

SST-DES 方法计算分析水下机器人的水动力性能

陈泰文, 何东亚, 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)

*通信作者: dcwan@sjtu.edu.cn

摘要: 在水下机器人的水动力性能数值模拟中, 为计算其静水阻力, 研究尾部的分离流动, 同时出于计算资源的考虑, 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。本研究分别应用 SST-DES 方法和 SST-RANS 方法对水下机器人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机器人的流动分离现象。

关键词: 水下机器人; 分离涡模拟; 剪切应力运输; 流动分离

1 引言

近年来, 随着海洋技术的研究与开发的不断发展, 水下机器人在军事和科研领域引起了日益广泛的重视。目前, 研究水下机器人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。

在水下机器人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: 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]在 1997 年提出了 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。

本研究基于开源平台 OpenFOAM，分别采用 SST-DES 和 SST-RANS 方法对水下机器人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尾流流场，为 SST-DES 方法应用于更复杂的流动问题上提供借鉴。

2 数值方法

2.1 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，因此在该区域不及 $k-\varepsilon$ 模型。Menter 等^[5]提出 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^[6]，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：

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

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

$$CD_{k\omega}^* = \max(CD_{k\omega}, 10^{-10}), CD_{k\omega} = 2\alpha_{\omega 2} \cdot \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (6)$$

式中, y 表示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:

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

式中, ϕ 为 SST 模型中的 α 、 β 、 γ 等系数, ϕ_1 、 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。

表 1 SST 模型中的所有系数

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

2.2 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 (1) 式中的耗散项乘上系数 F_{DES} , 得到新的输运方程

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

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

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, 这里取 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 , 本研究取 F_2 。

3 数值模拟

3.1 计算模型及工况

本研究计算模型为水下机器人 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 $\nu = 1.61\text{E-}6\text{m}^2/\text{s}$, 雷诺数 $\text{Re} = 2.3\text{E}6$ 。

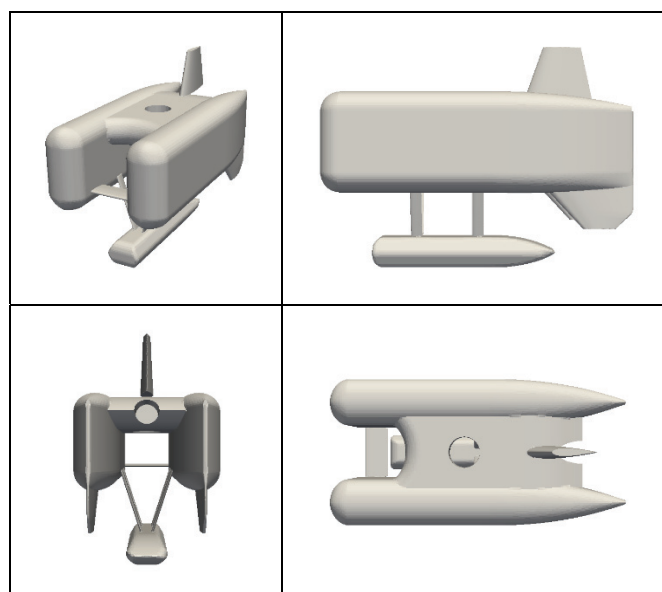


图1 模型三维视图

3.2 计算域及网格划分

采用全域计算，坐标原点在水下机器人首部，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，网格划分如图 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。

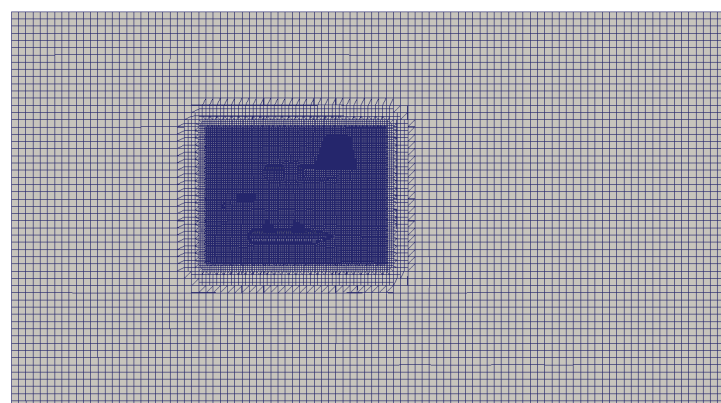


图2 计算域网格划分

3.3 离散格式

控制方程采用有限体积法离散，其中时间项采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求解的算法 PIMPLE（PISO 和 SIMPLE 结合）算法。

4 结果分析

4.1 阻力预报

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

表 2 两种方法静水阻力预报对比

	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%

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，这可以通过下面的流场分析来解释。

4.2 时均统计分析

本研究给出了 DES 方法计算结果的时均统计值，并与 RANS 方法解得的时均值比较。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 3 个典型截面 A1 (Z=0.75)、A2 (Y=0)、A3 (Z=0.35) 进行流场分析。图 3 所示是 A1、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。

我们结合流场来分析阻力预报的差异。水下机器人整个潜入水中，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，也就是说速度梯度差别不大，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。

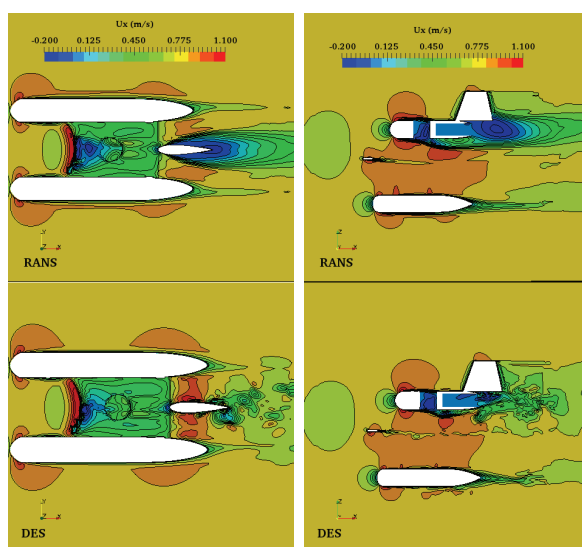


图3 A1 (左)、A2 (右) 截面的速度云图

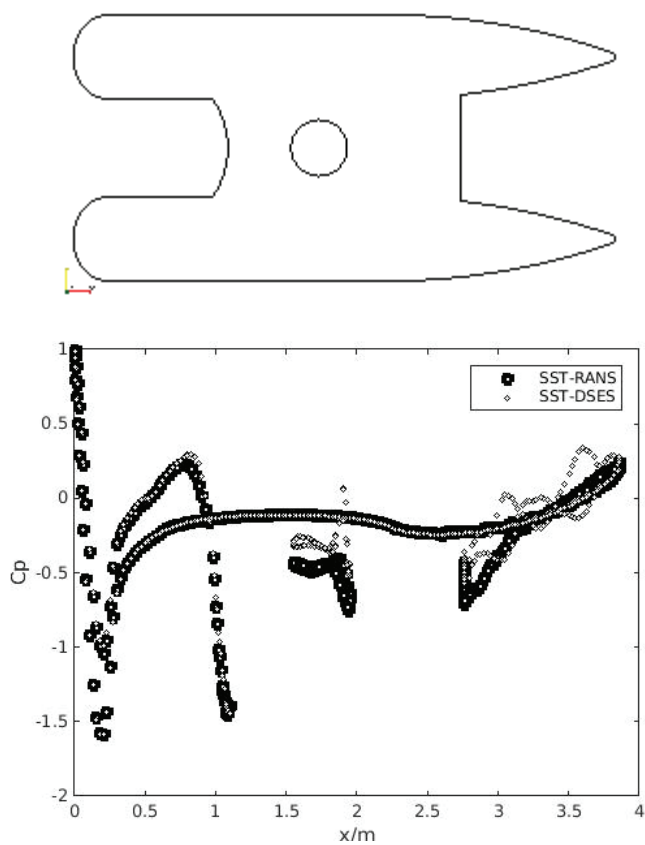


图4 A3 截面的表面压力系数分布

4.3 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。其中的涡量等势面用 Hunt 等^[7]建议的 Q 准则表示，Q 的定义如下：

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

式中， Ω 为涡量张量， S 为应变率张量。

从图 5 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 方法则几乎看不出泻涡现象。

图 6 给出了 A1、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 SST-DES 方法会切换到 LES 模式。此外，SST-DES 方法在 A1、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。

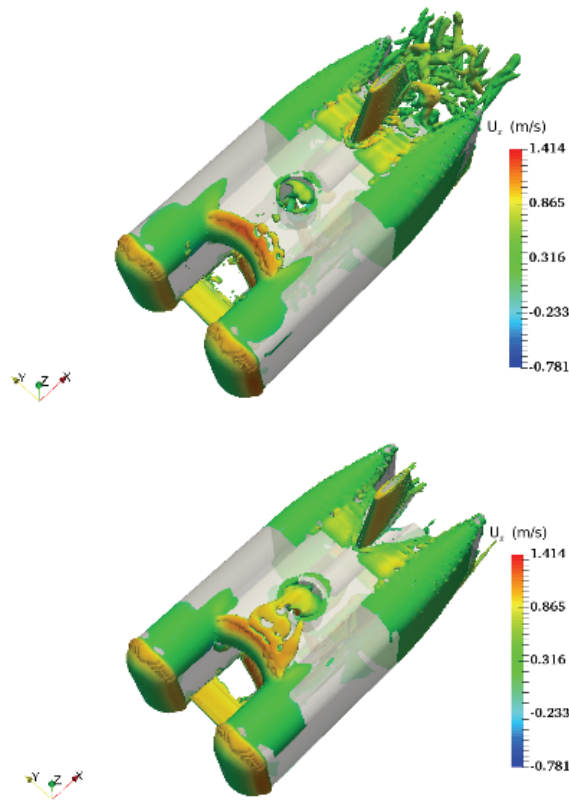
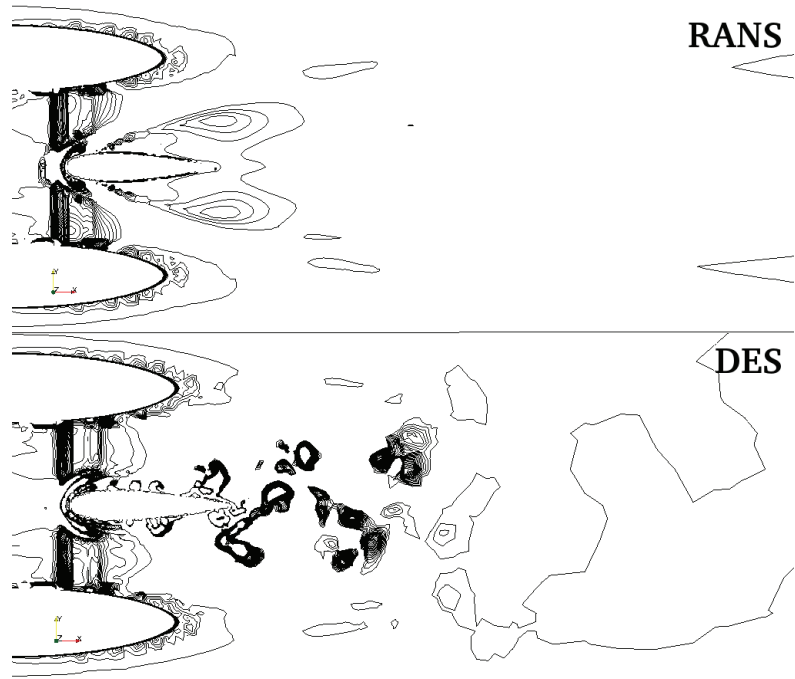
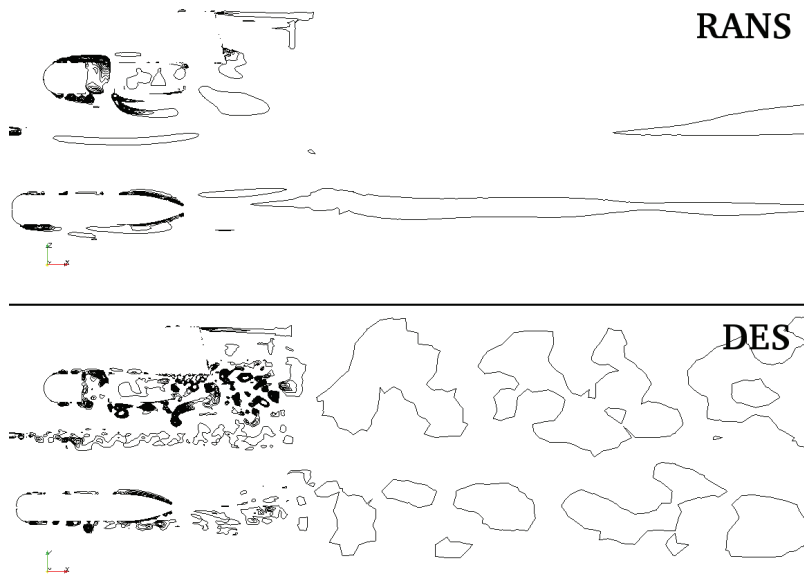


图 5 DES (上)、RANS (下) 涡量等值面， $Q=10$



(a) A1 截面



(b) A2 截面

图6 两个截面尾流涡量等值线, 用 $Q=0-20$ 之间的 32 条等值线表示

5 结论

本研究基于 OpenFOAM 开源平台, 分别采用 SST-DES 和 SST-RANS 方法对水下机器人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。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较好的效果。

致谢

本工作得到国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099), 上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022), 上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300), 上海市船舶工程重点实验室基金项目(K2015-11), 以及工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09) 的资助。在此一并表示衷心感谢。

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, 2016(1):1-8.
- 5 Menter F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. Aiaa Journal, 2012, 32(8):1598-1605.

- 6 Hellsten A. Some improvements in Menter's $k-\omega$ SST turbulence model[C]. 29th AIAA, Fluid Dynamics Conference, Albuquerque, USA, 1998.
- 7 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.

Application of SST-DES in numerical simulation of hydrodynamic performance of autonomous & remotely-operated vehicle

CHEN Tai-wen, HE Dong-ya, WAN De-cheng*

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

*Corresponding author: dcwan@sjtu.edu.cn

Abstract : In numerical simulation of hydrodynamic performance of Autonomous & Remotely-operated Vehicle (ARV), we need calculate still water resistance and research flow separation. Taking the limitation of computational resources into consideration, we attempt to use hybrid RANS/LES approach, the common one of which is Detached-Eddy Simulation (DES). The SST-DES employs Reynolds-Averaged Navies-Stokes (RANS) with shear stress transport (SST) model in the regions near boundary layers, 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; Flow separation.