旋桨的水动力性能有很大的提高.进一步分析预变形螺旋桨在水动力作用下的几何非线性结构响应,获取的螺旋桨最大应力和变形结果如表 6 所示.可见预变形的结构响应与未变形螺旋桨基本一致,但因采取了预变形策略,改善了其水动力性能,满足了水动力性能设计要求.

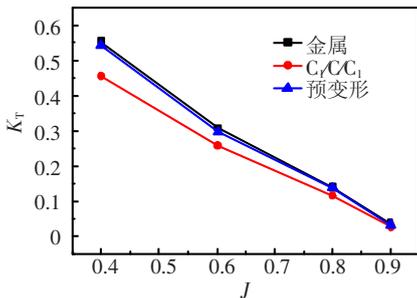


图 7 推力系数比较

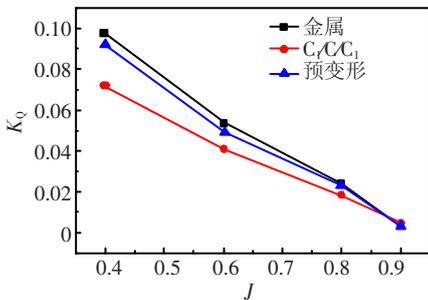


图 8 扭矩系数比较

表 6 预变形螺旋桨的最大应力和变形结果

| 最大位移/ mm | 最大主应力 S_1 /MPa | 最大等效 应力/MPa | 最大剪 应力 S_{yz} /MPa |
|-------------|---------------------|----------------|-------------------------|
| 0.026 357 | 6.157 882 | 6.329 877 | 0.220 556 |

4 结 论

1) 通过改变材料方案和铺层方案,可有效地提高复合材料螺旋桨的结构性能,但不能完全满足螺旋桨的水动力性能设计要求.

2) 结合预变形策略可使复合材料螺旋桨能够满足预定的设计指标要求:在达到传统金属螺旋桨水动力性能要求的同时,减重 30%,运行效率增加.

3) 将基于 RANS 方程的计算流体力学方法与有限元方法相结合,并使用预变形策略的研究方法在复合材料螺旋桨的设计中是可行的.

参 考 文 献:

- [1] MOURITZ A P, GELLERT E, BURCHILL P, *et al.* Review of advanced composite structures for naval ships and submarines[J]. Composite Structures, 2001, 53: 21 - 41.
- [2] LIN G. Comparative stress-deflection analyses of a thick - shell composite propeller blade[R]. Bethesda:David Taylor Research Center, 1991.
- [3] LIN G. Three-dimensional stress analyses of a fiber-reinforced composite thruster blade [C]//Symposium on Propellers/Shafting, Society of Naval Architects and Marine Engineers. Virginia Beach:[s. n.], 1991.
- [4] LIN H J, LIN J J. Effect of stacking sequence on the hydroelastic behavior of composite propeller blades [C]//Eleventh International Conference on Composite Materials, Australian Composite Structures Society. Gold Coast:[s. n.], 1997.
- [5] LIN C C, LEE Y J. Stacking sequence optimization of laminated composite structures using genetic algorithm with local improvement [J]. Composite Structures, 2004, 63: 339 - 345.
- [6] LEE Y J, LIN C C. Optimized design of composite propeller[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2004, 11: 17 - 30.
- [7] LIN H J, LIN J J. Strength evaluation of a composite marine propeller blade[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2005, 24: 1791 - 1807.
- [8] LIN H J, LIN J J. Nonlinear hydroelastic behavior of propellers using a finite-element method and lifting surface theory[J]. Journal of Marine Science and Technology, 1996, 1: 114 - 124.
- [9] WATANABE T, KAWAMURA T, TAKEKOSHI Y, *et al.* Simulation of steady and unsteady cavitation on a marine propeller using a RANS CFD code[C]//Fifth International Symposium on Cavitation. Osaka:[s. n.], 2003.
- [10] LI Da-qing. Validation of RANS predictions of open water performance of a highly skewed propeller with experiments[C]//Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics. Shanghai: Journal of Hydrodynamics, 2002: 520 - 528.
- [11] RHEE S H, JOSHI S K. Computational validation for flow around a marine propeller using unstructured mesh based Navier-Stokes Solver [J]. JSME International Journal, 2005, 48: 562 - 570.