

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2018.03.001

# 数值分析倒角半径对半潜式平台绕流特性影响\*

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, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn)

**摘要:** 半潜式平台的多柱绕流问题是研究半潜式平台涡激运动的基础, 而半潜式平台多柱之间旋涡脱落的相互干扰使得立柱倒角半径的改变对于半潜式平台绕流的影响更为显著, 故研究立柱倒角半径对半潜式平台绕流特性的影响对于半潜式平台的设计建造具有重要的指导意义。该文基于 OpenFOAM 开源代码工具箱, 采用基于剪切应力运输 (shear stress transport, SST) 的延迟分离涡模拟 (delayed detached-eddy simulation, DDES) 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  $0^\circ$  流向角时的阵列四柱绕流进行了数值模拟。并从半潜式平台立柱流体力系数、近尾流场流向速度分布及立柱尾部旋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绕流特性的影响。

**关键词:** 半潜式平台; 绕流特性; 立柱倒角半径; 分离涡模拟; OpenFOAM

**中图分类号:** U661.1

**文献标志码:** A

## Numerical simulation on the effect of corner radius on flow past a semi-submersible platform

LI Si-ming, LIU Zheng-hao, 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 study of the flow past a semi-submersible platform is the basis for the study of its vortex-induced motion. The interaction of vortex shedding between multi-columns of the semi-submersible platform makes the change of the corner radiuses of the columns has more significant effect on the flow past the semi-submersible platform. The study on the effect of

\* **收稿日期:** 2017-08-30(2018-03-20 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)和上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022)。

**作者简介:** 李思明(1994—), 男, 天津人, 硕士研究生。

**通讯作者:** 万德成, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

**Received:** August 30, 2017 (**Revised** March 20, 2018)

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

**Biography:** LI Si-ming (1994—), Male, Master Candidate.

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

column corner radius on flow past a semi-submersible platform has important guiding significance for the design of platform. Based on the open source CFD toolkit OpenFOAM, numerical simulation of flow past a semi-submersible platform with different column corner radiuses at  $0^\circ$  incident angle has been carried out in this paper using delayed detached-eddy simulation based on shear stress transport model (SST). Four typical current velocities are chosen. The effect of the variation of the column's corner radiuses on the flow characteristics of the semi-submersible platform is studied based on the fluid force coefficient of the columns and platforms, mean stream-wise velocity in the near wake and the characteristics of vortex shedding.

**Key words:** semi-submersible platform; flow characteristics; corner radius; detached-eddy simulation; OpenFOAM

## 引言

当流体以一定的流速流经柱体时,由于流体具有黏性,会产生边界层分离现象使得柱体两侧产生交替性的旋涡脱落,引起柱体产生周期性的脉动压力。不同于单柱,多柱旋涡脱落之间的相互干扰使得多柱绕流更加复杂,各个柱体的受力特性也有很大区别,多柱绕流一直是海洋工程领域的热点研究问题。半潜式平台作为一种典型的多柱式浮体,被广泛地应用于海洋工程领域。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,但立柱倒角半径对于半潜式平台绕流特性影响的相关研究目前鲜有报道。研究表明<sup>[1-2]</sup>,立柱几何形状的改变会引起流场特征的改变,而半潜式平台立柱之间旋涡脱落的相互作用使得立柱倒角半径的改变对于半潜式平台绕流的影响更为显著。研究半潜式平台的多柱绕流问题是研究半潜式平台涡激运动的基础,静止平台绕流虽然没有发生流固耦合现象,但研究该过程中立柱以及平台整体的升阻力特性,从流场的角度分析多柱体之间的旋涡脱落干扰,可以对半潜式涡激运动的发生机理进行研究,从而对于半潜式平台的设计建造具有重要的指导意义。

目前,关于柱体绕流研究的主要手段包括试验研究以及数值模拟方法。试验研究的优势在于通过试验手段获得的结果准确性较高。He等<sup>[1]</sup>利用试验手段研究了方柱前端切角对于减阻效果的影响,分析方柱绕流尾部流场结构探究了方柱前端切角的减阻机理,通过进行参数敏感性分析,揭示了尾部回流区与阻力系数间的关系。Goncalves等<sup>[2]</sup>进行了三种立柱截面形状的阵列四柱在三种来流角度下的多柱绕流模型试验,给出了各个立柱与整体系统的升阻力系数相关结果并与单柱结果进行了对比。而近年来,随着计算机技术的发展,计算流体力学(CFD)方法得到了广泛的应用。CFD方法的优势在于可以得到全流场信息,从流场的角度对问题进行分析,特别在研究例如本研究主题等几何参数敏感度问题时,CFD方法相较于试验方法具有节省时间和费用、便利度高的优势。因此相较于试验研究,CFD方法作为一种高效率的方法越来越成为了多

柱绕流的主要研究手段。Zhao等<sup>[3]</sup>应用基于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了数值模拟,分析了圆柱间距对流场以及阻力系数的影响。Han等<sup>[4]</sup>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,研究了不同立柱间距工况下的立柱表面周向压力系数分布。Islam等<sup>[5]</sup>对雷诺数100,不同间距的二维四柱绕流进行了数值模拟。刘为民等<sup>[6]</sup>引入雷诺平均法求解N-S方程,结合SST  $k-\omega$ 湍流模型对不同来流角度下的简化二维阵列四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。

本文以四种不同立柱倒角半径的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)两方程湍流模型的延迟分离涡模拟(delayed detached eddy simulation, DDES)方法,对四种不同立柱倒角半径的半潜式平台在 $0^\circ$ 来流角度下的静水拖曳试验进行了数值模拟。并从升阻力系数及近尾流场速度分布等角度对半潜式平台绕流特性进行了研究,利用CFD研究方法的优点,从流场角度分析总结了立柱倒角半径对半潜式平台绕流特性影响的机理机制以及相关规律。

## 1 数值方法

### 1.1 SST-DDES湍流模型

不可压缩黏性流体的控制方程为质量和动量守恒方程:

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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

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

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

本文湍流模型采用基于剪切应力运输SST模型的延迟分离涡模拟DDES方法。分离涡方法是Spalart等<sup>[7]</sup>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。SST-DDES方法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。分离涡模拟方法作为一种混合RANS和LES的方法,其优势在于既可以保证求解的精度,又可以通过减少近壁面处的边界层网格来降低计算量。

在SST模型中,湍动能 $k$ 和特定湍流耗散率 $\omega$ 的运输方程分别表示为:

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

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

SST模型中的湍流长度尺度定义为

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

而SST-DDES模型中将湍流长度尺度修改为如下形式

$$l_{DDES} = l_{k-\omega} - f_d \max(0, l_{k-\omega} - C_{DES} \Delta) \quad (7)$$

式中:  $C_{DES} = (1 - F_1) C_{DES}^{k-\varepsilon} + F_1 C_{DES}^{k-\omega}$ ,  $f_d = 1 - \tanh\left[\left(C_{d1} r_d\right)^{C_{d2}}\right]$ ,  $r_d = \frac{\nu_t + \nu}{\sqrt{0.5 \cdot (S^2 + \Omega^2) \kappa^2 d^2}}$

经过这样的修改, SST-DDES模型通过 $l_{DDES}$ 控制RANS和LES方法的自动切换。在边界层内部靠近壁面的位置包括对数层,  $r_d$ 函数取1,  $f_d$ 为0, 使得

$l_{DDES} = l_{k-\omega}$ , 保证了在此区域内湍流模型退化成雷诺平均模型, 延迟了DES模型转换为LES模型的时间, 实现了延迟效果<sup>[8]</sup>。

$k$ 方程中的耗散项可以改写为如下形式

$$D_{DES}^k = \beta^* k \omega = k^{3/2} / l_{DDES} \quad (8)$$

因此可以得到新的 $k$ 方程

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

具体方程中的常数参考文献[9]。

## 1.2 离散格式

在求解控制方程时采用有限体积法离散, 时间项采用二阶隐式格式离散, 对流项采用二阶线性迎风稳定化输运(LUST)格式离散, 扩散项采用高斯线性守恒格式离散。压力与速度耦合求解采用PIMPLE(混合PISO<sup>[10]</sup>和SIMPLE)算法。PISO方法通过先预估一步, 再修正两步的方法求解N-S方程。在OpenFOAM中, PISO方法用来进行瞬态计算, 需要使用较小的时间步长, 而SIMPLE方法在OpenFOAM中用来进行稳态计算。PIMPLE算法在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, 其作为混合PISO和SIMPLE的算法, 允许在计算过程中使用较大的时间步长。

## 2 数值模拟

### 2.1 计算模型

本文计算模型中, 立柱倒角半径 $R=0$  m对应的四方柱半潜式平台模选取Waals等<sup>[11]</sup>开展半潜式平台涡激运动试验所采用的模型, 该模型缩尺比为1:70, 具体平台几何及物理参数如表1所示。

表1 计算模型参数

Table 1. Parameters of the calculating model		
参数名称	实尺度	模型尺度
缩尺比/ $\lambda$	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/ $(D \times D)$	14 m×14 m	0.2 m×0.2 m
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/ $\Delta$	53 000 t	0.158 t

本文根据Chen等<sup>[12]</sup>的研究,选取两种不同的立柱倒角半径,对应模型尺寸分别为 $R=0.007\text{ m}$ 、 $0.031\text{ m}$ ,并另外增加一种立柱倒角半径 $R=0.100\text{ m}$ ,这种情况下立柱由方柱变为圆柱形式。图1展示了四种立柱倒角半径对应的立柱四分之一截面形式。本文采用立柱的有效直径 $D=0.2\text{ m}$ 作为计算模型的有效长度。为了能够单独输出每一个立柱以及浮筒的受力信息,在建模过程中对四立柱以及浮筒独立建模,最终形成了四种立柱倒角半径的平台模型,如图2所示。

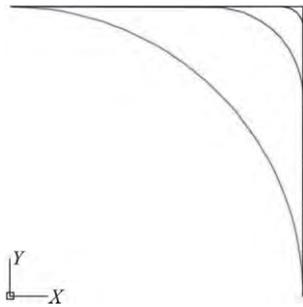


图1 立柱四分之一截面形式

Fig.1 A quarter of the column cross section

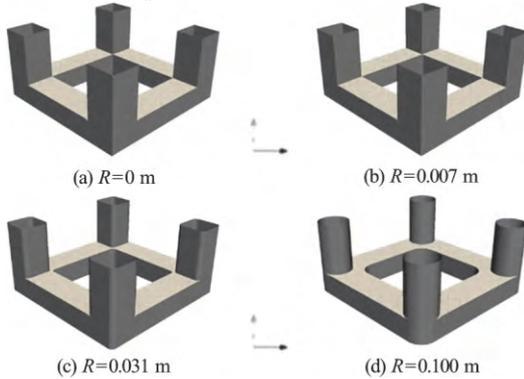


图2 计算模型

Fig.2 Computational models

### 2.2 计算工况

本文半潜式平台运动自由度被限制为0,即平台固定。考察了四种立柱倒角半径对应的半潜式平台在 $0^\circ$ 来流角,四种来流速度工况下的绕流特性。四立柱布置形式如图3所示,图中定义上游立柱为立柱1和立柱2,下游立柱为立柱3和立柱4。本文根据实际环境<sup>[13]</sup>,选取四种典型来流速度 $U=0.5\text{ m/s}$ 、 $0.75\text{ m/s}$ 、 $1.00\text{ m/s}$ 和 $1.25\text{ m/s}$ 。模型尺寸下的流速与实际流速具有如下对应关系

$$U_m = U / \sqrt{\lambda} \tag{10}$$

式中, $\lambda$ 为缩尺比,对应本文取 $1/70$ 。因此本文中对模型尺寸下的来流速度 $U_m=0.0598\text{ m/s}$ 、 $0.0896\text{ m/s}$ 、 $0.1195\text{ m/s}$ 、 $0.1494\text{ m/s}$ 。

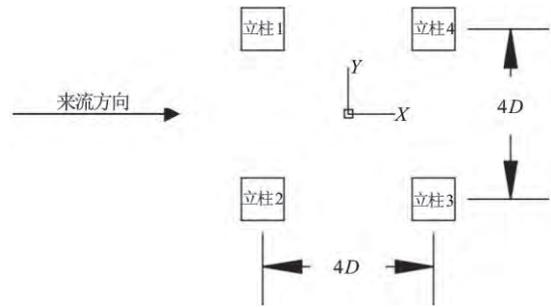


图3 立柱布置形式

Fig.3 The layout of columns

### 2.3 网格划分

本文采用OpenFOAM网格划分工具blockMesh和snappyHexMesh进行网格划分,首先利用blockMesh设置计算域大小并生成结构化六面体背景网格。计算域以平台顶部中心为坐标原点,计算域范围为: $-10D \leq X \leq 20D$ ,  $-10D \leq Y \leq 10D$ ,  $-9D \leq Z \leq 0$ ,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。最终四种立柱倒角半径模型网格数量均在270万左右,计算域设置及整体网格划分如图4所示。图5展示了计算网格与物体表面及附近局部网格情况。

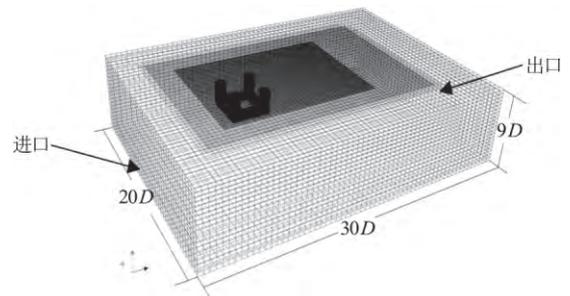


图4 计算域设置

Fig.4 Computation domain

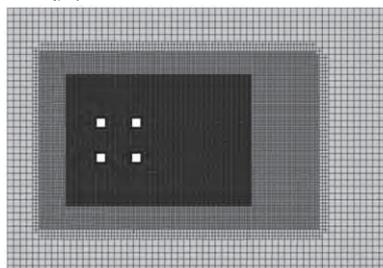
计算域的边界条件设置为:上游入口采用均匀来流速度入口,下游出口采用压力积分为零,顶部采用对称边界条件,其余边界均采用固壁边界条件,平台模型模型表面边界采用无滑移固壁边界。湍流黏度 $\nu_t$ 的近壁面函数采用nutUSpaldingWallFunction,这个壁函数是基于Spalding<sup>[14]</sup>提出的一个拟合的 $y^+$ 与 $u^+$ 的关系式,本文设定 $y^+$ 在2.6左右。

## 3 结果分析

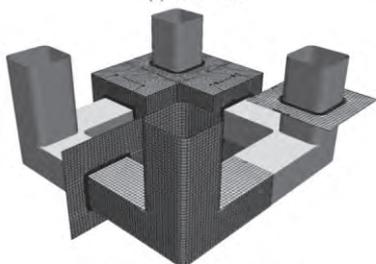
### 3.1 流体力系数

利用OpenFOAM函数库中的Force函数工具进

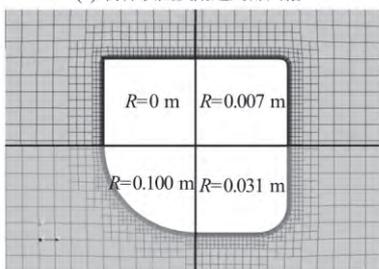
行后处理计算, 可以得到各工况下四立柱的受力时域变化数据, 之后通过无量纲化处理得到流体系数相关信息。流体系数包括拖曳力系数与升力系数, 其表达式为



(a) 计算网格



(b) 物体表面及附近局部网格



(c) 四种立柱倒角半径近壁面网格

图5 网格划分

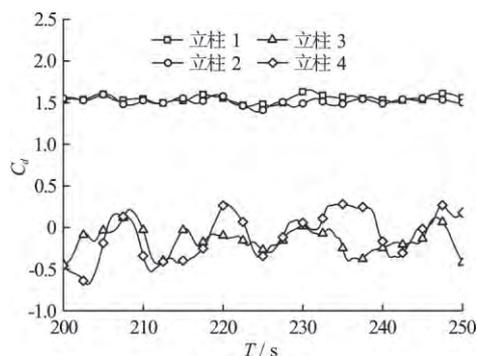
Fig.5 Global and local mesh

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

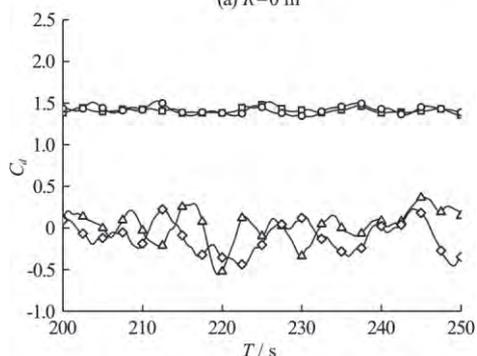
式中:  $F_x$ 和 $F_y$ 分别为顺流向与横流向的流体力。

图6给出了四种立柱倒角半径的半潜式平台在来流速度0.1195 m/s工况下的四立柱拖曳力系数时历曲线。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立柱, 还表现在下游立柱拖曳力系数呈现更强的波动性。从图中还可以看出, 上游立柱受力很小也会引起下游立柱产生很大的不同。随着立柱倒角半径的增大, 由于上游立柱拖曳力系数显著降低, 下游立柱与上游立柱拖曳力系数的差异逐渐减小。

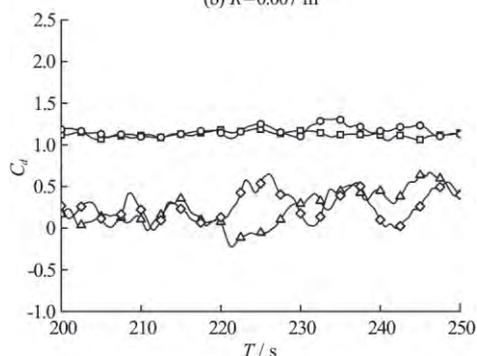
图7展示了来流速度0.0896 m/s工况下, 四种立柱倒角半径的上、下游立柱1和立柱4的升阻力系数



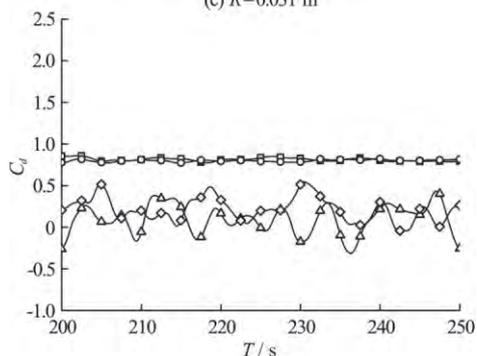
(a)  $R=0$  m



(b)  $R=0.007$  m



(c)  $R=0.031$  m



(d)  $R=0.100$  m

图6 四种立柱倒角半径半潜式平台四立柱拖曳力系数时历曲线

Fig.6 Time histories of drag coefficients of four columns with different column corner radiuses

对比情况。观察图6(a)和图6(b)可以发现, 立柱倒角半径对上游立柱拖曳力系数的影响十分规律, 随着立柱倒角半径的增大, 拖曳力系数呈现下降的趋势; 而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。当立柱倒角半径为

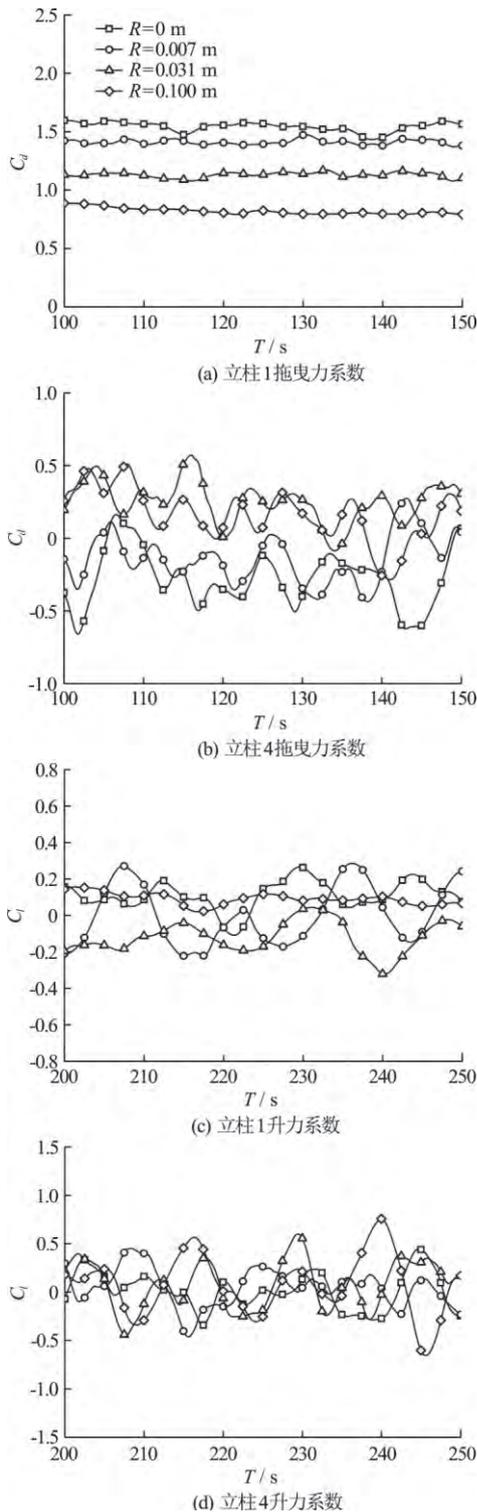


图7 四种立柱倒角半径上、下游立柱流体力系数时历曲线  
Fig.7 Time histories of fluid force coefficients of upstream and downstream columns with different column corner radiuses

0 m和0.007 m时, 下游立柱拖曳力系数均值较低甚至为负, 上下游立柱可能出现“相吸”现象; 而当立柱倒角半径为0.031 m和0.100 m时, 拖曳力系数均值较高且为正。然而通过观察图6(c)和图6(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, 且受对侧立柱影响, 升力系数时域曲线并不关于0对称。

图8分别展示了四种立柱倒角半径半潜式平台的上、下游立柱(立柱1, 立柱4)以及平台整体拖曳力系数平均值随来流速度变化曲线。由图8(a)可见, 上游立柱拖曳力系数均值随着立柱倒角半径的增大而下降; 而从图8(b)中可以观察到, 下游立柱拖曳力系数平均值随着立柱倒角半径的增大而增大, 且当立柱倒角半径较小时, 拖曳力系数平均值可能为负。当立柱倒角半径进一步增大时, 拖曳力系数平均值反而下降。由图8(c)可见, 整体平台拖

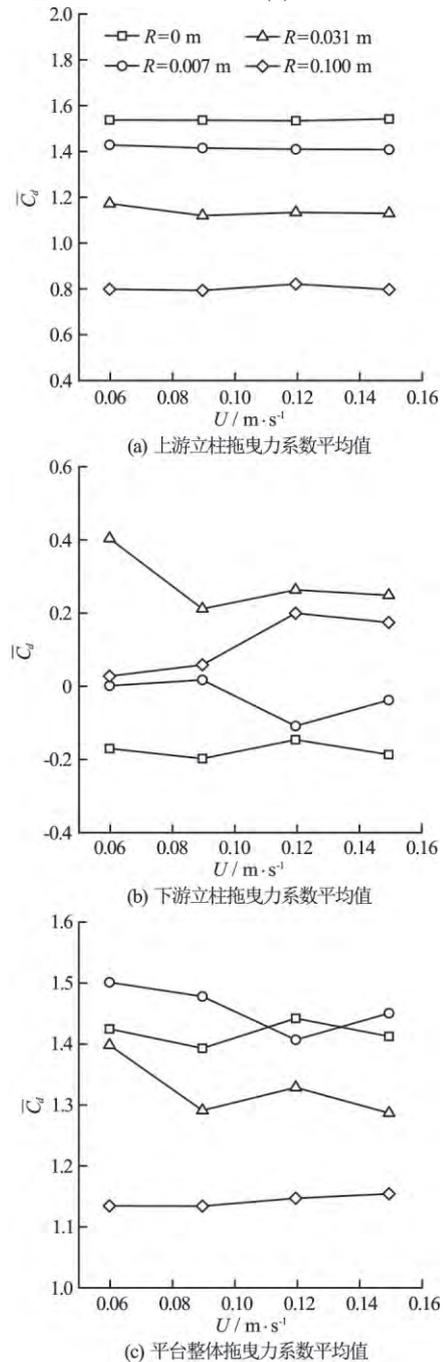


图8 拖曳力系数平均值随来流速度变化曲线  
Fig.8 Mean drag force coefficients with different velocities

曳力系数平均值, 随来流速度变化曲线显示出, 立柱倒角半径较大的半潜式平台的拖曳力系数平均值整体偏低, 其中立柱倒角半径 $R=0.100$  m对应的圆柱形式的平台拖曳力系数平均值最小。

### 3.2 近尾流场速度分布

图9和图10分别展示了四种立柱倒角半径的半潜式平台在来流速度 $0.0896$  m/s工况下的上、下游立柱近尾流场在 $X/D=1.0$ 、 $1.5$ 和 $2.0$ 三处位置的平均流向速度曲线, 其中 $X$ 为距上、下游立柱中心的距离。由图中可知, 受上游立柱尾流场影响, 下游立柱尾部回流区长度明显低于上游立柱。并且, 立柱倒角半径的变化会影响立柱尾部回流区宽度。随着立柱倒角半径的增大, 分离点位置的变化使得上、下游立柱外侧回流区逐渐向内偏移, 上游立柱尾部

流场最大平均流向速度呈现降低的趋势。此外通过观察可以发现, 立柱倒角半径较大时的回流区宽度相对较小, 且尾部流场最小平均速度相对大于立柱倒角半径较小时的情况。

### 3.3 涡量场分布

图11给出了来流速度 $0.1195$  m/s工况,  $Z/L=-0.5$ 平面内四种立柱倒角半径的半潜式平台绕流尾流场涡量图像以及对应的立柱1的局部涡量放大图像。观察整体尾部流场图像可以发现, 当立柱倒角半径 $R=0$ 和 $0.007$  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, 因此自身的涡涡并不明显。当立柱倒角半径 $R=0.031$ 和 $0.100$  m时, 通过观察上、下游立柱的涡量图像可以发现, 随着立柱倒角半径的增大, 上游立柱对下游立柱泻

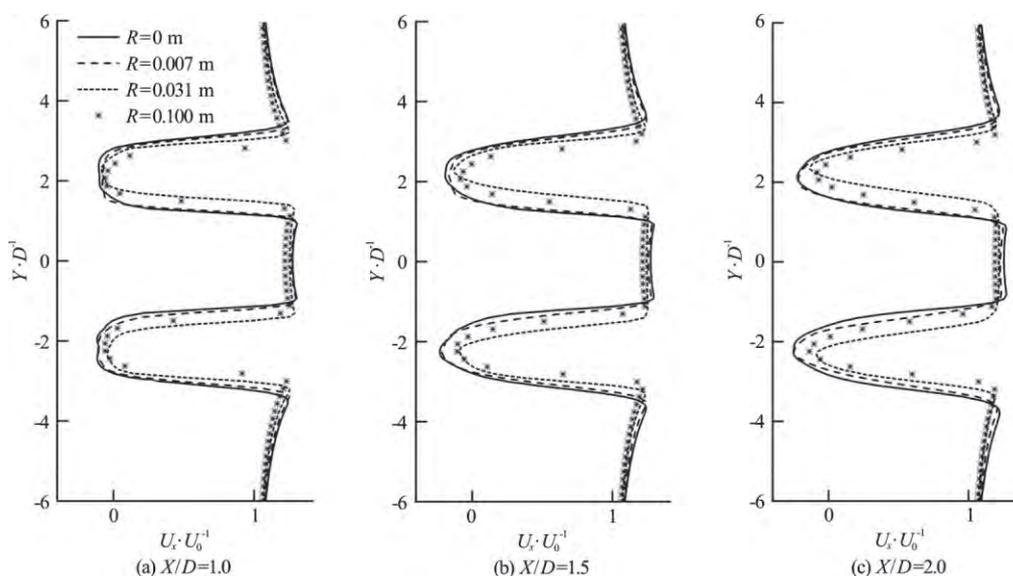


图9 上游立柱近尾流场流向速度分布

Fig.9 Mean stream-wise velocities at three locations in the near wake of upstream columns

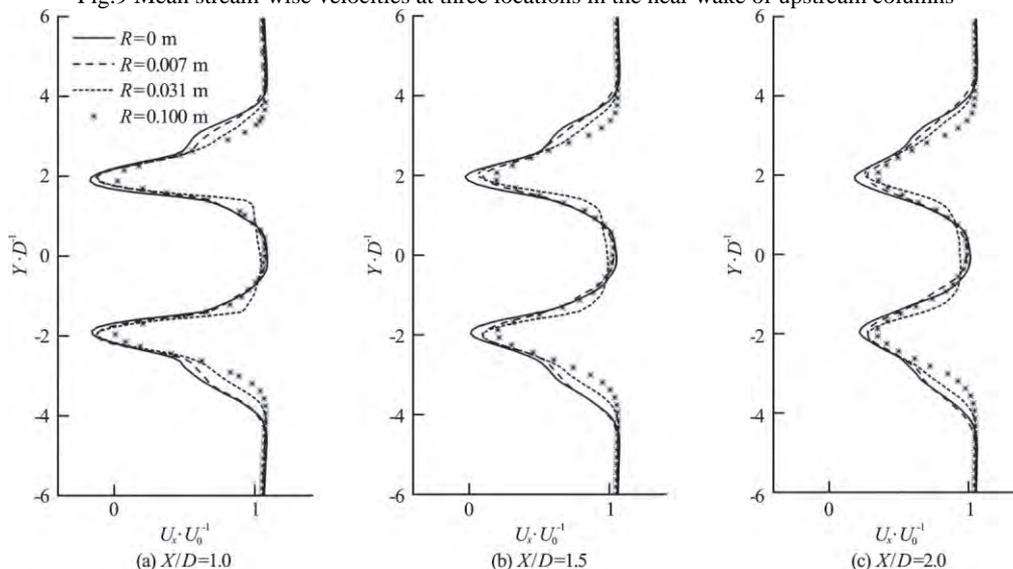
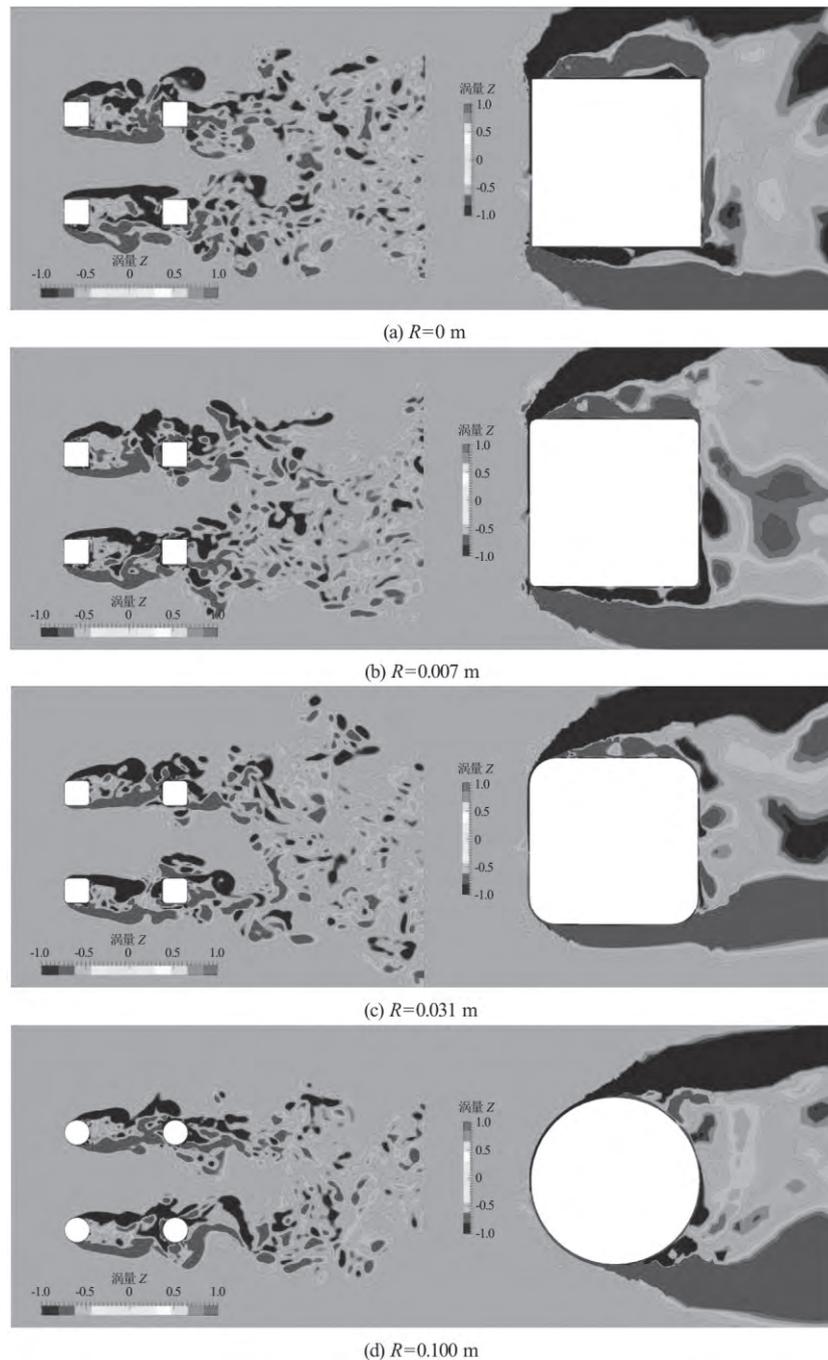


图10 下游立柱近尾流场流向速度分布

Fig.10 Mean stream-wise velocities at three locations in the near wake of downstream columns

图 11  $Z/L=-0.5$  平面尾部流场涡量图Fig.11 Z-vorticity contours on the  $Z/L=-0.5$  plane

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,下游立柱的拖曳力系数逐渐上升,升力系数波动幅值增大。

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,影响了回流区宽度,并且受对侧立柱的影响,立柱两侧分离点不对称,两侧的涡也并不对称,靠近对侧立柱一侧的涡更加贴近壁面,且在倒角半径 $R=$

0.031 m时尤为明显。这种现象解释了立柱的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零附近。

图12给出了来流速度0.1195 m/s工况,  $Z/L=-0.85$  平面内四种立柱倒角半径的半潜式平台绕流尾流场涡量图像。由于平面接近底部浮筒,因此受浮筒的影响,流场特征与立柱中部截面有所不同。从图中可以发现,在两侧立柱中间会产生对称的涡,且立柱倒角半径较大时的涡比立柱倒角半径

较小时更加明显。

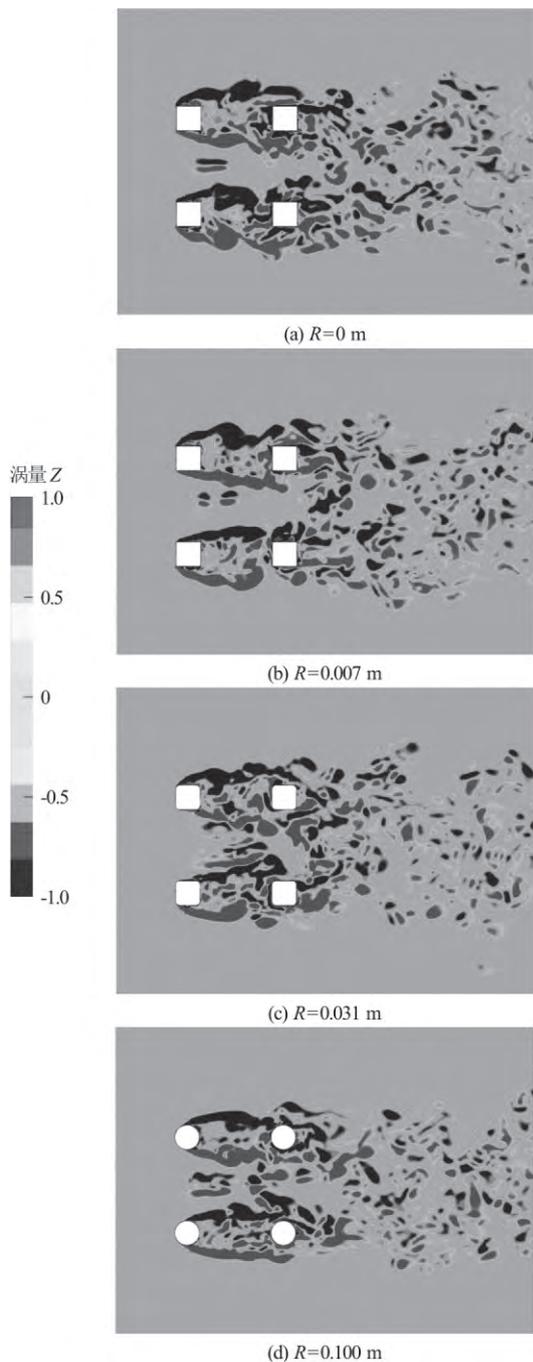


图 12  $Z/L=-0.85$  平面尾部流场涡量图

Fig.12 Z-vorticity contours on the  $Z/L=-0.85$  plane

## 4 结论

本文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) 两方程湍流模型的延迟分离涡模拟 (delayed detached-eddy simulation, DDES) 方法, 对四种不同立柱倒角半径的半潜式平台在 0 度来流

角度时的绕流特性进行了数值模拟。并得到如下主要结论:

(1) 在相同来流速度工况时, 立柱倒角半径的变化会影响立柱以及平台整体的流体力系数。上游立柱拖曳力系数平均值随着立柱倒角半径的增大呈单调降低, 而下游立柱拖曳力系数平均值随着立柱倒角半径的增大而增大, 当立柱倒角半径进一步增大时, 拖曳力系数平均值反而下降。且当立柱倒角半径较小时, 拖曳力系数平均值可能为负; 当立柱倒角半径较大, 下游立柱拖曳力系数均值为正。而对于整体平台而言, 立柱倒角半径较大的半潜式平台拖曳力系数平均值整体偏低, 其中立柱倒角半径  $R=0.100$  m 对应的圆柱形式的平台拖曳力系数平均值最小。

(2) 四种立柱倒角半径的半潜式平台上、下游立柱近尾流场在三处位置的平均流向速度曲线表面, 立柱倒角半径的变化会影响立柱尾部回流区宽度。随着立柱倒角半径的增大, 分离点位置逐渐向后偏移, 使得半潜式平台上、下游立柱外侧回流区逐渐向内偏移, 上游立柱尾部流场最大平均流向速度降低。立柱倒角半径较大时的回流区宽度相对较小, 且尾部流场最小平均流向速度相对大于立柱倒角半径较小时的情况。

(3) 四种立柱倒角半径的半潜式平台瞬时流场涡量场分布表明, 立柱倒角半径的变化会影响立柱尾部回流区长度, 从而影响上游立柱对下游立柱泻涡的干扰作用。当立柱倒角半径较小时, 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, 自身泻涡并不明显。而随着立柱倒角半径增大, 上游立柱对下游立柱泻涡的影响呈现降低的趋势。

本文研究工作目的一方面在于讨论立柱倒角半径对半潜式平台绕流特性影响, 另一方面由于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, 因此本文可为今后研究立柱倒角半径对半潜式平台涡激运动的影响提供参考。

## 致谢

本文工作也得到了上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300)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] HE G S, LI N, WANG J J. Drag reduction of square

- cylinders with cut-corners at the front edges[J]. *Experiments in Fluids*, 2014, 55(6): 1-11.
- [2] GONCALVES R T, HIRABAYASHI S, SUZUKI H. Experimental study on flow around an array of four cylinders with different section geometries[C]. ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Trondheim, Norway, 2017.
- [3] ZHAO W, WAN D C. Detached-eddy simulation of flow past tandem cylinders[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, 37(12): 1272-1281.
- [4] HAN Z, ZHOU D, TU J, 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.
- [5] ISLAM S U, ZHOU C Y, AHMAD F. Numerical simulations of cross-flow around four square cylinders in an in-line rectangular configuration[J]. *International Journal of Mathematical Physical & Engineering Science*, 2009, 3(9): 780-789.
- [6] 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.
- LIU Wei-min, GU Jia-yang, LU Yan-xiang. Study on the characteristics of flow around a four square cylinder array[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2012, 26(6): 534-540.
- [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[J]. *Advances in DNS/LES*, 1997(1): 4-8.
- [8] SPALART P R, DECK S, SHUR M, et al. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities[J]. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 2006, 20: 181-195.
- [9] ZHAO W W, WAN D C, SUN R. Detached-eddy simulation of flows over a circular cylinder at high Reynolds number[C]. *The Proceedings of The Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference*, Cupertino, California, USA, 2016.
- [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, 2007.
- [12] CHEN C R, CHEN H C. Simulation of vortex-induced motions of a deep draft semi-submersible in current[J]. *Ocean Engineering*, 2016(118): 107-116.
- [13] SHEIKH R, BROWN A. Extreme vertical deepwater current profiles in the south Chinas sea, offshore Borneo[C]. *Proceedings of the 29th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Shanghai, China, 2010.
- [14] SPALDING D B. A single formula for the "Law of the Wall"[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1961, 28(3): 455.