

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2018.02.001

CFD 计算分析水下潜器运动阻力性能*

陈泰文, 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, E-mail: 1361777517@qq.com)

摘要: 在水下潜器的水动力性能数值模拟中, 为了计算其静水阻力, 研究尾部的分离流动, 同时出于计算资源的考虑, 常尝试使用混合 RANS/LES 方法。分离涡模拟 (detached-eddy simulation, DES) 方法是其中较常见的一种。基于剪切应力运输 (shear stress transport, SST) 模型的 DES 方法在近壁面区域采用基于 SST 模型的 RANS 方法, 而在其他区域采用基于亚格子模型的 LES 方法。该文分别应用 naoe-FOAM-SJTU 求解器中 SST-DES 方法和 SST-RANS 方法模块, 对水下潜器的水动力性能进行数值模拟, 对比分析了两种方法计算得到的静水阻力和时均、瞬时流场, 结果表明 SST-DES 方法能较好地模拟出水下潜器的流动分离现象。

关键词: 水下潜器; 分离涡模拟; 剪切应力运输; 静水阻力; naoe-FOAM-SJTU 求解器

中图分类号: O357

文献标志码: A

CFD numerical analysis of resistance of autonomous & remotely-operated vehicle

CHEN Tai-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: In numerical simulation of hydrodynamic performance of Autonomous & Remotely-operated Vehicle (ARV), we need to calculate calm water resistance and study flow separation. Taking the limitation of computational resources into consi-

* **收稿日期:** 2017-08-30(2018-02-07 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(51490675, 11432009, 51579145), 长江学者奖励计划(T2014099), 上海高校特聘教授岗位跟踪计划(2013022), 上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300)

作者简介: 陈泰文(1995-), 男, 湖北汉川人, 硕士研究生。

通讯作者: 万德成, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

Received: August 30, 2017 (**Revised** February 7, 2018)

Project supported by foundations: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51490675, 11432009, 51579145), Chang Jiang Scholars Program(T2014099), Program for Professor of Special Appointment (Eastern Scholar) at Shanghai Institutions of Higher Learning (2013022), Shanghai Excellent Academic Leaders Program (17XD1402300).

Biography: CHEN Tai-wen (1995-), Male, Master Candidate.

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

deration, we attempt to use hybrid RANS/LES approach, the common one of which is Detached-Eddy Simulation (DES). SST-DES method employs Reynolds-Averaged Navies-Stokes (RANS) with shear stress transport (SST) model in the regions near wall surfaces, and Large-Eddy Simulation (LES) with sub-grid-scale (SGS) model in the separated regions. In this research, SST-DES and SST-RANS are both used to calculate the resistance, time-averaged field and instantaneous field. The comparison and analysis indicate that SST-DES perform well in numerical simulation of complicated separated flow.

Key words: ARV; detached-eddy simulation; shear stress transport; calm water resistance; naoe-FOAM-SJTU solver

引言

近年来,随着海洋技术的研究与开发的不断发展,水下潜器在军事和科研领域引起了日益广泛的重视。目前,研究水下潜器水动力性能的方法主要包括理论方法、实验方法和数值模拟方法。其中最有效的方法是模型实验,至今仍是解决工程问题的主要手段,缺点是成本较大。随着计算机技术的迅速发展,计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)日趋成熟,使数值模拟成为水动力性能分析的重要工具。

在水下潜器的水动力性能数值模拟中,需计算其静水阻力,并研究尾部的分离流动。雷诺平均方法(Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS)对 Navier-Stokes 方程进行时间平均处理,以致各种大小旋涡的特征被抹去,因而无法反映出真实的旋涡脱落现象。而直接数值模拟方法(Direct Numerical Simulation, DNS)和大涡模拟方法(Large Eddy Simulation, LES)虽然能更真实地模拟出泻涡现象,但是需要非常精细的网格,尤其是近壁面的网格,因而会消耗巨大的计算资源。近些年来,不少学者提出了混合RANS/LES方法:即在近壁面处使用RANS方法模拟,以减少网格和计算量;在远离壁面的区域使用LES方法模拟,保证能捕捉到大尺度的分离流动。

分离涡模拟(Detached-Eddy Simulation, DES)方法是常见的混合RANS/LES方法。Spalart等^[1]提出了DES97方法,将当地网格尺度 Δ 与RANS计算得到的长度尺度 d 比较得到混合长度尺度 \tilde{d} ,用来切换RANS和LES模式。然而,这种处理方法受近壁面网格布置方式的影响,网格布置不当,会引起模化应力损耗(modeled stress depletion, MSD)现象。Spalart等^[2]引入 f_d 对 \tilde{d} 的定义进行修正,提出了延迟DES(delayed DES, DDES)方法来解决MSD问题。Menter等^[3]也提出基于剪切应力运输(shear stress transport, SST)模型的DES方法解决了该问题。赵伟文等^[4]分别采用SST-DES和SST-URANS方法对亚临界雷诺数下的三维圆柱绕流问题进行了数值模拟,并与实验结果比较,验证了SST-DES方法在模拟大分离流动问题上的优势。但目前针对SST-DES方法应用于复杂流动问题的研究较为少见。

本文应用万德成教授课题组基于开源平台OpenFOAM开发的船舶与海洋工程水动力学求解器naoe-FOAM-SJTU^[5],分别使用SST-DES和SST-RANS方法模块,对水下潜器运动的阻力性能进行数值计算,对比分析了两种方法计算得到的静水阻力和尾流流场,可为SST-DES方法应用于更复杂的流动问题上提供借鉴。

1 数学模型

1.1 SST模型

在RANS方程中,出现新的未知量雷诺应力,需采用湍流模型使方程封闭。 $k-\omega$ 模型和 $k-\varepsilon$ 模型是两个常见的湍流模型, $k-\omega$ 模型对近壁面区域的边界条件有良好的处理能力,但在自由剪切流区域受来流的影响较大,因此在该区域的处理能力上不及 $k-\varepsilon$ 模型。Menter等^[6]提出了SST模型,用 $k-\omega$ 模型处理近壁面区域的流动,用 $k-\varepsilon$ 模型处理自由剪切流区域的流动,综合了 $k-\omega$ 模型在近壁区计算和 $k-\varepsilon$ 模型在远场计算的优点,并在湍流黏性系数的定义中考虑了湍流剪切应力的输送过程,使其应用更加广泛。

OpenFOAM中的SST模型是经过修正后的版本^[7],将湍流定义式中的涡量 Ω 换成了速度应变率 S ,以实现旋转不变性,本文以OpenFOAM中的符号为准。

湍动能 k 和特定湍流耗散率 ω 的输运方程分别为:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(u_j k)}{\partial x_j} = \tilde{G} - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} [(v + \alpha_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j}] \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \omega)}{\partial x_j} = \gamma S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} [(v + \alpha_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}] + (1 - F_1) CD_{k\omega} \quad (2)$$

式中, \tilde{G} 可定义为

$$\tilde{G} = \min(G, c_1 \beta^* k \omega), G = \nu_t S^2 \quad (3)$$

F_1 是混合函数, 定义如下:

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (4)$$

$$\arg_1 = \min[\max(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega}), \frac{4\alpha_{\omega 2} k}{CD_{k\omega}^* y^2}] \quad (5)$$

$$CD_{k\omega}^* = \max(CD_{k\omega}, 10^{-10}) \quad (6a)$$

$$CD_{k\omega} = 2\alpha_{\omega 2} \cdot \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (6b)$$

式中: y 为场点到最近壁面的距离, F_1 在近壁面处的值为 1, 随着 y 的增大, F_1 的值逐渐减小, 在远离壁面的区域变为 0, 由此来控制 $k-\omega$ 和 $k-\varepsilon$ 模型的切换。同时, 输运方程中的各个系数也应通过混合函数 F_1 求得, 即

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \quad (7)$$

式中, ϕ 为 SST 模型中的 α 、 β 和 γ 等系数; ϕ_1 和 ϕ_2 分别为 $k-\omega$ 和 $k-\varepsilon$ 模型中相对应的系数。

湍流黏性系数可由下式给出

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, b_1 S F_2)} \quad (8)$$

式中: S 为应变率的不变测度

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

F_2 为第二个混合函数, 定义为

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (10)$$

$$\arg_2 = \max\left(2\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega}\right) \quad (11)$$

上述公式中所有涉及到的系数取值见表 1。

1.2 SST-DES模型

基于 SST 模型的 DES 方法^[3]对湍动能 k 的输运方程进行改造, 将式(1)中的耗散项乘上系数 F_{DES} , 得到新的输运方程为:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(u_j k)}{\partial x_j} = \tilde{G} - \beta^* k \omega F_{DES} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \alpha_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (12)$$

$$F_{DES} = \max\left[\frac{L_t}{C_{DES} \Delta} (1 - F_s), 1\right] \quad (13)$$

式中: $L_t = \sqrt{k} / (\beta^* \omega)$ 为 SST-RANS 模型中的湍流长度尺度; $\Delta = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z}$ 为亚格子长度尺度; C_{DES} 为 DES 常数, 在此取 0.61; F_s 为混合函数, 控制 RANS 和 LES 的切换, 可以是 F_1 或 F_2 , 本文取 F_2

2 计算模型

2.1 模型及工况

本文计算模型为水下潜器 ARV (autonomous & remotely-operated vehicle), 模型尺寸为 $L \times B \times D = 3.86 \text{ m} \times 1.9 \text{ m} \times 2.9 \text{ m}$, 模型三维视图如图 1 所示。

计算工况为纵向均匀来流, 速度 $v = 0.7716 \text{ m/s}$, 运动黏性系数 $\nu = 1.61 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 雷诺数 $Re = 2.3 \times 10^6$ 。

2.2 计算域及网格划分

本文采用全域计算, 坐标原点在水下潜器首部, 中纵剖面为 $Y=0$ 平面, 计算域为: $-1.5L < x < 4L$ 、 $-2.5B < y < 2.5B$ 、 $-2D < z < 1.5D$, 并在物面附近一定区域内加密, 网格单元总数在 500 万左右, 网格如图 2 所示。边界条件为: 物面采用固壁无滑移条件, 入口采用均匀来流, 出口采用零压力梯度。

2.3 离散格式

控制方程采用有限体积法离散, 其中时间项采

表 1 SST 模型中的所有系数
Table 1. Coefficients of SST model

α_{k1}	α_{k2}	$\alpha_{\omega 1}$	$\alpha_{\omega 2}$	β_1	β_2	γ_1	γ_2	β^*	a_1	b_1	c_1
0.85	1.0	0.5	0.856	0.075	0.0828	0.555	0.44	0.09	0.31	1.0	10

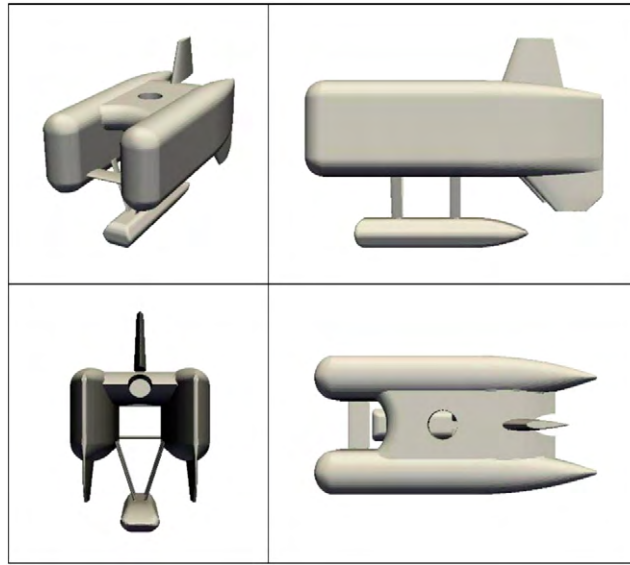


图 1 模型三维视图
Fig.1 3D view of model

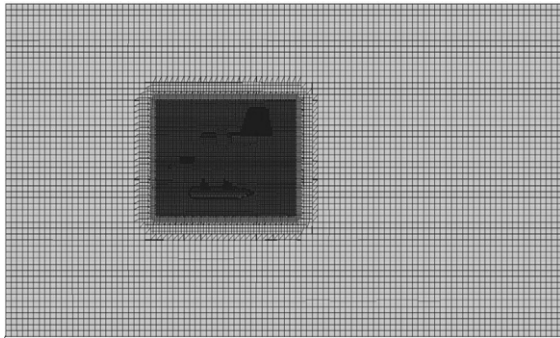


图 2 计算域网格
Fig.2 Computation domain

用二阶欧拉向后离散格式，对流项采用二阶迎风离散格式，扩散项采用高斯线性守恒格式，黏性项采用二阶中心格式，采用压力与速度耦合的 PIMPLE 算法求解。

3 计算结果与分析

3.1 阻力预报

对设计航速 1.5 kn (0.7716 m/s) 下的实尺度水下潜器进行静水阻力预报，分别采用 SST-DES 和 SST-RANS 方法，结果如表 2 所示。

分析表 2 的结果可以看到，DES 方法得到的总阻力比 RANS 要小，其中摩擦阻力相差较小，总阻力的差别主要来自于压阻力，这可以通过下文的流场分析来解释。

3.2 时均统计分析

本文给出了 DES 方法计算结果的时均统计值，

表 2 两种方法静水阻力预报对比
Table 2. Comparison of resistance between two prediction methods

	R_p	R_f	R_t
SST-RANS	101.356	30.3169	131.6729
SST-DES	88.4704	29.6010	115.1658
误差	-12.713%	-2.361%	-12.536%

并与 RANS 方法解得的时均值作了比较。需要指出的是，DES 方法解得的是瞬时值然后进行时均统计，这与 RANS 方法解时均化的方程有着本质的区别。

选取了三个典型截面 A1 ($Z=0.75$)、A2 ($Y=0$) 和 A3 ($Z=0.35$) 进行流场分析。图 3 所示是 A1 和 A2 截面的速度云图。从图中可以看出，两种方法得到的流场的差异主要体现在尾流区域，SST-RANS 计算得到的回流区比 SST-DES 的长。图 4 是 A3 截面的表面压力系数分布，横坐标为压力点的纵向位置，由于截面形状的关系，部分纵向位置对应两个不同的压力点，因此图中会出现同一横坐标存在两组压力值的区域。

结合流场来分析阻力预报的差异。水下潜器整个潜入水中，没有自由面，湿表面保持不变，所以影响阻力的主要因素有以下两个：物面附近的法向速度梯度（直接影响摩擦阻力）和物面上的压力分布（直接影响压阻力）。从图 3 来看，两种方法得到的速度等值线的疏密程度在物面附近并没有很大区别，换言之，速度梯度差别不大，因此两种方法计算得到的摩擦阻力差别不大。从图 4 中可以看出，两种方法得到的物面压力分布在首部几乎一致，但是在中部（圆孔处）和尾部差别却很大，RANS 方法得到的压力值明显比 DES 的小，导致首尾压差大，这也解释了 RANS 方法计算得到的压阻力较大的原因。

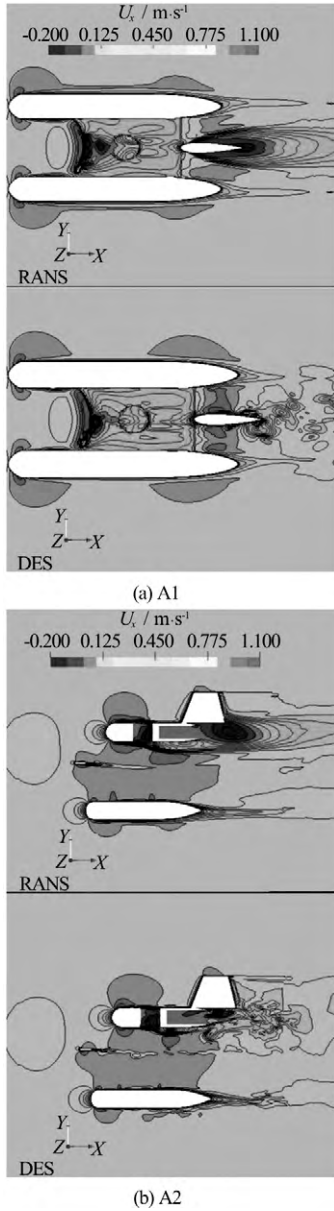


图 3 A1 和 A2 截面的速度云图
Fig.3 Contours of Ux of two slices

3.3 瞬时流场分析

图 5 给出了 DES 得到的瞬时流场涡量，RANS 方法则用时均值代替。图中的涡量等势面用 Hunt 等^[8]建议的 Q 准则表示， Q 的定义为：

$$Q = \frac{1}{2}(|\Omega|^2 - |S|^2) \quad (14)$$

式中： Ω 为涡量张量， S 为应变率张量。

从图 5 中可以看出，DES 方法可以很好地模拟出尾部旋涡脱落现象，而 RANS 方法则几乎看不出涡现象。

图 6 给出了 A1 和 A2 截面的涡量等值线图。在近壁面区域两种方法得到的结果几乎表现为一

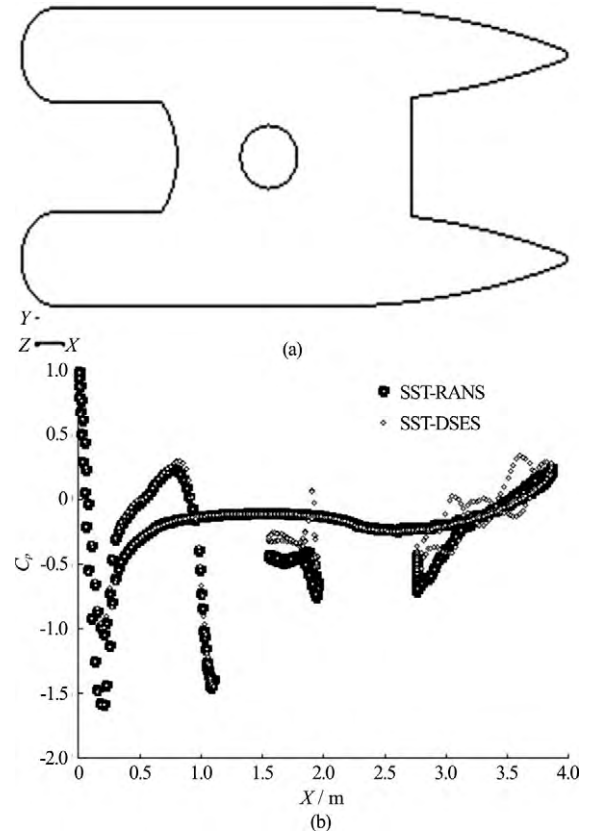


图 4 截面的表面压力系数分布
Fig.4 Cp of slice A3

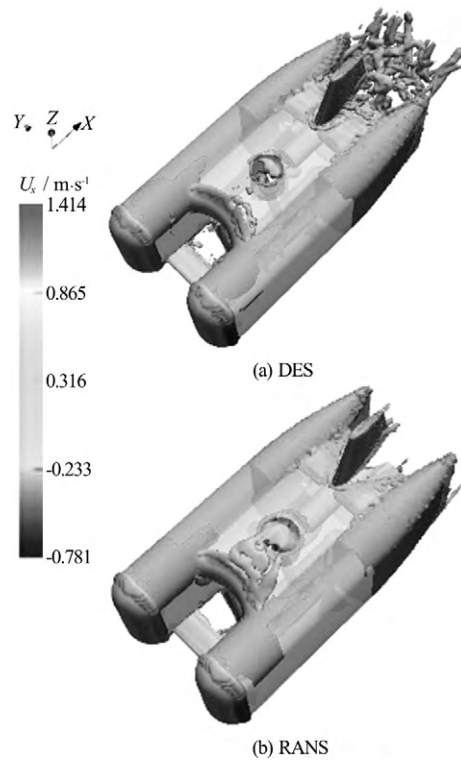


图 5 DES 和 RANS 涡量等值面 $Q=10$
Fig.5 Isosurfaces of Q of DES and RANS $Q=10$

致，在尾流区域则差异明显。这是因为在近壁面区域两者都是 SST-RANS 湍流模式，而在尾流区域

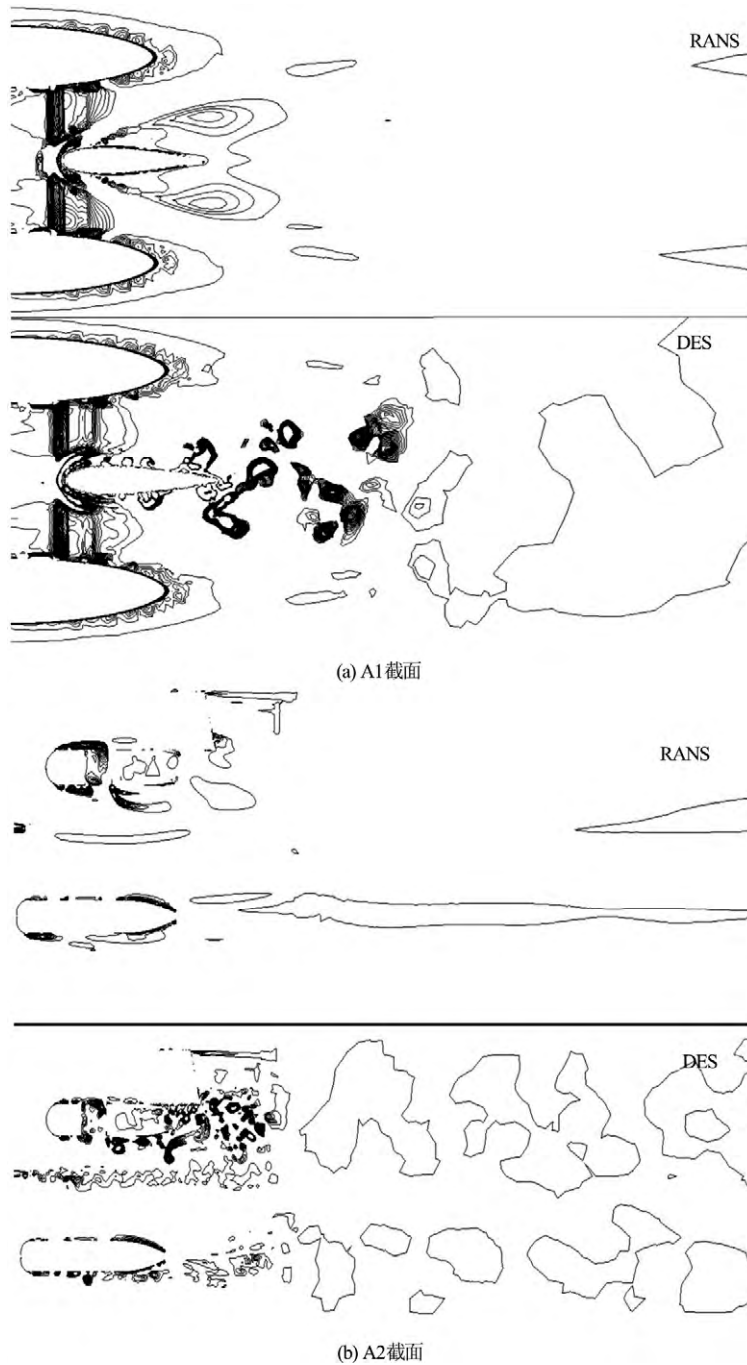


图6 A1 截面(上) A2 截面(下)尾流涡量等值线,用 $Q=0-20$ 之间的 32 条等值线表示
 Fig.6 32 Contour lines of Q (0-20) of slice A1 (up) and slice A2 (down)

SST-DES 方法会切换到 LES 模式。此外, SST-DES 方法在 A1 和 A2 截面的尾流区域都能看到明显的卡门涡街现象,证明 SST-DES 方法能很好地模拟出三维的卡门涡,而 SST-RANS 方法经过时间平均,只能看到极少的对称涡。

4 结论

本文基于 OpenFOAM 开源平台自主开发的水

动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU,分别采用 SST-DES 和 SST-RANS 方法模块,对水下潜器的水动力性能进行数值模拟,对比分析了两种方法计算得到的静水阻力和时均、瞬时流场,得出以下主要结论:

- (1) SST-DES 方法得到的静水阻力比 SST-RANS 要小,其中摩擦阻力相差较小,总阻力的差别主要来自于压阻力。通过对物面压力分布的分析表明, RANS 方法得到的表面压力分布在尾部比 DES 要小,以致首尾压差大,压阻力较大。
- (2) 对两个典型截面的时均流场的分析表明,

两种方法得到的流场的差异主要体现在尾流区域, SST-RANS 计算得到的回流区比 SST-DES 的长。

(3) 对瞬时流场的涡结构的分析表明, SST-DES 方法能很好地模拟出三维的卡门涡, 而 SST-RANS 方法经过时间平均, 只能看到极少的对称涡。说明 SST-DES 方法在模拟复杂分离流动的问题上有更好的效果。

参 考 文 献:

- [1] SPALART P R, JOU W H, STRELETS M, et al. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach[J]. *Advances in DNS/LES*, 1997(1): 4-8.
- [2] SPALART P, ALLMARAS S. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows[J]. *La Recherche Aéronautique*, 2003, 439(1): 5-21.
- [3] 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(1): 625-632.
- [4] 赵伟文, 万德成. 用 SST-DES 和 SST-URANS 方法数值模拟亚临界雷诺数下三维圆柱绕流问题[J]. *水动力学研究与进展, A 辑*, 2016, 31(1): 1-8.
ZHAO Wei-wen, WAN De-cheng. Numerical Simulation of Three-Dimensional Cylindrical Flow Problem with Sub-Critical Reynolds Number Using SST-DES and SST-URANS Methods[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2016, 31(1): 1-8.
- [5] SHEN, Z. R., WAN, D.C. Manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU. Technical Report for Solver Manual, No. 2012SR118110, Shanghai Jiao Tong University. 2012.
- [6] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*, 2012, 32(8): 1598-1605.
- [7] HELLSTEN A. Some improvements in Menter's $k-\omega$ SST turbulence model[C]. 29th AIAA Fluid Dynamics Conference, Albuquerque, USA, 1998.
- [8] HUNT J C R, WRAY A A, MOIN P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows[R]. Center for Turbulence Research Report CTR-S88, Stanford University, USA, 1988.