

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.03.016

乔永亮, 桂洪斌, 刘祥鑫. 三维圆柱绕流数值模拟湍流方法的选择[J]. 水利水运工程学报, 2016(3): 119-125. (QIAO Yong-liang, GUI Hong-bin, LIU Xiang-xin. Analysis of three-dimensional numerical simulation methods for turbulent flow past circular cylinder[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(3): 119-125.)

三维圆柱绕流数值模拟湍流方法的选择

乔永亮, 桂洪斌, 刘祥鑫

(哈尔滨工业大学(威海) 船舶与海洋工程学院, 山东 威海 264209)

摘要: 研究湍流模拟方法对三维圆柱绕流数值模拟精度的影响, 分别采用雷诺平均法(RANS)中的 $\kappa-\omega$ 模型、SST模型以及大涡模拟法(LES)对亚临界区内雷诺数 $Re=3\ 900$ 时的三维圆柱绕流进行数值计算, 分析了圆柱体表面的受力、圆柱后流场时均速度特性与瞬时涡量分布情况。结果表明, 当流体流过圆柱表面时, 圆柱表面出现的与流速方向相反的负压力差区域使流体从圆柱表面分离, 引起了不稳定的周期性交替脱落的湍流涡泄, 从而在圆柱表面产生周期性波动的升力, 同时在圆柱后近流场区域形成回流区。研究还发现, LES法对圆柱体的受力以及流场时均速度特性的模拟效果要优于 $\kappa-\omega$ 模型与SST模型; 相较于前人利用浸入边界法得到的模拟结果, LES法的模拟精度也有了较大提升; 同样, 通过对瞬时流场涡量等值线图的分析, 并与已有的模拟结果进行对比, 发现LES法不但可以从整体上表现出漩涡的周期性脱落, 而且对流场中不同位置的、复杂的小尺度湍流涡泄也描述得非常细致, 得到的自由分离剪切层长度与湍流涡泄的卷曲度更符合湍流涡泄的特征。所以, 在亚临界区, LES法对湍流的模拟效果相对较好。

关键词: 湍流模拟法; 圆柱绕流; 亚临界区

中图分类号: TV135

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)03-0119-07

在一定的雷诺数范围内, 当黏性流体流过固定钝体时, 会在钝体表面发生边界层分离现象, 产生漩涡进入钝体后流场, 并对钝体产生相应的水动力作用, 这就是绕流现象。圆柱绕流现象广泛存在于水工结构、海洋工程结构等现实应用中。

当 $Re>170$ (Re 是基于圆柱直径与无穷远处来流速度的雷诺数)时, 均匀来流中固定圆柱体后的尾流会呈现三维特性^[1], 因此通过对三维模型的模拟才能将尾流流动状况完全显现出来, 二维模型由于忽略了圆柱展向的流动变化, 所以得到的力的系数以及漩涡脱落频率往往会比真实值要大^[2]。

L. M. Lourenco等^[3-4]对 $Re=3\ 900$ 的圆柱绕流进行了模型试验, 并提供了尾涡 $x/D\leq 3$ 和 $3\leq x/D\leq 10$ 处时均速度场的试验结果, 这为后来关于圆柱绕流的数值计算提供了经典对比算例。随着计算机硬件条件的不断改善, 对三维圆柱绕流的数值模拟也越来越方便, 而关于不同湍流模型对三维圆柱绕流模拟精度的影响, 却鲜有较为系统的研究。R. Korpus等^[5]利用雷诺平均Navier-Stokes(RANS)方程以及 $\kappa-\omega$ 湍流模型研究了三维圆柱绕流现象; 毕继红等^[6]采用SST湍流模型对圆柱绕流进行了二维数值分析, 与试验结果吻合很好; 姚熊亮等^[7]采用大涡模拟(LES)分别研究了二维及三维圆柱绕流现象, 发现两者之间存在很大差别。

本文基于通用流体力学分析软件ANSYS-CFX, 分别采用 $\kappa-\omega$ 、SST和LES湍流模型研究典型亚临界雷诺数($Re=3\ 900$)条件下长径比 $L/D=\pi$ 的圆柱的三维绕流特性, 并与已有试验结果及数值模拟结果相比较, 分析了不同湍流模型的模拟精度。

收稿日期: 2015-05-29

作者简介: 乔永亮(1990—), 男, 山西长治人, 硕士研究生, 主要从事海洋潜标系留系统的涡激振动研究。

E-mail: hit_qyl@163.com

1 控制方程

湍流由流体在流动域内随时间和空间的波动组成,是 1 个三维、非稳态且具有较大规模的复杂过程。湍流运动由于物理上近乎无穷多尺度的漩涡流动和数学上的强烈非线性,因此试验和数值模拟都很难解决湍流问题。目前,在湍流数值分析中,虽然许多湍流模型已取得某些预报能力,但至今未找到一个有效统一的湍流模型。下面介绍本文所用的雷诺平均法(RANS)中的 κ - ω 模型、SST 模型以及大涡模拟法(LES),它们也是目前研究者们使用较多的方法与模型。

1.1 标准 κ - ω 模型

标准 κ - ω 模型是一种基于湍流能量方程和扩散速率方程的经验模型,考虑了低雷诺数、可压缩性和剪切流传播,基于 Wilcox κ - ω 模型修改而成,可以很好地处理近壁处低雷诺数的数值计算。标准 κ - ω 模型的湍动能及其比耗散率输运方程为:

$$\rho \frac{dk}{dt} + \rho \frac{\partial(ku_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(T_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\omega}{dt} + \rho \frac{\partial(\omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(T_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega \quad (2)$$

式中: G_k 为由层流速度梯度产生的湍流动能; G_ω 为由 ω 方程产生的湍流动能; T_k 和 T_ω 为 k 和 ω 的扩散率; Y_k 和 Y_ω 为由扩散而产生的湍流。

1.2 Shear Stress Transport 模型

基于 SST 模型的 κ - ω 方程考虑了湍流剪应力的传输,可以精确地预测流动的开始和负压梯度下流体的分离量。SST 模型的最大优点在于考虑了湍流剪应力,从而不会对涡流黏度造成过度预测。SST 模型的湍动能方程为式(1),其比耗散率输运方程为:

$$\rho \frac{d\omega}{dt} + \rho \frac{\partial(\omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(T_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (3)$$

式中: D_ω 代表正交发散项,其余各参数与标准 κ - ω 模型中的参数含义相同。

1.3 大涡模拟(LES)

大涡模拟的基本思想是将漩涡在空间上进行过滤,直接模拟大尺度的湍流运动,而利用亚格尺度模型模拟小尺度湍流对大尺度湍流的影响。控制方程为不可压缩流体的 N-S 方程:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + H = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} \quad (4)$$

其中: $\mathbf{u} = (u, v, w)$ 为速度矢量; p 为压力; $H = H(H_u, H_v, H_w)$ 为连通项。经过滤后的 N-S 方程如下:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial (\overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} \quad (5)$$

式(5)中最后一项是一个新的未知量,称为亚网格应力,用以描述小涡对大涡的影响。需要采用亚网格模型对其进行封闭。

2 数值模型

为了保证变量的唯一性,本文计算均采用统一的数值模型,具体如下。

2.1 几何模型与网格划分

图 1 是计算域模型示意图。在笛卡尔参考坐标系中,坐标原点在圆柱底面中心处, x, y, z 向分别代表顺流向、横流向和圆柱展向。以圆柱直径 D 为特征尺度,计算域的长、宽、高分别为 $20D, 10D$ 和 πD ,圆柱中心距离上下游断面的距离分别为 $5D$ 和 $15D$,距离圆柱两侧面分别为 $5D$ 。

图2是计算域网格划分示意图。为了保证网格模型具有足够的分辨率来模拟复杂的湍流运动,整个计算域被划分成了517 120个结构化六面体单元,圆柱展向的网格尺寸 Δz 约为 $0.1D$,圆柱径向第1层网格 Δr 的尺寸为 $0.001\ 25D$,沿圆柱周长分布 4×36 个节点。

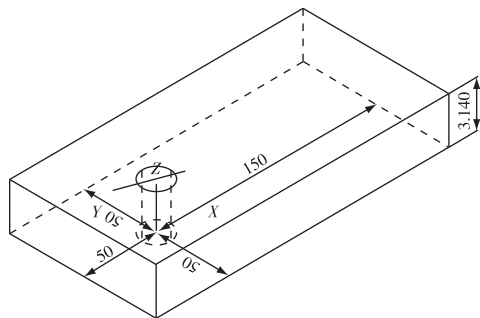


图1 计算域示意

Fig. 1 Computational domain

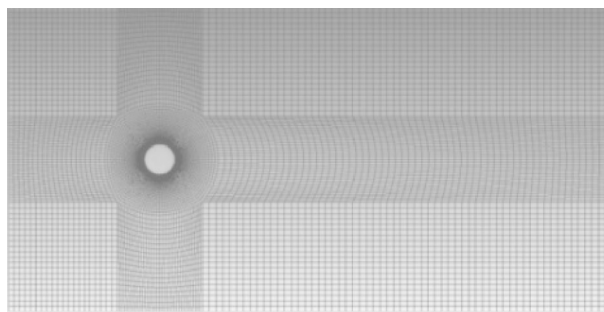


图2 网格划分俯视图

Fig. 2 Mesh of computational domain (top view)

2.2 边界条件与初始条件

计算域入口设置为定常流速 $U_0=1\text{ m/s}$ 的速度入口;出口设置为出流边界;上下左右4个面均设置为对称边界;圆柱表面为无滑移壁面边界。

流场中的流体为水,其密度 $\rho=1\ 000\text{ kg/m}^3$,动力黏滞系数 $\mu=0.025\ 641\text{ kg/m}\cdot\text{s}$,水温 $25\text{ }^\circ\text{C}$,流场无穷远处的均匀来流速度 $U_0=1\text{ m/s}$ 。

3 数值结果分析

3.1 时均流场分析

图3是圆柱中心线上($y=0$)顺流向时均速度分量 $\bar{u}$ 沿 x 方向的时均分布。从图3可见,圆柱后 $\bar{u}$ 呈先减后增的趋势,并且在圆柱近壁区内出现负值,这说明流体在该区域产生了回流。随后在远流场处 $\bar{u}$ 趋于稳定。图3中还给出了Lourenco和Shih, Ong和Wallace的试验数据,以及杜远征^[8]采用边界浸入法的数值模拟结果。

不同方法计算的回流区长度 L_b 以及最大回流速度 v_b 的比较见表1,发现本文LES法模拟结果与试验数值吻合最好,回流长度约为 $1.68D$,最大无量纲回流速度分量约为 -0.247 。同时表明,本文LES法相对于杜远征的浸入边界法^[8],模拟精度也有了一定提升。

表1 L_b 和 v_b 的对比情况Tab. 1 Comparison between results of parameters L_b and v_b

	试验结果	文献[8]	LES	SST	$\kappa-\omega$
L_b	$1.687D$	$2D(18.55\%)$	$1.68D(0.415\%)$	$1.2D(28.87\%)$	$1.18D(30.05\%)$
v_b	-0.254	$-0.245(3.54\%)$	$-0.247(2.76\%)$	$-0.117(53.93\%)$	$-0.228(10.24\%)$

注:括号中数值为计算结果与试验结果的对比误差。

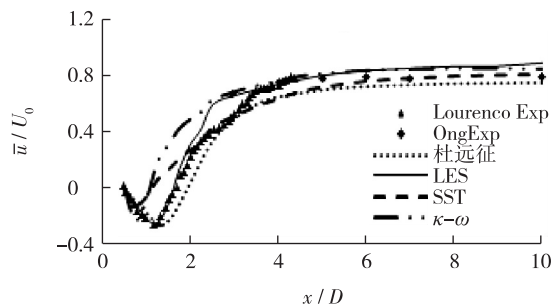
图3 圆柱中心线上 $\bar{u}$ 沿顺流向的变化曲线Fig. 3 Distribution of streamwise mean-velocity $\bar{u}$ along central line

图4所示为圆柱后近尾流区($x/D=1.06$) $\bar{u}$ 和 $\bar{v}$ 沿 y 方向的时均分布。从图4(a)可见,该区域 x 方向的

时均流速呈“V 形”分布,并且关于圆柱中心线对称。在 $y/D=0$ 处, $\bar{u}$ 达到负向最大值,并向圆柱两侧逐渐增大,最后趋于稳定。从图 4(b)可见 $\bar{v}$ 的分布近似关于圆柱中心对称,且该速度分量随 y 轴的变化并不明显,基本在 0 附近变化。本文 LES 法、SST 模型、 $\kappa-\omega$ 模型的模拟结果均与 Lourenco 和 Shih 的试验结果以及杜远征的边界浸入法数值模拟结果有所不同,这是因为在该雷诺数条件下的漩涡脱落属于湍流涡街,存在很大的不稳定性,同时还与监控点选取的疏密程度有关。

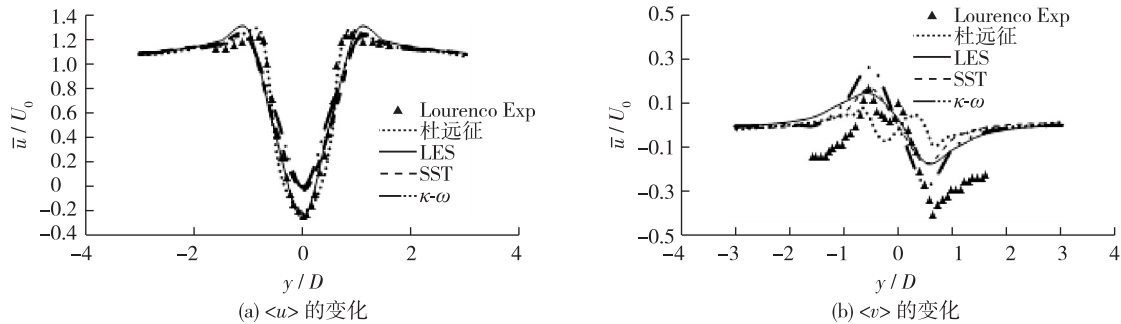


图 4 圆柱近尾流区 $\bar{u}$ 和 $\bar{v}$ 沿横流向的变化曲线

Fig. 4 Curves of $\bar{u}$ and $\bar{v}$ along transverse flow direction in near wake of circular cylinder

3.2 瞬时流场分析

图 5 为 LES 法、SST 模型、 $\kappa-\omega$ 模型与 Zhang Hui^[9]在 $Re=3\ 900$ 条件下所得到的涡量等值线。可见,所有方法模拟结果中,圆柱下游均出现了显著的卡门涡街现象,流体从圆柱表面分离,并形成周期性交替脱落的漩涡。正是这些漩涡的产生,导致了圆柱表面升力的周期性变化。

图 5(b)是 LES 法的涡量等值线,可以看到,流体自由分离剪切层的长度约 $1D$,圆柱后近流场的流体运动十分混乱,在下游较远处流体才卷曲形成漩涡,这与 Zhang Hui^[9]的模拟结果吻合很好。但是 LES 法的涡量图在距离圆柱较远处则显得更为紊乱,卷曲度更符合湍流涡泄的特征。

图 5(c)是 SST 模型所得到的涡量等值线,图中自由分离剪切层的长度很短,圆柱后近流场的流体运动十分规律,流体在距离圆柱很近的位置就已经形成了明显、规则的漩涡,这与湍流涡泄有一些不符。

图 5(d)是 $\kappa-\omega$ 模型的涡量等值线。与 SST 模型所得结果一样,流体在圆柱后紧接着就形成了较为规则的漩涡,并一直向流场远处发展。不同的是,该模型对圆柱后近流场的流动状况的模拟效果较 SST 模型要好一些。

通过以上对比,发现 3 种湍流模型都可以将漩涡脱落的主要特征描述出来,但在亚临界雷诺数条件下,LES 湍流模型对湍流涡泄的模拟效果明显要好于 $\kappa-\omega$ 模型与 SST 模型。

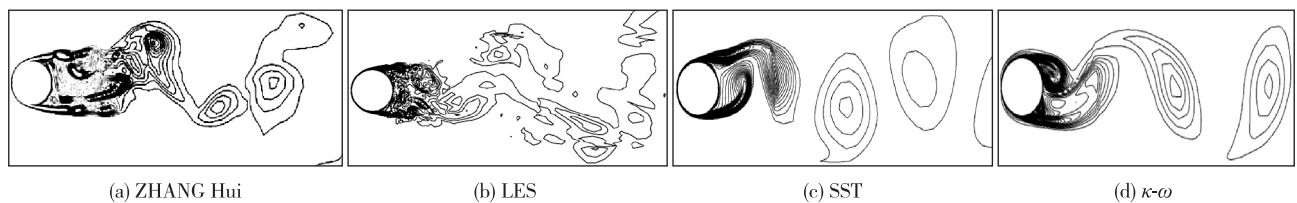


图 5 涡量等值线($t=10$ s)

Fig. 5 Iso-contours of mean vorticity magnitude($t=10$ s)

3.3 圆柱表面受力特性

图 6 是圆柱($y>0$)表面稳态压力分布。可见,在圆柱正对来流($\theta=0^\circ$)处,稳态压力系数 C_p 最大,随着向圆柱周围扩展,稳态压力系数迅速减小,并大约在 $\theta=70^\circ$ 附近压力系数达到最小值,随后压力继续增长,并

在圆柱背后形成了稳定的压力分布。可以看到,在 $\theta = 40^\circ \sim 72^\circ$ 的区域存在与流速方向相反的负压力差。从图中可以看出,总体上本文 LES 法、SST 模型、 $\kappa-\omega$ 模型的模拟结果与 C. Norberg^[10] 的试验数据以及杜远征浸入边界法所得结果吻合很好,但在压力系数的数值上有微小偏差, $\kappa-\omega$ 模型偏差最大,SST 模型次之,LES 法模拟效果最好。

分离角 θ_s 的大小见表 2,可见,LES 法的模拟误差最小,为 2.86%;而且相较于杜远征浸入边界法的模拟结果,LES 法的模拟精度有了很大提升。

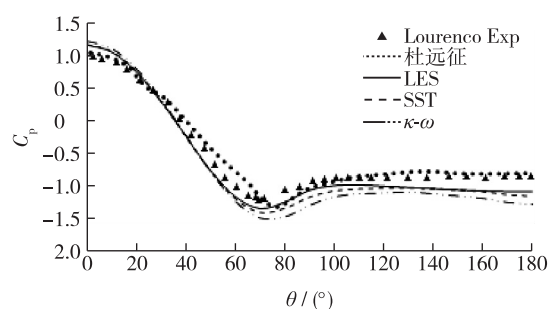


图6 圆柱表面的稳态压力分布

Fig. 6 Distribution of steady pressure along cylindrical surface

表2 分离角 θ_s , $\overline{C_d}$ 和 St 对比Tab. 2 Contrast results of parameters θ_s , $\overline{C_d}$ and St

	试验结果	文献[8]或[12]	LES	SST	$\kappa-\omega$
θ_s	70	79 ^[8] (12.86%)	72 (2.86%)	73 (4.29%)	75 (7.14%)
$\overline{C_d}$	0.99±0.05	1.150 ^[12] (13.9%)	1.117 (12.8%)	1.301 (31.41%)	1.333 (34.65%)
St	0.215±0.005	0.2157 ^[12] (0.3%)	0.216 (0.46%)	0.235 (9.31%)	0.234 (9.29%)

注:括号中数值为计算结果与试验结果的对比误差。

图 7(a) 是圆柱表面的阻力系数时程。可以看到, $\kappa-\omega$ 模型、SST 模型的阻力曲线呈先增后减,最后趋稳的变化趋势,而 LES 法的模拟结果始终处于随机波动状态。计算达到稳定后, $\kappa-\omega$ 模型、SST 模型所得的阻力系数平均值要大于 LES 法的模拟结果。阻力系数平均值 $\overline{C_d}$ 的模拟结果与 Kravchenko 等^[11] 试验数值的对比情况见表 2,表中还列出了何鸿涛^[12] 的模拟结果。

图 7(b) 是圆柱表面升力系数时程曲线,由图可见, $\kappa-\omega$ 模型、SST 模型的升力系数达到稳定后,其振幅稳定在 1 附近,而 LES 法的升力系数的振动幅值则随时间不断变化,大约为 0.3~0.6,它呈现出的是并非完全性的周期性振动,而是一种“准”周期性振动。

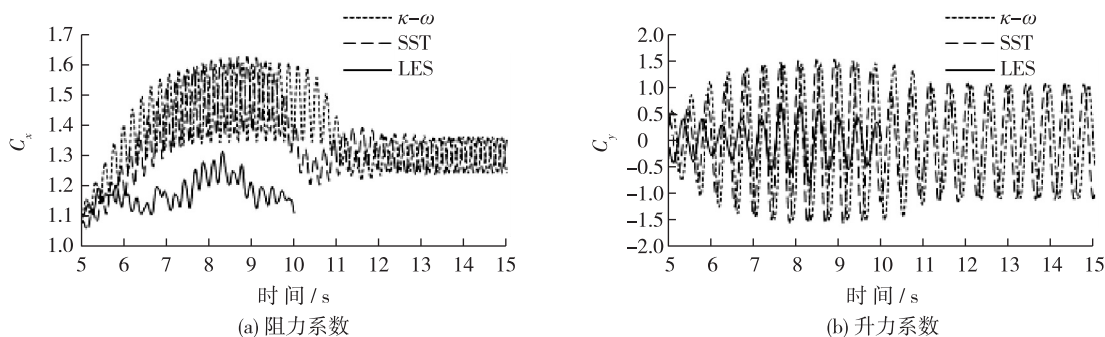


图7 阻力系数和升力系数时程

Fig. 7 Time histories of drag coefficients and lift coefficients

将相应的升力系数曲线分别进行快速傅立叶变化得到漩涡脱落频率,并根据公式 $St = fD/u_0$ 得到相应的斯特罗哈尔数,与文献[11]和[12]的结果进行对比(见表2)。通过对比发现,无论对于阻力系数平均值 $\overline{C_d}$,还是斯特罗哈尔数 St ,LES 法得到的结果都要比另外两种模型精确一些。

4 结 语

本文通过采用不同湍流模型对三维圆柱绕流特性进行模拟研究,主要得出如下结论:

(1)当流体流过圆柱时,圆柱表面大部分区域都是负压区,而且 $\theta=40^\circ\sim 72^\circ$ 的区域存在与流速方向相反的负压力差。由于负压力差与流体黏性的联合作用,流体与圆柱表面分离,使圆柱表面产生周期性交替脱落的湍流漩涡,从而使圆柱表面受到周期性变化的升力影响。LES 法得到的流体分离角与试验数据吻合最好,误差为 2.86%;LES 法得到的阻力系数平均值以及斯特罗哈尔数 St 与试验结果的误差均控制在合理范围。相应的 $\kappa-\omega$ 模型、SST 模型得到的结果与试验结果存在很大差距。

(2)脱落的漩涡进入圆柱后流场中,在圆柱近壁处形成了回流区。LES 法模拟得到了长度约为 $1.68D$ 、最大无量纲回流速度为 0.247 的回流区,与试验数值吻合很好; $\kappa-\omega$ 模型模拟得到的回流区最大无量纲速度也为 0.228,但长度只有一倍圆柱直径;SST 模型模拟得到的结果,其最大无量纲回流速度以及回流区长度均只有试验值的一半左右。所以,LES 法对流场时均速度的模拟效果最好。

(3)在亚临界雷诺数条件下,LES 模型对圆柱后极度不稳定的湍流涡泄的模拟效果最好,对复杂的湍流小尺度漩涡描述得更加细致,得到的自由分离剪切层长度约为 $1D$,得到的漩涡卷曲度更符合湍流涡泄的特征。 $\kappa-\omega$ 模型与 SST 模型对湍流的模拟效果要差一些,只能大致体现出漩涡周期性脱落的特性。

参 考 文 献:

- [1] NORBERG C. Flow around a circular cylinder: aspects of fluctuating lift[J]. Journal of Fluids and Structures, 2001, 5: 459-469.
- [2] ZHAO M, CHENG L, TENG B, et al. Hydrodynamic forces on dual cylinders of different diameters in steady currents[J]. Journal of Fluids and Structures, 2007, 23: 59-83.
- [3] LOURENCO L M, SHIH C. Characteristics of the plan turbulent near wake of a circular cylinder: a partial image velocimetry study[J]. Private Communication, 1993.
- [4] 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.
- [5] KORPUS R, JONES P, OAKLEY O, et al. Prediction of viscous forces on oscillation cylinders by Reynolds-averaged Navier-Stokes solver [C]//Proceedings of the Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Seattle: ISOPE Press, 2000(Ⅲ): 471-477.
- [6] 毕继红,余化军,任洪鹏.静止方柱和圆柱绕流的二维数值分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2012,34(1):41-45. (BI Ji-hong, YU Hua-jun, REN Hong-peng. Two dimensional numerical simulation of flow over a static square column and a static circular cylinder[J]. Journal of China Three Gorges University(Nature Science), 2012, 34(1): 41-45. (in Chinese))
- [7] 姚熊亮,方媛媛,戴少仕,等.基于 LES 方法圆柱绕流三维数值模拟[J].水动力研究与进展,2007,22(5):564-572. (YAO Xiong-liang, FANG Yuan-yuan, DAI Shao-shi, et al. Three-dimensional numerical simulation of the flow past a circular cylinder based on LES method[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 22(5): 564-572. (in Chinese))
- [8] 杜远征.三维圆柱绕流及涡激振动数值模拟[D].天津:天津大学,2011. (DU Yuan-zheng. Three-dimensional numerical simulation of flow around a circular cylinder and vortex-induced vibration[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese))
- [9] ZHANG Hui, YANG Jian-min, XIAO Long-fei, et al. Large-eddy simulation of the flow past both finite and infinite circular cylinders at $Re=3900$ [J]. Journal of Hydrodynamics, 2015, 27(2): 195-203.
- [10] NORBERG C. Effects of Reynolds number and low-intensity free-stream turbulence on the flow around a circular [D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 1987.
- [11] KRAVCHENKO A G, MOIN P. Numerical studies of flow over a circular cylinder at $Re=3\,900$ [J]. Physics of Fluids, 2000, 12(2): 403-417.
- [12] 何鸿涛.圆柱绕流及其控制的数值模拟研究[D].北京:北京交通大学,2009. (HE Hong-tao. Numerical simulation of characteristics and control of flow around a circular cylinder[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese))

Analysis of three-dimensional numerical simulation methods for turbulent flow past circular cylinder

QIAO Yong-liang, GUI Hong-bin, LIU Xiang-xin

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: Studying the influences of a turbulence simulation method on the accuracy of the three-dimensional numerical simulation of the turbulent flow past a circular cylinder, this study is made in a subcritical region ($Re = 3900$) by using $\kappa\text{-}\omega$ model, SST model, and large eddy simulation (LES), which are included in Reynolds average Navier-Stokes (RANS). Analyses of the stress distribution on the surface of the cylinder, the time average velocity characteristics of the flow field and the instantaneous vorticity distribution of the flow field behind the cylinder have been done in the study. The analysis results show that the negative pressure difference on the surface of the cylinder, which is of opposite direction to the velocity when flow passes a circular cylinder, separates the fluid from the surface of the cylinder and causes unstable periodic turbulent vortex shedding, which resulted to the periodic fluctuation of the lift force on the cylindrical surface and a backflow zone behind the cylinder. Moreover, the simulation effect of the LES method on the stress distribution on the cylindrical surface and a time average velocity characteristics of the flow field are superior to $\kappa\text{-}\omega$ model and SST model. Compared with the simulation results of immersed boundary method used by DU Yuan-zheng, the simulation precision of the LES method also has greater improvement. Then based on the analysis of the iso-contour maps of the vorticity magnitude of the flow field and comparing them with the existing simulation results, the LES method can not only depict the periodic shedding vortices as a whole, but also describe the complex small scale turbulent vortex at different positions of the flow field meticulously. And the scale of the separated free-shear layers and the crimpness of the vortex are more in line with the characteristics of the turbulent vortex shedding. Finally, it came to the conclusion that the simulation effect of the LES method for the turbulent flow is relatively better than that of the $\kappa\text{-}\omega$ model and SST model in the subcritical region.

Key words: turbulence simulation method; flow past a circular cylinder; subcritical region