

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2016.01.001

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*

赵伟文, 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, Email: weiwenzhao@sjtu.edu.cn)

摘要: 基于剪切应力运输 (shear stress transport, SST) 的分离涡模拟 (detached-eddy simulation, DES) 在近壁面的流动区域采用 SST 模型, 而在其他区域采用亚格子模型求解流场。本研究中分别应用 SST-DES 和 SST-URANS 方法对亚临界雷诺数 $Re = 3900$ 下的三维圆柱绕流进行了数值模拟, 比较分析了两种数值方法下圆柱表面的时均压力分布、圆柱后方的漩涡脱落特征、圆柱下游流场的时均速度剖面分布等, 并将数值模拟结果同前人物理试验比较, 结果表明 SST-DES 方法在亚临界雷诺数下的三维圆柱绕流数值模拟问题上比 SST-RANS 方法具有更好的效果。

关键词: 圆柱绕流; 流动分离; 分离涡模拟; 亚临界雷诺数

中图分类号: U661.1

文献标识码: A

Numerical study of 3D flow past a circular cylinder at subcritical Reynolds number using SST-DES and SST-URANS

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: The SST-DES is a hybrid RANS/LES model which employs Reynolds-Averaged Navies-Stokes (RANS) in the regions near boundary layers, and Large-Eddy Simulation (LES) in the separated regions. Numerical simulations of flow past a

* 收稿日期: 2015-07-16(2015-12-16 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379125、51411130131 和 11432009)、上海高校特聘教授(东方学者)岗位跟踪计划(2013022)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB036103)

作者简介: 赵伟文(1990 -), 男, 江西新余人, 博士研究生。

通信作者: 万德成, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

Received: July 16, 2015 (**Revised** December 16, 2015)

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

Biography: ZHAO Wei-wen (1990-), Male, Ph. D. Candidate.

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

circular cylinder at subcritical Reynolds number ($Re = 3900$) with both SST-DES and SST-URANS turbulence model have been carried out in current study. The mean pressure distribution on cylinder, vortex shedding patterns and mean velocity profile downstream of the cylinder are extensively studied and analyzed. Comparing with the experimental results, SST-DES shows better results than SST-URANS in subcritical Reynolds number cylinder flows.

Key words: circular cylinder; flow separation; detached-eddy simulation; subcritical Reynolds number

引言

圆柱绕流一直是流体力学中的经典问题,其涉及到的边界层转捩、流动分离、再附着及旋涡脱落等物理现象都是流体力学中的研究难点。由于雷诺平均方法(Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS)对 Navier-Stokes 方程在时间上进行了平均处理,求解的是时均处理之后的方程,忽略了流体的湍流脉动,因此难以捕捉到流体的瞬时脉动。尽管人们提出了非定常 RANS 方法(URANS)来处理非稳态流动问题,但仍显不足。而直接数值模拟方法(direct numerical simulation, DNS)和大涡模拟方法(large eddy simulation, LES)由于需要非常精细的网格来捕捉小尺度湍流流动,导致其计算资源消耗巨大,难以满足工程中常见的高雷诺数流动问题。因此,近年来研究人员提出了混合 RANS/LES 方法来处理带有大分离流动的非定常问题。混合 RANS/LES 方法结合了 RANS 和 LES 的优点:在近壁面区域采用 RANS 方法模拟,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分离流动。

分离涡(detached-eddy simulation, DES)方法为常见的混合 RANS/LES 方法之一,1997 年 Spalart 等^[1]通过对 Spalart-Allmaras(SA)模型^[2]进行改造提出了 SA-DES(又称 DES97)方法。DES97 方法将当地网格尺寸和 RANS 计算得到的长度尺度比较得到混合长度尺度 $\tilde{\Delta}$,用 $\tilde{\Delta}$ 代替了 SA 模型中的距壁面距离 d 。然而,这种处理方法在近壁面网格布置不当时,会将本应使用 RANS 求解的边界层区域判断为 LES 区域,从而过早地转换到 LES 模式,而网格又不足以支持 LES 计算。这样将使湍黏性降低,并导致模型的雷诺应力不平衡,这种现象被称为模化应力损耗(modeled stress depletion, MSD)。Spalart 等^[3]通过修改 $\tilde{\Delta}$ 的定义提出了基于 SA 模型的延迟 DES(delayed DES, DDES)方法解决了 MSD 问题。Menter 等^[4]也提出基于 sheared stress transport(SST)模型^[5]的 DES 方法,并解决了由 MSD 问题引起的网格诱导分离现象(grid-induced separation, GIS)。

本文以三维圆柱为研究对象,基于开源平台 OpenFOAM,分别采用 SST-DES 和 SST-URANS 方

法对亚临界雷诺数 $Re_D = 3900$ 情况下的圆柱绕流进行了数值模拟,并对比分析了两种方法在处理大分离流动问题上的计算结果,为以后将 SST-DES 方法应用到更加复杂的流动问题上奠定基础。

1 数值方法

1.1 SST 模型

SST 模型由 Menter 提出^[5],是一个两方程湍流模型。SST 将 $k-\varepsilon$ 和 $k-\omega$ 模型相结合,用 $k-\omega$ 处理近壁面的边界层区域的流动,而用 $k-\varepsilon$ 处理自由剪切流区域的流动。这样做既保留了 $k-\omega$ 模型对近壁面处边界条件的良好处理能力,同时避免了 $k-\omega$ 模型在自由剪切流区域对入口参数过于敏感的不足。OpenFOAM 中的 SST 模型参考的并非 Menter^[5]提出的原始版本,而是经过修正后的版本^[6,7],修正版本将湍流黏度定义式中的涡量 Ω 换成了速度应变率 S 。由于不同文献中采用的变量符号不尽相同,本文定义以 OpenFOAM 中的符号定义为准。

湍动能 k 和特定湍流耗散率 ω 的输运方程分别表示为:

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

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

式中, \mathcal{G}^k 可定义为

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

F_1 是混合函数,定义如下:

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

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

式中: $CD_{k\omega}^* = \max(CD_{k\omega}, 10^{-10})$, $CD_{k\omega} = 2\alpha_{\omega 2} \cdot \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$ 。 F_1 在贴近壁面处的取值为 1, 在远离壁

面的边界层内部区域及边界层之外的取值为 0, 以此来实现 $k-\varepsilon$ 和 $k-\omega$ 模型的切换。输运方程中的各个系数也可通过混合函数 F_1 得到

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \quad (5)$$

式中, ϕ 对应输运方程中的 α 、 β 和 γ 等系数。

在求得 k 和 ω 后, 湍流黏度可以按以下公式给出

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, b_1 S F_2)} \quad (6)$$

式中, S 为应变率的不变量测度 (invariant measure of the strain rate), 定义为

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

F_2 为第二个混合函数, 定义为

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (8a)$$

$$\arg_2 = \max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \quad (8b)$$

需要指出的是, 式中的 y 表示场点到最近壁面的距离。上式中所有涉及到的系数取值见表 1。

$$F_{DES} = \max \left[\frac{L_t}{C_{DES} \Delta} (1 - F_s), 1 \right] \quad (10)$$

式中: $L_t = \sqrt{k} / (\beta^* \omega)$ 为计算得到的湍流长度尺度; $\Delta = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z}$ 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, 可以是 F_1 或 F_2 , 本文中取 F_2 。

2 数值模拟

2.1 计算域及网格划分

本文选取亚临界雷诺数 $Re_D = 3900$ 下的圆柱为对象开展研究工作。关于此雷诺数下的圆柱绕流问题, 已经有不少研究人员进行过系统的分析和研究, 并取得了丰富的物理实验数据^[8-10]和数值模拟结果^[10-13]。本文中圆柱的展向长度取 $L_z = \pi D$, 这和 Kravchenko 等^[13]的设置相同。

坐标系定义为: 坐标原点为圆柱中心, x 为来流速度方向, y 为垂直来流速度方向, z 为圆柱展向。计算域划分为: $15D < x < 30D$ 、 $-15D < y < 15D$ 和 $-\pi D/2 < z < \pi D/2$ 。网格划分为: 圆柱周围 $5D$ 的范围内采用 200×100 的 O 型网格, 在其他区域使用近似正交的六面体网格, 圆柱展向划分的网格单元数为 $N_z = 30$ 。贴近圆柱表面的第一层网格厚度取 $\Delta = 0.005D$ 。最后整个计算域的网格单元总数为 1.215×10^6 。边界条件为: 圆柱表面采用无滑移固壁, 入口采用均匀来流, 出口采用压力梯度为零, 其余均为对称边界。

表 1 SST 模型中的所有系数

Table 1. Coefficients of the SST turbulence 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	5.0/9.0	0.44	0.09	0.31	1.0	10

1.2 SST-DES 模型

基于 SST 模型的 DES 方法^[4]将 k 方程中的耗散项乘以一系数 F_{DES} , 得到新的输运方程

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(u_j k)}{\partial x_j} = \mathcal{G}_k - \beta^* k \omega F_{DES} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \alpha_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (9)$$

F_{DES} 可定义为

2.2 离散格式

OpenFOAM 采用的是 Rhie 等^[14]提出的同位网格, 在求解控制方程时, 采用有限体积法离散, 时间项采用隐式欧拉格式离散, 对流项采用带限制器的线性差分 TVD 格式离散, 扩散项高斯线性守恒格式离散。采用压力与速度耦合的 PIMPLE (PISO^[13]和 SIMPLE 结合) 方法求解。PISO 方法是通过先预估一步, 再修正两步的方法求解 Navier-Stokes 方程, 而 PIMPLE 则在 PISO 的基础上, 对同一时间

步内进行多次循环修正,取其中最后一次修正的结果作为下一时间步的初始值继续迭代。

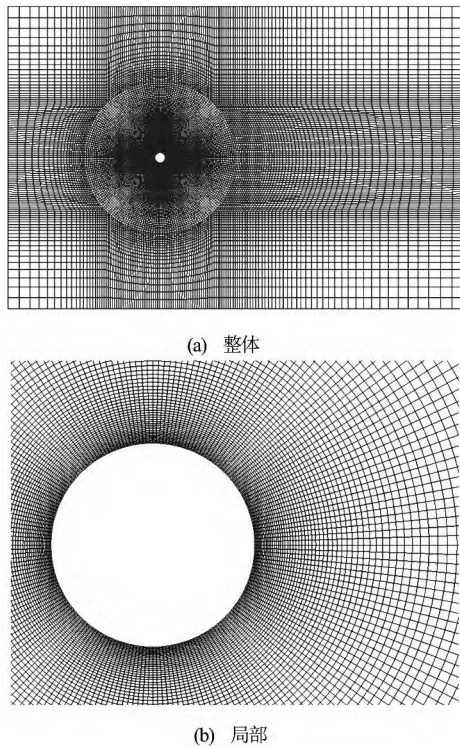


图1 圆柱计算域与网格划分
Fig.1 Global and local mesh for circular cylinder

流区域长度和无量纲最小来流速度 U_{\min}/U_{∞} 。从表中可以看到, SST-DES 除 L_{rec}/D 以外的各项物理量和试验结果较为接近。而对于 SST-URANS, 虽然其得到 St 数为 0.212, 较为接近试验的 0.215, 然而其他量均和试验值相差较大。

图 2 给出了 $z=0$ 平面内沿圆柱表面周向的时间平均压力系数分布。由图中可知, 在驻点处的压力系数稍大于 1, 这是因为黏性的存在使得入口处比出口处的实际压力要大, 而出口处的实际压力值通常取为参考压力。对比发现, SST-DES 结果与 Norberg 的试验结果较为接近, 而 SST-URANS 的压

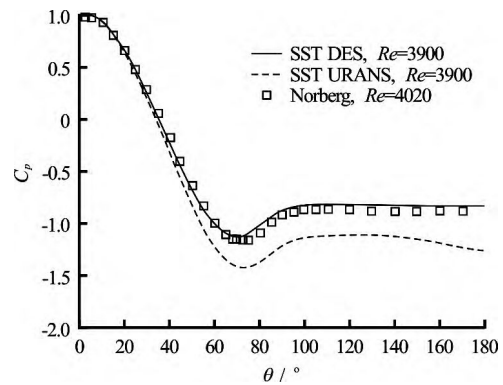


图2 圆柱表面压力系数分布
Fig.2 Pressure coefficient distribution around cylinder surface

表2 圆柱绕流的流体系数
Table 2. Coefficients for flow past a cylinder

数据来源	C_d	$-C_{pb}$	St	L_{rec}/D	U_{\min}/U_{∞}
试验 (取自文献[13])	0.990 ± 0.050	0.88 ± 0.05	$0.215 \pm 0.005^{[9]}$	1.33 ± 0.05	$\square 0.24 \pm 0.10^{[8]}$
PIV ^[10]	-	-	0.208 ± 0.002	1.51	$\square 0.34$
LES ^[10]	-	-	0.208 ± 0.001	1.56	$\square 0.26$
本文 SST-DES	0.991	0.84	0.216	1.56	$\square 0.29$
本文 SST-URANS	1.276	1.26	0.212	0.38	$\square 0.06$

3 结果分析

3.1 时均统计分析

本文给出了圆柱绕流时均统计的部分计算结果, 采用的时间间隔为 $0.39D/U_{\infty}$, 统计时间约为 78 个涡周期 ($T = 390D/U_{\infty}$), 远远大于 Beaudan 等^[11]以及 Kravchenko 等^[13]的约 7 个涡周期。

表 2 列出了部分时均统计物理量, 包括阻力系数 C_d 、圆柱尾部压力系数 C_{pb} 、 St 数以及无量纲回

力分布在圆柱后部区域误差较大。

图 3 所示是流场的速度和压力云图。从速度云图中可以看出, SST-DES 计算得到的回流区比 SST-URANS 要长, 而 SST-URANS 圆柱表面的负压区比 SST-DES 大, 这从图 2 中也可以看出。

从图 4 可知, 近尾流区域的平均流向速度先是呈 U 形分布, 然后逐渐发展到下游的 V 形分布。值得注意的是, 本文 SST-DES 得到的 $x/D = 1.06$ 处的平均流向速度呈 U 形分布, 这与 Kravchenko 等^[13]的 LES 结果、Parnaudeau 等^[10]的 PIV 试验和 LES 结果、周强等^[15]的 LES 结果一致。而 Lourenco 等^[8]的 PIV 试验结果呈 V 形分布, 同时 Lourenco

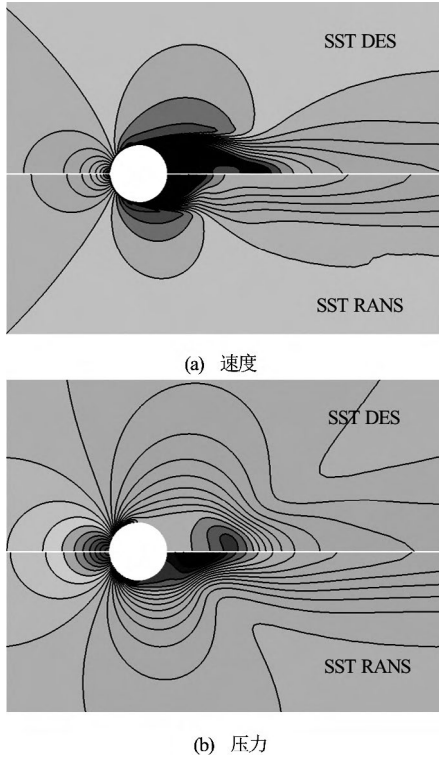


图3 用 U_∞ 或 U_∞^2 无量纲化后速度和压力云图
Fig.3 Velocity and pressure contour normalized with U_∞ or U_∞^2

等^[8]的平均横向速度分布呈现出不对称性(关于 $y=0$ 平面),如图5所示。因此,本文认为 Lourenco 等^[8]的试验存在外部扰动,影响了近尾流场的测量结果。

图4和图5表明 SST-DES 和 Parnaudeau 等^[10]的 PIV 试验吻合非常好,而 SST-URANS 则不能精确捕捉非定常流动,和试验结果相比误差较大。

3.2 瞬时流场特征

图6给出了圆柱尾部的瞬时流场涡量,其中的涡量等势面用 Hunt 等^[16]建议的 Q 准则 (Q -criterion) 表示。 Q 的定义如下

$$Q = \frac{1}{2}(|\Omega|^2 - |S|^2) \quad (11)$$

式中, Ω 为涡量张量, S 为应变率张量。

通过比较分析可以发现, SST-DES 和 SST-URANS 的结果都呈现出二维卡门涡街现象,而 SST-DES 的结果还额外地在圆柱展向方向也呈现卡门涡,三维效应明显,这与 Kravchenko 等^[13]的 LES 模拟结果和 Wissink 等^[17]的 DNS 模拟结果一致。

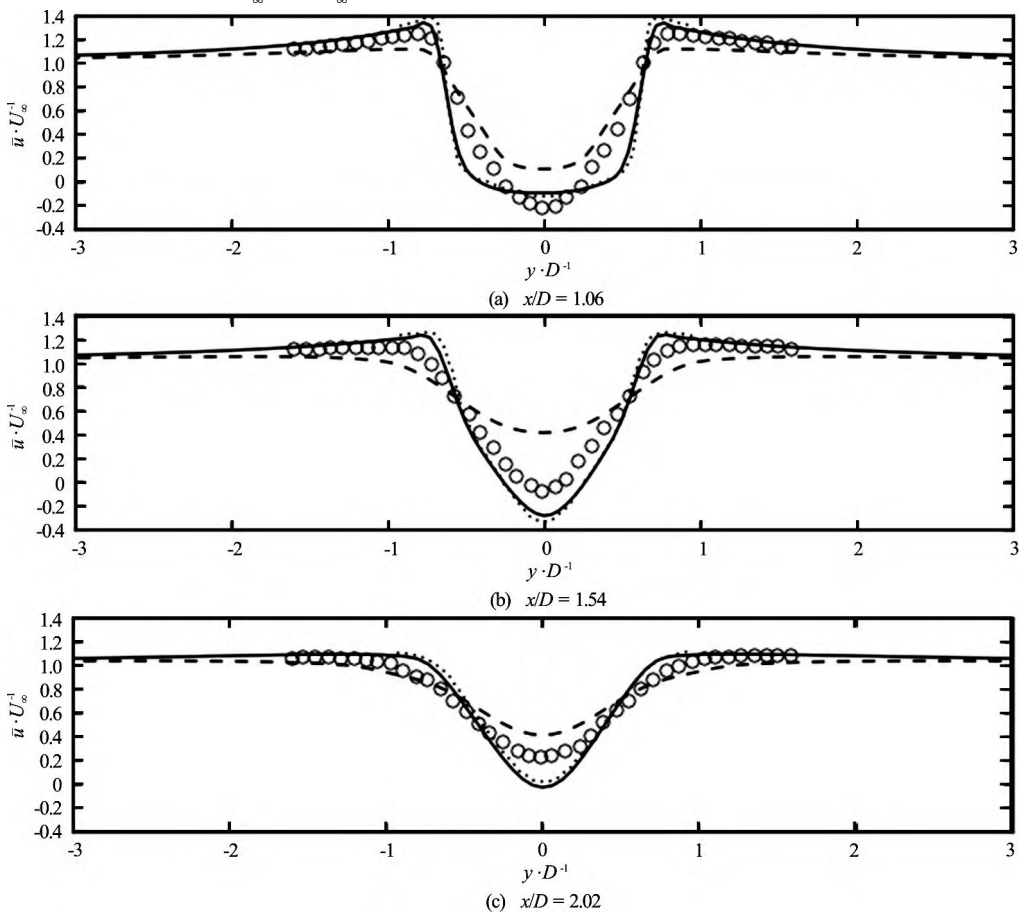


图4 近尾流场三个剖面处的流向速度分布
Fig.4 Mean stream-wise velocity at three locations in the near wake

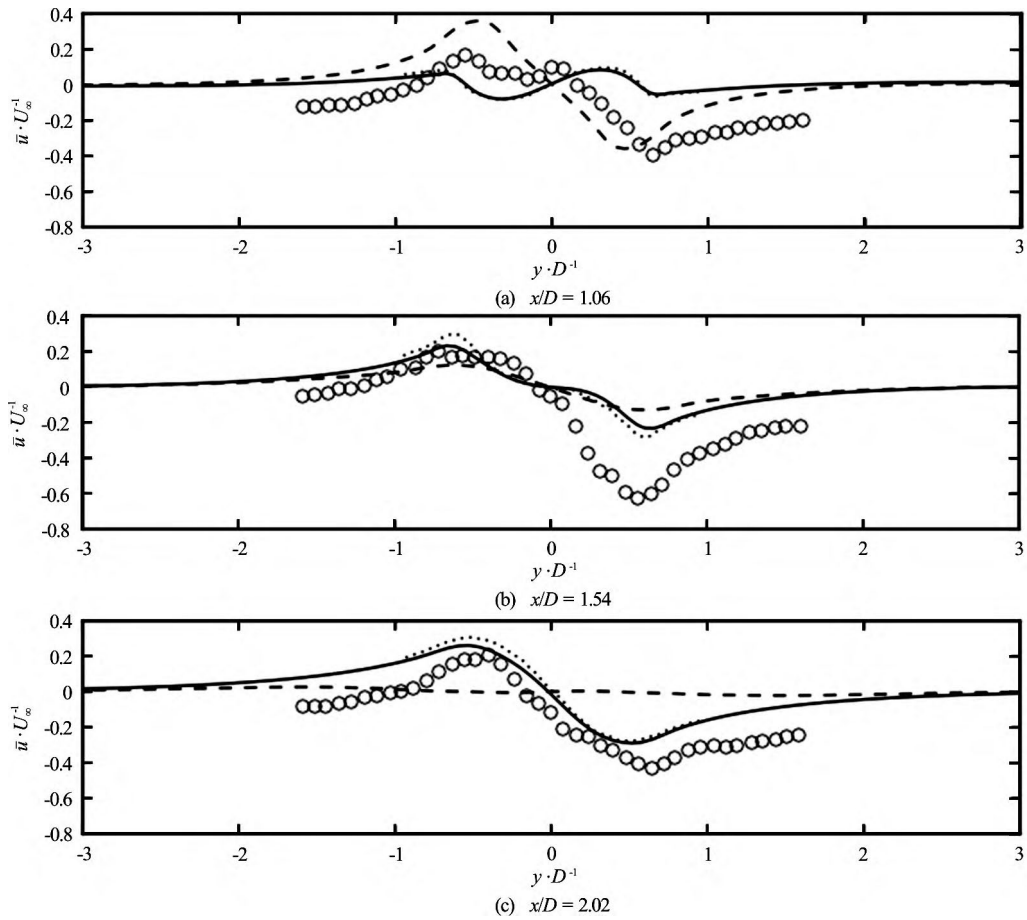


图 5 近尾流场三个不同剖面处的竖向速度分布
Fig.5 Mean cross-flow velocity at three locations in the near wake

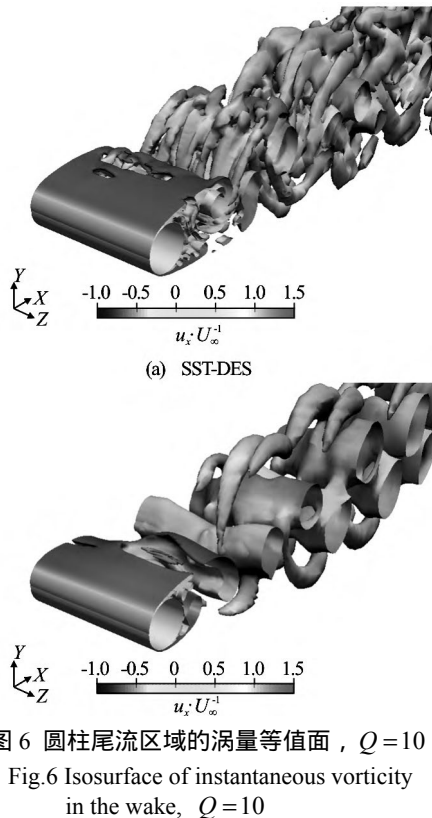


图 6 圆柱尾流区域的涡量等值面, $Q=10$
Fig.6 Isosurface of instantaneous vorticity in the wake, $Q=10$

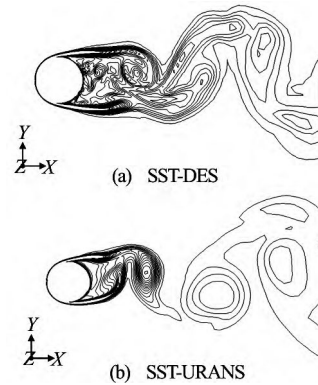


图 7 圆柱尾流区域的卡门涡街, 用 $\omega D/U_\infty = 0.5-10.0$ 之间的 16 个等值面表示
Fig.7 Karman vortex street in the downstream flow, shown by 16 contours of $\omega D/U_\infty$ from 0.5 to 10.0

图 7 给出了 $z=0$ 平面内的瞬时流场涡量等值线图。图中 SST-DES 的结果和 SST-URANS 相比显得不规则, SST-DES 在圆柱近尾流场处有许多三维涡结构, 而 SST-URANS 的三维效应相比之下则非常弱。此外, 还可发现 SST-DES 的回流区域比 SST-URANS 的要长。

4 结论

本文基于 OpenFOAM 开源平台, 分别采用 SST-DES 和 SST-URANS 方法, 对亚临界雷诺数 $Re_D = 3900$ 情况下的圆柱绕流进行了数值模拟, 给出了两种方法下的时均统计分析并和文献的物理试验和数值模拟结果对比分析, 同时分析了其瞬时流场结构, 并得出以下主要结论:

(1) 对阻力系数 C_d 、圆柱尾部压力系数 C_{pb} 和 St 数, 无量纲回流区域长度和无量纲最小来流速度 U_{min}/U_∞ 的分析表明, SST-DES 结果与试验值吻合较好, 而 SST-URANS 除 St 数吻合较好以外, 其余物理量均相差较大。

(2) 对圆柱后方不同位置处的速度剖面分析进一步表明, SST-DES 比 SST-URANS 更接近试验结果, 在数值模拟非正常大分离流动问题上, SST-DES 比 SST-URANS 更具有优势。

(3) 对圆柱瞬时流场的涡结构分析表明, SST-URANS 方法会产生过多的涡黏性, 从而“抑制”三维涡结构的形成, 而 SST-DES 则能够很好地计算模拟出三维涡结构, 更接近真实物理现象。

致谢

本文工作得到了国家自然科学基金项目 (51379125, 51411130131, 11432009)、上海高校特聘教授 (东方学者) 岗位跟踪计划 (2013022)、国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2013CB036103) 以及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] SPALART P, JOU W, 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 R, ALLMARAS S R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows[J]. Recherche Aerospaciale, 1994, (1): 5-21.
- [3] SPALART P R, DECK S, SHUR M L, et al. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2006, 20(3): 181-195.
- [4] 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.
- [5] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [6] MENTER F, ESCH T. Elements of industrial heat transfer predictions[C]. 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Uberlandia, Brazil, 2001.
- [7] HELLSTEN A. Some improvements in Menter's k - ω SST turbulence model[C]. 29th AIAA, Fluid Dynamics Conference, Albuquerque, USA, 1998.
- [8] LOURENCO L, SHIH C. Characteristics of the plane turbulent near wake of a circular cylinder[J]. A Particle Image Velocimetry Study, 1993.
- [9] ONG L, WALLACE J. The velocity field of the turbulent very near wake of a circular cylinder[J]. Experiments in Fluids, 1996, 20(6): 441-453.
- [10] PARNAUDEAU P, CARLIER J, HEITZ D, et al. Experimental and numerical studies of the flow over a circular cylinder at Reynolds number 3900[J]. Physics of Fluids, 2008, 20(8): 085101.
- [11] BEAUDAN P, MOIN P. Numerical experiments on the flow past a circular cylinder at sub-critical Reynolds number[R]. Technical Report TF-62, Stanford University, USA, 1994.
- [12] BREUER M. Large eddy simulation of the subcritical flow past a circular cylinder: Numerical and modeling aspects[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1998, 28(9): 1281-1302.
- [13] KRAVCHENKO A G, MOIN P. Numerical studies of flow over a circular cylinder at $Re_D = 3900$ [J]. Physics of Fluids, 2000, 12(2): 403-417.
- [14] RHIE C M, CHOW W L. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation[J]. AIAA Journal, 1983, 21(11): 1525-1532.
- [15] 周强, 曹曙阳, 周志勇. 亚临界雷诺数下圆柱体尾流结构的数值模拟[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013(1): 33-38.
ZHOU Qiang, CAO Shu-yang, ZHOU Zhi-yong. Numerical studies of wake characteristics on a circular cylinder at sub-critical Reynolds number[J]. Journal of

- Tongji University: Natural Science, 2013(1): 33-38.
- [16] 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.
- [17] WISSINK J G, RODI W. Numerical study of the near wake of a circular cylinder[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(4): 1060-1070.