

文章编号:1005-9865(2022)06-0011-10

分隔板对 Spar 平台涡激运动响应影响的分析研究

郭涵慧, 赵伟文, 万德成

(上海交通大学 船海计算水动力学研究中心(CMHL) 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要:当流体流经单柱式结构物时,由于流体黏性和逆压梯度的存在,会产生非定常的升力、阻力和涡旋脱落,即涡激运动现象,对一座 Truss Spar 平台的硬舱部分附加长度为 $1.0D$ (D 为硬舱直径) 的刚性来流侧分隔板,基于开源平台 OpenFOAM,采用基于剪切应力运输的延迟分离涡模拟(SST-DDES)方法,在不可压缩黏性流场中,对其进行三维数值模拟,以研究在不同流速下,来流侧分隔板对 Spar 平台涡激运动特性和运动响应的影响。结果表明:在较高流速下,横荡周期减小 22.21%,横荡最大幅值减小 81.3%。说明在较高流速下,附加分隔板有助于减少 Spar 平台的运动响应幅值。

关键词: Spar 平台;延迟分离涡模拟;涡激运动;分隔板

中图分类号: P751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16483/j.issn.1005-9865.2022.06.002

Numerical simulation of vertex induced motion for Spar platform with frontal splitter plate

GUO Hanhui, ZHAO Weiwen, WAN Decheng

(Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: When fluid flows through a single column structure, unsteady lift forces, drag and vortex shedding will occur due to the existence of fluid viscosity and adverse pressure gradient. In this paper, based on the open source platform of OpenFOAM, the delayed detached eddy simulation (DDES) based on shear stress transport, namely SST-DDES, is adopted to carry out three-dimensional numerical simulation on a Truss Spar platform. A rigid partition plate with a length of $1.0D$ (D is the diameter of the hard cabin) is attached to the hard cabin of the platform, so as to study the influence of the frontal splitter plate on the vortex-induced motion characteristics at different flowing velocities. The results show the period of sway is reduced by 22.21% and the maximum amplitude of sway is reduced by 81.3% at higher velocity. Therefore, the additional partition plate is helpful to reduce the amplitude of sway motion response of Spar platform at higher velocity.

Keywords: Spar platform; SST-DDES; VIM; splitter plate

作为深海浮式平台中的一类, Spar 平台经历多年发展,其主体结构形状已延伸出许多新形式,在人类开发深海的过程中起到了相当重要的作用,其中单柱式包括经典式 Classic Spar 平台和 Truss Spar 平台,多柱式则主要为分筒集束式的 Cell Spar 平台^[1],在一定的来流条件下,这几类平台都有发生涡激运动的可能,而涡激运动幅值可能会由于种种原因高于设计值,并因此对平台结构产生一定的损伤,相当不利于平台作业的安全性。

收稿日期:2021-11-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52131102, 51909160, 51879159);国家重点研发计划项目(2019YFB1704200)

作者简介:郭涵慧(1997—),女,硕士研究生,主要从事浮式平台,涡激运动,系泊系统等方面的工作。E-mail: 247285114@qq.com

通信作者:万德成(1967—),男,教授,博士生导师,教育部长江学者特聘教授,主要从事船舶与海洋工程数值水池、计算流体力学软件集成与开发等方面的教学和研究工作。E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

因此,涡激运动抑制装置的研究十分必要。而更有利于控制成本的被动控制法中,平台主体结构上附加分隔板则是较为普遍的形式之一,并且有研究证明,来流侧分隔板长度对涡激运动的抑制效果具有深刻的影响^[2]。在目前已进行的研究中,附加分隔板的位置包括结构表面来流侧和尾流侧两种,分隔板的类型包括分离式分隔板^[3]、柔性分隔板^[4]和刚性分隔板三种主流形式。

Gao 等^[5]对 $Re=26\ 600$ 情况下,附加来流侧分隔板($L/D=0\sim 2.0$)的圆柱进行了风洞试验,除了粒子图像测速外,进一步在圆柱中间截面周向布置了 35 个测速点进行截面压力测量以获得圆柱表面的压力分布。试验数据显示,加装分隔板后,当板长为 1.0 倍圆柱直径时,升阻力系数达到最小,其中,脉动升力系数比未附加分隔板的情况降低 63.6%,时均阻力系数则降低了 36.0%。但在分隔板长度更短或者更长的情况下,升阻力系数的降低并不显著,因此,适中的分隔板长度($L/D=1.0$)在工程应用中,可作为流动分离控制的最佳选择。Hwang 和 Yang^[6]沿圆柱体的水平直径放置分别位于来流侧和尾流侧的两个分隔板,研究发现来流侧和尾流侧分隔板的组合作用对抑制阻力有显著的作用。尾流侧分隔板可以破坏圆柱尾流侧的涡旋脱落,而来流侧分隔板则可以对来流施加摩擦力作用,两者结合,使来流侧压力较小,而尾流侧压力增大,通过减小圆柱两侧压差的方式来降低阻力。Chutkey 等^[7]的风洞试验对雷诺数 $Re=51\ 000$ 情况下的圆柱加装来流侧分隔板,通过粒子图像测速(PIV)获得相关流场情况。结果表明,来流侧分隔板改变了圆柱来流侧的流动条件,同时,由于分隔板的存在,圆柱下游的尾流特性也产生了实质性变化。Liang 等^[4]在研究中提出通过不同长度的柔性分隔板来控制涡激振动(VIV)。其中,圆柱体为刚性中空有机玻璃管,而柔性分隔板则由薄而轻的石蕊试纸制成。研究发现,对于分隔板 $L/D \leq 1.1$ 的情况,涡激振动可以得到很好的控制,然而随着分隔板长度的进一步增加,会发生严重的驰振,响应振幅甚至高于裸圆柱。

目前关于附加来流侧分隔板对 Spar 平台涡激运动特性影响的研究分析较少,因此,基于 OpenFOAM 开源平台,采用基于剪切应力输运模型的延迟分离涡模拟(SST-DDES)方法,对一座 Truss Spar 平台的硬舱部分附加长度为 $1.0D$ (D 为硬舱直径)的刚性分隔板,在不可压缩黏性流场中,对其进行三维数值模拟,研究在一定的流速区间内,是否附加来流侧分隔板将对 Spar 平台涡激运动响应特性造成的影响。

1 数值方法

1.1 SST-DDES 模型

作为一种两方程湍流模型,剪切输运模型,即 SST 模型由 Menter^[8]和 Menter 等^[9]提出将 $k-\varepsilon$ 与 $k-\omega$ 方程相加,且标准 $k-\omega$ 方程和标准 $k-\varepsilon$ 方程均乘以一个混合函数 F_1 。

混合函数 F_1 定义为:

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (1)$$

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

其中, k 为湍动能, ν 为分子黏度, ω 为特定湍流耗散率, y 为壁面距离。

$$CD_{k\omega}^* = \max(CD_{k\omega}, 10^{-10}), CD_{k\omega} = 2\alpha_{\omega 2} \cdot \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (3)$$

在靠近立柱壁面的区域,需考虑立柱表面边界条件的影响,因此在近壁区等价于 $k-\omega$ 模型,因此 $k-\omega$ 模型能更好地处理立柱壁面边界条件,此时 F_1 等于 1;在远离壁面的高雷诺数区域,需考虑湍流剪切应力的输运过程,此刻 F_1 等于 0,转换为标准 $k-\varepsilon$ 模型。

湍流耗散率 ω 的输运方程为:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \cdot \omega) = \gamma S^2 - \beta^* \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \alpha_{\omega} \nu_1) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) CD_{k\omega} \quad (4)$$

其中, ν_1 为湍流黏度, \mathbf{u} 为速度场。

Gritskevich 等^[10]采用施加延迟函数的方法实现了基于剪切应力输运模型(SST)的延迟分离涡模拟(DDES)方法,将 k 方程中的耗散项进行修正,即将 RANS 方法中的长度尺度 l_{RANS} 用混合长度尺度 l_{DDES} 代替。

l_{RANS} 和 l_{DDES} 定义为:

$$l_{\text{RANS}} = \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega}, l_{\text{DDES}} = l_{\text{RANS}} - f_d \cdot \max(0, l_{\text{RANS}} - C_{\text{DES}} \Delta) \quad (5)$$

式中: C_{DES} 为 DES 常数, Δ 为笛卡尔网格下的亚格子长度尺度。

经验混合函数 f_d 为:

$$f_d = 1 - \tanh[(C_{d1} r_d)^{C_{d2}}] \quad (6)$$

其中, $r_d = \frac{\nu_t + \nu}{\kappa^2 d_w^2 \sqrt{0.5(S + \Omega^2)}}$, Ω 为涡量张量, $\kappa = 0.41$ 为 von Karman 常数, d_w 为距壁面的距离。

由此,湍动能 k 的方程为:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(\mu_t k)}{\partial x_j} = \tilde{G} - \frac{k^{3/2}}{l_{\text{DES}}} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \alpha_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

其中, $\tilde{G} = \min(G, c_1 \beta^* k \omega)$, $G = \nu_t S^2$, S 为应变率的不变测度,且:

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial u_j}{\partial u_i} \right) \quad (8)$$

式中: β^* 、 γ 、 α_ω 、 $\alpha_{\omega 2}$ 、 C_{d1} 、 C_{d2} 均为常数。

1.2 动网格

要求解 Spar 平台的涡激运动,需要利用 OpenFOAM 中的动态变形网格技术以处理 Spar 平台涡激运动时,网格随之产生的较大变形。这种方法不仅可以维持网格之间原有的拓扑关系,同时网格单元可以进行拉伸变形^[11]。赵伟文和万德成^[12]采用了 OpenFOAM 的自带求解器 pimpleDyMFoam,并利用该动态变形网格方式,对于附加螺旋侧板的 Truss Spar 平台标准模型进行了数值模拟,并将其与试验成果加以比较,从而证实了该方案在数值模拟 Spar 平台的涡激运动时具备了相当的可行性。

1.3 离散格式

本文的离散格式采用有限体积法,对时间项的离散通过隐式欧拉格式,压力与速度的耦合计算求解则采用 PIMPLE 方法(PISO 和 SIMPLE 结合)。PISO 方法的求解步骤为:先预估一步,再校正两步。而本文所使用的 PIMPLE 方法,相对于原有 PISO 方法,差别在于对同一时间步内进行数次循环校正,取其最后一个校正结果,为下一时间步初始值,再进行上述迭代。

2 数值模型与计算工况

2.1 计算模型

作为一种单柱式结构物,Spar 平台主体部分可以划分为硬舱、中间段和软舱三部分,选取 Finnigan 和 Roddier^[13]进行拖曳试验所用的 Truss Spar 平台试验模型,该模型试验装置使用线性对称系泊系统,模型的主体部分还配备有螺旋侧板、管道和链条等。这里只取该试验模型主体部分,不考虑除主体外其他附属物的影响,将一定长度的刚性分隔板加装在主体单柱式结构物的来流侧,放开纵荡及横荡两个自由度模拟 Spar 平台涡激运动时的主导运动,建立数学模型,以考察不同折合速度下,刚性分隔板对 Spar 平台涡激运动的影响,对其流场和涡激运动响应特性进行分析。该 Spar 平台的主要参数如表 1 所示。

表 1 Spar 平台计算模型主要参数设置
Tab. 1 Main dimensions of the semi-submersible platform

参数	数值	参数	数值
弹簧刚度 $K/(N \cdot m^{-1})$	211	质量 m/kg	7 088
直径 D/m	1.75	吃水 H/m	2.95
分隔板长度 l/m	1.75	分隔板厚度 d/m	0.105

对于分隔板参数的选取,一方面,由于刚性分隔板固定连接在平台主体上,分隔板的厚度对整个系统的影响不大,选取分隔板厚度为 0.06 倍直径,即 0.105 m;另一方面,由于 Gao 等^[5]在固定绕流研究中发现,分

隔板长度为一倍圆柱直径时,对圆柱阻力的减弱效果最好,以此为参考,本文研究涡激运动时也将分隔板长度选取一倍圆柱直径,即 1.75 m。该附加来流侧分隔板的 Spar 平台计算模型如图 1 所示。

在绘制计算网格时,采用单元分割方式生成非结构化网格。首先通过 OpenFOAM 的 blockMesh 生成初始的纯六面体背景网格,然后在该网格的基础上进行八分法分裂,加密流场中的关键区域以捕获流动剧烈变化的细微流场结构,包括 Spar 平台所在高度区间,来流在分隔板上产生流动分离区域和尾流部分回流长度区域。直角坐标系下的计算域网格划分示意如图 2 所示。

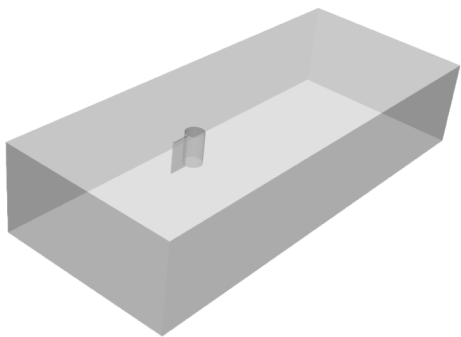


图 1 附加来流侧分隔板的 Spar 平台计算模型

Fig. 1 Computational model of spar platform with splitter plate

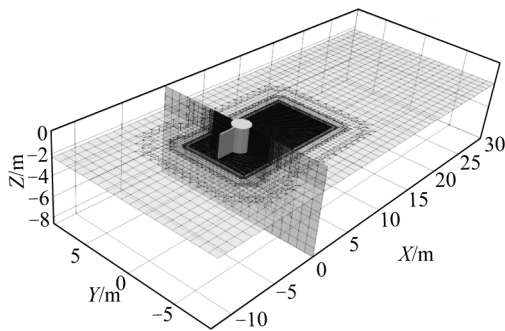


图 2 计算域网格划分示意

Fig. 2 Computational domain

计算域网格大小为 $27D \times 10D \times 3H$,对于局部网格绘制方面,在 Spar 平台表面采用 5 级加密。同时,为了更准确捕捉分隔板的形状特征,将分隔板采用 6 级加密。为保证壁面 $y^+ < 1$,在网格基本绘制完成后,另外对靠近圆柱及分隔板的第一层网格更进一步划分,使其高度为 $0.0004D$,进一步划分虽然在一定程度上加大了计算量,但是有利于对平台表面流动情况的精确捕捉。图 3 为 $t=5\text{ s}$ 时 $Z=-0.5H$ 截面处局部网格,此时部分网格已产生一定的变形。

计算域的边界条件设定为:在如图 X 负方向左边界,为上游来流入口,设置其边界条件为均匀来流,且法向压力梯度为零;在 X 正方向右边界,为下游的流动出口处,设置其速度边界条件为法向速度梯度为零,压力边界条件则取压力为零。计算域的上下边界 ($Z=0, Z=-3H$ 处),设置为对称边界条件,前后边界 ($Y=5D, Y=-5D$ 处)和 Spar 平台主体表面,设置为自由滑移边界条件,且 Spar 平台主体表面设定其法向压力梯度为零。其中,未附加分隔板的 Spar 平台网格数量约为 200 万,小于附加来流侧分隔板情况,是由于立柱表面和来流侧分隔板连接处需要加密,导致了网格数量稍有差异,但不同工况下,网格数量均控制在一个量级,分隔板和立柱处的加密等级也保持一致。附加分隔板的 Spar 平台网格绘制参数设置如表 2 所示。

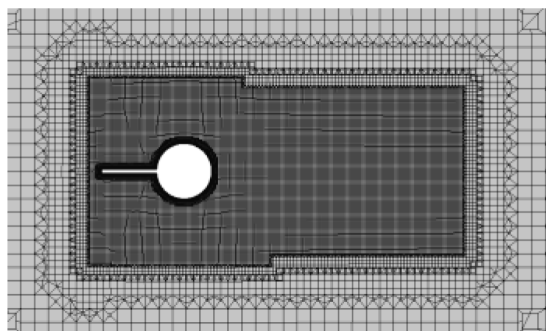


图 3 $Z=-0.5H$ 截面处局部网格分布 ($t=5\text{ s}$)

Fig. 3 View of the global mesh of section at $Z=-0.5H$ ($t=5\text{ s}$)

表 2 计算域网格参数设置
Tab. 2 Computational domain

计算域设置	数值	计算域设置	数值
X 方向	$27D$	Y 方向	$10D$
Z 方向	$3H$	网格数量	2 720 000
圆柱区域	5 层加密	分隔板区域	6 层加密

2.2 自由衰减数值模拟

由于 Spar 平台发生涡激运动时的主导运动为横向和纵向运动,出于简化问题的考虑,在本文的数值模

拟中只放开这两个自由度^[14]。为得到本次模拟中不同工况 Spar 平台的横向运动固有周期 T_n 以计算折合速度 U_r ,开展了平台的线位移自由衰减试验数值模拟,即给平台一个横荡方向初始位移或者初始速度,本文设置为横向运动方向的初始速度,从零时刻开始,在没有来流的情况下做自由振荡运动^[15],计算得到的振荡周期作为 Spar 平台的横向运动固有周期 T_n 。图 4 展示了平台的横荡自由衰减试验数值模拟得到的横荡时历曲线,并通过傅里叶变换得到 Spar 平台自由衰减横荡频谱图像,附加分隔板的 Spar 平台对应横荡自由衰减的频率为 0.041 69 Hz,未附加分隔板的 Spar 平台对应横荡自由衰减的频率为 0.064 43 Hz。Oakley 和 Constantinides^[16] 对该 Spar 平台进行了计算流体力学(CFD)数值模拟,该平台折合速度 $U_r = 6$ 时,对应来流速度为 0.64 m/s,横荡固有频率为 0.060 9 Hz,与本文中未附加分隔板情况下 Spar 平台横荡自由衰减频率的误差为 4.6%,证明了本次数值模拟结果的可靠性。

2.3 计算工况

为计算不同折合速度下,是否附加来流侧分隔板对 Spar 平台涡激运动的影响,设置 5 种不同来流速度,来流角度为 0° ,对附加分隔板及未附加分隔板的 Spar 平台进行数值模拟。计算工况共 8 种,具体参数如表 3 所示。

表 3 CFD 模拟计算工况
Tab. 3 CFD simulation case conditions

雷诺数 Re	来流速度/($m \cdot s^{-1}$)	折合速度 U_r	
		无分隔板	附加分隔板
6.4×10^4	0.364 0	3.0	5
7.6×10^5	0.437 7	3.8	6
1.0×10^6	0.583 7	5.2	8
1.27×10^6	0.729 6	6.5	10

3 结果分析

3.1 横荡与纵荡响应结果分析

对于 Spar 平台涡激运动中的运动响应,主要考虑了该 Spar 平台硬舱部分的横荡和纵荡运动响应,为便于分析,一般使用标称响应幅值和最大响应幅值进行统计。

$$(A_y/L)_{\text{nominal}} = \sqrt{2} \sigma [Y(t)] / L \quad (9)$$

$$(A_y/L)_{\text{max}} = \frac{Y(t)_{\text{max}} - Y(t)_{\text{min}}}{2L} \quad (10)$$

其中, $Y(t)$ 代表横荡时历位移, $\sigma [Y(t)]$ 代表横荡位移的标准差, $(A_y/L)_{\text{nominal}}$ 为标称响应幅值, $(A_y/L)_{\text{max}}$ 为最大响应幅值。

在本文计算的流速范围内,随着流速的增大,无来流侧分隔板的 Spar 平台纵荡运动周期逐渐减小,而附加来流侧分隔板的 Spar 平台纵荡运动周期先减小后增大。如表 4 所示,可以观察到在图 5(a)中 $U = 0.364 0$ m/s 时,附加分隔板后的 Spar 平台的涡激纵荡运动振幅大于相同流速下未附加分隔板情况的纵荡运动振幅,随着流速的增大,如图 5(d)所示 $U = 0.729 6$ m/s 时,附加分隔板 Spar 平台的纵荡运动幅值小于未附加分隔板情况,说明在流速较高时,附加分隔板有助于减少 Spar 平台的纵荡运动响应幅值。

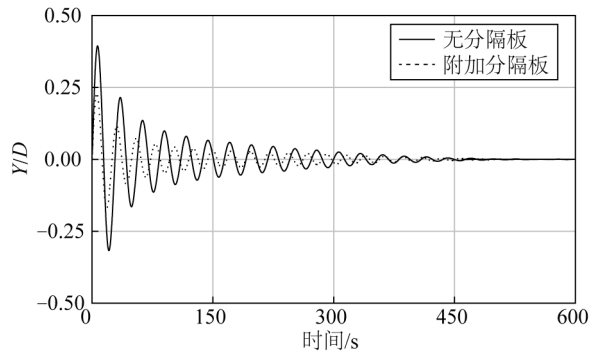


图 4 有无来流侧分隔板的 Spar 平台自由衰减横荡时历曲线
Fig. 4 Time history of free decay test (cross-flow motion)

表 4 有无来流侧分隔板的 Spar 平台涡激运动不同流速下纵荡运动对比
 Tab. 4 VIM surge motion for different flow velocities

来流速度 $U/(m \cdot s^{-1})$	无来流侧分隔板			附加来流侧分隔板		
	纵荡运动周期/s	纵荡最大幅值	纵荡标称幅值	纵荡运动周期/s	纵荡最大幅值	纵荡标称幅值
0.364 0	15.00	0.228 0	0.186 6	14.29	0.259 7	0.224 5
0.437 7	12.50	0.244 5	0.099 3	11.11	0.162 8	0.208 4
0.583 7	12.10	0.355 6	0.185 5	11.12	0.220 3	0.141 2
0.729 6	11.71	0.556 4	0.327 7	15.00	0.065 3	0.033 6

图 5 为不同流速下, Spar 平台涡激运动的纵荡时间历程曲线及傅里叶频谱分析。

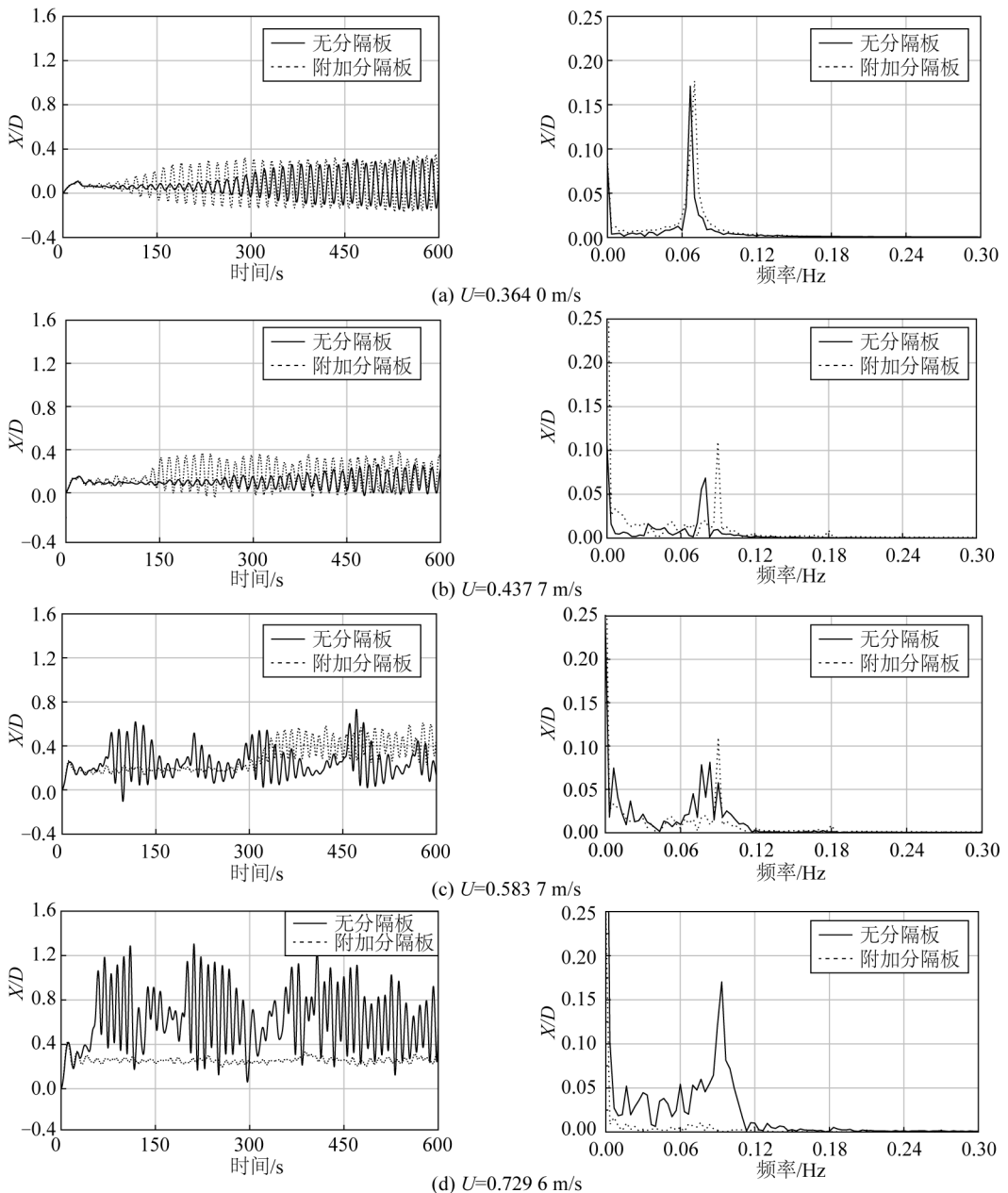


图 5 不同流速下的纵荡运动时间历程曲线及傅里叶频谱分析

Fig. 5 Time history of VIM surge motion and Fourier transform result

由图 5(a)可以看出,在较小流速 $U=0.3640$ m/s 下,未附加来流侧分隔板的 Spar 平台能量的累积比较

缓慢,纵向运动幅值随着时间的增长缓慢增加,直到 $t=350$ s 时才到达稳定,呈现出规律的往复运动,而附加分隔板情况下到达稳定状态耗费的时间更少。随着流速的增大,如图 5(c) 中 $U=0.5837$ m/s 时,短时间内,未附加来流侧分隔板的 Spar 平台就达到较为稳定的状态,纵荡运动的平衡位置在流向上逐渐远离初始位置,且此时可在无来流侧分隔板的情况下观察到明显的流动三维特性,平台纵向运动的不规律性逐渐增强,运动幅值也逐渐降低,反映在频率结果中则表现为出现若干个高阶频率,表明此时平台的纵向运动有多阶振型,运动特性较为复杂。对于附加分隔板的情况下,随着流速的增大,其纵荡运动能量集中的峰值逐渐减小。如图 5(d) 中 $U=0.7296$ m/s 时,附加分隔板 Spar 平台纵荡运动幅值最终小于未附加分隔板情况,且此工况下,其纵荡运动的平衡位置在流向上更靠近初始位置。

在本文计算的流速范围内,对于 Spar 平台的横荡运动响应,未附加分隔板的 Spar 平台其横荡最大幅值和标称幅值随着流速的增大逐渐增大,如图 6(d) 中流速 $U=0.7296$ m/s 时,其横荡运动频率接近横荡固有频率,其能量集中的峰值及横荡运动振幅达到最大,出现了“锁定”现象。

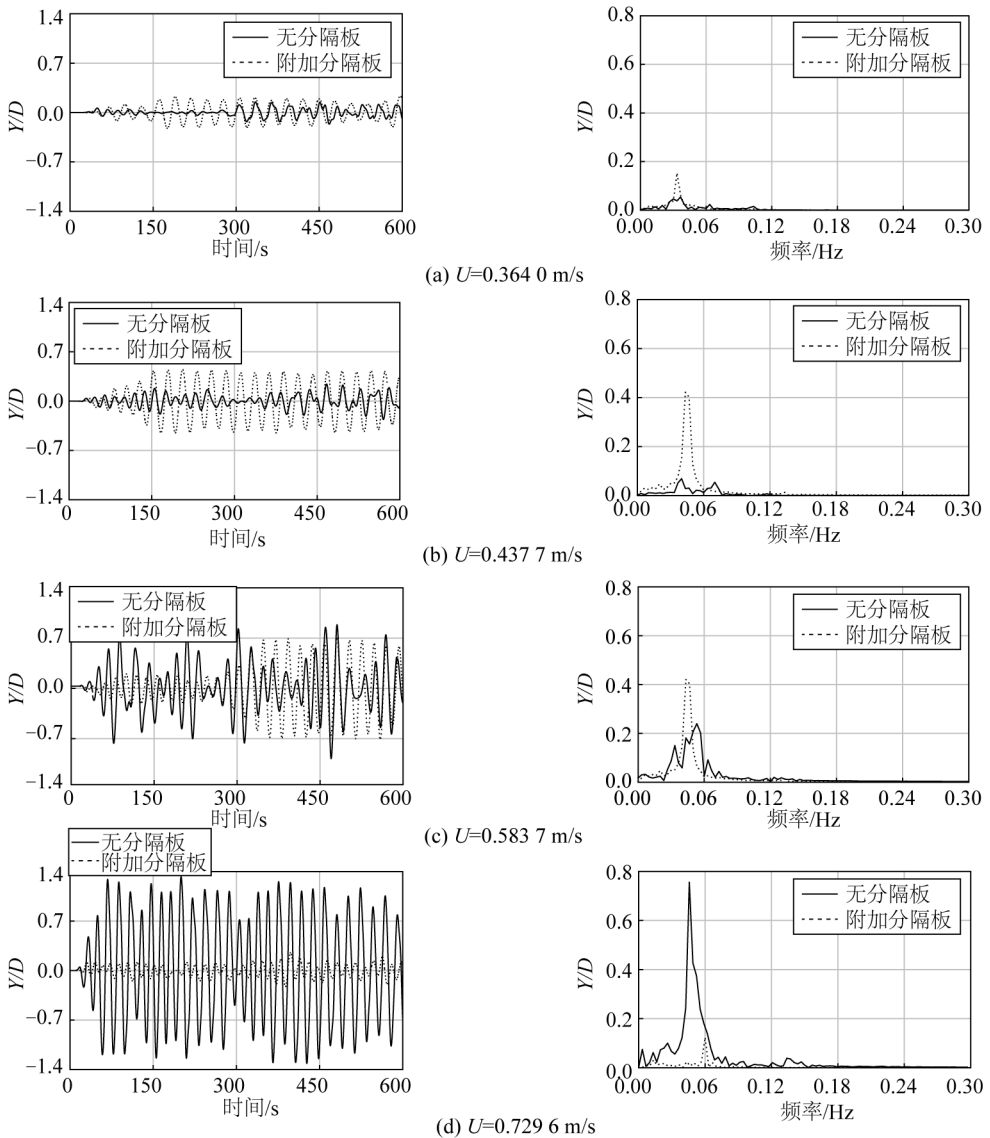


图 6 不同流速下的横荡运动时间历程曲线及傅里叶频谱分析
Fig. 6 Time history of VIM sway motion and Fourier transform result

对于附加来流侧分隔板的 Spar 平台,其最大幅值和标称幅值则随着折合速度的增大,呈现出先增大后减小的趋势,如表 5 所示,并在流速 $U=0.4377\sim 0.5837$ m/s 时,出现“锁定”现象,其横荡运动周期接近其固有频率,达到横荡最大幅值,而当流速继续增大,于图 6(d) 中 $U=0.7296$ m/s 时,显示其能量集中的峰值逐渐减小,横荡运动逐渐远离横荡固有频率,出现涡激运动的“解锁”现象,相对于没有来流侧分隔板作用的

Spar 平台,其横荡周期减小 22.21%,横荡最大幅值减小 81.3%。即在来流侧分隔板的影响下,Spar 平台涡激运动在相对较低雷诺数下实现了与高雷诺状态相似的流动分离。

表 5 有无来流侧分隔板的 Spar 平台涡激运动不同流速下横荡运动对比
Tab. 5 Time history of VIM sway motion for different flow velocities

来流速度 $U/(m \cdot s^{-1})$	无来流侧分隔板			附加来流侧分隔板		
	横荡运动周期/s	横荡最大幅值	横荡标称幅值	横荡运动周期/s	横荡最大幅值	横荡标称幅值
0.364 0	27.28	0.157 3	0.105 4	30.00	0.221 1	0.183 9
0.437 7	26.20	0.251 3	0.132 1	24.98	0.639 1	0.722 6
0.583 7	25.75	0.931 9	0.516 4	23.08	0.722 6	0.639 1
0.729 6	22.43	1.285 5	1.068 8	16.67	0.241 2	0.140 6

3.2 流场情况分析

于上文中,可在流速 $U=0.729 6 \text{ m/s}$ 情况下观察到,是否附加来流侧分隔板对 Spar 平台的横荡和纵荡运动响应影响最为明显。因此选取该流速情况,对是否附加分隔板 Spar 平台的流场情况进行分析。

来流侧分隔板改变了 Spar 平台的来流条件,因此也改变了尾流区涡旋脱落,图 7 为某瞬时该 Spar 平台位于平衡位置附近处的瞬时涡量图。

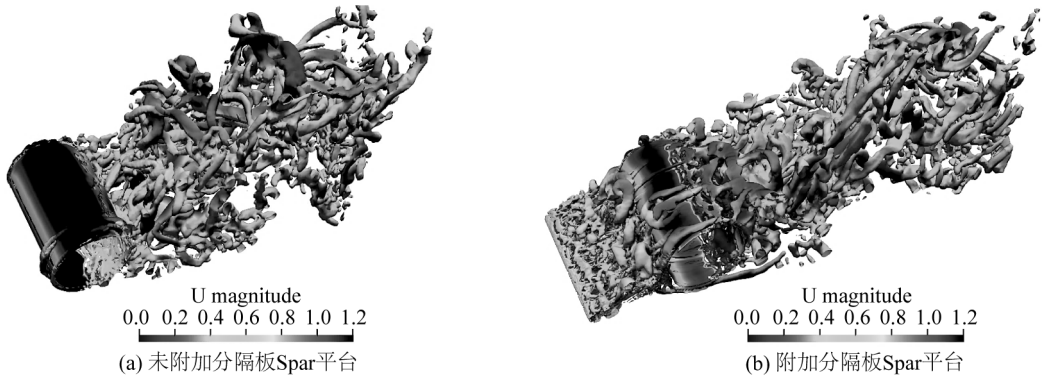


图 7 瞬时 Spar 平台涡量云图(Q 准则, $Q=0.5$)

Fig. 7 Tail vortex structure of spar platform with $Q=0.5$

可以观察到,在分隔板前端产生流动分离后,立柱表面处的流体速度方向发生逆转,形成旋涡,不对称的涡旋结构沿着来流侧分隔板形成,使得立柱展向方向上产生连接来流及尾流侧涡旋的涡结构,且在自由端,出现了更加明显的稍涡结构。

选取上述同时刻下的瞬时涡量平面图($Z=-0.5H$),如图 8 所示。

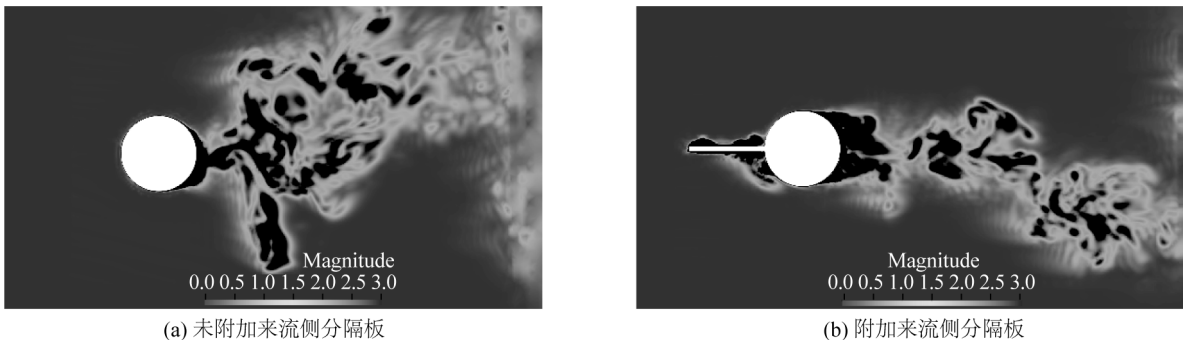


图 8 某瞬时 Spar 平台涡量云图($Z=-0.5H$)

Fig. 8 Distribution of vorticity contour on the $Z=-0.5H$ horizontal plane

由图 8 可以看出,当流体流经分隔板时,在来流侧分隔板前缘处,由于逆压梯度和流体黏性的存在,产生一定程度的流动分离,靠近分隔板与立柱连接处的流体速度慢慢减小为零,随后在来流侧前驻点附近形成不对称的回流涡旋结构,综上导致分离的剪切层过早地从层流转变为湍流,改变了平台来流状态。Qiu 等^[17]对附加来流侧分隔板的固定圆柱绕流的数值模拟表明,来流在分隔板上最大厚度约为 80 mm 的平板湍流边界层,并改变了立柱表面边界层状态。

对同一时刻的平面($Z=-0.5H$)速度云图(图 9)进行分析,附加分隔板的 Spar 平台两侧涡旋脱落中心的间距变窄,可能由于圆柱尾流区两侧剪切层更靠近,两者之间的相互作用更快,由于涡旋脱落频率由圆柱尾流区域两侧剪切层的作用决定,附加分隔板后圆柱尾流区涡旋脱落频率加快,也就解释了上文中,同等流速下,附加分隔板后 Spar 平台的横荡运动周期小于未附加分隔板的 Spar 平台。

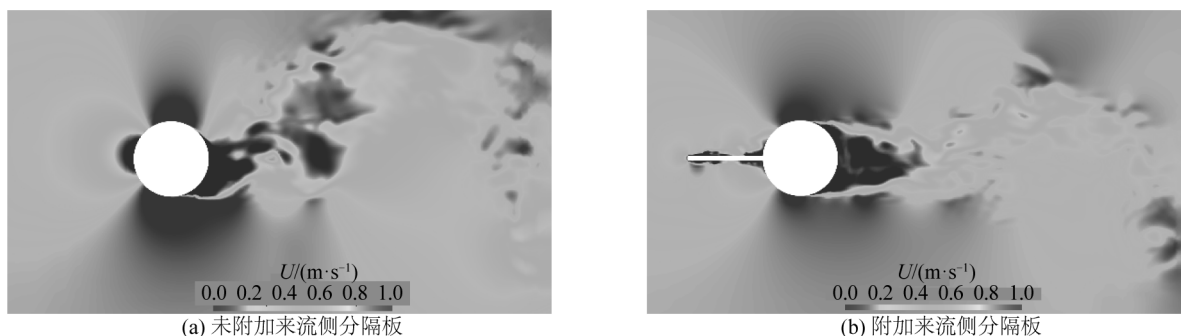


图 9 某瞬时 Spar 平台平面速度云图($Z=-0.5H$)

Fig. 9 Distribution of velocity contour on the $Z=-0.5H$ horizontal plane

观察某瞬时的展向平面速度云图($Y=-0.07D$),由图 10 可以发现,一方面,未附加分隔板情况下,在立柱自由端处靠近来流方向出现一块明显的高速流动区,该高速区是由于流体在流经此处时发生流动分离,形成一个靠近来流侧的回流区导致的,而在附加分隔板后,在图 10(b)中该高速区明显缩小,且高速区的速度也出现一定程度的减小,可能是由于附加分隔板后,在流体到达分隔板和立柱交接处时,已经在分隔板长度上发生了流动分离;另一方面,附加分隔板后,在尾流侧出现的低速流动区明显比无来流侧分隔板的大。

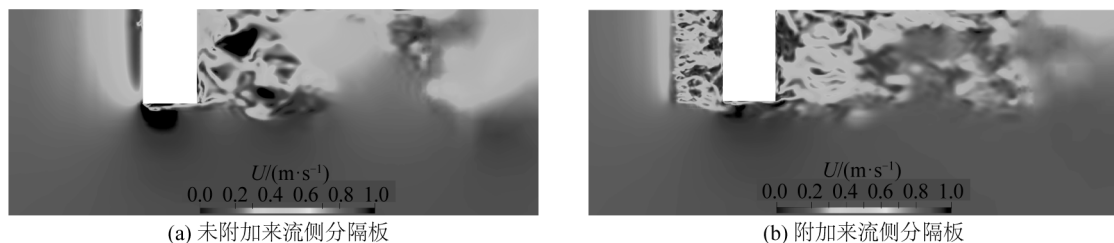


图 10 某瞬时 Spar 平台展向平面速度云图($Y=-0.07D$)

Fig. 10 Distribution of velocity contours on the $Y=-0.07D$ vertical plane

4 结 语

基于 OpenFOAM 开源平台,采用基于剪切应力运输的分离涡模拟(SST-DDES)方法,对一座 Truss Spar 平台的硬舱部分附加长度为 $1.0D$ (D 为硬舱直径)的刚性分隔板,在不可压缩黏性流场中,对其进行三维数值模拟,研究在不同折合速度下,来流侧分隔板对其涡激运动特性的影响。得出以下结论:

1) 在较高流速如 $U=0.7296$ m/s 时,附加来流侧分隔板 Spar 平台的横荡及纵荡运动幅值小于未附加分隔板情况,附加分隔板有助于在较高流速下抑制 Spar 平台的运动响应幅值。

2) 同等流速如 $U=0.7296$ m/s 时,未附加分隔板的 Spar 平台处于“锁定”区域时,附加来流侧分隔板的 Spar 平台已脱离“锁定”区域,且对比未附加分隔板情况,横荡周期减少 22.21%,横荡最大幅值减少 81.3%。即在来流侧分隔板的影响下,Spar 平台涡激运动在相对较低雷诺数下实现了与高雷诺状态相似的流动分离。

3) 当流体流经来流侧分隔板时,在来流侧分隔板前缘产生一定程度的流动分离,由于边界层内流体黏

性和逆压梯度的存在,靠近分隔板与立柱连接处的流体速度慢慢减小为零,随后在立柱前驻点附近形成回流涡旋。

4) 在较高流速下,附加长度为 1.0 倍立柱直径的来流侧分隔板,使得 Spar 平台两侧涡旋脱落中心的间距变窄,减小了自由端靠近来流侧由于流动分离产生的高速流动区面积,且扩大了尾流区的低速流动区面积。

参考文献:

- [1] 王颖,杨建民,杨晨俊. Spar 平台涡激运动关键特性研究进展[J]. 中国海洋平台, 2008(3): 1-10. (WANG Ying, YANG Jianmin, YANG Chenjun. Review on the study of Spar vortex-induced motions key characteristic[J]. China Offshore Platform, 2008(3): 1-10. (in Chinese))
- [2] ZHU Hongjun, LI Guomin, WANG Junlei. Flow-induced vibration of a circular cylinder with splitter plates placed upstream and downstream individually and simultaneously[J]. Applied Ocean Research, 2020(97): 102084.
- [3] AKILLI H, SAHIN B, TUMEN N F. Suppression of vortex shedding of circular cylinder in shallow water by a splitter plate[J]. Flow Measurement & Instrumentation, 2005, 16(4): 211-219.
- [4] LIANG S, WANG J, XU B, et al. Vortex-induced vibration and structure instability for a circular cylinder with flexible splitter plates[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 174: 200-209.
- [5] GAO D, CHEN G, HUANG Y, et al. Flow characteristics of a fixed circular cylinder with an upstream splitter plate: On the plate-length sensitivity[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 117: 110135.
- [6] HWANG J Y, YANG K S. Drag reduction on a circular cylinder using dual detached splitter plates[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(7): 551-564.
- [7] CHUTKEY K, SURIYANARAYANAN P, VENKATAKRISHNAN L. Near wake field of circular cylinder with a forward splitter plate[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 173: 28-38.
- [8] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. Aiaa Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [9] MENTER F R, KUNTZ M, LANGTRY R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model[J]. Heat and Mass Transfer, 2003, 4(1): 625-632.
- [10] GRITSKEVICH M S, GARBARUK A V, SCHÜTZE J, et al. Development of DDES and IDDES formulations for the k- ω shear stress transport model[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2012, 88(3): 431-449.
- [11] 何佳伟,赵伟文,万德成. 带螺旋侧板的 Spar 平台涡激运动数值模拟[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(4): 74-84. (HE Jiawei, ZHAO Weiwen, WAN Decheng. Numerical simulation of vortex induced motion for Spar platform with helical strakes[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(4): 74-84. (in Chinese))
- [12] 赵伟文,万德成. 用大涡模拟方法数值模拟 Spar 平台涡激运动问题[J]. 水动力学研究与进展, 2015, 30(1): 40-46. (ZHAO Weiwen, WAN Decheng. Numerical investigation of vortex-induced motions of Spar platform based on large eddy simulation[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2015, 30(1): 40-46. (in Chinese))
- [13] FINNIGAN T, RODDIER D. Spar VIM model tests at supercritical Reynolds numbers[C]//Proceedings of the International Conference on OMAE. 2007: OMAE 2007-29160.
- [14] 赵伟文. 立柱式平台涡激运动计算方法与应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018. (ZHAO Weiwen. Research on numerical methods and applications of vortex-induced motions of column-stabilized floating platforms[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018. (in Chinese))
- [15] 谢康迪,赵伟文,万德成. 基于重叠网格方法浮筒涡激运动特性数值分析[J]. 海洋工程, 2019, 37(3): 24-34. (XIE Kangdi, ZHAO Weiwen, WAN Decheng. Investigation on the characteristics of vortex-induced motion of buoyancy can based on overset grid method[J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(3): 24-34. (in Chinese))
- [16] OAKLEY O H, CONSTANTINIDES Y. CFD Truss Spar hull benchmarking study[C]//Proceedings of the ASME International Conference on Offshore Mechanics & Arctic Engineering. 2007: 703-713.
- [17] QIU Y, SUN Y, WU Y, et al. Effects of splitter plates and Reynolds number on the aerodynamic loads acting on a circular cylinder[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 127: 40-50.