

倒角半径对半潜式平台绕流特性影响数值分析

李思明, 刘正浩, 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: 基于 OpenFOAM 开源代码工具箱, 采用基于剪切应力运输 (shear stress transport, SST) 的分离涡模拟 (Detached-Eddy Simulation, DES) 方法, 选取四种典型来流速度, 对四种立柱倒角半径的半潜式平台在 0° 流向角时的阵列四柱绕流进行了数值模拟。从半潜式平台立柱流体力系数、立柱尾部漩涡脱落特征等方面探究了立柱倒角半径变化对半潜式平台四柱绕流特性的影响。

关键词: 半潜式平台; 绕流特性; 倒角半径; 分离涡模拟

1 引言

半潜式平台作为一种多立柱式浮体, 通常具有 4 个立柱, 形成一种典型的阵列四柱的形式。多柱绕流一直是流体领域的热点研究问题, 当流体以一定流速流经柱体时, 由于流体黏性的存在, 会产生边界层分离以及漩涡脱落现象, 使结构产生周期性的力。不同于单柱, 多柱绕流问题由于各个柱体之间流场的相互干扰更加复杂, 各个柱体的受力特性也有很大区别。半潜式平台四立柱的多柱体绕流问题是研究半潜式平台涡激运动的基础。目前对于半潜式平台, 其立柱多数为方形截面且经过一定的倒圆角处理, 但倒角半径对于平台结构响应影响的研究还开展的很少。研究表明, 立柱几何形状很小的改变可能会对平台响应产生很大的影响。因此研究立柱倒角半径对于半潜平台阵列四柱绕流特性的影响, 对于将来研究倒角半径对半潜式平台涡激运动影响以及平台的设计具有重要的指导意义。

目前对于柱体绕流特性研究的手段主要包括实验研究和数值模拟, 实验研究由于需要耗费大量的人力、物力, 特别对于不同倒角半径的研究, 需要投入更多的成本以制作不同的模型, 因此相较于实验研究, 数值模拟作为一种高效率的方法越来越成为柱体绕流的主

要研究手段。刘为民等^[1]引入雷诺平均法求解 N-S 方程, 结合 SST $k-\omega$ 湍流模型对阵列四立柱绕流进行了数值模拟, 结果表明立柱表明涡强最大值集中在上游立柱迎流面的拐点处, 立柱后方的尾流结构形式均为 2S 模式。赵伟文等^[2]应用基于 Spalart-Allmaras (SA) 模型的延迟分离涡 (DDES) 方法, 对亚临界雷诺数 $Re=3900$ 的串联双圆柱绕流进行数值模拟, 分析了圆柱间距对流场以及阻力系数的影响。Han 等^[3]同样采用基于 SA 模型的 CBS 有限元格式对不同间距的并联双方柱进行了数值模拟。He 等^[4]利用实验的手段研究了方柱前端切角对于减阻的影响, 通过分析尾部流场结构探究了方柱前端切角的减阻机理。谷家扬等^[5]采用有限体积法对具有不同倒角半径方柱涡激振动开展了数值研究, 比较了三种倒角方柱横、顺流向振幅随折合速度的变化规律以及运动轨迹。Chen 等^[6]利用有限分析法求解 N-S 方程, 结合 LES 湍流模型, 比较了三种倒角半径的半潜平台涡激运动随不同折合速度的横荡标称响应幅值。

本研究以四立柱半潜式平台为研究对象, 基于开源平台 OpenFOAM, 引入基于 SST (Shear Stress Transport, SST) 两方程湍流模型的分离涡模拟 (Detached-Eddy Simulation, DES) 方法, 对 4 种不同立柱倒角半径的平台模型的阵列四柱绕流特性进行了数值模拟。首先介绍了本研究采用的数值方法, 之后给出了 4 种不同倒角半径模型的几何参数和物理参数, 并且给出了计算域、网格参数以及边界条件设置等, 最后对比分析了 4 种倒角半径的半潜式平台立柱绕流特性得出相关结论。

2 数值方法

2.1 SST-DES 模型

对于不可压缩流体, 经过平均或过滤后的连续性方程和动量守恒方程可以表示为:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中, ν 为分子黏度, τ_{ij} 为雷诺应力或亚格子应力张量。根据 Boussinesq 假设, τ_{ij} 可以表示为

$$\tau_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} k - \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

分离涡方法 (Detached-Eddy Simulation, DES) 是 Spalart 等^[7]提出的一种混合雷诺平均 (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) 和大涡模拟 (Large-Eddy Simulation, LES)

的方法。它在远离壁面的自由剪切流动区域采用 LES 亚格子模型求解流动，而在靠近避免的边界层区域内以及其他区域采用 RANS 的 SST 模型求解流动。因此 DES 方法的优势在于既可以保证 LES 的求解精度，又可以通过减少近壁面处的边界层网格来降低计算量。

SST-DES 模型是由 Menter 等^[8]提出的。在 SST 模型中，湍动能 k 和特定湍流耗散率 ω 的运输方程分别表示为：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(u_j k)}{\partial x_j} = \tilde{G} - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} [(v + \alpha_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j}] \quad (4)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \omega)}{\partial x_j} = \gamma S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} [(v + \alpha_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}] + (1 - F_1) CD_{k\omega} \quad (5)$$

SST-RANS 模型中的湍流长度尺度定义为

$$l_{RANS} = \sqrt{k} / (\beta^* \omega) \quad (6)$$

因此， k 方程中的耗散项 $\beta^* k \omega$ 可以表示为 $k^{3/2} / l_{RANS}$ 。

DES 模型中用混合长度 l_{DES} 代替 l_{RANS} ，其定义为

$$l_{DES} = \min(C_{DES} \Delta, l_{RANS}) \quad (7)$$

其中 C_{DES} 利用混合函数 F_1 表示为

$$C_{DES} = (1 - F_1) C_{DES}^{k-\epsilon} + F_1 C_{DES}^{k-\omega} \quad (8)$$

因此可以得到新的 k 方程：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(u_j k)}{\partial x_j} = \tilde{G} - \frac{k^{3/2}}{l_{DES}} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(v + \alpha_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j}] \quad (9)$$

以上方程中的常数见参考文献[9]。

2.2 离散格式

本研究对控制方程采用有限体积法离散，时间项采用二阶隐式格式离散，对流项采用 LUST 格式离散，扩散项采用高斯线性守恒格式离散。采用压力与速度耦合的 PIMPLE (PISO^[10]和 SIMPLE) 算法求解。PISO 方法是通过先预估一步，再修正两步的方法求解 N-S 方程。在 OpenFOAM 中，这种方法用来进行瞬态计算，需要使用较小的时间步长。SIMPLE 在 OpenFOAM 中用来进行稳态计算。而 PIMPLE 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，它作为混合 PISO 和 SIMPLE 的算法，允许在计算过程中，使用较大的时间步长。计算时间步长取 0.01 s。

3 计算模型及算例

3.1 计算模型

本研究立柱倒角半径 $r=0$ m 对应的模型采用 Waals 等^[11]实验所采用的深吃水半潜式平台模型, 该平台模型的缩尺比为 1:70, 其中主要的几何和物理参数如表 1 所示。

表 1 模型主要参数

参数名称	实尺度	模型尺度
缩尺比	1:1	1:70
吃水 (T)	35 m	0.5 m
宽度 (D+S)	70 m	1 m
立柱中心间距 (S)	56 m	0.8 m
立柱截面尺寸 (D×D)	14m×14m	0.2m×0.2m
立柱高度 (L)	24.5 m	0.35 m
浮筒宽度 (B)	14 m	0.2 m
浮筒高度 (H _{pon})	10.5 m	0.15 m
排水量 (Δ)	53000 t	0.158 t

本研究设计计算模型自由度为 0, 即模型固定。考察了模型与来流呈 0° 夹角时的四柱绕流特性。根据 Chen 等的研究, 设置了另外两种立柱倒角半径, 分别对应倒角半径 $r=0.007$ m 和 $r=0.031$ m, 除此以外又增设倒角半径 $r=0.100$ m, 四种倒角半径立柱的 1/4 截面如图 1 所示。本研究采用立柱的有效直径 $D=0.2$ m 作为计算模型的特征长度。

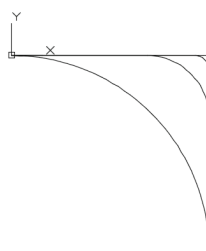


图 1 四种倒角半径立柱 1/4 截面

为了能够在之后的计算过程中分析每个立柱各自的受力情况, 因此对每个立柱与底座分开独立建模。其中定义上游立柱为 col1、col2; 下游立柱为 col3、col4。阵列四柱的排列形式如图 2 所示。

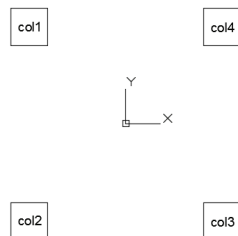


图2 阵列四柱排列形式

3.2 计算工况

根据实际环境，选取 4 种典型来流速度 $U=0.5$ 、 0.75 、 1.00 、 1.25 m/s。模型尺寸下的流速与实际流速具有如下对应关系：

$$U_m = U / \sqrt{\lambda} \quad (10)$$

式中， λ 代表缩尺比，对应本研究取 $1/70$ 。因此本文中对模型尺寸下的来流速度 $U_m=0.0598$ 、 0.0896 、 0.1195 、 0.1494 m/s。

3.3 计算网格

本研究的网格是利用 OpenFOAM 自带网格划分工具 blockMesh 和 snappyHexMesh 生成的，首先利用 blockMesh 设置计算域大小并生成结构化的六面体背景网格。所设计算域的大小为： $-10D \leq x \leq 20D$ ， $-10D \leq y \leq 10D$ ， $-9D \leq z \leq 0$ 。计算域如图 3 所示。之后在背景网格中利用 snappyHexMesh 捕捉模型表面并进行局部网格的加密以及边界层的添加。边界层网格数量为 8 层。四种倒角半径模型网格数量如表所示，均在 270 万左右。图 4 展示了计算网格与物体表面及附近局部网格情况。

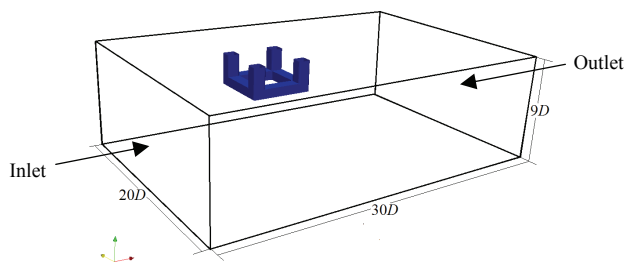


图3 计算域范围

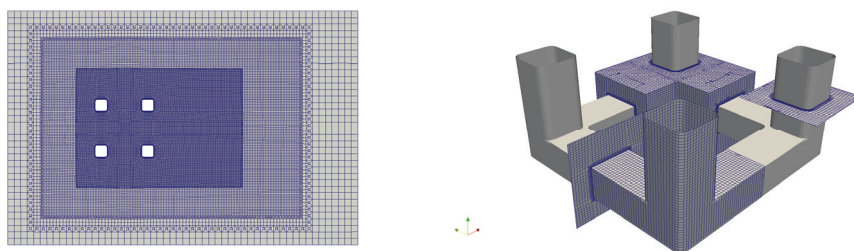


图4 网格划分

计算域的边界条件设置为：上游入口采用均匀来流，下游出口采用压力积分为零，顶部采用对称边界条件，其余边界均采用固壁边界条件。模型的边界采用无滑移固壁边界，湍流粘度 ν_t 的近壁面函数采用 `nutUSpaldingWallFunction`，这个壁函数是基于 Spalding 提出的一个拟合的 y^+ 与 u^+ 的关系式^[12]，本研究 y^+ 在 2.6 左右。

4 结果分析

4.1 流体力系数

利用 OpenFOAM 函数库中的 Force 函数工具进行后处理计算，得到各工况下 4 个立柱的受力时域变化数据，之后通过无量纲化处理得到流体力系数数据。流体力系数包括拖曳力系数与升力系数，其表达式为：

$$C_d = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho U^2 DL}, \quad C_l = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \rho U^2 DL} \quad (11)$$

式中， F_x 和 F_y 分别代表顺流向与横流向的流体力。

图 5 给出了 4 种倒角半径的阵列四柱在来流速度 0.1195 m/s 时的拖曳力系数时域曲线。从图中可以看出，由于本文计算模型具有对称形式，因此位于上游的立柱 1 和立柱 2 的拖曳力系数基本保持一致，而位于下游的立柱 3 和立柱 4 由于受到上游立柱尾流场干扰，因此受力情况相较于上游立柱有很大区别，不仅表现在拖曳力系数远小于上游，另外还表现在下游立柱拖曳力系数呈现更强的波动性。从图中可以看出上游立柱受力很小的区别会引起下游立柱产生很大的不同。随着立柱倒角半径的增加，下游立柱与上游立柱拖曳力系数的差异逐渐减小，其原因是倒角半径的增加会减小上游立柱尾流场对下游立柱的影响。

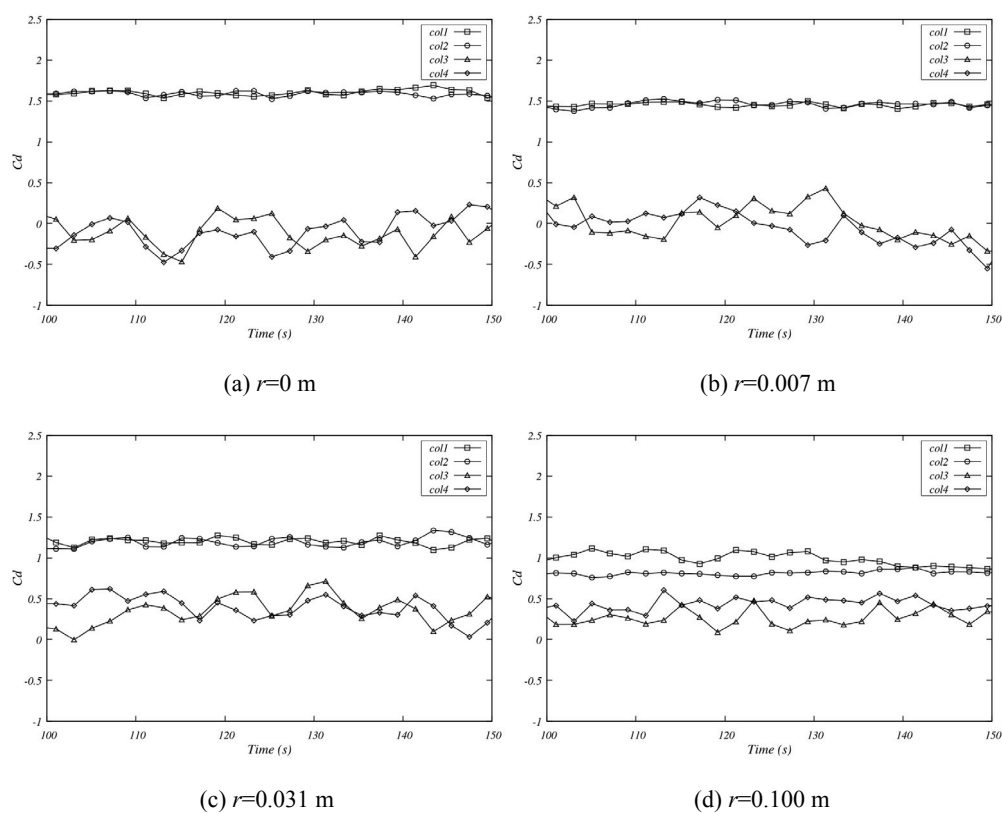


图5 不同倒角半径阵列四柱拖曳力系数

图6给出了来流速度 0.0896 m/s 工况下, 4种倒角半径的立柱1和立柱4的横、顺流向流体力系数对比情况。

观察图6(a)、(b)可以看出倒角半径对上游立柱拖曳力系数的影响十分规律, 随着倒角半径的增加, 立柱的拖曳力系数呈现下降的趋势; 下游立柱由于受上游立柱尾部流场干扰, 并没有呈现出与上游立柱相同的规律。当倒角半径为 0 、 0.007 m时, 下游立柱拖曳力系数大多为负, 上下游立柱出现“相吸”现象, 而当倒角半径为 0.031 m与 0.100 m时, 拖曳力系数多为正数。因此, 在实际工程设计中, 为了避免上、下游立柱出现“相吸”现象, 应当适当增大立柱倒角半径。然而通过观察图6(c)、(d)可以看出, 升力系数并没有体现出与拖曳力系数相似的随倒角半径变化的单调性, 当倒角半径为 0.031 m时, 上、下游立柱升力系数幅值均大于其他倒角半径。因此, 实际工程设计中, 倒角半径的增加也应当有一定的限制。

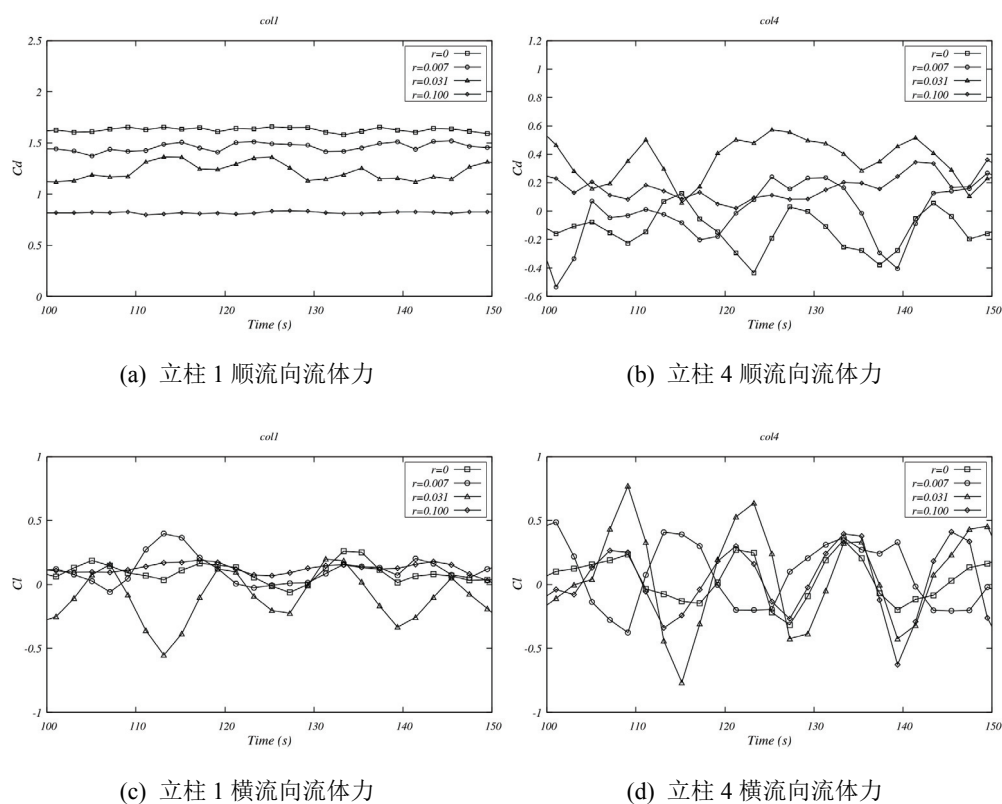
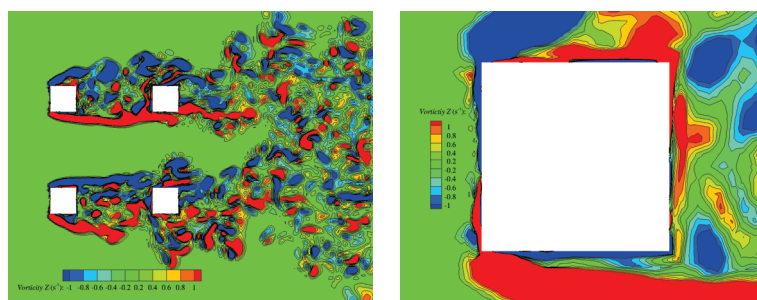


图 6 不同倒角半径流体力系数

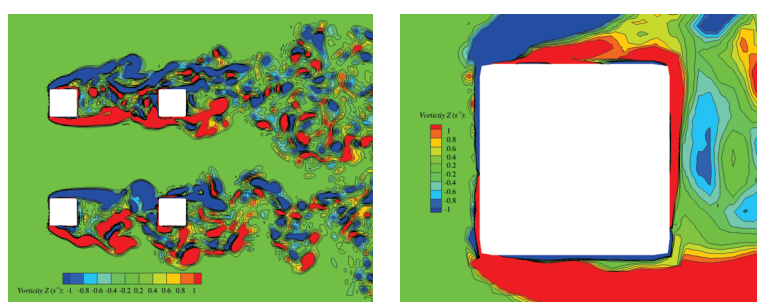
4.2 涡量场分布

图 7 给出了来流速度 0.1195 m/s 工况, $z=-0.15 \text{ m}$ 平面内 4 种倒角半径的立柱尾涡流场图像以及对应的立柱 1 的局部涡量放大图像。观察整体尾涡流场图像可以发现, 当倒角半径 $r=0$ 、 0.007 m 时, 上游立柱尾涡的回流区长度较大, 下游立柱位于上游立柱尾涡回流区内, 因此自身的泄涡并不明显。当倒角半径 $r=0.031$ 、 0.100 m 时, 通过观察上游立柱尾部回流区长度以及下游立柱的尾部涡量图可以发现随着倒角半径增加, 上游立柱对下游立柱泄涡的影响呈现降低的趋势, 即对下游立柱的干扰降低。这一现象也解释了随着立柱倒角半径的增加, 下游立柱与上游立柱拖曳力系数差异降低这一规律产生的原因。

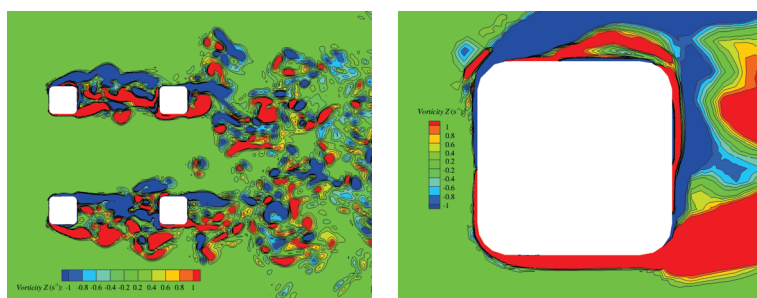
观察立柱 1 的局部涡量图可以发现, 随着立柱倒角半径的增大, 分离点位置逐渐向后偏移。并且立柱两侧分离点位置并不对称。由于对侧立柱的影响, 立柱两侧的泄涡并不对称, 靠近对侧立柱一侧的泄涡更加贴近壁面, 这种现象在倒角半径 $r=0.031 \text{ m}$ 时尤为明显。这种现象解释了立柱升力系数时域曲线关于 $t=0$ 不对称, 即升力系数时间平均值不在 0 附近。



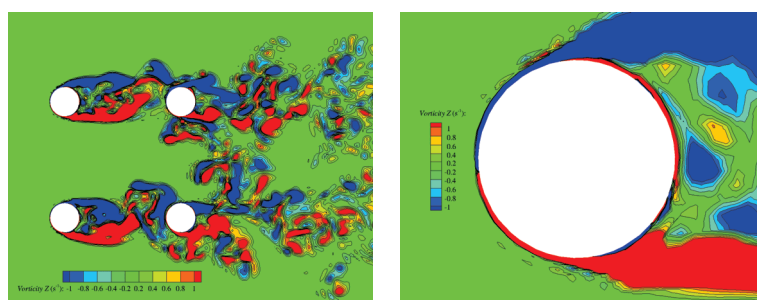
(a) $r=0$ m



(b) $r=0.007$ m



(c) $r=0.031$ m



(d) $r=0.100$ m

图 7 $z=-0.15$ m 平面尾部流场涡量

图 8 给出了来流速度 0.1195 m/s 工况, $z=-0.30 \text{ m}$ 平面内四种倒角半径的立柱尾涡流场图。由于底座的影响, 绕流特性有所不同。从图中可以发现在两侧立柱中间会产生对称的泄涡, 且倒角半径较大时的泄涡比倒角半径较小时更加明显。

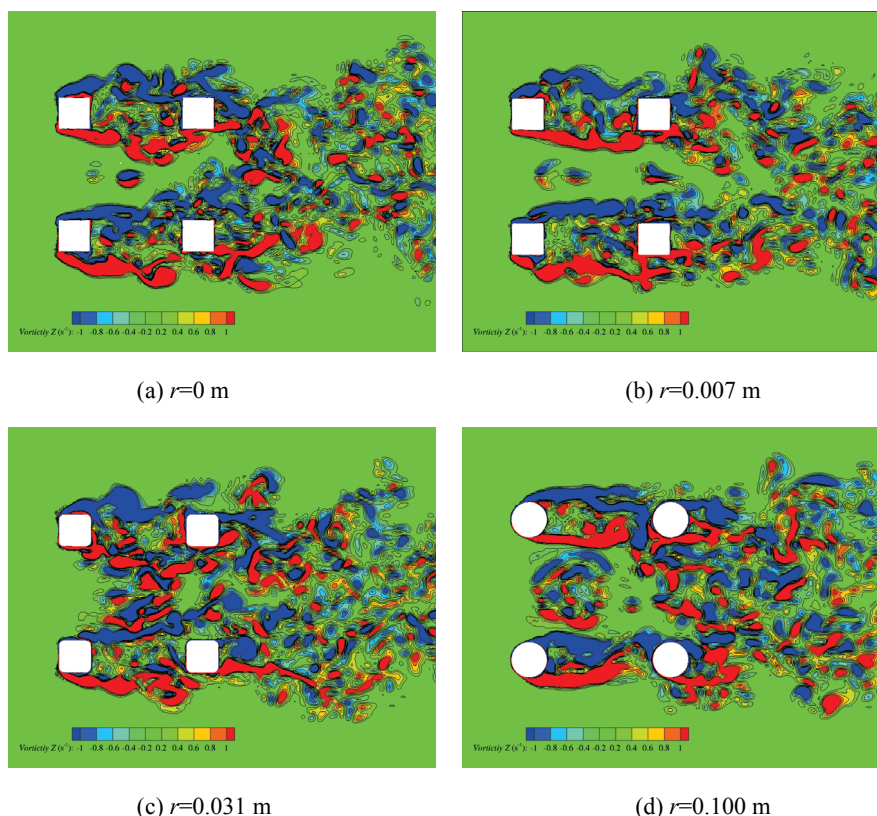


图 8 $z=-0.30 \text{ m}$ 平面尾部流场涡量

5 结论

本研究以四立柱半潜式平台为研究对象, 采用 OpenFOAM 求解器, 引入基于 SST (Shear Stress Transport, SST) 两方程湍流模型的分离涡模拟 (Detached-Eddy Simulation, DES) 方法, 对四种不同立柱倒角半径的阵列四柱在 0° 来流角度时的绕流特性进行了数值模拟。经过研究得到如下结论。

(1) 在相同来流速度工况时, 随着倒角半径的增加, 上游立柱拖曳力系数降低, 而下游立柱由于受到上游立柱尾部流场干扰, 并没有呈现相同的规律。在相同来流速度工况下, 当倒角半径较小时, 下游立柱拖曳力系数为负, 会与上游立柱产生“相吸”现象; 而当倒角半径增加, 下游立柱拖曳力系数为正; 而无论何种速度工况, 倒角半径为 0.031 m 时, 上、下游的升力系数幅值均大于其他倒角半径。

(2) 倒角半径变化会影响上游立柱对下游立柱的干扰作用。随着倒角半径的增加,上游立柱回流区长度降低,对下游立柱泄涡的影响减弱,导致上、下游立柱拖曳力系数差异降低。

本工作目的在于为今后研究不同倒角半径对半潜式平台涡激运动的影响提供基础。半潜式平台四柱绕流特性研究是研究半潜式平台涡激运动的基础。当平台运动时,平台的运动会影响结构的泄涡,流体与平台之间的相互作用使得问题更加复杂。

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 刘为民,谷家扬,卢燕祥. 阵列四柱绕流的数值模拟[J]. 江苏科技大学学报自然科学版, 2012, 26(6): 534-540.
- 2 赵伟文,万德成. 应用 SA-DDES 方法数值模拟串联双圆柱绕流问题[c]. 第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集, 2015: 220-223
- 3 Z Han, D Zhou, J Tu, C Fang, *et al* . Flow over two side-by-side square cylinders by CBS finite element scheme of Spalart-Allmaras model [J]. Ocean Engineering, 2014, 87(9): 40-49.
- 4 G S He, N Li, J J Wang. Drag reduction of square cylinders with cut-corners at the front edges [J]. Experiments in Fluids, 2014, 55(6): 1-11.
- 5 谷家扬,焦经纬,渠基顺. 倒角半径对方柱涡激特性的影响研究[J]. 中国造船, 2015(1): 51-60.
- 6 C R Chen, H C Chen. Simulation of vortex-induced motions of a deep draft semi-submersible in current [J]. Ocean Engineering, 2016(118): 107-116.
- 7 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 [C]. Advances in DNS/LES,1997, (1): 4-8.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 Kravchenko A G, Moin P. Numerical studies of flow over a circular cylinder at $Re = 3900D$ [J]. Physics of Fluids, 2000, 12(2): 403-417.

- 11 Waals O J, Phadke A C., Bultema S. Flow induced motions of multi column floaters [C]. Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. California, USA , OMAE2007-29539.
- 12 Spalding D B. A Single Formula for the “Law of the Wall” [J]. Journal of Applied Mechanics, 1961, 28(3): 455.

Numerical simulation study on the effect of filleting radius of flow past a semi-submersible platform

LI Si-ming, LIU Zheng-hao, 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: Based on the open source CFD toolkit OpenFOAM, numerical simulation of flow past four semi-submersible platforms with different column fillet radius at 0° incident angel have been carried out in this paper using Detached-Eddy Simulation (DES) based on Shear Stress Transport model(SST). Six typical current velocities are chosen in this paper. The effect of the variation of the column's filleting radius on the flow characteristics of the semi-submersible platform is studied based on the characteristics of vortex shedding and the fluid force coefficient of the column.

Key words: semi-submersible platform; flow characteristics; filleting radius; Detached-Eddy Simulation